

2.10 環境分野の基盤科学技術

2.10.1 地球環境リモートセンシング

(1) 研究開発領域の定義

リモートセンシングは広義には遠隔から電波や光、音波などを用いて対象物を触らずに調べる技術であり、衛星や航空機、ドローン、船舶、車両などに搭載することで広範に様々な情報を面的に取得できる。本領域では、衛星観測を主に扱う。気候変動にかかわる大気中の温室効果ガス（Green House Gases：GHGs）や微粒子（エアロゾル、雲）、気候変動因子（雲、土地利用、植生など）の濃度や変化に関するリモートセンシングを中心に記述する。地震、噴火等の自然災害に関するリモートセンシングも対象とする。

気候変動の総合的な観測は「2.2.1 気候変動観測」、予測は「2.2.2 気候変動予測」で扱う。自然災害も含めた適応等に関する研究は「2.8.2 農林水産業における気候変動影響評価・適応」領域や「2.8.3 都市環境サステナビリティ」領域で扱う。水災害への適用技術等は「2.2.3 水循環（水資源、水防災）」、生態系・生物多様性に関しては「2.2.8 生態系・生物多様性の観測・評価・予測」で扱う。

(2) キーワード

衛星観測、気候変動、地球環境観測、気象観測、合成開口レーダー（Synthetic Aperture Radar：SAR）、干渉SAR、位相配列方式L帯合成開口レーダー（Phased Array Type L-band SAR：PALSAR）、Ka帯レーダー干渉計（KaRIn）、改良型大気周縁赤外分光計（Improved Limb Atmospheric Spectrometer：ILAS）、多波長光学放射計（Second Generation Global Imager：SGLI）、ライダー、雲プロファイリングレーダー（Cloud Profiling Radar：CPR）

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

気象庁の気候変動監視レポート2021¹⁾では世界各地では過去30年の気候に対して著しい偏りを示した天候、いわゆる異常気象に増加傾向があると報告している。世界気象機関（World Meteorological Organization：WMO）が2021年8月に公表した報告書²⁾では1970～2019年の50年間で気象災害が5倍に増えたと警告している。一方で早期警報と災害管理の改善により、死亡者数はほぼ3分の1に減少したと報告されている。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³⁾。近年の気候変動に関して、「人間の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない」と気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第6次評価報告書第1作業部会報告書に明記されている。人為起源のGHGs排出による気候変動の影響を緩和する政策を実施していく上でも、地球の気候の状態を調べ、理解し、診断することが極めて重要である。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）。世界経済の進展および断絶、カーボンニュートラルに向けた活動の地域差や揺り戻しなどの影響を正しく捉えるには、海洋および陸域、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。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。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。

GHGsに関する全球観測への貢献⁴⁾に加えて、台風、豪雨、豪雪、洪水、地震、噴火、斜面崩壊、大規模火災など自然災害対応への貢献や、土地利用変化、植生変化、大規模森林火災、森林違法伐採などの把握などへの貢献も重要である^{5), 6)}。災害時の広域状況の把握とともに台風、豪雨、豪雪の予測に資する雲や

水蒸気も含めた観測が重要である。

[研究開発の動向]

■気象・気候の衛星観測 (GHGs 観測を除く)

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) の現業気象関係の国際枠組みにより維持されている。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。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。

科学的あるいは気候診断の地球観測の国際的な調整は地球観測衛星委員会 (CEOS) において行われており、各国の観測衛星開発計画の情報共有がなされている。国際協力による相互データ交換・評価の仕組みとして、GHGs、降水、陸域などの目的に応じた衛星集団 (CEOS Virtual Constellation) が構築されている。観測対象となる気候システムに必要な観測パラメーターは54の必須気候変数 (Essential Climate Variables : ECVs) 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、観測パラメーターの整理がなされた状況にある⁷⁾。並行して、特に長期観測が重要なパラメーターについては気候データ記録として識別されつつある⁸⁾。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。

