

2.7 地球システム観測・予測

2.7.1 気候変動観測

(1) 研究開発領域の定義

気候変動観測データの取得、生成、蓄積、処理、活用等を扱う。大気中の温室効果ガス (GHGs) や微粒子 (エアロゾル、雲)、短寿命気候強制力因子 (SLCFs)、雲などその他の気候変動因子の濃度や変化の情報を得るためのリモートセンシングや地上観測ネットワークなどの観測技術を対象とする。大気・陸域、海洋観測時には物理的、生物地球化学的、生物・生態系的な側面から気候とその変動を記述する必要がある。そのために定義された必須気候変数 (ECVs) を直接計測、または間接的に見積もる現場観測技術の開発や実装、データアーカイブ化、データプロダクト作成なども対象とする。大気・陸域、海洋に加え、気候変動に大きな影響を与えあう極地、森林 (植生)、土地利用変化等の観測技術も含む。観測ビッグデータのアーカイブ化やデータ処理技術も含む。さらには、各種データの統合的解析や観測データアーカイブから社会利益をもたらす情報化手法についても対象とする。衛星観測は地球環境リモートセンシング領域で扱うが、本領域でも一部触れる。

(2) キーワード

- 大気・陸域の観測：長寿命GHGs、SLCFs (Short - lived Climate Forcers)、GHG/AQ (大気質) 統合解析、A-CCP (エアロゾル、雲・対流・降水)、リモートセンシング、地上観測ネットワーク、フラックス、ECVs (Essential Climate Variables)、航空機観測
- 海洋の観測：海洋温暖化、海洋酸性化、海洋貧酸素化、海洋状況把握、海洋炭素循環、海面水位上昇、海洋生態系、海洋熱波、ECVs、全球海洋観測システム、生物地球化学アルゴ (BGC Argo)、水中グライダー、キャビティリングダウン分光法

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

■大気・陸域の観測

『地球温暖化の原因は人間活動によるGHGs等の排出量増加であることに疑う余地はない^{大気1)}』とされる。日本も「2050年カーボンニュートラル」を2020年に宣言し、緩和策を強化する方針を打ち出した。そのため、気候変動観測の意義は、純粋な要因把握から、フラックス変化量の検出と排出削減政策の効果検証へシフトしつつある。1.5°C目標達成に向けて許容される人為の炭素排出は残り12年分と見積もられている^{大気1)}。その残余カーボンバジェットを合理的に精度よく推定するためには、依然として、エアロゾル・雲の効果の定量化や、自然プロセス・フィードバックを含む濃度変化・循環・収支の評価が不可欠であり、その点にも気候変動観測の意義がある。さらには、数値モデルによってシミュレートされた地球システムが期待通りに変化しているかどうかの検証や、社会との間の科学的知見の迅速な共有に基づく政策の随時見直しのためにも、観測情報の重要度が高まっている。このような要請に応えるためには、引き続き、WMO (世界気象機関) が主導するGCOS (国際プログラム全球気候観測システム: Global Climate Observing System) が定義した54の大気・陸域・海洋に関するECVs^{大気2)}の系統的な観測が重要である。2015年のパリ協定採択に対応して、世界的に進捗状況を定期的に確認し、取組を強化していく「グローバル・ストックテイク (GST)」が2023年から5年毎に実装される。その際、人為起源排出の管理、自然を活用した解決策 (NbS: Nature-based Solutions、「自然を基盤とした解決策」や「自然に根ざした解決策」などと訳される場合もある) の有効性や、植生など自然吸収源の大きさを観測から評価する視点が重要となっている。CO₂より寿命が短い「SLCFs」を通じた将来気候影響にも注目されている^{大気3)}。SLCFsは、昇温に寄与するメタン、対

流圏オゾン、炭素を主成分とした微粒子のブラックカーボンや、逆に直接放射効果や雲過程を通じて降温をもたらす硫酸エアロゾル等の粒子、さらにはそれらの原料物質であるSO₂、NO_x等を含む総称であり、大部分は大気汚染物質と重なる。個別物質の濃度推移の予測に基づくと、SLCFs全体としては、今後0.1-0.7°Cの昇温をもたらすとされ、GHGsと合わせた管理が必要である。その際、複雑な化学反応に由来する、排出と大気中濃度との間の非線形性も理解する必要がある。周回・静止衛星や現場での観測を効果的に組み合わせ、大気組成や陸上生態系について、国際協力を基調としつつ特色ある観測を実施することが求められる。

■海洋の観測

地球表面の71%を占め、地球の水の97%を含む海洋は、熱の貯蔵・再配置、水循環、生物地球化学的循環に重要な役割を果たしている。上述の気候の特徴づけに重要な変数である54個のECVs^{大気2)}のうち19個が海洋に係るものである。海洋と大気は、熱・水・運動量の交換を通じて相互に影響を与え合うことで、気候システムに年単位～数十年スケールの自然変動を引き起こしている。大気のおよそ250倍の質量と4倍の比熱を有する水で満たされた海洋は、人為的なGHGs排出により気候システムに蓄積された熱の約91%を蓄えており^{大気1)}、海の温暖化が進行している。海洋の昇温と陸域の氷の減少に伴う海面水位の上昇が加速している^{大気1)}。海面水位の上昇をその地域的な分布も含めて理解するには、海洋の水温・塩分および循環の変化を知る必要がある。地球温暖化は、氷の減少に伴う淡水供給だけでなく、水循環の変化に伴う蒸発・降水の変化を通して海洋の塩分を変化させる^{海洋1)}。さらに、水温と塩分の変化は海洋の循環と混合を変化させる。1980年代以降、海洋は人為起源の炭素の総量の20～30%を吸収し、大気中のCO₂濃度増加を抑制している^{海洋2)}。しかし、それにもなって海洋の酸性化がもたらされている^{海洋3)}。表面付近ほど大きく昇温すること、そして高緯度海域における淡水供給の増加は、海洋上層の成層を強めて表層と深層の混合を抑制し、生物地球化学的循環を変化させて、酸性化とともに、生態系に深刻な影響を与えている^{海洋4)}。自然変動と地球温暖化が重なり合った気候システムの実態を、生態系への影響を含めて把握し、変動・変化のメカニズムを理解して将来を予測することは、持続的な発展を目指す人類に共通の喫緊の課題である。この課題に取り組むために、物理、生物地球化学、生物・生態系の分野を統合した全球的な海洋観測の展開が求められている。

[研究開発の動向]

■大気・陸域の観測

GHGsとSLCFsを複合観測し、両者に共通となる「大規模エネルギー燃焼排出源」を特定して定量化し、削減や監視へ結び付ける方法が検討されている。SLCFsはほぼ大気汚染物質であり、GHG/AQ統合解析とも呼ばれる。我が国のGOSAT-GWミッション（GHGs・水循環観測技術衛星）、欧州宇宙機関（ESA）のCO2Mミッション（Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring：人為起源CO₂モニタリングミッション）といった衛星観測計画が公式化している。GOSAT-GWは2023年度、CO2Mは2025年度に衛星打上げ予定である。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）で2023年から開始する第7次評価サイクルでは従来GHGsを扱ってきた国別排出インベントリ報告のための方法論に新たにSLCFsも対象に加えることが決まり、準備のための専門家会合が続いている。第7次評価サイクルでSLCFsに関する方法論報告書の作成が決定している。社会経済情報に基づいて報告される排出インベントリに対して、「濃度の観測」を元に、非線形性を見極めつつ「排出量」を適切に推定することは、実環境計測という独立した立場からの検証を可能とする。これは、温暖化緩和のための排出削減・エネルギー戦略の道筋を確かにする。気候変動予測を確実にするためにはエアロゾル放射効果や雲相互作用、陸域植生変化を介したフィードバックの感度の不確実性低減が不可欠で、そのための観測計画に進展がみられる。

① 温室効果ガスの地上、航空機観測等

GHGsに関連する地上観測ネットワークとしては、衛星データの検証に資するTCCON（Total Carbon

Column Observing Network: 全量炭素カラム観測ネットワーク)に加え、小型フーリエ変換赤外分光計 (FTIR) を活用したCOCCON (Collaborative CON) も進展している。高精度の地表付近濃度計測ではWMOの全球大気監視計画や米国海洋大気庁 (NOAA) の全球長期観測網などが代表的である。高精度の濃度計測や同位体計測には、高安定型のキャビティリングダウン装置や中赤外域の吸収に基づく小型機器も投入されている。

商用の航空機を活用した日本のCONTRAILプロジェクト (Comprehensive Observation Network for Trace gases by Airliner)、欧州のIAGOSプロジェクト (In-Service Aircraft for a Global Observing System) によって長期に取得した大気3次元濃度データも重要である。

