

日本の展望—学術からの提言 2010

報告

地球惑星科学分野の展望  
—地球の未来予測への挑戦—



平成22年（2010年）4月5日

日本学術会議

地球惑星科学委員会



この報告は、日本学術会議 地球惑星科学委員会での審議結果を取りまとめ公表するものである。

### 日本学術会議 地球惑星科学委員会

委員長	平 朝彦	(第三部会員)	(独) 海洋研究開発機構理事
副委員長	大谷 栄治	(連携会員)	東北大学大学院理学研究科教授
幹事	安仁屋政武	(連携会員)	筑波大学名誉教授
幹事	滝沢由美子	(連携会員)	帝京大学文学部教授
	碓井 照子	(第一部会員)	奈良大学文学部教授
	岡部 篤行	(第三部会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	北里 洋	(第三部会員)	(独) 海洋研究開発機構海洋・極限環境生物圏領域領域長
	永原 裕子	(第三部会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
	中島 映至	(第三部会員)	東京大学気候システム研究センター教授
	安成 哲三	(第三部会員)	名古屋大学地球水循環研究センター教授
	荒井 良雄	(連携会員)	東京大学大学院総合文化研究科教授
	石田 瑞穂	(連携会員)	(独) 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域特任上席研究員
	井上 一	(連携会員)	宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部長
	今脇 資郎	(連携会員)	(独) 海洋研究開発機構理事
	入倉孝次郎	(連携会員)	京都大学名誉教授・愛知工業大学客員教授
	尾池 和夫	(連携会員)	財団法人国際高等研究所所長
	大久保修平	(連携会員)	東京大学地震研究所教授
	大久保泰邦	(連携会員)	産業技術総合研究所産学官連携推進部門総括主幹
	岡田 尚武	(連携会員)	北海道大学理事・副学長
	岡田 義光	(連携会員)	独立行政法人防災科学技術研究所理事長
	奥村 晃史	(連携会員)	広島大学大学院文学研究科教授
	上出 洋介	(連携会員)	京都大学生存圏研究所特任教授
	蒲生 俊敬	(連携会員)	東京大学海洋研究所教授
	木村 学	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
	久城 育夫	(連携会員)	東京大学名誉教授
	熊木 洋太	(連携会員)	専修大学文学部教授
	河野 長	(連携会員)	東京工業大学グローバルエッジ研究院特任教授
	斎藤 靖二	(連携会員)	神奈川県立生命の星・地球博物館館長
	佐々木 晶	(連携会員)	国立天文台水沢観測所教授

佐竹 健治	(連携会員)	東京大学地震研究所地震予知情報センター教授
佐藤 薫	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
柴崎 亮介	(連携会員)	東京大学空間情報科学研究センター 教授・センター長
高橋 栄一	(連携会員)	東京工業大学大学院理工学研究科教授
高橋 桂子	(連携会員)	(独) 海洋研究開発機構地球シミュレータセンタープログラムディレクター
田村 俊和	(連携会員)	立正大学地球環境科学部教授
千木良雅弘	(連携会員)	京都大学防災研究所教授
津田 敏隆	(連携会員)	京都大学生存圏研究所教授
鶴田浩一郎	(連携会員)	元宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部長
富樫 茂子	(連携会員)	(独) 産業技術総合研究所評価部首席評価役
中田 節也	(連携会員)	東京大学地震研究所教授
中村 和郎	(連携会員)	駒澤大学名誉教授
西田 篤弘	(連携会員)	元総合研究大学院大学理事 (宇宙科学研究所名誉教授)
野上 道男	(連携会員)	東京都立大学名誉教授
長谷川 昭	(連携会員)	東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター名誉教授
花輪 公雄	(連携会員)	東北大学大学院理学研究科教授、研究科長
浜野 洋三	(連携会員)	(独) 海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域プログラムディレクター
春山 成子	(連携会員)	三重大学大学院生物資源学研究科教授
氷見山幸夫	(連携会員)	北海道教育大学教育学部教授
深尾 良夫	(連携会員)	(独) 海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域長
藤井 敏嗣	(連携会員)	東京大学地震研究所教授
松井 孝典	(連携会員)	東京大学名誉教授
松岡 俊文	(連携会員)	京都大学工学研究科社会基盤工学専攻教授
松本 紘	(連携会員)	京都大学総長
松本 良	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
丸山 茂徳	(連携会員)	東京工業大学大学院理工学研究科教授
三上 岳彦	(連携会員)	帝京大学文学部教授
森田 喬	(連携会員)	法政大学工学部教授
山形 俊男	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
山下 輝夫	(連携会員)	東京大学地震研究所教授
圀本 尚義	(連携会員)	北海道大学大学院理学研究院教授

若土 正暁	(連携会員)	北海道大学名誉教授
渡邊眞紀子	(連携会員)	首都大学東京大学院都市環境科学研究科教授

※ 名簿の役職等は平成 22 年 3 月現在

## 要 旨

世界の人口は、現在、68億人に達しており、2050年には90億人を越えると予想されている。エネルギー、食料、資源、水などの消費増加、その結果もたらされる環境への負荷増大、さらに地球生態系の大変化など、惑星としての地球は、その歴史の中でも、最も劇的な変動の最中に置かれている。私たちと地球は何処へ行くのか、世界の誰もが深い関心を抱いている。しかし、その予測は簡単ではない。それは地球が複雑なシステムから構成されており、そのシステムの挙動は、まだ十分に解明されていないからである。

地球惑星科学は、地球惑星システム（ここで地球惑星システムとは、地球と太陽系全体を構成する要素から構成される自然体系を指し、地球システムとは、その中で特に地球の自然および社会体系をいう）の進化とダイナミクスを理解し、その将来予測を目指す総合的な学問領域であり、同時に生命の存在と進化について本質的な理解を与えることのできる学問である。我が国は、地震や火山などの地球活動の最も活発な地域に位置し、また、最大の大陸と最大の海洋の境界という、地球環境を把握するうえで極めてユニークな場所を占めている。我が国はまた、常に自然災害と向き合わなければならない運命にある。したがって、地球惑星科学の振興は、我が国の国益に直接つながるものであり、また、国際的な使命でもある。

地球惑星科学の振興と普及のためには、大型探査研究計画や継続的な観測調査とモデル研究の推進、それらと有機的に連携した基礎研究と教育のネットワーク、さらに地球の理解と人間社会のあり方を考える力を養う一貫した教育システムの構築が不可欠である。現在、中等教育において地球惑星科学の履修率は極端に低く、国民の科学リテラシー基盤の低下が心配される。研究推進と教育振興への施策は、従来、独立に行われてきたが、これら全体を俯瞰し、必要な施策について、総合的かつ戦略的な企画・立案・評価を行う必要がある。以下、本報告での提案を5つの項目にまとめた。

### (1) 基礎科学としての地球惑星科学の発展

地球惑星科学は、宇宙惑星科学、大気海洋科学、固体地球科学、地球生命科学、地球人間圏科学に大きく区分できる。現在、これらをさらに統合し、地球史から人間生活までの時間スケール、太陽系から分子レベルまでの空間スケール、微生物から人間までの生物活動スケールを俯瞰した総合的な学問が誕生しつつある。これによって、地球惑星システムの挙動と進化を様々なスケールで記述し、さらに未来の状態を予測することが可能となる。地球の未来予測や、人間社会の将来のあり方への指針の確立のために、地球惑星科学は大きな役割を果たすべきであり、それを可能とする新しいパラダイムが、今、生まれつつある。そのような活動の中心として、関連学協会がまとまり地球惑星科学連合が作られた意義は非常に大きい。しかし、これからの発展を支えるために、継続性のある基礎研究と教育への資金的、人材的な支援が不可欠である。

## (2) 持続的観測の重要性

地球惑星システムは、その挙動が不可逆的であり、また、人間活動の影響が著しい現在では、非常に複雑な現象が新たに発生している。このような現象には予測が極めて難しいものがあり、それを把握するには、持続的な観測以外に手法は存在しない。例えば、大気炭酸ガス濃度、大気酸素濃度の継続的な観測こそが、現在の地球環境変動を考察する上で最も基礎的かつ重要なデータをもたらしてきた。近年、競争的資金を基礎とした効率性を強調するような“選択と集中”の結果、長期的視点からみた重要な計画は、次第に淘汰される傾向にある。これらの長期観測の維持、継続なくしては、人間社会の未来を予測することは困難であり、その中断は許されるべきものではない。地球惑星科学研究コミュニティは、これらの長期観測の継続を強く求めるものである。

## (3) 大型研究計画の推進

地球惑星科学の分野には、まだまだ未踏のフロンティア領域が存在し、その探査には大規模な研究施設が必要であり、また、多くの研究者の共同作業（ネットワーク研究）によって、探索が可能となる場合が多い。このような大型計画は、国際共同研究によって推進されるので、我が国のプレゼンスを示し、また、成果の普及などにおいて、学問の普及にも中心的な役割を果たす。大型研究もまた、長期的な視点に立ち、その支援を国が全力で行うことが必要である。大型研究には、従来は、大きく国策型とボトムアップ型があったが、今後の大型研究においては、両者の特色を生かし、企画・立案から実行・評価まで、研究者コミュニティが主体となり、推進する体制を築く必要がある。大学、共同利用研究機関、研究開発型独立行政法人、さらに民間企業などが一体となって推進できるような制度設計が必須である。また、大型計画全体について俯瞰し、国際的視野から戦略的に取り組む体制を、日本学術会議などに設置すべきである。

