

報告

大学教育の分野別質保証のための
教育課程編成上の参照基準
地球惑星科学分野



平成26年（2014年）9月30日

日本学術会議

地球惑星科学委員会

地球惑星科学大学教育問題分科会

この報告は、日本学術会議地球惑星科学委員会地球惑星科学大学教育問題分科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地球惑星科学大学教育問題分科会

委員長	西山 忠男	(連携会員)	熊本大学大学院自然科学研究科教授
副委員長	中村 尚	(連携会員)	東京大学先端科学技術研究センター教授
幹事	小嶋 智	(連携会員)	岐阜大学工学部教授
幹事	松本 淳	(連携会員)	首都大学東京大学院都市環境科学研究科教授
	碓井 照子	(第一部会員)	奈良大学名誉教授
	大久保 修平	(第三部会員)	東京大学地震研究所教授・高エネルギー素粒子地球物理学研究センター長
	北里 洋	(第三部会員)	独立行政法人海洋研究開発機構・東日本海洋生態系変動解析プロジェクトチーム・プロジェクト長
	永原 裕子	(第三部会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
	荒井 章司	(連携会員)	金沢大学理工研究域特任教授
	大路 樹生	(連携会員)	名古屋大学博物館教授
	大谷 栄治	(連携会員)	東北大学大学院理学研究科教授
	小口 高	(連携会員)	東京大学空間情報科学研究センター長・教授
	佐々木 晶	(連携会員)	大阪大学大学院理学研究科教授
	佐藤 薫	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
	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
	田中 和広	(連携会員)	山口大学理事・副学長
	花輪 公雄	(連携会員)	東北大学理事
	福田 洋一	(連携会員)	京都大学大学院理学研究科教授
	塚本 尚義	(連携会員)	北海道大学大学院理学研究院教授

本報告の作成に当たっては、以下の職員が事務を担当した。

事務	盛田 謙二	参事官 (審議第二担当)
	齋田 豊	参事官 (審議第二担当) 付参事官補佐
	冲山 清観	参事官 (審議第二担当) 付専門職
調査	崎山 直樹	上席学術調査員

要 旨

1 作成の背景

2008年（平成20年）5月、日本学術会議は、文部科学省高等教育局長から「大学教育の分野別質保証の在り方に関する審議について」と題する会長宛ての依頼を受けた。このため日本学術会議は、同年6月に課題別委員会「大学教育の分野別質保証の在り方検討委員会」を設置して審議を重ね、2010年（平成22年）7月に回答「大学教育の分野別質保証の在り方について」を取りまとめ、同年8月に文部科学省に手交した。

同回答においては、分野別質保証のための手法として、分野別の教育課程編成上の参照基準を策定することを提案している。日本学術会議では、回答の手交後、引き続きいくつかの分野に関して参照基準の策定を進めてきたが、今般、地球惑星科学の参照基準が取りまとめられたことから、同分野に関連する教育課程を開設している大学をはじめとして各方面で利用していただけるよう、ここに公表するものである。なお本文中の下線を付した専門用語については末尾に簡単な解説を付した。

2 報告の概要

(1) 地球惑星科学の定義

地球惑星科学は、地球ならびに太陽系内及び系外惑星の形成と進化を探求し、また地球惑星システムの変動を予測する学問である。とりわけ地球の構造、テクトニクス、化学的進化や物質進化、そして生物進化の研究を通じて人類の掘って来る所以を解明し、大気・海洋や地球深部と表層、電磁圏や惑星等を対象とした種々の研究活動を通じて人類の置かれている環境の営み、及びそれと人類との関わりを考察し、人類の将来に対する指針と展望を与える総合科学である。

(2) 地球惑星科学固有の特性

地球惑星科学の固有性は、多様な時空間スケールの中で生起する再現不可能な地球惑星の諸現象を対象とすることにある。地球惑星科学は他の全ての自然科学を基礎としながら、それらにはない固有の概念と視点を有している。地球惑星科学に固有の概念として、「成因」、「進化」、「空間構造」、「予測・予報」等があり、固有の視点として、「時間」及び「時間変化」、「空間」及び「空間変化」がある。研究対象の豊饒な多様性は方法論の多様性を生み、地球惑星科学の方法論はあらゆる自然科学の方法論を包含しつつ、独自の方法論を常に生みだしている。加えて地球惑星科学は多方面で社会的要請の強い学問でもある。

資源・エネルギー問題や地球環境問題等は、その典型であるが、災害科学としても自然災害の軽減・予報において地球惑星科学が果たすべき役割は大きい。

(3) 地球惑星科学を学ぶ学生が身に付けるべき素養

地球惑星科学を学修した者は、地球と惑星の成立の過程と現在の様態についての最新の知見を有し、生命と人類がこの地球で生まれ、発展してきた進化の歴史について正しい知識を修得している。そして現在の地球で進行しているさまざまな環境問題やエネルギー問題、自然災害等の諸問題についての科学的理解と思考を深め、それらの解決に向けた取り組みに貢献することの重要性を認識しているであろう。

地球惑星科学を学んだ者が身に付ける専門的能力としては、社会が直面している地球環境に関するさまざまな課題を、地球や惑星の自然的営みに関する正しい科学的知見に基づいて、自然現象と人間活動の調和の観点から考察し、あるべき方向性や適切な対応を考え、行動できる能力が挙げられる。

(4) 学修方法及び学修成果の評価方法に関する基本的な考え方

地球惑星科学においては、観察や観測が重視され、そのためのフィールドワークがきわめて重要な学修方法となっている。加えて他の自然科学と同様に実験・実習・演習が重要な教育方法である。各種の機器を用いた先端的化学分析や高温高圧実験、計算機を用いたデータ整備・解析及び数値シミュレーションの演習等の重要性が増している。また卒業研究やそれに相当する演習は、課題設定から論文(レポート)作成に至るまでの過程を自らデザインする能力を養い、学生の学力と研究に対する姿勢を飛躍的に向上させる学修方法として重要である。

(5) 市民性の涵養をめぐる専門教育と教養教育の関わり

地球惑星科学は、地球環境問題等市民生活に直結した課題を抱えることから、市民集団の形成に貢献しうる学問分野の一つである。地球惑星科学は、自然科学のほぼすべての分野をその基礎として成り立つ総合自然科学であることから、教養教育において数学、物理学、化学、生物学等の確固とした基礎を学んでおくことが必要である。また防災や地球環境・エネルギー問題等との関連において、人文・社会科学の諸分野についての基礎知識を獲得しておくことも重要である。その一方、地球惑星科学がそれ自身、教養科目として重要な意味を有していることは論をまたない。

目 次

はじめに	1
1 地球惑星科学の定義	2
(1) 地球惑星科学の定義	2
2 地球惑星科学に固有の特性	4
(1) 地球惑星科学に固有の視点	4
①対象と方法論の多様性	4
②時空間スケールの多様性	5
③局所性と普遍性	6
④技術開発による新展開	6
(2) 近接学問分野との多様で密接な連携	6
(3) 社会的要請	7
3 地球惑星科学を学ぶ全ての学生が身に付けることを 目指すべき基本的な素養	8
(1) 地球惑星科学の学びを通じて獲得すべき基本的な知識と理解	8
①地球惑星科学を学ぶことの本質的意義	8
②獲得すべき基本的な知識と理解	8
(2) 地球惑星科学の学びを通じて獲得すべき基本的な能力	12
①地球惑星科学に固有の能力	12
ア. 現実的課題への対処	12
イ. 職業上の意義	13
ウ. 市民生活上の意義	14
エ. 学問・社会の変化と地球惑星科学の学修	16
オ. 獲得されるであろう具体的な能力	16
②ジェネリックスキル	17
ア. 知的訓練としての意義	18
イ. 国際性と行動力を養う訓練としての意義	18
ウ. 技術教育としての意義	19
エ. ジェネリックスキルの修得	19
4 学修方法及び学修成果の評価方法に関する基本的な考え方	19
(1) 学修方法	19
(2) 評価方法	21
5 市民性の涵養をめぐる専門教育と教養教育の関わり	21

付録 1. 地球惑星科学の諸領域	23
付録 2. 用語解説	26
<参考資料 1> 審議経過	28
<参考資料 2> 公開シンポジウム	29

はじめに

わが国の大学教育は、質的転換の時期を迎えている。進学率の増加は、大学教育を「エリート教育」から「マスプロ教育」、さらには「ユニバーサル段階」へと変化させており、学士課程卒業後ただちに実社会へ出る学生が多くいる現状を鑑みると、大学教育の内容と質保証は社会にとってこれまでより一層重要な意味をもつこととなる。

このような問題意識を踏まえて、文部科学省は「学士力」の保証を大学に求め、各大学はそのためにさまざまな取り組みを開始したところである。「学士力」とは大学の学士課程を卒業したのものならば誰でもが身に付けるべき基本的で普遍的な能力、と定義される。しかしそれだけでは、各専門分野を学んだ学生に対する質保証とはなりえない。そのため、「学士力」と並んで「分野別質保証」の考え方が浮上してきた。「分野別質保証」とは、各専門分野を学んだ学生に求められる専門的知識と能力、並びにジェネリックスキル（専門を超えた汎用的能力）を保証する考え方である。

一方、急速にグローバル化する社会は、国際的に活躍できる人材の育成を強く大学に求めており、大学教育も国際基準の内容と質保証が求められている。このようなグローバル化に伴う高等教育の質保証は先進各国の共通した課題と認識されており、とりわけ EU 諸国は先進的な取り組みを行っている。なかでも英国では、高等教育質保証機構（Quality Assurance Agency for Higher Education）によって学科目ベンチマーク・ステートメント（Subject Benchmark Statement）が策定され、高等教育に活用されているところである。

このような状況を鑑み、日本学術会議は、各学術分野における質保証のための「参照基準」を策定する運びとなった。この参照基準は日本の大学における学士課程教育を国際基準で保証するための基本的な考え方をまとめたものであり、各大学はそれぞれの分野において、この参照基準を参考にカリキュラムを編成し、教育を実践することが求められる。

学士課程教育の参照基準の内容は、①当該学問分野の定義と特性、②当該学問分野で学生が身に付けるべき基本的な素養、③学修方法と学修成果の評価に関する基本的な考え方、④市民性の涵養をめぐる専門教育と教養教育の関わり方、である。

「地球惑星科学分野における参照基準」は、地球惑星科学とは何かを教育研究の対象とし、他の学問分野とはどのように異なる特有の物の見方をするのか、地球惑星科学の学士課程を卒業すればどのような能力が身に付くのか、その能力を身に付けるためにどのような学修方法が取られるのか、専門分野としての地球惑星科学を学修することにより一般市民としての教養がどのように高められるのか、等を具体的に記述している。

日本学術会議においては、すべての日本人が身に付けるべき科学技術の基本的素養として「科学技術の智」を明示しようというプロジェクトが行われ、「21世紀の科学技術リテラシー像～豊かに生きるための智～プロジェクト専門部会報告書：宇宙・地球・環境科学」という115頁に及ぶ報告書(<http://www.jst.go.jp/csc/archive/s4a.html>)が発行されている。参照基準とは取りまとめの趣旨は異なるが、今回の参照基準策定

