



海洋科学掘削によるマントル到達への挑戦
—地球最大のフロンティアに挑む—

地球深部探査船「ちきゅう」 の海洋科学掘削が切り拓く 新しい未来地球システムの 価値創造

稲垣 史生^{1,2,3*}

倉本 真一¹

平 朝彦^{1,4}

Creating a new value for our future Earth
system through scientific ocean drilling by
the deep-sea drilling vessel “Chikyu”

Fumio Inagaki, Shin'ichi Kuramoto, and
Asahiko Taira

-
1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構
 2. 東北大学大学院理学研究科地学専攻
 3. 早稲田大学ナノ・ライフ創新機構
 4. 東海大学海洋研究所
- * 責任著者 (E-mail: inagaki@jamstec.go.jp)

マントルとは、惑星地球の全容積の約83%を占める流動的な物質であり、惑星表層を覆う地殻の下に存在している。本特集号では、私たちにとってマントル掘削への挑戦や次の10年の海洋科学掘削とはどのような科学的意義を持ち、次代以降の人間社会の発展のために何をもたらすのかについて、幅広い分野・専門の方々からの意見を交えて考察し、その実現に向けた具体的な議論を深める機としたい。

1. はじめに

1958～1966年にかけて東太平洋メキシコ沖にて行われた「モホール計画」以降、海洋科学掘削による海洋地殻の完全貫通とその下の上部マントルへの到達は、地球惑星科学における最も本質的かつ挑戦的な計画とされてきた。それから約半世紀もの間、人間社会は化石燃料を主要なエネルギー源とした高度経済成長を成し遂げ、それと共に産業界における掘削技術も飛躍的な進展を遂げてきた。2005年、我が国は人類史上初のマントル

への到達を建造目的の一つに掲げた地球深部探査船「ちきゅう」を完成させ、2007年より、国際的な海洋科学掘削プログラム（IODP）における主要な掘削プラットフォームの一つとして運用を開始した（図1）。現在、「ちきゅう」の運航開始から約16年の年月が経ち、私たちは主に日本沿岸において複数の科学掘削プロジェクトを実施し、世界記録の樹立や、多くの学術的成果を挙げてきた。一方、マントル到達に向けた具体的な計画立案や実施計画については、未だその端緒に就いたばかりである。

2. 人新世と共に歩む海洋科学掘削の歴史

1950年代から米国を中心にはじまった海洋科学掘削は、まさしく人間の時代「人新世（Anthropocene）」の黎明期を象徴する高度経済成長やグローバリズムと共に進展してきた。平（2022）によれば、人新世は1945年の原爆実験から始まったと定義できる。戦後、世界経済を科学技術のイノベーションで牽引したのは米国で



図1 地球深部探査船「ちきゅう」。

あった。その象徴的な出来事は、米国が戦前の石油輸出国から、大量の石油を中東から輸入する国に変貌したことであり、それに伴っていわゆるセブンメジャーズと呼ばれる巨大石油会社が発展していったことであろう。これらの会社は、深い海底での石油開発が米国の経済成長を支える上で必須の技術であるとの認識のもと、掘削リグの開発・建造に取り掛かっていた。同時に、戦時中に発達したソナー技術を用いた海底地形探査や反射法地質構造探査も急速な進歩を遂げつつあった。この状況において、海洋底探査の大型プロジェクトに地球科学の未来像を描いた人物がいた。ハリー・ヘスとウォルター・ムンクである。彼らは海洋地殻の物質と構造、海洋底モホ面の実態、そしてマンツルの組成こそが地球科学の最大の謎であると考え、「モホール計画」を立ち上げた。

1961年から63年にかけて、5社の石油会社が共同で開発した掘削船「CUSS1号」(図2)を用いてメキシコ沖で実施されたモホール計画のフィジビリティ・スタディでは、水深約3,558メートルの海底から約183メートルまで掘削し、約170メートルの海洋堆積物とその下約13メートルの海洋地殻(玄武岩)のコアサンプルの採取に成功した。その歴史的成果に対して、当時のケネディ大統領か



図2 CUSS1号。

ら祝電が送られたことは有名なエピソードである。実際に、当時の科学技術では、モホロビッチ不連続面まで掘削するという野心的な目標には遠く及ばなかったかもしれないが、1969年のアポロ11号計画でニール・アームストロング船長が月面に足跡を残す約8年前に、人類はマンツル到達への第一歩を踏み出していたのである。その後、米国の政府科学予算がアポロ計画に傾注する中で、モホール計画の予算・運営が行き詰まり、本計画は1966年に終結せざるを得ない状況となった。他方、モホール計画における多くの検討事項や技術開発は、海域における石油・ガス資源開発や船舶工学に大きな影響を与え、同時に、その後の数々の歴史的な発見と科学成果を創出する海洋科学掘削の礎を築くこととなった。

1968年には、米国の掘削船グローマー・チャレンジャー号によるDeep Sea Drilling Project (DSDP)と呼ばれる深海掘削計画がスタートした。また、米国の提案により、1975年に国際深海掘削計画 (IPOD: International Phase of Ocean Drilling) が開始され、日本がプログラムの運用資金を一部分担することで、プロジェクトに参画するようになった。それらの黎明期を経て、米国を主体とする海洋科学掘削は、1985年にジョイデス・レゾリューション号 (図3) による国際深海掘削計画 (ODP:



図3 ジョイデス・レゾリューション号。

Ocean Drilling Program) へと引き継がれた。これらの経緯については、平らによる「地球の内部で何が起きているのか? (光文社新書)」や本特集号の江口・澤田と肖・末廣による寄稿に紹介があるので、ご一読いただきたい。

1960年代から1970年前半は、米ソ冷戦の時代であると共に、第三次産業革命とも呼ばれる熾烈なフロンティア科学技術の競争の時代でもあった。当時、欧米を中心として、経済成長を支える石油エネルギーの調達や、国防に資する科学技術開発に対して、莫大な国家予算の投資がなされていた。同時に、モホール計画やアポロ計画をはじめ、深海や宇宙といった人類未到のフロンティア開拓事業が国家の威信をかけて推進され、原子力や通信利用等の技術開発に関与する民間企業にも、莫大な予算と人的投資がなされていた。そこには、米国の国防総省高等研究計画局(DARPA)が意図していたように、国家の経済発展と軍事・安全保障等の国力増強に寄与する圧倒的なイノベーションのニーズがあった。その結果として、現在の全地球測位システム(GPS)や無人・ステルス航空機、リアモーターカーなどの基盤技術や、コンピューターの高度化によるシステム・オートメーション化などの基盤技術が確立した。つまり、冷戦中での「脅威」に対する国家的・資本主義的な投資圧力、そして民間の強烈な競争意識の高まりが、半ば無意識のうちに先駆的な科学技術開発のスピードと価値を高め、海洋科学掘削をはじめとするフロンティア研究の加速的な進展につながったと思われる。

当時、我が国においては、科学技術庁の特殊認可法人であった海洋科学技術センター(現:海洋研究開発機構)による無人探査機「かいこう」によるマリアナ海溝チャレンジャー海淵への到達や、有人潜水調査船「しんかい2000」および「しんかい6500」が建造されたように、戦後の科学技術の継承と進展により、未到の海洋フロンティアが開拓されてきた。それにより、人類はマリアナ海溝チャレンジャー海淵などの水深6,000メートル以深の超深海域を含め、ほぼ全ての地球表層環

境に直接的にアクセスすることができるようになった。海洋科学掘削においては、1979年から2019年にかけて、米国の掘削船ジョイデス・レゾリューション号(図3)がコスタリカ沖水深3,470メートルの504B孔において、複数回のプロジェクトからなるライザーレス掘削および孔内検層・掘進作業を行い、海洋地殻第3層(下部地殻)に迫る海底下2,111メートルまでの科学掘削を成功させた。その記録は、マントルを目指す基盤岩(海洋地殻)の海洋科学掘削としては世界最深到達記録であり、現在もその記録は更新されていない。

