

## 海洋科学掘削2050サイエンスフレームワーク 日本語要約版



深海掘削計画(DSDP)から国際深海掘削計画(ODP)、統合国際深海掘削計画(Integrated Ocean Drilling Program: IODP)、国際深海科学掘削計画(International Ocean Discovery Program: IODP)\*<sup>1</sup>へと、50年を越える歴史を持つ深海掘削科学。現プログラムが2023年に区切りを迎えることを踏まえ、これまでの歴史を継承しつつ、さらに奥深い海洋掘削科学への展開を図るべく、海洋科学掘削2050サイエンスフレームワーク(2050 Science Framework: Exploring Earth by Scientific Ocean Drilling)\*<sup>2</sup>が執筆され、2020年秋に出版されました。このフレームワークは650名を超える研究者が、インド、日本、ヨーロッパ、オーストラリア/ニュージーランド、アメリカ、そして中国で開催された6つのワークショップによって議論した成果を持ち寄り、科学者コミュニティのアイデアを結集して創り上げたものです。これまでの深海掘削で培われた分野横断の精神を発展させ、さらに高度な科学目標へ到達するために25年を越える長期のビジョンを示しています。

この日本語要約版は、124ページにわたるフレームワークドキュメントの要約を、専門や学術的背景が異なる皆さんに興味を持っていただけるように作成したものです。興味を持っていただけた方は、是非英語版の海洋科学掘削2050サイエンスフレームワーク完全版にチャレンジしてみてください。現在の海洋科学掘削における重要なフロンティア、およびその実現に必要な項目など、未来の海洋科学掘削へのヒントが盛りだくさんです。

日本地球掘削科学コンソーシアム(J-DESC)\*<sup>3</sup>では、地球掘削科学に関わる様々なイベントや情報発信を行っています。オンラインでのイベントも実施されておりますので、ホームページから情報にアクセスしてみてください。

J-DESC理事会

2021年6月30日

### 関連リンク

(\*1) 国際深海科学掘削計画 (International Ocean Discovery Program: IODP)

J-DESCホームページ(日本語): [http://j-desc.org/about\\_us/about-iodp/](http://j-desc.org/about_us/about-iodp/)

IODPホームページ(英語): <https://www.iodp.org/>

(\*2) 2050 Science Framework: Exploring Earth by Scientific Ocean Drilling:

<https://www.iodp.org/docs/iodp-future/1086-2050-science-framework-full-document/file>

(\*3) 日本地球掘削科学コンソーシアム(J-DESC):

[http://j-desc.org/about\\_us/](http://j-desc.org/about_us/)



## 科学掘削による地球システムの解明

# TOOLS FOR PROBING THE INTERCONNECTED EARTH SYSTEM

誕生から46億年、そのほとんどは人類のいない惑星として時を刻んできた地球。地球スケールの時間軸で見たとき、この惑星はダイナミックな変化を続けてきた。惑星地球の上で起こる全ての物質循環とその速度、自然災害の場所とその規模、地球全体の海洋の健全度と生命生息域の広がりの規定しているのは、いわば「地球システム」とも言える惑星の営みである。数億年かけて行われる大陸の移動や消滅。幾度となく繰り返された生命絶滅の危機もそのうちのひとつだ。20カ国以上の科学者が参加し行われる海洋科学掘削は、この地球モデルの解明に向けた実地調査に他ならない。





戦略目標  
STRATEGIC OBJECTIVES

1 生命とそれを育む地球

海洋における生命生息の条件と役割

地球は生命の存在が知られている唯一の惑星体である。何がこの惑星をハビタブル(生息可能)にしてきたのか。生命はどこでどのように発生し、進化したのか。これら生命の進化を理解するには、さまざまな環境に残された生命の記録を時系列で調べる必要がある。海洋科学掘削によって得られる試料=コアは、生命の痕跡が時間軸に沿って並ぶ優れた年代記録である。数千万年から2億年という堆積物が眠る海底下。ここからは、地球上で起きた突然の環境変動や、生命の大量絶滅の証拠が見つかり、環境変動に生命がどのように対応してきたか。その履歴が残されている。そして、環境変動によってどのように生命の進化が促進されてきたか、その痕跡を調べることもできる。海底下に残された微化石グループや微生物生命から、生命進化の歩みを紐解くことが可能なのである。

