

報告

地球惑星科学分野における
科学・夢ロードマップ（改訂）

2020



令和2年（2020年）5月15日

日本学術会議

地球惑星科学委員会

地球惑星科学企画分科会

地球・惑星圏分科会

この提言は、日本学術会議地球惑星科学委員会、地球惑星科学企画分科会及び地球・惑星圏分科会が合同で審議した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	藤井 良一	(第三部会員)	大学共同利用機関法人情報・システム研究機構長
副委員長	田近 英一	(第三部会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
幹事	木村 学	(第三部会員)	東京海洋大学海洋資源環境学部特任教授
幹事	春山 成子	(第三部会員)	三重大学名誉教授
	川村 光	(第三部会員)	大阪大学理学研究科教授
	高橋 桂子	(第三部会員)	国立研究開発法人海洋研究開発機構地球情報基盤センター長
	中村 尚	(第三部会員)	東京大学先端科学技術研究センター副所長・教授
	相川 祐理	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科天文学専攻教授
	東 久美子	(連携会員)	情報・システム研究機構国立極地研究所教授
	石渡 明	(連携会員)	原子力規制委員会委員教授
	伊藤 香織	(連携会員)	東京理科大学理工学部建築学科教授
	伊藤 悟	(連携会員)	金沢大学人間社会研究域教授
	植松 光夫	(連携会員)	東京大学大気海洋研究所教授
	碓井 照子	(連携会員)	奈良大学名誉教授
	江守 正多	(連携会員)	国立研究開発法人国立環境研究所地球環境研究センター気候変動リスク評価研究室長
	大久保修平	(連携会員)	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
	大久保泰邦	(連携会員)	宇宙システム開発利用推進機構技術参与
	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)	東北大学名誉教授
	沖 大幹	(連携会員)	東京大学生産技術研究所教授
	沖野 郷子	(連携会員)	東京大学大気海洋研究所教授
	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
	奥村 晃史	(連携会員)	広島大学大学院文学研究科教授
	蒲生 俊敬	(連携会員)	東京大学大気海洋研究所特任研究員
	川口 慎介	(連携会員)	国立研究開発法人海洋研究開発機構研究員
	川幡 穂高	(連携会員)	東京大学大気海洋研究所教授
	北里 洋	(連携会員)	東京海洋大学特任教授

久家 慶子	(連携会員)	京都大学大学院理学研究科教授
小嶋 智	(連携会員)	岐阜大学工学部教授
近藤 昭彦	(連携会員)	千葉大学環境リモートセンシング研究センター教授
三枝 信子	(連携会員)	国立研究開発法人国立環境研究所地球環境研究センター副研究センター長
齋藤 文紀	(連携会員)	島根大学エスチュアリー研究センター 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
佐竹 健治	(連携会員)	東京大学地震研究所所長・教授
佐藤 薫	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
篠田 雅人	(連携会員)	名古屋大学環境学研究科教授
新永 浩子	(連携会員)	鹿児島大学学術研究院理工学域理学系准教授
杉田 文	(連携会員)	千葉商科大学商経学部教授
鈴木 康弘	(連携会員)	名古屋大学減災連携研究センター教授・総長補佐
関 華奈子	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
高薮 緑	(連携会員)	東京大学大気海洋研究所教授
寶 馨	(連携会員)	京都大学大学院総合生存学館学館長、京都大学防災研究所教授
谷口 真人	(連携会員)	人間文化研究機構総合地球環境学研究所副所長・教授
張 勁	(連携会員)	富山大学大学院理工学研究部教授
佃 榮吉	(連携会員)	国立研究開発法人産業技術総合研究所特別顧問
津田 敏隆	(連携会員)	大学共同利用機関法人情報・システム研究機構理事
中島 映至	(連携会員)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構第一宇宙技術部門地球観測研究センター長
中田 節也	(連携会員)	東京大学地震研究所教授
永原 裕子	(連携会員)	日本学術振興会学術システム研究センター副所長、東京工業大学地球生命研究所 ELSI フェロー
中村 卓司	(連携会員)	情報・システム研究機構国立極地研究所長
中村 正人	(連携会員)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所太陽系科学研究系教授
新野 宏	(連携会員)	東京大学大気海洋研究所教授
西 弘嗣	(連携会員)	東北大学学術資源研究公開センター教授
西田 治文	(連携会員)	中央大学工学部教授
西山 忠男	(連携会員)	熊本大学先端科学研究部理学系教授
花輪 公雄	(連携会員)	東北大学理事
林 正彦	(連携会員)	日本学術振興会ボン研究連絡センター長

原田 尚美	(連携会員)	国立研究開発法人海洋研究開発機構地球表層システム研究センター長
氷見山幸夫	(連携会員)	北海道教育大学名誉教授
平田 直	(連携会員)	東京大学地震研究所教授
福田 洋一	(連携会員)	京都大学大学院理学研究科教授
古屋 正人	(連携会員)	北海道大学大学院理学研究院教授
堀 利栄	(連携会員)	愛媛大学大学院理工学研究科教授
益田 晴恵	(連携会員)	大阪市立大学大学院理学研究科教授
村山 泰啓	(連携会員)	国立研究開発法人情報通信研究機構ソーシャルイノベーションユニット戦略的プログラムオフィス研究統括
村山 祐司	(連携会員)	筑波大学生命環境系教授
森田 喬	(連携会員)	法政大学名誉教授
八木谷 聡	(連携会員)	金沢大学理工研究域教授
安成 哲三	(連携会員)	総合地球環境学研究所長
矢野 桂司	(連携会員)	立命館大学文学部教授
藪田ひかる	(連携会員)	広島大学大学院理学研究科教授
山岡 耕春	(連携会員)	名古屋大学大学院環境学研究科教授
山形 俊男	(連携会員)	国立研究開発法人海洋研究開発機構特任上席研究員、京都大学特任教授、東京大学名誉教授
山川 充夫	(連携会員)	帝京大学経済学部地域経済学科長・教授
山岸 明彦	(連携会員)	東京薬科大学名誉教授
山田 育穂	(連携会員)	中央大学理工学部人間総合理工学科教授
渡部 潤一	(連携会員)	大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台教授
渡邊誠一郎	(連携会員)	名古屋大学大学院環境学研究科教授

日本学術会議地球惑星科学委員会地球惑星科学企画分科会

委員長	藤井 良一	(第三部会員)	大学共同利用機関法人情報・システム研究機構長
副委員長	田近 英一	(第三部会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
幹事	木村 学	(第三部会員)	東京海洋大学海洋資源環境学部特任教授
幹事	春山 成子	(第三部会員)	三重大学名誉教授
	高橋 桂子	(第三部会員)	国立研究開発法人海洋研究開発機構地球情報基盤センター長
	中村 尚	(第三部会員)	東京大学先端科学技術研究センター副所長・教授

大谷 栄治	(連携会員)	東北大学名誉教授
川幡 穂高	(連携会員)	東京大学大気海洋研究所教授
中村 卓司	(連携会員)	情報・システム研究機構国立極地研究所長
西山 忠男	(連携会員)	熊本大学先端科学研究部理学系教授

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	田近 英一	(第三部会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
副委員長	大谷 栄治	(連携会員)	東北大学名誉教授
幹事	関 華奈子	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
幹事	山岡 耕春	(連携会員)	名古屋大学大学院環境学研究科教授
	川村 光	(第三部会員)	大阪大学理学研究科教授
	木村 学	(第三部会員)	東京海洋大学海洋資源環境学部特任教授
	中村 尚	(第三部会員)	東京大学先端科学技術研究センター副所長・教授
	藤井 良一	(第三部会員)	大学共同利用機関法人情報・システム研究機構長
	相川 祐理	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科天文学専攻教授
	東 久美子	(連携会員)	情報・システム研究機構国立極地研究所教授
	石渡 明	(連携会員)	原子力規制委員会委員
	大久保修平	(連携会員)	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
	奥村 晃史	(連携会員)	広島大学大学院文学研究科教授
	川幡 穂高	(連携会員)	東京大学大気海洋研究所教授
	北里 洋	(連携会員)	東京海洋大学特任教授
	久家 慶子	(連携会員)	京都大学大学院理学研究科教授
	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
	新永 浩子	(連携会員)	鹿児島大学学術研究院理工学域理学系准教授
	高薮 緑	(連携会員)	東京大学大気海洋研究所教授
	津田 敏隆	(連携会員)	大学共同利用機関法人情報・システム研究機構理事
	中島 映至	(連携会員)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構第一宇宙技術部門地球観測研究センター長
	永原 裕子	(連携会員)	日本学術振興会学術システム研究センター副所長、東京工業大学地球生命研究所 ELSI フェロー
	中村 卓司	(連携会員)	情報・システム研究機構国立極地研究所長
	中村 正人	(連携会員)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研

		研究所太陽系科学研究系教授
新野 宏	(連携会員)	東京大学大気海洋研究所教授
西 弘嗣	(連携会員)	東北大学学術資源研究公開センター教授
花輪 公雄	(連携会員)	東北大学理事
原田 尚美	(連携会員)	国立研究開発法人海洋研究開発機構地球環境観測研究開発センター長代理
福田 洋一	(連携会員)	京都大学大学院理学研究科教授
古屋 正人	(連携会員)	北海道大学大学院理学研究院教授
堀 利栄	(連携会員)	愛媛大学大学院理工学研究科教授
益田 晴恵	(連携会員)	大阪市立大学大学院理学研究科教授
藪田ひかる	(連携会員)	広島大学大学院理学研究科教授
山形 俊男	(連携会員)	国立研究開発法人海洋研究開発機構特任上席研究員、 京都大学特任教授、東京大学名誉教授
山岸 明彦	(連携会員)	東京薬科大学
渡部 潤一	(連携会員)	大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台 教授
渡邊誠一郎	(連携会員)	名古屋大学大学院環境学研究科教授

本報告の作成にあたり、以下の方々にご協力いただいた。

※以下では、公益社団法人日本地球惑星科学連合を JpGU と記す

木村 学	(第三部会員)	東京海洋大学海洋資源環境学部特任教授、JpGU 元会長
高橋 桂子	(第三部会員)	国立研究開発法人海洋研究開発機構地球情報基盤センター長
田近 英一	(第三部会員)	東京大学大学院理学系研究科教授、JpGU 副会長
中村 尚	(第三部会員)	東京大学先端科学技術研究センター副所長・教授
春山 成子	(第三部会員)	三重大学名誉教授
藤井 良一	(第三部会員)	大学共同利用機関法人情報・システム研究機構長
大谷 栄治	(第三部会員)	東北大学名誉教授、JpGU 固体地球科学セクションプレジデント
川幡 穂高	(連携会員)	東京大学大気海洋研究所教授、JpGU 会長
中村 卓司	(連携会員)	情報・システム研究機構国立極地研究所長
西山 忠男	(連携会員)	熊本大学先端科学研究部理学系教授
ウォリス サイモン		東京大学大学院理学系研究科教授、JpGU 副会長
中村 正人	(連携会員)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究 研究所太陽系科学研究系教授、JpGU 副会長

