

地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来  
2023 年度版

地球電磁気・地球惑星圏学会

2024 年 1 月

## 目次

<u>1. はじめに</u>	1-1
1.1 地球電磁気学・地球惑星圏科学の特徴	
1.2 本将来構想の策定における考え方	
1.3 本将来構想の策定に向けた取り組み	
<u>2. 地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と科学課題</u>	2-1
<u>2.1 太陽活動により変動する太陽地球圏環境の解明</u>	2-1
2.1.1 磁気圏・電離圏での時空間・エネルギー階層間結合	
2.1.2 地球圏に影響を及ぼす太陽風・太陽放射	
2.1.3 地球気候に対する太陽活動の影響	
2.1.4 内部・外部太陽圏研究	
2.1.5 太陽研究	
<u>2.2 宇宙につながる大気圏・電磁気圏環境の解明</u>	2-19
2.2.1 下層大気から中層・超高層大気への影響と緯度間結合	
2.2.2 中性大気・プラズマ相互作用	
2.2.3 電離圏と磁気圏との間の領域間結合過程	
2.2.4 地球大気の人為起源変動・内部変動がもたらす超高層大気への影響	
<u>2.3 多様な惑星圏環境の統一的理解</u>	2-26
2.3.1 磁化天体における時空間・エネルギー階層間結合の統一的理解	
2.3.2 大気流出過程および惑星大気進化の統一的理解	
2.3.3 惑星大気の統一的理解	
2.3.4 惑星ダイナモの統一的理解	
2.3.5 惑星環境の安定性と進化と分化の理解	
2.3.6 系外惑星への拡張・展開	
<u>2.4 宇宙プラズマ・地球惑星大気における物理素過程の理解</u>	2-39
2.4.1 宇宙プラズマ物理	
2.4.2 弱電離プラズマ・中性大気の物理	
<u>2.5 地球および月・惑星の電磁場変動、古磁場環境の解明</u>	2-51
2.5.1 地磁気変動 -現在、過去、そして未来予測	
2.5.2 月・惑星内部に関する電磁気学的研究	
<u>2.6 電磁場観測による地球内部の状態や変動現象の理解</u>	2-62
2.6.1 地下構造の解明	
2.6.2 モニタリング	
2.6.3 資源探査	
<u>2.7 岩石・堆積物が担う磁化の物理の解明とその応用</u>	2-78

2.7.1	岩石磁気学—理論的・実験的研究	
2.7.2	岩石磁気学の応用	
<u>2.8</u>	<u>太陽地球系と地球内部を結ぶ科学課題</u>	2-85
2.8.1	地磁気急変現象に伴う日本での地中誘導電流の解明	
2.8.2	地圏を含むグローバルサーキットモデルの再構築	
2.8.3	人工衛星による高精度地磁気観測から解明できる現象	
2.8.4	地震に伴う変動の理解	
<u>3.</u>	<u>社会との関わり</u>	3-1
<u>3.1</u>	<u>人類社会基盤への影響</u>	3-2
3.1.1	太陽地球圏現象が人類の宇宙での活動に与える影響	
3.1.2	太陽地球圏現象が既存の社会基盤に与える影響	
3.1.3	地震・津波・火山噴火による災害	
<u>3.2</u>	<u>知識基盤の構築に向けた研究課題</u>	3-6
3.2.1	宇宙環境計測機器開発の充実	
3.2.3	宇宙天気分野における予測研究	
3.2.4	極端宇宙現象の把握と対策	
3.2.4	将来の宇宙環境利用に向けた研究課題	
3.2.5	気象衛星による宇宙環境計測	
3.2.6	固体地球科学における知識基盤の構築	
3.2.7	周辺研究分野との連携	
<u>3.3</u>	<u>オープンサイエンスと研究データ</u>	3-10
<u>3.4</u>	<u>広報活動・人材育成の観点から</u>	3-11
<u>4.</u>	<u>学術のために必要な技術開発・環境整備</u>	4-1
<u>4.1</u>	<u>観測技術開発</u>	4-1
4.1.1	太陽地球系科学分野の機器開発	4-1
4.1.2	固体地球研究分野の観測・分析機器開発	4-29
<u>4.2</u>	<u>計算機シミュレーション・モデリング</u>	4-32
4.2.1	技術開発要素	
4.2.2	環境整備	
<u>4.3</u>	<u>データマネジメント・データシステム</u>	4-44
4.3.1	地球電磁気学・地球惑星圏科学におけるデータ	
4.3.2	データマネジメント	
4.3.3	メタデータ、共通データ解析ツール	
4.3.4	国際的な動向	
4.3.5	SGEPSS におけるデータシステムのあり方	
4.3.6	大気水圏科学データの蓄積・解析基盤形成	

<a href="#">4.4 情報数理技術</a>	4-49
4.4.1 データマイニング技術・機械学習に基づく AI 技術	
4.4.2 データ同化技術と再解析データ	
<a href="#">5. 研究推進のために必要な施策・組織</a>	5-1
<a href="#">5.1 研究推進のために必要な施策</a>	5-1
<a href="#">5.2 共同利用拠点を含めた大型研究機関の重要性</a>	5-82
<a href="#">5.3 国際学術団体や対応委員会の取り組み</a>	5-108
5.3.1 国際太陽地球系物理学科学委員会 (SCOSTEP)-STPP 小委員会	
5.3.2 SEDI (Study of the Earth's Deep Interior)	
5.3.3 国際電波科学連合(International Union of Radio Science: URSI)	
5.3.4 インターマグネット (INTERMAGNET)	
<a href="#">6. サステナブルな学術活動のために</a>	6-1
<a href="#">6.1 はじめに</a>	6-1
<a href="#">6.2 広報活動</a>	6-3
6.2.1 アウトリーチイベント	
6.2.2 秋学会時のプレスリリース	
6.2.3 衛星設計コンテスト	
6.2.4 教育機関、公共団体等への講師派遣	
6.2.5 若手アウトリーチ活動 “STEPLE”	
6.2.6 Web の充実・SNS を用いた情報発信	
6.2.7 これからの広報活動について	
<a href="#">6.3 人材育成</a>	6-11
6.3.1 初等・中等教育との関わり	
6.3.1.1 広報活動との関わり	
6.3.1.2 SGEPPS 分野の学校教育での扱われ方	
6.3.1.3 これからの学校教育へのはたらきかけについて	
6.3.2 高等教育との関わり、キャパシティービルディング	
<a href="#">6.4 研究者の充実したライフスタイルの実現</a>	6-16
6.4.1 現在の状況	
6.4.2 これまでの取り組み	
6.4.3 SGEPPS を取り巻く社会の動向	
6.4.4 今後の取り組み	

[資料](#)



## 1 はじめに

### 1.1 地球電磁気学・地球惑星圏科学の特徴

地球電磁気学・地球惑星圏科学の源流のひとつである地球電磁気学は、17世紀初頭に地球が磁石であることが理解されるようになって以降、大きく発展してきた。我が国では、田中館愛橘らによる全国の地磁気観測をはじめとして、寺田寅彦による地磁気脈動の解析など、明治から大正にかけて地磁気の観測が行われていたが、第2次世界大戦後の地磁気や電離層の研究機運の高まりにより、本学会の前身である日本地球電気磁気学会が1947年5月に設立された。その後、地球内部起源の地磁気の研究は、地球内部のコアやマンツルのダイナミクスによる地球磁場の成因やその永年変化、地球内部の電気伝導度の研究に発展するとともに、地震、火山、海流などの研究へも応用されてきている。一方、地磁気脈動などの外部起源の地磁気変動の研究は、電離圏から磁気圏、惑星間空間、太陽や、超高層大気とその下層大気とのつながりにも発展し、またその研究は、さらに地球以外の他惑星の磁気圏、電離圏、大気、固体惑星内部の研究へ応用されてきた。この広がりに伴い、本学会は1987年に地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) へ改称している。

このように現在の地球電磁気学・地球惑星圏科学は、地球惑星内部から太陽までの広い範囲を包含する、という大きな特徴を持っている。また、この中の宇宙プラズマや大気の研究は、直接測定ができる自然の宇宙実験場として、宇宙プラズマや大気の普遍的な物理素過程の研究につながっている。さらに、地球内部の電気伝導度の研究が火山内部の状況の把握に用いられ、測位衛星に代表されるような人類の宇宙利用の発展に伴って、電磁気圏の研究が人工衛星の運用に必要な宇宙天気予報の精度向上に活用されたりするようになるなど、これまで純粋に理学的な興味で行われてきた研究が、実用科学の側面も強くなってきた。また、オゾンホールや地球温暖化によって地球環境変動の重要性が認識されるようになり、地球電磁気学・地球惑星圏科学も地球環境科学の一部としての重要性が増している。

地球電磁気学・地球惑星圏科学のもう一つの特徴として、対象とする領域を測定する技術が多岐にわたって発展してきた、という点も挙げられる。本学会の研究は、人工衛星などの飛翔体による宇宙空間での直接測定、大型レーダーや分光機器に代表される電波や光を使ったリモートセンシング、スーパーコンピュータによる数値実験などを駆使して多面的に行われている。

### 1.2 本将来構想の策定における考え方

本学会に関連した将来構想の策定は過去には、例えば1991年の「地球電磁気学の発展的将来」、2005年の「21世紀の地球電磁気学」などが日本学術会議・地球電磁気学研究連絡委員会（地球電磁気研連）によってまとめられてきた。2012年5月には将来構想検討ワーキンググループを発足させ、「地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来」をまとめて2013年1月に公開している。現在の当学会を取り巻く状況は、日本学術会議や日本地球惑星科学連合などによる大型研究計画やロードマップのとりまとめの動き、我が国の人工衛星計画の将来像の変化、学会員が所属している大学・研究機関の連携・共同利用などの研究体制の変化や組織の将来計画をはじめ、さまざまな状況がめまぐるしく変化しており、学会としての将来計画をしっかりと外部に発信していくことが求められている。

こうした情勢を鑑みて、当学会では2017年度に将来構想検討ワーキンググループ (WG) を再構成、常設化して、学会としての将来構想を定期的に更新することとした。WGは、当学会で設置している各分科会と国際学術団体関連委員会、運営委員会から推薦された委員により構成し、WG委員は会員からの意見集約の窓口を担った。こうして将来構想文書「地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来 2019年度版」が2020年7月に公開された。

### 1.3 本将来構想の策定に向けた取り組み

当分野を取り巻く状況の変化や研究の進展を将来構想文書にタイムリーに反映させる必

要性から、将来構想検討 WG では 2021 年度からさらなる改訂に着手した。基本的な構成は前回版を概ね踏襲しているが、内容は各項目の専門家によって刷新されている。

本将来構想では、まず 2 章で地球電磁気学・地球惑星圏科学に関する現状と科学課題を各分野において挙げている。続いて 3 章で、社会との関わりとして、特に本学会の実用科学の側面に関して記述した。4 章では、これらの研究推進のために必要な技術開発・環境整備をまとめ、5 章では、研究推進のために必要な施策と、共同利用拠点を含めた大型研究機関の重要性をリストアップした。最後に 6 章で、研究教育体制およびアウトリーチに関して記述した。

## 2 地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と科学課題

### 2.1 太陽活動により変動する太陽地球圏環境の解明

地球周辺の宇宙空間であるジオスペースの中の電磁気圏や大気圏では、太陽や宇宙からの粒子・電磁エネルギーの流入によって様々なプラズマ現象や大気現象が発生し、サブストームや磁気嵐に代表される大規模な擾乱現象が起こる(図 2.1.1)。また、これらの外的な要因に加えて、ジオスペースの各領域や各エネルギー階層の非線形な結合過程も、電磁気圏と大気圏のダイナミクスを規定している。一方、太陽活動は地球の気候変動にも影響を及ぼしている可能性がある。さらに、太陽風の影響は太陽系全体に及び、太陽圏を形成し、多様なプラズマ現象を作り出している。

本節では、太陽活動が太陽地球圏環境に及ぼす影響という観点に立ち、電磁気圏、大気圏研究(2.1.1-2.1.2)、地球気候に対する太陽活動の影響(2.1.3)、内部・外部太陽圏研究(2.1.4)、そして太陽(2.1.5)について、現在までの研究の流れと現状、および今後重点的に追求すべき課題や視点を述べる。なお、酸素イオン流出に代表される地球起源イオンの流出と電磁気圏内での循環過程については 2.2 節で、また、惑星圏については 2.3 節で述べる。衝撃波などジオスペースで生起する様々なプラズマ過程の研究については、2.4 節で述べる。

なお 2.1.2(2) には、上流にある太陽・ジオスペースの変動が電離圏・大気圏に与える影響が記載されている。ここで述べられている現象・物理過程は 2.2 節と一部重複しているが、2.2 節では、下層からのエネルギー流入に伴う電離圏・大気圏の変動や電離圏内の緯度間結合、電離圏変動が磁気圏に与える影響についてその詳細を述べている点が異なる。

#### 2.1.1 磁気圏・電離圏での時空間・エネルギー階層間結合

磁気圏・電離圏分野の研究は 1960 年代の飛翔体観測の本格化とともに大きく発展した。1970 年代には磁気圏の基本的な構造が明らかにされ、磁気圏の平均描像の標準的なモデルが確立した。また、磁気圏と電離圏のように異なるプラズマパラメータを持つ領域が磁力線を介して結合しており、太陽風との相互作用を通して、磁気圏と電離圏が互いの運動を規定しながら変化の様子などが明らかになってきている。

このようにいわゆる磁気圏の平均描像の理解をふまえて、1990 年代には多くの衛星観測、地上観測、さらに数値シミュレーションの進展によって、非一様・非定常な複合システムとしての理解が進んだ。一方、磁気リコネクションなどのマイクロな物理の理解も急速に進展し、マイクロな過程がマクロなダイナミクスや構造に与える影響の研究も進められた。このように、磁気圏・電離圏の非線形性・非定常性、および異なるスケールの現象が動的に結合する「スケール間結合」の重要性が指摘されるようになった。

2000 年代以降の衛星観測ならびに地上観測の特徴の一つは、多点ネットワーク観測と高時間分解能観測が実現されるようになったことである。これらの観測によって、従来とらえられなかったスケールでの観測的な理解が進むとともに、異なる時空間スケールの現象が密接に関係していることがさらに明らかになってきた。このような、現象スケールの階層性とスケール間の結合過程は、磁気圏・電離圏現象を理解していくための重要な概念と認識されている。また、磁気圏と電離圏のように、異なるプラズマ領域が密接に結合することによってダイナミクスを規定する「領域間結合」の重要性、そして領域間結合における「スケール間結合」の重要性がますます強く認識されるようになってきている。さらに、内部磁気圏のように異なるエネルギーを持つプラズマ・粒子群がプラズマ波動との相互作用を通して動的に結合し、ダイナミクスを規定する「エネルギー階層間結合」も、磁気圏・電離圏現象の本質的な部分である。ここでは、このような新しい概念をふまえて、磁気圏・電離圏に生起する様々な過程を示し、その現状と今後の課題について述べる。

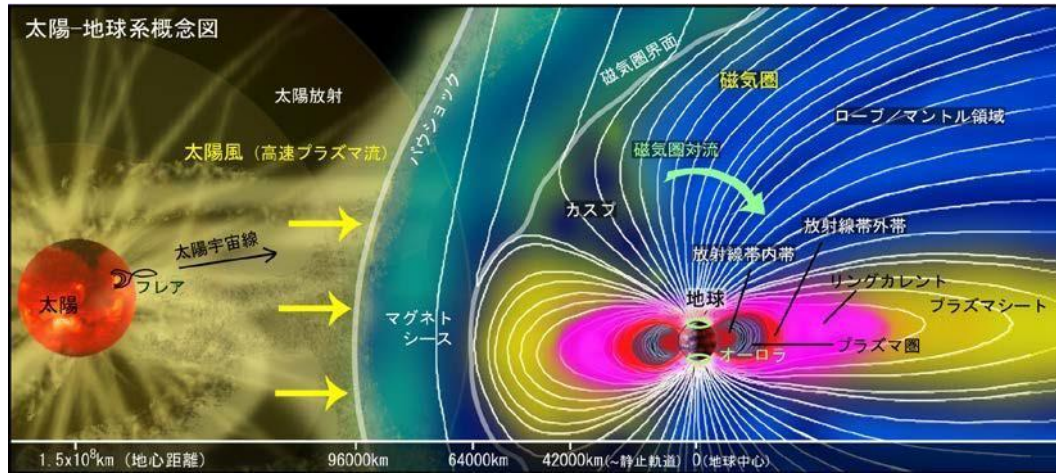


図 2.1.1 太陽-地球圏の領域と生起する現象

### (1) 磁気圏と電離圏の時空間結合

#### 現状

オーロラは、電離圏と磁気圏との相互作用で生じる現象である。磁気圏と電離圏は、時空間スケールの著しく異なるプラズマ領域が電流を介して強く結合する領域であるとともに、オーロラの発生する電離圏高度では、オーロラ活動に伴う超高層大気温度や組成の変化等も含めて、電離大気-中性大気間の相互作用の理解も重要とされる。また、磁気圏だけではなく、電離圏も能動的にダイナミクスに影響を及ぼしている。

磁気圏電離圏結合の現れのひとつであるオーロラの研究について、1990年代後半から2000年代にかけて高時間分解能を有する粒子観測器を搭載した衛星 (Fast・れいめい) によって、オーロラ降下電子の微細構造の研究が大きく進展した。特に Dispersive Alfvén 波によるオーロラ電子加速、およびそれに伴うオーロラ現象の研究が進んでいる。また、大規模な沿磁力線電流システムの中に、さらに空間スケールの小さい上向き・下向き電流系が埋め込まれており、階層的な構造を持っていることも明らかにされている。一方、地上観測においても、これまでにない高時間・高分解能のオーロラ光学観測が実現され、アルフベニックオーロラやフリッカリングオーロラなど時間変化の速いオーロラ現象が観測され、磁気圏-電離圏結合システムの微細過程の議論も進みつつある。

地上観測のネットワーク化が進んだことも、現象の理解を大きく進めている。たとえば極域を中心に SuperDARN HF レーダー網が展開され、分オーダーで極域電離圏全体の対流パターンをとらえることが可能となった。さらに、THEMIS ミッションにあわせて整備された地上多点光学観測網によって、高空間分解能オーロラの発達過程を一望できるようになり、サブストームオンセット時のオーロラの動的なふるまいの研究も進展している。

磁気圏電離圏相互作用の影響は極域に留まらず中低緯度電離圏や磁気赤道域にまで及んでおり、極域における R1 電流系、内部磁気圏に存在するリングカレント起源の R2 沿磁力線電流系に伴う電場が重畳し、その変動が磁気赤道域まで侵入することが知られている。近年発展してきたレーダー、地磁気、衛星観測により、IMF 南転やサブストームといった過渡現象時に中低緯度や赤道域電離圏の対流電場が瞬時に増大することが示されてきている。また IMF 北転やサブストーム時の過遮蔽と R2 電流系との対応も明らかにされ、対流電場変動をもたらす磁気圏ダイナモの様相が理解されつつある。一方、こういった局所的な観測に対し対流電場は全球的に配位するため、その全体像を捉えるには広視野の観測や統計解

析が必要である。近年の SuperDARN レーダーの中緯度域への拡張により、複数レーダーを用いた Sub-Auroral Polarization Stream (SAPS) の空間分布の同定や、SAPS の南北共役性の研究結果が出てきている。また、Van Allen Probes 衛星等による内部磁気圏の電場の直接観測、Millstone Hill レーダーによる中緯度電場観測データの統計解析により、SAPS 電場の空間分布や地磁気活動に伴う変動も明らかになってきた。

DC 的な大規模電場以外にも、ULF 地磁気脈動に伴う電場の性質についても二次元観測、多点観測により理解が進んでいる。統計解析による空間分布の解明や、太陽風擾乱やサブストームなどによる過渡応答の研究、cavity mode・磁力線共鳴・外部駆動といったモデルとの比較研究がなされてきている。

沿磁力線電流は磁気圏-電離圏結合におけるエネルギー輸送の重要な担い手の一つであり、明るいオーロラや地磁気擾乱を理解する上で重要である。大規模な沿磁力線電流の生成に対するマントルなど磁気圏各部位の役割と機能が磁気圏グローバルシミュレーションによって示されている。R1 電流の生成に内部エネルギーへの一時的な転化が関わっている可能性が指摘され、衛星観測による実証が待たれている。

また、Alfvén 波を介した磁気圏-電離圏結合の理論研究において、オーロラの微細構造発展に関わる非線形現象、磁気圏-電離圏結合系でのバルーニング不安定性、ジャイロ運動論を用いた磁気圏-電離圏結合系の定式化、などの進展があった。こうした理論・数値モデル研究の進展とともに、観測による理論の検証が望まれる。

## 今後の課題

磁気圏と電離圏の結合を担う沿磁力線電流については、異なる時空間スケールの変動が存在しており、どの時空間スケールの変動が、どのような現象の変化を主に担っているかを明らかにしていく必要がある。磁気圏および地上（電離圏）の観測を充実させ、時空間スケールを整理した研究が重要である。また、磁気圏-電離圏結合における、電離圏の効果を定量的に抽出するためには、統計解析を行うことができるような長期間のモニタリング観測が重要となり、そのようなことを可能にする継続観測も重要になる。

FAST やれいめいの観測は、従来考えられていた電子を地球側に加速させる準定常的なポテンシャル構造に加えて、Dispersive Alfvén 波や乱流的な構造が動的に電子加速過程を担っていることを強く示唆した。しかしながら、れいめい以降、オーロラ加速機構を主目的とした極域電離圏磁気圏の探査は行われておらず、FAST およびれいめいでは達成出来なかった、単一衛星による高時間分解能な粒子・電磁場・オーロラ光学の同時観測の実施が強く望まれる。また、複数衛星による編隊飛行観測を用いることで、FAST では成し得なかった時空間分離による Alfvén 波の詳細なモード決定が可能となり、Dispersive Alfvén 波による電子加速過程やオーロラ微細構造との関連の解明が期待される。近年の木星探査ミッション Juno は、木星オーロラにおいても Alfvén 波が電子加速に予想以上寄与していることを明らかにしており、また太陽コロナの加熱機構でも Alfvén 波が候補の一つであることから、地球近傍での Alfvén 波の精密観測とそこから得られる知見を、磁化惑星や恒星大気といったより普遍的なプラズマと比較していく視点も必要である。

電離層電流につながる沿磁力線電流は数 100km 程度の大規模構造の変動が 1 時間程度の時間スケールで理解されているが、10km 以下の空間スケールの沿磁力線電流については、低高度極軌道衛星による時間・空間分解能の制限から、その空間分布や基本的なスケールを十分に明らかにできていない。また、単独の低高度衛星では電磁場の時間変化と電流の空間変動を分離できないという問題も存在する。近年の ESA による低高度磁場観測衛星 (Øersted, CHAMP, Swarm) は、1 秒以下の時間分解能を有する高精度磁場観測を行っており、特に Swarm 衛星群は、3 機のうち 2 機の衛星がほぼ同一の軌道を近接して飛行しているため時空間分離が可能で、沿磁力線電流の微細構造を高い精度で観測することができる。この特徴を生かして、沿磁力線電流の微細構造と、これに対応するオーロラアークや磁気圏

尾部構造との関連性を明らかにしていくことができると考えられる。

中低緯度電離圏および内部磁気圏電場は磁気嵐の発達や磁気圏ダイナモの変動を理解する上で不可欠である。これまでは観測点の空間分布の制約から局所的な電場観測や統計解析に留まっていたが、SuperDARN レーダー網や全天カメラ網の拡張などにより広域での対流分布の同時観測が可能となってきている。これらを内部磁気圏（あらせ (ERG)、Van Allen Probes)、プラズマシート (Geotail, THEMIS、MMS)、オーロラ帯（レーダー、イメージャー、地磁気、低高度衛星）、赤道域電離圏（レーダー、イメージャー、地磁気）の観測と組み合わせ、極域電離圏や磁気圏での電流系や降下粒子変動が中低緯度/内部磁気圏電場に与える影響、さらには赤道域への伝送過程を明らかにしていく必要がある。特にサブストーム時に見られるプラズマシートの高速度流、内部磁気圏への粒子注入といった局所的かつ大きなエネルギー輸送を伴う現象に対する中低緯度電離圏や内部磁気圏電場、電流系の全球的な応答の研究はこれまで限られており、高分解能かつ広視野の観測による研究が必要とされている。

また、過去の観測は、電離層を「薄層」として積分的にとらえる2次元的な把握が主流であった。しかし高さ方向の勾配は有限値であり、上下方向の対流も存在する。それらは磁気圏と電離圏の大規模スケールでの結合では無視する近似もあり得たが、加速や微細構造を理解するうえでは、非常に重要な役割を果たしうる。従って今後は3次元空間としての電離圏の把握が必要であり、複数局によるレーダーシステムへの移行、並びに複数衛星による編隊飛行観測が不可欠である。磁場観測衛星が従来の1機観測から Swarm 衛星による3機観測になったことも、まさにこれが理由である。その流れの中で建設が始まった EISCAT\_3D レーダーシステムは重要な拠点であり、同時に EISCAT\_3D と同時観測を実施する複数衛星による極軌道衛星による共同観測を考える必要がある。

さらに、数値計算との比較も重要である。特に、磁気圏グローバルシミュレーションにおける磁気圏-電離圏結合領域の記述について、波動を介した動的な結合を組み込む方向で改良を行い、より過渡的な現象についても記述し、その理解を進めていくことが重要である。また、沿磁力線電流の生成も大きな問題であり、シミュレーションと観測を組み合わせた実証的研究が望まれる。こうした磁気圏グローバルシミュレーションを用いた研究では、プラズマダイナミクスのなかで磁力線のトポロジーの変化として磁気圏変動を捉えることの重要性が指摘されており、多様な視点で観測データを調べることを望まれる。加えて、オーロラの局所的な構造形成とグローバルな発達特性を同時に再現するシミュレーションモデルの開発や、運動論的效果を取り入れた磁気圏モデルによるオーロラ粒子加速とオーロラ構造形成の自己無撞着なモデリングの進展が待たれる。

## **(2) 内部磁気圏におけるエネルギー階層間結合 現状**

IMAGE 衛星やかぐや衛星等の観測によって、リングカレントおよびプラズマ圏の空間構造とその時間発展の理解が急速に進んだ。同時に、内部磁気圏に関するシミュレーション研究が進展し、磁気嵐時のリングカレントイオンの動態の理解が進められている。シミュレーション研究からは、内部磁気圏の対流電場発達における磁気圏-電離圏結合の果たす役割や、リングカレント消失過程の定量的な評価が進められている。

さらに、Sub-Auroral Polarization Stream (SAPS)、Sub-Auroral Ion Drift (SAID) や過遮蔽といった現象は、リングカレントと電離圏の磁気圏-電離圏結合過程の表れであることも、観測とシミュレーションから明らかにされ、磁気圏-電離圏の領域間結合の非線形相互作用過程が内部磁気圏の動態を決定づけていることが示されている。

また、放射線帯電子の加速機構について、ホイッスラー波動等のプラズマ波動を介した非断熱加速理論が提唱され、近年の Van Allen Probes やあらせの衛星観測によりその寄与が同定されている。一方、非断熱加速と従来の断熱的な加速機構とどちらが加速を担っているかを調べるためには、位相空間密度の空間分布の解析が続けられている。波動を介した加速



過程については、波動の励起や伝搬過程を制御する因子を含めて、内部磁気圏に存在するすべてのエネルギー階層のプラズマ粒子が動的に結合する「エネルギー階層間結合」の重要性が指摘されている。また関連して、コーラスや電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 波動の非線形過程に関する理論が進展し、シミュレーション研究の進展とあわせて波動の励起過程、粒子加速過程における非線形性の重要性が示されつつある。これらの波動を励起する種となる電子やイオンは、プラズマシートから内部磁気圏に流入したものと考えられており、プラズマシートの状態がその後のリングカレントの発達等に大きく影響していることも明らかにされている。また、シミュレーションによって、コーラスや EMIC 波動の励起過程と分布関数の変化の対応、またサブパケットと呼ばれる波形に見られる内部構造の理解も進んでいる。

さらに、THEMIS・あらせ衛星の観測によって、EMIC 波動/磁気音波とリングカレントイオンの波動粒子相互作用の直接推定のためにエネルギー交換を表す物理量 ( $E \cdot v$ ) の直接計測が実現し、無衝突プラズマにおける波動とイオンのエネルギー交換の様子が特定された。また、あらせ衛星と地上との連携観測によって、宇宙空間でホイッスラーモード波動によって電子がピッチ角散乱を受け、その結果、脈動オーロラが変調する過程が初めて同定された。このように新たな解析や、衛星観測によって、宇宙空間におけるプラズマ波動相互作用素過程の実証が進んでいる。

## 今後の課題

2010 年代に入り、米国の Van Allen Probes、日本の あらせ 衛星など、内部磁気圏の赤道面付近においてプラズマ総合観測を行う新しい観測が始まり、磁気嵐時の内部磁気圏の変化や、放射線帯高エネルギー粒子加速について、エネルギー階層間結合、領域間結合といった非線形相互作用過程が、内部磁気圏のダイナミクスにどのように影響を与えているかについての理解が進み、従来の描像を大きく変えた。特に、放射線帯の相対論的電子の起源が、放射線帯内部における波動粒子相互作用による加速が大きく寄与しているという発見は、従来の惑星磁気圏における粒子加速過程に変革を迫るものである。また、複数衛星観測や、衛星と地上観測の連携観測などによる新たな発見が相次いだ。実際、あらせ衛星では、地上観測との連携観測を精力的に進めている。今後も、衛星観測だけではなく、地上ネットワーク観測との連携観測にもとづく、衛星-地上総合データ解析や、シミュレーションとの比較による定量的な現象の理解といったアプローチを行う必要があり、複数の観測手法の有機的な連携のコーディネートや、統合解析ツールの提供といった研究環境整備を促進していくことが重要になる。現在、超小型衛星による内部磁気圏超多点観測の検討が行われているが、今後、磁気圏における超多点観測は重要な観測手段になると考えられる。さらに、ENA によるリングカレントイオンの可視化、FUV によるプラズマ圏イメージングなどの撮像観測と組み合わせることで、ジオスペースの全体構造とその場観測を組み合わせ観測の実現も重要な方向である。

一方、プラズマシートと内部磁気圏の結合については理解されていない点が多い。たとえば放射線帯電子の起源となる高い磁気モーメントを持った電子が、プラズマシートでどのように形成され内部磁気圏に向かって輸送されるかなどの理解は進んでいない。THEMIS や MMS 衛星のような 6~10 Re 付近の観測と、Van Allen Probes、あらせ衛星のような内部磁気圏での観測を組み合わせた研究が重要となるとともに、磁気圏尾部と内部磁気圏において、同じ磁気モーメントを持った粒子を比較していくことが重要となる。

近年急速に重要性を増した結合にイオンと中性粒子との結合がある。過去の「衝突過程」だけの仮定では観測を説明出来ないところまで知見が蓄積されていることが理由であり、たとえば熱圏構造などの地球大気の基本を形作するのに重要な要素であることが、近年の TIMED・TWINS 衛星観測などで分かってきた。しかし、そのプロセスは実験室で再現出来ないものであり、現に TIMED 衛星等の観測は中性・イオン結合が実験に基づく理論値で説明できないことを示唆している。その意味では、ほぼ未解明の分野である。

### (3) 磁気圏尾部を中心とした時空間結合・エネルギー階層間結合

#### (ア) サブストーム

##### 現状

2.1.1 (1) の項で述べた視点に加えて、オーロラサブストームは太陽風-磁気圏相互作用の変化を象徴するものである。サブストームオンセット研究については、磁気リコネクションがトリガーの役割を果たし、地球に近い領域に影響を及ぼすというモデル (Outside-In と呼ばれる) と、地球に近い領域から現象が起こるとするモデル (Inside-Out と呼ばれる) の、2 つの異なる考え方のもとに、研究が進められてきた。Inside-Out モデルはオーロラ帯低緯度境界付近からオーロラ・ブレイクアップが始まるという観測事実を説明できるとして支持を集めている。一方、Outside-In モデルにおいても磁気リコネクションに伴う地球向き的高速プラズマ流が地球近傍で沿磁力線電流を作ることによってオーロラ・ブレイクアップの開始位置を説明できるとされている。2000 年代後半においては、編隊衛星観測である THEMIS と地上の多点光学観測ネットワークを組み合わせ、この 2 つのモデルの検証が試みられたが、ユニバーサルな結論が得られたとは言い難い。この原因は、地上オーロラ観測の進展により、初期増光は突然増光するのではなく、弱いオーロラが徐々に増光し、その後オーロラが段階的に発展する、と認識が改められたため、磁気圏現象との対応が不明になったこと、またそれに伴って、サブストームオンセットの定義が研究者によって異なるようになったことによるものと考えられる。また、THEMIS 衛星は 5 機からなるが、磁気リコネクション領域近傍の地球側には、事実上 1 機しか滞在しておらず、不十分であった。2010 年代には、地上観測を主とした弱いオーロラの研究がさらに進められ、2020 年頃から、古典的な尾部リコネクションは、オーロラビーズや古典的な「初期増光」とは直接関係しないと解釈されることが多くなった。一方、2015 年に打ち上げられた MMS 衛星群は尾部リコネクション領域の詳細を明らかにすることが主目的であるが、Geotail 衛星・あらせ衛星・地上との同時観測により、別の観点からサブストームの解明にも進展をもたらすことが期待される。

サブストーム現象に伴い発生する地球向き高速流は、磁気圏尾部にとどまらず、内部磁気圏との境界領域 (磁場が引き伸ばされた状態から双極子状態への遷移領域) にプラズマを注入する。磁場構造の変化 (高速流前面の磁場圧縮領域や磁場双極子化) は、同領域でのプラズマ加速に重要な役割を担っている。これまで、このようなサブストームに伴う空間スケールが小さく時間スケールの短い現象が、磁気嵐の発達 (=内部磁気圏のプラズマ圧増加、リングカレント増強) に寄与するかしらないか長年、議論されてきた。しかし、近年の高解像度グローバルモデリングや、2010 年代に始まった高時間・エネルギー・質量分解能の多点観測によると、磁気嵐発達に無視できない現象であることが明らかになってきている。このことは、時間スケールが大きく異なる 2 大現象の結合が地球磁気圏近尾部ダイナミクスにおいて重要であることを示唆している。

##### 今後の課題

サブストームについては、オンセットを最終的に引き起こしているメカニズムの同定、という大きな問題の解明が待ち望まれる。近年では、Outside-In、Inside-Out 以外のモデルも提案されており、さらに磁気圏-電離圏結合の重要性も指摘されている。異なるデータセットを用いて提唱されている様々なモデルを統一するために、異なる空間スケールでの同時観測が必要である。今後、多点地上観測をさらに推し進めるとともに、視野の広い衛星光学観測が望まれる。さらに、将来的には、磁気リコネクション領域近傍の地球側に複数機を擁する衛星観測が望まれる。

また、2020 年代半ばには、ヨーロッパと中国によって、SMILE と呼ばれる衛星によるオーロラグローバル撮像観測が予定されている。オーロラのグローバル撮像は、Polar/IMAGE 衛星以来の計画となり、サブストームオンセット位置の特定や、オーロラオーバルをはじめと



した極域のダイナミックな変化を明らかにすることが期待される。

シミュレーションでは、オーロラ初期増光から極方向拡大までの段階的発達を再現することが鍵であると考えられる。サブストーム拡大相では強い上向きの沿磁力線電流が流れ、オーロラ・ジェット電流を維持していることはほぼ間違いない。この沿磁力線電流を作るために必要なダイナモについては長らく議論が続いている。最新の磁気圏グローバルシミュレーションの結果は地球近くでダイナモが現れることを示しているが、観測によって十分には確かめられていない。シミュレーションと観測が連携しながらオーロラサブストームの発達を支える上向きの沿磁力線電流とそれに関わるダイナモを実証的に明らかにすることが求められている。

内部磁気圏ダイナミクスへの影響という観点では、(2)で述べたように、近尾部と内部磁気圏での同時観測によって新しい知見が得られると期待される。また、2000年代前半のIMAGE衛星や2000年代後半のTWINS衛星による撮像観測の際にはほとんど達成できなかった、内部磁気圏と近尾部の遷移領域における遠隔総合観測が望まれる。

### **(イ) 高温プラズマシートの起源**

#### **現状**

1990年代から2000年代にかけて、Geotail、Cluster、THEMISによる近尾部プラズマシートの詳細な解析、およびGeotail、ARTHEMIS、かぐや等による中尾部から遠尾部にかけての探査が進められ、プラズマシートの流速や温度構造などが観測されている。しかし、太陽風からプラズマシートへの流入過程、および高温プラズマの形成過程については議論が続いている。さらに、イオンと電子の温度比の起源についても未解明である。また、2.2節で述べるように、磁気擾乱時に内部磁気圏ダイナミクスに大きな影響を与える地球電離圏起源イオンは、その大部分が磁気圏近尾部プラズマシートを経由する。電離圏起源プラズマと太陽風起源プラズマの混合過程や、電離圏プラズマ流入がプラズマシート特性や磁気リコネクション等の加熱過程に与える影響は、観測的にまだ明らかにされていない。あらせ衛星やMMS衛星などの高エネルギー・高質量分解能プラズマ検出器を搭載する衛星群による長期観測が期待されている。

#### **今後の課題**

近年、Magnetospheric Multiscale (MMS)衛星群によって磁気圏境界層やプラズマシート境界層付近の詳細観測が可能になったため、これからプラズマ流入過程および加熱過程の理解が進むことが期待される。さらに、MMS、THEMIS、Van Allen Probes、あらせ衛星等によってプラズマシートと内部磁気圏を同時観測することで、プラズマシートから内部磁気圏にいたるプラズマの輸送・加熱過程の詳細が明らかになることが期待される。特に、低温成分から非熱的成分までの幅広いエネルギー範囲をカバーする観測と、イオン質量と電荷を判別できる観測が備わっていることが重要である。

### **2.1.2 地球圏に影響を及ぼす太陽風・太陽放射**

地球電磁気圏や大気圏に生起する現象の多くは、太陽からのエネルギーの流出である太陽風・太陽放射の変化に起源をもっている。ここでは、地球圏に影響を及ぼす太陽風・太陽放射の研究として、太陽風-磁気圏相互作用、および太陽放射による電離圏、大気圏変動の研究について、その研究の現状と今後の課題を述べる。

#### **(1) 太陽風-磁気圏相互作用における太陽風 3次元構造の重要性**

##### **現状**

地球磁気圏は常に太陽風にさらされており、磁気圏で生起する現象の多くが太陽風の擾乱

に起源を持っている。太陽風-磁気圏相互作用は、磁気圏物理学の最も基本的な課題であり、これまで多くの研究がおこなわれてきた。特に 1990 年代に入り、Wind・ACE 探査機によって太陽風の連続観測が初めて実現し、現在に至るまで太陽活動周期 2 サイクル (約 22 年) 以上にわたってデータの蓄積が進んだことが、太陽活動周期性までを含めた太陽風-磁気圏相互作用の理解の進展につながった。特に太陽風の大規模構造との関係性や、特異な太陽風が到来した際の磁気圏の応答についての理解が進み、太陽風の 3 次元構造を理解する重要性が認識されるようになった。

太陽風-磁気圏相互作用による磁気圏の大規模擾乱現象の一つが、サブストーム/磁気嵐である。サブストームのトリガーとなる太陽風の主要なパラメータや、磁気嵐を引き起こすコロナ質量放出 (Coronal Mass Ejection: CME) や共回転相互作用領域 (Corotation Interaction Region: CIR) といった太陽風の大規模構造についての研究が進められている。太陽風の連続観測データとあわせて、後述の人工衛星や地上からのオーロラ連続観測が可能になったことから、磁気嵐やサブストーム等の変動現象を引き起こす太陽風の特性が詳しく解明されるようになった。さらに、太陽風密度が極端に減少した場合、強い CME が頻発した場合等々、通常の太陽風と異なる状態において、磁気圏側が特異な応答を示す様子も明らかになりつつある。

また、地磁気急始 (Sudden Commencement: SC) や過遮蔽電場構造など、太陽風の過渡的な変化のときに発現する現象についても理解が進み、地上の磁力計やレーダーによる観測や、グローバルな磁気圏シミュレーションによって、磁気圏システムがどのように応答し、その結果各領域にどのような変化が生じているかについても進展があった。太陽風動圧増大時の酸素イオンの流出など、太陽風の過渡的な応答が物質循環に果たしている役割も指摘されている。また、あらせ衛星などの複数衛星観測データ解析から磁気嵐が進行するにつれて磁気嵐の担い手が太陽起源から地球起源のプラズマへと変化していくという発見がなされている。

さらに、Geotail、Cluster、THEMIS、MMS 等の観測から、磁気圏前面における磁気再結合や、ケルビン-ヘルムホルツ渦の形成とそれにもなう物質輸送といった、太陽風-磁気圏結合の境界層の素過程研究も大きく進んでいる。特に、複数衛星観測およびシミュレーション研究から境界層の理解が大きく進み、境界層を通したプラズマ流入過程がプラズマシート形成に果たす役割の研究が大きく進んでいる。

また、宇宙天気研究およびその予報の観点から、到来する太陽風に対して磁気圏がどのように応答するかという点はきわめて重要な課題である。太陽風を入力とした物理モデル・経験モデルの開発がおこなわれており、宇宙天気予報への実装もなされている。

一方、太陽高エネルギー粒子 (SEP) の研究も、太陽面観測や ACE、DSCOVER などの惑星間空間観測、また磁気圏内の粒子観測によって大きく進展し、さらに惑星間空間の伝搬や、磁気圏への進入過程についてのシミュレーション研究も活発に行われている。SEP は磁気圏内に進入し、プロトンの放射線帯の起源の一つとして寄与するとともに、極域を中心に中間圏・対流圏領域にまで降り込み、オゾンの減少等を引き起こす。この SEP は、人工衛星の障害や宇宙飛行士の被ばくに直結するため、その変動の理解と予測は宇宙天気の観点からもきわめて重要である。

## 今後の課題

電磁気圏研究にとって、今後も継続した太陽風の観測が重要であることは言うまでもないが、さらに太陽風の 3 次元構造のダイナミクスを理解し、その微細構造、特に惑星間磁場変動の予測を可能にする研究も重要になる。また、通常とは異なる状態の太陽風 (通常よりも低/高密度の太陽風、マッハ数が著しく低い太陽風、極端に強い磁場を持つ太陽風など) のときに磁気圏がどのように応答するかについては太陽風、電磁気圏での観測事例を積み重ねるとともに、高精度数値シミュレーションを駆使した研究が必要になる。

また、近年、ジオコロナと太陽風の電荷交換反応を用いて X 線で磁気圏境界層を撮像でき

る可能性が指摘され、2020 年代初頭に中国と ESA が SMILE と呼ばれる衛星計画を、また日本でも GEO-X と呼ばれる計画が検討されている。この撮像観測によって、太陽風によってダイナミックに変化する磁気圏境界の様子が可視化されることが期待されており、太陽風によって磁気圏のグローバルな形状の変化がどのように起きているかを初めて可視化できる可能性がある。これらの衛星計画と連動した「その場」での衛星観測や地上観測との連携が必要となる。

## (2) 太陽・ジオスペースから電離圏・大気圏への影響

### 現状

完全電離かつ粒子無衝突空間の磁気圏と弱電離かつ粒子衝突空間の電離圏の間は、物理・化学特性の異なるプラズマが 3 次元電流系によって密接に結合することでダイナミクスとエネルギー・物質輸送が規定されている。それは時に太陽風と電離圏や磁気圏それぞれと直接的に結合し、具体的にはジオスペースを介した結合であったり、磁気圏を通しての電離圏との結合であったり、電離層・磁気圏結合の強弱への影響であったりとさまざまな形をとる。これは領域間結合と呼ばれ、その結合の中に包含され様々な時空間規模の現象として両領域を非線形に結合するスケール間結合、また内部磁気圏に見られるエネルギー階層間結合とともに、電離圏や大気圏に様々な形態として風速・温度・密度の変動を引き起こす。これらの変動はとりわけ極域に現れるが、電離圏・熱圏伝搬性擾乱が赤道方向へ伝搬する途中にエネルギーや物質を中低緯度大気へ再分配し、その場の電離圏や大気圏に副次的変動をもたらす。

最近の観測・数値シミュレーション研究によって極域に流入するエネルギーと物質およびそれによる極域電離圏・大気圏の変動についていくつかの進展がみられた。例えばジュール加熱に伴うカスプ域熱圏密度の特異点増加、オーロラアークとほぼ同程度の南北幅に集中して発生するジュール加熱と熱圏変動、サブストームの相や磁気地方時に依存したオーロラ降下電子エネルギー分布およびオーロラ形態発達や熱圏風速変動、100 keV を超える高エネルギー降下電子による中間圏・上部成層圏での窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) や水酸化物 (HO<sub>x</sub>) の増加とオゾンの減少などが挙げられる。また、EISCAT の観測によって脈動オーロラに伴って放射線帯電子が中間圏に降り込んでいることが発見され、これまで考えられていたよりも、頻度高く、中間圏での NO<sub>x</sub> や HO<sub>x</sub> の増加とオゾンの減少が起きていることが示唆されている。

極域で発生する電離圏・熱圏変動は電離圏嵐や熱圏嵐とも呼ばれている。電離圏嵐にはまた、F 領域での電子密度が増加する正相嵐、減少する負相嵐がある。極域のジュール加熱によって下部熱圏から巻き上げられた分子大気が赤道方向に輸送される過程で F 領域に電子密度変動を引き起こすと考えられているが、これらの発達過程の理解は電離圏研究において未だ重要な課題である。電離圏・熱圏の観測は不十分であるが、AE、DE2、UARS、TIMED 等の衛星観測、地上光学・レーダー観測 (例えば、EISCAT や SuperDARN、PANSY)、全地球測位衛星システム (GNSS) による全電子数観測や数値シミュレーションにより中性-プラズマ相互作用による熱圏風変動、熱圏大気循環、伝搬性擾乱の研究が大きく進展した。具体的には、磁気嵐時に見られる負相嵐は午前側の極域から開始し、その領域が磁気嵐の発達とともに低緯度側に拡大するという従来の考え方では説明できない描像が明らかになってきた。また、AMIE や KRM など種々の観測データを用いて極域電離圏変動を定量的に表現する試みは、全球モデルと連携することによって特徴的な現象の再現、または現象の物理機構の理解において重要な役割を果たしてきた。

磁気嵐の発生に伴って極域 2 セル対流の強化とその赤道方向への拡大が起これ、その 2 セル対流を引き起こす電場が極域から赤道電離圏へ侵入してくることが知られており、その東向き電場が日没後に赤道電離圏で発生するプラズマバブルの発生・発達に関わっていることが知られている。近年の全球的な全電子数観測によって中規模以上の磁気嵐になると、プラズマバブルが観測される領域が中緯度まで拡大することが明らかになってきた。

太陽フレアが発生した際、電離圏最下部の D 領域で著しい電離が起こることによって短波の吸収（ブラックアウト）が生じる。この現象は、デリンジャー現象とも呼ばれ、通信障害の一因として古くから多くの研究が行われてきた。近年、このような電離圏変動に加えて衛星観測により太陽フレアに伴い熱圏での中性大気質量密度が全球的に著しく増加することが明らかになった。

## 今後の課題

近年、超高層大気研究では地上観測装置網の拡充および数値計算空間における領域間結合モデルの構築が大きく進んだ。さらに測定センサの高感度化と新規開発技術の応用によって従来より 1-2 桁優れた時間・空間分解能での電離圏や大気圏の精密測定が可能になった。また大型大気観測レーダーや衛星開発が国際共同体制のもと着実に進行している。これまで様々な観測結果を積み上げ、電離圏・熱圏・中間圏などでの個々の現象を理解する試みが精力的に進められてきた。しかし上述の研究環境の向上を踏まえ、これまで難しかった電離圏・大気圏の 3 次元結合研究、即ち、極域と中低緯度の緯度間結合、経度分布、高エネルギー降下粒子による低高度電離や下層・中層大気から熱圏・電離圏に上方伝搬する大気波動などを介した鉛直結合、イオン-中性粒子衝突過程の観測実証に関する研究を進めるべきと考える。特に、オーロラ活動に伴う大気加熱と膨張および組成比変動、その水平輸送、電離圏電子密度変動（正相・負相嵐）は一連の物理過程と考えられているが、それを観測実証することは太陽を起源とするエネルギーの流入から消失の終端までを包括的に理解する重要な課題である。また、磁気嵐時における中緯度プラズマバブルの 3 次元構造とその生成機構について地上・衛星観測に加え、高精度全球電離圏-大気圏結合モデル(GAIA)を駆使して解明していくことが必要である。これらの研究は、GNSS 測位、低高度衛星の運用等に関連して、我々の生活基盤を維持する上で当研究分野に課せられた最重要課題の一つになると考えられる。

電離圏・大気圏の理解をさらに発展させるには超高層大気の中性粒子測定技術を向上させなければならない。イオンと中性大気粒子の衝突は基礎的かつ重要な物理過程であるが、電離圏プラズマに比べ超高層中性大気粒子の観測情報量は極めて少ない。現在、性能を向上させたファブリペロー干渉計やライダー、粒子計測器や紫外線測定による飛翔体搭載型測器の開発が進められており、新しい観測データを用いたイオン-中性粒子相互作用研究が期待されている。また、TIMED 衛星などの観測により、中性大気は高度になればなるほど、太陽輻射の影響だけでなく磁気圏活動の影響を強く受けることがわかってきた。従って、中性大気と電離大気を、相互に強い影響を及ぼし合う存在として、まとめて太陽からの影響を調べる必要がある。

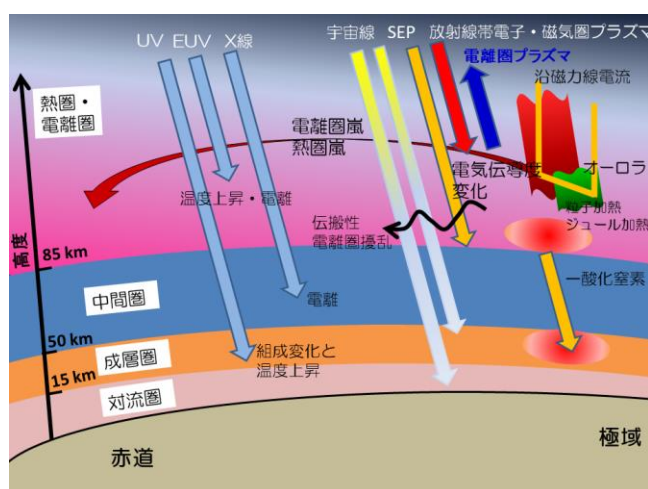


図 2.1.2 太陽から地球電離圏・大気圏への影響

### 2.1.3 地球気候に対する太陽活動の影響

#### 現状

太陽活動が地球の気候に影響を与えている可能性については古くから議論がなされてきたが、1978年より人工衛星で精密に観測され始めた太陽総放射量が、11年周期で0.1パーセント程度しか変化していないことが発見されたこともあり、太陽活動の影響は従来あまり重要視されてこなかった。しかし、2001年に北大西洋海底コアの分析から過去1万年にわたって太陽活動と気候の変動が非常に良く一致していたことが発見されて以来、両者の相関を強く示すデータが数多く報告されてきている。その時間スケールは多岐にわたり、太陽活動の基本となる11年周期のほか、双極子磁場の反転にともなう22年周期、マウンダー極小期などの活動低下に関連する200年周期、そして、1000/2000年といった長いスケールにまでおよぶ。また、太陽の自転に関連すると考えられる27日程度の周期性も、雷や雲などの観測データから見つかってきており、気象のスケールでも太陽が重要な影響を及ぼしている可能性が示唆されている。

太陽活動の変動によってもたらされる気候変動には、気温の変化のみならず、洪水や干ばつ、氷河の前進/後退、また短期的な気象への影響も含まれ、社会への直接的な影響が大きだけでなく、食料政策や環境政策にも多大な影響を及ぼしうる重大な問題であるため、その定量化やメカニズムの解明が喫緊の課題である。上述のとおり、太陽総放射量は太陽活動の極大期と極小期で0.1パーセント程度しか変化しておらず、この変動幅では、地球表層の気温を0.05℃変化させる程度にしか影響しないため、古気候学的に観測されている太陽活動と気候の相関は説明できない。

これまでに提案されているメカニズムは大きく分けて以下の6種類だが、これらの組み合わせやバリエーションも考慮すると、さらに多くのパターンが考えられる。メカニズム解明のためには、今後、これまでの常識に捕われない柔軟で分野横断的なアプローチが不可欠である。

(i) 銀河宇宙線：太陽系外から飛来する銀河宇宙線のうち数十GeV以下の成分は、太陽風磁場による遮蔽を受ける。そのため、11年周期をはじめとした太陽活動の変動に応じて地球での銀河宇宙線強度が変化する。コロナ質量放出が短期的に銀河宇宙線を強く遮蔽したり、また太陽風構造が地球を通過したりする影響もあるため、太陽の自転のスケールの変動も併せ持つ。また、太陽双極子磁場の反転に関連する22年周期の変動成分も見られる。銀河宇宙線は、大気分子を電離してイオンを生成するが、それが雲核生成や雲粒の成長率に寄与する可能性があると考えられている。僅かな雲量の変化は地球の気温を大きく変える(1パーセントで約1℃)と言われる。この銀河宇宙線説は1990年代に入ってSvensmark等がいくつかの論文を発表しており、それが今日の議論再燃のきっかけになっている。宇宙線が雲核形成に影響し得る点については、古くは1970年代から議論されていた。近年、欧州原子核研究機構(CERN)の加速器などを用いたチャンバー実験により、実験的に荷電粒子の雲核形成への寄与について検証する研究が進められており、チャンバーに添加する成分やチャンバーの温度に応じて、荷電粒子の影響の度合いが変化する様子などが捉えられている。



また、宇宙線による雲核形成や雲/エアロゾルの帯電の影響をシミュレーションで検証する動きもある。

(ii) 太陽総放射：1978年以降およそ3太陽サイクルにわたって太陽総放射量が計測されてきているが、その変動幅は0.1パーセント ( $1 \text{ W/m}^2$ ) 程度である。2008年に、太陽活動が200年ぶりとも言われる低下を示した際に、太陽総放射が1996年の極小期と比べて  $0.3 \text{ W/m}^2$  も低下したことは、驚きをもって受け止められたが、マウンダー極小期まで遡ったとしても、それを大きく超えて放射量が下がっていた可能性は低いと見られている。ただし、長期的に放射量の低下が起こった場合に、気候システム内でのフィードバックによりある程度の気候変化につながり得ると考えている研究者もいる。

(iii) 紫外線：200-400 nm 付近の紫外線は、太陽活動の11年周期変動によって0.1~数パーセント程度変化する。これがオゾン層で吸収されることで成層圏温度場、さらに風速場に変調を与えると考えられている。それが鉛直循環や波動伝搬の変調を介して、対流圏にも影響を及ぼす可能性が指摘されている。紫外線の11年周期変動にともなって、成層圏において

最大  $1^\circ\text{C}$  程度の影響が出ることが分かってきているが、対流圏への影響の定量化は今後の課題である。

(iv) グローバルサーキット：グローバルサーキット説が提唱されたのは1920年代である。地表と電離圏をコンデンサとする大気圏内に流れる電流が、雲の成長や降水効率などに影響するというシナリオである。積乱雲の中で正に帯電した氷晶が巻き上げられることによって上向き電流が流れ、電離圏の電圧が保たれる一方で、積乱雲以外の場所では、 $\text{pA/m}^2$  のオーダーで下向きの電流が流れているとされ、それが積乱雲ではない雲の中の電荷分布を変えることで雲の成長や降水効率に作用するとされる。大気中の電気伝導度を銀河宇宙線がつくるイオンが左右することで回路中を流れる電流が変化するほか、この回路はさらに上方で太陽風に起因する磁気圏-電離圏電流系とカップリングすることが指摘されており、下方にマッピングされると、グローバルサーキットの電流が約20%変化するという報告がある。しかしながら最近になってグローバルサーキットが理想的な球殻コンデンサーではなく、発電機である積乱雲分布や電離圏電気伝導度の非一様性が回路に影響している可能性を考慮しなければならないという指摘もあり、基本的な議論から研究を進めていく必要がある。

(v) 太陽風高エネルギー粒子：大規模な太陽フレアが発生し、数十 MeV~数 GeV 程度のエネルギーの陽子が大気に大量に降り注いだ場合に、窒素酸化物の生成やオゾン破壊などの大気化学反応を通じて極域を中心に成層圏下部まで気温の偏差がもたらされるという説である。また、 $100\text{keV}$  を超える電子の降下によっても、同様の現象が引き起こされる。ただし、規模が大きなものほど頻度は低く、また各事象の影響は最大でも数か月程度とされ、地表での長期的な気候変動への影響は未知数である。

(vi) 大気流出への寄与とその影響：地球大気の大気流出量は太陽風・太陽紫外線に依存すると考えられているが、過去の太陽の高い活動度を考慮すると、その流出量が地球の大気総量に対して必ずしも無視出来ないことが最近の研究で分かって来た。この流出には原子・イオンの

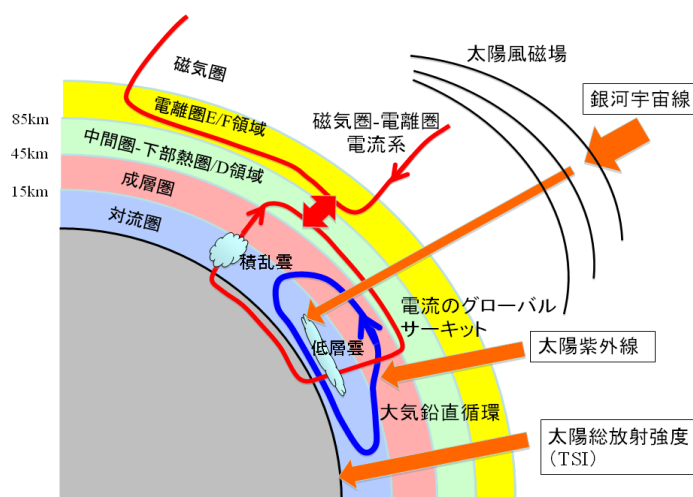


図 2.1.3 地球気候に対する太陽活動の影響

質量依存性もありうるため、流出に伴って大気組成が変化することも考えられる。このような大気組成変化は生命圏の酸化還元活動にも影響を与えうるもので、それが長周期の気候変動（変動にはいくつかの時間スケールがある）に影響を与えている可能性がある。

## 今後の課題

重要課題として、太陽地球気候結合のメカニズムに関する理解をより一層深め、地球気候モデルに組み込みが可能になるレベルにまで高めていく点が挙げられる。将来的には、太陽・太陽放射・太陽風などと地球磁気圏・電離圏・熱圏大気を統一的に扱うような宇宙天気モデルの開発、更にはそれを気象モデル・気候モデルに組込むなど、太陽地球気候結合の全体を包括するような大規模モデルが目標になってくるであろう。それらを見据え、観測・理論・シミュレーションから多角的に、太陽気候結合のメカニズムの解明に取り組んでいく必要がある。例えば熱圏 300 km より高い高度の大気について系統だった中性観測・熱的イオン観測は存在しない。それ故に静水圧平衡と実験室光化学のモデルのみで超高層中性大気は語られてきたが、そういったモデルと観測が合わないことが近年の観測から示唆されるようになってきている。また中性粒子とイオンとの間の結合がどのように関係しているか観測自体がほとんどない。地球気候に対する太陽活動の影響を議論するためには、こうした基本知識を深めていく必要がある。

影響を定量化し、かつその素過程を解明していくためには、太陽物理学、宇宙線物理学、超高層物理学、気候学、大気化学、古気候学などの、多くの研究分野・研究手法にまたがる研究者が分野横断的に議論を進めていく必要があるであろう。現時点では、各大気層あるいは各説を議論する研究者がそれぞれ別々のコミュニティに属していることが多く、議論の場が非常に限られていることが課題として挙げられる。多種多様な研究領域が、いかに密な協力体制を築いていけるかが、重要なポイントになるだろう。その上で、一大研究拠点の形成と充実は必要不可欠である。

銀河宇宙線などの荷電粒子の影響の見極めについては、今後、実大気下での雲核/雲粒の観測が益々重要になってくるであろう。チャンバー実験から示唆されるように、その場の大気微量成分や高度に応じて、雲核形成への影響の度合いは大きく異なると考えられる。したがって、全球の気候システム内における荷電粒子の影響の受容とそこからの影響の伝搬プロセスを見極めていく必要がある。荷電粒子の気候への影響の度合いについては、地磁気強度の長期的な変動の影響や、さらには太陽系周辺の宇宙環境変化の影響についての検証などからも、大きな示唆が得られてくる可能性があり、地質学分野との協力も今後ますます重要になっていくであろう。銀河宇宙線の強度の変動が、そもそもは銀河系内の環境変化や太陽系周辺の超新星残骸の密度の変化によってもたらされることを考えれば、この問題が今後、近年発見が相次いでいる系外惑星のハビタビリティを議論する際にも関係してくるだろうと考えられる。本項の知見は、そういった天文分野を含め、極めて幅広い分野への寄与が期待できるものである。

### 2.1.4 内部・外部太陽圏研究 現状

宇宙天気の変動要因の多くは、太陽活動に帰結する。太陽表面からは、太陽起源の磁場を伴った超音速の荷電粒子流（太陽風）が惑星間空間に向けて、絶えず吹き出している。コロナホールからは高速太陽風（ $>700\text{km/sec}$ ）が吹き出し、コロナホール境界や活動領域近傍の開いた磁力線の領域から低速太陽風（ $<400\text{km/sec}$ ）が吹き出していることが明らかにされている。惑星間空間シンチレーション観測やUlysses衛星観測から、太陽風の速度分布は二様態で  $400\sim 700\text{km/sec}$  の中間速度帯は狭い領域にしか存在していないと考えられているが、太陽近傍における精密な頻度分布や惑星間空間における発展過程の詳細はまだ明らかにされていない。また、高速太陽風と低速太陽風とではそこに含まれる磁気流体乱流の性質が異なることも明らかとなっている。高速太陽風が低速太陽風に追いつくと、その接触面では圧縮効果による高プラズマ圧、強磁場領域が形成される。この高圧・強磁場領域は共回転相互作用領域（CIR）と呼ばれている。このCIRやCMEなどを伴う太陽風は、磁気圏に於ける巨視的対流・電流系の基本的な駆動源であり、その磁場の向きが南向きの時、最も効率よく磁気圏と相互作用することがわかっている。太陽風変動はサブストームを始めとする、磁気圏システムに内在する様々な擾乱現象の源でもある。

一方で、我々の地球は銀河系内においては、大気、磁場、そして太陽風プラズマに覆われた存在とすることができる。天文スケールにおける地球環境を論じるにあたっては最後の太陽風プラズマの影響や、高エネルギー銀河宇宙線との関係に関する定量的知見を深めることが肝要である。これは具体的には太陽風（太陽圏）と星間風との境界領域に見られる物質（プラズマ、宇宙線など）や電磁場のエネルギー交換過程を理解することに帰結する。近年、Voyager 探査機による太陽圏境界領域の直接観測や、同領域で生成される高エネルギー中性原子（ENA）のIBEX衛星によるリモート観測から、境界領域の物理素過程に関する新しい発見が相次いでいる。特に、Voyager 1号、2号による太陽圏終端衝撃波の通過（それぞれ2004年、2007年）は21世紀の太陽圏観測における大きな進展をもたらした。その後2012年にはVoyager 1号が、2018年にはVoyager 2号がヘリオポーズを通過し、人類史上初めて星間空間の「その場」観測が行われる時代に突入した。Voyager および IBEX による一連の観測から、太陽圏に対する局所的な星間媒質（VLISM = Very Local Interstellar Medium）の相対速度がより正確に求められ、太陽圏の外側に存在すると考えられていたバウショックは存在せず、バウウェーブとなっている可能性が指摘されている。

内部太陽圏の観測は2010年代末から急速な進展を見せている。特に、BepiColombo（日欧共同水星探査ミッション、2018年打ち上げ）、Parker Solar Probe（2018年打ち上げ）、Solar Orbiter（2020年打ち上げ）の太陽近傍における「その場」観測を実行する衛星計画によって、太陽風加速・コロナ加熱問題などの太陽物理の諸問題においても、その場観測から得られる太陽風中の素過程（不連続構造、乱流、非熱的粒子、イオン組成など）の知見と分光撮像観測・シンチレーション観測で得られる太陽表面・近傍現象の知見とを整合させた研究の実現が可能となりつつある。太陽に接近し太陽風加速領域を直接探査する探査機Parker Solar Probeが2018年8月に、撮像・その場観測のハイブリッドで太陽風の大局的ダイナミクスの解明を目指す探査機Solar Orbiterが2020年2月にそれぞれ打ち上げられ、これまでの理解とは異なる太陽風描像が少しずつ明らかになってきた。また日欧共同水星探査ミッションであるBepiColomboも2018年10月に打ち上げられ、水星

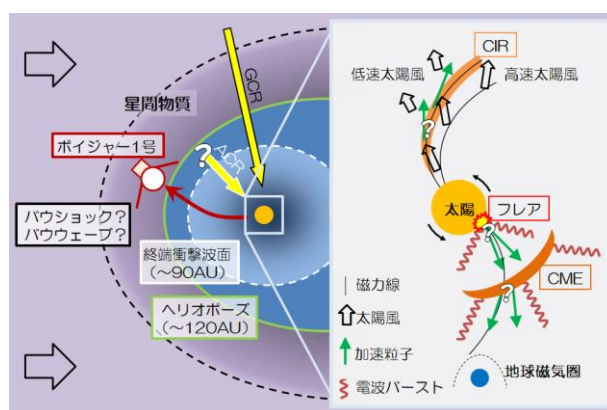


図 2.1.4 内部・外部太陽圏



に到達するまでのクルージング段階で精力的に太陽風観測を行っている。特に Parker Solar Probe はこれまでどの探査機も到達できなかった太陽近傍の直接観測に成功しており、2021年4月末には太陽風速度が Alfvén 速度よりも小さい領域（サブ Alfvén 領域）へ到達するなど大きな成功を収めている。太陽風近傍の観測で最も重要な科学成果の一つとして磁気スイッチバックの発見がある。磁気スイッチバックは磁場の動径成分が局所的に（数分程度）符号を急に反転させる現象であり、太陽風加速の謎を解き明かす鍵となるのではないかと期待されている。スイッチバックの初期報告以降理論的、観測的なフォローアップ研究が継続しているが、現状では太陽近傍の交換型磁気リコネクションがスイッチバックの起源として有力視されている。交換型磁気リコネクションはこれまで一部の低速太陽風の形成に重要であると考えられてきた。だがスイッチバックが普遍的に存在することは交換型磁気リコネクションがあらゆる太陽風の形成に一定の影響を及ぼしていることを示唆し、太陽風加速モデルの大幅な見直しが求められている。

## 今後の課題

今後の内部太陽圏研究の大目標は Parker Solar Probe、Solar Orbiter、BepiColombo の観測、およびそれらを踏まえた理論研究を通じて太陽から太陽圏全体へどのようにエネルギー・物質が輸送されるかを理解することである。例えば Parker Solar Probe が発見した磁気スイッチバックは太陽風モデルの大幅な見直しが必要である可能性を示唆している。今後より太陽に近い場所での観測が成功すれば、磁気スイッチバックの形成機構や進化、さらにその太陽風加速への役割がさらに深く理解できるだろう。また Solar Orbiter もその場観測だけでなく、紫外線望遠鏡の高い S/N 比を活かして太陽風加速領域の紫外直接撮像を行うことが期待されている。これらの観測をベースに、太陽近傍から太陽風加速領域以遠までシームレスに観測を説明できるような理論モデル、数値シミュレーションが必要になるだろう。

このような太陽と太陽圏の結合過程解明の知見は、広く宇宙プラズマ諸現象に普遍的なプラズマ加熱・加速過程の理解にも重要な貢献をもたらし、より詳細な太陽表面現象と太陽風 3次元構造の対応の解明を通じて宇宙天気・気候分野の進展、更には太陽以外の恒星の理解にも大きく寄与すると考えられる。これまで、特に日本のコミュニティにおいては天文学・天体物理学の一分野としての太陽物理の研究が主流であったが、今後の太陽近傍環境の直接観測の進展により、太陽地球系物理学の研究範囲が太陽物理のものと重複していくことは容易に想像できる。このことは、これまで宇宙天気分野などで行われてきた連携関係とは質的に異なる研究分野の融合を伴うものであると考えられる。重要計画を目前にした欧米における急速な研究の進展を鑑み、日本においても太陽・太陽風物理をその場観測と合わせて理解する文化を意識的に吸収していく必要がある。同時に、これまでの日本のコミュニティの強みでもある分光撮像観測や惑星間空間シンチレーション観測の一層の強化も、太陽活動・太陽風の変動解明の観点から不可欠である。

また、惑星間空間における太陽風変動の物理過程を理解するためには、太陽風プラズマの加熱と磁気流体乱流の散逸を理解する必要がある。2017年以降、Magnetospheric Multiscale (MMS) 衛星は地球から離れた位置で太陽風を観測できるようになった。今後、乱流の散逸過程を支配するイオン・電子スケールの太陽風乱流の理解が進むことが期待される。内部太陽圏の「その場」観測結果を理解するためにも、より精密な観測ができる地球磁気圏近傍で素過程の理解を進めることが重要である。

翻って、外部太陽圏においても多くの未解決問題が残されている。2機の Voyager 探査機による直接観測からは、長年懸案の宇宙線異常成分 (ACR) の加速機構の解明につながる手掛かりは得られていない。終端衝撃波通過時に観測された終端衝撃波粒子 (TSP) や高エネルギー電子の加速機構も謎のままである。Voyager 2号のヘリオポーズ通過では、Voyager 1号のときとは違う比較的急峻な境界が報告されている。両衛星は引き続き星間空間を航行中で、例えば太陽圏内部から到達した衝撃波など、VLISM のプラズマ環境について貴重なデ

ータを送り続けてきている。今後、データ解析やモデリング研究が進むことで、銀河宇宙線の太陽圏への侵入過程といった重要問題への知見も得られるであろう。IBEX 衛星が捉えた ENA の特徴的な空間分布 (IBEX ribbon) は、星間媒質中の中性粒子と太陽風陽子の間の電荷交換をもとにして説明されつつあるが、分布のエネルギー依存性や時間変動まで包括的に説明できるモデルの構築は今後の重要な課題である。さらに、太陽圏境界領域のリモート観測の地位を確立した IBEX は、現状で直接観測データがない太陽圏尾部 (ヘリオテール) の情報の重要な供給元でもあり、データの有用性は今後も増すはずである。IBEX の後継ミッションとして Interstellar Mapping and Acceleration Probe (IMAP) 衛星の打ち上げが 2025 年に予定されており、日本も IPS 観測データを提供する役割を担っている。なお今後の太陽圏外縁～星間空間の直接探査については、Voyager の後継にあたる米国の Interstellar Probe や中国の Interstellar Express などが構想段階にある。

地球軌道周辺を除けば、太陽圏の観測的情報は非常に限られている。そのなかでも、Voyager、IBEX を中心とした太陽圏外縁の観測結果には従来の描像を覆すものが多い。おそらく、今後予定されている太陽近傍のその場観測からも、新たな観測的事実が多く明かされるであろう。これらの貴重かつ希少なデータを踏まえた太陽圏の理論モデル構築に向け、数値シミュレーション研究の重要性が今後さらに増していくことも明らかである。

## 2.1.5 太陽研究

### 現状

太陽圏は太陽が放射する光および太陽から吹き出すプラズマ (太陽風) によって満たされており、太陽圏環境は太陽の活動によって支配されている。太陽風の吹き出し口である太陽の表面 (光球) から外層大気 (コロナ) は動的なプラズマ現象が複雑に絡み合う領域である。地球環境はこの動的な太陽大気から、太陽からの放射、太陽風などを通じて常に影響を受けており、太陽大気のダイナミクスそのものを理解する事は地球周辺の宇宙環境を理解する上で非常に重要である。

6 千度である太陽光球の上空には、約 1 万度の彩層が存在し、さらにその上空には 100 万度を超えるコロナが形成されており、このコロナから太陽風と呼ばれるプラズマが流れ出ている。どのようにして、この 100 万度を超える高温大気が形成され、さらに太陽風を加速しているかは、太陽物理学における最重要懸案事項の一つである。大気加熱の物理プロセスは大別して、アルヴェン波などの電磁流体波動を散逸させることによってコロナを加熱する波動加熱説と、コロナのいたるところで蓄えられた磁気エネルギーを微小爆発現象によって解放しコロナを加熱するナノフレア加熱説の 2 つがある。これらのプロセスがコロナのこういった領域で、どの程度寄与しているかなど、その詳細は未だ分かっていない。さらに、コロナの下に存在する彩層はダイナミックに運動しており、彩層のダイナミクスがコロナの加熱にどのように寄与するのかも重要な問題である。このような大気加熱の問題は、太陽に固有なものではなく、一般の恒星大気加熱、恒星風加速等の理解につながる重要な知見が得られている。

太陽における活動現象の中でも、社会インフラや人工衛星などへの影響が大きい太陽面爆発現象 (太陽フレア) は良く知られた現象である。1990 年代の「ようこう」衛星の観測以降、太陽コロナ中に蓄えられた磁気的エネルギーが磁気リコネクションにより爆発的に解放された結果であると考えられるようになった。一方で、現在の太陽物理ではフレアは磁気リコネクションだけでなく、コロナの磁気的システムが擾乱 (トリガー) によって不安定化する事も重要あり、磁気リコネクションとシステムの不安定性が複合的に関係し合う物理過程として理解されている。太陽フレアが発生すると、高温プラズマが大量に生成されるとともに、電子、陽子などが通常のコロナ中には存在しない高いエネルギーまで加速される。太陽フレアに伴う高温プラズマや高エネルギー粒子から放射される X 線や極端紫外線の急激な増加は、電離圏擾乱を引き起こす事が知られている。

フレアに伴ってしばしばコロナ質量放出現象 (CME) が発生する。この CME は巨大なプラ

ズマ雲であり、前面には衝撃波を内部には非常に強い磁場を抱え込んでいる。但し、Mクラス以上の比較的規模の大きなフレアであっても、約半数はCMEを伴っていないことから、フレアはCME有無の確実な指標ではない。CMEを伴わないフレアは閉じ込め型フレアといい、CMEを伴うフレアは噴出型フレアと呼ばれている。両フレアとも中心となるエネルギー解放メカニズムは磁気リコネクションであると考えられているが、大局的な磁場構造の違いによりCMEの有無などが決まると考えられている。CMEは地球磁気圏と衝突することにより、「突発性の磁気嵐」を引き起こすことは良く知られている。また、太陽から放出される、数keV(eV:電子ボルト)から数GeVの陽子、電子、重イオンを太陽高エネルギー粒子という。フレアやCMEに伴う衝撃波によって太陽高エネルギー粒子は加速されていると考えられている。これらの高エネルギー粒子流はフレア発生から数十分から数時間後に地球に到着し、磁気圏内部で数MeV以上のエネルギーを持つ陽子のフラックスが大量に増加するプロトンイベントを引き起こす。特に、GeVのオーダーまで加速された高エネルギー粒子は直接地球大気まで到達し、大気中の原子核と相互作用し、二次的粒子を生じる。この二次的粒子もエネルギーが十分高いため、反応の連鎖により大量の二次的粒子を生成するが、この現象を空気シャワーという。生成された粒子のうち、寿命の短いものは崩壊し、残ったガンマ線、電子、ミュー粒子、核子などの粒子が地表に複数同時に到来し、大量の放射線増加を引き起こすことが知られている。

太陽大気の形成過程を明らかにするため、2006年に太陽観測衛星「ひので」が打ち上げられた。「ひので」は太陽コロナの観測とともに太陽表面(光球)での磁場構造の変動を高解像度・高精度に測定し、これまでにAlfven波と考えられる波動の初検出やこれまでの想像を大きく上回る激しい現象(ジェットなど)や対流・乱流に駆動された光球・彩層の活動性を明らかにした。また、衛星観測からは把握の難しい太陽近傍での太陽風速度・密度擾乱の特性やCMEの3次元構造や伝搬特性については、惑星間空間シンチレーション観測によってその解明が進められている。地球軌道から離れて太陽風を直接観測する計画が進行中であり、Parker Solar ProbeやSolar Orbiter等、惑星間空間で起こる物理の理解が精力的に研究されている。

約11年の周期で変動する太陽活動を駆動・維持するメカニズムはいまだに明らかになっておらず、太陽物理学の大問題の一つである。対局的には、太陽の差動回転(自転)による大規模な磁場の引き伸ばし( $\Omega$ 効果)と、 $\Omega$ 効果によって生成された磁場のコリオリ力によるひねり( $\alpha$ 効果)によって太陽周期活動は維持されていると考えられている。これまでに乱流効果のダイナモ波を発生させる乱流 $\alpha\Omega$ ダイナモや、子午面還流の輸送を用いる磁束輸送ダイナモなどが提案されているが、未だ「標準モデル」は確立されていない。どのダイナモモデルが正しいか、もしくは新しいモデルが必要なのかを理解するためには太陽内部の流れ場の様子を観測的に明らかにする必要がある、今後の課題である。

「ひので」により極域磁場の詳細な観測が可能になり、極域コロナホール内の強磁場小領域(キロガウスパッチ)の発見や北極域が先行した南北非対称な磁場極性の反転の観測、などこれまでにない発見があった。また、サイクル24は近年稀にみる低調なサイクルであったこともあり、今後の太陽サイクルがどうなるか注目が集まっている。これらの太陽活動長期変動に関する理解は、過去から未来における惑星表層環境や生命の誕生などとリンクする非常に重要な内容である。

## 今後の課題

「ひので」の最新成果も踏まえて、今後10~20年に重点的に取り組むべき太陽に関する科学課題の柱は、以下の2つである。

- a) 太陽大気のダイナミクス・加熱の物理プロセスの定量的な理解
- b) 太陽磁場の生成起源および太陽周期活動の理解

このうちa)は、太陽大気の磁場構造や動的構造を3次元的に理解して、磁気リコネクション・プラズマ加熱・粒子加速・Alfven波など磁気プラズマの基礎的過程を定量的に理解

することで、彩層・コロナの加熱機構、高速太陽風の成因、高エネルギー粒子生成機構などを明らかにすることを目指す。さらに、太陽フレアの発生を予測するアルゴリズムの構築や太陽と地球環境の関係の理解を促進する観測を通じて、「宇宙天気(3章)」の基礎的研究において重要な役割を果たす。これらの科学目的を達成するための次世代太陽観測衛星ミッションでは、高空間・時間分解、かつ、彩層からコロナまでシームレスに観測できる撮像分光観測を行う。磁場にもなう多様な素過程(微細構造)と大局的構造、そしてその時間変動をとらえるとともに、これまでにない高い解像度でコロナを同時に観測することで、星の外縁に普遍的に存在する高温大気を生み出す機構をはじめ、激しく変動する太陽の磁気活動の全貌を明らかにする。次世代太陽観測衛星では光球磁場などの情報が無いので、DKISTをはじめとする地上観測、及びParker Solar ProbeやSolar Orbiter等の今後予定されている衛星計画とのシナジーが重要であると考えられる。さらに、電波による惑星間空間シンチレーション観測でも次世代観測装置が提案されており、それを用いたグローバルな太陽圏観測との連携によって太陽風の理解が飛躍的に進むと考えられる。彩層磁場の観測は太陽大気形成過程を理解する上で非常に重要であり、地上観測、ロケット実験(CLASP2)、気球実験(SUNRISE)などの結果をよく考察したのち、さらに衛星ミッションとして検討する。また、太陽フレアに伴う高エネルギー粒子生成の解明も重要な科学課題として認識しており、高時間分解能・高ダイナミックレンジのX線分光撮像観測などを通じて、明らかにしていく。

b)は、太陽大気の活動性や加熱を引き起こす源としての太陽磁場が太陽内部でどのような機構で生成されるのか、またその磁場がどうして約11年の周期で変動するのか、という太陽・恒星磁場の起源の理解を目指すものである。ダイナモ問題解決の鍵は太陽内部にあり、大まかには、1. 太陽はどのような自転速度分布(差動回転)を持つのか? 2. 子午面内の流れ場(子午面還流)はどのような構造を持つのか? 3. 熱対流は、どの領域、どの空間スケールで、どのような速度を持つのか? を観測的に明らかにする必要がある。1. 差動回転分布からは、太陽ダイナモにおける最も重要な効果である、差動回転による大規模磁場の引き伸ばし( $\Omega$ 効果)について空間分布の手がかりを得られる。また、2. 子午面還流からは、太陽内部における磁束輸送や、乱流による角運動量輸送を理解することができる。これは[子午面還流による角運動量輸送]=[乱流による角運動量輸送]の釣り合いが成り立つためである。さらに、3. 熱対流の性質と太陽の自転速度の関係からは、乱流的なダイナモ効果や差動回転や子午面還流を形成する乱流角運動量輸送がどのように行われるのかを確認することができる。これらの太陽内部を観測的に理解するため、現在検討されている計画の一つに、黄道面を離れた視点に探査機を送り、そこから太陽極域を観測するというものがある。これは、次の太陽磁気活動サイクルの種となる極域磁場を理解し、さらに太陽内部の深い領域の速度場の理解を進める考えである。2030年代以降の実現について、太陽圏のその場観測とも連携して、検討すべき重要なミッションコンセプトである。これらの観測は、各国で精力的に進められている理論シミュレーションの妥当性を検証する上でも重要な役割を果たす。

## 2.2 宇宙につながる大気圏・電磁気圏環境の解明

地球の大気圏・電磁気圏環境は、2.1 節に述べた太陽や宇宙からの粒子および電磁エネルギーの流入による影響に加え、下層大気で励起された大気波動によるエネルギーや運動量の輸送、温室効果ガスの増加等の様々な要因により、短期的・長期的な変動を示す。特に、地球大気においては、地上付近や下層大気の変動が、中層および超高層大気にどのような影響を及ぼし、我々の生活にどのように関わるのかを提示することは、当研究分野に課せられた重要な使命である。さらに、電離圏を含む超高層大気現象の変化が、より上空の磁気圏に与える影響を理解することもジオスペース全体の解明に重要である。また、3 章で述べるように、宇宙環境利用が進められている現代においては、その障害を起こす原因となる超高層大気を詳しく理解することが社会基盤を支えるために必要である。本節では、下層大気からの影響と地球大気の全球的な結合という観点に立ち、大気圏・電磁気圏環境における主要な研究課題について述べる。

### 2.2.1 下層大気から中層・超高層大気への影響と緯度間結合

#### (1) 下層大気から中層・超高層大気への影響

地球大気では、下層、中層および超高層大気各領域において特有の子午面循環（大気大循環）が駆動されている。これまでの気象学および超高層物理学分野での研究により、これらの循環の成因に関する理解が進み、下層大気で励起された大気波動が、中層大気の熱的・力学的構造に大きな影響を与えていることが明らかになった。特に、成層圏突然昇温の兆候が成層圏での変動に先立って中間圏から下部熱圏の大気循環に顕著に現れることが、近年の観測・数値シミュレーションから明らかになりつつある。下部熱圏における大気変動は、電離圏プラズマの運動にも影響を与え、2.2.2 で述べるように、中性大気・プラズマ相互作用によりダイナモ電場を駆動する。ダイナモ電場は、磁力線を介してさらに高高度に伝わり、電離圏構造を変調する。さらに近年の観測では、冬極成層圏に起こる突然昇温の影響が、上空の大気だけでなく、遠く離れた赤道域電離圏や夏極中間圏界面に現れることが明らかになった。この原因として、全球規模で起こる大気波動の変調が考えられており、その観測的研究やモデルによる再現実験が進められている。大気変動が電離圏プラズマに与える影響としては、赤道域において“波数4構造”と呼ばれる電離圏プラズマの変動を、大気潮汐波の影響により作り出していることが最近明らかになっている。このように、気象学が対象とする下層大気から超高層大気を含む全ての大気領域を結んだ地球大気の全体像の理解といった新たな視点での研究が必要となってきた。また、近年のGPSなどのGNSS受信機網の発達により、竜巻の親雲や、地震後に発生した津波によって励起された大気波動が電離圏にまで伝わり、電離圏のプラズマ密度を変調することが明らかになってきたほか、竜巻、火山、台風などによる影響も発見された。特に、1000年に1度というトンガ火山大規模噴火後に広範な領域で電離圏擾乱が発生し、噴火由来の大気波動が直接電離圏を揺さぶるだけでなく、中性大気・プラズマ相互作用によって駆動したダイナモ電場が北半球側の電離圏擾乱を駆動することが発見された。これらの結果は、地表面・海面変動や下層大気の変動が超高層大気に影響を与え得ることを示すものであり、ダイナミックに変動する地球の姿を映し出すとともに、電離圏研究が津波の規模や到来予測など防災科学として発展する可能性を新たに示した。

今後の研究においては、大気領域間を結びつける重要なプロセスとして、様々な大気波動の理解がこれまで以上に求められている。赤道域における活発な積雲対流は、様々な大気波動を励起することから、赤道域の積雲対流に関する力学・雲物理過程の解明は、大気波動を通じた大気上下結合の本質的理解に必要である。また、冬季高緯度域において重力波活動が極大となり、成層圏極渦の消滅過程を変調し、オゾンホールの変動に影響することが報告されている。しかし、この重力波の影響は現在の気候モデルでは再現されておらず、モデルの高解像度化によりこれらの重力波を陽に表現することや、高解像度な衛星観測や各

種拠点観測による極域の観測研究の重要性が指摘されている。さらに、下層大気で励起された大気波動がどのように伝搬し、どこで消失するか、また大気波動の消失に伴って発生すると考えられる乱流や二次的な大気波動について、全球規模で理解する必要がある。特に、中層大気の乱流は、上層に位置する熱圏の構造にも影響する可能性があることから、重要な研究課題といえる。また、地球大気に満ち満ちている大気波動がどのように電離圏プラズマの構造を変調するか、さらに、どのように電離圏擾乱を誘起するかという点も未解明の課題である。電離圏擾乱の特性を理解し、その発生を予測することは、人工衛星を利用する測位、通信、リモートセンシングなどの、電離圏を透過する電波を利用する社会基盤にとっても重要である。

雷放電に伴う発光現象も下層・超高層大気結合の現れの一つである。地表から超高層大気へと繋がる電流系（グローバルサーキット）の理解は、古くからの課題であったが、長い間進展を見せなかった。近年活発に行われるようになった、雷放電とそれに伴う諸現象の研究は、この課題の理解を進める上での一つの鍵となっている。

現状の大気上下結合に関する研究は、現象報告的なものが主流であり、個々の間接的な観測結果を基に推論している段階である。今後は、分野間連携を軸としたより詳細な複数の観測結果の統合解析や、対流圏から熱圏・電離圏までを含む全大気圏モデルを用いた数値実験により、これらの現象を総合的に解明することが地球大気全体の理解にとって重要である。

## （２）中層・超高層大気の緯度間結合

熱圏大気の主な大規模循環は、太陽紫外線加熱による夏半球から冬半球への循環である。これに加え、オーロラに伴う加熱（ジュール加熱や粒子加熱）によって逆方向の循環が生じることが数値シミュレーションで予測されているが、観測データは充分ではない。これらの循環は、電離圏プラズマの鉛直方向の運動や熱圏大気組成の変化をもたらす、プラズマ密度の変動を引き起こす。このような大気の循環が電離圏プラズマに与える影響については、これまでの研究により定性的に理解されるようになってきた。しかし、熱圏・電離圏領域では、下層大気領域に比べて全球観測が不十分であり、日々変動する大気の循環を観測的に把握するには至っていない。また、熱圏大気質量密度の半年周期の変動は、熱圏大気循環や乱流圏界面の高度変化に起因するものと考えられているが、その原因の詳細は不明である。

また、磁気嵐に伴う全球的な熱圏・電離圏変動は、超高層物理学分野における古くからの中心的研究課題である。しかしながら、個々の現象についての理解は進んだものの、それらの現象の予測にまでは至っていない。現象の一部を切り取って詳細に解析する研究だけでなく、現象の全体像を捉えるための総合的な観測およびモデリング研究を推進することが望まれる。また、宇宙通信や衛星運用等との関係からも、熱圏大気密度変動や、風速変動、電離圏電子密度変動の高精度予測のための研究を進める必要がある。そのためには、地上および飛行体観測による広範な緯度帯での熱圏・電離圏モニタリングをさらに推進し、数値モデルと観測データを有効に活用した統合データ解析に根差した研究の実施が必要である。

遠く離れた緯度・高度間で影響を及ぼしあう現象はテレコネクションと呼ばれ、対流圏・成層圏ではその存在が古くから知られていた。近年、冬の北半球成層圏で突然昇温が発生すると、夏の南半球中間圏界面において極中間圏雲の発生頻度が数日遅れで低下することが衛星観測により捉えられ、中間圏を介した全球規模のテレコネクションとして注目を集めている。大気大循環モデルのシミュレーション結果から、北半球成層圏の大きな風速変動に伴って全球規模で大気重力波による運動量輸送が変化し、中間圏に駆動される子午面循環が変調を受けることで南半球中間圏界面に影響を及ぼす interhemispheric coupling というメカニズムが提唱されたが、近年は、準2日波と重力波の協働による子午面循環の変調や冬半球成層圏の波強制に対する全球応答など、新たな複数のメカニズムが提案されている。そのメカニズム解明には、成層圏から下部熱圏までの幅広い高度領域において、惑星規模のロスビー波からメソスケールの重力波までを含む様々な大気波動の突然昇温時の重力波変動を全球的にとらえることが不可欠である。しかしながら、そのような観測研究はこれまで

存在しなかった。Interhemispheric Coupling Study by Observations and Modeling (ICSOM)は、PANSY レーダーを軸とする全球大型大気レーダーネットワークによる観測研究を実施し、データ同化技術を駆使して高解像度大気大循環モデルと組み合わせることにより、中層大気を介した南北半球結合の力学解明を試みる国際プロジェクトである。同計画はSCOSTEP (太陽地球系物理学・科学委員会) / VarSITI (太陽活動変動とその地球への影響) / ROSMIC (地球気候に対する太陽・中層大気・熱圏・電離圏の役割) の公式な観測キャンペーンとして承認され、2016年から2022年まで計7回実施された。現在、その観測・同化データを用いた研究が行われており、今後、南北両半球結合のメカニズム解明が進むことが期待されている。

## 2.2.2 中性大気・プラズマ相互作用

超高層大気は、太陽放射により中性大気が部分的に電離し、中性大気とプラズマとが混在した領域(電離圏)になっている。磁場が存在する地球大気においては、中性大気の運動が駆動するダイナモ電場や電流は、電磁気的な作用を電離圏プラズマに引き起こす。このため、電離圏に生起する様々な現象を理解するためには、この中性大気と電離大気間の相互作用を理解する必要がある。全球規模で生成されるダイナモ電場が電離圏構造に大きな影響を与えていることは従来から知られていたが、地上観測網や人工衛星観測の発達により、数100 kmスケールの電離圏電子密度構造の生成についても、ダイナモ電流やその電流が作る分極電場が重要な役割を果たしていることが明らかになってきた。特に、赤道域において電離圏プラズマが局所的に減少する現象であるプラズマバブルや、中緯度におけるプラズマ密度の波状擾乱である中規模伝搬性電離圏擾乱(MSTID)は、分極電場がその成因に強く関わっている。さらに、プラズマバブルやMSTIDの内部に発生する微小スケールの電離圏擾乱の生成にも分極電場が関与している。この分極電場は、2.4節で述べるようにプラズマ不安定によって生成されると考えられているが、その線形理論によって得られる成長率は非常に小さいため、観測を定量的に説明することができていない。この問題を解決するためには、非線形効果、異なる不安定が結合している可能性、さらには下層大気から伝搬する大気波動によるプラズマ不安定の“種”の重要性についても考慮に入れる必要がある。また、近年リチウム等の化学物質放出による中性大気風速観測技術が進歩し、日没付近の熱圏下部の風速変動は、従来描かれていた描像とは大きく異なる可能性が指摘されており、今後解明すべき課題と言える。

近年、プラズマから中性大気への影響が従来考えられてきたものよりも非常に大きいことが示唆されている。例えば、赤道域において、熱圏大気の密度は磁気赤道上で低く緯度±30度付近で最大となることが近年の観測から明らかになった。熱圏風は密度の低い磁気赤道上で最大となる。この磁気赤道上の風は東向きに地球の自転速度よりも高速で吹くこと(スーパーローテーション)が60~70年代の人工衛星観測から既に明らかにされているが、その物理過程は未だ解明されていない。また、極域における電流系の発達とエネルギー流入に影響される中性大気変動も未解明な課題として挙げられる。特に、電離大気に対する中性大気の衝突が支配的である高度約120 km以下では、オーロラ発生時に、大きな風速変動が頻繁に観測されるが、未だその風速変動を理論的に説明できていない。これら中性大気とプラズマとの相互作用を理解することは、ジオスペースに生起する様々な現象を理解するために必要不可欠である。

## 2.2.3 電離圏と磁気圏との間の領域間結合過程

### (1) 地球大気・電離圏から磁気圏への影響

従来の研究では、「宇宙空間物理」と「気象学・大気圏物理」の研究が個別に進められてきた。極域の中間圏・下部熱圏(MLT)領域は宇宙空間と下層大気の両方から直接的な影響を受ける特異な高度領域である。2.1節で述べたように、極域では磁気圏からの超高層大気への影響を多大に受けるが、この領域における両研究の融合によって、逆に、地球大気・電



離圏から磁気圏への影響も重要であることが明らかになりつつある。磁気圏から降り込むオーロラ粒子のエネルギーには、日照・日陰による違いがみられることや、オーロラやオーロラ加速域、沿磁力線電流には南北非対称が見られることが明らかになっている。これは、電気伝導度の空間非一様性などを介して、電離圏が磁気圏－電離圏結合において能動的な役割を果たすことを示している。例えば、電離圏における電気伝導度を高めるカウリング効果により電離圏に作られる 2 次電場が 3 次元電流系に与える役割や影響も理解が進みつつある。

また、後述するようにサブストームについても、電離圏が能動的な役割を果たしている可能性も注目されている。その電離圏の効果を定量的に抽出するためには、統計解析を行うことができるような長期間のモニタリング観測が重要であり、継続的な観測を維持する体制づくりが必要不可欠である。

このように、地球大気・電離圏が磁気圏に対して果たす能動的な役割は、従来の予想以上に大きいことが明らかになってきた。しかし、さらにこの役割を深く理解するためには、電離圏の電気伝導度の磁気共役点での非対称性や、より現実的な電離圏・熱圏の鉛直構造を考慮した系における電磁気的エネルギーと中性大気のエネルギー収支との関係などの多くの解明すべき課題が残されている。今後、極域電離圏や磁気圏に起こる様々な現象について、それぞれの現象の成因が磁気圏にあるのか、あるいは電離圏に起因するのかを明らかにする必要があり、MLT 領域の解明および宇宙空間研究と大気圏研究の更なる融合が推進されるべきである。特に、磁力線で結ばれた磁気圏・電離圏・熱圏領域をこれまでより高い時間・空間分解能で観測する必要があり、さらに、電離圏・熱圏領域においては高度分解能も向上した観測が求められる。

また、大気圏・電離圏の観測結果と数値計算結果との比較も重要である。近年の数値計算研究の発達により、磁気圏－電離圏－中性大気を結合したグローバルなモデリングが可能となりつつある。例えば、オーロラやサブオーロラ帯高速プラズマ流（SAPS）の変動による中性風の速度増加や、その速度が増した中性風による中低緯度電場へのフィードバック過程が近年議論されてきている。地上・衛星観測と数値計算を相補的に組み合わせることにより、磁気圏－電離圏－中性大気を総合的に研究することが求められている。

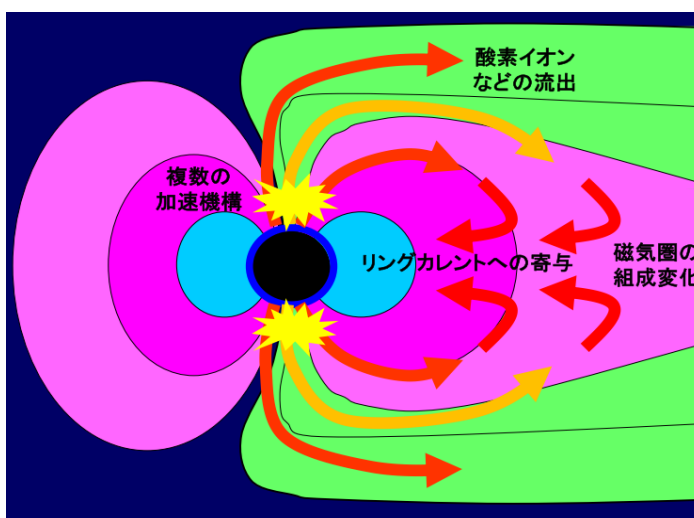


図 2. 2. 2 電離圏プラズマ流出と磁気圏への影響

## (2) 地球超高層大気物質循環や電離圏プラズマ流出

地球大気・電離圏から磁気圏への影響としては、大気の循環や散逸現象も欠かせない。地球超高層大気中の電離したプラズマは極域において磁力線方向に加速され、様々な磁気圏領域へ流出している。この現象は理論的予測が先行し、その後様々な人工衛星およびロケット、非干渉散乱レーダー観測により、その特徴が明らかにされつつある。現在では、流出するイオンのエネルギーは熱的レベルから超熱的レベルまで広く分布し、流出するイオン種も多岐にわたることが分かってきた。電離圏内のイオンを高高度に加速するメカニズムについても、分極電場や、プラズマ波動による加速、遠心力加速など、領域や高度によって異なるプロセスが働いていることが明らかになりつつある。しかし、これらの加速メカニズム



の相対的な重要性については十分に理解されていない。イオンが電離圏で加速され流出に至るまでの一連の加速過程を理解し、エネルギー収支を含む因果関係を正確に理解するためには、流出し始める電離圏高度の地上・衛星観測と様々な磁気圏高度における衛星観測との連携の取れた同時観測により、様々なスケール（マクロやマイクロ）の複数の物理量を同時に計測することが求められる。また、電離圏イオンに加え中性粒子に関しても、熱圏の加熱に伴う数 10m/s の鉛直風の成因や電離圏イオン上昇流との対応関係、さらに、荷電交換反応に起因する高エネルギー中性粒子の流出現象の発生過程や発生領域の理解を深める必要がある。

酸素イオン等の重イオンが電離圏から流出する結果として、磁気圏内のイオン組成比が変化する。それに対応して、サブストームの発生確率に変化したり、リングカレントイオンの組成を変動させたりするという研究結果も報告されている。しかし、リングカレント発達における重イオンの寄与や、そのような高エネルギーイオンの起源については不明な点が多く、今後の衛星観測の重要な課題と言える。近年の光学観測、GNSS、衛星観測技術の飛躍的な発展により、地磁気擾乱時に強化された磁気圏-電離圏対流によって内部磁気圏プラズマが昼側磁気圏界面まで輸送され、磁気リコネクションの効率を変化させるとともに、昼側中緯度の高密度プラズマがポーラーパッチとして極冠域に流れ込んだりするなど、対流によりプラズマが循環していく過程が見出されている。特に後者の輸送過程では、昼側カスプ領域の強い局在電場や降下粒子分布が影響しており、異なる領域の相互作用過程の存在が示唆されている。この領域間の相互作用の本質を理解するためにも、様々な高度における連携の取れた同時観測が必須である。

この地球起源イオンの磁気圏・宇宙空間への流出経路の研究も、数値計算および人工衛星による長期観測データに基づく統計的な研究が精力的に進められつつある。短期的には、太陽風動圧急増時に、地球起源の酸素イオンの増加が磁気圏内で観測されたり、これまでのモデルの予測を超える大量の電離圏プラズマ流出が磁気嵐に伴って観測されたりするなど、太陽風擾乱との関係も報告されている。地磁気活動や太陽活動に対するイオン流出の依存性等の特徴についても、地上および衛星観測から明らかになりつつある。ただし、これまでに観測されてきた領域における断片的な理解に留まっているのが現状である。物質循環という観点から電離圏、磁気圏、惑星間空間の各領域間のプラズマの流入・流出量を観測に基づいて精度良く推定し、地球超高層大気領域における粒子循環を定量的に理解することが必要である。さらに、長い時間スケール（数億年以上）での地球大気の変遷という観点からの研究も重要となる。

#### 2.2.4 地球大気の人為起源変動・内部変動がもたらす超高層大気への影響

人間活動に起因する大気中の温室効果ガスの濃度増大による地球温暖化は、世界中の関心事となっている。これに関連して、温室効果ガスの濃度増大は、中層・超高層大気の平均気温の低下や中性大気密度の減少、電離圏電子密度のピーク高度の低下など、中層・超高層大気にも大きな影響を与えることが、1980 年代後半の数値シミュレーションによって初めて示された。それ以降、低軌道衛星の軌道・周期変化から得られる熱圏大気密度や地上観測による電離圏高度について数十年スケールの長期変動が調べられるようになってきた。また、中間圏夏季に現れる夜光雲の出現頻度の経年変化も注目されるようになってきた。近年の夜光雲の出現率の増加は、中層・超高層大気の寒冷化の現れであり、下層大気温暖化のカナリアと考えられている。しかしながら、中層・超高層大気分野では、長期に渡って取得されているデータは極めて限られていることから、数 10 年スケールの長期変動の研究は、まさに始まったばかりの状態と言える。

また、大気中のオゾン破壊物質の量については、近年の観測から減少傾向にあることが明らかになり、南極オゾンホールも今後は回復していくと考えられている。この南極オゾンホールが対流圏の気候に与える影響も近年明らかになりつつある。特に、南極オゾンホールの出現が、南半球の中高緯度域における局所的な気温の変動や降水量の増減を引き起こすこ

とが報告されている。また、オゾンホールが発達に伴い南半球極渦の崩壊の時期が遅くなり、夏極中間圏界面付近の気温や風系を変化させること、それがさらに熱圏・電離圏にも影響を及ぼす可能性があることが報告されている。

中層・超高層大気は大気密度が小さいために、下層大気に比べて温室効果ガス増加に伴う変動の振幅は増幅される。その結果、下層大気では地球温暖化の有無やその程度がはっきりしない場合でも、中層・超高層大気では明瞭なシグナルが検出でき、下層大気での地球温暖化の先駆けとなる現象を発見できる可能性がある。そのため、過去の観測データのデータベース化や現在行われている観測を長期に渡って継続することは極めて重要である。また、数値モデルの高精度化をはかり、長期観測との連携を進めることで地球温暖化に関連する諸現象の定量的な予測を行うことも重要である。

温室効果ガス増加に伴い、中層・超高層大気では赤外放射冷却効果の増大以外にも、下層大気の大気循環変動に伴う大気波動の変調に起因する影響が現れると考えられる。例えば、地球温暖化に伴い、下層大気では、台風の巨大化、集中豪雨の発生頻度の増加、偏西風の蛇行によるブロッキング高気圧の発生頻度の変動などが考えられている。これら下層大気循環の変動に伴い、上方に伝搬する大気波動の活動度の長期変動により、中層・超高層の大気循環が影響を受ける可能性が大きい。また、夜光雲や極成層圏雲などの長期変動は、大気循環の長期変動のみならず、大気中の大気微量成分濃度の長期変動と密接に関連しているため、大気成分に関する光化学過程の解明という観点からも研究を推進する必要がある。そのためには、今まで以上の高時間・空間分解能での長期観測や大気微量成分の長期観測などが求められる。同時に、定量的な見積もりのためには、長期観測と連携した形で、対流圏変動を表現可能な数値モデルや大気的光化学過程を含む数値モデルによる研究の推進も必要である。特に、オゾンホールの定量的な再現・予測は最新の化学気候モデルでも難しく、モデル内の光化学過程や各種パラメタリゼーションなど、様々な改良が求められている。今後、南極オゾンホールが回復していく中で、温室効果ガスの増加と併せてどのような影響を引き起こすのかを注視し、継続した観測に基づく評価とモデルに基づく解釈と予測の双方を進めていくことで、オゾンホール発生メカニズムの定量的理解とその気候影響の予測精度向上に貢献することが期待される。

また、地球大気には、温暖化や南極オゾンホールといった人為起源の変動に加えて、エルニーニョに代表される数年から数十年スケールの地球大気固有の内部変動が存在する。実際、1998年に発生した大規模なエルニーニョとその後のラニーニャ状態は、1998年から2010年代前半にかけての温暖化の停滞（ハイエイタスと呼ばれる）を引き起こした。これらの内部変動は超高層大気にも影響し、熱圏・電離圏の密度変動や一日潮汐の振幅変動を引き起こすことが報告されている。人間活動に伴う長期変動の見積もりの際には、これらの内部変動に起因する超高層大気の変動を区別し、人間活動による影響を慎重に見積もる必要がある。

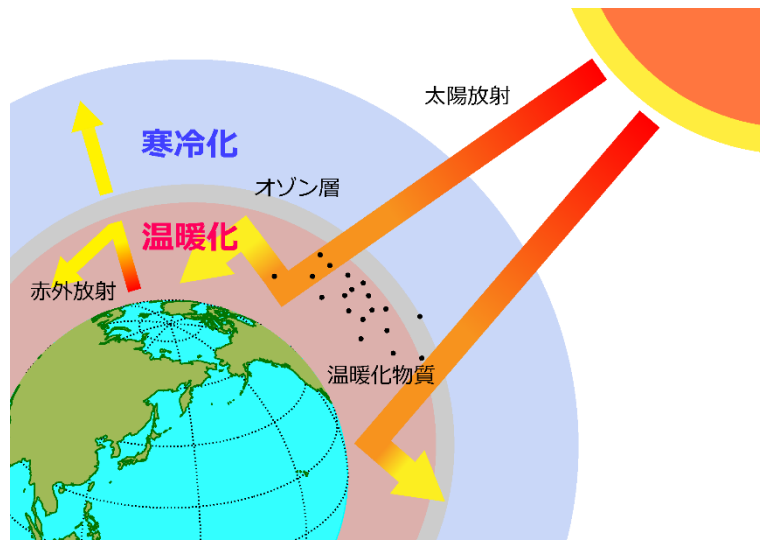


図 2. 2. 3 超高層大気と地球温暖化や気候変動との関わり

## 2.3 多様な惑星圏環境の統一的理解

地球を舞台に構築されてきた地球電磁気学や大気物理学は、地球を離れてどれほどの汎用性を持つのだろうか。惑星圏の研究においては、個々の惑星の科学課題の追求に加えて、比較惑星学的な観点が重要となる。惑星圏研究の多くは、精密観測が可能な地球における支配物理の探求を基軸としてそれを拡張・発展させることにより、惑星ごとの多様なプラズマ環境、大気環境、表層環境、内部構造、およびそれらの結合を、比較惑星学的な見地から統一的に理解するという問題意識に根ざしている。そして太陽系の直接探査によって実証的に構築された理論体系を、太陽系外惑星や、太陽系内惑星の過去（未来）の条件に適用することで、中心星と惑星系の普遍的な関係や、遍く宇宙に生起する多様な惑星プラズマ現象、大気現象、固有磁場生成、大気進化・分化などの更なる原理的な理解を目指している。さらに近年急速に進んでいる系外惑星の観測結果からは、太陽系惑星の知見・研究意義の再考が迫られる事例もある。

本節では、惑星圏における以下の主要な研究課題：

- ・磁化天体における時空間・エネルギー階層間結合の統一的理解 (2.3.1)
- ・大気流出過程および惑星大気進化の統一的理解 (2.3.2)
- ・惑星大気の統一的理解 (2.3.3)
- ・惑星ダイナモの統一的理解 (2.3.4)
- ・惑星環境の安定性と進化と分化の理解 (2.3.5)
- ・系外惑星への拡張・展開 (2.3.6)

について、現在までの研究の流れと現状、および今後重点的に追求すべき課題や視点を述べる。

### 2.3.1 磁化天体における時空間・エネルギー階層間結合の統一的理解

#### (1) 磁化天体におけるエネルギー階層間結合

2.1 節で述べたエネルギー階層間結合を介した非熱的な粒子加速機構の解明は、磁化天体に共通する重要課題である。グローバルな固有磁場を有する水星、木星、土星、天王星、海王星、木星の衛星ガニメデは、比較惑星磁気圏学の対象となってきた。太陽系最大の固有磁場強度を持ち、太陽系最大の巨大加速器という側面を持つ木星の磁気圏では、Galileo 探査機による周回観測を経て、磁気圏のほぼ全領域にメガ・エレクトロンボルト (MeV) 帯の非熱的な高エネルギー粒子が存在していることが明らかとなった。このような高エネルギーの電子を作り出す加速機構として、近年地球磁気圏で注目を集めているプラズマ波動を介した加速機構が担う可能性が指摘されている。極域では、Juno 探査機によって、地球ではマイナーであるはずの、Alfvén 波動による確率論的加速が、主要過程として MeV 帯に至るオーロラ加速を担っていることが発見された。地球磁気圏に普遍的な加速機構と、顕著ではない加速機構の両方が、木星では強力に働いている。一方で、弱い固有磁場を有する水星の磁気圏では、Mariner 10 や MESSENGER 探査機の観測により、サブストームに伴う磁気圏擾乱や、極域や夜側における数十～数百キロ・エレクトロンボルト (keV) の加速電子のバースト現象および X 線発光が報告されている。しかしその加速電子を生み出す機構の特定には至っていない。また水星磁気圏では地表起源の重イオンの存在が観測されているが、磁場

が弱くイオンの旋回半径が惑星スケールとなる水星磁気圏においてこれらが磁気圏全体の振る舞いに与える影響についてはまだ理解に至っていない。

今後の固有磁場を有する惑星・衛星・小天体の研究にあたって、特に重要となる視点は、惑星の基礎パラメータであり、磁気圏のエネルギーソースでもある、自転速度や固有磁場強度と、非熱的な粒子加速性能の関係性を明らかにすることである。木星磁気圏での多様な加速過程を理解するためには、磁気圏の各領域において粒子・電磁場・プラズマ波動の詳細な観測を行い、加速素過程を調べる必要がある。それとともに、磁気圏の各領域が動的に結合し、時間変動したときの、各加速過程が効果的に発動するプラズマ環境を明らかにする必要がある。自転軸と時軸の傾きが大きく異なる天王星・海王星磁気圏は、自転と磁場の基礎パラメータで磁気圏物理を普遍化するとき、必須の天体であるが、近年米国や中国が40-50年代に直接探査を表明している。今後30年に渡り木星、土星、天王星、海王星の巨大惑星磁気圏の普遍的な理解が進むと目される。

一方、固有磁場が弱い水星の磁気圏は、そのスケール長がイオンの旋回半径と同程度

に過ぎず、磁気流体力学近似が成立するぎりぎりの下限点に位置する。このような小さな磁気圏における粒子加速やサブストーム現象等を調査し、磁気圏現象の時空間スケールの適用可能範囲を調べることは意義深い。ベピコロンボによる波動計測器を含めた網羅的な水星磁気圏プラズマ環境の観測も期待される。また、3章で述べる磁気プラズマセイルや、小天体などのイオン旋回半径よりも小さな構造においても磁気圏は形成されるのか、衝撃波構造や磁気リコネクション等のプラズマ素過程はどうなるのか、またそれらは磁気圏形成にどのような影響を与えるのかなどは興味深い課題である。

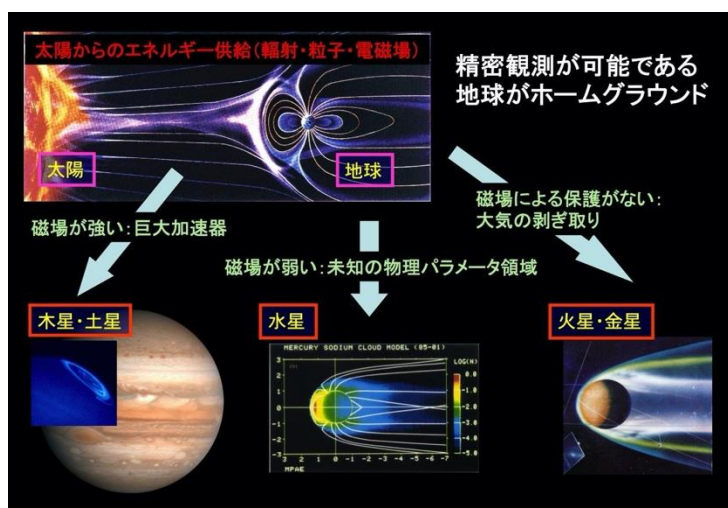


図 2.3.1 地球から惑星への電磁気圏・大気圏研究の発展

## (2) 自転効果が卓越する磁化天体における領域間結合

### 現状

磁化天体の自転速度は、天体とその磁気圏の結合を特徴づける重要なパラメータである。外惑星は強い自転効果に特徴を持つ。Voyager や Galileo 探査機などの観測により、木星本体の回転運動は、木星磁気圏ダイナミクスを大きく決定づけていることが示され、磁気圏の全領域に渡って回転エネルギーが支配的であると考えられてきた。しかし、太陽風が、磁気圏に蓄積されたエネルギーを磁気圏深部に伝える速いエネルギー輸送機構が存在する様子が、Cassini 探査機やひさき望遠鏡による衛星イオンの軌道周辺に分布する荷電粒子帯(イオトラス)と木星オーロラの光学観測でとらえられた。太陽風の影響はイオトラスの位置を変える電場変動を伴っていること、衛星の火山活動に伴うプラズマ供給が内部のみならずオーロラ領域にも変化をもたらすこともひさき観測から明らかとなり、回転天体における太陽風-磁気圏-電離圏の結合過程が示唆されている。土星磁気圏において様々な観測量が示す準自転周期が、季節変化や南北非対称性を伴っていることが明らかになり、季節変化する大気圏と磁気圏の結合過程が示唆されているが、観測を説明するメカニズムは未解明である。プラズマやエネルギーの輸送機構の候補として、磁気再結合、交換型不安定などが挙げられており、それぞれの存在を示唆するその場観測などが Juno や Galileo で各領域

で得られているが、それらの因果関係や領域間の結合に関しては未解明である。上記の大局的な磁気圏活動において微視的過程としては、Alfvén 波動が励起され、伝搬していると期待されるが、その素過程も未解明である。極域オーロラ帯へ Alfvén 波動が伝搬し、観測で得られた MeV 粒子加速が実現できるかどうかの実証が鍵になる。

## 今後

自転の影響が大きな惑星の研究において、今後重点的に追求すべき課題や視点は以下の通りである。回転効果が支配的な「中性子星型」の磁気圏を調べる上で、特に重要な視点は、磁気圏に内在する回転エネルギーや衛星プラズマ供給と、太陽風-磁気圏相互作用との競合過程を明らかにすることである。具体的な科学課題としては、惑星本体（大気圏、電離圏）から磁気圏への角運動量の輸送機構の解明、太陽風起源エネルギーの輸送機構の解明、さらにこれらの惑星で特徴的な準自転周期変動の季節（太陽光フラックス）依存性の理解などが挙げられる。また、回転支配型磁気圏の特徴として、磁気圏-電離圏の対流システムが地球型のそれとは大きく異なることが挙げられる。地球との対流システムの違いは、磁気圏プラズマの輸送の違いに加え、オーロラの地方時出現特性などの違いにも影響を与えているため、オーロラ観測を含む木星磁気圏-電離圏の詳細な観測と物理モデルによる調査が、回転支配型の磁気圏を理解する上で重要となる。これらの大局的な構造の中で、Alfvén 波動が随所で励起・伝搬し、惑星付近での MeV オーロラ粒子加速を駆動する一連の過程の物理モデル（理論・数値）の提案が加速の素過程としては重要である。

### （3）惑星-衛星結合

#### 現状

衛星は、有限の電気伝導度を持つオブスタクルとして、中心星である惑星の磁気圏と相互作用し、Alfvén 波動を励起する。この波動により、衛星と惑星の間で電磁エネルギーを交換する磁気圏-惑星結合系が形成される。巨大ガス惑星系においては、衛星は惑星と重力潮汐を介して相互作用し、内部物質の噴出を伴うことがあり、一部の衛星は濃密な大気を生成することもある。これらの噴出衛星は、惑星磁気圏の主要なプラズマ供給源として磁気圏全体の活動を制御する。上記の相互作用過程は、太陽系内の惑星-衛星系にとどまらず、太陽系外の恒星-惑星結合過程に共通する重要な物理過程である。

惑星-衛星間の Alfvén 波動伝搬は、両者を結ぶ沿磁力線電流系に相当する。その典型例である木星の衛星イオと木星電離圏の結合過程は、長年の電波・光学観測等により理解が進展した。近年、それらを記述する電磁結合の物理モデルは、系外惑星と主星の電磁相互作用へと応用され、系外惑星から放射されるオーロラ（特に電波帯）の強度が推定された。これにより、現在進行中の次世代国際電波干渉計 Square Kilometre Array (SKA) 等を用いた、系外惑星オーロラ電波の観測検討や、観測手法開発が急速に進展している。



Cassini 探査機による土星の衛星エンケラドゥス周辺のダスティープラズマの発見により、原始惑星系円盤にも共通するような、中性粒子、ダスト、プラズマが混合された媒質の電磁的素過程の新たな理解が進んでいる。

惑星磁気圏の高エネルギープラズマは、衛星の大気や固体表面へ照射され、天体進化の時間スケールで、表層物質の物理・化学反応を駆動する。これらは、衛星表層における有機物・無機物の供給や、酸化還元物質の生成過程として働く。氷衛星において、これらの表層物質が、プレートテクトニクスや水噴出孔関連の物質輸送によって内部海に輸送されれば、惑星と衛星の結合が内部海の世界環境を左右する可能性もあり、近年重要性が急速に高まっている。濃密な窒素・炭化水素大気を持つタイタンでは大気への磁気圏プラズマ照射により、大気中に芳香族の有機物が生成され、エアロゾルとして表層や炭化水素の海洋に輸送されていることを示唆する観測が Cassini 探査機で得られている。

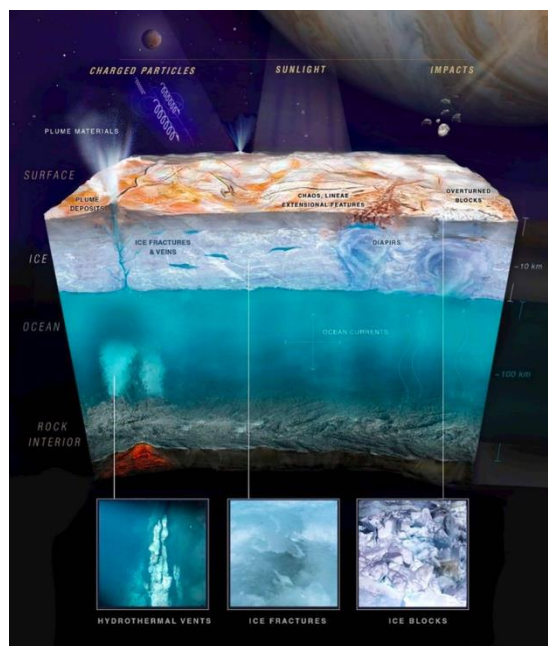


図 2.3.2 木星氷衛星エウロパの内部海、氷地殻、磁気圏間の相互作用

## 今後

今後の惑星-衛星結合過程の重要となる視点は、衛星における生命環境へのインパクトや、太陽系外の恒星系への応用である。

例えば、氷衛星表層やタイタン窒素大気における、磁気圏プラズマ照射による長期の有機物・無機物生成過程の解明は、地下海や大気という潜在的生命環境の化学組成や、進化の理解に大きく寄与する。NASA が 2027 年に打ち上げ予定のタイタン探査機 Dragonfly は、大気や表層を直接観測・サンプリングすることで、タイタンの表層環境を明らかにすることから、プラズマ照射による有機物・無機物生成過程の理解に制約を与えることができる。また、内部海から噴出した物質が、長期に渡る磁気圏プラズマとの相互作用によって経験する物理化学変化を、観測や実験により解明できれば、内部海の水が噴出した年代や、氷衛星内部の液相固相状態、内部海生命環境を決定づける塩分濃度等に迫ることができる。さらに、次世代惑星紫外宇宙望遠鏡 LAPYUTA により、水噴出の時空間変動を監視できれば、氷衛星内部や氷地殻にかかる潮汐力などの地学的な活動を明らかにでき、内部海の発生や維持を解明できる可能性がある。

イオと木星電離圏の結合や、エンケラドゥスと土星電離圏の結合は、系外惑星系の中心星と近接惑星の結合もなぞらえられる。汎用的な電磁結合モデルを完成することができれば、直接探査が不可能な系外惑星の磁気圏や電離圏の情報を引き出せる。このモデルで予言したオーロラ電波が、次世代電波干渉計で検出できれば、イオ役の系外惑星における大気や磁場の存在実証になる潜在的インパクトを有する。また、ガニメデ磁気圏と木星磁気圏との相互作用は、恒星風速度がアルヴェン速度を下回る恒星風-磁気圏相互作用と同等の過程であり、ガニメデと類似した水星磁気圏との比較から極小磁気圏の普遍的特性を抽出できる可能性がある。エウロパ・ガニメデ周辺の電磁環境は、開発中の Europa Clipper 探査機や JUICE 探査機の観測対象である。また、ESA の 2050 年代までに実施する L-Class ミッション提案候補として Moons of the giant planets が採択され、タイタン・エンケラドゥス、エウロパ・ガニメデ等を主眼においた JUICE の後継ミッションも検討が開始されている。さ

らに、NASA の Flagship ミッションではエンケラドゥス・オービランダーが 2050 年代初期の到着を目指し提案段階にあり、これらが実現すれば多様な氷衛星の理解が今後 30 年で急速に進むと考えられる。エンケラドゥス周辺のダスティープラズマ自身の詳細特性を Voyage2050 等の将来探査機の直接観測によって明らかにし、その振る舞いを物理モデル化できれば、系外惑星系や原始惑星系円盤において普遍的に起きている円盤、惑星、主星間の結合過程の理解にも寄与できる。

#### (4) 希薄大気天体における領域間結合

##### 現状

水星のように固有磁場を持つが、大気が希薄な天体においては、電離圏の電気伝導度が低いため、磁気圏-電離圏結合系の対流システムを決定づける沿磁力線電流が閉じるのに電離圏だけでは不十分で、惑星地下も介している可能性が指摘されている。近年の MESSENGER 探査機の観測により、水星磁気圏のダイナミックな様相が垣間見られつつあるが、電流系がどのように閉じるかに加えて電流のキャリアや分布など、磁気圏-電離圏結合系を形成する諸過程に関する多くの謎が未解明のままである。また、水星や月などの大気が希薄な天体においては、太陽風が固体表面と直接相互作用する。地上光学観測や探査機観測により、水星や月の希薄大気(外圏)は、太陽風イオンによる叩き出し(スパッタリング)、光脱離、熱脱離、微小隕石衝突などにより形成されることが示唆された。近年の「かぐや」衛星の観測により、月ウエイクや磁気異常周辺を含む領域での荷電粒子の挙動の理解が飛躍的に進んだが、上述の過程の各々の寄与は未だ明らかになっていない。巨大ガス惑星における氷衛星群に関しても、内部海起源の水や塩が表層に堆積して宇宙空間へロスする過程として、上記の希薄大気生成の素過程が主要に働いている。表層や内部海の物質組成を反映した希薄大気生成過程の理解が得られれば、大気観測から表層、内部の化学環境を推定できる可能性もある。

##### 今後

今後の希薄大気天体の研究において重点的に追求すべき課題や視点は以下の通りである。磁気圏-希薄電離圏結合系という視点における具体的な科学課題は、磁気圏-電離圏電流系がどう閉じるかという問題の解明、磁気圏-固体部結合の果たす役割の解明、固体表層から放出された重イオンが磁気圏や惑星周辺環境に与える影響、低い電離圏電気伝導度がサブストームの発達に及ぼす影響の解明などが挙げられる。一方、太陽風と固体表面の直接相互作用という視点における具体的な科学課題は、表層物質の変質(宇宙風化)過程の解明、外圏形成過程の解明、外圏形成過程において磁場が果たす役割の解明、宇宙プラズマの降りこみと表層からの光電子放出によって生じる表層レゴリス層の静電場構造の解明、そして帯電効果によるダスト粒子の挙動の解明などが挙げられる。また惑星・衛星の長期進化という視点では、希薄大気と表層宇宙風化の観測や室内実験の比較に基づく、大気、表層、内部の化学組成の制約が非常に重要な展開として考えられる。

#### 2.3.2 大気流出過程および惑星大気進化の統一的理解

##### 現状

グローバルな固有磁場を持たない天体である金星、火星、彗星、土星の衛星タイタンなどでは、固有磁場による保護がないために、太陽風が(衛星の場合は惑星磁気圏プラズマが)天体の超高層大気に直接作用し、地球とは異なる特性をもつ電磁気圏境界(プラズマ境界)を形成する。この特異なプラズマ境界は、磁場の向きやイオン組成比などの背景パラメータに応じて多様なプラズマ不安定が競合して選択的に発動し、非線形的に発展することによって形成すると考えられている。また、天体の大気保有量に影響を及ぼすほどの大量の大気の宇宙空間への流出(散逸)が、Pioneer Venus orbiter, Venus Express(金星)、Phobos-2, Mars Express, MAVEN(火星)、Cassini(タイタン)、彗星 67P/CG における Rosetta な



