

# 記 録

文書番号	SCJ 第 20 期 200904-20520200-013
委員会等名	日本学術会議地球惑星科学委員会 地球・惑星圏分科会
標題	地球惑星科学の現状と課題
作成日	平成 20 年（2008 年）9 月 4 日

※ 本資料は、日本学術会議会則第二条に定める意思の表出ではない。掲載されたデータ等には、確認を要するものが含まれる可能性がある。

## 日本学術会議地球惑星科学委員会

委員長	入倉 孝次郎	(第三部会員)	京都大学名誉教授・愛知工業大学客員教授
副委員長	平 朝彦	(第三部会員)	(独) 海洋研究開発機構理事
幹事	岡部 篤行	(第三部会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
幹事	永原 裕子	(第三部会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
委員	碓井 照子	(第一部会員)	奈良大学文学部地理学科教授
委員	河野 長	(第三部会員)	東京工業大学グローバルエッジ研究院特任教授
委員	大谷 栄治	(連携会員)	東北大学大学院理学研究科教授
委員	木村 学	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
委員	氷見山 幸夫	(連携会員)	北海道教育大学教育学部旭川校教授

## 日本学術会議地球惑星科学委員会地球・惑星圏分科会

委員長	永原 裕子	(第三部会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
幹事	大谷 栄治	(連携会員)	東北大学大学院理学研究科教授
委員	奥村 晃史	(連携会員)	広島大学文学研究科教授
委員	上出 洋介	(連携会員)	名古屋大学太陽地球環境研究所教授
委員	北里 洋	(連携会員)	海洋研究開発機構プログラムディレクター
委員	木村 学	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
委員	久城 育夫	(連携会員)	東京大学名誉教授
委員	河野 長	(連携会員)	東京工業大学グローバルエッジ特認教授
委員	斎藤 靖二	(連携会員)	神奈川県立生命の星・地球博物館館長
委員	佐々木 晶	(連携会員)	国立天文台 RISE 推進室教授
委員	佐藤 薫	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
委員	高橋 栄一	(連携会員)	東京工業大学大学院理工学系研究科教授
委員	津田 敏隆	(連携会員)	京都大学生存圏研究所教授
委員	鶴田浩一郎	(連携会員)	宇宙航空研究開発機構 名誉教授
委員	富樫 茂子	(連携会員)	産業技術総合研究所地質情報研究部門部門長
委員	中村 栄三	(連携会員)	岡山大学地球物質科学研究センターセンター長
委員	西田 篤弘	(連携会員)	総合研究大学院大学教授
委員	長谷川 昭	(連携会員)	東北大学名誉教授
委員	花輪 公雄	(連携会員)	東北大学大学院理学研究科教授
委員	浜野 洋三	(連携会員)	海洋研究開発機構
委員	松井 孝典	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
委員	坂本 尚義	(連携会員)	北海道大学大学院理学研究院教授

# 目次

1. 宇宙惑星科学の現状と課題	2
1.1 分野の位置づけ	2
1.2 最近の進展	2
1.3 今後の課題	3
1.4 課題推進のためにコミュニティとして取り組むべきこと	5
2. 大気海洋科学の現状と課題	7
2.1 分野の位置づけ	7
2.2 最近の進展	7
2.3 今後の課題	12
2.4 課題推進のためにコミュニティとして取り組むべきこと	15
3. 固体地球科学の現状と課題	17
3.1 固体地球科学分野の位置づけ	17
3.2 最近の10年間の固体地球科学進歩と我が国の貢献	17
3.3 今後の課題	19
3.4 課題推進のためにおよびコミュニティとして取り組むべきこと	22
4. 地球生命科学の現状と課題	24
4.1 分野の位置づけ	24
4.2 最近の進展	24
4.3 今後の課題	27
4.4 課題推進のためにおよびコミュニティとして取り組むべきこと	28
5. 地球人間圏科学の現状と課題	29
5.1 分野の位置づけ	29
5.2 最近の進展	30
5.3 今後の課題	33
5.4 課題推進のためにコミュニティとして取り組むべきこと	34
6. 大学および大学院における地学系教育の現状と課題	35
6.1 大学および大学院における教育の現状に関するアンケートの実施	36
6.2 大学および大学院における教育の現状	36
6.3 大学および大学院の目指すべき道	44
7. 地球惑星科学の大型計画における基礎科学のあり方	47
7.1 地球惑星科学における大型計画	47
7.2 今後の課題	52
8. 地球惑星科学の社会貢献	54
8.1 地球惑星科学の特徴	54
8.2 地球惑星科学がもたらした社会貢献	54
8.3 社会貢献に関する課題	57
8.4 これからなすべきこと	58

9. 地球惑星科学における国際対応の現状と将来.....	60
9.1 地球惑星科学における国際対応の重要性 .....	60
9.2 最近の情勢.....	60
9.3 現状の問題点と今後の課題 .....	61
9.4 課題を推進するためになすべきこと.....	63
10. 日本学術会議と地球惑星科学連合の役割.....	66
10.1 日本学術会議.....	66
10.2 日本地球惑星科学連合 .....	67

## はじめに

2005 年日本学術会議の抜本的な改革により発足した地球惑星科学委員会は、旧来の惑星科学、地球物理学、地質学、鉱物学、地理学などを含む地球惑星科学全体を統合したもので、100 年来の地球惑星科学コミュニティのありかたに決定的な変革をもたらすものであった。学術会議の改革を受け、学会レベルでは、日本地球惑星科学連合が形成され、またたく間に 50 もの学会がそこに結集し、コミュニティの再編が加速度的に進行した。

サイエンスの現状と将来をみるなら、地球惑星科学の広がり、一つの方向では系外惑星の発見や小惑星探査や地球外物質分析などを通じ、天文学との境界におよび、別の方向では地球と生命の共進化を通じ、生命科学との境界におよび、あるいは複雑系の変動予測のための大型計算を通じ、計算機科学との境界におよび、旧来基礎としていた物理、化学にとどまらない新たな展開をみせている。

他方社会的には、気候温暖化に象徴される“環境問題”、巨大地震、津波、地滑り・土砂災害、砂漠化・水不足、資源・エネルギー問題など、人類生存にかかわる難問が深刻さの度合いを増し、その問題の本質を考えるなら、地球惑星科学による深い理解、日常的な観測、過去のそれらの現象の復元、高度計算機技術を用いた将来予測に対する期待がこれほど高まっている時代はないとあって過言でない。

このような時代にあつて、地球惑星科学がみずからのサイエンスの到達点を総括し、将来の方向を議論することはコミュニティとして大きな意義を持っている。

本書は、地球惑星科学のサイエンスとコミュニティのありかたについて、初めて 1 冊の書としてまとめたものである。本書の作成は主に、第 20 期日本学術会議地球惑星科学委員会、地球惑星圏分科会がおこない、10 回におよぶ議論を重ねた結果である。全体は 2 部構成で、前半はサイエンス、後半は組織につき論じられている。サイエンスに関しては、地球惑星科学全体を、宇宙惑星科学、大気海洋科学、固体地球科学、地球生命科学 5 分野にわけ、それぞれの分野の位置づけ、目的、現状、課題を論じている。分科会の議論はまず、全体をどのような分野に分けるのか、またその位置づけは何か、ということから始めた。草案作成にあたっては、分野をこえ、分科会委員全員により、すべての分野、あらゆる組織問題につき、議論を重ね、改訂を積み重ねた。途中の段階でそれぞれの分野ではコミュニティに対して意見を求め、一部関係者による偏った考えとならぬよう努力をしてきた。ただし、地球惑星圏分科会のみでは地球惑星科学の全分野をカバーすることは困難であり、地球人間圏分科会、および学術会議会員・連携会員以外の多くの研究者の協力により完成に至った。この議論を重ねる中で、従来の分野を超えて、サイエンスの課題、組織的問題の理解が深まった。また、分野に共通する問題、特に国家的要請によりスタートすることの多い地球科学の多くのプロジェクトに対するコミュニティのあるべき姿など、共通的な問題の理解をえることもできた。

本書は一応完成したが、本書の作成はこのコミュニティが統一的な認識のもとに現状と将来をまとめた第一歩で、これをもとに今後議論を重ね、サイエンスの方向とそのため必要な組織改革をおこなう土台として活用していただくことが本来の目的である。

# 1. 宇宙惑星科学の現状と課題

## 1.1 分野の位置づけ

宇宙惑星科学の究極の目標は、探査、理論、実験などのあらゆる手法を駆使し、太陽系における地球と地球生命の普遍性と特殊性を理解すること、さらに、太陽系自体の普遍性と特殊性を理解することにある。そのため、(1) 太陽系を構成する惑星や衛星、隕石や惑星間の微細な塵などの地球外物質、(2) 惑星間空間のプラズマ、電磁場、それらの物理現象そのものを研究対象としてきた。最近では、太陽や太陽系外の惑星系、宇宙生命まで研究対象を広げている。太陽系天体の起源／進化の研究、惑星間の類似性や特殊性を比較した研究のほか、生命の存在条件や起源の研究も大きな分野として拡大しつつある。他方、宇宙プラズマを支配する普遍的法則の理解などの純粋物理学的な目標も重要性を増している。

宇宙惑星科学は、地球科学や天文学の各分野に惑星の名を冠してもいいほど、多くの分野から構成される。最近では、宇宙惑星科学の領域はますます広がっている。例えば、堆積岩地質学や生命科学はこれまで惑星科学との接点は少なかったが、最近の火星科学では最重要の分野である。

研究手法としては、地球惑星科学の様々な分野と同様に地上観測、理論研究、実験研究が重要な地位を占めている。しかし、他の地球惑星科学にはあまり見られない特徴として、宇宙探査機による直接探査が、宇宙惑星科学の発展に不可欠で大きい役割を果たしてきたことがあげられる。

宇宙惑星科学の研究は、地球と私たち人類が自然界にどのように位置づけられているのかという問題、人類の自然観に大きな影響を与えるものである。一方、宇宙天気のように、研究対象が人間活動に多大な影響を与え、実生活とも密接に関係するものもある。

## 1.2 最近の進展

この10年余りは、宇宙惑星科学では多くの新しい知見が広がった。火星を頂点に木星や土星の衛星の表層環境と生命存在可能性に関する知識の広がり、水星や月など活動を終えたと考えられていた天体における水の存在の発見、金星や水星の大気の循環、太陽系外惑星の発見による太陽系起源論や進化についての見直し、多くの太陽系外縁天体（カイパーベルト天体）の発見、太陽系小天体探査による小天体進化についての理解、太陽磁気活動に対する理解、太陽活動と惑星磁気圏の関係、プリソーラー粒子・スターダスト探査の彗星サンプルなどを含む太陽系起源物質に関する知見、詳細な太陽系初期年代測定の実用化、地球中緯度電離圏、プラズマダイナミクス、宇宙天気の実用化、などの分野で大きな進展があった。日本が重要な貢献をした分野としては、物質分析に基づく初期太陽系モデルや太陽系起源の理論的研究は、日本が世界をリードした分野である。また、エンスタタイトコンドライトの希ガスの起源の解明、彗星氷の生成温度の推定、分化した小惑星での含水鉱物の発見、原始大気散逸での海洋の役割の発見、磁気圏尾部でのリコネクションの位置同定、電離層起源粒子の輸送と大気散逸量推定、地球から流出するヘリウムイオンの直接撮像、衝撃波による電子加速物理の進展、散開星団中の巨星での太陽系外惑星の発見など、日本が誇る新しい成果も少なくない。

日本の惑星科学のこの10年の進展で特筆すべきこととして、探査機による惑星探査の開始があげられる。「あけぼの」、「GEOTAIL」に続いて、「れいめい」が打ち上げられ、磁気圏探査に活躍している。太陽系探査では、「のぞみ」は火星周回軌道投入を果たせなかったが、惑星間空間のデータを取得した。「はやぶさ」による小惑星イトカワ探査は大きな成果を挙げて小惑星観を変えた。現在「かぐや」が月を調査中であり、新しい成果が出始めている。また、太陽観測衛星「ひので」が太陽活動や太陽風の起源について大きな成果を挙げている。

われわれの太陽系観は大きく変貌を遂げている。太陽系外惑星の発見は、惑星が決して特殊な条件下で形成されるものではないことを明らかにするとともに、惑星の多様性を大きく広げつつある。続々と発見される太陽系外縁天体は、ついに惑星の定義に影響を与えるとともに、彗星の起源のシナリオも明らかにした。そして、スターダスト探査機が持ち帰った彗星物質の分析（日本も参加）からは、実はかなり均質でかき混ぜられた原始太陽系ディスクの姿が明らかになりつつある。一方、地球磁気圏とともに太陽表面でのプラズマ物理過程の重要性が明らかになってきた。

### 1.3 今後の課題

将来に向けて、以下のような課題が、日本が重要な貢献ができる宇宙惑星科学の重点分野として考えられる。太陽系始原物質、惑星大気、磁気圏スケール間結合の解明、高エネルギープラズマ粒子の物理、太陽系空間と宇宙プラズマ物理過程、磁気圏-電離圏-下層大気結合過程、月の科学、惑星内部構造、太陽系外惑星、宇宙生命・生命存在環境である。

各分野の発展のためには、様々な方策を講じていかなければならない。宇宙惑星科学の多くの分野では、宇宙機による太陽系探査という大きなプロジェクトとの関わりを無視することはできない。一方で、地上観測、理論研究、実験研究の強化も不可欠である。

#### (1) 太陽系始原物質

最近10年間の精密・微細分析の開発は、隕石や宇宙塵中から太陽系始原物質や太陽系前駆物質を直接分析することを可能にした。その結果、銀河の進化とその中の恒星-惑星系生成という宇宙史の中に初めて位置づけられる段階に発展しつつある。この分野の進展のためには、日本が誇る南極隕石コレクションの有効活用とともに、少量サンプルの高精度分析の技術開発に力を入れる必要がある。「はやぶさ」、「スターダスト」によるサンプルリターンを発展させるため、揮発性物質に富む最も始原的な小惑星や彗星からサンプルを回収・分析する意義は大きく、「はやぶさ2」「マルコポーロ」探査計画を推進すべきである。また太陽系始原環境を模擬した実験、星形成領域での物質の観測、理論的研究の充実が不可欠である。

#### (2) 惑星大気

惑星大気研究とは、地球のような大気環境がいかなるバランスのもとに成立し、それが宇宙的視点からどう位置づけられるのかを理解しようとする試みである。探査データと理論・観測が歩調を合わせることで、大きな成果が得られる。PLANET-Cは、金星大気を3次元的に遠隔観測し、高速大気循環「超回転」など大気力学の問題に挑む。続いて、2010年代半ばに火星の水循環や大

気力学、大気散逸の解明を目的とする周回衛星ミッションを行うことを検討している。温暖化の末に海を失った金星と寒冷化の末に凍りついた火星を続けて調査することにより、地球型惑星の気候の統一的な理解を進めることができる。さらに、2020年代の木星総合探査においては、惑星大気・気象学の普偏的理解の鍵になるデータを取得することを目指す。

### (3) 磁気圏スケール間結合現象の解明

地球磁気圏では、これまで予想もしなかった、小スケールでありながら大振幅のプラズマ波動が多数存在することが観測されている。磁気圏全体のダイナミクスを理解するためには、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、多点で観測する必要がある。ESA のクラスター (2000 年)、NASA のテーミス (2007 年) を一段と発展させる形で、磁気圏での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ため、衛星編隊計画「SCOPE-Cross Scale」を推進する。

### (4) 高エネルギー粒子の物理

高エネルギー粒子の物理を明らかにするため、放射線帯を観測する「内部磁気圏衛星計画」や、「木星磁気圏探査」も、次期磁気圏研究の要になる。内部磁気圏の研究は、相対論的エネルギー粒子の加速という宇宙プラズマ物理学の普遍的な課題と、人工衛星の安全・安心な運用への貢献という宇宙天気の問題の両方に資する。地球内部磁気圏で磁気嵐にともなって出現する相対論的粒子加速を解明する小型衛星 ERG を実施する。木星総合探査において、磁気圏探査衛星を使い、高速自転によってエネルギーが注入される巨大磁気圏物理の解明、太陽系最強の粒子加速器の物理の解明を行う。またもちろん、高エネルギープラズマ物理の場としても太陽表層の研究(観測・理論)の進展も不可欠である。

### (5) 磁気圏-電離圏-下層大気結合過程

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 次元的観測や、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重要である。中間圏から熱圏下部に至る MLT 領域は、地球表層環境とジオスペース(地球周囲の宇宙空間)の境界領域にあたる。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両方の影響を受け、流星や人工飛行体の再突入によって外因擾乱を受ける。

### (6) 月の科学

「かぐや」に続く日本の月探査においても、月の科学は最優先の価値がある。「かぐや」の月全球詳細マッピングの成果を発展させて、月の進化を解明することを目指すべきである。そのため以下のような科学探査が期待される。(1) 未踏査地域のローバ等による表面地質探査、さらにはサンプルリターンを行い、月の進化の鍵をにぎる試料(月裏側の高地地殻物質およびクレーター中央丘に露出する下部地殻ないし上部マントル物質)の分析を行う。(2) 地震計測、電波源、月

面天測望遠鏡、地下探査レーダ、熱流量計測などによる内部構造探査により、月の核、マントル、地殻の構造とその進化を解明する。特に多点地震観測による月内部の三次元構造の解明は、将来の目標である。月内部構造の研究は惑星内部構造の研究へのステップとしても不可欠である。(3) 大規模衝突現象の研究の場としても月は貴重なターゲットである。月面の衝突クレーターの内部構造と、理論・実験を比較することで衝突現象とその後の緩和過程を解明する。

#### (7) 惑星内部構造

地球型惑星の進化過程を解明するためには、天体の内部構造を解明することが必須である。「かぐや」では、月全球の電波サウンダ探査、子衛星を使った裏側を含む重力探査という、これまでにない内部構造を調べる探査を行っている。さらに将来月着陸探査により、地震観測などの内部構造の直接探査技術の確立を目指す。その先に、将来の太陽系天体探査（火星、小天体、氷天体）においても、重力、電波、地震計などによる内部構造探査は重要であり、それを発展させていく素地は日本にはある。また一方で、内部構造の実験（超高压など）や理論的研究においても、日本は強い実績があり、それをいっそう推し進めることが重要である。固体天体だけではなく木星型惑星の構造研究は、太陽系外惑星の研究にとっても不可欠である。

#### (8) 太陽系外惑星・生命存在環境

系外惑星の発見数は増えて、木星や土星のような巨大ガス惑星だけではなく、地球質量の10倍を切る固体（岩石または氷）天体も発見されている。M型やK型の暗い恒星のまわりでは、惑星表面に液体の水が存在可能な軌道範囲（ハビタブル・ゾーン）にあると推定される固体惑星も発見されており、海が存在や生命の存在についても議論されはじめている。重力レンズ効果による方法や、将来の宇宙望遠鏡を使えば、太陽のようなG型星のハビタブル・ゾーンにある地球質量の天体の発見も不可能ではない。今後、このような惑星系の多様性がどのように生まれたかを理論的・観測的に探るという天文学的アプローチとともに、様々な条件下にある海が存在可能な惑星の内部構造、熱史、大気構造・循環、それらと生命存在可能性の関わりを幅広い理論・実験研究をベースに議論するといった地球惑星科学的アプローチが重要となる。質量、組成、大気、表面温度など、これまで以上に広いパラメータで惑星を考える時代になる。我々の惑星観は大きく変貌するであろう。

### 1.4 課題推進のためにコミュニティとして取り組むべきこと

(1) コミュニティが参加できる体制での、計画的で科学的価値がある太陽系探査の実施と、探査における国際協力を推進していくべきである。とりわけ、宇宙探査を行う機関であるJAXAと研究者コミュニティの連携が重要である。計画遂行への協力だけではなく、科学的成果創出へのサポートを、探査に直接かかわらない研究者を含む広範囲から受けるような体制づくりも必要である。

(2) 現状では、他の宇宙科学分野と比較すると、宇宙惑星科学のコミュニティの宇宙探査に対する、発言力は決して強くない。学会横断的な、たとえば地球惑星科学連合をベースとしたコミュニティを確立して、宇宙惑星科学の将来と歩調が合った形の、科学探査の長期計画を提言する必要がある。とくに月探査計画においては、科学コミュニティの積極的な関与により、科学的価値

のある計画遂行に努力すべきである。

(3) 新しい科学分野の進展のためには、分野間の人材交流も積極的に行うべきである。たとえば、惑星地質学の分野には、地球科学の経験者が活躍できる分野が今後増大する。また、磁気圏探査分野における惑星探査の割合は、今後ますます大きくなる。より広い意味での惑星探査分野へと人材を交流させ、惑星探査全体を支える意識を持つ必要がある。

一方で、地球科学の諸分野と宇宙惑星科学は密接に関わるにもかかわらず、日本の現状は「分業」が進んでいく傾向が見られる。宇宙惑星科学は、広大な地球科学の人材と叡智を利用すべきであるし、また地球科学の諸分野でも比較惑星科学の視点から得られるものは多く、太陽系外惑星の時代にはさらに「多様な地球」が研究対象になるはずである。意識的な人材交流により、壁を無くすことが、宇宙惑星科学を含む地球惑星科学全体の発展に重要であろう。

(4) 大学院教育の充実など、次世代の人材育成を推進する。科学的の成果が出やすい部分を強化するのではなく、探査機搭載観測機器、地上支援観測に関連する機器、新しい実験・分析装置などを開発することのできる若手を育てるための支援が必要である。またそのようは開発を支える技術系人材の拡充を図らなければならない。

(5) それぞれの分野の社会での認知度を高めていかなければならない。宇宙惑星科学の中には、一般の人の興味を引き社会的認知度の高い分野と必ずしもそうでない分野がある。認知度が高かったとしても、月探査のように科学的価値についての理解が少ない分野もある。コミュニティの各構成員が、何らかの形で広報・普及活動に積極的に参加することが第一歩であるが、コミュニティ全体としてその動きを組織化、サポートする努力が必要である。

## 2. 大気海洋科学の現状と課題

### 2.1 分野の位置付け

大気海洋科学は、海洋の物理過程と関連する化学・生物過程、ならびに地上から高度約 1000km までの大気の物理・化学過程を主な対象とする科学分野である。大気はその温度構造から、対流圏(地上～高度約 10km)、成層圏(約 10～約 50km)、中間圏(約 50～約 90km)さらに熱圏(約 90km 以上)に分類される。中間圏は日中のみ電離し、一方、常時電離する高度約 100km 以上の大気は電離圏とも呼ばれる。熱圏下部より下層は気象学の、一方、成層圏以高は超高層大気物理学の対象領域として、領域を重ねつつ研究が進められてきた。両分野の学際的領域である、成層圏から下部熱圏までの約 10～100km の大気は、ひとくりに中層大気と呼ばれている。大気海洋に生起する現象は、乱流などのミクロスケールから地球規模のマクロの流れまで、それぞれの重みを持って絡みあうマルチスケールシステムである。また、組成・成層の強さ・空間スケール・自転速度など地球と大きく異なるパラメータを持つ惑星大気は、地球の大気を理解するうえで重要な研究対象である。

大気海洋科学は、地球惑星科学の他分野と同様に、自然現象の理解という純粋理学的な側面と、様々な環境問題に対し、理学的根拠を与える応用科学的側面を、併せ持つ。この両側面においての研究は独立に発展してきたのではない。たとえば、大規模な自然災害をもたらす台風や集中豪雨は、社会ニーズに応える形で研究が行われてきたが、純粋理学として、その物理的本質をとらえようとする研究が発展した。一方、大気海洋に卓越するロスビー波や重力波は、純粋理学としての研究が先行したが、短期気象予報や中長期気候予測に関する現象としての研究も盛んである。そして、大気海洋科学は、地球環境にもっとも大きく関わる分野として、さらにその研究領域を広げつつある。社会ニーズにも支えられ、エアロゾルや大気化学、植生等の生態系や、氷床を含む陸面過程、人間活動も含む炭素循環とそれらの相互作用を、気候システムを大きく超えた「地球システム」としてとらえる研究が発展しつつある。

日本では、このような大気海洋科学の純粋理学的、応用科学的研究のいずれの側面においても、世界をリードする研究が行われている。その背景には、現象をミクロからマクロまでシームレスに捉えるための、広域の地上や海中の現場観測網の整備と維持、高精度の大型地上測器や衛星観測の発展があり、その連関を定量的に理解するためのデータ同化や大規模モデリング技術、そして、地球シミュレータなどの大規模計算機技術の発展がある。また、その多くは、国際学術組織が主導する数々の共同研究計画の中で組織的に行われている。

### 2.2 最近の進展

大気海洋科学では、気候変動研究における中核分野としての研究、基礎研究のほか、国際的な研究計画と連携した大型研究が多く行なわれてきた。最近のこの分野の研究進展は以下のようにまとめられる。

#### (1) 気候変動研究における進歩

この 20 年ほどの間に、人工衛星観測技術、高精度地上観測技術、大規模計算機技術に支えられ、気候変動および気候変化の研究が大きく進歩した。様々な観測データを取り込む全球客観解析を、過去数十年さかのぼって、同一の方法でやり直す再解析は、大循環や気候パターン、波の活動等におけるトレンドや変動解析に広く用いられ、気候の変動と変化の研究発展に大きく貢献

している。また、基礎研究により、重力波の気候における役割が明確化され、また、境界層の高解像シミュレーションが可能となったことで、気候予測モデルにこれらの微細なプロセスを組み入れるための重力波および乱流パラメタリゼーションに大きな進歩があった。同様にパラメタリゼーションの形で扱われることの多い積雲については、これを陽に解像できる全球モデルや領域モデルが開発され、マルチスケールシステムの中での役割がクローズアップされている。また、放射収支に直接または間接的に寄与するエアロゾルが注目され、その研究がなお進行中である。これらの基礎研究に支えられ、気候予測モデルの開発が大きく進んだ。地球シミュレータを用いて、世界最高解像度の大気海洋結合モデル、大気大循環モデル、炭素循環モデルにより気候予測結果を算出し、20世紀の温暖化に対する人為影響の確実化、将来における豪雨など極端現象の増加、台風強度の増加等、IPCC第4次報告書に盛られた重要な結論に貢献したことは特筆すべき成果である。このような気候モデルは、過去の宇宙や固体地球からの外力への気候応答の理解をすることで、気候の未来予測に寄与する古気候研究においても積極的に用いられている。

## (2) 海洋の基礎科学

海洋学における最近の進展は以下のようにまとめられる。

**大循環の理解：** 国際協同研究プログラムである WCRP/WOCE（世界海洋循環実験、1990年から2003年）では、海面から海底、沿岸から沿岸までの高精度の海洋観測（WOCE-WHP）が行われ、全球の海洋に対して水温や塩分、酸素はもちろん、栄養塩をはじめとする各種化学組成のマッピングが行われた。さらに、これらのデータセットを用いて、各緯度線を横切る熱と淡水の輸送量が評価された。その後も、WOCE-WHP線を繰り返し観測する計画が行われ、海洋の長期変動と変化の理解が進められている。

**ENSO イベントや IDM の理解と予測技術の向上：** 国際協同研究プログラムである WCRP/TOGA（熱帯海洋と全球大気、1985年から1994年）では、太平洋熱帯域を中心として、係留系アレイ、篤志観測船網、験潮所、表面漂流ブイなどによるエルニーニョ監視網が整備され、エルニーニョの実態解明と、経験モデル、数値モデルによる予測技術が格段に進展した。一方、1990年代後半、インド洋にもエルニーニョに匹敵する大規模な大気と海洋とが相互作用し、広範な地域の天候・気候に影響を及ぼす気候モードが、我が国の研究者により発見された。この現象を、インド洋の海面水温偏差の出現形状から、インド洋ダイポールモード（IDM）と名付けられた。現在、この現象のさらなる実態解明と予測技術向上のため、インド洋における海洋監視網の整備がなされている。

**地球温暖化と海洋：** 1988年に設立された IPCC（気候変動に関する政府間パネル）による第一次評価報告書が契機となって、地球温暖化に伴う水温、塩分、水位、循環場、海氷、酸素、栄養塩など、海洋の長期の変動や変化を検出する研究が進められた。その結果、1950年代以降、海洋の緒熱量は急激に増加していること、海面塩分は、蒸発過多域でより高塩に、降水過多域で低塩になっており、地球の水循環が強化されていること、などの知見が得られてきた。観測資料に基づく海洋における温暖化の兆候と証拠が明瞭に提出されたものと言える。