古村 孝志		東京大学地震研究所教授、JpGU 副会長
高橋 幸弘		北海道大学大学院理学研究院教授、JpGU 宇宙惑星科学セクションプレジデント
関 華奈子	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授、JpGU 宇宙惑星科学セクションバイスプレジデント
倉本 圭		北海道大学大学院理学研究院教授、JpGU 宇宙惑星科学セクションバイスプレジデント
蒲生 俊敬	(連携会員)	東京大学大気海洋研究所特任研究員、JpGU 大気水圏科学セクションプレジデント
佐藤 薫	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授、JpGU 大気水圏科学セクションバイスプレジデント
谷口 真人		総合地球環境学研究所研究部教授、JpGU 大気水圏科学セクションバイスプレジデント
奥村 晃史	(連携会員)	広島大学大学院文学研究科教授、JpGU 地球人間圏科学セクションプレジデント
佐竹 健治	(連携会員)	東京大学地震研究所所長・教授、JpGU 地球人間圏科学セクションバイスプレジデント
田中 聡		国立研究開発法人海洋研究開発機構海域地震火山部門火山・地球内部研究センター長代理、JpGU 固体地球科学セクションバイスプレジデント
川勝 均		東京大学地震研究所教授、JpGU 固体地球科学セクション夢ロードマップ改訂タスクフォース委員長
遠藤 一佳		東京大学大学院理学系研究科教授、JpGU 地球生命科学セクションプレジデント
小林 憲正		横浜国立大学大学院工学研究院教授、JpGU 地球生命科学セクションバイスプレジデント
磯崎 行雄		東京大学大学院総合文化研究科教授、JpGU 地球生命科学セクションバイスプレジデント

本提言の作成にあたり、以下の職員が事務を担当した。

事務	犬塚 隆志	参事官 (審議第二担当)
	五十嵐 久留美	参事官 (審議第二担当) 付参事官補佐
	横田 真理江	参事官 (審議第二担当) 付審議専門職付

要 旨

1 作成の背景

地球惑星科学分野全体の科学・夢ロードマップについて初めて検討されたのは、第 21 期日本学術会議第三部（理学・工学）による 2011 年 8 月 24 日に報告として公表された「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ」（以下、「夢ロードマップ 2011」）[1] の準備作業の時であった。我が国の地球惑星科学分野の五十数団体の学協会とそれらが団体会員となっている公益社団法人日本地球惑星科学連合の協力を得て、地球惑星科学委員会が中心となって取りまとめられた。その後、2014 年 9 月 19 日に報告として公表された「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ 2014」（以下、「夢ロードマップ 2014」）[2] では、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による東日本大震災の反省も踏まえて、夢ロードマップ 2011 の内容の改訂作業を行った。

それから 6 年が経過し、地球惑星科学分野を取り巻く情勢の変化や学術的な進展があったことを受けて、それらを反映して今後 10～30 年程度の中長期的観点で実現すべき目標と道筋を再検討する必要があるとの認識に基づき、今回新たに「地球惑星科学分野における科学・夢ロードマップ（改訂）2020」（以下、「地球惑星科学・夢ロードマップ 2020」）として夢ロードマップ 2014 の内容を改訂し、報告として公表することとした。

2 報告作成の方針

地球惑星科学・夢ロードマップ 2020 の作成にあたっては、以下のことを方針とした。

今回の改定は、地球惑星科学分野における急速な進展に対応して実施するもので、現時点での知識、理解、研究コミュニティの検討を基に、地球惑星科学分野において、

- (1) 今後 10 年程度の中期的観点で実現すべき目標と道筋を示すとともに、その骨格をなす解明すべき重要課題について、実施可能で具体的な研究課題を提示すること、
- (2) 今後 30 年程度の長期的観点で地球惑星科学分野の拡大や分野間の連携・融合、さらに他分野との連携の促進も含めて、目指すべき学術の発展の方向性と目標を抽出して道筋を示し、それをシステムティックに実現するために必要な骨格をなす研究計画を明らかにすること、
- (3) それにより、地球惑星科学の発展・強化に資するとともに、広く他分野や社会の人々から地球惑星科学の重要性について理解と支援を得ること

について、地球惑星科学全体を宇宙惑星科学、大気水圏科学、固体地球科学、地球生命科学、地球人間圏科学という 5 つの分野に分けて、それぞれについてまとめることとした。この区分は、公益社団法人日本地球惑星科学連合における 5 つのサイエンス・セクション及び独立行政法人日本学術振興会の「科学研究費助成事業 審査区分表」の 5 つの区分に対応している。

地球惑星科学夢ロードマップの作成及び改訂に関して、地球惑星科学コミュニティの意見や情報のインプットはきわめて重要であることから、日本地球惑星科学連合のサイエンス・セクションとの密接な連携のもと、作業を行うこととした。

3 報告の内容

(1) 地球惑星科学・夢ロードマップの意義

地球惑星科学分野は、太陽系・地球・生命の誕生・進化等の学術的重要性はもとより、温暖化等の地球環境や安全・安心、SDGs 等、社会の課題と深く関連することから、科学者の学術的な夢を社会や国民に示すことは、科学者の責務を果たすことであるとともに、社会や国民の幅広い理解を得ながら科学者と国民が共に議論する機会を提供するものである。

(2) 地球惑星科学・夢ロードマップ改訂の必要性

夢ロードマップ 2014 以降の地球惑星科学を取り巻く近年の情勢の変化や急速な学術的進展に対応して、2020 年現在での地球惑星科学分野の方向性と発展の骨格となる中長期的な計画を再検討する必要があるとの認識に基づき改訂を行うものである。

(3) 地球惑星科学各分野別の夢ロードマップ

地球惑星科学における 5 つの分野（宇宙惑星科学、大気水圏科学、固体地球科学、地球生命科学、地球人間圏科学）のビジョンとともに、分野間の連携の強化と将来の融合・統合の方向性を示す科学・夢ロードマップとその考え方を示す。

(4) 改訂の主な内容

今回の改訂の主な内容は、前回（2014 年）以降の地球惑星科学を取り巻く近年の情勢の変化や急速な学術的進展、たとえば太陽系外惑星科学やアストロバイオロジーなどの新分野の展開、Future Earth や SDGs への取り組み、AI を用いたビッグデータ解析など新たな技術の導入を考慮したことに加えて、中長期的観点で地球惑星科学分野の拡大や分野間の連携・融合を強く意識し、地球惑星科学における 5 つの分野それぞれが、互いの分野や関連分野との連携・融合をロードマップの目標として明確に位置づけた、というものである。そして、「太陽系・地球・生命の誕生・進化」、「過去・現在・未来の地球の理解」、「人間圏の成立と発展」という 3 つの軸に沿って、最終的には 5 つの分野間の連携・融合のもとに、地球全体をひとつのシステムとして統合的に理解することによって、地球のより深い理解（「地球認識」）に到達しようとする内容になっている。

目 次

1 全体の概要.....	1
(1) 地球惑星科学分野の科学・夢ロードマップ改定の趣旨.....	1
(2) 地球惑星科学の特徴.....	1
(3) 地球惑星科学のロードマップの軸となる視点.....	3
2 地球惑星科学5分野の夢ロードマップ.....	5
(1) 宇宙惑星科学の夢ロードマップ.....	5
① 分野の概要.....	5
② 夢ロードマップ.....	5
(2) 大気水圏科学の夢ロードマップ.....	7
① 分野の概要.....	7
② 夢ロードマップ.....	9
(3) 地球人間圏科学の夢ロードマップ.....	11
① 分野の概要.....	11
② 夢ロードマップ.....	11
(4) 固体地球科学の夢ロードマップ.....	13
① 分野の概要.....	13
② 夢ロードマップ.....	13
(5) 地球生命科学の夢ロードマップ.....	16
① 分野の概要.....	16
② 夢ロードマップ.....	16
<参考文献>.....	21
<参考資料1>検討の経緯.....	22

1 全体の概要

(1) 地球惑星科学分野の科学・夢ロードマップ改定の趣旨

地球惑星科学は、人類の生存する惑星地球の構造と現象、起源と進化、惑星としての普遍性と特殊性を、太陽を中心に多様な惑星・衛星・小天体と宇宙空間が織りなす太陽系の成り立ち・進化とともに解き明かすことを目標とする学問分野である。研究領域は、精査が可能な地球を中心に太陽系全体、さらには系外惑星系まで拡大されてきており、これらの領域における多様な物理・化学・生命現象を観察・観測して理解し、その中から普遍的な原理やプロセスを見出すとともに、翻って、地球に対する理解をさらに深めることを目指している。同時に、人類を含む生物が生息する地球における人類の活動による自然の変容と変動、それに対する将来予測と対処、自然と人間と社会（人間圏）の共生のあり方を科学的根拠に基づいて示すことを目的としている。

今回の改定は、地球惑星科学分野における急速な進展に対応して実施するもので、現時点での知識、理解、研究コミュニティの検討を基に、地球惑星科学分野において、

- 1) 今後 10 年程度の中期的観点で実現すべき目標と道筋を示すとともに、その骨格をなす解明すべき重要課題について、実施可能で具体的な研究課題を提示すること、
 - 2) 今後 30 年程度の長期的観点で地球惑星科学分野の拡大や分野間の連携・融合、さらに他分野との連携の促進も含めて、目指すべき学術の発展の方向性と目標を抽出して道筋を示し、それをシステムティックに実現するために必要な骨格をなす研究計画を明らかにすること、
 - 3) それにより、地球惑星科学の発展・強化に資するとともに、広く他分野や社会の人々から地球惑星科学の重要性について理解と支援を得ること、
- を目的としている。

具体的には、地球惑星科学全体を網羅する現時点での分野の分類方法の一つである、宇宙惑星科学、大気水圏科学、固体地球科学、地球生命科学、地球人間圏科学における、ロードマップを改定するものである。この 5 つの分類は公益社団法人日本地球惑星科学連合における 5 つのサイエンス・セクションに対応している。より具体的な研究目標を以下の各分野のロードマップの項で述べる。

なお、本ロードマップは国際的な学術の動向や将来計画、国際コミュニティとの連携、その中における我が国の先導性を考慮したものであること、学問の進展により分野間の融合・統合や新たな分野の創設が必然的に起きるので、分野の分け方は、将来は変わっていくであろうこと、この観点において、本ロードマップに示される時系列の進展は地球惑星科学分野の将来の発展と在り様を示唆するものでもあること、を付言する。

