

## 提言

# 衛星による将来の地球観測プログラム ～地球環境課題に対する科学と技術の実現解～

2022年9月22日

将来ミッション検討タスクチーム

宇宙航空研究開発機構 第一宇宙技術部門

# 要約

## 1. 提言作成の背景

気候変動を始めとする近年の地球環境変動は人間社会に多大な影響を及ぼし、様々な課題を引き起こしているとともに、その大きな要因の一つである人間社会のあり方も問われている。このような課題に対して適切な対応策を講じるためには、現状を様々な時空間スケールで正確に把握し理解することが何よりも重要であり、衛星を用いた地球表層の観測は極めて大きな意義を持つ。

最新の宇宙基本計画(2020年6月29日宇宙開発戦略本部決定)は、社会の宇宙システムへの依存度が高まっており、特に人工衛星に関し、測位や通信・放送等は既に日常生活に定着し、我々の経済・社会活動の重要な基盤の一つとなっているとして、これを反映した内容となっている。また、災害時において、衛星観測は被災状況の把握や緊急時の連絡手段として大きな役割を果たしてきており、今後とも、社会を支えるインフラとしてその重要性は一層高まると考えられ、更には、宇宙システムの持つ広域的な機能が、地球規模課題の解決においても活用が期待されると言及している。つまり、地球を観測する衛星は、災害対策や地球規模課題の解決においてその重要性が高まっている。

しかしながら、宇宙基本計画の内容には宇宙安全保障に多くの項目が割かれており、衛星開発の計画を記した工程表においては情報収集衛星等を除くJAXAの地球観測衛星は「(2) 災害対策・国土強靱化や地球規模課題の解決への貢献」として「10. リモートセンシング衛星等の開発・整備・運用」に記載があるのみである。

そこで、JAXA 第一宇宙技術部門長の下に設置された有識者からなる本将来ミッション検討タスクチームは、将来の衛星地球観測のあり方を展望し、宇宙基本計画等の国の施策に対して、中短期的に工程表の改訂の参考となり、かつJAXAが担ってきた地球観測衛星にかかる実績や経験をもとに、20-30年先を見据えた日本が推進すべき地球観測衛星のあり方について科学的・技術的観点から検討し、提言をまとめた。

## 2. 現状、及び課題

我が国の安全保障や経済社会における宇宙システムの役割が大きくなっており、この傾向は更に強まると見込まれる。こうした中、宇宙活動は従来の官主導から官民共創の時代を迎え、広範な分野で宇宙の利用による産業の活性化が図られてきており、小型衛星コンステレーションを構築するベンチャー企業や衛星データ解析に取り組むスタートアップ企業が台頭するなどしている。

このように宇宙産業や人工衛星をとりまく環境が急速に変化する中、JAXAの役割も変化が求められている。JAXAのそれまでの役割は、①社会ニーズ(社会課題の解決)に対する衛星地球観測システムの実現解を提案し、②衛星地球観測システムの利用出口を明確化し、社会実装(社会定着)へ橋渡しをすることであった。従来通り、知の探究をする学术界とJAXAが連携することで、衛星観測を向上させ社会ニーズに応えるとともに、産業が拡大する中、③多様なステークホルダーとの連携による効率的、かつ持続可能な衛星地球観測事業を実施することが新たな役割として加えられた。

## 3. 戦略的な衛星リモートセンシングプログラムに向けて

将来ミッション検討タスクチームでは、「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(TF)」(2012年)や日本学術会議の提言「我が国の地球衛星観測のあり方について」(2017年)、改訂された提言「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」

(2020)など学术界での提言をベースとしながら、JAXA の技術開発にかかる知見と連携しつつ 20-30 年先を見据えた 日本が推進すべき地球観測衛星のあり方と計画案について議論を行い、戦略的な衛星プログラムのあり方をまとめた。科学シナリオについては第 2 部で、衛星観測が果たすべき役割とその技術的実現解について第 3 部でまとめており、それぞれの要旨は、以下のとおりである。

## 第 2 部 衛星地球観測が目指す科学シナリオの要旨

### 第 1 章 災害対策・国土強靱化への貢献

頻発化・激甚化する気象災害や地震・火山噴火災害への対策は日本における重要かつ喫緊の社会課題である。気象災害への対応においては、地球観測衛星は災害を引き起こす極端現象を監視することで実態を把握するとともに、得られたデータは気象予報の初期値の作成に用いられ、予報精度の向上に貢献している。気象予報における短期の予測システムでは、気温や水蒸気、風について広域の水平分布を把握することに加えて、**鉛直プロファイル（3 次元化）、さらに時間変化（4 次元化）を把握することが、将来の予測の発展に重要**となる。また、衛星観測データは検証やプロセス過程の理解を通じて気象予測モデル等の改良にも貢献することができる。たとえば、海洋上の台風の中心気圧や最大風速、内部構造の把握、また線状降水帯の発生メカニズムの解明には、水蒸気や風などの 3 次元構造の観測が必要であり、ここでも衛星の 3 次元観測が将来の研究開発に大きく貢献する。

発災後の被災状況把握では、最新の土地の基盤情報に基づく発災前後の比較が重要である。このため、高さ情報を含む地形情報（3 次元化）や、土地利用の分類を高頻度で更新することが望ましく、観測頻度が極度に上がることで（4 次元化）、リアルタイムでリスクの評価や更新、また被災状況の把握が可能となり、人々の適切な避難や社会基盤の維持に貢献できる。

### 第 2 章 地球規模課題の解決への貢献

地球規模での多様な課題に対し、衛星地球観測はモニタリングによる地球環境の保全と利活用、および温暖化に伴う気候変動の監視と予測への貢献が可能である。地球環境問題においては、水循環の把握により将来想定される水資源問題への対応や海洋資源の管理、森林や土地利用の状況変化による生態系の把握、越境する大気汚染物質の把握による対策などが期待される。いずれも現状でグローバルな状況把握（モニタリング）を実現しており、将来においては海の天気予報や航路把握のための空間分解能の倍増、森林バイオマス鉛直情報の取得、大気汚染における気化学プロセス解明のための静止衛星などが考えられる。

気候変動の監視と予測では、IPCC 第 1 作業部会は第 6 次評価報告書の中で人間活動による気候への影響が顕在化していることを、「疑う余地がない」と、強い表現で断定しており、地球規模で気候の変化を短時間に広域かつ均質に測定ができる衛星観測の重要性は、以前にも増して高まっている。また、実用化された地球観測衛星データは 40 年以上継続しており、今やグローバルな気候変動の監視に必要な不可欠な技術となっている。気候変動緩和策への貢献としては、パリ協定で定められた世界の目標達成に向けた進捗確認

（GST：グローバルストックテイク）において、人為起源の吸排出量推定のためのプロダクトとして衛星による CO<sub>2</sub> と CH<sub>4</sub> 観測データや、自然起源の吸収放出量推定のための AFOLU（農業、林業、その他の土地利用）部門の衛星観測データが利用される予定である。

また、気候変動の影響を監視する上で、極端現象を含む大気・海洋・陸域・雪氷圏などの地球規模での変化抽出に多様な衛星観測が利用されている。さらに、気候変動の予測では、大気・海洋・陸域・雪氷圏の 4 つ

のサブシステム間での変動メカニズムを解明することが重要であり、衛星観測に基づき、サブシステム間の物理過程の定量的理解と相互作用に関する適切なモデリングが進みつつある。地球温暖化の緩和にとって特に重要な今後数十年において、衛星観測によってこれらの物理過程を幅広い時空間スケールで観測的に理解し、その知見を適切に活用して数値気候モデリングの精度を向上させていくことは喫緊の課題である。このためには、サブシステム間でのエネルギー・水・炭素のやり取りを様々な**時空間スケールで定量化する必要**がある。

### 第3部 衛星観測が果たすべき役割とその技術的実現解の要旨

第3部では、第2部において示された衛星地球観測の分野で日本が目指すべき成果(目標)の実現にむけ、個々の地球観測ミッションを有機的に連携させ、総合的なシステム(System of systems)として、我が国が取り組むべき重要事項への貢献を果たすことを目指し、衛星観測に係る整備・運用・推進活動を進めるための衛星観測に係る戦略的・統合的なプログラム(戦略的衛星リモートセンシングプログラム(仮称))の素案を描いた。戦略的衛星リモートセンシングプログラム(仮称)では、人類の重点課題としての気候危機対策、及び日本の重点課題に対する衛星リモートセンシング事業として、防災減災・公共の安全確保、水循環の把握と適応、海洋環境の保全と利活用、カーボンニュートラルへの貢献、経済安全保障の5分野を識別するとともに、衛星観測で目指すべき方向性とその技術的実現解を、上記5分野毎にまとめた。本実現解の検討にあたっては、第2部で示された主に科学的側面のシナリオをベースに、JAXAの衛星開発・運用、利用推進・利用研究活動に基づいた実利用側面を加え、分野毎に日本の目指すべき成果(目標)とその達成に必要な物理量・観測情報とその要件を識別し、その実現に向けた将来的な技術的実現解の方向性を検討した。**全ての観測情報・物理量は、単独の計測手段では十分に伝えることができず、様々な特性を有する衛星・センサデータを複合的に解析することで導出が可能となる**ことを念頭に、複数計測手段での実現と、地上における統合的な解析技術・システムの必要性を検討した。また、プログラム化の目的である各種地球観測衛星データを有機的に連携させ、総合的なシステムとして最大限の効果を得るため、JAXAの衛星のみならず、海外や国内他省庁、民間企業が整備・運用する衛星も最大限に活用しつつ必要な観測情報・物理量の提供を目指すこととした。さらに、社会定着には衛星観測情報が“発展しながら継続”することが重要であり、限られた資源(人・資金)でそれを成し得るため、積極的な海外・民間との連携・活用を図りながら、要すれば観測情報・物理量の戦略的選択に伴う小型・低コスト化等による利用者への移管あるいは民間事業性の開拓の模索等、データ継続のための工夫を検討しつつ、資源を技術発展に振り向けることを目指した。

更に今後、①プログラムの実現に対し分野あるいはセンサ横断的に必要となる技術、②現状想定シナリオを超えた更なる新たな価値創出に向けた挑戦的な技術、③モデル連携や解析技術・システムの高度化等地上セグメントに係る技術開発や、軌道上データ処理及び衛星指向管理、データ通信等高度化する衛星観測を支える基幹的な技術・システムについて、識別・整理し、各分野で適切な時期に有効に活用できるよう、必要なフロントローディングやメーカを含めた開発体制の整備等、長期的・戦略的な技術開発について検討を進める必要がある。

## 4. 提言

### 提言①：「地球デジタルツイン」による4次元情報の強化

本稿では将来ミッション検討タスクチームのメンバーが作成する科学・利用シナリオを元に JAXA にて技術検討を行い、科学シナリオと技術シナリオの融合を試みた。この結果、農業など気候変動の影響を受ける産業にとって重要な気候変動への対策（緩和・適応）や頻発化・激甚化する気象災害の予測精度の向上には、予測モデルの改良・高度化が必須で、そのためには、**4次元情報(3次元+時間変化)の強化**が重要であると言える。

このため、陸域や大気を問わず、鉛直情報の収集に係る新たな技術獲得が不可欠であり、3次元データ取得に向けた研究開発が JAXA の目指す方向と言える。加えて国内外や民間事業者等の有する衛星能力の更なる活用による時間解像度の強化が期待される。

地球観測衛星データは、各種の数値モデルに入力・同化されることで予測・診断に貢献することができる。近年は特に「デジタルツイン」という、計算機内で限りなく精巧に対象を再現するアプローチが様々な分野で広がっている。「地球デジタルツイン」を目指す研究開発が活発化することを想定し、3次元、あるいは4次元情報の取得にかかる衛星観測技術の発展を目指すべきである。

### 提言②：地球観測衛星計画のプログラム化

科学シナリオと技術シナリオの融合によるミッションの実現性や国際連携、社会情勢等を踏まえて計画案をまとめるにあたり、国家予算で実施する地球観測システム・サービスを維持・発展させ、予見性を確保するためには**プログラム化**が必要である。ここで言う「プログラム化」とは、個々の地球観測衛星ミッションが有機的に連携し、全体として目標を達成する態勢を構築することであり、以下の項目を含む。

1. ミッション個々の衛星開発を**個別ではなく繋がりをを持った計画**とすること。
2. JAXA が研究開発を行い実証して終わりではなく、エンドユーザを明確にし、ユーザによる活用の中で、新たなニーズが生まれ、JAXA はそのニーズに技術開発で応えるという**サイクルを踏まえた計画**とすること。
3. JAXA で閉じたプロジェクトではなく、関係各省庁や民間が担う事業や学術分野が求める科学との関係を示し、**JAXA の役割を明確化**すること。

本提言に基づき衛星観測を実現するためには、優先順位が大きな課題となる。社会的な合意形成に向けて、議論の場を設け、学会等の意見を聴取し、優先順位を決めて、衛星観測を実現するべきであることも述べておくこととする。

# 目次

第1部 衛星地球観測を取り巻く環境変化と課題	1
1. 背景	1
2. 学術会議と学術連合によるタスクフォース	2
3. JAXAにおける「衛星リモートセンシングに係る衛星利用長期シナリオ」	3
4. 本文書の構成	4
第2部 衛星地球観測が目指す科学シナリオ	5
1. 我が国の災害対策・国土強靱化への貢献	5
1.1 災害対策にかかる衛星データ利用の考え方	5
1.2 気象災害への備えと対応	6
1.2.1. 極端現象の実況監視	6
(1) 気象・環境・災害等の監視	6
(2) 極端現象の判別	7
(3) 現業業務への活用	7
1.2.2. 気象予測のための地球観測システムへの貢献	8
(1) -1 気温・水蒸気・大気上層風	8
(1) -2 雲・降水	9
(1) -3 エアロゾル・微量気体	10
(2) -1 海面水温・海面高度	11
(2) -2 海上風速・風向	12
(3) 陸面・水文	13
(4) 雪氷圏	14
1.2.3. 数値モデルの検証と改良	14
(1) 気象予測モデルの検証と改良	15
(2) 物理プロセスの解明と物理モデリング	16
(3) 水文モデルと衛星の統合利用の高度化	17
(4) 海洋・海氷・積雪の短期予測精度向上	17
(5) モデル間の連携と結合	19
(6) 今後・将来に要請される地球観測の時空間解像度	19
1.2.4. 気象災害における基盤情報と被災状況把握	20
1.3 地震・火山噴火災害への備えと対応	23
1.3.1. 災害発生の予兆把握	23
1.3.2. 被災状況把握	23
2. 地球規模課題の解決への貢献	25
2.1. 地球環境の保全と利活用の両立	25
2.1.1. 水循環に関連する利活用への貢献	25

(1)	水文モデルとの統合利用の高度化	25
(2)	積雪・氷河・氷床の変動監視	26
2.1.2.	持続的な海洋の利活用への貢献	28
(1)	大気-海洋間の水・エネルギーフラックスおよび海況	28
(2)	陸-海洋-大気の物質循環	29
(3)	海氷と北極海航路	29
(4)	海洋生物資源および海洋生態系	30
2.1.3.	森林をはじめとする陸域の環境にかかる現状把握及び利活用への貢献	32
(1)	気候変動対策と生物多様性保全	32
(2)	現場把握と利活用の各論	33
(3)	将来の成果や技術の見通し	36
2.1.4.	大気汚染物質の監視と緩和策・適応策への貢献	39
2.2.	気候変動の監視と予測	41
2.2.1.	気候変動緩和策への貢献	41
2.2.2.	気候変動影響の監視	44
(1)	-1 台風	44
(1)	-2 集中豪雨	44
(1)	-3 猛暑、熱波	45
(1)	-4 大規模循環場	45
(2)	-1 海面水位	46
(2)	-2 黒潮、親潮	46
(2)	-3 低次生態系・海洋酸性化	47
(3)	-1 降雪、積雪、海氷	47
2.2.3.	気候変動の予測精度の向上への貢献	49
(1)	全球エネルギー・水循環とその物理プロセス理解の必要性	49
(2)	-1 大気	50
(2)	-2 海洋	52
(2)	-3 陸域	53
(2)	-4 雪氷圏	55
3.	人間社会への貢献	57
3.1.	農業	57
3.1.1.	農業分野の課題と地球観測衛星の利用	57
(1)	地球規模課題としての農業	57
(2)	国内政策課題の整理	57
(3)	農業分野での衛星地球観測の利用	58
3.1.2.	農業分野での利用状況	59