大気中GHGs濃度を大きく左右する陸域の炭素循環については、渦相関法によるタワー観測ネットワークが展開されており、全球ネットワークとしてFLUXNET、そのサブ組織としてアジア域ではAsiaFluxが展開されている。これらの観測により大気-陸域間の熱・水・CO₂等のフラックスが連続観測され、データ公開が進められている。近年は、FLUXNETについてはFLUXNET2015として、メタンフラックス観測網についてはFLUXNET-CH₄データとしてデータセットの公開が進んでいる。さらに、これらの地上観測網データと衛星観測データなどに対して機械学習を適用し、地上観測ネットワークデータを広域化した全球プロダクトも構築・公開されている。

② 陸域生態系データ等

GHGsのフラックス以外にも陸域生態系に関連する様々なデータセットが集約されており、大気-陸面のGHGsの収支を把握する上での重要な知見を提供している。例えば、植生季節変動長期観測ネットワーク (Phenological Eyes Network: PEN) は日本で構築されたカメラや分光観測器を用いた生態系観測ネットワークである。同様のネットワークとして米国のPhenoCamがある。これらは現地観測ベースで植物の展葉・落葉の時期などを観測し、気候変動が植生に与える影響を評価できる。ILTER (International Long-Term Ecological Research: 国際長期生態学研究ネットワーク) は植生バイオマス量などのプール量に代表される様々な生態系観測データを集約したデータベースなどの炭素収支の理解に重要な知見を提供しており、日本の組織としてJaLTERがある。TRYデータベースは植生の機能・形態パラメータを集約したもので、数値モデルの改良に重要な役割を果たしている。

2021年6月に発行された「IPBES/IPCC合同ワークショップ報告書」で、GHGs収支の推定において生物多様性の影響を勘案することの重要性が指摘されている (※IPBESは生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学-政策プラットフォームであり、生物多様性版のIPCCとも言われる)。IPCC第6次評価報告書第2作業部会報告書 (影響、適応、脆弱性) においても、気候変動影響評価や適応にあたり、生物多様性に関する内容が多く取り上げられている。そのため、今後は例えばJ-BON (日本生物多様性観測ネットワーク) などの、生物多様性ネットワークとの連携も望まれる。

③ エアロゾル・雲

エアロゾルの国際地上観測ネットワークについては、NASA主導のAERONETや、日本が主導しているSKYNET・A-SKY^{大気4)} (主に千葉大学)、AD-NET (主に国環研) がそれぞれ、データ取得・準リアルタイム解析・データ公開を定常的に実施し、誰もがデータを使えるよう整備している。月を光源にした夜間観測、紫外可視波長帯による光吸収性エアロゾル観測、雲光学特性観測、エアロゾル組成情報の高度分布導出、微量ガス濃度との同時観測などについて、技術的な発展が見られる。光吸収性エアロゾルとしてはブラックカーボンに加え、ブラウンカーボンが含まれる。ブラウンカーボンは、黄色や茶色の炭素微粒子で光吸収性の有機エアロゾルである。

地上現場でのエアロゾル組成の自動連続計測では、ブラックカーボンの高精度計測装置や、主要無機イオン成分等の湿式計測、微量金属などの元素分析装置などの国産機も活用されている。エアロゾル計測の

国際的な調和化の重要性は理解されているが、直近での大幅な前進は見られていない。エアロゾル-雲相互作用を通じた気候影響の不確実性は依然として大きい。その解明のため、雲凝結核や氷晶核の観測、それらと化学組成や起源との対応付け（有機エアロゾルのエイジングや、未解明度の高い生物起源バイオエアロゾルなどを含む）、エアロゾル-雲相互作用モデル化のためのエアロゾル個数濃度計測などが徐々に進展している。

④ SLCFsの衛星観測

2017年に欧州のSentinel-5 Precursor衛星が打ち上げられ、搭載したTROPOMIセンサー（Tropospheric Monitoring Instrument）により、従来20 kmクラスだった水平解像度が最高で5.5 km × 3.5 kmまで向上し、二酸化窒素（NO₂）、一酸化炭素（CO）、メタン（CH₄）などの日々の全球濃度分布の観測情報が蓄積され、都市や大規模排出源をおおまかに識別できるようになってきた。また、2020年に韓国が打ち上げたアジア上空のGEMS（Geostationary Environment Monitoring Spectrometer：静止軌道環境モニタリング分光器）からは、エアロゾルなどのプロダクトの一部が公開されるようになり、ガスを含む大気汚染についても、日内変動や光化学反応の追跡などで期待が高まっている。しかしながらTROPOMIの場合、対流圏NO₂の衛星観測では25～50%もの低バイアスが報告されるなど、地上分光リモートセンシングによる検証が引き続き重要となっている。地上検証機器としては、NASAが開発したPandoraや各機関で開発されたMAX-DOASが活用されている。欧米主導のPGN（Pandonia Global Network）観測網は、世界に展開した100台近いPandora機器による観測を標準アルゴリズムで解析し、NO₂カラム量などの結果を公開している。NO₂よりも高度な観測技術を要するホルムアルデヒドなどの他の微量ガスについても定量的な検証研究が進行中である。また、これらの地上観測を衛星観測と統合的に用いることで、地上付近濃度を高精度に導出することも目標となっている。

⑤ データ基盤・情報配信システム

大気成分の地上観測データは、WMO全球大気監視計画のデータを中心に、気象庁のWDCGG（World Data Centre for Greenhouse Gases）や、WDCA（WDC for Aerosols）、WDCRG（WDC for Reactive Gases）に収録されている。NOAAの全球モニタリングデータベース、米国エネルギー省のARM（大気放射測定施設）のデータベースや、欧州Actrisデータセンターからのデータ入手も便利になりつつある。ファイルサイズなどの観点から衛星データも各機関から発信されることが多いが、WDCGGへはGOSATデータ等も取り込まれるようになり、統合的なデータ利用が推進されている。航空機観測ではCONTRAILデータベース（国内）、HALOデータベース（ドイツ）、船舶観測ではJAMSTEC DARWINサイト（国内）などもある。対流圏オゾンアセスメントレポートTOARで収集された地上オゾン濃度データベースも整備された。これらの観測データは、IPCC評価報告書等のための各種モデル間相互比較実験の検証や、収支・プロセス解析、政策に関連する排出量の把握など、多岐の目的のために活用されている。

陸域生態系物質循環に関する地上観測データは、FLUXNETなどの国際プロジェクトを通して、品質管理されたデータセットが処理ソフトウェアも合わせて提供されている。上述のILTERやTRYについてもプロジェクト単位で同様にデータ公開が行われている。

■海洋の観測

気候把握のための海洋観測については、全球海洋観測システム（GOOS：Global Ocean Observing System）がGCOSと連携し、国際的観測ネットワークの構築を科学的・技術的側面と政府間の調整の側面で支援、推進してきた^{海洋5)}。GCOSは図表2.7.1-1の通り、海洋に関するECVsを設定している^{大気2)}。

図表 2.7.1-1 海洋に関する ECVs

物理変数	海面熱フラックス、海氷、海面水位、海面の状態、海面の流れ、海面塩分、海面応力、海面水温、海面下の流れ、海面下の塩分、海面下の水温
生物地球化学変数	無機炭素、一酸化二窒素、栄養塩、海色、酸素、過渡的トレーサ
生物・生態系変数	海洋生息環境、プランクトン

ECVsは気候システムとその変化を特徴づけるのに決定的に重要である。全球スケールでの観測・導出の実現可能性が十分に高く、費用対効果がよいという条件を満たすものが設定されている。

現在までに、全球的・持続的観測システムが概ね構築されているのは外洋域における物理 ECVsに限られている。しかし、気候変動への対応を含む国連のSDGs達成のため、外洋から沿岸域までをカバーし、かつ、生物地球化学的変数や生物・生態系に関する変数にまで対象を広げた分野横断の統合的観測の必要性が広く認識されるようになった^{海洋4)}。生物地球化学 ECVsについては、衛星観測が可能な海色を除いて、その全球的な観測はまだ限定的であり、生物・生態系 ECVsについては、全球的な観測網の構築は始まったばかりである^{海洋6)}。海洋 ECVsのうち、水温、塩分、流れに関する海面から深度2,000 mまでの全球的な観測は、自動観測ロボット（プロファイリングフロート）による観測網 Argoの構築によって飛躍的に進展した^{海洋7)}。Argoはプロファイリングフロート技術によるリアルタイムのデータ取得と迅速かつ高品質なデータ公開を可能にする強力なデータ管理システムを柱としている。Argoの成功を受け、生物地球化学変数の計測への拡張したBGC Argo、海底または深度6,000 mまでの計測への拡張したDeep Argoを求める動きが生まれた。国際Argoプログラムは、従来の深度2,000 mまでの水温・塩分を計測するCore ArgoとBGC Argo、Deep Argoを一体とした観測網OneArgoの構築を目指すことになった^{海洋8)}。BGC Argoは6つの生物地球化学変数（溶存酸素、硝酸塩、pH、クロロフィル蛍光、粒子による光散乱、下向き放射照度）を計測するフロートを1,000台、Deep Argoは海面から海底近くまでの水温・塩分を計測するフロートを1,200台展開することをそれぞれ目指している。Core Argoは、Argo開始当初の季節海氷域と縁辺海を除く、水深2,000 m以上の海域を緯度経度3度四方に1台のフロートでカバーするという目標を拡張している。また季節海氷域と縁辺海を含めて、赤道域、西岸境界流域とその周辺、縁辺海におけるフロート密度を2倍とすることを目指している。BGC ArgoとDeep ArgoのフロートはCore Argoの計測も行うため、Core Argo専用のフロート2,500台と合わせて計4,700台の展開が目標である。

