

4 学術のために必要な技術開発・環境整備

4.1 観測技術開発

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

4.1.1 太陽地球系科学分野の機器開発

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

4.1.1(1) 飛翔体搭載機器および新しい飛翔体プラットフォームの開発

太陽地球系環境および惑星を対象としたその場計測

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

惑星の大気、プラズマ、地下構造のリモートセンシング

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

地球および惑星の電磁環境計測のための飛翔体プラットフォーム

気球搭載望遠鏡
編隊飛行の衛星間通信を活用した観測動作制御法

以下に、各開発項目の概要を述べる。

熱的プラズマ測定器

(1) 科学目標・機器概要

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

1) ラングミュアプローブ

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

2) 電子密度擾乱測定器

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

3) イオン密度・ドリフト速度測定器

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

1) ラングミュアプローブ

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

2) 電子密度擾乱測定器

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

3) イオン密度・ドリフト速度測定器

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

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

中性粒子・背景イオン質量速度分析器

(1) 科学目標・機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

超低エネルギー粒子計測のための衛星電位制御

(1) 科学目標・機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

高時間分解能プラズマ計測

(1) 科学目標・機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

質量同位体計測

(1) 科学目標・機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

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

非熱的中性粒子観測

(1) 科学目標・機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

高エネルギー荷電粒子計測器

(1) 科学目標・機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

小型粒子計測器

(1) 科学目標・機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

すでに搭載機会を得ているものから構想段階のものまでさまざまである。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

飛翔体搭載電界アンテナ

(1) 科学目標・機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

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

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

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

定して開発を進める必要がある。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

小型プラズマ波動観測器

(1) 科学目標・機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

飛翔体搭載直流/低周波磁力計

(1) 科学目標・機器概要

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

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

飛行体搭載交流磁界センサ

(1) 科学目標と機器概要：

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

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

知的信号処理による高い電磁感受耐性を備えたプラズマ波動観測器

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

惑星大気・プラズマ観測用軟 X 線観測機器

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

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

地球磁気圏 X 線撮像計画 GEO-X と密接に関連する。

EUV 撮像技術

(1) 科学目標と機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

継続的な観測データの取得には、打ち上げ機会が定期的にあることが重要である。6 U サイズの超小型衛星の打ち上げの機会は、頻度高く見込むことができるため、極端紫外線撮像機を極限まで縮小し、地球の内部磁気圏の観測を継続しようとする気運が高まっている（エクレウス衛星搭載 Phoenix）。実現には、従来の反射鏡面積を約半分に縮小する必要があり、それを補うためには多層膜の反射率を最低でも 2 倍程度にまで向上させる必要がある。Si と Mo の組み合わせは、安定した界面を形成し、比較的高い反射率を達成できるため、工学的応用（EUVL）の分野でも長い間使われ続けている。さらに高い反射率を得るには、例えば、Mg と SiC や Mg と B₄C の組み合わせからなる多層膜が高い反射率を持つ事は計算上知られているが、実用化には至っていない。多層膜の界面が一方の金属の拡散（移動）により乱されているのが原因である。今後は、極端紫外線領域において良好な光学特設（屈折率と消光係数）を持ちつつ、化学的に相性の良い元素（化合物）を用いた多層膜の開発が重要である。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

近接離角にある高強度光源からの迷光除去技術

(1) 科学目標と機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

火星宇宙天気・宇宙気候計画

小型赤外波長可変レーザーファイバー分光器

(1) 科学目標と機器概要

地球型惑星における表層・地下と大気との相互作用を理解する上で、地中へのアクセス・地表面付近の大気物理量を捉えることは本質である。特に火星における水循環・水進化の観点においてこの観点は重要である。これまでの火星探査では、地形学・表面分光学にとどまり地下水圏へのアクセスは限定的であり、これに加えて衛星観測では地表面付近～高度 20km までの大気鉛直構造は捉えてこなかった。この二つの課題を解決すべく、小型波長可変レーザーファイバー分光器の実現を目指す。地表・地下に対して

は、ピンホール経由で赤外ファイバーを地表・物質内・地下等へアクセスさせ、希ガスや表層鉱物高精度計測を実現できる。上空に向けては、ヘテロダイン分光機能により地表～高度 20km までの精密鉛直構造推定を実現できる。地球型惑星における水循環・表層と大気との相互作用の解明にもつなげることを目指す。