(2) 地球惑星科学の特徴

地球惑星科学の特徴は、人類が生存する地球、地球を含む太陽系及び系外惑星について、現在の状態とそれらの誕生・進化の過程とそこに生起する物理・化学・生物過程及び現象の解明という Curiosity driven な学理を追求することに加えて、その学理に基づく人類の生存や安全安心に関わる様々な社会的課題解決への社会からの強い要請が

あり、学术界として社会的責任があるということである。

後者の具体的な例としては、地震、火山、風水害等の減災、温暖化などの地球環境変動の把握と科学的な根拠に基づく将来予測、社会的基盤（電力や宇宙インフラ等々）維持のための研究観測や継続的なモニター観測、それらに基づく科学的な将来予測等が挙げられる。これらの課題の進展・解決はIoT・AI等の革新的技術を活用した経済発展と社会的課題の解決を両立する新たな未来社会 Society5.0 実現のために必須であり、持続可能な開発目標 SDGs の達成の基盤をなすものである。

地球惑星科学の学問的特徴として、以下のようなことが挙げられる。

- 1) 地球や太陽・惑星の誕生・進化や、そこにおける物理・化学・生物過程や構造等が、様々な特徴的時間スケールと空間スケールを有し、そのスケールにおいて非定常でダイナミックに変動する。また、空間スケールは電子のスケールから太陽系のスケールまで広く、時間スケールも微小時間から数10億年と、両者ともに極めて幅広い。さらに、現象やプロセス、構造等は階層性を持ち、各々の階層で空間及び時間スケールが異なる。
- 2) 再帰性のあるものと再帰性がないもの双方あり、過去からの変動の把握が、現在の理解と将来の予測に必須である。
- 3) 普遍性と多様性を有する。多様な惑星の形成過程とその環境の違いなどにみられるように、多様性の理解が普遍性の抽出に重要なこと。すなわち、多様な空間・時間スケール、多様な物理・化学パラメータにおける現象や過程の発現の違いが、それらの普遍性・本質の理解に欠かせない。
- 4) 地球及び太陽系は、エネルギーと物質の流れ（流入、流出）の観点からみて様々な開放系で構成されていることがわかる。現状では、これらの開放系を個別に研究するとともに、隣接する系との連携・融合を目指している。最終的には、全体を一つの閉鎖系（全体システム）として理解すること必要で、各分野はその方向に進もうとしている。後述する、本夢ロードマップにおいて、第1期から2期、3期への流れでもこの方向性が見て取れる。
- 5) これらの系の解明には、第一原理を基礎とはするものの、系間の相互作用を含む複雑系（システム科学）の観点が必須である。
- 6) 天文学等と比較した場合の宇宙科学分野における地球惑星科学の強みは、現象等が生起しているその場での直接観測ができること、遠隔観測の場合でも、物理的、化学的、生物学的に精査できることが挙げられる。
- 7) 地球惑星科学において、地球は人類が生存する惑星として深い理解が必要であるとともに、他の惑星の成り立ちを理解する上でも重要な知見を与える、特別な研究対象であると位置づけられる。また太陽系全体の理解が、地球のより深い理解（地球認識）に到達するために重要な役割を果たすという、表裏一体の関係にある。

さらに、自然と人間との関わりについては、自然が人間や社会に与える影響に加え、産業革命以降、特に近年、人間活動が自然に与える影響が増大し、翻って変容する自然が人間や社会に重篤な影響を与え始めている。自然科学だけでは解き明かすことができない

い人間活動・社会と自然との関係、すなわち地球人間圏の研究が極めて重要になってきていることが挙げられる。このことは地球惑星科学が持続可能な開発目標 SDGs の 17 ゴールのうち気候変動(国際目標 13)や海洋 (14)・陸上(15)・天然資源 (12) など直接間接に関わるものが多数あることから明らかである。地球惑星科学の積極的な関与と発展が SDGs 達成のためにも必須である。

(3) 地球惑星科学のロードマップの軸となる視点

地球惑星科学の学術としての目標、社会からの要請を考慮して、今回改訂する地球惑星科学のロードマップの軸として、

- a 太陽系・地球・生命の誕生・進化
- b 過去・現在・未来の地球の理解
- c 人間圏の成立と発展

を設定する。

下記の表に示すように、地球惑星科学分野は、第 I 期 (今後の約 10 年間) では、各分野は地球や太陽・惑星における物理・化学・生物過程や構造等の把握と理解を進め、第 II 期 (今後約 10 年から 20 年の間) では、領域間の相互作用の理解を深めて、地球全体、太陽系全体を各々一つの系として扱うこと方向を目指してより強く連携・融合を行う。第 III 期 (今後 20 年以降) においては、「a 太陽系・地球・生命の誕生・進化」の理解に挑み、それを基に「b 過去・現在・未来の地球の理解」である“地球認識”への到達を目指す。第 I 期から III 期に向けて、紫色で記したように地球惑星科学の分野間での統合や天文学や生命科学、防災科学等の他分野との融合を進め、宇宙圏・大気水圏・固体圏・生命圏の統合進化モデルを構築することを目指す。

人類の生存する特別な惑星である地球における「c 人間圏の成立と発展」では、「持続可能な世界」を実現するために、第 I 期には地球惑星科学の様々な分野の学理と知識を結集し、人文・社会科学等とも連携して、人類が直面する諸問題を明らかにし、第 II 期では、稠密で継続的な観測等を通じてその解決を目指すことで社会的要請に応え、第 III 期では地球、生命、自然、人間社会の総合的理解への到達を目指す。宇宙惑星科学、大気水圏科学、固体地球科学、地球生命科学の発展を縦糸とすると、地球人間圏科学はこれら 4 つの分野の知見をその発展段階全てで活用する横糸的な科学と言えよう。

研究を進めるにあたり、観測・実験・探査、理論・シミュレーションの協働が必須で、そのためのインフラの整備についてもロードマップを基に着実に実施する。また、近年の観測・実験・探査、シミュレーションからは多種多様な大量のデータ (ビッグデータ) や試料が生み出され、今後さらに加速度的に大量のデータや試料が生み出されることが確実である。データや試料の有効活用を行うために、データや試料の組織的で継続的な収集と維持を行うことを基盤としつつ、データベースの統合利用プラットフォームの構築や資料の集積利用プラットフォームの構築を進め、積極的なオープンデータ、オープンサイエンス、AI の利用等を分野横断的に進めてゆくことが肝要で、そのための人材育成が急務である。

図1 地球惑星科学分野における科学・夢ロードマップ（改訂）2020 のまとめ
3つのステージ（I、II、III期）とそれぞれの目標及び各分野間の融合（赤字）

	I期（～2030）	II期（2030～2040）	III期（2040～2050）
宇宙惑星科学 探索・観測・分析・数値実験が切り拓く宇宙惑星科学	太陽地球・惑星系の理解と普遍化 宇宙環境変動・気候影響の理解 宇宙プラズマ過程の普的的理解 重力天体探査技術の高度化 大気水圏科学との融合 (a,b) 防災など社会実装 (c)	惑星系形成の仕組みの解明 惑星を持つ恒星系の普的的理解 天文観測と太陽系探査の融合 (a,b) より速くへ自在な探査技術の獲得 生命居住可能天体の探索 惑星の多様性の理解 生命科学との融合 (a,b)	生命を育む環境の普的的理解・フロンティア拡大と宇宙に開かれた生命惑星観の獲得 ハビタブル惑星環境の総合的理解 太陽圏の知見を系外惑星系へ応用
大気水圏科学 大気水圏の物理・化学・生物システムに関する基礎過程の把握と理解。高機能観測と常時監視及び高精度予測	大気、陸、海洋の諸過程と断層構造の解明・気候予測 階層モデル・結合モデル活用 全球観測網の基盤形成 長期気候データの蓄積 宇宙惑星科学分野との連携による	システム的な大気-陸-海洋層構造の解明と気候システム全体としての理解・気候予測の高精度化 観測とモデルの多元化・総合化	気候システムの変動・変化の常時把握と理解、予測の緻密化 宇宙・大気・海洋・陸の全域の継続的精密監視 持続可能で夢のある社会の達成
地球人間圏科学 持続可能な日本、アジア、世界の実現への道	地球人間圏が直面する諸問題の実態と改善の道筋を明らかにする Future Earth (2015-2025) SDGs (2016-2030) 宇宙、固体、生命、大気との共同 (c,b)	持続可能な日本・アジア・世界への道を見出す Future Earth, SDGs 次期展開 宇宙、固体、生命、大気との共同 (c,b)	地球、生命、自然、人社会の理解 Future Earth, SDGsのさらなる発展 持続可能な世界へ 全人類の協和、英知の結集、地球環境倫理の確立 宇宙、固体、生命、大気との共同 (c,b)
固体地球科学 稠密観測・極限実験・高感度分析・高性能計算が拓く固体地球科学	地球の構造/変動/歴史の解明 表層-中心核の観測と実験・数値計算上の再現 陸域稠密観測-海域掘削と構造・資源 地球史解読 地球型惑星の探査・組成・物性・ダイナミクス (b,a)	地球システムの理解と変動予測/検証 多圏相互作用と地球システム変動 (b,a) 海陸常時稠密変動観測と高精度予測	人類と宇宙に開いた「地球認識」への到達 地球の個性と普遍性 銀河史の中の地球史 人類と地球システムの未来 地球科学 惑星・天文学 生命科学融合 (b,a)
地球生命科学 次世代の探査・観測・分析が描く地球の生命像	地球と生命の多様性とながりの理解 ハビタビリティ、地球生命共進化、適応進化 生命圏の探査-国際深海科学観測計画 (b,a)	地球生命システムのダイナミクスの理解 生命存続条件特定、生態系の合成 小天体探査への貢献 (a,b)	宇宙における地球・生命とは何かの理解 スーパハビラビリティ、生命創成機構解明
研究基盤強化 研究を支えるデータ・試料の収集や計算機性能の向上、技術開発	長期連続観測とデータ・試料の組織的収集と維持 オープンデータ・データ科学の推進とAI等の利用 数値計算能力の高性能化 探査・分析技術開発、等々		

統合の流れ

紫色: 他分野との協働・連携 分野間の融合・連携によりどの目標の解明を目指すかを示す

a 太陽系・地球・生命の誕生・進化
b 過去・現在・未来の地球の理解
c 人間圏の成立と発展

図2 地球惑星科学分野の科学・夢ロードマップ（改訂）2020 の概要



2. 地球惑星科学5分野の夢ロードマップ

(1) 宇宙惑星科学の夢ロードマップ

① 分野の概要

宇宙惑星科学分野のサイエンスの大目標は、人類活動を内包する「太陽地球惑星の現状の把握」から、数10億年を超える時間スケールを持つ「惑星系形成の仕組みの解明」、生命誕生に関わる「生命居住可能天体の探索」、さらに宇宙における「生命を育む環境の普遍的理解」に及ぶ(図参照)。これらは、顕微鏡レベルのミクロなスケールを扱うものから惑星間空間・惑星系・星間雲といったマクロのスケールを扱うものまで、多面的な研究に支えられている。探査・観測、室内実験・物質分析、数値シミュレーションなど多様な手法による研究を束ねる意味で、飛翔体プロジェクトは基軸的な意義を持つ。宇宙からの観測に長ける本分野は、技術提供面からも他分野と密な連携が期待される。