2022年7月現在、3,916台のArgoフロート（注:Argoの構成要素となっているプロファイリングフロート）が展開されている^{海洋9)}。そのうち、生物地球化学センサを搭載したフロートは482台であり、変数別では溶存酸素473台、硝酸塩191台、pH214台、クロロフィル蛍光264台、粒子による光散乱264台、下向き放射照度69台で、6変数を計測するフロートは18台のみである。Deep Argoフロートは180台展開されており、そのうち4,000 m級のフロートが56台（フランス製Deep Arvor）、6,000 m級のフロートが124台（米国製Deep SOLO 104台、Deep APEX 20台）である。新たなArgoの目標達成のためには、参加各国の予算獲得努力に加え、生物地球化学センサの低価格化、フロート・センサの長寿命化や、データ利活用の拡大を進める必要がある。また、フロート投入時のセンサ校正や投入後のデータ品質管理のために、船舶による多項目・高精度の観測が必要であり、全球海洋各層観測調査プログラム（GO-SHIP）等の高精度船舶観測との連携が不可欠である^{海洋10)}。

自律型水中グライダーのネットワーク構築は、主に外洋域をカバーするArgoを補完し、外洋と沿岸域のギャップを埋める観測システムとして期待されている^{海洋11)}。水中グライダーの技術は2000年代に確立され、典型的には、海面から海底、または深度200~1,000 mまでを0.5~6時間で行き来しながら水平方向に0.5~6 km移動しつつ物理・生物地球化学・生物パラメータを計測できる。水中グライダーの運用には高度な

専門知識が必要だが、ユーザー間の科学的・技術的な情報交換や新たなユーザーの訓練に関する国際的な取り組みが過去十年ほどの間に組織化されてきた。国レベルや地域レベルで、水中グライダーの運用を提供する施設の整備も、欧州、北米、豪州で進んだ。このような動きを背景に、2016年に国際プログラム OceanGlidersが立ち上がり、2017年のWMO-IOC合同海洋・海上気象専門委員会第5回会合において、GOOSの構成要素として正式に認められた。OceanGlidersは境界流域をカバーする観測、台風予測に資する観測、主要水塊形成・変質の観測などを目指す全球的なネットワーク構築を目指している。

Argoや水中グライダーでカバーされないECVsとして海面熱フラックスが挙げられる。衛星観測では地表面付近と境界層の温度と湿度を必要な精度で測定することができないため、現在提供されている海面熱フラックスの全球プロダクトは、地表付近の気温と湿度について数値気象予報モデル出力に依存している^{海研6)}。海面熱フラックスの観測精度を向上し、大気・海洋のエネルギー収支を閉じ、その相互作用を理解するためには、現場観測が重要である。係留ブイや水上無人艇 (USV) 等のプラットフォームを用いた大気観測 (風速・気温・湿度) と海面水温の観測が行われているが、時空間カバレッジは非常に限られている。USVは、運用コストが高い係留ブイに代わる効率のよい代替手段となる可能性があるが、データの質 (USV用のセンサー開発を含む)、海上での長期的な展開におけるUSVプラットフォームの信頼性、運用コスト等の向上が必要である。

日本はArgoとその拡張について、継続的に貢献しているが、相対的な貢献度は低下傾向にある。Deep Argoについて、2019年は米国82台に次ぐ28台 (全体の20%) のフロートを運用していた^{海研8)} が、現在は米国、フランスに次ぐ15台 (同8%) の運用となっている。BGC Argoへの取り組みは、国レベルや地域レベルで戦略的に進めている米国や欧州に比べて遅れている。2,000 m級の国産プロファイリングフロートを持たないため、研究者と技術者あるいは民間企業が連携した生物地球化学センサの開発や利用が米国や欧州に比べて進みにくい状況にある。一方、JAMSTECや気象庁によるGO-SHIPやそれに準ずる高精度の船舶観測には大きな貢献をしており、Deep ArgoやBGC Argoを支える高精度データの供給に重要な役割を果たしている。水中グライダーについては、水産研究・教育開発機構が継続的な運用を目指しており、気象研究所も研究ベースでの運用を進めている。しかし、国レベルで運用や新たな利用促進を支援する仕組みを整えている欧州・北米各国、豪州に比べて、日本の活動は限定的で、OceanGlidersにも積極的に関与していない。USVによる観測については、米国、欧州が多機関連携の組織的な取り組みを始めているのに比べ、日本の取り組みは遅れている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

■大気・陸域の観測

① 新型コロナウイルス蔓延防止・ロックダウンによる排出量・大気組成変化の定量化

新型コロナウイルス感染症の世界的蔓延を抑えるため、2020年には各国でロックダウンなどの対策が講じられた。その結果、リーマン・ショック時を超える規模で世界的に社会経済活動が低下し、GHGsや大気汚染物質の排出量も減少した。この現象に着目して、各物質の「排出量変化」と「大気中濃度の応答」の対応関係や、それらが引き起こす「気候・健康影響」の変化を評価することは、カーボンニュートラルや大気質改善へ向けての今後の政策検討に極めて有効である。

温暖化を促すCO₂の排出量は、化石燃料消費量の変化から、前年比7%の減少と見積もられたが、世界規模での大気中濃度は上昇を続けた。年々のCO₂排出のうち約56%が植生や海洋に吸収され、残りの44%が大気中に蓄積されるとの分配比から見て、今回の排出減少幅は、その蓄積傾向を大きく変えるものとはならなかった。このことは、1.5°C目標とCO₂濃度安定化のために2050年カーボンニュートラルを目指す際に、いかに大きな社会変容が必要であるかを、改めて浮き彫りにした。

インドや中国では空気中のエアロゾル粒子汚染 (PM_{2.5} など) が収まり青空も戻ったと報告された。野外大気汚染による世界の早期死亡者数 (約400万人/年) を減少させる効果があったと試算されている。そ

の反面、気候影響の観点では、主成分である硫酸エアロゾルが持つ、太陽光を跳ね返す「日傘効果」が薄れ、逆に「昇温」傾向となることも指摘された^{大気5)}。このことは、大気汚染対策の今後の成功は必須だが、避けられない昇温をもたらすため、その寄与を打ち消すほどに十分な温暖化物質の削減が求められる、との教訓をもたらした。

大気汚染性のオゾンやすす（ブラックカーボン：BC）粒子は、削減に成功すれば健康影響も温暖化も和らげる「一石二鳥」の効果をもたらす。オゾンの原料物質である窒素酸化物（NOx）の人為的な総排出量は、2020年2月中旬までに中国では最大36%減少、2020年4-5月に世界全体で15%以上減少し、オゾンも全球で2%減少したと見積もられた^{大気6)}。NOxの主成分であるNO₂濃度については、先述のとおり、最新の人工衛星が、世界的な分布を日々・都市の内部まで解像して描き出すまでになり、排出量減少の推定の根拠となったほか、ロックダウン前後を比べた画像は報道でも多く取り上げられた。

首都圏について衛星データと地上リモートセンシング観測を組み合わせた解析^{大気7)}からは、2020年1年間ではNO₂濃度は約10%減少し、緊急事態宣言下では40%を超える減少を示した地域もあったことが分かった。また、NO₂の週内変化の振幅が顕著に大きくなったことも分かった。この変化は、近年稀であり、他国と比べて異常なほど減少した日本の週末の人流と同期していることが分かった。これは、日本では厳しい法的規制がなされなかったにもかかわらず、パンデミックの拡大を抑えるための自主規制が強く働き、一般的な習慣が変化した結果、独特の大気質の変化を生じさせたものと解釈されている。

季節風により中国から西日本へ飛来するBC粒子濃度をコロナ前後で比較した研究^{大気8)}からは、中国での主な排出部門が「家庭」と確かめられた。2020年の平時からの排出減少幅はピーク時でも18%減と比較的小さく、ロックダウン時にも排出レベルが維持された「家庭」部門からの寄与が産業・交通部門より多いためと解釈された。このことで、効果的な排出削減対象を絞り込むことができ、限界削減費用についても評価された。