3. 地球深部探査船「ちきゅう」の誕生とマントル到達への期待

1990年代半ばから2000年代初頭にかけて、インターネットを介した通信産業や物流が急速な勢いで拡大した。それに伴い、世界の時流は大国を中心とするナショナリズムの台頭からグローバリズムへと移行していった。我が国においても、90年代のバブル経済の崩壊を境として、高度経済成長期から徐々に成熟型社会への移行がはじまり、欧米を中心とする国際社会の中でいかにリーダーシップを発揮するかが問われはじめていた。1990年前半から2000年頃にかけて、科学技術庁(当時)の海洋開発推進懇談会・深海掘削研究会を中心に、大深度の海底下フロンティア研究にとって技術的な限界があるライザーレス式の掘削船に以外に、比重や粘性を調整した掘削流体(泥水)を循環させるライザー式の掘削船の科学的必要性と技術的可能性が議論されていた。それは、我が国の科学技術により、世界で初めてマントル到達の実現を目指すものであった。1997年、ライザー掘削国際科学者会議(CONCORD会議)が東京で行われ、翌々年の1999年には、ライザーレス掘削国際科学者会議(COMPLEX会議)がカナダのバンクーバーで行われた。国内では、ポストODPの国際プログラムを想定し、1994年より海洋科学技術センターに深海地球ドリリング計画(OD21)が組織され、ライザー掘削システムを有する新しい掘削プラッ

トフォームの検討・開発が進められた。2001年4月、日本政府は CONCORD 会議での科学提言を受け、総工費約 600 億円をかけた地球深部探査船「ちきゅう」の建造に着手した。2002年10月には、海洋研究開発機構に「ちきゅう」の運用を担う部署として、地球深部探査センター (CDEX) が発足した。翌2月には、日本地球掘削科学コンソーシアム (J-DESC) が組織化され、研究者におけるオールジャパン体制の活動が開始した。2003年10月、日米が共同運営する統合国際深海掘削計画 (IODP : Integrated Ocean Drilling Program) がスタートした。欧州は、ECORD と呼ばれる連合体 (コンソーシアム) により IODP に参加し、「ちきゅう」や「ジョイデス・レゾリューション号」による掘削が難しい海域でのオペレーションを目的とした特定任務掘削船 (MSP : Mission Specific Platform) を運用することとした。国際的なプログラム・マネジメントにおいては、米国ワシントン D.C. に事務所を構える IODP-Management International (IODP-MI) が組織された。当時海洋研究開発機構の研究担当理事を務めていた末廣潔氏が IODP-MI の第2代 President を務め、IODP 全体を統括・牽引した。そして2005年7月、ついに当時最新鋭のライザー掘削設備を有する世界オンリーワンの地球深部探査船「ちきゅう」が就航した (図1)。「ちきゅう」は、最大水深 2,500 メートルの海底にライザーパイプと噴出防止装置 (BOP : Blow-Out Preventor) を設置し、海底下約 7,000 メートルまでの掘削能力を有している。当時は、民間の石油業界を含めても、世界で5隻程度しかない最新鋭の掘削プラットフォーム (フローティング・リグ) であった。その後「ちきゅう」は、下北八戸沖での慣熟訓練航海を経て、2007年より IODP における主要掘削プラットフォームとしての国際運用が開始された。

「ちきゅう」の建造目的は、CDEX の前身である OD21 により、以下の5項目が掲げられていた (田中, 2000)。

-
1. 地球変動研究 : 急激な地球環境変動の復元と変動メカニズムの解明
 2. 地震発生メカニズム研究 : 地震発生帯への直接掘削と掘削孔内観測システムの構築
 3. 地球深部ダイナミクス研究 : 海洋地殻下部への掘削とそれに続くマントルへの挑戦
 4. 新しい資源の探究 : メタンハイドレートや地殻内微生物、生命の起源の解明
 5. 人類の活動領域の拡大 : 大型施設の機能を活かした深海域活動の拡大
-

上記の建造目的は、CONCORD 会議で国際的に合意されたライザー掘削船の科学目標や科学技術庁等との協議を踏まえ、OD21 として独自に設定されたものである。今からおよそ20年以上も前の議論ではあるが、IODP とそれ以外のプロジェクトを含め、現在までの「ちきゅう」の運航がこれらの建造目的の達成に向かって着実に行われてきたことに、色褪せることのない科学の本質や、先人たちの卓越した先見の明を窺うことができる。とりわけ、「2. 地震発生メカニズム研究」と「3. 地球深部ダイナミクス研究 (海洋地殻・マントル掘削)」については、「ちきゅう」に搭載されたライザー掘削システムを用いて、誰も掘削したことのない未知の地質学的セッティングを開拓していかなければ、その達成が困難な挑戦的な目標である。前者については、2007年以降に実施された南海トラフ地震発生帯掘削計画 (NanTroSEIZE) や東北地方太平洋沖地震調査掘削 (JFAST) 等の IODP プロジェクトにより、スロースリップ現象の発見や、東日本大震災の断層滑り面の検出、巨大津波発生メカニズムの解明など、世界トップクラスの科学成果が得られた。また、「4. 新しい資源の探究」においては、3 2012年に、「ちきゅう」のライザー掘削システムを用いて下北八戸沖石炭層生命圏掘削が実施され、海底下2キロメートルを超える世界最深部の海底下微生物生態系の存在や、地質学的な時間スケールで生物地球化学的な炭素循環とそれに付随する資源形成が起きている

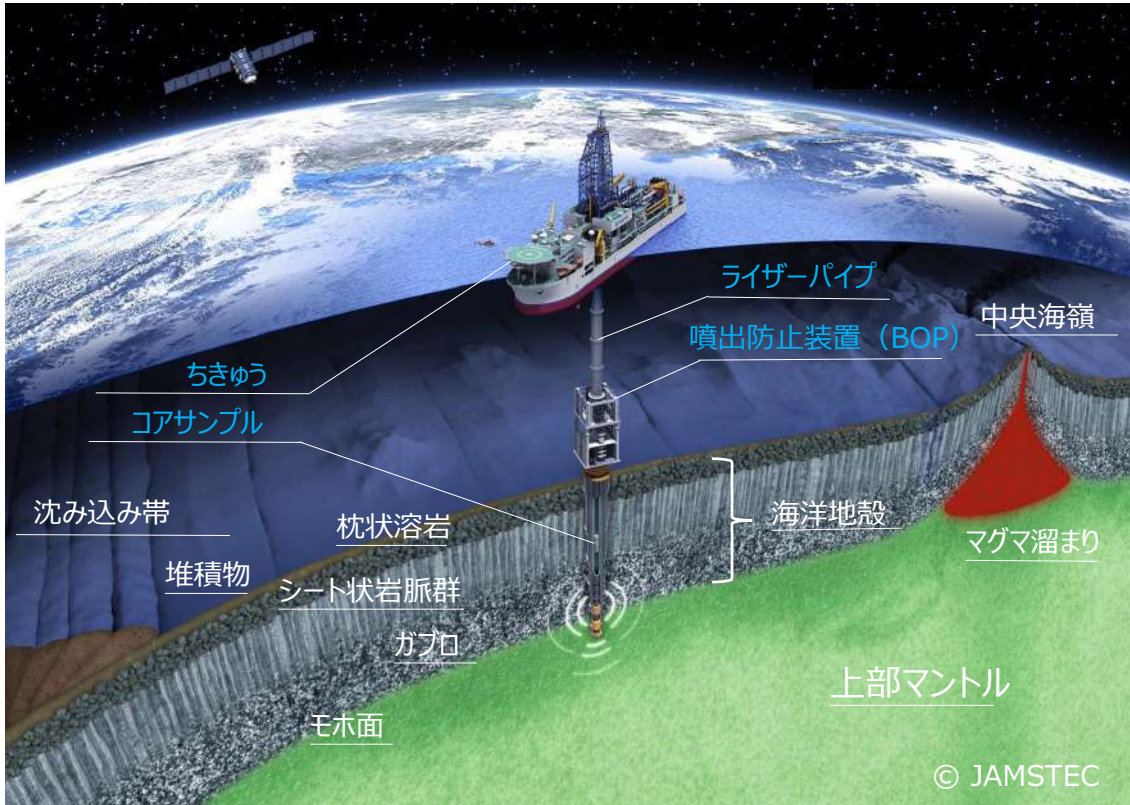


図4 「ちきゅう」によるマントル掘削の概念図。惑星地球を代表する太平洋プレート上の掘削候補地点において、人類史上初となる海洋地殻の完全貫通と上部マントルへの到達を目指す。