**海洋乱流：** 海洋における鉛直粘性・拡散係数はもともと不明なパラメータの一つであった。この間、海洋乱流を計測する技術が飛躍的に進展し、実測からこれらの係数を評価すること、一方では、理論的アプローチが進展し、これらの係数の空間的分布を推定できるようになった。たとえば、従来推測されていた係数よりも、ほとんどの海域では小さい値であるが、海底地形・起伏が激しい海域では、1桁以上も大きな値をとることがわかってきた。まだ、海洋全体におけるこれらの係数のマッピングは不十分であるものの、この分野の研究は急速に進展しつつある。

**衛星による海洋監視：** この20年間で、衛星によるリモートセンシング技術の進展により、世界

の海洋をくまなく監視する時代が到来した。海面水温は言うに及ばず、海上風の推定も高い精度で可能となった、さらに、それまでの試行を経て本格運用となった 1992 年に打ち上げられた TOPEX/Poseidon 衛星による海面高度の観測は、海洋研究に大きなインパクトを与え、1990 年代の海洋物理学は大いに進展した。とりわけ、海洋の中規模渦の変動が詳細に把握でき、その結果、海洋循環のスピンアップ・ダウンのプロセスが把握できるようになった。

**Argo 計画：** 衛星による海洋監視は大きな威力をもつものの、電磁波は海水を透過できないため、海面情報に限られる。研究船や篤志観測船、係留系、漂流ブイによる海中の水温や塩分場の把握に努力されてきたものの、世界の海洋をカバーするものでなかった。このような中、1990 年代後半、海中を漂流し、定期的に水温や塩分の鉛直分布を計測する Argo 計画が提案され、2000 年から実施に移された。おおよそ 300km 四方に 10 日間で 1 つのプロファイルを計測されること、計測されたデータは 24 時間以内の気象や海洋の現業機関、研究者に配信されることとなっている。国際 Argo 計画は順調に進展し、2007 年 11 月に、当初目標とした世界の海洋で 3000 台の Argo フロートの展開を完了した。Argo フロートのデータは、すでに様々な形で利用に供され、貯熱量増加の把握、水位上昇における熱膨張の割合の評価、各種水塊の分布や変動、その変質の理解などが、格段に進展した。

**数値海洋モデルとデータ同化モデル：** 観測データと数値モデルとの統合・融合により、海洋の正確な時系列格子データを作成し、その多様な応用を目的とするデータ同化は、1990 年代以降、WCRP/CLIVAR (気候変動特性と予測可能性、1995 年-) や GODAE (全球海洋データ同化実験、1997 年-) の国際的枠組みの中で発展し、今や「オペレーショナル海/洋学」を確立するにいたっている。さらに、高性能計算機の開発とともに、高解像度海洋モデルによる日本周辺の海流・海況予測技術が開発されるにいたった。いわゆる「海中天気予報」が黎明期を迎えた。

**海洋化学・生物学分野：** 海水の化学成分・同位体などの化学的性質が精密に分析可能となり、化学成分の空間変動の詳細解明が進展した。さらに、海洋内部だけではなく、隣接するリザーバー (大気、陸域、深海底など) との相互作用に関心が集まり、学際的研究が大いに進展した。このよう中、SOLAS、GEOTRACES などが提案され、現在進展中である。

### (3) 大気の基本科学

大気科学における最近の進展は以下のようにまとめられる。

**大気波動と物質循環：** 大気重力波の特性が、MU レーダー等大型大気レーダーやラジオゾンデ、ライダー、大気光観測により明らかにされ、理論的に予測された中緯度中層大気における波動減衰に伴う力学的摩擦効果が定量的に確認された。また、中高緯度の気候にも影響する赤道成層圏の準 2 年周期振動 (QBO) の駆動メカニズムについての理論的、観測的、数値モデル的再検討がなされ、大気重力波の寄与が本質であることが解明された。これは、過去約 20 年にわたり、赤道に捕捉されたケルビン波とロスビー重力波による加速によるとされてきた QBO のシナリオを大きく覆す転換であった。さらに、ロスビー波や重力波等の大気波動により駆動される中層大気子午面循環が対流圏との物質交換を支配するという新たなパラダイム (ダウンワードコントロール) が提案され、オゾン層回復にも関連する物質循環の理解が深まった。高解像度人工衛星観測による重力波グローバル分布の研究が進み、一方では、計算機技術の進歩により、重力波等小規模大気擾乱が表現可能な高解像度気候モデルが利用可能となり、現在、グローバル運動量収支解析が進みつつある。これらの大気擾乱が、中性大気のみならず、電離圏へと伝播し、プラズマ擾乱を誘発する可能性も示された。

**赤道域対流圏界面層：** 赤道域対流圏界面は、対流圏から成層圏への物質輸送の入り口である。ここは従来積雲活動によって支配されると考えられてきたが、衛星による大気微量成分観測や全球

再解析データを用いた波動の長期変動解析により、むしろ、中層大気における波動の駆動する大循環が重要であると認識されるようになった。微量な水蒸気を測定するゾンデ技術や、GPS 掩蔽観測による高い鉛直分解能をもつ温度データにより圏界「面」より圏界「層」と捉えるのが自然であるなど、その物理的特徴が明らかとなってきた。

**オゾン等大気微量成分：** 成層圏オゾンは紫外線から生命圏を守り、対流圏オゾンは有害物質として捉えられる。1980年代に顕在化した極域成層圏オゾン層破壊のメカニズムの本質は、フロン起源物質の関わる極成層圏雲の存在による不均一反応であることが解明され、集中的な極域観測や衛星観測による検証がなされつつある。モントリオール議定書とその改定案による国際的な規制が功を奏し、フロン等オゾン破壊物質は確実に減りつつあり、南極オゾンホールは21世紀半ば以降に消滅することが化学輸送モデル等により予測されている。しかし、近年顕著となってきた年々変動や、成層圏温暖化の影響などオゾンホールには未解明な要素も残っている。一方、上部対流圏オゾンは温室効果気体として働き、また、境界層オゾンは生命圏に悪影響を及ぼすため、対流圏オゾンの前駆気体の放出源と輸送過程の研究が進みつつある。また、ILAS、ILAS-IIなどの人工衛星や3次元化学輸送モデル、化学気候モデルによる二酸化炭素等の大気微量成分の広域分布も徐々にわかりつつある。

**エアロゾルと雲：** 今後の気候予測精度の向上に不可欠と考えられるエアロゾル、境界層、雲や降水の階層構造に関する観測的研究に進歩があった。たとえば、エアロゾルのサンプリング測定技術の革新があり、気候影響の定量的評価に不可欠なエアロゾルの特性評価が詳細に行えるようになった。人工衛星による鉛直を含む広域分布の観測データが取得され、エアロゾルと雲の相互作用の解明、降雨の全球分布が明らかとなってきた。

**亜熱帯・中高緯度の対流圏中長期変動：** 北極振動や南極振動が注目され、成層圏ともつながる主要な気候パターンの力学的研究が進んだ。ブロッキングや、地上寒冷高気圧、亜熱帯高気圧の形成や、アジアモンスーンについての力学的理解が進み、大気・海洋・陸面相互作用に加え、海氷の重要性が認識された。特に海氷変動の重要性が再認識された。

**熱帯気象：** 熱帯では、地球回転の効果が中高緯度と異なるため、中高緯度において支配的な地衡風バランスが成り立たない。むしろ雲降水活動に伴う水の相変化が主要な役割を果たし、広い時空間スペクトル領域において現象が複雑に相互作用している。このような中、数kmスケールの積雲対流と数千km～数万kmの赤道波、マッデン・ジュリアン振動などの大気波動との結合関係が明らかとなり、エルニーニョなどの長周期変動への効果が解明されつつある。これには、TRMM衛星観測による降雨や雲の詳細特性の全球解析研究、日本がインドネシアに建設した赤道大気レーダーを中心とした地上観測網による研究が大きく貢献した。世界に先駆けて、全球雲解像モデル開発が成功し、マッデン・ジュリアン振動とその微細構造がはじめて現実的に再現され、熱帯低気圧の数週間前からの予測可能性が示された。

**境界層：** 境界層は、太陽放射の半分を受け取る地表面と、自由大気との熱や運動量のやり取りを支配する重要な領域である。近年の計算機技術の進歩により、LES（ラージ・エディ・シミュレーション）モデルによる詳細な境界層乱流シミュレーションが可能となり、気候モデルに必要な1次元モデルの構築が進んだ。世界最高精度のヤマダ・メラのレベル3パラメタリゼーションスキームが開発された。平坦な地形だけでなく、植生、ビルが林立する都市での境界層の研究が進み、境界層でのダストの巻き上げと自由大気への輸送の理解も進んだ。また、レーダーやライダー等リモートセンシング技術により、これまでほとんど知られていなかった境界層内部の組織構造が次々と明らかとなってきた。

**数値予報とメソ気象：** メソスケールの大気現象は集中豪雨、梅雨前線、極低気圧、竜巻等、強風や豪雨により様々な気象災害を引き起こす現象が多く含まれる。したがって、応用科学的の色彩

の強い分野でもある。数値予報においては、データ同化技術が進歩し、連続的な観測データが取り込まれるようになり、精度が大きく向上した。特に、非静力雲解像モデルの開発が行なわれ、様々なマイクロ・メソスケールの現象のシミュレーションが可能となり、その物理過程の理解が深まり、予測精度の向上があった。これには、下層大気の3次元風ベクトルを高精度で観測できるウィンドプロファイラネットワークを始めとする各種観測網の充実も大きく寄与した。また、大気のカオスの特徴が顕著となり、決定論的時間スケールを超える、中長期予報においては、予測の確からしさを提供するアンサンブル予報が始まった。予測可能性に関する理論的研究も進展があった。

**極域大気：**アクセスが悪く、過酷な環境のため、極域大気は、他の緯度帯に比べて観測が大きく遅れをとっており、いまだ開拓の要素が残る研究領域である。北極と南極では、海陸分布に大きな差があり、北極では大気の地域特性が高く、南極では低い。このため、北極では、惑星規模波動の活動度が高く、南極では低い。これが、北極成層圏の気温は南極より約20度近く高く、極成層圏雲の量が少なく、成層圏オゾンの破壊量も少ない（オゾンホールは北極には存在しない）ことにつながっている。また、北極域は海（氷）で覆われているため、温暖化の影響が大きく現れるが、南極域は中緯度に張り出した南極半島を除いて、現在温暖化シグナルはほとんど現れていない。北極は領域研究を細かく行なう必要があるが、南極は1つの観測点の代表性が高い。したがって、北極研究と南極研究はどちらも並行して行なわれてきた。北極においては、スピッツベルゲン島の基地を利用し、アークティックヘイズなどのエアロゾルや大気微量成分の航空機および地上観測がドイツとの共同で行われ、その実態や輸送過程に関する研究がなされた。南極においては、地上気温マイナス80度近くに到達する地球の極限地である南極ドームふじ基地にて、越冬を含む数年がかりで行なわれた深層氷床コア掘削が成功し、過去70万年の気候解明に大きく寄与する資料が得られた。大陸沿岸部の昭和基地では南極オゾンホールの形成解明を目指した国際共同オゾンゾンデネットワーク観測や大気波動の集中観測が行われた。また、日本が世界をリードして中緯度や赤道域に設置した大型大気レーダーの南極昭和基地への設置計画が国際極年（IPY）にも呼応して進められた。

**熱圏（超高層大気）：**中間圏・熱圏下部は中性大気から磁気圏プラズマへの遷移領域として位置づけられる。大気の一部が電離しているため、大気力学と電磁力学とが混在している。また、化学物質分布は光化学と力学過程の影響を受けるのに加え、流星による間欠的な物質増加、また人工飛翔体の再突入による異物質流入によって外因的擾乱を受けている。地球大気環境の外縁部として、上方伝播する大気波動エネルギー等の下層大気からの影響を受け、同時に惑星間空間への境界領域にあたり、太陽放射、高エネルギー粒子流入や磁気圏からのフォーシングの影響を強く受けている。1989年に発見された上発雷現象（スプライト）は、雷雲と電離圏の間で発生する過渡放電発光現象であるが、局所的に存在する特異事例ではなく、グローバルに分布することが最近の衛星観測で明らかになってきた。従来無縁と思われていた、対流圏と電離層の間の電流系など、異なる大気層の結合過程として注目されている。また、気象分野で発展している大気大循環モデル（GCM）が熱圏にまで伸展され、広い高度領域における大気力学過程の理解が進みつつある。電離層と領域を重ねる熱圏では、電離プラズマ特性に比べて中性大気パラメータの観測が困難であった。しかし、衛星軌道情報の活用が進み、大気ドラッグによる低軌道衛星の軌道変動から熱圏大気密度の測定が可能となった。また、GPS地上観測網（GEONET）による電子密度擾乱の水平構造、GPS掩蔽による電子密度高度分布などの新しい観測データが利用できるようになり、熱圏の動態が解明されつつある。さらに、熱圏は宇宙ステーションや多数の低軌道衛星が飛翔する領域でもあり、宇宙開拓の実用面でも重要である。フレアなどの太陽活動の短期的変動がこの領域に与える影響の理解が進み、宇宙天気予報として活用されつつある。一方、気候変動に対する

太陽活動の影響に関する研究も行われ、太陽放射スペクトルや高エネルギー粒子・宇宙線の変動と大気現象の関係が議論されている。

**惑星大気：**金星や火星等の惑星大気についての純粋理論的数値実験が進み、惑星大気運動の普遍性の追求へと進展した。力学モデルや大循環モデルを用いた金星のスーパーローテーションに関する議論が進んだ。また、米国の火星探査機によるデータの解析により、火星の大気波動に関する様々な特性も明らかとなった。その妥当性を確認するための惑星探査や地上観測も充実しつつある。

## 2.3 今後の課題

持続社会の実現とその将来予測のため、大気海洋科学の担う役割はますます大きくなる。今後、観測、理論、数値モデルを用いた様々な手法による基礎科学を推進する必要がある。

### (1) 気候変動研究

次世代計算機の発展を視野に、気候予測モデルの一層の高精度化、データ同化などの気象予測精度向上のための技術開発を継続して推進するとともに、現在気候をきめ細かくモニターするための地上・海洋現場観測ネットワークの充実、地球観測衛星の整備が必要である。これらの研究推進は、気象災害、異常気象、気候変化の予測精度向上をもたらす、大気科学のさまざまな社会還元への期待に応えるものとなる。大気海洋結合・大気大循環モデルの高精度化により、長期予測、近未来予測の精度向上を目指すとともに、顕著現象が予測される領域での観測強化により、治水、農業、水産等、広く社会に密着した温暖化影響評価を行い、政策判断に還元する。

気候モデルによる古気候研究も今後ますます発展し、氷期から現在の間氷期に至る大気・海洋・氷床・炭素循環、数千年スケールの気候変動機構、白亜紀などの今より温暖な時代の気候の解明が期待される。南極ドームふじ基地で取得された氷床コアの分析による過去 70 万年の気候解析と併せて、定量的な議論へ発展させることが重要である。

### (2) 海洋の基礎科学

**気候変動・地球温暖化における海洋の役割：** 大きな熱的慣性と物質溶解能力を持つ海洋が、現在進行しつつある地球温暖化にともない、どう変化するか、さらにその変化が地球温暖化の進行に与える影響を解明することが重要な課題である。とりわけ、貯熱量増加に伴う海面水温分布の変化や、表層から深層にいたる海洋循環の変化、海面水位の変化、海洋の酸性化とその生態系の影響などの解明が重要である。

**熱帯域と極域における海洋科学の推進：** 最も活発に大気と海洋が相互作用する熱帯域と、観測データが乏しく今後大きな変化を引き起こし全球規模の影響を及ぼすと考えられる極域とにおける観測的研究を推進する必要がある。

**データ同化と海況予測および生物地球化学モデルの構築：** データ同化モデルの高精度化を図るとともに、生態系や化学系の予測モデルを結合し、統合海洋変動予測の実用化を目指す。このため、キーとなる海域や現象を対象に予測結果の現場検証実験や、鉛直拡散係数などのパラメータリゼーションの高度化に資する研究を進める必要がある。とりわけ、①海洋長期際解析の実施とその 4 次元データセットに対する気候変動解析、②海洋物理環境と化学・生物環境の融合したデータ同化、③海洋データ同化システムを用いた観測システムの評価、④沿岸過程の同化・予測、

さらには、⑤大気海洋結合同化システムの開発と気候変動予測実験への発展が必要である。

**生物地球化学：** 我が国の保有する世界的にトップクラスの海洋観測技術（大型研究船、高精度化学分析法など）を維持・発展させ、太平洋やインド洋における継続的な観測研究を主導し、グローバルな地球環境の把握に貢献する。大気と海洋環境のリンクを物質循環から解明する SOLAS、海洋環境中での生物地球化学的物質循環に取り組む IMBER、海洋環境の化学的変化を実測する GEOTRACES などの国際協同研究の進展に向けて役割を果たす。海洋の一次生産と微量元素郡とのかかわりについても解明を進める必要がある。

**社会貢献：** 海中天気予報に見られるような海洋物理学研究が社会産業活動に貢献する分野を積極的に推進し、情報に付加価値をつけてより広受益者を確保していくこと、さらに、発展途上国に技術移転して、沿岸域や外洋の管理にも役立てていくことが重要である。

**海洋観測網の整備と強化：** 上記課題の遂行には、研究船による繰り返し高精度海洋観測、係留系アレイ、衛星による海洋監視、漂流ブイやグライダーなどを用いた Argo 計画などが要であり、今後ますます発展・維持すべきである。

### (3) 大気の基礎科学

**エアロゾルとオゾン等大気微量成分：** 人工衛星観測により、二酸化炭素等、大気微量成分の全球分布が近い将来わかるようになる。このようなデータの有効利用のためには、3次元化学輸送モデル、化学気候モデルを高度化し、組み込むためのデータ同化技術の開発が必要である。また、大気質についての研究は、エアロゾルの大発生源であるアジア域での研究においての日本のリーダーシップが期待されている。オゾンについては、温暖化の成層圏オゾン層回復への影響や南極オゾンホールの変動のメカニズム、温室効果気体となる上部対流圏オゾンの動態、生命圏に悪影響を及ぼす境界層オゾンの長期増加傾向、オゾン前駆気体の放出量分布の正確な把握と輸送過程の解明が主な研究課題である。また、今後、成層圏オゾン破壊問題を背景に開発された化学・気候モデルを対流圏に展開し、さらに生物圏を含むひとつながりのモデルへと発展させる必要がある。

**対流圏中長期変動：** 大陸・大気・海洋相互作用で維持されるモンスーンは、地球気候システムの主要素であり、全球の気候維持や変動に大きな役割を果たしている。アジアモンスーン域には、全人口の半分以上が集中しており、その水文気候を支配しているアジアモンスーンの学際的研究計画を日本が立案し、リードすることが重要である。また、今後も、季節内変動や経年・10年規模変動に関する基礎科学を推し進め、その予測可能性を追求する必要がある。このためには、高解像度モデルや大気海洋結合モデルによるアンサンブル予報実験が有効である。

・熱帯気象： 今後も衛星・地上観測を充実させ、さらに精密な全球雲解像モデル開発も進めることで、雲・降水・波動の定量的理解を深める必要がある。特に、1つ1つの雲から惑星規模の大気擾乱にいたる数桁にわたる現象をシームレスに捉え、その相互作用を明らかにし、熱帯気象を支配する物理法則の明確化を目指す必要がある。これらの基礎研究は、気候モデルの改良に大きく寄与すると考えられる。また、改良された気候モデルを用いることにより、熱帯気象と中高緯度気象の相互作用、さらには、全球の気候状態と熱帯気象の相互関係を明確にすることが重要である。

**極域大気：** 北極域は、最も温室効果気体による温暖化の影響を受けやすい領域である。その気

候変化のプロセスを詳細に理解し、監視するために、大気、海洋、雪氷各圏のプロセス研究と気候への影響の解明を進める必要がある。観測環境の苛酷であるので、衛星、航空機、地上からのレーダーやライダー等のリモートセンシング技術の利用が今後も重要となる。また、昭和基地においては、極域の地球気候での役割を定量化するために、大型大気レーダーを実現し、これを軸として、ライダーやミリ波観測を開始し、南極中層大気観測の一大拠点を作り、米国で計画されている大型の非干渉散乱レーダーをはじめ、各国の基地との各種レーダーとも連携して、発見的要素の強かった南極大気研究を精密観測に変貌させる必要がある。この南極大型大気レーダー計画は、日本が世界をリードして中緯度や赤道域に設置し、大きな実績を上げてきた大型大気レーダーの自然な延長であり、これによりグローバルな中層大気レーダー観測網を完成させ、全球エネルギー・運動量収支問題を解明することが重要である。

**数値予報とメソ現象：** 日本域に限らず、東アジアや東南アジアの降水系も対象とし、力学に裏打ちされた普遍的なメソスケール現象の研究が必要である。また、深刻な気象災害をもたらすシビアストーム、気候予測に欠かせないメソスケール現象での大気海洋相互作用を研究する必要がある。一方、最近整備された気象庁のドップラーレーダー観測網による4次元データ同化、メソスケールアンサンブル予報、海上の水蒸気観測手法の開発により、台風や、集中豪雨等の気象災害を回避するための現象把握や予測を進める。より高精度な予測を目指した、航空機や静止衛星の高度利用等、集中観測による台風やメソスケール現象の研究も重要である。

**境界層：** 境界層力学の理解を進め、気候モデルへ寄与する良質のパラメータリゼーションの開発に向け、精密観測や超大型 LES 計算による境界層乱流特性の研究が重要である。また台風や斜面上境界層、境界層雲の気候への影響、ヤマセの研究等が重要である。

**中層大気と大気波動：** 大気重力波が分解可能な人工衛星や高解像度気候モデルを用いた、全球的な運動量・エネルギー収支の理解を進める必要がある。特に極域については、気候モデルの極成層圏の低温バイアス改善のため、大型大気レーダーや高解像度モデルを用いた定量解析が重要である。ロスビー波や重力波に代表される大気波動の気候システムの中での重要性は疑う余地はないが、その発生メカニズムには不明な点が多く、これが、大気循環やオゾンホールの変動の予測を妨げている。今後波動発生についての研究の推進が望まれており、特に最近その重要性が着目されている非定在性重力波の発生メカニズムや特性を把握し、より現実的なパラメータリゼーションスキームを開発する必要がある。大気波動力学は、中層大気を中心に大きく進展のあった分野であるが、今後、気象学や超高層物理学などの旧分野に囚われずに、対流圏から熱圏までの大気圏全体を俯瞰する視点で学際的研究を進める必要がある。

**熱圏（超高層大気）：** 上方発雷現象（スプライト）については、人工衛星と地上観測を組み合わせた3次元観測を広域に展開して、スプライトの全球的な発生状況を正確な把握することで、全球電流系モデルの確立と大気化学的なインパクトの推定が進むであろう。また、熱圏や中層大気上部は大気密度が低いため、わずかな太陽活動の変動にも敏感に反応する。熱圏や中層大気上部の変化は、下方からの大気波動の伝播特性を変化させ、ダウンワードコントロールにより、下層大気の気候にも関連する可能性は十分検討されているとは言いがたい。今後、太陽活動が地球システムへ与える影響を示す統計結果を説明するためのメカニズムと定量的評価を進める必要がある。

**惑星大気：** 2010年に打ち上げが予定されている、金星大気の探査計画を実現し、高解像データ

の取得を進めるとともに、南極ドーム基地の湿度と気圧の低い環境を生かした地球からの惑星大気観測基盤を進める必要がある。そして、理論や高解像大気モデルによる研究グループと共同研究により、観測データの物理的解釈や定量的議論に高める必要がある。特に、スーパーローテーションの駆動メカニズムの理解が大きく進展すると期待される。地球流体力学は、地球大気や海洋を対象として発展してきた分野であるが、惑星大気の研究にはその理論的枠組みの拡大が有効であり、さらには、地球内部や恒星内部の対流への展開も視野に入れる必要がある

#### (4) 国際研究計画と大型研究計画

今後も国際研究計画とも連動した基礎研究を推し進め、高いレベルでの国際貢献を果たしていく必要がある。気候変動研究には、大型の気候システムモデル、または、地球システムモデルを超大型超高速の次世代計算機で走らせる必要があり、そのための予算面、組織面における継続的保障が必要である。また、人工衛星計画や地上観測ネットワークの充実、大型地上観測装置の開発と設置など、国際的な中で日本の役割を常に認識・確認し、国際社会の中で連携しながら、現実大気や海洋を精密に捉え、モニターするための観測を充実させていく必要がある。

### 2.4 課題推進のためにコミュニティとして取り組むべきこと

大気海洋科学では、気候システムさらには地球システム全体をマイクロ過程からマクロ過程までシームレスにその相互作用をとらえる、バランスのとれた研究の推進がますます重要となる。このような背景において、今後も基礎研究を着実に進める必要があるのは言うまでもない。そして、大気海洋に隣接する超高層物理、雪氷・水文学等、幅広く関係分野との交流を進め、人為起源、固体地球（火山、地震）あるいは地球外（太陽活動、流星、宇宙線）からの影響、ならびに大気・海洋の自律変動に起因する変動と変化の機構を、海洋と大気圏の全高度領域において明らかにすることが重要である。また、最新理学の伸展には先端技術の活用が重要であり、常に工学分野との積極的な交流を保持する必要がある。

観測が地球科学の根幹を支えていることは論を待たないが、大気圏研究のさらなる伸展には、国内外の多点地上観測ネットワークの整備、および複数の小型衛星および国際宇宙ステーション (ISS) を用いた観測を連携させ、同時期に集中的に観測を実施することが重要である。地上観測では、日本で実績がある赤道および極域で総合観測体制を充実させることが肝要である。一方、十分な計算機リソースを確保することは世界トップレベルの研究を推進するために必須である。また、一般に地球科学は長期にわたり蓄積されたデータに依拠している。過去の貴重なデータも埋没させることなく活用し、さらに爆発的に増大し続けている地球環境情報を含めて使いやすいデータベースとして蓄積・提供する体制が重要である。このため、最新の情報技術を活用すべく情報科学との連携が望まれる。

21世紀の課題であるサステナビリティ社会の構築という目標に向けて、大学や大学共同利用機関法人等の研究機関と、気象庁や環境省などの官公庁、海洋研究開発機構、国立環境研究所、情報通信研究機構などの独立行政法人、民間の協力により、国民生活に密着した広範囲な社会還元を積極的に推し進める必要がある。

大気海洋科学の一層の伸展には、将来を担う研究者の育成が不可欠であり、初等・中等教育においても適切な配慮が必要である。惑星や極域等未開拓領域については、基礎科学を深め、理解し、大気海洋科学の根底を支える研究者育成のための格好の研究対象となる。また、気象予報士

制度の導入により、天気予報の民間事業化が進んでおり、天気予報の経済的価値は高まる一方である。さらに、海洋においても、海流や海況変動の定期的予測が始まっており、海運や水産業界からの注目が集まっている。大学での専門教育は後継研究者育成にとどまらず、実務担当者の養成および再教育も考慮すべきである。

### 3. 固体地球科学の現状と課題

#### 3.1 固体地球科学分野の位置づけ

固体地球科学は、46億年前の地球の形成期から現在に至るまでの広い時間スケールにおける地球の表面から地球の中心部に及ぶ固体地球の全領域で生じている諸現象を対象とし、その基盤となる手法開発を含む研究分野を総称する。この分野は、数多くの関連学会を持ち、地球惑星科学において大きな割合の研究者を擁している。この分野の研究は、観測・フィールドに根ざした研究分野、野外試料の精密化学分析・微細試料組織観察および実験室における地球内部条件再現実験、そして、高速計算機による地球内部の運動の数値シミュレーションおよび鉱物物性等の計算物理学による再現のどの理論的研究という3つの大きな研究手法によって、研究が進められている。他の分野と重複する課題については、上記視点から関連があるものを記述する。例えば、地球外天体の衝突など固体地球の進化に大きな影響を与えた現象の研究も固体地球科学分野に含めている。