どの多数の彗星観測などにより報告された。Mars Express、MAVEN、Rosetta、Venus Express、Cassini、あかつきによる固有磁場のない天体の大気・プラズマ環境と Cluster やあらせなどの地球プラズマ環境ミッションの結果の比較から、磁場のある天体では電離大気の大規模な非熱的散逸が、磁場のない天体では、その惑星の持つ質量に応じて熱的・光化学的散逸もしくは非熱的散逸が量的に卓越することが分かってきた。しかしながら、各メカニズムの特に極端な太陽活動事象下での応答や量的寄与の変動幅などは不明であり、特に太陽・太陽風・宇宙線などによる影響について、非熱的散逸のみならず熱的散逸すらモデルと観測とで大きな食い違いがある。また特に惑星においてはこれらの観測は限定的であり、例えば、太陽風起源のエネルギーがプラズマ境界を跨いでどのように輸送されるか、太陽風との相互作用によってどのように大気の散逸が誘導されるかなどの実態には未だ不明な点も多い。2.2 節で述べた地球などの磁化惑星と共通する散逸過程に加えて、非磁化惑星に特有の大気の叩き出し（スパッタリング）過程や太陽風-電離圏粘性相互作用過程などの各種大気・プラズマ散逸過程の実証的解明が求められている。これらの実証的解明を通して、惑星や大気を持つ衛星に普遍的な「大気散逸の標準モデル」が提案できれば、それを用いて直接探査が不可能な系外惑星の大気散逸を推定できる。実際に近年では太陽系内惑星の知見を系外惑星からの大気散逸研究に応用しようとする動きも活発化しており、MACH DRIVE center や RHAPS プロジェクトなど、国際的な分野横断的研究も進みつつある。また、2024 年打ち上げ予定の 2 機の衛星で火星宇宙環境の太陽風変動への応答を調べる NASA の ESCAPE 計画や、2026 年打ち上げ予定の我が国の火星衛星サンプルリターン計画 MMX の火星圏観測などにより新しい観測データがもたらせると期待されている。さらに、関連した衛星計画として、紫外線宇宙望遠鏡計画 LAPYUTA や国際宇宙探査に関連する MIM (Mars Ice Mapper) 計画や ESA の M7 ミッション候補である M-MATISSE 計画への観測機器搭載などの将来計画検討も進んでいる。上述の「大気散逸の標準モデル」による推定は、JWST、WSO-UV 等の巨大宇宙望遠鏡による系外惑星大気の光学観測や、SKA 等の地上電波干渉計による系外惑星オーロラ電波観測によって観測検証できる可能性がある。

## 今後

金星や火星などの地球型惑星研究の重要性は、それらが地球に最も性質の似た天体であり、その理解が地球の起源と進化 (2.3.5) の理解に直結することにある。惑星の進化を促す物理過程そのものを観測することは大抵の場合は不可能であるが（例えば地殻形成は何十億年も前に終了している）、大気散逸は数少ない例外の一つであり、現在進行形のプロセスの観測をもとに実証的に理論を構築して過去に演繹できるという特殊性を持つ。今後、地球型惑星を調べる上で特に重要となる視点の一つは、地球型惑星から宇宙空間にどの大気元素がどれだけ流失したのか、そしてその帰結として現在の大气中の元素存在量や同位体比にどのような影響を与えたのかを理解することである。この目的を達成するために、上述の各種大気・プラズマ散逸過程の直接観測を、太陽風と太陽放射のモニター観測とともに実施することが重要となる。地球などの磁化惑星における散逸過程の理解とともに、「惑星大気散逸の標準モデル」とも言うべき、包括的な理論体系を構築していくことが求められる。冥王星における流体力学的散逸（ハイドロダイナミックエスケープ）の観測も、初期太陽系における大気散逸過程を理解する上で重要である。また、大気散逸が固有磁場強度にどのように依存するかを推定することも、系外惑星への応用を視野に入れた普遍的な「大気散逸の標準物理モデル」構築に向けて重要な課題である。上述の MMX、ESCAPE、LAPYUTA、MIM、M-MATISSE 等の将来ミッションにもたらされる新たな観測データでモデルを検証してゆくことで大きな発展が期待される。

さらに太陽系内天体の直接観測で得られた散逸過程の知見は、超高層物理学やプラズマ物理学の進展に貢献するとともに、系外惑星の大気進化や多様性の理解、生命が存在可能な惑星（ハビタブル惑星）の成立条件の理解にも寄与する (2.3.6)。上記の大気散逸標準モデ

ルを構築できれば、系外惑星を持つ恒星系において、主星の XUV フラックスや恒星風の電磁エネルギーフラックスに対する磁化・非磁化惑星の大気散逸応答を推定できる可能性がある。JWST、WSO-UV、Ariel、LAPYUTA の赤外・紫外観測によりもたらされる系外惑星の新しい観測データと数値実験研究を融合することで、より広いパラメータ空間で大気散逸の標準モデルを検証できると期待される。また、恒星風電磁エネルギーは系外惑星オーロラを駆動し、大気のジュール加熱と散逸を駆動する。標準モデルでオーロラ加熱と散逸を推定し、SKA による系外惑星オーロラ強度で観測的に検証することも可能と期待されている。

### 2.3.3 惑星大気の統一的理解

2.2 節で述べたような地球を舞台に構築されてきた大気物理学は、地球と異なる条件下の惑星大気にどこまで通用するのだろうか。地球の大気構造は大気一般のバリエーションの一つとして、自転速度や大気量など惑星大気を支配するパラメータ空間の中にどう位置付けられるのだろうか。これらの問題意識のもとに、既存の大気物理学を広く太陽系惑星に適用して惑星大気の姿を統一的に説明しようという試みが、20 世紀後半に他惑星の探査データがもたらされるとともに本格的に始まった。これは一定の成功を収めたと言える。たとえば、強い温室効果をもたらす金星の高温環境、対照的に温室効果が弱く寒冷な火星環境、金星における硫酸エアロゾルの光化学生成、火星における移動性高気圧・低気圧（傾圧不安定）の存在、木星をおおうアンモニアの雲と氷雲生成による雷放電の発生、広く惑星上層大気に存在する高温領域（熱圏）などが、初期の惑星探査が大気構造を明らかにするやいなや大枠において理解されたのである。

しかしその一方で、当初から認識されていた惑星大気の特徴の多くが今も説明されておらず、現時点での大気物理学の限界を示している。たとえば大気力学に関しては、金星や土星の衛星タイタンに見られる高速大気循環や火星で発生する惑星規模のダスト嵐を、恣意的なパラメータ調整なしに数値モデルで再現することはできていない。木星や土星における高速風を伴う縞状構造は、大気上層の薄い流体運動で説明できるのか、それとも深部まで及ぶ循環が関与しているのか明らかになっていない。このことを、極端な条件下の大気の特異な振る舞いを説明できないだけであると割り切るわけにはいかない。外的条件の違いが大気の振る舞いをどう変えるのかが分からないことは、結局のところ地球大気が現在の姿をとる理由を基本原理から理解できていないということであり、さらに言えば過去や未来の異なる条件下での地球大気の振る舞いを確からしく語れないことを意味するからである。

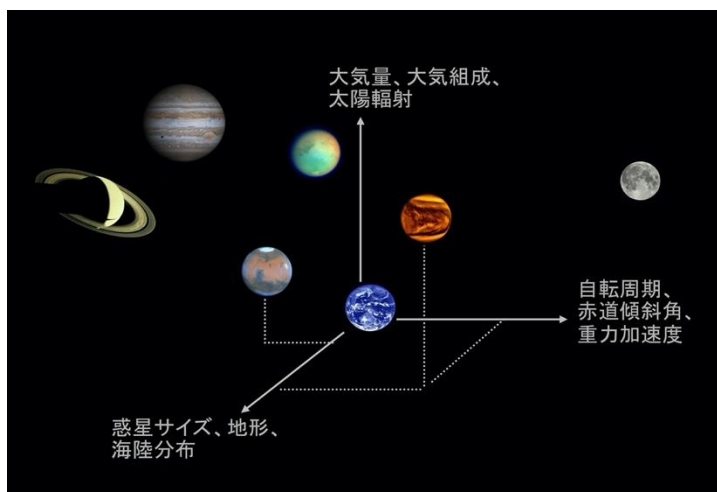


図 2.3.3 多様な惑星大気を多次元パラメータ空間に位置付けるイメージ

雲やエアロゾルの物理化学もあまり理解されていない。たとえば揮発性物質が効率よく凝結するためには凝結核が必要であるが、地表から遠く離れた金星やガス惑星の雲において凝結核となるべき粒子が存在するのかが謎である。現在の大気理論モデルは、恣意的な仮定なしにこれらの惑星で雲を作り出せないのである。雲やエアロゾルは大気の放射エネルギー収支の支配要因であり、これら惑星で得られる知見は地球の気候変動の理解にも大きな影響を与える可能性がある。

大気中の上下方向の物質輸送にも課題がある。たとえば揮発性物質が宇宙空間に散逸するにあたっては、物質が均質圏界面（地球では高度 100 km 付近に位置する）までどう運ばれ、さらにその上の重力分離領域（熱圏）をどのように上向きに拡散するかが重要である。地球大気の均質圏では大規模な大気運動のほか内部重力波の碎波がもたらす乱流が重要とされるが、これらが他の惑星でどう働くかはほとんどわかっていない。内部重力波など鉛直伝搬波動が均質圏界面を超えてどれほど高い高度にまで影響するのも課題である。たとえば木星の熱圏は太陽紫外線による加熱では説明がつかない高温であり、下層から伝搬する波動が加熱を担う可能性がある。

多岐にわたる研究課題に答えるべく、探査ミッションを中心に多くの観測が行われている。火星では NASA の Mars Global Surveyor や Mars Reconnaissance Orbiter、欧州の Mars Express や Trace Gas Orbiter など多くの周回機と着陸機が様々な大気種と気象場の時空間変動を明らかにしてきた。2014 年には NASA の火星探査車 Curiosity がメタンを検出し、その起源をめぐる論争は今も続いている。2018 年 11 月には NASA の InSight が火星に着陸し、地質学調査に加えて大気と固体惑星の力学結合の知見をもたらした。2021 年からは NASA の火星探査車 Perseverance が活動している。金星では欧州の Venus Express が金星の大気の構造やダイナミクス、物質の循環について理解を大きく前進させてきたが、現在は日本の「あかつき」が、紫外・可視光・中間-近赤外領域のカメラを搭載し、金星大気のダイナミクスや気象の調査を進めている。木星では NASA の Galileo、土星では Cassini-Huygens が大きな観測成果を挙げてきた。現在は NASA の Juno が 2016 年から木星周回軌道上で観測を行っており、重力場計測やマイクロ波放射計によって大気深部の情報も得られつつある。一方、欧州は木星とその衛星の大気や磁場、衛星の地表や地下の海などの探査を行う JUICE を 2023 年に打ち上げた。JUICE には観測装置の開発で日本も参加している。

新たな観測データを理論的に解釈すべく、近年の計算機能力の向上も手伝って、数値シミュレーションによる研究も高度化している。大気大循環モデルの解像度の向上、モデル領域の上層大気への拡大、領域モデルによるマイクロ・メソスケール現象の理解、化学輸送モデルの開発のほか、火星や金星では観測データとモデル出力を統合するデータ同化の試みも始まっている。

今後の研究においては、大気力学とそれがもたらす物質輸送、またその過程での化学物質の変質について、異なる条件下にある惑星の間でマイクロな素過程を比較することにより共通原理の理解を目指す。そのために、惑星周回機によるリモートセンシングをコアとして着陸機や地上望遠鏡による観測も組み合わせ、高い時間・空間分解能で気象場と様々な化学種の三次元観測を行う。微量だが反応性の高い化学種の分布など、これまで観測手段が乏しかった物理量を押さえることにも力を入れる。同時に、新たな観測データを統合解釈するために大規模な数値モデルの開発とそのための研究体制の構築を行う。惑星大気研究におけるデータ同化は今後、標準的な研究手法となるだろう。また、惑星分野では従来別々に研究されてきた下層大気と上層大気・電離圏を、エネルギーと物質の上下輸送、さらには大気散逸への接続という観点からひとつながりの系としてとらえる視点を確立していく。

#### 2.3.4 惑星ダイナモの統一的理解

固有磁場をもつ天体（水星、地球、木星、土星、天王星、海王星、木星の衛星ガニメデなど）の内部には高い電気伝導性をもつ流体領域が存在し、そこでの流体運動がダイナモ作用（磁場を自発的に生成・維持する作用）を駆動している。各天体の固有磁場は様々である。双極子成分が卓越するという点では地球磁場に似ているが、強度が非常に弱いもの（水星）、逆に強度が非常に強いもの（木星）、また四重極子成分が極端に弱いもの（ガニメデ）、ほとんど自転軸対称成分しか観測されないもの（土星）や、自転軸と双極子の方向が全く異なるもの（天王星や海王星）も存在する。また現在は固有磁場をもたないが、かつては活発なダイナモ作用が起こっていたと考えられる天体もある（月や火星）。こうした惑星ダイナモの多様性が何によって、どのように決まるのかを知ることは、ダイナモ素過程の物理的理解

を進展させるにとどまらず、惑星科学のさまざまな重要問題を解決するためにも必須である。たとえば固有磁場の有無、その強度や構造は、天体における太陽風との相互作用や大気流出の形態 (2.3.1 や 2.3.2) を決定する重要なパラメータでもある。

近年、各天体を周回する探査機の磁場マッピングによって、それぞれの固有磁場の差異がより明確になってきた。内惑星・衛星における観測が先行した。火星では Mars Global Surveyor によって、月では Lunar Prospector およびかぐや衛星によって、地殻起源の磁場 (磁気異常) が各天体表面の広範囲にわたって観測された。これらを深部ダイナモ作用以外で説明することは難しいことから、過去には活発なダイナモ作用が内部で起こっていたことが有力視されている。MESSENGER は、現在の水星では北側半球で約 3 倍強い磁場を生成するようなダイナモが駆動されていること、地殻起源の磁気異常の観測により過去にもダイナモが駆動されていたことを示した。より近年ではガス惑星の探査の進展が目覚ましい。Cassini の周回観測は、土星磁場の軸対称性が極めて高いこと、現在検出可能な精度での永年変化が存在しないことを示した。Cassini は 2017 年のグランドフィナーレの過程で惑星表面以低での磁場データも集積した。これは、表面以高で観測されている軸対称的な磁場が、深部のダイナモ作用そのものに由来するものか否かを決定するもので、ダイナモ理論にとって根源的な重要性をもつ。木星を周回する Juno の磁場計測は、地球を含めたこれまでの太陽系内探査としては最もダイナモ領域に近い高度 (半径比) での全球的データを取得するもので、局所的に磁場が強い領域が点在し、南北非対称性が顕著であるような磁場構造が明らかにされた。一般に地球以外の天体におけるその場観測は、観測衛星が通過した時間および場所に限定されてしまい、測定間隔は粗く、観測時間も短い。ダイナモに関連するような天体深部ダイナモの時間スケールは短くとも数年以上と予想されるため、深部ダイナモに付随する磁場変動を捉えるためには長期にわたるデータの蓄積が必要である。周回衛星による磁場観測を継続的に計画していく必要がある。

こうした惑星・衛星磁場の多様性を理解するためには、内部構造や物性、惑星の進化史の研究と、さまざまな条件下でどのようなダイナモ作用が起こりうるのかという理論研究とを車の両輪のごとくお互い補完しあうことが重要である。一例をあげると、地球型惑星のサイズが小さければ小さいほど冷却が早く進んで液体金属部分が固化し、ダイナモ作用も停止する、というような単純な話ではないことは、固有磁場をもたない火星よりもサイズが小さい水星やガニメデが固有磁場をもつことから明らかである。実際には、液体領域であっても対流が起らずに安定成層し、伝導によってゆっくりと熱を逃がすこともある。内部熱源の存在や金属コア中に含まれる軽元素の種類や量とそれに起因する組成対流の可能性など、さまざまな要因を加味する必要がある。いっぽう電気伝導度の高い流体の運動があればいつでも双極子磁場ができる、というような単純な話ではないこともダイナモ理論の基礎を論ずるまでもなく明らかである。惑星の内部構造・進化史のモデル構築により高電気伝導度の流体の存在可能性と対流運動の駆動源を明らかにすること、そしてその条件下でどのような流体運動が起こり、どのような空間構造の磁場がどのくらいの強さで存在しうるかを明らかにすることがひきつづき最重要課題である。なお本学会の他の研究分野 (たとえば超高層大気や宇宙空間での諸現象の研究) と異なり、天体 (特に地球型惑星) 深部の物理量や流体運動に関してはその場観測や光学的な遠隔観測がほぼ不可能であるという点を付言しておく。観測可能な限られた物理量から内部構造を推定すること、そのための新たな原理や手法を確立することも重要な研究課題である。

惑星ダイナモ作用を解き明かすためのツールとして、回転球殻内の磁気流体力学的ダイナモの数値的研究が 1990 年代以降進展し、多くの成果を上げてきた。いくつかの惑星磁場については、その空間構造や時間変化などが適当な内部構造や種々の境界条件を仮定した数値モデルを用いてよく再現できることがわかった。これは大型計算機の発達に伴い、大規模な数値計算を高速に実施することができるようになって初めて得られた成果である。とくにダイナモの駆動源が天体の冷却に伴う熱対流である場合についてはよく研究され、ダイナモの物理メカニズムが探求されるとともに、モデルパラメータを変化させたときに生

成される磁場強度や対流運動の熱輸送効率などがどう変化するかが精査された。後者はダイナモのスケーリング則と呼ばれる。現在実行可能な数値計算のモデルパラメータは、実際の天体における値と数桁以上異なると考えられるため、計算結果と現実の惑星磁場とのあいだの整合性を検討する上で、このスケーリング則の確立はとくに重要な研究課題である。より現実的な数値モデルを可能にするため、より高解像度な数値計算を高速に実施する大型計算機と数値計算法の開発が今後も必要不可欠である(2.5.1で後述)。一方で、大規模計算技術がこれまでと同等に発展し続けたとしても、惑星ダイナモを直接的に模擬するような数値計算が可能になるにはさらに約20年かかるとも予測されている。これを認識し、多角的に個々の問題や目的に応じたアプローチを模索していく必要がある。ダイナモのスケーリング則に関していえば、現在実行可能なモデルパラメータで目的の力学的レジーム(たとえば地球のコアの対流とダイナモ作用)を再現しうることが近年報告されている。こうした数値計算上の“観測”をもとに近似的に理論・数値計算を展開していくことも有効だろう。直角座標系を用いた局所的な数値計算や液体金属(ナトリウムやガリウム)を用いた室内実験は、現段階のグローバルな数値計算からは言及することが難しい小スケールの物理過程の解明に役立つだろう。惑星ダイナモ作用の源である回転磁気流体の力学的特性は、層流流のか乱流流のかに関わらず、まだ不明の点が多い。磁場と流体運動とがどのように相互作用しているかが、安定に存在できる磁場の形状(双極子型か否か)を規定しているという説もあり、今後さらに追求されるべきだろう。

地球を除く惑星では、一次元的な内部構造モデルすら確立しているとは言い難い。とくに惑星ダイナモを論ずるためには高い電気伝導度をもつ流体層の深さと厚さを正確に知ることがまず重要である。固体惑星・衛星ではそれは金属コアの大きさを知ることと相当し、表面での地震観測網を構築できれば原理的には高い精度で推定できる。月ではApolloが、火星では近年InSightが地震計を設置することに成功し、それぞれの内部構造に関する知見が得られているが、データの不足のためまだ確定的な結論が得られているとは言えない。内部構造の制約を重力や慣性モーメントの観測に頼っている現状においては、これらと独立に、電磁気学的に見積りを与えることは非常に意義深い。近年ではLunar Prospectorやかがや衛星の磁場データをもちいて月のコアの大きさが推定された。また電磁探査を実施することでも天体内部の電気伝導度構造を推定することができる。将来の探査においてはランダーでの電磁気観測による浅部構造探査や、ランダーおよび周回機による深部を含む電気伝導度構造探査を実施すべきだろう。固体天体の地殻やマントルを構成するケイ酸塩鉱物の電気伝導度は温度依存性が強いので、適切な物質を仮定すれば、電気伝導度構造から固体天体内部温度場を推定することもできる。これは対流運動の有無を予測する上でも有益な情報となる。ガス惑星においては、水素が分子解離し電気伝導性をもつようになる深さを特定することが重要である。現状では第一原理理論計算と高圧実験とに多くを頼っているが、重力観測データを用いた推定も試みられている。岩石惑星と異なり、その深部構造は惑星表層から連続的に変化するであろうことを考えると、ガス惑星では流体力学的な知見を用いた推定がより有効だろう。そして次の課題は、地球で試みられているような、ダイナミクス(ダイナモ作用)を規定するような物理量(流速、空間スケール、磁場強度など)の推定となるだろう。

別のアプローチとして、月や火星における地殻残留磁化の獲得年代や獲得過程を明らかにすることでも、その天体の進化史に制約を与えることができる。とくにこれらがかつてのダイナモ作用による固有磁場を記録したものである場合、そのダイナモが駆動していた年代、その当時の固有磁場の強度や形態、さらには内部進化史や構造にも言及することが可能である。最近、従来説に反して、月には約40億年前以降ダイナモ作用が無かった可能性が指摘された。また火星においては、クレータ年代との比較などから約40億年前にダイナモが停止したのではないかと推測された。現在では、液体コアが冷却して固化し始める前にコア内の流体運動が停止したという進化モデルが有力視されている。こうした説を確実なものにするには、現在の内部構造との擦り合わせが必要である。上述した内部構造の推定は

ここでも重要課題となる。天体表面に着陸した上での地震観測や磁場観測は、惑星ダイナモ研究を大きく進展させるはずである。

### 2.3.5 惑星環境の安定性と進化と分化の理解

惑星の大気はどのように作られ、その大気環境は外的条件に応じてどのように変遷し、多様な姿へ分化するのだろうか。そこに地球のような温暖で湿潤な環境はどう位置付けられるのだろうか。これは地球のような惑星の成立条件、生命誕生の普遍性に関わる惑星科学の根本的な問題意識である。上に述べた惑星プラズマ・大気・内部の支配物理の探求は、このような考察において要となるものである。

木星以遠のガス惑星の大気が太陽組成に近い原始太陽系星雲ガスに起源するのに対し、金星・地球・火星といった地球型惑星の大気は惑星集積の過程で微惑星より放出された脱ガス起源大気であるという考えは、広く受け入れられている。しかし個々の惑星の大気組成や地質学的記録は、大気が現在に至るまで大きく変化してきたことを示唆している。

金星では大気中の重水素/水素比から、かつて豊富に存在した水 ( $H_2O$ ) に含まれていた水素 ( $H$ ) が宇宙空間へ散逸して失われたと想像されている。理論計算は過去の金星に液体の海が存在した可能性を示す。火星では、地表に残された流水地形や堆積岩の存在が、過去に温暖湿潤な気候が生じたことを示している。過去の火星では現在と異なる大気量・組成のもとで強い温室効果が働いたのかもしれない。火星大気中の元素同位体比からは、少なからぬ揮発性物質が散逸で失われたことが示唆されており、これは過去の濃い大気存在を支持する。

金星と火星はそれぞれ、惑星が液体の水を長期にわたって保持する「ハビタブルゾーン」の内側と外側の境界付近に位置すると考えられている。これらの惑星がどのような初期状態から出発し、どのような変遷を経て現在のよな気候に至ったのかをひもとくことは、ハビタブルゾーンの決定機構の理解に直結する。系外の地球型惑星の気候を推定するうえで直接的なリファレンスとなるのもこれらの惑星である。そのために解決すべき課題は多い。たとえば、水素が散逸して失われたあと酸素 ( $O$ ) が残るとすれば表層の酸化還元状態はどのような影響を受けたのか。過去の火星ではどのような温室効果ガスが働いていて、それが失われるにつれて水はどのようにして現在見られるような地下水床を作ったのか。金星の水はいつ頃どのように失われ、そのあと硫黄化合物を豊富に含み硫酸雲におおわれた環境はどのように生じたのか。金星や火星の内部の火成活動は現在の大気量や組成にどう影響しているのか。実行中あるいは提案中の探査計画の多くは、これらの謎の手掛かりを得ようとするものである。

木星大気は原始太陽系星雲の組成の記録をとどめていると期待されている。米国の Galileo プローブによる組成計測結果は予想に反して太陽組成とかなり異なり、木星大気の起源に謎を投げかけるとともに、その計測の代表性にも議論の余地があるとされている。一方で、金星の大気組成も希ガスの相対存在度が火星や地球に比べて太陽組成に近いという特徴があり、地球型惑星の大気の起源の問題も決着しているわけではない。

惑星環境の安定性と進化と分化に関する研究は、今後、先に述べた惑星大気物質輸送や熱構造決定の物理の解明を柱に、さらに固体惑星との物質交換や、大気散逸による揮発性物質の総量変化を考慮し、大気だけで閉じない表層環境の安定性と変遷を解明することを目指す。大気化学や大気成分の相変化が揮発性物質の安定性にどう影響し、さらにはアルベド、リザーバーの形成、散逸する化学種にどう影響するのかも解明すべき問題である。地球のオゾンホール化学で知られているような、エアロゾル表面での化学反応の促進は、多くの惑星で重要性が予想されるにもかかわらず未踏の分野である。外惑星の氷衛星の希薄大気やエアロゾルの動態も、アルベドを通じて表層のエネルギーバランスに関わっており、今後追求すべきフロンティアであると言える。

このような問題を解明するためには、大気組成の詳細な調査に加えて地表や地下の物質分布や物理状態の情報が必要であり、着陸機を含む惑星探査を要する。ただし固体惑星との



物質交換に関しては、地表近くの大気微量成分の計測も重要である。たとえば火星では、地殻起源と思われるメタン、あるいは季節サイクルの中で地表を出入りする水蒸気の同位体比が挙げられる。理論面では、大気力学の素過程をきちんと考慮した物質輸送とその気候進化への関与が、今後の課題である。こうして太陽系惑星の比較研究から得られる汎用的な知見を系外惑星の条件にも適用し、惑星の気候形成に関する更なる原理的な理解を目指す。

惑星環境の安定度や進化を決定づける恒星活動度とその長期的変遷の理解も重要な課題である。近年の様々な年代の主系列星のスペクトル観測によって、恒星活動度の進化の理解は大きく前進したが、今後は特に不確定性の大きな初期数億年間の太陽風状態を理解することが重要となる。スーパーフレアや高エネルギー粒子の影響が、惑星のハビタビリティに及ぼす影響を調べることも重要な課題である。

### 2.3.6 系外惑星への拡張・展開

#### 現状

生命がなぜ地球に生まれたのか？人類は宇宙で孤独な存在なのか？これらの問いを探究することは科学の最も重要な課題といえよう。そしてこの課題に取り組むためには、前述されてきたような地球を含む太陽系惑星のあらゆる科学的知見をより広い視点で結合し、太陽系外惑星に適応可能となる普遍的な理論体系の構築が必要となる。

すでに5000個以上の系外惑星が確認されており、惑星が太陽系だけのものでないことは共通認識となった。そしてこれら系外惑星が太陽系内惑星よりもはるかに多様性に富むことが明らかになっている。例えば、水星よりもはるか内側を周回する木星サイズの惑星（ホットジュピター）が多数発見された。こうした惑星では主星からの強烈な輻射を受け、木星とは大きく異なる上層大気分布をもつことが予想されている。またTRAPPIST-1系に代表されるようにハビタブルゾーンに地球型惑星をもつ恒星系も発見され始めた。今後も海外では引き続きトランジット観測を中心とした系外惑星のサーベイを計画しており、発見数の増加とともに惑星の多様性の理解が深まることが期待されている。一方で、惑星の特徴づけはその観測の困難さからまだ大きく進んでおらず、多様な系外惑星においてどこまで生命居住可能性が広がっているかという問いには未だ多くの課題が残されている。

#### 今後

今後も各国のサーベイ観測により系外惑星、特に地球型惑星の発見が期待されている。こうした系外惑星における生命居住可能性を明らかにすることは今後の重要な課題となる。特にSGEPSSとして取り組むべき科学課題は系外惑星大気の観測、および恒星フラックスと恒星風が惑星環境に与える影響の普遍的な理論体系の構築であろう。太陽系近傍の恒星の80%以上は低温星（M型星）であり、今後のサーベイ観測においても低温星が主な観測対象となっている。これら低温星におけるハビタブルゾーンは主星のごく近傍に位置しており、その領域を周回する惑星は地球に比べてはるかに強烈な紫外線輻射と恒星風にさらされる。その環境下の地球型惑星では、何が起きているのか。太陽系でえられた知見から、大規模な大気流出が予想されるが、その予想は正しいか？地球の様に液体の水を有する惑星は、太陽系近傍にある恒星の大半を占める低温度星系には存在しないのだろうか？こうした条件下で惑星環境、特に大気が受ける影響を明らかにすることが、系外惑星における生命居住可能性の解明につながる重要な鍵となる。

具体的には以下のような科学課題に取り組む必要がある。主星からの強い紫外線輻射を仮定した場合、地球と金星にそれぞれ類似した大気をもつ惑星では外圏大気（例えば酸素原子）の拡がりに大きな差が生まれることが予想されている。こうした外圏大気の拡がりや紫外線によるトランジット観測で検出できれば、発見された地球型惑星が地球と似た大気成分をもつかどうか判定できる。そこで、紫外線観測による地球型惑星大気の検出が直近の課題となる。またこうした強紫外線条件下での惑星大気を再現するために、地球や火星、金星の観測結果を広く集約し、異なる紫外線輻射、大気成分、惑星質量などで計算可能なより一

一般的な惑星大気モデルの構築を目指す。それと並行して、太陽型（G型）恒星系での地球型惑星の大気観測により、現在の太陽系にある水星、金星、地球、火星で構築された理論の検証が可能となり、太陽系、地球に加え、我々人類の普遍性あるいは特殊性が明らかになるだろう。さらに、強烈な恒星風が惑星環境に与える影響を普遍的に理解しなければならない。非磁化惑星については火星や金星、彗星での知見を集約し、異なる恒星風・惑星大気パラメータで大気流出量を見積もれるようなモデルの構築を目指す。磁気圏をもつ惑星については地球および水星におけるプラズマ環境の知見、すなわち、地球観測で得られる大気流出と磁気圏の関係や、水星観測で得られる強い太陽風と弱い磁気圏の関係が重要となる。これらの観測結果をもとに異なる太陽風パラメータ下にある異なる磁気圏を再現可能な普遍的な磁気圏モデルの構築を目指す。本課題を通じて惑星における生命居住可能性への磁気圏の寄与を明らかにすることは、SGEPSSのこれまでの研究成果を広く集約するという視点においても重要といえる。さらには、様々な年齢の惑星系の観測により、太陽系内で得られる情報に基づいて進められてきた惑星系形成・進化に関する推論を検証し、太陽系・地球環境の進化を明らかにし、生命・人類誕生に求められる条件が明らかになっていくだろう。また、国際情勢としては、系外惑星の直接光学観測を行う欧州次期中型ミッションARIEL（可視近赤外）の検討が近年急速に進められ、正式に決定しており、日本からの参加が検討されている。一方、紫外線宇宙望遠鏡WSO-UVに、惑星上層大気の紫外線分光観測を目的として、日本から高感度の分光器であるUVSPEXの搭載が決定されたが、2022年2月以降のウクライナ情勢から装置の輸出は困難な状況となり、引き続き情勢を見守っている。2040年代の打ち上げが予定される6m宇宙望遠鏡は紫外線に対応することが想定されており、日本から系外惑星の観測に向けた装置の提供が検討されている。また、光学観測の可能性と限界を、系内惑星を対象に光学観測とその場観測の比較から実証する必要があり、また、光学観測で得られる値を正しく解釈するためのシミュレーションの役割も大きい。

## 2.4 宇宙プラズマ・地球惑星大気における物理素過程の理解

地球電磁気・地球惑星圏研究は、2.1節で見てきたように宇宙に1つきの“我々の地球や惑星と太陽の関係”を詳しく知ることの1つの大きなモチベーションとして発展してきたが、それと同時に、観測対象の広がりや周辺の関連する研究分野との交流を通して、研究対象をより汎的な視点で捉えることの重要性と可能性の大きさを知った。そして、地球電磁気・地球惑星圏の研究手段を最大限に活かすことで、観測される物理現象をより普遍的に理解し、関連分野に応用しよう、とする試みが行われるようになった。言い方を変えれば、地球、惑星、宇宙空間を大きな実験室と捉えて、自然現象を相手にその素過程を理解することを通して物理学に寄与することを目的とした研究が広く行われるようになりつつある。宇宙プラズマの物理素過程(2.4.1)においては、磁気流体力学的なマクロスケールな現象と運動論的なミクロスケールの現象のダイナミックなカップリング(スケール間結合)という考え方が本質的に重要であることが分かってきた。また、弱電離プラズマや中性大気における物理素過程の理解においても、様々なスケールにおける構造形成

地球周辺で“鍵”となる宇宙プラズマの物理素過程

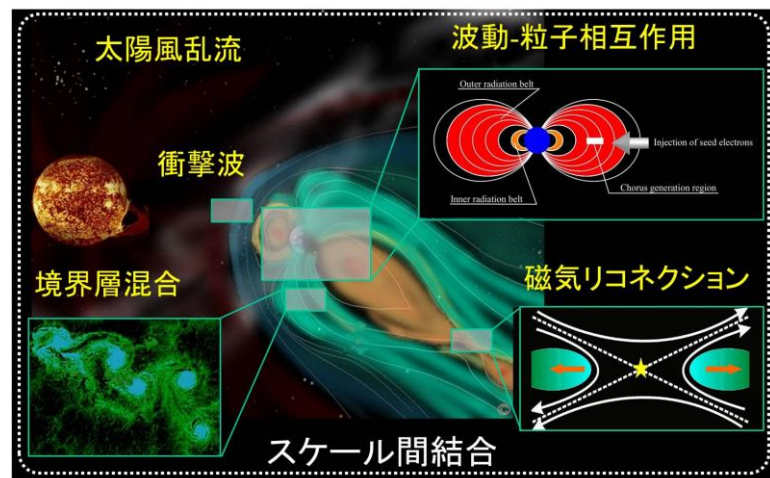


図 2.4.1 スケール間結合

の解明が重要であると同時に統計的一様性を保たない乱流(非一様乱流)へのアプローチが現象解明のカギとなる。

本節では、こうした宇宙プラズマ・地球惑星大気における物理素過程に関する以下の項目(磁気リコネクション(2.4.1(1))、衝撃波(2.4.1(2))、境界層混合(2.4.1(3))、プラズマ波動・乱流(2.4.1(4))、弱電離プラズマ(2.4.2(1))、中性大気乱流(2.4.2(2)))について、現在までの研究の流れと現状、および今後重点的に追求すべき課題や視点を述べる。

2.4.1では、高エネルギー粒子生成(粒子加速)の物理過程が共通に述べられているが、粒子加速研究を通して天文学分野等との交流が大きく進んでいる。粒子加速現象は、天体プラズマ研究でも注目される研究課題であるが、地球周辺空間における人工衛星・探査機による直接観測が、天体物理学的なアプローチとは異なる新しい知見をもたらすことで、他分野の研究者の興味をひいている。

### 2.4.1 宇宙プラズマ物理

#### (1) 磁気リコネクション

##### 現状

磁気リコネクションは、プラズマ宇宙における爆発現象を支配する物理プロセスである。ここで「爆発」とは、磁場という目に見えない形で蓄積されてきたエネルギーが突発的にプラズマの熱・運動エネルギーに変換されることを指す。したがって、ダイナミズムを特徴とするプラズマ宇宙において、最も重要な物理プロセスのひとつである。

計算機性能の向上に伴って、2000年代後半以降、理論面では、大きな計算空間における高解像度な完全粒子シミュレーション研究が主流になった。これにより、電子スケールの2次的磁気島（プラズモイド）が間欠的に生成される可能性や、X型磁気中性線周辺の電子スケール構造の理解が進んだ。また、2000年前後にはHall効果の速いリコネクションを駆動するという主張が広まっていたが、粒子計算の発展に伴い、現在では運動論効果が本質的だという考えが一般的になってきた。

MHD理論分野では、長年、遅いSweet-Parkerリコネクションと速いPetschekリコネクションという2つの理論モデルが議論されていた。しかし現在では、大規模MHDシミュレーションの実現により、典型システム長（Lundquist数）の大きな系では、Sweet-Parkerリコネクションの電流層内に多数の磁気島（プラズモイド）が発生して「プラズモイド型乱流リコネクション」に遷移することがわかってきた。プラズモイド型乱流リコネクションはSweet-Parker理論よりもリコネクション効率が良いため、リコネクションによるエネルギー解放効率の下限が引き上げられたことになる。

一方、磁気リコネクション領域の観測的研究としては、最近になってGeotail衛星の観測データから、磁場拡散領域の中心部に特徴的な高速電子流が検出され、近年の数値シミュレーション結果と整合性のあることが示された。また、太陽風中や水星磁気圏・木星磁気圏環境といったさまざまな環境でも、リコネクションの観測データが議論されるようになってくるなど惑星磁気圏における磁気リコネクション過程の普遍性が観測的にも示されてきている。そして2015年、地球磁気圏周辺のリコネクション領域を観測するNASAのMagnetospheric Multiscale (MMS)衛星が打ち上げられた。MMSは4機編隊で長時間・空間分解能の観測を行い、特に電子の運動論物理を検知できるようになった点が画期的である。MMSは、昼側磁気圏境界面および磁気圏尾部領域で磁気リコネクション領域を観測して、X型中性点付近の特徴的な電子運動に伴う速度分布関数を検出することに成功した。さらに、磁気圏シースの乱流領域で、電子のみが磁化したプラズマ領域で起きる「電子リコネクション」が発見され、乱流の構成要素としてのリコネクションの姿が予想外の形で見えてきた。

磁気リコネクションの粒子シミュレーション分野では、ペタフロップス級の大型計算機の普及に伴って3次元完全粒子シミュレーションも行われ始め、リコネクション領域外でも3次元的な磁気島形成が起こることなどが明らかになり、リコネクション層は全体として非常に動的である可能性が指摘されるようになった。また、MMSの昼側磁気圏境界面の観測に合わせて、両側の条件が揃っていない非対称タイプのリコネクションの研究が活発に行われ、特徴的な電子速度分布関数や低域混成ドリフト不安定性をもたらす乱流についての議論が進んでいる。また、磁気圏シース領域におけるプラズマ乱流や惑星磁気圏境界におけるケルビン・ヘルムホルツ渦などに関連して、プラズマフローが2次的に磁気リコネクションを引き起こし効率的な運動量・エネルギー輸送をもたらすことも新たに示された。

磁気リコネクションは、高エネルギー粒子生成機構の観点でも重要なプロセスである。最近では、磁気リコネクションのX型磁気中性線領域付近での古典的粒子運動（Speiser運動）に加えて、磁気島を含む大きな系での磁気リコネクションに伴う粒子加速機構の理解が進んでいる。電子については、磁気島の収縮・合体効果や多くの磁気島を散乱体とする統計加速が提案されるなど、磁気島というメソスケール構造を利用した加速過程が議論されるようになってきた。イオンについても、今後の研究の進展が期待される。観測的にも、リコネクションと高エネルギー加速電子の関連性について研究が進められており、理論研究との整合性が議論されている。また上述したように、惑星探査衛星により、地球同様に磁気圏を擁する水星・木星・土星の磁気圏尾部・磁気圏界面においても、磁気リコネクションが観測されており、各惑星の磁気圏ダイナミクスにおける重要性が議論され始めている。

天文学的な視点における磁気リコネクション研究としては、極限天体近傍の強磁場環境で有力視されている相対論的磁気リコネクションの研究が進んでいる。運動論では、リコネクション電場による粒子加速機構や相対論的電流層の安定性が議論された。また、相対論的プラズマ環境の磁気リコネクションでは、強い粒子加速が起きることがわかっており、かに

星雲のガンマ線フレア現象のメカニズム候補として注目されている。多くの粒子シミュレーション研究の結果、粒子加速の結果として高エネルギー粒子のべき型エネルギー分布が形成され、磁場が強い極限ほど、べき指数が小さく（スペクトルがハードに）なることが明らかになった。一方、流体論では新しいシミュレーション技法が開発され、リコネクションの基本的な性質と周辺パラメータとの対応関係などが明らかになった。さらに相対論的輻射流体抵抗性 MHD コードや一般相対論的抵抗性 MHD コードなども登場しており、これからの応用が期待される。

## 今後の課題

上記のように、宇宙空間における磁気リコネクションに対する理解は観測・理論・数値シミュレーションが連携して幅広く進んでいる。特にこれからは、MMS 衛星の地球磁気圏尾部におけるリコネクションの観測結果が蓄積されて、観測的実証が大きく進むことが期待される。これまで、磁気リコネクションの X 型磁気中性線近傍領域の詳細な物理については、数値シミュレーション研究が先行して理解が進んできたが、観測データと比較すると、明らかな数値シミュレーションとの差異も見うけられる。今後のより詳細な観測、あるいは、(理想的な状態ではない) 3 次元性を含むより現実的な状況下における数値シミュレーションの実施等によって、本質的にマルチスケール性を持つ磁気リコネクション現象の全体像の理解を進める必要がある。

衝撃波や磁気リコネクションに伴う高エネルギー粒子加速現象は、マルチスケールな現象が非線形にカップルしながら実現されていくことが明らかになりつつある為、今後はスケール間結合の様相を理解するような研究の進展が求められる。観測的には、従来のような単一衛星や Cluster や MMS のような単スケールの編隊衛星観測ではなく、同時に複数のスケールを観測することができるマルチスケールな編隊衛星観測が将来的には必要となるだろう。一方、プラズマ粒子系シミュレーション (PIC、ハイブリッド) による粒子加速の物理プロセスの研究の進展も期待が高い。今後は、衝撃波や磁気リコネクションの生成・発生から粒子加速までを自己無撞着に再現するような計算を実現することが期待され、このような次世代計算とマルチ・スケール観測を両輪として実証的な研究を進めることが重要である。パラメータ空間は限られるものの、実際にプラズマ条件をコントロールできる実験リコネクション分野との連携も必要になるだろう。

## (2) 衝撃波

### 現状

宇宙における衝撃波の特徴は、遷移層の厚みが媒質であるプラズマ中の粒子間衝突の平均自由行程よりも桁違いに小さいことである。このような衝撃波では、上流の流れのエネルギーが遷移層で散逸する際に衝突効果が本質的に効かない。そのため宇宙プラズマ衝撃波は無衝突衝撃波と呼ばれる。無衝突衝撃波 (以下、衝撃波) 研究の分野は、1980 年代から 1990 年代にかけて、ISEE 衛星、Geotail 衛星などによる観測研究や数値シミュレーション研究の活躍によって、基本的な理解は確立されたと考えられていた。しかし今世紀に入ってそれまで通説とされてきたことに疑問を投げかけるような研究成果が次々と発表され、衝撃波研究は新たな局面に差し掛かっている。

2000 年代後半以降、衝撃波の観測面での大きな話題は Voyager 2 号による太陽圏終端衝撃波の通過 (2007 年) であろう。Voyager 1 号 (2004 年に通過) によって、宇宙線異常成分 (ACR) のフラックスは衝撃波で最大とはならず、下流に行くほど増大することが示されていたが、Voyager 2 号ではさらに、低エネルギーの太陽風成分のデータから、終端衝撃波の圧縮比が予想よりはるかに小さいことが示され、またしても衝撃波統計加速モデルに対して不利な状況が明らかになった (Voyager 2 号では衝撃波通過時の粒子加速の兆候も捉えられたが、やはり下流でのさらなるフラックス増加がみられた)。Voyager 2 号のデータは、これまでよく分かっていなかったピックアップイオンの相対密度が予想よりも大きいこと

を示唆しており、これを受けて、終端衝撃波のシミュレーション研究が活発化している。

終端衝撃波は、これまで ACR の成因として議論がなされてきた。しかし、太陽圏外縁での ACR の主要加速現場が終端衝撃波以外の可能性が高くなった。終端衝撃波からヘリオシースにかけて存在するピックアップイオンが、星間媒質起源の中性原子と電荷交換して中性化した高エネルギー中性原子 (ENA) が IBEX 探査機によって観測され、太陽圏外縁における高エネルギー粒子のマップを提供している。特に下流のヘリオシース、もしくはヘリオポーズ以遠に加速源が存在する可能性が指摘されている。ACR はもとより、銀河宇宙線の加速機構としても最有力視されてきた衝撃波統計加速 (DSA or 衝撃波フェルミ加速) モデルは、今後再考を迫られるかも知れない。

地球磁気圏衝撃波では、Cluster によるバウショックの非定常性の研究が進んだほか、衝撃波遷移層における電子スケール波動の詳細観測に進展がみられた。また、衝撃波と不連続面の相互作用として現れる hot flow anomaly についても最近研究が活発化している。

これまでの観測から地球近傍や惑星間空間の比較的 low マッハ数 ( $<10$ ) の衝撃波においても衝撃波に伴う電子加速が起こっていることが明らかになっておきており、衝撃波における電子加速の議論が活発化している。これは衝撃波統計加速に対して (統計的でない) 直接加速の可能性、あるいは、衝撃波統計加速の注入問題の文脈で注目されている。ホイッスラー波と電子加速の相関、衝撃波リフォーメーションに伴う高エネルギー電子バースト、リップル構造のような多次元効果による電子加速の可能性などが議論されている。一方で、マッハ数数  $10\sim 100$  超の高マッハ数衝撃波に対して、Buneman 不安定性を介した電子の多段階加速モデルが複数提唱されている。また、反射イオンが励起する Weibel 不安定性の非線形発展の結果として、衝撃波遷移層で自発的に生成された電流層で磁気リコネクションが誘発されることが新たに明らかになった。古くから磁気リコネクション単体に伴う粒子の加熱・加速の議論は盛んに行われてきたが、今後は衝撃波の文脈における磁気リコネクションの役割を理解することが重要になると考えられる。

シミュレーション研究では、ハイブリッドコードによるグローバル多次元計算が盛んにおこなわれるようになり、地球をはじめ、火星や金星などの惑星や、衛星、冥王星、彗星などのバウショックを含む周辺環境が再現されるようになってきた。完全粒子シミュレーションでは、遷移層の局所計算のみならず、衝撃波を含む系の多次元マイクロ構造の解明も進みつつある。特筆すべき点は、これら完全粒子シミュレーションやハイブリッドシミュレーションといった手法が、高エネルギー天体物理学分野の研究に積極的に応用されるようになったことである。超新星残骸衝撃波やコンパクト天体からのジェットに伴う衝撃波などがその具体例である。

実験室における無衝突衝撃波の研究も進展を見せている。高強度レーザーを用いてプラズマの対向流を作り、無衝突衝撃波を生成する技術が確立されつつある。宇宙では、同時多点観測によって衝撃波のマクロ構造とマイクロ構造を同時に捉える試みが試行されているが、実験室では本来的にこれが可能である点は魅力である。

また、相対論的衝撃波の研究についてもいくつかの進展があった。特筆すべきは非磁化プラズマ中における衝撃波の形成が Weibel 不安定性を介して起こることが明らかになったことであろう。また形成された衝撃波近傍でフェルミ加速類似の過程が働いていることも示された。磁化プラズマ中の衝撃波においては高振幅電磁波とそれを用いた航跡場加速が 1 次元シミュレーションによって示唆されていたが、近年では多次元計算によってその効率が調べられるようになってきている。また、相対論的衝撃波からの電磁波放射は高速電波バーストのモデルとしても大きな注目を集めている。

無衝突衝撃波は宇宙における粒子の加速器の役割を果たし、天体物理においてもその重要性は広く認識されている。天体観測においては放射効率の良い電子が加速領域のプローブの役割を果たすが、その一方で理論的には電子加速は衝撃波統計加速への注入が困難とされてきた。最近になって粒子シミュレーションによって電子の注入過程の解析が可能になり、いくつかの進展があった。衝撃波遷移層において励起されるプラズマ不安定性を介し



た加速や磁気ミラー効果（ドリフト加速）によって一部の電子が衝撃波統計加速へ注入されることが指摘された。またこの過程を基にして、電子注入が起こる必要な条件として臨界マッハ数が理論的に提唱され、地球のバウショックの観測結果を説明し得ることが分かった。これまで知られていた太陽圏内の衝撃波と超新星残骸を始めとする高エネルギー天体衝撃波の違いを説明し得る初めてのモデルである。

### 今後の課題

2015年からNASAのMMS衛星による観測が始まり、電子スケールの物理を観測的に実証することが出来るようになってきた。実際に電子分布関数の超高時間分解能観測によって、高周波のホイッスラー波を励起し得る分布関数の直接計測が行われ、またホイッスラー波と電子の相互作用が観測的に示されている。今後はこのような観測と理論・数値シミュレーションとの比較によって衝撃波の物理、特に電子加速の理解が飛躍的に進むことが期待される。一方で、多点観測による利点を十分に生かした解析が行われているとは言い難い。この要因の一つとして、衝撃波が本質的にマルチスケールな構造を持つことが挙げられる。衝撃波の非定常構造やそれに伴う粒子の加速・加熱について実証的に理解を進めるためには、数値シミュレーションと観測のより密接な連携や、マルチスケールな編隊衛星観測の実現が必須である。一方で、衝撃波が本質的にマルチスケールな構造を持つことから、MMS衛星の衛星間距離では必ずしもその全体像が捉えられないことが問題となっている。衝撃波の非定常構造やそれに伴う粒子の加速・加熱について実証的に理解を進めるためには、数値シミュレーションと観測のより密接な連携や、マルチスケールな編隊衛星観測の実現が必須である。実際に、欧州を中心に立案中のミッションPlasma Observatoryではこの問題に挑む計画である。

### (3) 境界層混合

#### 現状

異種プラズマの接する境界層における混合過程を理解することは、古典的な粘性拡散の期待できない無衝突プラズマの普遍的性質を理解する上で重要である。宇宙空間における代表的な境界層として、地球磁気圏境界層が挙げられる。磁気圏境界では、惑星間空間磁場（IMF）が南向きの時、昼側低緯度領域でおこる磁気リコネクションにより太陽風プラズマが効率的に磁気圏内部に輸送され磁気圏プラズマと混合することが知られている。この昼側リコネクションについては、非対称な磁気リコネクションの物理として理論・シミュレーションを中心に理解が進んでいる。

しかし一方で、昼側リコネクションによる拡散が期待できない北向き IMF の条件下で、低緯度磁気圏境界内側に位置する太陽風と磁気圏プラズマの混合層（LLBL）の厚みが増加することが知られている。この北向き IMF 時の LLBL 形成の主な候補として、主に、高緯度磁気圏境界における磁気リコネクションおよび低緯度境界におけるケルビン・ヘルムホルツ（KH）渦が挙げられている。

高緯度リコネクションについては、まず、高解像度 Global MHD シミュレーションの実現により実際の太陽風パラメータ下における現象の再現が可能となった。さらに、低緯度領域を観測する THEMIS 衛星の編隊観測により、Global シミュレーションが高緯度リコネクションを再現するイベントで実際に昼側 LLBL の発展過程が観測された。また、高緯度領域を観測可能な Cluster 衛星によりリコネクションの発達過程が観測されるなど、混合プロセスの具体的な理解が進んでいる。

KH 渦については、まず、Geotail 衛星を中心に、巻き上がった渦が統計的に磁気圏脇腹から尾部領域に分布していることが確認された。また、理論および数値計算により、渦の一般的な性質として、渦流が渦内部で磁気リコネクションを引き起こすことが示された。さらに、多次元完全粒子シミュレーションによって、この渦内リコネクションが磁気島形成を伴う効率的なプラズマ混合を引き起こすことが示された。実際に、Cluster、THEMIS、MMS 衛星

により磁気圏境界における渦内リコネクションの発生および渦流と磁気島の共存が直接観測されている。また、惑星探査衛星により、地球同様に磁気圏を擁する水星・土星の磁気圏境界においても KH 渦が観測され、地球と異なる時空間スケールの他惑星磁気圏境界においても KH 渦の重要性が議論され始めた。

## 今後の課題

人工衛星による磁気圏境界層における KH 不安定とそれに伴う 2 成分プラズマの観測事実は、無衝突プラズマの混合について大きな問題を投げかけた。この問題に対して、1990 年代より、MHD、ハイブリッド、完全粒子シミュレーションの手法で理論的な解釈が取り組まれている。特に、「2 次の不安定性の成長」に代表される KH 不安定の非線形発展が、プラズマの混合を促進するメカニズムとして提唱されてきた。一つは、KH 渦内部で励起される磁気リコネクションで、磁力線のつなぎ替えに伴ってプラズマを輸送する。もう一つは、2 次的レイリーテイラー不安定で、流体的乱流中の渦構造生成に伴ってプラズマ混合を促進する。こうした基本理解を出発点に、今後は磁気圏グローバル構造の中での 3 次元 KH 不安定の非線形発展を考える必要がある、近年このような観点で報告が続いている。グローバル MHD シミュレーションによる研究は、KH 不安定によるプラズマ混合の問題だけでなく、ULF 波動を介した内部磁気圏における電子加速との問題と絡めて議論を進めていくべきである。

一方、地球磁気圏の低緯度境界で運動論的 Alfvén 波 (KAWs) の高頻度な発生が観測され、境界層における混合および太陽風の輸送に KAWs も寄与していることが示された。また、数値計算および観測により KAWs を KH 波などの表面波が励起する可能性も示された。このように、具体的な混合プロセスの解明が観測・理論・数値計算の連携により進展している。これらの多スケールに渡る複合的な乱流励起過程の理解が、今後の境界層混合過程の研究においても大きな主題であると言える。

## (4) プラズマ波動・乱流

### 現状

Geotail 衛星による観測は、電子スケール、イオンスケール、流体スケールといったマイクロからマクロまでの異なるスケール間の結合・相互作用のダイナミクスの解明が、磁気圏・宇宙プラズマにおける物理現象の理解に必須であることを明らかにした。スケール間結合の複雑なダイナミクスの把握には、異なるスケールの物理現象の同時観測だけでなく、その現象の時間・空間変化が明確に識別できることが必要である。プラズマ波動は、異なるスケールを結びつける重要な役割を果たすとともに、高時間分解能で計測可能であることから、将来の磁気圏・宇宙プラズマ物理の理解において必要不可欠な観測対象である。

月探査衛星かぐやによるプラズマ波動観測をもとに、太陽風と月の相互作用によって引き起こされる月ウェイク領域や、月表面の磁気異常上空における宇宙プラズマ物理過程の理解が進んでいる。これらの物理過程の理解は、今後の月・火星探査や開発を支える重要な役割を担うとともに、将来の水星および木星磁気圏探査を通じた比較惑星磁気圏研究の発展と、宇宙プラズマ・地球惑星プラズマ環境を支配する普遍的法則の解明の手掛かりとなり得る。

さらに近年の精力的な内部磁気圏の研究により、宇宙プラズマのダイナミクスに対する波動の寄与が従来考えられていた以上に大きいことが指摘され、グローバルな磁気圏ダイナミクスの中での波動・粒子相互作用の理解が進んでいる。特に内部磁気圏では、ジオスペース探査衛星あらせの観測によって、広いエネルギー範囲にわたるプラズマ粒子が、さまざまなプラズマ波動との相互作用によって互いに結びついていることがわかってきた。プラズマ波動と粒子の同時観測により、バースト的に発生するホイッスラーモード波動が数十 keV の放射線帯電子を加速する様子や、ロスコーン内部へ電子を注入する様子が捉えられた。また、波動と粒子の同時観測は、イオン・サイクロトロン波とイオンの間で生じるサイクロトロン共鳴過程の観測的実証や、リングカレントイオンの不安定性を介して実現される異

なる性質を持つプラズマ波動間による複雑なカップリング過程の存在も見出した。さらに、地上との同時観測によりホイッスラーモード波動と脈動オーロラとの間に非常に良い相関があることもわかってきた。

理論およびシミュレーション研究においては、ホイッスラーモード・コーラス放射励起過程の非線形成長理論の構築や斜め伝搬を含んだ非線形加速過程の理解に加え、非一様磁場を導入した沿磁力線方向1次元粒子シミュレーションによる観測実証研究が進んでいる。さらに、電磁イオンサイクロトロン波(EMIC)に関するコーラス放射と類似したEMICライジングトーン・フォーリングトーン放射と呼ばれる周波数上昇・降下を伴う波動放射の非線形理論および1次元リアルスケール・ハイブリッドシミュレーションが行われている。EMIC放射とイオンとの非線形な相互作用は従来の線形・準線形理論よりも効率よくプロトンを極域大気へ降下させてプロトンオーロラを励起し、また放射線帯の相対論的電子もEMIC放射の非線形捕捉によるピッチ角散乱を受けて極めて効率良くロスコーンに落ちることにより、放射線帯の消滅につながるということが明らかになりつつある。また、THEMIS, MMS, あらせ衛星などを用いたEMIC波動とイオンの非線形相互作用の直接計測が、波動粒子相関解析法(WPIA)の開発とともに進んでおり、シミュレーションとの比較研究が行われている。このように、プラズマ波動が内部磁気圏プラズマの輸送・加速・加熱過程を大きく支配している可能性が衛星観測/地上観測/シミュレーションの連携によって実証され始めている。

太陽風プラズマにおいては、高い時間分解能の衛星観測データに刺激されながら、運動論効果を含んだ、イオン・電子スケールでのプラズマ乱流物理の解明が進められている。また、2.1.4で述べられているParker Solar Probeなどによる内部太陽圏での「その場」観測結果は乱流、不連続構造、粒子加速・加熱などの太陽風プラズマのトピック全体の活性化に寄与している。例えば、Parker Solar Probeの初期結果としてハイライトされることが多い磁気スイッチバックは、短期間のうちに理論・シミュレーション研究へ波及し、多くの成果が報告されている。

## 今後の課題

現在、国際的な協力のもとで複数衛星による同時観測が実現され、磁気圏波動の理解が進んでいる。幅広い領域でのスケール間結合を見せる磁気圏中の波動粒子相互作用の物理をさらに深く理解するためには、高度化された計測器やそれを最大限活用する詳細観測手法の開発に加え、超小型衛星等による多点観測の実現が期待される。今後、計測器の小型・軽量化に向けた取り組みも重要な課題となる。また、多点での同時高時間分解能波形観測とそれから得られる波形データの相関解析は、磁気圏内の波動・粒子相互作用とスケール間結合による宇宙プラズマの時間・空間変化の解明に必須であり、今後さらなる発展が期待される。

近年大きな進展を見せている内部磁気圏波動に関する理論研究を基盤として、幅広いスケール間結合を実証するための大規模シミュレーション研究を進めるためには、以下のよう

1. 磁気圏への高エネルギー粒子注入のモデル化を考慮したVan Allen Probesやあらせ等の衛星観測結果と、より詳細に比較可能なリアルスケールシミュレーションコードの開発。
2. 磁気圏中の高エネルギー電子とイオンに対する非線形散乱過程の詳細な理解、定量的な評価、およびそのモデリング。また、プラズマの加熱・加速による内部磁気圏内の高エネルギー粒子形成に対する影響の理解。
3. シミュレーション空間の多次元化による、斜めモード励起の再現および反射やモード変換の理解。

グローバルな視点で内部磁気圏波動の理論研究とモデリング研究が進むことで、今後の宇宙天気予報の高精度化に向けた応用研究も期待される。

また、太陽風プラズマ研究においては磁気流体的プラズマ乱流から運動論を考慮したイオン・電子スケールの運動論的プラズマ乱流まで幅広いスケールの波動・乱流が研究対象となる。さしあたり、遂行すべき課題を以下のように分類する：

1. 各特性長（磁気流体、イオン、電子スケール）におけるスペクトル等の乱流の統計的性質。プラズマ乱流中の粒子運動の理解、および宇宙線輸送・拡散過程の解明。
2. 各特性長の間でのエネルギー変換過程。磁気流体的スケールからイオン・電子スケールへの変換、およびその逆過程。
3. 人工衛星による「その場」観測で明らかとなった太陽風プラズマ乱流の構造や統計的性質の生成・発展過程に対する統一的理解。

乱流の性質をより現実的に再現するためには空間三次元のシミュレーションが要求され、特にプラズマ運動論を考慮した乱流物理を理解するためには、大規模シミュレーション技術との連携が必要不可欠である。磁気流体乱流に限っても、乱流物理の観点からは未解明の点が多数あり、理論・シミュレーション双方から理解を進める必要がある。その先には、素過程としての磁気流体スケールから電子スケールに至るまでの乱流状態の生成過程および統計的性質の理解という課題がある。上記課題3はそこからさらに幅広いスケールの粒子・電磁場の観測結果が制約条件として課されるもので、領域間結合も念頭に置いた現象の理解が不可欠となる。例えば、磁気スイッチバックが報告されて以降、その生成過程については太陽表面に起源を探るものから惑星間空間における生成までいくつかの本質的に異なるシナリオが議論されている。また、磁気スイッチバックと従来議論されてきた太陽風中の不連続構造との関係も先行研究で指摘されているが、一方で太陽風不連続構造の研究には運動論効果の影響を重要視するものもあり、流体的な文脈で議論されることが多い磁気スイッチバックとの関連性はまだ明確ではない。今後も、観測が進むにつれて新たな制約条件が理論・シミュレーションモデルに課されることが考えられるが、それらは過去に得られた知見の上に課されるものであることを踏まえ、モデルの吟味や再構築を進める必要がある。

また、宇宙プラズマ乱流・波動の性質は粒子の加速・拡散過程とも密接に関わっている。今後も、磁気圏プラズマの加速・拡散や太陽圏プラズマ中の宇宙線輸送過程の解明に向けて乱流の理解を深めていく必要がある。

## 2.4.2 弱電離プラズマ・中性大気の物理

### (1) 弱電離プラズマ

#### 現状

これまでの節では完全電離プラズマにおける素過程について述べてきたが、中性気体分子の電離・結合過程を含む弱電離プラズマのダイナミクスも、地球電磁気・地球惑星圏における重要な素過程である。例えば、地球電離圏は弱電離プラズマで満たされた空間であり、また今後の惑星探査等で重要な役割を果たすであろう電気推進機関（衛星内で重イオンを生成し、それを電氣的に加速して噴射することにより推力を得るエンジン）においても弱電離プラズマの理解は欠かせない。

地球電離圏は、1924年のアップルトンによる観測・実証以降今日まで様々な研究が行われてきた。地球電離圏内には様々な空間スケールの電子密度構造を有する。たとえば、数100 km程度の中規模構造として、中・低緯度域のプラズマバブルや中規模伝搬性電離圏擾乱(MSTID: Medium-scale Traveling Ionospheric Disturbance)、高緯度域の極冠プラズマパッチなどがある。プラズマバブルは、赤道域で電離圏下部の低密度プラズマが局所的に高高度まで持ち上がる現象である。電子密度の微小擾乱中を横切って流れる重力ドリフト起源の電流を連続にするため分極電場が生じ、その結果起こるRayleigh-Taylor不安定性によって形成されると考えられている。一方、電離圏F領域を伝搬する電子密度の波状構造であるMSTIDは、日本上空など主として中緯度域で頻繁に観測される。夜間のMSTIDの空間構造は、電子密度の微小擾乱中に中性風が駆動する電流によって分極電場が生じ、その分極電場が電離圏を鉛直方向に変位させることで作られていると考えられている。近年に

なって、サブストームなどの極域の地磁気擾乱に伴ってオーロラ帯・サブオーロラ帯の夜間 MSTID の空間構造が変化することが発見されている。

Perkins 不安定性と呼ばれるこのプロセスは、定性的には MSTID の性質を説明できるものの、線形理論の範疇では不安定性の成長率が小さすぎ、観測事実を定量的には説明できていない。プラズマバブルや MSTID などの中規模構造の内部には、さらに小さい空間スケールの密度擾乱（イレギュラリティ）が存在することがレーダー・衛星・ロケットなどの観測で明らかになっている。同様の構造は、極冠プラズマパッチの近傍においても観測されており、電離圏 F 領域に存在する中規模電子密度構造の内部・近傍には、微小スケールの密度擾乱が緯度にかかわらず必然的に存在することを意味している。プラズマパッチ近傍のイレギュラリティも、電子密度の微小擾乱中を流れる水平電流の連続性を保つ分極電場が擾乱を増幅することによって生成されていると考えられている。このプロセスは、Gradient-drift 不安定性として知られているが、根源的なメカニズムはプラズマバブルや MSTID の生成のプロセスと共通である。つまり、電離圏内の電子密度勾配中を流れる電流が電子密度擾乱を横切ることによって生じる分極電場がプラズマの構造化を担っており、広い意味において弱電離プラズマ中に生じる交換型不安定性であると言えることができる。このように異なる緯度の電離圏で観測される異なった構造が、共通の普遍的なプラズマ不安定性によって形成されていることは特筆に値する。

一方で、実験室においても弱電離プラズマを用いた研究は古くから行われてきた。近年、化学推進のかわりに、衛星内でイオン化されたキセノンなどの重イオンを電氣的に加速して放出することにより宇宙空間中で推力を得る電気推進機関が小惑星探査機「はやぶさ」や「はやぶさ2」などにおいて実用化されている。これらの電気推進機関に関連して、イオン生成における弱電離プラズマ素過程の議論も進められている。電気推進機関におけるプラズマは、スケーリング（無次元化）によって宇宙プラズマ（例えば太陽風を典型的な例として）と同等視することはできない。それは、以下の理由による。

1. 推進プラズマは基本的に不完全電離であり（最高電離度 50%程度）、プラズマの運動だけではなく中性ガスの挙動、さらに中性ガス電離によるプラズマ生成について考慮する必要がある。
2. 粒子間衝突が無視できない。特に電子中性粒子の非弾性衝突は、プラズマ生成を考慮する上で本質的に重要である。電子・イオン衝突も無視できない。
3. 推進機関設計のためには、プラズマの様々な物理スケール（ラーマ半径等）に加えて機器のサイズ（口径等）を考慮する必要がある。

3 は工学応用へ向けた条件であると言えるが、1、2 の素過程は、電離圏プラズマなどの自然界の弱電離プラズマダイナミクスにもつながる素過程であると言える。

また、電気推進器からは重イオンビームや中和電子とともに中性粒子も衛星外に漏れ出るため、衛星近傍では背景の無衝突プラズマに加え、中性粒子を含む弱電離プラズマも存在する。この衛星のプラズマ環境を理解するためには、パラメータや特徴的な時空間スケールが全く異なる背景プラズマ、推進器から放出される人工的なプラズマ、中性粒子の3つの相互作用を考慮する必要がある。

## 今後の課題

先に述べたように、電離圏の異なる緯度において観測される異なった構造が、共通の普遍的なプラズマ不安定性によって形成されていることがこれまでの研究により明らかとなってきた。但し、MSTID 生成の鍵を握ると考えられている Perkins 不安定性、ポーラーパッチ近傍のイレギュラリティの生成に寄与していると考えられている Gradient-drift 不安定性の双方において、線形理論によって得られる成長率は小さすぎ、観測を定量的に説明することができない。これは、構造の成長が非線形段階において起こっていること、他の不安

定性とカップルすることで成長が促進されていることを示唆するものである。例えば、極冠プラズマパッチに伴うイレギュラリティに関しては、Gradient-drift 不安定性と Kelvin-Helmholtz 不安定性との組み合わせによって大きな成長率が得られている可能性が指摘されている。また、夜間 MSTID に関しては、Perkins 不安定性が起こっている F 領域と、E 領域のスボラディック E 層の内部で生じている不安定性がカップリングして、MSTID の速い成長を引き起こしている可能性が指摘されている。今後、不安定性の時間発展を制御するパラメータ（密度の勾配スケール長、中性風、背景電場と磁場、粒子降下など）を高い時空間分解能を持つ観測機器によって精密に測定し、得られたデータを考慮した数値シミュレーションを行うことで、弱電離プラズマ中のプラズマ不安定性が電離圏プラズマの構造化に与える影響を定量的に吟味していく必要がある。地上・衛星観測が充実している地球電離圏において、交換型不安定性によってプラズマに構造が生み出されていく過程を研究することは、その他の観測が疎な領域（磁気圏、惑星電離圏、太陽・恒星などの他天体）において生じている様々なプラズマ不安定性を理解する上で重要な意義を持つと考えられる。例えば、太陽の彩層にも電離圏と同じ弱電離プラズマが存在し、彩層プラズマ中、もしくは彩層からコロナへ繋がる領域において、様々な物理現象（プロミネンスなど）が観測されている。ここで述べた弱電離プラズマ中の交換型不安定性の普遍的意義を明らかにするためには、太陽彩層現象と電離圏現象の間のアナロジー研究を積極的に行うなどの取り組みが必要である。

電気推進機関の弱電離プラズマ（推進プラズマ）研究におけるテーマの一つとしてプラズマの生成・加速に関するものがある。プラズマ生成には多くの方法があるが、基本は中性ガス（少量の自由電子を含む）に電場をかけて電子を加速し、これと中性粒子との非弾性衝突によりカスケード的に電離を促進するものである。ガス中に電場を導入する方法としては、キャパシティブ（コンデンサと同様に電場を浸透させる）、インダクティブ（交流によりガス内に渦電場を励起）、ヘリコン（ガス内にホイッスラー波を励起）などがある。特にヘリコンプラズマ生成については、その物理過程の詳細に未解明な部分が多く、「生成・消失を含む非一様プラズマ中の波動伝搬」という観点から、非常に興味深い研究対象であり、SGEPSS 研究者の活躍できる分野であると考えられる。プラズマ加速には大別して3方法がある。ガス内部に導電することによりガスを加熱し推力を得る「電熱加速」、静電場によりイオンを加速する「静電加速」、ローレンツ力による「電磁加速」である。はやぶさで有名になったイオンスラスタは静電加速型である。グリッド損耗をさけるため、プラズマとグリッドが接しない無電極電磁加速型の推進機関の研究が現在さかんである。SGEPSS サイエンスの延長として実りのある結果が期待できる分野だろう。

また、推進プラズマの電荷中和過程やその中で生起するプラズマ不安定性も弱電離プラズマ環境における重要な研究テーマとなりうる。宇宙空間でのプラズマ推進利用は工学的な分野ではあるが、電気推進器から放出された重イオンビームの電子による電荷中和過程は未だにその詳細は定量的に理解されておらず、プラズマ物理分野の観点からも興味深い。衛星近傍では推進器から漏れ出た中性粒子が存在するため、イオンビームとの間で電荷交換衝突が生じ、低速イオン（CEX イオン）が生成される。高速イオンビームと低速の CEX イオン、電荷中和のための電子の相互作用によりイオンビーム領域ではプラズマ不安定性の励起が予想されるが、衛星を含む非一様な環境での理論的な解析は非常に難しい。今後、地上実験や計算機シミュレーション研究によって解き明かされる課題であろう。

## （２）大気の微細構造

### 現状

20 世紀後半の種々の計測技術の進歩により大気圏の構造や温度、風速場などの情報は飛躍的に豊富になった。地上から熱圏下部の高度約 100 km までの大気については、ロケットや気球などの直接観測および衛星やレーダーなどの間接計測で種々のスケールの大気構造が明らかになり、大気波動がこの領域で運動量やエネルギーの輸送に果たす役割が明らか



になってきた。これらの波動には、地球規模の大気潮汐波、プラネタリ波などから気候モデルではグリッド内の構造となるような水平 10 km スケールくらいに至る大気重力波などが含まれる。ところで、高度 100 km の大気で物質やエネルギーの鉛直拡散で重要な働きをする乱流についてはその観測的、理論的研究はどちらも大幅に遅れている。対流不安定、シア不安定などで生成される種々のスケールの乱流で満たされている大気中では、上方あるいは下方への物質の拡散については、熱圏下部までは乱流による渦拡散が支配的であり、熱圏での熱運動による分子拡散とは対照的であり、また大気波動がエネルギーや運動量の輸送には効果的だが鉛直物質輸送には効かないことも好対照である。(全球平均の)熱圏大気質量密度には顕著な半年周期の変動があることが知られているが、この変動を作り出す機構はわかっていない。数値モデルによる計算では、観測から得られた大気重力波の半年周期の変動に基づき、熱圏下部での渦拡散に半年周期の変動を入れると、上記の質量密度の半年周期変動が再現できる。ただし、熱圏下部での渦拡散は温度、風速、組成比などにも影響を及ぼすことから、(渦拡散変動を考慮した)数値モデル計算によってすべての熱圏パラメータを観測と整合的(定量的)に再現することは現状では不可能と考えられる。

### 今後の課題

地上から熱圏下部の高度約 100 km までの大気は先に述べたような種々のスケールの乱流で満たされている。一様空間で統計的に議論するだけでも難しい乱流が、現実の大気の状態に応じて変調されていることが、さらに問題を難しくしている。

取り組むべき課題を以下に述べる：

- ・乱流の観測手法の開発
- ・乱流の時空間構造の解明
- ・乱流の生成・維持機構の解明
- ・乱流圏界面領域の観測とモデル研究
- ・化学モデル等による渦拡散の推定値と実観測データのギャップの解明
- ・不均一な乱流現象のモデルへの取り込み。

乱流による物質の鉛直渦拡散は、地表からオゾン層破壊物質や温室効果ガスなどを上方に輸送する重要なプロセスであるとともに、熱圏から化学活性な酸素原子 (OI) や種々の流星起源物質、オーロラ等に伴う粒子降下で生成される NO<sub>x</sub> などを下方に輸送するプロセスでもあることから地球大気全体の変動を知る上でも極めて重要なプロセスであり、今後の研究の進展が期待される。乱流圏界面は地球と宇宙の種々の意味での境界のうち、もっとも知識の少ない境界面である。

このような状況で第一に重要なのは観測技術の新展開である。ロケットによる高時間分解能の大気物理量観測、レーダーのイメージング等による高時空間分解能の大気 3 次元構造観測などは乱流の実態の解明に迫るものである。現在、国際共同で進行中の EISCAT\_3D 計画等の実現により、乱流そのものや、乱流が大気変動に及ぼす影響の理解が飛躍的に進むものと期待される。また、上述したように、(下部)熱圏は弱電離プラズマの領域でもある。プラズマの存在下における新たな乱流理論の構築も重要な課題であり、そのための観測・理論・数値シミュレーションのさらなるブレークスルー・技術革新開発が望まれる。

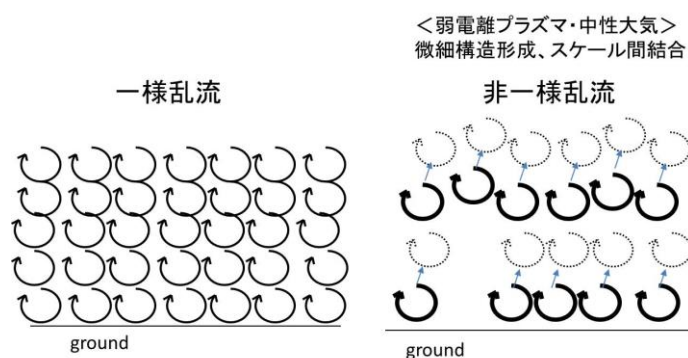


図 2.4.2 非一様乱流

地球大気における乱流の実態解明が惑星大気や太陽面における乱流の役割の理解においても重要であることは明らかであろう。例えば、火星大気の渦拡散は地球大気のそれに比べて極めて大きいと考えられている。どのような物理機構によって、このような大きな渦拡散が生成・維持されているのかを理解するためには、地球大気での乱流の精密計測、理論構築が不可欠である。

## 2.5 地球および月・惑星の電磁場変動、古磁場環境の解明

### 2.5.1 地磁気変動 -現在、過去、そして未来予測

#### (1) 現在の地球磁場変動に関する観測研究

地磁気は様々な時間スケールで変化している。地球内部に原因を持つ変化は、数十万年に一度の割合で起こる地磁気逆転や、千年程度の時間変動スケールをもつ非双極子磁場変動、数年程度で急激に変化をする地磁気ジャーク等が知られている。しかしながら、それぞれの現象の詳細や、変動の原因となるコアやコア・マントル系のダイナミクスについては未解明の問題が多い。継続的な観測による地球磁場の時間変動・詳細な空間分布の把握は、地磁気そのものの成因論や変動のメカニズムを議論する上で必要不可欠である。また、磁場や電場の連続記録を用いて、地球内部の電気伝導度などの電氣的物性や熱の分布を明らかにすることができる。このように地球電磁気学の核をなす諸課題について理解を深めるためには、観測の重要性は非常に高い。地球磁場変動に関する観測研究は、人工衛星による観測研究と地上・海底での連続観測研究に大別できる。前者は、全球的なデータを取得できる反面、移動観測のため、ある点における連続した磁場データが取得できない空間的に移動しながらの測定であること、運用の連続性が担保されないことなどの課題がある。一方後者は、定点において長期間にわたって精度が保障された連続磁場記録が得られるが、空間的に疎なデータとなる。これら2つの観測手法を相補的に継続することは、現在進められている研究のみならず、将来の地球科学研究にとっても重要な課題と言える。

#### (ア) 地球磁場観測衛星

地球磁場の詳細な空間分布や時間変動を観測するためには、世界各地の観測所における地球磁場観測に加えて、衛星によるグローバルな地球磁場観測が有効である。1979年10月に打ち上げられたMAGSAT以後、ヨーロッパを中心として計画されたØrsted(1999年2月打ち上げ)やCHAMP(2000年7月打ち上げ、2010年9月運用終了)、3機のSWARM衛星(2013年11月打ち上げ)などにより20年以上にわたる地球磁場観測が実施され、地球磁場の詳細な空間分布の把握や永年変動が明らかになり、数年の時間スケールを持つ外核起源の磁場が存在することが確認された(2.8.3(3)にて後述)。また、磁場観測データはコア表面の流れの分布やマントルの一次元電気伝導度構造の推定にも用いられた。このように、人工衛星による磁場観測データは地球内部ダイナミクスの理解には必要不可欠なものである。

地球磁場変動を理解し、コアやマントルのダイナミクスについて議論をするためには、数10年から100年以上にわたる長期間のデータ取得が必須であり、国際共同研究の枠組みで地球磁場観測衛星を継続的に打ち上げる必要がある。しかし、現在運用されているSWARM衛星以後の地球磁場観測衛星の計画は中国によるCSES衛星のみである。CHAMPやSWARMなどに代表される大型衛星による観測戦略は、経済状況に多大な影響を受けるため、将来にわたる持続可能な計画へとシフトする必要があると考えられる。安定して継続的に全球観測を行うための戦略として、以下の2案が考えられる。一つは地球観測衛星「だいち」のような大型衛星に磁力計を相乗りさせて磁場観測を行うことである。もう一つの戦略は小型衛星の活用である。小型衛星は比較的安価に作製、軌道投入が可能であり、また、小型化することにより複数機での磁場同時観測の可能性が高まると期待される。後者については、国内において超低高度衛星の実用化へ向けての技術開発が進められており、このような衛星への磁力計搭載も検討すべきである。超低高度衛星での磁場計測が可能となれば、CHAMPやSWARM衛星よりも空間分解能が格段に向上することが期待される。上記2つの戦略に必須の技術開発として、直流(DC)磁場まで計測できる磁場センサと周辺システムの小型化、磁気雑音のさらなる低減、および衛星姿勢モニターの高精度化が挙げられる。日本周辺などのリージョナルなスケールの磁場空間分布の解明には、同時多点観測が必要である。その実現

のためには高層気象観測で使用されているラジオゾンデなどの利用も検討するべきである。

### (イ) 地上および海底での連続観測

衛星による地磁気観測が実現した現在でも、地上の長期磁場観測は、地磁気永年変化において主要な情報源であることに変わりはない。国際的には、柿岡をはじめとする数か所の地磁気観測所で約 100 年間、国際地球観測年 (IGY) を契機に建設された女満別・鹿屋をはじめとする多くの地磁気観測所で 60 年以上のデータが蓄積されてきた。これにより、双極子単調減衰をはじめ、太平洋側半球と大西洋側半球の変化強度の差異、西方移動とその周期帯、60 年周期変動、地磁気ジャークなど、多様な特徴的变化が議論できるようになった。過去十数年間で、時間軸に制約を与える地上長期観測と空間分解能が高い地球磁場観測衛星のデータ融合が進み、地磁気のグローバルモデルが飛躍的に発展した。これらのモデルでは、主磁場 (コア起源の地球磁場) の時空間分解能の大幅向上に加え、主磁場以外の磁場情報 (地殻磁場、磁気圏ソースなど) を組み入れることに成功した。今後は外核での流体運動を拘束条件として取り入れたモデリングへと進展することが期待される。

一方、地磁気連続観測の疎域であった海域でも、連続観測が可能となりつつある。海半球プロジェクトによる西太平洋の海洋島での地磁気観測は長いものでは約 20 年間のデータの蓄積がある。また、陸上の定常地磁気観測に準ずる精度を海底観測においても実現するために、地磁気 3 成分、電場 2 成分に加え、絶対全磁力、ジャイロにより真北が計測できる観測ステーション (SFEMS: SeaFloor ElectroMagnetic Station) の運用もされていた。SFEMS 観測点は現在北西太平洋と西フィリピン海盆に 1 点ずつ展開され、すでに 10 年以上にわたる連続データの収集に成功した。

海底ケーブルによる超長基線電位差観測も、長いものでは 20 年以上継続されており、マントル深部の電気伝導度構造研究やコア起源の数年から数十年周期の磁場変動を検出する研究に用いられた。外核内部で閉じているため通常の磁場観測では困難とされてきたトロイダル成分起源の変動の検出を目指して、電場観測が継続されている。コアダイナミクス、マントルダイナミクスの課題を引き続き推進していくためには、より長期間変動場を記録することが重要である。磁場観測によって推定できるポロイダル成分に加えて、電場観測によりトロイダル成分についての情報が得られれば、外核の流れやコア・マントル境界部の磁場の状態をよりよく知ることができ、地球ダイナモの解明にとって重要な制約を与える情報となり得る。

これらの研究を前進させるためには更なるデータの蓄積が不可欠であり、国際的な協力関係を維持発展させ、連続データの収集に努めるとともに、下記に挙げる現状の観測体制の問題点について解決を図るべきである。

長周期の磁場変動を扱う研究においては、定期的な絶対観測により基線値が得られた良質な長期間のデータが必要不可欠である。日本の陸上地磁気定常観測においては、世界最高水準の気象庁の柿岡・女満別・鹿屋観測所の他に、国土地理院の鹿野山・水沢・江刺観測所、海上保安庁の八丈島観測所で比較的高頻度での絶対観測が行われてきた。しかしながら、2006 年の水沢・江刺の無人化、2009 年の八丈島観測所の閉鎖、2011 年の女満別・鹿屋観測所の無人化、2012 年鹿野山観測所の無人化、2016 年の国土地理院の MT 連続観測の停止、2019 年の江刺観測所の閉鎖と、観測体制の縮小が相次ぎ、将来にわたってこれまでと同様の良質なデータを提供していくことができるか予断を許さない状況にある。また、米国で USGS の全地磁気観測所の閉鎖が検討されるなど、国際的にも地磁気観測を取り巻く状況は厳しく、国際情勢により日本における地磁気観測維持も影響を受ける可能性が否めない。これまで以上に基盤的地磁気定常観測点の必要性を訴えることに加え、喫緊の課題として、絶対観測の自動化に向けた機器開発を進め、無人観測所においても高品質のデータ収録を可能とする体制の整備を進める必要がある。自動絶対観測システムの構築が実現されれば、これまで絶対観測がほとんど行われていなかった観測点にも導入することができ、長周期成

分の精度が担保された観測点網の拡大にも資することが期待される (4.1.1 (2) でも後述)。

海底における定常連続観測においては、SFEMS の運用が既に終了しているが、その技術開発の継続と運用再開については大いに検討が望まれる。従来の SFEM においては繰り返し観測とデータ回収による準定常的な運用に留まっている。最近5年で水中音響通信技術は大きく進歩したことを鑑み、定常観測への第一歩として、海上ブイとの音響通信および衛星通信によるデータの連続的な回収について検討を開始すべきである。また、将来的には、電力のその場供給を含めた、SFEMS のオンライン化に向けた技術開発を進めるべきである。

## (2) 過去の地磁気変動の解明とその利用、未来予測

19 世紀後半に近代的な地磁気観測が開始されて以降、地球磁場は様々な時間スケールで変動することが明らかになってきた。しかし、観測記録の得られていない過去に遡って地磁気変動を知るためには、古文書・考古資料・岩石・堆積物などから当時の地磁気情報を読み取る必要がある。変動の時間スケールに応じて、適切な試料・手法を選択することが重要である。

### (ア) 数十～数千年スケールの変動

地磁気永年変化のうち短時間 (数十～数千年) のものを知るための観測として、(a) 近代測器による観測 (現在から百数十年前まで)、(b) 方位磁針と伏角計による観測 (数百年前まで)、および (c) 古地磁気学的測定がある。(a) については、ヨーロッパではガウスによる Göttingen Magnetic Union の結成 (1834 年)、日本では第一回国際極年 (1883 年) を契機に開始された観測が、現在では INTERMAGNET の枠組に拡大し観測データが流通している。1900 年以降の国際標準地球磁場モデル IGRF が 5 年おきに作成されるなど、データの蓄積が進んでいる。一方で、日本では 2006-2012 年に柿岡を除く全ての観測所が相次いで遠隔観測化または廃止されるなど、観測体制の維持が懸案となっている (5.2.1.1 参照)。

(b) については、近年、中世における航海・隊商による観測データの調査が行われ、それを用いた全地球永年変化モデルが提案され標準モデルとして認知されている。加えて日本では伊能忠敬による測量データが見直され、19 世紀初頭の地磁気偏角マップが完成しつつある。(c) については、火山岩、湖底・海底堆積物、そして考古資料を対象とした研究がある。

考古資料 (考古遺物) を対象とする古地磁気学を考古地磁気学と呼ぶが、この学問は英国で戦前に創始され、日本でもその後すぐに開始された。当初は土器片を試料としたテリエ法分析により歴史時代の地磁気強度を調べる研究が中心であった。その後、土器を焼いた窯跡や住居等の竈跡から定方位試料を採取し、古地磁気方位を測定する研究にも発展した。両者は 1960～70 年代を通じて大量に測定され、80 年代の中盤にデータベースとして世界に公開されている。その後は継続して研究が進められ、長年データの蓄積が行なわれて来ており、世界的に見ても随一の量が存在する。国際誌での発信が十分でなく、広く認識されない状況であったが、2000 年代後半になって組織的に復興された。2010 年代半ばから、国際誌での発信を再開しつつある。ヨーロッパで AARCH 計画 (考古地磁気を応用した文化財保護, Archeomagnetic Applications for the Rescue of Cultural Heritage; 2002～2006) によって組織的な研究が推進され、GEOMAGIA50 データベースが整備され公開されたこと、全球的な地磁気永年変化モデルの作成に精度のよい考古地磁気データが欠かせないという認識が広まったこと、などが動機として挙げられる。

今後の研究目標は以下の 7 つに大別されよう。

- (i) 既報の考古地磁気研究の整理、および、データベース・アーカイブ化
- (ii) さらなる歴史時代の溶岩・湖底堆積物からの古地磁気データの統合による、地磁気永年変化の日本地域標準モデルの作成
- (iii) 考古学分野との連携による、新規発掘の際の考古地磁気学的測定の恒常化

- (iv) 考古地磁気強度測定技術および精度の向上
- (v) 年代未確定の試料に対する標準モデルを用いた年代推定
- (vi) 新規データに基づく、グローバル永年変化モデルの改良
- (vii) ダイナモシミュレーションによるデータ同化的モデルの作成

特に将来的発展が期待できる課題として、(vi) 考古地磁気データの精度の向上を掲げることができる。過去の地球物理量のうちで、観測に肉薄できるのは古地磁気観測のみである。そのなかでも、考古地磁気測定による過去の地磁気三成分の推定精度は特に高く、ここから、高精度古地磁気学への突破口を開くことが重要であろう。

### (イ) 数万～数百万年スケールの変動

海底堆積物試料を用いた研究の進展により、2010年頃までには、過去200万年間の地磁気双極子成分の時間変動が明らかになってきた。Sint-2000, PADM2M, PISO-1500などの、幾つかの古地磁気強度相対値(RPI)スタックが提案され、広く活用されている。2010年代以降は、とくに国際深海科学掘削計画(IODP: Integrated Ocean Drilling Program)の枠組みにおいて採取された数百メートルもの長さを超える海底掘削試料の分析が進展し、地点数は限られるものの過去約5000万年前までに遡るRPI変動を報告する成果も発表されている。今後は、さらに多数の地点から過去200万年を超えた期間についてのRPI変動の解明を進め、同期間のRPIスタックの確立を進めていく必要がある。

火山岩試料を用いた研究の進展により、古地磁気強度絶対値(API)データの着実な蓄積も進んでいる。コミュニティデータベースであるPINT database (<http://www.pintdb.org/>)は2021年11月に大幅に更新され、広く活用されている。APIデータとRPIスタックとを直接的に比較する試みが行われ始め、データ数は限られるが、過去200万年間の両者のデータ間に高い相関関係が確認され、独立の試料から推定されてきた双極子成分の変動の信頼性が実証されつつある。同様の検討を、さらに過去の期間のデータについても行い、双極子成分の変動の信頼性検証を進めていく必要がある。

最新の地磁気逆転(約77万年前)の詳細について全球モデルが提案されていたが、データの時空間分布に偏りがあるなど、改善の余地があった。チバニアン(千葉時代)の国際標準模式地となった千葉県市原市の海成堆積物の古地磁気研究が画期的に進展し、日本周辺の逆転時の詳細磁場変動データが拡充された。今後は、さらに過去の地磁気逆転の詳細変動データを蓄積するとともに、逆転時の全球モデルの構築、そして地磁気ダイナモにおける逆転メカニズム解明へと繋げていく必要がある。

数万～数百万年スケールの古地磁気永年変化については、過去10万年間については、GGF100kなどの全球変動モデルが提案され始めた。さらに過去の期間については、依然として、主に火山岩から得られる仮想地磁気極の角度分散の大きさの緯度依存を中心に研究されている。2010年代には南北アメリカ大陸西海岸での南北横断的な古地磁気研究が実施された。他の地域の緯度依存について、太平洋の西側などでも比較検証を行う必要があると考えられる。太平洋西岸は火山帯であり、多数の火山が分布している。日本での火山岩の古地磁気研究を進めると共に、過去のデータをコンパイルし、古地磁気永年変化の統計的性質の把握に務め、さらに隣国に広めていくことが望ましい。

近年、海底堆積物や氷床コアに含まれる、 $^{10}\text{Be}$ を始めとする宇宙線生成核種の変動を分析することで、相対古地磁気強度記録が得られることが分かってきた。これらの核種の生成率は、宇宙線の入射量は地磁気強度に支配されるからである。これまでは、相対古地磁気強度変動の推定は、主に海底堆積物の残留磁化を分析することにより行われてきた。宇宙線生成核種に基づく相対古地磁気強度変動の推定は、従来の方法とは独立に古地磁気強度の情報を与えるため、取り組みを進めていくことが重要である。相対古地磁気強度の信頼性を高める基礎的研究とあわせて統合的解釈を進めることが望ましい。地磁気逆転を含め、これら数万～数百万年スケールの地磁気変動の原因については、これまでいくつかの説が提案されているが、まだ学界のコンセンサスを得るまでには至っていない。特に、主に地磁気強度低



下時に地磁気エクスカッションが起こることが知られており、古地磁気層序にも活用されつつあるが、その発生メカニズムの解明は地磁気逆転とともに重要である。

### (ウ) 数千万～数十億年スケールの変動

地磁気は水惑星地球の大気と生命を維持するために重要な役割を果たしてきたと考えられ、その長期的変動を知ることが極めて重要である。生命誕生の条件となる大気組成や宇宙線強度は地磁気強度に影響される。地磁気変動は、大量絶滅やカンブリア爆発など生命進化における重要イベントの一因である可能性もある。また、地磁気変動は地球の核・マントル・表層のダイナミクスと密接に関連している。

過去 6 億年間の古地磁気データからは地磁気逆転頻度に特殊なモードがあることが示唆されている。一つは白亜紀のように地磁気逆転が数千万年間ほぼ停止するスーパークロンであり、もう一つは逆転頻度が百万年あたり 15 回以上に達するとされるジュラ紀やエディアカラ紀のようなハイパー逆転期である。スーパークロンは過去 5 億年間に 3 回確認されている。ダイナモ計算からは、スーパークロンのなふるまいは CMB の熱流量が下がることで達成できることと、平均古地磁気強度が高くなることが予想されている。今後、地殻・マントルを含めた数値シミュレーションの開発、プレート運動などに基づいた過去の CMB 熱流量の推定、スーパークロン時の古地磁気強度データの蓄積によって、地質記録と計算との比較を進め、スーパークロンの原因を追究することが期待される。また先カンブリア時代のスーパークロンの有無はよくわかっておらず、地球ダイナモの長期進化の手がかりとして、さらなる研究が必要である。

ハイパー逆転期については、正確な逆転頻度がわかっておらず、通常の逆転頻度から外れたモードとみなせるかについても議論が終わっていない。堆積岩をはじめとした古地磁気データの蓄積と、ダイナモ作用の理解に裏打ちされた統計的な分析が必要である。特に、エディアカラ紀の堆積岩から高い逆転頻度を示す複数の結果が得られている。この年代は、内核が成長を開始した時期とも関連付けて議論がされており、その真偽によっては地球史における重要性は高いため、古地磁気記録の信頼性を含めてさらなる検証が必要である。

熱史計算からは 10 億年程度以上前には固体内核が存在しなかったと考えられている。その時代の地球磁場の研究は地磁気成因論的に重要であるとともに、初期地球環境への影響も注目される。地磁気そのものの記録は少なくとも 34 億年前まで遡るが、純粋な熱対流で地磁気を生成し続けられるかは疑問視されている。内核生成以前の地球磁場の実態とその影響について、数値計算と古地磁気学、さらに超高層物理学等を含めた研究を進める必要がある。磁性鉱物を包有するジルコンなどの鉱物粒子は比較的変質に強いため、これらを用いた地球磁場強度の復元が行われており、40 億年を超えるデータも報告されているが、磁性鉱物が記録する磁場強度の信頼性評価手法の高度化も今後の課題である。

### (エ) 地球深部科学、地磁気ダイナモシミュレーション

地球磁場の時間変動や空間分布がどのように形成されたのか。これらは、外核内のダイナミクスのみでなく、マントルや内核との相互作用の結果をも反映していると考えられるため、その理解は地球の進化史や深部ダイナミクスの解明のためにも重要である。

項目 (ア) で述べたような、比較的短時間スケールの地磁気永年変化は、コア対流のターンオーバー時間と同程度かそれより短時間の流れの変動と関連があると考えられる。たとえば、双極子変動の周波数スペクトルとコア乱流の波数スペクトルとが相似の関係にあるという指摘もある。古地磁気・考古地磁気学、ダイナモシミュレーションおよび液体金属を用いたアナログ乱流実験などで相補的に研究を進めることで、回転磁気流体乱流の物理プロセスの解明が期待される。ダイナモシミュレーションで扱う場合、比較的積分時間が短くてすむ対象領域である利点を生かして、より高解像度、より現実的な物性パラメータの探索が望まれる。

数万年以上の長い時間スケールで維持されているような定常的空間構造や永年変化の空

間構造は、コア・マントル間の相互作用によって規定されてきたと考えられている（項目（イ）（ウ）でも前述）。相互作用のメカニズムは複数ありうるが、地球ダイナモを主に駆動してきたであろう外核対流により直接的に影響を与えるものとして、熱的相互作用が特によく調べられてきた。マントル対流のためにコアから逃がされる熱流束が水平一様でないことを考慮すると、観測的に知られる定常的空間構造や永年変化の空間分布などを再現できることが示されてきた。一方、内核形成開始後の外核では、内核の固化に伴い生じる浮力によって駆動される対流がダイナモの主な駆動源と考えられることから、内核・外核境界の方がより影響を与えてきたという指摘もある。この場合、内核・外核境界周辺の物理過程を知る必要がある。ここは金属鉄の相変化に伴う境界であり、その異方的成長、mushy か slurry であるか、その外核流体（対流）運動への影響など、多くは明らかでない。それらがダイナモに及ぼす影響を検討するためには、基礎的な物理モデルから検討・構築していくことが重要だろう。

内核の形成時期もそれほど確定的でない。過去には、古地磁気強度の増加の時期を内核形成開始と関連づけ解釈されたが、ダイナモを駆動するために利用できるエネルギーと実際に生成される（双極子）磁場強度との関係が自明でないことから、この説の当否は明確ではない。形成開始年代の見積もりは、主に熱史モデルに頼っている。近年、第一原理計算や高圧実験により液体鉄の熱伝導率の値が上方修正され、それを基に再計算された熱史モデルによって、内核の形成開始は十億年前前後と考えられるようになってきた。それより以前のダイナモ作用の駆動源については不明である。放射性元素の壊変による発熱、歳差運動、潮汐力など諸説が提案され、その流体力学やダイナモ作用が調べられているが、現在も混沌とした状況である。内核が形成される以前に獲得された古地磁気データを解釈していくためには、この点を注意深く検討する必要がある。

これらの問題は、外核のどこで流体運動・ダイナモ作用が起こっているか、という問題にも関わる。コア最上部における薄い安定成層の存在は長らく示唆されてきたが、近年、コア最上部における地震波低速度域を解釈するものとして再注目されている。その成層度が強い場合には、外核対流が深部域に押し込められたり、この薄層内での水平流体運動が深部ダイナモ作用によって生成された磁場をマスクしたり、などの影響が出ると考えられる。この安定成層の有無を電磁氣的または古地磁氣的に検討していくことも意義深いだろう。

定量的な議論に向けては、地球コア内のダイナミクス・ダイナモ作用をより精密に再現するための大規模計算技術をさらに発展させる必要がある。現在の外核のエクマン数と磁気プラントル数は、分子粘性などに基づいて、それぞれ  $10^{-15}$  および  $10^{-6}$  と程度と見積もられているのに対し、最新の対流駆動型ダイナモの数値計算でも、エクマン数  $10^{-7}$  程度、磁気プラントル数  $10^{-2}$  程度のモデルが計算性能の限界である。より低いエクマン数・磁気プラントル数の数値計算を実現するためには、より高解像度な数値計算を高速に行う必要があり、地球シミュレータや京といったスーパーコンピュータや GPU の利用が欠かせない。特に今後は 1 万個を優に超えるプロセッサによる超並列計算が主流になると見込まれることから、計算科学分野とも連携してそのようなアーキテクチャーにおいて高速に実行が出来る新しいアルゴリズム、コードの開発が必要である。

### （オ）年代学への応用

地磁気極性・強度変化の時系列データを利用する磁気層序は、地層の年代決定法の一つとして重要な地位を占めている。1960 年代に原型がほぼ完成した地磁気極性年代スケールは、地質学、古海洋学、人類学など広範な分野でも利用されている。現在、地球科学分野において広く利用されている地磁気極性年代スケールは Geologic Time Scale 2020 (Gradstein et al., 2020) である。

一方、1990 年代以降の深海底堆積物コアの研究から復元された相対古地磁気強度変動は、年代決定のための新たなツールとなった。2010 年頃までに、過去約 200 万年間について標準曲線が提案され、年代決定に利用されつつある。その適用は磁氣的に均質な堆積物に限ら

れるが、古地磁気強度変動の時間スケールは海洋酸素同位体変動の時間スケールよりも短いので、海洋堆積物の高精度年代決定に貢献する可能性がある。

今後は、磁気層序の高度化を目指してさまざまな地磁気イベントの詳細なデータを出していくことが重要であろう。逆転やエクスカージョンなど短期の地磁気イベントが固有の特徴で識別できれば、新たな磁気層序の道が開けることを示唆する。それは短期間しかカバーしていないことが多い陸成層の年代推定を可能にする。このためには、少なくとも百年スケールの特徴が検出できる高い解像度が要求される。海洋酸素同位体層序が適用でき、特に堆積速度が速い前弧海盆堆積物など（隆起により陸地化したものを含む）は有望な研究対象となる。また、これらの高精度化のためには、放射年代測定の精度の向上、堆積残留磁化獲得機構の解明、海洋酸素同位体による年代軸（+天文年代更正）の精度の向上が必要である。

高精度磁気層序の一例としては、日本の研究グループが研究を進めてきた千葉セクションの松山 - ブルン地磁気逆転記録が挙げられる。千葉セクションは、2017年6月に国際地質科学連合（International Union of Geological Sciences: IUGS）に更新世の前期 - 中期境界の国際標準模式地（Global Boundary Stratotype Section and Point: GSSP）の候補として申請された。そして、時間分解能の高い地磁気逆転変動・酸素同位体変動に加えて、U-Pb年代、<sup>10</sup>Be、微化石、花粉、地球化学的データを揃えており、世界の海洋堆積物や氷床コアデータとの対比が明確であることなどから、2020年1月に、IUGSによって中期更新世開始境界を定めるGSSPとして承認された。千葉セクションがGSSPに選定されたことにより、77.4万年前から12.9万年前までの地質時代が「チバニアン」と命名された。今後は、学術的研究のみならず、一般への普及や教育的な活用が期待できるが、さらに研究を進め、実績を積み重ねることが重要である。

並行して、これまで磁気層序が使えなかった岩相での磁気層序の適用についても検討を進める必要がある。例えば近年、成長速度の遅いマンガンクラストの極微細磁気層序に成功した研究例もある。SQUID（Superconducting Quantum Interference Device）顕微鏡を用いたサブミリスケールの磁化構造の解明により、地球上の物質のみならず、火星岩石表面に存在する可能性のある鉄マンガン酸化物から磁場記録を復元することで、火星における磁気層序が可能になり得る。

過去数千年間の古地磁気変動の復元は、地球磁場の振る舞い（性質）の解明につながるだけでなく、考古遺跡や火山噴出物の年代決定に有効である。日本における古地磁気永年変化の標準モデルを更新することで年代未知の試料に対して年代推定値を提供し、考古資料や火山層序の編年などに寄与していくことが望まれる。

#### （カ）地磁気変動と気候・環境の関係

地磁気逆転と気候変化の間に相関があるのではないかという仮説が1960年代に提案されてから、地磁気と気候との間の関連性を検討する研究は続いている。1970年代以降は地球軌道要素が氷期・間氷期変動と地磁気変動に影響を及ぼす可能性があると考えられ、10万年ごとの地磁気エクスカージョンの発生や、相対古地磁気強度に4万年・10万年のミランコビッチ周期が存在すること（Orbital forcing 仮説）が主張された。しかし、地磁気レコーダーとしての堆積物の岩相が気候変動に伴い変化し、それが相対古地磁気強度記録に混入しているとする批判がある。この問題が、Orbital forcing 仮説の検証を妨げている。銀河宇宙線量と下層雲量の間には正の相関が存在する可能性が指摘され（宇宙線-雲効果）、地磁気変動-気候・環境のリンクに関する議論は新たな展開を迎えた。<sup>10</sup>Be や <sup>14</sup>C など宇宙線生成核種生成率と地磁気強度は明確な逆相関を示すので、地磁気が宇宙線を制御し雲量も変え気候を変える可能性が指摘されている。

地磁気の気候・生物への影響に関する研究成果は、古地磁気分野においても報告されつつある。たとえば、完新世の地磁気双極子モーメントと鍾乳石の酸素同位体比データの相関から、低緯度域の降水量が宇宙線-雲効果の影響を受けている可能性が指摘された。大阪湾堆積物の花粉化石が示す古気候からは、海洋酸素同位体ステージ19の最高海面期に起こった寒

冷化が発見され、その寒冷化の期間が松山 - ブルン地磁気逆転（約 77 万年前）に伴う地磁気強度減少期（ $< 30\%$ ）に一致し、その間の銀河宇宙線量・雲量増加による負の放射強制力で寒冷化が説明できることが主張された。また、同様の寒冷化が少なくとも中低緯度の花粉化石データに見られると主張されている。

2021 年には、ニュージーランドのカウリ材を用いた年輪  $^{14}\text{C}$  記録と全球化学-気候モデリングから、ラシャン・エクスカッションにおける地磁気強度の極端な減衰とそれに伴う気候変動（アダムス・イベント）が、ネアンデルタール人やオーストラリア大型哺乳類の絶滅、現生人類の行動様式の変化をもたらした原因の一つであるとする仮説が提唱された。この仮説には考古学データの恣意的選択などの反論はあるが、地磁気強度低下による宇宙線量増加と気候寒冷化の関係が気候モデルによって示された意義は大きい。

これらの研究結果が報告されたのはごく最近のことであり、地磁気と気候・環境のリンクについてはさらなる検証を進める必要がある。たとえば、宇宙線-雲効果を検証するためには、松山 - ブルン地磁気逆転以外の地磁気強度が大幅に減衰するイベントについて、地磁気記録と同一試料を用いた花粉化石分析や有機地球化学分析による数十～数百年スケールでの古気候復元が有効であると考えられる。そのため、古気候復元に必要な花粉化石を含む沿岸堆積物は、重要な研究対象といえる。また、生物への影響を知る上では、高精度な  $^{14}\text{C}$  年代による地磁気エクスカッションと考古学・古生物学記録の精密対比が有効であろう。さらに、並行して、既報告の事象についても別地域・別試料の研究を通じて更なる検証を進めることも必要であろう。

地磁気-気候リンクに関わる物理メカニズムの解明には、宇宙天気グループと連携して研究を進めるべきであろう。たとえば、信頼できる古地磁気データに基づいて、地球磁場逆転時など磁場構造・磁場強度が異なる時期の古地球磁気圏（Paleomagnetosphere）を復元して、気候変動との関連性をシミュレーションによって解明する試みが期待される。生命進化ならびに大気の大気散逸にも大きく影響を与えたであろう、地球磁場が発生し始めた頃の様子が解明できれば、科学的インパクトも非常に大きい。

また、日本学術会議『未来の学術振興構想（2023 年版）』には本学会から提案した学術の中長期計画「地球電磁気学と考古学・人類学の連携による第四紀研究の新たなパラダイム構築」が採用された。今後、SGEPSS 内部のみならず、生命科学、人文科学分野の研究者と連携し、新たな学際領域の展開を図っていく。

### （3）未来予測

近代的な地磁気観測の開始以来、地磁気双極子モーメントの大きさはほぼ単調に減少を続け、最近百年間では約 6%の減少が確認されている。この減少が何を意味しているのかは、地磁気の長期予測の点で興味ある問題である。過去 100 万年程度の古地磁気データに基づく地磁気双極子成分の統計的性質によると、その平均が現在の双極子モーメント（ $\sim 8 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ ）の半分程度で、分散がその 1/4 程度であることが示唆されつつある。すなわち、現在の地磁気は 100 万年スケールで見るとかなり強い状態にあると言え、現在見られる双極子モーメントの減少は、平均的な状態に回帰していくフェーズにあると見ることもできるかもしれない。現在の地球ダイナモの状態が統計的にどの程度特殊であるかという観点は、古地磁気研究の一つの課題になるであろう。

長期予測に加え、IGRF 等の地球主磁場変動予測モデルの精度向上による精密な短期的な予測も、航空業界など産業界から期待されている。また、短期予測モデルは、火山活動起源の地磁気変動のより精密な抽出に利用することもできる。より詳細な地磁気の短期予測を行うためには、地球ダイナモモデルの精度の向上と、コアの流れの経年変動（振動）の解明が不可欠である。

機器観測に基づく詳細な地磁気データの時系列の長さが、コア対流の時間スケール（千年程度）に比べて短いという本質的な困難はある。しかし、長期予測、短期予測共に、データ

同化アルゴリズムを用いたより客観的基準に基づくモデル精度の向上が今後重要になると考えられる。

## 2.5.2 月・惑星内部に関する電磁気学的研究

惑星や衛星の内部構造およびダイナミクスを理解することは、固体天体の成因、進化を解明するための基礎情報を提供する。主磁場成因（ダイナモ現象）の理解を深めるために、比較研究として他の惑星・衛星における磁場の測定・磁気異常の推定が重要となる。地球のように固有磁場を有する水星や、ガニメデなどに対しては、磁場の空間分布および時間変動を明らかにすると同時に、内部構造の理解が必要である。本質的にダイナモ現象を理解するためには、固体惑星にとどまらず、木星・土星（ガス惑星）・天王星・海王星（氷惑星）の固有磁場分布および時間変動を知る必要もある。他方、現在は固有磁場を持たない月・火星についても、それぞれの形成直後にはダイナモ作用によって生じていた固有磁場があったと考えられている。月・火星の表面付近で観測される磁気異常の起源がその固有磁場であるならば、磁気異常の分布・年代・起源を明らかにすることがそれらの進化の解明につながる。加えて、惑星の初期進化段階、生命の生存可能性にかかわる磁気環境について理解を進めるためには、地球における古地磁気研究のみならず、古月・惑星磁場研究を推進する必要がある。

### （1）月・惑星・小惑星の磁気記録

Lunar Prospector や「かぐや」によって全球的な月磁気異常マップが作成され、月磁場の概要が明らかになってきた。その成果は多岐に渡って利用されているが、磁気異常の分布をより正確に記述する努力は怠ってはならない。たとえば、縁の海のスワール帯など、観測高度が十分に低くない領域も存在するため、現有のデータの処理方法を工夫・開発して最大限に細かいマッピングを行う必要がある。得られた磁気異常について表現技法の高度化を進め、月研究コミュニティの需要に応える必要がある。また、月の磁気異常を担う主要磁性鉱物であるカマサイトなどに対する岩石磁気学的な理解は、地球における主要磁性鉱物であるマグネタイト等と比べて進んでいない。将来の月探査では、月面着陸やサンプルリターンが計画されている。したがって、月サンプルによる古月磁気強度や古月磁気方位研究を睨み、現在のうちから月の磁性鉱物に対する研究を進め、知見を得ておく必要がある。さらには、今後の月観測計画に立案から参画する体制を整えることが望まれる。たとえば、SGEPSS内の異分野融合として、月磁気異常域の地下構造をレーダーサウンダー技術で推定する研究への取り組みを始めている。

惑星については、これまでに Mars Global Surveyor によって全球的な火星磁気異常マップが作成されている。また、Mariner10・MESSENGER のフライバイ観測によって現在の水星には主磁場が存在することが明らかとなっている。さらに、MESSENGERによる観測で水星にも磁気異常が存在することが確認された。今後、国際水星探査計画 BepiColombo の Mercury Planetary Orbiter および Mercury Magnetospheric Orbiter 「みお」による全球的な観測から水星の磁場、磁気異常の詳細が明らかになり、水星コアの状態やダイナモ作用、熱史に関する理解が進むことが期待される。小惑星については、コンドライトなどの始原的隕石の磁気分析から、太陽系形成初期における、原始惑星系円盤内の磁場について時間・空間分布の復元研究が行われている。はやぶさ2により、小惑星リュウグウから未変成・未風化の始原的岩石の微粒子が持ち帰られ、今後は OSIRIS-Rex により小惑星ベンヌから始原的岩石が持ち帰られる予定である。このような計画に対して、SGEPSS の固体物質のグループとして積極的に参画していく必要がある。高空間分解能の磁気顕微鏡として、東北大学に磁気インピーダンス (MI) 磁気顕微鏡が現有・活用されているが、求められるマイクロメートルサイズの古地磁気学的研究には分解能が足りない。小惑星のダイナモ磁場の有無や、宇宙風化における磁場の影響との関係に決着を付けるために、高空間分解能の国産の走査型 SQUID 磁気顕微鏡の開発をさらに進め、積極的に利用することが望まれる。さらに、ナノスケールの

磁場マッピングを可能とする技術として注目されている NV ダイヤモンド磁気顕微鏡が世界的に開発が進んでいるが、これら新技術の積極的導入による先端的研究の推進も重要である。惑星の多様性を考慮したダイナモシミュレーションを実施するとともに、このような室内実験を推進し、探査機や天文観測により太陽系惑星、系外惑星について得られる磁気シグナルと合わせることで、宇宙における惑星固有磁場の役割を解明できると期待される。

現在までに地球、月、および火星の磁気異常データが得られ、磁気異常ソースは表面物質よりも桁違いの磁化強度を持つことが分かってきた。これらの磁気異常の成因を明らかにして各惑星・衛星の磁場および内部構造・表層環境の進化を明らかにすること、加えて、それらを比較し惑星形成・進化モデルへの制約を与えることが今後の大きな目標となる。しかしながら、これら磁気異常の成因はほとんど分かっていない。地球表層の岩石に対応する実験的研究が行われているが、今後は多様な惑星環境に対応する実験を行い、上記の議論が可能となるデータを得て行く必要がある。惑星・月の表層では地球とは異なる磁性鉱物が何らかの表層変動プロセスを経て残留磁化を獲得している可能性がある。例えば、鉄ニッケル合金の磁気的性質や衝突現象に伴う残留磁化の性質に関する基礎研究を行い、知見を蓄積する必要がある。また今後は、地球型岩石惑星・衛星の 46 億年にわたる古地磁気・岩石磁気学として、表面岩石の分析のみならず内部岩石の磁性鉱物について確度の高い推定がいずれ必須になってくるだろう。これらの研究は、各天体の内部構造進化のみならず、地殻生成にかかわる火成活動（活動度、熱史、水含有量、酸素分圧値等）、磁気異常・宇宙プラズマ間の相互作用、固有磁場と大気進化など、他分野へのインパクトも大きい。

## （2）惑星の古磁場・ダイナモ

衛星観測（Mars Global Surveyor）により火星の磁気異常の存在が明らかになり、過去には火星においても磁場が生成されていたことが示唆されるようになった。惑星ダイナモの観点から、火星ダイナモの停止条件や、半球のみに磁気異常が存在することをダイナモによって証明しようとする試みがなされている。水星に関しては MESSENGER 衛星によって主磁場の存在が確認され、現在においてもコアのダイナモによる磁場生成が起きていることが明らかに成った。水星の磁気双極子は中心から大きくずれているなど、地球磁場と大きく異なる特徴を持つことも分かった。高圧実験や第一原理計算に基づく内部構造モデルをダイナモの数値計算に組み込むことによって、水星磁場の特徴を再現する試みがなされており、近年成果をあげている。また、MHD ダイナモ数値計算に用いるパラメータと出現する磁場の強さ等に関係付けたスケーリング則を求め、磁場から水星を含む惑星内部条件を推定する試みがされている。

ダイナモの挙動を理解するためには、これまで以上に広いパラメータ領域において数値計算を行い、基礎的な物理を理解することが現在でも必要である。また、これまで数値計算に用いられたパラメータは、金属の流体核が存在する場合のパラメータとは数桁以上の開きがあるため、求められた数値ダイナモ解が惑星磁場を再現し得るかは自明ではなく、今後の研究で明らかにする必要がある。また、非線形性が強い系であるため、同じパラメータを用いても複数の状態が出現する可能性がある。実際に、強磁場ダイナモの解が低レイリー数領域でも存在するという亜臨界（サブクリティカル）ダイナモ解が理論と数値計算から示されており、火星における磁場生成の急激な停止との関係が示唆されている。このため、ダイナモの初期条件や履歴への依存性についても理解する必要がある。

最近は大規模計算を可能とする計算機技術の発達により MHD ダイナモ計算が数多くなされ、重要な解が求められているが、ダイナモの統一的な理解には数値ダイナモは複雑すぎる可能性がある。MHD ダイナモの挙動を再現し得る単純なモデルを構築することからダイナモが生成する磁場を支配する要因を理解することも必要である。

## （3）惑星・衛星内部構造

月や固体惑星における電磁探査により推定されるグローバルな惑星内部電気伝導度構造



は、天体の起源と進化を議論する要素となる。天体外部を起源とする磁場変動と、天体内部に誘導された電流による電磁場変動の関係により、電気伝導度構造が推定できる。月が地球磁気圏尾部に位置する時の磁場や、水星周辺の1および1/2水星年の磁場変動から、それぞれのコアサイズが推定された。コアのサイズの電磁氣的推定は、重力や慣性モーメントから推定されるものとは独立の情報を与えるため、機会があるごとに積極的に取り組むべき課題である。また、数時間~数十時間の磁場変動から、天体のマントル電気伝導度構造に関する情報が得られる。2026年に水星に到着するBepiColomboによる観測による新たな成果が期待される。

月のように現在は固有磁場を有しない固体天体の場合、磁場変動の起源を内外分離するためには、周回衛星と着陸機を用いた磁場同時観測による探査を実施することが望ましい。さらに、これまでは実施されたことのない月面における電場計測の実現、ペネトレータ技術を用いた月面での多点磁場計測、人工信号を用いたアクティブ探査などの挑戦的課題・技術開発も継続的に進めていくことが望まれる。将来的には月面基地の建設とそれに関連する水資源の利用を念頭に、極域や縦穴の探査等が検討されている。こうした比較的浅部の構造探査に磁場探査を利用できないか、有人・無人の場合での実行可能性を追求していくことが目下の課題として挙げられよう。

## 2.6 電磁場観測による地球内部の状態や変動現象の理解

### 2.6.1 地下構造の解明

地殻・マントル・コアにまたがる地球内部の構造のうち、直接観察できる場所は表面付近のごくわずかの領域に限られる。宇宙・惑星探査と比較しても地球深部は、人類の到達困難な領域であり理解を目指すフロンティア的研究の対象である。電磁気学的観測・実験・モデリングに基づく地球内部の電気伝導度（比抵抗）構造の研究は、現状において固体地球の実体解明を可能とする数少ない研究手法の一つとして認識されつつあり、地球科学研究の重要な分野の一つである。電磁気学的探査による構造の解明が可能なスケールは、マントルダイナミクスの解明を目的とした 1000 km オーダーから表層の活断層や地下水分布を対象とした 10 m オーダーまで、多岐にわたっている。

電気伝導度構造等を基に地球内部のダイナミクスを議論する際には、他の地球科学分野の成果を交えることが必要不可欠で、本質的に学際的研究が必要である。また、地表付近で得られる観測データから間接的に内部構造の推定を行う性質上、他分野と連携・包括した共同研究の推進が極めて重要となる。SGEPSS 内においても、太陽・地球系の分野との相互交流を積極的に推進すべきである。例えば機器開発においては、いずれも小型・低消費電力・高精度な電磁場センサを必要としている。また、様々な時間スケールにおける高層での電流分布の研究は、地球内部電気伝導度構造推定に必要な外部磁場の空間分布に関する情報を与える。外部磁場空間分布を正確に把握することにより、より確からしい内部構造を推定することが可能となる。

#### (1) 地震・火山現象の発生場としての地下構造の解明

地震・火山活動に関する研究は、その実態を把握することが自然災害軽減に資するという面において社会的な要請も強く、更なる進展が望まれる。特に発生場の構造の把握は、地震・火山現象の発生時の物理や活動の推移を予測するための基礎情報として必要不可欠である。

#### (ア) 地震の発生場

(研究の目的と意義)

地震（断層運動）の発生やその過程は岩石の弾性的及び非弾性的性質に依存する。すなわち、地殻-マントルの岩石分布（地質構造）・間隙流体分布・温度構造等によって断層運動の起こりうる範囲や断層運動の速度、岩石歪みのたまりやすさが大きく異なる。そのため、地震発生の理解のためには震源断層周辺域を含む地震発生域の構造を把握することが必須となっている。マグネトテルリック法 (Magnetotelluric Method; 以下 MT 法) をはじめとする電磁気学的手法による構造探査は、バルクの電気伝導度分布の推定を可能とする。電気伝導度分布は、流体等の間隙良導物質や温度に高感度である性質を有するため、地震発生場の理解に資する情報をもたらすと考えられている。

(長期目標)

地震発生帯とその周辺域を含む領域における 3 次元電気伝導度構造においては、日進月歩で高度化する他分野からの構造情報に呼応して分解能を向上させることや、定量的な解釈に影響する推定精度を向上させることが目標となる。また、地震発生域における電気伝導度の時間変動を捉えることにより、地震発生場のモニタリングに資することが挙げられる。

(現状での到達点)

国内外の地震発生帯において MT 法観測及び電気伝導度解明の研究が精力的に進められ、1980 年代以降は 2 次元構造を仮定した電気伝導度構造が、2000 年代以降はインバージョン手法の進展により 3 次元構造解析による電気伝導度構造が得られるようになった。近年は、測定器や観測手法の洗練化や簡素化により稠密かつ面的な観測が可能となり、高解像度な 3 次元電気伝導度イメージングの研究例が増えている。また、これまで内陸の地震発生帯を対象にした研究が主であったが、海底における観測・解析手法の進展とともに海溝型地震など

を対象とした海域の研究例も増えている。これにより、様々な地震発生場における電気伝導度構造の解明が進んだ。例えば、起震断層の固着域と低電気伝導度領域との対応関係が見られることや、震源核形成場の下部に高電気伝導度領域が検出されるなどの特徴的構造が複数地域で明らかにされてきた。その一方で、適用するインバージョン手法やインバージョン時のパラメータの設定によって異なる構造が得られることや、自然ソースのみに頼る観測手法では人工ノイズ源の多い都市部の断層域などで電気伝導度構造の解明が困難であることなどが課題として挙げられる。

(次のステップ)

上記に述べた研究の方向性をさらに進展させ、他分野の成果と比較することによって地震発生に関わる物性値が定量的に推定できるよう、精緻な構造推定を目指すべきである。同時に、電気伝導度のリアルタイム・モニタリングを可能にするために、コントロールソースによる探査手法の適用などによる高精度な測定やより高度な解析技術が必要となる(2.6.2節を参照)。また、災害軽減に資するデータの提供という社会的要求に応えるためには、都市部近傍の地震発生ポテンシャルの評価は必要不可欠であり、地下構造の解明はポテンシャル評価の基礎情報となる。しかし、都市部近傍では人間活動に起因する電磁ノイズが大きいため電磁気観測に困難を伴う。そのため、コントロールソースによる探査手法の高度化やノイズを積極的に信号源として利用する手法の確立など、革新的な技術開発が期待される。

## (イ) 火山活動の発生場

(研究の目的と意義)

電気伝導度構造から、水蒸気噴火を発生させる熱水系、マグマ噴火を引き起こすマグマ溜まりとマグマ上昇通路の位置や形状を3次元的に推定し、火山活動の理解、活動予測、最大噴火規模予測の基礎情報として活用する。電気伝導度構造の時間変化から熱水やマグマの移動を推定することで火山活動予測に寄与する。電気伝導度構造を推定するための観測点を火山活動による電磁場シグナル観測点としても利用し、火山活動の新たな分析手法を開発する。

(長期目標)

火山浅部については、熱水・ガスだまりの高解像度(200 m程度)での位置・形状把握と、内部温度・圧力状態の定量化を進める。火山深部については、噴出物量が10 km<sup>3</sup>以上(火山爆発指数6以上)の噴火を引き起こす可能性があるマグマ溜まりの検出と、マグマ上昇経路の実態把握を目標とする。これらの推進により水蒸気噴火・マグマ噴火のポテンシャル評価に寄与する。火山地下の3次元電気伝導度構造の準リアルタイムモニタリング推定システムを開発する。測定器のさらなる小型化、低消費電力化、低価格化により、電磁場と地震波形の同時観測を可能とする。

(現状での到達点)

自然の電磁場を測定するMT法においては、測定器や観測手法の洗練化により稠密かつ面的な観測が可能となり、信頼性が高い電気伝導度3次元構造がルーチン的に推定されるようになった。深さ1km程度までの火山浅部においては、低浸透率の熱水変質層と考えられる数Ωm以下の高電気伝導度層の3次元形状が把握できるようになったことが重要である。これによって熱水変質層の下部で高圧な流体が蓄積されている領域が推定され、地震活動、地盤変動、水蒸気噴火との関係が議論されるようになった。しかし、浅部の高電気伝導度層が必ず低浸透率であるかは不確かである。より深部のマグマ供給系については、深さ10km程度から地表に向かって斜め鉛直に伸びる直径数km程度の良導体が多く火山で検出されるようになった。これまではこうした上部地殻の良導体は流体の通路として解釈されてきたが、電気伝導度構造の信頼性や解像度が向上したことにより、地震波低速度領域と良導体の場所や形状が一致しないことや、地表の火口や地熱地帯が良導体の中心部ではなく端部に位置していることが報告されるようになった。これらのことから、この良導体が全体として流体の上昇経路となっているか再考する必要がでてきた。電気伝導度の時間変化について

ては、人工電流源を用いて深さ数 100m 程度までの浅部構造の時間変化が報告されるようになった。

(次のステップ)

火山活動を解釈する上で、3次元電気伝導度構造の有用性は火山の研究コミュニティに広く認められるようになった。火山活動と地下構造との対応関係に着目した研究事例を増やすため、さらに多くの火山で電気伝導度探査を推進していくべきであるが、現状では依然として観測に多大な労力を要し、1つの火山の電気伝導構造推定には数年間がかかっている。そのため、例えば火山活動が活発化した際に、機動的観測が行われ時間をおかずに電気伝導構造が報告され活動解釈に役立てられることは稀である。また、空間解像度もマンパワーの制約から限界を迎えつつある。測定機の小型化、低消費電力化、低価格化を推進することにより観測労力の軽減をはかるべきである。特に磁場観測機材においては、新たなセンサーを用いるなどブレイクスルーが望まれる。構造解釈の不確実性解消のためには、地震学的構造との関係を高信頼度で得ることが不可欠であるが、世界的にみてもこれが成功している火山は極めて少ない。これまで電気伝導構造推定のための観測と地震学的構造推定のための観測は別の研究グループによってなされており、必ずしも両者の比較を念頭においたものでなかったが、観測機材の小型化が進めば、同じ研究グループが地下構造の真の解釈を目指して電磁場と地震波の観測を同時に行うことが可能になる。これは観測用地の許認可等の実用的な手続きの観点からも有利である。地震・電磁気両者の観測および解析のいずれにも通じた人材の育成も重要な課題である。

電気伝導度の時間変化については、自動解析およびモデリング手法の開発を引き続き推進する。他方、時間変化検出のための観測がなされている火山は少数にとどまっており、そこから得られる情報も不確実性が高いため、現状では火山活動の評価において重要視されているとは言い難い。地震の観測網が地震学的構造推定のためではなく地震波の観測を目的に発展してきたように、電磁気においても電気伝導度構造推定だけの目的ではなく、火山活動に伴う電磁場変動の観測を念頭に観測を行うことが構造の時間変化研究の進展になるであろう。近年報告された水蒸気噴火や微動による電場変動などを動機として観測網を展開することが有用であるが、ここでもやはり小型・低消費電力・通信機能を備えた測定機器の開発、地震や地殻変動との同時観測が必要である。

### **(ウ) 地震・火山の深部構造と沈み込み帯を包括する構造の解明**

(概要・研究目的・意義)

