

# 地球電磁気学の発展的将来

平成3年8月

日本学術会議

地球電磁気研究連絡委員会

# 地球電磁気学の発展的将来

平成3年8月

日本学術会議

地球電磁気研究連絡委員会

# 地球電磁気学の発展的将来

## まとめ

第14期日本学術会議地球電磁気研究連絡委員会は、21世紀における地球電磁気学の発展を指向し、将来計画の策定を行った。この報告書はこれを取りまとめたものである。研究現状の分析と主要な研究課題の特定に基づき、本委員会では特に推進すべき研究課題あるいは実現すべき研究教育体制として次のものがあると結論した。その際、地球システムという新しい科学的視点、地球環境保全や地球外進出に対する社会的要請、さらにわが国の役割に対する国際的要請なども考慮している。

### (1) 惑星研究の推進

宇宙空間プラズマおよび中層・超高層大気の研究は太陽地球系科学と呼ばれ、太陽活動が地球の超高層大気や磁場に与える影響の研究から出発したが、今では惑星や太陽系空間を包含する大きな分野に成長している。今後の研究は太陽・地球・惑星・太陽系空間を統一的なシステムとして理解することを目標とする太陽惑星系物理学として発展させて行かなければならない。この分野は現時点でのシステムの解明を目指すだけでなく、太陽系の起源や惑星の進化も含むものであり、また惑星における将来の人間活動を視野にいたした惑星環境の基礎研究という意義をもつものである。

わが国の探査機による惑星探査の対象として、まず地球型惑星（火星、金星）を選び、多くの点で地球と共通のパラメーターを持ちながら太陽からの距離の差、磁場の有無や自転速度の相違によって個性的な状態が作り出されているこれらの惑星の電離圏と大気圏の観測を実施し、新しい知見を得ることを計画する。2000年代に入ってからより大型の探査機によって地球型惑星の研究を発展させるとともに、対象を拡大し、大気を欠く水星の磁気圏と太陽風の相互作用、あるいは自転運動を主要なエネルギー源とする木星磁気圏のダイナミックスの研究等をすすめる。これらの惑星探査計画は諸外国の計画との連携によって相互に補完しながら有機的に推進して行く必要がある。

さらに、惑星探査によって得られる知見に基づいて地球を振り返り、新しい観点から地球の磁気圏や大気の観測を行って理解を深めることも極めて重要である。

## (2) 海外拠点観測所の設置

大気圏や磁気圏の大規模なダイナミクスを駆動するエネルギーは地球上の特定の緯度領域で集中的に生成あるいは供給される。大気現象においては赤道域、磁気圏現象においては極域がそれである。わが国は従来これらの重要領域に海外観測チームを派遣し短期集中型の観測を行って研究成果をあげて来たが、南極昭和基地を除き定常的な観測拠点は持っていなかった。しかし今後の研究発展のためには大型観測機器を中心にすえた観測拠点を設置し、国際協力によって長期間の観測を実施して行く必要がある。

中層・超高層の大気については、インドネシアを候補地として赤道拠点観測所を設置し、地表2kmから高度1000kmにわたる大気各層を連続的に長期観測し、大気波動、乱流パラメーター、拡散係数、電離層電場等のデータを得ることのできる大型レーダーを中心とする観測を行うことが望ましい。レーダー観測とともに電波、音波、光を用いた各種の地上リモートセンシング、気球観測、航空機観測を実施し、水平方向にも観測領域を拡大することによって総合的な観測を行う。

極域現象については、従来わが国の観測が重点をおいてきた極光帯よりも高い緯度であり、太陽風と直接のつながりを持つ極冠域の観測を強化する必要があるため、スピッツベルゲンを候補地として非干渉性散乱 (IS) レーダーを設置し、太陽風プラズマの侵入とこれに伴う大規模なプラズマ流動の発生をモニターすることが望ましい。これによって太陽風のエネルギー流入を把握し、衛星による太陽風直接観測との比較によってエネルギー流入機構の解明をすすめる。極域は大気科学にとっても興味深い領域であり、極域拠点観測所ではこの観点からの長期観測も実施する。これらの観測は全地球規模の環境変動の監視と原因究明という社会的要請にもこたえるものである。

## (3) 航空機観測体制の確立

航空機は成層圏やオゾン層の中で直接観測やリモートセンシングを行うことにより組成や化学過程について広範な情報をもたらすことのできる重要な観測手段である。高度5km付近を飛行し成層圏をリモートセンシングで観測する比較的小型の飛行機と高度10km以上の成層圏飛行ができしかも長い航続距離をもつ大型機とを持つことが望ましい。航空機観測は気象分野の雲や放射の観測でも重要であり、これらを総合した航空機観測体制の確立を必要とする。

#### (4) 理論研究の強化

宇宙空間科学および中層・超高層大気科学は不均一、非定常なガスやプラズマを対象とする開放系物理学であり、そこでの過程はしばしば非線形的な成長をとげている。このような複雑な系に生起する現象を理解するためには理論研究を高度に発展させることが重要であるが、この分野における理論専攻部門は存在しないに等しく、うれうべき状態にある。大学や研究所の理論部門を創設強化することが急務である。また数値シミュレーションの技術を発展させることにより、宇宙空間や中層・超高層大気における複数の素過程の競合や非線形発展などを三次元的に追求して行くことが必要であり、シミュレーションによる研究のための環境整備を要する。

#### (5) 海底地磁気観測所の設置

自己浮上型磁力計などによる数ヶ月程度の観測は現在でも行われているが、これらの臨時観測ではコアから発生する主磁場の変動をとらえることができない。地震学のポセイドン計画と同様に西太平洋地域海底に分布をした恒久的な観測点が必要である。このためには電源供給やデータの吸い上げなどの多くの問題を解決する必要があり、技術開発が必要である。当面はT P C - 1など海底敷設ケーブルの利用や、関東東海地方、西南日本、東北北海道など陸地から比較的近距離の浅海、大陸棚などでの設置から初め、技術的な進歩の後に西太平洋の深海への設置を目指すべきである。

#### (6) 地磁気観測所の整備

都市開発や鉄道電化、電力輸送方式の変化など電磁環境の悪化が進んでおり、この中で地磁気観測所の重要性は一層高まってきている。特に地震予知や火山噴火予知など災害軽減を目指す研究には永年変化や外部変化に起因する変動の補正が基本的重要性を持っており、地磁気観測所の役割が大きい。この意味では現在の国内の配置は幾分片寄っており、西南日本、特に中国四国地方に観測所がないことが種々のデータ補正、永年変化の研究の障害となっている。西南日本での地震災害や火山災害の危険度から考えても、早急に地磁気観測所を西南日本に設置すべきであろう。

また現在地磁気観測所を連続して維持することが困難になったために閉鎖する動きが多くの発展途上国にあり、国際的な問題となっている。このため、日本の観測所組織を維持

するとともに、測定ハード・ソフト面や観測技術者の養成も含めて、日本が主に東アジア・太平洋地域の観測所維持のために国際協力すべきであろう。

#### (7) 海底堆積物コア採取専用船

地磁気永年変化モデルの研究から明らかになったように、高い時間空間分解能を持ったグローバルモデルによる磁場の記述から地球磁場の本質的なふるまいが明らかになる。このような研究を、直接観測の数百年から地磁気逆転を含む数百万年まで拡大するためには、海底堆積物コアの系統的採取を行うのが最も現実的である。このために深海掘削計画によって開発されたAPCなどの技術により、海底の堆積物を100-300m程度連続的に採取する専用船を建造する。これは用船によっても実現可能である。堆積物コアからは地磁気永年変化だけでなく、生物種の変遷、火山活動、酸素や炭素の同位対比など、様々な指標を用いて過去から現在への地球環境の変化を研究することができるので、この計画を是非学際的協力のもとに推進すべきである。

#### (8) 磁場観測のための科学衛星や惑星探査機

地球磁場のグローバル観測には Magsat のような極軌道を飛ぶ人工衛星が最も効果的である。これには200-400kmの低高度で比較的短期間に地殻・上部マントル起源磁場の精密マッピングを行うものと、1000-1500kmの高高度で10年以上の期間にわたり観測を続けて、永年変化の精密測定を行うものの二種類が必要である。これらの人工衛星は米欧などでの計画（例えば Magnolia）などと相補的になるよう国際協力の上で実施されるべきものである。

太陽系の惑星が磁場を持っているかどうかという意味での惑星磁気探査は1980年代に一応達成された。次の世代の探査においては金星や火星の固有磁場が本当に存在しないのか、また木星などの磁場がどのような空間分布や時間変化を示すかなどが対象となろう。このためには、地球で行われているようになるべく極周回軌道に探査機を入れる必要がある。

#### (9) データネットワークとデータベースの整備

計算機能力の増大とネットワーク伝送速度の増加に伴い、大量の生データや画像データをネットワークで利用出来るようになることを予見し、地球電磁気に関わる大量の観測データの転送、取扱いや解析に関するシステムを整備して行く必要がある。このためにはW

DC-C2世界資料センターを充実させるとともに、総合的な業務を行うナショナルデータセンターを発足させることが望ましい。

#### (10) 研究・教育体制の整備

学術的目標以外にも、地球電磁気学は宇宙開発、地球環境（過去から未来へ向けて）の監視、地震・火山噴火予知、海底資源開発など人間生活に対し多方面でつながりを持っている。しかし現状ではこの方面の研究者は少なく、また大学等における研究者の養成は全く不十分である。この分野は理学的な面と工学的な面が密接に関連している。このため、理工学の両面を兼ね備えた地球惑星科学等を新設・強化するとともに、特にその中でも地球電磁気学関係の講座を増設する必要がある。

宇宙空間および中層・超高層大気科学は共同利用研究所と大学の研究者、および各省庁研究機関の研究者によって推進されている。これらの機関に属する研究者が緊密に協力することによってプロジェクト研究と基礎研究が一体となって発展するように、客員部門の強化や人事交流を活発に行うことが重要である。

とくに 惑星研究については、全国規模の惑星研究センターを設置し、既存の研究所や大学との連携のもとに固体惑星から大気圏、電離圏、磁気圏にわたる惑星研究の推進にあたることを望ましい。

また、海底地磁気観測所、衛星による磁気探査、海底堆積物コア採取専用船の運用などは、いずれも現存する大学等の部門で実施することは不可能な規模のものである。従って地震研究所、宇宙科学研究所および海洋研究所等に技術開発を進めこれらの事業の推進をはかるための部門を増設するか、「地球惑星電磁気センター」といったものを設置する必要がある。「センター」が設置されれば上記のような事業の他に電磁気関係のデータベースの整備やネットワークの維持、更に東南アジアなど国外の技術者の養成などの国際協力の側面も持たせることができよう。

一方、中学・高校教育においても、教材に地球電磁気学研究の発展を反映させることによって、研究の成果を一般市民に還元するとともに、将来を担う世代に早い時期からこの分野に関心を持たせる教育を行うよう、働きかけて行く必要がある。

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

## 目次

第1章	はじめに	1
第2章	宇宙空間	3
1	現在までの研究の流れとこれから目指すこと	3
2	各分野共通の課題	4
2.1	異質なものの境界に起こる物理現象の解明	4
2.2	複数の素過程の間の競合過程の解明	5
3	各分野毎の課題	6
3.1	太陽と太陽圏	6
3.2	地球磁気圏	6
3.3	磁気圏・電離層結合	7
3.4	他の太陽系天体(惑星、衛星、彗星)の物理	7
4	将来の研究計画	10
4.1	太陽と太陽風	10
4.2	地球磁気圏	11
4.3	磁気圏・電離層結合	12
4.4	惑星電離層・磁気圏	15
第3章	中層大気・超高層大気	18
1	基本的考え方	18
1.1	これまでの発展経過	18
1.2	今後予想される質的変容	18
1.3	本章の構成	19
2	既存各分野ごとの展望の要点	19
2.1	大気化学	20
2.2	大気力学	20
2.3	赤道域大気	20
2.4	極域大気	20
2.5	超高層/電離層大気	20

2. 6	惑星大気	21
3	今後の重要研究課題	21
3. 1	様々な相互作用の研究	21
3. 2	長い時間スケールの現象の研究	23
3. 3	新しい物理学の開拓	25
4	将来の研究計画	25
4. 1	力学・化学過程	26
4. 2	赤道大気	27
4. 3	極域大気	28
4. 4	超高層・電離圏大気	30
4. 5	惑星大気	31
第4章	地球及び惑星内部	33
1	研究推進に当たっての基本的な考え方	33
2	各分野に共通の視点	35
2. 1	各構成部分間、各素過程間の相互作用	35
2. 2	大規模スケール、長時間にわたる進化過程	35
2. 3	人間の生活との関わりをもつ側面	36
3	各分野毎の課題および現状における問題点	36
3. 1	地球内部の構造・物質・状態に関する研究	36
3. 2	地球内部の活動に関する研究	37
3. 3	地球・惑星の進化過程に関する研究	38
4	特に推進すべき研究課題	39
4. 1	地球惑星磁場の起源	40
4. 2	地球磁場変動史	42
4. 3	地球惑星内部三次元構造	44
4. 4	地殻活動監視	47
第5章	研究推進のために必要な施策	50
1	宇宙空間科学および中層・超高層大気科学	50
1. 1	惑星研究の推進	50
1. 2	国際協力の推進	51

1. 3	海外拠点観測所	53
1. 4	航空機観測体制の確立	55
1. 5	理論・シミュレーション	55
1. 6	データネットワーク・総合解析	56
1. 7	研究・教育体制	58
2	地球および惑星内部を対象とする電磁気学	60
2. 1	観測所観測の継続	60
2. 2	海底観測手法の開発および海底観測所の設置	61
2. 3	地球磁場変動史	62
2. 4	衛星の利用	63
2. 5	磁気測量と資源探査	64
2. 6	地殻活動の監視	64
2. 7	データベース	65
2. 8	教育研究体制の見直し	66
資料	第14期日本学術会議地球電磁気研究連絡委員会 委員名簿	67
	将来計画ワーキンググループ メンバー名簿	67

## 第 1 章 はじめに

地球電磁気学の源流は、地球磁場の研究、及び地球周辺の空間に流れる電流に起因する変動磁場の解明にある。しかし今日の地球電磁気学は、はるかに広範な問題を対象とする巨大な分野に成長している。その理由は磁場は地球内外に生起する様々な現象への窓口であって、磁場を通じて地球・惑星の内部構造や大気・プラズマのダイナミクスを見ることができからである。地球磁場の起源と変動はコアやマンツルの活動を反映するものであり、また地震や火山活動にも磁場変化がともなう。地球外部電流による磁場変動は、電離層から太陽系空間にいたる宇宙空間プラズマの挙動に基づくものであり、また中層・超高層大気現象の研究につながるものである。

1960年代から地球電磁気学は特に目ざましい成果をあげてきた。地球内部においては、古地磁気研究がプレートテクトニクスの確立に中核的な役割を果たした。宇宙空間プラズマの研究は電離層を越えて磁気圏、太陽圏に広がり、惑星や彗星のプラズマやその太陽風との相互作用を含めて、宇宙空間を満たすプラズマと磁場の激しいダイナミックな挙動が明るみに出された。一方電離層より下部においては、成層圏との間に存在する厚い大気層に探査のメスが入られ、ここにおいても大きく流動し変動する中層・超高層大気の様相が明かになった。この発展を受けて、1990年代以降の地球電磁気学は地球・惑星内部や太陽・惑星系空間のダイナミクスを系統的に把握し総合的に理解することを目指すとともに、現象の根底にある素過程について本質的な理解を深めることを指向している。

国際協力は古くから地球電磁気学の特徴的な側面であり、数十年前の国際極年の時代から全地球的な協力によって研究が推進されてきた。近年特に注目されるのは国際協力においてわが国の役割が高まったことである。わが国における地球電磁気学の水準向上と国力の増大があいまって、STEPなどの大型国際協力プロジェクトにおいてもわが国の研究者および研究機関の果たす役割が大きくなっており、国際的な地球電磁気学の研究推進におけるわが国の責務は非常に重いものとなっている。

この重要な時期にあたって、日本学術会議地球電磁気学研究連絡委員会では21世紀の初頭約10年間を見通す将来計画の策定をおこなうこととし、1990年春から約1年にわたって作業を行った。この小冊子はその報告書である。作業に当たってはワーキンググループを編成して素案を作成し、これを本委員会で検討するという方式をとった。地球電磁気学研究連絡委員会委員および将来計画ワーキンググループの名簿を別表に掲げる。

広範な領域を包含する地球電磁気学の性格に鑑み、本報告書の本文第2-4章では領域を宇宙空間、中層・超高層大気、および地球及び惑星内部の三つにわけ、各々について研究の現状認識と問題点の確認に始まり、将来の展望、重要な研究課題の特定を行っている。第5章では、これらの研究を推進するために必要な施策を記す。巻頭においた「まとめ」は、本報告書の要約である。

## 第2章 宇宙空間

### 序

「我々が住む大気圏の外には何が起きているだろうか」。素朴な疑問から出発したこの分野の研究は、現在、太陽と地球を取り巻くプラズマ大気から、外は太陽圏の終端までの全てに対象がひろがり、その内容はプラズマ物理の最先端を含んでいると言ってよい。一方で、30年以上にわたって追い求めてきた謎の中には、残念ながらいまだに解決されていないものも多数ある。21世紀初頭までの近い将来を見通したとき、この研究分野に於て重点的に追求すべき視点について述べる。

#### 1 現在までの研究の流れとこれから目指すこと

この分野の研究は、1960年代初頭の衛星時代の幕開けと共に現在の発展の基礎が築かれた。それからの15年間を基礎的発見の整理と、それに伴う理論的モデル提唱の時代だったとすれば、70年代の後半からは、より進歩した観測手段による時間空間的に詳しいデータの獲得によるモデルの検証に力が注がれた。また、新しい領域の開拓も不断に行われた。特に観測機器の発展と時間分解能の増大により、地球周辺のプラズマのふるまいに関する知識は格段に豊かになった。しかし、これらの知識の増大は決して十分ではなく、逆に一方で新たな謎を増やしたといってもよい。つまり、個々の素過程については、予言された性質が検証されたものも多いが、それぞれの要素が複雑に絡み合った非一様な系としてみる時、どの素過程が優位を占めるかを結論するには、理論的にも、観測的にも、まだ全く不十分な状態であるといってもよいだろう。この点に関しては2節で、各分野共通の問題点としてもう一度ふれたい。

観測的には、非均一でしかも時間的変動の激しい系の観測は非常にむずかしい。特に広い空間の一点でしか観測することの出来ないことの多かった我々の分野では、空間構造と、時間変化を見分けることが原点であり、90年代はこれを技術的に実現して全体像をつかむための努力をしなければならない。90年代の観測はすでにそのことを念頭に計画段階にあるものも多いが、ここでもう一度その方向性を確認すると、