② 夢ロードマップ

ア 現在の地球惑星の営み

太陽から電磁波放射とともに太陽風という形で運ばれるエネルギーや物質は、地球惑星の磁場や大気と相互作用し、様々な現象と変動をもたらす。こうした太陽から地球惑星大気に至る動的システムの理解のために、地球周辺の宇宙空間では、内部磁気圏の宇宙環境解明のトップランナーである Arase、太陽風と磁気圏の相互作用をX線を用いて可視化する GEO-X、探査衛星編隊を用いた FACTORS が、その複雑な動態を立体的に明らかにする。これら宇宙プラズマ現象と地表と繋がった中性大気現象の両方が交差する中層大気に対しては、SMILES-2 が大気成分ごとの挙動を詳かにする。定常的な多点地上計測が可能な利点をもつ地球については、衛星観測とあわせて長期観測データをアーカイブし、宇宙天気・宇宙気候研究の基盤とする。

さらに多様な惑星を調査し、太陽系外の惑星も含めた統一的普遍的な理解を目指す。金星探査機 Akatsuki は、金星大気の長期観測に挑む。水星探査機 BepiColombo は厚い大気を持たない惑星の磁気圏と太陽風の相互作用を詳らかにする。火星宇宙天気・気候・水環境探査は、太陽活動がもたらす大気散逸過程を解明し、火星の長期寒冷化の原因と過程を追究する。地上/気球/地球周回望遠鏡による、継続的な高品質の惑星モニター(観測継続中の紫外線望遠鏡衛星 Hisaki など)にも力を注ぎ、惑星探査をバックアップする。もちろん、太陽そのものの理解も欠かせない。太陽観測計画 Solar-C EUVST や PhoENiX は、地球気候に影響を及ぼしうる太陽活動の変動を監視する意義も有する。

イ 惑星形成の仕組みの解明

自然科学全体の究極の目的とも言える宇宙と生命の誕生と進化の解明に、天文学、地球科学と生命科学を架橋する宇宙惑星科学の果たす役割は大きい。かぐや、はや

ぶさ、あかつき、はやぶさ2の経験を経て、日本は米欧に比肩する太陽系探査の遂行能力を備えつつある。今後20年程度のスパンの太陽系探査においては、太陽系における生命生存可能環境の形成と進化の探求が第一の科学目標となる。

はやぶさの拓いた小惑星探査を、はやぶさ2（炭素質小惑星 Ryugu の近接観測・サンプルリターン）、小型深宇宙探査技術実証機 Destiny+（流星群母天体小惑星 Phaethon をフライバイ観測）、ソーラー電力セイル探査機 OKEANOS（外惑星系小惑星の直接探査）が、発展的にリレーする。また彗星からのサンプルリターンを目指す NASA の CAESAR 計画に冷蔵帰還カプセルを提供しつつ参加する。これらの探査のデータ解析と帰還試料の地上分析、相補的な理論的・実験的研究の展開により、惑星材料物質、特に生命とそれを育む表層環境に必須な水と揮発性物質の起源、運搬天体の構造と組成、初期太陽系における物質輸送、始原天体上での有機物進化の解明を進める。

火星衛星からのサンプルリターンを目指す火星衛星探査計画 MMX は、日本の小天体探査の強みを伸ばし、衛星を母惑星の形成過程の記録媒体として位置づける独自の切り口から、生命居住可能惑星の成立過程の解明に迫る。この計画は、生命居住可能環境を持つとされる火星の探査に、日本が再挑戦する嚆矢でもある。火星表層環境の長期進化に迫る火星宇宙天気・気候・水環境探査とは目的面で対をなす。

精密月着陸小型実証機 SLIM、月極域の地下氷を直接調査する月極域軟着陸探査（国外と共同）、月無人サンプルリターン計画 HERACLES（ESA 主導）、月ペネトレータ探査は、重力天体探査高度技術の実証によって人類の活動圏の月への再拡大と火星への拡張の先鞭となるだけでなく、月の形成と進化の理解に新たな光を当て、母惑星地球の成り立ちの理解を深める。これらの着陸技術や表層探査技術は、地下生命圏の探索等からなる、火星プログラム探査に応用する。

Bepi-Colombo は、地球との近縁性を持つ水星の物質科学も進め、揮発性物質の初期内惑星系への輸送に迫る。日本が複数の機器提供を行う木星巨大衛星ガニメデを周回探査する JUICE（ESA 主導）は、氷衛星の内部海における生命の存在可能性を解明する。

ウ 生命を育む環境の普遍的理解へ

帰還試料から物質進化情報を最大限に引き出すため、高解像度同位体顕微鏡、超微小非破壊分析装置、宇宙物質分析パイプラインを開発・整備する。探査データの予測、観測・分析結果の多角的解釈、実験室では再現不可能な重力多体系や星間雲・原始惑星系円盤・大気・天体内部など、巨視系の構造と時間発展を再現する最高性能の数値計算システムを整備する。ALMA や次世代望遠鏡等による系外惑星系の観測的研究の知見も交え、生命を育む環境の宇宙における普遍性の理解を進める。

日本が機器提供を行う WSO-UV（ロシア）など新規の宇宙望遠鏡計画により、系外惑星系の分光観測から、系外惑星大気の特徴づけを行い、生命居住可能性を明らかにする。観測対象を飛躍的に増やすことで、第二の地球の発見に挑む。

エ 持続可能な世界（人間と社会）の実現

衛星を用いた通信や測位システムの社会応用に代表されるように、人類の宇宙環境への依存度は高まっている。宇宙利用技術の安定性や精度は電離圏擾乱に左右されるため、その把握と予測精度の向上が求められる。躍進の目覚ましい超小型衛星は大気抵抗が大きく、軌道を予測し有効な運用を行うには、太陽・地磁気活動に依存する高精度大気モデルを必要とする。衛星寿命を左右する宇宙放射線の強度予測も、重要課題である。宇宙工学分野との密接な協力関係を築き、これらの問題を解決する。

地球環境・気候変動の解明と予測には、人間活動や地球の持つ内部的な要因に加え、太陽活動などの外部要因も考慮しなければならない。その中には、隕石落下や突発的な天体现象など人類の生存を脅かす事象も潜在する。地球生命環境変動の全球高精度監視に本分野の培った技術を応用するとともに、大気水圏科学や天文学との協力によりこれらの理解と把握を進める。

オ 共同研究システムの構築

研究及び社会貢献を持続的に発展させるため、魅力ある基軸プロジェクトの立案と練り上げ、そのために必要な知見やデータのアーカイブと活用、国際共同研究の主導、人材育成、アウトリーチ、産学協力、さらに次世代のワークライフバランスの確保を有機的に進めることも、本分野の重要課題である。そのために機関間連携を促進するコンソーシアム体制を築き、これらを実現する。

(2) 大気水圏科学の夢ロードマップ

① 分野の概要

大気水圏科学分野は、大気、海洋、陸域水圏、雪氷圏そして人間圏と、多様かつ変化に富む地球表層圏を研究の対象とし、それらの過去・現在における動態と長期変化を詳細に把握するとともに、未来の予測につながる科学を扱う。物理・化学・生物学に跨がる学際的な手法による常時観測やモデリングを通じて、各圏をつなぐ多重的な相互作用を解明する。学問としての重要性はもちろんのこと、今後の地球環境の保全や、持続的で夢のある未来社会の構築にとって不可欠の研究領域である。

従来のロードマップで謳われてきた「新しい観測網の展開と充実、計算機技術・数値モデルの発展」を今後も発展的に継承していく。すなわち最新の物理的・化学的・生物学的観測技術を用いた全球観測網の展開と、コンピュータの性能向上に即した階層モデル・結合モデルの構築・発展を図りつつ、多次元化、多様化、及び研究適用領域の拡大と観測空白域の縮小に努める。観測網が充実し、観測の時空間的分解能が向上し、かつモデルの高度領域拡大と高分解能化が進めば、当分野の扱うデータ量は莫大なものとなろう。したがって、AI 導入等によるビッグデータ解析技術の発展も必要となる。たとえば、過去の多次元時系列データを用いた深層学習を併用することに

より、これまで気象モデルの性能に強く依存していた集中豪雨などの天気予報の精度向上が実用化しつつある。同様に、多様なプロセスが絡み合う複雑な気候システムにおける因果関係・システム状態の特定や遷移を新たな切り口で解明できる可能性がある。さらにデータ同化技術によって観測とモデリングとの融合をはかり、かつシナジー効果を高めることにより、最終的には宇宙にもつながるシームレスな大気・海洋・水文過程の理解を深めていく。

このような地球表層系の基礎的かつ応用的な学問探究には、分野内での切磋琢磨はもちろんのこと、分野の枠を超えた異分野間での連携が欠かせない。宇宙惑星科学分野が中心となって近年充実しつつある惑星大気観測に基づく惑星大気諸過程の研究に、地球大気科学で培われた理論やモデルが導入されれば、地球を含む惑星大気の統一的理解につながるだろう。大気水圏分野の科学的知見を効果的に社会に還元するうえで、地球人間圏科学分野との情報共有や研究協力は不可欠である。また、固体地球科学、地球生命圏科学との研究協力も、統合的な地球システムの現状把握や未来予測のために今後ますます重要となろう。これらの多分野との連携については赤紫色の枠で示した。国際的にトップレベルの学術成果を発信していく一方で、海外諸国との連携や情報交換の重要性も急速に高まっている。そのために国内外の連合大会などを通じて連携の可能性を常に探り、学際的かつ国際的な研究交流の活性化を図る。また、アジア全域をカバーする観測網を充実させ観測を主導するなど、国際社会の中での役割分担にも鋭意対応していく。

大気水圏は人間生活との関わりが特に深いことから、社会貢献においても相応の責任を果たさなければならない。国連によるSGDs（持続可能な開発目標）を踏まえながら、人間社会にとって日常的なベネフィット（例えば、シビアウェザーの迅速予報、地下水の利活用、気候変動や長期的な地球温暖化予測の高精度化及び緻密化、水資源・エネルギー資源管理、防災・交通管理、土地利用・農業への応用、環境変動の総合的掌握など）に適う社会発信に努める。これら一般社会との密接な関わりや情報提供については、夢ロードマップ図の下側に、緑色の文字で記載した。本ロードマップが最終的に目指すのは「持続可能な夢のある社会の達成」である。