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。

気候変動の全容解明には、大気だけでなく海洋や陸域を含む地球システムへのフィードバックを総合的に理解する必要がある。海洋表層循環の研究はメソからサブメソスケールの現象へ進みつつある。水平混合・輸送・拡散に主として寄与するメソスケールの中規模渦については、レーダー高度計を中心とする衛星観測、アルゴフロートを中心とする現場観測、渦解像数値モデルの組み合わせでこの20~30年で飛躍的に理解が進んだ。アルゴフロートは海中をプログラムに従って浮き沈みしながら観測データを取得する現場観測機器だが、海面浮上時に衛星コンステレーション (協調動作する複数の衛星団) にデータを送信する仕組みを設けており、リモートセンシングも活用している。サブメソスケールの変動現象は鉛直混合・輸送・拡散に寄与するため、物理過程だけでなく物質輸送や生物生産など化学・生物過程にも直接つながり、観測・モデル両面で国際的にも近年注目を集めている。温暖化に敏感な雪氷圏においては、従来からの氷河氷床変動の検出に加え、衛星の高頻度観測を利用した凍土融解過程の検出が新たに進んでいる。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の陸域観測技術衛星「だいち2号」(Advanced Land Observing Satellite : ALOS-2) と欧州宇宙機関 (ESA) のSentinel-1による高頻度観測から、シベリアにおける森林火災の跡で、5年以上に亘り永久凍土の融解による地盤の変動観測されている。

■GHGsの衛星観測

地球温暖化の主要因となる二酸化炭素 (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 (以下、「国環研」と記載) とJAXAのGHGs観測技術衛星「いぶき」(GHGs Observing Satellite : GOSAT) シリーズなどが対応している⁴⁾。

2009年に打ち上げられたGOSATは宇宙からのCO₂とメタンの濃度の観測を主目的としており、世界で最初に軌道にのったGHGs観測衛星である。熱赤外域だけでなく短波赤外域のセンサーを同時に搭載し、対流圏全層に感度を有している。設計寿命を延長して2022年12月時点も運用を継続している。その観測データ

を利用することで、大陸規模で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GOSAT-2はGOSATよりもセンサー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。

米国航空宇宙局(NASA)は2014年に軌道上炭素観測衛星2号(Orbiting Carbon Observatory-2:OCO-2)の打ち上げを成功させている。その複製機であるOCO-3センサーが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を基盤として、南北アメリカ大陸におけるGHGsの濃度分布の可視化を目指した「GeoCARB(Geostationary Carbon Observatory)」ミッションは運用費用の増大などにより2022年12月に中止となった(※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。)。OCO-2衛星と類似したTanSat衛星も、2016年12月に中国科学院(CAS)により世界3番目に打ち上げられている。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年以降に打ち上げ予定である。日本では、GOSATとGOSAT-2の後継機としてGHGs・水循環観測技術衛星GOSAT-GW(GOSAT for GHGs and Water cycle)の打ち上げが2023年度に計画されている。高性能マイクロ波放射計(Advanced Microwave Scanning Radiometer-3:AMSR3)はGOSAT-GWに相乗りする計画とされており、水循環と炭素循環との複合研究も進められる。

■自然災害のリモートセンシング

増加する自然災害に対して、SARの官民・国際連携による衛星バーチャルコンステレーションによる高頻度・高分解能での観測とドローンや地上観測の活用、地理空間情報との統合による災害状況の把握が期待されている。また、降水量、地表面温度などの情報に基づく、土砂災害、干ばつなどの発生リスクの把握、モデルとの統合による洪水浸水域予測や干渉SAR技術による火山の山体膨張の把握による火山活動の警戒の強化などが災害の多発する日本やアジア各国で期待されている。

