

2.2 環境区分

2.2.1 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や微粒子（エアロゾル、雲）、短寿命気候強制力因子（SLCFs: Short - lived Climate Forcers、エアロゾル粒子を含む）、その他の気候変動因子（雲、土地利用、植生など）の濃度や変化の情報を得るための衛星等のリモートセンシング、地上観測ネットワークなどの観測技術を対象とする。海洋は物理的、生物地球科学的に気候とその変動を記述するために有用な変数が多い。それらの必須気候変数を直接計測、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、海洋に加え、気候変動に大きな影響を与えあう極地、森林、土地利用変化等の観測技術も含む。また、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。

(2) キーワード

- 衛星による観測：気候変動、環境観測、衛星観測
- 大気・陸域の観測：長寿命温室効果ガス、短寿命気候強制力因子（SLCFs）、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、必須気候変数（ECVs: Essential Climate Variables）、航空機観測
- 海洋の観測：海洋温暖化、海洋酸性化、貧酸素化、海洋状況把握、海洋炭素循環、水位上昇、海洋生態系、海洋熱波、必須気候変数（ECVs）、全球海洋観測システム、生物地球化学アルゴフロート（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]

■衛星による観測

近年、我が国をはじめ世界各地では過去30年の気候に対して著しい偏りを示した天候、いわゆる異常気象が増加傾向にある^{衛星1)}。それに伴い、極端な異常気象が産業・経済に及ぼす損害も年々、増大している。例えば、2011年のタイ・チャオプラヤ川洪水による日系企業の損害は約3,150億円と見積もられている^{衛星2)}。2018年西日本豪雨では積乱雲が連なる線状降水帯が、11日間に60回以上も発生し1兆3,500億円を超える被害を発生させた^{衛星3)}。2020年に至っても規模や威力を増す傾向がある。これらの異常気象の要因として、中緯度偏西風の蛇行（ブロッキング）、温暖化に伴う海面水温の上昇による台風への水蒸気供給量の増大など全球的な気候変動による影響の大きさが指摘されている^{衛星4)}。

気候変動そのものと気候変動に伴う異常気象に対して、長期的な地球の自然気候変動のみならず、人為起源の影響がそれを助長する形で有意に大きな影響を与えているという指摘がなされている^{衛星5)}。地球の気候の状態を調べ、理解し、診断することが長期的な気候変動の予測及び人為起源の影響を抑制する政策を実施する上で極めて重要である。地球の気候は海洋および陸地、極域、そして大気のそれぞれを全球で評価する必要がある。局所的な気象も遠地の状況と密接に結びついている（テレコネクション）。しかし、地球の全地

表面に対して、人間が現場で直接計測できる領域や時期は極めて限定的で、全球を評価するために必要な均一で広域の観測を地表面上で行うことは困難である。人工衛星観測は同じ計測器によって、全球の地表面とその近傍の表層を均質かつ周期的・継続的に計測できる唯一の手段である。全球の気候を評価する基本データ取得の観点から、衛星観測は極めて重要である。

■大気・陸域の観測

地球規模での気候変動という極めて困難な課題解決にあたり、まず、放射収支に影響するCO₂などの物質の大気中存在量と分布の変化、排出量との関係、循環や収支を十分に明らかにした上で、削減へ向けた効果的な道筋を構築する必要がある。全球収支の現況把握や将来予測では数値シミュレーションが重要な役割を担っているが、プロセス表現が不十分な場合が多く、その検証と不確実性の軽減のために「観測」が必須となる。世界気象機関（WMO：World Meteorological Organization）が主導する国際プログラム全球気候観測システム（GCOS：Global Climate Observing System）は54の必須気候変数（ECVs）^{大気1)}を定義し、大気・陸域・海洋に関する系統的な観測を促している。2015年にパリ協定が採択されて以降、温室効果ガス排出量削減の正確性や信頼性の担保のためMRV（Measurement, Reporting and Verification、温室効果ガス排出量の測定、報告及び検証）の観点で、観測が極めて重要な意義を帯びている。2℃目標などの長期的な目標に向け、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」が2023年から実装される。その際、人為起源排出の管理や森林減少・劣化の抑制策（REDD+：Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation）の有効性を観測から評価する視点が重要となっている。近年、CO₂より寿命が短い「短寿命気候強制力因子（SLCFs）」を通じた将来気候影響にも注目が集まっている。SLCFsは、温暖化に寄与するメタン、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^{大気2)}や、逆に直接放射効果や雲過程を通じて冷却効果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等を含む総称である。排出増加・削減が速やかに気候に影響する特徴をもつ。これらは大気汚染物質で、人間活動の影響が顕著だが、排出と大気中濃度との間の非線形性や、数十種の重要成分間の相互作用、自然変動の寄与、温暖化に伴うフィードバックも含め、諸プロセスを定量化する必要がある。このような目的を果たすため、長寿命温室効果ガス（LLGHGs：Long-Lived Greenhouse Gases）、SLCFs、関連するパラメータについて、国際協力を基調としつつ特色ある観測が求められる。

■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1)}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、1970年以降、気候システムに蓄積された熱の90%以上を蓄え^{海洋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水位の上昇が加速している^{海洋2)}。海水位の上昇をその地域的な分布も含めて理解するためには、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3)}。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。しかし、それ

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

にともなう海洋の酸性化がもたらされている^{海洋2)}。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]

■衛星による観測

気候変動に関する地球観測の基本は静止軌道から常時観測する気象衛星システムである。WMOが1963年に計画を立案した世界気象監視計画の基本構想に基づき構成され、気象衛星調整会議（CGMS：Coordination Group for Meteorological Satellites）の現業気象関係の国際枠組みにより維持されている。日米欧露中印韓の静止気象衛星ネットワークでは、日本においては気象庁ひまわり8号、9号が該当する。CGMSにおいては、低軌道の衛星による観測も近年追加され、気象観測あるいは気候診断を行っている。

科学的あるいは気候診断の地球観測の国際的な調整枠組みは地球観測衛星委員会（CEOS：Committee on Earth Observation Satellites）において、各国の観測衛星開発計画の情報共有がなされている。温室効果ガス、降水、陸域などの目的に応じ衛星集団（CEOS Virtual Constellation）が国際協力による相互データ交換・評価の仕組みとして構築されている。観測対象となる気候システムに必要な物理観測パラメータはECVS^{大気1)}としてリスト化されており、それをCEOSに答申することにより、観測パラメータの整理がなされた状況にある^{衛星6)}。並行して、特に長期観測が重要なパラメータについては気候データ記録（CDR：Climate Data Records）として識別されつつある^{衛星7)}。こうした活動においては欧州が観測衛星の計画作成・調整などで積極的に利用し、その推進を牽引している状況にある。

このような国際協調システムを含む衛星計画を前提とした科学的な研究ターゲットについては気候変動に関する政府間パネル（IPCC）報告書を起点とした議論が行われている。IPCCは特に人間活動とそれに伴う気候変動に主体を置いた報告を行っているため、現実社会に影響を及ぼす地球温暖化や、それに派生するとみられる極端気象、および新興国の工業発展・都市化（特にアジア領域）に伴うPM_{2.5}などを含む大気汚染などへの関心が高い。

① 温室効果ガス

地球温暖化について、IPCC第5次評価報告書において人間活動による温暖化への影響が確定的という報告がなされている。その主要因となるCO₂排出を含む炭素循環の定量的な評価を目標として、大気中のCO₂量の観測の高精度化が重要な課題となる。日本ではCO₂高精度評価に対して、環境省と国立環境研究所（国環研）と宇宙航空研究開発機構（JAXA）の温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」シリーズ（GOSATシリーズ：Greenhouse Gases Observing Satellite）などが対応している。

2009年に打ち上げられたGOSATはCO₂とメタンの濃度を宇宙からの観測を主目的とした世界唯一の衛星である。熱赤外域だけでなく短波赤外域のセンサを同時に搭載し、対流圏全層に感度を有している。その観測データを利用することで、大陸規模でのCO₂等の排出・吸収強度を推定する炭素循環の研究や、都市部などからのCO₂やメタンの排出インベントリの高精度化研究などに活用されている。

2018年に打ち上げられた「いぶき2号」（GOSAT-2）衛星はGOSATよりもセンサ感度が向上している。

晴天域を能動的に選定して観測効率を高められるインテリジェントポインティングを採用するなどの高度化が実装されている。人為起源のCO₂を特定する能力を向上するため、CO₂とメタンに加え一酸化炭素(CO)も観測可能となっている。