固体地球科学をカバーする学問分野およびその代表的なキーワードは、以下のようにまとめられる：固体地球物理学（地震現象、火山現象、地殻変動・海底変動、地磁気、重力、テクトニクス、内部構造、内部変動・物性、地震災害・予測、観測手法、実験手法）、地質学（地層、地殻、テクトニクス、地質時代、調査手法）、岩石・鉱物・鉱床学（地球惑星物質、地球進化、地殻・マントル・核、マグマ、元素分別濃集過程、実験手法、分析手法）、地球化学（元素分布、同位体、物質循環、地殻・マントル化学、分析手法）。

#### 3.2 最近の10年間の固体地球科学進歩と我が国の貢献

以下では、最近の10年間に世界における固体地球科学分野において、世界において大きく進歩した研究分野および我が国がその進歩に大きく貢献し世界の学界をリードした研究をまとめた。

地震研究とその予知研究への応用については、我が国において以下のような世界をリードする重要な成果が生み出された。すなわち、プレート境界地震の発生機構の理解が格段に進展し、それを用いたアルタイム地震情報が実現した。すなわち、プレート境界では非地震性滑りの進行により固着域（アスペリティ）に応力が集中し、やがて地震発生に至るとする地震発生モデル（アスペリティモデル）が成り立つことが最近の研究により明らかになってきた。発生した地震の震源位置・規模を震源近傍の観測点のデータから即時に推定し、まだ主要動の到達しない地点に伝達し被害軽減に役立てようとする研究が組織的に取り組まれ、その成果が「緊急地震速報」として結実した。阪神淡路大震災以降、地震断層の掘削、陸上に露出する断層の研究、実験による摩擦構成則の研究が大きく前進した。全国の活断層の活動履歴調査や海溝型地震の活動履歴調査に基づく長期的な活動予測が実現し、ボーリングコアの解析や物理探査に基づく平野部地下の三次元地質構造が順次解明され、地振動予測手法が確立されたことにより、国の地震調査研究推進本部による「全国を概観した地震動予測地図」「震源を特定した地震動予測地図」の作成を可能にした。

測地学においては、人工衛星を用いたGPSによる地殻変動モニターが行われ、地殻の歪の常時モニターが可能になり、地殻変動の現在の動的実態が詳細に描き出され、地震の長期予測が大き

く進展した。

火山研究では、火山噴火の噴煙柱ダイナミクス3Dモデルの確立を確立するなど、ユニークな成果も得られている。すなわち、これまでの1次元モデルに代わって、3次元モデルが確立し、プリニー式噴煙のダイナミクスが明らかになった。噴火直後の火道掘削によりマグマの発泡と噴火様式の関係解明に貢献した。また、火山地震観測に基づく噴火予知が噴火直前の住民避難として結実した。富士山・雲仙火山の科学掘削による詳細な噴火史と火山体構造が解明され、三宅島火山噴火における火山ガス放出のマグマだまり・火道モデルが提案された。

ヨーロッパ、中国、ロシアの様々な地域において超高压変成岩が発見され、大陸地殻のマントル深部への沈み込みと上昇(Exhumation)というダイナミックな運動が明らかになった。テクトニクス研究においては、地震探査や地震波観測データの解析と地質学的研究の共同によって、沈み込み帯のテクトニクスの理解が大幅に進んだ。すなわち、GPSや地震観測網など世界最稠密観測網設置により、地殻変動、地震発生帯下限域でのゆっくり地震、地震発生帯より浅いプレート境界域でのゆっくりすべりの発見など、相次ぐ世界的発見がなされ、動いている付加体の世界初観測に成功した。そして、付加体の短期間における急速な成長の実態が明らかになった。低角デタッチメント正断層により蛇紋岩化したマントルの広域露出の発見(フィリピン海プレート上に世界最大級の蛇紋岩露出域の発見)。海洋島弧において大陸地殻が形成されていることを見いだした。また、大陸地殻がマントル内部に沈降し、再度隆起するという地殻のダイナミックな動きテクトニクスが明らかになった。大陸地殻の沈み込み、上昇する(Exhumation)という認識が定着した。日本列島主要域での地震反射法、屈折法観測によってプレート沈み込み帯(島弧)域では世界で最も詳細に明らかにされた。さらに、海底掘削によって、特異な海底火山活動プチスポットの発見など、プレートの屈曲に伴うアセノスフィアのマグマ活動の存在が裏付けられつつある。マグマ生成に関わるリサイクルした海洋地殻成分の寄与が極めて大きいことが我が国の研究者を含む多くの研究者によって確立した。アンデス、ヒマラヤ、アルプスなどにおけるテクトニクス気候リンク研究など、テクトニクスと地球表層の環境変動の関係が強く意識され、地球史における全球凍結、全球温室などのグローバルな環境変化との関係や、乾燥湿潤などの地域的気候との関係の研究が推進されている。(テクトニクス)

地球深部のダイナミクス研究においては、地震波トモグラフィ法により地球内部の地震波速度の3次元不均質性が明らかになり、プレートテクトニクスを引き起こす地球内部過程への理解が進み、プレートの沈み込みと高温のマントルプルームの上昇からなるプルームテクトニクスの概念が確立した。この地震波トモグラフィ研究やプルームテクトニクスの概念の確立に我が国の研究者は大きく貢献した。また、落下するスラブの様相や、上昇するプルームとリフトー海嶺系の関係などマントルスケールの大局的構造と表層の変動との関係が描き出された。また、我が国の研究者は地震アレイ観測網を駆使して、マントル内の(特に下部マントル中層部)の地震波の反射面を発見し、これらを系統的に観測し、沈み込んだ海洋地殻の分布を初めて明らかにした。我が国は海底における長期機動観測技術が世界トップレベルに達し、従来は分解能が不足していた海洋域においても詳しいトモグラフィ解析が行なえるようになった。

地球内部のダイナミクス研究の最も重要な成果の一つは、最下部マントル条件に相当する温度圧力条件でポストペロブスカイト相が発見されたことである。この発見は我が国の研究者によりなされたものであり、核マントル境界領域の格段に理解が進んだ。また、下部マントルを構成す

るマグネシオブスタイトやペロブスカイト相に鉄イオンのスピン転移が存在することが明らかになった。これらの研究には放射光の強力 X 線と高温高压実験および第一原理計算 (Ab initio 計算) の進歩が大きな寄与をしている。また、上部マントル条件での無水および含水マグマや流体の構造と密度、粘性が解明され、また、ダイヤモンドの包有物中に下部マントル鉱物、含水高压鉱物などが発見され、天然試料にもとづいて、マントル遷移層や下部マントルの物質科学的性質の推定が可能となった。さらに、固体地球内部全域における物質移動に関しては、マントル遷移層を構成する鉱物である Wadsleyite と Ringwoodite が 2-3 wt. % の水を含み得ることが明らかになり、マントル遷移層が地球内部の最大の貯水庫であることが明らかになり、プレートに沈み込みにもなう水輸送、地球内部における大規模水循環と深部マントルにおける水分分布についての理解が深まり、海水の経年減少モデルが提案された。以上の研究はいずれも我が国の研究者が世界をリードして得られた成果であり、この分野の研究者層の厚さを明瞭に示している。さらに、放射光と超高压高温発生研究を用いた世界をリードする多くの成果が得られている。具体的には、H2O 流体-ケイ酸塩メルトの混和領域を高温高压 X 線イメージング法による決定し、H2O に富む流体とケイ酸塩主体のメルトが、マントルカンラン岩の系でも完全混和になることが示され、地球深部では H2O 流体とマグマの区別がないことが明らかになった。また、上部マントル条件でのマグマの構造、密度、粘性率などが高温高压 X 線その場観察実験によって解明された。さらに、我が国は、電子顕微鏡技術など鉱物の解析法などのキャラクタリゼーション技術の水準の高さを反映して、アキモトアイトやケイ酸塩ペロブスカイトなど我が国の研究者は隕石の衝撃波溶融脈中に様々な高压鉱物を発見した。

初期地球および地球進化史研究に関しては、地球の岩石および隕石中の W-Hf 同位体の精密分析が行われ、地球核が数千万年程度の比較的短時間に形成されたことが明らかになった。また、最古 44 億年前の地殻物質ジルコンの発見が見出され、形成期の地球への理解が進んだ。また、非質量依存同位体分別効果に基づいた安定同位体地球化学による地球表層環境変動の解析が行われ、複数回の全球凍結 (Snowball Earth) イベントの存在が同定された。我が国の地球化学研究においては、微量試料の年代測定法や同位体分析技術が進歩した。すなわち、二次イオン質量分析計等によるミクロンサイズの微小領域の年代測定法や同位体分析技術が格段に進歩し、初期太陽系のプロセスの詳細化を可能にした。さらにレーザー照射 ICP-MS、SHRIMP を用いたジルコンの U-Pb、Pb-Pb 年代測定法の迅速化、高精度化により、地質試料の年代測定が従来に比べて桁違いに簡便になり、過去の地質イベントに精度の高い年代軸を入れた議論が可能となった。

以上のような、固体地球科学の進歩とともに、素粒子物理学の新手法が地球化学に導入され始めた。このような試みにおいても、我が国の研究が世界をリードしている。神岡のカムランド観測装置において、地球ニュートリノの観測に成功し、地球内部の熱源 U、Th の直接観測に道が開かれた。また、ミューオン観測が火山体内部の火道の透視に使われた。これらの手法は、まだ導入が始まったばかりであり、地球科学的な研究を進めるためには、引き続き手法の改良などの努力が必要である。

### 3.3 今後の課題

固体地球科学においては、以下の課題・研究分野において今後発展が期待される。

地震の発生機構、地震断層研究、津波研究とその予知への応用研究においては、プレート境界地震についてはその発生機構の理解が格段に進展したことから、今後の研究のさらなる進展により現在の長期予測の段階から一歩進めて、中期予測へと踏み出すことが期待される。基盤地震観測網に加え、海域の地震・津波観測網の充実により、現在より格段に高精度の地震情報・津波情報を地震波主要動や津波到達前に伝達することが可能になると期待される。最近活動した地震断層の掘削に加え、地表に現れた過去の地震断層の解析や、活動域高い内陸の活断層の周辺における地殻不均質構造の研究や応力状態の観測、地震発生領域に相当する高温高压実験等により、内陸地震発生に果たす流体の役割など、内陸地震発生メカニズムの解明が進む。地球物理学的観測による地球内部構造研究に関しては地震波トモグラフィの精度が格段に改善し、電磁気学的観測にもとづいた、電磁気トモグラフィが進展する。特に日本が世界をリードする海底長期機動観測技術を駆使し、海洋域に広く展開した観測を行って地球内部全体の不均質性とダイナミクスが解明される。さらに、これ以外のニュートリノトモグラフィなどの複数のトモグラフィを解釈する不均質モデルが明らかになる。

火山噴火およびマグマの移動の研究においては、地震観測、電磁気観測、地殻変動観測など多項目観測により、火山噴火の短期的・直前予知が現実的なものになることが期待される。主要な活火山の掘削・トレンチを含む地質調査が進み、噴火履歴の詳細や山体構造の解明が明らかになり、火山ごとの噴火シナリオの作成と噴火推移予測の精度が向上する。マグマの分析・実験による岩石学的なアプローチが進み、マグマの生成・移動、発泡、脱ガス等に伴う諸過程やマグマの物性変化の時空間の分解能が向上し、噴火メカニズムの定量的な理解が進む。また、マグマの上昇・噴火の全プロセスが噴出物の解析から解読可能になり、噴火様式とマグマ上昇過程の研究進展が期待される。

テクトニクス研究においては、日本列島近傍を対象とした現在進行形のテクトニクスを一層定量的に描き出し、シミュレーション研究と結合させ、ダイナミクスとして理解することが可能にあらう。また、日本が世界に誇る付加テクトニクスの概念構築に加えて、近年黒瀬川構造帯の形成に関して、対立する概念として横ずれテクトニクスとナップテクトニクスの重要性が認識されている。西南日本内帯と外帯のテクトニクスが基本的に異なる可能性もあり、この問題の更なる検討が必要である。大陸衝突帯における超高压変成岩の発見と研究は、大陸地殻が地下 100 km まで沈み込み、再度上昇してくるという全く新しい知見を地球科学に与えた。大陸地殻がなぜ地下 100 km まで沈み込むのか、それがどのようにして再度上昇してくるのかという基本的問題は解決されていない。この基本問題はグローバルテクトニクスの第一級の課題であり、この問題の解決なくしてグローバルテクトニクスの新展開はありえない。この問題の解決には、地球物理学者とテクトニクス・岩石学者の共同研究が不可欠である。

地表に露出し、グローバルな意味を持つ地質学的研究対象（付加体とプレート境界岩、下部地殻岩石、マントルかんらん岩など）の定量的研究を推進し、理論的・観測的・実験的研究と結合してテクトニクスの研究を推進することが重要である。地震波トモグラフィによる地震波速度三次元構造の解明は、テクトニクスに革命をもたらしたが、地震波速度構造と物質および物性との対応がさらなる展開のための鍵となる。そのために、地震断層の化石とされるシェードタキライトの分布や産状と下部地殻・上部マントルにおける地震の発生メカニズムと分布との関連、間隙流体の存在によると考えられるスロースリップ地震と変成帯における交代岩類とりわけ蛇紋

岩と周囲の岩石の間に発達する脱水反応帯の関連、蛇紋岩化がテクトニクスに及ぼす影響、とりわけ沈み込み帯における変成帯の上昇（exhumation）メカニズムとの関係についての研究を推進する必要がある。変成帯に産する蛇紋岩やオフィオライト中の蛇紋岩化したマントルカンラン岩の研究から、地震学者とテクトニクス・岩石学研究者の共同研究の推進が望まれる。「ちきゅう」による海洋底掘削の本格化にともなって、1) 地震発生帯掘削研究は、南海トラフ地震発生帯域での稠密観測（三次元沈み込み帯構造の解明と「ちきゅう」による最稠密観測網と結合し、沈み込み帯研究で世界の他と比べて群を抜いている。今後の展開が期待される。2) 海洋島弧において大陸地殻が形成されていることを見いだした。（高精度地殻マントル構造探査・岩石学的モデリング）今後「ちきゅう」による掘削で検証する。また、地震断層（野島断層）における世界初の地震断層を掘削した。これは、地震発生メカニズムの物質科学的研究の本格的開始であり、サンアンドレス断層掘削、台湾チェウンプ断層掘削の先例となった。超深度掘削などにより、地震発生帯のプレート境界や大陸性と海洋性地殻深部および上部マントルで現在進行するテクトニクスの地質学的・物理化学的現行過程を理解し、地質学的長時間スケールでの地殻進化、固体地球内部の大規模物質循環の定量的理解へとつなげる必要がある。

このようなテクトニクス研究は、生命進化や気候変動との関連も重要である。ヒマラヤの隆起が気候を変化させたように固体地球のテクトニクスが気候や地球環境を変化させ、生命進化に大きな影響を与えてきた。固体地球のテクトニクスと気候のリンク・生命活動へのリンクの解明は今後の重要な課題の一つである。

地球の物質科学的研究も、大きく発展が期待されている分野である。超高压を発生し、地球の中心核の条件を実現し、そこでの物性・構造の解明が可能になると思われる。また、さらに高压を発生する研究が進められ、木星型惑星や系外衛星の内部構造やダイナミクスの研究が行われるであろう。超高压下での液体の研究、固体の流動現象の研究が進展する。超高压研究と強力な光源（X線、中性子線等）を結びつけたその場観察実験によって、極限条件での物質理解が格段に進むことが期待されている。また、高速計算機の更なる進歩による第一原理計算による地球物質の構造・物性の予測と地球のダイナミクスシミュレーションの研究が新展開することが期待される。第一原理計算による物質予測が正確になり、地球物質の物性のより正確な予言性のある計算が可能になる。実際の実験と両輪として、鉱物物理学・地球物理学をリードしてゆくと思われる。さらに、マントル対流やプレートの滞留と崩落を実験で求められた物理パラメータのもとで、より現実に近い地球内部のダイナミクスのモデルを創出することが可能となり、観測と対応付けることにより、地球内部のダイナミクスの理解が格段に進歩する。また、高速計算機の利用によって、初期地球の集積過程、ジャイアントインパクト、隕石重爆撃、核形成などのプロセスのモデル化が格段に進歩する。

地球化学の研究においては、従来困難であった重元素の安定同位体比の高精度分析が可能となったことにより、地質試料の分析に基づいた過去の地球表層変動の解析が飛躍的に進展し、環境変化の将来予測精度が向上すると期待される。また、ナノスケールの微小試料について、軽元素も含む広範な元素や分子の同位体の分析手法がさらに進み、元素合成、地球や生命の進化のモデルに制約条件を与える。また、環境に関しても、古環境解読だけではなく、将来の予想あるいは予知（地震、噴火などと同じ）が要求される。有機質量分析分野の進歩は目覚ましい。無機の質量分析の分野では、生体科学の分野において超微量金属元素を分析する「メタロミクス」という分

野が注目され始めおり、今後この分野の分析技術が格段に進歩する可能性がある。

地球科学の様々な手法の惑星科学への適用も積極的に推進すべき課題である。惑星表面のスペクトロスコープや精密画像解析とともに重力、熱流量、電気伝導度、地震波速度構造など様々な地球物理学的観測技術を惑星科学に適用する必要がある。ペネトレーターによる月・火星などの地震波内部構造や地震波トモグラフィ研究は惑星科学に大きなインパクトを与えるであろう。惑星探査等によるサンプルリターンによって、地球外物質が回収され、その中に新鉱物が次々に発見され、地球の条件では存在しない未知の新鉱物が発見され、記載鉱物学の大きな発展が期待される。月や火星の惑星探査やサンプルリターンに基づく新たな比較惑星学に基づき、地球の初期の数億年の現象のモデルが提案される。新たな地球科学における観測方法の開発と実用化も重要である。地球ニュートリノ研究は、検出器の改良によって地球ニュートリノの観測をより高精度化し、またカムランド以外の様々な地域に検出器を設置し測定することによって、地球内部の熱源の不均質性の観測など地球科学的に大きな意義のある観測手段に発展する可能性がある。

### 3.4 課題推進のためにおよびコミュニティとして取り組むべきこと

大型科学と基礎科学の項で記述されるように、固体地球科学に関してもいくつかの大型計画や重点化された課題の研究が進んでいる。一方で、これらの大型計画とは直接リンクしない中規模や小規模の研究も多い。これらの研究課題の実施に関して以下の課題がある。

固体地球科学の対象のスケールは、時間および空間において多様であり、これらのプロセスを明らかにしていく上でも、時間および空間スケールへの多様な方法による研究を実施する条件を確保することが重要である。サブミクロンから惑星にいたる幅広い空間のスケールでの現象を丹念に、a) 調査・観察し、事象の時間スケールにあわせた過去の地質の調査や現在の観測、b) 目的意識の明確な「分析・実験」、d) これらを理解するための「理論やシミュレーション」のそれぞれを総合してはじめて、固体地球科学の現象の理解を深めることが可能になる。

研究を進めるための手段の三本柱（観測、物質、シミュレーション）の連携が極めて重要である。国内には、それぞれの中核的研究機関研究所等があり、一部は全国共同利用研究所として、装置・機器の共有化や研究者のネットワークの形成に役立っている。しかし、観測、物質、シミュレーションの連携は、特定領域研究のような枠組みがつくられた場合を除き必ずしもうまく機能していない。連携が日常的に機能する仕組みをつくるのが、この分野で日本が世界をリードして行くために不可欠である。一つの方法として、現有の複数の中核的研究機関が大学の枠を超えて連携しネットワーク型の研究機構を構成することが考えられる。

国際共同研究を推進し、その中で我が国がリーダーシップを取ることは、今後も強く求められる。例えば、統合国際深海掘削計画 (IODP) では、「ちきゅう」などの掘削によるサンプルの取得、掘削孔の観測、さらに掘削孔を用いた実験など多岐にわたる観測科学と物質科学の展開が期待できる。すでに南海トラフ地震発生帯の掘削では、そのような研究計画が進展しているが、さらにシミュレーションとの連携を伴った一体的な科学提案を作り、それを国際共同で展開してゆく強いリーダーシップが必要であり、そして、それを可能とするような研究体制の構築が求められる。

地球惑星科学では、結晶構造から原子分子にいたるミクロスケール領域と、グローバルトモグラフィや惑星探査に象徴されるマクロスケール領域のそれぞれに（機器の進歩とともに）大きな研究の進展が期待されている。特に、地質学的に活動的な場である日本の特徴を活かすとともに、グローバルな課題に関しても国際的にみても優位性のある調査観測技術を活かした「調査観測」を強化すべきである。一方で地球科学の基礎となった「人間の目による野外調査」は、両者

を結ぶ中間スケールの「調査観測」手段として変わらず重要な役目を担っている。しかしながら、野外調査は人から人へと伝授する以外の継承が困難であり、機器に重点が置かれがちな現代の大学研究機関ではこの分野での人材育成が困難になりつつある。シームレスな空間次元の認識を実現するために、野外調査に強い人材育成のために有効な措置が必要である。「分析・実験」や「理論やシミュレーション」に関しては、国際的な競争力を一層有効に発揮するために「既存の枠を大きく超えた独創的な研究を育むことができる仕組み」の実現が必要である。そのために萌芽的な課題への長期的な取り組みや挑戦的な課題への取り組みが可能となる様、従来に国家型プロジェクト研究と別枠の大型競争的資金を導入するとともに、この分野を推進できる人材の育成が必要である。分析技術の開発に関しては、さきがけやCRESTなどを積極的に利用できる環境を整備して、実践力、技術力、研究開発スピードが高い分析機器メーカーとの共同開発をすすめる必要がある。最近導入された新学術領域研究は、新たな大型競争的資金の一つとして評価することができる。法人化後の多くの大学等で典型的にみられるように、電子顕微鏡や化学・同位体分析装置などの基盤的な設備の更新や施設の維持が困難となっている状況について改善すべく、個別の大学等の機関の短期的判断のみによらない「研究基盤を維持するための有効な措置」を計画的に実施することが必要である。

固体地球科学の推進に当たっては、上記で述べた「調査観測」「分析・実験」「理論やシミュレーション」をダイナミックに総合化して、新たな分野を切り開くことが不可欠である。このような、総合化を行い、かつその成果を強力に世界に発信できる次世代のリーダーやグループの育成が急務となっている。なお、次の10年を鳥瞰すると、最先端の分析・地球化学と実験鉱物科学を自ら開発・展開できる人材を育てることが世界をリードするために必要であり、大学はゼネラリストだけではなく、技術開発力の豊かなスペシャリストの育成も行わねばならない。

## 4. 地球生命科学の現状と課題

### 4.1 分野の位置付け

「われわれはどこから来たのか？ 何者なのか？ どこへ行くのか？」という問いは、多様な生物に満ちた地球の一員である人類が答えなければならない義務である。「地球生命科学」は、地球上に繁栄する多様な生物について、その起源、適応進化あるいは絶滅に関する原因とプロセスのすべてを、地球史を考慮しながら解明する研究分野である。研究は、生命の起源、化学進化、微生物から人類に至る生物進化の解明と、その地球史・地球環境変動との関わりを理解を視野に入れる。また、生物進化の過程で、太陽が、月が、そしてとくに地球が生物に何をしてきたのか？ 生物は地球に何をしたのか？ という生物と惑星地球の関わりを地球惑星科学的側面および生物学的側面双方から理解する。したがって、研究の手法と範囲は、地球惑星科学および生物学双方の広い分野に関わる。たとえば、地質学（地層、地質年代、古環境、古海洋、構造地質）、古生物学、生物学・生命科学（進化学、分子系統学、遺伝学、発生学、ゲノム科学、遺伝子工学、解剖学、代謝科学、生物機能科学、生物情報学）、固体地球科学（岩石学、鉱床学、鉱物学）、地球物理学（地球電磁気学、古地磁気学）、海洋学、物質循環学（熱水循環、Global Biogeochemical Cycles）、地球化学（有機地球化学、同位体地球化学、無機地球化学）、化学（有機合成化学）、惑星科学（地球外生命）などがもっとも関係しそうな分野として挙げられる。

生命の進化は固体地球の進化と関係する。たとえば、地球のマントル-核という層状構造が確立し磁場強度が増加する時期と、初期生物の多様化の時期とが相関していると考えられている。また、ハチやサケの帰巢性、鳥の渡りは地球磁場と関係すると言われる。地球の磁気圏の確立とそれを利用する生物の共進化も研究の範囲である。雲の形成をうながす銀河宇宙線と太陽活動も地球の環境変動に関わることから、広義の気象である大気科学も検討課題となろう。

### 4.2 最近の進展

「地球生命科学」は、地球惑星科学、生物学双方の研究の発展に伴い著しく進展した。たとえば、生命の起源や生物の初期進化の研究には、太古代地質学、地球化学、地球電磁気学、地球微生物学、掘削科学そして惑星科学の発展が不可欠であった。有機合成化学や遺伝子組み換えなどの手法が取り入れられ、実験的に生体物質の合成と進化の問題を解くことができるようになってきたことも分野の進展を促した。また、真核生物進化の解明は、多くの分類群について全ゲノムの解析が行われたこと、代謝の分子機構が解明されたこと、そして熱水環境、地下圏生物などの極限環境に生きる共通祖先とも言える始原的な生物の発見とその適応戦略の理解が進んだことなどが重要な役割を果たした。

最近10年間に著しく研究が進んだテーマを挙げると以下のようなになる。

(1) 生命に至る有機物がどのように非生物的に作られて組織化されたか？ について、現在まで、有機物が隕石などによって地球外からもたらされたか、地球上で合成されたかが論争となっている。CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>を主とする非還元的な原始地球の大気下では、有機物合成は難しいことから、「地球

外からの寄与」の重要性が検討されている。最近の10年では、マーチソン隕石中のアミノ酸にL体過剰が報告され、地球上生命との関連が主張された。オリオン座分子雲の星生成領域(OMC-1)に円偏光の乱れが発見され、生命分子の片手構造との関連性が示唆された。2007年度にはスターダスト計画によって、彗星の塵が地球に持ち帰られ、多くの日本人研究者が回収試料の分析に参加した。しかしながら、試料が極少量であるため、有機物の化学進化に関してはキラリティーを含めて、決定的な成果は出ていない。地球上の熱水環境における化学進化は、硫化物を用いた有機物合成が検討され、イオウ金属錯体を用いて酢酸塩が生成されることが検証された。一方で、非還元的な混合気体に対して模擬宇宙線など照射してアミノ酸を合成し、また深海の熱水環境や隕石突入時の衝撃波を利用して有機物を合成しようとする試みが日本の研究グループによって行われている。

(2) 地球上の生命の起源に関して、1996年に約38億年前のグリーンランド・アキリア変成岩から炭素同位体比を用いて、最古の多様な生命活動が報告されたが、この結果は2006年に否定された。同様に、炭素同位体比を用いて、シアノバクテリアなどの炭素固定生物の活動が約38億年前グリーンランド・イスア地域にあったと主張されている。一方で、約38億年前に地球上に隕石の激しい衝突があったという主張に従うとすると、生命の起源は地球表層における光合成生物ではなく、深海における化学合成生物が有力な候補として挙がってくる。今後、38億年前の炭素が本当に生物によって作られたものであるかを決着する必要がある。日本もイスア地域において、地質調査・炭素同位体比分析を行い、当時の地球環境の理解に大きな貢献をしている。

また、約35億年前のシアノバクテリア様形態についても、化石としての真偽の激しい議論が行われ、微化石様形態が熱水条件下で全く無機的にも生成しうることが主張されている。日本も多くの研究チームが西オーストラリアや南アフリカなどの約35-32億年前の地層を対象として地質調査やボーリング掘削を行い、これら微化石様形態を含む炭素同位体比の研究を展開し、それぞれ国際誌に発表されている。また、35億年前のチャートの流体包有物中のメタンが当時のメタン生成古細菌によるものとの報告もなされている。

(3) 遺伝子の分子系統樹は、地球上の生物が真正細菌・古細菌・真核生物の3界に分類されることを示した。分子系統樹は分岐のパターンを示すものの、分岐の年代は与えないため、生命史との照合が必要になる。1996年の時点では、これらの共通祖先は約18億年前に分岐したとの報告があった。しかし、1999年には約27億年前の堆積岩から真核生物由来のステランやシアノバクテリア由来のメチルホパンのようなバイオマーカーが発見され、少なくとも28億年前には共通祖先から分岐したと考えられた。さらに、前述の35億年前のシアノバクテリアやメタン生成古細菌の存在が確かなものであるとすると、生命は地球の黎明期にすでに3界に分かれていたことになる。