(2) 開発状況、運用状況と課題

地表・地下に対しては「赤外狭帯域・可変波長光源」として、上空においては「ヘテロダイン用の局部発振器」として、波長可変レーザーが有効に働く。検出器・ファイバー技術を可視域よりも気体・固体の物質情報を含む赤外域で確立することが有益である。上空に対しては、東北大・理で工学研究者との連携のもとで赤外ファイバーを用いた光混合・分波技術などの実用開発研究を進めてきた。双方とも、JAXA の支援（搭載機器基礎開発研究経費）等を得て進められており、また要素技術は後述する地上観測用分光器とも重畳している。なお、この活動は、火星着陸機等への開発展開を図りつつあるロシアとの国際協力で推進してきた。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

小型赤外分光撮像器：グレーティング・AOTF・フーリエ

(1) 科学目標と機器概要

火星衛星の起源論および地球圏・火星圏への水の起源を解明し、また火星大気のグローバル観測により大規模循環・変動過程を明らかにするには、赤外域分光撮像観測によって、衛星表面の含水鉱物・水関連物質・有機物や大気中のエアロゾル・CO・H₂O などの大規模分布とその変動を検出することが有効である。これらを可能とする小型分光イメージャーとしては、以下の3方式がありえる。A. グレーティング方式+可動ミラーによるスリット分光カメラ方式：仏との国際協力のもとで MMX 探査機用に開発している。B. AOTF 方式による波長スキャン型カメラ。A に方式転換されるまで、仏との国際協力のもとで MMX 探査機用に開発してきた。C. フーリエ方式による波長スキャン型カメラ。香川大開発をベースとして、東北大・名古屋大で評価検討に入っている。

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

紫外分光計/撮像

(1) 科学目標と機器概要

極端紫外から紫外の波長領域の光学観測は惑星や衛星の上層大気・プラズマを遠隔から捉えることができる観測技術であり、90 年代後半から光学技術が急速に進歩した。地球プラズマ圏の運動を可視化する研究手法を確立したことを皮切りに、木星磁気圏プラズマの可視化や火星・金星外圏大気の観測などにおいて大きな科学成果を生んできた。これらの実績を活かし、本技術を太陽系外惑星大気の観測へ展開も目指す。本波

長領域では一般的に反射光学系を用い、高効率を達成するために反射回数を最小限に抑えたシンプルな光学系を採用する。通常、分光装置は集光鏡・スリット・回折格子・検出器で構成され、撮像装置は集光鏡・フィルタ・検出器で構成される。

(2) 開発状況、運用状況と課題

既に、多くの飛行体に紫外線分光/撮像の観測器が搭載されており、紫外線光学系技術の今後は新しい素子によるブレイクスルーを目指すよりも、個々の光学部品の性能の向上から、観測機全体の S/N を上げる方向を目指している。例えば、水素ライマン α (121.6 nm) や酸素原子輝線 (130.4 nm) の波長における鏡の反射率は 75%程度に留まっているが、これを 90%以上まで向上させる要素開発が進められている。分光素子では特定の波長で効率を向上させるブレード型回折格子の開発が進んでいる。検出器については、マイクロチャンネルプレート (MCP) に代わる素子を惑星探査に使う気運はなく、MCP の表面に蒸着する光電物質の開発 (例えば、遠紫外領域で高い効率をもつ窒化ガリウム (GaN)) や MCP の受光面を凹面化する技術、MCP 表面の形状を変えることで開口率を向上させる技術 (ファネル型) が進んでいる。また従来のレジスティブアノードを用いた 2 次元位置検出部がもつ位置分解能および入射光量の上限を突破するために、CMOS センサを位置検出に用いた新型検出器の開発も進められている。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

