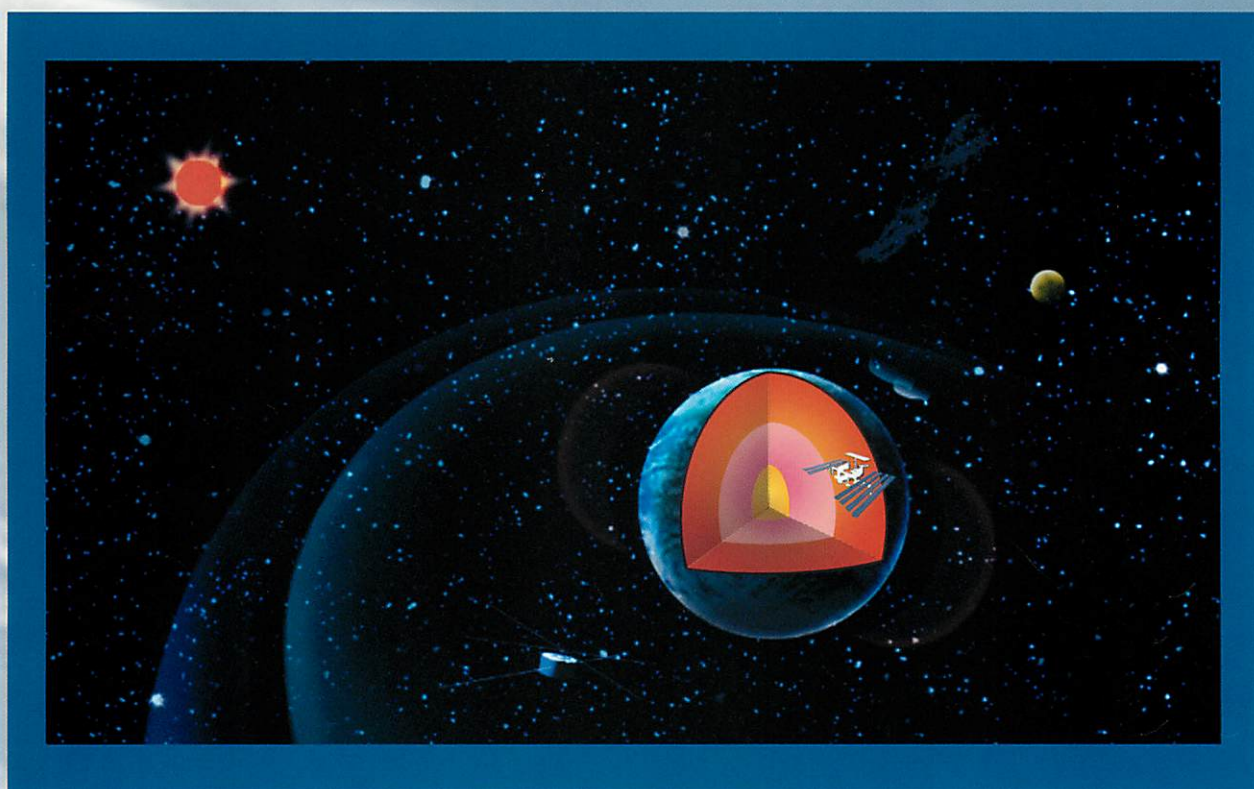


# 21世紀の地球電磁気学



平成16年 8 月

日本学術会議  
地球電磁気学研究連絡委員会

# 21 世紀の地球電磁気学

## まとめ

第 18 期および第 19 期地球電磁気学研究連絡委員会は、平成 3 年度に策定された将来計画を基に過去 10 年間の研究実績の評価と、21 世紀前半を見通した新たな将来計画の策定を行った。策定にあたっては、コミュニティとしての必要性、他分野との連携、国際プロジェクトとの関連、日本の計画としてのユニークさ、アジアにおける我が国の役割、大型機器の全体の目標の中での位置づけ、人材育成と一般社会への啓蒙という視点を重視した。この報告書はこれら委員会での評価・策定作業の結果をとりまとめたもので、特に推進すべき研究課題、実現すべき研究教育体制として以下の項目があると結論した。

### (1) 複合システムとしての太陽地球系の理解

地球周辺の宇宙空間は、磁気圏、電離圏、上層大気が非線形に結合した開放系である。その領域間結合を太陽活動・太陽風の変動の下にある非一様・非定常な複合系のふるまいとして理解するための研究条件が、最近 10 年ほどの間の極域を網羅する電離圏観測やグローバルな地磁気ネットワークの整備、衛星からのオーロラやプラズマ圏、内部磁気圏の撮像観測の開始とともに徐々に整いつつある。それらの観測結果は太陽・太陽風観測結果と合わせて、複合システムとしての視点から理解する必要がある。そのためには、コンピュータシミュレーションと衛星・地上の多種・多様な観測データを組み合わせた研究手法を確立するとともに、太陽・太陽風観測装置、グローバル地磁気ネットワークや南極における大型レーダーなどの設備の新設・更なる拡充が必要である。海外の拠点観測は、日本の独自性を発揮しつつ、世界の中での国際分担・国際協力の枠組みの中で推進する必要がある。

### (2) 普遍的プロセスとしての宇宙プラズマ現象の解明

非一様・非定常な複合系としての地球磁気圏を理解するためには、磁気リコネクションや衝撃波、沿磁力線電場の発生領域、磁気圏境界層および内部磁気圏などにおけるプラズマ素過程の理解が重要である。これらの領域では、電子とイオンのダイナミクスの違いが深く関わる「多重スケール間結合」が重要な役割を果たしており、それが時には巨視的構造変化をもたらし、さらに粒子加速を引き起こすということが最近の研究から示唆されている。この「多重スケール間結合」は無衝突プラズマの本質的な物性であり、その理解は単に地球磁気圏に留まらず、宇宙における普遍的プロセスとして、太陽物理学や高エネルギー天文学との学際領域における粒子加速の研究にも貢献するものと期待される。そのためには、大規模 3 次元数値シミュレーション、ハイブリッド型や粒子コードのシミュレーション技法を用いた研究を更に推進するとともに、国際的かつ長期的な視点に立った衛星計画と機動性のある小型衛星ミッションを推進する必要がある。

### (3) 普遍性の理解と新展開を追求する惑星の磁気圏と大気の研究

それぞれの惑星磁気圏と大気には、惑星固有の性質に起因して地球にはない現象が現れる。また類似的な現象であっても、異なる境界条件や構造の中で統一的に理解することは、新しい学問的展開を促すものと期待され、現在我が国で計画されている月周辺のプラズマ環境、火星における上層大気・残留磁場と太陽風の相互作用、金星・火星の上層大気・電離圏、水星磁気圏構造探査を推進する必要がある。また、大気科学を現在の地球大気科学から、より普遍的な惑星大気科学へと発展させ、地球大気をさらに深く理解することが重要である。

### (4) 境界領域としての中間圏・熱圏下部における物理化学過程の解明

対流圏・成層圏に比べて、中間圏・熱圏下部(MLT領域)では大気密度が薄くなるため、人工起源の微量な物質が注入された場合に、低高度に比べて相対的には指数関数的に大きなインパクトを受けうる。一方、この領域では、太陽活動の影響も現れている。下層からの大気波動や宇宙空間からのエネルギー流入の影響により、MLT領域では風速・温度構造は時として大きく乱され、背景場は定常的ではなくなっている。また、この領域の化学物質分布は光化学と力学過程の双方の影響を受けるばかりでなく、惑星間空間から飛来する流星による間欠的な物質フラックス増加、ならびに人工飛翔体の再突入による異物質の流入によって外因擾乱を受けている。このように、地球環境と惑星間宇宙の境界領域にあたる重要かつ興味深い大気層であり、グローバルな地球環境変化および、未解明の現象発見の両視点から研究を推進する必要がある。

### (5) 大気圏観測の充実と学際分野研究の推進

大気科学研究の更なる発展のためには、国内観測のネットワーク化とリアルタイム化を推進するとともに、南極での大型大気レーダーの設置、アジアの赤道地帯を中心とする観測の充実と国際協同観測ネットワークの構築が必要である。また、数年の準備期間で実施できる小型衛星観測の題材を追求するとともに、長期間にわたって安定して地球環境をモニターするための新しい観測手法を開発することが重要である。対流圏界面および中間圏界面の上下では、物理化学過程や様々な大気特性が大きく遷移しており、これらの境界領域の特性を相互比較する境界領域の科学、対流圏の積雲対流、成層圏雲(PSC)および夜光雲(NLC)の形態や生成メカニズムを解明する雲物理、雷放電の発生原因を解明し、宇宙線や太陽活動周期との相関、放電による中層大気の大気組成変動、電磁パルスがグローバル電流系に与える影響を研究する雷の科学等の学際分野研究を推進し、大気圏全体を俯瞰する視点を得る必要がある。

### (6) 衛星による地球および惑星の磁場観測とダイナモの研究

地球や惑星の固有磁場の起源については、3次元MHDダイナモの大規模な数値計算を実施することが可能になり、永年変化や双極子磁場の逆転が計算機上で実現されるようになった。しかし、現実の地球コアに対するパラメータを取り入れることはまだ困難であり、超並列計算機などを利用してさらに大規模な数値計算を推し進める必要がある。これと平行して、惑星磁場の分布や地球磁場の詳細な観測結果に即したダイナモモデルの構築や地



地球惑星内部構造とそのダイナミクスの解明が重要である。変動する地球磁場の精密かつグローバルな空間分布を得るため、日本、米国、EU 諸国が交互に主導して、5年ごとの衛星観測を実施することが強く望まれる。地球外天体の直接磁場観測では、今後も様々な探査機が国内外で打ち上げられるので、我が国の研究者が積極的に参加できる環境を整える必要がある。

#### (7) 地上および海底における長期精密観測の実施

地球磁場の時間変化を解明するためには、100年以上のデータの積み重ねを持つ地上観測のさらなる充実が重要となる。地磁気観測所が行っている世界最高水準の地磁気観測データは、世界資料センター(WDC)等を集積・公開され、またDst指数などの導出にも使われ、高い評価を得ている。また衛星観測データの地上校正点としても重要な役割を担っている。今後も、高精度を長期にわたって保証できる観測体制を維持する必要がある。圧磁気に伴う全磁力変化を正確に見積もるには、地殻応力起源以外の変化を除去する必要がある。日本列島標準磁場モデルの構築が求められる。そのためには、既設の観測点及び新規に必要なとされる観測点をネットワーク化し、観測の高度化を図る必要がある。海底・海域での地磁気観測点増設も、グローバルな情報を高精度に得るためには欠かせない。また、海底ケーブルや陸上の長基線観測を含めた国際的グローバル電場観測は、上・中部マントルの電気伝導度構造の推定、マントル最深部の不均質構造や、核・マントル境界付近の磁場の状態を考える上で磁場観測と同様に重要である。

#### (8) 海底掘削等による地球磁場および環境変動の解明

堆積物資料を用いた地球磁場や環境変動の高分解能な研究が近年飛躍的に発展した。これを更に発展させるためには、国際的協力の下、地球上の広い範囲から海底掘削船等により系統的に堆積物を採取する必要がある。また、岩石磁気測定においては、各地で得られたVGPを比較するという従来の手法から、各地で得られた同時期のサンプルから磁場変動を同時に解析するという段階に飛躍する必要がある。