○ 国際協力による多点観測（地上、衛星）、特にISTPやSTEP計画によって太

陽一地球系の各領域の相互依存を明確にすること

- 未探査域の開拓．．．太陽極域，太陽コロナ外縁部，惑星の未探査部分などに観測器を送り今まで得られなかった情報を得ること
- これらに対する理論のサポート

を主要な軸として、周辺の発展をはかるべきである。

さて、これらを礎として、来る21世紀にかけて何をなすべきか。この技術革新の時代で、未来にどんな技術発展があるかをよむことはむずかしいが、宇宙空間という人類の未来にかかわる分野としての責任と発展性を軸に考える必要があることは間違いない。特に、太陽地球周辺の空間の物理的諸過程を明らかにするために

- 懸案の課題を解明する鍵となる情報を与える、新観測テクノロジーの開発
- そこに得られた情報と理論的考察に基づく統一像の構築

が必要であり、その理解の上に立って、

- 人類の生活圏に直接関わる科学としての環境科学へと移行すると同時に

- 人類の未知の領域を求めて、さらなる未探査領域開拓の続行が必要である。

これらを実現するために力をいれるべき具体的プロジェクト項目についての議論は、4節に述べるが、次節では、これからの我々の研究の基本的視点と、各領域における研究課題について述べる。

## 2 各分野共通の課題

第1節に述べたように、地球周辺の空間の物理はまだ謎を多く含んでいる。それらをよくよく整理してみると、(1) 異質なものの境界に起こる物理現象の解明 (2) 複数の素過程の間の競合過程の解明の二つが最も重要なものとして浮かび上がってくる。これは、我々の分野に広く共通したことであると思われるので、以下に少し詳しく述べる。

### 2. 1 異質なものの境界に起こる物理現象の解明

我々は、その観測領域が広がるにつれ、常に新しい領域にぶつかってきた。それらの

領域はしばしば、圏という名前でよばれる——電離圏、磁気圏、太陽圏、といったように——。さらに、いま我々は別の惑星のテリトリーにも踏み込もうとしている。これらの領域で、我々はしばしば自然にできた非常にシャープな境界に出会う。そこでは、異なる起源を持つプラズマ、異なる性質の媒質が、ダイナミックに接しあっている。多くの場合、これらの境界の性質が、一方の領域から他の領域への物質輸送、エネルギー輸送を決定し、ひいてはシステム全体の振舞いを決定している。

2つの隣合う領域が両方ともコリジョンレス（無衝突プラズマ領域）の場合には、両側の領域の状態が非常に異なるとそれを緩和するために、一様な媒質中では起こらない種類の特別な過程（異常輸送、境界不安定、磁気再結合）が起こることがわかってきた。定在衝撃波、磁気圏境界面、電離層と磁気圏の境界、プラズマシート境界層、低緯度境界層（LLBL）など、現在残されている主要な問題は、本質的にこの種の過程を説明することであろう。さらに、これから我々が立ち向かわなければならないのは、コリジョンレスな領域とコリジョナルな領域（原子分子衝突の多い気体）の境界である。火星、金星など磁場のない惑星での太陽風—上層大気の相互作用、太陽圏と星間空間物質の境界など、これまで我々が扱ったことのない分野を、以上のような統一的視点で説明する必要がある。

## 2. 2 複数の素過程の間の競合過程の解明

前に述べたように、我々が出会った自然プラズマの世界は、強い非平衡、非一様な世界であった。そこで起こる物理は一元的でなく、様々な要素がぶつかり合っている。プラズマの理論で一様な媒質中に出てくる様々なマイクロな波動不安定現象は、互いに競合しあって、ある時は他を抑圧し、ある時は互いに他を助け合って一つのマクロな状態を形作っている。また、マクロな相互作用過程も、複数のものが共存して働いていることが明らかになってきた。それぞれの素過程は、理論的に説明できる範疇のものであっても、それらの競合過程は、本質的に非線形な現象であり、理論だけで解決できる問題ではない。むしろ理論やシミュレーションから、何が決定的パラメータかを定め、それを観測できる手段を開発することが重要となるであろう。プラズマ中では、電磁的カップリングにより、非常に遠くまで影響が及ぶ。同一場所に起こる素過程の競合だけでなく、離れた領域間で起こる相互作用の総合的理解が必要になる。この意味でも、広い領域に関する同時的観測手段（例えば撮像装置）の開発が必要になろう。

### 3 各分野毎の課題

以上の基本的視点の上に立って、特に重点を置いてすすめるべき研究対象について以下にまとめる。

#### 3. 1 太陽と太陽圏

太陽コロナから太陽風への遷移領域、内部太陽圏から外部太陽圏への遷移、及び太陽風プラズマから星間空間プラズマへの遷移領域に焦点がおかれよう。特に

- 太陽風の加速領域の特定（低速風、高速風）と、高速太陽風を生成するメカニズムの解明
- 太陽風プラズマ中の微視過程（マイクロ）が流体的側面（マクロ）をいかにコントロールするか
- 太陽内部の基本サイクルと太陽エネルギー放射との関連
- CME（コロナからの質量放出）、太陽フレア等の生起条件と予測
- 極域の太陽風構造とその太陽圏全体に及ぼす影響の解明
- 太陽圏と銀河系空間の境界領域の物理

などが、太陽圏の全体像を把握する上で鍵となる領域になろう。また、宇宙線を含む星間空間の物理、恒星風との比較など学際領域も進める必要がある。

#### 3. 2 地球磁気圏

地球磁気圏は、磁気圏学発展の原点である。80年代の研究は、磁気圏内のプラズマ現象の多様性を強く浮きたさせた。個々の現象には理論的に切り放して説明できたものがあるが、磁気圏全体としての基本的なメカニズムの定量的な理解が進んでいない。以下の懸案の重要課題の早急な解決が望まれる。

- 昼側境界面での輸送過程の中で、リコネクション、LLBL, KH, FTE,  $Cu$   $s$   $p$ 等の各素過程・領域の相対的重要度、および相互の依存性、干渉性と沿磁力線電流の形成機構

- 太陽風起源と電離層起源の粒子、それぞれの磁気圏内のサーキュレーションと加速、特にプラズマシート生成のメカニズム
- 尾部の形成と維持機構
- マグネトシースのタービュレンスと太陽風-磁気圏相互作用への影響
- サブストームのトリガーと尾部リコネクションの3次元的发展

これらのひとつひとつが、すでに80年代の観測で決着のつかなかった困難な問題であるが、それが多面的に絡み合った全システムとしての全体像を得るには、個々の観測の強化と同時に、点から多点、多点から面の情報へと、情報の性質を変えて行かなければならない。これらの理解の上に、太陽風から磁気圏へのエネルギー流入過程について何が本質的か総合的理解が得られよう。

### 3. 3 磁気圏電離層結合

この領域の物理は、オーロラとそれにかかわる粒子加速が重要な焦点である。沿磁力線電場の存在は理想的MHDの破れを象徴していると同時に、磁気圏と電離層領域の境としての高度数千キロから一万キロの領域の重要性を明らかにした。ここでも、個々のミクロな現象の競合過程と、そのマクロな場へのはねかえりが問題になろう。特に、

- 沿磁力線電場の維持機構と時間的変動、磁気圏-電離層結合への影響
- 各種波動モード成長の競合過程と、その定量的算定、特に粒子加速への寄与
- オーロラの構造（昼側、夜側オーバル、極冠域）に対応する磁気圏側の構造の特定（グローバルな構造とスモールスケールな構造の両方に対して）
- 電離層の存在と沿磁力線電流が磁気圏擾乱に能動的役割をはたすか
- 電離層と中性大気とのカップリング

等が重要である。また、電離層レベルと磁気圏レベルの磁力線をつなぐ正確な磁気圏磁場モデルや、磁気圏プラズマ組成密度等の標準モデルの構築が望まれる。

### 3. 4 他の太陽系天体（惑星、衛星、彗星）の物理

地球以外の太陽系天体の研究においては、その天体自体への興味とともに、比較惑星学の観点が重要なファクターとなる。それぞれの惑星の周辺環境の違いが、磁気圏現象に

おける様々な物理的プロセスの発現・競合・干渉にどの様に反映するか知ることにより、宇宙空間プラズマ現象の究極的な理解が得られるであろう。

### (1) 固有磁場を有する惑星の物理

水星、木星、土星、天王星、海王星は、固有磁場に基づく磁気圏を持つことが確認され、比較惑星磁気圏学の対象となってきた。磁気圏現象を支配する要因である惑星自転、衛星公転、磁気圏対流、太陽風変動などはそれぞれ違った時間変化スケールを持つから、磁気圏の連続観測に基づいてこれらの効果を分離すれば、現象を支配する法則を解明することが出来るはずである。また、地球と外惑星の磁気圏はいずれも非熱的電波源であり、磁気圏擾乱のリモートセンシングが可能である。惑星周回の人工衛星による直接探査計画と並び、地上あるいは地球周辺軌道上からの惑星電波観測が今後重要な役割を果たすであろう。

比較惑星磁気圏学上、次の項目が重要である：

- 磁気圏内対流のパラメタ依存性（太陽風パラメタ、惑星ダイポールの強度、傾きなど）の解明
- 木星、土星磁気圏外層部（共回転部分）の持つ大きな回転エネルギーが太陽風・磁気圏相互作用に持つ影響
- 磁気圏高エネルギー粒子の補給・流出機構と惑星間空間における伝搬機構
- 衛星大気やリングの中性成分と磁気圏プラズマ大気の相互作用
- 衛星の運動に伴う、惑星電離圏－衛星電離圏間の電磁相互作用
- 地球と異なる条件での電磁波放射機構の解明

### (2) 固有磁場を有しない惑星・彗星の物理

固有磁場を持たない（または、あっても非常に弱い）金星・火星・彗星と太陽風の相互作用においては、太陽風起源の磁場が捕捉されてできる「誘導」磁気圏とも呼ぶべき領域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。例えば、金星、火星には、太陽風と電離層または中性大気が直接接するという地球にはない形の境界面が存在する。この境界における物理現象の解明には、地球磁気圏でなじみの深いMHD的過程ばかりではなく、中性粒子の存在に基づく新しい効果（ピックアップ過程とそれに伴うプラズマ乱流励起、有限ラーマー半径効果、臨界速度電離過程など）を考慮しなければならない。特に、

- 電離大気の生成維持機構
- 太陽風磁力線の電離層，大気，地表への侵入過程
- 電離層イオンの流出機構と大気進化への影響
- 微弱な固有磁場，表面の残留磁場の存在の有無とその影響
- 尾部の構造とダイナミクス，サブストームに類した現象の可能性

などに関し，比較惑星磁気圏学的に貴重な情報が得られると期待される。

磁気圏現象を究極的に理解するために，地球と極端にちがう環境では問題のプロセスがどう競合し，どう振舞うか理解することが大切である。さらに，人類の未来の生存圏のひろがりとしての太陽圏を考えるなら，惑星の物理は，今の地球物理と同じように環境科学としての地位を占めることになる。

金星、火星には、太陽風と電離層または中性大気が直接接するという、地球にはない形の境界面が存在する。これらの磁場の弱い惑星、および水星、彗星では、いままで地球磁気圏でおなじみのMHD的な相互作用と、別の過程（大ラーマー半径、中性粒子との相互作用）との共存、競合過程が起こっていると考えられる。特に、

- 1) 電離大気の生成維持機構
- 2) 太陽風磁力線の電離層，大気，地表への侵入過程
- 3) 電離層イオンの流出機構と大気進化への影響
- 4) 固有磁場の存在と影響
- 5) Near-tailの構造とダイナミクス，サブストームに類した現象の可能性

などに関し，比較惑星磁気圏学的に貴重な情報が得られると期待される。

外惑星（木星以遠の惑星）は逆に，大きな双極子磁場と，強い回転効果に特徴があり，さらにリングや磁気圏内をめぐる衛星との相互作用等，地球磁気圏にない効果をもつ。特に、

- 1) 強い遠心力と回転エネルギーが太陽風磁気圏相互作用に及ぼす影響
- 2) 強く傾いた双極子のもとでの磁気圏プラズマ対流
- 3) 衛星大気やリングの中性成分と磁気圏大気の相互作用
- 4) 衛星の運動に伴う惑星電離圏と衛星電離圏の電磁相互作用
- 5) 地球と異なる条件での電磁波放射機構と，擾乱のモニター

など，比較惑星磁気圏学上重要である。

## 4 将来の研究計画

第1～3節で述べたように2000年を越えての宇宙空間プラズマの研究は、非平衡で非一様なプラズマが支配する太陽系空間、磁気圏、電離圏のさまざまな構造をつくり出しているマイクロ過程とマクロ過程を明らかにすることによって、太陽地球惑星系環境の理解に重要な貢献をすることを目標にしている。そのために今後2010年頃までに、1) 太陽と太陽風、2) 地球磁気圏、3) 磁気圏・電離圏結合、4) 惑星電離圏・磁気圏、の分野に関し、以下の研究計画を実施すべきと考える。

### 4. 1 太陽と太陽風

#### (1) ソーラープローブ計画への参加

0.3 AU 以内の太陽風は探査機によってこれまで直接観測は行われたことがない。2000年代初頭の打ち上げを目指して米国NASAが計画中のソーラープローブ計画は太陽から4Rs(Rsは太陽半径)まで接近するという画期的な試みであり、日本もこの計画への参加を積極的に考える必要がある。この計画が実施されればこれまで謎として残されていたコロナの加熱と太陽風の加速の機構が初めて直接観測のデータにより明らかにされる。

#### (2) 太陽同期衛星による太陽および太陽風観測

国際協同衛星計画として2000年代初頭に太陽同期衛星の打ち上げを計画する。20～60Rs軌道は太陽自転周期とほぼ同期するので、この軌道から太陽風を直接観測すると同時に太陽面上の諸現象をリモートセンシングで観測する。これらの観測から、太陽面上の磁場構造変化、コロナ、フレア現象等と太陽風の加速やCMEとの関係を明らかにすることができる。

#### (3) 太陽活動及び太陽風の総合的地上観測

太陽風の定点観測データは、STP研究の最も基本的なデータであり、長期にわたって定常観測として実施する必要がある。地球前面でのラグランジェ点での定常観測を国際協力のもとに実施する。

高精度太陽周期活動望遠鏡で太陽基本物理量(磁場、速度場、輝度)を長期観測し、

太陽周期活動の長期変化を明らかにする。また電波ヘリオグラフにより太陽活動域の形成とフレアの発生機構を解明する。さらに多周波、多点のIPS観測網を建設し、高い時間・空間分解能により太陽風観測を実施する。特に太陽近傍での太陽風のIPS観測を長期連続に実施し、その変動の実体を明らかにする。さらに、太陽からの中性子のモニタリングをハワイのマウナケア山頂、ボリビアのチャカルタヤ山頂、ケニアのライキピア大学、フランスのピレーネ山頂で国際協同観測として実施する。

#### (4) 高エネルギー宇宙線観測による太陽圏大規模構造の研究

深い地下での高エネルギー ( $\sim 10^{12}$  eV) 宇宙線観測および空気シャワー ( $10^{13} - 10^{14}$  eV) の観測を長期に実施することにより、100 AU 程度の大きさをもつ太陽圏の構造を明らかにする。

#### (5) 計算機シミュレーションによる太陽圏の研究

太陽磁場構造、フレアの発生機構、CME発生機構、コロナ加熱機構、太陽風加速機構、太陽圏境界における太陽風と星間物質の相互作用、異なる銀河環境における太陽圏の構造の変化等を計算機シミュレーションによって解明する。

### 4. 2 地球磁気圏

#### (1) クラスタ衛星計画

磁気圏の境界層を形成するカスプ、低緯度境界層 (LLBL)、マントル、プラズマシート境界層 (PSBL) の構造と境界不安定性、および境界領域中でのミクロなエネルギー、運動量、物質輸送過程を明らかにするために、クラスタ衛星により空間と時間の分離を行う。さらに磁気圏のグローバル構造をとらえるために磁気圏の紫外線撮像を行う他、ロケットから放出したイオン ( $Ba^+$ 、 $Li^+$ ) による磁力線トレーシングの撮像を行う。さらに、これらのデータからプラズマシート形成過程やサブストームのトリガーと発達過程の研究を行う。

観測器：磁場、電場、プラズマ、高エネルギー粒子、電子銃、イオン銃、  
波動 (含む、サウンダー)、紫外・可視磁気圏撮像

打ち上げ時期：2000 年前後（次期太陽活動極大期）

軌道：遠地点  $\sim 20$  Re、軌道傾斜角  $\sim 75^\circ$

衛星間の距離は 1000 - 10000 km 程度の範囲で変化させる

共同観測：極域からのロケット実験（Ba トレーサーの放出等）

地上ネットワーク観測

低高度小型衛星およびその編隊による観測

## （2）静止軌道衛星および準静止軌道衛星による磁気圏モニタリング

太陽地球系科学研究にとって磁気圏の長期連続モニターは、基本データとして重要である。磁気圏の基本量である磁場、電場、プラズマ粒子の他、電離圏プラズマに影響を与える太陽紫外線スペクトル輝度のモニタリング観測器を各種の静止衛星に搭載し、定常観測的にデータを取得する。また周期 24 時間で静止軌道周辺を動き回る衛星を複数打ち上げ同様の観測を実施する。

## （3）理論・計算機シミュレーション

磁気圏は電磁流体力学的マクロ過程と波動粒子相互作用によるマイクロ過程が相互に影響し合う複雑なフィードバック系となっており、非線形性、空間的な不均一性、非定常性によってさまざまな現象が生み出されている。そのため理論・計算機シミュレーションとしては最も複雑な物理系を扱うことになるが、計算機能力の向上とともに、今後は複数の素過程の競合関係のシミュレーションが可能となる。

## 4. 3 磁気圏・電離圏結合

### （1）クラスター衛星計画

複数（5～10 個程度）の小型衛星を同一極軌道にクラスターとして打ち上げ、磁場、電場、粒子の同時観測を行う。観測データはクラスターの中心に位置する親衛星を介して地上に伝送する。これらの観測により従来の衛星観測では不可能であった時間空間変動の厳密な分離を行い、磁気圏・電離圏結合系における磁場、電場、電流粒子の 3 次元構造を明らかにする。

観測器 : 磁場、電場、プラズマ粒子  
軌道 : 遠地点 10000 km、近地点 300 km の極軌道  
衛星間の距離 : 30 ~ 50 km 程度  
打ち上げ時期 : 2000 年代初頭  
衛星重量 : クラスター親衛星、300 kg 程度  
                  クラスター衛星群、1機 100 kg 程度