ガスフィルタ技術

(1) 科学目標と機器概要

ガスフィルタは、原子吸光原理を用いて特定のガスの輝線を分離観測する手法である。特に、波長が近接した同位体の輝線分離においては、一般的な分光技術に比べて小型・軽量の装置で観測できるという点で有用である。例えば遠紫外領域の水素 Ly- α 輝線を用いた同位体分光の場合は、H₂ ガス (もしくは D₂ ガス) を充填したセルにタングステンフィラメントを取り付け通電加熱することで、一時的に水素原子 (もしくは重水素原子) を解離生成する。このセルを光学系の軸上に配置すれば、天体から発せられた Ly- α を共鳴吸収できる。Ly- α は H と D で波長が異なるため (H: 121.567nm, D: 121.534nm), H₂ セルと D₂ セルを直列に配置し交互にフィラメントに通電することでそれぞれの輝線を選択吸収し、その差分から輝線強度を導出できる。この技術を用いれば、惑星大気散逸における質量依存性等の物理過程の議論や、同位体比で特徴づけられる天体大気の起源に迫れる。

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

長周期彗星探査計画 Comet Interceptor と関連する。

次世代熱赤外撮像機器

(1) 科学目標と機器概要

10 μ m の熱放射を捉える非冷却ボロメータ検出器は、小型軽量のため惑星探査に適している。「あかつき」搭載中間赤外カメラ (LIR) や「はやぶさ 2」搭載熱赤外カメラはこの種の赤外カメラの有用性を実証した。金星探査に関しては、この波長域を使って、

熱潮汐や子午面循環を継続的に観測する必要性が認知された。金星探査以外にも、例えば火星大気中の浮遊ダストの分布を観測することで、大気散逸の過程で重要な下層大気から外圏底部への物質輸送に関わる重力波を直接捉えられると期待されている。

(2) 開発状況、運用状況と課題

これらの観測を実現するためには、最新の非冷却ボロメータ検出器を採用した熱赤外カメラを開発し、技術力を維持することが必須となる。非冷却ボロメータカメラの開発とその技術力は 50 kg 級の大学衛星搭載機に継承されている。現在では LIR の素子数 328×248 をしのぐ素子数 1024×768 を有し、かつ感度が向上した次世代検出器を探査機に搭載可能である。一方、観測対象温度下限への要求は 230 K から 200 K 以下に下がり、8-12 μm を 1 μm 程度ごとに分光した多波長型カメラの要望もある。これらに応えるためにはカメラのさらなる感度向上という開発課題を解決することが必須となる。カメラ自身や光学系が発する熱放射の変動は感度の向上を妨げる主要因であるため、開発では検出器を含むカメラ全体の環境温度を一定に制御したり、精度の高い補正用の内部較正データを得たりする工夫が必要であろう。電気的に読み出し回路のフレームレートを低下させて露光時間を拡大させる、光学系の F 値を明るくする、反射光学系を試作して透過型のゲルマニウムレンズよりも光量の損失を抑える、といった感度向上のための新たな方策を導入していくことも有用である。近年の非冷却ボロメータ検出器にはペルチェレスと呼ばれる検出器の温度安定制御が不要な高感度タイプが存在するため、この検出器をペルチェで積極的に温度制御する事により、より高い感度を得られるだろう。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

小型サブミリ波ヘテロダイン分光観測装置

(1) 科学目標と機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

我が国の衛星搭載の当該観測装置としては、例えば 2009 年に国際宇宙ステーション (ISS) に打ち上げられ、地球大気成層圏・中間圏における微量成分の振る舞いについて高感度観測を実現したサブミリ波帯放射観測装置 SMILES がある。SMILES ではサブミリ波アンテナ光学系やサブミリ波受信機系の地上検証、また宇宙用超伝導ミクサ、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の大気微量分子観測について一桁高い精度を実現させた。欧米でも、これまでに Aura MLS やハーシェル宇宙望遠鏡、成層圏赤外天文台、そのほか成層圏気球などでもミリ波・サブミリ波ヘテロダイン分光観測が活発に展開されてきた。今後、地球・惑星大気についてマルチバンドの同時観測により、より高精度かつ短・中・長期的な 4D 観測 (緯度・経度・高度・時間) の展開が期待されている。国内でもそのために、将来の惑星探査周回機への搭載を見据えた小型・軽量のサブミリ波・テラヘルツ波検出器の開発や検討も進んでいるほか、主鏡をはじめとするアンテナ光学系の軽量化では、複合材を用いた新型のリフレクタの研究開発も進んで

