

# 地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来

地球電磁気・地球惑星圏学会

2013年1月

## 目次

1	はじめに	1
1.1	地球電磁気学・地球惑星圏科学の特徴	1
1.2	本将来構想の策定における考え方	1
2	地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と科学課題	3
2.1	太陽活動により変動する太陽地球圏環境の解明	3
2.1.1	磁気圏・電離圏での時空間・エネルギー階層間結合	3
2.1.2	地球圏に影響を及ぼす太陽風・太陽放射	8
2.1.3	地球気候に対する太陽活動の影響	11
2.1.4	内部・外部太陽圏研究	13
2.1.5	太陽研究	15
2.2	宇宙につながる大気圏・電磁気圏環境の解明	17
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	18
2.2.2	中性大気・プラズマ相互作用	20
2.2.3	電離圏と磁気圏との間の領域間結合過程	20
2.2.4	地球温暖化や気候変動との関わり	23
2.3	多様な惑星圏環境の統一的理解	25
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	25
2.3.2	大気流出過程および惑星大気進化の統一的理解	28
2.3.3	惑星大気の統一的理解	29
2.3.4	惑星ダイナモの統一的理解	31
2.3.5	惑星環境の安定性と進化と分化の理解	32
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	34
2.4.1	宇宙プラズマ物理	34
2.4.2	弱電離プラズマ・中性大気の物理	42
2.5	地球および月・惑星の電磁場変動、古磁場環境の解明	46
2.5.1	地磁気変動—現在、過去、そして未来予測	46
2.5.2	月・惑星内部に関する電磁気学的研究	55
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	58
2.6.1	地殻・マントルの構造の解明	58
2.6.2	地殻活動およびそれに伴う現象のモニタリング	64
2.6.3	資源探査	70
2.6.4	リモートセンシングの新展開	71
2.7	岩石・堆積物が担う磁化の物理の解明とその応用	73
2.7.1	岩石磁気学—理論的・実験的研究	73

2.7.2	岩石磁気学の応用.....	75
2.8	太陽地球系と地球内部を結ぶ科学課題.....	80
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.....	80
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.....	81
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.....	82
2.8.4	地震に伴う変動の理解.....	84
3	人類活動を支える知識基盤の構築.....	86
3.1	背景となるサイエンス.....	87
3.1.1	宇宙天気.....	87
3.1.2	宇宙工学.....	88
3.1.3	地球表層電磁気.....	89
3.2	人類社会基盤への影響.....	90
3.2.1	宇宙機・観測機器への影響.....	90
3.2.2	大気抵抗による衛星軌道の変動.....	90
3.2.3	空気シャワーがもたらす航空機乗員被爆.....	90
3.2.4	超高層大気変動が宇宙利用システムに与える影響.....	91
3.2.5	地上インフラに及ぼす影響.....	91
3.2.6	新しい宇宙探査・宇宙利用への影響.....	92
3.2.7	地震・津波・火山噴火による災害.....	92
3.3	知識基盤の構築に向けた研究課題.....	93
3.3.1	宇宙環境計測機器開発の充実.....	93
3.3.2	宇宙機運用データベースの整備.....	93
3.3.3	極端宇宙現象の把握と対策.....	93
3.3.4	大気海洋変動研究との連携.....	94
3.3.5	衛星工学分野との連携.....	94
3.3.6	予測研究の進展.....	94
3.3.7	予測研究実現のためのモデリングフレームワーク.....	94
3.3.8	予測研究実現のための観測.....	94
3.3.9	推進系.....	95
3.3.10	宇宙太陽発電所（SPS）建造における環境アセスメントへの貢献.....	96
3.3.11	地球表層電磁気現象.....	96
4	研究推進に必要な技術開発・環境整備.....	98
4.1	観測技術開発.....	98
4.1.1	太陽地球系科学分野の機器開発.....	98
4.1.2	固体地球研究分野の観測・分析機器開発.....	118
4.2	計算機シミュレーション・モデリング.....	121

4.2.1	技術開発要素.....	121
4.2.2	環境整備.....	130
4.3	データシステム.....	132
4.4	情報数理技術.....	136
4.4.1	データマイニング技術.....	136
4.4.2	データ同化技術.....	138
5	研究推進のために必要な施策・組織.....	139
5.1.	研究推進のために必要な施策.....	139
5.2.	共同利用拠点を含めた大型研究機関の重要性.....	242
6	学会と社会の関わり・研究者の働き方の多様性.....	265
6.1	はじめに.....	265
6.2	パブリック・アウトリーチ活動.....	266
6.2.1	アウトリーチイベント.....	266
6.2.2	秋学会の記者発表.....	269
6.2.3	衛星設計コンテスト.....	271
6.2.4	教育機関、公共団体等への講師派遣.....	272
6.2.5	若手アウトリーチ活動“STEPLE”.....	273
6.2.6	Webの充実.....	274
6.3	学校教育に対する働きかけ.....	275
6.3.1	SGEPSS分野の学校教育での扱われ方.....	276
6.3.2	「太陽地球系科学」の執筆と発刊.....	281
6.3.3	これからの学校教育へのはたらきかけについて.....	282
6.4	研究者の充実したライフスタイルの実現.....	284
6.4.1	現在の状況.....	284
6.4.2	これまでの取り組み.....	287
6.4.3	今後の方向性.....	288
資料	.....	291



## 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ト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。10年ごとに将来計画を構想する、という考え方に立つなら、前回の2005年から10年を待たずに次の構想をまとめるには少

し時期が尚早とのご意見もあるかもしれない。しかし、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、今まさに、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2012年5月に将来構想検討ワーキンググループを発足させ、学会としての将来構想をまとめる事とした。

本まとめでは、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、人類活動を支える知識基盤の構築として、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。

なお、本将来構想は、本編とその要約版を作成しており、この冊子は本編である。2013年1月の時点でどちらも一旦完成版とし、冊子体の配布及び学会ホームページでの公開を行うが、それぞれの分野の発展や状況の変化に応じてホームページの版は随時更新することとし、更新は当学会の運営委員会が対応することとした。

## 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。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、惑星圏については2.3節で述べる。また、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。

#### 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年代の飛行体観測の本格化とともに大きく発展し、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する様子などが明らかになってきている。

このような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、磁気再結合領域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、さらには領域間結合における「スケール間結合」の重要性も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。

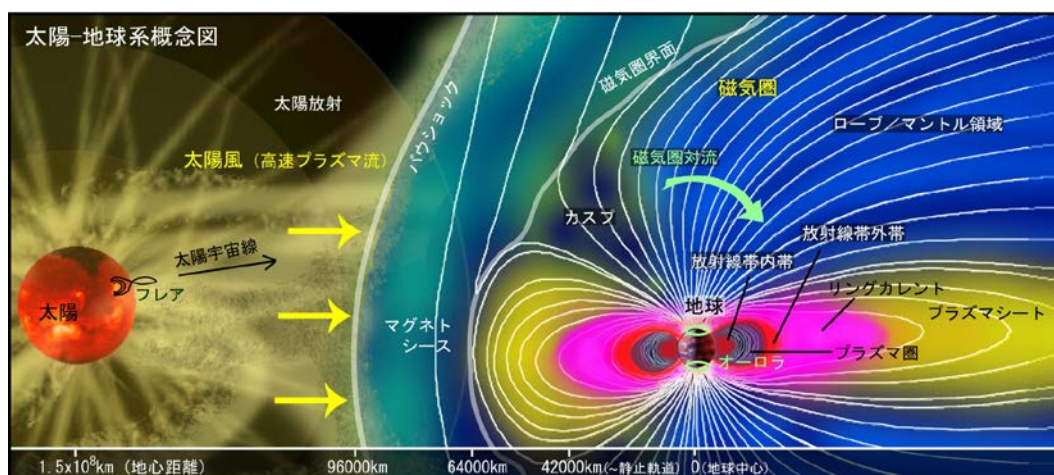


図 2.1.1 太陽-地球圏の領域と生起する現象

## (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の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表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、これまでになく高時間・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大きく進展したことも、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の変化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、空間分解能高く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変化の研究も大きく進展している。

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。またあけぼの衛星や Cluster 衛星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。

## 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。

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 (ERG、Van Allen Probes)、プラズマシート (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)と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的高速流、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んでいくような改良を行い、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。

## (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大きく進展し、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、SAPS (Sub-Auroral Polarization Stream) /SAID (Sub-Auroral Ion Drift) 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新たな非断熱加速理論が提唱され、従来の断熱的な加速機構とどちらが支配的かについての議論が続いている。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。

### 今後の課題

内部磁気圏赤道面でプラズマ総合観測が行われたのは1990年代のCRRES衛星が最後であり、上記の理論・シミュレーション研究を定量的に検証しうる新たな観測が必要となっ

ている。2010年代には、米国の Van Allen Probes、日本の ERG 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予定されており、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大きく進むことが期待される。このような研究を進めるためには、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、異なる観測手法間の有機的な連携を行うためのコーディネートや、統合解析ツールといった研究環境整備も重要になる。

また、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おらず、THEMIS 衛星のような 6~10Re 付近の観測と、Van Allen Probes、ERG 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。

### **(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、**Outside-In** と呼ばれる磁気再結合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過程と、**Inside-Out** と呼ばれる地球に近い領域から現象が起こるとする、2つの異なる考え方のもとに、研究が進められてきた。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るサブストームオンセットの研究が大きく進み、オンセットの前兆となるオーロラ現象や、オーロラ微細スケールの発展と磁気圏側の変化や地磁気脈動との対応の研究が行われた。また、昭和基地-アイスランドの共役観測によって、ブレイクアップオーロラや脈動オーロラの同時観測も実現されている。さらに、Geotail 衛星等の長期観測データにもとづく統計的な解析により、サブストーム時の磁気圏各領域での変化の様子が明らかにされている。さらに、Geotail・Cluster 等により、リコネクション領域の詳細な研究も進められている。一方、オーロラキロメートル電波 (AKR) の観測から、オンセット時にオーロラ加速領域の時間発展が多段階であることも発見された。

##### **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。磁気圏および電離

圏（地上）での様々な観測を組み合わせるとともに、オンセット直前に現れる微細なオーロラの構造の役割などの過渡的かつ微細な現象にも注目した研究が必要である。この点については、今後、多点地上観測をさらに推し進めるとともに、様々な空間スケールでの現象を解像できる観測が必要である。

## **（イ）高温プラズマシートの起源**

### **現状**

1990年代~2000年代にかけて、Geotail、Cluster、THEMISによるプラズマシートの詳細な解析、および Geotail、ARTHEMIS、かぐや等による広い範囲での探査が進められ、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わかっていない。

### **今後の課題**

2010年代には MagnetosphericMultiscale (MMS) 衛星によって磁気圏境界層付近での詳細な観測が行われ、プラズマ流入過程および加熱過程の理解が大きく進むことが期待される。このような境界層での詳細な観測と、THEMIS/Van Allen Probes/ERG等によるプラズマシート・内部磁気圏との観測を組み合わせることで、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。

## **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1サイクル（約11年）以上にわたってデータの蓄積が進んだことが、太陽風-磁気圏相互作用の理解を大きく進めている。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 (CME) や共回転相互作用領域 (CIR) といった太陽風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、サブストーム等の変化を引き起こす太陽風の特徴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 (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、地上の磁場、レーダー観測や、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。

さらに、Geotail、Cluster、THEMIS 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とま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 などの惑星間空間観測、また磁気圏内での粒子観測から大きく進展し、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、数値シミュレーションを駆使した研究が必要になる。

## (2) 太陽から電離圏・大気圏への影響

### 現状

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 CHAMP 衛星搭載の加速度計による観測から、太陽フレアに伴う熱圏での中性大気質量密度の著しい増加が明らかとなった。また、太陽フレアに伴う高エネルギープロトンの流入（太陽プロトン現象）によって、極域電離圏は激しく変動することも知られているが、高エネルギープロトンの影響は窒素酸化物（NOx）や水酸化物（HOx）の生成を通じて中間圏から上部成層圏にまで及び、オゾン破壊を引き起こすことも観測、数値シミュレーションから明らかになってきた。

磁気嵐やサブストームに際して地球へ流入したエネルギーの最終消費領域は電離圏、熱圏である。このときの電離圏、熱圏変動は、電離圏嵐、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り、これらの発達過程の理解は電離圏研究において重要な課題となっている。電離圏・熱圏の観測はいまだ不十分であるが、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）、GPS 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。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。

### 今後の課題

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。今後、それらの現象の普遍的な姿を体系化して記述する試みが求められる。そのためには、極域での地上観測網、衛星観測の一層の充実をほかり、それらの観測と数

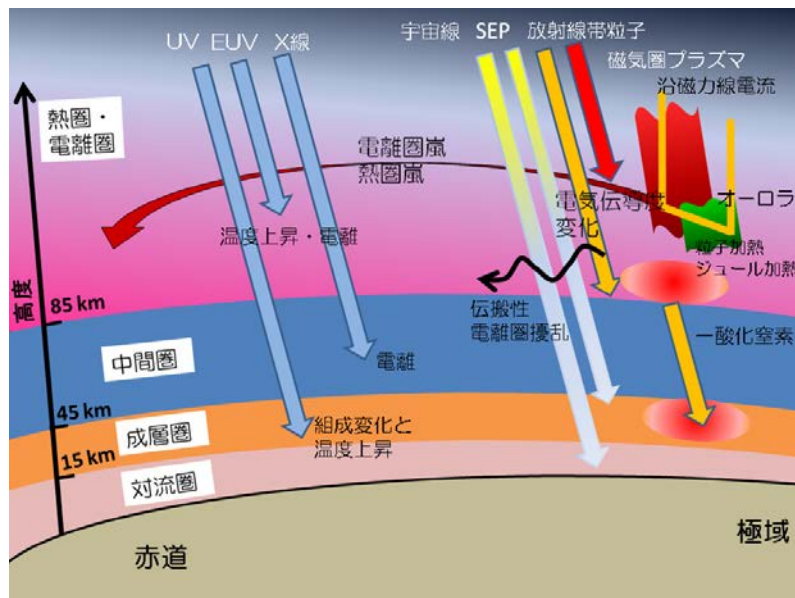


図 2.1.2 太陽から地球電離圏・大気圏への影響

値モデルとの連携が不可欠である。気象学・海洋物理学分野で行われているように、データ同化による現象の予測は今後の世界的な電離圏・熱圏・中間圏研究の潮流となる。特に、電離圏電子密度変動の予測（正相・負相嵐の予測）、熱圏中性大気の質量密度や酸素原子密度の変動予測は、GPS 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。SEP 現象に見られるように、太陽面での現象が広範囲に電離圏・熱圏・中間圏・上部成層圏にわたって影響を及ぼすことがわかってきた。現在の気象環境において、これらの影響を定量的に理解するとともに、過去（未来）においてどのようなことが起こったか（起こりうるのか）を理解する試みも必要である。

### 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象・気候に影響を与える可能性については古くから多くの研究があり、それを示唆する現象の報告やメカニズムの提案は少なくない。数日のものから有名な 11 年周期、マウンダーミニマムのような数 10 年のもの、さらにはミランコビッチサイクルの数万年から 10 万年まで、実に幅広い時間スケールの現象が扱われる。現時点で、太陽の気候への影響については、誰もが認める決定的証拠と呼べるものは存在しないが、もし実際にそれがあるとするならば、それはサイエンスとして第一級の面白さを持つと同時に、社会や地球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、慎重かつ多角的な検討が求められる。提案されている現状のメカニズムは大きく分けて以下の 4 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、無数ともいえるパターンが考えられ、メカニズム解明のためには、今後は、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は、太陽風中の磁場の遮蔽効果により、太陽自転周期や 11 年周期でその強度が変動することが知られている。それらは大気分子を電離してイオンを生成し、それが雲核生成に寄与する可能性がある。僅かな雲量の変化は地球の気温を大きく変える（1%で約 1°C）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。この説は、高エネルギー粒子の検出器である霧箱からのアナロジーであるが、霧箱の過飽和は約 200%なのに対し、実際の気象ではそのような高い過飽和はないとされ、また過飽和の条件を満たす場所は非常に限られており、このメカニズムの実効性に疑いを持つ気象研究者も多い。また、Svensmark の論文では 11 年周期の雲量変動が数%であるが、それは計測誤差範囲内だとして取り合わない風潮も一部にある。近年 CERN の加速器などで模擬する実験が行われたり、宇宙線による雲生成のプロセスをシミュレーションに組み込んだりするなどの動きもある。

(ii) 紫外線 : 300-400 nm 付近の紫外線は、太陽活動によって1%以上変化するが、そ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。比較的气象学分野の研究者に受け入れられやすい傾向にあるが、成層圏風速場の反応の時定数が1ヶ月程度とする説もあり、それよりも短期の変動の説明は難しい

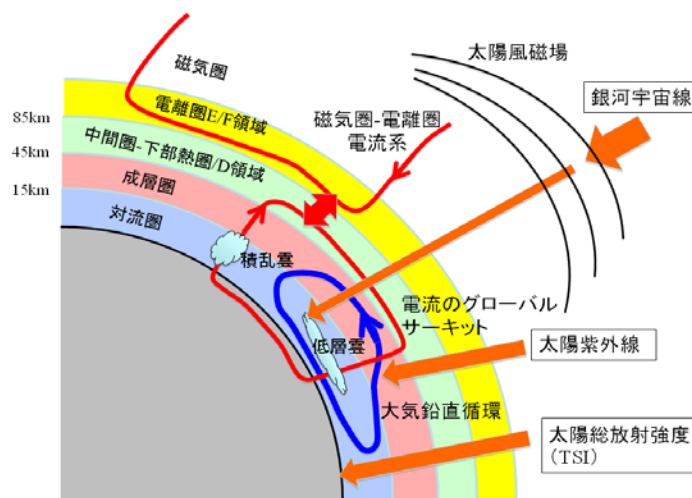


図 2.1.3 地球気候に対する太陽活動の影響

可能性もある。銀河宇宙線説は北欧を中心に欧州で支持する研究者が多いが、紫外線説は日本や米国で賛同者が多い。

(iii) 太陽定数 : 最近の衛星観測では太陽定数 (TSI: Total Solar Irradiance) がごく僅か (0.1% のオーダー) で変化することが分かっているが、そうした小さな違いでもエネルギーの絶対値変化としては紫外線よりも大きく、時間的に積分すると気候変動に繋がるという説がある。

(iv) グローバルサーキット : 地表と電離圏からなる球殻状のコンデンサーに、積乱雲という発電機が常に上向き電流で充電しており、晴天領域では下向きに電流が流れているというグローバルサーキット仮説が提唱されたのは1920年代である。この回路はさらに上方の電離圏-磁気圏電流系とも相互作用している可能性が指摘されており、もしそれが正しいとすると、この電流系によって鉛直輸送される大気中のイオンは、その分布が太陽風による変調を受ける可能性がある。イオンは雲粒の生成に寄与するとされるが、さらに、大気電場が雲の中のイオンに作用することで、雲の成長や降水による消失に関与するという説もある。この電流回路は、太陽活動に伴う磁気圏・電離圏変動の影響をだけでなく、太陽風磁場の変動に伴う銀河宇宙線量の変化によって、回路の抵抗値が部分的に変わるなどの可能性がある。

## 今後の課題

太陽活動が地球気候に与える影響については、いまだにその存否のレベルからコンセンサスが形成されていない。また上述の各説を唱える研究者はそれぞれが別のコミュニティに属していることが多く、そもそもそれらの間のインタラクションが希薄である。そのため、ある説を主張するものは、他の影響やそれらの間の相互作用について軽視する傾向が

否めない。しかしながら、基礎となる物理や化学の異なる多くの研究分野・手法を統合的に議論することは、極めて困難な作業であることは間違いない。これはある意味で、科学そのものの方法論が問われる題材と言ってもよいかもしれない。

銀河宇宙線が及ぼす影響を考えると、従来の霧箱のアナロジーだけではなく、グローバルサーキットにおける電気伝導度を変調する効果も考えないといけない。また、雲核物質の元となるイオンが生成されたとしても、その場が高度な過飽和状態になっていることは期待できないから、もしそうした物質が雲形成に影響するならば、そこには力学的な輸送が加味されなければならない。グローバルサーキットの振る舞いの全容を解明するためには、EおよびF領域電離圏の電位や電流を下層大気に接続する、D領域の振る舞いが大きな鍵になると考えられる。しかしながら、その高度の物理化学過程はそれ自身が極めて複雑難解であり、そうした分野のさらなる進展が、この太陽気候結合の理解を進めるための条件となっているように見える。このように、多種多様な研究分野が、それぞれの専門を極めながらもそこに留まらず、気候変動というキーワードで目的を共有できるかどうか、重要なポイントになるだろう。

## 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。太陽風の速度分布は二様態であり、 $400\sim 700\text{km/sec}$ の中間速度帯は非常に狭い領域にしか存在していないことがわかってきているが、その理由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

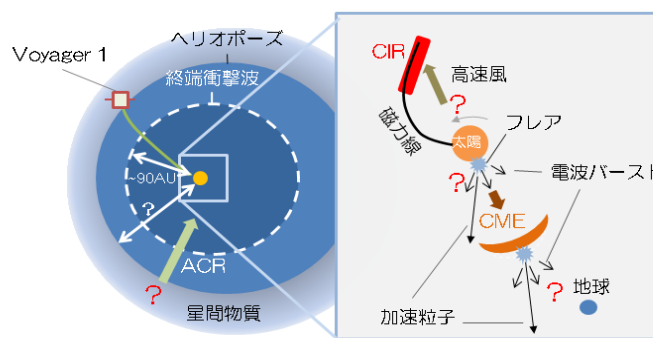


図 2.1.4 内部・外部太陽圏

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プラズマと電磁場のエネルギー交換過程であり、近年の Voyager 探査機による直接観測や IBEX 探査機の高エネルギー中性原子（ENA）検出による遠隔観測からは高エネルギー粒子の空間分布を始め、新しい発見が相次いでいる状況にある。特に、Voyager 2号による太陽圏終端衝撃波の通過（2007年）は2006年以降の太陽圏観測における大きな進展であると言える。

## 今後の課題

太陽と内部太陽圏の結合過程の理解は、太陽圏環境全体のエネルギー・物質の輸送過程の理解においても不可欠な要素であり、今後10年の間に欧米で複数の衛星計画が予定されている重要な領域でもある。特に、BepiColombo（日欧共同水星探査ミッション）、Solar-Orbiter、Solar Probe+など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ることが一つの重要な要素となると考えられる。このような太陽と太陽圏の結合過程解明の知見は、太陽以外の恒星にも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（太陽圏物理学）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、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。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。2012年12月におけるVoyager 1号の荷電粒子のデータは星間物質の存在を示唆しているが、現時点における解釈は定まっていない。また、IBEX探査機の観測からはヘリオポーズの先にあると予想されてきたバウショックの存在を疑うような結果が提出されている。さらに、現時点（2012年12月）における太陽活動の低下に伴う太陽風動圧の低下等による影響も、これらの結果の解釈や宇宙気候への展開を行う際には吟味が必要な事項である。

以上のようなVoyagerを中心とした観測結果には従来の描像を覆すものが多い。今後も、ヘリオポーズ・星間物質の観測や太陽活動に対する太陽圏応答などに関する新規の観測結果が報告されるであろう。それらの結果を踏まえた理論・シミュレーション研究の推進は、当該分野における喫緊の課題であると言える。

## 2.1.5 太陽研究

### 現状

太陽圏プラズマの主な励起源は太陽であり、太陽の光球から外層大気（コロナ）にいたるまでは動的なプラズマ現象が複雑に絡み合う領域である。太陽活動現象の中でも、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が、1990年代の「ようこう」衛星の観測以降、磁力線のひずみとして蓄積された磁場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。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。その粒子加速機構は、磁気リコネクション過程に深く関係していると考えられているが、いまだ詳細は解明されていない。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、地球電離圏に於ける異常電離現象を引き起こす。

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クラスの巨大フレアでもあっても、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再結合であると考えられているが、磁場配位の違いからCMEの有無などの特徴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10GeVの陽子、電子、重イオンを太陽高エネルギー粒子という。フレアに伴う衝撃波は主に急激な電子加速（イン

パルシブイベント：継続時間～数時間）を引き起こす。一方、CME 衝撃波は主に陽子に富む高エネルギー粒子群を緩やかに（グラデュアルイベント：継続時間数日間）生成する。前者の粒子加速は狭いフレア領域で生じるため、経度の広がりも限られ地球に直接到達する磁力線の領域に限られることに対して、後者は広い太陽経度に渡って観測される。全ての高エネルギー粒子がこの2つのメカニズムに集約されるわけではなく、低エネルギー側ではグラデュアル、高エネルギー側ではインパルシブといったハイブリッド・イベントが多く見つかっており、フレア衝撃波で加速された粒子が更に、コロナ中の準垂直衝撃波によって加速される2段階加速メカニズムなどが提唱されている。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地球の磁場に跳ね返されることなく大気まで到達し、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。

これらの動的な太陽プラズマ現象を明らかにするため、太陽観測衛星「ひので」による偏光分光観測が行われた。「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、これまでにアルヴェン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。太陽活動の長期変動という観点では、「ひので」により極域磁場の詳細な観測が可能になった。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、太陽風加速や太陽活動長期変動に関する新しい知見が得られている。

## 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、太陽大気磁場構造や動的構造を3次的に理解して、磁気リコネクション・プラズマ加熱・粒子加速・アルヴェン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ミッションでは、高解像度、かつ、高精度の偏光分光観測によって、光球のみならず、これまで困難であった彩層の磁場を測定し、それをもとに間接的手法でコロナの3次元磁気構造を求める。また、彩層磁場観測に加えて、「ひので」衛星を大幅に上回る解像度でコロナの観測を行うほか、彩層やコロナを分光観測することで微細スケールのダイナミクスをとらえる。磁場にと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。高エネルギー粒子生成に関しては、サブミリ波帯での高解像度の観測や高時間分解能・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、プラズマ物理学の知見を活かした粒子のふるまいの素過程を理解することが重要である。

b) については、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。近年の観測的、理論的研究から、対流層深部に磁場の起源が存在することが示唆されており、対流層深部の運動を詳細に調べるためのブレークスルーとなる観測が期待されている。その一つの可能性が、これまで流れや磁場の詳細な観測がなされていない太陽極域の探査である。黄道面を離れた視点から初めて太陽を観測し未踏の太陽極領域を中心に探査し太陽磁場の生成起源を観測的に調べる「太陽極域観測ミッション」を2020年代後半に実現を目指す。

## 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、超高層大気現象や電離圏の変化が、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、極域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が考えられているが、その全容は未解明のままである。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ている。また、近年のGPS観測網の発達により、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。この結果は、地表面・海面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。特に、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の上下結合の本質的理解に必要である。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、衛星測位や通信などの、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、まだ現象報告的であり、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、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。

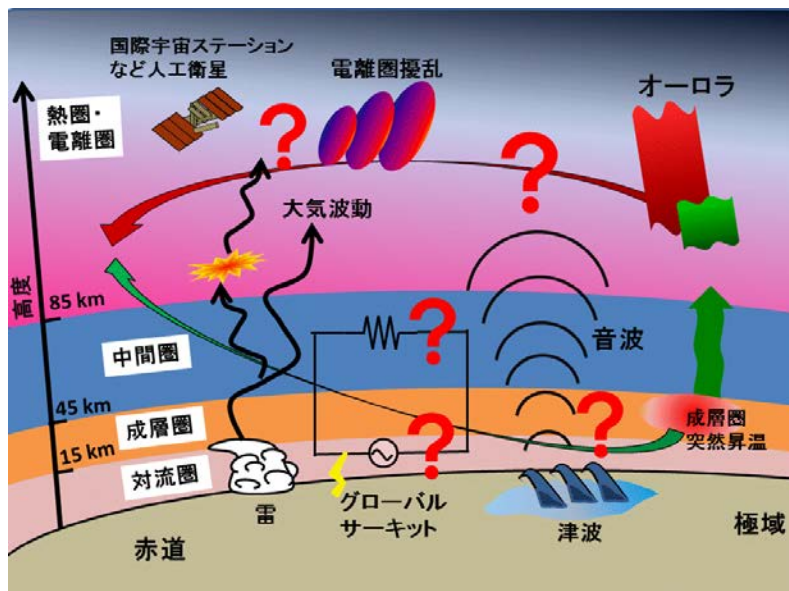


図 2.2.1 下層大気から中層・超高層大気への影響と緯度間結合

## (2) 中層・超高層大気の緯度間結合

熱圏大気的主要な大規模循環は、太陽紫外線加熱による赤道から極域への循環である。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し、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な研究課題である。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する試みが必要である。

## 2.2.2 中性大気・プラズマ相互作用

超高層大気は、太陽放射により一部が電離した大気となり、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、不安定性に非線形効果を考慮する必要や、異なる不安定が結合している可能性を考える必要がある。また、2.2.1 で述べたように、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”の重要性も指摘されており、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 $\pm 30$ 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「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

る特殊な高度領域である。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 次元電場が 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る。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・電磁気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。

## (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が変化したり、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、GPS、衛星観測技術の飛躍的な発展により、内部磁気圏プラズマが地磁気擾乱時に昼側磁気圏界面まで達して磁気リコネクションの効率を変化させたり、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。

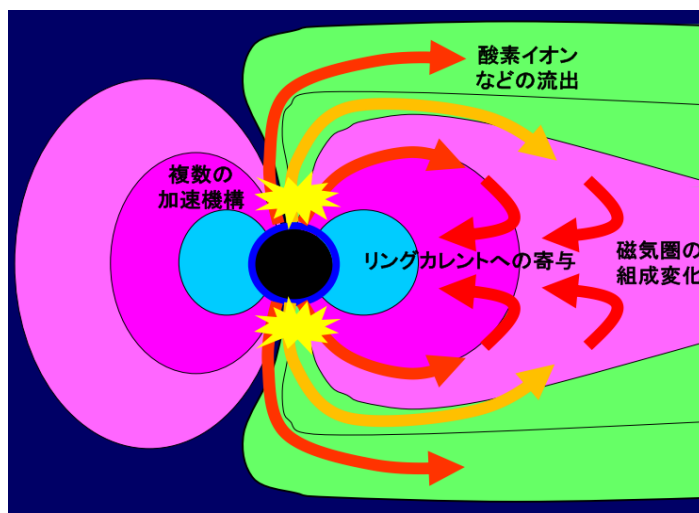


図 2.2.2 電離圏プラズマ流出と磁気圏への影響

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 地球温暖化や気候変動との関わり

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。近年の夜行雲の出現率の増加は、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、オゾンホールの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動にも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、オゾンホールが発生メカニズムに対する現状の理解は必ずしも充分ではない。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、オゾンホールの発生メカニズムが定量的に解明されることが期待される。

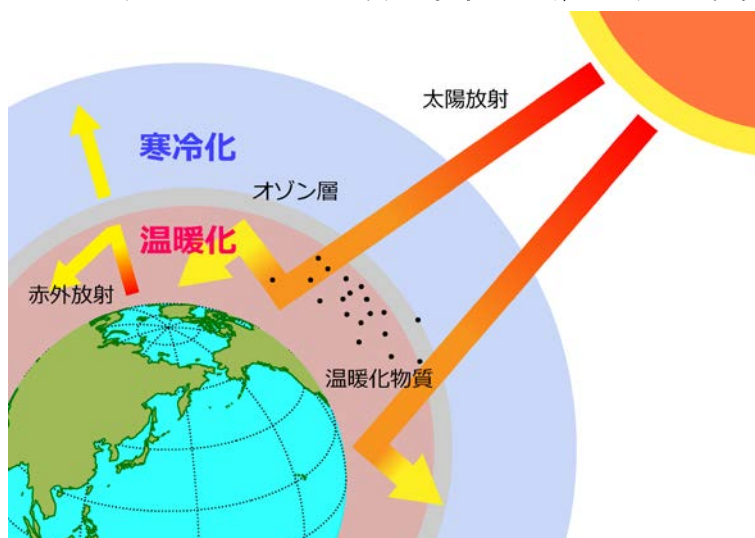


図 2.2.3 超高層大気と地球温暖化や気候変動との関わり



## 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。

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）

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

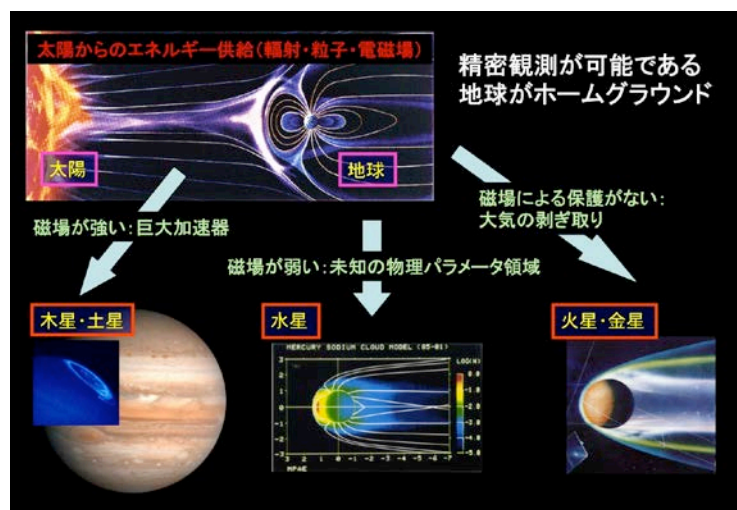


図 2.3.1 地球から惑星への電磁気圏・大気圏研究の発展

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、古典的な断熱輸送機構に加え、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も指摘されている。また、極域における周期的な相対論的電子のバースト現象など、地球磁気圏では発現していない木星磁気圏固有の加速機構が働いていることも示唆されている。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。

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、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、各加速過程が磁気圏ダイナミクスに及ぼす影響を評価するために、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。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回旋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、磁気圏現象のスケール則の適用可能範囲を調べることは意義深い。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回旋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。

## (2) 自転効果が卓越する磁化天体における領域間結合

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、木星磁気圏のプラズマダイナミクスを大きく決定づけていることが示され、特に木星近傍の領域（内部磁気圏）では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、近年の Cassini 探査機の衛星イオ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によると、太陽風起源のエネルギーを回転支配領域（共回転領域）の深部に伝える速いエネルギー輸送機構が存在するようである。エネルギーの輸送機構の候補として、交換型不安定やプラズマ波動などが挙げられているが、未だ明らかになっていない。

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「パルサー型」の磁気圏を調べる上で、特に重要な視点は、強い遠心力と回転エネルギーが、太陽風-磁気圏相互作用に及ぼす影響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、共回転からの遅れによる沿磁力線電流の

発生とオーロラオーバルの関係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が、回転支配型の磁気圏を理解する上で重要となる。

### (3) 惑星-衛星結合

衛星の存在は、磁気圏-惑星結合系に興味深い新たな要素をもたらす。衛星は磁気圏への大量のプラズマ供給源として重要であるとともに、惑星と衛星の電磁氣的結合過程そのものが重要な研究対象となる。磁化惑星とその磁気圏内に位置する衛星は、沿磁力線電流を介して電磁氣的に結合する。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。その一方で、Galileo 探査機による木星の衛星ガニメデの固有磁場の発見や、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、多様性に富む惑星-衛星結合過程の理解が求められている。

今後の惑星-衛星結合過程の研究にあたって特に重要となる視点は、太陽系外現象への適用を視野に入れた問題意識を持つことである。惑星と衛星の結合過程の理解は、惑星-衛星系のダイナミクスの理解に繋がるだけでなく、太陽系外の中心星-惑星結合過程の理解にも資するものである。例えば、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（ホットジュピターなど）の結合にもなぞらえられる。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（サブアルヴェニックな）恒星風-磁気圏相互作用とも言うべきものである。他にも天王星の非対称な磁気圏や、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直接観測によって明らかにすることは、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結合過程の理解にも寄与するものである。

### (4) 希薄大気天体における領域間結合

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に、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ない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、低い電離圏電気伝導度を有する磁気圏-電離圏の電流系がどのように閉じるかは明らかになっておらず、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、月ウェー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。

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、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、表層からの光電子放出と帯電ダストの挙動の解明などが挙げられる。

### 2.3.2 大気流出過程および惑星大気進化の統一的理解

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（火星）、Cassini（タイタン）、多数の彗星観測などにより報告された。しかし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はよくわかっていない。大気散逸の研究は、理論研究が先行しており、観測による実証が進んでいない。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。

金星や火星などの地球型惑星研究の最大の重要性は、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気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、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。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。

### 2.3.3 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ソルの光化学生成、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的基本的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ような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

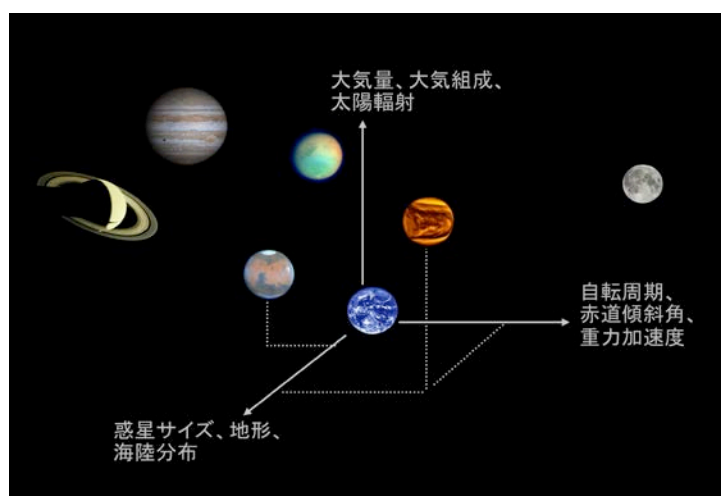


図 2.3.2 多様な惑星大気を多次元パラメータ空間に位置付けるイメージ

からしく語れないことを意味するからである。

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どうかは謎である。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砕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。火星では米国の Mars Global Surveyor や欧州の Mars Express 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、今後も欧州の Trace Gas Orbiter や米国の MAVEN が控えている。金星では欧州の Venus Express が続行中のほか、日本の「あかつき」が 2015 年に観測開始予定である。木星では米国の Galileo が成果を挙げ、同じく米国の JUNO が 2016 年から観測を行い、2020 年頃には欧州が JUICE を打ち上げる。土星では Cassini が観測を継続中である。

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

地球のように固有磁場を有する天体—水星、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部分が存在し、そこでの流体運動によって生じるダイナモ作用によって、各天体の固有磁場が生成・維持されている。各天体の固有磁場は地球のように双極子磁場が卓越しているが、地球磁場と比べて非常に弱いもの（水星）、非常に強いもの（木星）、ほとんど自転軸対称成分しか観測されないもの（土星）、自転軸と双極子の方向が全く異なるもの（天王星・海王星）など様々であることがわかっている。このような多様性は何によって決まるのであろうか。金星、火星、（地球の）月などは固有磁場を持たないが、火星では Mars Global Surveyor によって、そして月では Lunar Prospector およびかぐや衛星によって、地殻起源の磁場が各天体表面の広範囲にわたって観測されており、かつてはダイナモ作用による固有磁場を有していたと考えられるようになった。ダイナモ作用を起こす流体運動が熱対流や組成対流のように天体の冷却に伴うものであれば、天体のサイズが小さいほど冷却が進むので、流体部分が固化することによって、ダイナモ作用が停止してしまうことが予想される。しかし、この考え方は固有磁場を持たない火星よりも小さい水星やガニメデが固有磁場を持つことに反する。それでは、なぜ火星のダイナモ作用は停止したにもかかわらず、水星やガニメデのダイナモ作用は継続しているのだろうか。現在の天体の状態（内部構造・ダイナミクス）は、その天体の起源と進化に深く関係している。したがって、天体の固有磁場の空間分布・時間変動を観測することは、天体の起源と進化を理解するために、非常に重要な要素となっている。また、2.3.1 や 2.3.2 で述べたように、固有磁場強度は太陽風との相互作用の形態を決定づける支配パラメータの一つであることから、その生成機構や時間変動の理解は重要である。

ダイナモ作用の物理を理解するために、回転球殻内の電磁流体力学的ダイナモの数値計算が実施されてきた。これまでに使用されているパラメータの中には、実際の天体に対するパラメータとは数桁以上の違いがあるパラメータが含まれているため、数値計算の結果として得られているダイナモ機構がどれだけ現実のダイナモ作用の物理を再現しているかについては、今後、さらなる研究を積み重ねて、明らかにしなければならない。とはいえ、スーパーコンピュータの発達に伴い、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り、地球磁場の永年変化や極性の逆転などの現象もダイナモ作用の数値モデルとしてコンピュータ上で再現されている。このように、天体内部におけるダイナモ作用の物理は理解されるようになってきたといえる。また、比較的融点が高い金属であるナトリウムやガリウムを用いた電磁流体の実験も行われるようになった。天体とは時空間スケールが異なるものの、詳細な計測が可能であり、ダイナモ作用の物理の理解が進むと期待される。



固体惑星・固体衛星の電磁探査を実施することにより、天体内部の電気伝導度構造を推定することができる。固体天体の地殻やマントルを構成すると考えられ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ができる。このように、固体天体の電磁探査の結果に基づいて天体内部の構造を推定することによっても、その天体の起源・進化の理解を深めることができる。Lunar Prospector やかぐや衛星によって観測された磁場データを解析することにより、月のコアの大きさが見積もられた。コアの大きさを電磁気学的に見積もることは、重力、慣性モーメント、あるいは固体天体表面における地震観測から得られるものとは独立な情報となる。したがって、今後、コアの大きさの見積もりが未知の天体に対して実施すべき課題である。

月や火星で観測された磁場は磁化した地殻にその源がある。かつての月や火星内部でダイナモ作用によって生成されていた固有磁場の方向に磁化したのであれば、いつ、どのような機構で地殻が磁化したかを明らかにすることによって、月や火星の進化の解明につながる。

このような研究を進めるためには、地球以外の惑星・衛星において、周回衛星による磁場マッピングを実施することにより、各天体の磁場の空間分布、あるいはその時間変動を観測する必要がある。固体天体の内部構造を推定することを目的とする場合には、天体表面に着陸した上で、磁場観測をすることも必要である。

### 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 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) に含まれていた水素 ( $\text{H}$ ) 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の存在を支持する。



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うないくつかの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氷床を作ったのか。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量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の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。

## 2.4 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つきりの“我々の地球や惑星と太陽の関係”を詳しく知ることを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に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静かに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年代後半にはいと、理論面では、大きな計算空間における完全粒子シミュレーションによる研究が主流になった。粒子シミュレーションの解像度が向上したことで、電子スケールの2次的磁気島 (Flux Ropes) が乱流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

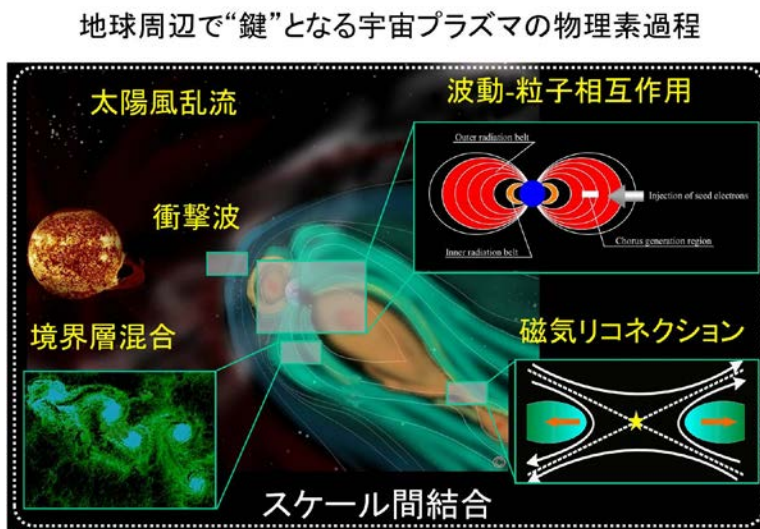


図 2.4.1 スケール間結合

構造の理解が進んだ。現在では、速いリコネクションを維持するためには Hall 効果ではなく運動論効果が重要という認識が広まったうえ、粒子加速研究も急速に進んでいる。昼側磁気圏界面で起きる「非対称型」リコネクションの研究が進み、リコネクションの基礎量をハイブリッド平均で拡張するなど、理論面の進展が著しい。2010年代に入ると、ペタフロップス級の大型計算機の開発に伴い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等が明らかになり、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。

理論的には、プラズマの広いパラメータ・レンジの中におけるリコネクションの物理の関係性の理解も進んでいる。Lundquist 数パラメータが大きな抵抗 MHD 系では、Sweet-Parker 型リコネクションの電流層内にプラズモイドが発生してリコネクション効率が上がることがわかった。こうした「プラズモイド型」リコネクションなどのリコネクション形態と、系の典型パラメータとの対応関係が整理されてきている。

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の結果と整合性のあることが示された。Geotail 衛星の観測器性能では限界があるが、MagnetosphericMultiscale (MMS) 計画等の将来の観測による磁気リコネクション研究の進展を期待させる結果である。また、太陽風中のリコネクションの観測データが議論されるようになったことも特筆すべきである。

昼側磁気圏境界面でのリコネクションに関しては、観測および数値シミュレーションにより、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

ムホルツ渦などに起因する動的なプラズマ流が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、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だ。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、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だ。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。そして磁力線トポロジーや輻射冷却効果が、こうした素過程を通じて、電流層の長期発展と粒子加速・熱化を左右することがわかった。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、例えばアウトフロー速度と磁化パラメータの関係則など、リコネクションの流体スケールの性質が明らかになってきた。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DC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。

## 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・実験が連携して幅広く進んでいる。将来、NASAのMMS、日本のSCOPEといった電子スケールを含む詳細な観測を可能とする人工衛星計画によりこれらの観測的実証が期待される。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、観測データとの比較をすると、明らかな数値シミュレーションとの差異も見られる。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、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課題である。観測・数値シミュレーションの両輪として実証的な研究を進めることが重要である。

## (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低マッハ数 ( $<10$ ) 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。

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。

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得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

観測的には、多点観測による利点を十分に生かした解析が十分に行われているとは言い難い。これは1つには観測の制約により、十分な観測データを取得することができていないことが大きいと思われるが、別の面としては、衝撃波も本質的にマルチスケールな構造をもっていることにより、衝撃波遷移層内の物理過程をすべてとらえるような十分な観測がおこなわれていない、ということもある。衝撃波面の非定常構造について実証的に理解を進めるためには、将来的には日本を中心に検討が行われている SCOPE 計画のようなマルチスケールな編隊衛星観測の実現が熱望される。

### (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、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、2次元完全粒子シミュレーションの実現により、この渦内リコネクションが磁気島形成を伴うことで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 および THEMIS 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た。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 次的不安定性の成長」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、磁場のつなぎ替えに伴うプラズマの輸送が示された。一方、2 次的レイリーテイラー不安定は、流体的乱流に伴う、小スケールの渦構造生成によるプラズマ混合が提唱されている。これらは主に 2 次元計算であったが、今後は磁気圏全体も含めたグローバル MHD シミュレーションによる KH 不安定の非線形発展も含めて考える必要があり、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アルフベン波 (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。

また月探査衛星かぐやでは、太陽風と月の相互作用の結果としての、月ウェイク領域や月表面の磁気異常上空におけるプラズマ・波動のダイナミクスが明らかにされつつある。これらの物理過程の理解は、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 - 粒子相互作用の網羅的な解明がホットトピックとなっている。特に内部磁気圏では、広いエネルギーレンジにわたるプラズマ粒子が、さまざまな波動との相互作用によって互いに結びつけられ、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示唆されている。近年の内部磁気圏の理論およびシミュレーション研究において、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、および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再現結果が注目されている。さらに、電磁イオンサイクロトロン波についてもコーラス放射と類似した電磁イオンサイクロトロン波 (EMIC) トリガード放射と呼ばれる周波数上昇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。トリガード放射と電子・イオンとの非線形な相互作用は、従来の線形・準線形理論よりも粒子の加速・消失過程への寄与が大きいことが明らかになりつつある。

太陽風プラズマにおいては、これまで注目されてきた磁気流体プラズマ乱流研究に加え、近年、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に注目が集まっている。また、運動論的プラズマ乱流に関して、数年前までは空間2次元のシミュレーション研究が多く行われていたが、近年では3次元の性質の研究が始まり、より現実的な運動論的乱流の理解へ発展しつつある。

## 今後の課題

このような研究背景の中、電磁界センサと機上処理ソフトウェアの高性能化により、プラズマ波動受信器の高機能化が進み、波形観測も含む波の微細構造の計測と、粒子観測データとの相関解析など、今後の磁気圏・惑星探査におけるプラズマ波動の詳細観測法の役割は極めて大きい。また異なる観測点での波動の同時高時間分解能波形観測と、同時多点観測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、早期の実現が期待される。

また、研究背景で述べたように内部磁気圏波動に関する理論研究も近年大きな進展を見せている。日本国内で特に進められているこれらの研究を進め、さらなる注目を集めるために、(大規模)シミュレーション研究として考えられる課題を以下に挙げる。

1. Van Allen Probes や ERG 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、および定常的な高エネルギー粒子注入のモデル化。

2. 高エネルギー電子、イオンのピッチ角散乱に関する問題。特に、大振幅を持つ EMIC トリガード放射による振り込み粒子の定量的な評価。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への影響
3. 各シミュレーションの空間多次元化による、斜めモード励起の再現および反射やモード変換の問題への取り組み。

また、太陽風プラズマ研究においても磁気流体的プラズマ乱流から運動論を考慮した運動論的プラズマ乱流へ注目が集まる中、現在遂行すべき課題として以下の3つを挙げる。

1. 各特性長（磁気流体、イオン、電子スケール）における乱流の統計的性質。乱流による粒子加速およびプラズマ加熱過程、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。また各領域を結合する領域での物理の理解。
3. プラズマ乱流を構成する波動（および構造）の性質。各スケールでのスペクトルの傾きおよび異方性についての理解。また、各スケール間でのそれらの関連性の理解。

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。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（プラズマエンジン）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発見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。

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で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、化学的エネルギーかわりに電気的エネルギーによって宇宙空間中で推力を得る推進機関（電気推進機関）がはやぶさ衛星などにおいて実用化されたが、これらの電気推進機関に関連した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（プラズマ推進）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。

## 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 領域のスプラディック 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、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、太陽の採層にも電離圏と同じ弱電離プラズマが存在し、採層プラズマ中、もしくは採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、太陽採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）研究における現在の主題は、おもにプラズマの生成・加速に関するものである。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。「プラズマに直接手をふれず、外部から電磁場によって加速する」と言い換えれば、宇宙プラズマの研究者にもおなじみの研究対象ではないだろうか。これも、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。

## (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な研究は大幅に遅れている。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。

### 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
- ・乱流圏界面領域の観測とモデル研究
- ・化学モデル等による乱流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。

このような状況でとくに重要なのは観測技術の新展開であると思われる。ロケットによる高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方向のものであるがさらに一層のブレイクスルー・

技術革新が望まれる。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。

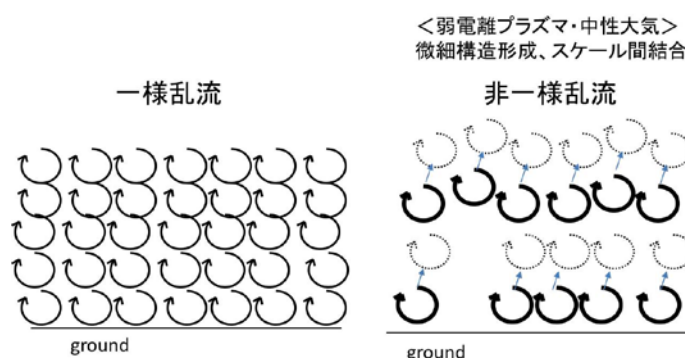


図 2.4.2 非一様乱流

## 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、変動の原因となる核や核-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と言える。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気的物性や熱の分布が明らかにされる。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者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) などの衛星により10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、1年以下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。また、磁場観測データはコア表面の流れの分布やマンツルの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、コアやマンツ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。しかしながら、3機の磁場観測衛星を同時に編隊飛行させ、より詳細に磁場の空間分布と時間変動をとらえることを目的とする SWARM 衛星(2013年打ち上げ予定)以後の地球磁場観測衛星の計画は今のところない。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。加えて後者については、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り、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、地磁気永年変化の

研究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約 50 年間のデータが蓄積されたことにより、数十年スケールとされる西方移動の周期帯まで議論できるようになった。過去 10 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（核起源の地球磁場）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 15 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) が運用されている。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 5 年以上にわたる連続データの収集に成功している。

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 (コアフィールド) 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、外核の流れの解明やコア・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、地磁気ダイナモ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。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。

海底における定常連続観測においては、SFEMS のオンライン化が望ましい。現状のオフラインの SFEMS では、繰り返し観測による準定常的な運用に留まっており、将来は電力のその場供給、海上ブイとの音響通信および衛星通信による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 世紀後半に近代的地磁気観測が開始されて以降、地球磁場は様々なタイム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・考古学的資料・地質試料などから当時の地磁気情報を読み取る必要がある。変動のタイムスケールに応じて、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道具として、(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 がコンパイルされるなど、データの蓄積が進んでいる。一方で、日本では 2006～2012 年にかけて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。(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が発掘・コンパイルされ、それを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磁気測定が見直され、19 世紀初頭の偏角マップが完成しつつある。(c) については、溶岩、湖底堆積物、そして考古学資料を対象とした研究がある。

考古学資料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が、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よう発展した。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が久しくあったが、2000年代後半になって組織的に復興される動きがでてきた。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）によって組織的かつ大規模な研究が推進されたこと、全球的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、古地磁気強度測定法が進歩し、精度確度が向上したこと、などが動機として挙げられる。

次の 10 年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 of 技術向上
- (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

特に今後の測定については、考古地磁気データの精度を向上させる必要がある。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。それが可能になれば、焼土の年代決定をより細かい精度で行なうことができ、考古資料の編年などの解釈に寄与できる。

これら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。特に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。ダイナモ数値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。

#### **(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、過去 200 万年間程度について、地磁気双極子成分の変動がシームレスに明らかになってきた。今後は、この期間について非双極子成分の変動解明を進めるとともに、過去 200 万年を超えた期間について、地磁気双極子成分のシームレスな変動の様子を解明する必要がある。また近年、一番最近の地磁気逆転（78 万年前）の詳細な形態が明らかになりつつあるが、引き続き研究を進めるとともに、さらに過去の地磁気逆転について形態を調べることが必要である。そのためには、湖底・海底

堆積物の古地磁気を中心に火山岩の古地磁気（特に強度）や海洋底磁気異常などから連続的かつ信頼性の高い磁場データの一層の収集を進める必要がある。この視点において、統合国際深海掘削計画（IODP: Integrated Ocean Drilling Program）の枠組みにおいて採取される数百メートルもの長さに渡る海底下掘削試料の存在は重要である。さらに、海と陸の古地磁気データの比較と統合についても検討を進める必要がある。

数万～数百万年スケールの古地磁気永年変化については、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きた。近年では南北アメリカ大陸西海岸でのトランセクト研究が系統的になされた。しかし、緯度依存だけを考えれば十分であるかは、必ずしも明白ではない。そこで、太平洋の西側でも比較検証を行う必要があると考えられる。幸いなことに、太平洋西岸は火山帯であり、材料には不自由しない。手始めに、日本での火山岩の古地磁気研究を進めると共に、過去に分析されたデータをコンパイルし、地磁気変動の統計的特性の全体像の把握に務める。その上で、さらに近隣の諸国へフィールドを広めて行くという方策が考えられるであろう。

近年、海底堆積物に含まれる、 $^{10}\text{Be}$  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、宇宙線の入射に支配されるが、その入射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、主に海底堆積物に含まれる磁性鉱物が担う残留磁化を分析することにより行われてきた。宇宙線生成核種の変動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。

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。ダイナモシミュレーション研究においては、これまでの高粘性のモデルを用いた研究から、金属コアの物性に近い、より低粘性のモデルへのステップアップが必要である。さらに種々の境界条件や対流の駆動源の問題、熱伝導率（プラントル数）などの、これまであまり重視されてこなかったパラメータに対しても系統的な研究が必要であろう。

#### **（ウ）数千万～数十億年スケールの変動**

地球ダイナモの数値計算と古地磁気変動データは、古地磁気研究の両輪である。近年の両者の進歩により有機的な結合が可能になりつつあるが、これをさらに推し進める必要がある。数値計算からは、地磁気逆転頻度や古地磁気強度の長期的変動が、コア・マントル境界（CMB）の熱流量分布にコントロールされる可能性が指摘されている。CMBの熱流量分布は、ブルームの活動や真の極移動（TPW: True Polar Wander）に影響される。この議論を進めるための古地磁気データとしては、古地磁気強度と逆転頻度の関係、2億年より前の地磁気逆転頻度の長期的変動、TPWの詳細の解明が特に重要である。

古地磁気強度と地磁気逆転頻度の関係の解明のためには、地磁気逆転が停止し地球ダイ

ナモが現在とは異なったモードにあったと考えられている白亜紀スーパークロンと、その後の地磁気逆転頻度が増加する期間の古地磁気強度データが重要である。白亜紀スーパークロンの古地磁気強度が強かったことを示唆するデータは多いものの、未だ確定に至っていない。これは、絶対古地磁気強度測定において、依然として手法や測定材料による系統的なバイアスの存在可能性が指摘されているためであり、その検証が必須である。連続的な古地磁気強度変動を復元する材料は堆積物の他にないが、レコーダーとしての堆積物の lithology の変化が、大なり小なり相対古地磁気強度変動記録に混入している可能性が大きい。根本的解決のためには、古くて新しい問題である堆積残留磁化獲得機構の解明を進める必要がある。そのためには、普遍的に存在すると考えられるようになった生物起源磁性鉱物の役割の解明が重要と考えられる。

TPW は、従来、ホットスポット座標系と地軸座標系における磁極位置の差として求められてきた。しかしながら、ハワイ・天皇海山列およびルイビル海山列の古緯度から、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とマントルダイナミクスの関係を理解しようとする研究は、深海掘削計画 (DSDP: Deep Sea Drilling Program) 掘削試料による推古海山の古緯度研究に端を発し、国際深海掘削計画 (ODP: Ocean Drilling Program) による天皇海山列掘削でハワイ・ホットスポットの南下が確認されたこと、マントル流動の大規模な数値計算が可能になったことなどにより発展してきた。マントル流動を考慮した hotspot reference frame を構築し、TPW の実態を解明するためには、インド洋や大西洋のホットスポット軌跡を掘削し古地磁気研究を行う必要があり、IODP において今後の重要なテーマに位置づけられている。

