

第1章

科学技術が切り拓く海洋

第1節 持続可能な開発のための海洋科学の10年に向けて

1 惑星限界を超えた人間活動

2017年12月、国連は2021年から2030年までを「国連持続可能な開発のための海洋科学の10年^(注1)」と決議した。この惑星に持続可能な社会を構築するうえで、地球表面の7割を占める海洋についての科学的な知見は、大きな役割を果たす。

産業革命以降、二酸化炭素（CO₂）に代表される温室効果ガスの濃度はホッケースティックに似た急激な増大曲線を描いている。多少の揺らぎはあるものの、大気中の平均気温も類似の右肩上がりのカーブを描いて急上昇中である^(注2)。こうした地球温暖化は特に北半球で顕著に現れて北極域の海水を溶かすのみならず、その熱の90%以上が海洋に蓄積し、深層に及ぶ海の温暖化を促している。海洋貯熱量の増加は、エルニーニョ現象などの気候変動現象を経て世界各地に干ばつ、洪水、巨大台風などの異常気象や極端現象を引き起こしており、その損害額はうなぎのぼりである。しばらく前になるが、米国の気候研究者であるウィル・ステファン博士らが2011年に英国王立協会の哲学紀要に示した、過去250年（1750-2000年）における人間活動指標の変化と地球環境指標の変化の一致は衝撃的であった^(注3)。人口やGDP、水利用などとCO₂濃度、平均気温の上昇、生物種の減少などの時系列が急激な右肩上がりの曲線を描いて見事に一致していたのである（図1-1-1）。相関関係のみで因果関係を議論することはできないが、気象学、海洋学、気候学や生物地球化学などの学術分野で蓄積された知識に基づけば、人間活動の影響がいまや生物圏を含む地球環境全体に深刻な影響を及ぼしていることは明らかである。

地球は太陽系の一惑星に過ぎない。しかし、その位置取りは水が気体、液体、固体の三相間で自在に転移できる極めてユニークなところにある。1995年にジュネーブ大学のミッシェル・マイヨール博士が地球から約50光年のかなたにある恒星一ペガス座51番星一を周回する惑星を発見して以来、いまや3,000個を超える太陽系外惑星が発見され、まさに惑星発見ブームの観があるが、地球のような惑星は宇宙全体から見れば極めて数少ないと予想される。そのユニークさによる水の相変化と潜熱の放出による活発な気象・海象現象は岩石の風化を加速し、一方で流動性に富む液体の水は良き溶媒として、さまざまな物質を溶かし込み、その循環と物質間の化学反応を可能にしてきた。こうして水惑星「地球」は生息可能な惑星として生命と環境の共進化を促してきたのである。これこそ母なる地球と呼ばれるゆえんである。しかし、皮肉なことに、その結果としての人間活動がいまや惑星限界を超えて地球のシステム全体に影響を与え、人間活動の持続可能性さえ危うくするに至っている。地質学の時代区分によれば、私たちは氷期の終了後の安定した気候である完新世（Holocene）にいるはずなのであるが、先に述べたような地球温暖化に代表される人間活動起源の急激な変化から、学界には新しい時代区分として「人新世

注1
UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development

注2
急激に上昇している気温変化のグラフの形状は、ホッケースティックを横にして置いたときの形状と似ていることから「ホッケースティック曲線」とも呼ばれる。

注3
Steffen, W., et al., 2011 : Phil. Trans. R. Soc. A, 842-867.

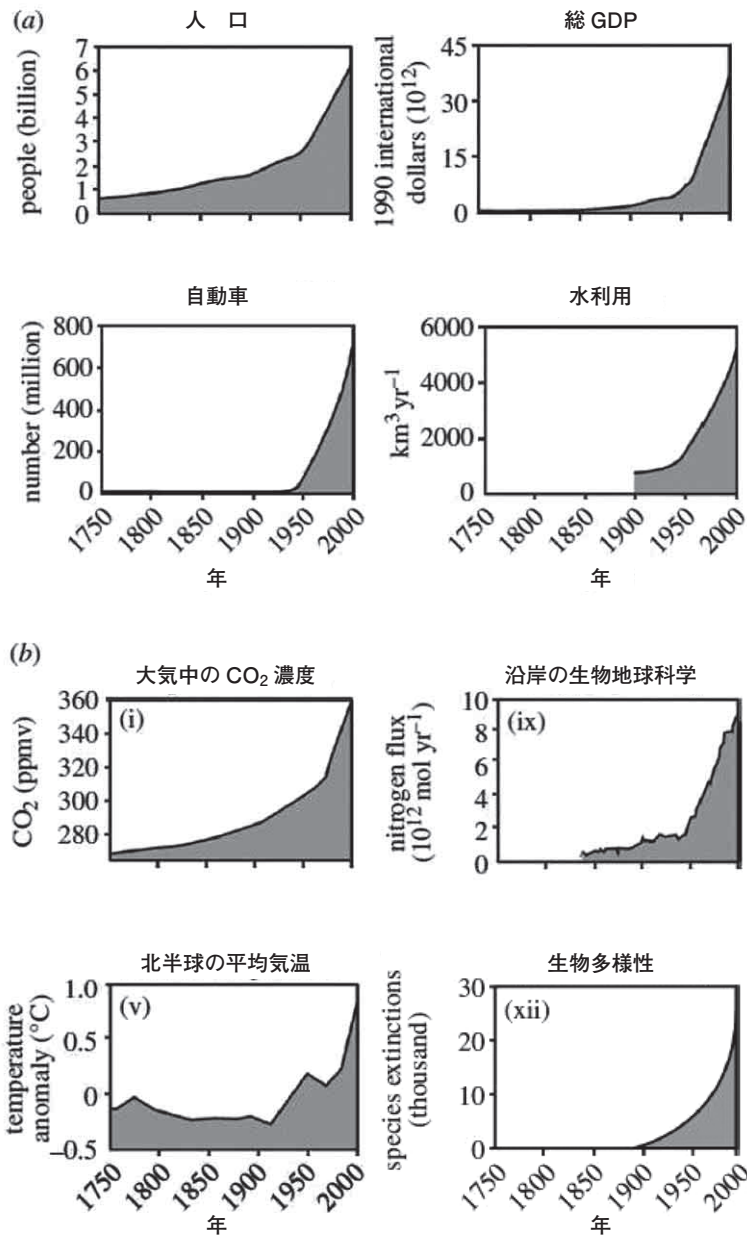


図1-1-1 過去250年（1750-2000年）の人間活動指標の変化（a）と地球環境指標の変化（b）。
 （出典：Steffen ら（2011）より抜粋）

（Anthropocene）」を導入する動きさえもある。いま、私たちは宇宙に浮かぶ惑星の視点から、人間活動を、ひいては私たち一人ひとりが生き方を見直す時期に来ているといえる。

2 未来の地球（Future Earth）計画

地球システムを国境にとらわれずに協力して丸ごと理解しようという動きは、学術界において、1950年代に顕著になっていた。特に地球物理学者の音頭で1957年7月から1958年末まで実施された「国際地球観測年^{注4}」計画では、ソビエト連邦が初めての人工衛星スプートニク1号を打ち上げ、次いで米国はエクスペローラー1号で地球磁場にとらえられた放射線帯、すなわちバン・アレン帯を発見した。海洋

注4
 International Geophysical Year

関係では、たまたま発生していたエルニーニョ現象の大気と海洋観測データが各国の協力により得られ、その後の大気と海洋の相互作用研究の基礎が築かれたのである。

海洋科学は世界の海を対象として物理学、化学、生物学、地質学からなり、極めて国際性、学際性豊かな学術分野である。これを推進すべく海洋科学委員会 (SCOR^(注5)) が国際科学会議 (ICSU^(注6)) の下に設けられたのが1957年なのは偶然ではない。こうした世界の動きに呼応して、わが国でも日本学術会議に海洋研究連絡委員会が設けられた。初代委員長の日高孝次東京大学教授 (当時) や茅誠司東京大学総長 (当時) らの尽力により、1962年にわが国最初の海洋研究所が全国大学共同利用のかたちで東京大学に設立された。

海洋観測、データ交換、人材育成を目指し、政府間海洋学委員会 (IOC^(注7)) が国連機関であるユネスコに設けられたのは1960年である。この組織の導入にあたっては、科学立国によって新たに世界の信頼を勝ち得るという基本方針に基づいて、わが国が中心的な役割を果たしたことは永く記憶されるべきである。IOCは、学術研究を推進する SCOR と連携して、海洋学の現業面を推進する母体となった。

こうした胎動期から半世紀以上が過ぎた。「人新世」への突入さえも喧伝されている現在、海洋をはじめとする地球システムの急激な変化に伴う危機と好機に効果的に対応するには、自然科学分野間の連携のみに基づく知の強化では不十分である。より広く、人文社会科学とも学際的に連携し、さらには、こうした学際連携も越えて社会のさまざまなステークホルダーと協働して、新しい価値観の下で地球の未来をデザインし、それに向けて社会を持続可能なかたちに変革していく必要がある。そこで、ICSU と国際社会科学評議会 (ISSC^(注8)) は「未来の地球 (Future Earth)」計画を2015年に10年計画で開始した。この計画は、①ダイナミックな地球の理解、②地球規模の持続可能な発展、③持続可能な地球社会への転換、の3つのテーマを掲げている。さらにこれら2つの国際組織は一歩進めて、2018年7月に合体し、国際学術会議 (ISC^(注9)) として新たな展開を開始している。学術界と社会が連携し、協働していくことがますます重要になってきたといえるであろう。

3 持続可能な開発目標 (SDGs^(注10))

持続可能な開発に向けた具体的な動きは、1987年に環境と開発に関する世界委員会 (ブルントラント委員会) が発表した報告書「我々の共有する未来」を受けて1992年に国連が開催した国連環境会議 (リオ地球サミット) を起源とする。ここでは行動計画「アジェンダ21」が採択され、気候変動枠組条約と生物多様性条約が署名された。特に17章では海洋の重要性が初めて取り上げられ、海域・沿岸域の保全、生物資源の保全、合理的利用と開発が謳われた。これを受けて、IOCの主導の下、全球海洋観測システム (GOOS^(注11)) 計画が始まったのである。IOCはユネスコからの機能的自立^(注12)の下、主要な3テーマ、気候変化と海洋、現業サービス、海洋生態系の健康に関する観測体制とネットワークの構築を進めてきた。一方、持続可能な開発に向けた国際的な取組みは2002年の「ヨハネスブルグ・サミット」や2012年の「リオ+20」を経て、2015年に開催された国連持続可能な開発サミットにおいて、「持続可能な開発のための2030アジェンダ」が採択され、2030年までに達成を目指

注5
Scientific Committee on
Ocean Research

注6
International Council for
Science

注7
Intergovernmental Oceanographic
Commission

注8
International Society for
Social Science

注9
International Science Society

注10
Sustainable Development
Goals

注11
Global Ocean Observing
System

注12
functional autonomy



図1-1-2 SDG 目標14「海洋・海洋資源の保全と持続可能な利用」

す17の「持続可能な開発目標（SDGs）」が明示されるに至った。貧困撲滅などを主眼として、おもに途上国を対象として2000年から2015年まで実施された「ミレニアム開発目標（MDGs）」に加えて、先進国も含む地球環境保全関係の目標が強化されていることに注目すべきである。海洋に関する目標としては、目標14「海洋・海洋資源の保全と持続可能な利用」が掲げられている。目標間のバランスや全体の統合性が弱いなどの問題点はあるにせよ、社会、経済、環境における持続可能性を対象とするSDGsは学術界における「未来の地球」計画と軌を一にするものである。

4 国連持続可能な開発のための海洋科学の10年に向けて

2015年の気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）で採択された「パリ協定」に基づいて、2018年10月に仁川（韓国）で開催された気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第48回総会でまとめられた「1.5℃特別報告書」では、2050年までに人為起源のCO₂の放出量をゼロにして、2100年までに気温上昇をパリ協定による2℃よりも厳しい1.5℃以下に抑えるならば、多くの地球温暖化の脅威から逃れることができるとしている。世界の現状を見ると、この目標自体が絶望的に厳しいものであるが、最近、衝撃的な論文が米国科学アカデミー紀要(PNAS)に掲載された^(注13)。著者らは仮にパリ協定を満たしたとしても、永久凍土の溶解、陸域・海域の炭素吸収能力の減退、海洋バクテリアの増加によるCO₂放出、熱帯雨林や森林の減退などが温暖化の相乗効果として起こり、一定の限度を超えると、地球システムは雪崩のように「温室地球（Hothouse Earth）^(注14)」へと暴走する可能性があるというものである（図1-1-3）。温度目標だけでなく、生物地球化学面でのフィードバックを考慮する必要があるという。このように、価値観を含む社会変革はすでに待ったなしの段階に来ている。

持続可能な社会の形成に向けてまず重要になることは、地球システムの現状をよ

注13
Steffen, W., et al., 2018 :
Proc. Natl. Acad. Sci. USA
115 (33), 8252-8259.