いる。おりしも ESA の木星圏探査ミッション JUICE にも小型サブミリ波分光計の搭載が提案されており、日本からも国際共同チームに参加している。こうした海外のサブミリ波測器開発チームとの連携によるインテグレーションや運用の経験は、我国の将来ミッションの推進に重要な役割を果たすと期待される。また、最近では超小型周回機・着陸機への搭載を念頭に置いた取り組みも検討されており、常温動作の高感度受信機や FPGA を集積した高分散広帯域のデジタル分光計、制御・計算機等のコンポーネントの超軽量化・低消費電力化・堅牢性の検証、惑星保護への対応、データ通信量の確保、キャリブレーション手法や機上での大容量データの高速度処理なども喫緊の課題として取り組まれている。

- (3) ミッションやプロジェクトとの関係
ヨーロッパの木星ミッション JUICE や、火星宇宙天気・気候・水環境探査のための戦略的国際火星探査計画などへの展開が期待される。

地下探査レーダサウンダ

- (1) 科学目標と機器概要

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

- (2) 開発状況、運用状況と課題

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

- (3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

気球搭載望遠鏡

- (1) 科学目標・機器概要

極周回成層圏テレスコープ FUJIN は地上観測、衛星望遠鏡に続く第 3 の惑星光学観測のプラットフォームとして提案されている。成層圏は大気が薄く安定しているため、天体光学観測に要求される良シーイング、晴天、紫外・赤外領域における高透過率が期待できる。FUJIN は衛星望遠鏡の性能を 1/100 の低コストで実現できることが大きなメリットである。惑星大気やプラズマ現象の光学観測において、観測の時間的継続性は現象

の本質を解き明かす上で非常に重要である。極域では 24 時間以上連続で惑星を観測可能な時期が存在することを利用して、当面は 65° ~ 70° に位置する放球場所から放球されたゴンドラを等緯度帯に沿って極周りを周回させる運用を実現する。将来的には成層圏で動作する推進装置を備え、極渦の中心に移動して定点観測を実施し、定期的メンテナンスのために放球場所まで帰還するという運用を目指している。

(2) 開発状況、運用状況と課題

米国は同様のコンセプトで彗星等の突発的太陽系内天体の観測を機動的に実現できる気球搭載望遠鏡を開発し、すでに実用段階まで漕ぎ着けている。FUJIN が今後世界の最先端に位置するためには、米国に水をあけられないよう今開発のピッチを上げなければならない。さらに、成層圏望遠鏡が半恒久的宙空天文台として成立するためには、長寿命スーパープレッシャー気球の開発が必要不可欠である。スーパープレッシャー気球の開発においても、我が国は米国に一步先んじられている。このような現況ではあるが、日米間の考え方に長期連続観測と機動的な観測というスタンスの違いもあり、共存していくことは可能である。現在、2023 年 3~4 月にオーストラリアにて金星の分光・撮像観測を目的とした FUJIN-2 気球実験の準備を進めている。FUJIN-2 気球実験では成層圏から金星ディスク上の紫外吸収が強い領域と弱い領域を分けて分光観測することによって、未知の吸収物質の同定と雲層中での加熱率分布の推定を目指す。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

極周回成層圏望遠鏡 FUJIN シリーズと関連する。

編隊飛行の衛星間通信を活用した観測動作制御法

(1) 科学目標・機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

4.1.1(2) 地上観測機器の開発

地球大気および電離圏環境のリモートセンシング

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

惑星大気および太陽圏環境のリモートセンシング

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

地上電磁場の計測

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

以下に、各開発項目の概要を述べる。

衛星電波を用いた電離圏電子密度構造の測定

(1) 科学目標と機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

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

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

多点フェーズドアレイ方式の非干渉散乱 (IS) レーダー

(1) 科学目標と機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

本観測機器は、欧州非干渉散乱 (EISCAT) 科学協会 (日本は加盟国の 1 つ) を中心に検討が重ねられている。2005 年から 2009 年にかけてデザインスタディーが実施され、その後、プロトタイプ受信局や技術実証用サブアレイを用いた開発が行われている。2017 年 9 月に建設を開始し、1 つの送受信局による運用を 2023 年 1 月、さらに 2 つの受信局を含む 3 局方式の運用を 2023 年冬から開始する予定である。複数局による電離圏イ