ことが示された(稲垣ら, 2018)。また、「1. 地球環境研究」については、「ちきゅう」のライザーレス掘削により採取された浅部堆積物コアサンプルの分析や、海洋研究開発機構と J-DESC による海底下 100 メートルまでの表層科学掘削プログラム (SCORE) の枠組みにより、精力的な研究が進められている。

これらの建造目的の中でも、とりわけ大水深・大深度フロンティアに係る挑戦は、世界中で「ちきゅう」でしか成し得ることができない独自性の高い課題である。そのプロジェクトの実施は、世界各地の著名な科学者や優秀な若手研究者を一同にプラットフォームに糾合することが重要である。それは、国際的な頭脳循環と分野融合を推進し、次世代の科学者・技術者やリーダーを育成す

る絶好の機会となる。同時に、それらのプロジェクトの実現に係る技術開発は、我が国における「5. 人類の活動領域(深海域活動)の拡大」といったフロンティア科学技術の真髄である国家基幹技術となる。これらの「ちきゅう」の挑戦は、現在もなお、国際コミュニティから大きな期待が寄せられている。2024 年以降のポスト IODP においても、海洋科学掘削による海洋地殻の完全貫通とモホ面より下のマントルへの到達は重要視されている。実際に、2050 年までに海洋科学掘削が達成すべき主要な科学目標を定めた 2050 Science Framework には、国際的に合意されたフラッグシップ・イニシアティブの項目「Probing the Deep Earth」に、海洋地殻の完全貫通とマントルへの到達が明記されている (Koppers and Coggon, 2020; 図 4)。「ち

きゅう」とそれを有する我が国のリーダーシップへの期待は、以前にも増して高まっているのである。

4. マントル掘削が目指す新しい科学と Earth Society 3.0

海洋科学掘削は、海洋底の堆積物や岩石に刻まれた過去1億数千万年間に起こったさまざまな歴史・事象を掘り起こして研究することで、古海洋・古気候変動と古生物進化、生物の大量絶滅をもたらした劇的な環境事変の解明、海洋底拡大説の証明、プレートの沈み込み帯や付加体の形成などを含むプレートテクトニクスの実証、スロースリップを含む巨大地震発生メカニズムの解明、そして膨大な数の微生物細胞からなる海底下生命圏の発見など、教科書を書き換える多くの発見や学術的成果を創出してきた。これらの輝かしい海洋科学掘削の歴史や詳細については各論や別の論文・解説に委ねるが、全体を俯瞰して、「いったい、私たちの暮らす地球とは、どのような星なのだろうか?」といった、科学者の純粋かつ本質的な知的好奇心がプログラムのドライビング・フォース(駆動力)として機能してきたことは明白である。半世紀以上におよぶ海洋科学掘削プログラムでは、基本的に海洋底を掘削船により掘削し、堆積物や岩石のコアサンプルを採取・分析し、さらに孔内検層や長期孔内観測(モニタリング)を実施してきた。一つ一つの課題(疑問)に対する仮説を構築し、それらを掘削や観測という直接的なアプローチにより検証し、その結果を速やかに質の高い学術論文として公開することが、長年の経験により積み重ねてきた海洋科学掘削のミッション・プロファイルである。そして、それらの知と技術の集積により、海洋科学掘削は地球惑星科学という学問体系の中で極めて重要な役割を果たしてきた。また、近年の国際プログラムでは、従来米国内主導で行われてきた海洋科学掘削プログラムが日米欧を主体とするグローバル体制で運用され、我が国の学生・若手研究者を含む多くの科学者・技術者が、国際プロジェクトの計画立案や評価に参加した。約2ヶ月間の船上での共同生活を通じて、

国際感覚と友情を育み、世界トップレベルの科学者と協働してきた。つまり、海洋科学掘削プログラムは、我が国の分野融合的な共同研究や国際的な頭脳循環の推進に大きく寄与してきたのである。

2010年以降、IoT(Internet of Things)やAI(Artificial Intelligence)といったビッグデータ情報システムや革新的なロボット技術が社会経済に導入され、時代は第四次産業革命に突入した。2016年に内閣府の政策として策定された第5期科学技術基本計画では、ICT(情報通信技術)を強化した経済成長戦略や健康長寿社会の形成など、人々に豊かさをもたらす新たな社会を生み出すためのビジョンとして、「超スマート社会」や「Society 5.0」が提案された。現在、その実現に向けた科学技術イノベーションの創出が推進・期待されている。他方、過去の間人社会の所業である産業革命は、惑星地球のサブシステムの変動と人間活動とを結びつける科学的知見や根拠が乏しく、半ば無意識のうちに、海洋・地球環境に大きな負荷をかけていた。著者らは、人々に豊かさをもたらす将来の間人社会は、その居住可能性(ハビタビリティ)・持続可能性(サステナビリティ)を支配する地球環境変動の本質を理解し、それと向き合いながら地球システムの一部として発展していくべきであるとの認識のもと、「Earth Society 3.0」と呼ぶ人間圏の未来を提唱している。すなわち、人新世の始まりまでの地球と人間社会の関係は、地球資源(水、土壌、生物、化石燃料、鉱物など)に一方的に依存したEarth Society 1.0の時代、人新世は地球資源を大規模に利用し地球を改変したEarth Society 2.0の時代、そして今後目指すべきは、地球・人間・機械(コンピュータ、インターネット、AI、VRなどのデジタル技術も含む)の共生と持続性そして地球の維持管理を包含したEarth Society 3.0の時代を意味している。詳しくは、平による「人新世—科学技術史で読み解く人間の地質時代—(東海大学出版部)」に書かれているので、参照してほしい。

今後、私たちは、海洋科学掘削を通じて、人新世の未来に直結する地球システム変動の理解に関

わる根源的な科学的命題を解き明かし、人間社会を持続可能に導く地球規模課題の解決法を創出していく必要がある。ここで、OD21で議論された「ちきゅう」の5つの建造目的は、大局的に変化することのない骨太の運用指針であることが再確認される。それらの多くは過去16年の「ちきゅう」の運用により着実に進められてきたが、最も挑戦的で深淵な課題である「3.0地球深部ダイナミクス研究（マントル掘削）」については、2020年10月にハワイ沖での事前調査に係る掘削計画の提案がIODPに提出され（951-Fullプロポーザル）、まさに端緒に付いたばかりである（本特集号の海野らを参照）。モホール計画から半世紀以上もたった現在においても、私たちは地球の大部分を占める海洋地殻の下のマントルに未だ一度も到達したことがない事実を重く受け止めなくてはならない。