この研究領域は、沈み込むプレート本体と上盤側の上部マントル及び地殻（以下、沈み込み帯という）の電気伝導度構造を研究対象としている。沈み込み帯は地球上で地震発生と火山生成が集中する変動帯で、沈み込み帯の理解には地球物理学的構造が重要な役割を担う。電気伝導度構造は、下部地殻程度より深部の分解能は地震波速度構造より劣るものの、地震波速度構造とは独立で地震波速度構造から得られない情報を抽出する。特に、地球物質の高温高压状態の電気伝導度は、温度、組成、状態等に依存し、弾性波速度より相対的にマグマや塩水等の流体の存在に強く影響を受ける特徴がある。沈み込み帯における地震および多様なすべり現象の発生には、流体の移動による岩石の摩擦強度の低下が重要な素因・誘因となる。また、沈み込み帯のマグマ生成では、沈み込むスラブから絞り出された水が岩石の融点を下げることが素因・誘因となる。そのため、沈み込み帯においては流体の存在と輸送を地下構造探査で捉えることが最重要課題の一つであり、そこでは電気伝導度構造研究の果たす役割が大きい。

(最終目標)

一般的な地震・火山の深部構造と沈み込み帯を包括する構造研究の究極の目標は、沈み込み帯の温度、組成（岩石・鉱物組成と分布）、マグマ・流体分布をマルチスケールで明らかにし、海溝から島弧を経て背弧海盆に至る物質・熱輸送過程とプレート沈み込みに伴う一連のプロセス（脱水・溶融・メルトの上昇）を統一的に理解するとともに、多様なプレート間

のすべり現象、そして火山と内陸地震の発生要因を解明することである。そのためには、地球物理学的構造と岩石・鉱物・地質学的情報さらに地球化学情報を統合した包括的なモデル化や、異なる物理量の同時インバージョンなどが求められる。本研究領域の最終目標は、その統合モデルに資するためのより高分解能、マルチスケールの電気伝導度構造の解明に尽きる。

(近年の進展)

電気伝導度構造の 3 次元インバージョンが実用的になってきたことと計算機資源の拡充に伴って、多点の陸域データを用いた島弧深部の沈み込み帯の 3 次元モデルの高解像度化が、この 5 年間でさらに進展した。一部の地域では、地震波速度構造ではイメージされていない、沈み込むプレート境界から火山帯直下の下部地殻に至るマグマ・流体の上昇を想像させる電気伝導度構造も推定され始めている。米国では、USArray 計画 (米国のほぼ全土を覆う多点観測) のもとで地球電磁気部門 EMSCope が、沈み込み帯の上盤側のイメージングを精力的に行っており、モホ面付近に等電気伝導度面の凹凸があることや、ウェッジマントル内のマグマや流体のより詳細な動態を示唆する構造が明らかになりつつある。さらに、地震・火山の発生場の深部構造を含む沈み込み帯の比較を目的とした国際共同研究にも進展がみられ、特にニュージーランドやトルコと日本の間で沈み込み帯の地球物理総合観測が進展している。

(次のステップ)

ニュージーランドでは沈み込み角度が低角であることから前弧側プレート境界について詳細な電気伝導度構造が明らかになりつつあり、流体の分布とプレート間すべりについて重要な知見が得られている。一方で、世界的には前弧側上盤の地殻・マントルの構造は、海陸データの統合解析が必要になるため未解明の領域が多いままである。日本でも、前弧域と背弧域の大部分が海陸境界および海域に当たる。このため、地震・火山の発生場の深部構造を含む沈み込み帯の 3 次元構造の解明には、海域での観測の拡充と陸域データとの統合解析が不可欠である。しかし、海陸データの統合解析には困難が伴うため未だ大きく進展しておらず、課題として残ったままである。障害となっている統合解析時の技術的な困難を克服する対策が急務である。また、浅海・湖底を対象とした電磁気観測装置については、費用と利便性のハードルを下げるための改良が引き続き必要であり、実地観測による一層の知見の集約も急務である。

## (2) マントル構造の解明

(研究の目的と意義)

地球は、形成時に蓄えた熱エネルギーをマントルの対流運動により宇宙空間に放出して冷却しつつ、現在の状態に進化してきた。マントル対流は、固体地球表面ではプレート (リソスフェア) の水平運動として現われ、地震や火山活動を引き起こす要因ともなっている (プレートテクトニクス)。プレートテクトニクスは、太陽系の他の岩石惑星には見られない地球に特有の現象であり、液体の水の安定的存在や生命の誕生・進化とも深く関連していると考えられている。惑星の進化過程とその中での地球の特有性の理解、および地震や火山現象の根源的理解のためには、地球マントルのダイナミクスを知ることが不可欠であり、マントル構造の解明はマントルダイナミクス研究の最も基本的なアプローチである。

電磁場観測によってマントルの電気伝導度構造を推定することができるが、電気伝導度は、温度、化学組成 (とくに水や二酸化炭素などの揮発性成分)、部分熔融量等に依存する。これらのパラメータはマントルのレオロジーを左右するが、直接観測することが難しい。したがって電気伝導度構造から間接的に推量することが、有望な手段の一つである。

(長期 (最終) 目標)

マントルの電気伝導度構造の解明は、究極的には、原理的に達成可能な最小分解能であらゆる地域・海域、深さの 3 次元的電気伝導度分布が推定され、かつその推定精度が与えられていることで、達成されたと言えるだろう。現実的には、固体地球表面に現われた代表的な

テクトニックセッティング（各種プレート境界、断裂帯、大陸縫合帯、ホットスポット、巨大火成岩石区、平坦海盆、安定陸塊など）下の電気伝導度構造を実観測の制約の範囲で明らかにし、マンツルのダイナミクスとの関係になんらかの法則・一般性を拘束することが、目標となる。

（現時点での到達点）

上部マンツルの電気伝導度構造研究は、様々な規模のMT観測データに基づき行われている。近年の潮流としては、大陸規模の研究領域を数十から100 km程度の間隔で面的に網羅するような大規模なMT観測により、高解像度の3次元電気伝導度構造を描像しようとする取組が推進されている。北米大陸、中国、オーストラリアなどでの研究から、安定陸塊下のレオロジーや大陸縫合帯に沿った構造変化などに関する知見が深まりつつある。中央海嶺系（発散型プレート境界）や沈み込み帯（収束型プレート境界）については、2次元構造解析が主流ではあるが観測例は比較的豊富で、中央海嶺下の減圧融解過程、島弧・背弧マンツルへの水の供給と部分熔融過程に対する電気伝導度構造からの支持はゆるぎないものとなった。非テクトニックな平坦海盆における観測の蓄積からは、海洋リソスフェア・アセノスフェアの熱構造進化が準静的な冷却のみでは説明できない複雑性が見いだされた。海域のホットスポット、巨大火成岩石区などを対象とする研究では、面的アレイ観測・3次元構造解析が実施できるだけの観測体制・解析技術が整い、予察的成果が得られている。

マンツル遷移層・下部マンツルの電気伝導度構造については、世界各地の地磁気観測所や海底ケーブルによる電位差観測などの定常的長期間の観測データ、人工衛星による磁場観測データを用いて全球規模で描像しようとする研究が複数の研究グループによって進められている。現状では地上観測点が比較的密な東アジア、ヨーロッパ地域のマンツル遷移層についてはグループ間で調和的な電気伝導度構造モデルが得られている。

上部マンツルおよびマンツル遷移層を構成する鉱物や溶融体の電気伝導度については、室内実験により比較的よく制約できている。実験研究の成果を用いてMT探査から求めた電気伝導度構造を温度、部分熔融量、含水量などを定量的に推定する試みが、多くの研究でなされている。

（次のステップ）

上部マンツルの電気伝導度研究の対象となるべきテクトニックセッティングでは、更なる観測例の蓄積によって各テクトニックセッティングの一般的な特徴と観測地域ごとの多様性を定量的に評価することが求められる。中央海嶺系では、とくに低速拡大海嶺において3次元構造解析を可能とする面的アレイ観測が望まれる。トランスフォーム断層や小規模の海嶺セグメント不連続とマンツル構造の関係は解明すべき課題である。海底拡大速度と海嶺下部分熔融過程との間関係を定量的に評価することが、重要な目標の一つとなる。沈み込み帯については、沈み込む海洋プレートの年齢や沈み込む速度、付加型・浸食型沈み込みとマンツルウェッジへの水の供給がいかに関連しているか、沈み込み手前でのプレートの折れ曲がりに伴うプレート上面への水の注入過程やプレート下面で起こる交代作用などはより詳細かつ定量的に議論されるべきである。

ホットスポットについては、マンツル上昇流を想起させる高電気伝導度異常が描像された例があるものの、上昇流の太さや根の深さに対する詳細な感度検定は将来的な課題である。電気伝導度異方性を検出できれば、上昇流がプレート下面に達した後の流れなどの議論にも貢献できる可能性がある。

海洋リソスフェア・アセノスフェアの熱構造進化について理解をより深めるためには、様々な海洋底年代の平坦海盆下マンツル構造を網羅する必要がある。特に従来の観測で十分カバーされていない3~7千万年の海底で観測データが蓄積されることが望まれる。未踏のテクトニックセッティング例としては、断裂帯、ホットスポット火山列が挙げられる。断裂帯は、海洋プレートへの水の浸透口としての役割を果たす可能性が指摘されている。マンツル対流に伴う水の循環あるいは地球表層と内部の水の収支の議論においても、断裂帯の電気伝導度構造が考慮されるべきである。ホットスポット海山列の観測からは、マンツル深



部からの上昇流によるリソスフェアの熱的・化学的改変過程の研究が期待できる。またプレート（上昇流）ープレート（リソスフェア）間の相互作用からリソスフェア・アセノスフェアのレオロジーに独立の制約を与えられる可能性がある。

マントル遷移層・下部マントル構造の研究については、地上観測データと人工衛星データを組み合わせた解析手法、複雑な空間形状をもつ磁場ソースを組み込んだ解析手法等に更なる高度化が望まれる。海洋島での定常磁場観測データや海底データを提供するなど、データ分布の不均衡を是正する貢献も重要である。複数の研究グループによりモデルが更新されて比較研究が進むことで、尤もらしい構造が明らかになっていくことが期待される。

### （3）構造推定に関する研究に共通する課題

（研究の目的と意義）

地殻・マントルの構造推定の目的と意義は、a) 推定された構造から、探査地域あるいは探査地域を含む類似の環境下における地球科学的性質の解明、さらに対象によっては a) に基づいた知見の b) 防災・減災政策への情報提供、あるいは c) 資源・エネルギー開発、環境保全等への応用、が挙げられる。構造推定研究自身は対象に関わらず、1) データ取得、2) データ処理、3) 構造解析、4) 構造解釈、5) 成果公開、のステップを踏むことになる。

（長期目標）

上述の5つのステップにおいて、それぞれ高度化が常に追求されている。究極の目標は、以下のように整理できるだろう。

- 1) データ取得：所期の目的達成のために必要かつ十分な質・量のデータを、少ない労力・経費で取得できるようになること。
- 2) データ処理：研究対象に併せて観測されたデータから信号とノイズを適切かつ効率的に判別、分離し、構造推定に直接用いるパラメータ（電磁場間の応答関数など）を精度良く見積もること。
- 3) 構造解析：データを説明する構造モデルの非一意性に鑑み、広範なモデルスペースを探索して構造モデルを推定し、かつ、推定した構造モデルの不確定性に関しても定量的な見積りを与えること。
- 4) 構造解釈：地下構造についての研究の目的と意義を達成するために必要な解釈を定量的に行えること。
- 5) 成果公開：論文・観測データ・構造モデルをアーカイブ化、公開して観測・研究成果を社会に還元すること。データ・構造モデルの2次利用による研究の更なる進展に寄与するとともに、研究成果の再現性を確保してオープンサイエンスを推進すること。

（現状での到達点）

- 1) データ取得：既存の技術を拡張した、より安価で取扱いの容易な観測装置の開発と量産が進んでいる。また、小型磁気センサーを使用した磁力計の開発も進められている。さらに、小型無人機や Wave Glider などの新しい観測技術も実用例が増えている。一方で、ノイズレベルの低い良質な参照データを提供する定常観測網の維持に関しては、気象庁および国土地理院が長くこの役割を担ってきたが、国土地理院が連続 MT 観測を終了し、今後定常観測網がさらに縮小されることが危惧される。
- 2) データ処理：電磁気応答関数の推定においては、ロバスト統計を用いて半自動的にノイズ区間の判定・除去を行う手法が実用化されて久しいが、ノイズレベルが比較的大きい場合の処理法についても経験的モード分解や独立成分分析などの比較的新しい統計解析手法を用いた研究が進められている。
- 3) 構造解析：電気伝導度構造研究では汎用的な3次元インバージョンコードが普及し、3次元イメージングが今や主流となっている。さらには、地形や表層不均質による電磁場の歪み（distortion）効果をインバージョンに組み込む手法、あるいはそれらの影響を受けない、または除去したデータを用いるインバージョン手法も実用化した。電気伝導度異方性を組み込んだインバージョン手法も研究例が増えている。条件を変えた数多く

のインバージョン解析結果を用いてモデル推定値の不確定性を定量的に与えること (probabilistic inversion) も試みられるようになってきたが、計算負荷が大きいため、ほとんどの手法は構造の次元を1次元または2次元と仮定している。地震学的観測データや重力異常データ等と電磁気観測データの同時インバージョンについても研究例が増えている。さらに、地下構造の時間変化に関する研究も進められている。

- 4) 構造解釈：地殻・マントルを構成する鉱物の電気伝導度に関する知見が、電気伝導度測定実験によって蓄積され、構造解釈にも積極的に用いられている。とくに想定される温度構造や鉱物組合せが比較的単純なマントルについては、複数の鉱物相および部分熔融相との相平衡関係や、揮発性成分の分配を考慮した定量的解釈が行われるようになった。また、電気比抵抗構造と地震波速度構造や物質科学からの情報を統合して、地下の物性値を定量的に推定する研究も行われるようになった。
- 5) 成果公開：一部のキャンペーン観測では、論文出版後に時系列データまたは応答関数が公開されるようになった。公開されたデータを別の研究グループが解析して新たな成果を発表するケースもでてきた。これまで日本周辺では陸域・海域とも、研究グループ単位でキャンペーン観測が計画されてきたが、より広域の構造をイメージングするために、これら個別に蓄積されたデータを統合的に再解析しようとする事例が増えている。また、データ処理、構造解析のためのツールについても共有される例が増えている。

(次のステップ)

- 1) データ取得：深部構造研究では、長期にわたる連続観測データの蓄積が不可欠であり、地磁気観測所や国土地理院の定常観測網の長期的な維持・運営にコミュニティとしての支援努力を怠ってはならない。また、連続観測の効率化のためにも小型で取扱いの容易な新しい観測装置の開発を進めることが望まれる。
- 2) データ処理：近年の統計解析の発展は目覚ましいため、それらの最新の研究成果を用いてノイズに対してよりロバストなデータ解析手法を開発することが望まれる。また、ノイズをモデル化することにより、データからノイズを直接除去、ノイズを構造解析のソースとして利用するための研究も重要である。
- 3) 構造解析：構造モデルの推定精度をさらに向上させるとともに、構造モデルの不確定性を定量的に推定する手法をさらに発展させることが重要である。今後、データ数、モデルパラメータ数が増すことは必然的な流れであるため、計算機科学分野との連携を強化し、解析技術の高速化・効率化を進めることも望まれる。
- 4) 構造解釈：電磁気学的構造以外の独立情報の利用は必要不可欠である。関連する分野との共同研究を積極的に推進し、電磁気学的構造とそれ以外の独立情報を統合して地下構造を解釈する試みを進めていくことが重要である。将来的には複数の分野に深く通じた次世代研究者が育成されることが望まれる。
- 5) 成果公開：様々なキャンペーン観測で得られたデータの統合的再解析研究の実現に向けては、データのアクセシビリティを高めるために、戦略的にデータを管理・公開・共有するコンソーシアムを創設する必要がある。結果として固体・超高層分野間の境界領域研究へのデータ流通が進み、相乗効果が期待できる。個別の研究計画で得られた観測データや構造モデルをデジタル形式で公開することも、解析結果の再現性確保や、地域間の比較研究を効果的に進める上で有用である。

#### (4) 岩石・鉱物実験

(概要・研究目的・意義)

電磁場観測による地球内部探査結果から、構造解釈をすすめるためには、室内実験による岩石・鉱物の電気物性データの取得が必要である。とくに、地球内部で見いだされる低/高電気伝導度領域の定量的解釈には、室内実験から得られた岩石・鉱物の詳細な電気伝導度データが必要不可欠である。高電気伝導度層は、伝導性物質の存在、流体との相互作用・熔融など様々な理由に起因するため、岩石・鉱物の化学組成だけでなく、温度・圧力・含水率な

どの状態も精査する必要がある。個々の造岩鉱物の電気伝導度データベースの構築は少しずつ進展しているが、多成分の鉱物の組み合わせである岩石すべての電気伝導度測定実験を行うことは難しい。また、流体を含む岩石や熔融状態の岩石の電気伝導メカニズムは未解明である。地球内部の流体相の存在や熔融状態は、複雑なメカニズムが関与するため、様々な物理条件下での実験や計算機シミュレーションにもとづく研究が重要である。

(長期目標)

高温高圧実験の進展により、地殻—マントル—核付近までの物理条件下での電気伝導度測定が可能になっている。さらに広範囲な条件下の電気伝導度測定実験を遂行するためには、より絶縁性の高いセルの開発、固相—液相を完全に封入する閉じた系のカプセル開発も推進する必要がある。岩石・鉱物の電気的な物性を理解するために、分子動力学 (MD) 法・第一原理計算などに基づく計算機シミュレーションの利用も推進すべきである。さらに多様な化学組成・物理条件の岩石・鉱物を再現することもニューラルネットワーク解析により可能である。計算機実験で取得した知見は、岩石・鉱物のデータベース (Rock/Mineral Informatics) として蓄積する事も必要になるであろう。

(現状での到達点)

多結晶体である岩石の電気伝導度の理解には、造岩鉱物間の電気伝導メカニズムの解明をはじめとする様々なアプローチが必要となる。近年では、電気伝導度の測定だけでなく岩石内部の構造を、3次元的に可視化するコンピュータトモグラフィ (CT) の技術も進展しており、個々の造岩鉱物のジオメトリーと多結晶体である岩石の全貌も捉えることができる。岩石内部の電気伝導メカニズムは複雑なパスで構成されているため、実験的に岩石内部の鉱物や粒界の構造と対比しながら、電気伝導メカニズムを議論することも可能になるであろう。

近年の計算機能力及び計算アルゴリズムの向上により、種々の造岩鉱物の組合せの電気伝導度を算出することも可能なため、実験と理論計算の精度を相互に向上させる取り組みも求められる。例えば、MD 計算を用いると、高温下や高圧下での岩石・鉱物の電気伝導度の挙動がより明らかになる。また、水分子モデルで複雑な系の流体相も再現できるため、地球内部の“流体+固体”の挙動も電気伝導度の視点から捉えることが可能になる。さらに、精度の高い教師データによるニューラルネットワーク解析を用いることで、任意の化学組成、温度、圧力、含水率を変化させた岩石・鉱物の電気伝導度推算も可能になっているため、実験データと計算データを相互参照しながら、電気伝導メカニズムを包括的に研究する段階にきている。

(次のステップ)

高温高圧実験では、様々な物理状態における複雑な試料の電気伝導度測定が可能になっている。今後は、火山体下、断層下や沈み込み構造などの具体的な地球内部現象を再現した室内の電気伝導度測定実験により、電磁気観測から得られた地下電気伝導度構造のデータを直接対比することが可能になる。しかしながら、室内実験のターゲットとなる岩石・鉱物の化学組成の組み合わせは無数に存在し、全ての試料パターンの電気伝導度を測定することはやはり不可能である。そのため、任意の状態を理論的に再現できる Digital rock/mineral の技術を用いて、任意の温度・圧力下での電気伝導度を計算機シミュレーションで推算することが次の目標となるであろう。例えば、地球内部の流体や熔融状態を計算上で再現し、任意の試料の電気伝導度を MD 法・第一原理計算などに基づく計算機シミュレーションで求めるなどである。地球内部の岩石・鉱物と流体との反応や熔融に関しては、室内実験及び理論計算と電磁気観測の研究の連結から、より定量的な解釈が発展することが期待される。実験結果—理論計算の連携により、地球内部に存在する様々な地学現象に関連した地下構造の理解に役立つ電気伝導度データの蓄積が求められる。さらに、衛星や小惑星、惑星に存在する岩石・鉱物の電気伝導度特性を参照することにより、地球と他の天体との構造比較という視点から研究を展開することも考えられる。

## 2.6.2 モニタリング

### (1) 地殻活動に伴う電磁場変動

地震や火山噴火などの地殻活動に伴って様々な電磁場変動が生じる。これを検出し、その原因を解明することにより、現象の発生に至る物理過程が明らかになることが期待される。また、地震・噴火現象の発生機構への理解が深化するばかりでなく、その発生場における応力状態や熱的状态など物理状態の現状を把握できる可能性がある。応力集中や高温状態にあることが逐次把握できれば、地殻活動の推移や予測を行う上で第一級の情報となり、防災・減災における意義も大きい。

### (ア) 地殻応力変動に起因する現象

(研究の目的と意義)

一般に、磁性体に作用する応力が変化すると磁化ベクトルも変化することが、実験・理論によって知られている。地殻を構成する岩石の多くも磁性体であり、その磁化は地殻応力に伴って変化する。これは応力磁気効果と呼ばれている。原理的には、応力磁気効果を利用すれば、地上で観測される地殻起源磁場の変化を地殻応力の変化と定量的に関連付けることができる。

地球物理学における応力磁気効果の研究は、地磁気経年変化の空間分布の特徴を地殻応力の変化として説明できないかという基礎科学的問題意識からスタートしたもののだが、それだけでなく、地殻応力の時間変化のモニタリングという難問を磁場観測によって解決する可能性を秘めている。例えば磁場観測によって地震時応力変化をとらえ、地震波が地上に到達する前に地震の発生を検知することも可能になるかもしれない。

(長期目標)

地殻活動モニタリングのための応力磁気効果研究のゴールは、地殻応力と磁化変化の定量的な対応を明らかにすること、そしてそれを用いて、観測される地磁気時間変化とその分布から地殻応力の時間変化とその分布を知る方法を確立し実用化することである。このゴールに向けて、観測・データ解析、理論、応用のそれぞれにおいて解決し解明すべき課題がある。

観測・データ解析に関しては、地殻応力変化起源の地磁気変化を正確にとらえること自体が最大の課題である。地殻活動に起因する地磁気変化は超高層から生じる短周期変動や地球深部から生じる長周期変動と比べて極めて小さく、また出現範囲も限られるため、その検出には、何よりもまず観測網を質・量ともに充実させることが必要である。加えて、観測値から地殻起源の変化を的確に抽出する方法の確立が必要である。

理論に関しては、応力磁気効果の構成法則を定量的に正確に記述することが課題である。応力磁気効果の構成法則は岩石実験と熱力学の理論から得られているのだが、岩石実験は対象とする試料のサイズも扱っている時間スケールも限られており、熱力学では物性定数を求めることができない。そのため、実際の地殻における応力磁気効果の構成法則には定量的に未解明な部分が含まれており、その解明が主要な課題である。

また、弾性波動場の計算スキームに応力磁気効果の構成法則をいかに組み込み、普遍的な特徴を得るかが主要な課題である。

(現状での到達点)

地殻応力変化起源の地磁気変化を正確にとらえる大前提は、質・量ともに充実した観測が行われていることである。秒・分あるいは時間単位の変化を得るには地上での連続観測が必要である。地上観測は地域によって観測点密度に大きな差があるが、例えば日本は比較的充実しており、現時点ではおよそ20か所で地上連続観測が行われている。一方、全球を高い密度で広くカバーする観測として衛星観測も行われている。

観測によって得られた地磁気時系列から地殻起源の変動を抽出するための方法として、地磁気標準場モデルを用いる方法が考えられている。これは、全球スケールの地磁気変化を地磁気モデルとして表現し、これと実測値との差をとることで、地殻活動に起因するとみな

しうる局所的な変化を抽出する方法である。この目的での地磁気モデルの例として、国土地理院によって試作されている多項式モデルなどがある。

応力磁気効果の構成法則に関しては、幾つかの地震や長期地殻変動を対象として、仮定した構成法則に含まれる係数（応力磁化係数）が観測値を説明するののかという観点から検証が行われてきた。実験室で得られる係数は必ずしも現実の地殻にあてはまるわけではなく、場合によっては1桁程度大きくなるらしいこと、そこに時間変化のスケールが関係している可能性があることなどの知見がこれまでに得られている。

応用の基礎として、幾つかの単純なモデルから生成される磁場変化の理論解が求められている。単純なモデルとは、例えば均質媒質中の矩形断層の一様変位に伴う磁場変化や無限媒質中の点震源から生じる弾性波動場に付随する磁場変化などである。これらを用いて、磁場の観測値を利用して幾つかの断層運動パラメータが推定されたこと、想定される幾つかの地震の発生時に地震波に先行して地上で地磁気変化が観測されるであろうとする理論的予測が得られたことなどがこれまでの成果である。

（次のステップ）

観測における次の主要課題のひとつは、磁力計の開発である。地殻応力起源の地磁気変化を広い時間帯域でモニタリングするには地磁気3成分の絶対測定が可能な機器を観測点に設置することが望まれる。現在、地殻活動起源の地磁気の観測研究では、絶対測定可能だが全磁力値のみしか測れないプロトン磁力計か、三成分が計測できるが温度等の影響で値が変化するフラックス磁力計に定期的な絶対測量を組み合わせることで多くのデータを得ている。全磁力値のみの時系列は解釈が難しい場合があり、絶対測定には観測者の技術習熟と時間を要する。有用で大量のデータを安定して取得するために、観測者の熟練度に依存せず、かつメンテナンスの容易な地磁気三成分の絶対測定機器の開発が望まれる。

データ処理手法に関して、地殻活動起源の地磁気変化を抽出する基準としての地磁気モデルの開発は進んできたが、その精度の評価は十分にはなされていない。通常、地磁気モデルの精度は観測値とモデルの不一致の度合いとして評価される。しかし、地殻起源の地磁気変化の一部が地磁気モデルとして表現される場合や、逆に地球深部起源の地磁気変化の一部が地磁気モデルとして表現されない場合もあるので、観測値とモデルの不一致の度合いは地殻活動起源の変動の抽出精度を的確に評価しているとはいえない。開発された地磁気モデルが全球的な変動だけをどれだけの精度で表現しているのかという観点での評価が求められている。

計算においては、単純ではなく複雑な物性構造を持った地殻から生じる応力地磁気変化の普遍的な特徴を抽出する、ということが次の課題である。各種境界条件の下で弾性波動場を求める問題が地震学において解かれており、そこに応力磁気効果の構成法則を組み込めば生成される応力磁気効果起源の磁場変動は計算できるし、実際にこれまで多くの解が得られている。しかし、実際には地殻の磁気物性、特に磁化強度は強い不均質性をもち、その分布を正確に知ることはできない。磁気物性に不均質があるという前提のもとで、地磁気観測値から地殻応力について何が推定できて何が推定できないかを明らかにすることが、幅広い応用のためには必要である。

## （イ）火山活動に起因する現象

（研究の目的と意義、現状での到達点）

この研究領域の目的は、火山体下における高温のマグマあるいはそれに付随する揮発性成分・流体及び熱の移動による地下の物理化学状態の時間変化／空間変化を、電場・磁場計測で捉えることである。これらは主に 1) 磁場観測による磁化構造の変化 2) 電場観測による自然電位の変化及び比抵抗構造の変化 3) 電磁場観測による比抵抗構造の変化の3つに大別できる。

磁場観測による火山活動モニタリングは、火山活動の活発化／静穏化に伴った全磁力変化の観測例が多数報告されていることもあり、火山活動の中長期的予測の指標として広く

認知されている。特に、プロトン磁力計やオーバーハウザー磁力計のような、測定精度が高く長期間安定した測定が可能な磁力計が比較的簡易に取り扱えるようになったことから、火山体での反復磁気測量や定点連続観測は、火山監視の現業機動観測項目としても浸透している。高温物質の移動による熱消磁やその後の冷却による再帯磁の把握が主な目的であるが、応力変化に伴う応力磁気効果の検出なども視野に入っている。

電場観測（自然電位観測）によるモニタリングでは、地下水流動の変化を電位の変動（流動電位）として捉えることを目的として、繰り返し観測や連続観測が複数の火山で実施されてきた。例えば、三宅島 2000 年噴火の前後に、自然電位の変化の観測例が報告されており、火山活動に伴う流動電位の変化あるいは地下の比抵抗の変化が示唆されている。また、三宅島 2000 年噴火では、継続時間約 50 秒の低周波地震波パルスに同期した自然電位変動も検出され、応力変化に起因する流動電位の変動が示唆された。最近では、2018 年の霧島硫黄山噴火の際に、空気振動により励起されたと考えられる電場変動が観測されている。また、火山体内部の流体挙動を推定するために、自然電位測定値と流体シミュレーションを統合して研究を行うことが日本を筆頭になされている。数少ない電場の観測事例を相補する形で数値シミュレーションを組み込むことは重要であり、実験室測定での各種物性データの拡充なども付随してさらなる発展が見込まれる。

電場・磁場並行観測による比抵抗変化の詳細については別項に譲るが、既述のように電場観測のみでは流動電位変動と比抵抗変化を分離することは困難なため、電磁場観測を同時に行うことで比抵抗変化をモニタリングすることは両者を区別する上で重要である。また、噴火事象に伴う電磁場現象として火山雷の研究への電磁場観測の適用についても報告されており、火山内部構造研究のみならず、火山噴火現象・様式の特定期にも今後寄与できると考えられる。特に、噴火が頻発する桜島火山では、大気電場測定とあわせた火山雷研究が精力的に行われており、その性状が明らかになりつつある。また、爆発的噴火の大気振動による電離層電子数の変化や、噴出した噴煙雲による GNSS シグナルの遅延を利用した噴出量測定などにも火山噴火素過程研究への応用が期待される。

（長期目標、次のステップ）

上述のとおり、いくつかの火山では電場・磁場の繰り返し/連続観測が実施され、成果も報告されている。今後は他の活火山にもその対象を広げて研究事例を増やし、噴火準備過程や噴火現象時において、どのような物理過程に基づいてどのような変化が検出されるのか、を実証することが重要になる。

磁場の観測では、その簡便性から現在全磁力観測が広く行われているが、より詳細な空間分布・時間変動を検証するために、3成分計による観測の拡充も望まれる。また、面的な観測も重要であり、従来の有人ヘリコプター等を利用した空中磁気測量に加え、無人機を用いた繰り返し測量による時間変化検出が報告されている。昨今の開発進歩が著しいマルチコプターに代表される簡便・安価な飛行体を用いた磁場観測も今後のさらなる発展が期待される。現状では地上観測に比べて測定精度が落ちるものの、空間分布を密にすることで、消磁・帯磁域の面的分布を検出できる可能性があり、その原因となる火山体内部の状態把握への寄与が期待できる。

電場観測については、安価な通信機能付き電場測定装置が開発され、以前に比較して連続観測が容易になったことから、今後複数の火山での連続観測が望まれる。電極そのものの劣化や被雷などの影響のため、長期安定的に測定するのは困難であり、火山活動に起因する変化と切り分けるためにも、それらの対策や検証が重要となる。また、電場のみの観測では得られた変動の解釈が容易ではないため、他の物理量とのマルチパラメータでの測定を推進する必要がある。

噴火事象前に噴火を予測することは社会的な要請の強い課題ではあるが、現状では困難である。そのためにもまずは観測事例・統計サンプルを増やし、また、海外の事例を含め比較研究を行うことで、火山活動に伴う電磁場変化を理解することが必要である。その上で、他の観測量や数値実験に基づき、火山体内部の状態を把握し変動を消磁させる物理過程を



特定することが目指すべき方向である。

## (2) 地下構造の時間変化

地震や火山現象にかかわる地殻活動をモニタリングするためには、地下構造の時間変化の検出は重要なテーマである。構造の時間変化の検出は、闇雲に連続観測を行えば実現できるというわけではなく、背景構造をもとにターゲットとする領域を選定し、適切な観測点配置及び方法（人工又は自然信号源）を検討し、戦略的に推進すべきである。地下構造を大きく反映する電気伝導度の構造を推定するにあたり、その空間解像度を飛躍的に向上させるとともに、時間変化の推定を行い（4次元解析）、地殻活動モニタリングとしての有効性を検証すべきである。電気伝導度構造の推定には大きく分けて、（ア）自然の電磁場変動を用いるもの、（イ）人工的に電磁場を発生させるものの2つがあるが、それぞれの課題を以下に挙げる。

### (ア) 自然の電磁場変動を信号源としたモニタリング

（研究の目的と意義）

自然の電磁場変動と、誘導される地電位により電気伝導度構造を推定する手法（MT法）によるモニタリングは、送信源を設置する必要がなく、観測点配置のデザインの自由度も高いことから、比較的容易に実施することができる。また、信号強度が不安定である帯域も含まれるが、人工信号源では探査が困難な、数km以上の深度を対象とすることができ、地殻活動の発生場のモニタリングに適している。近年では、3次元インバージョン技術の発達により、MT法による背景構造の空間的高精度推定が可能になってきたとともに、観測機器の小型軽量化、汎用性の向上が進んできた。これらをさらに発展させることで、電気伝導度構造の経時変化を推定する技術が確立されれば、火山噴火や地震発生の際における活動時の物理状態を即時に推定することが可能となる。

（長期目標）

本研究の長期目標は、人工信号では実現困難な探査深度における地殻活動について、ターゲットとなる現象に応じた様々な空間的、時間的分解能で、地下の電気伝導度変化を即時に検出することである。

（近年の進展）

観測機器の汎用性の向上、ストレージの大容量化などによって、MT法連続観測が比較的容易に行えるようになってきた。主な適用例としては、火山関連では帯水層のモニタリング、地震関連ではスロースリップ震源域のモニタリングが挙げられる。また、地熱サイトやCO<sub>2</sub>地中貯留実験等における坑井からの注水による地下状態の変化の把握目的でもMT法連続観測が展開され、地下構造の変化に伴う電気伝導度変化の検出に成功した例が報告されている。

一方、連続観測は様々な制約によって実施が困難な場合も多いことから、繰り返し観測による地下構造変化の検出の試みも行われている。測定位置の再現性や安定したS/N比の確保が重要であることが指摘されている。広帯域MT法の帯域での繰り返し観測では、主にS/N比の確保の点から変化の検出が困難な場合が多いが、信号強度が安定しているAMT帯域では、有意な比抵抗変化を検出した例も報告されている。

（次のステップ）

MT法は自然の信号源を利用するため、観測が比較的簡便である一方、信号強度が一定ではないために、得られる電気伝導度変動の品質の確保が重要な課題となる。長時間のデータを解析に用いることで、品質の向上が期待されるが、変動の時間分解能が劣ることとなる。このため、MT法による地下構造モニタリングを実現するためには、電磁場時系列データから、地下構造の変化に関係しないノイズの除去法を確立することが不可欠である。

連続観測そのものは、機器の発達により、以前と比較すると容易になったが、多点での同時観測は、依然として費用や維持のコストがかかるため困難である。具体的には、観測機器

への初期投資と電源の確保である。このため、安価かつ低消費電力な観測機器の開発を推進すべきである。また、データ転送によりリアルタイムで時変構造解析を行うことが必要である。このため、高速かつ大容量の通信手段を簡便に確保すること、高速な時変構造解析手法の開発を進めるべきである。

### **(イ) 人工信号源を利用したモニタリング**

(研究の目的と意義)

人工電流を用いる手法は、自然の電磁場変動を信号とする手法に比べ、ソースが既知かつ一定であるため再現性が高く、高 S/N 比のデータが安定的に得られるというメリットがある。また、ソースから周期的な電流を送信し、観測される電磁場レスポンスをスタッキングすることでノイズの影響を低減することができる。現状のシステムでは深さ数 100m までの地下浅部を対象としており、近年では GPS で時刻校正可能な高精度かつ軽量の観測装置も開発されている。こうしたデバイスを用い稠密な連続観測アレイを構築することで、詳細な浅部比抵抗分布を求めるとともに、地殻活動に伴う地下比抵抗の時間変化をターゲットとしたモニタリングを行うことが可能となっている。

(長期目標)

本研究分野での長期的な目標として、人工ソースを用いた観測手法がノイズに対し非常に堅牢である利点を活用し、地殻活動に関連した比抵抗の時間変化を連続・準連続モニタリングすることが挙げられる。こうした観測を通じ地殻流体、火山性流体の挙動を高分解能で監視することで、地震発生場や火山噴火発生場の理解に対し大きく資する情報が得られることが期待される。

(現状での到達点)

国内の幾つかの火山では、人工電流源を用いた観測装置を用いた地下比抵抗の連続・準連続モニタリングが行われており、これらの観測から火山活動に伴う地下比抵抗変化が検出されている。また断層における繰り返し注水実験で、注入水の地下拡散に伴う自然電場変動(流動電位)を地表で観測し断層周辺部の回復過程(空隙率の変化)を検出する試みも実施され経年的な変化を検出している。起震断層のような地下深部は困難であるが、地表地震断層近傍の応力変化に伴う地下水流動を検出できる可能性がある。

(次のステップ)

今後、得られた観測データから 3 次元電気伝導度構造を逐次推定するコードの開発を行うとともに、リアルタイム構造解析を視野に、より深部までをモニタリング可能とする新たな観測機械の開発が必要である。人工電流を用いる場合にはより安定した電流源の開発がとりわけ必要となる。また送受信デバイスの小型化、システムの省力化を進めポータビリティを高めることも望まれる。これにより高密度アレイの構築が容易となり空間分解能を向上させることができる。上記 2 点は相反する要件であるが、観測方法、データのスタッキング手法の工夫などを通して実現できれば、高い時間・空間分解能を持った地下水流動モニタリングが可能となる。

### **(3) 津波現象のリアルタイム・モニタリング**

(研究の目的と意義)

津波の発生時には、良導体である海水が地磁気下で運動することにより、観測可能な電磁場が誘導される。2000 年代以降発生した津波について、複数の電磁場観測例があり、津波の波高のみならず伝搬方向をも検知する新たな手段(ベクトル型の津波観測)として注目されている。ベクトル型の津波観測が可能となれば、従来の水位変動に加えて伝搬方向の情報も得られるため、波源の推定や伝搬予測等に関する精度の大幅な向上が見込まれる。また、離島においては津波の到達前に津波誘導電磁場が観測された事例が報告されており、津波の早期予測に活用できる可能性がある。海陸における電磁場による津波観測を既存の津波観測網に組み込むことで、精度の高い津波の早期予測を実現し、津波被害の軽減に資するこ

とが本研究分野の目的である。

(長期目標)

本分野では、(1)観測技術の改良、(2)電磁場データを用いた津波パラメータ推定手法の確立、および、(3)実データの解析実績の蓄積によって、電磁場観測を用いた津波予測の実用性と信頼性を高めることを長期目標とする。観測技術においては、恒常的な津波モニタリングに向け、係留ブイや海底ケーブルを用いた電磁場データのリアルタイム転送と長期間運用を実現する必要がある。また津波パラメータの推定では、海底・陸上を問わず様々な場所における流速・水位変化と電磁場変動を結ぶ関係式及び効率的な計算手法の開発が必須である。実データ解析では、混入するノイズの性質理解とその除去手法を確立することが重要である。

(現状での到達点)

観測技術については、2013-2014年にベクトル津波磁力計の試験運用が大きく進み、自律走航可能な Wave Glider と呼ばれる音響通信モジュール搭載ブイを用いて、海底電磁場データのリアルタイム転送にも成功した。一方で、ブイの維持コストの問題および観測航海時間の制限から、津波モニタリングを目的とした海底電磁場観測を複数点で展開するのは難しいのが現状である。津波パラメータの推定においては、2011年の東北津波において磁場ベクトル観測を利用した津波波源の推定、また、2007年の千島列島沖津波において磁場データから断層面のすべり量を推定した例が報告されている。一方、実地形を反映できる3次元シミュレーション手法が開発され、津波による電磁場変動の高精度な予測が可能になった。他方で、近年、海底で観測された津波磁場変動の鉛直・水平成分からそれぞれ独立に理論界を用いて波高時系列が精度良く推定できることが明らかとなり、海底電磁場データを用いた津波波源推定への道が大きく拓かれた。ノイズ除去に関しては、広域外部磁場擾乱の効果を、観測点間の磁場伝達関数を用いて除去する手法が一定の効果を挙げている。

(次のステップ)

観測面では観測機の低コスト化、省エネ化について検討することが重要である。また、モニタリングに関わる海底ケーブルやブイの維持にはかなりの費用がかかるため、地震・地殻変動などを含めた総合観測網の一部として電磁場観測を組み込むことを検討すべきである。理論面では、離島・沿岸における津波電磁場現象の理解を進めることが重要と考えられる。平らな海底では理論式の精度が高いが、沿岸域・離島で利用可能な簡便な計算法があれば、陸上データの利用率が高まる可能性が高い。実データ解析においては、津波波源のジョイントインバージョンなど、電磁場データと津波解析に関わる従来データ(海底圧力・潮位データ等)を併用する解析事例を増やし、電磁場データを用いて津波パラメータ推定に寄与していくことが重要である。そのためにも、ノイズ除去法の更なる進展が望まれる。近年、外部磁場擾乱だけでなく、波源近傍で津波励起の電離層擾乱の効果が海底磁場データに混入することが確かめられた。これらの除去法については、電離圏分野とも連携しながら手法開発を行う必要がある。

## 2.6.3 資源探査

### (1) 地熱資源

地熱資源の探査では、MT法やTEM(Transient Electromagnetic)法などの地球電磁気学的手法(電磁探査法)が1970年代から使われている。地熱貯留層に関する地下温度や変質粘土層、構造境界などの情報を地表から得ることのできる数少ない手段として、電磁探査(特にMT法)は地熱探査における主要な調査項目となっている。近年では、地下深部や複雑な地質環境を対象とした探査や、急峻な山岳地や未開地などアクセスの難しい場所での探査需要が高まっている。その状況に対応して高精度、広帯域、軽量、安価な探査システムが開発され、効率的に多点測定ができるようになり、詳細な比抵抗構造(電気伝導度構造)の解析技術も進んでいる。

火山国である我が国では、国が主導して地熱資源の探査が行われてきたが、1990年代後

半からは政策転換により、地熱調査が行われることが少なくなっていた。しかし、地球温暖化問題や福島第一原子力発電所の事故により、安定的な再生可能エネルギーとして地熱発電が見直され、急速に国内各地で地熱調査が行われるようになった。最近の地熱探査では3次元MT法が実施されることが一般的になっている。また、地表付近の変質帯等の分布を面的に把握することを目的として、ヘリコプターで直径約30mの送信ループを吊るして測定する時間領域電磁法が各地で適用されている。

経済産業省等が策定した「2050年カーボンニュートラルに伴う成長戦略」において地熱発電は、従来型の地熱貯留層の利用に加え、より深部・高温の地熱貯留層を利用する次世代型地熱発電（超臨界地熱発電）も含めて、加速的な導入拡大を推進する再生可能エネルギーの一つとして位置付けられており、今後も地熱調査における電磁探査の需要は継続・拡大するものと考えられる。高額な掘削費用を伴う開発リスクの低減のため、高分解能かつ高精度の比抵抗構造推定が期待されており、これを実現するための測定装置の高度化や解析および解釈技術の向上が必要である。

地熱調査における電磁探査は、火山や断層帯の近傍でも多く実施されており、そのデータは地殻構造や防災等の研究にも役立つと考えられる。逆に、大学等が研究のために取得した電磁探査データが、地熱探査に有用となるケースもある。これらのデータは、産業界と大学等の研究機関との連携が十分ではないことから有効活用されていないのが現状であり、複数の機関により同じ地域で重複した調査が行われている例も見受けられる。国の予算や技術者の数は限られており、得られた成果の社会への還元や情報公開の観点からも、できる限り産官学が連携して正確で詳細な比抵抗構造の解明が行われることが望まれている。

## （2）鉱物資源

（研究の目的と意義）

世界的な資源需要の高まりを受けて、海域における資源探査・開発の要求は増しており、海底下構造調査の高度化が実施されてきた。電磁気学的手法を用いた海底下の地殻構造調査については、1990年代までは測定装置の問題などから、国内ではほとんど行われていなかった。また海外でも一部の調査事例に限られていた。この間、反射法地震探査を中心とした地下構造解析技術は急速な進化を遂げ、3次元的地質構造の解明や油ガス層の発見などに大きな役割を果たしている。その一方で、地震探査のみでは海底下資源の評価が困難な場面も顕在化してきた。例えば、低飽和度のガス貯留層が地震探査では強異常体としてイメージ化されることが知られている。海底下の掘削リスクを下げるために、電磁気学的手法による海底資源探査が必要とされている。一方で、海底熱水鉱床に注目が集まり、国内外で探査手法に関する研究が急速に進展している。陸上同様に金属資源に対して感度の高い電磁気学的手法がその中心であり、その観測手法、解析手法の開発の進展が必要とされている。

（長期目標）

海底資源の効果的な発見や定量的な資源量評価において、自然信号・人工信号双方を用いた海底電磁気学的な探査技術の高度化を目指す。具体的には陸上の資源探査と同様に、電気探査・電磁探査・磁気探査・自然電位探査といった各種の電磁気学的探査技術の海底での実施、取得データの解析、3次元の地下構造情報の抽出、地質構造の解釈などが課題として挙げられる。実際には電磁気学的情報のみに基づく地下構造解釈は困難であるため、岩石物性の測定などに基づいて、地震探査・重力探査・掘削データなどとの比較・統合・解釈技術が必要である。これらの技術開発は海底資源の探査・開発のみならず、海底活断層やプレート境界断層の理解にもつながるものである。

（現状での到達点）

2000年以降、海外では延べ100台スケールの海底電位磁力計（OBEM）を展開した海底電磁気観測が実現しつつある。国内においても浅海・多点観測を意識した小型・ハイサンプリングレートのOBEMやOBEの開発が継続的に行われている。近年、国内では10台程度のOBEMの同時展開や、漁船などの小型船舶によるOBEMの運用などが可能となっており、観測点数

が飛躍的に増大しつつある。海底資源探査に注目すると、海底下数 km までの詳細な地下構造イメージングが必要であり、深海曳航型人工電流源を用いた電磁探査が実施されている。特に、海底付近に送信電流ダイポールと送信装置を曳航し、このときに生じた人工電磁場を海底に設置した OBEM で受信する人工電流源電磁探査（CSEM 探査）や、深海曳航式電気探査の適用例が増えつつある。これまでの学術的・商業的な成果としては、石油・天然ガス資源やメタンハイドレート（いずれも高比抵抗異常体）などの炭化水素探査への活用が挙げられる。例えば、国内では曳航式の電気探査装置や電磁探査装置を用いて、海底面付近に分布する表層型メタンハイドレートの検出や賦存量推定に成功しているほか、JAMSTEC と民間企業による天然ガス探査を念頭にした CSEM 探査の試験観測が行われている。

また近年では、海底熱水鉱床の探査と成因解明を目的とした磁気探査・電気探査・電磁探査・自然電位探査が世界各国で活発に実施されている。このうち、磁気探査については、熱水域と地磁気異常との関連や熱水域の磁化構造に関する研究が国内外で盛んに進められつつある。磁気探査が海底熱水鉱床探査の有効な手段と考えられているのは、熱水変質した岩体によって磁化構造が変化し、磁気シグナルとして地磁気異常に現れるためである。また海底電気探査や海底電磁探査では、海水よりも低比抵抗を示す地層が熱水域の海底直下～海底下数百 m に発見されている。熱水域で採取した岩石の物性測定によれば、導電性鉱物が地層の比抵抗低下に大きく寄与していること、また充電率が大きく IP 効果が大きいことが分かっている。さらに鉱体電池（酸化還元反応）による自然電位信号は海水中でも測定が可能であり、海底下数十 m に埋没した熱水鉱床を発見できることがごく最近になり判明し、国内外で複数の学術成果が報告されて始めている。石油天然ガス・鉱物資源開発機構（JOGMEC）の探査公募に自然電位探査が加えられている。磁気探査については、熱水域と地磁気異常との関連や熱水域の磁化構造に関する研究が国内外で盛んに進められつつある。熱水変質した岩体によって磁化を失った低磁化域としてイメージングされることが多いが、母岩の磁化構造によっては高磁化域と鉱体分布が一致することもあり、鉱体賦存よりは鉱体の成因を議論するのに適していると考えられる。これらの新技術は、潜頭性鉱床の発見に大きく寄与するものである。海水温度・濁度等の測定に基づく熱水プルームの検出が熱水噴出域の発見に有効であることは知られていたが、磁気・自然電位シグナルや低比抵抗異常に着目すれば、熱水活動が停止した後であっても熱水鉱床を検出することができ、また音響画像や目視観測では得られない海底下の情報を取得できるなど、資源探査により直接的に寄与できる。特に自然電位探査は、簡便な観測でおおよその鉱体賦存域を把握することができる可能性が高いため注目されている。内閣府戦略的イノベーション創造プログラムでは、開発された機器を用いて民間企業が独立して探査を行うことがゴールとされていたが、JOGMEC の探査公募に対して民間企業による探査がすでに行われている。

（次のステップ）

炭化水素探査においては、掘削リスクを低下させるべく人工電流源電磁探査が商業的に実施されてはいるものの、探査事例はいまだに限られている。また観測技術やデータ品質管理については評価方法が定まっていない。現在、国内では炭化水素探査を目的とした商業的な海底電磁探査は活発ではないが、JAMSTEC と民間企業による共同研究は商業利用を目的としたものであり、探査技術のより一層の高精度化及び汎用化を図っているところである。解析技術においては、人工電流源電磁探査・海底電気探査用の 3 次元地下構造インバージョン技術は開発競争の途上であり、未完成である。特に比抵抗の異方性や、地質情報を取り入れたインバージョンコードの開発が必要である。また海底 MT 探査用の 3 次元地下構造インバージョン技術については、複雑な海底地形を取り入れたコードが開発されたばかりであり、今後の適用事例の増加が期待される。

## 2.7 岩石・堆積物が担う磁化の物理の解明とその応用

強磁性鉱物は岩石・堆積物などの天然試料中に普遍的に含まれており、それら強磁性鉱物の様々な磁氣的性質を用いて、過去における磁場記録および磁氣的性質を指標として地球惑星科学における諸現象の記録を読み解く事が可能となる。岩石磁気学分野では、強磁性鉱物の磁氣的性質を実験的・理論的に研究する事で、上述の鉱物磁性を用いた地球惑星科学研究における基盤知識構築および適用研究を実施してきた。過去における磁場記録復元研究は、岩石・堆積物などの地質試料中に含まれる強磁性鉱物の残留磁化測定に基づくため、地質試料から信頼度の高い磁場記録を読み取るために、岩石磁気学の理論的・実験的研究が重要となる。地球惑星科学における諸現象への応用研究として、テクトニクス、磁気異常、考古学、防災科学、古環境などの研究が行われており、地質現象と関連する物理・化学的現象に伴う強磁性鉱物の磁性および磁化の変化の理解が重要となる。

### 2.7.1 岩石磁気学—理論的・実験的研究

過去における磁場記録・磁氣的性質の記録の測定は、1 mg - 10 g 程度の岩石・堆積物を対象とするが、それらの測定試料中には組成、粒径、そして組織が異なる複数種類の強磁性鉱物が含まれている。複数種類の強磁性鉱物が含まれている事に加えて、磁気測定における消磁・着磁の過程でそれらの強磁性鉱物が物理的・化学的に変化する。さらに、対象とする岩石・堆積物が過去の情報を記録する際にも物理・化学的現象に伴う強磁性鉱物の変化が起こっていたと考えられる。このような混合物から適切な情報を読み解くための試みとして、各種強磁性鉱物の磁性の基礎的研究に加えて、磁気測定において複数種類の強磁性鉱物のシグナルを分離する研究、複数種類の強磁性鉱物を空間的に分離してシグナルを得る研究、が近年の岩石磁気学において重要な役割を果たしている。

天然試料中に含まれる複数種類の強磁性鉱物のシグナルを分離する方法として、強磁性鉱物を含むケイ酸塩や炭酸塩鉱物を切断・破砕して分離し高感度の磁力計を用いて測定する取り組みが2000年代以降に行われてきた。この手法では、試料全体の測定では検出不可な、微量・微小な強磁性鉱物が記録する長期間安定な磁気記録を得る事が可能となり、とりわけ数億年よりも古い時代の磁場記録復元に貢献してきた。磁氣的シグナルを空間的に分離して測定する手法として、SQUID 顕微鏡、MTJ 顕微鏡、NV ダイヤモンド顕微鏡、MOKE (磁気光学) 顕微鏡、などの磁気顕微鏡による研究が挙げられる。各装置で磁場・空間分解能が異なり、適切な試料と地質現象に適用する事で様々な情報が得られ、分離した微小試料の磁化ベクトル測定などにも応用されている。また、磁化測定時の温度・磁場サイクルまた解析法を改良する事で、等温残留磁化獲得曲線やFirst Order Reversal Curve (FORC)の分析・解析から複数種類の強磁性鉱物のシグナルを分離可能となった点も重要な進歩である。これらの方法や新しい手法を用いて複数種類の強磁性鉱物のシグナルを分離して、適切に磁気記録を読み解く事が今後より一層重要な役割を果たすと考えられる。

単一種類の強磁性鉱物のシグナルを分離して測定する事が可能となった事で、計算機を用いた磁気モデリングと実験結果の対比も重要度が増してきている。単磁区-渦構造の境界に当たる0.1  $\mu\text{m}$ 程度の磁鉄鉱については、off-axis 電子ホログラフィによる観察と一致する磁区構造がモデリングにより得られた。キュリー一点に至るまで渦構造が安定であるという観察結果も報告されている。地質試料には、磁性鉱物として、1  $\mu\text{m}$ サイズの磁鉄鉱(マグネタイト)が普遍的に含まれるため、今後はとりわけミクロンサイズの粒子のモデリング計算が必要である。粒径に応じて渦構造から多磁区構造へどのように変化するかを、調べる必要もある。計算におけるセルサイズは原子の電子スピンに対応させると10  $\text{\AA}$ 程度であり、その間の相互作用は膨大な計算量となる。このような膨大な量の計算を行うためには、計算手法の改善と高い計算能力をもつ計算機が必要である。過去の計算コードはスクリプトで使えるように公開され、モデリングが以前より手軽に行えるようになった。

磁性鉱物の成因に関しては、近年ますます多様かつ複雑な組織・産状が報告され、岩石学

や鉱物学的見地から結晶化プロセスの理解が進んでいる。古地磁気学的に重要な発見の一つは、自然界には稀であると考えられていた単磁区磁鉄鉱粒子が、珪酸塩中の離溶磁鉄鉱および走磁性バクテリア内のマグネトソームとして広く見つかったことである。単磁区粒子は古典的な物性理論によってそのふるまいが定量的に予言できる唯一の存在であり、これら天然の単磁区粒子の精密測定により、地質時間スケールでの物性理論の検証および理論を背景にした古地磁気復元の両者が可能になってくると期待される。天然での鉱物の成長プロセスに関しても磁性を利用した定量的アプローチが期待される。例えば、近年、人工生成物・土壌・堆積物・マンガクラスト・ノジュール・砂漠ワニスなどに見られる鉄マンガ氧化物の磁性の重要性が認識されつつある。微小な結晶の磁性の研究などを通じて、岩石磁気学の発展も促される可能性があり、鉱物学や磁性物理学における最新の知見にも注意を払い、岩石磁気学分野にフィードバックしていく必要がある。

過去における地球惑星の磁場強度の復元は、地球惑星の内部ダイナミクス進化や表層環境進化と関連するため、地球惑星科学分野において重要な課題となっている。磁場強度を復元するためには、相互作用のない単磁区磁性粒子のみから構成される系を対象として消磁・着磁処理を行う必要がある。しかし、多くの場合に天然試料がこの系から逸脱していること、また、消磁・着磁過程で強磁性鉱物が物理的・化学的変化を伴う事などが、磁場強度復元研究を困難にさせる要因となっている。従来は段階的に熱消磁・着磁を行う「テリエ法」が最も信頼度が高いとされてきたが、過大見積もりとなる強度推定値が得られる事が2000年代以降に明らかになった。2010年代以降は、おもに相互作用のない単磁区磁性粒子群から構成されると考えられる火山岩試料を対象に、種々のチェック過程を強化した「IZZI テリエ法」によって強度を推定するのが最善であるとの共通認識になりつつある。また、日本の研究グループが開発・適用の取り組みを進めている「綱川・ショー法（従来は低温消磁二回加熱ショー法）」も、「IZZI テリエ法」と並び立つ信頼度の高い強度復元法であるとの認識が深まりつつある。テリエ法とは異なり、ブロッキング温度ではなく保磁力に基づいて古地磁気強度を推定する手法で、低温消磁や非履歴性残留磁化の利用により、試料が「相互作用のない単磁区磁性粒子群」以外で構成される場合でも、比較的信頼度の高い古地磁気強度を推定できることが特徴である。

「IZZI テリエ法」や「綱川・ショー法」などの加熱処理を用いる方法では、測定中の加熱に伴って著しい熱変質を被る試料に対しては適用できないため、自然残留磁化と等温残留磁化の強度比や自然残留磁化と非履歴性残留磁化との強度比を用いる加熱を伴わない磁場強度復元手法も開発され、堆積物試料や隕石などの地球外試料を中心に適用されている。実験室における測定時の物理的・化学的変化という観点以外に、過去における磁場記録イベントの多様性も重要な要素となる。火成岩中の強磁性鉱物が晶出後に磁場中で冷却されて残留磁化を獲得する熱残留磁化の場合「IZZI テリエ法」や「綱川・ショー法」で適切な磁場強度を復元できる可能性が高いが、一方で、堆積物が堆積時・堆積後に残留磁化を獲得する堆積残留磁化、強磁性鉱物が結晶成長中に残留磁化を獲得する化学残留磁化、地殻岩石が衝撃波伝搬時に残留磁化を獲得する衝撃残留磁化、など熱残留磁化と異なる機構で記録された残留磁化から適切な磁場強度記録を復元するための研究も重要と考えられる。磁場強度復元手法は磁鉄鉱とチタン磁鉄鉱を主な対象として開発・適用が行われており、今後は磁硫鉄鉱、赤鉄鉱、鉄ニッケル合金など異なる強磁性鉱物に対しても適切な磁場強度復元手法を開発していく事で、磁場強度復元研究の対象となる現象・試料を開拓していく事が重要である。

## 2.7.2 岩石磁気学・古地磁気学の応用

### (1) テクトニクス研究

地質学分野においては、古地磁気の手法を用いたテクトニクス研究が依然として注目されている。それは、多くの場合、地質学や地形学の手法では地殻の水平運動（鉛直軸回転や南北移動）を定量的に求めることができず、古地磁気学の手法に頼るしかないためである。



今後も岩石磁気・古地磁気学の手法（古地磁気方位や磁化率異方性の解析）は陸域・海域を問わずテクトニクス研究に貢献すると考えられる。たとえば、北海道中東部や本州中部などの島弧-島弧衝突域では、古地磁気方位を利用したオロクライン解析の手法を適用することによって地殻変形過程の詳細な理解が進むと期待される。また、深海掘削コアを用いた研究では、断層岩や変形した堆積物の構造解析において岩石磁気学の手法（掘削コアの北方向の決定・磁化率異方性解析など）が貢献しており、同様の手法は内陸活断層の活動履歴の研究においても役立つと期待される。

海洋掘削により求められたハワイ・天皇海山列およびルイビル海山列の古緯度とマントル対流シミュレーションから、ホットスポットが不動とは限らないことが明らかになってきた。ホットスポットの移動を考慮したプレート運動復元の参照座標系の作成が進んでいるが、軌跡、古地磁気緯度、年代の制約を完全に満たすモデルはまだない。インド洋や大西洋のホットスポット軌跡を掘削し研究を行う必要がある。ホットスポットの緯度変動のメカニズムとして真の極移動（TPW）も提案されているが、決定的な証拠はない。理論的には TPW は全プレートに共通する高速な回転として検出できるため、海域と陸域の高品位なデータを積み重ねる必要がある。見かけの極移動曲線（APWP）の適正な誤差評価と誤差組込統計モデルの構築なども今後の発展にとって重要であろう。

海洋底には地球の過去 2 億年間の変動が記録されているが、大陸には地球の過去 40 億年間のテクトニクスが記録されている。海洋底の研究のみでは地球の変動・進化の時系列を網羅できない。地球科学的な知見を蓄積するために大陸地域のテクトニクス研究は重要である。大陸プレートは、変形することが可能な領域であるためプレートテクトニクスに必ずしもあてはまらない。その変形は、地域・年代ごとにそれぞれデータを集積することによってようやく解明されるため、中長期的な成果を見据えた、地道な研究の継続が大切である。特に、インド大陸の衝突によるアジア大陸の変形現象は、現在のアジアモンスーンの誕生と発達、および、これに関連して生物の多様性にも多大なる影響を与えたことが知られていて、今後の研究が強く望まれる。

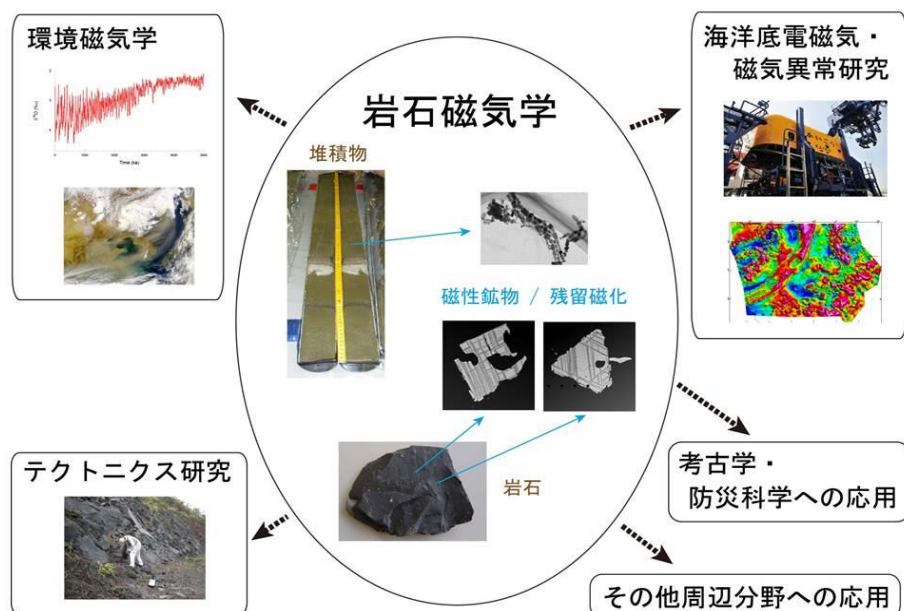


図 2.7 岩石磁気学とその周辺分野への広がり

## (2) 海洋底磁気異常研究

1950年代に発見された海洋地磁気縞模様は、1960年代に海洋底拡大の証拠となり、1970年代のプレートテクトニクス確立に貢献した。その後の海域磁気データ集積により、1980年代前半には過去約2億年間のプレート運動の概要が把握され、地球進化を知る上で重要な手がかりが得られた。1980年頃からは曳航式又は潜水艇など各種プラットフォームを用いた深海観測が始まり、海上からの観測では減衰して検出できない高振幅、短波長成分の地磁気異常が得られるようになった。短波長成分には、海底下構造と古地磁気に関する高空間・時間分解能の情報が含まれており、地磁気の極性反転に伴う縞状構造という一次近似的解釈から一歩進んだ、詳細な磁気異常の研究が可能となった。海洋地殻の磁化構造の問題やその応用としての海底熱水循環に伴う磁化構造変化、さらに既知の地磁気イベントでは説明できない短波長成分の成因などが主要なテーマとなった。今後は、未探査海域での海上磁気データの取得を進めると共に、高分解能な深海観測を効率的に展開していくことが必要である。

中央海嶺系を主体とした海洋地殻の磁化構造に関する研究は、多くの分野の研究と共に進展し、拡大速度の違いにより生じる海嶺の地質学的・熱的構造の多様性が、磁化構造をもまた多様なものになっていることが明らかになった。例えば低速拡大海嶺の磁気異常の成因については、磁気異常の主要な担い手である海洋地殻最上部の噴出岩層に加えて、セグメント境界付近などで生成される蛇紋岩化したマントルかんらん岩の寄与も大きいことなどが把握された。さらに一連の研究を進めるには、海底面および海底下から取得された岩石試料による岩石磁気学的分析と組み合わせた研究が望まれる。磁気異常観測から磁気異常ソース迄の一連の理解を進める研究は、地球のみならず、月・惑星の磁気異常を担う地球外天体内部岩石の磁性（ならびに電気伝導度）の把握のためにも重要である。

海洋地殻は過去2億年の地球磁場の連続的な記録媒体である。海洋底の玄武岩は海水との水岩石反応（低温酸化）を受け、初生の熱残留磁化を失い化学残留磁化を獲得していると考えられているが、時間連続性という面で大変有用である。中央海嶺においては、深海地磁気異常と相対古地磁気強度変動に良い対応関係のあることが確認されている。今後、汎世界的に数多くの海域から深海地磁気異常が得られたなら、グローバルな変動成分を取り出すことにより、過去2億年の古地磁気強度変動の特徴を引き出すことが可能となるかもしれない。特に、非逆転モードである白亜紀スーパークロン時の地磁気変動の解明に向けて、磁気異常の特徴は有力な情報源として期待される。

深海での磁気異常観測は、深海曳航フレーム、有人潜水船、有索無人探査機（ROV: Remotely operated vehicle）、自律型無人潜水機（AUV: Autonomous underwater vehicle）などのプラットフォームに磁力計を取り付けて行う。しかしながら、大規模運用が伴い観測の機会が限定されることから、深海地磁気測定は十分には行われていない。今後はROVやAUVを活用し、多台展開や高速化、大水深への対応などの技術発展も含め、深海地磁気異常データの蓄積を進めることが望まれる。その上で、限定された観測機会の中で地磁気データの情報量を増やすため、地磁気3成分を高精度で計測するなどのより良い観測法や、短波長データをそのまま生かすなどのより良い解析法が肝要である。今後の進展のためには、海底の露頭条件に大きく依存しない試料採取や定方位試料の取得を可能にする技術開発にも取り組む必要がある。

海洋地磁気異常のグローバルマッピングにも継続して取り組む必要がある。現状の観測では、船上3成分磁力計は船体磁気の影響が大きく絶対値は使いづらいという問題があるため、現在のプロトン磁力計（セシウム磁力計）のように曳航型の磁力計で3成分磁気異常を簡便に観測可能な小型・高性能3成分磁力計の開発が望まれる。

## (3) 環境磁気学—古気候・古環境変動、環境モニタリング

堆積物の磁気測定によって得られる情報は、過去の地球磁場の復元に利用されるだけでなく、磁性粒子の供給源や運搬過程、続成作用、さらにそれらに關与する気候変動の研究に

も有効である。堆積物の磁気特性を気候変動や汚染の問題等の環境システムの研究に利用する分野は環境磁気学と呼ばれる。環境磁気学という手法が成立する背景には、磁性粒子が地球の岩石や堆積物、土壌、さらに水圏や大気中にも普遍的に存在し、環境の差異に応じてその存在度や鉱物種、粒子サイズ等に変化が生じるという特質がある。このため、磁性粒子は過去の気候変動のプロキシ（代理指標）として、また現在の環境調査におけるトレーサーとしての役割を果たすことになる。

気候変動のプロキシとなる磁気特性についての研究は、深海底堆積物や湖沼堆積物、風成堆積物、沿岸堆積物など多様な試料を用いて進められており、氷期・間氷期サイクルや1000年スケールの気候変化、モンスーンの変動、海水準変動に対する沿岸環境の応答等に関する成果が得られている。また、炭酸塩微化石に乏しいことから年代制約が困難である南大洋海底堆積物において、大局的にダスト供給量のプロキシである磁化率や非履歴残留磁化強度を用いることで、南極アイスコアとの年代統合がなされている。今後、これらの研究をさらに発展させるためには、国際深海科学掘削計画（IODP）や国際陸上科学掘削計画（ICDP: International Continental Scientific Drilling Program）への積極的な参加、古気候・古海洋学分野の研究者との連携の強化が欠かせない。

一方、磁性粒子をトレーサーとして利用する手法は、環境汚染のモニタリングや風成ダストの発生と拡散に関する研究などに有効である。ヨーロッパやアメリカ、中国ではいくつかのプロジェクトが展開されているが、日本では体系的な研究が進められていない。日本列島は東アジアの風成ダストや広域大気汚染に関して重要な位置にあり、近隣諸国の研究者との連携により長期的な研究を行なう意義は大きい。

環境磁気学の新展開のためには、地球化学・古環境学分野などとの更なる連携も重要である。海洋化学を例にとると、2010年頃以降の微量元素の分析技術の発展が目覚ましい。これまで微量かつ海洋プランクトンの必須制限元素である海水中の鉄の量についても、吸光度を用いた測定技術が進歩して信頼性の高い値が得られるようになった。一方で鉄の形態に関する情報、つまり化合物名や粒径については、分光の技術が未発展であるために、その詳細は不明である。

そこで最近では他の物性、特に磁気特性を応用した鉄の形態を特定する方法が試みられている。しかしながら、海水中に存在する可能性のある鉄水酸化物（フェリハイドライト、ナノサイズのゲーサイト）や鉄硫化物（グレイガイト）については、磁気特性の基礎情報が十分でない。これらの化合物の基礎的な磁気特性データを充実させ、海水中における鉄の量や形態変化を明らかにできれば、たとえば、海洋プランクトンの増減が予測可能となるであろう。化学反応速度から考えると、海水中の微量元素の量や形態変化は、海洋プランクトンといった生態系での高次の元素利用者の増減よりも先んじて起こっているはずだからである。海洋環境変化の速度やその方向性を予測し、これらの変化に如何にして対応するかということを考えるためにも、環境磁気学は有用である。

環境磁気学では、様々な磁気パラメータや磁気特性が利用されるようになってきている。これらの意味についてさらに理解を深めるためには様々なアプローチが必要と考えられるが、たとえば、堆積物表層での初期続成作用に伴う磁性鉱物／磁気特性変化を詳細に把握することが必要であろう。また、そもそも堆積物に含まれる磁性鉱物は多様であるので、比較的理解が進んできている鉄酸化物・鉄硫化物以外についても、個々の磁気特性把握が必要である。技術面としては、氷（磁化の弱い試料）から磁性鉱物を検出する技術、すなわち、氷に含まれるダスト・火山灰・微少隕石などを「非破壊」で検出可能な技術の開発などが望まれる。様々な岩石磁気パラメータを用いて堆積物などに含まれる複数の起源による磁性鉱物を主成分解析などによって unmixing する試みがなされているが、中でも reversal process を扱った First Order Reversal Curve (FORC) の発展が著しい。しかしながら、その解釈は一意的で無い場合も多く、さらなる発展が望まれる部分である。

#### (4) 考古学への応用

古地磁気学や岩石磁気学が対象とする物質には天然の岩石だけでなく、人間が人為的に工作・加熱したものも含まれる。とくに、熱を受けた人工物はその時代の地磁気を反映した熱残留磁化を反映しており、その時代の地磁気方位・強度の復元が可能である(考古地磁気学)。考古遺物・遺跡の中には別途年代が判っているものも多く、考古地磁気学は地磁気永年変化の研究に寄与してきた。一方で、作成された永年変化標準曲線を利用して年代不明の遺跡に対する年代推定法としても利用されている。日本においては、現在までに過去2,000年弱分の方位・強度の変化が詳細に調べられており、火山岩試料や堆積物試料などのクロスチェックも並行しつつ、その年代区間をさらに拡張する作業が複数の研究グループによって進められている。今後10年、日本国内における縄文～旧石器時代を含む過去への地磁気永年変化曲線や年代推定法の延長に加え、韓国や中国等の東アジア各地のデータとの比較検討による高精度の地域モデルの構築が期待される。さらに、調査範囲をこれまで系統的な考古地磁気学的研究が行われてこなかった東南アジア地域等へ拡張するなど、さらなる発展が望まれる。

一方、土壌や粘土は高温に曝されることで、磁鉄鉱をはじめとする強磁性鉱物を晶出することが知られている。この性質を利用して、表面帯磁率計測を利用した遺跡内における被熱箇所(炉跡や焚火跡)の推定や、磁場探査による埋没被熱遺構の発見などにも寄与してきた。しかし、土壌や粘土の物質中に含まれる鉄が熱を受けたときどのような挙動をするかについては未解明な部分も多い。考古地磁気の残留磁化保持物質としての磁性鉱物の研究と合わせ、岩石磁気学的なさらなる発展が望まれる。

#### (5) 防災科学への応用

地震や火山活動に伴う災害を最小限に食い止めるには、それらの発生過程や発生履歴の理解が不可欠である。海溝型地震では、地震に加えて津波も発生するため、これらの発生過程やその履歴を解明するために、ICDP・IODPの枠組みを利用して、断層掘削研究(たとえば、台湾チェルンブ断層掘削(TCDP)など)が実施され、断層岩や津波堆積物の岩石磁気・古地磁気研究から地震すべり面の特定、地震時の温度上昇の見積りや磁性粒子をトレーサーとする津波堆積物の特定がおこなわれている。今後も新しい手法の開発と共に掘削プロジェクトや掘削試料の分析を支援する枠組みの維持が望まれる。また、環太平洋沿岸に普遍的に分布する津波や火山性泥流起源の巨礫を、古地磁気・岩石磁気の視点から研究し、考古地磁気のデータベースと津波工学との連携によって各地域の過去の津波や火山性泥流の規模・時期を決定する試みに取り組む。火山活動予測の一つとして、火山体の磁場変動が多くの火山で報告されているが、現状では山体内部の磁性鉱物の空間的分布を考慮せず、消磁を温度上昇と解釈することが多い。今後は、浅部熱水系に由来する硫化鉄や水酸化鉄の温度上昇に伴う磁鉄鉱への変化による着磁など、火山学の進展によって明らかとなってきた火山体の不均質な磁性鉱物分布とその温度変化の多様性を加味した磁場変動解釈に取り組む。火山噴出物の物質科学的解析から、マグマ供給系の理解と噴火時のマグマ火道ダイナミクスの理解が進んできた。近年普及してきたフィールドエミッション型電子顕微鏡などによってナノサイズ粒子の研究が急速に進展し、噴火時の脱ガス・発泡現象の詳しい描像が得られつつある。特に火道上昇中の温度・圧力条件下で結晶化するFe酸化物の産状の解析からは多くの情報が期待でき、鉱物学的手法に加えて、岩石磁気学的手法でアプローチすることで、高精度で定量的なデータの取得に取り組み、噴火ダイナミクスの理解を目指す。これらにより、国内外の各地域の減災に貢献できる。

## (6) 法科学への応用

事件や事故の現場から採取された土砂などの地質学的な試料は、非破壊で迅速な分析が求められる。岩石磁気学や環境磁気学において培われてきた岩石中の磁性鉱物の量や種類などを推定する手法は、このような分析が可能であり、ヨーロッパでは科学捜査において標準的な方法として認識されつつある。また考古磁気学で培われた被熱跡や鉄製品の秘匿物の位置を磁気測定から推定する方法も同様に、事件や事故の現場での科学捜査に応用されている。日本では、この分野の研究者数が少なく、また研究例も多くない。法科学分野の地質学的な試料への対応を行う委員会を発足し、研究の普及や次世代の育成をバックアップしている学会もある。当学会においてもアウトリーチなどで普及の機会が望まれる。

## 2.8 太陽地球系と地球内部を結ぶ科学課題

### 2.8.1 地磁気擾乱に伴う日本での地中誘導電流の解明

(概要・研究目的・意義)

この研究は、磁気圏・電離圏に引き起こされた擾乱によって地中に誘導される電流（GIC: Geomagnetically induced current）が送電線などの日本社会のインフラに与える影響を現実的に推測するというものである。GIC は1989年3月13日にカナダ・ケベック州で600万人に影響する停電事故を起こしたのを契機に社会的に認知され、主に欧米などの高緯度地方で調査が行われてきた。しかしながら、2011年の東日本大震災を機に、頻度が低い極端現象が与える危険の存在が認識されるようになり、地磁気緯度が低い日本でも千年に1度程度の巨大地磁気急変現象時にどれほどの誘導電流が流れるか、未調査であることが浮き彫りになった。

巨大GICの推定は社会的に重要であるだけでなく、太陽-磁気圏-電離圏-地殻・マントルに関係する分野横断的な新しい研究テーマである。即ち、大規模なGICを推定するためにはまず太陽活動の物理機構を解明し、大規模な太陽フレアの発生頻度を知らなければならない。そうしてさらに、大規模なフレアが引き起こす磁気圏・電離圏電流系の擾乱を見積もり、地上に到達する磁場擾乱の推定が必要である。これらの研究は理論的な考察と同時に、これまで蓄積されたデータの統計解析を行うことになる。そのうえで、精密な地下電気伝導度分布を用いて、地表に誘導される電場のモデリングを行わなければならない。最後に送電線網のインピーダンス情報を手に入れて、GICを計算することになる。当学会がこれらの研究分野をそれぞれ推進してきたことを鑑みれば、巨大地磁気擾乱現象によって日本で誘起されるGICの推定は、当学会において推進されるべき課題である。



図 2.8.1 地磁気急変現象による地中誘導電流（GIC）

(最終目標)

大規模太陽フレアの発生頻度、磁気圏・電離圏擾乱、現実的な地下電気伝導度分布、地表における誘導電場、送電線網の回路情報などの個々の項目の見積もり精度を上げることに加え、個々に活動してきたそれぞれの分野の研究者の緊密な連携が必要となる。さらに、社会への還元という意味では、インフラ運営会社、行政、当学会外の研究者にとってわかりやすい形式で情報を整理する必要があり、ハザードマップなどのGIC分布の作成や過去に日本で行われてきた見積もりとの違いの精査などが求められる。

(近年の進展)

世界的に見ても、ここ数年間は、中低緯度でのGIC研究、極端宇宙天気現象研究、地中の3次元的な電気伝導度分布が地表の電場・GICに与える影響の研究などが活発化した。日本



においても、最も極端な電気伝導度不均質である海陸分布を取り入れた誘導電場・GICの研究が行われるようになり、GICの見積もり精度が向上している。

さらに、電力会社の協力を得て GIC の直接観測を数カ所の変電所で行っている。また、GIC と柿岡地磁気観測所で観測した地電場の関係式が得られ、1859 年に発生した超巨大フレアが再来した場合に流れる GIC の推定を行うことができた。日本列島の地下比抵抗分布を取り入れた 3 次元電磁界シミュレーションと送電網モデルを組み合わせた GIC シミュレーションが開発され、GIC の観測値と比較することができるようになった。観測データと現実的なシミュレーションを組み合わせ、日本列島を流れる GIC の性質を正しく把握し、正確に予測することができる技法を開発していくことが重要である。

(次のステップ)

海陸分布以外の電気伝導度分布が GIC に与える影響について、日本では見積もられていない。日本列島の陸域及び沿岸海域での高密度な電磁気観測及び得られた電気伝導度分布モデルや実測インピーダンスのデータベース化が望まれる。

分野横断型の巨大 GIC の研究が始まり、他分野の知見が活かされる素地ができてきた。信頼に足る地下の電気伝導度分布がまとめられ、電磁誘導が精密に計算できるようになると、地上や低高度衛星での磁場観測データを精密に内外分離することが可能になり、地球内部の研究者・太陽-地球環境の研究者双方にとって、さらに新しい研究分野が開ける可能性もある。

## 2.8.2 地圏を含むグローバルサーキットモデルの再構築

地圏(固体地球および海洋)と電離圏が成す平行コンデンサーを基本構造とする全球電流回路(グローバルサーキット)仮説は1920年代にC. T. R. Wilsonによって提唱された。大気電場の日変動(カーネギーカーブ)は、UTで固定された変化を示しており、最も大気電場が高い時刻は、最も積乱雲が発達するアフリカ域が昼の時間帯に一致するためである。その後、鉛直大気電場観測によって電流回路の存在が確認され、数値モデルによる再現も試みられている。しかしその数値モデルにおいて、雷・降雨活動に依存する発電機能や電気伝導度に依存するコンデンサー形状の時間的・空間的非一様性などの入力変数が現実的に即して考慮されているとは言えず、モデルの再検討が必要である。モデルの再構築によって、下層大気と超高層大気の電気的な上下結合の度合いと、その結合過程に雷・降雨活動が果たす役割を定量的に明らかにすることが可能となる。従来は、下層大気から超高層大気への一方的なエネルギー流入源として大気重力波が考えられてきたが、グローバルサーキットが下層大気と超高層大気の間でどのように電磁エネルギーを輸送しているのかを特定することは、これまでほとんど考えられてこなかった大気圏-電離圏-磁気圏の電気的な結合過程を解明する上で極めて意義が高い。

本研究における長期的目標は、先ず、グローバルサーキットの数値モデルにより現実に即した情報を入力するための観測を拡充することである。特に、晴天域における鉛直大気電場観測や雷放電によって放射される電磁波動の観測が重要となる。次に、近年の技術革新によって可能となった静止気象衛星からの雷放電観測(GOES-R搭載GLM: Global Lightning Mapper、MTG搭載LI: Lightning Imager)や、全球降水観測計画(GPM: Global Precipitation Measurement)による降水観測などの結果を数値モデルに反映させることである。それらによって、雷・降水活動がグローバルサーキットでの電源として果たす役割を定量的に明らかにすると共に、地圏-大気圏-電離圏-磁気圏の結合過程においてグローバルサーキットが果たす役割を特定することが最終的な目標となる。ただし、晴天域の観測でも、上空に雲が通過することで、大気電場の変化は観測されており、また、近傍で雷が発生することでも擾乱が発生する。したがって、晴天での正確な大気電場の観測には留意が必要である。

これまで行われてきたグローバルサーキットの研究によって、この電流回路における充電機能を担うのは積乱雲の中で起きている電荷分離であり、それが大局的にみると上向き電流を発生させていると考えられている。雷雲の上空は、宇宙線によって生じたイオンが、



雷雲中の電荷が作る上向き電場によって移動することで上向き電流を形成する。また、近年ではスプライトに代表される Transient Luminous Events (TLEs) が、雷雲上空の電流回路形成に大きな役割を果たしている可能性が示唆されている。一方雷雲の下方では、帯電した降雨粒子やコロナ放電、落雷によって、やはり上向きの電流が地表に接続される。雷雲上空の電流が電離圏下部まで達すると、電流は水平方向に拡散し全球の晴天域で下向きの電流として地表まで到達し、先の雷雲下方の上向き電流と地圏を介して接続する。晴天域での下向き電場は 100V/m 程度だが、その値は、全球で発生した電力の総和として、全ての晴天域で同期した形で日変化を示すとされている。Wilson の提唱後、1970-80 年代頃には数値モデルとして精密化が進み、近年では衛星による雷・雲・降水観測等に基づいて、対流圏の発電装置である雷雲活動の分布や強度の時間変動について、より現実的に即した入力情報が使われるようになりつつある。しかしながら、回路上端の電離圏・磁気圏と下端の地圏については完全導体を仮定した計算が主流であり、特に、地圏の電気伝導度の水平および立体的な構造については全く考慮されていない。2.6 節に述べたように、地圏の電気伝導度は海洋と地殻、また地殻・マントルの組成と状態による水平構造を持ち、さらに鉛直方向にも様々な空間スケールで差異が存在する。雷活動の時間変動スケールは、季節変動や 1 日変動など比較的長期のものから、雷雲寿命の数時間さらには数分以下の短期のものまであり、それが地域や地方時で複雑に変化する。さらに、電離圏・磁気圏電流にも様々な時間スケールの変動が存在し、それによって生じた電磁場が地圏に電流を誘起する効果も考慮が必要になる。これらを全てグローバルサーキットの数値モデルに取り入れる段階には未だ至っておらず、地圏・大気圏・電離圏・磁気圏の電氣的結合過程の理解に繋がっていないというのが現状である。

こうした大気圏および電離圏・磁気圏の発電機能の時間変動と電気伝導度の複雑な空間構造は、グローバルサーキットが単純な 2 極板コンデンサーモデルでは表現できない可能性を示唆する。特に、時間的・空間的スケールのダイナミックレンジが広い電磁場変動が、地圏の構造と関わってグローバルサーキットをどのように変調する(しない)のかについて、本格的な検討は殆どなされていない。現実的なグローバルサーキットモデルの再構築を考えると、地圏電流系の動態把握は重要なテーマのひとつであり、太陽地球分野と固体地球分野の研究者のより一層の連携が求められる。

### 2.8.3 人工衛星による高精度地磁気観測から解明できる現象

最近の低軌道地球周回衛星 (Ørsted、CHAMP、SWARM など) は先例のない高精度高分解能の磁場観測データをもたらした。そのおかげで、地球コアから磁気圏にわたる多様な起源を持つ磁場についての研究が進展した。

#### (1) 磁気圏—電離圏結合系における沿磁力線電流と 3 次元電流構造の研究

主磁場が主な磁場源となっている領域である電離圏には、磁気圏との相互作用により電流の流入・流出が起き、二次的な磁場が生じている。この相互作用を担う沿磁力線電流は、磁気圏プラズマの運動を電離圏に投影することにより、磁気圏からのエネルギーを電離圏に伝えたりオーロラを光らせたりするなど、磁気圏—電離圏結合系において本質的な役割を果たしている。また、中緯度電離圏に見られる現象の空間構造の決定に寄与する南北両半球間の結合過程の形成にも、沿磁力線電流が深く関与していると考えられている。沿磁力線電流の影響は地上磁場変動にも現れるが、地上磁場観測のみからでは沿磁力線電流の効果と電離圏電流の効果との区別が困難である。そのため、沿磁力線電流の研究は主として衛星磁場観測によって発展してきた。沿磁力線電流の存在自体も、1970 年代の衛星磁場観測の成果によって初めて広く受け容れられるようになったものである。また、Region-1、Region-2 と呼ばれる 2 層構造に代表される極域沿磁力線電流の大規模空間構造も、低高度衛星による磁場観測によって得られた描像である。

衛星磁場を用いて沿磁力線電流を調べる際には、観測される磁場の時間変化を衛星の軌

道に沿った空間変化であると仮定するため、単一衛星のデータからでは、沿磁力線電流が時間的に変動しないという前提のもとに電流密度の導出が行われていた。また、衛星軌道に垂直な方向の空間変化を観測することができないために、電流層の一様性を仮定する必要があった。2013年に打ち上げられた低高度極軌道衛星群である Swarm は、3機の衛星が編隊飛行をすることにより、電流層近傍の磁場の空間変動を直接観測することが可能になった。これにより、電流密度が精度よく求まるだけでなく、時間変化と空間変化との識別もある程度可能になっている。近年では、Cluster、THEMIS、MMS など高高度で磁気圏を高精度観測する衛星と Swarm との同時観測イベントの解析によって、磁気圏を流れるグローバルな電流系や、磁気圏におけるエネルギーの流れと電離圏の応答に関する研究が盛んに行われている。磁気圏内の様々な場所における編隊飛行衛星群による磁場観測データを、地上観測網の磁場データとも組み合わせることにより、磁気圏・電離圏電流系の3次元的な空間構造や、そのダイナミックな変動の解明が可能になると考えられる。

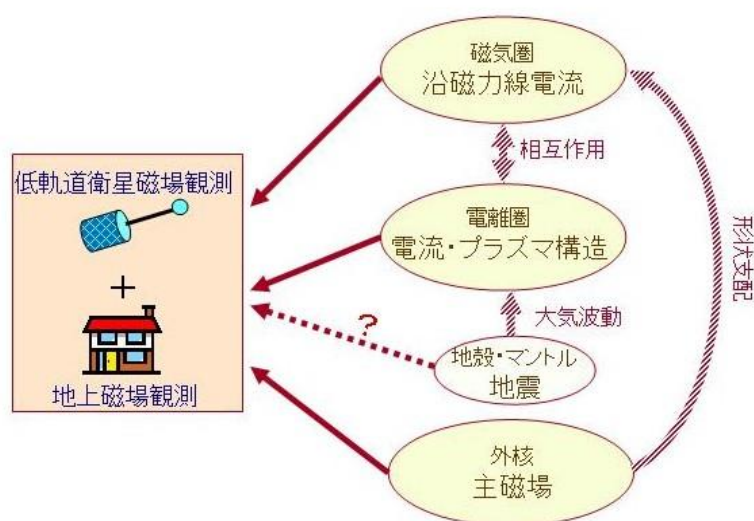


図 2.8.2 地上と衛星による地磁気観測が扱う科学課題

## (2) 電離圏現象の研究

2.2節および3章で述べたように、電離圏は、低軌道の人工衛星が飛翔する領域に存在する高密度のプラズマ領域であり、長距離短波通信に利用されたり、衛星-地上間通信の障害や測位誤差を発生させたりする重要な領域である。低軌道地球周回衛星による高精度な磁場データが研究に貢献する電離圏の現象は、(i) 赤道・オーロラエレクトロジェット電流や沿磁力線電流のような大規模な電流系、(ii) 中規模伝搬性電離圏擾乱 (MSTID)、(iii) プラズマバブルやプラズマブロップ、極冠パッチに代表される電離圏プラズマの不規則構造、(iv) 地上磁場と衛星磁場の観測の組み合わせから、地磁気脈動やその伝播における電離圏効果の抽出が挙げられる。(i)、(iv)は衛星による高時間分解能のその場観測が有効な例であり、これまでも多くの研究がなされてきている。今後は、Swarm衛星群による編隊飛行磁場観測によって時間変化と空間変化を分離し、現象の動的な特性を明らかにするための研究が行われていくものと考えられる。(ii)、(iii)に関しては、例えばCHAMP、Swarmなどの衛星によって、極冠パッチやプラズマバブルに伴う電子密度擾乱の磁氣的性質(反磁性効果による磁場変動)が検出されており、これらの現象の統計的性質が明らかにされつつある。これは、低高度衛星による磁場の高精度観測が電離圏プラズマの諸現象の観測にも有効であることを示すものである。

### (3) 地球コア起源の主磁場の研究とその活用

2.5.1(1)節にも述べたように、過去20年以上に渡り低軌道地球周回衛星による膨大な量の地球磁場観測データが蓄積された。極めて稠密で一様に分布した衛星データが得られたことで、起源の異なる磁場(図2.8.2参照)の分離が高精度化し、その成果としてコアに由来する主磁場の時空間分解能も著しく向上した。主磁場グローバルモデリングの目覚ましい進歩の例として、空間的には18次までの球面調和関数、時間的には半年間隔の4次Bスプラインで展開された主磁場モデルの登場が挙げられる。同スプラインの採用は、主磁場永年加速(2階時間微分)の適切な表現を念頭に置いたものであり、これにより永年加速の時空間分布までも議論の対象となった。

起源分離の高精度化による特筆すべき成果の一つとして、主磁場の微細な経年揺動が検出されるようになったことが挙げられる。この揺動は、電磁流体波理論や数値実験からも示唆されているコア流体の波動に起因すると考えられる。特に約6年の周期帯では、「ねじれ振動」理論に基づくコア流体波動モデルが、主磁場揺動のほかに、観測された地球自転変化の位相とも整合することが示されている。今後の主磁場およびコア経年変化モデリングの発展は、経年コアダイナミクスの解明のみならず、主磁場変化の短期予測精度向上にも資すると期待される。なお、地表定点観測から知られていた地磁気27ヶ月振動(準2年振動)は、主として太陽活動による磁気圏・電離圏電流系変化に起因するとされている。同じ周期帯の主磁場変動の検出のためには、衛星データの蓄積とともに太陽活動、大気変動を考慮した包括的地磁気モデリングの進展が必要となる。

衛星観測から得られた知見は国際標準地球磁場(IGRF)にも反映され、広く利用されている。たとえば、電離圏・磁気圏プラズマの運動は、地球の主磁場に強く支配されるため、電離圏・磁気圏科学において主磁場の情報は重要である。磁気圏現象は基本的に磁力線に沿って電離圏に伝わるため、磁気圏現象と電離圏現象とを比較する際には、精度のよい磁場モデルによる磁気圏から電離圏へのマッピングが必要となる他、南北半球の地磁気共役点の決定も場合によっては有用である。また、放射線帯粒子などの高エネルギー粒子の分布にも磁場が強く影響する。例えば、南大西洋磁気異常領域では放射線帯粒子が低高度まで侵入しやすくなっていることが知られており、高エネルギー粒子の侵入予測やリスク評価にも正確な磁場の情報が重要となる。一方、磁場観測による地殻・火山活動監視では、主磁場の永年変化成分を正確に取り除くために信頼度の高い時間連続主磁場モデルが利用できるようになった。近年ではデータ同化技術を応用し、ダイナモ数値シミュレーションモデルと地磁気観測を統合することで複雑なコア流体ダイナミクスに起因する地磁気永年変化の将来予測(数年～数十年スケール)も試みられており、今後は更なる衛星データの蓄積により予測精度が向上することが期待される。

### (4) 今後に向けて

現在も継続中である連続衛星観測の開始は、長い地球磁場観測史の中でも革命的な進展であったと言える。全球を覆う精密なベクトル観測は、主磁場のより詳細な分布と変動を明らかにし、電離圏・磁気圏電流系について知見を与え、地殻磁化の空間解像度を大幅に向上させた。衛星計画の下に多分野の研究者が集まってさまざまな現象を調べることで相乗効果が生まれており、今後はさらに太陽地球系と固体地球系の研究グループの結びつきが深まっていくと考えられる。例えば、主磁場の微細な経年変動の検出では、静穏日の磁気圏電流系が太陽活動の周期に伴って変動する影響を考慮に入れることが必要になるであろう。モデル計算からは、主磁場を良導体である海水が運動することによって誘導されるダイナモ磁場のうち、潮汐のような大規模な運動に起因する成分が検出されることが示唆されている。マンツルの電気伝導度の3次元分布の効果をより詳細に取り入れた誘導磁場の計算ができるようになると、電離圏・磁気圏電流系に含まれる成分の見積もりに影響を与える可能性もある。

地上の多点磁場観測は、その歴史的継続期間の長さや、定点観測による時間変動の信頼性

という点で貴重なデータをもたらし続けている (5.2.1 節) もの、空間的な疎らさと偏りは克服できない。衛星観測はこれとちょうど相補的な関係にあり、両者による観測を平行して継続していくことは地球磁場の観測的研究において非常に重要な意味を持つ。衛星によるその場観測のデータが磁気圏・電離圏の諸現象を直接観測できる唯一の手段であること、主磁場変動は数十年から数百年といった長周期にもピークを持っていることから、衛星磁場観測の継続の有効性は明らかである。中国の CSES やフランスの NanoMagsat など、既に各国で新しい低軌道地球周回衛星の開発と運用が進められているが、当学会でも多くの分野にまたがる研究者が協力し、継続的な低軌道地球周回衛星の打ち上げの実現に貢献し、地上観測と組み合わせて解析をしていく必要がある。

## 2.8.4 地震に伴う変動の理解

(研究の目的と意義)

地殻活動に伴う地球電磁気現象として、従来から地震や火山噴火に先行、並行または関連して生じる現象の観測的・理論的研究が進められてきた。地震、火山噴火はいずれも中心的には力学的、熱的及び化学的現象とみなせるが、これらが地殻物質の物理的・化学的過程を介して地球電磁気現象をもたらすことは先行研究の蓄積の中で知られている。火山が噴火活動の開始から収束までの間に地球電磁気現象をもたらす過程については、これまで複数の活動的火山の周辺に地球電磁気観測点が配置され、同様に展開される多項目の観測によるデータとの比較から解釈が築き上げられてきた。その一方で、地震に伴う地球電磁気現象に関する観測研究については、時間的な再現性、空間的な観測点分布の 2 点において困難が伴う。この困難の回避ないし克服を目指す研究アプローチとして、地震と関連しない通常の地球電磁場(「標準場」)の定義、地球電磁場自体に代わり地球電磁場に密接に関連する新たな物理量への着目、限られたデータの中に含まれる異常の同定のためのデータ解析手法の開発などの研究が進められてきた。

日本において近代的地球物理観測手法が展開されるようになった 19 世紀以降、人命的・社会的に大きな被害をもたらしてきた中心的な地殻活動は地震である。地球物理観測に基づいた知見による人命的・社会的地震被害の軽減への寄与は、社会に生きる地殻活動研究者の宿願の一つとなってきた。地震に伴う地球電磁気現象の解明を通じて、断層運動と地震準備過程における物理的・化学的過程の解明と、これを通じた人命的・社会的地震被害の軽減がこの研究の目的と意義となる。

(長期目標)

地震に先行、並行する現象の検知と、現象の有無と量に関する解釈の確立が、地球電磁気学研究を通じた地殻活動研究における学術的目標となる。太陽地球系の電磁気現象としての理解にとどまらず、地震学、測地学などの固体地球物理学とともに統一的な地震過程の描像を得るうえで、従来の固体地球物理学では得られていない知見をもたらすことが地球電磁気学の目標達成に対する役割である。

(現状での到達点)

国土規模での地球電磁気連続観測データの蓄積と解析手法の開発により、時間分解能 1 日の国土規模の地磁気変化モデルが構築されるようになった。地磁気変化の国土規模における標準場が、地磁気変化モデルの更新及び精度向上を通じてその整備と活用が進められれば、今後、地震に関連する空間的・時間的異常場の検知に資することが期待される。

地震に先行する GNSS-TEC の異常変化に関する研究は、地球電磁場の変動と直接に関連する、時間的に継続的かつ空間的に面的に分布するデータからの推定量として、特に大規模な地震との対応に関する事例の蓄積が進んだ。しかし現象の理論的説明については、先行研究が基づいてきた大気圏・電離圏のモデル計算手法の良否はもとより、地表における地球電磁気観測事実とモデル計算における仮定との著しい齟齬が指摘され、蓄積された事例の理論的理解の追究は引き続き重要な課題となっている。

複数観測点における地磁気データのディープラーニングにより、データに含まれる異常

を同定する手法の開発が進められてきた。断層運動の開始に伴う異常な地磁気変化の瞬時の同定を通じた警報の発生への応用が目指されている。

(次のステップ)

現状での到達点を踏まえた上での国土規模の地磁気変化標準場に関する課題として、現行の時間分解能の1日から更に高分解能にすること、精度を現行の約3nTから更に向上することが挙げられる。

地震に先行するGNSS-TECの異常変化に関する研究に関する課題として、継続される事例の蓄積から、異常変化の特徴をより詳細に記述すること、地震との関係にとどまらずGNSS-TEC自身の理解を深めることとともに、電離圏・大気圏・固体地球のすべてにおける現象の無矛盾な理論的理解の構築が挙げられる。

地磁気データのディープラーニングによる異常の検出においては、地磁気変化に関する既知の理解のデータ解析への取り込みが、計算の高速化や計算結果の精度向上に資する可能性がある。従来の情報学的アプローチではディープラーニングに対してデータからの未知の法則性の抽出が期待されるのに対し、地磁気データでは複数観測点における共通な変化自体に地球科学的法則性が存在するためである。

そのほか、地震断層周辺における観測に基づく地球電磁気学研究の困難に対し、震源に仮定しうる物理的・化学的過程に基づいて予測される力学的・電磁氣的現象の理論的検討を通じた観測のデザインは引き続き重要である。地震学・測地学との共同の進捗がまたれる。また海外では既に行われている、人工衛星を用いた面的な地球電磁気データの収集による地震に先行、並行する電磁気現象の研究は魅力的であり、その可能性の探求が期待される。

### 3 社会との関わり

2章で詳述したように、本学会は、太陽地球環境、超高層領域、固体地球系に生起する様々な現象について研究を行ってきた。その活動は地球・宇宙電磁気学の萌芽に始まり、宇宙物理学の開拓、それを推進するための宇宙工学の発展にも大きく貢献している。例えば、科学衛星による宇宙環境観測の推進、宇宙機と宇宙プラズマの相互作用の精査、宇宙推進システムの開発などは、本学会の研究活動と密接に結びついている。

一方、機械化・情報化が高度に進み、人類がその活動域を拡大した現代社会は、常に様々な自然災害の脅威にさらされるようになってきている。それに伴い、本学会で行われる研究活動は、災害の原因となる自然現象を理解しそれに対処する方策を示すという実学的側面にもまた広がってきた。日本列島はプレートの沈み込み帯縁部という地殻活動の活発な地域に位置するため、我が国はこれまで、地震・津波や火山噴火などによる災害をたびたび経験してきた。そして、いまや社会基盤の一部となった、成層圏を網の目様に飛行する航空機群、科学探査、環境モニタリング、資源調査、通信、測位といったあらゆる用途の人工衛星、およびそれらを結びつけるネットワークインフラストラクチャーは様々なレベルでの宇宙災害を被る可能性があり、人類の活動領域が宇宙空間へと拡大する中、宇宙飛行士の人体被曝リスク低減も避けて通れない大きな問題となっている。このように高度に発達した人類の活動を安定的に維持し、それに対する災害のリスクを最小限にとどめるために、我々はこれまで蓄積してきた科学成果を知識基盤として再構築し、社会に還元する必要がある。今後進めるべき科学的施策も太陽地球惑星圏システムに発露する現象の発見と理解だけではなく、そのモニタリング・予測へと踏み込むことを躊躇すべきではない。

宇宙工学の発展や宇宙地球電磁気現象のモニタリング・予測成果を知識基盤として整え、宇宙工学の発展、自然災害・宇宙災害のリスク軽減等を通じて社会に還元することが、太陽地球惑星圏科学への信頼、ひいてはその発展へと繋がっていくであろう。本章では、宇宙地球電磁気学、宇宙天気・気候科学、宇宙工学の進展について、人類活動を支える知識基盤の構築という観点から、現状の報告と将来への提言を行う。

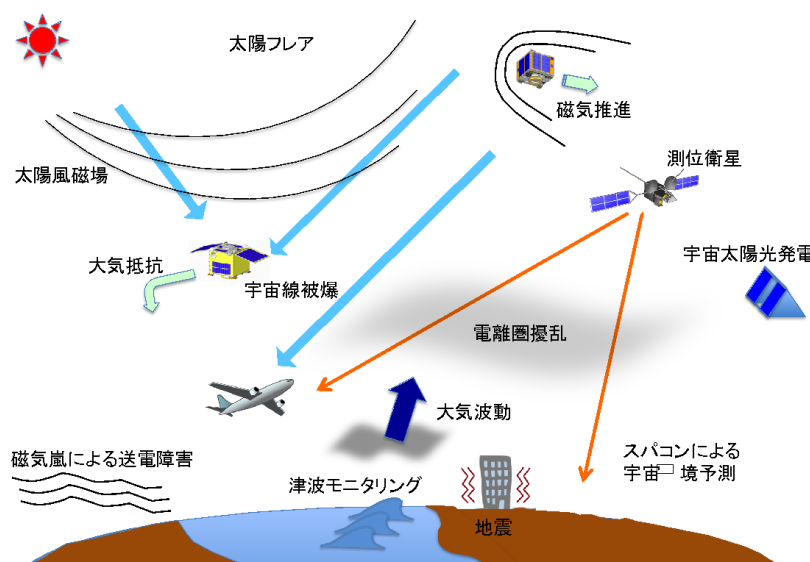


図 3.1 太陽地球圏と人間活動とのかかわり



## 3.1 人類社会基盤への影響

### 3.1.1 太陽地球圏現象が人類の宇宙での活動に与える影響

宇宙利用時代に入って半世紀以上、人類は宇宙への進出を続け、そこに構築されたシステムは日常生活の社会基盤と密接に結び付くまでに至った。このように人類が新たな生存圏を開拓した結果、特有の問題も生じるようになった。

宇宙機・観測機器への影響：過去には、多くの重大な衛星異常や故障が報告されている。故障の主因は、

- ①表面帯電：サブストームに伴う粒子の注入により、衛星表面にプラズマが帯放電し障害を引き起こす現象
  - ②内部帯電：磁気嵐後の放射線帯の高エネルギー電子フラックスの増加により、衛星交代を突き抜けた電子が内部ケーブル等に帯放電し障害を引き起こす現象
  - ③シングルイベントアップセット：太陽フレアに伴う高エネルギー粒子等により、衛星の電子機器（半導体素子）に衝突した際に信号エラーを引き起こす現象
  - ④トータルドーズ：太陽フレアに伴う高エネルギー粒子等による衛星の損傷が蓄積し衛星機能が低下・喪失する現象
  - ⑤大気ドラッグ：太陽活動の増大により地球大気が膨張し、低高度衛星との摩擦が増加することにより衛星軌道が変化する現象
- などがある。

原子状酸素による表面材料・被膜の酸化、その結果生じる剥奪も、特に低高度衛星には深刻である。これらの影響については、「受けた影響（発生後の原因究明）」と「受ける可能性の影響（発生する可能性と軌道上運用対策）」の両方を考えて行く必要があり、“発生環境の予測”についても研究を深めていく必要がある。また、月着陸や惑星表面探査などの計画に向けては、宇宙線等による二次的に発生する中性子等の影響についての検討も議論していく必要があろう。

大気ドラッグに関しては特に高度 500 km 以下を飛行する低高度衛星においては、軌道保持のために大気密度変化に伴う空気抵抗を考慮する必要があり、宇宙天気との関連では、磁気嵐などの突発現象による空気抵抗の変化が宇宙機に及ぼす影響を理解し予測する必要がある。現在、宇宙機の落下予測を精度良く実施することが不可能な原因の一つには、このような大気密度変動を正確に予測できていないことが挙げられる。今後の課題としては、地上磁場擾乱、電離層電場観測などから見積もられた大気膨張率と実際の衛星軌道変化の比較研究による経験モデルの作成と、磁気圏-電離圏-熱圏結合シミュレータによる第一原理的な衛星高度での大気密度変動モデル作成等が挙げられる。特に、高度 150-250 km での大気密度は計測例が極めて少なく、例えば、超低高度衛星技術試験機「つばめ」などによる実測データも磁気圏-電離圏-熱圏結合シミュレータに反映させることが望まれる。

新たな宇宙探査・宇宙インフラの実現に向けた課題：人類の新たな可能性を拓くためには、宇宙探査の継続も不可欠である。そして、深宇宙の探査には、長時間にわたって推進力を得ることのできる装置が必要である。はやぶさ、はやぶさ 2 に利用されたイオンエンジンは代表例である。そして、そのイオンエンジンの動作や高効率化には本学会がもつプラズマに対する知見が有用である。また、更に、太陽光圧による薄膜推進、太陽風圧による磁気プラズマ推進など新しい推進装置開発に対し、当学会における宇宙プラズマの視点・知見から貢献していくことも重要である。

宇宙太陽発電衛星（SPS）は、クリーンで安定した新エネルギー源を確保する手段として有望視されているが、巨大建造物を宇宙空間に構築することによる宇宙環境への影響や、エネルギー伝送用マイクロ波と宇宙プラズマや大気との相互作用による影響などは、宇宙プラズマ中の物理素過程の理解が不可欠である。すなわち、宇宙建造物やプラズマとマイクロ波の相互作用などに関わる大規模シミュレーション、さらにはロケット実験による直接計測など、将来の宇宙利用を視野に入れた研究が必要であらう。



一方、宇宙における人類の次の大規模活動の場となる月面環境は、本学会がもつ知見が大きな貢献を果たす場となるであろう。月面は絶縁体に近いレゴリスと呼ばれる砂で覆われている。そのため、周囲のプラズマの温度・密度などにより容易に帯電状況が大きく変化する。更に、その帯電は光電子の放出によっても変化するため、日照・日陰の差によっても帯電状況は変化する。その空間スケールは、月の半球(日照域と日陰域)から、レゴリス砂粒表面の日照・日陰スケールまで様々であり、これは、月面における人間活動に対し、機器から人間の健康までさまざまな影響を与える可能性がある。そして、月は、地球磁気圏と太陽風中を移動するため、帯電に及ぼす物理パラメータが大きく時間によって変化する他、磁気圏中のプラズモイド、太陽風中の CME など突発的な現象の影響も受ける。これらの宇宙プラズマの影響による月面の帯電現象と、それを計測し、変化を予測するための知見を本学会は有しており、今後の月面における人間活動の拡大に対し、大きな役割を担う必要がある。

### 3.1.2 太陽地球圏現象が既存の社会基盤に与える影響

電離圏擾乱がもたらす通信・放送・測位への影響：短波通信・放送は比較的安価な装置で地球全体に情報を提供することができる経済的なシステムであり、現在でも様々な分野で他の通信手段の補完的な役割を果たしている。短波は電離圏で反射する性格があるため、電離圏と地上の間での反射を繰り返すことで見通し外の領域まで伝搬することが可能である。電離圏が太陽活動等により通常の状態から変化すると、短波が反射しなくなり通信・放送利用が制限されることが知られている。例えば太陽フレアで発生する紫外線により電離圏 D 領域の電子密度が増大することで発生するデリンジャー現象、高エネルギー粒子による極冠域吸収、磁気嵐に伴い発生する負相電離圏嵐などで短波利用は大きく制限されることが知られている。

また近年利用が増大する衛星測位に使用されるマイクロ波 (L 帯) は電離圏を通過する電波を利用して行われるが、磁気赤道に対称に南北に発達するプラズマバブルの発生はロック損失をもたらす、測位利用が制限されることが知られている。また正相電離圏嵐によって電離圏の厚みが増大することで電離圏遅延が大きくなることで測位誤差が増大することも知られている。

現在防災無線等に使用される VHF 帯の電波は通常電離圏伝搬は発生しないため、見通し外の領域では同一周波数を別用途で使用することがある。しかしながら、スプラディック E 層が発達すると、通常発生しない VHF 帯の電離圏での反射が発生し、遠方からの予期しない電波による干渉が発生することが知られている。

このような通信・放送・測位への影響に対して指標を作り、影響が出そうな規模の現象発生時には警報発信を行う検討が進められている。社会インフラの安全な運用に貢献するために、電離圏現象の理解を深めることで電離圏変動の現況把握の向上と予測の高精度化を行い、社会事業者との連携により定量的な影響評価と対策検討を進めていくことが必要である。

空気シャワーがもたらす航空機乗員被爆：フレア、CME 衝撃波により GeV レンジまで加速された太陽高エネルギー粒子は、成層圏下部から対流圏において空気シャワーを生じさせ、大量の放射線 (GLE) を生成する。最大級の GLE は、一度で航空機乗務員の年間管理目標値の線量に匹敵する被爆をもたらすことから、航空機乗務員・乗客の健康被害を最小化するための方策を検討する必要がある。その第一歩は、太陽高エネルギー粒子の地球到達を正確に予測するモデルを開発することであろう。更に、空気シャワーの生成と宇宙天気を結びつけた研究を展開するために、今後宇宙線分野の研究者との連携を深める必要がある。その第一歩は、太陽高エネルギー粒子のリアルタイムモニター観測や、速やかな実況解析の環境を充実させることであろう。更に、定量的な予測にもつながるモデリング研究を展開するために、今後宇宙線分野の研究者との連携を深める必要がある。2019 年 11 月から開始された国際民間航空機関 (ICAO) による宇宙天気情報サービスにおいても、航空機被ばくは通信・測位と

並んで検討されており、社会的にも現況把握・予測の必要性は高まっている。

GICの地上インフラへの影響：宇宙空間に生起する擾乱現象は、様々な過程を経て地上での地磁気変動を引き起こす。この地磁気変動に伴い励起される誘導起電力は、送電線やパイプラインに誘導電流を生じさせる。このような誘導電流は GIC (Geomagnetically Induced Current) と呼ばれており、電力系統の障害や、パイプラインの金属腐食を助長することが知られている。さらに海底ケーブルの中継器に電源を供給するケーブルや鉄道の線路を使った信号の伝送などにも影響を与えることが報告されており、GIC 障害の影響は広範囲に及ぶ。高緯度地域ではオーロラ活動に伴う強い電流が GIC の主な原因であるが、CME に伴う衝撃波の到来による SC (Sudden Commencement) や SI (Sudden Impulse) といった磁気嵐に伴う地磁気の急激な変化は、中低緯度領域でも GIC 障害の原因になると考えられている。GIC の正確な予測のためには地面に誘導される電場 (地磁気誘導電場) の性質を十分に把握しておく必要がある。そのためには地磁気及び地電場観測網の充実及び継続的な観測に加え、地下の精密な 3 次元比抵抗モデルの構築が求められる。GIC の直接的な原因となる磁気圏・電離圏電流の予測モデルも不可欠である。高精度化するリアルタイム磁気圏シミュレーションに磁気圏電離圏地圏結合アルゴリズムと適切な地下比抵抗モデルを組み込み、全球における地磁気変動と GIC 励起を予測可能とすることは、人類社会を支える重要な知識基盤整備事業のひとつとして積極的に進めていくべきであろう。

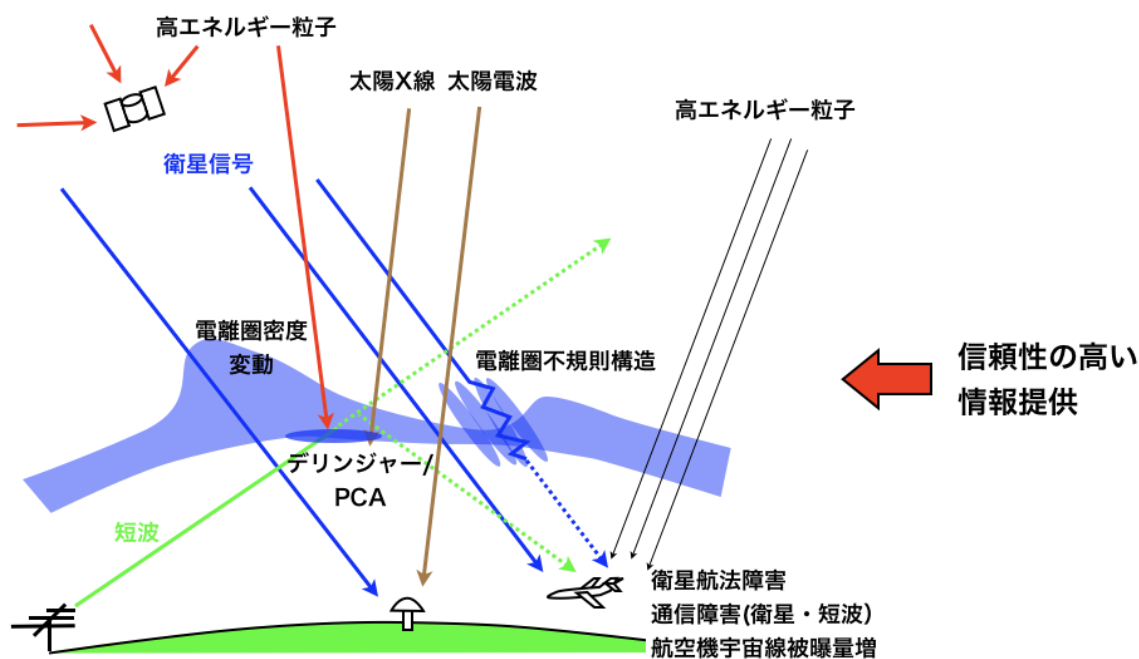


図 3.2.1 宇宙利用システムに影響する太陽地球系現象。電離圏密度変動は短波通信の不安定、衛星測位誤差の増大などの影響を、電離圏不規則構造は衛星信号にシンチレーションによる障害を引き起こす。太陽電波強度の増大は衛星信号の雑音を増大させる。高エネルギー粒子の増大は、衛星環境の悪化、航空機宇宙線被曝量の増大、極回り短波通信の途絶などの障害の原因となる。

### 3.1.3 地震・津波・火山噴火による災害

日本はプレートの沈み込み帯縁辺部に位置するため、地震・津波や火山噴火による多大な災害をこれまでに経験してきた。このため、第 2 章にて述べたような地震・津波の発生や火山噴火を学術的に理解するための電磁気学的研究にとどまらず、地震・津波や火山噴火等のハザードの発生と推移を早期に察知して警戒情報に繋げる各種観測のリアルタイムモニタリングや、火山ハザードマップ作成のための過去の溶岩流の形成年代の推定等、減災に貢献

するための研究を継続して推進する必要がある。電磁場は様々な原因により幅広い時間スケールで常に変動しているため、ハザードとなる現象に起因する信号を抽出するためのリファレンスとなる定常観測点の維持も重要である。

地震に関する電磁気現象：東北地方太平洋沖地震を引き起こした海底の断層運動は、海面の急激な変動をもたらし、津波の原因となった。この海面変動は、大気圏と電離圏に音波と重力波を通して影響を与え、電離圏電子密度の変動が伝播する様子が GNSS 全電子数観測や、海底ならびに陸上の電磁場観測、イオノゾンデ、SuperDARN などによりとらえられた。一方、実在性や物理的機構は明瞭ではないが、地震発生前に大気圏および電離層で擾乱が発生していたとの報告もある。福島原発事故に伴う放射能汚染のモニターは、大気中の電気伝導度の上昇と、それに伴う静電・電磁気現象への影響という形で、地球電磁気学と関係があり、複数の論文も報告されているが、この影響は観測装置の進化に伴い、将来的には飛行体やレーダー・人工衛星からも可能になると思われる。それは日本に限らず、世界のどこで起こっても役立つ技術であり、同時に大気核実験のモニターにも役立つと期待される。

津波電磁気現象：海水は良導体であり、地球磁場中で運動することにより、誘導起電力を発生する。近年の海底電磁場観測により、チリや東北地方太平洋沖等の巨大地震による津波がとらえられた。また、東北地方太平洋沖地震については、東北地方太平洋沿岸や父島において、津波を起源とする磁場変動が観測された。これらの磁場変動は、津波の到達に先行して生じることがあることが観測および理論的研究から示されている。また、海面の上下変動を観測する従来の観測手法と異なり、電磁場は津波の伝搬方向の情報も含んでいる。これらのことは、電磁場観測が津波の到来予測において有用なツールとなり得ることを意味する。このため、海底での電磁場リアルタイムモニタリングは将来の津波の早期警戒のための観測項目の一つとして期待される。

過去の火山活動に伴う古地磁気記録：火山活動に伴い溶岩流が形成されると、当時の地磁気を反映した熱残留磁化が獲得される。地質学的・火山学的に同一の溶岩流と推定される場合でも、古地磁気方位を分析してみると異なる方位を記録していることが分かることも多く、異なる時期に形成された溶岩流であることが推定されることも多い。古地磁気永年変化の速さを仮定すれば、相対的な年代の差についても 50-100 年の精度で推定することが可能であり、地磁気方位の永年変化を年代ごとに追ったいわゆる標準曲線が構築できれば、数値年代(絶対年代)としてさらに精密に推定することが可能である。地質学的・火山学的な知見に基づいて組み立てられている火山ハザードマップの精度向上に、大きく役立てられる可能性がある。

過去の地震・津波の発生時期の解明：日本周辺では、海溝型巨大地震が数百年～千年周期で繰り返されてきた可能性が高く、その発生時期・規模の解明が社会的にも重要である。近年、海底堆積物中から、地震・津波に起因する海底の地殻変動によって運搬され堆積した土砂の層である「地震性タービダイト」を認定して堆積年代を推定し、規模と発生間隔等を解明する研究が進められるようになった。海底堆積物の堆積年代の推定には、放射性炭素 ( $^{14}\text{C}$ ) 年代法が用いられることが多いが、有孔虫殻を含まない珪藻質の堆積物や炭酸塩補償深度 (CCD) 以深から採取された堆積物など、同法の適用が困難な堆積物も多く分布する。地磁気方位の永年変化を年代ごとに追った、いわゆる標準曲線が構築できれば、海底堆積物が記録した古地磁気方位・強度変化を分析して比較対照することで、深度—堆積年代の関係を明らかにでき、「地震性タービダイト」の堆積年代を推定できると期待される。

## 3.2 知識基盤の構築に向けた研究課題

### 3.2.1 宇宙環境計測機器開発の充実

これまで行われてきた地球磁気圏（静止軌道から低軌道）の放射線計測を継続（充実）すると共に、エネルギー計測範囲を拡大し、帯電現象評価に必要なプラズマ（keV オーダー）計測を実施する必要がある。さらに、国際的に欠落している宇宙環境データ（微小デブリ、大気密度）および放射線帯の変動に影響を与える太陽活動に起源をもつ宇宙環境データ（X線、紫外線）の計測を随時実現していくことも宇宙天気研究を進めて行く上で非常に重要である。こうした研究開発を実現するためには、JAXA の関連部門、大学や他研究機関と連携をとることにより対象領域をこれまでの磁気圏周辺から惑星空間に、影響評価領域を搭載コンポーネントから有人に関わる領域まで拡大していくことが望ましい。なお、これら人類の知識基盤としての成果を基に、宇宙機関会合、国連および ISO 等を通して国際的な連携/イニシアティブを発揮していく努力も重要となるであろう。

将来の有人活動が地球外の天体へ展開していくことが予想される今後、惑星や衛星環境のモニタリング観測は重要な課題である。惑星分光観測衛星「ひさき」は2013年の打上げ以降キャンペーンベースでの木星・金星・火星・水星のモニタリング観測を継続しており、その成果は海外からも高く評価されている。惑星監視設備は今後も世界的に要求が高まっていくインフラであるため、次世代惑星紫外望遠鏡 LOPYUTA へと受け継ぎ、日本が引き続き担当する必要がある。氷衛星の水噴出や火星・金星大気散逸監視を主眼とする科学目的を主眼に据え、同ミッション提案が検討されている。

地球外の天体において有人活動が展開されていくであろう今後、これまで得られた惑星環境の知見をより一般的・基本的な社会知識基盤へと拡張することが必須である。このためには、他分野との学際共同による惑星探査に参加し、惑星の環境や進化をより広く根源的に理解することが必須である。このためには、SGEPSS が長年に渡って技術ヘリテージを蓄積してきた、プラズマ・中性粒子質量分析器、波動観測器、磁力計、紫外分光器等の、惑星科学分野の探査機への搭載が鍵であると考えられる。これらは、火星、月、小天体、小惑星、氷衛星、タイタンなどの、地球外生命環境の理解に重要な天体向けに、表層・内部構造を探査する強力なツールになりうる。質量分析器は、天体表層や大気から放出される物質の組成を測定し、着陸探査できない天体の表層や大気物質組成を推定できる。波動観測器や磁力計は、レーダーや磁場サウンダーとして応用できれば、天体の内部海や地下水資源を着陸せずに探査できる唯一無二の搭載機器となるだろう。紫外分光器は、地球周回の宇宙望遠鏡や探査機の搭載機器として、天体表層の反射率測定から、ソリン、芳香族系の有機物などの検出が可能である。タイタンや氷衛星などの水、炭化水素、窒素、アンモニア等が豊富な天体における有機物生成過程をリモセンできる可能性がある。

### 3.2.2 宇宙天気分野における予測研究

宇宙天気と社会とのつながりについては、総務省の研究会「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会」においても強調されている ([https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000820488.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000820488.pdf))。本検討会では、太陽フレア爆発等の極端宇宙天気現象が通信・放送・測位、人工衛星、航空無線、電力等の社会インフラに異常をもたらし、社会経済活動に多大な影響を与える恐れがあるという我が国初となる「極端な宇宙天気現象をもたらす最悪シナリオ」を策定している。また、これを宇宙天気現象を現実のリスクとして捉え、国家全体としての危機管理の必要性が提言されている。このことを踏まえ、宇宙天気研究を人類活動を支える知識基盤へと昇華させるには、予測研究は必要不可欠である。羅列的であるが、太陽活動長期変動の予測、フレア発生予測、プロトン現象予測、高速太陽風予測、磁気嵐・サブストーム予測、放射線帯粒子予測、電離圏擾乱予測（電離圏嵐、プラズマバブルなど）、地磁気擾乱予測等が挙げられる。これらの各現象に着目した予測型研究の一部については、既に各研究機関において実施されており、今後もそ

の高精度化の試みは継続的に進められるべきである。一方、これらの物理量は多圏間結合、階層間結合の文脈で互いに関連し合っている。今後はこうした宇宙天気現象の包括的理解、記述へとつながるシステム予測へと発展すべきであろう。

予測研究を実現させるためには、大規模データ解析技術、大規模数値シミュレーション技術、予測技術、データ同化技術の向上が必須である。平成 27-31 年度に実施された科学研究費・新学術領域「太陽地球圏環境予測：我々が生きる宇宙の理解とその変動に対応する社会基盤の形成（領域代表：名古屋大学宇宙地球環境研究所 草野完也）」では、様々なモデリングフレームワークと観測を組み合わせた予測研究の実現を目指した取り組みが行われ、予測研究のユーザーとの情報交換を通じた予測研究の最適化がなども精力的に進められた。このような取り組みを通じて、こうした数理物理学手法と実際に取得されるデータが統合され、システムの包括的理解へと進む方向性は、今後我々の分野が開拓すべきフロンティアの 1 つであろう。

宇宙天気観測を睨んだ衛星計画も積極的に推進すべきである。環境把握という側面においては、超小型および超々小型衛星の活用によるその場観測によるジオスペース・モニタリングの多点化も方向性の一つであろう。また、地上観測においては、超多地点グローバル観測技術を向上させ、宇宙天気環境の把握に有用な指数を開発することが望ましく、ネットワーク観測が可能な各種データについては、それらを統合していく施策を積極的に推進していくべきである。その他、低高度衛星による超高層大気観測の空白高度域（高度 100-200 km）への 3 次元レーダーによる（中性温度、風、成分）アプローチも環境把握のためには必須である。また、電磁気的な地下構造のモニタリング手法の確立は、GIC のより正確な把握へと繋がる。これらについては、超高層・固体分野のより強い連携が求められる。