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

- (3) ミッションやプロジェクトとの関係
日本を含む国際共同で推進中の「EISCAT_3D 計画」が挙げられる。

HF ドップラー観測装置

- (1) 科学目標と機器概要

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

- (2) 開発状況、運用状況と課題

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

（装置のデジタル化）

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

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

- (1) 科学目標と機器概要

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

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

ライダーの新規技術開発

(1) 科学目標と機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

夜間大気光の多点イメージング分光観測

(1) 科学目標と機器概要

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

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

ファブリ・ペロー干渉計による2次元・多波長観測

(1) 科学目標と機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

近年、米国アラスカ大学が全天型ファブリ・ペロー干渉計 (Scanning Doppler Imager: SDI) による風速・温度の 2 次元観測を行い、オーロラアーク規模の空間分布と時間変化が熱圏風・温度に現れることを示した。さらに風速導出精度の向上と、より多様な科学課題への応用を進めるために、鉛直成分を含む風速ベクトルの導出、風速ベクトルの回転項の導出方法の改善、発光高度の時間変化に起因した不確定量の軽減方法の開発、日照領域での測定技術の開発 (例: ダブルエタロンの応用) が必要である。そのためには SDI の複数点配置による風速ベクトルの導出、非干渉散乱レーダーや SuperDARN レーダーを組合わせた電離圏・熱圏の同時測定が有効である。スカンジナビア北部において、3 機の SDI と EISCAT_3D レーダーによる新しい観測体制が 2023 年に始まる。また背面照射型の冷却 CCD カメラや EMCCD カメラの導入により、受光部の感度および測定可能な波長範囲が格段に改良されたことを受け、従来使われてこなかった発光輝線を観測するための技術開発を通して、熱圏大気の宇宙空間への散逸過程や、高度に依存した熱圏風速・温度の変動などを明らかにすることが期待される。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

OMTIs, SDI-3D, EISCAT_3D, SuperDARN

地上オーロラ光学観測

(1) 科学目標・機器概要

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

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

脈動オーロラ観測プロジェクト、PWING プロジェクト、ALIS_4D

超高分解能赤外レーザーヘテロダイン分光観測

(1) 科学目標・機器概要

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

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

1) ヘテロダイナミック分光器の開発

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

2) グレーティングタイプ分光器の開発

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

3) リトリバーバル数値モデルの開発

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

4) 惑星/系外惑星専用望遠鏡の確立

要請される短中長時間変動の観測、ならびにイベント発生にフレキシブル対応した追跡観測を実現するには、水蒸気量が少なくかつ晴天率の高い好適地に専用望遠鏡の確立を要する。東北大は、ハワイ大との協力により 2014 年に 60 cm クーデ望遠鏡を福島県飯館村からハレアカラ山頂に移設を実現した。観測設備の拠点構築の整備をすすめ、JAXA（ひさき・あかつき）・米国（Juno）・欧州（Mars Express、ExoMars Trace Gas Orbiter）への支援観測や、またドイツ・ケーペンハウワー研、名古屋大、九州国際大、千葉工大らへの観測機会提供を行ってきた。さらにハワイ大等と 1.8 m 軸外し型グレゴリアン望遠鏡「PLANETS」を、早ければ 2019 年度に完成させる予定である。

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

ミリ波・サブミリ波地上観測装置の開発

(1) 科学目標・機器概要

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

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

電波望遠鏡(低周波帯)

(1) 科学目標・機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

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

(3) 紐づくミッションやプロジェクト

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

自然 VLF 波動観測器(地上)

(1) 科学目標と機器概要

磁気圏で頻繁に観測される VLF 帯ホイッスルモード波の一種であるコーラスは、特にダイフューズオーロラを光らせる 10 keV 以上の高エネルギー電子や MeV エネルギーに至る放射線帯電子と、地球磁場の勾配が小さくなる磁気圏の赤道面付近で相互作用し、粒子のピッチ角散乱や加速を引き起こすことが理論的に予想されている。このため、自然 VLF 波動観測器の科学目標は、地上多点ネットワークから得られるホイッスルモード波の様相から、逆問題として磁気圏における巨視的な波動粒子相互作用領域のグローバルマップを得ることである。観測システムは、電磁誘導を原理に断面積 100 m² 程度のループアンテナが一般的に用いられている。

