

## 2 地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と科学課題

### 2.1 太陽活動により変動する太陽地球圏環境の解明

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

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

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

#### 2.1.1 磁気圏・電離圏での時空間・エネルギー階層間結合

磁気圏・電離圏分野の研究は 1960 年代の飛翔体観測の本格化とともに大きく発展した。1970 年代には磁気圏の基本的な構造が明らかにされ、磁気圏の平均描像の標準的なモデルが確立した。また、磁気圏と電離圏のように異なるプラズマパラメータを持つ領域が磁力線を介して結合しており、太陽風との相互作用を通して、磁気圏と電離圏が互いの運動を規定しながら変化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、1990 年代には多くの衛星観測、地上観測、さらに数値シミュレーションの進展によって、非一様・非定常な複合システムとしての理解が進んだ。一方、磁気リコネクションなどのマイクロな物理の理解も急速に進展し、マイクロな過程がマクロなダイナミクスや構造に与える影響の研究も進められた。このように、磁気圏・電離圏の非線形性・非定常性、および異なるスケールの現象が動的に結合する「スケール間結合」の重要性が指摘されるようになった。

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

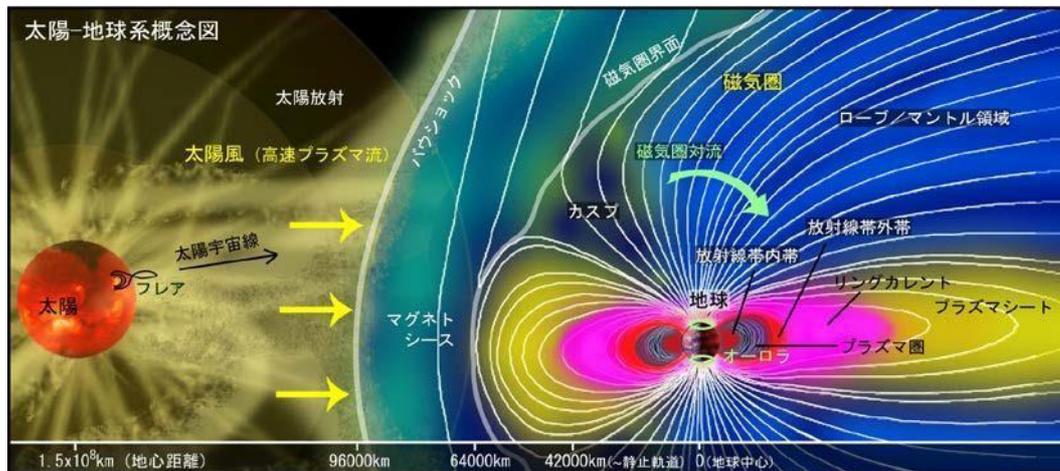


図 2.1.1 太陽-地球圏の領域と生起する現象

### (1) 磁気圏と電離圏の時空間結合

#### 現状

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

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

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

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

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

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

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

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

## 今後の課題

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

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

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

尾部構造との関連性を明らかにしていくことができると考えられる。

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

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

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

## (2) 内部磁気圏におけるエネルギー階層間結合

### 現状

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

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

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

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

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

## 今後の課題

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

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

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

### (3) 磁気圏尾部を中心とした時空間結合・エネルギー階層間結合

#### (ア) サブストーム

##### 現状

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

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

##### 今後の課題

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

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

した極域のダイナミックな変化を明らかにすることが期待される。

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

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

### (イ) 高温プラズマシートの起源

#### 現状

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

#### 今後の課題

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

### 2.1.2 地球圏に影響を及ぼす太陽風・太陽放射

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

#### (1) 太陽風-磁気圏相互作用における太陽風 3次元構造の重要性

##### 現状

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

に起源を持っている。太陽風-磁気圏相互作用は、磁気圏物理学の最も基本的な課題であり、これまで多くの研究がおこなわれてきた。特に 1990 年代に入り、Wind・ACE 探査機によって太陽風の連続観測が初めて実現し、現在に至るまで太陽活動周期 2 サイクル (約 11 年) 以上にわたってデータの蓄積が進んだことが、太陽活動周期性までを含めた太陽風-磁気圏相互作用の理解の進展につながった。特に太陽風の大規模構造との関係性や、特異な太陽風が到来した際の磁気圏の応答についての理解が進み、太陽風の 3 次元構造を理解する重要性が認識されるようになった。

太陽風-磁気圏相互作用による磁気圏の大規模擾乱現象の一つが、サブストーム/磁気嵐である。サブストームのトリガーとなる太陽風の主要なパラメータや、磁気嵐を引き起こすコロナ質量放出 (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性が詳しく解明されるようになった。さらに、太陽風密度が極端に減少した場合、強い CME が頻発した場合等々、通常の太陽風と異なる状態において、磁気圏側が特異な応答を示す様子も明らかになりつつある。

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

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

一方、太陽高エネルギー粒子 (SEP) の研究も、太陽面観測や ACE、DSCOVR 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、高精度数値シミュレーションを駆使した研究が必要になる。

また、近年、ジオコロナと太陽風の電荷交換反応を用いて X 線で磁気圏境界層を撮像できる可能性が指摘され、2020 年代初頭に中国と ESA が SMILE と呼ばれる衛星計画を、また日本でも GEO-X と呼ばれる計画が検討されている。この撮像観測によって、太陽風によってダイナミックに変化する磁気圏境界の様子が可視化されることが期待されており、太陽風によって磁気圏のグローバルな形状の変化がどのように起きているかを初めて可視化できる

可能性がある。これらの衛星計画と連動した「その場」での衛星観測や地上観測との連携が必要となる。

## (2) 太陽・ジオスペースから電離圏・大気圏への影響

### 現状

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

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

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

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

### 今後の課題

近年、超高層大気研究では地上観測装置網の拡充および数値計算空間における領域間結合モデルの構築が大きく進んだ。さらに測定センサの高感度化と新規開発技術の応用によ

って従来より 1-2 桁優れた時間・空間分解能での電離圏や大気圏の精密測定が可能になった。また大型大気観測レーダーや衛星開発が国際共同体制のもと着実に進行している。これまで様々な観測結果を積み上げ、電離圏・熱圏・中間圏などでの個々の現象を理解する試みが精力的に進められてきた。しかし上述の研究環境の向上を踏まえ、これまで難しかった電離圏・大気圏の 3 次元結合研究、即ち、極域と中低緯度の緯度間結合、経度分布、高エネルギー降下粒子による低高度電離や下層・中層大気から熱圏・電離圏に上方伝搬する大気波動などを介した鉛直結合、イオン-中性粒子衝突過程の観測実証に関する研究を進めるべきと考える。特に、オーロラ活動に伴う大気加熱と膨張および組成比変動、その水平輸送、電離圏電子密度変動（正相・負相嵐）は一連の物理過程と考えられているが、それを観測実証することは太陽を起源とするエネルギーの流入から消失の終端までを包括的に理解する重要な課題である。また、GNSS 測位、低高度衛星の運用等に関連して、我々の生活基盤を維持する上で当研究分野に課せられた最重要課題の一つになると考えられる。

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

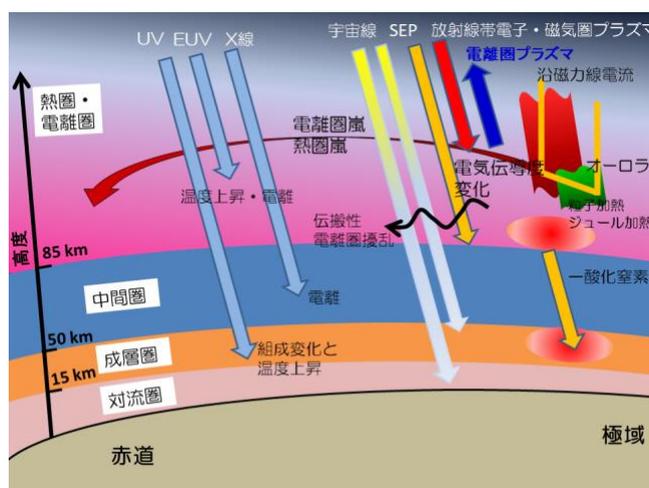


図 2.1.2 太陽から地球電離圏・大気圏への影響

### 2.1.3 地球気候に対する太陽活動の影響

#### 現状

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

ルにまでおよぶ。また、太陽の自転に関連すると考えられる 27 日程度の周期性も、雷や雲などの観測データから見つかってきており、気象のスケールでも太陽が重要な影響を及ぼしている可能性が示唆されている。

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

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

(i) 銀河宇宙線：太陽系外から飛来する銀河宇宙線のうち数十 GeV 以下の成分は、太陽風磁場による遮蔽を受ける。そのため、11 年周期をはじめとした太陽活動の変動に応じて地球での銀河宇宙線強度が変化する。コロナ質量放出が短期的に銀河宇宙線を強く遮蔽したり、また太陽風構造が地球を通過したりする影響もあるため、太陽の自転のスケールの変動も併せ持つ。また、太陽双極子磁場の反転に関連する 22 年周期の変動成分も見られる。銀河宇宙線は、大気分子を電離してイオンを生成するが、それが雲核生成や雲粒の成長率に寄与する可能性があると考えられている。僅かな雲量の変化は地球の気温を大きく変える（1 パーセントで約 1℃）と言われる。

この銀河宇宙線説は 1990 年代に入って Svensmark 等がいくつかの論文を発表しており、それが今日の議論再燃のきっかけになっている。宇宙線が雲核形成に影響し得る点については、古くは 1970 年代から議論されていた。近年、欧州原子核研究機構 (CERN) の加速器などを用いたチャンバー実験により、実験的に荷電粒子の雲核形成への寄与について検証する研究が進められており、チャンバーに添加する成分やチャンバーの温度に応じて、荷電粒子の影響の度合いが変化する様子などが捉えられている。また、宇宙線による雲核形成や雲/エアロゾルの帯電の影響をシミュレーションで検証する動きもある。