② 極端な気候現象と大気-陸面環境への影響評価

地球温暖化などの気候変動の進行を一つの要因として、ここ数年の間に地球上の様々な地域で異常気象が発生しており、それらの影響が大気-陸面システムにも大きな影響を与えている。異常気象は大気だけでなく陸面にも大きな影響を与えており、その結果、大気環境にさらに大きな影響をもたらす。2018年における東アジアや欧州における熱波（異常高温）は、特に欧州においては乾燥が伴ったことにより、植生の生産量が減少するなどの影響があった。2020年の春～初夏においてはシベリアの北部で8万年に一度とされる規模の異常高温を示した。このように、永久凍土の融解や森林火災の発生などのリスクが高まっている。米国における2020年の森林火災においても解析が行われている。2022年においても欧州や中国で猛暑・干ばつが報告されており、これらが大気-陸面環境に与える影響が危惧されている。これらの現象は、衛星リモートセンシングなどで、早急なモニタリングが可能になってきている。

■ 海洋の観測

① 国連 持続可能な開発のための国連海洋科学の10年

2021年から「持続可能な開発のための国連海洋科学の10年」(以下、「国連海洋科学の10年」)が始まった。国連海洋科学の10年は、海洋の持続的な開発に必要な科学的知識、基盤、パートナーシップを構築すること、および、海洋に関する科学的知見、データ・情報を海洋政策に反映し、多くのSDGs達成に貢献することをめざしている。この目的の実現には、海洋観測の充実が不可欠であり、重点的な取り組みの一つに、海洋観測システム、データシステム等の基盤強化が挙げられている。具体的な取り組みとして、GOOSが提案または共同提案した3つの「海洋科学の10年」プログラムが実施されている。Ocean Observing Co-Design (ObsCoDe) は目的に合った全球海洋観測システムを共同設計するためのプロセス・インフラ・ツールの構築を目指す。Observing Togetherはあらゆる観測を考慮して、必要とされる観

測や予測をグローバルなデータストリームに流してユーザーに提供することを、関係コミュニティの支援を通じて目指す。CoastPredictでは全球における河川流域から陸棚斜面までの沿岸域における観測と予測の変革を目指す。Core・BGC・Deep Argoを一体としたフロート観測構築を目指すOneArgoは、ObsCoDeの下の「海洋科学の10年」プロジェクトと位置付けられた。

② G7 気候・エネルギー・環境大臣会合

2022年5月にドイツ・ベルリンで開催されたG7気候・エネルギー・環境大臣会合では、健全な世界の海とレジリエントな海洋・沿岸生態系が極めて重要であるとの認識を共有し、G7内外の海洋ガバナンスの強化、科学的協力、大胆な海洋行動に対する緊急の必要性を強調し、これに貢献することに合意した。会合コミュニケおよび付属書で、G7 Future of the Seas and Oceans Initiative (FSOI) を通じて、継続的に、BGC Argoの推進や持続的海洋観測のガバナンス・調整・資金確保の強化に貢献することなどが表明されている。

③ ArgoプログラムがIEEE Corporate Innovation Awardを受賞

Argoが2022年度「IEEEコーポレートイノベーション賞」を「For innovation in large-scale autonomous observations in oceanography with global impacts in marine and climate science and technology」で受賞した。この賞はIEEEの関連領域における教育、産業、研究およびサービス等に関する傑出したイノベーションを表彰するもので、日本からはソニー株式会社（1986年）、セイコーエプソン株式会社（2002年）、トヨタ自動車株式会社（2007年）、パナソニック株式会社（2012年）が受賞している。持続的な海洋観測ネットワークを構築・維持するArgoプログラムの受賞は異例だが、Argoの革新性と、科学・技術だけでなく社会への大きな波及効果が評価された。

④ 世界気象機関（WMO）が新たなデータポリシーを採択

WMOは、観測技術や通信技術、数値予報技術などの科学技術の進展に伴う気象業務に利用可能な観測データの増加を踏まえて、1995年に採択された気象データの国際交換に関する基本的な方針（データポリシー）を見直した。気象に限らず様々な分野も含めたデータの国際交換に関するポリシーとして検討し、2021年10月の臨時総会で新たなデータポリシーを採択した^{海洋12)}。このデータポリシーでは、気象、気候、水文、大気組成、雪氷圏、海洋、宇宙天気⁷の7分野を対象とし、あらゆる気象業務の基盤となる全球数値予報に必要な不可欠な観測データと、全球数値予報による予測結果（プロダクト）の世界的な共有を目的とし、各分野における国際交換されるべきデータの要件が定められた。これらの要件の具体は、WMOが管理する技術規則に定められ、科学技術の進展や気象業務に必要なデータのニーズ等を踏まえ、必要な改定を行っていくことになっている。海洋データが、気象業務で明確に位置付けられたことにより、持続的な海洋観測へ気象機関の関与の強化が期待される。関連する動きとして、全球海洋観測システムのパフォーマンス向上のためのモニタリング、メタデータの標準化・統合の先導、運用のサポートと強化、新しいデータストリームと観測ネットワークの実現などを目的として、GOOSの下に置かれている組織OceanOPSのリーダーのポジションがWMOの通常予算によって措置されるようになった。

⑤ 気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第6次評価報告書の公表

IPCCは第6次評価プロセスの一環として、2021年8月9日に第1作業部会の報告「気候変動 - 自然科学的根拠」、2022年2月28日に第2作業部会の報告「気候変動 - 影響・適応・脆弱性」、2022年4月4日に第3作業部会の報告「気候変動 - 気候変動の緩和」をそれぞれ公表した。第6次評価プロセス最後の統合報告書は2023年3月の公表を目指した作業が行われている（2023年3月13日時点）。2019年9月に公表された「海洋・雪氷圏特別報告書」で指摘した海水温や海水位などの海洋の変化が継続あるいは

強まっていることを指摘し、生態系や社会への影響の広がりや将来の見込みも更新された。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■大気・陸域の観測

① 温室効果ガスと短寿命成分の統合解析・同時制御 (GHG/AQ 統合解析)

衛星によるGHGsとSLCFsの計測を統合し、両者に共通となる化石燃料燃焼などの発生源を特定し、排出を定量化する取り組みが、実装へ向け着実に進展している。Sentinelシリーズで知られる欧州Copernicus計画の地球観測衛星ミッションでは、6つの新規ミッションの1つにCO₂とNO₂を計測するCO2Mミッションが選定され、この取り組みを推進している。日本でもGOSAT-GWにてCO₂大規模排出源の特定の目的でNO₂計測を取り入れることとなり、研究開発の起爆剤となることが期待されている。IPCCの第7次サイクルでは、UNFCCC (国連気候変動枠組条約) への従来の国別GHGs排出推計にSLCFsを追加していく動きが始まり、その検証観測も重要となる。共通排出の理解に加え、両データを数値モデルへ同化させ、CH₄の消失を支配するが大気質化学反応で決まるOHラジカルの理解向上を進展させることも重要である。SLCFは大気汚染物質であり大気質(AQ)にも深く関わるため、これらはGHG/AQ統合解析とも呼ばれる。今後に向けては、地上観測・衛星観測・モデルを統合した解析が有意義である。わが国の地上拠点である綾里・南鳥島・与那国島・昭和基地(WMO全球大気監視計画サイト)、千葉・沖縄辺戸岬・福江(SKYNET・A-SKY・AD-NET他の共通サイト)、能登・波照間島・落石・東京スカイツリーなどの研究・モニタリングサイト、つくば・佐賀・陸別(TCCONサイト)、EANET(東アジア酸性雨モニタリングネットワーク)局などの活用も望まれている。

② 大気汚染・温室効果ガスの静止衛星観測の動き

※詳細は2.10.1 地球環境リモートセンシング領域に掲載

③ 地球観測衛星の戦略立案の新たな道筋：グランドデザインと提言

※詳細は2.10.1 地球環境リモートセンシング領域に掲載

④ 北極観測研究の重点化と船舶観測

温暖化の進行が著しい北極域の気候環境変動メカニズムを明らかにするための観測研究が世界的に重要視されている。日本もArCS-II北極域研究加速プロジェクト(2020-2024年度)などにおいて、炭素やブラックカーボン循環や生態系変動の理解を進めるための現場観測などを推進している。国際的には、ドイツ連邦教育省の砕氷船R/V Polarsternを海氷域に閉ざして実施する通年観測計画MOSAic(2019-2020)が実施され、国際北極科学委員会(IASC)と地球大気化学国際協同計画(IGAC)の合同アクティビティPACES (air Pollution in the Arctic: Climate Environment and Societies、北極域大気汚染と地球の気候環境と人間社会の相互作用プロジェクト)の活動や、北極評議会・北極モニタリング評価プログラムでのSLCFアセスメントレポート(2022年)への知見集約が進んだ。文部科学省では砕氷能力のある北極域研究船の建造^{大気9)}が進められており、通年での北極観測などへの新たな展開が期待されている。北極以外での船舶観測は研究船や商用船等を利用し気象庁・海洋研究開発機構・国立環境研究所などが実施している。

2020年1月、国際海事機関により、船舶からのSO_x排出基準が3.5%から0.5%に世界的に大幅強化されたことに伴う気候・環境への影響にも注目が集まった^{大気10)}。また、GHGsの排出低減に向けた議論も行われている。

