

地球電磁気学研究連絡委員会報告

21世紀の地球電磁気学

平成17年5月19日

日本学術会議

地球電磁気学研究連絡委員会

この「報告」は、第18期および第19期日本学術会議地球電磁気学研究連絡委員会の審議結果を取りまとめ発表するものである。

第18期地球電磁気学研究連絡委員会

委員長 上出洋介（名古屋大学太陽地球環境研究所教授）
幹事 歌田久司（東京大学地震研究所教授）
委員 家森俊彦（京都大学大学院理学研究科教授）
河野 長（岡山大学固体地球研究センター教授）
本蔵義守（東京工業大学大学院理工学研究科教授）
向井利典（宇宙航空研究開発機構教授）
湯元清文（九州大学大学院理学研究院教授）
渡部重十（北海道大学大学院理学研究科教授）

第19期地球電磁気学研究連絡委員会

委員長 歌田久司（東京大学地震研究所教授）
幹事 家森俊彦（京都大学大学院理学研究科教授）
委員 麻生武彦（国立極地研究所教授）
大村善治（京都大学生存圏研究所教授）
星野真弘（東京大学大学院理学系研究科教授）
町田 忍（京都大学大学院理学研究科教授）
山崎俊嗣（独立行政法人産業技術総合研究所研究グループ長）
渡部重十（北海道大学大学院理学研究科教授）

要旨

1. 報告書の名称

2 1 世紀の地球電磁気学

2. 報告書の内容

1) 作成の背景

地球電磁気学は、地球を含む太陽系全体を対象に、電磁気学的手法を用いてさまざまな時空間スケールの現象を研究する学問である。地球電磁気学では、扱う領域（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間でも活発な交流が行われてきた。またわが国は、1950 年代の国際地球観測年の頃から現在に至るまで、国際的な枠組みにおいて主体性ある研究活動を実施し、着実な基盤研究の下に国際貢献を行ってきた。この間、平成 3 年 8 月に、日本学術会議地球電磁気学研究連絡委員会は、対外報告「地球電磁気学の発展的将来」を発表し、将来展望をふまえた重要研究課題の策定を行った。その後 10 年以上を経て、研究・教育体制の転換、社会情勢の大きな変化の中で、地球電磁気学はさらなる発展を遂げようとしている。

以上をふまえ、地球電磁気学研究連絡委員会は、第 18 期と 19 期にわたり、地球電磁気学における過去 10 年間の研究実績の評価を行うとともに、同分野の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実施した。この報告書はその結果をまとめたものである。

2) 現状と課題

将来計画では、平成 3 年に策定された重要課題の達成度の評価に基づき、引き続き強化を図る必要のある課題を取り上げるとともに、現状を反映して新たに取り組むべき課題を同定した。これに基づき、必要な研究体制の整備や強化、機器開発の推進、教育・広報体制を充実すべく、諸課題の解決とさらなる研究分野の発展を図ることが必要である。

なお、課題の同定の際には、国内外諸情勢および周辺分野との関連を配慮して、

- ・地球電磁気学の基礎科学としての重要性、人類の知的フロンティア拡大への貢献とともに、
- ・21 世紀における地球環境問題、自然災害予知、宇宙天気予報など、学際領域への積極的取り組み
- ・地球観測など、わが国が国際的な観測研究体制において果たすべき役割の 3 つの事項に特に重点がおかれた。

3) 提言の内容

地球電磁気学の各研究領域における現状認識および問題点の指摘と将来展望を行って重要課題をまとめ、これらの課題を推進するために必要な具体的施策を、太陽地球系科学から宇宙空間研究の 3 課題および大気圏研究の 5 課題の合計 8 課題と、固体地球電磁気学の 5 課題について述べた。

宇宙空間研究では、(1) 太陽および地球磁気圏の衛星観測と惑星探査の推進、(2) 地上大型設備の新設・拡充、(3) 国際協力の推進の合計 3 課題、大気圏研究としては、(1) 国内観測のネットワーク化、(2) 極域の大気観測、(3) 赤道大気、(4) 衛星観測と新しい観測技術の開発、(5) 惑星大気観測の 5 課題を必要な具体的施策とした。また、固体