米国は2014年に軌道上炭素観測衛星2号(OCO-2: Orbiting Carbon Observatory-2)の打ち上げを成功させている。その複製機であるOCO-3センサが2019年に国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」に搭載された。OCO-2衛星と類似した中国のTanSat衛星は2016年末に打ち上げられた。欧州は、大都市などをターゲットにした高空間分解能を有すMicroCarb衛星を2023年以降に打ち上げる予定である。我が国は、GOSATやGOSAT-2の後継機である温室効果ガス・水循環観測技術衛星(GOSAT-GW: GOSAT for Greenhouse gases and Water cycle)の打ち上げを2023年度に計画している。高性能マイクロ波放射計(AMSR3: Advanced Microwave Scanning Radiometer-3)はGOSAT-GWに相乗りする計画となっており、水循環と炭素循環との複合研究も進められる。

② 地球温暖化に影響する森林バイオマス量、土地利用変化

IPCC第5次評価報告書においてCO₂の主な吸収源となる陸域での森林バイオマス量の評価精度向上が課題として挙げられている。日本では、陸域のバイオマス評価に対してJAXAの陸域観測技術衛星「だいち」シリーズ(ALOS-2,3,4: Advanced Land Observing Satellite)、気候変動観測衛星「しきさい」(GCOM-C: Global Change Observation Mission – Climate)、宇宙ステーション搭載レーザー高度計などが対応している。陸域生態系の土地被覆分布(植生分布)や森林域の把握は、温室効果ガスや放射収支を通して、気候へ影響を与える。グローバルスケールで様々な土地被覆状況を把握する試みが続けられている。近年は衛星データを用いた土地被覆とその変化の把握が進み、年毎などの従来よりも高い時間分解能を達成している。また空間的にも全球を約30 mの空間分解能で土地被覆とその変化を把握できるようになってきた。

③ 地球温暖化に影響するエアロゾル・雲

エアロゾル・雲・降水のプロセスは地球の放射収支を大きく左右する。時間的変化の早いこれらのプロセスが、GHGの放射収支の評価に対しても大きく影響している。その正確な理解のため一層の観測的把握の発展が望まれる。また、後述する大気汚染とも関連する。日本においてはJAXAのGCOM-C、欧州宇宙機関(ESA: European Space Agency)とJAXAと情報通信研究機構(NICT)の雲エアロゾル放射ミッション(EarthCARE: Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer)が対応している。GCOM-C衛星に搭載されている多波長光学放射計(SGLI: Second Generation Global Imager)センサは、近紫外チャンネル搭載、高空間分解能観測、偏光観測に技術的な新規性があり、雲、エアロゾル、放射も含めた気候変動に関わる様々な因子を観測している。ひまわり8・9号は、これまでの静止気象衛星に比べて時間・空間解像度ともに2倍向上し、高時間・高空間解像度のエアロゾル観測が可能である。さらに、GOSAT-2衛星に搭載された雲・エアロゾルセンサ2型によって、雲に加えて、PM_{2.5}やブラックカーボンのモニタリングに貢献するデータの提供も試みられている。

雲レーダーによる雲の鉛直内部構造の観測は、気候変動に伴う放射収支の変化の評価に必要不可欠である。2006年に米国航空宇宙局(NASA)のジェット推進研究所(JPL: Jet Propulsion Laboratory)が初めて雲レーダー搭載のCloudSatを打ち上げている。我が国では現在、CloudSatよりも感度が10倍高く、雲内部の鉛直流の情報を衛星から世界で初めて取得するためのドップラー速度の観測が可能な雲

プロファイリングレーダーを開発している。このレーダーを搭載するEarthCAREによる観測が2022年度下半期以降に予定されている。なお、強い関連性を有する降水や水蒸気の衛星観測も推進することにより、雲・降水に関わる気候変動研究の相乗効果が期待される^{※1)}。「エアロゾル、雲・対流・降水研究(A-CCP)」は2017年に米国から発行された今後十年の地球観測への指針を示すDecadal Surveyにおいて最優先観測対象として選定されている。国際活動計画の検討において、降水レーダーの提供やアルゴリズムの開発とともに、日本からの貢献が期待される。

④ 極端現象

極端気象との関連については、温暖化により温まった海面水温とそこから放出される大気への水蒸気量の関連性が指摘されている。降水状況の観測と共に水循環について更に観測を詳細化する必要がある。日本においてはJAXAのGCOM-C、水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W: GCOM-Water)やNASA/JAXA/NICTの全球降水観測計画主衛星(GPM主衛星: Global Precipitation Measurement Core Spacecraft)が対応している。加えて、これまで技術的に困難であった大気風の風速ベクトルを計測するライダー(Light Detection and Ranging、※レーザーを用いたレーダーのこと)や鉛直風を計測する雲レーダーが登場しつつある。従来の海上風ベクトルや気象衛星の雲の変化から雲移動ベクトル(Cloud Moving Vector)を算出する大気力学的観測に対して、大幅な発展が期待される。

⑤ 大気汚染

大気汚染については、日本においては地球観測プラットフォーム技術衛星「みどり」(ADEOS/ADEOS-2: Advanced Earth Observing Satellite)に搭載した国環研の改良型大気周縁赤外分光計(ILASシリーズ: Improved Limb Atmospheric Spectrometer)に端を発し、対流圏上部より上方を中心とした大気汚染物質の赤外掩蔽観測がなされてきた。さらに宇宙ステーション搭載超伝導サブミリ波リム放射サウンダにおいてサブミリ波掩蔽観測に発展した。今後の大気物質観測計画としては宇宙からの大気汚染物質観測(APOLLO: Air Pollution Observation)の検討などが続いている。

⑥ プラットフォーム

これまでの観測データは主に衛星ミッション^{※注)}ごとに整備されてきた。近年、計算機技術の発達とともに、データを統合的に利用するためのインフラの整備が進められている。一カ所にデータを集積し、解析できるプラットフォームとして文部科学省(MEXT)のデータ統合・解析システム「DIAS」、経済産業省(METI)の政府衛星データのオープン&フリー化及びデータ利用環境整備事業「Tellus」などの国主導のものや、民間企業によるプラットフォームやクラウドサービスが提供されている。また、衛星データを一元的に提供するためのデータ提供サイトがJAXAの地球観測衛星データ提供システム(G-Portal)をはじめとして整備・運用されている。時間空間的に蓄積された衛星データは地理空間情報、地上観測データとあわせてビッグデータとして、機械学習、ディープラーニングなどのIT技術により情報としてサービスされる方向にある。

衛星観測ビッグデータは、演繹的な数値モデルである気象庁気象研究所による数値予報モデルや、東京大学/国環研/海洋研究開発機構(JAMSTEC)による大気循環モデルなどにデータ同化を行うためにも利用される。これらの数値モデルは計算機処理能力の発展とともに高分解能化しており、東京大学の全球モデルNICAM(Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model、※非静力学正20面体格子大気モデルのこと)や、名古屋大学の雲解像モデルCReSS(Cloud Resolving Storm Simulator)などを筆

頭として発展を見せている。

※注) 人工衛星におけるミッションとは、狭義には衛星で達成しようとする目的、宇宙飛行任務を指し、広義には衛星に関する一連の計画検討、搭載機器開発、運用、行動など全般を含んで用いられている。

■大気・陸域の観測

最近の動向として、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向性が強く打ち出されてきた。SLCFsは大気汚染物質であることから、GHG/AQ (Air Quality、※大気質のこと) 統合解析とも呼ばれる。とくに、我が国のGOSAT-GWミッション、欧州ESAの人為起源CO₂モニタリングミッション (CO₂Mミッション: Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring) といった衛星観測計画が公式化している。2019年のIPCC第49回会合において、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手法論に新たにSLCFsも対象に加えることが決まった。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ものであり、その実践が始まるものである。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を低減することも不可欠で、そのための観測計画についても進展がみられる。

① 温室効果ガスの地上、航空観測等

温室効果ガス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全量炭素カラム観測ネットワーク (TCCON: Total Carbon Column Observing Network) に加え、小型フーリエ変換赤外分光計 (FTIR: Fourier Transform Infrared Spectroscopy) を活用したCOCCON (Collaborative Carbon Column Observing Network) が立ち上がりつつある。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キャビティリングダウン分光方式の計測器が実用化され、世界的に地上ステーションへの導入が進んでいる。

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。COVID-19パンデミックに伴う定期航空便の縮小による影響が懸念されている。

大気中温室効果ガス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。FLUXNETについてはFLUXNET2015^{大気3)}としてユーザーが使いやすい形でデータが提供され、定期的に更新されている。メタンの観測網の統合解析もFLUXNETを主体に進み成果が出始めた状況である。さらに、これらの地上観測ネットワークデータと衛星観測データなどに対して機械学習を行わせて、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され、研究コミュニティが利用可能となっている。

② 陸域生態系データ等

温室効果ガスのフラックスに限らず、陸域生態系に関連する様々なデータが集約されつつあり、大気―陸面の温室効果ガス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 (PEN: Phenological Eyes Network) は日本で構築されたカメラ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。国際長期生態学研究ネットワーク (ILTER: International Long Term Ecological Research) 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いる。また、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。