## (4) 社会的課題への挑戦

現在ほど、地球環境、生態系、エネルギー、自然災害など地球と人間の関係について、多くの問題が指摘されている時代はない。地球の資源や環境許容度などの有限性が明らかになり、人間社会の持続性と未来社会のあり方が日々議論され、また、様々な対応策が提案されて実行に移されつつある。これらの問題は、グローバルであると同時に地域的な課題とも密接に関連している。さらに考える時間スケールによっても、様々な側面が見えてくる。すなわち、これらの課題は、すぐれて、地球惑星科学的課題そのものである。しかし、現在、これらの課題への科学的基礎の理解や対応への科学的アプローチがおろそかにされ、経済的、あるいは政治的対応が優先されつつある。このままでは、未来へ、大きな負の遺産を残す可能性が否定できない。そのためには、地球惑星科学は社会・人文科学を包含した新しいパラダイムを構築して、課題解決のために全力をあげなければならない。このために地球惑星科学コミュニティは研究・教育において新たな挑戦を継続する必要がある、また、社会に対し、科学・技術の重要性、特に地球科学技術者の必要性について、メッセージを発信し続ける必要がある。

## (5) 人材の育成と学問の普及

子供の頃、月を双眼鏡で観察したり、山の中の貝化石に驚いたり、海の波を何時までも眺めていた体験を持つ人は多いだろう。このような身近な体験こそ、地球惑星科学のみならず、自然科学への導入であり、その好奇心や探究心を育て、さらに真理の探究へと導いて行くことが人材の育成につながる。すなわち、研究コミュニティーの育成は、初等教育から始まり、また、その道筋は、家庭的、社会的環境にも大きく左右される。さらに、大型研究などの支援には、社会的な理解が必要であり、社会の知的レベルと興味のある方が大きな影響を与える。地球惑星科学は、身近な現象を基礎としながら、様々なレベルでの教育が可能であり、また、恐竜展などの人気から見ても一般市民の関心も非常に高い。然るに、地学の中等学校教育における履修率は異常に低く、また、大学入試においても非常にマイナーな科目となっている。地球惑星科学コミュニティーは、総合的な科学リテラシー構築の中で、自らの位置づけを明確にするために、今後、さらに力を尽くすべきである。



## 目 次

1	地球惑星科学とは.....	1
2	基礎科学としての地球惑星科学の現状と課題.....	3
	(1) 宇宙惑星科学.....	3
	(2) 大気海洋科学（気候システム科学）.....	4
	(3) 固体地球科学.....	6
	(4) 地球生命科学.....	7
	(5) 地球人間圏科学.....	9
	(6) 継続的な基礎研究の維持.....	11
3	大型の地球惑星フロンティア研究の推進.....	12
	(1) 宇宙惑星探査.....	12
	(2) ジオスペースの環境科学と地球観測.....	13
	(3) 気候予測プロジェクト.....	14
	(4) 南極観測.....	14
	(5) 深海掘削.....	15
	(6) 地震と火山の観測と予測.....	15
	(7) 今後の課題.....	16
4	社会的な課題への新たな挑戦.....	17
	(1) 地球環境と生態系の保全.....	17
	(2) 自然災害と防災.....	18
	(3) 資源・エネルギー問題.....	19
	(4) 持続可能な陸域と海域の利用.....	20
	(5) 政策策定のための地球惑星科学の重要性.....	21
5	「地球を好きになる」教育とアウトリーチ.....	23
	(1) 教育とアウトリーチの重要性.....	23
	(2) 総合的基礎素養と地球惑星科学.....	23
	(3) 社会へのアウトリーチ.....	24
	<参考文献>.....	26

## 1 地球惑星科学とは

人間が地球を他の天体から初めて眺めたのは、1969年、アポロ計画によって月面に到着した宇宙飛行士によってである。荒涼とした月面のかなた、宇宙空間に浮かぶ地球は、青く、白く、まさに宝石のように輝いていた（図1）。この映像によって、私たち人間は、地球がまさに有限の大きさを持つ、そして限りなく美しい天体であるとの共通認識を持つにいたった。それから40年の歳月が過ぎた。



図1 月面に浮かぶ地球

2008年、「かぐや」撮影

1969年に世界の人口は、37億人であった。現在、それは68億人に達しており、2050年には90億人を越えると予想されている。エネルギー、食料、資源、水などの消費の増加、その結果もたらされる環境への負荷増大、さらに地球生態系の大変化など、惑星としての地球（今後、惑星地球と記述）は、その歴史の中でも、最も劇的な変動の最中に置かれている。私たちと地球は何処へ行くのか、世界の誰もが深い関心を抱いている。しかし、その予測は簡単ではない。それは地球が複雑なシステムから構成されており、そのシステムの挙動は、まだ十分に解明されていないからである。

地球システムは、地球を構成する多数の要素が複雑に関連した「多圏複雑系」システムである。このシステムは、主に太陽放射エネルギーによって駆動される表層環境システムと、放射壊変エネルギーや重力ポテンシャルの解放を基幹とする地球内部システムから構成され、地球の誕生以来、そのエネルギー収支が地球の状態を支配してきた。しかし、近年、人間活動が地球表層システムの一つのサブシステムとして顕著に機能するようになり、地球システムは地球人間圏システムと呼べるほど大きく変貌した。

地球惑星科学は、地球と人間の活動を成り立たせている多くのサブシステムに関し、過去から現在にいたる諸現象を観測して変動メカニズムの根本原理を捉え、地球の将来予測を可能にしようとする学問である。地球惑星科学の研究の方向は様々である。地球を太陽系の一惑星、また、太陽系を銀河内の一惑星系とみなし、生命の存在する地球の普遍性と特殊性をより客観的に理解することをめざす方向、固体地球や惑星内部の進化・変動を統一的に理解する方向、海洋や大気の運動や電離圏から磁気圏におよぶ高層大気の運動とそれら多層間相互作用の理解を目指す方向、太陽活動の変動が地球周辺の宇宙空間（ジオス

ペース) や地球大気環境に及ぼす影響の理解と予測を目指す方向、地球と生命の 40 億年以上にわたる共進化を理解する方向、マルチスケール複雑系の変動の理解と予測のための大規模計算を通じ計算機科学としての理解を目指す方向、地球表層部分で展開される人間の諸活動と地球の相互作用をフィールド調査やリモートセンシングをはじめとする情報機器で捉えて分析し、その情報を蓄積して社会に開かれた研究基盤とする方向など、様々な研究がある。

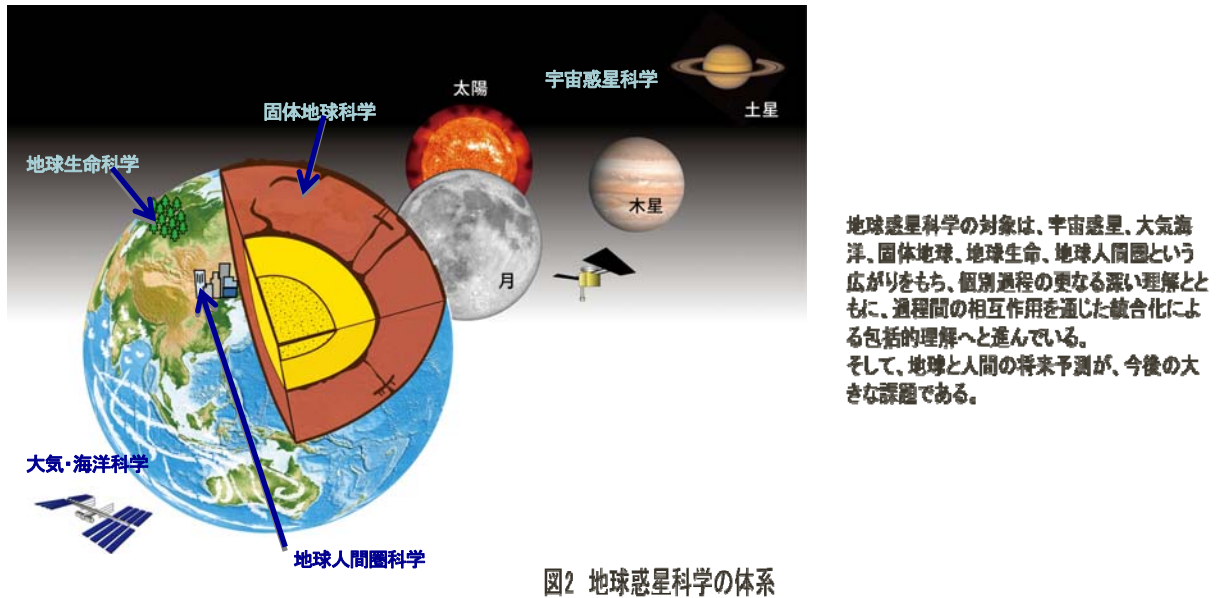
現在、これらをさらに統合し、地球史から人間生活までの時間スケール、太陽系から分子レベルまでの空間スケール、微生物から人間までの生物活動スケールを俯瞰した総合的な学問が誕生しつつある。これによって、地球惑星システムの挙動と進化を様々なスケールで記述し、さらに未来の状態を予測することが可能となる。

太古から、人間は地球そのもの、あるいは惑星としての地球の運動などに依存して活動を行ってきた。例えば、時、暦、天体の位置関係に基づいた航法などは、古来、人間生活の基本を担っている。鉱物資源や化石燃料などを通じて宇宙そして地球から恩恵を受けるとともに、一方では、地震や火山噴火などの地球活動から災害を被っている。地球温暖化に象徴される環境問題、地滑り・土砂災害、砂漠化・水不足など、人々の生存にかかわる出来事は、全て惑星地球の活動に起因する。

地球惑星科学は、人類の持続的な繁栄に貢献する知恵を提供する必要かつ不可欠な分野である。地球惑星科学は、生命を含む地球惑星システムを俯瞰した壮大な自然観を構築するとともに、人間社会からの視点として人文・社会科学を包含した新しいパラダイムを構築して、我々の直面する課題の解決に貢献する。このために地球惑星科学コミュニティーは、研究と教育に関して新たな挑戦を継続する必要がある、また、地球惑星科学のメッセージを、社会へ発信し続ける責務がある。