### 3.2.3 極端宇宙現象の把握と対策

キャリントン事象のように数百年に一度おこるような極端な事象が報告され、マウンダー極小期のように長期にわたり太陽地球系が極端な状態にあったことを示唆するデータもある中、頻度の低さとデータ取得の難しさが相まって、これらの極端な事象についての理解はあまり進んでいない。しかし、1989 年の巨大磁気嵐群や、2009 年の極小期を含む長年のデータの蓄積と、シミュレーション技術の発展により、過去の極端事象を理解し、人類が観測したことのない極端な太陽地球系を予測する手掛かりは揃いつつある。人類の社会基盤に対する大きなリスクとなり得る極端宇宙現象については、太陽活動や気候変動などに関する数十年-数百年スケールの変動から、磁気嵐、サブストーム、オーロラ、中層大気変動などに関する数分-数日スケールの変動など、様々な時間スケールでおこる事象をデータベース化するとともに、極端条件を組み込んだシミュレーション研究も発展させる必要がある。なぜ極端事象がおこるのか、我々が現在獲得している枠組みの延長としてこれらの極端事象を考えてよいのか、物理的要因によって決まる上限や下限があるのか、人類活動への影響はどれほどか、などの問いかけを通し、極端事象も物理的に予測することを可能とする、太陽地球系物理を目指す必要がある。

### 3.2.4 将来の宇宙環境利用に向けた研究課題

米国のアルテミス計画を皮切りに各国の宇宙機関が月探査の流れを加速される中、月有人活動の機運が高まっている。将来の持続的な月面利用に向けた研究課題として月面帯電環境の解明と定量評価が挙げられる。月は濃い大気や強い磁気を有していないため、宇宙プラズマの荷電粒子が月面に直接到達することができ、月の土壌やそれを構成するレゴリス粒子、人類が持ち込んだ探査機を帯電させる。帯電したレゴリス粒子は静電気力の作用により浮揚する。このダストは月有人活動における様々な問題、すなわち機械や装置の目詰まりによる故障、機械の摩滅や熱制御装置の性能低下などの原因であり、さらには人体と接触、もしくは吸入すると種々の健康被害を引き起こす可能性が指摘されている。これらの現象の引き金となっているのはプラズマ電気力学的な効果であり、将来の月面利用を見据えた

環境予測に SGEPPSS が貢献できる。具体的には月面でのプラズマ・電磁気計測データをベースに、地上実験や数値シミュレーションを融合して構築された包括的月面帯電評価フレームワークを構築した上で、月面のレゴリス粒子や人類が設置するインフラにどのような帯電状態が生じるかを定量的に把握する。得られる具体的な帯電状態のデータに基づきインフラの設置形態や運用方法、帯電レゴリス付着回避方法に関する基準値を設定し、それに基づいたインフラ開発や月面運用等を検討することが重要となる。

外惑星ミッションにおける惑星間航行や低高度軌道での地球周回においては、多くの搭載燃料を必要とする化学推進ではなく、イオンエンジンなどの電気推進や太陽光圧を利用したソーラー電力セイル推進など、高効率な先端的推進システムが不可欠である。イオンエンジン推進は既に多くの人工衛星や宇宙探査機で使用実績があり、近年では地球超低高度軌道の希薄大気を推進剤とした電気推進器や、イオンエンジンと太陽光圧推進技術を組み合わせた日本独自のソーラー電力セイルによる外惑星往復探査技術の開発も始まっている。また、太陽風と衛星の人工磁場との相互作用による推力システムや、電極摩耗のない無電極電気推進など、次世代推進システムの検討も行われている。

これらの先端的宇宙推進器の開発においては、宇宙プラズマと衛星システムとの相互作用や、衛星推進系から放出される人工プラズマと衛星システム、および宇宙プラズマとの相互作用が推進効率に与える影響について、十分な検討を行う必要がある。推進システムからの能動的プラズマ放出による衛星環境への影響に関する定量的評価も、観測データに含まれる人工的擾乱の除去において非常に重要である。

推進システムに限らず、人工衛星そのものやステーションなどの大型建造物と宇宙プラズマとの相互作用の理解は今後の宇宙利用において非常に重要な研究テーマである。衛星などの宇宙機は宇宙プラズマとの接触により帯電などの悪影響を受ける。時にはこの帯電が原因で宇宙機表面や内部で放電が起こり衛星破損などの事故が起こることもある。また、宇宙機に電力を供給するために用いられる太陽電池パネル内で生じる電圧は宇宙機周辺のプラズマ環境に影響を与える。これらの影響は、将来の衛星システムの大電力化、高電圧化に伴い、宇宙環境利用や計測において大きな問題となる可能性があり、SGEPPSS の貢献が期待される研究領域である。

### 3.2.5 気象衛星による宇宙環境計測

静止気象衛星ひまわりは、アジア・オセアニア地域の気象を宇宙から常時観測している日本の人工衛星である。その気象衛星ひまわりの後継機（ひまわり 10 号）で、「地上の天気」と同時に「宇宙の天気」を計測する装置を搭載するための研究技術開発「ひまわり後継機の高機能化研究技術開発」が 2021 年 10 月より、内閣府宇宙開発利用加速化戦略プログラム(スターダストプログラム)の課題として実施されている。地上の天気も宇宙の天気も防災や多様な分野での活用のためにはより精度の高い観測・予測データが重要である。静止軌道位置は限られた資源であり、日本を常時監視するために最も適した位置(東経 140.7 度の赤道上空)にあるひまわりを活用し、宇宙環境観測を担当する総務省と気象観測を担当する気象庁が連携し、2029 年に地上の天気と宇宙の天気の同時観測が可能なひまわり後継機の打ち上げおよび運用開始を目指す。

宇宙環境の観測及び基礎・応用研究は、前述・後述の章にも記載されている通り、宇宙天気に関わる研究が始まった黎明期から当学会が研究対象とする学術分野である。特に、宇宙空間における計測技術は、JAXA 及び国内の大学・研究機関に所属する当学会所属メンバーが、多くの科学衛星の打ち上げ実績、並びに技術開発・研究成果を有する。ひまわり 10 号では高エネルギー粒子を計測対象として、太陽フレア起源の高エネルギー陽子・銀河宇宙線に含まれる陽子 (10 MeV~1 GeV)、さらにバンアレン帯の高エネルギー電子 (50 keV~5 MeV) を計測することが計画されている。ひまわり衛星用の計測装置は、国内外の研究機関と連携し、これまで科学衛星の開発で培ってきた技術を礎に長期定常観測を目的とした実用センサとして製造される。これまで、情報通信研究機構が実施してきた我が国の宇宙天

気予報は、米国の GOES 衛星による観測データを基準として、現況監視及び予警報の発令を行ってきた。この技術開発が実現すれば、ひまわり 10 号衛星打ち上げ後は、国内で自律的に、放射線環境の厳しい静止軌道における環境の状況把握と計測データの利用者へ準リアルタイム配信するが可能になる。静止軌道における高エネルギー粒子変動の長期観測データは、内部磁気圏における粒子環境変動メカニズムを解明するにあたり重要であり、科学研究にとっても非常に価値が高い。米国の気象衛星 GOES には、高エネルギー粒子センサのみならず磁力計や X 線・紫外線等による太陽観測センサなど多様な宇宙環境計測装置が搭載され、様々な宇宙天気研究や商用利用が行われている。今後、日本の気象衛星を含む実利用衛星に、さらに多くの種類の宇宙天気を計測するための装置が搭載され、それによる基礎科学の発展および実利用アプリケーションが充実することが期待される。

### 3.2.6 固体地球科学における知識基盤の構築

地球の内部構造とその時間発展を明らかにすることは、固体地球科学における中心的課題のひとつである。さまざまなスケールで行われている電気伝導度分布の探査は、今や地球内部構造研究の重要な一角を占めるようになってきている。地震学、火山学、測地学、資源工学など、地球電磁気学の関連分野との協働を通じて、地球内部の静的構造や動的過程の包括的な理解を深め、さらには新たな研究の創出や社会的課題の解決にも貢献できる可能性がある。例えば、我が国は地球上の変動帯に属しており、地震や火山噴火などの脅威を免れることはできない。自然災害に対して強靱な社会を構築することは、国民生活において極めて重要な課題である。また、エネルギー資源に乏しい日本では、地下や海底下の利用可能な資源を確保することは安全保障の観点からも重要である。こうした諸課題に対処するための知識基盤を構築するための第一歩は、関連分野も含めた研究コミュニティが参照できる構造モデルを、非専門家にも使いやすい形で提供することであろう。さまざまな制約から、こうした取組は電気伝導度構造研究の分野では現時点ではあまり進んでいるとはいえない。しかし、我が国でもシステムティックかつ大規模な探査が行われる例が増えており、過去の探査で取得されたデータの提供を受けて新たな手法で統合解析するなどの動きも盛んになってきている。今後、こうした取組から得られる電気伝導度構造を 3 次元的にイメージングしたモデルを、周辺分野と共有することで得られるアウトカムは確実に増えていくと期待される。

一方、世界各地の地質試料・考古資料からの古地磁気測定データは、世界中の関連研究者の協働により、その多くがデータベースに登録され、参照することが可能になっている。地球史スケールでの年代をカバーする MagIC データベース (<https://www2.earthref.org/MagIC/>) や PINT データベース (<http://earth.liv.ac.uk/pint/>)、過去 50,000 年間をカバーする GEOMAGIA50 データベース (<http://geomagia.gfz-potsdam.de/>) などがある。これらのデータに基づいて、過去数千年間の全球地球磁場連続時間変動モデルや、過去約 200 万年間の地磁気双極子連続時間変動モデルなどが提案されつつあるが、依然として基となるデータの量は圧倒的に乏しい。より信頼度の高い古地磁気データを数多く得ていくことで、これらのモデルの時空間分解能・信頼性をともに向上させていく必要がある。

とくに考古資料に着目すると、関連する古地磁気学的研究は日本では 1950 年前後より行われ、1970 年代には地磁気方位の永年変化を年代ごとに追ったいわゆる標準曲線が確立された。その後 2010 年代になると新しいデータを加えた考古地磁気データベースが構築され、それを用いて標準曲線を引き直す動きが出てきた。同曲線の年代精度はかなり高く、永年変化の速度が速い時代では 20 年程度の精度で古地磁気年代推定を行うことができるようになってきている。実際に、考古学の分野では様々な適用事例があり一般的なツールとなっているほか、最近では火山の溶岩に対する古地磁気測定結果と比較することによって溶岩流の同定や噴火史研究にも役立つことがわかってきた。今後、これらの分野以外へも年代ツールとして情報とノウハウを提供できるよう進めるべきであろう。



### 3.2.7 周辺研究分野との連携

太陽が地球気候に与える影響については、SGEPSS を主体とした宇宙空間や電離圏・磁気圏、超高層の研究者と、大気・海洋変動の専門家との連携が不可欠である。近年、海上ブイに GPS 受信機を設置し、電離圏全電子数の観測を行うことが検討されているが、このような試みは超高層大気地上観測の空白域を埋めるという大きな意義を持つ。このような取り組みを通じて、大気・海洋変動の専門家と共同で研究コミュニティを立ち上げ、情報共有と意見交換ができる体制を構築することが望まれる。

また、宇宙天気の研究は、衛星の製作および運用などの実利用面での応用にも重要であるが、実際には関連分野との情報共有と意見交換は必ずしも十分とはいえない。衛星工学に関しては、大気密度、放射線粒子、酸素などの予測が有用と言われるが、それらがどのような精度で求められると、何がどのくらい意味があるのかなどの議論を行う、コミュニティ同士の交流は殆どないのが現状である。これは国際的にも似た状況で、サイエンスの業界として、工学分野とも太いパイプを築く必要がある。

### 3.3 オープンサイエンスと研究データ

#### 3.3.1 知の源泉としての研究データ

科学研究を行う上で、インターネット基盤、デジタルデータプラットフォーム上でのデータや情報の交換が、近年は容易に高速に行うことができるようになってきている。これは、単なる情報交換の難易度や速度の問題ではない。例えば科学政策面からは、デジタルデータ・情報をキーとした新しい方法論を通じて、研究手法や科学研究のあり方、科学と社会の相互関係の本質にとって、新しい局面をもたらすと期待されている。

「オープンサイエンス」は、このような新しい考え方・パラダイムや、それを実現するための原則や実践を指す名称として使われることが多い。近年、G8 および G7 科学大臣会合や経済開発協力機構 (OECD) などの国際科学政策や、AGU、EGU など国際的な学界で「オープンサイエンス」、およびそこでの研究データの取扱いを中心とした議論が盛んに進められている。科学研究における「データ」は「知の源泉」(内閣府、統合イノベーション戦略、2018) であり、国際学会や政府当局において、その整備・利活用が重視されるとともに、科学的発見の根拠、また更に深い知を生むため次世代へ引継ぐべき研究資産、と再認識されるようになってきている。2012 年の研究評価に関するサンフランシスコ宣言 (<https://sfdora.org/>) や 2017 年の G7 科学大臣会合合意 ([https://www8.cao.go.jp/cstp/kokusaiteki/g7\\_2017/2017.html](https://www8.cao.go.jp/cstp/kokusaiteki/g7_2017/2017.html)) 等においても、データを論文とならぶ学術業績として認める動きが明文化されている。

科学において、研究活動および論文執筆が本質的に重要な活動であることは言を俟たないが、同時に、それだけでは科学という存在は成立しない。例えばジャーナル出版社は、論文出版業という商業活動が主とみなされがちであるが、研究成果物の公開について社会的・道義的責任をもって運営される。世界で最初に成功した学術ジャーナルの発明は、1665 年、英国王立協会とフランス国立アカデミーによるものである。以来、350 年以上にわたり、読者の有無や引用の多寡に関わらず、科学論文はすべて、出版者と図書館の協業により出版・保存され科学者や社会に提供されてきた。現代社会における基盤となっている発見や発明、これに基づく社会基盤(例えば電話、鉄道、航空機、インターネット等)は、すべてこれらの印刷されたジャーナル論文上の科学知を使って実現されてきたものである。今後は、インターネットや計算機システム上の研究データが同様に、新たなイノベーション、新たな科学知の源泉として論文と同様に不可欠なものとなるであろう。

#### 3.3.2 国際社会での研究データの捉え方

国際学術連合 (ICSU、現在の国際科学会議 ; 2018 年より ISC、国際学術会議に改組) が、1957-1958 年に実施された国際地球観測年 (IGY) で取得された大量の観測データを国際的に交換・保存する必要性を提示し、世界資料センター (WDC) 組織が設立された。地球電磁気・地球惑星圏科学データは、歴史的にこの枠組を利用して世界中の研究者に提供されてきた。近年では、国際科学会議 (ICSU) の太陽地球系物理学科学委員会 (SCOSTEP) が主導した、太陽地球系エネルギー国際協同研究計画 (STEP: 1990-1997)、STEP-Results、Applications and Modelling Phase (S-RAMP:1998-2002)、Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAWSES: 2004-2008)、および CAWSES-II (2009-2013) などの国際研究計画を通して、各研究機関でのデータベース化が進められてきた。

こうした ICSU (ISC) 関連組織をはじめとするデータに関する国際的活動は、地球電磁気・地球惑星圏科学分野だけのものではない。データのオープン利用と流通が学術発展の根幹の一つであるという認識は、国際科学会議における ISC-WDS (World Data System) 事業や

ISC-CODATA<sup>1</sup> (Committee on Data for Science and Technology あらため Committee on Data of ISC)他関連機関でも共有され (例えば <https://codata.org/initiatives/data-together/>等)、国際連合下の学術やデータ、地球観測の関連組織群、また GEO (地球観測に関する政府間会合) において、データ体制の根本理念として共有されているところである。

地球科学のデータベース整備・開発の現状はデータの種類や取得機関によって大きく異なっている。例えば、人工衛星により取得されるデータは、我が国においても比較的データベース整備が進んでいるが、これはデータが地上局に転送された時点で既に計算機上に乗っていてデータベース化などの処理フローに乗せやすいためである。また、主なデータ生産者は宇宙航空研究開発機構に限定されるので一元管理ができ、かつデータセンターが業務として明確に位置づけられているために、他機関とくらべて比較的定常的なリソースを投入しやすい点が重要と考えられる。それに比べて、地上観測データは取得者は広く分布する上に、所得者と管理者が同一人物であることが多いことから組織的な整備が遅れている。

### 3.3.3 科学としての研究データ整備とデータシステムのあり方

社会のデジタルトランスフォーメーション (DX) が叫ばれる中、科学知についても、科学界の DX の中で、新たな科学のあり方と社会との共存関係、これを可能とする科学研究のデジタル基盤とそこでの新しい科学活動のサイクル (= 科学研究の「エコシステム」(生態系) と呼ばれる) が求められている。我が国では、近代科学は欧米からの輸入文化であり、自らこうした総合的科学基盤や、科学研究システムを構築した経験を持たない。しかし現代では先進諸国の一角として、オープンサイエンスの議論に加わり、国際的な科学システムの構築に、積極的に関与することが求められている。

研究データに関しては、研究に必要なデータの取得・処理・保存を行う情報ネットワークや、構築されたデータベースおよびアーカイブ、さらに、それらを共有 (または公開) し、科学界の共通資産として長期保存する機能、そしてその組織の運営までを含めた幅広い活動は、まさに前述の科学論文の生産、保存、公開に対応する科学研究の基盤であり、かつ科学という「社会システム」にとって今後、必要不可欠な存在となっていくと考えられる。データを処理する計算機ハードウェアやソフトウェアとしての狭義のデータシステムを包含したうえで、さらに上記の科学活動のための基盤システム全体をとらえてわたしたちの今後の科学研究活動のデータ・情報アクティビティやワークフローについての科学的考察・調査研究が不可欠となろう。当学会ではこれを、「オープンサイエンス」を構成する要素の 1 つである研究データに関わるあらたな科学研究分野として「データシステム科学」と捉える。

## 3.4 広報活動・人材育成の観点から

本節では広報活動・人材育成の観点から社会との関わりに関して述べる。SGEPSS のアウトリーチ部会 (2004 年度に発足) は多くの広報活動を行っており、これらの活動は社会と密接に関わっている。アウトリーチ部会の活動の詳細は 6 章で述べるが、秋学会時に

---

<sup>1</sup> ISC-WDS は 2008 年に、WDC および天文地球物理恒久事業連盟 (FAGS) が発展的に統合されて設立された。ISC-CODATA は、1966 年に Committee on Data for Science and Technology として ICSU に設置され、物理常数の国際推奨値の策定やデータサイエンス、オープンサイエンス等 に貢献してきた。近年、名称が Committee on Data of ISC に変更された。

におけるアウトリーチイベント (6.2.1 節)、秋学会時におけるプレスリリース (6.2.2 節)、衛星設計コンテスト (6.2.3 節)、教育機関や公共団体等への講師派遣 (6.2.4 節)、若手アウトリーチ活動”STEPLE” (6.2.5 節)、Web 広報 (6.2.6 節) などが主な活動である。アウトリーチイベントは、主に小学生や未就学児などとその保護者をメインターゲットにして、SGEPSS 分野の研究成果を社会に還元することを主な目的としている。また、イベントによる研究者と市民の相互交流を通して、研究成果を含めて SGEPPS の認知度を向上させると共に、科学の楽しさや面白さを伝え科学リテラシーの向上に貢献することができる。プレスリリースはマスコミを通じた最新の研究成果の社会への還元という位置づけで行なっている。プレスリリースによって研究領域や SGEPPS の存在感をアピールする意義がある。衛星設計コンテストは、高専・高校生から大学院生までを対象としたコンテスト形式の教育プログラムであり、SGEPSS からは委員を派遣している。教育機関や公共団体等への講師派遣は、会員を学校教育現場や市民の集まりに派遣し講演や出前授業を行う活動である。若手アウトリーチ活動”STEPLE”も講師派遣を行なっており、生徒や一般市民との交流を通して、研究成果の社会への還元に寄与している。またオンラインによるアウトリーチ活動として Twitter や Facebook を用いた広報活動も展開している。

このような広報活動は、将来の人材育成(6.3 節)にも密接に関連している。アウトリーチイベントや衛星設計コンテスト、講師派遣などは初等・中等教育課程の年齢層との関わりが大きい。研究成果の社会への還元に加えて、SGEPSS そのものを知るきっかけや、SGEPSS 分野への進路を考えるきっかけになって欲しいという期待も持っている。また、学校教育ワーキンググループがアウトリーチ部会発足直後に立ち上がり、学校教育課程への働きかけを目指して、「太陽地球系科学」を発刊 (2010 年) した。別の観点として、SGEPSS の扱う研究対象は地球規模の現象を扱うことが多いため、国際協力で研究を進めることが必須となる。高等教育においても、このような国際交流の機会は次世代育成という観点からも非常に重要である。

## 4 学術のために必要な技術開発・環境整備

### 4.1 観測技術開発

SGEPSS 分野には 2 章で述べたような幅広い研究対象があるが、その未知の部分に対して様々な手法を駆使して観測データを取得する事が研究の基盤となる。観測手法の改良や新たな観測機器の開発が、新しい研究の展開をもたらす。本節では、2 章で述べた科学課題を追及するために必要な、観測機器の開発について述べる。4.1.1 節では太陽地球系科学分野について、4.1.2 節では固体地球研究分野について、それぞれまとめる。

#### 4.1.1 太陽地球系科学分野の機器開発

太陽地球系科学分野では、人工衛星、観測ロケット、観測気球といった飛翔体を用いる観測と、地上に機器を設置する観測を相補的に駆使して、現象の発見・解明を図る。これらの観測機器について、それぞれ、将来に向けた開発項目を以下に述べる。

##### 4.1.1(1) 飛翔体搭載機器および新しい飛翔体プラットフォームの開発

###### 太陽地球系環境および惑星を対象としたその場計測

プラズマ・ 高エネルギー荷電粒子・ 中性粒子	熱的プラズマ測定器
	中性粒子・背景イオン質量速度分析器
	超低エネルギー粒子計測のための衛星電位制御
	高時間分解能プラズマ計測
	質量同位体計測
	非熱的中性粒子観測
	高エネルギー荷電粒子計測器
電磁場	超小型粒子計測器
	飛翔体搭載電界アンテナ
	小型プラズマ波動観測器
	飛翔体搭載直流/低周波磁力計
	飛翔体搭載交流磁界センサ
知的信号処理による高い電磁感受耐性を備えたプラズマ波動観測器	

###### 惑星の大気、プラズマ、地下構造のリモートセンシング

X 線	惑星大気・プラズマ観測用軟 X 線観測機器
光学・赤外	EUV 撮像技術
	近接離角にある高強度光源からの迷光除去技術
	小型赤外波長可変レーザーファイバー分光器
	小型近赤外分光撮像器：グレーティング・AOTF・フーリエ
	紫外分光計/撮像の性能向上
	ガスフィルタ技術
次世代熱赤外撮像機器	
電波	小型サブミリ波分光装置
	地下探査レーダサウンダ

###### 地球および惑星の電磁環境計測のための飛翔体プラットフォーム

気球搭載望遠鏡
編隊飛行の衛星間通信を活用した観測動作制御法

以下に、各開発項目の概要を述べる。

## 熱的プラズマ測定器

### (1) 科学目標・機器概要

電離圏プラズマの重要な構成要素である熱的電子の温度および密度の推定を行うことを目的とする。熱的電子は局所的に生ずる物理・化学的な加熱および冷却過程に敏感に反応し、その場での温度は熱エネルギー収支を議論する上で欠かすことの出来ないパラメータである。磁気圏からは降下粒子や電磁エネルギーとして、また下層の中間圏からは大気波動を媒介として、電離圏にエネルギーが供給され、電子温度や密度の変化となってあらわれる。そのため、これらのパラメータの変化を知ることによって電離圏を含む地球・惑星上層大気で発生している現象を推測することができる。これらのパラメータの推定を可能にする測定器としてはラングミュアプローブがあり、古くから観測ロケットや人工衛星に搭載されてきた。現在、次の3つの熱的プラズマ測定器を運用・開発中である。

#### 1) ラングミュアプローブ

プラズマの存在する空間で金属製電極への印加電圧を掃引した際に得られる電流電圧特性から、電子温度と電子密度を推定する。電極は状況に応じて、球形、円筒形等を使い分ける。

#### 2) 電子密度擾乱測定器

プラズマ中で、金属製電極に対して固定電圧を印加した際に得られる電流値の変動から飛翔体周辺での電子密度・イオン密度擾乱（空間変化量）情報を提供する。

#### 3) イオン密度・ドリフト速度測定器

飛翔体搭載用として開発されてきたRPA(Retarding Potential Analyzer)とIDM(Ion Drift Meter)の機能を有し、イオンの密度・ドリフト速度の推定を可能にする測定器。

### (2) 開発状況、運用状況と課題

#### 1) ラングミュアプローブ

観測ロケットには頻繁に搭載されてきた他、一部の科学衛星にも搭載されてきた。近年ではデータ取得の時間分解能を高くしたいとの科学的要求に応えるため、電流電圧特性取得のための掃引周波数を高くする傾向にあり、限られたテレメータレートの中でその要求を実現するために、飛翔体上でデータ処理により電子温度と密度を計算し、結果のみ地上に送信する開発も行われている。

#### 2) 電子密度擾乱測定器

観測ロケットには頻繁に搭載されてきた。測定用電極への入射電流を 1kHz 以上の高サンプリングレートで取得することにより、空間分解能にして 1m あるいは 10cm 以下のスケールの電子密度擾乱情報の取得を目指している。その他、プローブとなる電極の更なる小型化にも取り組んでいる。

#### 3) イオン密度・ドリフト速度測定器

低高度衛星や観測ロケットへの搭載を念頭においた発展型イオン密度・ドリフト速度測定器の開発を開始した。これまで海外では、測定器開口面接線方向の速度の推定が可能な IDM や開口面に直交する速度成分の推定が可能な RPA が人工衛星に搭載されてきたが、小型でありながらこれら2つの機能を兼ね備え、イオン種毎の密度とイオンドリフト速度をベクトルとして高精度に測定できる発展型測定器の開発を行う。

### (3) ミッションやプロジェクトとの関係

(2)に述べた測定器の中で、1)と2)は今後も観測ロケットに搭載されていくであろう。

1)のラングミュアプローブに関しては SGEPS 分野の地球電磁気圏・熱圏探査衛星への搭載可能性も検討されている。3)のイオン密度・ドリフト速度測定器に関しては、2024年度頃に打上げられる観測ロケットに搭載される予定となっている。

## 中性粒子・背景イオン質量速度分析器

(1) 科学目標・機器概要

飛翔体を用いた、地球・惑星超高層大気における中性粒子の速度分布関数の直接観測は、温度・風速・密度に代表される超高層大気に関する基本物理量の精密観測という視点に加え、宇宙惑星結合系における宇宙からのエネルギー注入に対する超高層大気の応答、磁化惑星極域領域からの大気流出や非磁化惑星全体の大気進化を理解する上でも必要とされる。現在開発が進められている分析器の測定原理は、搭載された飛翔体の進行方向（ラム方向）を向いた扇形平面スリットから入射した中性粒子を電子衝撃により電離させ、その後 RF 電場型質量分析部により弁別する。この方式は、入射部における背景イオン除去機構部と電子衝撃による電離部を作動させない場合、超高層大気領域の背景イオンの質量速度分析としても利用できるため、適切な分析器構造を設計・構築し、分析器運用を切り替えることで、中性粒子・背景イオンの両方が観測対象となる。質量分析部を通過した粒子は、蛍光面付マイクロチャンネルプレート（MCP）及び CCD 素子によって 2 次元速度分布が画像として検出される。平面スリット面内の速度成分が分析器内部で保存されるように設計することにより、検出される画像は質量電荷比毎の 2 次元速度分布関数を表すことになる。この画像から温度・風速・密度の算出が可能である。想定される測定範囲は、風速が 0-1 km/s、粒子質量が 1-40 AMU、密度が  $10^6$ - $10^9$  cm<sup>-3</sup>、温度が 500-2000K である。

(2) 開発状況、運用状況と課題

基礎設計の終了後、BBM の製作・組み上げを行い、室内ビームライン較正装置を用いて機能確認・性能評価試験を行いつつある。基礎開発で最も大きな経費が必要なのは、2 次元速度分布画像を取得する蛍光面付 MCP・CCD 素子、及びその信号読み出し系であるが、現時点では現有の 2 次元位置検出機能付き MCP アセンブリーで代用している段階であり、今後の開発経費獲得が求められる。また、RF（1MHz 程度の高周波）電場型可変高圧電源と大電流・高密度の電子銃の開発も必要となる。現在の室内試験においては、飛翔体速度に対応するイオンビームの生成が極めて困難であるため、高速度飛翔体を仮定した擬似的な試験にとどまっている。また、中性粒子ビームの生成も本分析器の現行の開発環境では実現しておらず、新規構築・他機関協同を視野に入れた将来的な課題である。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

ERG（あらせ）衛星の次の SGPSS コミュニティーミッションとして、宇宙地球結合系（磁気圏電離圏結合系）探査衛星群（FACTORS）計画を、本分析器開発と並行して検討・推進しており、搭載可能性を海外機関との協力にて検討中である。

### 超低エネルギー粒子計測のための衛星電位制御

(1) 科学目標・機器概要

宇宙空間では周囲のプラズマ環境、太陽紫外線環境などによって衛星が帯電する。地球磁気圏では数十 V 程度の帯電（日照時）は通常よく起こる範囲内にある。この場合、低エネルギーイオン観測においては eV レンジの粒子観測が困難となる。また、低エネルギー電子観測では衛星表面から放出された光電子によるノイズの増大を招いてしまう。地球惑星磁気圏において数 eV 程度以下の低エネルギー粒子の観測例は少なく、その振る舞いはよく分かっていないが、無視できない量のフラックスが存在することが明らかになってきている。特に天体からのイオン流出については、流出の初期エネルギーが低く、その加速プロセスを解明するうえで低エネルギー粒子のエネルギー・質量分析が重要である。

(2) 開発状況、運用状況と課題

衛星電位を制御する方法としてイオンエミッタによるアクティブ電位制御が考えられる。この技術は日本ではまだ開発されておらず、将来の実現が望まれる。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係



宇宙地球結合系（磁気圏電離圏結合系）探査衛星群（FACTORS）計画などへの応用が考えられる。

### 高時間分解能プラズマ計測

#### (1) 科学目標・機器概要

宇宙空間において低エネルギー荷電粒子の3次元分布を計測する際の時間分解能は、1990年代以前の数秒のオーダーから、現在では10ミリ秒近くまで向上して来ている。時間分解能の向上のためには、荷電粒子の検出時間を短くすることに加え、計測統計精度を維持するために観測装置の感度を増加させることが必須となる。

#### (2) 開発状況、運用状況と課題

従来の技術の範囲内で、かつ衛星搭載可能なサイズに観測装置をおさめようとした場合、三次元分布の計測ではミリ秒の時間分解能がほぼ限界であることが明らかとなった。大きな原因の一つは検出器に用いている電子増倍素子のダイナミックレンジであり、もう一つは観測装置の感度/サイズ比の問題である。荷電粒子とプラズマ波動の相互作用をプラズマの分布関数の変化から完全に理解するためには、現在のミリ秒時間分解能ではまだ不十分であり最終的にはマイクロ秒オーダーの時間分解能が必要となる。このためには、小さい入射面積で広いダイナミックレンジを確保できる新たな荷電粒子検出器の開発、高いエネルギー分解能・角度分解能・感度を保ったまま衛星搭載可能なサイズに観測装置を納めるための新しいエネルギー分析器の開発を進める必要がある。現在、小型軽量エネルギー分析器として、樹脂をメタライズして電極として使用し、20mmX20mmX20mm程度のサイズの部品を、必要とする感度に応じて組み合わせるタイプの分析器の試作・試験を進めている。

#### (3) ミッションやプロジェクトとの関係

宇宙地球結合系（磁気圏電離圏結合系）探査衛星群（FACTORS）計画などへの応用が考えられる。

### 質量同位体計測

#### (1) 科学目標・機器概要

着陸探査機による天体表層物質の質量分析や周回探査機による希薄ガス分析によって、天体の起源・進化や背景にある太陽系の進化を明らかにすることが目的である。

#### (2) 開発状況、運用状況と課題

惑星起源粒子の単原子の同位体計測には一般的に  $m/\Delta m > 100$  といった非常に高い質量分解能が必要である。存在比の非常に異なる同位体及び高分子の分別では  $m/\Delta m \sim 10,000$  の性能を必要とする。これまで月探査衛星「かぐや」搭載のTOF型低エネルギーイオン質量分析器 ( $m/\Delta m \sim 20$ ) を開発して観測まで行い、その発展型として水星探査計画ベビコロンボ用イオン分析器 ( $m/\Delta m \sim 40$ ) を開発し、MMX用には  $m/\Delta m \sim 100$  のイオン分析器を開発中である。一方で、将来着陸探査で必要になってくる  $m/\Delta m \sim 10,000$  を実現するには「かぐや」型の質量分析では限界があるため、リフレクトロン型や大阪大学の技術であるマルチターン型TOF質量分析法などが考えられる。それぞれ20cm程度のコンパクトなイオン光学系で  $m/\Delta m \sim 300, 30,000$  という高分解能を実現している。リフレクトロン型は月極域探査ミッションLUPEXの探査ローバーに搭載される水資源分析計REIWA (Resource Investigation Water Analyzer) 中の質量分析器TRITON (Triple-reflection Reflectron) として搭載にむけた開発を進めており、これに必要な宇宙用のマスケート用パルス電源、中性粒子の電離機構の開発も並行して進めているところである。今後は、積算とカウンティングを組み合わせた高速読み出し回路の開発が課題である。

#### (3) ミッションやプロジェクトとの関係

搭載を目指す探査計画として、LUPEX（3回反射リフレクトロン型TOF質量分析器）、

Mars Ice Mapper, 次世代小天体 SR (マルチターン型 TOF 質量分析器を想定) などがある。

## 非熱的中性粒子観測

### (1) 科学目標・機器概要

非熱的中性粒子はプラズマ粒子が背景中性粒子と荷電交換することによって生成される。また、希薄な大気しかもたない天体においては高エネルギー粒子が天体表面に直接衝突することによって後方散乱・スパッタリング過程を通して生成される。これらの中性粒子は電磁場の影響を受けずに弾道飛行するため、遠隔観測点から生成領域のリモート撮像観測を行うことが可能になる。荷電交換によって生成された中性粒子からは生成領域のプラズマのエネルギー分布、質量分布、空間分布などの情報を得られる。また、後方散乱粒子・スパッタリング粒子を観測すると、当該天体におけるプラズマ粒子の降り込み領域の空間構造を得ることが可能になる。ただし、通常、中性粒子フラックスは非常に小さく、現在の技術ではプラズマ粒子観測で実現しているような精密観測は困難である。しかし、非熱的中性粒子観測によって得られるグローバルな撮像観測データは粒子生成領域の時空間発展を追うことにつながり、本質的に一点観測となるプラズマ観測に対して相補的な役割を果たすことができる。

### (2) 開発状況、運用状況と課題

非熱的中性粒子観測器における開発項目はノイズ除去、高感度化、エネルギー・質量の高分解能化、二次元撮像観測の実現、および軽量化である。これまでに開発した数十 eV から数 keV レンジの非熱的中性粒子観測器では飛行時間計測 (TOF; Time-of-flight) 法を用いて入射粒子種を弁別するが、一方で TOF 法を用いることにより、高エネルギー粒子や紫外線などによる背景ノイズの効果的な除去を可能にした。非熱的中性粒子はプラズマ粒子に比べ、希薄なフラックスであることが多いため、ノイズの除去は重要である。なお、日本では撮像機能を持った非熱的中性粒子観測器は実現しておらず、将来の実現が望まれる。

### (3) ミッションやプロジェクトとの関係

ヨーロッパの木星ミッション JUICE に一次元の角度分解能を持った機器が搭載されることとなっている。

## 高エネルギー荷電粒子計測器

### (1) 科学目標・機器概要

粒子のダイナミクスを理解するうえでは、速度分布関数の情報が重要であるが、過去の高エネルギー粒子計測器では視野が限られている事が多い。例えば惑星探査の場合は多くの場合、衛星は三軸姿勢制御である (スピンしない) ため、スピンに依らず広い視野を持つ分析器が必要である。

### (2) 開発状況、運用状況と課題

半球状に視野を持つオプティクスの開発は進んでいる。計測フラックスのダイナミックレンジを広くするために、高計数率での計測を実現する回路系が必要であり、従来品をベースに改良し、開発を進めている。多チャンネルの視野があっても機器をコンパクトにするため、プリアンプ基板の ASIC 化などが課題である。

### (3) ミッションやプロジェクトとの関係

火星宇宙天気・宇宙気候探査計画などをターゲットとしている。宇宙地球結合系 (磁気圏電離圏結合系) 探査衛星群 (FACTORS) 計画などへの応用も考えられる。また、月面探査ミッションなどでの表面帯電モニタとしての意義もある。

## 小型粒子計測器

### (1) 科学目標・機器概要

CubeSat を含む超小型探査機の理学利用が進んでいる。惑星探査を含め様々なシチュエーションで超小型探査機への搭載機会が期待されるため、それに合わせた小型(10cm x 10cm x L) の計測器の開発が望まれる。科学目標は上述の粒子機器で包絡される。

(2) 開発状況、運用状況と課題

すでに搭載機会を得ているものから構想段階のものまでさまざまである。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

九工大 Bird-5 衛星への搭載や、Comet Interceptor B1 への搭載など、超小型探査機の利用が活発化しており、今後、コンパクトな理学ミッションのますますの多様化が期待される。

### 飛翔体搭載電界アンテナ

(1) 科学目標・機器概要

宇宙空間におけるグローバル電場は「巨視的なプラズマ運動」や「MHD からの破れ」を示す基本物理量のひとつであり、また荷電粒子を加速する基本場である。また、電場振動をとまなうプラズマ波動は無衝突系での物理プロセスの根幹を成す「波動粒子相互作用」の媒体であり、その種類・強度を捉えることは、物理素過程を解明する上で重要である。グローバル電場およびプラズマ波動電場成分の観測を両立させる計測手法として、二つの球プローブの電位差を測定する方法(プローブ法)が用いられる。これは伸展機構を要する構造物であり、衛星・探査機設計に与えるインパクトは常に大きい。

(2) 開発状況、運用状況と課題

この電場観測手法の将来に向け(1)ワイヤ(+ブーム)式、(2)リジッドブーム式、(3)小型リジッド式の3開発を進めていく。また、同様のセンサーを使用する Langmuir Probe とのシェアも可能としていく。

(1) ワイヤ(+ブーム)式：最近の衛星で用いられた電場プローブには、日本等の Geotail 型(ワイヤ型)と、米・欧等のガード電極を持つ Cluster 型(ワイヤ+ブーム型)があり、水星探査機 BepiColombo/MMO では両者が搭載される。近年は、特にワイヤ+ブーム型が主流となりつつある(スピン安定衛星の場合、3軸衛星の場合は、下記のリジッドブーム式アンテナが利用されることが多い)。このワイヤ+ブーム型は高周波ではやや感度が落ちるものの、衛星本体や太陽電池パネルなどの伸展物による電場の擾乱の影響を低減することができる利点をもつ。我が国でもこのブームをもつタイプの電界アンテナの開発が重要である。一方、この手法に関わる回路系では、フローティング回路技術、すなわち a) 低雑音フローティング電源、b) DC/AC 共用広帯域フローティングアンプ、c) アンプ出力によるフローティング電位制御部の三要素技術は確立しており、これを宇宙用機器として展開していく。

(2) リジッドブーム式アンテナ：上述のワイヤ+ブーム型を、3軸衛星に搭載する電界センサーでは、ブームをリジッドな材料を用いて実現する必要がある。また、スピン衛星においてもスピン軸方向の電界センサーは同様にリジッドである必要がある。リジッドエレメントそのものをアンテナとして使用するタイプ、また、リジッドブームの先にプリアンプを設置して、そこからセンサー部を更に伸展させるタイプが想定される。リジッドブームの材料には、Be-Cu、カーボンファイバー素材(CFRP)などが候補であるが、国際的には、エルジロイが主流であり、我が国でも開発を加速させていく必要がある。

(3) 小型リジッド式アンテナ：超小型衛星を用いた宇宙プラズマ環境探査を実現させるには、搭載可能となる小型リジッドアンテナの実現が必要である。観測ロケットにおいても同様であるが、その材料として、Be-Cu が heritage として充実している。Be-Cu を材料として、タケノコバネを作成する手法でこれまで用いられている。しかし、超小型衛星での利用を考えると、更に、小型化をはかる必要があり、その意味で、Be-Cu よりも軽量化にむいていると考えられる上述のエルジロイ材料や、CFRP 材料の利用も想

定して開発を進める必要がある。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

提案予定の宇宙地球結合系（磁気圏電離圏結合系）探査衛星群（FACTORS）計画では、リジッドエレメント方式のアンテナを用いる予定である。一方、超小型衛星を用いたミッションを提案していく段階で小型リジッドアンテナの開発も必須であり、その技術は、小型・中型ミッションでも使用できるリジッドブーム式アンテナにもつながっていく。

### 小型プラズマ波動観測器

(1) 科学目標・機器概要

編隊飛行衛星、惑星探査機、超小型衛星などいずれのミッションでも搭載機器の極端な小型化は避けては通れない。アナログ回路が大きなウェイトを占めるプラズマ波動観測器では、まず、このアナログ回路の小型化が必須で、その方策として Hybrid IC あるいは、ASIC の利用が考えられる。あけぼの衛星では Hybrid IC の利用による小型化が試みられた。Hybrid IC では既成部品ベアの組み合わせにより特定機能を有するチップをつくる。一方、ASIC では、シリコン基板の上に自ら MOS トランジスタを設計することにより特定のアプリケーション機能を有するチップを開発することができる。また、デジタル部も組み込んだアナログ・デジタル混載チップの実現も可能であり、究極的には、ワンチップでセンサーからのアナログ出力を、ASIC 内アナログ回路受信器でフィルタリング、増幅したのち、デジタル化を行って FFT などのデジタル処理をした結果の出力を行うワンチッププラズマ波動観測器が実現できる。ASIC を利用してプラズマ波動観測器を小型化する場合において、それは当然規格外の部品であるため、衛星搭載機器に利用するにあたって、その品質性能をどう評価・保証するか、といった問題がある。耐放射線強度の保証や部品のスクリーニングプロセスなどを含め、特定の観測装置用 IC の開発スキームを JAXA とともに確立していく必要がある。

(2) 開発状況、運用状況と課題

現時点で、科学衛星搭載品と同程度の性能をもち電磁界 6 成分を同時に計測することができる「波形捕捉型受信器」を 5 mm 角内のチップに納めることに成功している。一方、プラズマ波動観測器上でのデジタル処理のハードウェア化という意味で、従来ソフトウェアに依存していた「波形圧縮ロジック」、「FFT 処理ロジック」、「オンボードノイズ除去」等の FPGA によるハードウェア化も処理の高速化に加え小型化に大きく寄与する。FPGA 上に実現されたロジックは、最終的に ASIC 上へ移植することが可能である。すでに波形捕捉型受信器のアナログ部に A/D コンバーター、デジタルフィルタ、簡単な FFT 処理を組み合わせたチップの開発にも成功している。世界的にみても小型化における ASIC の役割はその重要性を増しており、その利用範囲はプラズマ波動観測器にとどまらない。ところが、ASIC の設計はディスクリート部品による回路設計とは、異なる知識や技能が必要で、また多くの設計経験も必要であり、高度な小型観測装置を ASIC で実現する上で人材育成の重要性も見逃してはならない。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

ミッション機器を 1U から 3U 程度に納める必要がある超小型衛星に搭載するプラズマ波動観測器に対して利用されていくと考える。

### 飛翔体搭載直流/低周波磁力計

(1) 科学目標・機器概要

フラックスゲート磁力計は、DC から 100Hz 程度の低周波磁場を測定する計測器として、これまで多くの飛翔体に搭載されてきた。新たな領域における観測や、より高度な科学成果創出のために、性能を落とすことなく、より厳しい温度環境や放射線環境で動作する磁力計や、より小型・軽量・省電力の設計により搭載性を向上させた磁力計が開発さ

れつつある。従来のリングコア型フラックスゲート磁力計に対し、耐環境性の向上、センサや回路部の低リソース化開発が行われてきた。回路部を更に小型・軽量・省電力化を進める方式として、デジタル化やASIC化がある。デジタル化は、従来アナログ回路で行っていた増幅、検波、積分、フィードバックをデジタルのロジックにより行い、使用するアナログ部品の点数を減らす方式である。ASIC化は増幅、検波、積分、フィードバックを行うアナログ回路をワンチップにおさめることにより、回路規模や消費電力を低減する試みである。従来のフラックスゲート磁力計は励磁方向と感度方向が平行であり、センサ出力の二次高調波を検出する方式であったが、励磁方向と感度方向が直交し、基本波を検出する新たな方式を基本波型直交フラックスゲートと呼ぶ。この方式により、センサの抜本的な低リソース化が可能となる。

## (2) 開発状況、運用状況と課題

厳しいリソースの制限と放射線環境に対応するために、小型軽量、耐放射線化したリングコア型フラックスゲート磁力計が開発された。磁場の精度を決める重要な要素の一つにアナログ-デジタル変換器(ADC)であるが、十分な耐放射線性を持つ商用の高ビットADC部品が存在しなかったため、耐放射線性を持つディスクリット部品だけで構成したデルタシグマ方式ADCを開発した。回路のデジタル化の開発は、ピックアップ信号をデジタル変換してFPGAで処理し、再びアナログ化してフィードバックする方式を進めている。FPGAによるデジタル演算方法を改良し、また、フィードバックをデジタル化する部分の高精度化、高速化を行ってきた。基本波型直交フラックスゲートセンサに関しては、ノイズの低減や温度によるオフセットドリフトの制御を目指した開発を行ってきた。磁力計を飛行体に搭載する時、飛行体自体の出す磁場が観測にとってノイズとなり、高精度磁場観測の阻害要因となる。複数の磁力計センサのデータにより、飛行体が出す磁場ノイズを自然界の磁場信号と分別する試みも行われている。

## (3) ミッションやプロジェクトとの関係

現在運用中の科学衛星では、BepiColombo「みお」とジオスペース探査衛星「あらせ」に搭載された機器が観測を継続している。「あらせ」は放射線帯内という機器にとって過酷な環境にもかかわらず、5年以上観測を継続している。BepiColomboは地球、金星、水星をフライバイしながら2025年の水星到着に向けて航行中である。フライバイ時等のイベントでは「みお」による磁場観測を行っている。水星到着後には、ESAが製造したMPOに搭載された磁場観測器との共同観測により、水星の固有磁場や太陽風-水星磁気圏間の相互作用を調査する予定である。今後打ち上げが予定されるプロジェクトでは、火星衛星探査計画MMX、始原彗星探査計画Comet Interceptorに基本波型直交フラックスゲート磁力計を搭載する予定があり開発を進めている。また観測ロケットには、デジタル方式やASIC方式の磁場観測器を、磁場擾乱の観測だけでなくロケットの姿勢決定や新たに開発した機器の飛行実証を目的として搭載している。

## 飛行体搭載交流磁界センサ

### (1) 科学目標と機器概要：

無衝突プラズマ中のエネルギー授受の媒体であるプラズマ波動(磁界成分)は、直流に近い成分から100kHz程度までの広い帯域において、 $fT/Hz^{1/2} \sim nT/Hz^{1/2}$ の広いダイナミックレンジに存在する。飛行体搭載交流磁界センサの科学目標は、衛星による網羅的な観測に基づくプラズマ波動のグローバルな様相(強度、偏波、波数ベクトルなど)から地球磁気圏、惑星磁気圏ダイナミクスの解明に貢献し、かつ微視的な観測(位相を含む高精度波形観測)から波動粒子相互作用の素過程の解明にも貢献することである。このため、交流磁界センサとしては、ファラデーの法則を原理とした広帯域、高ダイナミックレンジ、優れたロバスト性を有したサーチコイルまたはループアンテナが用いられている。また、アナログ部の小型化を目指し温度補償を有する超低ノイズプリアンプのLSIチップ(5mm各のベアチップ)が開発されている。

- (2) 開発状況、運用状況と課題：  
 複数の共振を有するセンサによる観測周波数の広帯域化、及び集積回路技術を導入したアナログ部の小型化が推し進められている。集積回路技術により、従来よりも回路規模が大きくなるチョッピング制御を用いることで、100 Hz 以下のフリッカ雑音低減が試みられている。しかし、一般的に磁界センサを飛翔体に搭載するには、衛星本体からの雑音の影響を軽減するためにセンサを衛星本体から離す必要があり、そのために伸展物が必要となる。将来の小型衛星、超小型衛星への搭載に向けて、伸展物を用いずとも効果的に雑音を除去する知的信号処理技術の開発が重要な課題となっており、音声信号処理、適応信号処理の技術を用いた雑音除去についての検討が進められている。
- (3) 関連ミッションやプロジェクト  
 宇宙地球結合系（磁気圏電離圏結合系）探査衛星群（FACTORS）計画と関連する。

### 知的信号処理による高い電磁感受耐性を備えたプラズマ波動観測器

- (1) 科学目標と機器概要  
 科学衛星に搭載されるプラズマ波動観測器は、プラズマダイナミクスの理解に必要不可欠の測器として、近年ますます重要性が指摘されているが、高感度電磁界センサの性能を最大限に発揮するには、衛星搭載機器が放射する電磁ノイズを極力抑制する必要がある。これは電磁適合性（EMC: Electro Magnetic Compatibility）対策と呼ばれ、搭載機器が放射する電磁ノイズは、「EMC 基準」以下に抑えることが規定されている。プラズマ波動観測器は、非常に微弱な電磁波を観測するため、同機器を搭載する科学衛星は、各搭載機器の設計時に極めて厳しい EMC 基準が規定される。このため、衛星搭載機器のノイズ抑制設計や、EMC 基準達成確認試験（EMC 試験）は、衛星設計・製作上の大きな負担となっている。また、電磁ノイズ低減策として、センサをできる限り衛星本体から遠ざけるための伸展物の搭載も、衛星の小型・軽量化実現の大きな阻害要因である。
- (2) 開発状況、運用状況と課題  
 我々はこのような課題に対して、オンボードソフトウェアや、FPGA・ASIC などの小型チップに高度なデジタル信号処理を実装することで、受信器に混入した衛星搭載機器起源の雑音を衛星上でソフトウェア的に除去する手法を確立し、電磁感受耐性（EMS: Electro Magnetic Susceptibility）を強化したプラズマ波動観測装置の実現を目指す。このような高機能受信器が実現することにより、衛星搭載機器に課す EMC 基準の緩和、衛星搭載伸展物の短縮または不要化など、プラズマ波動受信器向け EMC 対策にかかる負担の大幅な軽減が期待できる。混入雑音を十分に抑圧することにより、トリガ機能を用いた自然波動の選択的抽出や到来方向等のキーパラメータ演算、さらには波形データの高効率圧縮など、これまで以上にプラズマ波動の振幅・位相情報を限られたテレメトリ容量で高精度・高感度に計測することを目指す。また、これらの機能を統合してワンチップ化することで、将来のミッションへの搭載性向上を図る。次世代の知的信号処理として、プロセッサの動的再構成等によるエッジコンピューティング技術を確立し、オンボード人工知能等によるサイエンスアウトプットの向上を狙う。
- (3) ミッションやプロジェクトとの関係  
 宇宙地球結合系（磁気圏・電離圏・熱圏結合系）探査衛星群（FACTORS）計画と関連する。

### 惑星大気・プラズマ観測用軟 X 線観測機器

- (1) 科学目標と機器概要  
 宇宙科学の X 線観測は、ブラックホールの発見、中性子星・白色矮星の観測など天文学分野で大きな成果を挙げている。一方で、地球惑星科学のプラズマ物理学分野では X 線観測の歴史は浅く、チャンドラ衛星や XMM ニュートン衛星、すざく衛星による木星 X

線オーロラや木星放射線帯の高エネルギー粒子による発光、地球ジオコロナや火星外圏と太陽風プラズマの電荷交換反応による X 線発光などが近年観測されてきたところである。惑星大気や惑星周辺プラズマ領域での X 線発光は、惑星大気・プラズマの大局的な分布と時間変動を観測するための新たな手段であり、時間変化・空間変化・スペクトル変化を同時に分離する二次元撮像分光は、将来の惑星探査において新たな見解を生む観測であると期待される。

(2) 開発状況、運用状況と課題

惑星探査にはこれまでの天文衛星搭載機器が比較的不得意な広視野観測かつ軽量コンパクトという特性が必要であり、ここに機器開発要素が残っている。そこで広視野を短焦点でカバーする斜入射光学系として、Si 基板を微細加工して作った  $\mu\text{m}$  スケール微細穴の側壁を反射鏡として使い、従来の天文用望遠鏡よりも 1 桁以上の軽量性を実現する。光学系の方式としては広視野 Wolter I 型と Lobster eye 型等があり、いずれも開発が進んでおり、環境試験も実施している。同時に、酸素・炭素イオンの特性 X 線をターゲットとした直入射光学系の開発が進んでいる。試作した反射鏡の反射率はほぼ設計どおりの性能を有しており、経年変化や衛星打ち上げの環境試験も実施している。さらに惑星からの可視光への耐性を持ちつつ、惑星プラズマ環境で発光する 2 keV 以下のエネルギーの特性 X 線を連続 X 線から波長分解する軟 X 線検出器の開発も進められている。今後は観測実現に向けた具体的な探査計画も重要になる。具体的には地球磁気圏、月、火星外圏、木星磁気圏等が候補として上がってきている。分野開拓的な意味も含めて、低コストかつ迅速に実現が可能な超小型衛星と親和性が高いと考えており、着実に検討を進めてゆきたい。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

地球磁気圏 X 線撮像計画 GEO-X と密接に関連する。

## EUV 撮像技術

(1) 科学目標と機器概要

地球・惑星の磁気圏プラズマの研究は磁場、電場、プラズマ、波動の「その場」観測を基に大きく発展し、特にミクロな物理過程についての知見が深められてきたが、大規模な構造とダイナミクスに関しては局所的な観測結果の統計解析に頼る他なかった。その相補的な観測手段として高速中性粒子や極端紫外光などを用いた遠隔観測により、太陽風の影響を受けて時々刻々変化する地球磁気圏の大規模構造とその時間変化を撮像観測するための検討が米国を中心に 1990 年頃から始まった。地球・惑星の電離圏・磁気圏内に存在するヘリウム、炭素、酸素、硫黄などの重イオンの発光輝線が含まれる極端紫外波長領域では、明るい光学系、特に光を集める反射鏡の開発が必要であり、1990 年代後半から本格的に始まる。21 世紀の初頭にはこの技術を用いた地球内部磁気圏の撮像が可能となり、ヘリウム一価イオンの共鳴散乱線（波長 30.4nm）を効率よく集光する多層膜反射鏡が、この分野に大きな成果をもたらした。Mo（モリブデン）と Si（シリコン）の薄膜を 20 層、鏡の表面に積層することにより通常では数%にも満たない鏡の反射率が、干渉の効果により 20%にまで向上した。観測機全体を構成するには、これに加え、マイクロチャンネルプレート（検出器）、金属薄膜フィルタ（バンドパスフィルタ）を利用するのが常套である。地球磁気圏撮像の継続、外惑星のプラズマ・大気の撮像にはこの技術が応用されている。

(2) 開発状況、運用状況と課題

継続的な観測データの取得には、打ち上げ機会が定期的にあることが重要である。6 U サイズの超小型衛星の打ち上げの機会が、頻度高く見込むことができるため、極端紫外線撮像機を極限まで縮小し、地球の内部磁気圏の観測を継続しようとする気運が高まっている（エクレウス衛星搭載 Phoenix）。実現には、従来の反射鏡面積を約半分に縮小する必要があり、それを補うためには多層膜の反射率を最低でも 2 倍程度にまで向



上させる必要がある。Si と Mo の組み合わせは、安定した界面を形成し、比較的高い反射率を達成できるため、工学的応用 (EUVL) の分野でも長い間使われ続けている。さらに高い反射率を得るには、例えば、Mg と SiC や Mg と B<sub>4</sub>C の組み合わせからなる多層膜が高い反射率を持つ事は計算上知られているが、実用化には至っていない。多層膜の界面が一方の金属の拡散 (移動) により乱されているのが原因である。今後は、極端紫外線領域において良好な光学特設 (屈折率と消光係数) を持ちつつ、化学的に相性の良い元素 (化合物) を用いた多層膜の開発が重要である。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

かぐや衛星、のぞみ衛星、I S S 暴露部、ひさき衛星の開発から発展した技術であり、超小型衛星エクレウスに搭載される極端紫外線撮像機 (Phoenix) に利用されている技術である。

### 近接離角にある高強度光源からの迷光除去技術

(1) 科学目標と機器概要

多数の惑星探査機で、惑星間空間へと接続する超高層の熱圏・電離圏大気の光学観測が実施されてきたが、ほとんどが組成同定や鉛直分布測定を目的とした一次元分光観測で、二次元撮像観測はほとんど行われていない。界面形状や密度分布構造およびその時間変化を撮像で捉えるには、非常に微弱な信号を惑星本体からの強い太陽反射光の照射下で捉える必要がある。

(2) 開発状況、運用状況と課題

このような近接離角からの迷光を除去するため、高コントラストを達成しうる微細構造パツフルの概念設計・シミュレーション・実証機の開発を進めている。高コントラストの実現には、幾何学遮光ではなく高精度の波動光学的相殺現象を要するため、開発は挑戦的で、系外惑星の高コントラスト観測技術で培った知見・技術を活用する。この技術により、非磁化惑星の流出大気・氷衛星における地下海噴出現象などの二次元撮像を目指す。計測が困難であった惑星大気-惑星間空間の境界域を計測する鍵となる技術であり、次世代惑星観測機器の基礎光学技術となりうる。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

火星宇宙天気・宇宙気候計画

### 小型赤外波長可変レーザーファイバー分光器

(1) 科学目標と機器概要

地球型惑星における表層・地下と大気との相互作用を理解する上で、地中へのアクセス・地表面付近の大気物理量を捉えることは本質である。特に火星における水循環・水進化の観点においてこの観点は重要である。これまでの火星探査では、地形学・表面分光光学にとどまり地下水圏へのアクセスは限定的であり、これに加えて衛星観測では地表面付近～高度 20km までの大気鉛直構造は捉えてこなかった。この二つの課題を解決すべく、小型波長可変レーザーファイバー分光器の実現を目指す。地表・地下に対しては、ピンホール経由で赤外ファイバーを地表・物質内・地下等へアクセスさせ、希ガスや表層鉱物高精度計測を実現できる。上空に向けては、ヘテロダイン分光機能により地表～高度 20km までの精密鉛直構造推定を実現できる。地球型惑星における水循環・表層と大気との相互作用の解明にもつなげることを目指す。

(2) 開発状況、運用状況と課題

地表・地下に対しては「赤外狭帯域・可変波長光源」として、上空においては「ヘテロダイン用の局部発振器」として、波長可変レーザーが有効に働く。検出器・ファイバー技術を可視域よりも気体・固体の物質情報を含む赤外域で確立することが有益である。上空に対しては、東北大・理で工学研究者との連携のもとで赤外ファイバーを用いた光混合・分波技術などの実用開発研究を進めてきた。双方とも、JAXA の支援 (搭載機器

基礎開発研究経費)等を得て進められており、また要素技術は後述する地上観測用分光器とも重畳している。なお、この活動は、火星着陸機等への開発展開を図りつつあるロシアとの国際協力で推進してきた。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

ロ・米共同金星探査計画 Venera-D などへの共同搭載検討が行われている。

### 小型赤外分光撮像器:グレーティング・AOTF・フーリエ

(1) 科学目標と機器概要

火星衛星の起源論および地球圏・火星圏への水の起源を解明し、また火星大気のグローバル観測により大規模循環・変動過程を明らかにするには、赤外域分光撮像観測によって、衛星表面の含水鉱物・水関連物質・有機物や大気中のエアロゾル・CO・H<sub>2</sub>O などの大規模分布とその変動を検出することが有効である。これらを可能とする小型分光イメージャーとしては、以下の3方式がありえる。A. グレーティング方式+可動ミラーによるスリット分光カメラ方式: 仏との国際協力のもとで MMX 探査機用に開発している。B. AOTF 方式による波長スキャン型カメラ。A に方式転換されるまで、仏との国際協力のもとで MMX 探査機用に開発してきた。C. フーリエ方式による波長スキャン型カメラ。香川大開発をベースとして、東北大・名古屋大で評価検討に入っている。

(2) 開発状況、運用状況と課題

A. これが最もスタンダードな方式である。スキャンミラーを要し大型となりやすい点が問題である。B. ExoMars 搭載用 AOTF を用いた鉱物サンプルの実験室計測を実施した他、課題となる熱輻射成分補正・位相角補正・適切な光学設計のための、室内実験を行ってきた。C. 地上・民生用途を含め産学官での開発が進みつつあり、JAXA の支援(搭載機器基礎開発研究経費)等を得てきた。これらのバックエンドをなす2D 検出器技術は、赤外カメラと同等であり近年入手・技術確立は可能となっている(ただし、冷凍機を含め国産ではない)。いずれも、将来の月を含む広範囲の周回機・着陸機等における基盤技術として重要である。また既に挙げたファイバー技術との結合による多点分光も可能となる。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

A/B については、JAXA 火星・衛星探査計画 MMX への搭載に向け、仏との共同搭載検討が行われてきた。

### 紫外分光計/撮像

(1) 科学目標と機器概要

極端紫外から紫外の波長領域の光学観測は惑星や衛星の上層大気・プラズマを遠隔から捉えることができる観測技術であり、90 年代後半から光学技術が急速に進歩した。地球プラズマ圏の運動を可視化する研究手法を確立したことを皮切りに、木星磁気圏プラズマの可視化や火星・金星外圏大気の観測などにおいて大きな科学成果を生んできた。これらの実績を活かし、本技術を太陽系外惑星大気の観測へ展開も目指す。本波長領域では一般的に反射光学系を用い、高効率を達成するために反射回数を最小限に抑えたシンプルな光学系を採用する。通常、分光装置は集光鏡・スリット・回折格子・検出器で構成され、撮像装置は集光鏡・フィルタ・検出器で構成される。

(2) 開発状況、運用状況と課題

既に、多くの飛翔体に紫外線分光/撮像の観測器が搭載されており、紫外線光学系技術の今後は新しい素子によるブレイクスルーを目指すよりも、個々の光学部品の性能の向上から、観測機全体の S/N を上げる方向を目指している。例えば、水素ライマン  $\alpha$  (121.6 nm) や酸素原子輝線 (130.4 nm) の波長における鏡の反射率は 75%程度に留まっているが、これを 90%以上まで向上させる要素開発が進められている。分光素子では特定の波長で効率を向上させるブレード型回折格子の開発が進んでいる。検出器につ

いては、マイクロチャンネルプレート (MCP) に代わる素子を惑星探査に使う気運はなく、MCP の表面に蒸着する光電物質の開発 (例えば、遠紫外領域で高い効率をもつ窒化ガリウム (GaN) ) や MCP の受光面を凹面化する技術、MCP 表面の形状を変えることで開口率を向上させる技術 (ファネル型) が進んでいる。また従来のレジスティブアノードを用いた 2 次元位置検出部がもつ位置分解能および入射光量の上限を突破するために、CMOS センサを位置検出に用いた新型検出器の開発も進められている。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

国際紫外線天文衛星 WSO-UV への搭載に向けて系外惑星大気の観測を目指した紫外線分光装置 UVSPEX の開発が進められているほか、国内では紫外線宇宙望遠鏡計画 LOPYUTA の検討が進められている。

## ガスフィルタ技術

(1) 科学目標と機器概要

ガスフィルタは、原子吸光原理を用いて特定のガスの輝線を分離観測する手法である。特に、波長が近接した同位体の輝線分離においては、一般的な分光技術に比べて小型・軽量の装置で観測できるという点で有用である。例えば遠紫外領域の水素 Ly- $\alpha$  輝線を用いた同位体分光の場合は、H<sub>2</sub> ガス (もしくは D<sub>2</sub> ガス) を充填したセルにタングステンフィラメントを取り付け通電加熱することで、一時的に水素原子 (もしくは重水素原子) を解離生成する。このセルを光学系の軸上に配置すれば、天体から発せられた Ly- $\alpha$  を共鳴吸収できる。Ly- $\alpha$  は H と D で波長が異なるため (H: 121.567nm, D: 121.534nm), H<sub>2</sub> セルと D<sub>2</sub> セルを直列に配置し交互にフィラメントに通電することでそれぞれの輝線を選択吸収し、その差分から輝線強度を導出できる。この技術を用いれば、惑星大気散逸における質量依存性等の物理過程の議論や、同位体比で特徴づけられる天体大気の起源に迫れる。

(2) 開発状況、運用状況と課題

本技術の原理実証は 90 年代以前にすでに行われている。一方でフィラメントの耐久性向上やガス圧の最適化、ガラス材の選定や (原子拡散接合を始めとする) 溶着技術の向上は技術課題である。また、フィラメントへの通電加熱以外の分子解離技術 (高周波励起など) の確立や、ガス種類の拡張 (ヘリウム、酸素、窒素等) への応用が今後の開発課題である。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

長周期彗星探査計画 Comet Interceptor と関連する。

## 次世代熱赤外撮像機器

(1) 科学目標と機器概要

10  $\mu$ m の熱放射を捉える非冷却ボロメータ検出器は、小型軽量のため惑星探査に適している。「あかつき」搭載中間赤外カメラ (LIR) や「はやぶさ 2」搭載熱赤外カメラはこの種の赤外カメラの有用性を実証した。金星探査に関しては、この波長域を使って、熱潮汐や子午面循環を継続的に観測する必要性が認知された。金星探査以外にも、例えば火星大気中の浮遊ダストの分布を観測することで、大気散逸の過程で重要な下層大気から外圏底部への物質輸送に関わる重力波を直接捉えられると期待されている。

(2) 開発状況、運用状況と課題

これらの観測を実現するためには、最新の非冷却ボロメータ検出器を採用した熱赤外カメラを開発し、技術力を維持することが必須となる。非冷却ボロメータカメラの開発とその技術力は 50 kg 級の大学衛星搭載機に継承されている。現在では LIR の素子数 328 $\times$ 248 をしのぐ素子数 1024 $\times$ 768 を有し、かつ感度が向上した次世代検出器を探査機に搭載可能である。一方、観測対象温度下限への要求は 230 K から 200 K 以下に下がり、8-12  $\mu$ m を 1  $\mu$ m 程度ごとに分光した多波長型カメラの要望もある。これらに

応えるためにはカメラのさらなる感度向上という開発課題を解決することが必須となる。カメラ自身や光学系が発する熱放射の変動は感度の向上を妨げる主要因であるため、開発では検出器を含むカメラ全体の環境温度を一定に制御したり、精度の高い補正用の内部較正データを得たりする工夫が必要であろう。電氣的に読み出し回路のフレームレートを低下させて露光時間を拡大させる、光学系の F 値を明るくする、反射光学系を試作して透過型のゲルマニウムレンズよりも光量の損失を抑える、といった感度向上のための新たな方策を導入していくことも有用である。近年の非冷却ボロメータ検出器にはペルチェレスと呼ばれる検出器の温度安定制御が不要な高感度タイプが存在するため、この検出器をペルチェで積極的に温度制御する事により、より高い感度を得られるだろう。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

ロシアの金星探査計画 Venera-D や米国の金星探査計画 Phantom などの次世代金星探査で非冷却ボロメータカメラの搭載が検討されている。

### 小型サブミリ波ヘテロダイン分光観測装置

(1) 科学目標と機器概要

サブミリ波・テラヘルツ波は、信号を波として捉える技術と光子として扱う技術の狭間にあって検出器開発の難しさが付随する。しかし、電波や可視・赤外領域では観測が不可能な分子・ラジカル化学種の回転や振動励起のスペクトル線が多数存在しており、天文・惑星科学分野における科学的発展の可能性を大いに秘めた最後のフロンティア波長領域と言える。SGEPSS 分野においては地球や惑星の低層から高層にかけての上下結合・物質循環の研究への成果が期待され、特に系外内を含めた地球型惑星の大気微量成分組成の解明やヘテロダイン技術による高い周波数分解能観測が可能にする風速場の直接観測など、ユニークな研究が可能である。

(2) 開発状況、運用状況と課題

我が国の衛星搭載の当該観測装置としては、例えば 2009 年に国際宇宙ステーション (ISS) に打ち上げられ、地球大気成層圏・中間圏における微量成分の振る舞いについて高感度観測を実現したサブミリ波帯放射観測装置 SMILES がある。SMILES ではサブミリ波アンテナ光学系やサブミリ波受信機系の地上検証、また宇宙用超伝導ミクス、冷却光学系、サブミリ波校正源といったコンポーネントをインハウスで開発し、4 K 級冷凍機と組み合わせることで、従来の同様の地球大気の大気微量分子観測について一桁高い精度を実現させた。欧米でも、これまでに Aura MLS やハーシェル宇宙望遠鏡、成層圏赤外天文台、そのほか成層圏気球などでもミリ波・サブミリ波ヘテロダイン分光観測が活発に展開されてきた。今後、地球・惑星大気についてマルチバンドの同時観測により、より高精度かつ短・中・長期的な 4D 観測 (緯度・経度・高度・時間) の展開が期待されている。国内でもそのために、将来の惑星探査周回機への搭載を見据えた小型・軽量のサブミリ波・テラヘルツ波検出器の開発や検討も進んでいるほか、主鏡をはじめとするアンテナ光学系の軽量化では、複合材を用いた新型のリフレクタの研究開発も進んでいる。おりしも ESA の木星圏探査ミッション JUICE にも小型サブミリ波分光計の搭載が提案されており、日本からも国際共同チームに参加している。こうした海外のサブミリ波測器開発チームとの連携によるインテグレーションや運用の経験は、我国の将来ミッションの推進に重要な役割を果たすと期待される。また、最近では超小型周回機・着陸機への搭載を念頭に置いた取り組みも検討されており、常温動作の高感度受信機や FPGA を集積した高分散広帯域のデジタル分光計、制御・計算機等のコンポーネントの超軽量化・低消費電力化・堅牢性の検証、惑星保護への対応、データ通信量の確保、キャリブレーション手法や機上での大容量データの高速度処理なども喫緊の課題として取り組まれている。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

ヨーロッパの木星ミッション JUICE や、火星宇宙天気・気候・水環境探査のための戦略的国際火星探査計画などへの展開が期待される。

## 地下探査レーダサウンダ

### (1) 科学目標と機器概要

火星環境、特に水循環の現状・進化を理解するためには、宇宙空間への大気散逸に加えて、大気と表層・地下の相互作用を観測から把握していくことが欠かせない。また、月極域では地下氷存在の可能性が示唆され資源利用の観点からも関心を集めているが、存在形態（氷、含水鉱物、H原子）、供給・散逸・濃集メカニズムの詳細は未解明である。地下探査レーダサウンダは、ローバまたは周回機に送受信機・アンテナを搭載し、アンテナから電磁波を放射して、反射波を計測することで対象天体の地下構造を明らかにする。火星・月・小惑星などの固体天体の地下・内部の構造、層序を観測し、上記の課題に取り組むとともに、火星では火山・構造地形の把握、月では隕石衝突・火山活動・テクトニクス理解・溶岩チューブの探索、小惑星では分裂・衝突・崩壊などの物理的進化過程の解明にも貢献する。

### (2) 開発状況、運用状況と課題

広域探査用の低周波地下レーダは SELENE 搭載 HF 帯レーダの開発・観測運用の実績がある。高分解能探査用の高周波地下レーダは、はやぶさ2 オプション機器・小惑星探査 WG として、UHF 帯送受信機 BBM が開発されている。また、単純な構造を持ちながら広帯域特性を持つ UHF 帯ビバルディアンテナも設計済である。東大・東北大・JAXA・東工大 から約 10 名の研究者が参加して、(1) 月極域の氷探査に向けたアンテナ・送受信機の 0.5~3GHz 帯対応、(2) 周回機搭載サウンダの高周波化による Clutter 増加に対応するためのクロスレンジ解析技術の検討（合成開口処理・マイグレーション等）(3) 将来の小惑星内部探査に向けた送受信機の軽量化・レーダトランスポンダの開発に取り組んでいる。(1)の LUPEX に提案したレーダ（インド側担当の方針確定により、条件付採択後に不採択）は、EM 制作に1年半、PFM 制作に1年半の合計3年（小型軽量化を要する場合はその検討を含む4年）で開発可能と見込んでいる。(2)の解析技術は、解析・運用支援で参加予定の LUPEX の GPR データ解析においても有用な技術である。

### (3) ミッションやプロジェクトとの関係

SELENE-R、火星宇宙天気・宇宙気候計画、着陸機による火星環境探査 RG

## 気球搭載望遠鏡

### (1) 科学目標・機器概要

極周回成層圏望遠鏡 FUJIN は地上観測、衛星望遠鏡に続く第3の惑星光学観測のプラットフォームとして提案されている。成層圏は大気が薄く安定しているため、天体光学観測に要求される良シーイング、晴天、紫外・赤外領域における高透過率が期待できる。FUJIN は衛星望遠鏡の性能を1/100の低コストで実現できることが大きなメリットである。惑星大気やプラズマ現象の光学観測において、観測の時間的継続性は現象の本質を解き明かす上で非常に重要である。極域では24時間以上連続で惑星を観測可能な時期が存在することを利用して、当面は65°~70°に位置する放球場所から放球されたゴンドラを等緯度帯に沿って極周りを周回させる運用を実現する。将来的には成層圏で動作する推進装置を備え、極渦の中心に移動して定点観測を実施し、定期的メンテナンスのために放球場所まで帰還するという運用を目指している。

### (2) 開発状況、運用状況と課題

米国は同様のコンセプトで彗星等の突発的太陽系内天体の観測を機動的に実現できる気球搭載望遠鏡を開発し、すでに実用段階まで漕ぎ着けている。FUJIN が今後世界の最先端に位置するためには、米国に水をあけられないよう今開発のピッチを上げなければならない。さらに、成層圏望遠鏡が半恒久的宇宙天文台として成立するために

は、長寿命スーパープレッシャー気球の開発が必要不可欠である。スーパープレッシャー気球の開発においても、我が国は米国に一步先んじられている。このような現況ではあるが、日米間の考え方に長期連続観測と機動的な観測というスタンスの違いもあり、共存していくことは可能である。現在、2023年3~4月にオーストラリアにて金星の分光・撮像観測を目的としたFUJIN-2気球実験の準備を進めている。FUJIN-2気球実験では成層圏から金星ディスク上の紫外吸収が強い領域と弱い領域を分けて分光観測することによって、未知の吸収物質の同定と雲層中での加熱率分布の推定を目指す。

- (3) ミッションやプロジェクトとの関係  
極周回成層圏望遠鏡 FUJIN シリーズと関連する。

### 編隊飛行の衛星間通信を活用した観測動作制御法

- (1) 科学目標・機器概要

科学衛星は「その場 (in situ)」を直接計測する唯一の手段であるが、衛星観測は、移動する飛行体での1点観測ゆえに空間構造の時間・空間変化が切分けできず、空間全体の巨視的変動の把握が難しい。さらに磁気圏プラズマ中では、多数の要因が融合して異なる時間・空間スケールの現象が同時発生的に起こり、その因果関係の解明が難しい。

- (2) 開発状況、運用状況と課題

このため、「複数衛星を用いた同時観測」が国際的にも重要視されており、海外ではすでに CLUSTER、THEMIS の運用に続き、新たに MMS 計画も実施中である。わが国でも親衛星1機と子衛星3~4機で磁気圏尾部の探査を目指す編隊飛行観測計画「SCOPE」の検討に合わせて、衛星間距離の測距と時刻同期を時分割の交互衛星間通信で行うための技術開発を行い搭載品開発前の段階までの開発を完了した。本研究開発は、将来の複数衛星による編隊飛行観測計画において、衛星間通信を活用して親子衛星が互いの観測状態を情報共有し、編隊飛行衛星群が自律的かつ適応的に連携して同時観測を実現するための最適連携動作の決定アルゴリズムと、それに基づく衛星搭載観測器の制御法を開発することを目的としている。この技術の開発により、衛星群が自律的に連携して重要イベントを確実にとらえ、限られたリソース内で大きなサイエンスアウトプットの獲得が期待できる。

- (3) ミッションやプロジェクトとの関係

高時間分解能による同時多点観測を実現するための将来の宇宙空間探査衛星群計画などへの応用が考えられる。

#### 4.1.1(2) 地上観測機器の開発

##### 地球大気および電離圏環境のリモートセンシング

電波	衛星電波を用いた電離圏電子密度構造の測定
	多点フェーズドアレイ方式の非干渉散乱 (IS) レーダー
	HF ドップラー観測装置
	短波帯干渉性散乱レーダーによる広域・高時空間分解能の電場・中性風イメージング
レーザー	ライダーの新規技術開発
光学	夜間大気光の多点イメージング分光観測のための技術開発
	ファブリ・ペロー干渉計による2次元・多波長観測のための技術開発
	地上オーロラ光学観測のための技術開発

##### 惑星大気および太陽圏環境のリモートセンシング

赤外	超高分解能赤外レーザーヘテロダイン分光観測
電波	ミリ・サブミリ波地上観測装置の開発
	電波望遠鏡 (低周波帯)

##### 地上電磁場の計測

電磁場	自然 VLF 波動観測器 (地上)
	VLF/LF 帯標準電波・tweek 空電の観測装置
	地上磁力計システム

以下に、各開発項目の概要を述べる。

##### 衛星電波を用いた電離圏電子密度構造の測定

###### (1) 科学目標と機器概要

全地球測位衛星システム (GNSS) などの衛星電波を用いて地球電離圏・プラズマ圏の3次元電子密度分布を連続的に測定し、電離圏・プラズマ圏の変動とその変動の物理過程を明らかにすることを目標とする。GNSS は1990年代より急激な発展を続けており、電波を送信する衛星数、電波を受信する地上および衛星上の受信機数ともに増加を続けている。このGNSS電波を用いた電離圏・プラズマ圏電子密度構造の観測において、測定領域・空間分解能・時間分解能のいずれもが急速に向上しており、現在における電離圏観測の最も基盤的な手法となってきた。今後、取り組むべき課題としては、新しい領域での観測の実施、観測された巨大データの共有と活用システムの構築、トモグラフィや擾乱構造の抽出などのデータ解析技術の向上、得られたデータの数値シミュレーションとの比較、データ同化への利用、航空機航法など社会システムへの電離圏構造の影響の評価・軽減、などである。

###### (2) 開発状況、運用状況と課題

GNSS 衛星システムとして日本においては「みちびき」(準天頂衛星システム)が継続的に開発・運用されており、米国 GPS、欧州 GALILEO、ロシア GLONAS、中国 BeiDou、インド GAGAN などと合わせて多くの衛星からの電波が利用できるようになってきている。従来の高度 20,000km 周辺の中軌道衛星に加えて、静止軌道衛星も増加しており、1つの地上受信機から多数の観測点のデータが同時に得られるようになってきている。GNSS 受信機においては、複数周波数受信機が飛躍的に安価かつ小型化しており、高い



精度での衛星測位と同時に全電子数の測定が容易になってきている。海外も含めて連続的な観測を行う GNSS 受信機網は増加しており、科学目的の観測網だけではなく、測位情報サービスのための民間企業による GNSS 受信機網の整備も飛躍的に進んでおり、そのデータの科学目的への利用も進められている。また、衛星搭載 GNSS 受信機網も COSMIC-2 衛星群などの科学衛星に加えて、SPIRE 社などの民間企業による 100 機以上の人工衛星において GNSS 電波掩蔽測定が行われており、急速に発展している。今後は、極域や、海上、静止軌道衛星などこれまで GNSS 受信機の展開が進んでない領域への展開と、受信機網の高密度化が進むと期待される。

このようなデータの大量増加に対して、データの共有システムは非常に重要であり、名古屋大学 ISEE による全電子数データベース：<https://stdb2.isee.nagoya-u.ac.jp/GPS/GPS-TEC/> や NICT による DRAWING-TEC：[https://aer-nc-web.nict.go.jp/GPS/RT\\_GEONET/](https://aer-nc-web.nict.go.jp/GPS/RT_GEONET/) は国内外の研究者に利用されている。また測定される電子密度の電波経路上の積分量である全電子数から 3 次元電子密度分布を求めるトモグラフィ手法の開発も重要であり、電子航法研究所によってリアルタイム・トモグラフィが行われている：<https://www.enri.go.jp/cnspub/tomo3/>。これらのデータ共有と活用システムの構築と、トモグラフィや擾乱構造の抽出などのデータ解析技術の向上は今後も継続して行うことが必要である。また、これらを通じて電離圏・プラズマ圏に関する科学研究以外の他の分野との連携を進めることも重要である。観測で得られた電離圏・プラズマ圏の 3 次元電子密度構造からさまざまな電波の伝搬状況やその障害の評価・予測は、社会システムへの電離圏構造の影響の評価・軽減のためにも活用されるべきである。

### (3) ミッションやプロジェクトとの関係

得られた 3 次元電離圏・プラズマ圏電子密度構造の物理過程を解明するために、GAIA モデルとの連携は非常に重要である。さらに継続的に多地点で得られる観測データをデータ同化することにより電離圏・プラズマ圏の変動の予測モデルへ発展することも重要である。また、GNSS 受信機やビーコン送信機の観測ロケット S520-32 号機への搭載も行われており、観測ロケットや人工衛星搭載機器の開発も進められている。

## 多点フェーズドアレイ方式の非干渉散乱 (IS) レーダー

### (1) 科学目標と機器概要

非干渉散乱 (IS) レーダーは、大型アンテナと、大出力の VHF/UHF 帯電波、超高感度の受信機を用いて、電離圏電子からの微弱なエコーを観測し、広い高度範囲のプラズマ温度や密度などの電離圏物理量データを取得できる強力な観測装置である。MU レーダーや AMISR に代表されるフェーズドアレイ方式の IS レーダーでは、イメージング (干渉計) 観測やレーダービームの高速走査、ポスト・ビームステアリングなどの多くの観測手法の開発がなされてきている。また、EISCAT レーダーによる複数のパラボラアンテナによる観測では、3 局方式による正確な 3 次元イオン速度の導出手法を確立し、定常利用されてきている。これらの観測技術をさらに発展させた、電離圏電流や電場、電気伝導度、中性風などの立体観測が、オーロラ物理や磁気圏-電離圏結合、プラズマ-中性大気相互作用などの様々な重要課題の理解を進めるために、強く求められている。本観測機器は、そのような立体観測を実現するための、送受信局と複数の受信局共にフェーズドアレイ方式を用いた IS レーダーシステムである。

### (2) 開発状況、運用状況と課題

本観測機器は、欧州非干渉散乱 (EISCAT) 科学協会 (日本は加盟国の 1 つ) を中心に検討と整備が進んでいる。2005 年から 2009 年にかけてデザインスタディーが実施され、その後、プロトタイプ受信局や技術実証用サブアレイを用いた開発が行われている。2017 年 9 月に建設を開始し、1 つの送受信局による運用を 2024 年から、さらに 2 つの受信局を含む 3 局方式の運用を 2025 年以降に開始する予定である。複数局による電離

圏イメージング観測やレーダービームの高速走査、ポスト・ビームステアリングは初めての試みであり、複数局の正確な時間同期を含む様々な技術開発が必要とされる。これらの複数局で扱う観測データの量は膨大（特に時系列データは約6 TB毎秒）であり、超高速の信号処理技術やデータ蓄積手法の開発が必須である。さらに、1局あたり約1万本のアンテナを必要としており、部品点数が大幅に増加するため、効果的なメンテナンス方法の開発も重要である。また、宇宙天気予報に貢献するためには、常時のリアルタイムモニタリングが必要であり、そのための安定した連続運用とデータの可視化についても新規開発が課題と言える。

- (3) ミッションやプロジェクトとの関係  
日本を含む国際共同で推進中の「EISCAT\_3D計画」が挙げられる。

### HF ドップラー観測装置

- (1) 科学目標と機器概要

HF帯電波が電離圏において反射される際、反射点が上下動する場合、ドップラー効果により電波の周波数が増減する。したがって、この周波数変化を観測することで、電離圏（プラズマ）の上下動を観測することが可能である。HFドップラーはこの原理を応用して、数m/s程度の電離圏上下動を観測可能である。HFドップラー観測の歴史は比較的長く、これまでも、太陽フレアや磁気嵐に伴う電離圏変動や伝搬性電離圏擾乱の観測を行っている。また、電離圏プラズマのドリフトがExBドリフトによることから、電離圏での電場の観測にも可能である。これにより、磁気嵐時の極域からの電場侵入やevening enhancementの観測などにも用いられてきた。また、周波数を変化することができれば、原理はイオノゾンデと同じになることもあり、Spread FやスポラディックE層の観測などにも用いられる。

- (2) 開発状況、運用状況と課題

近年注目されているHFドップラー観測の対象として、中性大気とプラズマの相互作用を通じた、中性大気波動による変動の観測が挙げられる。地震や火山噴火などに伴い電離圏変動が発生することが知られているが、これらは、地面の振動や噴火に伴う衝撃などにより、大気波動が発生し、電離圏に伝搬することによる。HFドップラーでは、プラズマの動きを観測するが、その変動から中性大気粒子の運動を定量的に推定するには、磁場の傾きの影響、疎密波の伝搬に伴う電子密度時間変化の影響を考慮する必要がある。ドップラー効果は、反射点の上下動により引き起こされると述べたが、より正確には、位相経路長の時間変化により発生する。したがって、音波のような中性大気の疎密波が伝搬する場合、伝搬経路上においてプラズマ密度が時間変化し、電波の位相速度も時間変化するため、それによりドップラーシフトが発生する。これらの効果を考慮することでHFドップラー観測から得られたプラズマの動きから中性大気粒子の運動を導出することが可能になる。電離圏高度での中性大気粒子の運動そのものを観測することは難しいため、結果の検証については、数値計算やシミュレーションなどの結果との比較を通じて行っていく必要があると考えられる。

（装置のデジタル化）

- (3) ミッションやプロジェクトとの関係  
電気通信大学 HFD プロジェクト  
九州大学・九州工業大学連携プロジェクト

### 短波帯干渉性散乱レーダーによる広域・高時空間分解能の電場・中性風イメージング

- (1) 科学目標と機器概要

短波帯干渉性散乱レーダーは、大型アンテナと短波帯電波送受信機を用いて主に電離圏電子密度不規則構造からの後方散乱エコーを観測し、広範囲の電離圏プラズマ対流分布や電離圏電子密度変動などの電離圏物理量データを1秒～2分の時間分解能、15～

45 km の空間分解能で取得できる観測装置であり、磁気圏-電離圏-中性大気相互作用の研究において重要な役割を果たしてきている。単一のレーダー装置だけで 3000~5000 km に及ぶ範囲の電離圏環境変動の観測が可能であるが、世界約 10 か国の国際協力により運用されている約 35 基の短波レーダー網である Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) では、1~2 分程度の時間間隔で地球規模の電離圏プラズマ対流・電子密度変動分布の情報を提供できる唯一無二の観測手段である。特に、SuperDARN では異なるレーダー装置間で共通の制御・スケジューリングプログラム、共通のデータフォーマットおよび共通の解析ソフトウェア基盤を採用しており、複数のレーダーデータを組み合わせることが非常に容易な体制を整備している。日本においては、国立極地研究所が昭和基地に 2 基、名古屋大学宇宙地球環境研究所が北海道陸別町に 2 基、それぞれレーダー装置を所有して運用している。

(2) 開発状況、運用状況と課題

SuperDARN 南極昭和基地 SENSU レーダーをはじめとする複数の SuperDARN レーダーでは、(条件が整えば従来よりも一桁程度高い) 高時空間分解能観測を実現するイメージングレーダー化の開発を行っている。これにより、オーロラ光学観測等で得られるメソスケールの現象に関連した数 km 程度の電離圏電場や FAI 構造および電子密度変動の詳細を、大域的電場構造と同時に捉えることが可能となり、電離圏磁気圏結合過程の解明に寄与することが期待できる。また SuperDARN 北海道-陸別第一・第二レーダーでは比較的安価な USRP 受信システムを導入することにより、将来的にイメージング化の実現を通じて、中緯度・サブオーロラ帯における高時空間分解能の実現を目指している。さらには、SENSU レーダーで開発した高精度流星風観測 (即ち、流星観測による中間圏界面領域の中性風観測) を、国内外の全 SuperDARN レーダーに拡大し、南北半球中~高緯度の経度方向にも広範囲に広がる中性風観測網の構築を実現する準備を進め、中間圏界面近傍 (或いは MLT 領域) の全地球規模の中性風系や大気波動の動態把握、大気上下結合の解明に寄与することを目指している。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

日本を含む世界約 10 か国の国際協力で推進中の SuperDARN 計画、特に国内の SENSU (昭和基地第一・第二レーダー装置)、HOP (北海道-陸別第一・第二レーダー装置) が挙げられる。

## ライダーの新規技術開発

(1) 科学目標と機器概要

ライダーは、レーザーを利用したアクティブリモートセンサで光によるレーダー観測 (レーザーレーダー) 機器である。一般的にはレーザーパルス光を上空に送信し、大気からの各種の散乱信号を望遠鏡で集光して受信することで大気からの情報を得る。送信時刻からの経過時間ごとに受信信号を捉えることで、送信点からの距離の関数として物理量が計測できること (レンジング機能) が大きな特徴である。ライダーで利用する散乱には、ミー散乱、レイリー散乱、ラマン散乱、共鳴散乱など多数あり、またレーザー光が散乱される場所までを往復する間に受ける吸収の変化量を計測する差分吸収ライダーという手法もある。ライダーの大きな特徴は、ターゲットになる大気分子や原子に固有な共鳴波長や吸収波長を用いることで、多種多様な大気成分濃度の時空間分布を観測できることである。また散乱体や吸収体の散乱および吸収断面積の波長依存性やドップラー効果を利用することで、大気成分濃度と同時あるいは個別に大気の温度や風速などの物理量を正確に測定することもできる。これが電波を用いるレーダーとの大きな違いである。

(2) 開発状況、運用状況と課題

対流圏の雲やエアロゾルの観測には広くミー散乱ライダーが用いられており、黄砂やサハラ砂漠のダスト、火山噴火や森林火災によるエアロゾルの輸送がライダーネット

ワークによりモニターされている。また、二酸化炭素やメタンを測定する差分吸収ライダーが実用化されるとともに、半導体レーザーを光源とした小型でメンテナンスの容易な水蒸気差分吸収ライダーの開発が進み、全自動連続運転が実現している。対流圏や成層圏では差分吸収ライダーによるオゾン観測が引き続き行われているとともに、地球温暖化に大きな影響を与える大規模火山噴火により成層圏へ注入される火山ダストの観測に加え、最近では小規模な火山噴火や大規模な森林火災により発生した火災積雲により成層圏まで達したエアロゾルの観測が、衛星搭載ライダーや地上ライダーにより全球的に行われている。中層大気から下部熱圏までのライダー観測は、最近では中緯度だけではなく極域や赤道域など世界各地でレイリーライダーによる気温高度分布観測や、ナトリウムライダー等共鳴散乱ライダーにより金属原子密度プロファイルや気温・風の観測が行われている。今後大きな進展が考えられるのは、差分吸収ライダー、共鳴散乱ライダーなどの微量成分をターゲットとしたライダー技術である。波長可変レーザーや波長変換、光検出器技術の発展により、これまで利用できなかった波長を用いて様々な微量成分の消長を捉えることが期待できる。特にこれまで計測困難であった高度 110 km 以上の熱圏大気で、ヘリウムや準安定窒素分子、励起状態の酸素や窒素イオンなど利用した手法が提案、あるいは試験観測が行われ始めている。今後、地上や衛星からのライダー観測で計測可能になり、熱圏内の温度、風速をはじめ種々の微量成分のプロファイリングは、必ずや超高層大気科学における新分野を開拓できるものと期待される。もう一点注目したいのは、従来のパルスライダーとは異なる、連続波 (CW) によるライダーである。パルスにくらべて CW レーザーは波長制御が容易で同じ平均出力のパルスレーザーに比べてレーザー本体や光学素子の耐久性が高い。今後は高出力のレーザーに符号化変調とその復調を用いた CW ライダーの実用化が期待される。この技術は、これまでのライダー観測で課題として挙げられた長期間にわたる無人観測や遠隔観測の容易化に結びつくものであり、実用的ライダー技術としては大変意味のある研究である。航空機や宇宙からの地球大気のリダー観測は、これまで米国をはじめ欧州などで数多く試みられ、また現在でも多くの計画も存在する。その結果、NASA の CALIPSO の例を挙げるまでも無く、この分野に衝撃的な成果を挙げてきた。一方、日本においては、航空機搭載ライダーどころか、大気観測用の衛星搭載ライダーは計画段階にも達していない。ライダーは我が国が開発の初期段階から世界をリードする研究を行ってきた研究分野である。今後も世界の流れに遅れることなく、新規技術の開拓とその理学応用の両輪を大事にしたプロジェクトの推進が望まれる。

### (3) ミッションやプロジェクトとの関係

南極 (昭和基地) で国立極地研究所が主導している南極観測計画の一環として、昭和基地にて各種ライダー観測 (波長可変共鳴散乱ライダー、レイリーライダー等) が進められてきている。北極 (トロンソ) EISCAT レーダーサイトでは、名古屋大学、信州大学、理研、電通大、ノルウェー北極大学の共同で、ナトリウム風速・温度ライダーが運用されている。中緯度 (国内) においては、国立環境研究所、気象庁気象研究所、首都大学東京などで、各種研究プロジェクトによるライダーの開発、観測が行われている。赤道 (コトババン) では、京都大学生存圏研究所の全国国際共同利用施設である赤道大気観測所に首都大学東京のライダー観測拠点が有り、世界で唯一の赤道直下にあるライダー観測拠点としてその運用が継続的に行われている。

## 夜間大気光の多点イメージング分光観測

### (1) 科学目標と機器概要

全天カメラ、ファブリ・ペロー干渉計などには、1990 年代後半から背面照射型の冷却 CCD カメラが応用されるようになり、感度が 1 桁上がることによって、オーロラだけでなく中低緯度で発光する夜間大気光のイメージング分光観測が可能になった。また、従来は非常に大がかりで高価であったファブリ・ペロー干渉計も、感度が上がったために

口径の小さいエタロンでも観測が可能になり、価格が 1/3 程度に下がるとともに自動観測が可能になってきた。

(2) 開発状況、運用状況と課題

今後は、これらの機器が多観測を行うようになり、それに伴って膨大な画像データを効率的に処理するデータベースの手法が重要になってくるであろう。特に複数の全天カメラの画像を地理緯度経度にマッピングし、長期間にわたって広い範囲の変動を捉える大量画像処理とデータ可視化が必要である。また、晴れ・曇りの判断や、画像中の波動現象に関して、自動的に捉えていく 2 次元フーリエ変換やウェーブレット変換の手法の一般化・汎用化の努力も必要であると思われる。また、南極高地での展開を目指して天文学研究コミュニティで進められている「南極望遠鏡計画」へ、極地観測経験の豊富なコミュニティとして協力を図るとともに、(1) (2) の展開を含めた将来活用を図っていく。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

OMTIs (Optical Mesosphere Thermosphere Imagers) および PWING プロジェクトに関連している。

### ファブリ・ペロー干渉計による2次元・多波長観測

(1) 科学目標と機器概要

電離圏プラズマの運動に大きな影響を与える熱圏中性大気の観測データは少ない。電離圏・熱圏の変動機構の理解をさらに発展させるには、熱圏大気の測定技術を向上させなければならない。ファブリ・ペロー干渉計は、オーロラや大気光の高精度分光計測を通して、熱圏の風速と温度を地上からリモートセンシングすることができる数少ない装置である。

(2) 開発状況、運用状況と課題

近年、米国アラスカ大学が全天型ファブリ・ペロー干渉計 (Scanning Doppler Imager: SDI) による風速・温度の 2 次元観測を行い、オーロラアーク規模の空間分布と時間変化が熱圏風・温度に現れることを示した。さらに風速導出精度の向上と、より多様な科学課題への応用を進めるために、鉛直成分を含む風速ベクトルの導出、風速ベクトルの回転項の導出方法の改善、発光高度の時間変化に起因した不確定量の軽減方法の開発、日照領域での測定技術の開発 (例: ダブルエタロンの応用) が必要である。そのためには SDI の複数点配置による風速ベクトルの導出、非干渉散乱レーダーや SuperDARN レーダーを組合わせた電離圏・熱圏の同時測定が有効である。スカンジナビア北部において、3 機の SDI と EISCAT\_3D レーダーによる新しい観測体制が 2024 年に始まる。また背面照射型の冷却 CCD カメラや EMCCD カメラの導入により、受光部の感度および測定可能な波長範囲が格段に改良されたことを受け、従来使われてこなかった発光輝線を観測するための技術開発を通して、熱圏大気の宇宙空間への散逸過程や、高度に依存した熱圏風速・温度の変動などを明らかにすることが期待される。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

OMTIs, SDI-3D, EISCAT\_3D, SuperDARN

### 地上オーロラ光学観測

(1) 科学目標・機器概要

オーロラ活動には、様々な空間スケール、時間スケール、発光強度レベル、の変動があり、グローバル (マクロ) スケールの発達の中でのメソスケールの構造、メソスケールの構造を生み出すミクロスケールのプロセス、など、オーロラ活動の全体像を理解するためには、スケール間の関係が把握出来るような、「マルチスケールの」「定量的な」データを「同時に」取得する必要がある。地上観測のメリットは、ミクロからメソスケールまでの現象の高空間分解能、高時間分解能、多波長、連続観測が可能である点で、

視野に関しては、魚眼レンズを用いた全天から、望遠鏡を用いた狭視野観測まで、時間分解能については、最近の EM-CCD (Electron Multiplying) や科学用 CMOS といった撮像素子を用いた、高感度、(超) 高速撮像観測までが可能となっている。また、「多波長観測」については、狭帯域の干渉フィルター、エタロン、回折格子、液晶チューナブルフィルターなどを用いた分光観測が行われてきており、地上からの「マルチスケールの同時観測」という意味では、こうした素子や技術を組み合わせて、全天の微細構造の高速変動をくまなく捉えることが出来る、「多色全天微細構造高速撮像カメラ」システムの開発が強く求められている。

## (2) 開発状況、運用状況と課題

2010 年代に入り、EMCCD カメラや科学用 CMOS カメラを用いたビデオレート (30 Hz) を超えるオーロラ観測が、北極域を中心に行われている。特に、北欧や北米には 100 Hz で高速撮像を行う EMCCD カメラがネットワークとして配備され、現在スカンジナビア 4 地点、アイスランド 1 地点、アラスカ 1 地点、カナダ 1 地点において運用されている。また、ノルウェーのトロムソにおいては、多波長での全天高速撮像カメラ (427.8 nm, 844.6 nm の発光) が 10 Hz の時間分解能で運用され、複数波長における発光強度の比からオーロラ降下電子のエネルギー推定が行われている。今後は、光学的手法によって降下電子のエネルギー推定を行うことがどの程度の定量性を持つのかについて、非干渉散乱レーダーや衛星との同時観測によって検証していく必要があると考えられる。また、こうした、高時間・高空間分解能観測から生み出される膨大な量の「ビッグデータ」を蓄え、処理・解析を行うための総合的なシステムの開発も重要な課題となる。こうした課題は、地球惑星科学分野以外の、「ビッグデータ」を扱う他の分野にも共通するものと考えられ、情報科学、統計科学なども含め、他の分野の先端技術の適用や、逆に、他の分野をリードする新しい技術の開発などにつながる可能性がある。同時に、現在 FMI (Finnish Meteorological Institute) のグループによって開発されてきているような、解析に値する重要なデータのみを自動的に取捨選択して残す、或いは、解析対象とする現象を自動的に検出・抽出する、といった、高レベルの「オーロラ現象自動認識ツール」の開発も必要であろう。「多点のネットワーク観測」に関しては、上述した、マクロスケールからミクロスケールまでのマルチスケール観測の観点からの観測点配置・観測機器配備の最適化を行う必要がある。また、最適な位置に観測点を設置・配備するために、自然エネルギー (太陽光、風力、その他) を電力源とする「インテリジェントな無人観測システム」の開発をさらに進める必要がある。また、北欧の ALIS (Aurora Large Imaging System) 観測データを元に開発されてきている、オーロラの 3 次元立体構造を求める「オーロラトモグラフィ」解析手法の確立と汎用化、実際の様々なオーロラ活動への適用を進める必要がある。

## (3) ミッションやプロジェクトとの関係

脈動オーロラ観測プロジェクト、PWING プロジェクト、ALIS\_4D

## 超高分解能赤外レーザーヘテロダイン分光観測

### (1) 科学目標・機器概要

赤外域は、多数の分子振動・回転バンドや固体物質の吸収スペクトル情報によって、大気分子や固体物質の組成・同位体比や大気温度場・速度場の情報をもたらし、大気進化、有機物質の生成・消滅、火山・熱水活動、大気三次元運動の把握を可能とすることで、惑星大気の変動・進化に鍵となる情報を提供する。地上観測では、(1) (2) 大きさ・重量の制約から探査機への搭載が困難な高分散分光器の開発、および (3) 地球観測との共通化・転用が可能な数値解析モデルの開発を進める。また、(4) 惑星/系外惑星観測に要請される短中長時間変動・イベント追跡を実現できる専用望遠鏡の確立を進め、国内外の太陽系探査/系外惑星探査ミッションへの常時貢献を可能とする。これ

らの活動は、探査機に展開される搭載装置観測の技術基盤と開発能力の形成に直結する。

## (2) 開発状況、運用状況と課題

### 1) ヘテロダイナミック分光器の開発

東北大は、中間赤外線レーザーヘテロダイナミック分光器 MILAHI（観測波長：7-12 $\mu\text{m}$ 、波長分解能  $\sim 10^{-7}$ ）の実利用に目途をつけた。電波観測と同様、天体信号と局部発振源の混合で得られる「ビート信号」を高速検出し、高い周波数分解能と量子雑音限界を達成する。波長可変ガスレーザー・量子カスケードレーザーを用いた新システムにより惑星光検出が可能な性能を達成。これに類する観測器は世界に他に 2 つ（NASA、ケルン大）しかない。より小型かつ遠隔制御可能な実用機に向けた開発を進め、(4) ハレアカラ観測施設等へ展開し、観測へ供していく。このシステムは、将来的には探査機搭載（リモートセンシング）、および着陸機搭載（In-situ 観測）への展開も可能で（前節参照）、(2)とともに探査計画の検討へ反映させその実現を図る。2018年現在、ロシア・モスクワ工科大との共同研究をこの方向に向けて実施している。

### 2) グレーティングタイプ分光器の開発

東北大では、近赤外線エッセル分光器（観測波長：1-4 $\mu\text{m}$ 、波長分解能  $\sim 4 \times 10^4$ ）の開発を進めている。本機は、「微量ガス・同位体の検出」および「数百 m/s 程度の速度場導出」を可能とする。また名大では、中間赤外線エッセル分光器 GIGMICS（観測波長：8-13 $\mu\text{m}$ 、波長分解能  $\sim 2 \times 10^{-5}$ ）の開発に成功し、金星の広帯域スペクトル取得に成功している。これに類する観測器は世界に他に 1 つ（テキサス大）しかない。本機は、同時観測波長範囲が広く、惑星/系外惑星大気からの中間赤外吸収線を一気にカバー可能である。これらは、(4) ハレアカラ観測施設等へ展開し、観測へ供していく。また着陸機搭載用小型分光器の技術開発要素である中空ファイバー技術の開発とその援用をすすめていく。

### 3) リトリバーバル数値モデルの開発

太陽直射光、雲・ヘイズ・ダスト散乱光、地上反射光が混在する観測情報からより精度の高い情報をより高速で引き出すため、多重散乱を考慮した高速リトリバーバルモデルを開発する。地球大気の地上観測・衛星観測で開発されたものと併用することで、相互連携して進めていくことができる。ベルギー・イタリア等を含む国際協力を得て、国内外の将来惑星/系外惑星探査のインフラとなるべく企図する。

### 4) 惑星/系外惑星専用望遠鏡の確立

要請される短中長時間変動の観測、ならびにイベント発生にフレキシブル対応した追跡観測を実現するには、水蒸気量が少なくかつ晴天率の高い好適地に専用望遠鏡の確立を要する。東北大は、ハワイ大との協力により 2014 年に 60 cm クーデ望遠鏡を福島県飯舘村からハレアカラ山頂に移設を実現した。観測設備の拠点構築の整備をすすめ、JAXA（ひさき・あかつき）・米国（Juno）・欧州（Mars Express、ExoMars Trace Gas Orbiter）への支援観測や、またドイツ・ケーペンハウワー研、名古屋大、九州国際大、千葉工大らへの観測機会提供を行ってきた。さらにハワイ大等と 1.8 m 軸外し型グレゴリアン望遠鏡「PLANETS」の開発を進めている。

## (3) ミッションやプロジェクトとの関係

東北大ハレアカラ観測所望遠鏡「T60」、東大アタカマ望遠鏡「TAO」等へ向けた実利用開発、また東北大・名古屋大等の国内勢およびハワイ大・キーペンハウアー太陽研等との共同によるハワイ・ハレアカラ中口径光赤外望遠鏡計画「PLANETS」への搭載検討が行われている。

## ミリ波・サブミリ波地上観測装置の開発

### (1) 科学目標・機器概要

地上観測を想定したミリ・サブミリ波のヘテロダイナミック分光計測では、超伝導ミキサ検出



器を用いた量子雑音に迫る高感度性能と、周波数高分解能の分光が特徴であり、地球や惑星大気の微量分子の高度分布や速度場の観測に威力を発揮する。また、波長が長いためにダストやエアロゾルの吸収を受けにくいことや、ターゲットの昼夜の面を問わず観測できる特徴がある。名古屋大学では、北海道陸別、南極昭和基地、アタカマ高地(チリ)、リオ・ガジェゴス(アルゼンチン)、トロムソ(ノルウェー)においてミリ波大気分光観測を行い、成層圏から中間圏に至るオゾンやオゾン層破壊物質、窒素酸化物の定常観測を推進している。このように今後多地点のネットワーク観測の発展に期待がかかる。しかし、フィールドでは電力やスペースが限られるため、安定運用の展開には、装置の小型化・消費電力化や低コスト化、現地スタッフが容易に調整できるシステムの簡易化が重要な開発要素となっている。

(2) 開発状況、運用状況と課題

この波長域での惑星・衛星・彗星などの観測は、主として国内外の大学や天文学関連研究機関のミリ・サブミリ波望遠鏡の技術によって展開されてきた。最近では、東アジア・米国・欧州の国際アタカマ大型ミリ波・サブミリ波干渉計(ALMA)の共同利用観測がフル稼働し、原始惑星系円盤や太陽系天体の超高解像度観測も可能となりつつある。ALMAはアンテナの台数が多く、また超伝導検出器は量子雑音限界に迫る高感度性能を有するため、従来の干渉計よりも1桁短い時間で観測を実施できる。このため惑星だけでなく、衛星、彗星などに対しても、化学組成の空間分布を捉えることも可能となってきた。今後のミリ・サブミリ波観測では、より多くの分子の同時観測を可能にする受信機が多素子化や分光計の広帯域化、パイプライン処理の高速化などが鍵を握る。これらのテクノロジーも即、地球・惑星大気の地上観測への応用・発展に重要な役割を果たす。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

ALMAなど地上の様々なミリ・サブミリ波望遠鏡プロジェクトや、国内外の地球大気環境観測施設・機関のミッションと関連している。

## 電波望遠鏡(低周波帯)

(1) 科学目標・機器概要

数十MHz～数GHz帯域の低周波電波は、太陽・太陽風・惑星など様々な電波現状の地上観測に適している。太陽から放射される電波バーストからは、太陽フレアやコロナ質量放出(CME)等によって生成された非熱的粒子の生成・伝搬過程を調べることができる。また、木星等の惑星から放射される電波現象からは惑星の電磁気圏の活動を調べることができる。太陽や惑星からの電波放射は放射源の高エネルギー粒子の特徴を調べる手がかりになることに加え、それらの放射機構そのものにも未解明の点が多く残されており、研究対象となっている。太陽や惑星の電波バーストは時間変動が激しいため、ミリ秒スケールの高時間分解能が必要となる。また、広帯域な観測や偏波観測も必要となる。低周波電波観測のもう一つの科学目標として太陽風が挙げられる。太陽風は電離した大気の塊であり、電波を散乱する性質がある。太陽系外の天体を電波観測中に、地球と電波天体の間を太陽風が通過すると、天体からの電波が散乱され、強度が激しく変動する。これを惑星間空間シンチレーション(IPS)と呼ぶ。IPSからはグローバルな太陽風の分布やその太陽活動依存性、惑星間空間CMEの伝搬過程を捉えることができる。IPS観測では、微弱な電波天体を数多く観測し、0.1秒程度の散乱による時間変動を検出するため、 $\sim 1000\text{m}^2$ を越える開口面積と0.01秒スケールの時間分解能が必要となる。また、観測天体数を増やすためのマルチビームシステムも重要な要素となる。太陽電波バーストやIPSは対象となる高エネルギー粒子、衝撃波、太陽風等より先んじて観測されるため、理学的課題に加えて、宇宙天気予報の指標としても活用が期待される。

(2) 開発状況、運用状況と課題

名古屋大学宇宙地球環境研究所では327MHz帯域においてIPS観測用のアンテナ3台(最大開口面積約4000 $\text{m}^2$ )を運用している。東北大学では福島県飯館および宮城県蔵

王に設置されたアンテナによって VHF 帯域から UHF 帯域にかけての木星・太陽等の電波観測が行われている。情報通信研究機構では、山川電波観測施設において、70MHz-9000MHz における太陽電波バーストの広帯域偏波スペクトル観測が定期的に行われている。これらの装置は長年運用されたアンテナや、その後継機であるが、2010 年代に入り、FPGA 等を用いた デジタル信号処理を導入することで、性能を向上させてきた。太陽観測では、広帯域デジタル分光計の開発・導入を進めてきたことで、スペクトルの時間・周波数分解能が飛躍的に向上しつつある。また、波形計測が可能なデジタルサンプリング装置を導入することで、パルサーや VLBI 観測にも応用されている。現在は IPS 観測用のデジタルフェーズドアレイ装置の開発が進んでおり、FPGA を用いたデジタル処理でマルチビーム性能や較正精度、合成能率が大きく向上した IPS の 2 次元フェーズドアレイ観測が実現されることが期待されている。一方、アンテナ系の開発は大きな課題である。太陽・惑星電波観測用の広帯域アンテナや IPS 観測用の 2 次元アレイアンテナの開発が進められており、その早期実用化が望まれる。

(3) 紐づくミッションやプロジェクト

進行中の次世代大型計画として IPS 観測には「次世代太陽風観測装置」がある。世界各地の IPS 観測装置でネットワークを構成する World-wide IPS Stations (WIPSS)とも関係している。また、海外が主導するミッションである SKA (Square Kilometer Array)、NenuFAR とも関連する。

### 自然 VLF 波動観測器(地上)

(1) 科学目標と機器概要

磁気圏で頻繁に観測される VLF 帯ホイッスルモード波の一種であるコーラスは、特にダイフューズオーロラを光らせる 10 keV 以上の高エネルギー電子や MeV エネルギーに至る放射線帯電子と、地球磁場の勾配が小さくなる磁気圏の赤道面付近で相互作用し、粒子のピッチ角散乱や加速を引き起こすことが理論的に予想されている。このため、自然 VLF 波動観測器の科学目標は、地上多点ネットワークから得られるホイッスルモード波の様相から、逆問題として磁気圏における巨視的な波動粒子相互作用領域のグローバルマップを得ることである。観測システムは、電磁誘導を原理に断面積 100 m<sup>2</sup>程度のループアンテナが一般的に用いられている。

(2) 開発状況、運用状況と課題：巨大なループアンテナは、地上多点ネットワークの構築において大きなボトルネックになっている。このため、巨大なループアンテナと同等の感度を有しながら積極的な小型化を図るため、サーチコイル磁力計や SQUID (超伝導量子干渉計) を用いたセンサの検討が推し進められている。また、地上観測では所望する信号以外の雑音を重ねてしまうため、所望信号と雑音を区別する知的信号処理の開発も推し進められている。

(3) 関連ミッションやプロジェクト

PWING プロジェクト (<http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/dimr/PWING/index.html>) に関係している。

### VLF/LF 帯標準電波・tweek 空電の観測装置

(1) 科学目標と機器概要

VLF/LF 帯の送信局電波や雷起源の電磁波 (tweek 空電) は、地表面と下部電離圏の間で反射を繰り返しながら長距離伝搬するため、下部電離圏 (D 領域および E 領域下部) 探査の地上観測手段として長年に渡り利用されてきた。これらの基本的な観測技術は成熟しており、電離圏 D 領域の物理量導出の代替観測手段がないため、現在でも用いられている。近年、太陽活動 (フレアやプロトンイベント)、放射線帯からの高エネルギー電子の降下、及び雷放電に伴う超高層発光現象が下部電離圏、熱圏下部、中間圏に及ぼす影響や、日食、地震、火山噴火等に伴う下部電離圏異常および、下部電離圏の長期

変動の物理過程解明のために、VLF/LF 帯送信電波の連続受信が再び注目を集めている。また tweek 空電はこれまで夜間のみ観測されると言われていたが、昼間でも観測されることが分かり、太陽フレア等の研究に利用できることが明らかとなった。Tweek は雷起源の自然電磁波であるため、雷の位置推定により、特に海上の下部電離圏モニタリングが可能となる。これらの観測からは、下部電離圏の電離状態の水平、鉛直方向の空間構造並びに時間変動のスケール（秒～日）を観測的に捉えることが要請されている。一方、VLF 帯標準電波が宇宙空間まで伝搬し、VLF バブルと呼ばれる領域を形成し、放射線帯の内側まで広がっていることが報告されている。VLF 帯標準電波自体が高エネルギー荷電粒子と相互作用し、地球周辺のプラズマ環境に影響を及ぼす可能性があり、宇宙天気観測からの標準電波の定常的モニタリングが重要となっている。

(2) 開発状況、運用状況と課題

上記の目的をふまえ、国内では、NICT（当時の通信総合研究所）や名古屋大学などが1970年代から国内で観測を開始し、電通大が多点同時連続観測を20年程度前から開始している（現在常設8観測点）。これは、下部電離層擾乱の詳細な局所的空間構造の導出のためであり、下部電離圏の長期変動、太陽活動や下層大気との関連性を研究する上でも貴重なデータとなっている。現在、観測網のさらなる充実が電通大はもとより、東北大、名大、千葉大等により国内外で進んでおり、放射線帯粒子の大気への降下損失による下部電離圏電離現象をはじめ、太陽活動や雷活動等の大気電気現象による成層圏、中間圏への影響、地震・火山噴火に関連する電離圏擾乱や大気重力波の観測が主な観測ターゲットとなる。尚、観測網の構築には観測空白域への展開や他の電離圏網と同時観測が可能な地域での観測の充実、観測装置、特にループアンテナの小型化が不可欠である。また、これらの観測から得られる情報は、擾乱の発生源から受信点間の積分量であるため、非一様な電離圏における電波伝搬を考慮し、観測量から下部電離圏の空間構造の情報を導出するアルゴリズム・技術の確立が必要である。現在、数値計算と実験値との比較を用いた、下部電離圏の時空間規模導出に関する研究が始まっており、現在までに日食や地震等における応用が発表されている。さらに、様々な外因により複雑な時空間変動を示す送信電波信号を、外因別に評価する取り組みも始まっている。

(3) 関連ミッションやプロジェクトとの関係

電磁気手法を用いた地球環境の環境と監視と予測プロジェクトや、ジオスペース探査衛星（ERG）計画、内部磁気圏のプラズマ・電磁場変動の総合地上ネットワーク観測（PWING）と関連している。

## 地上磁力計システム

(1) 科学目標・機器概要

宇宙地球電磁気学の進展のみならず、地球環境モニタリングの観点からも汎世界的、長期的な地磁気観測体制の整備は今後も重要な課題である。地磁気の定常観測は、フラックスゲート磁力計を用いた変化観測とそれを補正する間欠的な絶対観測から成り立ち、このうち絶対観測は熟練の観測者が手動により磁気儀と呼ばれる偏角伏角測定装置を操作することで実施されている。現状の変化観測の精度と安定性では、絶対観測による補正が欠かせない。特に近年、定常観測点が閉鎖あるいは無人化されるなど地磁気観測事業が縮小される傾向にあり（2.5.1 節）、この絶対観測を効率よく継続するために、人手を介さない自動化が求められている。絶対観測の自動化が実現し離島などの環境の厳しい観測点にも展開できれば、長期的な太陽地球環境の研究、地球内部ダイナミクスの研究、地震・火山電磁気研究など、超高層から内部磁気圏にわたる幅広い研究分野に、長期的に安定した精度の高い地磁気データを提供できるようになると期待される。

(2) 開発状況、運用状況と課題

多点観測体制の更なる展開と維持を両立させるためには、データロガー等を含めたシ

システム全体として、「自動化」、「小型化」、「低価格化」、「省電力」、「安定した電源（太陽光発電、風力発電、蓄電池等の利用）」、「温度対策」、「データ転送の安定化（準リアルタイム化）」、「定期的な時刻校正」、「低コスト化（機器、通信費）」、「トラブル時の自動復旧」等を実現したパッケージを開発することが必須である。このような性能を有するシステムの開発が進むことで、無人による変化観測と絶対観測の同時運用、GPS 同期による人工衛星観測との詳細な位相比較の実現、海洋への観測領域の拡大等によりサイエンスの新しい展開がもたらされるであろう。固体系・超高層系観測システムの標準化によるコスト削減と、協働によるシナジー効果の創成も今後の重要な課題である。

このうち絶対観測の「自動化」については、近い将来の完全自動化の実現は困難と見られる。研究開発が先行している海外の自動絶対観測装置では、観測値の精度や長期安定性などにおいて実用化にはまだ多くの課題を抱えている。、現実的な対策としては絶対観測の手動操作の「省力化」が課題となろう。近年、磁気儀の緻密な操作や観測者の厳格な非磁性を緩和できる新方式「弱磁場方式」が海外の地磁気観測所では主流となってきており、国内で求められる観測精度を維持できるよう改良しつつ導入することが望まれる。暑さや寒さ、風雨、虫などに起因する観測者の心身負担が比較的大きい野外観測点においては、弱磁場方式の運用の効果が特に大きく、火山を含む地殻活動監視のための展開も含め、同方式の導入の価値は大いにある。

一方、「小型化」「低価格化」に対する一つの有望なアプローチとしては、MI（マグネトインピーダンス）センサーを用いた三軸磁力計の開発と実用化が期待される。MI センサーは、地磁気観測では一般的な三軸磁力計であるフラックスゲート磁力計と比較すると、非常に小型で安価な磁気センサーであり、例えばスマートフォンに磁気センサーとして内蔵されている。MI センサーと Raspberry Pi を応用した超小型収録器を用いた 3 成分 MI 磁力計を地磁気の精密観測に活用することができれば、容易に多点の同時観測を行うことが可能となり、例えば地磁気脈動の空間分布の詳細な解析に繋がる。また小型ゆえに恒温装置も省電力化できることから、MI 磁力計を応用した野外の 3 成分長期安定観測も可能となるかもしれない。

### (3) ミッションやプロジェクトとの関係

国立極地研究所と気象庁地磁気観測所では、地磁気全球観測網の強化に貢献するため南極昭和基地の地磁気観測施設を大幅に改修するプロジェクトを進めている。オーロラ帯直下にある昭和基地では 1960 年代より継続して変化観測と絶対観測が行われているが、同プロジェクトでは、その設備・運用・データ処理・伝送方法を全面的に改善して①変化観測の安定化、②弱磁場方式を用いた絶対観測高頻度化、③毎秒値のリアルタイム配信を実現する。計画では数年の改修期間ののちにインターマグネット（5.3.4 節）認定観測所としての登録申請を目指している。

#### 4.1.2 固体地球研究分野の観測・分析機器開発

電磁場	高分解能・高感度磁力計
	月電磁探査装置
	小型・低消費電力・高精度な電磁場センサ、ロガー

以下に、各開発項目の概要を述べる。

##### 高分解能・高感度磁力計

###### (1) 科学目標・機器概要

地球惑星科学の進歩に伴い、地球最古の岩石や、月・惑星などからの地球外物質といった希少な試料の分析が求められている。そのためには、従来の1インチ径試料を大量に測ることを基礎とした従来の古地磁気・岩石磁気学的なアプローチではなく、微小試料の測定が必要となる。近年、周辺分野で開発されている技術をより積極的に導入し、高分解能かつ超高感度な磁力計の開発を進める必要がある。

###### (2) 開発状況、運用状況と課題

サブミリスケールの磁化構造の解明を可能とする、天然試料に特化した超伝導量子干渉素子(SQUID)顕微鏡の開発・実用化が進みつつある。また、近年、SQUIDにならぶ磁気センサ(例:光ポンピング原子磁気センサ)が開発されつつあり、既に天然試料への応用が始まっているが、これらの利用についても考える必要がある。現在、堆積物や鉱物などの微弱な残留磁化の測定には、米国メーカーのSQUID磁力計が広く使われていて独占状態にあるが、次世代の高感度の残留磁化測定を行うためには、消磁方法やサンプルホルダーを試料の特性に応じて自在に工夫できる技術をもつことがのぞましい。国産の高感度磁力計システムを、日本の研究グループとして共同開発することが望まれる。SQUID磁力計のみならず、既存の磁力計の感度を向上させることも重要である。残留磁化、磁化率、磁気ヒステリシスを磁場強度や周波数、温度を変化させて、数十mgの試料でも測定できる高感度の磁力計の開発が望まれる。1つの種類の磁力計でカバーすることはできないので、様々な種類の磁力計が必要であり、また、測定の自動化を考慮した開発を進めることも重要である。

###### (3) ミッションやプロジェクトとの関係

なし

##### 月電磁探査装置の開発

月周辺で電磁探査を行うことにより、月内部の電気伝導度構造を推定することを目的とする。浅部構造は月資源探査への応用につながり、グローバルな構造は月の起源と進化の解明につながる。

浅部構造：

###### (1) 科学目標・機器の概要

月極域に存在することが示唆されている氷の有無を明らかにすることを目標とする。電磁探査のための装置として電極を使用することは接地抵抗の軽減が必要とされるが、それは非常に困難である。そこで、接地抵抗の考慮が不要であるループ・ループ法に基づく月面電磁探査装置を提案する。ループ・ループ法は過渡現象を利用する電磁探査法(Transient ElectroMagnetic (TEM)法)のひとつである。送信ループと受信ループを用意し、送信する電磁場を急激に変化させ大地の過渡応答を測定する。送信ループに流す電流の周波数や送受信ループの間隔を変えることにより、地下の深さ方向の電氣的構造を推定することが可能となる。

###### (2) 開発状況、運用状況と課題

開発状況としては概念検討の段階である。地球上では広く資源探査等に活用されているが、月面では無人で電磁探査を実施するための方策を検討しなければならない。将来の有人月面探査の場合の実施方法の検討も必要である。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

SELENE-R

グローバルな構造：

(1) 科学目標・機器の概要

月全体の電気伝導度構造を推定することにより月の起源と進化の解明を目標とする。電気伝導度構造は鉱物に応じて温度構造に変換することができる。磁場の時間変動を月の内部起源と外部起源とに分離するために、月着陸機と月周回衛星の両者に3成分の磁力計を搭載し、同時に磁場を観測する。アポロ計画で得られた結果よりも高精度の結果を得るための分解能・サンプリング周波数を有する磁力計とするべきである。

(2) 開発状況、運用状況と課題

磁力計そのものの開発状況としては、これまでの衛星磁場観測で使用されてきた性能があればよい。月面で長期間にわたり高精度の磁場観測を実施するために、越夜の問題、電磁適合性の問題を解決する必要がある。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

2015年に終了したSELENE-2計画。ただし、月の起源と進化の解明には必要なので準備・検討を続ける。

### 小型・低消費電力・高精度な電磁場センサ、ロガー

(1) 科学目標・機器概要

構造探査、モニタリングの各分野において、手軽に多点展開するため、安価で取り扱いやすい電磁場観測システム（センサ、ロガー、伝送、電源）の開発が望まれている。共通するのは、小型化、高精度化、低価格化、低消費電力化であり、電池に関しては高密度化も望まれる。量子効果を用いた磁場センサ等、衛星用に開発された高精度超小型センサや技術を地上での観測に応用するのも有力な方法であり、電磁気探査や長期観測の要求に即して改良する研究が必要である。

現状の広帯域 MT 観測装置（0.01~10,000s の応答関数推定可能）と同程度のスペックで電磁場5成分（電場：水平2方向，磁場：3方向）を容易に測定できる観測装置を開発する。開発目標は以下のとおりである。

重量： 25 kg（現状） → 5 kg

消費電力： 15W(12V)（現状） → 5W（12V）

価格： 700万円（現状） → 100万円

(2) 開発状況・運用状況と課題

電場計測については、2014年になり、重量2 kg，消費電力2W(12V)以下、価格70万円程度の測定装置が開発された。これは労力のかかる現状の広帯域MT観測装置による磁場計測を最小限にし、電場-磁場分離型MT法により効率的に地下の電気伝導度構造を推定するためのものである。開発以降、九重火山、霧島火山、熊本地震震源域などに適用され、既存の広帯域MT観測装置では非常な労力を要した場所（たとえば火口周辺）で地下10km程度までの比抵抗構造が推定されるようになった。また、これまで多大な労力を要した100点規模の広帯域MT観測が1年程度で可能になった。今後、電場だけでなく磁場計測についても測定を容易にすることが目標である。磁場は表層のローカルな電気伝導度不均質の影響を受けにくく、より信頼性の高い電気伝導度構造推定に寄与する。特に微小な変化の検出が求められる電気伝導度構造のモニタリングには威力を発揮することが期待される。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

文部科学省「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」「次世代火山研究・

人材育成総合プロジェクト」



## 4.2 計算機シミュレーション・モデリング

4.2.1 節では、2 章で述べた科学課題を迫及するために必要な計算機シミュレーション・モデリングの技術開発について述べる。4.2.2 節では、計算機シミュレーション・モデリング研究を推進していく上で必要な環境整備について述べる。

### 4.2.1 技術開発要素

#### (1) 方程式系

太陽地球惑星系のプラズマ現象は、(無) 衝突ボルツマン方程式を基礎として、流体・粒子などの異なる時空間スケールの物理現象に対して様々な近似レベルで記述されている。無衝突プラズマの第一原理計算手法としては、電磁粒子法やブラソフ法などの運動論的手法が挙げられる。一方で、巨視的現象は流体的手法が適用される。またその中間的なスケールを取り扱う手法として、イオンを運動論的に、電子を流体的に扱うハイブリッド法も挙げられる。以下では、それぞれの計算手法に特有な展望と課題を挙げる。