5 航空機観測関連

2018年以降、NASA専用航空機による南極～北極にわたる高度プロファイル計測 (ATom等) や森林火災による大気組成変化観測 (FIREX-AQ)、ドイツ専用機HALOによるアジア観測 (EMeRGe-Asia) などが、長寿命気体・エアロゾル・SLCFsを網羅する形で総合的に実施された。2024年には、NASA専用航空機によるアジア上空での大気組成総合観測 (Asia-AQ) が計画されている。日本では、科研費・新学術領域研究プロジェクトにおいて、2022年にチャーター機によるエアロゾル・雲集中観測が船舶観測と同期して実施された。しかしながら、依然として観測専用機は保有しておらず、欧米だけでなく、中韓にも遅れをとっている。

6 グローバルカーボンプロジェクト (GCP: Global Carbon Project)

GHGs濃度の上昇速度を減少させるための地球規模の政策決定や科学的理解を助けるために2001年に設立されている。本プロジェクトでは、2007年以降、大気-陸域、大気-海洋間などの自然炭素収支と化石燃料燃焼や土地利用変化などの人為的排出量を毎年更新している。さらにその中に地域別炭素収支を推定するRECCAP (REgional Carbon Cycle Assessment and Processes: 地域炭素収支評価) があり、現在はRECCAP-2の成果が出はじめているところである。さらにCH₄や亜酸化窒素についても同様の解析が進み、成果も公表されている。また、これら分野はIPCC報告書における生物地球化学分野における重要な貢献となっている。

7 Google Earth Engineなどのオープンなデータ解析プラットフォーム

Google Earth Engineでは、様々な衛星データ、気象データが収集されており、クラウドコンピューティングを利用して、大量データの解析が行える仕組みを提供する。特に個人研究者レベルでは扱うことができない大量のデータを所有しており、簡単なスクリプトを書くことで様々な解析ができるようになっている。Landsat衛星やSentinel-1, 2衛星データなどの空間解像度の細かいデータ (10~30 m程度) に加えて、中空間分解能 (1 km程度) の衛星データなど広域の気候変動観測にも利用可能なデータセットも準備されている。

8 対流圏オゾンアセスメント (Tropospheric Ozone Assessment Report: TOAR)

TOARは、2020~2024年の第二期 (TOAR-II) に入り、最終年での論文化へ向け、国内外の研究者がオゾンの地上観測等の全球規模収集とトレンド・気候影響評価等を継続している。IPCC報告書などの大きなアセスメントの前に、物質毎・地域毎などでの知見を適切に集約しておく活動のモデルともみなされる。我が国ではPM_{2.5}やオゾンの観測は越境大気汚染・都市汚染と気候変動両面で重要である。

9 グローバル・メタン・プレッジ

排出削減による降温効果がCO₂より短期に期待されるCH₄について、2030年までに2020年比30%削減することを目指したイニシアチブで、主導した欧米に加え、2021年のCOP26までに、日本を含め100以上の国と地域が参加を表明した。

10 エネルギーのグリーン化がもたらす副次的作用に関する評価

新たなエネルギーキャリアとして注目される水素の大気への大量漏出が、OHラジカル濃度を低減させ、CH₄の寿命を延ばし間接的に温暖化を促す効果について、大気化学輸送モデルを用いた評価が欧米中心で取り組まれている。アンモニア漏出・混燃が窒素サイクルやオゾンへ与える影響などについても実環境中での現実的な評価が必要である。

■海洋の観測

① GO-BGC (Global Ocean Biogeochemistry Array、全球海洋生物地球化学アレイ)

U.S. National Science Foundation (米国立科学財団) が2020年10月に採択したプロジェクト GO-BGCは、2021年からの5年間に、5~6つのBGC変数を計測するBGC Argoフロート500台を全球に展開することを目指している。予算総額は5290万ドルである。「国連海洋科学の10年」のContributionとして認定されている。OneArgoが目指す1000台のBGC Argoフロート展開の半分に相当し、BGC Argoのglobal demonstration projectと位置付けられる。GO-BGCによって、BGC Argoデータの品質管理手法の開発、BGCフロート・センサー技術の向上が進むと期待される。

② Observing Air-Sea Interactions Strategy (OASIS)

SCOR Working Group #162 - Developing an Observing Air-Sea Interactions Strategy (OASIS) によって提案された「国連海洋科学の10年」プログラムOASISが採択され、2021年に開始した。大気海洋相互作用の科学的知識の向上と大気・海洋境界層と大気・海洋交換過程をあらゆるスケールで監視する観測能力の格段の向上を通じて、気象・気候・海洋予測を根本的に改善し、健全な海洋、ブルーエコノミー、持続可能な食糧・エネルギーを推進するための観測に基づく知識を提供することを目指す包括的なプログラムである。観測の拡充に必要な予算として、5年間にわたり年間2億ドル以上、モデリングと予測、予報に関わる活動に計1億ドル以上を見込んでおり、提案時点で、それらの約50%がNOAA、NSFなど複数の財源により確保済みとされていた。

③ Deep Ocean Observing Strategy (DOOS)

主に2,000 m以深の深海の観測を、「海洋観測枠組み (Framework for Ocean Observing)^{海洋13)}」に基づき推進するGOOSプロジェクトである^{海洋14)}。学界、産業界、NGO、各国政府、国際政府機関を含む深海に関わる幅広いパートナーシップの下、今後数十年にわたり物理学、生物地球化学、生物/生態系科学における深海の課題解決に資する重要な知見を継続的に提供できるような観測システムの構築を目指している。DOOSは、同名の「海洋科学の10年」プログラムとしても採択された。

④ Synergistic Observing Network for Ocean Prediction (SynObs)

SynObsが「国連海洋科学の10年」プログラムForeSea-The Ocean prediction Capacity of the Futureの下でのプロジェクトとして2022年に認定された。ForeSeaを主導するOceanPredict (海洋予測に関する国際共同研究) の観測システム評価タスクチームが実施主体である。筆頭パートナー機関は気象庁気象研究所で、日本がリーダーシップをとって各国の予報現業機関が参加している。目的は、衛星観測と現場観測、外洋の観測と沿岸の観測など、様々な観測の組み合わせから得られる、海洋・結合予測に対する効果の最大化である。観測システムのインパクト評価や設計を通して、異なる観測プラットフォームの最善の組み合わせを見つけ、相乗効果が得られるようなデータ同化スキームの開発を目指している。海洋観測データのパワーユーザーである海洋予測コミュニティと観測コミュニティの連携強化が期待されている。提案時点で確保されている運営予算は無かった。

(5) 科学技術的課題

■大気・陸域の観測

① 小型センサやドローン、分光技術の気候変動観測への利用

従来、大気汚染ガス (CO、NO_x、O₃、SO₂) や粒子状物質 (ブラックカーボン等)、GHGsは、ラックマウント型の比較的高額な機器により計測されてきた。近年、技術の進歩により、適度な精度を保ったまま価格やサイズが2桁程度低下したローコスト小型センサが多点稠密観測やドローン搭載観測に活用される

ようになった。市民と一体となったIoT型の計測や、Society5.0への貢献を視野においたきめ細やかでスマートな社会情報発信なども期待されている。一方、長期安定性や信頼度の向上、ドローンでの安全確保やルール確立が課題である。衛星や航空機からのイメージング分光によるリモートセンシングでは、可視・紫外から近赤外～熱赤外への波長域拡張が応用範囲の大幅な拡大を生むと期待されており、ハイパースペクトルカメラの応用などと合わせ、大気汚染物質・GHGs・植生・海色・生物多様性などの高度な観測を視野に入れて研究開発を進めることが重要になる。

② 衛星ライダーによるエアロゾル・温室効果ガス観測

※詳細は2.10.1 地球環境リモートセンシング領域に掲載

③ ビッグデータへの対応

ひまわり8・9号をはじめとした静止衛星観測等の高機能化により、観測データ量が飛躍的に増大した。そういったビッグデータへの対応が課題となっている。データのアーカイブだけでなく、リアルタイム利用を可能とするサービス体制の充実化などによりデータ利活用を促進することも重要である。気候変動等に伴って頻発していると考えられる「広義の安全保障」に関わる防災情報をリアルタイムに自治体などが活用できる仕組みもここに含めて考える必要がある。

④ 人為的GHGs排出量推定の見直し

Global Carbon Projectなどにおいて、様々な手法間における炭素収支量の比較解析により、人為的GHGsの排出量にも不確実性が高いことが示されてきた。主には、化石燃料によるGHGs排出量や、土地利用変化によるCO₂排出量である。特に、後者は、地上観測と衛星観測を組み合わせると不確実性を低減できると考えられているが、まだ道筋はたっていない。