本分野に限ったことではないが、地球惑星科学の将来の発展のためには人材育成の充実が欠かせない。中等教育及び高等教育において大気水圏科学分野の重要性を幅広く伝え、フィールドにおける実習や調査研究への参加を奨励する。海洋研究を例にとれば、学術研究船（白鳳丸・新青丸）や大学練習船などを整備し、研究・教育の機会を十分に確保するよう努める。

今後の中・長期的な本分野進展の方向を具体的に示しているのが、日本学術会議の大型研究ヒアリング（2018. 3. 28 実施）で提案された大型プロジェクトのうち、本分野と関連の深い以下の6件である。

1) 飛行艇を用いた臨床地球惑星科学の創成：船舶と航空機の利点を兼ね備えた大型飛行艇を、海洋や大気の新しい観測研究を推進する共同利用ツールとして初めて導入する。従来は行えなかった臨機応変の観測を実現し、世界初の「臨床地球惑星科学」、

すなわち迅速な現場観測と実証を基本とした新しい地球惑星科学の創始を目指す。

2) 衛星を用いた全球地球観測システムの構築：日本学術会議の提言「我が国の地球衛星観測のあり方について」(2017年)に基づき「地球衛星観測グランドデザイン」を策定。衛星による全球観測システムを構築して長期気候データの蓄積に努め、地球規模の気候変動・水循環メカニズムの解明、気象予報や地球温暖化予測の高精度化を進める。災害防止に対応する社会の構築に資する。

3) 航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進：東アジア全域をカバー可能な地球観測用航空機を導入し、温室効果気体、PM2.5などエアロゾルを現場観測するとともに、ドロップゾンデのピンポイント降下によって台風の急発達メカニズムを解明する。数値モデリング、衛星観測との連携により、気候・地球システム研究の飛躍的発展を目指す。

4) 太陽地球系結合過程の研究基盤形成：地球への太陽エネルギー(放射と太陽風)移行過程、及び地球の周辺環境(磁気圏、電離圏、大気圏)の応答を観測によって解明する。太陽放射及び太陽風が、それぞれ最大となる赤道域及び極域に大型レーダーを建設し、赤道域と極域をつなぐ広域地上観測網によるデータを合わせ、全球的なエネルギーと物質の流れを明らかにする。

5) 深海アルゴフロートの全球展開による気候・生態系変動予測の高精度化：水温・塩分センサーに加え乱流センサー・生物/化学センサー等を装着した6000m級の深海アルゴフロート(約1000台)を世界に展開し、海洋表層から底層に至る全球観測網を確立する。得られたデータから高精度の気候モデル解析を可能とし、過去及び将来の海洋環境変動・海洋生物変動の再現と予測を進める。

6) 極域科学のフロンティア：大型大気レーダーをはじめ極域観測のための先端的リモートセンシング機器の整備と活用を進める。衛星観測や高解像度モデリングを併用して、極域の中層から超高層に至る大気の物理的・化学的性質や変動機構を明らかにする。地球環境変化に関わる様々な先端的観測を北極と南極で並行して実施し、両極域の相違点を追究する。

② 夢ロードマップ

夢ロードマップ図の最上段には、ほぼ10年ごとに区切って、達成が見込まれる研究・技術の進展を総括的に示した(以下の太字部分)。それらの具体的内容とキーワードを以下に詳述する。

1) 今後10年以内(階層モデル・結合モデル活用、全球観測網の基盤形成、及び長期気候データの蓄積による、大気、陸、海洋の諸過程と階層構造の解明・気候予測)

開発と活用が進む結合モデルとして、メソ気象解像度実用・雲システム解像モデル、エアロゾル・化学過程の精緻モデル、乱流・雲・重力波パラメタリゼーションの改良型モデル、高解像度全大気モデル、海洋階層構造モデル、生態系・水循環結合モデルなどが挙げられる。

全球の観測と監視の基盤形成及びデータ蓄積に関しては、地球表層観測網（地上気象、大型大気レーダー、海洋レーダー・フロート、水文・生態系）、航空機・観測船・飛行艇による機動的観測、衛星観測（雲・風・気温・水蒸気・降水・温室効果気体・大気汚染物質センサー）、小規模集中観測（雲ライダー・各種ゾンデ等）、アジア生物多様性観測、極域氷床コア解析・次世代コア採取技術の開発、太陽活動の気候影響研究、最先端化学計測・センサ技術・分析手法の開発と応用、深海用アルゴフロート開発と展開、地下水の利活用システムなどの進展と拡大を図る。

宇宙科学分野との連携が進み、惑星大気 of 諸過程の理解が深まる。さらに地球人間圏分野との協力により社会への還元が充実化する。

2) 今後 10～20 年以内（観測とモデルの多元化・総合化と融合による「シームレス」な大気-陸-海洋階層構造の解明と気候システム全体としての理解、気候予測の高精度化）

コンピュータの性能が格段に向上することを背景として、人・地球システムモデルの開発と活用、特に雲システム解像モデル実用化と雲解像モデル開発、全中性大気高解像モデルの実用化、雲微物理の発展、放射現象の組込、境界層乱流の組込、大気・海洋の階層構造と階層間相互作用のシームレスな解明、物質輸送・拡散の解明、生態系・水循環相互作用の組込、自然と人間活動との相互作用の組込などが進む。また、観測データのモデルへの同化対象及び予測可能領域が広がる。

観測と監視に関わる体制の整備・拡張に関しては、多元的かつ継続的総合観測網（衛星・航空機・レーダー・多機能ライダー・各種ゾンデ・地上ステーション）の整備、機動的観測の確立（シビアウェザー・越境汚染）、全球及び沿岸海洋観測の確立（メガ津波・観測船・飛行艇・レーダー・深海アルゴフロート・環境試料分析計）、衛星全球観測と静止衛星の高度化と安定継続化（雲・エアロゾル・温室効果気体・水循環・海洋生物・植生・越境汚染）、全球アイスコア採集（気候記録のアーカイヴ化）、オゾン層・極中間圏雲中層大気の監視体制確立、生態系・全水循環過程監視体制確立、ジオスペース観測システム整備、太陽-大気相関計測システムの確立などにおいて、大きな進展が見込まれる。

宇宙惑星科学分野との連携が一層深まり、地球を含む惑星大気の循環や物理・化学諸過程の統一的理解が進む。固体地球分野や地球生命圏分野との連携も本格化し、統合的な地球システム研究が活発に展開される。

3) 今後 20～30 年以内（宇宙・大気・海洋・陸の全域の継続的精密監視による、気候システムの変動・変化の常時把握と理解、予測の緻密化）

コンピュータの性能が、さらに格段に向上することにより、人・地球・宇宙システムモデルの開発と活用、雲解像モデルの実用化と乱流解像モデルの開発、全大気次世代モデルの実用化、水文・海洋フラックス・太陽活動の組込、地球システム-社会経済結合モデルなどの実用化が進む。また、観測データのモデルへの同化技術

も高度化し、宇宙・大気全層・海洋の高精度予測が可能となる。

観測と監視においては、地上及び宇宙からの観測網が一層充実し、宇宙・大気全層・海洋の精密監視が定常的に行われるようになる。その結果、ジオスペース・大気・人間活動相互作用の理解促進、機動的・多元的観測体制の確立と運用による気象・海洋・水文・生態系の統合監視、衛星による水循環・気候変動・全大気現象の切れ目のない定常観測、海洋における突発・異常現象の監視と海洋生態系の時空間変動・資源の計画的な管理、南極グリッド掘削・惑星氷床掘削の実現、フルデプス海洋管理システムの構築が可能となる。

アジア域においては総合的な観測体制を主導するようになり、国際的な環境監視に基づいた気候変動と環境変化に関する高度な対策技術の確立へ向かう。

地球惑星科学分野全体として、現在の地球システムの統合的な理解が深まるとともに、地球の誕生から、近年の地球温暖化に至る時系列過程が詳細に明らかにされ、長期にわたる未来予測が高精度で可能となる。

(3) 地球人間圏科学の夢ロードマップ ～持続可能な日本、アジア、世界の実現への道～

① 分野の概要

21 世紀前半の我が国における地球人間圏科学の最大の課題を、「持続可能な日本、アジア、世界の実現への貢献」と規定し、その達成度を地域・社会のサステナビリティ及び知識・情報の質・量・モビリティ等で決まる広い意味でのサイエンスレベルの向上により実現するという道筋を描いた。全期を以下の通り 3 期に分け、全期を通じてサイエンスレベルを押し上げる力として教育・研究により駆動される人・情報・知識の循環を掲げた。

② 夢ロードマップ

ア Phase I (2018 年頃～2030 年頃)

2015 年に国連総会決議において決議された『持続可能な開発のためのアジェンダ 2030 (SDGs)』は世界共通の課題として世界に共通する 2030 年までの目標を掲げている。この期間には 2010 に始まった ICSU Grand Challenges の成果から明らかとなりつつある地球人間圏が抱える諸問題の実態把握と改善の道筋をもとに、地球人間圏科学・教育の充実と世界的展開の流れを確実にする。また同時に進行している Future Earth の枠組みの中でも研究を推進する。さらに気候変動に関するパリ協定と防災に関わる仙台枠組みも地球人間圏科学にとって重要な目標である。具体的には以下の活動を進める。

- 1) 地球・人間圏科学研究教育。情報ネットワーク充実：市民参加モニタリングネットワーク、グッドプラクティス発掘と推進、社会との協働・協創。
- 2) 陸域持続可能性研究の充実：LUCC、土地・資源・エネルギー、都市・農村、水環境、環境保全、生態系保全、統合モデル研究、地球情報の充実。

- 3) 沿岸・縁辺海域・海洋持続可能性研究の推進：陸域－縁辺海域システム、沿岸・縁辺海域利用、環境保全、生態系保全、海洋資源、汚染の浄化。
- 4) 災害リスク統合研究の充実：気候変化影響、地震・津波、洪水、地形災害、火山災害等、旱魃・ゾド、学際領域での災害原因究明、データ統合、リスクの人間社会的側面、災害レジリエンス、社会連携。
- 5) 地球情報・地理空間情報の整備・公開・可視化：地球人間圏の観測・モニタリング・予測、GIS、RS、オープンデータ、ビッグデータ、消えゆくデータの保全。

イ Phase II (2030年頃～2040年頃)

Phase I の成果を活かし、全人類的パートナーシップを確立し、持続可能な日本、アジア、世界への道を見出すことを目標とする。この時期、国際連合の SDGs 等の目標や ISC Future Earth が新たなフェイズを迎えるにせよ、別のプロジェクトとして発展するにせよ、人類の持続的発展のための国際協調が引き続き重要な目標であることに変わりはなく、前期と同様の枠組みのなかで研究が展開される。具体的には以下の活動を継続する。