## (2) 南北極域地上多点観測網によるオーロラ現象の観測

磁気圏・電離圏結合系における諸現象は極域に集中して投影されるので、衛星観測に呼応した極域での地上多点観測はこれら諸現象の理解のための最も有効な手段である。特にオーロラ現象は太陽風から磁気圏へのエネルギー輸送過程、磁気圏でのエネルギーの輸送・変換過程、沿磁力線電流による磁気圏と電離圏の結合過程、沿磁力線電場や波動-粒子相互作用によるオーロラ粒子の加速過程など磁気圏における重要な物理過程をすべて含んでいるので極域地上観測の中心となる。

今後の方向性としては、オーロラ現象と磁気圏の構造変化を一対一に対応づけるため、オーロラ帯での観測に加え、これまであまり観測が行われてこなかったカスプ領域と極冠帯での観測が重要となる。また観測項目としてはオーロライメージング観測、磁力計観測、リオメータ観測、VLF波動観測など時間・空間分解能の高い総合的な観測が必要となる。観測網は、衛星によるデータ取得を行う無人観測所と有人の拠点観測所で構成し、国際協力により各国が分担し構築する。

観測を北極域と南極域の両方で行うことにより、南北の電離圏状態の違いが磁気圏・電離圏の結合過程にどのような影響を及ぼすかが明かとなる。また北極域はすでに多数の地上観測点がありレーダなどの大型施設の建設にも便利なので、オーロラ現象の広域精密観測に適している。一方南極側では極冠域が大陸上に位置するため、極を取り巻くように観測点を配置することができ、極冠帯現象をすべてのローカルタイムで同時にモニターできる。北極域での拠点観測所や南極の観測基地では自然現象の長期変動を知るために磁場、オーロラ、電離層などの基本物理量の観測を長期に定常観測として実施することも重要である。

## (3) 北極ISレーダ計画

非干渉性散乱（IS）レーダは電離圏プラズマの動態（電子密度、電子・イオン温度、イオン組成、イオンドリフト、降下粒子エネルギー、ジュールエネルギー等）に加え、中層・超高層大気の動態（大気運動、大気組成、ナトリウム層、中間圏雲等）を総合的に観測できるので電離圏・磁気圏結合系の研究にとってはきわめて強力な手段である。すでにグリーンランドレーダ（米国）が稼動中であるが、これに加え、我が国とヨーロッパ諸国が共同でスピッツベルゲンにISレーダを計画し、さらに米国はアラスカとレゾリュートベイにISレーダを建設することを計画している。これらが完成すれば、北極域の極冠域、カस्प域、オーロラ帯を同時に観測することが可能となるので、この分野の研究の飛躍的発展が期待できる。

一方、干渉性散乱短波（HF）レーダはISレーダほど大型ではないが、一つのレーダで数千kmにわたる広範囲の領域を観測できることから、北極域の数カ所に建設することにより、北極全域のカバーが可能になる。従って、この観測から極域全体のプラズマの運動や電場分布が求まることになる。現在この計画は米国とヨーロッパを中心に進められているが、我が国もこの計画への参加が望まれる。

#### （４）南極レーダ計画

北極域でのISレーダやHFレーダ計画に呼応し、南極域でもHFレーダ観測網の建設が米国、イギリスで進められている。我が国もこの計画に呼応し昭和基地にHFレーダの建設を計画している。ISレーダに関しては、まだ南極域に一カ所もないが、米国が極点基地への建設を提案している。今後各国が協力してISレーダ計画を進めていくことが望まれる。

#### （５）ロケット観測計画

磁気圏・電離圏の研究におけるロケット観測の役割は、電離圏から上部電離圏にかけての高度分解能の高い観測である。観測場所としてはこれまであまりロケット観測が実施されたことのないカस्प領域や赤道域の高度100～1000kmの領域が興味深い。

#### （６）理論・計算機シミュレーション

オーロラ粒子の生成にとって重要な沿磁力線加速の詳細な物理機構は未だほとんど解明されていない。沿磁力線電場はエネルギーの低い捕捉粒子や背景粒子群によって担われ

ており、エネルギーの高い粒子が選択的に加速されると考えられている。またオーロラのアークは南北方向に極端に薄い空間構造をもっていることから空間的不均一性がオーロラ粒子加速の本質と考えられる。沿磁力線電場というマクロ構造と波動・粒子相互作用というマイクロ過程のフィードバック系を理解するには理論・計算機シミュレーションが重要な手段となる。また電離圏プラズマの磁気圏への供給過程に関してもまだほとんど解明されておらず、中性大気と電離大気の衝突過程を考慮した磁気圏・電離圏結合の計算機シミュレーションが今後は必要となる。

#### 4. 4 惑星電離圏・磁気圏

現在米国、ソ連、ヨーロッパは惑星研究を急速に進展させようとしている。その中心は火星探査であり、米国は 1992 年にマーズオブザーバーを打ち上げる準備を進めている。またソ連は 1994 年に打ち上げを目指しマーズ 94 計画を進めている。その後 2000 年代初頭の米国、ソ連、ヨーロッパの火星計画としてはローバーやサンプルリターンなどの計画がある。金星に関しては現在米国のマゼラン探査機が表面地形を観測中であるが、その後の計画は今のところない。水星に関しては米国が 2000 年代初頭に実施したい希望である。木星に関しては米国のガリレオが 1995 年に木星に到着し、オービターになる予定である。土星に関しては米国とヨーロッパが 2000 年頃土星とその衛星タイタンの探査を目指してカッシーニ計画を準備中である。彗星・小惑星に関してはアメリカが 1994 年打ち上げを目指し C R A F 計画を準備中であり、その後 2000 年初頭には彗星核のサンプルリターンを目指すロゼッタ計画を立案中である。ソ連も小惑星探査のベスタ計画をもっている。

こうした情勢の中で、現在宇宙科学研究所では M-V ロケットを開発中であるが、これを使用すれば 1990 年代に火星や金星探査を実施することは十分に可能である。2000 年代初頭の我が国の惑星探査としては水星探査や木星/冥王星探査等が考えられるが、これには M-V よりもさらに大型のロケットを必要となる。各国との共同プロジェクトとして実施する方向と宇宙開発事業団の H 2 ロケットを使って実施する方向とが考えられる。以下考えられる計画の概要を述べる。

##### (1) 火星探査計画

火星には固有磁場が無く、太陽風と電離層や中性大気が直接接していると考えられる。

電離層から供給されたイオンが太陽風と混合し、結果として太陽風が減速され磁場が火星を取り巻く様な形で磁気圏が形成されていると考えられる。その際、大量の電離層イオンが太陽風に持ち去られる可能性があり、大気進化の過程を考える上で重要である。また、時々激しいダストストームが発生したり、はっきりした四季が存在し、大気圏の状態が大きく変わるので、その影響が電離圏の構造変化にまで及んでいる可能性がある。

観測器： 磁力計、電場計、高エネルギー粒子観測器、プラズマ計測器、中性粒子・ダスト計測器、プラズマ波動計測器、サウンダー、紫外分光撮像器、電子温度計測器等。

軌道： 近地点 150 km、遠地点  $5 R_H$  ( $R_H$ は火星半径) 程度の赤道面軌道

## (2) 金星探査計画

金星も火星と同じく磁場を持たず、電離層や中性大気が太陽風と直接相互作用していると考えられている。しかし、火星と異なり、大気が高温かつ濃密であるので、既存の大気科学の枠を越えた新しい分野が開拓される可能性がある。また、惑星本体の自転が公転と逆行し、しかも大変遅いため「4日循環」と呼ばれる不思議な現象などが出現しているので、電離圏と大気の相互作用はきわめて興味深い。観測器の構成は火星探査機と類似のものが考えられるが、特に、中性大気関連の観測を強化する必要がある。

## (3) 水星探査計画

水星には微弱ながらも固有の磁場があり、小型の磁気圏をもつことが米国のマリナー10号等の探査によって明らかになっている。しかも、地球に似たサブストームが短い時間スケールで起こっていることが判明している。大気がほとんどないために地球のような電離圏と磁気圏の結合は存在しないであろうが、むしろ、その様な簡単な条件下で、純粋にサブストームを駆動する物理過程が取り出せるのではないかと期待される。観測器としては、火星・金星と同様の構成が考えられるが、特に、プラズマ関連の計測に重点を置くべきであろう。

#### (4) 木星／冥王星探査計画

木星は巨大な磁気圏をもっており、10時間という短時間で自転しているため、その回転のエネルギーによって磁気圏の諸現象が駆動されている。またイオ衛星の発電効果や中性ガスの放出によるトーラスの形成など地球とはかなり異なる磁気圏となっている。1995年に木星オービターになるガリレオ探査機の主目的は、木星の衛星群の地形や物性の調査であるため、磁気圏研究にとって重要な極域の探査は十分に行われたい。

一方、冥王星は米国のボイジャー探査が及ばなかった最後の惑星であり、その探査はきわめて興味深い。2機の探査機を木星まで一体として飛行させ、1機を木星の極軌道オービターに、他機を冥王星に向けてスイングバイ飛行される案が国際協同の大型プロジェクトとして考えられる。

#### (5) 衛星VLBIによる惑星電波観測計画

木星からのデカメートル電波の地上観測は電離層の不均一性による位相ずれの問題が常につきまとう。地上-衛星、または衛星同士のVLBIを実施すれば木星電波源を高精度にポインティングすることが可能となる。また電離層の遮蔽により地上まで届かない木星ヘクトメートル電波や土星キロメートル電波の観測も可能となる。これらの観測データから木星や土星での太陽風と磁気圏の相互作用のメカニズムを解明することができる。

#### (6) 地上干渉計網による惑星電波の観測

50 km スパンの干渉計網を国内に20点ほど配備し、電離層による位相ゆらぎを取り除きつつ空間分解能の高い観測を行う。また広帯域アレイアンテナシステムを建設し、これまで検出できなかった微弱な惑星電波成分の検出を行う。これらの観測から電波放射源のマッピングが可能となり、木星磁気圏でのエネルギー変換過程が明らかになる。

### 第3章 中層・超高層大気科学

#### 1 基本的考え方

##### 1. 1 これまでの発展経過

人類が地球大気圏を認識したのは遠くギリシア時代にまで遡ることができるが、科学的理解が確立した領域は19世紀末に至るまで山の高さを越えず、20世紀前半の飛翔体あるいは遠隔測定技術の発明によって初めて広大な中層・超高層大気が発見されるに至った。当初この高度領域では電離層あるいはオゾン層の存在が注目されたため、特に電磁気学・光化学過程を主な研究対象とする超高層大気物理学が、対流圏および力学・降水過程を対象とする気象学とは独立に創始されたのである。また気象学においては一定技術による観測の継続と天気予報を始めとする実用的側面が重視されたのに対し、超高層大気物理学においては新技術の開発と未知領域の探査に常に大きな比重が置かれたことは特筆すべきである。

超高層大気物理学は、まずIGY（国際地球観測年）に始まる1950年代以降約30年にわたる研究で、電離圏やオゾン層の成因を含む鉛直構造の基本的知識を整備し、その結果、電離圏の外側に広がる磁気圏や太陽系惑星間空間を対象とする宇宙空間プラズマ物理学が分化し（第2章参照）、一方、中層・超高層大気においては力学的側面の研究が主要な課題となった。特に対流圏気象学と超高層物理学の境界領域として未知の多かった中層大気に関しても、MAP（中層大気国際協同観測計画）に始まる1980年代の研究で、対流圏から伝播する各種波動に関する力学理論の確立や、大型レーダーを始めとする高性能観測手段の開発が進み、また基本的理解のためのメカニスティックな数値モデルの作成も試みられ、それぞれの高度・緯度領域ごとの現状に対する定性的な認識はほぼ整った。

##### 1. 2 今後予想される質的変容

中層・超高層大気科学は、近年再び質的な変容の時期にある。この変容の要因の第一は、中層大気領域に関する理論・観測両面の飛躍的進展により、オゾンホールや準2年周期

変動(QB0)に代表される経年変動，ならびに大気圏の各高度・緯度領域間の相互作用の存在が発見されたことである。また第二は，人類の地球規模環境破壊への危機感や他惑星への進出という，社会的に新たな局面が生まれたことである。これら二つの要因により，中層・超高層大気圏内の諸現象を下層大気や宇宙空間，さらに水圏，生物圏，雪氷圏，固体圏との相互作用を包含した，一つの地球システムの中で捉えること，また中層・超高層大気観測の長期に亘る継続やこれに基く実用的側面を今まで以上に重視すべきであること，が必然的に要請されることとなったのである。

かくして1990年代においては，既に完成した設備による観測の継続と全地球的展開の努力が続けられ，今世紀末には中層・超高層大気についても経年変動まで議論できるデータが拡充されると考えられる。また計算機能力の向上により，少なくとも各高度・領域・分野毎のモデルは完成の域に達し，それらの結合も部分的に次々と試みられるだろう。さらに21世紀には，中層・超高層大気圏の内外を問わず観測事実・理論概念・実験手法が積極的に導入され，他の隣接する地球・惑星科学諸分野をも糾合した‘より普遍的な新しい大気科学’あるいは‘真の太陽地球系物理学’として生まれ変わり，これにより人類の生存に関する確実な科学的アセスメントも初めて確実なものとなると期待される。

### 1. 3 本章の構成

前述のような中層・超高層大気科学の質的変容の過程においては，既存各分野で培われた成果を十分に認識しつつ，融合させていくことが重要である。第2節では既存分野ごとに90年代までの発展経過から見た展望を極く簡単にまとめ，これを踏まえて第3節では21世紀における重要研究課題を分野に捉われずに述べる。最後の第4節では，今後20年程度の間に進捗すべき研究計画を，再び既存分野に立脚して具体的に提言する

## 2 既存各分野ごとの展望の要点

既存研究分野は高度領域としては中層大気・超高層大気・惑星大気に大別できるが，特に中層大気分野の最近の発展などを考慮すると，基盤・手法により化学および力学に分類し，また水平領域のうち赤道域および極域はある程度別個に検討すべきである。以上の

各分野の将来展望をまとめると以下ようになる：

## 2. 1 大気化学

環境科学としては「オゾン層の化学」が中心となるが、基礎科学としては全ての組成変動の基礎となる「化学・力学結合」が重要であり、何れにしても長期的変動をグローバルかつ上下結合の視点で監視していくことが必要となる。

## 2. 2 大気力学

引き続き「波動・平均流相互作用」の研究が中心となるが、特に波動生成・伝搬に関する定量的観測の継続、グローバル・上下・化学結合過程の視点に立った観測データの整備、さらに新しい解析方法や理論的概念の模索が必要である。

## 2. 3 赤道域大気

「非年周期変動の気候学」が中心となり、統計方法および海外長期観測拠点の確立とともに、放射・化学微物理学・力学の平衡、地球表面（水圏・生物圏・固体圏）・中緯度との相互作用、大気構造の階層性・確率性・不確定性に関する理論的ブレイクスルーが必要となる。

## 2. 4 極域大気

「物質循環」における極域の意義が改めて重要なテーマとして認識され、水平・鉛直・化学力学の諸相互作用のより進んだ研究、既存観測・研究テーマの見直しと再統一などが重点的に推進されることになろう。

## 2. 5 超高層／電離圏大気

「力学的側面」に重点が置かれ、赤道域を含めた広域の力学量の観測の推進とデータ

ベース化，太陽活動・磁気圏あるいは中層大気との定量的比較解析，理論に導かれた現実的なモデルの構築と観測との結合などが大きな比重を占めるようになる。

## 2. 6 惑星大気

人類の観測対象および活動領域の拡大に伴った「比較惑星大気学」と，歴史性・学際性を導入した理論的研究を柱とする「大気形成・進化論」とが相補的に推進され，新しい自然観・学問体系の形成および成熟に寄与することが期待される。

## 3 今後の重要研究課題

1節に述べたように，今後は2節に述べた既存各分野における研究対象は有機的に統合され，グローバルな地球システムの構成要素として位置づけられることになる。その場合，特に重要な柱となるべきものは「領域現象間相互作用」・「長時間スケール」・「新しい物理学の開拓」の3つである。以下この3つのそれぞれに含まれる研究課題について，順次列挙していくこととする。

### 3. 1 様々な相互作用の研究

既存各分野を統合する上で，当面の具体的目標となる素過程の研究が数多く含まれる。対象としては鉛直・水平の各領域間の結合，また手法的にも力学・化学間の結合が問題となる。

#### 3. 1. 1 鉛直方向の相互作用（下層 $\leftrightarrow$ 中層 $\leftrightarrow$ 超高層）

定性的にはある程度予想されてはいるが，全高度領域の統一的観測が未達成であるため定量的把握がなされていない素過程が多い。

（1）下層大気と中層大気との相互作用： 子午面循環および波動伝播が重要である。特に種々の経年変動を生む波動の源や活動度の時・空間的分布，各種物質の循環過程の観測的説明が鍵である。

(2) 中層大気と電離圏との相互作用： 波動伝播や碎波乱流の作用が子午面循環よりも重要となり、さらに光化学・電磁過程との複雑な相互作用が予想される。特に各種波動が中間圏から熱圏に運び込む角運動量・エネルギー・物質の定量的把握、下層で顕著な長周期変動の超高層大気中での有無の確認が当面の課題であるが、因果関係の理解のためには高度100km近傍への温度・拡散機構・組成・電離度の急変の集中を解明することが必須である。

(3) 熱圏・電離圏と磁気圏との相互作用： 特に磁気圏電場・対流・粒子落下とグローバル熱圏構造・循環との関係について、観測の困難な中性大気組成・運動を把握するための数値モデルの確立、および未知の多い低緯度領域の観測の拡充が必須である。

(4) 太陽変動・磁気圏変動に対する大気応答： 太陽紫外線・X線変動の電離圏変動を通じた中層大気以下への影響、磁気圏変動の電離圏変動を通じた大気組成変動の生成、また逆に下層大気変動の電離圏を通じた間接的影響の可能性の定量的検討が重要である。特に高度100~150kmで拮抗する磁気圏と中~下層大気との影響の分離が必要となる。

### 3. 1. 2 水平方向の相互作用（赤道域 $\leftrightarrow$ 中緯度域 $\leftrightarrow$ 極域）

赤道QBOと南極オゾンホールとの相関（赤道東風時にオゾン損失小）などが指摘されているが、特に低緯度および南半球における観測の蓄積が乏しいため、定性的にも未知の部分が大きい。

(1) 大気大循環による力学的相互作用： 低緯度・南半球観測ならびに放射・力学結合モデルの信頼度を増し、両半球間の差異を定量的に解明することが当面の課題であり、その中から未知の素過程が発見される可能性が高い。

(2) 物質輸送を通じた化学的相互作用： 各成分のグローバル分布観測ならびに化学・力学モデルの信頼度を増し、これに基づいて季節・経度変動を含む赤道域から極域への物質循環の実態を解明することがまずは必須である。