4 地球システムのフィードバックを理解する

地球システムを安定化や不安定化させるプロセス

大気圏、水圏、岩石圏、生物圏それぞれのシステムが複雑に相互作用することで成り立つ地球システム。ここでは何らかの原因で起こった変化をさらに強める作用=正のフィードバックが働く。あるいは変化を抑える負のフィードバックも存在する。長い時間のスケールでは、数億年の単位で繰り返されてきた温室時代と氷室時代のような気候の変動。短い時間スケールでは、大気、海洋、雪氷圏の間のフィードバックが氷床の成長・衰退を加速させ、それに伴って温度・降水・植生の大きな変化が起こった。さらに短い人類の時間スケールでは、海洋循環の変動とその結果として深海の貯熱槽が拡大縮小することで高緯度での温度と降水の急激な変化を引き起こしてきた。さまざまな時間スケールで、地球の不安定化や安定化を生み出してきたフィードバックのプロセスを押さえていくことが重要である。海洋科学掘削により取り出された、これらフィードバックのプロセス記録を、ひとつひとつ明らかにすることで、地球システムの解明につながる。

5 地球史のティッピングポイント

将来の環境変動を明らかにするために地質時代の地球を活用する

人間の生活に欠かせない気候などの地球システムの要素、特に氷床や生物の生態、海洋循環は、外的要因に対応しながら同様の变化曲線をたどるわけではない。ある閾値に達するまでは徐々に変化するが、その閾値を超えると急激な変化を起こし、不可逆的に新たな状態へ移行してしまう。この転換点をティッピングポイントという。地球システムは複雑に相互作用するため、システムの中のある要素がティッピングポイントを超えると別の要素も連鎖を起こす可能性がある。海洋科学掘削で採取される堆積物や岩石記録は、地球システムがティッピングポイントを超える際の境界条件や、新しい安定状態に移行するのに要する時間などを解明するために必要な要素だ。なぜ地球システムの要素にティッピングポイントを持つものがあるのか、そのポイントを超えることで生態系機能にどう影響するか。そして、生物種の絶滅をもたらすのは何か。過去の地球から得られる教訓は多い。現代社会が直面する気候変化にどう取り組むかを判断するためにも、地球システムがティッピングポイントを通過する前にその実態を把握する必要がある。

2 地球表層を覆うプレートのライフサイクル

プレートの生成と、経年変化、破壊を探る

地球内部から上昇したマグマによって生まれた地殻が、プレートテクトニクス運動によって移動しながら冷やされ、その下のマントル上部を取り込みながら形成されるのが海洋リソスフェア(海洋プレート)である。海洋プレートは、長い年月を経て厚みを増し、大陸プレートにぶつかるとその下に沈み込み始める。日本列島には、約2億年かけて形成された世界最大級の太平洋プレートが沈み込む。この時の歪みが巨大地震の原因となる。このプレート運動と沈み込みは、地震や津波、火山噴火を引き起こすと同時に、地球規模の物質循環を可能として、我々の経済資源を生み出す機能も果たしている。地球のライフサイクルとも言えるプレート運動を探ることは、災害への対応知見と共に、地球システムの解明につながる。そのために、海洋深部の掘削が必要となる。

3 地球の気候システム

氷床、海洋、大気のダイナミックな活動や海水準変動を探る

海洋堆積物には、気候変動のプロセスをはじめ、そのメカニズムに関する情報が蓄積されている。数年から数億年というさまざまな時間スケールで、地球の気候システムの変化を連続で記録する記録媒体だ。今後もさらに時間連続性と解像度の高さを誇る古気候復元が可能となるだろう。重要な焦点の一つは、現在の気候システムの中で変化の影響を受けやすい要素が、いつ始まり、どのような相互作用を起こし、維持されてきたのか。その記録を得ることだ。海洋大循環、海氷や氷床、降水パターンなど、過去の地球の様々な気候状態で気候システムがどのように作動したのかを記録媒体から解析していくことが必要となる。海洋科学掘削で得られたデータは、将来の気候変動を知るための数値モデルの改善に不可欠な要素となっている。