#### 流体法

流体法は、(無衝突) ボルツマン方程式の 0 次から 2 次モーメントまで (質量保存、運動量保存、エネルギー保存) を基礎とした計算手法である。流体法の中でも特に磁気流体力学 (MHD) 法は、太陽地球惑星系の巨視的現象に対して広く用いられている。

MHD 法での課題は、特に、圧縮性・高レイノルズ数 (非粘性) 流体の現象を取り扱う際に顕在化してくる。問題点の 1 つ目は、計算手法によっては、多次元で磁場のソレノイダル性が破れ計算に破たんをきたす場合があることである。現状では、ソレノイダル性のあるレベルで維持するような様々な計算方法が提案されているが、それぞれ一長一短であり決定的な解決に至っていない。問題点の 2 つ目は、衝撃波などの不連続な圧縮性構造が、しばしば非物理的な数値振動の発生源となることである。不連続な構造を正確に捉えるために、近似リーマン解法等の衝撃波捕獲法が現在広く使われている。衝撃波捕獲法は、不連続面を捉えるのに高い性能を示す一方で、波が数値的に減衰するため波動や乱流現象を正確に記述することができない。特に、高ベータ領域と低ベータ領域、または高マッハ数領域と低マッハ数領域が共存する特性速度の比が大きな系において、正確な数値解を得るのは困難である。太陽地球惑星系では衝撃波・乱流両方が本質となる現象がしばしば起こるため、不連続構造と波動の双方を正確にかつ安定に記述しつつ、磁場のソレノイダル性も維持できるような新たなアルゴリズムの開発が必要である。

多流体法は、電子やイオンなどを個別の流体として解く手法であり、基礎となる方程式系の近似レベル (イオンの慣性効果を含むかどうか、電子の慣性効果を含むかどうか、電荷準中性を仮定するかどうか、電磁場モードを解くかどうか等) により様々なスケールの現象を扱うことが可能である。一方で、3 次以上の高次モーメントの寄与は無視しているため、エネルギー散逸はモデルに頼る必要がある。数値解法の開発要素としては MHD 法と共通であり、磁場のソレノイダル性を維持しつつ、不連続構造と波動の双方を正確にかつ安定に記述できる手法の開発が必要である。特に、多流体系では 1 流体の MHD 方程式系に対して扱うべき固有モードの数が増大するため、既存の衝撃波捕獲法をそのまま適用するのが困難であり、衝撃波捕獲法以外のアプローチも視野に入れた新たな数値計算法の開発が不可欠である。

また、シームレスな太陽地球惑星系の流体系グローバルシミュレーションを実現するためには、格子法 (一般曲線座標格子、正多面体格子、立方化球格子、適合格子細分化法など) の研究開発も必要となる。

#### 粒子法

無衝突プラズマの第一原理・運動論的計算法として電磁プラズマ粒子 (EM-PIC: Electro-

Magnetic Particle-In-Cell) 法が広く使われている。これは、無衝突ボルツマン (ブラソフ) 方程式で記述される分布関数の位相空間上での時間発展を有限個の超粒子によって代表させ、その粒子軌道をニュートン-ローレンツ方程式により直接解き進める手法である。一方、電磁場は格子点上に定義され、マクスウェル方程式を差分化することで解き進める。個々の粒子の運動は、電流を隣接する格子点上に配置する電流として、電磁場の変化に反映される。オイラー変数である場とラグランジュ変数である粒子が共存する PIC 法は、1960年代より使われており、アルゴリズム自体はほぼ完成されていると言って良い。残されている課題としては、天体プラズマやレーザープラズマなどの相対論的な極端現象への適用に向けた技術開発や、今後の超並列スパコンに対応した超並列計算法の開発が挙げられる。

一般に、電磁場の時間発展は時間-空間 2 次精度の時空間有限差分法 (FDTD 法) で解かれるが、差分化により電磁場 (光) モードに数値分散が現れることが知られている。天体・レーザープラズマ現象ではしばしば相対論的流れが生じるが、そのような状況において、光速に近い速さで移動する粒子が数値分散性を持つ光モードと共鳴し、数値チェレンコフ不安定性と呼ばれる非物理的な電磁波放射を起こすことが問題視されるようになってきた。回避法としては、滑らかな粒子形状 (高次形状関数) を採用することで不安定性の成長を遅らせるといった、対処療法的な手法しかないのが現状である。根本的な不安定性の除去が可能な手法のブレークスルーが必要である。

従来の EM-PIC 法の並列化では、場は全ノードで共通して解き、粒子のみを並列化する粒子分割法が採用されてきた。粒子分割法は、これまでのベクトル型並列計算機に適した方法であり、並列数がたかだか数百程度までしか性能向上が得られないことが知られている。近年のスカラ型超並列スパコンに対応するためには、領域ごとに粒子と場を分割してそれぞれの領域で場と粒子を計算する領域分割法の採用が必要である。しかし領域分割法では、流体法では現れない計算負荷の不均一化という問題が含まれる。問題によっては、系の発展に伴い粒子はある一部の領域に集中し、その他の領域は粒子が少なくなる状況が考えられる。その場合、粒子が集中している領域を担当するプロセスに負荷が集中することとなる。各時間ステップで同期が必要な EM-PIC 法では、計算負荷の不均一化によって高い並列効率が望めない。これを解消するためには、各プロセスの計算担当領域や計算担当粒子を動的に変動させるような負荷バランサーの実装が不可欠である。現在では京都大学で開発された動的負荷分散技法 OhHelp や自己重力系 N 体計算で利用される Recursive Multi-section 法など、動的負荷バランサーアルゴリズムが一部の PIC コードへと実装されており、人工衛星周りプラズマ環境のシミュレーションや無衝突衝撃波への適用が進んでいる。

## ブラソフ法

ブラソフ (無衝突ボルツマン) 法は、EM-PIC 法と同様に無衝突プラズマの第一原理計算法として知られるが、ラグランジュ量である粒子を直接解く PIC 法に対し、オイラー量である速度分布関数を位相空間上で離散化しブラソフ方程式を直接解く手法である。開発自体は粒子法と同様の時期に始まったが、超次元位相空間を扱うために計算コスト (メモリ使用量) が膨大であることや、方程式を正確かつ安定に解くアルゴリズムの開発があまり進んでいなかったため、近年に至るまで実問題への適用が成されていなかった。しかし、ノイズがなく、超並列スパコン上で容易に実空間および速度空間の領域分割法を適用できる (負荷バランスの崩れがない) という PIC 法に対する利点から、今後 PIC 法と共に必要な計算技術となると考えられる。

ブラソフ法の数値計算上の最大の課題は、速度空間内の分布関数の移流および回転を精度良く解くことにある。プラズマ加速・輸送を対象とした研究を行うには、電磁プラズマの挙動を知る必要があり、電磁ブラソフ法の開発が日・欧・米において活発に続けられており、近年その成果が報告されるようになってきた。とは言え、粒子法に比べてブラソフ法のアルゴリズムは未だ発展途上にある。速度空間上での数値拡散・振動は直接加熱・加速に繋がるため、数値拡散・振動が極めて少ない移流方程式の数値解法や、非相対論的磁化プラズマの

ジャイロ運動を記述する剛体回転および、相対論的磁化プラズマのジャイロ運動を記述する差動回転の高精度数値解法を開発する必要がある。また、大きな時間ステップ幅においても安定に解ける時間積分法の確立も、現実的な計算時間に収めるために必要な課題である。

### ハイブリッド法

ハイブリッド法は、イオンを運動論的に、電子を流体的に扱う計算手法であり、EM-PIC法やブラソフ法などの運動論的手法とMHD法の中間の時空間スケールを扱う手法である。前述のようにブラソフ法が未だ発展途上にあるため、多くの場合においてイオンを粒子として扱うPIC法が採用されている。ハイブリッドPIC法は、流体スケールの構造を解きつつイオンの粒子性も取り入れることができるため、最近の計算機資源の発展により、地球惑星磁気圏のグローバル構造のダイナミクスをより正確に記述する手法としてMHD法の代替モデルとして採用されるようになってきた。ハイブリッドPIC法における課題は、PIC法に共通な超並列スパコンでの並列化、低密度領域の取り扱い、短波長ホイッスラー波の位相速度の発散、などが挙げられる。

ハイブリッド法では、一般化されたオームの法則に基づいて磁場の時間更新をおこなっており、これには個数密度による除算が含まれる。しかし、低密度領域では有限個の粒子数の影響で数値ノイズが大きくなり、これがポンドロモーティブ力となって低密度領域から粒子を押し出すように作用する。結果として密度が0となる領域が発生し、密度での除算によってしばしば計算の破たんをきたす。関連した問題として、イオン慣性長は密度の $-1/2$ 乗に比例して長くなるため、系の時間発展に伴い発生した低密度領域においてはイオン慣性長が格子幅より大幅に大きくなる。これにより、結果的にイオン慣性長に比して短波長のモードを扱うことになるが、ホイッスラー波の位相速度には上限が存在しないため、計算が不安定化しやすくなる。

近年この問題を回避するために、電子慣性を考慮した形に拡張された方程式系が提案された。すなわち、オームの法則に有限の電子慣性効果を含めることによって、位相速度に物理的な上限を与え、また真空領域までをシームレスに解くことが可能になった。これは数値的な安定化に一定の効果をもたらすが、粒子ノイズを起源とする短波長のホイッスラー波を完全に安定化するには至っていない。また電子慣性を考慮したオームの法則から電場を求める際には連立方程式を解く必要があり、特に真空領域では行列の優対角性が弱くなるため、効率的な反復解法の導入が課題として残されている。

### ジャイロ運動論

よく知られているように、磁気流体方程式では、ランダウ減衰、捕捉粒子、有限ジャイロ半径効果などの運動論的現象を取り扱うことができない。一方、荷電粒子の運動をニュートンローレンツ方程式で直接扱う粒子法やブラソフ法では、運動論的効果を完全に含むのに対し、磁気流体スケールの現象を取り扱うことは非常に困難である。また、電子を流体とし、イオンを粒子で扱うハイブリッド法では、上述の課題に加え、モデルの適用限界がしばしば問題となる。例えば、電子熱速度が分散性アルヴェン波の位相速度よりも大きい場合、電子を流体として扱うには運動論的効果を取り入れた流体方程式の完結モデルが必要となるが、磁場揺動を含む非線形領域での完結モデルは未だ確立されていない。

これらに対し、ジャイロ運動論は、荷電粒子のジャイロ周波数よりも十分緩やかな現象に対してブラソフマクスウェル方程式系を適切なオーダリングのもとで近似して得られる方程式系からなる理論体系であり、磁場閉じ込め核融合理論分野で発展してきた。一般に、ジャイロ周波数に比べてゆっくりした時間依存性を持つ磁化プラズマ中の揺らぎは、磁場垂直方向に比べ平行方向に長い波長（小さな波数）をもつ。ジャイロ運動論的方程式は、この周波数および波数の比を展開パラメータとしてブラソフ方程式で記述される分布関数（または荷電粒子のラグランジアン）を展開し、それらをジャイロ運動について平均化することで導かれる。また、低周波数の現象を扱うため、変位電流を無視したアンペール則およ

び準中性条件によって、電磁ポテンシャルの揺動成分が与えられる。これらの近似により、取り扱う現象の時空間スケールを緩やかなもののみ限定することができ、また、ジャイロ位相に関する平均化により位相空間次元を5次元に低減することができる。

ジャイロ運動論の適用対象としては、シアアルヴェン波や遅い磁気音波を含む磁気流体波や磁気流体不安定性、密度や温度場の不均一性に起因するドリフト波などが挙げられる。磁場閉じ込め核融合プラズマ研究では、ドリフト波不安定性によって駆動される乱流輸送、高エネルギー粒子が駆動するアルヴェン波不安定性、強い背景磁場を含む系でのテアリング不安定性（磁気リコネクション）、などに広く適用されている。同様に地球や惑星磁気圏の多くの問題にも適用可能であり、運動論的バルーニング不安定性や、磁気圏-電離圏結合系のフィードバック不安定性などの理論解析に応用されている。

ジャイロ運動論的方程式を数値的に解くシミュレーションには、粒子法またはブラソフ法が用いられる。最近では、衝突項導入の容易さや、粒子ノイズから自由であることなどからブラソフ法を用いたコードが多く開発されている。さらに、ジャイロ運動論には、分布関数の揺動成分のみを扱う $\delta f$ 法と全分布関数の時間発展を求める full- $f$ 法がある。前者は、巨視的な勾配を含む背景場を固定して局所的な揺動を扱うのに対し、後者では背景場の変化を含む定式化がなされている。前者では、アルヴェン乱流などの非線形電磁揺動を解析するコードが開発されているが、後者においては主に静電的な取り扱いがなされている。将来的には、地球や惑星磁気圏を対象として、電磁揺動とともに、磁場形状や非マクスウェル分布を取り入れたジャイロ運動論的シミュレーションコードの開発により、磁気圏中での乱流や粒子加速・波動励起過程、磁気圏-電離圏結合や放射線帯粒子の非線形ダイナミクス解明へ向けた研究の進展が期待される。

## (2)モデリング

太陽地球惑星系は様々な時空間スケールの現象が混在した複合系であり、また宇宙機によるその場観測が可能であることにより観測データによる現象論科学的な側面を持っている。太陽地球惑星系の様々な現象において、その現象の本質を表す方程式系を適切に現象に固有の外部条件や内部条件を適切に選択することは重要である。外部条件や内部条件は前述の方程式系だけでは表せない別の物理過程を含む場合があり、これらはモデルとして与えられる。また観測データの再現においては、前述の方程式系を用いた計算機シミュレーションを行うことが必ずしも最適ではなく、しばしば方程式を簡略化したモデル計算が行われている。以下では、それぞれのモデリングに特有な展望と課題を挙げる。

### 太陽コロナー太陽風ー太陽圏

地球電磁気圏環境変動のほとんどは、太陽から到来するプラズマである太陽風によって引き起こされる。この太陽風は、太陽コロナの開いた磁力線に沿って太陽コロナから加速され始めて全方向に流出し、太陽地球系のみならず惑星軌道を超え、星間物質との相互作用の結果としてその太陽圏を形作る。このように太陽風は、太陽コロナから太陽圏外縁までの時空間スケールが広大なダイナミックレンジで変化する領域を連続的に流れる。さらに、太陽の複雑な磁場構造の影響を受ける衝突系プラズマである太陽コロナ、無衝突系である内部太陽圏、星間風中性水素との2流体系である外部太陽圏と、伝搬する過程で支配的な物理過程が遷移していく。太陽コロナでは、コロナ加熱・太陽風加速過程が未だに解明に至っておらず、近年ではそれらにおける波動や乱流の役割が注目したモデリング研究が進められている。太陽圏外縁部についても、Voyager や IBEX によって従来の常識を覆す観測データが得られるようになり、限られたデータを理解するためのモデリング研究が不可欠になっている。

また太陽風は宇宙天気の大擾乱主要因として社会の実利用の面でも重要になる。太陽風は太陽コロナの磁場構造に強く影響された速度構造を持ち、太陽の自転の影響で地球に到来する太陽風が変動する。さらに、太陽フレア等の爆発現象にともなって大量のプラズマと磁

束が放出されるコロナ質量放出が発生し、太陽風の中を背景の太陽風と相互作用をしながら伝搬する。宇宙天気予報、特に磁気圏擾乱の予測には太陽風中の南向き磁場の予測が重要であり、太陽風の変動とコロナ質量放出の到来の予測手法の確立が求められている。

このような背景の中で、太陽コロナ-太陽風-太陽圏のモデリングは、大きく分けて2つの方向性を持つものに大別される。1つ目は、太陽風の加速などの物理素過程の理解を目指した大規模計算で、もう1つは宇宙天気予報での利用のために解像度・手法を大幅に簡略化した高速計算である。前者において、太陽から太陽圏外縁までを単一のシミュレーションで連続計算することは、計算資源の面からほぼ不可能である。そのため、共通の物理過程に支配される隣接領域のみを同時に取り扱う研究が多く、一部のグループでは多層格子を用いてコロナ-太陽風、太陽風-太陽圏などの隣り合う物理過程の異なる領域を繋いだ最先端研究が行われている。未解明の物理過程である乱流の取り扱い・太陽コロナ加熱・太陽風加速過程の効果についても様々な形で取り入れたモデリング研究が進められている。今後10年の内部太陽圏ミッションとの連携により、物理過程解明に向けた動きが加速すると考えられる。また、太陽圏外縁領域においても、今世紀に入って直接探査が進んでいる効果で、太陽圏と星間媒質の相互作用や境界領域で起こる粒子加速過程などの未解明問題に対して、観測に立脚したモデリング研究が急速に進展しつつある。一方後者では、予報を目的として、太陽風分布をモデル化することで太陽風の加速過程を省略し高速化を図ったモデル(SUSANOOなど)がある。これらのモデルは、モデルで与える境界条件が予測精度を決定づけており、不確定性を補填するためモデルのパラメータを分散させたアンサンブル・シミュレーションやデータ同化といった手法をとり入れた予測精度の向上が不可欠である。将来の計算資源の向上とともに、予測のためのシミュレーションを高度化していく方向で発展することが期待される。

### 磁気圏-電離圏結合

計算機科学の発展に伴い磁気流体力学をベースにしたグローバルシミュレータは、太陽風擾乱による巨視的磁気圏応答を準リアルタイムに再現するレベルまで進化している。一方で、超高層物理学の積年の課題である、磁気嵐やオーロラ嵐(サブストーム)といった巨視的現象については、未だ観測と対応可能な数値モデルは実現していない。この理由は大きくは二つ挙げることが出来る。一つは磁気流体力学をベースとしたグローバルシミュレータでは、プラズマの非等方性や非ジャイロトロピック効果が繰り返り込まれていないため、オーロラ降下粒子の第ゼロ近似となる磁力線沿いの熱流束や、リングカレントの基本要因である粒子のドリフト効果を本質的に再現できないことである。もう一つの理由は、弱電離気体系である電離圏と磁気圏のシームレスな結合(磁気圏電離圏を通じた電磁力学)が実現されていないため、オーロラ粒子加速過程や巨視的な電磁結合系の再現が不十分であることによる。また、これら領域間を自己無同着につなぐ数値的な境界条件の取り扱いも重要である。特性波ごとによる境界条件の設定など、数値的安定性を担保した領域間結合も課題要素である。開発も多くの探査衛星や地上観測によりその全容解明が進められている磁気圏電離圏結合物理学の主戦場でシミュレーション科学を展開するためには、内部磁気圏における高エネルギー粒子加速過程や、運動論的磁気再結合過程を巨視的磁気圏動力学の中で再現するシミュレータ、その系を弱電離気体系システムとシームレスに結合させるスキームの発展が必須である。究極的にはブラソフシミュレータによるプラズマ宇宙の一形態としての太陽地球環境システムの再現、更には弱電離気体系や中性大気力学をも抱合する衝突ボルツマンシミュレータの実現が望まれるが、これらは今後20-30年のスケールで開発を進めていく必要がある。

### 放射線帯

放射線帯のモデリングは、放射線帯電子自身が背景場にほとんど影響をおよぼさないこと、および経度方向にほぼ一様に分布していることをふまえて、背景磁場の中での動径方向拡

散過程、波動粒子相互作用によるピッチ角散乱や運動量変化をフォッカー-プランク方程式で記述する手法がよく用いられている。従来は、動径方向拡散のみ、あるいはピッチ角散乱のみのモデル化が行われていたが、2000年代に入って、すべての拡散過程を同時に解き進め、放射線帯の3次元空間変化を計算することができるようになった。従来の手法においては、波動の強度や場の変化をモデルとして与え、それに基づいて拡散係数を構築し計算を進めていた。2000年代後半において、拡散係数の計算方法に大きな進展がみられ、実際に観測された波動データを用いて様々なプラズマ波動との相互作用を定量的に評価し、波動による内部加速過程を計算に組み込む努力も行われている。この手法は計算負荷が比較的小さいため、太陽活動周期にわたるような長期の変動の計算や、データ同化を組み込んだ計算などの開発も進められており、宇宙天気・宇宙天気予報の観点から重要である。一方、これらのモデリングにおいては、背景磁場の急激な変化に伴う消失過程等を含めることは一般に困難であり、過渡現象を計算するのには適した方式ではない。

上記のフォッカー-プランク方程式による手法とは別に、ジャイロ平均およびバウンス平均した4次元の分布関数について、粒子の動径方向、経度方向の運動をボルツマン方程式で記述し、観測データよりモデル化した波動粒子相互作用を拡散項として右辺に組み込んでフォッカー-プランク方程式を構成するといったモデリングも行われている。この手法では、低エネルギー側の分布関数から波動の成長率を計算し、波動粒子相互作用の評価を行っている。またこの手法においては、後述するリングカレントなどの、内部磁気圏イオンの分布関数の時間発展モデルと組み合わせることで、背景電磁場の時間変化とカップルさせた計算も可能となる。

一方、近年の放射線帯の観測からは、太陽風の不連続面通過にともなった過渡的な応答が注目されている。このような変化を追跡するためには、現実的な電磁場の中で粒子の運動を高精度に計算する必要がある。Tsyganenkoなどの経験的な磁場モデルに、解析的な電場モデルを組み合わせることで電子の軌道を追跡することや、磁気流体シミュレーションから得られる電磁場の中で、電子の軌道を追跡するテスト粒子計算も行われている。さらに観測からは、ホイッスラーモード波動やULF波動との非線形波動粒子相互作用の重要性が指摘されている。非線形波動粒子相互作用の素過程計算は精力的に行われているが、グローバルシミュレーションの中に非線形波動粒子相互作用を直接組み込むことはまだ成功しておらず、非線形波動粒子相互作用が大局的な放射線帯の変動にどのような影響を及ぼすのかを評価するには至っていない。局所的な理論・モデリングの観点からは重要性が示唆されているこの非線形波動粒子相互作用をグローバルシミュレーションに組み込む努力が、今後必要になると考えられる。

## リングカレント

数日間に及ぶ磁気嵐の直接的な原因であるリングカレントは数keVから数百keVのエネルギーを持つイオンが主なキャリアであることや、水素イオンに加え電離圏起源の酸素イオンの寄与が大きいことなど基本的な性質が衛星観測によって明らかになっている。一方で、太陽風及び電離圏からプラズマシートを経てリングカレントに至るまでのイオンの輸送経路と加速・加熱過程、イオンの早い消失問題、磁気圏ダイナミクスへの影響など未解決問題が多い。放射線帯と同様にフォッカー-プランク方程式やボルツマン方程式を用いて位相空間分布関数の時間発展を解き進めるばかりでなく、非ジャイロ運動領域を解くことができる粒子シミュレーションとの連結が期待される。酸素イオンの流入問題は電離圏イオンの流出問題とも直結しており、電離圏-熱圏シミュレーションとの結合が望まれる。過遮蔽現象のようにリングカレントは磁気圏対流に大きな歪みを生じさせることが知られており、全体系に対するリングカレントの影響は無視できない。磁気圏全体におけるリングカレントの役割を理解するため、磁気圏全体を運動論的方程式とマクスウェル方程式を連立させて解くアプローチが今後必要であろう。また、リングカレントは中低緯度地域を流れる地磁気誘導電流(GIC)の原因の一つになることから、巨大太陽フレアに呼応して発達するリン

ゲカレントの予測も社会的責務として重要である。

一方で、平衡状態を仮定した磁場形状では、サブストームインジェクションやULF波動などの比較的長時間スケールの短い、リングカレント発達や粒子加速に重要な現象が捉えられないことが指摘されており、これらの問題点を解決するための新しいシミュレーション手法として、ドリフト近似した5次元の運動論的(ブラソフ)方程式とマックスウェル方程式を連立させた、電磁場とプラズマ粒子の運動を自己無撞着に解き進める手法が開発されている。5次元のドリフト運動論的方程式を用いて内部磁気圏における数時間から1日程度の時間スケールの現象を扱っており、現時点においても非常に多くの計算機リソースを必要としている。さらに、急激な空間勾配を持つ双極子磁場中をバウンスする粒子運動を如何に精度よく解くかが重要となり、またULF波動の性質およびULF波動とのドリフト共鳴やドリフト・バウンス共鳴を理解するにあたっては波動の記述精度も求められる。これらの課題の克服にはグリッド構造や数値計算スキームの高精度化が必要になる。

### 電離圏－熱圏－中間圏結合

近年の衛星観測は下層大気から電離圏までのつながりを強く示唆しており、モデル開発においても下層から超高層大気までをつなぐ試みが世界的に行われている。国内でも組織的な領域モデル結合の試みによって、対流圏から熱圏までの中性大気領域と電離圏をつなぐ全球のシミュレーションモデルが実現している。さらに、モデルの下層大気部分に気象再解析データを融合させ、実際の上層大気の変動を再現しようとする取り組みもなされている。このようなモデルと地上・衛星観測によって、下層大気で起きる現象の影響が中層大気を経て熱圏・電離圏まで及ぶ大気上下結合過程(例えば、対流圏の経度依存性や成層圏突然昇温の上層への影響)や、超高層大気における中性－電離大気相互作用などの理解が急速に進んでいる。一方、今後の課題として、電離圏や熱圏は下層大気のみならず磁気圏からの影響も重要であることから、大気圏－電離圏－磁気圏間の全ての結合過程を取り入れたモデルの開発が望まれる。さらに、近年地上の観測網や宇宙機からの超高層大気の観測が充実しつつあり、データ同化を含み、モデルと観測との連携を強めていくことで、自然現象の理解やモデルの高精度化、宇宙天気への応用に向けた数値予測技術の開発などが進む。この点において、電離圏・熱圏の観測では100 kmや10 kmといった水平空間スケールの変動が見られており、全球的なシミュレーションでもこの程度まで分解能を向上させれば、新たな自然現象の理解につながると期待できる。また、大気中には微量でも全体の熱収支やそれに伴い変化するダイナミクスにおいて重要な役割を担う成分が知られており、詳細な物質の化学過程や輸送を取り入れることも今後のモデル開発の課題である。

一方で、地球全球を対象とした大規模モデルに対して、小スケールのプラズマ不安定を対象とした領域モデルによる研究も進んでいる。大規模モデルは、気象分野における大気大循環モデル(GCM)と同様に、空間分解能は緯度・経度方向に数度程度である。一方、領域モデルは、対象とする現象の空間スケールにも依存するが、数百m程度の空間分解能で現象を再現可能であるが、緯度・経度方向に数度程度の計算領域を確保するのが限界であるため、両者が扱う空間スケールには大きな隔りがある。現在の重要な課題の一つは、プラズマ不安定発生の日々変動の解明とその予測であり、その発生条件には背景の大規模な大気圏、電離圏の構造も考慮に入れる必要がある。また、小スケールの現象が、種々の結合過程を経て大規模な場に影響を及ぼす例も存在する。従って、大規模モデルの高分解能化と、領域モデルの計算領域拡大の先に期待されるのは、両者が融合した超高解像度の全球モデルである。既存の全球モデルの高分解能化は近似レベルや数値スキームの問題で扱うことができる物理過程に限界があるため、小スケールのプラズマ不安定を扱う領域モデルの全球化は、人為的な境界条件を取り去るといった観点からも重要である。ただし、これには膨大な計算機リソースを必要とする。



## ダイナモ

地球の主磁場の生成、特に軸双極子の卓越やその極性の突発的な反転をどう説明するかは、長い間地球物理学上の未解明問題のひとつであったが、1990年代以降、磁気流体力学的ダイナモのシミュレーション研究が行われるようになり、一定の成功を収めている。計算手法としては、金属コアが球形の非圧縮流体として近似でき、ほぼ不導体である固体のマントルに覆われているという特性から、伝統的に流れ場と磁場をポロイダル・トロイダル展開し、それらの定義関数を球面調和関数展開するスペクトル法が用いられている。一方、有限要素法やインヤン格子を用いた有限差分法によるシミュレーション研究も行われており、特に後者は大規模並列計算に向けた手法として評価されている。液体金属コアは、コリオリ力に対する粘性力の効果をあらわす無次元数であるエクマン数が、渦粘性を考慮しても $10^{-9}$ 乗と非常に小さく、また対流の運動エネルギーに対する磁気エネルギーの比が $10^3$ 程度と非常に大きいという特徴をもつ。しかしながらこうした低粘性、高磁気エネルギーの地球ダイナモの特性には、いまだ未解明の点が多い。粘性ゼロ、磁気エネルギー無限大の磁気地衡流近似を用いたモデル構築の試みもあるが、解が存在するのかどうかもよくわかっていない。また磁場の極性反転は数十万年以上の時間スケールをもつものに対して、磁気流体乱流に起因すると考えられる数年以下のスケールの磁場変動も観測されており、これらを統一的に再現することはきわめて困難ながら、今後取り組むべき課題として残っている。こうした課題にはより高速な大規模並列計算機をもちいたシミュレーション研究が本質的に重要であることは他の分野と同様である。観測される地磁気データをモデルで説明することは、観測不可能な金属コア内部の流れや磁場の情報を得るために不可欠であるだけでなく、対流の駆動源や境界条件であるマントル最下部の構造を推定することにも寄与し、マントル対流や地球の熱史を考える上で重要である。残念ながらコア対流の時間スケールに比べて、機器観測に基づく詳細な地磁気データの時系列の長さが短いという問題はあるが、データ同化の手法を用いたより客観的な基準に基づくモデル精度の向上が今後重要な研究課題となるであろう。

## 宇宙機

宇宙機構体や太陽電池パネル表面、もしくはスラスター噴射時のプルームと周辺プラズマ環境の相互作用については、宇宙機の形状、材質、システム構成、およびその背景となるプラズマ環境に大きく左右されるため、その度合いを解析的に評価することは困難である。宇宙機の大型化や高電圧化に伴い、宇宙プラズマ環境との干渉の度合いも顕著となっており、その定量的知見はシステム設計や機器開発において重要な基礎データである。

宇宙機周辺のプラズマ環境を定量的に理解するために、一様格子システムを用いたシミュレーション研究は古くから行われてきた。近年では、複雑な宇宙機の形状をより現実的に再現するために、空間格子局所細分化法や、非構造格子法、境界埋め込み法を用いたシミュレーションが実用化されつつある。また宇宙機表面近傍の局所的な高密度プラズマ領域においてはデバイ長が短くなるため、不均一空間格子システムの採用が不可欠であり、速やかに対応すべき課題である。

プラズマと固体表面の境界領域に形成されるシース内には強力な静電場が局所的に発生するため、荷電粒子の加減速も顕著である。陽解法に基づく従来の粒子シミュレーションでは時空間の刻み幅を十分に小さく設定しなければ数値誤差の蓄積を招き、計算が不安定化する。この問題を解決するために、エネルギー保存型の陰解法プラズマ粒子計算スキームの活用が主に電気推進分野で検討され始めている。陰解法スキームでは時間刻みによらずに安定に計算を進めることができるため、計算コスト低減の観点からも宇宙機解析全般で利用の検討を進める価値がある。一方で、数値拡散の低減や高効率の並列化アルゴリズムの開発など、計算手法のさらなる高度化も必要である。

宇宙機表面素材の電気的特性も、表面帯電に関連する現象を解析する場合に重要な要素である。誘電体の帯電時定数はプラズマの固有振動周期に比べてはるかに大きく、プラズマ

粒子シミュレーション手法で短時間に定常解を得るのは困難なため、近似モデルに基づく高速化手法を導入するなど工夫を要する。また、光電子放出や二次電子放出モデルの信頼性を高め、より高精度の宇宙機環境モデリングを構築していくことが必要である。

### (3) 共通技術課題

#### 計算機アーキテクチャに適したコードの最適化

大部分のスーパーコンピュータ（スパコン）の CPU アーキテクチャは 2000 年以降にベクトル型からスカラ型に取って代わられている。近年のスカラ型 CPU では、消費電力の問題から CPU コアのクロック数を高くすることが困難なため、演算性能を上げるために CPU コア数を増やすこと、および FMA (fused multiply-add) や SIMD (single instruction multiple data) により同時演算数を増加させることでその性能向上を実現している。このため、CPU コア増加に対応し、FMA や SIMD を効率的に利用できるコードでなければ、近年の計算機ではその性能を発揮できない。更に、スカラ型 CPU には様々な種類があり、その特徴も異なるため、それぞれの CPU に対応したコードのチューニングが必要となっている。また、近年では HBM に代表される高帯域を実現した高速メモリが計算機に実装されている場合が増えてきた。このメモリはメモリ基板の積層化によって帯域を拡大しているが、メモリサイズが小さくなる傾向がある。このため外部に通常のメモリを持つものもあり、このような階層型メモリ構造を意識したコードの最適化も重要となってきている。

このような CPU の現状に対して、加速器による性能向上を実現するものが世界的な流れとなっている。その多くは GPU (Graphics Processing Unit) を加速器として採用しており、機械学習を含む数値計算分野で広く利用されている。しかし、通常の CPU で利用されるプログラミング言語に加えて独自に拡張された言語を利用する必要があるため、敬遠される場合もあったが、現在は C だけでなく Fortran 用のプログラミング環境も整備されており、コードの GPU 利用への移植も比較的容易になっている。また近年では、従来のベクトルプロセッサのアーキテクチャを採用した加速器も開発されている。その性能とコスト次第では、このようなベクトル型加速器が再普及する可能性もある。

このように現在は計算機アーキテクチャが様々であり、今後もこの状況は変わらないと想定され、コードのチューニングにますます労力がかかることが想定される。このため、各コードで得られたチューニングに関する知見を共有し、効率的に最適なチューニング手法を発見する必要がある。

一方で、計算機システム全体の性能を向上させるために、大量の計算機を高速ネットワークで繋ぐことによりスパコンを構成している。この結果、スパコンの総コア数が数万から数百万個にも及び、5 年前に比べて 1~2 桁ほど多い並列数の計算が必然と行われるようになってきている。このため、大規模計算を行うには MPI などによるプロセス並列化が必須となった。数千以上の超並列数計算においては、プロセス間の同期待ち時間やプロセス間通信自体の増大による遅延時間が全体の計算時間に対して無視できなくなっている。更にプロセス通信に利用されるメモリがプロセス数に比例することもあり、近年のスパコンではノード間のプロセス並列に加え、ノード内のスレッド並列と組み合わせたハイブリッド並列化が多くアプリケーションで実装されている。

2022 年にエクサフロップスに到達したスパコンが米国にて完成し、今後も日本を含む各国でエクサフロップス超級のシステムが構築されると思われる（中国のシステムはすでにエクサフロップスに達成していると考えられているが詳細は公開されていない）。その実現のためには現状の電力消費量を維持しつつ計算処理能力を上げる必要があり、そのため TOP10 にランクするスパコンの大半は GPU を加速器として採用したシステムである。2023 年 7 月現在世界 2 位の処理能力をもつ「富岳」は、ARM 命令セットをベースとした CPU が多数導入された構成となっており、開発当時は GPU と遜色のない消費電力あたりの演算効率を達成していた。一方で、演算レジスタ数が削減されるなど前システムであるスーパーコンピュータ「京」と比べ内部構造が大きく変わっており、コードの最適化に注力する必要がある。

るのが現状である。このようなアーキテクチャの大きな変更を含む大規模スパコンプロジェクトにおいては、計画の早い段階から積極的に関わり、その性能を最大限利用できる準備をすることは今後の研究のために重要である。2022年度から「富岳」の後継機に向けた調査研究が始まっており、積極的な参加、協力が求められている。また、電力問題は一般のスパコンでも言えることであり、大学の計算機センターに「富岳」で開発されたCPUやGPUを加速器とした低電力型のアーキテクチャが普及してきているのが現状であり、これらアーキテクチャに最適化しておくことは、今後のスパコン利用にとっても必須であると考えられる。

## 時間積分法

数値シミュレーション・モデリングにおいて、方程式の時間発展（時間積分）は極めて重要である。通常用いられる時間積分方法は、過去の時間ステップのデータのみから次の時間ステップのデータを決定する、陽解法である。陽解法の特徴として、アルゴリズムが比較的単純であるため実装が容易であることや、並列化しやすいことなどが挙げられる。一方で陽解法は、時間刻み幅は系の特性速度の最大値と空間格子幅で決まる CFL 条件によって束縛される。系の固有値（伝搬速度）の最大絶対値と最小絶対値の差が大きい方程式系においては、陽解法では時間刻み幅が最大固有値で決定されるため、解きたい問題を限られた計算資源で計算出来ないという問題を孕んでいる。太陽地球惑星系の現象はまさに、電子スケールと磁気流体スケールが混在し、かつカップルするようなマルチスケール現象であるため、陽解法で記述できる現象は限られたものとなっており、時間積分の高速化が必要であるというのが、シミュレーション・モデリング研究者の共通認識である。

時間積分の高速化の1つとして、過去の情報と未来の情報から成る方程式を満足するように未来の情報を解く陰解法が挙げられる。陰解法は時間刻み幅によらず安定に解くことができ、アルゴリズムの精度の範囲で解を得ることができる。一方で、解を得るには逆行列を求める必要があるため、行列操作に必要なアルゴリズムが陽解法に比べてあまりに複雑であること、領域分割による並列化の効率が悪くなることなどの課題が残されているため、採用が限られているのが現状である。逆行列を計算する方法としては、反復法が広く用いられており、今後、高速かつ安定に収束する計算手法を取り込む必要がある。

## 4.2.2 環境整備

### (1) 分野間連携

計算機シミュレーション・モデリング分野は、サイエンスの共通性に限らず、手法の共通性・共有性において他分野との連携・交流が続いている。プラズマ物理の共通性を踏まえて、物理学会や天文学会との連携・交流は既に行われている。各学会の持ち回りで行われている3学会合同プラズマ共催セッション「プラズマ宇宙物理」は1つの例であるが、当学会の計算機シミュレーション・モデリング分野の研究者が中心となっていることは周知の事実である。また核融合科学分野とはサイエンスと手法の両方の共通性により盛んな交流が行われている。例えば、反復法による陰解法、ランダウ流体近似や、ジャイロ運動論コードなどの先進的な計算手法は、今後当学会にも取り入れていく必要がある。また核融合科学分野では、衝突による電離や化学反応過程に関する手法もよく発達しており、これらの手法を取り込むことは今後の当学会における弱電離プラズマシミュレーションにおいて重要である。

計算科学分野との連携は今後ますます重要となると考えられる。特に HPC（ハイパフォーマンスコンピューティング）においては、ノード間通信の最適化や CPU キャッシュチューニングなどの計算科学的技術は不可欠である。また、高速な反復法やソーティング法など、今後の高性能計算に必要な技術を取り入れていく必要がある。また後述する計算リソースの確保の観点からも、計算科学分野とは積極的に交流する必要がある。

流体力学・航空宇宙分野では実用性を考慮した流体シミュレーション手法は発達しており、特に格子生成技術や高効率流体法などは当学会にも取り入れていくべき先進的な手法

である。気象・大気科学分野とは環境変動予測という共通性があり、先進的なモデリング・データ同化技術は当学会にも取り入れていくべき手法である。

## (2) 計算リソースの確保

当学会の計算機シミュレーション・モデリングは潜在的に非常に多くの計算リソースを必要としている。しかしながら当学会は、防災という観点からの気象・大気科学分野と、物理学という観点からの素粒子・天文分野に挟まれた位置にあり、相対的に視認性が不高いため、大規模な計算リソースを獲得することができていない。事実として、現在国家主導で推進されているポスト京コンピュータ向け HPCI (革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ) の九つある重点課題には、当学会は含まれておらず、それらの課題に次ぐ四つの萌芽的課題の一部として採択されているに過ぎない。「富岳」の開発ではアプリケーションと計算機システムの co-design を目指し、運用前からアプリケーションと計算機の密な関係がある。このような国家規模の計算機システムでは、リソース確保の面からもシステムの運用前、開発中に積極的に関わることができる環境を作ることが必須である。

安定な計算リソースの確保において、当学会に関連する全国共同利用・共同研究拠点設備は非常に重要な役割を果たしている。宇宙科学研究所や国立天文台などの国立研究所においては、それぞれの研究所のミッションに合致した計算機共同利用研究を推進している。京都大学生存圏研究所では、2008 年度より京都大学学術情報メディアセンターのスパコンとリソースを共有化して共同利用研究を推進している。名古屋大学宇宙地球環境研究所(旧太陽地球環境研究所)では、1997 年度より名古屋大学情報基盤センターのスパコンを利用した計算機利用共同研究を推進しており、また 2010 年度からは名古屋大学情報基盤センターとともに名古屋大学 HPC 計算科学連携研究プロジェクトを推進している。

一方で、北海道大学、東北大学、東京大学、東京工業大学、名古屋大学、京都大学、大阪大学、九州大学の計算機センター群は「学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点」(JHPCN)を形成し、ネットワーク型大型計算機利用共同研究を実施しているが、これには当学会の研究課題も幾つか採択されている。さらに HPCI では、理化学研究所の「京」に JHPCN 拠点と筑波大学を加えたスパコン群を用いた共同研究を推進している。これまでに、「京」の利用において、複数件の当学会の関連研究課題が採択されている。また、HPCI コンソーシアムには、ユーザーコミュニティ代表機関として宇宙科学研究所と名古屋大学宇宙地球環境研究所が正会員として参加している。東京大学および九州大学で独自に実施している HPC 関連プロジェクトにおいても、当学会の関連研究課題が採択されている。このように、個々の当学会関連課題が様々なプロジェクトで採択されているが、大規模なものではなく、一層の視認性を高める必要がある。

計算機シミュレーション・モデリング分野において、計算リソースの確保は重要な問題である。特に若手研究者の育成において、当学会に関連する全国共同利用・共同研究拠点設備の計算リソースが果たしてきた役割は非常に大きい。最近では HPCI に計算資源が集中する傾向にあるが、当学会関連分野が主として利用できる全国共同利用・共同研究拠点設備の計算リソースの維持に学会として努める必要がある。また大学附置研究所においては各大学の計算機センターとの協力関係をより密なものにし、安定的な計算リソースの維持を継続的に行っていく必要がある。HPCI に計算資源が集中する傾向にある現在において、更なる当学会の計算リソースを要求することは難しく、今後さらに大規模計算を行っていく上では、HPCI をはじめとする HPC 関連プロジェクトへの応募は不可欠となる。したがって、(1) 当学会関連の全国共同利用・共同研究拠点設備の計算リソースにおいて、並列プログラムの開発ができ並列計算が実施可能な研究者を育て、アプリケーションを開発すること、(2) HPC 関連プロジェクトへ積極的に応募して大規模計算を実施し、当学会の研究が広く HPC 分野に理解されていくこと、の 2 点が今後の計算機シミュレーション・モデリング分野の発展にとって極めて重要であると言える。後者は特に、学会から HPCI やその課題審査委員会に向けて、計算リソースの必要性を主張していくことも必要である。

### (3)人材育成

計算機シミュレーション・モデリング分野において、プログラム開発が出来る若手研究者を育成することは急務である。しかし、プログラム開発技術の習得は機器開発と同様に難しく3年以上は要するため、単年度や短期間で雇用しているPDが、プログラムを新規開発することが困難になってきている。また近年の計算手法や並列化手法の複雑さに加えて成果として要求されるサイエンスの高度化により、シミュレーション・モデリングコードの中身を知らずに道具としてのみ利用する、ユーザーとしての立場の研究者が増えてきた。さらには、プログラム開発ができる研究者のキャリアパスも大きな問題である。近年では、HPCIプログラムに関連して、核融合科学分野、天文学分野や計算科学分野へのキャリアパスが開かれてきたが、当学会関連機関においては狭き門であると言える。

シミュレーション・モデリング研究者の育成においては、国際的には ISSS (International School for Space Simulations) が数年おきに開かれている。本スクールでは、学生・初学者向けのスクールと、一流の研究者によるシンポジウム講演の組み合わせにより、宇宙プラズマシミュレーション手法の基礎と最新成果の両方を学べる機会を提供している。国内においては宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションサマースクールが毎年千葉大学において開催されていた(コロナ禍により2020年より開催見送り中)。CANS+、pCANS、OpenMHDなどの公開シミュレーションコードを用いた研究の事例が増えてきており、サマースクールで使用される講義資料や日本語ドキュメントがWebで公開されている。一方、最先端の並列化・最適化の情報を共有する機会はむしろ減ってきているように思われる。今後は、Webなどを利用したドキュメントの整備や初心者用のシミュレーションスクールの開催のみならず、上級者向けのプログラム講習会やコード開発ワークショップなども行っていく必要がある。こうした取り組みには、学会のサポートが不可欠である。

## 4.3 データマネジメント・データシステム

### 4.3.1 地球電磁気学・地球惑星圏科学におけるデータ

地球電磁気学・地球惑星圏科学におけるデータは、気球・航空機・人工衛星などの飛翔体を用いた観測や、世界中に設置された地上観測装置を用いた観測により日々生産される。近年では、数値シミュレーション・モデリング技術の急速な発展により、大量のデータが計算機上で生み出され、観測データとの比較研究が行われている。

このうち、特に観測は、人為的に制御できない、時々刻々と変動する自然を記録していくものであるため、全く同じ条件で生ずる現象の観測データは二度と取得することができない。このため、科学の基本的な手続きである「第三者の追試による再検証」を保証するためには、得られた観測データを可能なかぎり保存して失われないようにしておくことが本質的に重要となる。この点が、実験条件・分析方法などを記録しておけば、現象の再現が可能となる物理・化学分野等の実験的研究と大きく異なる点である。

また、地球電磁気学・地球惑星圏科学分野のデータは太陽から地球に至る広大な空間の「環境」を記録したものである。今後、人類が地球周辺の宇宙空間を継続して利活用していくにあたり、数十年から数百年以上のスケールの長期変動を調査するためには、観測データを長期間に亘って蓄積・保存する必要がある。

### 4.3.2 データマネジメント

地球電磁気学・地球惑星圏科学分野においては、研究者が取得したデータを自分で解析するだけでなく、その研究データを原則無償で公開し、相互利用や共同研究を行うことは比較的普通に行われてきた。データの公開形態については、データセンターから公開されているものもあれば、個人や研究機関のサーバーから公開されているものや、リクエストベースで公開されているものなど、様々なものがある。公開データを解析して得られた研究成果を発表する際には、データ作成者やデータ提供者を共著者に含めることもあるが、論文の最後にデータ利用に関しての謝辞を記すだけのこともあり、統一された方法があるとは言えなかった。

最近になって、研究データ利活用の促進および研究公正の担保という両面から、「研究データマネジメント」、すなわちデータの標準化及び組織化・保存・共有・公開・再利用に関する一連の作業が求められるようになってきている。例えば、論文を出版するためには、用いたデータやそれらが保存されているリポジトリの明示等、研究データの取り扱いについて適切な対応や記述を迫られるようになってきているし、科学研究費補助金の複数種目については、研究データの保存・管理等に関するデータマネジメントプラン(DMP)の提出が求められるようになってきている。(特に前者については、Wilkinsonら(2016, doi:10.1038/sdata.2016.18)によって書かれたFAIR原則に基づく科学データのマネジメントに関する論文が参考になる。)

研究データマネジメントの中でも、特に、データ公開体制を新たな学術研究の制度として根付かせるために「データ出版(data publication)」およびその一環として、データを論文のように参照・引用して被引用頻度を通じた業績評価を可能にする「データ引用(data citation)」などが国際的に議論されている(図 4.3.1)。これらの実現のために、科学データへのデジタル識別子の付与が急速に進められており、データ引用も徐々に実施されつつある。その他には、研究データマネジメントの実施項目の明確化とその達成度を自己評価するための「データマネジメントルーブリック(rubric)」の作成も進められている。データシステムとしての対応を含めて、地球電磁気学・地球惑星圏科学分野としても研究データマネジメントの必要性を認識し、関連した活動に積極的に参加していくべきである。

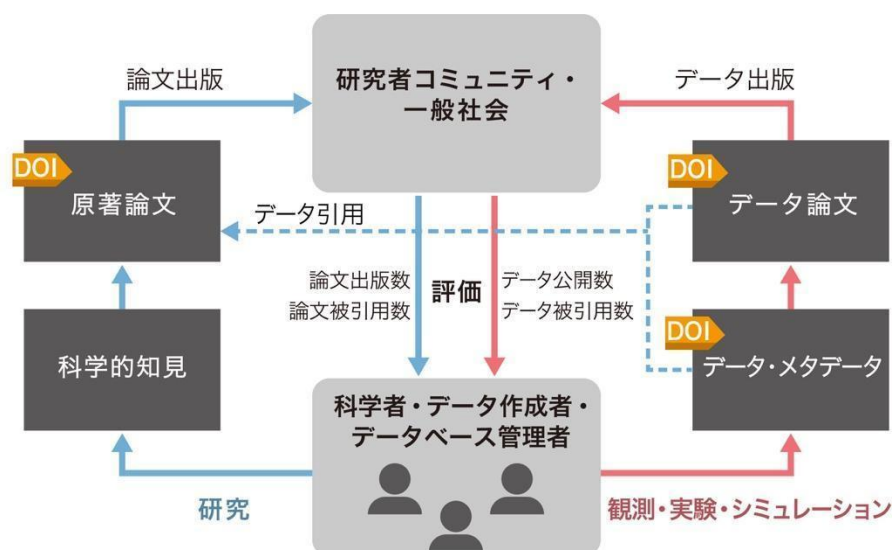


図 4.3.1 科学的知見の出版と科学データの出版。従来は左側の青色ループの仕組みだけであったが、右側の赤色ループの仕組みが急速に整備され、また普及しつつある。

#### 4.3.3 メタデータ、共通データ解析ツール

メタデータとは、研究データの中身やそれに関連する情報(物理量、観測方法、観測者など)を記述したデータのことであり、研究データを効率的に管理したり検索したりするためには、メタデータの作成とそのデータベース構築が重要である。特に、複数の研究機関が保管する研究データに関して、それらのメタデータを一括管理するメタデータデータベースがあれば、研究機関・研究プロジェクト・研究分野を横断してデータを検索できるようになる。

こうしたメタデータデータベースの検索結果に基づき、研究機関が保管する研究データをインターネット経由で利用できるようなバーチャルな分散データセンターの実現は現代の技術で可能になってきている。さらに、データサービスの一環として、各研究機関が共通データ解析ツールを開発・供給することで、バーチャルな分散データセンターと研究者の研究活動を直接的に結びつける手段を提供することも求められている。

これらの点については、過去のデータセンターや、最近では大学間連携プロジェクト「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究」(Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETwork: IUGONET)でも試みられているところである。地球電磁気・地球惑星圏科学における現象を理解する上で、多圏間結合は本質的であり、各領域で得られた様々な物理量を総合的に解析することが極めて重要である一方、複数の機関により多種多様な観測装置で取得されたデータを発見、収集、解析することは、多大な労力と時間を要するため、これまで実現が容易ではなかった。そこで、2009年度から開始された IUGONET では、5.2 節に挙げられるような国内研究機関が保管する地上観測データを中心として、メタデータの作成とそのデータベースを整備し、データの横断検索ができるようなシステムを一般公開すると同時に、それらの研究データをワンストップで解析できるような共通データ解析ツールの開発を行ってきている。また、データベース及び解析ツールの観点から、飛行体による観測データと地上観測データとを融合させる試みの1つが、ERGサイエンスセンター(ERG-SC: <https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp>)によって実施されている。IUGONET プロジェクトと連携しつつ、ERG-SC によって、あらせ衛星と連携地上観測データについて、実データ及びメタデータの標準化が推進され、それらの共通データアーカイブに基づいた共通解析ツールが整備・公開されている。



このように、個々の研究グループやプロジェクトによる研究データアーカイブを、分野共通のメタデータベースや解析ツールによって有機的に束ねることによって、全体として網羅するデータセット数・種・範囲が拡大すると同時に利便性が向上し、結果として、複数データを組み合わせた多くの研究成果に結びついている。そして、実データ・メタデータや解析環境整備に関する技術・作業の共有及び共通化を通して、中長期のデータ保存やキュレーションに関する、データベース間のネットワークや、それに付随する人的ネットワークの構築にも一役買っている。学会として、地球電磁気・地球惑星圏分野における研究データを総覧し、オープンデータ・オープンサイエンス活動へ寄与していくためにも、学会の資産ともいべき各種研究データベースと、またそれらをバーチャルに束ねるメタデータベースの構築を推進していくべきである。

#### 4.3.4 国際的な動向

地球電磁気・地球惑星圏科学分野において、ファイルフォーマットやメタデータスキーマ、解析ツールなどを標準化する活動も行われている。例えば、宇宙空間や超高層大気における衛星観測データ・地上観測データ・モデルに基づくデータに対して、標準フォーマット・メタデータスキーマ・共通データ解析ツールなどについて議論を行う場として、International Heliophysics Data Environment Alliance (IHDEA) が 2018 年に発足した。年に 1 度の頻度で開催される会議に加えて、常設作業部会(Working Group)では、データ流通を促進し、科学成果を増加させるための方策が検討されている。

上記 IHDEA の例では、実データのフォーマットとして CDF(Common Data Format) や NetCDF(Network Common Data Form)、FITS(Flexible Image Transport System)といった自己記述型フォーマットが推奨されている。また、メタデータは、SPASE(Space Physics Archive Search and Extract)データモデルに基づいて作成されることが多い。NASA が作成しているスキーマであるため、人工衛星観測データを記述することに重点が置かれたものとなっている。解析ツールについては、インターネット上に分散している多様なデータを統合的に解析可能とするツールが既に開発されている。近年では、データサイエンスの応用が容易なプログラミング言語 Python をベースとしたツールが開発されつつある。このような標準化の活動によって相互運用性が高まり、データベース間のメタデータの交換や、異なる機関・ミッションで得られたデータの総合解析、異なる分野の横断型研究が一層促進されることが期待されている。

ISC-WDS は国際事務局を 2011 年から 10 年間、我が国の情報通信研究機構がホストするなどその運営に貢献してきた一方、その間にデータベースあるいはデータリポジトリ信頼性の認証機構となる CTS (CoreTrustSeal) の策定や、FAIR 原則推進のために AGU や Research Data Alliance 等国際組織との連携をすすめるなど、成果をあげてきた。

SPASE データモデルは年に 1 度程度データモデルのバージョンアップが行われ、その際に、IUGONET からは地上データを記述するためのデータモデルの追記を提言した。データマネジメント・データシステムに関連する標準化が国際的に進められる中、日本からの積極的な参加・提案が望まれる。

その他に、Planetary Data System (PDS) と呼ばれる長期間のデジタルデータアーカイブが NASA によって運用されており、惑星探査ミッションや様々なフライト実験や地上観測で得られたデータがピアレビューの後、登録・公開されている。ここで使われている PDS4 (PDS version 4) 標準はアーカイブされるデータファイルの表現情報(観測時刻などのメタデータやファイル構造の情報)のみならず、データセットの構成も含めて定義している。PDS4 標準は NASA が主導して制定しているが、各国の宇宙機関によって構成される国際惑星データ連盟(IPDA, International Planetary Data Alliance)の推奨するアーカイブ標準でもあり、NASA 以外の宇宙機関も PDS4 標準に準拠するデータアーカイブを整備し公開している。PDS4 標準に準拠したデータの検索サービスなどはいまだ開発途上であるものの、今後の発展が期待されている。

#### 4.3.5 SGE PSS におけるデータシステムのあり方

オープンサイエンスを推進するための情報基盤・データ基盤の構築においては、情報・データの中身であるコンテンツレベルの整備(メタデータの作成)や保存・共有が非常に重要である。これらについては、データファイル管理レベルとは異なり、各研究分野における専門領域の知識が必要であり、技術・専門性・データリテラシーが必要と考えられる。そこでは各専門分野の知識を備えつつ、データ整備作業・データキュレーション・データマネジメントを安定継続して実施できる人材が不可欠である。定常的・連続的観測によって得られるデータについてはデータの品質管理が、また保存されているデータについてはデータの維持管理が継続的に必要な作業となる。これまでの研究データの維持管理は、特定の研究者のボランティア的な努力によって支えられてきたが、その負担は非常に大きい。また近年の全世界的なデータシステムの発達とその技術発展にともなって、その負担は今後ますます大きくなっていくと想像される。4.3.3 節で述べたようなバーチャルな分散データセンター、分散型データシステムを構成する各機関にデータ専門スタッフを配置してデータ維持・管理体制を強化することが喫緊の課題である。

#### 4.3.6 大気水圏科学データの蓄積・解析基盤形成

気象庁は気象・海洋はもちろん地震や地球電磁気学データを収集・作成・保有し、気象業務に活用している。これらのデータは、質・量共に我が国随一であり、地球惑星科学の研究・教育にも極めて重要であるが、その提供は「気象研究コンソーシアム」を通じて、日本気象学会の会員に限定されており、学際研究の阻害要因となっていた。

この課題について、日本気象学会学術委員会データ利用部会及び気象研究コンソーシアム運営委員会において、2019 年頃から意見交換が重ねられ、学術側が気象庁データを提供するための組織やハードウェアを整備すること、関連分野の研究者にもデータを提供し学際研究を推進すること、高等教育だけでなく初等中等教育にも活用すること、オープンサイエンス推進のためにデータに DOI を付与すること、データ構築を業績として評価すべきであることについて認識が共有された。

以上の議論を具現化するため、「気象研究コンソーシアム」の取組を大幅に拡充した「大気水圏科学データ蓄積基盤」(AHSAP)が構想されている。「気象研究コンソーシアム」は古いデータを蓄積していないのに対し、AHSAP では災害をもたらす気象のメカニズム・予測可能性研究及び防災リテラシーの向上・防災教育充実を目的として、気象データを蓄積する。さらに、データ解析やデータ同化、機械学習、可視化等のツールを開発・整備・提供することにより、地球惑星科学に有用な研究基盤とするだけでなく、当該分野でのデータ科学の人材育成や、地学教育への活用を図る。

気象庁データは SGE PSS の会員にとっても有用であり、学際研究を進める上で有意義である。また、次節のデータ同化など共通部分も多い。内外で気象・気候データを「仮想地球」として提供する動きがあるが、「仮想金星」や「仮想火星」などに広げ、比較惑星気象学の新たな展開の契機とすることも考えられる。

#### 4.4 情報数理技術

地球電磁気・地球惑星圏科学に関わる様々なデータは、観測技術の進展に伴う観測機器の高精細化・高時間分解能化や観測点の多点化、また計算機シミュレーションを行うプラットフォームの性能拡大に伴い、飛躍的に増大している。これらの巨大データを相互補完的に取り扱って、地球電磁気・地球惑星圏科学の発展に役立てるには、近年急速に発展してきた情報数理学的な手法や知見を積極的に取り込んでいくことが必要である。

##### 4.4.1 データマイニング技術・機械学習に基づくAI技術

一般に自然科学分野では、獲得したデータからいかに興味ある事象を発見し、その原理をいかに理論的に説明するかが、最も基本的な研究アプローチである。しかし多くの場合、観測対象となるデータは、太陽活動度・地磁気活動・季節・緯度・ローカルタイムなど、多次元につながるパラメータに依存し、種々の観測量の因果関係も、極めて複雑である。そのため、従来の研究アプローチは、「ある理論に基づき、その裏付けとなる観測結果を科学者が発見する」、「非常に特異な観測結果について理論説明を試みる」など、科学者が長年蓄積した経験と知見に基づいて行われてきた。しかしながら、観測データの高精度化・高分解能化にともなう爆発的な増加と、その理論解釈を助けるべき計算機シミュレーションの大規模化は、人間がその全貌を直感的に把握できるキャパシティを越えつつある。

このような情報爆発問題に対し、巨大なデータ群から計算機の力を借りて知識を発見するデータマイニングと呼ばれる技術が情報数理学の分野で研究されている。データマイニングとは、巨大なデータ群の中に含まれる意味のあるパターンを網羅的に抽出し、列挙する技術の総称である。データマイニングの基軸となる手法には、大量データを意味のある有限個のグループに分類するクラスタリング、与えられた入力に対し未知の出力を予測する回帰分析、与えられたデータのカテゴリを予測するクラス分類などがある。解析されるデータの種類に応じテキストマイニング、グラフマイニング、時系列マイニングなどと呼ばれる。これらは、経済学（経済動向予測）、経営学（顧客の嗜好解析に基づくサービス提供・販売予測など）、生命科学（ゲノム情報解析）、医療（医療画像診断）、工学（システムの異常検知）など様々な分野で活用されている。

一般にデータマイニングの目的は、大規模データに埋もれた頻出パターンや相関規則を発掘することで、対象とするシステムに対し何らかの知識を発見することである。我々の分野において特に重要なタスクは相関規則の発見であるが、従来のデータマイニングでは線形な相関に着目することが多かった。しかし近年では、カーネル法のような非線形性を効率的に取り扱う仕組みも発展し、テキストデータと画像データのような全く異なるデータ間の相関規則を獲得することも可能となってきた。多圏間結合過程の解明を目指す我々の学会では、異なる領域で観測された多種多様なデータを取り扱う。従って、非線形な相関規則を抽出可能なマイニング技術を導入することは、複数領域にまたがる諸現象の相関規則を網羅的に発見する上で避けて通れない課題になると考えられる。

データマイニングと呼ばれる技術には、システムのダイナミクスを陽に仮定しないものが多い。従って、データマイニング技術によって獲得された規則が、データの背後に潜在するダイナミクスの本質を捉えているとは限らず、データ（あるいは諸現象）の表面的な振る舞いを抽象化したものに過ぎない可能性もある。つまり、獲得された規則が常に理論的に解釈できるとは限らないことに注意する必要がある。一方で、我々の学会が取り扱う自然科学データは、「同じ事象は二度と発生しない」といってよいほど個々の事象の特徴にバラエティがあり、それらを網羅的に説明できる理論の構築は極めて困難である。従って、そのような多様なシステムの振る舞いを帰納的に解釈でき得るデータマイニング技術は、現在の理論では注目されていない意外な規則の発見につながる可能性を秘めている。4.3節で述べたように、地球電磁気・地球惑星圏分野の各種データを広く統合的にアーカイブし活用できる環境が今後急速に進むことが考えられる。これらの大容量データを、情報数理学的な技術を積極的に取り込んで研究に活用することは、理論研究やシミュレーション研究と相補的

な駆動力として学問の発展を加速する駆動力となるであろう。このような研究アプローチはまだ端緒についたばかりであるが、長期にわたる巨大データセットから、磁気嵐急始部の自動検出や、特徴的なスペクトルを持つ波動現象の自動抽出（類似イベント抽出）システムなど、徐々に応用が始まりつつあり、今後の発展が期待される。

データマイニングが規則獲得の過程にヒューリスティクスを含有する手法であるのに対し、AI（人工知能）システムが経験から自らの振る舞いや性能を向上させるための仕組みは機械学習と呼ばれる。特に、問題の正解例を多数与え、うまく問題を解けるようになるまで繰り返し訓練をおこなう方法は、教師あり機械学習と呼ばれる。現在の第3次AIブームの火付け役となったディープラーニングの登場により、教師あり機械学習に基づくAI技術の産業応用が急速に進んでいる。ディープラーニングとは、人工ニューラルネットワークと呼ばれる神経系を模したモデルのうち、従来よりも深い構造のニューラルネットに基づく機械学習技術を指す。この深いニューラルネットを効果的に学習させる仕組みが進歩したことで、与えられた問題を解く上で重要な特徴をAI自ら獲得する表現学習が可能となった。抽出すべきパターンを人間が試行錯誤して最適化していた従来のデータマイニングと比べると、表現学習の実現はAI技術の応用可能性を大きく広げるブレイクスルーになった。実際、ディープラーニングは画像認識、文字認識、音声認識など、様々な認識タスクで従来手法を上回る成果を上げており、今後のさらなる発展が期待されている。これに対し同じ教師あり機械学習の一種で、比較的単純なモデルを多数統合して問題を解かせるアンサンブルラーニングも盛んに研究されており、問題によってはディープラーニングを超える性能も報告されている。

機械学習の近年のトレンドとして、2つの異なるタイプのニューラルネットを競合させ、より高い精度での予測を目指す敵対的生成ネットワークが注目を集めている。通常の機械学習が平均的に良い予測を下すのに対し、敵対的生成ネットワークは本物と見分けがつかない精緻な構造を予測することを目的としている。敵対的生成ネットワークの応用として、低解像画像から自然な高解像画像を推定する超解像技術の研究が進んでいる。我々の学会においても、ハード的には克服が困難な計測分解能の限界を、ソフト的に乗り越える手段として活用できる可能性を秘めている。また、制御やロボティクス分野では、強化学習とディープラーニングを融合させた深層強化学習が注目を集めており、囲碁の戦略や自動運転など、より複雑なタスクをこなすAIも登場している。例えば衛星観測において、投入軌道や観測モードを自ら最適にプランニングするAI技術が実現されれば、運用期間中により効率よく現象を捉えることが可能となるはずである。このように機械学習に基づくAI技術は日進月歩であり、自然現象の検出や予測をこなすツールとしてのみでなく、宇宙環境の計測にブレイクスルーをもたらす可能性を常に秘めている。

従来の教師あり学習に基づくディープラーニングでは、深い人工ニューラルネットワーク（深層ニューラルネットワーク）の性能を引き出すために、大量の訓練データが必要であった。しかしながら、自然科学分野では正解となるラベルやアノテーションの付与には高度な専門性が要求されることがある。それは地球電磁気・地球惑星圏科学においても例外ではないと考えられ、タスクによっては短くても数日、長いと数ヶ月単位、専門知見に基づくラベル/アノテーション作成作業が想定される。それに対し、機械学習分野では少数の訓練データから効率よく深層ニューラルネットワークを学習する仕組みの研究も盛んに行われている。例として、少数のラベルありデータと大量のラベルなしデータから訓練を行う半教師あり学習、ラベルの不確実性を考慮した弱教師あり学習、ラベルありデータを用いずデータ間の構造の違いから必要な特徴を獲得する対照学習など、様々なタイプの機械学習技術が研究されている。また、類似した問題で訓練を行った深層ニューラルネットワークを別の新しいタスクへと活用する転移学習、その発展系としての継続学習など、AIにとっての既に得られた知見を、次の予測に有効活用する技術も盛んに研究されている。それらの技術群は、問題によってはコンピュータビジョン分野を中心に、教師あり学習に迫る性能が実現されつつある。

このような訓練データ構築の作業コストを大幅に削減可能なAI技術は、今後さらなる進化を遂げることが予想され、手法の特性と問題の性質が合致すれば現時点ではAIの導入があまり進んでいない地球電磁気・地球惑星圏科学の諸データ解析に対しても、容易にAIを導入できる可能性がある。特に、長期観測データからのイベントの自動検出・分類や、動画像から現象の動態を定量化する問題については、それら事後的なデータ解析のみならず、例えば人工衛星にAIを搭載することで、その場観測データからリアルタイムでAIを訓練し、イベントの検出・予測を行わせることも可能となるであろう。しかしながら、小型衛星では特に、消費電力やメモリの関係からあまり表現力の高い深層ニューラルネットワークを稼働させられないケースもあると考えられる。そのようなケースでは、AIの軽量化・省エネルギー化も重要な研究課題となるであろう。具体的には、分散したエッジデバイスにおいて軽量のモデルを学習させ統合する連合学習や、リザーバーコンピューティングに基づく省エネルギーで動作するエッジAI技術は、衛星観測や地上多点観測網をよりインテリジェントに進化させる要素技術となる可能性がある。

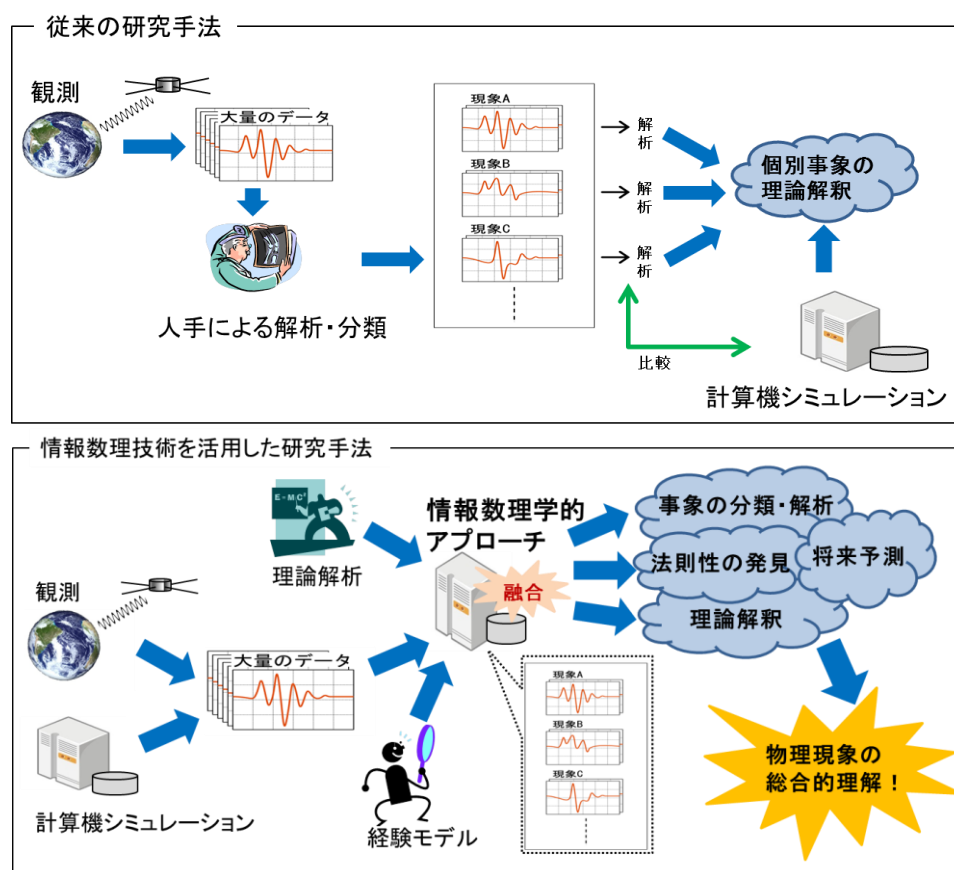


図 4.4.1 情報数理技術の活用

#### 4.4.2 データ同化技術と再解析データ

一般的に地球科学の観測データはシミュレーショングリッド等に対して疎である。一方、シミュレーションで用いられているパラメータや境界条件等の不定性は大きく、現象の高精度な推定を行うためにはこれらのパラメータの精度向上が必須となる。そのため、観測データとシミュレーションを融合させた「データ同化」という技術が、地球電磁気・地球惑星圏科学においても、電離圏・プラズマ圏・リングカレント・放射線帯・地磁気ダイナモの研究に用いられるようになってきており、現象の理解に大きく貢献している。しかしながら、こうした研究の規模は、気象や海洋といった他の地球科学分野に比べてずっと小さい。気象

学においては気象庁のような現業機関においてデータ同化が天気予報のために活用されていることを鑑み、地球電磁気・地球惑星圏科学においても、宇宙天気の実験室を行っている機関で、データ同化技術の積極的な導入と運用をはかっていくことが必要になると考えられる。さらには、シミュレーションコードを開発している研究室と観測データセットを提供する研究室が協力し、データ同化・大規模計算機シミュレーションで学位を取得する人材の育成を図っていくべきである。

これまで、磁気圏や電離圏においてある特定の時刻の磁場分布やプラズマ分布などを推測しようとする場合、太陽風パラメータなどを説明変数とする経験モデルを用いることも少なくなかった。しかし、磁気圏の状態は、長時間にわたる太陽風、磁気圏の履歴によって決まるため、ある時点の太陽風のパラメータを与えたからといって精度よく推定できるとは限らない。気象学においては、「再解析データ」と呼ばれるデータ同化の出力結果が長期間にわたり連続的に得られており、他の観測との比較研究に用いられる他、数値シミュレーションの入力としても使われるなど、標準となる参照データとして広く普及している。磁気圏・電離圏においても、長期間のデータ同化を行い、再解析データとして整備することで、他の観測との比較研究などに活用できる可能性がある。

## 5 研究推進のために必要な施策・組織

### 5.1 研究推進のために必要な施策

この章では、2-4 章で挙げられた各研究課題を解明するための施策を挙げる。これらの施策は全学会員にアンケート調査を行うことにより得られたものであり、

- 5.1.1 飛翔体計画
- 5.1.2～5.1.4 地上施設整備・観測計画  
(予算規模によって大型(5.1.2節)、中型(5.1.3節)、小型(5.1.4節)に分類)
- 5.1.5 技術開発
- 5.1.6 センター整備

に分かれている。以下に、まず全ての施策を表としてまとめる。それ以降のページに、各施策の詳細の記述を述べると共に、それぞれの記述の最後に、原則1枚のまとめ図と連絡先担当者をつける。

節番号	タイトル	カテゴリ	連絡担当者所属	連絡担当者
<b>5.1.1</b>	<b>衛星計画</b>			
5.1.1.1	惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画(LAPYUTA)	衛星計画	東北大学	土屋史紀
5.1.1.2	BepiColombo プロジェクト(日欧共同国際水星探査計画)	衛星計画	宇宙航空研究開発機構	村上豪
5.1.1.3	JUICE 計画への参加	衛星計画	宇宙航空研究開発機構	齋藤義文
5.1.1.4	国際宇宙探査と連動した火星宇宙天気・気候・水環境探査(MIM)計画	衛星計画	東京大学	関華奈子
5.1.1.5	MMX 火星圏観測計画	衛星計画	東京大学	今村剛
5.1.1.6	小型衛星群による大気圏-電離圏観測	衛星計画	宇宙航空研究開発機構	児玉哲哉
5.1.1.7	衛星・惑星内部構造推定を目的とした電磁探査	衛星計画	東京大学地震研究所	清水久芳
5.1.1.8	地球磁場観測衛星	衛星計画	東京大学地震研究所	清水久芳
5.1.1.9	編隊飛行による地球電磁気探査衛星計画(FACTORS)	衛星計画	名古屋大学太陽地球環境研究所	平原聖文
5.1.1.10	NEO-SCOPE 計画	衛星計画	宇宙航空研究開発機構	齋藤義文
5.1.1.11	ジオスペース探査衛星(ERG)計画	衛星計画	宇宙航空研究開発機構 名古屋大学	篠原育 三好由純
5.1.1.12	Comet Interceptor 計画	衛星計画	東京大学	笠原慧
5.1.1.13	M-MATISSE 計画	衛星計画	東北大学	寺田直樹
<b>5.1.2</b>	<b>大型地上施設整備・観測計画</b>			
5.1.2.1	海洋科学掘削 2050 サイエンスフレームワーク	観測計画	海洋研究開発機構(JAMSTEC)	木戸ゆかり
5.1.2.2	国際陸上科学掘削計画	観測計画	海洋研究開発機構(JAMSTEC)	木戸ゆかり
5.1.2.3	太陽地球系結合過程の研究基盤形成	観測計画 施設整備	京都大学生存圏研究所	山本衛
5.1.2.4	EISCAT_3D レーダー	施設整備	国立極地研究所	先端的レーダー研究推進センター
5.1.2.5	南極昭和基地大型大気レーダー(PANSY)を中心とした南極重点研究観測	観測計画	東京大学 国立極地研究所	佐藤薫 堤雅基 富川喜弘



5.1.2.6	赤道MUレーダー	施設整備	京都大学生存圏研究所	山本衛
---------	----------	------	------------	-----

<b>5.1.3</b>	<b>中型地上施設整備・観測計画</b>			
5.1.3.1	日本列島周辺での大規模アレイ状電磁観測計画	観測計画	京都大学	後藤忠徳
5.1.3.2	次世代太陽風観測装置による革新的太陽圏科学の実現	施設（観測網）整備	名古屋大学宇宙地球環境研究所	岩井一正
5.1.3.3	多点地磁気観測ネットワーク MAGDAS・短波帯電離圏観測FM-CWレーダーによる広域ネットワーク磁場・電場連携観測	施設（観測網）整備	九州大学国際宇宙惑星環境研究センター 九州工業大学	吉川顕正 藤本晶子
<b>5.1.4</b>	<b>小型地上施設整備・観測計画</b>			
5.1.4.1	大学中・小型望遠鏡群による惑星観測計画－惑星変動現象の飛翔体連携観測と系外惑星の大気成分検出に向けて	施設整備	東北大学	坂野井健
5.1.4.2	太陽系・系外惑星大気の精密観測のための赤外高分散分光技術開発－惑星大気物理過程の多角的理解に向けて	施設整備	東北大学	坂野井健
5.1.4.3	HF～VHF帯大型アレイ・アンテナ計画	施設整備	東北大学	三澤浩昭
5.1.4.4	UHF帯高感度・広帯域偏波スペクトル計開発	施設整備	東北大学	土屋史紀
5.1.4.5	赤道・低緯度 SuperDARN レーダー装置	施設整備	名古屋大学宇宙地球環境研究所	西谷望
5.1.4.6				
5.1.4.7	ライダーおよびレーダーによる極域大気上下結合の研究	施設整備	名古屋大学宇宙地球環境研究所	野澤悟徳
5.1.4.8	内部磁気圏のプラズマ・電磁場変動の総合地上ネットワーク観測	施設（観測網）整備	名古屋大学宇宙地球環境研究所	塩川和夫
5.1.4.9	大気・プラズマ結合過程のアジア・アフリカ子午面ネットワーク総合観測	施設（観測網）整備	名古屋大学宇宙地球環境研究所	塩川和夫
<b>5.1.5</b>	<b>技術開発</b>			
5.1.5.1	海洋底構成岩石の系統的試料採取技術の開発	技術開発	国立極地研究所	藤井昌和
5.1.5.2	掘削コア試料の古地磁気測定に関わる技術開発・環境整備	技術開発・環境整備	高知大学	山本裕二
<b>5.1.6</b>	<b>センター整備</b>			
5.1.6.1	宇宙地球環境研究のための包括的なデータサイエンスセンター	センター整備	名古屋大学宇宙地球環境研究所	草野完也 三好由純
5.1.6.2	将来の惑星探査・観測を念頭に置いた惑星大気コミュニティモデルの開発とコアモデリンググループの確立に向けて	研究グループ確立	神戸大学惑星科学研究センター	高橋芳幸
5.1.6.3	超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究（IUGONET）	センター整備	国立極地研究所 京都大学生存圏研究所	田中良昌 山本衛
5.1.6.4	宇宙地球環境研究のための国際連携研究センター	センター整備	名古屋大学宇宙地球環境研究所	塩川和夫
5.1.6.5	CPS(惑星科学研究センター)の定常化に向けて	センター整備	神戸大学惑星科学研究センター	牧野淳一郎 林祥介
5.1.6.6	惑星探査コンソーシアム	センター整備	国立天文台	竝木則行

### 5.1.1.1 惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画 (LAPYUTA)

LAPYUTA は、宇宙の「生命生存可能環境の探求」と「構造と物質の起源の理解」という学術的に重要な2つの目標の解明を目指し、4つの課題の達成を目的とする（図1）。

現在、5,000個以上の太陽系外惑星が発見され、その中には生命生存可能環境を持つ惑星があると期待されている。惑星環境の形態と進化を明らかにする上で、太陽系探査は貴重な手段である。課題1では、宇宙で最も詳細な観測が可能な太陽系内天体のうち、ガス惑星を周回する氷衛星と地球型惑星の大気進化に焦点を当てる。生命生存可能環境の探査という観点から、これらの研究は太陽系探査の焦点となっている。氷衛星は「第二のハビタブル環境」を持つ天体として注目されており、氷衛星の観測から地球とは異なるハビタブル環境の解明が期待されている。火星・金星では、かつて存在した水が失われた要因の一つとして宇宙への流出が重要視されており、現在も大気中の水蒸気や温室効果ガスが流出している。大気の流出量の空間および時間変化の法則性を見出すことで歴史上失われたガスの総量に制約を与えることが期待される。課題2では、系外惑星のトランジット観測から外圏大気の広がりをつえ、太陽系の知見を系外惑星に拡張して惑星大気の特徴づけを行う。また、系外惑星の環境に影響を与える恒星活動の解明を目指す。太陽系天体の詳細な知見と、今後の天文観測から得られる恒星系天体の統計情報を組み合わせることで、惑星系における普遍的な生命生存可能環境の理解を深めることができる。課題1と2で鍵となる観測領域は天体と宇宙の境界に形成される外圏大気・電離大気である。様々な天体に対してこの領域を観測し、大気の広がりや散逸を制御する惑星や恒星の条件を明らかにする。

生命生存可能環境の探求の背後には、宇宙そのものの進化や、宇宙の構造が現在の姿に至る過程についての根本的な興味がある。課題3では宇宙の構造形成史の中で残された基本的な問題の一つである銀河の形成過程に取り組む。銀河の構造に  $Ly\alpha$  ハローが普遍的に含まれているかどうかを調べ、 $Ly\alpha$  ハローの物理的起源が理論で予言されている星形成を引き起こすコールドストリームと呼ばれる低温のガス降着なのか、それとも衛星銀河や銀河周辺の HI ガスかを明らかにする。銀河形成の背後にある物理過程を明らかにするために欠落している重要な観測的証拠を新たに得ることによって、理論的な研究によって提案されている銀河形成のシナリオの検証が可能となる。課題4では、物質進化における未解明課題である重元素合成の解明を目指す。中性子星合体による重元素合成の全体像を把握し、重元素の起源を理解するとともに、超新星爆発からの最初のシグナルを観測し、大質量星進化の最終段階を理解することにつなげる。

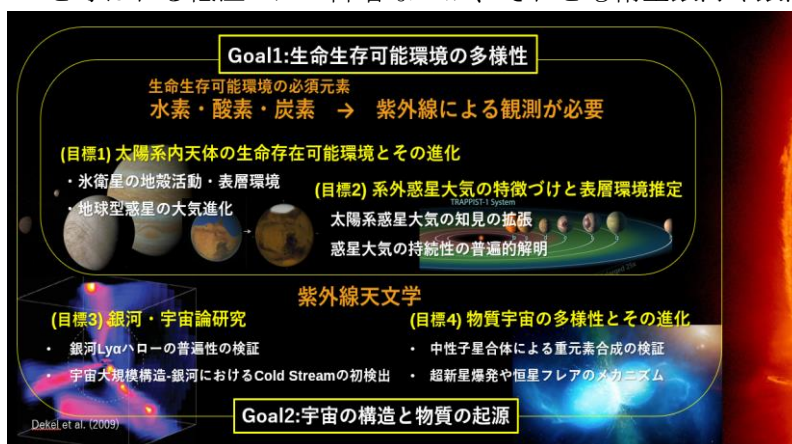


図1 LAPYUTA の科学目標

氷衛星は 2030 年代の国際探査の対象となっており、2035-2050 年代の ESA の L-class ミッション Voyage2050 においても、Moons of the Giant Planets が実施候補の1つに位置づけられている。火星、金星においても 2030 年代に複数の探査計画が予定されている。さらなる系外惑星の発見をめざす計画としては TESS、JASMINE、NGRST(Roman)、PLATO があり、可視赤外線トランジット分光による大気観測を行う JWST、ARIEL があ

る。一方、ハッブル宇宙望遠鏡の退役後に紫外線波長域をカバーする高解像度の宇宙望遠鏡はなく、LAPYUTA は 2030 年代の紫外線観測を担う。その場の詳細観測を行う惑星探査と、空間構造を俯瞰する撮像観測を行う LAPYUTA の協調観測により、科学成果の最大化が期待できる。

上記の観測を実現する最適な手段として、LAPYUTA では地球周回軌道の紫外線宇宙望遠鏡を選択した。JAXA 宇宙科学研究所の公募型小型計画による実現を想定している。紫外線宇宙望遠鏡に求められる設計目標は以下の通りとなる。光学系有効面積 350cm<sup>2</sup>、空間分解能 0.1 秒角、観測波長 110nm~190nm、波長分解能 0.02nm 以下、分光及び撮像視野 180arcsec 以上。紫外線は地球大気を透過しないため、宇宙機からの観測が必須となる。口径 60cm 以上の紫外線宇宙望遠鏡に紫外分光観測装置、紫外イメージャー、広視野ガイドカメラを搭載する。地球外圏大気の酸素、水素原子発光の影響を低減しつつ放射線の影響を極力回避するため、近地点高度 1,000km、遠地点高度 2,000km を想定している。



図 2 LAPYUTA の想像図

## 2. 参加機関

宇宙科学研究所、東北大学、東京大学、名古屋大学、東京理科大学、立教大学、国立天文台、大阪大学、北海道大学、情報通信研究機構、京都産業大学、東京工業大学、東北工業大学、金沢大学、千葉工業大学、海洋研究開発機構、コロラド大学、筑波大学、北見工業大学、京都大学、パリ第六大学

## 3. 予算規模

(c) 180 億円

## 4. 準備状況とスケジュール

本計画は、ISAS の公募型小型計画公募への提案を目指し 2020 年末に WG が設立された。2022 年 8 月にミッション提案を行い、2023 年 4 月に公募型小型計画 6 号機候補に選定された。実施計画は、概念検討期間（3 年）、プロジェクト準備期間（3 年）、プロジェクト期間（開発 6 年、運用 3 年）からなる。現在は概念検討期間にあたり、プロジェクト準備期間に向けた検討の具体化を進めている。プロジェクト準備期間では、高い空間分解能要求を早期に検証するため、主要部品の試作と評価を実施する。プロジェクト期間では、エンジニアリングモデルの評価を通してフライトモデルの設計と製造を行う。2032 年に打ち上げ、3 年間の観測で 4 つの科学課題を実現する他、年間 1-2 カ月の公募観測期間を設ける。プロジェクト期間終了後は、最長 9 年の後期運用観測を実施する。実施機関は JAXA 宇宙科学研究所である。

連絡先：土屋史紀（東北大学大学院理学研究科）

e-mail: tsuchiya.f@tohoku.ac.jp

### 5.1.1.2 BepiColombo プロジェクト(日欧共同国際水星探査計画) (BepiColombo Project)

#### 1. 目的・内容

紀元前から知られる水星は、「太陽に近い灼熱環境」と「軌道投入に要する多大な燃料」から周回探査は困難であった。過去の探査は、米国マリナー10号による3回のフライバイ観測(1974-5)と米国 MESSENGER による周回探査(2011-2015)の2つのミッションのみである。2011年に世界で初めて水星周回軌道に投入された米国 MESSENGER 衛星により多くの興味深い現象・事実が発見・観測された一方、それらの多くは未だ解明に至っていない。ベピコロombo (BepiColombo) は、欧州宇宙機関(以下、ESA)との国際分担・協力によりこの惑星の磁場、磁気圏、内部、表層を初めて多角的・総合的に観測し、MESSENGER によって発見された問題の解明を含め、水星に関して調べ尽くそうというプロジェクトである。固有磁場と磁気圏を持つ地球型惑星は地球と水星だけで、初の水星の詳細探査＝「初の惑星磁場・磁気圏の詳細比較」は、「惑星の磁場・磁気圏の普遍性と特異性」の知見に大きな飛躍をもたらす。また、磁場の存在と関係すると見られる巨大な中心核など水星の特異な内部・表層の全球観測は、太陽系形成、特に「地球型惑星の起源と進化」の解明に貢献する。

本計画は、観測目標に最適化された2つの周回探査機、すなわち表面・内部の観測に最適化された水星表面探査機(MPO)(3軸制御、低高度極軌道)と、磁場・磁気圏の観測に最適化された水星磁気圏探査機(MMO)「みお」(スピン制御、長楕円極軌道)から構成される。JAXA/ISAS は、日本の得意分野である磁場・磁気圏の観測を主目標とする「みお」の開発と水星周回軌道における運用を担当し、ESA が残りの全て、すなわち、打ち上げから惑星間空間の巡航、水星周回軌道への投入、MPO の開発と運用を担当する。これら2つの周回軌道衛星により水星の起源・誕生、進化、および環境に関する科学課題の解決に取り組む。具体的には、地形・組成などの「惑星としての水星」、「水星磁場の起源」、「外圏大気」の組成・構造並びに生成・消失メカニズム、太陽風との相互作用などの「磁気圏現象」、相対性理論の観測的検証、重力場観測等の「基礎物理研究」などに関して同時観測により明らかにする事を科学目標としている。

ベピコロomboの両探査機は2018年10月に仏領ギアナからAriane-5ロケットで打ち上げられ、2025年末の水星到着に向けて順調に航行を続けている。合計9回の惑星スイングバイが予定されており、2020年4月に地球スイングバイ、2020年10月と2021年8月に2回の金星スイングバイ、2021年10月と2022年6月、2023年6月に3回の水星スイングバイをそれぞれ実施済みである。想定通りの軌道を航行していることに加えてスイングバイ前後の科学観測にも成功し、すでに科学成果を創出し始めている。また当初の計画には含まれていなかった惑星間空間航行中の科学観測も多く実施し、太陽高エネルギー粒子(SEP)やCMEイベントの検出に成功しているほか、米国のParker Solar Probeや欧州のSolar Orbiterとともに内部太陽圏の多点同時観測実現に貢献している。

水星到着後の観測は、選ばれた装置開発チームに留まらず、広く日欧研究者で構成する「BepiColombo 科学ワーキングチーム」(年2回程度開催)で立案・実施される。

#### 2. 関係機関(MMO 関係機関のみ)

国内：JAXA、東北大、東北工大、東大、東工大、国立天文台、立教大、早稲田大、東京海洋大、東京工芸大、東海大、極地研、情報通信研究機構、名大、京大、京産大、大阪市大、金沢大、富山県立大、愛媛大、九大、熊本大

国外：

フランス：CESR-CNRS、CETP-IPSL、CNRS、LESIA、LPCE-CNRS  
ドイツ：Tech. Univ. Braunschweig、MPS、MPI-NP  
オーストリア：IWF  
ロシア：IKI  
連合王国：Imperial College、MSSL/UCL  
スイス：Univ. Bern  
スウェーデン：IRF、KTH  
ノルウェー：Univ. Oslo  
フィンランド：Finn. Meteo. Inst., Univ. Oulu  
ハンガリー：Eotvos Univ.  
イタリア：CNR-IFSI  
チェコ：Charles Univ., IAP  
米国：APL/JHU、UCLA、Boston Univ.  
台湾：National Central Univ.

### 3. 予算規模

(c) 100 億円以上

### 4. スケジュール

開発完了

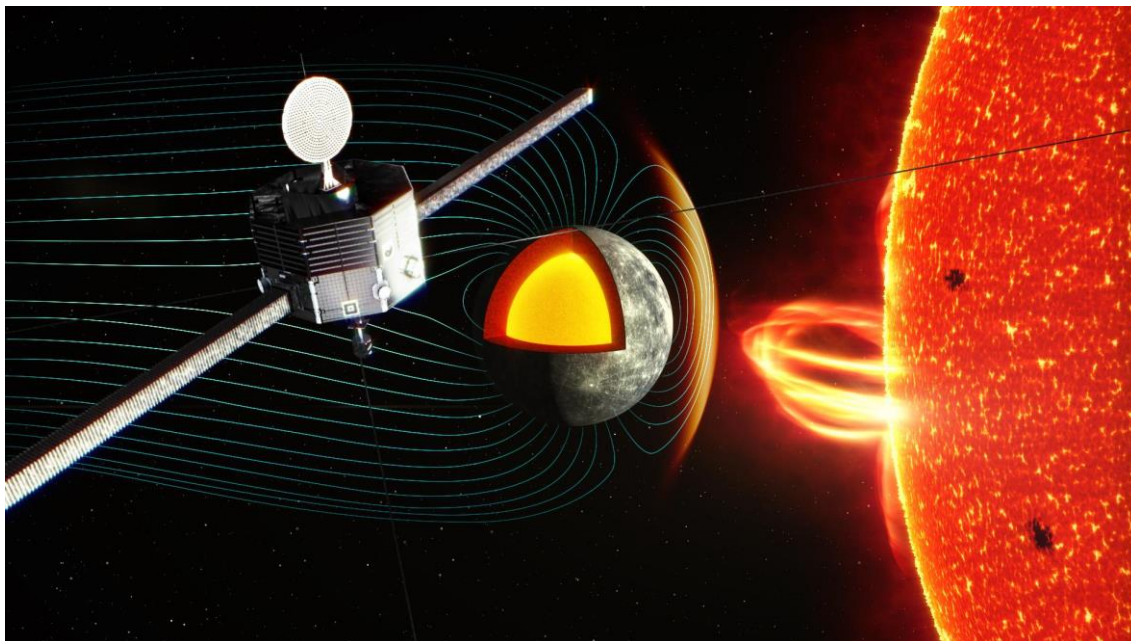
打ち上げ：2018 年 10 月

仏領ギアナより Ariane-5 型ロケットにより打上げ

水星周回軌道投入：2025 年 12 月(予定)

観測期間：ノミナル 1 地球年

さらに延長として 1 地球年 (以上) を想定



連絡先：村上 豪 (宇宙航空研究開発機構)

e-mail: go at stp.isas.jaxa.jp



### 5.1.1.3 JUICE 計画への参加

(Participation to ESA's L-class mission: Jupiter Icy Moons Explorer)

#### 1. 内容

「木星氷衛星探査計画 (JUICE)」は欧州宇宙機関 (ESA) が主導する L-class の基幹ミッションであり、日本からは、ISAS・JAXA の多様な小規模プロジェクト群「戦略的海外協同計画」の一つとして、観測機器の一部の開発・提供及びサイエンス共同研究により参画すべく準備を進めている。海外大型計画への国際協力により効果的・効率的に成果創出を目指す。

JUICE ミッションの目的は、木星周回軌道から木星系の観測 (磁気圏、木星大気、エウロパ・カリストのフライバイ観測) を実施し、世界初の氷衛星周回機となって太陽系最大の氷衛星ガニメデの総合観測 (元の表現では精査) を実施することで、以下の理解・解明を目指す。

- 1) 「惑星はいかにして作られたのか？」 (太陽系以外にも適用できる普遍的な惑星形成論を構築し、太陽系形成論を見直す。)
- 2) 「地球の外に水の海はあるか？」 (氷衛星の地下海、生命誕生につながる高分子が生成する環境が作られる条件を探る。)
- 3) 「太陽系で起きている環境の変動にはどのようなものがあるのか？」 (木星 (JUICE)、水星 (MMO)、地球 (ARASE) のプラズマ過程を比較を行うことで、宇宙のプラズマ過程を理解する。)

ISAS/JAXA は、11 の搭載観測機器のうち、我が国が実績と技術的な優位性を持つ 3 つの機器 (RPWI: 電波・プラズマ波動観測装置、PEP/JNA: 高速中性粒子観測装置、GALA: ガニメデレーザ高度計) についてハードウェアの一部を開発・提供するとともに、2 つの機器 (JANUS: カメラシステム、J-MAG: 磁力計) のサイエンス共同研究者として参加する。また、搭載観測機器の一つである SWI: サブミリ波観測機器 については NICT からハードウェアの一部を開発・提供して参加する。

JUICE ミッションに参加することで、1) 外惑星探査に関わる技術の獲得、惑星・生命科学の新たな知見の創出 2) 国際協力プロジェクトへの参画により、将来の我が国の宇宙科学研究者の人材育成に貢献 などの成果が期待できる。

#### 2. 関係機関

機器チームの代表者は、東北大、ISAS/JAXA、NICT に所属している。

#### 3. 予算規模

(b) 約 24 億円

#### 4. JUICE ミッション概要

重量: 2,200kg (ドライ)、2,900kg (推進薬)

電力: 約 180W

打上げ年度 (予定): 令和 5 年度 (2023 年度)

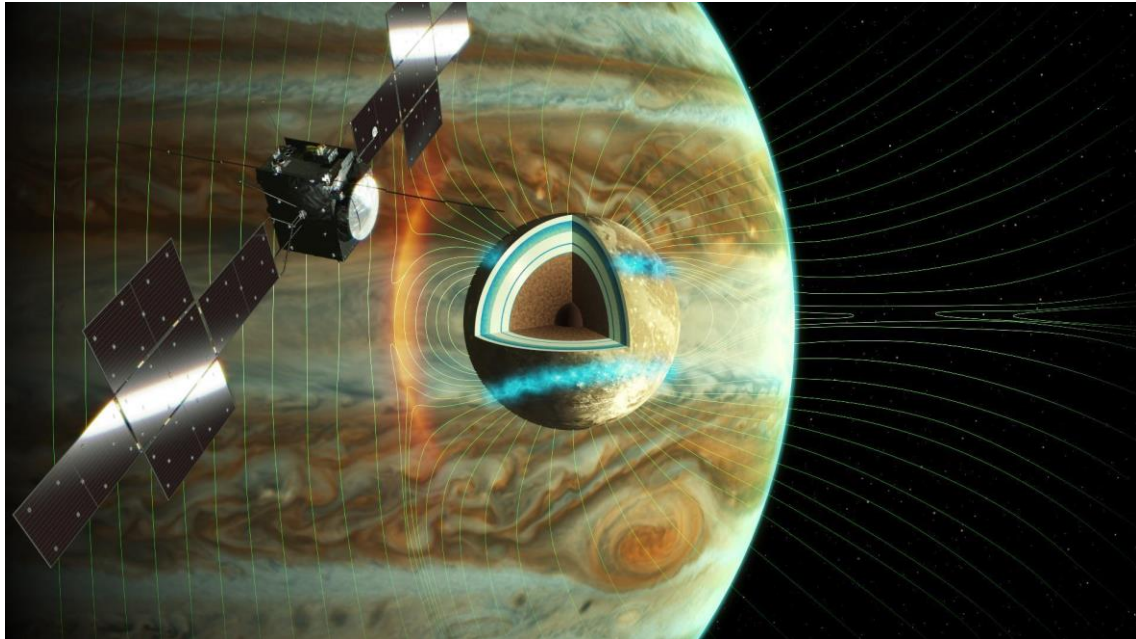
打上げロケット: アリアンロケット (欧州が打上げ)

運用期間: 12 年間 (2023~2035 年)

2023 年打上げ、2031 年木星系到着、2034 年ガニメデ周回軌道投入、2035 年ミッション完了 (予定)

探査機システム担当: ESA (欧州宇宙機関)

観測機器担当：各国機関（日本も一部参画）



連絡先：齋藤義文（宇宙研）

e-mail: saito at stp.isas.jaxa.jp

## JUICE計画への観測機器搭載

木星系探査衛星 宇宙プラズマ物理・惑星大気科学・固体惑星科学  
ESAのクラス計画 打ち上げ 2023年

ミッション目的：木星周回軌道から木星系の観測（磁気圏、木星大気、エウロパ・カリストのフライバイ観測）を実施し、世界初の氷衛星周回機となって太陽系最大の氷衛星ガニメデの総合観測（元の表現では精査）を実施することで、以下の理解・解明を目指す。

- 「惑星はいかにして作られたのか？」太陽系以外にも適用できる普遍的な惑星形成論を構築し、太陽系形成論を見直す。
- 「地球の外に水の海はあるか？」氷衛星の地下海、生命誕生につながる高分子が生成する環境が作られる条件を探る。
- 「太陽系で起きている環境の変動にはどのようなものがあるのか？」木星（JUICE）、水星（MMO）、地球（ARASE）のプラズマ過程を比較を行うことで、宇宙のプラズマ過程を理解する。

実施形態：多様な小規模プロジェクト群「戦略的海外協同計画」の一つとして、欧州宇宙機関（ESA）の基幹ミッションである「木星氷衛星探査計画（JUICE）」に、観測機器の一部の開発・提供及びサイエンス共同研究により参画すべく準備を進めている。海外大型計画への国際協力により効果的・効率的に成果創出を目指す。

構成：JAXAは、11の搭載観測機器のうち、我が国が実績と技術的な優位性を持つ3つの機器（RPWI：電波・プラズマ波動観測装置、PEP/JNA：高速中性粒子観測装置、GALA：ガニメデーザ高度計）についてハードウェアの一部を開発・提供するとともに、2つの機器（カメラシステム、磁力計）のサイエンス共同研究者として参加する。

予算規模：(b) 10億円以上

関係機関：機器チームの代表者は、東北大、ISAS/JAXAに所属。



### 期待される成果:

- ・外惑星探査に関わる技術の獲得、惑星・生命科学の新たな知見の創出。
- ・国際協力プロジェクトへの参画により、将来の我が国の宇宙科学研究者の人材育成に貢献。

### 探査機主要諸元:

- ・重量: 2,200kg (ドライ)、2,900kg (推進薬)
- ・電力: 約180W

打ち上げ年度(予定): 令和5年度(2023年度)  
打ち上げロケット: アリアンロケット(欧州が打上げ)

運用期間: 12年間(2023~2035年)  
2023年打上げ、2031年木星系到着、2034年ガニメデ周回軌道投入、2035年ミッション完了(予定)

探査機システム担当: ESA(欧州宇宙機関)  
観測機器担当: 各国機関(日本も一部参画)



### 5.1.1.4 国際宇宙探査計画と連動した火星宇宙天気・気候・水環境探査(MIM)計画 (Martian Space Weather, Climate, and Aqueous Environment Exploration in cooperation with the International Mars Ice Mapper)

#### 1. 目的・内容

##### 背景と目的：

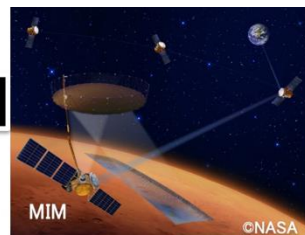
今後の太陽系探査の中で火星は、過去にハビタブルな環境を保持し、進化の過程でそれを失った地球外太陽系天体として、国際的にも重要な探査対象である。近年の先行火星探査における新発見も踏まえ、本計画の目的は、ハビタブル環境の持続性の理解に向けて、火星における宇宙天気・気候・水環境の探究と、着陸探査に向けた探査技術実証である。本計画は、アルテミス計画などにより月から火星へと人類の活動域が拡大する中、我が国の戦略的火星探査の重要なステップとして位置づけられており、我が国の宇宙基本計画の方針とも合致している。火星は地下水圏、大気圏、宇宙環境の相互作用の帰結としての水環境進化を実証的に調べることができる惑星であり、本計画では、水の貯蔵と散逸過程に着目し「惑星大気進化に重要な大気上下結合、宇宙環境影響の理解」と「地下浅部を含めた H<sub>2</sub>O の動態と揮発性物質の起源の制約」を目指した探査を実施し、ハビタブル惑星環境の持続性の理解に貢献する。この目的実現のため、国際 Mars Ice Mapper (MIM) 計画において、周回機に搭載する2つの科学機器パッケージと小型着陸実証機を担当することを計画している。本計画は3ステップで進めようとしている戦略的火星探査において、工学的には次の本格着陸探査に向けた探査技術実証を達成するという目的も持つとともに、宇宙放射線環境や表層・浅部地下水環境など、将来探査に不可欠な知見を提供することで、人類の活動域拡大にも貢献する。

**目的** 火星における宇宙天気・気候・水環境を探る

～ハビタブル(生命生存可能)惑星成立の条件は何か?～

**達成目標**

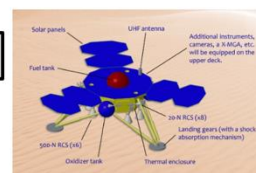
周回機: 惑星大気進化に重要な大気上下結合、宇宙環境影響の理解



1. 大気境界層での水蒸気観測を実現し、地表/地下の水リザーバーがどの程度大気と相互作用するのかを明らかにするとともに、広い高度範囲での速度場観測を実現し、大気の大気上下結合による水の効率的な輸送機構を解明する。(観測項目: A,B,C,D)
2. 火星オーロラの高感度撮像を実現し、地殻磁場が宇宙放射線環境と大気散逸に与える影響を明らかにする。(観測項目: C,D,E,F,G)

**着陸機: 浅部地下を含めたH<sub>2</sub>Oの動態と揮発性物質の起源を制約**

3. 将来の本格着陸探査の技術実証と小型着陸機による探査により H<sub>2</sub>Oの動態と揮発性物質の起源を制約する。(観測項目: H, I, J)



**観測項目**

A: 表層付近(<10km高度)の大気境界層の水蒸気観測, B: 高度30-100kmの速度場と水蒸気分布の3次元同時観測, C: 電離圏温度・速度場観測, D: 電離圏同位体計測, E: 火星オーロラ撮像, F: 磁場観測, G: 高エネルギー粒子観測, H: 着陸地点地質の特徴の撮像, I: 着陸地点気象観測, J: 着陸地点での化学分析

2つの科学機器パッケージ:  
大気上下結合パッケージ  
火星宇宙天気パッケージ  
をMIM周回機に搭載するとともに、小型着陸機による技術実証と科学観測を検討中

サイエンス成果が与えるインパクト:

生命生存可能(ハビタブル)惑星成立の条件は何なのか。この人類の根源的な問いに対し、今後の太陽系探査において、太陽系におけるハビタブル環境の形成と進化の探求が重要な科学目標となっている。約 40 億年前の火星は湿潤な気候であったと推定される一方で、現在の火星は寒冷乾燥な気候をもつ。従って火星は、過去にハビタブルな環境を保持し、進化の過程でそれを失った地球外太陽系天体として、ハビタブル環境の持続性を調べるために国際的にも重要な探査対象となっている。火星がハビタブル環境を失った際の大規模な気候変動を引き起こすには、多量の水と CO<sub>2</sub> 大気が地下に貯蔵もしくは宇宙空間に流出して表層環境から取り除かれる必要がある。その中で、過去の激しく変動する太陽条件下での宇宙空間への水や大気の散逸機構の解明が、喫緊の要請となっている。また、月から火星への有人探査を目指すアルテミス計画など国際宇宙探査が活発化する中、火星の放射線環境や気象の理解が人類のフロンティア拡大の関連から重要課題となっている。火星においては、もしかしたら生命活動に重要な役割を果たした可能性のある過去の海洋水が、現在でも凍土や含水鉱物として地下に存在している可能性があり、地下水圏、大気圏、宇宙環境の相互作用の帰結としての水環境進化を実証的に調べることができる。その中で、本計画では、「惑星大気進化に重要な大気上下結合、宇宙環境影響の理解」と「浅部地下を含めた H<sub>2</sub>O の動態と揮発性物質の起源を制約」に着目した探査を実施し、ハビタブル惑星環境の持続性の理解に貢献することを目指している。

多数の系外惑星が発見される中、主星の活動と惑星圏環境の関係を理解しようという宇宙気候探求の機運が高まっており、本計画で得られる知見は、系外惑星がどのような大気と表層環境を持ちうるか(ハビタブル環境を持つか否か)を推定する知的基盤を提供する。また、本計画で実現する宇宙放射線環境や表層・浅部地下水環境の把握は、将来の着陸探査や国際協働による火星有人探査に不可欠な知見を提供する。本計画は、学術的な価値に加えて、人類の活動領域を火星へと拡大するために重要な探査である。さらに工学的には、重力天体突入・降下・着陸に関する着陸探査に向けた航空宇宙工学、ロボット工学等の幅広い発展が促され、総合的な技術の体系的な獲得が可能となる。

モデル科学機器:

本計画では、モデル科学機器として、下表の項目(オプションを除く総重量約 72kg、電力約 160W)を設定している。その開発状況・搭載実績等は下表を参照されたい。

パッケージ	センサー	開発状況	搭載実績
大気上下結合パッケージ	THSS	天文・地球観測ミッションで、技術・手法は確立され、国内外を含めて観測実績も豊富。多周波/広帯域/周波数高分解能における小型省電力化や惑星保護対応が発展的課題。	SMILES (Herschel, JUICE, MLS/AURA, SWAS, Odin, IceCube,)*
	HRMS	各開発要素は BBM で検証済み。OKEANOS 用に概念検討を実施、類似観測器を LUPEX 用に開発中。	
	IDA	海外協力機器、コンポーネントレベルでの実績多数	Mars/Venus Express 他
火星宇	MAI	IMAP/VISI をベースに、MAVEN/IUVS チームと協	IMAP/VISI

宙天気 パッケージ		力して SNR・光学概念設計を検討中。スキャナーミラーは DESTINY+ の開発実績を活用。	
	SE sensors	RockSat-XN, あらせ, みお など搭載実績多数.	RockSat-XN 他
	EPS MAG	要求を満たす技術は既存。小型・省電力が必要な場合には開発が必要。(他計画用に現在開発中)	あらせ, みお
	ESA	搭載実績は多数。小型省電力化は発展的課題。	あらせ他

小型着陸機搭載機器候補については、気象パッケージ(温度、風速、圧力、水蒸気、ダスト)、Ne 同位体分析器、カメラを想定して検討を進めている。

## 2. 関係機関

JAXA 宇宙科学研究所 (ISAS)、東京大学、東北大学、大阪大学、大阪府立大学、東京工業大学、情報通信研究機構、名古屋大学、京都大学、他、計 18 機関。

## 3. 予算規模

(c) 100 億円以上

## 4. 準備状況とスケジュール

2030 年代には国際協働による火星サンプルリターンが計画されており、そこで日本が主導的な役割を果たすためにも、太陽の影響を受ける大気と浅部地下環境の共進化過程に着目した我が国独自の火星探査の実施が喫緊の要請である。本計画は、この要請に応えるため先行探査の成果を精査し検討された JAXA 宇宙科学研究所 (ISAS) の火星タスクフォース報告書にて、国際協働宇宙探査に向けた我が国の戦略的火星探査の MMX に続く次の重要なステップとして位置づけられている。本計画は、国際宇宙探査と宇宙科学探査のシナジーが期待できる探査計画であり、MIM 周回機搭載機器については、主に ISAS/JAXA の宇宙物理学委員会の下に設置された周回・探査技術実証による火星宇宙天気・気候・水環境探査計画検討 WG において開発検討を進めている。また、小型着陸機搭載機器候補については、2022 年 2 月に JSEC/JAXA に発足したミッション定義チームの下で、小型着陸機システムと合わせて技術検討を実施している。また、関連コミュニティとの連携も進んでおり、日本学会会議のマスタープラン 2020 の大型研究計画として、SGEPSS (地球電磁気・地球惑星圏学会) と惑星科学会両学会の会長名で提案され採択されている。また本計画は、本文書の他、太陽系・系外探査プログラムの工程表 (日本惑星科学会) にも記載されている。

また、Mars Ice Mapper 計画は、NASA (米国)、CSA (カナダ)、ASI (イタリア)、JAXA (日本) の 4 ヶ国の宇宙機関が協働で行う新しい形の国際宇宙探査計画であり、2021 年 2 月には、意向表明書が発出されている (<https://www.isas.jaxa.jp/topics/002581.html>)。また、同 8 月には Measurement Definition Team が国際公募され (<https://www.exploration.jaxa.jp/e/news/20211112.html>)、現在その報告書が取りまとめられている最中である。各国の役割分担については、この報告書も受けて今後決まっていく予定であるが、意向表明書の段階では JAXA は衛星システムと sub-science payloads (科学機器と EDL 着陸機) を担当する方向性が示されており、全体として 2030 年頃の打ち上げを目指して検討が進んでいる。

連絡先：関 華奈子 (東京大学大学院理学系研究科)

e-mail: k.seki at eps.s.u-tokyo.ac.jp

### 5.1.1.5 MMX 火星圏観測計画

#### 1. 背景

火星は表層環境の歴史や有人活動の観点から世界的な関心を集めてきた。現在の火星は地表と地下に凍結した水資源を含む寒冷な世界であるが、探査機によって得られた地質学的な証拠から、過去には温暖湿潤な環境が存在した可能性がある。現在の気候への移行は、脱ガス、揮発性物質の宇宙への散逸、内部磁場の消失、大気と地殻間の水や他の揮発性物質の交換、光化学、放射伝達、大気循環など様々な物理・化学プロセスによって生じたと想像されている。そのような異なるプロセスの間の結合を理解することを目的として、MMX (Martian Moons eXploration) ミッションにおける火星観測計画は立案された。

#### 2. 目的・内容

MMX は第一に、火星の衛星フォボスとダイモスのクローズアップ観測を行い、フォボスからサンプルを採取して地球に持ち帰り、2つの衛星の起源を明らかにすることを目指している。MMX はさらに、3年間の火星周回期間中に火星の大気や地表の遠隔観測と、宇宙空間に散逸する揮発性物質のその場測定も行う。地球に持ち帰るサンプルには小天体の衝突によって火星表面から放出された粒子が含まれていることが期待されており、そこから初期火星の情報を得ることも想定している。MMX ミッションではこれらを統合して、火星とその衛星、そして火星の周辺空間からなる火星システムを総合的に理解することを目指している。

これまでの多くの火星周回機が極軌道を採用したのとは違い、MMX は赤道面に近い高高度軌道をとる。そのため、火星表面の短時間スケールの現象を連続的に遠隔観測することが可能である。このことを利用して、水蒸気、氷雲、ダスト、微量気体などの広域分布の日周期～季節変動を、多色広角カメラ (OROCHI) ・望遠カメラ (TENGOO) ・分光撮像装置 (MIRS) を用いて高高度から高時間分解能かつ高空間分解能でマッピングする。火星大気における物質輸送、地表・地下のリザーバーと大気との間の交換過程、上層大気への物質輸送を理解するための手がかりが得られると期待される。

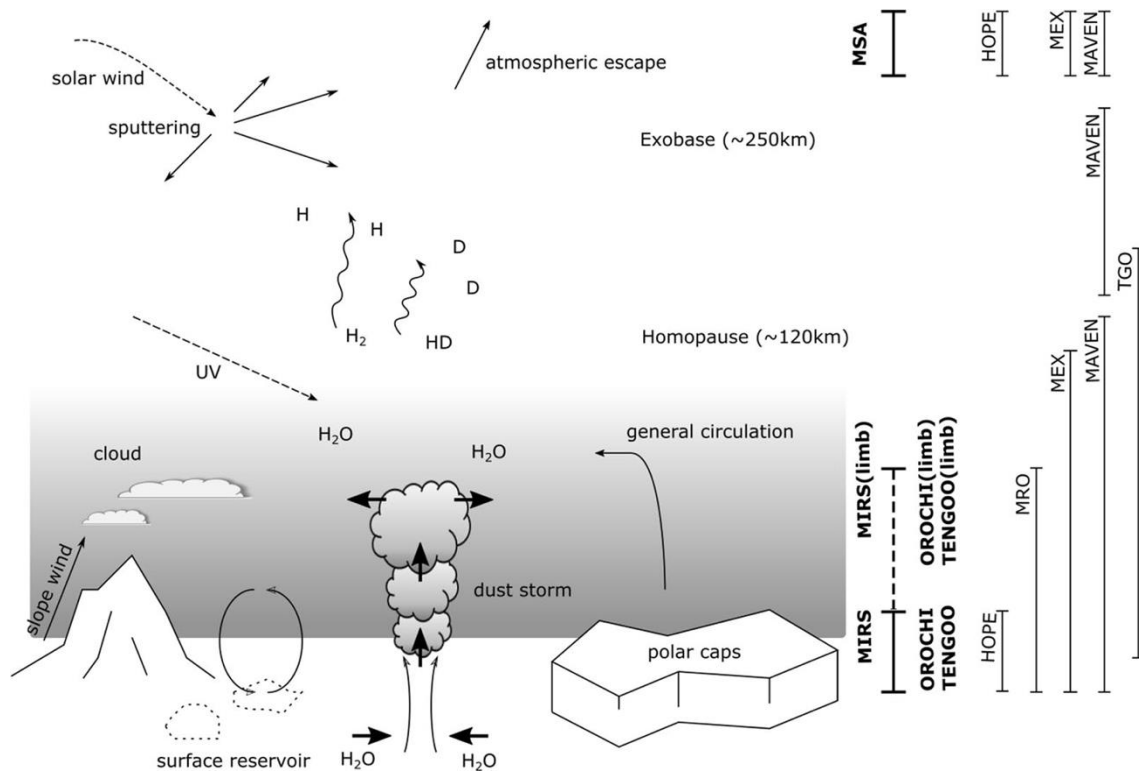
MMX の軌道はまた、火星とフォボスの影を利用して低エネルギーイオンを計測するのに有利である。高い質量分解能を持つ質量分析計 (MSA) で宇宙へ逃げるイオンを観測し、過去の火星が現在のような冷たく乾燥した環境へと変化した要因と考えられる大気散逸を究明する。

フォボスの表面には火星の放出物があまり衝撃を受けずに蓄積されていると予想される。火星からの噴出物が堆積していれば、堆積岩から火成岩まで、あらゆる地質時代の火星の岩石が含まれている可能性がある。そのため、帰還したサンプルを分析することで、火星の表面環境の歴史を復元することができる。

これらの異なる観測は火星の環境進化の解明のために有機的に結びつけられる。たとえば大気の遠隔観測と散逸イオンの直接計測によって水が地表から宇宙空間までどのように運ばれるかを追跡し、さらに帰還した火星サンプルの同位体分別分析とを組み合わせることによって、環境進化のシナリオを構築する。

#### 3. 準備状況

当初予定では、探査機は2024年に打ち上げられ、2025年に火星軌道に投入され、2028年まで火星周回軌道に滞在し、2029年に地球に帰還する予定であった。しかし2023年のH3ロケット打上げ失敗を受けて、スケジュールは2年程度遅れる見込みである。この探査はJAXAを中心にNASA、ESA、CNES、DLRが国際協力が進められており、世界から多くの研究者が参加している。同時期に火星圏にいる他の火星ミッションとの協同についても検討が始まっている。



MMX による火星圏観測と他の火星ミッションの対象高度領域と物理化学プロセス (Ogohara et al. 2022)

連絡先：今村 剛 (東京大学)

t\_imamura at edu.k.u-tokyo.ac.jp

### 5.1.1.6 小型衛星群による大気圏—電離圏観測 (Small Satellite Constellation for Atmosphere-Ionosphere Research)

#### 1. 目的

電離圏研究はもはや電離圏のみを研究する時代ではない。また電離圏研究は、1920年代に電離圏が発見されてから、既に約100年が経過しようとしている現在では、電離圏に関する知識は人間活動に応用されている。一方では電離圏で生じているいくつかの大きな現象の物理が未解決である。電離圏は電離圏よりはるか下部の対流圏、成層圏、中間圏、熱圏の大気力学、あるいは電磁気現象と深く関連しており、これらの高度における物理量を同時に知る必要がある。

私達はその物理を理解したい現象は：

1. 台風による電離圏への影響
2. 成層圏突然昇温の電離圏への影響
3. 大地震発生前における電離圏擾乱
4. 地磁気赤道帯における電波シンチレーション

などである。特に項目3、4は直接社会に影響をおよぼすものである。この他に、

5. 電離圏F領域のプラズマ密度、温度モデルなどの改良

があげられる。上記項目のうち台風による電離圏擾乱は、高層雲に伴う帯電、あるいは内部重力波、成層圏突然昇温は他下部大気の大気運動の変動、そして最終的には高度100km付近のダイナモ電場を変化による電離圏への影響であると考えられ、地震の前駆現象については、いくつかのメカニズムが提案されている。その一つは地震発生前に何らかのメカニズムにより発生し、増幅された内部重力波であり、2つ目は地球内部の岩石の押し合いにより発生した正電荷、そして第3には地下からのラドン発生による大気の電離によるものである。どれが主なる役割を果たしているか不明である。あるいはこれらの原因が同時に影響している可能性も捨てきれない。電離圏シンチレーションは電離圏F領域における電子密度の小振幅の変動に始まるという報告がある。この場合、電離圏に擾乱を与えているのは内部重力波の可能性が大きい、その重力波が、どこでいつ発生するのか全く不明である。

#### 2. 上記の目的達成のための観測器

上記した問題の解決のためには衛星観測のみならず、イオノゾンデ、磁力計、対流圏、成層圏風レーダー等の地上観測との共同作業が必須である。

いずれの場合においても内部重力波が主な擾乱源と考えられるが、内部重力波が直接電離圏F層に到達する、あるいはまず高度100km付近のダイナモ電場を変化させる、あるいは両方同時に働く可能性も捨てきれない。したがって上記した現象の物理を解明するための観測機器は共通している。そのための観測優先順位順には、

- 1 衛星高度からの観測項目：電子密度の衛星高度の上下の高度分布、プラズマドリフト速度、電子温度・イオン温度及びイオン組成、中性風速度、中性ガス密度・温度、電場・磁場 (DC/AC)
- 2 高度約100km付近の観測項目：中性風速度及び温度
- 3 中間圏以下の観測項目：中性風及び温度

高度で分けたのは観測機器により測定高度が違うからである。②及び③を全世界的に測定するには、例えばTIMED衛星に搭載されたSABAR及びTIDIが考えられる。ただしこれ

らの観測器は光学的手法であり、観測が地方時で制限を受けるかもしれない。

中間圏以下の高度では GPS 掩蔽観測による中性ガス温度の観測が可能となる【参考：Formosat-3/COSMIC】

### 3. 小型衛星と超小型衛星群の組み合わせ

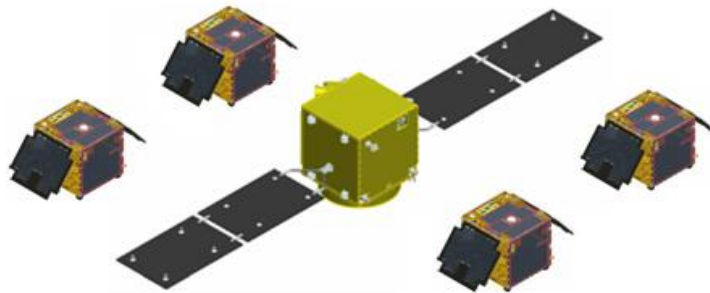
ここで述べる超小型衛星は、約 50～100kg、小型衛星は～500kg であろう。ここでは前者を子衛星、後者を母衛星と呼ぶことにする

母衛星は上記①において挙げた観測項目の少なくともイオン組成までの物理量に加え、②及び③のための GPS 掩蔽受信機及び SABAR, TIDI に類する測定器を搭載する。

超小型衛星はプラズマの基本量すなわち電子密度・温度は基本的な測定器として搭載し、余裕があればプラズマ速度測定を最優先として他の測定器も搭載する。少なくとも 6 機を軌道に経度で等間隔に配する。等間隔に衛星を配置するためにはまず衛星を設定高度より高い高度に持ち上げ、衛星間の距離が離れた時点で再び高度を落とす必要があり、このために小型のスラスターを搭載する必要がある。

衛星高度は一案として母衛星は 300～1000km, 子衛星は 300～Xkm が考えられる。楕円軌道を取ることで子衛星と母衛星の寿命を同程度にするための高度 X の値は正確な軌道決定が必要である。

軌道傾斜角は今後の議論によるが、SSW に関連して境域の大気力学も考慮すると極軌道とすることも考えられる。



上記の観測以外の主衛星搭載計器候補機器一覧（赤印は特に搭載優先順位高い）

	重量[kg]	電力[W]	Datarate [kbps]
電子密度・温度プローブ	計 2	計 7	計 20 以下
GPS 掩蔽受信器	2.5	25	2.3(25Mbytes/day)
低周波電磁波受信機	5	5	64
電場測定器	5	5	64
二次元フォトメータ	5	2	10
エネルギー測定器	8.6	13.5	32
プラズマ高度プロファイル計測器	12	40	32
イオン・中性ガス質量分析計	2.97	8	32
中性風測定器	10	5	20
プラズマドリフトメータ	3	3	20
酸素原子測定器	3	3	19.2
磁力計(Magnetometer)	3.11	5	1.544
技術データ取得装置 (TEDA)	4.55	11.9	1



合 計	約 68kg	約 133W	約 318kbps
-----	--------	--------	-----------

上記以外に高度 100km 付近から以下の測定のため

TIDI System	Mass: 41.8 kg	19.32 watts (orbit ave.)	
Heater Power: 11.0 watts	2494 bits/sec		
SABER System	Mass: 65.6 kg	76.5 W	4 kbps
.....			
総計	170kg	230 W	

従来の衛星において測定器の衛星全重量に占める割合は約 30%であることを考えると衛星総重量は約 500kg となる。

#### 4. 国際協力

本計画は日本一国で進めるよりはまず2つの理由で諸外国と共同で進めるべきと考える。第一の理由はたとえば TIMED 衛星に搭載された TIDI, および SABAR の2つの測定器、熱圏での中性風測定器など日本ではすぐには開発出来そうもない。第2の理由は費用である。このために本計画は早い時期に国際会議において周知を図るべきである。

#### 5. サクセス・クライテリア

	Minimum Success	Nominal Success	Extra Success
実利用： 気象予測精度向上	GPS 掩蔽観測により時空間的な大気圏の諸物理量を計測する。	GPS 掩蔽観測技術を確立し、ミッション期間中に取得したデータにより気象予測精度改善に資する。	GPS 海面反射実用化への目処をつけるとともに長期観測の実現により、他の地球観測衛星データの精度改善に利用する。
科学研究： 地圏・中間圏・電離圏	多様な搭載機器により時空間的な大気圏から電離圏にわたる領域の諸物理量を計測する。	ミッション期間中の信頼度の高い高精度な電離圏モデルを構築し、国際標準電離圏モデルに貢献する。	長期観測の実現により、信頼できる地震先行電離圏変動の結果を積み重ねるとともに、地圏—大気圏—電離圏結合の解明をする。
工学利用： 宇宙環境・宇宙天気	宇宙環境データ取得装置 (TEDA) 及び搭載機器により宇宙環境・電離圏の諸物理量を計測する。	ミッション期間中に取得したデータにより宇宙環境モデルを構築し、JAXA 衛星設計基準に反映するとともに、宇宙天気予報の精度を改善する。	長期観測の実現により、大規模太陽フレア等の異常イベントデータを取得し、宇宙環境・宇宙天気データの蓄積を行う。

--	--	--	--

## 6. 予算規模

100 億（主衛星 30 億、超小型衛星 5 億×6=30 億、イプシロン 40 億）  
国際共同ミッションとし、経費節減を図る

# 小型衛星群による大気圏－電離圏統合観測

内容：主衛星および子衛星複数機による観測

- ・高度500-600km・軌道傾斜角50-60度
- ・大気圏－電離圏の時空間変動観測のため  
全衛星にGPS掩蔽・電子密度・温度プローブ
- ・主衛星は予定されるすべての観測機器・子衛星の余剰  
ペイロードには光学・電波・粒子観測機器等