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

(3) 関連ミッションやプロジェクト

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

VLF/LF 帯標準電波・tweek 空電の観測装置

(1) 科学目標と機器概要

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

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) 関連ミッションやプロジェクトとの関係

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

地上磁力計システム

(1) 科学目標・機器概要

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

クスの研究、地震・火山電磁気研究など、超高層から内部磁気圏にわたる幅広い研究分野に、長期的に安定した精度の高い地磁気データを提供できるようになると期待される。

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

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

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

4.1.2 固体地球研究分野の観測・分析機器開発

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

以下に、各開発項目の概要を述べる。

高分解能・高感度磁力計

(1) 科学目標・機器概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

なし

月電磁探査装置の開発

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

浅部構造：

(1) 科学目標・機器の概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

SELENE-R

グローバルな構造：

(1) 科学目標・機器の概要

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

(2) 開発状況、運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

小型・低消費電力・高精度な電磁場センサ、ロガー

(1) 科学目標・機器概要

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

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

重量： 25 kg（現状） → 5 kg

消費電力： 15W(12V)（現状） → 5W（12V）

価格： 700万円（現状） → 100万円

(2) 開発状況・運用状況と課題

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

(3) ミッションやプロジェクトとの関係

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

人材育成総合プロジェクト」

4.2 計算機シミュレーション・モデリング

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

4.2.1 技術開発要素

(1) 方程式系

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

流体法

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

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

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

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

粒子法

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

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

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

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

ブラソフ法

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

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

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

ハイブリッド法

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

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

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

ジャイロ運動論

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

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

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

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

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

(2)モデリング

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

太陽コロナー太陽風ー太陽圏

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

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

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

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

磁気圏-電離圏結合

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

放射線帯

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

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

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

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

リングカレント

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

ゲカレントの予測も社会的責務として重要である。

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

電離圏－熱圏－中間圏結合

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

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

ダイナモ

地球の主磁場の生成、特に軸双極子の卓越やその極性の突発的な反転をどう説明するかは、長い間地球物理学上の未解明問題のひとつであったが、1990年代以降、磁気流体力学的ダイナモのシミュレーション研究が行われるようになり、一定の成功を収めている。計算手法としては、金属コアが球形の非圧縮流体として近似でき、ほぼ不導体である固体のマントルに覆われているという特性から、伝統的に流れ場と磁場をポロイダル・トロイダル展開し、それらの定義関数を球面調和関数展開するスペクトル法が用いられている。一方、有限要素法やインヤン格子を用いた有限差分法によるシミュレーション研究も行われており、特に後者は大規模並列計算に向けた手法として評価されている。液体金属コアは、コリオリ力に対する粘性力の効果をあらわす無次元数であるエクマン数が、渦粘性を考慮しても 10^{-9} 乗と非常に小さく、また対流の運動エネルギーに対する磁気エネルギーの比が 10^3 程度と非常に大きいという特徴をもつ。しかしながらこうした低粘性、高磁気エネルギーの地球ダイナモの特性には、いまだ未解明の点が多い。粘性ゼロ、磁気エネルギー無限大の磁気地衡流近似を用いたモデル構築の試みもあるが、解が存在するの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

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

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

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

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

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

(3) 共通技術課題

計算機アーキテクチャに適したコードの最適化

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

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

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

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

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

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

時間積分法

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

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

4.2.2 環境整備

(1) 分野間連携

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

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

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

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

(2) 計算リソースの確保

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

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

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

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

(3)人材育成

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

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

4.3 データマネジメント・データシステム

4.3.1 地球電磁気学・地球惑星圏科学におけるデータ

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

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

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

4.3.2 データマネジメント

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

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

研究データマネジメントの中でも、特に、データ公開体制を新たな学術研究の制度として根付かせるために「データ出版(data publication)」およびその一環として、データを論文のように参照・引用して被引用頻度を通じた業績評価を可能にする「データ引用(data citation)」などが国際的に議論されている(図 4.3.1)。これらの実現のために、科学データへのデジタル識別子の付与が急速に進められており、データ引用も徐々に実施されつつある。その他には、研究データマネジメントの実施項目の明確化とその達成度を自己評価するための「データマネジメントルーブリック(rubric)」の作成も進められている。データシ