1992年の地球資源衛星「ふよう1号」(Japanese Earth Resources Satellite-1:JERS-1)以来、ALOS、ALOS-2と日本が先導してきたL帯SAR衛星は、固体地球科学分野にも大きく貢献している。ALOSおよびALOS-2によって福島県浜通り地域で2011年に発生した地震断層が2016年にも発生していることが見いだされた⁹⁾。後継のALOS-4の打ち上げが決まっているが、同様のL帯衛星NISAR(NASA-ISRO SAR、※NASAとインド宇宙研究機関(ISRO)共同のS帯およびL帯のSAR)が2023年にNASA/ISROによって打ち上げ予定であり、ESAも2028年打ち上げを目指してROSE-Lミッションに着手している。

■大気汚染の衛星観測

日本の地球観測プラットフォーム技術衛星「みどり」(Advanced Earth Observing Satellite:ADEOS/ADEOS-2)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行われてきた。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ー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(Air Pollution Observation:APOLLO)の検討などが続いている。

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、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(Tropospheric Emissions:Monitoring of Pollution、※NASAの

対流圏排出、汚染監視ミッション)に先んじて、2020年3月に韓国が大気質監視衛星GEO-KOMPSAT-2Bの打ち上げに成功した。そのデータ検証、解析の進展により、アジア域でのSLCFs(※メタン、NOx等の短寿命気候強制因子。詳細は2.2.1 気候変動観測を参照)の排出・光化学反応の日変化解析などの活性化が期待される。

■森林バイオマス量、土地利用変化の衛星観測

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引き続き重要な課題である。日本では、陸域のバイオマス評価に対してJAXAのALOSシリーズ、気候変動観測衛星「しきさい」(Global Change Observation Mission - Climate: GCOM-C)、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、GHGsや放射収支を通して、気候へ影響を与える。全球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10m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。

加えて土地利用の変化とともに、陸上での水資源の把握が持続的な農業実施などのために進んでいる。ESAはSentinel拡張ミッションの中で30m級の高分解能熱赤外センサーを搭載するミッションLSTM(Land Surface Temperature Monitoring)¹⁰⁾を掲げている。これにより農業に重要な陸上の蒸発散などの把握や火山噴火などの災害観測、都市のヒートアイランドへの対応をするミッションも2028年を目指して開発を進めている。また、可視から短波長赤外までのハイパースペクトルメータによる持続可能な農業・生態系管理と土壌の把握をするミッションも、日米欧などで開発・運用が進んでいる。

■エアロゾル・雲の衛星観測

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、GHGsによる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に一層の観測的把握の発展が望まれる。また、エアロゾルについては前述の大気汚染とも関連する。

日本においてはJAXAのGCOM-C、ESAとJAXA、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SGLIセンサーは、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、それ以前の静止気象衛星に比べて時間・空間解像度ともに2倍に向上し、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・エアロゾルセンサー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NASAジェット推進研究所(JPL)が初めて雲レーダー搭載のCloudSatを打ち上げている。日本では現在、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で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EarthCARE¹¹⁾による観測が2023年度に予定されている。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¹²⁾。「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。

■極端現象

極端気象と温暖化との関連について、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-Water: GCOM-W) や NASA/JAXA/NICTの全球降水観測計画主衛星 (Global Precipitation Measurement Core Spacecraft: GPM主衛星) 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) 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。さらに、台風などに伴う猛烈な海上風を航空機による観測との同期によりSARで把握する研究が日米欧などで進んでいる。定常的にSARによる海上風の観測データが洋上でとらえられるようになれば、台風などの進路予測モデルへの入力データとして活用されると期待されている。

■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のデータ統合・解析システム「DIAS」、経済産業省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達とともに高分解能化しており、東京大学の地球モデル「NICAM」や、名古屋大学の雲解像モデル「CReSS」などを筆頭として発展を見せている。