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

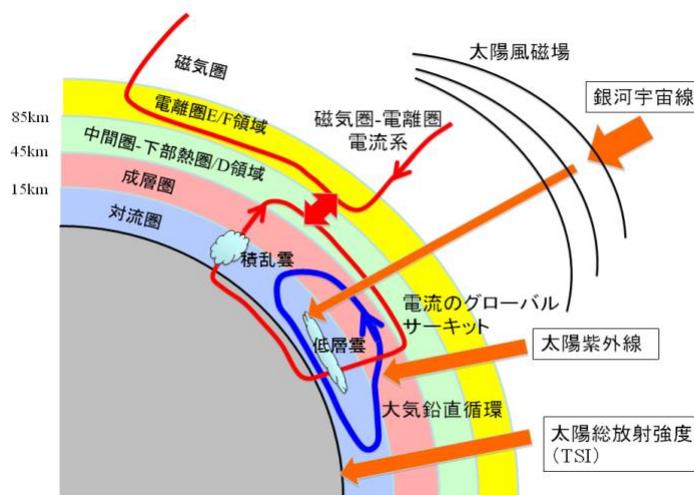


図 2.1.3 地球気候に対する太陽活動の影響

(iii) 紫外線：200-400 nm 付近の紫外線は、太陽活動の 11 年周期変動によって 0.1～数パーセント程度変化する。これがオゾン層で吸収されることで成層圏温度場、さらに風速場に変調を与えると考えられている。それが鉛直循環や波動伝搬の変調を介して、対流圏にも影響を及ぼす可能性が指摘されている。紫外線の 11 年周期変動にともなって、成層圏において最大 1°C 程度の影響が出ることが分かってきているが、対流圏への影響の定量化は今後の課題である。

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

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

(vi) 大気流出への寄与とその影響：地球大気の流れ量は太陽風・太陽紫外線に依存すると考えられているが、過去の太陽の高い活動度を考慮すると、その流出量が大気の総量に対して必ずしも無視出来ないことが最近の研究で分かって来た。この流出には原子・イオンの質量依存性もありうるため、流出に伴って大気組成が変化することも考えられる。このような大気組成変化は生命圏の酸化還元活動にも影響を与えうるもので、それが長周期の気候変動（変動にはいくつかの時間スケールがある）に影響を与えている可能性がある。

## 今後の課題

差し迫る最重要課題は、太陽気候結合のメカニズムに関する理解を、気候の長期予測を行う全球モデルに組み込みが可能になるレベルにまで高めていくことであるが、27 日という気象の時間スケールでも太陽活動の影響が示唆されていることを考慮に入れば、将来的には、気象予測モデルへの宇宙天気予報の組み込みも視野に入ってくると考えられる。それらを見据え、観測・理論・シミュレーションから多角的に、太陽気候結合のメカニズムの解明に取り組んでいく必要がある。例えば熱圏 300 km より高い高度の大気について系統だった中性観測・熱的イオン観測は存在しない。それ故に静水圧平衡と実験室光化学のモデルのみで超高層中性大気は語られてきたが、そういったモデルと観測が合わないことが近年の観測から示唆されるようになってきている。また中性粒子とイオンとの間の結合がどのように関係しているか観測自体がほとんどない。地球気候に対する太陽活動の影響を議論するためには、こうした基本知識を深めていく必要がある。

影響を定量化し、かつその素過程を解明していくためには、太陽物理学、宇宙線物理学、超高層物理学、気候学、大気化学、古気候学などの、多くの研究分野・研究手法にまたがる研究者が分野横断的に議論を進めていく必要があるであろう。現時点では、各大気層あるいは各説を議論する研究者がそれぞれ別々のコミュニティに属していることが多く、議論の

場が非常に限られていることが問題として挙げられる。多種多様な研究領域が、いかに密な協力体制を築いていけるかが、重要なポイントになるだろう。その上で、一大研究拠点の形成と充実は必要不可欠である。

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

## 2.1.4 内部・外部太陽圏研究

### 現状

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

一方で、我々の地球は銀河系内においては、大気、磁場、そして太陽風プラズマに覆われた存在とすることができる。天文スケールにおける地球環境を論じるにあたっては最後の太陽風プラズマの影響や、高エネルギー銀河宇宙線との関係に関する定量的知見を深めることが肝要である。これは具体的には太陽風（太陽圏）と星間風との境界領域に見られる物質（プラズマ、宇宙線など）や電磁場のエネルギー交換過程を理解することに帰結する。近年、Voyager 探査機による太陽圏境界領域の直接観測や、同領域で生成される高エネルギー中性原子（ENA）の IBEX 衛星によるリモート観測から、境界領域の物理素過程に関する新しい発見が相次いでいる。特に、Voyager 1 号、2 号による太陽圏終端衝撃波の通過（それぞれ 2004

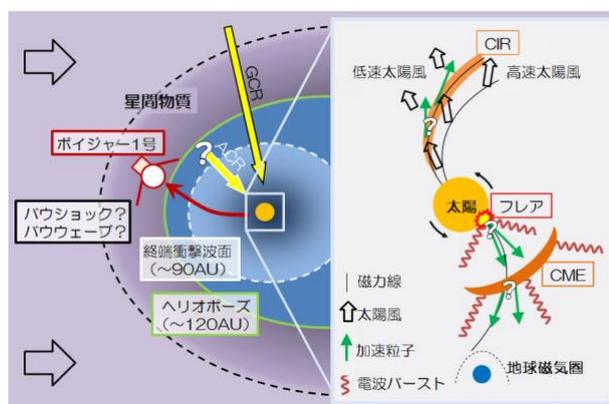


図 2.1.4 内部・外部太陽圏

年、2007年)は21世紀の太陽圏観測における大きな進展をもたらした。その後2012年にはVoyager 1号が、2018年にはVoyager 2号がヘリオポーズを通過し、人類史上初めて星間空間の「その場」観測が行われる時代に突入した。Voyager および IBEX による一連の観測から、太陽圏に対する局所的な星間媒質 (VLISM = Very Local Interstellar Medium) の相対速度がより正確に求められ、太陽圏の外側に存在すると考えられていたバウショックは存在せず、バウウェーブとなっている可能性が指摘されている。

内部太陽圏の観測は2010年代末から急速な進展を見せている。特に、BepiColombo (日欧共同水星探査ミッション、2018年打ち上げ)、Parker Solar Probe (2018年打ち上げ)、Solar Orbiter (2020年打ち上げ)の太陽近傍における「その場」観測を実行する衛星計画によって、太陽風加速・コロナ加熱問題などの太陽物理の諸問題においても、その場観測から得られる太陽風中の素過程(不連続構造、乱流、非熱的粒子、イオン組成など)の知見と分光撮像観測・シンチレーション観測で得られる太陽表面・近傍現象の知見とを整合させた研究の実現が可能となりつつある。太陽に接近し太陽風加速領域を直接探査する探査機Parker Solar Probeが2018年8月に、撮像・その場観測のハイブリッドで太陽風の大局的ダイナミクスの解明を目指す探査機Solar Orbiterが2020年2月にそれぞれ打ち上げられ、これまでの理解とは異なる太陽風描像が少しずつ明らかになってきた。また日欧共同水星探査ミッションであるBepiColomboも2018年10月に打ち上げられ、水星に到達するまでのクルージング段階で精力的に太陽風観測を行っている。特にParker Solar Probeはこれまでどの探査機も到達できなかった太陽近傍の直接観測に成功しており、2021年4月末には太陽風速度がAlfven速度よりも小さい領域(サブAlfven領域)へ到達するなど大きな成功を収めている。太陽風近傍の観測で最も重要な科学成果の一つとして磁気スイッチバックの発見がある。磁気スイッチバックは磁場の動径成分が局所的に(数分程度)符号を急に反転させる現象であり、太陽風加速の謎を解き明かす鍵となるのではないかと期待されている。スイッチバックの初期報告以降理論的、観測的なフォローアップ研究が続いているが、現状では太陽近傍の交換型磁気リコネクションがスイッチバックの起源として有力視されている。交換型磁気リコネクションはこれまで一部の低速太陽風の形成に重要であると考えられてきた。だがスイッチバックが普遍的に存在するということは交換型磁気リコネクションがあらゆる太陽風の形成に一定の影響を及ぼしていることを示唆し、太陽風加速モデルの大幅な見直しが求められている。

## 今後の課題

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

このような太陽と太陽圏の結合過程解明の知見は、広く宇宙プラズマ諸現象に普遍的なプラズマ加熱・加速過程の理解にも重要な貢献をもたらす、より詳細な太陽表面現象と太陽風3次元構造の対応の解明を通じて宇宙天気・気候分野の進展、更には太陽以外の恒星の理解にも大きく寄与すると考えられる。これまで、特に日本のコミュニティにおいては天文学・天体物理学の一分野としての太陽物理の研究が主流であったが、今後の太陽近傍環境の直接観測の進展により、太陽地球系物理学の研究範囲が太陽物理のものと重複していくことは容易に想像できる。このことは、これまで宇宙天気分野などで行われてきた連携関係とは

質的に異なる研究分野の融合を伴うものであると考えられる。重要計画を目前にした欧米における急速な研究の進展を鑑み、日本においても太陽・太陽風物理をその場観測と合わせて理解する文化を意識的に吸収していく必要がある。同時に、これまでの日本のコミュニティの強みでもある分光撮像観測や惑星間空間シンチレーション観測の一層の強化も、太陽活動・太陽風の変動解明の観点から不可欠である。

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

翻って、外部太陽圏においても多くの未解決問題が残されている。2機のVoyager探査機による直接観測からは、長年懸案の宇宙線異常成分(ACR)の加速機構の解明につながる手掛かりは得られていない。終端衝撃波通過時に観測された終端衝撃波粒子(TSP)や高エネルギー電子の加速機構も謎のままである。Voyager 2号のヘリオポーズ通過では、Voyager 1号のときとは違う比較的急峻な境界が報告されている。両衛星は引き続き星間空間を航行中で、例えば太陽圏内部から到達した衝撃波など、VLISMのプラズマ環境について貴重なデータを送り続けてきている。今後、データ解析やモデリング研究が進むことで、銀河宇宙線の太陽圏への侵入過程といった重要問題への知見も得られるであろう。IBEX衛星が捉えたENAの特徴的な空間分布(EBEX ribbon)は、星間媒質中の中性粒子と太陽風陽子の間の電荷交換をもとにして説明されつつあるが、分布のエネルギー依存性や時間変動まで包括的に説明できるモデルの構築は今後の重要な課題である。さらに、太陽圏境界領域のリモート観測の地位を確立したIBEXは、現状で直接観測データがない太陽圏尾部(ヘリオテール)の情報の重要な供給元でもあり、データの有用性は今後も増すはずである。IBEXの後継ミッションとしてInterstellar Mapping and Acceleration Probe (IMAP)衛星の打ち上げが2025年に予定されており、日本もIPS観測データを提供する役割を担っている。なお今後の太陽圏外縁～星間空間の直接探査については、Voyagerの後継にあたる米国のInterstellar Probeや中国のInterstellar Expressなどが構想段階にある。