(1) 基盤地図	59
(2) 生育監視/収量予測	59
(3) スマート農業（精密農業）	60
(4) 持続可能な農業	60
3.1.3. 農業分野での社会実装に向けて	61
3.2. 公衆衛生	63
3.2.1. 公衆衛生分野の課題と地球観測衛星の利用	63
(1) 環境と健康	63
(2) 地球観測衛星データの利用	63
3.2.2. 公衆衛生分野での利用事例	64
(1) 感染症	65
(2) 非感染症（大気汚染による呼吸器系疾患など）	65
(3) 非感染症（熱中症/熱関連疾病、その他環境要因と疾病）	66
3.2.3. 今後のさらなる活用に向けて	66
3.3. エネルギーの安定的な確保	68
3.3.1. 再生可能エネルギー（風力、水力、太陽光、地熱、バイオマス、波力等）の利用拡大推進	68
3.3.2. 二酸化炭素回収・貯留技術(CCS)・二酸化炭素回収・利用・貯留技術(CCUS)	69
3.4. 鉱物資源の安定的な確保	71
<b>第3部 衛星観測が果たすべき役割とその技術的実現解</b>	<b>73</b>
1. はじめに	73
2. 重点的推進事業5分野の実現解概要	74
2.1 防災減災公共の安全確保	74
2.1.1 分野の方向性	74
2.1.2 地形情報/変化（DSM/DTM）	74
2.1.3 土地被覆・土地利用	77
2.1.4 地殻変動	77
2.1.5 被害状況および発災に伴う各種情報	78
2.1.6 統合解析技術・システム	79
2.2 水循環の把握と適応	79
2.2.1 水蒸気	79
2.2.2 雲・降水	81
2.2.3 風プロファイル、海上風速・風向	82
2.2.4 エアロゾル	83
2.2.5 SST/LST、土壌水分（地表面蒸発散量）	85
2.2.6 積雪・降雪、氷河・海氷（グローバルな情報として）	85
2.2.7 河川・湖沼（グローバルな情報として）	86



2.2.8 統合解析技術・システム(Today's Earth や GSMap、他)	87
2.3 海洋環境の保全と利活用	87
2.3.1 SST	87
2.3.2 海色 (水質)	89
2.3.3 海氷	90
2.3.4 海洋デブリ、海面高度、海洋塩分	92
2.3.5 統合解析技術・システム	92
2.4 カーボンニュートラルへの貢献	92
2.4.1 温室効果ガス排出量の時空間的動態把握 (大気中温室効果ガス濃度の観測)	93
2.4.2 植物生態系の時空間的状态把握 (表層環境 (土地被覆・土地利用、沿岸環境)、バイオマス)	
94	
2.4.3 統合解析技術・システム	97
2.5 経済安全保障	97
3. プログラムの実現に向けた技術的取組	98
第4部 まとめ	100
1. はじめに	100
2. 衛星地球観測における JAXA の役割	100
2.1. JAXA の役割	100
2.2. JAXA が取り組むべき技術開発	100
2.3. 持続可能な衛星開発・運用の体制	101
3. 地球観測衛星データの更なる普及と利活用に向けて	101
3.1. デジタルツインの普及と期待	101
3.2. 長期観測の必要性	102
3.3. オープンデータ	102
3.4. 使い勝手の向上	102
4. 提言	103
5. 結び	104
付録情報	105
1. 執筆者	105
2. 衛星データプロダクト一覧	107
3. 参考文献	110
4. 関連文書	118

## 第 1 部 衛星地球観測を取り巻く環境変化と課題

### 1. 背景

気候変動を始めとする近年の地球環境変動は人間社会に多大な影響を及ぼし、様々な問題を引き起こしているとともに、この大きな要因の一つである人間社会のあり方も問われている。そのような課題に対して適切な対応策を講じるためには、現状を様々な時空間スケールで正確に把握し理解することが何よりも重要であり、衛星を用いた地球表層の観測は極めて大きな意義を持つ。衛星地球観測は、新たな科学的知見をもたらす地球科学のフロンティアへの挑戦とその社会への応用を両輪として今日まで発展してきた。現在の衛星地球観測は単独のセンサによる観測の高度化はもとより、複数のセンサ、異なる観測手法の組み合わせ、さらには数値モデルと連携した新たな情報の創出など、大きく変化、発展しつつある。日本の地球観測衛星も国際社会の中において重要な役割を果たしてきており、今までの実績を踏まえた上で我が国の中長期的な地球観測衛星のあり方を議論し、国の施策に活かすことは極めて重要である。

1980 年代、JAXA の前身である NASDA（宇宙開発事業団）が組織運営した地球観測衛星委員会（いわゆる 600 人委員会）において、我が国の地球観測衛星計画について官学が中心になって議論を進め、民間がその議論に付加価値をつける形で参加し、今日までの我が国の地球観測衛星計画が立案され順次実施に移されてきた。現時点において、当時の計画はほぼ実現されつつある。平成 20 年（2008 年）に宇宙基本法が施行され、内閣府に宇宙開発戦略本部が設置されると、日本の宇宙計画は宇宙開発戦略本部で策定される宇宙基本計画の工程表に沿って進められるようになった。最新の宇宙基本計画(2020 年 6 月 29 日宇宙開発戦略本部決定)は、社会の宇宙システムへの依存度が高まっており、特に人工衛星に関し、測位や通信・放送等は既に日常生活に定着し、我々の経済・社会活動の重要な基盤の一つとなっているとして、これを反映した内容となっている。また、災害時において、衛星観測は被災状況の把握や緊急時の連絡手段として大きな役割を果たしてきており、今後とも、社会を支えるインフラとしてその重要性は一層高まると考えられ、更には、宇宙システムを持つ広域的な機能が、地球規模課題の解決においても活用が期待されると言及している。つまり、地球を観測する衛星は、災害対策や地球規模課題の解決においてその重要性が高まっていると言える。

しかしながら、宇宙基本計画においては依然として宇宙安全保障に多くの項目が割かれており、衛星開発の計画を記した工程表の中で情報収集衛星等を除く JAXA の地球観測衛星は「(2) 災害対策・国土強靱化や地球規模課題の解決への貢献」として「10. リモートセンシング衛星等の開発・整備・運用」に記載があるのみである。現在の工程表における 2030 年までの衛星開発には、ALOS シリーズ、GOSAT シリーズの継続に加えてマイクロ波放射計の継続的高度化、GOSAT-GW、降水レーダ後継ミッションの検討が盛り込まれた一方で、GCOM-C の後継機や新しい地球観測衛星センサの開発に関する記載は無い。

そこで、JAXA 第一宇宙技術部門長の下に設置された有識者からなる本将来ミッション検討タスクチームは、宇宙基本計画等の国の施策に対して、中短期的に工程表の改訂の参考となり、かつ JAXA が担ってきた地球観測衛星にかかる実績や経験をもとに、20-30 年先を見据えた日本が推進すべき地球観測衛星のあり方について科学的・技術的観点から提言を含む本報告書をまとめた。

## 2. 学術会議と学術連合によるタスクフォース

1 項に示す状況の中、2012 年に「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（以下、TF と言う。）」が設立された。また 2017 年には日本学術会議により提言「我が国の地球衛星観測のあり方について」が発出され、我が国の地球衛星観測が将来にわたって国民生活のための健全な環境の維持に貢献し国際的に評価される役割を果たすために何かなされるべきかが示された。

その後、提言に沿った活動により様々な進展がみられたものの、2020 年度の宇宙基本計画の改訂方針は、宇宙防衛を主眼においた狭義の安全保障及び宇宙の産業利用、国際宇宙探査の拡大に集約しており、持続的な人間社会の基盤としての地球衛星観測計画の将来を十分に見通すことができない状況であった。これを受けて、学術会議の第 24 期地球・惑星圏分科会では、「地球観測将来構想検討小委員会」を設置して当該提言のフォローアップを行った。

改訂された提言「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」(2020)では、我が国の宇宙基本計画について、頻発する自然災害等による国民社会の損害を最小限に抑える「広義の安全保障体制」を強化し、地球衛星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ことが提言されている。

具体的な提言は以下のとおり。

- i. 持続的な人間社会の基盤としての地球衛星観測計画の強化として、宇宙基本計画工程表において現在「その他」に分類されている気候変動問題に関連する計画は「地球環境観測（仮）」として別途カテゴリを設けること。
- ii. 地球衛星観測の戦略的計画推進の仕組みとして、文部科学省の地球観測推進部会と宇宙開発利用部会の下に「地球衛星観測委員会（仮称）」を、宇宙政策委員会の宇宙産業・科学技術基盤部会と宇宙民生利用部会の下に「地球観測小委員会（仮称）」を設置すること。
- iii. 観測データアーカイブ体制の構築と利活用の促進として、地球衛星観測データの継続的な利活用を促進する「地球観測データリポジトリ（仮称）」を確立すること。
- iv. 人材育成の体制強化と地球観測リテラシー（知識・知恵及びその活用能力）の向上として、地球観測技術の向上や大容量データ取り扱いの高度化を担う人材育成を強化するための産学官チームを構築すること。

一方、これらの提言を受け、前述の TF の下部委員会の一つである「地球科学研究高度化ワーキンググループ（WG）」は、地球観測に関わる学術コミュニティ・諸機関が一体となって日本学術会議の提言を実現する方策を示す「地球観測グランドデザイン」を作成し、TF 全体会議での議論を経て、日本学術会議地球惑星科学委員会などに提案した。内容は、100 年先を見据えつつ、2050 年代までの 20～30 年スパンの中長期計画、公募による、より具体的な衛星ミッションを含む短期計画にまで及ぶ。特に、短期計画（宇宙基本計画の工程表に対応）は文部科学省宇宙開発利用部会、内閣府宇宙政策委員会および宇宙関係各省や JAXA などの宇宙関係機関へ提案するというプロセスを想定している。

### 3. JAXA における「衛星リモートセンシングに係る衛星利用長期シナリオ」

JAXA は政府全体の宇宙開発利用を技術で支える中核的实施機関として、宇宙基本計画に即し「災害対策・国土強靱化」、「地球規模課題の解決」へ貢献する多様な地球観測衛星を開発、運用している。2022 年 2 月時点における宇宙基本計画・工程表の「リモートセンシング衛星等の開発・整備・運用」では、2030 年度までの衛星計画が明記されており、2025 年以降においては、打ち上げ時期まで明示されているのは気象庁主管の「ひまわり」（GMS）シリーズを除いては ALOS-3 後継機、ALOS-4 後継機のみである。

宇宙基本計画・工程表における地球観測衛星の記述が限定的であったことから、JAXA におけるリモートセンシング衛星の将来戦略に関する検討を 2018 年に開始し、「衛星リモートセンシングに係る衛星利用長期シナリオ案」（以下、長期シナリオ（2018 年版）とする）としてとりまとめた。長期シナリオ（2018 年版）では、限られたリソース内で衛星データ利用の社会実装の定着化を効率的かつ早期に実現するため、以下を基本方針とした。

- ◇ JAXA の知見、経験を活かしつつ、将来ビジョンの実現に必要な新規のセンサ、衛星、利用研究開発にシフトする。
- ◇ 技術成熟度が高く、新規開発の必要性がないと評価されるセンサ、衛星は利用者、民間事業者等へ移管することを基本とする。

しかしながら、宇宙基本計画が 2020 年 6 月に改定され、衛星地球観測をとりまく環境は、災害対策からインフラ管理などデータ利用による課題解決への期待が高まり、小型衛星開発ベンチャー企業の台頭に見られるような宇宙産業における市場拡大への期待感など大きく変化している。これらの変化を受けて、現在、JAXA は長期シナリオ（2018 年版）を改定するべく議論を行っている。JAXA の改定版「衛星リモートセンシングに係る衛星利用長期シナリオ（以下、長期シナリオ（2021 年度版）とする）」においては、将来ミッション検討タスクチームにおける議論を並行して参考としながら、2040 年に向けた基本方針は、様々な環境変化を踏まえ、災害対策・国土強靱化、地球規模課題の解決、安全保障、産業振興、イノベーションの創出、地球科学、外交力の強化など、リモートセンシング衛星の開発・利用により創出される多様な国益を最大化するため、以下を基本方針として衛星リモートセンシングに関する開発・利用を推進することとされている。

#### (1) 衛星リモートセンシングの統合的・戦略的な推進(プログラム化)

衛星開発・実証プラットフォームの下、衛星リモートセンシングに関する開発・利用・国際連携等に関する取組を統合し、以下の取組を含む統合的な地球観測(衛星リモートセンシング)プログラムとして戦略的に推進する。

- 1 予見性の確保
- 2 利用者と共同での利用実証・官民連携の促進
- 3 戦略的な国際連携の推進
- 4 地球科学・工学の強化

#### (2) 小型・超小型衛星コンステレーションの開発・利用の推進

我が国の小型・超小型衛星コンステレーションの国際競争力の強化が政策上強く求められていることを踏まえ、JAXA のリモートセンシング衛星ミッションにおいて、民間事業者等と連携し、小型・超小型衛星コンステレーションを積極的に活用するとともに、小型・超小型衛星の観測基盤技術の高度化に取り組む。

### **(3)関係府省庁・機関、民間事業者等と JAXA の適切な役割分担の構築**

技術成熟度が高いセンサ・衛星は利用者、民間事業者等へ移管、もしくは利用者等の適切な負担のもと開発利用を実施することを目指し、JAXA は先進的な地球観測衛星等の研究開発及び基幹的な衛星技術の高度化を進める。これにより、JAXA、民間事業者、利用者等が適切な役割分担の下、衛星データを継続的かつ安定的に提供しつつ、衛星データ利用の社会実装を効率的かつ着実に進めるとともに、リモートセンシング衛星技術の高度化による国際競争力・自立性の確保や利用の拡大を目指す。

## **4. 本文書の構成**

本文書は、第 1 部として背景等のイントロダクション、第 2 部「衛星地球観測が目指す科学シナリオ」では、宇宙基本計画にある「災害対策・国土強靱化」、「地球規模課題の解決」を中心に、農業やエネルギーなどを「人間社会への貢献」として 3 つの構成でまとめている。地球規模課題の解決では、モニタリングによる実利用への貢献と長期観測による気候変動研究への貢献の 2 つの観点でまとめている。

第 3 部「衛星観測が果たすべき役割とその技術的実現解」は、科学シナリオをふまえて JAXA が考える「地球観測衛星のプログラム化：戦略的衛星リモートセンシングプログラム(仮称)」で日本が重点的に取り組む推進事業 5 分野（防災・減災・公共の安全確保、水循環の把握と適応、海洋環境の保全と利活用、カーボンニュートラルへの貢献、経済安全保障）に関し、それぞれの技術の実現性をまとめている。最後に、第 4 部まとめとして、提言を総括する構成となっている。

## 第 2 部 衛星地球観測が目指す科学シナリオ

### 1. 我が国の災害対策・国土強靱化への貢献

#### 1.1 災害対策にかかる衛星データ利用の考え方

はじめに、災害によって社会環境に直接的な被害を及ぼしている状態を衛星で観測する意義について述べる。自然災害への対応は、自助・共助・公助が知られているが、特に公助は政府や地方公共団体等の公的機関は必ず対応をとることが災害対策基本法、防災基本計画、地域防災計画等により定められている。特に、都道府県や政府（府省庁）は広域なエリアを所管・管理しているため、自然災害の発生状況を広域に把握する必要がある。そのため、政府は、災害の全体像を把握し、必要に応じて政府が有するリソースを現場の自治体に投入することが求められている。自然災害の被災状況の全体を把握することができれば、短期的には応急対応、中長期的には復旧・復興に必要な予算的・人的リソースを最適に配分でき、その自然災害の全体の被害の軽減や、復旧や復興の時間の短縮が実現できる。