■地球観測衛星の戦略立案の新たな道筋

宇宙開発体制のあり方について、産学官の連携による社会課題の解決、科学技術の高度化に関わる25の学会が参加している「タスクフォース会合・リモセン分科会 (TF)」コミュニティが2012年から活動している。このTFでは衛星観測ミッションの公募などを通して、地球観測のグランドデザイン、地球観測ロードマップが関係省庁、日本学術会議に提案されている¹³⁾。

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) から、予算化への新たな道筋づくりも進められている。排出源の特定に資するキロメートル級観測実現などを目指した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。宇宙基本計画工程表重点事項の具体的取組として、2022年5月に「衛星リモートセンシングの開発・利用に携わる産学官の関係企業・機関や有識者等が広く参加するコンソーシアムを立ち上げ、同分野における全体推進戦略案の検討や、産学官連携の取組等を促進する場の形成を図る」旨が記載され、この年の9月に「衛星地球観測コンソーシアム (CONSEO)¹⁴⁾」が設置された。

背景にはデジタル発展による環境変化 (Society5.0の実現、スマートシティの構築、AI技術発展等) により、衛星観測データがICT分野で活用されるようになり、宇宙産業市場においてベンチャー企業を含む民間企業の宇宙活動が活発となっていることがある。コンソーシアムでは、産学官により日本の衛星地球観測分野における総合的な戦略提言をまとめることで宇宙基本計画や工程表等の政策議論へ貢献すること、日本の地球観測に基づく地球科学の強みを伸ばし、世界との協調による気候変動対策を先導すること、さらに産学官による具体的な連携活動を推進し、コンソーシアムへの参加者が多様な産業に拡大することによって、日本

の成長産業となることなどを目指すとしている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

■陸域：多面的な植生・生態系パラメーターの観測

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ー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PALSAR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の需要が高い。国際宇宙ステーションにも陸域植生を計測できる複数のセンサーが搭載されている。これらにより、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GHGs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、不確実性の低減が期待される。

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SAR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に活用される。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は日本では1992年打ち上げのJERS-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観測および情報の提供を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ISRO合同のNISARなどの打ち上げが予定されている。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（Radar Observing System for Europe - L-Band : ROSE-L）、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（Global Ecosystem Dynamics Investigation）¹⁵⁾ および、日本の植生観測ライダー（Multi-footprint Observation Lidar and Imager : MOLI）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。

■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、年単位の変動を全球で扱うことは、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35 cm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くな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）、VIIRS（Visible/Infrared Imager and Radiometer Suite、※マルチチャンネルイメージャー・放射計）などから全球の高頻度観測情報が無償で提供されている。例えば、Landsat衛星データ（分解能約30 m）を用いた全球での森林の伐採・植林年が把握されている¹⁶⁾。これらのデータは毎年更新されている。欧州のSentinel-1、Sentinel-2は、観測データが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。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。

■海洋衛星観測

海洋に関する基本パラメーターとして、これまで海面温度、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り観測が行われている。

■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や中国TanSat、欧州MicroCarbと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、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・エアロゾルセンサー2型により、雲だけでなく、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の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CO（※GOSAT-2で観測可能）やNO_x（※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により実施されており、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ションとしての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。NASA-JPLによる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ー（RainCube）、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（えんぺい）観測についてサブミリ波を利用する検討が続けられている。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。海外では欧州のSentinel-4、NASAのTEMPO、韓国のGEMS（※大気質監視衛星GEO-KOMPSAT-2Bに搭載。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がセンサーとして搭載が予定されている。

■極域

極域は特に温暖化の感度が強いことから、極域の海氷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 (Special Sensor Microwave/Image : SSM/I)、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、マイクロ波放射計を搭載した 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) が立ち上げられ、ALOS-2、ドイツ航空宇宙センター (DLR) の TerraSAR-X、カナダ宇宙機関 (CSA) の Radarsat-2、ESA 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た。氷床の厚さの変化を観測するため、NASA がライダーによる氷床観測衛星の後継機 (ICESAT-2) が 2018 年に打ち上げている。