人類初のマントル到達の実現の先に何があるのかを考える上で、そのインパクトに匹敵する一つのエピソードを紹介したい。1950年代、生命の形質が遺伝する伝達物質とその世代継承メカニズム（メンデルの法則）については、その多くが謎に包まれていた。1952年、アフルレッド・ハーシーとマーサ・チェイスは、デオキシリボ核酸（DNA）に含まれるリン酸基を放射性元素³²Pで、タンパク質に含まれる硫黄を放射性元素³⁵Sでそれぞれ標識し、大腸菌へのT2ファージウィルスによる感染実験を実施した。それにより、大腸菌に感染する遺伝物質はタンパク質ではなくDNAであるということが実証された。翌年の1953年、ジェームス・ワトソンとフランシス・クリックは、おそらく未来永劫、科学史に語り継がれる20世紀最大の発見を発表した。その世代継承を担う「遺伝物質」とは、細胞内に含まれるデオキシリボ核酸が4つの相補的な塩基（A: アデニン、G: グアニン、C: シトシン、T: チミン）の水素結合からなる「二重らせん構造」であることを示したのである（Watson and Crick, 1953）。その後、クリックにより生命現象の基本原則である「セントラルドグマ」の概念が提唱され、半保存的複製のメカニズム、3つの塩基配列からなる遺伝暗号（コドン）の発見、

mRNA や tRNA の発見、そして遺伝子発現とタンパク質合成の基本メカニズムの解明へとつながっていった。これら一連の発見は、その後の分子生物学や医学の発展にとって、どれだけの寄与をしたについては論を俟たない。例えば、近年のコロナウィルスによるパンデミックへの対応も、ある特定の遺伝子断片を増幅させるPCR（Polymerase Chain Reaction）法の確立や、本発見に端を持つmRNA ワクチンの技術開発がなければ不可能であったろう。この二重らせん構造の発見は、当時米国の若き生物学者であったワトソンと英国の物理学者であったクリックとの国際的な分野融合研究、そしてX線によるDNA結晶構造解析を進めていた英国の物理化学者ロザリンド・フランクリンの分析技術とその研究環境があってこそ生まれたものであった。

これらの生命科学分野における歴史的な発見は、その分野融合のプロセスや卓越した科学技術行使できる国際的な研究環境の整備など、マントル掘削をはじめとする海洋科学掘削のプロジェクト研究に共通する部分もあり、現在の科学技術に求められる破壊的なイノベーションの創出を促す科学政策の観点からも興味深い。さらに、「遺伝物質がDNAであり、それが半保存的複製機能を持つ二重らせん構造である」ことを示す一連の発見が、ポーア、ハイゼンベルグ、シュレディンガーといった物理学者による、「生命とは何か」といった先駆的かつ本質的な議論とリンクしていたことも追記しておきたい。後に、クリックは「すばらしいのは分子であって、科学者ではなかったのだ」と述べている（クリック, 1989）。

ワトソンとクリックによるDNA二重らせん構造の発見は、人間自らを含むあらゆる地球上の生物が、自然界における生態系の一員（構成種）から、第三次産業革命における科学技術の対象物となったある種の特異点（シンギュラリティ）であったと捉えることができる。つまり、「遺伝物質の構造」がはじめて明らかにされたことで、人間が自らの遺伝的設計図を含めた地球システムの構成要素に大きな影響力を持つようになったのである。

奇しくも生命科学と地球科学はほぼ同時期に革新的な技術開発と社会的背景により躍進し、現在に至っている。1950年代の地質学者のインスピレーションにより立案された「モホール計画」は、地球システムの構造や変動を理解し、かつその変動と人間社会との相互作用を明らかにする上で不可欠な事業として、科学的重要性や実現性が高まっている。

人類が地球の大部分の固体表層を形成する海洋地殻の構造を明らかにし、モホを貫いてその下のマントルに到達することは、地球惑星科学におけるシンギュラリティを彷彿させる。すなわち、DNAが生命の情報伝達を司る物質として動的な構造特性と機能を担っているように、海洋地殻とマントルは地球システムを維持・駆動する物質として動的な構造特性と機能を担っているはずである。そして、これまでの地球惑星科学の研究成果は、地球と生命は約40億年以上もの時間軸の中で共に互いに影響を与えながら適応・進化してきた証拠が示されている。従って、マントル掘削を通じて地球システム変動の本質に迫ることは、今後、人類が地球システムと向き合いながら持続的に発展を続けていくために必要なマイルストーン・イベントであると考えられる。その科学的・社会的・地球的なインパクトは、ハーシーとチェイスの遺伝物質を特定する試みや、ワトソンとクリックによるDNAの二重らせん構造の発見に匹敵すると言っても過言ではない。おそらく、向こう100年の時間スケールにおいて、この宇宙における地球と人類の存続に関わる極めて重大なものになるだろう。

5. 「ちきゅう」による海洋地殻貫通とマントル到達へのシナリオ

海洋科学掘削のようなフロンティアの探究は、人類にとって何らかの知的好奇心や幸福をもたらすロジックとドライビング・フォースが不可欠である。同時に、誰も足を踏み入れたことがない未知の空間を、挑戦を恐れず、そしていかに安全かつ高い確度で突き進めるかといった、先進的な要

素技術開発と運用マネジメントが両輪で駆動しなければならない。本稿では、サイエンス（科学）とテクノロジー・マネジメント（技術と運用）におけるロジックモデルの一例を紹介したい。以下に述べる内容は、2019年4月に海洋研究開発機構研究プラットフォーム運用開発部門の中に組織されたマントル掘削プロモーション室を中心に、同機構の理事長達によるマントル掘削検討タスクフォース、そして2020年にJ-DESCのIODP部会の下に設けられたマントル掘削ワーキンググループでの議論等を経てまとめた素案であり、今後、これらをたたき台として、国際コミュニティにより修正や合意形成がなされていくことに留意して頂きたい。

5-1 マントル掘削におけるサイエンス（科学）のロジックモデル

マントル掘削におけるサイエンスのロジックモデル（図5）では、最終アウトカムを「地球内部—表層システムの統合的理解と惑星持続可能性に係るブレークスルー」により、「地球惑星環境と人間社会のサステナビリティに貢献」と設定した。また、その実現に必要な二つの科学的命題「海洋地殻・マントルのダイナミクスとプレートテクトニクスの新しい描像」と「地球惑星システムの成り立ちと生命を育む惑星要因としてのマントルの役割」を、サイエンスに求められるアウトカムとした。次に、それら二つのアウトカムの達成に必要な課題目標を6つに大別して抽出し、各課題目標に対する仮説と、仮説を立証・検証するために必要な代表的な研究アプローチ（手法）を明記した。そして、それらの研究アプローチを用いることによって、どのような内容・エッセンスのアウトプット（研究成果）を提示するのかについて、各項目が目指すべき到達点を明示した。本ロジックモデルにおける科学的な課題目標は、例えば弾性波探査や地表に隆起した物質などから得た知見に基づくものであり、実際に海洋科学掘削による岩石コア採取や観測が実施されることにより、はじめて科学的に実証・検証されるものとなっている。また、それらの実測・実験データを