注14
温室のイメージよりは過酷で、金星の環境に近づくような「灼熱地獄」を意味している。

図解 海洋モニタリング

海洋環境がどのように変わっているのか、過去にどのような変遷を経て現状に至っているのかを知るために観測データを取得して提供するのが「海洋モニタリング」である。

海洋モニタリングには、さまざまな機器による、さまざまな観測手法が用いられている。

HFレーダー

陸上から海流や波などを計測。

トライトンプイ

係留型の観測システム。
水温、塩分、海上気象などを計測。

バイオリギング (ウミガメ)

海洋生物にセンサーを付けて、その生態などを観測。

アルゴフロート

浮上と降下を繰り返しながら水温・塩分などを計測する漂流型観測システム。

海底ケーブル

海域での地震・津波などを観測。

CTD採水器

水温、塩分、水圧を計測するCTDと採水器をあわせたもの。

海底設置型ADCP (超音波ドップラー式流速プロファイラー)

海底に設置し、潮流や沿岸流を観測。

マルチプルコアラー

海底の堆積物の表層を採取。





航空ライダー
海洋上の大気、海洋性のエアロゾルなど観測。



人工衛星
海面水温や海面高度、海水を計測。船舶監視などにも利用される。(第1章第2節3参照)



篤志船 (VOS)
商船や漁船の協力による観測。

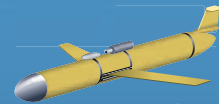
海上漂流ブイ
水温や波高、波の周期など観測。



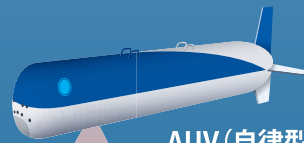
エアガン
ストリーマーカーケーブルとセットで、海底下の地殻構造を探索する。

ストリーマーカーケーブル
エアガンとセットで、海底下の地殻構造を探索する。

XBT
鉛直方向の水温を計測する。(XCTDは塩分も計測)



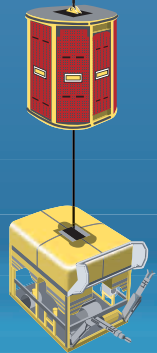
水中グライダー
水中を自律的に移動する観測システム。



AUV (自律型無人潜水機)
海底地形や海底資源などに関する情報を取得する。(第1章第2節4参照)



セジメントトラップ
海中に沈降する粒子を収集。



ROV (遠隔操作無人探査機)
深海の調査、海底での試料など収集・機器の設置。



FPG (ファインダー付パワーグラブ)
海底鉱物などの試料を採取。



ドレッジバケット
海底の堆積物や岩などを採取。

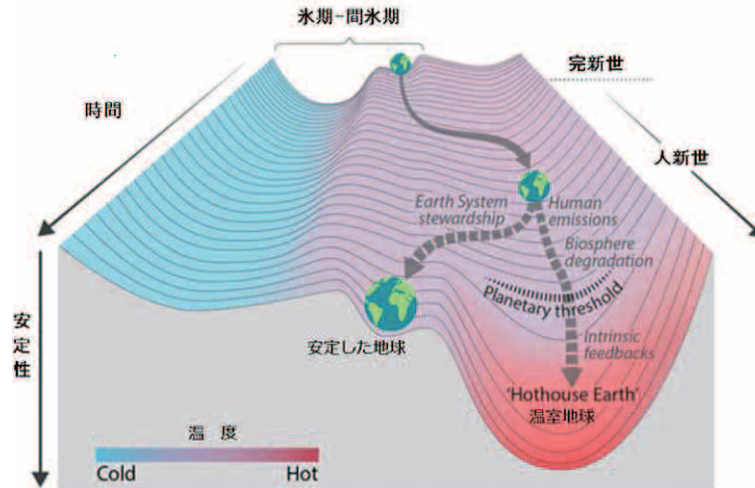


図1-1-3 地球システムの未来を俯瞰した図

いま、地球システムは氷期-間氷期サイクルを少し外れたところにある。炭素循環を適切に管理して安定した地球システムに導くことができるか、それとも生物地球化学の暴走フィードバックによって惑星限界をはるかに超えた「温室地球」に向かうのか、私たちは人新世の岐路に立っている。(出典：Steffen ら (2018))

く捉えることである。地球温暖化にとどまらず、水惑星地球の環境がいまどのような危機にあるのかを正確に捉えることなしに進むことはできないからである。それには、すべてのステークホルダーが協力して、社会経済を含む地球システムにいま起きていることを把握するデータシステムの構築を急がなければならない。このシステムはデータの取得とサービス、政策担当者との活発な交流メカニズムから構成されるべきである。



2021 United Nations Decade
2030 of Ocean Science
for Sustainable Development

図1-1-4 「国連持続可能な開発のための海洋科学の10年」のロゴマーク

冒頭に示したように、国連は2017年12月、2021年から2030年までの10年間を「国連持続可能な開発のための海洋科学の10年」とすると決議した。海洋科学の共通のフレームワークを提供し、各国の「持続可能な開発のための2030アジェンダ」の達成を支援するものとなる。

この決議に先立ってユネスコIOCがとりまとめた報告書「Global Ocean Science Report」では、海洋科学を「海洋生態系」

「海洋と気候」「海洋の健全性」「人間の健康・福祉」「ブルーグロース (Blue Growth)^(注15)」「海洋の地殻災害」「海洋テクノロジー」「観測とデータ」の8つに分類^(注16)、世界の海洋科学の実態を初めて定量的に評価している。たとえば科学論文数の評価からは、先進国と途上国の能力の違いが浮き彫りとなる (図1-1-5)。これら評価を踏まえて、2021年からの実施に向けて、IOCの主導のもとで実施内容の検討が進んでいる。

この「海洋科学の10年」は、科学と政策の境界を越えた新たな基盤を構築する「生涯に1度 (once in a lifetime)」の機会となることが目指されている。科学コミュニティ、政策立案者、企業や市民社会に結集を呼び掛けたのは画期的なことであり、海洋科学先進国としてのわが国の積極的な貢献がますます期待されている。

(山形 俊男)

注15 計画的にブルーエコノミー (海洋を活用した経済活動) を拡大すること。

注16 「観測とデータ」は、他の7分野に共通する分野として位置づけられている。



図1-1-5 海洋科学分野の論文数に応じた面積で各国をあらわした世界地図
(出典：「Global Ocean Science Report^(注17)」)

注17
<https://en.unesco.org/gosr>

第2節 フロンティアを切り拓く

1 新しい深海生命圏の姿

1 深海探査による深海生命圏研究小史

「海のどこまで深いところに（微）生物は存在するのか？」という問いは、おそらく人類が文明を持ち始めたころから始まる根源的なものであると想像できる。紀元前1000年ごろのギリシャでは、素潜りによる魚介類の採取に加えて、船を用いて海綿を採取するかなり洗練された漁が行われていたことが知られる。しかし一方で19世紀後半までの約2900年の間、数百メートルを超える深海には生物はほとんど存在しないと考えられていたことも事実である。1872年から1876年にかけて行われた英国のチャレンジャー号探検航海を機に多くの研究調査が行われ、深海にも多くの生物が生息していることが徐々に明らかになった。1900年代初頭になると、水深6,000mを超える超深海の海溝からも動物が採取され科学論文として記述されるようになり、深海には未知の生態系が存在することが広く認識されるようになった。

比較的簡単な技術でも調査可能であった目に見える深海大型生物に比べ、目に見えない深海微生物の研究はそれから半世紀近く遅れた。1950年代の初頭に行われた深海堆積物のコア試料やグラブ試料^(注18)を用いた研究によって、深海環境にも大きな生物量（バイオマス）を有する微生物生態系が広がっていることが明らかになった^(注19)。初期の研究成果から、そのような深海環境で生息する微生物生態系は、海洋表層の活発な光合成一次生産の残り物（つまり沈降有機物）をエネルギー・栄養源とする高圧条件にうまく適応することができた浅海環境からの移住者から成り立っていると考えられた。つまり、光の届かない深海に生息する耐圧・好圧能という特殊な表現形を獲得した独特の生態系ではあるものの、その生存の最も根幹を成すエネルギーや炭素・窒素等の栄養源を太陽光による光合成一次生産に依存していることから「光エネルギーの生態系」の一部であると捉えられてきた。

1970年代後半になると、当時の最先端深海探査ツールであるカメラシステムや有人潜水船を用いた調査によって、東太平洋の深海底において深海熱水活動^(注20)が初めて発見された^(注21)。深海熱水活動の発見自体、地球科学史上の最も大きな発見のひとつと考えられているが、それ以上に一般社会にまで衝撃を与えた大きな発見と

注18
堆積物を掬い取るサンプリング装置で採取された試料。

注19
Zobell C. E. and Morita R. Y.; "Barophilic bacteria in some deep sea sediments", J. Bacteriol., Vol.73, No.4, pp.563-568 (1957).

注20
マグマで熱せられた海水が地殻の物質を溶かし込みながら海底から噴出する現象およびその活動のこと。

注21
Corliss J. B., Dymond J., Gordon L. I., et al.; "Submarine thermal springs on the Galápagos Rift", Science, Vol.203, No.4385, pp. 1073-1083 (1979).

注22

メタンや硫化水素など還元的な化学物質を利用して、二酸化炭素から有機物を合成して生きているバクテリア。

して、深海熱水活動域において奇妙な形態を有した多様な大型生物が極めて高密度に生息していることが見つかった点を挙げることができる。その後の研究によって、これらの深海熱水活動域に生息する大型生物の多くが化学合成独立栄養バクテリア^(注22)を共生させ、その共生バクテリアからエネルギー・栄養源を獲得していること、さらに深海熱水活動域に広く分布する微生物群集が熱水活動によりもたらされる還元型化学物質の酸化還元反応による化学合成一次生産に依存した生態系であることが明らかとなった。つまり、深海熱水活動域には、太陽光による光合成一次生産とはまったく独立した地球内部エネルギーによる化学合成一次生産に依存した、いわば「暗黒エネルギーの生態系」が存在することが初めて認識されるようになったのである。

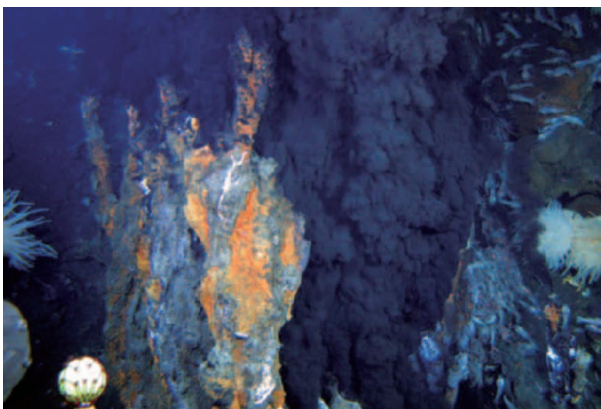


図1-2-1 カーリーチムニーサイトと呼ばれる熱水噴出孔
中央インド洋海嶺におけるきれいなフィールドのカーリーチムニーサイトと呼ばれる熱水噴出孔の写真。このようなブラックスモーカーを噴出する深海熱水域が1970年代後半に東太平洋で発見された。
(写真提供：海洋研究開発機構)

注23

マリアナ海溝など11,000メートル級の海洋の最深部に到達できる探査機。ROV (Remotely Operated Vehicle) については、本節4を参照。

注24

塩分・水温・水深を計測するセンサー付きの装置による海水サンプリング。

注25

Ohara Y., Reagan M. K., Fujikura K., et al.; "A serpentinite-hosted ecosystem in the Southern Mariana Forearc", Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol.109, No.8, pp. 2831-2835 (2012).

さらに1990年代の後半から、ROV「かいこう」といったフルデプス探査機^(注23)やCTD採水^(注24)やフリーフォール探査機器による調査により、地球のあらゆる海洋環境の海底に至る詳細な研究が可能となり、それまで断片的にしかわからなかった深海における(微)生物生態系の存在様式やその繋がりが理解されるようになった。世界最深部のマリアナ海溝チャレンジャー海淵の海底といえども多様な生物が生息し、また、より浅海の水塊や海底の堆積物に由来する好圧性あるいは耐圧性の従属栄養微生物が連続的に分布していることがわかりつつある。つまり、海洋の最深部に至る深海の世界においても、太陽光による光合成一次生産に依存した「光エネルギーの生態系」が広がっているという事実が知られつつある。また一方で、中央海嶺や沈み込み帯といった特定の地質環境にのみ点在すると考えられてきた化学合成一次生産に依存した「暗黒エネルギーの生態系」が、その他の深海環境^(注25)にも存在し得ることも明らかとなってきた。

2 最新探査によって見えてきた新しい深海生命圏の姿 —海底下生命圏の拡張と限界—

近年、深海探査プラットフォームだけでなく、極限環境条件における極小の微生物群集の存在や微弱な生命活動を検出することが可能な分析技術や現場計測技術の発展が組み合わさることによって、これまでの調査研究では検出・認識できなかったような新しい深海生命圏の存在が次々と見つかりつつある。

1990年代の中ごろから、科学掘削船を用いた深海底のさらに地下に広がる海底下



図1-2-2 無人探査機 (ROV) 「かいこう」

かいこうは上部のランチャーと下部のビーグルで構成されており、ランチャーから二次ケーブルを繰り出すことでビーグルの機動性を確保する仕組みになっている。

(写真提供：海洋研究開発機構)

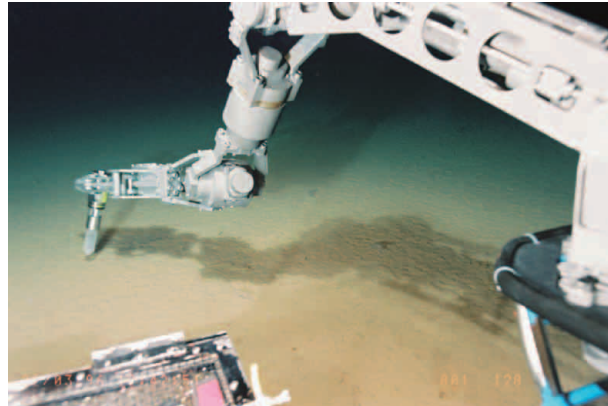


図1-2-3 マリアナ海溝チャレンジャー海淵の世界最深部の海底の堆積物の採取

無菌採泥器による採取の様子。

(写真提供：海洋研究開発機構)

環境の微生物探査が行われるようになった。初期の海底下微生物の研究成果に基づく試算は、地球に存在するあらゆる生物のおよそ半分に匹敵するような巨大なバイオマスが大陸や海洋の地下に存在していることを示唆するものであった。また、極めてエネルギー・栄養の供給が緩やかであると予想される海底下生命圏を構成する微生物の多くは、現場環境においてゆっくりと生存していることは間違いないものの^(注26)、従来の培養に基づく手法では検出できず、環境メタゲノム解析^(注27)のような新しい方法論による解析が必要であった。ジョイデス・レゾリューション号^(注28)や地球深部探査船「ちきゅう」を用いた国際深海科学掘削計画 (IODP^(注29)) において堆積物を中心としたさまざまな海底下環境から得られた試料を用いた解析によって、より正確なバイオマスの推定が行われ、その総量は下方修正されることとなったが^(注30)、それでもいまだ巨大なバイオマスを有する海底下生命圏を構成する微生物の多くが、表層環境に生息する微生物と遺伝的にも機能的にも大きく異なることが明らかになった^(注31)。一方で、海底下堆積物中の微生物の生命活動やバイオマスはその環境における有機物量と相関関係にあることが明らかになり^(注31,32)、表層生命活動と時空間的に断絶された海底下生命圏といえども、大局的に見れば「光エネルギーの生態系」の一部として捉えることができることがわかりつつある。

かつては「地球最後の生命圏フロンティア」と考えられた海底下生命圏も、わずか20年の間に科学掘削船を用いた調査研究によって、少なくとも堆積物環境においては、その微生物存在量や多様性について概要が明らかにされた。しかしながら、海底下のどのくらい深くまで生命圏が広がっているのか、あるいは堆積物の存在しない岩石地殻環境においてもどのくらいの生物量や生命活動が存在しているのか、という点については未解明のままであった。

2012年に行われた「ちきゅう」を用いたIODP 第337次航海では、下北半島沖の日本海溝の前弧海盆における海底下2.5kmまでの掘削試料を用いた海底下生命圏の研究が進められた^(注33)。それまで微生物の存在と活動が確認された最も深い場所は海底下1.9kmの堆積物環境であったが、この研究調査では海底下2.5kmの石炭層において活動的な微生物群集の存在が見つかり (図1-2-4)、海底下生命圏の最深限界が更新された^(注33)。さらに海底下1.5kmを超える環境では、微生物とその活性

注26

Morono Y., Terada T., Nishizawa M., et al.; "Carbon and nitrogen assimilation in deep seafloor microbial cells". Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol.108, No. 45, pp.18295-18300 (2011).

注27

環境から採取した試料に含まれる(微)生物を培養することなくそこに含まれるDNAを解析によって解析すること。

注28

1985年から運用されている米国の深海掘削船。

注29

掘削船で深海底を掘削し、地球の環境変動や内部構造、地殻内生命圏などの解明を目指す多国間科学研究協力プロジェクト。

注30

Kallmeyer J., Pockalny R., Adhikari R. R., et al.; "Global distribution of microbial abundance and biomass in seafloor sediment", Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol.109, No.40, pp.16213-16216 (2012).