地球研究については、(1) 衛星によるグローバル地球磁場観測の実施、(2) 地磁気観測所およびグローバル地球磁場・電場長期観測実施体制の整備、(3) 統合深海掘削計画 (IODP) への積極的参加による古地磁気研究の推進、(4) 地球電磁気学的手法による地殻活動監視のための連続観測点の設置、(5) 地震・火山現象を解明するための新しい観測・解析手法の開発の合計 5 課題が、具体的施策として必要と結論した。

最後に、地球電磁気学の発展のためには、教育研究体制・国際交流・アウトリーチ活動の充実等を通じ、国内および国際社会との密接な連携が必要であることを指摘した。

目次

1. はじめに	5.
2. 現状と推進すべき研究課題	6.
2.1. 太陽地球系科学	6.
2.1.1. 宇宙空間研究	6.
2.1.2. 大気圏研究	7.
2.2. 固体地球研究	8.
3. 研究推進のために必要な施策	9.
3.1. 太陽地球系科学	10.
3.1.1. 宇宙空間研究	10.
3.1.2. 大気圏研究	11.
3.2. 固体地球研究	12.
4. 研究教育体制およびアウトリーチ	13.

[本文に出てくる英語名略称]

EISCAT:	European Incoherent Scatter
IAGA:	International Association of Geomagnetism and Aeronomy
IGY:	International Geophysical Year
IODP:	Integrated Ocean Drilling Program
ISTP:	International Solar-Terrestrial Physics
IT:	Information Technology
MLT:	Mesosphere Lower Thermosphere
MST/IS:	Mesosphere Stratosphere Troposphere / Incoherent Scatter
MT:	Magneto-Telluric
SCOSTEP:	Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics
STEP:	Solar-Terrestrial Energy Program
STP:	Solar Terrestrial Physics
SuperDARN:	Super Dual Auroral Radar Network

1. はじめに

地球電磁気学は、地球内部に起因する磁場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を利用して、地球内部構造や地球近傍の宇宙空間を解明する学問として発展してきたが、今日では太陽系全体の宇宙空間から地球中心部まで、極めて広範な領域を対象とする研究分野に発展した。また時間スケールにおいても、地質学的年代スケールまで遡り、地球惑星の形成・進化および現在の状態とそこで発生している諸現象、さらには将来の予測を行う学問として、地球惑星科学の中で重要な役割を果たしている。宇宙および地球の諸現象に関する科学的探求と新知識の獲得により、将来に向けて知の創造と人類の持続的発展への貢献を行っている。

地球電磁気学は、地球内部・大気圏・宇宙空間（惑星間空間・磁気圏・電離圏）それぞれを対象とする研究グループによって行われている。これらのグループ間にさまざまな協力・交流があるのはもちろんであるが、気象学・海洋物理学・地震学・測地学・火山学・地質学・惑星科学など地球惑星科学の関連する他分野との活発な交流が行われているという点も、地球電磁気学の大きな特徴である。いいかえれば、地球電磁気学は、磁気・電気・プラズマなどのキーワードで表される研究手法・手段によって、地球惑星科学の中で分野横断型の研究を展開し、その独自性を発揮しているということができる。また分野全体としてはこれまでの基礎・応用研究に加えて、今後は地球環境問題・自然災害予知・宇宙天気予報・宇宙環境工学などの社会生活に密着した応用研究への積極的参画も要請されている。基礎科学の面においても、自然プラズマ現象の普遍性に由来する太陽物理学・宇宙物理学との連携研究により、人類の知的フロンティア拡大への貢献も期待されている。したがって、地球惑星科学における地球電磁気学が果たすべき貢献はますます大きくなり、これまで以上に多様な交流と学際領域の開拓を進める必要がある。