⑤ 河川を通じた流出など個々の素過程を明らかにする必要性

Global Carbon Projectなどにおいて、様々な炭素フラックスを比較して、整合性を確認すると、河川を通じた陸から海へのCO₂フラックスなど、推定を向上させる必要があるフラックスは多い。その他にも農作物の収穫による炭素フラックスなど、多くの点を改善する必要がある。これらの理解には地上観測や統計データ（インベントリデータ）が非常に重要な役割を果たすこととなる。

⑥ 種々のデータの統合的解析

個々の研究結果の長所・短所を踏まえて、様々な研究結果を利用した統合的な解析が進められている。例えば、種々のリモートセンシングデータや地上観測データを利用した統合的研究として、独立した手法からの成果を多面的に見ることによって、各手法の長所・短所や、今後必要な研究が明らかになる。近年はこういった統合的な解析が普及しつつあり、この傾向は今後も続くと思われる。

⑦ 最新世代の静止気象衛星観測網を利用した陸域モニタリング

衛星リモートセンシングは、広範囲を同一基準で観測ができるために有意義である。現在MODISセンサなどの周回衛星データが広く用いられているが、特に熱帯地域では雲の頻度が高く植生のモニタリングが非常に困難である。ひまわり8・9号に代表される最新世代の静止気象衛星では可視・近赤外域の観測バンド数が増え、陸域モニタリングへの応用が期待されている。静止気象衛星は10分等の高い時間分解能をもつため、熱帯雨林などの雲被覆の多い地域のモニタリングに有効である。また、植生の展葉・落葉フェノロジーなど時間分解能を向上させたい現象のモニタリングにも有効である。さらには、米国・中国・韓国・欧州の静止衛星を融合したグローバルでの10分毎などの超高頻度観測データの構築によるグローバル

ルスケールでのモニタリングへと展開されるとみられる。

■海洋の観測

① プロファイリングフロート技術の向上

Argoプログラムに用いられている主なフロートは、現在のシェア順で米国 Teledyne Webb Research 社製 APEX、フランス NKE-INSTRUMENTATION 社製 ARVOR、米国 Sea-Bird 社製 NAVIS、米国 スクリプス海洋研究所の SOLO-II、米国 MRV 社製 S2A である。経費削減・投入機会確保・環境負荷軽減の観点から Argo の持続可能性を高める上で効果的なフロートの長寿命化は概ね年々進んできている。最も成績の良い SOLO-II では、2018 年に投入されたフロートは全て 36 サイクル観測（1 年に相当）を完了し、2015 年に投入されたフロートの約 90% が 144 サイクル（4 年相当）を完了した。しかし、機種によって故障率が異なり、たとえば ARVOR では約 5% のフロートが 36 サイクルに達しておらず、144 サイクルに達する割合も 5 割程度となっている。技術的完成度を高める努力が望まれている。トップレベルの寿命を達成している機種では、バッテリーの長寿命化が課題となっている。スクリプス海洋研究所が米国 Tadiran 社製ハイブリッド型リチウム電池を長期試験し、良好な結果を得ており、140～150 サイクル（寿命 10 年以上）の達成が見込まれている。より長期的な視点から、環境負荷の軽減のための化学物質排出削減等につながる抜本的な改良も望まれている。

② Argo フロート搭載 CTD センサの多重性・代替性の確保

Argo 計画開始直後の一時期を除き、Argo に用いられているフロートに搭載されている CTD センサ（Conductivity Temperature Depth profiler、※電気伝導度（塩分）・水温・圧力（深度）計）は、米国 Sea-Bird 社製 SBE41 または SBE41CP である。一社独占の状況は、観測網の安定的な維持には好ましくない。過去 2 回、製品の不具合により、CTD の供給が滞り、Argo 観測網の維持に重大な支障をきたした。国際 Argo 運営チームは、新たなセンサを Argo に導入する際の手続きを整備し、フロートに搭載可能で長期間安定した新たな CTD センサの開発を奨励している。しかし、長期安定性の実証などのハードルは高く、現在パイロットフェーズとして搭載されている新たな CTD センサの製造元であるカナダ RBR 社は、経費の面から、開発を継続できるか否かの岐路に立たされていたが、国際 Argo 運営チームによる積極的な試験投入の呼びかけもあり、事業を継続し、Argo プログラムによる正式採用を目指している。この事例は、センサ開発を民間企業の努力だけに頼るあり方の限界を示しているといえ、公的資金による支援の仕組みが望まれる。

③ BGC Argo フロート搭載生物地球化学センサ技術の向上

BGC Argo が対象とする 6 つの生物地球化学変数を計測するセンサは既に実用化されているが、長期安定性の向上が不可欠である。BGC Argo の持続可能性の確保には、センサの低価格化も必要である。さらに長期的には、CTD センサと同様に多重性・代替性の確保する必要もある。

④ データ提供・活用技術の向上

プロファイリングフロートや水中グライダーなどの自律型プラットフォームによって膨大な海洋データが蓄積されつつある。それらのデータを、研究現場から実社会までの幅広いコミュニティが目的に応じて自由かつ適切に利用可能にする技術向上が望まれる。従来のデータベース化やデータプロダクト作成の枠に留まらず、分野横断的に利用できれば、統合的な海洋観測の価値を高めることにつながる。

(6) その他の課題

■大気・陸域の観測

① 長期観測の実施体制

※詳細は2.10.1 地球環境リモートセンシング領域に掲載

② 観測専用航空機

先端的で高精度な観測装置を搭載でき、エアロゾル・雲の相互作用などの現象解明の切り札となる観測が実施できる観測専用航空機が新たに必要である。航空機観測はGHGsなどの実際の観測に加え、台風や集中豪雨などを直接観測することで予測精度が向上し、防災効果も得られる。欧米では観測専用航空機によりGHGs観測やハリケーンの直接観測などが行われているが、東アジアは系統的な航空観測の空白域である。これを打破すべく、日本気象学会が中心となり「航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進」研究計画書を提案し、「第24期学術の大型研究計画に関するマスタープラン2020」の重点大型研究計画に選定された。2022年の日本地球惑星科学連合大会でも大型研究計画として提案された。既存航空機を利用した観測の継続・拡大や、無人機の地球観測利用などの実績の蓄積から次への発展が期待されている。

③ 次世代の育成

次世代研究者の育成など、優秀な人材の輩出が急務である。特に近年では、日本人の博士課程学生数が低調で、40歳前後の中堅研究者層が未だ若手研究者と捉えられている現状がある。一方、中国では博士課程の学生数や若手研究者数は非常に充実している。さらに多くの学生・研究者が海外機関で研究をする機会を得て、活躍している。次世代の育成にあたっては、シニア研究者層がこれから研究者を目指す学生層に対して魅力を伝え、海外経験などの幅広い経験を提供し、良い教育を行う一方で、若手層のポジションの確保も重要である。

■海洋の観測

Argoの拡張等をリードしている欧米の研究機関では、科学研究部門と技術開発部門が密接に協力して、フロートやセンサを開発・改良している事例が多い。サイエンスの目的に即した技術開発が効果的に行われ、技術開発の成功が新たなサイエンスの開拓につながるという好循環ができています。ある程度完成した技術を民間に移転する、あるいは、新たなベンチャー企業を立ち上げるなど、測器の量産体制への移行も比較的にスムーズに行われている。日本では、具体的なサイエンスの目的を共有した科学研究者と技術開発者の連携が弱く、欧米のような好循環が生まれにくい課題がある。革新的な技術開発はもちろん、観測技術の漸進的改良においても日本が世界に貢献するためには、中長期的な目的を共有した研究者・技術者間の持続的な連携を可能にする仕組みが望まれる。

研究船の共同利用制度は、研究のアイデアはあるものの十分な観測資源・技術を有していない研究者の支援などの面で、観測的海洋研究の振興に大きな役割を果たしてきた。水中グライダーに代表される自律型観測プラットフォームの運用には、高度な技術・専門知識とマンパワーが必要だが、これらの観測プラットフォームを利用する個々の研究者にそれを求めるのは極めて非効率的であると考えられる。日本でも、欧米並みに自律型観測プラットフォームの運用を集中的に行う組織の整備が望まれている。

分野横断の統合的海洋観測と社会的な課題の解決とを結びつけるうえで、国際的な枠組みや目標とは別に、日本としても独自の目標の設定や日本の事情に即した効果的な国内連携の仕組み作りが必要とされている。欧州のEuroGOOS、豪州のIMOS (Integrated Marine Observing System)、米国のIOOS (Integrated Ocean Observing System)などを参考に、活動の成果をBest Practiceとして発信し、西太平洋地域の活動をリードすることが望まれている。