これまでの古地磁気学の研究によって、地磁気そのものの記録は約 34 億年前まで遡ることができており、なかでも地磁気の大規模な変動の記録は約 20 億年前まで遡ることができている。さらに古い地球最古の岩石・鉱物について研究が期待されるが、1 インチ試料を大量に測ることを基礎とした従来の古地磁気学アプローチでは、風化・変質の問題により困難を伴う。必然的に微小試料の測定を行うことが求められるが、そのためには、近年発展を遂げている超高感度磁気測定技術をより積極的に導入すると共に、天然試料に特化した独自の技術開発を行う必要がある。また、同時期に存在したと考えられる月・火星ダイナモを記録する地球外試料との比較を進める視点も重要である。

## (エ) 地球深部科学、地磁気ダイナモシミュレーション

外核のダイナミクスおよびそれに伴う地球ダイナモは、マントルおよび内核からそれぞれ、熱流束不均質性、安定成層、異方成長などを通じて大きな影響を受けていることが明らかになってきた。こうした効果の起源や詳細なメカニズムに対する知見を増やすことで、地磁気永年変化や逆転頻度といった問題に対する理解が進むはずである。そのためには地震学や鉱物物理学からのインプットを取り入れた精密なダイナモモデルが必要である。更に、ダイナモモデルの特徴を把握することでモデルの検証を可能にできるかを明らかにで

できれば、地磁気観測や地震波観測との連携が進むと期待される。

外核のエクマン数と磁気プラントル数はそれぞれ  $10^{15}$  および  $10^6$  と予想されているが、現在の最新のダイナモシミュレーションにおいても、エクマン数  $10^7$  程度、磁気プラントル数 0.1 程度のモデルが計算性能の限界である。地球ダイナモを定量的に再現するには、より低いエクマン数・磁気プラントル数のダイナモシミュレーションを実現することが重要であり、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古地磁気層序は、年代法の一つとして重要な地位を占めている。実際、1960 年代に原型がほぼ完成した地磁気極性層序は、地質学、人類学、考古学など広範な分野でも利用されている。鮮新世以降の地磁気極性年代表は、天文年代調節された海洋酸素同位体層序によって年代が高精度に決められており完成度が高いと考えられているが、松山ーブルーン極性境界 (MBB) に対し数千年若い天文年代や  $^{10}\text{Be}$  を用いた年代が提案されるなど、アップデートの議論が続いている。

一方、最近約 20 年間の深海底堆積物コアの研究から解明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。その適用は磁氣的に均質な堆積物に限られるが、一時的に地理極から地磁気極が大きく離れる現象である地磁気エクスカージョンとともに、主にブルーン正磁極期 (過去 78 万年) 内の数万年スケールの年代決定に役立っている。

今後は、古地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。逆転トランジション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、新たな古地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、堆積速度が速い沿岸堆積物 (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、同位体年代軸 (+天文年代更正) の精度の向上が必要である。

並行して、これまで古地磁気層序が使えなかった岩相での古地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古地磁気層序に成功した研究例もある。SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) 顕微鏡の開発とそれ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、火星における古地磁気層序が可能になり得る。

歴史時代の地磁気復元は、地球磁場の振る舞い（性質）の解明につながるだけでなく、考古遺跡の年代決定に有効である。日本における地磁気永年変化の標準モデルを更新することで、標準モデルを用いた未知の年代試料に対する年代推定値を提供し、考古資料の編年などの解釈に寄与していくことが望まれる。

### （カ）未来予測

近代的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、地磁気未来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。より詳細な地磁気未来予測を行うためには、地球ダイナモモデルの精度の向上が不可欠である。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ものの、単なるフォワードモデリングに留まらず、データ同化の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。

### （3）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 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。根本的解決のためには、古くて新しい問題である堆積残留磁化獲得機構の解明を進める必要がある。最近では、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）、新たな展開を迎えた。 $^{10}\text{Be}$  や  $^{14}\text{C}$  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。

近年、古地磁気分野においても地磁気と気候のリンクに関する研究成果が報告されつつある。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-ブルー地磁気逆転（約 78 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。

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、さらなる検証を進める必要がある。たとえば、松山-ブルー地磁気逆転時以外の地磁気強度が大幅に減衰する他のイベントについて、宇宙線-雲効果を検証することが考えられる。有意な成果を上げるためには、大阪湾の研究のように間氷期の地磁気イベントに狙いを定めて寒冷化の検出感度を上げ、Orbital forcing による氷体量変化とは独立の短期イベントを検出する手法が必要かもしれない。今後、温暖期に起こった地磁気逆転や地磁気エクスカージョンに的を絞って地磁気と気候の高解像度データを出せば、地磁気と気候のリンクに関する検証を進めることが可能になる。沿岸堆積物は古気候復元に必要な花粉化石を含むので、重要な記録媒体といえる。また、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。

## 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・惑星の磁気異常

月磁場については、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、その概要が明らかになってきた。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なう必要がある。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事が明らかとなっている。現在、MESSENGER が水星周回軌道で磁場観測を行っており、BepiColombo による観測が計画されていることから、将来、水星の磁気異常情報が得られると期待される。また、今後の宇宙探査では、原始惑星系時代の未変成・未風化の始原的炭素質隕石の微粒子（はやぶさ2）が持ち帰られる見込みである。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）磁場顕微鏡が現有・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。さらに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 磁場顕微鏡を導入することが望まれる。このような室内実験を、惑星の多様性を考慮したダイナモシミュレーションをより緊密に連携させて推進し、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。

地球、月、火星について、現在までに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事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来ているが、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。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。惑星ダイナモ研究においては、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。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を関係付けたスケーリング則を求め、磁場から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、これまでに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

月や固体惑星において、電磁探査を実施することにより、グローバルな惑星内部電気伝導度構造を推定することも、その起源と進化の解明につながる。地球のように磁気圏が大きい場合、地球内部に電磁誘導を引き起こす地球外部を起源とする磁場変動と、地球内部に誘導された電流により生成される地球内部を起源とする磁場変動とを分離することは、地磁気ポテンシャル解析によって実施することができる。水星のように磁気圏が小さい場合、外部起源の磁場変動は固有磁場の推定に影響を及ぼすが、他方、相対的に大きいとされるコアサイズの見積もりに、電磁誘導現象を利用できる可能性がある。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、積極的に取り組むべき課題である。

月のように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・着陸機ともに磁力計を搭載して同時観測での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。

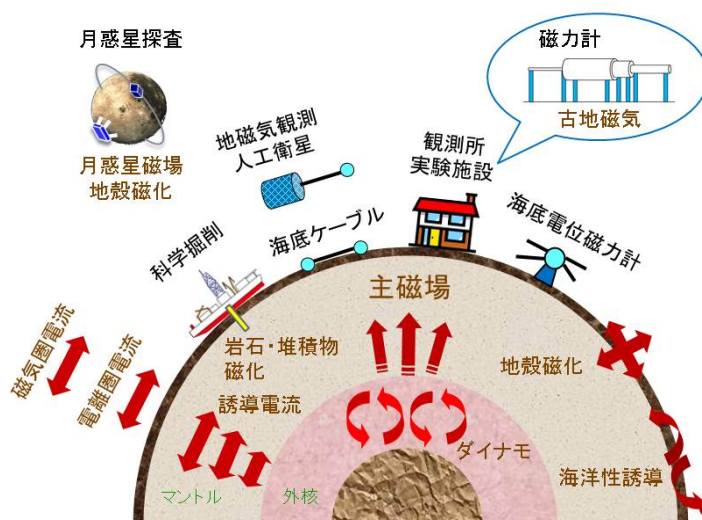


図 2.5 固体地球分野における電磁気観測

## 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 地殻・マントルの構造の解明

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、人間の到達困難域の理解を目指すフロンティア的研究の対象であると言える。

電磁気学的手法による地球内部構造探査研究は、固体地球の実体解明を究極の目的とする地球科学研究の一分野である。電磁気学的研究では、磁化構造・電気伝導度（比抵抗）構造等を推定するが、それを基に地球内部構造を規定するより基本的なパラメータの分布や調査地域のテクトニ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分野である。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きわめて重

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。たとえば機器開発の側面においては、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。特に発生場としての構造の把握は、地震・火山現象の発生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**

詳細な地下構造の解明により進展が期待される地震に関するテーマは、地震発生過程（破壊の始まり/成長/停止）や地殻（断層）強度・レオロジー、間隙流体の存在とその形態、歪集中を担う上部マントルから地殻に至る大規模構造（brittle-ductile 遷移層の分布など）などを把握することが挙げられる。電磁気学的手法による構造探査は、バルクとしての電気伝導度分布の推定を可能とするが、温度や場の状態、間隙良導物質に高感度である性質を有するため、前述のテーマの総合的な理解に資する情報をもたらすと考えられる。

1980 年代以降、国内外において二次元観測・解析が精力的に進められ目覚ましい成果が得られた。たとえば、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、それぞれの観測的研究により、対象とする領域の特徴的構造が明らかにされてきた。近年、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、加えて汎用的なインバージョンコードが開発されたことにより、三次元のイメージングへと拡張されつつある。この研究の方向性をさらに進展させ、他分野の成果と比較可能である精緻な構造推定を目指すべきである。

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る。地下構造の解明はポテンシャル評価の基礎情報となるが、都市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。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**

マグマの発生から噴火にいたるまでの一連のマグマの蓄積・移動と、付随して発生する

熱や物質の蓄積・移動に対して一定の制約を与えるために、マルチスケールでの三次元電気伝導度構造の解明を一層推進してゆくべきである。

この10年間に、いくつかの火山では、火山噴火、特に火山爆発の発生場の電気伝導度構造の理解が進んだ。浅部の良導体は低浸透率の熱水変質層であり、熱水系の構造を規定し、ひいては種々の火山活動にも影響を与えうる鍵層になっているとの解釈が広く行われた。火山噴火の多様性が生じる深さ2~3kmまでの浅部三次元電気伝導度構造の解明を一層推進し、水蒸気爆発やマグマ噴火など、同タイプの噴火を典型的に行う火山同士の構造の比較研究が必要である。その下方、深さ5~10kmには、マグマ溜りに関連すると考えられている地殻変動源が多く火山で推定されている。三次元構造解析が実用レベルに近づいてきたことにより、地磁気地電流法(Magnetotellurics: MT法)による深さ数kmから数10kmのマグマ溜りのイメージングが現実味を帯びてきた。電磁探査手法の原理的な分解能の問題から明確なマグマ溜りの描像は得られていないが、いくつかの火山ではマグマ溜りの存在が疑われる高電気伝導度領域も見つかっている。マグマ溜りの位置・サイズや内部の状態を特定できることは、物理モデルに基づく噴火の予測に大きく貢献することになるため、引き続き三次元構造解析技術の向上を進めるべきである。マグマ溜りの実体に迫るためには、適当なスケールの三次元電気伝導度構造の解明を行うとともに地震波速度構造や密度構造など他分野の成果との比較研究が必要である。活動度の異なる火山の比較構造研究も有効と思われる。これを推進してゆけば、カルデラ形成等の低頻度大規模噴火の発生場に対しても、想定される噴火のポテンシャル評価という観点から一定の寄与が期待できる。

#### **(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**

火山や内陸地震域のさらに深部を対象とした調査を実施する場合、これまで日本においては二次元探査が主流であったため、沈み込み帯から火山・内陸地震域に至る物質・熱輸送過程のモデル化の基礎となる大規模構造の把握は不十分であった。複雑な地形・地質からなる我が国では、地下深部の電気伝導度構造を明らかにするために、海陸分布や、地溝帯・沖積層の分布など、リージョナルな周辺構造をモデルに組み込むことが必要となる場合も多い。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ためには、沈み込む前のプレート、前弧域、背弧域も含めたイメージングが必要不可欠である。一方、沈み込むプレート運動によって発生する海溝型巨大地震の想定震源域を対象とした二次元構造解析においても、固着域と電磁気学的不均質構造の因果関係が指摘されつつある。これを面的な観測に基づく三次元イメージングへと進展させ、巨大地震発生域と不均質性の関係について一層の解明を目指すべきである。両者に共通して、海陸共同の観測研究、つまり海域での高密度の観測の実現と陸域データとの統合解析により、沈み込み帯を包括する広域三次元モデルを構築することが将来的な課題として挙げられる。これまで精力的に技術開発が行われてきた浅海を対象とした海底電磁気観測装置について、一層の改良を推進し、海陸データに対する統合解析において問題となる技術的な

困難を克服する手法の開発を行なう必要がある。

日本周辺のプレート沈み込みに伴う諸現象を理解するためには、他の海洋プレートの沈み込み帯や、大陸同士の衝突帯などとの比較研究の重要性は高い。北米西海岸、コスタリカ沖、ヒマラヤ、南米アンデス、ニュージーランド等で積極的に行われている調査との対比を行うとともに、積極的に共同研究を推進することが期待される。

## (2) マントル構造の解明

マントルの電気伝導度構造研究は、主要なテクトニックセッティング（拡散的プレート境界、収束的プレート境界、ホットスポット、および非テクトニックな安定大陸地塊や深海盆）で、様々な規模の MT 観測データに基づき行われている。そのいくつかは国際共同研究として実施されている。また、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を用い、セミ・グローバルからグローバルスケールのマントル遷移層・下部マントル構造研究が進展しつつある。

マントルの温度・化学組成等の環境に対して、電気伝導度が地震波速度構造とは独立かつ相補的情報を与えるとの認識が広まり、地震学との合同観測・共同研究が増加している。電気伝導度や地震波速度など、それぞれのイメージング結果をもとに温度・組成等の寄与を分離する手法が提案されている。

地震波速度構造などと比較を行う上では、電気伝導度構造推定における分解能・構造モデルの信頼性の向上と、それらの定量的評価が必要である。地震波速度構造と対比して電気伝導度構造の分解能は低い、手法の違いに起因する原理的な分解能の違いがあるにせよ、より高密度な観測によってその差を縮める余地は大きい。

海底拡大系の研究では、高速拡大する東太平洋海膨での観測により、従来の温度構造に依存したプレート成長のイメージが覆され、マントル中の水分布の重要性が認識されるようになった。中～低速拡大する中央海嶺での観測も複数行われ、類似の構造が得られる一方、地域ごとの多様性も明らかになりつつある。発散型プレート境界の電気伝導度構造モデルについては、今後これらの特徴を統合的に整理して一般化する必要がある。ホットスポットについては、本格的な三次元電気伝導度構造解析を目的とした観測研究がいくつかの現在活動的なホットスポット火山周辺海域において行われており、今後の研究の進展が期待される。これらはプルームテイルの構造研究であるが、プルームヘッドの構造を明らかにすることもプルームテクトニクス全体の理解の上では欠かせない。巨大海台や洪水玄武岩大地など、プルームヘッドのなごりと考えられている地域も将来の重要な観測ターゲットの一つである。

非テクトニックなフィールドとして、海域では北西太平洋の深海盆において大規模な観測が行われている。海洋底年代とリソスフェアの成長・アセノスフェアの実態については、未だ十分に解明されていない。全容の解明には北西太平洋のみでなく様々な年代の深海盆での観測データの蓄積が必要である。深海盆は、スラブやプルームの影響を受けていない

「普通」のマンテル遷移層を実体視する絶好の観測窓である。安定大陸地塊については、カナダ楕状地での研究が 20 世紀までは主流であったが、最近では南アフリカの Kaapvaal クラトン下の電気伝導度構造研究が大きく進展している。古い大陸下に見られるテクトスフェアについての電気伝導度の解釈は未だに混沌としているが、主要な決定要素は温度構造（熱伝導層の厚さ）であろう。異なるテクトスフェアでの比較研究で熱伝導層の厚さの違いが電気伝導度構造の違いに現れている命題の検証が進むことが期待される。

マンテル遷移層や下部マンテルの電気伝導度構造イメージングはこの数年でいくつかの研究例がでてきたが、なおチャレンジングな領域である。観測技術の面では、通常の MT 機動観測に用いる海底電位磁力計（OBEM）に加え、潜水船を使って電位差ケーブルを数 km にわたって海底に展開する地球電場観測装置（EFOS）が開発され、1 日を超える長周期の電場変動をより精度良く測定することが可能になりつつある。OBEM と EFOS を組み合わせたアレイ観測は、今後様々な海域での適用が期待されるが、EFOS は潜水船の援用が必須であるため、汎用化への努力が今後さらに必要である。解析面においては、1 万秒から 100 万秒の周期帯の電磁気信号を用いた電気伝導度構造の推定に克服すべき問題がある。この周期帯はマンテル遷移層に感度が高いと考えられるが、波長無限の一様ソースを仮定できる短周期帯から有限波長を考慮すべき長周期帯への遷移領域であるとともに、地磁気静穏日日変化（Sq）や潮汐による複雑な磁場変動も存在する。これらを分離する有効な解析手段や、複数のソースを同時に扱うモデリング手法の開発が望まれる。

### （3）構造推定に関する研究に共通する課題

近年、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、加えて汎用的なインバージョンコードが開発されたことにより、電気伝導度構造研究は三次元イメージングへと拡張しつつある。この研究の方向性をさらに進展させるためには、より安価で取り扱いの容易な観測装置の開発と量産、またその維持・運用体制を含む観測マネジメントの最適化が望まれる。将来的には、大量生産した観測器材を共同で管理し、各研究機関から観測計画を公募して戦略的に運用する等、データのアーカイブ化も含めた仕組みを構築することも一案であろう。

他方、得られる構造モデルの信頼性を向上する上では、地形や表層不均質による電磁場の歪み（distortion）効果を効率的にモデリングすることが重要である。電気伝導度異方性の導入は、マンテル鉱物の結晶配列や流体やメルトのつながり具合など、方向性のあるパラメータを議論に加えることができる。三次元構造や distortion、異方性を組み込んだモデリング・インバージョン法は、いくつか実用化されているものの十分に洗練されているとは言えず、手法開発は引き続き重要な研究課題である。他の物理観測データとの統合的解釈では、異なる物理観測データの解析結果をつきあわせて解釈するだけでなく、異なるデータを共通のパラメータに対して同時インバージョンする手法の開発などに今後の発展の余地がある。加えて、今後、扱うデータが巨大化することは必定であるため、計算機科学の分

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。

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。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機運が高まりつつある。このような要求を実現するためには、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だろう。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。

MT法に代表される電磁探査では、ノイズレベルの低い電磁場参照観測点の存在が構造推定精度を大きく向上させる。国土地理院等が設置したMT連続観測点が参照点として重大な役割を果たしているが、従前にも増して恒常的な電磁場参照観測点の需要の高まりが予想されることから、引き続き、良質な参照点の拡充を急ぐ必要がある。また、深部構造研究では、連続観測データの蓄積が不可欠であり、地磁気観測所や海底ケーブルを用いた電場観測などの定常観測網の維持が重要となることから、参照点も含めた長期的な維持・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、この分野の課題解決のためには、SGEPSS内において分野横断的な交流を積極的に推進すべきである。たとえば、機器開発の側面においては、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できれば、より確からしい三次元構造を推定することが可能となる。

#### (4) 岩石・鉱物実験

電磁気学的手法で捉えた地球内部の電気伝導度構造解釈のためには、高温・高圧実験による岩石・鉱物の物性データの精査が必要である。特に、地殻やマントル内において見出される低/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・鉱物の電気伝導データが必要不可欠である。

過去の実験データより、岩石・鉱物の電気伝導度の圧力依存性は小さい事が判明しているが、温度依存性は極めて大きいため、多様な温度条件における造岩鉱物の電気伝導度および種々の鉱物の組み合わせによる電気伝導度データベースの構築・充実が急務である。また、多結晶体である岩石の電気伝導度の理解には、例えば、鉱物間の電気伝導メカニズムの解明など様々なアプローチが必要となる。個々の鉱物のデータから推定される多結晶体の岩石と、天然の岩石そのものとのデータは未だに大きく乖離する状況が多い。鉱物間の微量元素・不純物の存在やその分布形態が非常に複雑であることに起因すると考えられるが、これらの不一致を説明する実験的・シミュレーション的アプローチが進められることが期待される。加えて、地殻の代表的鉱物に関してその多くが室内実験による電気伝導度測定がなされておらず、このようなデータの欠如を埋める研究が今後重要となる。

地殻内や沈み込み帯の構造イメージの解釈には、固体-流体系での電気物性データベースが必要とされている。近年、含水鉱物を対象としたその場観察が試行されているが、測定技術が未確立であるためデータベース化には至っていない。物理的に閉じた系で電気伝導度測定を行う技術開発が急務である。加えて今後は、単なる流体の電気伝導度測定を行うだけでなく、“イオン化”した高電気伝導度の流体が地殻内や沈み込み帯の近傍に存在する事をより明らかにする必要があるが、そのためには、岩石・鉱物の電気的な物性を分子動力学 (MD) などに基づくシミュレーションを利用することも考慮すべきである。

マントル深部を想定した岩石・鉱物実験は、下部マントル最上部までは川井型マルチアンビルセル (KMA)、下部マントル深部からコアにかけてはダイヤモンドアンビルセル (DAC) を用いて研究が進められてきた。電気伝導度は電子・ホール・ポーラロン・イオンの拡散過程であり、定常で扱うか非定常で扱うかという問題には議論がある。KMA と DAC では、数時間以上の比較的定常状態での測定値か、秒単位の非定常状態での測定値か、という測定条件に大きな違いがある。実際の観測では、時間スケールの長い現象を利用して構造が推定されるため、DAC による測定結果を KMA で相互にチェックすることが近い将来の課題であろう。

加えて、電気伝導度構造を解釈するために、室内実験によるミクロな物性情報と観測データから推定されるバルクとしての電磁氣的構造をつなげるスケーリング則を明らかにする必要がある。

## 2.6.2 地殻活動およびそれに伴う現象のモニタリング

### (1) 動的な現象に起因する電磁場変動

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って、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な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

地殻応力場の時間変化を正確に把握することは、地震発生機構の理解という基礎科学の側面からも、また地震災害軽減の社会的要請に応える実学的な観点からも重要な課題である。地殻応力場の時間変化は測地学的あるいは地震学的方法で推定するのが一般的であるが、どの方法も固有の短所を持つため、多数の手法の併用が望ましい。磁場観測は、その一手段となる可能性がある。

応力変化に伴う岩石磁気の変化、すなわち応力磁気効果とそのモデリングに関する研究の重要性は以前より指摘され、これまで多くの観測と研究が行われてきた。応力磁気効果



に起因する磁場変動を検出することが可能となれば、地震学的・測地学的手法とは独立な地殻内応力の変化を知る手段となり、大地震の発生を地震波が地表に到達する前に検出することも可能である。しかし現在までに、測地学的・地震学的方法とは独立に地殻応力時間変化を捉えることに成功した事例は極めて少ない。最大の問題は、応力磁気効果等に起因する地磁気時間変化が極めて小さく、それを地球深部および超高層大気で生じる地磁気時間変化と分離することが難しい点にある。

地殻活動起源の磁場変化を検出するために、その地域に特化した高精度の標準磁場モデルを用いる方法が考えられる。日本の場合、気象庁の地磁気観測所に加えて、国土地理院の連続観測点や大学・気象庁等による研究目的の連続観測点も存在し、精度の検証を行えば、利用できる観測情報を増やせる可能性がある。2000年以降、標準磁場モデルの構成法は大きく進歩しているが、地殻活動起源の地磁気変化と識別するためには、相対的に精度の高い標準磁場モデルを構成するだけでなく、その精度を正しく決定することが求められる。そのためには、基礎となるデータ時系列の精度を系統的に評価するとともに、モデル構成法に内在する誤差の伝搬を定式化することが必要である。また、地球の平常の磁場変動から地殻起源のシグナルのみを分離するために、地磁気時空間変化の特性を踏まえた時系列処理手法を開発することが必要である。標準的な磁場モデルを構築する過程で得られた知見を観測に対してフィードバックすることも重要である。たとえば、モデルの要求に対して観測精度が低い観測点の抽出・精度向上や、テクトニクス面で重要であるにもかかわらず観測点が不足しているために十分なデータが得られていない地域（西南日本など）へ観測点を新設することも並行して行う必要がある。

地殻活動起源の磁場変化を捉えるためのより直接的な方法は、観測態勢の量的・質的向上である。テストフィールドを戦略的に設定し、観測点密度を20km四方あたり1点程度に向上させるとともに、将来、新規に連続点が設置されれば、これまで見逃されてきた小さな事象も検出される可能性がある。日本では約40年前に国土地理院によって二等磁気測量が実施されており、その観測点密度は世界でも例を見ないほど高く、地殻起源の微小地磁気変化を検出するための基準ともなり得るものであった。しかしながら、以後同じ密度での観測は行われておらず、変化量の空間分布を求めるには至っていない。現在、地磁気空間分布およびその変化は衛星による観測データをもとに推定され、リソスフェアの構造推定等に利用されているものの、衛星高度での取得データを地表面に内挿することによる精度の議論は不十分である。二等磁気測量が再実施されれば、地殻起源地磁気変動の空間分布を正確に把握することにつながると期待できる。

地磁気の時間変動を正確かつ長期間にわたり測定することは地球電磁気学の基盤データとして重要であり、観測網の拡充が必要である。そのためには機器の特性や観測者の熟練度に依存しない絶対測定手法の確立が求められる。現在用いられているプロトン磁力計では、原理上スカラー量である全磁力しか計測できないので、任意の成分の連続的絶対測定を可能とする設計原理に基づいた新型磁力計の開発が望まれる。

応力変化に伴う岩石電磁気物性変化検出の応用として、より短い時間スケールを対象としたテーマには、地震発生時の即時検出が挙げられる。現在の緊急地震速報は揺れの検出によって行っているため、最も震源に近い地震計に地震波が到達するよりも速い警報は原理的に不可能である。一方、震源断層の破壊・滑りにともなう応力変化から生じる電磁場変動は光に近い速度で伝搬するため、その検出による警報は、タイミングの上では地震計記録を利用するシステムを上回る。電磁場変動検出による緊急地震速報の実用化のためには、まず、破壊直前の、および短周期応力変化を加えた場合の岩石電磁気物性を実験・理論の両面から調べることも必要となる。また、応力分布が時間変化する場合に応力磁気効果から生じる電磁場変動を適切にモデリングする手法を開発することが必要である。

地球システムが地殻活動による力学的エネルギーの一部を電磁気学的エネルギーに変換していることは十分に考えられる。これまでに行なわれてきた基礎的な岩石実験では、岩石試料の圧縮や破壊に伴う起電力や電磁波（可視光や赤外線含む）が確認されており、原因として石英のピエゾ電気効果・間隙水の界面動電効果・荷電格子欠陥の特異な挙動などが提案されているが、現実地殻の条件下でもこれらの原因による電磁気現象が発生しているかどうかの確証は得られていない。力学的・電磁気学的エネルギー変換モデルを真に解明するためには、温度圧力がダイナミックかつ不均一に変化する現実地殻を再現できる装置を用いて岩石実験を行うことにより、現実的に起こり得る電磁気現象を推定し、有効な計測方法を導入した精密観測による実地検証を行なっていくことが必要である。ただし、このような実験装置を構築するには単一の大学や研究機関では難しいため、複数の大学や研究機関、さらには海外の研究機関との大型共同プロジェクトを立ち上げて推進することが望ましい。

### **(イ) 火山活動に起因する現象**

電場・磁場観測は火山のモニタリング技術としてのポテンシャルが高く、火山国である我が国では実用性の高い応用分野である。特に、プロトン磁力計やオーバーハウザー磁力計を用いた反復磁気測量は火山監視の現業機動観測にも浸透しつつあり、主に山体内部の温度変化の指標として広く利用されるようになってきた。今後は、地下構造・地盤変動・放熱率等の情報と合わせて、変化源の実体解明に向けた研究の一層の進展が望まれる。空中磁気測量の反復による時間変化の検出技術も実用レベルに到達し、いくつかの火山で実証的な成果が得られている。今後は、自律飛行可能な無人ヘリコプター等をプラットフォームとした磁場観測技術の高度化をさらに進めるべきである。いくつかの火山（有珠山・草津白根山・伊豆大島・阿蘇山・九重山・雲仙岳・霧島山など）では、既に10年を超える定点観測データが得られており、噴火時のみならず非噴火時においても顕著な磁場変化が存在することが明らかになってきた。こうした長期的変化は、噴火の準備過程や終息過程における地下の温度・圧力の変化を反映している可能性があるが、未だ理解が不十分であ

る。今後は、既に手がかりの得られているこれらのフィールドでの観測を継続・発展させることで、噴火サイクルを通じた磁場変化の全容を明らかにし、比較研究を通じて共通性や相違点とその背景にあるメカニズムを解明していくべきである。そのためには、長期変動からグローバルな地磁気永年変化の影響を分離する必要がある。このための参照点としては、全磁力だけでは不十分で、基線付きの三成分連続観測点が重要な役割を果たす。地磁気三成分絶対測量の自動化技術の開発を含め、気象庁地磁気観測所や国土地理院等の現業機関の担っている地磁気観測業務は、国土の基盤的測量の一項目として、適正な時間空間密度を確保しながら維持・発展させていくことが望まれる。

火山では、応力磁気効果も考慮しなければならない磁場変化のメカニズムのひとつである。近年、粘弾性媒質の応力磁気効果の理論に進展があった。現在、我が国では火山での孔井観測が準基盤的インフラとして整備されつつあるが、電磁場が観測項目として採用されることは希である。傾斜や歪み等の地盤変動と電磁場観測を一体で測定することで、火山活動に伴う応力磁気効果の研究が実証的に進展するものと期待される。今後の整備計画に電場磁場観測が組み込まれるように関係機関に働きかけ、実績を積み上げていくことが必要である。

火山研究の現場では、頻繁に爆発を繰り返す火山を対象として、多項目の同時観測によって噴火の物理過程を解明しようとする研究が国内外で進められている。現状では、こうした観測は地震や傾斜等の力学観測に音波や熱映像などを加えたものが一般的であるが、電磁場はまだ手つかずの領域である。火道近傍における電磁場観測で、マグマの上昇や破砕に関連した新たな情報を引き出せる可能性もあり、今後取り組むべき課題のひとつといえる。火山噴火と大気・電離圏とのカップリングも注目されるようになっている。現在知られている現象として代表的なものは、爆発に伴って発生した大気振動を介した電離層電子数の変化であるが、火山雷と気象雷の比較研究から雷発生の素仮定を解明することも今後、取り組むべきテーマである。

周波数 0.1Hz~DC 帯の自然電位観測の成果は主に火山で報告されている。自然電位のゆっくりとした変動には、地下水の流動を反映したものがある。これらを界面動電現象として説明し、地下水の流動を組み入れたシミュレータの開発により火山や地熱地帯における地下水流動の詳細が解明されつつある。さらに自然電位の現象理解を進めるためには、界面動電現象を規定するパラメータの実測ならびに実験的測定をさらに充実させる必要がある。また、長期間の安定した自然電場を測定可能な電極の開発も必要である。

Merapi 山や三宅島では数秒から数分かけての火口下の膨張に伴う自然電位の変動が得られた。また三宅島では 2000 年噴火以降、10 年間かけて自然電位の正異常が横方向に 2km 拡大していると推定された。しかし両者とも自然電位単体での観測であったため、その解釈に不定性が高い。今後は低サンプリングでの自然電位単体の観測はできるだけ避け、磁場観測も併せた高サンプリングの観測に切り替え、電気伝導度構造の時間変化も併せて推定することが望ましい。

## **(2) 地殻活動に伴う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、適切な観測点配置および方法（人工もしくは自然信号源）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（四次元解析）、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**

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）は、三次元電気伝導度インバージョンコードの開発・公開により、適用範囲が広がっている。今後、モニタリングの観点からは、多点で稠密観測を行い、推定される電気伝導度構造の不確実性を減らしていくとともに、データ転送によりリアルタイムで構造解析を行うことが必要である。そのためには、高い時刻精度で1000Hz程度の高サンプリングデータを記録し、さらに無線LANや携帯電話通信網によりデータ転送できる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。

### **(イ) 人工信号源を利用したモニタリング**

人工電流を用いる手法は、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いるが、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のデータが安定的に得られるというメリットがある。今後、得られた観測データから三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共に、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でも、信号受信点で求められる機材スペックは自然信号を用いたMT法とほぼ共通であるが、それに加えてより安定した電流源の開発が必要となる。

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。精度の高い電気伝導度モニタリングを組み合わせて、地下水流動モニタリング手法の開発が望まれる。

### (3) 津波現象のリアルタイムモニタリング

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震は、我が国において未曾有の大規模災害をもたらした。その被害の大半は、巨大津波に起因するもので、今後の津波災害を減じるためには、津波発生時の即時モニタリングの手法・観測網の構築が非常に重要な課題となっている。

良導体である海水の地磁気下における運動は電磁場変動を誘導する事が知られており、近年発生した津波に伴う誘導電磁場の観測例も複数報告されるようになってきた。誘導電磁場は津波に伴う海水の運動によって発生することから、海底での電磁場観測は津波の伝搬方向をも検出可能とする新たな手段（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。実際に2011年東北地方太平洋沖地震においては水位変動に加えて津波の到来方向が検出できたことにより、津波波源の解明に貢献している。また、従来の水位計は津浪による水位変化と地動による影響の分離が困難であるのに対し、電位磁力計ではその分離が比較的容易である事も利点として挙げられる。陸上観測点においても津波に起因する誘導磁場は報告されており、例えば父島の地磁気観測点では2011年東北地方太平洋沖地震時に津波の到来よりも10分程度早く磁場変動が検出されている。この事から、電磁場観測は離島における津波到来の早期予測にも活用できる可能性がある。

推進すべき事項として、リアルタイム津波予測への活用を見越した技術開発と観測点の整備が挙げられる。そのためには、まず理論面での研究を進める事により、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の関係を定式化する事が必要である。それと同時に、電磁場変動や姿勢変化の検出精度の向上および電位磁力計の時間分解能向上などをハード面の改良を進める事も必須である。電磁気観測と水位変動の観測にはそれぞれ長所と短所があるため、同時運用による相補的な観測システムを構築することが重要となる。加えて、係留ブイまたは海底ケーブルによるオンライン化・長期間の運用を実現することが、リアルタイム津波観測の研究の進展につながるものと考えられる。海底での連続観測については、海底ケーブルの敷設や係留ブイの維持に莫大な費用がかかるため、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が現実的である。豊橋沖では既にこのような総合観測網が構築されつつある。今後巨大地震発生が懸念される東海・東南海・南海地域では、同様な観測網の充実が喫緊の課題である。

その他に、震源のごく近傍における電磁場データについて、さらなる検討が必要である。震源近傍では、地動による観測機器の姿勢や移動が磁場データに多大な影響を与える事が報告されている。それに対して電場データは、姿勢変化の影響が軽微であるため有用な情報を抽出し得るが、津波に起因する電場そのものの変動を検出した例は少ない。今後の観測データの蓄積により、津波の記録が電場によって検出可能かの検討が加えられることが望まれる。また、電離圏・磁気圏に起因する地磁気擾乱は、津波起因の電磁場変動の検出に対してノイズとなるため、その分離は今後の検討課題である。外部起源の電磁場は海水

によって減衰するため深海では影響が比較的小さいのに対し、陸上の観測点では影響が大きい。遠地の観測点のデータ等を用いた逐次補正などの手法開発が望まれる。

### 2.6.3 資源探査

#### (1) 陸上における資源探査

金属鉱床や地熱貯留層あるいは油田・ガス田などの地下資源の探査では、MT 法や TEM 法 (Transient Electromagnetic 法) などの地球電磁気学的手法 (電磁探査法) が 1970 年代の頃から使われている。電磁探査法のシステム開発は研究資金が豊富な資源探査の分野が中心となって行われてきたと言っても過言ではない。近年では発見が容易な地下資源の鉱床が少なくなり、地下深部や複雑な地質環境を対象とした調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が増えている。その状況に対応するように、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、詳細な電気伝導度構造の解析技術も進んでいる。最近では電磁探査法が火山や内陸地震域の調査に利用されることが増えているが、その一因として資源探査で開発された技術の導入が進んだことがあげられる。地下資源へのニーズがある限り、資源探査技術の開発は行われるので、この傾向は今後も進むと考えられる。

資源探査で利用される電磁探査法において、最近 10 年で著しく技術が発展した手法として、空中電磁法があげられる。この手法は 1990 年代までは、飛行機 (固定翼機) を用いた時間領域電磁法とヘリコプターを用いたバード方式の周波数領域電磁法が主流であった。前者は大まかな電気伝導度分布をマッピングする概査として、後者は深度 50~100m 程度までの浅部探査として利用されてきた。2000 年代に入るとヘリコプターを用いた時間領域電磁法が実用化され、広い範囲の比較的深部まで電磁気構造を詳細に求めることが可能となった。最大探査深度は現在のところ 500m にも達しており、海外では金属鉱床探査をはじめとして、石油やウランなどの探査にも利用されている。大深度を対象としたシステムは直径 10~20m のループをつるして飛行するため、国内で使用できるかはいまだ不透明であるが、資源探査に導入しようという計画が検討されている。本システムが導入されれば、火山の浅部構造の解明や噴火予知研究などに役立つと考えられる。

火山国である我が国では、国が主導して熱水性金属鉱床や地熱資源の探査が行われてきた。調査地域は限られた場所ではあるが、火山周辺では地下の電気伝導度構造に関して多くのデータが取得されている。1990 年代の後半から国内での探査は減っていたが、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、最近では地熱調査で電磁気探査が行われることも増えつつある。残念ながら、産業界と大学などの研究機関との連携が十分ではないことから、資源探査で取得されたデータが十分に有効活用されていないのが現状である。逆に大学などが実施した電磁気探査の成果も資源探査に利用されることは少なく、地熱探査などでは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。資源探査では政治的あるいは経済的な制約があ

ることは否めないが、国の予算や技術者の数も限られており、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電磁気構造の解明が行われることが望まれている。

## (2) 海底における資源探査

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。しかし2000年以降、海外では延べ100台スケールのOBEMを展開した観測が実現しつつある。一方、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海底電位磁力計(OEEM)の開発研究が継続的に行われ、漁船などの小型船舶へと運用範囲が広がり、観測点数が飛躍的に増大しつつある。海底資源探査に特化すると、数km深度までの詳細な構造イメージングが必要となるため、人工電流源を海底付近に曳航・設置する人工電流源電磁探査(CSEM探査)や曳航式電気探査の需要が高まっている。石油・天然ガス資源やメタンハイドレートなどの炭化水素探査が目的とされることが多い。国内でも曳航式電気探査装置を用いて、メタンハイドレートの検出に成功しているが、より一層の高度化が必要である。

近年では、海底熱水鉱床の探査と構造解明を目的とした磁気観測の応用に期待が高まっており、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である。磁気探査が海底熱水鉱床探査の有力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。熱水プルームの検出には海水温度・濁度等の測定が有効であるのに対し、磁気シグナルの利点は、熱水活動が停止した後であっても検出し得ること、また音響写真や目視観測では得られない海底下の情報を持っていることなどにある。これまでに発見された日本近海の海底熱水鉱床は、伊豆・小笠原島弧または沖縄トラフに点在している。プレート沈み込みに伴う島弧や背弧における火山活動は中央海嶺に比べてはるかに複雑であり、その中にある熱水域の構造を解明することは難題である。加えてカルデラや凹地といった険しい地形の中に存在するものが多いため、観測面の困難もある。磁気探査以外にも、電気探査・CSEM法・TEM法などへの期待が高く、国内の大学や研究機関など継続した研究が進められるべきである。今後、排他的経済水域(EEZ)内に多くの熱水域、すなわち有力な海底熱水鉱床ポテンシャルを持っている日本が先行する研究分野となれるはずである。

### 2.6.4 リモートセンシングの新展開

小型無人飛行体を利用した電磁場観測は、地形的制約・危機不可避等で到達することが困難な場面、あるいは、低高度かつ空間的に稠密な測定が求められる場面これまで実施されてきた。技術的な進展としては、あらかじめ入力した飛行経路を高い位置精度で飛行できる無人機を使用することにより、同一地点・測線での繰り返し測定を比較的容易に行

なうことが可能になった。低高度・広範囲な測定例としては、極域において、航続距離 200 km以上の長距離空中磁気測量が無人航空機により達成されている。稠密な測定例としては、活火山地域において、測線間隔 100m 程度の繰り返し空中磁気測量が無人ヘリコプターを用いて実施されている。無人機を用いた測定は磁気測量だけにとどまらず、地上に設置したコントロールソースによる電磁探査においても利用されている。たとえば、比較的大型の無人ヘリコプターに磁力計を搭載し、空間的に稠密に大地の電磁応答データを測定する空中電磁探査が行われた例もあり、観測作業における無人飛行体の利用用途・価値が広がりつつある。

海底観測においては、Remotely Operated Vehicle (ROV) のような水中無人探査機の開発進展が目覚しく、今では海底観測において欠かせないツールとなっている。浮力を稼げるため、種々の観測機器の搭載や設置・回収ができるのは水中観測におけるメリットであり、今後の観測研究へのより一層の活用が望まれる。今後、無人飛行体も測定機器を搭載・曳航することに加え、目的場所への機器設置・回収等の作業を行えるまでに高度化されることが望ましい。それにより、例えば、活火山等の危険地域における陸上観測等の活用が考えられ、従来得られなかった火口近傍での観測データから、より詳細な火山噴火の状況を測定・解析できるようになる。ただし、我が国の法制上、大型無人飛行体を開発することが困難な状況にあり、搭載できる観測機器の重量も限られてしまう。従って、上記のような目標を達成するためには、無人飛行体そのものの性能を高めることに加え、種々の観測機器の超小型化・高精度化が求められる。今後は空中磁気探査に加え空中電磁探査への応用が一層増加するであろうことを考慮すると、機器を曳航・測定するという観点では、現在主流の全磁力測定だけでなく、磁場 3 成分の観測が必須になる。そのためには、小型の 3 成分磁力計に加え、高精度の小型方位計も搭載する必要がある。また、測定機器を人の代わりに遠隔設置・回収するという観点では、測定機器そのものの小型化はもちろん、バッテリー等電力源の高エネルギー密度化や省電力化が必要になる。一方で、無人飛行体そのものは最近超小型化に進む傾向にあるが、上述のように、ある程度の重量の測定機器を搭載し、位置精度よく飛行するためには、現状程度の大きさが要求され、開発側との調整が必要であろう。



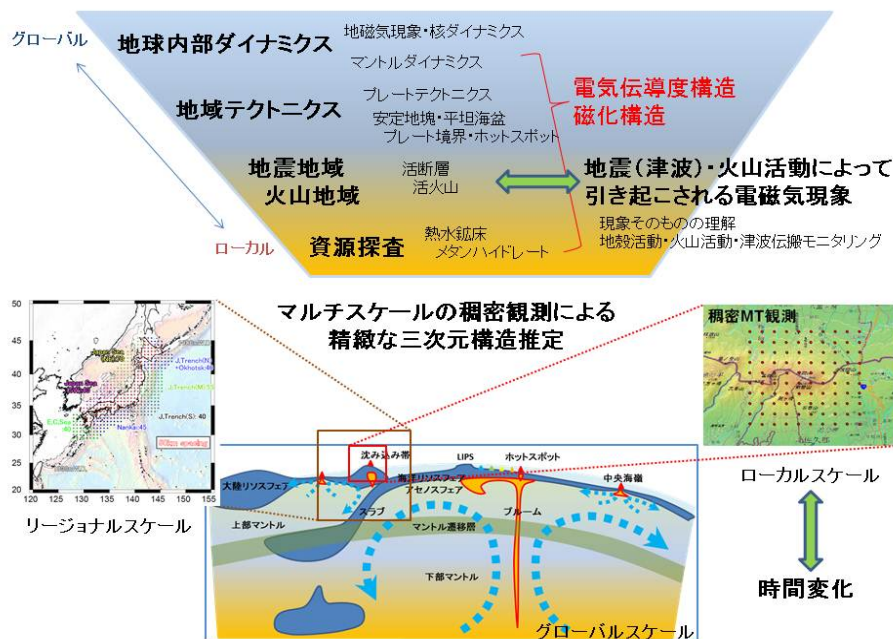


図 2.6 地球内部の状態を目指したマルチスケールモデリングと変動現象の理解のためのモニタリング研究

## 2.7 岩石・堆積物が担う磁化の物理の解明とその応用

近代測器による磁場測定が及ばない長い時間スケールでの地球磁場の変動を得ることが、地球電磁気学、なかでも古地磁気学の基本的な課題である。そして、古地磁気学は、岩石や堆積物などの地質試料中に含まれる強磁性鉱物が担っている残留磁化の測定に全面的に依拠している。残留磁化が地球磁場の単なるプロキシ（代理指標）ではなく、理論と実験から再現性をもつ記録であることを保証するのが岩石磁気学である。地質試料から信頼ある古地磁気記録を読み取るためには、その基礎として岩石磁気学の理論的・実験的研究が重要であり、その発展と共に、様々な応用分野への広がりを見せている。

### 2.7.1 岩石磁気学—理論的・実験的研究

実験室で合成した強磁性鉱物を用いて、磁氣的性質が組成や粒径によってどのように変化するかを明らかにすることが岩石磁気学の主流である時代が数十年続いた。「岩石」を扱わないのが岩石磁気学と呼ばれた所以である。最近の 10 年間は、測定されたマクロな磁氣的性質をミクロな磁区構造にリンクさせて理解する研究が進んだ。マイクロ磁気モデリングと off-axis 電子ホログラフィや磁気力顕微鏡による観察がその両輪である。磁氣的性質の粒径依存性の原因は、磁区構造が単磁区から渦構造を経て多磁区へと変化することであると明らかにされたことは大きな進歩である。

古地磁気学者にとっては、「岩石磁気学」は基礎的な研究より、自然残留磁化以外の磁気測定の意味で使われることが多い。岩石や堆積物中の強磁性鉱物の組成や粒径に一定の制約を与えて磁気記録に正当性を付与するためである。最近の10年では、単に一つの指標で代表させるだけでなく、等温残留磁化や reversal curve の分解から組成や粒径の分布を論じるようになったことが大きな変化である。

しかしながら、自然の岩石と堆積物が含む強磁性鉱物は多様である。1つの試料片の中でさえ組成と粒径に分布をもつ強磁性鉱物が複数種混合され、しかも消磁や着磁の過程で変化する可能性がある。合成試料のデータは基礎的な情報を与えてくれるが、岩石や堆積物にそのまま適用できるわけではない。光学顕微鏡で見ることができる強磁性鉱物は、残留磁化にほとんど寄与しない。ケイ酸塩や炭酸塩鉱物からなるブラックボックスの中に潜むわずかな強磁性鉱物を、高感度の装置を用いて様々な工夫された磁気測定で検知して、巧妙にデータ処理を行い、原理や合成試料のデータと照らし合わせて解釈していくことが必要である。

磁気測定によって得られるデータから磁性鉱物の組成や粒径の分布を推定するためには、岩石磁気学の原理に基づくモデリング計算が必要である。実際の天然地質試料には、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。計算におけるセルサイズは、原子の電子スピンに対応する程度となるので、10  $\text{\AA}$  程度が必要となる。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。

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。しかし、この方面での岩石磁気学の貢献は少なく、磁性を利用した定量的アプローチの余地は大きい。たとえば、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ン酸化物の磁性の重要性が認識されつつある。微細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る。ナノスケールでの磁性鉱物の構造・物性などを分析・観察可能な技術（スピン走査型電子顕微鏡など）は、すでに日本にも存在しており、これらの技術を活用していくことが望まれる。また、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。

古地磁気学においては、近年、過去の地球磁場の方向だけでなく強度を得ることが中心課題となっている。古地球磁場強度を得るためには消磁と着磁を行う必要があり、その過程で組成や磁区構造が変化しては強度を得ることはできない。方向を得るための消磁では単に残留磁化を壊していけばよく、消磁中に組成や磁区構造が変化しても古地磁気方向の記録が影響を被ることは稀であったことを考えると、いかに試料の選択と測定結果の解釈において、一層高度な岩石磁気学の知見と方法が必要になってきているかは明らかである。

実際、火山岩（溶岩）試料からの古地磁気強度測定は、様々な手法が1960年代後半から適用されてきているが、未だにそれらの信頼性については議論が続いている。たとえば「テ

リエ法」が最も信頼度が高いとされてきたが、特に 2000 年代初頭から手法の信頼性に疑問符が付くようになった。これまでにデータベースとして整備されてきた古地磁気強度絶対値の報告のなかには、数十パーセントの過大見積もりをしているデータが少なからず存在し、地磁気強度絶対値変動を誤って理解している可能性がある。測定手法の信頼性の検討と、新たな測定法の開発およびその適用による既報告データのチェックが必要である。日本の研究グループは、綱川—ショー法（低温消磁二回加熱ショー法）の開発およびその適用の取り組みを進めている。

## 2.7.2 岩石磁気学の応用

### (1) 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、さらにそれらに関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、古地磁気・岩石磁気学のなかで重要な位置を占めるようになってきている。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、モンスーンの変動等に関する成果が得られている。今後、これらの研究をさらに発展させるためには、統合国際深海掘削計画 (IODP) や国際陸上科学掘削計画 (ICDP: International Continental Scientific Drilling Program) への積極的な関与、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。たとえば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、中国・韓国・台湾など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。

環境磁気学の発展のためには、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、ここ数年で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（グレイサイト）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ろう。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。

## （２）テクトニクス研究

プレートテクトニクス理論は海洋底の研究から生まれた。そして現在もなお、統合国際深海掘削計画（IODP）などプロジェクトの規模からみても、災害科学などの社会的要請の側面からみても、海洋底は重要な研究対象として認識されている。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進化の時系列を網羅できないため、より深く地球のダイナミクスを理解するために、また、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、プレートテクトニクスの理論に必ずしもあてはまらない、変形することが可能な領域であることが認識されてきた。この変形は地域ごと、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全容が解明されるため、その研究は必然的に困難なものとなる。そのような研究にとって魅力ある地域へは、アクセスすることすら困難な地域も多く存在することもまた、研究を困難なものとしている。

インド大陸とアジア大陸間の衝突現象は、現在のアジア大陸東部におけるモンスーン気候の誕生と発達、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る。世界で最も新しい巨大大陸であるアジア大陸には、地球それ自身と生命圏の発達についての未知の規則性、法則性が数多く残されていることが期待される。今後は、特に、中生代から新生代にかけて、アジア大陸で生じた大陸間の衝突によるアジア大陸東

部の変形現象を、古地磁気学および地質学の観点から明らかにすることが強く望まれる。

他分野との連携という観点では、地質学分野において、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大きく貢献すると考えられる。たとえば、IODPにおける掘削船「ちきゅう」を用いた沈み込み境界掘削研究（南海トラフ地震発生帯掘削（NanTroSEIZE）、東北地方太平洋沖地震調査掘削（JFAST））が現在行われているが、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（磁化率異方性解析など）が大きく貢献する可能性がある。また、内陸活断層の活動履歴の研究においても同様の貢献が期待される。

### （3）海洋底電磁気・磁気異常研究

1950年代に発見された海洋地磁気縞模様は、海底拡大と地磁気反転の強力な証拠としてプレートテクトニクス理論の確立に大きく貢献した。その後の急速な地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極めて重要な手がかりを与えることとなった。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、海上観測に比べてはるかに解像度の高いデータが得られるようになった。海底の近くで測定するほど、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からである。短波長成分には、海洋地殻、古地磁気に関する、高空間・時間分解能の情報が含まれていると考えられる。この結果、磁気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、より詳細な磁気異常の研究が行われるようになった。そこでは、海洋性地殻の磁化構造の問題やその応用としての海底熱水鉱床による磁化構造、さらに既知の地磁気反転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、観測データの分解能を更に上げることが必要である。

深海で得られた地磁気異常からは、海底の地質により良く対応した、詳細な海洋地殻の磁化強度分布を得ることができる。また深度を変えた深海観測、海上観測、人工衛星による異なる高度からの地磁気観測と合わせて、海洋地殻形成過程、変質過程の情報を持った海洋地殻の鉛直方向変化も含めた磁化構造を調べることができる。海洋性地殻の磁化構造については、中央海嶺をテーマとした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事実を明らかにしてきた。例えば低速拡大海嶺においては、磁化の主要な担い手とされる海洋地殻最上部の噴出岩層（extrusive layer）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、深海掘削による岩石磁気と組み合わせた研究が望まれる。特にオフィ

オライトや「ちきゅう」による深部掘削試料の研究は、地球の海洋地殻のみならず、月・惑星の磁気異常を担う地球外天体内部岩石の磁性鉱物の解明のためにも、重要度を高めるのではないと思われる。

古地磁気変動の連続的な記録としては深海堆積物の堆積残留磁化が用いられているが、火山岩による絶対古地磁気強度変化の情報を得ることも重要である。このためには、時系列がはっきりとした連続的な火山活動により形成された火山岩による研究が望まれるが、陸上での火山岩では連続性が限定される。一方、海洋地殻は過去 2 億年の地球磁場の連続記録媒体である。海洋底の玄武岩は普遍的に低温酸化を受け、初生の熱残留磁化が失われていることが多いという問題はあるが、連続性という面では魅力的な測定対象である。中央海嶺においては実際に、深海堆積物の磁化から得られた古地磁気強度変動と深海地磁気異常と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の記録が得られたなら、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情報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ーン時の地磁気変動の解明については、陸上火山岩のみからのアプローチでは限界があるため、有力な情報源として期待される。

深海の地磁気測定は、磁力計を深海曳航する、または潜水船、無人探査機 (ROV)、自律型無人潜水機 (AUV: Autonomous Underwater Vehicle)、サイドスキャンソナーなどの曳航体に磁力計を取り付けて行う。しかしながら、観測の非効率さから、深海地磁気測定は十分には行われていないのが現状である。今後は AUV を活用して、より効率的に地磁気測定を行い、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、より良い解析法の検討が肝要である。また今後の進展のためには、海洋底の玄武岩の試料採取を系統的に行うことが可能な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。

#### **(4) 考古学・防災科学への応用 -被熱遺構探査、地震発生過程、古地震**

岩石や土壌中の磁性鉱物が被熱により別種の鉱物に変化するのを磁性測定によって検出することで、それらの被熱の有無を判定でき、たとえば古代人の火の使用の有無に関する情報を得ることができる。火の使用開始がいつかを知ることは、人類が文明を持ち始めたのはいつかという問題を明らかにすることにつながり、極めて重要である。また、遺構内のどこで火が使用されたのかを決めることは古代人の生活様式を復元する意味においても重要である。これまでかなりのケーススタディが行われ、多くの成果を出しているが、岩

石や土壌の種類によって発現する磁性変化は異なっているので、更なる研究が必要である。こういった岩石磁気学的な被熱遺構探査研究は、帯磁率計や磁力計による磁気探査による方法と共に考古学、特に旧石器考古学の進展に大きく寄与できるだろう。

地震発生過程の物理を解明するための断層掘削研究では、応力・歪の推定のため、採取された岩石試料の磁化率異方性が、その他の物理特性（地震波速度・電気伝導度等）の異方性ととも利用されてきた。また、断層岩の磁性鉱物の変化や古地磁気方位を利用した地震時の温度上昇の見積もり、断層活動時期の推定の試みも行われており、岩石磁気学の新たな応用として手法開発を進めていく必要がある。近年の断層掘削の多く（たとえば、台湾チェルンプ断層掘削（TCDP）、サンアンドレアス断層掘削（SAFOD）、南海トラフ地震発生帯掘削（NanTroSEIZE）、コスタリカ地震発生帯掘削（CRISP）、東北地方太平洋沖地震調査掘削（JFAST））はICDP・IODPの枠組みを利用しており、今後も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。

過去に起こった海溝型巨大地震の頻度や規模を解明するため、津波堆積物についての研究が行なわれているが、通常の堆積学的手法では泥質堆積物において津波の影響を評価することは容易ではない。泥質の津波堆積物を認定するために、磁性粒子をトレーサーとして用いる手法を検証することが望まれる。また、環太平洋沿岸に普遍的に分布する津波起源の巨礫や津波堆積物を、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の規模・時期を決定する試みに取り組む。これらにより、国際的な防災科学と地域の減災に貢献してゆく。

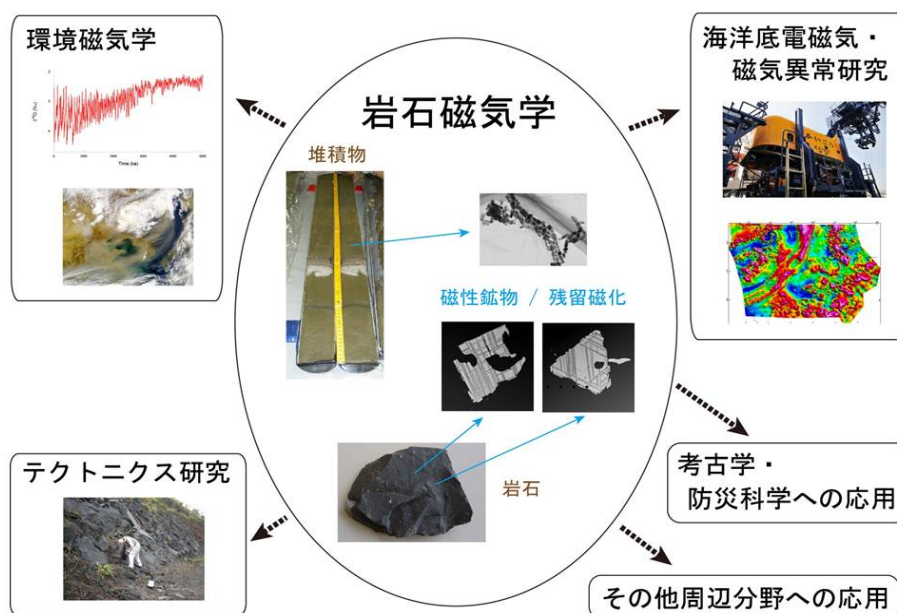


図 2.7 岩石磁気学とその周辺分野への広がり



## 2.8 太陽地球系と地球内部を結ぶ科学課題

これまで見てきたように、当学会は地球深部から太陽系にわたる広大な空間を研究対象とし、用いる手段も電磁気学・プラズマ物理・岩石物性・流体力学・化学など多岐にわたる。各分野の専門性が深まる中で、当学会の普段の活動では、地球外部を研究対象とするグループ（太陽地球系）と地球内部を研究対象とするグループ（固体地球系）に緩やかに分かれていることが多い。