一方、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。古くは、1950年代の国際地球観測年(IGY)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。最近では、太陽地球系エネルギー国際共同研究計画(STEP)、太陽地球系物理学国際共同観測計画(ISTP)など、わが国の主体性ある活動を国際協力の枠組みにおいて実施し、着実な基盤研究の下に国際貢献を行ってきた。今後とも宇宙観測やグローバル地球観測において国際的な連携は必須であり、その中で我が国が果たす役割は極めて重大なものとなっている。現在準備が進められている今後10年の地球観測においては、地球電磁気学分野の観測の多くが、重要項目として取り上げられ、国際的枠組みで実施されようとしている。また、基礎研究の維持強化については、短期間でなしえるものではなく、国際社会の中での将来の動向を見据えた計画とそれに見合った取り組みが必要である。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、パラダイムを変えるような新しい発想を積極的に発信することが求められている。日本学術会議地球電磁気学研究連絡委員会は、設置当初より一貫して国際地球電磁気学・超高層物理学協会(IAGA)の対応委員会としての役割を果たしてきており、今後ますます多様化する当該分野内および他分野との学術国際交流において、重要な働きをすることが期待されている。

平成3年(1991年)8月、地球電磁気学研究連絡委員会は、「地球電磁気学の発展的将来」と題する対外報告(以下「前回報告」という)を発表し、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策定を行った。この策定から10年余りを経た現在、研究・教育体制の転換、社会情勢の大きな

変化の中で、地球電磁気学はさらなる発展を遂げようとしている。

このような背景を受けて、第18期地球電磁気学研究連絡委員会は、過去10年間あまり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。地球電磁気学がカバーする領域を、大きく太陽地球系物理学(STP)および固体地球電磁気学に分け、それぞれの主査のリーダーシップのもとに、とりまとめ作業が開始された。平成14年3月には、地球電磁気・地球惑星圏学会の協力を得てシンポジウムを開催し、意見交換と議論を通じて問題点の絞り込みを行った。その後、国立大学の法人化など、研究・教育機関をとりまく情勢の変化があり、その作業は19期へ引き継がれた。本報告は、両期委員会における作業内容の要約である。

第2節では、地球電磁気学の各分野における前回報告以来の達成度の評価を含む現状認識および問題点、将来展望、とくに推進すべき研究課題について述べ、第3節においてそれらを推進するために必要な具体的施策、第4節に研究教育体制およびアウトリーチに関する具体的課題についてまとめた。

2. 現状と推進すべき研究課題

2.1. 太陽地球系科学

2.1.1. 宇宙空間研究

宇宙空間物理分野の研究は、これまで主に2つの側面から行われてきた。ひとつは、太陽系に住む我々人類にとって欠かせない「太陽活動と地球の関係」をよりよく知ることであり、もうひとつは、広大な宇宙空間で普遍的に起きている物理過程やプラズマ素過程に関し、直接観測が可能な身近な宇宙空間の研究を通して理解を深めることである。具体的目標は、オーロラや磁気嵐などの地球を取り巻く高温希薄プラズマの諸性質を解明すると同時に、太陽コロナから惑星間空間へ超音速となって流れる太陽風を経て、地球磁気圏・電離圏へと運ばれる物質・エネルギー輸送やそれを支配するプラズマ物理過程を理解することである。宇宙開発時代を経て、この宇宙空間・磁気圏物理の研究は大きく発展し、その対象は地球周辺の宇宙空間だけでなく、他の惑星や太陽風が流れる太陽圏全体へと広がってきている。

近年この研究分野では、従来の枠組みに加えて、次の二つの視点がクローズアップされている。一つは、磁場やプラズマが支配する宇宙一般へと研究の舞台を広げる「宇宙でのプラズマ科学」である。例えば惑星間空間に形成される衝撃波や磁気圏での磁力線再結合などは、高エネルギー粒子生成に直接関連しており、磁場やプラズマの支配する宇宙での重要な要素となっている。直接観測ができる地球周辺空間での磁場とプラズマのエネルギー変換や非熱的高エネルギー粒子加速のメカニズムを理解することで、太陽や天体磁気圏などの宇宙ダイナミクスの理解を深化させ、光・電磁波観測を主とする天体物理研究の発展と相俟って、宇宙プラズマの物理・物性を実証的に解明していく研究が展開されている。また、磁場強度や電離層・大気の有無などで異なる他の惑星磁気圏を研究した上で、地球磁気圏・電離圏を統一的に理解しようとする「比較惑星磁気圏」の研究も、宇宙プラズマ科学として重要な位置付けとなっている。太陽大気についても、地球磁気圏との類似性が数多くあり、学際領域研究が活発になってきている。