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 (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^{大気4)} や氷晶核^{大気5)} 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

2017年に欧州の Sentinel-5 Precursor 衛星が打ち上げられ、搭載した対流圏観測機器 (TROPOMI: 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)、メタンなどの日々の全球濃度分布の観測情報が複数年分蓄積され、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、新型コロナウイルスの世界的蔓延に伴う経済活動の低下に関し、エネルギー燃焼の指標となる NO₂ カラム濃度の 2020 年春季のマップが前年と対比されつつメディアから発信されるなど、迅速に社会ニーズにこたえた。しかしながら対流圏 NO₂ の衛星観測では 25～50% もの低バイアスが報告されており、地上分光リモートセンシングによる検証が重要である。その際、紫外可視波長帯の太陽直達光・散乱光を利用したポータブルな受動型リモートセンシング装置として、NASA/Pandora や各機関で開発された MAX-DOAS が活用されている。世界に配置されるようになってきた Pandora 観測と解析を標準化する、欧米主導の PGN (Pandonia Global Network) 観測網がこの 2 年間で立ち上がった。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。2020

年に韓国が打ち上げた静止衛星からのアジア大気汚染観測衛星の静止軌道環境監視分光器 (GEMS : Geostationary Environment Monitoring Spectrometer) への期待も大きい。ラッシュアワーなど日内変動をもつNO_x排出や光化学反応を追跡できるもので、成層圏オゾンと区別された対流圏オゾンカラム濃度の計測もなされる計画である。対流圏オゾンアセスメント (TOAR : Tropospheric Ozone Assessment Report) ^{大気6)} は、2020～2024年の第二期 (TOAR-II) に入り、オゾンの地上観測等の全球規模収集と気候影響評価等を継続している。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。

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、MRVなどの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提供されている。上述のILTERやTRYについても同様にデータ公開 (プロジェクト単位) 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) が国際的観測ネットワークの構築を、科学的・技術的な側面と政府間の調整の側面から支援し、推進してきた。GCOSは以下の通り、海洋に関するECVを設定している^{大気1)}。

物理変数：海面熱フラックス、海氷、海水位、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

ECV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ECV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、生物地球化学の変数や生物・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5)}。生物地球化学ECV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ECV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ECVのうち、水温、塩分、流れに関する海面から深度2000mまでの全球的な観測は、自動観測口

ポット（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6)}。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6000m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2000m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の構築を目指すことになった^{海洋7)}。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1000台展開することを、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1200台展開することを、それぞれ目指している。Core Argoは、Argo開始当初の季節海水域と縁辺海を除く、水深2000m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。季節海水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2500台と合わせて計4700台の展開が目標である。

2020年7月現在、3854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8)}。そのうち、生物地球化学センサを搭載したフロートは385台であるが、半数近くが酸素センサのみを搭載したものであり、6変数を計測するフロートは2割未満である。Deep Argoフロートは142台展開されており、そのうち4000m級のフロートが34台（日本製Deep NINJA 4台、フランス製Deep Arvor 30台）、6000m級のフロートが108台（米国製Deep SOLO 85台、Deep APEX 23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。

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自律型水中グライダーのネットワーク構築が期待されている^{海洋9)}。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200～1000 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、あるいは地域レベルで、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・変質の観測などを旨とするグローバルなネットワーク構築を目指している。

Argoとその拡張について、日本は継続的に貢献しており、とくにDeep Argoについては米国に次いで世界をリードしている。しかし、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。また、2000m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、豪州に比べると、その活動は限定的であり、また、OceanGlidersにも積極的には関与していない。

(5) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

■衛星による観測

① 陸域：多面的な植生・生態系パラメータの観測

従来は太陽光の反射を利用した植生の把握が主であったが、近年、様々なリモートセンシング手法によって、様々な陸域植生パラメータが計測されるようになってきた。例えば、光合成量をより直接表現できる物理量として注目度が高い太陽光励起クロロフィル蛍光はGOSATやGOSAT-2、OCO-2、TROPOMI衛星で観測が可能である。さらには、マイクロ波の放射を用いた植生バイオマスの推定、ライダーによる樹高の推定などが挙げられる。またフェーズドアレイ方式Lバンド合成開口レーダー（PALSAR：Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar）に代表されるマイクロ波による能動的リモートセンシングデータが需要が高い。さらには、国際宇宙ステーション搭載型のセンサとして陸域植生を計測できる複数のセンサが搭載されている。樹高・植生ストレス・高波長分解能分光観測などの詳細な多面的な観測が可能になっている。これらは陸域における温室効果ガスのモデルを構築するにあたり、様々な物理量を提供できることから、不確実性の低減につながる。

疎な植生や雲・雨などを透過して地表の情報が得られるL帯の周波数を利用した合成開口レーダー（SAR：Synthetic Aperture Radar）は走査幅を増しつつ全球の森林領域の識別とバイオマスの評価を行う。100 t/ha以上の高密度森林領域での低感度性については、ライダーによる観測評価で補間することで全球バイオマスの測定を実現しつつある。L帯SARは日本で1992年に打ち上げた地球資源衛星「ふよう1号」（JERS-1：Japanese Earth Resources Satellite-1）からの長期の観測データの蓄積があり、現在もALOS-2によりその観測を継続するとともに、1.5ヶ月ごとに、熱帯域の森林変化の情報の観測および提供をJAXA/JICAが継続している。2020年代には、ALOS-2の後継であり観測幅を広げたALOS-4や、NASAとインド宇宙研究機関（ISRO：Indian Space Research Organization）がNISAR衛星（NASA-ISRO SAR、※NASAとISRO共同のS帯およびL帯の合成開口レーダー衛星）などを打ち上げ予定である。加えて、欧州ではコペルニクス計画の一環として2025年ごろを目指したL帯欧州レーダー観測システム（ROSE-L：Radar Observing System for Europe - L-Band）、米国ではNISARの後継がDecadal Surveyの中でのSDC（Surface Deformation and Change、※地表の変形・変化のこと）というミッションで研究されている。また、ライダーでは特に熱帯雨林の評価を行う米国のGEDIおよび日本の植生観測ライダー（MOLI：Multi-footprint Observation Lidar and Imager）があげられる。森林評価は炭素循環の吸収源となる重要計測であり、大気中CO₂計測と並行した観測が重要である。加えて、林野火災によるCO₂排出の把握も重要であり、熱赤外などによる林野火災の発生域の把握、SARなどによる消失面積の把握、およびHAZE（※微粒子により視界が悪くなる現象のこと）の観測も行われている。

② 陸域：土地被覆、土地利用変化の詳細な把握

気候変動における不確定要素の一つには、都市化などによる土地利用変化がある。これまで土地被覆・土地利用の把握について、年単位の変動をグローバルで扱うことは、分類の精度や計算能力の観点から困難であった。しかし、近年になり、Google Earth Engineのようなクラウドコンピューティング

技術の発展により、土地利用変化、土地被覆変化を年々の単位で追跡することが可能になってきた。また、これらの詳細な正確な面積判定に対して、商業化された高分解能衛星群の台頭が挙げられる。商用衛星として35cm分解能撮像データの流通が始まっており、特に時間変化が大きい土地利用変化については有効な観測ソースとなりうる。分解能が要求されない場合にはGCOM-C、Landsat、Sentinel-2、Sentinel-3、MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer、※可視・赤外域の放射計のこと)、VIIRS (Visible/Infrared Imager and Radiometer Suite、※マルチチャンネルイメージャ・放射計のこと) などが全球の高頻度観測が無償で観測情報が提供しており、応用されている。例えば、Landsat衛星データ(分解能約30 m)を用いたグローバルでの森林の伐採・植林年が把握されている^{衛星8)}。そしてこれらのデータは毎年更新されている。また、欧州の衛星であるSentinel-1、Sentinel-2については、無料で公開されている点、Google Earth Engineやその他解析ツールの充実、複数機の打上による観測頻度の高さなどの利点もあり、広く利用されるデータセットとなっている。また、小型・超小型衛星などによる高頻度観測と無償の衛星データとの組み合わせ、あるいは熱帯域などの雲の多い地域では、Sentinel-1、ALOS-2のようなSARとの組み合わせによる土地利用変化の情報利用も進められている。新たなシステムとして、大型望遠鏡を用いた静止軌道からの観測システムも日欧などで検討されている。