しかし、科学の知見が蓄えられ、技術が発展するにつれて、研究のフロンティアに位置する現象の解明には学際的な知識が求められるようになってきている。かねてより行われていた、多分野で協力して大掛かりな装置を開発したり、同一データを多方面から調べたりといった例に加えて、今後は、共同作業で一つの現象を解明する研究も進められるであろう。

本節では、将来に向けて推進されるべき当学会ならではの分野横断的な研究課題を取り上げる。具体的には、地磁気急変現象に伴う日本での地中誘導電流の解明、地圏を含むグローバルサーキットモデルの再構築、人工衛星で観測した地磁気変動から解明できる現象、地震に伴う電磁気変動の理解、の4課題である。前の2課題は多分野協力によって解明できる現象の例、後の2課題は多分野の研究者が結集することによって実現できる観測や全体的な描像が得られる例である。

### 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

1989年3月13日に発生した地磁気急変現象に伴って地中に誘導された電流（GIC: Geomagnetically induced current）によって、カナダ・ケベック州の送電線網の変電所トランスに許容限度を越す電流が流れ、600万人に影響する停電事故が起きたことは有名である。この事故を契機にオーロラ帯などの高緯度ではGIC研究や社会インフラに対する影響の調査が進んだが、地磁気緯度が低い日本は安全であろうと考えられ詳細な研究は行われてこなかった。

しかしながら、歴史的にみると1859年9月1-2日に発生したキャリントン磁気嵐のように、地磁気急変現象にも数百年に1度の規模の巨大なものがあり、そのような極端な現象時に日本国内においてどれほどの誘導電流が流れるかは自明ではない。折しも、太陽類似星の観測から800年～5000年に一度の超巨大フレア（スーパーフレア）の発生が示され、太陽の超巨大フレアが引き起こす超巨大な地

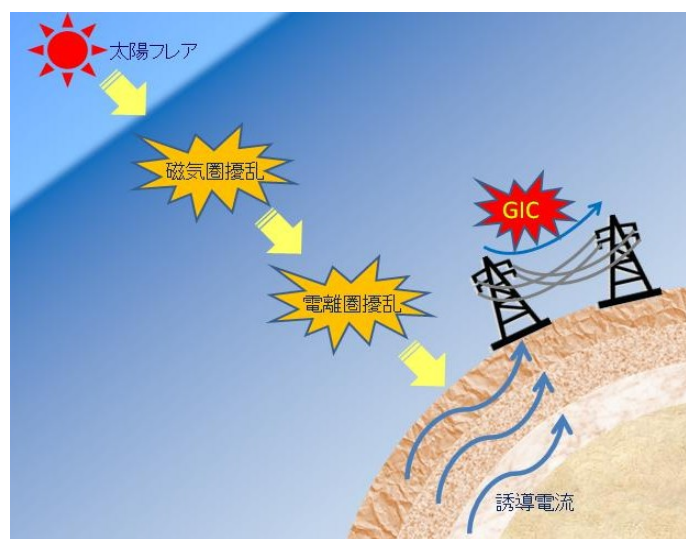


図 2.8.1 地磁気急変現象による地中誘導電流（GIC）



磁気急変現象を想定することも、1000年に1度程度の発生頻度とはいえ、考えられるようになった。

以上の状況から、巨大地磁気急変現象によって日本で誘起されうるGICの推定は、当学会において将来的に推進されるべき課題である。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の創出につながる。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や電離圏の擾乱を見積もり、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。

これまで、GICの研究は宇宙天気分野の磁気圏電離圏研究にとどまってきた。また、地殻・マントルの電気伝導度構造の研究も、他分野から利用しやすい形に整理されてはこなかった。分野横断型の巨大GICの研究の結果、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）と電離圏が成すコンデンサーを基本構造とするグローバルサーキット仮説は1920年代にC.T.R. Wilsonによって提案された。この回路において充電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。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。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、最近では衛星による雲観測等に基づいて、対流圏の発電装置である雷雲活動については、その分野や強度の時間変動について、よりリアルな入力情報が使われるようになっている。

しかしながら、回路の上部である電離圏・磁気圏と下部の地圏については、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バリエーションが存在する。

雷放電活動の変動には、季節変動や 1 日変動などの比較的ゆっくりした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。

こうした大気圏および電離圏・磁気圏の発電機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。どこの、どういった時間スケールの電磁場変動が、地圏の構造と関わって、グローバルサーキットを変調するのか、あるいはしないのかさえ、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る。太陽地球分野と固体地球分野の研究者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 (Magsat、Orsted、CHAMP 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、地球外核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 3 次元電流構造の研究

磁気圏と電離圏との相互作用を担う沿磁力線電流は、磁気圏のプラズマの動きを電離圏に伝えたり、磁気圏からのエネルギーを電離圏に伝え、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す。また、中緯度電離圏の南北両半球間の結合過程においても沿磁力線電流が関係していると考えられる。沿磁力線電流は地上磁場にも影響を及ぼすが、地上磁場観測からは沿磁力線電流の効果と電離圏電流の効果との識別が難しい。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、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り、また、region-1、region-2 と呼ばれる 2 層構造など、極域沿磁力線電流の大域的な空間構造も、衛星磁場観測によって得られた描像である。

衛星磁場から電流を調べる際には、観測される磁場の変化を衛星の軌道に沿った微分と仮定するため、単一衛星のデータでは、衛星軌道に垂直な方向の微分や電流の時間変化が考慮されないという問題があった。しかし今後は、SWARM 衛星群による編隊観測など、複数衛星による観測が実現することにより、電流密度が精度よく求まる他、時間変化と空間変化との識別もある程度可能になると期待される。さらに、衛星磁場観測データは、地上観測網の磁場データと組み合わせることで、磁気圏・電離圏電流系の 3 次元的な空間構造や、さらに時間軸を加えた、4 次元的電流構造の解明にも役立てられる可能性がある。

## (2) 電離圏

2.2 節、3 章に述べたように、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、(v) 海流、の5つが挙げられる。(i)、(iv) は衛星によるその場観測が有効な例、(ii)、(iii) は高精度観測であることからプラズマ構造の磁氣的性質を捉えることが出来る例である。(v) も高精度観測が活かされた例で、地球磁場中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を観測することができる。

## (3) 地球外核起源の主磁場の研究とその活用

2.5節にも述べたように、過去約10年間は従来の地上磁場観測網に加えて低軌道地球周回衛星による磁場データが得られたため、地球外核起源の主磁場の時空間分解能が飛躍的に向上し、周期1年以下の変動や局所的な変動の存在が明らかになった。その結果、主磁場のグローバルモデルが飛躍的に進歩し、スナップショットでは球関数にして数十次、地上磁場観測と組み合わせた永年変化部分でも十数次の分解能を持つものや、加速度情報を持つものなどが複数作成された。現在は外核の流体場の情報を取り入れたモデルが模索されている。

これらの知見は国際標準磁場 (IGRF) モデルにも反映され、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。

## (4) 今後に向けて

主磁場の現在の変動を調べる研究の進歩は、衛星による磁場観測により地上磁場観測が疎な地域の観測値が得られたことだけでなく、地殻磁化分布の空間解像度が大幅に向上し、

電離圏・磁気圏電流系についても知見が得られ、磁場観測データから主磁場を見積もる精度が上がったためでもある。このように、衛星磁場データを用いた研究では、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を生んでいる。今後、マントルの電気伝導度の3次元分布の効果が詳細に計算できるようになると、電離圏・磁気圏電流系に含まれる地球内部に誘導された成分の見積もりにも影響を与える可能性があり、太陽地球系と固体地球系グループの結びつきがさらに深まっていくことも考えられる。

衛星によるその場観測のデータは磁気圏・電離圏の諸現象を直接観測できる唯一の手段であるし、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おり観測の継続性が特に有効な分野である。今後の発展のため、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、地上の多点磁場観測と組み合わせて解析をしていく必要がある。

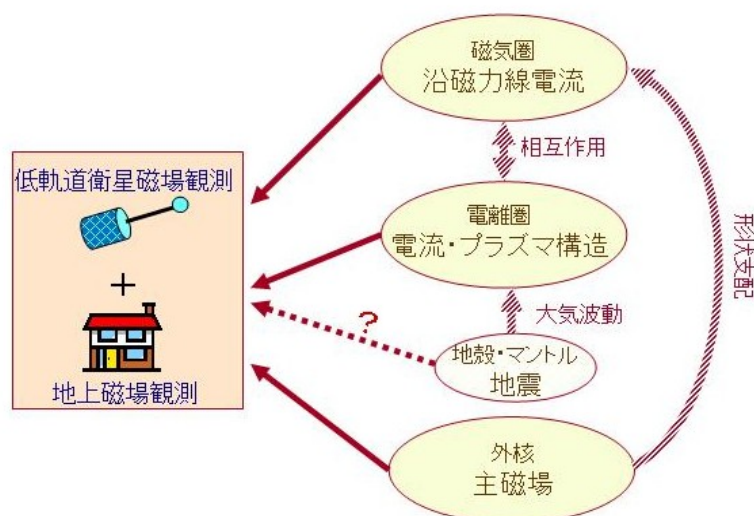


図 2.8.2 地上と衛星による地磁気観測が扱う科学課題

#### 2.8.4 地震に伴う変動の理解

地震に関連して、当学会でも地中、地表、大気圏、電離圏で様々な変化が調べられてきた。地震という社会的関心が高い主題であることを反映し、減災を意識した研究に大きな発展があった。

近年、計測機器が高感度化し、高速サンプリングによるデータ取得が容易になったことから、震源近傍で電磁気的な低ノイズ環境が実現できれば、断層破壊時の応力変化によるピエゾ磁気変化が測定できる見通しがでてきた。ピエゾ磁気変化の存在は古くから予想されていたが、2008年岩手・宮城内陸地震で初めて観測の報告があった。同様に、地震波の伝播に伴う電磁変動が測定されることも報告されている。いずれも電磁気的な変化が光速に近い速度で伝わることから地震波が測定点に到着する前に変化を検知でき、地震波検知による緊急地震速報のさらなる速報化に貢献する可能性もある。

過去10年で大きく理解が進んだのは、地震に伴う大気圏、電離圏の変化であろう。大地

震・大津波の発生は地表面・海面の大きな位置変化をもたらす場合があり、大気圏のみならず電離圏に音波および重力波としてその影響が伝搬する。大気圏においては地表面において微気圧計・磁力計の変化が検知されており、電離圏ではプラズマも同時に変化することから多種多様な計測方法で検知されている。特に GPS を用いた総電子数観測は、GPS 受信点が国内のみならず諸外国でも年々増加していることを受け、空間的な変化がより明瞭になってきた。米国が運用する GPS 以外にも、GNSS と総称される測位衛星は諸外国で独自衛星として年々増加しており、より詳細な電離圏プラズマの時空間分布が得られると予想され、さらなる研究の進展が期待される。

地震学では現在極めて困難とされている短期地震予知は、予測に必要とされる先行現象が現在のところ報告されている範囲では明瞭とはいえず、今後長いスパンで研究を推進する必要があるだろう。しばしば報告されている、地震に先行して地表で測定される電磁気的変化や大気圏・電離圏変動などは、今後も統計的な相関および物理的機構を示していくことが重要課題である。地表で

観測される現象には観測領域・観測頻度の制限があり、統計的な評価の実現は容易ではないが、衛星による広範囲な観測と組み合わせるなどの工夫ができる。また、地震起源と非地震起源の変化を識別するためには多種目の観測項目による包括的理解が必要であり、そのためにも地上観測と連携した衛星群による時空間的観測が有効である。

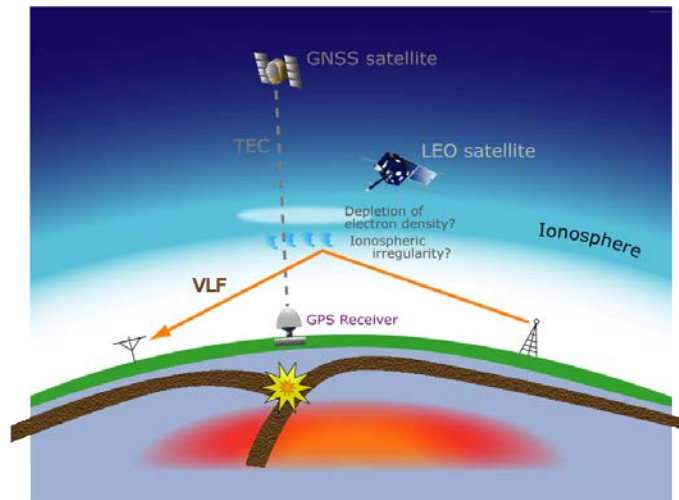


図 2.8.3 地震現象が結ぶ地球内部と電離圏

### 3 人類活動を支える知識基盤の構築

2章で議論したように我が学会は、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おこなってきた。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、我が国はこれまで、地震・津波や火山噴火による多大な災害を経験してきた。日本列島はプレートの沈み込み帯縁辺部というテクトニックに非常に活発な領域に位置するため、地震・津波や火山噴火による社会基盤への影響と向かい合う必要がある。そして、いまや人類の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爆リスク低減も避けて通れない大きな問題となっている。このような人類および社会基盤の発展、および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人類活動を支える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理し、宇宙工学の発展、自然災害・宇宙災害のリスク軽減等をつう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行くであろう。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、現状と将来への提言について報告する。

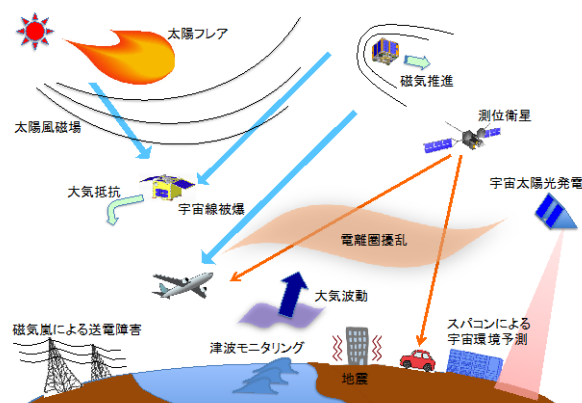


図 3.1 太陽地球圏と人間活動とのかかわり

## 3.1 背景となるサイエンス

### 3.1.1 宇宙天気

太陽風：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、すなわち、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 km/sec) が吹き出し、コロナホールに隣接した活動領域の端から低速太陽風 (<400 km/sec) が吹き出していることが明らかにされている。太陽風の速度分布は二様態であり、400-700 km/sec の中間速度帯は非常に狭い領域にしか存在していないことがわかってきているが、その理由はまだ明らかにされていない。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領域 (CIR) と呼ばれている。地球に到達した太陽風は、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 (IMF: Interplanetary Magnetic Field) 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「オーロラ嵐」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。CIR は地球磁気圏接触することにより「回帰性の磁気嵐」を引き起こすことが知られている。また、IMF 強度の変動は、太陽系外から飛来する銀河宇宙線の量を変化させる。IMF は太陽フレアなどの突発的な短期現象に加え、太陽自転周期 (約 27 日) や 11 年周期でも変動を示すため、銀河宇宙線もそれに同期して変動する。

太陽面爆発現象：太陽面爆発現象 (フレア) は磁力線のひずみとして蓄積された磁場エネルギーが爆発的に解放現象する現象である。フレアに伴って大量に高温プラズマが生成され、軟 X 線が急増するとともに、衝撃波によって加速された高エネルギー電子、陽子、ヘリウムが生成される。高エネルギー粒子が高密度の太陽大気と衝突して硬 X 線や  $\gamma$  線、紫外線を爆発的に放射することが知られている。こうしたフレアに伴う X 線や極端紫外線が地球に到達すると、電離圏に於ける異常電離現象を引き起こす。また、しばしばフレアに伴って発生する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 クラスの巨大フレアでもあっても、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 を伴う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再結合であると考えられているが、磁場配位の違いから CME の有無などの特徴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」の要因となる。

高エネルギー粒子生成：太陽から放出される、数 KeV から数 10 GeV の陽子、電子、重イオンを太陽高エネルギー粒子という。フレアに伴う衝撃波は主に急激な電子加速 (インパ



ルシブイベント：継続時間～数時間）を引き起こす。一方、CME 衝撃波は主に陽子に富む高エネルギー粒子群を緩やかに（グラデュアルイベント：継続時間数日間）生成する。前者の粒子加速は狭いフレア領域で生じるため、経度の広がりも限られ地球に直接到達する磁力線の領域に限られることに対して、後者は広い太陽経度に渡って観測される。全ての高エネルギー粒子がこの2つのメカニズムに集約されるわけではなく、低エネルギー側ではグラデュアル、高エネルギー側ではインパルスブといったハイブリッド・イベントが多く見つかリ、フレア衝撃波で加速された粒子が更に、コロナ中の準垂直衝撃波によって加速される二段階加速メカニズムなどが提唱されている。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地球の磁場に跳ね返されること無く大気まで到達し、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。

紫外線および可視光の変動：太陽から到来するエネルギーの大半は、可視光を中心とした電磁波による。一般にそのエネルギーは「太陽定数」という言葉からも分るとおり、変動の幅は非常に小さいと考えられてきた。しかし、最近数 10 年間の人工衛星による精密観測により、太陽からの電磁波エネルギー（TSI: Total Solar Irradiance）も、太陽自転周期や 11 年周期に伴い、0.1% オーダーの変動を持つことが明らかになっている。また、こうした周期の変動は波長が短くなるにつれ振幅が大きくなることが知られており、成層圏のオゾン層で吸収を受ける 300-400 nm の紫外線では、1% 以上の振幅を持つため、成層圏の温度場を変動させることが指摘されている。

以上のように太陽活動現象は、地球圏に於ける宇宙天気の変動現象を引き起こす源となる。地球圏では磁気圏・電離圏・熱圏・大気圏そして地圏が複合的に結合した多圏間結合システムが形成されており、因果を供する応答もまた様々な様相を持つ。これらについての研究の現状、課題については、2 章を参照されたい。

### 3.1.2 宇宙工学

宇宙機と宇宙プラズマの相互作用：宇宙空間は全くの真空ではなく、希薄な宇宙プラズマで満たされており、その中で宇宙機を用いた様々な人類活動が行われている。このため、宇宙機と宇宙プラズマの間には様々な相互作用が発生する。具体的には、宇宙機の帯電、表面放電、それによる電磁界干渉、電気推進などにおける宇宙機からの能動的プラズマ放出による干渉や、エレクトロダイナミックテザーシステムや SPS など大型宇宙システムと



宇宙環境との相互作用が挙げられるが、これらは、宇宙機の形状、材質、システム構成、およびその背景となる宇宙プラズマ環境に大きく影響するため、その定式化は非常に困難である。

また、科学衛星による宇宙環境観測においては、衛星やセンサ等自体がその場のプラズマ環境を乱すため観測データはその影響を受ける可能性がある。科学衛星は宇宙プラズマ粒子の衝突により帯電し、周辺のプラズマ密度分布、電位構造を大きく変化させる。これらの衛星プラズマ相互作用は、プラズマ粒子もしくは波動計測に少なからぬ影響を与える。粒子計測においては、衛星から放出される光電子や衛星の帯電の影響により、衛星周辺の低エネルギー電子・イオンの分布が大きく乱される。またプローブ法を用いた電場観測においては、光電子や衛星ウェイクに起因するスプリアス電場の発生や、波動電界の較正時に必要となるプローブ複素インピーダンスのプラズマ中での特性変化が問題となる。こうした影響は、従来から機器設計や観測データ較正の段階において、理論的にもしくは経験則に基づいて注意深く考慮されてきた。一方で、近年、粒子と波動など異なる種類のデータ、多点の観測データ、衛星と地上観測データなど複数のデータを高度に組み合わせた衛星観測研究が模索される中、衛星データに求められる精度や信頼性もより厳しいものとなっており、衛星プラズマ相互作用の観測への影響を定量化することが急務となっている。

宇宙空間における推進システムにおいては、衛星がひとたび地球の重力圏外に出てしまえば、純粋な推力よりも自動車という燃費に当たる比推力の方が長距離航行や打ち上げ重量を考える上で重要な性能となる。実際、電気推進機関は、はやぶさ衛星などですでに実用化されているが、一方で電極の摩耗がエンジンの寿命に与える影響が問題視されてきた。このような電気推進機関の欠点を克服するために、現在世界各国で様々な研究が行われている。

### 3.1.3 地球表層電磁気

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、電離層電子密度の変動が伝播する様子が GPS 観測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。

津波電磁気現象：海水は良導体であり、地球磁場中で流れることにより、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も津波を起源とする磁場変動が津波到達以前に観測された。

## 3.2 人類社会基盤への影響

### 3.2.1 宇宙機・観測機器への影響

宇宙利用時代に入って 50 数年、多くの重大な衛星異常、故障が報告されている。故障の主因は、オーロラ嵐時の粒子注入領域などを横切る時に生じる「衛星帯電」による絶縁破壊や材料変質、銀河放射線、太陽高エネルギー粒子、放射線帯粒子が半導体素子に飛び込み、集積回路上に電荷蓄積し、ソフトウェアなどを引き起こす「シングル・イベント」、MeV 以上のエネルギーを持つ粒子が衛星外壁を通過し、基盤などに付着、電子デバイスの耐圧を越える局所電位により、電子機器の不具合をもたらす「内部帯電」などによる。また総放射線吸収量（トータル・ドース）が部品に及ぼす影響も考慮する必要がある。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。これらの宇宙機被害の低減は、3.1.3 で述べたような宇宙工学分野の課題でもある。現在 JAXA を中心としたグループがその対策研究を推進している。

### 3.2.2 大気抵抗による衛星軌道の変動

太陽フレアに伴って降り注ぐ X 線や紫外線の増大、磁気嵐は大気を加熱膨張させ、衛星軌道を大きく変化させることが報告されている。特に高度 500 km 以下を飛翔する低高度衛星は、軌道保持のために空気抵抗を考慮する必要があるが、磁気嵐などの突発現象による空気抵抗擾乱もそれに加えられるべき項目であろう。大気膨張の直接要因は、磁気嵐に伴う電離層電流増大ジュール加熱の増大に起因するものと思われる。従って、磁気嵐予測とも連動した、長期大気密度予測手法を開発する事が重要である。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変動モデル作成等が挙げられる。

### 3.2.3 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於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は、今後宇宙線分野の研究者との連携を深める必要がある。

### 3.2.4 超高層大気変動が宇宙利用システムに与える影響

超高層大気科学は、短波通信における電離圏変動の影響など、元来実利用システムと密接に関連して行われてきた。近年、人工衛星や有人宇宙船による宇宙利用や、衛星航法の利用の飛躍的増大により、これらに対する超高層大気の影響の低減が必要とされている。これらの社会的要請に基づく研究成果の利用を念頭におき、超高層大気の物理現象の解明を進めていく必要がある。特に、電離圏における擾乱現象は、近年利用が飛躍的に増大している衛星航法の精度と信頼性に影響を与える。電離圏擾乱現象（電離圏密度変動、電離圏不規則構造）の有効かつ確実な検出と予測につながる研究および衛星航法の将来の利用形態を想定した電離圏擾乱の特性の適切な理解に基づく情報提供が重要である。

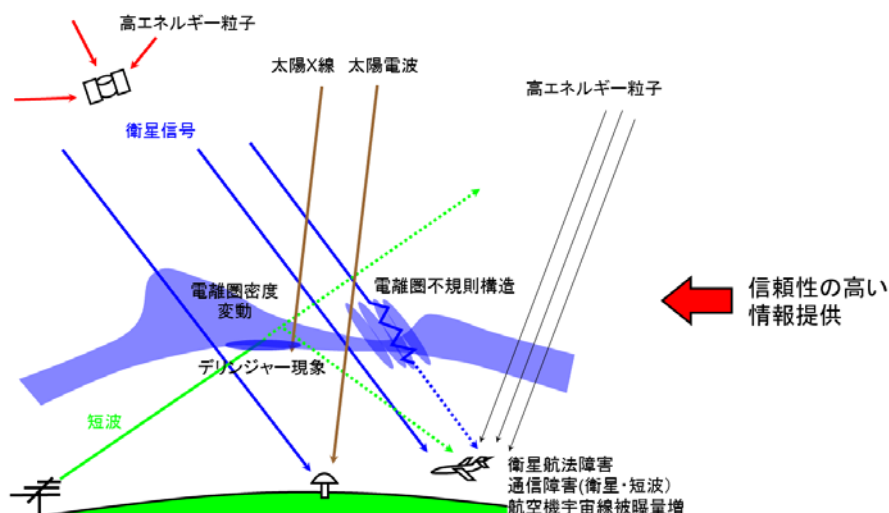


図 3.2.1 宇宙利用システムに影響する太陽地球系現象。電離圏密度変動は短波通信の不安定、衛星測位誤差の増大などの影響を、電離圏不規則構造は衛星信号にシンチレーションによる障害引き起こす。太陽電波強度の増大は衛星信号の雑音を増大させる。高エネルギー粒子の増大は、衛星環境の悪化、航空機宇宙線被曝量の増大、極回り短波通信の途絶などの障害の原因となる。

### 3.2.5 地上インフラに及ぼす影響

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、システムの障害や、金属腐食を促進することが知られている。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 は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かも報告されている。GIC の正確な把握、予測のためには何よりも高密度な地磁気データの取得、正確な地磁気変動予測が不可欠である。世界中に展開する地磁気観測網を統合ネットワーク化が可能となれば、GIC 現象の世界規模でのモニタリングが可能となるであろう。また、高精度化するリアルタイム磁気圏シミュレーションに正確な磁気圏電離圏地圏結合アルゴリズムを組み込み、全球に於いて地磁気変動、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 1 つとして積極的に進めて行くべきであろう。

### 3.2.6 新しい宇宙探査・宇宙利用への影響

この半世紀、人類は宇宙への進出を続け、先の節で述べたように社会基盤と密接に結び付くまでに至った。上で述べた影響の多くは、人類が新たな生存圏を開拓した結果生じたものである。その一方で、人類の新たな可能性を拓くための宇宙探査の継続も不可欠である。2010 年に小惑星イトカワからのサンプルリターンを終えて地球大気圏の再突入したはやぶさ衛星のように、新たな挑戦は社会的な関心を大きく集め、技術水準を国内外にアピールする効果も期待できる。はやぶさ衛星においては電気推進機関の一つであるイオンエンジンが搭載され、長期間航行が実証された。今後は、新たな小惑星探査や木星近傍などより近傍の宇宙（深宇宙）の探査が目標となる。より長期間の航行へ向けては、イオンエンジンが構造的に持つ欠点などの克服を目指した研究が必要になる。

一方、宇宙太陽発電所（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、2.4 で述べてきた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ろう。

### 3.2.7 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、地震・津波や火山に関連した電磁気現象の解明や電磁気を用いた構造等の推定にとどまらず、リアルタイムモニタリング等、減災を目的とした研究を継続して推進する必要がある。

### 3.3 知識基盤の構築に向けた研究課題

#### 3.3.1 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、これらの成果を「人類の知識基盤として」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。

#### 3.3.2 宇宙機運用データベースの整備

十数年間の蓄積された軌道上環境データベース、他機関とのデータ共有、軌道上不具合収集、設計・運用に関する知識データベース、環境予測モデル、環境警報システムおよびリアルタイムデータ表示を統合化することにより、宇宙機設計者、宇宙機運用者、軌道上不具合究明活動等に必要データを抽出、提供する情報システムを構築し、複雑化・多様化する宇宙機および搭載コンポーネントの効率的で確実な開発・運用を実現することが重要である。

#### 3.3.3 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無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、極端事象と太陽地球系物理の理解を深める必要がある。

### 3.3.4 大気海洋変動研究との連携

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、関連分野の研究者との密接な連携が不可欠である。とりわけ、大気・海洋変動の専門家とは、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。

### 3.3.5 衛星工学分野との連携

宇宙天気の研究は、最終的には衛星製作および運用などの実利用面での応用を目指していると言われるが、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、それらがどういう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、工学分野と太いパイプを築く必要がある。

### 3.3.6 予測研究の進展

宇宙天気研究を、人類活動を支える知識基盤へと昇華するためには、予測研究は不可欠である。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（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。

### 3.3.7 予測研究実現のためのモデリングフレームワーク

予測研究を実現するさせるためには、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。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。

### 3.3.8 予測研究実現のための観測

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於いては、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、地上観測に於いては、超多地点グローバル観測技術を向上させ、宇宙天気環境に把握に有用な INDEX 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、超高層大気に於ける観測空白地帯（空白高度 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変化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。

### 3.3.9 推進系

はやぶさ衛星で長期間航行が実証されたイオンエンジンなどの電気推進機関では、電極の摩耗による推進効率の低下が欠点として挙げられている。それらの欠点の解決のために、様々なタイプの電気推進機関が提案されており、盛んに研究が行われているのが現状である。以下では、宇宙プラズマ物理・超高層物理との親和性の高い 2 つの推進方法を述べる。

磁気プラズマセイル (MPS) : JAXA を中心に検討が行われている MPS (Magnetoplasma Sail) は、衛星搭載の超伝導コイルによって形成される小規模ダイポール磁場構造と太陽風の相互作用により太陽風モーメントを衛星推力に変換することを想定した推進システムである。太陽風運動量を衛星の推力に変換するには、衛星起源の磁場構造と太陽風との電磁気的な相互作用が鍵となる。太陽風とダイポール磁場の相互作用という点では、地球磁気圏形成の場合と類似であるが、MPS の場合、人工ダイポール磁場の規模は太陽風イオン慣性長より小さいため、太陽風との相互作用の評価において MHD 近似モデルの利用は適当ではない。太陽風イオンのラーマ半径が約 100 km とすると MPS ダイポール磁場規模がそれ以下であることを考えると MPS-太陽風相互作用においてはプラズマ運動論効果を含めた解析が必要である。本解析は、MPS の推力評価という宇宙工学的な側面としても重要であるが、同時に小規模磁場構造と太陽風との相互作用という理学的観点から見ても非常に興味深い重要な研究テーマであると考えられる。また、MPS 解析によって得られる知見は、弱磁場惑星と太陽風の相互作用や、月面磁気異常と太陽風の相互作用の定量的理解に応用できる点でも重要となる（比較磁気圏に関しては 2.3.2 を参照）。

無電極電気推進機関: 無電極電気推進における開発要素は主に (1) プラズマ生成、(2) プラズマ加速、(3) プラズマ放出（ディタッチメント）の 3 つに分けることができ、国内の動向としては (1) のプラズマ生成でヘリコンプラズマを用いる研究に特色がある。現在は、(2) のプラズマ加速過程を中心とした実行可能性の研究が、理論・実験・数値計算を組み合わせた形で推進されている。このような実験室プラズマにおける工学応用の追究の中で顕在化するプラズマ素過程の解明は、弱電離プラズマ物理の理解を深化させる上でも極め

て有用である（素過程に関しては 2.4.7 を参照）。また、これらの電気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の定量的評価についても宇宙プラズマ環境アセスメントという観点から非常に重要な研究テーマと考えられる。宇宙システムと宇宙プラズマとの相互作用の解析においては、近年の目覚ましい発展を遂げている計算機技術を基盤とした計算機シミュレーションが近年注目を浴びつつある。解析対象が具体的な衛星システムを含む非一様な宇宙プラズマ空間であり、衛星とのプラズマ運動論的相互作用が重要であるため、3次元空間を用いた粒子モデルが必須となり、必然的に大規模なシミュレーション解析となる。従来のプラズマ粒子シミュレーション手法を衛星周辺プラズマじょう乱の定量解析に応用する試みが開始されており、近年は実用化に向けて一定の成果を収めつつある。

### 3.3.10 宇宙太陽発電所（SPS）建造における環境アセスメントへの貢献

24 時間太陽エネルギーをロスなく得ることのできる宇宙空間を利用するこの SPS に対する、SGEPSS の貢献はその環境アセスメントにある。SPS それそのものは、電子工学・宇宙工学の粋を集める巨大建造物であるが、その建造物周辺における宇宙プラズマの乱れや建造物そのものの帯電など宇宙環境に対する知見を多く有する SGEPSS が貢献していくべき分野である。また、エネルギー伝送用マイクロ波と電離層プラズマへの影響、SPS を建造するために必要となるロケット輸送が大気を与える影響、放射線帯が SPS 建造に与える影響など SPS 建造物それ自身だけでなく、建造プロセスから運用プロセスにおける環境アセスメントも宇宙や大気の知見が必要となるため SGEPSS の貢献が期待される場所である。

### 3.3.11 地球表層電磁気現象

地震・火山現象発生場としての構造の把握は、発生の物理や活動の推移を予測するための基礎情報として不可欠であり、日本全国の地下構造推定を継続して行う必要がある。日本周辺のプレート沈み込みに伴う諸現象を理解するためには、他の海洋プレートの沈み込み帯や、大陸同士の衝突帯などとの比較研究を行い、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が必要である。

地震・火山現象のモニタリングの一つの手法として、自然電磁場を用いた構造変化の検出があげられる。これを実現するためには、構造決定手法の高度化に加え、リアルタイムデータを用いた即時構造解析を行うことが必要であり、このためには、高い時刻精度で 1000 Hz 程度の高サンプリングデータを記録し、さらに無線 LAN や携帯電話通信網によりデータ転送できる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、自然信号による方法に加え、人工電磁場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。

津波のリアルタイムモニタリングには、オンライン化された定常海底電磁場観測網が不可欠である。実現するためには、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が現実的である。

## 4 研究推進に必要な技術開発・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。各節では、開発項目と2章で述べた科学課題とのつながりを表としてまとめる。

#### 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プラットフォームの開発

以下に、開発項目と2章で述べたサイエンスゴールの関連を示す。

カテゴリー	機器開発項目	対応するサイエンスゴール (2章の各節との対応)
プラズマ/ 高エネルギー 荷電粒子/ 中性粒子	熱的電子の温度およびエネルギー分布の高時間分解能観測	2.1.1, 2.1.2, 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3, 2.3.1, 2.3.2, 2.4.2,
	超熱的エネルギー帯におけるイオン3次元速度分布計測	2.1.1, 2.1.2, 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3, 2.3.1, 2.3.2, 2.4.2,
	超低エネルギー粒子計測のための衛星電位制御	2.1.1, 2.1.2, 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3, 2.3.1, 2.3.2, 2.4.2,
	超高層大気における中性粒子計測	2.1.1, 2.1.2, 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3, 2.3.1, 2.3.2, 2.4.2
	高時間分解能プラズマ計測	2.1.1, 2.1.2, 2.2.3, 2.3.1, 2.4.1
	惑星圏での低エネルギーイオン同位体計測	2.3.1, 2.3.2, 2.3.5
	非熱的中性粒子観測	2.1.1, 2.1.2, 2.1.4, 2.2.3, 2.3.1, 2.4.1
	高感度高エネルギー荷電粒子計測のための検出器・読み出し回路開発	2.1.1, 2.1.2, 2.1.4, 2.2.3, 2.3.1, 2.4.1
電磁場	飛翔体搭載電界アンテナの開発	2.1.1, 2.1.2, 2.2.3, 2.3.1, 2.4.1
	小型プラズマ波動観測器の展望	2.1.1, 2.1.2, 2.2.3, 2.3.1, 2.4.1
	飛翔体搭載直流/低周波磁力計の開	2.1.1, 2.1.2, 2.2.3, 2.3.1, 2.4.1

	発	
	飛翔体搭載交流磁界センサの開発	2.1.1, 2.1.2, 2.2.3, 2.3.1, 2.4.1
	高い電磁感受耐性を備えたソフトウェア波動観測器	2.1.1, 2.1.2, 2.2.3, 2.3.1, 2.4.1
光学・X線	惑星大気・プラズマ観測用軟X線観測機器の開発	2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.5
	近接離角にある高強度光源からの迷光除去技術の開発	2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.5
	紫外線領域での面分光観測の光学技術の開発	2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.5
	紫外分光計/撮像の性能向上	2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.5
	飛翔体による可視高分散分光観測装置と高安定型検出器の開発	2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.5
	小型サブミリ波放射計の開発	2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.5
飛翔体プラットフォーム	気球を利用した惑星光学観測	2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.5
	編隊飛行の衛星間通信を活用した観測動作制御法	2.1.1, 2.1.2, 2.2.3, 2.3.1, 2.4.1

以下に、各開発項目の概要を述べる。

### 熱的電子の温度およびエネルギー分布の高時間分解能観測

従来型のラングミュアプローブでは5 Hz程度で電圧電流特性を取得するのが限界であったが、微小空間スケールの電子密度擾乱等の研究に必要とされる高速サンプリングが可能な測定器の開発が求められている。単純にDC電圧スイープの周波数を上げる方法ではテレメータ容量に起因する限界を超えることは出来ないために、スイープの結果取得された電圧電流特性をオンボードで処理し、電子温度、電子密度の情報に加えて飛翔体電位などの情報を地上へ伝送する手法の開発が行なわれている。電子エネルギー分布の測定には二次高調波法が使用されてきたが、従来の方法ではサンプリングの高速化には限界があるために、新たなアイデアを取り入れて高時間分解能観測を可能にすることが求められる。

また、近年ではアクティブ実験により飛翔体電位が大きく変化するような状況下において熱的電子の温度や密度の測定を要求されることが多くなってきた。このような状況下においては、まず飛翔体の電位を自ら見つけ出した上でDC電圧のスイープ範囲を決定し電圧電流特性を取得して、電子温度と密度を導き出せるようにすることが望ましい。現在、このようなロジックでの動作を可能にする測定器の開発に取り組んでいる。

## 超熱的エネルギー帯におけるイオン3次元速度分布計測

非・弱磁化惑星周辺での太陽風・電離圏・熱圏の相互作用と、それに左右される地球型惑星超高層大気環境を、直接観測を基軸とする手法により探査するためには、超熱的エネルギー帯におけるイオン3次元速度分布計測が必須となる。この様な相互作用環境下で熱化された惑星プラズマイオンのラーモア半径自体が電離圏構造に比較しても無視できない大きさであるため、惑星大気プラズマが流出する過程として重要なエネルギー帯といえる。また、これらの超熱的エネルギー帯の惑星大気プラズマイオンが、惑星周辺の太陽風プラズマ領域にまで電離圏から上昇したり、惑星中性大気粒子がその領域で太陽光により電離する場合、それらのイオンは太陽風電場構造により更に加速され、惑星電離圏環境から完全に流出することになる。従って、非・弱磁化惑星大気環境での惑星プラズマの流出量と加速機構を特定することで、惑星大気自体が電離圏を経て惑星間空間に流出する過程を解明し、数億年以上の時間スケールで進行する惑星大気の進化・変遷への影響を定量的に評価することが初めて可能になる。加えて、ホットジュピターやスーパーアース等続く地球規模の系外惑星、特に金星・地球・火星に類似の大気惑星の発見とそれらの大気組成観測は今や時間の問題であり、太陽系内外の惑星系における生命の誕生・維持、知的生命への進化という視点から、固体（地球型）大気惑星における大気進化・超高層大気環境に関するより深い知見が求められている。この視点からも、系内惑星の直接探査・その場観測は最も優先順位の高い研究開発項目といえる。計測原理としては、本分野の独自技術における過去の成果・実績から、適用の有用性が証明されており、現時点で最も実現性・有効性が高いものを採用する。具体的には静電型エネルギー分析部とTOF（Time-of-flight）型質量分析部を、超熱的イオン粒子分析器を構成する2大要素として採用する。

## 静電型エネルギー分析部

過去に探査機（のぞみ・れいめい衛星）への搭載実績があり、探査機の自転運動を利用する事で3次元速度分布関数を容易に、かつ高精度で取得できるという特性上の利点に鑑み、360度の平面状視野を常時独立に確保できるTop-hat型を採用する。

## TOF（Time-of-flight）型質量分析部

高質量の分子イオンに対する検出効率・質量分解能を向上させるため、また、10 kV以上の高電圧を必要としないという利点を考慮し、金属表面衝突によるTOF start信号生成機構が候補の一つであるが、ゲート電圧方式によるTOF型、あるいは、掃引電場印加方式による粒子軌道偏向型とTOF型の組み合わせ、等の複数の機構を同時並行で研究開発する。

実際の惑星探査計画に適用するためには、上記の機構からなる超熱的イオン粒子分析器を10 kg以下の重量、10 W以下の電力で実現することが必要である。

また、太陽光に晒される探査機自体が、光電効果により超熱的エネルギー帯と同程度に帯電するため、以下に述べられる探査機自体の電位制御が必要となり、統合的な搭載機器

開発活動が求められる。

### **超低エネルギー粒子計測のための衛星電位制御**

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。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。

### **超高層大気における中性粒子計測**

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観測は、温度・風速・密度に代表される基本物理量の精密観測のみならず、非磁化地球型惑星の大気進化や大気流出を理解する上でも必要とされている。現在開発が進められている分析器の測定原理は、ラム方向を向いた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。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および CCD 素子によって検出されるが、平面スリットに平行な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、取得された画像は質量電荷比毎の二次元速度分布関数をあらわすことになる。この画像からは、温度・風速・密度の算出が可能である。想定される測定レンジは、風速が 0-1 km/s、粒子質量が 1-40 AMU、密度が  $10^6$ - $10^9$   $\text{cm}^{-3}$ 、温度が 500-2000K である。

### **高時間分解能プラズマ計測**

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のに加えて、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。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、3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てきた。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。

### 惑星圏での低エネルギーイオン同位体計測

将来惑星探査での同位体計測を目的とした高分解能質量分析器の開発を現在行っている。特に、最近検討中の火星探査計画による火星の大気散逸・進化過程の解明を、具体的な観測対象の一つとしている。惑星起源粒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。火星大気散逸観測の場合は、 $N_2$  と  $CO$  の分別に必要な分解能として  $m/\Delta m > 3,000$  まで求められている。

我々はこの10年間で月探査衛星「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、現在はその発展型として、水星探査計画ベピコロポ用イオン分析器 ( $m/\Delta m \sim 40$ ) を開発している。しかしながら、同位体計測に必要な  $m/\Delta m > 100 \sim 3,000$  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、産業用質量分析・同位体計測の技術として大阪大学が開発しているマルチターン型 TOF 質量分析法を採用している。マルチターン型 TOF 質量分析器の一つで可搬型のもは既に 20 cm 四方のコンパクトなイオン光学系で  $m/\Delta m \sim 30,000$  という高分解能を実現している。周囲の粒子を効果的に取り込むインレット部の導入と、マスゲート用パルス電源の宇宙環境への耐性と省電力の実現によって、マルチターン方式を利用した  $m/\Delta m > 3,000$  の小型・軽量の宇宙機用質量分析器の開発が可能であると判断した。現在は特に、宇宙用のマスゲート用パルス電源の開発に取り組んでいる。

### 非熱的中性粒子観測

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。非熱的中性粒子観測器における開発項目は高感度化、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。特に、数 keV 以下の中性粒子観測では二次元撮像観測機能をもった観測器は実現していない（衛星スピンの利用したものは存在する）。また、 $\sim 1$  keV 以上に感度を持つ観測器についても、日本では撮像観測機能をもったものは実現していない。将来の実現が望まれる。

### 高感度高エネルギー荷電粒子計測のための検出器・読み出し回路開発

ジオスペースを含む宇宙空間における粒子加速を理解するため、高エネルギー粒子の計測は人工衛星探査の黎明期から盛んに行われてきた。今後の高エネルギー粒子計測で重要なことは、衝撃波、磁気リコネクション、放射線帯領域といった粒子加速の現場を、より高い時空間分解能をもって観測する事である。高い時空間分解能を実現するためには、高感度の観測器が必要であり、その結果、高い信号カウントレートに対応できることが求められる。高カウントレートの信号を処理するためには、検出器をピクセル化して並列に読み出す事で、ピクセルあたりの読み出しカウントレートを下げるのがよい。こうした検出器としては、従来のシリコン SSD（ソリッドステートディテクタ）や APD（アバランシェフォトダイオード）をピクセル化して用いる、という方向性の他に、素粒子実験・X線計測の分野で開発の進んでいる新しい検出器の応用などが考えられる。一方、ピクセル化に伴って読み出しは多チャンネル化するため、1チャンネルずつプリアンプや A/D コンバータを用意することは、重量・電力の観点からいって現実的ではなく、多チャンネル読み出しのための ASIC（Application Specific Integrated Circuit）の開発が不可欠である。なお ASIC 開発においては、カウントレートのみならず、エネルギーのダイナミックレンジ拡大に配慮することも、高エネルギー粒子観測の性能向上のために非常に重要である。

### 飛翔体搭載電界アンテナの開発

宇宙空間電場は、「巨視的なプラズマ運動」や「MHD からの破れ検出」など、プラズマ観測の基本物理量のひとつであるとともに、プラズマ粒子を加速する基本場である。またプラズマ波動・電波は、無衝突プラズマ系での物理プロセスの根幹を成す「波動粒子相互作用」の種類・強度を直接・間接に捉え、物理プロセスを解明する重要観測量のひとつである。両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。伸展機構を擁する構造物であり、衛星・探査機設計に与えるインパクトは常に大きい。この将来改善に向け、(1) ワイヤ式アンテナ、(2) 大型リジッド式アンテナ、(3) 小型リジッド式アンテナの3開発を進めていく。

- (1) ワイヤ式アンテナ：最近の衛星で用いられた電場プローブには、日本で開発された GEOTAIL 型と、米・欧で開発されたガード電極を持つ CLUSTER 型があり、水星探査機 MMO では日欧双方から両者が搭載される。両者の融合に必要な電気系における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の基

礎技術を基礎は 2012 年度までに確立しており、今後、宇宙用機器として展開を可能としていく。

- (2) 大型リジッド式アンテナ： 磁気圏の直接探査において、DC 電場 3 成分の高精度測定の実現には、スピン軸平行伸展アンテナが不可欠である。特に従来測定できていなかった「粒子加速につながる磁場平行電場」「プラズマシートへの粒子流入・流出につながる Z 方向電場の高時間分解・高精度計測」の実現が重要テーマとなる。JAXA・東北大では、カーボンファイバー素材 (CFRP) を用いた 5m 級軽量伸展アンテナの開発を進めてきた。アンテナの素材・強度および伸展機構の基礎を 2012 年度末までに確立させる予定である。今後、宇宙用機器として展開を可能としていく。
- (3) 小型リジッド式アンテナ： 観測ロケット・次世代探査機・着陸機に求められる、小型伸展アンテナを開発中である。安全に伸展かつ長期間保持できる長さ 1-2 m の伸展物は国内に存在せず、国際的にも米国 (カリフォルニア大バークレー) が数百回の実績を擁するものがあるのみである。以下 2 方式の素材・伸展方式での開発を企図している。[ケース 1] BeCu 素材リボンアンテナ: ラッチ機構で先端の蓋を外せば BeCu アンテナ材のバネ力で自己伸展する。現存するものは、スピンによる遠心力で形状を保つ思想で、外力なしで自立しないため、素材・形状・収納方式を含めた全体検討を要する。これにむけ、2 m 以上の長尺 BeCu 素材を形成する炉の開発を 2011 年度に成功させた。[ケース 2] カーボンファイバー (CFRP) 素材ステムアンテナ: アンテナ素材を平面展開してドラムに巻き、モーター駆動ないし自力 (バネ力) で筒形状に再構成して伸展する。長大かつ大強度のアンテナを構築できるが、伸展機構が複雑である。

### 小型プラズマ波動観測器の展望

編隊飛行衛星、小型衛星、惑星探査機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、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 の利用があげられる。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り、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実現する。いずれの部品を利用して小型化する場合においても、それらは当然規格外の部品であるため、衛星搭載品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。

また、プラズマ波動観測装置の小型化において、Hybrid IC ではブロックの小型化はできるが観測装置全体を一挙に小型化するには、ASIC の開発が必須となる。特に、プラズマ波動では、Mixed signal process の利用により、アナログ部、デジタル部を混在した形での究極



の小型化は原理的に不可能ではない。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おり、ここに低ノイズプリアンプ、キャリブレーション回路を組み込む試作品もできている。一方、アナログ回路規模が非常に大きくなる周波数掃引タイプのスペクトル受信器の ASIC 化も非常に重要である。世界的にみても小型化における ASIC の役割はその重要さを増しており、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。

### 飛翔体搭載直流/低周波磁力計の開発

フラックスゲート磁力計は、DC から 100 Hz 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。その一つの方法として、回路のデジタル化を進める方式がある。これは、従来アナログ回路で行っていた、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ものである。フィードバックするためのデジタルアナログ変換器の高性能化が課題となっている。また、ピックアップ/フィードバック回路を ASIC 化することにより、回路規模や消費電力を抜本的に低減する試みも行われている。

磁力計を飛翔体に搭載する時、飛翔体自体の出す磁場が観測にとってノイズとなる。打ち上げ前の地上較正はもちろんのこと、打ち上げ後のデータを用いたオフセットの較正手法は、飛翔体が出す磁場の低減と共に重要な課題である。これらの課題は、解決のための基本的な方針は既に知られているものの、実際の適用は、個々のプロジェクトのシステムや運用上の制約、軌道条件等に影響されるため、プロジェクト毎に最適の方法を検討することとなる。

### 飛翔体搭載交流磁界センサの開発

飛翔体による交流磁界ベクトル計測には、サーチコイルまたはループアンテナが用いられる。いずれもファラデーの法則を原理としたロバスト性に優れた特性を有しており、計測対象のプラズマ波動に対し偏波、屈折率、ポインティングベクトルなどの物理量を与える。交流磁界センサは、プラズマ波動の「磁界」成分のみを検出するべきものであるが、プラズマ波動の「電界」成分に起因する交流磁界センサに生じる電位差も検出してしまいう問題がある。このため、電界成分に対するセンサ感度の定量評価方法および低減技術の開発が求められている。さらに、複数衛星や超小型衛星によるプラズマ波動観測のため、交流磁界センサのリソース（消費電力、サイズ、重量など）の低減を図りつつ、耐環境性能

(温度、放射線など)を維持することも重要である。得にリソースの低減には、これまでディスクリット部品を用いてプリント基板上に作成されてきたプリアンプに対し、ASIC化を図り、数 mm 角のチップ内に収めることを目指す。

### 高い電磁感受耐性を備えたソフトウェア波動観測器

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、非常に微弱な信号をとらえる高感度電磁界センサの性能をフルに発揮するには、衛星搭載の各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、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。これに対し、我々は、波動観測器の機上処理ソフトウェアによって衛星搭載器起源の雑音をデジタル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、これまで以上に精細なプラズマ波動の振幅・位相情報が高感度で計測できると同時に、衛星設計にかかる EMC 基準の緩和による EMC 対策にかかる負担の大幅な軽減が期待できる。

### 惑星大気・プラズマ観測用軟X線観測機器の開発

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 ニュートン衛星による木星 X 線オーロラや、すざく衛星による地球ジオコロナ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たところである。惑星大気や惑星周辺プラズマ領域での特性 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・空間変化を分離する二次元撮像は、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。ただし、惑星探査にはこれまでの天文衛星搭載機器には不得意な広視野観測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。まず広視野条件に適合する直入射光学系を設計し、酸素・炭素イオンの特性 X 線の反射率を同時に高める二重多層膜の開発を進めた。試作した反射鏡の反射率は設計どおりの性能を有し、多層膜の層間拡散による反射率経年変化もないことを確認した。今後はさらに、反射鏡を軽量化するためのマイクロアプトイクスの開発や、惑星プラズマ環境で発光する 1 keV 以下のエネルギーの低い特性 X 線を波長分解する検出器の開発が必要と考える。

## 近接離角にある高強度光源からの迷光除去技術の開発

多数の惑星探査機で電離圏プラズマの光学観測がこれまでに実施されているが、その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が主であり、二次元撮像観測はほとんど行われていない。今日の電離圏プラズマの研究では、電離圏界面形状や電離圏プラズマ分布の空間構造の時間変化を捉える観測が求められている。電離圏プラズマの二次元撮像観測が困難である理由としては、非常に微弱な信号であること、かつ、惑星本体からの太陽反射光が非常に強いことが挙げられる。このような近接離角からの迷光を除去する技術の開発が必須である。そこでベン構造バッフルの基礎的な光学技術の獲得を進めている。光学設計アプリケーションの照明解析からベン構造バッフルを設計し、試作したベン構造バッフルの光量除去率を測定する計画である。迷光源と観測視線のなす角を振って、迷光除去率の角度依存性を測定することも予定している。この技術は、特に金星・火星などの非磁化惑星の大気進化の理解に向けて、非磁化惑星の電離圏と太陽風プラズマの直接相互作用領域の空間構造を観測する撮像機器に応用できる。これまで計測が困難であった希薄な惑星電離圏と宇宙空間の境界領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になると期待できる。

## 紫外線領域での面分光観測の光学技術の開発

惑星探査機による光学観測は、一次元の分光観測による組成同定や鉛直分布測定や、二次元撮像観測が独立して行われている。惑星探査で二次元での分光撮像観測（面分光観測）が必要なときは、時間をかけて一次元分光観測機器をスキャンして二次元化する運用方法をとっており、導出した組成や大気・プラズマのスケールハイトの緯度・経度依存性は時間差を含んだものとなっている。面分光観測が可能となれば、同時性を確保できるとともに、その時間変化を高分解能で捉えることが可能となる。これに対して X 線観測では検出器でエネルギー分解を行うことができるため面分光観測がすでに可能である。しかしながら紫外線は、元々光子のエネルギーが低いこともあり検出器でのエネルギー分解は困難である。そのため、光学系による面分光システム（イメージスライサ）を構築する必要がある。イメージスライサの光学系は複雑となり、シグナル集光部、分光部、検出器への導光部とわけることができる。イメージスライサとしては、赤外線観測の地上望遠鏡用には既に構築された技術であるが、衛星搭載機器にはまだ応用されていない。紫外線用に転用するには分光部について、二次元像を一次元化し分光する光学システムの基礎技術の開発が必要である。さらに惑星探査機搭載用に軽量化、各種環境変化に対する光学性能評価などの検証が必要である。データ量の次元がひとつ増える画期的な次世代光学観測技術になると期待できる。

## 紫外分光計/撮像の性能向上

90年代後半から、極端紫外から紫外領域にあるプラズマや大気の共鳴散乱光を集光する

光学技術が急速に進歩した。この技術の発達には磁気圏/電離圏のリモートセンシングを可能にし、地球物理学に大きな成果をもたらした。例えば、日本の人工衛星がヘリウムイオンの共鳴散乱線 (HeII 波長 30.4 nm) を世界で初めて捕らえ、内部磁気圏のプラズマの運動を可視化する研究手法を確立した。技術の革新が鏡の反射率を向上させ、それが大きな科学成果を生んだ。

既に、地球型惑星や木星、土星に向かう探査機に紫外線分光/撮像の観測器が搭載され、実用レベルに達しているように見える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、鏡の反射率は、極端紫外光領域でも 40% 前後まで達成され、惑星空間からの背景光 (He I 584, H I 1216A) の波長での反射率を選択的に下げる光学技術が進んでいる。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が進んでいる。

#### 飛翔体による可視高分散分光観測装置と高安定型検出器の開発

水星磁気圏探査機ベピコロンボ MMO に搭載されるナトリウム大気分光撮像装置 (MSASI) には惑星探査機として初めてファブリ・ペロー干渉計が搭載され、高い波長分解能 ( $\lambda/\Delta\lambda \sim 80,000$ ) により、水星昼面と大気光を分離することで昼面の大気分布が観測される見込みである。水星ナトリウム大気は初速数 km/s で放出され、太陽放射圧により 30 km/s 程度まで加速される。MSASI ではこのような加速現象を捉えられる。しかしながら、現状では火星や金星などその他の惑星上空で想定される風速 ( $\sim 100$  m/s) を計測することは困難である。波長分解能を向上させるためにはファブリ・ペロー干渉計に用いる鏡面の平面度をより高める必要がある。ここ数年の技術開発によって、平面度 1 nm 程度の精度が達成されるようになったが、さらに数倍の精度向上が必要であり、更なる技術開発の継続が求められる。

近年、数多くの系外惑星が発見され続けているが、系外惑星の持つ大気の性質はほとんど分かっていない。これは、惑星に対し主星が非常に明るいため、現行の技術では系外惑星大気の観測が非常に困難であることに起因する。主星・惑星の空間分解を行うためには主星光を低減する装置を備えた大型の宇宙望遠鏡が必要であるが、これは巨額の開発コストを必要とするものである。しかし、惑星系全体が発する光量の時間変動を捉え、さらに変動成分のスペクトルを得る事ができれば、主星と惑星の空間分解を行わなくとも系外惑星の表面、あるいは大気上層の性質を調べることが可能となる。この場合は、必ずしも大型の望遠鏡は必要ではないが現行の検出器に比べて桁違いに感度が安定した検出器が必要となる。要求される性能が達成されるまでには時間が必要と考えられるが、系外惑星大気観測は 21 世紀において惑星科学者が達成すべき最重要課題であり、観測の実現に向けた

技術開発が必須である。

### 小型サブミリ波放射計の開発

サブミリ波・テラヘルツ波帯は、電波と光波との境界領域に相当する。その信号検出は、信号を波として捉える技術と光子として扱う技術の境界領域となり、長らく技術的に困難とされていた。一方、この波長帯には、電波や可視・赤外領域では観測が不可能な分子・ラジカル化学種の振動励起吸収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領域である。SGEPSS 分野においては特に惑星の高層大気研究への成果が期待され、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大気循環（風速）の直接観測など、ユニークな研究対象が挙げられる。

我が国のサブミリ波測器開発としては、国際宇宙ステーション（ISS）から地球大気を観測するサブミリ波帯放射観測装置 SMILES を 2009 年に打ち上げ、地球大気成層圏・中間圏における微量成分の振る舞いを高感度で観測することに成功している。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キサ、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観測装置より一桁高い精度を実現させた。

現在、国内では、SMILES 開発の技術的経験をもとに、将来の惑星探査周回衛星への搭載を念頭に置いた小型・軽量のサブミリ波測器の開発が進められている。特に主鏡をはじめとするアンテナ光学系の軽量化がキーであることから、複合材を用いた新しいタイプのリフレクタの研究開発を進め、宇宙空間で試作品の曝露実験を行うことなどが計画されている。また、折しも ESA の次期 L クラス木星圏探査ミッション JUICE にも小型サブミリ波スペクトロメーターが衛星モデルペイロードとして提案されており、日本からも測器開発の一旦を担うべく JUICE サブミリ波測器の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を密にしていくことで、測器軽量化技術の習得や測器インテグレーション経験の蓄積が期待され、SMILES で培った宇宙用サブミリ波測器の開発技術を将来ミッションへと発展させていくことが出来る。