国際的な防災戦略を策定する国連主催の第 3 回国連防災世界会議（2015 年）では、仙台防災枠組 2015-2030 が採択され、本枠組にて、災害リスクを理解するための衛星の役割として、「24 条（国及び地方レベルの災害リスクの理解）：宇宙情報の利用」、「25 条（全球及び地域レベルの災害リスクの理解）：宇宙技術の利用と地球観測の強化」が定義され、世界的にも、衛星データの利活用が認識された。国内においては、2020 年 6 月に第 4 次宇宙基本計画が閣議決定された。ここでは「宇宙政策の目標と具体的アプローチ」の 1 つとして「② 災害対策・国土強靱化や地球規模課題の解決の貢献」と記載されているように、防災についてのキーワードが項目レベルとしてはじめて明記された（内閣府、2020）。この中に、先進光学・先進レーダ衛星の打ち上げをはじめ、後述する総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）が主導する戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）のプロジェクトが位置付けられている。ALOS シリーズのミッションとして「災害状況の把握」は当初から掲げられてきたが、宇宙基本計画でそれをさらに後押しする形となった。

2021 年 4 月から開始された第 6 期科学技術・イノベーション基本計画では、「現状認識」として激甚化する大規模自然災害への対応の必要性が謳われ、「国民の安全と安心を確保する持続可能で強靱な社会」を構築する際に災害が新たな脅威の一つとして位置付けられている。その上で、Society 5.0 の実現に向けた具体的な取組として「① 頻発化、激甚化する自然災害への対応」に「国際的な枠組みを踏まえた地震・津波等に係る取組も含め、自然災害に対する予防、観測・予測、応急対応、復旧・復興の各プロセスにおいて、気候変動も考慮した対策水準の高度化に向けた研究開発や、それに必要な観測体制の強化や研究施設の整備等を進め、特に先端 ICT 等を活用したレジリエンスの強化を重点的に実施する」とされている（内閣府、2021）。

このように防災分野に関わる施策の中で衛星地球観測の意義や価値が唱えられており、20～30 年先を見据えて ALOS シリーズのような情報が、継続的・発展的に提供される仕組みを維持すべく研究開発を進めていくことが必要とであると言える。また、気象災害に関しては、ALOS 等による災害発生後の状況把握に加えて、豪雨など極端現象の予測精度の向上においてマイクロ波イメージャや降雨レーダ、可視赤外イメージャなどの多様な衛星のデータが同化され、初期値として用いられるなど衛星データの利活用が進んでいる。災害の予測、事前把握のために数値モデルの進展とともに衛星観測の重要性は今

後益々高まるものと考えられる。

## 1.2 気象災害への備えと対応

### 1.2.1. 極端現象の実況監視

近年、世界的に豪雨や干ばつなどの極端現象が頻発・激甚化し、災害を引き起こしている。国連防災機関（UNDRR）によると2000～2019年の20年間に発生した自然災害は7348件あり、そのうち91%は気象（気候）に起因していると報告されている。また、2021年8月に公開された、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第6次評価報告書（AR6）第1作業部会報告書（自然科学的根拠）（AR6/WG1報告書）では、人為起源の気候変動は、世界中の全ての地域で、多くの気象及び気候の極端現象に既に影響を及ぼしているとしている。

AR6/WG1報告書では次のような極端現象に関する気候変動を述べている。

- 1950年以降、陸域の多くで、高温に関する極端現象（熱波を含む）の頻度と強度が増加。
- 陸域の平均降水量は1950年以降増加しており、1980年代以降はその速度が上昇。陸域のほとんどで1950年代以降に大雨の頻度と強度が増加（人為起源の気候変動が主要な駆動要因）。
- 1970年代以降、海洋上層（水深0～700m）が温暖化（人間の影響が主要な駆動要因）。海洋熱波の頻度は1980年代以降倍増。
- 強い熱帯低気圧の発生割合は過去40年間で増加。

日本はアジアモンスーンの影響下にあり、水資源の恩恵を大きく享受しつつも、同時に水災害が多発する環境にあるため、気候変動によって降水量の長期的変動や極端現象が顕在化すれば、水災害の高頻度化や甚大化に加え、主食とする稲作農業や公衆衛生にも悪影響をもたらす恐れがあり、我々の社会生活に大きな打撃を与えることになる。また、産業活動はグローバル化しており、日本企業の生産基盤が海外に分布し、食料やエネルギーについてもその多くを海外からの輸入に依存している現状をみても、日本のみならず世界全体の気象海洋の状況（例えば、豪雨や干ばつ、海洋熱波などの極端現象）を常に把握しておくことは、我が国として急務である。

このような社会的影響が大きい極端現象に対応するためには、全球的に観測が可能な衛星観測を継続しつつ、頻度・精度・分解能の改良を通じて一層の定量化を図るとともに、社会ニーズに即した情報を提供する必要がある。ここでは、「気象・環境・災害等の監視」、「極端現象の判別」、「現業業務への活用」の3点について述べる。なお、具体的なプロダクト例については付録にまとめる。

#### (1) 気象・環境・災害等の監視

地球観測衛星は世界気象機関（WMO）やユネスコ政府間海洋学委員会（IOC）等の下に運営されているGlobal Climate Observing System（GCOS）が指定している54の必須気候変数（Essential Climate Variables）の約60%を観測することができる。太陽同期極軌道衛星と静止軌道衛星を組み合わせることにより全球をカバーし、特に大気や海面、陸面に関する項目はほとんど全てを観測することができる。また、極域を除けば可視赤外センサによる観測では10分程度の時間分解能でデータを得ることが可能である。これらの衛星により、気象災害につながる集中豪雨や豪雪、台

風、陸域および海域の熱波などを常時観測することができる。災害時に地上観測点が近くに存在しない場合や災害により地上観測データが得られない場合でも衛星による観測で気象状況を把握することができる。

また近年は、単一の衛星からの観測データだけでなく、海外衛星も含んだ複数衛星の観測データ、数値モデル、地上データなどを複合的に利用して、新たな物理量や時空間的に高分解能化されたプロダクトの構築が試みられており、これらを用いた気象・環境・災害等の監視も進展している。たとえば、複数の衛星センサを利用する衛星全球降水マップ GSMaP を用いて JAXA と東京大学の共同研究グループが開発している、「Today's Earth - Japan」は約 1km の水平分解能で日本中の河川の流量や氾濫域を推定・予測できるシステムである。しかしながら GSMaP の水平分解能は現在 0.1x0.1 度格子（10km 程度の間隔に相当）であり、将来、分解能が改善されれば洪水の把握や地域的な水課題解決のためにより効果的になるものと考えられる。

さらに、複数の衛星データを利用したプロダクトや数値モデルと連携したプロダクトの時空間的な再処理を行い、可視化するなどして、現業機関などのユーザが業務にそのまま活用できるような情報提供システムの構築も試みられている。今後も複数衛星の観測データ、数値モデル、地上データなどを複合的に利用する気象・環境・災害等の監視に関する高度化技術の開発を促進することが重要である。

## **(2) 極端現象の判別**

災害につながる極端現象を判別するためには、気候値や経年変動等の変動特性の解析が必要であり、その算出のためには、質保証された長期データセットの構築が必須であり、限られた観測期間の単一衛星データのみならず、複数の衛星データを活用し、衛星データ間の相互校正技術や、複数の衛星データに適用可能な物理量推定アルゴリズムの開発が必要である。衛星センサを高度化する際も、衛星観測センサの均一性を追求できる「上位互換」的な高度化が長期データの構築には有用である。また気象庁の長期再解析（JRA）のような現業機関による再解析データセットは過去から現在までの均質・高品質な全球気候データセットを提供しているが、その構築には衛星観測が大きく貢献している。それらを通じて気候変動研究に利用可能な長期データセットを作成する活動が進み、極端現象の判別に資することができる。このようなデータセットの構築と改良を今後も継続していくことが期待される。

## **(3) 現業業務への活用**

近年は、研究開発衛星であっても、気象・環境・災害等の監視での利用者のニーズや要求を考慮し、準リアルタイムでのプロダクトの作成・提供が世界的に増えつつあり、日本においても同様の傾向にある。このため、データ提供だけでなく、準リアルタイムで可視化するシステムも多く構築・公開されている。実利用にとっては衛星データのレイテンシは基盤的な情報であり、今後もレイテンシの向上が求められている。またある衛星センサを現業業務に利用するための技術を開発しても、その衛星センサの運用期間が短ければ、利用技術のコストに見合わない結果となる。そのため、現業業務における極端現象の監視の観点においても、衛星センサの高度化および運用期間の長期化が望まれる。



### 1.2.2. 気象予測のための地球観測システムへの貢献

豪雨・豪雪・強風・台風・洪水・旱魃・熱波などの気象災害に備え、その被害を軽減するためには、将来予測の高度化、すなわち高精度な予測情報を十分なリードタイム（準備時間、予測時間。具体的には、予測を出した時刻から実際の予測対象時刻までの時間）を確保する必要がある。このような気象予測情報は、観測データを数値予報モデルに同化し、その結果を初期値として予測を行うことで作成される。日本は周囲を海洋に囲まれ、また台風が発生・発達する熱帯・南海洋や太平洋域、偏西風上流にあたる中国やシベリア大陸域、そしてオホーツク海域や北極海域からの影響を強く受けるため、これらの広領域を高精度・高頻度に観測し、そのデータを有効に同化することが重要である、そのためには、これらの領域を定常的にリアルタイムで観測できる衛星観測が重要な役割を果たす。本節では、短期の予測システムでの利用という観点で、気象予測のための衛星観測の重要性と将来への期待について述べる。

#### (1) 大気

##### (1) -1 気温・水蒸気・大気上層風

現業気象機関は今日でも多くの衛星データを同化しており、特に大気を表現する代表的な物理量である気温、水蒸気、風について、広域・高頻度で観測する衛星観測は重要な役割を果たしている。これらの物理量の水平分布や鉛直プロファイル、そして時間変化を詳細に把握することは、正確な予測を行うために不可欠である。気温や水蒸気については、赤外域やマイクロ波域の強い吸収帯付近でいくつかの波長を観測するサウダと呼ばれる測器が、鉛直プロファイルも含む 3 次元的な観測を行っており、数値予報精度にとって最も寄与が大きい。赤外サウダの主流であるハイパースペクトル赤外サウダは、数千のチャンネルで短波長赤外域～長波長赤外域を観測し、海上・晴天域ではラジオゾンデ並みの観測精度を実現しており、今後も現業的な極軌道衛星並びに静止衛星への搭載が計画されている。また全天候型のマイクロ波サウダは、米欧中の現業気象衛星によって、50～183GHz 域を観測する体制が維持される計画である。サウダ以外にも、マイクロ波域では水蒸気や雲降水観測について様々な観測が行われているため、次項で改めて取り上げる。その他、GNSS 測位電波の掩蔽観測（GNSS-RO）が、民間企業を含むいくつかの衛星に搭載されており、数値予報精度改善に大きな役割を果たしている。

将来に目を向けると、局所的な豪雨や台風の急発達など、今日ではまだ困難な予測の高度化を行うために、現在よりも高頻度かつ高精度な観測体制が構築されることが望ましい。そのためには、波数分解能の改善やチャンネル数の増大による鉛直解像度の向上、詳細な現象把握のための水平解像度の向上、観測手法や対象を多様化させる観測周波数域の拡大、観測精度向上や人工電波干渉対策、観測頻度を向上させるための静止衛星や小型衛星への搭載などが重要な課題となる。例えば線状降水帯を始めとした豪雨の予測精度を向上させるためには、特に大気下層（高度 3km 程度より下層）で 1km 前後の水平スケール、500m 以下の鉛直解像度で水蒸気や気温が毎時間観測できることが望ましい。豪雨発生のポテンシャル（潜在可能性）を捉えるのであればここまでの解像度は不要だが、豪雨発生や消滅に関する詳細な予測情報を作成するためには、これらの解像度やより高い頻度での観測（5－10 分間隔）が必要となる。そのため、ポテンシャルが高い領域を機動的・重点的に観測する機能や、衛星以外の観測と組み合わせた観測システムの構築も重要である。地球温暖化に伴い豪雨

の頻度が増加することが観測で示されており、また今後のさらなる増大も予測されていることから、現状でもこれらの高頻度・機動的観測に対する要請は高いが、温暖化の影響がより顕著になる 1.5 度昇温レベルに達する頃（今後 10-20 年後）までにこのような高頻度観測が実現することが望ましい。静止気象衛星「ひまわり」による機動観測、次期静止気象衛星におけるさらなる高度利用にも期待がかかる。また現在は、雲・降水の影響が強い領域では得られる情報が限定されるが、このような条件でも十分な精度を持った情報が得られるような観測手法および同化手法の高度化が望まれる。

大気上層の風観測は、可視・赤外イメージャの高頻度観測から雲・水蒸気を追跡することにより、水平風ベクトルが算出されている（大気追跡風（AMV）と呼ばれる）。さらに、水平風の鉛直プロファイルや鉛直成分（上昇流、下降流）を観測できる、ドップラー風ライダーやドップラー雲・降水レーダが既に実現、もしくは近い将来実現する予定である。しかしこれらのドップラー風観測は単機の研究開発衛星で行われるため、観測頻度やカバレッジ、継続性などの点で不十分・不確実であり、将来にわたり継続して高頻度・広範囲な観測体制を確立する必要がある。また台風中心付近等の激しい気象現象内においても、水平・鉛直成分の風プロファイルを高解像度・高精度で観測できることが望ましい。例えば、台風の強度予測は進路予測と比べ中心付近の複雑な物理過程が大きく影響するため困難だが、中心付近の水平風を水平解像度が 1km 前後で 1 時間毎に観測することができれば、大きな改善が期待できる。なお上述したサウングでも、高頻度観測した水蒸気分布を追跡することにより、間接的に水平風の鉛直プロファイルを算出することが可能である。しかし単体では推定精度が低いいため、ドップラー風との補完的な利用が有効である。

## **(1) -2 雲・降水**

### **【マイクロ波放射計による水蒸気・雲・降水観測】**

1978 年打上げの米国の Nimbus-7 衛星搭載のマイクロ波放射計（マイクロ波イメージャ）SMMR と、その後継である DMSP 衛星に搭載されて 1987 年から定常運用が開始された SSM/I は、衛星気象観測に欠かせない装置の一つである。我が国が開発したマイクロ波放射計 AMSR シリーズは、2002 年から 2011 年まで米国 Aqua 衛星に搭載された AMSR-E を皮切りに、AMSR2 さらに 2023 年度打ち上げが予定される AMSR3 へと受け継がれている。マイクロ波放射計は、鉛直積分水蒸気量・雲水量・降水量の計測に優れ、とくにマイクロ波イメージャおよびマイクロ波サウングによる降水量推定値は GSMaP を始めとする全球降水プロダクトの基礎をなす重要な観測情報を提供する。典型的なマイクロ波放射計は、低周波チャンネル（6・10・19・22・37GHz 帯）で水平解像度が数十 km と粗く、また陸上では地表面射出率の変動が激しいため大気観測の推定精度に課題が残る。しかし 1980 年代から続く長期全球観測にもとづく気候データレコード構築に欠かせない観測インフラであることを鑑み、マイクロ波放射計は将来に向けて継続的な開発運用が求められる。

マイクロ波放射計の将来計画としては、JAXA が開発を進める AMSR3 のほか、欧州の極軌道衛星 MetOp の次世代計画に MWI および、次期コペルニクス計画候補の CIMR の名が挙がる。NASA の ACCP（AOS）計画では、89GHz より高周波（サブミリ波帯含む）のチャンネルに絞った比較的小型の放射計の搭載が検討されている。ミリ波・サブミリ波放射計は、183GHz 帯の水分子吸収線を利用した水蒸気観測に加え、氷散乱シグナルを用いた対流圏上層の氷雲計測が期待されている。