生物が進化して、様々な代謝活動を行うことは地球環境の進化に決定的な役割を担っている。一例として、シアノバクテリアのような酸素発生の光合成生物の誕生は大気に遊離酸素を放出して酸化的なものとした。現在の通説では酸化的な大気へのシフトは約24億年前に起こったとされているが、新たに2003-2006年に日本・アメリカ・オーストラリアなどの国際チームによって行われたアーキアン生物圏掘削計画(ABDP)による研究では約25億年前に大気中に酸素が長い期間にわたって蓄積したことや、それ以前にも酸素があった可能性が示唆されている。

このような生命の初期進化や共通祖先に関わる研究に対して、日本の研究者は海底熱水系を掘削して深層生物圏を研究するアーキアンパーク計画を実施した。この他にも共通祖先に関わる研

究は深海調査ならびに深海掘削計画などによっても積極的に推進され、多くの成果を挙げている。また、世界中の太古代や原生代の地層の地質調査や掘削にも多くのグループが参加している。

(4) 生命の初期進化解明にも関わる新しい分野に、地下生物圏に関する研究がある。地下生物圏は、地下の地層や岩石中に分布する、主に微生物からなる生物圏である。もともとは石油掘削、廃棄物の地層投棄に関連して発展した分野であるが、深海の地層中に 1cm<sup>3</sup>あたり 100 万細胞を超える DNA を持つ微生物粒子が確認されて以来、深海掘削の主要ターゲットとなっている。南極などの厚い氷床中に閉じこめられている微生物の研究、氷床の下に数百万年に亘って隔離された Vostok 湖への掘削が行われようとしているが、これも地下生物圏研究の一環である。地下生物圏の研究の意義は、単に地下空間にバクテリアを中心とした生物の世界が広がっていることを知っただけではない。酸素存在環境における生物に基づいて組み立てられてきた生命観では説明しきれない、嫌気環境あるいは高温高圧環境に適応した生物の存在を明らかにしたのである。その結果、初期生命進化やその後の生物進化を考えるためにはそれらを含めなければならないという生命観のパラダイム転換を起こしたことにある。また、生物地球化学循環を考える時に、地下空間をも考慮しなければならなくなった点も重要である。最近、深海・熱水・湧水などの極限的な海洋環境、南極やグリーンランドなどの大陸氷床、そして陸上の極限的な環境を呈する地層・岩石・鉱床から始原的な生物が続々と発見されている。これらの生物は、地球生命史を生物学の手法で紐解く機会を与えている。

(5) 地球上の生物の多様性は、固体地球を含む地球史イベントとその多様性と相関している。たとえば、生命史の大きな区切りをなす、古生代、中生代、新生代などの地質時代の境目には、海洋無酸素事件や隕石衝突、巨大火山活動などの大きな地球史イベントが起こり、それが生命の絶滅を招き、その後、生き残った生物の爆発的な進化、適応放散が起こっているように見える。地球史イベントと生物進化現象とが関連したことであるかどうか？ 同期しているかどうか？ については、詳細な地質調査を含む地球惑星科学および遺伝子解析を含む生物・生命科学、双方の実証的な研究を待たねばならない。

(6) 地球史を通じて離合集散を繰り返す大陸と海洋の分布は、生物に異なった住み場所と環境を提供している。たとえば、200Ma 前にパンゲアが分裂したことをきっかけとして渦鞭毛藻・石灰質ナノプランクトン・珪藻という現在の海洋の基礎生産を支える植物性プランクトンが進化した。それに関連して生物地球化学循環が影響を受け、深海生物が進化したという中生代海洋大変革事件が起こっている。また、最近では、40Ma 前に南米と南極大陸が離れ、南極環流が形成されたことによって極域の寒冷化が強化され、生物の両極分布を生じ、生物多様性に拍車をかけた。白亜紀中期に全球で起こったとされる海洋無酸素事変は、地球内部活動の活発化が地球表層部の環境に変化を与え、生物の絶滅と進化が起こったことと連動したイベントであると理解されている。

このように、固体地球の活動が地球表層環境、生物圏の大変化と相関していることを明らかにしたことは、ここ 10 年の成果の一つである。しかし、生命の進化が固体地球の進化とさまざまな局面で相関することは示せたものの、その生物学的な因果関係の解明はほとんどできていないのが現状である。最近の生命科学の進歩は、多くの生物の全ゲノムを解読し、遺伝子の機能を解明しつつある。これらの成果を受けて、たとえば、ホメオボックスと体節進化、生物の左右対称性、視覚の進化などの生命史における重要なトピックスについて、ゲノム科学からの説明がされるようになってきたことは喜ばしい。生命科学の言葉で生命史を語ることを通じて、なぜ、生物の進

化が、特定の地球史イベントと関連して起こったのかが説明、あるいは証明されるようになるに違いない。

「地球生命科学」の研究に日本は大きな貢献をしている。たとえば、実験的手法を用いた化学進化の検証、深海熱水系における初期生命進化、大量絶滅の原因と回復過程、真核生物進化のプロセスとその分子生物学的基礎などのトピックについて、ユニークな研究が行われている。日本発の研究はシステムティックな野外調査や室内での巧緻な実験を基礎としているが、それとともに、諸外国を凌駕する機動的な海洋・陸域観測や深海掘削技術などに支えられていることは特記すべきである。

### 4.3 今後の課題

「地球生命科学」は、以下のような分野で研究が進展することが期待される。

- (1) 地球がいかにして生物生存に適した惑星になったのか？ という含めて生物の初期進化を解明し、生命の起源に迫る。この先には惑星生命科学研究がある。
- (2) 地球生命史のすべてについてドキュメンテーションを行い、どうして地球が多様な生物に満ちた星であるのか？ を明らかにする。
- (3) 生物と地球との元素や物質のやりとりを明らかにし、相関を明らかにする。

具体的には以下のようなテーマが重要な目標になる。

- ① 太陽系内や原始地球上での有機物の種類とキラリティーの普遍性・特異性を解明するために、小惑星や彗星からのサンプルリターンによる有機物分析や星間空間における有機物生成に関わる観測・実験・理論の研究を進めていく必要がある。ことに、原始惑星あるいは原始地球環境における有機合成実験が重要である。また、地球内部では熱水環境下での有機物のキラリティーの創出が可能であるかを明らかにする必要がある。
- ② 生命の起源に関しては、メタンなどの生物材料が熱水反応などによって無機的にも生成することから、今後は炭素同位体比やより複雑なバイオマーカーなどを使って、生命活動の有無を確実に検証する手法の開発が必要である。それは初期地球に留まらず、地球外物質の研究にも応用できるものになる。
- ③ 初期生命の進化については、真性細菌・古細菌・真核生物という3界を構成する生物の進化が地球環境の変遷とどのように結びついていたのか、また大気などの地球環境の進化が生物活動とどのように関係しているのか？を詳細に解明することが期待される。地層の研究では、27億年前の地層から発見されたバイオマーカーが最近の生物による汚染である可能性も指摘されており、生成以来、地上に露出したことがなく、風化や汚染を受けていない地層からの試料を、地球上の多くの地点から採取する必要がある。このような全球の広い範囲に於ける陸上掘削を行うためには、学界を挙げたサポートが必要である。また、我々の共通祖先がどのような場所・環境で誕生したかを理解するためには、「ちきゅう」を始めとする統合深海掘削計画（IODP）で行われる極限的な環境への掘削航海に多くの地球生命科学研究者が積極的に参画できる体制を整えることも必要である。
- ④ 地下生物圏研究は、今後10年間、今まで以上につばぜり合いの領域になる。地球生命科学を

志す研究者が、「ちきゅう」を始めとする深海掘削計画に積極的に関わり、乗船することが必要であるが、それとともに、日本が先導するユニークな掘削提案を作成することが何より重要である。そのためには、地下圏の場に関する情報を提供する地球惑星科学と地下圏の住人を研究する微生物学など、さまざまな分野の関連研究者が対等な立場で参加する研究グループが存在すべきである。欧米では、すでにそのようなチームが生まれ、ユニークな掘削提案を出し始めている。

⑤ 地球と生命の共進化研究は、地球史と生命史のイベントについて相関を検討することから始まるが、因果関係に迫る試みも必要である。たとえば、地球史と生命史の相関はそれぞれのイベントを含む地層について、層序に従った高精度の化石記録の探査や物理化学分析などを行うことを通じて事象同士のチューニングを行わなければならない。しかし、地球史イベントと生命史イベントが同期しているように見えたとしても、因果関係があるかどうかはわからない。生命史が地球史イベントを原因として起こっているという因果関係の検討に際しては、生命科学の言葉で語るアプローチが有用である。たとえば、ゲノムレベルで進化を説明できることである。また、過去の環境を復元した条件下における培養実験や有機合成実験などの実験的アプローチが、因果関係の理解に向けたより積極的な方法として大事である。いずれにしても、それぞれの分野に於ける最先端の研究成果と斬新な「ものの見方」、そして有機物の分析・合成に関わる先端的な科学技術を導入することが分野の発展を促すことになる。

これらのトピックは、いずれも既存の学問分野だけでは対処することはできない。地球科学、惑星科学、生物学・生命科学などの関連研究分野が融合した研究を展開することがなにより必要である。「地球史プロジェクト」や「アーキアンパーク」では、地球惑星科学の言葉で初期生命史を語る試みがなされ、一定の成果を挙げた。この研究スタイルを進めるべきであるが、一方で、生物学・生命科学の言葉で地球史を語る試みがあってもいいのではないだろうか？

#### 4.4 課題推進のためにおよびコミュニティとして取り組むべきこと

「地球生命科学」は、地球惑星科学の各分野と生物学・生命科学などがコラボレートした新しい学問分野である。学際領域の人材が集い、生命の進化とその地球史との関わりを活発に議論し、理解することを通じて、新しい学問が形作られていく。どのような学問領域に育っていくのかは、我々の研究の成果にかかっている。具体的には、地球惑星科学の領域に生物学・生命科学の研究者を呼び込む機会を作ること、あるいは地球惑星科学者が生物学の領域に入り込んでいくことが大切である。地球惑星科学の大学院課程に生物学・生命科学の学生を入学させる努力も積極的に行うべきであろう。さらに、学際的な研究組織・研究領域を立ち上げ、その中で異なったディシプリンの研究者たちが共通テーマに取り組む機会を作っていくことも必要である。このような融合を促す場と機会を作ることによって、学際的な研究を展開できるキメラ的な研究者が育っていくことが期待される。

「地球生命科学」は、惑星探査、深海掘削、陸上掘削などの巨大科学に試料採取の機会を依存している面がある。コミュニティが一体となって研究計画を立案するとともに、巨大科学の進展を支える構造を作る必要がある。

## 5. 地球人間圏科学の現状と課題

### 5.1 分野の位置づけ

地球人間圏科学は地球・惑星の自然現象と人間活動との相互作用に関わる地球惑星科学である。自然現象の面から見れば、人間とその活動に影響を与え、利益や損害をもたらす地球と惑星の自然現象が地球人間圏科学の対象である。人間活動の面から見ると、自然現象が生物としての人間や人間が作りあげた社会や文明にどのように影響を与えるか研究することが地球人間圏科学の課題といえる。

21世紀に入り地球惑星科学的現象が引き起こす社会問題がますます重要となっている。この数年間の間にも2004年新潟県中越地震、2004年スマトラ西方沖地震とインド洋の大津波、2005年ハリケーンカトリナ、2005年パキスタン北部地震、2008年汶川地震などが、甚大な自然災害を相次いで発生させた。また、地球温暖化に伴う環境の変化や気象災害も激しさを増しているとみられている。このような自然災害と環境変動のインパクトを軽減するためには、気象学や地震学の個別な分野の研究に加えて、災害を引き起こした地球科学現象と、それが引き起こした連鎖的な現象を総合的に解明することが不可欠である。すなわち、台風-強風-降雨-高潮、地震-津波、地震-マスマーブメントといった現象を、自然から人間までを包括する視点で学際的に解明することが不可欠となっている。この問題に対処するには、地球科学的な観点から、地球と人間の相互作用的な現象の解明と、その対策案を練ることが社会的に大きく期待されている。この社会的期待に学問的に応えるべく、地球人間圏科学は、時間的には第四紀から現代の生活的時間まで、空間的には、地球全域から地域や日常生活空間までを対象とし、人間の活動と関係した地球惑星科学的現象の解明と、その現象が引き起こす人間とその社会への影響の解明を目的としている。その成果は地球的な社会問題解決方法について検討をして人間が合理的な行動を選択するための基礎となる。

自然と人間を分離することなく、人間活動をその舞台である地球表層の自然や天然の資源と一体に捉え、そのダイナミクスを研究することも人間圏研究の一つの定義である。しかし、人間と自然の渾然一体となった状況を分析するためのパラダイムや手法は未だに成熟しておらず、既存の地球惑星科学のディシプリンを活かしつつ自然と人間の関わりを研究するためには、自然現象と人間活動との相互作用について、自然から人間へ、人間から自然へという異なる極性で整理していくのが適切と考える。

自然の側から地球人間圏科学を考える場合、人間活動の場としての自然の成り立ちと自然が人間に与える影響が主要な課題となる。従来の地球惑星科学の幅広い分野がこれに関わるが、なかでも地質学、地震学、火山学、応用地質学、第四紀学、自然地理学、地形学などが深く関わっている。一方人間活動の側からのアプローチとしては、人間がどのように自然環境の変化に対応したかを解明する視点に加えて、人間が自然を改変し現代では地球システム全体に大きな影響を与えているとの視点も重要となっている。これらの視点からは、人類学、考古学のように自然科学の側面を強くもつ研究分野だけでなく、人文科学・社会科学と強く結びついた人文地理学や、農学・工学等に関連する分野も地球・人間圏科学と密接に関係している。

このような極めて学際的で、ある意味混沌とした研究者の集団は広い意味での地球惑星科学に新しい観点をもたらすポテンシャルを有する。方法論や価値観を異にする研究者の集団がそれぞれの研究分野に向けて発散することを防ぎつつ新しい観点から成果をあげるための模索が現在進

行中である。本稿では、自然災害や環境変動など地球・人間圏科学にとって重要な課題に共通する、近未来予測の精度と信頼性を高める研究に関わる地球惑星科学の現状と課題を論ずる。

近未来予測に関わる地球惑星科学の基本的な立場は、過去に発生した自然現象を詳細に解明するとともに、現在がその自然現象の再来にいたる過程のどの位置にあるかを観測することにある。また、過去に地球が経験したことの無い現象がもしも進行しつつあるとすれば、その現象が及ぼす影響を過去の事象をもとに予測することも必要である。人間の側では、自然から受けた影響に対し過去と現在にどのような反応あるいは対応があったか、その時の人間活動の空間的、社会的な状況はどのようであったかを解明して、将来の反応・対応の近未来予測が可能となる。また、変化し続ける社会の現状を正確に把握することも予測の基礎として重要である。特に自然災害や環境変動を受け止めるさまざまなスケールの社会構造の変容や地域の人文地理学的なあり方について、最新の情報を収集することも必要である。

地球惑星科学に基づく近未来予測が成立するためには、繰り返し発生するイベントが認識されて現象が正確に把握されること、イベントを時間と空間の中に高い分解能で位置づけること、さらに、イベントの背景として定常的に進行する自然現象を明らかにして、イベントの信号を高い精度と信頼度で把握することが必要である。ここで注意すべきことは、過去の自然現象に関するわれわれの知識はきわめて断片的で質も量も限られていることである。また、現在の地球内部や大気海洋に関しても、近年の情報の増加は著しいが、今なお情報の分布はごく疎らであり、未知の領域は広大である。その未知に起因する近未来予測の認識論的不確実性は非常に高い。しかし、地球惑星科学の進展と、予測することができなかった、時に大きな災害を伴う自然現象の発生によって、認識論的不確実性は徐々に小さくなっていることは間違いない。認識論的不確実性が消滅することは決してありえず、科学の貢献はその減少の程度によって測られることを共通の理解とすべきである。

## 5.2 最近の進展

### (1) 過去に発生した自然現象の認識：データの取得

「未曾有」と呼ばれる大災害を引き起こす自然現象の多くは、過去に繰り返し発生しており、その発生が現代の人間の周知するところではなかったために「未曾有」の大災害となった例は数多い。観測や歴史文書に記録されていない、あるいは不完全にしか記録されていない自然現象の存在を地球惑星科学の方法で認識し近未来予測の出発点とすることは基本である。

しかし、近未来の地震予測を例にとると、活断層や液状化、突発的な地盤の昇降など地震地質資料をもとに人間への地震の影響を検討することは、1990年代半ばまでほとんど行われていなかった。1994年ノースリッジ地震や1995年兵庫県南部地震は地震地質情報が地震危険度評価に重要であることを示して、過去の地震情報を地形・地質から収集することの意義を明らかにした。これを受けてこの10年余りの間に、世界的に内陸活断層のマッピングや活動時期の調査が高い精度で進められるとともに、カスケーディア沈み込み帯や千島弧西部、スンダ弧中部の巨大地震と津波の解明が進んだ。これは地震に随伴するマスムーブメントについても同様である。たとえば1999年台湾集集地震、2005年パキスタン北部地震、2008年汶川地震が引き起こした巨大崩壊について、その特徴や発生場、および過去の発生時期を解明し、過去の巨大地震履歴とその様式を推定しようとする試みが進められた。

環境変動の研究では、1990年代前半に確立した大深度氷床コアの掘削や、深海底コアの各種

気候プロキシの高精度な分析がこの 10 年間に普遍的に行われるようになった。北大西洋で 1980 年代に認められたハインリッヒイベントやグリーンランド氷床コアから提唱された D-O サイクル、新ドライアスイベントなど 100 ないし 1000 年オーダーで振幅の大きい変動が広域的に認められるようになった。また、南北アメリカや、極東など北大西洋から遠く隔たった地域でも、深海堆積物やレス、湖沼堆積物の時間分解能の高い分析から同様のイベントと長期的な変化のトレンドが高い精度で検出されるようになった。

## (2) 過去に発生した自然現象の空間的広がりや発生時期の解明：データの分離と結合

突発的、あるいは短期間継続して振幅の大きい自然現象のメカニズムを明らかにし、近未来予測の具体的な資料とするためには、現象の空間的な広がりや発生時期の精度良い解明が必要となる。特に遠く離れた地点で類似した現象が観察される場合、発生時期決定の時間分解能によって空間的な広がりが左右される。低い時間分解能によって同時現象とみなされていた現象が、高い時間分解能によって分離され、さらに、分離された現象の因果関係まで明らかとされることは、近未来予測にとって非常に重要な発見といえる。

地球上の広い空間において時間分解能を高めるための基本的な技術は年代推定手法にある。相対的な年代推定手法としては、1990 年代には精度の高い酸素同位体変化曲線が基準となっていた。しかし、酸素同位体変化曲線による時代対比は厳密には時間の対比ではなく現象の対比であることが明らかになると、メタン濃度変化や、マイクロテフラ、火山噴火に伴うエアロゾルなど、環境変化とは独立した相対年代指標が重要性を増した。また、数値年代として、高精度の放射性炭素同位体年代測定は、樹木年輪年代に基づく初生濃度変化の補正や湖底堆積物、海洋堆積物の年縞年代との比較校正によって著しく信頼度を増した。放射性炭素同位体年代測定結果については、樹木年輪年代補正に加えてベイズ理論に基づく年代値の改良や、確率密度分布としての年代値の比較によって、より合理的で精密な時間軸を打ち立てるのに著しい進歩があった。さらに年代測定の対象をひろげ測定可能な試料を増やすうえで、ルミネッセンス年代測定と宇宙線生成核種を用いた曝露年代測定は過去 10 年間に普及して地球年代学に大きな貢献をした。

特に山岳地における過去の隆起・浸食量についての理解は、宇宙線生成核種を用いた曝露年代測定やフィッシュトラック法を用いた熱履歴年代推定によって進展した。特に宇宙線生成核種を用いた曝露年代測定法やルミネッセンス年代測定法は浸食あるいは氷床後退によって露出した基盤岩や有機物を含まない砂礫層の年代測定を可能にし、第四紀末期の地殻変動や環境変動を定量的に解明することに貢献している

また、複数の年代推定手法を組み合わせることで過去数百年の地質時間尺度の精度を 1 年以下まで高めることも実現している。たとえば塊状サンゴの年縞年代と地震性の相対的海水準変動の記録、およびウランシリーズの TIMS を用いた高精度ワイドレンジ年代測定の組み合わせは、2004 年スマトラ西方沖地震以前に中部スダ弧地域の 18 世紀以降の沈み込み帯巨大地震の発生時期と破壊領域、海岸線の昇降を精密に解明していた。

過去の大地震の発生に関する情報量は、組織的なトレンチ掘削調査や、深海底のタービダイト調査によって飛躍的に増加した。その膨大な情報は、時間分解能が高く信頼度の高い年代測定に支えられて、ある地震による地震発生領域を特定して、地震規模の推定や再来モデルの改良に貢献している。

地球規模の環境変動に関しては、精密なイベント認定と年代推定に基づいて気候変化発生時期の地域差が詳細に解明されて、ハインリッヒイベントのような突発的イベントがどのように地球規模に伝播するかについてのモデルが提示されるようになった。海陸境界域の環境変動や海水の塩分濃度の変化を記録するサンゴ礁の研究からは、海水準の変動が高い時間・空間分解能で解明された。さらにサンゴの年輪や樹木年輪からは、高精度年代とともに、それぞれの年輪を構成する物質の同位体組成や化学組成の解明から、きわめて高い分解能で気候変動が復元されている。

### (3) 近未来予測のためのモデルの作成とその高度化：データベースの整備とモデリング

組織的に取得された高精度なイベントと定常変化データは、モデリングを目的としたデータベースにまとめられ、研究者に共有されるようになった。気候変動に関しては大気、海洋、気候、物質循環に関わるモデルの作成とデータベースを用いたシミュレーションの実行、フィードバックの手法が確立した。また、地震研究では、過去の地震時系列と空間分布の現象論的な説明としてのモデルから、物理学的な過程としての地震サイクルと破壊プロセスのモデル化が進められている。

### (4) 自然と人間の相互作用の解明

人間が活動し自然現象の影響を受ける場所でのイベントの理解もこの10年間に大きく進展した。海洋底や氷床など人間活動から遠くの気候変動プロキシの解明から、人間活動の場における気候変動の解明が試みられるようになった。これは、微化石やレス、土壌などのプロキシだけにとどまらず、人類学や考古学が明らかにする人間の対応についても検討が進んでいる。

地震学における強震動観測と予測手法の確立、地震工学と地震学、地質学の共同研究が幅広く行われるとともに、オンフォルトの地震研究に加えて、地震動が被害を生じる場所におけるオフフォルトの地震研究にも大きな成果があった。液状化や津波堆積物の地質学・地形学的な研究は地震の人間への影響を明らかにするうえで有効であった。

さらに、関連する社会科学分野では、災害が起こる現場で、人間とそのコミュニティがどのような状況にあるかを理解する面で、ソフトインフラを含め社会組織がどのように自然災害に関わっているかの解明、国土形成と土地利用の計画論的な研究、リスクコミュニケーション、リスク評価などの面で、人間の側に立った研究が大きく進展した。

### (5) 相互作用の場である、地表環境に関わる地球情報・地理情報

地球観測衛星による SAR-altimetry と航空機搭載 Lidar (Laser Scanner) による地表形態の高精度な面的データの取得によって、従来極めて低密度で精度の低かった地表の位置標高データが世界的には 10 m メッシュで、ローカルには 10 cm メッシュで取得できる。低地の地盤高、微地形と土地条件、断層変位地形、マスマーブメントなど膨大な地形と地表環境データの取得が可能となった。洪水、津波、地震など災害対策だけでなく、土地利用の適正化に貢献する。特に、航空機搭載 Lidar (Laser Scanner) は、従来植生によって精密な空中写真測量・判読が不可能であった地域の微地形計測を可能とした。

SAR-interferometry により cm オーダーの地表変形を m オーダーのスペーシングで検出することが可能となった。この10年間観測衛星と観測帯域の整備がすすみ、計測対象地域が著しく拡大し利用が普遍化している。また、GPS の普及と観測網の展開により、大地の動きを数秒から数年の時間帯域で直接観測が可能となり、地殻変動の情報が飛躍的に増加した。

GPS を用いたリアルタイム測位は理学・工学分野だけではなく人間活動の解明にも応用され新たな研究領域を開いている。また、ウェブ GIS、ユビキタスマップなどの技術は、地球惑星科学研究を効率的に進めることに貢献している。

#### (6) 地下調査・可視化技術の革新

高レベル放射性廃棄物の地層処分に代表される地下利用と関係して、さまざまな地下調査技術・可視化技術が開発された。高密度電気探査、トモグラフィ、地中レーダーなどによって、地下数 m から数 km の深さまでの探査が可能となった。また、界面活性剤を用いた新しいボーリング掘削技術によって、従来採取不能であった未固結物質や破碎物質の採取が可能となり、地下の地質性状の解明が飛躍的に進んだ。

### 5.3 今後の課題

#### (2) 認識されない、できない過去のイベント

地震の近未来予測に関わる地形・地質研究が地震モデルと強震動の予測をも含めて進展する一方で、従来観測記録・歴史記録が欠如していたうえに、地質記録も収集されていなかったために予測されていなかった大地震が、台湾、インド・グジャラート、パキスタン、新潟県中越地方、スマトラ沖、四川で発生して、大きな被害と驚きをもたらした。これらの地震は定性的には発生が予見されていた。しかし、発生時期や規模などの定量的な情報は全く得られていなかった。定量的な地震の近未来予測が実現して応用が進む中で、定性的な情報しか得ることの出来ない地震に対する検討は十分に行われて来なかった。半定量的あるいは定性的な情報から災害予測を合理的に行うための方法論が必要である。

気象災害の面でも、激甚な災害が相次いで発生している。これらのイベントが自然現象として前例のない予測を超えたものであるのか、それとも、数十年から百年程度の経験から予測できる現象であって、災害を拡大した原因が人間活動の側にあるのか、災害軽減のための対策を考えるうえでの基礎的な情報が必要である。そのためには現代的な気象観測が行われていない時代と地域での過去の気象イベントについての定量的な情報を収集することや、定性的な情報の分析も必要である。

近年多量の高解像度衛星データから植生や雪氷の詳細なモニタリングが可能となり、山岳氷河の後退と表面高度の低下などが詳しく明らかにされ、それによる氷の融解量ならびに海面上昇への寄与の見積もりなどが行われている。しかし、海面上昇に大きな影響を与え正確な海面上昇の予測にとってもっとも重要な南極氷床の気候変動による動態はまだデータが不足しており、これからの課題である。

#### (2) 空間・時間分解能の限界と予測精度の向上

人間活動に関わる自然現象の将来予測には、空間的には人間の生活空間程度、時間的には数年から数十年という高い分解能が要求される。歴史記録からの自然の復元は最も高い時間分解能をもっているが、近代以前の気象観測データ、気象に関わる現象の歴史記録を広くに収集し、現代の観測データと接合することは、極めて重要な課題である。特に記録の乏しい低人口密度地域、熱帯域、について歴史時代の質の高いデータを蓄積する必要がある。

樹木年輪、年縞堆積物、雪氷など、高い時間分解能をもつ試料からのイベント・定常的変化の抽出はこれまで大きな成果を挙げてきた。しかし、精度の良いデータは空間的に偏って分布しており、人間活動が集中する場での環境変動やイベントの影響を高い精度で解明することは一般に容易ではない。特に東アジアや南アジアのように人間活動の集積が著しい場所での災害や環境変動は人間にとっての影響が大きいにもかかわらず、データの不足から直接の解明が遅れており、モデルを作り検証するためのデータも不足している。このデータを補って、人間活動に関わる自然現象の近未来予測の時間・空間分解能を高めるための調査研究が不可欠である。

地震や豪雨によって発生する地すべり等は人間圏にとって非常な脅威であり、その発生の場所や時を予測する事は大きな課題である。特に地震によって発生する大規模な地すべりをそれがもたらす災害は従来の想定を大きく超えることが明らかになってきており、そのメカニズムや発生場を解明することは緊急の課題である。