### 3. 1. 3 力学・化学の相互作用（物質循環）

鉛直・水平方向の相互作用における種々の素過程を総合した応用問題であり、さらに広大な海洋や複雑な生物圏の関与が無視できそうになく、これら大気圏以外の生成・消滅過程の基礎的研究の発展も必要となる。Lagrange的（空気粒子に相対的）な大気運動の記述や、生物圏との相互作用を含む地球環境問題としての視点の推進が不可欠である。

(1) 水の循環： 赤道域下層大気中の対流活動で上方へ運ばれた水蒸気の大部分が対流自身の作る低温の対流圏界面で降水粒子となり地上落下する（コールドトラップ）ための成層圏乾燥化，特にインドネシアやパナマでの集中的成層圏侵入（成層圏の泉），またやはり赤道対流圏から運ばれたメタンが成層圏光化学反応で水蒸気となる過程，南極冬季下部成層圏での雲(PSC)形成によるオゾンホール促進，等々の諸仮説を一つ一つ定量的に検証すべきである。

(2) オゾンの循環： 各高度ごとに異なる光化学寿命と力学輸送時間スケールとの兼ね合いが鍵である。まず寿命の長い下部成層圏で卓越する力学輸送効果，寿命と輸送が拮抗する中部成層圏で顕著な力学・化学相互作用を定量的に吟味すること，またこれらを考慮した「化学渦」と呼ばれる効果や中層大気構造の安定性の問題が解決されねばならない。さらに寿命の極めて短い上部成層圏以高で予想される人為・太陽起源の顕著な絶対量減少の可能性を検証する必要がある。

(3) その他の微量物質： オゾンホールに関連しては人為起源フロンガスの上部成層圏に運ばれる所要時間，下層大気温暖化に関連しては人為起源二酸化炭素が南極域に達する経路と所要時間，また二酸化炭素増加による昇温に対する水の相変化と放射による抑制過程などが重要である。さらにメタン，エアロゾル等と生物圏・人間活動・地表面との関係も，今後は大きな問題となると予想される。

### 3. 2 長い時間スケールの現象の研究

種々の相互作用の素過程に関する研究成果を具体的に応用・発展させたものである。観測の継続による実証が可能な地球大気の経年変動と，それよりずっと長い惑星・地球大気の歴史にせまるもの到大別できる。

#### 3. 2. 1 中層・超高層大気の経年変動

超高層大気についてはほとんど全て，中層大気についても数年以上の現象については，観測の継続が不足していて実態としても未知である。

(1) 主として下層大気起源と予想される周期的変動： 約2年（赤道成層圏大気波動の効果によるQB0）および約4年周期（大気海洋相互作用と考えられるエルニーニョ南方振動=ENSO）については部分的には定性的に理解されているが，特にグローバルな振舞いや

因果関係については解かれていない。また約10年については（太陽変動の影響との説があるが）原因が全く不明である。さらにこれらと年振動，半年振動，季節内振動（IS0；1～2ヶ月），惑星波・赤道波（ $\leq$ 半月）との関連が重要である。

（2）長寿命大気組成の一方的変化： オゾン減少や二酸化炭素・メタン・フロン等の濃度増加を把握し，温度変化等を通じた極域成層圏雲(PSC)や対流圏雲量の変化などの二次的・化学・微物理学過程を解明する必要がある。また水循環における中層大気中のPSC・夜光雲生成の意義，金属元素の中層大気・超高層大気・太陽系空間相互作用における役割を解明すべきである。

（3）太陽活動の変化に伴う組成・構造の変化： 地球自転・公転に伴う日・年（赤道では半年）周期の太陽放射変化，ならびに太陽活動の周期変動（27日および11年）に対する，大気各高度領域の応答の（周波数のみならず）振幅をそれぞれ定量的に把握・理解することから始めるべきである。

### 3. 2. 2 地球および惑星大気形成の歴史的変遷

一般に観測・理論とも未発展のものが大部分を占め，さらに（地球における生物圏・水圏や）固体圏・太陽圏など大気圏以外との総合的研究が要請される，大気圏科学における最も新しい研究領域である。

（1）気候変動（103年より短い時間スケール）： 他惑星においては，金星大気4日循環，火星大気中の二酸化炭素量季節変化および極冠や表面砂塵との相互作用，木星大赤斑や海王星大暗斑など気象学的諸問題が未解決のままである。また地球の経年変動，小氷期・小間氷期のサイクル（数102年）などは，水圏（海洋・水河）・生物圏との相互作用の問題として解く必要がある。さらに各惑星の電離圏の比較も，大気圏・電離圏相互作用の解明に重要である。

（2）地質時代の気候変動（104～107年の時間スケール）： 固体圏変動，地磁気逆転，天文学的摂動との関連，地球の大気・海洋・氷床系の水循環と生物圏・大気・海洋・地殻間の炭素循環，大気の安定性の研究と惑星環境改造への応用などを研究する必要がある。

（3）大気の起源と進化（108年よりも長い時間スケール）： 惑星システム全体の起源および進化，原始惑星の一次大気（水素・ヘリウム）を残す木星型惑星および惑星内部起源の二次大気（二酸化炭素など）をもつ地球型惑星の分化，惑星電離圏の生成と分化が

解明されるべきである。特に、地球型惑星の分化（さらに人類を含む生命の維持）において本質的な、地球の水の保持およびオゾン層の形成と人類生存、金星の濃密大気の生成・維持と水および酸素の消失、火星の大気量の消長は極めて重要な課題である。

### 3. 3 新しい物理学の開拓

総合的・普遍的な大気科学を打ち立てるには、以下に述べるような新しいパラダイムの構築が必須である。

(1) 研究対象の拡張および総合化： 水圏・生物圏・雪氷圏・固体圏などを大気圏と対等にスケーリングし、また組成変動過程・放射過程あるいは電磁過程を取入れた大気大循環モデルを構築し、地球大気中の物質分布・長期変動・進化過程を自己完結的に再現するのみならず、他惑星のパラメタあるいは仮想的条件を与えての数値実験を目指すべきである。さらに現在の大気力学の体系を拡張し、地球・他惑星・恒星の流体系や惑星間物質・恒星系・銀河集団の多体系などを統一的に記述できる新しい連続体物理学を建設する。

(2) 新しい理論的概念・手法の導入： 日周期・年周期以外の各種波動・変動の重畳した場の観測結果を記述し、かつ成因や相互作用を研究するために、他分野で編み出された統計的概念の吸収・応用し、あるいは現実大気に即した全く新しい普遍的概念を構築する。また非線形問題（多重平衡系や多自由度自励振動系）の理論、階層構造を持ったモデルおよびそれらの並列計算技術の開発を発展させ、数理物理学・数値計算科学の前進に寄与する。

## 4 将来の研究計画

第1-3節で述べたように2000年を越えての中層・超高層大気の研究は、さまざまな時間スケールの現象とさまざまな領域の相互作用を研究対象とすることにより、新しい大気科学をつくり出し、地球規模環境変動の解明に重要な貢献をすることを目標としている。このような新しい視点に立つ研究を進めてゆくには、十分に検討された独創的な研究計画が必要となる。今後2010年頃までに、1) 力学・化学過程、2) 赤道大気、3) 極域大気、4) 超高層・電離圏大気、5) 惑星大気、の分野に関し、以下の研究計画を実施すべきと考える。

## 4.1 力学・化学過程

地球温暖化やオゾン化学に関係した二酸化炭素、メタン、オゾン、窒素酸化物、塩素酸化物などの物質の大気中の量は、酸素や窒素などの大気の主成分に比べ極端に少ないが、大気の熱収支やオゾン層形成には本質的な役割を演じている。大気におけるこれらの物質の役割を明らかにするには、物質の生成過程、生成した物質の輸送と輸送中の変質過程、および物質の消滅過程のすべてのプロセスをグローバルに解明してゆかなければならない。従って必然的に大気の力学過程と化学過程の両者が研究対象となる。

大気物質の変化をとらえるには、対流圏から熱圏にいたる全大気領域の高精度観測を長期に維持して行く必要がある、それにはさまざまな大気微量成分の高精度測定技術を開発して行くことも重要な研究課題となる。以下にこの分野で実施すべき研究計画について述べる。

### (1) 地上グローバルモニタリング

中層大気領域における物質循環として重要なものにオゾン、水蒸気、窒素化合物、塩素化合物などの循環がある。成層圏のこれらの成分は赤道地域が主要な生成源になっており、大気の南北循環により極域に輸送されてゆく。この循環を明らかにするために赤道域と南北両半球の中低緯度、極域に定点観測所を設け、各種のリモートセンシング装置によりオゾン、水蒸気、窒素化合物、塩素化合物等の大気微量成分の長期的な高精度観測を実施する。

### (2) 衛星大気観測

衛星からの大気微量成分のモニタリングはグローバル観測の最も有効な手段である。現在 NIMBUS-7 衛星によりオゾン全量の観測が行われているだけで、ほとんど未開拓の分野である。そのため各国とも衛星による大気観測を急速に発展させるために、現在さまざまな計画を準備している。特に米国航空宇宙局 (NASA) は地球環境を総合的に観測する EOS 計画を立案中であり、大型極軌道衛星を5年ごとに2機ずつ打ち上げ、15年間にわたってグローバル観測を実施しようとしている。我が国も独自の高精度センサーを開発し、それらを搭載した衛星を打ち上げてゆく必要がある。

### (3) 航空機・気球・ロケット観測

航空機観測は、天候に左右されず、リモートセンシング法により広い地域の観測が可能となる他、成層圏飛行機では成層圏の大気成分の直接観測も可能となるなど数々の利点をもつ。従って、今後の航空機観測では多種類の観測器による同時観測がますます重要となるので、使用する航空機としては小型機とDC-8クラスの大型機の併用が望ましい。

気球高度では赤外分光にとって問題となる水蒸気の影響がなくなるので、極く微量の大気成分の観測も可能となる。この特徴を生かし、長時間、広い領域の観測を行えば物質循環の研究にとって有力な情報が得られる。観測場所としては北極、南極、および赤道地域が重要であり、南極域で実施している周回気球(PPB)を北極、赤道地域でも実施する必要がある。

気球が到達できない高度40 kmより高い領域のオゾンやそれに関連する大気微量成分の高度分布と輸送過程を明らかにするにはロケット観測が必要となる。打ち上げ場所としては日本以外に、北極、南極、赤道地域が重要である。

### (4) 大気圏物質循環のモデリング

グローバル観測のデータを解釈するためにも、またグローバル観測を実施するための観測点の配置を考える上でも計算機による大気圏物質循環のモデリングは不可欠である。しかしこれまでの循環モデルは主に力学過程に焦点がおかれており、化学過程に関しては大幅に単純化されている。今後は複雑な化学過程をうまく組み込んだグローバルな物質循環モデルの構築が必要となる。

## 4.2 赤道大気

赤道域はグローバルな物質循環や超高層大気現象において特異な地域であり、重要な役割を演じていると考えられる。その理由は、赤道大気が以下の特徴をもっているからである。

○太陽からの放射エネルギーが最大となる地域であり、グローバルな地球大気の運動や各種の大気波動の動力源となっている。

○コリオリ力が小さいために広い周波数範囲にわたる各種の大気波動が容易に上方に伝わることができ、中層大気へのエネルギー源となっている。

○海陸分布が複雑なためにインドネシア域での活発な積雲対流にみられるように経度方向に局在化した大気擾乱が起こっている。

○赤道域の超高層大気圏では、赤道ジェット電流、赤道大気光、プラズマバブルなど赤道域特有の現象が発生している。

しかし、赤道域での大気の力学・化学過程の高精度リモートセンシングはこれまで行われたことがなく、その詳細なメカニズムはまだわかっていない。また赤道域特有の超高層大気現象がどのようなエネルギーの輸送・変換機構によって起こされているかに関しても全く未知の状態にある。これらの問題の解明のために以下の観測が必要である。

#### (1) 赤道レーダによる中層・超高層大気の総合観測

赤道域特有の対流圏と中層大気の相互作用、中層大気と熱圏・電離圏の相互作用、熱圏・電離圏と磁気圏の相互作用を明らかにするために、地表 2 km から高度 1000 km に至る大気各層を連続的に長期観測する。観測項目としては、対流圏・中層大気の大気波動、乱流パラメータ、拡散係数、および超高層大気における電離気体の組成、運動、電場である。観測所の設置場所としては、大気擾乱が特に大きな地域であるインドネシアが最適である。レーダシステムとしては直径 300 m 程度の開口面積をもつ大型アレーアンテナと 1MW 以上の送信パワーが要求される。

#### (2) 赤道レーダとの共同観測

レーダ観測との共同観測として電波、音波、光を用いた各種の地上リモートセンシング装置による観測、気球観測、航空機観測を実施し、水平方向にも観測領域を拡大することによって赤道大気現象の総合的な解明を行う。

### 4.3 極域大気

極域大気は以下の特徴をもつことから、極特有の諸現象を解明することが中層・超高層大気研究に重要な貢献をすることになる。

○極域の低温な成層圏ではエアロゾル粒子が成長し、不均一反応が重要な役割を演じる。成長したエアロゾル粒子は重力落下し、成層圏物質の下層への輸送を担う。

○極渦と呼ばれる成層圏大気の循環パターンは、南極域がほぼ同心円状であるのに対し、北極側は大きく蛇行する。そのため極域大気の太陽光照射条件が南極と北極で異なり、光化学反応の進行は南北で非対称となる。

○極域中間圏においては極低温のために夜光雲や極中間圏雲など極特有の現象が出現する。

○オーロラ帯でのジェット電流、極冠帯での太陽プロトン流入など極域超高層大気圏には太陽風エネルギーが効率よく流入することから、太陽活動の大気圏への影響が他の地域よりもより直接的な形で現れる。

以下、実施すべき研究計画について述べる。

#### (1) 拠点観測所での極域大気の長期モニタリング

北極域でも南極域でも大気の長期変動を明らかにするために、ライダー、赤外分光計、ミリ波・サブミリ波分光計・レーダ、音波レーダ等の高精度リモートセンシング装置を開発し、拠点観測所で長期モニタリングを実施することが重要である。観測項目は大気微量成分（オゾン、水蒸気、窒素酸化物、塩素酸化物、フロン、エアロゾル等）と気象要素（気圧、温度、風向、風速）である。拠点観測所としてはオーロラ帯や極冠帯での違いを見るために南極、北極とも複数必要となる。

#### (2) 力学・化学過程の地上・航空機・気球・ロケット総合観測

極域における不均一反応過程を明らかにするために、地上や航空機からのリモートセンシングと航空機・気球による大気のサンプリングを組み合わせた総合観測を実施する。不均一反応としては、特に成層圏エアロゾル、夜光雲、極中間圏雲、クラスターイオンなどの生成機構に焦点をおく。南極域で気球による大気サンプリングを行うためには新たに気球回収方法を確立する必要がある。また南極周回気球（PPB）システムをさらに発展させ、大気観測の主要な研究手段に発展させることも重要である。一方、下部電離圏でのクラスターイオンの役割を明らかにするためにはロケット観測が必要となる。回収型ロケットが開発されれば、中間圏でのエアロゾルのサンプリングにより物質構造を明らかにする

ことも可能となる。

#### 4.4 超高層・電離圏大気

中間圏上部および熱圏は中性大気と電離大気が共存する領域であり、その相互作用がこの大気領域の力学過程や化学過程に重要な役割を演じている。またこの領域は磁気圏と荷電粒子、電流、電場という形で相互作用を行っており、一方、下層大気とは重力波や大気潮汐などの波動をを介して相互作用を行っている。これらの相互作用の機構を明らかにするために以下の研究を実施する。

##### (1) 大気圏・電離圏衛星計画

高度 80 - 90 km 付近の中間圏界面付近にはクラスターイオン層や極中間圏雲、夜光雲、金属原子層などの特異な組成構造が存在し、また力学的にも下層から伝搬してきた重力波が碎波し、弱風層という摩擦層をつくり出している。すなわち中間圏界面付近は上側に存在する熱圏・電離圏と、また下側に存在する成層圏・対流圏と強い相互作用を行っており、化学的にも力学的にも遷移層となっている。この遷移層をつくり出すメカニズムの解明は残された大気研究の課題の中でも最も興味深いものである。

そこで、現在観測の空白域となっている中間圏の研究を柱に、この領域の上側に存在する熱圏・電離圏、および下側に存在する成層圏・対流圏における力学・化学過程、さらに太陽活動変動がこれらの大気領域に及ぼす影響の研究に焦点をおいた衛星計画を実施する。

観測器：金属原子層観測ライダー、赤外レーザーヘテロダイン分光計、  
OH大気光回転温度放射計、トリプルエタロン型熱圏風観測器、  
チューナブルエタロン型対流圏温室効果気体観測器、高精度太陽  
紫外スペクトル輝度モニター、オゾン層3次元観測紫外撮像  
分光計

衛星重量：1500 kg

観測器重量：500 kg

打上げ時期：2000 年前後

軌道・姿勢：高度 500 - 700 km の極軌道、3軸制御

## (2) ロケット観測

大気研究におけるロケット観測の意義は他の手段ではできない大気の微細構造の観測が可能となることである。例えば中間圏でのPMSE（極域中間圏界面夏季エコー）などは厚さが1 km ときわめて薄い、こうした構造はロケット観測によって初めて明らかにされたものである。しかしロケット観測の最大の問題点は高速で飛翔するため前面に生じる衝撃波で自然の状態が壊されてしまうことである。従って今後のロケット観測では、この衝撃波の影響を受けない方法としてロケットからのリモートセンシングや、ロケットからパラシュートを放出しそこから観測する方法（バルーンシステム）の開発が必要となる。研究課題として興味深いのはD層イオン化学反応と大気構造の関係で、大気組成、エアロゾル粒子、イオン組成、電子密度などの同時観測が必要となる。大気構造の地域による違いを明らかにすることが重要であり、ロケットの打ち上げ場所としては、日本以外に、北極、南極、赤道地域を考える。

## (3) 中層・超高層大気大循環モデルの構築

高度 90 - 500 km の熱圏大気の力学過程を扱う熱圏大循環モデルの精密化を図るとともに、中層大気との相互作用を取り入れたモデルを構築し、成層圏から熱圏に至る大気領域の総合的なモデリングを行う。

## 4.5 惑星大気

金星、火星、木星などの惑星大気の研究は、それぞれの惑星独自の大気環境下で進行する力学過程と化学過程を明らかにすることを目的とするだけでなく、さらに比較惑星学的に、惑星大気の進化の過程の違いを明らかにすることを目指す。そのために以下の研究計画が必要となる。

### (1) 大型光学望遠鏡を用いた惑星大気観測

可視域や赤外域での超高分解能分光技術の進歩により、大型の光学望遠鏡を用いた惑星大気分子吸収線の強度とドップラー観測から惑星大気の組成とダイナミックスを研究することが可能になりつつある。観測対象としては火星や金星の二酸化炭素分子吸収線、木星