注31

Jørgensen B. B. and Boetius A.; "Feast and famine - microbial life in the deep-sea bed", Nature Rev. Microbiol., Vol. 5, pp.770-781 (2007).

注32

Lipp, J. S., Morono Y., Inagaki F. et al.; "Significant contribution of Archaea to extant biomass in marine subsurface sediments", Nature, Vol.454, No.7207, pp. 991-994 (2008).

注33

Inagaki F., Hinrichs K.-U., Kubo Y., et al.; "Exploring deep microbial life in coal-bearing sediment down to ~2.5 km below the ocean floor", Science, Vol.349, No. 6246, pp.420-424 (2015).

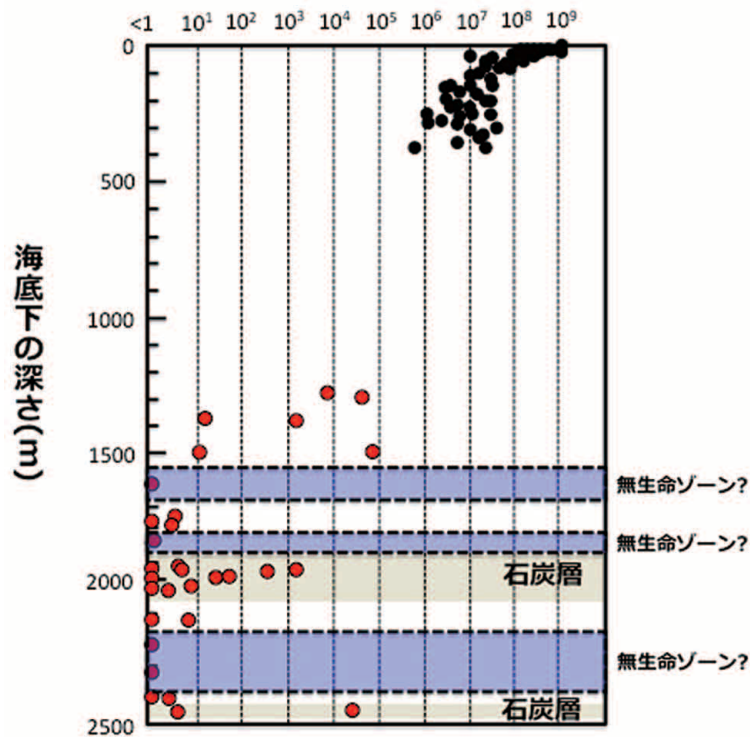


図1-2-4 顕微鏡で観察された1 cm³の堆積物当たりの微生物細胞数

2012年に行われた「ちきゅう」を用いたIODP337次航海で明らかとなった海底下約2.5kmの深さにまで広がる海底下微生物生態系の存在。海底下約2kmや約2.5kmの深さに存在する石炭層にも活動的な微生物やその活性が存在することが明らかになった。一方、海底下約1.5km以深に、微生物や活性が検出できない領域が存在することもわかった。この研究は世界で初めて、海底下における暗黒の生態系の限界領域を示した例となった。
(出典：2015年7月24日のJAMSTEC プレスリリースの図3Aより改編)

が存在する領域とまったく微生物や活性が検出できない領域が見つかった（図1-2-4）。同研究は世界で初めて、自然環境における海底下生命圏の深部限界を実証した例となった。

そのほか、2010年に行われた「ちきゅう」を用いたIODP第331次航海では、沖縄トラフの伊平屋北熱水域の科学掘削によって海底から海底下の熱水溜まりを貫通するような急激な温度勾配を有する試料が採取され、そこに生息すると予想された海底下生命圏の検証が進められた^(注34)。海底下15-20mに存在する熱水溜まりのキャップロック層^(注35)が極めて明瞭な海底下生命圏の限界を形成しており、約110°C以上の温度がその海底下生命圏の限界を制約する境界条件となっていることを明らかにした^(注34)。同研究は、自然環境における海底下生命圏の限界を実証した2例目、かつその境界条件を特定した初めての例となった。

さらに続くIODPの航海においても、それぞれ特徴的な海底下環境における生命圏の限界の実証とその境界条件の特定が進められている。最新の科学掘削技術を用いた新しい探査によって、これまで理論研究と室内実験によってのみ推定されてきた深海や海底下の生命圏の広がりや限界条件に対する実証研究が進み、今後、地球生命圏の拡張や限界条件の理解が大きく発展することが期待できる。

3 最新探査によって見えてきた新しい深海生命圏の世界 —超深海海溝生命圏の発見—

すでに述べたように、1990年代の後半から始まったROV「かいこう」等の深海

注34 Yanagawa K., Ijiri A., Breuker A., et al.; "Defining boundaries for the distribution of microbial communities beneath the sediment-buried, hydrothermally active seafloor", ISME J., Vol 11, No.2, pp.529-542 (2017).

注35 透水性が低く水やガスを通さない地層。

探査プラットフォームによる調査により、マリアナ海溝をはじめとする超深海海溝の海底環境での深海生命圏の理解が進んだ。しかし一方で、海底環境に比べ超深海海溝の水塊中の微生物群集についてはほとんど研究例がなかった。

2008年に行われたROV「アビスモ」を用いたマリアナ海溝チャレンジャー海淵の研究調査では、海面から海底に至る10,000mを超える水塊と堆積物における世界で初めての水塊-堆積物の連続的試料採取に成功し、その10,000mを超える深度方向に広がる微生物群集の遷移が調べられた^(注36)。その結果、マリアナ海溝の水塊中の微生物群集は有光層、深海層、超深海層でそれぞれ大きく異なることが明らかとなった^(注36)。光合成一次生産が卓越する有光層の微生物群集とその沈降有機物に依存する深海層の微生物群集が変化することはそれまでの研究の結果からすでによく知られる現象であるのに対し、水深6,000mを超える海溝内水塊で浮遊微生物群集の組成や機能が大きく変化することは同研究によって明らかにされた新発見であった(図1-2-6)。この研究は、マリアナ海溝の超深海水塊環境に特有の微生物群集、つまり超深海海溝生命圏が存在することを示すものであった^(注36)が、同様の調

注36

Nunoura T., Takaki Y., Hirai M., et al.; "Hadal biosphere: Insight into the microbial ecosystem in the deepest ocean on Earth", Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol.112, No.11, pp.E1230-E1236 (2015).

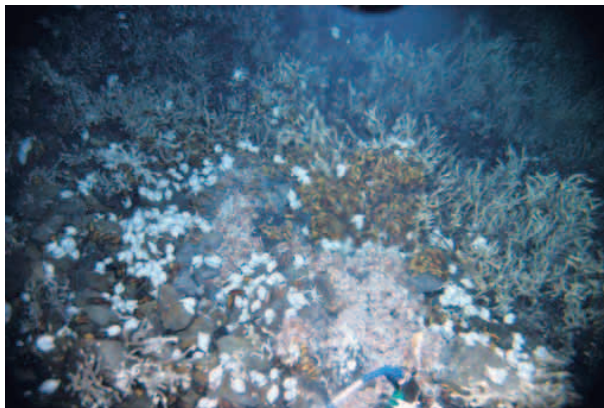


図1-2-5 中央インド洋海嶺のソリティアフィールドに見られる化学合成生物群集の風景

これらの化学合成生物は体内や体外に化学合成細菌を共生させることで暗黒のエネルギーを利用することができる。
(写真提供：海洋研究開発機構)

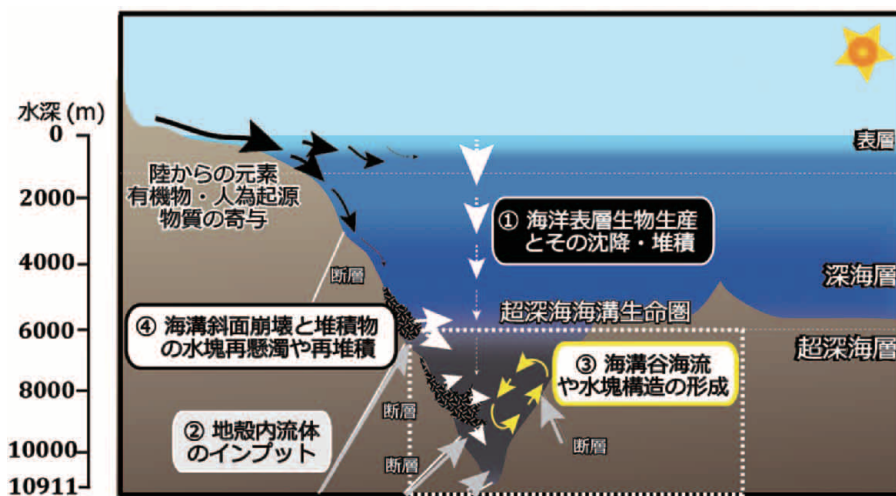


図1-2-6 超深海海溝の海溝谷の水塊中に見つかった超深海海溝生命圏の概念図

当初はマリアナ海溝の水塊中に発見されたが、同様の調査が他の海溝環境で行われた結果、規模や詳細は異なるものの同じような超深海海溝生命圏の存在が確認された。超深海海溝生命圏の形成には、海溝の陸側斜面に頻発する混濁流や斜面崩壊による堆積有機物の再懸濁、陸からの距離や海域の表層生産力、および海溝内海流の影響が重要な役割を果たしていると考えられている。

査が小笠原海溝や日本海溝で行われた結果、規模や詳細は異なるものの同じような微生物種が優占する超深海海溝生命圏が形成されていることも確認された。超深海水塊は海洋環境のなかでも最も調査が進んでいない研究対象であることから、今後、世界中に点在する海溝や断裂帯での超深海域における探査が進み、新しい暗黒の生態系である超深海生命圏の広がりや多様性についての理解が進むことが期待される。

4 最新探査によって見えてきた新しい深海生命圏の世界 —電気合成生態系の存在—

すでに述べたように、深海生命圏にはその生命活動のエネルギー・栄養源を光合成一次生産に依存している「光エネルギーの生態系」と地球内部活動に由来する化学物質の酸化還元反応による化学合成一次生産に依存している「暗黒エネルギーの生態系」が混在する。多様な深海や海底下の環境においては、その2つの生態系のバイオマスや活動の優占度も時空間的に変化する。しかしながら、全球的な時空間スケールで考えた場合、2つの生態系の存在量は、地球に及ぼす究極的なエネルギー源である太陽光の放射エネルギーと地球内部の熱エネルギーの量論で決定されることが予想できる。実際に、最新の定量観察データを用いて、全球的な時空間スケールにおける「光エネルギーの生態系」と「暗黒エネルギーの生態系」の存在量の推定が行われ^(注37)、その存在量は地球における太陽光放射エネルギーと地球内部熱エネルギーの量論と相関することが指摘されている^(注37)。さらに言えば、「暗黒エネルギーの生態系」を構成する多様な微生物構成、つまり「暗黒エネルギーの生態系」を構成するエネルギー代謝組成やその代謝に依存したバイオマス組成についても理論的に推定可能であることが示されている^(注38)。

2010年、深海熱水環境に広範囲に電流が発生する可能性が発見された^(注39)。還元的化学物質を豊富に含む熱水と酸化的化学物質に富んだ海水の間の化学非平衡状態は、実際の酸化還元化学反応に利用されるだけでなく、導電体としての金属硫化鉱物沈殿物に隔てられた熱水-海水間の酸化還元電位差を基にした電気発生に寄与していることが予見された^(注38)。その後、深海での現場電気化学センサーを用いた調査によって、実際の深海熱水環境での大規模な地球電流の発生、深海熱水発電現象、が実証された^(注40)。また時を同じくして、室内微生物培養実験の結果から、特殊な膜貫通型の分子機械を有する化学合成独立栄養微生物が、酸化還元反応を介した電子伝達ではなく、電極から直接電子をエネルギー源として受け取り利用することが可能であることが示された。これらの新しく発見された知見を体系的に捉え直すと、「地球最大の自然発電所」である深海熱水環境において、豊富に存在する電気エネルギーを利用

注37
Nakamura K. and Takai K.; "Subseafloor biosphere linked to hydrothermal systems", Springer, Tokyo, pp. 11-30 (2014a).

注38
Nakamura K. and Takai K.; "Theoretical constraints of physical and chemical properties of hydrothermal fluids on variations in chemolithotrophic microbial communities in seafloor hydrothermal systems", Proc. Earth Planet. Sci., Vol.1, p.5 (2014 b).

注39
Nakamura R., Takashima T., Kato S., et al.; "Electrical current generation across a black smoker chimney", Ange. Chem. Int. Ed., Vol.49, No.42, pp.7692-7694 (2010).

注40
Yamamoto M., Nakamura R., Kasaya T., et al.; "Spontaneous and widespread electricity generation in natural deep-sea hydrothermal fields", Ange. Chem. Int. Ed., Vol. 56, No. 21, pp.5725-5728 (2017).