#### (9) 地震火山活動場の性質解明と活動モニタリングの実施

内陸地震発生メカニズムの解明、および、地震予知研究の観点からは、活断層を含む活構造地域のMT観測による地殻構造探査はきわめて重要である。地殻深部までの精密比抵抗構造の把握は、地殻内流体(水)の存在に関する重要な情報をもたらすと考えられている。また、活動的火山のマグマを探査するためには、浅部に存在する高電気伝導度の層を突き抜けて地下深部をイメージングできる手法の開発が不可欠である。磁氣的構造探査も重要で、各種飛行体を用いた全磁力マッピングなどをさらに精力的に行うべきである。

#### (10) 研究教育体制およびアウトリーチ活動の改善

地球電磁気学研究に必要な基礎知識を身につけるための当該分野固有の教育課程の確立を中学、高校においても目指す必要がある。大学院教育では、広く地球・宇宙科学の知識を身につけさせるためのカリキュラムを導入する必要がある。また、地球電磁気学では国際共同研究が本質的であるため、国際交流を進めるとともに、発展途上国の学生・若手研

究者の受け入れも同様に重視する必要がある。我が国には、アジアにおけるリーダーシップが強く期待されているが、各国における独自の研究開発を支援するためには、専門の研究支援組織による国際対応が必要である。研究分野に関しては、地球電磁気学が地球科学全体の中で果たす責務を明確にするとともに、広い視野で多分野との研究交流を行い、学際分野の課題発掘を常に心がける必要がある。広報・啓蒙活動においては、地道な地球電磁気・太陽地球系科学研究の重要性を主張することが重要であり、ホームページ、公開実験、体験学習、学会での特別セッション等を活用することが効果的である。

以下本文において、21世紀の地球電磁気学の課題と推進方策につき、より詳細な提言を行う。

## 21 世紀の地球電磁気学

### 目次

第 1 章	はじめに	p.1
1. 1.	地球電磁気学の特徴	
1. 2.	将来計画策定の考え方	
第 2 章	宇宙空間研究	p.4
2. 1.	現状認識	
2. 2.	今後 10 年間の重要課題	
2. 3.	研究推進のための施策	
2. 4.	前回の策定の評価	
第 3 章	大気圏研究	p.10
3. 1.	現状認識	
3. 2.	地球環境変化に関する取り組み	
3. 3.	MLT 領域の物理化学過程	
3. 4.	学際分野の研究課題の推進	
3. 5.	惑星大気	
3. 6.	大気圏の観測	
第 4 章	固体地球研究	p.15
4. 1.	現状認識	
4. 2.	地球惑星磁場と地球惑星内部の状態	
4. 3.	地球磁場変動史と地球の進化	
4. 4.	地震火山活動場の性質と活動モニタリング	
4. 5.	具体的施策を必要とする課題	
第 5 章	研究教育体制およびアウトリーチ	p.26
	執筆者リスト	p.28

## 第1章 はじめに

### 1. 1. 地球電磁気学の特徴

地球電磁気学の源流は18世紀にまで遡ることができ、地球に固有の磁場の変動および地球周辺の空間に流れる電流がつくる磁場変動の解明を目的とした学問分野である。20世紀の中頃から地球電磁気学は急速な発展をとげ、今日では太陽から地球中心部まで、電磁波の伝播から地質学的年代スケールまで、極めて広範な時空間スケールの問題を対象とするに至っている。

このような変遷をとげつつ、地球電磁気学が今なお一つの学問分野として存在するのは、「磁場」というキーワードのもつ重要性による。すなわち、地球磁場の起原は地球のコア（核）やマントルのダイナミクスを反映したものであり、この地球磁場と大気の大気圏の存在こそが地球という惑星における生物圏の形成を可能にしているからである。また、地球磁場変動のうち地球外の電流による変動は、太陽・惑星間空間から地球の磁気圏および電離圏にいたるプラズマ過程によるものであり、さらにその影響は超高層大気や中層大気現象にまで及んでいる。地球内部の現象としてもっとも顕著な地震や火山活動にも、磁場の変化がともない、地球誕生以来の地球の活動を知る上で、岩石に記録された磁気の情報を取り出すことも有効な手段の一つとなっている。このように、地球を含む太陽系全体の環境を対象に、さまざまな時空間スケールの現象を「磁場」によって研究する学問分野が地球電磁気学である。

もう一つの特徴は、地球電磁気学が扱う各領域（惑星間空間、磁気圏、電離圏、大気圏、地球内部）間だけでなく、関連する他の学問分野との活発な交流が行われているということである。例えば、中・超高層大気の研究は大気化学や大気・海洋物理学との、固体地球の研究では地震学・測地学・火山学・地質学などとの共同研究が必須である。また、地球環境問題、自然災害予知、宇宙天気予報といった、応用を含む学際領域への積極的参加も要請されている。21世紀において、地球電磁気学を含む地球科学分野の統合化を進める必要がある。

地球電磁気学は、古くから国際協力を積極的に推進してきたこともその特徴のひとつにあげることができる。これは、「この地球（ほし）をよりよく知ろう」という基本的姿勢からは当然のことであるが、学問を進める体制として具体的な方策にも表われる。1950年代の国際地球観測年の頃から、全地球的な規模の協力による観測研究が行われてきただけでなく、近年の宇宙開発やグローバル地球観測技術の発展により、協力体制はより強固なものとなった。併行して、国際的な地球電磁気学研究の推進に我が国が果たす役割は一層重大なものとなっている。今日の我が国の地球電磁気学分野の研究者の活力を見れば、21世紀においてもその果たすべき責務はますます重さを増すことは疑いなく、積極的にパラダイムの発想を発信することによる貢献が求められようとしている。

### 1. 2. 将来計画策定の考え方

日本学術会議地球電磁気学研究連絡委員会は、平成3年（1991年）8月、「21世紀初

頭までの 10 年間を見通す将来計画の策定」を公表し、地球電磁気学という学問体系の現状認識と問題点の確認から、将来展望をふまえた重要研究課題の特定を行った。この策定から 10 年余りを経た現在、研究・教育体制の転換期の中で、地球電磁気学は周囲の社会情勢の大きな変化の中でさらなる発展を遂げようとしている。ここにあって第 18 期地球電磁気学研究連絡委員会は、過去 10 年間の研究実績の評価を行うとともに、将来展望の見直しを行い 21 世紀前半を見通した将来計画の策定を行うこととした。折しも日本学術会議 18 期では、環境破壊やエネルギー枯渇など、地球規模で噴出している問題群の解決を目指し、「人類的課題解決のための日本の計画 (Japan Perspective)」を設定した。人類の行動力の向上 (それは、とりもなおさず人類の知識の増加による) に起因するこれらの問題群は、人類のおかれている立場、すなわち宇宙での地球の立場、の理解なくして解決はあり得ない。本研究連絡委員会の将来研究課題の策定は、地球電磁気学的見地からの地球の立場の理解、さらに地球科学の体系化の提案を通して、日本の計画として世界に提案するという意味で、日本学術会議 18 期の課題の一翼を担っている。

地球電磁気学がカバーする領域を、大きく太陽地球系科学 (Solar Terrestrial Physics) および固体地球電磁気学 (Solid Earth Geomagnetism) に分け、それぞれの領域の主査のリーダーシップのもとに、当期研究連絡委員会発足の平成 12 年秋、とりまとめ作業が開始された。平成 13 年 1 月には、将来策定の間接まとめを地球電磁気・惑星圏学会ホームページに発表し、コミュニティの意見を求めた。平成 14 年 3 月には、日本学術会議主催の「将来計画シンポジウム」を開催し、2 日間にわたって活発な議論が行われた。このコミュニティ全体での作業は、換言すれば我々自身の自己評価でもあり、「解くべき課題が明確か、最先端か、コミュニティ wide か」、「研究のゴールが明確か」、「研究方法は適切か」などの多面的要素が入ることも確認されている。策定には、度重なる研究連絡委員会で次の視点が盛り込むことが確認されている。

#### (1) コミュニティとしての必要性

特定の研究グループがある研究を進めていきたいということではなく、その研究課題にはパラダイム変換につながり得る、説得力のある理由があり、かつ学界全体が要求しているというような強い必要性が要求される。

#### (2) 他分野との連携

たとえば太陽地球系科学の場合、「上」は太陽物理学、「下」は大気科学と固体地球科学という隣接する関連分野がある。固体地球電磁気学にしても宇宙空間物理学にしても、惑星科学とは共通の研究課題があり、共同で開拓していく必要がある。

#### (3) 国際プロジェクトとの関係

米国やヨーロッパでは、これからの 10 年を目指して大型の研究プロジェクトがすでに提案されているが、これらとの整合性をもたせなければならない。

#### (4) 日本のユニークさ

日本には、独自の手法、有利な点、さらに歴史的に強い分野がある。こうした点を生かし、国際学界でユニークな貢献をすることが期待される。

#### (5) アジアでの日本の役割

この分野全体としては、アジアはやはり欧米に遅れをとっている。日本には、アジアを代表してリーダーシップを取ることが期待されているだけでなく、アメリカ/ヨーロッ



パで教育を受けたアジア諸国の指導者たちと協調して、研究を進めていくことが求められる。

(6) 大型機器の整備

大型の実験／観測共同機器を、コミュニティとしてリストアップし要求する。その場合、全体の目標の中での具体的な位置を明確にする。

(7) 人材育成と一般への啓蒙

全国の大学はもとより、共同利用研究所における教育体制改善システムに関して、適切な提言を行う。ポスドクが将来に向けて有効な研究テーマを見つけられるよう、配慮することも考える。また、理科教科書の内容提案も行い、私たちの住みつく惑星を知るといふ、エキサイティングな学問分野の意義・面白さを、ビジュアル材料の使用等により、一般に公開する。

本小冊子は、このような過程を経てとりまとめられた地球電磁気学の将来計画の報告書である。報告書は、5章から構成される。本文の第2-4章において地球電磁気学がカバーする3つの領域についての将来計画を述べ、第5章では当該分野全体にわたり、社会との連携および研究教育体制の整備についての方策が述べられている。

## 第2章 宇宙空間研究

### 2. 1. 現状認識

この分野の研究は、1960年代初めの衛星観測の幕開けとともに飛躍的に発展した。1970年代には、地球磁気圏の基本的な構造が明らかになり、太陽風との相互作用に基づく物理モデルが構築されている。また、磁気圏と電離圏を結びつける沿磁力線電流の存在が実証され、地上磁場変動から推定される電離圏電場・電流やそれらの動態が、磁気圏の大規模構造や太陽風との相互作用の視点からとらえられるようになった。しかし、1980年代に描かれた磁気圏の構造は、数少ない衛星観測と局所的な地上観測を繋ぎ合せて作られた“平均的描像”であった。

1990年代には、衛星観測と地上観測の充実や計算機シミュレーションの進展が相俟って、非一様・非定常な複合系としての太陽地球系システムの理解が進展した。一方、衛星観測と理論・シミュレーションの連携から、ミクロな物理過程の研究も大きく進展し、「多重スケール間結合」の新たな重要性がクローズアップされてきた。この物理過程は、サブストームのような強い非線形性・非定常現象につながるとともに、巨視的な構造変化や境界層での物質混合・運動量輸送においても重要な役割を果たすことが示唆されている。動的なスケール間結合・領域間結合の理解は、次世代の磁気圏研究にブレークスルーをもたらすものと期待される。