- 1) 超学際研究の体系化：地球人間圏科学研究・教育・情報ネットワークの充実と世界的展開。
- 2) 陸域・沿岸・縁辺海域・海洋持続可能性研究の充実。
- 3) 統合的災害リスクマネジメント研究・教育の充実と世界的展開：防災プラットフォーム計画、グッドプラクティスの推進。
- 4) 生物多様性と生態系保全の推進。
- 5) 安心安全、豊かで誇りをもち暮らせる地球社会創造
- 6) Education for Sustainable Development の充実。
- 7) 都市農村の相互依存社会の構築。

地球人間圏科学は新しい概念の創生・展開の一つである「地球生命圏サステナビリティ」を介して地球生命科学とつながることをめざす。このリンクは、3つの軸の中で残された 持続可能な日本・アジア・世界への道を見出すうえで重要である。

ウ Phase III (2040年頃～2050年頃)

Phase II の成果を活かし、地球人間圏科学・教育の充実と世界的展開に努めるとともに、すべての人類の協和、英知の結集、地球環境倫理の確立を実現し、以下の目標を達成することに寄与する。

- 1) 持続可能な世界にむけた生命観、自然観、世界観、地球人間圏科学の創出
- 2) 統合的地球環境問題の克服：人口・食糧問題、土地・資源・エネルギー問題、温暖化問題、汚染縮小、災害克服、格差・貧困克服
- 3) 地球人間圏科学の高度化

4) 科学の果実の全人類的共有

以上により、人と自然が調和した平和で持続可能な日本、アジア、世界を実現することに最大限の貢献をすることが、我が国の地球人間圏科学の「夢」である。

(4) 固体地球科学の夢ロードマップ

～稠密観測・極限実験・高感度分析・高性能計算が拓く固体地球科学～

① 分野の概要

地球は、海、陸、生命が存在し、大きな衛星「月」との強い相互作用、及びプレート運動、地殻変動、ダイナモ作用を伴う活動的な惑星である。なぜ地球がこのように活動的であるのか、未来の地球と人間社会の関わりはどのように変化していくのか、また宇宙の中でも特殊であるのか普通であるのか、これらの疑問のもと、系外惑星の探索・発見とともに惑星「地球」の見方が大きく変わりつつある。地球での知見がリファレンスであると同時に、より一層、惑星「地球」の深い理解が求められている。

地球は、固体地球圏、気圏、水圏、生物圏等に分けられるが、地球の根源的理解のためには、これらを一つのシステムとして捉える必要がある。その中でも、質量の99.98%を占める固体地球は重要な部分であり、火成・脱ガス作用、大陸形成、プレート物質循環等を通して、表層環境や生物進化に深く関わる。固体地球の徹底的な理解は、人間社会にとっても重要である。巨大な地震・津波・火山噴火を含む変動現象の評価とそれによる災害の予測と予防、資源の探求及び開発、環境の保全と改善等への貢献を通して、人間や社会と深く関わる。

地球システムにおける固体地球の特殊性は、現象のもつ特徴的時間スケールと多様性にもある。プレートテクトニクスをもたらすマントル対流は、100万年といった時間のなかで支配的であり、その変動が地球システム全体の長期的変動を規定する。プレートの運動により地震が起こり、火山や地形がつくられる。千年に一度の巨大地震は、一瞬（数分）の間に起こり、大災害を引き起こす。また人類は、千年以上の時間スケールでどのような変動が起こりうるか把握できていない。このような時空にわたる固体地球変動の複雑さに思いを馳せるとき、科学としての面白さと、それによって恩恵・影響を受ける人類社会の対応の難しさに理解が及ぶ。このような“超”複雑系ともいえる固体地球の理解は、各要素の漸進的理解が絡み合って展開する。

惑星「地球」とそこでの現象の理解には、形成から現在に至るまで、及び表層から深部までの構造、進化の全容解明が必要である。それに基づき、宇宙の中での地球の個性と普遍性が明らかになり、未来予測や人間社会への貢献も可能となる。しかしながら固体地球の変動予測には多大な不確実性がともない、新たな観測データや現実によって検証されることにより理解が一段進む。このプロセスを経た理解を「認識」と呼ぼう。すなわち、地球の構造、変動、歴史の解明をさらに進め、惑星「地球」のシステムを理解し予測/検証することが、人類と宇宙に開いた「地球認識」に繋がるのである。高度な「地球認識」を得てはじめて我々は、科学にもとづいた人類の未来を語

ることが出来る。

② 夢ロードマップ

段階的に、地球科学、惑星・天文学、生命科学を融合し、地球の個性と普遍性、銀河史の中の地球史、人類と地球システムの未来の探求を進める。

固体地球科学の進展は、主に夢ロードマップの副題及び以下に掲げられる手法によって支えられる：(1) 表層から中心核まで、及び地球史に及ぶ稠密観測：物質科学的観察（地質・岩石・鉱物学、古生物学、地球化学的手法による全地球・地球史野外調査、組織構造解析、試料採取）と資料アーカイブ化とキュレーション、及び地球物理学的観測（地震-測地観測網、重力、素粒子による海陸連結稠密常時変動観測）とデータ公開、(2) 室内実験及び数値実験による極限実験：地球惑星物質の物性に関わる超高温高压発生実験、スーパーコンピューターによる第一原理計算、地球内部及び全地球システムの大規模連結シミュレーターによるダイナミクスの解明、ビッグデータ解析によるシステム解読、及びハード・ソフトウェア共有、(3) 生体物質を含む地球惑星物質の高感度分析：高解像度構造解析、ナノスケール全元素・同位体・古地磁気強度分析。また図3の4に記載される、サイエンス・テクノロジーの進展にも大きく依存する。

固体地球科学の夢ロードマップには、社会の未来の発展に多大な影響を及ぼす可能性のある境界条件的事象が含まれる。それらの起こりうる災害/変動規模を予測し、社会に提示して行く必要がある。高頻度事象としては、巨大地震(プレート境界、都市域直下)、噴火(地域および気候への影響)などがある。低頻度/地球史的事象としては、巨大カルデラ噴火、気候変動、隕石衝突などがある。

以下、夢ロードマップの各要素項目とキーワードの関連性についてまとめる。

ア 地球の構造、変動、歴史の解明

(ア) 構造/物性とダイナミクス（表層-中心核の観測と実験・数値計算上の再現）

- 1) 地殻-マントル-核とメルトの相平衡・転移・流動（極限圧縮物性測定、高輝度ビームライン）
- 2) プレート・マントル対流/循環、MHD ダイナモ（ポスト京）
- 3) 大規模波動場構造解析・データ同化変動解析（Large-N array、ポスト京）
- 4) 未踏域観測（太平洋アレイ、フロンティア観測）、新計測（地球ニュートリノ、ニュートリノ振動、原子/光格子時計、光ファイバーセンシング、弾性回転計測）
- 5) 沈み込み帯比較・統合研究、大変形・地形形成・長期変動・火成活動

(イ) 変動と自然災害（陸域稠密観測-海域掘削と構造・資源）

- 1) 地震-測地観測網（S-net、DONET/2、スロー地震）、重力、素粒子（ミュオン透視）

- 2) 巨大変動(地震・火山噴火)評価、災害予測と社会還元(緊急地震速報、災害科学・防災施政との連携、ジオパーク)
- 3) 海陸地質/資源(深海掘削、超深度掘削、断層掘削、海陸新資源、元素資源マッピング)
- 4) 衛星地球観測、環境変動/極域モニタリング

(ウ) 地球史と生命(地球史解読)

- 1) 探査回収試料による形成初期進化(サンプルリターン)
- 2) 地球史・生命環境史の変動期(特異点)抽出(地球史特異点)

(エ) 惑星地球と探査(地球型惑星の探査、組成・物性・ダイナミクス)

- 1) 全地球・ミクロ-マクロ変動結合計算(マルチスケール地球シミュレーター)
- 2) 素粒子による地球内部熱源分布計測(ジオニュートリノ熱源トモグラフィ)
- 3) 惑星内部構造・変動予測、惑星内部トモグラフィ(スーパーアース、ランダー探査)

イ 地球システムの理解と変動予測/検証

(ア) 多圏相互作用と地球システム(変動)

- 1) 固体・大気・海洋複合系の循環・変動
- 2) 月・惑星・宇宙空間との相互作用
- 3) 地球形成過程: マグマ海、大衝突、月
- 4) 地球史化学・生物層序と内外営力(同位体質量分析顕微鏡、初期地球)

(イ) 地球システム変動予測(海陸常時稠密変動観測と高精度予測; 新環境制御、廃棄物処理)

- 1) 全球運動と表層地質変動の連携解明
- 2) 日本周縁ケーブル網、太平洋定常地球物理観測網(光ファイバーセンシング、フロート・グライダー観測)
- 3) 地震・火山噴火予測の高度化

ウ 人類と宇宙に開いた「地球認識」への到達

(ア) 惑星物性、資源(惑星地質・構造探査、太陽系新資源)

- 1) 超高温高压下での惑星内部構造と新物性
- 2) 惑星: 地質、新資源、移住・利用検討

(イ) 最先端稠密全球ネットワークによるリアルタイム監視(多様性の探索と長期地球変動予測/検証、自然・災害: 制御/共生)

- 1) 固体地球・表層・大気海洋・月・太陽相互作用の稠密観測
- 2) 地震・火山噴火・変動高精度予測、防災手法確立

(ウ) シームレスな地球形成・進化史：データとシミュレーション(固体地球-表層・生命圏-宇宙圏統合進化モデル)

- 1) 集積過程-冥王代から現在まで、表層環境から地球中心まで、全地球システム史と未来予測

(5) 地球生命科学の夢ロードマップ

① 分野の概要

地球惑星科学の今後 30 年のロードマップの重要な軸は、(a) 宇宙の生成と生命の誕生と進化、(b) 現在の地球の営み、(c) 持続可能な世界（人間と社会）の実現の 3 点に集約される。地球生命科学は、地球惑星科学の他の分野と強く連携しながら、これらの軸のいずれにも深く関与しつつ、分野独自の夢に向けた歩みも遠望する。

その夢の主要な方向性は、ロードマップの対角線にある 3 つの矢印で示された 3 段階で構成される。すなわち、ハビタビリティ、地球生命共進化、適応進化について理解する第 1 段階、生命存続条件を特定し、生態系を人工的に合成する第 2 段階、スーパーハビタビリティ、生命創生の機構について明らかにする第 3 段階である。それぞれは、今から 10 年先、20 年先、30 年先の到達目標にそれぞれ対応する。また、それぞれの段階の内容を言い換えると、「地球と生命の多様性をつながり理解する」段階、「地球生命システムのダイナミクスを理解する」段階、「宇宙における地球・生命とは何かを理解する」段階としてまとめることができる。