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

## 2.1.5 太陽研究

### 現状

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

6千度である太陽光球の上空には、約1万度の彩層が存在し、さらにその上空には100万度を超えるコロナが形成されており、このコロナから太陽風と呼ばれるプラズマが流れ出ている。どのようにして、この100万度を超える高温大気が形成され、さらに太陽風を加速しているかは、太陽物理学における最重要懸案事項の一つである。大気加熱の物理プロセスは大別して、アルヴェン波などの電磁流体波動を散逸させることによってコロナを加熱する波動加熱説と、コロナのいたるところで蓄えられた磁気エネルギーを微小爆発現象

によって解放しコロナを加熱するナノフレア加熱説の2つがある。これらのプロセスがコロナのこういった領域で、どの程度寄与しているかなど、その詳細は未だ分かっていない。さらに、コロナの下に存在する彩層はダイナミックに運動しており、彩層のダイナミクスがコロナの加熱にどのように寄与するのも重要な問題である。このような大気加熱の問題は、太陽に固有なものではなく、一般の恒星大気加熱、恒星風加速等の理解につながる重要な知見が得られている。

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

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

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

約11年の周期で変動する太陽活動を駆動・維持するメカニズムはいまだに明らかになっておらず、太陽物理学の大問題の一つである。対局的には、太陽の差動回転(自転)による大規模な磁場の引き伸ばし( $\Omega$ 効果)と、 $\Omega$ 効果によって生成された磁場のコリオリ力によるひねり( $\alpha$ 効果)によって太陽周期活動は維持されていると考えられている。これまでに乱流効果のダイナモ波を発生させる乱流 $\alpha$  $\Omega$ ダイナモや、子午面還流の輸送を用いる磁束輸

送ダイナモなどが提案されているが、未だ「標準モデル」は確立されていない。どのダイナモモデルが正しいか、もしくは新しいモデルが必要なのかを理解するためには太陽内部の流れ場の様子を観測的に明らかにする必要がある、今後の課題である。

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

## 今後の課題

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

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

b) は、太陽大気の活動性や加熱を引き起こす源としての太陽磁場が太陽内部でどのような機構で生成されるのか、またその磁場がどうして約 11 年の周期で変動するのか、という太陽・恒星磁場の起源の理解を目指すものである。ダイナモ問題解決の鍵は太陽内部にあり、大まかには、1. 太陽はどのような自転速度分布(差動回転)を持つのか? 2. 子午面内の流れ場(子午面還流)はどのような構造を持つのか? 3. 熱対流は、どの領域、どの空間スケールで、どのような速度を持つのか? を観測的に明らかにする必要がある。1. 差動回転分布からは、太陽ダイナモにおける最も重要な効果である、差動回転による大規模磁場の引き伸ばし( $\Omega$  効果)について空間分布の手がかりを得られる。また、2. 子午面還流からは、太陽内部における磁束輸送や、乱流による角運動量輸送を理解することができる。これは[子午面還流による角運動量輸送]=[乱流による角運動量輸送]の釣り合いが成り立つためである。さらに、3. 熱対流の性質と太陽の自転速度の関係からは、乱流的なダイナモ効果や差動回転や子午面還流を形成する乱流角運動量輸送がどのように行われるのかを確認することができる。これらの太陽内部を観測的に理解するため、現在検討されている計画の一つに、黄道面

を離れた視点に探査機を送り、そこから太陽極域を観測するというものがある。これは、次の太陽磁気活動サイクルの種となる極域磁場を理解し、さらに太陽内部の深い領域の速度場の理解を進める考えである。2030年代以降の実現について、太陽圏のその場観測とも連携して、検討すべき重要なミッションコンセプトである。これらの観測は、各国で精力的に進められている理論シミュレーションの妥当性を検証する上でも重要な役割を果たす。

## 2.2 宇宙につながる大気圏・電磁気圏環境の解明

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

### 2.2.1 下層大気から中層・超高層大気への影響と緯度間結合

#### (1) 下層大気から中層・超高層大気への影響

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

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

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

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

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

## （２）中層・超高層大気の緯度間結合

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

また、磁気嵐に伴う全球的な熱圏・電離圏変動は、超高層物理学分野における古くからの中心的研究課題である。

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

遠く離れた緯度・高度間で影響を及ぼしあう現象はテレコネクションと呼ばれ、対流圏・成層圏ではその存在が古くから知られていた。近年、冬の北半球成層圏で突然昇温が発生すると、夏の南半球中間圏界面において極中間圏雲が数日遅れで消失することが衛星観測により捉えられ、中間圏を介した全球規模のテレコネクションとして注目を集めている。大気大循環モデルのシミュレーション結果から、北半球成層圏の大きな風速変動に伴って全球規模で大気重力波による運動量輸送が変化し、中間圏に駆動される子午面循環が変調を受けることで南半球中間圏界面に影響を及ぼす interhemispheric coupling というメカニズムが提唱されている。しかし、個々の重力波の空間規模は小さいためその影響は限定的であることも考えられ、同領域での波の2次発生の重要性も指摘されていることから、そのメカニズム解明には突然昇温時の重力波変動を全球的にとらえることが不可欠である。しかし

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

## 2.2.2 中性大気・プラズマ相互作用

超高層大気は、太陽放射により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、非線形効果、異なる不安定が結合している可能性、さらには下層大気から伝搬する大気波動によるプラズマ不安定の“種”の重要性についても考慮に入れる必要がある。また、近年リチウム等の化学物質放出による中性大気風速観測技術が進歩し、日没付近の熱圏下部の風速変動は、従来描かれていた描像とは大きく異なる可能性が指摘されており、今後解明すべき課題と言える。

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

## 2.2.3 電離圏と磁気圏との間の領域間結合過程

### (1) 地球大気・電離圏から磁気圏への影響

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

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

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

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

また、大気圏・電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。

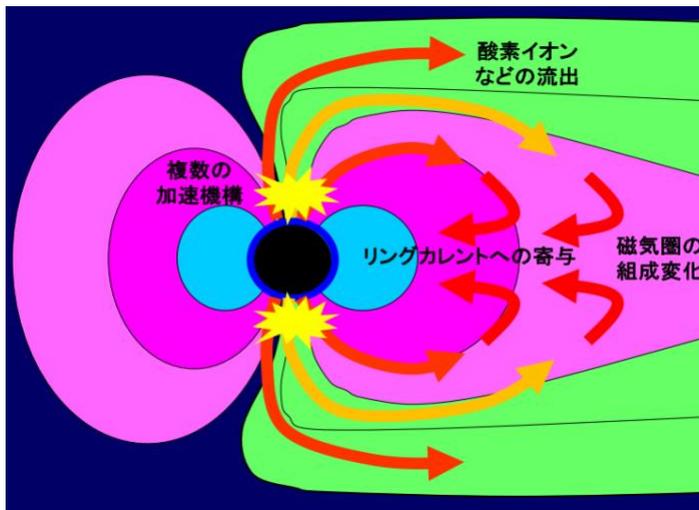


図 2.2.2 電離圏プラズマ流出と磁気圏への影響

## (2) 地球超高層大気物質循環や電離圏プラズマ流出

地球大気・電離圏から磁気圏への影響としては、大気の循環や散逸現象も欠かせない。地球超高層大気中の電離したプラズマは極域において磁力線方向に加速され、様々な磁気圏領域へ流出している。この現象は理論的予測が先行し、その後様々な人工衛星およびロケット、非干渉散乱レーダー観測により、その特徴が明らかにされつつある。現在では、流出するイオンのエネルギーは熱的レベルから超熱的レベルまで広く分布し、流出するイオン種も多岐にわたることが分かってきた。電離圏内のイオンを高高度に加速するメカニズムについても、分極電場や、プラズマ波動による加速、遠心力加速など、領域や高度によって異なるプロセスが働いていることが明らかになりつつある。しかし、これらの加速メカニズムの相対的な重要性については十分に理解されていない。イオンが電離圏で加速され流出に

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

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

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

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

人間活動に起因する大気中の温室効果ガスの濃度増大による地球温暖化は、世界中の関心事となっている。これに関連して、温室効果ガスの濃度増大は、中層・超高層大気の平均気温の低下や中性大気密度の減少、電離圏電子密度のピーク高度の低下など、中層・超高層大気にも大きな影響を与えることが、1980年代後半の数値シミュレーションによって初めて示された。それ以降、低軌道衛星の軌道・周期変化から得られる熱圏大気密度や地上観測による電離圏高度について数十年スケールの長期変動が調べられるようになってきた。また、中間圏夏季に現れる夜光雲の出現頻度の経年変化も注目されるようになってきた。近年の夜光雲の出現率の増加は、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調に起因する影響が現れると考えられる。例えば、地球温暖化に伴い、下層大気では、台風の巨大化、集中豪雨の発生頻度の増加、偏西風の蛇行によるブロッキング高気圧の発生頻度の変動などが考えられている。これら下層大気循環の変動に伴い、上方に伝搬する大気波動の活動度の長期変動により、中層・超高層の大気循環が影響を受ける可能性が大きい。また、夜光雲や極成層圏雲などの長期変動は、大気循環の長期変動のみならず、大気中の大気微量成分濃度の長期変動と密接に関連しているため、大気成分に関する光化学過程の解明という観点からも研究を推進する必要がある。そのためには、今まで以上の高時間・空間分解能での長期観測や大気微量成分の長期観測などが求められる。同時に、定量的な見積もりのためには、長期観測と連携した形で、対流圏変動を表現可能な数値モデルや大気的光化学過程を含む数値モデルによる研究の推進も必要である。特に、オゾンホール定量的な再現・予測は最新の化学気候モデルでも難しく、モデル内の光化学過程や各種パラメタリゼーションなど、様々な改良が求められている。今後、南極オゾンホールが回復していく中で、温室効果ガスの増加と併せてどのような影響を引き起こすのかを注視し、継続した観測に基づく評価とモデルに基づく解釈と予測の双方を進めていくことで、オゾンホール発生メカニズムの定量的理解とその気候影響の予測精度向上に貢献することが期待される。