また、主に米国と旧ソ連邦が行ってきた惑星探査によって惑星プラズマの状況が知られるようになり、「比較惑星磁気圏学」の視点が創出された。そこでは、惑星固有環境、すなわち、大気や磁場の有無、自転速度（回転エネルギー）の違いなどによって、地球磁気圏では見られない新しい現象が発見された。また、天文分野で進展してきた太陽コロナ、X線星、活動銀河核などでの高エネルギー粒子加速現象の研究は、地球磁気圏で見られる素過程が宇宙における普遍的過程であるとの認識をもたらしつつある。これらにより、地球・惑星磁気圏から広大な銀河スケールに至る広い物理現象について、その特殊性と普遍性を総合的に究明する新たな学際領域が生まれつつある。

さらに、地球・惑星周辺の宇宙環境に大きな影響を及ぼしている太陽の研究も、1990年代になってから、衛星・ロケット・気球からの紫外線やX線撮像観測や地上からの光学望遠鏡、太陽中性子観測、太陽近傍のプラズマによる電波シンチレーション観測などにより大きく発展した。その結果、太陽フレアや粒子加速、コロナ質量放出等についての理解が飛躍的に進展するとともに、これらが地球周辺環境に及ぼす影響の重要性が大きく認識されるようになってきた。

現代社会は通信衛星や気象衛星などの情報に大きく依存する高度情報化の方向に進んでおり、人類の宇宙活動は増加し続けている。そのため、太陽からの高エネルギー粒子の飛来による人工衛星の障害や地上の電力施設等の被害が発生することがあるのは社会的な脅威である。これらが宇宙環境擾乱に起因することは明らかであるが、そのメカニズムは必ずしも明確でない。太陽からのコロナ質量放出や高エネルギー粒子発生機構の解明とそれらに対する磁気圏や超高層大気の応答を理解し、それらを基に宇宙環境擾乱の予測を目指す「宇宙天気研究」は緊急の課題となってきている。そのため、この問題は国際的にも大

大きく取り上げられている。現在、2つの動きがあり、宇宙機関（NASA、ESA、ISAS/JAXA、IKI、CSA）が進めている「International Living With a Star」（ILWS）であり、もうひとつは太陽地球系物理学・科学委員会（SCOSTEP：ICSU傘下の常置科学委員会）の「Climate And Weather of Sun-Earth System」（CAWSES）である。後者は日本学術会議のSCOSTEP専門委員会とSTPP専門委員会が共同で対応しており、我が国が国際的にも中心的役割を担うことが期待されているが、その研究課題は本研連に密接に関連している。

## 2. 2. 今後 10 年間の重要課題

### (1) 太陽地球系システムの理解：宇宙天気

最近、国際的に注目を集めている重要な課題は宇宙天気予報に関する研究である。特に、太陽面での大規模な爆発（フレアや大量のコロナ質量放出、高エネルギー粒子生成）によって地球周辺の宇宙環境擾乱が発生して、人工衛星や地上高緯度地域の電力線に障害を引き起こす例が報道され、社会的にも注目を浴びている。将来の宇宙利用の拡大と人類の宇宙活動の発展のためには宇宙環境擾乱の的確な予測が必須であり、これは太陽地球系物理学の応用面における社会的責務である。

地球周辺の宇宙空間は、磁気圏、電離圏、上層大気に大別されるが、それらが非線形に結合した開放系である。その領域間結合を太陽活動・太陽風の変動の下にある非一様・非定常な複合系のふるまいとして理解することは、太陽地球系物理学スタート時からの主要課題である。最近 10 年ほどの間に、極域を網羅する電離圏観測やグローバルな地磁気ネットワークが整備され、衛星からのオーロラやプラズマ圏、内部磁気圏の撮像観測も可能になってきたが、それらの観測結果と太陽・太陽風観測結果を有機的・統合的に理解するための研究課題は多い。その基礎となるのは次項以降の研究課題であるが、さらに、中性大気との衝突の無視できない電離圏や、エネルギー源である太陽面現象との関連も含めて、太陽地球系システムをグローバルな視点から理解する必要がある。また、宇宙天気予報のため、コンピュータシミュレーションと衛星・地上の多種・多様なリアルタイム観測データを組み合わせた予測手法を確立する事が重要な研究課題である。

### (2) 宇宙の普遍的プロセスとしてのプラズマ物性と粒子加速

非一様・非定常な複合系としての地球磁気圏の理解、とくにその巨視的構造とダイナミクスの解明、において長年の懸案となっている問題は、重要プラズマ領域における素過程の理解である。これらの領域では、MHD 近似で無視されてきた電子とイオンのダイナミクスの違いが深く関わる「多重スケール間結合」が重要な役割を果たしており、それが時には巨視的構造変化をもたらし、さらに粒子加速を引き起こすということが最近の研究から示唆されている。「多重スケール間結合」は無衝突プラズマの本質的な物性であり、その理解は単に地球磁気圏に留まらず、宇宙における普遍的プロセスとして、太陽物理学や高エネルギー天文学との学際領域における粒子加速の研究にも貢献するものと期待される。この研究では日本が世界のリーダーシップを握っており、今後ますます発展させるべき重

要課題である。次のような具体的な研究課題がある。

- 磁気リコネクション
- 磁気圏尾部電流層の動的構造
- 電離圏・磁気圏結合と沿磁力線電場の動的構造
- 内部磁気圏における高エネルギー粒子生成と消滅
- 磁気圏境界層における物質混合・エネルギー輸送過程
- 衝撃波による粒子加速のマイクロ過程

### (3) 比較惑星磁気圏学の発展

我々の視野を地球以外の太陽系天体の未探査域にも拡大していくことは、自然科学として当然の成り行きである。それぞれの惑星には、惑星固有の性質、すなわち、大気や磁場の有無、自転速度（回転エネルギー）の違い等による特殊性のために、地球磁気圏にはない新現象が現れ、また類似的な現象を異なる境界条件や構造の中で統一的に理解することは、宇宙空間物理学に新しい展開を促すものと期待される。比較惑星磁気圏としての研究課題は10年前の本研連の将来計画の中でも述べられているが、世界的に最近注目されているのは水星探査ミッションの実現に対する期待である。水星と地球の磁気圏における相違性と類似性の比較研究は、宇宙プラズマとしての普遍的物性の幅を広げ、新たな展開を促す可能性がある。今後10年間に実施される予定の月・惑星ミッションの主要課題としては、次の観点がある。

- 月周辺のプラズマ環境
- 火星における上層大気・残留磁場と太陽風の相互作用
- 金星・火星の上層大気・電離圏：大気散逸と変遷
- 未知の水星磁気圏構造・宇宙プラズマ現象

### (4) 太陽・太陽圏の研究

太陽・太陽圏の研究は太陽地球系複合システムを理解する上でも重要であり、惑星と同様、我々の視野拡大という自然科学としての対象である。太陽コロナの加熱と太陽風加速機構の研究は長年にわたる問題であるが、最近では、フレア／コロナ質量放出のトリガー機構・エネルギー蓄積機構や磁場の起源(11年周期、活動領域の誕生と進化)、太陽定数変動の起源の解明が重要視されている。また、これらの研究は宇宙天気予報や長期的な気候変動という実用的な観点からも脚光を浴びている。一方、太陽圏と星間ガスの相互作用の問題も最近注目を集めている。

## 2. 3. 研究推進のための施策

### (1) 太陽および地球磁気圏の衛星観測と惑星探査の推進

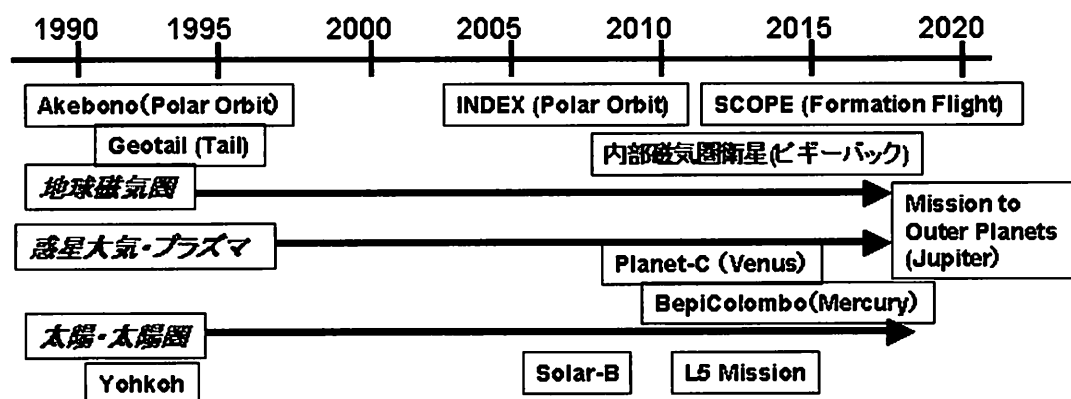
宇宙空間の研究において衛星観測は中核をなすものであるが、ひとつの衛星計画の立案から実現を経て成果を得るまでには長年の歳月と多大な経費を要する。そのため、衛星計画(BepiColombo, Planet-C, Solar-B, SCOPE, L5 Mission など)の推進に際しては、分野の

世界的動向も考慮した長期的な視点に立ったロードマップを持つ必要がある。一方、時機を得た成果を出していくためには、機動性のある小型衛星ミッション(INDEX, 内部磁気圏衛星など)も推進していくことが必要である。

## 太陽系プラズマミッションのロードマップ

### 目標: 太陽・太陽圏～地球・惑星周辺環境の統一的理解

- 地球のおかれた宇宙環境の普遍性と特殊性を知る(比較惑星磁気圏学)
  - 母なる太陽から惑星環境へのエネルギー供給と消費の物理過程
  - 惑星環境の普遍性、および大気・磁場・重力・自転速度・太陽距離による特殊性
- 宇宙プラズマ現象の物理素過程の理解
  - 磁化プラズマにおける多重スケール間結合過程
  - 高エネルギー粒子の生成機構と緩和過程
- 太陽磁気プラズマ活動現象の発生機構の解明
  - コロナ加熱、および磁場エネルギーの開放機構
  - フレア、およびコロナ質量放出



### (2) 地上大型設備の新設・拡充

- 太陽可視光望遠鏡  
画像補償光学装置などを備えた高性能太陽望遠鏡を設置し、太陽磁場活動のメカニズムの解明をめざす。
- 太陽風撮像観測用大型アンテナ  
天体電波の惑星間空間シンチレーション観測専用の大型アンテナを建設し、太陽風およびコロナ質量放出の伝播を撮像観測する。
- グローバル地磁気ネットワークの充実  
汎地球的規模の地磁気ネットワーク観測システムを構築し、リアルタイム化を推進する。
- 南極 MST レーダー  
世界に先駆け、南極に大型大気レーダーを設置し、極域大気観測の一大観測拠点とする。

### (3) 国際協力の推進

世界最先端を目指す衛星計画や海外の拠点観測は、日本の独自性を発揮しつつ、世界中での国際分担・国際協力の枠組みの中で推進する必要がある。実際、上記の衛星計画や海外拠点としての EISCAT や SuperDARN レーダーはそのような枠組みで計画され、遂行されている。

なお、本研連で策定する研究課題は、太陽地球系物理学委員会 (SCOSTEP) の下で計画されている宇宙天気・気候国際協同研究 (CAWSES) に密接に関連する。