② 夢ロードマップ

前回策定された 2014 年版の夢ロードマップと比較すると、前回のマップの対角線にあった夢の主要な方向性が「表層圏、地球内部（10 年後）、マントル、太陽系内（20 年後）、ハビタブルプラネット、太陽系外（30 年後）」と目標が「到達する場所」であったのに対し、今回のマップでは、上述のように「到達する認識の境地」となるように修正した。地球生命科学では、テクノロジーの進歩によって単に遠いところに行けることではなく、むしろ「地球における生命」や「宇宙における生命」とは何かを理解することの方がより本質的であろうと考えられるからである。

また、2014 年版では、対角線の 30 年後の矢印の先に「地球と生命の共進化」が到達目標として掲げられていた。今回その目標は 10 年後の目標に前倒しされ、その先に、生態系の合成（20 年後）、生命創生の機構解明（30 年後）を目標に掲げ、「地球生命」の理解だけではなく、より普遍的な「宇宙生命」の理解というさらに大きな夢を目指すこととした。これにより、対象とする現象の空間スケールも、原子・分子レベルから宇宙レベルへと広がった。また、対象とする時間スケールも地球における生命の起源から現在までの時間軸に加え、地球外における生命の起源も視野に含まれることと

なった。生命はその誕生以来、非平衡状態を維持してきた。生命がいかにして混沌から生まれ、熱平衡に陥ることなく秩序を保ってきたのか、地球生命科学はその謎に挑む。

また、2014年版で想定していた未来が順次現在になってきたことに伴い、地球生命科学に関連したいわゆる「大型プロジェクト」（現行のものと計画中のものを含む：マップ中では白抜きの四角で示す）の達成時期も大部分前方に平行移動することとなった。例えば、国際深海科学掘削計画（IODP）、国際陸上科学掘削計画（ICDP）、はやぶさ2/OSIRIS Rex等は今から10年後の間に位置付けられた。一方で、土星衛星サンプルリターン等のように、前回設定された達成時期よりも後に今回達成時期が設定されたプロジェクトもある。なお、これらのプロジェクトにおける地球生命科学の関わりの度合いを示すため、それぞれのプロジェクトの科学目標において地球生命科学が全体の50%以上を占めるものを濃いピンク色で、20-50%のものを薄いピンク色で、20%未満のものを白色で、区別して示した。

さらにきめ細かく今後30年における地球生命科学の進むべき道を示すため、地球生命科学を構成する6つの分野、すなわち、アストロバイオロジー、地球微生物学、生命の起源論、生物地球化学、古環境学、進化古生物学のそれぞれで、10年後、20年後、30年後に予想される、あるいはそれまでに達成することが期待される研究内容、研究成果をリストアップした（マップ中に記述されている項目）。例えば、進化古生物学を例に取れば、10年後、20年後、30年後の到達目標は、それぞれ古代ゲノムの復元、古生物の生理・発生機構の復元、古生物の復活（これについては倫理的問題も十分考慮しながら進める）ということになる。

このマップでは、横軸に現在から30年後までの時間軸を取り、縦軸にはサイエンス・テクノロジーレベルを用いている。最初に示した対角線の3本の矢印の下には、特にテクノロジーレベルの向上により進むと想定される項目が示されている（高精度モレキュラー分析など）。一方で、その下の横軸に沿った領域では、それらのテクノロジーレベルの向上と直接的にはリンクしない基盤的な知識の蓄積（例えば分子系統・分類学・リポジトリ・フィールド調査）や、新しい概念の創生・展開（例えば地球生命圏サステナビリティや進化再現・人工進化など）が示されている。

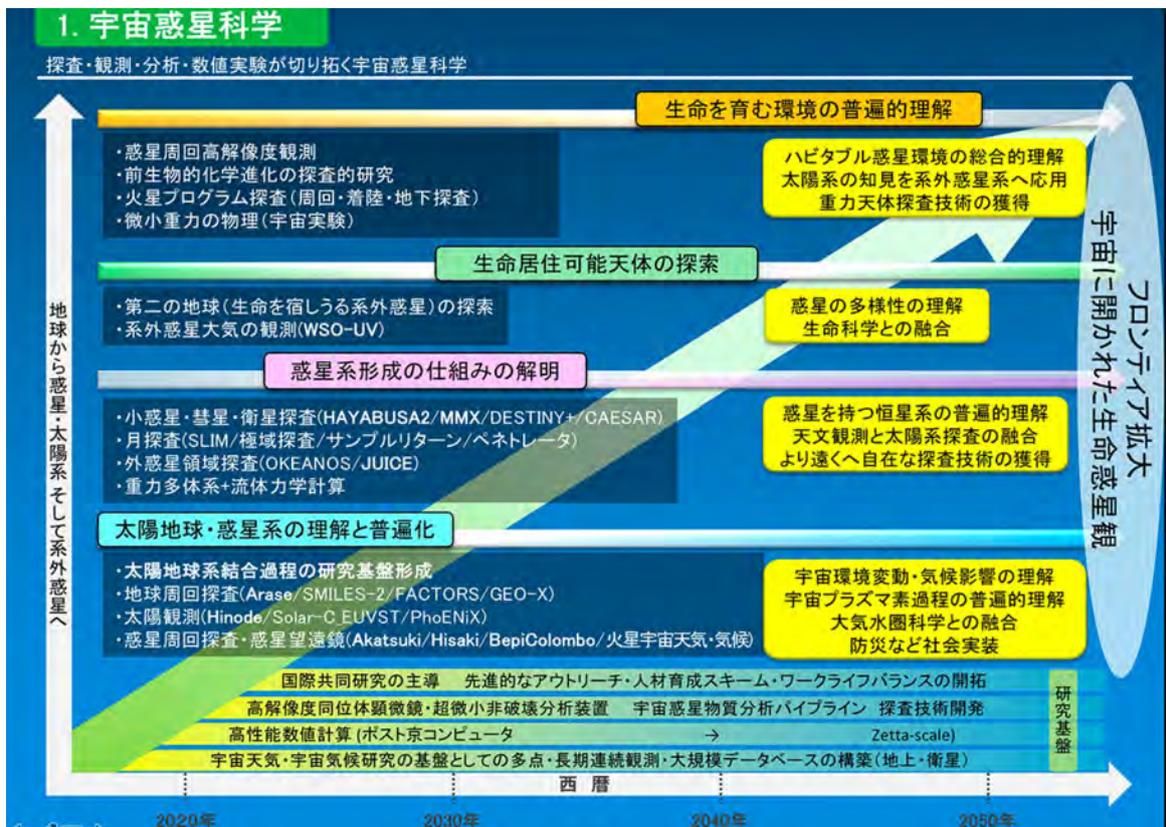
このマップは地球生命科学で閉じたものではない。生命科学と密接にリンクしているほか、地球惑星科学の他の分野とシームレスでつながるのりしろを有している。まず、地球の生命は地球の一部であり、地球表層の物質からできている。その意味で、地球生命科学そのものが固体地球科学の一部であるということもできる。また、上述の大型プロジェクトの一部、すなわち、「深海・熱水系地下生命圏探査」「深海アルゴフロート」「次世代AUV運用」及び「深海プラットフォーム」などは、大気水圏科学と密接にリンクしている。これらの分野とのつながりは、最初に述べた地球惑星科学全体のロードマップの3つの重要な軸の一つである（b）現在の地球の営みを理解する上で欠かすことができない。

また、同じく地球生命科学の大型プロジェクトの一部、すなわち「国際宇宙ステー

ション」「深宇宙ゲートウェイ」「無人火星着陸探査」「有人火星探査」及び「土星衛星サンプルリターン」などは、宇宙惑星科学と深くつながっている。宇宙惑星科学とのリンクは、もう一つの重要な軸である (a) 宇宙の生成と生命の誕生と進化を理解する上で不可欠である。最後に、人間は生命の一部であり、地球人間圏科学と地球生命科学が密接に関連していることも明らかであろう。夢ロードマップにおいては、地球生命科学の新しい概念の創生・展開の一つである「地球生命圏サステナビリティ」を介して地球人間圏科学とつながる。また、このリンクは、3つの軸の中で残された (c) 持続可能な世界 (人間と社会) の実現において重要である。