## 2 基礎科学としての地球惑星科学の現状と課題

日本学術会議地球惑星委員会は20期に、記録『地球惑星科学の現状と課題』[1]を取りまとめた。これに基づき、以下では基礎科学としての地球惑星科学を、宇宙惑星科学、大気海洋科学、固体地球科学、地球生命科学、地球人間圏科学の五つ(図2)に分け、その現状と課題を述べる。



### (1) 宇宙惑星科学

「宇宙惑星科学」の究極の目標は、星・惑星系の形成と進化の法則を理解することにある。とりわけ、太陽系における地球とそこに棲む生命の位置づけを経時的に把握すること、また、宇宙における太陽系自体の普遍性と特殊性を理解することである。

最近の画期的な進展として、太陽系外惑星が1995年以降次々と発見されてきたことが挙げられる。主星のすぐそばを回る巨大惑星(ホットジュピター)や長楕円軌道をもつ巨大惑星といった、太陽系とは大きく異なる惑星系の発見により、宇宙における惑星系存在の普遍性が明らかになり、太陽系を様々な惑星系の1つとしてその特徴を探るといった新たな視点が導入された。その上、従来の太陽系形成の標準モデルを超えて、太陽系外惑星の多様性をも説明する新たな汎惑星系形成論が組み立てられつつある。これにより、太陽系外惑星において海を持ちうる(すなわち地球型生命の存在しうる)惑星の存在が予測可能となりつつある。

もう一つの大きな進展は、惑星・小天体・惑星間空間探査である。とりわけ、日本において人工衛星による固体惑星探査が実現されたことは、宇宙惑星科学が新たなフェーズに入ったことを意味する。「あけぼの(1989年打ち上げ、以下同様に打ち上げ年)」、「ようこう(1991)」、「GEOTAIL(1992)」に続いて、「れいめい(2005)」、「ひので(2006)」が打ち上げられ、太陽からジオスペースへのエネルギー輸送、太陽フレア・サブストーム・磁気嵐等巨視的構造の時間変化、粒子加速過程、磁気リコネクションに

よる太陽フレアや全地球的なオーロラの発生などを明らかにしつつある。固体惑星探査では、「はやぶさ（2003）」による小惑星イトカワ探査は、衝突破片の再集積（ラブルパイル）という小惑星モデルを実証するとともに、月以外の太陽系天体の試料が獲得される可能性を残している。「かぐや（2007）」による月探査は、世界で初めて月全球の詳細画像や地形図、重力や放射性元素、磁場の正確な全球分布などを取得し、今後の月探査に大きく貢献するとともに、表側と裏側の性質が異なる月の二分性の起源やマントル組成に関する新たな知見を示した。さらに、アメリカによるスターダスト計画により持ち帰られた彗星の塵の分析結果は、初期太陽系の高温過程、ガス円盤における大規模な物質移動など、理論的には不明確であった事実を明らかにし、今後の始原的小天体探査の課題を明確にした。

また、多点ネットワーク等の地上観測によるジオスペース・超高層大気科学の進展もめざましい。北極、中緯度および赤道に設置された大型レーダー、地磁気・光学・GPS・短波レーダー観測網により、地球の磁気圏や電離圏の3次元的な描像がさまざまなスケールで得られるようになった。これらの知見は、惑星大気変動機構の普遍的な理解に役立つだけでなく、ジオスペースの環境科学という新たな分野を形成していくであろう。

宇宙惑星科学における今後の重要な課題は、惑星系起源・進化の多様性の実証的な理解、惑星や惑星間空間のダイナミクス・物質循環・進化についての理解、さらには工学的・実用的な側面への応用にある。太陽系外惑星研究の進展は、宇宙における生命すなわち宇宙生物学（アストロバイオロジー）という、新たなサイエンスの重要分野を切り開き、惑星科学・天文学のみならず、大気物理、大気-海洋相互作用、生命進化史などより広い分野を巻き込み、発展しつつある。惑星大気・磁気圏探査の進展は、太陽系内のさまざまな惑星探査計画に広がり、火星においては太陽風による大気のはぎとり、水星においては希薄大気構造および惑星磁気圏、木星においては巨大磁気圏における粒子加速等の課題に発展している。それらはさらに、惑星大気や磁気圏物理の普遍性と特殊性の解明という次の課題に結びついている。探査やサンプルリターンにより持ち帰られる宇宙物質の研究は、惑星形成論や天文観測との連携により、実証的な惑星系進化論に発展しつつある。また、それを支える室内実験の重要性も浮かび上がってくる。このように、今後の宇宙惑星科学は、探査、理論、分析、実験などの多様な研究の相互作用により進展するといえる。それを保障するのは、それぞれの分野・研究手法における研究の進展と同時に、大学間、大学と宇宙航空研究開発機構（JAXA）をはじめとする研究機関、天文学や生命科学などの分野との連携である。

## (2) 大気海洋科学（気候システム科学）

「大気海洋科学」は、地球の大気と海洋を含む地球表層系を対象とする科学分野である。地球表層系の挙動は気候現象そのものであるから、これを「気候システム科学」と呼ぶこともできる。そのなかで起こる物理、化学、生物にかかわる過程と、大気と海洋が接する陸域表層の水循環や植生の研究も重要な研究分野である。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

問題に対応するための応用科学的側面を併せ持つ。

この両側面に関わる研究は相互に影響し合いながら発展してきた。例えば、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、その根本的理解には、対流現象や湿潤大気の物理学を発展させる必要があった。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となった。

現在、大気海洋科学は、地球環境に最も大きく関わる分野として、一層その研究領域を広げつつある。社会ニーズにも支えられ、大気汚染・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、人間活動をも含む炭素循環と温暖化の問題などが、重要な分野として急速に発展してきた。我々の理解が深まるにつれて、それら個々の現象は非常に強い相互作用を持っていることが明らかになってきた。そのために個々の現象のより良い理解と予測問題の解決のために、気候システムを大きく超えた「地球システム」として捉える研究が発展しつつある。その意味では、理学と工学、人間圏、社会経済に関わる接点も重要になってきており、地球システム科学パートナーシップ (ESSP) などに象徴されるような多圏複合的な研究を益々推進する必要がある。

このような大気海洋科学の研究における我が国の現状は、世界的にみても高いレベルにあると言える。その背景には、現象をマイクロからマクロまでシームレスに捉えるための、広域の地上や海洋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モデリング技術、データ解析技術、そして、それらを支える大規模計算機技術の発展がある。また、その多くは、国内と国際の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。持続性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益々重要になることは世界的な研究動向と各国の支援体制を見ても明らかである。我が国では、「地球シミュレータ」の始動による温暖化現象の研究を初めとする気候モデリングの発展が著しく、超高解像度の全球非静力大気モデルのような、世界をリードする研究が生まれている。このような我が国が得意とする計算科学・技術に根ざした大気海洋科学研究は今後も大きく発展するポテンシャルを持っている。

今後は、比較的脆弱な観測的研究、および観測結果をモデルに取り込むデータ解析研究を、一層増進する必要がある。そのためには、気候をよりきめ細かくモニターするための現場観測ネットワークの充実、地球観測衛星の一層の整備が必要である。このような観測体制の整備とモデル研究を統合することによって、大気と海洋が活発に相互作用する熱帯域と、観測データが乏しいが、今後、全球規模の影響を及ぼすと考えられる極域の双方における研究を推進する必要がある。特に大気化学、雲と対流、エネルギー収支の観測体制の整備とそのモデル化が重要である。温暖化や大気汚染に伴う対流圏の変化と、それとは異なるより上層の大気の変化、および上下結合の研究も引き続き行う必要がある。海洋においては、より高精度な熱塩循環像の解明と、そのなかにおける海洋渦の役割、沿岸海洋や海氷場の構造と変化を理解する研究などが重要な課題である。さらに、我々の社会に大きな直接的影響を与える陸域の水循環、雪氷、植生の応答の問題

を大気循環と海洋循環に結合された形で理解する必要がある。

また、古気候研究は、深海掘削、氷床掘削によって大きく発展し、大気海洋科学の重要な分野としての地位を確立した。今後は、全地球史における大気と海洋の役割や物質循環の理解だけでなく、現在問題となっている温暖化の将来予測の精緻化にとっても必要な完新世（過去1万年間）の高精度環境変動復元を一層推進する必要がある。

このような大気海洋科学の発展には、将来にわたり超高速計算機環境の維持と、ネットワーク研究体制の推進が不可欠である。

### (3) 固体地球科学

「固体地球科学」は、地球の固体表面から中心核に至る地球内部について、地球創成から現在に至る時間スケールでの諸現象を解き明かそうという研究領域である。固体地球科学が解明すべき具体的現象には、地殻から上部マントルにいたる相対的に浅い地球内部現象として、時間スケールの短い地震・津波・火山噴火・地殻変動などの現象、時間スケールの長い地形形成、造山運動、大陸海洋の離合・集散・進化などである。また、それらを支配する表層流体圏や地球深部との相互作用を含む物質・エネルギーの流れである。一方、地球深部のダイナミクス研究が解明すべき現象は、超高温・超高压におけるマントル・中心核の物質とその物性・状態、マントル対流と地球ダイナモ、その表層の現れである諸現象との関連、それらを包括した固体地球の進化である。