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

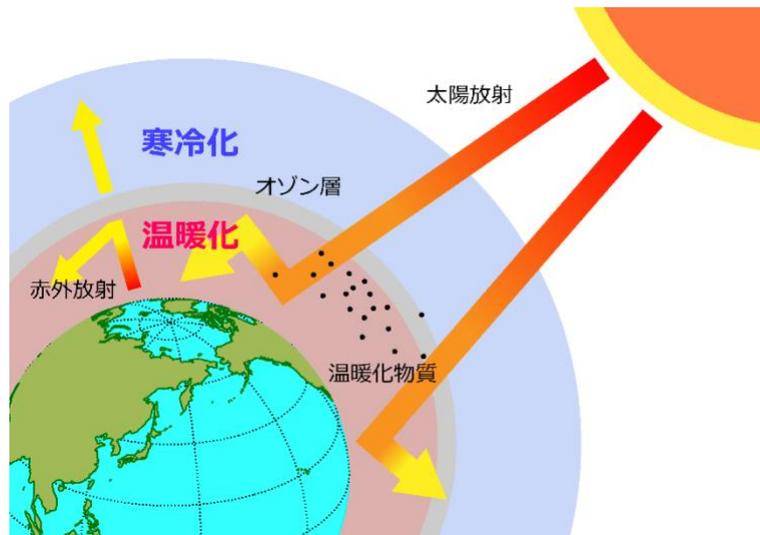


図 2. 2. 3 超高層大気と地球温暖化や気候変動との関わり

## 2.3 多様な惑星圏環境の統一的理解

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

本節では、惑星圏における以下の主要な研究課題：

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

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

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

#### (1) 磁化天体におけるエネルギー階層間結合

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

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

今後の固有磁場を有する惑星・衛星・小天体の研究にあたって、特に重要となる視点は、惑星の基礎パラメータであり、磁気圏のエネルギーソースでもある、自転速度や固有磁場強度と、非熱的な粒子加速性能の関係性を明らかにすることである。木星磁気圏での多様な加速過程を理解するためには、磁気圏の各領域において粒子・電磁場・プラズマ波動の詳細な観測を行い、加速素過程を調べる必要がある。それとともに、磁気圏の各領域が動的に結合し、時間変動したときの、各加速過程が効果的に発動するプラズマ環境を明らかにする必要がある。自転軸と時軸の傾きが大きく異なる天王星・海王星磁気圏は、自転と磁場の基礎パラメータで磁気圏物理を普遍化するとき、必須の天体であるが、近年米国や中国が40-50年代に直接探査を表明している。今後30年に渡り木星、土星、天王星、海王星の巨大惑星磁気圏の一般的な理解が進むと目される。

一方、固有磁場が弱い水星の磁気圏は、そのスケール長がイオンの旋回半径と同程度に過ぎず、磁気流体力学近似が成立するぎりぎりの下限点に位置する。このような小さな磁気圏における粒子加速やサブストーム現象等を調査し、磁気圏現象の時空間スケールの適用可能範囲を調べることは意義深い。ベピコロンボによる波動計測器を含めた網羅的な水星磁気圏プラズマ環境の観測も期待される。また、3章で述べる磁気プラズマセイルや、小天体などのイオン旋回半径よりも小さな構造においても磁気圏は形成されるのか、衝撃波構造や磁気リコネクション等のプラズマ素過程はどうなるのか、またそれらは磁気圏形成にどのような影響を与えるのかなどは興味深い課題である。

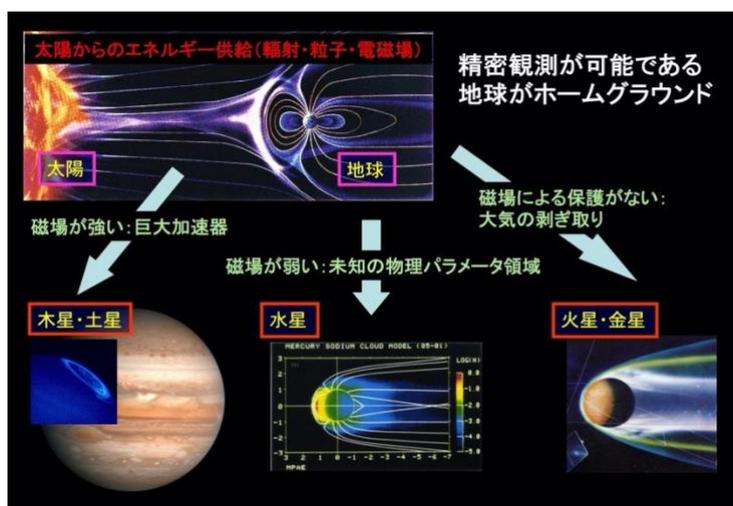


図 2.3.1 地球から惑星への電磁気圏・大気圏研究の発展

## (2) 自転効果が卓越する磁化天体における領域間結合

### 現状

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

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

## 今後

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

### （3）惑星-衛星結合

#### 現状

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

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

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

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

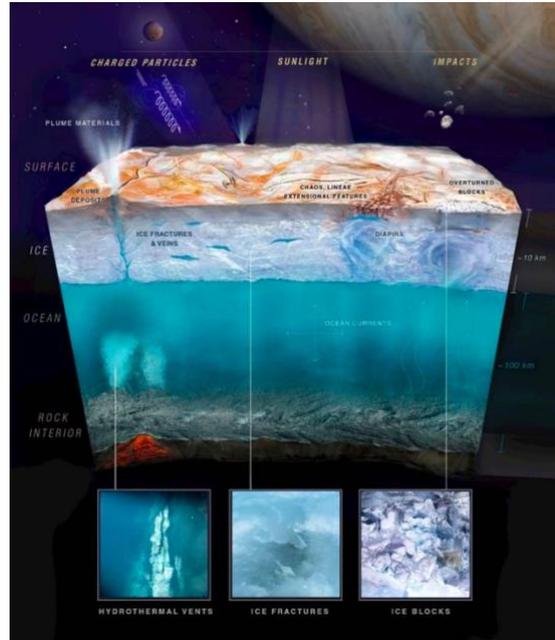


図 2.3.2 木星氷衛星エウロパの内部海、氷地殻、磁気圏間の相互作用

## 今後

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

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

イオと木星電離圏の結合や、エンケラドゥスと土星電離圏の結合は、系外惑星系の中心星と近接惑星の結合もなぞらえられる。汎用的な電磁結合モデルを完成することができれば、直接探査が不可能な系外惑星の磁気圏や電離圏の情報を引き出せる。このモデルで予言したオーロラ電波が、次世代電波干渉計で検出できれば、イオ役の系外惑星における大気や磁場の存在実証になる潜在的インパクトを有する。また、ガニメデ磁気圏と木星磁気圏との相互作用は、恒星風速度がアルヴェン速度を下回る恒星風-磁気圏相互作用と同等の過程であり、ガニメデと類似した水星磁気圏との比較から極小磁気圏の普遍的特性を抽出できる可能性がある。エウロパ・ガニメデ周辺の電磁環境は、開発中の Europa Clipper 探査機や JUICE 探査機の観測対象である。また、ESA の 2050 年代までに実施する L-Class ミッション提案候補として Moons of the giant planets が採択され、タイタン・エンセラダス、エウロパ・ガニメデ等を主眼においた JUICE の後継ミッションも検討が開始されており、多様な氷衛星の理解が今後 30 年で急速に進むと考えられる。

他にもエンケラドゥス周辺のダスティープラズマ自身の詳細特性を Voyage2050 等の将来探査機の直接観測によって明らかにし、その振る舞いを物理モデル化できれば、系外惑星系

や原始惑星系円盤において普遍的に起きている円盤、惑星、主星間の結合過程の理解にも寄与できる。

#### (4) 希薄大気天体における領域間結合

##### 現状

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

##### 今後

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

#### 2.3.2 大気流出過程および惑星大気進化の統一的理解

##### 現状

グローバルな固有磁場を持たない天体である金星、火星、彗星、土星の衛星タイタンなどでは、固有磁場による保護がないために、太陽風が(衛星の場合は惑星磁気圏プラズマが)天体の超高層大気に直接作用し、地球とは異なる特性をもつ電磁気圏境界(プラズマ境界)を形成する。この特異なプラズマ境界は、磁場の向きやイオン組成比などの背景パラメータに応じて多様なプラズマ不安定が競合して選択的に発動し、非線形的に発展することによって形成すると考えられている。また、天体の大気保有量に影響を及ぼすほどの大量の大気の宇宙空間への流出(散逸)が、Pioneer Venus orbiter, Venus Express(金星)、Phobos-2, Mars Express(火星)、Cassini(タイタン)、彗星 67P/CG における Rosetta などの多数の彗星観測などにより報告された。Mars Express, MAVEN, Rosetta, Venus Express, Cassini, あかつきによる固有磁場のない天体の大気・プラズマ環境と Cluster などの地球プラズマ環境ミッションの結果の比較から、磁場のある天体では非熱的散逸が、磁場のない天体では、その惑星の持つ質量に応じて熱的・光化学的散逸もしくは非熱的散逸が量的に卓越することが分かってきた。しかしながら、各メカニズムの量的寄与の変動幅などは不明であり、特

に太陽・太陽風・宇宙線などによる影響について、非熱的散逸のみならず熱的散逸すらモデルと観測とで大きな食い違いがある。また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。これらの実証的解明を通して、惑星や大気を持つ衛星に普遍的な「大気散逸の標準物理モデル」が提案できれば、それを用いて直接探査が不可能な系外惑星の大気散逸を推定できる。この推定は、JWST、WSO-UV等の巨大宇宙望遠鏡による系外惑星大気の光学観測や、SKA等の地上電波干渉計による系外惑星オーロラ電波観測によって観測検証できる可能性がある。