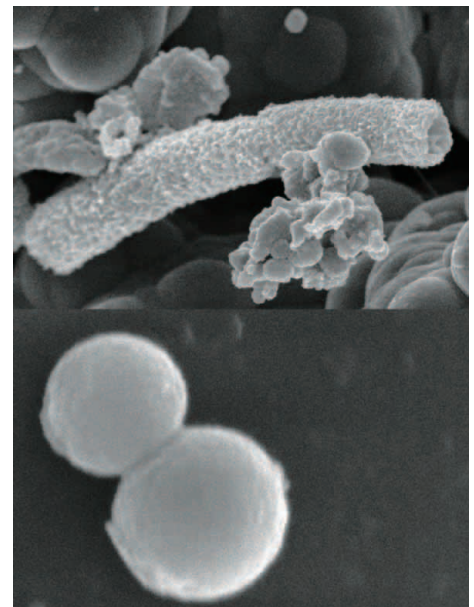


図1-2-7 微生物の電子顕微鏡写真

中央インド洋海嶺におけるかいらいフィールドの360℃の熱水中に存在する微生物の電子顕微鏡写真。上はメタノバイラス属、下はメタノコッカス属かサーモコッカス属の超好熱菌であろうと予想される。
(写真提供：海洋研究開発機構)

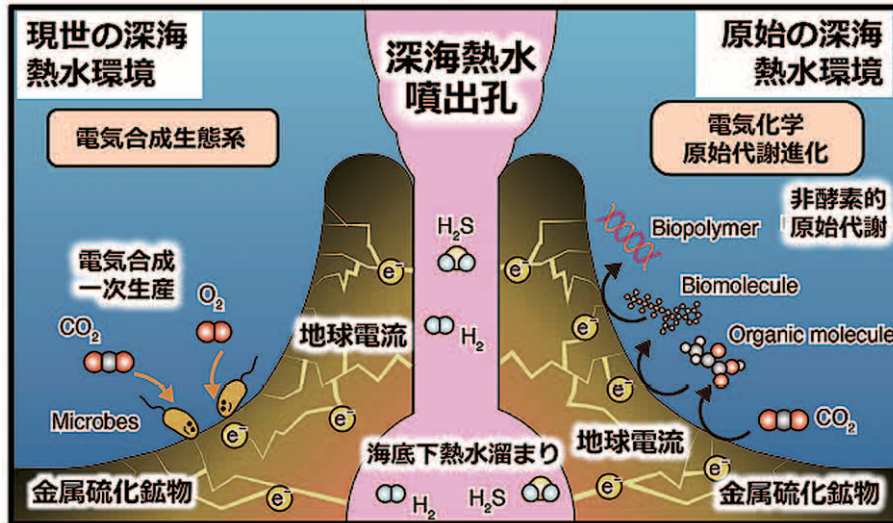


図1-2-8 現世の深海熱水環境における電気合成微生物生態系の存在と原始の深海熱水環境における前生物学的電気化学進化の可能性

深海熱水環境に存在する大きな時空間的広がりを有する地球電気は、生命の第三のエネルギー獲得システムである電気合成代謝に基づく「暗黒の生態系」を支えていることが強く予想されている。一方、生命が誕生する以前の地球環境で、原始の深海熱水環境は極めてありふれた無機・有機物の電気化学反応場を提供し、その連鎖的ネットワークが非酵素学的な原始代謝を成立させ、生命の誕生を準備した可能性が示されている。この原始深海熱水環境における電気化学原始代謝の誕生が生命の誕生を導くとする仮説は、「深海熱水電気化学メタボリズムファースト仮説」と呼ばれている。

(出典：Yamamoto M., Nakamura R. and Takai K. (2018) より改編)

した電気合成微生物生態系が存在している可能性が十分に予想された^(注41)(図1-2-8)。電気合成に依存した微生物生態系は、大局的には化学合成微生物生態系と同じく地球内部熱エネルギーを基とする「暗黒エネルギーの生態系」の一部として見なすことができるが、生命活動のエネルギー獲得システムとしては、光合成、化学合成に続く第三の新しいエネルギー利用形態である。その第三のエネルギー獲得システムに支えられた電気合成微生物生態系が自然環境において実在し重要な役割を果たしていることを証明することができれば、大きなパラダイムシフトとなることは間違いない。すでに深海現場電気化学培養や室内電気化学培養を用いた研究によって、その証拠は蓄積されており、近い将来、電気合成に依存した深海電気生命圏の実在が証明されることが期待できる(図1-2-8)。

さらに深海熱水環境における地球電流の発生現象は、自然環境中の新しい「暗黒エネルギーの生態系」である電気合成微生物生態系の存在を支えているだけでなく、地球における生命誕生において極めて重要な役割を果たした可能性がある^(注41)。太古の深海熱水環境における地球電流の発生は、生命の誕生の前駆的条件である最も原始的な代謝システム、つまり非酵素学的な電気化学有機高分子合成による代謝ネットワークの成立をもたらしたとする「深海熱水電気化学メタボリズムファースト」説の提唱に結びついている^(注41)(図1-2-8)。今後の研究の進展によって、最新の探査によって見えてきた新しい暗黒の生態系の理解が地球における生命誕生の謎を解き明かす重要な鍵に結びついた画期的な例となることが期待できる。

(高井 研)

注41

Yamamoto M., Nakamura R. and Takai K.; "Deep-sea hydrothermal fields as natural power plants", ChemElectroChem, Vol.5, No.16, pp.2162-2166 (2018).

コラム 01 環境 DNA が描き出す海洋生態系の顔ぶれ

環境中に漂う DNA を調べて、そこにすむ生き物を探る「環境 DNA 分析」が普及しつつある。従来の調査には時間と費用と体力が求められ、種の同定には高度な知識も不可欠だった。時には希少な動物の生命を利用する必要もあった。さらに、濁った湖沼で素早く隠れる小さな動物は見つからないなど、採集能力にも限界があった。一方の環境 DNA 分析は、生き物が環境に残してくれた手がかり（新陳代謝に伴いはがれた体の一部や粘液などに含まれる DNA）を読み解くことで、これまでにないスピードと網羅性で、生態系の構成員を種名まで言い当てることができる。

環境 DNA 分析が脊椎動物でも有効と示したのは 2008 年のフランスのウシガエルに関する研究が最初だ。日本では 2011 年に源利文氏（神戸大学准教授）が、水槽の水から淡水魚の DNA を検出した。2015 年には、近藤倫生氏（東北大学大学院生命科学研究科教授）と宮正樹氏（千葉県立中央博物館生態・環境研究部長）の研究チームが、海水魚を対象とする「MiFish 法（魚類環境 DNA メタバーコーディング）」を開発した。これは、2011～2018 年度の（国研）科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業（CREST）に採択された「海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する基盤技術の創出」プロジェクトの優れた成果である。MiFish 法は、メタバーコーディング（多種同時並列分析法）と呼ぶとおり、魚種ごとに異なる DNA の塩基配列をバーコードのように複数登録しておく。そして、それと照合することによって、バケツ 1 杯の水で、多くの種の生息場所や現存量、遺伝的多様性などを一度に推定できる。



環境 DNA は、多少荒れた海でも採取可能。採水後、フィルターを付けた注射器で、DNA を含む有機物をこし取る。写真は、京都大学舞鶴水産実験所の調査船緑洋丸での環境 DNA 採取（2016 年 6 月、益田玲爾氏撮影）

益田玲爾氏（京都大学フィールド科学教育研究センター准教授）は、なじみの舞鶴湾で MiFish 法の威力

を実感したという。たった 1 回の採水と分析で、16 年以上かけて月に 2 度も潜水して記録してきた魚種のほとんどを当てられてしまったからだ。分析結果は、舞鶴港で水揚げされる魚種までカバーしており、DNA 量が多かったカタクチイワシとマアジは、目視でも多かった上位 2 魚種と一致していた。

宮氏ら 114 人の協力者は 2017 年の夏、全国 528 地点で一斉に MiFish 法による調査を実施して、日本の沿岸魚類約 2,800 種のうち 1,200 種以上の検出に成功し、地球温暖化の影響と思われるブリの北上（空間変動）なども明らかにした。その後の調査では、冬を越せない死滅回遊魚がいる夏に、検出される種数が増える現象（季節変動）も確認できたという。

蓄積していく多様性のビッグデータ

環境 DNA は、海水中では放出後 1 日で 7～9 割が分解される。その濃度は放出源からの距離や、放出されてからの時間に左右され、最近いたということは検出できても、個体の大小や多少については推測できない。死んだ個体や産卵・放精があると多量の DNA が検出されることもわかっている。分析の過程で細心の注意を払わないとコンタミネーション（サンプルの汚染や劣化）が起こることも課題だ。また、プライマーという DNA の断片を呼び水として、ごく微量の DNA を増幅させてから分析する手法なので、既知の生物種で、なおかつ事前にプライマーが用意できていることが条件となる。つまり、回答集がなければ、答え合わせができない。これらは環境 DNA 分析の弱点だが、省コストで迅速な、画期的手法であることは確かである。

日本産の魚類（淡水・海水）については、約 4,300 種のうち現在 2,800 種ほどの DNA データベースが構築されている。また、いまや環境 DNA メタバーコーディングは、甲殻類や鳥類などにも応用されている。千葉県の館山の海岸で「あまりカニはいないだろう」と思いつつ採水して分析した宮氏は、40 種以上のカニが検出されて驚いたという。

国際的な研究の広がりを受けて、日本の科学者らは 2018 年 4 月 27 日、環境 DNA 技術を活用した自然調和型社会を目指す「（一社）環境 DNA 学会」を立ち上げた。今後、生物多様性をビッグデータとして管理することで、世界中の未知の生態系の謎解きが大きく前進することが期待される。

（本文中の所属・役職は 2019 年 3 月現在のもの）

（瀬戸内 千代）

2 極地のサイエンス

1 北極海／北極域の環境変化と、北極海の観測研究

米国大気海洋庁（NOAA）が毎年12月に発表する「Arctic Report Card^(注42)」によると、2018年の北極域の気温は1900年以降2番目の高温年（1981年～2010年の平均に対して+1.7℃、過去最高は2017年）であり、2014年から2018年までの5年平均でも過去最高の気温であったことが示されている。この北極域の気温上昇は全球平均の2倍以上の大きさであり、北極温暖化増幅として知られている。これと密接に関係するかたちで、北極海の海水氷が1990年代以降急速な減少を続けており、今世紀中ごろには夏季に海水氷がない海域になることが示唆されている。海水氷の減少に伴って、北極海は海自体が温暖化して淡水化や酸性化が進み、海水氷や海洋の流れが活発化するなど、物理・化学的に変化を起している。さらにこのような環境変化は海洋生態系にも影響を及ぼし、海洋酸性化^(注43)が地球上のどの海域よりも早く進行していること、海水氷とともに生きる生物種が絶滅の危機に瀕していること、大西洋や太平洋に生息している生物が北極海に進出しはじめてきていることなどが、観測からも明らかになってきた。

海洋のみならず、グリーンランド氷床や高緯度陸域氷河、永久凍土、陸域生態系などにおいても北極の温暖化は重要なインパクトを及ぼしている。特にグリーンランド氷床の融解は、海水面の上昇に大きな影響を与えている。全球規模で進行している海面上昇の3分の1が北極域の氷が融解した影響によるものであり、その半分がグリーンランド氷床の融解によるとされている。しかしながら、氷床の融解についてはいまだにわからないことが多く、その影響は過小評価されているのではないかと危惧されている。北極域の変化が気象・気候に与える影響はとて大きく、北極海の海水氷減少と日本を含めて中緯度域への寒波の到来（豪雪など）についても広く認知されることとなってきた。もはや北極域の自然環境変化は、北極域にとどまらない話と考えるべきである。

さらにこのような北極域の環境変化は、自然科学のみにとどまらず、社会に対しても大きな影響を与えている。海水氷減少に伴って利用可能となった北極航路については、2010年前後から実利用が始まっている。社会情勢の影響を強く受ける側面もあるが、北極航路の利用が経済性のみならず温暖化抑止策の側面を持つ^(注44)ことが

注42 Osborne, E., J. Richter-Menge, and M. Jeffries, Eds., 2018: Arctic Report Card 2018, <http://www.arctic.noaa.gov/Report-Card>.

注43 大気中の二酸化炭素（CO₂）が増加することで、海水中に溶け込むCO₂の量が増えている。これに伴って海水中のpHが低下し酸性に近づくことを、海洋酸性化という。海洋酸性化は同時に海水中の炭酸カルシウムの飽和度を低下させ、炭酸カルシウムの殻をもつ生物に悪い影響を及ぼすことが示唆されている。

注44 距離・時間を短縮することができる北極航路を利用することで、消費する燃料を少なくすることができる。これにより温暖化抑止の効果があるとされている。

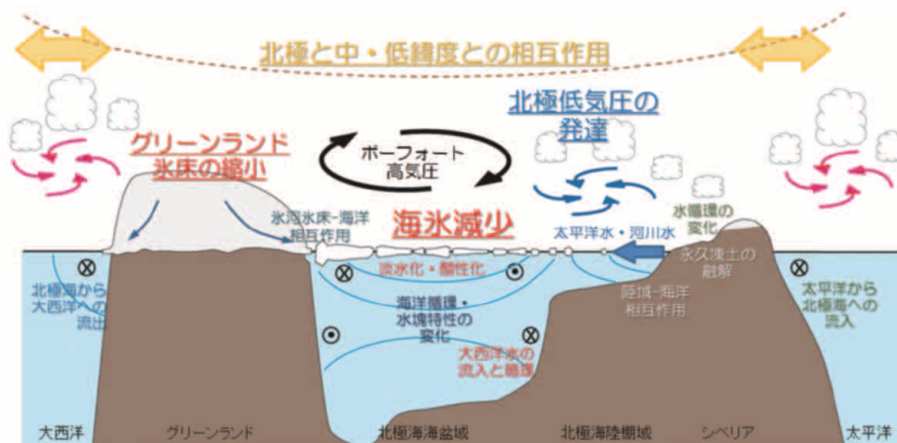


図1-2-9 北極海を中心とする北極環境変動に関する模式図

ら発展を続けており、今後さらなる利用が見込まれる。また北極海やその沿岸域にある資源の開発に対して、北極海沿岸国のみならずそれ以外の多くの国も興味を持っており、ロシアのヤマル・プロジェクトなどすでに運用が始まっているものもある。観光分野においては、北極航路を通る観光クルーズ船が運航を始めており、注目を集めている。一方で、海氷や永久凍土の融解は、そこで生活を営む先住民族に対して深刻な影響を及ぼし始めている。地盤の崩壊、高潮・波浪や沿岸侵食が進んだために、これまで生活をしてきた沿岸の街を移動せざるを得なくなってきたところもある。また北極航路の利用が増えることによる海上交通の増加も、海洋生態系や先住民族の生活への影響が懸念されている。もはや北極海／北極域で進行している環境変化は、その社会への影響を深刻に考える必要があるレベルに達してきたと言える。

北極評議会^(注45)の作業部会のひとつである北極圏監視評価プログラム作業部会(AMAP^(注46))では、2017年4月にSWIPA^(注47)2017という雪・氷に関する環境評価報告書^(注48)を公表した。そのなかで6つの鍵となる発見として、現在進行している北極域の変化について、以下のようにまとめている。

- ① 北極の気候は、すでに新しい状態に移っている
- ② 北極の気候変化は極めて速く進行している
- ③ 変化は少なくとも今世紀中ごろまでは続く
- ④ 温室効果ガス排出の本質的な削減が今世紀中ごろ以降の影響を安定化できる
- ⑤ 適合策が脆弱性を低減することができる
- ⑥ 効果的な緩和・適合策には、北極の気候変化に関して精通する必要がある

これらを踏まえて、将来に向けて、①これから起きる変化を制限するための施策をとるべき、②予測の確実性を高めることにつなげる研究や知的創造を優先すべき、③北極の気候変化とそこから引き起こされる結果を監視・評価・理解する努力を続けるべき、④北極気候変化の観測・予測・そして一般社会への報告と教育を優先すべきであるとの“実施すべき方向性(Recommendation steps)”を北極評議会の参加国、常時団体、そしてオブザーバーに対して示した。

SWIPA 2017に示されているとおり、急速に進行している北極海／北極域の環境変化の実態を把握して影響を明らかにし、将来予測の確実性を高めるような研究活動を行い、その成果を広く社会に発信する必要がある。日本では、文部科学省のもと、国立極地研究所を代表機関、(国研)海洋研究開発機構(JAMSTEC)と北海道大学を副代表機関として、北極域研究推進プロジェクト(ArCS^(注49))を2015年度から進めている。ArCSでは、急変する北極域の気候変動の解明と環境変化、社会への影響を明らかにし、精度の高い将来予測や環境影響評価等を行うことを目的とすることに加え、このような北極に関する包括的な研究から科学的な知見を統合し、内外のステークホルダーに有効かつ重要な情報を提供することも目指している。これまでも北極評議会の作業部会や専門家グループに参加し報告書作成に加わったり、一般向けの講演会を積極的に行い北極問題に関する社会・世間の理解促進に努めたりするなど、科学調査のみならず社会への発信にも力をいれている。

ArCSにおける研究活動のなかで、「北極海」の環境変化とその影響の解明に関する調査・研究については、JAMSTECが所有する海洋地球研究船「みらい」と北海道大学練習船「おしよる丸」を中心として、観測をベースとした研究を進めている。