③ 海洋衛星観測

海洋に関する基本パラメータはこれまで海表面温度、海上風速および海面高度が観測されてきたが、米国AquariusによるL帯放射計と散乱計の組み合わせや欧州のL帯受動合成開口放射計で海面塩分濃度が計測された。さらにTopex/Poseidon、JASONなどの直下型の高度計による海面の観測に加え、Ka帯合成開口レーダー(Ka-SAR)を使い、面的な観測を実現するSWOT衛星観測(Surface Water and Ocean Topography、地表水・海洋地形)の登場により、海流など海の循環についての知見が発展するとみられる。海面水温観測の詳細化による沿岸領域の観測(GCOM-C観測における250 mレベルの高分解能化)などが継続している。ひまわり、GCOM-W、GCOM-Cなどの異なる分解能のデータ、モデルなどの組み合わせによる高精度の海面水温の情報作成の研究も進められており、実利用面では「海しる」などの統合的海洋情報システムが開発されている。海上風は、アクティブなマイクロ波による散乱計やSARとともに、パッシブなマイクロ波放射計による観測が行われている。

④ 大気・エアロゾル・雲衛星観測

大気については、これまで観測が困難だった陸上に浮遊するエアロゾル観測について、GCOM-Cが紫外域観測、偏光観測を実装し、海上と陸上を合わせたエアロゾルの観測評価を可能とした。CO₂については、日本のGOSATを筆頭に米国OCO-2や欧州、中国による観測衛星開発が一層激化している。GCOM-C衛星は雲、エアロゾル、放射など気候変動に関わる様々な因子の包括的な観測を行い、現在データの検証やアルゴリズムの改良などが進められている。GOSAT-2衛星に搭載の雲・エアロゾルセンサ2型により、雲だけでなく、近年健康被害が懸念されている地表付近のPM_{2.5}やブラックカーボンのモニタリングに貢献するデータ提供に向けた検証やアルゴリズム開発の新展開が図られている。

観測時刻が固定される低軌道衛星だけではなく、米国では静止軌道から観測の検討も始まっている。またCO₂以外に不完全燃焼による人為起源や森林火災の指標となる一酸化炭素(※GOSAT-2で観測可能)や窒素酸化物(※GOSAT-GWで観測可能)の同時観測、メタンの鉛直分布計測(独仏MERLIN: MEthane Remote Sensing Lidar Mission)などが注目されている。放射収支に高い影響を持つ雲の

生成消滅については、エアロゾル観測、降水観測の間を埋めるべく、CloudSat/CALIPSO (NASA) およびその後継ミッションとなる EarthCARE が開発されている。降水についてはマイクロ波放射計による全球観測が国際協調して実施されており、AMSR シリーズがリードしているが、欧州で新たな放射計の検討もなされている。それらマイクロ波放射計のキャリブレータとしての Ku/Ka 降水レーダーとマイクロ波放射計を搭載した GPM 主衛星が整備されている。また次世代の高頻度観測の技術実証である超小型衛星センサ (RainCube/NASA-JPL)、日米欧国際協力による後継ミッション ACCP (Aerosol and Cloud, Convection and Precipitation、※エアロゾル・雲、対流・降水の統合観測ミッションのこと) の検討が開始されている。大気物質循環/大気汚染の領域としては、対流圏から成層圏下部を観測中心とした掩蔽観測についてサブミリ波を利用する検討が続いており、また放射収支に影響の高い氷雲の詳細観測を目標としたサブミリ波観測も技術実証に入りつつある。海外では欧州で Sentinel-4、米国では TEMPO (Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution、※NASAの対流圏排出、汚染監視ミッションのこと)、韓国の GEMS (※機器は米国が開発) など、紫外可視領域の静止衛星搭載ハイパー分光計による対流圏大気物質観測などが計画・開発されている。特に欧州では低軌道においても欧州気象衛星 (MetOp- Second Generation) に紫外～短波長赤外イメージング分光計 Sentinel-5 がセンサとして搭載される予定である。

⑤ 極域

極域は特に温暖化の感度が強いことから、極域の海水状況について米国軍事気象衛星搭載のマイクロ波撮像装置 (SSM/I: Special Sensor Microwave/Image)、改良型高性能マイクロ波放射計 (AMSR-E) などから時間的、面積的把握が始められた。現在、マイクロ波放射計である GCOM-W が続けられている。加えて、SAR や MODIS、VIIRS、GCOM-C による観測も続けられている。特に SAR ミッションにおいては、国際的な共同研究プロジェクトである MOSAiC (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate、※北極気候研究のための分野横断漂流観測所での観測ミッションのこと) が立ち上げられ、ALOS-2、ドイツの TerraSAR-X、カナダの Radarsat-2、欧州の Sentinel-1 の SAR と光学衛星、現地観測などによって、北極域での氷床の移動を 2019 年 9 月から 1 年にわたり観測キャンペーンが実施されている。また氷床の厚さの変化を観測するため、ライダーによる氷床観測衛星の後継機 (ICESAT-2) が米国により打ち上げられた。

⑥ 次世代静止気象衛星

静止気象衛星について、NASA の気象衛星 GOES-R とひまわり 8、9 号機が利用できるようになっている。ひまわり 8・9 号に搭載された可視赤外放射計によって従来の 1km 分解能から倍の 500m 分解能への高精度化および撮像間隔を 2 分半まで縮めたことによる動画観測が実現している。その上、エアロゾル観測が可能になっている。この水準での高時間・高空間解像度のエアロゾル観測は、欧米の新世代の静止気象衛星に先駆けたものであり、国際的にも注目されている。準リアルタイムデータについては、気象庁気象研究所のエアロゾルの数値シミュレーションモデルプロダクト共に、「JAXA ひまわりモニター」ウェブサイトで公開されるようになっている。CGMS は今後イメージャ搭載の他に、赤外サウンダおよび雷センサの搭載を推奨しており、次号機搭載の方向性で検討・調整が開始されている。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

⑦ 地上処理：IT技術（プラットフォーム、大規模データアーカイブ、機械学習・ビックデータ解析）

膨大な衛星観測データを蓄積し、相互に利用するためにクラウドベースあるいは大型計算機システムを用いたプラットフォームが国内外で整備されている。国内においてもDIAS、Tellus、NICTや産業技術総合研究所の大規模アーカイブなどが存在している。地球観測衛星データ、地上データなどのビックデータから社会情報を抽出して紐付ける機械学習、ディープラーニングなどのIT技術開発は、産業技術総合研究所や民間企業などにより急速に進みつつある。しかしながら、このようなデータを扱うためのプラットフォームの整備、運用とともに、データサイエンティストの観測データへの習熟やアプリケーションの研究開発などが喫緊の課題である。また、アウトプットとしての社会情報や、どのように利用されるべきかの検討についても課題である。米国では商業クラウド業者の提供するプラットフォームやNASAなどによる研究が、欧州ではコペルニクスDIASとHORIZON2020などの研究開発及び人材育成において主要な役割を果たしている。

⑧ 地上処理：衛星間データフュージョン

関連する複数衛星の観測データ結果から統合的に全球状況を把握する手法の研究が行われている。GPMを元としたGSMaP（衛星全球降水マップ）、実用海洋情報の統合化を図った「海しる」等が代表的である。またEarthCAREに搭載される複数種のセンサの統合解析、前述のバイオマス評価におけるL帯SAR（合成開口レーダー）/ライダーの統合処理などの活動がある。また、LandsatとMODISのデータの統合処理による高時間・空間分解能の正規化差植生指数の時空間適応反射率融合モデル作成や超高解像度化などの活動がある。

■大気・陸域の観測

① 東アジアの大気汚染の改善傾向とコロナウイルス感染拡大に起因した全球排出変化

衛星観測や地上観測の長期連続データなどが、2010年前後から、中国を含む東アジア域の大気汚染（ブラックカーボンを含むエアロゾル、NO_x、SO_x）レベルの改善傾向を示している^{大気7), 8), 9)}。これらの観測から近年の排出削減率が推定され、IPCCの気候シミュレーションに入力されている排出インベントリに修正が必要であることも指摘されている。硫酸エアロゾルの低減は今後の温暖化傾向を増強する大きな要因となっており、ブラックカーボンの低減がその効果をどれだけ打ち消すかなど、現実に沿った解析が重要である。一方、対流圏オゾンの明確な減少は観測されておらず、大気化学非線形プロセスの解明が望まれる。

新型コロナウイルスの世界的流行による経済活動低下に関し、2020年2月の中国を皮切りに、世界各地でNO_x濃度などの明瞭な低下が人工衛星データなどから確認された^{大気10)}。CO₂の排出^{大気11)}も一時的に最大3割削減されたとの推定もあり、交通や産業といった排出部門ごとの活動低下度との対応付けなどを手掛かりに、これまで困難であった部門毎排出量の推計などが実践されることも期待されている^{大気12)}。

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。また、2019年末におけるオーストラリアの森林火災では、オーストラリアの森林（ユーカリに代表される広葉樹林・混合林帯）の約20%が2019年末から2020年初頭の

火災シーズンにおいて消失した。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、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。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

2017年12月、国連総会において2021年から2030年までを「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」)とすることが決議された。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。