### (4) 社会との連携

宇宙天気予報が宇宙環境利用を含む人類の宇宙活動に必須という観点から、社会との連携が重要である。具体的には、基礎研究と応用をつなぐ分野の人材育成が必要となる。

## 2. 4. 前回の策定の評価

本研連が平成 3 年に策定した「将来計画」で提言された施策の達成度を、次のように評価している。

### (1) 惑星研究の推進

金星大気観測を目的とする PLANET-C、及び、水星探査を目的とする ESA のコーナーストーンミッション BEPI-COLOMBO における大型国際協力（日本が磁気圏衛星を担当）が宇宙研（現、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部）の衛星計画の中で認められた。火星探査を目的として 1998 年に打ち上げられた「のぞみ」は、2002 年 4 月末に起きた電源系の不具合により、残念ながら当初の目的を達成することができなかった。しかし、火星上層大気と太陽風の相互作用は、金星大気・電離層での未知の物理と併せて、今後とも解明が必要なテーマとして残されている。

大学における惑星研究に関しては、従来の地球物理学教室は大学院重点化に伴い、地球惑星科学専攻と衣替えし、「惑星」というキーワードが定着した。また、東北大学に惑星大気研究センターが付置された。

### (2) 国際協力の推進

STEP, Post-STEP (S-RAMP など)

GARP, WCRP, IGBP

CAWSES

### (3) 海外拠点観測所

大規模拠点観測所として提案された北極 IS レーダー（スピッツベルゲン）と赤道レーダー（インドネシア）はいずれも実現した。前者は、日本がヨーロッパ諸国の協同設備である EISCAT に参加する形で認められ、極域電離圏からのイオン流出現象など、新しい成果を出しつつある。赤道レーダーは当初計画より規模縮小を余儀なくされ、ようやく本格稼働が始まったばかりであるが、今後、中層大気の研究における多大な成果が期待されている。



中小規模の多点グローバルネットワークは科研費等によって部分的に実現され、維持されている。

#### (4) 航空機観測体制

中層大気・成層圏観測を目的として提案されたが、組織的な体制は確立されていない。(5) 理論・シミュレーション

提言された方策は概ね実施された。特に、大規模 3 次元数値シミュレーションでは世界をリードする成果を得ている。また、ハイブリッド型や粒子コードのシミュレーション技法も発達し、特に「Geotail 衛星」の観測結果との対比、すなわち、理論と観測のタイアップにより、同衛星の成果を高めることに貢献した。

#### (6) データネットワーク・総合解析

この 10 年間の IT 技術の進展は目覚ましいものがある。本研連では、10 年前の将来計画策定時からデータネットワークの有効利用を訴え、学術情報センター（現、情報研）にも働きかけてきた。当時の予想通りに、今やギガビットの時代になり、Webpage を介したデータ公開は日常的になった。しかし、公開データの校正やアーカイブ作成のための人員不足が解消されたわけではなく、ナショナルデータセンター機構の設立も日の目を見ていない。

## 第3章 大気圏研究

### 3. 1. 現状認識

STP が関与する大気圏研究は、気象学が扱う対流圏の大気現象、および電離圏以高の超高層物理学の課題と領域を重ねつつ、成層圏・中間圏（中層大気）ならびに下部熱圏を主な研究の舞台として多数の斬新な研究課題を開拓し、短期間に飛躍的な発展を遂げた。その結果、大気圏は地球科学における重要な研究分野として確立されたが、今後、自在に変貌して、さらに惑星大気を含む未知領域への拡大を目指すことが重要であろう。

大気圏研究を取り巻く状況は近年大きく変化しつつある。まず、地球温暖化およびオゾンホールで代表されるグローバルな地球環境変化の研究に端を発した環境科学が広汎に浸透し、包括的な研究分野として拡張を続けている。一方、情報通信（IT）技術が急速に進歩した結果、大量データをリアルタイムで取り扱うことが可能となり、研究手法ならびに共同研究形態が変貌しつつある。また、国立研究機関、大学などのあり方が大きく改革される中で、研究教育体制も対応が迫られている。

### 3. 2. 地球環境変化に関する取り組み

1980年代に始まった地球環境問題は、当初、地球温暖化およびオゾンホールで代表されるグローバルな変化が中心課題であった。しかし、「環境」の意味が広汎に解釈されたため、環境変化に対する問題意識に大きな温度差ができた。これを契機に既存の学問体系を脱却した新しい分野が多方面で発掘・進展されているのは好ましいことであるが、ともすれば希薄化されつつある「グローバルな地球環境変化」の視点を見直す必要がある。

地球環境変化は沈静化していないにも拘らず、その変化の速度に社会が適応し得る、あるいは自然界の自浄機能により環境が自動調節されると楽観視され、危機意識は薄れてきている。大気圏研究者は精密な長期定常観測を基礎に、地球環境の変化傾向を定量的に評価し、科学的判断を社会に提示する責務がある。これには、既に顕在化している変化トレンドを監視するのみでなく、未知の変化現象を求めて新たな研究開発を進めることが重要である。つまり、人工起源および地球外（太陽活動、流星、宇宙線）および固体地球（火山、地震）からの影響、ならびに大気・海洋の自律変動に起因する地球環境変化を長期モニタリングすることを基礎としつつ、それに留まらず、新たな変化現象を追求し、地球大気圏の全高度領域における変化トレンドの機構を明らかにすることが重要である。

これまで地球環境変化の主な研究領域であった対流圏・成層圏に比べて、中間圏・熱圏では大気密度がさらに薄くなるため、人工起源の微量な物質が注入された場合に、低高度に比べて相対的には指数関数的に大きなインパクトを受けうる。したがって、未解明の特異現象が隠されている可能性が大きい。例えば、対流圏温暖化に対応して、高々度ではより大きな寒冷化が現れている。つまり、中間圏・下部熱圏（MLT: Mesosphere and Lower Thermosphere）は対流圏の環境変化に対して敏感で、かつそのシグナルが拡大して現れていると考えられる。ここで、対流圏の現象が線形に MLT 領域に射影されているとは限らないことに留意し、下層大気に対する知識をもとにした外挿的な研究に留まらず、新し

い変化機構の発見を目指すべきである。

### 3. 3. MLT 領域の物理化学過程

中間圏から熱圏下部に至る MLT 領域には地表付近の現象の影響が及んでいるとともに、太陽活動の影響が同時に現れている。例えば、中間圏界面温度の長周期変動には、太陽活動と火山噴火の影響が同程度の大きさで検出されている。小規模なプロセスについても、下層／中層大気で卓越する拡散過程である乱流拡散が、熱圏下部以上では分子拡散によって変わることによって代表されるように、様々な過程が変化する遷移領域ともなっている。つまり、MLT 領域は地球環境と惑星間宇宙の境界領域にあたる重要かつ興味深い大気層である。

下層に起源を持つ大気波動が上方伝搬して MLT 領域に到達しているが、そこでは波動減衰が顕著になるとともに、背景風と波動振幅が同程度となるため、波動・平均風および波動・波動間の相互作用が重要となる。結果的に大気波動は下層から運動量・力学エネルギーを輸送し、再配分している。一方、熱圏下部は高エネルギー粒子の降り込みやオーロラを通じて、宇宙空間からのエネルギー流入に対しても大気は応答している。こういった上下層からの影響により、MLT 領域では風速・温度構造は時として大きく乱され、背景場は定常的ではなくなっている。また、MLT 領域の化学物質分布は光化学と力学過程の双方の影響を受けるばかりでなく、惑星間空間から飛来する流星による間欠的な物質フラックス増加、ならびに人工飛行体の再突入による異物質の流入によって外因擾乱を受けている。

### 3. 4. 学際分野の研究課題の推進

地球科学では多くの学際分野が自然発生的に融合・分離してきているが、大気圏研究も例外ではなく、隣接する同業異種である気象学と超高層物理学で独自に樹立されてきた学問体系の学際分野（境界領域）として発生した。その後、地球環境変化を契機に新しい学際的課題が次々と生み出されている。今後、これまでに蓄積された知識・技術を財産として、類型と相違を追求する研究を進めることで、進んで学際領域に向かうことが学問分野の硬直化を避けるために重要である。近未来の具体的な研究課題を 3 例示す。

#### (1) 境界領域の科学： 中間圏界面と対流圏界面

大気循環および物質輸送にとって対流圏界面は大きなバリアになっており、その上下で物理化学過程も異なる。一方、中間圏界面付近では様々な大気特性が大きく遷移しており、地球環境と太陽活動の影響の接点となっている。これらの境界領域の特性を相互比較する。

#### (2) 雲物理： 対流圏の積雲対流、成層圏雲 (PSC) および夜光雲 (NLC)

対流圏には様々な形態の雲が発生・存在し、放射や潜熱解放により大気エネルギーバランスに大きく関わっている。一方、極域中層大気にも冬季に成層圏 PSC、夏季に中間圏界面付近の NLC が存在している。これらの形態や生成メカニズムを、対流圏雲との相違に着目して研究するとともに、中層大気気候への役割を解明する。

#### (3) 雷： 下方、雲中および上方放電

高次の非線形現象である放電の詳細なメカニズムは未だに明らかにされていない。雷雲から地表への落雷、雲中放電および上方放電現象について、発生原因を解明し、宇宙線や

太陽活動周期との相関を総合的に研究する。さらに、放電による中層大気の化学組成変動や、電磁パルスがグローバル電流系に与える影響を研究する。

これらの研究の進展には、既存の学会や研究グループの垣根を取り払うことが肝心である。今後、研究領域を自縄自縛せず、積極的に学際分野の研究課題に立ち向かうことで、大気圏研究は継続的に大きく発展していくことが期待される。また、このように旧来分野に囚われず大気圏全体を俯瞰する視点を得て初めて、基本的な学問的枠組みすら構築されていない未知領域である他惑星の大気圏へアプローチすることも可能となる。

### 3. 5. 惑星大気

地球大気をさらに深く理解するには、他の惑星条件（自転周期、傾斜角、惑星直径、重力場、太陽放射、磁場、大気量・組成、地形など）にも適用可能な普遍性のある大気科学を構築し、地球大気を惑星気象学という大きな学問的枠組みの中に位置付けることが重要である。その結果、地球・金星・火星の惑星分化において大気圏が果たした役割や、さらには地球気候の変遷といった問題を解くことができる。なお、気象数値モデル（GCM）が地球大気大循環の研究に有用であるが、これを他の惑星条件に適用するだけでは問題が解決しない。つまり、GCMには現在の地球大気を再現するために、多くの経験的パラメタリゼーションとチューニングが含まれており、大きな逸脱は考慮されていない。惑星全体が厚い雲に覆われ自転速度の数十倍にもおよぶ高速気流を持つ金星や土星の衛星タイタン、数百年も持続している大赤斑がある木星型惑星の大循環はまだ原理的にも理解されていない。これらの惑星大気現象を理解しようとする過程で、大気科学を現在の地球大気現象のケース・スタディから、より普遍的な惑星大気科学へと質的发展させることができる。

### 3. 6. 大気圏の観測

観測は STP 科学の基礎であり、長期的モニタリングに重点を置かずして、大気圏研究の将来の発展は望めない。今後も引き続き、衛星および国内地上観測に加えて、極域（昭和基地、北極）、赤道域等での海外拠点観測を推進することが重要である。同時に新しい発想に基いた直接観測およびリモートセンシング法を開発する努力を怠ってはならない。