■静止気象衛星データ活用および後継機

静止気象衛星データについて、NASA と米国大気海洋庁 (NOAA) の気象衛星 GOES-R とひまわり 8、9 号機が公開されており、利用できる。ひまわり 8・9 号に搭載された可視赤外放射計によって、それ以前の 1 km 分解能から倍の 500 m 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。2017 年に運用開始した GOES-R には雷放電観測センサー (Geostationary Lightning Mapper : GLM) が搭載され、米国を含む西半球の雷放電観測データを取得している。ハリケーン強度予測などへの利用が検討されている。CGMS はイメージャー搭載の他に、赤外サウンダーおよび雷センサーの搭載を推奨しており、ひまわり 10 号 (仮称) に搭載する検討や調整が行われている。

■重力場衛星観測

NASA と DLR が 2002 年に打ち上げ、2017 年まで運用した GRACE 衛星は地球の重力場を観測した初の双子衛星である。双子衛星間距離、軌道高度変化等により地球の重力場を求めている。GRACE で得られた地球重力場の変化を解析することで、南極や高山域の氷河氷床の喪失、地下水貯留量の減少、海流の変化などが従来よりも正確に推定でき、気候変動の影響解析をはじめ水文、海洋、雪氷科学などに重要な貢献を果たした。また、地震前後の重力場の変化の解析などにも応用されている。後継機 GRACE-FO が 2018 年に打ち上げ成功しており、月ごとのデータの公開を継続している。

■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・ビッグデータ解析)

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グ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。

■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ーの統合解析、前述のバイオマス評価におけるL帯SAR/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。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

【国内】

■ GOSAT-GW

2023年度に打ち上げ予定のGOSAT-GWはCO₂観測性能を発展させた独自のGHGs観測センサー(Thermal And Near Infrared Sensor for carbon Observation : TANSO)を搭載し、GHGs排出源を都市別に観測できる性能の達成を目指している。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帯が追加されている。

■ EarthCARE (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer ; アースケア)

EarthCAREはJAXA、NICTとESAが共同開発している地球観測衛星である。地球全球の雲とエアロゾルの3次元分布を観測し、気候モデル予測精度を向上させることをミッションとしており、CPR、大気(紫外)ライダー、多波長イメージャー、広帯域放射収支計という4つのセンサーが搭載されている。JAXAとNICTが共同開発によるCPRは世界で初めて衛星から雲の上下方向に動く速度を計測するセンサーである¹⁷⁾。

■ 二周波降水レーダー後継機

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)について検討されている。

■ GCOM-C/GOSATシリーズの雲・エアロゾルセンサー後継機を含むSGLI後継

多方向観測、偏光観測、近紫外帯を用い、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されている。

■ 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シリーズの後継ミッションが検討されている。特にALOS-4はJERS-1から続くL帯SARミッションを継続し、長期データや全球データを持つ日本の特徴となるセンサー搭載衛星である。

■ 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が検討されている¹⁸⁾。

■ 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されている。

■ ひまわり8号・9号後継機

ひまわり8号・9号の設計寿命は2029年であるため、その後継機の性能、開発項目等を気象庁が検討しており、気象学会等でも議論が行われている。近年、我が国で頻発している線状降水帯や大型台風による豪雨などの水災害の予測のためには、水蒸気量などの大気の状態のより正確で即時性の高い観測値が重要とな

る。ひまわり8号・9号では雲を平面的に観測しているものの、鉛直方向には観測できない。ひまわり10号(仮称)には「ハイパースペクトル赤外サウンダー」を搭載し、水蒸気や気温、風など大気の状態を立体的に、常時、広範囲に観測し、気象予測と防災活用能力を向上する計画である。2023年から製造を開始し、2028年に打ち上げ、2029年に運用開始の予定である。