② G7「海洋に関する環境・海洋・エネルギー大臣による共同会合」

2018年9月にカナダ・ハリファックスで開催された環境・海洋・エネルギー大臣会合では、持続可能な海洋の発展に向けた状況の改善を実現しつつ、海洋観測データ収集のギャップ解消に向けて協働すること、科学的知見の発展とより効率的・効果的な科学的海洋観測ネットワークの実現に向けた「海洋の未来に関するG7専門家作業部会」を開催することなどに合意した。これは、2016年のG7科学技術大臣会合における、国際的に海洋観測網を強化することなどを盛り込んだ共同声明「つくばコミュニケ」の内容を、G7各国が協力して継続的に推進することを確認したものと位置付けられる。

③ OceanObs'19

世界の海洋観測コミュニティが一堂に会し、海洋観測に関する将来指針を議論する OceanObs'19が2019年9月にホノルルで開催された。OceanObs'99(参加者約300名)、OceanObs'09(36か国から参加者約600名)と10年ごとに開催され、その後の海洋観測の方向に大きな影響を与えてきたが、OceanObs'19では、社会/産業/政策面のエンドユーザーとの連携を目標に掲げ、74か国から多様なセクターのエキスパート(従来海洋観測と関わりに薄かった社会学者、政策者、市民団体、産業界から幅広い参加者を含む)1300名以上が参加した。140本におよぶWhite Paperのテーマは多岐にわたり、異なるコミュニティ間の対話と連携を重視した、幅広いステークホルダーの議論を促すよう分野横断型の議論が展開された。この会議を機に新たな段階を迎えたコミュニティ間の連携が、今後の海洋観測のファンディングからデータ活用の在り方までを大きく変えていく可能性がある。

④ ユネスコ政府間海洋学委員会(IOC)によるArgoの拡張に関わる提案の承認

自動観測ロボット(プロファイリングフロート)による全球海洋観測網であるArgoの拡張に関わる2つの提案が2018年にIOC執行理事会で採択された。ひとつめは、Argoの計測項目に6つの生物地球化学パラメータを加えることである。これらのセンサを搭載したArgoフロートにも、沿岸国の排他的経済水域(EEZ)に漂流する可能性のあるフロートに係る情報の提供方策に関するガイドラインを適用することが合意された。ふたつめは、Argoへの新たな計測項目の追加を、(1) experimental、(2) global

approved pilot、(3) global implementationの3段階で行うことである。具体的には、段階(1)は上記のガイドライン適用外の各国の研究プログラムとして実施され、国際Argo運営チーム(AST)がその結果を評価して段階(2)に進めるか否かを判断する。段階(2)は、科学的評価を行うための期間に限定されるが、この間、上記のガイドラインが適用される。その結果を踏まえ、ASTとGOOS運営委員会が段階(3)への移行をIOCに提案し承認を得る。IOCによるArgo拡張への承認と支持は、Argoの新たなステージの幕開けを公式に告げるものといえる。

⑤ 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)「海洋・雪氷圏特別報告書」の公表

IPCCは第6次評価プロセスの一環として、2019年9月に「海洋・雪氷圏特別報告書」を公表した。第5次評価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が報告された。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■衛星による観測

【国内】

① GOSAT-GW

GOSATシリーズを継承した、新たな地球観測衛星である。GOSAT-GWは独自の温室効果ガス観測センサ(TANSO: Thermal And Near Infrared Sensor for carbon Observation)において引き続きCO₂観測性能を発展させ、排出源を都市別に観測できる性能を達成する。その上で、AMSRシリーズも継承し、同時搭載されるAMSR3では、固体降水を観測できる高周波数バンドが追加された。

② EarthCARE

EarthCAREは能動/受動の光学/電波センサを組み合わせた観測衛星である。ESAとJAXA、NICTが共同開発しており、世界初のドップラーレーダーにより、雲内を含めた鉛直風観測を行う。

③ 二周波降水レーダー後継機(DPR: Dual-frequency Precipitation Radar)

全球における降水状況の準リアルタイム観測予測システムの中心的衛星であるGPMの後継について、国際協力を前提に、今後の降水ミッション(ACCP)について検討中。

④ GCOM-C/GOSATシリーズの雲・エアロゾルセンサ後継機(CAI: Cloud and Aerosol Imager)を含む多波長光学放射計(SGLI)後継

多方向観測、偏光観測、近紫外バンドを用い、これまで観測困難だった陸上エアロゾルを高精度に観測する性能を有したSGLIの後継について検討中。

⑤ ALOS-5,6(次期光学・L帯SAR衛星)

大規模災害の監視、被害状況の観測を国際災害チャータ枠組みにより実現しているALOS-3,4の後継ミッションを検討中。特にALOS-4はJERS-1から続くL帯SARミッションを継続し、長期データやグローバルデータを持つ日本の特徴となるセンサである。

⑥ ISS搭載MOLI

ライダーの長寿命化技術を実証し、SARとの複合利用による森林バイオマス評価、また数値地形モデル (DTM: Digital Terrain Model) 3次元マップの高精度化を目的として、レーザー高度計ミッションを検討中。

⑦ ドップラーライダー

民間航空企業からの要望を基に航空路管理、また将来的に国際協力により全球の大気力学的観測を実現するシステムを目標に検討中。

【海外】**① フランス国立宇宙研究センター (CNES) のMicroCarb**

CO₂の排出源と吸収源とその季節変動を観測する小型衛星である。

② NASAのGeoCarb

静止軌道の商用通信衛星への同乗により、特定地域の常時観測性を獲得する目的であり、OCO-2の発展形である。なお、OCO-3はISSに搭載された。

③ ESAのCO₂M

人為起源のCO₂とメタンや二酸化窒素を監視する将来衛星である。

④ ドイツ航空宇宙センター (DLR) とCNESのMERLIN

差分吸収ライダーの原理により、メタンの精密局所観測を実現するライダー衛星。

⑤ NASA/ISROのNISAR

NASAがISROと共同開発した大型展開アンテナをもちL帯およびS帯のSAR観測を行う衛星。

⑥ NASA/CNESのSWOT

KaSAR2機と電波高度計を搭載し、従来は1次元の観測しかできなかった海面高度を2次元 (面的) に計測するTopex/POSEIDONの後継衛星。

■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GHG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近2年で顕著に加速した。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従来の6ミッションにさらに6つの新規ミッションが加わりPhase Bへと進んだ。その中の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る。IPCCの第7次サイクルでは、従来のUNFCCC (国連気候変動枠組条約) への国別温室効果ガス排出推計に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、メタン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。今後に向けても、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・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る。SLCF削減のための気候と大気浄化の国際パートナーシップ(CCAC)は、アジア太平洋地域における大気汚染の現状と具体的な政策措置について科学的見地から包括的に分析した初めての評価報告書「Air Pollution in Asia and the Pacific: Science-based Solutions」を2019年に公表し、温暖化緩和面についても述べている。

② 大気汚染・温室効果ガスの静止衛星観測の動き

大気汚染天気予報のように、汚染大気を時々刻々と追跡して時空間的に密に観測することの重要性からESA、NASA、韓国航空宇宙研究院(KARI)のそれぞれが静止衛星計画を進めており、地球観測衛星委員会(CEOS)のAC-VC会合(Atmospheric Composition Virtual Constellation)などでも連携が活発に議論されている。ESAのSentinel-4、NASAのTEMPOに先んじて、韓国が静止衛星軌道にGEMSを2020年に打ち上げに成功し、アジア域でのSLCFsの排出・光化学反応の日変化解析などが活性化する見通しがある。また、静止衛星からCO₂を計測する米国のGeoCarbミッションにも注目が集まっている。赤外サウダの水蒸気から温室効果ガス計測への展開にも期待がある。

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

現業省庁ニーズ型以外の、学術界からの地球観測衛星ボトムアップ型提案は近年停滞していたが、25の学術団体などによる「今後の宇宙開発体制のあり方に関するタスクフォース会合・リモートセンシング分科会」による「地球観測グランドデザイン」とりまとめ(2017年)および2018、2019年ミッション公募、日本学術会議・地球惑星科学委員会・地球・惑星圏分科会地球観測将来構想小委員会による「持続可能な人間社会の基盤としての我が国の地球衛星観測のあり方」提言(2020年)とりまとめなどから、予算化への新たな道筋づくりと活性化が進められている。排出源の特定に資するキロメートル級観測実現などを旨としたGOSAT-GW後の計画や、次世代静止衛星の議論などの場として重要である。