もう一つの視点は、「宇宙天気」である。宇宙利用の拡大に向け、太陽風によって変動する地球周辺の電磁環境を定量的に評価し、太陽からのコロナ質量放出や高エネルギー

一粒子発生により生じる大きな電磁環境擾乱を的確に予測して、人工衛星の障害や地上の電力施設等の被害発生を軽減するための研究である。太陽活動と長期地球環境変動との関わりも未知の分野であり、地球上層大気の物理化学過程の解明が大切である。地球周辺の空間は、磁気圏、電離圏、大気圏に大別されるが、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・非定常な複合系の振る舞いとして統一的に理解することは、太陽地球系物理学の黎明期からの主要課題のひとつであった。この宇宙天気研究は、宇宙プラズマ物理の研究と併せて、各国の宇宙関係機関が中心となって推進している国際共同計画である International Living With a Star (ILWS)の重要テーマでもある。SCOSTEP(国際太陽地球系物理学・科学委員会)においても Climate And Weather of Sun-Earth System (CAWSES)という計画がはじまっており、わが国は太陽地球系物理学国際共同観測計画 (ISTP)の中核を担ったあけぼの衛星や Geotail 衛星観測などの実績を基に、国際協力の下で重要な役割を担っている。

この両者の研究計画の背後にあるのは、先端技術を用いた地上および衛星観測の展開と、情報通信技術 (IT) の発達、および、「スケール間結合」や「領域間結合」という言葉に代表される広大な自然プラズマ現象への理論的取り組みである。磁気圏プラズマは、複雑な非一様・非線形システムを形成し、その様々な物理スケールにより、その振る舞いが規定されている。小さなスケールはデバイ長や電子・陽子のサイクロトロン半径などで、大きなスケールは地球半径の 100 倍以上にも及ぶ夜側磁気圏のサイズで特徴づけられる。そのため、宇宙空間の物質・エネルギー輸送の理解には、数 km 程度のプラズマ素過程から、数十万 km の電磁流体力学的現象まで取り扱う必要がある。両者の時間空間変動スケールを個別に取り扱った後で繰り込む従来の古典的マイクロ - マクロ結合ではなく、「スケール間結合」や「領域間結合」を、動的なマイクロ - マクロ相互作用として、理論と観測の両面から解明しようとする取り組みへと進展してきている。

上記の研究を推進するにあたり、地上観測では極域を網羅する電離圏観測やグローバル地磁気観測ネットワークが整備され、地球磁気圏においては複数の人工衛星による多点観測網が敷かれるなど、飛躍的に質の高いデータが取得されてきている。理論面からは、観測に密着したコンピュータシミュレーションによる物理素過程の研究やグローバルモデリングの研究が、スーパーコンピュータの進歩と相俟って大きく発展している。すなわち、精密な磁気圏電磁場モデルやプラズマ組成モデルの下、磁気嵐やオーロラ発生メカニズム解明に本格的に取り組む時期が到来したといえる。このような状況の下で、今後更に推進する必要があるのは、「高時間分解能観測」や「高空間分解能観測」および「多点同時観測」である。

最後に、広大な宇宙空間で生起する多様な現象を多方面から解析するためには、これまで取得されたデータを含め、多種大量の観測データをネットワークで迅速に収集・処理・データベース化して、国内外の研究者が自由に利用できるシステムを整備することも大切である。

2.1. 2. 大気圏研究

太陽地球系科学が関与する大気圏研究は、気象学が主に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、大気圏研究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、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人為起源の地球環境変化の研究に端を発した環境問題が広汎に浸透し、包括的な研究分野として拡張を続けている点あげられる。一方、情報通信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。