### (3) 自然と人間の相互作用の解明

環境変動や自然現象が人間に与える影響は、人間活動の状況によって大きく変化する。特に、生活や経済活動が行われる場所の土地条件と土地利用は環境変動や災害への人間の曝露の程度を決定する要因の一つである。自然的な土地条件の情報は、宇宙技術やリモートセンシングに基づく地理情報の整備によって急速に増加しているが、その情報を利用しやすくして一般への普及を急ぎ進めることによって、土地条件の定量的な理解を進める必要がある。地盤や地下水、土壌の情報もより高い密度で統一的に利用できる環境の整備が必要である。加えて堤防や盛り土、各種災害対応設備など人工的な土地条件も変化がリアルタイムで反映できるような土地条件のデータ整備行われなければならない。

一方、人間活動によって変化し続ける土地利用や、資本の投下や人の集中によって高まるリスクの変化は、災害の程度を決定する重要な要因である。土地利用情報と人間活動のデータをリアルタイムに把握して曝露と脆弱性を定量化することは、災害予測の基本的な作業として組織的に進められる必要がある。

人間が自然から受ける影響を評価するためには、位置情報をもった人文・社会経済データが必要である。統計データは膨大に存在するものの、位置をキーとして一元的に整理されたグローバルなデータの整備は遅れている。また、人や物、資本や情報のフローに関する人文・社会経済データは圧倒的に不足している。データ取得のシステムと世界共通の空間情報データベースが必要である。地理情報処理技術の進展は近年著しいが、自然系のデータと一元化をすすめて、人間と自然の関わりを解明し分析するための努力を進めるべきである。

自然災害の地域性や災害素因に関わる地域差を、一国から地球規模までのさまざまなスケールで分析し、自然環境と社会環境の双方を視野に入れたリスクマネジメントを地球惑星科学からも提案できるようにする研究が必要である。地理学の視点にたった土地利用研究は災害に強い地域計画を勘案するために特に緊急な課題である。

このようにして蓄積されたデータについて、2007年に制定された「地理空間情報活用推進基本法」などに基づき、「基盤地図情報」の整備・公開が進められているほか、ウェブでの地理空間情報の流通が進みつつあることから、大量の情報を管理し、利用可能とするプラットフォームの確立やシステムの高度化が課題である。ここでも作成主体の異なる情報の統合利用手法の開発が重要な課題である。

## 5.4 課題推進のためにコミュニティとして取り組むべきこと

(1) 近未来予測研究の目的は予測そのものではなく、個人から社会に至るさまざまなレベルで人間が近未来に発生するイベントや変化に合理的に対応することを可能とすることにある。そのためには、研究者のコミュニティから現実社会へ研究成果のエッセンスが伝達されるだけでは不十分である。基礎データを取得する現場の研究者、データの分析者、モデル構築者、研究の総括者、実践者としての技術者など、さまざまなレベルで地球人間圏科学の成果が社会に対して発信され、研究の全体に関する理解と支援を実現すべきである。

(2) 同時に、地球惑星の自然現象の研究者は自然と人間の相互作用、およびその向こうの人間活動に対する哲学的、社会学的、経済学的、政治学的あるいは心理学的な一定の理解を常識として有する必要がある。人間の側を中心に研究する研究者は自然科学者の啓蒙を助ける努力が必要である。これは、理学・工学に関わる教育においても考慮されなければならない。

(3) 真の意味での Interdisciplinary、Multidisciplinary 研究を推進しなければならない。狭い専門分野で研究を深めざるを得ない研究者のセクショナリズム、その現状を是認して結果的に研究者を分断してコントロールする行政サイドによるコンパートメンタライゼーション、そしてそれを疑問と思わない研究者の存在は、研究者の視野を狭めて地球・人間圏研究を推進する上での大きな障害の一つとなっている。異分野の研究者の研究から実務レベルにいたる交流、それぞれの研究者の異分野からの学習は必須の条件である。さらに、複数の研究分野の考え方と技術を体得し、その分野の研究パラダイムの先端を理解できる人材の育成とリーダーシップの発揮が研究を牽引する原動力となる。教育、研究、実務の体制を全面的に見直す必要がある。

(4) 日本における、モデリングコミュニティとデータ収集コミュニティの距離はこの 10 年余りの間に大きく縮み、分野によっては両者が不可分となっている。しかし、単一の研究グループや研究プロジェクトとして両者を統合するものは数が少なく、参加する研究者の人数も限られている。モデルとデータ間のフィードバックを緊密にし、より良質で精度の良いデータを収集し、モデルを進化させるためには、二つのコミュニティが融合し、意識と目的を共有することが必要である。関連する各分野の研究者の協力を進めるための研究プロジェクトや研究交流のための予算と、それを支える人材の確保が必要である。

(5) 地球人間圏科学が対象とする時間帯域は、現在の生活時間 (< 1 年) から、氷期-間氷期サイクル (10 万年)、その繰り返しと人類進化 (100 万年) に及ぶ。日本の地球科学では従来からのこの時間帯域の研究者の層が薄い。観測を主体とする地球物理学 (< 100 年)、文献研究 (< 1000 年) でカバーすることのできない、1000 年ないし 100 万年の地球科学の研究・教育を充実させることは、地球人間圏科学に基づく地球惑星科学に必要である。

(6) 地球情報・空間情報に関して、情報の規準化、規準化された情報の公開、および計測的に情報の維持管理ができる仕組みの構築に関連する地球惑星科学分野、人文社会科学、政府等を含めて横断的に推進しなければならない。

## 6. 大学および大学院における地学系教育の現状と課題

### 6.1 大学および大学院における教育の現状に関するアンケートの実施

近年我が国の大学では国立大学法人化、学科〔専攻〕間の連携・再編など様々な取り組みが行われ、地学を取り巻く情勢にも大きな変化が生じている。全国の大学における地学（惑星科学・天文学・地理学・地球環境学を含む）関係学科の現状、過去10年の動向、および近未来の再編計画などについて把握し、この分野の基礎データとするためアンケート調査を実施した。学会連合の資料に基づき、地学関連の学科および大学院専攻の送付リストを作成した。連合の資料には教育学部地学教室がほとんど含まれていなかったため、地質学会の協力を得てリストを補充した。地学関連学科（71）、教育学部地学教室（84）、地学関連大学院専攻（84）へ宛てて2007年1月20日、日本学術会議事務局からアンケートを発送した。東工大のCOE-HP上の（非公開）URLから用紙をダウンロードし、4月30日までに電子ファイルで回答を集めた。アンケート回収率は学科・専攻に関しては約50%であった。10大学（旧7帝大、筑波、東工大、広島大）、理学部に地球科学系の学科が設置された国立19大学（弘前大、秋田大（工学資源学部）、山形大、茨城大、千葉大、新潟大、信州大、静岡大、富山大、金沢大、神戸大、岡山大、島根大、山口大、高知大、愛媛大、熊本大、鹿児島大、琉球大）、それ以外の国立・公立大学（教育学部地学系を含む）、および私立大学の4区分に分けて分析した結果を以下に報告する。

### 6.2 大学および大学院における教育の現状

#### (1) 学科の統合再編について

地学系の学科は学科名だけでなく教育内容でも、環境学、生物学、化学、物理学などとの統合再編を多く経験している。それらの中には自ら意図した再編も、大勢に従わざるを得なかった選択もあったと思われる。これらについては1回のアンケート中間集計では深い事情まで把握することはできない。大学院の名称と融合・再編はさらに多様である。ここではアンケートに記載されていた多数の統合再編の事例の中から、学部における特徴的な例を抽出掲載する。これらの事例からは、環境という新たなキーワードを自ら工夫して取り入れようとする姿、他学科と一度統合したものの学生教育上の問題から統合を解消し、地学分野が独自に結集しようとする姿などが見える。

#### a. “環境”を学科名に取り入れた：東京大学理学部 地球惑星環境学科

平成12年に地学系3専攻（地質、鉱物、地理）と地球惑星物理学専攻が合同して地球惑星科学専攻が発足以降、平成17年度まで学部生の志望者が減少し続けた。この原因としては、1) 専攻合同の結果、地学科と地球惑星物理学科の違いが見えにくくなった事、2) 地学という呼称のマイナスイメージ、3) 時代の変化や社会の要請に対応した教育内容改善への努力を怠り、学問的魅力が失われた事、などが考えられた。そこで、1) 生命、環境の側面を強調するとともに、フィールド教育、物質科学的教育に重点を置く事で地球惑星物理学科との違いを明確にし、2) 地球惑星環境学科と名称変更する事で、地学のマイナスイメージの払拭を計り、3) カリキュラムを全面的に改定する事で、学問的魅力の復活を目指した。その結果、18年度年度進学生から、志望者の減少傾向は下げ止まり、19年度進学予定者数は、久しぶりに定員を上回った。

**b. 化学と統合を解消した： 山口大学理学部 地球圏システム科学科**

変更年： 平成18年

変更前：化学・地球科学科（定数70） 地球科学コース

変更後：地球圏システム科学（定数30）

平成17年までの数年間は、化学・地球科学科として前期日程志願者が募集の2倍程度しかなかったが、平成18年の改組時点で地球圏システム科学科前期日程が8.9倍、平成19年度は3.8倍となった。これは、学科名と、入試制度の変更が原因ではないかとみられる。

**c. 生物と統合を解消した： 静岡大学理学部 地球科学科**

平成8年 地球科学科 から 生物地球環境科学科（定員90）へ変更

平成18年 生物地球環境科学科 から 地球科学科 へ変更

平成8年の再編は学生定員15名の増加と教員ポスト3名増を伴った。地球科学と生物学の融合教育を1年2年次に実施したが、次第に学生の希望が生物系中心になり、固体地球科学を希望する学生が減り続け、10年を機に2学科を分離することにした。このような再編が可能であったのは、いずれの再編に於いても地球科学系の教員が学科の再編を主導したことが大きな理由と考えられる。

**d. 理学科のコースとして再統合した： 茨城大学理学部 理学科地球環境科学コース**

平成7年3月まで 地球科学科

平成7年4月より 自然機能科学科、地球生命環境科学科

平成17年4月より 理学科地球環境科学コース

平成7年、従来の数学、物理、化学、生物、地球科学の5専攻を数理、自然機能、地球生命環境の3学科に改組。平成17年より理学科となり、その中に6コースを設けた。大学院博士後期課程を作るために3学科への改組が要請された。また、教育上の問題点が多々生じたため、地学系を再度統合して地球環境科学コースとした。

**e. 基礎教育を重視する立場から理学部1学科とした： 熊本大学理学部 理学科地球環境プログラム**

平成17年3月まで 地球科学科

平成17年4月より 理学科地球環境プログラム

理学部1学科であるので、学部教育では幅広く学習し、進路を決める事が出来るのが特色。3年次以降は専門分野毎の「プログラム」に分かれるが、定員を設けず、希望した進路に進む事ができる。「地球科学科」時代に比べると「地球環境プログラム」を選択する学生の数が大幅に減少した。特に環境以外の地球科学を志望する学生の減少が著しい。

**(2) 大学間格差とその増大**

今回の大学および大学院教育アンケートで、我が国の国立大学および私立大学における学生あるいは大学院生の数に対する、教員数、支援職員数に極めて大きな格差が存在し、独立法人化後ますますその格差が拡大しつつある状況が浮き彫りとなった。下の図は学部学生の入学定員に対する、教員（教授・助教授・講師・助手）、正職員（事務職員と技術職員）、非常勤職員（事務職員と技術職員）の比率である。国立10大学、理学部に地球科学系の学科を持つ19国立大学、その他の国立大学、私立大学の4つのグループに分けて比率を計算した。調査後多くの大学で助教授を准教授へ、助手を助教へ移行したがここでは調査時点の職名で表示した。ただし、学部学生

は4年間でこの4倍の人数が在籍している。また、理学部1学科制に移行した大学では「学科定員」が存在しないので、下の図には集計していない。同様に私立大学でも、「学科定員」が存在しないところはこの集計から省いた。

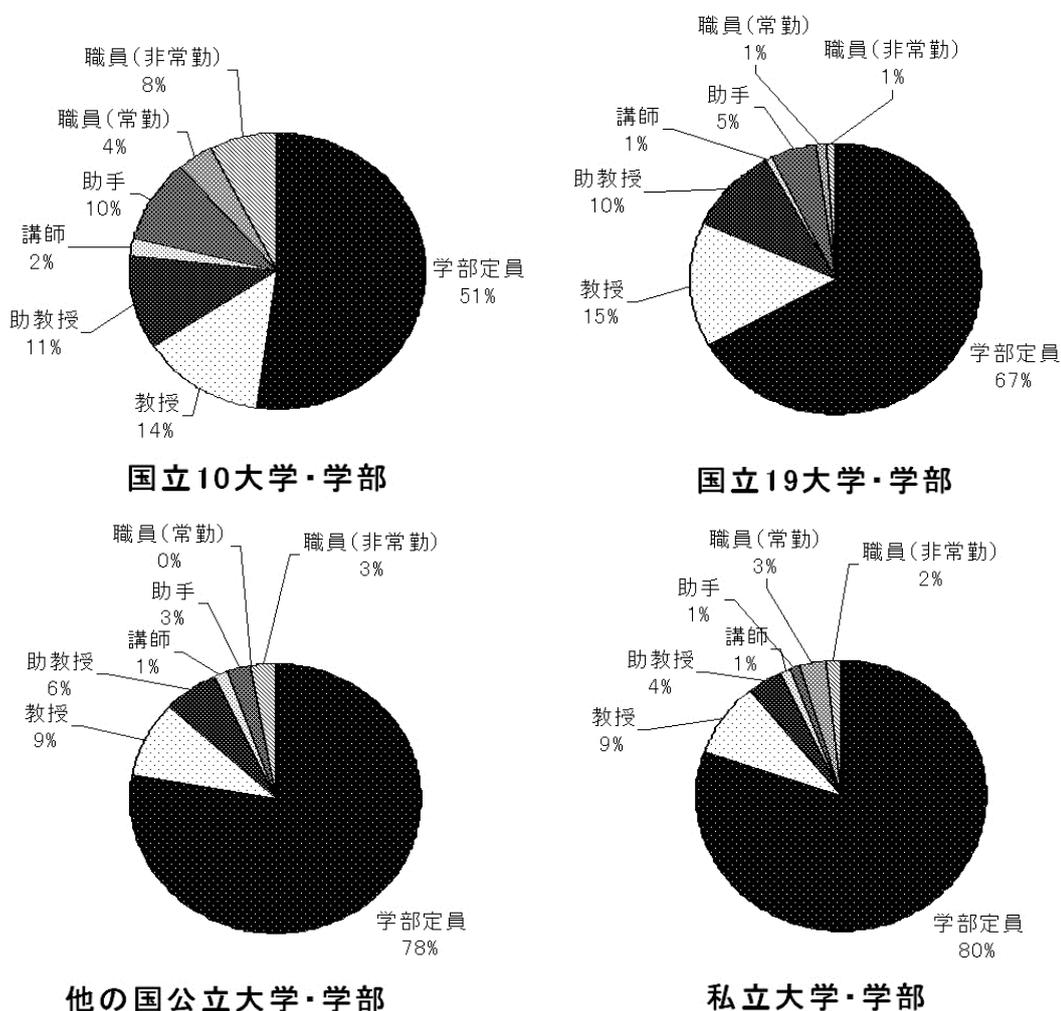
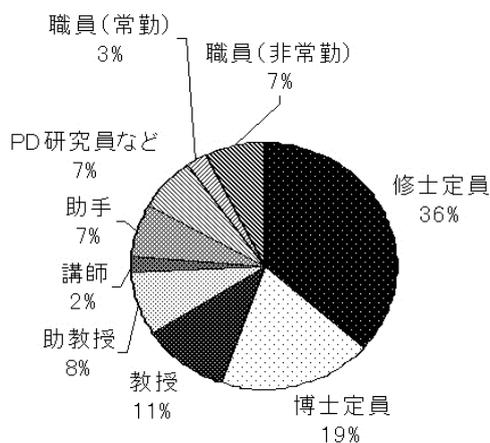


図6-1. 大学学部における地学系学科の構成員（ただし学生の実数はこの4倍）

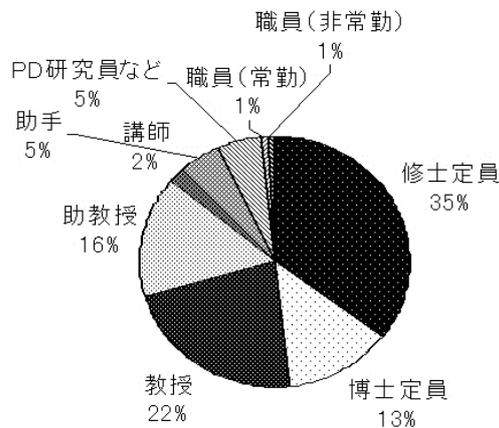
一見して明らかなのは、学生定員に対する教員および職員の数が、10大学、19大学、その他の国立大学、私立大学の順に著しく減少することである。すなわち、国立大学理学部にある10大学、19大学とそれ以外の国公立大学および私立大学には（学生数/教員数）比で極めて大きな格差が存在する。国立10大学と19大学を比較すると、（学生数/教員数）比が19大学において大きい。また、前者に於いては教授・助教授・助手がほぼ1：1：1の割合で在籍するのに対して、19大学では助手の数が少ない。助手の占める割合は、10大学、19大学、その他の国立大学、私立大学の順に減少する。とりわけ著しい違いは、19大学では正職員、非常勤職員ともに10大学の1/6程度の割合しか在籍しないことである。その他の国立大学、私立大学でも国立10大学に比べると職員の数は少ない。

多くの大学において、地学系の学科事務室に非常勤の事務職員すら置けない状態が慢性化している。教育を支える若手教員（助手）および支援職員の数が（学生定員に対して）極めて少ないことは、19大学、そのほかの国立大学および私立大学において教授・助教授層の深刻な疲労を招いている。しかもその状況は法人化後の国立大学において、中期目標の設定、JABEE関係の仕事

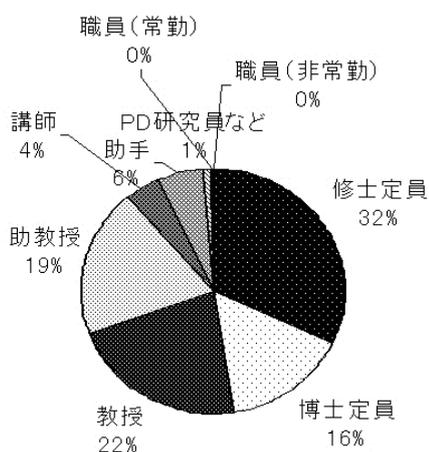
(後述) などの従来にない事務作業の増加、定員削減圧力(後述)により深刻さを増している。



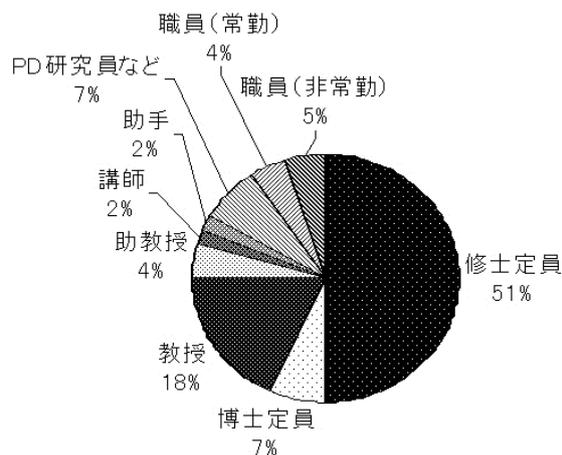
国立10大学の大学院



国立19大学の大学院



その他の国公立大学の大学院



私立大学の大学院

図6-2。大学院における地学系専攻の構成員(ただし修士・博士の院生はこの2倍・3倍)

大学院においては、修士、博士の学生定員が国立10大学とその他の国立大学で大きく異なる。10大学の幾つかでは、学部の学生定員をはるかに上回る修士定員を持っている(後述)。したがって、両者は比率で見ると10大学でむしろ教員の数が少ないように見える。しかし、大学院生の実際の在籍数は10大学に偏在しているのでこの比率は見かけに過ぎない。私立大学では修士の大学院生定員が国立10大学をしのぐ場合もあるが、博士の定員は少ない。私立大学の一部には国立10大学に匹敵する職員、研究者をもつ専攻も有る。下の図から19大学およびその他の国公立大学は、職員、PD研究者の構成員に占める割合で私立大学を大きく下回ることがわかる。すなわち、国立大学大学院の教育環境は大学間格差が大きく、10大学以外では劣悪である。

## (2) 学生の就職状況

### a. 学部学生の就職先

学部生の就職先を10大学、19大学、その他の国公立大学、私立大学に分類して集計した。その他の国公立大学、および私立大学には教育学部地学系教室を含むためか、就職先に占める小中高教員の占める割合が高い（下段）。大学の種類を通じて地学系学科を卒業した学部生はコンピュータSE、流通業、サービス業など幅広い業界に就職する。一昔前までは地学系学部卒業生の多くが就職した資源および地質コンサル（土木建設）は、現在では（19大学においてさえ）学部生の主要な就職先ではない。地学系の学部教育が役に立つ専門的職種への就職は限られている。しかし、見方を変えれば、地学系の学部卒業生の就職先が下図のように多様である原因の一つには、複雑な自然現象を見通す能力が広く社会で役に立つことが有るのかもしれない（後述）。

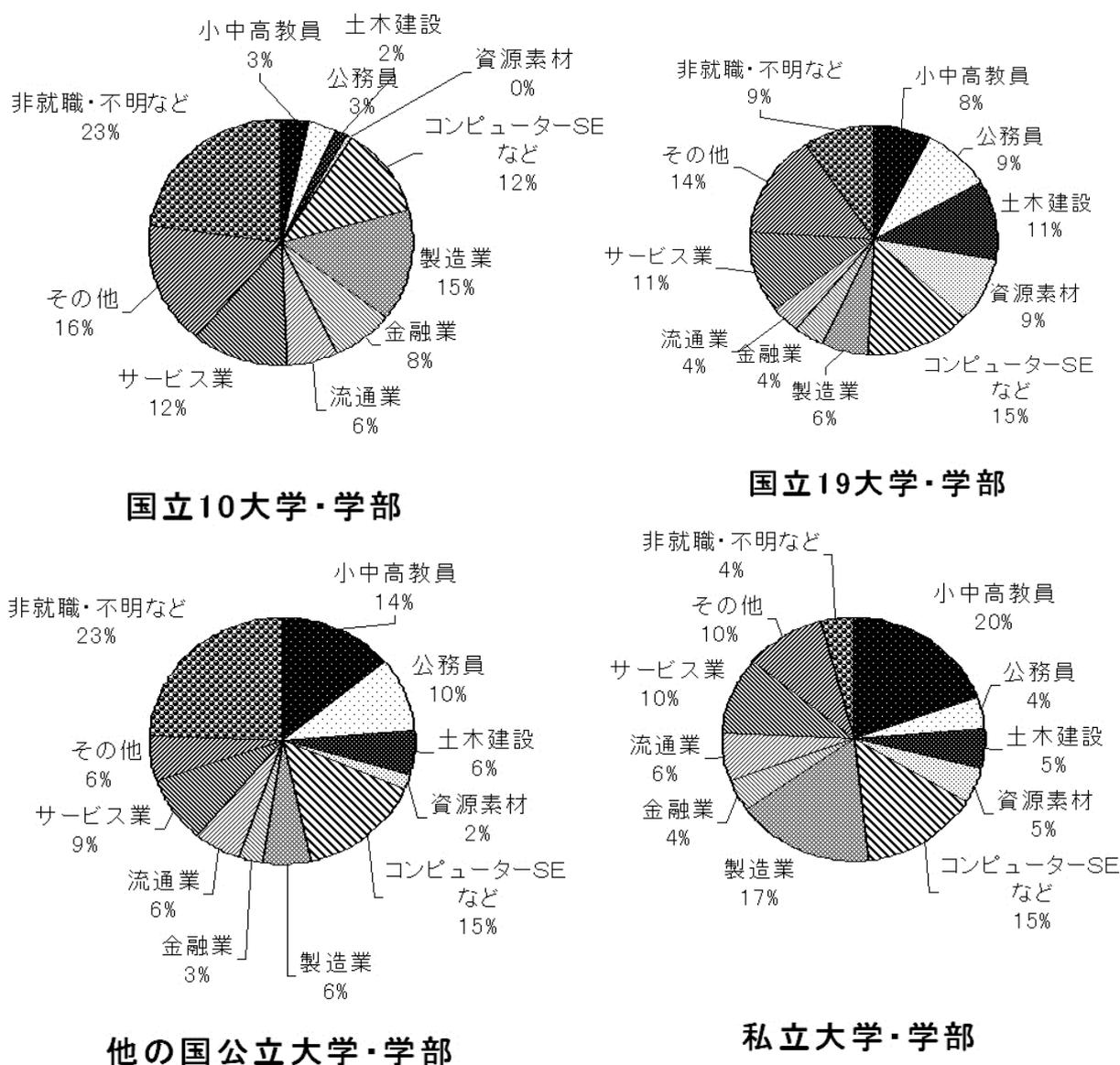


図6-3. 大学学部における地学系の学生就職先

## b. 大学院生の就職先

大学院生の過去10年間の平均的な就職状況を尋ねた。下の図は10大学、19大学、その他の国公立大学、私立大学の大学院卒業生の就職先である。博士と修士を区別して訊いていないのでそれらが混じった就職状況が下のグラフに反映されている。卒業する大学院生の人数から考えると修士の卒業生が7割以上を占める。10大学に於いては研究職（大学・研究所、およびPD）が～30%を占めるほか、公務員、教員、土木建設、コンピュータSE、資源、製造業、サービス業など広い業種に就職先が分散している。これに対して19大学およびその他の国公立大学では土木建設（地質コンサルタント）が20～30%を占めている。地質コンサルタントでは地質調査のみならず最近では環境化学分析などの仕事も割合も多くなっている。地質コンサルタントへの就職を有利にするために、19大学およびその他の国公立大学において、JABEE(後述)を教育に取り入れる理由となっている。

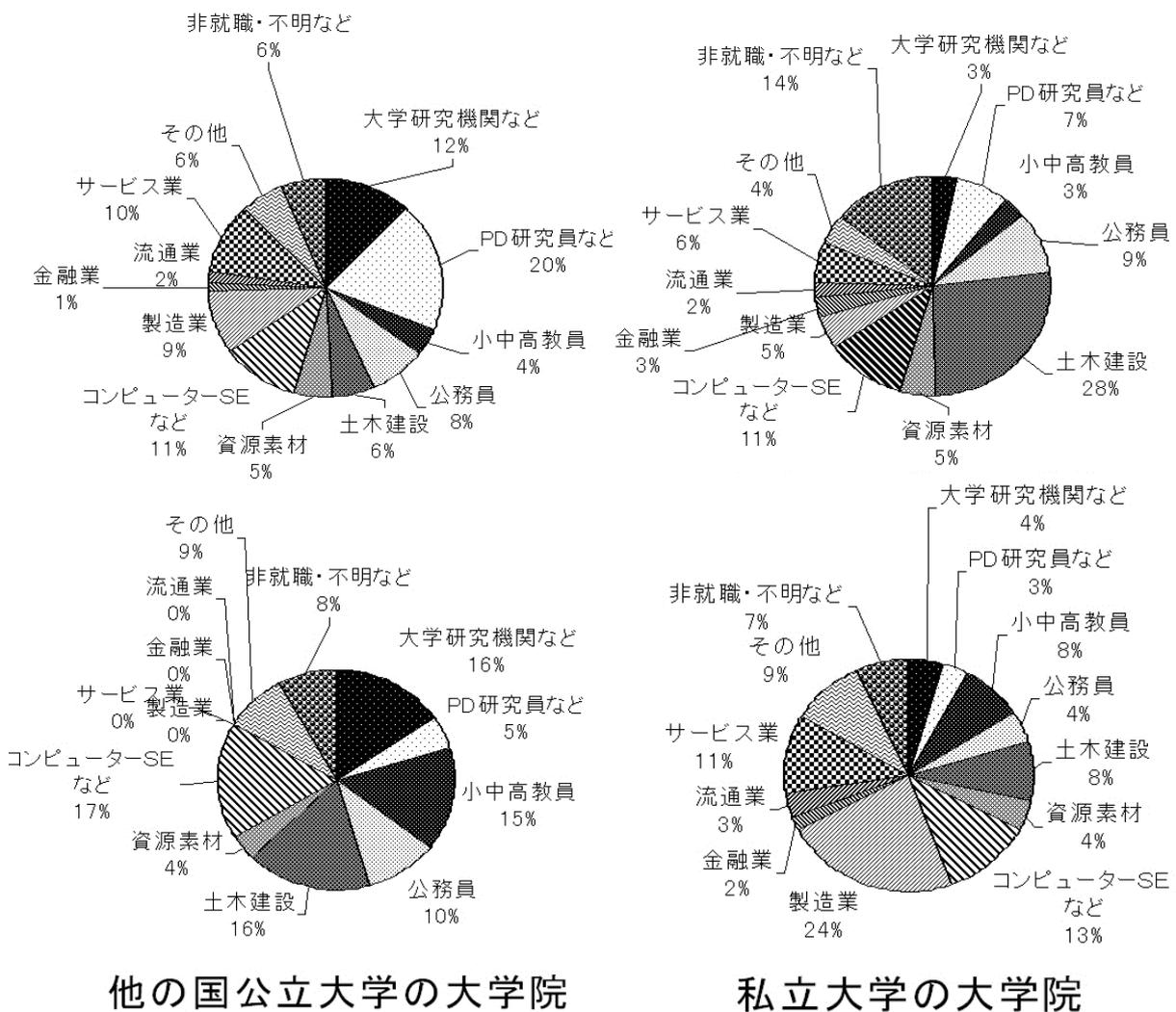


図6-4. 大学院（修士・博士）における地学系の大学院生の就職先

#### (4) 大学の抱える諸問題

##### a. 野外調査教育についての困難

今回のアンケートで学部および大学院の教育に於ける問題点を自由記入形式で聞いたところ、多くの大学から野外調査教育をめぐる困難についての指摘があった。その内容は次の3点に集約される。