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)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(2021年)に向け知見集約が進んでいる。文部科学省では砕氷能力のある北極研究船の基本設計が進められており、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・JAMSTEC・国環研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SOx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ている。また、GHGの排出低減に向けた議論も行われている。GHG排出削減に向けたルールを議論する国際海事機関の海洋環境保護委員会の会合はCOVID-19の影響で延期されていたが、2020年11月に開催中である。国際貨物増大等により、船舶のCO₂排出量も加速度的に増大し、2008年と2018年を比較すると40%の増加となっている。日本は2018年から海洋環境保護委員会の議長国でもあり、2030年までに船舶CO₂排出量を40%減少させるため、全船舶での燃費性能を強化する提案を各国と協調して提案している。新規船舶だけでなく、SOx等の大気汚染物質とGHG排出ともに多い現存船舶の省エネ化を促す提案が国際合意に達すれば、CO₂排出量削減につながるものと期待される。欧州や日本の新規船舶ではLNG（液化天然ガス）の大型貨物船が就航し、メタノール、LPG、水素等の新燃料の研究開発も行われている。

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。日本は観測専用機を保有しておらず、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）

温室効果ガス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地域炭素収支評価（RECCAP：REgional Carbon Cycle Assessment and Processes）があり、現在はRECCAP-2が着手しつつある状況である。さらにメタンや一酸化二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。

■海洋の観測

① TPOS2020（Tropical Pacific Observing System in 2020 project、熱帯太平洋海洋観測システム2020プロジェクト）

TOGA（Tropical Ocean and Global Atmosphere、※熱帯太平洋と全球大気、1994年に終

了）計画で構築された太平洋海洋観測システムはTAO/TRITON（the Tropical Atmosphere Ocean/ TRiangle Trans-Ocean buoy Network）のブイ網に後継されている。TPOS2020は、そのブイ網を利用し、2020年までに再設計することを目指すGOOSプロジェクトである。日米だけでなく多国多機関の協力を得て、2040年まで有効な新たな観測システムとすることを目標としている。各大洋の赤道域と太平洋の緯度南北10度以内の熱帯域で、Argoフロートの空間密度を2倍にすることなどを含む提言をしている。

② AtlantOS

欧州連合（EU）のHorizon 2020プロジェクトであるAtlantOSは、GOOSとGroup on Earth Observations（GEO、地球観測に関する政府間会合）による国際協調の枠組みの上に組み立てられた。GOOSとGEOの取り組みを補完し、物理学だけでなく、海や海底の生物学、生態学、生物地球化学にも焦点を当て、大西洋における海洋観測システムを「海洋観測枠組み（Framework for Ocean Observing）^{海洋10)}」に基づいて組織的に強化・最適化することを目指して、2015年4月に開始された。2019年9月に終了し、その成果をもとに、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。ただし、移行後に大きな予算措置はなされていない。

③ Deep Ocean Observing Strategy

主に2000 m以深の深海の観測を、「海洋観測枠組み（Framework for Ocean Observing）」に基づいて推進しようとするGOOSプロジェクトである^{海洋11)}。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で、今後数十年にわたって物理学、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を構築することを目指している。

（6）科学技術的課題

■衛星による観測

① 静止軌道・あるいは衛星多数フォーメーションを利用した観測常時化

- ・ 望遠鏡・アンテナの展開技術を含む大型化
 - 分割式大型望遠鏡技術（NASA天文観測衛星JWST、JAXA静止光学衛星等）
 - 展開大型アンテナ技術（NISAR、BIOMASS等）
- ・ 観測センサの小型軽量化
 - Ka帯など高周波採用や送信デバイスの固体化高出力化によるアンテナの小型化
 - 群衛星運用技術
 - 酸化ガリウム、ADC等を集積化した検知器などの採用による電気周りの小型省電力化
- ・ 軌道制御機能を持つ小型衛星バスの技術開発

② 能動光学（レーザー）を用いた観測の高度化

- ・ スキャニングなどによる高精度3Dイメージング
- ・ ドップラー観測による地球大気運動観測

③ 表層下観測などを実現する新しい手法の研究

- ・電波センサの周波数域の拡大、能動センサの多周波化
 - サブミリ波など高周波およびP波など低周波の利用 (Ice Cloud Imager, BIOMASS) による観測対象の拡大
 - 多波長 SAR による観測対象識別 (NISAR)
- ・重力場観測による地下水推定 (GRACE シリーズ, GOCE)

④ 複数衛星による干渉観測によるリアルタイム化、高精度化

- ・複数衛星フォーメーションによる SAR 観測 (TANDEM-X, SAOCOM)
- ・地上/衛星、衛星/衛星間による干渉観測システムの発展 (電波天文衛星 VSOP 等)

⑤ MEMS (Micro Electro Mechanical Systems、※微小電気機械システム) 技術の発展に伴う要素技術の応用研究による新たな観測システム設計

- ・メタマテリアルアンテナ/光学素子、TypeII 超格子赤外センサ、マイクロボロメータ等

⑥ 設計開発プロセスにおける設計・検証の統合的デジタル化による開発期間短縮**⑦ SoC 技術、ソフトウェア通信技術等を取り入れた軌道上フレキシブルなシステムの研究****⑧ 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の研究**

- ・プラットフォーム (アーカイブ、クラウド)、IT 技術 (機械学習、ディープラーニングなど)

■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)、温室効果ガス (CO₂ 等) 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 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) 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、Society 5.0 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。その一方で、長期安定性や信頼度の向上が重要な課題である。ドローンでの自律・自動的な高度分布計測にも期待が集まるが、安全確保技術の確立が求められる。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合わせ、大気汚染物質・温室効果ガス・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である。

② 衛星ライダーによるエアロゾル・温室効果ガス観測

衛星ライダーによるエアロゾル観測については、すでに直交偏光式雲エアロゾルライダー (CALIOP: Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization)、雲エアロゾル輸送システム (CATS: The Cloud-Aerosol Transport System) が運用され、大気ライダー (ATLID: The ATmospheric LIDar)

の開発が進められている。しかしCALIOP はすでに寿命を越えており、CATS はISS 搭載のため観測緯度範囲が限定されている一方、ATLID は運用期間が3 年と短い。このためATLID 以降の衛星ライダー計画に着手することが求められているが、高コストのライダー開発、長期間に渡るライダー運用可能性の問題がある。また、GOSAT、OCO-2 のような太陽光を使う観測の場合、太陽高度が低くなる冬期や夜間の観測が出来ないが、レーザーを使った差分吸収ライダー等の計測ではこれらの問題点を回避出来る可能性がある。その一方でライダーは長期間に渡る運用可能性にまだレーザー光源の寿命の問題等の課題がある。

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、そういったビッグデータへの対応が課題である。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べきである。

④ 人為的温室効果ガス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、人為的温室効果ガス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、化石燃料による温室効果ガス排出量や、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の低減を行うことができると考えられるが、まだ道筋はたっていない。

⑤ 河川を通し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、河川を通した陸から海への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、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、各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だろう。

⑦ 静止気象衛星を利用した陸域植生モニタリング

衛星リモートセンシングは、広範囲の植生を同一基準で観測ができるために有意義である。現在MODISセンサなどの極軌道衛星データが広く用いられているが、特に熱帯雨林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。静止気象衛星は10分等の高い時間分解能をもち、熱帯雨林などの地域のモニタリングには有効に利用できる可能性を持つ。特にひまわり8・9号では可視・近赤外域の観測バンド数が増えており、陸域植生のモニタリングへの応用が進められている。

■海洋の観測

① プロファイリングフロート技術の向上

現在Argoプログラムに用いられている主なフロートは、シェア順に、米国Teledyne Webb Research社製APEX、フランスNKE-INSTRUMENTATION社製ARVOR、米国スクリプス海洋研究所によるSOLO-II、米国Sea-Bird社製NAVIS、米国MRV社製の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の場合、2018年に投入されたフロートはすべてが36サイクルの観測（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の場合、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る。一方、トップレベルの寿命を達成している機種にとっては、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の長期試験を実施中で、現在まで良好な結果を得ており、140～150サイクル（寿命10年以上）の達成が期待されている。より長期的な視点からは、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る。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るだろう。

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（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。また、BGC Argoの持続可能性を確保するためには、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にかつ適切に利用できるようにする技術の向上が望まれる。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ない、分野横断的な利用を可能にすることは、統合的な海洋観測の価値を高めることにつながる。

（7）その他の課題

■衛星による観測

① 我が国として整備すべき観測データ項目の認識とデータ入手先についての戦略明確化

これまで地球観測衛星については、GCOS/CEOSで識別されたECVsリストを参考にしつつ、その充足を目指して計画立案/各々のミッション推進を実施してきた。しかしながら、我が国として気候変動観測についてどのような観測データベースを整備すべきかについて公式の設定は行われていない。他国との協力によるデータ取得も含め、観測データベース整備について、オープンな議論の下、国としての方針を定めていく必要がある。

② 国際協力戦略含め我が国としての地球観測計画を立案、評価判断する補助機能体制確立

前項の議論を受け、それらの観測要求を基に、我が国の衛星観測システムをどのように実現していくか計画を立案し、それらを評価する必要がある。衛星観測技術の性格から広範とならざるを得ない議論を、各専門分野の立場から補助する機能の体制確立が課題である。