にあたり、地球惑星科学の基本的素養を取りまとめた報告として参考にさせていただいた。

また、地球惑星科学連合教育問題検討委員会は、初等中等教育の内容とあり方を検討して「地球惑星科学教育の目的」(<http://www.jpogu.org/education/20081105.html>)を公表している。この参照基準はその延長線上にあるものと位置付けることができる。地学（「地学基礎」や「地学」）が開講されている高等学校数は、平成24年度の学習指導要領改訂後わずかに増加しつつあるものの、履修者は全生徒数の20%程度に過ぎず、それも文系学生中心である。理系学生は高等学校で地学を学ぶ機会すら奪われていた場合が多い。このような現状においては、大学の教養教育において地学ができるだけ多くの学生に基本的素養として教えられることが重要である。東日本大震災に見るように、地学現象に起因する各種の自然災害が社会に甚大な影響を与えることを鑑みると、地学は国民の基礎的素養として重要な学問であり、高等学校教育においてもっと重要視されるべきである。

「地球惑星科学分野における参照基準」においては、「大学教育とは何か、いかにあるべきか」というより根源的な問題には踏み込んだ議論をせず、むしろ教育内容に関する具体的技術的指針を与える内容になっている。この点、諸賢のご批判があらうかと思うが、そのような根源的問題については「学士力」保証の基準との関連からより包括的に論議されるべきであり、敢えて本参照基準では触れなかった。

策定された「地球惑星科学分野における参照基準」の内容は多岐に亘っており、学士課程教育の内容としては盛りだくさん過ぎるという批判もあるであろう。さらには、地質教育を教育の中心に据え、JABEEの認定を受けている一部の大学においては、この参照基準に基づいたカリキュラムの策定は困難である場合も想定される。しかしながら、分野別質保証の考えにおいては、各大学は、各大学の教育理念に基づき、大学が所有する人的資源と経営資源ならびに学生の資質を考慮しつつ、本参照基準を参考にして、最良の教育課程を編成し、実行することが期待されている。その場合、教養教育や非常勤講師による集中講義等で専門教育における不足な部分を補う工夫が必要であろう。しかし、各大学においてはその状況に応じて本参照基準に掲げられた内容を必ずしもすべて教育課程に盛り込む必要はないことをここに明記する。

1 地球惑星科学の定義

(1) 地球惑星科学の定義

地球惑星科学は、地球並びに太陽系内及び系外惑星の形成と進化を探求し、また地球惑星システムの変動を予測する学問であり、とりわけ地球の構造、テクトニクス、化学的進化や物質進化、そして生物進化の研究を通じて人類の拠って来る所以を解明し、大気・海洋や地球深部と表層の研究、未踏の極地の探査から電磁圏や惑星の探査まで種々の研究活動を通じて人類の置かれている環境の営み、及びそれと人類との関わりを考察し、人類の将来に対する指針と展望を与える自然科学の学問分野である。

その対象は、電子顕微鏡でしか見ることのできないイトカワのナノあるいはマイクロサイズの微粒子から人間の居住空間としての「地域」スケール、半径約6400km

の惑星（地球）とその周縁、さらには太陽系外の惑星まで、多様な空間スケールに亘る。また地震のような秒オーダーの現象からプレート運動のように約1億年もかけて太平洋を形成するような現象まで、対象とする時間スケールも幅広い。

約138億年前に宇宙が生まれ、およそ46億年前に太陽系が形成されて以来、地球は延々と進化し続けてきた。微惑星の合体から原始惑星が形成され、隕石の衝突による鉱物の脱水分解によって原始大気が生まれた。隕石の衝突エネルギーは熱エネルギーに転化して、原始大気の保温効果によってマグマの海に覆われた熱い地球となった。その冷却の過程で大陸と海洋が生まれ、長い時間をかけて海洋の中で原始的な生命体が育まれた。その後の生命進化は、長大な時間スケールの中で大気、海洋、地圏といわゆる「共進化」を行いながら、他の惑星には見られない特異な表層環境を形成した。約5億年前のカンブリア紀には多様な多細胞生物の爆発的な進化（「カンブリア爆発」）が起こり、その後現在の人類に至るまでの生物のたゆまない進化の証は、化石として記録されている。このようにミクロからマクロまで極めて多様な時空間スケールに亘る現象を研究する地球惑星科学は、物理学、化学、生物学、数理科学、計算機科学、情報科学、等の堅固な知識を必要とする総合科学であり、また地球惑星科学の内容も、宇宙惑星科学、大気・水圏科学、地球生命科学、固体地球科学、地球人間圏科学と実に多岐に亘る。これらの諸知識を総合的に駆使して、地球の物理的、ならびに化学的そして生物的進化を論ずる地球惑星科学は、地球とその上で生きる人類の過去と未来を見据える道標となる学問分野である。

さらに地球惑星科学には純粋なアカデミズムを超えた実学としての側面がある。石油、石炭そして金属資源等の鉱床探査、それらの鉱床の成因研究（鉱床学・鉱山地質学）は人類の資源エネルギー問題に直結する学問である。さらに社会科学・災害科学・防災科学としての側面（応用地理学、応用地形学、変動地形学、応用地質学、地震学、火山学、応用気候学、地球人間圏科学）も重要である。ダムや道路、鉄道、橋梁、原子力発電所等々の建設に当たっては精密な地形・地質調査が不可欠であり、活断層の調査は特に重要である。日本はその地理的並びに地質的条件により自然災害の多い国であるが、自然災害は地学現象を背景として自然と人間活動の関係の中で生じ、また人間による土地利用変化や情報伝達等によって時代的・地域的にも大きく変容するものであり、地球惑星科学の研究対象である。台風・竜巻・集中豪雨・豪雪・干ばつ・猛暑・寒波等の気象災害は気象学や気候力学の、土砂災害は地形学や応用地質学の、火山噴火は火山学の、地震や津波は地震学・海洋学・地質学・地理学の教育・研究対象で、いずれの自然災害に対しても地球人間圏の視点からの対応が必要である。これらの教育・研究は、東電福島原子力発電所事故のような重大な複合災害（自然災害と人為災害）を回避・軽減するために、きわめて重要な基礎的素養を国民に与える有用性を有している。さらには、近年の人口爆発と産業活動の爆発的成長を伴う人間活動は、地球温暖化や砂漠化、オゾン層の破壊等に代表される様々な環境問題を引き起こしており、地球惑星科学の知見に基づく信頼性を有する将来予測とそれを踏まえた解決方策の提示は喫緊の課題となっている。このように地球惑星科学は、「持続性科学」の側面を有し、日本国民の、ひいては人類の安全を守り、様々な環境問題を解決するための直接的な有用性を有す

る総合的自然科学と定義できる。なお、付録1に地球惑星科学の諸領域について、詳しい解説を付したので参照されたい。

2 地球惑星科学に固有の特性

(1) 地球惑星科学に固有の視点

地球惑星科学の固有性は、再現不可能な地球惑星の諸現象を対象とすることと、多様な時空間スケールで相互に作用を及ぼしあって常に変化し続ける現象を対象とすることから生まれる。長大な時空間スケールの現象は実験室で再現することはできない。例えば、大気や海洋、そしてプレート運動の様な流体力学的かつ熱力学的な運動は、基礎方程式に基づく理論的考察や実験室でのアナログ実験からその本質的特徴のいくつかをつかむことはできても、自由度の高い複雑系に内在する非線形的な挙動の詳細な解明には計算機シミュレーションに頼らざるを得ない。むしろ計算機科学の成果を活用して、巨大な複雑系である地球惑星システムの変動を詳細に記述し、予測することに地球惑星科学の固有性と意義がある。実際、60余年前の発明直後に電子計算機が数値天気予報に応用されて以来、地球惑星科学とコンピュータ技術は互いに影響を及ぼし合いつつ共に発展してきた。

一方、過去に遡る観察が不可能な地球進化や地質史の研究では、自然界に記録されている現象を読み解くことの必然性から、本質的に再現不可能な現象をその対象とする。すなわち現在から過去を読み解く逆問題としての性格も有するのである。以上のことは地球惑星科学の精密科学としての側面に一定の制約を与える一方、他の科学にはない独自性と発展性も与えている。すなわち地球惑星科学においては「時間」と「空間」が本質的に重要なパラメーターであり、個々の事象は物理、化学に還元できるとしても、それらの総体としての地球や惑星は「時間」と「空間」をその中心的視座として理解されるべき対象である。

このことから地球惑星科学に固有の概念がいくつか生まれる。「成因」や「物質進化」、「空間構造」、「予測・予報」等はその代表的なものである。「成因」という言葉は、「地球の層状構造の成因」や「火成岩の成因」等のように用いられ、ある現象や実体の出現や成立のプロセスを意味する。そこには自ずと時間変化と空間変化の概念が包含されている。「物質進化」は「生物進化」と照応しつつ、それとの違いを強調した概念で、無機物である地球惑星物質も、融解や結晶分化作用等の種々の物理変化を経て、化学組成や物性を変化させることを意味しており、ここにも時間・空間変化の概念が寓意されている。天気予報や気候予測に代表される「予測・予報」は、防災の観点から地球惑星科学に重要な使命を付与している。一方、「空間構造」は、地球及び惑星における物質分布の空間的多様性により生じており、成因を解明する場合にも重要な鍵となる概念である。このように地球惑星科学の固有の視点として、「時間」及び「時間変化」、「空間」及び「空間変化」が存在すると言える。

① 対象と方法論の多様性

地球惑星科学の対象は、太陽系内・系外の惑星や惑星間空間から、固体地球、

大気、海洋、陸水を含む地球と、地球生命圏、地球人間圏まで広範囲に及ぶ。空間スケールにおいては、エアロゾルや宇宙塵のようなナノ粒子から地球全体を包み込む電磁圏、さらには太陽系外の惑星にまで及んでいる。時間スケールについても全地球史約 46 億年から地震のような秒オーダーの現象まで実に多様である。これら時空間的に多様な現象を解明するために様々な方法論が生みだされてきた。野外における地形・地質調査、大気・海洋・水文観測、空中写真や衛星画像の判読や解析から実験室での高温高压実験、様々な地球物理学的観測、計算機シミュレーション、宇宙地球化学的分析等の多様な方法論を駆使し、その結果を統合することで初めて地球や惑星の全貌が明らかになる。これらの方法論の一つ一つはそれぞれに熟練を要したり、精密な機器を駆使したりするために、高度に専門化されており、一人の人間が複数の方法論に精通することは容易ではない。このため地球惑星現象の総合的理解のためには共同研究が不可欠となる。