1980年代に顕在化した地球環境問題は、当初、地球温暖化およびオゾンホール等の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結果、新しい分野が多方面で開拓・進展されている反面、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。大気圏研究者に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。そのためには、人為起源および地球外（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、地球大気圏の全高度領域における長期変化の機構を明らかにすることが必要である。

中間圏から熱圏下部に至る 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。ここでは、上方伝播してきた大気波動が下層から運動量・力学エネルギーを輸送再配分する一方、高エネルギー粒子の降り込みやオーロラ等を通じて、宇宙空間からのエネルギー流入に対して応答している。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。このような MLT 領域の物理化学過程の解明は、今後推進すべき重要課題の一つにあげることができる。

大気圏研究は、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、発展して来た。今後もこれまでに蓄積された知識・技術を財産として、積極的に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。例えば近未来の具体的な学際研究課題としては、(1) 圏界面：中間圏界面と対流圏界面の対比、(2) 雲：対流圏の積雲対流、極成層圏雲および夜光雲、(3) 雷：下方、雲中および上方放電がある。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。

観測は太陽地球系科学の基礎であり、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、北極域）赤道域等での海外拠点観測、さらに惑星大気の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観測手法を開発する努力を怠ってはならない。従来は複雑な大気現象の一側面を切り取った研究が多かったが、多種多様な研究者がデータを同時参観できる現代では、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特に必要である。

2.2 . 固体地球研究

地球内部の電磁気学的研究は、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持つ研究領域を含むが、1970年代以降の人工衛星による観測の実用化、近年の計算機能力の飛躍的向上や海底長期観測・火山における稠密観測などの観測・測定技術の革新により、さらなる発展を遂げつつある。このような中で、地球惑星内部に係わる電磁気研究について、以下のような研究課題を推進することが特に重要である。

地球磁場の研究においては、地球磁場変動を地球システム全体の変動の一部と捉え、他の様々な変動との関連を総合的に明らかにして将来の変動の予測へつなげることが今後の重要な課題である。最近の計算機能力の飛躍的な向上により、地球惑星ダイナモのシミュレーションが大きく進展し、地磁気逆転などの地磁気的基本的性質を計算機で再現できるようになった。しかし、現状では外核の電磁流体運動と地球システム全体の変動との関連は明らかになっていない。この関連を明らかにするには、様々な素過程(例えば、内核 - 外核 - マントルの相互作用)を理解することが必要である。そのためには、全球的な観測に基づく地磁気永年変化パターンの解明、上・中部マントルの電気伝導度構造の推定、マントル最深部の物性とその不均質性や核・マントル境界付近の磁場の状態解明の努力がなされるべきである。また最近議論になっている、数千年～数十万年のタイムスケールの古地磁気変動と気候変動・地球軌道要素変動との関係を明らかにしていくことも必要である。第二に、地球の進化の一環として地磁気ダイナモを理解することが必要である。そのためには、過去の地球磁場変動の情報とダイナモモデルとを結合することが必要である。特に、地磁気逆転が停止し地磁気ダイナモが現在とは異なったモードにあったと考えられている白亜紀の古地磁気変動の解明と、内核が形成され成長していった太古代の古地磁気変動を明らかにする努力がなされるべきである。地球磁場に関するこれらの研究を進めることは、地球磁場変動の将来予測(例えば、現在急減しつつある地球磁場強度が地磁気逆転のような大変動に至るかどうかなど)にもつながると期待される。さらに他の惑星・衛星の固有磁場の情報とあわせて統一的な地球惑星ダイナモモデルを構築することも、予測可能なモデルへの到達のために重要である。