6 エネルギーと物質のグローバルサイクル

地球システムサイクルの役割、メカニズムと規模を評価する

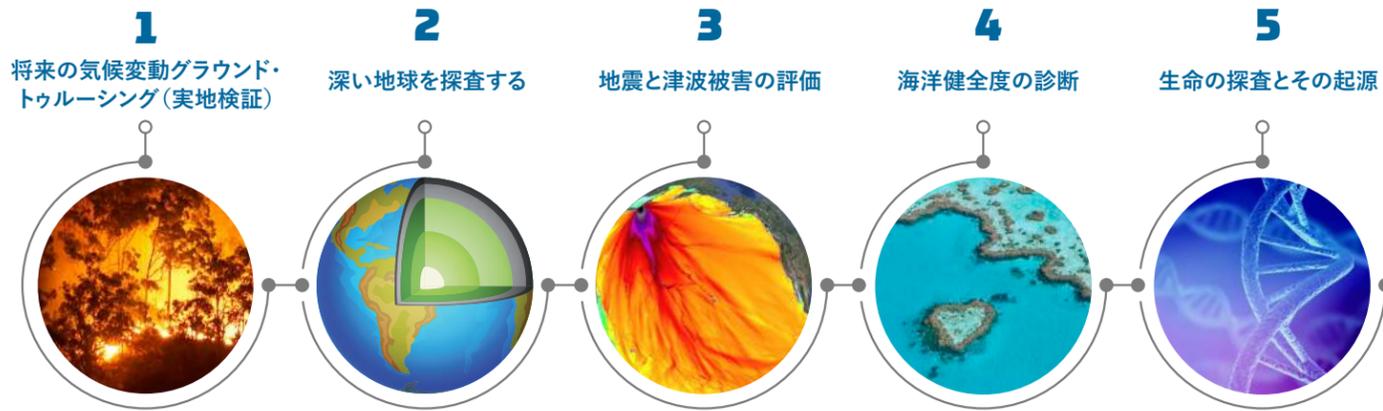
エネルギーや物質は、地球システムの中をさまざまなパスを巡って循環している。たとえば、火山噴火によって放出された二酸化炭素は、植物というリザーバーに蓄積され一部が石炭となって地下に蓄積された後に、時を経て人間によって再びエネルギーに変換され、大気圏に再び放出される。自然のグローバルサイクルを人間が加速させている状況が、地球温暖化の問題となって出現しているのだ。一方、炭素循環に限らず、地球は物質やエネルギーの循環によって、地表を作り、大気・海洋の化学組成を変化させ、物理化学条件をコントロールして生命の出現や進化も引き起こす。社会に脅威となる自然災害を引き起こす反面、水資源や金属資源の集積に寄与している。

7 社会に影響を与える自然災害

海洋における自然災害の理解

地震、津波、地滑り、火山の噴火、大洪水などの自然現象は、人間社会のインフラや生活、環境に直接脅威をもたらす。これら自然災害の調査研究に海洋科学掘削は重要な役割をはたしてきた。特に海洋プレート沈み込み帯において行われた実地調査は、地震の痕跡を直接発見するなどの成果をもたらした。しかし、今後の予測といった科学の解までにはまだ到達してはいない。次にいつ起こるのか。発生の先駆的現象はあるのか。地震の発生メカニズムを理解し、将来予測に言及することができるのか——。直近の危機が迫る海域にモニタリング機器を設置しながら、さらに新たな海底下を掘り、有史以前の災害を掘り起こし、災害の規模や頻度を探る。絶え間ない調査・観測が必要とされる。

フラグシップ構想  
FLAGSHIP INITIATIVES



1 将来の気候変動グラウンド・トゥーリング(実地検証)

大気 CO<sub>2</sub>濃度は 2020 年には 410 ppm を超え、2100 年までに 900 ppm を超えると危惧されている。この 900 ppm は 5000 万年前の暑い「温室」時代の CO<sub>2</sub>濃度と言われ、人類は経験したことがない。ここ 300 万年で大気 CO<sub>2</sub>濃度が 410 ppm を超えたことはなく、異常な状態は産業革命以降の人間の活動が生み出したものと考えられる。これが気候温暖化の要因とされ、カーボンオフを目指す根拠となっている。これほど古い時代の気温や CO<sub>2</sub>濃度がわかるのは、氷床掘削や海洋科学掘削から得られた古気候記録から科学的に数字を導き出しているからだ。IPCC などでも報告されるような将来予測モデルのパフォーマンスを評価するために、古気候データを参考にするのは重要なこととなる。古気候記録の時間空間解像度の向上がますます不可欠となる。