なお、最近の情報通信技術の発展にともない、大気観測にも変革が起こりつつある。大気現象は複雑だが、従来は現象の一側面を切り取った研究が多かった。IT の発達により、多種多様な研究者がデータを同時参照できる時代では、専門分野を越えた総合的観測を企画し、多機能で多様な観測技術を活用して多種の大気パラメータ（力学・化学・放射）を同時測定できる仕組みが必要である。

#### (1) 拠点観測

(a) 国内観測のネットワーク化： 大気圏を電波・光・音波を用いてリモートセンシングする装置が、国内の分散した観測拠点に次々と設置されつつある。これらを有機的に組織化し、インターネットを通じてデータをリアルタイムで交換すれば、列島規模のリージョナル観測ネットワークが構成できる。この観測空間範囲は、衛星リモ観測のフットプリン

トサイズ程度であり、衛星観測の較正点としても大きな貢献をすることができる。

(b) 極域の大気観測： 極域は宇宙空間との接点であり、未解明である太陽活動の大気圏への影響を調べるために重要である。また、地球環境変化が如実に現れた地域でもあり、環境変化の監視に最適である。既にオゾンホール、夜光雲（NLC）が研究の焦点となっていることから分るように、極域では地球環境変化が顕在化している。極域ではローカルな人工ノイズが少ないという大きな利点を活かして、極域に現れる未解明の環境変化、およびそれらが全球に与えるインパクトの評価を研究する必要がある。

昭和基地に世界に先駆けて大型大気レーダー（MST/IS レーダー）を設置することで、国際的な一大観測拠点とすることが企画されている。一方、北極域では EISCAT およびアラスカ計画等が並列して活発に進められているが、北極域は地形・海陸分布による経度変化が大きいため、観測点を複数ヶ所に整備することが望ましい。一方、南極域では経度変化は比較的小さいため、昭和基地に集中した 1 点豪華主義が有効である。

(c) 赤道大気： 赤道の陸域は南米、アフリカ、インドネシア諸島があり、海域は太平洋、インド洋、大西洋で構成される。既にインドシナ・インドネシアには日本の研究グループが現地観測を展開し、国際的にも研究をリードしている。一方、アフリカ・南米は欧米の研究グループが観測を展開している。今後は、空白地帯であるインドネシアから西方のインド洋、および中部・東部太平洋に広がる地域に観測を広げることが重要である。同時に、これらをもとに国際協同観測ネットワークを構築していくことが必要である。

なお、発展途上国では国際共同研究が対等の立場で行われず、現地の研究者には観測データが十分に活用されていない場合がある。極言すれば、国際共同研究の美名のもとに、研究成果の搾取が行われるという、憂えるべき状況もあった。これは学問にも新たな「南北問題」の火種を持ち込むことになりかねない。発展途上国において研究者を育成し、自発的な研究計画の企画を助けることが重要である。

## (2) 衛星観測

今後 10 年以内に多くの地球観測衛星が打ち上げられる予定であり、既に打ち上げられたものも含めると、成層圏・中間圏・下部熱圏を観測対象とする実験としては、TIMED, ADEOS-2, ROCSAT-2, SMILES, GCOM 等がある。従来、衛星開発には多大な経費と時間がかかったが、最近では 50–100 kg 程度のミニ衛星でも十分な成果が期待できる観測手法が開発されている。国内でもピギィバッグとして小型衛星を打ち上げることが比較的容易になりつつあることから、数年の準備期間で実施できる衛星観測の題材を追求することが重要である。

従来、衛星による大気観測には放射計が主に用いられてきたが、計測結果を較正しなければならぬ弱点があった。長期間にわたって安定して地球環境をモニターするには、キャリブレーションフリーの新しい観測手法を開発することが重要である。そういった技術の典型として、GPS 電波の伝播遅延・掩蔽観測により対流圏の水蒸気、成層圏の温度、電離層の電子密度不規則構造をリモートセンシングする新しい技術が発展するであろう。

## (3) 新しい観測手法の開発

(a) リモートセンシング： 今後、中層大気について衛星・地上からのミリ波・サブミリ

波観測が重要度を増すであろう。これは比較的小さな分子やラジカルの観測に適しており、オゾン、硝酸、水蒸気やそれらの同位体等、オゾン層破壊、気候変動、太陽活動と大気の相互作用に関連する重要な分子種が観測される。我が国は超伝導素子を用いたミリ波・サブミリ波技術水準が高く、重点的に推進すれば大きな成果が期待できる。一方、FTIR は小さな分子や硝酸塩素のような複雑な分子までの観測が可能であり、ミリ波・サブミリ波観測値と相補的なデータが得られる。従来から用いられている、各種の大気レーダー、ライダーは風速場、気温、エアロゾル、オゾン・金属原子等の鉛直分布の観測に必須である。また、可視・紫外分光計は成層圏のNO<sub>2</sub>、オゾン等の気柱全量の観測に有効である。

(b) 直接観測の重要性： 現在はリモートセンシング全盛期であり、直接観測は押されがちである。しかし、大気状態を仮に1 mの空間分解能で測定する必要がある場合には、リモートセンシングは無力である。しかし、最近の衛星測位（GPS）ではこれに足る精密な位置・時刻決定が可能である。最新の電子技術を活用しつつ、周回気球（南極、赤道）、完全再使用型ロケット、成層圏飛行船等を活用して、新しい直接観測法を開発することが重要である。測定分解能が桁違いに向上すれば、見えてくる物理化学現象の質まで変わる。

#### (4) 惑星大気の観測

惑星大気観測には探査機と地上あるいは地球周回望遠鏡による方法がある。前者には直接撮像の空間分解能、観測可能な緯度経度範囲などでメリットがある反面、開発にかかる経費や労力、観測機器重量の制限、修理不能の点が不利である。後者は最新技術を比較的低コストで導入でき、長期観測が可能で、重量制限が緩く修理が比較的容易であることが利点であるが、空間分解能や撮像範囲は限られる。これらの手段を相補的に組み合わせて、幅広い時空間スペクトルを持つ惑星大気圏現象の全体像を把握することが重要である。

探査機として、まず2009年に金星に到着する金星オービター（Planet-C）が挙げられる。紫外から赤外に至る多波長で周回軌道から連続的にグローバルな撮像観測を行い、大気運動を3次元的に可視化して大循環の駆動機構の解明を目指す。2年以上にわたる長期データはこれからの金星気象学の基盤となる。さらに将来的には木星探査も実現するであろう。

探査機による観測と並行して、地上に設置した可視・赤外望遠鏡、電波（デカメーターサブミリ波）望遠鏡、気球・航空機・ロケット・地球周回小型衛星からの紫外を含めた観測などを実施する。探査機を用いないこれらの観測では、高分光分解能を生かした大気組成計測、探査機がカバーしない超高層大気の風速計測、ミッション期間より長い時間スケールの気候変動の検出、などが可能である。



## 第4章 固体地球研究

### 4. 1. 現状認識

この分野は、例えば地球磁場の分布とその成因など、地球電磁気学の中でも最も長い歴史をもつ研究を含んでいる。しかし、1970年代以降の人工衛星による観測の実用化や計算機技術、さらにさまざまな観測技術の発達によって、急速な進展がもたらされつつある。

平成3年度に策定された将来計画提言で特に重要な課題とされたものの中でも、「海底観測所の開発および設置」、「海外観測ネットワークの建設、古地磁気データベースの構築」、「海底掘削船の建造」、「地殻活動監視のための陸上観測の高度化」などのハードウェアの整備は、かなりの達成度であると評価できる。一方、重要課題とされながら我が国では実現できなかったものとして、「衛星による地球惑星磁場観測」があげられる。

今後の研究の一層の発展のためには、これらのハードウェアの整備をさらにすすめることはもちろんであるが、研究体制などのソフトウェアの整備が重要になる。具体的には、衛星による磁場観測や月・惑星探査などにおいては、宇宙空間研究分野など地球電磁気学の他分野との協力体制が不可欠である。地球惑星磁場の成因の研究・グローバル地球内部構造・古地磁気研究・海底掘削などでは、国際的な共同研究体制をさらに強固なものにすることが望まれる。また、地球内部構造の研究や、地殻活動監視などの研究分野では地震学をはじめとする固体地球科学諸分野との連携のさらなる強化が急務である。

固体地球内部現象の時間スケールは、通常的生活時間スケールに比べて非常に長いために、長期間にわたり世代を越えてデータの蓄積が受け継がれるべき観測項目がある。すでに1世紀になろうとする、地磁気観測所における地球磁場の精密観測からのデータ蓄積はその典型例である。近年、地球磁場観測に限らず、このような長期にわたる観測を継続することは、社会の急激な変化に伴い困難さを増している。社会に対する説明責任を果しつつ、このような観測を次世代に継承できるような体制を築くことも重要な課題と考える。

以上のような現状認識に基づき、以下では固体地球を対象とした分野をさらに「地球惑星磁場と地球惑星内部の状態」、「地球磁場変動史と地球の進化」、「地震火山活動場の性質と活動モニタリング」に分けて、それぞれの重要課題をまとめる。

### 4. 2. 地球惑星磁場と地球惑星内部の状態

地球や惑星の固有磁場の起源は、最近のコンピュータシミュレーションにより、かなりわかってきた。今後の課題として、観測面からは地球及び惑星磁場の詳細な分布、磁場の変動などに重点が移りつつあり、観測結果に即した地球惑星ダイナモモデルの構築や地球惑星内部構造とダイナミクスの解明などが重要な研究課題となる。

これまで、地球磁場観測、地球内部3次元電気伝導度構造、惑星磁場探査、ダイナモシミュレーションなど、それぞれの分野で研究が進められてきたが、これらを有機的につなぎ、さらに強力な研究チームを結成する段階に至りつつある。

#### (1) 衛星および月・惑星探査機による磁場観測

地球磁場の空間分布を解明するもっとも有効な観測は、衛星による観測であることはいうまでもない。ただし、地球磁場は変動しており、衛星観測も繰り返し行う必要がある。地球磁場が5年ごとに改定される国際標準磁場モデル (DGRF, IGRF) で示されていることを考慮すれば、衛星観測も5年ごとに行われることが必要となる。しかし、我国が独自に5年ごとの衛星観測を行うことは現実的ではないであろう。1980年のMAGSAT(米国)、1999年のØrsted (デンマーク) などの国際協力方式によることが望ましい。これらの場合は、約20年の間隔になったが、今後は我国、米国、EU諸国が交互に、5年ごとの衛星観測を実施することが強く望まれる。我国についていえば、15年ごとに衛星観測を行うことになる。

我国の地球磁場衛星観測を推進するためには、地球環境観測を行ってきた宇宙航空研究開発機構を中心として大学等の多くの機関の研究者からなるチームを結成し、国際プロジェクト立案を早急に行うべきである。1999年Ørsted衛星以後も国際的に衛星観測計画が進んでいるが、これらの情勢を考慮しつつ、我国主導の衛星観測を2010年-2015年に実施するための準備に早急に入るべきである。日本主導の地球磁場観測人工衛星打ち上げの実現のためには、固体電磁気関係者が積極的に宇宙観測プロジェクトに関わって、人工衛星に特有な条件下での開発・観測経験を積んでいくことが必要である。