② 時空間スケールの多様性

上述した地球惑星科学の対象の時空間スケールの多様性は、自ずと研究そのものの多様性を生む。例えば地震という現象一つを取り上げてみても、地震の観測研究と地震の発生メカニズムの研究と大きく二つのアプローチがあり得る。観測研究においては、地震は短時間スケールの現象であるが、地震発生メカニズムの観点からは地震は長時間スケールの現象と捉えねばならない。なぜならばプレート運動に起因する地震は、プレートを構成する物質（岩石）とその物性・レオロジーに関係しているからである。このように同じ現象に対してさまざまな研究のアプローチがあり得るのも、地球惑星科学の固有性と言える。反面このことは狭い研究分野を多数派生させ、相互理解の障害となる分野の壁を作り上げる危険性を孕んでいる。たとえば、2011 年の東日本大震災の際に起きたような巨大津波の発生の可能性は、過去の堆積物の記録から地質学者によって予見されていたにも拘らず、それが津波対策に十分に生かされてこなかった。これは、分野の壁の悪しき実例として今後の教訓とされるべきであろう。地球惑星科学の将来のためには、多様性を尊重しつつ、そこから生まれる専門性の壁を相互理解によって打破し、新しい地球惑星観を創生する必要がある。

また今一つ留意すべき点として、人間のライフタイムと地球惑星現象の時間スケールの違いに対する社会認識の不十分さがある。1000 年に一度の大地震に備えるのは、財政的にも心理的にも抵抗が大きい。ともすれば人々が忘れがちで軽視しがちな長周期のカタストロフィックな現象に注意を促すのも地球惑星科学の使命であろう。さらに人類のライフタイムと地球の時間スケールの違いにも留意しなければならない。人類が多量の化石燃料を消費するようになったのは産業革命以降のことであり、それ以来人類は地球環境を劇的に変化させたと言っても過言ではない。地球が数億年かけて蓄積した化石燃料を人類が極めて短期間のうちに消費した結果、地球が 46 億年かけて築きあげてきた自然環境は急速に変貌しつつあり、地球システムに備わる自己調節機能（ラブロック「ガイア仮説」）が働く前に、地球環境が回復不可能なほどに破壊されてしまう恐れすらある。実際、フロ

ンがそのオゾン層破壊能力に気づかれないまま使用規制がなされなかったならば、21世紀半ば過ぎには地球はオゾン層を失っていた可能性がある。「持続可能な地球」のために、地球惑星科学は環境問題に取り組む使命がある。それは地球惑星科学固有の使命である。

③ 局所性と普遍性

地球惑星科学においては、いかなる研究対象であっても、実際に観察・観測できるのはその総体のごく一部でしかない。その意味では、実験以外のいかなる研究も局所性の縛りを免れ得ない。そのため研究成果においては常に普遍化の努力が求められる。例えば、日本の四万十帯や美濃帯の研究から世界に通用する「付加体」の概念が生まれたように、ローカルな研究からグローバルに通用する普遍的概念の抽出が求められる。言い換えると、普遍的概念につながるローカルな研究、地域的な研究を見出す能力が必要で、常に具体的な局所あるいは地域と広域的・一般的な普遍とを結び付ける必要性が認められることは、地球惑星科学の研究における固有性の一つである。

④ 技術開発による新展開

他の多くの自然科学分野と同様に、地球惑星科学においても技術開発が研究の急激な進展をもたらすことがある。例えば、コンピュータの発明が気象学の急速な進展をもたらしたように、地震波トモグラフィーの開発もわれわれの地球観を劇的に深化させ、島弧の深部構造、沈み込むスラブの構造、プルームの存在等が、まるで人間の体内をCTスキャンで見るように明らかにされた。さらに二次イオン質量分析法やCHIME法(U-Th-Pb化学アイソクロン法)等の開発によるジルコンの年代測定技術は、地球年代学、地球史、テクトニクス分野に大きなインパクトを与えている。また高感度地震計や全地球航法衛星システムの高密度観測や高解像度衛星による解析は長期的、短期的な地殻変動の進行を明らかにした。一方、人工衛星による地球環境のモニタリングやリモートセンシング、GIS(地理情報システム)等の空間分析、地球シミュレータ等高速計算機による精緻な数値シミュレーション等により、人類の地球に関する知見は著しく拡大・深化してきた。また、地球惑星科学者みずから地球惑星中心部の超高压高温を実現する技術開発を行い、物理学・化学・材料科学等の諸分野に地球惑星科学を超えて自前技術を提供している例もある。地球惑星科学の研究者は常にこのような新しい技術の進展に目配りし、いち早くそれらを導入し、あるいは必要な技術を自ら開発することが必要とされる。

(2) 近接学問分野との多様で密接な連携

地球惑星科学のそれぞれの分野は近接する他分野・学問領域と深い関係を持ち、有機的に連携している。例えば、地球深部の物質を研究する高压物質科学は、鉱物学や岩石学と関係するだけでなく、物性物理学や高压物理学のフロンティアでもある。また生物の進化を研究する古生物学は、地質学や生物学と深い関係を有するの

は当然であるが、地質史に残る生物種の大量絶滅の研究を通して、地球環境科学、地球進化学とも関係が深い。さらに近年注目を浴びている新しい科学である非線形科学と複雑系科学も地球惑星科学に大きな影響を与えている。これは言うまでもなく地球惑星科学が対象とする系・現象の多くが、複雑系・非線形現象であることによるが、逆に「カオス」のように地球惑星科学の分野（気象学）から生まれた数理科学の概念もある。また、自然災害や地球環境問題に関しては、工学、農学、医学、法学、人文社会科学等との連携も必要である。このように様々な関連学問分野と密に交流しながら発展していくのが地球惑星科学であり、それはこの分野の固有な特徴といえよう。

(3) 社会的要請

地球惑星科学の少なくともいくつかの分野は、実学として発展してきた側面がある。その顕著な例は明治政府の富国強兵策のもとで推進させられた地質学である。石炭・石油・各種鉱物資源の確保は重要な国策であり、それを達成するために多くの地質学者が養成された。このような国内での資源探査としての社会的要請は、昭和後期の国内資源の枯渇やエネルギー革命による石炭採掘の中止に伴って相対的に小さくなった。他方、産業の発展が自然環境の破壊をもたらしたことから、地球環境問題や地域的な環境問題への社会的関心が高まり、計算機の進歩とも相まって気象予測・気候変動予測研究が注目されるようになった。気象学は精密な地上・衛星観測網の構築と計算機科学の発展を通じて、数日先までの天気予報において飛躍的な精度向上を果たし、また、長期的なモニタリング観測に基づく大気中の人為起源を含む化学物質やエアロゾル等の挙動、大気海洋相互作用を含めた気候モデルによる地球及び地域スケールでの気候予測は、人類の将来へ向けた指針策定の基盤的情報を提供し、さらに生態系や炭素循環も組み込んだ地球システムモデルとしての発展が見込まれている。一方、新たな資源探査の側面も内包する海洋掘削船「ちきゅう」に代表される海洋底科学、あるいは「はやぶさ」に象徴される惑星探査科学が国策としても推進されてきている。加えて自然エネルギー源としての地熱や太陽・風・波力エネルギー等に関する研究も進んでいる。このように、地球惑星科学においては、国策とも連動して、時代とともに教育研究の重点が大きく変化してきている。

一方で、必ずしも国策や社会的要請によって始められた研究ではなくても、結果的に社会的な要請に大きく応える成果となる分野もある。その顕著な例は活断層研究や津波の地質記録解読の研究で、2011年の東日本大震災と原子力発電所事故以降、地震に伴う津波災害の予防側面としての社会的要請がきわめて大きくなった。そして、放射性物質の輸送・拡散予測にも気象学・海洋科学の数値モデリングが必要とされている。この他にも、不断に行われている地形・地質調査ならびに水文調査も斜面災害等の基礎資料を提供する研究として重要である。また梅雨期の豪雨、台風災害等の気象災害には気象学や気候力学が、それに伴う土砂災害には地形学が、火山噴火災害には火山学や火山地質学が、そして地震には変動地形学や地震学が、重要な貢献をなしている。さらにはこれらの諸科学の成果のもとで、地球と人間の

関わりや土地利用の在り方等を考える地球人間圏科学も重要性を増している。このように地球惑星科学には災害科学や持続性科学としての側面があり、社会的要請に直接応える学問分野でもある。また地球温暖化等の環境問題が全世界的課題となっている現在、気象学・気候力学・雪氷学や海洋科学等によるグローバル及びローカルな水環境に関する予測や、人間活動の自然環境変化への影響評価を含む地球環境科学は今後社会的要請が一層強まる分野として、発展が期待される。

3 地球惑星科学を学ぶ全ての学生が身に付けることを目指すべき基本的な素養

(1) 地球惑星科学の学びを通じて獲得すべき基本的な知識と理解

① 地球惑星科学を学ぶことの本質的意義

全ての自然科学は人間の知的好奇心に根ざしており、中でも地球惑星科学は博物学の時代から学問の中心の一つであった。ゲーテが鉱物学や地形学を研究し、アインシュタインがスイスアルプスの山肌に現れた褶曲構造の成因を友人と議論したことは有名である。古来人類は星空を眺め、天空の運動を理解したいと切望し、氷河が運んだ巨石の謎を追い、翻って火山噴火や大地の鳴動に恐れをなし、大地の成り立ちを知りたいと願った。また石の中に残された生命の記録から、進化の神秘に思いを馳せた。また、ギリシャ時代には「観天望気」により翌日の天気を予想する試みが行われていた。このような先人の知的好奇心から営々と築き上げられてきた学問の体系は、然るべき知的好奇心の持ち主によって承継され、発展させられねばならない。ここにこそ学びの本質がある。すなわち地球惑星科学の学びは、地球や惑星のさまざまな現象に関する素朴な疑問、知的好奇心に裏付けられたものでなければならない。そして学びの過程においてそのような知的好奇心が一層育まれ、自ら考え、更なる学びを求める姿勢が醸成されねばならない。このように学べば学ぶほどますます学びたくなるという「学びのポジティブフィードバック」が達成されることこそ、地球惑星科学における教育の目標であり、学ぶことの本質的意義もここにある。

地球惑星科学を学ぶことによって、学生たちは地球という不思議な惑星の営みを知ることができる。この広大な宇宙空間において、現在まで知られているところ唯一の知的生命体を宿す惑星の神秘を、その成立の過程と現在の様態を学ぶことによって実感することができるだろう。そして人類がこの地球上で生まれ、今日まで発展を遂げてきた歴史を知り、人類の将来を考える大きな契機となすことができよう。そして学生たちはこのかけがえのない地球で現在進行しているさまざまな環境問題やエネルギー問題、自然災害増大等の諸問題について理解と思考を深め、それらの解決に向けた取り組みに貢献することの重要性を認識するだろう。つまるところ「われわれはどこから来て、どこへ行くのか」という人類究極の問いを考え続け、人類の望ましい未来を実現させるのが地球惑星科学の学びの本質であると言えよう。