**波及効果**  
高密度の海洋科学掘削ネットワークや掘削帯域をグローバルに展開することで、地球の気候システムにおけるフィードバックとティッピングポイントをより正確に把握することが可能になる。これは、大気温室効果ガスや海洋大循環の変化、その他の境界条件に対する気候感度の評価を大きく改善させる。

2 深い地球を探索する

教科書に載っているような地球断面図は、長い年月をかけて地球科学者がたどり着いた結果だ。主に地震波の分析から描き出したもので、実際には誰も見たことがない。1909 年にモホロヴィチッチ地震波不連続面(モホ)が提唱されて以来、地球の地殻とその下にあるマントルの上部にまで到達しようとする深部掘削は、地球科学者の夢である。マントルに最も近いであろうとされる海洋地殻は約 6000m。人類が海洋地殻を掘削した最も深い穴は 2000m 余り。今後数十年に渡って工学的な技術開発を進めながら進行する科学的な海洋掘削戦略は、掘削、コアリング、ロギング、およびモニタリング技術を最大限に活用しながら、複数の掘削航海によって上部マントルに到達することを目指している。固い岩石が、髪の毛の伸びる速さで動いているとされるマントル。その実物をぜひ見たいものだ。

**波及効果**  
海洋深部科学掘削は、人類に地球深部への道を提供し、地球の形成と進化、地動学的挙動、そして地質学的、地球化学的、生物学的、気候学的サイクルの間の相互関係についての基本的な洞察を広げることになる。

3 地震と津波被害の評価

海溝型地震とそれに関連した津波は、過去 20 年間でもっとも最悪の自然災害を人類にもたらしてきた。2011 年に東北地方で発生したマグニチュード 9.0 の東北地方太平洋沖地震は、1 万 8000 人以上の犠牲者と 17 兆円の経済的損失をもたらした。2004 年にインド洋で発生したマグニチュード 9.2 のスマトラ-アンダマン地震は、15 カ国に渡り 23 万人以上の犠牲者と 15 億ドル相当の経済的損失をもたらした。これらの多くは津波による犠牲者である。また、2006 年に台湾で起きたマグニチュード 7.0 の地震では、海底地滑りと重力流により 22 の海底ケーブルが切断され通信のインフラが大きな被害を受けた。世界のプレート沈み込み帯においては、このように大きな災害をもたらす地震が周期的に起こる。しかし大地震を起こすプロセスにはわかっていないことが多く、次にいつ起こるのかはまだ予測できない。海洋底のモニタリングを行い、地震発生を捉えるのと共に、過去に起こしてきた地震の痕跡を科学掘削することで、根本的な地震メカニズムに迫る研究が必要とされる。

**波及効果**  
海洋科学掘削により世界中の沿岸と沖合にある断層帯にアクセスし、観測機器を設置してモニタリングすることで、沈み込み帯で起こる地震や津波に関するより信頼性の高い予測や危険度評価が可能となり、災害への準備や対応への改善促進に繋がる。

4 海洋健全度の診断

海洋の温暖化、酸性化、貧酸素化、栄養塩濃度の上昇と下降は、海洋生態系に地球規模の変化を引き起こしている。海の健康を測るバロメーターとしての海洋健全度の低下は、生物の多様性や生息域、生物生産性、さらには漁業においても壊滅的な損失につながる。産業革命以降の人新世(Anthropocene)の年代にはそれが加速しているが、長い地球史のスケールで読み解くと、急激な気候温暖化や寒冷化、海洋無酸素事変、海洋酸性化イベント、隕石衝突や火山・火成活動などにより海洋生態系は重大な影響を受けてきた。自然サイクルや壊滅的な変動など、地球史における重要な時期に焦点をおくことで、今後の激変する環境変化が海洋生態系や食物網、全球の炭素循環に与える影響を評価することができる。

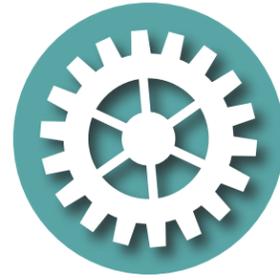
**波及効果**  
海洋科学掘削を通じて、地質学的時間スケールで海洋健全度を検証することで、海洋健全度の調整や健全度衰退への兆候、回復過程を制御する地球システムの駆動力について、社会への情報提供に役立てることができる。