## 【レーダによる降水・雲観測】

防災を目的とした気象予測では、災害の原因となる降水の予測精度向上が重要な課題である。特に短期予報における降水予測精度の向上には、初期値における降水システムの立体構造の再現性が大きな役割を果たす。地上降水レーダは降水システムの鉛直プロファイルを含む3次元情報を観測可能だが、陸上と比べて海上ではレーダ観測が乏しく、降水システムの3次元情報を全球的に得る手段は衛星搭載型降水レーダ以外に無い。特に、海上における衛星搭載型降水レーダのデータ同化は、海上の初期値の精度向上をもたらす、海上から陸上に流入する降水の予測精度の向上につながる。また、雲レーダは、降水レーダや放射計では十分に捉えることのできない雲氷の詳細な鉛直情報が観測可能である。現業機関の同化システムの多くは数値天気予報モデルを用いているため、雲レーダによって捉えられた雲氷の鉛直情報を同化することで雲氷の分布だけでなく観測周辺の気温・水蒸気や風の鉛直情報も最適化される。更に初期値の雲や降水の鉛直情報の改善は、予報モデルの雲降水過程や放射過程を通じて降水・気温・風速といった様々な気象要素の予測精度に影響を与える。将来的には、モデルの高精度化と高解像度化が進むことで降水システムの3次元構造をより詳細に予測することが可能になると考えられる。このような精緻化が進むモデルの初期値作成には水物質を含む大気の精細な鉛直情報が必要となる。そのため、種別の異なる水物質に感度を持つW帯、Ka帯、Ku帯といった多周波同時観測や水物質の落下速度と大気の鉛直運動を捉えることが可能なドップラー速度観測が望まれる。特に水物質と大気の鉛直運動が複雑に相互作用する降水システムを精度良く再現するためには、降水システムの3次元構造をスキャンできる観測が望ましい。kmスケールの解像度を持つ数値予報モデルにとって有用な観測情報は、kmオーダーの分解能、分オーダーの頻度と考えられる。更に高解像度の数値予報モデルを用いる場合は、より時空間分解能の高い観測情報が期待される。また、気象庁では衛星搭載型降水レーダであるGPM/DPRが現業利用されており予測精度の向上に寄与している。予測精度の維持と向上のためには降水レーダ観測の継続と拡充が必要不可欠である。

### (1) -3 エアロゾル・微量気体

人間活動、砂漠、森林火災、火山噴煙等を起源とする大気中の粒子状浮遊物質（エアロゾル）や微量気体（対流圏オゾンや一酸化炭素など）は、地球システムの一つの要素として、地球環境や社会生活など多岐に渡って影響を与えている。近年では、PM2.5や光化学オキシダントとして健康や農作物等への影響など、単寿命気候強制力因子（Short-lived Climate Forcer; SLCF）として地域的気候への影響が注目されている。大規模かつ様々な放出源を風上にもつ日本にとっては重要な問題であり、国民的関心も高い。

これら大気汚染物質のモニタリングと影響の評価、対策のため、数値モデルを用いたいわゆる“化学天気予報”と衛星による監視が行われており、社会インフラの重要な一部となっている。予測精度向上を目的としたデータ同化による両者の統合も行われており、2020年には気象庁の黄砂解析予測でひまわりから算出された光学的厚さ（AOT）の現業的な同化利用が開始された。

現世代の同化システムでは、エアロゾルのカラム総量に対応するAOTの利用が主流であり、エアロゾルの重要な要素である組成や粒径分布、輸送高度に関する観測情報が用いられていない。夜間の観測情報の欠落も重要な課題である。SGLIを始めとする多波長光学イメージャからは、日中のAOT、オン

グストローム指数（粒径の情報）、単散乱アルベド（吸収の情報）の推定が行われており、熱赤外と夜間光を利用した夜間観測の研究も行われている。

高スペクトル分解ライダーである EarthCARE/ATLID からは衛星直下のエアロゾルの高度分布を、日中夜間を問わず観測でき、エアロゾルの成分や粒径情報を得ることも可能である。また、TROPOMI（極軌道）、TEMPO や GEMS（静止軌道）といったハイパースペクトルの光学センサからはエアロゾルおよび対流圏オゾンの前駆物質である対流圏 NO<sub>2</sub> カラム濃度が観測されているが、これらのデータを同化利用している予測システムは国内では運用されていない。次世代の同化システムでは、これらのデータを活用した“量”から“質”への転換が求められるであろう。

黄砂や森林火災エアロゾル等の自然起源の物質に関しては、モデル内部でシミュレーションされており、土地被覆、積雪、土壌水分、火災等が重要な境界条件となる。人為起源の物質に対しても、衛星による対流圏 NO<sub>2</sub> カラム濃度観測から現実に即した NO<sub>x</sub> 排出量を逆推計する研究が行われている。データ同化による初期条件の改善に加え、衛星観測による境界条件や排出量の改善によって、大気汚染物質の発生から輸送までの一連の予測精度向上が期待できる。

このように衛星データの情報を最大限活用することで、日々のエアロゾルについて、いつごろ、どこに、どこ起源の、どの種類のものが、どのぐらいの濃度で飛来するかを高精度で予測するシステムを構築することができる。気象庁、環境省等の現業機関による本システムの運用と定常的な情報公開を通じ、国民がこれらの情報を共有することが、大気環境対策や健康被害の低減に貢献する。このモデル予測の改善に資するために、イメージ観測ではモデル予測よりも十分真値に近い AOT（0.02 以下のバイアス、0.05 以下の精度）、オングストローム指数および単散乱アルベドを陸面（発生源付近）も含め、4 回/日程度の頻度で取得できることが望ましい。ライダー観測においては、消散係数（20%以下の精度）と主要エアロゾル成分に関する観測情報の取得が、鉛直プロファイルおよび組成を含めたエアロゾル予測精度向上の大きな鍵となる。

また、エアロゾル・雲・降水過程を通じて短期の天気予報や、長期の気候（放射強制力、土地被覆変化）予測不確実性の低減に貢献する。さらに、多くの人々が広域のエアロゾルの輸送をリアルタイムに把握し結果を体感することを通じて、国境を超えた地球環境問題に対する社会の科学的・客観的な見地の醸成に繋がる。さらに、大気環境に関わる社会基盤情報として、黄砂（ダスト）以外でも、他の種類のエアロゾル（都市起源、森林火災、火山性等）の情報も現業機関から公開することが望まれる。数十年スケールのエアロゾル再解析データを作成することで、エアロゾルに関わる雲や放射、物質循環変動のプロセス研究・監視への貢献が期待できる。

## **(2) 海洋**

### **(2) -1 海面水温・海面高度**

海洋表面の水温（海面水温）は、大気海洋相互作用に関するベースラインの情報であり、数値気象予報の境界値や海洋モデルの初期値として必須の物理量である。このため、国内外の気象機関において、現場観測（係留ブイ、漂流ブイ、船舶）と衛星観測（熱赤外放射計、マイクロ波放射計）を複合利用した海面水温データセットが作成されている。時空間的に均質なデータ取得を行うためには衛星観測が不可欠であるが、とくに AMSR シリーズのような低周波チャンネルを持つマイクロ波放射計による海

海面水温観測は雲の影響を受けないことから貢献度が大きい。近年は、Group of High-Resolution Sea Surface Temperature (GHRSSST)による国際連携の下で利用者が使いやすい統一フォーマットでのデータ提供が進んでおり、各国の気象機関での衛星海面水温データの利用が広がっている。

現状では衛星の観測頻度の問題もあり、海面水温境界値の作成は日平均値が主流で、空間解像度も全球モデルでの均一利用を想定している場合が多いが、今後は数値モデルの進展にあわせて、時間解像度（海面水温の日変化の表現が可能な数時間程度）や空間解像度（沿岸域の海面水温の表現が可能な数 km 程度）の向上が必要となってくるだろう。例えば、ひまわり 8 号に始まる最新世代の静止気象衛星搭載の熱赤外放射計は観測頻度が大幅に向上したことから、比較的变化が緩やかな海面水温について、観測欠損域の低減が可能になった。台風通過時に湧昇や攪拌の効果で海面水温が低下する現象は、これまでマイクロ波放射計でしか観測できなかったが、ひまわり 8 号でも部分的に捉えることができている。海洋モデルでは衛星海面高度計のデータ同化が一般的に行われており、海面水温の利用は数値気象予報用の日平均の境界値を使うのが主流だったが、より直接的に衛星海面水温を領域海洋モデルにデータ同化する研究が近年進展することにより、台風による水温低下などの短時間に变化する現象の再現にも成功している。

現状の衛星海面高度計は、軌道上の観測間隔は数 km だが、軌道と軌道の間隔（間隙）が衛星 1 機では 100km 以上になる。現状では複数の海面高度計が稼働しているため、組み合わせにより間隙は 50km 程度であるが、この間隙をさらに狭め、観測のカバレッジを高めることが期待されている。例えば、10 日で全球を 10km 以下の間隔で包含できれば、中規模渦（100km スケールで 10 日程度の変動周期）の捕捉が可能となる。これらは NASA の SWOT によって 2023 年頃には部分的・一時的には実現されるが、2030 年代以降には更なる観測の強化及びその継続性が望まれる。しかしながら、衛星観測だけから観測頻度を大幅に向上することには限界があることから、衛星海面高度計に加えて衛星海面水温を同化した海洋モデルの出力を大気モデルの境界値で活用する等の方向性も期待したい。

## (2) -2 海上風速・風向

海上風速・風向は、大気海洋相互作用の研究に利用されるほか、海洋循環モデルの駆動力として、また、気象モデルへ同化するデータなどとして重要な物理量である。マイクロ波散乱計を用いれば、海面直上の風速・風向を同時に観測することができる。日本での開発例はないが、ADEOS、ADEOS-II では、米国の散乱計を日本の衛星に搭載した。スカラーの海上風速は、マイクロ波放射計、マイクロ波高度計、合成開口レーダなどによっても観測可能である。特に、日本の強みであるマイクロ波放射計に国際協力によって散乱計を同時搭載して観測できれば、物理量推定精度の向上、科学研究、実利用で大きなメリットがあると考えられる。

気象災害を対象とする場合、台風などの強風・豪雨下での全天候型の海上風観測が必要になる。現在、マイクロ波放射計の低周波チャンネルを用いた全天候海上風データが利用されているが、現状では空間分解能が 50km 程度と粗く、台風や前線周辺の微細構造は解像できない。空間分解能の向上には、マイクロ波放射計の大口径径が必要である。10km 程度の分解能が達成できれば、台風の強度予測に大きく貢献できるであろう。また、L-バンド SAR を用いて、熱帯低気圧周辺の海上風場を 10

～100m の高空間分解能で観測する試みも進められているが、こちらは観測頻度が課題となっている。L-バンド合成開口レーダ（SAR）による海上風観測は天候に影響されことなく観測が可能であるため、台風を中心付近の構造の解析に大きなインパクトを有する。実用化には最低でも 1 日 1 回程度の観測が望まれるため、今後の将来計画では台風の観測を念頭においた設計が求められる。米国では、小型衛星で GNSS 信号の海面からの反射を観測し、高風速域の海上風速・風向を推定するミッション CYGNSS も実現しているが、実利用レベルに達するには、まだ解決すべき課題も多いと思われる。

### (3) 陸面・水文

陸域の土壌水分量・陸域生態系・地表面温度の状態は、主に蒸発散を通じて大気境界層に影響を与える。そのため陸域の水や植生の正確な表現は数値天気予報の精度に影響を及ぼす。既存の全球規模の解析からは日本国内においてとりわけ強い局所的な大気－陸面相互作用の存在は見て取れないものの、日本にとって偏西風上流域にあたる中国大陸域では強い土壌水分－降水フィードバックの存在が示唆されている。そのため日本域の数値天気予報においても正確な陸域水文量の表現が求められる。

加えて、陸域は少し前の時刻の大気の状態のメモリーになっているとも考えられる。陸域の観測を大気モデルに直接同化すること（強結合データ同化）により、陸域の状態から大気の状態を逆向きに推定するような形で、大気の状態推定を改善する方法も研究レベルでは期待されている。このような戦略を取る場合、陸から大気へのフィードバックの強弱は関係なくなるため、日本域の局所的な気象現象の再現性向上に陸域水文量や植生動態の観測が貢献できる可能性がある。現状では数値予報モデルやデータ同化の手法上の制約からこのような利用は進んでいないが、今後はこのような利用方法も視野にいれた開発が期待される。

陸域生態系の観測は GCOM-C/SGLI を始めとする可視・赤外放射計が、土壌水分の観測は GCOM-W/AMSR2 を始めとするマイクロ波放射計がこれまで多大な貢献をしてきた。また双方の観測手法が高精度な地表面温度の算出を可能としている。比較的ゆっくりとした時間スケールを持つ植生動態に比べて、土壌水分の時間変化は早い。陸域水文量の変化する時間スケールに対して、土壌水分の正確な観測を可能にする C バンド以下の周波数を持つマイクロ波放射計による衛星観測の数は必ずしも十分多くなく、数値天気予報への応用を考える上ではその観測頻度は十分であるとは言えない。C バンド、L バンド、（P バンド）のマイクロ波放射計による衛星観測を国際的な連携の下に維持・拡充し高い観測頻度を実現する必要がある。また、マイクロ波放射計による観測は空間解像度が低いため、これを補うための低周波マイクロ波レーダ観測との連携が現在の研究トレンドであり、今後重要になってくる。GPM 計画に匹敵するような数の低周波マイクロ波放射計・レーダの観測の組み合わせにより、地表面から地下 5cm 程度の土壌水分を 3 時間ごとに 10km 以下の空間分解能で観測可能になることが十分期待できる。これが実現すれば、降水イベントの検知能力・大気－陸面相互作用の理解の双方の向上が期待できる。加えてこのような高頻度観測を数値予報に取り込むことで様々な時空間スケールの予測能力の向上が期待できる。地表面温度の観測に関しては静止衛星観測の利用による高頻度な観測が実現している。今後の静止衛星の開発にあたっては高頻度・高精度な陸域観測という観点を盛り込んだ設計が必要である。

#### (4) 雪氷圏

日本はユーラシア大陸からの季節風の影響を受けており、冬期、日本海側を中心とした広い範囲が積雪で覆われる。また、北海道の北東に広がるオホーツク海ではロシア沿岸域で生成された海氷が海流で運ばれて南下し、毎年北海道周辺にまで押し寄せる。積雪や海氷は数値気象予報を行う際に大気層下端の境界条件（アルベド・温度）を決める重要な物理量であり、その面的な広がりはもちろん、鉛直方向の厚さに関する（量的）情報が大気と陸・海面との間でやり取りされるエネルギー量を評価する際に重要となる。

衛星による観測は、広域の積雪・海氷分布を精度よく捉えるのに最も効率的であり、人工衛星が地球観測に用いられ始めた 1960 年代より、天気予報の精度改善を目的として衛星に搭載されたアナログ式テレビカメラの撮像画像をもとにした積雪・海氷域の面的分布の同定が開始されている。2000 年代以降に打ち上げられた光学放射計は、可視～熱赤外域に多くの波長帯を備えており、単なる面的な分布だけでなく、積雪の汚れや粒径など、雪質の情報もとらえられるようになっている。また、1970 年代以降、マイクロ波放射計を搭載した衛星が打ち上げられると、陸上の積雪深（水量）の観測や海域の海氷密接度の観測が可能となった。マイクロ波放射計は雲の有無や昼夜の別に関係なく観測が可能であり、日々の積雪・海氷域の面的分布の観測に威力を発揮しているところであるが、将来的には現行機 AMSR2 の倍以上の空間解像度（18GHz で 5km 程度）を達成すれば、海外の同型センサとの連携で高頻度の海氷分布や移動ベクトルなどの情報の提供が可能になると期待される。さらにマイクロ波放射計は、観測した輝度温度から海氷厚の情報を経験的に求めることも行われている。ただし、現状では適用範囲は主に厚さ 50cm 程度未満の薄氷に限定され、融解期には海氷の電波射出特性が変わるため年間を通じた観測はできていない。また近年、光学ライダーやマイクロ波レーダ（高度計）などの能動型センサが開発され、海氷厚や海氷上積雪深の情報が得られるようになってきている。しかし、能動型センサは観測幅が狭く、受動型センサに比べて同一地点の観測頻度が著しく劣っているのが現状である。