のメタン、エタン、エチレンの吸収線が考えられる。観測システムとしては、惑星観測に専有できる大型望遠鏡と、検出部としてファブリーペロー可視分光計、レーザーヘテロダイン赤外分光計および高感度のCCD撮像装置等が必要である。

#### (2) 探査機による金星大気観測計画

金星は自転周期が243日と非常にゆっくりと回転しているため、昼側と夜側の温度差を自転以外の方法で解消する必要がある。高度100 km以下では4日循環(スーパーローテーション)が、100 km以上では昼夜間対流が起こっている。しかしこれらの駆動機構はまだ全くわかっていない。さらに超高層大気はイオン化学反応や太陽風との相互作用により加熱され、金星のまわりに水素コロナと酸素コロナをつくり出しており、一部はイオン化され太陽風によって運び出されていく。これらの金星大気の構造とダイナミックスを探査機で観測するには、母船であるオービターからの紫外分光計によるリモートセンシングと母船から降下させる気球による直接観測の組み合わせが有効である。

#### (3) 探査機による火星大気観測

火星の大気量は地球の200分の1と少ないために熱容量が小さく、熱的に不安定である。浮遊するダストの太陽光散乱による熱潮汐波、自転軸の摂動による気候変化、固体圏(ドライアイス)との相変化等により、大気量が大きく変わるので、その変化や大気のグローバルな熱循環の観測が重要である。金星の場合と同様にオービターからのリモートセンシングと気球による直接観測が効果的であると考えられる。

#### (4) 惑星大気の数値シミュレーション

惑星大気の循環パターンをつくり出す機構を明らかにするためには、観測とともに理論解析と数値シミュレーションが必要となる。また惑星からの大気散逸の問題、惑星大気の進化の問題等を解明するためにも数値シミュレーションが重要な研究手段となる。

## 第4章 地球及び惑星内部

我々人類の住む地球やその仲間である惑星の内部に起こっている現象を理解するためには、力学、熱学、電磁気学といった様々な手段を用いた総合的な研究が必須である。本章では地球及び惑星の内部活動とその現われである表層現象や外部環境との相互作用に焦点を絞った地球惑星科学に於て、電磁気学的アプローチをどのように進展させるか、またそのために今何をなすべきかについて述べる。

### 1 研究推進に当たっての基本的な考え方

1970年以降、地球惑星科学は質的な変貌をとげた。20世紀に入ってから科学技術の進歩により、海洋を含む全地球的な観測データの飛躍的な蓄積があった。そして、1960年代終わりに枠組みがほぼ出来上がったプレートテクトニクスは、それらを統一的に理解するための基礎を与えた。プレートテクトニクスは、地球内部及び表層の各部分が独立して活動しているのではなく、各部分の素過程が互いに影響を及ぼし合うことによって全体の地球活動が存在するというグローバルな視点を、また現在の地球現象を過去の地球の歴史を通じての地球活動の現われとして捉えるべきであるという時間的視点を、明確に導入した。その結果として、地球活動についての各分野の研究は独立に実施されるべきものではなく、時空間に広がる一つのシステムとして地球を理解することを目標とした研究が重要であることを、一般に認識させた。現在でもプレートテクトニクスを実際に立証し、かつその原動力を解明しようとする立場から、グローバルな観測・解析・理論が大きく進みつつある。プレートテクトニクスは、それまで力学的な視点に片寄りがちであった地球科学に、熱学的、電磁気学的、物質科学的な観点を付け加え、力学的な視点も含めた総合的な地球観の発展をもたらした。

一方、惑星探査の進展は、地球科学の方法を惑星の研究に適用することを可能にただけでなく、地球活動の理解に対しても新たな手掛かりを付け加えつつあり、地球を太陽系の一員として捉え全体の活動を考えようという、地球科学へのフィードバックをもたらしている。このような地球科学の地球惑星科学への視点の拡大に対応し、今や地球・惑星活動を総合的に理解するための新しい概念の誕生が近づいていると考えられる。

また、近年における科学技術の進歩による人間活動の地球規模への拡大は、人間の生活の場である地表付近の環境をグローバルに変化させ自然環境を破壊する危険性を産み出し、他方、今まで不可能であった地球深部の資源を利用することや、地震や火山等の災害をコントロールできる可能性を実現しようとしている。地球科学の研究はこのような人間活動と地球環境との関わりに、より密接に関与していく責任を持たされるようになってきている。

しかしながら、過去20年間のこのような地球惑星科学の進展に対して、日本の科学者が主導的な役割を果たしてきたとは言いがたい。また、現在の研究・教育体制は20年前のものと同質的な変化はない。今、新しい将来構想の下に研究者の意識及び研究体制の両面で大きな変革を行わなければ、現時点の地球惑星科学の大転換期に乗り遅れ、今後の10年間、20年間においても日本は受動的な役割を果たすにとどまるであろう。

地球電磁気学は、地球・惑星の基本的な場である電磁場を研究対象・手段とすることにより地球活動を理解しようとする分野であり、大陸移動、海洋底拡大、海洋底電磁気構造などの研究において、プレートテクトニクスの確立によって決定的な役割を果たしてきた。現在ではプレートテクトニクスで扱われてきた範囲を越えて、より地球深部のマントル下部やコアの活動とその相互作用を考慮に入れ、更に惑星の活動までも視野においた地球惑星科学が進展しつつある。地球や惑星の電磁場はこれらの惑星のコアやマントルなどの深部でのプロセスに直接関連した現象であり、新しい地球惑星科学にとって地球電磁気学の役割はますます重要なものとなる。したがって、地球電磁気学の視点から見た地球惑星科学の将来の構想は、その発展にとって緊急に必要とされるものである。

地球電磁気学の特徴の一つは、時間及び進化の概念がその学問の初期から明確であったことである。現在の地球活動を地球誕生以降の地球進化過程の一つの断面として捉えるために、地球電磁気学は重要な手段を提供しうる。また、地球の弾性的、力学的な挙動の観測から得られる地球内部の構造に加えて、電磁波を用いた熱・電磁氣的な構造の解明は、地球・惑星ダイナミクス研究に必須である。

地球電磁気学の研究には、地球・惑星という天体のなかで起こる大規模スケール、長時間の電磁気現象を物理過程として理解しようとする方向と、電磁気現象を用いて地球・惑星内部の構造やその時間的変動を探ろうとする方向とがある。これらは、電磁気現象を研究対象として考えるか研究手段として用いるかという、二つの研究姿勢と考えてもよい。また、前者は純粋科学としての側面が強いが、後者は災害科学、環境科学、資源探査など

我々の生活に密接に結びついた実際科学的な側面を持つ。これらは厳密に区別して考えるべきものではないが、将来的な地球電磁気学の発展のためには、この両面を考慮する必要があり、どちらか一方だけを推進するものであってはならない。

## 2 各分野に共通の視点

地球及び惑星内部についての研究の将来像を考えると、以下の各点が共通の問題認識となっていることがわかる。

### 2.1 各構成部分間、各素過程間の相互作用

地球の各構成部分（大気圏、水圏、地殻、マントル、核など）はそれぞれ独立しているわけではなく、相互間で物質やエネルギーのやりとりをしており、これらが本質的に重要なプロセスである。また、沈み込み帯の電気伝導度構造やD''層の磁気シールド効果に見られるように、プレート運動やマントルからの鉄のしみ出しといった力学的、化学的、熱学的な作用がその電磁場に支配的な影響を及ぼすことが多い。従って現象の本質を明らかにするためには、一方で理想化した単純な系での素過程を詳しく調べる必要があるが、他方で同時に多くの要因が相互に複雑にからみ合った系であることを認識しなければならない。従って電磁気的現象であっても、電磁気学のみでの説明にとどまることなく総合的に全体像を理解する努力を惜しんではならない。

### 2.2 大規模スケール、長時間にわたる進化過程

地球や惑星内部で起こっている各種の現象はいずれも力学、電磁気学、熱力学などの古典的な物理学によって記述されうるものである。しかし古典物理学ではほぼ熱平衡の成り立つ閉じた系が考察の対象であったのに対し、地球や惑星では非平衡開放系であることが本質であり、更に大規模スケール、長時間にわたって進化をする系であることを認識しなければ正しい描像は得られない。従ってカオスやフラクタルなどで表される非線形系の物理学の視点が今後益々重要性を増すであろう。更に、地球史の中から各種の周期性（逆転周期、ミランコビッチ周期、等）を抽出することは、地球という複雑な系の各種の外力の影響に対する反応を取り出すことに相当し、地球の自由振動の精密な計測と理論からマントル内の水平方向の非一様性が導かれたように、今後の研究に大きなブレイクスルーを与

える可能性がある。

### 2.3 人間の生活との関わりをもつ側面

地球や惑星の内部についての電磁気学は自然現象を解明するという純粋科学としての側面だけでなく、地震や火山噴火の予知・災害の軽減などに結びつく側面、あるいは磁場の大きな変動（逆転を含む）が人間の環境にどのような影響を及ぼすかを予測する側面など、災害科学・環境科学的な内容をもっている。今後21世紀にかけて、人間活動と環境との相互作用（CO<sub>2</sub>ガスの温室効果、大都市集中による自然災害の拡大など）の重要性が益々大きくなると考えられるので、電磁気学のこの側面を基礎の面とバランスの取れた形で発展させていくことが必要となろう。

## 3 各分野ごとの課題と現状における問題点

地球及び惑星の内部に焦点をおいた地球電磁気学の研究は、（1）地球内部の構造、物質、状態に関する研究、（2）地球内部の活動に関する研究、そして、（3）地球及び惑星の進化の過程に関する研究、の3つに大別されよう。しかし、最近20年間の研究の進展からは、これらの研究が互いに独立したものではなく、時空間に広がる一つの地球システムの解明を目指して、お互いに関連して研究を進めていくべきものであることが明確となってきた。本節では従来に分け方に従って、最近20年間の地球電磁気学の発展と今後の展望を述べ、次節において新しい展望のもとに具体的な研究課題をまとめる。

### 3.1 地球内部の構造・物質・状態に関する研究

地殻及び上部マントルの構造に関しては、海底の磁気異常が磁場の逆転を海洋底の拡大によって記録したことが明らかになり、プレート運動を見積もるための手段として活用されると共に地球磁場の逆転史などのグローバル磁場変動の理解に役立つこととなった。人工衛星による磁場観測の進展等により、プレート沈み込み帯の大規模構造に伴う磁気異常や下部マントルやコア・マントル境界、そしてコア内部に関係した磁場の空間分布の議論が可能となってきた。小スケールのものとしては陸地の断層に伴う磁気異常が発見され、地殻の活動と磁気異常とが関連することが明かとなった。

地殻及び上部マントルの電気伝導度構造の研究から、海洋地域における海洋地殻の年代

と相関のよい上部マントルの高電気伝導度層や下部地殻の一部に高電気伝導度の層が存在することが明らかになった。このような地球活動に伴う電磁気構造は、力学的、熱的な構造と関連させて地球活動を理解するために重要である。特に、下部地殻の構造は大陸の形成過程と密接に結びついていることから、今後の研究が望まれる。

下部マントルの電磁気構造に関しては、コア起源の磁場変動を用いたマントル最下部の電気伝導度の見積りの再検討が行なわれているが、この20年間に革命的な進展は見られない。しかし、地震トモグラフィ等の進展により力学的な構造がより明かとなりつつあり、今後特に、マントル遷移層、コア・マントル境界における電磁氣的構造を明らかにすることが、地球活動の解明のために特に重要と考えられる。また、マントルのダイナミクスに関連した電磁気構造の不均質性や非等方性を議論するために、球対称標準電磁気構造モデルの確立が急務である。これらの電磁気構造からマントルの運動や状態を求めるためには、上記の観測、解析に加えてマントル物質の超高压下での物性測定の実験を推進する必要がある。

### 3.2 地球内部の活動に関する研究

地震、火山活動に伴う電磁場変動がこの十数年間多くのケースについて観測され、地球表層活動の物理的な理解に役立つようになってきた。このような研究は、密に分布した群列による連続観測の重要性を特に認識させるものであった。地震に関連した電磁気観測においても日本列島全体を見渡した観測と同時に、いくつかの断層に着目した重点的な多点同時連続観測が特に有効であると考えられる。

これまで続けられてきた沈み込みに伴う電磁気構造や海底の磁気異常の観測、陸上岩石の古地磁気学研究などを通じて、変動を起こす現象の物理学的な解明と同時に、空間的、時間的にもっと密な観測が必要とされている。このような広域精密観測のためには、海底磁気異常の観測においても古地磁気学の研究においても、ベクトル量である磁場の強さと方向の同時測定が是非必要とされる。特に海洋における観測に於て、地磁気異常の全磁力だけでなく3成分観測を行なうためには、新しい装置の開発と専用の観測船を用意することが望ましい。また、全地球的観測が必須であることから、日本が主体となった国際共同研究による地球観測を組織化することが急務である。

マントル深部の活動及びコアのダイナミクスの解明は、地球電磁気学の究極の目的の一つである地球磁場の起源の解明と密接に関係してくる。このための観測的手段としては

電磁場変動の観測がもっとも重要である。装置による観測が行なわれた最近数百年の期間に対しては、主に解析手法の進展によりコア表層の流体運動に対する情報がより確からしいものとなり、またコア・マントル相互作用が磁場変動と力学的な観測（地球回転等）との比較から議論できるようになってきた。こうした解析を進める上では、観測点が主に陸域に限られることが致命的な障害となっているおり、より根本的な進展のためには、長期的な将来計画のもとに海域での海底観測所の設置による海底常時観測点の確立、人工衛星による地球磁場の繰り返し観測のルーチン化等を行なうことが必要であろう。

地球磁場の起源を理論的に考えるいわゆるダイナモ理論では、この20年間に於て、磁場の生成、維持のために必要な流体運動の素過程の研究が進展した。また、コア内部の流体運動の原動力に関しては色々な考察が行なわれたが、現時点では内核の成長に伴う組成対流が重要な候補として考えられている。今後の発展のためには、従来のように数学的な非線形方程式系の解を求めることから磁場の発生過程を解明しようとするだけでなく、流体運動の原動力から考え直した新しい地球中心部の物理学の概念を追及することと、地球進化を考慮にいたした磁場の時間発展の理論的研究が重要であろう。特に説明すべき事実として、上記の地球磁場とその変動だけでなく、太陽系の他の惑星の磁場についても、単なる博物学でない比較惑星学として、ダイナミックな視点から磁場の起源の問題に取り込んでいくことが必要となろう。また、大スケール、長時間で起こる物理学の実験場として地球磁場の発生を捉えていく視点も見過ごしてはならない。このような理論に必要なコアやコアーマントル境界の物性が明らかになりつつある今、新しい概念による研究が緊急に望まれる。

### 3.3 地球・惑星の進化過程に関する研究

より長い時間スケールの磁場の変動を明らかにすることは、地球の進化過程の解明のためにぜひ必要である。数千年から10億年以上の広い周期にわたる磁場変動の様相を、最近数100年の観測だけから理解しようとするのは不可能であり、この分野においては特に海底や湖底の堆積物の古地磁気研究が進展してきた。これは超伝導磁力計によって弱い磁化の測定が可能になったことと、堆積物コアの獲得方法の技術的な進歩（Advanced Piston Core, APC など）による。これらの研究により、最近数万年の磁場変動、磁場逆転時の変動がより精密に議論できるようになった。しかし、これまでの観測成果はその空間分布と時間分解能の点で最近数百年の装置による観測と比較できるまでには至っていない。

今までの観測では日本はDSDP, ODPなどの国際深部掘削計画に参加することなどによって比較的受動的に研究を続けてきたが、今後はより主体的に研究を行なうことが必要である。日本周辺の海域の、特に堆積速度が早い(数m/1000年)海底の掘削による最近数万年の精密磁場変動の解析と、中程度の堆積速度(10cm/1000年)の堆積物の獲得による磁場逆転時の磁場変動の解析に重点をおくべきであろう。そのためには日本独自の装置と専用の観測船を必要とする。連続的な磁場変動の様子を追跡できるという堆積物の古地磁気学の利点を更に生かすためには、堆積物から過去の磁場強度を推定する方法を確立することが必要であり、そのためにいまだ明確でない堆積物の残留磁化の獲得機構を早急に解明しなければならない。

このような過去の磁場変動の連続的な時間変化の観測を、空間的に広げていこうという試みと同時に、海底の地磁気異常の精密観測から空間的に広い磁場分布の時間変化をしらべるといふ方向の研究も必要であろう。

地球及び太陽系の進化過程に関わる研究に於ては、地球磁場逆転と地質時代の境界との関係、磁場変動と気候変動、地球回転との関係、より長期の磁場変動(地球初期の磁場や隕石の磁化など)の解析が行なわれてきた。これらの研究では地球初期のコアの形成過程、コア運動とマントル運動の長期的な相互作用、磁場変動と表面環境との関連等が重要な問題である。特に、長期的な変動史を地球磁場、地球回転、海面変動、テクトニクスの活動などに対して、相互の時間関連、卓越周波数などの時間軸、周波数軸の両方から整理することがまず必要とされる。

#### 4 特に推進すべき研究課題

上記で述べた将来展望に関する根本姿勢、及び地球電磁気学の各分野での現状と展望に基づき、今後特に推進すべき研究課題及びそれらの研究計画を次のようにまとめることができる。

- (1) 地球惑星磁場の起源
- (2) 地球磁場変動史
- (3) 地球惑星内部三次元構造
- (4) 地殻活動の監視

研究課題を推進していくための具体的な方法から明らかなように、これらの課題は個別的にそれぞれを取り上げて推進するべきものではなく、お互いに関連して進めることが必要である。

#### 4.1 地球惑星磁場の起源

グローバル地震学の発展により、コアや下部マントルの三次元構造、コア-マントル境界の精密な観測が行なわれるようになり、超高压実験に基づくコアの物性の議論が現実的になってきた。地球磁場の起源を解明しようとする研究は、今新しい局面を迎えようとしている。磁場の生成と維持は地球規模の大きさで始めて可能となる物理過程であり、この時間、空間スケールでの物理学として磁場の起源を究明しなければならない。また、磁場はコア内部の流体運動によって維持されていることから、磁場の起源の解明はこの流体運動とその原動力を求めることは、地球全体の活動の解明につながる。地球惑星磁場の起源の解明には、(1)ダイナモ理論などの理論的な研究、(2)グローバルな磁場変動観測の推進、(3)古地磁気学による過去の磁場変動の解析、(4)惑星探査、を緊密な連絡をとりながら進めていくことが必要であろう。