比較的浅い地球内部現象に関しての最近10年ほどの進展は、次のようであった。① 地震研究においては稠密な地震・GPS 測地観測網の配置、観測情報処理システム・方法の発展整備、実験・モデル研究の発展によって、新しい展開がもたらされた。とくに低周波微動・地震・地殻変動など収束プレート境界域の理解が格段に進展し、地震の長期予測向上に貢献している。② 火山研究では、噴火の噴煙柱ダイナミクス3次元モデル、噴火直後の火道掘削によるマグマの発泡と噴火様式の関係解明、火山地震観測に基づく噴火予測等において顕著な進展をみた。③ 物質・エネルギーの流れに関わる研究では、大陸物質や水のマントル深部への大規模な還流と上昇の理解、マグマ生成における海洋地殻成分の大きな寄与の理解、熱水活動の物質循環における役割の理解、深海掘削による付加体成長の動的・定量的解明、陸上に露出した地震発生帯の研究などにおいて、大きな前進があった。④ 表層流体圏との相互作用に関わる研究では、乾燥・湿潤などの地域的気候の激変、地球史における全球凍結・温室気候などの全球的環境変動と、山脈形成・大陸海洋配置などのテクトニクス、そして物質循環の関係の研究が推進されている。

地球深部ダイナミクス研究の最新の重要な成果として、以下が挙げられる。① 最下部マントル相当の温度圧力条件で現実にポストペロプスカイト相が発見するという実験的発見があった。また、② マントル遷移層が地球内部の最大の貯水庫である可能性が高圧実験から指摘され、プレートの沈み込みに伴う水輸送、地球内部での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化した。これらの進展の背景として、③ 地震波トモグラフィ法の発展により、地球内部の地震波速度構造の3次元不均質性

が詳細に解明されてきたことが挙げられる。④ さらに、初期地球の中心核形成が数千万年程度の比較的短い事件であったとする解明結果も大きな成果である。

固体地球科学の今後の課題として、以下が挙げられる。① 地震研究では、地震の長期予測から中期予測への発展が期待される。海域での地震・津波観測網の整備と高精度の地震・津波情報の即時伝達システム構築は重要である。また、海洋研究開発機構（JAMSTEC）の「ちきゅう」による南海トラフ域での掘削によって、海溝型巨大地震の理解が飛躍することが期待される。孔内長期観測を陸海域観測と結合し、沈み込み帯で世界の群を抜いた成果が期待できる。また、「ちきゅう」によるマントル掘削は、早期に実現すべき、国際協力の重要計画である。② 火山研究では、マグマ・流体の挙動解明や噴火シナリオに基づく噴火推移予測の精度の向上、火山噴火の短期的・直前予知の実現が期待される。③ これらの現象を長時間・広空間へ敷衍し、地殻進化、地球内部の大規模物質エネルギー循環とダイナミクスを明らかにする研究が重要である。その際、鍵となる地質体や岩石などの定量的研究を推進し、理論的・観測的・実験的研究と結合することが重要である。④ テクトニクス・気候変動の相互作用、さらに生命進化をリンクさせる研究は、固体地球を超えた境界領域として今後促進すべき研究である。

また、今後の地球深部ダイナミクス研究では、以下を指摘できる。① 最近の海洋底における地震学的、電磁気学的、測地学的観測技術の飛躍的向上による地球内部の詳細な解明において、中心核の条件を実現する超高压物質科学を結合し、マントル・コアの全プロセスの解明に着手する段階に入ると期待される。② 超高压下での液体、固体の流動現象の研究と強力な光源（X線、中性子線等）を結びつけた現場リアルタイム観察実験によって、極限条件での物質理解が格段に進むことが期待される。③ 素粒子を用いた固体地球観測は、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。

固体地球科学を発展させている手法の他領域への波及も期待される。例えば、惑星表面の分光解析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の観測技術、化学分析技術は、サンプルリターンによる宇宙惑星科学に適用されよう。超高压物質研究は、木星型惑星や太陽系外惑星の内部構造やダイナミクスの研究へ広がるであろう。最近可能となった重元素の安定同位体比の高精度分析は、地質試料へ適用することにより、古気候解析精度の飛躍的向上を通じて気候将来予測の向上につながるであろう。また、ナノスケール試料について、軽元素も含む広範な元素や分子の同位体、バイオマーカー（生物地球化学的な指標となる化合物）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であろう。

#### (4) 地球生命科学

「地球生命科学」は、地球と生物について、それらの創成から現在に至るまで、相互に関わりながら進化・変遷してきた過程を明らかにする研究領域である。地球生命科学は、生物について、なぜ地球に生命が繁栄しているのか、なぜ地球には多様な生物がいるのか、では宇宙ではどうなのか、など、生命の起源、複雑化、多様化に関する、ある



いは絶滅に関する原因とプロセスの全てを解明することを目指す。また、地層や岩石に賦存する有機物について、その生物地球化学プロセス、岩石鉱物との相互作用などを明らかにする。生物源エネルギーである石油、石炭、天然ガス、ガスハイドレートなどの成因や背景に関する研究も地球生命科学の重要な課題である。

地球生命科学は、地球科学、惑星科学、生物学などの関連分野の研究の発展に伴い著しく進展した。例えば、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、掘削科学そして宇宙・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、冷湧水、嫌気水塊、超深海、地下圏などの極限環境に生きる原始的な生物の発見とその適応戦略の理解が進んだことに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ことにより得られた成果は、以下のようにまとめられる。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、「地球外からの寄与」の重要性が指摘され、地球上の熱水環境における化学進化について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。② 隕石・彗星有機物の分析などにより、地球外有機物と生命との関連が詳細に議論されるようになった。③ 極限環境生物の研究や惑星探査により、火星・エウロパ・タイタン・エンケラドスなどが、生命生存可能な惑星・衛星である可能性が高まった。④ 地球上の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なりつつある。⑤ 遺伝子の分子系統樹は、地球上の生物が、地球の黎明期に真正細菌・古細菌・真核生物の3群にすでに分かれたことを示した。⑥ 生命の初期進化解明にも関わる新しい分野として、地下生物圏に関する研究が進展しつつある。⑦ 地球上の生物の多様性が、固体地球を含む地球史イベントと相関していることが明らかになりつつある。⑧ 地球史を通じて離合集散を繰り返す大陸と海洋の分布、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、真核生物の絶滅と進化が起こったことが明らかにされつつある。

また、今後の中心的な課題は、以下のものである。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ことも含めて生物の初期進化を解明し、生命の起源に迫る。この先には宇宙や惑星における有機化学／生命科学研究がある。例えば、地球外に残る原始惑星環境（小惑星、彗星、エウロパ、エンセラダス、タイタンなど）から生命誕生過程の直接的な証拠を得るとともに、地球極限環境や地球外環境での新たな生物圏の検出を目指す。② 地球生命史の全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。進化解明の鍵となるモデル生物の全ゲノム解析も視野に入れるべきである。③ 地球と生物との元素や物質の分配を明らかにし、地球創成以来の物質循環の進化を、生物源エネルギー資源との関わりもふまえて明らかにする。

この分野では、「ちきゅう」や宇宙探査機によるフロンティア探索、新しい分析・実験装置、生命科学との連携による新しい科学の創生など、進展が目覚しく、将来、地球惑星科学の中核的分野となると予想され、強力な支援体制の構築が急がれる。

## (5) 地球人間圏科学

「地球人間圏科学」の主な研究対象は、地球表面、即ち陸域と海域における自然現象、および、自然と人間の活動(経済、社会、文化活動を含む)が相互に関連しあつて織りなす諸現象である。そのような現象の調査、観測、測定、記述(地図化)、データ蓄積・管理、分析、モデル構築、予測、計画・政策策定、伝達・視覚化などの研究をする。その大きな特徴は、自然科学、工学、人文・社会科学の視点を複眼的に持つところにある。自然の側から地球人間圏科学を考える場合、自然の成り立ちと人間環境に影響を与え得る自然現象が主要な課題となる。地球惑星科学の幅広い分野がこれに関わるが、なかでも従来の自然地理学、地形学、地質学、応用地質学、堆積学、地震学、火山学、第四紀学、海洋学、水文学などが深く関わっている。一方、人間活動の視点からは、人文科学・社会科学と強く結びついた人文地理学や人類学、考古学、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。

近年の地球温暖化を含む地球環境の大きな変化は、人間の産業活動によって引き起こされた可能性が強い。地球人間圏科学では、単にこれを気候の変動として研究するのではなく、人間社会との相互作用として把握し、環境変動の原因、人間社会への影響、今後の予測と対応策など、幅広い領域から、この課題にアプローチする。

人間的な時間スケールにおける地球環境変動や自然災害など、人間が活動し自然現象の影響を受ける場所での諸事象の理解は、この 10 年間に大きく進展した。たとえば、海洋底や氷床などから得られる記録の解釈が進み、氷河時代、完新世、歴史時代の気候変動の比較ができるようになり、また、それと文明史などとの対応が研究されるようになった。すなわち、海洋底堆積物や湖沼堆積物の微化石や黄土、土壌などの分析のみにとどまらず、人類学や考古学が明らかにする人間の歴史との対応についても検討が進んでいる。

また自然災害の研究においても、理学と工学そして人文社会科学との連携が進み、新しい防災科学が発展してきた。たとえば、地震学においては、人工物などに直接に影響す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ようになった。また、トレンチ発掘による活断層研究および数 10 年スケールでの確立予測や被害予測のハザードマップが作られてきた。遺跡における液状化の証拠や津波堆積物の地質学・地形学的な研究は、過去の地震や津波の規模や頻度を明らかにする上で有効であった。さらに、地震や降雨で発生する地滑り、崩壊、土石流などのマスマーブメントのメカニズムについても、GPS を用いた観測網などの整備によって理解が進み、一部は降雨による土砂災害警戒情報発信に結びついた。一方、関連する社会科学分野では、災害が起こる現場で地域の情報基盤や社会組織がどのように自然災害と関係するかの解明、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ている。