③ 複数省庁で利用する観測衛星開発・運用経費の予算化の仕組み、衛星運用機関の必要性

地球観測衛星については技術開発を完全に民間/商用ベースにすることは難しく、技術開発に関する国の長期計画およびコスト負担の検討が必要である。現在、提案された衛星ミッションの予算化は各省庁の予算に帰属しているが、共用目的で利用されるものがほとんどであり、こうしたものの予算化の仕組みを考える必要がある。またJAXA等研究開発機関が科学技術研究を実施する一方で、開発された技術を用いた衛星を社会インフラとして継続的に運用・利用推進する目的を持つ機関の設置が課題である。

一方、民間が地球観測衛星を長期的に運用するためには、他国の例でも明らかなように、国としての「長期契約によって作り出された安定需要（アンカーテナンシー）」が望まれる。今後は技術開発省庁による長期的な技術開発計画/予算および利用省庁によるアンカーテナンシーにかかる計画/予算を、宇宙関連計画/予算として有機的に取りまとめることが期待される。さらにアンカーテナンシーについては単一省庁では規模/期間的に不十分であると考えられるため、各省庁の案件を国として集約し、民間に示すことが要請される。

④ 若手研究開発人材の枯渇対策、知と経験の体系化、拠点化と国際交流強化

衛星地球観測の研究開発人材については、世代交代が必ずしも適切にできておらず急速な科学技術力低下が発生しつつある。これまでに得られた知見を体系化し、若い世代を教育・啓蒙し科学技術力を維持するための実施体制や教育拠点の整備が課題である。例えば、既に構築されている東京大学-JAXA連携講座等を核とする方策もある。衛星観測は国際協力が前提となるため、こうした活動の中で国際的人材交流を一層推進すべきである。その他、日本学術会議による提言も科学技術発展シナリオのベースとして参考とすべき内容がある。

■大気・陸域の観測

① 長期観測の実施体制

気候変動との密接な関わりが指摘されている世界各地で頻発している極端現象による自然災害等から国民社会を保護する「広義の安全保障体制」の強化が喫緊に必要であり、そのために衛星観測や地上観測

の有効性を最大限に引き出した長期計画により社会基盤を維持する必要がある。そのためにも、国策での長期観測に関する戦略作りと計画実装が必要である。たとえば米国のNEON（National Ecological Observatory Network）では2019年から30年間の本観測実施が、欧州の衛星観測計画ではMetOpなどのシリーズ化によって30年規模の気象・地球観測衛星計画が実装されている。また欧州ではICOS（Integrated Carbon Observation System）として温室効果ガスの地上観測についてEU全体で長期にサポートする計画が実施されている。わが国での計画では5年程度のプロジェクトに依存し継続性が担保されない場合が多い。この点を見直し、特色を持った長期観測を維持するメカニズムを構築していくことが必要である。省庁内での観測再編などによりオゾンゾンデなどの長期継続観測が終了する場面も見られ、我が国全体としての戦略の議論も必要である。例えば、GCOM-C、GOSAT、PALSARなどの我が国の高性能な後継センサを高度化しつつ、継続的に打上げていくことにより我が国の優位性を持続することができる。また、次期静止気象衛星（ひまわり10、11号だけでなくそれ以降も含む）の継続的な打ち上げについては、気候変動に関わる成分の計測の可能性も含めて、今後、検討すべきである。SKYNETやAD-NET等の地上観測ネットワークも持続的な長期観測のメカニズムを検討すべき段階にあり、特に、観測のための人的リソースを含むインフラの維持が課題となっている。

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。航空機観測は温室効果ガス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温室効果ガス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ている。文部科学省の大型プロジェクト基本構想ロードマップ2020への選定には至っていないが、基礎的検討が進展している。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る。

③ 次世代の育成

上述の研究を確実に進める上で、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。一方で中国を見ると、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く。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ス

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 環境区分

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も、日本における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。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重要である。その際には、欧州のEuroGOOS、豪州のIMOS（Integrated Marine Observing System）、米国のIOOS（Integrated Ocean Observing System）などが参考になるだろう。それらの活動の成果を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も望まれる。

(8) 国際比較

■衛星による観測

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	○	↘	●IPCCや国際会議における活動は活発だが、欧米と比較して先端的な研究を実施している人数が少なく層が薄い。若い世代の育成が間に合っていない。世代交代や拠点化などの国内体制整備が必要。
	応用研究・開発	○	↘	●気候変動観測衛星の戦略立案がここ数年停止している。次世代の衛星システムの準備がされていない。産官学それぞれにおいて若い世代の育成努力が不足している状況が続いており、早急に次期戦略が必要。
米国	基礎研究	◎	→	●ゴダード宇宙科学研究所（NASA-GISS）、NOAAやスクリプス研究所、大学および軍関連の研究機関を中心とし、基礎研究についても世界を継続的にリードしている。
	応用研究・開発	○	→	●地球観測衛星はDecadal Survey（10カ年計画）などで長期計画を立案してきているが、開発実施に至らない、あるいは大きく遅れる計画も散見される。後継機と新規ミッションのバランスを調整中。民営化よりも軍関連の研究推進が顕著である。
欧州	基礎研究	◎	→	●欧州全体としては網羅性をもって十分な研究体制が敷かれており、ほぼ全ての分野をカバーできている。しかしながら先端性については米国あるいは日本などから遅れるところもある。 ●英国では英国気象庁（Met Office）などを中心とした研究の層が厚く、研究をリードする分野も多い。 ●ドイツは大学やマックスプランク研究所などの組織を中核として、特に電波センサを利用する分野を得意としている。 ●フランスは大学を中心とした基礎研究を展開しており、特に光学センサに関する分野を得意としている。
	応用研究・開発	◎	→	●センチネル衛星群を含むコペルニクス計画において、継続的な観測インフラシステムと得られたデータの社会利用を進めている。民営化の途上にある。

				●英国は一時期開発から撤退したため開発力がかなり低下したが、SSTL社などが小型衛星は世界的にリードする力を保持している。今後、中大型、小型フォーメーション等で英国宇宙局(UKSA)を軸に復活の方向性がみられる。 ●ドイツはドイツ航空宇宙センター(DLR)を中心として発展を試みている。X-band SAR衛星の民営化などを実施している(Tandem-X)。近年はライダーの研究も推進している。 ●フランスはツールーズのフランス国立宇宙研究センター(CNES)やAIRBUS社などによる光学衛星の開発で欧州をリードしており、またライダーの開発も推進している。
中国	基礎研究	△	↗	●長期にわたる龍計画(ドラゴンプログラム)で欧州宇宙機関(ESA)から技術導入し、急速に成長しつつある。しかし、まだ習得中の状態であり、自ら新しい研究を確立し、地球環境の持続可能性の議論をけん引する段階にはまだ至っていない。
	応用研究・開発	○	↗	●国家資本集中により今後10年で100機程度の地球観測衛星を開発打ち上げるとしており、急速に技術的キャッチアップアップを行おうとしている状況である。温室効果ガス観測については、様々な観測方式による複数の衛星を打ち上げている。
韓国	基礎研究	△	→	●韓国気象庁や大学などで研究は行われているが、日米欧の研究を追隨するレベルに有り、急速に発展する様子がない。
	応用研究・開発	○	→	●欧州AIRBUS社、米国Harris社等から観測システムを調達して実利用観測を行っている。自国で小型衛星を開発しているが、実用衛星レベルの開発能力を持つにはまだ時間がかかると思われる。

■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	○	↗	●CO₂、SLCFs(メタン、NO_x等)、水循環を総合的に観測するGOSAT-GW衛星(温室効果ガス・水循環観測技術衛星)が公式化し、研究開発の起爆剤となる可能性が出てきた。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へ向けて、関連チャプターへのリードオーサー、レビューエディターとして貢献しており、国際社会への知見提供が期待される。 ●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	○	→	●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、基礎研究の波及効果が後年度に期待できる。
米国	基礎研究	◎	↗	●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	◎	→	●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。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

欧州	基礎研究	◎	↗	●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。 ●英国は中国やインド等との連携が活発で、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。 ●フランスはマクロン大統領の施策により優秀な科学者を世界から集めるなど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	◎	↗	●欧州中期予報センター（ECMWF：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からの知見もいち早く発信された。 ●英国は小型ローコストセンサの開発や実装研究、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	○	↗	●大気汚染や温室効果ガスの現場・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	△	→	●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	○	↗	●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	△	→	●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	○	→	●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）では他国をリードしているが、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全球的なネットワークOceanGlidersには積極的に参加していない。
	応用研究・開発	△	→	●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展しているが、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4000m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。