海洋地球研究船「みらい」の前身は原子力船「むつ」である。原子炉を撤去した

注45 「北極圏に係る共通の課題(持続可能な開発、環境保護等)に関し、先住民社会等の関与を得つつ、北極圏諸国間の協力・調和・交流を促進すること」を目的としたハイレベルの政府間協議体。北極国8か国と先住民団体6団体で構成されている。日本は2013年5月の会合において、オブザーバー国として参加が認められた。

注46 Arctic Monitoring and Assessment Programme, <https://www.amap.no>

注47 Snow, water, ice, and permafrost in the Arctic

注48 AMAP, 2017. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. xiv+269pp および AMAP, 2017. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017. Summary for Policy Maker (SPM). Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. xiv+20pp

注49 Arctic Challenge for Sustainability

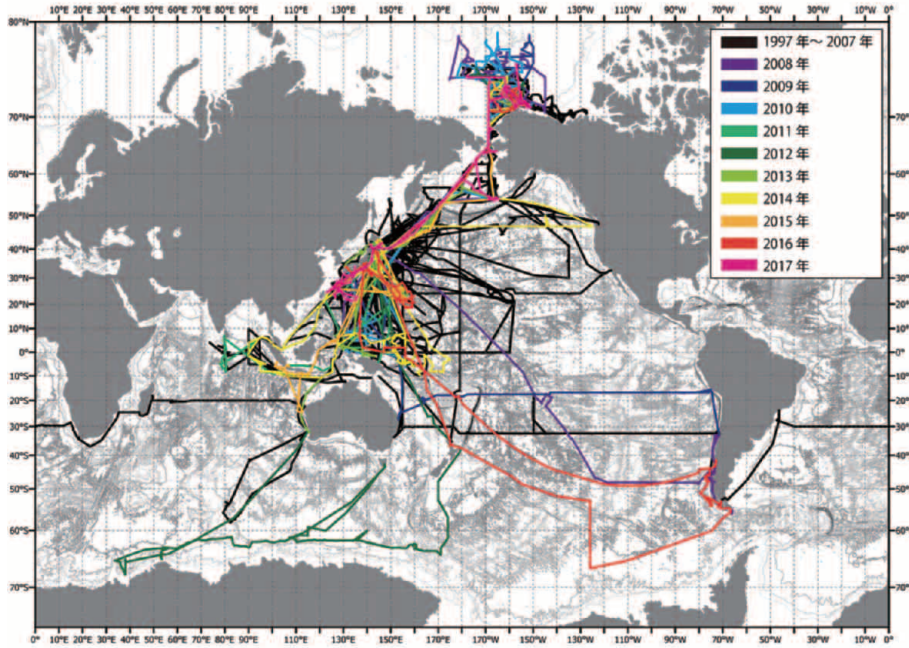


図1-2-10 海洋地球研究船「みらい」が1997～2017年の間に実施した観測航海の航跡図
北極海では、2018年までに16回の航海を行い、貴重な観測データと新たな知見を得て公表してきた。



図1-2-11 海洋地球研究船「みらい」北極航海の様子
ラジオゾンデによる測定 (右上)、セジメントトラップの回収 (右中)、CTD採水 (右下)

のち通常ディーゼル機関を搭載するなどの改造を行い、最新の海洋・気象・地球観測のための装置を装備して海洋地球研究船「みらい」として生まれ変わり、1997年から観測航海を始めた。優れた耐久性・耐氷性能と航行性を有し、広域かつ長期にわたる観測研究が可能となり、これまでに太平洋だけでなく、南大洋、インド洋、そして北極海でも観測を行ってきた。特に2003年8月から2004年2月にかけては南半球一周航海を実施、詳細な海洋観測を行い、南大洋と太平洋・インド洋・大西洋との間の海水・熱・物質輸送に関する貴重なデータ・知見^(注50)を得ることができた。

北極海に関しては、海洋地球研究船「みらい」は、1998年から2018年までの21年間に16回の観測航海を実施している。砕氷船ではないために海氷域の中に入ることができないが、海氷融解の影響が顕著に現れてきた太平洋側北極海において、海水

注50
Katsumata and Fukasawa,
Prog. Oceanogr., 2011など。

注51

ある固定点での海中の水温・塩分・海流などの情報を時系列で得るための観測システム。海底の重りから観測機器を取り付けたケーブルやワイヤーを立ち上げ、浮きをつけて張ることで、その地点の時系列観測を行う。回収の際には、装置に信号を送り重りから切り離すことで、観測装置などを浮上させて船上に回収する。北極海の場合は、海水が少なくなる夏から秋にかけて設置・回収作業を行うことで、通年の観測データを取得できる。

注52

北極海に広がる深海盆のうち、北緯70~85度・西経120~180度のアラスカ・カナダ側に広がる海盆。3000~4000mの深さがある。

注53

Yamamoto-Kawai et al. Science, 2009.

が融解することでどのような影響が起きるかに関する調査・研究を進めてきた。またこれらの航海では、船舶では行くことができない期間のデータを取得し海水の消長に伴う通年の変化を明らかにするために、中層係留系^(注51)の設置・回収も行っている。得られた貴重なデータを公開するとともに、これらを解析することで多くの成果を出してきた。たとえば、海水減少に伴って、特に太平洋側北極海においては、海洋の温暖化・淡水化が進行するとともに、海の流れや渦活動が活発化している。このような海洋循環の変化は、熱・淡水・生物活動の栄養源となる物質などの輸送にも影響を与えている。さらに、海水に覆われていたところは起きなかった波浪や高潮が北極海沿岸域において重要な問題にもなっている。

北極海で進行しているさまざまな環境変化のなかで、最も大きな問題となっているもののひとつが海洋酸性化である。「みらい」を含む国際連携による北極海観測の結果から、太平洋側北極海のカナダ海盆域^(注52)は海洋酸性化が世界のどの海域よりも最も早く進行していることが明らかになった。これは大気中の二酸化炭素(CO₂)濃度が増加し海水融解に伴って北極海の海中に取り込まれるCO₂の量が増えるといった通常の海洋酸性化のプロセスに加えて、海水融解や河川水など淡水流入の増加による希釈効果(炭酸カルシウム濃度を低下させる効果)が加わったために起きたものである^(注53)。そしてその影響はすでに海洋生態系に及んでいると考えられている。たとえば、室内実験の結果から海洋酸性化が進む海では生物の骨格が脆弱になるなどの報告がなされている。実際の海域で生息する生物に対してどのような影響が及んでいるのかについても日本を含めて各国の調査が続けられている。特に日本では、海水融解の影響が顕著に見られ、海洋酸性化の影響が懸念される太平洋側北極海(カナダ海盆西部)において最新のモニタリングを2010年から継続的に

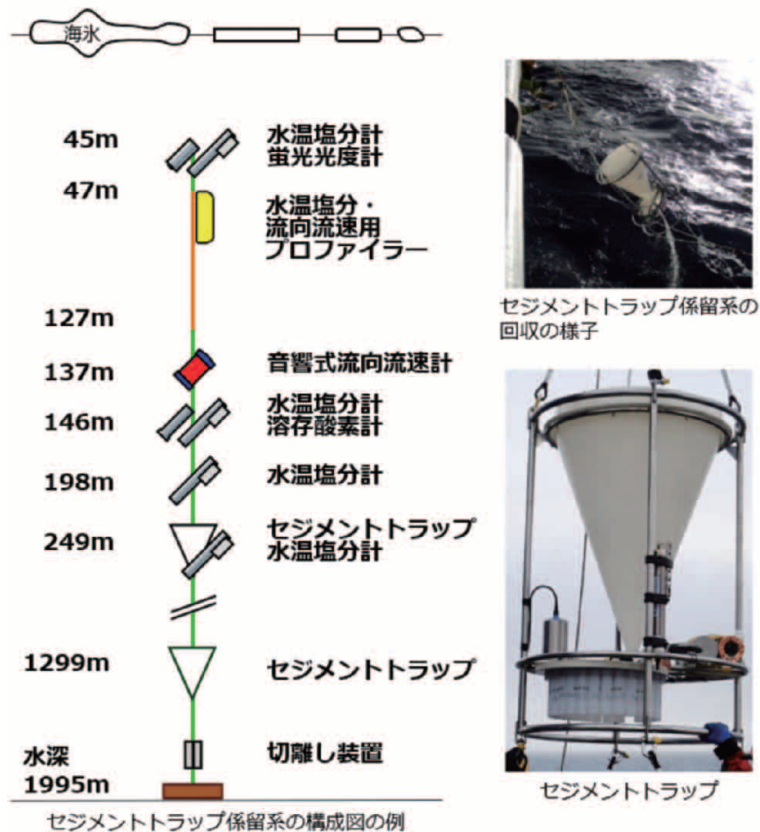


図1-2-12 海洋中の沈降粒子サンプルを取得できるセジメントトラップ係留系

行っており、プランクトンを含む海洋中の沈降粒子のサンプル取得を行ってきた(図1-2-13)。同時に得られた海氷・海洋環境に関するデータと合わせて分析することで、進行している海洋酸性化の影響が明らかになることが期待される。2018年10月にはAMAPにおいて、北極域の海洋酸性化について現時点での知見がとりまとめられ、評価報告書^(注54)として発表された。進行が進む海洋酸性化とその影響が明らかになっていくなかで、地球温暖化への対策と同じように、海洋酸性化の抑止策として、人為起源二酸化炭素の排出削減策が必要であるなどのコメントが示されている。

海洋地球研究船「みらい」などを用いるかたちで、これまで北極海に関する日本の船舶を用いた観測研究活動は、海氷がなくなることで起きる現象やその影響を中心として行われ、さまざまな知見を発表してきた。一方海氷に覆われた海域では、国際連携による砕氷船航海に参加して観測を行う、もしくは海氷設置型漂流ブイを用いた自動観測を行うなどのかたちでデータを取得し、成果を公表していた。たとえば海氷域での観測としては、JAMSTECが1990年代から継続的に実施している漂流ブイを用いた観測があり、特に海氷と海洋間の熱輸送と海氷融解との関連などについての成果が発表されている^(注55)。

北極海の水氷減少やこれに伴う環境変化は、これまでに行われてきた将来予測の結果を上回るペースで進行している。数十年後の北極海の環境は、夏季に海氷がない海となり、いまとは明らかに異なる新たな状態になることが考えられている。しかしながら、その時期や規模、詳細な状態について、必要とされる十分な知見は得られていない。より精度の高い将来予測を行うためには、いまだに科学的知見とのギャップとなっているいくつかの重要な過程を明らかにしなければならない。たとえば、海氷の厚さの分布や、海氷-海洋間の相互作用については、十分なデータ・知見が得られていない。これらの知見の欠如が、海氷予測モデル、そして気候モデルの高度化・高精度化を妨げていると言える。これらを明らかにするための観測システムの開発が必要とされている。

自律型探査機(AUV^(注56))は海氷下での観測を行うことができる手法のひとつである。JAMSTECでは、海氷下の観測を行うことができる小型で軽量ないわゆる「海

注54

AMAP, 2018. AMAP Assessment 2018: Arctic Ocean Acidification. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway. vi+187pp

注55

Kikuchi et al., Deep-Sea Res., 2007. や Kawaguchi et al., Polar Sci., 2012. など。

注56

Autonomous Underwater Vehicle 本節 4 参照。

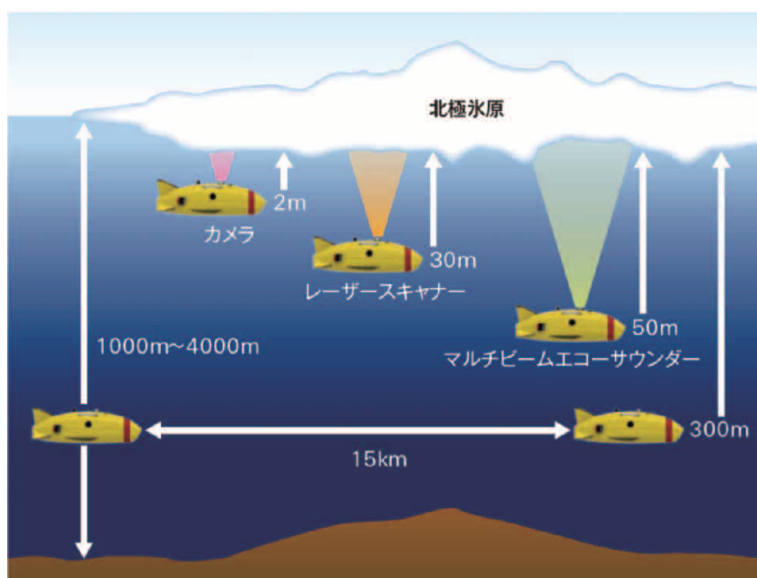


図1-2-13 複数の海中観測ドローンを用いた海水下の複合観測の模式図^(注57)

注57

海と地球の情報誌『Blue Earth』158号 特集「北極の海氷減少がもたらすもの」: 『海中観測ドローンで、北極の海水下を観測する』を参照。

中観測ドローン」の開発と、それに必要とされる基礎研究を進めている。たとえば、海中観測ドローンを海氷下で運用するためには、その正確な位置を導き出す必要がある。これを可能とするための航法装置や、海氷があっても位置確認できる電磁モデムシステムの開発が進められている。これらの開発を進めることで、近い将来に海中観測ドローンによる海氷下の観測を可能とし、将来的には複数機の海中観測ドローンを用いた複合的な観測を氷縁域から海氷下において行うことを目指す（図1-2-13）。

国際的な北極への関心の高まりとともに、さまざまなかたちで国際会議が行われ、北極に関する研究活動そして社会とのつながりについて議論されている。2018年10月19～20日に行われた北極サークルは、アイスランドがホストを務め2013年から開催している国際会議である。日本からは2014年以降、北極担当大使による講演やArCSによるセッション開催・発表を行い、プレゼンスを示してきた。2018年の北極サークルでは、オープニングセッションにおいて、初めて河野太郎外務大臣によるわが国の北極政策に関する基調講演が行われた^(注58)。また2018年10月25日～26日にベルリンで行われた第2回北極科学大臣会合には、柴山昌彦文部科学大臣が出席し、日本の北極に対する活動の紹介を行うとともに、第3回会合を2020年にアイスランドと共同ホストのかたちで日本において開催することを提案し、承認された^(注59)。1990年代以降継続的に行われてきた日本の北極研究への期待は大きく、今後もさまざまなかたちでプレゼンスを示していく必要があると考えられている。

2 南大洋に関する観測研究

極域海洋という意味では、北極海とともに南大洋があげられる。どちらも英語名で Ocean を使う大洋であり海氷が存在する海であるが、北極沿岸5か国に囲まれた地中海である北極海（Arctic Ocean）に対して、南大洋（Southern Ocean）は南極大陸を取り囲むかたちで環状に広がった海であり、太平洋・大西洋・インド洋とも広くつながっている。南極大陸沿岸は、グリーンランド海とともに、海洋熱塩大循環^(注60)の駆動力となる深層水の形成域となっており、そこでの海洋構造の変化、ポリニヤ^(注61)の成因と役割、南極氷床との相互作用、生態系への影響などが現在注