地下利用の拡大に伴い、様々な地下調査・可視化技術が開発された。地下水の調査方法やシミュレーションモデルが高度化し、地下水汚染管理の手法が確立されてきた。

ここ10年間、石油・天然ガスの探査、開発手法は大きな進歩を遂げた。3次元物理探査手法の精密化、解析手法の高度化によって数千mの地下の状態が非常に詳しく解析できるようになり、探査効率が向上した。さらに深海油・ガス田開発は目覚しく、大西洋やメキシコ湾では、岩塩層の下部、3000mの海底下5000m以上の深部への掘削が始まっている。一方、我が国は、メタンハイドレートの探査において世界に先行している。

一方、二酸化炭素の地層貯留技術(CCS)の発展も進み、ノルウェー沖では、実用化が開始されている。さらに地下での流体移動や破壊現象の解明は、放射性廃棄物の地層処分技術と不可分であり、今後の地球科学と工学の連携が極めて重要となる。

海底鉱物資源の探査・開発も新しい局面を迎えている。2008年11月に国連大陸棚限界委員会に大陸棚延伸の申請がなされた。大陸棚調査は、海洋基本法の制定のもと、我が国が一体となって行った事業であった。審査にはさらに数年を要するが、我が国の経済水域内における、莫大なコバルトリッチ・クラストおよび熱水鉱床の存在が明らかになった。これからの資源安全保障を考えると、これらの、さらなる探査、開発手法について早急に着手する必要がある。一方、再生可能エネルギー（太陽光、風力、波力、地熱など）の研究と開発もまた、地球人間圏科学にとって、ますます重要になる分野である。

陸域と海域、とりわけ両者が隣接し相互の影響が強い陸域-縁辺海域は、生産活動、消費活動など多くの人間活動が集中するところであり、食料、鉱物、水、エネルギーなどの資源を提供するとともに、温暖化ガスの放出と吸収や汚染の発生と浄化、廃棄物の投棄の場ともなっている。それ故に、温暖化をはじめ自然災害、資源問題などの地球環境に関わる深刻な問題が山積しているところであり、また自然災害の多くが起こる場でもある。中でも、自然と人間の共生が崩れつつある地球環境危機の時代の様々な制約的条件下における陸域と縁辺海域の利用の在り方とそれに至る道筋を提示することと、それらに関連する地球環境・災害問題や食料問題の解決に役立つ知見と情報ベースを社会に提供することが求められている。

地球人間圏分科会は以上の認識の下で、提言『陸域-縁辺海域における自然・人間の持続可能な共生へ向けて』[2]を2008年6月に取りまとめ、その具体化に向け地球情報基盤の整備、分野横断的研究の推進、政策の推進と教育の充実を緊密に連動させた総合的な取り組みを提唱している。

資源・エネルギー・環境に関する施策については、国家的な長期戦略に基づく必要がある。これをどのように進めるのか、については、地球惑星科学の視点が不可欠である。我が国の地球惑星科学コミュニティーは、理学、工学、人文社会科学を融合した地球人間圏科学の体系化、定量化、精緻化を急ぎ、実践で応用しながら、地球と人間の関係に関する新しいパラダイムの構築を図っていかなければならない。

## (6) 継続的な基礎研究の維持

地球惑星システムの挙動は、高密度で継続的な観測調査とサンプル・データの蓄積、そして解析、モデル化などを通じて初めて理解される。その活動記録は、歴史的・地理的な情報を含めた時系列的なデータとして蓄積される。多くの地点における観測と調査を数十年、数百年と継続することを通じてのみ、絶え間なく変動を繰り返している惑星地球の姿を理解し、その成果を将来予測に繋げることができる。地震や火山噴火、大気・海洋・地球内部・惑星の観測、生物多様性の観測など、変動を繰り返しながら推移する地球や惑星の実態は、継続的な観察や綿密な現地調査、観測データの積み重ねがなければ把握できないのである。例えば、約 60 年前にキーリングらがハワイで始めた大気中の炭酸ガス濃度の継続的な測定が、地球大気への人為的な炭酸ガスの放出に伴う濃度の上昇をデータとして示したことが好例である。しかし近年、短期的な効率や成果を偏重し、数年では結果が現れにくい長期的な調査観測やそれを支える基礎研究を軽視する傾向が強まっていることは憂慮すべきである。

地球惑星科学の研究には、継続性、長期的な視点の導入が最も重要であり、基礎研究や観測体制の維持に関しては、ゆるぎない国の支援が不可欠である。

### 3 大型の地球惑星フロンティア研究の推進

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的要請から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(図3)。しかし、トップダウン型であっても、大型研究において展開される科学はまさにフロンティアを切り拓くものであり、大型研究を抜きに地球惑星科学を語ることはできない。大型研究には多くの研究者、特に若手研究者が関わっており、人材育成の上でも極めて重要な役割を果たしている。また、地球惑星科学で取り扱う現象は全球規模であることから、国際協力と共同研究が不可欠であり、世界的な視野に立った研究体制の構築が常識となっている。このような大型研究のありようについて、日本学術会議からは20期に对外報告『基礎科学の大型計画のあり方と推進方策検討分科会』[3]が、また記録『地球惑星科学における国際対応』[4]が取りまとめられている。大型研究はそれぞれ独自の目的、組織形態で遂行されるため、ここでは計画ごとに記述する。



図3 地球惑星科学の大型計画の例

#### (1) 宇宙惑星探査

宇宙惑星科学は、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月からは宇宙関係の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きた。しかし、宇宙基本法(2008年5月28日、法律第43号)が成立してよりは、内閣の宇宙開発戦略本部の下、関係府省が一体となって施策の推進を図ることとなった。この体制の下で宇宙惑星探査をさらに活発に進めてゆかなければならない。

日本の飛翔体を用いた宇宙惑星科学は、X線天文学を皮切りに、超高層大気、磁気圏・プラズマ物理、太陽、ガンマ線天文学などの分野において多大な成果を上げてきた。また最近においては赤外線天文学の分野でめざましい進展をあげつつある。そのような中で、最近では、固体惑星探査が一つの重要な位置を占めるようになってきた。とりわけ月探査や惑星探査に関しては、国策として資源探査・月面利用などが看板に掲げられているが、その本質的な内容は科学探査に他ならず、世界最先端の科学的成果を追究することが求められている。また、今後の宇宙惑星科学探査においては、NASA、ESA（欧州宇宙機関）等との国際連携により第1級のミッションを遂行することが必須である。

今後、宇宙惑星科学のコミュニティーが一体となって、実現可能な探査のロードマップを作り、その実現に向けて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ついて、これを科学的意義の高いものにしてゆかなければならない。一方で、JAXA のはやぶさ計画やNASA のディスカバリー計画のようにコミュニティー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、コミュニティーの発展のために重要である。さらにコミュニティーを支える大学等の研究者が、教育研究業務を継続しながら、強い動機をもち宇宙惑星探査ミッションに参加できるよう、長期的に安定でかつ人事交流を円滑にする仕組み（予算、組織）を整備すべきである。

## (2) ジオスペースの環境科学と地球観測

太陽活動が宇宙環境・地球環境に及ぼす影響を理解・予測する科学は、ジオスペースの環境科学として、益々その重要性を深めていく。その成果は、宇宙天気予報に代表されるように、通信・放送・測位・地球環境監視等を目的とする人工衛星や有人宇宙活動の安全・安心な運用に資する。また、太陽活動に起因する地球環境変動を理解することは、人為起源の地球環境の変動を予測する上でも重要な要素である。これらのジオスペースの環境科学は、人工衛星計画と相補的に実施される全国の大学や共同利用機関が地上からのグローバルな拠点・多点観測として、世界各地のフィールド観測点において推進してきたが、これらの観測の整備と長期運用は益々重要になり、我が国がリーダーシップをとって国際的な観測プログラムを推進することが必要である。

地球システムを理解するためには、全球をカバーすることのできる人工衛星による全球観測システムが不可欠で、その発展と適切な維持を今後とも重点的に進めるべきである。従来の大気と海洋、陸域表層に関する観測に加えて、環境変化を監視するための地球表層系の詳細な性質の観測、生態系と生物の全球動態の観測、地球エネルギー収支と各部分系の相互作用の観測、固体地球構造の観測などに関する観測技術と解析技術の発展が急速であり、その有効な利用と衛星観測システムの構築が必要である。また、モデルによるデータ同化技術の発達により、現業ミッションで投入されている衛星観測システムのみならず、先端的な研究目的で投入された衛星システムや地上観測網のデータも相補的に利用可能になりはじめている。従って、今後の衛星観測システムの設計は、地上の観測網の同時利用や多目的利用の観点から十分に検討し、最先端研究の発達と社会に関わる諸課題の解決のために効率よく貢献するミッションを確立すべきである。また、

最先端観測技術とそれによる高度な研究レベルの維持のための国家予算の集中的投入とともに、公益性の高いものは世界で広く薄く負担すべきであり、国際連携、特にアジアにおける連携による開発組織の確立を国際的に提唱する必要がある。

大型海洋観測は、気候変動、生態系変動、生物多様性モニタリング、天然資源など、社会的要請の大きい分野である。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、地球科学全体に特筆すべき成功例である。しかし、全体としてみると、現状の観測網と運用体制は海洋に必要な時空間サンプリングニーズに全く追いついていない。国際科学会議（ICSU）あるいはユネスコ政府間海洋学委員会（IOC）の傘により国際計画が多数行われているが、その成否が全て当事者国内の予算支援状況によること、油価の変動が観測基盤維持に重大な障害をもたらすことなどの問題を克服しなくてはならない。今後必要なことは、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であり、それを支える大学や共同利用機関、研究開発機関などのネットワークを強化することが重要な課題となる。