② 獲得すべき基本的な知識と理解

地球惑星科学がカバーする領域は多岐にわたり、各専門分野において必要とされる知識と理解は多様であるが、地球惑星科学を学ぶ学生は次のような事項について基本的な知識と理解を求められる。これらは前述した地球惑星科学の定義と固有の特性に緊密に結びついたものである。ただし、以下の内容はあくまで総合的な地球惑星科学関係の学科を想定したものであり、地質学、地球物理学、もしくは自然地理学に特化した学科の場合、その一部のみが当てはまるものと理解されたい。

○太陽系の形成と構造に関する基本的事項

ビッグバンに始まる宇宙の形成と進化、宇宙の基本構造である銀河に関する初歩的な理解、並びに星の一生と元素の起源に関する知識、太陽系の形成と惑星形成に関する理解、探査により得られている現在の太陽系の惑星に関する基礎的知識と、固体惑星・ガス惑星・氷惑星の違いとその成因についての基礎的理解、さらに、太陽系以外の惑星系に関する初歩的な知識、太陽放射・集積エネルギー・放射性元素という、惑星の活動を維持するエネルギー源に関する基本的理解。

○磁気圏と宇宙空間に関する基本的事項及び地磁気に関する基本的知識

太陽の構造とその活動に関する基本的な理解、太陽風と惑星磁気圏の相互作用に関する基礎的理解、星間空間へと繋がる太陽圏全体の構造と宇宙線に関する基礎的理解、特に地球磁気圏・電離圏・放射線帯等の構造とその動力学を支配するプラズマ物理に関する基本的理解、オーロラや磁気嵐のメカニズムについての基礎的理解や、磁気嵐と人間生活への影響についての基礎的知識、地磁気の日変化・永年変動に関する知識と磁場ダイナモの基本的理解、太陽黒点の活動と地球環境の関係や 1 ミランコビッチ・サイクルに関する知識。

○地球の初期進化に関する基本的事項

原始地球から出発して、原始大気が形成され、隕石衝突による熱エネルギーの集積によってマグマの海が形成され、地球の層状構造が成立するまでの地球の初期進化に関する知識。

○地球の大きさや形状に関する基本的事項

天体観測や、測地測量、人工衛星を用いた観測等により、地球の大きさや形状、また重力分布の様子と 2 ジオイドの形状等をいかにして知ることができるか、という知見。

また、自転する地球の形状がどのように形作られどのような座標系で表現されるのか等についての基本的な知識、さらに近年発達した全地球航法衛星システムや宇宙測地技術を用いた測地学とその地殻変形への応用に関する知識。

○大気・海洋系の運動と相互作用に関する基本的知識

地球大気と海洋の基本的な構造並びに他の惑星大気との相違、地球全体の放射熱エネルギー収支と大気や雲による温室効果、地表面熱収支における水の役割、放射性熱収支の南北不均衡に伴い駆動されるハドレー循環や貿易風、偏西風ジェット気流やそれに重畳する傾圧不安定波（移動性高気圧）、成層圏・中間圏におけるオゾン等の物質循環等、大気の循環に関する基本的知識や気候系における役割、乾燥・湿潤大気の熱力学、雲形成や降水の仕組みと水循環、海洋の風成循環の様

態と西岸強化のメカニズム、並びに海洋の熱塩循環とその仕組み、気候への影響に関する基礎知識、大規模な運動にはたらく 3 コリオリ力と地衡風平衡・温度風平衡、大気海洋相互作用がもたらすエルニーニョ等の自然気候変動に関する基本知識、オゾンホールや地球温暖化等人間活動の影響による気候変化に関する基本的知識。

○地球温暖化等地球環境の変動と人間活動の関係に関する基礎的知識

「大気・海洋系の運動と相互作用に関する基本知識」に加え、温室効果気体の挙動や地球上の炭素循環、気候系のはたらく様々なフィードバック過程に関する基本知識、オゾン層形成とオゾンホールに関する基礎知識。

○地球史と物質進化に関する基本的知識

熱機関としての地球の理解に基づき、初期地球形成後の火成作用や変成作用の変遷を理解すること、地球の基本的な層状構造の形成後、マントル対流、プレートテクトニクス及び 4 プルームの活動により定常的な全地球物質循環が進行していることについての基本的知識、これらを通じ、マントルで様々なマグマ源物質が形成され、海嶺・島弧・プルーム上等のマグマ形成場でそれぞれ特徴的なマグマ活動や熱水活動があることへの理解、加えて海洋・島弧・大陸等の地殻内や沈み込むスラブ等において特徴的な変成作用の場が形成されていることへの理解。

○地球年代学と地球化学に関する基本的知識

放射性同位体を用いて、地球や隕石、岩石の放射年代を決定する種々の年代測定法の基本原理とそれによって得られた年代論的知識（隕石や地球の年代、代表的な造山帯の年代等）。天然における元素の循環、微量元素や安定同位体を用いた岩石成因論、物質移動の解析、とりわけ水や流体の輸送の解析に関する基本的知識。

○地球の内部構造に関する基本的知識

地震波や地球自由振動に関する基本的知識とこれらによって決定された地球の層状構造についての基本的知識、またそれぞれの部分を構成する物質についての知識、地震波トモグラフィーについての理解とそれによって推定される地球の内部構造（沈み込むスラブの構造やプルームの形態等）についての理解。

○地球内部ダイナミクスに関する基本的知識

地球内部の熱をエネルギー源とした、流体核内での運動と地球ダイナモ・地球磁場、マントル内の対流運動、プレート運動、大陸形成、地震・火山活動等の地球現象に関する基本的な知識と理解、天体の起潮力や地球表層流体（大気・海洋・陸水・雪氷）の運動・変化に対する構造や物性に依存した固体地球の応答としての、潮汐・加重変形、地球回転（歳差・章動、極運動）・自転速度（LOD）の変化、5 アイソスタシー等に関する基本的理解。

○テクトニクスに関する基本的知識

プレートテクトニクスやマントル対流の基礎的理解、プレート、プルーム、6 ホットスポット、7 アセノスフェア等の基礎的知識、中央海嶺の構造と 8 オフィオリイト、9 リソスフェアの形成と構造に関する理解、沈み込み帯における付加体と島弧の形成、大陸の分裂と衝突等の 10 グローバルテクトニクスに関する基本的理解、

また地震や断層、褶曲あるいは ¹¹ ナップ構造、変動地形等表層テクトニクスに関する基本的知識、造山作用による大地形と広域変成帯の形成に関する理解、岩石の変形組織から応力や歪に関する情報を読み取る構造岩石学・¹² レオロジーの基礎知識。

○地球惑星物質に関する基本的知識

地球や惑星の構成物質である鉱物、岩石、熱水、マグマ等に関する基本的な知識とそれらの形成過程（火成作用、変成作用）、とくに結晶分化作用に関する理解、鉱物の相転移や、鉱物同士及び鉱物とメルト・流体間の化学反応に関する知識、多成分多相系の化学平衡（¹³ ギブスの相律）の理解とそれに基づく基本的な相図の正しい理解、高温高压実験に基づく下部マントルや核を構成する物質についての知識、熱力学に基づく地質温度圧力計の知識、化学反応のカイネティクスや拡散等の輸送現象の基礎的理解。

○陸水の表層循環と地質学に関する基本的知識

地球表層における風化・侵食と砕屑物の運搬と堆積、続成作用、その結果として形成される地形と堆積岩、及び物質運搬に関与する陸水の挙動に関する基本的知識、地層の分布や産状、含有化石等を総合的に研究し、生成年代の新旧を基準として地層を区分し、対比する層序学の方法論に対する理解、地質調査による地層や岩体の3次元分布とそれぞれの相互関係の把握、新旧関係の理解。

○生物進化と地質年代区分に関する基本的知識

地球上で大陸と海洋が成立し、海洋の中で原始的生命体が生まれ、「¹⁴ カンブリア爆発」を経て多様な生物の進化へとつながり、今日人類が出現するに至る生物進化についての基礎知識、並びにそれに基づいて決定されている地質年代区分についての知識、とりわけ地球史においては、生命進化と地球表層環境の「共進化」的關係、古生代末や白亜紀末に見られるような生物種の大量絶滅とその後の回復・多様化が繰り返し起こっていること、その原因について小天体衝突説や環境変動説等さまざまな説が議論されていることを理解すること、人類が進化した時代における環境変化と現代における環境変化を対比し、地球史における人類の果たす役割を理解することに加え、今日生物多様性の喪失が問題視される背景の理解。

○自然災害に関する基礎的知識

台風や竜巻、雷、集中豪雨、豪雪等の気象災害に関する基礎知識。活断層、地震、津波等テクトニクスに関係する災害ならびに斜面災害や土石流等の複合的要因による災害の基礎的理解、火山噴火による火砕流、溶岩流、火山灰降下による災害の基礎的な知識、またこれらの災害時の対応に関する防災知識。

○鉱産資源に関する基礎的知識

石炭、石油、天然ガス及び各種の鉱物資源の形成と産状、世界的な分布等に関する基礎的知識。

○関連する諸分野等の学修及び諸経験

地球惑星科学は「時間」と「空間」を主要な視座としてもつ学問分野であるが、数理科学や物理学、化学、生物学、情報科学等他の自然科学諸分野の広範な知識を利用して初めて成立する学問でもある。このため、学生は自己の興味に合わせ、必

要に応じてこれらの学問分野を適宜学修することが重要である。何をどれだけ学ばねばならないかは、対象とする専門分野によって大きく異なり、学生は指導者の助言を仰ぎながら自ら判断する必要がある。

また、地球惑星科学は野外科学の側面も持つことから、地質・地形巡検や海洋調査実習、種々の地球物理学観測実習、土地利用調査等の機会を捉えて積極的に参加し、さまざまな経験を積むことも極めて重要である。これらの巡検や実習によって直接「生の地球に触れる」体験を持ち、自分でデータを収集する経験をするには、知的好奇心の涵養に大きな効果があり、かつ自己の科学者としての適性を見極めるのにも良い機会となるであろう。

○現代社会における地球惑星科学の役割と課題

学生は、地球惑星科学が複合系を扱う自然科学であるとともに、地球環境問題や資源・エネルギー問題に関わり、かつ社会基盤整備における基礎科学、災害科学としての側面も併せ持つことを認識することが重要である。この認識は、学生の職業選択にも大いに影響するはずであり、また学びへの直接的な動機付けとなることも考えられる。とりわけ地球環境問題、資源・エネルギー問題や自然災害は現代社会が抱える大きな課題であり、地球惑星科学がこれらの課題の解決にどのように貢献できるかについて考察を深めていくことが重要である。

(2) 地球惑星科学の学びを通じて獲得すべき基本的な能力

① 地球惑星科学に固有の能力（専門的な知識や理解を活用して、何かを行うことができる能力）

ア 現実的課題への対処

地球惑星科学を学ぶことの本質的な意義は、上に述べたように「地球・惑星に関する知的好奇心を育み、自ら考え学ぶ姿勢を醸成すること」並びに「人類の拠って来る所以を考え続け、地球の自然的営みと人類との関わりの中で、人類の望ましい未来の実現に貢献すること」と考えられる。であるならば、地球惑星科学の学修者は、社会が直面している地球環境に関するさまざまな課題を自分が学修したことに基づいて考察し、適切な対応を考え、行動できる能力を獲得する、ということになるはずである。