この10年間、地球外天体の直接磁場観測では、大きな発見が相次いだ。木星の月であるイオとガニメデに固有の大規模磁場が存在すること (ガリレオ探査機)、そして火星に極めて強い縞状磁気異常があること (Mars Global Surveyor: MGS) である。月磁場探査もアポロ以来30年振りに行われ (ルナプロスペクタ)、月の裏側にも大きなサイズの磁気異常が発見された。また、誘導磁場観測から月の核半径は約500 kmと推定された。このように探査機による惑星内部起源磁場の観測は、地球との比較においてもインパクトの強い発見をもたらしているが、日本における固体地球電磁気学系の研究者が惑星探査に参加することはほとんどなかった。その理由として、地球型惑星の磁場データが最近までほとんどなかったこと、日本の人工衛星磁場観測では主に地球磁気圏など超高層領域の磁場観測が行われてきたこと、そして開発に関わる環境が固体地球電磁気関係者にとってバリアが高かったことなどが挙げられる。しかしながら、これからは様々な探査機が国内外で打ち上げられ、惑星内部起源磁場 (大規模磁場・磁気異常・誘導磁場) の観測が行われていくので、固体地球電磁気学グループとしても積極的に参加すべきである。

日本でも火星探査機NOZOMIが1998年に打ち上げられ、固体地球電磁気関係者も共同研究者として参加した。また、月探査周回衛星として、SELENEが2006年に打ち上げられる予定である。これは旧ISAS・NASDA合同の初の衛星であり、高度100 kmの円軌道上で月内部起源の磁場観測も行われる。磁力計はプラズマ観測器とともに一つの重要な機器を構成しており、SELENEでは固体系・超高層系分野がともに協力して開発にあたっている。これを手始めに、将来のミッションではさらに協力していくことが強く望まれる。

水星は火星・金星と違って、大規模磁場が存在する。MESSENGER (NASA) の2005年打ち上げが決まり、また、BEPI-COLOMBO (ESA, ISAS) の2009年打ち上げが予定されている。いずれも磁場観測が主な目的の一つになり、日本側からも積極的に参加すべきである。また、磁気圏衛星 (長円軌道)、周回衛星 (円軌道) などに搭載される磁力計で同時観測を行うこと、つまり、水星の外部磁場観測・大規模磁場観測・誘導磁場観測を行

うことが、水星の内部構造・歴史を理解するために是非とも必要である。

以上のような人工衛星による地球・月・惑星磁場探査の分野は、固体電磁気分野と超高層分野の境界領域にあたり、将来的に大いに発展させるべき新分野と考えられる。しかしながら、人工衛星打ち上げ間隔は数年以上であり、長期的視点に基づく境界領域研究者の育成が重要である。そのために、研究推進、研究者育成する上でのさまざまな環境整備を今のうちから着実にすすめて行くべきである。たとえば、このようなミッション計画は打ち上げまでの準備期間が5-10年間と長く、その間は観測データが出ないまま、開発に携わることになる。固体系の大学機関研究者などが深く関われるような基本条件として、少なくとも開発期間中の関連研究費・PD等が保証されるべきである。現在は、予算のほぼ100%がメーカーに直接渡っており、研究者の持ち出しもあるのが実態であるし、打ち上げ延長・失敗などの可能性から大学院生が主たる研究テーマとして関わるにはリスクが大きい側面がある。研究費・PD等の環境整備がない限りは、衛星開発に携わる日本の科学者は増えないどころか減少するであろう。その結果、常にNASAなどのデータを待つて研究するというスタンスになっていかざるをえなくなる。早急なる改善が望まれる。

## (2) 地上における長期観測

地球磁場の時間変化を解明するためには、100年のデータの積み重ねを持つ地上観測のさらなる充実が重要となる。国内には、柿岡(1913年設置)、女満別(1952年設置)、鹿屋(1958年設置)の3地点に有人の観測所があり、地磁気3成分変化連続観測と週1回の絶対観測を行うことにより、7桁(精度:0.1 nT)の有効数字を持つ世界最高水準の観測値が毎秒得られている。これらのデータは気象庁、World Data Center、INTERMAGNETプロジェクトを通じて一般に公開され、日本のみならず東アジアスケールの地磁気現象を代表するものとして高い評価を得ている。長期間安定して正確であることから利用範囲も広く、Dst指数・Kn指数などの全地球的な地磁気活動の指数導出に使われ、またマントルダイナミクスや地磁気永年変化の全地球的なパターン変動の推定に用いられるなど、様々な現象の理解に貢献している。衛星観測が本格化すれば、地上定点でのキャリブレーション点としての役割も担うことになる。今後も、高精度を長期にわたって保証できるような観測体制を維持する必要がある。

海底・海域での地磁気観測点増設も、グローバルな情報を高精度に得るためには欠かせない。1990年代後半から始まった海半球計画では、海域における観測という長年の懸案の解消を試みたものである。国際協力によって西太平洋の島嶼部に計9点の地磁気観測点を設け、地磁気3成分の変化(フラックスゲート磁力計)、全磁力(プロトン磁力)の連続観測を行っている。さらに、気象庁などの協力により年1-2回の絶対観測も実施され、長期的にも数nTの観測精度が達成できていると考えられている。今後は、国内関係諸機関およびこれらアジア大太平洋諸国との強固な協力関係を築き、このネットワーク観測を長期に継続できる体制を整備することが必要である。

また、グローバルスケール電場観測が、西太平洋と日本海に布設されている海底ケーブル(TPC-1, TPC-2, 沖縄ケーブル、日本海ケーブル)を用いて日米共同で行われている。これらのデータは、従来の観測所データや海底電磁気観測データとともに上・中部マントルの電気伝導度構造の推定、マントル最深部の不均質構造や、核・マントル境界付近の磁

場の状態を考える上で磁場観測と同様に重要であり、陸上の長基線観測を含めた国際的グローバル電場観測体制の構築を急ぐべきである。

### (3) ダイナモシミュレーション

地球及び他の惑星・衛星の固有磁場を生成しているダイナモ作用に対する研究は、キネマティックダイナモ及び核流体運動の推定におけるものが主体であったが、計算機の発達に伴い、この10年間で回転球殻中の3次元電磁流体力学的(MHD)ダイナモ問題を数値的に解くことができるようになった。

高速回転球殻内における3次元MHDダイナモの大規模な数値計算を実施することが可能になったということは、ダイナモ理論に基づいて地球惑星磁場の起源を明らかにしていく上で非常に重要である。現に、地球磁場のような永年変化や双極子磁場の逆転が計算機上で実現されるようになった。しかしながら、現実の地球コアに対するパラメータを取り入れることは、まだ困難である。コアの分子拡散率は非常に小さいので、渦拡散率を導入するだけでなく、超拡散率も導入しているのが現状である。超拡散率を使用しない数値計算を実施するためには、超並列計算機などを利用してさらに大規模な数値計算を推し進める必要がある。この点、地球シミュレータの利用が可能になったということは重要であり、我国がダイナモシミュレーションにおいて世界をリードできる条件が整いつつある。

有限の電気伝導度を持つ内核の存在は外核で生成される磁場の変動を安定化する。非常に速い地球回転の影響のために生じる柱状対流セル及び差分回転により、磁場は生成・維持される。双極子磁場の逆転は、地球回転の変動や核-マントル境界における熱流束分布の変動などの外部からのトリガがなくても、MHDダイナモ過程において自発的に起きうる。逆転の頻度は、核-マントル境界における熱流束分布による影響を受ける。ただし、非常に大きなレイリー数及び非常に小さなエクマン数に対する数値計算を実施する場合には、超拡散率が導入されているため、真のダイナミクスが理解されていない可能性も指摘されている。

ダイナモのエネルギー源の見地から、磁場生成過程は地球の進化過程と密接に結びついていると考えられる。それを解明するために、地球システムとして内核-外核-マントルの相互作用を取り入れ、過去の地球磁場の情報を取り込み、地球の進化過程における地球磁場の変遷を理解することが重要である。また、惑星・衛星の磁場探査を実施することによって、他の惑星・衛星の固有磁場の特徴も含めて、総合的に磁場生成過程を理解することも必要である。

#### 具体的な研究課題

- 永年変化モデル
- コアダイナミクス
- マントル電気伝導度3次元構造
- 惑星固有磁場
- 地球型惑星の磁気異常マッピング

## 4. 3. 地球磁場変動史と地球の進化

### (1) 海底堆積物コア磁化測定

過去の地球磁場を探るために、堆積物の残留磁化が重要な役割を果たしている。特に、地磁気永年変化や古地球磁場強度、地磁気極性の逆転やエクスカージョンの研究には、連続的な堆積物試料を得ることが欠かせない。たとえば過去には、深海底や湖底堆積物コアの採取が可能になって地磁気極性逆転史やエクスカージョンの研究が飛躍的に発展した。最近では、深海底掘削計画などで採取された試料から、古地球磁場強度や、地磁気永年変化、エクスカージョンについての多くの新知見が得られている。

海底堆積物採取において、この10年程度の間も、深海掘削計画（ODP）が最も重要な役割を果たしてきた。ODPでは、APC（水圧ピストンコアラー）を用いて一地点の複数の掘削孔から堆積物を採取し、これらを互いに対比することによって、時間的に欠損のない連続的な記録が得られる。この手法によって、地球磁場や環境変動の高分解能の研究が飛躍的に発展した。終了したODPに代わり、2003年10月から統合深海掘削計画（IODP）が開始され、米国が用意する従来型（非ライザー）掘削船に加え、2006年からは日本が用意するライザー掘削船「ちきゅう」による科学掘削が開始される予定である。また、90年代には国際全海洋変動研究（IMAGES）のため、最大50 m長の大口径コアを採取することができるMarion Dufresne号をフランスが運航しており、採取されたコアは古地磁気研究にも用いられてきた。国内では、90年代後半に海洋科学技術センターの調査船「みらい」「かいれい」が相次いで就航した。これらには、20 m長ピストンコアラーが装備されている。このように、海底堆積物コア採取に利用できる船舶は増加してきた。しかし、コア採取時の二次磁化を獲得するという問題と、現状では古地磁気測定に適した種類の堆積物を地球上の広い範囲から系統的に採取されていないという問題があって、古地磁気学研究に有効に利用できていない。これらの問題点を解決するために、コア採取時の二次磁化獲得を防ぐための技術開発の必要性を古地磁気研究コミュニティとしてIODP等に働きかけることと、測定に適した堆積物を系統的に採取するために研究者の国内および国際的協力により戦略的にIODP等のプロジェクトに提案していくことが必要である。

さらに、従来の海洋調査で対象とされることの少なかった浅海や内湾、さらに淡水湖沼においても長大かつ高品質な堆積物コアの採取を進めることも重要な課題である。これらの水域からは高分解能の古地磁気と環境変動の記録が得られ、火山岩を含む陸上の研究成果と海洋堆積物の記録を統合するためにも重要な役割を果たす。

### (2) 陸上岩石磁化測定

ブルン・松山境界等に関しては多くの同時観測があるが、これまでの各地で得られたVGPを比較するという段階から、各地の磁場変動を同時に解析するという段階に飛躍することを目指すべきである。このためには、地球上での分布を考えた上で、信頼性の高い堆積物による記録をさらに多く得る必要がある。また、ピンポイントのデータであっても、フィルター効果がなく絶対強度の求まる火山岩による記録を得ることも重要である。

また、過去の平均的な地磁気強度は現在の値の半分程度しかなかったという説が、限られたサンプル集団に基づいて提唱されている。この説の真否の確認は極めて重要で、種々の時代や広い地域について、信頼性の高い古地磁気強度のデータをさらに多く得る必要が