##### 4.1.1 ダイナモ理論の研究

地球磁場成因は地球物理学上の大問題であるにもかかわらず、依然として十分には理解できていない。ダイナモ問題は典型的な非線形問題であり、最近では数理論理学の面からも注目され始めている。また、ダイナモプロセスは地球中心核内の流体運動に支配されているので、地球の進化過程と密接に結びついているはずである。この意味からもダイナモ問題の解明は重要で、早急に本格的研究に取り組む必要がある。この場合、単に数理的な理論の側面にとらわれることなく、地球及び惑星の磁場の情報を常に念頭におき、現実地球や惑星内部で起こっている物理過程に即した研究を目指すことが重要である。また、過去の地球磁場の情報を積極的に取り込んで、地球の進化との関連を追求することも必要であろう。

##### 4.1.2 グローバル観測

地球や惑星の磁場の起源を探る上で、磁場の時間的・空間的分布は絶対に不可欠な情報である。現在世界各地に地磁気観測所があり地磁気の精密観測を行っている。近代産業の

発展は、地球上の環境破壊をもたらしているが、電磁気的な環境も悪化の一途をたどっている。地球中心核の流体運動に伴う磁場変動をとらえるには、少なくとも20年以上、できれば100年以上の継続的な観測が必要であることから、地磁気観測所における観測環境の確保は人類に課せられた使命であると言えよう。また現状を見ると、観測所の分布は先進諸国に偏りがちであり、全地球的な磁場の分布及びその時間変化を調べるのには不十分である。このためには、開発途上国の観測設備の近代化を図るとともに、必要に応じ標準的な地磁気観測所を設置し、分布を一様化することが強く望まれる。さし当たり、東アジアや東南アジア等近隣諸国へ国際協力、技術援助などを行って、一日でも早く磁場観測データの蓄積を開始すべきである。

地球表面の3分の2は海洋が占めるので、一様な観測点分布を得るためには、当然のことながら海洋での観測が不可欠である。観測環境の保全や将来にわたる継続性などの観点から考えても、海底地磁気観測所の実現を推進することが急務であると考えられる。一方、我国においても、標準的な観測所は不足している。特に西南日本においては、鹿屋のみであり、四国もしくは中国地方に地磁気観測所を設置することが急務である。地殻活動監視のための磁場観測に含まれる擾乱磁場の除去の際にもかかる標準観測所の果たす役割は極めて大きい。

1979～1980年、米国のNASAによる本格的な地磁気測定衛星MAGSATの打ち上げによって、地磁気3成分の観測が行われ、地球内部の磁場に関する研究に多大の成果をもたらした。人工衛星による観測には、きわめて短時間のうちに全地球的に高密度かつ均質な地磁気の分布をもたらすという利点がある。衛星観測と地上・海底観測とによって、時間・空間分解能の高いデータの蓄積が可能となる。このため、今後は5～10年毎に衛星による観測の実施を目指すべきである。地殻起源の磁場の精度はマッピングと永年変化のグローバルな観測とでは衛星に対する要求が異なっている。従って、前者の目的に対しては100～200kmという低高度を飛ぶ比較的寿命の短い衛星、後者に対しては1000～1500kmの高高度で10～15年に渡って連続的に観測を続けられる衛星を打ち上げることが望ましい。

#### 4.1.3 古地磁気研究

地球磁場の起源の解明には、過去の磁場変動の様子が最も直接的な情報となる。コア起源の磁場変動のスペクトルは周期にして数年から10億年の範囲に及ぶが、装置による観測を用いて精密な議論が可能なのは、100年程度までの時間スケールに限られている。このよ

うな精密な議論を少なくとも数万年から地磁気逆転を含む数百万年の時間スケールまで延長することが、地球磁場の起源の解明に画期的な転換をもたらすことになる。このためには、専用船を用いた海底での長大コア採取による堆積物の古地磁気学及び考古地磁気学の研究を組織的に推進することが必要である。また、磁場の逆転時の変動の様子はダイナモ作用を特徴づける現象であり、現在の技術水準で地球表面の広い範囲において観測が可能なものである。是非追求するべきである。もっと長期の変動については多くの測定があるにも関わらず、時間精度の不足等のために十分に活用されていない状況である。これに関してはデータの整理とデータベース化、そして新しい解析法の確立が必要である。

#### 4.1.4 惑星探査

最近の惑星探査は華々しいが、磁場観測の観点からは非常に不十分といわざるをえない。たしかに、パイオニアやボイジャーといった米国の惑星探査ミッションには磁場計測が組み込まれ、惑星磁場の概要はつかめたものの、その後の磁場計測の進展は非常に遅い。たとえば、火星や金星の磁場は本当に存在しないのか、またその場合、月に見られるようなローカルな磁気異常は存在するのかもしれないのか、未だにはっきりしていない。特に、水星がその小さなサイズと遅い回転速度にもかかわらず固有磁場を保持していることは、ダイナモ機構全般の解明に対して大きな問題を提起している。また、惑星磁場は地球磁場と同様の永年変化を示すのかどうかという問題も未解決である。これからの磁場計測に必要な観点は大きく二つに分けられる。一つは、惑星固有の磁場及びその永年変化の解明であり、地球における定期的衛星磁場観測もこれに含まれる。水星については前述のような問題があるのに観測が少ないので、重点的な対象として取り上げる必要がある。もう一つは、惑星周回衛星によるローカルな磁場観測であり、惑星上での観測も含まれる。とくに、金星や火星の磁気異常の観測は、これらの星のダイナミクスとの関連で重要な情報となる。

#### 4.2 地球磁場変動史

地球誕生から現在に到る地球進化過程の究明のためには、地球磁場の変動史が有力な研究手段である。地球の進化は初期に高温であった地球が冷却していく過程であり、現在プレート運動として観測される表面の活動と、コアとマントルを通しての熱と物質の輸送過程が、地球の冷却を規定している。地球磁場は主にコアで生成、維持されているが、地球の冷却に伴うコアとマントルの相互作用が、コア内部の運動に影響を与え、磁場の変動と

して現われることは明らかである。また、40億年前からの変動史が観測可能な物理量として磁場は貴重な情報である。この研究課題を推進していく上では、特に磁場変動の時空間分布をできるだけ広く均一に観測することを目指すことと、磁場変動だけに着目するのではなく、地球環境、宇宙環境の変遷と関連させて考えることが重要である。このための実際的な推進方法としては、(1) 海底磁気異常の精密観測、(2) 古地球磁場変動の連続的な観測、(3) 太古代の古地磁気研究、(4) 地球環境と磁場変動の関係の解明、が考えられる。

#### 4.2.1 海底磁気異常の精密観測による磁場変動の解明

海底の地磁気異常の縞模様は海洋底の拡大様式の解明に役立ったばかりでなく、過去2億年間の地球磁場の逆転史の大枠を明らかにした。更に進んで過去の磁場変動の詳細を解明するためには、変動の空間的な分布を知ることが特に重要であり、地球表面の70%を占める海域から情報を得ることが是非必要である。海底の磁気異常の研究は、今までは全磁力の観測による地磁気逆転史の解明が一般的であった。今後は、船上及び深海曳航地磁気三成分測定などの新しい測定技術を駆使した広域精査、多くの深部掘削による海洋地殻、マンツルの岩石磁気的な性質の真の解明などを通じて、地磁気異常から地磁気極性の変化だけでなく、過去の磁場の強度や方向変化を読み取る方法を確立することが是非必要である。これにより、我々が持つ地球磁場変動に関する知識は飛躍的に増大する。

#### 4.2.2 堆積物を用いた古地球磁場変動の連続観測

海底や湖底の堆積物は、過去の地球磁場の連続的な時間変動を調べるためにもっとも重要な試料である。堆積物の古地磁気学的な研究は近年大きな発展をとげているが、未だに直接観測(観測所)の結果と同質の議論を行なうに至っていない。これを打開するためには、空間的、時間的に均一と言えるだけのデータ量を蓄積することと、堆積物から過去の磁場の強度を読み取る方法を確立することがとくに重要である。具体的な重要課題としては、堆積速度の大きな堆積物を用いて、地球磁場逆転時の磁場変動の詳細を知ること(しかもブリュンヌ/松山境界だけでなくできるかぎり多くの逆転境界で)、数百年から数万年の周期の磁場変動(非逆転時)の詳細を少なくとも過去百万年に遡って解明すること、遅い堆積速度の堆積物を用いて長期にわたる非双極子磁場の実態や真の極移動を明らかにすることがある。

研究対象としての堆積物を得るために、今までは国際深海掘削計画などに参加するなど

してきたが、更に我々の研究目的に最適な堆積物を地球上の広い範囲の海底から獲得するためには、専用船など独自の手段と哲学を持って、主体的に国際的な共同研究を組織していく必要がある。

#### 4.2.3 太古代の古地磁気

初期地球の進化プロセスの研究は現代の地球科学の明確なフロンティアの一つである。この時期の古地磁気学には二つの期待がなされている。第一には地球磁場の始まりを明らかにすることで、これはコアの形成時期を知る殆ど唯一の直接的な手段である。今一つは、太古代のプレート運動速度を見積もることである。太古代の地球は温度が高かったと考えられていて、その結果マントル対流も盛んであったと予想されているが、ここでも古地磁気学は殆ど唯一の確認する方法である。研究を進めるうえでは海外学術調査などにより各大陸の太古代の地層を組織的に採集することが必要であり、国際的な共同研究が望まれる。

#### 4.2.4 地球環境と地球磁場変動の関係

地球磁場と地球環境との関連は、以前より議論がある。例えば、第四紀の気候変動と地球磁場強度との関係、地磁気逆転と生物の大量絶滅、古気候変化の要因の一つとされる地球軌道の離心率とブリュンヌ期の短期間の地球磁場逆転やエクスカーションとの相関などが挙げられる。これらの問題は、過去の地球磁場変動の詳細や因果関係、その物理的機構が不明であるため、未だ憶測の域を出ない。しかし、地球の多圏間相互作用や長期地球リズムの問題として、解明すべきテーマと考えられる。このためには、前項でのべた堆積物を用いた磁場変動の解明を強力に推進すると共に、同じ堆積物試料を多角的に利用し、酸素同位体比をはじめ各種の古海洋学的研究を同時に進めることが必要である。とくに、古気候を支配しているミランコビッチ周期として知られる地球の軌道要素の変動周期を含む、数万年から数十万年オーダーの地球磁場強度変化を解明することが重要である。

#### 4.3 地球惑星内部三次元構造

地球内部構造の研究は地球活動のための場を規定する段階から、地球活動そのものを観測する段階に進化しつつある。これは地球の球対称モデルから出発して、地球深部までの不均質性や異方性等の三次元構造を求められるようになったことに対応する。地球内部の上層部である地殻や上部マントルについてはプレートテクトニクスに対応した構造が求められ、より深部においてはマントル対流や内核の成長過程を直接的に観測することが可能

になろうとしている。地球電磁気学の研究においても地殻や上部マントルについては詳しい観測が行なえるようになったが、より深部に関しては解像度が不足している。この状況を打開して地球電磁気学の研究を進めることは総合的な地球活動の理解に極めて有効である。更に、現時点の構造を調べるだけでなく、構造発達の歴史をあわせて考え、他の惑星との比較を行なうことが地球活動の真の理解のために重要であろう。また、比較的上層部の研究においては、測定精度をあげるための技術を開発することにより、研究の目的に役立つだけでなく、今まで利用が不可能であった深さにある資源を探查し、獲得することが可能となろう。地球惑星内部三次元構造の解明のためには、(1)グローバル観測、(2)高密度のアレー観測、(3)超高圧実験、(4)古地磁気学による構造発達の研究、(5)惑星探查、(6)資源探查技術の開発、の研究を進めることが必要である。

#### 4.3.1 グローバル観測

地球外部に起因する磁場変動は、地球内部に電流を誘導する。誘導される電流の分布は、地球内部の電気伝導度分布を反映する。地球内部の中で、下部マントルの電気伝導度を調べることは、最重要課題の一つである。このような電磁誘導現象を用いる場合、周期の長い現象ほどより深部の構造に関する情報を含んでいる。下部マントルの構造を調べるためには、1日程度よりも長い周期の現象を解析する必要がある。一方地磁気変動のうち10～20年周期までは、主として地球外部に原因があることが知られている。このような周期の磁場変動を、精密かつ高密度に観測することは、下部マントルの電気伝導度分布を調べるうえで決定的な役割をはたす。従来下部マントルの研究では、不均質性を考慮したものはなかったが、今後は観測点密度をあげることによりこの点も考慮すべきである。この意味からも、すでに述べたように、海洋をも含め全球的に均質な観測点配置による高精度観測が強く望まれる。

#### 4.3.2 高密度アレー観測

数分～数時間のより短周期の電磁誘導を利用することにより、地殻や上部マントルの電気伝導度構造を調べることが出来る。わが国では、近年この分野の進展が著しく、日本列島の2次元的な地下構造の詳細なモデルが得られるようになった。その結果、沈み込むプレートの構造に密接に関連した、沈み込み帯特有の電気伝導度分布の特徴が明らかにされつつある。今後はモデルの詳細化と3次元化が課題となっている。このためには、観測の高密度アレー化が不可欠である。従来観測は、1ないし数本の測線で行ってきたが、こ

れを面的なアレーで行うことが必要である。わが国のように、周囲を海で囲まれた地域の地下構造を調べるためには、海洋での観測が必須であるが、海底観測も同様に面的なアレーで実施すべきである。この場合、海水のシールド効果による自然磁場の減衰が著しいので、より深部の構造で求めるには人工的な制御電源による探査が必要で、そのための技術開発が急がれる。観測の高密度化とともに、現実的な3次元構造のモデル解析の手法の確立を図ることも重要な課題である。また、海陸結合観測の手法確立をまって、東アジア-西太平洋域の電気伝導度構造を決定するための観測を近隣諸国へ呼びかけたい。

#### 4.3.3 超高压実験

地球内部の電磁気構造を議論するうえでは、高压、超高压実験による物質、物性の測定は欠かせないものである。今までは、観測の方の精度が十分でなく、また実験により精度の高い物性測定を行なうには発生できる圧力が不足していた。しかし、実験技術の進歩により下部マントルからコア内部までの圧力の発生が、精度の良い物性測定が可能な大きさの試料を用いて、行なえるようになってきた。地球電磁気学的な興味から出発した超高压実験は従来は比較的になかったが、今や物質の電磁気的な性質を超高压下で測定することを観測と同時に進めることが地球内部構造の理解に必須であろう。また、地球の表面付近でも大陸下部地殻は、その構成物質や状態に関して多くの謎が残されている。下部地殻の温度、圧力状態での物性測定は比較的容易であり、大陸地殻の発達過程の解明に役立つものである。是非推進すべきである。

#### 4.3.4 構造発達過程の研究

地球現象解明のためには現在の構造だけを見るだけでなく、構造の発達過程を合わせて考えることが必要である。古地磁気研究は大陸移動や過去の地塊の運動・変形の幾何学を求めることにより、表層構造の発達過程の解明に貢献してきた。今後は次々と明らかになりつつある地球内部の構造と合わせて考えることにより、地球深部までを含めたより物理的な構造発達過程の議論を進展させるべきである。

#### 4.3.5 惑星探査

惑星の内部を研究する手段として、磁場変化による惑星内部の電磁誘導現象を利用することが考えられる。現に、月に関してはすでに研究が行われており、月内部の電気伝導度構造の概略が推定されている。この研究を更に発展させ、月内部のより精密な構造を明ら

かにするには、月表面の数カ所に高性能磁力計及び電位差計を配置し、磁場及び電場の変化を観測する必要がある。同様の研究は金星や火星に対しても行われるべきであろう。また、木星型惑星に対しては、複数の周回軌道衛星を用いれば同様の研究が可能である。この目的のための惑星探査は当然のこととして、「地球惑星磁場の起源」の惑星探査と結び付けて計画すべきことである。

#### 4.3.6 資源探査技術の開発

地下深部の構造を調べるには、浅部の構造を正確に決めておく必要がある。一方、地殻浅部の地下構造の探査方法は、資源探査のために重要な技術である。従って、探査の手法の高精度化は、より深部を知ろうとする研究目的にとっても、資源探査のためにも必要である。従来磁気測量や電磁探査法は、金属・石油・地熱などの資源探査に応用され技術開発がなされてきた。この技術はより深部を調べる目的にも利用されてきている。今までにも地質調査所、水路部、国土地理院などによる航空磁気測量や海上磁気測量の実績は豊富である。今後は、磁場3成分観測の精度を上げることによって、構造探査の空間的分解能を著しく向上させることが期待される。さらに、測定点の3次元化（異なる高度での測定）を計ることによって探査精度の向上を目指すべきである。

#### 4.4 地殻活動監視

リアルタイムで地球活動を観測、監視することは地球科学の原点であり、生きている地球を実感させるだけでなく、地震予知や火山噴火予知に結びつき、災害科学の面で社会に貢献できる研究課題である。また、地球環境の監視を通して環境科学の側面を持つ。この分野の研究は我々研究者の使命として観測・研究が進められてきたが、実用的な地球活動の監視体制としてはまだ不十分であり、より一層の進展が必要である。また、現時点の状況を理解するだけでなく、過去の活動を的確に把握することが、この分野の進展のために不可欠であろう。この研究課題は、（1）予知技術の開発、（2）マグマの探査と活動の監視、（3）活構造の探査と活動の監視、（4）電磁環境の監視、（5）地殻活動史の研究、に分けられる。

##### 4.4.1 予知技術の開発

地震、火山噴火にともなって、またしばしば先行して電磁気現象が観測されている。地震、火山噴火予知はその社会的要請の強さからも、我々がとり組まなければならない重要

課題の一つであることは言うまでもないが、その際、これらの電磁気現象と地震、火山噴火メカニズムとの物理的対応を明確にするような観測、研究方法の開発が重要である。また、現在の地殻及び上部マントルの応力場が地震、火山、地殻変動などの活動を支配するものである以上、主にプレート境界での上部マントルの電磁気構造の解明が急務である。また、太平洋の沿岸海底では、巨大地震発生に関連した電磁場の前兆的变化が顕著であると予想されているので、海底での電磁場観測が急がれている。現在、気象庁の海底地震監視システムを利用した地電位常時観測が東海沖と房総沖のみで実施されているが、更に多点に広げることが望ましい。

#### 4.4.2 マグマの探査と活動の監視

火山活動は、地下のマグマ溜まりから供給されると考えられているマグマの動きによるものであるから、火山活動の監視にとってマグマ溜まりの構造、その消長を明らかにすることは決定的に重要である。高温、かつ高電気伝導度であるマグマは、まさに電磁気的手法に最適の対象物であると言える。

火山噴火に関連した電磁場変動の観測は古くから行なわれていたが、最近の火山活動に関連した観測は、多点同時連続観測の有用性を示すものである。また、マグマの動きを捉えるためには、火山山体自身の電磁気学的三次元構造が明らかにされねばならない。