例えば、地球惑星科学と密接に関係する地球環境問題は、多くの相反する要因と利害が絡み合った複雑な問題であり、単純な解決策のないオープンエンドな課題である。その一つ、エネルギー問題は地球惑星科学と密接に関係した喫緊の課題である。現代文明は、多量のエネルギーを消費することで成立している。例えば火力発電においては数億年も長い地質時代を通じて形成されてきた化石燃料を数百年という短期間に大量に消費し、大量の二酸化炭素等の化学物質、エアロゾルを大気中に放出している。即ち、人間活動に必要なエネルギーを得るために、燃料の採掘や消費に伴う大きな環境破壊という代償を払っており、その影響は局地的汚染に留まらず、地球温暖化にも及んでいるのである。一方、有限な化石燃料資源に取って代わるべき種々の再生可能エネルギーについても、その普及に向けては多くの問題点を抱えており、決定的な方策は定かでないのが現状であ

る。この他、多発する自然災害に対する対応、将来に予想される水資源の不足や食糧問題、生物多様性の喪失等、現代社会が抱える多くの問題は、地域規模だけでなく、地球規模での解決が必要になっている。このような難しい問題に対して、地球や惑星の自然的営みに関する正しい知見に基づき、自然現象と人間活動の調和の観点から考察するという地球惑星科学的アプローチによってあるべき方向性を探っていくことのできる能力、それこそが学際的で総合的な学問である地球惑星科学の学修者に獲得可能な特筆すべき能力なのである。それゆえ、地球の自然的営みの中で生きてきた人類にとって、地震、津波、暴風、洪水等の自然災害に関する減災の本質的な意味は、地球惑星科学を学ぶことのみによって本質的に理解されるものである。

イ 職業上の意義

地球惑星科学が貢献することのできる職業は多岐に亘る。以下に代表的な職種を列挙する。

- 行政職・一般技術職：国際、国家、地方レベルの行政機関並びに企業において、自然環境に適合した国土利用や地域開発計画、災害に強い社会の実現、安全で持続的な資源・エネルギーの確保、等に従事する。
- 研究職：大学や各種研究機関での地球惑星科学に関連する諸分野での研究や、研究開発に従事する。
- 教育職：高等教育機関での地球惑星科学、環境科学、理科教育等の教育を担当する。また人文社会系学部を含む広範な学科での、地球惑星科学、地球環境等に関する教養教育を担当する。小・中・高校での理科・数学・社会科を担当する。自然史系博物館学芸員として、自然史に関する資料収集、研究を行うとともに普及教育やジオパークの推進等を行う。またそのような人材を育成する。

これら教員や学芸員等は、地域の地質や化石・鉱物・岩石等に関する実地教育を通じて、国民に対する幅広い自然史教育を行っている。このような教育は単に自然に対する理解を深め知的好奇心を醸成するのに役立つだけでなく、その地域で繰り返し起こる災害に対する防災教育としても機能している。

業務内容として代表的なものを以下に列挙する。

- 気象予報：日々の生活に欠かせない気象予報については、主に気象庁が観測業務や予報業務・研究を行い、民間気象予報会社は、予報の内容を社会に伝達する役目や天候情報を活用した様々なコンサルタント業務を主に担っている。それらの場で活躍するのは地球惑星科学、とりわけ気象学を専攻した人材である。なお、海況予報や季節予報の業務・研究、さらには気候の将来予測研究には、気象学のみならず、海洋物理や気候力学等より幅広い分野からの人材も必要とされている。
- 防災：上に述べた気象予報は気象災害に対する防災にも生かされる。また地震や火山の観測・予測を担当する地震学・火山学を専攻した人材は地震・火山災害に対応する。地方行政や防災関連コンサルタントでの国家レベルでの防災

部門と連携した活動や、予想される自然災害に対して、ハザードマップを作成し、必要な防災・減災工事を企画・実施する等の業務も、地球惑星科学を専攻した人材が、土木・建設を専門とする人材との協力において担うべきである。

- 測量・地図作成：測量や地図作成業務（電子地図を含む）及び GIS（地理情報システム）データ作成や空間解析業務、台帳管理や GIS による システム作成業務等測量・地図/GIS に関するコンサルタント等で地球惑星科学出身者は貢献している。
- 水産資源管理：水産資源の管理のための、物理学的・生物学的環境の調査等には、海洋科学を専攻した人材が活躍している。
- 水資源確保：世界的に見て水資源、特に地下水資源の確保は重要な課題となっている。とりわけアフリカ等の発展途上国においては死活問題であり、水文学・水理地質学専門の大学研究者、地質コンサルタントに勤務する地球惑星科学出身の人材がこの問題の解決に従事している。
- 地形・地質調査・物理探査：道路、橋梁、ダム、原子力発電所等の構造物の建設に当たっては地形・地質調査と物理探査が不可欠であり、とりわけ公共施設の立地選定に当たっては活断層の調査が重要であることは論をまたない。このような業務に当たるのは地質コンサルタントや建設・測量会社に勤務する地球惑星科学出身の人材である。
- 資源探査：石油や金属鉱物資源の探査や買い付けは日本の産業を支える重要な職業である。諸外国での探査業務や買い付け業務を担うのは、資源探査会社や商社に勤務する地球惑星科学出身の人材である。特にレアメタルの資源探査は、日本の産業の発展に深く関わっている。
- 新素材開発：鉱物学や岩石学を専攻した人材はセラミック業界やマテリアル業界で新素材の開発や分析業務に従事する等して、この分野で大きな貢献をなしている。
- 地球環境問題の解決：20 世紀からの人口急増や高度経済発展に伴う自然改変や自然破壊、様々な廃棄物等に起因する大気、土壌、地下水、海洋等の汚染は、システムや循環といった観点を含む総合的な対策が求められる。このような課題に対しては、産・官・学を巻き込んだ研究や法整備等が求められ、そこでは地球惑星科学の素養が求められる。
更には、地球温暖化問題や食糧問題等への取り組みにおいても、地球惑星科学からの貢献が増えている。
- 計算機関係：地球惑星科学のいくつかの分野では、コンピュータを用いた大規模な数値シミュレーションやその膨大な出力データや観測データの数値解析、さらにはこれらに必要なプログラミングについての教育が行われる。これらの分野を学んだ多くの人材が、コンピュータ関連の職種に就き活躍している。

以上の例に留まらず、地球惑星科学の教育によって培われた能力は、マスコミや出版等の分野においても活用されており、職業上非常に応用範囲の広い能力である。また政府の ODA（政府開発援助）や企業活動の一環として、諸外国での

鉱産資源・水資源開発や環境保全事業に従事し、国際貢献に寄与している者も多い。

ウ 市民生活上の意義

地球惑星科学の学修者が、地球と惑星に関する基本的な知識を修得し、そこで起こる種々の現象に関して多面的な観察や観測と分析、そして合理的な考察を行い判断できるようになることは、市民として社会と関わる際にも多くの有用性を発揮できる。

地域の地理的特徴を把握し、地学的成り立ちを一人の人間が経験できる時間スケールを超えて理解することは、自然災害に対する備えの第一歩である。地球惑星科学の学修はその土地固有の特性を理解することを助け、ハザードマップや地形図・画像から防災上危険な個所の判別を可能にし、国土の適切な土地の利活用に貢献する。単に個人の生活を守るだけでなく、地域の防災にもその知識を活用することが可能である。

加えて、地球環境に関する諸問題に対して多面的な考察を行い、解決に向けた種々の提言を行う能力も養われることが期待される。上述のエネルギー問題のように、科学的にも社会的にも高度に複雑な問題を総合的に考察できるのは、地球惑星科学を学修した者の特質である。同時に、こうした高度で複雑な問題やそれに関連する専門知識を、一般市民や社会に分かりやすく伝えることができるのも、また地球惑星科学の学修者なのである。我々は、この地球を離れては生きていけないので、この地球を良く知り、その上で地球とうまく共生する術を見出さねばならない。こうした意味において、地球惑星科学を学ぶことの社会的意義は大きい。

私たちは、活動的な地球によって与えられるさまざまな劇的な変化に対処するために、「地球に生きる素養を身に付けている」ことが大切である。地球、そして身の回りにある自然を科学的に理解して自然が引き起こす変化に対して適切に判断し行動できること、かつ人間活動が地域的あるいはグローバルな自然環境に与える影響をも科学的に推察できることが、「地球に生きていく素養」あるいは「教養」である。しかしながら、現在の初等・中等・高等教育及び生涯教育において、「地球に生きていくための素養」を身に付ける基本となる教育は他教科と有機的な結合をとりながら進められているとは言い難い。

社会における地球惑星科学の学びの場は教室だけではない。日本各地に設立されている自然史博物館、科学館等を利用することによって、地球惑星科学に関係する現象を深く理解することができる。また、日本各地に設立された「ジオパーク」は、地質巡検あるいは野外教室の役割を果たしており、積極的に利用することが望まれる。「地学オリンピック」や「地理オリンピック」は、学校教育「地学」や「地理」に関する知識を網羅的に学び確認する機会を与えている。これに加えて、「地球に生きる素養」がどの程度身につけているかどうかを確認する手段を持つことも大事である。こういった社会的な活動を通して、地球惑星科学へのより深い理解と市民生活を送る上の実践的な知識が身につくのである。こうい

った中であって高等教育で展開される「地球惑星科学」は、初等・中等教育を引き継ぎ、社会へとつないでゆく、重要な橋渡しの役割を果たしているのである。

エ 学問・社会の変化と地球惑星科学の学修

「社会的要請」の項でも述べたように、地球惑星科学の教育と学修における力点は国策や社会情勢の変化とともに大きく変化してきた。また、学問の内容もプレートテクトニクスや白亜紀末の生物の大量絶滅等、異なる観点からの論争の上に新たな学説が構築されてきた。何が正しくて、何が正しくないのか、すなわちある学説の真偽を見極めるのは、地球惑星科学の場合、そう簡単ではない。場合によっては何十年も論争が続くこともある。その意味では学士課程を修了した後も、常に新しい研究の動向に注意を払い、新たな知識を吸収する努力を怠らないことが重要である。

オ 獲得されるであろう具体的な能力

地球惑星科学は、地球惑星の複雑系に生起する多様な時間・空間スケールの様々な現象を対象とした学問であり、全ての自然科学の基礎知識を必要とする総合科学であるから、地球惑星科学の全てに通暁することは容易ではない。学士課程においては、地球惑星科学の概要を学んだ後、比較的狭い領域の内容をより深く学ぶのが一般的であろう。そのため、学生がどの領域を深く学んでいくかによって、獲得される専門的知識や具体的能力は異なってくる。