(7) 国際比較

■大気・陸域の観測

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●CO₂、SLCFs (CH₄、NO_x等)、水循環を総合的に観測するGOSAT-GW衛星の解析システム・科学利用研究の準備が進展し、GHG/AQ解析の方向性も見えつつある。衛星および地上からのエアロゾル観測にも一定の進展がある。 ●2021年公表のIPCC第6次評価報告書WG1では、関連チャプターへのリードオナー、レビューエディターとして貢献があり、国際社会への知見提供や、社会への知見の還元がなされた。 ●大気組成のデータ同化、国際連携観測などでも着実な発展がみられる。 ●個々の観測を統合的に解析する分野での人材確保が必要である。また全般に若手研究者の育成に問題を抱えている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●現場観測のためのユニークな観測機器・技術開発が一部にみられるが拡大していない。GOSAT-GWや静止衛星などのデータ解析技術に関し、基礎研究が進展しており、社会実装などの波及効果が期待できる。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●国として、戦略的/長期的な視点に基づいて、競争的環境の中で様々な基礎研究を進めている。問題設定に優れ、航空機観測なども用いて、課題解決を強く意識した、発見性の高い研究成果を挙げている。若手研究者の層も厚い。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●ベンチャー企業などが地上観測での先端的な機器開発を多く手掛けている。
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●先端的な衛星データと地上観測の連携や、国際標準作りが活発である。さらに各国が上手く連携・共同研究を進めている。新規衛星観測ミッションのための基礎研究の充実度は卓越している。 ●英国は気候変動と関連するプロセス理解の増進で成果が多くみられる。 ●ドイツは研究の層が厚く、北極観測や航空機観測などについても総合的かつ主導的に実施している。傑出した研究機関があり、組織として上手く研究が進められている。 ●フランスでは環境研究の積極的な推進策が見られる。伝統的な赤外衛星観測と解析で進展がみられる。傑出した研究機関があり顕著な成果をあげている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●ECMWF (欧州中期予報センター: European Centre for Medium-range Weather Forecasts) やCopernicus計画でのサービスや、高解像度衛星の実現などにおいて、顕著な成果が上がっている。新型コロナウイルスの世界的蔓延による経済活動低下に関する大気汚染衛星データを社会へ広く発信し、浸透した。 ●英国はグローバル・メタン・プレッジの評価研究、ECMWFでの大気組成データ同化による再解析データ配信などが活発である。 ●ドイツは精度等の性能に優れた計測機器の継続的な開発がみられる。 ●フランスはライダーなど計測機器の継続的な開発がみられる。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●大気汚染やGHGsの現場・航空機・衛星観測に進展がみられ、自国の技術も活用しながら欧米を追いかけている。若手研究者、博士課程学生の層が厚く、人材には非常に恵まれており、今後の著しい発展が期待される。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●独自の技術での製品化はみられるが、自国での活用の域を出ていない。
韓国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●2020年に、世界初となる静止衛星からのGEMS大気汚染計測を実現し、関連したアジア全域検証網の提案するなど、研究開発が活発化している。自国のセンサ開発は乏しい。若手研究者の育成については、日本と似た問題を抱えている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●機器開発の産業化などにおいては活発な状況はみられない。

■海洋の観測

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●海洋における気候変動観測のバックボーンといえるArgoについて、海洋研究開発機構と気象庁が密接に連携し、米国に次ぐグループでの貢献を維持している。一方、Argoの深海への拡張（Deep Argo）では米国に次ぐグループにいるが、生物地球化学への拡張（BGC Argo）では遅れている。 ●全球船舶海洋観測プロジェクト（GO-SHIP）では、米国に次ぐグループで貢献をしている。 ●欧米に比べ、組織的な水中グライダー観測が遅れている。2016年に立ち上げられたグライダー観測網のグローバルなネットワークOceanGlidersには積極的に参加していない。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●国際的にプロファイリングフロートや水中グライダーなどの自動観測プラットフォームの活用が進んでいるが、国内における開発・製品化がほとんどなく、海外展開が弱い。国産で4000 m級の深海プロファイリングフロートDeep NINJAや、自動観測プラットフォーム搭載型の溶存酸素センサRINKOが開発されたが、利用実績が国内機関に留まっている。欧米と比較して、海洋における気候観測を推進するための組織的な国内連携・協力体制が弱い。 ●JAMSTECが開発した多目的小型観測フロート（MOF）、多目的観測グライダー（MOG）、CTDセンサ等の製造・販売を合同会社オフショアテクノロジーが始めた。MOFは浅海用であり、現時点でArgoプログラムには使用できないが、今後、測器開発と基礎・応用研究の連携を推進する上で、注目すべき動きである。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●世界の海に展開されているArgoフロート約3900台のうち2100台以上、BGC Argo、Deep Argoでも全体の半数前後を運用しており、文字通り世界をリードしている。その多くは、NSFの研究資金による南大洋観測のSOCCOMプロジェクトによって展開されたものである。OneArgoを構成するBGC Argoの目標運用数1000台の半数に相当する500台のBGCフロートを5年間で投入するNSFプロジェクトGO-BGCを2021年に開始した。 ●GO-SHIPも主導している。 ●外洋と沿岸をつなぐ観測網として水中グライダーを組織的に展開して、国際ネットワークOceanGlidersを欧州とともにリードしている。 ●測器やセンサの供給、データ品質管理、データプロダクト作成などの面でも世界の観測研究を牽引している。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●大学・研究機関内で技術者と研究者が協力して有用な次世代測器やセンサを開発できる、観測現場と開発現場の近さが大きな強みであり、その成果である製品を世界に供給している。 ●自動観測プラットフォームによる観測の推進でも、常に先頭を走っている。Core Argo、BGC Argo、Deep Argoの統合など、NOAAと有力大学・研究機関等が協調した長期的研究計画の立案を行っている。 ●温室効果ガスの観測に変革をもたらしたキャビティリングダウン分光装置を開発し市販しているPICARRO社、LOS GATOS Research社はともに米国のベンチャー企業である。 ●世界の海に4000台近くが展開されているArgoフロートの大半は、“Navis”（Sea-Bird Scientific）、“APEX”（Teledyne Marine）、“Alamo”（MRV Systems）などの米国製である。それらに搭載されている水温・塩分・圧力センサのSBE41 CTD（Sea-Bird Science）も、米国企業の製品である。 ●National Oceanographic Partnership Program（NOPP）の支援により、深海フロート用CTDセンサSBE-61 CTDの改良、BGC利用を可能とするSOLOフロートの拡張、BGCフロート用の新たなセンサーの開発を進めている。

2.7 地球システム観測・予測

欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●欧州各国が協調してArgo全体の25%に貢献することを目指すEuro Argoは2014年からEuropean Research Infrastructure Consortium (ERIC)として活動しており、欧州独自の関心も反映させつつBGC Argo、Deep Argoにも積極的に取り組んでいる。欧州各国の政府機関・研究機関・民間企業による協会EuroGOOS (European Global Ocean Observing System)が沿岸観測・データ活用・科学研究・技術開発・海洋リテラシー普及等の各分野に組織的・計画的に取り組んでいる。 ●ドイツはArgoフロートを約230台展開し、国別4位の貢献である。そのうちBGCセンサ(酸素センサを含む)が搭載されたArgoフロートは12台で国別10位である。GO-SHIPやOceanGlidersにも参加している。海洋CO₂観測に加え、数値モデリングでも水準の高い研究が行われている。アルフレッドウェゲナー研究所(AWI)、GEOMARヘルムホルツ海洋研究キールセンター、ハンブルク大学CENなど主要研究機関・大学・博物館等からなるドイツ海洋研究コンソーシアム(KDM)が気候観測分野を含む戦略的研究計画立案、インフラ管理、政策決定者への提言などを担っている。海洋数値モデルによる物質循環の研究も高い水準にある。 ●フランスはArgoフロートを約270台展開し、BGC Argo、Deep Argoでも米国に次ぐ貢献をしている。CORIOLISプログラムを通じて、Argoデータを含む現場観測データの管理・プロダクト作成を組織的にを行い、欧州はもちろん世界のデータセンターの役割を担いつつある。OceanGlidersプログラムを主導している。 ●英国はArgoフロートを約140台展開し、国別7位の貢献をしている。GO-SHIPでは、米国に次ぐ貢献をしている。Met Office(英国気象庁)、国立海洋学センター(NOC)、プリマス海洋研究所(PML)が連携してArgoを推進している。GO-SHIPにも貢献している。気象庁が作成・公開している水温・塩分データプロダクトEN4は、気候研究に世界で広く用いられている。 ●ノルウェイは積極的にArgoフロートの展開を進めており、現在約50台を運用しており、うち約30台がBGCフロート(国別3位)である。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●大西洋における統合的な海洋観測システムの最適化と強化を目指したEU Horizon 2020プロジェクトAtlantOSが2019年9月に終了し、欧州の枠を超えた新たな国際プログラムAtlantOS(All-Atlantic Ocean Observing System)に移行したが、今後の予算措置は不透明である。 ●ドイツは2019年に国内BGC Argoグループ(ICBM、IOW、GEOMAR)を設立し、資金提供官庁との交渉を継続している。 ●フランスはフランス海洋開発研究所(Ifremer)がフロートやセンサの技術開発を積極的に進めている。IfremerがArgoフロートを市販しているnke instrumentation社と協力して、BGC Argo、Deep Argoを含むフロート供給の米国に次ぐ拠点となっている。特に、観測目的の応じた多種のBGCフロートを実用化している点に特色がある。 ●英国は国立海洋学センター(NOC) Marine Robotics Innovation Centerがハブとなり、科学研究と民間企業を結び付けて自動観測プラットフォームの開発を進めている。
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●Argoフロートを約60台展開し、BGC Argo(約20台)とDeep Argo(3台)にも貢献している。自国の通信システムBeiDouの利用、国産のプロファイリングフロートHM2000の展開を進めている。 ●「青島海洋科学・技術国家実験室」に世界中から人材を集め、砕氷船や観測船の建造を進めるなど、海洋研究の強化に力を入れている。 ●海洋のCO₂研究では、砕氷船による北極海観測などを実施しているが、その他の活動については詳しい状況や成果が不明である。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●Argoの3か年(2020-2022年)計画が1200万ドルの予算で承認され、400台規模の展開を行う見込みである。BGC Argo、Deep Argoにも積極的で、とくにDeep Argoについては、フロート開発に5か年で約450万ドルの予算を充てており、深海用モデルHM6000の開発を進めている。