地震・火山活動等の地殻活動に係わる電磁気学的研究は、自然災害の軽減のため社会的にも要請の大きい研究分野である。地殻活動を研究する固体地球科学全体の重要課題として、日本列島規模の広域応力場変化の検出が第一にあげられる。この目的達成のためには、応力地磁気効果についての体系的観測研究を推進することが必要である。具体的には、観測網整備と並行して理論的・実験的研究を行うことにより、実用的な応力地磁気効果の定量的評価方法を確立することと、バックグラウンドとしての日本列島標準磁場モデルを構築して、異常磁場変動の検知能力を向上させることが必要である。第二に、地震および火山活動発生場の地下構造の状態を正確に把握すること、特に、温度構造や水の分布を推定する手法の確立が重要である。このためには、地磁気地電流(MT)法や人工電流法等による3次元比抵抗探査手法等の観測手法の高度化や観測網の充実が必要である。これと並行して圧電気効果、圧磁気効果、界面動電効果、熱磁気効果等、地殻活動に関連した電磁気現象の発生メカニズムの基礎的研究とシミュレーションの開発が強く押し進められるべきである。

前回報告以降の十数年を振り返ると、「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。地球惑星磁場の研究において最も基本的なデータをもたらす衛星による磁場観測は国際的な連携で行われており、わが国

主導によるミッションの実現による貢献が期待されている。今後の固体地球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充実させるだけでなく、分野間の協力や国際協力など研究体制の整備も重要である。例えば、最近の研究から、地磁気は数千年～数十万年スケールでは極めて大きな変動を繰り返してきたことが明らかになり、古地磁気研究と太陽活動・太陽風の長期変動研究との接点生まれ、太陽地球系物理学との連携が必要となっている。また、他の惑星・衛星の固有磁場研究のためには、固体地球電磁気系の研究者が惑星探査ミッションに積極的に参画することが必要である。さらに、地殻活動に関連した電磁気研究においては、地震学、測地学、地質学、高温高压物質科学等の固体地球科学諸分野との共同研究の重要性は言うまでもなく、連携の一層の強化が必要である。

地球内部の変動に起因する時間スケールの極めて長い電磁気現象の長期的な観測は、固体地球の電磁気学研究のために必須であるが、このような観測を継続することは、近年の社会情勢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である。

3. 研究推進のために必要な施策

本節では、重要な研究課題を推進するために必要な具体的施策をまとめる。以下の策定においては、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係、日本のユニークさ、アジアでの日本の役割、大型機器の整備、人材育成と一般への啓発などの視点が重視された。

3.1. 太陽地球系科学

3.1.1. 宇宙空間研究

(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、衛星観測はその中核をなすものである。地球磁気圏においては、これまで予想しなかった多様なプラズマ波動が観測され、小スケールでありながら大振幅の波動が多数存在し、そのエネルギーは全体のダイナミクスを理解する上でも無視できない。また、2.1節で述べた「スケール間結合」を解明するためにも、時間分解能とエネルギーのダイナミックレンジを向上させた電磁場およびプラズマ粒子観測を推進する必要がある。磁気圏でのプラズマ物理過程・スケール間結合過程を重視したプラズマ輸送過程を研究する「SCOPE 衛星計画」や、地球で最も高エネルギー粒子密度が高い放射線帯を観測する「内部磁気圏衛星計画」は、次期磁気圏研究の要になる。

惑星探査としては、現在宇宙航空研究開発機構(JAXA)とヨーロッパ宇宙機構(ESA)の国際水星共同研究計画が進行しているが、固有磁場を持たない火星のように、太陽風と電離層や中性大気が直接相互作用する惑星磁気圏の研究も重要課題として再度推進することが望まれる。また木星磁気圏は、そのサイズが地球磁気圏に比べて百倍程大きいので、相対論的エネルギーまで加速された粒子が多数存在している。地球磁気圏や水星磁気圏などで得られた知見を木星で吟味し、さらに天体磁気圏へと発展させる上で重要な天体と位置付けられており、SCOPE 衛星計画や内部磁気圏衛星計画の延長線上の研究課題となっている。