【海外】

■ 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¹⁹⁾。2023年の打ち上げが計画されており、NASAが2014年に打ち上げたOCO-2の役割を引き継ぐことが計画されている。その分散分光計装置は、4.5 km x 9 km のピクセルサイズで高精度 (1 ppm のオーダー) で大気中のCO₂濃度を地球規模で測定するように設計されている。

■ ESAのCO2M

Copernicus Sentinel Expansion ミッションの1つとして人為起源のCO₂とメタンや二酸化窒素を監視する将来衛星であり、2機で構成されコンストレーションとして動作するように計画されており、2026年の打ち上げが計画されている。

■ DLR/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単独のライダー衛星²⁰⁾であり、2027年からの運用が計画されている。

■ 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²¹⁾であり、2024年の打ち上げが計画されている。

■ NASA/CNESのSWOT

NASAとCNESが、CSAと英国宇宙局(UKSA)の協力を得て共同開発したものであり、海洋と陸域の表層水の理解を目的としており、2022年12月に打ち上げられた²²⁾。Ka帯レーダー干渉計(KaRIn)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の後継衛星であり、地表にある淡水域と海洋の水の90%以上の高さを測定するとされている。

(5) 科学技術的課題

■ 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)
- 観測センサーの小型軽量化
 - 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

■ 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)

■ 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

■ 衛星ライダーによるエアロゾル・GHGs観測

衛星ライダーによるエアロゾル観測は、すでに直行偏光式雲エアロゾルライダー (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization : CALIOP)、雲エアロゾル輸送システム (The Cloud-Aerosol Transport System : CATS) が運用され、大気ライダー (The Atmospheric Lidar : ATLID) 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、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への着手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が問題とされている。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できないが、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できる可能性がある。その一方でライダーは長期間に渡る運用の可能性が高く、レーザー光源の寿命の問題等の課題解決が求められている。

■ 表層下観測などを実現する新しい手法の研究

- 電波センサーの周波数域の拡大、能動センサーの多周波化
 - 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)

■ 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

■ 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

■ 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)

膨大な衛星観測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。

なお、国内宇宙法における「衛星リモートセンシング記録の適正な取り扱いの確保に関する法律」に規定される高分解能なデータについてはテロリストの手に渡ることを防止すること等を目的として、記録の安全管理義務等が求められている。

(6) その他の課題

■日本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が実施されてきた。しかしながら、日本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ことが必要とされている。

■国際協力戦略含め日本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、日本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とされている。

■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、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とされている。そのために衛星観測や地上観測の有効性を最大限に活用する社会基盤として、長期観測を維持する国策としての戦略作りと計画実装が求められている。

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求められている。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のように、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。JAXA等の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・利用推進するしくみが必要とされている。

米国のNEON (National Ecological Observatory Network) では2019年から30年間の本観測実装が、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。欧州ではICOS (Integrated Carbon Observation System) としてGHGs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。日本では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とされている。例えば、GCOM-C、GOSAT、PALSARなどの日本の高性能な後継センサーを高度化しつつ、継続的に打上げていくことで日本の優位性を持続できると期待される。ひまわり10、11号だけでなくそれ以降も含む次期静止気象衛星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検討すべきとされている。SKYNET、A-SKY、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されている。

■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とされている。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挙げられている。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とされている。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。

(7) 国際比較

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"> ● 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。 ● CO₂、SLCFs、水循環を総合的に観測するGOSAT-GW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。
	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、基礎研究の波及効果が後年度に期待できる。 ● 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● NASAゴダード宇宙科学研究所 (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。 ● 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。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 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。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 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。しかしながら先端的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、特に電波センサー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、特に光学センサーに関する分野を得意としている。 ● 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。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。 ● 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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 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UKSAを軸に復活の方向性がみられる。 ● ドイツは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。 ● 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。 ● 英国は小型ローコストセンサーの開発や実装研究、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。 ● 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	△	↗	●長期にわたる龍計画（ドラゴンプログラム）で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中。GHGs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。 ●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	△	→	●韓国気象庁や大学などで研究は行われているが、日米欧の研究を追随するレベルに有り、急速に発展する様子がない。 ●2020年に、世界初となる静止衛星からの大気汚染計測を実現し、関連したアジア全域検証網を提案するなど、研究開発が活発化している。自国のセンサー開発は乏しい。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	○	→	●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。 ●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。