### 気球を利用した惑星光学観測

極周回成層圏望遠鏡は地上観測、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。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。現在のところ、このアイデアに基づいて惑星観測用成層圏望遠鏡の開発を進めているのは日本のグループのみである。しかし、米国を中心とする研究者グループも同様の構想

を検討しており、もし予算措置がなされて動き出せば圧倒的資金力と技術力で追い越されるであろう。日本のグループは先進の利を生かして、早急に最初の科学的成果を上げることが求められる。現在、開発中されている成層圏望遠鏡の口径は400 mmであるが、将来的にはメートルクラスの望遠鏡にアップグレードすることで、最大級の地上望遠鏡に匹敵する観測能力が低コストで実現できるであろう。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である。スーパープレッシャー気球の開発には日米でしのぎを削っているが、実用化まであと一歩のところまできている。また、成層圏で動作する推進装置が開発できれば、極渦の中心に移動して定点観測を実施し、定期的に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が可能になる。JAXA 気球グループの開発力に期待したい。

### 編隊飛行の衛星間通信を活用した観測動作制御法

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。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 計画が進行中である。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」が検討途上にあるが、SCOPE の特徴は、衛星間距離の測距と時刻同期を行うことで、非常に精細な同時多点観測を目指す点にある。本研究開発は、SCOPE をはじめとする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。

#### 4.1.1 (2) 地上観測機器の開発

以下に、開発項目と2章で述べたサイエンスゴールの関連を示す。

カテゴリー	機器開発項目	対応するサイエンスゴール (2章の項目と対応)
大気圏・電離圏リモートセンシング	衛星電波を用いた全電子数観測と電離圏電子密度のトモグラフィ手法の開発	2.1.1, 2.1.2, 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3, 2.4.2
	非干渉散乱 (IS) レーダーによる電離圏物理量の立体観測手法の開発	2.1.1, 2.1.2, 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3, 2.4.2

	SuperDARN による電場構造イメージング	2.1.1, 2.1.2, 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3, 2.4.2
	ライダーの新規技術開発	2.1.2, 2.2.1, 2.2.2, 2.4.2
光学・電波	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	2.1.2, 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3, 2.4.2
	地上オーロラ光学観測のための技術開発	2.1.1, 2.1.2, 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3, 2.4.2
	赤外線地上観測装置の開発	2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.5
	低周波電波天文観測のための大型アレイシステムの開発	2.1.2, 2.1.3, 2.1.4, 2.1.5, 2.3.1
地上電磁場	自然 VLF 波動の地上観測	2.1.1, 2.1.2, 2.2.3
	VLF/LF 帯標準電波・tweek 空電の観測	2.1.1, 2.1.2, 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3
	地上磁力計システムの新展開	2.1.1, 2.1.2, 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3

以下に、各開発項目の概要を述べる。

### 衛星電波を用いた全電子数観測と電離圏電子密度のトモグラフィ手法の開発

現在、GPS に代表される測位衛星 (GNSS) の多点受信機網データを利用した、電離圏全電子数 (Total Electron Content: TEC) の 2 次元観測システムを構築し、密な受信機網が存在する日本や北米、欧州においては、高時間・高空間分解能かつ広範囲で、数百-数千 km スケールの電離圏擾乱現象を捉えることに成功している。この 2 次元 TEC 観測の空間分解能は GNSS 衛星と受信機の密度に依存し、観測領域は GNSS 受信機の分布に依存する。そのため、世界的に増加傾向にある GNSS 衛星および地上受信機網を利用することで、2 次元 TEC 観測の空間分解能向上と観測領域拡大が見込める。しかし、現状では密な GNSS 受信機網が地上の限られた領域にしか存在しないことから、全球を埋め尽くす観測ができない。全球の高解像度 TEC 観測を実現するためには、観測の空白領域である海上や砂漠、南極等に、海洋 GNSS ブイや自立型 GNSS 受信機などを展開する必要がある。この実現のためには、小型・省電力で実現可能な通信技術や、小型・安価な GNSS 受信機の機器などの開発が必要である。また、気象、海洋、防災分野など、地球電磁気・地球惑星圏分野以外の研究機関との連携も有用である。

これら地上の GNSS 受信機による観測に加え、低軌道衛星が送信する電波を用いた TEC 観測 (いわゆる衛星ビーコン観測) や衛星搭載 GNSS 受信機による TEC 観測データも活用すべきである。これらの TEC データの活用方法としてトモグラフィ解析による電離圏電子密度の 2 次元・3 次元分布の推定がある。しかし、この実現のためには受信機固有のバイア

ス除去する方法や、トモグラフィを行うための逆問題のアルゴリズムなどを開発する必要がある。

### **非干渉散乱 (IS) レーダーによる電離圏物理量の立体観測手法の開発**

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手段である。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。

EISCAT\_3D 計画では、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ることにより、電離圏密度や温度の立体 (3 次元) 分布に加え、3 次元プラズマ速度分布やプラズマ温度の異方性を立体的に観測する手法開発を進めている。特に多点アンテナ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、多点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。これらの多点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、EISCAT\_3D では 1 万本を超える数のアンテナを用いることで、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求められる。

### **SuperDARNによる電場構造イメージング**

南極昭和基地 SENSU 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。南極昭和基地 SENSU SuperDARN レーダーを用いて開発・実現した SuperDARN レーダーにより高精度流星風観測 (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ている。



## ライダーの新規技術開発

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）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。送信パルスからの時間変化として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を計測する差分吸収ライダーという手法もある。対流圏を中心に雲やエアロゾルの観測には広くライダーが用いられているがそれにとどまらず、中層大気から下部熱圏までの種々の観測を行うライダー（例：レイリーライダー、ナトリウムライダー等）が運用されている。その大きな特徴は、ターゲットになる大気分子にそれぞれ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を観測できることである（たとえば CO<sub>2</sub> ライダー）。また散乱体や吸収体の断面積の波長依存性を計測することで大気の温度や風速を正確に測定することもできる。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て計測可能なライダー技術であろう。日進月歩のレーザー技術や種々の光デバイスの発展の恩恵を受けて、これまで計測できなかった様々な微量成分の消長を捉えることができるだけでなく、これまでもっとも計測困難であったもののひとつである高度 100 km 以上の熱圏大気も、地上や衛星からのライダー観測で計測可能になってくるものと思われる。熱圏内の温度、風速をはじめ種々の微量成分（中性原子や分子、イオンも含む）のプロファイリングは必ずや超高層物理の新たな切り口を開くものと期待される。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。パルス波にくらべて連続波の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 ライダーへの期待が高まる。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。今後も世界の先端をゆくライダー技術を我が国が牽引するべく新規技術の開拓とその理学応用の両輪を大事にして前進したいものである。

## 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

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。今後は、これらの機器が多点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。

### 地上オーロラ光学観測のための技術開発

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 ISIS-CCD（In-situ Storage Image Sensor）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などを用いた分光観測が行われてきている。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、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、が最終的に目指すところになる。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。

### 赤外線地上観測装置の開発

赤外域は、多数の分子振動・回転バンドの芳醇な情報を有し、大気分子の「微量ガス・同位体の検出」および「温度場・速度場の導出」によって、大気進化の過程、有機物質の生成・消滅の検出、火山・熱水活動の現況、大気3次元運動の直接把握などを通し、惑星大気の進化と運動に鍵となる情報を提供しうる。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。

#### (1) 高分散分光器：ヘテロダインタイプの開発

東北大は、中間赤外線レーザーヘテロダイン分光器 MIRAHI (観測波長：7-12 $\mu\text{m}$ 、波長分解能  $\sim 10^{-7}$ ) の開発に目途をつけた。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、2012年初頭に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。引き続き、より小型の実用機に向けた開発を進めて(4) ハレアカラ観測施設へ展開し、観測へ供していく。

この基本システムは、将来的には探査機搭載システム (リモートセンシング)、およびガスセルと組み合わせた着陸機搭載システム (In-situ 観測) への展開も可能で、今後の探査計画の方向によってその実現検討を行う。

#### (2) 高分散分光器：エッセルタイプの開発

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  $\sim 4 \times 10^{-5}$ ) の開発に目途をつけた。本機は、波長安定度の向上を企図したもので、「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」を可能とする想定である。

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  $\sim 2 \times 10^{-5}$ ) の開発が成功裏に終了し、2011年に広島大・東広島天文台における試験観測で金星の広帯域スペクトル取得に成功した。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。

前者は、(4) ハレアカラ観測施設へ展開し、観測へ供していくとともに、同時観測波長範囲の拡大を目指した改装を行っていく。後者は、2013年夏の SUBARU 試験装着を進めるとともに、(4) ハレアカラ観測施設への展開を図っていく。

#### (3) リトリvable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分光情報から適切な情報を引き出すため、多重散乱を考慮したリトリーバルモデルを開発する。定常的観測との結合により、各種微量成分の経度/緯度/高度分布と時間変動の追跡を可能とする。Discrete Ordinate Method (DOM) 法・モンテカルロ法の2方式で確立し、相互比較検証を可能とすることで計算精度・速度の改善につなげる。地球大気の地上観測・衛星観測で開発されたものも存在するため、相互連携して進めていくことができる。イタリア等を含む国際協力が進め、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・イベント追跡を実現するには、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、2013年夏に福島県飯館・東北大惑星圏観測所からハレアカラ山頂へ60 cm クーデ望遠鏡(2013年度前半に稼働)の移設を実現する。また、ハワイ大等との国際協力により、1.8 m 軸外し型グレゴリアン望遠鏡「PLANETS」を、早ければ2014年度に完成させる予定で、建設を進める。付随して、山麓のハワイ大・天文学研究センター施設を整備拠点として活用していく。

### 低周波電波天文観測のための大型アレイシステムの開発

低周波(HF~UHF)帯の太陽・惑星電波観測は、放射メカニズムや太陽・惑星圏プラズマ環境を研究する有力な手段となっている。また、同周波数帯で観測される電波シンチレーションや分散現象は、太陽風プラズマを研究するための有効なツールになっている。我が国では、低周波帯の電波天文観測をつかってSTP分野の研究が盛んに実施されてきた。最近、この低周波帯の電波天文観測において、国際協力のもとで先端技術を取り入れた超大型設備の建設が開始されている。その代表がSKA(Square Kilometer Array)計画であり、デジタル技術を積極的に取り入れたフェーズドアレイを用い $10^6$  m<sup>2</sup>級の有効面積をもった高感度システムを実現しようとするもので、その観測からは天文学・STPにまたがる広い分野でブレイクスルーとなるデータが期待されている。ただ、その実現には多くの技術的な課題を解決する必要がある。我が国からもこれまでの研究実績に基づいて貢献できる可能性がある。そこで、我が国において太陽圏・惑星圏の研究を目的とした、低周波帯大型アレイシステムの開発研究を行うことを提案する。このシステムは、有効面積 $10^3\sim 10^4$  m<sup>2</sup>の規模で我が国のSTP研究拠点で整備を目指す。開発要素は、広帯域・高効率の受信素子(Active Balunを含む)、FPGAによる受信機、ソフトウェアによるビーム形成(Self-Calibration法を含む)などがある。これらの設備ができれば、各拠点における研究がさらに発展する他、若手研究者の教育・育成にも利用され、国際協力が進められている大型プロジェクトへの寄与にもつながる。

## 自然VLF波動の地上観測

磁気圏で頻繁に観測される VLF 帯ホイストラモード波の一種であるコーラスは、特にディ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、VLF 帯ホイストラモード波の様相が、パルセーティングオーロラなどの変動に直接関係していると考えられている。しかし、科学衛星と地上までの磁力線トレースの不確定性や、そもそも自然 VLF 波動の地上観測ネットワークが十分に整備されていないため、特に放射線帯粒子の加速がどの緯度で効率良く発生しているのかはよくわかっていない。自然 VLF 波動の地上観測ネットワークが整備されない一つの理由として、そのアンテナの巨大さが挙げられる。約 1 fT/√Hz という微弱な交流磁界を検出するには、ファラデーの法則より一般的に断面積 100 m<sup>2</sup> 以上のループアンテナが用いられており、その物理的大きさにより地上観測ネットワークの整備を妨げている。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約 50 ~100 cm 程度の円柱状のサーチコイル磁力計の開発が進められている。そして、地上でコーラスを十分検出する感度を有しながらも小型化を図ったサーチコイル磁力計による地上観測ネットワークの展開を早急に推し進め、科学衛星では不可能な異なる L 値での常時観測により、放射線帯粒子加速の様相を詳細に捉え波動粒子相互作用とオーロラ活動の関係に迫ることが求められる。

## VLF/LF帯標準電波・tweek空電の観測

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、内部磁気圏、電離圏、雷放電に伴うレッドスプライト等超高層大気発光現象や、地圏・大気圏・電離圏結合過程を示唆する地殻変動に伴う下部電離層異常など、新たな知見に基づく物理過程解明のため VLF/LF 帯送信電波受信による下部電離層擾乱観測が再び注目を集めている。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。

上記の目的をふまえ、国内では、電通大が多点同時連続観測を 15 年前から開始しているが (現在常設 7 観測点)、より詳細な局所的空間構造の導出のために観測網のさらなる充実が電通大、東北大、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をはじめとする、高エネルギー粒子による下部電離圏電離現象、雷活動等の大気電気現象、地殻変動に起因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り、数値計算と実験値との比較を用いたアプローチが進んでいる。

### 地上磁力計システムの新展開

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。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ステム全体として、「無人化」、「小型化」、「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。地上観測に耐えるデジタル磁力計の開発はシステムの小型化・低価格化に大きく貢献することが期待される。また、プロトン磁力計とフラックスゲート磁力計の組み合わせによる絶対・揺動磁場の無人同時観測、GPS 同期による衛星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。

#### 4.1.2 固体地球研究分野の観測・分析機器開発

以下に、開発項目と2章で述べたサイエンスゴールの関連を示す。

カテゴリー	機器開発項目	対応するサイエンスゴール (2章の項目と対応)
電磁場観測	高分解能・高感度磁力計の開発	2.5.1., 2.5.2., 2.7.1., 2.7.2
	船上3成分磁力計の小型化・高度化	2.7.2.
	リアルタイム津波モニタリングシステムの開発	2.6.2.
	惑星／衛星電磁探査用電極の開発	2.3.4., 2.5.2.,
	小型・低消費電力・高精度な電磁場センサ、ロガーの開発	2.5.1., 2.6.1., 2.6.2., 2.6.3., 2.6.4.

以下に、各開発項目の概要を述べる。

#### 高分解能・高感度磁力計の開発

磁力計がより高感度になることで、従来は測定できなかった天然試料（地球外物質を含む）を対象とした古地磁気・岩石磁気学的な研究が可能になり、新しいサイエンスを開い

てきた。今後の研究においては、現在にも増して、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を分析することが必要となる。ここでは、1 インチ試料を大量に測ることを基礎とした従来の古地磁気学的アプローチが取れず、微小試料の測定を行うことになる。そのためには、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。

たとえば、具体的には、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) 顕微鏡の開発が急務である。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小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。

### 船上3成分磁力計の小型化・高度化

現状の海洋地磁気異常観測では、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。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。たとえば、GPS・ジャイロを入れて非磁性で構成し、波の影響を受けすぎない程度に海面下 1 m 程度を曳航する設計とする。これにより、GPS のアンテナは海上に出る。GPS/GLONASS/Galileo が同時受信できるレシーバーが出てきているので DGPS の精度は十分と考えられる。GPS ジャイロでも良いかもしれない。しかしながら、3 成分磁力計センサとしてフラックスゲートを考えると、全磁力用のセンサに比べて温度ドリフトの影響が大きいと考えられるので、この点の克服が必要と考えられる。人工衛星などで利用する高性能センサを利用すればよいかもしれないが、価格が高いという欠点がある。新型センサの可能性についても、検討すべきである。

### リアルタイム津波モニタリングシステムの開発

地磁気の下で、良導体である海水が津波によって運動したとき、電磁場が誘導されることが知られており、海底電磁場観測はベクトル型の津波観測を可能にする新たな手段

として注目されている。電磁場を用いた津波のリアルタイムモニタリングを行うためには、主として海底で、地磁気 3 成分・地電位 2 成分と水位を同時に連続観測し、津波による水位変化と誘導電磁場を検出する必要がある。津波用の海底電磁場観測には、センサの分解能の向上、時間分解能の向上、姿勢変化検出精度の向上という技術課題がある。現在よりも分解能を上げた電場・磁場センサを理想的には 10 秒サンプリングで連続駆動するため、システム全体の省電力が必要になる。また、長期安定した観測実現のため、電極の長寿命化が必要である。揺れによる変化を補正するために、観測機器の姿勢制御または姿勢感知の精度の向上する必要がある、小型ジャイロの高精度化が望まれる。これらに加えて、電磁場計と水位計を長期連続稼働するために、電源系と伝送系の整備が必要となる。沿岸部であれば海底ケーブルによる電力供給やデータ伝送が可能であるが、津波警報として社会に資するならば深海部での多点観測が不可欠となり、低消費電力センサ・大容量電池・その場発電システムなどの電力系と、係留ブイと衛星によるデータ伝送系の開発が必要である。

#### **惑星／衛星電磁探査用電極の開発**

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の軽減と、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、ゲル状物質を用いた電極等の開発を行う必要がある。また、通常の設定型電極に加えて、コンデンサー型の電極等の検討を行う必要がある。

#### **小型・低消費電力・高精度な電磁場センサ、ロガーの開発**

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。



## 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

#### 4.2.1 (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、ソレノイダル性を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、有限体積法と近似リーマン解法を組み合わせた衝撃波補足法が広く使われている。衝撃波補足法は、不連続面を捉えるのに高い性能を示す一方で、波動や乱流現象を正確に記述することができずに、波形のひずみを生じる。また、磁場のソレノイダル性も破れやすい。しかし、太陽地球惑星系では衝撃波・乱流両方が本質的となる現象がしばしば起こるため、衝撃波補足法にこだわらずに、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、既存の近似リーマン解法をそのまま適用するのが困難であり、近似リーマン解法に依存しない新たな数値計算法の開発が不可欠である。

## 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。この数値不安定性は、数値分散がない (極めて少ない) 解法においても回避できず、非相対論的流れの場合でも起こりうるものが近年認識されるようになってきている。この数値不安定性の根本原因は、格子上に存在する粒子の形状に起因するエイリアス誤差によるエントロピーモードが電磁モードと共鳴することにある。この回避法は、現状ではより滑らかな粒子形状 (高次形状関数) を採用することにより、少しでもエイリアス誤差を減らす以外にはなく、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、粒子分割と領域分割を組み合わせたハイブリッド並列化によりプロセス数を削減し、さらに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スアルゴリズムの技術開発が不可欠である。

## 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、オイラー量である直接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領域分割法を適用できる（負荷バランスの崩れない）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を精度良く解くことにある。特に、磁化プラズマのジャイロ運動を速度空間上で記述することは多くの数値計算上の困難が伴うため、現状では非磁化（静電）プラズマを対象とした計算の実行が多くを占める。しかしながら、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る。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、今後の計算機の発展により、磁気圏グローバル構造のダイナミクスを記述する手法として MHD 法に取って変わる可能性がある。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

度領域でのプラズマの穴あき、短波長ホイッスラー波の位相速度の発散による時間積分、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割り算が含まれる。しかし、希薄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希薄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 となりうるため、ゼロ割によりしばしば計算の破たんをきたす。従って、希薄な領域でも安定に解けるような磁場の時間更新アルゴリズムの開発が必要である。

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局所的に格子幅より大幅に大きくなりうる。そのような領域では、ホイッスラー波の位相速度が無限に大きくなりうるため、CFL 条件を満たさず、計算の破綻をもたらす。この問題を回避するためには、電子慣性を含めた方程式系を解くことによりホイッスラー波をある程度正しく記述するか、後述する陰解法による時間発展法を採用する必要がある。いずれの方法においても線形連立方程式を解く必要があるため、反復法の導入が必要である。

#### 4.2.1 (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。

#### 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、弱电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。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。このフォッカー–プランク方程式に基づいたモデル化は日・米・英で進められている。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ほうかを行っている。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をかけ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あるいは MHD シミ

ミュレーションから得られる電磁場の中で、相対論的なエネルギーを持つ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。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、これまでの衛星観測により、そのキャリアが数 keV から数百 keV のエネルギーを持つイオンであること、イオンの組成は概ね水素イオンと酸素イオンで占められていること、磁気嵐中、酸素イオンの寄与が増大すること、リングカレントは完全な軸対称では無いことなどリングカレントの現象論的側面はほぼ明らかになっている。これに基づいて、(1) リングカレントを担う粒子の起源・輸送・加速・消失過程、(2) 粒子と電磁場との力学過程、(3) 粒子と電磁場のエネルギー変換過程について、大規模且つ包括的なモデリング研究が推進されている。具体的には、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ている。従来は、電磁場は経験モデルで与えられていたが、近年では、イオンの圧力分布から平衡状態を仮定した磁場を算出し、場と粒子の結合を再現している。

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 波動などの比較的短い時間スケールの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。そして、このようなモデルと衛星観測によって、大気波動を介した大気上下結合や、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、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改良などが進む。この点において、電離圏・熱圏の観測では 100km や 10km 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の分解能まで高精度にすれば、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ダイナミクスにおいて重要な役割を担う成分があり、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、領域モデルは数 km の空間分解能を持つが、数度程度の計算領域全体が限界であるため、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が重要である。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、解が存在するのの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

宇宙機からのスラスタ噴射時や高電圧太陽電池パネルの利用時における、周辺プラズマ環境と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宇宙プラズマ環境に大きく左右されるため、その度合いを簡単に定式化、評価することは非常に困難である。今後、宇宙機の大規模化や高電圧化に伴い、宇宙プラズマ環境との干渉はますます大きくなると考えられ、その定量的知見がシステム設計や機器開発において重要な基礎データとなる。

現在、宇宙機環境を含めたプラズマ空間を、一様格子システムを用いて離散化したシミュレーション研究が推進されている。しかし、宇宙機に取り付けられた細く長いブームや宇宙機表面の微細構造など、複雑な宇宙機の形状をより現実的に再現するためには、宇宙機表面近傍の空間格子を局所的に細かくする必要がある。また宇宙機搭載の電気推進システムからのプラズマ噴射や衛星表面での光電子、二次電子放出による局所的な高密度プラズマ領域においてはデバイ長が太陽風領域に比べて極端に短くなるため、数値的不安定性を避けるためにも衛星近傍領域では太陽風領域に比べて空間格子間隔を小さく取る必要がある。このように、人工的な擾乱現象が顕著に現れる宇宙機近傍での不均一空間格子システムの採用は、効率的なシミュレーション解析には不可欠であり、速やかに対応すべき課題である。

宇宙機表面についても、現状の完全金属だけでなく様々な誘電体素材に対応させる必要がある。特に、宇宙機の帯電に関連する現象を解析する場合は、宇宙機表面素材は重要なパラメータであり、部分帯電などの現象を再現するには不可欠である。ただし、誘電体の時定数がプラズマの固有周期に比べてはるかに大きい場合、初期値問題によるプラズマ粒



子シミュレーション手法だけで定常解を得るには工夫が必要であり課題である。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。

#### 4.2.1 (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

これまでのベクトル型計算機に対して、近年のスカラ型計算機は、CPU コアのクロック数等 CPU の演算性能そのものを上げる代わりに、CPU コア数を増やすことでその性能向上を実現している。また、大量の計算機を高速ネットワークで繋ぐことによりスーパーコンピュータ（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千から数十万個にも及び、一昔前に比べて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。これに対して、計算機1台あたりに搭載されているメモリは減る傾向にあり、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量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くる。従って、最新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奨励されている。

一方で次世代のスパコンでは、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に迫られており、現状の汎用CPUのみによる構成に加え、消費電力の少ない演算加速装置（GPGPU等）や演算補助装置（MIC等）の導入が進みつつある。これらの汎用CPUと演算加速・補助装置で構成されるヘテロジニアスなシステムは、今後のスパコン主流になる可能性がある一方、演算加速・補助装置のアーキテクチャの更新や衰退は速いため、計算機ハードウェアの動向に注意しつつ、プログラムの書き換えやチューニングにかかる労力とうまくバランスを取る必要がある。

##### 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

### 4.2.2 (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が可能である。プラズマ科学の共通性としては、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。

### 4.2.2 (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る。事実として、現在国家

主導で推進されている 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) の戦略プログラムには、当学会は陽には含まれておらず、今後視認性を高めていく必要がある。

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。京大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。名古屋大学太陽地球環境研究所では、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 年度からは専用スパコンを導入して共同利用研究を強化している。

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、大型計算機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。また HPCI では、理化学研究所の京コンピュータに 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。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太陽地球環境研究所が正会員として参加している。京コンピュータの利用においては、一般枠で 1 件、若手育成枠で 1 件、条件付枠で 5 件、当学会の関連研究課題が採択されている。また、東京大学、名古屋大学、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、当学会は戦略分野には選ばれてはいないものの、視認性は徐々に高まりつつあると言える。

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、学会として全国共同利用・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。しかがって、(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 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。

### 4.2.2 (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度同様に難しく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に、新たにプログラム開発を教えるのは困難な状況にある。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おり、間もなく11回目を迎える。また天文学分野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開催されている。しかし、近年の先進的手法の発達に伴ってプログラムやシミュレーション手法が複雑化し、説明文とプログラムの対応関係がよく分かるような教科書が少なくなっている。また教科書やドキュメントの整備が新手法の開発スピードに追い付いていない。この結果、プログラム開発技術の基礎を学ぶ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。しかしこれらには、学会のサポートが不可欠である。

## 4.3 データシステム

### データシステム

本節では、科学研究を行う上で必要なデータの取得、処理、保存をする情報ネットワークや計算機、データの形式や扱い方などを考える情報科学や技術、構築されたデータベースやアーカイブ、さらに、それらを運用する組織を一体のもの、すなわち、データシステムとして捉える。そして、地球電磁気・地球惑星圏科学分野における情報科学や技術の利用・応用、そして、今後目指すべきデータシステムについて述べる。

### 現代の情報と科学

情報技術・通信技術 (IT あるいは ICT) の発達と普及には、インターネット通信技術を中心にめざましいものがある。しかしその結果、電子情報が急激に増加し、情報爆発、データの嵐、情報洪水、あるいはビッグデータなどとよばれる状況が出現した。膨大な情報量に適切なテクノロジーを用いて対処し、最大限の知識を獲得して社会の発展に役立てる必要がある。我が国では、技術的にはさまざまなチャレンジが行われ、例えば情報処理については「地球シミュレータ」「京 (けい)」といった世界トップランクのスーパーコンピ

ュータの開発、ネットワークでは超10ギガビット級のSINET4、JGN-Xなどの研究ネットワークの整備および実験に国家予算が支出されている。

地球電磁気・地球惑星圏科学においては、その時代ごとにロケット、人工衛星、レーダー、スーパーコンピュータなどの最新技術を利用して新たなブレークスルーをもたらしてきた。当分野において新たな飛躍をもとめるとすると、最新の情報通信技術を取り入れた新しいデータシステムの構築は一つの有力な手段であると考えられる。

### **地球電磁気・地球惑星圏科学とデータ**

地球電磁気・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、人類が制御できない、時々刻々と変動する自然を記録していくものであるがゆえに、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余すところなく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、再検証に必要な情報として実験条件・方法、分析方法のみを記録しておけばよい物理・化学分野等の実験的研究と大きく異なる。また、地球電磁気・地球惑星圏科学データは地球環境データであり、数十年~数百年スケールの長期変動も重要な研究対象である。従って、観測データを長期に渡り蓄積・保存する必要がある。

### **データベース・データシステムの現状**

国際学術連合（ICSU、現在の国際科学会議）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 Modeling 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。

ただし、データベース整備・開発の現状はそれぞれのデータ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、定常的にリソースを投入できる点大きい。

### **これからの科学データシステム、データベースのあり方**

定常的・連続的観測で得られるデータについてはデータの品質管理、また保存されているデータの維持、管理が不可欠である。このためには、データの維持管理にも専門的な人材が必要であることは言うまでもない。現状、我が国で多く見られるような、分業体制の未確立によるデータ管理業務の特定の研究者への集中は解消されなければならない。

公文書に国立公文書館があるように、データを公的に維持・管理する「国立科学データセンター（仮）」のような専門組織を設立すべき、とは、「地球電磁気学の発展的将来」（平成 3 年）においても提言されてきたところである。しかしながら、こうした公的機関の設立やその予算の確保は容易ではなく、いまだ実現には至っていない。一方、情報ネットワークで接続された機関同士でデータを流通しあうことで、バーチャルな分散データセンターを構想することは現代の技術で可能になっている。さらに、データサービスの一環として、データセンターが共通データ解析ツールの開発・供給することで、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つつある。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 IUGONET プロジェクトでも試みられているところである。喫緊の課題として、分散データセンター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急務である。また、それぞれの機関の独自観測データについては、メタデータやデータファイルのデータベース化と、関係組織との相互交換体制をつくることを条件づけて、そのための予算・人員を手当するなどの方策を通じて、オープンなデータ流通機構の普及を推進していくことが必要不可欠である。

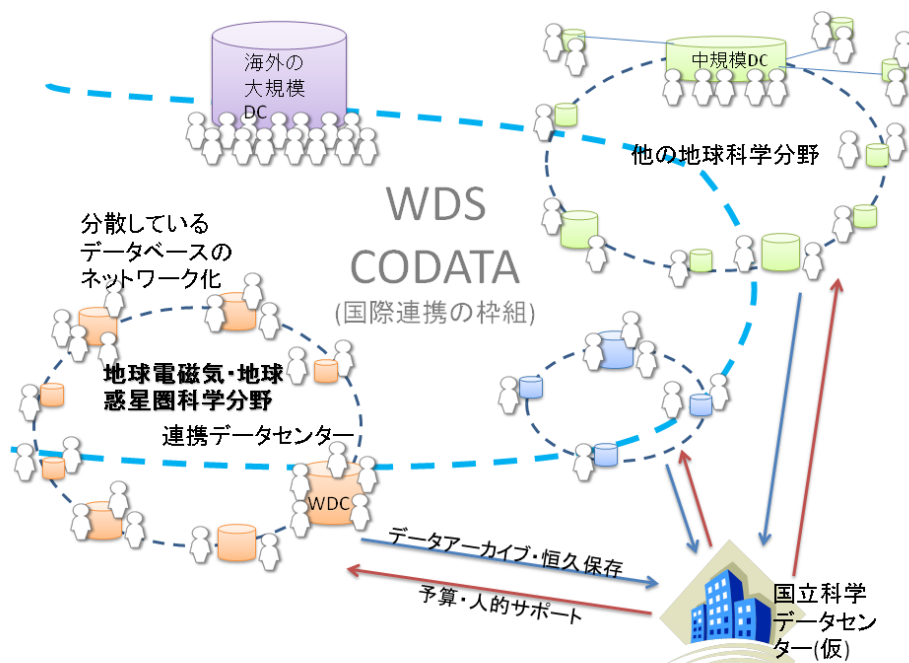


図4.3.1 連携データセンターと国立科学データセンターによる科学データサポート体制

こうした動向は、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 World Data System (WDS) 事業や Committee on Data for Science and Technology (CODATA) 他関連委員会、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。

また新たな動向として、データ公開体制を学術研究の制度として根付かせるために「データ・パブリケーション (data publication)」およびその一環として、データを論文のように参照してサイテーションインデックスのように被引用頻度を通じた業績評価を行う「データ・サイテーション (data citation)」などが国際的に議論されている。実際に一部の研究機関と商業出版社によるサービスが試験的に始まっているが、これは科学データの利用・評価体制全般の変革につながることであり、データシステムとしての対応を含めて、地球電磁気・地球惑星圏分野としても積極的に参加していくべきである。

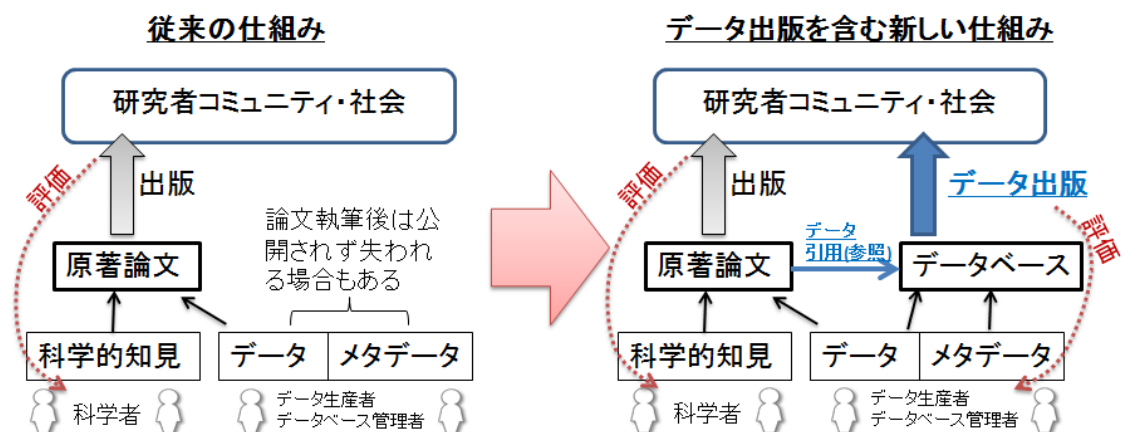


図4.3.2 科学的知見、科学データの出版

#### 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、飛躍的に増大することが予想される。これらの巨大データを有効に取り扱って科学の発展に役立てるには、科学的解釈を行うために用いる有用情報をデータ群から効率良く抽出する知的情報処理手法や、解釈を裏付けるデータをわかりやすく示す高度なコンピュータ活用法を積極的に導入する必要がある。さらには、観測とシミュレーションを連携し、両者を補完的に扱うことで、多数の要素が複雑に関与する物理現象をより現実的な形で計算機上に再現することも可能となりつつあり、物理現象の理論解釈や将来予測への活用が期待されている。このように、近年急速に発展してきた情報数理工学的な知見を、我々の学問分野に取り込んで応用することが、今後の地球電磁気・地球惑星圏科学の発展に必須である。

##### 4.4.1 データマイニング技術

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、多次元にわた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、巨大なデータ群の中に含まれる特定のパターンを機械



的に認識し抽出するパターン認識、既存の多量データに現れる法則性を学習させて将来予測に役立つ機械学習、複数の事象間の因果関係を見つけ出して定量化する相関ルール、類似するデータをいくつかのグループに分類するクラスタリングなど、巨大なデータ群から計算機の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学の分野で研究され、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）など様々な分野で活用されている。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。しかしながら、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、これらの大容量データを、情報数学的な技術を積極的に取り込んで研究に活用することが学問の発展に寄与するであろう。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。

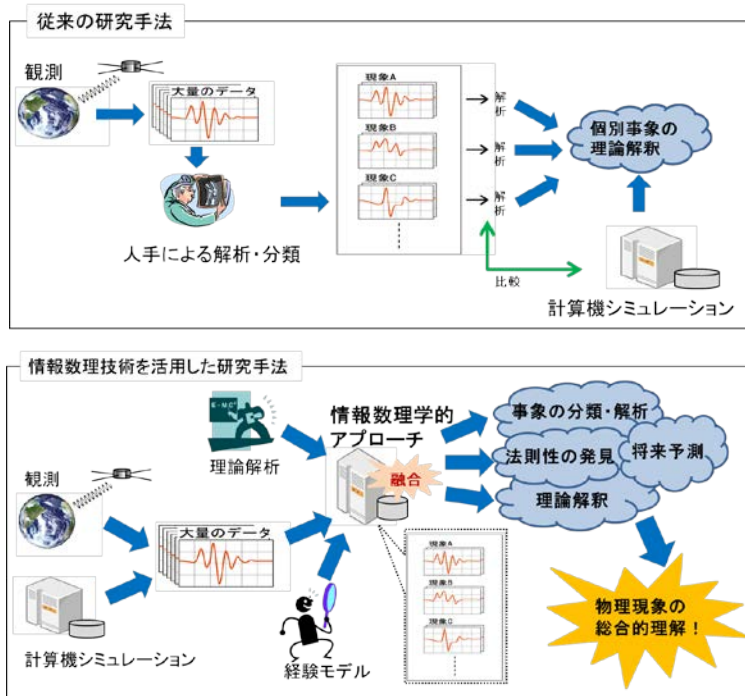


図 4.4.1 情報数理技術の活用

#### 4.4.2 データ同化技術

近年、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用いられるようになってきている。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。データ同化の技術としては、気象業界を中心に用いられている 4 元データ同化法<sup>1)</sup>の他、アンサンブルカルマンフィルターや粒子フィルターなどの逐次データ同化法と呼ばれる手法がある。

気象や海洋といった他の地球科学分野に比べて、地球電磁気・地球惑星圏科学においてにおけるデータ同化の適用例は、まだそれほど多くはない。電離圏、プラズマ圏、リングカレント、放射線帯といった領域についてのデータ同化研究が、米国、日本、欧州で進められており、モデルの改善や、現況、そして予測の高精度化に活用されつつある。一方、気象科学等の分野では、データ同化が天気予報にも活用されており、気象庁のような現業機関でも運用されている。地球電磁気・地球惑星圏科学においても、宇宙天気<sup>2)</sup>のオペレーションを行っている機関において、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。

## 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について、それを解明するための施策を挙げる。これらの施策は、2012 年に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る。施策は、衛星計画、地上施設整備・観測計画（予算規模によって大型、中型、小型に分類）、技術開発、センター整備に分かれている。次ページ以降に、まず全ての施策を表としてまとめたものをつける。この表には、対応する科学課題として、2, 3 章の章番号を示した。これらの施策の構想には、既に実施中のものから、構想段階のものまで、さまざまな段階の提案があるので、構想の成熟度を参照のためにつけた。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、1 枚のまとめ図と連絡先担当者をつけるようにした。

通し番号	タイトル	title	予算規模	カテゴリ	関連する科学課題の章番号	構想の成熟度(注1)	補足	連絡担当者所属	連絡担当者	連絡担当者メールアドレス
	衛星計画									
1	BepiColomboプロジェクト(日欧共同国際水星探査計画)	BepiColombo Project	100億円以上	衛星計画	2.1, 2.3	A		宇宙航空研究開発機構	早川 基	hayakawa_at_isas.jaxa.jp
2	JUICE計画への観測機器搭載	Payload development for the JUICE mission	10億円以上	衛星計画	2.3	B		宇宙航空研究開発機構	藤本 正樹	fujimoto_at_stp.isas.jaxa.jp
3	火星大気散逸探査計画(のぞみ後継機)	Mars atmospheric escape exploration (heir of Nozomi)	100億円以上	衛星計画	2.3	C		宇宙航空研究開発機構	松岡 彩子	matsuoka_at_isas.jaxa.jp
4	火星気象オービター	Mars meteorological orbiter mission	100億円以上	衛星計画	2.3	C		宇宙航空研究開発機構	今村 剛	imamura.takeshi_at_jaxa.jp
5	非磁化地球型惑星での超高層大気探査と関連する観測機器開発	Exploration for the upper atmospheres of unmagnetized terrestrial planets and associated instrumental development	数千万円-数百億円	衛星計画	2.1, 2.2, 2.3	D	探査機計画としては、SGEPSSが主体となり検討・推進すべき将来課題である一方、機器の基礎的研究・開発には既に少額の予算配分を受け、着手している。	名古屋大学太陽地球環境研究所	平原 聖文	hirahara_at_stelab.nagoya-u.ac.jp
6	SCOPE計画	The SCOPE Mission	100億円以上	衛星計画	2.1, 2.4	C		宇宙航空研究開発機構	藤本 正樹	fujimoto_at_stp.isas.jaxa.jp
7	EXCEED/Sprint-A計画	EXCEED/Sprint-A mission	10億円以上	衛星計画	2.3	A		東京大学	吉川 一朗	yoshikawa_at_eps.s.u-tokyo.ac.jp
8	ジオスペース探査衛星(ERG)計画	Geospace Exploration: ERG Project	数十億円	衛星計画	2.1, 2.4, 3	A		宇宙航空研究開発機構 名古屋大学太陽地球環境研究所	高島 健 三好 由純	ttakeshi_at_stp.isas.jaxa.jp miyoshi_at_stelab.nagoya-u.ac.jp
9	日本-ノルウェー共同観測ロケット10年計画	JAPAN-NORWAY Sounding Rocket Experiment Decadal Plan	24.35億円	ロケット計画	2.1, 2.2	A-D	ICI-4:Aに近いB 1号機 SS520: Bに近いC 2号機 SS20: Cに近いD それ以降: D	宇宙航空研究開発機構	齋藤 義文	saito_at_stp.isas.jaxa.jp
10	小型衛星群による大気圏-電離圏観測	Small Satellite Constellation for Atmosphere-Ionosphere Research	約80億円	衛星計画	2.2, 3	C		宇宙航空研究開発機構	児玉 哲哉	kodama.tetsuya_at_jaxa.jp
11	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	1億円以上	衛星計画	2.5	D		東京大学地震研	清水 久芳	shimizu_at_eri.u-tokyo.ac.jp
12	地球磁場観測衛星	Geomagnetic field observation satellite	1億円以上	衛星計画	2.1, 2.5, 2.8	D		東京大学地震研	清水 久芳	shimizu_at_eri.u-tokyo.ac.jp
	大型衛星地上施設整備・観測計画									
13	「ちきゅう」による統合国際深海掘削計画(IODP)	International Ocean Discovery Program (IODP) by D/V Chikyu	100億円以上	観測計画	2.5, 2.7	A		独立行政法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)	木戸 ゆかり	ykido_at_jamstec.go.jp
14	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	80億円	衛星計画 施設整備	2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.8, 3	B		京都市大学生存圏研究所	山本 衛	yamamoto_at_rish.kyoto-u.ac.jp
	中型地上施設整備・観測計画									
15	赤道MULレーダー	Equatorial MU Radar	31.5億円	施設整備	2.2	B		京都市大学生存圏研究所	山本 衛	yamamoto_at_rish.kyoto-u.ac.jp
16	大型レーダーを用いた南北両極の大気科学の推進:PANSYレーダー及びEISCAT_3Dレーダー計画	PANSY and EISCAT_3D	数十億円	施設整備	2.1, 2.2	B	PANSYレーダーはA	東京大学大学院理学系研究科 国立極地研究所 名古屋大学太陽地球環境研究所	佐藤 薫 宮岡 宏 堤 雅基 野澤 悟徳	kaoru_at_eps.s.u-tokyo.ac.jp miyaoka_at_nipr.ac.jp tutumi_at_nipr.ac.jp nozawa_at_stelab.nagoya-u.ac.jp
17	アウターライズ海底観測フロントによるプレート境界域の地震・津波・プレート運動のリアルタイムモニタリング	Outer Trench-slope Seafloor Observatory Chain for Real-time Monitoring of Plate Loading and Tsunami Generation	設置に関しては5年間で約15億円	施設(観測網)整備	2.6	B		独立行政法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)	浜野 洋三	hamano_at_jamstec.go.jp
18	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	10億円以上	観測計画	2.6	C		京都大学	後藤 忠徳	goto.tadanori.8a_at_kyoto-u.ac.jp
	小型地上施設整備・観測計画									
19	2m低散乱光学望遠鏡による惑星大気観測計画 - 飛翔体との連携観測と系外惑星の大気成分検出に向けて	Plan of planetary atmosphere measurements with a 2m low-diffraction optical telescope - toward cooperation with spacecraft and detection of exoplanetary atmosphere	~5億円	施設整備	2.3	B		東北大学	坂野井 健	tsakanoi_at_pparc.gp.tohoku.ac.jp

20	惑星大気の高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 atmosphere processes	～2億円	施設整備	2.3	B		東北大学	坂野井 健	tsakanoi_at_pparc.gp.tohoku.ac.jp
21	HF～VHF帯大型アレイ・アンテナ計画	Development plan of a large antenna array in the HF to VHF range	～1億円	施設整備	2.1, 2.3	C		東北大学	三澤 浩昭	misawa_at_pparc.gp.tohoku.ac.jp
22	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	1億円以上	施設整備	2.1, 2.3	C		東北大学	土屋 史紀	tsuchiya_at_pparc.gp.tohoku.ac.jp
23	火山活動モニタリングのためのリアルタイム構造解析へ向けて	Toward real-time resistivity modeling for monitoring volcano	1億円以上	観測計画	2.6, 3	D		東京工業大学	神田 径	kanda_at_ksvo.titech.ac.jp
24	赤道・低緯度SuperDARNレーダー装置	Equatorial and low latitude SuperDARN radar	1.2億円以上	施設整備	2.2	D		名古屋大学太陽地球環境研究所	西谷 望	nisitani_at_stelab.nagoya-u.ac.jp
25	SuperDARN北海道第二レーダー計画	SuperDARN Hokkaido West radar	1.2億円	施設整備	2.1, 2.2	B		名古屋大学太陽地球環境研究所	西谷 望	nisitani_at_stelab.nagoya-u.ac.jp
26	低周波電波天文観測による太陽圏の3次元探査	3-dimensional exploration of heliosphere using low-frequency radio astronomical observations	数億円	施設(観測網)整備	2.1	C、部分的にB		名古屋大学太陽地球環境研究所	徳丸 宗利	tokumaru_at_stelab.nagoya-u.ac.jp
27	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	Research on atmospheric vertical coupling based on Multi-LIDAR and radar observations	1億円以上	施設整備	2.2	C		名古屋大学太陽地球環境研究所	野澤 悟徳	nozawa_at_stelab.nagoya-u.ac.jp
28	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	5億点程度	施設(観測網)整備	2.1, 2.2	B	一部は整備済み、一部は予算要求中	名古屋大学太陽地球環境研究所	塩川 和夫	shikawa_at_stelab.nagoya-u.ac.jp
29	大気・プラズマ結合過程の総合地上ネットワーク観測	Comprehensive ground-based network observations of coupling between the atmosphere and the ionosphere	5億点程度	施設(観測網)整備	2.1, 2.2	B	一部整備済み、一部は予算要求中	名古屋大学太陽地球環境研究所	塩川 和夫	shikawa_at_stelab.nagoya-u.ac.jp
30	MAGDAS/210° MM子午線磁力計のベア化とそれによる磁気圏密度L依存性の推定	Dualization of MAGDAS/210MM to estimate the L-dependence of the magnetospheric density	～1億円	施設(観測網)整備	2.1	D		九州大学宇宙天気科学・教育センター	河野 英昭	hkawano_at_geo.kyushu-u.ac.jp
31	衛星地上融合観測に基づく磁気嵐時の放射線増加と大気膨張の予測研究	Prediction study of the radiation-belt enhancement and atmospheric expansion during magnetic storms by using a unified satellite-ground observation system	1億円以上	施設(観測網)整備	2.1, 2.2, 3	B		九州大学宇宙天気科学・教育センター	河野 英昭	hkawano_at_geo.kyushu-u.ac.jp
32	極域・磁気赤道域を連結する全球Cowlingチャンネルの実証的研究	Survey of electromagnetic coupling from auroral to equatorial ionosphere – Integrated study of theoretical and Empirical approach	1億円以上	施設(観測網)整備	2.1	B		九州大学宇宙天気科学・教育センター	吉川 顕正	yoshi_at_geo.kyushu-u.ac.jp
技術開発										
33	地磁気絶対観測自動化の技術開発	A technological innovation of magnetic theodolite for automatic absolute measurements	1億円以上	技術開発	2.5	C		気象庁地磁気観測所	源 泰拓	minamoto_at_met.kishou.go.jp
34	天然試料に特化した試料調製技術の開発	Development of procurement techniques for natural samples	～1億円	技術開発	2.5	D	構想段階のため暫定額	海洋研究開発機構	臼井 洋一	yoichi_at_jamstec.go.jp
35	海洋底玄武岩の系統的試料採取技術の開発	Development for techniques in systematic sample collections of submarine basalts	～1億円	技術開発	2.7	D	構想段階のため暫定額	神戸大学	島 伸和	seama_at_kobe-u.ac.jp
36	海底堆積物の長尺不攪乱試料採掘器の開発	Development of long piston corer for sediment paleomagnetic study	～1億円	技術開発	2.5, 2.7	D	構想段階のため暫定額	海洋研究開発機構	金松 敏也	toshiyak_at_jamstec.go.jp
37	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	～1億円	技術開発・環境整備	2.5, 2.7	D	構想段階のため暫定額	高知大学	山本 裕二	y.yamamoto_at_kochi-u.ac.jp
38	金属コア対流の再現実験の技術開発と大規模数値シミュレーションのための環境整備	Technical developments for metallic core convection experiments and general improvements for large-scale numerical simulation	～1億円	技術開発・環境整備	2.5	D	構想段階のため暫定額	東京大学	櫻庭 中	sakuraba_at_eps.s.u-tokyo.ac.jp
センター整備										
39	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)	2億円/年	センター整備	2.3	AないLB	G-COEプログラムによって現在実施中。また、概算要求、JSPS 拠点研究申請などを現在行っている。	神戸大学惑星科学研究センター	中川 義次	yoshi_at_kobe-u.ac.jp

40	宇宙環境研究のためのサイエンスセンター計画	Space Environment Science Center	1億円程度	センター整備	2.1, 2.2, 2.3, 2.4	A,B,C	一部はすでに予算化されて実施中であるとともに、今後の拡充に向けての計画を具体化しつつある。	名古屋大学太陽地球環境研究所	草野 完也 関 華奈子 三好 由純	kusano_at_stelab.nagoya-u.ac.jp seki_at_stelab.nagoya-u.ac.jp miyoshi_at_stelab.nagoya-u.ac.jp
41	宇宙生存学研究教育拠点	Research hub for human survivability in space	1億円以上	拠点整備	2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 3	C		京都大学・宇宙総合学研究ユニット	磯部 洋明 柴田 一成	isobe_at_kwasan.kyoto-u.ac.jp shibata_at_wasan.kyoto-u.ac.jp
42	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	1億円/年	研究グループ確立	2.3	D		神戸大学惑星科学研究センター	高橋 芳幸	yot_at_gfd-dennou.org
43	グローバル地上観測連携データセンター構想	Virtual data centre for ground based global observations	2000万円/機関/年	センター整備	2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 4	C		京都大学	家森俊彦	iyemori_at_kugi.kyoto-u.ac.jp

注1) 構想の成熟度の定義は以下の通り

A: 既に予算がついて実施中の計画

B: 現在予算要求中である

C: 予算要求のために計画を具体化しつつある

D: 構想段階であり、現在のところ予算要求の予定はない

### 5.1.1. 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、本年3月に米国 MESSENGER が周回軌道に入るまでは、同衛星の3回(2008-2009)、米国マリナー10号による3回のフライバイ観測(1974-5)のみであった。これらの探査は、この小さな惑星にはあり得ないと考えられていた磁場と磁気圏活動の予想外の発見をもたらしたが、その究明は30年以上続く夢に留まってきた。耐熱技術の進展に代表される技術革新が、ようやく大きな壁を取り除きつつある。昨年米国 MESSENGER 衛星が世界で初めて水星周回軌道に投入され、観測が行われており、次々と興味深い現象・事実が観測されている。「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)、磁場・磁気圏の観測に最適化された「水星磁気圏探査機(MMO)」(スピン制御、長楕円極軌道)から構成される。ISAS/JAXA 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 MMO 探査機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、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。

両探査機に搭載する数々の科学観測装置は、2004年の搭載機器選定以降開発は着々と進行し、日本側は昨年11月にシステムの詳細設計審査が完了した。ESA側は2013年1月に予定されている詳細設計審査にむけて準備を進めている。

MMO は本年 1 月にフライトモデルを用いた機械・電気インターフェース試験が終了し、現在は単体各機器の環境試験および最終のキャリブレーションを実施中である。また本年 10 月より総合試験を開始し、本年末にかけて順次搭載機器が参加をし、その後電気試験、振動試験、熱真空試験等を実施し、来年末に終了する予定である。MTM(Mercury Transfer Module：巡行軌道中に使用される電気推進エンジンモジュール)、MPO、MMO を結合したスタックレベル(MCS:Mercury Cruise System)の機械環境試験が本年 9 月末まで ESA/ESTEC において行われた。日本側は MMO 構造モデルを ESA/ESTEC に輸送し、これに参加した。また、EM(Engineering Model)を用いた電気試験が 10 月よりドイツ・フリードリヒスハーヘンにおいて開始されている。MPO、MTM の総合試験は来年度開始される予定である。その後 2014 年度にフライトモデルによる MCS レベルでの試験を経て 2015 年 8 月に仏領ギアナより Ariane-5 により打上げられる予定である。

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 1 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

開発中

打ち上げ：2015 年 8 月(予定)

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：2022 年 2 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

## BepiColombo計画 日欧国際共同水星探査計画



- ESAとJAXAによる共同ミッション
- 2015年にAriane-5によって打ち上げる予定
- 水星周回軌道投入：2022年
- JAXAは水星磁気圏探査機(MMO)の開発・運用に責任を持つ
- ESAは水星表面探査機(MPO)の開発・運用、打上げから水星周回軌道投入にまで責任を持つ
- 日本はMPO搭載観測器の一部の開発に参加する
- 2機の周回機による同時により、水星の磁場・磁気圏、表面、内部構造などを観測し、水星の現在・過去を明らかにする

国内関連機関：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、東海大、極地研、NiCT、名大、京大、京産大、大阪市大、富山県立大、愛媛大、九大、熊本大

連絡先：早川 基（宇宙航空研究開発機構）

e-mail: hayakawa at isas.jaxa.jp

## 5.1.2. JUICE 計画への観測機器搭載 (Payload development for the JUICE mission)

### 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

想定打ち上げ年 2022年

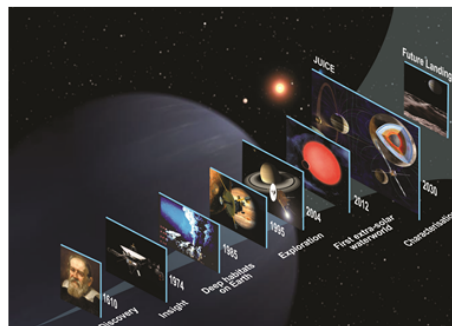
ESAのLクラス計画

意義: 木星系(磁気圏、木星大気、エウロパ・カリストのフライバイ観測)、および、ガニメデ周回観測が目的:(1)系外惑星を意識した、巨大ガス惑星の世界の理解。(2)アストロ・バイオロジーを意識した、氷衛星の探査(ガニメデ、エウロパ、カリスト)

構成: 2012年10月に締切のあったESAでのJUICE搭載観測機器AOへと日本人研究者が参加する。機器提案のPIは欧州側であり、それに日本側チームが協力する形での参加である。合計6つの観測機器提案への参加からなる。競争的な選定過程を経て、AOの結果は2013年2月に通知される。JAXAでの小規模プロジェクトとして実施することを想定して調整中。

予算規模: (b) 10億円以上

関係機関: 日本側チームの代表者は、東北大、東大、NICT、JAXA/ISAS、国立天文台に所属。AOで採択された後は、大学共同利用機関であるISASがとりまとめとなる。この活動は、日本による木星探査機提供を目指して活動してきた、ISASにおけるWG活動のアウトプットでもある。



#### 展望:

JUICEは、過去の探査結果を踏まえ、かつ、地球の熱水鉱床における生態系の発見、系外惑星の発見を踏まえつつ、将来の宇宙生命学の発展を展望する、「人類として実施すべきミッション」だと考える。

このような世界第一級の、30年に一度程度しか実施されない外惑星探査計画に、日本から何らかの形で参加することの意義は、様々な側面において高い。

日本からは、宇宙プラズマ、惑星大気、固体惑星科学分野の観測機器へと協力の予定である。実際、これらがAOで採択されれば、そのことが関連分野における起爆剤となり、日本の惑星分野全体が世界の動向と同期してより活性化することが期待できる。

連絡先: 藤本 正樹 (宇宙航空研究開発機構)

e-mail: fujimoto at stp.isas.jaxa.jp

### 5.1.3. 火星大気散逸探査計画（のぞみ後継機） (Mars atmospheric escape exploration (heir of Nozomi))

#### 1. 目的・内容

本探査計画の目的は、火星気候の大変動の謎を解く鍵となる「火星の二酸化炭素と水の行方」を探ることにある。これまで提案されてきた多様な大気散逸機構を観測的に分別し、各々の大気散逸機構の太陽変動への応答を理解することによって、私達は初めて過去の大気散逸量を推定する根拠を手にすることができる。本探査計画は、過去 40 億年の間に、火星からの大気散逸が気候変動に与えてきた影響を明らかにし、その演繹によって、非磁化惑星のハビタブルゾーンの理解を深めることを目指している。この目的を達成するために、本計画では以下の 4 つ（1 つはオプション）の科学目的を設定している。

- ・目的 1：水と二酸化炭素の各総散逸率を明らかにする
- ・目的 2：惑星起源の低エネルギー帯を含む粒子の散逸機構を明らかにする
- ・目的 3：各大気散逸機構の太陽風・太陽放射変動への応答を明らかにし、大気散逸が気候変動に果たした役割を理解する

・目的 4（オプション）：大気の上下結合が大気散逸率におよぼす影響を明らかにする

目的 1 の実現には、高い質量分解能をもつ粒子観測装置による観測が必要となり、目的 2 の実現には撮像観測とその場観測を連携させた「全体」と「詳細特性」の同時観測が有効となる。目的 3 の実現には、火星軌道での太陽風・太陽放射のモニター観測および太陽活動極大期を含む時期の観測が必要となる。熱的なジェーンズ流出機構や、光化学反応による散逸機構、偏極電場による散逸機構に加えて、非磁化惑星に特有のイオンピックアップ機構、スパッタリング機構、太陽風・電離圏粘性相互作用機構などの各種大気・プラズマ散逸機構とその太陽風・太陽放射変動に対する応答を明らかにすることによって、太陽活動度が高かった過去も含めて火星からの温室効果ガスと水の総散逸量を評価し、大気散逸が気候変動に果たした役割を理解する。火星の大気散逸探査で得られた知見は、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、他の非磁化惑星のハビタブルゾーンの理解にも寄与する。