1) 野外調査の費用の大部分が（多くの大学で長い間の努力の成果として一部を大学が負担するようになった歴史はあるものの）現在でも学生・大学院生の自弁になっていることの困難である。地学以外の科目に於いて実験・演習などの費用がすべて大学負担であることと比較して、野外調査を学生が自費で実施せねばならないことは地学系教育の大きな障害となっている。

2) 野外調査に当たっては、学生の安全確保のために、障害保険を校費で掛けることにしているが、手続き的にまだ煩雑であること、保険会社も野外調査に対応できる商品を開発していない点など、制度的な問題が大きい。

3) 教員採用の際に、業績（数）重視の傾向が非常に強くなったため、野外調査、実習の指導が行なえる教員（いわゆるフィールド科学系教員）の採用が困難になり、フィールド科学系教員数の減少、および高齢化が著しい。フィールド教育の為の教員枠を確保し、採用をして行かないと、数年後には野外調査、実習教育が出来なくなる事が予想される。

##### b. 定員削減の圧力

国立大学独立法人化の目的のひとつは、国家公務員に一律に課されている定員削減の圧力から逃れることにあったはずである。独立法人化した後の国立大学で定員削減の方式はそれぞれの経営判断に任されている。アンケートの結果、多くの大学で20%に達する教員定員の削減目標が示され、教員が定年で退いた後の後任人事が凍結されている状況が浮き彫りとなった。

##### c. 修士課程大学院生について

国立10大学においては、学部生の8割以上は大学院に進学する。他の国立大学では大学院への進学率は2～3割りである。10大学の一部の大学院定員が学部定員より遥かに多いのに対して、その他の大学では大学院生の定員は学部の定員を下回っている。東大および京大の大学院へ優秀な学生の多くが流出する現状を嘆く声が多くの上がっている。私立大学でも工学系の専攻では修士課程までの進学が多くなっている。

##### d. 博士課程大学院生について

国立10大学においては、研究者の養成を目指して博士課程の定員が修士課程の定員の約1/2～1/3程度の比率で置かれている。他の大学では博士課程の定員は少ない。いずれの大学でも近年博士課程の学生が定員を大きく下回る傾向にある。しかも、大学院の定員について文部科学省から定員割れを問題と指摘されることを懸念している大学が多い。

博士課程大学院生減少の理由について聞いたところ、以下のような指摘があった。

1) 若手の研究者の就職先としてほとんどが任期付きポジションとなり、他の民間の職種と比べて不均衡が目立つ。それ故、優れた院生でも、修士修了時に民間企業への就職を選ぶ者が少なくない。

2) 最近企業の業績が好転し、就職状況が改善したこと。

3) 一部の恵まれた大学に大学院生が奪われる。21COE、G-COEなどの制度が拍車をかける。

また、博士課程大学院生の減少を食い止めるために、以下のような提案があった。

4) 優秀な学生に進学を勧めるには、返済無用の奨学金を用意するのが最も重要と考える。諸外国でも、学生が優れた学業成績を上げるかどうかのリスクは、貸与時に大学側が負うのが普通である。奨学金制度の変更も大きな影響を与えていると思われる。現行の「奨学金返還免除審査」の仕組み（大学院終了時に返還免除者を教員側が選んで推薦する）は愚策であり、博士前期（修士）と博士後期（博士）の課程の開始時に返還免除者を成績で振り分けるよう、早急に変更を望む。

東大、京大を始め 10 大学のいくつかでは、1990 年代の大学院重点化の際に学部学生の人数に比べて大幅に大学院生の定員（修士・博士）を増加した。重点化の結果、東京大学地球惑星科学専攻、京都大学地球惑星科学専攻はわが国の地学系大学院の中で特に大きな大学院定員を持つようになった。また北大環境科学院、東工大総合理工学研究科のように学部を持たない大学院も作られた。（ただし、北大の環境科学研究科設置は 1977 年、および東工大の総合理工学研究科設置は 1975 年にさかのぼる）。重点化の結果、これらの大学院においては他大学（多くの場合、地球科学以外の学部）の卒業生を大学院生として教育する事になった。様々な学部教育を受けた大学院生で構成されるこれらの大学院においては、修士課程教育を学部レベルから行なわなければならない、重点化前に比べて、修士論文の平均レベルが低下傾向にある。また、同学年の学生の理解度に大幅な差があるため、本来切磋琢磨すべき教育環境がうまく機能しない状況が多々生じている。最近では博士進学率が大幅に下がってきている。前述したように、修士での就職状況が好転したこと、ポスドクがなかなか定職に就けない実態があり、キャリアパスを描きにくい状況にあることが主な原因と考えられるが、加えて、このような大学院教育環境の質的変化も大きいと考えられる。

#### e. 基盤的設備の更新について

アンケートに答えたほとんどの大学および大学院から建物の老朽化、および基盤的な研究設備が老朽化しても更新ができない現状を嘆く回答が返ってきた。中には、「大学設置以来 32 年間建物も研究設備もほとんど更新されていない（筑波大学）」という報告もある。独立法人化したことにより、国立大学からは従来の概算要求の仕組みが無くなり、研究の基盤となる分析設備（たとえば XMA 装置、X 線回折装置、蛍光 X 線分析装置など）を買い換えることも、維持費でメンテナンスすることもできなくなった。このままでは数年後に我が国の多くの大学・大学院の研究が崩壊する危険を秘めている。日本学術会議では大学の教育・研究の基盤的設備を更新する仕組みを作るように緊急に政府に提言すべきである。

#### f. JABEE 導入を目指す大学

日本技術者教育認定機構（JABEE: Japan Accreditation Board for Engineering Education 設立 1999 年）の認定を受け、卒業生に「技術士補」の資格を与えようとする大学が最近数年間に急速に増加しつつある。地学系卒業生の多くが就職する地質コンサルタント業界は、工学部土木系出身者のしめる割合が地質系の出身者よりはるかに高く、「技術士」の数が会社にとって重要な財産となっている。このため、将来「技術士」資格を取得する準備となる「技術士補」の資格を持つことが地質コンサルへの就職には有利である。一方で JABEE 認定には学科として教育の隅々まで厳しい認定基準を満たすことが必要であるため、従来に無い膨大な労力が（少なくとも当初は）学生教育の形式を整えることに費やされている。事務職員などの支援がほとんどない旧帝大系以外の大学において、JABEE 認定に要する手間の多くが、教員の研究時間を割いて行われている現状は緊急に改善されるべきである。

## 6.3 大学および大学院の目指すべき道

### (1) 初等・中等教育における地学の履修

多くの大学において、地学系の学科を第一志望とする受験生の減少傾向が問題視されている。理学部として入学した学生を他学科と競争で学科所属させる大学（東大、京大、東工大など）では、優秀な学生を第一志望で獲得することが年々難しくなっている。また、最近理学部1学科制を導入したために、地学系が物理・化学・生物・数学との厳しい学生獲得競争にさらされるようになった大学（熊本、茨城、高知、琉球大など）もある。これらに共通している問題は、「学生の地学離れ」である。高等学校以下で「地学」がほとんど教えられていないことが「地学離れ」の最大原因であると考えられる。

「地学離れ」を食い止めるために、日本地球惑星科学連合はセンター試験について以下の要望書を文部科学省に提出した。：「平成15年6月に発表された平成18年度大学入試センター試験の「理科」の実施方法に対して危惧の念を抱いており、次のような改変を要望します。「地学I」が「物理I」と同じグループに入れられているため、「地学I」と「物理I」を組み合わせ受検できないことを大変に危惧しています。受験科目として提供される6科目のうち、少なくとも「物理I」、「化学I」、「生物I」、「地学I」の4科目から任意の組み合わせで2科目ないしは3科目を受検できる制度に改変することを強く要望します（平成18年度（2006年度）以降の大学入試センター試験「地学」出題方式（「理科」内でのグループ分け）に関する要望書 日本地球惑星科学連合 2004年12月10日 文部科学省高等教育局局長あて）。

また、日本学術会議地球惑星科学委員会、社会貢献分科会では、新しい教育体系への提言を計画している：「地球を知り、人間社会を知るには、理科全体、社会全体の幅広い教養に基礎を置かねばならない。さらにすべての知識の基礎として言語、数学の着実な理解が必要となる。自然の理解、すなわち理科教育は、従来の物理学、化学、生物学、地学といった枠を超えて、さらに工学や技術の分野を総合したものを、基礎的な知識から、それを応用して考える力を養うまで、初等、中等、高等教育まで一貫して積み重ねることが大切である。私立大学の多くは、英語や国語だけなどの少数の入試科目や、センター試験のみによる選抜を行ったりしている。また、これに応じた高校や中学における教育の内容も変化してきた。その結果、進学してきた大学生が受けた初等、中等教育の中身は、ここ10年で大きく変化し、数学、国語、英語、理科、社会全体にわたって、バランスある基礎学力を身につけた学生の進学が著しく減ってきた。このことはわが国の将来にとって大きな問題となっている。高等学校で“一般的な教養を高める”ための学びを保証し、大学での学びを開始するにあたっての基本的な最低レベルの明確化を行うため、大学入学資格検定試験を創設する。この試験では、高校1年終了時より受験可能とし、国語、外国語、数学、理科、地理・歴史科、公民科の基礎学力を試験する。本資格検定試験は、生涯何回でも受験できる（新しい教育体系への提言-大学入学資格検定試験の創設 - 日本学術会議地球惑星科学委員会、社会貢献分科会 2008年より）。

### (2) 大学における地学系教育の目標

アンケートから浮き彫りにされた学生・院生の就職状況を踏まえて、今日の大学および大学院における地学系教育の目的はどのように定義されるべきだろうか？ 理学としての地球および宇宙の研究を目指す研究者の養成が、10大学においては大学院教育の基本である。地学の持つ社会的な意義として、「資源の開発と確保」、「自然災害の予測と軽減」が広く認知されている。気象予測、地震予知、噴火予知、海外における資源探査などの専門分野に相当数の卒業生が毎年送り出されている。一方でまた、環境問題に対する社会的関心が近年特に高まっている。地学系の学科

専攻の多くが環境をキーワードに再編を行っているが、環境学は学問として未完成であり、この分野の教育目標もまだ定義し難い状況にある。地球科学の教員がイニシアチブを発揮して「地球環境学標準カリキュラム」を整備することが必要である。

学生・院生の就職状況調査から明らかになったように、地学系の教育を受けても、地学に関わる職業に就ける学生・院生の数は多くない。しかしながら、地学教育で得たものを、社会生活のなかで生かすチャンスは決して少ないわけではない。たとえば、企業で、地域社会で、家庭で「温室効果」や「地球温暖化」の意味や違いを正確に伝えることは、地学教育を大学で受けた人間のまさに果たすべき役割であろう。あるいは、地震や津波、火山噴火、台風などの災害時に正しい知識を周囲につたえることは、地学教育を受けた人間が現代社会で果たすべき重要な役わりとなっている。そのような卒業生を社会に送り出すことが、大学での地学教育に期待される共通の課題であろう。

卒業生の多くを地質コンサルに送り出してきた大学では前述の JABEE が最近の 5 年間に急速に大きな重みを持つようになってきた。JABEE は地学系教員にとって（特に支援職員がほとんどいない学科・専攻が多いが故に）極めて大きな教務作業の負担となっている。また JABEE 認定コースの大学では、「技術士」の資格経験を持つ教員を新たに採用するなど、地学系教育の内容にまで変化を及ぼしている。しかしその一方で、地質コンサル業界に就職できる卒業生の数は、公共事業の抑制などの効果で年々減り続けている。全国の大学の地学系教育の中で JABEE が占めるべき位置と適正な規模について検討が必要である。

### (3) 教育研究環境の改善

全国の国立大学および私立大学で最近 10 年間に教育と研究に対する人的、経費的、設備的状況は大幅に悪化した。国立大学は 2004 年 4 月から国立大学法人に移行した。法人化の影響は様々で有るが、アンケートを見る限り、法人化以前に比べて経費的にも人的にも状況は悪化している大学がほとんどである。法人化に伴い、それまでの国立大学に存在した概算要求（大学内で必要な様々な予算措置の順位を決め文科省に要求する仕組み）ができなくなったことが大学の教育研究を支える基盤的設備の更新をする上で極めて重大な障害となっている。さらに、法人化以前に比べて人的削減、定年退職者の不補充などの措置がより急速に進行している大学がほとんどである。また、法人化に伴い、中期目標・中期計画・自己点検・外部評価の実施など、大学教員の時間を割く事務仕事量が増加した。

文科省が大学間競争を促すという名目で始めた 21 世紀 COE、グローバル COE などの施策は、それまですでに合った大学間格差をさらに増大する方向に働いている。全国の大学において、地学系の教員が疲弊し、将来に希望をもてなくなっている現状は放置することが許されない。地学系で起きている教育と研究環境の劣化は基礎科学のあらゆる分野に共通の問題であろう。日本学術会議は、我が国の全ての大学において、大学における教育と研究の質のこれ以上の改悪を阻止し、大幅な改善を行うよう直ちに政府に働きかけるべきである。

### (4) 地球惑星科学コミュニティ結束の必要性

大学のおかれている現状の調査が地学系全体としてこれまで実施されて来なかった背景には、物理学会、化学会のような分野を統合する学会が無かった事情が有る。「日本地球惑星科学連合」、「日本学術会議地球惑星科学委員会」など、我が国の地球惑星科学全体を見通せる組織ができた意義は大きい。「連合」および「日本学術会議」の元で、今後は継続的に地球惑星科学の教育と研究の現状を調査し、問題点を分析把握して、必要な援助の手を差し伸べるべきである。

その際に参考にすべき事例が有る。旧帝大など 10 大学以外で、「理学部に地球科学関連の学科

が設置された国立大学」は、「19 大学地球科学系学科主任会議」を自主的に組織し、各大学の持ち回りで毎年 1 回この会議を開催し永く継続してきた。これらの大学はそれぞれの抱える問題を地学系という共通の視点から見つめて、お互いに支えあって来た歴史を持つ。「日本地球惑星科学連合」、および「日本学術会議地球惑星科学委員会」は、この先例に学んで、アンケート調査にとどまらず、関係者が集まって生の声で語り、継続的に会議する場を作るべきである。

## 7. 地球惑星科学の大型計画における基礎科学のあり方

### 7.1 地球惑星科学における大型計画

大型計画には、①大型設備を用いたボトムアップ型基礎科学研究計画（研究者のボトムアップ提案に基づくもの）、②国策的大型計画（国策的な科学技術政策に基づくトップダウン型）がある。地球惑星科学の分野では、地球環境問題への対応や自然災害軽減など、社会貢献に対する地球惑星科学への期待と役割が高まっていることから、大型計画、特にトップダウン型の国策的大型計画が多く推進されている。ここでは、地球惑星科学の各分野で推進されている個々の大型計画について、現状をとりまとめ、抱える課題と将来の方向を整理した。それらを分野ごとに、以下に記述する。

#### (1) 宇宙惑星探査

**現状：**宇宙惑星科学は、人工衛星、惑星探査機を重要なツールとして急速に発展してきた。衛星・探査機の開発、打ち上げロケットの開発、そして打ち上げ、運用は全国大学共同利用の宇宙科学研究所を中核機関として行われてきたが、2002年10月からは宇宙3機関の統合により実現した宇宙航空研究開発機構（JAXA）がその機能を引き継いでいる。

**課題：**どのような衛星や探査機を開発し、どのようなターゲットの観測をするかは、宇宙惑星科学にとって基本的なことである。選択の如何によって、その分野が開いたり、しぼんでしまったりもする。宇宙科学研究所の時代には、毎年一つのプロジェクトを選ぶことを原則に、これらの選択は第一線の研究者で構成された委員会により行われてきた。しかし、衛星の規模も大きくなり、準備・開発期間が長くなってきたことを考えると、毎年白紙の状態から一つの計画を選ぶことに困難も出てきた。グランドプランに基づいた開発計画が必要になったと考えるべきかもしれない。さらに、研究分野の多様化と必要な衛星の多様化は、「毎年1機の中型衛星」という原則が必ずしも研究者のニーズに沿わなくなっている。機器開発の規模・期間が大きくなり、個別の大学研究室の長期的な関与が難しくなっている。そのため小型衛星・大型衛星など、多様な可能性を研究者が有効に利用できる方策を考えていく必要がある。

最近、国が進める大型の計画として、月探査や宇宙探査の議論がなされ始めた。これらの計画においては、資源探査・月面利用などが看板に掲げられているが、実用面での成果は当面期待されないため、科学面に多くの成果を期待する傾向にある。しかし、社会の暗黙の期待が科学にあるにもかかわらず、これらの探査計画の立案に関しては、宇宙惑星科学研究者の関与度は決して高くない。

**将来：**現状は、探査機を使った宇宙惑星科学分野の研究者は様々な学会で活動しているため、個別の学会単位で意見を出すことはできても学会横断的なコミュニティから発言することはほとんど無かった。連合をベースにした、宇宙惑星科学のコミュニティを確立する。そして、実現可能なロードマップを作り、その実現に向けてコミュニティが組織的に動くことが大切である。併せて、月探査や宇宙探査のような国の大型計画に対して、宇宙惑星科学の立場からきちんと発言できる仕組みを早急に作る必要がある。

一方で、NASAのディスカバリー計画のようにコミュニティの独創的なアイデアから科学ミッションを育てる仕組みを確立することも、コミュニティの発展のために重要である。さらにコミュニティを支える大学等の研究者が大きなリスクを背負わずに、長期的に安定して衛星計画に参画できる仕組み（予算、組織）も整備すべきである。

## (2) 南極観測

**現状：**日本は、国際地球観測年から約 50 年、定常的に南極地域観測隊を送り出し、オゾンホールが発見、氷床コア掘削に基づく過去 72 万年の気候変動の解明、オーロラの発生機構の解明、大量隕石採取による宇宙科学への貢献等を行ってきた。今や、南極地域は地球規模の気候・環境や地球史、惑星科学における必須の貴重な観測フィールドとなっている。

**課題：**これからの南極観測には、個々の学問分野はもとより、従来の分野を越えた融合的研究・観測が必要となる。たとえば、最近発見された南極氷床下湖、および、氷床中の生命体の研究には、雪氷学と生物学の融合が必須である。また、南極域は地球上にあって人為的擾乱の最も少ない場所として、温室効果気体等の地球規模変動のモニタリングに最適である。ところが、観測隊員ポストがないために、高度な分析技術を要するモニタリング観測担当隊員の確保には毎年かなりの努力が必要となっている。標高が高く、低温で水蒸気が少ない環境下のドームふじ基地は、天文観測への利用価値が高く、宇宙への窓として惑星科学への貢献も期待されている。だが、そのための内陸基地への物資輸送や運用には、設営的基盤拡充が不足している。

南極域は、冷源・極として地球気候の鍵となる場所である。しかし、アクセスが年 1 往復の観測船航海に限られているため、中低緯度で行われているような精密かつ大型の観測機器の導入が遅れていた。これからの南極科学は、定量的な精密科学へ変貌する必要がある。中低緯度での実績のある大型大気レーダ観測の早期実現が待望され、これによって太陽活動の影響を考慮した大気上下結合、南極大陸の南半球大循環での役割、中低緯度とのオゾン等物質交換など、山積みの未解明課題に積極的に取り組む必要がある。

**将来：**南極科学において国際的リーダーシップを確保するためには、南極観測事業にとらわれず、研究者が自由な発想で自由に参加できる南極観測体制が必要である。とくに大型観測計画を実現するためのボトムアップ的予算獲得の流れの確立が必要である。観測船航海に加え、航空機利用による高効率アクセス方法と輸送体制の確保が強く望まれる。地球環境監視の長期維持のため、担当観測隊員の安定確保の仕組みが必要である。

## (3) 次世代計算機（地球シミュレータと京速計算機）

**現状：**地球科学における大型計算機の利用は、地球シミュレータによって質的に飛躍的な発展がもたらされた。高解像度の気候温暖化予測計算、全球雲解像大気モデルの開発、地震波動予測モデルの 3 つが顕著な成果である。これに加えて、従来の大学等の大型計算機を利用した研究は、研究の裾野としてその重要性は変わらないが、地球シミュレータにより次元上のチャンピオン計算が可能になり、地球科学に本質的に内在するマルチスケール計算に質的な変化をもたらした。

**課題：**大型計算機は世界的な競争が激しく、すぐに陳腐化してしまうため、継続的な次世代計算機整備計画を推進が必要であり、そのための予算維持が最大の課題である。次世代計算機には、高解像度大気海洋モデル、地球システムモデル、地震波、固体地球統合モデル、宇宙天気予報モデルなど様々な研究分野、機関で推進されるべき研究課題があるが、これを効率的に行なう基盤整備は十分とはいえない。たとえば、セキュリティの保障された小規模なサテライトセンターが日本各地で利用可能な体制が望ましい。また、次世代計算機の効率利用に当たっては、課題の優先順位を決めるしくみを作る必要がある。IPCC に大きく貢献した気候温暖化予測計算を始め、各分野の最重要課題を主体とするのは言うまでもないが、科学コミュニティのレベル維持のためには、基礎研究の利用も妨げるべきではない。このあたりのバランスの取れた評価システム導入が大切である。また、次世代計算機を用いた研究は、従来型の研究者の個人営業的な研究ではもはや限界がある。計算や解析のための専用のスタッフを有した十名程度以上の研究グループを組織する必要がある。

**将来：** 継続的な次世代計算機の整備計画を推進すべきである。気候温暖化予測計算等世界トップレベルの大型計画の優先利用を保障し、科学コミュニティレベル維持のための基礎研究での利用も可能とするような、大所高所からの課題評価システムが重要である。次世代計算機の有効活用のためには、次世代計算機そのものだけでなく、研究グループの組織化や研究環境等基盤整備のための予算措置も必要である。

#### (4) 気候予測プロジェクト

**現状：** 計算機技術の進展とともに現実的な気候の再現を可能にする気候モデルが急速に発展してきた。ことに、日本の気候モデリングコミュニティは、2002-2006年度に実施された文部科学省人・自然・地球共生プロジェクトにおいて、地球シミュレータを用いて世界最高解像度の気候予測結果を算出した。日本の研究成果は、20世紀の温暖化に対する人為影響の確実化、将来における豪雨など顕著現象の増加、台風強度の増加等、IPCC第4次報告書に盛られた重要な結論に貢献し、地球温暖化問題へ世界的な対応の進展を促した。

**課題：** 気候予測の精度の向上とともに、自然災害や治水、農業、水産等国民生活に関わるより広範な分野での温暖化の影響評価の重要性が増してきており、気候とこれらの分野との連携を促進する必要がある。モデルによる予測は向上してきたとはいえ、雲に関わる過程、エアロゾル、炭素などの物質循環や生態系との相互作用等、気候システムのさまざまな面での科学的知見の不足のため、予測には無視できぬ大きさの不確実性が伴っており、環境変化に対する定量的な適応、緩和策の策定を困難にしている。集中豪雨や台風などのメカニズムの理解やモデルによる再現性も未だ十分とはいえない。自然のプロセスの解明は、コンピュータ計算を繰り返すのみでは達成されず、実際の自然を観測することが不可欠である。ことに地球的な環境問題においては、衛星などグローバルなカバレッジを持つ観測手法が重要である。また長期間にわたるモニタリングが重要である。同時に、雲粒の大きさの分布や微粒子の組成、分布、海洋中の生物物理過程の解明など、ミクロな素過程を明らかにする開拓的な観測も重視しなければならない。

**将来：** 温暖化予測の不確実性の低減は、社会的にも自然科学的にも重要な課題である。観測とコンピュータモデリングの連携、基礎科学と予測研究の連携等を推進し、人類危急の課題である温暖化被害の軽減、抑止に資するべきである。

#### (5) 海洋観測

**現状：** 大型計画としては、研究基盤としての海洋調査観測船舶、海洋観測衛星、海洋現場観測機器の運用、維持が、国内外の複数機関によってなされている。最近のアルゴ計画による3000台以上の観測網展開によるデータの取得と利用は、海洋研究にとどまらず地球科学全体においても特筆すべき成功例である。このほか、定点定置ブイ観測あるいは長距離測線の繰り返し観測も実施されているが、海洋に必要な時空間サンプリングニーズにまったく追いついていない。このことは、世界経済に響く可能性が高まる気候変動への対処と検証を要する気候予測の発展の障害となる。天然資源、生物多様性についても、同様である。

ICSUあるいはIOCの傘により国際計画が多数走っているが、その成否は、すべて当事者国内の予算支援状況による。海洋基本法により海を知ることの重要性は、法文化された。一方、近年の予想を超える油価の上昇は、観測基盤維持に重大な障害をもたらしつつある。

**課題：** 海洋基本計画は策定されたが、総合科学として、観測からモデル予測へシームレスにつながるグランドデザインが不十分である。海洋科学は、基礎から応用の広い分野をカバーしているが、海洋研究者育成の大学院ネットワークがない。品質管理された観測データを持続的に蓄積することの地球科学における重要性は、海洋においても同様であり強化不足である。基礎科学とし

て必要かつ研究者の興味を引くプロセス研究は、その成果を大型計画において大規模複雑なシステムの中における役割を検証できる体制が必要である。基礎科学と業務（オペレーション）をつなぐために半研究半オペレーショナルな観測体制の充実が必要である。

**将来：**未解決の基本プロセスが検証され、もって地球の未来予測の不確実度が減るような大型計画の姿を国内コミュニティが早急に提案すべきである。その内容は、国内へのリターンのみならず、グローバルなリターンを包含した、国民に世界のリーダーシップが見えるものが望ましい。多様な分野が協力できる基盤整備を構想することも重要である。

## (6) 深海掘削

**現状：** 統合国際深海掘削計画(IODP)は、日本（文部科学省）、米国(NSF)が主導し、この両国と覚書を取り交わした欧州、豪州、中国、韓国が参加している大型国際共同研究である。掘削プラットフォームは、「ちきゅう」、「Judies Resolution」と欧州の「特殊任務掘削リグ」から構成され、世界の海洋のほとんどの場所で掘削が可能である。科学計画は国際科学諮問組織において選定された掘削提案に基づいて立案される。掘削プラットフォームの運用は日米欧が直接に担当し、一方参加メンバーが払う分担金は、NSFに一旦集め、法人（IODP-MI）を経由して科学推進経費として使用される。

我が国では海洋研究開発機構が「ちきゅう」の運用を担当し、科学提案や研究推進は大学等の連合体である日本掘削科学コンソーシアム（J-DESC）が担当する。「ちきゅう」は2007年9月から2008年2月まで、紀伊半島沖の南海トラフにて地震発生帯掘削を行い、IODPに本格参入した。「Judies Resolution」は現在、改修中であり、2008年夏には復帰する予定である。