目的：①実利用：GPS掩蔽データによる気象予測精度向上

②科学研究：分野横断的学際研究・国際標準電離圏モデルへの貢献

③工学利用：宇宙環境・宇宙天気・通信・高精度測位への利用

予算規模(b)：約80億(打上げ費は除く)

関係機関：JAXA、気象庁、NiCT、国内外大学、UCAR、IRI、URSI及び  
IUGG/EMSEV等

連絡先：JAXA 第一研究ユニット 児玉哲哉 kodama.tetsuya at jaxa.jp

#### 5.1.1.7 衛星・惑星内部構造推定を目的とした電磁探査 (EM survey of moon and planets)

電気伝導度は地震波速度構造や密度構造と独立な情報であるため、地球内部構造や地球を構成する物質、ダイナミクスを理解する目的で、電気伝導度探査が行われている。月の電気伝導度探査はアポロ計画によって行われたが、十分な精度で求められているわけではない。また、「かぐや」によって観測された磁場から核の大きさや表層の電気伝導度の見積もりがされたが、さらなる同種、または別の原理に基づいた観測により、これまでに得られた結果が確立される必要がある。また、惑星において慣性モーメント等の推定から得られた内部構造と比較するためにも、電気伝導度探査が重要である。

磁場観測のみによる電気伝導度探査では、月・惑星表面で観測された磁場と高高度で観測された磁場を用いて電磁感応を求める方法と、表面における複数点による磁場観測から電磁感応を求める方法の2つが考えられる。これらのためには、月・惑星表面における、数ヶ月以上の磁場観測が必要となるため、磁力計を月・惑星表面に設置する技術や厳しい温度条件下で利用可能な磁力計を開発する必要がある。

地球での電気伝導度探査では、電磁場の両方を計測する MT 法がしばしば用いられる。これは、磁場変動入力に対する電場の応答を直接的に観測することで、電気伝導度探査の非常に強力な手法となっている。しかし、地表での観測においても、長期間安定して良好な電場データを取得するためには、電極のメンテナンスが必要となる。

惑星／衛星での電場観測では、電極と大地との接地抵抗を低減する技術や、高入力インピーダンスの計測器の開発が必要となる。地上の観測では接地抵抗の軽減のために、銅-硫酸銅電極のような液体部分を含む電極に、粘土質の材質を付着させ、大地と接地させる。このような方法は、惑星／衛星での電場観測には用いる事ができないので、電極の材質そのものを含めた開発が必要となる。

上記に加えて、月や惑星表面で人工的に電磁場を発生させ、それらに対する電磁感応を観測する人工電磁場電気伝導度探査を行うことも検討に値する。このためには、人工電磁場発生源となる比較的大規模（直径数メートル以上）のコイルの展開方法の検討と、ローバー等の移動体に装着可能な小型電磁場発生源と観測装置の開発や、装着方法の検討が必要である。

予算規模：トータルで1億円以上  
関連機関：東京大学、東京工業大学など

## 惑星・衛星の電磁探査

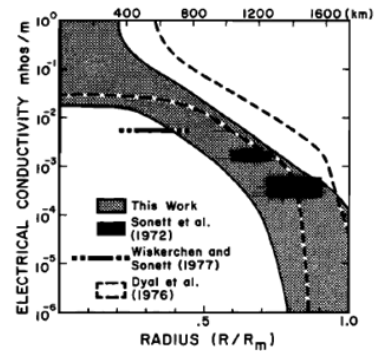
### ・惑星、衛星内部の電気伝導度探査の目的

- 測地学的観測(慣性モーメント等)とは独立な情報
- 惑星、衛星の温度構造、構成物質の制約
  - 表面付近の水の存在、メルトの存在
- 惑星、衛星熱史の解明

### ・現状: 月の電気伝導度構造

- Apollo: 高高度衛星+月表面での磁場観測 [マントル]
- Kaguya: 低高度衛星 [核の大きさ]

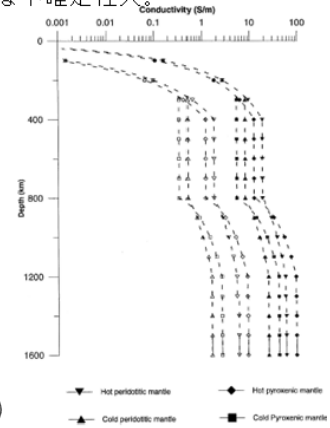
→ マントルの電気伝導度にも1桁程度の不確定性あり。表層 80 km は不確定性大。



月の電気伝導度構造 (Hood et al. 1982)

### ・将来: 月/火星表面での電磁場観測による電磁探査

- 複数点での磁場観測による電気伝導度構造 (C-response)
- 電磁場の同時観測による電気伝導度探査
  - MT 法、要電極と電極設置方法の開発
- 人工ソース電磁場探査
- 着陸機式/ペネトレータ式



火星の電気伝導度構造と物質/温度の対応(理論値)

Mocquet and Menvielle (2000)

連絡先: 清水久芳 (東京大学地震研究所)  
shimizu at eri.u-tokyo.ac.jp

### 5.1.1.8 地球磁場観測衛星 (Geomagnetic field observation satellite)

地球磁場の空間分布や数年程度の時間スケールを持つ地磁気永年変動を観測し、地球深部ダイナミクスを解明することを目的として、地球磁場観測衛星がアメリカやヨーロッパを中心として打ち上げ・運用されてきた。Oersted、CHAMP 衛星および、2013年に打ち上げられた3機の SWARM 衛星による連続したベクトル磁場観測により、1年程度の時間スケールを持つ永年変動（地球磁場の時間1階微分）や加速度（2階微分）の議論が可能となり、地球回転速度変動（lod 変動）との比較により、核のダイナミクスがあきらかになりつつある。地磁気永年変動や加速度変動を理解するためには、さらに長期の面的な観測が必要であるが、残念ながら、CHAMP 衛星は2010年9月に運用を停止し、Oersted 衛星も現在は地磁気強度の観測のみを行っているが、通常運用は終了している。

Oersted、SWARM 等の地球磁場観測衛星プロジェクトに個人、グループ単位で参加していた日本人研究者は存在し、また、日本発の、数百 km 程度の高度を飛行する地球磁場観測衛星計画の検討はされてきたが、観測は実現していない。日本単独での衛星開発や打ち上げは困難であるかもしれないが、高い空間解像度を持つ地磁気データを継続して取得するために、日本を中心とした国際的な地球磁場観測衛星計画の検討を継続する必要がある。

今後検討する項目としては、主に下記3点があげられる。

- 衛星の規模、数、観測期間に関する検討  
(大型／1機／長期 or 中小型／複数機／短期等の検討)
- 磁場センサー／周辺システムの小型化と DC 観測の高精度化に関する検討
- 地球観測衛星への相乗りに関する検討  
(衛星本体や他の機器の磁気ノイズを避けるための検討)

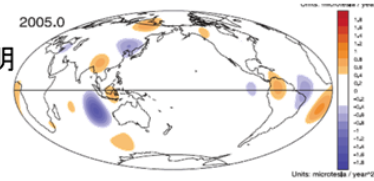
予算規模：1億円以上

関連機関：東京大学、東京工業大学、京都大学など

## 地球磁場観測衛星

### ・地球磁場の面的観測による地球内部ダイナミクスの解明

- 地磁気空間分布の詳細の解明 (MAGSAT)
- 地磁気永年変動と原因となる核のダイナミクスの解明
  - 地磁気ジャーク等の短期磁場変動
  - 地磁気変動加速度の空間分布
- マントル内部電気伝導度構造とマントルダイナミクスの解明



2005.0年における Br 成分の時間2階微分  
Finley et al. (2012)

### ・地球磁場観測衛星

Satellite	Operation	Inclination	Altitude	Data
OGO-2	Oct. 1965–Sep. 1967	87°	410–1510 km	Scalar only
OGO-4	Jul. 1967–Jan. 1969	86°	410–910 km	Scalar only
OGO-6	Jun. 1969–Jun. 1971	82°	400–1100 km	Scalar only
Magsat	Nov. 1979–May 1980	97°	325–550 km	Scalar and vector
Orsted	Feb. 1999–	97°	650–850 km	Scalar and vector
CHAMP	Jul. 2000– Sep. 2010	87°	350–450 km	Scalar and vector
SAC-C/Orsted-2	Jan. 2001–Dec. 2004	97°	698–705 km	Scalar only
Swarm	<del>2010–2014</del> 2013–	88°/87°	530/<450 km	Scalar and vector

・SWARM 以降のプロジェクトは未定

Olsen et al. (2009) に加筆

### ・地球磁場の継続観測

- 地磁気ジャークの面的な理解、再現性の解明
- 100年以上の時間スケールの永年変動(e.g. 西方移動)の解明
- マントル最下部電気伝導度構造の解明

### ・日本発の地磁気観測衛星の検討

- これまでのような大型／1機／長期 or 中小型／複数機／短期
- 地球観測衛星への相乗り
- 小型センサー／周辺システムの小型化、DC 観測の高精度化

連絡先：清水久芳（東京大学地震研究所）

shimizu at eri.u-tokyo.ac.jp

### 5.1.1.9 編隊飛行による地球電磁気探査衛星計画 (FACTORS)

#### 1. 目的・内容

極軌道（高度：350～3500km）を約1～50km(可変)の間隔で編隊飛行する2～3機の衛星群の直接・間接観測により、大気惑星、特に磁化大気惑星における宇宙惑星結合系として作用している普遍的で多様性に富む物理機構の定量的理解を得る事を目的とする。

地球周辺の宇宙空間と電磁的・物質的に接合している地球極域磁気圏・電離圏では、領域間結合系機構により、宇宙空間物質の加速・輸送、それらに関わる波動の励起・伝搬、大規模な電場構造、そして地球超高層と宇宙空間における電流が、多様な形態と様々な空間・時間スケールで発現し、相互作用機構を担っている。磁気圏プラズマダイナミクスにより駆動された現象が、磁力線により地球極域へと投影・伝達され、地球極域電磁気圏・超高層大気においては、宇宙プラズマ粒子の加速・輸送、電磁気圏電流系の形成・変動、オーロラ発光、地球大気プラズマの加熱・流出、あるいは中性大気加熱が引き起こされている。

このような宇宙惑星結合系は、系内・系外惑星を問わず、中心星(太陽)からの恒星風(太陽風)に晒される大気惑星、特に地球と同じ磁化惑星においては多様で普遍的な物理過程であり、それらの惑星周辺の宇宙空間を含む惑星圏の形成や惑星大気進化に深く関わる基本的な物理機構として作用する。特に地球極域電磁気圏の結合過程は、大気惑星における宇宙惑星結合系を代表するだけでなく、衛星による直接観測と、それらと相補的・多角的な地上観測との統合的観測体系により、最も精密で定量的に理解出来る探査対象である。

更に、ERG(あらせ)衛星計画において世界で初めて実証されつつある波動・粒子相互作用解析によるエネルギー授受機構の定量的評価の実績を継承し、電離圏イオンのプラズマ波動による加速・流出現象、極域磁気圏で励起するアルベン波やイオンサイクロトロン波によるプラズマ加速現象における素過程の定量的な物理機構の同定が可能である事も特筆される。これらの波動観測や波動粒子相互作用解析においては、複数衛星による同時観測が、波動のモード・伝搬特性、加速領域の空間分布・時間変動の定量的解析には不可欠となる。

また、従来の単独衛星による直接観測では時間変化と空間分布の分離がほぼ不可能であるのに対し、高時間・空間分解能によるオーロラ発光の2次元空間分布・時間変動の画像データとの比較・相関解析により、複数探査衛星での同時・多点観測データの取得・解析が実現すれば、自然事象の成長/励起・伝搬/輸送・消滅/減衰に関する定量的な評価が可能となる。これにより、広く宇宙科学全般において最も詳細で多面的な物理量(6桁に及ぶエネルギー帯域でのプラズマ粒子の速度分布関数の取得、7桁以上の周波数帯域におけるプラズマ波動の電界・磁界の多成分スペクトル・波形の計測、オーロラ・大気光の高速2次元単色撮像、等)を、統合的にもたらして来た実証科学としての宇宙空間物理学の分野に、まさに質的な転換をもたらすと期待される。

国外では編隊飛行衛星計画が着実に実現されて来ており、その学術的意義と将来展開の方向性は明瞭である。しかしながら、欧米に比肩する成果を輩出して来た日本の宇宙空間物理学分野には、未だに編隊飛行による探査衛星計画が実現しておらず、加えて、着実に実績を積み重ねつつ世界の第一線に並びつつある中国・インドにおける宇宙科学の将来計画に鑑みても、日本独自の構想と技術による編隊飛行探査衛星計画の早期実現が不可避である。

この状況下において、他の探査計画とは大きく異なる観点で、本探査衛星計画は独創的・進歩的である。それは、無衝突プラズマ系としての宇宙プラズマと弱電離プラズマ系としての地球超高層中性大気との領域間結合の直接探査である。無衝突系である磁気圏プラズマや電磁場・プラズマ波動が、磁力線に沿って地球極域電離圏・熱圏へと侵入・入射される過程において、衝突系であり弱電離プラズマを有する超高層大気領域との相互作用を経て、中性大気・プラズマ結合系を主体とする領域結合系を形成しているという事は、宇宙地球結合系を代表する特長の一つである。この様に、無衝突プラズマ領域から衝突系としての弱電離



プラズマ領域へと変化する結合系を、様々な物理量に渡って統合的・直接的に精密観測し得るのは地球超高層大気領域を対象とする本計画が唯一と言える。つまり、本計画のほぼ全ての高度領域において、最先端の学術的視点における科学観測意義・目的に合致した観測項目を提案している。

本計画では近地点高度 300~400km・遠地点高度 3500km の楕円極軌道に、3 軸姿勢安定方式の衛星を投入し観測・運用を行う。この軌道上での直接観測では 2 つの大きな特長を有する。第一点は、れいめい衛星と同様に、プラズマ粒子分析器が有する 360 度の平面状視野に磁力線を捕捉する姿勢制御により、ピッチ角分布を瞬時に取得可能で、1 台の分析器でも高い時間分解能を達成出来る事である。また、オーロラ発光を撮像している領域内にプラズマ粒子計測地点の磁気共役点を捕捉する姿勢制御を行う事で、オーロラ発光領域へ降下するオーロラ電子、あるいはオーロラ帯から上昇してくる電離圏イオンのエネルギー・ピッチ角分布を長時間に渡って同時計測する事も可能になる。次に、低高度での中性大気粒子計測においても、姿勢制御により衛星の進行方向を粒子分析器の視野内に捕捉し続ける事で、中性大気の密度・風速・温度計測が実現可能となる。この姿勢制御は近地点高度での空気抵抗を利用した微細な軌道修正運用にも有効である一方で、近地点・遠地点維持には衛星搭載推進系による制御も検討する必要がある。更に、イオンの旋回位相を分離しつつ、フラックスを計測するという世界初の旋回位相同時計測も可能で、波動粒子相互作用と併用する事で、波動・粒子間のエネルギー授受素過程の定量的直接観測が実現する。

前述の通り、本計画は ERG (あらせ) 衛星計画の発展型としても位置付けられる。ERG (あらせ) 計画では衛星観測・地上観測・モデリング/シミュレーションからなる三位一体型研究体制を新規軸の研究体制・手法として確立し、無衝突プラズマ系における波動・粒子間のエネルギー収支を定量的に評価出来る波動粒子相互作用解析として提案したが、本計画ではこれらを更に深化させ、世界的にも類を見ない研究活動を展開する事を目指している。従って、本計画は ERG (あらせ) 衛星計画の次のコミュニティーミッションとして分野の総意で提案されているものである。国外の宇宙空間物理学や超高層大気物理学の分野においても今後 10 年間に於ける最も重要な観測領域として広く認識されている。その中でも本計画は、宇宙地球結合系に作用する素過程の定量的・統一的理解を目指すという点で独創性・独自性が高く、広範な高度・領域・現象を網羅的、かつ統合的に観測する唯一の探査衛星計画として位置付ける事が出来る。また、本計画に衛星本体を提供し、同時打ち上げ・同時共同観測を行う可能性を見通し、スウェーデンの王立宇宙物理学研究所と国立宇宙機関も関心を持っており、実質的に推進する研究者間の検討・意見交換がなされつつある状況である。

本探査計画では、系内・系外の大気惑星において不変的な宇宙惑星結合系の定量的理解を得る事が目的であり、編隊飛行による探査計画という日本初の手法を基盤として実施する。更に、極軌道探査衛星計画においては世界初となる高時間・高空間分解能を達成し、衛星観測と相補的な地上観測、及びモデリング・シミュレーションとも連携することで、磁気圏・電離圏の領域間結合における多様な電磁的・物質的エネルギー授受過程の定量的理解、波動粒子相互作用におけるエネルギー授受の素過程の理解、無衝突プラズマ系から衝突系である弱電離プラズマ系へのエネルギー注入機構と中性大気の応答に関する統一的理解、をもたらすものと期待される。

## 2. 関係機関

名古屋大学、宇宙航空研究開発機構、京都大学、東北大学、東京大学、国立極地研究所、情報通信研究機構、電気通信大学、金沢大学、富山県立大学、大阪大学、九州大学、高知高専、スウェーデン王立宇宙空間物理学研究所 (Swedish Institute of Space Physics, IRF)、スウェーデン国立宇宙委員会 (Sweden National Space Board)

## 3. 予算規模

(c) 150 億円程度 (JAXA・宇宙研の公募型小型衛星計画)

#### 4. スケジュール

2018 年度に JAXA・宇宙研でワーキンググループ申請・承認

2022 年度に JAXA・宇宙研の公募型小型衛星計画として提案の結果、不採択

2022 年度末までに今後の方針（WG 解散、計画の再構築、など）を再検討（予定）

連絡先：平原 聖文（東海国立大学機構名古屋大学宇宙地球環境研究所）

hirahara at nagoya-u.jp

#### 5.1.1.10 NEO-SCOPE 計画 (The NEO-SCOPE Mission)

磁気圏・宇宙プラズマの大規模ダイナミクスは、これまで主として MHD 方程式に基づいて議論されて来た。しかしながら、磁気圏・宇宙プラズマにおいて多彩な現象がおこる真の原因を突き詰めていくと、全体としては大規模な運動であってもその中で鍵となる小さな領域が出現すること、その領域で鍵となるプロセスが発動すること、鍵プロセスはプラズマ粒子が MHD の制約から解き放たれて振舞うことに強く関係することが、Geotail, Cluster, THEMIS などによる最近の衛星観測から明らかになってきた。特に 1992 年打ち上げの Geotail 衛星以降、精密「その場」観測結果に基づいて MHD 近似の範囲を越えた議論が行われるようになった。2015 年 3 月に打ち上げられた米国の MMS 衛星は 4 衛星による編隊観測を電子スケールで展開している。鍵となるプロセスを理解するためには、鍵となる場所で、電子スケールでのプラズマ粒子の振る舞いを理解しなければいけない。しかしながら鍵となる場所の観測だけではスケールをまたがったダイナミクスの連携があるため十分とは言えず、鍵領域での電子スケールを分解すると同時に、イオンスケール、MHD スケールでのマルチスケール観測を行う必要がある。

NEO-SCOPE はポスト MMS のサイエンスを担うミッションである。比較的大きな親衛星 1 機と、100kg を少し超えるサイズの 4 機の子衛星で複数スケールの観測を目指した SCOPE 衛星計画は、日本だけでは実現不可能な規模に大規模化してしまった結果、海外協力の不調により検討半ばで実現を諦めざるを得なくなった。この、旧 SCOPE の反省の上に立ち、NEO-SCOPE では 50-100kg 級超小型衛星を本格的な磁気圏観測に投入することで、旧 SCOPE よりも小さい予算規模で SCOPE 以上の成果を目指す。現時点では高性能の 50kg 級衛星、およびそれに搭載可能な高性能観測装置の開発が途上であるため、ミッションの実現時期は確定できていない。

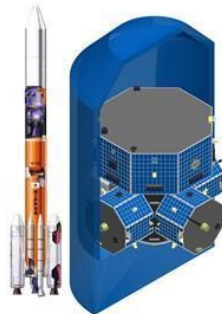
## SCOPE計画から NEO-SCOPE計画へ

### 磁気圏探査衛星・宇宙プラズマ物理 想定打ち上げ年 未定

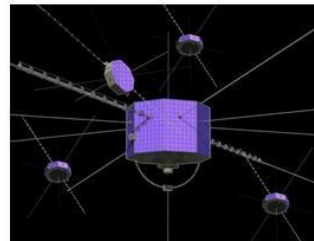
意義：(1) 太陽の影響下で大変動する太陽系宇宙環境を理解する。(2) 宇宙空間を満たすプラズマガスの物理を解明する。(3) プラズマ物理に基づいた新しい宇宙観を構築する。

目的：(1) 衝撃波、(2) 磁気リコネクション、(3) プラズマ乱流輸送において、ミクロ・スケールとマクロ・スケールの現象がどのように結合することで現象全体が作用するのか、宇宙ガスの振る舞いを支配することになるのかを、高性能「その場」観測から解明する。これら3つの現象の本質を理解することは、プラズマ宇宙観の構築にとって必須である。

## 旧SCOPE計画



H-2Aによる打ち上げを想定して検討。右は6機編隊をフェアリングに格納した状態。



親子衛星ペア(中心の二機)とそれを取り囲む3衛星からなるSCOPE編隊。親子間距離を10~100km、編隊の衛星間距離を100~5000kmとすることで、プラズマ物理における重要なスケールを網羅する。

構成：ダイナミックな現象が展開する地球周辺宇宙空間を宇宙プラズマ物理現象の実験室と見做し、そこでの精密な「その場」観測から宇宙空間ダイナミクスの根源的理解へと迫る。旧SCOPE衛星計画では、宇宙プラズマ現象「その場」で「同時マルチ・スケール観測」を実施するため、親子ペア衛星とそれを取り囲む子機3機の計5機で衛星編隊を組むことを想定していた。親子ペアがミクロ物理へのズーム・インを行うと同時に、3機編隊がその周辺場のマクロ物理を把握し、スケールの異なる物理プロセスが結合・連携する様相を解明する予定であった。しかしながら、SCOPE衛星計画は、日本だけでは実現不可能な規模に大規模化してしまった結果、海外協力の不調により検討半ばで実現を諦めざるを得なくなった。この、旧SCOPEの反省の上に立ち、NEO-SCOPEでは50-100kg級超小型衛星を本格的な磁気圏観測に投入することで、旧SCOPEよりも小さい予算規模でSCOPE以上の成果を目指す。

連絡先：齋藤 義文（宇宙航空研究開発機構）

saito at stp.isas.jaxa.jp

### 5.1.1.11 ジオスペース探査衛星(ERG)計画 (Geospace Exploration: ERG Project)

#### 1. 目的・内容

本計画は、放射線帯の高エネルギー粒子の輸送・加速・消失機構と宇宙嵐ダイナミクスの解明を目的としたミッションである。2016年12月に、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所によって、ERG(あらせ)衛星が打ち上げられ、現在ジオスペースの観測を行っている。また、日本国内をはじめとする研究グループによって、ジオスペースの地上観測網が整備され、新学術領域、特別推進、基盤S等の大型科研費等の支援も受けながらネットワーク観測を行っている。また、ジオスペースの様々な現象に関係したモデリング・シミュレーションの開発も行われている。取得されたデータや解析ツールは、ERGサイエンスセンター(<https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp>)から公開されている。これまで、本ミッションでは、関連する国外のジオスペース探査計画との積極的な連携を進め、キャンペーン観測や共同観測を多く展開してきた。今後も、関係するミッションとの共同観測を積極的に実施し、ジオスペース変動現象の包括的な理解を目指していく。また、国内外での講習会等の活動を通して、キャパシティビルディングにも貢献する。

#### 2. 関係機関

宇宙航空研究開発機構、東北大学、名古屋大学、東京大学、大阪大学、金沢大学、京都大学、富山県立大学、台湾 ASIAA、北海道大学、東京工業大学、電気通信大学、立教大学、情報通信研究機構、国立極地研究所、統計数理研究所、東京工科大学、大阪府立大学、大阪電気通信大学、吉備国際大学、九州大学、鹿児島高専、台湾国立成功大学、IRF、他国内外の多くの研究機関

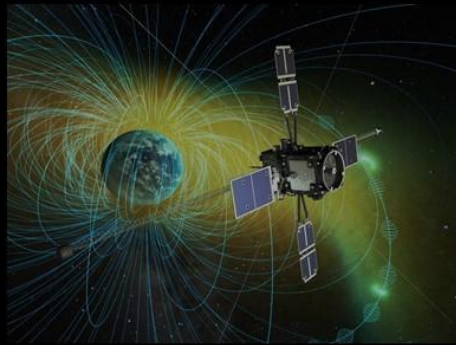
#### 3. スケジュール：実施中

2016年：ERG(あらせ)衛星の打ち上げ

現在、ERG衛星によるジオスペース観測、地上観測や他衛星との共同観測を実施中

## ジオスペース探査衛星(ERG/あらせ)計画: 放射線帯相対論的電子加速と宇宙嵐変動機構の解明

宇宙嵐時に大きく変化する放射線帯高エネルギー粒子加速、消失機構を  
衛星による直接観測、連携地上観測、モデリングの総合研究体制で解明



2016年12月 あらせ衛星の打ち上げ



衛星観測、地上観測、モデリングの総合研究体制

**年次計画 2016年：ERG衛星の打ち上げに成功**

**現在、衛星、地上観測群の連携によってジオスペース探査を行っている**

ERGサイエンスセンター：<https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp>

関連機関：宇宙航空研究開発機構、東北大学、名古屋大学、東京大学、大阪大学、金沢大学、京都大学、富山県立大学、台湾ASIAA、北海道大学、千葉大学、東京工業大学、電気通信大学、立教大学、情報通信研究機構、国立極地研究所、統計数理研究所、東京工科大学、大阪府立大学、大阪電気通信大学、吉備国際大学、徳山高専、九州大学、鹿児島高専、台湾国立成功大学、IRF

連絡先：篠原育（宇宙航空研究開発機構）

e-mail: [iku@stp.isas.jaxa.jp](mailto:iku@stp.isas.jaxa.jp)

三好由純（名古屋大学）

e-mail: [miyoshi@isee.nagoya-u.ac.jp](mailto:miyoshi@isee.nagoya-u.ac.jp)

### 5.1.1.12 Comet Interceptor 計画

#### 1. ミッション概要

Comet Interceptor は、長周期彗星（オールト雲領域から太陽系内側領域に飛来する彗星）に対し、複数探査機のフライバイによって電磁場・プラズマ観測、コマ物質観測、表面撮像などを行う。このサイエンスを実現するため、ターゲットとなる彗星が出現するまでの間はラグランジュ点で待機するという、新しいコンセプトの探査である。観測に成功すれば、太陽系初期に形成された小天体の形成環境・履歴に関する重要な知見を与えると期待される。プラズマ物理の観点では、衝撃波や太陽風 cavity, diamagnetic cavity といった、プラズマ境界を同時多点観測できるメリットがあり、衝撃波や中性粒子-プラズマ相互作用といった素過程の理解、さらには、その理解の惑星への応用が期待される。

本ミッションは、ESA において既に採択済みである。また、JAXA 側でも ISAS の SDR を通過し、提供する子機システム・観測器の開発を進めている。

探査機構成：

親機（ESA）、子機 1（JAXA）、子機 2（ESA）の 3 機構成の予定。

ペイロード：

ESA 側ではプラズマ観測器（粒子、電磁場）の他、中性粒子質量分析器、ダスト観測器、可視カメラ、分光計など。日本からは、磁力計、イオン質量分析器、可視カメラ、紫外カメラなどを搭載予定。

#### 2. 関係機関

JAXA, 立教大, 京都産業大, 国立天文台, 東大, 京大など

#### 3. 予算規模

10 億円以上 100 億円未満

#### 4. スケジュール

2029 年頃打ち上げ予定

#### 5. 連絡先

笠原 慧（東京大学大学院理学系研究科）

e-mail: s.kasahara at eps.s.u-tokyo.ac.jp



### 5.1.1.13 M-MATISSE 計画

#### 1. ミッション概要

M-MATISSE (Mars-Magnetosphere Atmosphere Ionosphere and Space-weather SciencE) は、ESA の 7 番目の中型ミッション (M7) の候補である。M-MATISSE は、2 機の周回衛星による編隊観測によって、火星の電磁圏・大気圏・宇宙天気を探査する計画である。M-MATISSE の主な科学目的は、太陽からのエネルギー入力と火星電磁圏・熱圏におけるエネルギー消費を親子衛星で同時観測することにより火星システムの大局的ダイナミクスを明らかにすること、火星の放射線環境を理解して宇宙天気予報の第一ステップを火星に展開すること、これらの中層・下層大気や地表への影響を明らかにすることである。

ESA の M7 は、2021 年 12 月に公募が発出された。これまで 3 度のダウンセクションが実施され、27 件あったミッション提案は M-MATISSE を含む 3 件に絞られた。今後、2026 年中頃に Phase-B1 に進む 1 つのミッションが選定される予定である。ミッション提案のプロセスにおいて ISAS から Letter of Endorsement を発行しており、日本の関係者は ISAS RG として活動を進めている。

探査機構成：

親機と子機の 2 機構成

#### 2. 関係機関

JAXA、東北大、阪大、東大、京大、東工大、極地研、NICT、京産大、奈良女子大など

#### 3. 予算規模

1 億円以上 10 億円未満

#### 4. スケジュール

2037 年頃打ち上げ予定

#### 5. 連絡先

寺田 直樹 (東北大学大学院理学研究科)

e-mail: teradan at tohoku.ac.jp

## 5.1.2.1 海洋科学掘削 2050 サイエンスフレームワーク

### 1. 目的・内容

深海掘削計画 (Deep Sea Drilling Program: DSDP) から国際深海掘削計画 (Ocean Drilling Program: ODP)、統合国際深海掘削計画 (Integrated Ocean Drilling Program: IODP)、国際深海科学掘削計画 (International Ocean Discovery Program: IODP) へと 50 年の歴史を持つ深海掘削科学は、日・米・欧 (カナダを含む) 主導のもと、中、韓、豪、印、ニュージーランド、ブラジルといった世界 20 カ国以上が参画する多国間国際共同プロジェクトである。2013 年 10 月からのプログラムが、2023 年に区切りを迎えるため、これまでの歴史を継承し、さらなる海洋掘削科学へ展開を図るべく、海洋科学掘削 2050 サイエンスフレームワーク (2050 Science Framework: Exploring Earth by Scientific Ocean Drilling) が 2020 年秋に出版された。世界各国から 650 名を超える研究者・技術者が議論を尽くし、科学コミュニティのアイデアを結集させて創り上げた 25 年を越える長期ビジョンを示している。科学掘削による地球システムの解明を目指し、7 つの戦略を骨子としている。1. 生命とそれを育む地球、2. 表層を覆うプレートのライフサイクル、3. 気候システム、4. 地球システムのフィードバック、5. 地球史のティッピングポイント、6. エネルギーと物質のグローバルサイクル、そして 7. 社会に影響を与える自然災害への挑戦である。

IODP では日本、アメリカ、ヨーロッパがそれぞれ提供するプラットフォームである科学掘削船を用いて、海底を掘削し研究を行っている。日本は地球深部探査船「ちきゅう」を主力船として、掘削やラボの運用を牽引してきた。海底広域研究船「かいめい」を用いた欧州との協力体制での調査航海の枠組みにも着手している。IODP に参加する研究者は、掘削によって得られる地層・岩石の柱状試料 (コア) や、掘削孔を活用した研究を行っている。科学掘削を通じて、地球科学や生命科学等における飛躍的な発展、パラダイムシフトが生まれた。地球電磁気学分野においても、海底磁気異常を担う海洋地殻の磁化構造の進化過程、変質過程等の解明を目指すとともに、過去の地球磁場変動の解明をより一層進めることを目指している。

国際深海科学掘削計画 (International Ocean Discovery Program: IODP)

J-DESC ホームページ (日本語): [http://j-desc.org/about\\_us/about-iodp/](http://j-desc.org/about_us/about-iodp/) IODP ホーム

ページ (英語): <https://www.iodp.org/>

### 2. 関係機関

文部科学省、海洋研究開発機構、日本地球掘削科学コンソーシアム

国内では 50 組織 (大学及び研究機関等)、賛助会員 6 企業、個人会員 5 名が参画し、海洋研究開発機構は総合的推進機関となっている。

### 3. 予算規模

100 億円以上

### 4. スケジュール・構想の成熟度

すでに予算がついて実施中の計画だが、個々の掘削プロポーザルは、予算要求のために計画を具体化しつつあるのものから予算要求中のものも含まれる。

連絡先： 木戸ゆかり

国立研究開発法人 海洋研究開発機構 (JAMSTEC)

研究プラットフォーム運用開発部門 (MarE3)

運用部 研究航海マネジメントグループ

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2番地15

e-mail: [ykido@jamstec.go.jp](mailto:ykido@jamstec.go.jp)

URL: <https://www.jamstec.go.jp/>

J-DESC 事務局: [https://j-desc.org/about\\_us/about-iodp/](https://j-desc.org/about_us/about-iodp/)

### 5.1.2.2 国際陸上科学掘削計画 (International Continental Scientific Drilling Program: ICDP)

#### 1. 目的・内容

国際陸上科学掘削計画 (International Continental Scientific Drilling Program: ICDP) は、各種陸上科学掘削計画を推進するための国際的な枠組みで、メンバー国は 23 カ国に及ぶ。近年、地球の内部情報について、物理探査調査、リモートセンシング、広域マッピング等で広域概査がなされ、地球の形成過程や構造をよりよく理解するためのツールとして、科学掘削が注目されている。掘削は、地球の形成過程を直接研究できる唯一の手段であり、また地表観測やリモートセンシング観測に基づく地質学的モデルを評価・検証するためにも役立つ。掘削から得られる情報は、地球の天然資源や地球環境を管理する戦略作成にあたって必要不可欠なものとなっている。ICDP では、プロジェクト提案の相互評価を行い、メンバーの年間寄付金から掘削資金を提供する仕組みである。

ICDP は、21 世紀の我々社会の基礎的な挑戦として以下の 3 つのテーマを掲げている。

- ・ 気候と生態系
- ・ 持続可能な地下資源
- ・ 自然災害

これらの挑戦は我々が生きる惑星地球の表層のみならず、地下から表層の至る所で起こる化学反応や物理運動、そして生物間相互作用などのダイナミクスと密接に関わり、時空間の広がり膨大で限りなく複雑である。SGEPSS 関連では、極域の氷床、火山、鉱床、湖沼等での地球電磁気学的調査や地下構造の解明や過去の地球磁場・気候変動の解明をより一層進めることに寄与している。

ウェブサイト：

J-DESC ホームページ(日本語)：<https://j-desc.org/icdp-2/>

ICDP ホームページ(英語)：<https://www.icdp-online.org/home/>

#### 2. 関係機関

文部科学省、海洋研究開発機構、日本地球掘削科学コンソーシアム（海洋研究開発機構内に事務局が置かれている）。

#### 3. 予算規模

1 つのプロジェクトは、1 億~数十億円規模

#### 4. スケジュール・構想の成熟度

すでに予算がついて実施済~実施中の計画であるが、各プロポーザルベースでは、構想段階のものから予算要求中のものもある。

ICDP の組織

理事会 (AOG)：出資国の代表により構成され、ICDP の政策を決定し、活動を監視する。

執行委員会 (EC)：メンバー各国から出される代表 1 名により構成され、計画全体の統括、プロポーザルの実行順位の決定、予算の配分、および各掘削の運営・実施に当たる。

科学諮問グループ (SAG) : 世界の主導的な研究者により構成され、提出されたプロジェクトを評価 (ピアレビュー) し、計画委員会に送る。

技術支援グループ (OSG) : プロポーザルを提出する人に技術的な助言を与えると共に、実際の掘削の管理、得られた試料・データの整理分配を行う。

連絡先 : 木戸ゆかり

国立研究開発法人 海洋研究開発機構 (JAMSTEC)

研究プラットフォーム運用開発部門 (MarE3)

運用部 研究航海マネジメントグループ

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2 番地 15

e-mail: [ykido@jamstec.go.jp](mailto:ykido@jamstec.go.jp) URL: <https://www.jamstec.go.jp/>

J-DESC ホームページ (日本語): <https://j-desc.org/icdp-2/>

ICDP ホームページ (英語): <https://www.icdp-online.org/home/>

### 5.1.2.3 太陽地球系結合過程の研究基盤形成 (Study of coupling processes in the solar-terrestrial system)

#### 1. 目的・内容

##### 【これまでの経緯】

本計画は、日本学術会議が2010年ごろに大型研究計画のマスタープラン策定を開始した当初から現在まで、引き続き提案を続けてきたもので、いずれの機会においても高い評価を得てきた。本題目名の研究計画としてマスタープラン2011に採択され、マスタープラン2014で重点大型研究計画（さらに、文科省ロードマップ2014に新規課題として採択）とされた。その後のマスタープラン2017とマスタープラン2020においても重点大型計画として高評価を連続して得てきた。さらに、第25期の日本学術会議が提唱する「未来の学術振興構想」（2023年版）の学術の中長期研究戦略においてグランドビジョン⑫：観測技術革新による地球システムの理解と地球変動予測への展開として掲載された。しかしながら、未だ我が国の大型計画としての予算を獲得できていない状況にある。一方で、本計画に含まれるEISCAT\_3DレーダーはEU諸国からの予算を得て建設が進められつつある。

文科省ロードマップ2023の公募に対しても、提案を行い現在、審査中である。ここではその概要を紹介する。本計画に含まれる各装置に関して、本文書の各所に説明がある（下記に各節の番号を示す）。

（参考）

第25期 未来の学術振興構想（2023年版）公表文書  
<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-25-t353-3.html>

##### 【計画概要】

太陽からの放射エネルギー・太陽風プラズマの流れと、それに対する地球大気圏・電磁気圏の応答過程を観測し、太陽地球系の結合過程を統一したシステムとして定量的に理解するとともに、人類の宇宙利用や地球大気変動の予測に貢献する。このため、我が国が得意とする太陽風から地球までの地上設置観測装置群を整備し、太陽風速度、極域の電磁気圏変動、赤道域の全地球大気上下結合、全緯度域の電離圏・超高層・中層大気変動を10年以上にわたり観測・長期モニタリングする。

- 1) 赤道 MU レーダー：インドネシアに赤道 MU レーダーを設置して総合観測拠点とし、対流圏から中層大気を経て超高層大気に至るエネルギー・物質の噴流・循環過程（赤道ファウンテン）を解明する。（5.1.3.2 参照）
- 2) EISCAT\_3D レーダー：6ヶ国共同で北欧に建設中の EISCAT\_3D レーダー計画に参画し、主として送信機の整備を担当する。太陽風エネルギー流入により激しく変動する極域の電磁気圏を高解像度で3次元観測し、太陽風エネルギーの流入と地球大気の応答過程を解明する。（5.1.2.4 参照）
- 3) 広域地上観測網：地磁気と大気発光現象の広域地上観測網を赤道から極域に展開し、中層・超高層大気の大気結合過程を解明する。（5.1.4.10 参照、5.1.4.11 参照）
- 4) 次世代太陽風観測装置：太陽風プラズマが電波天体（キューサー等）からの電波信号に生じさせるシンチレーションの受信装置（3点観測）を整備する。太陽風加速機構を明らかにし、太陽面爆発が地球に影響を与える規模と到来時刻の予報精度を飛躍的に向上させる。（5.1.4.7 参照）
- 5) 観測データ管理機構：大学間連携で運用中の「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究（IUGONET）」を活用して、多種多様な観測データの統合デー

データベース・解析ツールを構築し、国際共同研究に供する。(5.1.6.3 参照)

## 2. 関係機関

本計画の主たる実施機関は以下の通りである。

- 1) 赤道 MU レーダー  
京都大学生存圏研究所  
インドネシア国立研究革新庁 (BRIN)
- 2) EISCAT\_3D レーダー  
国立極地研究所  
名古屋大学宇宙地球環境研究所  
EISCAT 科学協会
- 3) 広域地上観測網  
名古屋大学宇宙地球環境研究所 (光学・電磁場観測網)  
九州大学国際宇宙惑星環境研究センター (地磁気観測網 (MAGDAS))
- 4) 次世代太陽風観測装置  
名古屋大学宇宙地球環境研究所
- 5) 観測データ管理機構  
IUGONET 運営協議会 (所属機関下記)  
京都大学生存圏研究所・京都大学理学研究科附属世界地磁気資料センター・  
京都大学理学研究科附属天文台・国立極地研究所・  
名古屋大学宇宙地球環境研究所・東北大学理学研究科・  
九州大学国際宇宙惑星環境研究センター

## 3. 予算規模

本計画の所要経費は総額 215 億円 (設備費と運営費 (10 年間)) である。

内訳

- 1) 赤道 MU レーダー : 120 億円
- 2) EISCAT\_3D レーダー : 40 億円 (日本の分担額)
- 3) 広域地上観測網 : 20 億円
- 4) 次世代太陽風観測装置 : 20 億円
- 5) 観測データ管理機構 (IUGONET) : 15 億円

## 4. スケジュール・構想の成熟度

- 本計画に対して国内外の研究コミュニティから支援を得ている。関連する学協会には、日本地球惑星科学連合 (略称 JpGU) 傘下の地球電磁気・地球惑星圏学会 (略称 SGEPS) および日本気象学会であり、電子情報通信学会にも関連が深い。国際的には ISC 傘下の SCOSTEP、URSI、IUGG (IAGA, IAMAS)、並びに ISWI である。
- 日本学術会議地球惑星科学委員会による「地球惑星科学分野における科学・夢ロードマップ 2020」の「1. 宇宙惑星科学」と「2. 大気水圏科学」に明確に位置付けられている。
- 参加研究機関はそれぞれの観測装置について概算要求を行っている段階にある。
- 赤道 MU レーダーは予算化から 3 年、地上広域観測網は予算化から 2 年間程度で装置類の設置を完了できる見込みである。EISCAT\_3D レーダーは第 1 段階の建設が開始され 2023 年には部分運用が開始されるが、当初計画を達成するためには、日本の貢献が必須である。



連絡先：山本 衛（京都大学生存圏研究所）  
e-mail: yamamoto at rish.kyoto-u.ac.jp

#### 5.1.2.4 EISCAT\_3D レーダー (EISCAT\_3D Radar)

##### 1. 目的・内容

スカンジナビア北部に設置された欧州非干渉散乱 (EISCAT) レーダーシステムに替わる、世界で初めての多点イメージングレーダー (EISCAT\_3D) を国際共同で建設・運用する。EISCAT 科学協会により、EISCAT\_3D レーダーの第 1 段階の建設が 2017 年 9 月から開始され、2024 年からの運用開始を予定している。第 1 段階では、主局のシーボトンと、2 つの受信局 (カイセニエミとカレスバント) を整備する。日本は EISCAT\_3D レーダーの送信系の開発及び部分整備を担当してきており、さらに第 2 段階における送信機増強への貢献を目指している。長年築いてきた国際共同の責任を果たし、EISCAT\_3D レーダーの完成に貢献すると共に、国内研究者が十分な観測時間を確保する上でも予算獲得が強く望まれる。

EISCAT\_3D レーダーの性能は、現行の EISCAT レーダーより 100 倍程度の向上が見込まれている。それにより、これまで成しえなかった電離圏物理量 (電子密度・電子温度・イオン温度・3 次元イオン速度) の立体観測を高い時間分解能で実現する。この EISCAT\_3D レーダーを中心とした拠点観測により、大気科学や太陽地球系科学、宇宙天気やレーダー工学等における様々な研究課題のブレークスルーを目指す。科学目標と機器概要、開発状況に関しては、「4.1.1 (2) 地上観測機器の開発」内の「多点フェーズドアレイ方式の非干渉散乱 (IS) レーダー」の項目を参照。

なお本提案は、日本学術会議 未来の学術振興構想 (2023 年版) のグランドビジョン 12「観測技術革新による地球システムの理解と地球変動予測への展開」に含まれる計画番号 98「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」による実現を目指している。(参照: 5.1.2.3 節)

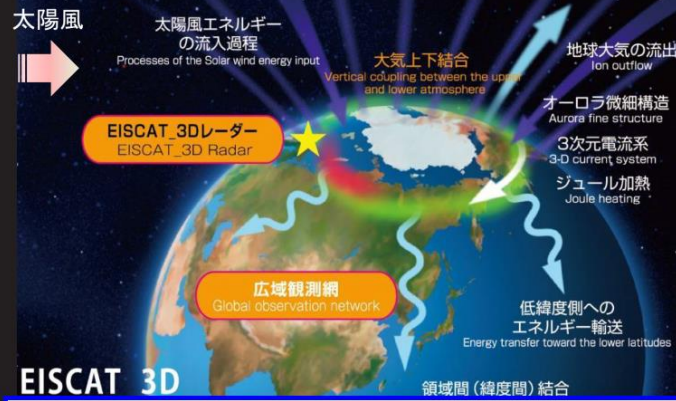
##### 2. 関係機関

EISCAT 科学協会には、国立極地研究所が EISCAT 国内代表機関として参画している。名古屋大学宇宙地球環境研究所をはじめとする全国の 17 大学・研究機関が現行の EISCAT プロジェクトに参画し、共同利用を実施している。国際的には、6 カ国 (日本、ノルウェー、スウェーデン、フィンランド、英国、中国) が EISCAT 科学協会加盟国として EISCAT レーダー群を維持・運用し、さらに准加盟国 (米国、ドイツ、韓国) によるレーダー実験が実施されている。さらに、ピアレビュープログラムと呼ばれる実験公募により、世界中の研究機関の研究者がレーダー実験に参加している。

##### 3. 予算規模

EISCAT 加盟国を中心とした各国による整備費支出を予定。総建設経費は約 160 億円。その第 1 段階においては、ノルウェー・スウェーデン・フィンランド・英国、日本の国際共同による約 600 MSEK (約 80 億円) の予算を用いて整備を進めている。さらに、国立極地研究所は、約 25 億円規模の整備予算申請を継続し、第 2 段階における送信機増強の実現を目指している。運用費として年間約 5 億円を必要としており、加盟国の分担金で支出する。日本は 15% 程度のレーダー利用時間割り当ての確保を目指している。

## 大型レーダー（EISCAT\_3D）による極域の磁気圏・電離圏 ・大気圏へのエネルギー流入と応答過程の解明



太陽風の粒子エネルギー流入によって極域に特有の現象が発生する。

- ・オーロラで代表される地球周辺プラズマ現象は秒単位の高速度で時間変動する。
- ・極域からは、地球大気の一部が宇宙空間に流出している。
- ・太陽風に起因する熱エネルギーや大気物質の変動は、下層の大気ならびに低緯度方向に伝わる。

これらの現象について、3次元立体構造を精密観測できる世界初の多局式大型フェーズドアレイレーダー「EISCAT\_3D レーダー」を国際協力で建設する。

EISCAT 3D

### EISCAT\_3Dレーダー

(設備総額160億円、日本分担35億円)

欧州非干渉散乱(EISCAT)科学協会(日本・中国を含む6カ国)が提案し、EU大型研究ロードマップ(ESFRI)に採択(2008年)、ESFRI-Landmark 認定(2018年)。2017年9月に整備着工、2024年から第1期運用を開始予定。

- ・ノルウェー/スウェーデン/フィンランド/英国の予算を基に建設中。国立極地研究所も概算要求中。
- ・国内体制: 国立極地研究所+名古屋大学ISEE

1

## EISCAT\_3Dレーダーの状況

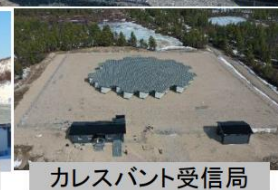
### 進捗状況

- ・現在3つのサイトにおけるアンテナユニットの整備を完了。2024年から部分運用を予定。
- ・日本は主要装置である送信モジュールの技術実証開発・製造(2016-2017年)、大量生産用送信機ユニットの部分整備(2018年以降)に貢献。
- ・「先端的レーダー研究推進センター」を極地研に設置(2022年)。EISCAT\_3Dレーダーの共同利用・共同研究体制を強化。

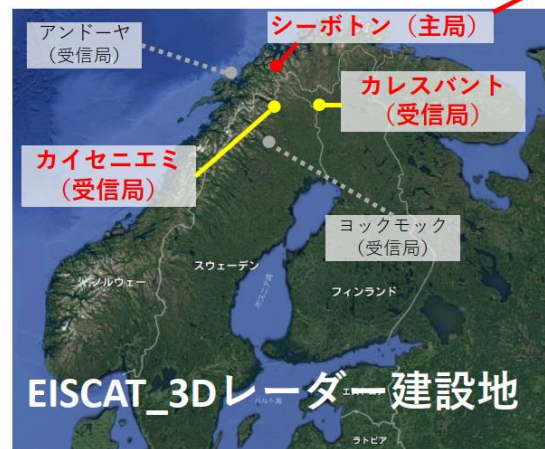
### シーボトンの主局アンテナ (直径約70m)



カイセニエミ受信局



カレスバント受信局



### EISCAT\_3Dレーダー建設地



EISCAT\_3Dの観測イメージ図



日本から提供した送信モジュール 2

連絡先: 先端的レーダー研究推進センター (国立極地研究所)

e-mail: arrc-all at nipr.ac.jp

### 5.1.2.5 南極昭和基地大型大気レーダー(PANSY)を中心とした南極重点研究観測 (Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar and JARE prioritized project)

#### 1. 目的・内容

日本の南極地域観測事業は 1956 年に開始され、これまで 60 年以上にわたって継続して実施されてきた。これまでに行われた研究観測や定常観測から得られたオゾンホールが発見、南極氷床深層掘削、隕石の大量収集などの数多くの成果は、国内のみならず国際的にも極めて高い評価を受けている。平成 21 年度に南極初の大型大気レーダーとなる PANSY レーダーの南極昭和基地への設置が認められ、平成 22 年度から 27 年度まで実施された第Ⅷ期 6 か年計画においては、重点研究観測「南極域から探る地球温暖化」のサブテーマ①「南極域中層・超高層大気を通して探る地球環境変動」の枠組みのもと、対流圏から熱圏／電離圏に至る幅広い高度領域における風速 3 成分や各種プラズマパラメーターの高精度かつ高鉛直・時間分解能な連続観測を開始した。これに加えて、昭和基地では PANSY レーダーと相補的なデータを提供する各種電波・光学観測が整備・運用されている。平成 28 年度から令和 3 年度までの第Ⅸ期 6 か年計画では、PANSY レーダーフルシステムによる観測を軸に、これらの相補的観測を組み合わせ、南極大気の力学や物質輸送等に関する精密科学を展開する重点研究観測「南極から迫る地球システム変動」のサブテーマ①「南極大気精密観測から探る全球大気システム」を実施した。これは、南極観測のみならず、国内外の機関と共同で全球ネットワーク観測を行い、高解像度大気大循環モデルを用いてこれらをつなぐ世界初の総合的な地球気候システム研究として展開された。さらに、令和 4 年度から開始された第Ⅹ期 6 か年計画では、重点研究観測「過去と現在の南極から探る将来の地球環境システム」のサブテーマ⑥「大型大気レーダーを中心とした観測展開から探る大気大循環変動」として、PANSY レーダーを中心とした大気観測を継続発展させ、数分から太陽活動周期 11 年の幅広い周期帯の南極大気現象を捉えるとともに、各大気現象の年々変動とメカニズムを明らかにするための研究観測を実施している。

これまでの南極重点研究観測では、対流圏・成層圏・中間圏を主な対象として、軸となる PANSY レーダーフルシステムによる連続観測に加えて、種々の光学・電波同時観測を展開することで、成層圏極渦、極中間圏雲などの南極固有の大気現象やブリザード・ブロッキングなどの下層大気現象と中層・超高層大気の上下結合の解明を進めてきた。また、近年発見された冬極成層圏と夏極中間圏を結ぶ両半球結合過程のメカニズムを探るための基礎となる重力波観測データを取得するため、南極の他国基地および中低緯度・北極域をつないだ大型大気レーダー国際共同によるキャンペーン観測 (ICSOM: Interhemispheric Coupling Study by Observations and Modelling) を計 7 回主導した。関連して、全大気モデルによる長期シミュレーション実験データに基づいて、両半球結合の経路や中層大気中で発生する各種波動の重要性を明らかにし、新たなメカニズムを提案した。また、中間圏下部熱圏を含む高解像大気大循環モデルを用いて衛星等の観測データを同化し、現実大気の高解像グローバルデータを作成する開発研究が行われており、ICSOM による国際共同精密観測データを組み合わせることで、重力波スケールから惑星規模までの全中性大気の階層構造や大気大循環の仕組みの定量的解明が期待される。また、PANSY レーダーでは対流圏・成層圏・中間圏の基本観測に加えて、南極では初となる非干渉性散乱エコーの観測 (とそれを用いたプラズマパラメータ推定) や、周波数領域干渉計と多チャンネル観測を組み合わせた 3 次元イメージング、沿磁力線不規則構造の観測 (による電場の推定) などがキャンペーンベースで実施されている。基本観測である中間圏観測の際に、副産物として行う流星風観測を実用化し、下

部熱圏域も常時連続観測が実現している。また付加受信装置を用いた境界層観測も計画されている。さらに、高分解能気温センサーを搭載したラジオゾンデや無人飛行機との同時観測による大気乱流の研究、スーパープレッシャー気球による面的観測と組み合わせた大気重力波の研究など、南極では初となる様々な研究観測が実施されている。さらに、2023年からは公募による共同利用を開始し、国内外の研究者と共同で流星ヘッドエコー観測や観測手法開発を実施する予定である。また、PANSY 計画では第 VIII 期中の 2015 年から第 X 期中の 2027 年にかけて、太陽活動の 11 年周期を含む約 12 年のフルシステム観測を予定しており、それ以降も規模を縮小した部分システムによる観測を継続する予定である。これらの高時間分解能な長期連続観測データを用いた広範な周波数領域における変動成分の抽出と異なるスケール間の遷移過程や相互作用の解明も期待される。第 X 期においては、大気大循環変動の理解を傘テーマとし、以下のような研究展開を行う。

### 1. 大気大循環変動のメカニズムの理解

気候変動の理解には、気候決定の重要要素である大気大循環の変動の定量理解が不可欠である。大気大循環は、様々な時間空間スケールの大気現象の相互作用の結果として生成維持されているため、その変動のメカニズムの理解には、総合的な大気観測の実施が本質となる。第 X 期においては、PANSY レーダーを軸に蓄積してきた長期連続高解像度観測データをもとに大気大循環変動に取り組む。とりわけ観測の不足する大気重力波を中心に、その発生、伝播、砕波の物理メカニズムや大循環変動に対する役割を研究するとともに、カタバ風・極成層圏雲・極渦・オゾンホール・成層圏突然昇温・極中間圏雲などの南極固有の現象も研究対象とするほか、対流圏界面折込み現象や乱流における輸送・混合過程にも光をあてる。さらに、以下に示す PANSY 高機能観測、各種電波・光学観測装置、ネットワーク観測、相補的高解像度大気大循環モデルを組み合わせた研究体制を構築する。

### 2. 高機能観測および電波・光学同時観測の充実による大気現象の変動の多角的理解

様々な南極固有現象の変動の深い理解には、PANSY レーダーの対流圏から下部熱圏域の定常観測に加えて、各種高機能観測と相補的各種電波・光観測装置による多角的観測が有効である。PANSY レーダー観測の電離圏観測を拡充するとともに、イメージング手法をもとにした高空間分解能観測を実施し、付加受信装置による境界層内の観測も行う。また、第 IX 期までに導入された大気光イメージャ、ミリ波分光放射計、MF レーダー等の観測を継続・強化する。さらに、PANSY レーダーを、気象予報のための装置としてとらえ、そのデータの局所的・遠隔的影響を、データ同化システムを用いて探る。

### 3. 新たな面的観測展開による南極広域大気理解

気候変動の実態を捉えるには、気温・風などの基本的観測を長期にわたって行うことが必要となるが、南極域は圧倒的に観測データが不足している。第 X 期では PANSY レーダーを中心とした昭和基地拠点における超精密観測に加え、面的展開として、南極上空の風に乗って南極域全域を周回し長期間の観測可能とする気球（スーパープレッシャー気球）を開発し、季節ごとに実施する。第 X 期にとどまらずより長期的な実施を視野に入れている。

### 4. 太陽地球系としての地球外環境に対する極域大気応答の解明

極域では、宇宙空間からのエネルギー注入や流星ダスト等の地球外物質の流入による大気組成やエネルギー収支の変動が起こる。長期的な地球環境変動を予測するには、地球近傍の宇宙空間も含めた地球システムの精密な理解が欠かせない。第 X 期では、第 IX 期に開始した光電波観測や衛星観測等に加え、宇宙線観測の拡充も行い、地球外起因の現象調査を継



続・発展させる。

## 5. 国際協同ネットワーク観測と高解像度大循環モデルの結合による総合研究

PANSY レーダーを要として、数年にわたり我が国主導で行ったグローバルな国際協同大型大気レーダーネットワーク観測データを生かし、精密な南北両半球結合メカニズムの解明を行う。データ同化による地上から下部熱圏までの全中性大気の長期再解析データを作成し、これを用いた高解像大気大循環モデルによる重力波を含む観測の再現を行い、季節性や年々変動の視点で研究する。この国際協同観測には、大気光イメージャネットワーク (ANGWIN) による相補的観測も含まれる。PANSY レーダーおよび ANGWIN の観測を継続し、並行して南極周回気球観測を加え、高解像度大気大循環モデルを用いた研究と連携することで、地上から下部熱圏までの全球的な定量的な運動量・エネルギー収支の解明が期待される。

### 1. 関係機関

国立極地研究所、東京大学、京都大学、名古屋大学、東京都立大学、信州大学、明治大学、立教大学、電気通信大学

### 3. スケジュール

2022～2028 年：南極地域観測第 X 期 6 か年計画重点研究観測

～2027 年：PANSY レーダーフルシステム観測

2027 年～：PANSY レーダー部分システム観測

連絡先：佐藤薫（東京大学大学院理学系研究科）

e-mail: kaoru at eps.s.u-tokyo.ac.jp

堤雅基（国立極地研究所）

e-mail: tutumi at nipr.ac.jp

富川喜弘（国立極地研究所）

e-mail: tomikawa at nipr.ac.jp

## 5.1.2.6 赤道MUレーダー (Equatorial MU Radar)

### 1. 目的・内容

#### 【設備の概要】

生存圏研究所の最大・最重要な海外研究拠点である赤道大気レーダーの飛躍的な拡充をめざし、MUレーダーと同等の感度を有する高機能大気レーダー「赤道MUレーダー」をインドネシア共和国に設置する。本装置は、多チャンネル・多周波数の送受信機能と高度な信号処理技術により、地上から超高層大気に至る広領域の大気現象を3次元イメージング観測する。装置概要は、1045台のクロス八木アンテナが略円形敷地内に配置された「アレイアンテナ」、各アンテナ基部に設置された同数の「送受信モジュール」、ソフトウェア無線技術を駆使して多チャンネル・多周波数の変調パルスを生成し受信信号を復調し信号処理するサブシステムと信号の分配・合成回路等から構成される「多チャンネル変復調・データ処理装置」である。本装置は高度化する大気微細構造の観測ニーズを満足するために必要不可欠であり、導入によって、地球環境変化の鍵を握る赤道域大気現象の微細構造を立体可視化して捉えることができるようになる。

なお、赤道MUレーダーは、日本学術会議マスタープラン2020の重点大型研究計画である計画番号18「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」の設備群に含まれている。さらに、現在公募が行われている日本学術会議「未来の学術振興構想」においても、同名称の計画の一部として提案される。(参照：5.1.2.3節)

#### 【導入の必要性等】

わが国は、MUレーダー(中緯度域の大気レーダー;1984年設置)、南極昭和基地大型大気レーダーPANSY、赤道大気レーダーと、低緯度・中緯度・高緯度域にそれぞれユニークな観測装置を有している。しかし赤道大気レーダーは他の2者より感度が1/10と低くバランスを欠く状況である。赤道域は太陽放射エネルギーを最も強く受ける領域であり、地球大気の種類現象の駆動源であって地球環境変動研究上の最重要地点である。特にインドネシア域は太陽光による島嶼(とうしょ)の加熱と周辺の海洋からの水蒸気供給によって、地球上で最も活発な対流現象が発生しており、この地域の大気諸現象が日本の気象・気候変動に与える影響も小さくない。「赤道MUレーダー」を用いてインドネシア域赤道大気の観測感度と機能を飛躍的に高め、赤道の下層大気で発生した大気波動が上方へ伝搬し上層大気の運動を変化させる様子など、赤道を中心とする地球大気の上下結合すなわち「赤道ファウンテン」と呼ぶべき大気の構造・運動の解明を進めることが必要不可欠である。

高感度の「赤道MUレーダー」によって、世界で初めて、地理赤道上における中間圏(高度60~100km)の大気乱流観測と、電離圏からの超微弱なインコヒーレント散乱の観測が可能となる。またレーダーイメージングによって地球環境変化の鍵を握る赤道域大気現象の微細構造を立体可視化して捉えることができる。以下のような研究の進展が期待される。

- ・対流圏界面近傍・中間圏を含む下層・中層大気のダイナミクスの解明
- ・対流圏・下部成層圏における乱流層の微細立体構造の解明
- ・地球温暖化にも関係する大気微量成分の鉛直輸送に関する研究
- ・電離圏コヒーレント散乱の微細立体構造の解明
- ・流星・スペースデブリの微細立体構造の解明
- ・新しいイメージングレーダー技術の開発研究

### 2. 関係機関

京都大学生存圏研究所

インドネシア国立研究革新庁(BRIN) 【相手国の協力機関】



### 3. 予算規模

概算要求額（設備費） 100億円  
（運営費：10年間で20億円）

## 赤道MULレーダーの具体化状況

### • 設備計画

- 用地は確保済。工事のための環境影響評価、工事許可の合意済。
- 赤道大気レーダー（EAR、2001年完成）の北側に整備する。
- 詳細設計が終了しており、建設開始から約12ヶ月で観測開始できる。

### • 運用体制

- 15年以上に亘って、EARをインドネシア航空宇宙庁（LAPAN）と共同運営。
- 赤道MULレーダーに関し、インドネシアの研究・技術高等教育省（RISTEK-DIKTI）大臣と2回面会し、対応責任機関をLAPANとすることが決定済。
- LAPANと計画推進で合意済（2014年）
- インドネシア側の要請を日本大使館を通じ文科省に伝達済。
- 日本側：設備費、運営経費（電気代、装置維持費、共同研究経費等）
- インドネシア側：用地提供、観測所の設置、研究者・観測要員の配置等、既にEARのために体制構築済。



連絡先：山本 衛（京都大学生存圏研究所）  
e-mail: yamamoto at rish.kyoto-u.ac.jp

### 5.1.3.1 日本列島周辺での大規模アレイ状電磁観測計画 (Project “JEMINI” : Japan Electro-Magnetic Imaging with Network observation In-depth)

#### 1. 目的・内容

プレート沈み込み場の 1 つである日本列島とその周辺海域では、地震や火山活動などの地球科学的活動が極めて活発であり、そこには地殻やマントル内の流体の寄与が指摘されている。そこで本計画では、日本列島の海陸を覆うような、大規模アレイ状の地球電磁気観測を実施して、地下の 3 次元電気伝導度構造を解明し、流体の分布や地殻活動への寄与について制約を与えることを目的としている。

日本列島周辺に沈み込むプレートは 1 枚ではなく、年代の違うプレートが重なって沈み込むなど、立体的で複雑な沈み込み場となっている。日本列島規模の 3 次元地下構造を把握することは、沈み込みに伴う諸現象を解明するために必要であり、これまでに面的な地震波観測や地殻変動観測により、3 次元速度構造モデルや地殻変動モデルが提案されている。しかし、これらとは独立な物理量である電気伝導度の 3 次元構造は未解明であり、地下の温度構造や地殻・マントル内の流体分布について制約を与えるために必要となっている。

一方、海外では大規模アレイ状電磁気観測が精力的に実施されている。例えば北米における USArray、中国大陸における SINOPROBE、イベリア半島における Topo-Iberia など、3 次元地下構造解明を目指した大型プロジェクトが大きな成果を上げている。これらを受けてその他の国でも同様の計画を検討中であり、例えばオーストラリアでは AuScope 計画が進行中である。

そこで JEMINI 計画（仮称）では、日本列島の陸域～沿岸海域を 50km 間隔で覆い尽くすように観測点を配し、電磁気観測を実施し、地下での電磁誘導現象を明らかにすることを計画している（別図）。陸域においては既存の電磁気観測データを補うように観測を行う。また海底については 10 台以上の海底観測装置を巡回させ、10 年程度をかけて日本の周辺海域でのデータ取得を行う。

#### 2. 関係機関

SGEPSS 分科会 CA 研究会に参加する大学・研究機関

（北海道大、東北大、秋田大、東京大、東京工業大、千葉大、京都大、大阪市立大、神戸大、鳥取大、高知大、産業技術総合研究所、国土地理院、気象庁、海洋研究開発機構など）

#### 3. 予算規模（(b) 10 億円以上）

・ 観測機器開発費（陸上用、長周期磁力計 x20 台）	1 億円
・ 観測機器開発費（海底用、海底電位差磁力計 x40 台）	4 億円
・ 観測消耗品（海底用、年間 30 点、年間 3000 万円）	3 億円/10 年間
・ 旅費（野外観測、学会発表など、年間 1500 万円）	1.5 億円/10 年間
・ 人件費（データ整理、解析、年間 2000 万円）	2 億円/10 年

#### 4. スケジュール

2013 年度～2017 年度：

既存の地下比抵抗断面の整理（地殻比抵抗構造データベースの構築）

観測地点データベース構築のためのデータ収集

2018 年度より当面：

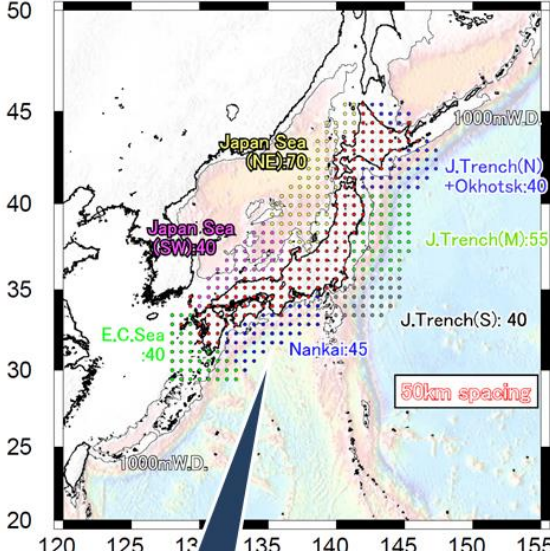
既取得データの整理・データベースの構築、フィージビリティスタディー

その後：東北地方（太平洋・日本海側）を中心とした海陸での電磁観測の実施

近畿・中国・四国地方（太平洋・日本海側）を中心とした海陸での電磁観測の実施

その他の地域（北海道、九州、中部日本）での海陸での電磁観測の実施

### JENINI計画 - 日本列島周辺での大規模アレイ状電磁観測 (Japan Electro-Magnetic Imaging with Network observation In-depth)



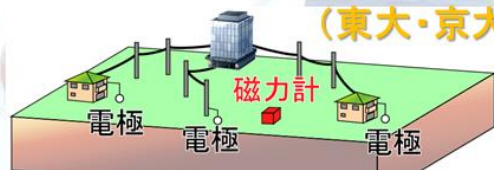
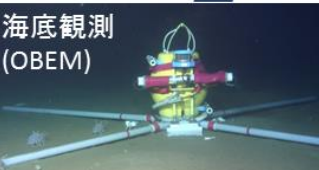
日本列島の海陸を覆うような  
大規模アレイ状の  
地球電磁気観測を実施

↓

3次元的な地下電気伝導度構造  
を解明し、流体の分布や地殻活  
動への寄与を明らかにする。

年次計画  
2013年より当面：既存データの整理、事前検討  
その後：東北日本での海陸電磁観測  
：西南日本での海陸電磁観測  
：その他の地域での海陸電磁観測

関連機関：SGEPSSCA研究会  
(東大・京大・JAMSTECほか)



海底観測  
(OBEM)

陸上観測  
(Network-MT)

連絡先：後藤忠徳（京都大学工学研究科）  
goto.tadanori.8a at kyoto-u.ac.jp



### 5.1.3.2 次世代太陽風観測装置による革新的太陽圏科学の実現 (Next generation solar wind observation system)

#### 【内容】

太陽の大気コロナは数 100 万度もの高温に保たれており、コロナのプラズマ大気の一部は、超音速の風「太陽風」となって宇宙空間へと流出する。太陽風の速度は 300km/s から 800km/s 程度まで領域によって大きく変化し、太陽圏を満たしている。この太陽風を加速するメカニズムは詳しく分かっておらず、太陽物理学・宇宙空間物理学における共通の問題として活発に研究が行われている。また、太陽風の変動や突発的擾乱は地球・惑星の周辺環境や大気進化に影響を与える。太陽風の理解とその予報は情報通信を始めとして急速に宇宙に進出する社会基盤にとっても重要となっている。本提案では (1) 太陽風がどうやって加速され宇宙空間へと伝搬していくのか、という太陽物理学最大の未解決問題「太陽風加速問題」を解明すること、そして (2) 太陽風のリアルタイム予測による宇宙天気予報の実用化・高精度化を通じて社会に貢献すること、という 2 つの課題を達成することを目指す。太陽風は電離した大気の塊であり、電波を散乱する性質がある。この惑星間空間シンチレーションを地上電波観測から捉えることは、太陽風のグローバルな構造を導出できる有効な手法である。本研究では国内 3 箇所に 327MHz 帯域に感度を持つ広視野大口径なアレイアンテナを設置し、多方向に存在する電波天体を一度に観測することで、既存装置の 10 倍の太陽風速度データを創出する。このデータから世界で初めて太陽表面における太陽風の流源の空間分布を分解し、その加速過程を解明する。更に本装置で得られる太陽風のリアルタイムデータを太陽圏の磁気流体シミュレーションに同化することで、太陽風の擾乱現象が地球に到来する時刻を劇的に向上させる。

#### 【予算規模】

- 約 20 億円 (建設費約 15 億円、運用経費約 5 億円/20 年)

#### 【関係機関】

名古屋大学宇宙地球環境研究所 (日)、UCSD、UAH、SwRI (米)、UNAM (メキシコ)、Lebedev Physical Institute (露)、など

#### 【時間軸】

2021 年～2020 年代前半 : 全体の数%の規模のアレイの建設、観測  
2020 年代半ば～2020 年代後半 : 1 基地局 (富士) におけるフルサイズアレイの開発  
2020 年代後半～2030 年代前半 : 2 基地局 (木曾・豊川) におけるフルサイズアレイの開発



## 次世代太陽風観測装置による革新的太陽圏科学の実現

**本設備の特徴：**

- ・平面フェーズドアレイと独自に開発したデジタル信号処理装置で高い感度で複数の方向を同時に電波観測が可能。
- ・**既存機の10倍**の太陽風観測性能を達成。
- ・駆動部が無く安定した運用と維持費の低コスト化が可能。

**科学目標：「太陽風の加速問題」の解明**

- ・太陽・恒星から秒速数100kmもの超音速の風が発生するメカニズムは全くの未解明（＝宇宙物理の最重要未解決問題の一つ）。従来の約3倍の空間分解能から世界で初めて太陽風の3次元分布と、その流源の加速領域の構造との詳細な比較が実現。太陽風の宇宙空間でのダイナミクスや加速メカニズムを解明。
- ノーベル賞級の成果を創出**

**社会貢献：**

- ・太陽風によって地球の周辺環境に大きな擾乱が発生し、情報通信などの経済活動に深刻な影響が発生。
- ・太陽風の予報（＝宇宙天気予報）が緊急の課題。
- ・本設備のデータを用いた独自のデータ同化シミュレーションで世界最高精度の太陽風予報を実現。
- 宇宙インフラの安定・防災に貢献**

連絡先： 岩井一正（名古屋大学宇宙地球環境研究所）  
 e-mail: k.iwai@isee.nagoya-u.ac.jp

### 5.1.3.3 多点地磁気観測ネットワーク MAGDAS・短波帯電離圏観測 FM-CW レーダーによる広域ネットワーク磁場・電場連携観測 (Cooperative observations with MAGDAS and FM-CW)

#### 1. 目的・内容

高移動性・小型化・廉価化による多点地上地磁気観測、地磁気微小変動観測に基づくグローバルな地球電磁場環境の変動の定常監視システムを実現してきた。九州大学国際宇宙惑星環境研究センターは、その前身となる宙空環境研究センター、国際宇宙天気科学・教育センターの時代を経て、過去 40 年以上にわたり、多点地磁気観測網 MAGDAS プロジェクトを実施し、太陽風擾乱エネルギーの赤道域への浸入過程の理解において成果をあげてきた。一方で、低出力高利得、低コスト、移動性に優れた短波帯電離圏観測 Frequency-Modulated Continuous Wave (FM-CW) レーダーによる多点電離圏観測を国内外に展開し、電離圏の電場推定ならびにプラズマ運動の計測を実施している。FM-CW レーダー観測を MAGDAS 観測と組み合わせることにより、超多点地磁気観測ネットワークによって捉えられた全球的な地磁気擾乱の極域から磁気赤道域への伝搬過程や、地磁気変動の励起源が磁気圏起源か電離圏起源といった詳細特定までを可能とする。

本観測計画では、MAGDAS・FM-CW 広域ネットワーク観測を通して、下記のグローバルな電磁エネルギー結合系の理解を目指している。

- (a) 宇宙空間（磁気圏）を横切って直接電離圏・地上へと伝達される「太陽-地球系結合」
- (b) 極域に流入してくる電磁エネルギー電離圏を介して全球へと伝わる「面的結合」
- (c) 気象変動などの下層大気擾乱により励起された重力波や潮汐波が電離圏まで到達し有限な磁場振幅を励起する「上下結合」

このように、3 次元的な結合過程を把握することで、太陽表面爆発が及ぼすと地球システムへの影響、気象現象・長期気候変動と太陽活動の関連性、超高層大気を含む物質・エネルギーの全球循環を明らかにすることを目的としている。

また、この広域ネットワーク観測は太陽地球系結合過程のフロンティアを切り拓く重要なツールに加えて、日々アーカイブされる地磁気と電離圏のビッグデータの宇宙天気概況・予報へ利活用に関する宇宙天気インフォマティクス研究も行なっている。

ICT 情報通信技術の進展や計測技術の高度化に伴い、太陽地球系を取り巻く観測データはビッグデータ化してきた。一方で、近年の人類による宇宙進出や利活用を背景に、宇宙天気環境のより高精度な把握や予測が重要となっている。

膨大に蓄積されている宇宙天気ビッグデータから日々の宇宙天気環境と類似した情報や特徴を高速かつ高精度に取り出し、情報を精査し、我々の安心・安全な宇宙活動へフィードバックする新たなしくみを創成することを目指している。

#### <多点地磁気観測ネットワーク MAGDAS について>

MAGDAS は、高緯度から中低緯度領域、磁気赤道領域に広がる全球的磁場観測網であり、その観測拠点の整備に特徴がある。

特に、磁気赤道領域は太陽風-磁気圏-電離圏-大気圏結合系の終着点であり、宇宙天気現象の様々な様相が磁気赤道特有の地磁気変動の異常増幅・減衰成分として観測される特異な領域である。

210 経度帯ネットワークをつうじて、緯度間結合を捉え、磁気赤道ネットワークをつうじてその全球的な広がりを把握するためのネットワーク構築に取り組んでおり、取得されたデータの利活用により、

- ・ EE-index の作成による宇宙天気監視モニタリングシステム構築
- ・ 磁場変動データによるプラズマ圏密度診断



- ・気象現象・長期気候変動と太陽活動の関連性
  - ・超高層大気を含む物質・エネルギーの全球循環
  - ・太陽表面爆発が及ぼすと地球システムへの影響
- 等の、様々なプロジェクト研究を推進する。

#### 〈短波帯電離圏観測 FM-CW レーダーについて〉

FM-CW レーダーの特徴はイオノゾンデ観測とドップラー観測の 2 種類に観測モードを兼ね備えている。前者は、その観測データを可視化したイオノグラムから電離圏電子密度の高度プロファイルや、その時間変動から侵入電場の推定が可能である。後者の観測モードでは、電離圏プラズマの鉛直運動速度を推定できる。FM-CW レーダーは、国内・海外の計 4 拠点で観測運用を行っており、昼一夜間電場侵入の関係性の把握を可能とする。現在は、特に下記の課題に取り組んでいる。

- ・FM-CW レーダー受信機のデジタル化・小型化

既存システムは、従来のアナログシステムにおいては小型であるが、デジタル化による更なる可動性の向上を目指している。特に、受信部に関して、ソフトウェア無線技術を利用して、ソフトウェアを変更すること複数の通信方式を変更できる受信システム整備を行なう。

- ・自動制御観測

FM-CW レーダーの 2 種類の観測モードの切り替えを既存の事前スケジューリング方法から、準リアルタイム電離圏環境に応じた自動切り替え方法へと拡張する。これまでに蓄積された電離圏ビッグデータを利活用して、機械学習、強化学習といった、数理・データサイエンス・AI 技術を応用した FM-CW 自動制御システムの開発を行う。

- ・複合電離圏観測による電離圏じょう乱現象の定常モニタリング

上記の受信機開発に関連して、FM-CW レーダーに加えて、GPS シンチレーション計測を併せもつ受信システムと、地磁気 MAGDAS ネットワーク観測を組み合わせた複合電離圏観測を行う。特に、MGADS・EE 指数モニタリングを活用した磁気赤道域プラズマバブル発生・消失メカニズムの理解や、低緯度・磁気赤道域における電波伝搬障害となるスプラディック E 層の定常モニタリングを実施する。さらには、機械学習ベースの一般物体検出技術やグラフ理論を応用して、電離圏イオノグラム画像からの電離圏じょう乱現象の特定や物理パラメータの読み取りや、地磁気データの特徴分析などの高速化・高精度化を行う。

## 2. 関係機関

MAGDAS・FM-CW 観測連携機関： 91 観測拠点・30 ヶ国・62 研究機関（欧州・アフリカ域：15 観測拠点・11 ヶ国・12 研究機関、アジア・太平洋域：57 観測拠点・12 ヶ国・38 研究機関、ロシア域：9 観測点・2 研究機関、北・南米域：10 観測拠点・6 ヶ国・7 研究機関）

国内連携パートナー：九州大学国シア宇宙惑星環境研究センター (i-SPES)、九州工業大学、鹿児島高専工業専門学校、名古屋大学宇宙地球環境研究所 (ISEE)、東北大学超高層大気プラズマセンター、気象庁柿岡地磁気観測所、星槎大学

締結済学術協定：4 機関、MOU：10 機関

## 3. 予算規模

約 15 億円程度

## 4. スケジュール

今後 10 年程度（2022 年 - 2032 年）で、広域ネットワーク観測拠点の拡張（地磁気観測点 100 点、FMCW 観測点 20 点）を目指し、「気象現象・長期気候変動と太陽活動の関連性」、「超高層大気を含む物質・エネルギーの全球循環」、「太陽表面爆発が及ぼすと地球システムへの影響」の解明に取り組む。

連絡先: 吉川 顕正 (九州大学国際宇宙惑星環境研究センター)  
e-mail: yoshikawa.akimasa.254 at m.kyushu-u.ac.jp  
藤本 晶子 (九州工業大学大学院情報工学研究院)  
e-mail: fujimoto at ai.kyutech-u.ac.jp

#### 5.1.4.1 大学中・小型望遠鏡群による惑星観測計画

##### ー惑星変動現象の飛翔体連携観測と系外惑星の大気成分検出に向けて

(Plan of planetary observation with small- and medium size optical telescopes - toward understanding planetary atmospheric variation in cooperation with spacecraft and detection of exoplanetary atmosphere)

#### 1. 目的・内容

現在ハワイ・ハレアカラ山頂（標高 3000m）で稼働している東北大学 60cm 望遠鏡・40cm 望遠鏡による惑星大気変動現象のために不可欠な光赤外リモートセンシングの「連続観測データ」を得るとともに、国際共同で進められている口径 1.8m 低分散光学望遠鏡「PLANETS」をはじめ、地上望遠鏡の観測を進める。ハワイ望遠鏡以外にも、北大・名寄ピリカ望遠鏡、チリ・アタカマの東京大学 TAO 望遠鏡が稼働中もしくは近年に稼働を開始する。これらの大学望遠鏡では自前の設備の利点を生かして科学目的に最適な連続モニタリング観測、突発現象や飛翔体連携観測などのフレキシブルな運用を行うことができる。地上からは、大型の装置を生かした可視・近赤外観測が有効であるが、高地では近紫外観測も可能となるため様々な惑星・小天体観測が候補となる。具体的には以下の通りである。

- ✓ 木星 Hisaki/EXCEED, Juno, JUICE: 衛星イオ火山ガスモニタリング、衛星イオプラズマトーラス、木星オーロラ活動、エウロパ水プルーム
- ✓ 火星 MMX, MAVEN, MarsExpress など火星探査機: 微量気体・水系分子季節変動
- ✓ 金星 Akatsuki: 風速・温度分布、雲・未知の吸収物質分布
- ✓ 土星: エンセラダス水系分子トーラス発光
- ✓ 水星 Bepi Colombo : アルカリ金属外圏大気分光

さらに、偏光分光や高コントラスト性能を生かした系外惑星の大気成分の検出も課題である。

#### 2. 関係機関

東北大学、JAXA、東大、名古屋大、国立天文台、ハワイ大学、ドイツケーペンハウワー研、フィンランド・トゥルク大、ブラジル・ポントグロッサ大、フランス・リヨン大

#### 3. 予算規模

～3 億円

#### 4. スケジュール

2022 年: PLANETS 主鏡の最終研磨、PLANETS 観測所建築工事

2023 年: PLANETS 望遠鏡国内試験観測、TAO 望遠鏡完成予定

2024 年: PLANETS 望遠鏡のハワイ・ハレアカラ観測所への設置

2025 年～: PLANETS 望遠鏡の定常観測の開始、木星、火星、金星ならびに系外惑星の科学観測

次ページのサマリ図を参照のこと。

## 大学小型・中型望遠鏡群による惑星観測計画

### －惑星変動現象の飛行体連携観測と系外惑星の大気成分検出に向けて

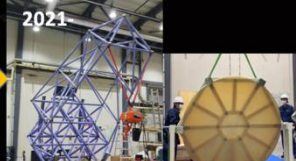
- ・ ハワイ・ハレアカラ山頂（標高3000m）の口径1.8m低分散光学望遠鏡「PLANETS」を用いて、惑星変動現象のために不可欠な光赤外リモートセンシング「連続データ」を得る。
- ・ 大学望遠鏡の専有性を生かし、科学的に最適化したフレキシブルな運用を行い、突発天体や飛行体連携を進める。

● 主な研究テーマ  
 木星オーロラ・衛星イオ火山ガス  
 火星量気体季節変動、同位体、水系分子  
 金星雲分布・風速温度分布  
 系外惑星大気

- コスト  
 ～3億円
- 主な関連機関  
 東北大学、JAXA、東大、名古屋大、北大、国立天文台、ハワイ大学、ドイツケーペンハウワー研、フィンランド・トゥルク大、ブラジル・ボンタゴロッサ大、フランス・リヨン大

#### 1.8m低分散光学望遠鏡PLANETS (東北大・名大、京大他)

#### 既設ハレアカラ40cm・60cm望遠鏡（東北大）



#### ● スケジュール

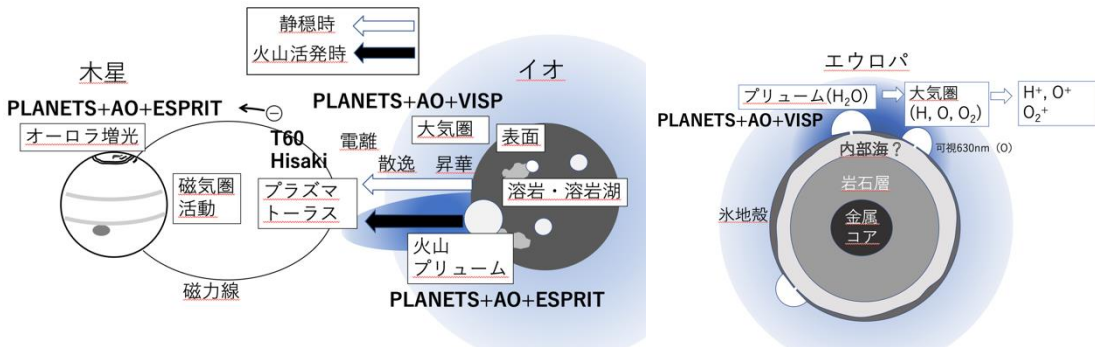
- ✓ 2022年：PLANETS主鏡の最終研磨、PLANETS観測所建築工事
- ✓ 2023年：PLANETS望遠鏡国内試験観測、TAO望遠鏡完成予定
- ✓ 2024年：PLANETS望遠鏡のハワイ・ハレアカラ観測所への設置
- ✓ 2025年：PLANETS望遠鏡の設置、木星、火星、金星ならびに系外惑星の科学観測を開始

#### 飛行体観測との連携

水星 (BepiColombo) 金星 (Akatsuki) 火星 (MMX, MAVEN, MarsExpress 等) 木星 (Hisaki, Juno, JUICE 等)

#### 大学望遠鏡群との連携 (東大TAO6.5m望遠鏡等)

研究テーマ例：（左）イオ火山と木星磁気圏-電離圏結合過程の解明（右）



連絡先：坂野井 健（東北大学）

e-mail: tsakanoi\_ at\_pparc. gp. tohoku. ac. jp

#### 5.1.4.2 太陽系・系外惑星大気の精密観測のための赤外高分散分光技術開発 －惑星大気物理過程の多元的理解に向けて

(Development of infrared high-resolution spectroscopy for precise measurement of planetary atmosphere - toward understanding the multifactor in planetary atmospheric processes)

##### 1. 目的・内容

これまでの可視高分散分光装置、コロナグラフ、中間赤外ヘテロダイン分光装置の開発スキルを生かし、中空ファイバーを用いた小型軽量ヘテロダイン分光装置、近赤外高分散エシエル分光装置、近赤外でも利用可能なファイバーアレイ開発を行う。また、補償光学(AO)を用いて、水星などの惑星表面やイオ火山火口・溶岩ならびにエウロパ水プルームの分布を捉える高空間分解観測を行う。さらに、小型軽量高分散分光器の将来飛翔体実験を検討する。具体的な研究テーマを以下に挙げる。

- ✓ 火星の微量気体成分の観測から、惑星気候変動に取り組む。
- ✓ 金星の微量成分観測と雲層の風速と温度を明らかにする。
- ✓ 木星イオ火山活動と赤外オーロラ観測から、磁気圏におけるプラズマ加速と磁気圏-電離圏結合を解明する。
- ✓ エウロパ水プルーム分布観測から地下構造の解明に挑む。
- ✓ ロケットや飛翔帯搭載機器開発への技術展開を図る。

##### 2. 関係機関

東北大学、名古屋大学、東京大学、国立天文台、千葉工大、JAXA、ハワイ大学

##### 3. 予算規模

～2億円

##### 4. スケジュール

2022年：近赤外カメラによる木星赤外オーロラの国内試験観測、可視AO実験

2023年：可視AO観測、赤外ファイバーアレイ開発、赤外AO開発

2024年：近赤外エシエル分光器試

2025年～：近赤外エシエル分光器の国外観測開始

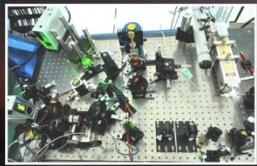
次ページのサマリ図を参照のこと。

# 太陽系・系外惑星大気の精密観測のための赤外高分散分光技術開発

## － 惑星大気物理過程の多元的理解に向けて

- 可視高分散分光装置、コロナグラフ、中間赤外ヘテロダイン分光装置の開発スキルを生かし、中空ファイバーを用いた小型軽量ヘテロダイン分光装置、近赤外高分散エシェル分光装置、近赤外でも利用可能なファイバーアレイ開発を行う。
- 補償光学（AO）を用いて、水星などの惑星表面やイオ火山火口・溶岩ならびにエウロパ水ブリュームの分布を捉える高空間分解観測を行う。
- 小型軽量高分散分光器の将来飛翔体実験を検討する。

中間赤外ヘテロダイン分光装置



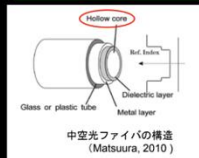
可視高分散分光装置  
コロナグラフ装置



- ✓ 主な研究テーマ
- ✓ 火星の微量気体成分の観測から、惑星気候変動に取り組む。
- ✓ 金星の微量成分観測と雲層の風速と温度を明らかにする。
- ✓ 木星イオ火山活動と赤外オーロラ観測から、磁気圏におけるプラズマ加速と磁気圏-電離圏結合を解明する。
- ✓ エウロパ水ブリューム分布観測から地下構造の解明に挑む。
- ✓ ロケットや飛翔帯搭載機器開発への技術展開を図る。

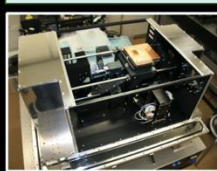
ファイバーアレイ追加  
AO化、赤外検出

中空赤外ファイバー応用



小型軽量化  
飛翔体搭載検討

近赤外高分散エシェル分光装置



地上望遠鏡へ設置・観測

- コスト  
～2億円
- 主な関連機関  
東北大学、名古屋大学、東京大学、国立天文台、千葉工大、JAXA、ハワイ大学

- スケジュール
- 2022年：近赤外カメラによる木星赤外オーロラの国内試験観測、可視AO実験
- 2023年：可視AO観測、赤外ファイバーアレイ開発、赤外AO開発
- 2024年：近赤外エシェル分光器試
- 2025年～：近赤外エシェル分光器観測開始

連絡先：坂野井 健（東北大学）

e-mail: tsakanoi\_ at\_pparc. gp. tohoku. ac. jp



### 5.1.4.3 HF～VHF 帯大型アレイ・アンテナ計画

#### (Development of a high sensitivity radio observation system in the HF-VHF range)

##### 1. 目的・内容

太陽コロナや惑星圏で発生し到来する非熱的電波は、その放射域や伝搬域の電磁環境やプラズマ・ダイナミクスに関わる情報を内包している。それらの非熱的放射の中で、地球電離圏で遮蔽されずに地上に到達し得る低い周波数帯の電波には、STP 領域に加えて宙空災害科学の研究面でも重要な、多様な時間・周波数で変化する電波現象が存在する。本計画では、太陽、惑星から到来する HF～VHF 帯 (20～80MHz) の電波を、高感度・高速、且つ、定常的に観測を行い得る装置の開発を行う。具体的な内容として、低コストの小型アンテナ群を、高速演算素子を用いた受信機をデジタル的に結合し、「高感度・高速性」を備え、且つ、STP・宙空災害科学両研究面で重要な、「連続・長時間観測」が可能なシステムの開発を目指す。

本計画で観測対象とする周波数帯において、「高感度性」を備える観測システムとして、国際的な超大型電波干渉計プロジェクトであり、開発の進む超大型アレイ・アンテナである SKA (Square Kilometer Array) -Low(豪)の path-finder 的な役割を担う LoFAR (Low Frequency Array, 欧州) や NenuFAR (仏) プロジェクト等があるが、こうした大型プロジェクトは多目的に運用されるため、STP・宙空災害科学両研究分野で求められる「連続・長時間観測」には適さない。現在、太陽・惑星電波の定常的な高感度観測を行っているシステムは、世界的にはフランス・パリ天文台の電波観測装置(NDA)がほぼ唯一であり、可観測時間が限られている。本装置の設立は太陽・惑星電波の世界的な観測カバレッジ増加に繋がり、NDA とともに「連続・長時間観測」を実現することにより、惑星圏グローバル変動様相の解明や、人類の宇宙活動の脅威となる高エネルギー粒子 (SEP) 発生に同期して放射される特徴的な太陽電波バーストの高速検出に基づく、SEP 出現の早期把握等への貢献が期待される。また、本装置は将来的に SKA-Low と超長基線干渉計 (VLBI) を構成し、太陽系外も含む惑星科学研究への展開の他、天文学分野の研究 (宇宙再電離研究 他) への貢献も期待される。更に、本計画で行おうとする「高感度・高速性」実現のための技術開発は、人材育成面も含めて、on-going の研究課題である、月面天文台や宇宙空間での本計画より更に低い周波数帯での「高感度」電波観測へ接続する役割を担うことも期待される。

本計画の具体的な研究対象は以下の通りである。

- ・ 太陽電波バーストの広帯域偏波観測による粒子加速過程・電波伝搬過程の究明
- ・ 太陽電波バーストの高感度観測による電波発生的高速同定と高エネルギー粒子 (SEP) 現象の早期把握
- ・ 惑星 (木星) 電波バーストの高感度観測による磁気圏グローバル変動過程の究明
- ・ 惑星 (木星) 電波バーストの高感度広帯域偏波観測によるプラズマ環境とその変動の究明
- ・ 超大型アンテナとの VLBI 観測による系外惑星電波の同定と惑星電磁環境の探究

##### 2. 関係機関 東北大学、名古屋大学、情報通信研究機構、国立天文台

##### 3. 予算規模 ～1 億円

##### 4. スケジュール

2022 年：広帯域・高速信号処理系のソフトウェア構築とデジタル受信機の仕様策定

2023 年：デジタル受信機の開発およびアンテナ・アレイへの適用と、信号処理系統合



による 高感度電波観測システムの構築  
2024年～：太陽電波バースト・惑星電波の観測・研究

連絡先：三澤 浩昭（東北大学）  
e-mail: misawa\_ at\_pparc. gp. tohoku. ac. jp

#### 5.1.4.4 UHF 帯高感度・広帯域偏波スペクトル計開発 (High sensitive Spectro-Polarimeter in the UHF range)

##### 1. 目的・内容

惑星磁気圏・大気圏や太陽コロナ領域からは、数十 MHz から数 GHz 帯の周波数領域で強い非熱的放射が生じており、地上から電波観測は有効な惑星の遠隔探査手段となる。惑星のオーロラ活動に伴って放射される非熱的放射は、系外惑星探査の手段の一つとしても注目されており、この周波数帯の電波観測の高感度化、高機能化が求められている。本計画では、惑星磁気圏・大気圏の電磁気現象及び太陽大気中の粒子加速の究明に向け、高感度・広帯域偏波スペクトルの計測機能をもつ地上大型電波観測装置の開発を行う。東北大学が運用している開口面積 1023m<sup>2</sup> の飯館惑星電波望遠鏡 (IPRT) に設置されている狭帯域高感度受信機 (325MHz・650MHz) と太陽電波観測用広帯域スペクトル偏波計 (AMATERAS) (150-500MHz) の広帯域化・高効率化を実現するフィードを開発する。電波天文観測分野では、低周波域で広大な集光能力を持つ電波望遠鏡 SKA (Square Kilometer Array) が計画されており、本研究はこの活動と連携し、IPRT は開発された広帯域フィードのテストベンチの役割を担うとともに、SKA を用いた観測・研究への参画の足掛かりとする。

本計画により整備した広帯域受信系を用い、以下の観測的研究を推進する。

- ・ 木星シンクロとトロン放射の強度・偏波並びにその時間変動観測に基づく、放射線帯電子の加速・輸送・消失過程の探査
- ・ 太陽電波バースト微細構造観測によるコロナ中の粒子加速・プラズマ素過程の探査
- ・ 惑星大気 (火星・土星) の雷放電電波観測と大気科学・力学過程の理解への貢献
- ・ SKA をはじめとする大型電波干渉計との超長基線干渉計 (VLBI) 観測による系外惑星電波の検出に向けた、観測技術の開発
- ・ パルサーのディスパージョンメジャーを用いた星間空間構造の観測
- ・ パルサー、銀河磁場構造、FRB 探査を通じた低周波天文学グループとの研究推進

##### 2. 関係機関 主幹：東北大学、名古屋大学、国立天文台

##### 3. 予算規模 1 億円以下

##### 4. スケジュール

2022 年：広帯域フィードの開発並びに実装・試験観測

2023 年～：木星放射線帯・惑星雷現象・太陽電波バーストの観測及び、VLBI 観測による電離圏遅延補正技術の開発

# UHF 帯高感度・広帯域偏波スペクトル計開発 (High sensitive spectro-polarimeter in the UHF range)

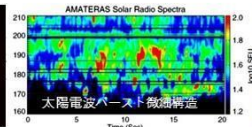


飯館惑星電波望遠鏡 (東北大学)

## 非熱的放射観測によるリモートセンシング



木星シンクロトロン放射



太陽電波バースト微細構造



火星雷放電(想像図) (Farrell et al 2004)

木星シンクロトロン放射：放射線帯電子の加速・輸送・消失過程  
 太陽電波バースト微細構造：太陽コロナ中の粒子加速・プラズマ素過程  
 惑星大気の雷放電電波観測：大気科学・力学過程の理解への貢献  
 パルサーのディスページョンメジャー：星間空間構造の観測



低周波天文学観測の共同研究：パルサー、銀河磁場構造、FRB探査  
 SKA (Square-kilometer array)への参画・技術開発の連携

Square-kilometer array (想像図)  
 Jodrell Bank Centre for Astrophysics - The University of Manchester

SKA (Square-kilometer array)参画・技術開発連携

関係機関  
 東北大学(主幹)  
 名古屋大学  
 国立天文台

連絡先：土屋 史紀 (東北大学)  
 e-mail: tsuchiya\_ at\_pparc. gp. tohoku. ac. jp

#### 5.1.4.5 赤道・低緯度 SuperDARN レーダー装置 (Equatorial and low latitude SuperDARN radar)

(1) 必要と思われる施策・技術開発

赤道・低緯度領域に新たに SuperDARN レーダー装置を設置することによる上記領域に特有な電離圏・熱圏擾乱現象の観測網の確立並びに、電離圏対流観測網のより低緯度域への拡大および、他の装置との協力によるグローバル超高層大気観測網の確立

(2) 具体的に存在する計画 (a) 1 億円以上

「タイトル」 赤道・低緯度 SuperDARN レーダー計画

「内容」 赤道や低緯度領域に新たに SuperDARN レーダー装置を設置し、電離圏・熱圏・上部中間圏の高時間分解能 2 次元観測を行い、上記領域に特有な電離圏・熱圏擾乱現象の観測網を確立すると同時に、他の観測装置およびシミュレーションとの協力により磁気圏・電離圏から熱圏・上部中間圏にわたる領域におけるグローバルダイナミクスの解明を目指す。

「予算規模」 レーダー数により 1.2～数億円

「関係機関」 名古屋大学宇宙地球環境研究所・情報通信研究機構・国立極地研究所・電気通信大学等

「時間軸」 5-10 年後に完成し、その後 10 年以上にわたる運用を予定

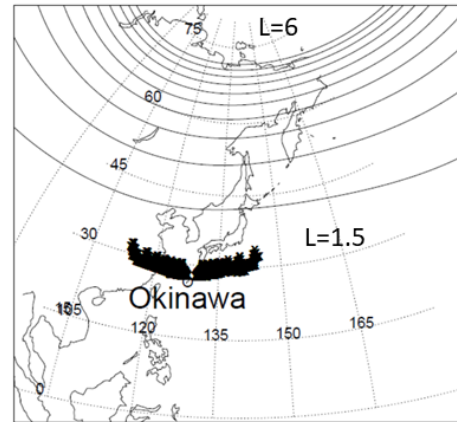
(3) 計画の内容

現在の SuperDARN レーダーの視野は最も低緯度側にある北海道-陸別 HF レーダーにおいても地磁気緯度で 38 度以上であり、プラズマバブルのような赤道低緯度域に特有の電離圏・熱圏擾乱現象を捕らえることができない。上記現象は通信・測位に深刻な影響を与えることが知られており、発生メカニズムの解明および広域にわたる連続したモニタリングのためには、当該装置の設置が極めて重要である。赤道・低緯度領域においてはプラズマバブルの他にも LSWS (Large Scale Wave Structure)、TID のような興味深い現象が数多く報告されており、本装置を設置することにより研究の進展が期待される。

さらには、1989 年 3 月のような大規模磁気嵐時には現存の SuperDARN レーダーの視野より低緯度側に高速対流領域が拡大すると見込まれ、最近注目を浴びつつある極端宇宙天気事象を詳細に解析するためにはより低緯度側に視野を広げて観測体制を形成しておくことが重要である。一方、通常時においても、disturbance dynamo、penetration electric field、overshielding、tide 等にともなう電離圏電場変動を常時モニターすることが可能であり、継続的に高時間分解能の二次元データを取得していくことにより、上記プロセスの解明に貢献すると期待される。

# 赤道・低緯度HFレーダー計画

- 「内容」赤道や低緯度領域に新たにSuperDARNレーダー装置を設置し、電離圏・熱圏・上部中間圏の高時間分解能2次元観測を行い、上記領域に特有な電離圏・熱圏擾乱現象の観測網を確立すると同時に、他の観測装置およびシミュレーションとの協力により磁気圏・電離圏から熱圏・上部中間圏にわたる領域におけるグローバルダイナミクスの解明を目指す。
- 「予算規模」レーダー数により1.2～数億円
- 「関係機関」名古屋大学宇宙地球環境研究所・情報通信研究機構・国立極地研究所・電気通信大学等
- 「時間軸」5-10年後に完成し、その後10年以上にわたる運用を予定



(図は沖縄に設置した場合のエコー分布計算結果、ただし9MHz, 2.5 hopまで)

## 研究ターゲット

- プラズマバブル、LSWS (Large Scale Wave Structure)、TID
- 大規模磁気嵐時の電離圏対流分布
- 赤道・低緯度領域における電離圏対流分布の変動
  - disturbance dynamo, penetration electric field, overshielding, tide, ...
- Etc.

1

連絡先：西谷 望 (名古屋大学宇宙地球環境研究所)  
e-mail: nisitani at isee.nagoya-u.ac.jp

#### 5.1.4.6 ライダーおよびレーダーによる北極域大気上下結合の研究

(Research on atmospheric vertical coupling based on Multi-LIDAR and radar observations in the polar region)

##### 1. 目的・内容

スカンジナビア北部に設置されたライダーおよびレーダーを用いて、成層圏から熱圏までの幅広い高度領域の観測を行い、北極域大気上下結合の解明を行う。

##### 2. 関係機関

名古屋大学宇宙地球環境研究所、信州大学、理化学研究所、電気通信大学

##### 3. 予算規模

(b) 1億円以上。

##### 4. スケジュール

トロムソ(北緯 69.6 度、東経 19.2 度)を中心として整備したライダーおよびレーダー群に加えて、ナトリウムライダーの出力増強による下部熱圏および成層圏観測の時間分解能の向上、ミリ波分光計を新たな開発により、極域成層圏から熱圏までの詳細観測を行う。

2024年： ナトリウムライダーのレーザー出力増強、ミリ波分光計の開発

2026年： ミリ波分光計の設置

2026-2034年：北極域成層圏から熱圏までの観測を実施

##### 5. その他

2010年からトロムソにて、ナトリウムライダーによる中間圏-下部熱圏(MLT)の大気温度観測を実施している。既存のEISCATレーダー、MFレーダー、流星レーダーを併用することにより、MLT領域の大気変動の解明を進めている。ナトリウムライダー開発によるノウハウを活かして、レーザー光出力を増強し、下部熱圏高度におけるオーロラ加熱の評価能力、成層圏観測における時間・高度分解能を高める。同時に、大気微粒子観測用のミリ波分光計を開発・設置し、高エネルギー粒子による大気変動も同時に解明を進める。

**ライダーおよびレーダーによる北極域大気上下結合の研究**



トロムソ  
スカンジナビア半島

設置用コンテナ

世界初5方向同時観測

ミリ波分光計

**特徴**

- ・世界最高性能にてオーロラ大気加熱の解明に迫る
- ・大気微量粒子測定を合わせ、大気上下輸送過程を解明
- ・風速および温度観測に基づく大気波動の解明

**成層圏から熱圏まで観測**

高度 ↑

温度 風速 Na	大気微量成分
温度	
Naライダー 80-110 km 温度、風速、Na	ミリ波分光計 40-70 km 温度 大気微量成分

連絡先：名古屋大学宇宙地球環境研究所 野澤悟徳  
e-mail: nozawa at nagoya-u. ac. jp



#### 5.1.4.7 内部磁気圏のプラズマ・電磁場変動の総合地上ネットワーク観測 (Comprehensive ground-based network observations of plasma dynamics and electromagnetic disturbances in the inner magnetosphere)

##### 1. 目的・内容

地球周辺の宇宙空間であるジオスペースのうち、特に静止軌道（地球半径の 6.6 倍）から内側の内部磁気圏は、ジオスペースの最高エネルギーである MeV エネルギーのプラズマで構成される放射線帯から、1eV の低エネルギーの低エネルギー電子で構成されるプラズマ圏まで、6 桁以上の広いエネルギー範囲のプラズマ粒子が混在し、0.1Hz–10kHz の ULF-VLF 帯プラズマ波動と相互作用しながら、粒子の加速・消失が起きている興味深い領域である。また、この領域は大部分の人工衛星が飛翔しており、プラズマとの衝突による衛星障害も発生している。この内部磁気圏の粒子変動機構を解明するために、緯度 70 度付近のオーロラ帯よりも少し低緯度側のサブオーロラ帯に経度方向に並べて、高感度全天カメラ（観測対象：オーロラ粒子降り込み）、誘導磁力計（ULF 帯地磁気脈動）、ループアンテナ（LF/VLF 帯プラズマ波動）、リオメータ（高エネルギー粒子降り込み）、GPS 受信器（電離圏電子密度変動）を設置し、地球半径の 4 倍程度に位置する放射線帯粒子、プラズマポーズやリングカレント粒子に関連したプラズマ粒子降り込みやそれに伴う ULF 帯・LF/VLF 帯波動と粒子の相互作用を、地球規模の広い経度帯に沿ってネットワーク観測する。これらの観測と、この領域を磁気圏で観測する RBSP 衛星（2012 年打ち上げ）や ERG 衛星（2016 年度打ち上げ）のデータを組み合わせ、内部磁気圏の粒子変動機構を明らかにする。本計画は、科学研究費補助金の特別推進研究「地上多点ネットワーク観測による内部磁気圏の粒子・波動の変動メカニズムの研究」（PWING Project、研究課題番号：16H06286、<http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/dimr/PWING/>）として、平成 28 年度から開始され、令和 4 年現在も各観測点で自動定常観測が続けられている。本計画により、サブオーロラ帯の磁気圏・電離圏・大気圏の様々な変動過程が明らかにされつつある。

2. 関係機関：名古屋大学宇宙地球環境研究所、金沢大学、東北大学、千葉大学、国立極地研究所、カナダ・アサバスカ大学、ロシア・IKIR/IKFIA/ISTP、米国アラスカ大学など

3. 予算規模：5 億円程度

##### 4. スケジュール

2012 年 8 月：RBSP 衛星打ち上げ

2016 年 4 月：特別推進研究の採択・開始

2016-2017 年度：機器の購入、ロシアシベリア域、北欧地域、カナダ、アラスカへの設置

2016 年 12 月：ERG 衛星打ち上げ

2016 年度－：設置した機器の定常観測継続と衛星－地上同時キャンペーン観測の実施

## 内部磁気圏のプラズマ・電磁場変動の総合地上ネットワーク観測

目的・内容: 緯度70度付近のオーロラ帯よりも少し低緯度側のサブオーロラ帯に経度方向に並べて、高感度全天カメラ(観測対象:オーロラ粒子降り込み)、誘導磁力計(ULF帯地磁気脈動)、ループアンテナ(LF/VLF帯プラズマ波動)、リオメータ(高エネルギー粒子降り込み)、GPS受信器(電離圏電子密度変動)を設置し、地球半径の4倍程度に位置する放射線帯粒子、プラズマポーズやリングカレント粒子に関連したプラズマ粒子降り込みやそれに伴うULF帯・LF/VLF帯波動と粒子の相互作用を、地球規模の広い経度帯に沿ってネットワーク観測する。これらの観測と、この領域を磁気圏で観測するRBSP衛星(2012年打ち上げ)やERG衛星(2016年度打ち上げ)のデータを組み合わせ、内部磁気圏の粒子変動機構を明らかにする。本計画は、科研費の特別推進研究(PWING Project、<http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/dimr/PWING/>)として、平成28年度から開始されている。

予算規模:5億円程度

年次計画

2012年8月:RBSP衛星打ち上げ

2016年4月:特別推進研究の採択・開始

2016-2017年度:機器の購入、ロシアシベリア域、北欧地域、カナダ、アラスカへの設置

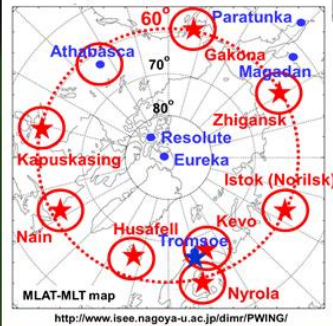
2016年12月:ERG衛星打ち上げ

2016-2020年度:設置した機器の定常観測継続と衛星-地上同時キャンペーン観測の実施

関連機関:名古屋大学宇宙地球環境研究所、金沢大学、東北大学、千葉大学、国立極地研究所、カナダ・アサバスカ大学、ロシア・IKIR/IKFIA/ISTP、米国アラスカ大学など

Ground-based stations of the PWING Project. (since 2016)

● Existing sites ★ New sites

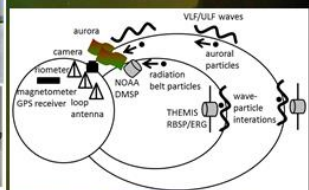


Induction magnetometer

VLF antenna

riometer

all-sky camera



連絡先: 塩川 和夫 (名古屋大学宇宙地球環境研究所)

e-mail: shiokawa at nagoya-u.jp

#### 5.1.4.8 大気・プラズマ結合過程のアジア・アフリカ子午面ネットワーク総合観測 (Network observations of plasma-atmosphere coupling processes over the Asian and African meridians)

##### 1. 目的・内容

高度 80–1000km の地球の電離圏は、一部の大気が電離してプラズマ状態にあり、人工衛星–地上間の通信・測位に障害を引き起こしたり、電離圏電流が地上の送電線に誘導電流を引き起こしたりする。太陽を主な起源として宇宙空間から高緯度地域に侵入する電磁場・プラズマ擾乱と、赤道域を中心とした下層大気の大気擾乱に起因する大気波動によって、この電離圏のプラズマ変動が引き起こされており、特に近年は後者も非常に大きな影響があることがわかってきた。本研究ではこれらの変動の原因を調べるために、宇宙空間からのエネルギーの侵入がある高緯度地域から、大気擾乱が活発であり磁力線が水平になる磁気赤道域までの子午面において、高度 100km 以下の中間圏からそれ以上の熱圏の大気変動、電離圏のプラズマ変動を光学・電波機器を使って総合的に観測し、電離圏を中心とした大気・プラズマ結合過程を明らかにする。具体的には、高感度全天カメラ（観測対象：オーロラ・大気光）、ファブリ・ペロー干渉計（熱圏風・温度）、分光フォトメータ（中間圏温度）、磁力計（地磁気）、流星レーダー（中間圏風速）、イオノゾンデ（電離圏高度・電子密度）、GPS 受信器（電離圏電子密度）、ループアンテナ（下部電離圏高度）、クランプ電流計（誘導電流）などの機器を、アジア・アフリカの子午面に設置し、多地点地上ネットワーク観測を行う。これらの観測と、電離圏高度を観測する米国の ICON/GOLD 衛星、DMSP 衛星、ドイツの Swarm 衛星などの人工衛星データを組み合わせ、電離圏における大気・プラズマ結合過程とその緯度間結合を明らかにする。日本を含むアジアの子午面はこれらの機器が広く設置・運用されてきたが、ヨーロッパを含むアフリカの子午面ではまだあまり観測が行われていない。両子午面は磁気赤道と地理赤道の位置関係や赤道の対流活動の大きさが異なり、それらの違いが大気・プラズマ結合過程に与える影響も明らかにすることができる。本計画は、令和 3 年度から基盤 A 研究としてその一部が開始されており、ヨーロッパやエジプト、エチオピア等に大気光観測用全天カメラの設置が予定されている。

2. 関係機関：名古屋大学宇宙地球環境研究所、京都大学、情報通信研究機構、千葉大学、国立極地研究所、九州大学、インドネシア・LAPAN、タイ・チェンマイ大学、ナイジェリア宇宙航空研究開発機構（NASRDA）など

3. 予算規模：5 億円程度

##### 4. スケジュール

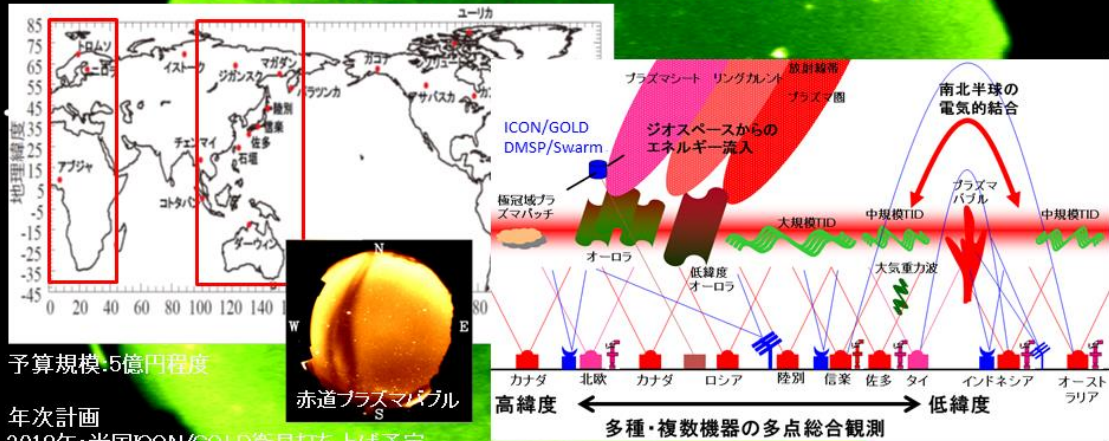
2018 年：米国 ICON/GOLD 衛星打ち上げ

2020–2021 年度：機器の購入、アジア、アフリカ、ロシア、カナダ、北欧地域への設置

2022 年度以降：設置した機器の定常観測継続と衛星–地上同時キャンペーン観測の実施

# 大気・プラズマ結合過程のアジア・アフリカ子午面 ネットワーク総合観測

目的・内容: 高感度全天カメラ(観測対象:オーロラ・大気光)、ファブリ・ペロー干渉計(熱圏風・温度)、分光フォトメータ(中間圏温度)、磁力計(地磁気)、流星レーダー(中間圏風速)、イオンノンデ(電離圏高度・電子密度)、GPS受信器(電離圏電子密度)、ループアンテナ(下部電離圏高度)、クランプ電流計(誘導電流)などの機器を、アジア、アフリカの子午面に設置し、多地点地上ネットワーク観測を行う。電離圏高度を観測する米国のICON/GOLD衛星、DMSP衛星、ドイツのSwarm衛星などの人工衛星データを組み合わせ、大気・プラズマ結合過程とその緯度間結合を明らかにする。



連絡先: 塩川 和夫 (名古屋大学宇宙地球環境研究所)  
 e-mail: shiokawa at nagoya-u.jp

### 5.1.5.1 海洋底構成岩石の系統的試料採取技術の開発

#### (Development of systematic sampling techniques for oceanic crust and mantle)

##### 1. 目的・内容

海洋底には過去の地磁気変動の歴史が連続的に記録されている。たとえば、地磁気縞模様などに代表される磁気異常は、海底拡大の解明など固体地球進化の研究に不可欠な証拠として広く活用されてきた。近年では、深海観測技術の発展により高分解能な磁気異常も観測されるようになり、熱水循環や断層運動など詳細な地質過程と関連付けた議論も進みつつある。しかしながら、「何が海域磁気異常を作るのか？」という根本的な問いはまだ未解明な点が多い。この原因の一つに、海洋底から直接採取される岩石が限られ、磁気異常の起源を解釈する学術的基盤が乏しい事が挙げられる。古地磁気、プレート運動、海底下構造などの研究発展に、海洋底構成岩石から信頼ある古地磁気記録を得るための技術開発が望まれる。

海洋底試料採取の方法として、岩石ドレッジがよく知られるが、残留磁化強度や磁化率などの情報は得られても定方位による古地磁気情報の取得は難しい。深海掘削計画も広く展開されてきたが、定方位採取でない点や大規模観測の割に試料採取が限定的となる他に、掘削時に獲得する2次磁化の問題などが存在する。有人潜水船ではマンピュレータを用いて目視による露頭試料採取が可能であるが、割れやすく掴みやすい形などの条件が伴い、古地磁気研究に最適な試料が得られない。

こうした状況を打破するため、効率的かつ信頼性の高い方法として、露頭観察が可能かつ機動性のある海中無人探査機で簡易掘削機を利用する方法が実用化されつつある。現状では、二重管式のドリル・ロッドで内管が回転せずに方位マークが付く構造を持ち、長さ30cm程度の定方位コアを10本程度採取可能な試験機が、水深2000m級の日本近海でROV「ハイパードルフィン」(耐水深3000m)用いて運用された。今後は、ROVの改良も含めて水深6000m級の領域で観測を可能にするとともに、外航航海でも運用できるシステム構成を構築する必要がある。溶岩の産状やマンガンクラスト被覆などの海底露頭条件に大きく依存せずに、幅広い水深および年代を持つ海底で定方位での試料採取を実現することが期待される。空間的な分布とともに鉛直方向の構造の解明も進める必要があり、掘削孔を活用した計測・採取等とは異なるアイデアとして、海底断裂帯の鉛直断面などを活用した浅部の定方位連続採取など、海洋底の磁化構造の本質的な理解深化への展開も望まれる。

##### 2. 関係機関

国立極地研究所、東京大学、産業技術総合研究所、千葉工業大学、国立科学博物館、熊本大学、高知大学、海洋研究開発機構

##### 3. 予算規模

～1億円(構想段階のため暫定額)

##### 4. スケジュール・構想の成熟度

構想段階であり、現在のところ予算要求の予定はない。

連絡先：藤井 昌和(国立極地研究所)

e-mail: fujii.masakazu (at) nipr.ac.jp



# 海洋底構成岩石の系統的試料採取技術の開発

## 【現状】

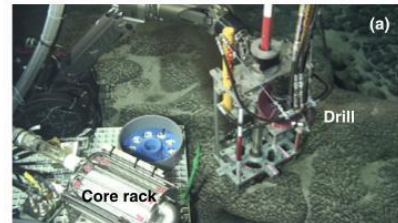
- 深海観測技術の発展も背景に、観測磁気異常と岩石磁気の連携が一層期待される
- 海底露頭条件に依存しない採取法が必要
- 掘削時に獲得する2次磁化の問題
- 定方位の古地磁気情報が必須



海洋底玄武岩の産状の例  
(Fujii & Okino, 2018 EPS)

## 【具体策】

- ROVを用いた定方位浅部掘削
- 大水深化、汎用化
- 異なる地質背景で複数の航海実績へ



ROVを用いた定方位掘削の例  
(Yamazaki et al., 2021 EPS)

連絡先： 藤井 昌和 (国立極地研究所)  
fujii.masakazu (at) nipr.ac.jp

### 5.1.5.2 掘削コア試料の古地磁気測定に関わる技術開発・環境整備

#### (Technical developments and general improvements for paleomagnetic measurements on drilling core samples)

##### 1. 目的・内容

国際深海科学掘削計画 (IODP) や国際陸上科学掘削計画 (ICDP) の進展に伴い、これまでに以上に掘削コア試料から信頼ある古地磁気測定結果を得るための技術開発・環境整備が望まれる。

IODP における掘削では、多くの場合、採取されるコア試料に非常に大きな掘削残留磁化が二次的に印加され、初生磁化の情報を覆い隠してしまうという問題を抱えてきた。このため、古地磁気層序が決定できなかつたり、決定できても層序の信頼性が乏しい岩相が発生したりすることも多かった。この問題は、非磁性コアバレルを導入することで大きな改善が見込まれ、実際、アメリカが IODP のために運行する JOIDES Resolution 号において積極的な導入がなされ成功を収めている。日本が運行する「ちきゅう」など、他の掘削船でも積極的に導入されることが望ましい。非磁性コアバレルは、通常のコアバレルに比べて高価かつ耐久性に劣るという問題点もあるため、平行して、安価・高耐久性の高性能材料の調査研究をすすめ、導入しやすい状況を作り出すことも重要と考えられる。

掘削コア試料に共通する問題として、コアの定方位採取が挙げられる。多くの場合、コア試料の採取時には水平面内の回転が起るため、古地磁気偏角の情報が失われる。コア試料からさらに有用な古地磁気情報を得るためには、定方位の情報が必須である。IODP においては FlexIt と呼ばれるツールが利用されるようになり、正帯磁・逆帯磁を判断できるほどには定方位採取が可能になってきているが、永年変化を議論できる程度までの精度はなく、改善の余地は大きい。陸上掘削においては、未だ、技術開発は発展途上である。磁場・ジャイロ等を複合的に用いたオリエンテーションツールの開発が望まれる。

IODP においては、掘削後間もないコア試料を対象として、船上搭載機器による初期分析が行われる。この初期分析の結果は、その後のコア試料研究の方向性を大きく左右するため、船上測定においては高精度かつ高信頼度のデータが継続的に得られるような環境整備が常に求められる。このためには、主力の古地磁気測定機器である超伝導磁力計をはじめとした機器の維持整備が必要であり、陸上の関連研究施設との密接な連携のもと、この任にあたる船上技術者のスキルの維持・向上も重要である。将来的には、さらに高性能な測定機器への更新も必要と考えられ、随時、検討を進めていくべきである。

##### 2. 関係機関

日本地球掘削科学コンソーシアム

##### 3. 予算規模

～1 億円 (構想段階のため暫定額)

##### 4. スケジュール・構想の成熟度

構想段階であり、現在のところ予算要求の予定はない。



# 掘削コア試料の古地磁気測定に関わる 技術開発・環境整備

## [現状]

- 定方位情報の欠如
- IODP掘削時に「掘削残留磁化」が獲得される問題
- IODPの船上測定環境の問題

## [具体策]

- 磁場・ジャイロ等を複合的に用いた定方位ツールの開発.
- 高耐久性をもつ非磁性コアバレルの導入.
- IODP船上搭載機器の維持・整備 / 船上技術者のスキルの維持・向上.