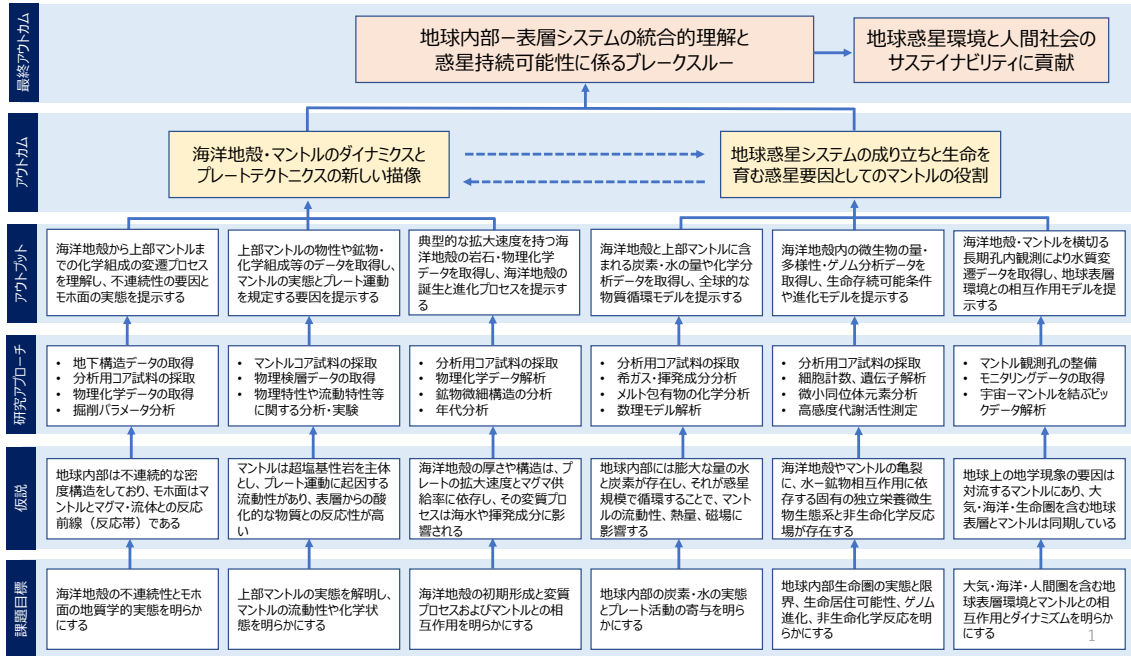


図5 マントル掘削におけるサイエンス(科学),のロジックモデル案。

用いた複数の数値シミュレーション・モデル試験を行うことで、動的な地球システムの全体像を正確に捉え、将来予測の確度を高めることができる。

本ロジックモデルでは、「モホール計画」から受け継がれる主題として、海洋地殻の構造と進化や、モホとは何か、マンツルの岩石・鉱物学的特性や化学状態とは何か、などの疑問を列挙した(本特集号の海野ら, 針金・森下, 森下・西尾, 阿部, 秋澤, 高澤・谷, 羽生による寄稿を参照)。それ以外にも、人間圏を含む大気・水圏と地下圏との物質の移動や循環が、海洋地殻の変質や非生物学的な化学進化、マンツルの流動性や磁場とどのように関わっているのかについて、生命の存続・居住性や生命に必須の要素である水(H₂O)や揮発性分のマクロな動態と、それに付随する生命圏や岩石変質プロセスの理解も重要な課題目標となっている(本特集号の鈴木, 羽生の寄稿を参照)。それらは、宇宙からのリモートセンシングや超高精度微小領域分析などにより解明しようと

する宇宙—地球生物学的な科学的課題であることも述べておきたい(本特集号の寄稿を参照)。

一方、現在のロジックモデルには、海洋地殻における生命の限界や非生物学的反応についての新しい視点が導入されているものの、「地球はいつまでハビタブルな惑星でいれるのか?」といった、長期的な視点での課題目標が設定されていない。主に、ウラン・トリウム・カリウムの放射性元素によって規定される地球内部の熱量・フラックスとその消長は、プレートテクトニクスの推移や磁気圏の消長といった「地球の健康寿命」に直接的な関わりがある。マンツル掘削や孔内観測によって、それらの関連性を解き明かすことは、地球惑星における生命居住性(ハビタビリティ)の限界や地球外生命の存在可能性とその限界を明らかにすることにもつながる。本課題については、地球ニュートリノやミュオグラフィなど、我が国が世界トップレベルの実力を持つ素粒子物理学のコミュニティからの新たな視点・研究アプローチの

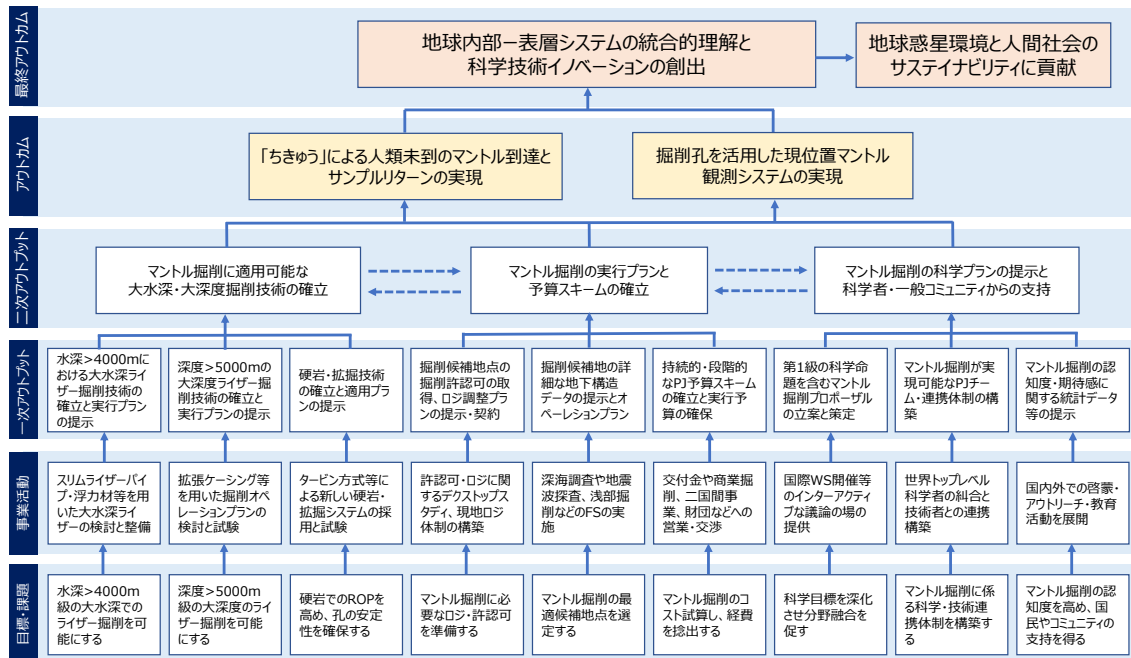


図6 マンテル掘削におけるテクノロジー・マネジメントのロジックモデル案。

導入・適用が期待される（本特集号の渡辺・McDonough, 田中の寄稿を参照）。

5-2 マンテル掘削におけるテクノロジー・マネジメントのロジックモデル

マンテル掘削におけるテクノロジー・マネジメントのロジックモデル（図6）では、最終アウトカムを「地球内部一表層システムの統合的理解と科学技術イノベーションの創出」により「地球惑星環境と人間社会のサステナビリティに貢献」と設定し、「「ちきゅう」による人類未到のマンテル到達とサンプルリターンの実現」および「掘削孔を活用した現位置マンテル観測システムの実現」により、科学技術に革新的な成果・イノベーションをもたらすことを一次アウトカムとした。それらのアウトカムを実現するためには、「マンテル掘削に適用可能な大水深・大深度掘削技術の確立」と「マンテル掘削の実行プランと予算スキームの確立」、さらに「マンテル掘削の科学プランの提示と科学者・一般コミュニティからの支持」と

いった技術開発課題とプログラム・マネジメントの双方への対応が必要である。換言すれば、それらはパッケージとして相互にリンクしないかぎり、アウトカムの達成には至らない（本特集号の肖・末廣の寄稿を参照）。本ロジックモデルでは、それら3つを二次アウトプットに設定し、バックキャストでそれらを達成するために必要な要素課題と事業活動（アクション・アイテム）および一次アウトプットを抽出した。

海洋科学掘削によるマンテルへの到達を実現することは、革新的な大水深・大深度掘削技術を実現することに他ならない。「ちきゅう」建造から16年が経過し、産業界におけるライザー掘削システムを搭載したフローティング・リグも数世代のグレードアップがなされた。産業界では、経済性を持つ探鉱の対象となる石油やガス田のリザーバーが比較的浅い水深に限られていることもあり、今もなお水深約3,000～3,500メートルまでのライザー掘削が実績としてあるのみである。一方、現

在のマントル掘削の候補地は水深 3,500-4,300 メートルの深海底であるため、商業掘削の世界記録を更新する挑戦的なオペレーションとなる。この課題目標を克服するためには、船体から吊り下げる BOP を可能な限り軽減化（簡素化）すると共に、ライザー管の総重量を軽減する必要がある。詳細なスタディが必要であるが、一つの案として、現在の 21 インチ径のライザー管を 14 インチ径にまで縮小したスリムライザー管を適用し、その組み合わせに浮力材をつけることで、船体への重量負荷を軽減できる可能性がある。さらに、BOP を設置した海底からマントルまで、約 6,000 メートル級の掘削を行うには、複数サイズのケーシングを設置し、掘進率(ROP: Rate of Penetration)を向上させる必要がある。それには、アンダーリーマーと呼ばれる拡張掘削の掘削編成とエキスパンドブル（拡張）・ケーシングとの組み合わせや、タービンドライブを搭載した硬岩用ドリルビットの適用等が想定される。すなわち、さまざまな改良や試験は必要であるものの、「ちきゅう」に既存の要素技術を導入することで、マントル掘削に挑戦できる技術パッケージを確立しうる状況にある（詳しくは、本特集号の江口・澤田の寄稿を参照）。