#### 4.4.3 活構造の探査と活動の監視

火山活動同様、活断層を含む活構造の探査及びその活動の監視が地震発生のメカニズムの解明及び地震予知の観点からも重要である。山崎断層での集中観測以来、多くの活断層に低比抵抗帯、磁気異常、自然電位の異常等が伴うことが明らかになってきた。また、地震活動に関するとと思われる電磁場変動の観測もなされている。今までの経験によると電磁気的異常変化の観測され易い特定の場所があり、これは断層近傍の破碎帯に多い。この理由として、地殻応力の変化に伴う地下水の移動が関連していると考えられている。また、地震の発生している深さと電気伝導度構造との間に相関が認められている。地震発生や前兆出現には地殻内の水が深く関係していると予想されるので、水及びクラックの分布を知るため、地殻の3次元的構造を調べる事が重要と考えられる。

また、少なくともいくつかの断層にまとを絞り、100kmの範囲に数10台程度以上の磁力計及び電場観測装置を配置して連続観測を行うことにより、重要な成果が得られることが期待される。

#### 4.4.4 電磁環境の監視

地球磁場は、地球及びその周辺空間に広がって、地球環境の重要な一部を構成している。そして、地球上のあらゆる生物の生態や進化に影響を与えると同時に、われわれ人間の実生活にも少なからずかかわりを持っている。現在、産業廃棄物や自動車排気ガスなどによる環境破壊が問題とされている。このような環境破壊が進行する一方で、我々をとりまく電磁環境も劣悪化の一途をたどっていることは、生物の生活などに与える影響が未解明の部分が多いため、余り認識されていない。現実には地磁気の観測条件の悪化のみが表面に現われている段階である。しかしながら、大気や海洋と同様に電磁環境を清浄に保つことが、将来的に極めて重要な問題になる可能性は否定できない。

#### 4.4.5 地殻活動史

地殻活動の現況の理解には過去の活動を的確に把握することが重要である。古地磁気学は大陸単位の動きを知る道具として利用されてきたが、新生代ぐらいであれば極移動曲線が明確になった現在、それを利用してより細かい構造の動きを知ることができるようになった。また、これは、プレートのダイナミクスを理解するために必要な、プレート境界のカイネティクスを与えるものであり、プレートテクトニクス以後の地球科学を方向付ける基礎的なデータになるものと期待される。

## 第5章 研究推進のために必要な施策

### 1 宇宙空間科学および中層・超高層大気科学

#### 1. 1 惑星研究の推進

##### 1. 1. 1 2000年代へ向けての展望

1991年より開始された太陽地球系エネルギー国際共同研究計画(STEP)は、IGY(1957年-58年)に始まるSTEP研究に一つの区切りをもたらすこととなろう。このSTEP後の太陽地球系物理学研究の指向してゆく方向は、太陽・地球・惑星を太陽系システムとして捉え、このシステムを統一的に理解していくことを目標とする太陽惑星系物理学(SPP)にあるとあってよい。

この太陽惑星系物理学は、単に太陽地球系物理学の延長上にあるものではない。すなわち、太陽系を1つのシステムとしてとらえることはプラズマ物理学・大気物理学の範囲に留まるものではなく、扱う物質としてはプラズマ相から固相までの全ての状態相が、空間としては太陽系空間から他の恒星惑星系までが、また時間軸としては現在の瞬時の変動から惑星の形成・太陽系の起源にまでさかのぼる時間スケールのもので扱われることになる。これはまた、単に天文学の分野に踏み込んだものとも全く異なる。すなわち、太陽系の科学として、過去をも含めた未知の物理過程を探り実証的に明らかにしていく開拓的な学問分野である。また更に、将来の惑星における人間活動の場・環境の基礎研究という広い視野を持ったものである。

この太陽惑星系物理学は、従って広い研究分野の連携が不可欠である。既存の学問分野で言えば、地球物理学を中心に、天文学、プラズマ物理学、地質鉱物学、物理学、化学そして工学にわたる領域を新しい観点から再編成して出発する総合科学といえる。太陽惑星系物理学を、2000年を越えたこれからの我々の中心研究課題としてゆくとき、研究推進のために以下の方策が必要となる。

## 1. 1. 2 惑星研究推進のための方策

### (1) 探査機による惑星探査

火星や金星などの地球型惑星への探査機は太陽電池を電源として使用できるため現在の地球軌道の衛星技術を発展させることにより開発が可能である。また探査機の打ち上げロケットも現在宇宙科学研究所で開発しているM-Vロケットで可能である。従って1990年代はこれらの惑星に探査機を送り、磁気圏、電離圏、大気圏の観測を実施し、新しい知見を得ることを計画する。2000年代に入ってから金星や火星、さらに水星の観測をより大型のロケットを使用し大規模に実施するとともに、木星や他の外惑星の探査を国際協力のもとに実施することを計画する。

### (2) 大学における惑星研究の基盤構築

惑星研究の底辺を拡大し、惑星研究の基盤をつくるために、相当数の大学に惑星関連の学科や大学院の専攻課程をつくり、惑星研究の専門家を養成する。また惑星研究の中でも特に重要と思われる特定の課題を対象にした研究センターをいくつかの大学につくり、基礎研究の発展を図る。

### (3) 惑星センターの設立

前述の惑星研究の基盤が作り出される1990年代後半の段階で全国規模の惑星研究センター設立する。このセンターは既存の研究所や大学との連携のもとに固体惑星から惑星大気圏、電離圏、磁気圏まで広い研究対象をもち、我が国の惑星研究の中核としての役割を果たす。附属施設として惑星データセンター、隕石資料解析センター、惑星大気・電波観測所等をもち、観測とデータ解析や計算機シミュレーションを一体化した研究を進める。

## 1. 2 国際協力の推進

### 1. 2. 1 歴史的経過と将来の方向

S T P 研究は地球諸科学のうちでも最も地域研究的性格が少なく、視点は常にグロー

バルであるために、特に観測においては国際的に共同歩調をとって進めてきた歴史がある。国際協力事業は第1次、第2次国際極年(1882-83、1932-33)をさきがけとし、IGY(1957-58)で本格化し、その後はIQSY(1964-65)、IASY(1969-71)、IMS(1976-79)、MAP(1982-85)、STEP(1990-95)と実施してきたが、我が国はこれらの計画の中で重要な役割を果たしてきた。特にMAPやSTEPでは計画段階から我が国が積極的な役割を演じるようになった。

一方、気象・気候関係のプログラムには、GARPとWCRPがあり、また生物圏まで含めたIGBP(地球圏・生物圏国際協同研究計画、1990-2000)というプログラムも始動した。IGBPは進行中・計画中のプログラムとの重複を避け、境界領域を重視していくつかの中核プロジェクトを設定している。大気関係の中核プロジェクトは、対流圏化学を対象とするIGACが動き始めており、またMAPの流れをひいて成層圏・対流圏相互作用を対象とするSTIBも中核プロジェクトとして提案されている。

IGBPは地球システムにおける生物の役割を初めて本格的にとり上げた点で重要である。地球環境を考えると、地球を惑星の一つとしてとらえ比較惑星学的に研究する視点がでてきたが、地球と他の地球型惑星の大気環境に大きな差がある主要原因の一つが生物活動にあることが明らかになってきた。中層・超高層大気分野でもオゾン層の形成やオゾン層破壊物質の生成、太陽活動変動が気候や生物活動に与える影響など生物活動と密接に結び付いた研究課題が多数存在し、今後この分野の研究を発展させる必要がある。

## 1. 2. 2 実施方策

これまでの国際協同研究計画への国内の対応は、臨時の特別事業として行われてきた。STEP分野が未知の領域の発見の時代にあった時期には、次々と新機軸を打ち出し、臨時事業として行うことは有効であったと思われる。しかし地球環境研究の重要性の高まりとともに、この分野へのSTEPの貢献が期待されている。そこで将来においては、国際協同プログラムを恒常化し、日本がこの面で国際的に十分な貢献を行う必要がある。

我が国が大きな貢献ができる具体的なプロジェクトとしては次のようなものが考えられる。

### (1) 中層・超高層大気国際協同研究計画

中層大気と超高層大気の相互作用の機構をグローバルに研究する。特に我が国は観測の空白地域となっているアジア・太平洋地域や極冠域における協同観測を計画し、我が国がその実施のために十分な貢献をする。この協同研究を通じてグローバルな中層・超高層大気の力学・化学過程が初めて詳細に明らかとなる。計画の中ではまた国際協同の拠点観測所（後述）や観測点網を赤道域や極域に建設し国際協同研究の場として利用する。

## （２）太陽惑星環境国際協同研究計画

太陽・地球・惑星系の現在の環境を定量的に理解するとともに、惑星環境の進化の過程を明らかにすることを目的とする。そのために各種の地上観測や惑星観測のための衛星群の打ち上げなどを国際的に企画する。

### 1. 3 海外拠点観測所

全地球規模で非定常に発生するSTP現象の全体像をつかみ、かつ、現象の空間変化と時間変化を分離するためには、地上多点観測と衛星観測を組み合わせた3次元のグローバルネットワーク観測が必須であり、それ以外に問題を解決する方法と手段はない。例えば、磁気圏で起こっているプラズマ現象を理解しようとするれば、衛星データを二次元情報が取得できる電離層レベルでのオーロラ、粒子、波動等の空間分布と比較することが不可欠であるし、大気のグローバルな物質循環のメカニズムを明らかにしようとするれば、衛星観測に呼応したグローバルな地上観測が不可欠となる。

グローバル観測を実施するには、自動データ取得を基本とする比較的小規模の観測点からなるグローバルネットワークと、各種の観測装置をもちネットワークの中核となる拠点観測所の組み合わせが必要となる。拠点観測所は大規模なものから小規模なものまでさまざまな形態が考えられるが、観測の実施場所であるとともに国際共同研究の場としての意味も重要である。

#### 1. 3. 1 大規模拠点観測所

大型の海外拠点観測所としては、京都大学超高層電波研究センターが中心となり計画を進めている赤道レーダ（インドネシア）と名古屋大学太陽地球環境研究所がヨーロッパ

諸国との協同計画として進めている北極 I Sレーダ（スピッツベルゲン）がある。これらは設備の規模から国際観測所として観測・研究を実施する。

赤道レーダに関しては、中層・超高層大気研究推進の方策の項で述べたように、3000 基の八木アンテナからなる大型アレーアンテナシステムにより地表 2 km から 1000 km までの広範囲の大気領域の観測を目指す。一方、北極 I Sレーダに関しては、宇宙空間プラズマ研究の方策の項で述べたように、太陽風エネルギーが流入するカスプ領域に位置するスピッツベルゲンに建設し、中層・超高層大気圏および電離圏の総合的な解明を目指す。アンテナシステムはフェーズド・アレー方式であり、送信出力は 3 MW、送信周波数は 45 0 MHz を予定している。

### 1. 3. 2 中小規模観測拠点

#### (1) 電磁圏・太陽圏観測拠点

電磁圏や太陽圏観測のための多点グローバルネットワークの中核拠点としての機能を持ち、各種の観測器によりオーロラ現象、電離圏、磁気圏宇宙線の観測を行う。観測拠点の場所としては、1) 磁気圏尾部の粒子と場、および太陽風磁場効果のモニターを行う深極冠域（カナダのユーリカ等）、2) 太陽風からの磁気圏へのエネルギー、運動量、粒子輸送過程をモニターするカスプ域（スピッツベルゲン）、3) 電磁圏のエネルギー変換、粒子加速の中心であり、かつ多点観測の拠点としてのオーロラ帯（アラスカのポーカーフラット、カナダのサスカツーン）、4) 内部磁気圏へのエネルギー輸送をモニターする低緯度（ハワイ）、5) 電離圏磁気赤道現象のモニターとしての磁気赤道拠点（インドネシア）、6) 太陽風観測の時間分解能、および空間カバーを増すための南半球アメリカ子午線拠点（ペルーまたはブラジル）、7) 宇宙線の南北観測を実施する拠点（オーストラリアのタスマニヤ）、が考えられる。

#### (2) 中層・超高層大気観測拠点

相手国との共同研究という形態で観測拠点をつくり、各種のリモートセンシング装置を用い大気の長期グローバルモニタリングを行う。また気球観測も実施する。観測拠点の場所としては、1) 極渦の中に位置するスピッツベルゲンやカナダのリゾリュートベイ、2) 極渦の境界付近に位置するアラスカのポーカーフラット、3) 赤道域のインドネシア、

4) 南半球のニュージーランド等が考えられる。

#### 1. 4 航空機観測体制の確立

南極、北極のオゾン化学過程の解明に米国NASAのDC-8とER-2航空機は大きな成果を上げている。DC-8は高度9-12 kmを飛行し、赤外分光器やライダーなど大型の観測器を搭載し、動く実験室となっている。一方ER-2は高度15-20 kmを飛行する特殊な飛行機で、オゾン層の中で直接観測を行うことができる。航空機観測は、リモートセンシング法や直接観測法により広い地域の観測が可能となることから中層大気の観測にはとりわけ有効である。今後ますます需要が高まると予想されるので、我が国としても航空機観測を常時実施できる体制を早急に確立する必要がある。

成層圏観測用の飛行機としては、

- 1) 高度5 km付近を飛行し成層圏をリモートセンシング法で観測する比較的小型の飛行機、
- 2) 高度10 km以上の成層圏飛行ができ、しかも長い航続距離をもつDC-8クラスの大型の飛行機、

の2機併用が必要となる。航空機観測は気象分野の対流圏の雲や放射の観測でも重要でありこれらを統一した航空機観測体制の確立が望まれる。

#### 1. 5 理論・シミュレーション

##### 1. 5. 1 理論と計算機実験の目指すところ

太陽地球系物理学(STP)は巨大なプラズマである太陽をエネルギー源とした非線形・不均一・非定常なプラズマと大気を対象とする開放系物理学である。このような物理系は太陽地球系だけでなく、広く天文分野にも見られるが、STP研究においては実際に観測器を送り込んで得られる実験データを基礎としているところに大きな特徴がある。STP研究のもう一つの際立った特質は、環境科学としての側面である。来世紀には人類は

ますます宇宙空間の利用を進め、やがて宇宙生活圏を実現してゆくであろう。その際、太陽地球系環境に対して充分かつ定量的な知見が要求されることは言うまでもなく、これに応えられる学術分野はまさにS T P研究分野である。

S T P研究における理論と計算機実験はこの二つのS T P研究の目的と特質を十分に考慮しながら、飛翔体観測と地上観測と連携してゆかねばならない。今後の新しい目標は、1) 複数の競合する物理的素過程を定量的に研究し、それらの競合関係を明らかにすること、2) 巨視的物理過程と微視的物理過程の複雑な結合連鎖を明らかにすること、3) 中性大気とプラズマの相互作用を定量的に明らかにすること、4) 光化学反応過程と力学過程の相互作用を明らかにすること、5) S T P分野で開発されている熱圏・電離圏の大循環モデルと気象分野で開発されている対流圏・成層圏の大気循環モデルの統一、等がある。

#### 1. 5. 2 理論・計算機実験推進のための方策

(1) 大規模3次元数値シミュレーションにより、太陽圏、地球および惑星の電離圏・磁気圏の巨視的および微視的構造、非線形的時間発展を明らかにする。

(2) 熱圏の力学・化学モデル、中層大気の力学・化学モデル、電離圏モデルを精密化させるとともに、これらを統一した成層圏から熱圏に至る大気のグローバルモデルを構築し、数値シミュレーションによりその時間発展、特に太陽活動変動に対する応答過程を明らかにする。さらにこれらの手法を惑星大気に応用し、その構造と変化の機構を明らかにする。

(3) S T P研究における理論・計算機実験を発展させるために、大学や研究機関の理論部門を強化する。また基礎理論や応用理論の専門家、計算機実験の専門家を養成するために、大学に理論・計算機実験の研究拠点を設け、大学院教育の充実をはかる。

(4) 理論・計算機実験の国際交流を進めるために、これまで行われてきたI S S S国際学校活動を一步進め、国際共同の理論・計算機実験研究組織を新たにつくる。

#### 1. 6 データネットワーク・総合解析

## 1. 6. 1 2000年代へ向けての展望

STP研究では、個別の観測データのみを覗いていただけでは現象を説明する確実な結論に達することは難しいことが認識されるようになり、ここに、多種類の観測データを直接比べた研究、しかも同時の観測データを有機的に結合し、モデリング・シミュレーションと比較した研究が重要視されるようになってきた。これらの総合解析研究の手法は1980年代に基礎が作られ、国内では1991年から5年計画で実施されるSTEPプロジェクトでその真価を発揮することになる。

1990年代後半から2000年代に向けては、計算機の処理能力も増大し、ネットワークの伝送速度もギガビットの時代になるので、これまでのように一次処理を終わりコンパクトになったデータの利用だけではなく、大量の生データや画像データをデータネットワークで利用出来るようになる。従ってこれらの大量データの取り扱い方や解析方法の確立、ネットワークを通しての大量データの転送処理方法の確立が必須になる。

## 1. 6. 2 研究推進の方策

### (1) STP観測資料の集積とデータベース構築

STPの観測資料で、組織的に集積してデータベース化が計られているのは衛星観測データと各専門ごとのWDCのデータである。その他のプロジェクトごとの観測データ及び研究観測のデータも同様に集め、利用できる形にデータベース化することはSTP研究に不可欠である。今後、観測から取得されるデータは量質共に大きく変化すると予想されるので、それらに対応したデータ処理法の開発が必要となる。

### (2) STPネットワークの整備と利用方法の確立

STPの観測資料は専門家のいる世界中の研究機関でデータベース化されるので、それらの間を結ぶ高速のネットワーク、研究者間の研究情報とデータ配布及び交換を可能にする包括的なネットワークの整備、そのネットワークを活用したデータ交換法とデータ解析法の開発導入が必須である。観測データのリアルタイム解析と交換、観測計画へのフィールドバック、共同観測への利用、宇宙環境変動のリアルタイムでのモニターと予報を実現するためには、ネットワーク利用が決定的に重要となる。

### (3) ナショナルデータセンター機構の設立

データベースとネットワーク利用の時代に対応して、ソフトウェアとハードウェアを開発・整備・維持し、多種大量のデータを効率的に処理していくためには、専門家の確保と先端設備の導入が不可欠である。また分散して構築された専門データベースの有効な相互利用の方法を確立する必要がある。そのために、専門的知識およびデータを保持し、WDC-C2を運営している世界資料センターを充実させるとともに、総合的な業務を扱うデータセンターを発足させ、既存のWDC-C2と連携してナショナルデータセンター機構を構成し、国際化に対応する。また、WDC-C2のWDC内での立場と成すべき任務を再検討し、日本の役割と国際的寄与を明確に打ち出す必要がある。