#### 2. 関係機関

JAXA 宇宙科学研究所、北海道大学、東北大学、立教大学、東京大学、NICT、名古屋大学、富山県立大学、京都大学、金沢大学、他 計 22 機関

（WG 設立時メンバー：68 名）

### 3. 予算規模

(c) 100 億円以上 (中型科学衛星)

### 4. スケジュール

2011 年に ISAS 内ワーキンググループ設立が承認され、現在検討中。

打ち上げ時期は 2022 年頃を想定 (ミッション期間に次期太陽活動極大期を含む)

**火星大気散逸探査計画(のぞみ後継機):**

**「火星気候変動の謎: 二酸化炭素と水の行方を探る」**

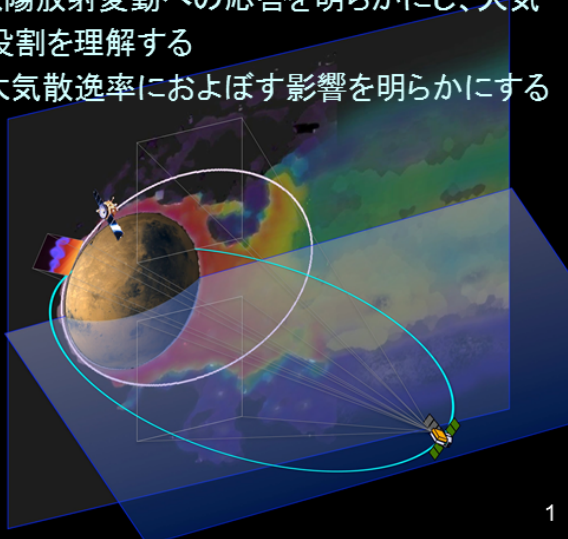
- ・目的1: 水と二酸化炭素の各総散逸率を明らかにする
- ・目的2: 惑星起源の低エネルギー帯を含む粒子の散逸機構を明らかにする
- ・目的3: 各大気散逸機構の太陽風・太陽放射変動への応答を明らかにし、大気散逸が気候変動に果たした役割を理解する
- ・目的4(option): 大気の上層結合が大気散逸率におよぼす影響を明らかにする

◆ 検討段階: 2011年にISAS内ワーキンググループ設立が承認され、検討中

◆ 予算規模: 中型科学衛星

◆ 打ち上げ時期: 2022年頃 (ミッション期間に次期太陽活動極大期を含む)

◆ 関連機関(提案時WGメンバー:68名): JAXA宇宙科学研究所、北海道大学、東北大学、立教大学、東京大学、NICT、名古屋大学、富山県立大学、京都大学、金沢大学、他計22機関



1

連絡先: 松岡 彩子 (宇宙航空研究開発機構)

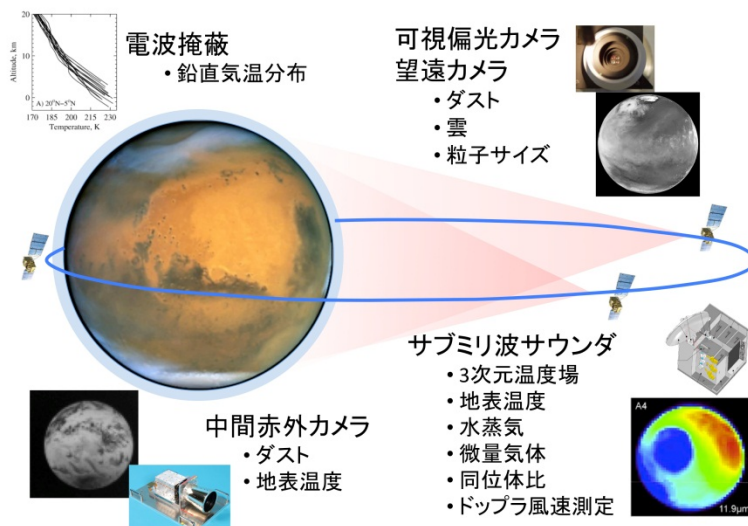
e-mail: matsuoka\_at\_isas.jaxa.jp

## 5.1.4. 火星気象オービター (Mars meteorological orbiter mission)

### 1. 火星のダストと気候

現在の火星の大気は薄く、主成分が二酸化炭素であるにも関わらず温室効果がほとんど働かない。代わって大気中にミクロンサイズの鉱物粒子（ダスト）が常時浮遊し、これが太陽光を吸収することにより加熱源となり、大気構造を支配している。この放射効果により火星のダストは、大気大循環、水循環、上層大気に輸送され散逸に至る大気種など、現在の火星気候の特徴とその変遷要因に深く関わっている。しかしダストがどのようなプロセスで地表から大気へと巻き上げられ、どのように大気中を運ばれて現在見られるような大気の不透明度を維持しているのかは、あまり理解されていない。火星のような凍結した惑星の気候がどのように調節されるのかを知るために、また惑星の大気循環の普遍的な理解のために、ダストに支配される火星の気象学と其中で生起する様々な物質の輸送を解明することは重要な課題である。

ここに提案する火星気象オービターは、ダスト気象学を中心に火星気候の決定要因を明らかにしようとするものである。ダストの輸送プロセスをこれまでにない高い時空間分解能のリモートセンシングによって捉え、ダストの巻き上げメカニズムや、大気力学におけるダストの放射効果の理解を目指す。さらに水蒸気輸送が駆動する水循環、その他微量気体の輸送と変質を支配する物理の解明も掲げる。我が国は惑星気象の観測的研究に道を拓くべく金星探査機「あかつき」を送り出したところであるが、火星オービターはこの実績を引き継ぎつつ、新たな科学目的のもとに惑星気象学の一層の発展を目指すものである。



気象オービターからの観測のイメージ

## 2. 世界初の連続グローバル大気観測

これまで火星の気象を継続的に観測したミッションとして米国の Mars Global Surveyor や Mars Reconnaissance Orbiter があり、これらの観測により惑星スケールの大気構造や大気波動、その季節変化の理解が大きく進んだ。しかしこれらは低高度の極軌道衛星ゆえに衛星直下の狭い範囲しか観測することができず、メソスケールから総観スケール（数 km ~ 数千 km）の大気現象の時間発展を追跡できないという、気象学研究にとって大きな問題があった。火星大気を特徴付けるダストの輸送、また水循環を駆動する水蒸気輸送やエアロゾル表面反応を含む大気化学においては、この空白のスケールこそ重要である。熱容量の小さな火星大気では大きな日変化が本質的であり、これを追跡できる時間分解能も必須である。新たな火星オービターは高い軌道からのグローバルな連続観測により、大気力学場とその中で起こる物質輸送を同時に可視化する。

検討中の軌道は軌道傾斜角  $9.97^\circ$ 、近火点高度 450 km、遠火点 6.45 火星半径、軌道周期 1/2 火星日（12.3 時間）であり、遠火点が昼側に固定されたほぼ赤道周回の軌道である。この軌道からは 1 周回の間特定の半球内の気象現象の時間発展を半日にわたって追跡可能であり、日変化をモニターしつつ 2 周（1 火星日）で全球をカバーする。1~2 時間おきに取得された観測データからは、個々の気象擾乱が成長しつつあるのか衰退しているのか、どのような背景風があるのかといった、力学過程を特定するための情報も得られる。後述の偏光観測のために 1 周回のうちに広い太陽位相角をカバーする。

## 3. 搭載センサと観測

主要観測センサは偏光カメラ、サブミリ波サウンダ、中間赤外カメラ、望遠カメラ、電波遮蔽観測用の超高安定発振器である。このうち偏光カメラとサブミリ波サウンダは世界に先駆けて初めて火星探査機に搭載しようとするものであり、中間赤外カメラと望遠カメラも気象観測用としては世界初となる。これらの機器によって諸外国の追従を許さない革新的な観測データを得る。

火星ダストの研究においてはこれまで可視カメラ画像が多く用いられてきたが、浮遊ダストと地表ダストの区別がつきにくく、縁のはっきりしたダスト雲だけが研究対象たりえてきた。しかしこれでは少なからぬダスト現象を見逃しているはずであり、新たな手法の開拓が望まれる。赤外分光は浮遊ダストと地面を区別できるが、従来はサンプリングが経度方向に疎らであったため惑星スケールの現象しか見ることができなかった。そこで我々は、可視波長での精細な偏光撮像によって浮遊ダストと地表ダストを区別する。地表・雲・ダストの偏光度がそれぞれ異なる太陽位相角依存性を示すことを利用して、1 周回中の連続撮像により位相曲線を描いてこれらを分離するとともに、ダストの粒径や数密度情報を抽出する。また撮像ごとに、場所による偏光度の違いからこれらを分離し、1 周回中の時間変化をとらえる。同時に狭視野の望遠カメラを運用し、偏光カメラでは分解できない小規模

なダスト現象を捉えることも検討している。

これと相補的な観測として、昼夜区別なくダストや雲の撮像を行うために中間赤外カメラを搭載する。この機器はリム撮像によりダストの高度分布も得る。近年の火星探査により地表から離れた高高度のダスト混合比極大が報告されているが、中間赤外カメラはこのような高度分布を作り出す3次元ダスト輸送の解明のために重要な役割を担う。地表温度マッピングにより地表の熱慣性やダスト分布の情報も得る。

3次元力学場の情報はサブミリ波サウンダで得られる。サブミリ波では赤外分光と違ってダスト雲の内側も外側も同じように計測できることが重要な点である。地球観測衛星に搭載されたサブミリ波サウンダが従来行ってきたリム観測に加え、このミッションでは直下視で視線方向を2次元走査することにより、数百 km の水平分解能でグローバルな3次元情報を得る。観測対象は気温の3次元分布、水蒸気の3次元分布、同位体 ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ )、微量気体 ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{HO}_2$ ,  $\text{O}_3$  など)、地表面温度と物性、ドップラーシフトによる風速である。

サブミリ波サウンダによる水蒸気観測は水循環の理解のための決め手となる。表層の氷の分布を支配する水蒸気の長距離輸送と日変化サイクルを周辺の気象場とともに捉えることは初の試みである。微量気体計測では、ダストや雲の分布、3次元気温情報が同時に得られることを生かして、粒子表面反応など気象場と結合した大気化学と輸送の理解を目指す。これは微量気体の高感度検出に最適化した ESA の **Trace Gas Orbiter** とは異なる視点である。

電波掩蔽による気温計測は、観測地点が地球から見た火星の縁付近（朝方と夕方）に限られるものの、高精度ゆえに地表付近の大気安定度のモニターや鉛直伝搬波動の検出を可能にする。サブミリ波サウンダによる気温計測の精度評価にも利用する。

以上の基本搭載機器の他に、サイエンスを強化するために新たな観測装置も検討している。たとえば中間赤外分光により大気ダストの定量や気温計測をより確かなものにする、近赤外分光により  $\text{CO}_2$  コラム量を定量し地表気圧をモニターする、などである。実施の可能性について引き続き検討を行う。

これら大気温度や物質分布の観測データを、数値シミュレーションを用いて4次元データ同化し、物理的に整合的なデータセットを構築して研究に供する。データ同化は地球大気科学においては経験が蓄積されているが、惑星探査分野では火星について初期的な試みがあるのみで、研究の余地が大きい。今後の惑星大気科学にとって必須と考えられるこの技術の開発に、我々は正面から取り組む。

#### 4. 予算規模、関係機関、実施時期

実施のための予算は衛星と打ち上げロケットを合わせて200億円規模が想定される。関係する機関は、衛星開発の主体となる JAXA 宇宙科学研究所のほか、観測機器開発やデータ解析を担う大学（北大、東北大、神戸大、東大、立教大など）、サブミリ波サウンダの開



発を担う情報通信研究機構と NASA など共同開発機関である。実施時期はおよそ 10 年後（2020 年代初頭）を想定している。

## 5. 展望

近年、火星には欧米によって多くの探査機が送り込まれ、火星に関する我々の理解は 20 年前と比較にならない高いレベルにある。これまで惑星探査に関わってこなかった国々でも火星探査の機運が盛り上がり、世界の注目が火星に集まっていると言える。しかしそれだけに、残されている課題は難問揃いであり、後発の我が国が画期的な成果を挙げるのは容易でない。その中であってこのオービター計画は、金星探査機「あかつき」や ISS 搭載サブミリ波サウンダ SMILES などの開発実績をベースにした堅実な手法をもとに、これまでになかった斬新な視点を火星環境科学に導入するものである。ユニークな観測機器による高高度からの連続グローバル観測は、これまで知られていない多様な大気現象を暴き出し、ダスト気象学を中心に物質輸送の理解を大いに進展させるだろう。世界における惑星環境研究の重要な一手として、着実に実現に近づけていきたい。

# 火星気象オービター




**電波掩蔽**  
• 鉛直気温分布



**可視偏光カメラ  
望遠カメラ**  
• ダスト  
• 雲  
• 粒子サイズ

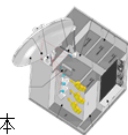


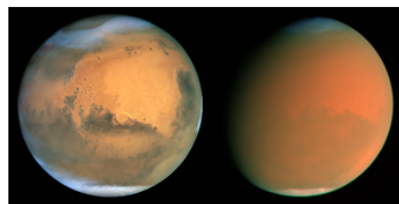




**中間赤外カメラ**  
• ダスト  
• 地表温度

**サブミリ波サウンダ**  
• 3次元温度場  
• 地表温度  
• 水蒸気

• 微量気体  
• 同位体比  
• ドップラ風速測定





**内容:** 周回機からのリモートセンシングにより、ダスト気象学をはじめとする火星気候の支配物理を明らかにする。ダストや水蒸気など微量大気成分の輸送とその背後の流体力学を、これまでになかった高い時間空間分解能の連続グローバル観測によって可視化する。

**予算:** 200億円規模

**関係機関:** JAXA、大学、NICT

**実施時期:** 2020年代前半

連絡先：今村 剛（宇宙航空研究開発機構）

imamura.takeshi at jaxa.jp



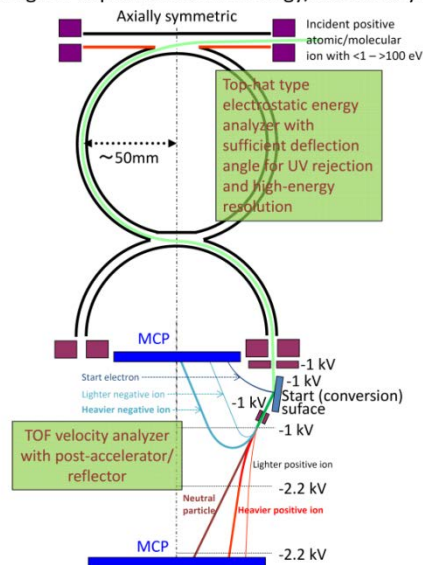
## 5.1.5. 非磁化地球型惑星での超高層大気探査と関連する観測機器開発 (Exploration for the upper atmospheres of unmagnetized terrestrial planets and associated instrumental development)

### 1. 目的・内容

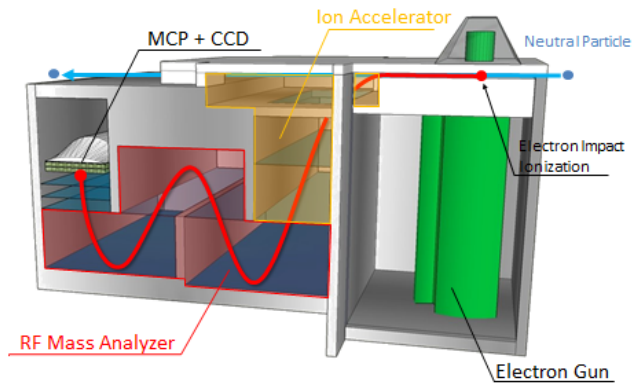
生命の誕生・維持、及び知的生命への進化において、必須ともいえる「大気」と「地殻」を持つ惑星の中でも、特に未だ不十分な非磁化惑星探査を今後の最重要課題と位置付け、非磁化惑星周辺での太陽風・電離圏・熱圏の相互作用と、それに左右される地球型惑星超高層大気環境を、直接観測を基軸とする手法により探査する。また、この目的のために必要となる観測機器群の開発を行う。個々に求められる観測機器技術として、今後国内で注力すべきは以下の2項目である。

1. 超熱的エネルギー帯におけるイオン3次元速度分布計測（下左図）
2. 中性粒子の質量・速度分布計測（下右図）

Design of Suprathermal Ion Energy/Mass Analyzer



ANA Schematic View



### 2. 背景

日本国内外で現在遂行中・開発中の探査計画を含め、地球を始めとする磁化惑星の探査は高度に発展しつつある。一方で、大気を持つ非磁化惑星における太陽風・電離圏・熱圏の相互作用や超高層大気環境の直接観測自体が国内では未踏破のままである。加えて地球の場合でも、固有磁場がこのまま漸次減少し、1千年以内には四重極以上の多重極分布による数百 nT という弱い磁場環境に一時的にも陥ることが予想される。この弱磁場環境は、現在、探査計画が進行中の水星磁気圏より更に極端なものとなり、同じ地球型惑星の中でも、金星や火星に代表される非磁化大気惑星により近い環境となると推測される。更に昨今、系外惑星観測によるホットジュピター・スーパーアースの発見を契機に、惑星系における生

命の誕生・維持、知的生命への進化という視点から、固体（地球型）惑星における大気進化・超高層大気環境に関するより深い知見が求められている。しかしながら、これらの視点から俯瞰した場合、国外の複数の探査計画や具体的な観測成果も全く不十分と言わざるを得ない状況にある。上述した諸問題・課題は、太陽系でのみ遂行可能な惑星の「電離圏・熱圏」、「超高層大気」における直接観測が極めて重要な事を示唆しており、本学会主導による早急な対応が必要であるはずであるが、地球・惑星の「磁気圏」観測と比した場合、残念ながらその方策・体制・実施が大きく立ち後れているのが現状である。

### 3. 関連機関

国内独自の探査計画の場合、その計画自体の実施母体は宇宙航空研究開発機構、特に宇宙科学研究所になると思われる。個々の観測機器の研究・開発は関連する全ての大学・研究所等の複数の機関にて、同時並行・共同研究により遂行される。

### 4. 予算規模

太陽系内で大気を持つ非磁化惑星として直接観測が容易なものは金星、次いで火星であり、それらの探査を国内で実施する計画自体としては、観測機器を含む探査機の開発・打ち上げ・運用において数百億円の予算が必要である。従って予算規模は(c)となる。

探査計画が立案・承認されるまでには、個々の観測機器の基礎開発が必要となり、その研究・開発のための地上関連設備の構築も含め、その経費は数千万～億円である。従って予算規模は(a)となる。

### 4. スケジュール

#### 探査計画

2020年代中期での実施を想定した場合、2010年代中期・後半での計画提案・承認が適切かと思われる。

#### 観測機器、及び関連設備の研究開発

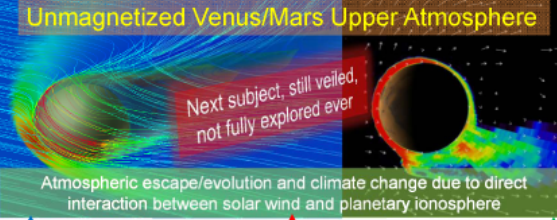
1. 超熱的エネルギー帯におけるイオン3次元速度分布計測
  - (ア) 基礎開発：2012-2017年
  - (イ) ロケット等による実証・地球観測：2016-2021年
  - (ウ) 惑星探査用モデル開発：2020年-
2. 中性粒子の質量・速度分布計測
  - (ア) 基礎開発：2012-2017年
  - (イ) ロケット等による実証・地球観測：2016-2021年
  - (ウ) 惑星探査用モデル開発：2020年-
3. 開発・較正実験用施設としての超熱的エネルギー帯イオン・中性粒子ビームライン

- (ア) 開発・整備：2012-2015年
- (イ) 定常運用・改良：2016年-

## Exploration for the Upper Atmospheres of Unmagnetized Terrestrial Planets and Associated Instrumental Development

### —非磁化地球型惑星での超高層大気探査と関連する観測機器開発—

非磁化地球型惑星の超高層大気探査計画：2010年代中・後期での計画提案・承認、2020年代中期での実施  
 観測機器、及び関連設備の研究開発項目：超熱的エネルギー帯におけるイオン3次元速度分布観測器  
 中性粒子の質量・速度分布観測器  
 開発・校正実験用施設としての超熱的エネルギー帯イオン・中性粒子ビームライン

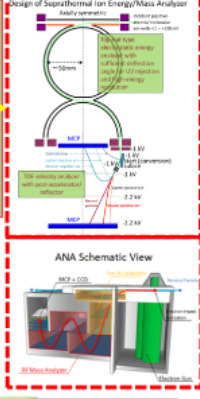


**Unmagnetized Venus/Mars Upper Atmosphere**

Next subject, still veiled, not fully explored ever

Atmospheric escape/evolution and climate change due to direct interaction between solar wind and planetary ionosphere

Instrumental development of suprathermal ion and neutral analyzers for upper atmospheric explorations



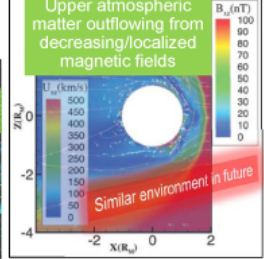
Design of Suprathermal Ion Energy/Mass Analyzer

ANA Schematic View

Direct comparisons of the interaction processes between the solar wind and magnetized/unmagnetized planetary environment

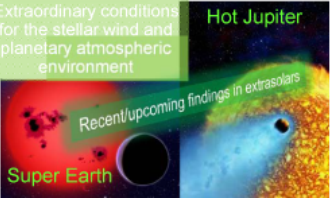
Insight to terrestrial upper atmospheric environment with the geomagnetic field decreasing in 1000 yrs.

Upper atmospheric matter outflowing from decreasing/localized magnetic fields



Understanding of similarities/discrepancies in exospheric environment between our planets and exoplanets

Extraordinary conditions for the stellar wind and planetary atmospheric environment



Hot Jupiter

Super Earth

Recent/upcoming findings in extrasolars

Direct comparisons of the interaction processes between the solar wind and magnetized/unmagnetized planetary environment

Magnetized Planetary Space

Terrestrial upper atmosphere and intrinsic magnetic field

Many missions on going or coming soon

Solar wind plasma stream and interplanetary magnetic field

**観測機器**

基礎開発  
2012-2017年

ロケット等による  
実証・地球観測  
2016-2021年

惑星探査用開発  
2020年-

**開発・校正  
実験用施設**

基礎開発  
2012-2017年

定常運用・改良  
2016年-

連絡先：平原 聖文（名古屋大学）  
 e-mail: hirahara at stelab.nagoya-u.ac.jp

## 5.1.6. SCOPE 計画 (The SCOPE Mission)

### SCOPE計画

#### 磁気圏探査衛星・宇宙プラズマ物理 想定打ち上げ年 ～2020年代前半

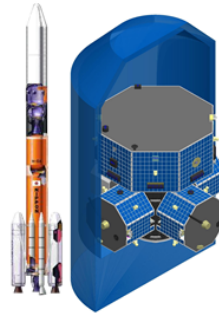
**意義:** (1) 太陽の影響下で大変動する太陽系宇宙環境を理解する。(2) 宇宙空間を満たすプラズマガスの物理を解明する。(3) プラズマ物理に基づいた新しい宇宙観を構築する。

**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。

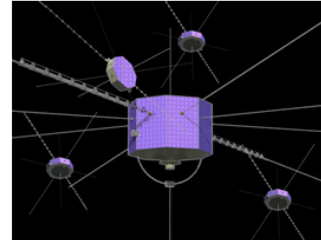
宇宙プラズマ現象「その場」で「同時マルチ・スケール観測」を実施するため、親子ペア衛星とそれを取り囲む子機3機の計5機で衛星編隊を組む。親子ペアがマイクロ物理へのズーム・インを行うと同時に、3機編隊がその周辺場のマクロ物理を把握し、スケールの異なる物理プロセスが結合・連携する様相を解明する。

**予算規模:** (c) 100億円以上

**関係機関:** 東北大、東大、東工大、名大、京大、九大等。大学共同利用機関であるJAXA宇宙科学研究所がとりまとめとなる。また、国際協力も必須である(調整中)。



H-2Aによる打ち上げを想定して検討。右は5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。

**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、マイクロ・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。

連絡先：藤本 正樹 (宇宙航空研究開発機構)

e-mail: fujimoto at stp.isas.jaxa.jp

### 5.1.7. 地球の周回からの惑星プラズマ・大気の観測 (EXCEED) 計画 (Earth-Orbiting EUV Spectrometer for planetary science)

#### 1. 目的・内容

EXCEED 計画は、惑星周辺に分布するプラズマが発する極端紫外光を地球周回軌道から分光・撮像する衛星計画である。地球型惑星の大気散逸と、木星型惑星に見られる回転支配型磁気圏でのエネルギー輸送の問題に焦点を当て、地球とは異なる磁気圏特性の理解を目指す。宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所の小型科学衛星 1 号機(Sprint-A)に選定され、2013 年の打ち上げに向けて開発が進行中である。

#### 2. 関係機関

東京大学、東北大学、JAXA

#### 3. 予算規模

10 億円以上

#### 4. スケジュール

2013 年 8 月に打ち上げ、最低でも 1 年間の観測を実施し、最長で 3 年間の観測を目指す。



連絡先: 吉川 一郎 (東京大学)

e-mail: yoshikawa at eps.s.u-tokyo.ac.jp

### 5.1.8. 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。宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所が実施する ERG 衛星計画による直接探査による粒子、場、波動の詳細観測と、各研究機関によって実施されている地上多点ネットワーク観測によるジオスペースリモートセンシング観測とを組みあわせ、さらに数値実験と観測データとの比較によって、放射線帯、宇宙嵐現象の定量的かつ包括的な理解を目指している。また、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、国際協調にもとづいて成果の拡大を図るとともに、THEMIS 計画、大学間連携計画等と共同して統合解析ツールの開発を推進し、各種データのシームレスな解析を円滑に実施できるような準備も進めている。

#### 2. 関係機関

宇宙航空研究開発機構、東北大学、名古屋大学、京都大学、北海道大学、東京大学、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、富山県立大学、金沢大学、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

#### 3. スケジュール: 実施中

2012 年: 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所でプロジェクト化

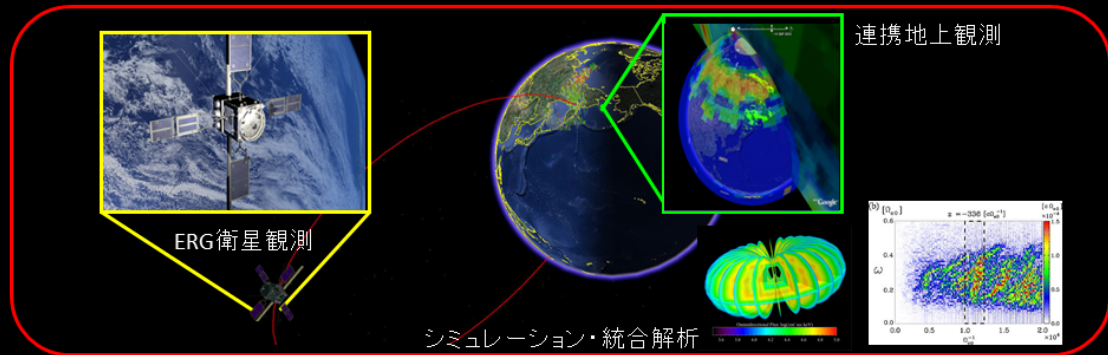
2012 年-2015 年: ERG 衛星の開発

2015 年: ERG 衛星の打ち上げ、ジオスペース観測開始



## ジオスペース探査衛星 (ERG) 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、シミュレーションの三位一体の研究体制で解明



年次計画 2012年: ISAS/JAXAにて、ジオスペース衛星計画としてプロジェクト化

2012-15年: ERG衛星の開発

2015年: ERG衛星の打ち上げ、ジオスペース直接探査の開始

関連機関: 宇宙航空研究開発機構、東北大学、名古屋大学、京都大学、北海道大学、千葉大学、東京大学、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、富山県立大学、金沢大学、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: 高島健 (宇宙航空研究開発機構) e-mail: ttakeshi at stp.isas.jaxa.jp

三好由純 (名古屋大学) e-mail: miyoshi at stelab.nagoya-u.ac.jp

### 5.1.9. 日本—ノルウェー共同観測ロケット10年計画 (JAPAN—NORWAY Sounding Rocket Experiment Decadal Plan)

#### (1) 内容

「極域電離圏におけるグローバルからメソスケール現象発生の際となるマイクロフィジックスの統一的理解とその役割（スケール間結合）の解明」を計画全体の目的として、日本—ノルウェーの国際協力の下で観測ロケット実験を中核とした地上観測・衛星観測を含む総合観測を実施する。計画には以下の項目が含まれる。

- a) ノルウェーの観測ロケットICI-4への観測装置の搭載による参加
- b) アンドーヤからのS520観測ロケット実験
- c) スピッツベルゲン島ニーオルスンからの3機のSS520観測ロケット実験
- d) アンドーヤからのSS520観測ロケット実験

#### a)

##### ICI-4 (2013年度)

「極域カスププラズマ擾乱現象の観測的研究：ノルウェーの観測ロケットICI-4への観測装置の搭載」

本研究は、極域カスプ領域に発生するプラズマ擾乱現象の観測を主目的としてノルウェーがスピッツベルゲン島ニーオルスンから打ち上げる観測ロケットICI-4に日本が製作する2台の観測装置を搭載し、現象の解明に本質的な高時間分解能データの取得を行うものである。このICI-4キャンペーンは日本、ノルウェー、フランス、カナダ、アメリカの5か国の国際協力により実施される。ロケットの打ち上げは平成25年度冬に予定されており、日本からは、電子密度擾乱測定器（FBP）と低エネルギー電子計測器（LEP-ESA）を開発してロケットに搭載する。ICI-4プロジェクトにおいてこれらの最も重要な物理量測定を担当することで、電離圏物理学研究上の顕著な課題に対して大きく貢献できることになる。また搭載観測装置は、本計画で計測性能の向上を進めながら使用する、高時間分解能観測装置初期モデルのフライト実証試験の側面も持っている。

#### b)

##### 10年計画2号機 S520-10Y1 (2017年度)

「パルセイティングオーロラ高速直接観測」

パルセイティングオーロラについて、ロケットによる高時間分解能での粒子・波動観測と地上からの高時間・高空間分解能の光学観測、更に、理論的にパルセイティングオーロラの生成領域と考えられている磁気圏の磁気赤道領域を飛行する2015年度打ち上げ予定のERG衛星の観測を組み合わせることにより、オーロラの高速度微細スケール構造を作り出す



メカニズムを解明する。パルセイティングオーロラのパッチ構造は電離圏から流出した熱的電子の磁気圏分布が決められている可能性があるため、電離圏電子の流出メカニズムの解明にもつながることになる。また、パルセイティングオーロラの特徴である薄い発光層の形成に電離圏E領域での電場構造が関わっているという仮説について、観測にもとづく直接検証を行う。ERG衛星、地上観測と同時にロケット観測を実施することで、長年の課題となって来たパルセイティングオーロラ生成メカニズムの議論に決着をつけることが期待できる。

c)

10年計画1号機 SS520-10Y1 (2015年度)

**「極域カスプ上空波動一粒子相互作用の直接観測による電離大気流出過程の研究」**

電離大気の加速・流出現象は、地球のみならず火星、水星を含む他惑星や月を含む衛星周辺でも起こる普遍的な現象であることが最近の国内外の観測で次第に明らかとなってきた。しかしながら、その流出機構については、それぞれの天体の条件で様々に変化し、それらの機構を理解することは天体周辺大気の変遷を理解・予測する上で必要不可欠である。本ロケット実験は、地球で主要な電離大気流出が起きている極域カスプ周辺領域において、電離大気流出の原因として理論的に想定されている波動一粒子相互作用を、将来の人工衛星ミッションに向けて新たに開発された観測装置を用いて世界で初めてその場で検出、解明するミッションである。これらの波動一粒子相互作用は極域カスプ上空1000km付近から効率よく働いていると予測されており、本実験には1000km高度まで到達できるSS520の使用が必須となる。更に、カスプ上空にSS520を打ち上げる事のできる射場は、スピッツベルゲン島ニーオレスンを除いて他には無い。本実験においては、ロケット搭載観測装置による直接計測と、地上からのレーダー及び光学観測を総合的に実施する。

10年計画3号機 SS520-10Y2 (2018年度)

**「極域カスプ領域において中性大気一電離大気の相互作用が大気流出量に与える影響の研究」**

極域下部電離圏での中性大気と電離大気の相互作用は電離圏からの大気流出量に大きな影響を与える。これは下層からの大気供給量が流出するプラズマフラックスを左右するからである。電離圏中では原子・分子とプラズマ間の荷電交換反応が生じるが、極域電離圏カスプ領域に存在する中性大気の上昇流フラックスの観測例が無いために、定量的な議論ができないのが現状である。本実験では電離時定数が約30秒のバリウムを蒸気化した状態でロケットから放出し、中性大気成分と電離した成分の共鳴散乱光を連続的に撮像することで、それぞれの速度成分を得る。同時に測定される電子密度、イオン密度等のデータと合わせて解析することで、中性大気と電離大気間の運動量輸送についての定量的な議論が可能になる。

10年計画 4号機 SS520-10Y3 (2019年度)

「極域カスプ北側領域における波動一粒子相互作用の直接観測による電離大気流出過程の研究」

極域カスプの北側の領域においては、地上からのレーダー観測によって電子の降り込みに伴ってイオンの流出が起きることがわかっている。カスプ中央部での観測に続いて、次第に違いが明らかとなりつつあるカスプ北側の領域における電離大気の流れ過程を降り込み電子との関係を含めて波動一粒子相互作用の直接検出を通して明らかにする。カスプの北側領域はカスプ中央部に比べて、inverted-Vと呼ばれる電子の電場による加速（加速電圧は夜側のオーロラ上空に比べてそれほど高くない）や、電子の速度分散を伴った降り込みなどが頻繁に観測され、カスプ中央部に比べて高い時間分解能での観測が要求される。

d)

10年計画 5号機 SS520-10Y4 (2022年度)

「夜側ディスクリートオーロラ上空における波動一粒子相互作用の直接観測による電離大気流出過程の研究」

夜側でディスクリートオーロラ上空においてもイオンの流出が起きることが衛星観測によって知られている。しかしながら、昼側のカスプ領域とは、磁気圏から降り込む電子、イオンが大きく異なることから、イオン流出のメカニズムは（加熱に起因する波動一粒子相互作用も含め）昼間側と異なると考えられている。夜側ディスクリートオーロラ上空には電子の非常に強い加速が存在し、従って降り込む電子のフラックスも昼側に比べて高い。また加速領域の時間的な変動（強度、位置）も大きいことからカスプ周辺における観測よりも更に高い時間分解能での観測が要求されるため、本計画では難度の高い5番目の実験として位置付けている。

(2) 予算規模

- ・ ICI-4 0.35億円
- ・ SS520-10Y1 10年計画1号機 5億円
- ・ S520-10Y1 4億円
- ・ SS520-10Y2 10年計画2号機 5億円
- ・ SS520-10Y3 10年計画3号機 5億円
- ・ SS520-10Y4 10年計画4号機 5億円

計 24.35億円

(3) 関係機関

現時点でSS520・S520観測ロケット実験には海外の大学、研究機関を含む12の大学、研究機関が参加している。

京都大学、東北大学、富山県立大学、金沢大学、名古屋大学、東海大学、宇宙科学研究所、極地研究所

オスロ大学（ノルウェー）、IWF（オーストリア）、IEP（オーストリア）、カルガリー大学（カナダ）

(4) 時間軸

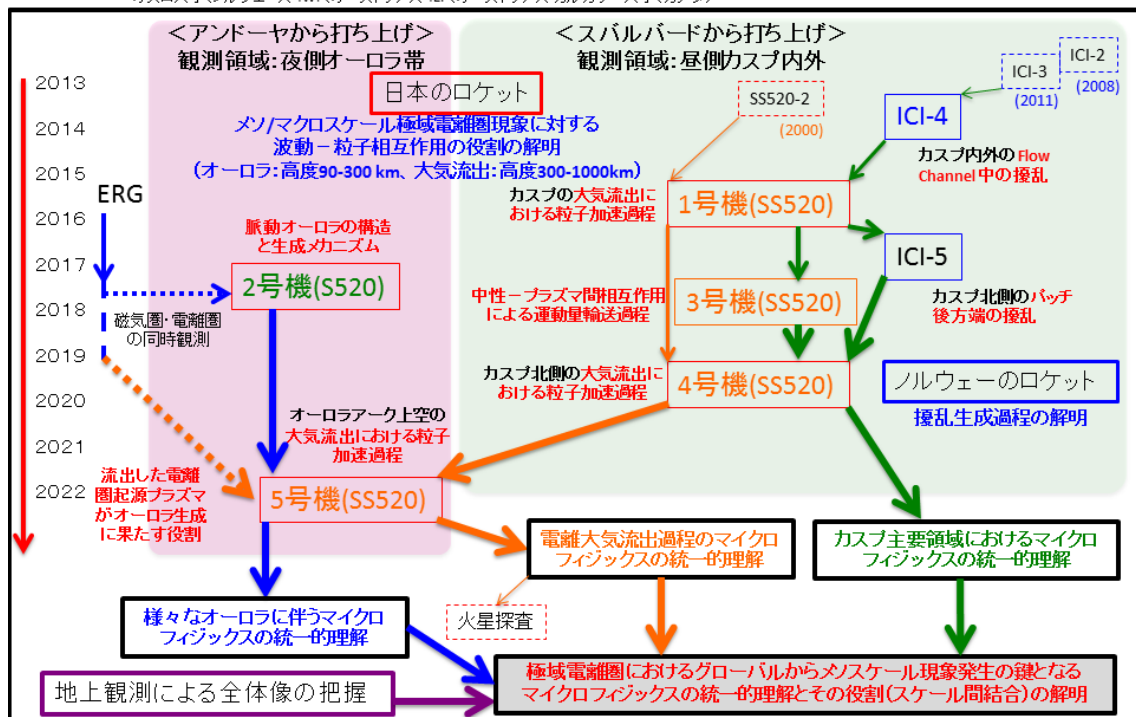
計画中のICI-4については、実行直前の状態にある。

計画全体としては2013年度から2022年度までの今後10年間を予定している。

### 日本-ノルウェー共同観測ロケット実験10年計画

「極域電離圏におけるグローバルからメソスケール現象発生の際となるマイクロフィジクスの統一的理解とその役割(スケール間結合)の解明を計画全体の目的として、日本-ノルウェーの国際協力の下で観測ロケット実験を中核とした地上観測・衛星観測を含む総合観測を実施する。

予算規模: 24.35億円  
 関係機関: 京都大学、東北大学、富山県立大学、金沢大学、名古屋大学、東海大学、宇宙科学研究所、極地研究所、オスロ大学(ノルウェー)、IWF(オーストリア)、IEP(オーストリア)、カルガリー大学(カナダ)

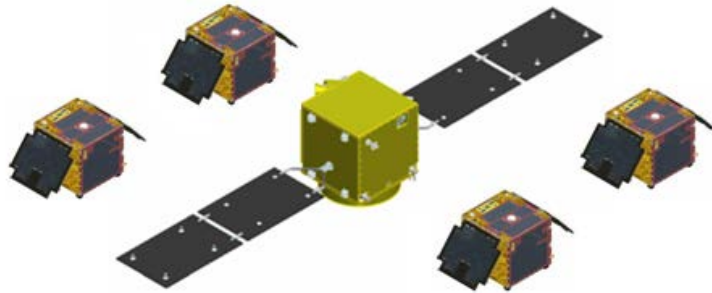


連絡先: 齋藤義文 (宇宙研)

e-mail: saito at stp.isas.jaxa.jp

**5.1.10. 小型衛星群による大気圏－電離圏観測**  
**(Small Satellite Constellation for Atmosphere-Ionosphere Research)**  
**(ELMOS ワーキンググループ, 2012 年 10 月)**

内容：主衛星および子衛星 5～6 機による観測



- ・ 高度 500-600km ・ 軌道傾斜角 50-60 度の円軌道
- ・ 大気圏－電離圏の時空間変動観測の為、全衛星に GPS 掩蔽・電子密度・温度プローブを  
搭載
- ・ 主衛星は以下の観測機器、子衛星の余剰ペイロードには光学・電波・粒子観測機器等

主衛星搭載ミッション機器一覧（案）

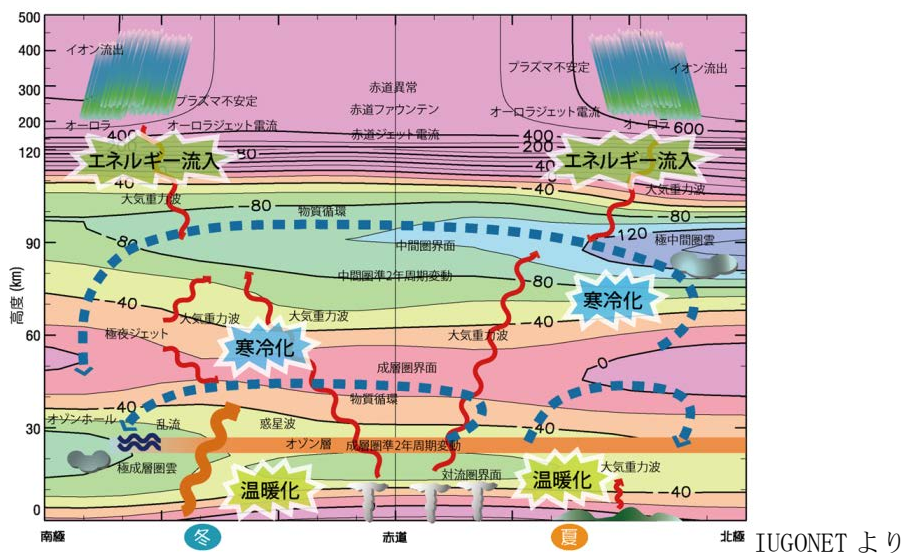
	重量[kg]	電力[W]	Datarate [kbps]
電子密度・温度プローブ	計 2	計 7	計 20 以下
GPS 掩蔽受信器	2.5	25	2.3(25Mbytes/day)
低周波電磁波受信機	5	5	64
電場測定器	5	5	64
二次元フォトメータ	5	2	10
エネルギー粒子測定器	8.6	13.5	32
プラズマ高度プロファイル計測器	12	40	32
イオン・中性ガス質量分析計	2.97	8	32
中性風測定器	10	5	20
プラズマドリフトメータ	3	3	20
酸素原子測定器	3	3	19.2
磁力計(Magnetometer)	3.11	5	1.544
技術データ取得装置 (TEDA)	4.55	11.9	1
合 計	約 68kg	約 133W	約 318kbps

- 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

既に GPS 掩蔽観測データは気象予報精度の改善に利用されており、実利用のみならず、大気圏－電離圏研究に貢献する安価な大気圏－電離圏統合観測システムとなる潜在力を有している。

今後、各国の測位衛星の整備により、掩蔽観測によってもたらされる大気圏・電離圏情報は飛躍的に拡大することが確実である。将来的には超小型衛星の利用により観測密度を向上させることが可能となる。

本ミッションの研究対象領域



- 電離圏：電離圏物理, 宇宙環境・宇宙天気・通信測位・国際標準電離層モデル
- 中間圏：大気散逸・大気圏－電離圏結合
- 成層圏：発光・突然昇温・温暖化に伴う寒冷化
- 対流圏：GPS 掩蔽観測による気象予測精度改善（実利用）
- 地 圏：地震・海洋情報

## 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。

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、IUGG/EMSEV 等

時間軸 : 2018 年頃打上げ予定 (JAXA 提案中) ・後継は小型化と機数増加

## ELMOS ワーキンググループ (2012.9.18 現在)

小山孝一郎 元宇宙科学研究所教授・台湾國立成功大学研究教授

渡部 重十 北海道大学教授・宇宙観測基礎データセンター長・国際標準電離層タスクグループ副委員長

日置 幸介 北海道大学教授

茂木 透 北海道大学・地震火山研究観測センター教授

柿並 義宏 北海道大学・地震火山研究観測センター  
 小原 隆博 東北大学惑星プラズマ大気研究センター長・前 JAXA 宇宙環境グループ長  
 中谷 正生 東京大学地震研究所・地震火山噴火予知研究協議会地震発生先行過程部会長  
 海老沼拓史 東京大学・(財)衛星測位利用推進センターGNSS 専門委員会主査  
 早川 正士 電気通信大学名誉教授  
 芳原 容英 電気通信大学教授・地震電磁気研究ステーション長  
 服部 克巳 千葉大学教授・電気学会自然災害軽減のための早期警戒システムと電磁界技術調査専門委員会委員長  
 ヨサファット テトオコ スリスマンティヨ 千葉大学環境リモートセンシング研究センター准教授  
 鴨川 仁 東京学芸大学・日本地震学会地震予知検討委員会委員  
 田中 宏明 防衛大学システム工学群航空宇宙工学科  
 白澤 秀剛 東海大学情報教育センター  
 高橋 隆男 東海大学情報教育センター  
 田中 真 東海大学情報教育センター  
 長尾 年恭 東海大学地震予知研究センター長・日本地震学会地震予知検討委員会委員  
 大塚 雄一 名古屋大学太陽地球環境研究所  
 山本 真行 高知工科大学  
 湯元 清文 九州大学宙空研究センター長・(社)スペースウェザー協会理事  
 Huixin Liu 九州大学宙空研究センター  
 大西 健夫 LATMOS/IPSL/フランス国立科学研究センター  
 古宇田亮一 産業総合技術研究所地質分野研究企画室  
 西橋 政秀 気象研究所  
 陣 英克 情報通信研究機構電磁波計測研究所  
 津川 卓也 情報通信研究機構電磁波計測研究所  
 大津山卓哉 電子航法研究所  
 鈴木 睦 JAXA 宇宙科学研究所・IMAP-GLIMS プロジェクトマネージャ  
 五家 建夫 元 JAXA 宇宙環境グループ長  
 松本 晴久 JAXA 宇宙環境グループ長  
 児玉 哲哉 JAXA 地球観測研究センター (ELMOS-WG 事務局)

#### アドバイザーメンバー

上田 誠也 日本学士院・東京大学名誉教授・米地球物理学連合フェロー・ロシア科学アカデミー  
 劉 正彦 台湾国立中央大学太空科学研究所教授・国家太空中心主席科学家

Oleg Molchanov ロシア地球物理研究所

Michel Parrot フランス国立科学研究センター

Sergei Pulinets ロシア応用物理研究所・北海道大学客員教授

## 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

時間軸: 2018年頃打上げ予定・後継は衛星数を増加(JAXA提案中)

1

連絡先: JAXA 地球観測研究センター 児玉哲哉 kodama.tetsuya at jaxa.jp



### 5.1.11. 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

目的: 月の電気伝導度構造モデルの高度化  
惑星での電磁探査の実現に向けて

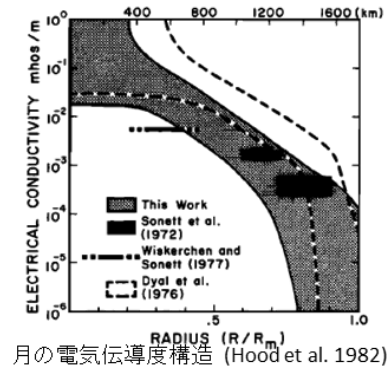
将来推進すべき施策:

月／火星表面での電磁探査

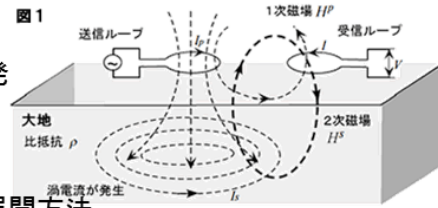
- 複数点での磁場観測による電気伝導度構造 (C-response)
- 電磁場の同時観測による電気伝導度探査
  - MT 法、要電極と電極設置方法の開発
- 人工ソース電磁場探査
  - 着陸機式／ペネトレータ式

必要な技術開発

- ・惑星・月表面での多点磁場観測について
  - 着陸機等の磁場ノイズ低減・補正
  - 磁場3成分センサー方位の精密な決定
  - センサー間の時刻の同期方法
- ・MT 法探査実現のための電場観測
  - 電極(容量性電極or接地抵抗軽減方法)の開発
  - 高入力インピーダンス電位差計の開発
- ・人工ソース電磁場探査
  - ローバー搭載等移動型電磁場探査装置
  - 人工電磁場発生源(大規模電流ループ等)の展開方法



月の電気伝導度構造 (Hood et al. 1982)



連絡先: 清水久芳 (東京大学地震研究所) shimizu at eri.u-tokyo.ac.jp

### 5.1.12. 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 と CHAMP 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。しかし、CHAMP は 2010 年 9 月に運用を停止し、また、Oersted も現在は地磁気強度の観測のみを行っている。今後はヨーロッパを中心として、3機の衛星を用いて磁場観測を行う SWARM が、2013 年打ち上げ予定で計画されている。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、SWARM 以降には、地球磁場観測衛星は計画されていない。

Oersted 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いるが、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はこれまでに計画されていない。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、衛星磁場観測を継続し、地球内部ダイナミクスのさらなる解明をすることを目的として、日本を中心とした国際的な地球磁場観測衛星プロジェクトの計画を検討すべき時期に達していると考えられる。

今後検討する項目としては、主に下記3点が考えられる。

- 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／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、東京工業大学など

# 地球磁場観測衛星

面的観測：地球内部ダイナミクスの解明

継続的観測：長期変動場の抽出と時間スケールの長い変動場の理解

## ・地球磁場観測衛星の現状

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> 2013–2016 (?)	88°/87°	530/<450 km	Scalar and vector

Olsen et al. (2009) に加筆

・Orstedは現在はスカラーのみ、CHAMP の運用停止

・SWARM プロジェクト：2013 年2 or 3 月 その後のプロジェクトは未定

## ・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

### 5.1.13. 「ちきゅう」による統合国際深海掘削計画 (IODP) (International Ocean Discovery Program (IODP) by D/V Chikyu)

#### 1. 目的・内容

深海掘削科学は、地球環境変動の理解や予測、新しい地下生命圏の探査、地球内部の活動や地震、火山活動といった固体地球活動の実態解明を目的とした広範囲の基礎科学であり、さらには、様々な工学を包含した巨大科学である。これを大きく前進させるため、日本は地球深部探査船「ちきゅう」を建造し、世界 25 ヶ国が参加する統合国際深海掘削計画 (IODP) を米国と共に主導してきた。IODP は 2013 年 10 月から次期計画へと移行し、「ちきゅう」による海底下深部掘削では、(1) マントル掘削、(2) 海洋島弧掘削、(3) 縁海掘削をテーマとする掘削を通じて、地球科学や生命科学等における飛躍的な発展、パラダイムシフトを目指す。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す。

#### 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

#### 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

(2023 年度までに、最大水深 4,000 m の海底下から 6,000 m の掘削を予定。)

## 「ちきゅう」による統合国際深海掘削計画 (IODP)

- 日本が建造した地球深部探査船「ちきゅう」により、(1)マントル掘削、(2)海洋島弧掘削、(3)縁海掘削をテーマとする海底下深部掘削を行う。
- 地球科学や生命科学等における飛躍的な発展、パラダイムシフトを目指す。
- 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す。

(C)JAMSTEC/CDEX

### 年次計画

2023年度までに、最大水深4,000mの海底下から6,000mの掘削を予定。

関連機関：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

(c)JAMSTEC/CDEX

連絡先：木戸 ゆかり（海洋研究開発機構 地球深部探査センター）

e-mail: ykido (at) jamstec.go.jp

### 5.1.14. 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

##### 【マスタープラン2011】

本計画は、日本学術会議・科学者委員会・学術の大型研究計画検討分科会が平成23年9月28日に公表した「報告 学術の大型施設計画・大規模研究計画 マスタープラン2011」に所収の研究課題、計画番号23「太陽地球系結合課程の研究基盤形成」（提案責任者：京大大学生存圏研究所・教授／所長・津田敏隆）である。

##### （参考）

日本学術会議 科学者委員会 学術の大型研究計画検討分科会（22期）

<http://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/ogata/index.html>

同（21期）の活動状況とマスタープラン2011

<http://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/ogata/kakoindex.html>

##### 【概要】

太陽から大気圏に至る広い領域における太陽地球系結合過程を研究対象とする。未解明な課題のうち、地球上で最も活発で特異な変動を示す赤道大気の地上総合拠点観測、ならびに太陽活動の変動特性の衛星観測を推進する。本提案はマスタープラン2011の分野のうち〔3〕エネルギー・環境・地球科学に所属しており、〔6〕宇宙空間科学に関連する。

（1）地球上で最も大気擾乱現象が活発なインドネシアに総合観測拠点・赤道 MU レーダーを設置し、赤道大気を中心とするエネルギー・物質の噴流・循環過程（赤道ファウンテン現象）を解明する。

（2）大気質、大気光等の広域観測網、宙空圏の地磁気全球観測（MAGDAS）を整備し、数値モデルを活用することにより、このファウンテンの地球規模の広がり、ならびに太陽活動・宇宙嵐が下層に与える影響の理解を深める。

（3）太陽ダイナモ、コロナ加熱、フレアの発生機構を解明し、太陽活動の地球への影響を理解するため、太陽観測衛星 SOLAR-C を整備し、日震学手法による太陽表層下の流速場の測定と併せて、太陽表面・コロナの多波長域かつ超高分解能観測を実現する。さらに将来的には、太陽ダイナモ機構の解明のため太陽極域の探査を目指す。

##### 【国際協力・国際共同】

太陽地球系結合過程の研究は本質的に国際的であり、CAWSES（太陽地球系の気候と天気；2004-2008）、CAWSES-II（2009-2013）、IHY（国際太陽観測年；2007-2009）、ISWI（国際宇宙天気イニシアティブ；2010-2012）と呼ばれる国際研究計画が推進中であり、我国のこの研究分野における貢献が強く期待されている。SOLAR-Cの計画規模は、日本のみで成し遂げられるものではなく、海外宇宙機関であるNASA及びESAとの協力が不可欠である。本計画において、赤道MUレーダーは日本・インドネシアの緊密な協力のもとに整備されている。また、広域観測網は、各地の関連研究者との良好な国際協力のもとに構築されている。これらの設備は、完成後は全国・国際共同利用施設として運用することを想定している。さらに太陽観測衛星の打ち上げ後の運用については、これまでのようこう・ひので衛星と同じように、国際協力のもとで推進される。

#### 【計画における国際共同の重要性と問題点】

（1）本研究グループは、国際的にも第一級のレベルを保持しており、分野も地表に近い大気層から地球大気と宇宙をつなぐ超高層大気までをカバーする点きわめてユニークである。東南アジアにおける研究推進は、我が国側のみが利益を追うだけでなく、研究上の「南北問題」解消が必須である。この点においても、我々は十分な配慮を行っている。本計画は、長年にわたって積み重ねてきた重層的な取り組みの上に提案するものであり、実現性・有用性・国際性・ユニークさの全ての点で優れている。

（2）SOLAR-Cの計画規模は、日本のみで成し遂げられるものではなく、海外宇宙機関であるNASA及びESAとの協力が不可欠である。SOLAR-Cの母体となる本研究グループは、これまでの「ようこう」、「ひので」の実績により、世界の太陽研究をリードしてきた。

#### 【準備状況】

（1）本計画の段階は概算要求に向けて調整中である。赤道大気レーダーの増強方法について技術的検討は終了しており即座に着手できる。広域観測ネットワークは、学内予算により調査準備中である。

（2）太陽観測衛星SOLAR-Cは、JAXA戦略的開発経費により技術開発等の準備段階である。

本提案の準備状況は良好である。これまで多くの国際研究プロジェクトに参加し、科研費・特定領域研究「赤道大気上下結合」をはじめとする多数の科研費等を得て、全世界の各地で海外観測を行ってきた。国内5大学・研究機関の連携による「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究(IUGONET)」を実施中であり、科研費・新学術領域研究「赤道大気圏のエネルギー・物質ファウンテン」を提案するなど、本計画の準備を実質的に進めている。一方、太陽探査に関しても、「ようこう」「ひので」による実績を踏まえ、探査機SOLAR-Cの計画立案を着実に進めてきた。



## 2. 関係機関

計画責任者：

津田敏隆（京都大学生存圏研究所・教授／所長）

（赤道 MU レーダーを中心とする赤道ファウンテンの解明）

共同研究者：

湯元清文（九州大学宙空環境研究センター・教授）

（地上広域観測網による宙空圏—地球圏の結合課程の研究）

塩川和夫（名古屋大学太陽地球環境研究所・教授）

（地上広域観測網による宙空圏—地球圏の結合課程の研究）

川勝康弘（宇宙航空研究開発機構・准教授）

（探査機 SOLAR-C による太陽探査）

原弘久（国立天文台・准教授）

（探査機 SOLAR-C による太陽探査）

山本衛（京都大学生存圏研究所・教授）

（赤道 MU レーダーを中心とする赤道ファウンテンの解明）

## 3. 予算規模

総額 80 億円（地上観測について 10 年計画）　うち設備 50 億円、運営 30 億円

（1）赤道 MU レーダー　　設備 30 億円、運営 20 億円

（2）地上広域観測網　　設備 20 億円、運営 10 億円

（3）次期太陽観測衛星 SOLAR-C　予算要求は別途

## 4. スケジュール

赤道 MU レーダーと地上広域観測網については、予算化されればすぐに実現に向けて動き始め、2 年間程度で装置類の設置を完了できる見込みである。太陽探査については、2020 年代前半と予想される次々期太陽極大期の観測実施を目標に、2018 年度の打上げを目指している。

日本学術会議 科学委員会 学術の大型研究計画検討分科会

(<http://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/ogata/index.html>)

『報告 学術の大型施設計画・大規模研究計画 マスタープラン2011』(2011年9月28日)

計画番号23 「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」

○概要－太陽から大気圏に至る広い領域における太陽地球系結合過程を研究対象とする。未解明な課題のうち、地球上で最も活発で特異な変動を示す**赤道大気**の地上総合拠点観測、ならびに**太陽活動**の変動特性の衛星観測を推進する。【関連分野: [3]エネルギー・環境・地球科学、[6]宇宙空間科学】

○計画－予算規模 総額380億円(地上観測について10年計画)