年次計画：構想段階

関連機関：日本地球掘削科学コンソーシアム

連絡先：山本 裕二（高知大学）

e-mail: y.yamamoto (at) Kochi-u. ac. jp



### 5.1.6.1 宇宙地球環境研究のための包括的なデータサイエンスセンター (Integrated Data Science Center for Space-Earth Environmental Research)

#### 1. 目的・内容

太陽・地球・惑星・太陽圏を含む太陽地球惑星圏環境の研究は多様な衛星観測および地上観測にもとづいている。それ故、これらがもたらすデータを統合し、シミュレーションやモデリングとの定量的な比較によって現象をシームレスに把握するための取り組みが、複雑な太陽地球惑星圏の理解のために不可欠である。このような総合解析研究は、データのフォーマットの違いや固有の解析環境の違いなどによって、これまで必ずしも効率的に実現できていなかった。それゆえ、様々な太陽地球惑星圏ミッションと関連する地上観測に柔軟に対応し、データの標準化とアーカイブ化、付加価値を付けたデータファイルと統合解析ツールの整備、観測と直接比較できる高度なシミュレーションの開発などを先導して実施し、メタデータや DOI の整備、太陽地球惑星圏のシームレスな理解とその変動を予測するためのサイエンスを推進するための拠点センターを整備する必要がある。

これまで、名古屋大学と宇宙科学研究所、国立天文台の共同によって、ひので衛星サイエンスセンター、ERG（あらせ）プロジェクトサイエンスセンター（2013-2017年度：宇宙科学連携拠点）が運営され、これらのプロジェクトの推進に貢献してきた。2018年度からは新たに宇宙科学連携協力協定が、名古屋大学と宇宙航空研究開発機構の間で締結され、ひので、ERGサイエンスセンターの運用を実施している。さらに、2022年度から太陽、ジオスペースおよび惑星圏の飛翔体探査計画（ひので、あらせ、Geotail、BepiColombo、Solar-C\_EUVST）と地上観測、シミュレーション研究を連携することで太陽圏システム科学を推進する太陽圏サイエンスセンターが、名古屋大学、宇宙航空研究開発機構、国立天文台の連携でスタートし、様々なコミュニティ・プロジェクトの研究基盤を提供すると共に国際的な研究の拠点としての役割を担うための包括的なサイエンスセンターの整備が進められている。

#### 2. 関係機関

名古屋大学、宇宙航空研究開発機構、国立天文台、他関連大学、研究所

#### 3. 予算規模 : (a) 1億円程度

#### 4. スケジュール：実施中

2010年より：ひので、あらせサイエンスセンターを運営。2013-2017年度は、宇宙航空研究開発機構と名古屋大学の宇宙科学連携拠点として ERGサイエンスセンターを運営

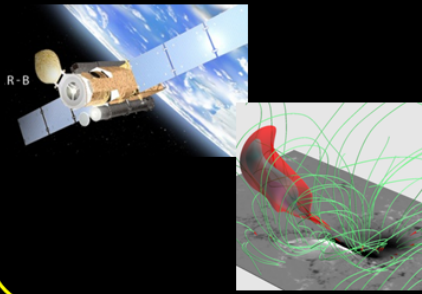
2018年度以降：宇宙航空研究開発機構と名古屋大学による宇宙科学連携協力拠点として、太陽地球系科学分野の探査に関するサイエンスセンターを継続・発展

2022年度以降：太陽圏環境研究のための包括的な太陽圏サイエンスセンターを設置・運用

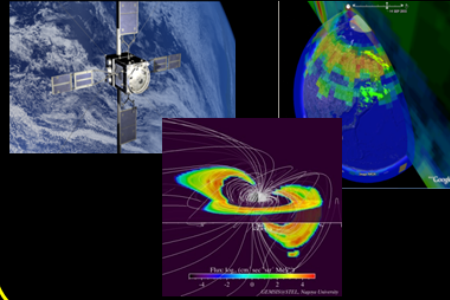
## 宇宙環境研究のための包括的なサイエンスセンター： 太陽地球系の総合的な理解と予測に向けた研究基盤構築

人工衛星や地上からの多様な観測と、シミュレーションとを融合した総合的な研究を進めるために、各種データの標準化、統合解析ツール開発を先導し、異なるミッションで共通して利用できる研究基盤を継続的に提供する。

ひのでサイエンスセンター



ERGサイエンスセンター



年次計画 2010年-2017年： ひので衛星サイエンスセンター/ERG衛星サイエンスセンターを運用

2018年以降： ひので、ERGサイエンスセンターを継続運用

コミュニティのニーズに呼応して、Solar-C\_EUVST, BepiColomboなどに向けた発展の準備

2020年度以降： 太陽地球惑星圏環境研究のための包括的なデータサイエンスセンターの整備

関連機関：名古屋大学、宇宙航空研究開発機構、国立天文台、他関連大学・研究機関

連絡先：草野完也（名古屋大学） e-mail: kusano at isee.nagoya-u.ac.jp  
三好由純（名古屋大学） e-mail: miyoshi at isee.nagoya-u.ac.jp

### 5.1.6.2 将来の惑星探査・観測を念頭に置いた惑星大気コミュニティモデルの開発とコアモデリンググループの確立に向けて

(Toward development of community models for planetary atmosphere and establishment of core modeling group for purposes of future planetary exploration and observation)

#### 1. 目的・内容

シミュレーションモデルは、惑星大気・表層の理解を試し、試された理解を集積・表現するための手段であり、当該分野の主体的な展開を目指すコミュニティは自前での開発能力を獲得すべき基盤的資源である。また、欧米における近年の惑星大気・表層探査においては、その立案やデータの提供時に、シミュレーションモデルは観測システムシミュレーション実験 (Observation System Simulation Experiment; OSSE) やデータ同化・再解析を担う必須の道具として認識されるようになってきており、多くの投資がなされつつある。実際、火星探査においては、地球観測と同様、大きな力を発揮しつつある。

日本においても、「あかつき」による金星大気探査が実現し、また、将来の MMX による火星探査、JUICE による木星探査も進められており、他方、太陽系外にも多数の惑星が発見され、それらに期待される表層環境の推測や新たな観測計画の立案が求められている。これを担うにふさわしい、防災科学や地球環境科学に最適化されたものとは異なる惑星大気科学を主目的とした、シミュレーションモデルと同化システムやデータ処理ツールの構築提供をすすめることが急務である。

このようなソフトウェア資源は、多くの研究者からの知見の集約と様々な協力が得られなければ構築できないし、かつ、それには厩大な手間 (コスト) がかかる。一方、誰でも利用でき改変再配布が許される (学生にも使える) のでなければ、人々の協力と参加が期待できない。惑星大気シミュレーションモデルはこれらを担保するオープンな思想に基づいたコミュニティモデルとして構築される必要がある。これを可能にするためには、人々の信頼を得、その中心となる専従コアチームの確立が必要である。

#### 2. 関係機関

神戸大・理/CPS (Center for Planetary Science, 惑星科学研究センター)、北大・理、京大・理。

しかし、欧米の該当機関に比肩しうる、上記ミッションを専従して担う常勤職員を有した共同利用研究機関の設立が望まれる。現在は全国の大学 (北大、京大、京産大、神戸大、岡山大学、九州大、福岡大など) に分散する教員・研究者が、時間を割いて任意団体である地球流体電脳倶楽部 (<https://www.gfd-dennou.org/>) を組織して上記活動を試みている。

#### 3. 予算規模

一億円/年 (専従研究者・職員の人件費と基盤的運営経費)

#### 4. スケジュール



### 5.1.6.3 超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究 (IUGONET)

#### 1. 目的・内容

超高層大気科学の研究において、多数の大学・研究機関で地上観測や衛星観測、数値シミュレーションによって得られる多種多様なデータを共有し、包括的に解析することが重要である。しかし、データの多様性により、異なる研究・観測グループ間でデータを相互利用することは容易ではなかった。その状況を打開するため、2009年度に5機関7組織の大学間連携による『超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究(略称: IUGONET)』プロジェクトが開始され、データの公開・共有支援、研究基盤(メタデータデータベース、統合解析ツール)開発、国際連携・研究者育成等の活動が行われてきた。

宇宙物理データに関しては、国際太陽系物理学データ環境アライアンス(International Heliophysics Data Environment Alliance: IHDEA)によって、実データやメタデータのフォーマット、ツールやAPI等の標準化についての議論が行われている。IUGONETでは、基本的にこのIHDEAで推奨されている実データフォーマット(CDF、NetCDF、FITS等)、メタデータフォーマット(SPASE)でデータを公開している。また、IUGONETが開発した研究基盤であるメタデータデータベース「IUGONET Type-A」、統合解析ツール「UDAS」、「M-UDAS」も、これら標準フォーマットに基づいている。

現在、IUGONETプロジェクトは第3期(2021~2026年度)を迎えており、今期は(1)太陽地球系物理学分野への貢献、(2)国際連携・人材育成、(3)新しい領域研究の推進、の3つの目標を掲げている。以下、それぞれの内容を述べる。

#### (1) 太陽地球系物理学分野への貢献

国内外の太陽地球系物理学分野における様々な地上観測プロジェクトで取得されるデータ、具体的には、EISCAT\_3Dレーダー、赤道MUレーダー、地上広域観測網等で得られるデータについて、公開、メタデータの作成、統合解析ツールへの登録等を進める。これらの大量且つ多様なデータを効率的に検索、可視化、解析するために、これまでに開発した研究基盤(メタデータデータベース、統合解析ツール)を強化する。

メタデータについては、観測だけでなくシミュレーションデータ、再解析データ等を新たに作成して登録する。これらのデータを記述するために、必要に応じてメタデータフォーマットの改良を行う。また、近年、研究データにデジタルオブジェクト識別子(DOI)を付与する活動が盛んになっていることから、IUGONETでも研究データにDOIを付与するサービスを行う。統合解析ツールについては、IHDEAでも推奨されているプログラミング言語Pythonで書かれた解析ツール「PySPEDAS」のプラグインソフトウェアを開発する。

#### (2) 国際連携・人材育成

宇宙物理データの国際標準メタデータフォーマット「SPASE」を策定しているSPASEコンソーシアムと連携し、SPASEの改良に貢献する。既にIUGONETはSPASEコンソーシアムのメンバーであり、議論を開始している。また、米国NASAの太陽系物理学データポータル(Heliophysics Data Portal)にIUGONETメタデータを登録し、IUGONET参画機関のデータをこのポータルで検索可能にする計画である。加えて、IUGONETは世界科学データシステム(World Data System: WDS)のネットワークメンバーに加盟することを目指している。

国内外の研究者を対象に、IUGONETが開発した研究基盤を用いたデータ解析講習会をオンサ

イト/オンラインで開催し、若手研究者育成に貢献すると共に、多種データ総合解析による共同研究を推進する。特に、赤道 MU レーダーや地上広域観測網等が展開されるアジア、オセアニア、アフリカ地域において、データ公開支援やデータ解析講習会開催を実施することで、国際共同研究を推進する。

### (3) 新しい領域研究の推進

大型レーダー等で取得されるデータ量は極めて膨大であり、そこから効率良く科学成果を創出するために、機械学習や深層学習等のデータサイエンス手法を応用した解析手法、ツールの開発を行う。そのために、統計数理、情報科学分野の研究者との共同研究を推進する。また、異分野、隣接分野の研究者と連携することで、新しい研究領域を開拓する。

## 2. 関係機関

IUGONET 参加機関（情報・システム研究機構国立極地研究所/データサイエンス共同利用基盤施設極域環境データサイエンスセンター、名古屋大学宇宙地球環境研究所、東北大学大学院理学研究科、京都大学生存圏研究所、京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター、京都大学大学院理学研究科附属天文台、九州大学国際宇宙惑星環境研究センター、北海道大学、金沢大学、JAXA/ISAS）、並びに、上記以外の SGEPPS 分野関連データ取得・収集機関（未定）

## 3. スケジュール

2022～2023 年度：

新たに得られる地上観測データ、シミュレーションデータ、再解析データ等の公開を支援する。IUGONET メタデータを利用したデータ DOI 付与のフローを構築する。Python ベースの解析ツール PySPEDAS の開発・公開を行う。

2024～2026 年度：

STP 分野の様々なプロジェクトと連携し、多様なデータの公開を進める。新しい観測装置で取得されたデータの高機能解析ツールの開発を行う。国内外の研究者を対象にデータ解析講習を開催し、若手研究者の育成、共同研究の推進に貢献する。

連絡先： 田中良昌 (国立極地研究所) E-mail: ytanaka at nipr.ac.jp  
山本衛 (京都大学生存圏研究所) E-mail: yamamoto at rish.kyoto-u.ac.jp



#### 5.1.6.4 宇宙地球環境研究のための国際連携研究センター (Center for International Collaborative Research)

##### 1. 目的・内容

地球規模の現象を相手にする宇宙地球環境の研究においては、国際連携研究が欠かせない。このため、宇宙地球環境の分野の共同利用・共同研究拠点として、名古屋大学宇宙地球環境研究所 (ISEE) が所内に国際連携研究センターを整備し、全国の研究者の国際連携研究の推進を支援している。具体的には、国内の研究者が海外の研究者と共同で推進する国際共同研究、名古屋大学をはじめとした国内に海外の研究者を招聘して共同研究を推進する外国人招聘共同研究、テーマを絞ったトピックについて国際ワークショップを開催しその成果を論文の特集号やレビューとして出版する国際ワークショップ、の3種類の国際共同研究を毎年公募して推進している。さらに、海外の著名研究者をクロスアポイントメントで雇用したり、国際スクールやトレーニングコースを主催したり、ISCU傘下のSCOSTEP (太陽地球系物理学科学委員会) が推進する VarSITI プログラムなどの国際プログラムを主導的に推進したり、この分野の各種の多点ネットワーク観測プロジェクトを推進したりしている。このために、英語対応可能な事務補佐員を複数名雇用し、国際事務体制を整備している。このような活動は今後、国際的な共同利用・共同研究拠点として発展させていく必要がある。

##### 2. 関係機関

名古屋大学宇宙地球環境研究所

##### 3. 予算規模 : ( a ) 1 億円程度

##### 4. スケジュール: 実施中

2015 年-2026 年: 名古屋大学宇宙地球環境研究所に国際連携研究センターを整備・推進  
2023 年以降: センター活動を中心に ISEE が国際共同利用・共同研究拠点へ発展

名古屋大学宇宙地球環境研究所  
国際連携研究センター  
Center for International Collaborative Research

国際派遣・招聘



国際連携研究の推進  
クロスアポイントメントによる外国人教員の雇用  
国際共同研究の展開  
外国人招聘共同研究  
国際ワークショップの主催と特集号出版  
発展途上国での国際スクールの主催  
英語対応可能な事務体制の整備





国際スクール




国際ワークショップ

国際協同研究プログラムの立案・推進

連絡先：塩川和夫（名古屋大学）  
e-mail: shiokawa at nagoya-u.jp

## 5.1.6.5 CPS(惑星科学研究センター)の定常化に向けて Toward the establishment of CPS (Center for Planetary Science)

### 1. 目的・内容

21COEプログラム最終年度(H19)に設立され、続くG-COEプログラム(H20-H24年度)の実施拠点として機能した神戸大学理学研究科附属惑星科学研究センター(Center for Planetary Science, 略称CPS) (<http://www.cps-jp.org/>)を財政的・組織的に安定化定常化させる。そこで実現していた国際プラネタリースクール、あるいは、近年開催していた探査ミッション立案スクール(H27-H30)など各種滞在型スクール・実習・研究会開催あるいは開催支援、様々な形での人材交流、知見情報アーカイブの運営維持等々の活動を復活あるいは維持継承発展させるとともに、これらの活動を運営する事務局とこれらの活動を介して涵養される人的ネットワークをもって、別途惑星科学・宇宙科学関係者で構想されている、日本学術会議マスタープラン2020「惑星探査コンソーシアムプロジェクト：太陽系における生命生存環境の探求」(計画番号97 学術領域番号24-2)後継プランの構成要素として機能し、太陽系探査を支える基盤の一翼に資する。

高度化専門分化した現在の科学のスタイルにおいて、知識を総合し俯瞰すること、交流と協業を促す場と知見を集積し提供する装置を有することはその継承と展開において必要不可欠であり、特に、太陽系探査に象徴される巨大プロジェクトを必要とする惑星科学・宇宙科学の展開においては、その企画を議論提案支援し成果を抽出提供共有していくために必須の装置である。

CPSはネットワーク型研究所としてそのような必要に答えようとする組織である。少人数のスタッフで構成し、あらゆる分野に手法として必要とされる計算科学・データ科学の展開と知見アーカイブをその中核に据え、コミュニティの研究者による交流と協業の企画・運営を支援することで知識を総合し俯瞰することに貢献する。このようなネットワーク型研究所の重要性は米国や欧州では認識されており、Lunar & Planetary Institute (LPI) や International Space Science Institute (ISSI) 等がその例として挙げられる。CPSをもってLPIやISSIに比肩しうるネットワーク型研究所として定着させ、それらが惑星科学・宇宙科学において担っているのと同等の機能を我が国において実現することが目標である。

### 2. 関係機関

JAXA/ISAS、国立天文台、アストロバイオロジーセンター(ABC)、神戸大、北海道大、他惑星科学に関連するすべての研究教育機関

### 3. 予算規模

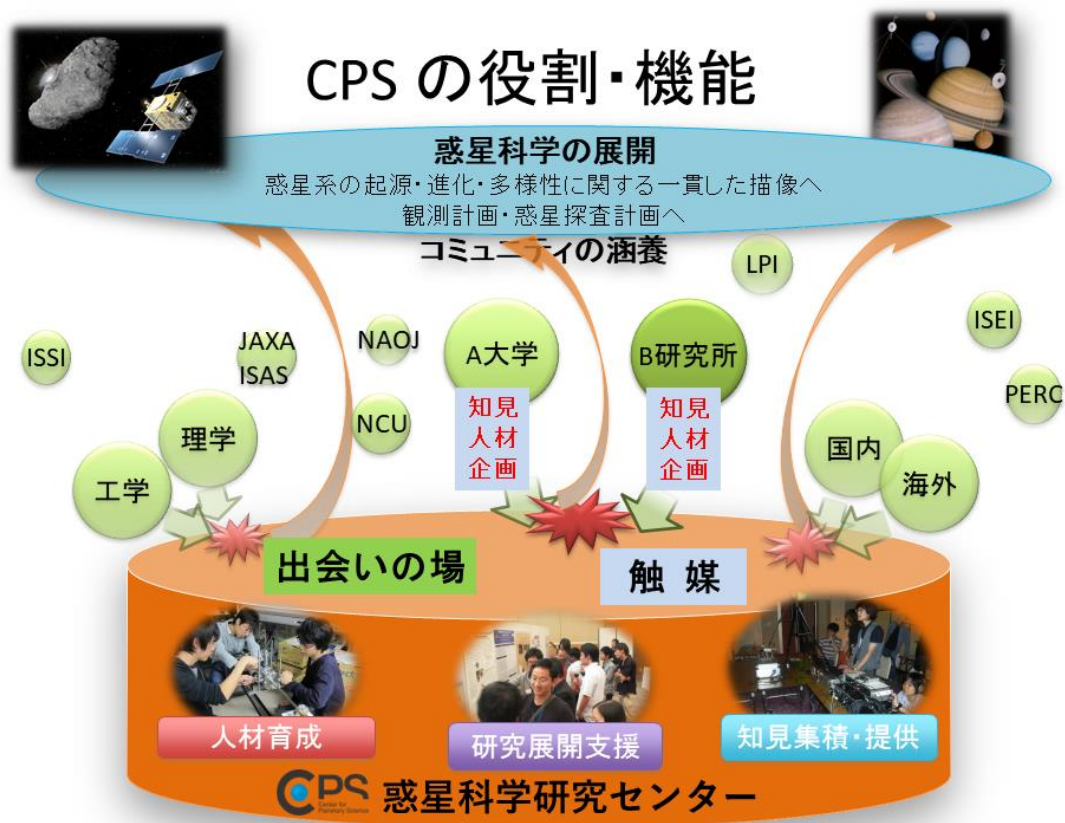
4億円/年 (= G-COEプログラムの規模+計算情報基盤)

国際プラネタリースクール、各種滞在型スクール・実習、CPSセミナーならびに各種研究会・大型計画企画立案集会の開催、人材の国内外への派遣並びに招聘等の事業費、ならびに、これらの事業を企画運営しその事務局として機能するための専任教員と専任職員の人件費、知見情報の収集とその活用を促すソフトウェア・ハードウェアの開発ならびにそれらの整備提供等の事業費、これらの活動を支える神戸大学等での空間維持経費ならびに情報基盤の整備運営維持費等。

### 4. スケジュール

神戸大学・北海道大学G-COEプログラムが平成24年度に終了した後、CPSは財政的組織的に不安定な状態にあり、できるだけ速やかに定常状態に移行させ、経験と資産の散逸消失を防ぐことが望まれている。平成25年度から平成30年度までは神戸大学からの支援によって同大学統合研究拠点にて空間と若干名の事務員と常駐専任研究者を擁することができ、特に平成27年度から30年度まではJAXA宇宙科学研究所との大学共同利用連携拠点事業(太陽系探査ミッション創出と探査を牽引する人材育成プログラム)、現在も継続中の事業

としてはアストロバイオロジーセンター（ABC）との連携事業、そして、HPC活用の計算科学振興事業として、ポスト「京」萌芽的課題「生命を育む惑星の起源・進化と惑星環境変動の解明」（平成28～令和元年度）、「富岳」成果創出加速プログラム「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」（令和2～4年度）等の事業推進を実現できてはいるが、G-COE終了から10年の歳月を経て様々なノウハウの散逸の危機にあり、これを防ぐべく安定的な運営基盤の確保確立が急がれるところにある。



連絡先：牧野淳一郎、林祥介（神戸大学理学研究科／惑星科学研究センター）  
e-mail: exec-ml at cps-jp.org

### 5.1.6.6 惑星探査コンソーシアム

日本の宇宙探査は構想段階から始まって、いわゆるフェーズ A(概念検討)、B(開発研究)、C(開発)、D(運用)を経た後に、獲得データを使った成果創出に至る。JAXAは『実行機関』として、フェーズ A~Dに責任を持ってプロジェクトを実施するが、最初の構想段階と最後の成果創出は、原則として、個別の研究グループや個人研究者の自助に委ねられている。しかしながら、典型的な大型プロジェクトである宇宙探査では、多様なミッション提案、機器提案を JAXA がゼロから評価することはあり得ず、『コミュニティの合意』というフィルタを通して事前の選別を行うことが求められる。成果創出の段階においては、プロジェクト研究者のデータ利用優先と速やかなデータ公開のバランスをコミュニティが調整して科学成果の最大化を図らなければならない。このように、プロジェクトの入口と出口において、コミュニティは重い責任を負っているのであり、その責任を担うだけの体制が必要である。

コミュニティはミッション構想段階において、搭載機器の基礎開発を行い、ミッション案をブラッシュアップして、コミュニティ内での優先順位をつける責任がある。一方、この段階で組織されたりサーチグループ(RG)が、概念検討・プロジェクト化準備段階でワーキンググループ(WG) ⇒ プリプロジェクトと発展するにつれて、コミュニティと宇宙研メンバーが緊密に協力して搭載機器開発やミッション定義を行わなければならない。特に、ミッション構想~概念検討段階においては、宇宙研における機器開発の経験を人材交流を通して宇宙研所外の大学・研究機関へ還流させて、多種多様な搭載機器の萌芽を育てることが重要である。反対に、コミュニティは現実的なシミュレーション研究(一般には“研究成果”として認められ難い)によって、宇宙研による概念検討・プロジェクト化準備を支援する。現状では、惑星科学コミュニティにおける責任体制が無く、宇宙研との連携に重大な支障がある。

アルテミスに代表されるトップダウン型のプロジェクトでは、原則として、個別の研究グループが一本釣りで直接 JAXA プロジェクトに組み込まれる。コミュニティが分野ごとに持っている将来計画やロードマップを反映させるためには、宇宙研(アルテミスでは国際宇宙探査専門委員会)を通して JAXA(アルテミスでは国際宇宙探査センター)に働きかける必要があるが、そのような意思疎通のシステムの構築は現在模索中である。

安全保障や産業振興といった目的で実施されるトップダウンプロジェクトにおいて、コミュニティが一貫した科学戦略を保つためには、多様な搭載機器の選択肢を常備していなければならない。そのためにはコミュニティに戦略的機器開発と情報流通を統括する指令塔が必要である。また、今後は宇宙理工学のみならず、医学や農学、人文社会学にわたる広い視野をもつ人材が求められる。学際的な人材の教育は宇宙技術に特化した JAXA よりも基礎教養を重んじる大学の務めであろう。

宇宙研とともに日本の惑星探査プロジェクトを実現するにあたって、コミュニティに以下のような役割を求められていることが分かる。(1)ミッション構想~概念検討段階において、宇宙研と連携しうる責任体制を構築する。搭載機器開発を育成し、ミッション提案のブラッシュアップを実行するとともに、シミュレーション研究を通して概念検討やプロジェクト化準備を支援する。また、宇宙研との人事交流を可能にする。(2)トップダウンのプロジェクトに即応できる体制を構築する。積極的な情報流通により、戦略的な機器開発を統括する。(3)宇宙理工学の壁を破り、医学や農学、人文社会学にわたる広い視野をもつ人材を大学において育成する。(4)データの管理・公開に一定の責任を持つ体制を構築する。研究目的で開発されたオープンソフトウェア群と、それにより高次処理されたデータを維持する。(5)コミュニティ内の将来計画提案を具体的で実現性の高いロードマップへ蒸留する中核研究所を構築する。このような役割を担う体制として惑星探査コンソーシアムを提案している。

連絡先：竝木 則行 (自然科学研究機構 国立天文台)

E-mail: nori.namiki at nao.ac.jp



## 5.2. 共同利用拠点を含めた大型研究機関の重要性

この章では、地球電磁気・地球惑星圏科学に関する研究を発展させるために重要な研究機関とその重要性を挙げる。これらの研究機関の記述は、全学会員にアンケート調査を行うことにより得られたものであり、

- 5.2.1 国立研究開発法人などの大型の研究機関
- 5.2.2 大学附置研究所
- 5.2.3 主に大学の学部や研究科に附属したセンター

に分類される。以下に、まず全ての研究機関を表としてまとめ、それ以降のページに各機関の詳細を記述する。

節番号	機関名	URL	原稿作成者
<b>5.2.1</b>	<b>大型研究機関</b>		
5.2.1.1	気象庁地磁気観測所	<a href="http://www.kakioka-jma.go.jp/">http://www.kakioka-jma.go.jp/</a>	浅利晴紀
5.2.1.2	産業技術総合研究所	<a href="http://www.aist.go.jp/">http://www.aist.go.jp/</a>	小田啓邦
5.2.1.3	国立極地研究所	<a href="http://www.nipr.ac.jp/">http://www.nipr.ac.jp/</a>	中村卓司
5.2.1.4	情報通信研究機構	<a href="http://www.nict.go.jp/">http://www.nict.go.jp/</a>	石井守 村山泰啓
5.2.1.5	宇宙科学研究所／宇宙航空研究開発機構	<a href="http://www.isas.jaxa.jp/">http://www.isas.jaxa.jp/</a>	篠原育
<b>5.2.2</b>	<b>大学附置研究所</b>		
5.2.2.1	東京大学大気海洋研究所	<a href="http://www.aori.u-tokyo.ac.jp/">http://www.aori.u-tokyo.ac.jp/</a>	山崎俊嗣
5.2.2.2	東京大学地震研究所	<a href="http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/">http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/</a>	清水久芳
5.2.2.3	名古屋大学宇宙地球環境研究所	<a href="http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/">http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/</a>	塩川和夫
5.2.2.4	京都大学防災研究所	<a href="http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/">http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/</a>	吉村令慧
5.2.2.5	京都大学生存圏研究所	<a href="http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/">http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/</a>	山本衛
5.2.2.6	高知大学海洋コア国際研究所	<a href="http://www.kochi-u.ac.jp/marine-core/">http://www.kochi-u.ac.jp/marine-core/</a>	山本裕二
<b>5.2.3</b>	<b>大学関連センター</b>		
5.2.3.1	北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター	<a href="http://www.sci.hokudai.ac.jp/isv/">http://www.sci.hokudai.ac.jp/isv/</a>	橋本武志
5.2.3.2	東北大学大学院理学研究科附属惑星プラズマ・大気研究センター	<a href="http://pparc.gp.tohoku.ac.jp/">http://pparc.gp.tohoku.ac.jp/</a>	笠羽康正 小原隆博
5.2.3.3	東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター	<a href="http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/">http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/</a>	市來雅啓
5.2.3.4	名古屋大学大学院環境学研究科付属地震火山研究センター	<a href="http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/center/">http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/center/</a>	市原寛
5.2.3.5	京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター	<a href="http://www.aso.vgs.kyoto-u.ac.jp/menu/index.html">http://www.aso.vgs.kyoto-u.ac.jp/menu/index.html</a>	宇津木充
5.2.3.6	京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター	<a href="http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/">http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/</a>	松岡彩子
5.2.3.7	神戸大学惑星科学研究センター	<a href="http://www.cps-jp.org/">http://www.cps-jp.org/</a>	林祥介
5.2.3.8	九州大学国際宇宙惑星環境研究センター	<a href="https://www.i-spes.kyushu-u.ac.jp/">https://www.i-spes.kyushu-u.ac.jp/</a>	吉川顕正
5.2.3.9	九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター	<a href="http://www.sevo.kyushu-u.ac.jp/">http://www.sevo.kyushu-u.ac.jp/</a>	相澤広記





気象庁地磁気観測所は、電磁気学的な手法によって地球環境の変動を監視する国家機関である。2013年に百周年を迎えた柿岡本所は長期に渡り地磁気データを安定供給し続ける国際的な標準観測所であり、女満別・鹿屋観測施設もそれぞれ運用開始から60有余年の歴史を誇る。これら3観測所からは最高品質の地磁気データを遅滞なく供給し続けており、いずれもインターマグネット(5.3.4節)の認定観測所として国内外から高い評価を得ている。また他に、父島でも無人の地磁気連続観測点を運営しており、こちらも設置からまもなく50年を迎える。

柿岡・女満別・鹿屋・父島で取得された地磁気・地電流の確定データについては0.1秒値から1時間値まで公式ウェブサイト(<https://www.kakioka-jma.go.jp>)にて公開している。これらは地球・宇宙科学分野の研究対象である地球内部現象(地磁気永年変化・地殻活動)、地球内部構造(地球コア・マントル・地殻)、超高層現象(地磁気脈動)の解明に資する基礎資料としてSGEPSSの研究活動を支えている。また、京都大学の地磁気世界資料解析センター(5.2.3.6節)、情報通信研究機構(5.2.1.4節)に即時提供している観測データは、太陽地球環境の監視(それぞれ地磁気じょう乱指数の算出、宇宙天気の実況把握・予報)に活用されることで社会にも貢献している。更に、国内5火山(雌阿寒岳、草津白根山、伊豆大島、三宅島、阿蘇山)において全磁力観測を行っており、観測結果は気象庁における火山活動の評価・警報等の防災情報にも資している。

このように近代地磁気観測の黎明期から地球電磁気学の発展に寄与してきた当所も近年では目まぐるしい変革期を迎えている。女満別・鹿屋の無人観測化および女満別の大気電場観測の廃止(2012年)、いわき・北浦の全磁力連続観測施設の閉鎖(2020年)、更には柿岡・女満別・鹿屋の地電流観測および柿岡の大気電場観測の廃止(2021年)と、相次いで省力化が進んだ。また、柿岡の精密観測を担って半世紀になる独自開発の磁気儀DI-72が老朽化する中、その保守や次期磁気儀への更新では困難に直面するなど、観測体制の維持を巡る状況は以前にも増して厳しくなっている。

施設や人的な資源に限られる現状に対し、今後は定常観測・データ処理・データマネジメントにおいて新しい技術を導入することで学術成果とデータ提供サービス両面を維持することが望まれる。地磁気絶対観測の従来方式では熟練の手技を要するが、現在、その負担を軽減できる新方式(弱磁場方式の改良版)の導入に向けて精度調査を進めている。同方式は、観測環境が厳しい父島、南極昭和基地(4.1.1節「地上磁力計システムの新展開」参照)、更には火山活動の評価の高度化に繋がる地磁気ベクトルの観測に導入される予定である。一方、次期磁気儀の国内独自開発においても、当所が主体となり、計測機器等に精通した専門家や製造業者の協力のもとに推進することが望まれる。データ処理では、AIを活用した準リアルタイムの自動判定技術の開発導入により、磁気嵐・地磁気脈動をはじめとした地磁気短周期現象や擾乱指数の読取り・採用作業の効率化を目指したい。情報通信研究機構への常時通報体制を整えることで、宇宙天気の実況監視や予報に寄与し、電波通信や電力供給障害へのアラートに繋がると期待される。データマネジメントでは、当所の公開データベースへのDOI付与作業がようやく完了したところであり、DOIによるデータ引用の普及促進によりSGEPSS分野のオープンサイエンスによる学術基盤の発展の一端を担い始めている。更に、歴史的な磁気嵐等も観測したアナログ記録のデジタルデータ化、地磁気暫定データのリアルタイム提供システムの整備を進め、多様化する学術界のニーズに対して当所のオープンアクセス体制を拡張することで、より時代に即したサービスを提供する。

新たな百年を迎えた当所をめぐる状況は、観測体制、観測環境ともに厳しさを増しつつある。その中で如何に学術界や社会に貢献するかという課題に対し、歴史を通じて蓄積・継承された知見に最新技術を柔軟に融合させることで新たな活路を見出そうとしている。

連絡先：技術課

〒315-0116 茨城県石岡市柿岡 595 Tel: 0299-43-1876

Fax: 0299-43-1154

### 5.2.1.2 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

#### 【研究機関の目的】

国立研究開発法人産業技術総合研究所（産総研）は日本の産業技術を支えるエネルギー・環境領域、生命工学領域、情報・人間工学領域、材料・化学領域、エレクトロニクス・製造領域、地質調査総合センター、計量標準総合センターの7領域の研究を行う我が国最大級の公的研究機関である。産総研は2001年発足であるが、1882年の農商務省地質調査所がその始まりである。在籍研究員は約2,200名、4,000名以上の外来研究者を受け入れている。持続可能な社会の構築に向けて、21世紀型課題の解決のために研究開発を進めており、2021年に産総研ビジョン「ともに挑む。つぎを創る。」を策定した。2020年度から開始した第5期中期計画においては、産総研ブランドの確立に向けて、ナショナル・イノベーション・エコシステムの中核機能と産総研のチーム力の強化を行うこととしている。社会課題の解決に向けて全所的に取り組む研究開発としては、1. エネルギー環境制約への対応、2. 少子高齢化の対策、3. 強靱な国土・防災への貢献、4. 防疫感染症の対策の4つがあげられる。

#### 【SGEPSSにおける重要性と今後の展望】

産総研における現在のSGEPSS会員は地質調査総合センターを中心に複数の領域に在籍しており、陸および海における磁気探査・電磁探査、地球内部電磁気学、古地磁気学・岩石磁気学、惑星探査の分野で活動を行っている。海域の磁気探査においては日本のEEZのみならず西太平洋・南極海を中心に世界の磁気異常データの蓄積に貢献してきた。空中磁気探査に関しては日本の国土とその周辺海域についてデータの蓄積を行い、特に火山地域地下構造の解明に貢献してきた。これらの磁気異常データは、米国NGDCのデータベースに寄与するとともに、IAGAのワーキンググループの活動を通してコンパイルを行い世界の研究者に提供されている。陸・海域における電磁探査および空中電磁探査については、SGEPSS会員のみならず物理探査学会会員によって精力的に行われてきた。これらの結果、日本の構造発達史の解明・活断層調査・資源探査などに貢献してきた。古地磁気学の分野では、特に過去数百万年における地球磁場強度変動や地球磁場逆転・地磁気エクスカージョンの記録を年代推定に用いるための信頼できる基礎的データを提供してきた。また、走査型SQUID顕微鏡の開発を行い、海底鉄マンガンクラストへの極微細古地磁気層序の適用による成長年代軸構築、ならびに環境岩石磁気のマッピングを成功させている。さらに、地質分野の微化石・火山灰・放射年代測定等の専門家と共に複合年代層序を構築し、精密な地質年代軸を提供するとともに、信頼できる地質図幅の完成にも寄与してきた。これらの総合的成果の代表例として、新たな地質年代として認定された「チバニアン」の国際標準模式地申請における貢献が挙げられる。惑星探査の分野では金星探査機「あかつき」など現在も進行するミッションに関わり、産総研で長く経験を持つ宇宙空間での機器校正技術の知見を活かし観測データの品質保証に尽力するとともに、金星特有の気象現象の解明に貢献している。

産総研の特徴として、知的基盤情報の提供とともに他の地球物理分野および地質分野との連携による幅広い視点からの深い理解に基づく地下構造・構造発達史の解釈があげられる。今後の展望としては、これまで行ってきた研究を着実に継続・発展させるとともに、冒頭で述べた7領域にまたがるメリットを生かして新たな研究の展開を行うことが期待される。エレクトロニクス・製造領域ではスピントロニクスや次世代磁性物質などに関する研究が進められている。エネルギー・環境領域では、ダイヤモンドNV中心を使った磁気検出デバイスの実用化が期待される。計量標準総合センターでは電流標準を整備しており、標準磁場は精密に整形されたコイルに標準電流を流すことで実現される。例えば柿岡地磁気観測所の地磁気観測装置はこのようなコイルを用いて校正が行われる。また、絶対磁気計測のよりどころとなる水素原子(proton)のGyromagnetic ratioの導出にも貢献している。このような環境を生かして革新的な観測装置や分析装置を開発して先端的研究成果につなげていくことは産総研の目指す研究所像でもあり、SGEPSSと日本の将来にとっても重要である。

また、放射性耐性の高いLSI、宇宙メンテナンスロボット、無線電力送信のための整流回路など、産総研の技術シーズを宇宙開発につなげる動きも活発化しており、SGEPSS の宇宙空間における活動にとっても今後益々重要な役割を果たすことが期待される。

代表連絡先

住所：〒305-8560 茨城県つくば市梅園 1-1-1

中央事業所 つくば本部・情報技術共同研究棟  
つくば本部

電話：029-861-2000

### 5.2.1.3 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所 (Research Organization of Information and Systems, National Institute of Polar Research)

国立極地研究所は「極地に関する科学の総合研究および極地観測を行うこと」を設置目的とする大学共同利用機関である。南極大陸と北極圏に観測基地を擁し、極域での観測を基盤に総合研究を進めている。全国の研究者に南極・北極における観測の基盤を提供するとともに、共同研究課題の公募や、試資料・情報提供を実施するなど極域科学の推進に取り組んでいる。

規模：研究教育職員 51名、特任教員 12名、特任研究員 14名 計77名。  
事務/技術系職員 176名（短時間雇用職員、南極観測職員も含む）  
総計 253名。  
令和4年度予算 42.6億円（文部科学省補助金、科学研究費補助金等含む）

南極地域観測の中核機関：日本の南極地域観測計画を企画・立案・実施する。2022年からは第X期6か年計画として「過去と現在の南極から探る将来の地球環境システム」を主要なテーマに研究観測を行っている。また、南極地域にある基地施設（昭和、みずほ、あすか、ドームふじ）の維持管理、運営を行うほか、南極地域観測隊の編成準備、各種訓練、観測事業に必要な物資の調達、搬入計画の作成や観測で得られた試資料の収集、保管などを行っている。

北極観測実施の中核機関：北極観測は、ニーオルスン基地をはじめ、スバルバル、グリーンランド、スカンジナビア北部、アイスランド等の陸域を観測拠点として、大気、氷床、生態系、超高層大気、オーロラ、地球磁場等の観測を実施している。また、北極海やグリーンランド周辺における海域においても海洋生態系・大気観測を実施している。2020年度からはArCS II（Arctic Challenge for Sustainability II）北極域研究加速プロジェクトを開始した。

研究者の育成機関：大学院教育では、総合研究大学院大学複合科学研究科極域科学専攻として5年一貫制博士課程による学生を受け入れ、幅広い視野を持った国際的で独創性豊かな研究者の育成を図っている。

SGEPSSとの関連：極域は、オーロラをはじめとする太陽風－磁気圏－電離圏現象の研究や、熱圏や中間圏・成層圏大気を通じた地球環境変動の研究、また、古気候・古環境変動や地球内部ダイナミクスの研究にとって重要な領域であり、南極観測・北極観測はSGEPSSの研究分野においても極めて重要な要素となっている。南北両極での観測と研究を推進する中核機関、とくに国家事業である南極地域観測を推進する中心機関であり、最近では国内の北極気候変動研究を束ねる役割も有する国立極地研究所はSGEPSSの重要な共同利用機関の一つであると言える。

代表連絡先（SGEPSS対応）：中村卓司教授（所長）  
〒190-8518 東京都立川市緑町10-3 国立極地研究所、T:042-512-0601、F:042-528-3164

#### 5.2.1.4 情報通信研究機構

(National Institute of Information and Communications Technology; NICT)

<概要および当学会における重要性>

国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) は、電気試験所、文部省電波物理研究所などを源流として、後には郵政省電波研究所、通信総合研究所等を経て 2004 年に設立された。現在の NICT は電磁波先進技術分野、革新的ネットワーク分野、サイバーセキュリティ分野、ユニバーサルコミュニケーション分野およびフロンティアサイエンス分野の重点 5 分野とともに、日本標準時の配信、無線機器の型式検定や宇宙天気予報業務を担う。また、1957 年以来、電離圏・宇宙天気世界資料センター (WDC for Ionosphere and Space Weather) を担当するとともに、1962 年に発足した国際宇宙環境サービス (ISES) の一員として、日本地域警報センター (RWC Japan) を担当してきた。2019 年 12 月からは国際民間航空機関 (ICAO) のグローバル宇宙天気センターとしての役割を果たしている。当学会に関連する研究活動としては、現在宇宙天気予報に関する研究開発や地球環境のリモートセンシング技術の研究開発などが実施されている。NICT は総務省所管の国立研究開発法人であり、基礎から応用までの幅広い研究をカバーしながら、かつ、基礎・基盤開発と社会展開の間をつなぐ研究を担う機関としても重要な役割を果たしている。

<構成>

当学会に関係する主な部局は、電磁波研究所電磁波伝搬研究センター (リモートセンシング研究室、宇宙環境研究室) がある。

<設備>

- ・広帯域太陽電波観測 (70-9000MHz) : 山川 (鹿児島県指宿市)
- ・太陽風観測衛星データ受信 (DSCOVR) : 本部 (東京都小金井市)
- ・太陽観測衛星データ受信 (STEREO) : 本部 (東京都小金井市)
- ・磁力計 : 沖縄 (沖縄県国頭郡国頭村)
- ・東南アジア低緯度電離圏観測ネットワーク (SEALION) : チュンポン、チェンマイ、ブーケット (タイ)、バクリウ (ベトナム)、コタババン (インドネシア)、セブ (フィリピン)
- ・短波電波伝播方探観測 : 大洗 (茨城県東茨城郡大洗町)
- ・電離圏定常観測 : サロベツ (北海道天塩郡)、国分寺 (NICT 本部 ; 東京都小金井市)、山川 (鹿児島県指宿市) 沖縄 (沖縄県国頭郡大宜味村)、南極昭和基地 (昭和基地 : 文科省事業)、および各サイトにおける関連観測実験
  - ・GNSSTEC 観測 : 国内外の GNSS 受信機データを収集・処理し電離圏全電子数観測データ等公開。
- ・ウィンドプロファイラレーダー : 1.3GHz 帯レーダー (NICT 本部 ; 東京都小金井市)
- ・コヒーレントドップラーライダー (NICT 本部 ; 東京都小金井市)
- ・フェーズドアレイ気象レーダー : 単偏波フェーズドアレイ方式降水レーダー (大阪大学吹田キャンパス、未来 ICT 研究所 (神戸)、沖縄電磁波技術センター)。
- ・マルチパラメータ・フェーズドアレイ気象レーダー : 二重偏波フェーズドアレイ方式降水レーダー (埼玉大学)。
- ・HG-SPIDER : W 帯高感度雲レーダー (NICT 本部 ; 東京都小金井市)
- ・ES-SPIDER : W 帯電子走査雲レーダー (NICT 本部 ; 東京都小金井市)
- ・Pi-SAR X3 : 航空機搭載合成開口レーダー

- ・オーロラ Web カメラ等（米国アラスカ州ポーカークラフト）

（以上、装置によっては他機関との共同研究・共同実験が可能なもの・困難なものがあるので、個別にお問い合わせいただきたい。）

連絡先：

〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

情報通信研究機構





### 5.2.1.5 宇宙科学研究所／宇宙航空研究開発機構

(Institute of Space and Astronautical Science/Japan Aerospace Exploration Agency)

2003年10月1日に、それまで我が国における宇宙及び航空の分野において独自に研究活動を行ってきた宇宙科学研究所、宇宙開発事業団、航空宇宙技術研究所の3機関の力を結集し、宇宙開発、宇宙科学研究及び航空科学技術を一段と効率よく効果的に推進する体制を構築するため、これらの3機関が統合され、独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）が設立された。

宇宙科学研究所（ISAS）の設置目的は、その前身である文部科学省宇宙科学研究所の大学共同利用機関の機能を継承し、全国の大学や研究機関に所属する関連研究者との有機的かつ多様な形での共同活動を行う研究体制を組織し、科学衛星・探査機による宇宙科学ミッション、大気球・観測ロケット、小型飛翔体等による小規模ミッション、宇宙環境を利用した科学研究、将来の宇宙科学ミッションのための観測技術等の基礎研究を推進することであり、これまで、宇宙科学研究について、国公立大学等多くの機関の研究者の協力の下に、多大な成果を収めてきた。

ISASでは、研究者が個人あるいはグループを作って行う研究で、萌芽的な性格をもつ「研究者の自主性を尊重した独創性の高い宇宙科学研究」と、科学衛星プロジェクトに代表される、装置開発からデータ解析、成果の公表までの一連の作業を含む「衛星等の飛翔体を用いた宇宙科学プロジェクトの推進」を両輪として研究を進めている。

また、大学共同利用システムを通して、宇宙科学研究に従事する全国の国公立大学その他の研究機関の研究者に実験施設・設備利用の場を提供するとともに、大学院教育の場として、国公立大学の要請に応じ、当該大学の大学院における教育に参加・協力することとなっており、この制度の下にSTP分野の後継者育成にもあたっている。

地球電磁気・地球惑星圏学会（SGEPSS）との関連では、超高層大気、宇宙プラズマ、惑星科学、等の研究活動が太陽系科学研究系に所属する研究者を中心に、各研究機関に所属する研究者との連携の元を実施されている。「ジオテイル」「れいめい」「あかつき」「ひさき」「あらせ」の現在運用中の科学衛星、水星を目指して惑星間空間を航行中の「みお」（BepiColombo/MMO）、また、JUICE、Destiny+やMMX、等の将来計画の搭載観測機器開発、計画されている観測ロケットや大気球実験、等、多くの関連飛翔体プロジェクトを実施しており、SGEPSSに所属する研究者にとって極めて重要な共同利用機関となっている。

研究機関連絡先住所：〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1

Tel: 042-751-3911, Fax: 042-759-4251

### 5.2.2.1 東京大学大気海洋研究所

(Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo)

東京大学大気海洋研究所は、大気海洋科学の基礎的研究を行うことを目的とした全国の研究者のための共同利用・共同研究拠点として、学術研究船共同利用、柏地区及び大槌研究拠点で公募する共同利用・共同研究（外来研究員制度、研究集会の公募制度）の公募を行っています。大気海洋研究所は、3つの研究系に括られた8つの研究部門および研究連携領域、3つの研究センターからなり、共同利用・共同研究のための支援組織として、共同利用共同研究推進センターがあります。

学術研究船白鳳丸は、比較的長期の研究航海を行う大型の研究船で、遠洋の航海が可能です。2021年度に今後20年間の利用を見据えた大規模改修が行われました。研究計画は3年ごとに公募により策定され、さらにその研究計画に基づいた単年度の公募があります。新青丸は、2012年度で退役した淡青丸の後継船として建造された、東北海洋生態系調査研究船（学術研究船）です。公募は主として日本近海の調査研究を対象に毎年行われます。さらに、深海潜水調査船支援母船「よこすか」の共同利用公募も大気海洋研究所にて行われます。

船舶だけでなく、マルチナロービーム測深装置や船上重力計のような船体固定の観測装置はもちろん、マルチチャンネル地震探査システム、プロトン磁力計、ピストンコアラー、CTD採水システム等の観測装置も共同利用の対象です。さらに、ナノシムス、放射性炭素年代測定用加速器質量分析システムをはじめとする種々の陸上研究施設も、外来研究員制度により担当教員との連携のもとで共同利用に供されています。

地球電磁気・地球惑星圏科学の中でも、地磁気・古地磁気・岩石磁気研究や、電磁場観測による地球内部研究の推進のためには、海洋における電磁気観測や海底試料の採取・分析を行う必要があります。そのためには船舶とそれに付帯する観測設備が欠かせません。これまでも東京大学大気海洋研究所は、学術研究船の共同利用を行う中核的な研究機関として、このようなニーズに応じてきました。近年の財政事情により、船舶の共同利用に供することができる運航日数が減少しており、ボトムアップ研究の推進のためには海洋研究コミュニティのニーズに応えられるだけの運航日数の確保が重要な課題となっています。

#### 機関連絡先

住所：千葉県柏市柏の葉 5-1-5

電話：04-7136-6006（代表）

ホームページ：<http://www.aori.u-tokyo.ac.jp/>

### 5.2.2.2 東京大学地震研究所 (Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

地震研究所には80名を超える理工学分野の研究者(教員)が結集し、1) 私たちが住む惑星地球で展開される、地震・火山活動や地球内部における諸現象の科学的解明と、2) これらの現象が引き起こす災害の軽減を目指し、総合的な研究・教育を進めています。令和4年現在、地球電磁気を専門とする常勤教員6名が在籍する、国内最大規模の固体地球電磁気研究拠点です。

平成6年に全国共同利用化され、平成22年に全国共同利用・共同研究拠点として認定されてからは、本学会員が共同利用に多数参加しています。平成16～令和4年度におけるその実績は、同研究所の委員として計8名、客員教授等として5名の会員が同研究所の運営に参加する一方、本学会員が申請者となった共同利用課題は84件、研究集会の開催数9件に達しています。

代表連絡先住所：113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1 東京大学地震研究所  
電話番号：03-5841-2498  
FAX 番号：非公開  
HP URL：<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp>



名古屋大学宇宙地球環境研究所 (ISEE) は、これまでの名古屋大学内の太陽地球環境研究所 (STEL)、地球水循環研究センター (HyARC)、年代測定総合研究センター (CCR) を統合して、2015年10月1日に設立された。ISEEは宇宙科学と地球科学を結び付ける全国で唯一の共同利用研究所として、地球・太陽・宇宙を1つのシステムとしてとらえ、そこに生起する多様な現象のメカニズムや相互関係の解明を通して、地球環境問題の解決と宇宙に広がる人類社会の発展に貢献することをミッションとしている。ISEEがカバーする研究分野は、地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) の分野の大きな部分を占めており、SGEPSSの研究及び運営において、ISEEの研究者は大きな役割を果たしてきた。

ISEEは、所内においては、総合解析研究部、宇宙線研究部、太陽圏研究部、電磁気圏研究部、気象大気研究部、陸域海洋圏生態研究部、年代測定研究部の7つの研究部からなる基盤研究部門、および、国際連携研究センター、統合データサイエンスセンター、飛翔体観測推進センターの3つの附属センターで構成され、全国に4つの観測所を持つとともに、世界各国に90か所以上の観測点や連携機関を持っている。職員は約46名の任期なし研究者の他、年間7-10名程度の外国人特任教員、15名以上の特任・ポストドク研究員、10名以上の技術職員・技術補佐員、研究所事務部で構成されている。大学院教育としては、理学研究科・工学研究科・環境学研究科の3研究科に協力講座を持ち、大学院生の教育を通して若手の人材をSGEPSSに輩出している。また、旧STELの時代から太陽地球系科学に関する国際大型研究計画を国際的なリーダーシップを持って推進しており、近年では、国際組織SCOSTEP (国際太陽地球系物理学・科学委員会) が推進する国際協同研究「変動する太陽地球系結合過程の予測可能性」(Predictability of Variable Solar-Terrestrial Coupling (PRESTO)) を主導している。

共同利用・共同研究拠点としては、2022年度から開始された第4期中期計画の中で、融合研究戦略室を立ち上げて新たな融合研究を推進するとともに、国際共同研究、外国人招聘共同研究、国際ワークショップ、一般共同研究、研究集会、学生向け奨励共同研究、データベース作成共同利用、計算機利用、加速器質量分析装置等利用の従来の共同利用・共同研究プログラムに加えて、航空機観測共同利用、若手国際フィールド観測、国際技術交流、国際スクール開催支援、若手国際派遣支援を新たに展開し、全部を合わせて年間200件程度の共同利用・共同研究を推進している。また、関連する大型装置群による観測を維持・継続すると共に、SGEPSSコミュニティに使いやすい形で、衛星観測・地上観測・モデリングのデータや統合解析ツールを提供している。

研究機関連絡先住所：〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町

Tel: 052-747-6306, Fax: 052-747-6313

#### 5.2.2.4 京都大学防災研究所

(Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

京都大学防災研究所は、1951年の創設から現在に至るまで、「災害学理の追求と防災に関する総合的・実践的な研究の推進」をミッションとした研究と教育を展開している。地震災害、火山災害、水災害、気象災害、地盤災害などの自然災害を対象とし、理学・工学・社会科学・情報学等の多様な背景を持つ約100名の常勤研究者を筆頭に、多数の研究者・大学院生と共に、災害を起こす事象の予測と究明、災害を予防するための技術開発、災害に対する危機管理、災害後の対応や復旧等、災害の軽減に資する研究に総合的に取り組んでいる。

2009年6月に防災研究所は、文部科学大臣より「自然災害に関する総合防災学の共同利用・共同研究拠点」として認定を受け、全国の自然災害科学関係の大学・研究機関の中で研究の核となり、独創的・先端的な研究を推進することを目的に共同研究を実施している。そのために、共同研究・研究集会の公募を行うとともに、防災研究所が主体となる共同研究プロジェクトを進めている。また、研究所が有する15の共同利用施設（実験所・観測所）、70を超える共同利用設備（実験・観測装置）、およびデータを共同利用に提供している。

「共同利用・共同研究拠点」の枠組みの中では、SGEPSS会員を代表とする多くの研究集会、共同研究の提案がなされ、コミュニティ内の研究活動を支援する一つのファンクションとして重要な役割を果たしてきたと自負している。特に、災害学理の追求に関わる、災害事象の発生予測と発生メカニズムの解明という命題に対して、地震や火山を対象とした観測的共同研究が広く実施されており、電場磁場同時測定装置などの共同利用設備の利用も非常に多い。また、地磁気連続観測データなども共同利用に提供するとともに、観測器材設置のために遠隔地観測所等の利用も推進している。

#### 機関連絡先

〒611-0011

京都府宇治市五ヶ庄

Tel: 0774-38-3348 Fax: 0774-38-4030

### 5.2.2.5 京大生存圏研究所

(Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University)

生存圏研究所は、人類の持続的発展の根幹に関わる重要課題として4つのミッション「1: 環境診断・循環機能制御」、「2: 太陽エネルギー変換・高度利用」、「3: 宇宙生存環境」、「4: 循環型材料・環境共生システム」を掲げて生存圏科学の研究を推進している。平成28年度からは、新たに第5のミッション「高品位生存圏」を掲げ、ミッション1~4に当てはまらない融合的な研究や、研究成果の社会への応用にも注力している。

生存圏研究所は、生存圏科学の共同利用・共同研究拠点として認定されている。「大型設備・施設の共用」、「生存圏科学に関わるデータベースの公開」ならびに「共同研究プロジェクトの推進」の3つの形態に沿った共同利用・共同研究を広範に実施している。また公募型の研究会「生存圏シンポジウム」も多数開催している。

- A) 大型設備・施設の共用：全体で9項目あり「MUレーダー／赤道大気レーダー」、「電波科学計算機実験(KDK)」、「マイクロ波エネルギー伝送実験装置(METLAB)」が当学会に関連する。研究所全体が実施する共同利用・共同研究課題数は約200件に達する。国際共同利用を全国に先駆けて実施しており、例えば令和3年度において、MUレーダー／赤道大気レーダー共同利用は、計34件の国際課題を採択・実施した。
- B) 生存圏データベース：標本データと電子データの2種類がある。標本データについては共同利用課題11件を実施した(令和3年度)。電子データにはMUレーダー、赤道大気レーダー、GEOTAILプラズマ波動受信機などの観測データが含まれており、インターネットへの公開を進めている。最近では、電子データベースへの総アクセス数は年間3億回以上(転送データ量は400テラバイト以上)の状況が続いている。
- C) 研究プロジェクト・シンポジウム：公募型の「プロジェクト型共同研究」を実施しており令和3年度には計19件を採択・実施した。また公募型の研究会「生存圏シンポジウム」を25件採択・開催し、研究会への参加者の累計は3996名であった(令和3年度)。これらに加え、多岐にわたる生存圏科学の基礎となる研究コミュニティの総合的な意見交換の場として、「生存圏フォーラム」が設立されており、総会および特別講演会を毎年開催している。またオープンセミナーを定期的で開催(令和3年度：13回)して研究成果を広く情報発信した。インターネットを通じたオープンセミナーの外部発信を強化した結果、参加者が705名と大幅に増加した。令和3年度においては海外への発信も6回実施された。



写真：MUレーダー全景(左)、EARアンテナ(中央)、A-METLAB外観(右)

代表連絡先：〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所  
山本衛(電話 0774-38-3814、FAX 0774-31-8463)





## 海洋コア国際研究所

### 5.2.2.6

高知大学 海洋コア国際研究所  
( Marine Core Research  
Institute, Kochi University)

海洋掘削試料（コア試料）の冷蔵・冷凍保管を始めとし、コア試料を用いた基礎解析から応用研究までを一貫して行うことが可能な研究設備を備える、コア研究を中核とした研究機関です。2003年4月に全国共同利用施設として設立され、2009年6月には文部科学大臣から共同利用・共同研究拠点として認定を受けました。2016年1月と2021年10月には認定の更新を受け、現在は「地球掘削科学国際研究拠点」として活動を行っています。2023年4月に、前身の海洋コア総合研究センターから改組しました。毎年度、延べ約2,000名の内外の研究者が利用しています。本研究所の施設・設備は、海洋研究開発機構との共同運営体制をとっており、「高知コアセンター（Kochi Core Center; 略称KCC）」と命名し、国際深海科学掘削計画(IODP)を中心とした地球掘削科学に関わる研究・教育活動を展開しています。

地球電磁気・地球惑星圏科学の一角を担う地磁気・古地磁気・岩石磁気分野の観測・実験的研究において、高精度・高解像度データを得るためには、超伝導磁力計システム・磁気特性測定システム(MPMS)をはじめとする高感度磁力計測装置群や、大型磁気シールド実験室・大型コアカッターなどの機器・設備を必要とします。これらの機器・設備は、各大学・研究機関に所属する研究者が個々の研究室単位で維持・管理するのは困難であるため、中核的な研究施設において維持・整備されて常に良好な状態で共同利用・共同研究に供されるのが望ましいという、学会コミュニティとしての切実な要望があります。同時に、このような中核的施設には、地磁気・古地磁気・岩石磁気分野に深い造詣をもつ専門スタッフの配置が必要であり、また、当該スタッフを中心とした体制による研究集会の開催・若手世代の教育プログラムの実施も重要です。

現在、国内においては、本研究所における共同利用・共同研究の枠組みとしてこのような機能・体制が備わっており、関連研究者に数多く利用されています。研究集会に関しては本研究所の主催で関連シンポジウムなどが定期的に行われ、また、教育プログラムに関しては、地磁気・古地磁気・岩石磁気研究会の支援により、当研究所の古地磁気・岩石磁気実験室の設備を活用した若手研究者向けの実践的レクチャーコース「J-DESC コアスクール 古地磁気コース」が実施されてきています。地磁気・古地磁気・岩石磁気分野の研究の推進のため、このような枠組みが維持・発展されることが重要です。

#### 代表連絡先

〒783-8502 高知県南国市物部乙 200

電話 (088)864-6712 , FAX (088)864-6713



### 5.2.3.1 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター (Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University)

#### <研究機関の概要・目的>

北海道は3つのプレート（太平洋プレート・アムールプレート・オホーツクプレート）が  
出会うプレート沈み込み帯に位置し、我が国でも特に地震や火山活動の活発な地域です。当  
センターは、地震や火山噴火の発生メカニズムの解明や予測技術に関する調査研究を推進  
するため、それまで北海道大学理学部に設置されていた諸施設を統合して1998年に発足し  
ました。当センターは、全国の関連研究機関と連携しながら「災害の軽減に貢献するための  
地震火山観測研究計画（第2次）」を推進する観測研究拠点となっています。また、次世代  
を担う人材育成のため、地震学火山学講座として理学院自然史科学専攻の大学院教育にも  
参画しているほか、理学部地球惑星科学科の学部専門科目や全学教育科目も担当していま  
す。多くの学部4年生・大学院修士・博士課程の学生が研究活動に取り組んでいます。

#### <規模・構成>

地震火山研究観測センターは、4つの研究分野（地震観測研究分野、火山活動研究分野、海  
底地震津波研究分野、地下構造研究分野）と地域防災情報支援室から構成されています。

#### <SGEPSSにおける重要性>

当センターで行っている研究は、SGEPSSでは地球内部電磁気学の分野に深く関連していま  
す。我々は、地震発生地域や火山地域の比抵抗構造探査、磁気観測による火山活動監視手法  
の開発、磁気観測による地殻応力変動の推定などに精力的に取り組んでおり、地震発生場・  
噴火発生場の理解を深めて災害の予測と軽減に役立てようとしています。また、最近では地  
震や津波などの地圏の活動が大気圏や電離圏と結合する現象が注目されるようになってい  
ますが、地震や地殻変動など、こうした研究における地圏の基本的観測を担っているのが当  
センターです。このような現象の追究を通じて、今後もSGEPSSの活動に貢献します。

#### <連絡先>

〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西8丁目  
TEL: 011-706-2892 FAX: 011-746-7404

### 5.2.3.2 東北大学大学院理学研究科 惑星プラズマ・大気研究センター (Planetary Plasma and Atmospheric Research Center [PPARC], Tohoku University)

<概要> 主に惑星圏における多くの謎を“電波”と“光・赤外線”の観測を主軸に解明すべく、国内・国外の観測所を拠点とし、衛星・探査機も駆使しつつ進めています。研究・教育活動では地球物理学専攻に属し、同専攻の宇宙地球電磁気学分野・惑星大気物理学分野と協力しながら活動しています。



<構成> 光・赤外と電波を主要観測手段として、地上観測施設および衛星・探査機による観測を行い、太陽系を舞台に生起する諸現象の解明と惑星圏の環境理解を進めています。

<設備> 宮城・蔵王、福島・飯館の両電波観測所と、ハワイ・マウイ島・ハレアカラ山頂の光赤外観測所（ハワイ大・天文学研究センターと協力）を拠点としています。観測環境の良好な地点に位置し、以下の主な観測設備を擁します。これらの設備および持ち込み観測装置による国内外の関係研究者との共同研究にも供しています。

- 60cm 光学望遠鏡、40cm 光学望遠鏡（ハワイ・ハレアカラ山頂）
  - VHF～UHF 帯大型電波望遠鏡（福島県飯館）
  - HF 帯電波受信網（宮城県蔵王・福島県飯館）
- また、以下の観測網も擁しております。
- LF 帯標準電波受信網（北海道・宮城県・台湾・タイ・ノルウェー・カナダ）

<国際協力> ハワイ・ハレアカラ山頂の観測施設は、米国ハワイ大学との協力の元で観測を進めており、また口径 1.8m 級オフセット望遠鏡 PLANETS の開発が進行中です。LF 帯標準電波受信網は、ノルウェー・カナダの研究機関との共同です。さらに、アラスカ、ノルウェー、スウェーデンの研究機関と協力し、北極オーロラ地上観測も実施しています。

<研究テーマ> 主な研究テーマは、以下の通りです

- ・ 太陽 太陽活動と粒子加速現象の解明
- ・ 地球・惑星 磁気圏・放射線帯現象の解明 主に地球・水星・木星  
電離圏・大気圏現象の解明 主に地球・火星・木星  
衛星と上記の相互作用の解明 主に木星・火星
- ・ 開発 電波・赤外・可視観測機器：地上観測用、衛星・探査機搭載用  
[活動中の衛星・探査機] Hisaki (紫外線・極端紫外線望遠鏡衛星)  
Arase (地球放射線帯観測衛星)  
BepiColombo (日欧共同水星探査機) など  
[開発中の衛星・探査機] JUICE (欧木星探査機：2022 打上予定)  
MMX (火星衛星探査機：2024 打上予定)

<連絡先> 笠羽康正（教授・センター長）、小原隆博（教授）  
三澤浩昭、坂野井健、土屋紀史（准教授）、鍵谷将人（助教）  
<https://pparc.gp.tohoku.ac.jp/>  
〒980-8795 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3

### 5.2.3.3 東北大学大学院理学研究科 附属地震・噴火予知研究観測センター (Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions / Tohoku University)

#### <概要・目的>

地震・噴火予知研究観測センターは、1912年の東北帝国大学附属観象所設立を起源とし、1998年に現組織に転換しました。現在は測地学審議会による地震予知計画と火山噴火予知計画に基づいて設置されています。設立目的は、地震予知および火山噴火予知手法の確立を目指して、固体地球物理学全般にわたる観測研究の推進とともに、学生の教育に資することです。研究では東北日本を主な対象として、地震・噴火予知の基礎研究を推進し、プレート境界地震や内陸地震の発生過程のモデル化、島弧火山の深部構造の解明など、重要な研究成果をあげています。教育では理学研究科地球物理学専攻の他、理学部物理系の専門科目や全学教育科目も担当し、学部4年生・大学院博士前期・後期課程の学生が当センターで研究しています。



<構成> 地震・噴火予知研究観測センターでは、4つの研究グループ（内陸地震研究グループ・火山研究グループ・海域地震研究グループ・グローバル地震火山研究グループ）と3つの観測所（秋田・本荘・遠野）を設置しています。構成員は、非常勤職員を含めた教職員数が42名、4年生から博士課程の学生が26名（2022年4月1日現在）です。

<SGEPSSにおける重要性> 地球内部の水・マグマ等の流体の性質と挙動の解明が、噴火モデルの構築と噴火予知の定量化に貢献するとともに、地震活動を含む地殻活動全般の解明に重要な要素であることが分かってきました。当センターは、地震発生地域・火山地域の比抵抗構造探査や比抵抗変動監視手法の開発等、地球内部の水・マグマ等の流体の性質と挙動の解明に精力的に取り組んでいます。この他、火山地帯での磁気観測による噴火発生場の熱変動の監視、宇宙天気を入力とした比抵抗構造による地磁気誘導電流(GIC)の評価と影響の研究を通して災害の軽減と予測およびSGEPSSの発展に貢献していきます。

#### <連絡先>

〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6  
TEL 022-225-1950 FAX 022-264-3292  
<https://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/>

#### 5.2.3.4 名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター (Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

##### <研究機関の概要・目的>

名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センターは、地震・火山災害の軽減を目指し、地殻活動の仕組みの解明と、それを通じた地震および火山活動の予測に関する研究と教育を行うことを目的としています。地震と地殻変動の観測所として活動をスタートし、中部地方における地震・地殻変動・火山観測を担ってきた経緯から、本センターは観測に基づく研究を主体としつつ、理論や計算、史料調査などを加えた多面的な研究を展開しています。具体的には、南海トラフでの巨大地震発生を念頭においた、沈み込み帯における地震発生の物理過程の解明と監視・評価を目指した研究、プレート運動と地殻活動の相互作用の観点に立脚した内陸地震の研究、御嶽山を始めとする火山におけるマグマや熱水系などの火山現象の過程の解明と活動評価を目指した火山研究を中心的な研究課題として取り組んでいます。本センターは環境学研究科の一員として大学院教育にも積極的に取り組んでいます。地震・火山の謎に取り組むことにより固体地球科学の深い知見を持つとともに、関連分野への広い視野を持つ、将来を担う研究者と安全安心な社会に貢献できる人材を育成していきます。

##### <規模・構成>

地震火山研究センターは、名古屋大学東山キャンパスを拠点とし、2017年度に新設された御嶽山火山研究施設および3つの観測所と多数の観測点を有しています。2022年7月現在の非常勤を含む教職員数は計28名です。

##### <SGEPSSにおける重要性>

当センターで行っている研究は、SGEPSSの地球内部電磁気学分野に深く関連しています。特に電磁気学的探査手法を用いた地震発生地域・火山地域の地下構造解明に精力的に取り組んでおり、地震・火山噴火現象の解明を目指した電磁場測定手法の開発なども行っております。また、GNSSデータを用いた電離層電子密度異常の研究にも取り組んでおります。

##### <連絡先>

〒464-8601 名古屋市千種区不老町  
TEL: 052-789-3046 FAX: 052-789-3047

### 5.2.3.5 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター (Aso Volcanological Laboratory, Institute of Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University)

#### <研究機関の概要・目的>

九州は火山活動が活発な地域であり、日本全国で約 110 ある活火山うち 17 の活火山が存在しています。またそれらの火山のいくつかは現在も活発な火山活動を継続しており、阿蘇火山においても 2014 年 11 月にマグマ噴火が発生しました。本研究センターは、火山噴火メカニズムや火山活動にともなう諸現象の解明といった火山に関する研究・教育を行うことを目的に、地球物理学的手法を用いた観測研究を行っています。このため観測体制の拡充・設備の近代化を進め、阿蘇火山をはじめ、九州の火山を対象に観測研究に取り組んでいます。2016 年 4 月に発生した熊本地震により、熊本県・南阿蘇村の火山研究センター本館が被災し大きな被害を受けましたが、2018 年現在は阿蘇市坂梨に仮設研究棟を設置し、観測研究を継続実施しています。

#### <規模・構成>

京都大学の遠隔研究施設の一つである地球熱学研究施設は、別府の地球熱学研究施設と阿蘇の火山研究センターが平成 9 年に統合され発足しました。火山研究センターは 1928 年（昭和 3 年）に設立され、以来 90 年に渡り阿蘇の地で観測研究活動を続けています。火山研究センターの 2018 年度の教職員は 4 名、技術職員は 2 名です。

#### <SGEPSS における重要性>

当研究センターでは、阿蘇火山や九重火山など九州内の火山で地下比抵抗観測や地磁気観測を主体とした観測研究を行っており、SGEPSS における地球内部電磁気学の分野に深く関連しています。電磁気学的観測量は地下の火山性流体の分布・挙動や、地下の温度状態に対し高いセンシティブティティーを持ちます。こうした利点を活用し、火山活動を電磁気学的観測からモニタリングし、そのダイナミックな挙動を捉える事に取り組んでいます。また火山研究センターでは、阿蘇火山に近いという遠隔施設の地の利を生かし、フィールド実習を主体にした教育活動にも力を入れています。これらのプログラムには地球電磁気学的手法を用いた実習も採り入れられており、こうした教育活動が、SGEPSS の将来を担う若手人材の育成につながると考えています。

#### <連絡先>

〒869-2611 熊本県阿蘇市一の宮町坂梨 3028 番地（坂梨小学校内）  
TEL: 0967-22-5000 FAX: 0967-22-5500



### 5.2.3.7 神戸大学 惑星科学研究センター (CPS: Center for Planetary Science)

#### 目的

惑星科学研究センター (CPS) は、様々な背景を持つ人々の交流と知見の交換集積を促す場を提供することを目指した組織である。惑星科学は、惑星系の起源・進化・多様性に関する一貫した描像を構築し、生命を育む地球をそこに位置づけることを究極の目的としている。地球科学と天文学の間であって、生命科学や工学をも含む広範な分野の知見の集積融合なくしてはその展開はありえない。高度化専門分化した現在の科学において、その成果を集積し、一貫した描像として俯瞰することは一層困難であり、これに積極的に貢献する仕組みが必要とされる。そのような仕組みは、太陽系探査に代表される巨大プロジェクトを推進する惑星科学において、その企画や利用を議論提案支援していくためにも必須である。

CPS は、このような状況に対し、「ネットワーク型」の研究所として対応するべく構想された。少人数の専任スタッフが、コミュニティーの研究者による協業活動の企画・運営を支援することでこれを実現しようというものである。このようなネットワーク型研究所の重要性は米国や欧州では、特に太陽系探査推進の見地から認識されており、惑星科学や宇宙科学の分野では米国 Lunar & Planetary Institute (LPI) や欧州 International Space Science Institute (ISSI) 等がその例として挙げられる。

現在、CPS は神戸大学理学研究科附属の研究センターとして存在しており、人と知見の交換集積を促す物理的な場としては、神戸大学統合研究拠点に 500 m<sup>2</sup>の空間を確保してもらっている。ここに事務局を設置、各種スクールや実習、セミナーや研究会を開催あるいは支援し、インターネット上にこれらの中継し、また、これらから寄せられる資料や講演動画等を集積した知見情報アーカイブを北海道大学理学院惑星宇宙グループの協力により提供している。

近年では惑星科学の特に計算科学・データ科学的側面の促進をもって、財政的・組織的な基盤と活動を維持しているが、上記構想にふさわしい組織としての安定化・定常化を図り、LPI や ISSI に比肩しうるネットワーク型研究所として CPS を定着させることが懸案である。日本学術会議マスタープラン 2020 では「惑星探査コンソーシアムプロジェクト：太陽系における生命生存環境の探求」(計画番号 97 学術領域番号 24-2) において人々の交流と知見の交換集積を促す中核としての CPS の安定化をプランが実現するべき課題の一つに挙げた。続く未来計画においては、CPS の役割をより明確にし、諸問題にかかわる計算科学・データ科学的側面から分野横断的な交流と知見集積を促す場の必要性を訴え、これを実現できる組織としての安定化・定常化を訴えていくことを企図している。

#### 規模

G-COE プログラム (H20-H24 年度) 時の規模は、専任研究者 10 名、事務員 5 名、約 2 億円/年 (人件費と事業費) であり、セミナー・研究会・実習・スクールの企画・運営・支援にはこの規模の人員と予算が必要必須、この復活・定常化をめざしている。

#### SGEPSS における重要性

宇宙科学を強力に推進してきた SGEPSS 分野の研究者が惑星科学を取り込み、惑星科学における展開を促進し、あるいは、惑星科学をリードするための触媒装置として機能する。



## 連絡先

神戸大学理学研究科附属惑星科学研究センター（CPS）

センター長・教授 牧野 淳一郎、副センター長・教授 林 祥介 [exec-m1@cps-jp.org](mailto:exec-m1@cps-jp.org)

事務担当 [secretary-m1@cps-jp.org](mailto:secretary-m1@cps-jp.org)

〒650-0047 神戸市中央区港島南町7丁目1-48 神戸大学統合研究拠点 301

Tel: 078-599-6731, Fax : 078-599-6735,

<http://www.cps-jp.org/>

### 5.2.3.8 九州大学 国際宇宙惑星環境研究センター

(International research center for Space and Planetary Environmental Science : i-SPES)

「学際的な宙空環境科学の創成と宇宙天気予報・宇宙デブリの情報の基礎研究」を目的として設置された、学内共同教育研究センターである宙空環境研究センター（第1期センター：平成14年4月～平成24年3月）は、平成24年4月に国際宇宙天気科学・教育センターとして改組され、「宇宙天気科学の調査研究の更なる拡大、およびこれに関する国際的教育の世界的拠点化」の実現をミッションとした第2期センターとしての活動を開始した。

第1期センターでは、国際的な地磁気観測網(MAGnetic Data Acquisition System: MAGDAS)の整備による宇宙電磁場環境データのリアルタイムな取得と世界への提供体制の構築とともに、最先端の宇宙デブリ軌道計算研究を推進し、地球周辺の宇宙環境(宙空領域)を精査するための基盤が整えられた。第2期センターにおいては、MAGDASを基軸とした国際的な観測ネットワークの構築と拡充、その利活用による国際的な若手研究者育成事業の展開等により、宇宙天気科学の各国への拡がり、大学院生の国際教育に大きく貢献してきた。同時に、深刻化する宇宙デブリ問題の解決に向け、アストロダイナミクスを応用した宇宙デブリ軌道計算研究を深化させ、その成果は世界的な議論の場で日本のツールとして紹介されるなど、九州大学の国際的なプレゼンス増大にも大きく寄与している。更に、異分野データ融合プロジェクトである大学間連携プロジェクト(Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETwork: IUGONET 2009-)を立ち上げ、宇宙環境データの分野横断型相互利用体制を整えるとともに、地上磁場変動を用いた宇宙天気指数の確立、太陽圏科学の創始と、放射線帯科学を含む高エネルギー粒子科学発展への貢献、地表面から電離圏高度に至る統合型超高層大気シミュレーションGAIA(Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy)モデルの開発とそれによる超高層大気科学の発展、地圏-大気圏-電離圏-磁気圏-惑星間空間結合の学理構築など、従来想定されていた宇宙天気科学の枠組を大きく超えた拡がりを創出してきた。

すなわち、第1期センターは、宇宙天気科学を含む、人類の生存圏である近地球領域の宇宙空間環境の調査を行う為の宙空環境科学の創成へと導く基盤構築に、第2期センターでは、その国際的展開と教育への利活用、学際領域の更なる拡大へと繋がる成果の創出に大きく寄与した。

この第2期センターの設置期間が令和4年3月をもって終了するにあたり、令和4年4月からの第3期より、これまでに第1期、第2期センターが展開してきた活動を基軸として、「宙空環境科学・宇宙天気科学の更なる発展と、その時間軸と空間軸を拡大させた宇宙惑星環境科学の開拓」を目的とした、国際宇宙惑星環境研究センター(i-SPES)が設置された。

時間軸と空間軸を拡大させた宇宙惑星環境科学では、宇宙に開かれた地球環境を、過去から現在、そして未来へと変化し続ける進化プロセスの中で、俯瞰し、理解することを希求する。これは、宙空環境の過去の探索、近未来予測、長期予測研究の為の必須の学術基盤でもある。

i-SPESでは、第1期、第2期センターが展開してきた国際的な共同利用観測ネットワークの強化と宙空環境科学・宇宙天気科学の更なる発展を、理工融合による宇宙状況認識科学の強化とともに推進する。さらに、星形成、惑星磁場進化、惑星大気・宇宙プラズマ環境進化と、地球環境進化に影響を及ぼす宇宙物質流入、そしてそれらが融合した結果生じる生命環境進化に係る研究を、分野融合で推進する研究部門を編成し、現在の太陽地球環境・生命環境を育むに至った過去から未来への必然を明らかにする学際的な研究領域を開拓する。この分野融合研究を促進するためのデータ科学部門も設置した。更にセンターが担ってきた宇宙天気科学の国際的な教育拠点活動を、宇宙惑星環境科学の分野まで拡大し、異分野融合で新しい学術を切り拓く、国際的拠点機関としての地位の確立に貢献する為、以下の3つのミッションを実行する。

ミッション1: 国際的共同利用観測ネットワークの強化と宙空環境科学と宇宙天気科学の更なる発展を宇宙状況認識科学の強化と共に推進

ミッション2: 宇宙惑星環境科学の展開による、現在の太陽地球環境を育むに至った過去から未来への必然を明らかにする学際的な研究領域の開拓

ミッション3: 宇宙惑星環境科学分野へと拡大する国際的教育事業の展開

これらのミッションの遂行は、SGEPSSで展開される地球・惑星・宇宙科学の学術の領域展開と分野融合に大きく貢献することが期待される。

<連絡先> 国際宇宙惑星環境研究センター長 吉川顕正  
yoshikawa.akimasa.254 at kyushu-u.ac.jp  
TEL & FAX 092-802-6240

### 5.2.3.9 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター (Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University)

#### <研究機関の概要・目的>

本センターは、地震・火山噴火現象の理解とその予測のための研究を推進しています。我が国でも特に地震や火山活動の活発な九州を主な研究対象地域とし、地震・地殻変動・電磁気等の総合観測により研究を推進しています。本センターは全国の関連研究機関と連携しながら「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第3次）（令和6年度～10年度）」を推進する観測研究拠点となっています。また、次世代を担う人材育成のため、地震学・火山学講座として理学府地球惑星科学専攻の大学院教育にも参画しているほか、理学部地球惑星科学科の学部専門科目も担当しています。多くの学部4年生・大学院修士・博士課程の学生が本センターで研究活動に取り組んでいます（2023年度 学部4年生以上の学生数 19名）。

#### <規模・構成>

地震火山観測研究センターの人員は、2023年度現在、4名の常勤教員、7名の常勤技術系職員、2名の非常勤研究員、4名の事務・技術補佐員の計17名です。

#### <SGEPSSにおける重要性>

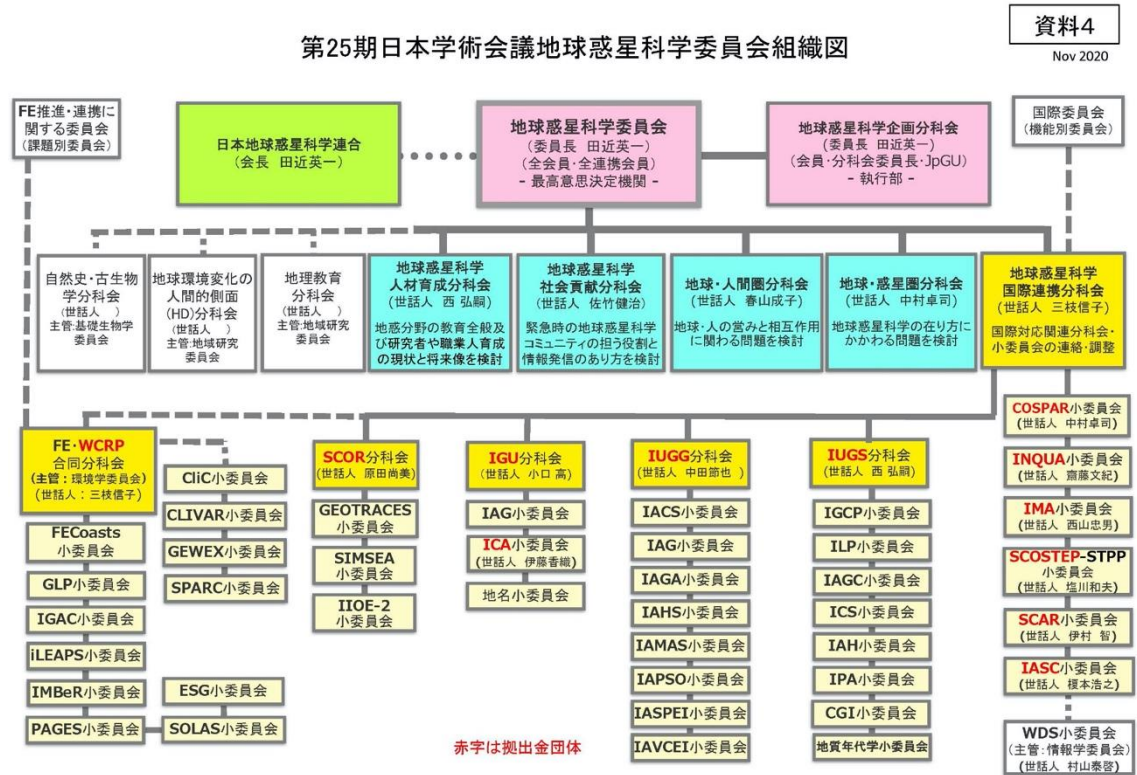
当センターで行っている研究は、SGEPSSでは地球内部電磁気学の分野に深く関連しています。我々は、比抵抗構造調査を基礎におく将来の内陸地震の発生場所や規模の予測手法の開発に取り組んでいます。また、比抵抗構造と自然電位の時間変化から噴火の場所、規模、時期を予測する手法を開発し、災害の軽減に役立てようとしています。また、火山雷に伴う電磁気シグナルの観測から、目視や気象レーダーが使用できない悪天候時においても噴火規模の即時予測を行えるよう技術開発に取り組んでいます。今後は、得られた技術や知見を通じて、SGEPSSにおける固体分野と大気・超高層分野を融合した新たな連携研究分野の発展にも貢献したいと考えています。

#### <連絡先>

〒855-0843 長崎県島原市新山 2-5643-29  
電話：0957-62-6621 / Fax：0957-63-0225

### 5.3. 国際学術団体や対応委員会の取り組み

この章では、地球電磁気・地球惑星圏科学に関連する重要な国際学術団体や関連する委員会の概要と、SGEPSS における重要性を挙げる。これらの研究機関の記述は、関連学会員から寄稿を頂くことによりまとめたものであり、寄稿頂いた順に枝番を振り、次ページ以降に紹介する。また、とくに関連の深い日本学術会議地球惑星科学委員会の組織図について下に示す。



日本学術会議地球惑星科学国際連携分科会資料 (令和2年11月16日) より転載

### 5.3.1 国際太陽地球系物理学科学委員会 (SCOSTEP)–STPP 小委員会

SCOSTEP–STPP 小委員会は、第 24 期の日本学術会議において、地球惑星科学委員会の下で国際連携分科会の中に平成 29 年度後期に新たに設置された。第 25 期でも継続して設置されている。この小委員会は第 23 期までの SCOSTEP 小委員会および STPP 小委員会の機能を継承するものである。この小委員会は、太陽地球系物理学に関する以下の事項を目的としている。

(1) ICSU (国際学術会議) 傘下の SCOSTEP (国際太陽地球系物理学科学委員会) に参画し、太陽地球系物理研究の推進を図るとともに国際対応を行う。また、同委員会が実施する国際共同計画とその立案に参画する。現在の計画 PRESTO (変動する太陽地球系結合の予測可能性) の実施と将来計画の立案を行う。

(2) ICSU 傘下の連合・学際組織以外の国際的な研究計画 (STPP)、即ち、ISWI (国際宇宙天気イニシアチブ) 等と協働して、国際・国内対応を中心に俯瞰的な見地で活動する。

この小委員会では、これらの国際共同計画の立案・実施、および太陽地球系物理学に関する国際・国内対応に関する事項について議論することを主な役割としている。

この小委員会が対応している ICSU 傘下の学際組織である国際組織 SCOSTEP は、1966 年の ICSU 総会で臨時委員会として設立され、1978 年以降は常置委員会となった。SCAR, IAGA/IUGG, IUPAP, URSI, COSPAR, IAMAS/IUGG, IAU, WDs と連携し、太陽地球系物理学において、地球惑星科学の分野間にまたがる広い領域で、一定期間にわたる国際学術協力事業を提案・実施している。また、4 年に 1 回、Solar-Terrestrial Physics (STP) Symposium を企画・開催している。日本学術会議は SCOSTEP に対し一定の分担金を毎年支払っており、SCOSTEP に対する日本の貢献度などは毎年、SCOSTEP–STPP 小委員会を通して学術会議に報告されている。SCOSTEP がこれまで実施してきた国際学術協力事業の主なものは以下の通りである。

- 1976–1979: IMS (International Magnetosphere Study)
- 1982–1985: MAP (Middle Atmosphere Program)
- 1990–1997: STEP (Solar-Terrestrial Energy Program)
- 1998–2002: Post-STEP (S-RAMP, PSMOS, EPIC, and ISCS)
- 2004–2008: CAWSES (Climate and Weather of the Sun-Earth System)
- 2009–2013: CAWSES-II (Climate and Weather of the Sun-Earth System-II)
- 2014–2018: VarSITI (Variability of the Sun and Its Terrestrial Impact)
- 2020–2024: PRESTO (Predictability of Variable Solar-Terrestrial Coupling)

また、(2) にあるように、この小委員会は SCOSTEP 以外で太陽地球系科学に関連する ISWI などの国際事業にも対応している。1957–1958 年に実施された国際地球観測年 (IGY) の 50 周年にあたる 2007 年に、国際太陽系観測年 (IHY: International Heliophysical Year)、国際極年 2007–2008 (IPY: International Polar Year)、国際デジタル地球年 (eGY: electronic Geophysical Year)、国際惑星地球年 (IYPE: International Year of Planet Earth) という 4 つの国際研究事業が実施された。このうち、UN/ESA/NASA の提唱によって 2007–2009 年に実施された IHY を引き継ぐ事業として、ISWI が 2010–2012 年に行われ、この事業が現在まで国連 (UN) と協働した事業として引き継がれている。

### 5.3.2 SEDI (Study of the Earth' s Deep Interior)

#### 【概要】

SEDI (<http://www.sedigroup.org>) は 1987 年に国際測地学地球物理学連合 (IUGG) の直下の委員会 (Union Commission) として発足し、主として地球内部、とりわけ深部の研究を対象とする国際的研究委員会である。SEDI 最大の目的は過去から現在に至る地球深部の熱的、化学的進化とそのダイナミクス、そしてそれらが地表において観測される構造やプロセスへ与える影響に対する理解を進めることである。通常「深部」とはコアと下部マントルを指し示す言葉として捉えられているが、SEDI においてはマントルブルームやスラブの研究なども対象としているなど、広く地球内部を指している。SEDI は地球磁場とダイナモ、地磁気永年変化、古地磁気学、外核の化学組成とダイナミクス、ダイナモのエネルギ論、内核の構造、コア-マントル境界、コア-マントル結合と地球回転、下部マントルの構造、対流、ブルームなど地球内部の幅広い研究課題に対応している。以上のような研究課題は多くの場合 IAG、IAGA、IASPEI、IAVCEI などの研究分野に分類され、単一の視点から考えられがちであるが、こうした課題を多角的視点から捉え、それらを融合させていくことを図ることも SEDI の目的としてあげられている。

#### 【SGEPSS における重要性と今後の展望】

地球磁場、地磁気永年変化、ダイナモ、コアダイナミクスや惑星磁場・ダイナモは SEDI における主要な研究課題に位置づけられており、SGEPSS の研究課題と非常に良く対応している。また、地震学的手法や高温高压実験、第一原理計算等によるコア、マントルのダイナミクス、物性や化学組成といった SGEPSS の枠組みに留まらない分野横断的研究課題を研究・議論する場を定期的に提供している。このような SEDI の取り組みは SGEPSS の研究領域を広げる上でとても重要なものである。

SEDI の主な活動は地球深部の研究に関する活動の促進、シンポジウムや各種学会セッションの開催、研究計画の枠組みを提供すること等である。その中でも隔年で開催される国際シンポジウムは最重要事業であるが、日本では 1992 年の水沢と 2014 年の湘南において、二度のシンポジウム開催の実績がある。それらの運営には SGEPSS 会員が多く携わり、中心的役割を果たしてきたことが認められる。研究面および運営面への貢献にもより、SEDI における日本の存在感は高いレベルを維持しており、こうした状況を継続・発展させていくことが期待される。特に、SGEPSS 会員によって今後の SEDI の活動が先導されていくことが、地球磁場と地球内部ダイナミクスの研究を進展させていくという点においても重要になるであろう。



### 5.3.3 国際電波科学連合 (International Union of Radio Science : URSI)

国際電波科学連合 (International Union of Radio Science : URSI) は、電波科学を対象分野として 1919 年に設立された国際科学会議 (International Council for Science : ICS) に加盟する国際学術団体である。その後、光の領域にまで対象を拡大して、電磁波の理論的研究や電磁波による通信や計測、人体への影響など多岐な研究分野をカバーし、現在ではそれぞれの領域に対応する 10 コミッション (Scientific Commission) が設けられている。URSI では、URSI 総会 (URSI General Assembly: URSI-GA)、大西洋電波科学会議 (Atlantic Radio Science Conference: AT-RASC)、アジア・太平洋電波科学会議 (Asia-Pacific Radio Science Conference : AP-RASC) の 3 つの国際会議をそれぞれ 3 年おきに主催しており、日本学術会議電気電子工学委員会の下に設置されている URSI 分科会およびその配下の 10 の小委員会 (表 1 参照) が国内対応を担当している。URSI 日本国内委員会では URSI-Japan Radio Science Meeting (URSI-JRSM) を主催する他、ウェブページを立ち上げて運用している (<http://www.ursi.jp/japanese.html>)。SGEPSS に関連が深いコミッションとしては、コミッション G (国内対応：電離圏電波伝搬小委員会) 及びコミッション H (国内対応：プラズマ波動小委員会) が挙げられ、SGEPSS 会員の多くが対応する小委員会の委員となっている。

電離圏電波伝搬小委員会では、コミッション G の活動に対応して、我が国における電離圏プラズマ中における電波の伝搬および電波伝搬に影響を与える電離圏プラズマの構造と変動に関わる科学研究の発展に務めることを目的に、電離圏電波伝搬や電離圏プラズマの研究発展のための国内における情報交換や成果とりまとめ、国際的発信を行っている。また、国内外の関連学会参加、国際宇宙空間研究委員会 (Committee on Space Research : COSPAR) と共同の国際標準電離層 (International Reference Ionosphere : IRI) への寄与に係る審議に関することなどの対応もしている。

プラズマ波動小委員会では、コミッション H の活動に対応して、我が国におけるプラズマ波動の精密計測や計算機シミュレーション、プラズマ物理素過程の解明、宇宙プラズマ環境センシング、マイクロ波エネルギー伝送などに関わる研究交流や情報交換、研究・開発活動を活発化することを目的に、プラズマ波動に関わる研究動向の調査、国内の研究成果の取りまとめと国際的発信を行っている。また、SGEPSS 波動分科会と密な連携を取りつつ、当該分野に関わる先端研究の紹介、研究交流、若手研究者の育成を目的とする研究集会の整備・促進や URSI の関連分野に関わる各種活動への対応、国際協力を必要とする研究活動の組織化・支援に関わる審議に関することなどの対応もしている。

SGEPSS がめざすサイエンスには、全球を網羅する地上観測網の整備や観測ロケット・科学衛星ミッションの推進など、国際協力が不可欠なミッションが多数存在する。特に、大気・電離層観測のためのレーダー設備や、太陽・地球圏探査のための飛翔体を用いたミッション立案・推進には、URSI に関わる科学者の国際的な連携が必須と言える。このような国際協力関係を組織的に強化し、SGEPSS がめざすサイエンスを国際的にも高いレベルで遂行するためにも、URSI への活動に積極的に関与し、国内外に成果を発信することが望まれる。特に 2023 年には日本では 30 年ぶり、3 回目となる URSI 総会が札幌で開催されることが決定しており、本学会が URSI の活動に対して国際貢献する絶好の機会と言える。

URSI 配下の各コミッションでは、議長 (Chair) 及び副議長 (Vice-Chair) に加え、若手研究者の代表者 (Early Career Representative: ECR) が選任されており、これらの役員が URSI

旗艦会議の開催や各コミッション運営において主導的役割を果たしている。また URSI-GA、AT-RASC、AP-RASC の各旗艦会議では、若手研究者を対象とする学術賞 (Student Paper Competition: SPA、Young Scientist Award: YSA) を設けて、若手科学者の研究を奨励する活動を行っている。我が国の電波科学分野の発展、さらには SGEPS が当該分野で国際的なリーダーシップを発揮するためにも、これらの URSI 役員や若手学術賞への応募を積極的に推奨し、若手研究者のすそ野を広げる活動を展開することが重要である。

**表 1** : URSI が構成する 10 のコミッションと対象分野

(括弧内は日本学術会議電気電子工学委員会 URSI 分科会小委員会の名称)

A: Electromagnetic Metrology (電磁波計測)
B: Fields and Waves, Electromagnetic Theory and Applications (電磁波)
C: Radiocommunication Systems and Signal Processing (無線通信システム信号処理)
D: Electronics and Photonics (エレクトロニクス・フォトニクス)
E: Electromagnetic Environment and Interference (電磁波の雑音・障害)
F: Wave Propagation and Remote Sensing (非電離媒質伝搬・リモートセンシング)
G: Ionospheric Radio and Propagation (電離圏電波伝搬)
H: Waves in Plasmas (プラズマ波動)
I: Radio Astronomy (電波天文学)
K: Electromagnetics in Biology and Medicine (医用生体電磁気学)

### 5.3.4 インターマグネット

(International Real-time Magnetic Observatory Network: INTERMAGNET)

インターマグネット (<https://intermagnet.org>) は世界各国の主要観測所で取得される地磁気データの品質管理および即時配信を推進する国際協力事業である。米・加・英・仏の地磁気観測を担う国家機関によるデータ即時交換体制の構想を起源とし、1990年に日本を含む各国の観測機関により設立された。その翌年には最初のデータ配信が開始し、加盟機関の数と全球における観測所ネットワークのエリアを拡大しながら2013年には国際科学会議ICSU(現在の国際学術会議ISC)傘下の世界データシステムWDSのメンバーとなった。2022年6月時点では、世界38カ国の52機関により運営される122点のインターマグネット認定観測所IMOと、地磁気情報集合節GINと呼ばれる5つのデータサーバから構成される。インターマグネットの事業内容には、各IMOによるデータの生産、GINを経由した収集配信のほか、OPSCOMと呼ばれる運営委員会が主体となって推進する以下の活動が含まれる。

- 新規の観測点の設置と運用における技術支援、および、IMOとしての承認審査
- IMO管理者およびデータ利用者のためのマニュアル作成とソフトウェア開発
- ウェブベースによる配信プラットフォームの開発と運用
- 毎秒と毎分の確定データの信頼性を担保するための品質チェック

このような活動の成果として、現在ではIMOによる速報値(準リアルタイムの毎秒・毎分値)、準確定値(取得より3か月以内の毎秒・毎分値)、そして確定値(メタデータ付きの毎秒・毎分・毎時・毎年値)が既定のフォーマットにより無償提供されている。

インターマグネットへの加盟機関は上述のようにIMOかGINに限られるため、事業の運営そのものに直接関わってきたSGEPSS会員の数は必ずしも多くはない。しかし、品質の保たれた地磁気データの安定提供を行う事業の性質から、その成果と発展はSGEPSSの研究活動を基盤から支えるものである。人工衛星により膨大な地磁気観測データが得られるようになった昨今でも、絶対値が保証された地上定点でのベクトル観測データの重要性は薄れない。特に、長周期変動を扱う地球内部電磁気学分野の観測研究には不可欠であり、主磁場やその永年変化の解析、或いは主磁場の全球/地域モデル構築のためのデータセットにおいては、インターマグネットの高品質データが中核をなしている。また、火山を含む地殻活動の長期監視のための参照としての役割も大きい。超高層大気分野においても、IMOのメタデータには地磁気の擾乱具合を表すK指数も含まれており、これらは太陽活動に由来する超高層起源の短周期変動に関する標準的な指標として用いられる。さらに、磁気嵐強度評価の代表的指数であるDst指数確定値は、可能な限りノイズの除去・修正の行われたインターマグネットの確定毎時値をもとに算出されている。以上のように、インターマグネット事業はSGEPSSの研究領域に対して広い影響力を持つ。そのメリットを最大限に享受するためにも、運営委員会の年会議の日本招致も念頭に置きつつ、会員による運営面での積極的な貢献を拡大することは重要となろう。

## 6 サステナブルな学術活動のために

### 6.1 はじめに

地球電磁気・地球惑星圏学会（SGEPSS）は、地球電磁気学および地球惑星圏科学の研究を行う者たちが集い、互いに切磋琢磨し、研鑽をつむことを目的とした任意団体である。学会の目的を追求する上で、社会と関わりを持つこと、および学会員（研究者）の活動について学会が関与することは自明ではない。しかしながら、我々の研究活動の基盤は、そのほとんどが税金を原資とする公的な資金に依存していることから、我々の研究活動の継続には、国民に対する説明責任を果たすと共に、我々が獲得した知見を社会に還元し、更に活用・発展させていくために国に対して提言を行うなどの活動が必要となる。

また、我々が対象とする研究領域は人類の生活基盤にも大きく影響を及ぼしうる自然現象をテーマとしている。我々が研究を通じて獲得した知見を広く社会に還元することは、人類がより安全かつ持続的に高度な生活を営み、自然現象に対する理解を深める助けとなる。また、災害等に対する適切な対策・対応において、氾濫する情報に惑わされることなく、その知見を活用することは特に重要である。

更に、学会という研究コミュニティが持続的に発展していくためには、後進の参加が不可欠である。小中高生および大学生は次世代の社会の担い手であり、この中から新たな研究者が生まれてくる。彼らに対して適切な教育・広報や普及活動を行い、我々の研究内容を理解してもらうことは、研究コミュニティの持続的発展という観点においてもきわめて重要である。

我々は、これら一連の活動を総称して「アウトリーチ・教育普及活動」と呼んでいる。学会としてこれらの活動を行うことは、社会における学会の認知度向上のために必要であるのみならず、特定の大学・研究機関の利害に依存しない俯瞰的・戦略的な立場で活動できることが大きな特徴である。さらに、このような活動が間接的に国民全体の科学リテラシー向上につながると考えられ、学会による社会貢献の一つとなる。一方、このような活動に携わる研究者達の最も根底には、「科学することの喜び」を体感し、またそれを人々に伝えたいという気持ちがある。この欲求が我々の活動の大きな原動力となっている。そして、「アウトリーチ・教育普及活動」に対する学会としての必然性と、研究者の欲求のマッチングが多種多様な活動を継続的に支えている。

研究コミュニティとしての学会という側面に目を向けると、会員（研究者）にとって魅力的な研究環境を提供する、あるいは魅力的な研究・労働環境を実現するための働きかけをすることも学会の重要な役割と言えるであろう。研究者も一人の人間であり、社会と個人、仕事と家庭といった様々な環境要因の中で研究活動を営んでいる。個々の研究者が自由に研究を行う上では、働き方の多様性の相互理解、環境整備、具体的な実現が重要である。また、女性・若手研究支援や雇用・労働環境問題を含むキャリアパス支援、ワーク・ライフ・バランスの向上のほか、年齢や性別に留まらず、国籍や民族・文化・思想、障害や経済格差などの様々な視点、価値観の多様性の相互理解、これを受容する環境整備や意識改革、問題解決に向けた模索といったダイバーシティ推進的な観点が重要である。

しかしながら、現在はその理想的な状況からは程遠い。1つには研究者の男女比の問題がある。幼少期には科学に対する興味関心が男女ほとんど同数であるにもかかわらず、年齢が増加するにしたがって、女性の比率が下がってしまうのは、何らかの社会的背景が関係している可能性があると考えられる。我が国の男女共同参画社会実現に向けた政策的取組なども後押しして、近年はポストク、院生・学生と世代が若くなるにつれて女性比率に増加傾向が見られるものの、まだ道のりは遠い。若干の改善は見られるものの、出産・育児といったライフイベントにおける女性の負担は今でも大きい。問題を解決していくためには、施策として女性負担の軽減を進めるのみならず、男性の育児参加の積極的推進という観点も必要である。

もう1つは有期雇用の問題である。有期雇用は、研究者の流動性を高め、競争的環境の中

で切磋琢磨させるという狙いの元で、1990年代半ばから我が国に導入された。大学院重点化と大学院学生の定員の増大、および、その後の有期雇用による若手研究者の数が増大し、研究活動が活性化されたのは事実であろう。その一方で、大学院の教員数は微増であったことなどから、その後のパーマネント職への道が極端に狭き門となっているため、不安定な身分のまま研究に従事する研究者を大勢生み出し、若手研究者は生活・研究の両面において厳しい状況におかれることとなった。これが結果的に博士課程進学者、すなわち研究コミュニティおよび学会の後継者の大幅な減少にもつながっている現状がある。また、大学や大学院におけるキャリアパス教育が十分ではないこと、および博士号取得者が広く社会に出て行かない、出ていきにくいという状況も問題を更に深刻にしているだろう。研究者の充実したライフスタイルの実現のために、学会が男女共同参画やキャリアパス支援の問題に取り組むことは重要である。

本章では、我々が研究活動を推進していく背景となる学会と社会の関わり・研究者の働き方の多様性などの課題および今後必要と思われる対策について述べる。

## 6.2 広報活動

SGEPSS 運営委員会でアウトリーチ活動を行うことを決定し、「アウトリーチ部会」が発足したのは 2004 年度である（第 22 期）。それ以来 20 年に渡ってさまざまなアウトリーチ活動をしてきた。ここでは、これまでの活動を振り返り、それぞれについて今後の方針と展開について述べる。

### 6.2.1 アウトリーチイベント

アウトリーチ部会が組織された 2004 年より毎年、秋学会の開催に併せて一般向け公開イベント（アウトリーチイベント）を開催してきた。アウトリーチイベントの主目的は、一般市民も大きな関心を寄せている宇宙や地球環境を研究する SGEPSS の認知度を向上させると共に、研究の内容や、研究者を理解してもらうことにある。加えて、科学することの面白さや楽しさを伝えたい研究者と市民がイベントを通じて直接交流することで、市民が科学に対して抱いているイメージや理解度を知ったり、市民に対して科学をわかりやすく説明することの難しさを研究者が直接知ることが出来たりするというメリットがある。このイベントは部会の実施するパブリック・アウトリーチの中核をなす活動であり、各都市における SGEPSS の認知度向上に寄与してきたと考えている。これまでのイベントタイトル、開催日時等は末尾リストの通りである。このイベントの開催にあたって、文部科学省の科学研究費補助金（研究成果公開促進費）の申請を 2005 年以降行っており、これまでに 9 回採択されている。科研費による補助は、イベントの質・量の向上に貢献した。このような 20 年にわたるイベント経験によって、イベントのノウハウも構築されてきた。

イベント活動当初は、我々の研究分野を志向し、関係大学等に進学を希望する、どちらかといえば科学に強い興味があり積極的に参加する中・高校生を主たるターゲットにしていた。しかし、彼らは部活や期末テスト等で多忙な日々を過ごしており、イベントの方向性・宣伝方法等にかかわらず、ある一定数しか来場しない傾向があった。その一方で、科学に特別に興味を持っているかどうかはわからない小学生や未就学児達が、保護者に連れられてイベントに来場した場合、純粋に面白い内容であれば興味を強くもってくることがわかってきた。また、中高年世代の科学に興味を持っている人々も、イベント開催の情報が周知されていれば、よく来てくれることもはっきりしてきた。現在は、この「会場に足を運んでイベントを一緒に楽しんでくれる世代」を対象に、より幅広く科学の裾野を広げる方向性を目指している。とくに、小学生・未就学児とその保護者を主なターゲットにして会場設定や集中的な広報活動をしている。

このイベントによって、学会が受ける直接的な恩恵は、学会および学会に所属する各研究機関の認知である。次に、このような活動に学会員が参加することにより、会員が社会と対話する重要性・難しさ・楽しさを認識し、一般社会に対するプレゼンテーション技術を身につけることができることにある。このことは中長期的に学会全体の社会に対する説明責任を果たすうえでも役立つようになる。また間接的には、広く科学に興味を持ってもらい、単純な共感を得ることによって、国民全体として科学に対する理解や信頼を得やすくなることであると考えている。特に学童期にこのような働きかけを受けることにより、科学的なリテラシーを持つ市民を育成する基盤となることにつながっていくと期待しており、このような活動を通して学会が社会に貢献する意義はますます重要になっていくと考えられる。現在、我々が行っている秋のアウトリーチイベントは以下のようなものである。イベントは、秋学会の開催都市にある科学館や公民館で開催することが多く、学会会期中の祝日・土日に開催している。イベントの広報活動を円滑に行うために、市や県の教育委員会等にイベントの後援をお願いすることも多い。イベントの日程調整、開催地選定、広報活動などには、秋学会 LOC からの協力もある。

イベント終了から次年度イベントまでの間には、部会でイベントの内容を議論している。JpGU 会期中に部会を開催し、各担当(web、広報、予算など)を決定している。イベントの内容は大きく分けてトークショー、展示コーナー、実験・工作コーナーの 3 本立てが多い。か

つてはトークショーを中心としてイベントを企画することもあったが、近年ではトークショーを行う年もあれば行わない年もある。トークショーとは独立に学会研究分野領域を広く紹介するために、各種の展示を用意する。ただ単に展示をするだけではなく、「〇〇はかせ」（〇〇にはオーロラ、惑星等の名前が入る）と称して若手研究者を中心として配置し、研究者自身が積極的に研究の面白さをアピールしたり、参加者の質問に答えるなど対話したりするブースを展開する。初期のイベントでは、展示はポスターを中心とした静的なものが多かったが、来場者の興味を強く引くため、現在ではほとんどの「はかせ」ブースで、動く、あるいは体験できる展示を行うなどの工夫・改良がなされている。また、近年では各機関で作成・展開されているアウトリーチ用の資料（宇宙天気ポスター、「〇〇50のなぜ」（〇〇にはオーロラ、惑星等の名前が入る））や展示（ダジック・アースなど）などコンテンツが増えてきている。さらに、学会の研究領域で扱っている基礎的な物理等を紹介する意味で、実験・工作コーナーを設けている。たとえば、ゲルマニウムラジオの作成キットを小学生に組み立てさせて実際に受信テストをしてもらうような工作、波の仕組みを理解してもらうためストローを用いたウェーブマシン工作、太陽・惑星・衛星の大きさを理解してもらうためのピンポン球惑星工作などを行っている。このような体験型のイベントを前面に押し出すようになり、実際に来てくれた人々が興味を示す度合も飛躍的に増大した。その結果は会場で取っているアンケートの集計結果にも表れている。加えて、近年ではイベントの運営に協力してくれた学部生・大学院生・ポスドクに対して学会長名で感謝状を発行している。

COVID-19の影響により、2020年度はアウトリーチイベントを開催しない決断となったが、2021年度は初のオンラインイベントとして開催した。2022年度以降は以前のように対面式のイベントに戻っている。今後も様々な困難に直面したとしても一般公開アウトリーチイベントを継続的に開催し続けていくことは重要であろう。現在行っているイベントの規模は、学会やアウトリーチ部会から考えられるほぼ最大限のものになっていると考えているが、今後は、時代の変化に即した内容、また来場者、とくに子供達の記憶に残るような良質の企画を提供していきたいと考えている。

現在、イベント開催に関する現状の課題は、イベント運営に関わる会員数の維持、効果的な宣伝方法の確立、予算の獲得である。イベント運営に関わる会員数の維持は、学会員へアウトリーチ活動の周知をするなど地道な努力が必要であると考え。効果的な宣伝方法の確立については、費用対効果を高めつつ来場者数を増やすためには、広報活動を工夫する必要がある。現在では SNS や動画サイトを通じた広報活動など幅広い選択肢を取ることが可能である一方、JpGU など分野の重なる団体との差別化、イベント時に特化した広報にするのか、恒常的な情報発信を目指すのか、またそのための担当者の確保等、検討すべき事項は多い。予算の獲得に関しては、学会内での予算配分の増額や各種補助金への申請の検討が考えられる。今後はテーマ、会場の設定、宣伝（内容やメディアの選択）等について、我々内部の知の結集のみならず、他のイベント等も参考にして切磋琢磨したい。

#### <イベントリスト>（開催日時，開催地，来場者数，主テーマ）

- 2004/09/26 16:00～19:00 愛媛県松山市 来場者約 120 名  
「スーパープラネタリウム 惑星探査の最前線から」
- 2005/10/01 13:00～16:30 京都府京都市 来場者約 110 名  
\*「青少年のための最新”宇宙地球環境科学”入門 ～女性研究者が語る最前線～」
- 2006/11/04 14:00～16:00 神奈川県相模原市 来場者約 200 名  
「極限の世界からの贈り物オーロラ ～南極・北極インターネット生中継～」
- 2007/09/29 13:30～16:00 愛知県名古屋市 来場者約 90 名  
「地球のひみつ ～見えない地球の中を探る～」
- 2008/10/13 11:00～17:00 宮城県仙台市 来場者のべ約 1990 名  
\*「体感！日本の惑星研究最前線」



2009/09/26 12:00～17:00 石川県金沢市 来場者約 100 名  
 \*「宇宙を探る電波のチカラ ～ビビッとすごい電波の不思議～」  
 2010/10/30 12:00～16:30 沖縄県那覇市 来場者約 200 名  
 \*「オーロラ日和は嵐の日?～宇宙天気の話～」  
 2011/11/06 13:00～16:30 兵庫県神戸市 来場者約 250 名  
 \*「スーパーコンピューターで大冒険! ～宇宙と地球の不思議を発見しよう～」  
 2012/10/20 13:00～16:30 北海道札幌市 来場者のべ約 280 名  
 「聞こえてくるよ、地球の鼓動 ～電流と磁場でさぐる地震・火山～」  
 2013/11/02 11:00～17:30 高知県高知市 来場者のべ約 500 名  
 \*「身近なワンダーランド 宇宙と地球のふしぎがいっぱい ～宇宙・地球はかせが大集合!～」  
 2014/11/02 13:00～17:00 長野県松本市 来場者のべ約 320 名  
 \*「見て・さわって・感じよう!電波と磁場の不思議」  
 2015/11/03 12:00～17:30 東京都文京区 来場者のべ約 200 名  
 \*「きょう、地球をキミの手に!宇宙をキミの手で!」  
 2016/11/19 12:00～17:30 福岡県福岡市 来場者のべ約 140 名  
 \*「宇宙の天気は今日も気まぐれ!」  
 2017/10/15 11:00～16:00 京都府宇治市 来場者のべ約 480 名  
 「京都で体験!キミの知らない宇宙と地球の話」  
 2018/11/23 11:00～16:00 愛知県名古屋市 来場者のべ約 230 名  
 「はかせとワクワク大科学実験☆地球と宇宙のひみつを解明しよう!」  
 2019/10/27 10:00～15:00 熊本県熊本市 来場者のべ約 530 名  
 「科学実験で宇宙・惑星・地球の不思議を体験しよう!」  
 2020 年度は COVID-19 の感染拡大のため中止  
 2021/10/31 10:30～16:00 オンライン 申し込みアカウント数約 100 件  
 「はかせがナビゲート! 宇宙・惑星・地球のふしぎ」  
 2022/11/3 11:00～16:00 神奈川県相模原市 来場者のべ 271 名  
 「体験型☆地球・宇宙マスターを目指せ!」

\*文部科学省の科学研究費補助金（研究成果公開促進費）が採択されたイベント

<イベント内容例:2019 年度>

おしえて☆はかせ：○火山はかせ ○地磁気はかせ ○海はかせ ○宇宙天気はかせ  
 ○デジタル地球儀（ダジック・アース）はかせ  
 はかせと実験：「手作りラジオで電波星をめざせ」、「ピンポン球惑星工作」「光のフシギをしらべよう!」、「折り紙で自分の生まれた日の地球を作ろう」  
 機関アウトリーチ資料・展示：ダジック・アース (<https://www.dagik.net/>)、南極もつと知り隊、北極のひみつ (<http://www.nipr.ac.jp/outline/summary/pamphlet.html>)、「50 のなぜシリーズ」 ([http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/ste-www1/doc/outreach\\_j.html](http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/ste-www1/doc/outreach_j.html))、「宇宙天気ポスター」 (<http://seg-www.nict.go.jp/panel.html>)

## 6.2.2 秋学会時のプレスリリース

我々は、マスコミを通じた最新の研究成果の社会還元も行っている。大学や研究機関とは別に、学会として関与する特定の研究領域における科学成果についてまとめて発表を行うことは、研究領域や学会の存在感をアピールする上で大きな意義があると考えられる。実際、天文学会など近隣分野の学会では以前から独自の記者発表会を実施し、研究成果の積極的な公表に取り組んでいる。こうした考えから、アウトリーチ部会の活動の一つとして 2004

年の秋季年会（松山開催）より、学会講演会の発表の中からピックアップしプレスリリースを行ってきた。

今後も効果的な発信方法を検討し、学会およびアウトリーチ部会として、マスコミを通じたアピールについてのノウハウを蓄積する。課題の一つとして、これまでのプレスリリースの大部分を占めていた研究内容は、一般の人にとっては純粋な天文学、地質学、地震学等と比べ視覚的イメージを持ちにくく、少し難しく感じられる点がある。過去のプレスリリース原稿を記事化実績と合わせて蓄積する、著者及びプレスリリース担当などで原稿を推敲する時間を長くとする等の対策により、伝わりやすいプレスリリース資料の作成を支援する体制が必要であろう。もう一つの側面として、発信方法についても、大学・研究機関のプレスリリース状況を見定めつつ、学会としてのアピールに有効な形を模索する必要がある。2004年当初は学会開催地で記者を招いたプレスリリースを行い、地方紙等の媒体から地元の人へ向け発信していた。しかし必ずしも取材等の関心が集められず、2018年以降は記者会へのメール投げ込みとウェブ広報に移行している。秋季年会時のプレスリリースに限らず、学会として普段から報道各社や科学ジャーナリストとコネクションを持ち、日常的に学会の活動や会員の研究成果をお知らせする体制も必要であろう。

### 6.2.3 衛星設計コンテスト

衛星設計コンテストは高専・高校生から大学院生までの学生・生徒を対象にしたコンテスト形式の教育プログラムであり、宇宙に係わる基礎・応用研究を積極化する機会を提供し、併せて我が国の宇宙開発のすそ野の拡大に寄与しようとするものである。参加者は、小型の衛星をはじめとする様々な宇宙ミッションを創出し、その設計を行う。審査員は、着想点、創意工夫、基礎的な技術知識、将来性、等の様々な観点からすぐれた作品を選考し、最終審査を経て優秀な作品に賞が与えられる。2022年現在、当学会を含む9つの学会・機関が共同主催で本コンテストを実施している。1993年に第1回が開催されて以来、30年にもわたり開催されている。応募区分は「設計の部」「アイデアの部」「ジュニアの部(2005年設立)」に分かれている。(http://www.satcon.jp/)

地球電磁気・地球惑星圏学会は2003年の第11回大会から理学系の学会として初めて主催団体として加わり、実行委員、企画委員を派遣してコンテストの企画・運営の一翼を担ってきた。また、審査委員を派遣し、コンテストに応募してきた作品の中から「地球電磁気・地球惑星圏学会賞」を選び、毎年表彰してきた。その他、多数の学会員が有識者として本コンテストに協力している。第26回から第28回までは当学会シニア会員が実行委員会会長を務め、海外、特にアジア諸国からの参加・応募も促し、積極的な国際化を進めた。

コンテストの審査の主要な視点は、提案された衛星が工学的に実現可能な設計になっているかという点である。一方、その衛星によって実現されるミッションが独創性・先進性に富み、かつ、そのミッションを達成するために必要かつ十分な衛星設計がなされているかという点も重要である。そのため、工学と理学の両面から競い合うコンテストとなっている。

当学会は多くの学会員が様々な衛星ミッションに関わってきた経験を有しており、理学・工学両面の素養を持った人材が豊富であるため、本コンテストの大きな牽引力の1つとなっている。加えて、学会員の指導する学生・生徒が本コンテストに作品を応募し、最終審査会まで勝ち残って受賞している事例も見受けられる。学生・生徒に本コンテストへの応募を促し、支援することは、次世代のSGEPSSのミッションをけん引したり、サポートしたりする人材の育成に貢献することにもつながる。実際、本コンテストで受賞したグループの学生・院生が、メーカーの技術者として衛星の設計・開発現場で活躍しているケース、学生の設計した衛星ミッションを更にブラッシュアップして、後年大学衛星として打上げにまで至ったケースなどがある。

今後、応募されるミッションの完成度、現実度をより高めるためには、理学系、工学系のグループのマッチングを事務局側が斡旋するような仕組みがあると良いだろう。また、「設計の部」に応募したグループで優秀と認められた場合、希望に応じて相乗り超小型衛星への

推薦状を発行する取り組みを行っているが、コンテスト応募のインセンティブをより高めるために、実ミッションへステップアップするための具体的な支援を行う仕組みの整備が望まれる。また、学会員に対しては、総会や会報記事を通じて本コンテストに関する情報提供を行っているものの、認知度は必ずしも高くはない。そのため、今後学会内でのPR活動にも力を入ると共に、今後も継続的に学会員の指導している学生・生徒が本コンテストに参加することを促す努力も必要であると考えている。近年では、CubeSatなどの極めて小さな衛星の開発が進んできており、以前に比べ、はるかに安価に衛星を打ち上げることができる時代が到来してきている。これにより、大学・研究室レベルで人工衛星を打ち上げることが可能になりつつある。衛星を開発するスキルの必要性は高くなってきており、本コンテストのような衛星開発を学べる機会の重要性もますます高くなってきていると思われる。

#### 6.2.4 教育機関、公共団体等への講師派遣

2003年頃よりSGEPSSのアウトリーチ活動のひとつとして、小中高校等教育機関や公共団体等への講師派遣事業が始められた。文部科学省のスーパーサイエンスハイスクール事業(SSH)や科学技術振興機構(JST)のサイエンスパートナーシッププロジェクト事業(SPP)、学校における柔軟な学習時間等の普及により、学校教育現場や市民の集まりが科学者に直接話を聞く機会が格段に増えたことに対応するためである。当初は講師派遣希望機関からの要望を運営委員会が受けてアウトリーチ担当者が斡旋していたが、組織的に対応するためにこの事業についてもアウトリーチ部会が担当することになった。SGEPSS会員が所属する各機関の多くでは講師派遣や出張授業が制度化されている。これらは、大学や研究機関の広報・宣伝事業(たとえば大学であれば高大連携事業)の1つとして位置づけられているようである。学会としてわざわざ組織化して取り組む大きな理由は同様に広報宣伝ではあるが、大学等と違い学問分野そのものの宣伝が目的となっていて、考え方としては前述のプレスリリースと類似する。また、学会として講師派遣をすることには、

- ・学会が講師リストを保持して斡旋するので、派遣先のテーマや内容についての希望に適した人選がしやすく、全国的に対応できること
  - ・マネジメントだけでなく各分野の講師についてもノウハウを蓄積できること
- といった利点がある。

講師派遣事業の作業の流れは以下のようなものである。まず、講師派遣に賛同する会員のリストをホームページ上で公開する。派遣を希望する学校・団体等の関係者はこのリストを見て、派遣希望の講師、テーマ、時期、対象の学年・属性等をアウトリーチ部会宛に連絡する。その後、アウトリーチ部会の講師派遣プロジェクト担当者が希望された会員やテーマ・地域的にマッチした登録会員に打診し、派遣可能な会員が見つかった場合、講師の連絡先を派遣先に知らせて最終的には直接交渉してもらう。近年、リストを最新のものにアップデートするとともに、窓口を明確化しこれらの流れを一度整理する必要があるのではないかという議論がある。

このようなやり方でこれまでに、23件の事業に会員を派遣してきた。いくつかの高校とはよいコネクションができて、定期的に講師の派遣依頼が来ている。本事業の成果は数としては多くはないが、大学等の講師派遣事業と棲み分けしながらも継続していく価値があると考えられる。他方、現状として後述する学会若手アウトリーチ活動”STEPLE”の講師派遣と事業内容が重複していることは事実である。経緯とモチベーションがかなり異なっているので別組織別制度として併存しているが、どこかの時点で制度を整理する必要が出てくるだろう。しかし今のところは、STEPLEの方が活発であり、無理に統一するべきではないと考えている。

#### 6.2.5 若手アウトリーチ活動“STEPLE”

アウトリーチ部会発足当初から、6.2.1のアウトリーチイベントはアウトリーチ部会が中心となって企画・運営されていたが、イベントの事前準備や当日の実施については学生や若

手研究者などが中心となって行われてきた。そして、2010年には、「もっと若手が積極的にアウトリーチ活動に関与し、学会のアウトリーチ活動を活性化させたい」という強い希望を持ったグループが現れ、若手独自の学会アウトリーチ活動“STEPLE”が発足された。STEPLEという愛称は、“Space, Terrestrial and Planetary Lectures”の頭文字をとったもので、「手に届く宇宙☆地球科学レクチャー」を合い言葉として、SGEPSSの研究分野や、広くは「研究」、「科学」の魅力を小中高生や一般市民へ伝えていくことを目的としている。近年の活動内容としては、角田市スペースタワー・コスモハウスが主催するイベント、仙台市天文台との共催イベント、女子中高生夏の学校などに毎年参加している。また年1~2回程程度の頻度で講演の依頼を受けて、講師を派遣し出前授業を行っている。これまでの13年間で46件の講師派遣を行ってきた([http://sgepss.org/steple/demae\\_general/demae\\_past/](http://sgepss.org/steple/demae_general/demae_past/))。

STEPLEに所属する若手学会員はこれらの活動を通して対外的な交渉スキルや企画のマネジメントスキル等を身につけることができ、若手自身のキャリア形成において研鑽の場としての側面も併せ持つ。また、若手学会員が学会という組織を身近なものとして考えていく1つのきっかけにもなっている。さらに、SGEPSSや自身の研究をわかりやすく一般の方に伝える経験を通して、自身の研究の意義や重要性を改めて実感できる機会を得ることもなっている。したがって、学会としてこのような活動を支援していくことは、学会の活性化のみならず若手人材育成にもつながり、非常に重要で意義深いことであるといえる。

今後は、毎年参加しているイベントのみではなく、新しいイベントにも積極的に参加し、より多くの方にSGEPSSの研究分野を知っていただけるように活動の幅を広げていくことが重要である。特に近年はSTEPLEメンバーのうち東北大生が占める割合が大きく、東北地方のイベントへの参加が多い傾向があった。そこで、なるべく全国の学生や若手研究者にSTEPLEに加入してもらえるように、各地方の大学や研究機関の若手学会員に積極的にSTEPLEの宣伝を行い、東京大学、東京理科大学、電気通信大学、明治大学、名古屋大学、京都大学、九州大学などから多くの学生がSTEPLEに新規加入した。今後は東京、名古屋、京都、九州でも毎年継続して参加していけるようなイベントを見つけることで、SGEPSSの認知度の向上に大きく貢献することが期待される。

### 6.2.6 Webの充実

アウトリーチ部会では、その開設当初から一般向けのホームページを作成・公開してきた。現在は、<http://www.sgepss.org/ornew/>で公開している。オンラインによるアウトリーチ活動の主な内容は一般への各活動(6.2.1~5)の紹介、一般向け連絡先の提示、および部会内・グループ内への連絡MLである。また、2010年度よりイベントに合わせてTwitter(<https://twitter.com/sgepss>)を利用しはじめ、さらに、2012年度よりFacebook(<https://www.facebook.com/sgepss/>)による広報活動も開始している。また、2021年度のアウトリーチイベントはオンライン開催という形態であったため、YouTubeを用いたイベント特設チャンネル(地球電磁気・地球惑星圏学会 イベントチャンネル)を開設し当日ライブ配信を行なった。ソーシャルメディアの活用は現代において一般とのつながりをするうえでは必須であると考えているが、まだアウトリーチイベント(6.2.1節)に関連した使用がほとんどであるので、普段からの配信を増やし、フォロワー等を増やして学会活動を広めていければと考えている。また、他の研究団体・研究機関等とのネット上での連携も推進していくべきであろう。一方で、SNSを用いた継続的な情報発信に関しては、発信する話題数や内容、かけるマンパワーに対する費用対効果の問題などいくつかの課題もある。

Web, SNSを利用した今後の展開として、一般・小中高生向けの学会研究内容の解説が挙げられる。過去にも一般向けの分野紹介のページは存在したが、記述に不完全な部分が残されていた他、歳月が過ぎて内容やデザインが古くなってしまったこともあり、現在では休止している。今後は学会パンフレットの改訂と連携し、現在の一般の興味や学校教育とマッチする形で解説を増やしていくべきであろう。近年では大学や研究機関も積極的にプレスリ

リリースや Web 上での研究紹介コンテンツの作成を実施するようになり、分野によっては研究者自らが実施しているようなケースも見受けられる。研究成果の社会還元の一環として、今後も積極的な活用が望まれる。

このような流れを受けて 2022 年 5 月にパンフレットを新規作成した。今後は、アウトリーチイベントなどの機会に来場者に配布するなど、積極的に活用していく予定である。

### 6.2.7 これからの広報活動について

本節では、これまで述べてきた広報活動に関する課題や今度のプランに関して述べる。アウトリーチ部会での活動は、研究成果の社会還元、国民の科学リテラシー向上、SGEPSS の認知度向上などのためにも必要な活動である。次世代育成という観点や、研究コミュニティの持続的発展という観点においても重要である。一方で、アウトリーチ活動に携わっている研究者達の根底には「科学することの喜び」を人々に伝えたいという気持ちがあり、この欲求が活動の原動力となっている。このようなアウトリーチ活動を継続していくことは、我々の目標である。

一方で課題点もある。6.2 節で紹介してきた広報活動は、原則としてボランティアベースの活動が多い。各会員は、自身の勤務先における研究・教育・事務作業などの用務の間にこのような広報活動を行なっている。このような本務先での負担は年々増加しており、ボランティアベースの広報活動に割ける時間にも影響を与えている。アウトリーチイベントは近年イベント規模が拡大してはいるものの、イベント規模を維持するためには、マンパワーの維持も重要となってくる。プレスリリース担当や衛星設計コンテスト委員においては、関係者が後継者候補に直接依頼を行いバトンタッチしている状況である。そのため、後継者がいない場合は同一の会員が担当を継続せざるを得ない。ボランティアベースで行なっている広報活動において、特定の会員が長期的に継続して活動を行うことは場合によっては負担増となる可能性がある。

このようなことを解決するためには、一つには学会として広報活動の将来的な目的や目標を明確にすることも必要であると考ええる。先述した委員の後継者などは、関係者のみだけでなく学会が後継者を探すなどの工夫も必要と考えている。また、多様な職種にも学会の間口を広げることも必要と考える。学校教員などの教育活動に熱心な方の会員が増えると、アウトリーチ部会のメンバー数も増えマンパワー問題の解決の一助になると考えられる。SGEPSS として広報活動に対する賞などを新設することによって、アウトリーチ部会のメンバーのモチベーションアップやメンバー数増加などの効果が得られるかもしれない。