注58
外務省プレスリリース
https://www.mofa.go.jp/mo_faj/fp/msp/page1_000678.html
北極サークルのホームページにて、河野外務大臣の講演の動画を見ることができる。
<http://www.arcticcircle.org/assemblies/2018>
以下のサイトでも公開されている。
<https://vimeo.com/295994012>

注59
文部科学省プレスリリース
http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/kaiyou/houdou/1410697.htm

注60
熱塩循環は、おもに中深層で起こる地球規模の海洋循環を指す。深層大循環とも呼ばれる。

注61
広く海氷が存在する中、もしくは沿岸域などにできる開水面（疎水域）のこと。その成因から、海洋下層にあった暖かい海水が湧昇し海水生成が抑制されることで生じるもの（潜熱ポリニヤ）と、強い沖向きの風によって海水が発散することで生じるもの（顕熱ポリニヤもしくは沿岸ポリニヤ）に分けられる。

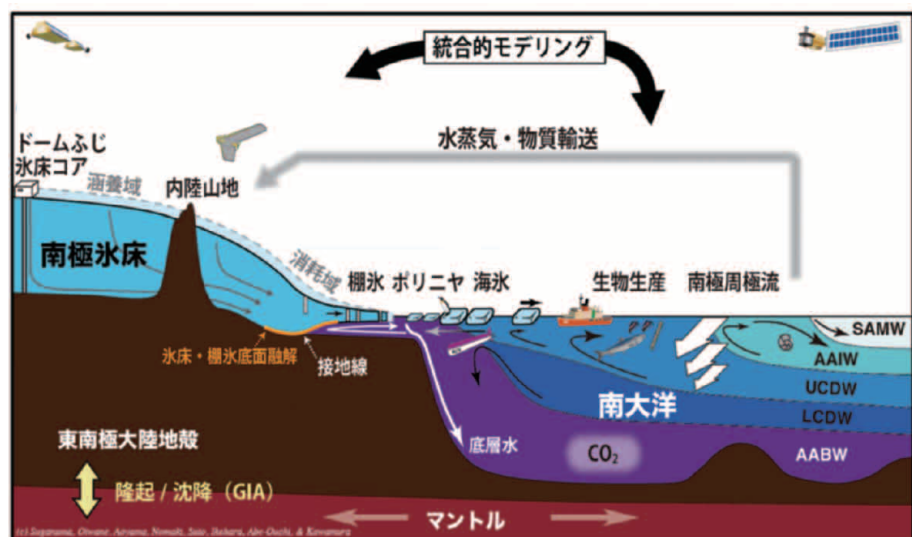


図1-2-14 南大洋・南極氷床と全球環境とのつながりを表した模式図

(出典：新学術領域研究「熱—水—物質の巨大リザーバ 全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床 (GRAntarctic)」より)

目される研究テーマとなっている。

これらの研究テーマに関して、日本では、2017年度から「文部科学省 科学研究費助成事業 新学術領域研究『熱—水—物質の巨大リザーバ 全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床 (GRAntarctic : Giant Reservoirs-Antarctic)』^(注62)」が始まった。日本がこれまで研究を進めてきた東南極の海と氷をターゲットとして、海洋循環や生態系、温室効果ガス、氷床、地殻などの状態とそれらの相互作用、過去から将来までの変遷について、観測とモデルと融合させることで明らかにするとともに、南大洋および南極氷床が地球の環境変動に及ぼす影響やそのメカニズムの解明に迫ることを目的としている。本プロジェクトでは、南極観測事業において運用されている砕氷船「しらせ」のみならず、東京大学/JAMSTECの「白鳳丸」や東京海洋大学の「海鷹丸」、水産庁の「開陽丸」などを用いた海洋観測研究が進められており、今後貴重なデータと研究の成果が広く発信されることが期待されている。

(菊地 隆)

注62
研究代表者：川村賢二（国立極地研）GRAntarcticに関する詳細は、以下のサイトを参照（<http://grantarctic.jp/index.html>）。

3 海洋と宇宙の連携

広大な海洋に対して、宇宙という離れた領域からのサービスはさまざまな恩恵をもたらしている。宇宙からは現在、衛星通信、位置情報の提供（GPS等）、リモートセンシング観測等のサービスが提供されている。

2017年12月23日、気候変動観測衛星「しきさい」(GCOM-C)が打ち上げられ、この打ち上げより前にも、センサーの能力を大幅に強化した気象衛星ひまわりや気候変動観測衛星「しずく」(GCOM-W)などがすでに宇宙から観測データを送り続けていることで、さまざまな波長帯、観測領域の衛星を保有することとなり、日本の衛星による海洋情報収集も新しい時代に突入した。

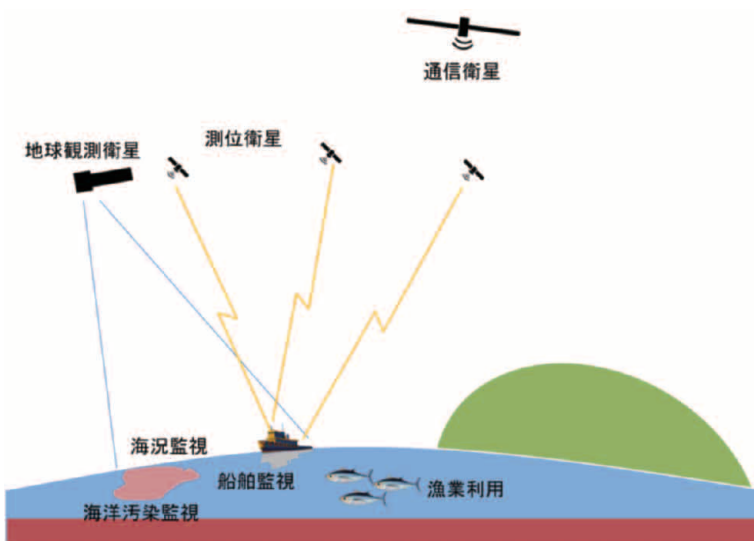


図1-2-15 海洋に関する宇宙の利用

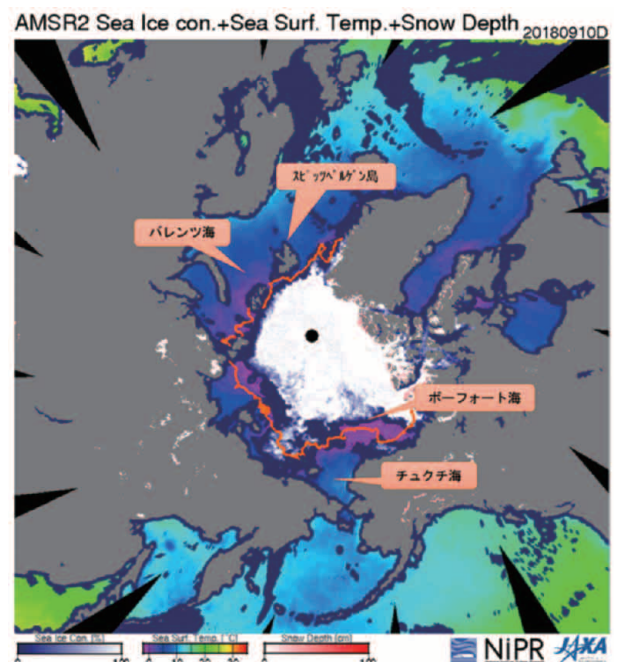


図1-2-16 しずく搭載のAMSR2による極域の海水温および海氷観測の画像

(出典：JAXA ホームページ)

また、近年は広大な洋上の船舶動静情報の収集を宇宙から行うことで、従来とは異なる俯瞰的な状況把握能力を提供している。

衛星通信においても、海外ベンチャーによる小型衛星を活用した高速通信サービスの検討が行われ、こうしたベンチャーへの投資も加速されている。

位置情報の提供サービスにおいても従来のGPS衛星だけでなく、日本の準天頂衛星「みちびき」による高精度な位置情報の提供があり、今後の利用拡大が期待されている。

こうした背景からも、2018年5月に策定された第3期海洋基本計画において、海洋と宇宙の連携およびSociety5.0^(注63)の実現に向けた研究開発、海洋状況把握(MDA^(注64))の能力強化、大容量の海洋データの送信を行うための衛星を活用した高速通信技術にかかる研究開発等、多数の宇宙技術に関する記述がされている。これらを踏まえ、本項では、環境モニタリングから船舶監視まで、宇宙からの海洋ガバナンスの貢献について展望する。

1 宇宙との連携の現状

前述のように、宇宙から実現される機能のうち、特に海洋と関わりの深いものとして、衛星通信・放送、位置情報の提供、リモートセンシングによる広域観測の実施がある。

衛星通信の発達には、船舶におけるIoTによる船舶搭載機械の状態(故障の兆候等)の遠隔監視を実現し、船舶健全性の常時監視体制の確立や、ブロードバンド通信などの高速インターネット回線による画像送信など、船上と陸上のコミュニケーションの多様化にも役立てられる。

通信衛星には、インマルサット社(英国)をはじめとして従来からの静止衛星による通信のほかに、近年ではOneweb社(米国)による大量の小型衛星による通信ネットワーク構築の構想など、小型衛星の低軌道衛星を活用した広帯域ネットワークが検討されている。このネットワークでは、静止軌道とは異なり、遅延が少なく広帯域の通信に向いており、北極等の高緯度地域で地上の仰角が低くなることはない。

次に、位置情報の提供では、米国のGPS衛星が先駆けて構築されたが、近年は欧州、ロシア、中国など各国でも測位衛星が打ち上げられ、従来の米国GPS衛星、ロシアのGLONASS衛星によるもの以外に、主要各国でも独自のサービスを提供している。日本においても、2018年に準天頂衛星「みちびき」4基が軌道上で運用されるようになり、日本およびその周辺において高精度な測位情報の提供が可能となった。このほか、中国では「北斗:Beidou」、欧州では「Galileo」、インドでは「NAVIC」といった衛星群が順次衛星の数を増やしながら運用を始めている。

とりわけ、「みちびき」衛星は、従来のGPS衛星より高精度な位置情報を提供でき、次世代船舶として自動航行などへの応用も期待され、近年世界的に関心が高まっている。

最後にリモートセンシングなどの観測では、対象やセンサ・手法の多様化が進み、従来からの可視光線や赤外線のほか、衛星搭載の海面高度計による全球の表層海流を定期的な観測やマイクロ波放射計を用いた海面水温や海流、海氷、海上風、海面の塩分等のグローバルかつ定期的な物理量の観測を行っている。


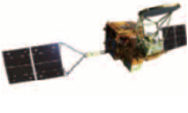


「だいち」衛星に搭載されている合成開口レーダ(SAR^(注65))はマイクロ波の後方

注63
サイバー(仮想)空間とセンシングなどの現実空間を融合したシステムにより経済発展と社会課題の解決を目指す人間中心の社会。

注64
Maritime Domain Awareness 第4章第3節参照

注65
Synthetic Aperture Radar

表1-2-1 海洋観測に係る日本のおもなリモートセンシング衛星

日本名 (英名)	だいち2号 (ALOS-2)	しずく (GCOM-W)	しきさい (GCOM-C)	ひまわり8号、9号 (Himawari-8/9)
	 (C) JAXA	 (C) JAXA	 (C) JAXA	 (C) JMA
センサ	合成開口レーダ (SAR)	マイクロ波放射計 (AMSR2)	多波長光学放射計 (SGLI ^{注66})	可視赤外放射計 (AHI ^{注67})
概要※	極軌道衛星	極軌道衛星、	極軌道衛星	静止衛星、
主な利用分野	高分解能画像、船舶監視、海象 (波浪等)	海面水温 (広域、全球)、海水	海面水温、赤潮、漁場把握	海面水温 (広域高頻度)、気象

※極軌道衛星が高度800~1,000kmの低軌道であるのに対して、静止衛星の高度は36,000kmと高軌道なので1基でより広範囲をカバーできる。

散乱を利用したセンサーで、光学系のセンサーと異なり、雲による影響をほとんど受けないことから、全天候の観測が可能である。こうした理由で、海洋においては、後述のAIS情報など他の情報と組み合わせて船舶の動静把握にも活用されている。現在、日本のALOSのほか、カナダのRADARSAT、イタリアのCOSMOSKY-Med、ドイツのTERRASARなど、さまざまな国でSAR衛星が運用されている。

「しずく」衛星に搭載されているマイクロ波放射計AMSR2は「みどり2号」衛星(ADEOS-2)および、米国Aqua衛星に搭載されたAMSR、AMSR-Eの観測結果を引き継ぎ、海面の水温、氷の分布、海上風の推定等を行っており、グローバルかつ継続的な観測を実現している。また、米国SMOS衛星では海洋塩分の観測も行っている。こうしたマイクロ波放射計のデータは分解能は高くないが、ほぼ全天候でデータを得ることができるため、エルニーニョ現象などの気候変動状況の把握などに役立てられている。

「しきさい」衛星に搭載されている多波長光学放射計(SGLI^{注68})は、可視光線

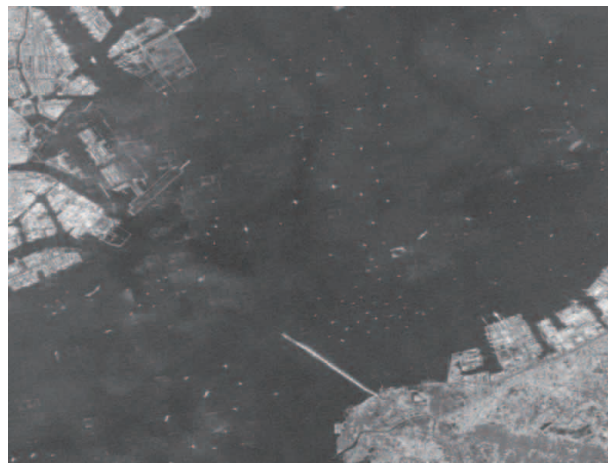


図1-2-17 ALOS2(だいち2号)による東京湾における船舶のレーダー撮像例

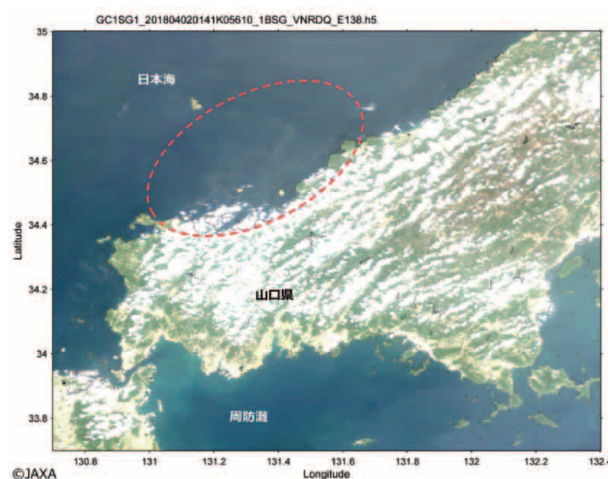


図1-2-18 「しきさい」搭載SGLIによる赤潮の画像(赤い破線部分)
(出典: JAXA ホームページ)