ある。さらに、議論の続いている白亜紀スーパークロンの地磁気強度を決着させることは、非逆転モードのダイナモ作用を明らかにするため重要である。

最近の10年間で散発的ながら20–30億年前の古地磁気強度が南アフリカ、オーストラリア、カナダなどの太古代岩石からわかり始め、10億年スケールの核構造進化が議論されるようになった。太古代の古地磁気研究では以下の3つのテーマが今後の重要課題になる。

- 地磁気の存在はいつからか？
- 太古代地磁気双極子モーメントの大きさはどのくらいか？
- 地磁気逆転頻度など太古代の時間変動はどうであったか？

これらは、コアダイナミクスやコア・マントル相互作用の問題の解明にとって基本的な情報となる。さらに、MGS探査機によって火星表面の磁気異常が発見され、数十億年前の火星磁場存在が強く示唆されたことから、太古代の古地磁気学は一気に惑星磁場研究のカテゴリーに入ろうとしている。火星・水星・月探査が進展する今後10年間は、このような太陽系スケールの観点から地球磁場をみる必要がある。

しかしながら、他の惑星や月と違い、表層での変動の激しい地球では岩石の残留磁化の起源を慎重に検討しなくてはならない。太古代の古地磁気データは地質時代のデータと比べて、量的だけでなく質的にもかなり劣るため、既存の方法を単に適用するだけでなく、試料を厳選し、かつ、岩石磁気学的な検討を十分に加える必要がある。しかしながら、初生磁化であるかどうかという判断は若い岩石でも難しいので、新しいデータセレクション方法の開発あるいは新しい測定方法の開発が望まれる。最近1–2年間に、長石やジルコンなど1個の鉱物の磁化を測定する方法が始まっており、太古代古地磁気データの信頼度の向上が期待される。

### (3) 海底磁気異常の精密観測

深海曳航体や潜水艇を用いた海底近傍での磁場測定により、地球磁場変動についての高精度で高時間分解能の情報をもたらすデータが得られるようになってきた。その結果、地磁気逆転時だけでなく、その他の期間における磁場変動の研究が可能となってきた。特に、多くの地域から得られた類似のデータをスタックし、グローバルな変動成分のみを取り出すことにより、地磁気の強度変動の情報を引き出すことが可能となる。磁化プロセスが異なる堆積物の磁化変化などから得られる情報との比較で、相互に補完しあうことも重要である。このような高分解能測定は、新生代地磁気逆転史の研究、さらに期間の短い逆転やエクスカージョンの研究にも有効である。また、白亜紀スーパークロンにおける地磁気変動の研究の進展も期待できる。

### (4) 地球環境と磁場変動

地球磁場と地球環境の関連は、興味深いテーマとして70年代より議論がある。しかし、過去の地球磁場変動の詳細や、磁場と環境を関連付ける物理的機構が不明であったため、憶測の域を出なかった。

90年代には、堆積物から相対的地球磁場強度変動を読み取る研究が進展し、過去100万年程度の地球磁場強度変動が明らかにされた。そして、得られた時間変動と、ミランコヴィッチ周期として知られる地球軌道要素の変動の周期を通じた気候変動との関係が、様々



な時系列解析手法により明らかにされ、地球磁場強度変化に4万年、10万年の周期的変動が含まれることが報告された。しかし、一方では堆積物の岩石磁氣的性質が古気候変動に支配されて変化し、それが堆積物から求めた古地磁気強度変化に影響したもの、とする反論がある。これは、堆積物の磁化獲得機構には依然として不明な点が多いためであり、さらに岩石磁気学的検討を進める必要がある。

地磁気変動と古気候変動に因果関係があるとすれば、地球磁場の強度だけでなく方位の永年変化にも現れることが期待されるので、この観点からの研究を進めることも必要である。ただし、地球磁場方位の永年変化は、強度に比べて振幅がはるかに小さいため、ローカルな変動の影響を強く受ける。従って、数万年—数十万年オーダーの変動を復元するためには、年代軸が精密に決まった堆積物コアが強度の復元の場合よりもはるかに多く必要となるであろう。諸条件を考慮すると、今後、地球磁場変動と気候変動の関連を地球史に亘って明らかにするためには、まず、過去数百万年間の地磁気永年変化を1年以上の時間分解能で求める必要がある。

さらに磁場変動と気候変動には、数千年、数百年、数十年スケールの変動があることも知られている。これらの時間スケールにおいて磁場と気候変動の間に因果関係があるかどうかを解明していくことも必要である。

#### 具体的研究課題

- 古地球磁場強度の解明
- 古地磁気永年変化モデル
- 逆転時及びエクスカージョン時の地球磁場の特徴逆転磁場のモルフォロジーとその時間変化
- 太古代の古地磁気
- 磁場変動と地球軌道要素・古気候変動との関係

#### 4. 4. 地震火山活動場の性質と活動モニタリング

活断層の不均質構造と地震発生の特徴との関連が明らかになりつつある。また、断層面上のアスペリティー分布に対応するような不均質比抵抗構造が得られつつある。一方、最近の全磁力観測によると、これまで考えられていたよりも大きな圧磁気変化が検出され、体系的観測網の必要性が指摘されている。

火山関連では、熱磁気変化が明瞭に観測され、火山活動の推移を予測する上で全磁力変化モニターは大きな役割を果たすようになってきた。さらに、熱水流動に伴う自然電位の変化も明瞭に観測されている。一方、火山体の比抵抗や磁化の分布、さらに自然電位の分布など、火山体の構造の解明が進みつつある。

##### (1) 列島規模の観測

圧磁気変化の検出を目指した観測は、これまでは地殻の磁化構造を深く考慮することなく行われていたが、最近の全磁力変化検出例によると、今後は特に磁気異常地域で観測を

行うという戦略が求められる。とりあえずは特定の地域で試験観測を行い、圧磁気変化の検出例を増やすことから始めるとよい。その上で、全磁力観測点の全国展開を図るのが適当である。当面は100点程度の連続観測点網を構築し、列島規模の応力変化を調べる必要がある。一方、圧磁気効果の理論的・実験的研究も重要である。例えば温度効果をも考慮した実験などを通して、圧磁気効果の定量的評価を確立すべきである。

このような列島規模の全磁力変化を正確に見積もるには、地殻応力起源以外の変化を除去する必要がある。そのために、日本列島における全磁力永年変化モデルが必要となる。つまり、日本列島標準磁場モデルの構築が求められる。現在、気象庁地磁気観測所による父島（1970年設置）、国土地理院による江刺、水沢、鹿野山、海上保安庁水路部による八丈島（1979年設置）、東京大学地震研究所による八ヶ岳（1970年設置）の6観測所において、絶対観測と連続観測が続けられており、日本近辺における磁場の振舞いの理解に貢献している。しかし、これらの地磁気観測所の地理的分布には偏りがあり、特に西南日本における観測所の必要性が叫ばれてきたが、実現には至っていない。このような問題を補うべく、1995年に国土地理院によって全国11箇所に地磁気3成分と全磁力を測定する無人観測点が設置され、連続的に観測が行われるようになった。これらの観測点及び新規に必要な観測点をネットワーク化し、日本列島標準磁場モデルの高度化を図る必要がある。

地殻比抵抗構造探査法としてのMT観測は強力であるが、ノイズ除去のためにはMT参照観測点が必須となる。今後のさらなるMT観測の必要性を考慮すれば、恒常的なMT参照点の設置が望まれる。当面は東日本、西日本それぞれに参照観測点の設置を急ぐべきであろう。

## (2) 地震発生場および火山体の構造探査

内陸地震発生メカニズムの解明、および、地震予知研究の観点から、活断層を含む活構造地域の地殻構造探査はきわめて重要である。70年代後半から活断層周辺での浅部比抵抗構造調査が精力的に行われ、活断層の破砕帯に対応する低比抵抗ゾーンや断層に沿う磁気異常の存在が確認されてきた。90年代に入って、2次元イメージング手法の発展とともにMT観測の広帯域化が進み、活構造の深部比抵抗構造にその研究対象が移ってきており、地震発生場の性質に関する研究の進展に大きく寄与している。例えば、高比抵抗領域で地震が発生するという活断層周辺での比抵抗構造の不均質性が明らかにされ、さらに、地震波の反射面に対応して低比抵抗領域の存在することが明らかになるなど、地殻深部までの精密比抵抗構造の把握は、地殻内流体（水）の存在に関する重要な情報をもたらすと考えられている。

最近、活断層周辺の応力測定から、主応力方向は断層面にほぼ直行していることが明らかにされてきた。このことから、活断層の“weak fault”というイメージが定着しつつある。つまり、活断層はかなりの部分が破砕されたweak faultであり、アスペリティーの部分でのみ固着していると考えられるようになってきている。活断層周辺での比抵抗構造や磁化構造の不均質性を調べることは、この断層周辺でのアスペリティー構造の解明につながることで期待される。

室内実験の立場からは、断層破砕帯物質そのものの性質の解明が期待される。断層破砕

帯物質は破碎・変質のため岩石がもとの構造を残さず、断層ガウジ、断層角礫といった断層岩とよばれる特異な構造を示すようになってきている。また、断層深部にいたるとさらに粉碎、固結したカタクレサイト、高温のため組成流動を示すようになったマイロナイトといった特徴のある岩石が存在している。また、断層帯には熱水との反応によって生成された粘土鉱物が多く含まれることが想定されるが、実験上の困難さから粘土鉱物の電気伝導度は未解明の部分が多い。まず、各種断層岩の電気伝導度の測定例を増やすことが当面の課題となる。

火山体の深部にあるとされる、いわゆる「マグマ溜まり」を電磁気的な探査で可視化することは現時点で難しいが、この10年間に行われてきた探査によって、活動的火山の地下浅部（数km程度まで）には、多くの場合、極めて電気伝導度の高い層（熱水変質層あるいは火山性流体の滞留層と推定される）が存在することが明らかになってきた。電気伝導度の空間分布からマグマを探査するためには、こうした高電気伝導度の層を突き抜けて地下深部をイメージングできる手法の開発が不可欠である。この10年間で、TDEM法などのアクティブソースによる探査がいくつかの火山で試みられ、深部探査に有望であることが示されたものの、観測例はそれほど多くなく、マグマ溜まりを検出した例もない。今後は、地殻浅部の3次元性をとり入れたモデリング手法を改良するとともに、人工ソースの大電流化や、さらに分解能を高める測定方法を模索することが必要になろう。

磁気的構造探査も重要で、各種飛行体を用いた全磁力マッピングなどをさらに精力的に行うべきである。

### (3) 地震電磁気現象および火山活動のモニタリング

ピエゾ電気効果やピエゾ磁気効果により、地殻の応力に変化が電磁ソースになることは古くから知られている。また、クラックの生成やダイラタンシーによって水の流動が起これば、界面動電現象によって自然電位変動が発生する。さらに、地殻の温度変化は熱磁気効果によって捉えられる可能性があり、地殻流体や温度の空間分布の変動は電気伝導度構造の変化として捉えられる可能性もある。最近では、地震ダイナモ効果の存在が提唱され、実証観測も行われている。このように直接的、間接的に地殻応力変化や地震波伝播に伴う変動が電磁場測定によって捉えられるため、古くから地殻活動監視の一手法として電磁場観測が行われてきた。