米国	基礎研究	◎	→	●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。 ●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	◎	→	●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フロートも、“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RBRargo CTD sensor (RBR Ltd.)とSBE41 CTD (Sea-Bird Science)も、米国企業の製品である。
欧州	基礎研究	◎	→	●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・データ利活用・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160台展開し、国別5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6台で国別11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250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150台展開し、国別6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。
	応用研究・開発	△	→	●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AltantOS (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。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
環境区分

				●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。 ●英国は国立海洋学センタ（NOC）の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	○	↗	●Argoフロートを約90台展開し、BGC ArgoとDeep Argo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	△	→	●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いる。
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CO₂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340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。 ●インドは継続的な予算を確保してArgoフロート約120台を展開し、BGC Argoにも国別で3位の貢献をしている。 ●カナダはArgo、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会合で発表した。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の範囲
応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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
◎：特に顕著な活動・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 ※ここ1～2年の研究開発水準の変化
↗：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 2.2.2)
- ・ 水循環 (水資源、水防災) (環境・エネ分野 2.2.3)
- ・ 生態系・生物多様性の観測・評価・予測 (環境・エネ分野 2.2.8)
- ・ 都市環境サステナビリティ (気候変動適応、感染症、健康) (環境・エネ分野 2.2.11)
- ・ 農林水産業における気候変動適応・緩和 (環境・エネ分野 2.2.12)

参考・引用文献

全体として参考とした文書

- 全1) 地球観測TF地球科学研究高度化ワーキンググループ,「地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析」『気象研究ノート』234号(2017):1-94, <http://www.jsprs.jp/pdf/TF20160531.pdf> (2021年1月アクセス)
- 全2) 高藪緑, 佐藤薫,「提言 我が国の地球衛星観測のあり方について」『文部科学省地球観測推進部会』, https://www.mext.go.jp/content/20191224-mxt_kankyou-000003559_1.pdf (2021年1月アクセス)
- 全3) H. Shimoda and T. Kimura, *Comprehensive Remote Sensing : Japanese Space Program*, S. Liang (ed.), 1st. edition (Berkeley, CA : Elsevier, 2017), 246-280, <https://www.elsevier.com/books/comprehensive-remote-sensing/liang/978-0-12-803220-6> (2021年1月アクセス)
- 全4) 気象庁,「異常気象レポート2014 近年における世界の異常気象と気候変動～その実態と見通し～(Ⅷ)」『気象庁』, https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/climate_change/2014/pdf/2014_full.pdf (2021年1月アクセス)

■衛星による観測

- 衛星 1) 気象庁,「気候変動監視レポート2019 世界と日本の気候変動および温室効果ガスとオゾン層等の状況」『気象庁』, https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2019/pdf/ccmr2019_all.pdf (2021年1月アクセス)
- 衛星 2) 環境省, 文部科学省, 農林水産省, 国土交通省, 気象庁 他,「気候変動の観測・予測および影響評価総合レポート2018～日本の気候変動とその影響～」『環境省』, http://www.env.go.jp/earth/tekiou/report2018_full.pdf (2021年1月アクセス)
- 衛星 3) 国土交通省水管理・国土保全局河川計画課,「平成30年7月豪雨が統計開始以来最大の被害額に」『国土交通省』, <https://www.mlit.go.jp/common/001301033.pdf> (2021年1月アクセス)
- 衛星 4) Stephanie C. Herring et al., “Explaining Extreme Events of 2016 from a Climate Perspective”, *Bulletin of the American Meteorological Society* 99, no. 1 (2018): S1-S157
- 衛星 5) IPCC Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis*, IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate

(Cambridge : Cambridge University Press, 2013)

- 衛星 6) GCOS-107, “Systematic Observation Requirements for Satellite Based Products for Climate”, WMO
- 衛星 7) National Center for Atmospheric Research (NCAR) /University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) , “Climate Data Guide”, NCAR/UCAR, <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-data-records-overview> (2021年1月アクセス)
- 衛星 8) M. C. Hansen et al., “High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change”, *Science* 342, no. 6160 (2013) : 850-853, doi : 10.1126/science.1244693

■大気・陸域の観測

- 大気 1) GCOS, “Essential Climate Variables”, WMO, <https://public.wmo.int/en/programmes/global-climate-observing-system/essential-climate-variables> (2021年1月アクセス)
- 大気 2) 安成哲平, 「大気ブラックカーボン及びその役割を知る」『細氷』62号 (2016) : 3-42, http://www.metsoc-hokkaido.jp/saihyo/pdf/saihyo62/2016_02.pdf (2021年1月アクセス)
- 大気 3) FLUXNET, “FLUXNET2015 Dataset”, <http://fluxnet.fluxdata.org/data/fluxnet2015-dataset/> (2021年1月アクセス)
- 大気 4) Julia Schmale et al., “Collocated Observations of Cloud Condensation Nuclei, Particle Size Distributions, and Chemical Composition”, *Scientific Data* 4 (2017) : 170003, doi : 10.1038/sdata.2017.3
- 大気 5) BACCHUS project (Impact of Biogenic versus Anthropogenic emissions on Clouds and Climate : towards a Holistic UnderStanding) , “BACCHUS Ice Nucleation DataBase”, BACCHUS, <https://www.bacchus-env.eu/in/index.php> (2021年1月アクセス)
- 大気 6) Alastair Lewis, “Tropospheric Ozone Assessment Report (TOAR) ”, Elementa : Science of the Anthropocene, <https://collections.elementascience.org/toar/> (2021年1月アクセス)
- 大気 7) Hitoshi Irie et al., “Turnaround of Tropospheric Nitrogen Dioxide Pollution Trends in China, Japan, and South Korea”, *SOLA* 12 (2016) : 170-174, doi : 10.2151/sola.2016-035
- 大気 8) 鵜野伊津志 他, 「PM2.5越境問題は終焉に向かっているのか?」『大気環境学会誌』52巻6号 (2017) : 177-184, doi : 10.11298/taiki.52.177
- 大気 9) Y. Kanaya et al., “Rapid reduction in black carbon emissions from China : evidence from 2009–2019 observations on Fukue Island, Japan”, *Atmos. Chem. Phys.* 20 (2020) : 6339–6356, doi : 10.5194/acp-20-6339-2020
- 大気10) M. Bauwens et al., “Impact of coronavirus outbreak on NO₂ pollution assessed using TROPOMI and OMI observations”, *Geophysical Research Letters* 47, no. 11 (2020) : e2020GL087978, doi : 10.1029/2020GL087978
- 大気11) C. Le Quéré et al., “Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement”, *Nat. Clim. Chang.* 10 (2020) : 647–653, doi : 10.1038/s41558-020-0797-x

大気12) P. M. Forster et al., “Current and future global climate impacts resulting from COVID-19”, *Nat. Clim. Chang.* 10 (2020) : 913-919, doi : 10.1038/s41558-020-0883-0

■海洋の観測

- 海洋 1) IPCC Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis*, IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (Cambridge : Cambridge University Press, 2013)
- 海洋 2) N. Abram et al., “Summary for Policymakers : IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate”, IPCC https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/03_SROCC_SPM_FINAL.pdf (2021年1月アクセス)
- 海洋 3) IPCC Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis*, T. F. Stocker et al. (eds.) , IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (Cambridge : Cambridge University Press, 2013) , Technical Summary
- 海洋 4) J. Aristegui et al, *Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities*, N. L. Bindoff et al. (eds.) , IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (Cambridge : Cambridge University Press, 2019) , Chapter 5, <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-5/> (2021年1月アクセス)
- 海洋 5) S. Speich et al., “Editorial : Oceanobs'19 : An Ocean of Opportunity”, *Frontier in Marine Science* 6 (2019) : 570, doi : 10.3389/fmars.2019.00570
- 海洋 6) S. C. Riser et al., “Fifteen years of ocean observations with the global Argo array”, *Nature Climate Change* 6 (2016) : 145-153, doi : 10.1038/nclimate2872
- 海洋 7) D. Roemmich et al., “On the Future of Argo : A Global, Full-Depth, Multi-Disciplinary Array”, *Frontier in Marine Science* 6 (2019) : 439, doi : 10.3389/fmars.2019.00439
- 海洋 8) JCOMMOPS, “Integrated information, maps and tools to help coordinate and monitor global ocean observation efforts”, Oceanops, <https://www.jcommops.org/> (2021年1月アクセス)
- 海洋 9) P. Testor et al., “OceanGliders : A Component of the Integrated GOOS”, *Frontier in Marine Science* 6 (2019) : 422, doi : 10.3389/fmars.2019.00422
- 海洋10) The Global Ocean Observing System (GOOS), “Framework for Ocean Observing (FOO)”, https://www.goosocean.org/index.php?option=com_content&view=article&id=18&Itemid=118 (2021年1月アクセス)
- 海洋11) L. A. Levine et al., “Global Observing Needs in the Deep Ocean”, *Frontier in Marine Science* 6 (2019) : 241, doi : 10.3389/fmars.2019.00241