しかしながら、いずれの領域を深く学んだ者であれ、通常次のような事項のいくつかについて地球惑星科学の学修者に固有の能力を身に付けることになる。

- 各種の地図や画像を作成し、それを読み解き必要な情報を解析することができる。

地形図や海図、地質図や天気図等地図化された地球惑星科学情報は非常に多い。それらを正しく作成または収集し、読み解く能力は地球惑星科学で獲得できる素養の第一歩である。

- 世界中のデータや情報を収集し、その内容を読み解いて必要な情報を得ることができる。またそのための語学力を有している。

各種観測データや各種主題図、統計資料、衛星画像等のデータや情報を世界中から収集する能力が養われる。また、GNSS（全地球航法衛星システム）を利用して必要な位置情報を得ることや、空中写真の判読や衛星画像等の解析、GIS（地理情報システム）等を利用した空間解析能力も養われる。国内外の文献の検索にも精通可能な語学力も養われる。

- さまざまな現地調査（フィールドワーク）を行い、現場において必要なデータを収集・解析することができる。

地球惑星科学に固有な方法論として、野外における現地調査（フィールドワーク）があり、多様な現象が生じる現場において、地形・地質調査、土地利用調査、災害被害調査、災害履歴調査、気象観測、海洋観測、地震観測、火山観

測等を実施する能力が得られる。さらには、現場で得られた情報、各種の地図や他地点からの情報、リモートセンシングや統計資料等から得られる情報を多面的に解析する能力も養われる。

○ **さまざまな対象や現象を観察あるいは観測し、記載することができる。**

地質学分野では、野外での露頭の観察と記載、化石の分類と記載、火山噴火の観察と記載等が、岩石・鉱物学分野では、岩石・鉱物・鉱床等の産状と顕微鏡下での観察、自然地理学分野では、地形、土壌、植生、自然災害の観察と記載、気候、水文観測等が、また地球物理学分野では、気象、大気物質、オーロラ、地震、海流・波浪等の観測が、記載の対象となる。これら多様な対象や現象を正確に観察あるいは観測し、記載する能力が養われる。

○ **解明したい目的のために必要な機器や技術を選択あるいは開発して、測定や分析を行うことができる。**

質量分析技術や高度な化学分析技術等、解明したい目的のために必要な機器や技術を選択あるいは開発し、目的に応じた測定や分析を行う能力が養われる。

○ **観測データを利用して、解明したい目的のためにコンピュータを駆使して解析することができる。また将来の変化・変動の予測を行い、その結果を解釈するための能力を有している。**

地震波トモグラフィーや各種の気象・海洋データの解析等、地球物理学の領域では大量の地球観測データについて統計的手法に基づくコンピュータを駆使した解析を行う能力が養われる。また GIS やリモートセンシングを活用する能力も養われる。さらに、気象・気候・海洋循環等の数値予測研究を行う能力も養われる。なお、天文現象の予測とは異なり、大気や海洋等複雑系の数値予測には、そのカオス的振る舞いに伴う不確実性が常に付随するが、こうした予測の不確実性に対する認識も養われる。

○ **ある対象またはある現象のさまざまな時空間スケールにおける実態を解析し、それらの統一的な描像を作り上げることができる。**

たとえば 1000 万年に及ぶ長い時間スケールの造山作用の運動像を、広域地質調査、露頭での観察や岩石組織の観察から明らかにしたり、実験によって岩石のレオロジーを明らかにし、プレートテクトニクスに組み込むことでその全体像を描き出したりする等、多面的で総合的な研究を行う能力が養われる。

○ **ローカルな研究からグローバルに通用する普遍性のある概念を抽出できる。**

地球惑星科学の研究が必ずしもすべて地球全体をその対象とする訳ではないが、例えば地域研究であっても、それを行う中から普遍性のある概念が発見されることがある。地域研究そのものにも重要な意義があるのはもちろんであるが、普遍的概念の発見は学問的意義がさらに大きく、それを通じて地球の将来を俯瞰することも可能となろう。こうした発見は誰もができるわけではないが、常にそのような意識を持ちつつ研究を行うことが重要であり、それを強く意識した教育がなされるべきである。

② **ジェネリックスキル（分野に固有の知識や理解に依存せず、一般的・汎用的な**

有用性をもつ何かを行うことができる能力)

ア 知的訓練としての意義

地球惑星科学は、実在する物質や実際に生起する現象を対象とした学問であり、論理だけで構築される学問とは異なる。そのため地球惑星科学においては、野外教育や実物教育が重視される。その際に「観察」という行為が重要になる。「観察」は単にあるがままに見るという受動的行為ではなく、見たいものを見るという能動的行為である。「観察」を定量的なデータとして記録する行為が「観測」である。そこでは目的意識と着眼点が重要であり、同一の対象を観察しても、人により着眼点が異なれば、抽出される情報も異なる。地質学から例を取れば、同じ露頭を観察しても、地層の重なり方から堆積場を論ずる人もいれば、割れ目の配列から応力場を議論する人もいるだろう。新たな着眼点を得ると、それまで見えなかったものが見えてくるということも良く経験するところである。「観察・観測」を通じて科学する視点を養うこと。これが地球惑星科学の教育における知的訓練の一つである。

また「観察・観測」という行為は、物事を多面的に見ることの重要性を教えてくれる。そして一つの事象を理解するのに、実にさまざまな知識が必要とされることも痛感されるに違いない。たとえば、火山の噴火現象を理解するには、まずマグマの性質を知るために化学的知識が必要であり、マグマの流動を理解するために流体力学やレオロジーの知識が必要となる。噴煙柱の挙動を理解するには数値シミュレーションが有効で、そのための計算機科学の知識が必要となる。地球惑星科学を学ぶ者は、幅広く様々な分野の学問を必要に応じて主体的に学ぶことが求められ、この過程を通じて、包括的な視野を獲得することができる。

もう一つの知的訓練として重要な点は、地球惑星科学の対象が高度に複雑で自由度の高い系である場合が多いことに由来する。系の挙動を単純な微分方程式で記述できることは稀で、複雑な非線形連立偏微分方程式系に帰着することが多い。それらは解析解がないか、あったとしてもそれを得るのは極めて困難であるのが普通である。そのため系の挙動を支配する要因を解明するには、ある種のモデル化が必要となる。具体的には方程式系における速い変数と遅い変数との分離、摂動展開による線形化等数学的なモデル化、あるいはスケーリング等の現象そのものの物理的モデル化が必要となる。この種のモデル化を行うにはある種のセンスが必要であって、そのセンスは具体的な学修・研究の過程で初めて得られるものである。地球惑星科学の学修者はこのような複雑な系をどのようにモデル化するのかについて、有用な知的訓練を受けることができる。

イ 国際性と行動力を養う訓練としての意義

地球惑星科学では各種のフィールドワークを行うことが多い。フィールドは世界中に及び、陸上におけるフィールドワークのみならず、洋上観測や航空機を利用しての大気観測、中には南極や北極、高山における観測や深海底観測等厳しい条件におけるものも含まれる。また、惑星探査や宇宙探査への挑戦もある。このようなフィールドワークや各種の観測・探査を通じて、地球惑星科学

を学ぶ者は自然の厳しさを知りつつ、その中に身を置いて学問をすることの楽しさと喜びをも知ることになる。また外国や極地での活動や、国際的な観測・探査プロジェクトへの参加を通じて、日本にいただけでは得られない視野が開ける。フィールドワークの経験は、国際性と行動力という点で職業人としても大きな力となる。

ウ 技術教育としての意義

地球惑星科学の学修においては、各種の観測技術を学ぶことができる。さらに、実験室における化学分析、合成実験、物性測定等の実験を通じて、各種の実験技術を修得し、得られたデータの精度や限界等に関する知識を学ぶことになる。化学分析では化学物質に関する基礎知識と、それらを安全にかつ注意深く取り扱う能力が養われる。また高度な精密分析機器を扱う技術も修得する。合成実験や物性実験では、電気技術や機械技術を学び、自ら新しい実験装置を考案、製作することもある。これらの技術教育を通じて、化学物質や機器の基本的取扱いに習熟し、社会に出てからの職業の幅を広げることができる。さらに地球惑星科学ではリモートセンシングデータや数値地図、GIS 等によるデータ解析に関する教育も浸透しており、コンピュータを用いた数値シミュレーションの重要性も増している。これらを学んだ者は、社会においての情報機器を活用した職業、分野に活躍の場を広げている。

エ ジェネリックスキルの修得

地球惑星科学の学修者は、上述のような学修の過程を経て、通常、次のような事項についての汎用的な能力を身に付けることになる。

- 観察によって、複雑な事象からでも必要な情報を抽出することができる。また観測によってそれを定量化できる。
- ものごとを、人間が経験できない時空間スケールを含めて、多面的な視点から考察し、総合的な判断を下すことができる。
- 知的好奇心を有し、必要に応じて主体的にかつ継続的に学ぶことができる。
- 未知のフィールドや、異なる分野へも積極的にチャレンジすることができる。
- さまざまな分野における現地調査や種々の観測を立案し、遂行することができる。
- 化学物質や各種の機器を正しく取り扱うことができる。
- 計算機プログラミングやそれを用いた数値シミュレーション、多変量統計解析を行うことができる。

4 学修方法及び学修成果の評価方法に関する基本的な考え方

(1) 学修方法

地球惑星科学を学ぶための学修方法は多様であり、それらを通じて個別的なスキ

ルの獲得が必要となるが、おおよそ以下に述べるような学修方法が基本となると考えられる。

○ 講義

学修効果を上げるために、基本的事項と最新の知見とがバランス良く配合された内容であるのが望ましい。地球惑星科学はどの分野も著しい進展を見せているので、限られた時間でその分野の内容を的確に講義するのは難しい。それを補うには、WebCT等を活用して、事前学修と事後学修を義務付ける等ブレンディッドラーニング（eラーニングと対面講義の組み合わせ）を実施する等の工夫があっても良い。また学生の理解度・到達度をチェックするため、毎回の講義の最後に簡単な小テストや演習問題を行わせるのも良い。講義の時間中、適宜質問する等双方向の授業となるよう努めることも重要である。講義は教員が教える（teaching）のではなく、学生が学ぶ（learning）という態度が重要であり、講義の到達目標等、学生が理解し修得すべき内容をシラバスに明記する必要がある。

○ フィールドワーク

地球惑星科学においては、フィールドワークは極めて重要な学修方法である。地形や地質、土壌、土地利用に関する調査法の指導と野外巡検、地球物理学的な実地観測や気象・水文観測、可能であれば海洋観測等も実施できれば学生にとって益するところは大きい。近年、大学教育において、フィールドワークの時間数が激減していることが懸念されている。安全を重視するあまり、学生単独でのフィールドワークが禁じられている大学もある。しかし、常に教員が付き添ってのフィールドワークは非現実的であって、それではフィールドワークの力はつかない。安全に十分に配慮しつつ、学生のフィールドワークの力が十分に涵養されるよう、現実的な指導がなされるべきである。またフィールドワークに要する費用についてもできるだけの援助がなされるべきである。