(1)赤道MULレーダー 設備30億円、運営20億円

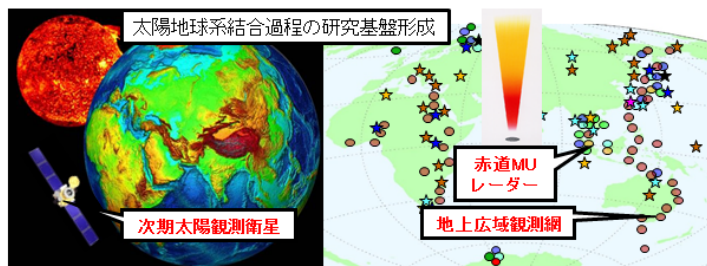
地球上で最も大気擾乱現象が活発なインドネシアに**総合観測拠点・赤道MULレーダー**を設置し、地表付近の境界層から対流圏、中層大気、超高層大気に至る大気圏(～高度約1,000 km)で共通して起こっているエネルギー・物質の噴流・循環過程(赤道ファウンテン現象)を解明する。

(2)地上広域観測網 設備20億円、運営10億円

大気質、大気光等の**広域観測網**、**宇宙圏の地磁気全球観測(MAGDAS)**を整備し、数値モデルを活用することにより、このファウンテンの地球規模の広がり、ならびに太陽活動・宇宙嵐が下層に与える影響を理解する。

(3)次期太陽観測衛星SOLAR-C 設備250-300億円

太陽ダイナモ、コロナ加熱、フレアの発生機構を解明し、太陽活動の地球への影響を理解するため、**太陽観測衛星SOLAR-C**を整備し、日震学手法による太陽表面下の流速場の測定と併せて、**太陽表面・コロナの多波長域かつ超高分解能観測を実現**する。



計画責任者:

津田敏隆(京大大学生存圏研究所)

共同研究者:

山本衛(京大大学生存圏研究所)

湯元清文(九州大学宇宙環境研究センター)

塩川麻由(名古屋大学太陽地球環境研究所)

川勝康弘(宇宙航空研究開発機構)

原弘久(国立天文台)

連絡先: 山本 衛 (京大大学生存圏研究所)

e-mail: yamamoto at rish.kyoto-u.ac.jp

## 5.1.15. 赤道MUレーダー (Equatorial MU Radar)

### 1. 目的・内容

#### 【設備の概要】

わが国は、MUレーダー（中緯度域の大気レーダー）、赤道大気レーダー（低緯度域の大気レーダー）、南極昭和基地大型大気レーダーPANSY（極域の大気レーダー）、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。しかし能力的には赤道大気レーダーが他の2台に比して感度が1/10と低く機能が低くバランスを欠く状況にある。これを解消すべく、赤道大気の構造・運動の観測を主目的とする高機能大気レーダーをインドネシア共和国に設置することを提案する。本装置では、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もので、感度・機能の双方において劣る観測機能を改善する。本装置の新設によって、赤道大気ダイナミクスの研究能力が飛躍的に高まる。

なお本提案は、「日本学術会議 科学者委員会 学術の大型計画分科会」の報告「学術の大型施設計画・大規模研究計画マスタープラン2011」に採択された計画番号23「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」に対応する。（項目5に詳述）

#### 【導入(更新)の必要性等】

本研究所では、信楽MU観測所（滋賀県甲賀市）にMUレーダー（1984年完成）、インドネシア共和国西スマトラ州コトタバンに赤道大気レーダー（2001年完成）の2つの大気観測用大型レーダーを有しており、それぞれ全国・国際共同利用に供している。大気レーダーは大気変動の微細構造を観測する上で最適な観測装置であり、大気の下層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が明らかにされてきた。特にMUレーダーは多様な観測が可能な装置であるため、レーダーイメージングと呼ばれる、レーダーを使って観測対象の形状を把握する先進的な観測手法の開発などが行われている。一方、赤道大気レーダーに関しては、赤道域が地表に入射する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となっている。インドネシア域では、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。

本要求装置は、赤道大気の構造と運動をイメージング観測する高機能の大気レーダーであり、これまでMUレーダーや赤道大気レーダーによる研究成果の蓄積を踏まえて設計され、インドネシア共和国に設置される。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と期待される。

### 2. 関係機関

京都大学生存圏研究所

インドネシア航空宇宙庁（LAPAN）【相手国の協力機関】

### 3. 予算規模

概算要求額（設備費） 31億5000万円

(運営費：10年間で20億円)

#### 4. スケジュール

○平成25年度概算要求 生存圏研究所から提案済み

○設置場所は現在の赤道大気レーダーの隣接地を予定している。インドネシア航空宇宙庁との連携も密であり、実現に当たっての問題はない。

#### 5. 設備整備に係る自助努力

(日本学術会議からのサポート) 日本学術会議は「科学者委員会 学術の大型計画分科会」において、学術の最先端を切り拓く大型の研究計画について、長期的で俯瞰的な視点から、わが国における企画、推進方策を検討している。平成23年9月28日付で報告「学術の大型施設計画・大規模研究計画マスタープラン2011」が公表された。同報告では計画番号23「太陽地球系結合過程の研究基盤形成(提案責任者：京都大学生存圏研究所・教授・津田敏隆)が取り上げられたが、本設備はその「赤道MUレーダー」に対応する。また、同計画においては運営費を10年間で20億円としている。

(参考 URL) <http://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/ogata/kakoindex.html>

(日本・インドネシア双方からのサポート) 平成23年9月22～23日に赤道大気レーダー10周年記念式典及び記念国際シンポジウムをジャカルタで開催した。インドネシア側から研究技術(RISTEK)大臣、インドネシア航空宇宙庁(LAPAN)長官を初めとする多くの政府高官、日本側から駐インドネシア公使、文部科学省研究振興局学術機関課長、京都大学理事・副学長らの出席を得て成功した。我々の研究に対する理解とサポートが確認された。

(現地調査) 設置に関わる現地調査を平成24年3月3～10日に実施した。候補地の地形、電源確保の諸問題、資材運搬に利用する道路の現況など、本装置を実現する上で重要な問題点について多くの知見が得られた。結果をもとに具体的な設置計画を策定中である。

(研究コミュニティにおける議論) 日本地球惑星科学連合2012年大会(2012年5月20～25日、千葉・幕張メッセ国際会議場)において特別セッション「赤道大気レーダー10周年 ～赤道大気研究の発展に向けて～」を開催した。現在までの研究成果の取りまとめと、本計画を含む研究コミュニティの将来構想について議論を行った。

(外部資金の獲得) 本設備の運営管理に関しては、競争的研究経費の獲得に全力を挙げる。これまでも、平成13～18年度に科研費・特定領域研究「赤道大気上下結合」を獲得し、事後評価において最高位の評価結果：A+ (期待以上の研究の進展があった) を得る等の実績を得ている。平成22～24年度には、科学技術戦略推進費(国際共同研究の推進)「インドネシア宇宙天気の研究推進と体制構築」を得て長期連続観測を推進中である。

#### 6. 利用形態

本設備は共同利用される。インドネシア共和国に設置される本装置の共同利用者は、当然ながら全国に関連研究者のみならず、国際的にも開かれたものとなる。全国・国際共同利用の実施体制に関して、生存圏研究所には十分な経験が蓄積されている。一方、本設備の運営に関しては、LAPANと共同運営を予定している。同庁との信頼関係と協力体制は、過去10年にわたる赤道大気レーダーの運営を通して培われており、問題はない。

## 赤道MULレーダー(京都大学生存圏研究所)

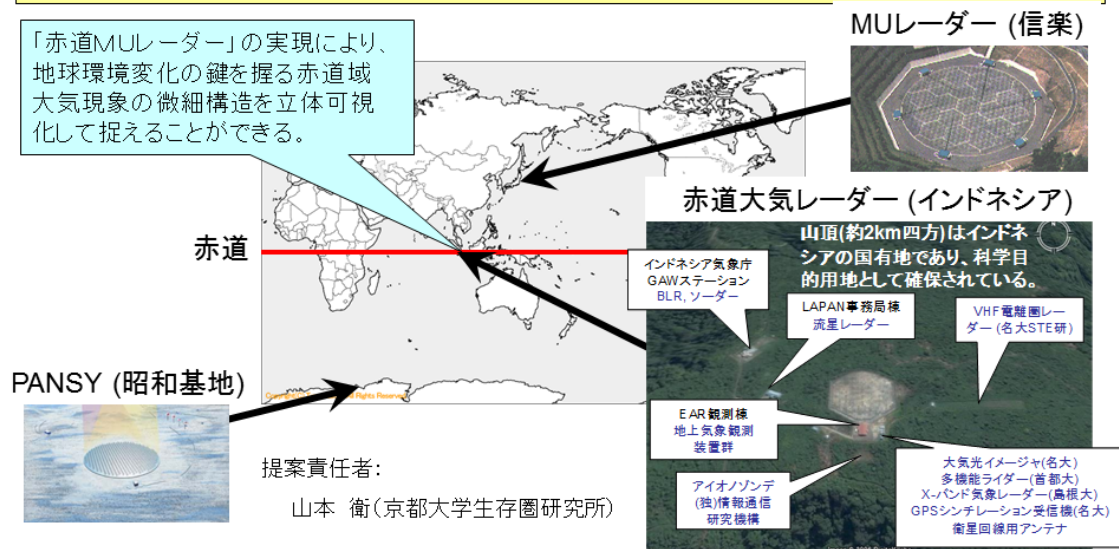
生存圏研究所の最大・最重要の海外研究拠点= 赤道大気レーダー

中緯度には高感度・高機能のMULレーダーがあり、南極域に同規模のPANSYが建設中である。

赤道大気レーダーも観測装置の充実した一級の観測フィールドである。しかしながら、その中心であるレーダーの感度がMULレーダーに比して0.1でしかない。

→赤道域に高感度・高機能の「赤道MULレーダー」の建設がぜひ必要。

「赤道MULレーダー」の実現により、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。



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

**5.1.16. 大型レーダーを用いた南北両極の大気科学の推進：  
PANSY レーダー及び EISCAT\_3D レーダー計画  
(PANSY and EISCAT\_3D)**

1. 目的・内容

南北両極域において大型レーダー設備を用いた観測を行い、極域大気科学および太陽地球系科学の飛躍を図る。これからは、極域観測においても発見的科学観測・環境監視観測から精密科学観測へと質的に大きな転換が必要な時代となる。そのため、南極では、2010年度に昭和基地に設置された南極初の大型大気レーダー(PANSYレーダー、MST/ISレーダー、50MHz帯)を用いて対流圏・成層圏・中間圏(乱流/Polar Mesospheric Summer Echo)・熱圏/電離圏の広い高度領域における風速およびプラズマパラメータを精密観測する。北極域では、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)を国際共同で計画中である。南北両極から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。

2. 関係機関

PANSYレーダーは、東京大学(大学院理学系研究科)、国立極地研究所、京都大学(大学院情報学研究科、大学院理学研究科)の研究者によるコアグループを中心に、全国および外国の計20以上の大学や研究機関の研究者と連携して計画を推進している。また、各国基地設備と連携した観測ネットワークの展開と、モデル研究および衛星観測との有機的結合が不可欠であるため、この観点からすでに各国際学術組織に働きかけて提言を得るなど、協力体制の構築を進めている

EISCATレーダーは、国立極地研究所及び名古屋大学太陽地球環境研究所をEISCAT国内代表機関として、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。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加盟国としてEISCATレーダー群を維持・運用、さらにタイムバイヤーによる実験実施国は4カ国(フランス、ロシア、ウクライナ、EU)、その他に、peer review program を利用した実験については様々な国の研究機関の研究者が参加している。

3. 予算規模

①南極大型大気レーダー関連

小計 39.13 億円(観測運用費+維持費 2.5 億円/年 x 13 年、キャンペーン観測 3000 万円/年 x 13 年、人件費 2100 万円/年 x 13 年)。建設費は予算措置されたが、運用費のめどは立つ

ておらずその確保が喫緊の課題。

#### ②EISCAT\_3D レーダー関連

EISCAT 加盟国を中心とした各国の予算申請を予定。国際共同により約 120 億円の予算確保を目指している。なお、ノルウェーでは 210 MNOK (約 29 億円) の予算申請を 2012 年に開始。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。日本は現行のオーナーシップ 15%程度 確保を目指している。

#### ③南極北極大気観測センター運営費

小計3.9億円 (人件費旅費等3000万円/年 x 13年)

### 4. スケジュール

PANSY レーダーは 2010 年度に昭和基地に建設されて対流圏観測を開始し、順次、成層圏、中間圏観測を立ち上げており、2013 年度には電離圏まで含む基本観測(MST/IS)モードの試験・調整を行い、EISCAT\_3D の準備フェーズに寄与する (～2014 年度まで)。その後は、PANSY レーダーによる MST/IS モードでの定常観測を継続し、各国と共同してのキャンペーン観測を適宜行う。EISCAT\_3D 計画については、2008 年 12 月に欧州研究インフラ戦略フォーラム (ESFRI) のロードマップに採択され、EU 枠組み計画 (FP-6) による EISCAT\_3D デザインスタディ (2005 - 2009 年) や EU 枠組み計画 (FP-7) による準備フェーズ (2010-2014 年) を実施中。2014-2017 年にアンテナ群を建設予定。2017 年から運用を開始し、これにより南北両極からの大型レーダーによる本格観測を実施する。これらの観測に加え、高解像モデル研究も並行して行い、定量的な視点から地球気候における極域大気 役割を解明する。

### 5. その他

南極昭和基地大型大気レーダー計画は、2000 年に計画立案され、包括的な南極大気研究に発展できるものと国際的にも強く期待され (国際学術組織 IUGG, URSI, SCAR, SCOSTEP, SPARC からの提言)、2009 年の予算化を受けて実現した。南極での観測は基本的に SCAR 等を通じた国際協力のもとに行われる。日本は南極最大の大型大気レーダーを中核観測設備とし、世界トップクラスの大循環モデル研究も併せて推進することで国際協同観測研究をリードする。

現行の EISCAT プロジェクトについては、北欧に設置した非干渉散乱レーダーシステムを、日本を含む 6 ヶ国による国際共同で維持・運用。日本は 1996 年に EISCAT 科学協会に加盟後、北極域超高層大気 総合観測・研究の要としてレーダーシステムを継続して利用。EISCAT 協会全体では、27M スウェーデン・クローナ (約 3.2 億円) が年間運用予算 (2012 年度)。日本は極地研から約 2 千万円を分担金として毎年拠出している。

# 大型レーダーを用いた南北両極の大気科学の推進： PANSYレーダー及びEISCAT\_3Dレーダー計画

**内容・目的：** 南北両極域において大型レーダー設備を用いた観測を行い、極域大気科学および太陽地球系科学の飛躍を図る。温暖化等の気候変化や太陽活動の地球気候への影響を解明し、地球気候予測の高精度化を目指す。



連絡先：

PANSY 東京大学大学院理学系研究科、国立極地研究所

URL: <http://pansy.eps.s.u-tokyo.ac.jp>

EISCAT 国内事務局（国立極地研究所・名古屋大学太陽地球環境研究所）

e-mail: eiscat at nipr.ac.jp, eiscat at stelab.nagoya-u.ac.jp



**5.1.17. アウターライズ海底観測フロントによるプレート境界域の  
地震・津波・プレート運動のリアルタイムモニタリング  
(Outer Trench-slope Seafloor Observatory Chain for Real-time Monitoring of Plate  
Loading and Tsunami Generation)**

提案責任者 浜野洋三、杉岡裕子 (IFREE, JAMSTEC)

**目的**

海溝軸とアウターライズの間領域の海溝沿いに、地震、津波、地殻変動等の海底観測のため、広帯域地震計、ベクトル津波計、圧力計等で構成される海底観測ステーション群を展開することによって、

- (1) プレート境界に起こる地震、津波、地殻変動等の活動を、海溝の外側から監視し、海溝陸側に展開されたケーブル観測、陸上観測等と連携して、活動の推移をモニターする。特に海溝近傍でおこる地震による津波の有無、津波の規模、津波波源の場所を、地震発生から数分以内に検出することをめざす。
- (2) 本ネットワークにより、日本周辺域の海底火山活動に伴って励起され、SOFARチャンネルを伝播する水中音波を捕らえることによって、海底火山活動の監視に役立たせる。
- (3) 本ネットワークによって、沈み込む海洋プレート内の微小地震活動、海洋プレートの移動と変形（傾斜と歪み）をモニターし、プレート境界に起こる地震、地殻活動との時空間での相関を調べる。
- (4) これらの相関に基づいて、プレート境界に起こる地震・地殻活動と沈み込むプレートの挙動との因果関係を明らかにし、プレート沈み込みの3次元シミュレーション等によって、将来のプレート境界域の地震・地殻活動の予測につなげる。
- (5) この観測研究によって、プレートの沈み込み運動が巨大地震を引き起こす根本メカニズムを理解し、地球表層ダイナミクスの一貫像を得ることを目指す。

**実施概要**

太平洋プレートとフィリピン海プレートの沈み込む海溝の外側の、海溝とアウターライズの間場所に、海嶺に沿って海底観測のための海洋観測ステーションを展開する。各海底観測ステーションでは、基本的装備として、広帯域地震計 (BBOBS)、ベクトル津波計 (VTM)、及び超長基線海底地殻変動観測のための海底圧力計アレー (BPG, 3点一組、基線長約10 km) と航走機能をもった自律型海洋プラットフォーム (Autonomous Ocean Vehicle) を設置する。すべての海底装置は音響モデムを備えAOVとの双方向通信を可能とする。

BBOBSはプレート境界に起こる地震、低周波地震、地殻変動等の活動と海洋プレートのアウターライズ周辺の地震活動、潮汐周期程度までの短い時間スケールの地殻変動をモニターする。また海底火山活動による水中音波を捕らえる。

ベクトル津波計は、プレート境界で起こる地震による津波の有無、津波の大きさ、津波波源の位置を地震発生後数分以内に把握できるように配置する。ベクトル津波計の微差圧計(DPG)部は、津波観測に加えて、BBOBSとの同時観測によって特に海洋プレート内に起こる微小地震の地震震源、遠くの海底火山活動に伴う水中音波を捕らえる役割を持つ。さらにベクトル津波計のOBEM部はDPG及び海底圧力計との組み合わせによって海洋中の大規模流を検知するとともに、海洋中の流れにより励起される電磁場変動を用いて海底直下の電気伝導度構造を知るためにも用いられる。

沈み込む海洋プレートの運動と変形を連続的にモニターするために、海底の3点に設置された海底圧力計(BPR)基準点で、圧力測定によって海底の隆起・沈降を検知して、海洋プレートの傾斜変化を連続的に測定するとともに、海面上のGPSを備えたAOVを用いて、GPS・海中音響通信結合方式による海底地殻変動観測を定期的を実施する。ほぼ10km間隔で設置された海底圧力計群は、超長基線傾斜計及び歪み計として機能し、プレート沈み込みに伴う海洋プレートの移動、傾斜変化、歪み変化を、海溝沿いの各ステーション毎に高精度で観測することをめざす。またBPRはBBOBSやDPGと連携して、周辺のプレート内地震の位置決定にも用いられる。

自律型海洋プラットフォーム(AOV)はGPS、衛星通信機能、音響通信機能を装備し、海底装置で観測されたデータは、低サンプリング間隔(毎秒値)データに関しては、音響通信によって海底装置から取得し、AOVからは通信衛星を経由して、常時あるいは1日1回程度の頻度で、陸上センターに伝送される。広帯域地震計及びベクトル津波計については、2年程度の電源を内蔵した自己浮上型とし、これらの海底装置に蓄積された高サンプリングレートデータについては、毎年あるいは2年毎に装置の交換を行うことによって回収する。また大きなイベントがあった時には、陸上からの指令によって、海底装置から高サンプリングレートの記録を取得出来るようにする。

地殻変動観測については、長期間の連続観測が必要なため、圧力計と音響モデムの基準点は海底に固定され、電源としてはリチウム2次電池を用い、2年毎に水中ワイヤレス給電方式によって充電する作業を行う。この充電装置も音響モデムを備え、充電中に近距離での高速音響通信により高サンプリング間隔データを取得する。この充電装置の回収と設置にはROVを必要とする。

本研究プロジェクトの計画としては、上記のような観測ステーションを、日本海溝及び相模、駿河、南海トラフ沿いに約100km間隔で設置し、継続的な観測を実施する(図1参照)。最終的には、ステーションの数は全体で20~30地点を予定する。

自律型海洋プラットフォームとしては、Wave Glider(Liquid Robotics社製)を使用することを計画している。本プラットフォームは燃料不要の波力推進機構を持ち、本プロジェ

クトに必要となる定点保持能力と、海底地殻変動観測に必要となる航走能力の両方を併せ持つ。

本観測ステーション群の利点の一つは、比較的容易に各観測点において新しい観測機能を付け加えられることと、機動的に観測ステーションを増減できることである。前者については、将来的には、上記の装置群に加えて、水中音波観測のためのSOFARチャンネルの深度への係留型ハイドロフォンの追加、高精度加速度計（重力計）やジャイロによる海洋プレートの高精度地殻変動連続観測装置の開発等を考えている。後者については、日本列島近傍の地殻活動によって、適宜観測ステーションを展開する。

### 期待される成果

日本列島とその周辺に起こる地震・地殻変動、火山活動は、日本列島下に沈み込む太平洋プレート、フィリピン海プレートの沈み込みが、その原因となっている。この沈み込む海洋プレートと陸側プレートとの力学的カップリングについては、実は十分に分かっていなかったことが、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震によって明らかとなった。このカップリングの実態を明らかにすることは、プレート境界の巨大地震の発生メカニズムを解明し、その発生予測につなげるために、緊急の課題である。このためには、現在整備されつつある日本列島沿岸域のケーブル観測網だけでは片手落ちであり、もともとの原因である沈み込む海洋プレートの海溝外側での活動を同時にモニターすることが、是非必要とされる。本研究プロジェクトで整備しようとするアウターライズ海底観測フロントは、現在整備されつつあるDONET等のケーブル式地震・津波観測網や日本列島内に展開された地震、地殻変動観測網と連携することによって、海溝周辺のプレート境界の活動を高精度にモニターし、さらに日本列島の地震・火山活動の根本原因である海洋プレートのローディング過程、緩和過程を海溝沿いに常時監視することができる。これにより日本列島に起こる地震・地殻活動励起のシナリオを明らかにし、中長期の地震・地殻活動予測に役立てることが期待される。この同時観測により、海洋プレートの動きと海溝近傍の活動の関係をモニタリングでき、これまでは主に陸側プレート上の観測から推定されていたプレート境界でのカップリングの実態を、実測することにより、プレートテクトニクスの根本であるプレート運動と地震発生の関係を統一的に理解することが可能となる。

津波予報に関しては、海溝外側に津波計、特にベクトル津波計をおくことで、水深の深い海溝近傍を高速で伝わってくる津波を早期に検出できるため、陸側の水深の浅い場所に置かれた津波計にくらべて、ずっと早く津波情報を取得することが可能である。海溝から50 km離れた場所に100 km間隔でベクトル津波計を配置すれば、海溝沿いのどの場所で津波が発生しても、5分以内に津波の大きさと波源の位置の特定ができる。また津波計を海溝の外側に設置することによって、震源域での地殻変動成分を除いた津波による水位変化成分だけを観測することができ、津波の規模推定の精度向上に役立つ。さらに海溝の外側にあり、震源域を通るケーブルも必要としないことから、地震、津波によって破壊さ

れにくく、津波の第1波だけでなく、後続の津波や余震による津波等についても監視を続けることが可能である。

## 年次計画

初年度～5年目 12地点に観測ブイを設置して観測開始、

初年度 装置開発開始 経費 2億円

2～5年 各年度3セットの海底観測システムを設置、各セット7000万円、  
維持開発費5000万円、経費計3億円

6～10年目 観測継続、あたらしい観測点10点程度の追加

+予備セット、新しい観測装置の開発、経費 各年 3億円

10～15年目 新しい観測点、観測項目の追加。各年 2億円

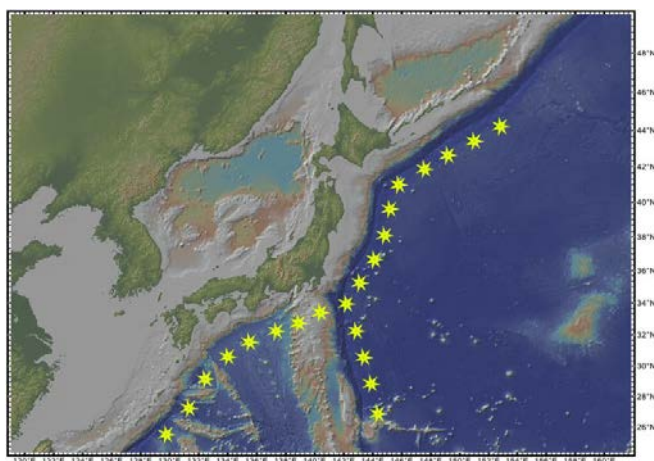


図1 海底観測ネットワークの配置図

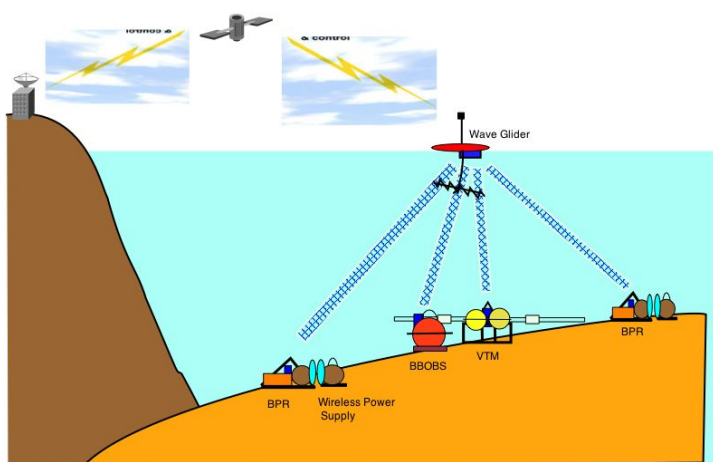
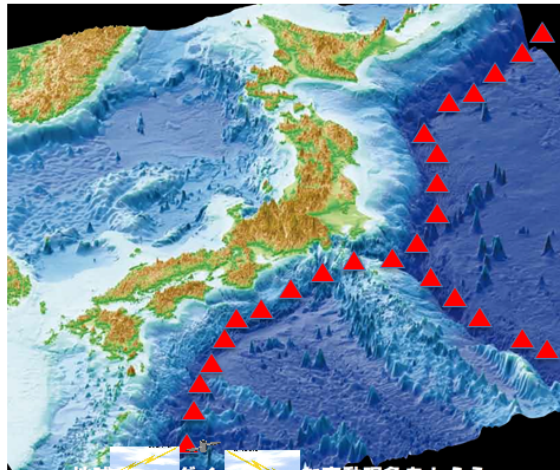


図2 各観測ステーションの装置群

## アウターライズ海底観測所群列によるプレート境界域の地震・津波・プレート運動のリアルタイムモニタリング

### Outer Trench-slope Seafloor Observatory Chain for Real-time Monitoring of Plate Loading and Tsunami Generation



#### 概要

海溝軸とアウターライズの間領域の海溝沿いに、広帯域地震計(BBOBS)、ベクトル津波計(VTM)、圧力計(BPM)等で構成される海底観測ステーション群を展開することによって

- \* プレート境界に起こる地震・低周波地震・地殻変動等の活動の推移の監視
- \* プレート境界地震に伴う津波の大きさ・波源の位置の早期検知
- \* 海洋プレートの移動と変形(歪みと傾斜)をモニター
- \* プレートローディングとプレート境界活動の相互関係を理解
- \* プレート沈み込みの3次元モデリングによって、プレート間カップリングの実態把握

を実施し、プレート沈み込みによる巨大地震発生のメカニズムを明らかにし、将来のプレート境界活動の予測につなげる

#### 年次計画

- 2012年度 VTMの製作とリアルタイム化、BPM開発
- 2013年度 VTM,BBOBS,BOPからなる観測ステーション1点設置
- 2014-2018年度 各年度観測点3点を設置し運用開始
- 2019年度以降 観測ステーション群の観測継続

関連機関 独立行政法人海洋研究開発機構

連絡先担当者：浜野洋三（独立行政法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)）

hamano at jamstec.go.jp

### 5.1.18. 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次元的な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こみ場となっている。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、佐賀大、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 年度より当面：

既存データの整理・データベースの構築、フィージビリティスタディー

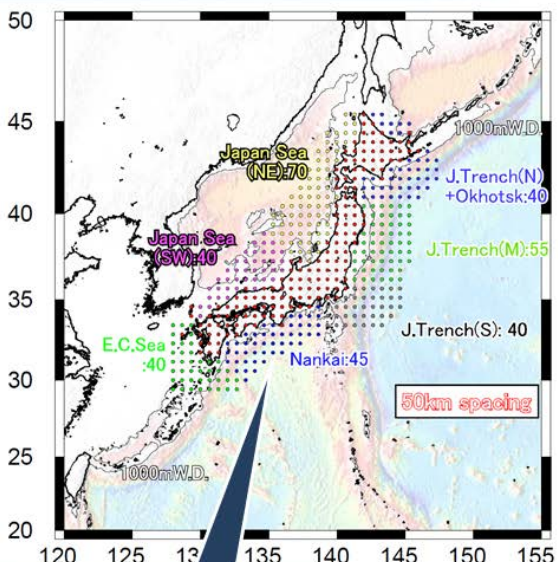
その後：東北地方（太平洋・日本海側）を中心とした海陸での電磁観測の実施

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

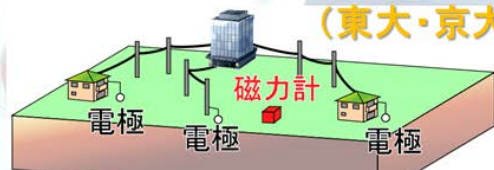
2013年より当面：既存データの整理、事前検討

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

### 5.1.19. 2m低分散光学望遠鏡による惑星大気観測計画

#### －飛翔体との連携観測と系外惑星の大気成分検出に向けて

(Plan of planetary atmosphere measurements with a 2m low-diffraction optical telescope - toward cooperation with spacecraft and detection of exoplanetary atmosphere)

#### 1. 目的・内容

現在計画が進められている口径 2m 低分散光学望遠鏡ならびに 60cm 光学望遠鏡をハワイ・ハレアカラ (標高 3000m)にて運用し、惑星大気変動解明に不可欠な光赤外リモートセンシングの「連続観測」を実施する。

特に、自前の設備の利点を生かし、飛翔体観測との連携を進める。具体的には、以下の通り。

- 木星 EXCEED, JUNO, JUICE: 赤外オーロラ、衛星イオトラス発光、火山ガス
  - 土星 Cassini: エンセラダストラス発光,赤外オーロラ
  - 水星 MESSENGER, Bepi Colombo :アルカリ金属外圏大気分光
- さらに、低分散光学系の性能を生かし、系外惑星の大気成分の検出を目指す。

#### 2. 関係機関

東北大学、ハワイ大学、JAXA

#### 3. 予算規模

～5億円

#### 4. スケジュール

2012年：主鏡の製作、構造設計

2013年：主鏡保持ユニット製作、架台製作

2014年：ドーム観測小屋の電気・土木工事、望遠鏡の設置

2015年～：木星、土星など太陽系惑星ならびに系外惑星の観測を開始



## 2m低散乱光学望遠鏡による惑星大気観測計画 — 飛翔体との連携観測と系外惑星の大気成分検出に向けて



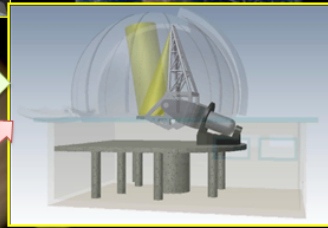
既設: ハワイ・ハレア  
カラ40cm望遠鏡  
(東北大)



新設望遠鏡:  
口径2mオフセット鏡による  
ユニークな低散乱光学系  
による連続観測(東北大、  
ハワイ大他)

移設: 現福島県飯館  
村にある60cm望遠  
鏡をハワイへ移設  
(東北大)

飛翔体との  
連携(東北大、  
JAXA他)



- ・ 口径2m望遠鏡をハレアカラ(標高3000m)で運用し、惑星大気変動解明に不可欠な光赤外リモートセンシングの「連続観測」を実施する。
- ・ 自前の設備により飛翔体観測との連携を進める。
  - 木星EXCEED, JUNO, JUICE: 赤外オーロラ、衛星イオトーラス
  - 土星Cassini: エンセラダストーラス、赤外オーロラ
  - 水星MESSENGER, Bepi Colombo: アルカリ金属外圏大気分光
- ・ 系外惑星の大気成分の検出を目指す。

### ●年次計画

2012年: 主鏡の製作、構造設計

2013年: 主鏡保持ユニット製作、架台製作

2014年: ドーム観測小屋の電気・土木工事、望遠鏡の設置

2015年~: 木星、土星など太陽系惑星ならびに系外惑星の観測を開始

●コスト: ~5億円

●関連機関: 東北大、ハワイ大学、JAXA

連絡先: 坂野井 健 (東北大)

e-mail: tsakanoi\_ at\_pparc.gp.tohoku.ac.jp

5.1.20. 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 atmosphere processes)

1. 目的・内容

これまでの可視高分散エシエル分光装置、中間赤外超高分散レーザーヘテロダイン分光装置、近赤外高分散エシエル分光装置の開発スキルを生かし、最新のレーザー技術を用いて、赤外高分散分光装置の開発を行う。特に、以下の課題に取り組む

- ・ 火星のメタンなど微量気体成分の観測から、惑星気候変動に取り組む。
- ・ 木星赤外オーロラ観測から、熱圏温度や電離圏プラズマドリフト速度を明らかにし、惑星磁気圏-電離圏-熱圏結合過程を明らかにする。
- ・ 南極2 m望遠鏡への搭載検討や、飛翔帯搭載機器開発への技術展開を行う。

2. 関係機関

東北大学、名古屋大学、北海道大学、極地研究所、ハワイ大学

3. 予算規模

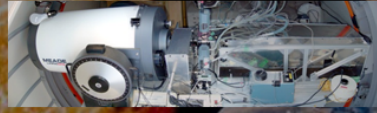
～2億円

4. スケジュール

2012年 : 中間赤外ヘテロダイン分光装置と近赤外エシエル分光装置の開発  
2013～14年 : 南極2 m望遠鏡やハワイ・ハレアカラ望遠鏡の搭載の検討  
2015年 : 望遠鏡への設置、試験観測  
2016年～ : 火星メタン並びに木星オーロラの連続観測

## 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

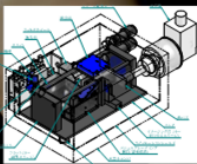
既設: 可視高分散  
 エッセル分光装置  
 (東北大)



開発中: 中間赤外超  
 高分散ヘテロダイ  
 ン分光装置(東北大)



開発中: 近赤外高  
 分散エッセル分光  
 装置(東北大)



検討中: 南極  
 2m望遠鏡へ  
 の搭載、飛翔  
 帯搭載機器  
 開発

- ・最新のレーザー技術を用いて、赤外高分散分光装置の開発を行う。
- ・火星のメタンなど微量気体成分の観測から、惑星気候変動に取り組む。
- ・木星赤外オーロラ観測から、熱圏温度や電離圏プラズマドリフト速度を明らかにし、惑星磁気圏-電離圏-熱圏結合過程を明らかにする。
- ・南極2m望遠鏡への搭載検討や、飛翔帯搭載機器開発への技術展開を行う。

### ●年次計画

- 2012年 : 中間赤外ヘテロダイン分光装置と近赤外エッセル分光装置の開発
- 2013~14年 : 南極2m望遠鏡やハワイ・ハレアカラ望遠鏡の搭載の検討
- 2015年 : 望遠鏡への設置、試験観測
- 2016年~ : 火星メタン並びに木星オーロラの連続観測

●コスト: ~2億円

●関連機関: 東北大学、名古屋大学、北海道大学、極地研究所、ハワイ大学

連絡先: 坂野井 健 (東北大学)

e-mail: tsakanoi\_ at\_pparc.gp.tohoku.ac.jp

### 5.1.21. HF～VHF 帯大型アレイ・アンテナ計画 (Development plan of a large antenna array in the HF to VHF range)

#### 1. 目的・内容

太陽大気・惑星磁気圏ダイナミクスの究明に向けた地上大型高感度電波観測装置の開発。具体的な目的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の究明
- ・太陽電波バーストの高感度偏波観測による太陽大気～太陽風空間の擾乱様相の究明
- ・惑星（木星）オーロラ電波の高感度観測による磁気圏変動過程の究明
- ・惑星（木星）オーロラ電波の高感度広帯域偏波観測による粒子加速過程の究明

#### 2. 関係機関

主幹：東北大学

研究協力：名古屋大学S T E研究所、国立天文台野辺山太陽電波観測所

#### 3. 予算規模

～1億円

#### 4. スケジュール

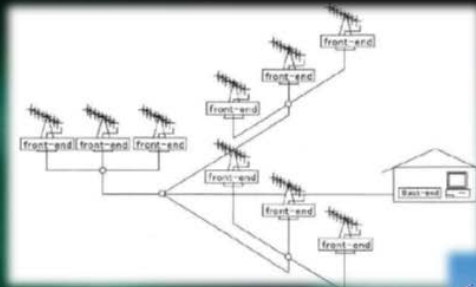
2012年： 広帯域偏波観測用アンテナ・システムの基礎開発

2013-14年：アレイ・アンテナ装置の設置

2015年-：太陽電波バースト・惑星オーロラ電波の観測

## HF～VHF帯大型アレイ・アンテナ計画

### － 太陽大気・惑星磁気圏ダイナミクスの究明に向けて



新設: HF～VHF帯大型アレイ・アンテナ

広帯域連携観測

既設: VHF～UHF帯  
大型電波望遠鏡  
(東北大)



- ・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の究明
- ・太陽電波バーストの高感度偏波観測による太陽大気擾乱様相の究明
- ・惑星(木星)オーロラ電波の高感度観測による磁気圏変動過程の究明
- ・惑星(木星)オーロラ電波の高感度偏波観測による粒子加速過程の究明

#### ●年次計画

2012年 : 広帯域偏波観測用アンテナ・システムの基礎開発

2013～14年: アレイ・アンテナ装置の設置

2015年～ : 太陽電波バースト・惑星オーロラ電波の観測

●コスト: ～1億円

●関連機関: 主幹: 東北大学、研究協力: 名古屋大学STE研、国立天文台野辺山

連絡先: 三澤 浩昭 (東北大学)

e-mail: misawa\_ at\_pparc.gp.tohoku.ac.jp

### 5.1.22. 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・大気圏の電磁気現象及び太陽大気中の粒子加速の究明に向けた、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。

具体的な目的は以下の通りである。

- ・木星放射線帯ダイナミクスの中～長期的監視に基づく、放射線帯電子の加速・輸送・消失の解明
- ・木星放射線帯で生じる突発的な粒子加速・輸送現象の解明
- ・惑星大気(火星・土星)の雷放電に伴う電磁パルス検出と大気科学・力学への貢献
- ・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究明

#### 2. 関係機関

主幹：東北大学

#### 3. 予算規模

1 億円以上

#### 4. スケジュール

2012 年：電波干渉処理用受信機の開発

2013 年：広帯域偏波計・デジタル信号処理装置の開発

2014 年：UHF 帯電波望遠鏡の新規設置

2015 年：木星放射線帯・惑星雷現象・太陽電波バーストの観測・監視



## UHF帯高感度・広帯域偏波スペクトル計 - 惑星磁気圏・大気圏の電磁気現象の究明に向けて



既設: VHF-UHF帯(<1GHz)  
 大型電波望遠鏡(東北大)

新設: UHF帯電波望遠鏡  
 (直径20mディッシュ)



### <科学課題>

- ・木星放射線帯ダイナミックスの中～長期的監視
- ・木星放射線帯の突発的な変動(粒子加速・輸送)機構の解明
- ・惑星大気(火星・土星)の雷活動検出と大気科学
- ・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究明

### <技術課題>

デジタル信号処理による  
 微小信号検出

### 既設望遠鏡

低周波(100MHz)

### 新設望遠鏡

重複帯域  
 電波干渉計

高周波(数GHz)

### ●年次計画

2012年: 電波干渉処理用受信機の開発

2013年: 広帯域偏波計・デジタル信号処理装置の開発

2014年: UHF帯電波望遠鏡の新規設置

2015年～: 木星放射線帯・惑星雷現象・太陽電波バーストの観測

●コスト: 1億円～

●関連機関: 東北大学

連絡先: 土屋 史紀 (東北大学)

e-mail: tsuchiya\_ at\_pparc.gp.tohoku.ac.jp

### 5.1.23. 火山活動モニタリングのためのリアルタイム構造解析へ向けて (Toward real-time resistivity modeling for monitoring volcano)

#### 1. 目的・内容

##### 目的：

火山噴火は、火山内部に蓄積された熱やマグマ等物質を一気に火口から放出する現象である。従って、火山噴火現象の準備段階から終息に至るまでの一連のプロセスを明らかにするためには、火山体内部での熱や物質の状態・挙動を知る必要がある。本計画は、火山体周辺の地下比抵抗構造の変化を時々刻々捉えることによって、火山体や深部のマグマの移動や火山爆発直前の熱や物質の移動を把握し、火山噴火機構の一層の解明および火山噴火予知技術の高度化へ寄与することを目的とする。

##### 内容：

事前準備として、対象領域において 100 点規模の稠密広帯域 MT 観測を（主に外注で）実施し、深さ 20km 程度までの詳細な 3 次元比抵抗構造（初期モデル）を決めておく。他の物理・化学観測などから予想されるマグマ等物質の貯留・移動経路の検討を行ない、ターゲットとなる場所を絞り込む。その周囲で 10 点程度の多点連続電磁場観測を行なう。人工電流源を利用すれば高い S/N も期待できる。取得データを一定時間毎に転送し、研究室等で時系列処理・変換関数の推定・モデリングまで自動処理する。予め決定した初期モデルから 3 次元逆解析により一定時間ごとの 3 次元構造を得る。データ転送量や計算コード等の制約から 1 日毎の時間変化検出を目指す。計算機や通信インフラの更なる高速化が将来的に実現し、高速 3 次元構造推定コードの開発が行われれば、1 時間毎の構造変化まで捉えられるようになることが期待される。

##### 必要な機器開発等：

- ・低消費電力・通信機能を備えた測定機器の開発。多点観測のための低価格化の実現。
- ・人工電流源利用のための送受信機器の開発、解析・モデル化コードの開発。
- ・長期安定した参照磁場観測点（ボアホール観測も含む）の整備・運用。

#### 2. 関係機関

火山噴火予知研究計画関連機関

#### 3. 予算規模

1 億円以上／火山

#### 4. スケジュール

未定



## 火山活動モニタリングのためのリアルタイム構造解析へ向けて

**目的:** 火山体の比抵抗構造の変化を時々刻々捉えることによって、やや深部のマグマの移動や噴火直前の熱や物質の移動を把握し、火山噴火機構の解明および火山噴火予知技術の高度化へ寄与する。

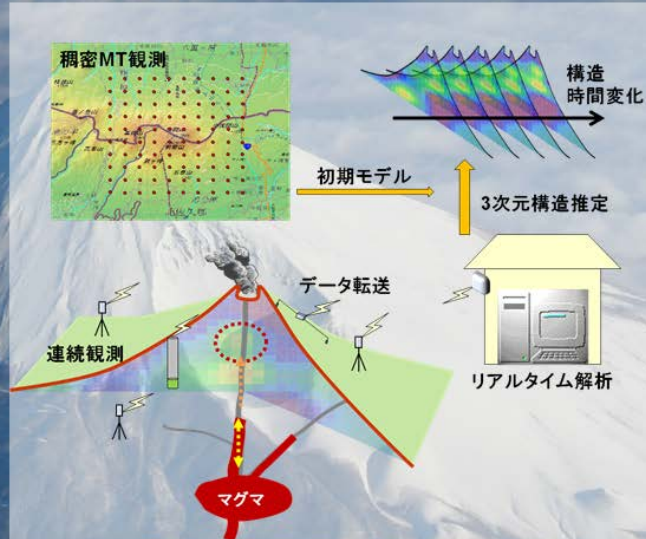
### 内容:

- ・初期構造モデルを得るための100点規模の稠密観測。
- ・対象を絞った10点程度の多点連続観測。
- ・データ転送、変換関数推定、モデル化までの自動処理。
- ・1日(将来的に1時間)毎の3次元比抵抗構造モデルの作成。

### 必要な機器開発等:

- ・低消費電力・通信機能を備えた測定機器の開発。
- ・多点連続観測のための装置の低価格化の実現。
- ・人工電流源利用のための送受信機器の開発、解析・モデル化コードの開発。
- ・長期安定した参照観測点(ボアホール観測も含む)の整備・運用。

**予算:** 5000万円以上/火山



**関連機関:** 火山噴火予知研究計画関係機関

連絡先: 神田 径 (東京工業大学)  
e-mail: kanda at ksvo.titech.ac.jp

### 5.1.24. 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ならびに、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 of 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」 名古屋大学太陽地球環境研究所・情報通信研究機構・国立極地研究所等

「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

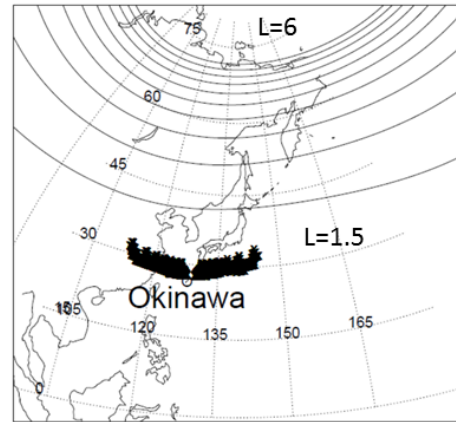
#### (3) 計画の内容

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」名古屋大学太陽地球環境研究所・情報通信研究機構・国立極地研究所等
- 「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 (名古屋大学太陽地球環境研究所)  
e-mail: nisitani at stelab.nagoya-u.ac.jp

### 5.1.25. SuperDARN 北海道第二レーダー計画 (SuperDARN Hokkaido West radar)

#### (1) 必要と思われる施策・技術開発

中緯度 SuperDARN レーダー網視野の日本北西方向への拡大および、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」 SuperDARN 北海道第二レーダー計画

「内容」北海道内に SuperDARN 規格のレーダーを設置し、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、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」1 億 2 千円

「関係機関」名古屋大学太陽地球環境研究所・情報通信研究機構・国立極地研究所等

「時間軸」5 年以内に完成し、10 年以上にわたる運用を予定

#### (3) 早急に整備を必要とする理由

##### a. 太陽活動期との関連性

予想では 2013 年頃に太陽活動のピークを迎える。これにともない、停滞期では本来高緯度でしか見出されなかった現象が中緯度・低緯度領域に拡大している。人間活動に多大なる影響を及ぼす大磁気嵐はピークから太陽活動下降期に多く発生することが知られており、この状況の中で早急に当該装置を整備することが喫緊の課題である。

##### b. 人工衛星プロジェクトとの相互協力

ERG、RBSP 等との研究協力により、内部磁気圏・中緯度・サブオーロラ帯電離圏システムのダイナミクスを解明する非常に恵まれた状況になりつつある。

また、ISS-MAP(2012-)等の地球外からの大気光撮像データと相互協力することにより、電離圏・熱圏・上部中間圏ダイナミクスの解明を非常に効率的に行うことができる。

##### c. 他の SuperDARN レーダー・地上観測活動との研究協力

SuperDARN ではアメリカ・ロシア・オーストラリア・イギリス等の研究者グループが中緯度域に短波レーダーを稼働中もしくは建設中であり(中国も検討中)、特にロシアのグループとは当該装置と視野を共有している。これらのグループと協力することにより、グローバルな電離圏・熱圏変動ダイナミクスの解明を効率的に推進することができる。ただし、計画中のものを含めて磁気緯度 40 度より低緯度に設置するレーダーは非常に少なく、大磁気嵐の全貌をとらえるためには当該装置を整備することが非常に重要である。

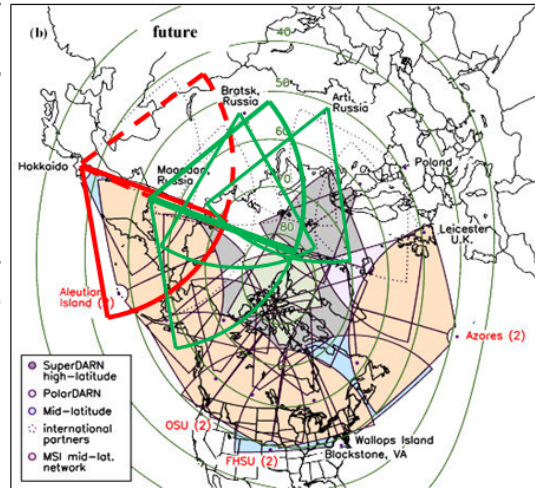
##### d. サイエンスセンターにおける SuperDARN データベース構築に対する貢献

太陽地球環境研究所が立ち上げ中である ERG サイエンスセンター、ひのでサイエンスセン

ターの運用にとって、SuperDARN レーダーのデータは極めて重要な意味を持つ。

## 北海道第二HFレーダー計画

- 「内容」北海道内にSuperDARN規格のレーダーを設置し、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、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」1億2千円
- 「関係機関」名古屋大学太陽地球環境研究所・情報通信研究機構・国立極地研究所等
- 「時間軸」5年以内に完成し、10年以上にわたる運用を予定



----- 北海道第二HFレーダー

早急に整備を必要とする理由

- a. 太陽活動期との関連性
- b. 人工衛星プロジェクトとの相互協力
- c. 他のSuperDARNレーダー・地上観測活動との研究協力
- d. サイエンスセンターにおけるSuperDARN データベース構築に対する貢献

1

連絡先：西谷 望（名古屋大学太陽地球環境研究所）

e-mail: nisitani at stelab.nagoya-u.ac.jp

### 5.1.26. 低周波電波天文観測による太陽圏の3次元探査

#### (3-dimensional exploration of heliosphere using low-frequency radio astronomical observations)

##### 【内容】

最近の太陽活動は宇宙空間の近代的な観測が始まって以来、例を見ない低さであり、これに伴って太陽風には従来とは異なる特徴が見られている。その一つが太陽風動圧の全球的な現象であり、太陽圏の収縮を示唆している。この特異な太陽活動は次期サイクルまで継続すると予測されており、その結果もたらされる太陽圏の変動を明らかにすることが重要な課題となっている。惑星間空間シンチレーション (IPS) に代表される低周波帯の電波天文現象は、太陽圏プラズマのグローバルな特性を解明するのに有効な手段となる。今後、低周波電波天文観測を強化し、特異な太陽ダイナモ活動に伴う太陽圏変動の全体特性を解明してゆく。観測は、多地点 IPS の他、パルサーの dispersion/rotation measure を含む。本研究で得られた知見は、地球周辺の宇宙環境や太陽圏境界域の研究や従来謎とされていた太陽活動と地球気候のつながりを解明することにも役立つ。

##### 【予算規模】

- 数億円
  - 新型高感度アンテナの開発
  - 既存の大型アンテナ群の改良・保守

##### 【関係機関】

STE 研 (日)、カリフォルニア大学サンディエゴ校、アラバマ大学など (米)、UNAM (メキシコ)、Lebedev Physical Institute (露)、Tata Institute for Fundamental Research (印)、など

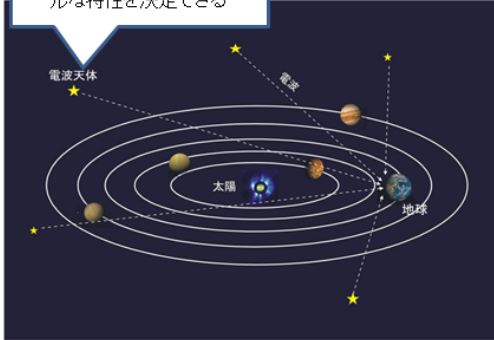
##### 【時間軸】

現在～：STE 研の IPS システムの性能改善、C24 極大期から極小期における太陽圏構造の変動を解明、Voyager, IBEX による太陽圏外圏域探査や SMEI 観測との共同研究を推進  
約5年後～：パルサー観測による太陽極域プラズマ密度の計測、C24/25 極小期における太陽圏構造の解明、Solar Probe Plus, Solar Orbiter による太陽風観測に対して相補的なデータを提供  
約10年後～：新型高感度アンテナの開発、C25 における太陽圏構造の解明、IMAP など次期太陽圏外圏域探査との共同研究



# 低周波電波天文観測を用いた 太陽圏の3次元探査

多数の天体電波源の観測データから太陽圏のグローバルな特性を決定できる



STE研では独自の技術により高感度のアンテナ群を開発(写真は富士アンテナ)

- 特異な太陽ダイナモ活動に伴って太陽圏3次元構造が如何に発展するかを、地上の低周波電波天文観測から解明する
  - 惑星間空間シンチレーションおよびパルサー Dispersion/Rotation measure観測
  - 外圏域探査や宇宙天気、太陽活動-地球気候結合の研究に寄与
- 期間: 現在~約10年後
  - 現在: Voyager、IBEXによる太陽外圏域探査が進行中
  - ~5年後: 次期極小期にはSolar Probe Plus、Solar Orbiter計画が実施され、太陽風加速・コロナ加熱、太陽極域が課題となる
- 予算規模: 数億円
  - 新規大型アンテナ開発および既存アンテナ群の改良
- 関係機関
  - STE研(日)、UCSD、UAH、SwRI(米)、LPI(露)、TIFR(印)など

連絡先: 徳丸 宗利 (名古屋大学太陽地球環境研究所)

e-mail: tokumaru at stelab.nagoya-u.ac.jp



**5.1.27. 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**  
**(Research on atmospheric vertical coupling based on Multi-LIDAR and radar observations)**

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、対流圏から熱圏までの幅広い高度領域の観測を行い、極域大気上下結合の解明を行う。

2. 関係機関

名古屋大学太陽地球環境研究所、信州大学、理研、極地研究所

3. 予算規模

(b) 1億円以上。

4. スケジュール

トロムソ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、レイリーライダーとミリ波受信器を新たに開発し、極域対流圏から熱圏までの観測を行う。

2016年： レイリーライダーの開発、ミリ波観測装置の開発

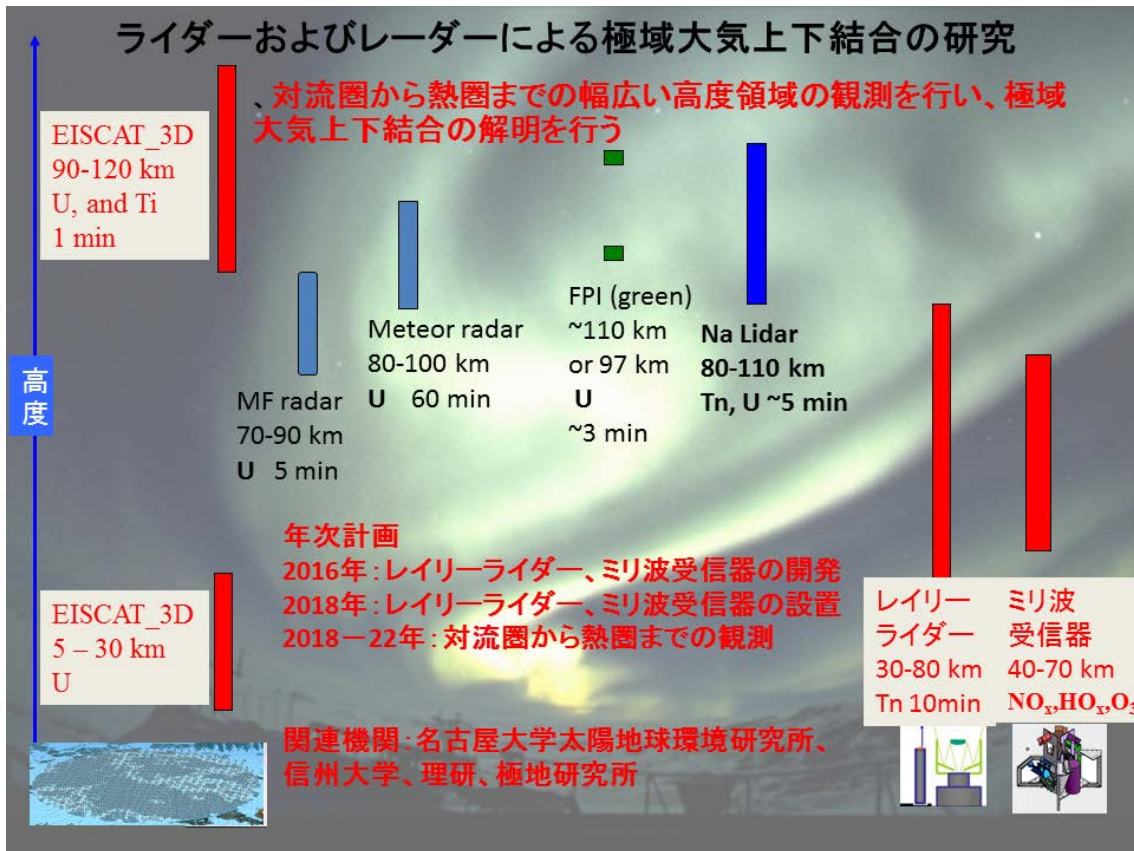
2018年： レイリーライダーの開発、ミリ波観測装置の設置

2018-2022年：極域対流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領域の大気温度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、新たに高感度・高精度のレイリー温度・風速ライダーを開発する。





連絡先: 名古屋大学太陽地球環境研究所 野澤悟徳  
 e-mail: nozawa at stelab.nagoya-u.ac.jp

**5.1.28. 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（2015 年度打ち上げ予定）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。

2. 関係機関：名古屋大学太陽地球環境研究所、金沢大学、東北大学、千葉大学、東京工業大学、カナダ・アサバスカ大学、ロシア・IKIR/IKFIA 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