**課題：** IODPは非常に良く作られた計画推進体制を持っており、草の根から育つアイデアを、競争によって掘削計画に育てあげ、さらにこれを成果としてまとめるメカニズムが機能している。しかるに、最近、掘削に関連する諸費用が高騰しており、現在の予算のレベルでは、当初計画にある掘削プラットフォームの通年運用は難しい。このような計画経費の問題は、地下生物圏やマントル掘削など、これからの科学計画の立案の仕方など、計画推進体制そのものの見直しを迫るものであり、国際的なリーダーシップが期待されている。また、我が国では、計画管理や広報出版などの研究支援分野で国際的に活躍できる人材の育成も急務となっている。

**将来：** 大型計画でありながらボトムアップであるという科学本位の特性が、基礎科学と大型計画とのひとつの理想的関係の実現となることが重要である。そのためにスモールサイエンスから大型プロジェクトに育て上げる総合科学として位置づけて、大学（基礎）と研究機関（大型）との連携を促進し、成果に結びつける体制の強化が必要である。

## (7) 地震予測

**現状：** 地震学の目指す研究は、地震現象の理解と地震波を用いた地球内部構造の理解であるが、近年、その理解に基づいて、地震活動と地震に伴う諸現象の予測の研究が現実的な課題となってきた。地震被害軽減という政策的観点から、政府の地震調査研究推進本部によって、トップダウン型の地震調査研究が進められ、地震ハザード（地震動、津波）予測の研究が進展した。地震調査研究推進本部では、地震被害軽減を目指して、地震調査研究に関する国としての総合的かつ基本的な施策をまとめ、当面推進すべき調査研究計画を策定して推進してきた。このように、国として一元的に地震調査研究を推進する体制は、1995年阪神・淡路大震災の後に整備された体制であり、世界的に例がない。その結果、全国規模の地震観測・GPS観測網が整備され、活断層の調査が進み、全国を対象とした地震動予測地図の公表、緊急地震速報の実用化が実現した。現在、

今後 10 年で取り組むべき総合的かつ基本的施策策定に向け検討を行っている（政策委員会の下に専門委を設置、2008 年 8 月中旬に中間報告を取りまとめの予定）。同時に、研究者の自由な議論に基づいて研究者コミュニティのコンセンサスをボトムアップ型に形成して、測地学分科会から建議を行って実施している地震予知を目指した観測研究計画が推進されている。地震発生の予測を科学的に行うことは、地球という複雑システムにおける予測科学を進展させるために特に必要なことである。現在、次期 5 ヶ年計画の建議策定に向けて測地学分科会で検討中である（2008 年 6 月に建議を取りまとめの予定）。

**課題：**地震調査研究推進本部による政策誘導型の調査研究計画と、研究者の自発的な企画と測地学分科会の建議に基づく地震予知研究計画とは、互いに連携しつつ推進する必要がある。しかし、これらの役割分担・連携の仕組みが必ずしも明確でない。また、地震現象を理解し被害軽減に役立てるためには、長期間にわたる観測研究が不可欠である。そのための予算の確保が困難な状況にある。地震調査研究推進本部政策委員会の下に設置された専門委員会、さらには測地学分科会下の地震部会及び計画推進委員会でも、これらの課題を解決すべく議論を進めている。

**将来：**日本列島全域をカバーする地震・地殻変動観測網の整備・維持は、国として基本的に重要なことであり、今後とも地震調査研究推進本部の基で推進すべきである。特に、今世紀前半にその発生が危惧されている南海トラフ巨大地震を含め、海溝型地震の予測には海域での観測が必須であり、陸上観測網に加え海域に新たな観測網を構築すべきである。また、研究者コミュニティのコンセンサスに基づいて推進されている地震予知研究計画は、地震予知研究を広く地球科学のなかの予測科学の一分野と位置づけて、引き続き、研究者のオープンな議論に基づいて進めるべきである。その際、地震調査研究推進本部による調査研究計画との役割分担を明確にする必要がある。

## (8) 火山噴火予測

**現状：**火山噴火予測の研究分野では測地学分科会の建議に基づく火山噴火予知を目指した、ボトムアップ型の火山噴火予知計画が推進されてきた。これまで、7 次におわたって行われてきた火山噴火予知計画であるが、その間整備された大学等の観測点のデータは現業官庁である気象庁の火山監視にも活用されている。また、火山噴火予測に関する研究成果は気象庁へ技術移転され、その結果、2007 年 12 月からの噴火警報の実施に見られるように、噴火時期の直前予知の一部実現をもたらした。しかし、中長期的な予知や、噴火災害軽減に最も重要な噴火推移や噴火規模の予測については依然実現しておらず、噴火予知にむけた基礎的観測研究の重要性が指摘されている。次期 5 年計画では、更なる進展を目指して、これまで独立に進められてきた地震予知研究計画との統合が検討されている。

**課題：**火山噴火予測の研究においてはそれぞれの火山における噴火準備過程から噴火発生、終息に至るまでの全過程の理解が重要であり、長期にわたる多項目の観測研究が不可欠である。しかし、大学等においては、観測設備維持のための人員および予算確保も困難であり、火山噴火予測の観測研究にも支障が生じつつある。気象庁の保有する火山観測網は火山活動の高まりを把握するための監視機能としては有効であっても、ノイズレベルの点や、観測点配置の点で不十分なものが多く、研究用には活用できない。それどころか、気象庁の火山監視は大学の観測研究のデータが活用されて実現できたのであるから、大学等の観測設備の維持が困難になれば、わが国の火山防災力の低下も危惧される。

**将来：**ノイズレベルの低い高感度観測点は気象庁による火山監視にも有効に活用できるものである。火山噴火予測研究のための研究基盤ならびに火山防災のための基幹的な観測点として活用できる基盤的火山調査研究観測網を実現すべく、国として具体的な案を策定する必要がある。

## (9) 放射光

**現状：**地球惑星科学において放射光 X 線の利用は、高エネルギー教育研究機構物質構造科学研究所の放射光施設（フォトンファクトリー）、および同蓄積リング（AR）、高輝度光科学研究センター（Spring8）において行われている。地球惑星科学分野では、高温高压 X 線その場観察実験、X 線分光分析による微量成分分析、X 線イメージングによる岩石や隕石組織の非破壊観察などの研究が行われている。特に、高温高压 X 線その場観察実験では、ダイヤモンドアンビルおよびマルチアンビル高压装置をビームラインに設置し、これを活用することによってポストペロブスカイト相をわが国の SP8 ビームラインでの研究によって発見するなど、世界をリードする目覚ましい成果をあげている。一方、放射光を用いた高温高压 X 線スペクトルスコーピー（核共鳴散乱法、非弾性散乱法、放射光メスbauer法など）においては、地球科学への適用は始まったばかりであり、欧米に大きく水を開けられている。

近年、地球惑星科学にも有用な強力中性子源 J-PARC が建設された。強力中性子光源の物質科学への適用に関しては、欧米と先端を競っている。特に超高压極限条件での中性子回折実験においては、氷等の軽元素化合物やマグマ・メルトの高压における構造決定、含水鉱物の高温高压下における構造解明などの先端的研究が期待され、地球惑星科学分野の高压研究者は、地球惑星科学に貢献する高温高压中性子実験の実現を目指して、特定領域研究などの大型研究予算を申請している。

**課題と将来：**放射光 X 線を用いた研究においては、高温高压 X 線回折法を用いた研究で、わが国が世界をリードした。一方、高温高压 X 線スペクトルスコーピーでは、欧米に大きく水を開けられている。この分野の研究の振興を若手研究者の育成も含めて強力に推進すべきである。この点に関連して、わが国の鉱物学が X 線結晶学偏重の傾向が強く、固体の電子論にもとづいた物性論的な教育が大きく遅れている点は、改善を要する。また、高温高压中性子実験による研究は、地球惑星物質の解明に大きく貢献することから、強力に支援することが望まれる。

## 7.2 今後の課題

以上みてきたように、地球惑星科学の多くの分野で大型計画が推進されており、それらはそれぞれの計画が推進されてきた経緯を反映して固有の課題を抱えている。一方で、共通する課題も存在する。それらを抽出すると

- ① 現在進められている大型計画の中には、その主要な目的の一つに基礎科学があっても、計画の立案に研究者が関与する仕組みが明確でなく、その結果、学術事業としての位置づけが必ずしも明確になっていないものがある。
- ② 現在の地球惑星科学における大型計画のほとんどは国策型で、近未来の人類の利益を配慮してのものである。一方で、深い専門知識を持った科学者の洞察により提案される、遠未来の人類の利益に資するための、大型基礎研究も必要である。ところが、現状では、このようなボトムアップ的な大型基礎研究を展開するための予算獲得の道はほとんど閉ざされている。日本の国際的な地球惑星科学レベルを維持するためにも、改善が必要である。
- ③ 国策的大型計画と基礎科学の大型計画との連携・役割分担の仕組みが必ずしも明確ではない。また、大型研究の推進に必要な人材の育成・研究組織のあり方、大学等のボトムアップ型基礎研究と独法等の国策的大型研究との間の研究者・研究体制の関わり・協力のあり方等についても、検討が必要である。
- ④ 地球惑星科学の推進に不可欠である観測とコンピュータモデリングのための基盤的大型設備

については、その整備・維持が決定的に重要なことであるが、近年の厳しい財政事情から困難な状況となっている。

などがあげられる。

国策的大型計画が多く推進されている地球惑星科学において重要なことは、国策を踏まえたうえで如何に基礎科学の振興を図っていくか、さらには、トップダウン型の国策的大型計画とボトムアップ型大型計画それぞれの利点を活かしつつ、如何に地球惑星科学の強力な推進を図っていくかである。

上記の課題を解決し地球惑星科学の一層の推進を図るために、今後組織的な検討が必要である。特に、国策的大型計画の個々の事業にはそれぞれの目的があるものの、基礎的学術推進の観点からの提言も考慮されるような方策の検討が望まれる。なお、日本学術会議「基礎科学の大型計画のあり方と推進方策検討分科会」では、対外報告「基礎科学の大型計画のあり方と推進について」（平成19年4月10日）において、(1)基礎科学の大型計画にかかわる長期的マスタープラン・推進体制の確立、(2)ボトムアップ型と国策的大型研究のかかわり・協力と将来のあり方、の二つについて提言し、その検討を具体的にすすめるよう提案している。地球惑星科学の分野においても、この提案を踏まえて検討作業を進めていく必要がある。

## 8. 地球惑星科学の社会貢献

### 8.1 地球惑星科学の特徴

大気大循環やプレートテクトニクスのように、自然現象としての地球を知ることは、自然科学の発展において、重要な位置を占めてきた。自然科学は、真理を追究することを目標としており、科学の対象と追求する主体(つまり自分)とは、通常明確な区別がある。真理を追究する行為においては、自分が人間として生きていく行為との間に関係はなく、それぞれの知的好奇心に基づいて研究を進めることができる。

一方、地球惑星科学は人間が存在している基盤である地球に関する学問であるが故に、自分を含む社会との関係が必然的に生じてくる。石器や土器の時代から、石炭や鉄によって支えられた産業革命を経て、石油など様々な資源によって支えられている現代社会に至るまで、人間は地球の資源や空間を利用しながら社会を築いてきた。

現代社会において、地球惑星科学が直接社会に関与しているもっとも身近な例は、天気予報であろう。天気の変化を物理的事象として捉え科学的に解明したいという真理探究の要求とともに、将来の天気を予測することによって社会のために役に立ちたいという意欲が、天気予報の駆動力となってきた。地震、火山噴火や土砂災害などの予測なども同様である。これらの多くは国の事業として実施され、気象庁や国土地理院、海上保安庁海洋情報部、地質調査所(現在は産業技術総合研究所地質調査総合センター)などの国の機関が設けられている。

このように、社会への貢献は地球惑星科学の中に組み込まれているといつてよいが、その組み込まれ方は科学と社会の発展段階によって多様である。現代では、人間活動による地球への影響が強く懸念されてきており、地球惑星科学への社会からの期待は今後ますます高くなるであろう。また、自然科学としての地球惑星科学は、社会貢献を主たる原動力とする工学や農学などの応用科学とは、社会貢献に対する立場は異なっており、今後社会貢献を進めていく上では、これらの分野との連携がますます求められるだろう。

### 8.2 地球惑星科学がもたらした社会貢献

現代において、地球惑星科学が社会貢献している典型的な例として、気候変動、地震、火山噴火についてみてみよう。

**気候変動**：気候変動に関する研究は、1980年代初頭から行われたWCRP(気候変動国際共同計画)が大きな役割を果たした。このWCRPは、雲気候研究計画、熱帯海洋全球大気研究計画、世界海洋循環研究計画などの国際共同研究計画を推進した。これらに対応して、1986年に文部省測地学審議会の建議が出され、1987年から1990年にかけて、気候変動予測とそのモデル、雲の分布とその気候への影響、大気大循環に及ぼす熱帯海洋の影響、海洋混合層の実験観測、南極域の大気と海氷の年々変動、気候に対する自然的要因および人為的要因の6課題が実施された。さらに、その後「新プログラム」でも継続され、共同研究が推進された。東京大学に気候システム研究センターが設置され、そこで教育された研究者らによって、地球シミュレータを用いた「日本モデル」が開発された。また、エルニーニョに伴う気候変動の研究が、大学と国の研究所との共同で行われた。JAMSTECでは原子力船から転換された「みらい」を用い、NOAAと協力して太平洋でTRITONブイシステムを展開した。また、NASDAでは、地球観測衛星計画の展開が図られた。1996年のADEOS、

1997年のTRMM衛星の打ち上げ以降、ADEOS-2、MASR-E、GOSAT、GCOM衛星シリーズと現在まで維持され、さらなる発展が模索されている。このように1990年代後半からの気候研究者とNASDAやJAMSTECなどとの協力関係が、地球科学に新たな流れを生み出してきた。

科学と社会のかかわり方に大きなインパクトを与えたのは、1988年にWMOとUNEPにより設置されたIPCC(InterGovernmental Panel for Climate Change:気候変動に関する政府間パネル)であろう。このIPCCは、政府が代表であるという意味で、従来の国際協力研究とは性格を異にしている。また、IPCCは、「policy relevantな(政治的に適切な)」という名文句を生み出したように、科学の側からは価値判断に基づく主張を行うのではなく、現在可能な科学的知見を整理し、要約し、政治家が参照できるようにして提供することが目的である。そのため、peer reviewされた(客観性のある)印刷された結果をまとめて要約し、現在の最新の科学的知見を提供することになっている。

**地震：**地震の予測に関しても、地震学の発展は社会に貢献してきた。1960年代からボトムアップ的に5年ずつの地震予知研究計画が立案され、文部科学省測地学分科会からの建議を経て実施されてきた。この地震予知研究計画によって全国の地震観測網は整備され、多くの地球科学的な発見をもたらした。実用的な地震予知(短期的な予知)はまだ実現していないが、プレート境界地震の発生場所、規模、長期的な発生時期の予測については、一定の見通しが得られるようになってきた。6000人を超える死者を出し日本社会に大きな影響を与えた1995年の阪神・淡路大震災の後、政府に地震調査研究推進本部が設置され、地震に関する調査研究を一元的に推進するため、施策の立案、関連省庁間の連携・調整、地震活動の評価、将来の地震発生や強震動の予測などを政策的に行っている。地震調査研究推進本部では、活断層の履歴調査などに基づき、「全国を概観した地震動予測地図」を作製し、例えば今後30年以内に震度6弱以上の揺れに見舞われる確率を地図として公表している。また、全国各機関の地震観測網のデータは気象庁に送られ、地震発生直後に震源やマグニチュードが公表されている。津波警報に関しては、1980年頃までは地震後20分程度かかっていたが、現在では地震後2-5分程度で発表されるようになった。最近では、主要動が到達するまえに震源情報を発信する、緊急地震速報が実用化されてきた。このような地震観測結果がテレビやラジオを通してリアルタイムで国民に知らされるシステムが機能しているのは、世界中で日本だけである。

**火山噴火：**火山については、火山噴火予知計画発足以来、行政も同席する火山噴火予知連絡会の場で火山研究者が我が国の火山活動状況の判断を行うことにより、火山防災に貢献してきた。また、災害予測シナリオやハザードマップを含む減災助言にも取り組んできた。この間、桜島、有珠山、三宅島など、いくつかの火山で、観測体制が整備されて火山噴火予知研究が推進されたことにより、噴火の前兆をとらえ、噴火時期の直前予知ができる例が出てきた。特に2000年有珠山噴火では、噴火数日前に公表された緊急火山情報に基づいて避難指示が行われ、住民が避難したため、居住地に近接した爆発的噴火にもかかわらず人的被害は出ていない。2004年浅間山噴火でも、噴火直前に火山観測情報を出すなど、正確な噴火時期の予測は困難な場合でも、火山活動の高まりを把握し、噴火の近接を発信できるようになっている。また、噴火直後からの観測強化によって、刻々と変化する噴火推移を把握し、行政による避難地域の拡大や縮小の判断に寄与してきた。これらの研究成果を踏まえて、気象庁は2007年から噴火警報・噴火予報を業務として開始した。一方、100を越える日本の活火山の多くでは、観測はとて十分といえる状態ではない。また、火山噴火現象は極めて多様であるため、噴火前に噴火の規模や様式、推移を予測することはほとんど実現されていない。今後は観測体制の充実に加え、火山毎の詳細な噴火履歴と噴火メ

カニズムの解明による噴火シナリオの作成とその精度の向上が課題となっている。

### 地すべり等

ここでいう地すべり等とは、地すべり、崩壊、土石流など、すべての集団移動現象を指す。地すべり等については、その発生場所・時の予測やその影響評価の面で貢献してきた。防災科学技術研究所で出版を進めている地すべり地形分布図は、あと数年で我が国すべてを覆う予定である。1997年秋田県の澄川地すべりや、2004年新潟県中越地震で多数発生した地すべり、および2005年石川県羽咋市で発生して基幹送電鉄塔を破壊した地すべりなどは、これらの分布図にすでに示された箇所で発生し、この地図の有効性を示した。さらに、わが国で近年多発しているダム湛水による地すべりは予測困難である場合が多かったが、2003年奈良県の大滝ダム貯水池で発生した地すべりを契機に、ダム湛水池周辺で詳細な地形・地形調査が実施されるようになり、地すべりの初期的段階に関する理解が進んだ。降雨の土壌中への浸透挙動に関する研究も進み、これらの研究を踏まえ、気象庁では、1999年の広島豪雨災害の後、土壌雨量指数の運用段階に入り、レーダーアメダス解析雨量から土壌水分をリアルタイムで計算し、土砂災害の危険性についての評価を土砂災害警報として一般に発信するようになった。これは豪雨時に気象情報とともに一般的に報道されている。地すべり等については、明治30年以降のいわゆる砂防3法に基づいて事業が展開されてきた。しかしながら、1998年の福島県豪雨災害および1999年の広島県豪雨災害を契機に、対症療法的な対処ではなく、土地利用そのものを規制する必要性が再認識され、土砂災害防止法が2001年に施行された。これは、あらかじめ警戒区域を指定し、土地利用を規制するものである。警戒区域の策定のため、地球惑星科学の応用地質学・地形学的な貢献がなされている。しかしながら、近年の地すべり等による災害の発生は、既往の法的枠組みに含まれない場で発生し、また、広範囲にわたって影響を及ぼす場合もあり、これらに関する科学的研究が必要となっている。

### 資源・エネルギー

近年、中国やインドなどの経済発展に伴い、金属、炭化水素、ウランなどの資源エネルギー原材料が高騰しており、これらの探査・開発が急進展を遂げている。特に海底鉱物資源や大水深海域での石油・天然ガスなどフロンティア域での探査とその技術開発が急速に発展すると同時に、海底鉱物資源の起源や大水深海域の地質構造の理解など基礎的な知見の蓄積が進んだ。

海底鉱物資源においては、熱水鉱床が近未来の開発ターゲットとして、海外では商業開発に向けた準備が行われている。我が国においても海洋基本計画の策定の中で、熱水鉱床の探査・開発に向けた施策が打ち出されている。熱水鉱床の開発には、資源の形状、量などの把握から採鉱、精錬までの技術開発、そして環境影響評価の確立が必要となる。これらには、海洋地質学、地球物理学、生態学などの技術と知識が不可欠であり、省庁を超えたレベルでの協力体制の構築が重要となる。

海外では、大水深海域の石油・天然ガスの探査・開発に、まさに最先端の科学技術が導入され、巨大な投資と雇用の場となっている。しかし、我が国では、この分野の発展は大きく立ち遅れている。2008年に3次元物理探査船「資源」が就航したことは、今後の展開に向けた大きな出来事である。地球深部探査船「ちきゅう」は、資源探査にも活用できる能力がある。資源エネルギー開発においては、これらのインフラを活用した資源探査、研究機関と大学との連携、資源関係分野における人材の育成、海外企業も含めた産業界への人材供給と連携など、地球惑星科学コミュニティが貢献できる広大な分野が開けている。

エネルギーに関して地球惑星科学のもう一つの大きな貢献の一つは、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究であろう。我が国は世界第3位の53基の原子力発電所を有し、その電力の

3分の1を原子力発電に依存している。すでに使用済み燃料が大量に発生し、当面原子力発電が継続されることは不可避であることから、高レベル放射性廃棄物の地層処分は緊急の国家的課題である。原子力発電を進めている各国は、いずれも放射性廃棄物を自国の地下に処分する方針を定めているが、未だに実施に至っている国はない。特に、これらの国の中では最も地殻変動が激しい我が国の状況は、各国に注目されている。高レベル放射性廃棄物は、安定な地層あるいは岩体中に封じ込め、未来1万年以上人間圏から隔離することを求められており、従来の工学的考え方では対処しきれず、ここに地球惑星科学の貢献がある。このような長期にわたる地下環境の安定性、火山活動の長期的安定性、断層活動の評価、断層の新生の問題、地殻変動システムの安定性、などの研究面で大きな進展があった。また、地下の調査・評価手法についても、種々の物理探査やボーリング孔・コア解析に関して技術革新が進められた。

我が国では、2030年代後半の処分実施が予定されており、それに向けて日本原子力研究開発機構（旧日本原子力研究所と日本核燃料サイクル開発機構）を中心として、研究開発が進められている。現在、愛知県と北海道において、それぞれ結晶質岩と堆積岩とを対象とした地下実験施設が建設中であり、地下の調査、予測、確認、手法の改善、の技術的研究のループが回っている。今後、地下実験施設において様々な処分技術が実験・検証される予定である。

地層処分の処分場は、候補地としての立候補があることを前提として進められてきたが、立候補がなされても結局取り下げに終わることが繰り返されてきた。これは、1万年という長い期間の安定性に対する不安によるところが大きい。地球惑星科学は、地球という場を地質的時間にわたって研究しており、処分場の適正可否判断にきわめて重要な役割をになっていると言える。

### 8.3 社会貢献に関する課題

地球惑星科学が社会に貢献してきた一方で、科学の実力と社会の期待の齟齬が問題になる。同じような問題を対象としていても、科学の側からの提供できる知見と社会の側から期待される知見の間には大きなギャップが存在するのである。社会の側では、具体的な行為が、決断が求められる。一般に政策担当者は、政治的決断についての科学的根拠を求めがちである。一方、科学の側の行動基準は、「分かっていること以上の話は出来ない」というものである。したがって、科学が提供する話は、「細かく、限定的なもの」になりがちである。これに対し、社会の側からは、「要点が分からない」、「もっと具体的に言ってくれ」などと批判が寄せられるのである。最近では、地球温暖化問題などの登場により、政策的対応が求められるようになり、このような科学的が限定的な中での政治的意思決定の問題が提起されてきている。

地球惑星科学の研究成果が広く知られておらず、防災に生かされなかった例もある。阪神・淡路大震災を起こした兵庫県南部地震について、淡路島や六甲山麓の活断層の存在が一般には知られておらず、神戸周辺では大地震は発生しないと思われていた。史上最悪の津波被害をもたらした2004年インド洋津波に関しても、インドネシア・タイ・スリランカなどの被災地では、沿岸住民に津波という現象についての知識が全くなかった。特に、タイやスリランカでは、地震発生から津波到達まで2時間以上の時間的余裕があり、関係機関は大地震の発生・津波の可能性を認識できたにも関わらず、津波警報を発令して住民を避難する仕組みがなかったため、大きな被害が発生した。

科学の成果を生かして社会貢献をしようとする際には、特定のコミュニティに閉じこもってはいない効果的でない。たとえば日本学術会議では、多くの部会・分科会が自然災害に関心を持っており、地震災害に関する報告はほぼ隔年に出されてきた。これらは、それぞれの科学者コミュニティでの議論に基づいた提言ではあるが、いくつかは似たような内容であり、またこれらのう

ちのどれだけが実際に実現されてきたのかやや疑問が残る。社会貢献と言いながら、研究者コミュニティだけが自己満足しては意味がない。

一方で、社会への貢献にあたり、その時代の社会の要請に単純に応えていけばよいというものではない。社会の要求するタイムスケールは、数年あるいは長くても数十年とかなり短く、問題が起きてからにわかに対処しようとする傾向がある。最近の例としては、資源問題がある。レアメタルなどの金属や石油の需要の急激な増加と産地の偏在は経済に対して深刻な影響を与えることが、ここ数年にわかに顕在化してきた。代替も含めた新たな資源のグローバルな開発が求められているが、短時間に資金を投入するだけで解決する問題ではなく、シニアを活用してもなお圧倒的に人材が不足している。資源は、科学的にみると「地球における物質の濃集現象」であるが、その物質の有用性や価値は産業技術や経済の発展によって、これまで資源でなかったものが資源になることが常である。そうであれば、長期的には、特定の資源探査だけではなく、「地球における物質の濃集現象」を解明するための基礎科学を推進し、得られた地球情報を蓄積しておくことが、今後も地球を利用し、地球と共に生きていく社会を実現する上で、極めて重要である。ところが、従来型の資源に関しては、科学としての成熟度が高く、その多くが社会で実用化されているがゆえに、資源に関する基礎科学への社会の新たな役割が見えにくくなり、ここ数十年にわたり、人材の確保や育成を怠ってきたことに問題がある。

現在の環境に関する科学技術の大部分においても、短い時間スケール、狭い空間における対策技術に偏りがみられる。その点で、地球を研究対象とする立場から、地球惑星科学が今後果たすべき責任は、気候変動に限らず、きわめて大きい。将来において、これらの分野においても地球惑星科学は、地球で起きている現象について時間空間認識の科学としてのポテンシャルを活かし、長期的視点から、社会に対してこれまでよりさらに能動的に貢献すべきである。

## 8.4 これからなすべきこと

### (1) 基礎科学の発展

自然科学の目的は真理の追究であり、それに向かって基礎科学をさらに発展させることが最も重要である。例えば、地震の短期的な予知はまだ実用化されていないが、対症療法的あるいは経験的な方法のみに頼るのでなく、地震現象そのものの理解に向かって、観測・実験・理論・モデリングなどを総合した研究を推進すべきである。

### (2) 長期的な視点に基づく基礎科学についての社会への働きかけ

社会への貢献にあたり、時間空間を正しく認識できる地球惑星科学の特性を活かして、長期的な視点で、科学が社会において担うべき役割のあり方を、能動的に社会へ働きかけることが必要である。将来において資源や国土の利用に資する地質現象に関する基礎研究を継続的に推進し、地球科学に関する地域情報（地球情報）を着実に蓄積するとともに、長期的な観点から人材を育成し確保しておく重要性を訴えていかねばならない。

### (3) 社会のニーズの把握

一方で、社会が科学に対して何を求めているのか、社会のニーズを把握することも重要であろう。政策的あるいはトップダウンの研究は、社会のニーズに基づくものである場合が多い。また、政策提言については出しっぱなしにするのではなく、そのフォローアップも必要であろう。大型の予算を伴う研究計画や研究組織については、事前・中間・事後の評価が行われ、投資対効果的な観点も含めた外部評価が実施されている。政策提言についても、そのような追跡調査や評価が

必要であろう。

#### (4) 社会へのアウトリーチ

地球温暖化・地震・火山などの研究結果は、社会に影響するものであるから、最新の研究成果を社会に知らせるべき、アウトリーチ活動が重要である。また、公的資金で行われている研究成果を公表するのは、科学者の説明責任でもある。この際気をつける必要があるのは、個々の研究成果を宣伝するのではなく、その分野の動向をコミュニティとして社会に伝える重要性である。科学者の間で合意が得られている説とまだ論争の段階である説との区別、科学ができることとできないことなどの区別などについて、社会にきちんと説明する必要がある。科学と社会のギャップの背景には、気候変動に関する科学的な不確定性や、大地震の発生確率などについて、一般には理解されていないという事実がある。これらのアウトリーチ活動には、ある程度の訓練が必要であり、学会や機関で専属のスタッフを置く必要であろう。