受動型、能動型双方の衛星センサの利点を生かし欠点を補う意味で、受動型センサによる面的・質的な積雪・海氷域の観測を今後も継続するとともに、将来的には海外の機関とも協力して能動型センサを搭載した衛星を複数機運用する体制を構築し、鉛直（厚さ）方向の観測頻度を向上させ、積雪・海氷域の量的な分布情報の抽出を行っていくことが重要である。また、狭小で起伏に富む日本国土の雪氷及び周辺海域の海水を監視するには、空間分解能 100-250m 程度を有する光学放射計（現行の SGLI 相当の可視～熱赤外域の波長帯を備える）による日単位の監視（北極・南極を含んだ全球観測をあわせて行う意味で、極域付近を通る極軌道を採用した衛星を複数期体制で運用すること）が必要である。

##### 1.2.3. 数値モデルの検証と改良

近年、日々の気象において、豪雨や台風、熱波・干ばつ等の極端現象の激甚化が報告されている。このような社会的な影響が大きい気象現象へ備えるためには、地球観測衛星のデータを利用し、気象予測モデル・水文モデルを継続的に検証・改良し、高度化を進める必要がある。

雲・降水過程など大気中における複雑な現象を理解し、数値モデルそのものを改良することに加えて、

大気との境界にあたる海面・海氷や陸上積雪の分布の現況把握とその短期予測の精度向上も、日々の気象予報の精度改善に重要である。海洋に囲まれている日本域では、線状降水帯や台風等の気象の極端現象の予測に海洋プロセスの監視・理解が重要である。今後は気象・海洋モデルを結合した数値予測モデルによる予測の向上が課題になると考えられる。また、北極域の海氷分布が日本の豪雪等の激甚気象にも影響を与えていることが指摘されており、気象予測の向上のためには、日本周辺だけでなく、短期的な時間スケールでの海氷分布の予測の精度向上も重要となってくると考えられる。

### (1) 気象予測モデルの検証と改良

気象予測モデル・水文モデルの精緻化・高度化のためには継続的な衛星観測データによる検証と改良を遂行する必要がある。これら気象・水文現象の予測向上のために、気温、風等の気象要素、水蒸気・雲・降水等の水文関係の観測について頻度・精度・分解能の改良を進め、これを検証データとして利用することで、予測モデルのさらなる検証・改良に利用することが必要である。

防災的観点で重要な台風については、気象予測モデル検証のための観測データの不十分性が指摘されている。現状では、海洋上における中心気圧や最大風速の実測値がなく、人工衛星観測からの間接的な方法でこれらの値を推定せざるを得ない。今後は、より精緻な航空機観測・地上観測等と人工衛星観測を統合的に利用し、台風の内部構造について精緻なモニタリング・同化を実施し、気象予測モデルの詳細な検証が可能な観測データの解析を推進する必要がある。

近年、大雨による激甚災害を引き起こす線状降水帯は、数 100km、数時間の局所的短時間の気象現象である。線状降水帯の発生メカニズムはまだ十分に解明されておらず、詳細な観測・モデリングによる理解の進展が必要である。水蒸気の流入、風の分布、大気不安定性が線状降水帯の発生に関わるとされており、これらの物理量の詳細な観測が必要である。水蒸気の 3 次元構造の監視のために、静止気象衛星による赤外サウンダの観測が期待される。衛星搭載ドップラーライダー等による風の鉛直分布の観測も予測精度向上に貢献すると考えられる。

台風の進路・強度の予測の改善のためには、台風の内部構造の観測データおよび台風に影響を与える環境場の観測データの品質の向上が必要である。特に、台風の強度予測精度改善のためには、台風の発達衰弱のメカニズムの解明が鍵であり、台風の眼の壁や外側に台風を取り囲む降水帯（アウトターインバンド）の力学のさらなる理解の進展が必要である。そのためには、これらを形成する対流雲に関わる気温・風・水蒸気・雲・降水といった台風内部の気象環境場の詳細な（空間について km スケール、時間について数分スケール）観測・監視を実現し、モデルの検証と改良を行うことが必要である。また、太平洋高気圧などの環境場の変化の予測精度向上のためには、広域での気温・風・水蒸気の鉛直分布の観測が必要である。

近年、夏季の猛暑に伴う熱中症による犠牲者が多発している。猛暑を高い精度で予測する必要がある。地表付近の温度の詳細構造の観測、放射に関わる雲・水蒸気・エアロゾル量の観測に加えて、広域の太平洋高気圧やチベット高気圧等の大規模場の気象要素の観測により、気象予測精度の向上を継続的に進める必要がある。

最近、高緯度の降雪とともに、冬季の降雨（Rain On Snow: ROS）が注目されてきており、まとまった雨が重量となって山の斜面の不安定性や建築物の倒壊、その後の地表面での凍結で災害を起こし



ている。防災の観点から ROS の高精度での検出とともにその予測が期待されている。

静止気象衛星では現行で中層や上層水蒸気と雲が観測可能である。今後、静止気象衛星後継機に赤外サウダが搭載されれば、水蒸気・気温の鉛直構造を取得できる。これらの鉛直構造の情報は気象予報にけるデータ同化において最も効果的であり、モデルの改良の観点からも衛星観測と連携することが望まれる。

雲・降水の鉛直分布は、現在まで TRMM・GPM・CloudSat のレーダによって観測が実施されてきた。今後、EarthCARE や ACCP (AOS) でドップラー機能をもつレーダが実現し、雲の鉛直運動も計測可となる。これにより、大気鉛直運動や雲降水の粒径分布等の雲物理量に関わる情報の観測が可能になり、モデル内の降水過程に関する改良が期待される。

水平風を直接観測できる衛星は、現行では欧州 ADM-Aeolus (風ドップラーライダー搭載) のみであるが、気象予測モデルの精度向上に貢献している。また間接的な水平風観測は、静止気象衛星のイメージャによる高頻度観測によって雲や水蒸気を追跡することによって得られており (大気追跡風 AMV)、さらに高頻度サウダから AMV の鉛直分布の算出も試みられている。今後もドップラーライダーや AMV 等により、風の観測情報を取得する必要がある。

これらの衛星観測データは、多くが既に現業システムにおいても同化されており、また将来の同化を目指して研究開発が進められている。同化処理においては、モデルから観測相当量を計算するため、観測とモデル間の比較を常に (全ての観測場所・時間において) 行うことになる。また同化処理を用いて、モデルのパラメータ推定を観測と整合するように実行することも可能である。このように同化は、モデル計算初期値の作成だけでなく、検証やパラメータ推定などの改良にも有用である。ただし同化処理をモデルの検証や改良に用いるためには、モデルが表現する場や物理過程と関連した観測データが必要である。このため、気温・水蒸気・風といった基本的な物理量と関連した観測に加え、雲や降水、オゾン、エアロゾル、海上風、地表面温度、土壌水分などの観測が必要である。

## (2) 物理プロセスの解明と物理モデリング

気象予測モデルの改良・向上のためには、力学場の改善と物理過程の改良を並行して進める必要がある。物理過程として、放射・乱流過程に加えて、雲物理過程の改良が重要であり、このうち雲物理過程は大雨や暴風等の気象災害をもたらす雲降水システムの表現に関わり、精度を継続的に向上する必要がある。雲降水システムの物理プロセスの理解およびモデリングの精緻化、特に、雲・降水の時空間構造 (水平分布・鉛直分布) 観測による雲物理量の解析を通じた雲・降水過程の理解とモデルの改良が重要である。同時に、対流過程・乱流過程・放射過程等の物理過程のモデリングについても総合的に向上させる必要があり、これら素過程の理解のためには地球観測衛星のデータが大きく貢献する。また、降水の供給源となる水蒸気の輸送過程をより正確に監視するために大規模場の循環場、特に海洋上の水蒸気および風の 3 次元的な構造の把握が重要な鍵を握る。

雲から降水に至るまでのプロセス理解の不足は、気象・気候モデルの不確実性の主要因のひとつとなっており、短期の気象現象のスケールと長期の気候スケールでのモデル改善における課題とも共通である。TRMM、GPM、Cloudsat、CALIPSO 等の能動型センサを搭載した衛星により、雲・降水の内部鉛直構造が明らかになってきた。近年では粒子の量に関する三次元情報のみならず、粒子の大きさ、相、形

状などの情報も衛星により観測できるようになり、雲・降水の物理過程に関する知見は大きく進展している。今後は、高感度・高解像に加え、高度化（新たな技術の導入等）・高頻度化された能動型センサと受動型センサとの組合せによる雲・降水解析により、雲・降水を1つのシステムとしてとらえる必要があり、複数センターの同時観測が可能な EarthCARE、ACCP（AOS）の衛星観測に期待がかかる。例えば、台風の強度予測精度向上には、能動型センサによる台風上部の氷晶もふくめた雲・降水システムの観測により、台風内部構造の理解の進化が期待される。また、雲・降水プロセスのモデルによる再現性を向上するには、気温・水蒸気・風のような環境場の高頻度・高精度の観測も必要であり、これらの解析と合わせて、その物理過程の理解を進めるとともに改良されたモデルも組合せた包括的なアプローチが期待される。

### **(3) 水文モデルと衛星の統合利用の高度化**

より身近な防災・減災対策のためには、我々の生活における利水・治水の観点から降水やその変動が実際にどのような影響を及ぼすのかという点について、衛星・モデルの双方を駆使して監視・予測することが極めて重要である。そのために水文モデルを高度化（モデル技術の高度化や解像度向上等）することにより、降水をはじめとした高度化された衛星データを活用することが求められる。これにより、高い時空間分解能の世界最先端の陸面シミュレーションシステムの継続的な開発が可能となる。このような研究の最前線の中でモデルを継続的に開発・運用することで、実利用を含めたより広い分野への貢献を目指すべきである。このシステムで得られた水文量をもとに、衛星プロダクトそのものの整合性確認を行うことで相互に精緻化を図ることが可能となる。

### **(4) 海洋・海氷・積雪の短期予測精度向上**

近年、海洋プロセスの気象予測における重要性が認識されてきており、短期の気象現象の予測において高解像度の領域大気海洋結合モデルの利用が進められようとしている。具体的には、台風による大気海洋結合作用に伴う海面水温の低下や黒潮上の雲降水システム（メソスケール対流）の発達等の高精度予測のため、海洋モデルの精度向上が要請される。気象予測に影響を与える海面水温分布は、中緯度域では熱帯域に比べ南北勾配が強くなり、さらに海流分布による影響もあるため、特に海面水温の水平的な分布の把握が重要である。海面水温の水平勾配の形成においては、海流の前線波動などに伴う小中規模現象が重要な役割を果たしている。その時空間スケールは数日、数 km 以下であり、高解像度の衛星海面水温データを用いてモデルを検証し、小中規模現象の統計的再現性を向上させるために空間解像度の向上や、粘性などのパラメータを改良していくことが重要である。小中規模現象は乱流現象であるためカオス性を考慮すると、最終的には衛星データをモデルに同化する、すなわち予測可能性期間を考慮しつつモデル初期値を逐次修正することで実現象の把握が可能となる。気象現象の把握においては、海面水温だけではなく海面付近の混合層（海洋混合層）における蓄熱量の把握も重要である。衛星海面高度観測は、海洋混合層を含めた海洋内部構造の把握のために重要である。ただし従来の衛星海面高度観測は軌道直下型であり、100km に及ぶ軌道間の観測空白域が把握空間スケールの限界となっていた。現在開発中の面的海面高度計の実用化とこれによるモデルの検証と改良、そのデータ同化は現象把握の空間解像度を大きく改善し、海洋内部構造に大きな影響を与える海

洋中規模渦のより正確な記述を実現するものと考えられる。大気海洋相互作用に大きな影響を与える海面塩分の衛星観測は、低周波マイクロ波による計測が実用化され、塩分感度が強い高水温域を中心に 40km、7 日程度の解像度と周期でモニタリングし、これを用いてモデルを検証改良しさらにデータ同化することが可能となった。今後、沿岸や極域をも包含する全球スケールの変動把握と高解像度化・高頻度化が課題となってくる。海洋の塩分変動のモデリングには、海洋モデルと海氷モデル・水文モデルとの結合が有効であり、これを衛星データによって検証・改良し、さらには衛星データ同化も行うことで一層の精度向上が進むものと考えられる。

地表面の短波・長波放射収支に大きな影響を及ぼす海氷や陸上積雪の分布を高頻度に把握することは、日々の気象予報の精度改善にとって重要である。現在、海氷に関しては、GCOM-W 搭載 AMSR2 により全球の海氷分布を日々 15km の空間分解能かつ全天候でとらえているが、空間分解能の改善が望まれている。空間分解能のさらなる向上に向けて、GCOM-W に加えて、GCOM-C 搭載の光学センサ SGLI や ALOS-2 搭載合成開口レーダ PALSAR-2 等のデータを組合せ、より高頻度・高空間分解能化したプロダクトを作成することが重要である。

将来的には、これらの複合的な衛星プロダクトを活用し、さらに数値天気予報データとも統合した 1 週間～数週間先の短期の海氷状況の予測の実現可能性を検討すべきであり、その成果は科学的意義のみならず、社会利用にも貢献できる。近年利用が増加している北極海航路の船舶航行に対し、数週間の航海中における海氷分布特に境界域での正確な分布把握が求められている。さらに海氷の発達・消耗過程の傾向を読み取り予測することは、安定した産業活動に貢献する。マイクロ波放射計がもたらす、曇天や霧の多い北極海での全天候の海氷分布、成長や移動予測、氷縁域での海水温や海上風や降水の観測により、より精度の高い情報支援が可能になる。

積雪に関しては、GCOM-W 搭載 AMSR2 により大陸上の積雪深を 30km の空間分解能でとらえているが、融雪期や植生域等において精度が低下する問題を抱えており、GCOM-C 搭載 SGLI による全球晴天域の積雪域（分解能 250m, 1km）を組み合わせることで、面的な信頼性を向上させた複合積雪プロダクトの開発を実施すべきである。積雪の予報精度向上については、3 項（水文モデルとの統合利用の高度化）の陸面シミュレーションと連携して実施すべきである。

海氷の有無は地表面放射収支や大気海洋間フラックスを大きく変え、海氷域とその周辺の気象予報の精度に大きく影響する要素である。その意味では、特に海氷縁の位置を正確に把握し予測することの重要性が高い。現状の衛星観測では全球の海氷分布が時間 1 日程度および空間 10 km 程度の分解能で得られているが、さらに時空間分解能を高めることが求められる。現状の海氷モデルには解決すべき課題が未だ多くあるが、海氷分布の高分解能予測という目的では、海氷の力学的変形プロセスの表現が特に問題である。現在ほぼすべての海氷モデルで採用されている力学過程の定式化は、水平 100 km スケールで粗視化した海氷の振る舞いを表現するように考案されたものである。より小さなスケールにおいて海氷が持つ様々な力学的特徴の実態を把握し、新たな力学過程の定式化を開発・検証するために必要な観測に関して、領域が限定されてもよい代わりに、1 km 以下の空間分解能で数日程度の変化を連続的に追跡することが望まれる。一方、北極の海氷分布の影響は中緯度に及び、日本の豪雪などの気象災害にもつながっていると指摘されている。数週間以上先の海氷分布を信頼性高く予測することができれば、気象災害に対する長期的な備えにつながる可能性がある。そのためには、予測の初期