### (3) 気候予測プロジェクト

「地球シミュレータ」を用いた世界最高解像度の気候予測は、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[5]に盛られた重要な結論に貢献した。社会の要請は、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予測と評価の重要性にあり、その精度の向上のためには、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、地球システムのより定量的な評価、集中豪雨や台風などの気象災害の予測の高度化などを進める必要がある。そのためには、プロセス解明のための観測強化、より総合的なモデルの構築、観測データの同化、それらを支える計算機の性能の向上、衛星によるグローバルな観測、長期間にわたるモニタリング等、多面的かつ統合的な取り組みが必要である。また、長期間の気候変動や地球環境変動に関する理解をモデルと実証の両側面から進めることも重要であり、地球史などの研究との融合もさらに重要さを増している。気候予測に関しては、比較的十分な予算措置がなされてきている。地球惑星科学が社会の期待に応えて一層大きな成果を上げることが重要である。

### (4) 南極観測

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。また、数年内に設置予定の大型大気レーダー（PANSY）により大気科学に新たな展開がみられることが期待される。これからの南極観測は、地球規模の気候・環境変動にかかわる最も重要なデータを得るための観測と、地球史、宇宙・惑星科学の最先端を切り開くサイエンスの場としての二つの役割が科されている。とりわけ、ドームふじ基地は、南極を利用する新た

な学問の土台となりうるものであり、そのための物資輸送や運用が焦眉の課題である。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観測に参加できる体制が必要である。また、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。

## (5) 深海掘削

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、欧州、豪州、中国、韓国、インドなど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、日本の「ちきゅう」、米国の「Joides 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。IODPの計画推進体制は、研究者によるアイデアを、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仕組みが機能している。また、中心となって計画を担っている海洋研究開発機構と国内大学の連携も密接に行われている。しかし、掘削に関連する諸費用の高騰は深刻な問題であり、「ちきゅう」も現在、年5～6ヶ月の科学目的での稼働が精一杯である。重要な課題である地下生物圏の探査やマントル掘削に対して、十分な戦略を練り、最大の効率を上げるように努力してゆく必要がある。

「ちきゅう」では、将来の4000m級水深からの7000m掘削を目指した技術開発を行うことが国家基幹技術として求められている。このような技術開発には、大水深の石油掘削技術を基礎としながらも、新たなる着目点での開発が必要であり、研究者と技術者の密接な連携が求められる。

2009年9月に開催されたIODPの将来計画を議論する国際会議(INVEST)では、700人の研究者(日本からは107人)が集まり地球環境変動、地球内部ダイナミクス、地震・津波などの地球災害(ジオハザード)、海洋地殻・マントル掘削、地下生命圏、二酸化炭素地層貯留などの幅広いテーマが議論された。その中で、今後も国際間の密接な協力が不可欠であることが確認された。

計画の実行のためには、我が国が国際的なリーダーシップをとることが期待されているほか、計画管理や出版広報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である。また、将来のIODPをどのような仕組みで行ってゆくのか、についても我が国から明確な方針を提示すべきである。

## (6) 地震と火山の観測と予測

地震や火山噴火に伴う諸現象の予測の研究は、沈み込み帯に位置する我が国においては特に社会的要請の大きい課題の一つである。地震と火山噴火の観測と予測の研究は、これまで研究者コミュニティの合意をボトムアップ型で形成して、科学技術・学術審議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」と「火山噴火予知計画」として、個々に推進されてきた。しかし、互いに関係する面も大いにある地震と火山噴火現象の研究を連携して進めるために、今年度からは「地震および火山噴火予知のための観測研究計画」として統合され、実施されている。この間、地震予測につ



いては、主に海溝型地震についての理解が格段に深まり、地震の発生場所・規模や繰り返し時間間隔に関する新たな知見が得られるなどの成果をあげてきたが、地震予知の実現には至っていない。火山噴火予測については、経験則に基づくものの、前兆現象を捉え噴火直前予知を一部実現するなどの成果が得られたが、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、基礎的観測研究の重要性が指摘されている。

地震活動と地震に伴う諸現象については、1995年の阪神淡路大震災以降、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も進められ、地震ハザード（地震動、津波）予測の研究が進展した。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。2009年4月には、今後10年で取り組むべき総合的かつ基本的施策が策定された。課題は、政府の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を通じた科学技術・学術審議会の建議に基づく研究計画とは、互いに連携しつつ推進する必要があるにもかかわらず、役割分担・連携の仕組みが必ずしも明確でない点と、火山噴火に関する調査研究は地震調査研究推進本部による調査研究計画には含まれていないことである。また、地震や火山噴火現象を理解し被害軽減に役立てるためには、長期間にわたる多項目の観測研究が不可欠であるが、予算の確保が困難な状況にある。これらの問題の解決が重要な課題である。

## (7) 今後の課題

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を強力に推進するかという点である。

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、対外報告『基礎科学の大型計画のあり方と推進について』[3]においては、(ア) 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、(イ) 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2つについて提言し、その検討を具体的に進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り、さらに国際的視点からの大型計画の位置づけについても俯瞰することが重要である。

## 4 社会的な課題への新たな挑戦

地球惑星科学は、理工学、生命科学、人文・社会科学にまたがる総合的な研究分野である。それはひとつの学問領域だけでは解けない問題が多いことを意味し、長期的な展望に立った総合基礎科学としての研究・教育体制を作り上げる必要がある。また、同時に地球惑星科学はローカルからグローバルまで地球と人間の相互作用が生み出す社会的な課題の解決に挑戦してゆく必要がある。その具体的な解決のためには、地球惑星科学に基礎を持つ地球科学技術者の働きが重要である。以下に五つの社会的な課題を示し、それらへの取り組みの展望を述べる。

### (1) 地球環境と生態系の保全

地球環境変動や急激な社会経済的变化などに伴い、局地から地球規模に至る様々な環境問題が起り、また自然災害の発生回数が増加している。地球環境問題は、地球惑星システム、生態系変動、そして人類活動とその行動倫理に至る総合的な視点から対応することが必要であり、総合基礎科学である地球惑星科学が全力を挙げて取り組むべき課題である。人間活動に伴う温室効果ガスの放出が、全球地球化学循環において余剰となり、その結果、全球平均気温の上昇、極端な気象海象現象、そしてさまざまな生態系の破壊と生物多様性の減少となって現れている。森林や海洋生物資源の乱獲による生態系の直接的な破壊や生物多様性の減少も、生物地球化学的な物質循環の変調に加担している。地球惑星科学は、近未来予測を、地球環境変動の観測とモデル研究による科学的根拠に基づいて提示する責任がある。また、地球史を通じて起こった過去の地球環境変動と生態系への影響を詳らかにすることを通じて、現状の評価と将来予測への制約条件を与える必要がある。さらに、これらの科学的成果に基づいて、政策の決定に対して発言していくべきである。現在、G8をはじめとする世界各国は、温室効果ガスの削減目標を掲げ、そのために地球温暖化への適応と緩和を求めている。いわゆる「低炭素社会」の実現である。この問題は、政治、経済あるいは工学分野の問題であると思いがちであるが、地球惑星科学が基盤的な部分で強く絡んでおり、地球惑星科学者コミュニティは積極的に発言すべきである。低炭素社会への適応策にあたっては、炭素放出を伴わない、あるいは著しく少ない脱炭素エネルギー生産システムの開発が求められている。さらに再生可能エネルギーの研究・開発が重要となる。

地球温暖化緩和策についても様々な検討がなされている。物理的に地層内、深海などに二酸化炭素を隔離する直接的な方法については、地球や海洋のダイナミクスとテクトニクス、また、深海や地下圏の生物群の機能と適応生態の理解が必須である。海洋、森林などの炭素緩和バイオマスが、それぞれ、全球生物地球化学循環の中でどのような役割を果たしており、どれくらいの速度で反応するのかを理解しておくことが必要であり、その結果が緩和策の提案につながっていく。もちろん、水素などを基幹とする新たな生物エネルギー資源の開発による適応・緩和システムの提案も検討すべき課題である。

## (2) 自然災害と防災

日本を含むアジアモンスーン地域は、季節的に大量の降雨があることで特徴づけられる。同時にその多くの地域は地殻変動の活発な地帯にあるため、地震、火山活動が活発であり、また、地質が脆弱である。地震、火山噴火などの地殻活動および激しい降雨は、それぞれが甚大な災害を引き起こすだけでなく、これらが時間的に重複したり、また相次いだりすることによって、被害を増幅させることが多い。

災害危険度は狭い地域内でも大きく異なり、同一地域内でも相対的に安全な土地と危険な土地とが隣り合わせて存在することも多い。例えば、河川下流部のデルタや海岸平野は、最近数千年間の洪水氾濫の繰り返しや波浪・沿岸流などの作用で作られてきた土地なので、微地形が異なり、洪水・高潮・津波等の加害外力への影響の違いが大きい。このため、堤防、排水機場、放水路その他防災施設も多く作られ、対応能力の向上が図られてきた。しかし、そのような対応能力の向上が新たな人口集中を招き、結果的には脆弱性の高い地区が広がってしまったところも少なくない。水害、とくに近年頻発している内水氾濫対策だけを念頭においた盛土が、地震被害の潜在的危険度を高めている例もある。そして、そのような土地に住む人々がその危険性をほとんど認識せず、防災を考慮した土地利用の規制・誘導も効果的に行われないことが少なくない。

計画的な土地利用は、無秩序な開発の抑止効果が望めるため、環境保全の実現にもつながりうる。一方、埋立地等自然の地形を大きく改変して開発される土地での災害の多くは、造成位置・手法・材料等を地形に応じて選択することで回避でき、また造成に関する情報を住民に知らせておくことで大幅に軽減できる可能性が高い。このように市民に対して、いつ、誰が、どのように、どんな情報を伝えるのか、ということに関しての研究はようやく緒についたばかりであり、今後の研究課題である。