#### (5) 研究者が社会貢献できる仕組みの構築

このような科学のコミュニティと社会とのコミュニケーションをさらに推進するためには、研究経験のある人材が行政に参加するなどの、社会貢献ができる仕組みが必要であろう。また、研究者側にも、研究経験を行政に生かすというキャリアパスの可能性を検討するなどの意識が必要であろう。気象庁などの国の機関や独立行政法人研究機関ではある程度行われているが、大学でも意識改革が必要であろう。また、研究者と政府や地方自治体などの政策現場、学校などの教育現場、非政府組織や一般市民とのコミュニケーションを図る必要がある。

#### (6) 国際貢献

日本では、天気予報・緊急地震速報・津波警報・噴火警報など、気象学や地震学・火山学の成果が社会で実用化されているが、諸外国、特にアジア諸国では、まだ遅れているため、サイクロンや地震・津波によって多くの犠牲者がでていいる。日本の成果を海外に技術移転することは、世界への重要な社会的な貢献である。

#### (7) 分野横断的な研究の展開とそれを推進する仕組みの構築

地球温暖化問題に関しては、「行動の時代である」といわれている。今後は、人間、社会、そして自然との相互作用を考慮した、すなわち自然科学、社会科学、人文科学を統合した新しい知の体系が必要となってくる。このような認識を受けて、大学、研究所などで、大きな組織変更が相次いでいる。たとえば、東京大学では「サステイナブル学連携研究機構」や「総合防災情報研究センター」が設立され、分野横断型の教育・研究が開始された。

分野横断型の統合的な科学を展開していくには課題も多い。既存の学問は、自身の体系を自己保存する傾向があり、新しい体系を作るには、新しい研究組織を作るしかない。また、より専門分野に特化することが一流であり、分野横断型の研究は「1.5流である」という根強い偏見がある。たしかに、専門分野の基礎ができていなければ、すぐれた分野横断型の研究はできない。それぞれの専門分野でも一流で、しかも、分野横断型の研究に転進する、という仕組みを作る必要がある。たとえば、40代のうちに、専門分野を続けてゆくのか、別の道をとるのかの判断する機会を設けることも考えられ、これは既に多くの組織で行われている、管理職になるのか、一専門家で行くのかという判断に対応する。

## 9. 地球惑星科学における国際対応の現状と将来

### 9.1 地球惑星科学における国際対応の重要性

日本学術会議の主たる目的の一つに科学における国際対応がある。この目的のために、日本学術会議は国際会議を主催するなどのほか、多くの国際学術団体に日本を代表して加入している。現在加入して分担金を払っている組織が46あるが、そのうち12組織は地球惑星科学関連である。これらはいずれも国際科学会議(ICSU)傘下の団体で、科学ユニオン4(IGU、INQUA、IUGG、IUGS)の他、関連科学団体2(IASC、ICA)、学際組織5(COSPAR、SCAR、SCOR、SCOSTEP、WCRP)、およびIUGSの下部組織が1(IMA)となっている。この他に、分担金は払わないが参加している国際学術協力事業が5件あり(IGBP、IHDP、IGCP、ILP、STPP)、これらはすべて地球惑星に関係するものである。日本学術会議には全部で30の分野別委員会があることを考えれば、1分野でこれだけの国際組織に関係している地球惑星科学分野は突出しているといっていよう。このことは、地球科学がグローバルな現象を扱うために、国際協力なしには学問の発展がはかれないという性格によるものである。

日本学術会議が発足して以来の学術における国際的な動きを考えると、1957-58年の国際地球観測年(IGY)が最も大きなイベントであったと言えよう。IGYはもともと25年ごとに行われていた国際極年を受け継いだものであり、極地の観測が大きなテーマであった。日本でも日本学術会議の勧告を受けて、1956年に南極観測が開始され今日まで続いている。しかしIGYの事業はこれだけでなく極めて広い範囲と地域に及んでいた。1957年10月にはソ連によってスプートニク1号が初めての人工衛星として打ち上げられ、これが契機となって宇宙空間科学や惑星科学などに大きな進歩をもたらしたことは鮮明に記憶されている。1960年代からのプレートテクトニクスの爆発的な発展も、この時期に広く取り組まれた国際協同事業としての海洋観測に基礎を持っているといっても過言ではない。

今日では、温暖化などの地球環境問題の重要性が増しているほか、スマトラ島沖地震-インド洋津波に見られるように、大規模な自然災害による被害が大都市化などの影響もあって増大する一方である。これらの自然現象の解明および被害の軽減のためには、国際的な協力が必須の条件であり、その象徴的な例として気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の活動をあげることができる。こうした点から、地球惑星科学における国際的な活動の重要性は今後ともきわめて大きいと結論することができる。このような前提に立って、今後10年程度の期間の国際対応にかかわる活動を考えることにする。

### 9.2 最近の情勢

かつてICSU傘下のユニオン(IUGS、IUGG、IGU等)は地質学、地球物理学、地理学など各分野の世界的な組織として国際的に大きな権威をもっていた。こうした権威は現在でも失われたわけではないが、これらの組織は他の国際的な組織と激しい競争にさらされており、必ずしも盤石な基盤を持っているとは言えない。これには、(1)多様な国際会議が頻繁に開かれ、誰でも参加する会議を自由に選べるようになった、(2)自分の学問の最先端を追うには、テーマの絞られた小規模の会議のほうが良いと考える科学者が多い、(3)ユニオンの大会は4年に1回開かれる程度なので、学問の急速な進歩についていけない、など様々な要因があるが、(4)多くの学問分野でアメリカの学会の卓越性が顕著となり、地球惑星科学でもアメリカ地球物理学連合(AGU)やアメリカ地質学

会 (GSA) などが実際上国際学会としての機能を持ち始めた、という事情も見落すわけにはいかない。もちろん、IPCC の例にも見られるように、真の国際組織からでないと言言などが世界的に受け入れられないような場合も存在し、その限りでは前述のユニオンなどの発言力は衰えていない。しかし、これらが科学の発展そのものではなくその結果得られた多様な結果をどう調和的に扱うか、という調整機能にかかわっていることには留意する必要がある。

最近ではアメリカの強力な学会に対抗するために、大陸スケールの地域的な学会が力をつけつつある。このことは地球惑星科学の分野でも顕著である。ヨーロッパでは以前から地球物理系の EGS と地質系の EUG が存在していたが、2002 年に統一されてヨーロッパ地球科学連合 (EGU) となり、現在では AGU にも対抗しうるほどの大学に発展した。アジア太平洋域でも 2003 年にアジアオセアニア地球科学会 (AOGS) が発足し、毎年学会を開いて順調に規模を拡大している。このような地域的な学会に対応する仕組みは日本学術会議には存在しない。したがって、日本地球惑星科学連合との間に緊密な連携を取って、適切な対応をとることが重要であろう。

もう一つの重大問題は、急速に進行している学術誌のオンライン化、デジタル化の影響である。この結果は少数の巨大出版社 (Elsevier など) と商業誌 (Nature など) への集中をもたらし、アメリカを除いた一般の学会にとっては苦しい状況を招きつつある。学会のもっとも重要な機能が研究集会開催と学術誌の出版であることを考えると、旧来のユニオンが影響力をそがれる原因はこの点にもある。今後の国際対応を考える場合、この点も見落としてはならないと思われる。

### 9.3 現状の問題点と今後の課題

#### (1) 受け身な国際対応

現在の地球惑星科学分野の国際対応における最も重大な問題は、多くの場合に対応の仕方が受け身であることだろう。そのことは、国際共同観測事業などで日本からの提案で実現したものが極めて少ないという事実にも示されている。すべてというわけではないが、国際団体が何かを決めて各国の組織に連絡してくると、日本の国内組織がその方針に沿うように行動を起こす、というのがよくあるパターンである。「向こう」が何も言ってくなければこちらから動くことはないし、ましてこちらから「向こう」に出向いてこちらの言い分を通すことなどは考えていない。一昔前にオリンピックについて言われたように「参加することに意義がある」といった態度である。もちろん全てがそうだというわけではない。国際組織の中で積極的に発言し、また活発な活動している組織もないではないが、そのようなケースは全体から見ればかなり少ないと言わざるを得ない。

こうなってしまったのにはやむを得ない事情もある。かつて日本はアメリカやヨーロッパに比べて圧倒的に貧しく、国際的な組織に加えてもらっても国内から発信できるものはほとんど持っていなかった。したがって、国際組織に加わることは進んでいる外国から知識を取り入れるという面が強かったのは当然ともいえる。しかし時代は変わり、例えば宇宙探査について言えば、現在では日本発の衛星や探査機は、NASA や ESA のものと完全に互角とは言えないにしても、ほぼ匹敵する成果を上げている。またスーパーコンピュータや深海掘削船でも、世界最高性能に近いものを日本は持っている。普通の研究室レベルであっても、十分な性能の測定器や実験器具を備えているのはむしろ普通になった。こういう状況下では、昔とは違って日本から世界へ向けた科学的な発信はもっと強まって当然と言える。

#### (2) 国際研究集会に出席する際の意識の問題

科学研究費補助金が外国旅費に使えるようになってから、日本の研究者が国際研究集会などに

出席することは極めて容易になった。その結果、例えば IUGG、IUGS 総会クラスの大きな研究集会では、日本からの参加者は 500 名程度と、アメリカと開催国を除いた他の諸国に比べるとはるかに多い人数がいるのが普通になっている。しかしこれらの参加者の多くは、自分の論文の発表（それも多くの場合ポスター）だけはまじめに取り組むが、あとの時間は外国の科学者と議論をするでもなく、日本人仲間で過ごしていることが多いようだ。こうした安易な行動で、研究分野の国際的なリーダーたちに自分を認識してもらい貴重な機会を逸している。さらに日本からの国際発信という点で特に問題なのは、こうした人たちがビジネスミーティングにほとんど出ないことである。

国際学術団体は一般的に言って民主的な運営がなされている。組織全体の役員は各国代表の投票によって選出されるにしても、その他の重要事項（中間以下の役員、次回のシンポジウムの課題、コンビーナ、主要招待講演者、国際共同研究事業の提案など）はビジネスミーティングでの議論の結果で決めるのが普通である。もちろんこういう会議には、関心を持った研究者ならだれでも出席し発言できる。会議の結論は、場合によってはそれ以後数年間の国際的な研究動向を左右することもあるほど重要なものであるが、日本人参加者の大多数はほとんど姿を見せない。彼らにはこうした会議の重要性についての基本的認識が欠けているように思われる。物事を取り決める会合に出席せずに国際的な発信などできるはずがない。多くの参加者が国民の税金に支えられてこうした集会に出席していることを思えば、この点を早急に是正する必要がある。

### (3) 国際活動を担う人材の不足

国際組織の中での活動としては、研究集会への参加、成果の発表から始まって、組織の役員を務める、シンポジウム・共同研究事業などの提案、研究集会の招致や開催、など多様な形態がある。上に述べたように、多くの研究者のかかわり方が参加・発表の段階にとどまっていることが日本の国際対応の大きな弱点である。もちろん言語のハンディキャップは大きい。カナダ・オーストラリアなどは必ずしも大国ではないが、これらの国の研究者たちが国際的な場で大活躍していることは、英語を母国語とすることを抜きにしては考えられない。しかし、英語圏でない国でもフランス・ドイツなどは多くの国際組織で強い存在感を示していること、また最近特に中国の科学者が国際的な役員などを積極的に引き受けていることなどを考慮すれば、日本人科学者の低調な国際活動の原因を言語のせいにするわけにはいかない。

一例として国際組織の会長などの役員を務めることを取り上げると、これは組織の今後の方針を決めて実行に移すのが役目だから、当然自分のあるいは日本発の考えを提案し実現する機会を持つことになる。しかし残念ながらこうした役割を担いうる能力を備えた人は、そう沢山はいない。たまたまそういう人がいても、日本で考える「国際対応」の常識と違うからか、なかなか国内ではその活動が評価されないのも残念なことである。この人材不足の問題の原因は、結局人材を育てるシステムが整備されていないことと、国際的な活動が国内ではあまり評価されないことにあると思われる。

### (4) 体制の問題

学術における国際対応は日本学術会議の重要な機能であるが、予算の制約やこれまでの歴史的な経緯、あるいは国際組織の性格から、すべての国際学術協力について日本学術会議が対応する体制が組み立てられているわけではない。例えば、医学系の国際組織などでは、学協会が多額の加盟金を払って独自に国内委員会を作って対応している場合もある。また地球惑星科学に関連した範囲でも、統合国際深海掘削計画 (IODP) や政府間海洋科学委員会 (IOC) など、文部科学省が主に対応するために作った組織に科学者が個人として参加している場合などが存在する。しかし大まかに言

えば、地球惑星科学分野の国際対応は日本学術会議で対応している場合が多いと言えよう。これは前の述べた IGY 以来の伝統による部分が多い。日本学術会議は、国際学术交流において、ナショナルセンターとしての役割を果たすべきであるという検討が進んでおり、今後は外部にある組織で国際対応しているものも含めて連携を強化しようという方向に動くと思われる。その意味では、今後日本地球惑星科学連合との連携を強めて、地球惑星科学分野の国際対応の全体に対し日本学術会議において状況把握できるよう体制を作っていくべきであろう。

#### 9.4 課題を推進するためになすべきこと

地球惑星科学における国際的な発信を強めるためにはどうすればよいか。これから 10 年ぐらいの期間を考えた場合、先に述べたような問題点や課題を解決するためには以下の諸点に力を注ぐ必要があると思われる。

##### (1) 特に若手の研究者から国際発信力を持った人材を育てること

国際発信力を強めるために長期的に有効な対策は、若い研究者の中から有能な人材を育てることに尽きるとと思われる。現在、国際的な場で活躍できる人材を育成するシステムは日本には存在しない。人材を育成するシステムを築きあげることこそ緊急を要する課題である。この点で参考になるのはフランスのやり方ではないかと思う。フランスでは重要な国際会議ほど意図的に優秀な若手を派遣してくる。こうした実践を通して国際的な場で活躍できる人材を育てているのであろう。日本でも十分参考にする必要がある。

我々が取りうる手段としては、日本として主張したい意見をまとめたうえで、国際研究集会に参加する若手研究者にビジネスミーティングに出席し発言することを要求し、帰国後に報告を求めることが考えられる。このような活動を国際対応分科会及び国際関係の分科会・小委員会が継続して行えば、若手研究者の中から有力な人材を育てること大きく寄与するであろう。

##### (2) 国際的な活動を正当に評価する仕組みを作ること

現在の研究者の評価は論文など業績に大きく偏っており、そのほかには教育やコミュニティへのサービス（学会役員、学術誌編集委員、シンポジウムコンビーナなど、多くの場合国内活動）がある程度加味される程度である。国際的な活動となると、どんな国際学会に参加しているかを見る程度で、真の意味での国際的な発信に直結する活動、例えばビジネスミーティングでの発言や役員として国際組織を運営することなどは、ほとんど評価の対象になっていない。このような状態を改め、研究者の国際的な活動が正当に評価されるようにしなければならない。

これらは地球惑星科学のみでなく、どんな研究分野でも多かれ少なかれ抱えている問題である。しかし日本全体として評価の仕組みを変える（例えば科研費の書式の中に国際活動の状況を記述させる）ことは、必要であるが実現にはかなりの時間を要するであろう。そこで地球惑星科学分野だけでも早急実現可能な方策を立てる必要がある。例えば、国際対応分科会が連合や各大学関連学科の協力を得て、科研費など公費で国外の集会に参加した研究者から、その集会で行った国際発信活動の簡単な報告を求め、それらを取りまとめてウェブ上に公開することで活動状況をだれにでもわかるようにするなどが取りうる手段ではないだろうか。

##### (3) 狭い分野や国際組織の枠にとらわれず、限られた人材を有効に生かす仕組みを作ること

日本の国際対応では往々にして狭い分野などにとらわれて、その中だけで国際的な対応をしようとしてうまくいかないことが多く見られる。これまで研究分野ごとに寸断されていたために、

個々の分野内で動員できる人材の数がそれほど多くない。人材不足のままでは何とか対応しようと四苦八苦しているケースがしばしばあるが、こういうことは発想を変える必要がある。もっと広い関連した分野も含むコミュニティから最適な人材を動員することを考えるべきである。こういう点からも、旧来の研連や狭い専門を追求する学会をベースにした対応には限界がある。人材の育成、動員に当たっては、第20期から日本学術会議、学会双方の体制が広く地球惑星科学全体を対象とするように変わったメリットを十分生かすのでなければならない。

#### (4) 国際対応を強めるための体制を強化すること

日本学術会議において地球惑星科学委員会のもとに国際対応分科会が発足したことは、地球惑星科学の分野における国際的な活動を推進するうえで重要な転換であった。第19期まで、日本学術会議には国際組織ごとに対応する研究連絡委員会（研連）や特別委員会が設置されており、個々の組織への対応はこれらの委員会がそれぞれ独立に行っていた。このため、同じ地球惑星科学系といっても共通する戦略もなかったし、受け身の活動が批判されることもなかった。第20期から旧来の研連が廃止されたため、地球惑星科学分野のすべての国際的な活動が国際対応分科会で集約して扱われるようになった。各組織への対応の実務は国際対応分科会の下に設置された小委員会で行われるが、以前に比べて格段に横の連絡が良くなったと言える。また学会の側でも日本地球惑星科学連合という全分野にまたがる大きな組織ができたので、多くの国際組織に統一して対応を考えるやり方に都合が良い体制となっている。

その後 ICSU のユニオンに対応する小委員会は分科会に昇格したが、国際対応分科会が国際活動の全体に対して責任を持つ体制は変わっていない。また、国際対応分科会には拡大役員会が設置され、全体の方向性を議論するとともに緊急時にも適切な行動がとれる仕組みが作られた。今後、この分科会が国際対応の共通目標を設定し、戦略を考える中心的機関として機能するべきである。特に拡大役員会は、地球惑星科学分野の国際対応全般に関して司令塔的な役割を果たすことが期待される。そのためには、日本学術会議が対応する活動だけでなく、政府が直接関与している国際活動などにおいても、地球惑星科学の範疇に入るものについては国際対応分科会で取り上げて議論できるようにする体制整備が必要である。

第21期以降になっても、この統一された対応の仕組みを強化し、地球惑星科学の日本からの情報発信を強めるよう努力すべきであろう。

#### (5) 国際組織や地域的組織への対応を、連合との緊密な協力のもとに分担して行うこと

ユニオンなどの国際組織の権威はかつてほど強固なものではない。しかし IPCC などの実績からわかるようにこうした真の国際組織には現在も重要な役割があり、それをアメリカやヨーロッパなどの地域的な学会が代行するというのも、当分の間は起こらないであろう。また、これらの学会はその地域性のために、日本の科学者が乗り込んで強い影響力を行使することは考えられない。ユニオンなどの組織には以前から加盟していて、これまでにいろいろな対応をした経験も持っており、今後もこれらの組織を通して日本からの国際的な発信を行うことが最も有効であろう。これらの組織において日本の研究者が役員を務める、組織の今後の行動について適切な意見を出し採用させる、など運営面で主導性を発揮することが重要である。国際対応分科会はこうした活動を強力に推進できるよう体制を強化しなければならない。

しかしそのような体制がさらに強固なものになっても、日本学術会議内の組織に様々な活動をサポートする力量がないことも明らかである。このため、地球惑星科学連合との緊密に連携をとることが様々な場面で重要になる。特に AOGS など地域的な組織に対応する仕組みは日本学術会議側にはないので、この面では連合に先頭に立って活躍してもらう必要がある。これまでの国際的

な学術に対する貢献から考えて、中国など新興国の勢いが著しい現在においても、アジア地域ではまだしばらくの間は日本がリーダーシップをとるのが当然であり、そういう自覚に基づいてAOGSなどに対応する必要がある。

## 10. 日本学術会議と地球惑星科学連合の役割

地球惑星科学は、地球惑星科学連合に加盟する学協会が 50 にもおよび、従来単一のコミュニティとしての行動、意思の形成、提言、社会に向けて情報発信等をおこなうことは不可能であった。これは単一の学会を中心に活動をすすめてきた他分野との決定的に大きな違いである。しかし、科学においてもグローバル化が進行し、国際的・国内的発進力が必要となり、分野のありかたを根本的に見直さねばならない段階となっている。温暖化問題、地震、サステナビリティなどをはじめ、地球惑星科学がその予測性をもって社会に直接貢献することの必要性はますます高くなっている。他方、地球惑星科学をふくむ自然科学研究の道に進む若い人材の減少、PD 問題、国立大学法人化にともなう教員数の減少や基礎教育・研究をささえる基盤設備費の減少など、コミュニティ全体として問題解決にあたらねばならない問題も増加している。国際的には、AGU による国際コミュニティの集中化が顕著となり、それに対抗するべく結成された EGU の結成による世界の 2 極化の進行となりかねない状況のなかで、日本としての発言力の増強は急務となっている。

このような情勢のなかで、日本学術会議地球惑星科学委員会と地球惑星科学連合は、日本で唯一のこの分野の統合組織である。この両者がそれぞれの役割を認識し、協力し、活動をおこなうことが、この分野全体の今後の発展をささえ、この分野が社会的責任を果たすことにつながるという。

### 10.1 日本学術会議

2005 年の日本学術会議の大改革にともない発足した地球惑星科学委員会は、気象学、海洋科学、惑星科学、地球電磁気学、地震学、固体地球科学、地質学、自然地理学、地理情報学、一部人文地理学等、きわめて広範な分野を含んでいる。また、会員・連携会員は学協会からの推薦等、ボトムアップ的に選出されるのではなく、会員がメリットベースで会員を選ぶ（コオプテーション）ため、学協会などの科学者コミュニティとの直接的なつながりをもたないという特徴をもつ。一方、日本の地球惑星科学のコミュニティは、旧来きわめて多くに細分された構造をもち、それらが互いに独自の活動を展開してきたため、分野に共通する研究・教育の在り方、人材育成の問題を議論する場がなかった。さらに重要なことは、グローバル化、競争型社会への転換が強まるにつれ、分野としての社会に向けたさまざまな情報発信の重要性が高まっているにもかかわらず、コミュニティとしてのまとまった対応をとることがままならないという決定的な状況が発生しつつあることである。

日本学術会議の任務は、(1) 内閣府直属の組織として、学術のあり方等に関する政策提言をおこなうこと、(2) 科学者コミュニティ連携の促進、(3) 国際交流の推進、(4) 社会とのコミュニケーション・情報発信、である。このいずれを進めるに当たっても重要なことは、コミュニティとしての統一的な行動と、そのためのコミュニティ内部の統一的な意思の形成である。学術会議地球惑星科学委員会は、第 20 期においては会員 6 名、連携会員 54 名というわずかな人数で構成され、しかも学会等コミュニティと直接的関係をもたないという状況であり、社会と直接的なコミュニケーションをとることはむずかしい。したがって、学術会議の役割は、コミュニティの統一的な意思の形成と、政策側あるいは社会に対して意思の表出をするために必要なあらゆることの実行ということになる。“地球惑星科学の現状と課題”は、我が国の地球惑星科学コミュニティとして初めての統一的な現状分析と将来構想の検討であり、統一的な意思形成のためのツールとなるものである。

政策提言に関しては、日本学術会議は特定分野の圧力団体あるいは利益代表ではないので、学

術あるいはそれを支える大学等に共通する問題とその解決方法に関する提言をする必要がある。地球惑星科学分野の抱える問題の多くも、他の分野と共通するものが多く、今後においては、より積極的にこの提言機能を利用すべきである。

科学者コミュニティ連携促進にあたっては、日本地球惑星科学連合との連携が基軸となる。

国際交流に関しては本書第9章に書かれているように、地球惑星科学は他の分野とは比較にならない数の国際組織が存在し、グローバル化進行のなかで、我が国のあるべき姿の議論にはじまり、実際的な行動が求められている。日本学術会議第20期地球惑星科学委員会は、統一的対応をとることを可能とする土台作りを進めてきた。今後の問題としては、より明確な統一的意思形成のための努力、政策提言力の増強、国際発進力の増大があげられる。そのためには、日本地球惑星科学連合とのより強固な連携が重要である。

社会とのコミュニケーションに関しては、人類が抱える今日的課題の多くが、地球惑星科学のベースなしには解決できない問題であることから、今後一層重要となる役割である。今後の地球惑星科学がこのことを十分に自覚し、これまで以上に成果の社会還元、社会の求める人材育成、様々な場・レベルにおける教育、行政・マスコミ等における正確な情報発信等を進めることが強く求められている（第8章参照）。

これらの責務を果たしてゆくため、将来を担う人材育成は決定的に重要な課題である。日本学術会議地球惑星科学委員会は、大学・大学院における教育・人材育成問題に関し、複数の分科会において現状調査、問題点の指摘、提言などをおこなっている。また、初等中等教育における地学教育、大学入試制度のありかたなど、多面的な検討を進めている。さらに、全国地球惑星科学系専攻長・学科長会議の開催などを通じ、人材育成の点からも分野としての統一的な議論の場を作り、組織化を進めることは重要である。日本学術会議第20期地球惑星科学委員会は、2008年度日本地球惑星科学連合の場において、初めて全国専攻長・学科長会議を開催した。今後、定期的に会議を開催し、教育・研究・人材育成等にかかわる共通の問題への解決策・方針を論ずる場としてゆく予定である。

## 10.2 日本地球惑星科学連合

日本地球惑星科学連合は2005年、日本の地球惑星科学関連24学会が集まり発足した。明治以降の近代日本の科学史上はじめて、地球物理学、地質学、鉱物学、地理学等に関する主要な学会のほとんどを網羅する総合的な連合組織が形成されたのである。発足後3年が経過したが、相次いで関連学協会の合流が進み、2008年3月現在、47学協会が加盟、その総会員数は約5万人に及んでいる。これは世界的に見てもアメリカ地球物理学連合、欧州地球科学連合と並ぶ規模になっている。この連合の発足は、それまでの地球惑星関連学協会合同大会開催の長年の蓄積と、学術会議の再編への直接的対応が契機となったものであるが、その国際的な規模にふさわしい飛躍的發展を計る時期にある。

日本地球惑星科学連合は、行政機関、営利企業、政治団体、マスコミなどから独立した学術団体として、「日本の地球惑星科学の総合的發展を果たす」ことを目的としており、その役割・事業展開は主要な3つの柱から構成される。

第1の柱は、学術団体の中心的使命である地球惑星科学の發展を計る主体としての役割・事業展開である。その基本は学術大会の開催と権威ある国際ジャーナルの発行である。これらに関して加盟学協会における長年の活動との調和を計ることが、日本の地球惑星コミュニティの総合的強化のために重要である。そのために、研究対象と方法の違いによる従来の学協会の活動と共存

しつつ、これまでの分野と方法を超えて求められる学術の交流と発展の強化が重要である。国際的競争力を強化するための学術大会の国際化と国際雑誌の発行を実現することは急務である。

第2の柱は、学術団体としての社会貢献である。地球惑星科学は地球環境問題、自然災害問題、資源エネルギー問題などを通して社会と直結している科学であり、その科学の成果にもとづく社会貢献事業の展開は重要な役割である。これらの課題に対して関連する加盟学協会を支援し地球惑星科学コミュニティ全体としての貢献にリーダーシップ発揮することが日本地球惑星科学連合の重要な役割である。

第3の柱は、地球惑星科学の教育普及提言事業における役割である。日本における地球惑星科学分野の意見集約や合意形成をはかり、対外的な窓口組織として国や一般社会に対して提言や情報発信を行うことである。とくに、日本学術会議との連携による我が国の科学技術政策への提言、初等・中等・高等教育における地学教育や理科教育、専門教育問題への対応、地学・地理オリンピック事業支援、報道機関を通じた特筆すべき研究成果等の情報発信、一般市民を対象とした教育・啓蒙・アウトリーチ活動等を積極的に行うことが重要である。

今後、我が国の地球惑星科学の発展、国際活動、社会貢献、人材育成などのあらゆる面において、コミュニティの結束と発展のため、日本学術会議地球惑星科学委員会と密接な連携のもと、その役割を強化してゆく必要がある。