○ 実験・実習・演習

すべての自然科学におけると同様、地球惑星科学においても実験・実習・演習は極めて重要な教育方法である。実験・実習が講義内容と関係付けて実施される場合は、講義する教員と実験を担当する教員との間で、内容に関する十分な打ち合わせがなされ、教育内容に関する共通理解が形成されなければならない。個々の講義と直接関係付けられない実験・実習の場合は、学生の理解を深めるために、実験や実習の導入部で内容に関する短い講義を行うのも良い。マニュアルを渡して、学生に自主的に実験・実習をさせるスタイルの場合は、実験・実習の意義に関する解説を含めた丁寧なマニュアルの作成が求められる。実験内容は基礎的なものから次第に高度なものへと体系的にカリキュラムが設計されなければならない。さらに、数値や画像データ解析や数値シミュレーションの重要性が増している現状を鑑みれば、コンピュータを用いた演習・実習が効果的に学修に組み込まれることが望ましい。演習・実習の課題を適切に設定することと、ティーチングアシスタントの活用による丁寧な指導体制が求められる。また、時間外にも学生が自由にコンピュータを利用できる環境が望ましい。実験や演習・実習の結果はレポートにまとめさせ、その内容は教員が点検して学生にフィードバックし、

学修効果を高めることが望ましい。加えて、国内外の論文講読、将来の研究課題設定のための演習も必要である。

○ 卒業研究

卒業時に卒業論文を課す場合や、卒業論文を課さず卒業研究に相当する課題を演習等で課す場合には、卒業論文や卒業研究を通じて、学生の学力や研究に対する姿勢を飛躍的に向上させることが望まれる。そのためには、教員は次のように学生を指導すべきである。すなわち、学生には従来の研究のレビューを踏まえ、自ら課題達成のために何をすべきか問題意識を持たせ、課題設定から実施計画立案、実施、論文作成、プレゼンテーションに至るまでの過程を自らデザインする能力を身に付けさせるように導く。

(2) 評価方法

地球惑星科学固有の評価方法があるわけではないが、フィールドワークを実習として課している場合、その評価方法は実験や演習のそれに準じるか、長期のフィールドワークの場合は卒業論文に準じて行われることになる。

講義の場合、期末試験のみの評価によるのではなく、中間試験や小テスト、レポート、あるいは WebCT を利用している場合は事後学修の成果、等を総合的に加味して評価を行うことが望まれる。試験の内容も単に知識の獲得を確認するにとどまらず、思考力や洞察力を問う内容であることが望ましい。

実験や実習・演習の場合、評価はレポートによることになるが、実験・演習の結果のみならず、その結果に対する考察がどの程度深く行われているか、論理が正しく展開されているかどうか、に評価の重点が置かれることが望ましい。

卒業論文・研究の場合、学生がどれだけ自主的に取り組んだか、どれだけ研究動向を調査し研究の意義を深く理解したか、研究を実施する過程で何を工夫し身に付けたか、研究結果や考察、そして導かれる結論を論理的に正しく論文やレポートとして記述できたかどうか、に評価の重点が置かれることが望ましい。卒業論文や研究の成果は、口頭発表あるいはポスター発表等の形で学科内に公開し、質疑応答により学生の理解度を確認した上で、複数の教員の合議により評価するのが望ましい。

5 市民性の涵養をめぐる専門教育と教養教育の関わり

地球惑星科学の対象は、ローカルな現象からグローバルな現象まで幅広く、たとえローカルな研究であってもそこからグローバルに通用する価値を見いだせる科学である。よって、研究者の思考回路は、研究の過程でどんなに専門主義に陥っていても、最後はグローバルな視座に帰ってくる必然性を持っている。このような研究者集団から教育を受ける地球惑星科学の学修者もまた同じ思考回路を持つことが期待され、多面的な視点からものごとを総合的に判断できる能力を獲得させることが期待されている。地球惑星科学は、地球上やさまざまな地域で生じる諸問題が市民生活に直結している場合が多いことから、数多くある自然科学の学問分野の中でも、もっとも身近で市民生活に関わりの深い学問であり、市民集団の形成に貢献しうる学問分野の一つである。その意味で、地球惑星科学は専門教育において十分に市民性の涵養を果たし

得る学問である。

もちろん、このことは教養教育を軽視するものでは全くない。地球惑星科学は、自然科学のほぼすべての分野をその基礎として成り立つ総合自然科学であるから、教養教育において、数学、物理学、化学、生物学等の確固とした基礎を学ぶことが不可欠である。さらに地球惑星科学の学修者は、防災や環境問題、エネルギー問題に何らかの形で関わるのが想定されることから、人文・社会科学や工学・農学の諸分野についての基礎的知識を獲得することも重要である。一方、地球惑星科学やその基礎である地学及び地理学が教養課程や高等学校で教えられるならば、身近な題材を通じた自然科学への動機付けとなりうるし、地球環境問題等人類の抱える問題に関心を持たせることにもなる。そしてそのことが、地球惑星科学の基礎である、数学、物理学、化学、生物学の学びの動機付けともなることが期待される。

地球惑星科学の学修者は、良き市民となることを期待されるだけでなく、良きコスモポリタンになることも期待されている。フィールドワークで世界を飛び回る機会が多いことに加え、社会に出てからも世界を相手にする職種に就く人が多いことが予想されるからである。良きコスモポリタンになるためには、国際理解のための教養教育、語学教育は非常に重要であり、地球惑星科学の学修者には早くそのことに気付かせねばならない。また世界の多様な文化や価値観を認めることのできる素養を養うことも重要である。

地球惑星科学は地球ならびに太陽系内及び系外惑星の形成と進化を探求し、また地球惑星システムの変動を予測するという、学修者の知的好奇心を満たす魅力ある自然科学である。一方で、地球惑星科学は、自然災害等のローカルで身近な問題と地球環境問題のようにグローバルな問題との双方に関して、重大な社会的使命を担う自然科学でもある。この点において、地球惑星科学は人間と自然との関わりを学ぶという文理融合科学の側面も有している。言い換えれば社会からその有用性を強く求められる科学であり、社会との接点が極めて濃厚な科学である。地球惑星科学の学修者にはこれらのことを認識させ、教養教育と専門教育の双方を通じて、高い市民性の涵養に努めさせることが重要である。そうして会得した知識や知見を生かし、社会的にも重要な地球科学の問題や関連する専門知識を、個々の学修者が各自可能な範囲で、社会と国民に分かりやすく伝えることが求められる。

付録 1. 地球惑星科学の諸領域

① 宇宙惑星科学

宇宙惑星科学は、惑星、衛星、小惑星、彗星、太陽系外縁天体等太陽系の様々な天体、宇宙空間のプラズマやダストを研究対象とする。人工衛星による地球周囲の放射線帯の発見にはじまり、月惑星探査機により天体の詳細な情報が得られるようになり、この分野は大きく展開した。隕石、宇宙塵、アポロ・はやぶさをはじめとする探査機取得サンプル等の地球外由来物質の分析研究は、理論・シミュレーション研究とともに、太陽系の起源と進化を解き明かしてきた。そして、様々な軌道・質量の系外惑星の発見により、宇宙における惑星系の普遍性と多様性とその起源の解明が大きな研究目標となっている。個々の天体においては、リモートセンシングや着陸機の観測データをもとに、固体地球科学、大気科学の研究手法を応用する形で、研究が進められる。惑星質量、組成、太陽からの距離、大気組成・量、磁場の存否・強度、自転周期等の条件が地球と異なる天体と環境を調べることにより、地球で起きている事象の普遍性や独自性を議論することができる。なかでも生命存在環境の追求は、研究者以外の人を巻き込む「人類の夢」として火星探査、氷衛星探査の推進力となっている。宇宙生物学（アストロバイオロジー）も広い意味で宇宙惑星科学に含まれる分野である。さらに宇宙惑星科学に特徴的なものとして、衝突現象（破壊、クレーター形成）、衝撃波（固体、プラズマ）が重要な研究対象である。地球電磁気学のなかで、プラズマ過程が重要になる。超高層大気から外側の研究は、宇宙惑星科学の分野に含まれる。宇宙探査機やロケット、気球により、超高層大気やオーロラ、大気光等の大気現象を、外からまたは直接観察できるようになった。さらに、宇宙空間プラズマを研究する分野は、地球・惑星大気から電離圏、磁気圏、太陽系空間、そして太陽からのプラズマ加速現象まで分野は広がる。磁気圏・太陽系空間の宇宙探査機による観測は、惑星や太陽系に固有の現象だけではなく、広いプラズマの物理過程の実証にも繋がる。一方で、宇宙天気という社会的貢献のある分野が生まれている。

② 大気・水圏科学

この分野は気象学（大気科学）、海洋科学、水文学を核として、応用数学、物理学、化学を礎に、気候力学、雪氷学、地下水学、陸水学、自然地理学、地球化学、生態学、水資源学等の周辺分野と連携しつつ発展する地球科学の重要な一分野である。地球の気候や表層環境に重要な地球全体の放射エネルギー収支やそれに関わる大気や雲による温室効果、陸面・海面における熱収支、陸域における水・物質輸送動態を扱う。熱的不均衡により駆動されるハドレー循環、モンスーン、偏西風とそれに重畳する種々の波動擾乱（移動性高低気圧等）、大気波動（ロスビー波や重力波等）の運動量輸送により駆動される中間圏・成層圏循環と対流圏の力学的結合、さらには海上風系に駆動される海洋の風成循環の様態と海流西岸強化の力学、海洋の熱塩循環の仕組み等を理解するために、地球流体力学という大気海洋共通の理論体系が確立されている。また、雲形成や組織化、降水の仕組みと水の循環、大気海洋循環による様々な物質の輸送、太陽活動や火山噴火等の外力や、大気海洋相互作用がもたらすエルニーニョ等の自律的システムによる自然気候変動、さらには地球温暖化やオゾンホール、人為起

源のエアロゾル等人間活動の影響による気候・環境変化についても扱う。

なお、本分野の発展は計算機科学の発展とともに加速し、今日では日々の天気予報や波浪・海況予報、化学天気予報、季節天候予報、洪水・渇水・水質予測さらには古気候の再現、気候の将来予測等、科学研究にも利用価値が高く、社会にも役立つ数値シミュレーションが行われ、予測の長期化・高時空間分解能化が図られている。また数値予測においては、わずかずつ異なる多くの初期値を用いた「アンサンブル予報」により予測の不確実性の情報をも付与できるようになり、種々の観測データを予報初期値として数値モデルに取り込む「データ同化」手法も急速に発展している。

③ 地球生命科学

地球生命科学は、地球上に繁栄する多様な生物の起源、適応進化あるいは絶滅に関する記録を探り、その原因とプロセスを、地球史を考慮しながら解明する研究分野である。研究は、生命起源物質の化学進化、生命の起源、原核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、生物と惑星地球が共に進化するさまを地球惑星科学的側面及び生物学的側面双方から理解する研究分野である。したがって、研究の手法と範囲は、地球惑星科学及び生物学双方の広い分野に関わる。