## 今後

金星や火星などの地球型惑星研究の最大の重要性は、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、「惑星大気散逸の標準モデル」とも言うべき、包括的な理論体系を構築していくことが求められる。冥王星における流体力学的散逸（ハイドロダイナミックエスケープ）の観測も、初期太陽系における大気散逸過程を理解する上で重要である。

太陽系内天体の直接観測で得られた散逸過程の知見は、超高層物理学やプラズマ物理学の進展に貢献するとともに、系外惑星の大気進化や多様性の理解、生命が存在可能な惑星（ハビタブル惑星）の成立条件の理解にも寄与する（2.3.6）。上記の大気散逸標準モデルを構築できれば、系外惑星を持つ恒星系において、主星のXUVフラックスや恒星風の電磁エネルギーフラックスに対する磁化・非磁化惑星の大気散逸応答を推定できる可能性がある。JWSTやWSO-UVの赤外・紫外トランジット観測により、系外惑星大気による恒星光の吸収として検出して推定された大気散逸を検証する。また、恒星風電磁エネルギーは系外惑星オーロラを駆動し、大気のジュール加熱と散逸を駆動する。標準モデルでオーロラ加熱と散逸を推定し、SKAによる系外惑星オーロラ強度で観測検証する。

### 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、強い温室効果が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そ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が謎である。現在の大気理論モデルは、恣意的な仮定なしにこれらの惑星で雲を作り出せないのである。雲やエアロゾルは大気の放射エネルギー収支の支配要因であり、これら惑星で得られる知見は地球の気候変動の理解にも大きな影響を与える可能性がある。

大気中の上下方向の物質輸送にも課題がある。たとえば揮発性物質が宇宙空間に散逸するにあたっては、物質が均質圏界面（地球では高度 100 km 付近に位置する）までどう運ばれ、さらにその上の重力分離領域（熱圏）をどのように上向きに拡散するかが重要である。地球大気の均質圏では大規模な大気運動のほか内部重力波の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 Mars Reconnaissance Orbiter、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てきた。2014 年には NASA の火星探査機 Curiosity がメタンを検出し、その起源をめぐる論争は今も続いている。現在は欧州の Trace Gas Orbiter による火星大気の組成・化学、米国の MAVEN による大気散逸/流出過程を探る詳細観測なども展開されている。2018 年 11 月には NASA の InSight が火星に到着し、ランダーを用いた地質学調査を行う予定である。金星では欧州の Venus Express が金星の大気の構造やダイナミクス、物質の循環について理解を大きく前進させてきたが、現在は日本の「あかつき」が、紫外・可視光・中間-近赤外領域のカメラを搭載し、金星大気のダイナミクスや気象の調査を進めている。木星では米国の Galileo、土星では Cassini-Huygens が大きな観測成果を挙げてきた。現在は米国の Juno が

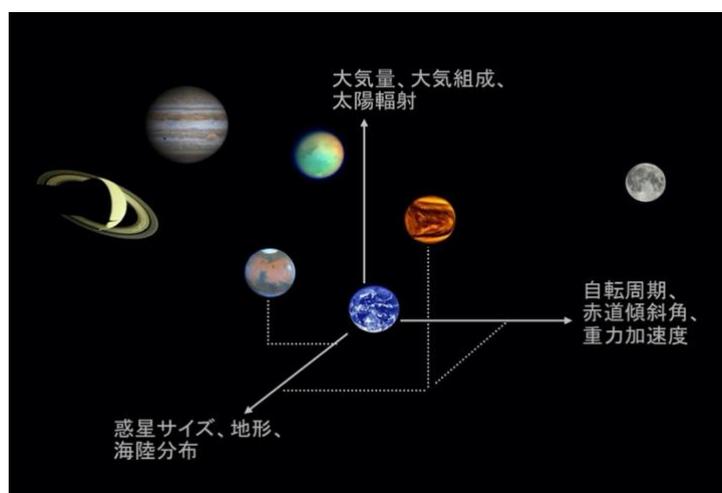


図 2.3.3 多様な惑星大気を多次元パラメータ空間に位置付けるイメージ

2016 年から木星観測を行っており、詳細な画像から物質の輸送・ダイナミクスについて重要な知見が得られつつある。一方、欧州は 2022 年頃に JUICE を打ち上げ、木星とその衛星の大気や磁場、衛星の地表や地下の海などの探査を行う計画である。

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、火星や金星では観測データとモデル出力を統合するデータ同化の試みも始まっている。

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

#### 2.3.4 惑星ダイナモの統一的理解

固有磁場をもつ天体（水星、地球、木星、土星、天王星、海王星、木星の衛星ガニメデなど）の内部には高い電気伝導性をもつ流体領域が存在し、そこでの流体運動がダイナモ作用（磁場を自発的に生成・維持する作用）を駆動している。各天体の固有磁場は様々である。双極子成分が卓越するという点では地球磁場に似ているが、強度が非常に弱いもの（水星）、逆に強度が非常に強いもの（木星）、また四重極子成分が極端に弱いもの（ガニメデ）、ほとんど自転軸対称成分しか観測されないもの（土星）や、自転軸と双極子の方向が全く異なるもの（天王星や海王星）も存在する。また現在は固有磁場をもたないが、かつては活発なダイナモ作用が起こっていたと考えられる天体もある（月や火星）。こうした惑星ダイナモの多様性が何によって、どのように決まるのかを知ることは、ダイナモ素過程の物理の理解を進展させるにとどまらず、惑星科学のさまざまな重要問題を解決するためにも必須である。たとえば固有磁場の有無、その強度や構造は、天体における太陽風との相互作用や大気流出の形態（2.3.1 や 2.3.2）を決定する重要なパラメータでもある。

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

間および場所に限定されてしまい、測定間隔は粗く、観測時間も短い。ダイナモに関連するような天体深部ダイナミクスの時間スケールは短くとも数年以上と予想されるため、深部ダイナモに付随する磁場変動を捉えるためには長期にわたるデータの蓄積が必要である。周回衛星による磁場観測を継続的に計画していく必要がある。

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

惑星ダイナモ作用を解き明かすためのツールとして、回転球殻内の磁気流体力学的ダイナモの数値的研究が1990年代以降進展し、多くの成果を上げてきた。いくつかの惑星磁場については、その空間構造や時間変化などが適当な内部構造や種々の境界条件を仮定した数値モデルを用いてよく再現できることがわかった。これは大型計算機の発達に伴い、大規模な数値計算を高速に実施できるようになって初めて得られた成果である。とくにダイナモの駆動源が天体の冷却に伴う熱対流である場合についてはよく研究され、ダイナモの物理メカニズムが探求されるとともに、モデルパラメータを変化させたときに生成される磁場強度や対流運動の熱輸送効率などがどう変化するかが精査された。後者はダイナモのスケーリング則と呼ばれる。現在実行可能な数値計算のモデルパラメータは、実際の天体における値と数桁以上異なると考えられるため、計算結果と現実の惑星磁場とのあいだの整合性を検討する上で、このスケーリング則の確立はとくに重要な研究課題である。より現実的な数値モデルを可能にするため、より高解像度な数値計算を高速に実施する大型計算機と数値計算法の開発が今後も必要不可欠である（2.5.1で後述）。一方で、大規模計算技術がこれまでと同等に発展し続けたとしても、惑星ダイナモを直接的に模擬するような数値計算が可能になるにはさらに約20年かかるとも予測されている。これを認識し、多角的に個々の問題や目的に応じたアプローチを模索していく必要がある。ダイナモのスケーリング則に関していえば、現在実行可能なモデルパラメータで目的の力学的レジーム（たとえば地球のコアの対流とダイナモ作用）を再現しうるものが近年報告されている。こうした数値計算上の“観測”をもとに近似的に理論・数値計算を展開していくことも有効だろう。直交座標系を用いた局所的な数値計算や液体金属（ナトリウムやガリウム）を用いた室内実験は、現段階のグローバルな数値計算からは言及することが難しい小スケールの物理過程の解明に役立つだろう。惑星ダイナモ作用の源である回転磁気流体の力学的特性は、層流流的か乱流流的かに関わらず、まだ不明の点が多い。磁場と流体運動とがどのように相互作用しているかが、安定に存在できる磁場の形状（双極子型か否か）を規定しているという説もあり、今後さらに追求されるべきだろう。

地球を除く惑星では、一次元的な内部構造モデルすら確立しているとは言い難い。とくに

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

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

### 2.3.5 惑星環境の安定性と進化と分化の理解

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

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

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

する。

金星と火星はそれぞれ、惑星が液体の水を長期にわたって保持する「ハビタブルゾーン」の内側と外側の境界付近に位置すると考えられている。これらの惑星がどのような初期状態から出発し、どのような変遷を経て現在のよ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気量や組成にどう影響しているのか。実行中あるいは提案中の探査計画の多くは、これらの謎の手掛かりを得ようとするものである。

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

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

このような問題を解明するためには、大気組成の詳細な調査に加えて地表や地下の物質分布や物理状態の情報が必要であり、着陸機を含む惑星探査を要する。ただし固体惑星との物質交換に関しては、地表近くの大気微量成分の計測も重要である。たとえば火星では、地殻起源と思われるメタン、あるいは季節サイクルの中で地表を出入りする水蒸気の同位体比が挙げられる。理論面では、大気力学の素過程をきちんと考慮した物質輸送とその気候進化への関与が、今後の課題である。こうして太陽系惑星の比較研究から得られる汎用的な知見を系外惑星の条件にも適用し、惑星の気候形成に関する更なる原理的な理解を目指す。

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

### 2.3.6 系外惑星への拡張・展開

#### 現状

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

すでに 5000 個以上の系外惑星が確認されており、惑星が太陽系だけのものでないことは共通認識となった。そしてこれら系外惑星が太陽系内惑星よりもはるかに多様性に富むこ