次期海洋科学掘削の枠組みにおいて、マントル掘削を「科学」と「技術」の両面において成功に導くには、上記に関連する要素技術のデスク・スタディや海域における試験・経験が欠かせない。つまり、準備・検討もなしに、いきなり大掛かりな本坑掘削が開始できるわけではない。予算獲得やロジスティクス、国際コミュニティの合意形成、世界トップレベルの科学者チームの構築も、プロジェクトを実現に導くための重要なプロセス要素となる。これも、一足飛びに準備できるものではなく、いくつかの段階的なステージゲートをクリアしながら全体をマネジメントしていく必要がある。例えば、掘削候補地点における物資輸送や掘削許認可などのロジスティクスは、それに関係する国際的な法律や手続きに準拠したものでなければならず、その準備やプロセスには時間とエフォートが必要である。また、予算について

は、本坑掘削の前に行うパイロット孔や浅部掘削孔の試験掘削が極めて重要である（後述のステージ 1）。BOP 設置のための海底堆積物の力学強度の情報や、硬岩掘削システムを用いた際の掘進率やビットの摩耗率などの掘削パフォーマンスの経験値がなければ、各オペレーションに係るコストや時間を正確に見積もることが難しい。これは、トラブルが起きた際の対応策など、リスクマネジメントを含む経済性や安全性にも関わってくる問題でもある。

また、本ロジックモデルに記載のない事項として、掘削孔を活用した孔内検層（ロギング）技術の検討や、深海対応のミュオグラフィセンサー等の最新の観測機器を含む長期孔内観測システムのデザイン・開発など、海洋地殻を上部マントルまで完全貫通した世界で唯一の掘削孔井をどのように観測孔として活用するかについて、それらの技術開発とビックデータの運用プランを検討していく必要がある（孔内検層については本特集号の山田ら、深海ミュオグラフィについては田中の寄稿を参照）。

5-3 マントル到達までの段階的なアプローチ

前述のとおり、マントル到達までの道筋は、事前調査や開発機器の海域試験を実施した後で、いくつかの段階的なステップを踏んだアプローチをとるべきである。「ちきゅう」による科学掘削以外のプロジェクトにおいても、最終的に「ちきゅう」の建造目的の一つであるマントル掘削に有用な要素技術の適用・改良の機会と意識していくことも肝要である。本稿では、暫定的にマントル掘削の長期的なオペレーションを大きく 4 つのステージに区分し検討した（図 7）。それぞれのステージにおけるプロジェクトが、掘削オペレーションの不確定要素を補完し、適用可能な改良策やリスク対応策を講じることで、次のステージのプロジェクト・デザインの完成度と成功確度を高めていく。これは、PDCA（Plan → Do → Check → Action）サイクルを回していく大型研究プロジェクトの基本的なマネジメント・プロセスである。

まずステージ 1 では、海底堆積物とその下の

部玄武岩の特性について、ライザーレス掘削による基礎調査を行う。海野らにより提案されているハワイ沖マントル掘削パイロット孔の掘削候補地点においては、海底地滑りや火山活動の記録を含む約 160 メートルの遠洋性堆積物を水圧式ピストンコアリングシステム (HPCS) により基盤岩境界までコアリングし、その後、ロータリー・コアバレル (RCB) を用いて約 8000 万年前に形成された上部玄武岩を数百メートル掘削するオペレーションが想定される。このステージ 1 における比較的短期間・低コストの掘削調査を行うことにより、BOP ライザーや大口径ケーシングパイプ (36 インチ径と 20 インチ径) の設置に必要な力学強度などの技術的な情報を獲得することができる。また、HPCS のコアリング・シューに搭載した温度センサー (APCT-3) を用いて、その後のマントル掘削の科学技術オペレーションプランにとって重要な要素である地温勾配の推定値を得ることも可能である。

ステージ 2 では、ステージ 1 の掘削区間を延長し、RCB を用いたライザーレス掘削により海洋地殻内の第 2 層 (枕状溶岩~シート状ダイク) を海底下約 2,500 メートルまで掘り進め、第 3 層の下の上部ガブロ (斑れい岩) 層まで到達することを目指す。本孔の掘削調査計画は、2020 年 7 月に行われた国際オンラインワークショップにより「マントル掘削のパイロット孔」と位置付けることが国際合意されており、同年 10 月には、IODP に対して 951-Full プロポーザルが提出されている。その科学的な目標等については、本特集号の海野らによる解説や *Scientific Drilling* 誌に掲載されたワークショップレポートを参照して頂きたい (Umino *et al.*, 2021)。技術的には、本パイロット孔のライザーレス掘削におけるオペレーション上の大きな障壁は存在しない。むしろ、異なる岩層での掘進率や掘削ツールのパフォーマンスの経験が、次のステージのライザー掘削システムを用いた大深度マントル本孔に係るオペレーション・デザインやロジスティクス・経費のプランニングに対して、極めて重要な数値目標を与えることになる。また、

本パイロット孔は、ジョイデス・レゾリューション号による岩石圏 (海洋地殻) の世界最高深度記録である 2,111 メートル (コスタリカ沖, サイト 504B) を更新することになるだろう。さらに、その後のマントル掘削本孔とパイロット孔とをつなぐ革新的な観測設備や実験オペレーションへの展開も想定されるため、後に長期孔内観測設備等を設置できるデザインとしておくことが望まれる。

ステージ 3 は、いよいよ満を辞して、スリムライザー管と BOB を海底に設置し、海底下約 6,000 メートルのマントル掘削に挑む。それまでのステージ 1・2 の掘削パフォーマンスを十分に考慮し、最適の掘削ツールとケーシングオプションを準備して臨む。既に掘削調査が終了しているガブロ層までの深度区間をコアリングせずに掘進し、速やかにケーシングを施すことで、オペレーションのスピードと確実性・安全性を高めることができる。その後、海洋地殻第 3 層のみをモホ面に向けてスポットコアリングをしながら硬岩用ドリルビットで掘り進む。モホ面付近における地殻-マントル境界 (遷移帯) は、本当に境界を抜けたのかをカッティングスやコアリング、ロギングツールなどを用いて確認しつつ、上部マントル層を少なくとも 100 メートル以上は掘り進めたいところである。現在の海洋科学掘削の世界最高到達深度は、2014 年 1 月に「ちきゅう」のライザー掘削による南海トラフの掘削サイト C0002 で樹立した 3,262.5 メートルであり、本マントル孔井はその 2 倍近くの掘削深度に相当する。沈み込み帯の複雑な応力変形がかかる南海トラフ付加体の堆積物層と、成層する太平洋プレート上の代表的な海洋地殻の岩石層を単純に比較することはできないが、約半世紀以上の過去の経験を活かしたりリスク管理や対策など最善を尽くし、掘削オペレーションの最適化と安全性を担保することで、人類史上初そして 21 世紀の科学技術において最大級の金字塔を残すことができるだろう。それが、地球システムにおける非連続的な科学技術イノベーションの創出につながることは疑う余地がない (Inagaki and Taira, 2019)。

マントル掘削プロジェクトは、モホ面を貫通して上部マントルに到達することで最大のミッションを達成することになるが、それで終了というわけではない。ステージ2のパイロット孔でも述べたように、惑星地球においてはじめてとなるマントル孔井は、「宇宙—大気—海洋（深海）—地殻—マントル」を結ぶ観測・実験プラットフォームとしての利活用が可能であり、本稿ではそれをステージ4と位置付けた（図7）。マントル掘削と観測を結びつけるには、マントル掘削の当初段階から、孔井に各種観測センサーを入れる前提でプロジェクト全体をデザインしていく必要がある。掘削後には完全廃孔とせず、少なくとも後のオペレーションでセンサー類を設置できるよう、孔井を保存しておく必要がある。また、それらの孔井デザインを考慮したセンサー機器や情報伝達ツールの技術開発が必要となるだろう。特に、地球の熱量の変動に関する地球ニュートリノや、地殻の密度構造を可視化するミュオンなどの素粒子観測との組み合わせには、センサーの耐圧化や小型化等を含め、新しい科学技術を海洋科学掘削にもたらす可能性がある（本特集号の渡辺・McDonough、田中の寄稿を参照）。