この10年間において、長期にわたって安定した電磁場データが面的に取得できるようになった。また取得周波数の広帯域化が図られ、さまざまな電磁放射や電離層異常を捉える研究が精力的に進められた。その結果、地震と相関があるとされる電磁場変動に関する発表や論文報告が多くなされた。異常とされる個々の変動は、前兆的な変動も含まれている可能性はあるものの、周波数帯域、継続時間、振幅、先行時間などについて実に多様な形態を持っていて、それらが本当に地震に関連する現象であることを証明するまでには至っていない。これらについて、地震現象との因果関係の解明が急務である。

この10年間に、GPS, SAR, 超伝導重力計、広帯域地震計など、測地、地震学的観測技術の革新が進められた結果、プレート境界域における固着域と非固着域の存在や地震破壊核の形成から本震に至る準備過程の解明など、新しい地震像が確立されつつある。電磁気学的研究においても、今後上記のような観点からの電磁場変動が捉えられるようになれば、

力学的な観測だけからでは得られない（例えば流体運動を伴った）新しい地震像の確立に多大な貢献をなすものと思われる。しかし、電磁場観測固有の問題点もある。理論的に微弱であると予想される電磁場変動を、日本列島域の高い人工電磁ノイズレベルの中で検出するためには、S/Nを向上させるための新しい観測手法、データ解析手法の開発および改良が必須である。例えば、比抵抗構造を考慮した観測域の選定、人工電流源を用いた精密比抵抗モニタリング、地上の連続観測と繰り返し航空測量との併用、ボアホールを利用した連続観測、空間分布を考慮した電磁ソースの分別（主成分分析）手法の開発などが有効であろう。また、海溝型巨大地震に伴う現象を調べるためには、海底での連続観測は必須であり、そのための開発研究が必要である。電磁現象の素過程解明のための室内実験も推進する必要がある。

低消費電力かつ軽量のプロトン磁力計が普及したことで、火山活動にともなう地磁気全磁力変化が比較的容易に検出できるようになり、活動的火山における地磁気全磁力の観測が盛んに行われてきた（例えば、阿蘇山、雲仙岳、草津白根山、安達太良山、岩手山、三宅島、有珠山など）。このように、全磁力観測が火山における活動監視の標準的項目としての地位を獲得しつつあるのは、世界的に見ても我が国だけと言ってもよい状況である。このことは、今後、この分野で我が国が世界をリードして行くべき立場にあることを意味する。世界の諸火山の監視への普及を考える時、今後は、データを安全・確実に取得するための技術開発（通信衛星や携帯電話の利用）や、さらなる低消費電力化、軽量化、低価格化に重点がおかれるべきである。観測された地磁気変化に火山学的解釈を与えるためには、航空磁気測量を事前に実施しておくことや、地殻変動と熱放出量の観測とのリンクが欠かせない。

自然電位による火山の調査もこの10年間で国内外を問わず盛んに行われるようになってきた。多くの事例で活動火口を中心とした高電位異常が検出されており、噴火活動に伴ってその消長が認められた。今後は、流体流動と電場変動をリンクしたシミュレータを積極的に活用して、地下の熱水対流について、その流量や空間的規模に関する定量的な議論が行われるべきである。また、DC成分だけでなく、三宅島で観測されたような、地下の圧力変動に伴うと考えられる地電位の比較的短周期の変動にも着目して、数秒から数時間の変動を捉える地電位観測を進めるべきである。このような観測は、長周期地震計や傾斜計によって捉えられる地殻の力学的過程に対して強力な制約条件を与えることができ、火山学上の貢献度が高いと考えられるからである。

#### 具体的研究課題

- 日本列島における広域応力変化観測
- 圧磁気効果・熱消磁効果および界面動電効果を用いた地震・火山活動モニタリング
- 断層深部および断層面上のアスペリティーの比抵抗構造
- 火山体深部の電磁氣的構造
- 地震電磁気諸現象の生成メカニズムの解明

#### 4. 5. 具体的施策を必要とする課題

以上に述べた固体地球電磁気学の今後10年の重要課題の中で、大型の予算措置や体制の

整備等の具体的施策を必要とするものは以下の通りとなる。

- (1) 2005-2010 年における我が国主導の国際協力による衛星によるグローバル地球磁場観測の実施
- (2) 永続性のある地磁気観測所およびグローバル地球磁場・電場長期観測を可能にする国内およびアジア・太平洋地域の観測実施体制の整備
- (3) 惑星磁場探査実施と衛星ミッションに関わる研究者の研究環境の整備
- (4) 古地磁気研究者の IODP への積極的参加の推進するための国際的連携の強化
- (5) 列島規模の圧磁気変化の検出を目指した 100 点程度の連続観測点網の構築
- (6) 地震・火山現象を解明するための新しい連続観測手法の開発
- (7) 東日本と西日本における MT 法の常時参照観測点の設置

## 第5章 研究教育体制およびアウトリーチ

地球電磁気学は、学術研究目標以外に、宇宙開発、地球環境、地震予知および火山噴火予知、資源開発など実社会に対して多方面でつながりをもっている。このような分野において、社会に対して相当の貢献を果すことは、一般社会の期待に応えるという意味で極めて重要である。しかし、この方面を担う研究者は依然として少なく、大学等における研究者の育成も依然として不十分である。10年前に「地球電磁気学の発展的将来」を策定した時点から、状況は少しも改善されていない。

一方、前回策定以降の社会情勢の急激な変化により、実社会とのつながりを意識して貢献するのみならず、学術研究目標を主とする分野においても積極的に社会に対して説明責任を果すことが求められるようになった。たとえ基礎科学といえども、その研究費の大半は国民の税金であることから、このことは研究者が当然果すべき義務ではある。しかし、その点を強く意識するあまり、ともすると「役に立つ」ことが、しかも経済社会における時間スケールと同じ、長くても数年から5年程度のスケールで実社会に役に立つことのみが求められるのは、必ずしも好ましいことではない。地球電磁気学分野においても、実社会に直結した部分の背景には、自然現象の予報など、基礎的な学術研究における地道な努力が必要であり、この点を含めた納得できる説明があってはじめて、学問分野としての説明責任を果したことになるはずである。

教育体制の整備は、次代の研究者の育成という研究者の本能とも言うべき重要な目標があるが、社会に対する説明責任のためというもう一つの目標にも同等の重みをおいて行う必要がある。すぐれた後進の育成のためには、大学等における専門的教育の充実はもちろんであるが、将来を担う世代に初等および中等教育の時期から地球科学の分野に関心を持ち、高等教育において宇宙空間から固体地球までを扱う地球電磁気学に興味を持たせるよう、働きかける必要がある。児童・生徒に関心をもたせることが主眼であるから、教育内容は知識の羅列であってはならず、宇宙空間や地球内部への探究に夢をはぐくむことと、人類の存在環境である太陽系の中の地球という存在を正しく知ることの重要性と楽しさが伝わるようなものであるべきである。社会に対する説明責任を果すためにも、初等・中等・高等教育段階における質のよい教育は何よりもまして重要である。そしてそのためには、これらの教育段階において、役割を担う地球電磁気学を含む地球惑星科学の優れた教育者の育成も重要な課題となる。

以下、いくつかの最優先課題について述べる。

(1) 教育体制： 地球電磁気学研究に必要な基礎知識は、現在中学・高校の教育課程において地学、物理学などの多岐にわたる科目中に「埋没」しているが、当該分野固有の教育課程の確立を目指すことも重要である。大学院教育では、広く地球／宇宙科学の知識を身につけさせるために、既存のカリキュラムに加えて、国内の他大学・研究機関を訪問して、先端研究に触れさせるインターン制度を導入するのが得策である。他機関における教育過程・講義内容についての情報開示のために、ホームページを充実させる努力も当然必要である。

(2) 国際交流： 地球電磁気学では国際共同研究が本質的であるため、インターン制度を

海外に広げることや、国際サマースクールを企画運営することで国際交流を進める。なお、先進国への派遣のみでなく、発展途上国の学生・若手研究者の受け入れも同様に重視する。とくに、我が国には、アジアにおけるリーダーシップが強く期待されている。現在、発展途上国との共同研究は、対等の立場で研究成果を共有できていない。各国における独自の研究開発を支援するためには、従来の“単発的”な交流では不十分であり、専門の研究支援組織による国際対応が迫られている。

(3) 専門家とプロジェクトリーダーの分業化： 研究プロジェクトが総合的かつ大型化してきている。一方、ITの進歩にともない高度の情報交換が可能となった。こういった情勢により、共同研究体制にも変革が起こりつつある。今後、研究結果の処理速度が格段に高くなるにつれて、国際的に研究の分業化が進むことが予想される。その結果、研究者は個別分野の専門家集団とプロジェクトリーダーに二極分化される事態が予想される。

(4) 他分野との交流： 研究対象の舞台（たとえば、大気層）が同じであっても、研究課題や興味が異なる場合が往々にしてあり、異分野の交流が盛んではなかった。今後、例えば、総合観測所における研究活動や惑星探査等の大型プロジェクト参画を通じて、同舟異夢を抱いた研究者群が（半強制的に）接触することで、異分野にまたがる横断的研究課題が発掘されるであろう。今後、地球電磁気学が地球科学全体の中で果たす責務を明確にするとともに、研究分野を自縄自縛せず、広い視野で多分野との研究交流を行い、学際分野の課題発掘を常に心がける必要がある。

(5) 広報・啓蒙活動： 人類の利益に直結するさまざまな問題の基礎となる地球電磁気学の重要性は、社会に広く認識されている。しかし、たとえば大気科学を例にとっても、実際の地球環境変化に直結した課題に携わる研究者は全体のごく一部であり、大多数はより基礎的な分野の研究を行っている。したがって、広報・啓蒙活動においても、環境問題を隠れ蓑とすることなく、地道な太陽地球系科学研究の重要性を主張することが重要である。ホームページでのリアルタイムデータ表示、大気の物理化学基礎過程の公開実験、飛翔体・地上観測の体験学習を実施する他、学会でジュニアセッションを企画し、高校生・学部生が発表する機会を設けることも、啓蒙活動として効果的である。

## 執筆者リスト

### 第18期地球電磁気学研究連絡委員会

家森俊彦、歌田久司（幹事）、上出洋介（委員長）、河野 長、本蔵義守（固体地球研究将来計画主査）、向井利典（宇宙空間・大気圏研究将来計画主査）、湯元清文、渡部重十

### 第19期地球電磁気学研究連絡委員会

麻生武彦、家森俊彦（幹事）、歌田久司（委員長）、大村善治、星野真弘、町田忍、山崎俊嗣、渡部重十

### 委員以外の執筆者リスト

#### 宇宙空間研究

小野高幸、斎藤義文、塩川和夫、品川裕之、徳丸宗利、中村正人、長井嗣信、藤井良一、三澤浩昭、宮岡 宏、山本 衛、吉川顕正

#### 大気圏研究

今村 剛、岩上直幹、齊藤昭則、佐藤 薫、塩谷雅人、高橋幸弘、津田敏隆、村山泰啓、中根英昭、余田成男

#### 固体地球研究

井口博夫、上嶋 誠、内田利弘、大志万直人、小川康雄、小田啓邦、乙藤洋一郎、小村健太郎、金松敏也、渋谷秀敏、島 伸和、清水久芳、高倉伸一、田中秀文、綱川秀夫、藤 浩明、橋本武志、林田 明、藤井郁子、藤田清士、牧 広篤、松島政貴、横山由紀子