5 生命の探査とその起源

世界最大の生命圏と言われる海洋堆積物と海洋地殻には微生物生命が生息している。近年まで海洋地下にはこのような微生物が生きているとは考えられていなかったが、海洋掘削によって徐々に明らかになりつつある。2020 年には 1 億年前の堆積層に眠っていた微生物の生存が確認されている。移動やエネルギー摂取の非常に限られた環境において、なぜ微生物は生き延びることができるのか。地球化学、生化学的プロセスにより形成される生体物質には多くの謎が残されており、解明が待たれる。

**波及効果**  
海洋科学掘削により海底下の生命を探索することで、生命存続の原理、生命圏の限界、地球上の生命の起源、および地球外における生命の可能性について、理解が進む。類似する地球外環境における生命の可能性やその姿を推測することにも貢献する。さらに新しい微生物や生命機能の発見はそれらの工学的応用へもつながる可能性がある。

## 成果に向けた不可欠な要素 ENABLING ELEMENTS



### 1 幅広い波及効果と普及啓発

海洋掘削は、気候モデルの改善や地震に関する知識の向上、生命の存在限界、地球外生命の可能性に関する知見など、重要なデータを提供している。社会にとって関心のある重要なテーマを幅広く対象としているため、参加する科学者も、地球科学から生物、環境、気候など多様な分野にわたる。また、海洋掘削は国際的な共同研究モデルとして認知されており、科学と工学の分野横断的な協調関係を生み出す礎ともなっている。大学院生やキャリア初期の科学者が船上と陸上の両方に参加することで、次世代の地球科学者を育成するための卓越したプログラムである。国際的な共同研究から得られたデータや成果は、様々な媒体を用いて、教育者や一般の人々に広く普及される予定だ。

### 2 陸から海へ

科学的な海洋掘削と陸上掘削のコミュニティは、地球科学の分野で最も成功した長期的な国際共同研究プログラムだ。プログラム間の強化されたコラボレーションは、互いの目的に合う地球システムを調査するために大きな力を発揮してきた。これから実施される陸上掘削と海洋掘削の複合掘削計画は、地球のダイナミクスと自然災害についての基本的な問題を解き明かすだけでなく、プレートテクトニクス、地球の気候システム、生態系、生命とその他の生息可能範囲、海面の変化、および海岸線から海底淡水への流れ等を明らかにするだろう。

### 3 地球から地球外へ

火星や小惑星をはじめ、今進んでいる宇宙研究機関の研究と海洋科学掘削との間の将来の共同作業は、惑星の進化と構造をより深く理解することや、地球外惑星の生命発見への可能性へとつながることができるだろう。また、海洋掘削データの古気候記録と現代の衛星データを統合することで、複雑な気象プロセスの理解を向上させることも可能になる。

### 4 技術開発とビッグデータ解析

このプロジェクトは、2050年という中長期的な目標を見据えて進められる。ここをゴールとして成果を生み出すためには、掘削およびコアリング技術、コア孔内および船内分析ツール、データ処理における技術開発などで広範な共同体制が必要となる。特に、エンジニア、情報科学者など、科学や技術、工学、数学といった多様な人材が求められる。コア分析と地球物理学的観測をリンクさせるなど、観測と情報分野の統合が必須とされ、ビッグデータ解析の必要性が高まる。技術開発とビッグデータ解析が将来の海洋科学掘削の発展を牽引することになるだろう。

## FIGURE CREDITS, SOURCES, AND REFERENCES

Top ..... **D/V Chikyu**: JAMSTEC/IODP.

Page 3 ..... **Dynamic Earth**: iStock.com/KalypsoWorldPhotography.

**Climate and the Environment**: iStock.com/Bernhard\_Staehli.

**Life**: iStock.com/xrender.

**Natural Hazards**: iStock.com/skrum.

**Cycles and Rates**: MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen (CC-BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**Health and Habitability**: iStock.com/IBorisoff.

Page 6 ..... **Ground Truthing Future Climate Change**: iStock.com/Byrnsdad.

**Probing the Deep Earth**: Illustration by Rosalind Coggon.

**Assessing Earthquake and Tsunami Hazards**: <https://nctr.pmel.noaa.gov/honshu20110311/GE.jpg>.

**Diagnosing Ocean Health**: iStock.com/byrneck.

**Exploring Life and Its Origins**: iStock.com/artisteer.