5-3 マントル掘削技術の醸成と展開

海洋底あるいは海洋島における玄武岩岩体やカンラン岩層の大深度掘削技術・観測技術ノウハウの蓄積により、未踏の地下領域を新たな人類活動域として広げることが可能となるだろう。また、4,000メートル以上の深海への物質の揚降技術もまた、フロンティアを拡大する。その活動には、海底資源開発、二酸化炭素地層貯留・固定化技術、廃棄物地層処分技術など、国益の増進と人類的課題の解決策も含まれるだろう。

6. 地球システム変動の統合理解と人類の選択

6-1 新しい知の体系の創成

現在、大気中の温室効果ガスの濃度上昇に伴う地球温暖化や海洋酸性化、高緯度域における氷床の融解、極渦の不安定化、それらに伴う生物多様

性の損失や生態系バランスの崩壊などが現在顕在化している。地球システムを構成する多くの要素・サブシステムの変動は、人間社会における経済社会学的な成長要素と連動しながら、一体的かつ加速度的に増加しつづけている。このカスケード反応は、人新世における大変動（Great Acceleration）と呼ばれ、現在進行形の人間社会の活動が、地球システム変動の自律的な制御機構に直接的な影響を及ぼしはじめたことを示唆している。それらの一体的なサブシステムの変動は、ある閾値を超えて制御・回復不能な状態になると、将来における地球環境の維持はもとより、遠くない未来における人間社会の持続可能性をも左右する脅威となる。

今後、我々人類は、加速度的に進む地球システムの大変動や、それに付随して起こりうる大規模自然災害等の危機イベントに対して、どのように備え、適応していけば良いのだろうか？仮に、人間社会の持続可能性にとって、人間自身が超複雑系の地球システム変動を中・長期的にガバナンス・制御していく必要があるとすれば、私たちはこれまでの地球システムと人間社会との関わりを根本から見直す必要があるだろう。さらに、体系化された科学的データや知識を効果的に一般社会に伝え、科学と社会経済が連動するネットワーク体制を拡大・強化していく必要がある。すなわち、地球システムに係る総合的な知的体系からもたらされる情報や指針は、政策や民間企業における選択とアクションにその根拠を示唆を与える上で、重大な役割を担うことになる。

そもそも、なぜこの惑星の表層に大気・海洋や生命が維持され、プレートテクトニクスが存在しているのだろうか？なぜこの惑星に生命が誕生し、幾多の絶滅の危機を乗り越え、ホモサピエンス（ヒト）の誕生に至る脈絡とした生命進化が続いてきたのか？そして、近代化された人間活動が半ば無意識の内に負荷を与えてきた地球環境への影響はどれほどで、他の要素因子との連動性やフィードバック効果はどうなっているのか？このような第一義的な疑問を紐解く上で重要なこと

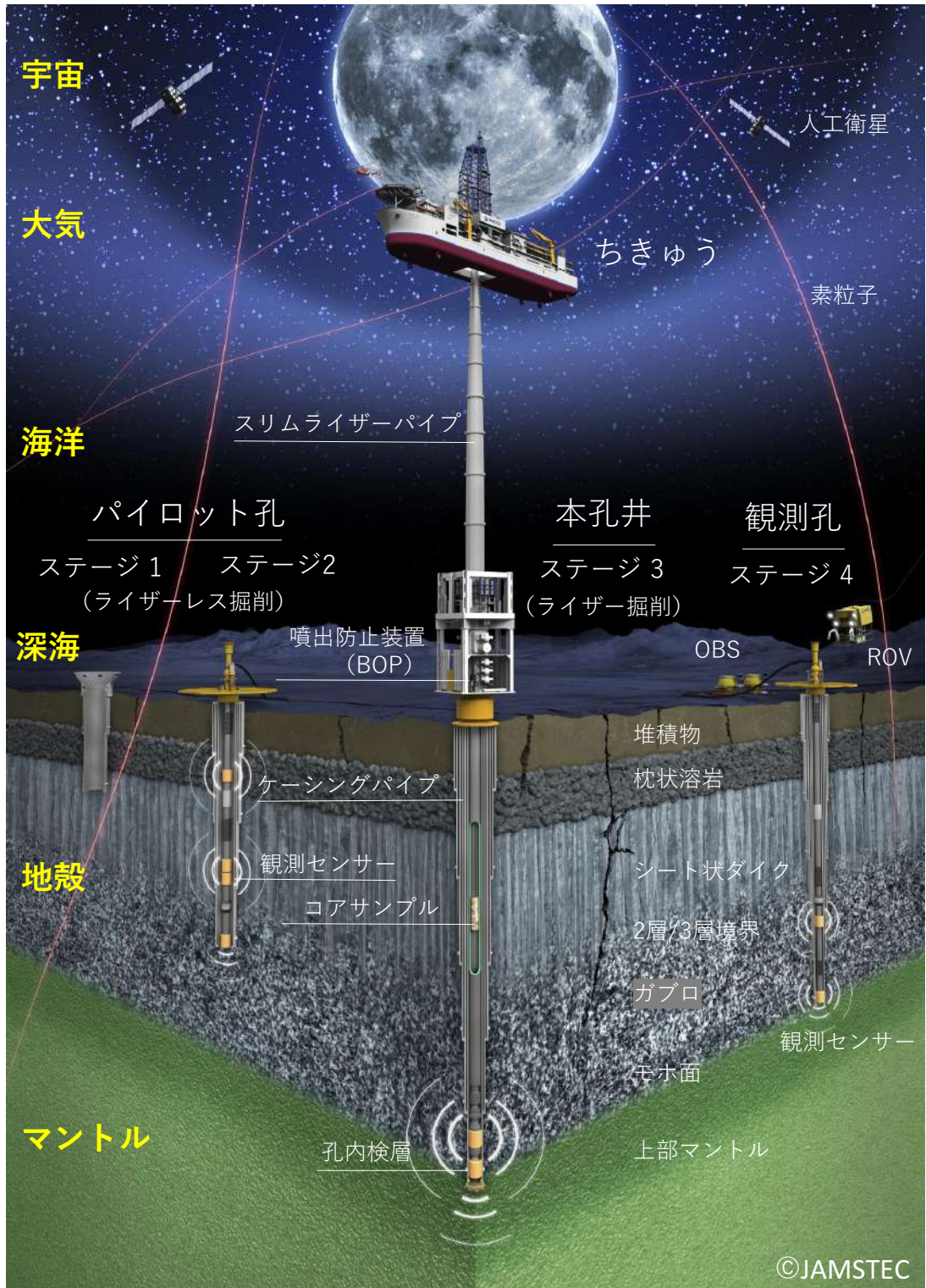


図7 段階的なアプローチによる海洋地殻の完全貫通とマントル到達のシナリオを示す概念図。

は、それらの現象が人間を主体とする一つの地球システムの中で完結している点にあり、火星など地球外に居住地を求める議論を除けば、そこに存在し発展し続けようとする人間自身の身体的・精神的な幸福度（ギリシャの哲学者アリストテレスは、これをユーダイモニアと呼んだ）に直結しているということである。すなわち、人間の心身の健全性を生み出すのは、地球と人間に関しての新たな知的体系そのものであり、それは、地球のサブシステムの変化に対する人間社会の適応性や順応性は、常に流動的かつ自己組織的に調節されていくものであるという理解に基礎を置くと予想される。私たちは、宇宙で自らが生息する唯一の惑星である地球のシステムについて、平衡と非平衡の摂動や、秩序と無秩序との境界を、海洋科学掘削に ICT や AI を導入しつつ、四次元的に理解していく必要がある。地球は、私たちにとって唯一無二の故郷の星なのである。