システムとしての対応を含めて、地球電磁気・地球惑星圏科学分野としても研究データマネジメントの必要性を認識し、関連した活動に積極的に参加していくべきである。

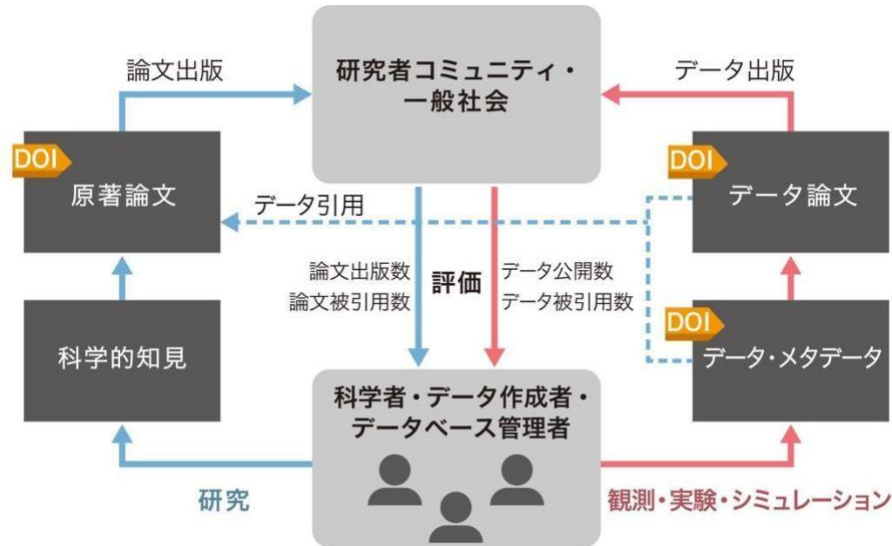


図 4.3.1 科学的知見の出版と科学データの出版。従来は左側の青色ループの仕組みだけであったが、右側の赤色ループの仕組みが急速に整備され、また普及しつつある。

4.3.3 メタデータ、共通データ解析ツール

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

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

これらの点については、過去のデータセンターや、最近では大学間連携プロジェクト「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究」(Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETwork: IUGONET)でも試みられているところである。地球電磁気・地球惑星圏科学における現象を理解する上で、多圏間結合は本質的であり、各領域で得られた様々な物理量を総合的に解析することが極めて重要である一方、複数の機関により多種多様な観測装置で取得されたデータを発見、収集、解析することは、多大な労力と時間を要するため、これまで実現が容易ではなかった。そこで、2009年度から開始された IUGONET では、5.2 節に挙げられるような国内研究機関が保管する地上観測データを中心として、メタデータの作成とそのデータベースを整備し、データの横断検索ができるようなシステムを一般公開すると同時に、それらの研究データをワンストップで解析できるよう

な共通データ解析ツールの開発を行ってきている。また、データベース及び解析ツールの観点から、飛翔体による観測データと地上観測データとを融合させる試みの1つが、ERG サイエンスセンター(ERG-SC:<https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp>)によって実施されている。IUGONET プロジェクトと連携しつつ、ERG-SC によって、あらせ衛星と連携地上観測データについて、実データ及びメタデータの標準化が推進され、それらの共通データアーカイブに基づいた共通解析ツールが整備・公開されている。

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

4.3.4 国際的な動向

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

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

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

SPASE データモデルは年に 1 度程度データモデルのバージョンアップが行われ、その際に、IUGONET からは地上データを記述するためのデータモデルの追記を提言した。データマ

ネジメント・データシステムに関連する標準化が国際的に進められる中、日本からの積極的な参加・提案が望まれる。

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

4.3.5 SGEPPS におけるデータシステムのあり方

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

4.3.6 大気水圏科学データの蓄積・解析基盤形成

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

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

以上の議論を具現化するため、「気象研究コンソーシアム」の取組を大幅に拡充した「大気水圏科学データ蓄積基盤」(AHSAP)が構想されている。「気象研究コンソーシアム」は古いデータを蓄積していないのに対し、AHSAP では災害をもたらす気象のメカニズム・予測可

能性研究及び防災リテラシーの向上・防災教育充実を目的として、気象データを蓄積する。さらに、データ解析やデータ同化、機械学習、可視化等のツールを開発・整備・提供することにより、地球惑星科学に有用な研究基盤とするだけでなく、当該分野でのデータ科学の人材育成や、地学教育への活用を図る。