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

## 今後

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

具体的には以下のような科学課題に取り組む必要がある。主星からの強い紫外線輻射を仮定した場合、地球と金星にそれぞれ類似した大気をもつ惑星では外圏大気（例えば酸素原子）の拡がりに大きな差が生まれることが予想されている。こうした外圏大気の拡がりを紫外線によるトランジット観測で検出できれば、発見された地球型惑星が地球と似た大気成分をもつかどうか判定できる。そこで、紫外線観測による地球型惑星大気の検出が直近の課題となる。またこうした強紫外線条件下での惑星大気を再現するために、地球や火星、金星の観測結果を広く集約し、異なる紫外線輻射、大気成分、惑星質量などで計算可能なより一般的な惑星大気モデルの構築を目指す。それと並行して、太陽型（G 型）恒星系での地球型惑星の大気観測により、現在の太陽系にある水星、金星、地球、火星で構築された理論の検証が可能となり、太陽系、地球に加え、我々人類の普遍性あるいは特殊性が明らかになるだろう。さらに、強烈な恒星風が惑星環境に与える影響を普遍的に理解しなければならない。非磁化惑星については火星や金星、彗星での知見を集約し、異なる恒星風・惑星大気パラメータで大気流出量を見積もれるようなモデルの構築を目指す。磁気圏をもつ惑星については地球および水星におけるプラズマ環境の知見、すなわち、地球観測で得られる大気流出と磁気圏の関係や、水星観測で得られる強い太陽風と弱い磁気圏の関係が重要となる。これらの観測結果をもとに異なる太陽風パラメータ下にある異なる磁気圏を再現可能な普遍的な磁気圏モデルの構築を目指す。本課題を通じて惑星における生命居住可能性への磁気圏の寄与を明らかにすることは、SGE PSS のこれまでの研究成果を広く集約するという視点においても重要といえる。さらには、様々な年齢の惑星系の観測により、太陽系内で得られる情報に基づいて進められてきた惑星系形成・進化に関する推論を検証し、太陽系・地球環境の進化を明らかにし、生命・人類誕生に求められる条件が明らかになっていくだろう。また、国際情勢としては、系外惑星の直接光学観測を行う欧州次期中型ミッション ARIEL（可視近赤外）の検討が近年急速に進められ、正式に決定しており、日本からの参加が検討されている。一方、紫外線宇宙望遠鏡 WSO-UV に、惑星上層大気の紫外線分光観測を目的として、日本から高感度の分光器である UVSPEX の搭載が決定されたが、2022 年 2 月以降のウクライナ情勢から装置の輸出は困難な状況となり、引き続き情勢を見守っている。2040 年代の打ち

上げが予定される 6m宇宙望遠鏡は紫外線に対応することが想定されており、日本から系外惑星の観測に向けた装置の提供が検討されている。また、光学観測の可能性と限界を、系内惑星を対象に光学観測とその場観測の比較から実証する必要があり、また、光学観測でられる値を正しく解釈するためのシミュレーションの役割も大きい。

## 2.4 宇宙プラズマ・地球惑星大気における物理素過程の理解

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

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

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

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

### 2.4.1 宇宙プラズマ物理 (1) 磁気リコネクション 現状

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

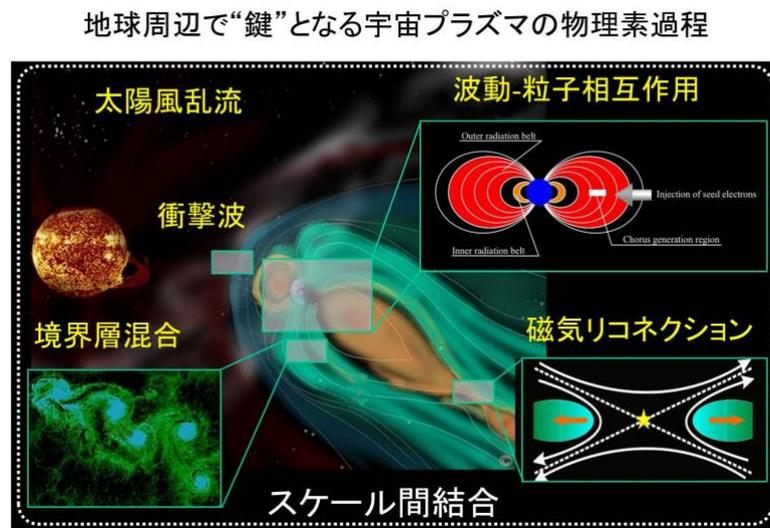


図 2.4.1 スケール間結合

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

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

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

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

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

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

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

## 今後の課題

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

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

## (2) 衝撃波

### 現状

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

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

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

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

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

これまでの観測から地球近傍や惑星間空間の比較的低マッハ数 ( $<10$ ) 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。また、反射イオンが励起する Weibel 不安定性の非線形発展の結果として、衝撃波遷移層で自発的に生成された電流層で磁気リコネクションが誘発されることが新たに明らかになった。古くから磁気リコネクション単体に伴う粒子の加熱・加速の議論は盛んに行われてきたが、今後は衝撃波の文脈における磁気リコネクションの役割を理解することが重要になると考えられる。

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

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

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

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

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

### 今後の課題

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

### (3) 境界層混合

#### 現状

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

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

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

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

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

## 今後の課題

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

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

## (4) プラズマ波動・乱流

### 現状

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

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

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

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

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

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

## 今後の課題

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

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

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

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

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

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

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

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

## 2.4.2 弱電離プラズマ・中性大気の物理

### (1) 弱電離プラズマ

#### 現状

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

地球電離圏は、1924年のアップルトンによる観測・実証以降今日まで様々な研究が行われてきた。地球電離圏内には様々な空間スケールの電子密度構造を有する。たとえば、数100 km程度の中規模構造として、中・低緯度域のプラズマバブルや中規模伝搬性電離圏擾乱（MSTID: Medium-scale Traveling Ionospheric Disturbance）、高緯度域の極冠プラズマパッチなどがある。プラズマバブルは、赤道域で電離圏下部の低密度プラズマが局所的に高高度まで持ち上がる現象である。電子密度の微小擾乱中を横切って流れる重力ドリフト起源の電流を連続にするため分極電場が生じ、その結果起こる Rayleigh-Taylor 不安定性によって形成されると考えられている。一方、電離圏 F 領域を伝搬する電子密度の波状構造である MSTID は、日本上空など主として中緯度域で頻りに観測される。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 の性質を説明できるものの、線形理論の範疇では不安定性の成長率が小さすぎ、観測事実を定量的には説明できていない。プラズマバブルや MSTID などの中規模構造の内部には、さらに小さい空間スケールの密度擾乱（イレギュラリティ）が存在することがレーダー・衛星・ロケットなどの観測で明らかになっている。同様の構造は、極冠プラズマパッチの近傍においても観測されており、電離圏 F 領域に存在する中規模電子密度構造の内部・近傍には、微小スケールの密度擾乱が緯度にかかわらず必然的に存在することを意味している。プラズマパッチ近傍のイレギュラリティも、電子密度の微小擾乱中を流れる水平電流の連続性を保つ分極電場が擾乱を増幅することによって生成されていると考えられている。このプロセスは、Gradient-drift 不安定性として知られているが、根源的なメカニズムはプラズマバブルや MSTID の生成のプロセスと共通である。つまり、電離圏内の電子密度勾配中を流れる電流が電子密度擾乱を横切ることによって生じる分極電場がプラズマの構造化を担っており、広い意味において弱電離プラズマ中に生じる交換型不安定性であると言えることができる。このように異なる緯度の電離圏で観測される異なった構造が、共通の普遍的なプラズマ不安定性によって形成されていることは特筆に値する。

一方で、実験室においても弱電離プラズマを用いた研究は古くから行われてきた。近年、化学推進のかわりに、衛星内でイオン化されたキセノンなどの重イオンを電氣的に加速して放出することにより宇宙空間中で推力を得る電気推進機関が小惑星探査機「はやぶさ」や「はやぶさ2」などにおいて実用化されており、これらの電気推進機関に関連して、イオン生成における弱電離プラズマ素過程の議論も進められている。電気推進機関におけるプラズマは、スケールリング（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なく中性ガスの挙動、さらに中性ガス電離によるプラズマ生成について考慮する必要がある。
2. 粒子間衝突が無視できない。特に電子中性粒子の非弾性衝突は、プラズマ生成を考慮する上で本質的に重要である。電子・イオン衝突も無視できない。
3. 推進機関設計のためには、プラズマの様々な物理スケール（ラーマ半径等）に加えて機器のサイズ（口径等）を考慮する必要がある。

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

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

## 今後の課題

先に述べたように、電離圏の異なる緯度において観測される異なった構造が、共通の普遍的なプラズマ不安定性によって形成されていることがこれまでの研究により明らかとなってきた。但し、MSTID 生成の鍵を握ると考えられている Perkins 不安定性、ポ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、太陽の彩層にも電離圏と同じ弱電離プラズマが存在し、彩層プラズマ中、もしくは彩層からコロナへ繋がる領域において、様々な物理現象（プロミネンスなど）が観測されている。ここで述べた弱電離プラズマ中の交換型不安定性の普遍的意義を明らかにするためには、太陽彩層現象と電離圏現象の間のアナロジー研究を積極的に行うなどの取り組みが必要である。

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

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

## （２）大気の微細構造

### 現状

20 世紀後半の種々の計測技術の進歩により大気圏の構造や温度、風速場などの情報は飛躍的に豊富になった。地上から熱圏下部の高度約 100 km までの大気については、ロケットや気球などの直接観測および衛星やレーダーなどの間接計測で種々のスケールの大気構造が明らかになり、大気波動がこの領域で運動量やエネルギーの輸送に果たす役割が明らかになってきた。これらの波動には、地球規模の大気潮汐波、プラネタリ波などから気候モデルではグリッド内の構造となるような水平 10 km スケールくらいに至る大気重力波などが含まれる。ところで、高度 100 km の大気で物質やエネルギーの鉛直拡散で重要な働きをす

る乱流についてはその観測的、理論的研究はどちらも大幅に遅れている。対流不安定、シア不安定などで生成される種々のスケールの乱流で満たされている大気中では、上方あるいは下方への物質の拡散については、熱圏下部までは乱流による渦拡散が支配的であり、熱圏での熱運動による分子拡散とは対照的であり、また大気波動がエネルギーや運動量の輸送には効果的だが鉛直物質輸送には効かないことも好対照である。(全球平均の)熱圏大気質量密度には顕著な半年周期の変動があることが知られているが、この変動を作り出す機構はわかっていない。数値モデルによる計算では、観測から得られた大気重力波の半年周期の変動に基づき、熱圏下部での渦拡散に半年周期の変動を入れると、上記の質量密度の半年周期変動が再現できる。ただし、熱圏下部での渦拡散は温度、風速、組成比などにも影響を及ぼすことから、(渦拡散変動を考慮した)数値モデル計算によってすべての熱圏パラメータを観測と整合的(定量的)に再現することは現状では不可能と考えられる。