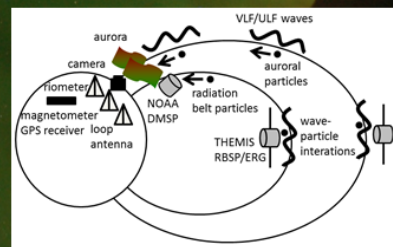
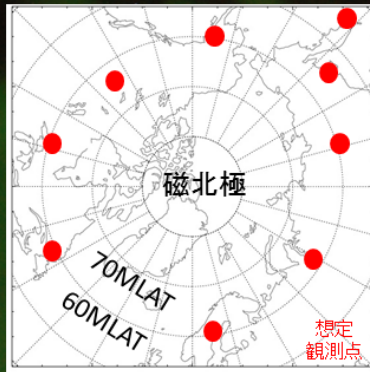
2013-2014 年度：機器の購入、ロシアシベリア域、北欧地域、カナダへの設置

2014–2017 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

2015 年：ERG 衛星打ち上げ

## 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、プラズマボ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(2015年度打ち上げ予定)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。



予算規模:5億円程度

年次計画

2012年8月:RBSP衛星打ち上げ

2013-2014年度:機器の購入、ロシアシベリア域、北欧地域、カナダへの設置

2014-2017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

2015年:ERG衛星打ち上げ

関連機関:名古屋大学太陽地球環境研究所、金沢大学、東北大学、千葉大学、東京工業大学、カナダ・アサバスカ大学、ロシア・IKIR/IKFIAなど

連絡先: 塩川 和夫 (名古屋大学太陽地球環境研究所)

e-mail: shiokawa at stelab.nagoya-u.ac.jp

### 5.1.29. 大気・プラズマ結合過程の総合地上ネットワーク観測

#### (Comprehensive ground-based network observations of coupling between the atmosphere and the ionosphere)

##### 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侵入する電磁場・プラズマ擾乱と、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や、磁力線が水平になる磁気赤道域を中心として、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、北欧、カナダ、ロシアに設置し、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国際宇宙ステーションの IMAP 機器、米国の C/NOFS 衛星、DMSP 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・プラズマ結合過程を明らかにする。

2. 関係機関：名古屋大学太陽地球環境研究所、京都大学、情報通信研究機構、千葉大学、国立極地研究所、インドネシア・LAPAN、タイ・チェンマイ大学、ナイジェリア工科大学、コートジボワール・フェリックス・ハウファー・ボグニー大学など

3. 予算規模：5 億円程度

##### 4. スケジュール

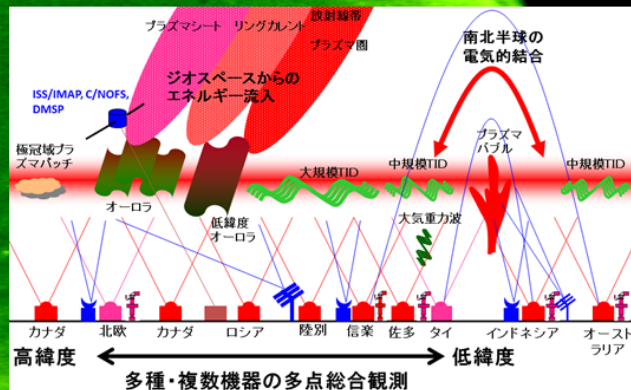
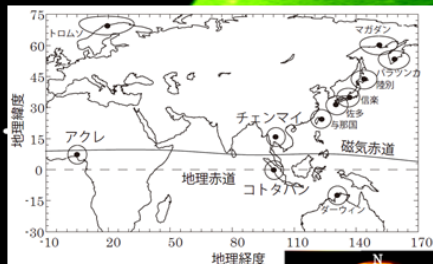
2012 年 7 月：ISS-IMAP 衛星打ち上げ

2013-2015 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

2014 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総合地上ネットワーク

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)、イオンアンテナ(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、北欧、カナダ、ロシアに設置し、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国際宇宙ステーションのIMAP機器、米国のC/NOFS衛星、DMSP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・プラズマ結合過程を明らかにする。



予算規模:5億円程度

年次計画

2012年7月:ISS-IMAP衛星打ち上げ

2013-2015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

2014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

関連機関:名古屋大学太陽地球環境研究所、京都大学、情報通信研究機構、千葉大学、国立極地研究所、インドネシア・LAPAN、タイ・チェンマイ大学、ナイジェリア工科大学、ドイツ・ジボワール・フェリックス・ハウファー・ボグニー大学など

連絡先: 塩川 和夫 (名古屋大学太陽地球環境研究所)

e-mail: shiokawa at stelab.nagoya-u.ac.jp

### 5.1.30. MAGDAS/210° MM 子午線磁力計のペア化とそれによる磁気圏密度 $L$ 依存性の推定 (Dualization of MAGDAS/210MM to estimate the $L$ -dependence of the magnetospheric density)

#### 1. 目的・内容

九州大学宇宙天気科学・教育センターが中心となって維持運営している MAGDAS/CPMN の中には 210MM (日本を含む磁気子午線) 沿いの磁力計 chain が存在する。MAGDAS/CPMN は世界の地上磁力計ネットワークの consortium である ULTIMA に参加しており、他の参加ネットワーク中 北米及びヨーロッパには「100~300km 磁気緯度方向に離して 2 点設置した磁力計ペア」の磁気子午面 chains が存在している。磁力計ペアによって磁力線固有振動が大変効率的に同定出来る事が知られており、この磁力線固有振動数からは、その磁力線沿いのプラズマ密度を推定出来るので、北米及びヨーロッパでは磁気圏プラズマ密度の  $L$  分布が推定出来ている。しかし、210MM は未だペア化されていないのでそれが出来ず、経度方向の同時観測という視点で見ると大きな gap になっている。これを解消し ULTIMA の国際協同研究に貢献する為にも、210MM 磁力計をペア化する事は有意義である。

2. (国内) 関係機関 九州大学宇宙天気科学・教育センター、名古屋大学太陽地球環境研究センター

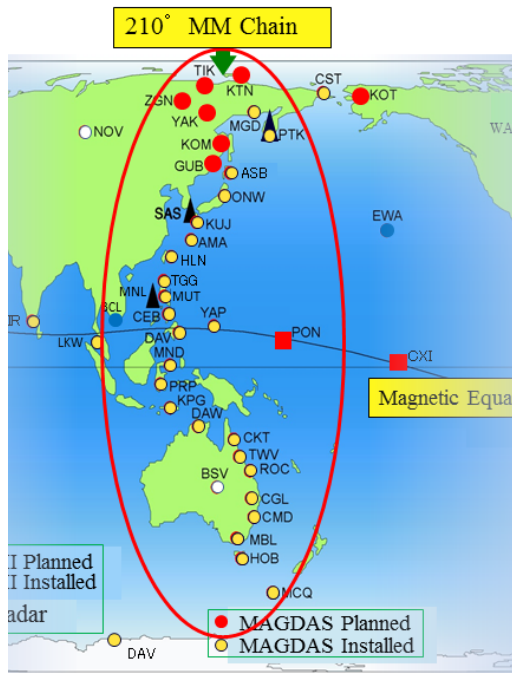
3. 予算規模 (a) 1 億円程度

4. スケジュール 未定



‐ MAGDAS/210° MM磁力計のペア化とそれによる

磁気圏密度 $L$ 依存性の推定



MAGDAS/CPMN中には210° MM(磁気子午線)沿いの磁力計chainが存在する(左図)。MAGDAS/CPMNは世界の地上磁力計ネットワークのconsortiumであるULTIMAに参加しており、他の参加ネットワーク中 北米及びヨーロッパには「100~300km磁気緯度方向に離して2点設置した磁力計ペア」の磁気子午面chainsが存在している。磁力計ペアによって磁力線固有振動が大変効率的に同定出来る事が知られており、この磁力線固有振動数からは、その磁力線沿いのプラズマ密度を推定出来るので、北米及びヨーロッパでは磁気圏プラズマ密度の $L$ 分布が推定出来ている。しかし、210° MMIは未だペア化されていないのでそれが出来ず、経度方向の同時観測という視点で見ると大きなgapになっている。これを解消しULTIMAの国際協同研究に貢献する為にも、210° MM磁力計をペア化する事は有意義である。

関連機関：九州大学宇宙天気科学・教育センター、名古屋大学太陽地球環境研究センター

連絡先：河野英昭（九州大学）

e-mail: hkawano at geo.kyush-u.ac.jp

**5. 1. 31. 衛星地上融合観測に基づく磁気嵐時の放射線増加と大気膨張の予測研究  
(Prediction study of the radiation-belt enhancement and atmospheric expansion during  
magnetic storms by using a unified satellite-ground observation system)**

1. 目的・内容

磁気嵐やオーロラ嵐による宙空環境（放射線、超高層大気）の全球の変動メカニズムの解明と宇宙災害予測を目的に、九州大学が世界に誇る全球的 MAGDAS 地上ネットワーク観測と宇宙航空研究開発機構(JAXA)の宇宙環境衛星観測とを連携融合した、特に、JAXA 静止衛星「きく8号」や「準天頂衛星」の軌道を通る磁力線上の東経135度付近のシベリア-南極域、東経20度子午線沿いのアフリカと磁気赤道南米域に新たな地上観測点をロシアや発展途上国と協働で構築し、3次元的な衛星地上連携融合観測研究に基づく宇宙天気監視と宇宙災害予測システムを確立する。

2. 関係機関：九州大学宇宙天気科学・教育センター、鹿児島工業高等専門学校、徳山工業高等専門学校、宇宙航空研究開発機構

3. 予算規模 (a) 1億円以上

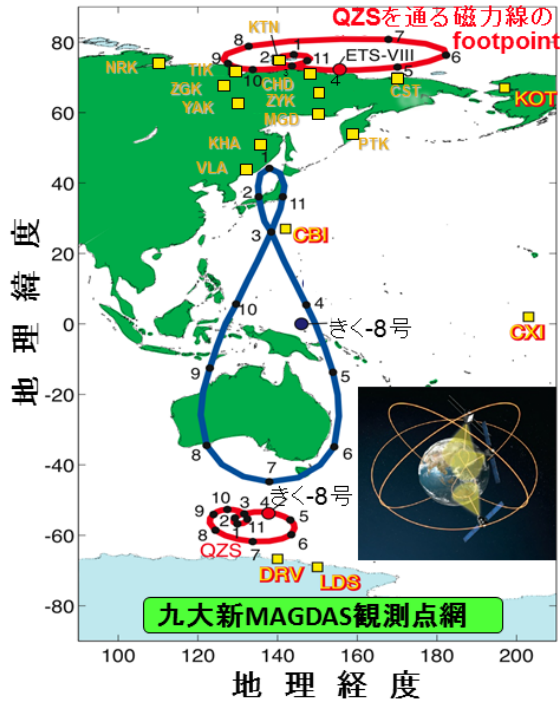
4. スケジュール

(科研費申請準備中) 2013年度以降以下を段階的に行う：

- (1) 地上-QZS 衛星連携融合観測ネットワークの構築
- (2) それを用いた観測研究
  - (2-a) 地球大気-宇宙空間相互作用
  - (2-b) 超高エネルギー電子生成
  - (2-c) 超高層大気膨張
- (3) 磁気嵐時の宇宙環境変動メカニズムの解明と宇宙災害監視予測システムの確立
- (4) 国際交流活動推進



衛星地上融合観測に基づく磁気嵐時の放射線増加と大気膨張の  
 予測研究～磁気嵐やオーロラ嵐による宇宙環境の変動メカニズムの  
 解明と宇宙災害予測～



- (科研費申請準備中): 2013年度以降  
 以下を段階的に行う:
- (1) 地上-QZS衛星連携融合観測ネットワークの構築
  - (2) それを用いた観測研究
    - (2-a) 地球大気-宇宙空間相互作用
    - (2-b) 超高エネルギー電子生成
    - (2-c) 超高層大気膨張
  - (3) 磁気嵐時の宇宙環境変動メカニズムの解明と宇宙災害監視予測システムの確立
  - (4) 国際交流活動推進

関連機関: 九州大学宇宙天気科学・教育センター、鹿児島工業高等専門学校、徳山工業高等専門学校、宇宙航空研究開発機構

連絡先: 河野英昭 (九州大学)

e-mail: hkawano at geo.kyushu-u.ac.jp

**5.1.32. 極域・磁気赤道域を連結する全球 Cowling チャンネルの実証的研究**  
**(Survey of electromagnetic coupling from auroral to equatorial ionosphere -**  
**Integrated study of theoretical and Empirical approach)**

1. 目的・内容

MAGDAS/CPMN, SUPERMAG を用いた超多点磁場観測データ及び、SWARM 衛星による電流実測、SUPERDARN レーダ、及び多点 FM-CW レーダ網を用いて極域から磁気赤道域を連結する電磁結合系の解明を目指す。現在 FM-CW は九大独自には世界に 4 点しか展開していないが、各機関との連携及び、補正・概算要求で計 20 点程度からなる多点観測網を整備する。これらの各種データの融合解析を行うためのチームを日本、米国、欧州でそれぞれ立ち上げ、各チームの連携により理論・数値実験、データ解析の三位一体のアプローチで全球 Cowling チャンネルの実証的研究を推進する。

2. 関係機関：九州大学宇宙天気科学・教育センター、名古屋大学太陽地球環境研究所、フィンランド気象研究所、オーストリア科学アカデミー、ジョンズ・ホプキンス大学

3. 予算規模 (a) 1 億円以上

4. スケジュール

(科研費申請準備中) 2013 年度以降以下を段階的に行う：

- (1) 補正・概算要求：FM-CW レーダの多点化 目標 15 点以上
- (2) 基盤(A): 理論・数値実験・データ解析の融合：九大、名大、  
ジョンズ・ホプキンス大
- (3) EU-FP7, MI-結合チーム：フィンランド気象研究所、九大、  
オーストリア科学アカデミー他
- (4) NSF, MI-結合チーム：ジョンズ・ホプキンス大、九大、名大

## FM-CWレーダの多点化計画 — 「極域—磁気赤道域結合する全球Cowlingチャンネルの解明」に向けて

Survey of electromagnetic coupling from auroral to equatorial ionosphere :  
Integrated study of theoretical and Empirical approach

SWARM 衛星

MAGDAS/CPMN, SUPERMAG地磁気ネットワーク

SUPERDARNレーダ, 「多点FM-CWレーダ観測」

及び、国際的な磁気圏電離圏結合の理論・解析チームの連携により  
極域から磁気赤道域に跨がる全球電磁結合過程、特に極域磁気  
赤道域を結合する子午面電流を精査する。

このための、多点レーダ網の整備を行う。

年次計画 予算準備

・ MI チーム研究

2013-2015: 基盤(A), NSF, EU-FP7 (各3000万程度)

・ FM-CWレーダの多点化

2013-: 補正、概算要求 一億以上

関連機関: 九州大学、名古屋大学太陽地球研究所、ジョンズ・ホプキンス大学、  
フィンランド気象研究所、オーストリア科学アカデミー他

連絡先: 吉川顕正 (九州大学)

e-mail: yoshi at geo.kyushu-u.ac.jp

### 5.1.33. 地磁気絶対観測自動化の技術開発

#### (A technological innovation of magnetic theodolite for automatic absolute measurements)

##### 1. 目的・内容

人工衛星による宇宙空間における観測や、海底・極域での無人観測がおこなわれる一方で、地磁気観測所の数は国際地球観測年（1957-1958年）の期間に比べて著しく減少している。日本国内でも、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どうか予断を許さない状況にある。

地磁気観測は連続観測とそれを補正する間欠的な絶対観測から成り立つ。このうち絶対観測については、磁性をもたない部品で構成された経緯儀を用いて、人手を介して行われていて、この観測手順にはある程度の熟練を要する。絶対観測自動化は長年強く求められているが、実現していない。これは角度測定器の稼動に必要なモーターと方向を読み取る装置を非磁性化することが困難なためである。最近、超音波モーターとロータリーエンコーダーを用いることによって技術的な困難は克服されつつあり、海外で絶対観測自動観測装置の試作・試験が行われている。

この絶対観測の自動化が実現すれば、職員が常駐していない観測点において定常的な観測が可能になるので、要員の問題で地磁気観測の継続が困難となっている観測点を救うことが可能になるほか、技術を身につけたスタッフを派遣することが難しくなっている極地や国外の観測点で得られる観測値を高品質かつ安定したものとすることができる。これにより、精度の高い地磁気データを地球内部ダイナミクス研究や地震・火山電磁気研究のために提供できるようになると期待される。

##### 2. 関係機関

東京大学地震研究所，国立極地研究所（予定）

##### 3. 予算規模

(a) 1億円以上

##### 4. スケジュール

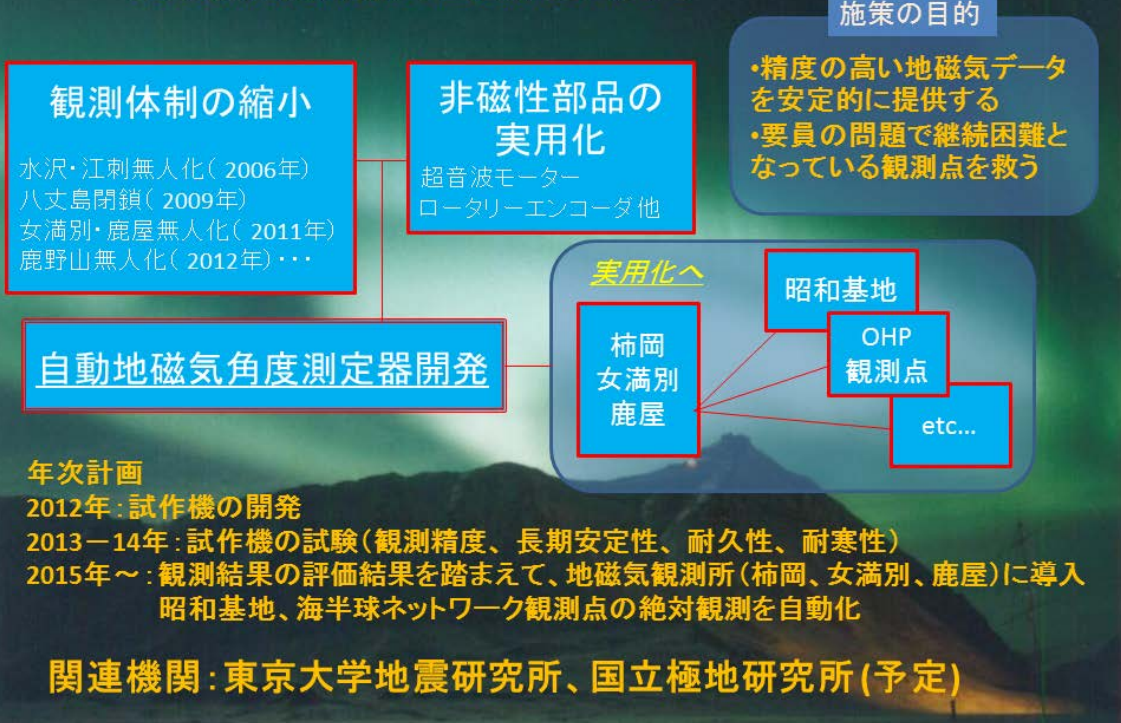
2012年：試作機の開発

2013-14年：試作機の試験（観測精度，長期安定性，耐久性，耐寒性）

2015年～：観測結果の評価結果を踏まえて，地磁気観測所（柿岡，女満別，鹿屋）に導入  
昭和基地，海半球ネットワーク計画における地磁気観測点での絶対観測を自動化

# 自動地磁気角度測定器開発計画

## — 地磁気絶対観測の自動化に向けて



連絡先: 源 泰拓 (気象庁地磁気観測所)  
e-mail: minamoto at met. kishou. go. jp

### 5.1.34. 天然試料に特化した試料調製技術の開発 (Development of procurement techniques for natural samples)

#### 1. 目的・内容

天然試料の特徴は不均質性であり、微視的な鉱物組織と対応した選択的な磁気測定的重要性は長らく認識されてきた。一般に、選択的測定にはターゲットの抽出と高感度測定 of 両者が必要になる。しかし古地磁気学においては、ターゲットの抽出技術は高感度測定に比べ顧みられておらず、これまで 1 mm 程度の加工精度しか実現されていない。磁場逆問題の不定性から、バルク試料のその場観察とデータ解析では、微小ターゲットの情報は完全に抽出しきれない。そのため、超精密な物理的抽出 (= 機械的加工) を真剣に検討しなければならない。

まず、機械工学分野では超精密加工部品の制作が追求されており、その技術を応用することで 1-10  $\mu\text{m}$  程度の加工精度は達成できるものと思われる。精密な切削加工や、短波長・短パルスのレーザー加工が考えられる。これらの加工には機械の振動や熱膨張などを考慮した大掛かりな制御が必要であり、また、磁氣的にクリーンな微細加工法を確立しなければならないという観点がある。これらを踏まえると、拠点的施設に予算を集めてコミュニティの共同開発として推進するのが望ましい。化学消磁も薄片状試料へ適用することで、組織観察と物理的分離を両立できる。

天然試料から古地磁気情報を解読する際には、試料を実験室で加熱しなければならない場合が多い。しかし、多くの場合、この加熱によって試料が変質を起し岩石磁氣的性質が変化してしまうという問題が存在する。とくに、この問題は、熱残留磁化を自然残留磁化として保持している試料 (火山岩など) から、過去の地磁気強度絶対値を復元する際に大きな問題となっている。加熱による変質を如何に抑制するかが、この復元の成功率を大きく左右する要素となっている。これまでの古地磁気学・岩石磁気学における実験技術では、加熱雰囲気工夫する、マイクロ波を利用する、レーザー照射をするなど、様々な工夫が取り入れられてきている。とくに有望と考えられるのは、マイクロ波の利用、レーザー照射であり、実際、国外ではこれらの技術を取り入れた装置が実用化されつつある。国内においても、独自の視点から、これらの技術を取り入れた装置の開発・実用化が望まれる。

#### 2. 関係機関

海洋研究開発機構, 熊本大学, 高知大学, 産業技術総合研究所



### 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。

## 天然試料に特化した試料調製技術の開発

### [現状と将来]

- 現状：1 mm 程度の試料加工精度 / 試料加熱による化学変質
- 将来：1-10  $\mu\text{m}$  程度の試料加工精度 / 化学変質が起こらない試料加熱

### [具体策]

- 既存の切削加工技術，レーザー加工の採用。ただし，磁氣的にクリーンな環境が必要。
- マイクロ波や，レーザーを利用した試料加熱。

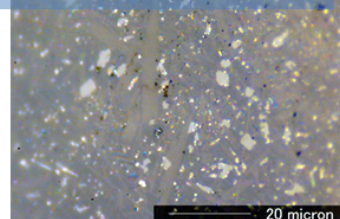
年次計画：構想段階

関連機関：海洋研究開発機構、産業技術総合研究所、熊本大学、高知大学

従来の古地磁気測定試料の例（10cm<sup>3</sup>程度）



残留磁化記録を担う磁性鉱物（白色）。この程度のサイズの加工精度が必要



連絡先：臼井 洋一（海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域）

e-mail: yoichi (at) jamstec.go.jp

### 5.1.35. 海洋底玄武岩の系統的試料採取技術の開発

(Development for techniques in systematic sample collections of submarine basalts)

#### 1. 目的・内容

古地磁気変動の連続的な記録媒体として、時系列がはっきりとした連続的な火山活動により形成された海洋底玄武岩は魅力的な測定対象である。しかしながら、海洋底の玄武岩の試料採取を系統的に行うことが可能な技術は開発途上である。この岩石採取技術として、潜航・観察への信頼性が高く、水中での機動性がある無人探査機 (ROV) をベースに、岩石採取地点の海底面起伏に応じてより効率的な採取が期待できるクローラなど海底走行装置を搭載し、傾斜を伴った海底面から硬い岩石を採取する岩盤サンプル採取装置を開発することが望まれる。採取岩石からより良い古地磁気情報を得るために、採取装置は定方位での試料採取を行えるよう技術開発が進むことも望まれる。

#### 2. 関係機関

大阪大学、海洋研究開発機構、熊本大学、神戸大学、国立極地研究所、東京大学

#### 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。



# 海洋底玄武岩の系統的試料採取技術の開発

[現状]

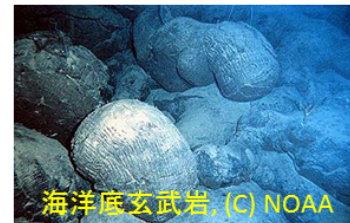
- 技術は開発途上.

[具体策]

- 無人探査機 (ROV) をベースにする.
- 海底起伏面に対応した海底走行装置を搭載.
- 傾斜をもつ海底面からの試料採取装置を搭載.
- 「定方位」での試料採取.

年次計画：構想段階

関連機関：大阪大学、海洋研究開発機構、  
熊本大学、神戸大学、国立極地研究所、東京大学



連絡先：島 伸和（神戸大学）

e-mail: seama (at) kobe-u.ac.jp

### 5.1.36. 海底堆積物の長尺不攪乱試料採泥器の開発

#### (Development of long piston corer for sediment paleomagnetic study)

##### 1. 目的・内容

これまでの海底堆積物による、古地磁気学への貢献は大きい。さらに古く、また空間的に広く試料を採取し地磁気の時空間変動データを収集することは、地磁気の理解にとって重要である。現在、松山期を超えるような古い記録は深海掘削によって採取された試料の解析によるところが大きく、今後もこういった研究が推進される事が望まれる。しかし深海掘削の実施にあたっては、多大な時間と経費が必要であるため、空間的に広く記録を得ることは難しい。そこで、通常の調査船を使って、広い範囲で数十 m までの堆積層を採取し、古地磁気変動の復元をすることが重要である。堆積層の採取では、コアリング長さが長いほど、より古い地磁気の記録を得ることができる。現在、日本では最大で海底下 20m までの堆積層のコアリングが実施可能であるが、諸外国においては海底下 50～60m までの堆積層のコアリングが実施されており、日本においても同等あるいは、それ以上の長さの採泥器を整備し、より古い地磁気の記録の復元を広範囲でおこなうことが望まれる。

##### 2. 関係機関

海洋研究開発機構、高知大学

##### 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、現在のところ予算獲得の予定はない。

# 海底堆積物の長尺不攪乱試料採泥器の開発

## [現状]

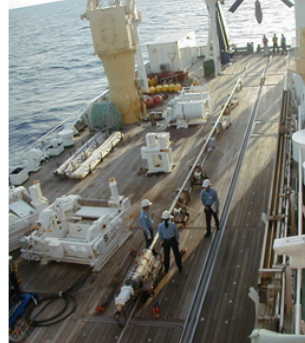
- 堆積層の採取では、コアリング長さが長いほど、より古い地磁気の記録を得ることができる。
- 国内では20mまでの長さの採泥が可能。
- 海外では60mまでの例がある。

## [具体策]

- 日本においても同等あるいは、それ以上の長さの採泥器を整備し、より古い地磁気の記録の復元を広範囲でおこなうことが望まれる。
- 長いピストンコアラーをハンドリングできるよう、船の改造が必要。
- 長いパイプが堆積層に安定して刺さるコアラーの作成が必要。

年次計画：構想段階

海洋研究開発機構、高知大学



国内最長のピストンコアラー



長尺コアラーのデモンストレーション  
WHOI [http](http://)より

連絡先：金松 敏也（海洋研究開発機構）

e-mail: toshiyak at jamstece.go.jp

### 5.1.37. 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

統合国際深海掘削計画 (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、古地磁気層序が利用できなかつたり、古地磁気層序の精度が低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るが、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り、アメリカが運行する JOIDES Resolution 号でしか積極的に導入がなされていない。他の掘削船でも積極的に導入されることが望ましいが、平行して、安価・高耐久性の高性能材料を発掘して非磁性コアバレルを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、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、例えば、SQUID 顕微鏡が実用化された暁には、その搭載なども検討すべきである。

## 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. 38. 金属コア対流の再現実験の技術開発と大規模数値シミュレーションのための環境整備

(Technical developments for metallic core convection experiments and general improvements for large-scale numerical simulation)

### 1. 目的・内容

地球の液体金属コアでは、対流運動によって電流が自発的に作りだされるダイナモ作用が起こっており、これが地球の固有磁場の源である。コア対流の性質やダイナモ作用の物理過程を理解するために、液体ガリウムをもちいた対流実験をおこなっている。まず低プラントル数流体であるガリウムの特性を生かした熱対流実験をおこない、対流セルの特徴的な振動を見いだした。これは地磁気永年変化のメカニズムである可能性がある。さらに磁場を印加した磁気対流実験によって、対流セルの循環方向の突発的な反転が起こることがあきらかになった。今後、回転台を設置し、回転熱対流や回転磁気対流の実験をおこなう予定である。この実験では超音波をもちいた流速場測定が重要なツールとなっており、今後その測定技術を成熟させる必要がある。実験と平行して、数値計算による再現実験もおこなっており、両者を相補的に活用していく計画である。

コア対流の数値シミュレーションはその規模も大きく、とくに磁極の逆転などを再現するためには、きわめて長時間にわたる数値積分が必要とされる。固体地球電磁気学分野では、他に岩石磁気学分野においても、岩石磁気学の知見と磁気測定データを結びつける目的で、組成や粒径の分布を得るためのデータ解析と第一原理から計算するモデリングを行うが、とりわけミクロンサイズの粒子のモデリングを行うには計算手法の改善とともに高い計算能力をもつ計算機環境が必要である。現在、JAMSTEC の地球シミュレータ、理化学研究所の京、さらにいくつかの大学や研究所の計算機センターなど、大型の並列計算を可能にする施設があり、これらの計算資源を可能な限り有効利用することが望まれる。地球内部研究の発展を鑑み、学会を中心とした研究グループが先導して、計算時間の割り当てを確保していくことが望まれる

### 2. 関係機関

海洋研究開発機構、北海道大学、東京大学、神戸大学、東京工業大学、同志社大学

### 3. 予算規模

～1 億円（一部構想段階のため暫定額）

### 4. スケジュール

ガリウム実験については、2014 年までに回転磁気対流の実験をおこなう。

その他については、構想段階のため未定。

# 金属コア対流の再現実験の技術開発と 大規模数値シミュレーションのための環境 整備

- 液体金属コア対流の物理過程を「実験」と「数値計算」によって相補的に理解する。
- 液体ガリウムをもちいた対流実験。
- 回転磁気流体シミュレーション。
- 固体地球電磁気学分野における大規模数値シミュレーションのための環境整備。

## 年次計画

2013-14年: ガリウムをもちいた回転磁気対流の実験

関連機関: 海洋研究開発機構、北海道大学、東京大学、神戸大学、東京工業大学、同志社大学

## ターゲット

- 地磁気永年変化、逆転
- 回転磁気流体乱流
- ダイナモ作用

## 必要となる技術

- 不透明液体の流速場測定技術の確立
- 回転磁気対流のシミュレーションコード開発

連絡先: 櫻庭 中 (東京大学)

e-mail: sakuraba (at) eps.s.u-tokyo.ac.jp



### 5.1.39. 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

G-COE プログラム(H20-H24 年度)の実施拠点である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 G-COE プログラム終了後も継承発展させ、各種滞在型スクール・実習・研究会開催、知見情報アーカイブの運営維持等々の活動を維持展開して行きたいと考えている。

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。CPS は、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を助けるための仕組みであり、巨大プロジェクトを必要とする惑星科学の展開において、その企画や利用を議論提案支援していくための場である。

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。そのような場を介して教育・研究の展開を促進する。CPS はネットワーク型研究所であり、少人数のスタッフで構成され、その活動はコミュニティの研究者による企画・運営を支援し協業することで実現される。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 Institute of Space Science (ISSI)等がその例として挙げられる。我が国にもLPIやISSIに比肩しうるネットワーク型研究所を定着させ、世界から見える惑星科学の一つのセンターとして確立することが目標である。

#### 2. 関係機関

JAXA/ISAS・JSPEC、国立天文台、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

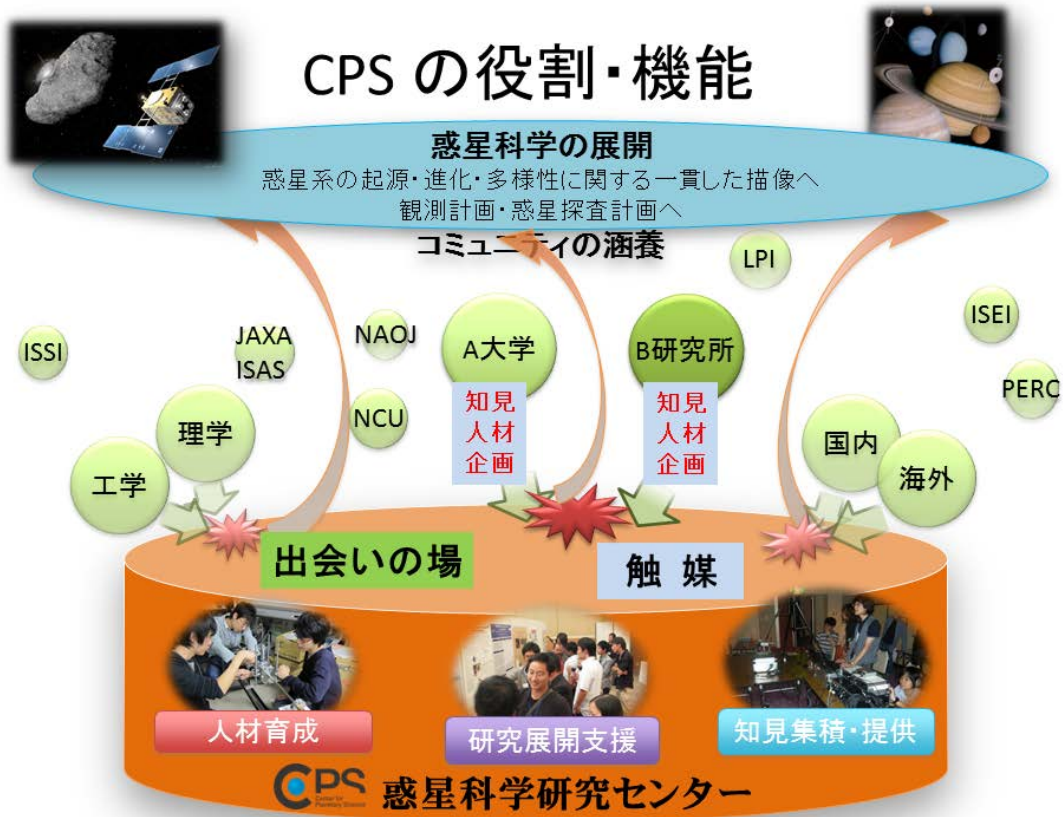
2億円/年 (= G-COE プログラムの規模)

専任教員・専任職員の人件費 (CPS ホスト大学のポストを返却) と各種滞在型スクール・実習・研究会開催、知見情報アーカイブシステム等情報基盤運営維持等々の事業費

#### 4. スケジュール

神戸大学 - 北海道大学 G-COE プログラムにより現在神戸大学統合研究拠点にて実行中





連絡先：中川 義次（神戸大学理学研究科／惑星科学研究センター）

e-mail: yoshi at kobe-u.ac.jp

### 5.1.40. 宇宙環境研究のためのサイエンスセンター計画 (Space Environment Science Center)

#### 2. 目的・内容

太陽、ジオスペースの観測手段は衛星、地上と多岐にわたっており、これらのデータをシームレスに統合し、シミュレーションやモデリングとの定量的な比較にもとづく総合解析が現象の理解のために必須である。このような総合解析は、データのフォーマットの違いや解析環境の個別性などによって、必ずしも効率的に実行できていなかった。本計画では、データの標準化とアーカイブ、統合解析ツールによるシームレスな解析環境の整備、観測と直接比較できるシミュレーションの開発を進め、コミュニティに提供することにより、異なるミッション間で共通して利用できる研究基盤の整備を進めるものである。

これまで、名古屋大学太陽地球環境研究所の中期計画の中で、サイエンスセンター機能の整備が行われ、具体的なミッションとしてひので衛星サイエンスセンター、ERG プロジェクトサイエンスセンターの整備が行われている。今後、ERG 衛星の打ち上げに向けて、体制の充実をはかりつつ整備を推進するとともに、Solar-C、BepiColombo に向けた準備も開始する。

#### 3. 関係機関

名古屋大学、宇宙航空研究開発機構、国立天文台

#### 3. 予算規模 : (a) 1 億円程度

#### 4. スケジュール: 実施中

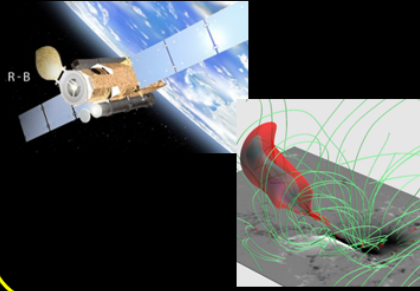
2010 年-2015 年: 名古屋大学太陽地球環境研究所中期計画として  
サイエンスセンター機能の整備

2016 年以降: Solar-C, Bepi-Colombo などコミュニティのニーズに呼応して継続・発展

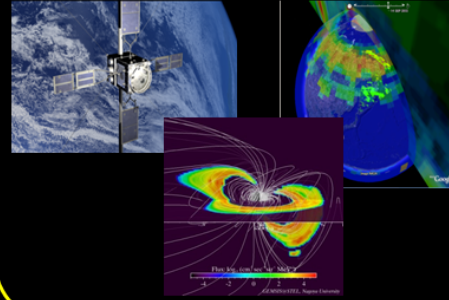
## 宇宙環境研究のためのサイエンスセンター： 太陽地球系の総合的な理解に向けた研究基盤構築

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-2015年: GEMSIS-Phase II (サイエンスセンター機能の整備)

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推進中。

2016年以降: ひので、ERGサイエンスセンターを継続推進。

コミュニティのニーズに応えて、Solar-C, BepiColomboなどに向けた準備。

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 stelab.nagoya-u.ac.jp

関華奈子 (名古屋大学)

e-mail: seki at stelab.nagoya-u.ac.jp

三好由純 (名古屋大学)

e-mail: miyoshi at stelab.nagoya-u.ac.jp

### 5.1.41. 宇宙生存学研究教育拠点 (Research hub for human survivability in space)

#### 1. 目的・内容

宇宙は人類に残されたフロンティアであると同時に、人工衛星等の宇宙利用は現代社会に必須の社会インフラとなっている。人類の活動場所としての宇宙環境の理解と予測、革新的な宇宙技術によるフロンティアの開拓と宇宙利用の拡大、宇宙開発利用に伴う倫理、政策、文化的問題など、理学、工学、人文社会科学の多岐にわたる学際的な研究が喫緊の課題となってきた。地球電磁気・地球惑星圏科学においても、学術としての発展と、国民の安心安全に資するという社会的要請の両面から、防災分野との連携、新しい観測・データ解析手法の開発、宇宙空間利用や惑星探査に関わる人文社会的課題等、学際的な研究及び人材育成の重要性は増す一方である。本計画の目的は、宇宙に拡大した生存圏における中長期的な人類の生存と発展のための学際的な研究教育拠点の形成である。

このため、宇宙に関する学際的研究の開拓と推進を行ってきた京都大学宇宙総合学研究所の機能を強化し、同ユニットに宇宙生存学研究教育拠点を設置する。拠点には、極端宇宙天気現象とそれへの対策など宇宙環境の基礎研究を行う部門、ナノ工学など先端技術を駆使した宇宙工学の研究を行う部門、宇宙開発利用に伴う倫理・哲学課題、文化・社会的課題などを人文社会的観点から研究する部門、衛星データの利用拡大や地域・産業連携、科学コミュニケーション活動等を担う社会連携部門等、4つ程度の部門を設け、それぞれに若干名の特定教員を配置し、京大内及び他機関の研究者との連携による学際的、総合的な研究及び人材育成を行う。

#### 2. 関係機関

京都大学・宇宙総合学研究所ユニット及び同ユニット参加部局（理学研究科、工学研究科、生存圏研究所、総合博物館、人間・環境学研究所、基礎物理学研究所、防災研究所、文学研究科、こころの未来研究センター、他人文社会系を含む関係部局）

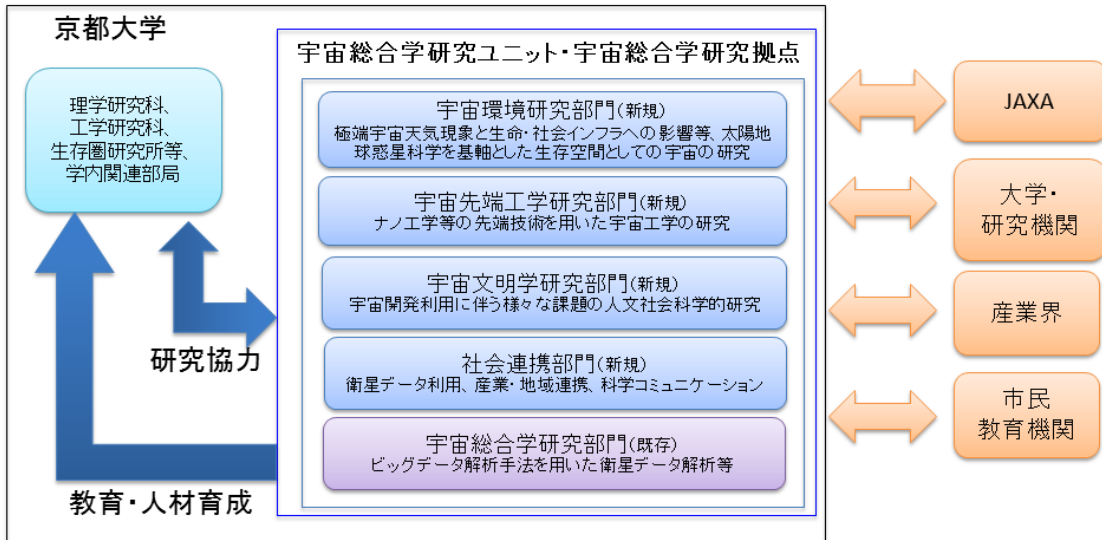
#### 3. 予算規模

1億円以上

#### 4. スケジュール

H26年度以降できるだけ早期の発足を目指す。（現在概算要求等による資金の獲得を検

## 宇宙生存学研究教育拠点計画(案)



- 多様な研究者を抱えた総合大学である京都大学の強みを活かし、宇宙に拡大した生存圏における中長期的な人類の生存と発展のための、学際的な研究の推進と人材の育成を行う
- H26年度以降、できるだけ早期の設置を目指す

連絡先：磯部洋明（京都大学） e-mail: [isobe@kwasan.kyoto-u.ac.jp](mailto:isobe@kwasan.kyoto-u.ac.jp)  
 柴田一成（京都大学） e-mail: [shibata@wasan.kyoto-u.ac.jp](mailto:shibata@wasan.kyoto-u.ac.jp)

#### 5.1.42. 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(再)探査が予定され(2015年12月に金星軌道投入予定)、また、将来の火星探査・木星探査も議論されており、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。

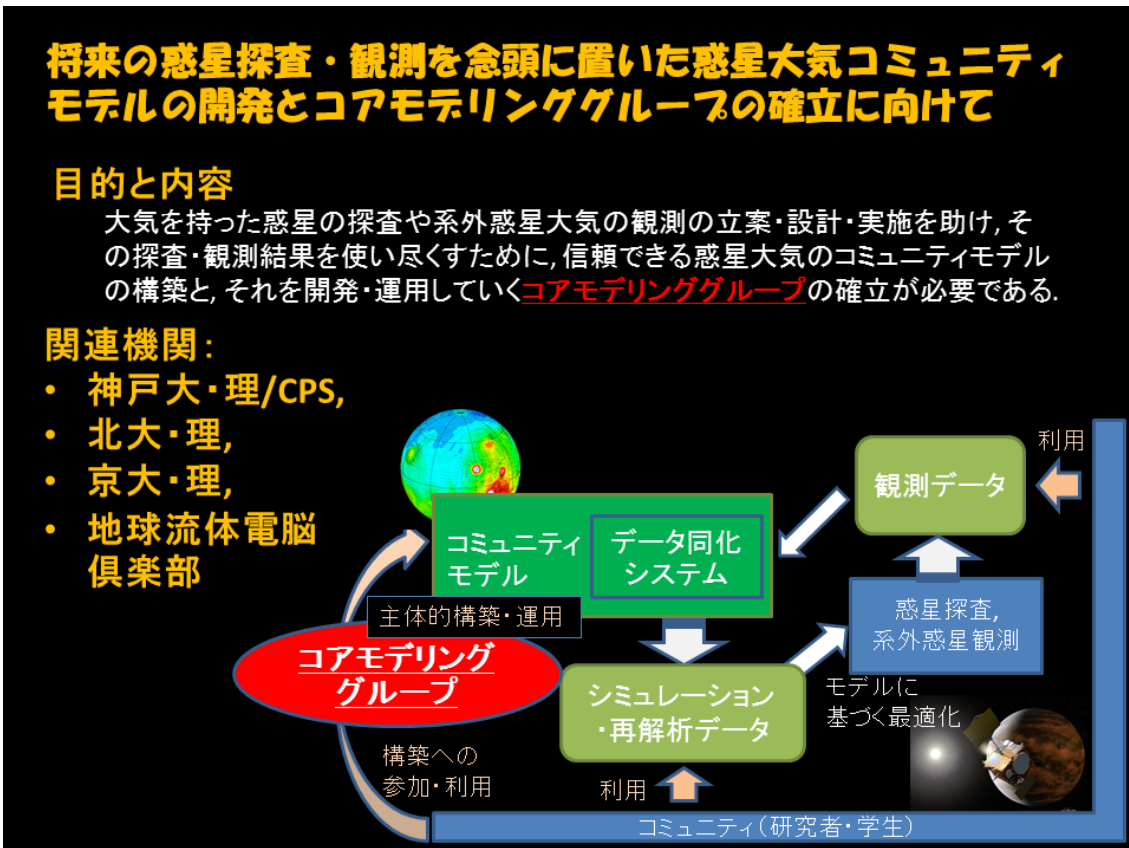
しかし、欧米の該当機関に比肩しうる、上記ミッションを専従して担う常勤職員を有した共同利用研究機関の設立が望まれる。現在は全国の大学(北大、京大、京産大、神戸大、岡山大、九州大、福岡大など)に分散する教員・研究者が、時間を割いて任意団体である地球流体電脳倶楽部 (<https://www.gfd-dennou.org/>) を組織して上記活動を試みている。

### 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

地球流体電脳倶楽部としては実行中



連絡先：高橋 芳幸（惑星科学研究センター/神戸大学）

### 5.1.43. グローバル地上観測連携データセンター構想 (Virtual data centre for ground based global observations)

#### 1. 目的・内容

SGEPSS 分野の研究には、多数の大学・研究機関により取得された地上観測に基づく多種多様なデータが重要な役割を果たしている。しかし、観測対象と手段の多様性により、異なる研究・観測グループ間でのデータの相互利用が容易ではなかった。その状況を打開するため、平成 21 年度より 6 年計画で、5 機関 7 組織の連携による『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）が開始され、メタデータのデータベース構築を核として、データの検索システムと解析ソフトウェアを開発している。

IUGONET のように、各機関が取得・収集したデータのデータベースは各機関で構築し、データベースの独自性・多様性を維持しつつ、全体としては一つのデータシステムとして多種・多様なデータを横断的に利用できる仕組みを、ここでは連携データシステムとよぶ。IUGONET のような活動は、分野横断的研究の推進にも極めて重要な役割を果たすと考えられることから、5 機関 7 組織で閉じているべきものではなく、連携組織および分野の拡張が重要である。また、国際的にも同様な試みが行われつつあり、それらと連携することで、観測データに基づく研究の推進に相乗的効果が期待される。



この構想では、IUGONET で開発したシステムを更に発展させ、超高層観測データだけではなく、SGEPSS 内部電磁気関係、大気・海洋関係にも拡張するとともに、国際科学会議 (ICSU) が主導する WDS (World Data System) やヨーロッパの ESPAS (Near-Earth Space Data Infrastructure for e-Science)、米国を中心とする様々な VO (Virtual Observatory) など、国際組織、プロジェクトとの連携を推進する。

このような活動、すなわち、連携データシステムの構築を通して、連携データセンターとしてのバーチャルな組織、「グローバル地上観測連携データセンター」を確立し、データ関連の国家的および国際的的事业とも協働できる体勢を整える。

#### 2. 関係機関

IUGONET 参加機関 (国立極地研究所、名古屋大学 STE 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、九州大学国際宇宙天気科学・教育センター)、および、上記以外の SGEPSS 分野関連データ取得・収集機関 (未定)



3. 予算規模： 2000 万円/機関/年

4. スケジュール： 現時点では構想段階

連絡先： 家森俊彦(京都大学大学院理学研究科)

E-mail: iyemori at kugi.kyoto-u.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、2012年に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る。これらの機関は、独立行政法人などの大型の研究機関、大学附置研究所、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。次ページ以降に、まず全ての研究機関を表としてまとめたものをつけ、それ以降のページに、各機関の詳細を記述する。

通し番号	機関名	英語名	連絡先	URL
	大型研究機関			
1	気象庁地磁気観測所	Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency	〒315-0116 茨城県石岡市柿岡595 Tel: 0299-43-1876 Fax: 0299-43-6904	<a href="http://www.kakioka-jma.go.jp/">http://www.kakioka-jma.go.jp/</a>
2	産業技術総合研究所	National Institute of Advanced Industrial Science and	茨城県つくば市東1-1-1 産業技術総合研究所 つくばセンター 電話:029-861-2130	<a href="http://www.aist.go.jp/">http://www.aist.go.jp/</a>
3	国立極地研究所	National Institute of Polar Research	〒190-8518 東京都立川市緑町10-3 Tel: 042-512-0602、Fax: 042-528-3164	<a href="http://www.nipr.ac.jp/">http://www.nipr.ac.jp/</a>
4	情報通信研究機構	National Institute of Information and Communications Technology	〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1 Tel:042-327-7429(代)	<a href="http://www.nict.go.jp/">http://www.nict.go.jp/</a>
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	〒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	<a href="http://www.isas.jaxa.jp/">http://www.isas.jaxa.jp/</a>
	大学附置研究所			
6	東京大学大気海洋研究所	Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo	〒277-8564 千葉県柏市柏の葉5-1-5 電話:04-7136-6130, Fax: 04-7136-6148	<a href="http://www.aori.u-tokyo.ac.jp/">http://www.aori.u-tokyo.ac.jp/</a>
7	東京大学地震研究所	Earthquake Research Institute, University of Tokyo	113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1 電話番号:03-5841-2498	<a href="http://www.eri.u-tokyo.ac.jp">http://www.eri.u-tokyo.ac.jp</a>
8	名古屋大学太陽地球環境研究所	Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University	〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町 Tel: 052-747-6306, Fax: 052-747-6313	<a href="http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/">http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/</a>
9	京都大学防災研究所	Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University	〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 Tel: 0774-38-3348 Fax: 0774-38-4030	<a href="http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/">http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/</a>
10	京大生存圏研究所	Research Institute for Sustainable Humanosphere,	〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 電話0774-38-3814、FAX 0774-31-8463	<a href="http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/">http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/</a>
	大学関連センター			
11	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(ISV), Faculty of Science, Hokkaido University	〒060-0810 札幌市北区北10条西8丁目	<a href="http://www.sci.hokudai.ac.jp/isv/">http://www.sci.hokudai.ac.jp/isv/</a>
12	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	Planetary Plasma and Atmospheric Research Center/ Tohoku University	〒980-8795 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3 TEL 022-795-3794 FAX 022-795-6406	<a href="http://pparc.gp.tohoku.ac.jp/">http://pparc.gp.tohoku.ac.jp/</a>
13	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	〒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	<a href="http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/">http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/</a>

14	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	Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Graduate School of Science, Kyoto University	〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 電話: 075-753-3949, FAX: 075-722-7884	<a href="http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/">http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/</a>
15	惑星科学研究センター	CPS: Center for Planetary Science	〒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 惑星科学研究センター Tel: 078-599-6731, Fax : 078-599-6735	<a href="http://www.cps-jp.org/">http://www.cps-jp.org/</a>
16	高知大学 海洋コア総合研究センター	Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University	〒783-8502 高知県南国市物部乙200 電話 (088)864-6712 , FAX (088)864-6713	<a href="http://www.kochi-u.ac.jp/marine-core/">http://www.kochi-u.ac.jp/marine-core/</a>
17	九州大学国際宇宙天気科学・教育センター	International Center for Space Weather Science and Education, Kyushu University	九州大学 国際宇宙天気科学・教育センター 〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6丁目10番 1号	<a href="http://www.serc.kyushu-u.ac.jp/">http://www.serc.kyushu-u.ac.jp/</a>

### 5.2.1. 気象庁地磁気観測所

#### (Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency)

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の機関である。2013年1月に百周年を迎える柿岡は世界でも数か所しかない地磁気の長期データを供給し、約60年の地磁気連続データを供給する女満別・鹿屋と合わせて、東アジア・北西太平洋地域の中低緯度帯の現象解析には不可欠な観測所として国際的に高い評価を得ている。この3観測点のデータの品質は、世界に冠たるものと言っても過言ではない。この他、地磁気観測所では、父島に無人の地磁気連続観測点を、北浦・いわきに全磁力連続観測点を運営している。地磁気以外にも、柿岡では大気電気連続観測、柿岡・女満別・鹿屋では地電流連続観測を行っている。

柿岡・女満別・鹿屋の地磁気データは、京都大学の地磁気世界資料解析センター等により公開され、Dst、Knをはじめとする地磁気指数や、地磁気脈動の検出、宇宙天気、国際地磁気標準モデル(IGRF)などに反映される永年変化検出、地殻活動検出のための参照点、地殻・マントルの構造探査など、地球深部から太陽地球環境に及ぶ多彩な研究に利用されて、国際的な地球電磁気研究活動を支える基礎の一部になっている。

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続けてきた地磁気観測所も、近年、大きな変革期を迎えている。2011年に女満別・鹿屋を無人観測化し、女満別の大気電気観測を廃止、2012年からは地磁気の長期的な精度を確保する絶対観測を女満別・鹿屋では毎週から隔週にするなど、効率化が進んだ。

一方で、地磁気観測所では、最近、データ提供方法の改善に力を入れてデータ利用度の向上を図り、また、最新技術の活用によって観測の質の向上を目指している。2012年には、0.1秒値から1時間値までの地磁気・地電流データとメタデータがHPからダウンロード可能となった。さらに、過去のアナログデータのデジタル化も進めており、2013年以降、公開する予定である。また、地磁気観測の中で唯一手動で残されていた絶対観測の自動化を目指し、本格的な調査を行っている。自動化は、無人観測点の長期安定性の向上や、高精度観測点の増加にもつながることから、地磁気観測網の充実に貢献することが期待される。

永年変化や指数類には長期安定した観測データが継続して提供される必要があり、これらの国際的なニーズにこたえるためには今後も柿岡・女満別・鹿屋・父島において高精度な観測を継続する必要がある。地磁気観測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ていくことが予想されるが、最新技術の積極的な活用等により、地上の精密地磁気観測データを提供し続けることが強く望まれる。

連絡先：技術課

〒315-0116 茨城県石岡市柿岡 595 Tel: 0299-43-1876

Fax: 0299-43-6904

## 5.2.2. 産業技術総合研究所

(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

### 【研究機関の目的】

産業技術総合研究所（産総研）は日本の産業を支える環境・エネルギー、ライフサイエンス、情報通信・エレクトロニクス、ナノテクノロジー・材料・製造、計測・計量標準、地質という多様な6分野の研究を行う我が国最大級の公的研究機関である。総職員数は約3,000名であり、その内2,000名以上の研究者が、組織・人材・制度を集積する「オープンイノベーションハブ」構想の基に、産業界、大学、行政との有機的連携を行い、研究開発からイノベーションへと展開している。特に、「グリーン・イノベーションの推進」、「ライフ・イノベーションの推進」、「知的基盤の整備・推進」、「先端的技術開発の推進」を研究推進戦略としている。

### 【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 会員は地質分野を中心に約 12 名であり、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。海域における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ってきたが、特に火山地域の地下構造の解明に貢献してきた。これら磁気異常データに関しては米国 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が、最近では東北地方における空中電磁探査による津波被害調査などに貢献しつつある。また、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。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。惑星探査分野では月探査衛星「かぐや」の可視赤外線反射率スペクトルのデータを解析して低カルシウム輝石に富む物質の分布から超巨大隕石の痕跡を発見した。

産総研の特徴として、基盤的情報を提供する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6分野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。計測標準部門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必要に応じて先端的な観測装置や分析装置を企業と共同開発するなどして先端的研究成果につなげていくことも SGEPS と日本の将来にとって有意義である。

#### 代表連絡先

住所：茨城県つくば市東 1-1-1 産業技術総合研究所 つくばセンター

電話：029-861-2130

### 5.2.3. 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法人である。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 50名、特任教員 11名、特任研究員 33名 計94名。  
事務/技術系職員 102名。 南極観測職員 20名 総計 216名。  
平成24年度予算 33.5億円（文部科学省補助金、科学研究費補助金等除く）

**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。2010年からは第VIII期6か年計画として「極地から探る地球温暖化」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、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。2011年度からはグリーンネットワークオブエクセレンス(GRENE)北極気候変動研究事業を開始した。

**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 SGEPS 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

〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3 国立極地研究所、T:042-512-0602、F:042-528-3164

#### 5.2.4. 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>

独立行政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は電磁波センシング基盤技術、ネットワーク基盤技術、ユニバーサルコミュニケーション基盤技術、未来ICT基盤技術の研究開発とともに、日本標準時の配信、無線機器の型式検定や電離層定常観測・宇宙天気予報業務を担う。また、1957年以来、国際宇宙環境情報サービス（ISES）の一員として、西太平洋地域警報センター（RWC Japan）及び電離圏世界資料センター（WDC for Ionosphere）を担当してきた。当学会に関連する研究活動としては、現在宇宙天気予報の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。また2011年より日本学術会議との協力のもとでICSU-WDS（国際科学会議・世界データシステム）事業の国際プログラムオフィスをホストしながら環境計測等科学データアーカイブの研究開発等を実施している。NICTは総務省所管の独立行政法人であり、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、電磁波計測研究所（関係する研究室は宇宙環境インフォマティクス研究室、センシングシステム研究室、センシング基盤研究室）、および統合データシステム研究開発室がある。