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

4.4 情報数理技術

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

4.4.1 データマイニング技術・機械学習に基づくAI技術

一般に自然科学分野では、獲得したデータからいかに興味ある事象を発見し、その原理をいかに理論的に説明するかが、最も基本的な研究アプローチである。しかし多くの場合、観測対象となるデータは、太陽活動度・地磁気活動・季節・緯度・ローカルタイムなど、多次元に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、巨大なデータ群から計算機の力を借りて知識を発見するデータマイニングと呼ばれる技術が情報数理学の分野で研究されている。データマイニングとは、巨大なデータ群の中に含まれる意味のあるパターンを網羅的に抽出し、列挙する技術の総称である。データマイニングの基軸となる手法には、大量データを意味のある有限個のグループに分類するクラスタリング、与えられた入力に対し未知の出力を予測する回帰分析、与えられたデータのカテゴリを予測するクラス分類などがある。解析されるデータの種別に応じテキストマイニング、グラフマイニング、時系列マイニングなどと呼ばれる。これらは、経済学（経済動向予測）、経営学（顧客の嗜好解析に基づくサービス提供・販売予測など）、生命科学（ゲノム情報解析）、医療（医療画像診断）、工学（システムの異常検知）など様々な分野で活用されている。

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

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

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

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

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

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

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

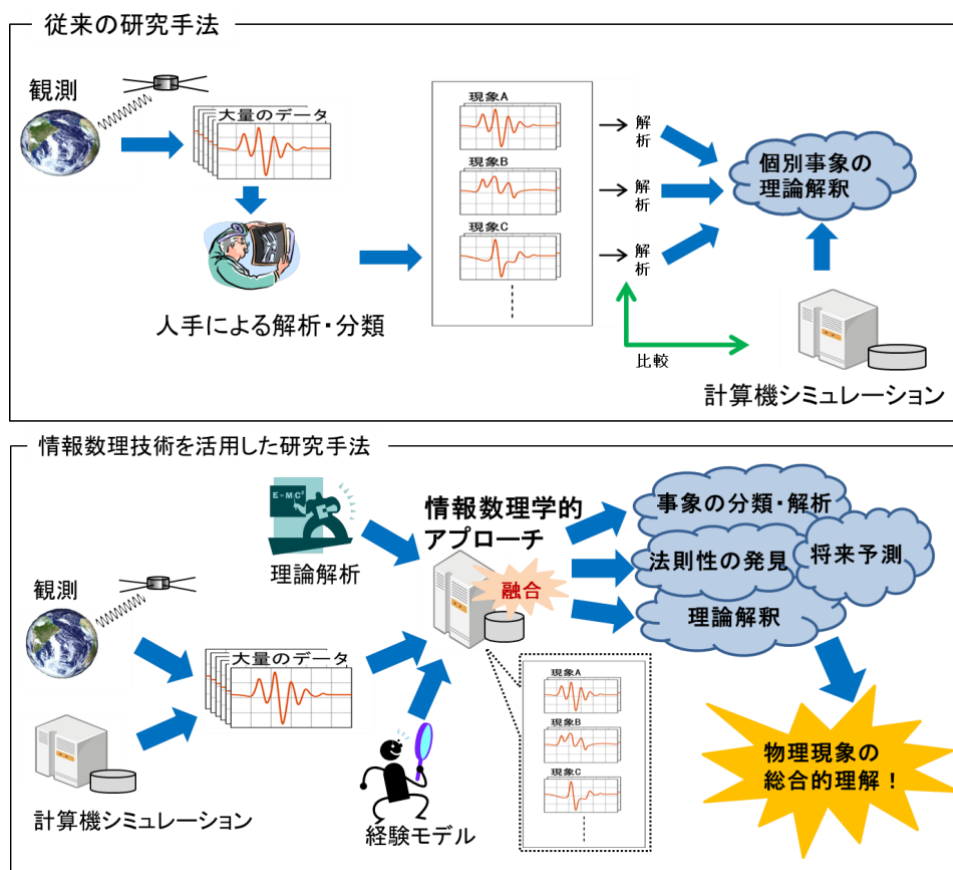


図 4.4.1 情報数理技術の活用

4.4.2 データ同化技術と再解析データ

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

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

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