注66
Second generation Global Imager

注67
Advanced Himawari Imager

注68
Second generation Global Imager

から赤外線まで17の波長帯で観測し、さまざまな海面物理量の推定を行うことができる。海色やクロロフィル量の推定もそのひとつで、植物性プランクトンや基礎生産量の推定にも用いられている。こうしたデータは漁場推定のために用いられている。

2 将来の展望

今後は、ユーザーの範囲が広がるにつれて、衛星データの専門的な理解や解析環境をユーザーに要求することは難しくなる。このため衛星データをそのままユーザーに提供せず、ユーザーが必要とする情報としての提供や、ユーザー自身が容易に解析を行うことができる加工環境がデータとともに提供されるかたちに進むものと考えられる。また、小型衛星の打ち上げは進展すると考えられ、通信やリモートセンシングにおける活用が広がると同時に、大型の衛星による高い能力との複合的な活用が進むようになる。こうしたことから今後は、クラウド技術の活用による高い計算機能力を安価に利用できるプラットフォームの提供や、衛星データ同士、または衛星データとその他のデータなどとの複合による情報としての加工、提供が進むと考えられる。

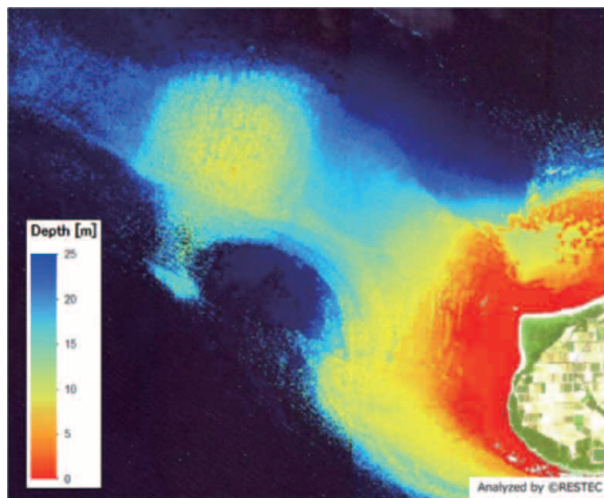


図1-2-19 衛星画像から解析を行った沿岸水深の例

① 海底調査

離島の調査はこれまで上陸して行うものが主流であったが、外洋の離島や外国の島などでは、その頻度を多くとることが難しい。こうした訪問が難しい地域においても、高分解能な光学センサ衛星画像から沿岸の水深情報を得ることが可能である。衛星推定水深（SDB：Satellite Derived Bathymetry）はその精度の高さは、レーザや超音波などの測深機器に譲るが、上記のような現場での測定に制約

がある場合や作業効率化の面でも今後の活用が期待される。

② 資料同化によるデータの統合

たとえば、天気図を書くときには各地点のさまざまな観測値から等圧線を描くが、等圧線と観測データ力学的なルールに矛盾のないように引く必要がある。このため気象予報の数値モデルの計算も一緒に考慮した気圧場の計算を行っている。こうした資料同化といわれる手法は、空間的、時間的に均質なグリッドデータの作成に有効である。衛星によるリモートセンシング情報も静止衛星からの情報を除くと、空間的にも、時間的にも連続的なデータがバラバラに散らばった離散的な状態である。そのため、資料同化などの手法により数値計算モデルとの融合を行い、時間的、空間的に連続した物理量としてグリッドデータに加工している^(注69)。

欧州連合（EU）が主導で行っている人工衛星の開発から実利用までを担う統合

注69
コラム11で示す黒潮大蛇行の数値計算も、このような衛星からのデータを資料同化して行われている。

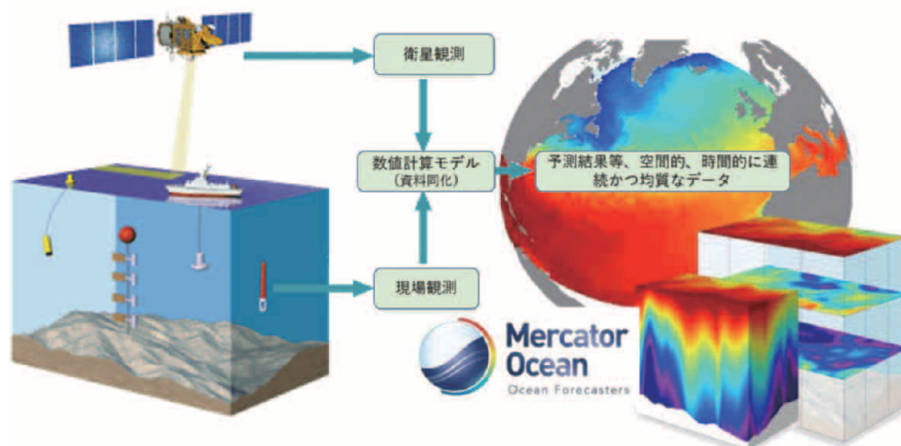


図1-2-20 宇宙からの観測や現場観測データのシミュレーションモデルを介した資料同化のイメージ
(出典：MERCATOR OCEAN の資料を利用して作成)

サービスを目指す COPERNICUS 計画において、MERCATOR OCEAN と呼ばれる海洋情報サービスが、宇宙からの観測や現場観測データを、シミュレーションモデルを介した資料同化結果とともに提供している。

③ 小型衛星の活用

宇宙の衛星軌道からのサービスは基本的に地球のあらゆる地点に対して提供可能なものであるが、ミッションの目的に適した軌道は限られている。静止衛星は赤道の上空36,000kmにある軌道からの広い視野で連続的に観測や通信といったサービスを行うことが可能であるが、地球表面との距離が遠い分、通信の遅延による伝送能力の低下や観測画像の分解能の低さ、南北極域における衛星に対する仰角の低さによる通信の困難さといったマイナス面も存在する。逆に上空数百キロメートルの低軌道を通る衛星は上記の課題は解決するが、衛星が常時上空に存在せず、時間的制約が大きい。

近年ではこうした課題を解決するために複数の低軌道衛星（コンステレーション^{注70}）によるサービスも実施されている。ただし、大型または中型の衛星で、こうしたコンステレーションを構築するとコストが増大することから、小型の衛星によるコンステレーションが選択されるケースが多い。

低軌道周回的人工衛星の弱点としては、カバレッジ^{注71}の面積が静止衛星軌道ほど広くないことと、観測、通信対象の上空を通過するタイミングが限られていることである。このため、観測衛星であれば、天候や対象の移動などにより機会を逸することもある。

こうした欠点を改善すべく、多数の衛星群によるコンステレーションを用いて高頻度で上空を通過するように軌道上に小型衛星を配置する事業者が増えている。また、大型衛星に比べて小型衛星は量産効果により衛星の価格低下もあり、開発途上国やベンチャーによる開発が加速している。

通信衛星においても、静止衛星に比べて、低軌道の方が地表面に近く、高速回線を確認できる。この通信衛星においても Oneweb 社など、低軌道衛星コンステレーションによる通信ネットワークを構築する構想が進められている。

注70
衛星の連携した配置

注71
全体に対する網羅率

注72
Automatic Identification
System

注73
ただし、小型衛星に搭載できる機器にはレンズやセンサのサイズ、使用できる電力など物理的な限界も存在することから、性能面、運用面などで制約があり、中・大型の衛星との機能の分担が必要である。

注74
Vessel monitoring system
漁船を対象とした船舶位置監視システム。

注75
このほか、米国 HawkEye360 社の様に従来は検出対象外であった電波発信源を宇宙から直接探査するサービスも始まりつつある。

④ 船舶監視（漁船を含む）

船舶同士の衝突防止に用いられていた AIS^(注72)（船舶自動識別装置）からの VHF 信号が船舶動静監視に役立てられているが、衛星でも受信することにより、従来陸上から沿岸域だけの監視であったものが、海洋全体を見ることができるようになっている。また、衛星 AIS による監視サービスが ExactEarth 社（カナダ）や Orbcom 社（米国）といった民間でも行われ、複数の衛星で高頻度の監視を実現している。

さらに、海洋においては、前述の合成開口レーダ（SAR）による船舶画像と AIS 情報など他の情報と組み合わせて船舶の動静把握にも活用されている。日本の ALOS シリーズなどさまざまな国での SAR 衛星が運用されている。また、200機近い衛星を用いて、毎日の高分解能画像による監視を実現している PLANET 社（米国）のほか、Spire 社（米国）のように小型衛星による AIS 受信を行うことでコストダウンを図っているベンチャーも出現している^(注73)。

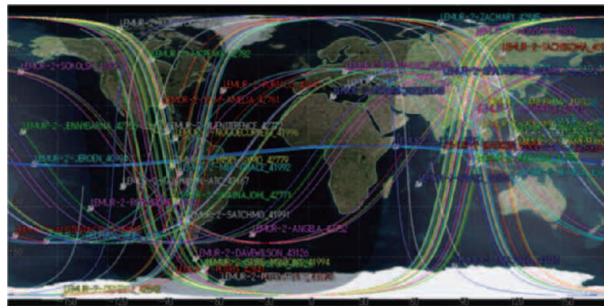


図1-2-21 Spire 社の衛星軌道（上）と衛星から取得された船舶動静状況（下）

Spire 社では、小型衛星によるコンステレーションを通して AIS を受信することで、全世界の船舶位置情報を入手している。

Google 社（米国）などが違法・無報告・無規制（IUU）漁業の監視のため進めている GFW（Global Fishing Watch）は AIS や VMS^(注74)のほか、衛星画像情報も使って違法操業の検出を行っている。さらに、夜間の船舶灯火、特に漁船の集魚灯も観測可能である米国 NPP 衛星の夜間光観測結果も活用して漁船の活動などの監視を行っている。

安全保障においても MDA の概念による宇宙の活用が進んでいる。AIS と衛星画像を複合した船舶動静監視や、船舶のみならず海洋に関する総合的な情報の把握・分析を行うプラットフォームが MDA のもとで提供

されつつある。

欧州の e-GEOS 社やカナダ MDA 社（現・米国 MAXAR 社）等の船舶動静把握サービスでは、地上・衛星から収集した AIS 情報のほか、SAR センサなどの衛星画像情報や船舶登録情報などの複合的な分析を行うサービスプラットフォームに近年は海象・気象を加えた MDA プラットフォームとして安全保障関連のユーザーに提供している^(注75)。

上記のように、小型衛星の出現による高頻度、高分解能の監視体制、広帯域の通信の実現、みちびき衛星に代表される高精度位置情報といった、海洋における利用者ニーズとのギャップを縮めるサービスが出現しつつある。今後は衛星の能力の向上とともに、IoT などのセンサとの組み合わせや、AI、資料同化などの解析技術の導入など、複合的に活用するプラットフォームの構築が重要となってくる。

（坂田 英一）

4 深海探査の最前線

1 深海探査と無人探査機

地球表面の70%を占めている海の平均水深は約3,800mと知られている。厳密な定義があるわけではないが、海洋開発の世界で深海とは一般に水深200m以深の領域を指す場合が多く、地球上の海は実はそのほとんどが深海に属している。深海開発に向けた探査用プラットフォームとして、1960年代まではおもに有人潜水機が使われてきた。しかし、人間にとって極限の環境である深海で人命安全を確保しつつ所望する機能を十分に発揮できる有人潜水機を開発するには莫大な資金と長い設計および製作期間を要することから、人命安全と経済性ではるかに有利な無人探査機が注目を集めるようになってきた。その開発に不可欠な要素技術の進歩とともに1970年代から深海無人探査機の開発が本格化した。以来、1980年代から2000年代にかけて深海無人探査機は海洋石油開発と軍事分野を中心に飛躍的な技術発展を遂げ、さらに2010年代に入ってから海底鉱物資源探査などより多様で高度な実用任務に向けた研究開発が本格化している。本項では、いまや先進的海洋調査システムとして世界中の海でその活動の場を広げており、次世代海洋開発の中核を担うプラットフォームとして期待が高まる深海無人探査機について、世界と日本における開発の歴史と将来展望を概観する。特に、日本の深海無人探査機については2016年に管制機と調査機すべてが無人機で構成される純無人型調査ユニットを用いた海底熱水地帯の調査に世界で初めて成功するなど^(注76)、近年、顕著な成果が出ていることを踏まえ、最新の成果を中心に紹介する。

2 世界の深海無人探査機

一般に、深海無人探査機は遠隔操作型のROV^(注77)と自律行動型のAUV^(注78)に大別される。支援母船とケーブルでつながっているか否かが最も大きな違いで、遠隔操作型のROVにおいては動力供給や情報転送のためのケーブルを必要とする。ROVやAUVの歴史は意外と古く、ROVの場合1965年に米国海軍が機雷掃海訓練や人命救助の目的で開発したCURV-I^(注79)が世界初の実用機とされている^(注80)。一方、世界で初めて作られたAUVとされているのは、1957年に米国ワシントン大学の応用物理学研究所が極地水域調査の目的で開発したSPURV^(注81)である^(注80,82)。1970年代からROVの開発が本格化するきっかけとなったのが、1973年の第一次石油危機である。原油価格の高騰により多くの石油メジャーが海底油田開発を急ピッチで試みるなか、海底調査や海洋構造物点検など海中作業に投入するROVの需要も急増した。海底油田開発を支援する目的で開発された最初のROVとして知られているのが、HydroProducts社(米国)が1979年に発表したRCV-150である。以来、海底油田開発が人間による海中作業が難しい深海域まで広がるにつれ、多くの関連企業・団体が多様な海底作業用ROVを導入するようになり、1980年代に入ってからのはや海洋石油開発に欠かせない装備として定着した。ところが、1980年代半ばに入ると原油価格が下落し、さらに長らく下げ止まりが続いたことから、新規の海底油田開発事業は大きく縮小した。この影響を受け、海底油田開発に関連したROVの研究開発にも歯止めがかかった。こうした状況から、ROV業界は海底油田開発以外の分野、たとえば、海洋土木工事、鉱物資源調査、環境保全、水産資源調査等への利

注76
日刊工業新聞 2016.12.30.
“海技研、全自動広域調査システム開発—自律型水中ロボット4台で効率5倍”。<https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00412153>

注77
Remotely Operated Vehicle

注78
Autonomous Underwater Vehicle

注79
Cable-controlled Underwater Recovery Vehicle-I

注80
浦環、高川真一、『海中ロボット』成山堂書店、1997

注81
Special Purpose Underwater Research Vehicle

注82
Christopher von Alt, Autonomous Underwater Vehicles, Woods Hole Oceanographic Institution, 2003.