地震防災においては、基盤とその上の軟弱地盤の関係が強振動の予測にとって非常に重要であることが理解されるようになり、地盤形状のデータベース化が進み、きめの細かい対応が可能となってきた。また、火山災害では、過去の活動を詳しく調べ、活動の予測に役立つ活動も行われるようになった。これらの知見はしばしばハザードマップとしてまとめられている。

わが国は、国土の70%を山地で占められ、毎年のように地すべり等のマスマーブメントによる災害を被ってきた。安全を確保し、有効な土地利用を進めるために、これらの発生場所やメカニズムに関する理解を深め、ハザードマップに生かすことが求められている。ハザードマップについては、様々な角度からの利用の仕方、情報伝達のやり方、またマップ自体の高度化など、研究課題が山積している。

温暖化に伴う海面の上昇や異常気象の増加、急速な社会経済的変化などの影響を受けつつ益々深刻化している自然災害の回避・軽減のため、従来の防災研究に加えて土地の適正利用という視点からの研究を推進すべきである。土地利用と防災のあり方に関する総合的研究は、国際的研究計画等と連携して推進することが望ましい。上記のように自然災害を避け、また防災を進めるためには、科学的な研究を進めるとともに、それを背景とした地球科学技術者や工学技術者の育成と互いの連携を強めることが必要である。

### (3) 資源・エネルギー問題

「社会のための地球科学」をかかげて実施されている UNESCO の国際惑星地球年 (IYPE、2007 年～2009 年) のテーマの一つに「資源—持続的利用に向けて」がある。人類は、必要とする鉱物・エネルギー資源のほとんどを地球から得ている。資源消費量は急速に増大しているだけでなく、その多くは再生不可能であり、偏在しており、生産コストも土地条件により大きく異なる。そのため、地下の埋蔵が確認されている資源の場合であっても、採掘を本格化するに当たっては、他の土地利用との競合、政治経済的な問題、環境上の問題などを解決しなければならない。さらに、産業構造の変化により、これまで資源として扱われてこなかったものが資源となる可能性もある。従って、資源・エネルギー問題への対応は、分野横断的な研究チームによる総合的研究によってのみ可能である。

今後、世界的には大水深・大深度での石油・天然ガス開発、メタンハイドレート開発、海底熱水鉱床等の海底鉱物資源の探査開発が進むであろう。我が国では、海洋基本法制定と大陸棚の延伸申請を契機に、海洋資源・エネルギーへの関心が急速に高まっており、海洋探査技術や資源開発技術の向上がこれからの課題である。また、現在はわが国の発電能力の 1%にも満たないが、地熱エネルギーも利用可能性が高いものである。なお、これらの開発にあたっては、環境への影響評価技術の確立も重要となる。また世界の原油生産が減産に転じる時点、いわゆるピークオイルの到来が現実味を帯びてきており、ポスト・ピークオイルの時代に世界とわが国がいかに関わり立ち向かうかが今問われている。この人類史的大問題の解決には、人類の全ての英知を結集しなければならない。気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書 (1997 年 12 月 11 日) に始まる二酸化炭素排出削減の動きは加速している。また、排出した二酸化炭素の分離・貯留技術 (CCS) の開発も急ぐ必要がある。

二酸化炭素を排出しない原子力発電は、放射性廃棄物の地層処分の際に長期的安全性を確保することが求められている。これは、原子力発電の長期的成否を決めるといっても過言ではない重要課題であり、地質学、地球物理学、地震学、水文学、地球化学、地理学など全ての地球科学者は、その長期安全性について、科学的根拠に基づいて、また、科学の中立性に立って、提示・評価する責任を持っている。さらに、原子力発電所自体の安全性に関連して、地震動の評価をより安全かつ合理的に行うためにも地球惑星科学の果たす役割は大きい。

人口増大や気候変化に伴う降水パターンの変化などから、水資源の確保は 21 世紀の世界にとって最も重要な問題の一つである。温室効果ガス増加の影響として、特にモンスーンアジア地域では、水循環変化とそれに関連した水資源・水災害変化とその予測が重要である。IPCC 報告も、アジアモンスーン地域での水循環・洪水、旱魃などの極端な水災害の変化予測には大きな不確実性があると述べており、特に地域的な変化の予測のニーズは高い。また、地下水の挙動解析、汚染防止、管理予測の技術向上も今後、世界的にみて極めて重要となる。日本は、気候モデルによる予測研究において、世界をリード

できる体制づくりの構築と研究推進で大きな貢献をし、アジアの水資源問題の解決に向けて、さらに大きな力を注ぐ責任とポテンシャルがある。

#### (4) 持続可能な陸域と海域の利用

陸と海にまたがる圏域で起こる現象は、自然と人間が複雑に作用するため、その解明が難しい。このため、地球惑星科学を中心としたグローバルな研究と、公害問題や環境の保全・修復などを中心としたローカルな研究を関連づけるような、自然科学から工学、人文社会科学までを含む分野横断的な研究が必要である。

陸域と海域のなかでも海岸平野と沿海域は生物生産性が高く、農業や漁業の場として極めて重要である。この圏域は都市化の影響を強く受けているために、環境保全や自然災害に関する問題も深刻化している。これらの課題に対処するには、まず実態の把握が必要であるが、現状は不十分である。この圏域の農業は国際的な食料需給の影響を強く受けるために、世界の農業的土地利用の動向を把握しておかねばならないが、データの定義、信頼性、精度などは国や地域によってまちまちであり、全世界の状況を把握することはできていない。経年変化の把握はさらに困難である。土壌は、食料生産や地球環境を保全する上で非常に重要な役割を果たす。土壌有機物の動態と生化学的機能は土地利用や気候の変化に敏感に反応するため、それらの変化を追跡する長期モニタリングは世界の趨勢である。地球温暖化に伴って土壌が炭素や窒素の吸収源となっているのか、それとも発生源になっているのかを評価することは、極めて重要な意味をもつ。加えて、陸域の土壌環境が還元的であるかどうかは、地下水・河川を經由して海域へ移送される鉄や微量金属フラックスに影響する。土壌中の微生物相から沿海域の生物相にまたがるエネルギー・栄養の獲得のしくみの解明には、大気－土壌－河川・地下水－海域における各研究分野の横断的な連結が求められる。

都市化も海岸平野の地域において顕著な現象であり、地球環境問題と自然災害を考える上で極めて重要である。都市化に関連する問題は、わが国でも人口や産業の集中する地域を中心に多く見られるが、開発途上国、とりわけ経済発展の著しいアジアでは特に顕著である。急激な都市化は農地や縁辺海域への強い環境負荷となり、またインフラ整備や市民生活などに深刻な影響を与えている。さらに都市人口の急増が生活水準の向上と同時に起きていることが、自動車の急増と車の渋滞に伴う排気ガスの増大、上下水道問題、エネルギー・物質消費の増大、汚染物質やゴミの投棄による海域汚染の拡大など、都市化に関わる様々な問題を一層深刻化させている。現代の都市システムは利便性と経済性の指向が非常に強く、その結果自然災害に対する脆弱性が益々高まっていることも問題であり、解決に向けた研究と政策が望まれる。

陸域と海域の保全と持続可能な利用を実現するには、その資源としての有限性と環境悪化の問題の解決に役立つ分野横断的な総合的研究を陸域と縁辺海域の双方で実施するとともに、陸域－縁辺海域を連続したシステムとして捉え、多様な要因を総合的に研究するプロジェクトを推進しなければならない。

## (5) 政策策定のための地球惑星科学の重要性

地球温暖化問題をはじめとする、人間活動の増大に起因する全球規模の地球環境問題やそれに起因する自然災害の問題は、新しいタイプの社会問題と言える。すなわち、このような地球環境変化は全球スケールで複雑多岐にわたっており、その対策の策定には、地球システムの正確かつ詳細な理解と知識が必要になっている。大気・海洋・陸域の各部分系に起こる変動は、シームレスな部分系間の相互作用によって、全球に変動が伝播し、また、その原因となった変動も周囲から影響を受けて変化してゆくため非常に複雑である。従って、このような多圈的複合系の状態の形成と変動のメカニズムを理解することなくして、その変化予測と引き起こされる影響を勘案した適切な対策を取る事は難しい。

このような地球環境の振る舞いを理解するために、例えば大気海洋大循環モデルなどが、地球惑星科学の粋を集めた長い研究の歴史によって築かれてきた。同時に人工衛星を始めとした地球観測システムの発達で、全球を被う様々な物理、化学、生態等にかかわる高度な観測が可能になり、モデリングとの密な結合により、より正確なシミュレーションを支援する体制ができつつある。

このような地球惑星科学における進歩に支えられて、IPCCによる評価活動に代表されるように、精緻で総合的な温暖化現象の理解と、それに基づいた影響評価が可能になってきた[5]。さらにこれらの科学的知見を適応策と緩和策の策定に利用するケースも増えてきた。従って、いまや科学に裏づけられた評価なくしては施策の策定が難しい時代になっており、この傾向は、今後、さらに進むと考えられる。例えば、台風を再現できる超高解像度大気モデルや、様々な炭素循環過程を組み込んだ地球システムモデルなどの開発により、より詳細な素過程がモデルに組み込まれ始め、その応用範囲も生物多様性の問題、農業、林業、水産業、水管理等、社会基盤設計など、様々な方向に広がっている。従って、地球環境変化の影響評価、適応策、緩和策の策定において、地球惑星科学が果たす役割は今後、より大きくなり、従ってそれを支える科学者コミュニティーの責務は益々増大すると考えられる。また、このような地球環境変化は複雑で、往々にして専門家をもってしても正しい理解が難しい場合があるので、問題に関わる正しい知識を政治家、行政、産業、社会一般に説明し、伝えることも一層重要になっている。従って、地球環境問題におけるこのような地球惑星科学の重要性を科学者自身と社会が自覚し、科学者がどのように政策に関わり、科学的研究成果を社会利用するかについて、真剣に検討する時期が来ている。このような現状認識に立ち、以下の行動提案を行う。