これまで述べてきたようにアウトリーチ部会の広報活動は多岐に渡っており、規模も大きくなっている。部会ははじめ各広報活動は、ボトムアップで始まったものが多いが、このように多岐かつ大規模になってきた活動を整理するためにも、アウトリーチ部会の規約を作る必要があると考えている。

## 6.3 人材育成

本節では、人材育成という観点で、初等・中等教育との関わり(6.3.1節)、高等教育との関わり(6.3.2節)に関して述べていく。

### 6.3.1 初等・中等教育との関わり

6.2.1節で述べたようなアウトリーチイベントは、来場者に科学的興味を持ってもらうことを目的の一つとしている。これらは科学リテラシーの向上に寄与する活動とも言える。また、SGEPSS が持続的に発展していくためには、後進となる新たな研究者の参加が不可欠である。6.2節で紹介したアウトリーチ部会の活動は、このような次世代育成の側面もある。本節では人材育成という観点で、初等・中等教育との関わりに焦点をあてる。具体的には広報活動と学校教育に関して述べていく。

#### 6.3.1.1 広報活動との関わり

6.2.1節で述べたようにアウトリーチイベントは、イベント来場者に SGEPSS の研究分野を知ってもらうことを主目的とすると同時に、科学的興味を持ってもらうこと(科学リテラシーの向上)も目的の一つである。来場者の年齢層は、当初 SGEPSS の研究分野を学べる関係大学等に進学を希望する中・高校生を主たるターゲットにしていた。しかし、部活や定期テスト等で多忙な日々を過ごし、来場者数が少ないという傾向があった。その一方で、科学に特別に興味を持っているかどうかはわからない小学生や未就学児達が、保護者に連れられてイベントに来場した場合、純粋に面白い内容であれば興味を強くもってくれることが経験上わかってきた。このような経験則もあり、現状ではアウトリーチイベントは未就学児や小学生をメインターゲットにして開催することが多い。イベントに参加した子供たちが将来 SGEPSS 分野に進学してもらうことはアウトリーチ活動の主目的ではないが、副次的効果として期待したい。このようなアウトリーチイベントのみならず、アウトリーチ部会の講師派遣プログラム(6.2.4節)や STEPLE の活動(6.2.5節)を通じた小中高高校生への広報活動も、科学リテラシーの向上や将来の SGEPSS 分野への進路選択に寄与する側面もある。

#### 6.3.1.2 SGEPSS 分野の学校教育での扱われ方

SGEPSS において学校教育ワーキンググループができたのは、アウトリーチ部会ができた直後のことである。それ以前から、地球惑星科学関連学会合同大会運営機構のもとに組織された「地学教育」委員会に委員を送り、学会内対応組織として「高校地学教育 WG」が活動していた。この WG の活動は 2004 年度に終了・解散したが、その後 2005 年 5 月の運営委員会において「運営委員会アウトリーチ担当の下のワーキンググループ」として「今年度のみという期限付き」で学校教育 WG が組織された。主な目的は「文部科学省が直近に予定している学習指導要領改訂への対応・提言を検討すること(会報 186 号)および地球惑星科学連合の教育問題検討委員会に対応することであったが、後にはかなり具体的な学校教育課程への働きかけを目指し、「太陽地球系科学」を発刊(2010 年)した。その後、学校教育現場に対する働きかけとしては「講師派遣(6.2.4節)」を続けているが、能動的に取り組むには至っていない。本節では、我々の研究関連分野が学校教育(小学校・中学校・高等学校)でどのように扱われているかを示す。

我々 SGEPSS 会員の研究分野の対象は地球内部から表層、大気圏、磁気圏、惑星間空間および太陽と惑星圏まで非常に広いものである。主に電磁氣的現象について取り扱っているため、学校教育で関連する学習分野は、小学校～高等学校の理科、とくに物理分野・地学分野(そして一部化学分野)である。

高等学校までに履修する物理分野では、特に基礎的な物理法則が取り扱われ、そのほとんどすべては理想系の中で問題づけられる。つまり、我々が扱う生の自然を相手とする諸問題については、本文中には登場せず、囲み記事にてごく簡単に登場することがある程度である。そのため、教員が「こんなことがあって、それは理科(物理)の勉強と関係がある」という

ことを示さない限り、理科、とくに物理分野の授業に関連して児童生徒の関心事にはなりづらい。ただし、SGEPSS が対象とするものの基礎的な事柄に関しては、小学生の段階から高等学校までに扱う内容は数十年間あまり変わらず電磁気学が扱われていること、また、現行指導要領では光学の内容も小学校・高等学校にあることから、(物理を選択した理系志望の生徒であれば) 大学における必要な基礎教育の内容は学んできているようである。

地学分野では、現実の地球・惑星・宇宙における現象を具体的に取り扱っていて、SGEPSS の研究分野の一部もその対象である。しかし、多くの問題では現象そのものは扱うがプロセス(どうしてそうなったか)については触れられないことが多い。学問分野としての「地学」は基礎科学かつ応用科学でもあるので、他の物理・化学・生物を基礎とし連携することが要求されているはずである。しかし、実際には限られたカリキュラムの中で教科を成立させなくてはならず、他の 3 科目を履修していることを前提で学習することは難しい。そこで、小学生の地学分野(実際にそのような名前はないが、地学的な内容を取り扱う部分)や中学校理科第 2 分野(生物・地学分野)では、目に見える現象、私たちの生活に近い現象、その仕組みが直感的にわかりやすい(わかりやすそうな)現象、または古典的現象のみが取扱われる。SGEPSS の対象で言えば、地震、火山、大気、月・惑星、太陽はあるが、それらの電磁氣的現象には触れられないし、地磁気は(小学生で磁石が北を向くことが解説されているのを除けば)その対象ではない。一方、高等学校の地学分野(「地学基礎」と「地学」)では少し様相が異なる。「地学基礎」においては、地球科学的・天文学的事象を主に非定量的・非物理的に取り扱う。そのため地球物理的な内容でも、事象の形をいわば博物学的に学習する体系が取られており、「地学は暗記科目」という認識がされている。実際に地学を選択し大学入試センター試験の望む受験生のほとんどは文系志望であることに留意しなくてはならない。いっぽう「地学」では物理的現象を積極的に取り扱いいくつかの定量的な学習もするので、SGEPSS 分野の取扱いも若干増える。しかし、この科目は理系志望で地学を受験に使うような生徒しか履修せず、教科書の発行状況や各種調査から推察すると、そのような生徒は毎年全国に数千人程度しかいない。ある科学分野が学校教育で扱われるかどうかは、基本的には学習指導要領(とその解説)にどのように記述されているかによる。しかしながら、教科書執筆者や副教材執筆者の裁量により囲み記事や発展学習、実験などが設定されるため、これに教育現場が影響されることも多いと考えられる。さらに、高等学校地学では、教科書本文で取り扱う内容にも執筆者の個性と主張が表れ易い(他の教科・科目と比べて学習指導要領の要求が漠然としており、教科書執筆者・検定委員の裁量も広いようである)。実際、旧課程の教科書では、SGEPSS 関係分野の記述がかなり豊富なものも存在する。さらに、平成 24 年度より、理科基礎科目の 3 科目選択必修化(実質的には物理基礎・化学基礎・生物基礎・地学基礎から 3 科目を選択する)によって「地学基礎」を開講する高校が増えたが、SGEPSS 関係分野の記述はこれまでと比べて減少している。我々が自分たちの研究分野や基礎的現象を小中高校生に知ってもらう機会は、(少なくとも教科書の上では)確実に減り続けていることに留意しなくてはならない。

### 6.3.1.3 これからの学校教育へのはたらきかけについて

ここでは、SGEPSS 分野が学校教育で扱われている SGEPSS 分野(6.3.1.2 節)をもとにして、今後の学校教育への働きかけについてのプランを示す。

これまで記述してきたように、小学校～中学校の教育課程では、SGEPSS 会員の研究領域が関連する内容は対流圏内気象や地震火山など一部を除いてほとんど扱われない。義務教育期間では「身近な現象で観察が容易なもの」を優先して取り扱うため、電磁気現象はその対象になりづらいのである。

また、前述したように、高等学校で「地学基礎」を選択している生徒のほとんどは文系志望であり、「地学」を選択するいわゆる理系地学選択は数えるほどしか存在しない。これは我々の分野の大学教育課程にやってくる学生のほとんどは高校時代に地学を選択しないことを意味する。このことと、「子供のころから憧れてこの分野に進学する」ことは必ずしも



一致しないが、分野全体のアピールを損ねていることも事実である。

一方で、地学国立大学文系志望の受験生にとって非常に選択しやすく大学入試センター試験で高得点が望める科目であったうえ、現行課程では普通科において基礎 4 科目から 3 つを選択必修することが義務付けられたので「地学基礎」を履修できる学校が増え選択者も増大したようである。ところが、「地学基礎」では地磁気（主磁場）の取扱いがなくなってしまった。当然、核の役割や磁気圏といった SGEPS に関する話題に触れる機会は減少し、結果として教科書内における SGEPS 諸分野のプレゼンスは大きく低下してしまった。しかしながら、この「地学基礎」を受講する生徒たちは将来の日本社会を担い、政策決定にかかわる層とも大きく重なる。彼らに働きかけるのは長い目で見て必ず学会の利益になるものと考えられよう。

今後 SGEPS が学校教育に対する働きかけとして取るべき手段として、考えられることを以下に列挙する。

- (A) 身近な現象として、地磁気やオーロラ、流星、雷や火山雷等の現象を小中学校理科や小学校生活科（1, 2 年）で取り扱ってもらえるよう努力する。いずれも学校教科書に書いてあるレベルの「囲み記事」として成立し得る事項であろう。あるいは、副教材や科学読本として啓蒙書を作成する。「太陽地球系科学」は高等学校の生徒にも難しいが、もっと簡単なものを作成することは可能であろう。たとえば、名古屋大学太陽地球環境研究所（現宇宙地球環境研究所）が作成した「50 のなぜ」シリーズのようなものを利用したり、別途補完するようなものを作成するのも一つである。
- (B) 高等学校の物理・化学・生物の各科目の囲み記事、関連情報に我々の研究関連分野の事象が自然界における具体的な例として当てはめられることを社会に示す。それぞれの科目で学習する基礎的な内容が自然界でこんな場所に出てくる、と言う事例として取り上げてもらうすべを考える。また、高等学校「科学と人間生活」にも隙間があるかも知れない。
- (C) 高等学校理科教科、とくに「地学基礎」を開講する学校の教員向けに副教材などを作成し働きかける。これまで「太陽地球系科学」の出版によって、高等学校物理教員が地学を開講する際の事前学習をする参考書として使われることを期待している。しかし「地学」が実際に開講される学校は非常に少なく、一方で「地学基礎」は開講数が増えることが期待される。そこで、（我々の分野の取扱いは減ったものの）電磁気現象を視野に入れた副教材を作ることは可能であろう。
- (D) 将来の学習指導要領改訂に関与する。残念ながらそちら方面にコネクションがある本学会会員は数少ない。しかしながら、少しずつ学校教育の政策決定や現場におけるプレゼンスを増やしていくよう努力すべきではなかろうか。また、学会として指導要領や教科書に携わる関係者に働きかける努力をする。とくに、高校地学に関しては「教科書が難解（定性的・定量的説明が少なく、言葉が並んでいるだけ）」、「各社の教科書刊で扱っている内容や語句の説明が異なる、場合によっては矛盾する」と言った問題がある。これは我々の研究分野に関連した取扱い分野だけでなく、地学教科書全体の問題でもある。教員にとって使いやすい教科書、生徒にとって読んで意味が解る教科書に変えていく努力も必要であろう。
- (E) 我々の分野を専攻した卒業生に対し教育現場への就職を奨励する。教育学部のみならず、理学部・工学部等の大学・大学院を卒業して、中学校・高等学校での教職に就こうとすることは、現在の学生にとってのキャリアパスの 1 つでもある。たとえ高校で地学が開講されていないなくても、情熱のある人ならば開講に向けて努力するかもしれない。また、物理や化学の授業を担当していても上記(B)のようなことをしてくれる機会もあるだろう。
- (F) JpGU 教育問題検討委員会との連携をはかる。既に委員会のメンバーでもある SGEPS 会員は数名いるが、SGEPS 教育・アウトリーチ関係との連携はうまくとられていない。この点は実に残念であり、現アウトリーチ部会ではここを改善したいと考えてい

る。この委員会は地学教育全般について扱っている。つまり、地学の地位向上を主目的として活動はしているものの、内部では地学関係の指導要領や教科書内部の容量を食い合うライバルでもあり、元々我々分野のプレゼンスは非常に小さい。ここに強く働き掛けるためには、連携強化が必要であると考ええる。

- (G) 学会内でも、学校教育、大学基礎教育、教職課程教育に携わるメンバーや基礎教育に関心のあるメンバーでの知識経験の集積と意見交換を活発に行うようにする。これは、前項に書いた新学校教育 WG と共通のものになろう。おそらく、これは学会内の各研究分野・分科会間でかなり温度差があるであろうが、共通の認識として教育問題に対する危機感のある人間が集まって意見を出し合うところからスタートできるのではないだろうか。

### 6.3.2 高等教育との関わり、キャパシティビルディング

地球電磁気・地球惑星圏学会は古くから地球内部の電磁気学と電離層を含む地球周辺の宇宙空間をその対象領域として発展し、近年はさらに広く太陽系の惑星群もその範囲に含めている。他の地球科学の分野と同様に、人類活動のグローバルな発展に伴い、地球規模の気候変動や宇宙利用の重要性が注目され、当学会が専門とする領域も基礎科学としてだけでなく人類活動に資するための重要性が増している。このような現状の中で、当学会としては、会員の研究交流を促進させ、その研究がさまざまな新しい方向に発展していくための一助として活動していくことが改めて重要になってきている。高等教育においては、基礎科学としての理学研究科と宇宙開発・宇宙利用という視点での工学研究科における教育を中心として、人類が本格的に宇宙で生活する場合や過去の太陽活動の記録の発掘など、人文社会学系の教育も必要になってくるであろう。また本学会は地球規模の現象を対象としているために、本質的に国際共同研究が必須の分野でもある。今後、当学会が国際的な研究交流の柱の一つになり、広く世界で次世代育成に貢献していくことが大事である。

当学会に限ったことではないが、日本では修士課程の入学率はほぼ横ばいか微増であるのに対して、博士後期課程に進学する数が2000年頃（～30%）から2019年（～16%）と急激に減少している（科学技術・学術政策研究所、[https://www.nistep.go.jp/sti\\_indicator/2020/RM295\\_32.html](https://www.nistep.go.jp/sti_indicator/2020/RM295_32.html)）。日本では、博士号を取得しても企業で有利に働かないと思ってしまうことや、周りの大部分が修士までで就職するなかで自分だけ博士後期課程に進学する自信を持ってない学生が多いと考えられる。また、大学においては、競争的研究資金は増大しているが、毎年1.6%減という運営費交付金の定常的な減少により、大学の常勤研究ポストが減少しているという現実がある。これらの対策としては、以下のことが考えられる。

- 1) 研究者になるためだけでなく、企業においてでも、海外とやり取りして国際的に活躍するためには博士号の学位が必要であること、海外に出た時に博士号を持っていないと研究者として扱われないこと、を周知する。
- 2) 海外での就職も含めて広く世界で活躍できる人材を育てる。
- 3) 情報通信研究機構(NICT)、宇宙航空研究開発機構(JAXA)、産業技術総合研究所(AIST)などの独立行政法人において修士卒の大学院生を採用後、研究を通して論文博士や社会人博士を取得するキャリアパスが存在しており、これをもっと活用する。
- 4) 大型研究費を申請する際に、博士後期課程の学生をRAとしてフルサポートで雇用する経費を含めるようにし、採択されたら、後期課程に進学する前に広く公募して、大学院生の後期課程への進学を奨励する。

特に3)、4)については、企業への就職活動が年々早まっており、M1修了時点では内々定の出ている学生も多くいることも踏まえ、M1の2月くらいまでに、修士卒の採用や博士後期課程のRAの採用を決めている必要がある。そうしないと修士の学生が博士後期課程に進学する決断の助けにならない。

博士後期課程と一緒に進学する仲間を増やすことも重要である。その一助となっている

のが、主に当学会に関係した学生が集まる宇宙地球惑星科学若手の会の活動（学会での交流会や夏の学校）である。図1に、近年の宇宙地球惑星科学夏の学校の参加者数を示した。2010年の100人以上をピークに、だんだん減少し、2016年以降は40-50人程度で推移している。2020、2021年はコロナ禍のためオンラインで開催された。この若手会の活動に学生が積極的に参加するように取り計らっていくことも大事である。

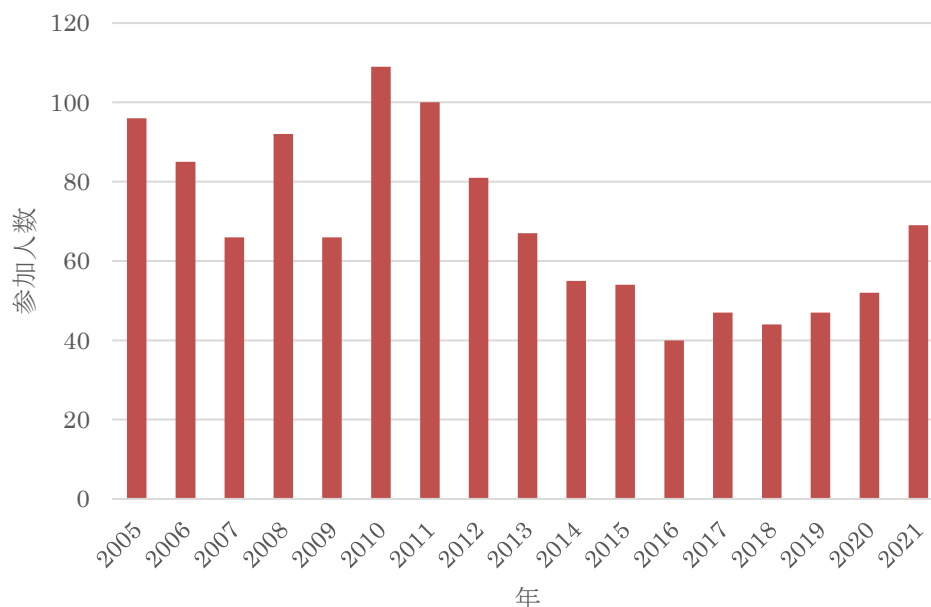


図1. 宇宙地球惑星科学夏の学校の参加人数の推移

前述したように、地球規模の現象を扱う本学会は本質的に国際協力で研究を進めることが必須である。その点では、海外からも大学院生や若手研究者を受け入れたり、派遣したりすることが、将来の持続的な国際共同研究の発展にとって重要である。例えば SCOSTEP が実施している SCOSTEP Visiting Scholar (SVS) プログラムでは、海外の大学院生や若手研究者を2-3か月間、最先端の国際研究機関に派遣する制度で、SCOSTEP が往復旅費を、受入機関が滞在費を負担する。この受入機関になって、海外の優秀な学生を積極的に受け入れることで、将来にわたる持続的な国際交流を進めることができる。また、近年は SCOSTEP などを中心として、大学院生や若手研究者のキャパシティビルディングのための国際スクールやオンラインセミナーが頻繁に開催されており、こういった活動に積極的に参加することで、国際交流を進めることができる。

## 6.4 研究者の充実したライフスタイルの実現

最後に、われわれ研究者自身の充実したライフスタイルの実現について述べる。いうまでもなく研究者も個人的な生活を営む一人の人間であり、研究環境と私生活の充実、どちらが大きく欠けても良質な研究を持続し、精神的に豊かな生活を送ることは難しいだろう。それゆえ学会全体の研究活動を持続的かつ健全に発展させるためには、個々の学会員の充実したライフスタイルの確立が欠かせない。近年、「働き方改革」[\*1]の議論がなされているが、現在の研究者に焦点を当てると、取り巻く環境は厳しさを増している。以下、6.4.1では、2021年10-11月に実施した会員対象のダイバーシティ関連アンケートの結果を基に、(1)ワーク・ライフ・バランス、(2)任期付き職の不安定雇用問題、(3)会員数の推移、(4)学会参加の視点から問題点を整理し、6.4.2にてこれまでの取り組み、6.4.3にて学会を取り巻く社会動向を踏まえ、6.4.4にて今後の取り組みについて述べる。

### 6.4.1 現在の状況

#### (1) ワーク・ライフ・バランス

我が国では急速に少子・高齢化が進み、労働人口の減少が現実の問題となっている。そのような時代にあっても、学会や研究コミュニティが国際的な競争力・発信力を失うことなく維持し、長く発展し続けていくための方策を考えることは重要である。その方策のひとつとして、さまざまな年齢層・性別・国籍から幅広く優秀な人材を確保していく必要がある。また長時間労働が仕事以外の個人の生活（ライフ）などにおいて自らが望む生き方を困難にさせているばかりでなく、十分な研究時間を確保できていないという問題がある。多様な背景を持つ人材が自らのライフを犠牲にすることなく、それぞれの能力を発揮できる環境を実現すること、すなわち、「多様なキャリアパス、及びワーク・ライフ・バランスを選択可能な環境の形成」が、今後の重要な課題である。

2021年10-11月に実施した会員対象のダイバーシティ関連アンケートでは、長時間労働のわりに研究・開発に充てられる時間が少ないことが浮き彫りになっている。職場での1週間当たりの勤務時間は、「40時間以上 45時間未満」が女性の割合が高く、「55時間以上 65時間未満」では男性の割合が高く、契約上の労働時間より長時間労働になっている（図2、棒グラフ中の数字は人数を示す）。1週間当たり研究・開発に充てている時間は、女性で「5時間未満」と「25時間以上 30時間未満」の割合が高く、男性も「5時間以上 10時間未満」が多く、長時間労働のわりに研究・開発に充てられる時間は少ない（図3）。2021年10月1日現在の勤務形態は、「在宅・リモートが認められている」のは男性の割合が高く、「在宅・リモートが認められていない」や「制限付きで認められている」のは、女性の割合が高

い (図4)。

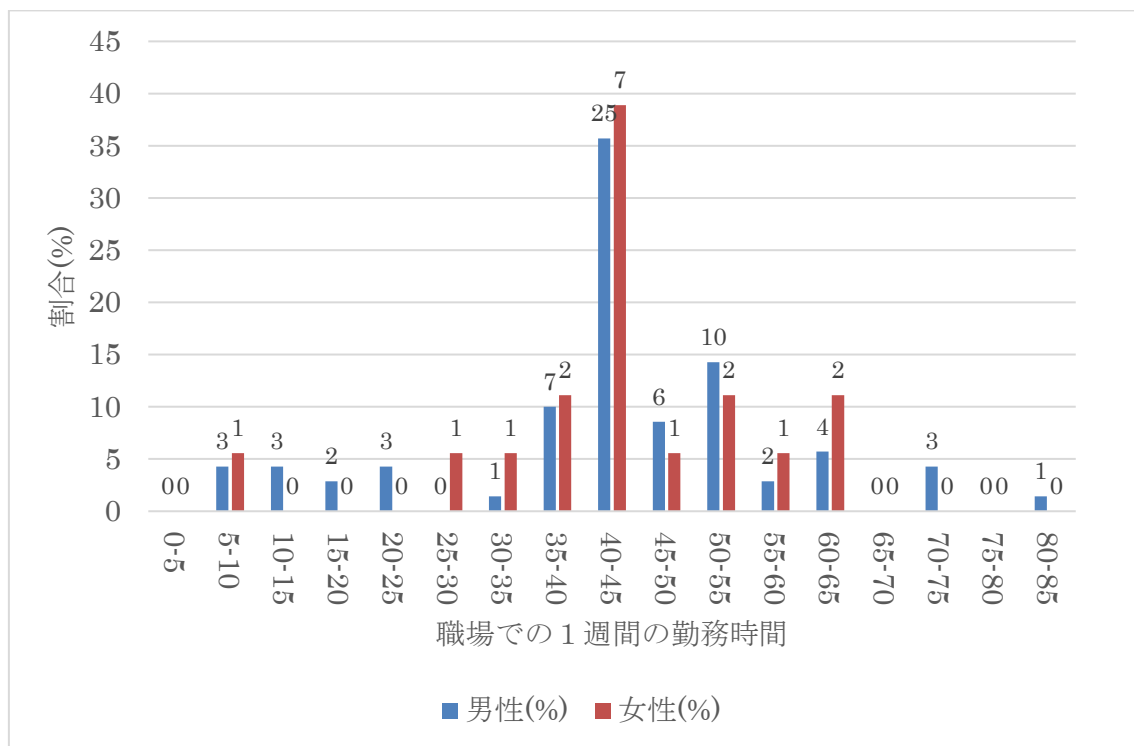


図2 職場での1週間の勤務時間の男女別割合 (図中の数字は人数を示す)

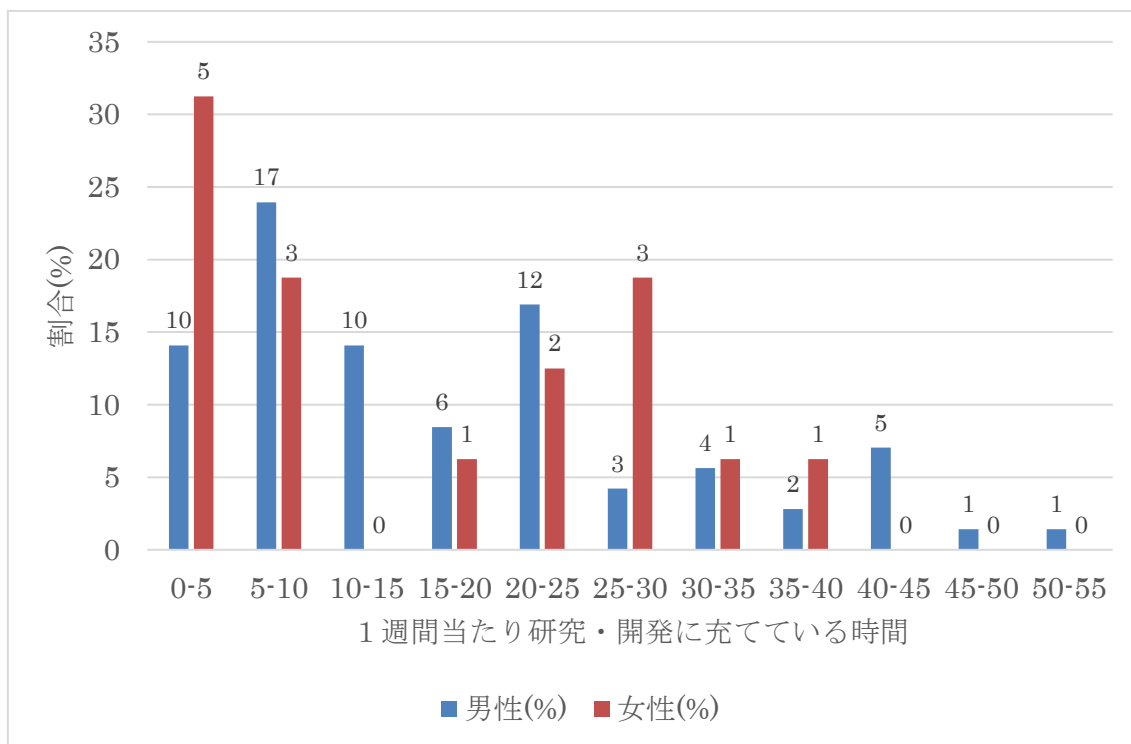


図3 1週間あたり研究・開発に充てている時間の男女別割合 (図中の数字は人数を示す)

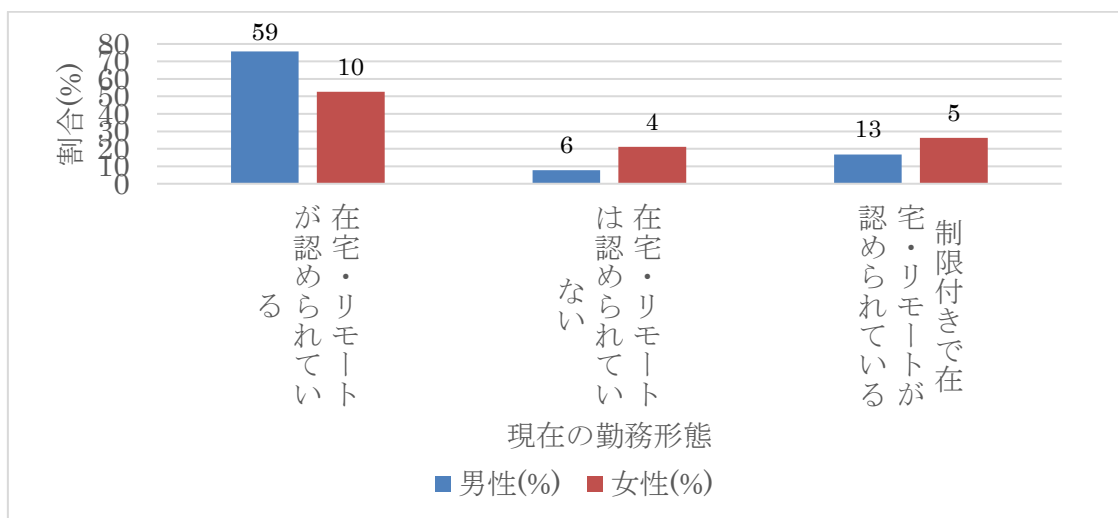


図 4 2021年10月1日現在の勤務形態の男女別割合（図中の数字は人数を示す）

在宅・リモート勤務が認められている方に在宅・リモートでの勤務時間（1週間あたり）を聞いたところ、最も多いのは男性・女性とも20時間未満であり、次に40時間未満が続いた（図5）。男女間の差異はあまりなかったが、女性では40時間以上のリモート勤務をしている人が皆無であった。なお、最長は男性で70時間、女性では24時間であった。

リモートの勤務時間のうち研究・開発にあてている時間に関しては、男性・女性とも10時間未満が最も多く、次に10時間以上20時間未満が続いた（図6）。男女間で比較すると、女性の10時間以上20時間未満の割合がやや高く、長時間（20時間以上）が皆無であった。

性別・年代別にみると、男性は30代40代50代で在宅・リモートの勤務時間が長く、60代で短い（図7）。そのうち研究・開発に充てる時間は50代で最も短く、60代でやや回復する傾向がみられる。女性では、30代40代50代と年代が上がるにつれて在宅・リモート勤務時間が長くなるのに対し、そのうち研究・開発に充てる時間は年代が上がるにつれて短くなる。なお、20代70代はそれぞれ回答者が1名のみであった。

### 13-1

#### 在宅・リモートでの勤務時間は1週間あたり何時間ですか。

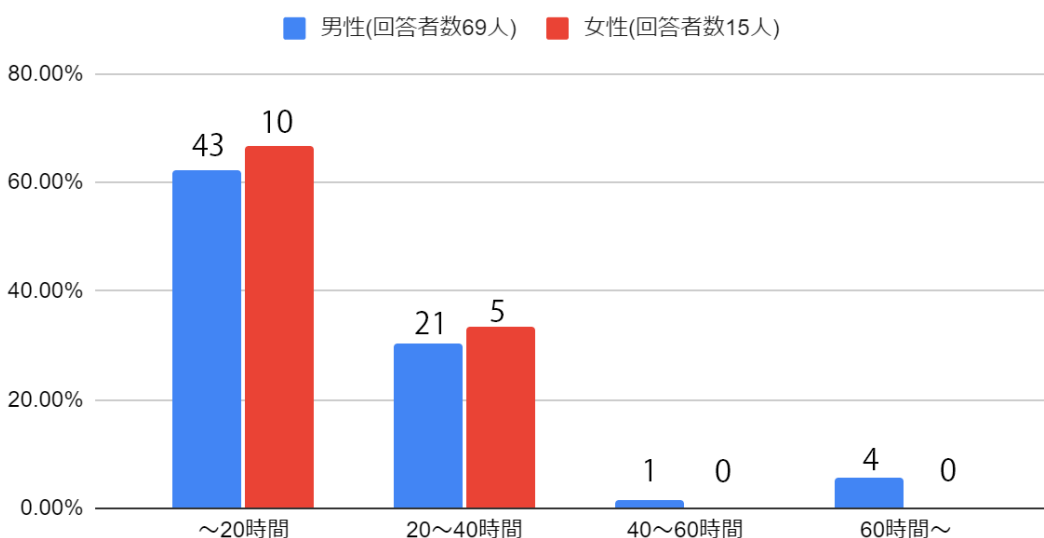


図 5 在宅・リモートでの勤務時間（図中の数字は人数を示す）

### 13-2 そのうち研究・開発にあてている時間

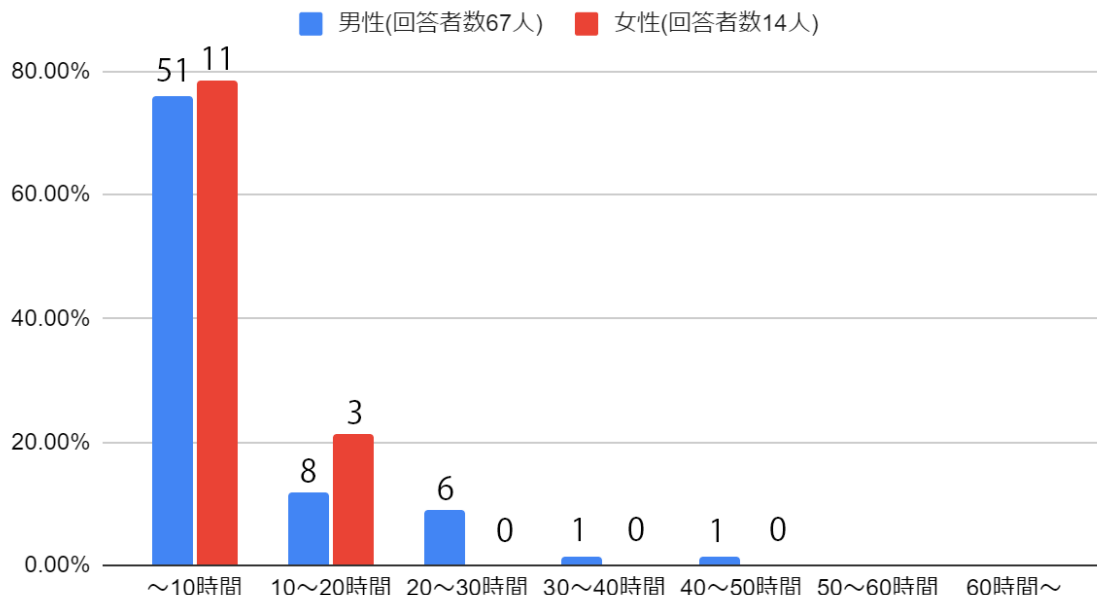


図 6 在宅・リモートでの勤務時間のうち、研究・開発にあてている時間（図中の数字は人数を示す）

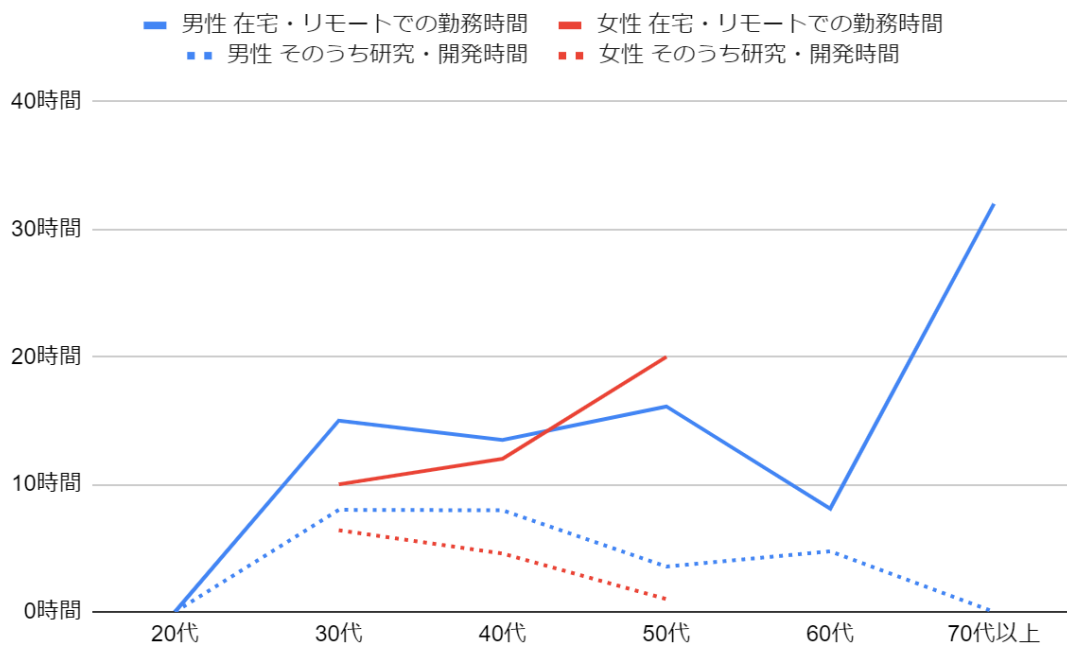


図 7 在宅・リモートでの年代別勤務時間数

ダイバーシティ関連アンケートでは、「家事・育児・介護などに要する時間（1日平均）（時間（整数記入））」の設問に対して、全回答者 126（男性 103、女性 23）名中、有効回



答は 95 (男性 78、女性 17) 名であった。男女とも、概ね 0～8 時間の回答が殆どであったが、男性の中で 24 時間との回答の方が 1 名いた (図 8)。また、男女で比較すると、男性では 1 時間が最も多く男性有効回答者中約 22%、0～2 時間の回答が半数を超え (約 53%)、24 時間の方を除けば、時間がより多くなる回答は時間数とともに概ね減少した (0～5 時間の回答が約 72%、6～8 時間の回答は約 3%であった)。これに対し、女性では、男性より多めの 2～3 時間の回答が最も多く (共に女性有効回答者中それぞれ約 17%)、0～5 時間の回答は約 61%であり、より多い 6～8 時間の回答の方が女性の約 13%と一定数いた。男性有効回答の平均は、2.23 時間 (24 時間との回答を除いた場合の平均は 1.95 時間)、女性回答者の平均は 2.94 時間、男女全員の平均は 2.36 時間 (24 時間回答を除いた場合 2.13 時間) (男性平均と女性平均の単純平均は 2.56 時間 (24 時間回答除く場合 2.44 時間)) であった。

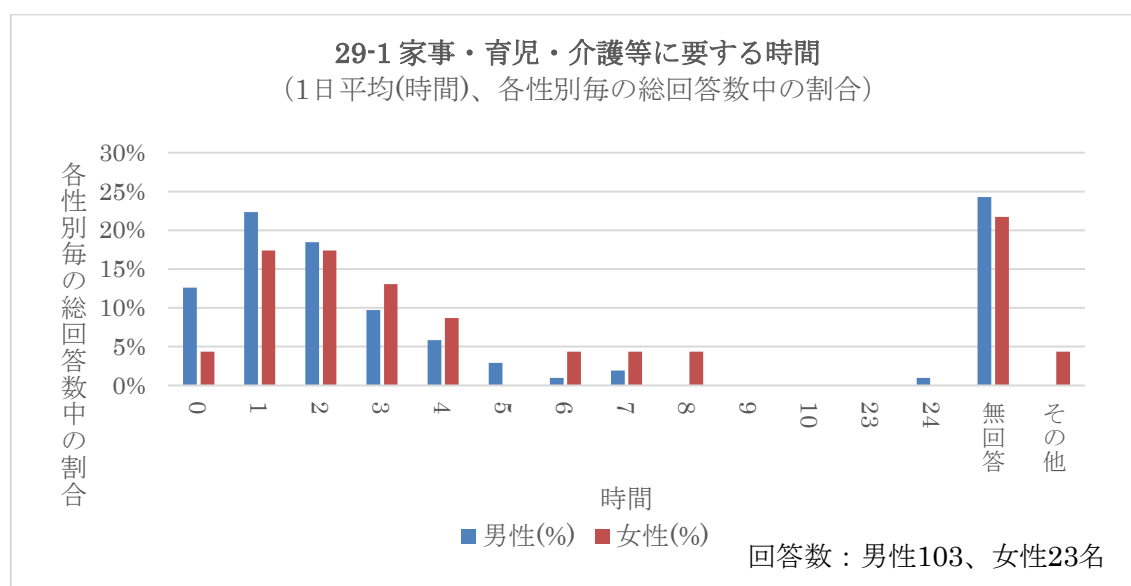


図 8 家事・育児・介護等に要する時間 (割合)

以上をまとめると、2021 年 10 月現在の課題は以下の 5 つである。

1. 出勤、在宅・リモートワークの形態によらず、長時間労働のわりに研究時間は 10 時間未満と少ない。
2. 「在宅・リモートが認められている」のは男性の割合が高く、「在宅・リモートが認められていない」や「制限付きで認められている」のは、女性の割合が高い。「在宅・リモートが認められていない」や「制限付きで認められている」女性の職種は教授から研究員まで様々であり、原因も多様であると思われる。
3. 女性では、年代が上がるにつれて在宅・リモート勤務時間が長くなるのに対し、そのうち研究・開発に充てる時間は年代が上がるにつれて短くなる。
4. 家事・育児・介護などに要する時間は、女性のほうが男性より多い。
5. 約 2 割の人が家族の看護・介護の経験があり、研究時間を確保する、あるいはキャリアを中断することなく、研究者としての活動を継続できる対策が十分に整えられていない。

ワーク・ライフ・バランスの実現のためには、長時間労働の改善、十分な研究時間を確保できる働き方の改善、勤務形態の多様性が必要である。

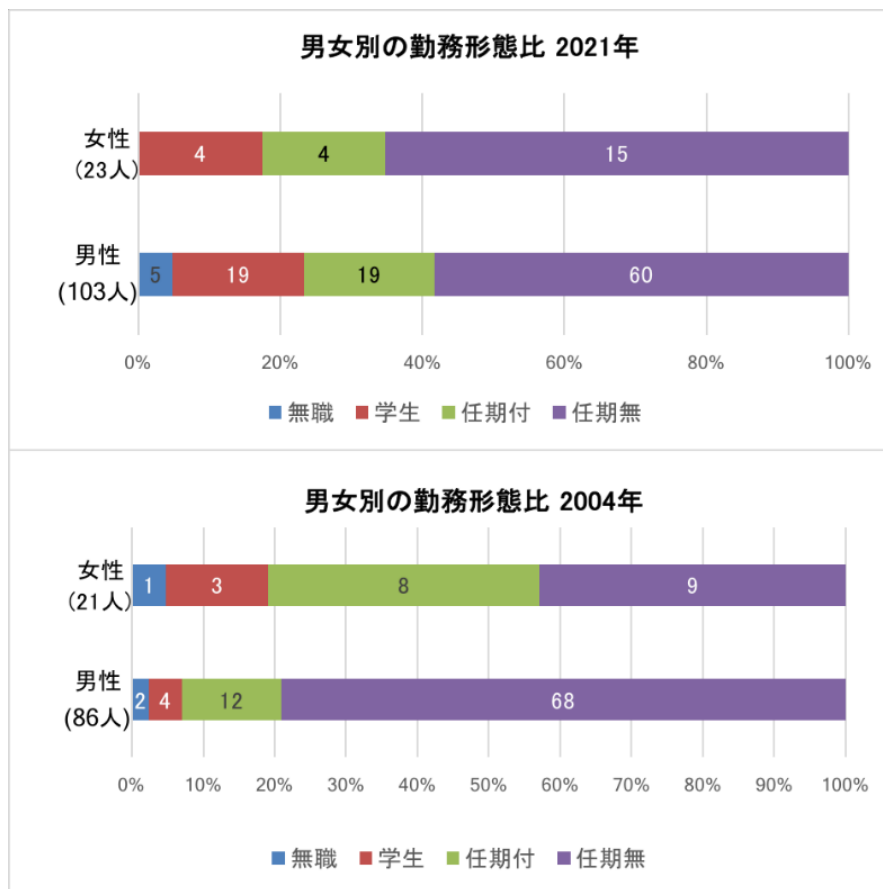


図 9 2003 年および 2021 年の男女別の勤務形態比 (図中の数字は人数を示す)

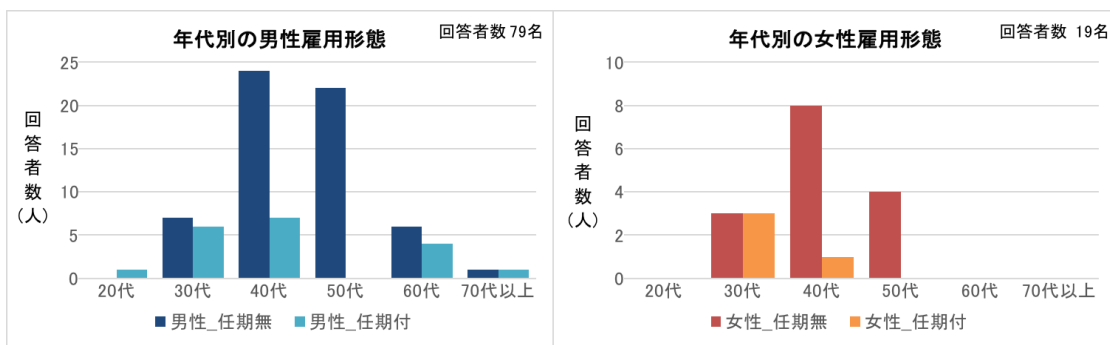


図 10 年代別の男女の雇用形態

## (2) 任期付き職の不安定雇用問題

図 9 は 2021 年と 2003 年のアンケートによる男女別の勤務形態比を示す。ここで、2003 年の「任期付職」の回答者数は 2003 年のアンケートにおいて、「常勤(任期付)」と「非常勤」の合計とした。男性では、2003 年は任期無し職が 8 割程度を占めていたが、2021 年は 6 割弱に減少し、学生と任期付き職の割合が増加した。逆に女性では、任期無し職の割合が増加し、

男女ともに変わらない勤務形態に変化した。女性が任期無し職を得る機会が増えたことが推察できる。

次に2021年のアンケート回答者に対し、職に就いている人を年代別に分類したのが図10である。男女ともに、任期無し職に就いている回答者は40代が最も多く、ついで50代が多い。男性では、任期付き職は50代を除き各年代に回答者がいるが、女性が任期付き職である年代は30代と40代のみである。60代以降も任期無し・任期付きとして職を得ている回答者は男性のみである。

さらに、2021年のアンケート回答者に対し、任期付の職の回答者の雇用形態を年代別に分類した(図11)。研究員は広い年代に分布している。一方、講師は30代のみ、助教は30代と40代のみ、准教授は40代のみ、教授は60代のみ、教授以上は70代以上である。

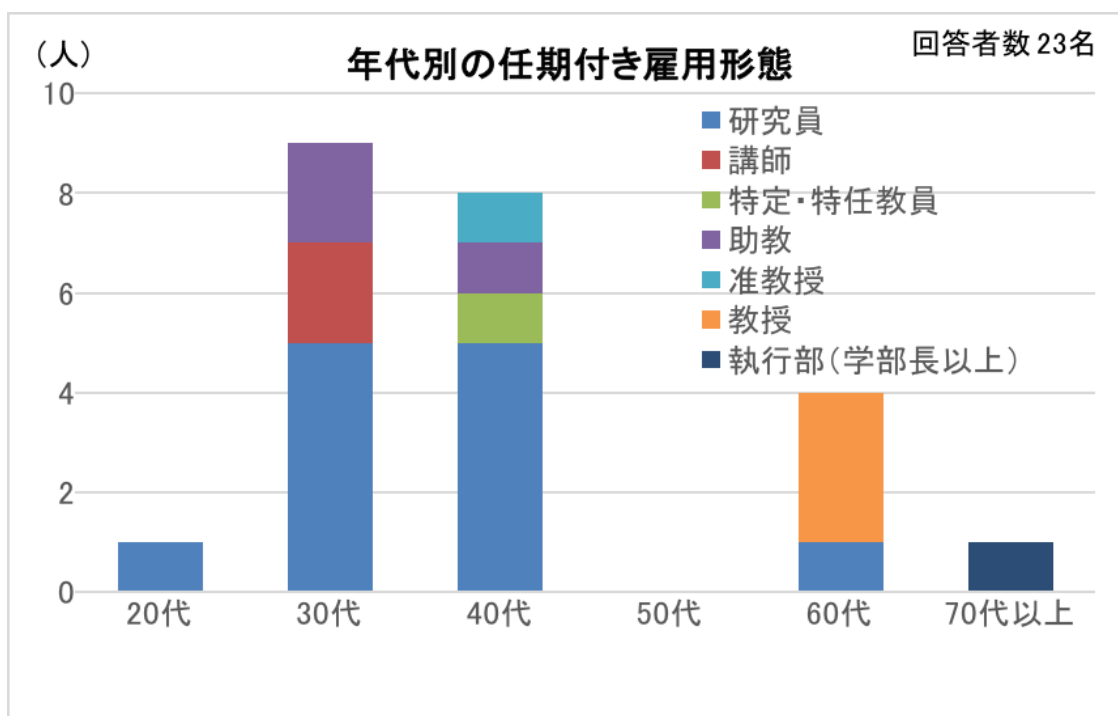


図 11 年代別の任期付き雇用形態

図12は、2021年10月1日現在、任期・契約期間付きの職に就いている回答者23名に対して、現職の任期・契約期間を職位によって分類した図である。契約期間1年が全体の44%と最も多い。回答者23名中12人は研究員であり、その契約期間は最長6年まで各期間に分布しており、研究員の契約状況は多様であることが推察できる。

現職の任期・契約期間付きの職がテニユアトラック型か否かを、職位によって分類したのが図13である。全体の83%がテニユアトラック型でないと回答した。講師は2名ともテニユアトラック型である。

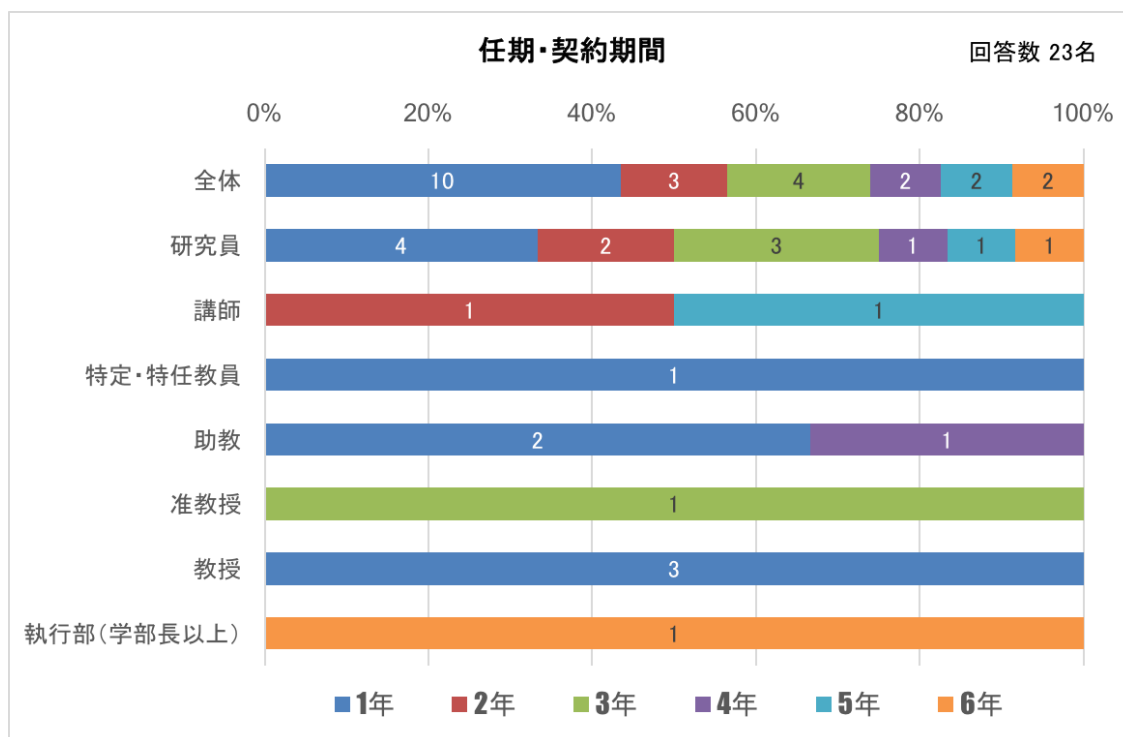


図 12 職位別の任期・契約期間（図中の数字は人数を示す）

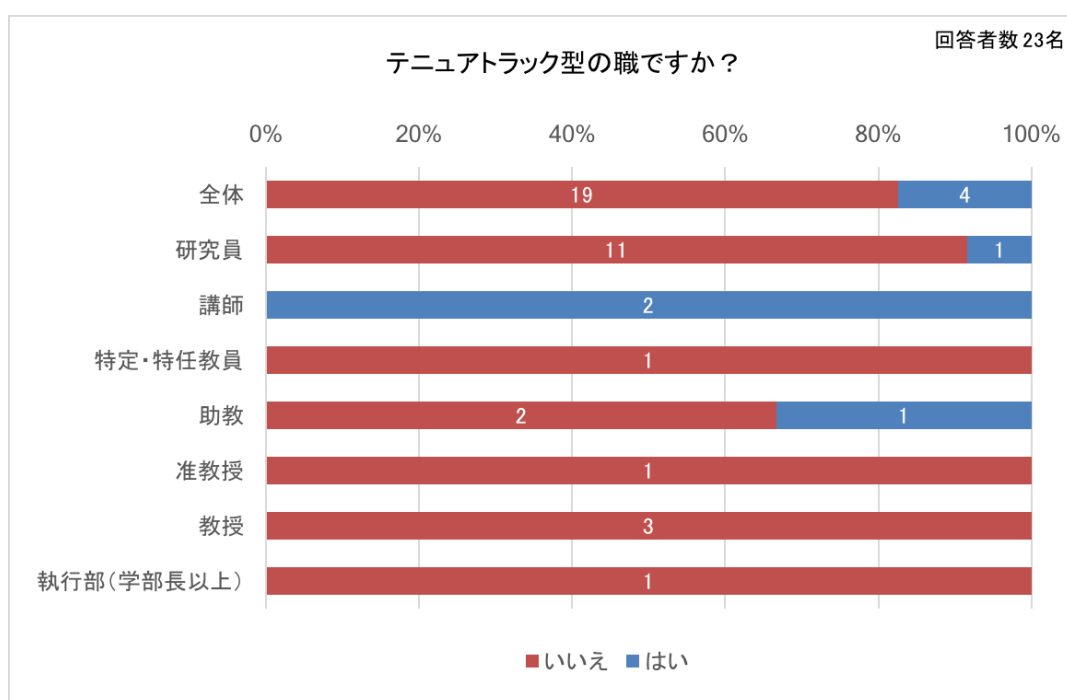


図 13 職位別テニュアトラック型の有無（図中の数字は人数を示す）

図 14 は任期・契約期間付き職の再任の可否を職位別に示した。再任は「不可」が 39.1%と最も多いが、「再任可」と「再任回数に制限がある」を合わせると 47.8%となり、約半数は制限あるが再任可能である。また、教授の職位はすべて再任可能である。さらに、再任不可は助教以下の低い職位に集中しており、助教以下の職は安定してないことが推察できる。

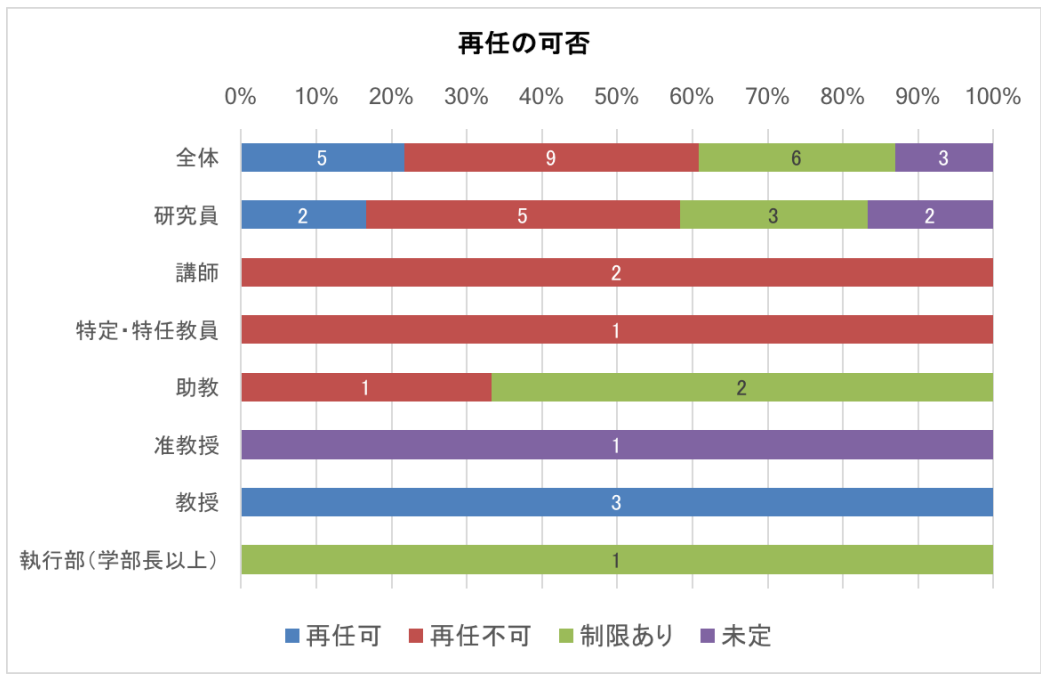


図 14 職位別再任の可否 (図中の数字は人数を示す)

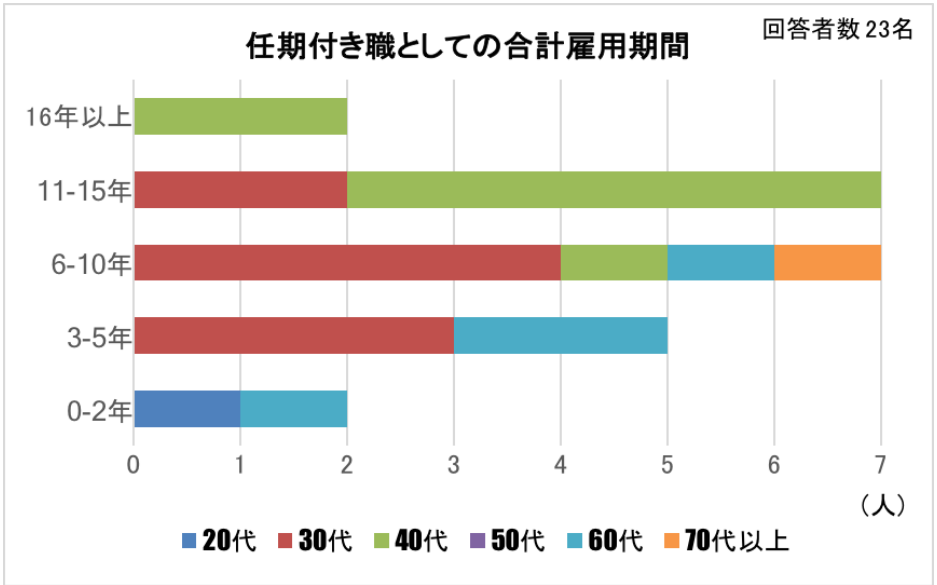


図 15 任期付き職としての合計雇用期間

「これまで合計何年間、任期・契約期間付きの職に就いていますか？」との問いには、40代までは年代が上がるほど長くなる傾向にあり、40代の回答者で最大20年間という回答があった(図15)。一方、60代以降の回答者では2年間から最大7年間と30代以上の回答者と比べ短い期間に分布している。

上記と同様に、任期・契約期間付きの職として所属が変わった経験がある回数は、40代までは年代が上がるほど回数が増える傾向にあり、最大6回である(図16)。一方、60代以降は最大1回である。所属が変わった経験は4回が最も多い。

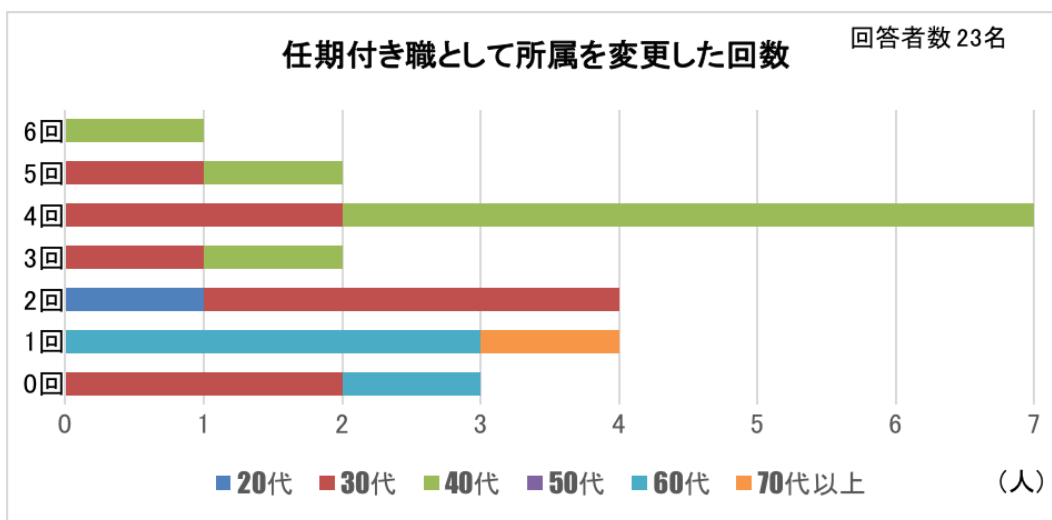


図 16 任期付き職として所属を変更した回数

図 17 は任期・契約期間付きの職に就いている回答者 23 名の社会保険の加入状況を職位別に示す。本設問は複数回答であり、回答数の合計は 42 件である。全体の 90%がなんらかの社会保険に加入している。教授職 2 名と研究員 2 名が社会保険に加入していない。うち教授 1 名の回答者から「短期雇用であるため社会保険には加入していない。」との記述があった。

図 18 は任期・契約期間付きの職に就いている回答者 23 名の育児休業の可否を示す。全体として 65%は育児休業が可能である。「分からない」と回答したのはすべて研究員であり、「不可」または「分からない」と回答した研究員は 58%である。

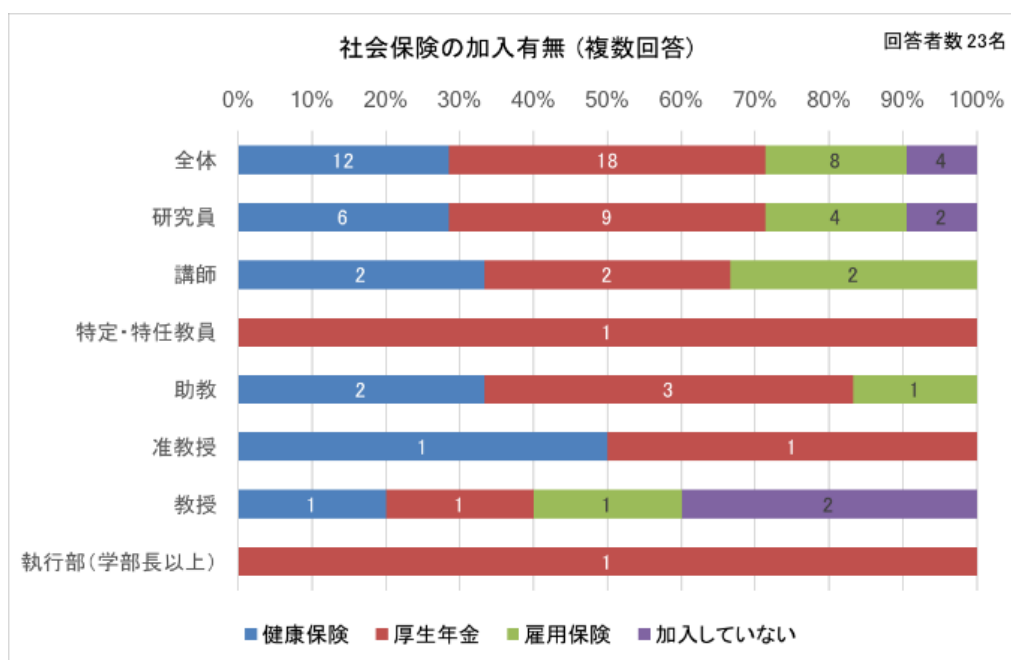


図 17 社会保険の加入有無（複数回答、図中の数字は人数を示す）

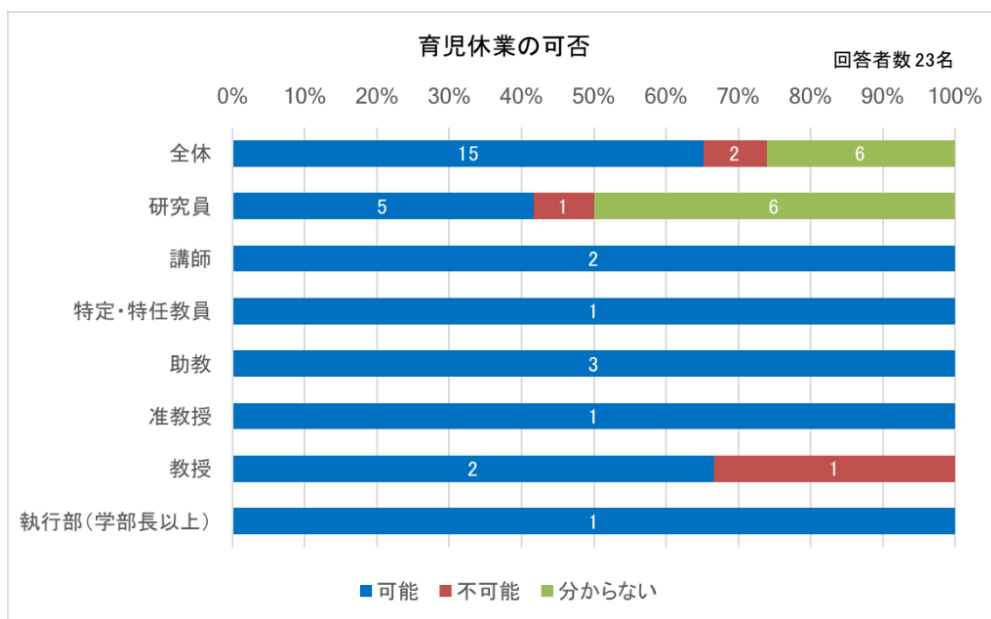


図 18 育児休業の可否 (図中の数字は人数を示す)

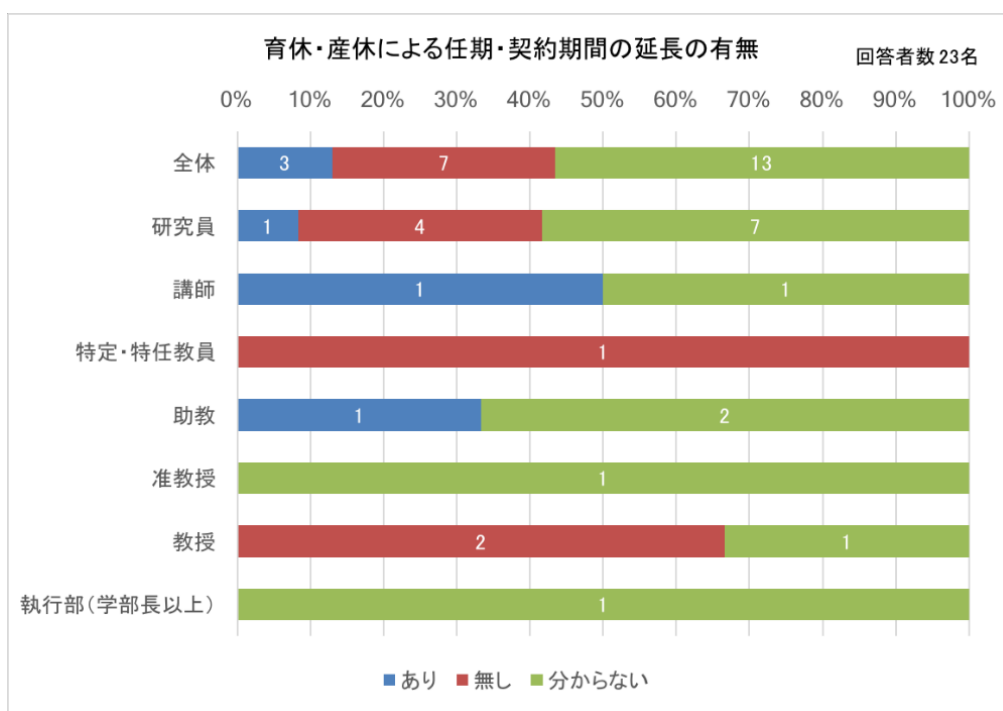


図 19 育休・産休による任期・契約期間の延長の有無 (図中の数字は人数を示す)

「育休・産休後に、休業期間に応じた任期・契約期間延長があるか」、との問いに対して、「分からない」と回答したのは全体の 57%であり、「無し」も含めると全体の 87%となった(図 19)。「無し」と回答した 7人の契約期間は 1 から 4 年間に分布していた。契約期間が短い場合には、その制度を利用する前に転職・異動また離職するためかもしれない。もしくは、契約期間中に育休・産休を取らなければ、延長制度を利用しないため、制度があるか分からない、ということが考えられる。

「任期・契約期間無しの職に就きたいか?」との問いには、78%が「はい」と回答した(図



20)。「いいえ」と回答したのは、60代以上の回答者である。

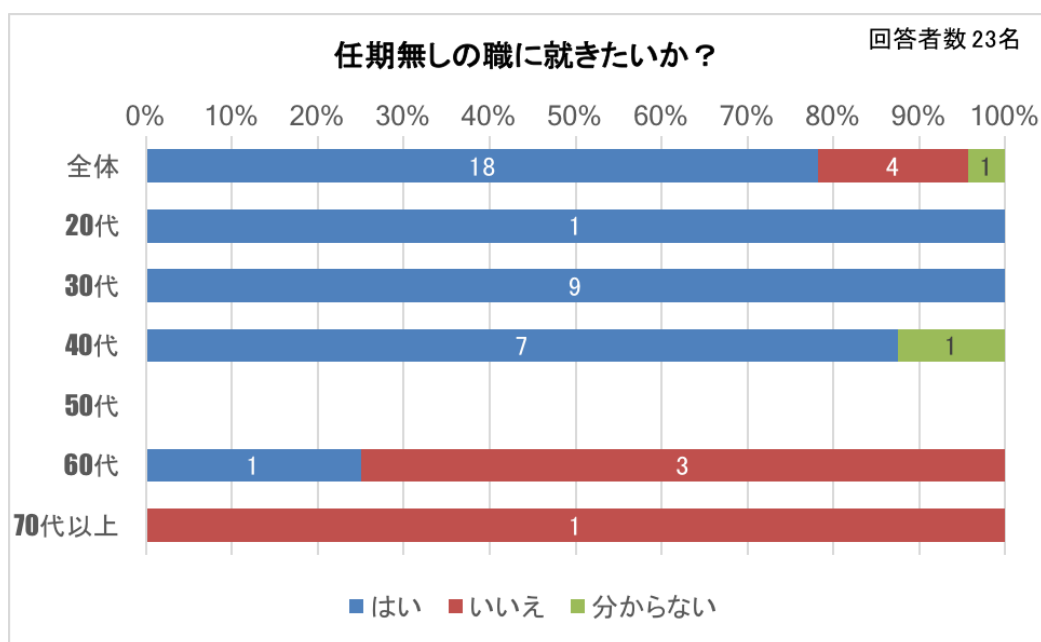


図 20 任期なしの職への希望 (図中の数字は人数を示す)

以上より、任期付きの職では、契約期間が1年から6年までと様々であり、社会保険制度も充実しており、育休制度も比較的ある。一方で助教以下の職位では、再任が難しい場合が多く、30代、40代の研究者は、任期付の職を転々としている現状が明らかになった。

以上をまとめると、2021年10月現在の課題は以下の5つである。

1. 男性では、2003年は任期無し職が8割程度を占めていたが、2021年は6割弱に減少し、学生と任期付き職の割合が増加した。逆に女性では、任期無し職の割合が増加し、男女ともに変わらない勤務形態に変化した。女性が任期無し職を得る機会が増えた一方、男性で任期付き職の割合が2003年時に比べ増加している。
2. 任期付き職では、契約期間1年が全体の44%と最も多い。契約期間の短さから、研究計画や生涯設計を立てづらいという問題がある。また従来は、3年あるいは5年の任期が付いていても、有期契約のまま更新される場合が多かったが、2013年に労働契約法18条が施行され、5年(例外として10年)継続勤務で、無期転換の申し込みができることになった。任期付きの専任教員を無期転換して、終身雇用並みの待遇にした場合と、無期転換前に雇止めにして、新たに非常勤講師又は低賃金の任期付き専任教員を雇う場合では、生涯賃金で一人1億円程度の差が生じると試算されている。そのため、無期転換を恐れ2013年から10年たつ2023年4月になる前に雇い止める動きが強まっている。これが任期付き専任の2023年問題である[\*2]。
3. 任期付き職の再任不可は助教以下の低い職位に集中しており、助教以下の職は安定していない。
4. 任期付き職に就いた合計年数は、40代までは年代が上がるほど長くなる傾向にあり、40代の回答者で最大20年間という回答があった。一方、60代以降では2年間から最大7年間と30代以上の回答者と比べ短い期間に分布している。30年前に比べ、任期付き職の在職年数が長くなっており、長期間にわたり不安定な身分で将来展望を描けない状況がうかがえる。
5. 任期付きの職として所属を変った経験がある回数は、40代までは年代が上がるほど回数が増える傾向にあり、最大6回である。一方、60代以降は最大1回である。所属

が変わった経験は4回が最も多く、上記4と同様、長期間にわたり不安定な身分に置かれている。

6. 任期付き職の育児休業の可否は全体として65%は育児休業が可能である。「分からない」と回答したのはすべて研究員であり、「不可」または「分からない」と回答した研究員は58%である。
7. 育休・産休後の休業期間に応じた任期・契約期間延長の有無の問いに対して、「分からない」と回答したのは全体の57%であり、「無し」も含めると全体の87%となった。「無し」と回答した7人の契約期間は1~4年間に分布していた。契約期間が短い場合には、その制度を利用する前に転職・異動また離職するためかもしれない。もしくは、契約期間中に育休・産休を取らなければ、延長制度を利用しないため、制度があるか分からない、ということが考えられる。

任期付き職の待遇改善のためには、大学や研究機関における若手研究者に向けた任期無し職の拡充や、企業による博士人材の積極的採用が必須である。一般調査では、任期付き職から職種変更した人の約1割は研究開発とは関係のない職に就いており、また6.6%は無職（専業主夫・専業主婦を除く）になった人も含まれている[\*3]。大学や公的研究機関は非常に狭き門であるため、民間企業の研究開発枠が広がることが期待される。

### (3) 会員数の推移

SGEPSSの正会員及び学生会員の総数は707人、うち男性会員は630人、女性会員は77人で、その比率は10.9%である(2021年10月時点)。女性比率はこの10年間で微増している傾向にあるが(0.18%/年)、2021年10月現在で10.9%と低い。平成15(2003)年6月、政府の男女共同参画推進本部は、いわゆる「202030」目標という「社会のあらゆる分野において、2020年までに指導的位置に女性が占める割合を少なくとも30%程度になるよう期待するという目標」であったが、SGEPSSではいまだに達成できていない状況である。

図21に、男女・年代別会員数の推移を示す。2018年は保管されている会員データの月(11月)が他年(10月)と異なり傾向がかなり違ってしまいうため、省いた。また2017-2018年は学生会員のデータが事務局に残っておらず空白にしている。全体的に、40代男性会員が最も人数が多いが、最近では減少傾向にある。50代男性会員および65歳以上男性会員は増加傾向にある。20代男性の主に学生会員は、2013年以降、急増したが、最近では少し減少しており、20代男性会員、50代男性会員、65歳以上男性会員の人数が同程度となっている。30代男性会員の減少が著しく、2021年では2011年時の半分以下になった。今後、学会の中核を担う40代の会員が少なくなることが懸念される。女性会員の人数は男性会員に比べ大

きな変化はない。しかしながら、最近では20代女性会員の減少傾向が見られる。

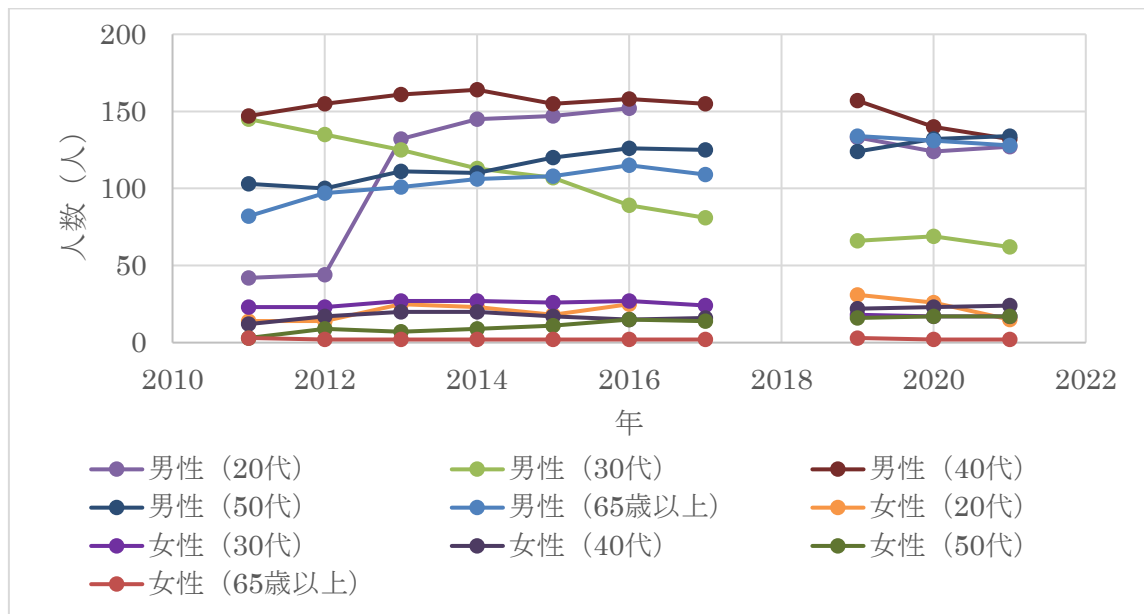


図 21 男女別・年代別会員数の推移

図 22 は、男性会員総数に対する各年代の男性の割合の推移を示す。2017-2018 年は学生会員のデータが事務局に残っておらず空白にしている。割合が多い順から、50 代、40 代、65 歳以上、20 代となっており、30 代は他の世代の約半分となっている。

女性会員も 30 代会員が 2017 年までは最も多かったが、最近では著しく減少している (図 23)。40 代と 50 代会員は増加傾向にあり、2021 年現在、40 代は最も多い世代となっている。20 代会員は 2019 年には一時的に増えたが、最近では減少している。一方、65 歳以上の女性会員数は、この 10 年間で変化しておらず一定である。

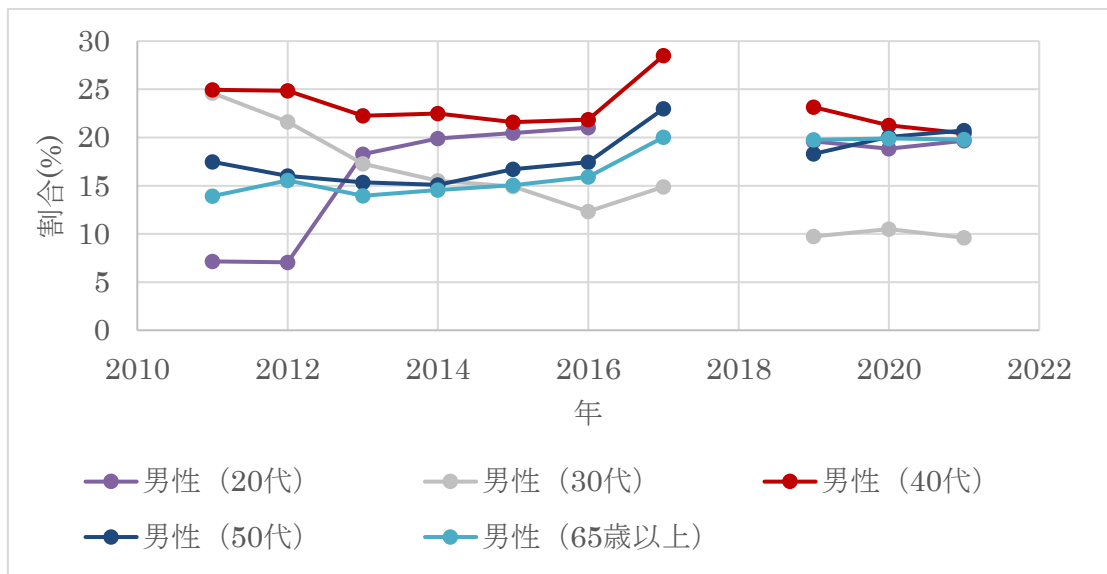


図 22 男性会員の年代別の推移

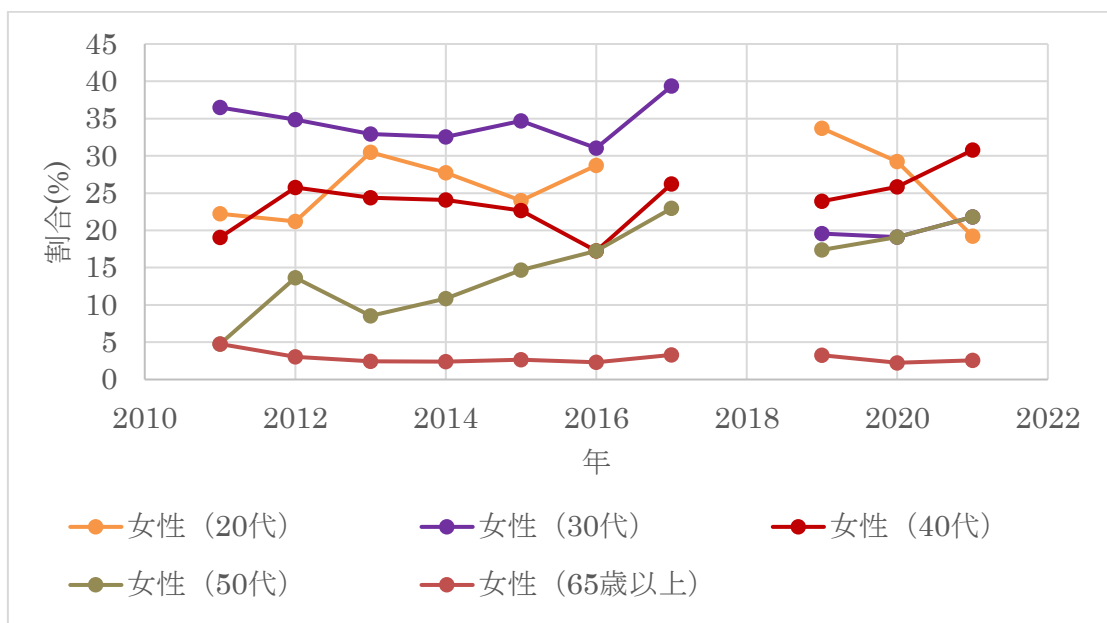


図 23 女性会員の年代別の推移

「SGEPSS は会員減少および会員の高齢化の問題に直面しています。今後、会員を増やすために取り組むべき事項は何だと思いませんか（複数回答可）」という設問に対して、2件以上の投票を持つ項目は9項目となる（総投票数 291、図 24）。「学会の充実」（44）と「海外からの参加のし易さ」（44）といった学会員や研究者に向けた取り組みに対し、「アウトリーチ」（49）、「一般向け講演会」（44）、「SNS 等による広報活動」（42）といった外部/一般へ向けた取り組みの拡充に賛同する意見が上位9項目の約半数（46.3%）におよぶ。自由コメントの中にも、より積極的な報道発表を進める意見があり、一般および社会に対する学会プレゼンスをこれまで以上に発揮することが、今後の会員数を増やすために重要であるという意見が多い。「アウトリーチ」や「一般向け講演会」といった、外部/一般へ向けた取り組みについて女性の賛同が多い。自由記述の中には学生に対する支援や対策を提案する意見が多い。学生が SGEPSS 分野に入ってくるような取り組み（アウトリーチ、学部生へのアピールなど）を挙げる意見に加えて、就職支援や SGEPSS 専門分野に進むキャリアの明確化など、出口への支援を重要視する意見も挙がっている。また、任期なし正規雇用の充実に指摘するような、既存の会員の維持に着目した意見も多くあった。一方で、会員数減少の

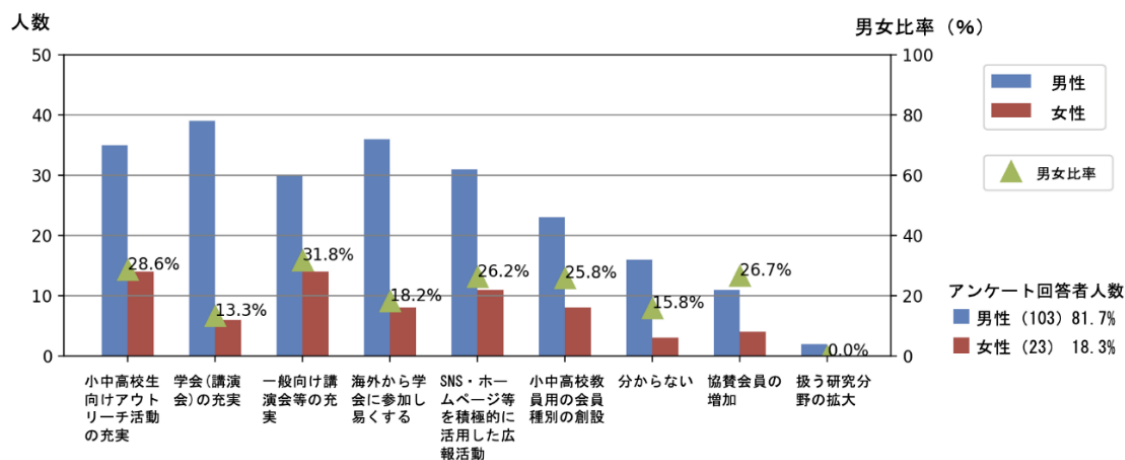


図 24 今後会員を増やすための取り組むべき課題（複数回答）

問題は、少子化などの社会問題の側面が強く、アウトリーチなどは主要な解決方法では無いという意見もあった。

他には、直接的に会員数を増やすような一般会員種別や聴講会員等の創設の提案に加え、他分野からの研究者の参加の促し、他学会分野との共同研究、多様性/マイノリティの尊重、といった意見が見られ、「多様性」を受け入れ理解することの重要性が指摘されている。

以上をまとめると、現在の課題は以下の3つである。

1. 女性比率はこの10年間で微増している傾向にあるが(0.18%/年)、2021年10月現在で10.9%と低い。
2. この10年間で、特に男女とも30代会員の減少が著しく、今後、学会の中核を担う40代の会員が少なくなることが懸念される。
3. 65歳以上の男性会員が増加傾向にあり、2021年では20代の会員の割合(約20%)と同程度となっている。
4. 会員数確保のため、学会の充実や海外からの学会参加のしやすさ等の会員への支援および、アウトリーチやSNS等による広報活動などの外部へ向けた取り組みの拡充が望まれる。

年齢・性別の推移の中に、任期制・定年制といった就労状況、アカデミアのポジション数、任期なしポストの有無、結婚、出産、育児、介護といったライフイベントとの関連についても、問題の根本が解決しなければ、若手会員の減少はストップせず、学会が衰退していくことが予想される。大学の人件費は年々削減され、30代で安定的ポストを得ることが困難な状況であり、民間企業への就職(本研究分野からの離脱)により、退会しているものと思われる。上記4で指摘したように、少しでも会員減少に歯止めをかける対策を講じることが重要だと思われる。

#### (4) 学会参加

学会参加は、研究者にとっては新しい知識を得ることに加え、議論、共同研究の意見交換、新ネットワークづくりやキャリア形成の上で重要な場である。しかしながら、2021年10月に実施したダイバーシティ関連アンケートにより、通常業務や上司または職場で認められなかったために学会参加を断念したり、参加したりするのに苦労した会員がいることが分かった(図25)。参加できなかった・参加しにくかった理由としては、男性では「業務の調整がつかなかったため」「日程が合わなかったため」が多く「上司または職場で認めてもらえなかったため」がわずかであったのに対し、女性では「上司または職場で認めてもらえなかったため」「業務の調整がつかなかったため」が多かった。

学会及び研究集会等の開催方法について参加しやすい形態については、男性は「従来どおりの現地開催」「webを使ったオンライン開催(ライブ型)」「ハイブリッド形式」がいずれも30%程度と拮抗したのに対し、女性は「webを使ったオンライン開催(ライブ型)」がやや多い傾向となった(図26)。「webを使ったオンライン開催(収録型)」を選んだ回答者は男女ともに10%以下であった。

学会および研究集会等の開催について参加しやすい曜日・時間を聞いた設問では、現地開催の場合は男女ともに平日と答えた回答者が最も多かった(図27)。ただし、女性の方が平日と答えた回答者が男性よりもやや少なく、土曜日・日曜日と答えた回答者がやや多い傾向が見られた。

オンライン開催の場合は、男性は平日の午前と午後17時までを選んだ回答者がそれぞれ20%を超えたが、女性ではその時間帯を選んだ回答者は17~19%にとどまり、土曜日や日曜・祝日の午前と午後17時までを選んだ回答者が男性よりもやや多い傾向が見られた(図28)。夜20~23時を選んだ回答者は男女ともにどの時間帯よりも少なかったが、女性の方が男性

よりもこの時間帯を避ける傾向が見られた。

### 14 SGEPSS学会への参加状況（複数回答）

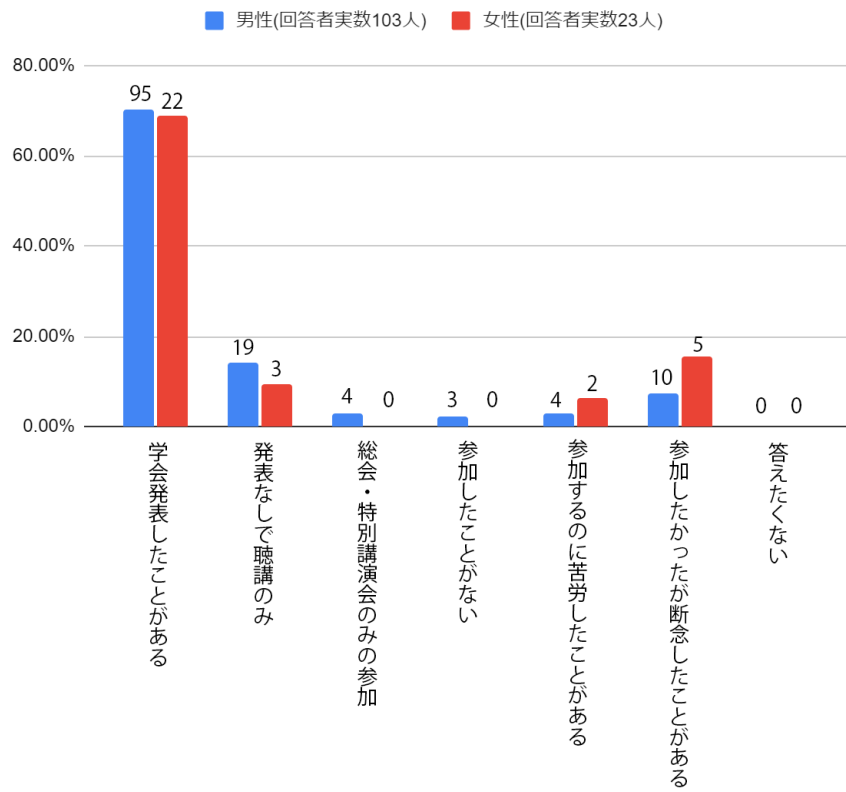


図 25 SGEPSS 学会への参加状況（図中の数字は人数を示す）

15-1  
学会および研究集会等の開催方法について参加しやすいものを教えてください。

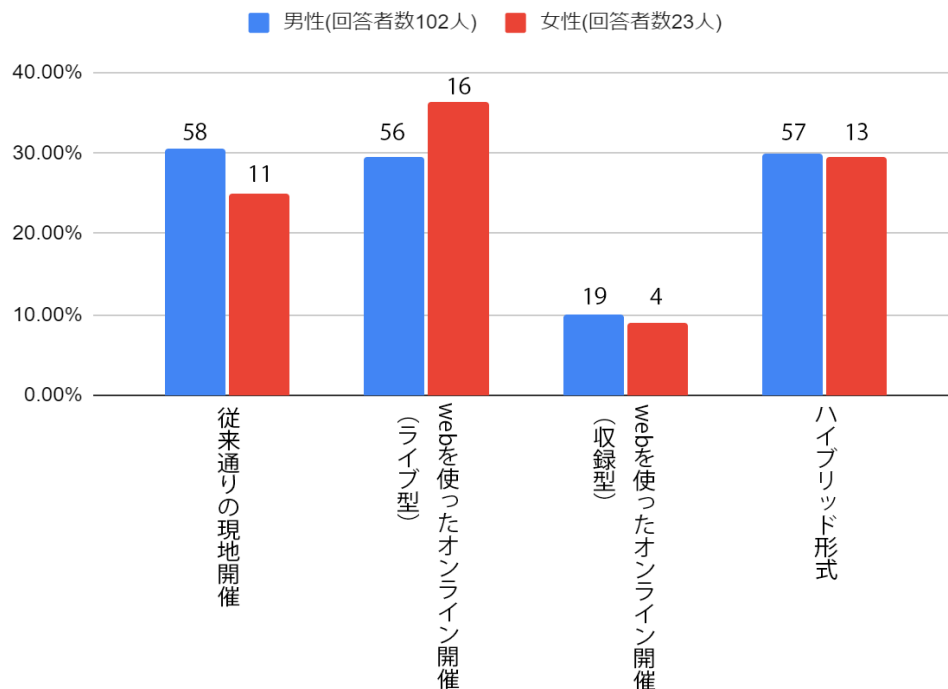


図 26 学会および研究集会等の参加しやすい開催方法（複数回答、図中の数字は人数を示す）

16-1 現地開催の場合

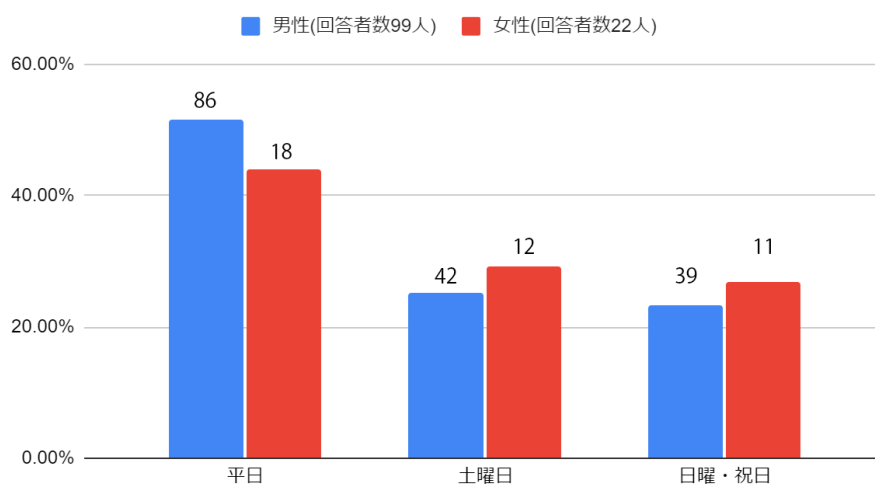


図 27 学会が現地開催の場合の希望曜日（複数回答、図中の数字は人数を示す）



## 16-2 オンライン開催の場合

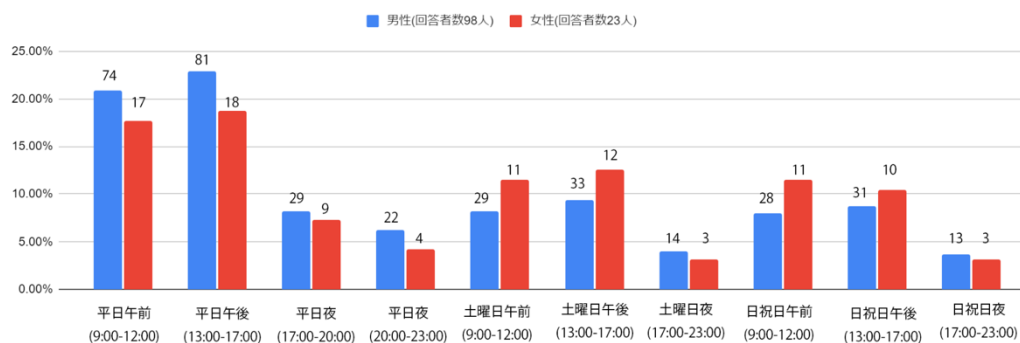


図 28 学会がオンライン開催の場合の希望日時（複数回答、図中の数字は人数を示す）

以上をまとめると、学会参加には下記の課題・現況がある。

・学会参加を望んだが、通常業務や上司・職場で認められえず、参加を断念したり、参加するのに苦労した経験を持つ会員がいる。

1. 学会の開催形態は、Webを使ったオンライン開催（ライブ型）を希望する女性会員が多く、Webを使ったオンライン開催（収録型）は男女ともに望む人が少ない。
2. 現地開催の場合、男女ともに平日開催を望む声が多かった。
3. オンライン開催の場合、男性は平日昼間が多かったが、土曜日、日曜・祝日の昼間を希望する人は女性のほうが男性よりやや多い。

今後、ダイバーシティの観点からも、学会参加の重要性を広く周知する社会に対する働きかけも含め、会員に対する支援や開催形態の見直し等が必要であると思われる。

### 6.4.2 これまでの取り組み

SGEPSS の取り組みは、国や周辺学会における取り組みと連動する形で進められてきた。

1999年6月の「男女共同参画社会基本法」の成立と翌2000年12月の「男女共同参画基本計画」（第一次）の閣議決定、日本学術会議における2000年6月の「女性科学者の環境改善の具体的措置について」（要望）と「日本学術会議における男女共同参画の推進について」（声明）の採択を受けて、複数の理工系の学会・協会が男女共同参画に取り組む上での連絡会として、「男女共同参画学協会連絡運営委員会」（学協会連絡会）が2002年10月に発足した。SGEPSSは2003年7月からこの学協会連絡会にオブザーバー参加し、2005年4月には正式加盟している。毎年、新規に加盟する学協会があり、2019年現在正式加盟が55学協会、オブザーバー加盟が53学協会にのぼる。科学技術分野での男女共同参画推進に対して情報や課題を共有する場は確実にひろがっている。2006年5月18日に日本地球惑星科学連合(JpGU)においても「男女共同参画委員会」が設立され、2015年7月には「ダイバーシティ推進委員会」となり、SGEPSS会員が長年にわたって重要な役割を担っている。学協会連絡会では加盟学協会の協力を得て、ほぼ5年毎(2003年、2007年、2012年、2016年、2021年)に大規模アンケート調査を行っており、この調査結果に基づく議論及び提言等によって、様々な支援事業が立ち上がっている。

SGEPSS独自の取り組みとしては、2004年5月に「男女共同参画提言ワーキンググループ」を設置し、若手研究者のキャリアパス問題を最も重要な課題のひとつと位置づけて活動を展開してきた。具体的には、若手任期付研究員雇用実態調査(2006年)、大学・研究機関における有期期限雇用の研究職に関するアンケート調査(2008年)、職種・年齢・性別人数分布調査(2010年)などの実態調査を行い、ポストクの抱える問題を明らかにしてきた。これにより、一足飛びの解決策が示されたわけではないが、ポストク問題の根底に政策的・

制度的な問題が存在し、若手世代にその負担が集中していることが広い世代の共通認識として認められるようになった。

しかしながら、近年は「男女共同」だけでなく、ジェンダー・年齢・出身、障がいの有無、価値観・信条、雇用形態、家族形態など「多様性」に寛容な社会の実現に議論は拡大している。その中で SGEPS として、女性会員、若手の会員、任期付きで雇用されている会員、外国人の会員等の実態や、会員が直面する課題などの現状を把握できていない状況だった。経済状況悪化や基礎研究への予算配分削減、非正規雇用の増加、格差拡大などの懸念される昨今の社会情勢の変化に伴い、会員のキャリアパス問題の深刻化や、ワーク・ライフ・バランスやクオリティ・オブ・ライフの悪化や後退なども懸念され、改めて実態把握が必要と考えられる。また、会員各々が学術活動や生活が豊かにかつ安定的に送るためには、多様な価値観や課題を共有・受容し、会員間の意識改革を図ることも重要である。各会員の多様性を受容し、個々の能力が存分に発揮できる環境を実現することが、本学会や関連する学術分野、ひいては社会の持続的な発展に寄与すると考えられる。そのため SGEPS は「男女共同参画提言 WG」を発展的に解消し、「ダイバーシティ推進ワーキンググループ」を 2020 年 5 月 25 日に設立した。2021 年 10-11 月には、会員対象のダイバーシティ関連アンケートを実施し、会員が抱えている問題の把握に努めている。

また、総会・講演会に乳幼児・児童を同伴する参加者のために、2005 年秋大会から大会開催期間中に保育室を設ける取組みを実施している。利用者は子供一人につき 1 時間当たり 500 円の利用者負担を支払い、残りを学会が補助する形で運営して来たが、2012 年大会から学会員の利用については利用者負担金を廃止して無料となった。保育室利用の支援を利用する会員はこの 2014 年以降では、1 組もしくは利用なしの状況が続いたが、2019 年には 3 名 (2 組) の利用があった。2020-2021 年は新型コロナ感染拡大防止のため、学会が完全オンライン開催だったため、保育室設置は行わなかった。2022 年の学会はハイブリッド開催であったが、保育室設置は利用希望が無かったため行わなかった。学会講演会への参加は、研究者として情報共有や議論の場として非常に重要である。そのため、育児中の会員が学会等に出席しやすい環境づくりは会員が利用しやすい支援の形態も含めて重要な課題である。

さらに学会外への働きかけとして、「女子中高生夏の学校」への参画が挙げられよう。SGEPS は本企画の立ち上げ段階から毎年積極的に参加し、2005 年の第一回夏の学校から 2022 年時点ですでに 18 年に涉って活動を行っている。この間、様々な会員の協力を経て、講演会の講師を派遣するほか、南極昭和基地や JAXA からの TV 会議中継などの企画を実施してきた。近年は、若手アウトリーチ活動 STEPLE の有志が中心となり、本学会の研究分野に関連した実験実習を企画、実施してきた。さらに毎回展示ブースを出して、全国から集まる女子中高生に直接、SGEPS の研究分野を紹介し、進路の相談を行なった。2020 年は新型コロナ感染症拡大のため開催中止となり、2021-2022 年は完全オンラインで実施した。完全オンラインの場合も、STEPLE のメンバーにより、実験実習およびポスター展示を実施した。

女子中高生夏の学校について：

理系進路を選択する女性の数が少ない要因として、進路選択を行う中高校生の時期にロールモデルと出会う機会が少ない、両親や教師が (女性の理系進路に対する情報不足などから) 女子の理系進学を阻害する場合があるといった問題が指摘されている。このことから 2005 年に日本物理学会の提案で「女子高校生夏の学校～科学・技術者のたまごたち～」が開催された (主催：男女共同参画学協会連絡会、国立女性教育会館)。一泊二日で女性研究・技術者の研究内容や体験を聞いたり、デモ実験を体験したりするもので、様々な理工系分野の学協会の研究紹介ブースも設置され、全国から集まった 60 名近くの女子高校生が様々な形で女性研究者等との交流を持つ機会となった。また多数の理系の女性大学生・院生も企画立案・運営に参加し、TA としてクイズ・アトラクション・進路選択相談などを行って、大いに盛り上げた。この企画の成功などを背景として、文部科学省は 2006 年に女子中

高生理系進路選択事業をスタートさせた。これは、女子中高生の理系分野への関心を高め、理系分野への進学を意識してもらうためのさまざまな取り組みを公募し、優れたプランを支援するもので、本企画と同様な事業が様々な機関で実施されるようになった。夏の学校自体もその後「女子中高生夏の学校～科学・技術者のたまごたち～」と名前を変え、継続的に実施されている。

### 6.4.3 SGE PSS を取り巻く社会の動向

前述したように、学会や研究コミュニティが国際的な競争力・発信力を維持し、持続的に発展し続けていくためには、「多様なキャリアパス、及びワーク・ライフ・バランスを選択可能な環境の形成」が重要である。また、年齢・性別に加え、様々な差異や価値観の多様性についての相互理解や受容と意識改革や、国際化による活性化や競争力の更なる向上等々の視点からの議論も重要となろう。ポスドク問題や女性研究者の問題については、ファクトベースで認識が共有化され、国としても解決に向けた様々な施策に取り組みつつある。そのため、現在進行中の施策の効果を見据えながら更なる具体的な解決策を議論・検討する時期を迎えている。一方、急速に少子・高齢化が進み、財政状況が厳しい我が国において、常勤研究者の数を増やすことは容易ではない。我々は視野を拡げ、正しい現状認識に基づきより柔軟に課題の解決に向けた取り組みを進める必要がある。

理系の博士号を取得した人材の持つ情報収集・分析力、論理的思考能力、専門的スキルはもっと社会全体で活用されるべきである。近年は、大学や研究所などでの広報の専任教員やサイエンスコミュニケーターなど、科学研究と社会との橋渡し役としての、博士人材の活躍の場も広がりつつある。その一方で、我が国は諸外国に比べると企業の役員クラスや政治家・行政の長として活躍する理系博士号取得者の数は少ない。このことは、社会と研究コミュニティの間に乖離があることを示している。多くの理系博士号取得者が社会で活躍し、理系博士号取得者を雇用することのメリットが社会において認識されるようになれば、多様なキャリアパス構築への道が広がるのが期待される。また、少なくとも、博士号取得を検討している大学生・大学院生に多様なキャリアパスの可能性を予め提示できる状況を作り出すことは重要である。SGEPSS として実現できる取り組みとしては、現在社会で活躍する博士、ポスドク経験者の事例を調査・把握し、理系博士号取得者の活躍事例を広く周知することや、博士号取得者に対する公募情報を、大学・研究機関に限らず企業からのものも含めて周知したりすることが挙げられる。

研究コミュニティ自体の環境改善についても、きめ細かなソフト面での対応にはまだ余地がある。充実した研究環境とは、議論できる相手がいること、必要に合わせ柔軟に使うことのできる研究費があること、研究サポートの充実、忙しい中でも主体的に時間的融通を付けられること、研究者間の良好な人間関係、サポートスタッフとの良好な人間関係、これらを保証する組織の透明性、業績が公正に評価される体制、などから有機的に作られるものである。若手からシニア層まで、等しくこれを享受し、新鮮な研究の喜びに満ちた研究生活を送るために必要なものは何か、知恵を絞っていく、その議論の受け皿として学会の果たす役割は大きい。

また、研究活動の継続のため、既存のキャリア資源に閉じずに、様々な工夫と対策によって新たなキャリア資源を大胆に開拓していくことも必要であろう。近年、高等専門学校

(高専)の教員採用では博士号を有することが重要視され、ポスドクの就職先として高専が注目されている。当学会の若手会員の中にも高専で常勤職を得て教育・研究活動に従事している会員が多数おり、長年の実績を次世代に生かすことが望まれる。また、他の学会では学芸員など社会教育施設の職員として研究を継続している事例もある。広報・アウトリーチの観点も含め、今後社会教育施設との交流・連携は強化して良い課題の一つと思われる。あるいは、競争的資金の応募資格を緩和してもらうことで、従来研究活動が難しかった職種(例えば、高等学校の教員等)や民間企業等においても研究の継続が可能となるかもしれない。新しい取り組みとして、ワークシェアリングなどの導入なども検討が必要であろう。

一方、米国などのように有期雇用のまま年齢によらず、実力と研究内容を足掛かりに生涯研究活動を続ける道もあるだろう。そのためには正規雇用と非正規雇用の間の生涯賃金や社会保障の格差是正を図る必要があり、我が国の雇用システム・年金システムにも根ざす問題が立ちはだかっている。また「何歳でも挑戦できる環境」は「何歳でも失敗できる環境」によって保証される。年齢制限の壁は学術界以外の職についても緩和される必要がある。ハードルは高いが中長期的には非正規雇用問題の社会的な議論の進展とともに実現性を帯びる可能性がある。いずれにせよ、コミュニティ全体の課題として、今後あらゆる機会をとらえて多様な形態の研究キャリアパスを構築・模索することが重要であると考えられる。また、有期研究員の雇用形態・契約内容は雇用側の目的によってもまちまちではあるが、研究コミュニティの持続的発展のためには、雇用者側には有期研究員の育成という観点からのサポートや、人材育成・若手雇用のための財源も望まれる。また、有期研究員側も自らの雇用形態や契約内容を熟知すると共に、雇用者側と自らが考えるキャリアパスプランの情報を共有しておくことが望まれる。

大学・研究機関と行政、Funding Agency との人事交流も重要である。国の研究機関では、研究者が主管官庁や総合科学技術会議などの官公庁・政府系機関、研究機関内の企画部門などへ 1-2 年間出向し、行政や研究組織の運営を支援する仕事に従事するのは普通であるし、米国などでも研究者が NSF などの Funding Agency に数年間出向し、仕事に従事している。このような機会は、ともすれば自分の研究のみに閉じこもりがちな研究者に、研究を支える組織の状況や行政の仕組み・働きを認識させるきっかけとなる他、研究者の考え方や要望を、直接的に行政や研究組織の運営側に伝える役割を果たしている。

女性研究者支援については秋季年会における保育所設置や女子中高生夏の学校への参画、研究とライフイベントの両立の実践事例の情報共有など、地道な取り組みを今後も継続していくことも重要である。そして、政府に対して現状の問題を提起し解決策を提言していくためには、より大きな組織である学協会連絡会や JpGU との連携が重要である。個別の情報収集やきめ細かな学会としての対応は学会独自の活動で行い、大規模調査や政府への提言には学協会連絡会や JpGU など通じてアクションを起こすといった役割分担が効果的である。

最後に、社会の支持を得ることの重要性について述べる。我々の研究活動を支える費用の大半は国民が納める税でまかなわれていることを鑑みれば、納税者の理解を得る努力が重要である。あらゆる機会を捉えて、基礎科学研究が国家や社会に多いに役立つものであるとの認識を広げ、国民的な支持を得られるよう努力することが不可欠である。その意味で今後もアウトリーチ活動を戦略的に展開する必要がある。また未来の研究者となるべき子供たちに、夢のある職業として本学会分野の研究者を目指してもらえるように、取り組みを広げることも重要である。

#### 6.4.4 今後の取り組み

従来の提言ワーキンググループは、2010-2011 年以降 JpGU の男女共同参画委員会に実質的な活動の場を移した。提言ワーキンググループ自体はその後学協会連絡会への調査協力等を除き、事実上活動休止状態となった。この間、社会の動向を受けて、JpGU では 2015 年に「ダイバーシティ推進委員会」が設立されたが、SGEPSS との連携が希薄な状態であり、最近の学会内の実態把握も十分とは言えない状況となっている。女性研究者支援、若手キャリアパス（ポスドク問題や雇用・労働環境の改善など）、ワーク・ライフ・バランスに留まらず、国籍・民族・人種、貧富や障害、思想・宗教・文化・地域など多様な視点、価値観の多様性に関わるさまざまな課題について、当学会が学協会連絡会や JpGU 等とどの様に連携し、どのような方向性でどう向き合い取り組むべきかを検討・議論する仕組や場が実質機能していない状況とも言える。この様な状況を踏まえ、2019 年 10 月、当学会 SGEPPS の直面する課題を改めて把握し直し、学会員の多様なワーク・ライフ・バランスやキャリアパス

が選択可能な環境実現を目指し、これまでの提言ワーキンググループの発展的解消を含めた新たなワーキンググループ設立に向けた準備タスクフォースの設立を経て、2020年5月に「ダイバーシティ推進ワーキンググループ」が設立された。2021年10-11月には、会員対象のダイバーシティ推進アンケートを実施し、今後継続的に会員が抱える問題の把握に努め、対策等の提言やダイバーシティ理解のための交流会等を検討していく予定である。また学会の国際化の推進が望まれる。国の施策として、少子化も踏まえて留学生を増やす努力がなされているのに対し、SGEPSS 関連分野の留学生は言語の壁によって、日本人学生に比べて成果発表や情報収集の機会を得にくくなっている。今後更に増えるであろう留学生や外国人研究者も会員に加わりたくなるような、学会の国際化の施策の検討に取り組むことも学会のダイバーシティの向上に重要な観点である。国外で活躍するSGEPSS 会員や元会員も増えている中、どのように海外のコミュニティと連携するかという視点も必要である。

\*1 「働き方改革」の実現に向けて、厚生労働省、<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000148322.html>

\*2 任期付き教員の2023年問題と札幌大学事件の不当判決の衝撃、」首都圏大学非常勤講師組合、[https://note.com/hijokin\\_tokyo/n/n64085810b663](https://note.com/hijokin_tokyo/n/n64085810b663)

\*3 ポストドクター等の雇用・進路に関する調査(2018年度実績) [調査資料-304] の公表について、科学技術・学術政策研究所、<https://www.nistep.go.jp/archives/46910>

---

## 資料

### 地球電磁気・地球惑星圏学会 将来構想検討ワーキンググループ委員（2012年度）

会長：家森俊彦

主査：塩川和夫、清水久芳、寺田直樹、吉村令慧

委員：梅田隆行、大塚雄一、小川泰信、笠原慧、笠原禎也、亀田真吾、神田径、櫻庭中、篠原育、高橋幸弘、長妻努、中村卓司、成行泰裕、畠山唯達、藤井郁子、藤本正樹、堀智昭、松清修一、三好由純、村田健史、村山泰啓、山本衛、山本裕二、吉川顕正

### 地球電磁気・地球惑星圏学会 将来構想検討ワーキンググループ委員（2017-2018年度）

会長：渡部重十

主査：橋本武志、細川敬祐、山本裕二、加藤雄人

委員：浅利晴紀、天野孝伸、家森俊彦、市原寛、今村剛、大塚雄一、小川泰信、笠原慧、笠原禎也、熊本篤志、小山幸伸、齋藤義文、塩川和夫、清水久芳、関華奈子、銭谷誠司、埜千尋、高橋太、田所裕康、津川卓也、寺田直樹、富川喜弘、成行泰裕、西野真木、能勢正仁、堀久美子、前澤裕之、松清修一、三宅洋平、三好由純、村上豪、村山泰啓、望月伸竜、山内正敏、横山竜宏、吉川顕正、吉村令慧

### 地球電磁気・地球惑星圏学会 将来構想検討ワーキンググループ委員（2019-2020年度）

会長：大村善治

主査：三好由純、臼井洋一、山本裕二、加藤雄人

委員：浅利晴紀、家森俊彦、市原寛、今村剛、今田晋亮、笠原慧、笠原禎也、木村智樹、小山幸伸、齋藤武士、齋藤義文、櫻庭中、関華奈子、銭谷誠司、高橋太、田所裕康、津川卓也、富川喜弘、成行泰裕、西谷望、西野真木、西山尚典、能勢正仁、橋本武志、細川敬祐、前澤裕之、松清修一、簗島敬、三宅洋平、村上豪、村山泰啓、吉川顕正、横山竜宏、山内正敏、大村善治、山本衛、海老原祐輔

### 地球電磁気・地球惑星圏学会 将来構想検討ワーキンググループ委員（2021-2022年度）

会長：山本衛

主査：今村剛、山本裕二、津川卓也

委員：家森俊彦、市原寛、今田晋亮、今村剛、臼井洋一、笠原慧、加藤雄人、小山幸伸、齋藤義文、塩川和夫、関華奈子、銭谷誠司、高橋太、田所裕康、津川卓也、富川喜弘、西谷望、西野真木、西山尚典、能勢正仁、橋本武志、細川敬祐、前澤裕之、松清修一、三宅洋平、三好由純、村上豪、山内正敏、山本裕二、山本衛、吉川顕正、

桜庭中、小川泰信、松田昇也、松本洋介、新堀淳樹、浅利晴紀、村山泰啓、木村智樹、齋藤武士

## 地球電磁気・地球惑星圏学会 将来構想検討ワーキンググループ委員 (2023年度)

会長：塩川和夫

主査：片岡龍峰、齋藤武士、今村剛

委員：西野真木、三宅洋平、高橋太、津田卓雄、新堀淳樹、三好隆博、銭谷誠司、田所裕康、松島政貴、菅沼悠介、市原寛、加藤雄人、今田晋亮、篠原育、諫山翔伍、松田昇也、三好由純、桂華邦裕、栗田怜、今城峻、堺正太郎、佐藤隆雄、市原寛、橋本武志、堀智昭、小山幸伸、前澤裕之、関華奈子、今村剛、小川泰信、吉川顕正、齋藤義文、浅利晴紀、山内正敏、山本衛、中村卓司、臼井洋一、津川卓也、畠山唯達、西岡未知、西山尚典、土屋史紀、池田昭大、能勢正仁

## 2022年度改訂版 執筆協力者 (\*印は改訂・新規項目担当者)

### 2章 地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と科学課題

#### 2.1 太陽活動により変動する太陽地球圏環境の解明

##### 2.1.1 磁気圏・電離圏での時空間・エネルギー階層間結合

\*笠原慧、家田章正、大塚雄一、小川泰信、桂華邦裕、銭谷誠司、細川敬祐、三好由純、山内正敏

##### 2.1.2 地球圏に影響を及ぼす太陽風・太陽放射

\*新堀淳樹、大塚雄一、大山伸一郎、小川泰信、笠原慧、細川敬祐、三好由純、山内正敏

##### 2.1.3 地球気候に対する太陽活動の影響

\*新堀淳樹、大塚雄一、大矢浩代、小川泰信、笠原慧、高橋幸弘、富川喜弘、藤原均、細川敬祐、三好由純、山内正敏、宮原ひろ子

##### 2.1.4 内部・外部太陽圏研究

\*松清修一、河村聡人、塩田大幸、銭谷誠司、坪内健、徳丸宗利、成行泰裕

##### 2.1.5 太陽研究

\*松清修一、今田晋亮

#### 2.2 宇宙につながる大気圏・電磁気圏環境の解明

\*新堀淳樹、大塚雄一、津川卓也、富川喜弘、三好勉信、三好由純、横山竜宏、Huixin Liu

#### 2.3 多様な惑星圏環境の統一的理解

##### 2.3.1 磁化天体における時空間・エネルギー階層間結合の統一的理解

\*木村智樹、埜千尋、西野真木、村上豪



- 2.3.2 大気流出過程および惑星大気進化の統一的理解  
\*木村智樹、関華奈子、地球型惑星圏環境分科会
- 2.3.3 惑星大気の統一的理解  
\*関華奈子、黒田剛史、前澤裕之
- 2.3.4 惑星ダイナモの統一的理解  
\*桜庭中、\*高橋太、\*小田啓邦、堀久美子、望月伸竜
- 2.3.5 惑星環境の安定性と進化と分化の理解  
\*関華奈子、村上豪
- 2.3.6 系外惑星への拡張・展開  
\*亀田真吾、村上豪、山内正敏
- 2.4 宇宙プラズマ・地球惑星大気における物理素過程の理解
- 2.4.1 宇宙プラズマ物理  
\*銭谷誠司、\*今田晋亮、天野孝伸、小路真史、齊藤慎司、中村琢磨、成行泰裕
- 2.4.2 弱電離プラズマ・中性大気の物理  
\*新堀淳樹、白井英之、大塚雄一、横山竜宏
- 2.5 地球および月・惑星の電磁場変動、古磁場環境の解明
- 2.5.1 地磁気変動-現在、過去、そして未来予測  
\*小田啓邦、浅利晴紀、清水久芳、望月伸竜
- 2.5.2 月・惑星内部に関する電磁気学的研究  
\*松島政貴、\*小田啓邦、佐藤雅彦、高橋太、堀久美子
- 2.6 電磁場観測による地球内部の状態や変動現象の理解  
\*橋本武志、相澤広記、市來雅啓、市原寛、宇都木充、笠谷貴史、後藤忠徳、小山崇夫、多田訓子、高倉伸一、馬場聖至、藤田清士、南拓人、山崎健一、山谷祐介
- 2.7 岩石・堆積物が担う磁化の物理の解明とその応用
- 2.7.1 岩石磁気学-理論的・実験的研究  
\*小田啓邦、白井洋一、福間浩司、望月伸竜、山本裕二
- 2.7.2 岩石磁気学・古地磁気学の応用  
\*斎藤武士、\*小田啓邦、望月伸竜、山本裕二
- 2.8 太陽地球系と地球内部を結ぶ科学課題  
\*中村紗都子、\*新堀淳樹、\*松岡彩子、\*浅利晴紀、\*橋本武志、浅利晴紀、小河勉、佐藤光輝、藤井郁子、細川敬祐
- 3章 社会との関わり  
\*津川卓也、\*石井守、\*小嶋浩嗣、\*三好由純、\*片岡龍峰、\*新堀淳樹、\*橋本武志、\*木村智樹、\*三宅洋平、\*橋本武志、\*村山泰啓、\*能勢正仁、\*行松彰、\*坂中伸也、\*大矢浩代、\*田所裕康、市原寛、海老原祐輔、久保勇樹、斎藤享、塩田大

幸、高島健、津川卓也、田光江、西塚直人、畠山唯達、細川敬祐、山内正敏、山本裕二、横山竜弘

#### 4 章 学術のために必要な技術開発・環境整備

##### 4.1 観測技術開発

\*浅村和史、\*阿部琢美、\*斎藤義文、\*横田勝一郎、\*三谷烈史、\*笠原慧、\*笠羽康正、\*小嶋浩嗣、\*松岡彩子、\*尾崎光紀、\*笠原禎也、\*松田昇也、\*江副祐一郎、\*吉川一朗、\*中川広務、\*村上豪、\*吉岡和夫、\*田口真、\*斎藤昭則、\*熊本篤志、\*野澤悟徳、\*藤本晶子、\*行松彰、\*西谷望、\*塩川和夫、\*大山伸一郎、\*前澤裕之、\*岩井一正、\*大矢浩代、\*浅利晴紀、相澤広記、阿保真、市原寛、大川隆志、大塚雄一、小川泰信、笠谷貴史、小嶋浩嗣、斎藤享、坂野井健、島伸和、高島健、津川卓也、津田卓雄、土屋史紀、徳丸宗利、長澤親生、中田裕之、中村卓司、西谷望、野村麗子、橋本武志、平原聖文、平原靖大、福原哲哉、芳原容英、細川敬祐、松島政貴、宮岡宏、村上豪、山本裕二

##### 4.2 計算機シミュレーション・モデリング

###### 4.2.1 技術開発要素

\*松本洋介、\*三宅洋平、天野孝伸、梅田隆行、海老原祐輔、加藤雄人、齊藤慎司、塩田大幸、陣英克、深沢圭一郎、松清修一、三好隆博、三好由純、横山竜宏

###### 4.2.2 環境整備

\*松本洋介、\*三宅洋平、梅田隆行、深沢圭一郎

##### 4.3 データマネジメント・データシステム

\*村山泰啓、\*能勢正仁、\*榎本剛、小山幸伸

##### 4.4 情報数理技術

上野玄太、中野慎也、能勢正仁

###### 4.4.1 データマイニング技術・機械学習に基づく AI 技術

\*徳永旭将、深沢圭一郎

###### 4.4.2 データ同化技術と再解析データ

\*三好由純、\*上野玄太、中野慎也、能勢正仁

#### 5 章 研究推進のために必要な施策・組織

##### 5.1 研究推進のために必要な施策

\*土屋史紀、\*村上豪、\*斎藤義文、\*関華奈子、\*今村剛、\*児玉哲哉、\*清水久芳、\*平原聖文、\*篠原育、\*三好由純、\*笠原慧、\*木戸ゆかり、\*山本衛、\*小川泰信、\*佐藤薫、\*堤雅基、\*富川喜弘、\*後藤忠徳、\*坂野井健、\*三澤浩昭、\*土屋史紀、\*神田径、\*西谷望、\*岩井一正、\*野澤悟徳、\*塩川和夫、\*吉川顕正、\*藤井昌和、\*山本裕二、\*草野完也、\*高橋芳幸、\*田中良昌、\*塩川和夫、\*林祥介、\*竝木則行

##### 5.2 共同利用拠点を含めた大型研究機関の重要性

\*浅利晴紀、\*小田啓邦、\*中村卓司、\*石井守、\*村山泰啓、\*篠原育、\*山崎俊嗣、\*清水久芳、\*塩川和夫、\*吉村令慧、\*山本衛、\*橋本武志、\*笠羽康正、\*小原隆博、\*市來雅啓、\*市原寛、\*宇津木充、\*松岡彩子、\*林祥介、\*山本裕二、\*吉川顕正、\*相澤広記

### 5.3 国際学術団体や対応委員会の取り組み

#### 5.3.1 国際太陽地球系物理学科学委員会(SCOSTEP)-STPP 小委員会

\*塩川和夫

#### 5.3.2 SEDI (Study of the Earth's Deep Interior)

\*高橋太

#### 5.3.3 国際電波科学連合(International Union of Radio Science: URSI)

\*加藤雄人、笠原禎也、津川卓也

#### 5.3.4 インターマグネット (INTERMAGNET)

\*笠原禎也、津川卓也

### 6章 サステナブルな学術活動のために

\*田所裕康、\*行松彰、\*坂中伸也、\*大矢浩代

編者 : 地球電磁気・地球惑星圏学会 (編)  
タイトル: 地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来 2023 年度版  
出版日 : 2024 年 1 月 31 日

本将来構想文書に関する全ての著作権は地球電磁気・地球惑星圏学会に帰属します。  
無断転載を禁じます。