図1-2-22 ウッズホール海洋研究所 (WHOI) の AUV ABE (Autonomous Benthic Explorer) とマサチューセッツ工科大学 (MIT) の調査チーム
(出典：WHOI ホームページ)



図1-2-23 民間企業が中心となって開発した HUGIN 1000 AUV
(出典：Kongsberg 社 資料)

用拡張を模索し、今日に至るまであらゆるニーズに応えるさまざまなサイズで多様な機能の ROV ユニットが世界中で開発・利用されるようになった。

一方、AUV の場合 SPURV を皮切りに欧米を中心として数多くの開発プロジェクトが進められ、ケーブルにつながっていない無索機ならではの高い運動自由度と広い行動範囲を活かし、海底地形・地質調査、海中人工物の点検、海底資源探査、水産資源調査、さらには軍事目的の機雷発見・掃海に至るまで、さまざまなミッションを見据えた多様な機種のアUV が作られた。特に、米国による研究・開発が最も活発かつ多様で、その根底には海軍が主導する大規模な研究・開発がある。こうした傾向は今日まで続いており、毎年世界中に出される AUV の半数以上が米国で建造されているのが実情である^(注83)。米国で軍事分野以外の AUV 研究を牽引しているのが、ウッズホール海洋研究所 (WHOI^(注84)) とマサチューセッツ工科大学 (MIT) の連携

による共同研究・開発である。豊富な高度人材を有する MIT と連携することで、WHOI は基礎・理論研究分野を中心に MIT のリソースを活用する一方、機器、施設や研究船など、多様なインフラとその運用能力を有する WHOI との連携で、MIT は研究成果の検証や実装、さらには実海域展開までをシームレスに進められる環境を得た。

米国以外の海外では、ノルウェー国防研究所と Statoil 社、Kongsberg 社などの民間企業が中心となって開発した HUGIN Series や、イギリス国立海洋研究センター (National Oceanography Centre) が開発し、数多くの実海域運用実績を持つ AutoSub、また北極海にて約60時間にわたり海水下調査潜航を成し遂げるなど、実用機としてさまざまなミッションに対する運用実績を持つカナダの ISE^(注85) 社の Theseus 等が有名である。

3 日本の深海無人探査機

国内の深海無人探査機開発においては東京大学生産技術研究所 (東大生研) と (国

注83
S.A. Gafurov, E.V. Klochkov, Autonomous Unmanned Underwater Vehicles Development Tendencies, Procedia Engineering 106(2015), 141-148.

注84
Woods Hole Oceanographic Institution

注85
International Submarine Engineering

研) 海洋研究開発機構 (JAMSTEC) がパイオニア的存在で、研究開発の拠点として基盤研究から実用研究、さらには運用技術まで幅広く研究開発を展開してきた。まず、ROVに関してはJAMSTECが1981年に開発したJTV-1 (JAMSTEC Tethered Vehicle 1) が日本初のROVプロトタイプとして知られている。一方、AUVの場合、1974年(財) 機械振興協会新機械システムセンターがOSR-V (Ocean Space Robot-V) といった無索無人機を開発し、沼津市沖で潜航試験を行ったのが国内における初めての試みとして知られている。しかし、艇体運動が単純

な上下移動に特化しており、運用コストに対する効果の問題からOSR-Vは単発性の開発で終了してしまっただけでなく、こうした実情から、日本におけるAUV開発の歴史は東大生研の浦環(現・東京大学名誉教授)らにより1986年からスタートしたPteroa計画^(注86)から本格化したとみて良いだろう。本計画で開発されたPteroa150は初の国産航行型AUVで、その開発過程で得られた知見は以降Twin-Burger, Tri-Dogといったテストベット機はもちろん、R-One, r2D4のような実用機の開発にまで受け継がれている。日本の深海無人機開発はスタートこそ欧米に後れをとったものの、両機関のリードにより、現在は対等な性能のAUV/ROVシステムが開発できる技術レベルに達している。また、無人探査機の運用においても日本は世界有数の実績を有しており、代表例として挙げられるのがJAMSTECのROV「かいこう」と「ドルフィン3K」によるH-IIロケット8号機^(注87)エンジンの捜索および回収(1999~2000年)^(注88)、また東大生研のAUV「r2D4」による世界最大規模の溶岩平原の発見(2007年)^(注89)。AUV開発に関しては2014年度からスタートした国の研究開発プロジェクト「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)次世代海洋資源調査技術(海のジパング計画)^(注90)」が新たな起爆剤となり、AUV複数運用手法等の研究開発を担当している(国研)海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所(海技研)が、AUVと関連技術の開発および実海域運用に新たに参入した。本プログラムのもと海技研は5機の最新鋭AUV(航行型4機、ホバリング型1機)およびこれら複数機AUVを同時に管制できる1機の洋上中継器(ASV)^(注91)を開発し、支援母船からの遠隔操作を一切必要としない全自動で純無人型の海洋調査ユニットを構築した。複数機AUVの同時運用を基本とすることから、本ユニットは調査効率を飛躍的に向上させることができ、4回にわたる調査航海にて実海域に展開し、その有効性を確認した。AUV複数運用手法等の研究開発については、次にその詳細を述べる。



図1-2-24 海上技術安全研究所のAUVおよび洋上中継器(ASV)
(上:左から航行型AUV 3、4号機/下:左から洋上中継器(ASV)、
ほばりん、航行型AUV 1、2号機)

注86
Pteroaはラテン語で翼を意味する。

注87
1999年11月に種子島から打ち上げられた国産ロケット。1段目エンジンの破損し推力を失ったため地上からの指令で爆破、機体と衛星は父島の北西約380kmの海中に落下した。エンジンの回収が原因解明の大きな鍵となっていた。

注88
渡辺正之、門馬大和、H-IIロケット8号機のエンジンの捜索と回収、Techno Marine 日本造船学会誌、854巻、497-504、2000。

注89
AFP BB News 2007.01.10. インド洋で世界最大級の溶岩台地を発見、東京大学チーム。

注90
内閣府・政策統括官(科学技術・イノベーション担当): 「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)次世代海洋資源調査技術(海のジパング計画)研究開発計画」(2018)

注91
Autonomous Surface Vehicle

4 AUV 複数運用手法等の研究開発

① 概 要

政府（内閣府）は、2014～2018年度、「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）次世代海洋資源調査技術（海のジパング計画）」を実施し、そのなかで、「AUV 複数運用手法等の研究開発」をとりあげた。以下に、内閣府の計画書に基づき、ここでの AUV 複数運用手法等の研究開発の概要を示す。

わが国は国土面積の12倍を超える管轄海域を有しており、これまでの調査によって当該海域には鉱物資源の存在が確認されている。しかし、これらの鉱物資源が期待される広大な面積を効率良く調査する技術は開発途上にある。わが国が高効率の海洋資源調査技術を世界に先駆けて確立して調査を加速することは、海洋資源開発、環境保全および資源安全保障の観点から重要である。これらを踏まえ、「海のジパング計画」では、国が主導して民間企業とともに、効率的な調査技術を確立することによる海洋資源調査産業の創出を目指した。

計画では、主として海底熱水鉱床などの海洋鉱物資源を低コストかつ高効率（従来の数倍以上のスピード）で調査する技術を、世界に先駆けての実現を目指した。特に、いままで発見するのが困難であった潜頭性鉱床の調査に有効な技術を開発した。具体的には、水深2,000mまでの有望海域を高効率・低コストの調査が可能な調査機器の開発などを行った。AUVによる1日あたり調査可能な面積を約5倍以上に拡大することを目指した。

AUVは軍事・国防目的の開発が主流であったため、わが国よりも欧米の技術開発が進んでいる。しかし、そのほとんどは200m以浅の浅海用であり、深海用 AUV の複数機同時運用技術については、海外でも試験がされ始めているものの実運用は主

として今後委ねられている。

調査対象海域の広域化にあたっては、隻数が限られる AUV 専用母船を使用することでは限界がある。そこで一般の作業船を使用して、AUV を複数機同時に運用できる技術の確立を目指した。また、民間が AUV を保有かつ利用しやすい環境を整備することにより、AUV の民間利用を促進し、調査効率の向上を図った。具体的な実施項目は以下のとおりである。

- ・一般作業船での同時運用を実現するための、4機の小型 AUV（航行型）、1機の小型 AUV（ホバリング型）および洋上中継器（ASV、半没水型の複数 AUV 管制機）の開発・製作
- ・AUV の複数機同時運用の



図1-2-25 複数 AUV 同時運用のイメージ

ための、AUVの投入・揚収等の運用方法、音響通信技術、協調行動プログラム、複数機同時観測システムおよびこれらを統合するオペレーションシステムなどの開発

- ・開発した小型AUV、洋上中継器（ASV）の複数機同時運用に関する性能確認のための水槽試験および実海域での実証試験を実施し、AUV運用技術を蓄積

なお、これらの項目の実施にあたっては、海技研が全体をとりまとめ、機器サプライヤーとして期待されるメーカーおよびオペレーターとして期待される民間企業が一体となり、機器の製品化および観測調査の事業化を意識した開発が行われた。

② 実海域探査

次世代海洋資源調査技術の実現に向け、海技研は民間の海洋調査組織である海洋調査協会（JAMSA）との協力のもと、開発したAUVと洋上中継器（ASV）を実海域に展開し、海底熱水地帯の潜航調査を実施した。こうした潜航調査は2016年秋からスタートし、2018年末の時点で伊豆諸島、奄美大島西方沖、鹿児島湾、駿河湾など、数多くの海域にて実用ミッションとして行われた。ここでは代表的な潜航調査を表1-2-2に紹介する。

表1-2-2 代表的な潜航調査

調査名	大室海穴潜航調査	久米島西方沖および鹿児島湾若尊カルデラ潜航調査	奄美大島西方沖潜航調査
期間	2016. 11. 28～12. 04	2017. 10. 18～10. 27	2018. 06. 06～06. 20
使用機器	航行型AUV 1、2号機、ぼぼりん、ASV（管制機）	航行型AUV 1、2、3号機、ぼぼりん、ASV（管制機）	航行型AUV 3、4号機
海域	伊豆諸島	沖縄トラフ、鹿児島湾	沖縄トラフ
概要	海技研が実施した複数機AUV同時展開による海底熱水地帯調査	民間組織主導で実施した複数機AUV同時展開による海底熱水地帯調査	民間組織主導で実施した潜頭性海底熱水地帯調査

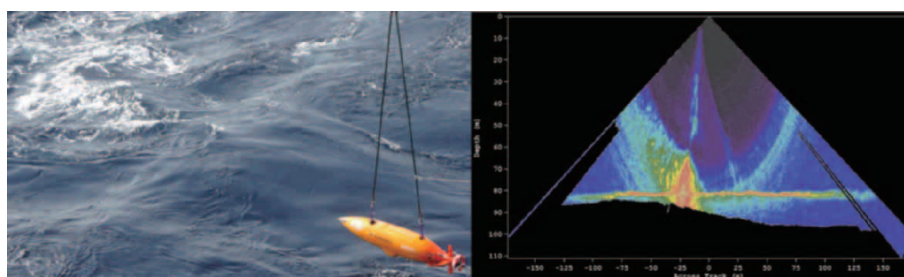


図1-2-26 潜航開始直前の航行型AUV 4号機(左)およびMBES^(注92)で捉えた海底熱水活動の様子。

注92
Multi-Beam Echo Sounder

「海のジパング計画」で開発されたAUV複数運用手法については、今後、制御手法のさらなる高度化を図ることによる新たな展開が期待されている。たとえば、AUV群を一体として航行させることにより、個別に装備すべき機能を共通化でき、経済性の向上が図れる。また、散開したAUV群のセンサーを連携させることにより、従来のAUVでは不可能であった観測手法も可能になる期待がある。これらを目指した新たな制御手法の研究開発の一端は、内閣府が2018年度から開始した「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）革新的深海資源調査技術」のなかで海技研が担当し、実施していく予定である。

（井上 俊司・金 岡秀）

コラム 02 深海を無人機で探る国際コンペ

地球最後のフロンティアと言われる深海に挑む国際コンペティション「シェル オーシャン ディスカバリー X プライズ (Shell Ocean Discovery XPRIZE)」が、2018年末に最終段階に入った。

米国で1955年に設立された主催者の「X プライズ財団」は、10年間で5つの海洋コンペを予定している。これまでに流出原油の除去方法(2010年)と海洋酸性化調査用 pH センサー(2013年)のコンペを行い、最優秀チームに100万ドル単位の賞金を授与してきた。

極限環境で活躍する無人ロボット

低温・超高压かつ真っ暗で電波も通じない深海には、未発見の生物や資源、沈船や墜落機など、たくさんの謎が潜んでいる。自然保護や持続可能な資源開発のためにも、より安価で、かつ正確に素早く海底を探る技術が求められている。

そこで、石油大手のロイヤル・ダッチ・シェルが600万ドルを、さらに米国海洋大気庁(NOAA)がボーナス賞の100万ドルを用意して、計700万ドルをかけた同コンペが2015年末に始まった。書類審査の後、ラウンド1(技術評価試験)を経て、2018年3月までに応募32チームが9チームまで絞られた。

決勝にあたるラウンド2(実海域競技)は、11月から2019年2月まで、ギリシアのカラマタ沖で実施された。水深4,000mの深海で24時間以内に250平方km以上(目標500km²)の海底の3Dマップを構築すると同時に、10枚の海底写真を撮影する技術が競われた。「機材の持ち込みは40フィートコンテナ1つまで」「支援母船を用いない」「海域に人が立ち入らない(搬入は陸か空から)」「地形図は調査後48時間以内に提出」といった厳しい条件付きだった。

ファイナリストたちは、AUV(自律型海中ロボット)を駆使して、富士山の高さよりも深く、奄美群島の徳之島以上の広さの海底を、水平5m、垂直50cm以上の解像度で描き出す難問に挑戦した。

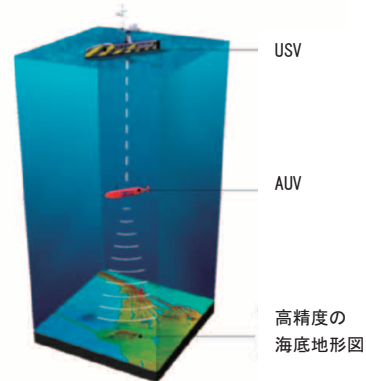
結果は審査の後、2019年3月ごろに発表される。最も精度の高い海底地形図を作成した優勝チームには400万ドル、2位には100万ドルが授与され、その地形図は、地中海に次世代ニュートリノ望遠鏡を設置するための共同研究に活用されるという。

ファイナリストのひとつは、日本財団と GEBCO(大

洋水深総図指導委員会)が実施している人材育成事業の修了生の同窓有志が中心となって結成した「GEBCO-NF Alumni Team」だ。産業界のパートナーを含めると、日本を含めた17か国以上から50名以上のメンバーが集結した。同チームのアプローチは、既存技術である AUV と、AUV を搭載・投入揚集可能な無人船(USV)を組み合わせた無人の調査技術である。また、日本の産官学民協働の「Team KUROSHIO」も決勝に残った。

なお、公的な海底地形図を作成してきた世界で唯一の組織である GEBCO は現在、日本財団とともに「NF-GEBCO Seabed2030」プロジェクトを推進している。2030年までに世界の海底地形図の完成を目指す同プロジェクトは2018年6月、米企業オーシャン・インフィニティから行方不明のマレーシア旅客機捜索のために描いた12万 km²の海底データを寄付された。11月からは海域ごとの地図作成会議が始まり、国境を越えた共同作業が動き始めている。

(各チームのホームページやリリースなどを参照し作成)



「GEBCO-NF Alumni Team」のコンセプト
(出典：<https://www.gebco-nf.com/news-and-updates>)



「GEBCO-NF Alumni Team」の集合写真(日本財団 提供)