### 今後の課題

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

取り組むべき課題を以下に述べる：

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

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

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

地球大気における乱流の実態解明が惑星大気や太陽面における乱流の役割の理解においても重要であることは明らかであろう。例えば、火星大気の渦拡散は地球大気のそれに比べて極めて大きいと考えられている。どのような物理機構によって、このような大きな渦拡散

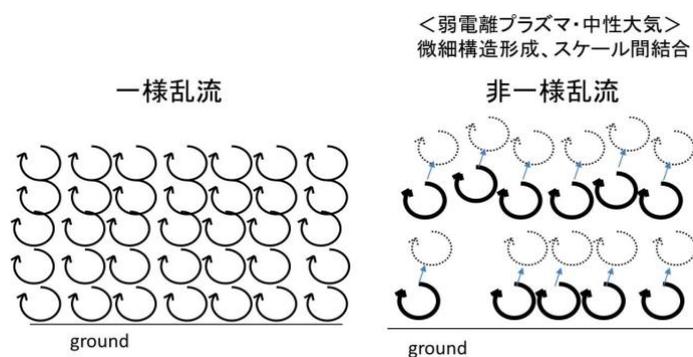


図 2.4.2 非一様乱流

が生成・維持されているのかを理解するためには、地球大気での乱流の精密計測、理論構築が不可欠である。

## 2.5 地球および月・惑星の電磁場変動、古磁場環境の解明

### 2.5.1 地磁気変動 -現在、過去、そして未来予測

#### (1) 現在の地球磁場変動に関する観測研究

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

#### (ア) 地球磁場観測衛星

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

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

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

### (イ) 地上および海底での連続観測

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

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

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

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

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

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

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

## (2) 過去の地磁気変動の解明とその利用、未来予測

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

### (ア) 数十～数千年スケールの変動

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

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

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

今後の研究目標は以下の 7 つに大別されよう。

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

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

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

### (イ) 数万～数百万年スケールの変動

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

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

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

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

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

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

### (ウ) 数千万～数十億年スケールの変動

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

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

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

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

### (エ) 地球深部科学、地磁気ダイナモシミュレーション

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

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

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

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

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

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

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

### （オ）年代学への応用

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

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

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

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

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

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

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

#### （カ）地磁気変動と気候・環境の関係

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

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

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

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

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

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

### （3）未来予測

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

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

機器観測に基づく詳細な地磁気データの時系列の長さが、コア対流の時間スケール（千年程度）に比べて短いという本質的な困難はある。しかし、長期予測、短期予測共に、データ同化アルゴリズムを用いたより客観的基準に基づくモデル精度の向上が今後重要になると考えられる。

## 2.5.2 月・惑星内部に関する電磁気学的研究

惑星や衛星の内部構造およびダイナミクスを理解することは、固体天体の成因、進化を解

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

### （１）月・惑星・小惑星の磁気記録

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

惑星については、これまでに Mars Global Surveyor によって全球的な火星磁気異常マップが作成されている。また、Mariner10・MESSENGER のフライバイ観測によって現在の水星には主磁場が存在することが明らかとなっている。さらに、MESSENGER による観測で水星にも磁気異常が存在することが確認された。今後、国際水星探査計画 BepiColombo の Mercury Planetary Orbiter および Mercury Magnetospheric Orbiter 「みお」による全球的な観測から水星の磁場、磁気異常の詳細が明らかになり、水星コアの状態やダイナモ作用、熱史に関する理解が進むことが期待される。小惑星については、コンドライトなどの始原的隕石の磁気分析から、太陽系形成初期における、原始惑星系円盤内の磁場について時間・空間分布の復元研究が行われている。はやぶさ2により、小惑星リュウグウから未変成・未風化の始原的岩石の微粒子が持ち帰られ、今後は OSIRIS-Rex により小惑星ベンヌから始原的岩石が持ち帰られる予定である。このような計画に対して、SGEPSS の固体物質のグループとして積極的に参画していく必要がある。高空間分解能の磁気顕微鏡として、東北大学に磁気インピーダンス（MI）磁気顕微鏡が現有・活用されているが、求められるマイクロメートルサイズの古地磁気学的研究には分解能が足りない。小惑星のダイナモ磁場の有無や、宇宙風化における磁場の影響との関係に決着を付けるために、高空間分解能の国産の走査型 SQUID 磁気顕微鏡の開発をさらに進め、積極的に利用することが望まれる。さらに、ナノスケールの磁場マッピングを可能とする技術として注目されている NV ダイヤモンド磁気顕微鏡が世界的に開発が進んでいるが、これら新技術の積極的導入による先端的研究の推進も重要である。惑星の多様性を考慮したダイナモシミュレーションを実施するとともに、このような室内実験を推進し、探査機や天文観測により太陽系惑星、系外惑星について得られる磁気シグナルと合わせることで、宇宙における惑星固有磁場の役割を解明できると期待される。

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

## （2）惑星の古磁場・ダイナモ

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

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

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

## （3）惑星・衛星内部構造

月や固体惑星における電磁探査により推定されるグローバルな惑星内部電気伝導度構造は、天体の起源と進化を議論する要素となる。天体外部を起源とする磁場変動と、天体内部に誘導された電流による電磁場変動の関係により、電気伝導度構造が推定できる。月が地球磁気圏尾部に位置する時の磁場や、水星周辺の1および1/2水星年の磁場変動から、それぞれのコアサイズが推定された。コアのサイズの電磁氣的推定は、重力や慣性モーメントから推定されるものとは独立の情報を与えるため、機会があるごとに積極的に取り組むべき課

題である。また、数時間~数十時間の磁場変動から、天体のマントル電気伝導度構造に関する情報が得られる。2026年に水星に到着する BepiColombo による観測による新たな成果が期待される。

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

## 2.6 電磁場観測による地球内部の状態や変動現象の理解

### 2.6.1 地下構造の解明

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

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

#### (1) 地震・火山現象の発生場としての地下構造の解明

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

#### (ア) 地震の発生場

(研究の目的と意義)

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

(長期目標)

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

(現状での到達点)

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

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

(次のステップ)

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

## (イ) 火山活動の発生場

(研究の目的と意義)

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

(長期目標)

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

(現状での到達点)

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

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

(次のステップ)

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

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

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

(概要・研究目的・意義)

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

(最終目標)

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

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

(近年の進展)

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

(次のステップ)

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

## (2) マントル構造の解明

(研究の目的と意義)

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

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

(長期 (最終) 目標)

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

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

（現時点での到達点）

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

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

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

（次のステップ）

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

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

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

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

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

### （3）構造推定に関する研究に共通する課題

（研究の目的と意義）

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

（長期目標）

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

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

（現状での到達点）

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

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

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

(次のステップ)

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

#### (4) 岩石・鉱物実験

(概要・研究目的・意義)

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

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

(長期目標)

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

(現状での到達点)

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

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

(次のステップ)

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

## 2.6.2 モニタリング

### (1) 地殻活動に伴う電磁場変動

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

#### (ア) 地殻応力変動に起因する現象

(研究の目的と意義)

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

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

(長期目標)

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

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

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

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

(現状での到達点)

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

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

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

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

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

（次のステップ）

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

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

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

## （イ）火山活動に起因する現象

（研究の目的と意義、現状での到達点）

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

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

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

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

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

（長期目標、次のステップ）

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

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

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

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

特定することが目指すべき方向である。

## (2) 地下構造の時間変化

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

### (ア) 自然の電磁場変動を信号源としたモニタリング

（研究の目的と意義）

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

（長期目標）

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

（近年の進展）

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

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

（次のステップ）

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

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

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

### **(イ) 人工信号源を利用したモニタリング**

(研究の目的と意義)

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

(長期目標)

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

(現状での到達点)

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

(次のステップ)

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

### **(3) 津波現象のリアルタイム・モニタリング**

(研究の目的と意義)

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

とが本研究分野の目的である。

(長期目標)

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

(現状での到達点)

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

(次のステップ)

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

## 2.6.3 資源探査

### (1) 地熱資源

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

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

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

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

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

## （2）鉱物資源

（研究の目的と意義）

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

（長期目標）

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

（現状での到達点）

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

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

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

（次のステップ）

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

## 2.7 岩石・堆積物が担う磁化の物理の解明とその応用

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

### 2.7.1 岩石磁気学—理論的・実験的研究

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

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

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

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

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

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

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

## 2.7.2 岩石磁気学・古地磁気学の応用

### (1) テクトニクス研究

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

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

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

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

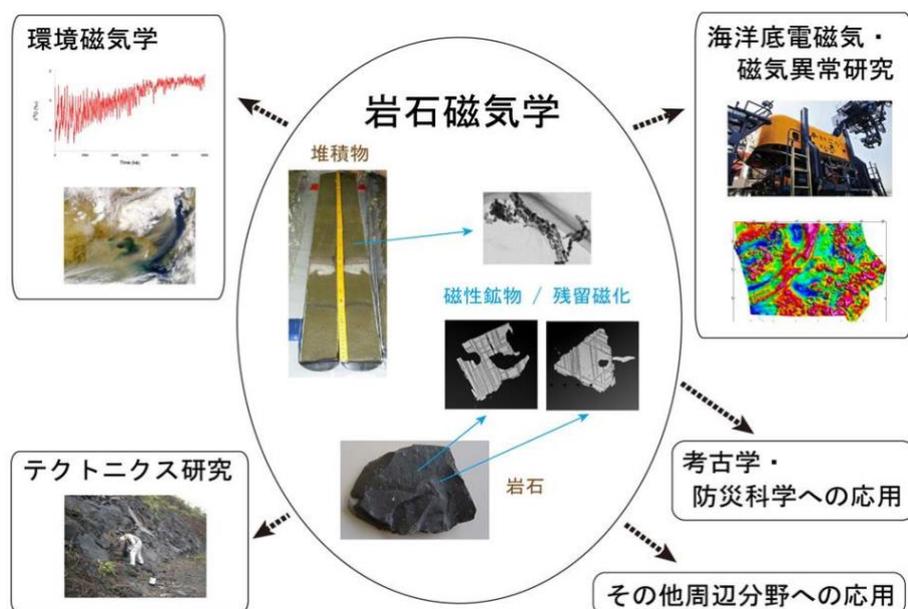


図 2.7 岩石磁気学とその周辺分野への広がり

## (2) 海洋底磁気異常研究

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

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

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

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

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

## (3) 環境磁気学—古気候・古環境変動、環境モニタリング

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

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

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

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

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

そこで最近では他の物性、特に磁気特性を応用した鉄の形態を特定する方法が試みられている。しかしながら、海水中に存在する可能性のある鉄水酸化物（フェリハイドライト、ナノサイズのゲーサイト）や鉄硫化物（グレイサイト）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る。技術面としては、氷（磁化の弱い試料）から磁性鉱物を検出する技術、すなわち、氷に含まれるダスト・火山灰・微少隕石などを「非破壊」で検出可能な技術の開発などが望まれる。様々な岩石磁気パラメータを用いて堆積物などに含まれる複数の起源による磁性鉱物を主成分解析などによって unmixing する試みがなされているが、中でも reversal process を扱った First Order Reversal Curve (FORC) の発展が著しい。しかしながら、その解釈は一意的で無い場合も多く、さらなる発展が望まれる部分である。