地球生命科学の分野は多岐にわたるが、化石記録から生命進化を探る進化古生物学、過去の生態学を研究する古生態学、地層の時代を決定する生層序学等の古典的な古生物学分野に加えて、主として生命誕生から初期進化の過程とプロセスを探る地球微生物学、骨格形成のメカニズムを探る生体鉱物学等の各分野が、相互に関わりながら発展を遂げている。さらに現生生物の DNA に基づく分子生物学の導入により、信頼度の高い生物系統の復元、従来重視されてきた形態形質の再評価、絶滅生物の形質推定、生体鉱物の形成過程等多岐に及ぶ分野で新たな展開が行われている。また生態系システムとしての生物地球化学循環、特に炭素及び窒素循環を通じた地球環境と生態系の共進化を扱うバイオジオサイエンス (Biogeosciences) 分野が興隆している。

地球生命科学の重要な視点である「地球と生命の共進化」を理解するためには、地球と生命圏における親生物元素の各圏における量と、各圏間を移動するフラックスという生物地球化学循環を理解することが大事である。生命圏の主役である生物が進化し、生物たちが構成する生態系の機能の進化、生態系がおよぼす地球環境への影響等を把握する事を通じて、ダイナミックに変動し進化する地球生命圏を、はじめて理解出来るのである。

④ 固体地球科学

固体地球科学は、大気海洋を除く地球表層と内部を研究対象とし、その組成・状態・構造とそれらの形成・運動・進化、すなわち地球内部ダイナミクスをさまざまな時間空間スケールにおいて理解することを目指す研究領域である。

固体地球科学では、いくつかの異なる研究方法を駆使して、地球の形成、進化の過程を明らかにしている。野外での調査・観測によって地球を解明する手法は、現在の地球の諸現象を地球物理学的な観測に基づいて研究する地震学・測地学・火山学・地

球電磁気学等の分野において行われており、野外の地質構造や堆積構造の調査・観察に基づいて、過去の地球変動を解明しようとする研究手法は地質学・岩石学・火山学等の分野で行われている。地球内部を観測する手法は、その進歩によって、地震波速度、電気伝導度等の物性の三次元の不均質構造を詳細に解明しつつある。さらに、活断層のトレンチ調査、地殻及び海洋底掘削に見られるように、科学者が能動的に貴重な地質試料を採取する手法も行われている。また、野外から回収した試料の元素分析、微小部の組織観察にもとづく研究手法は、主に地球化学・鉱物学・鉱床学等の分野で行われている。これらの分野では微小領域の観察技術・分析技術の開発も重要な研究課題となっている。野外の調査と野外から採取した試料の分析・観察は、不可分なものとして行われることも多い。さらに、実験及び理論に基づいて地球の内部条件、物質の動きを再現し、固体地球のダイナミクスを明らかにする研究手法も行われている。これらの研究には、地球内部の運動を再現する地球内部の対流シミュレーション、超高压発生技術による地球内部の再現、地球内部物質の第一原理計算等による分子シミュレーション等があり、これらの研究を行うための手法の開発も重要な研究課題になっている。

⑤ 地球人間圏科学

地球人間圏科学は、地球上の人類の主要な活動領域である地球表層、すなわち陸域と海域における自然環境及びそれと人間の活動が相互に関連しあう諸現象を主要研究対象とし、持続可能な地球表層環境を構築することをめざす研究領域である。自然科学、工学・農学、人文・社会科学の視点を複眼的にもち、自然と人間との相互関係に取り組む点に特徴がある。自然現象に軸足を置く場合には、人間活動の場である地球表層環境の空間的構造、時間的な変化、多様性を明らかにし、それらをもたらす要因を解明することが主たる目的となる。地球上の熱と水の循環プロセスに関係した表層環境（地形、土壌等）の変動、あるいは断層運動や火山活動に起因する表層環境の変動等を対象に、自然地理学や地質学、地球物理学あるいはその複合領域となる幅広い分野（地形学、土壌学、地生態学、堆積学、地震学、火山学、応用地質学、第四紀学）の学問によって研究が進められ、人間活動を直接的に支える環境とその変遷に関する基礎知識を提供している。また生態学や土木工学、砂防学等と深い関わりを持ち、地球表層の状態が人間活動や生態系に与える影響の評価も主要課題としている。一方、人間活動に軸足を置く場合には、自然の場で人間活動がどう展開されているか、人間活動が自然にどう影響しているかを主要課題とし、人文地理学や地域研究、文化人類学、考古学、歴史学さらには農学、工学等の諸分野も密接に関係する。多様かつ深刻化しつつある環境問題、近年世界的に増加傾向にある自然災害、土地利用・土地被覆の変化に関わる問題、土地資源問題等の実態把握、問題発生メカニズムや危険性を自然科学的側面と人文社会科学的側面から総合的に理解し、適切な対策を立案していくことが重要な課題になっている。

付録 2. 用語解説

1. ミランコビッチ・サイクル

地球の公転軌道の離心率、自転軸の傾き、および自転軸の歳差運動によって現れる約 2 万年、4 万年、10 万年周期の気候変動。セルビアの地球物理学者 M.ミランコビッチによって提唱されたのでこの名がある。

2. ジオイド

地球の等重力ポテンシャル面のうち、平均海水面と一致するもの。

3. コリオリカ

自転する惑星にいる観測者が、惑星表面に相対的な物体の運動を記述する際に必要となる見かけの力で、その向きは物体の運動に直交し、大きさは物体の速度に比例する。地球科学においては、大気や海洋の大規模な水平運動に及ぼす地球自転の影響を表す見かけの力を指すことが多い。

4. プルーム

核・マントル境界に起源をもつマントル内部の高温の上昇流。

5. アイソスタシー

地球内部のある深さの場所（補償面）で静水圧平衡が成立している現象、またその考え。

6. ホットスポット

地球内部の固定された場所（とくに核・マントル境界）に起源をもつ高温上昇流（プルーム）の地表における表現。

7. アセノスフェア

リソスフェアの下位に存在する比較的やわらかく、流動性に富むマントルの層。部分熔融しているため地震波速度が小さく、地震波低速度層とも言う。

8. オフィオライト

造山帯に産する塩基性～超塩基性複合岩体で、海洋プレート（海洋地殻と上部マントル）の断片と考えられる岩体。最上部に深海性堆積物や枕状溶岩を伴う。

9. リソスフェア

地球表層を覆う厚さ 100km 程度の比較的固い岩石の層。岩石圏とも言われ、プレートとほぼ同義。

10. グローバルテクトニクス

プレートテクトニクスに代表される全地球規模の構造運動。

11. ナップ構造

低角の衝上断層で下位の地質体の上に累重している異地性岩体をナップと言い、そのような構造をナップ構造という。

12. レオロジー

固体や液体の変形と流動を扱う学問分野

13. ギブスの相律

熱統計力学の創始者の一人、J.W.ギブスによって考案された、多成分多相系の化学平衡を記述する法則。

14. カンブリア爆発

カンブリア紀初期（約 5.4～5.2 億年前）にほぼすべての動物門が一斉に進化、多様化し、出現したことを指す用語。中国雲南省の澄江化石群（5.20 億年前）やカナダのバージェス頁岩の化石群（5.05 億年前）が有名。

この用語解説の作成に当たっては次の文献を参考にした。

地学団体研究会編 新版地学事典 平凡社

<参考資料 1> 地球惑星科学委員会地球惑星科学大学教育問題分科会 審議経過

地球惑星科学大学教育問題分科会

平成 23 年 (2011 年)

12 月 2 日 分科会 (第 1 回)
役員を選出、地球惑星科学の大学教育の現状について

平成 24 年 (2012 年)

3 月 9 日 分科会 (第 2 回)
分野別質保証について

8 月 3 日 分科会 (第 3 回)
参照基準の作成について

12 月 28 日 分科会 (第 4 回)
報告 (案) について

平成 25 年 (2013 年)

1～4 月 メールにて審議 分科会暫定最終案の策定

5～7 月 分科会暫定最終案の公開 (日本地球惑星科学連合HP) とパブリックコメントの募集

6 月 16 日 公開シンポジウム「学士課程教育における地球惑星科学分野の参照基準」開催

7～9 月 メールにて審議 分科会最終案の策定

平成 26 年 (2014 年)

○月○日 日本学術会議大学教育の分野別質保証推進委員会 (第○回)
報告 (案)「大学教育の分野別質保証のための教育課程編成上の参照基準地球惑星科学分野」について承認

<参考資料2> 公開シンポジウム

日本学術会議 公開シンポジウム 「学士課程教育における地球惑星科学分野の参照基準」

日 時： 平成 25 年 6 月 16 日（日）13：00～16：00

場 所： 東京大学地震研究所 2 号館第 1 会議室

開催要旨： 大学教育の分野別質保証の取り組みの一環として、地球惑星科学分野の参照基準を策定したので、これを広く一般に公開し、その内容について高大連携、社会との関係も含めて議論し、今後の地球惑星科学教育の在り方を探る。

次 第：

13：00～13：05 開会の辞

永原裕子（日本学術会議第三部会員・地球惑星科学委員会委員長、
東京大学大学院理学系研究科教授）

13：05～13：30 基調講演「大学教育の質保証と参照基準の考え方」

北原和夫（日本学術会議特任連携会員・大学教育の分野別質保証
推進委員会委員長、東京理科大学大学院科学教育研究科
教授）

13：30～14：00 分科会報告「地球惑星科学参照基準の策定プロセスとその内容」

西山忠男（日本学術会議連携会員・地球惑星科学委員会大学教育
問題分科会委員長、熊本大学大学院自然科学研究科教授）

14：10～15：50 パネルディスカッション

「Ⅰ. 地球惑星科学の将来と大学教育 Ⅱ. 各大学の実情とカリキ
ュラム改革 Ⅲ. 地球惑星科学における高大学接続と社会との連携」

モデレーター

中村尚（日本学術会議連携会員・地球惑星科学委員会大学教育問
題分科会副委員長、東京大学先端科学技術研究センター教授）

パネリスト

佐々木晶（日本学術会議連携会員、大阪大学大学院理学研究教授
：宇宙惑星科学）

大谷栄治（日本学術会議連携会員、東北大学大学院理学研究科教
授：固体地球科学）

北里洋（日本学術会議第三部会員、独立行政法人海洋研究開発機

構海洋・極限環境生物圏領域長：地球生命科学)
氷見山幸夫（日本学術会議第三部会員、北海道教育大学教育学部
教授：地球人間圏科学）
小嶋智（日本学術会議連携会員、岐阜大学工学部教授：固体地球
科学）
西山忠男（前掲、熊本大学：固体地球科学）

15：50～16：00 閉会の辞
花輪公雄（東北大学理事・副学長）

総合司会 松本 淳（日本学術会議連携会員・地球惑星科学委員会大学教育問題分科
会幹事、首都大学東京大学院都市環境科学研究科教授）