① 地球環境のより正確、かつ応用範囲の広いモデリングと観測技術の開発が必要である。② 社会的に大きな影響を引き起こす可能性のある地球環境変化の予報能力を高める必要がある。③ 政治家、行政、産業、社会一般がその意思決定を行う際に役立つ、最先端知識の体系化と選択の際に考慮すべき条件を示す評価書を、それぞれの問題で適時、作成する努力を行う。作成には長い時間が必要であり、粘り強い執筆努力が重要である。また、それらをわかりやすく社会に伝える努力を行う。④ モデリングと観測の結果を問題解決に有効に利用する仕組みをより発展させる必要がある。⑤ 研究成果の

社会利用において、科学の中立性を維持する仕組みと、研究者の行動規範の確立を行う必要がある。

さらに、地球惑星科学が環境、災害、資源・エネルギー問題などに関する政策策定に対して基本的考え方を提言するとともに、問題解決に具体的に貢献するためには、研究者と地球惑星科学的基礎に立脚した技術者との協力が必要である。わが国の地球科学技術者の大部分は、理学的な地球惑星科学の教育を受け、その後産業界で技術者として育成された者であるため、地球惑星科学的な基礎に立脚することができる。わが国の地球科学の技術者資格としては技術士の応用理学部門があり、その資格取得者の大部分は地球科学の技術者であるものの、その認知度は低い。また、近年の世界的な流れとして技術者の資質を教育で担保しようとする動きがあり、それに呼応するように日本技術者教育認定機構（JABEE）が1999年に設立された。今後、地球惑星科学が広く社会に貢献するためには、地球科学技術者の役割に留意した人材育成の検討も必要である。

## 5 「地球を好きになる」教育とアウトリーチ

### (1) 教育とアウトリーチの重要性

私たちは地球上に生き、地球の活動からさまざまな恩恵と影響を受けている。自然と共生する持続的な社会を構築するためには、全ての市民がまず地球を知り、地球とともに生きるためにはどうすれば良いかを自ら考えることができる基礎知識と素養をもつことが必須である。

そのためには、初等中等教育の段階から、理工学、生命科学、人文・社会科学にまたがる領域を総合的に含む分野である地球惑星科学に関する教育を正課として実施することが必要であり、それを通して市民の全てが、地球が身近なものであることを意識し、地球を好きになることを目指す必要がある。この「地球を好きになる教育」は、全ての市民享受しうるように実施すべきであり、そのためのカリキュラムの整備と教員の確保が急務である。人類が地球とともに生きていることを、市民が正しい科学情報に基づいて理解するためには、全ての年齢層に向けた地球惑星科学のアウトリーチ活動が必要であり、そのような活動を担うことができる研究者や社会人を育成するとともに、それらの活動を評価し、支援するしくみを構築すべきである。

### (2) 総合的基礎素養と地球惑星科学

現在の子どもたちが大人になり、かつ社会的な責任を果たす2030年～2050年頃には、科学・技術は現在より著しく発展していると同時に、地球環境も世界情勢も大きく変化しているはずである。これからの人々の生き方に関する基礎として、地球と人間社会のかかわりをより良く理解することが極めて重要である。大気や海洋をはじめ、あらゆる資源、生物体をつくる物質まで、私たちの生活を支えているのは、全て宇宙と地球からの贈物である。未来への展望を開くためには、自然界の仕組みを良く知ることが必要であり、地球や宇宙からの恵みを利用して、文明を築き、さらに高度な科学・技術社会を作りだしてきた人類の歴史、社会と人間のあり方についての十分な理解が必須である。もちろん、全ての知識の基礎としての言語および数学の着実な理解と修得が必要であることは言うまでもない。現代社会が直面する重層的で複雑な課題を解くためには、その上に学際的総合的な知識を総動員して考え、組織化して行動し、解決することができる素養が必要である。そのためには、初等中等教育段階での理科、社会(地理分野)の修得が不可欠である。ことに、地学の総合的な内容を持つ教科の学習と修得は、複雑でグローバルな課題を解くために欠かせない。従来の地学に環境科学も包含した「地球学」とも呼ぶべき新しい教科を設定し、必須教科とするなどの措置も考慮する必要がある。一方で、このような総合的な内容を持った教科を的確に教えることができる人材が不足している。これを補うためには、地球惑星科学の修士、博士号取得者が、初等中等教育で教師として就労できるような大学および大学院での教育体系の改善、そして必要な教員免許制度の見直しを進めることが必要である。

このような観点に立ち、第20期の地球惑星科学委員会社会貢献分科会よりの記録『総



合的基礎教育の確立への道-大学進学基礎学力認定試験の創設』[6]では、国語、外国語、数学、理科（物理・化学・生物・地学）、地理歴史、公民の全体にわたる広範で基本的な学力の確保を目的とする義務教育の達成度認定試験を大学進学のため資格として課するという考え方を示した。

総合的な科学リテラシー構築の中で、地球惑星科学の位置づけについて明確な方向性と対策を打ち出す必要がある。研究と教育の一体的かつ戦略的な推進こそが、社会の知的活動の新しい地平を開く唯一の方策と考える。

### (3) 社会へのアウトリーチ

地球惑星科学は、社会の全ての年齢層に対して、常に、気象や地震などの身近なでき事、グローバルな環境問題そして地球惑星に関する新しい見方・考え方など、社会生活に密接した情報の獲得や考え方の指針を発信してゆくことが大切である。このために生涯教育としての社会教育ネットワークを構築することを提案する。

地球温暖化や地震、火山噴火、津波、洪水、エネルギー問題など、地球惑星科学に関連した自然現象が、益々一般市民の社会生活に大きな影響を与えるようになっている。地球や惑星の活動や現象を理解し、考え、行動することが全ての年齢層の市民に求められている。その社会的な要求に応えるためには、研究者自身が、地球惑星科学の考え方や研究の成果を社会に還元することを求められている。例えば、人間活動の地球環境への影響を軽減するための政策提言、自然災害の防災のための手法、資源・エネルギーの選択など、それぞれの市民が、自ら考え、判断することのできる素養を持つように仕向けることができる、社会にも目を向けた研究者を育成しなければならない。そのためには学校以外の場でも、地球の自然とその研究成果について、わかりやすく指導できる能力を持った人材を育成する必要があり、そのための仕組みを作ることが求められている。そのためには、現在、大学研究機関で行われている社会教育や生涯教育に対する研究者の貢献を評価し、かつそのような活動を支援する体制が必要である。

地表で見ることのできる地球の現象を保全し、市民、とくに子どもたちの学習に資するために各地で「ジオパーク」を整備する活動が始まっている。重要な地球の遺産を複数含む自然を地球科学の普及に活用し、ジオツーリズムを通して地域の活性化をも目指すものであり、2004年に世界ジオパークネットワークがユネスコの支援により設立され、2009年6月現在で58箇所のジオパークが参加しており、日本でも2008年に日本ジオパーク委員会が発足してこのネットワークに参加するための活動が始められた。日本列島は変動帯にあって複雑多岐な構造を持つ島弧であり、ジオパークは変動帯の地球科学的意義を世界に示すために重要な活動となるものである。

社会科学としての地球惑星・人間圏科学にも目を向けると、違った側面が浮かんでくる。例えば、開発途上国は、災害に対して脆弱である社会が多く、地球環境の変化が市民生活に大きな影響を与える。それらに対処するためには、全ての市民が、地球惑星科学の基礎知識を持ち、自ら考えて行動するような教育を促進させる必要がある。科学先進国は国際的な枠組みの中で技術移転と教育を行う義務があり、日本は、JICAなどの国

際協力組織を通じて、このような支援に力を入れるべきである。

子供の頃、月を双眼鏡で観察したり、山の中の貝化石に驚いたり、海の波を何時までも眺めていた体験を持つ人は多いだろう。このような身近な体験こそ、地球惑星科学のみならず、自然科学への導入であり、さらに、好奇心や探究心を育て、さらに真理の探究へと導いて行くことが、人材の育成につながる。子供の時から自然に触れ、自然を調べる楽しみを知り、自然の美しさに感動できる人間、そして、社会に出てからも、また歳をとってからも、自然についての科学的知見を学び、それぞれの生き方や防災に役立てるような、そのような人間が一人でも多く住む社会をつくること、それが私たちの使命である。

## <参考文献>

- [1] 日本学術会議、地球惑星科学委員会 地球・惑星圏分科会、記録『地球惑星科学の現状と課題』、2008年9月4日
- [2] 日本学術会議、地球惑星科学委員会 地球・人間圏分科会、提言『陸域-縁辺海域における自然と人間の持続可能な共生へ向けて』、2008年6月26日
- [3] 日本学術会議、物理学委員会・基礎生物学委員会・応用生物学委員会・地球惑星科学委員会・化学委員会・総合工学委員会合同 基礎科学の大型計画のあり方と推進方策検討分科会、対外報告『基礎科学の大型計画のあり方と推進方策検討分科会』、2007年4月10日
- [4] 日本学術会議、地球惑星科学委員会 国際対応分科会、記録『地球惑星科学における国際対応』、2008年9月4日
- [5] 気候変動に関する政府間パネル (International Panel on Climate Change: IPCC)、第4次評価報告書、2007年11月
- [6] 日本学術会議、地球惑星科学委員会 社会貢献分科会、記録『総合的基礎教育の確立への道—大学進学基礎学力認定試験の創設』、2008年9月15日