#### (4) 考古学への応用

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

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

#### (5) 防災科学への応用

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

## (6) 法科学への応用

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

## 2.8 太陽地球系と地球内部を結ぶ科学課題

### 2.8.1 地磁気擾乱に伴う日本での地中誘導電流の解明

(概要・研究目的・意義)

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

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

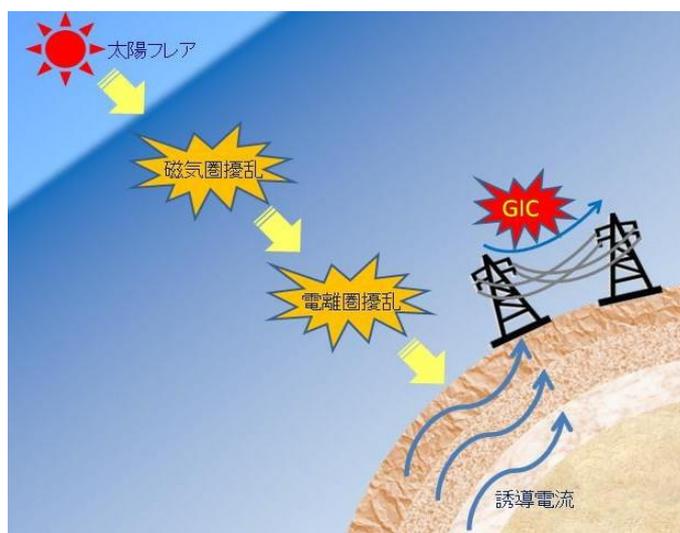


図 2.8.1 地磁気急変現象による地中誘導電流（GIC）

(最終目標)

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

(近年の進展)

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

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

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

(次のステップ)

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

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

## 2.8.2 地圏を含むグローバルサーキットモデルの再構築

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

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

これまで行われてきたグローバルサーキットの研究によって、この電流回路における充電機能を担うのは積乱雲の中で起きている電荷分離であり、それが大局的にみると上向き電流を発生させていると考えられている。雷雲の上空は、宇宙線によって生じたイオンが、雷雲中の電荷が作る上向き電場によって移動することで上向き電流を形成する。一方雷雲の下方では、帯電した降雨粒子やコロナ放電、落雷によって、やはり上向きの電流が地表に接続される。雷雲上空の電流が電離圏下部まで達すると、電流は水平方向に拡散し全球の晴天域で下向きの電流として地表まで到達し、先の雷雲下方の上向き電流と地圏を介して接

続する。晴天域での下向き電場は 100V/m 程度だが、その値は、全球で発生した電力の総和として、全ての晴天域で同期した形で日変化を示すとされている。Wilson の提唱後、1970-80 年代頃には数値モデルとして精密化が進み、近年では衛星による雷・雲・降水観測等に基づいて、対流圏の発電装置である雷雲活動の分布や強度の時間変動について、より現実に即した入力情報が使われるようになりつつある。しかしながら、回路上端の電離圏・磁気圏と下端の地圏については完全導体を仮定した計算が主流であり、特に、地圏の電気伝導度の水平および立体的な構造については全く考慮されていない。2.6 節に述べたように、地圏の電気伝導度は海洋と地殻、また地殻・マンツルの組成と状態による水平構造を持ち、さらに鉛直方向にも様々な空間スケールで差異が存在する。雷活動の時間変動スケールは、季節変動や 1 日変動など比較的長期のものから、雷雲寿命の数時間さらには数分以下の短期のものまであり、それが地域や地方時で複雑に変化する。さらに、電離圏・磁気圏電流にも様々な時間スケールの変動が存在し、それによって生じた電磁場が地圏に電流を誘起する効果も考慮が必要になる。これらを全てグローバルサーキットの数値モデルに取り入れる段階には未だ至っておらず、地圏・大気圏・電離圏・磁気圏の電氣的結合過程の理解に繋がっていないというのが現状である。

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

### 2.8.3 人工衛星による高精度地磁気観測から解明できる現象

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

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

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

衛星磁場を用いて沿磁力線電流を調べる際には、観測される磁場の時間変化を衛星の軌道に沿った空間変化であると仮定するため、単一衛星のデータからでは、沿磁力線電流が時間的に変動しないという前提のもとに電流密度の導出が行われていた。また、衛星軌道に垂直な方向の空間変化を観測することができないために、電流層の一様性を仮定する必要があった。2013 年に打ち上げられた低高度極軌道衛星群である Swarm は、3 機の衛星が編隊飛行をすることにより、電流層近傍の磁場の空間変動を直接観測することが可能になった。これにより、電流密度が精度よく求まるだけでなく、時間変化と空間変化との識別もある程

度可能になっている。近年では、Cluster、THEMIS、MMS など高高度で磁気圏を高精度観測する衛星と Swarm との同時観測イベントの解析によって、磁気圏を流れるグローバルな電流系や、磁気圏におけるエネルギーの流れと電離圏の応答に関する研究が盛んに行われている。磁気圏内の様々な場所における編隊飛行衛星群による磁場観測データを、地上観測網の磁場データとも組み合わせることにより、磁気圏・電離圏電流系の 3 次元的な空間構造や、そのダイナミックな変動の解明が可能になると考えられる。

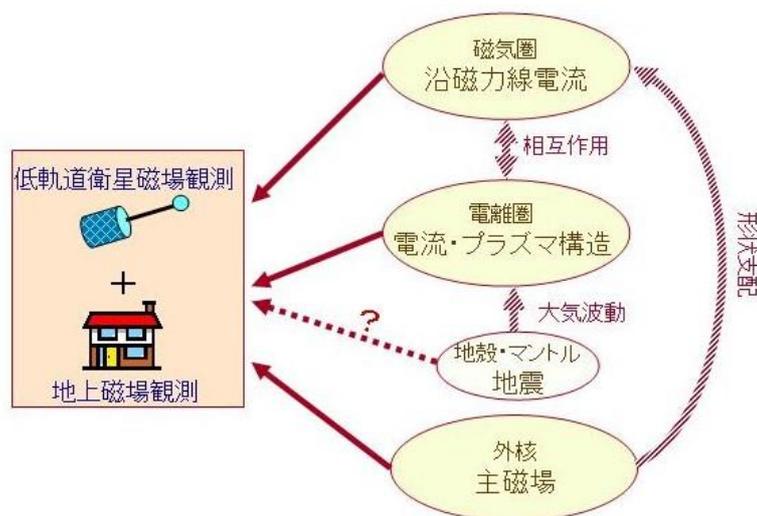


図 2.8.2 地上と衛星による地磁気観測が扱う科学課題

## (2) 電離圏現象の研究

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

## (3) 地球コア起源の主磁場の研究とその活用

2.5.1(1) 節にも述べたように、過去 20 年以上に渡り低軌道地球周回衛星による膨大な量の地球磁場観測データが蓄積された。極めて稠密で一様に分布した衛星データが得られたことで、起源の異なる磁場 (図 2.8.2 参照) の分離が高精度化し、その成果としてコアに由来する主磁場の時空間分解能も著しく向上した。主磁場グローバルモデリングの目覚ましい進歩の例として、空間的には 18 次までの球面調和関数、時間的には半年間隔の 4 次 B スプ

ラインで展開された主磁場モデルの登場が挙げられる。同スプラインの採用は、主磁場永年加速（2階時間微分）の適切な表現を念頭に置いたものであり、これにより永年加速の時空間分布までも議論の対象となった。

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

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

#### （4）今後に向けて

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

地上の多点磁場観測は、その歴史的継続期間の長さ、定点観測による時間変動の信頼性という点で貴重なデータをもたらしている（5.2.1節）ものの、空間的な疎らさと偏りは克服できない。衛星観測はこれとちょうど相補的な関係にあり、両者による観測を平行して継続していくことは地球磁場の観測的研究において非常に重要な意味を持つ。衛星によるその場観測のデータが磁気圏・電離圏の諸現象を直接観測できる唯一の手段であること、主磁場変動は数十年から数百年といった長周期にもピークを持っていることから、衛星磁場観測の継続の有効性は明らかである。中国の CSES やフランスの NanoMagsat など、既に

各国で新しい低軌道地球周回衛星の開発と運用が進められているが、当学会でも多くの分野にまたがる研究者が協力し、継続的な低軌道地球周回衛星の打ち上げの実現に貢献し、地上観測と組み合わせる解析をしていく必要がある。

#### 2.8.4 地震に伴う変動の理解

(研究の目的と意義)

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

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

(長期目標)

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

(現状での到達点)

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

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

複数観測点における地磁気データのディープラーニングにより、データに含まれる異常を同定する手法の開発が進められてきた。断層運動の開始に伴う異常な地磁気変化の瞬時の同定を通じた警報の発生への応用が目指されている。

(次のステップ)

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

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

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

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