値としての海氷厚を知ることが特に必要であり、高い精度と時空間分解能を持つ海氷厚分布データセットの構築が求められる。

## (5) モデル間の連携と結合

現実に生起する気象現象を正確に監視するためには、可能な限りの地球観測衛星データを統合的・包括的に利用し、観測データと数値モデルと連携することが必要である。観測データと数値モデルの連携のアプローチには、数値モデルと観測データの比較・検証、個々の物理プロセスモデルを含む数値モデルの精度向上・改良、観測データの数値モデルへの同化といった方法がある。統合的・包括的に観測データを利用することにより数値モデルを検証・改良し、数値モデルの精度を向上する不断の試みが必要であり、高精度化した数値モデルを利用した観測データの同化により、より現実に近い解析値を得ることができる。このようにして得られた解析データを初期値として利用することで、気象予測の精度向上が実現される。

現業機関の気象予測のための初期値を得るためのデータ同化には、1.2.2節にまとめられている通り、赤外サウンダ、マイクロ波放射計・散乱計、衛星風、降水レーダ等の多数の衛星観測データが利用されている。気象・気候予測に利用される数値モデルの検証のためには、静止気象衛星や極軌道衛星による可視・赤外イメージャによる雲観測データ(ISCCP)や、雲レーダ・ライダー(CloudSat/CALIPSO)の観測値が利用されている。また、降水データの解析値を得るためには、低軌道衛星による降水レーダやマイクロ波による観測データと静止気象衛星による赤外イメージャ等のデータが利用されている(GSMaP, iMERGE)。これらの観測データを数値モデルに同化することで、降水データのみならず全球にわたる気象データを解析値として得ることができ、気象予測の初期値として利用される(NEXRA等)。

気象モデル、水文モデル、海洋モデル、海氷モデルなど複数のモデル間を結合・相互連携し、地球観測衛星データを利活用することが、気象予測・水文過程予測のために必要である。具体的には、気象モデルと水文モデルを結合し、人工衛星観測を同化して得られた降水データを水文モデルに利用することで、河川流量、洪水予測が可能になる(Today's Earth)。また、衛星によるライダー観測や大気上端における短波放射反射率の観測をエアロゾル輸送モデルに同化することにより、エアロゾルの広域輸送が検証・改良され、エアロゾル予測の改良に利用される。さらに、気象モデル・海洋モデルを結合したモデルを利用することで、台風等の大気海洋相互作用が重要な事象の予測精度が向上するなどの例が挙げられる。降水や水蒸気の気象場だけでなく、地表面太陽直達光や海上風の観測値が大気海洋結合モデルの検証・開発に必要である。

## (6) 今後・将来に要請される地球観測の時空間解像度

気象予測モデル・水文モデルの改良の観点から、将来における地球観測衛星の時空間解像度は、数値モデルの解像度と同程度以上のものが要請される。10~20年後の数値気象予測モデルの解像度は全球モデルについて10km以下、領域モデルについて1km以下、鉛直解像度数100mが予想される。したがって、風や温度・水蒸気等の気象場について水平10km程度の3次元構造、雲・降水粒子について水平1km程度の鉛直構造の観測が要請される。さらに、数値モデルにおける雲物理過程や放射過程等の物理プロセスのモデルの高度化のためには、数値モデルの解像度より一桁程度高い観

測情報が得られることが望ましい。このためには、静止気象衛星などによる高頻度の時空間観測（水平数 100m、時間数分）を基盤情報として、低頻度（1日数回）の低軌道衛星による観測情報を統合化することで、大気諸物理量について高頻度高解像度の3次元情報を構築し、数値モデリングの改良に資する数値データを構築することが求められる。エアロゾルに関しても、気象場と同様な時空間解像度が要求される。特にプロセスに関しては、雲エアロゾル相互作用の観点から、雲降水と同様の数値モデルの解像度より一桁程度高い観測情報が得られることが望ましい。

地表面モデル及び河川水文モデルの改良の観点からは、地形や土地被覆等、重要な境界条件が本質的に極めて不均一であることから、大気モデルとの結合を考えた場合、大気場と同等かそれよりも高い解像度での観測情報が要求される。具体的には全球モデルについて1km～数km、領域モデルについて数10m～数100m程度が期待される。

海洋観測について、大気海洋結合モデルの要請から、気象場と同程度の時空間解像度（全球モデルについて10km以下、領域モデルについて1km以下）が要求される。また、海洋の渦や流れの構造は大気よりも細かく変化しており、その意味においても高空間解像による観測が望まれる。

海氷観測について、課題となっている海氷の力学的変形プロセスの表現について、その実態を把握しモデルを検証するために、限定的な領域について、1km以下の空間分解能で数日程度の変化を連続的に追跡することが望まれる。

積雪は、直接的にアルベドや地表面の熱収支に影響するだけでなく、ダストや火災エアロゾルの放出域・時期や融雪後の植生変動の時期などに影響するため、1週間以下の頻度&モデル解像度以下の空間解像度で変動を監視する必要がある。

#### 1.2.4. 気象災害における基盤情報と被災状況把握

気象災害の事象には、集中豪雨や台風にとまなう水災害や風害とこれらに起因する土砂災害、干ばつや熱波、林野火災、竜巻、雪害などが想定される。これらの対策のために必要となる基盤情報として、各種予測モデルの境界条件として必要となる情報とハザードそのものに備えるために必要となる情報が挙げられる。

気象予測モデルや陸面水文予測モデルの初期値や境界条件として必要となる各種気象要素は、1.2.3項でまとめられる通りであるが、これら以外にも必要な情報を更新・最新化の上利用すべきと考えられる。例えば、下記のような情報が想定される。

- 地形情報：数値地盤モデル(DTM)、数値地表モデル(DSM)
- 地理空間情報：数値建物モデル(DCHM)・3次元都市モデル、土地利用・土地被覆分類図(LULC)、森林の健全性、道路・鉄道・電気施設・水道施設・防災施設などインフラ関連情報と、これらの災害による変化
- 治水整備（ダムや貯水池等）の運用状況（水災害時）

これらの情報は、これまで比較的長時間変化が小さく静的な情報として扱われており、更新そのものにリソースが必要なため高頻度な更新が難しくなっているものだが、20～30年先を見据えた防災活動の高度化や、現実に即した防災関連情報の提供には定期的かつタイムリーに更新された情報を活用すべきである。これらの情報の多くは、ALOSシリーズのような陸域観測衛星データから算出可能であり、また航

空機や UAV などの観測技術も複合的・補完的に利用することも重要と言える。また、各種インフラ整備やメンテナンス状況は設計・建設段階からデジタル化し、例えば地理情報システム（GIS）として管理しておくことが重要と言える。すなわち、これまで以上に DX 化を進めることに期待される。

災害に対する事前の対策としては、ハザードそのものへの備えが重要となる。この一つとしては、極力最新の平時の地表面状況を捉えた衛星データによるベースマップの整備と、ハザードマップの精緻化や最新化が考えられる。これにはいくつかのアプローチが想定されるが、例えば上記の予測モデルにもとづき災害危険度を評価するとすれば、前述と同様の情報が必要となる。加えて、

- 人流データによる人や車の動き
- 適切な避難ルートの設定と誘導，その時間変化
- 住民への説明，意識向上のための教育

豪雨を起因とする土砂災害は、この発生そのものを予測することは現在の科学技術でも困難な課題と言えるが、地形情報等にもとづく地すべり発生危険度の評価結果はこれまでに示されている。これに基づき、また最新の情報に置き換えることで土砂災害への備えにつながることを期待される。しかし、人工的な改変（盛土や切土、埋立て等）にともなう影響についてはまだ十分に理解・把握されていない。これら建設工事にともなう更新情報も今後適宜デジタル化の上、GIS 上で管理・共有されることが有効と考えられる。また、地上設置センサなどとの連携も重要な課題である。

これらの活動によって、気象災害にともなう人的被害の軽減や二次災害の抑止・低減につながることを期待される。

一方で有事の際、最優先で必要とされるのは被災状況の把握である。そのために、衛星地球観測によるリモートセンシングの利点の一つである周期性・網羅性・広域性を活かし、社会環境に対して直接的な被害を及ぼした状態を観測し、被害の全体像が分かる情報を抽出し、利活用がすることを目指す。現在、公的機関を中心に数m程度の空間分解能を有する光学およびレーダ衛星による観測データの活用が試みられている状況である。

高分解能光学センサと合成開口レーダ(SAR)による被災状況の把握は一長一短ある。光学センサは平時に直近の地表面の様子を捉えたベースマップと比較することで、発災後の状況の詳細を捉えることができ理解しやすい。一般的に「水害時は悪天候のため光学観測は困難」と言われるが、台風起因の場合、台風一過はむしろ晴天が多く、前線性の降雨時でも雲の隙間から災害の状況を捉えられる確率も比較的高い。直下視付近で観測できれば、土砂災害の様子も容易に捉えることが可能であるが、観測頻度向上のためポインティング観測では山陰の影響で捉えにくくなる。SAR は特に夜間や悪天候時でも詳細な地表面観測が可能であるが、斜め方向の観測やスペckルノイズの影響で、やはり確定的な判読は困難である。土砂災害に対しては斜め観測であるため地形の影響を受け、特にレーダの照射方向と土砂流下方向の関係から解釈が難しくなっているのが事実である。したがって、より確度の高い被災状況把握のためには複数の光学と SAR による双補完的な観測システムの構築が重要と言える。特に現状、太陽同期極軌道衛星の宿命から降交点通過地方時刻（Local Sun Time, LST）が固定されるため、観測可能な時間帯は、例えば ALOS-3 は 10 時 30 分頃、ALOS-2/-4 は 12 時頃・24 時頃となる。このため、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）などでの利用実績も踏まえ、複数の軌道による観測可能時刻の増加によって、時間分解能を向上させた総合的観測システムの構築が望まれる。

これを自国の衛星のみで完全に構築することが困難な場合、官民連携などの国内連携に加えて、国際協力が重要となる。現状、防災についてはセンチネルアジアや国際災害チャーターの枠組みが運用されており、日本も重要なプレーヤーとなっている。この枠組みには主要な民間衛星も加わっている。しかしながら、甚大な災害が予測される場合を除いて国際的な枠組みを動かすことは難しいため、自国の衛星資源で撮像が可能となることが求められる。このため、ALOS シリーズで緊急時に利用できる撮像資源を増大させるとともに、迅速にデータを提供することが必須である。

また、宇宙機関間のバイ協力的な協力による枠組みも構築され、有事の際にはお互いに情報共有できる体制になっているが、これは日本も提供できる衛星情報を有しているからこそ成り立っている。自国で自立性・抗たん性を確保する上でも、国際協力を取り込む上でも、このような総合的観測システムを構築・維持することは重要と言える。

## 1.3地震・火山噴火災害への備えと対応

### 1.3.1. 災害発生の予兆把握

一般的に、災害予兆の把握は平時と比較しての変化検出による。したがって、平時から最新の地表面状況や土地利用・土地被覆状況の把握、ならびに発災前の状況把握などのために衛星データの整備が重要であり、定期的なベースマップの整備・更新を進める必要がある。また、特にハザードマップ整備にあたってはこれまでの平面 2 次元の状況だけではなく、標高データを含めた 3 次元情報のマップの高精度化が必要である。標高データは、衛星データを地図に合わせるためのオルソ補正や判読性を高めるための地形斜面補正、干渉 SAR 解析(InSAR)においても必要となる。また、利用可能な衛星データが高解像度化することに合わせて、本来、これらの処理に使用する標高データも高解像度化・高精度化する必要がある。

特に、地震活動や地殻変動、火山活動のモニタリングについては、SAR による定期的なベースマップ観測と InSAR によって異常検知が可能である。ただし、地震の発生そのものの予測は未だ難しく、地震後の断層変動の把握によって将来、動き得る断層の抽出に留まる。

火山活動レベルの把握には、地表面温度の変化検出も参考情報として重要である。噴火後の溶岩流や火砕流の状況把握にも夜間の観測も可能な熱赤外センサによる観測は有用と言える。一方、海底火山活動のモニタリングには、海色や海水温の異常検知が重要であり、やはり光学や赤外センサによる定期的なベースマップ観測が必要不可欠である。また、いつ起きるか分からない火山噴火のモニタリングには、静止軌道からの常時観測が噴煙や降灰状況の把握にも有効であり、20～30 年後を見据えたと実現可能と考えられる。さらに、環境観測衛星や風ライダーによる風速・風向情報や気象情報と組み合わせ、人間活動に甚大な被害をもたらす噴煙や降灰予測の精緻化にも期待される。

### 1.3.2. 被災状況把握

前述の通り、被災状況把握も基本的には発災前・後に得られた衛星データの比較にもとづくことが、より確度の高い情報抽出に必要である。光学センサ画像・SAR 画像による比較だけでなく、InSAR 解析も含めて前後の差分解析と言える。このためには、平時の定期的なベースマップ観測がやはり重要となる。また、理想的には同一センサによる同一観測条件でイベント発生前後のデータが利用できることが望ましいが、20～30 年後を考えると様々なセンサによるデータを利用することが、観測頻度向上の観点からは有効である。この際、考慮すべき最低条件として、①異なるセンサ間でも位置が合うこと（幾何精度の担保）、②少なくとも相対的な輝度特性の一貫性が担保されること（輝度精度の担保）が必要である。このためには、ある「基準」に対して各衛星データの精度が十分に合っていることが重要であり、平時の定常的な校正・検証が必須である。単一センサデータのみで衛星利用を推進することは時代遅れであり、ニーズに合った情報を適時に提供するためには複合的な衛星データ利用が必須であり、これらの活動が重要である。

防災利用における被災状況の把握では、光学センサは地震による地割れやインフラの健全性、地滑り、溶岩・火砕流の把握に有用である。また、高分解能観測では、家屋の損傷状態が得られるため、早期罹災証明の発行などに利用される。SAR は InSAR 解析を用いることで、地盤変動量や山体膨張量を精密に測定することが可能となり、地震や火山活動の詳細な把握が可能となる。また、地震後の津



波にともなう浸水域把握においては、洪水時における浸水域把握と同様の手法で解析が可能である。このためには、標高情報や土地利用・土地被覆情報の高度化や最新情報への更新は必須となる。

このように、被災状況の把握についても前項と同様に、高分解能光学センサと SAR によるベストミックスな総合的観測システムの構築が重要であり、小型衛星や静止軌道衛星との組み合わせによる高頻度観測の実現、またこれら複合的な衛星データ利用においては、基準となる標高データの高度化・更新や、発災のトリガーとなるような気象要素の観測やイベントの把握なども考慮すべき事項となる。

## 2. 地球規模課題の解決への貢献

### 2.1. 地球環境の保全と利活用の両立

#### 2.1.1. 水循環に関連する利活用への貢献

水の利活用は人間のみならず生態系においても必要不可欠であることは論を俟たない。特に人間社会は昔から河川、湖沼、地下水等の水を日々の生活や産業利活用してきた。しかしながら、地球温暖化に伴う気候変化が顕在化する近年は、人口の増加と経済産業構造の変化も相俟って水の供給と利用のバランスが崩れつつある。このことは、砂漠化や地下水の枯渇など直接環境を劣化させると同時に人間活動の気候への影響によって間接的に地球の環境に影響を及ぼし、そのフィードバックとして我々の生活に跳ね返ってくる。たとえば、山岳地帯の氷河や積雪は天然のダムとして水資源の確保に大きく貢献しているが、温暖化によって積雪量が減少すれば灌漑に大きな影響を及ぼす。豪雨や干ばつなどの異常気象も直接的な災害のみならず、農作物などを通じて水資源という意味においても人間社会に様々な問題を引き起こしている。その実態を把握し、メカニズムを明らかにするために衛星観測データが大きく貢献している。