<設備>

- ・広帯域太陽電波観測（25-2500MHz）：平磯（茨城県ひたちなか市）
- ・短波レーダー（SuperDARN）：キングサーモン（米国アラスカ州）
- ・磁力計ネットワーク（NICT-MAG）：キングサーモン（米国アラスカ州）、マガダン、パラツンカ（ロシア）、沖縄、ヤップ（ミクロネシア連邦）
- ・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（タイ）、バクリウ、フーツイ（ベトナム）、コタババン、ビアク（インドネシア）、セブ（フィリピン）、ハイナン（中国）
- ・赤道越短波電波伝播観測：大洗（茨城県）
- ・電離圏定常観測：サロベツ（北海道天塩郡）、国分寺（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（昭和基地は文科省事業）、および各サイトにおける関連観測実験
- ・GPS-TEC データベース：世界各地のGPS受信機データを収集・処理し公開。・大型計算機（日立 SR16000 モデル M1）：国分寺（東京都小金井市）
- ・サイエンスクラウド（OneSpaceNet）：国分寺（東京都小金井市）

- ・ 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）、440MHz 帯レーダー（沖縄電磁波技術センター大宜味観測施設；沖縄県大宜味村）。稚内 VHF レーダーとともに風速値を気象庁へ常時配信して現業数値予報へ入力している。
  - ・ 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）
  - ・ 稚内大気レーダー施設（稚内市声間）：MF レーダー(1.9MHz 帯)、VHF レーダー(46.5MHz) による中間圏・対流圏風速、電離圏 D 領域の観測
  - ・ フェーズドアレイ気象レーダ：東芝(株)、大阪大学、NICT が共同して開発した日本で唯一の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）。
  - ・ MF レーダー、オーロラ Web カメラ等（米国アラスカ州ポーカーフラット）
- （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（代表電話：042-327-7429）



### 5.2.5. 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システムを継承し、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る。ISASでは、中期目標に従い、「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「衛星等の飛翔体を用いた宇宙科学プロジェクトの推進」を重点的に推進している。前者は、研究者が個人あるいはグループを作って行う研究で、萌芽的な性格のものであり、後者は、科学衛星プロジェクトに代表される研究で、衛星の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活動である。これまで、宇宙科学研究について、国公私立大学等多くの機関の研究者の協力の下に、自由な発想に基づく一貫した研究プロジェクトが進められ、多大な成果を収めている。

また、ISASでは、大学共同利用機関として、宇宙科学研究に従事する全国の国公私立大学その他の研究機関の研究者に実験施設・設備を利用させることを行っている。大学院教育としては国公私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・協力することになっており、このことを通じて、この分野の後継者の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。「あけぼの」「GEOTAIL」「れいめい」「あかつき」の現在運用中の科学衛星をはじめ、「BepiColombo/MMO」, 「Sprint-A」, 「ERG」の開発中の衛星、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、ISASは飛翔体による観測機会を提供する、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

### 5.2.6. 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、学術研究船白鳳丸・淡青丸共同利用、柏地区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）、国際沿岸海洋研究センターにおける共同利用・共同研究の公募を行なっています。大気海洋研究所は、3つの研究系（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、また、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。

白鳳丸は、遠洋、近海を含め比較的長期の研究航海を行う研究船です。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。淡青丸（後継船建造中）の公募は、主として日本近海の調査研究を対象に毎年行われます。

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堆積物・岩石試料の採取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えてきました。地球電磁気研究の推進のためには、今後もこのような枠組みが維持・発展されることが重要です。

#### 連絡先

山崎俊嗣（東京大学大気海洋研究所 海洋底科学部門）

住所：千葉県柏市柏の葉 5-1-5

電話：04-7136-6130

Fax: 04-7136-6148

### 5.2.7. 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。平成 24 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 16～24 年度におけるその実績は、同研究所の委員として計 5 名、客員教授等として 2 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 40 件、研究集会の開催数 6 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>



## 5.2.8. 名古屋大学太陽地球環境研究所 (Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University)

名古屋大学太陽地球環境研究所は、1990年に設立され、太陽地球系科学全域をカバーする国内唯一の全国共同利用・共同研究拠点である。「生命を育む地球」と「21世紀の人類が活動を展開していく宇宙空間」を、共に人類の環境としてとらえ、先導的に世界最先端のレベルで太陽地球系の構造と変動の研究を行っている。太陽地球環境研究所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、本研究所の研究者は大きな役割を果たしてきた。

本研究所は、大気圏環境、電磁気圏環境、太陽圏環境、総合解析の4つの研究大部門、ジオスペース研究センター、及び1つの客員部門で構成され、全国に4つの観測所を持っている。職員は約30名の常勤研究者の他、年間5-7名の外国人客員教授、10名以上の特任・ポスドク研究員、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、「理学研究科素粒子宇宙物理学専攻」と「工学研究科電子情報システム専攻」の両方に協力講座を持ち、年間50名程度の大学院生の教育を行うことによって、若手の人材をSGEPSSに輩出してきた。また、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することも主なミッションとして位置づけており、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「太陽地球系の気候と天気」(Climate And Weather of the Sun-Earth System-CAWSES, I: 2004-2008、II: 2009-2013) を積極的に推進している。

共同利用・共同研究拠点としては、2010年度から開始された第2期中期計画の中で、(1)特異な太陽活動周期における太陽圏3次元構造の変遷と粒子加速の研究、(2)グローバル地上・衛星観測に基づく宇宙プラズマ-電離大気-中性大気結合の研究、(3)太陽活動の地球環境への影響の研究、(4)実証型ジオスペース環境モデリングシステム(GEMSIS): 宇宙嵐に伴う多圏間相互作用と粒子加速の解明に向けて、の4つの共同研究プロジェクトを推進している。これらに関連して、年間30件以上の研究集会を開催すると共に、一般共同研究、データベース共同利用、計算機共同利用、地上ネットワーク観測共同利用、を展開し、全部を合わせて年間150-170件に上る共同利用・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、サイエンスセンター機能を整備して、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

### 5.2.9. 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



## 5.2.10. 京大大学生存圏研究所

(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: 環境計測・地球再生」、「2: 太陽エネルギー変換・利用」、「3: 宇宙環境・利用」、「4: 循環型資源・材料開発」に関する研究を推進する。これに沿った全国・国際共同利用・共同研究を「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形態で広範に実施している。また公募型の研究集会「生存圏シンポジウム」を多数開催している。以上を総合すると年間の課題総数は250件以上に達している。(以下、課題数等はいずれも平成23年度)

- A) 大型設備・施設の共用：全体で7項目あるが「MU 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)」、「赤道大気レーダー(EAR)」が当学会に関連する。研究所全体の課題数は計180件に達している。国際共同利用を全国に先駆けて実施しており、平成23年度にはEARの9件をはじめ計19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17件を実施した。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。
- 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35件を採択・実施した。また公募型の研究集会「生存圏シンポジウム」を32件採択・開催した。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、平成20年度に「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に関催(平成23年度：16回)して研究成果を広く情報発信した。



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 京大大学生存圏研究所  
山本衛(電話 0774-38-3814、FAX 0774-31-8463)

## 5.2.11. 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。本センターは、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。本センターは、全国の関連研究機関と連携しながら「地震および火山噴火予知のための観測研究計画(平成21年度～25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・博士課程の学生が本センターで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、海底地震研究分野、地下構造研究分野)、地域防災情報支援室、観測技術部、客員分野から構成されています。2012年度現在の教職員数(非常勤を含む)は計33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、地震発生地域・火山地域の比抵抗構造探査や、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、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。今後は、このような現象の追究を通じて、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>

〒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

## 5.2.12. 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

(Planetary Plasma and Atmospheric Research Center/ Tohoku University)

＜概要＞；惑星プラズマ・大気研究センター（ Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, PPARC ）は、主に惑星圏における多くの謎を“電波”と“光”の観測から解明しようと6つの観測所を拠点とし、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研究しています。



＜構成＞；惑星プラズマ・大気研究センターでは、2 つの

研究部門(惑星分光観測研究部、惑星電波観測研究部)を設置しています。それぞれ電波と光を観測手段として協力しながら惑星圏の現象と環境の理解を進めています。

＜設備＞；宮城、福島両県にまたがる5カ所の観測所と、ハワイ・ハレアカラ山頂の光学観測所を観測拠点としています。それらの観測所はいずれも、電波と光の環境の良好な地点に位置しており、ネットワーク観測が行われています。主な観測設備は以下の通りです。

- 60cm 光学望遠鏡(福島県飯館)
- 40cm 光学望遠鏡・可視分光器(ハワイ)
- 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・福島県)
- 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)
- サーチコイル・フラックスゲート磁力計(宮城県女川)

＜国際協力＞；米国ハワイ大学との協力で、ハレアカラ山頂における惑星可視光観測が行われています。現在、口径 1.8m級オフセット望遠鏡の開発計画が進行中です。また、アラスカ、ノルウェーやスウェーデンの研究機関との協力で、北極におけるオーロラ地上観測を実施しています。

＜研究テーマ＞；主な研究テーマは、以下の通りです

- 太陽電波と粒子加速現象の解明
- 惑星電波と磁気圏現象の解明
- 木星オーロラとイオ起源ガスのダイナミクス
- 月・衛星や水星の希薄大気の生成・輸送過程
- 惑星放射線帯変動の解明
- オーロラ微細構造の衛星・地上観測
- 赤外・可視観測機器の開発
- 人工飛翔体搭載機器の開発
- LF～UHF 帯電波観測装置の開発

＜連絡先＞；小原 隆博(教授・センター長)、三澤 浩昭(准教授)、坂野井 健(准教授)

〒980-8795 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3

TEL 022-795-3794 FAX 022-795-6406

**5.2.13. 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>**

東北日本は、その下に太平洋プレートが沈み込んでいる典型的な「プレートの沈み込み帯」です。沈み込み帯は、中央海嶺で地表に噴出しプレート運動によって移動してきた物質が再び地球内部へとかえっていく場所であり、地球内部の物質循環の過程を考える上で重要な役割を担っています。地震や火山の噴火は、このような地球内部の物質循環活動が地表に現れたものです。その為、沈み込み帯に位置する東北日本では地震や火山の活動が極めて活発で、過去に繰り返し大地震や火山噴火による災害を生じてきました。このような災害を軽減するためだけではなく、プレートの沈み込みの全過程を理解するためにも、東北日本は世界的にたいへん重要な研究対象でもあります。

地震・噴火予知研究観測センターは、このような地球科学的背景にある東北日本を主な対象として、観測データに基づく研究を精力的に行うとともに、実験や理論などに基づく研究を進めています。地震予知や火山噴火予知のためには、地震や火山現象そのものだけではなく、それらの原因であるプレートの沈み込み過程をより深く理解する必要があると考えています。

**<構成>**

地震・噴火予知研究観測センターでは、3つの研究部門（地震予知観測研究部□火山噴火予知観測研究部□海域総合観測研究部）と4つの観測所（秋田・本荘・遠野・三陸）を設置しています。

**<SGEPSSにおける重要性>**

最新の研究では、沈み込み帯で発生する地球内部の水・マグマ等の地殻流体の性質と挙動が地震や火山の噴火の発生に大きな影響を及ぼすことが解明されつつあります。電磁気学的物理量である地球内部の磁化率や電気伝導度の時空間変化の情報は、この地殻流体の検出に最も有効であるため、噴火モデルの構築と噴火予知の定量化、さらには地震活動を含む地殻活動全般に及ぼす地殻流体の役割を解明する上で、これらの推定は極めて重要です。地表での地磁気変動と電位差変動の位相差が地球内部の電気伝導度異常に起因していることをCagniardより2,3年先んじてMaxwellの方程式から証明し、また空中磁気測量の先駆的開発を行った加藤愛雄元センター長を初めとして、地震・噴火予知研究観測センターは地球電磁気現象から地球内部の磁化率・電気伝導度の分布を推定する基礎研究や地球内部の電磁気現象の時間変動の研究を精力的に進めてきましたし、今後も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

**5.2.14. 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**  
**(Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Graduate School of Science, Kyoto University)**

研究機関の目的：

京都大学大学院理学研究科の附属施設として、全世界から収集・処理した地磁気観測データを基礎に、地球電磁気学・太陽地球系物理学およびその関連分野を中心とする研究と教育を行うとともに、国際科学会議（ICSU）世界データシステム（WDS: World Data System)のメンバーとして、World Data Center for Geomagnetism, Kyoto を運営し、地磁気観測データおよび地磁気指数の算出を中心とするデータサービスを、全世界の研究者、学生、一般市民にたいして行う。

規模： 計7名（専任職員4名、任期付き研究員1名、非常勤職員2名）

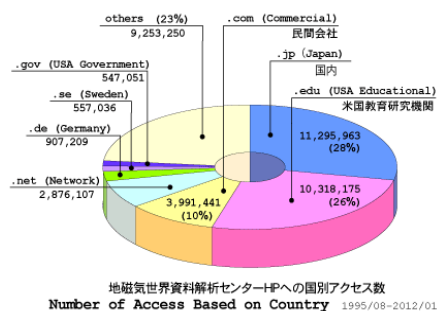
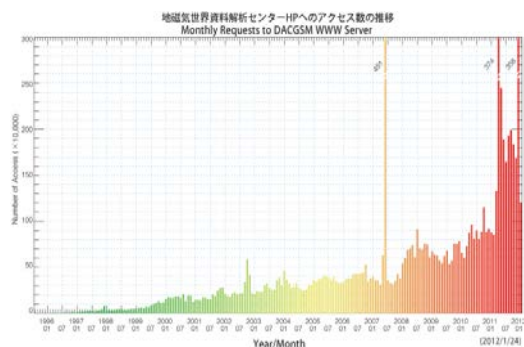
SGEPSS における重要性：

SGEPSS は地球電気・磁気学研究者が中心となって 1947 年に結成され、発展してきた学会であり、地磁気観測データはその設立以来現在に至るまで、研究の基礎データとして重要な位置を占めている。すなわち、地磁気は電離層・磁気圏電流の研究、宇宙天気の研究、地磁気ダイナモ生成メカニズムの研究、地球内部誘導電流を用いた地殻電気伝導度構造の推定など、SGEPSS 分野の幅広い範囲で基本となる物理量であり、収集した地磁気観測データだけではなく、当該組織で算出・公開している地磁気指数(Dst, AE, ASY/SYM, Wp)は、SGEPSS 会員が行う様々な研究・教育活動で極めて頻繁に参照・利用されている。下の図は、当センターHP へのアクセス数の推移と、接続機関の種別を示す。最近では、一ヶ月当たり約 200 万件、主として SGEPSS 分野の教育研究機関からアクセスされている。また、今後重要となる、分野をまたがるデータシステム形成の世界的流れの中で、SGEPSS 分野に関連するデータシステム形成の我が国に於ける活動(IUGONET や WDS)の一端をになっている。

代表： 家森俊彦（センター長）

連絡先住所： 606-8502 京都市左京区北白川追分町  
 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

電話： 075-753-3949, FAX： 075-722-7884



## 5.2.15. 惑星科学研究センター (CPS: Center for Planetary Science)

### 目的

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。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。CPS は、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を助けるための仕組みであり、巨大プロジェクトを必要とする惑星科学の展開において、その企画や利用を議論提案支援していくための場である。そのような場を介して教育・研究の展開を促進する。

人と知見の交換集積を促す場としては、神戸大学統合研究拠点に確保されている500 m<sup>2</sup>の空間を拠点として、国際プラネタリースクールをはじめとする各種滞在型スクールや実習、セミナーや各種研究会を展開、インターネット上にこれらの企画を中継し、これらから寄せられる資料や公演動画等を集積した知見情報アーカイブを提供している。

CPS は「ネットワーク型」研究所である。少人数の専任スタッフで構成され、上記活動はコミュニティの研究者による企画・運営を支援し協業することで実現、実施されている。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、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。CPS は、我が国にも LPI や ISSI に比肩しうるネットワーク型研究所を定着させ、世界から見える惑星科学の一つのセンターとして確立することが目標である。

CPSは現在のところ神戸大・理学研究科附属の研究センターであるが、次回「全国協同利用・共同研究拠点」認定に向け、申請可能な神戸大附属の研究センターへの昇格を目指している。さらに将来的には大学組織からは独立した研究センターとして、上述の目的により適合した体制を実現したいと考えている。

### 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)である。現在H25年度以降の継承を求め、神戸大学からの支援や概算要求等の予算獲得努力中であり、同程度の規模を維持したいと考えている。

### SGEPSS における重要性

宇宙科学を強力に推進してきた SGEPPS 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

センター長・教授 中川義次 [yoshi@kobe-u.ac.jp](mailto:yoshi@kobe-u.ac.jp),  
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  
惑星科学研究センター  
Tel: 078-599-6731, Fax: 078-599-6735, 事務担当 [secretary-ml@cps-jp.org](mailto:secretary-ml@cps-jp.org)  
<http://www.cps-jp.org/>





**5. 2. 16. 高知大学 海洋コア総合  
研究センター**  
(Center for Advanced Marine Core  
Research, Kochi University)

当センターは、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、コア研究に特化した機関です。平成 22～27 年度の期間について、文部科学大臣から「地球掘削科学共同利用・共同研究拠点」としての認定を受け、センターの卓越した施設設備を活用した共同利用・共同研究が年間 70 件程度実施されています。

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)・微小試料振動磁力計 (Micro-mag VSM)・大型磁気シールド実験室・大型コアカッター・微小試料 X 線回折装置 (Micro-XRD) などの機器・設備を必要とします。これらの機器・設備は、資金・労力的に各大学・研究機関に所属する研究者が各研究室単位で維持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、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あると考えます。

現在、国内においては、当センターにおける共同利用・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当センター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、当センターの古地磁気・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」が継続的に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、今後も、このような枠組みが維持・発展されることが重要であると認識しています。

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

### 5.2.17. 九州大学 国際宇宙天気科学・教育センター (International Center for Space Weather Science and Education)

本センターは、2002年の設置以来、学際的な宙空環境科学の創成と宇宙天気予報・デブリの警報実用化のための基礎研究を行ってきた宙空環境研究センターが、5年評価、10年見直しの基本方針の下、(1)宇宙天気科学としての研究枠組みの拡大と更なる推進、(2)国際的な宇宙天気科学教育センターとしての展開、(3)宙空環境変動と気候変動・災害との関連性の精査等に取り組む新センターとして改組された組織である。

本センターは、「宙空観測・模擬実験」、「宙空大気圏結合」、「宙空基礎理論解析」「宙空災害予測研究」、「宇宙生物・医学」の5研究部門から構成され、本学教員約20名、外部からの客員教授2名が所属して宇宙天気科学と関連した研究を行っている。また、本センターは、多点リアルタイム地磁気ネットワーク観測システム「MAGDAS」の運用機関でもあり、現在世界中に67観測地点を配備、現地研究協力機関とともに世界最大級の地磁気観測網の維持・発展を担い、汎世界的な宇宙天気研究・モニタリングに大きく貢献している。

本センターの活動の大きな特徴として、ネットワーク観測構築と併せて国際的な宇宙天気科学の教育拠点として、特に発展途上国に於ける科学研究能力の向上「キャパシティ・ビルディング」に貢献することが挙げられる。2012年6月には、国連宇宙部と協働して国際的な宇宙天気科学教育の中核を担う本センターの設置に関する口上書が日本国政府と国連の間で交換され、宇宙天気科学に関する国際スクール、セミナー、研究者トレーニング等の本格的なキャパシティ・ビルディング活動が開始された。

STP科学を推進するためには、各機関による地上観測施設の整備が非常に重要であり、こうしたファシリティを発展的に維持していくためには、現地ホスト機関との良好な関係を結ぶことが必要不可欠である。観測データの効率的な取得に焦点を合わせるだけでなく、観測ホスト国での地道な研究レベル向上、教育啓蒙活動を行っていくことが、STP科学の進展、延いては本学会の活動に対する国際的な信用向上へとつながる重要事項であると考えられる。

〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1  
TEL & FAX 092-642-4403



## 6 学会と社会の関わり・研究者の働き方の多様性

### 6.1 はじめに

地球電磁気・地球惑星圏学会（SGEPSS）は、地球電磁気学及び地球惑星圏科学の研究を行う者たちが集い、お互いに切磋琢磨し、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、及び学会員（研究者）の働き方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のが現状である。そのため、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、我々が扱っている研究領域は人間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対して還元することは、人類がより安全に持続的な生活を営み、自然現象に対する理解を深める助けとなる。また、氾濫する情報に惑わされることなく災害等に対する適切な対策・対応をとる際にその知見を活用してもらう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、後進となる新たな研究者の参加が不可欠である。小中高生及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、我々の研究内容を正しく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）にとって魅力的な環境を提供する、あるいは魅力的な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、研究者の働き方の多様性を実現することが重要である。しかしながら、現在はその状況からは程遠い。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関わらず、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あると考えるのが自然である。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、近年はポスドク、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の女性に対する負担は今でも大きい。問題を解決していくためには、施策として女性の負担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、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ている。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減少にもつながっている現状がある。また、有期雇用が適用されているのが概ね特定の年齢層に偏っているため、流動化に十分寄与しているとは言い難い状況もある。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、及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について述べる。

## 6.2 パブリック・アウトリーチ活動

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9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自負している。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年以降毎年行っており、8回の申請に対して5回採択されている。科研費による補助によって我々のイベントは質・量ともに大きく向上している。

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れ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。現在も中・高校生がイベントに来てくれることを最終目標にはしているが、どちらかといえばこの「会場に足を運んでイベントと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・中学生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。イベントは学会開催前日、もしくは開催中の休日午後、開催都市の科学館や公民館で開催する。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している。前年のイベント終了から次年度科研費申請までの間に、まず学会内の研究・技術領域から主たるテーマをひとつ決める。開催地の研究室の活動をアピールする場として活用してもらうことを想定して、通常、秋学会を主催する研究室の研究・技術領域が選ばれることが多い。その主テーマに沿った講演会（トークショー）がイベントの柱である。

その分野を研究している会員に講演を依頼し、イベント委員（講演担当）と一緒にトークショーの内容を練り上げる。トークショーという表現を敢えて用いているのは、堅苦しいイメージを払拭し、講演も、適宜聴衆にクイズを出したり、司会者との掛け合いなどを入れたりして気楽に聞いてもらうためである。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、「○○はかせ」（○○にはオーロラ、惑星等の名前が入る）を配置し、研究者自身が積極的に研究の面白さをアピールしたり、参加者と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。しかし、それでは来場者の興味を強く引くことができず、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。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をしている。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。

今後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、我々の大きな目標である。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。この規模を維持しつつ、内容的に時代の変化に即し、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、イベント開催に際して最大の問題は、予算の獲得と効果的な宣伝方法の確立である。前者は今後も科研費を取得すべく努力を続ける。後者については、我々のやり方ではまだ不十分であり、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。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。また、いずれ主ターゲットを中高生も含める形に広げ、分野への進学指南をできるようにすべきとも考えている。

<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

「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～」

### 6.2.2 秋学会の記者発表

社会に科学的成果を還元するのは研究者の大きな使命の一つである。研究者の側から積極的に研究成果についてマスコミを通じて社会に公表することは、最近では大学や研究機関も行っている。これとは別に学会として発表することは、純粋に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い、学会としての存在感をアピールするという意味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我々より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。我々はこのことに危機感を覚え、アウトリーチ部会の活動の一つとして 2004 年の秋学会（松山開催）から学会講演会の発表に関する記者発表会を実施してきた。2012 年秋に札幌で開催した秋学会で 9 年目の開催である。

基本的な流れは以下のようなものである。秋学会プログラム構成時に各セッションのコンビナーに対し、発表の中から「科学的にも社会的にもインパクトのある研究」として 1,2 件の推薦を頂く。その後、アウトリーチ部会内での議論等を経て、最終的に学会長によって 3~5 件程度の発表を決定し、各著者に連絡して主に学会前日に開催される記者発表での発表の可否を打診する。この作業はアウトリーチ部会に所属する 1 名の記者発表会担当と秋学会プログラム担当が共同で行う。一方、記者発表会のお知らせはアウトリーチイベントのお知らせと一緒に、学会が開催される地方のマスコミに対して告知される。この作業は通常 1 か月前から 1 週間前の間に行われる。発表会当日（学会前日）は秋学会 LOC の協力により会場をセッティングし、1 件約 15 分程度で著者本人から論文内容を紹介してもらおう。質疑は記者発表の時間中に行われるが、発表会終了後に直接記者から著者への取材が入ることも多い。報道される割合は必ずしも高いとは言えないが、報道される場合は学会発表前後の紙面で掲載されることが多い。事前の紙面掲載が反響を呼び、学会発表当日に後追い取材が入り、記事として大きく取り上げられた事例もある。

記者発表会を開催する上の課題は、記者の方々に発表会に来てもらうことと、記者発表を記事につなげることである。前者は運営上の問題が大きい。毎年異なる場所で開催され

る秋学会に併せて行うため、その地方のマスコミ事情が大きく影響する。多くの場合、秋学会 LOC の機関が持つコネクションを使わせて頂くことになるが、場合によっては完全に独自にプレスリリースを配布して宣伝することも起こりうる。年によっては、記者に全く来てもらえないこともあった。現実問題として、地方のマスコミには、たとえ大手の支局であっても科学担当の記者がおらず、科学記事を共同通信や時事通信などの配信に依存しているという事情もある。このような事情から、他学会では記者発表会は学会開催地に依存せずに、東京で事前に実施しているところもある。この事業を継続的にやっていくために、この問題はもう少し検討すべきことであろう。後者（記事につなげること）はアウトリーチ部会としてまだノウハウを蓄積し切れているとは言い難い。我々の扱う研究内容は、純粋な天文学、地質学、地震学等と比べると（世間的には）少し難しいものである。各研究者には「なるべく平易な言葉で」、「新規性・モチベーションを一言で」等の願いをして発表してもらおうが、実際にはどんなに簡単に言おうとしてもなかなか伝わるものではなく、多くの研究者は「簡略化と正確性のトレードオフ」に頭を悩ませているようである。事前の打ち合わせ等を密にする、発表スライドを事前にチェックする等の対策が必要であろう。

この事業は、今後も継続していく方針である。学会開催地で記者発表会を行う理由は研究者が直接自らの成果を紹介できるということの他に、学会開催に関して各地域の自治体やコンベンション、大学等から支援を受けていることへの恩返しの意味も含んでいる。地方紙・地方版に、現在このような学会というものが開催されていて、こんな研究発表があるということを報道してもらい、地元の方に知っていただけることを一番期待している。記者発表を東京で行わないことに関しては、この制度を始めた当初から異論が存在する。しかし、SGEPSS のような小規模学会では2か所での発表会はなかなか難しく、研究者の協力を得ることも困難であるので、現在はこの形にしている。補完する一つの試みとして2012年には地元だけでなく東京のマスコミにもプレスリリースを送付することにした。このことで内容に関心を持ってもらえた時に東京の科学部等から直接連絡が来ることや、地元の記者への取材指示が出ることを期待してのものである。また、春学会（JpGU）のSGEPSS 関係セッションに関してのプレスリリース配布も検討している。実際に記者発表会は行えなくとも、社会的に興味を引きそうな発表に関してプレスリリースを打つことで、幕張における直接の取材も期待される。さらに、秋学会時だけでなく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と、会員の研究内容について報道・一般向けのわかりやすい文章作成をサポートする体制も望まれる。

近年では大学や研究機関も積極的にプレスリリース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は、良い方向ではあるものの、学会としての記者発表会の位置づけについては、十分な議論が必要であろう。また、プレスリリースのルートが多様化する中で、論文内容の

捏造にマスコミが気付かずに記事にされるなどのケースも見られることから、専門家集団の学会が研究発表の内容をある程度吟味し、信頼度の高い記者発表会を実施することは一つの方向性であろう。

### 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。現在、当学会を含む8つの学会・機関が共同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、20年にもわたり開催されている。

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。

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一つとなっている。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、応援することは、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、受賞したグループからリクエストがあれば、相乗り小型衛星への推薦状を出すなどの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 活動にも力を入れると共に、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。

#### 6.2.4 教育機関、公共団体等への講師派遣

2003 年頃より SGEPS のアウトリーチ活動のひとつとして、小中高校等の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。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他が斡旋していたが、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。SGEPS 会員が所属する各機関の多くでは講師派遣事業が制度化されているようである。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る。この考え方は前述の記者発表と類似する。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に専門分野と居住地を登録してもらった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。

このようなやり方でこれまでに、約 10 件の事業にのべ十数名の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、今後も継続的に講師派遣が実現できそうである。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できるように継続していく価値があると考えられる。また、現状として後述する学会若手 WG 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、若手WG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”

アウトリーチ部会の発足当初から、学会のアウトリーチ活動は若手のメンバーを中心に行われてきた。この傾向は、学会のみならず各研究機関のアウトリーチ活動でも同様である。若手の機動力の良さ、人数確保のしやすさ、そして親しみやすさなどが、若手が活動の中心となる主な理由として挙げられる。活動に加わるきっかけは周囲からの勧誘がほとんどであるが、一度活動を始めるとその重要性や面白さに気づき、自ら積極的にかかわる姿勢が出てくることとなる。またここ数年、学会や各研究機関において、アウトリーチ活動の重要性が広く認識されることとなり、アウトリーチ活動に参加する機会も格段に多くなったことも挙げられる。

このような流れの中で、「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、2010年に若手独自の学会アウトリーチ活動“STEPLE”を立ち上げ活動を開始している。活動内容は、大学院生を含む若手学会員有志による出前授業であり、若手が自らの母校や近隣校などへの出前授業を企画・実施し、SGEPSSの研究分野や広くは「研究」、「科学」の魅力などを小中高生や一般市民へ伝えていくことを目指している。“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、若手らしい親しみやすく、新鮮な活動を展開している。これまでの活動リストは末尾の通りである。

活動当初から企画も独自で行い、ウェブやメーリングリスト、twitterの活用など時代に即したツールを積極的に取り入れ、学会アウトリーチ活動の新しい中核をなすものとなってきている。このような活動を通して、学会のアウトリーチ活動が発展していくことはたいへん喜ばしいことであり、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、アウトリーチ活動は若手が実際にマネジメントに関わり、対外的な交渉スキルを磨くことができる機会を提供することにもなっており、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。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、人材育成と学会の活性化に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、若手有志の範囲をSGEPSS全分野やより多機関の若手へ広げて、会員全般のアウトリーチ活動に対する意識への刺激となるよう継続・発展していくことが期待される。また、これら若手の活動が、学会内外で教育業績として認められるよう、学会としてはたらきかけることも重要である。

<活動リスト>

2010/08/21 高知工業高等専門学校（高知県）

- オーロラと宇宙天気/STP 分野に進むための大学・大学院進学
- 2010/11/06 由利本荘市立矢島中学校 (秋田県)  
オーロラ科学への招待 -矢島出身の地球物理学研究者の卵の話-
- 2010/12/23 私立高知学芸中学高等学校 (高知県)  
オーロラと宇宙天気 -理系大学・大学院への進学-
- 2011/12/12 近畿大学附属和歌山高等学校 (和歌山県)  
惑星気象学～地球以外の惑星の不思議な気象～
- 2011/12/25 仙台市天文台 加藤・小坂ホール (宮城県)  
オーロラ・神秘の世界への誘い  
※「全国オーロラ講演会 2011」の一環として実施
- 2012/2/18 ほんぼーと中央図書館 ビーンズホール (新潟県)  
オーロラから知る地球と宇宙のつながり  
※「全国オーロラ講演会 2011」の一環として実施
- 2012/8/7 NPO 法人町田市学童保育クラブの会 図師学童保育クラブ (東京都)  
わたしたちのすむ宇宙「太陽系」
- 2012/9/2 福岡県青少年科学館 (福岡県)  
宇宙☆オーロラのふしぎを体験しよう
- 2012/12/23 成蹊大学 (東京都)  
クリスマス・オーロラ講演会@成蹊大学  
※「全国オーロラ講演会 2012」の一環として実施
- 2012/12/24 江戸川区子ども未来館 (東京都)  
みて・さわって・かんじよう！宇宙からのおくりもの"オーロラ"のふしぎ

## 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/~outreach/> 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。



図 6.1: SGEPPS アウトリーチ活動のホームページ

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。これを内容やデザインを一新して新たにスタートさせることが必要であろう。ただし、SGEPPS 学問分野をすべて網羅するような紹介文を新たに書き起こす労力は多大なため、新規の紹介ページでは関係各機関等のドキュメントへのリンクをはって整理する形で公開したいと計画している。近年では大学や研究機関も積極的にプレスリリースや 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。また、2010 年度よりイベントに合わせて twitter を利用しはじめ、さらに、2012 年度より Facebook による広報活動も試験的に開始している。これらソーシャルメディアを活用することにより、学会の発信する情報を広く周知していくことにつながると考えている。

### 6.3 学校教育に対する働きかけ

SGEPPS 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、最終的に「太陽地球系科学」の発刊（2010 年）として活動が結実することになる。

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概説し、「太陽地球系科学」の出版への流れと、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とにする。

### 6.3.1 SGEPPS 分野の学校教育での扱われ方

我々 SGEPPS 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。主に電磁気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（そして化学分野の一部）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、それは物理の勉強と関係がある」ということを示さない限り、物理の時間中には児童生徒の関心事にはなりづらい。ただし、電磁気学の基礎的な事柄に関しては、小学生の段階から（永久磁石や電気回路に関しては小学校 3 年生から、電磁石に関しては 5 年生から）、高等学校までに扱う内容は数十年間あまり変わらず基礎的なものをカバーしていることから、（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い、SGEPPS 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（2011年度入学生までは「地学Ⅰ」と「地学Ⅱ」、2012年度入学生からは新課程の「地学基礎」と「地学」）では少し様相が異なる。「地学Ⅰ」および「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。「地学Ⅱ」、「地学」では物理的現象を積極的に取り扱って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。さらに、2013年度から開講されるはずの新課程「地学」は教科書の検定が遅れており、2013年春に旧課程「地学Ⅱ」を出版していた2社から発行される予定ではあるものの、細かい内容についてはまだ明らかになっていない。文部科学省の発表によれば、教育現場における来年度の開講に万が一間に合わない場合は、新指導要領に基づきながら旧課程「地学Ⅰ」「Ⅱ」の教科書を暫定的に使用することが想定されている。

次に、SGEPSS内の各分野について、学校教育で現状どのように取り扱われているか概説する。

#### (1) 基本的な物理（電磁気学）

##### (ア) 小学校

3年生にて、「磁石の性質」および「電気の通り道」について学習する。前者では磁石につくものとつかないものの区別を、後者では電気の通るものと通らないものの区別をする。4年生にて「電気の働き」と称して、乾電池とソーラーパネルを使って豆電球・モーターを動作させる。5年生では「電流の働き」として、電磁石を取り扱う。特に鉄心の周りにコイルを巻きつけ磁化させる（誘導・残留？）ことは特筆すべき内容である。6年生では手回し発電機を使う。また電気エネルギーが熱や仕事に変わることを理解を求めている。各学年において本単元で「ものづくりを行うこと」と要求がある。これは実験・工作を指すと思われる。

##### (イ) 中学校

中学理科第1分野にて「電流とその利用」の中で「電流」および「電流と磁界」を取り扱うことが指定されている。新旧指導要領ともに「電流」については基礎的な回路とオームの法則を学ぶと同時に静電気が電気であることを扱う。一方、旧指導要領においては「電流の利用」とされていた項目が新指導要領では「電流と磁界」と名前を変え、より一層磁界について踏み込む内容となったよ

うだ。内容的には、「磁石や電流による磁界の観察・磁力線・コイルの周りの磁界」、「磁石と電流を流したコイルの間に働く力」、「磁石を動かすことで電流が発生すること」に加え、新課程では「直流と交流の違いの理解」が加わった。さらに、「内容の取扱い」欄（注釈）では、力や磁界について「レンツの法則、フレミングの法則を取り扱わない」とあった項目がなくなり、「電流の向きや磁界の向きを変えた時に力の向きが変わること」と言う文言が加えられた。義務教育、必修である中学理科でこの項目が加わった（復活した？）ことは歓迎すべきことであろう。

#### (ウ) 高等学校

旧課程「物理Ⅰ」と新課程「物理基礎」の間で以下のような変化がある。電磁気学的内容については、電気に関して「生活の中の電気」（モーターや交流・電波を扱う）とあったものが大単元「様々な物理現象とエネルギーの利用」中で「電気」として「物質と電気抵抗」・「電気の利用（交流の発電と送電）」が記述されることになった。また、旧「物理Ⅰ」では「波」として地震波・水波・光・音などを扱うよう要求があった（特に光と音に関しては干渉や回折・共鳴など）ものが新「物理基礎」では光に関する言及がなくなり、波の伝播に関しても平面波だけを言及するようになった。

理系進学希望の生徒が選択するであろう、旧「物理Ⅱ」、新「物理」では、以下のようなものが取り扱われている。電磁気に関しては、「物理Ⅱ」では電界・磁界ならびに電流が作る磁界、電磁誘導と電磁波が取り扱われるのに対し、「物理」では「電流が磁界から受ける力」とローレンツ力の取扱いがはっきりとした（「物理Ⅱ」でも取り扱うがはっきりと節立てられた）。さらに、定性的にのみ扱われていた交流回路について、新課程では自己誘導・相互誘導の扱いが加わった（復活した）ようだ。また「原子」単元では電子や原子、粒子性と波動性について簡単に触れられている。

### (2) 地磁気（主磁場）・古地磁気・岩石磁気

#### (ア) 小学校

指導要領によるはっきりした指定はないが、物理の所で述べたように小学校 3 年生の理科で永久磁石の取扱いがある。ここで、砂鉄を用いた磁力線の表現があるようだ。また、小学校 3・4 年生社会、および、4 年生理科で「方位について取り扱う」との記載があり、方位磁針を使用した学習と「なぜ方位磁石は北を向くか」を追加で学習している可能性がある。

#### (イ) 中学校

理科第 2 分野においては取扱いがない。

#### (ウ) 高等学校

旧課程「地学Ⅰ」において、地磁気の大規模な双極子性（傾いた双極子）とその磁力線、

および、地表での観測 3 成分（偏角・伏角・全磁力）について学ぶ。しかし、新課程「地学基礎」においてはこれらの取扱いがなくなった。また「地学Ⅱ」では（おそらく新課程「地学」でも）、地磁気逆転、地磁気永年変化、残留磁化と古地磁気、およびプレートテクトニクスの基礎として海洋底の磁気異常縞模様を取り扱われている。地磁気の要因については、教科書によってはダイナモに触れられている。

### (3) 地球内部電磁気学、地震火山における電磁気学

#### (ア) 小学校

6 年生理科にて、地震や火山噴火が土地（表層地形）の変化をもたらすことを学習する。地球内部については触れない。

#### (イ) 中学校

理科第 2 分野では地震・火山の取扱いがある。地震については、揺れ、表面の土地の変化、震源が地中にあることを取り扱う。火山については、活動の様子、噴出物と地下のマグマについて取り扱う。いずれも電磁気学的な事象についての取扱いはない。

#### (ウ) 高等学校

中学校同様、地震火山の取扱いがある。特に日本列島近辺と汎世界的な地震火山の分布がプレートに関連していること（深発地震面や火山前線についても）を学習する。また、火山岩についてはマグマの成長と結晶分化作用について取り扱う。しかし、中学校同様、電磁気的現象には触れられない。地球内部構造について、基本的な 4 層構造に触れる。マントルに関しては岩石でできていることは理解させるが、電気伝導度を含む電磁気的な事項は取り扱わない。「地学Ⅱ」では 1 社の教科書の本文中において、阿蘇火山における実例を示し双極子の磁気異常の解説を加えている。

### (4) 大気圏

#### (ア) 小学校

小学校 3 年理科で「風と空気の流れ」について、4 年で簡単な圧力の概念、さらに 4 年では気温、水蒸気と身近な天気について、5 年で雲の様子を含む天気の変化について学習する。

#### (イ) 中学校

理科第 2 分野にて、対流圏内の身近な気象について学習する。気圧・気温・湿度について理解し、雲や前線について学習する。成層圏以上の中・超高層大気は取り扱われない。

#### (ウ) 高等学校

「地学Ⅰ」にて大気の鉛直構造（温度・組成）や地球表層における熱収支について取り扱う。また、電離層やオーロラ出現の位置について取り扱う。ただし、

大気分野で扱うほとんどは対流圏内の気象であり、それより上層の扱いは極めて小さい。オゾン層破壊については触れることを求められていたが、実際には取扱いは小さかった。しかし、「地学基礎」になって環境に関する単元がはっきり要求されるようになり、オゾン層の破壊も大きく取り扱われるようになった。「地学Ⅱ」では次項に記述するようにオーロラについて触れている。1社の教科書ではオーロラオーバルについて（用語は用いないものの）明示的に紹介している。また、両社とも地球環境と関連してオゾンホールにページを割いている。他に1社の教科書ではロケットによる上空30km, 50kmでの長期気温変動観測を例示し、高層大気の観測を説明している。

(5) 電離圏と磁気圏

(ア) 小学校

小学校では取扱いがない。

(イ) 中学校

取扱いがないようだ。

(ウ) 高等学校

「地学Ⅰ」において、磁気圏の形を取り扱う。ただし、各教科書では太陽風との相互作用をなんとなく示す図を提示しているものの、きちんとした説明はあまりない。また、「磁気嵐」等についてごく簡単に説明される。しかし、新課程「地学基礎」では地磁気そのものの取扱いがなくなるため、磁気圏の記述が残ったとしても、それには何の意味も付け加えられなくなる。電離層は大気の鉛直構造の中で簡単に扱われる。

「地学Ⅱ」（および新課程「地学」）では、太陽風、磁気圏について、もう少し詳しく扱う。特に太陽磁場についても簡単に触れられているほか、太陽フレア（CMEの記述無）と磁気嵐、オーロラ出現の関係、磁気圏尾部・プラズマシートについての記述もある。ただし、「地学Ⅱ」を発行する2社の教科書ともに一連の用語が並べられているだけと言う感はぬぐえず、これを読んだ高校生が興味をもって学習するかは疑問である。

(6) 太陽と惑星間空間、惑星

(ア) 小学校

小学校理科のうち、3,6年次において太陽を、4,6年次に月を学習する。前者は主に太陽光と熱、後者は満ち欠けと日周運動について学習するが、6年次には太陽と月の位置関係が満ち欠けにかかわっていることを学ぶ。また月の表面についても学習する。

(イ) 中学校

惑星の取扱いが新課程になる段階で大幅に増えている。旧課程では「恒星との対比」として扱い、太陽系の構造に触れる程度だったのが、新課程では惑星の



大きさ、大気組成、表面温度、衛星の存在について取り上げられ、地球が生命の存在する条件を満たしていることにも着目するよう求めている。また、金星の満ち欠けについて、形・大きさを扱うよう具体的に求めている。太陽については新旧課程ともに、恒星の一つとして定義されるほか、大きさ、表面温度、表面の様子、放射について扱う。惑星間空間についての言及はない。

#### (ウ) 高等学校

「地学 I」、「地学基礎」どちらでも、恒星としての太陽の取扱いを求められる。また、表層付近の構造と現象についても取扱いがある。「黒点」、「粒状斑」、「彩層」、「フレア」、「コロナ」、「太陽風」、「磁気嵐」、「デリンジャー現象」等の単語について簡単に説明が入るが、深入りはしていない。惑星に関しては比較惑星学的な取扱いをする。その中で大気についても簡単に触れられるが、磁場（惑星磁気圏）については一切記述がない。惑星間空間についての記述はない。

ある科学分野が学校教育で取り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（新旧課程で 4 種類の教科書）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やすい（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、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。この丁寧さは指導要領というよりは、むしろ、執筆者の構成によるところが大きく、今後かりに新課程教科書が出揃うとしても、関連分野の記述がこれまでのような量と質を維持できるか不明である。さらに、新指導要領では、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、履修者が増えると期待されている「地学基礎」では、その前身科目である地学 I と比べて SGEPSS 関係分野の記述は減少している（地磁気について取扱いがなくなったことは特筆すべき点である）。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。

### 6.3.2 「太陽地球系科学」の執筆と発刊

上記のように、SGEPSS 関連研究分野を巡る学校教育現場での取扱いは、他の地球・宇宙科学の分野と比しても著しく低い。また、一部では取り扱われて来た分野（たとえば高等学校「地学 I」における太陽～磁気圏、大気圏鉛直構造、地磁気、など）についても、あまりにもさらりとした語句の羅列に終始しているため、学校教育現場で実際生徒と向き合う教員にとってもわかりづらい教科書で電磁気現象を説明しなくてはならないという複雑さが存在する。

そこで、SGEPSS 学校教育 WG では 2007 年頃より、新たな教科書・啓蒙書を編集する計

画が始動し、その成果が「太陽地球系科学（2010, 京都大学学術出版会）」として刊行された。この本は「新しい太陽像」、「太陽地球環境」、「地球内部電磁気」の3部12章から構成されており、地学を教える高等学校教員をターゲットとしている。現行の教科書が不得手としている地磁気～太陽までのつながりを意識して記述し、各サブシステムにおける諸現象の解説と学校教科書では記述されていない事項（たとえば太陽内部構造、CME、サブストーム、地球内部の電気伝導度構造など）についても取り扱っている。付録として関係年表と読み解くための基礎的な物理（ほとんどは高等学校物理の内容）、用語集が加えられている。この本を読むことで、おそらく、物理を担当している理科教員が急に地学を教えなくてはいけなくなった場合にも対応できるようになるであろう。また、物理教員にとっても教えている基礎がこんなことにも役に立つという実例を示すのにも役立つと考えられる。

しかし、6.3.1の最後で述べたように、2012年度からスタートした新学習指導要領の高等学校地学基礎では、SGEPSS 関連分野の取扱いがますます減ってしまった。我々の次なる課題は、この本を読んでもくれる教員層の開拓であろう。つまり、我々の方に興味を持ってくれ、この本を読んでさらに身近になり、生徒に伝えてくれる教員の開拓が必要である。

### 6.3.3 これからの学校教育へのはたらきかけについて

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など一部を除いてほとんど扱われない。主な原因は義務教育期間では「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ことである。

また、前述したように、高等学校で（旧課程）「地学Ⅰ」、（新課程）「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、（旧課程）「地学Ⅱ」、（新課程）「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、（旧課程）「地学Ⅰ」は（主に国立大学）文系志望の受験生にとっては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。さらに新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」を選択し、実際にセンター試験の受験者が増えることも期待できる。ところが残念なことに、「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話も無意味になり、結果として教科書内における我々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一致する。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 SGEPSS 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、という実例として取り上げてもらうすべを考える。また、新課程の高等学校「科学と人間生活」にも隙間があるかも知れない（指導要領の文面ではほとんど触れられないことになっているが）。
- (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（地学Ⅱ）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(Ⅱ)」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) 次期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 SGEPPS

会員は数名いるが、SGEPSS 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ではライバルでもあり、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も、「太陽地球系科学」発刊後解散した SGEPS 学校教育 WG の再組織も検討している。

- (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。

#### 6.4 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す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。しかしながら、現在の研究者を取り巻く環境は厳しさを増している。ここでは(1)若手研究者の育成、(2)女性研究者支援、(3)研究環境の充実とワークライフバランスの実現、の視点から問題点を整理していく。

##### 6.4.1 現在の状況

###### (1) 若手研究者の育成

1996 年度に「ポストドクター等一万人支援計画」が第 1 期科学技術基本計画に盛り込まれたことにより、我が国の有期雇用研究員（いわゆるポスドク）の数は急増した。2000 年には早くも「一万人支援計画」の数値目標が達成され、2009 年 11 月現在のポスドク数は 15,220 人と報告されている[\*1]。競争的環境の中で鍛えられたポスドク達は、研究分野の活性化や研究活動の牽引力となってきた。2000 年代に入ると成熟したポスドクが多数育ってきたものの、次のステップである常勤アカデミックポストの不足や多様なキャリアパス開拓が不十分であったことから、博士号取得者のポスドク経験後の進路に深刻な課題を残す結果となった（一般的にキャリアパスとは、さまざまな経験やスキルを積みながらキャリアアップしていくその道筋のことである。加えて、ここでいう多様なキャリアパスとは、出産育児による休業や他の業種の職を経験した者が研究者を目指すことや、博士号取得者が研究者や大学教員以外の職に就くことも含む）。この状況が 10 年以上経過した現在も続き、若手研究者を経済的・心理的に圧迫している。2007 年に雇用対策法が改正され、募集・

採用における年齢制限が禁止されたが、我が国の雇用には変わらず実質的な年齢の壁が存在する。もともと博士号取得者は学卒等に比べて最初の職に就く年齢が高い。加えて何年かポスドクを経験した後では、年齢制限の壁に阻まれ研究以外の職に活路を見出すことも非常に難しい。まさに「引くに引けない」、「失敗したら終わり」という状況に追い込まれていくのである。若手研究者をめぐるこの厳しい状況はいわゆる「ポスドク問題」と呼ばれ、社会問題の一つとなっている。またポスドク層の苦勞を目の当たりにした学部生・大学院生が、研究者を「報われない、リスクの高い職業」と感じて回避することで、科学研究そのものの衰退を招くとの懸念がある。2010年度の科学技術白書では、我が国の博士課程進学者数が2003年をピークに減少傾向にある理由について、ポスドク期間の長期化や博士号取得者が安定した職に就きにくい現状があると分析している[\*2]。

SGEPSSとその周辺コミュニティにおいても、深刻なポスドク問題が存在する。男女共同参画提言ワーキンググループが行った大学・研究機関における有期限雇用の研究職に関するアンケート調査[\*3]では、ポスドクの抱える様々な問題が明らかになった。一例を挙げると、ポスドクの有配偶者率や子供のいる率が同年代の常勤職に比べて大幅に下回っていた。また多くの人々が研究と結婚・出産・育児といったライフイベントの両立が経済的理由で困難であることを挙げている。さらに、自由記述欄には不安定で弱い立場に苦しむ切実な声が多数寄せられている。

このような状況を受け、国もポスドク問題の解決に向けて様々な施策を導入している。例えば、科学技術振興機構の若手研究者が自立して研究できる環境の整備を促進するため、テニュアトラック制を実施する大学等を支援することにより、テニュアトラック制度の普及・定着を図る「テニュアトラック普及・定着事業」や、ポスドクを対象に、大学教員や独立行政法人研究機関の研究者以外の多様なキャリアパスの確保を支援するため、長期のインターンシップ(3ヶ月以上)などを含むキャリア開発を組織的に支援するシステムを構築する取組を支援する「ポスドクター・キャリア開発事業」、更に博士課程の教育プログラムとして、産学官界での博士号取得者の活躍を焦点とした「リーディング大学院プログラム」などである。これらの事業に大学・研究機関が応募し、採択された機関で取り組みが始まっている。我々はこれらの事業が実際にどの程度ポスドク問題の解決に貢献しているのかを注意深く見守っていく必要がある。

(テニュアトラック制：公正で透明性の高い選考により採用された若手研究者が、審査を経てより安定的な職を得る前に、任期付の雇用形態で自立した研究者として経験を積むことができる仕組み)

## (2) 女性研究者支援

SGEPSSの会員数は702人、女性会員は65名でその比率は9%である(2011年8月現在)。女性会員の分布は比較的若い年代に集中している傾向がある。少し古いデータになるが2006年時点の一般会員に占める女性会員の割合は6.4%、ポスドク世代に限定すると20%強、

学生会員では 22.0%であった[\*3]。SGEPSS の女性研究者の本格的な参入は比較的最近始まったことが分かる。これらの女性ポスドク・院生・学生たちが今後、積極的に研究を進め、それにふさわしい地位を同年代の男性たちと同様に得られるかどうかは、学会として重要な課題である。同調査では、男性会員の多くが国立大学（当時）や国公立研究所（当時）に所属しているのに対し、国立大学常勤職の女性会員は非常に少ないことが示された。このことは、女性会員が大型研究プロジェクトに指導性を発揮できる機会が極めて少ないことを暗示しており、今後改善されるべき課題である。

結婚・出産・育児といったライフイベントは夫婦で共有するべきものであるにも関わらず、依然として女性が大きな負担を抱える状況にあり、これらは若手研究者として不安定な身分で研究生生活を送る時期とも重なるため、若手女性研究者をとりまく環境を一層厳しくしている。女性研究者支援と若手育成の問題には同時に取り組むべき課題も多い。

女性研究者支援についても国はいくつかの事業を導入している。例えば、科学技術振興機構の女性研究者がその能力を最大限発揮できるよう、出産、子育て又は介護（以下「ライフイベント」という）と研究を両立するための環境整備を行う取組を支援する「女性研究者活動支援事業」、日本学術振興会の優れた若手研究者が、出産・育児による研究中断後に円滑に研究現場に復帰できるように支援する「特別研究員-RPD」事業などである。これらの事業も、若手研究者支援同様、その効果を注意深く見守っていく必要がある。また、ライフイベントや家事を共有化していくためには、女性研究者のみならず、男性研究者も働き方も変え、性別に関係なく家庭生活を充実させる意識改革やそれを支援するための施策も重要である。

### (3) 研究環境の充実とワークライフバランスの実現

今後、我が国では急速に少子・高齢化が進み、労働人口が減り続ける時代がやってくる。そのような時代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、長く発展し続けていくためには、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、学会や研究コミュニティが社会の中でその存在意義を示していくためには、人材交流も含めた社会との連携が必要である。多様な背景を持つ人材が家庭生活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。

この課題は前述した若手研究者や女性研究者のみに閉じない。常勤研究者をめぐる環境も、近年厳しさを増している。国立大学の法人化後、大学教員の教育や大学運営、諸々の事務作業などに関する負担は年々増しており、これにほぼ連動する形で日本の研究者の論文数が減少している、との指摘がある[\*4]。ブランド力に劣る小規模大学ではさらに状況は厳しく、少子化で 18 歳人口が減少する中、経営自体が悪化し、大学そのものや学部・学科単位の統廃合、それに伴う（まったく異分野への）異動なども起こっている。また、独立

行政法人となった国立研究機関は、法人の合理化・効率化という観点による厳しい評価にさらされ、運営費交付金も毎年削減される状況が続いている。このような中、よりよい研究コミュニティの環境を獲得するために、学会として何ができるのか真剣に考える時期に来ている。

#### 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。男女共同参画社会基本法の成立とその後の閣議決定を受けて、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。学協会連絡会では 2003 年、2007 年、2012 年とほぼ 5 年おきに参加学協会の協力を得て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 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。2006 年 5 月 18 日に日本地球惑星科学連合においても男女共同参画委員会が設立され、SGEPSS 会員が重要な役割を担っている。

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）[\*3]、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。

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。

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。SGEPSS 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 2012 年時点ですでに 8 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。更に、毎回展示ブースを出して、全国から集まる女子中高生へ研究分野の紹介を進めてきた。

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へ~」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へ~」と名前を変え、継続的に実施されている。

#### 6.4.3 今後の方向性

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。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。我々は視野を広げ、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。

大学・研究機関で理系の博士号を取得し、その後も研究コミュニティ内で活動することは現状大多数が望む道であろう。だが、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ことが期待される。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者が複数おり、心強い限りである。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。そのためには実質的に存在する年齢制限の壁を取り払い、また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。6.4.1-(1)で述べたように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学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。

- \*1 ポストドクター等の雇用・進路に関する調査 -大学・公的研究機関への全数調査(2009年度実績)-,【科学技術政策研究所 調査資料-202】, 文部科学省 科学技術政策研究所 第1 調査研究グループ(齋藤経史, 鐘ヶ江靖史, 三須敏幸, 茶山秀一) 文部科学省 科学技術・学術政策局 基盤政策課
- \*2 平成 22 年版 科学技術白書 第 1 部 第 2 章 第 1 節「価値創造人材の育成に向けて」  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/hakusho/html/hpaa201001/detail/1296372.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpaa201001/detail/1296372.htm)
- \*3 大学・研究機関における有期限雇用の研究職に関するアンケート調査報告, 2008 年 3 月 14 日, 長妻努 石井守, 松岡彩子, 中村卓司, 木戸ゆかり, 坂野井和代, 川村誠治, 吉村玲子, 田中良昌, 北村健太郎, 江尻省, 田口真, 前田佐和子
- \*4 ある地方大学元学長のつばやき-鈴鹿医療科学大学元副学長、三重大学元学長、国立大学財務・経営センター理事長の「つばやき」と「ぼやき」の blog-, 2012 年 06 月 27 日,  
<http://blog.goo.ne.jp/toyodang/e/26f372a069cbd77537e4086b0e56d347>

## 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

### 執筆協力者

相澤広記、浅村和史、阿部聡、阿部琢美、天野孝伸、家田章正、石川尚人、磯部洋明、市來雅啓、市原寛、今田晋亮、今村剛、臼井英之、臼井洋一、宇津木充、宇野康司、海老原祐輔、大山伸一郎、沖野郷子、荻野瀧樹、小田啓邦、尾花由紀、小原隆博、笠羽康正、笠谷貴史、片岡龍峰、加藤恒彦、加藤雄人、門倉昭、金松敏也、鴨川仁、河野英昭、川村紀子、北村成寿、木戸ゆかり、草野完也、古賀清一、小嶋浩嗣、児玉哲哉、後藤忠徳、小山崇夫、齋藤慎司、齋藤武士、斎藤享、齋藤実穂、齋藤義文、坂野井和代、坂野井健、佐川英夫、佐藤薫、佐藤雅彦、柴田一成、渋谷秀敏、島伸和、清水敏文、下山学、小路真史、陣英克、菅沼悠介、杉山徹、鈴木臣、関華奈子、銭谷誠司、高倉伸一、高島健、高橋太、高橋芳幸、田口真、竹内昭洋、津川卓也、土屋史紀、堤雅基、綱川秀夫、坪内健、藤浩明、徳丸宗利、富川喜弘、中川広務、中川義次、中野慎也、中溝葵、中村琢磨、中村教博、西谷望、西村幸敏、野澤悟徳、橋本武志、羽田亨、馬場聖至、浜野洋三、早川基、林田明、原弘久、兵頭政幸、平原聖文、Huixin Liu、深沢圭一郎、福間浩司、藤田茂、藤田清士、富士原敏也、藤原均、芳原容英、星野真弘、星博幸、細川敬祐、本莊千枝、松岡彩子、松島政貴、松本洋介、三澤浩昭、三島稔明、源泰拓、簗島敬、宮岡宏、宮下幸長、三好隆博、三好勉信、村上英記、望月伸竜、森永速男、八木谷聡、山崎敦、山崎健一、山崎俊嗣、横田勝一郎、横山竜宏、吉川一朗、渡部重十