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）を積極的に推進していくことも必要である。

(2) 地上大型設備の新設・拡充

レーダーやGPS電波および光学的手法を駆使した電離圏の3次元観測や、汎世界的地磁気ネットワークを更に充実させ、地上と衛星の同時多点観測から、磁気圏と電離圏の結合過程をより正確に理解することが必要である。すなわち、個別の観測に基づいて得られた平均的描像ではなく、多点同時観測に基づく瞬間的描像を得る必要がある。また太陽地球系のエネルギーの源である太陽コロナ放出や、その伝播過程をよりの確に評価するための太陽望遠鏡や大型電波シンチレーション観測などを行うことは、宇宙プラズマ素過程の理解と併せて宇宙天気予報研究の重要項目となっている。そのために必要な大型設備としては、太陽磁場活動のメカニズムを解明するための、画像補償光学装置などを備えた高性能太陽望遠鏡の設置、天体電波の惑星間空間シンチレーションを利用して太陽風およびコロナ質量放出の伝播を撮像観測するための、太陽風撮像観測用大型アンテナの建設、汎地球的規模の地磁気観測データをリアルタイム収集するネットワークの充実、南極の超高層大気観測を3次元的に行うことのできる南極大型大気レーダーの建設を挙げることができる。

(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。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・運用されている。これらの観測で得られた多種・大量のデータが、過去に得られたデータも含め、正しく処理・評価され、世界中の研究者に自由に使われるようにするためには、データセンターおよびネットワークの整備、およびデータの所有権・著作権に関する国際的合意が必要である。

3.1.2 大気圏研究

(1) 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ることにより、列島規模のリージョナル観測ネットワークを構成すべきである。

(2) 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る地域でもあり、環境変化の監視に最適である。昭和基地に世界に先駆けて南極大型大気レーダー（MST/ISレーダー）を設置して、国際的な一大観測拠点とする計画の実現が必要である。また北極域において推進されている、EISCATおよびアラスカ大学を中心とする米国との国際共同研究等を更に充実し継続する必要がある。

(3) 赤道大気

赤道の陸域のうち既にインドシナ・インドネシアには日本の研究グループが、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。また、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。

(4) 衛星観測と新しい観測技術の開発

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、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の発展が望まれる。一方、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、観測される物理化学現象の質まで変わることが期待される。

(5) 惑星大気観測

惑星大気の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り、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。探査ミッションとしては、2009年に金星気象衛星（Planet-C）が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。将来的には木星探査も実現を目指すべきである。

3.2 固体地球研究

(1) 衛星によるグローバル地球磁場観測の実施

地球磁場の空間分布および時間変動を解明するもっとも有効な観測は、衛星による“繰り返し”観測である。このような観測は、1980年のMagsat衛星（米国）、1999年のØrsted衛星（デンマーク）などの国際協力によって行われており、我国も米国、EU諸国と協力して実施することが強く望まれる。そのためには、地球環境観測を行ってきたJAXA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行うべきである。Ørsted衛星以後も国際的に衛星観測計画が進んでいる情勢を考慮しつつ、我国主導の衛星観測を2010年から2015年の間に実施するための準備に早急に入るべきである。

(2) 地磁気観測所およびグローバル地球磁場・電場長期観測実施体制の整備

地球磁場の時間変化を解明するため、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、世界最高水準の観測精度が得られている。今後も、世界的にも評価の高い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。また、過去10年あまりに整備された我が国主導による、西太平洋域の地球磁場観測網や海底ケーブルによる電場観測網を長期的に維持するため、国内およびアジア太平洋地域の諸国を含めた観測実施体制を早急に整備すべきである。

(3) IODPへの積極的参画による古地磁気研究の推進

2003年10月から日米が主導する統合深海掘削計画（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。地球掘削を手段とする地球科学諸分野との連携及び国際的連携を強化し、重要課題解決のための戦略的掘削プログラムの提案や乗船研究を行うことにより、古地磁気研究を推進することが重要である。

(4) 地球電磁気学的手法による地殻活動監視のための連続観測点の設置

地殻活動研究における重要課題の解決のためには、連続的な観測点のさらなる設置が必要である。まず、日本列島規模の応力変化を調べるために、100点程度の連続観測点網を構築して継続した観測を実施すべきである。これにより圧磁気変化の検出例を増やすとともに、理論的・実験的研究により、圧磁気効果の定量的評価手段を確立すべきである。また、従来の地磁気観測所および観測点を含めてネットワーク化し、日本列島標準磁場モデルの高度化を図る必要がある。さらに、MT法による地殻活動域の地下構造探査の高度化のため、東日本および西日本それぞれに恒常的なMT参照観測点の設置を急ぐべきである。