(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

- ・ 気候変動観測（環境・エネ分野 2.2.1）
- ・ 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

- 1) 気象庁, 「気候変動監視レポート2021」 2022年3月, https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2021/pdf/ccmr2021_all.pdf
- 2) World Meteorological Organization (WMO), WMO ATLAS OF MORTALITY AND ECONOMIC LOSSES FROM WEATHER, CLIMATE AND WATER EXTREMES (1970-2019), https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10989
- 3) Herring, Stephanie C., Nikolaos Christidi, Andrew Hoell, James P. Kossin, Carl J. Schreck, Peter A. Stott, Robert S. Webb, et al. "EXPLAINING EXTREME EVENTS OF 2016: From A Climate Perspective." Bulletin of the American Meteorological Society 99, no. 1 (2018) : S157. <https://www.jstor.org/stable/26639334>.
- 4) 久世暁彦 「宇宙からみた人間活動からの温室効果ガス-COVID-19の影響はとらえられたか-」『俯瞰

- ワークショップ報告書 感染症問題と環境・エネルギー分野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 (2021), 183-200., <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2020/WR/CRDS-FY2020-WR-08.pdf>, (2023年2月1日アクセス) .
- 5) 祖父江真一「JAXAの地球観測衛星—ALOSシリーズを中心として」『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), 148-159., <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2021/WR/CRDS-FY2021-WR-06.pdf>, (2023年1月31日アクセス) .
 - 6) 田中一広「GCOM衛星による地球環境の観測」『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), 160-170., <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2021/WR/CRDS-FY2021-WR-06.pdf>, (2023年1月31日アクセス) .
 - 7) GCOS-107, “Systematic Observation Requirements for Satellite Based Products for Climate”, WMO, https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=12835#.Y83yv3bP238
 - 8) 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>
 - 9) Yo Fukushima et al, Extremely early recurrence of intraplate fault rupture following the Tohoku-Oki earthquake, https://gateway.webofknowledge.com/gateway/Gateway.cgi?GWVersion=2&SrcAuth=JSTA_CEL&SrcApp=J_Gate_JST&DestLinkType=FullRecord&KeyUT=WOS:000446089100017&DestApp=WOS_CPL, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0201-x>
 - 10) Copernicus Sentinel Expansion missions, https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Copernicus_Sentinel_Expansion_missions
 - 11) EarthCARE/CPR , <https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/project/earthcare/index.html>
 - 12) 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)
 - 13) グランドデザイン/資料, <https://www.sal.t.u-tokyo.ac.jp/RsTaskforce/>
 - 14) 衛星地球観測コンソーシアム, <https://earth.jaxa.jp/conseo/>
 - 15) Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) , <https://gedi.umd.edu/>
 - 16) 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
 - 17) 富田 英一, “気候変動の要因である、雲とエアロゾルの分布や動きを詳しく調査する世界初の試み”, <https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/story/1356/index.html>
 - 18) ISS搭載ライダー実証 (MOLI) プリプロジェクト, <https://www.kenkai.jaxa.jp/research/moli/moli-index.html>
 - 19) MICROCARB , <https://microcarb.cnes.fr/en/MICROCARB/index.htm>
 - 20) MERLIN - Die deutsch-französische Klimamission, https://www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2440/3586_read-31672/
 - 21) NASA-ISRO SAR (NISAR) Mission, <https://nisar.jpl.nasa.gov/>
 - 22) SWOT SURFACE WATER AND OCEAN TOPOGRAPHY, <https://swot.jpl.nasa.gov/>