水循環を構成する各要素は、主として地表面からの蒸発散、水蒸気輸送、降水、河川流出、海流などフラックスで表現される水の移動と、海氷・積雪・氷河などによる水の貯蔵に大別される。水循環研究において、衛星観測と数値モデルとは車の両輪であり、連携が必要である。衛星には、水蒸気・降水・海氷などの物理量を全球的に観測・監視できるという利点がある一方、風・河川流量・土壌水などの水循環研究に必須の物理量には、衛星から直接観測が困難なものも多い。数値天気予報においては、衛星観測を含む様々な観測から得られる諸量と数値予報モデルの予報値とを最適な方法で組み合わせ、次の予報ステップの初期値を作成する。これが同化手法である。この手法を用いて、水循環研究に必須の「水の流れ」を様々な系、時間、空間スケールで推定することができる。衛星観測と数値モデルとの効果的な連携のよい例である。

数値モデルの予測精度向上のため、衛星データは、「衛星データ同化等による初期値の改良」のみならず、「プロセス解明によるモデルの高度化」を通して大きく貢献する。データ同化は、モデルの初期値を改善し、気象予報や台風進路予報など短時間スケールの予報精度向上に貢献する。これに対して、衛星観測から得られたデータを用いた研究が、雲の発生・発達過程や降水過程などのモデル化において従来仮定していた物理過程の理解を刷新することでモデルを大幅に改良することができる。それは、短時間スケールの現象のみならず気候変動など長時間スケールの変化の予測精度も大きく向上することに繋がる。さらに、海氷や陸上積雪の分布の高頻度把握は地球表面の短波・長波放射収支の評価に大きな影響を及ぼすため、日々の気象予報や気候モデルによる将来予測の精度向上に重要である。

本節では、【水文モデルとの統合利用の高度化】と【積雪・氷河・氷床の変動監視】を取り上げる。

#### (1) 水文モデルとの統合利用の高度化

より身近な防災・減災対策のためには、利水・治水の観点から降水やその変動が実際に我々の生活にどのような影響を及ぼすのかということ、衛星・モデルの双方を駆使して監視・予測することが極めて重要である。降水をはじめとする高度化された衛星データを活用した、高時空間分解能の世界最先端の陸面シミュレーションシステムの開発は、このような研究の最前線であり、これを継続的に運用することで、

実利用を含めたより広い分野への貢献を目指す。このシステムで得られた水文量をもとに、衛星プロダクトそのものの検証も行うことで相互に精緻化を図ることが期待される。

JAXA が東大と協力して開発している Today's Earth (TE) はその例であり、全球を対象として実時間運用している数少ないシステムの一つとして運用されている。降水量や放射量にはそれぞれ GSMaP とひまわり 8 号等からのデータを使用するなど、衛星データが重要な役割を果たす。

さらに、衛星データを活用した陸面シミュレーションシステムの開発は、グローバルな視点から水に関する環境監視を実現し、水資源のさらなる利活用に結びつくため、地球環境の保全につながる点においても重要である。世界気象機関 (WMO) は衛星による極端気象モニタリングプロジェクト SWCEM

(Space-based Weather and Climate Extremes Monitoring) として、GSMaP データ等を用いた、半旬～月単位の極端気象モニタリングプロジェクトを進めている。2019 年のオーストラリアで発生した干ばつに関して、オーストラリア気象局で GSMaP 等を解析した結果が WMO の報告書 (WMO Statement on the State of the Global Climate 2019) に掲載されるなど、降水変動の把握に対する衛星観測の有用性が示されてきている。このような衛星によって検知された水循環変動を陸面シミュレーションシステムに導入することで、水害に関する防災と水資源の運用が高度化されることが期待できる。

## (2) 積雪・氷河・氷床の変動監視

北半球大陸上の積雪域は、地球の熱収支や水循環に大きな影響を及ぼすため、面的・量的分布の日々の変動監視が、流域内の淡水資源を把握・管理する上で重要である。また、ヒマラヤ等の山岳域に存在する氷河は、下流域への淡水供給源として重要である一方で、近年の温暖化の進行に伴い、氷河湖の形成・崩壊による土石流災害を引き起こす要因ともなっており、その消長を宇宙から高頻度に監視することが必要である。また、南極とグリーンランドの氷床は、地球上の淡水量の 8 割弱を占め、海水準変動に大きな影響を及ぼす。

積雪域の面的・量的な分布については、中程度分解能の多波長光学放射計により積雪域分布の観測が、またマイクロ波放射計による積雪深 (相当水量) 分布の観測がそれぞれ定期的に行われており、積雪面積・積雪深双方の縮小傾向が明らかにされている (Mudryk et al. 2020)。氷河については、米国 Landsat や日本の ALOS/AVNIR 等に代表される高分解能光学放射計や ALOS/PALSAR 等の全天候型の合成開口レーダにより、氷河域の全体分布、流動速度、氷河湖の有無等の監視が行われている (Fox-Kemper et al., 2021)。氷床については、米国の重力場変動観測衛星 (GRACE) の観測により、南極およびグリーンランド氷床のどちらも 2002 年以降質量損失が続いていることが明らかとなっている (Velicogna et al., 2020)。この氷床の質量損失はレーダ高度計 (TOPEX, Jason-1, -2) による海水準の上昇トレンドとも整合的である (Chen et al., 2013)。

今後の人口増加と地球温暖化の進行に伴い、陸上の淡水資源はその価値が増すことは必至であり、積雪・氷河の全球分布を常時、正確に把握・管理することが求められる。そのためには、従来からの中程度分解能光学放射計 (SGLI タイプ) による積雪域 (面的) 分布の観測体制の維持とともに、マイクロ波放射計 (AMSR タイプ) による積雪深と光学ライダー (ICESat2 タイプ) による積雪深情報を複

合的に利用した、より精度の高い量的分布の観測体制の構築が望まれる。なお、能動型の光学ライダーは観測頻度が他の受動型センサに比べて著しく劣るため、国際協力による複数機の運用（あるいは走査型ライダーの実現によりある程度の観測幅の確保）による観測頻度の向上が望まれる。氷河の監視についても、氷河を画像上で分解可能な空間分解能 10m 程度の光学放射計および合成開口レーダによる常時監視体制を維持していく必要がある。氷河の氷厚の計測には光学ライダーの観測も有効である。氷床の質量損失の監視についても、衛星による監視継続が必要なことは言うまでもなく、海外機関と連携した観測体制の維持が望まれる。

### 2.1.2. 持続的な海洋の利活用への貢献

海洋は、地球表面の約 70 % を占め、大気との相互作用を通して気候の形成に大きな役割を果たしている。また、海洋環境の変化は水産業や海上交通などの社会活動にも大きな影響を与える。広大な海洋を短時間で繰り返しかつ長期にわたって観測するために、衛星観測は必要不可欠な手段となっている。本節では、持続的な海洋の利活用への衛星観測の貢献について概説する。気象予測システムへの衛星観測データのリアルタイム提供のための海洋観測については 1.1.2 節を、気候変動の監視と予測のための海洋観測については 2.2.2 および 2.2.3 節を参照されたい。持続的な海洋の利活用を通して、衛星観測は、SDGs の目標 13、14 を中心に、多くの目標に貢献可能であり、また、2021 年にスタートした「国連海洋科学の 10 年」や「国連生態系回復の 10 年」においても重要な役割を果たすものと期待される。

#### (1) 大気-海洋間の水・エネルギーフラックスおよび海況

現在、衛星海洋観測は、可視・赤外放射計、マイクロ波放射計、マイクロ波散乱計、レーダ高度計、合成開口レーダ (SAR) などのセンサを利用して、海面水温、降水量、海上風速・風向、海面高度、表層流速、波浪、植物プランクトン、海洋汚染、海水分布などが観測されている。また、これらの観測データを組み合わせて、運動量、熱、淡水などの海面フラックスを推定したデータが作成されている。

20~30 年後の将来に向けて、海洋環境の保全と持続的な利活用に貢献するためには、これらの観測体制を維持しつつ、高精度化、高時空間分解能化、観測時系列の延長 (30 年間以上) を図ることが必要であろう。例えば、海上風や海面水温などの物理量の全球観測の現在の標準的な時空間サンプリングは、日本の AMSR シリーズなどの貢献もあって、緯度・経度 1/4 度 (~25 km)、1 日程度となっている。この時空間サンプリングを 10km、6 時間以内まで向上させれば、サブメソスケールの海洋変動の研究 (伊藤ほか、2019) が飛躍的に進展するとともに、海況把握や水産業、海上交通などへの利用促進が期待できる。また、近年、飛躍的に時空間分解能が向上している海洋大循環モデルへのデータ同化による海況把握・予測 (いわゆる「海の天気予報」) の実利用化も拍車がかかると期待される。

海洋汚染の監視という視点では、赤潮・青潮、油汚染、漂流ゴミや海洋デブリの追跡などへの貢献が期待できる。赤潮・青潮の監視には、現在、SGLI などの可視水色センサが利用されているが、高空間分解能化 (数 10m 程度)、静止衛星への搭載による観測頻度の向上やハイパースペクトル化を含む観測チャンネルの増加が望まれる。また、技術的課題は多いが、水色ライダーが実現できれば植物プランクトンの鉛直分布の情報が得られ、研究・実利用の両面での飛躍的な進展が期待できる。油汚染に関しては、SAR の利用が進んでいるが、実利用を考えると、観測頻度の向上が必須であろう。漂流ゴミや災害デブリの追跡には、高分解能可視センサと SAR の組み合わせが有効であるが、こちらも観測頻度の向上 (2 回/日以上)、高分解能化 (数 10m 程度)、短波長赤外の利用などが必要である。また、海上風や海面高度などの観測データを背景情報として使った数値モデルの利用も今後さらに発展が期待できる。

## (2) 陸-海洋-大気物質循環

沿岸域は、養殖を含む漁業やレジャーなどの活動で海洋の利用が最も活発に行われている領域であり、また河川からの栄養塩供給により光合成などの生物活動も活発で生産性が高い。大陸棚域は面積としては全海洋の5%ほどを占めるのみであるが、一次生産では20%を占めるなど、物質循環の観点からは鍵となる海域と言え、全球規模への影響も大きい。沿岸域の物質循環動態を捉えるため、河川供給量と海洋生態系の活性の関係を把握する研究が必須である。現状では、河川流量の増減と関係が深い変数として、表層のクロロフィル濃度を示す海色が観測されている。さらにSGLI センサなどにより懸濁粒子や有色溶存有機物が観測可能となっているが、栄養塩供給量などとの相関を把握し、さらに適切な海洋生態系モデルを開発し、データ同化も活用することで、生態系にとって直接的に重要な変数を導出する研究を進めることが必要であろう。

沿岸域の物質循環については外洋域との海水交換も決定的な役割を果たす。この点については、海面水温 (SST) などの衛星観測による外洋情報取得に加え、データ同化を施したシミュレーションモデルによる現況把握と予測が有効である (Miyazawa et al., 2021)。現状では、データ同化に用いられる衛星観測データとして海面高度や SST、またモデル駆動用に海上風などが使われている。これらのデータの分解能については、計算機資源との兼ね合いの観点から必要なレベルが規定されるが、現在進んでいる空間解像度の高解像度化に合わせ特に時間分解能について、将来的には1日に複数回の同化が可能となる衛星観測体制が望まれる。これらに加えて、沿岸のシミュレーションモデルにとって重要な入力データとなる河川流入や栄養塩の河川供給についても充実させることが望ましい。JAXA 等で開発が進む河川モニタリングシステム (Ma et al., 2021) をさらに応用、発展させて、データ同化による現状把握、予測と連携するなど、陸域の情報が沿岸海洋モデルに伝達されるよう多様なシステムの統合を図ることが望まれる。

さらに、沿岸域における物質循環の問題として、人間活動による気候変動に伴う海洋酸性化や貧酸素化がある。こうした課題については、直接関与する変数を衛星観測で把握することが困難であるが、植物プランクトンの種組成の変化などから間接的に影響を検出する手法を開発し、データ同化可能な海洋生態系モデルを活用していくことで、青潮などの沿岸環境問題の改善につながることを期待できる。

## (3) 海氷と北極海航路

北極海は、年間を通じて広い範囲が厚い多年氷で覆われてきたため、長い間、海上交通を遮断してきた。しかし、近年の地球温暖化の進行に伴い、夏期に多年氷の融解が進むとともに冬期の海水生成が抑制されることにより、北極海全体の海氷厚は年々薄くなってきている。そのため、最近では、毎夏、北極海内のロシア側沿岸やカナダ側沿岸には海氷の無い海域が出現し、欧米とアジアを結ぶ海上航路として注目を集めるようになってきている。

1978年より毎日全球データを取得できるようになったマイクロ波放射計 (イメージャ) による観測は、夏期の最小時期の北極海氷面積が、1980年代から2010年代にかけて約4割減少したことを明らかにしている (例、Parkinson and Comiso, 2013)。特に、日本の AMSR シリーズセンサは、2002年に AMSR-E が打ち上げられて以降、現在までマイクロ波放射計として世界最高水準の性能を

誇っており、この分野で世界をリードする立場にある。現在、GCOM-W 搭載 AMSR2 により全球の海水分布の観測が全天候下で日々15kmの空間分解能で行われており、世界の気象機関の数値予報計算に利用されている。AMSR シリーズセンサによる海水分布プロダクトは世界の気象機関の数値予報計算に利用されており、今後も後継機による継続的な観測運用を行い、海水域面積のリアルタイム監視として長期変動傾向の検出を通して海水情報を発信継続できる体制の維持が望まれる。

一方で、海上航路を航行する船舶向けの海水監視の観点では、現行のマイクロ波放射計の解像度（1画素数十km）では不十分であり、マイクロ波放射計自身の高分解能化（AMSR2の倍以上の空間分解能が望ましい）を図ることはもちろん、分解能100-250m程度を有し、融解期の薄いあるいは細かく分散した海水を高頻度に検出できる高-中程度分解能光学放射計（GCOM-C 搭載 SGLI をより高解像度化したセンサ）や合成開口レーダ（ALOS-4 搭載 PALSAR-3 後継機）を複合的に利用する海水監視体制の構築が望まれる。

また、日本では運用実績はないが、レーダ高度計は海水の厚さ（海面上に浮き出た氷体部分の厚さ（ice freeboard）を計測し氷体全体の厚さを計算可能）を計測可能である一方、光学ライダーは海水上の積雪深の情報を計測可能である（Kwok et al., 2020）。これらの能動型センサを既存の受動型の光学・マイクロ波センサと併用する観測体制を構築できれば、海水移動速度の推定や海水融解・生成過程を再現するモデルの精緻化とその検証に有用な情報となるものと期待される。

将来的には、これらの複合的な衛星プロダクトと数値気象予測データとを統合し1～数週間先の短期の海水状況の予測の実現可能性を検討すべきである。これにより、近年増加している北極海航路の船舶航行のために必要な数週間の航海期間の特に境界域での正確な海水分布把握が期待される。また、詳細な海水情報は、資源開発や漁業などの産業活動の安定化にも効果が期待される。

#### **(4) 海洋生物資源および海洋生態系**

地球温暖化や海洋熱波による海水温の上昇、北極海域の海水激減などの海洋環境の変化は、海洋生態系にも大きな影響を与え、人間が利用する海洋生物資源、特に水産学的に有用な魚介類の分布や資源量に影響する。そのため、国連の持続可能な開発目標14では、海洋と海洋の資源を持続可能な方法で利用することが求められている。

外洋域においては、海洋生物資源量や漁場の推定に極軌道衛星の海面水温や海色クロロフィルのデータが用いられてきた。これらデータの1km空間解像度と約1-2日の時間解像度は、沖合では十分に機能していると考えられる。しかしながら、雲による欠損も多いため時間解像度を2倍程度に上げることで（例えば、午前と午後）、海洋生物資源の根幹となる植物プランクトンの有機物生産量（基礎生産量）とその深層への輸送量に比例する海洋生物資源量をより正確に把握できると考えられる。また、環境変動に伴って栄養段階数を左右する植物プランクトンのグループやサイズも変化するが、波長分解能を2nm程度にすることで、それらの詳細な分布の識別が可能となり、気候変動に対する生態系の応答と海洋資源量の変化に寄与すると考えられる。