6-2 次代を持続可能に導く海洋科学掘削の役割

私たちは、この惑星に人間が存在している理由と役割について自ら問いを投げ、過去から現在、そして未来へと続く地球システムの変動をより深く理解していく必要がある。同時に、自らの幸福と存続を基軸とした地球システムのあり方と科学の役割に対して、「Earth Society 3.0」といった新しい価値を創造していく必要がある。その人間主体のガバナンスに係る方向性は、これまでのフォアキャスト型の科学アプローチだけでなく、科学的ゴールと社会的価値の双方のビジョン達成を定めたバックキャスト型（課題解決型）の科学アプローチが重要になってくるだろう。

科学者が未来を語ると、「それは、サイエンスフィクション（SF）であって科学ではない」と厳しい指摘を受けることがある。しかし、いずれ将来、地球システムの大変動は収縮し、新しいベクトルの摂動へと移行しはじめると仮定して、未来を想像することは、全人類や惑星規模の中長期的なリスクマネジメントの観点から新しい価値創造につながる。おそらく、その転換点（Tipping point）は、現在から次代を含めた数十年～百年程

度の近未来である。そのタイミングが人間社会の稼働可能範囲内にあり、私たちの科学技術がその実装に「間に合う」のであれば、人間はこの惑星で持続可能な未来を構築できることになる。それは、これまでの化石燃料エネルギーに依存した高度成長社会とは大きく異なり、地球システム変動に順応した新しい地球共生型社会（= Earth Society 3.0）であるかもしれない。他方、地球システムの大変動が制御・回復不能な状態に至り、あらゆる人間の科学技術やアクションが「間に合わない」場合、転換点より先の世界（人新世の未来）は、地球システム変動の摂理の中で人間社会の不安定化や多様性の損失といった痛みを伴うことになろう。さらに、最悪のケースでは、さまざまな自然災害や環境ストレスにより人間の心身の幸福度や社会レジリエンスが徐々に損なわれ、不可避的な人新世の終焉（人類滅亡）が訪れる可能性も否めない。地球システムの変動を理解しない状況の中で指数関数的な技術革新と未来社会の構築は、惑星限界（プラネタリーバウンダリー）を超えて連鎖的な種の淘汰を誘引し、最終的には、神性的な人工知能と技術を持つポスト・ヒューマンが支配する壮絶な格差社会「ホモ・デウスの時代」に至るという考えもある（ハラリ、2018）。

6-3 惑星スチュワードシップに向けた知の流動化

現在、人類が直面する地球システムの大変動の中で、人間社会を持続可能に導くためには、科学的データ・根拠に立脚した「惑星スチュワードシップ」の創発が何より重要である。これは、地球惑星科学における知の体系化だけでなく、いわゆる「知の流動化（Knowledge Sharing & Mobilization）」と呼ばれる、企業や政策決定者を含めた人間社会全般と科学・アカデミアを相互につなぐフィードバック・ループ、そしてユーダイモニアを基礎とする人間本来の力を介してはじめて機能するものである。人間社会が自らの存続のためにどのように地球システムの大変動に適応していくのか、そのために、どのような経済・社会システムであるべきなのかは、知の流動化を通じた科学の役割と正義、そして全人的な選択・

行動に委ねられている。私たちは次代に責任を転嫁することなく、私たちの時代のうちに、複雑に絡み合う地球システムの変動を理解し、持続可能な人間社会の構築に向けた知の体系化と新しい価値創造に取り組みねばならない。換言すれば、私たち地球科学者には、「宇宙における地球という惑星とその価値とは何か」について、科学技術を通じて社会と共有し、次代を持続可能に導いていく責任があるのである。

本特集号で取り上げた人類史上初となるマントルへの到達に向けた挑戦は、科学者の知的好奇心を満たしつつも、人類と惑星地球の命運をも左右する国際的な科学技術プログラムであると言っても、決して過言ではないだろう。私たちは、惑星地球とそこに住む自らの未来を意識的に創造していく時代に突入したといえる。「ちきゅう」は、世界の叡智を結集して地球規模の重要な課題に取り組むことのできる、世界で唯一の地球深部探査船である。今後、人類史上初となるマントルへの到達と観測、それにより引き起こされる非連続的なイノベーションとパラダイムシフトは、地球深部探査船「ちきゅう」を有する我が国の科学技術の進展と科学者の熱意、そして国際協働におけるリーダーシップに委ねられている。そして、ひとたび科学技術イノベーションにより人類未到のマントル空間への扉が開かれれば、その科学技術はより洗練されたものへと進化し、新しい概念や科学目標を掲げた第二・第三のマントル掘削につながるだろう。近い将来、「ちきゅう」による統合的なマントル掘削を通じた画期的な国際分野融合研究がなされ、いつか必ず、「すばらしいのは地球であって、人間ではなかったのだ」と懐古する日が訪れることを目指していく。

【謝辞】 本稿を執筆するにあたり、末廣潔氏、石井正一氏、東垣氏、江口暢久氏、斎藤実篤氏、猿橋具和氏、山田泰広氏、阿部なつ江氏、肖楠氏をはじめ、国内外の大学・研究機関、民間企業の方々に多くのご助言を頂きました。特に、金沢大

学の海野進教授をはじめとする日本地球科学掘削コンソーシアム (J-DESC) AIODP 部会のマントル掘削ワーキンググループのメンバーの方々には、マントル掘削の科学ロジックモデル等に関してご助言とご賛同を頂きました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- [1] 平朝彦, 徐垣, 末廣潔, 木下肇, 地球の内部で何が起きているのか?, 光文社新書, 2011.
- [2] 田中武男, 深海地球ドリリング計画 (OD21) と統合深海掘削計画 (IODP), 地質ニュース, 546号, 35-44, 2000.
- [3] Koppers, A. A. P., and Coggon, R. (eds.) Exploring Earth by Scientific Ocean Drilling: 2050 Science Framework. pp. 124, <https://doi.org/10.6075/J0W66J9H>.
- [4] 稲垣史生, 諸野祐樹, 星野辰彦, 井尻暁, 肖楠, 鈴木志野, 石井俊一, 浦本豪一郎, 寺田武志, 井町寛之, 久保雄介, 海底下深部生命圏フロンティアの探究と将来展望, 地質学雑誌, 124巻, 1号, 77-92, 2018.
- [5] 平朝彦, 人新世—科学技術史で読み解く人間の地質時代—, 東海大学出版部, 2022.
- [6] Watson, J. D., and Crick, F. H. C., Molecular structure of nucleic acids: A structure for deoxyribose nucleic acid. *Nature*, 171, 737-738, 1953.
- [7] フランシス・クリック, 熱き探究の日々—DNA二重らせん発見者の記録, 中村桂子 (訳), TBS/ブリタニカ, 1989.
- [8] ジム・アル＝カーリー, ジョンジョー・マクファデン, 量子力学で生命の謎を解く, 水谷淳 (訳), SB クリエイティブ, 2015.
- [9] Umino, S., Moore, G. F., Boston, B., Coggon, R., Crispini, L., D'Hondt, S., Garcia, M. O., Hanyu, T., Klein, F., Seama, N., Teagle, D. A. H., Tominaga, M., Yamashita, M., Harris, M., Ildefonse, B., Katayama, I., Kusano, Y., Suzuki, Y., Trembath-Reichert, E., Yamada, Y., Abe, N., Xiao, N., and Inagaki, F., Workshop Report: Exploring deep oceanic crust off Hawai'i. *Scientific Drilling*, 29, 69-82, 2021.
- [10] Inagaki, F., and Taira, A., Future opportunities in scientific ocean drilling: Illuminating planetary habitability. *Oceanography*, 32, 212-216, 2019.
- [11] ユヴァル・ノア・ハラリ, ホモ・デウス—テクノロジーとサピエンスの未来—, 柴田裕之 (訳), 河出書房新社, 2018.

☐