(5) 地震・火山現象を解明するための新しい観測・解析手法の開発

理論的に微弱であると予想される地震・火山活動に関連する電磁場変動を、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、SN比を向上させる新しい観測手法、データ解析手法の開発および改良へ向けた組織的取り組みが必須である。例えば、不均質構造による信号の増幅効果の利用、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、掘削抗を利用した連続観測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、海底での連続観測の開発研究も必要である。

4. 研究教育体制およびアウトリーチ

地球電磁気学は、多岐に亘る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。それゆえ、この分野に関する学校教育、次世代の研究者育成、および社会に対する研究成果の還元は極めて重要である。しかし、これを推進する体制の整備および研究者の意識改革は依然として不十分である。

したがって教育体制の整備も、次世代の育成と社会還元という二つの目標に向けて行う必要がある。すぐれた研究者の育成のためには、大学等における専門的教育の充実だけではなく、初等および中等教育の時期から、地球電磁気学を含む地球および宇宙の科学に興味を持たせる必要がある。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、質のよい教育であるべきである。そのためには、地球電磁気学分野も修めた優れた教育者の育成も重要な課題である。また、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であることや、大気研究においては地球環境変動に直結した問題を扱い、固体地球研究でも地震や火山災害の軽減に取り組むなど、社会と連携して地球電磁気学分野が果たすべき役割は大きい。そのような連携の担い手として、基礎研究と応用をつなぐ分野の人材育成が必要となる。

以下、いくつかの具体的課題と解決の方策を述べる。

(1) 教育体制

地球電磁気学分野の理解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分散している。このためこの分野の取り扱いが非常に限られたものとなっているので、分散した状況を改め、より系統的な教育が行われるように改善する必要がある。大学学部教育では、広く宇宙・地球科学の知識を身につけた人材育成を目指し、各大学におけるこの分野の教育課程・講義内容についての

情報開示を推進して、より多くの優秀な学生を惹きつけると共に、学生や社会のニーズにあった教育の実施につとめる。大学院教育では、研究分野を広く見渡せるようにするため、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、先端研究に触れる機会を提供する、いわゆるインターン制度を導入することが有効である。

(2) 国際交流

地球電磁気学の研究推進には国際協力が非常に重要であるため、上記インターン制度を海外に広げることや、数値シミュレーション等我が国が得意とする分野の国際サマースクールを企画運営することで世界中の優秀な大学院学生や若手研究者を集め、国際交流を進める。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ので、先進国への派遣のみでなく、発展途上国への派遣や各国の学生・若手研究者の受け入れも同様に重視する。特に、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との連携による体制の整備が必要である。

(3) 研究体制

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で、通信技術の進歩にともない高度の情報交換が可能となったため、研究体制にも変革が起こりつつある。IT技術を活用し、各大学・研究機関の研究者が共同して大型のプロジェクトや国際共同研究を一層効率よく推進できる体制を整備する。また、衛星観測・惑星探査においては、大学等に所属する研究者が多数参加し、重要な役割を果たしてきた我が国の衛星プロジェクト推進のシステムをさらに発展させ、衛星・惑星探査計画に経験のなかった研究者でも容易に関わることができるような、制度およびインフラストラクチャー両面からの環境の整備が望まれる。

(4) 広報・啓発活動

地球電磁気学の重要性を社会に広く認識されるよう、説明責任を果たす必要がある。そのためには、広報・啓発活動において、基礎研究としての地球電磁気学研究の重要性とおもしろさを伝えることに重点を置くことが何よりも重要である。基礎的なことからへの理解が広がることによってはじめて、地球環境など具体的な問題への正しい認識と理解が得られるものと考えられる。このような観点で、ホームページでのリアルタイムデータ表示、大学・研究機関での公開実験、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などの啓発活動を積極的に推進する。