2.7

地球システム観測・予測

韓国	基礎研究	○	→	●韓国気象庁 (KMA) がArgoフロート約20台を日本海と東シナ海に展開し、KIOST (韓国海洋科学技術院) がTPOS2020 などに参加している。海洋研究に力を入れ、海洋CO ₂ 観測も実施しているが、まだ顕著な成果が見えていない。
	応用研究・開発	△	→	●Argoフロートがカバーしない東シナ海から黄海の浅海域3か所で、観測プラットフォーム (Ocean Research Station) をKIOSTが長期間維持している。物理・生物地球化学データを外部研究者との共同研究に供しており、幅広い応用研究・開発への活用のポテンシャルはある。
その他の国・地域	基礎研究	◎	→	●豪州はArgoフロート約310台を南太平洋・インド洋を中心に展開し、米国に次ぐ大きな貢献をしている。GO-SHIPでも南大洋で重要な貢献をしている。IMOSによって沿岸域の観測を組織的に整備し、水中グライダーの運用も活発である。 ●カナダは現在約150台のArgoフロートを運用しているほか、OceanGliders、GO-SHIP等の国際プログラムに継続的・組織的に貢献している。
	応用研究・開発	◎	↗	●カナダは小島嶼開発途上国支援も念頭に、主にBGC Argoに貢献する新規予算 (4年間で560万ドル) を2018年のG7会合で発表し、フロートの寄贈など途上国支援を進めている。RBR社が省電力・低価格のフロート用CTDセンサを開発し商品化している。長期安定性の検証が課題だが、米国SeaBird社の独占状態の解消が期待される。

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発 (プロトタイプの開発含む)・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・気候変動予測 (環境・エネ分野 2.7.2)
- ・水循環 (水資源・水防災) (環境・エネ分野 2.7.3)
- ・生態系・生物多様性の観測・評価・予測 (環境・エネ分野 2.7.4)
- ・農林水産業における気候変動影響評価・適応 (環境・エネ分野 2.8.2)
- ・都市環境サステナビリティ (環境・エネ分野 2.8.3)
- ・持続可能な大気環境 (環境・エネ分野 2.9.2)
- ・地球環境リモートセンシング (環境・エネ分野 2.10.1)

参考・引用文献

■大気・陸域による観測

大気1) Valérie Masson-Delmotte, et al., eds., *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2021).

大気2) World Meteorological Organization (WMO), “Essential Climate Variables,” <https://public.wmo.int/en/programmes/global-climate-observing-system/essential-climate-variables>, (2023年1月31日アクセス) .

- 大気3) 竹村俊彦「カーボンニュートラル指向時代の短寿命気候強制因子 (SLCFs) に関する研究」『俯瞰ワークショップ報告書 気象・気候研究開発の基盤と最前線に関するエキスパートセミナー』国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター (2022), 22-31., <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2021/WR/CRDS-FY2021-WR-06.pdf>, (2023年1月31日アクセス) .
- 大気4) 入江仁士「国際地上リモートセンシング観測網A-SKYの展開：衛星大気プロダクト検証を通じた大気環境変動研究の推進」『日本リモートセンシング学会誌』41巻5号(2021) : 575-581., <https://doi.org/10.11440/rssj.41.575>.
- 大気5) Chris D. Jones, et al., “The Climate Response to Emissions Reductions Due to COVID-19: Initial Results From CovidMIP,” *Geophysical Research Letters* 48, no. 8 (2021) : e2020GL091883., <https://doi.org/10.1029/2020GL091883>.
- 大気6) Kazuyuki Miyazaki, et al., “Global tropospheric ozone responses to reduced NO_x emissions linked to the COVID-19 worldwide lockdowns,” *Science Advances* 7, no. 24 (2021) : eabf7460., <https://doi.org/10.1126/sciadv.abf7460>.
- 大気7) Alessandro Damiani, et al., “Peculiar COVID-19 effects in the Greater Tokyo Area revealed by spatiotemporal variabilities of tropospheric gases and lightabsorbing aerosols,” *Atmospheric Chemistry and Physics* 22, no. 18 (2022) : 12705-12726., <https://doi.org/10.5194/acp-22-12705-2022>.
- 大気8) Yugo Kanaya, et al., “Dominance of the residential sector in Chinese black carbon emissions as identified from downwind atmospheric observations during the COVID-19 pandemic,” *Scientific Reports* 11 (2021) : 23378., <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02518-2>.
- 大気9) 国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC)「北極域研究船プロジェクト」<https://www.jamstec.go.jp/parv/j/>, (2023年1月31日アクセス) .
- 大気10) Moe Tauchi, et al., “Evaluation of the effect of Global Sulfur Cap 2020 on a Japanese inland sea area,” *Case Studies on Transport Policy* 10, no. 2 (2022) : 785-794., <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.02.006>.

■海洋による観測

- 海洋1) 日本海洋学会『海の温暖化—変わりゆく海と人間活動の影響』(朝倉書店, 2017)
- 海洋2) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Summary for Policymakers,” in *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, eds. Hans-Otto Pörtner, et al. (Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2022), 3-35., <https://doi.org/10.1017/9781009157964.001>.
- 海洋3) Nathaniel L. Bindoff, et al., “Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities,” in *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, eds. Hans-Otto Pörtner, et al. (Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2022), 447-587., <https://doi.org/10.1017/9781009157964.007>.
- 海洋4) Sabrina Speich, et al., “Editorial: Oceanobs’19: An Ocean of Opportunity,” *Frontier in Marine Science* 6 (2019) : 570., <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00570>.
- 海洋5) 須賀利雄「気候に関わる海洋研究：全球海洋観測に着目して」『俯瞰ワークショップ報告書 気象・気候研究開発の基盤と最前線に関するエキスパートセミナー』国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター (2022), 32-52., <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2021/WR/CRDS-FY2021-WR-06.pdf>, (2023年1月31日アクセス) .

- 海洋6) The Global Climate Observing System (GCOS), *The Global Climate Observing System 2021: The GCOS Status Report (GCOS-240)* (Geneva: pub WMO, 2021).
- 海洋7) Stephen C. Riser, et al., “Fifteen years of ocean observations with the global Argo array,” *Nature Climate Change* 6 (2016) : 145-153., <https://doi.org/10.1038/nclimate2872>.
- 海洋8) Dean Roemmich, et al., “On the Future of Argo: A Global, Full-Depth, Multi-Disciplinary Array,” *Frontier in Marine Science* 6 (2019) : 439., <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00439>.
- 海洋9) OceanOPS, “Integrated information, maps and tools to help coordinate and monitor global ocean observation efforts,” <https://www.ocean-ops.org/board>, (2023年1月31日アクセス) .
- 海洋10) Dean Roemmich, et al., “The Technological, Scientific, and Sociological Revolution of Global Subsurface Ocean Observing,” *Ocean Observing* 34, no. 4 (2022) : 2-8., <https://doi.org/10.5670/oceanog.2021.supplement.02-02>.
- 海洋11) Pierre Testor, et al., “OceanGliders: A Component of the Integrated GOOS,” *Frontier in Marine Science* 6 (2019) : 422., <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00422>.
- 海洋12) 気象庁「気象業務はいま 2022」 <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/hakusho/2022/HN2022.pdf>, (2023年1月31日アクセス) .
- 海洋13) The Global Ocean Observing System (GOOS), “Framework for Ocean Observing (FOO),” https://www.goosoocean.org/index.php?option=com_content&view=article&id=18&Itemid=118, (2023年1月31日アクセス) .
- 海洋14) Lisa A. Levine, et al., “Global Observing Needs in the Deep Ocean,” *Frontier in Marine Science* 6 (2019) : 241., <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00241>.