## 1. 7 研究・教育体制

### 1. 7. 1 STP研究・教育体制の発展の歴史

STP研究の最大の特徴は、太陽・地球・惑星系という広大な空間を研究対象としていることから、衛星観測やグローバルネットワーク観測などの大型プロジェクトを実施することが不可欠なことである。これらのプロジェクトの実施の核となっているのが、大学共同利用機関である宇宙科学研究所、国立天文台、極地研究所と、全国共同利用のための名古屋大学太陽地球環境研究所および京都大学超高層電波研究センターである。極地研究所が設立されたのは昭和48年で、昭和56年には京都大学超高層電波研究センターの設立と宇宙航空研究所（東京大学）の宇宙科学研究所への発展的改組が行われた。その後昭和63年に国立天文台がそして平成2年に名古屋大学太陽地球環境研究所が設立され、大型プロジェクトの実施体制は年々強化されてきた。

これらの大型プロジェクトを支え、また中、小ささまざまなプロジェクト研究や基礎研究を実施してきたのが大学や各省庁の研究機関に所属している研究者である。大学では地球物理学科、物理学科、地球科学科、電子工学科などの学科や大学院の専攻、学部附属の研究施設や実験施設等でSTPの研究・教育が行われてきた。一方、国立の研究試験機関である郵政省通信総合研究所と気象庁地磁気観測所はIGY以来一貫して我が国のSTP研究の中で重要な役割を演じてきた。また最近の地球環境研究の高まりの中で、気象庁気

象研究所や環境庁環境研究所でもSTPに関連した大気研究が実施されつつある。

## 1. 7. 2 STP研究・教育体制の将来

2000年を越えてのSTP研究・教育体制の方向性としては、プロジェクト研究と基礎研究が一体化し、互いに刺激し合う研究体制が必要となろう。そのために以下の方策を進める必要があると思われる。

(1) 大学、大学共同利用機関、国立試験研究機関の研究者がより緊密な共同研究が実施できるよう、これらの機関が参加する包括的な研究組織をつくる。この研究組織に参加する機関はそれぞれ客員部門を設け、研究者の交流を活発化する。また研究機構は5～10年程度の大型共同研究プロジェクトを計画し、実施に必要な予算を確保する。

(2) 大学でのSTP研究・教育体制を飛躍的に強化するため、既存の大学院の専攻の拡充および相当数の大学に新たな大学院専攻を設ける。さらに既存の学部附属の研究施設や実験施設を大学院教育のためのリサーチセンターとして発展的に改組し、十分な基礎研究が実施できるよう、人員、設備、研究費を大幅に拡充する。

(3) 学部教育の充実を図るため、STP関連の学科を相当数の大学に新設する。また大学院と学部の関係を強め、大学院担当教官が積極的に学部教育に参加できる体制をつくる。

(4) STP研究の発展に対して国際的役割を果たすため、北極地域、赤道地域、南極地域など海外の複数の地点に我が国が主体的に運営する国際協同観測所を設置し、STP分野の観測・研究・教育を国際協力のもとに実施できる体制をつくる。また交換科学者や外国人留学生等の受け入れ制度を拡充し、海外から若手の研究者がSTP分野の研究に参加できる体制をつくる。

(5) 大学院生教育の充実を図るとともに、大学院生のリサーチフェローとしての役割を正當に評価し、それに対する援助制度を確立する。

(6) 中学・高校での理科教育の中でSTP関連の教育を充実させ、できるだけ早い時期からこの分野に関心がもてるような教育を実施する。

## 2 地球及び惑星内部を対象とする電磁気学

### 2.1 観測所観測の継続

現在国内では気象庁、国土地理院、海上保安庁水路部等、行政機関による地磁気3成分を主とした定常観測が7カ所、大学によるものが4カ所で行なわれている。この他、プロトン磁力計による連続観測が大学等によって25カ所で行なわれている。これらの観測の目的は、世界観測網の一環としての観測、2) 地域的観測における基準データを提供するための観測、3) 地殻活動監視のための観測等に分けられる。

今日の地磁気世界観測網は年々貧弱になってきている。IGYの期間にくらべ、世界の地磁気観測所の数は著しく減少している。これらは経済上の理由、観測技術者の不足などが主である。また、観測の精度にも問題が出てきている。第4章でも触れたように、地球科学は地球惑星科学へ大きく飛翔しようとしており、グローバルな観測の充実がいつそう期待されている。例えば、ダイナモ理論の検証のための、コアやコア・マントル境界のダイナミクスの研究には地球上で、均等に分布した地点での、長期に渡って安定した磁場の観測が必要である。これを実現するには、世界に地磁気観測所の継続、充実を呼びかけるとともに、すくなくとも東南アジアや東アジアなどわが国の近隣諸国への技術援助などを伴った観測所の設置へ協力する必要がある。

日本の国内の実状を見ると、観測点の地理的分布に偏りがある。すなわち、西南日本には鹿屋と阿蘇が有るのみで、中国、四国には観測所はない。国土地理院、水路部、大学等により定期的に繰り返されている精密磁気測量のデータ補正には基準点での3成分観測は欠くことの出来ないものである。補正精度の向上を測るには観測所の地理的に均一な配置が不可欠である。現在の観測所配置の偏りは、地殻活動監視の重要事項である地震、火山噴火予知の研究のためには大きな障害となっている。以上の事から、少なくとも中国、四国地方および沖縄地方の3カ所に地磁気3成分連続観測点を設けることが急務と考える。

## 2.2 海底観測手法の開発および海底観測所の設置

地殻及びマントル上部の3次元電気伝導度構造を知ることは、固体地球惑星電磁気学にとって主要なテーマのひとつである。今後10年以内を目標として、少なくとも地下数100km (C層)位までの、グローバルな伝導度構造モデルを作りたい。このモデルはさしあたり、陸域、海域および海陸境界領域における高密度アレイ観測の成果を、地域毎に継ぎ合わせるによって得られるであろう。深さ数100kmまでであっても、グローバルな電気伝導度分布が求められれば、それがプレート運動の原動力、深発地震やマグマ発生場の環境などの理解のために決定的な情報となるのは間違いない。次の諸点を強調したい

### 2.2.1 海底観測手法の開発

海底観測は電場のノイズが少なくしかもドリフトがないので、長周期成分については安定したデータが得られ利点がある反面、海底では海水のシールド効果のために自然電磁場の短周期成分の減衰が著しいので、数100m-1kmの比抵抗構造を自然電磁場で決めるのは難しい。従って、海底電磁気観測においてはOBEM (海底磁力電位差計)を主力機器とする一方、制御電源を用いた海底電気探査手法の開発を早急に進める必要が有ろう。

CAグループは1980年代に、「日本列島の電気伝導度構造モデル」を求める目的で陸上における集中観測を組織的に実施してきた。今までの観測成果から判断すると、よりよい電気伝導度構造を決めるには、海域のデータが不可欠であることが明らかになってきた。そこで今後少なくとも5年間は、海底観測手法の開発を進めつつ、CAグループの集中観測は、その重点を日本の周辺海域に移すべきと考えられる。

### 2.2.2 海底観測所の設置

海底電磁気観測を効果的にするには、海底における常時連続観測が必要である。これは、さきに述べたグローバルな主磁場観測網の充実および後述する地殻活動監視のためにも、できるだけ早期に実現されるべきであろう。西太平洋海底に分布した恒久的観測点の設置を目指すべきである。特に相模湾、駿河湾への設置は急務と考えられる。

### 2.2.3 国際共同観測

グローバルな電気伝導度構造モデルを構築するには、海底観測を日本列島海域から諸外国海域へと広げねばならない。このためには、日本列島海域直下の電気伝導度構造モデルを構築する過程で、まずわが国で、人材を育成し、海陸結合観測の技術を蓄積し、数10台のOBE Mと数台の制御電源海底比抵抗測定装置を備えたうえで、さしあたり、東アジア諸国の研究者達に、東アジア-西太平洋の電気伝導度構造を決定するための共同観測を提案し推進したい。この目標を達成するには、5年ないし10年はかかるであろう。

## 2.3 地球磁場変動史

### 2.3.1 古地磁気

地球磁場の変動を過去にさかのぼって復元することは、グローバルテクトニクスやコアのダイナミクスの研究のみならず、気候の変動をも含む古環境の解明に欠くことの出来ない問題とされている。残留磁化の性質、安定性を調べる岩石磁気の研究と一体になって重要なデータを供給してきたのが古地磁気、岩石磁気の研究領域である。

しかし、従来からの古地磁気研究は、多くの研究機関が独立に地域を決め、異なった目的で研究を行なうことが多かった。グローバルな地球磁場の変動を過去に遡って復元するためには、出来る限り各機関の調査研究対象が独立なものではなく、お互いに有機的に関連したテーマとなっていることが望まれる。加えて、各研究機関の特色を生かした調査地域、時代を設定し、無駄のない調査研究が望まれる。これの実現には、データベースの活用が最も期待される分野の一つである。研究機関の枠を越えたデータベースの構築が急務である。

一方、岩石磁気研究は古地磁気の解釈を行う上で重要な役割を演じているが、磁化獲得の機構や残留磁化の信頼度判定基準の確立など残された問題も多い。また、年代決定の精度をあげるため地球化学分野との連携も不可欠である。これと同時に、日本の主要地域の地磁気変化、極移動曲線が絶対年代と共にえられているべきである。

### 2.3.2 海底掘削

地球磁場の過去の変動を連続的に追いかけるには、湖底や海底に連続的に堆積した堆積物の残留磁気を調べるのが最も効率がよい。この際、資料採取地点は時代、場所共にでき

るだけ地球上に均一に分布することが望ましい。海底堆積物採取には、海底掘削の可能な調査船が必要である。最近、国際深海掘削計画で開発された技術や、得られた成果はめざましいものがある。これらの研究を更に発展させるために堆積物の系統的な採取をするための専用船を建造することが望ましい。

またより深い地殻物質の獲得を目的として現在進められている、日本の海洋技術開発センターでの掘削船の造船計画も是非実現して欲しい。これらの計画が実現の暁には、掘削された深海底堆積物の研究には、国内的にも、国際的にも開かれた体制で行なう必要がある。共同研究を行なうための研究センターの設置が望まれる。

## 2.4 衛星の利用

地球内部の構造とダイナミクスを知る上で、地磁気の全地球的に均一な衛星データが必須であることは論を待たない。計測技術などの開発をとまなうので、わが国の人工衛星などの打ち上げ計画の全貌を把握して、短期的、長期的視野にたって観測計画を立てねばならない。さしあたり、衛星利用の形態として次の四つが考えられる。

### 2.4.1 低高度での衛星観測

MAGSAT衛星による地球磁場観測は、地表300-500Kmの高度で行われた。地球内部起源の磁場をより詳しく知るには、出来れば地上100-200Kmの低い高度での測定が欲しい。しかし、かかる低高度の衛星は飛行継続時間が短いから、長期に渡る観測は難しい。出来れば定期的な打ち上げが望まれる。これは永年変化の観測にも必要である。

### 2.4.2 静止衛星による観測

静止衛星高度での複数定点の電磁場観測は、擾乱磁場の補正精度向上のためにも用いることができ、地上の定点（観測所など）、海底の定点と同様に重要である。このために必要な準備は早急に始めなければならない。

### 2.4.3 他の惑星での電磁場観測

地球以外の惑星の電磁場観測による惑星の磁場成因の解明は、地球磁場の成因の解明に

重要な手がかりが期待できることは言うまでもない。惑星探査機の打ち上げに間に合うよう測定機器の開発を急ぐべきである。

#### 2.4.4 データ転送への利用

地表における全地球的データを得るためには、人里はなれた陸上の無人観測所や、地表の70%を占める海底での電磁場測定が必要である。これらのデータの転送には静止衛星を利用するのが最も効率的と考えられる。

さらに、国際的なデータ交換網の構築も今後はますます重要となるであろう。

#### 2.5 磁気測量と資源探査

航空磁気測量、海上磁気測量や電磁気探査等は地質調査所、海上保安庁水路部、国土地理院などによって行なわれてきた。磁場ベクトルの3成分を観測することは、空間的分解能を上げる事に相当し、地殻上部の構造に関する詳しい情報を得ることが期待される。これは資源探査のみならず地殻上部の3次元構造など学術的に有力な情報を与えてくれる。今後の問題としては、測定点の3次元化を計ること、省庁の枠を越えた測定機器、施設等の共同利用体制などを実現することがあげられ、特に航空機や観測専用船などの共同利用は早期実現を計りたい。

#### 2.6 地殻活動の監視

##### 2.6.1 陸上観測

地磁気地電流の観測が地震発生、火山噴火予知にかなり有望であることは、最近の伊豆半島、伊豆大島、兵庫県山崎断層などで観測された顕著な前兆現象の例でも明らかである。しかし、現段階では観測された異常変化の大きさや継続時間等から、地震発生の場所や大きさ、火山噴火の規模、形態等を特定することはきわめて難しい。これを可能にするには、多点同時観測による経験を積むことが必要である。今までの経験から、電磁氣的異常変化の多くは、活断層近傍などの破碎帯に観測され易い事などが分かっている。この理由として、地殻応力の変化に伴う地下水の移動が関連していると考えられている。また、内陸部での地震の発生している深さと電気伝導度構造との間に相関が認められている。地震発生

に地殻内の水がなんらかの働きをしている事が予想される。水及びクラックの分布を明らかにするためにも、地殻の3次元的電磁気構造を調べる事が重要とされている。このためには探査深度が20Km程度の簡便な電磁気探査技術の開発が急がれる。しかし、我国のように複雑な地質構造をした所では断層に固有な構造を求めるのが困難な場合もしばしばある。そこで比較的単純な地質構造をした地震断層を、近隣諸外国、例えば中国などに求め、共同で調査を行い、より一般的な断層構造を求める事が重要である。また、近年わが国で得られた火山構造、火山活動モニターおよび噴火機構推定についての研究成果の一層の一般化を目指して、諸外国との火山共同研究を行う必要がある。これには国際的な移動観測班の整備が急務である。

## 2.6.2 海底観測

巨大地震は太平洋沿岸の海底で発生する。電磁場の前兆的变化は海底の方が顕著であることが期待されている。現在、気象庁の海底地震監視システムを利用した地電位常時観測が東海沖と房総沖でのみ実施されているが、さらに多点に広げることが望ましい。また、海底通信ケーブルの積極的な活用を促進すべきである。今後の方向として、地磁気3成分、地電位差、比抵抗などの海底での直接測定が望ましい。いずれも、陸上に比べて人工的擾乱ははるかに少ないので高精度の観測が期待できる。

## 2.7 データベース

現在、利用可能な地球電磁気学のためのデータベースとしては、地震研究所地震予知観測情報センターの地磁気データベースがある。このデータベースには地震予知を目的として大学、関連政府機関等によって実施されている地磁気全磁力永年変化精密観測の成果と、柿岡及び八ヶ岳の地磁気観測所の地磁気3成分毎分値のデータが納められている。現時点では、このデータベースの利用者は限られている。このデータベースは本来地震予知を目的として構築されているため、利用の汎用性に欠けていること、データの項目・種類が少ない事などによると思われる。今後は資源開発など利用範囲を広くするため、データの項目・種類を増やしたり、これらのデータを効率よく利用するより高度な解析手段の開発、提供を計るよう努めねばならない。日本およびその周辺の多点の全磁力及び地磁気3成分の時系列データや、航空磁気測量のデータをコンパイルした空間的地磁気データベースも

必要である。また、データとともにこれらを活用するすぐれたアプリケーションも不可欠である。加えて、地球電磁気以外のデータベースともリンクし、他の地球物理学的情報をも柔軟に取り込み、利用可能であるといった側面も、これからのデータベースには要求されるであろう。

## 2.8 教育研究体制の見直し

理学系の地球電磁気学を専攻する学生が少ない。この傾向は地球内部電磁気学の分野において特に著しい。現象的には、従来からの地球電磁気学講座が、研究や教育の内容を地球内部から電離圏、磁気圏さらに惑星間空間へと広げて行ったことによる。これには1950年代末の人工衛星打ち上げという宇宙時代の幕開けに始まる惑星間空間の華々しい研究の発展が導いた当然の帰結とも言える。一方、同じ頃に海洋底拡大説からプレートテクトニクスへと新しい地球観が誕生して行った過程で、古地磁気学を初め地球内部電磁気学の果たした役割にも目を見張るものがあった。にもかかわらず、後者は衰退とも言えるくらい研究者の層の薄さが目立ち、結果的に学生の数も少なくなっている。研究の方法、研究の対象、測定機器の開発などに問題はなかったか検討すべきである。専門分化、特殊技能化への偏りを防ぎ、広い範囲の分野へ興味を持ち、総合的、一般的理解を高め得るような指導が必要である。

いくつかの惑星については、地球電磁気学的手法で実際に研究し得る日は遠くない。これを前提とした、惑星としての地球を観測、理論によって研究を深める体制を作らねばならない。いくつかの大学に地球科学系の講座が新設されているが、必ずしも研究者養成を目指したものではない。地球科学から地球惑星科学への大きな転換を向かえている今日、新しい時代の研究者養成を急ぐべきである。さらに、共同利用の「地球惑星電磁気センター」を設置し、大型プロジェクトの研究を促進するとともに、国際観測や国際協力を発展させるため、海外研修生の受け入れ、技術者の養成などを進めるべきである。

## 資料

### 第14期日本学術会議地球電磁気研究連絡委員会委員（\*は将来計画担当）

小口 高、 小嶋 稔、 大家 寛、 加藤 進、 木村 磐根、  
\*河野 長、 杉浦 正久、 \*西田 篤弘、 行武 毅

### 将来計画ワーキンググループ メンバー（\*はサブグループ主査）

#### 宇宙空間・超高層大気関係メンバー

家森 俊彦、 岩坂 泰信、 江尻 全機、 小川 利紘、 小川 忠彦、  
荻野 竜樹、 大村 善治、 神沢 博、 小島 正宜、 近藤 豊、  
塩谷 雅人、 田中 高史、 津田 敏隆、 寺沢 敏夫、 中村 健治、  
\*深尾昌一郎、 \*福西 浩、 林 幹治、 藤井善次郎、 \*前沢 冽、  
丸橋 克英、 松本 絃、 町田 忍、 宮岡 宏、 向井 利典、  
森岡 昭、 山本 達人、 山本 哲生、 山中 大学、 湯元 清文

#### 地球惑星内部電磁気関係メンバー

伊勢崎修弘、 植田 義夫、 歌田 久司、 唐牛 公平、 笹井 洋一、  
渋谷 秀敏、 杉浦 直治、 \*住友 則彦、 田中 穰、 玉木 賢策、  
綱川 秀夫、 鳥居 雅之、 中塚 正、 西谷 忠師、 西田 泰典、  
\*浜野 洋三、 半田 駿、 本蔵 義守、 森 俊雄、 山崎 俊嗣