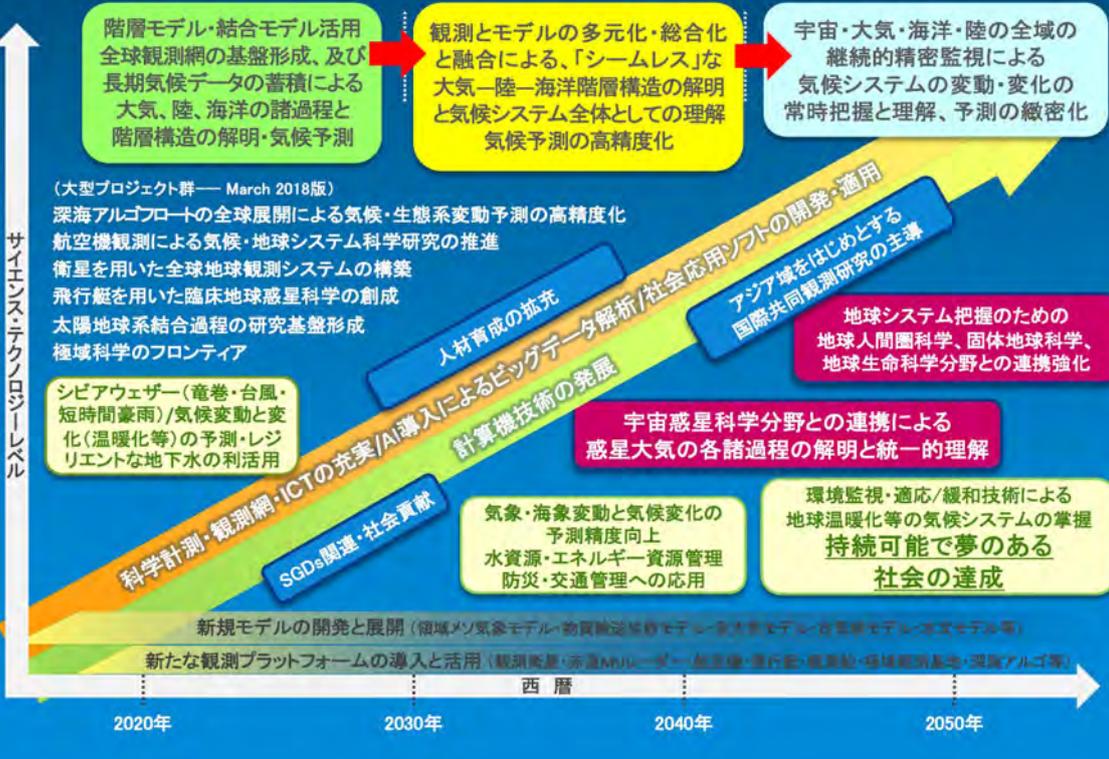
図3 地球惑星科学5分野の夢ロードマップ (改訂) 2020 の概要

1. 宇宙惑星科学、2. 大気水圏科学、3. 地球人間圏科学、4. 固体地球科学、5. 地球生命科学



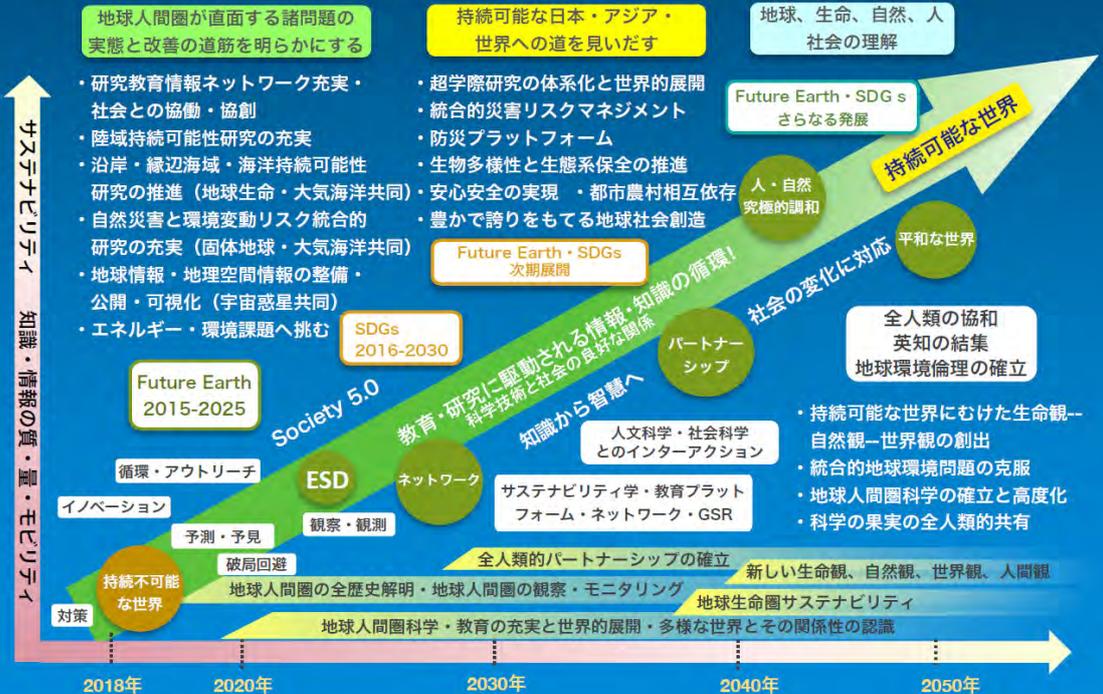
2. 大気水圏科学

大気水圏の物理・化学・生物システムに関する基礎過程の把握と理解。高機能観測と常時監視、および高精度予測



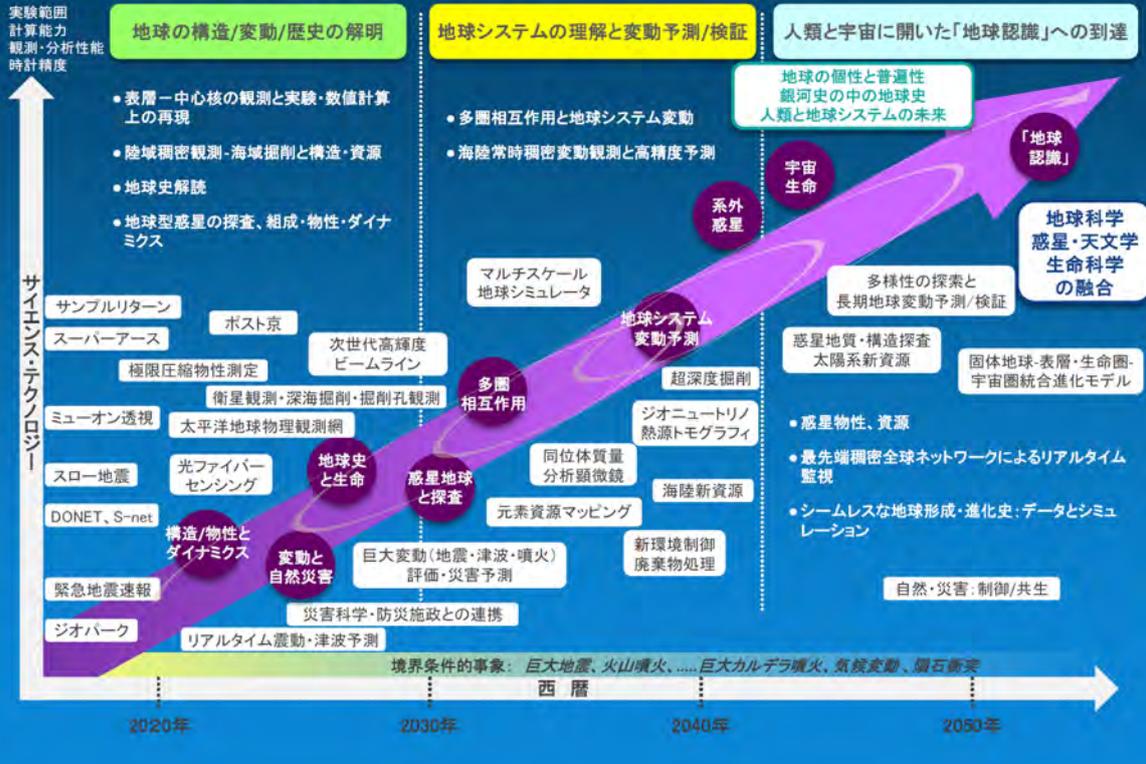
3. 地球人間圏科学

持続可能な日本、アジア、世界の実現への道



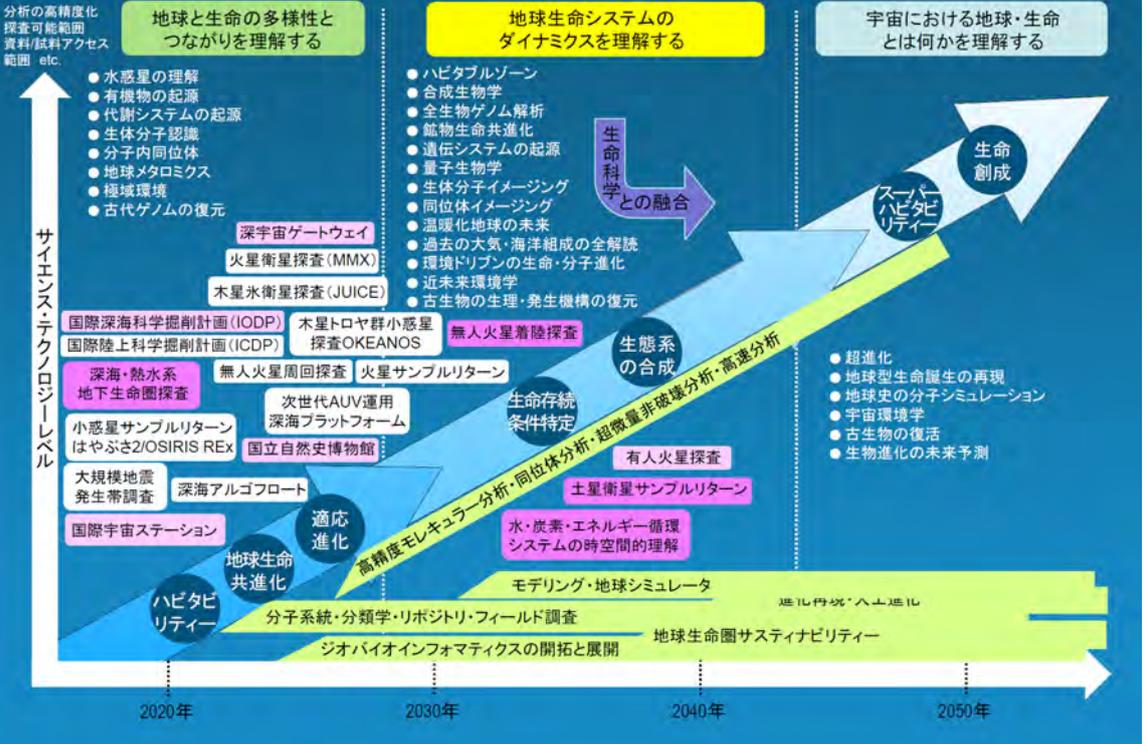
4. 固体地球科学

稠密観測・極限実験・高感度分析・高性能計算が拓く固体地球科学



5. 地球生命科学

次世代の探査・観測・分析が描く地球の生命像



<参考文献>

[1] 日本学術会議第三部、報告「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ」、2011年8月24日。

<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-21-h132.html>

[2] 日本学術会議第三部、報告「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ 2014」、2014年9月19日。

<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-22-h201.html>

＜参考資料 1＞検討の経緯

※以下では、公益社団法人日本地球惑星科学連合を JpGU と記す

- 2017年11月20日 日本惑星科学連合（JpGU）ユニオンサイエンスボード会議（拡大）が開催され、地球惑星科学委員会から JpGU ユニオンサイエンスボード会議に大型研究計画改定の取りまとめとユニオンセッションの開催が提案・要請され、検討が行われた。
- 2018年5月21日 JpGU 2018年大会ユニオンセッション「地球惑星科学の進むべき道- 8: 地球惑星科学分野における将来計画とロードマップ」を開催。JpGU の5つのサイエンス・セクション（宇宙惑星科学、大気水圏科学、地球人間圏科学、固体地球科学、地球生命科学）から改定の準備状況と改定案の報告及び今後の方針の検討が行われた。
- 2018年6月11日 JpGU ユニオンサイエンスボード会議（拡大）で改定の趣旨、改定の方角性、今後の具体的スケジュールについて検討・決定された。
- 2018年12月27日 地球惑星科学委員会と地球・惑星圏分科会の合同委員会で審議・議論され、その意見を基に再度改定を行い、最終案を作成することを決定した。
- 2019年5月26日 地球惑星科学委員会・地球・惑星圏分科会合同委員会で最終案を確認した。
- 2019年12月24日 地球惑星科学委員会・地球・惑星圏分科会合同会議および地球惑星科学委員会地球惑星科学企画分科会において、報告案「地球惑星科学分野における科学・夢ロードマップ（改訂）2020」が承認された。
- 2020年4月30日 日本学術会議幹事会（第289回）
報告「地球惑星科学分野における科学・夢ロードマップ（改訂）2020」について承認