一方、沿岸域では海洋生物資源の分布を決める海洋現象の空間スケールが小さく、時間変化も早い。そのため、現在の200m-1km空間解像度の水温・クロロフィル等のデータでは、沿岸環境監視や沿岸漁業にとって十分ではない。また、魚介類や大型藻類（コンブ、ワカメなど）の養殖海域、養殖

施設における環境監視には、より高い空間解像度が要求される。時間解像度については静止衛星（例えば、GOCI、ひまわり）によって改善されつつあるが、空間解像度を 100 m 以下にすることで、より利便性の高い情報を沿岸研究者や漁業者に提供することが可能となる。

以上の改善を実現することで、海洋の低次生産生態系と海洋生物資源との乖離を埋め、気候変動に対する海洋生態系の応答の研究が発展し、生態系に基づく海洋生物資源管理と生態系サービスの持続的利用に貢献することができると考えられ、「国連海洋科学の 10 年」の「健全な海」や「生産的な海」に大きく寄与する。



### 2.1.3. 森林をはじめとする陸域の環境にかかる現状把握及び利活用への貢献

#### (1) 気候変動対策と生物多様性保全

「地球環境の保全と利活用の両立」という観点で「森林をはじめとする陸域の環境」を検討するには、気候変動対策と生物多様性保全という 2 つの切り口が重要である。前者は UNFCCC (気候変動枠組条約)と IPCC (気候変動に関する政府間パネル)で、後者は UNCBD (生物多様性条約)と IPBES (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、それぞれ政策的・科学的に議論されている。現在は、それぞれにパリ協定と愛知議定書という国際合意に基づいて政策的に取り組まれている。

気候変動対策の観点で森林・陸域環境を論ずるに最も重要なのは、ここが大きな温室効果気体 (GHG)の排出源だということである。すなわち人類起源の GHG 総排出量のうち、AFOLU (agriculture、forestry、and other land use: 農業、林業、その他土地利用)が 23 %を占める。また、気温上昇の程度は、陸域は全球平均の約 2 倍と顕著である。森林減少や森林劣化、その他の陸域環境変動に起因する GHG 排出を抑制し、むしろ GHG のシンクとするには、森林と土壌 (永久凍土や泥炭や湿地を含む) に蓄積する炭素量 (バイオマス) の保全・増加、太陽電池やバイオエネルギーなどの再生可能エネルギーの活用による化石燃料の使用量の削減が必要であり、それらには効果的・効率的な土地利用と管理が重要である。それには火災や風水害、旱魃、病虫害の蔓延などへの適切な対処も含まれる。

一方、生物多様性は Nature's contributions to people (NCP; 生態系が人類にもたらす様々な便益) の基盤だが、それが世界的に悪化している。過去半世紀～1 世紀で、生物の種数や個体数が急減している。その原因は不明なことが多いが、主として陸上では土地利用 (プランテーションや農地、都市の拡大等)、また、自然への持続的な人為的関与 (いわゆる里山) が減っていること、気候変動などである。人の移動や貨物輸送などが外来種の急速な拡散をもたらしている。生態系では多くの種が食物連鎖・物質循環の中で相互作用しており、気づかぬうちに特定種の消滅や移入が連鎖的に他の種の消滅や移入をもたらし得る。

気候変動の激化と生物多様性の喪失が顕在化しつつある現在、森林・陸域は、地球システムの中で人類が (良くも悪くも) 最も関与しやすい部分である。人と自然の新しい「関わり方」を見出し移行するためには、全体像を把握するグローバルな視点と、国・地域・個人レベルで実践するためのローカルな視点の両方で、陸上生態系の変動と、その背景である人間活動と気候変動 (極端気象現象) を把握する必要がある。

衛星による森林・陸域観測はこれらのアセスメントにおいて決定的に重要な役割を果たす。とりわけ、

- 1) 土地利用・植生タイプ (さらには植生種) ・植被率等の高頻度なマッピング
- 2) 人間社会活動のモニタリング
- 3) 森林バイオマス・土壌バイオマスの高頻度なマッピング
- 4) 生物多様性・生態系機能 (植物季節・生物季節等) の観測

という 4 つが大きな目標である。1 は 2～4 の基盤である。火災や病虫害といった突発的な生態系擾乱の検出・マッピングも含まれる。2～4 は気候変動と生態系の間で発生する相互作用の要因・結果を示すものであり、対策や提言に欠かせない。なお、1)、3)は WMO の ECV (Essential Climate

Variable)でもある。1)、4) (植物季節) は生物多様性観測ネットワーク(GEO BON)の EBV (Essential Biodiversity Variable)でもある。

衛星観測は、政策枠組みに影響力のある科学報告書 (IPCC、IPBES、FRA、TEEB 等) に貢献することが求められる。また、政策枠組みの実現に貢献することも目指すべきである。その例として、「国連森林戦略計画 2017-2030」で示された世界森林目標の中の「4.5 例えば多くの専門分野にわたる科学的な評価を通じ、森林に関する情報の収集、利用可能性、入手可能性を向上させる」「5.2 国及び地方の森林セクターを顕著に強化する等、森林法の執行及びガバナンスが向上するとともに、違法伐採や関連の取引を世界中で大幅に減少させる」などがある。その具体化が JJ-FAST などの社会実装、REDD+などへの貢献である。

陸上の生物や土地被覆や人間活動を詳細に見ようとすると、空間分解能を上げる必要性が出てくる。しかし高解像度化には慎重に対応すべきである。民間サービスとの競合や安全保障の制約が発生し、オープンデータポリシーが難しくなる。技術的にもデータ爆発の問題 (データを衛星から下ろせない) 、衛星以外のプラットフォーム (特にドローン) との競合などを考えると、JAXA のミッションとしては筋が良くない。小さな生き物を見ようとすると限りがないので割り切りが必要である。生き物の個体を見ようとするのではなく、群集 (小さい生き物も、集まれば大きく見える) や生息域 (ハビタット) の観測と評価を目指すべきだろう。

本節の最後に、当該分野における衛星観測の長期的なミッションに言及したい。衛星観測は長期継続が重要な特色である。人類がここ数 10 年~100 年の気候変動・生物多様性崩壊を乗り切っても、生態系は絶えず動的に変化していく。そしていずれ氷期-間氷期サイクルや巨大火山噴火、地磁気逆転などの劇的な環境変動が必ず起きるだろう。陸上生態系の観測はそのような変化や緩衝機能にも着目すべきである。長期観測が安定的に行えるリモートセンシング分野から、新しい生態系・生物多様性の考え方を提言することも志すべきである。

## (2) 現場把握と利活用の各論

前項に挙げた 1)~4)の目標について、現状を検討していこう。

まず、1) 土地利用/土地被覆の分類図について、現状でも、全球や国レベルの広域を対象とした分類図を衛星画像から作成したプロダクトは各機関から公開されているが、経年変化を把握するためには、長期にわたって一定の品質のプロダクトを継続的にリリースすることが重要である。そのためには、ある一時期の分類図の精度向上だけでなく、各年次の分類図の整合性を担保するという意味での精度向上も必要である。誤分類ともなう偽の土地利用/土地被覆変化は極力低減する必要がある。さらに日本国内で言えば、土地利用基本計画に基づく土地利用区分との整合性の担保も課題となるだろう。また、次の 2)にも関わるが、人間活動の影響をより詳細にモニタリングするためには、より細分化された土地利用/土地被覆カテゴリでの分類を、より詳細な空間分解能によって行うことが求められる。ただし空間分解能については、あまりに高い分解能では、都市の中の街路樹や庭木が森林に分類されるなど、実際の土地利用との乖離が問題となる可能性もある反面、これらの情報は都市緑地の定量化という観点では重要な情報である。このように、用途に応じて適切な空間分解能を選択することも必要である。いっばう分類カテゴリの細分化、例えば森林のカテゴリを樹種レベルまで細分化したり、農地カテゴリを作物種レ

ベルまで細分化することは非常に有効である。すなわち、衛星画像の画素単位で優占樹種や作物種などを特定して分類図を作成することができれば、例えば気候変動や人間活動に伴う樹種分布の変化状況や、後述する生物多様性の変化状況などの把握に際して非常に重要な情報源となる。現状の土地利用/土地被覆図では、カテゴリ数が10~20程度で、分類精度（全体精度）が80~90%程度のもが多い。なお、カテゴリ数が増えると分類精度は低下することが知られており、現状ではカテゴリが1つ増えることで0.7%程度の低下がみられる。これに対して将来的には、0.5%程度の低下にとどめて、カテゴリ数は15程度と現状から変化しないままで95%程度の精度を達成することが望ましい。そのためには、衛星データ取得の時間分解能を年間4回程度に向上し、分類手法を土地被覆図変化プロセスを考慮した新しい手法を開発するなどが必要となる。また空間分解能については、詳細すぎると個々の地物が観測されてしまうため、ローカルな土地利用/土地被覆図で10m、グローバルなもので100m程度が適当と考えられる。また、光学センサを利用する際には雲被覆域のスクリーニングが必要となるため、常時立体視センサを利用することで高精度に雲を特定する技術が望まれる。

2) の人間活動の影響のモニタリングという点では、1)と関係して森林減少や森林劣化、および再造林や植生回復の発生箇所を特定する技術も需要が高い。森林減少については、現状でもJJ-FASTなど準リアルタイム森林減少モニタリングシステムがいくつか運用されているが、今後は、合成開口レーダ（SAR）と光学センサを併用することによって、より高頻度かつ高空間分解能のシステムが求められる。そして特に途上国などでは、大径木だけを抜き切りする違法伐採が横行している地域も多く、森林劣化の監視技術も必要とされている。また国内では、ナラ枯れなど病虫害も問題になっている。これらには、単木レベルで森林変化を観測できるような高空間分解能の衛星センサが求められる。いっぽう、再造林や植生回復のモニタリングについても高い需要があり、例えば日本では、林地開発を除いて森林を伐採したら再造林することが義務付けられており、地方自治体では伐採跡地における再造林の有無の監視技術には強い期待感がある。これについても、センサの高解像度化が求められる分野である。具体的には、単木レベルの変化を把握できる解像度が必要であり、森林劣化には1m以上、再造林・植生回復には10~30cm以上の解像度が必要である。さらに、森林減少や森林劣化、再造林、植生回復のいずれにおいても、できるだけ短い時間間隔で監視することで、違法行為を特定した場合にただちに対応できるようにするため、少なくとも1ヶ月以上の高頻度での観測が求められる。

3)の森林バイオマスについても、特にその動態のモニタリングが重要である。森林バイオマスは樹木の乾燥重量を意味し、その約半分は炭素重量であるため、森林の炭素蓄積量を把握する基本単位として扱われる。現状では、LバンドSARと衛星ライダーとを併用した森林バイオマス推定が主流となっている。衛星ライダーは観測フットプリント位置しか計測できないものの、衛星センサの中では最も高精度に森林バイオマスを推定できるため、軌道に沿って点状に分布する森林バイオマス値を、SAR画像を利用した推定モデルの構築に際して校正・検証のための教師データとして利用されている。現状の森林バイオマス推定精度は、衛星ライダーのフットプリントで40t/ha程度、SAR画像などを利用したマップで60t/ha程度で、複数時期ではなく1時期のみの推定例が多い。将来は、複数時期の森林バイオマスを、できるだけ高い精度で推定することが望まれる。SARについては、Lバンドより長い波長帯であるPバンドのほうが、高バイオマス林分での信号飽和が抑えられるとされており、今後の利用が期待されている。また、時系列的に観測されたSAR画像やテクスチャ情報を抽出した画像などの利用で、推定精度の向上が確認

されているので、より高頻度かつ高空間分解能での観測が、高精度化のため求められる。また、まだ研究段階ではあるが、SAR の干渉技術にも期待できる。すなわち、SAR トモグラフィ解析 (TomoSAR) や多偏波干渉 SAR 解析 (PolInSAR) といった技術を利用することで森林の 3 次元構造の観測を可能とし、より高精度な森林バイオマス推定につながる可能性がある。こうした技術は、後述する生物多様性指標のモニタリングにも利用できる可能性があるため、技術開発の待たれる分野である。また、SAR だけでなく光学の常時立体視センサを利用した 3 次元構造把握技術を応用した森林バイオマス推定にも期待が持てることから、センサの開発や手法の研究が待たれる。

また、衛星ライダーについては、衛星の軌道に沿って数ラインのレーザ光を発射しているのが現状であるため、まずは観測点密度の増加が求められる。航空機ライダーではスキャン機能を有するものが一般的であるため、衛星ライダーでもスキャン型のセンサを開発する、もしくは多数のレーザ光を同時に発射できるようにするなどの技術検討が必要となる。また、樹冠が幾重にも重なったような林分では、レーザ光が地面まで到達しにくいのが現状である。地面からの反射を観測できないことは、樹高や森林バイオマスの推定精度を著しく低下させることになる。そのため、できるだけ高出力のレーザを用いる、もしくは ICESat-2/ATLAS のようにフットプリントの重複を大幅に増やすことで、地面からのレーザ光反射を検知できるよう技術開発が求められる。レーザ光の波長については、現状では近赤外域のレーザを利用することが多いが、高調波の利用や複数のレーザを同時搭載するなどによる多波長化にも期待したい。多波長ライダー観測により、1 つのフットプリント内で植生指標などの高度分布を観測することが可能であり、観測波形を地面と樹冠の反射部分に正確に分離することに寄与し、樹高や森林バイオマスの推定精度の大幅な向上が期待できる。さらに、上層木と下層木の樹種の違いを観測するなどの応用の可能性も広がる。

4)の生物多様性等の評価を目的とした衛星観測に関しては、センサの分解能の性能や観測体制を原因として、数年前までは技術的に大きな制約を受けていた。しかしながら、最近の SENTINEL-2A/2B や PlanetScope 衛星などの登場により、革新的な研究開発が期待されている。生物多様性には 3 つのレベル、すなわち「遺伝子の多様性」「種の多様性」「生態系の多様性」があるとされる。このうち、「遺伝子の多様性」を衛星から直接的に観測することは困難であり、「種の多様性」も現在の技術レベルでは簡単ではない。しかし、生態学分野の研究により、例えば森林の樹種の多様性は樹冠構造の複雑性と正の相関関係があることが知られている（すなわち、単層林に比べて複層林のほうが樹種の多様性は高い）。樹冠構造の複雑さであれば、衛星ライダーや SAR の干渉技術などを利用することで観測の可能性があり、間接的な生物多様性の観測につながる。これは一例にすぎないが、衛星により観測可能な生物多様性に相関のあるパラメータを特定し、その観測精度を高めていくといった観点が求められる。例えば GEO BON は、地球規模での生物多様性モニタリングに必要なパラメータとして Essential Biodiversity Variables (EBVs) を選定しており、その中では Primary Productivity、Ecosystem Phenology、Ecosystem Disturbances、Ecosystem Distribution、Vertical Profile などは衛星から観測できる可能性のあるパラメータと考えられる。現在進行中の研究分野でもあるため、関連する生態学の研究成果にも目を配りつつ、衛星の観測技術の向上が必要となる。また「生態系の多様性」については、先述の土地利用/土地被覆分類の技術を応用することでモニタリングの可能性があると考えられる。

また、生態系機能やその動態をモニタリングするための観測体制の確立も必要である。過去 10 年、

GOSAT シリーズなどによる太陽光励起クロロフィル蛍光（SIF）の導出や光合成量の推定への利用が進んだが、SN 比の向上、空間分解能・時間解像度の向上などが課題として挙げられる。また、各種統計技術、機械学習を利用したハイパースペクトルデータによる葉形質情報の抽出研究もこの 10 年で飛躍的に進歩した分野である。これまでのハイパースペクトル観測は航空機の利用が中心であったが、ISS に搭載された HISUI や諸外国の同系統の衛星センサをさらに発展させ、より広範囲、高空間分解能での観測体制が望まれる。それに加えて、これまで利用されてきた紫外から熱赤外にかけての電磁波や、マイクロ波の利用に加えて、熱赤外とマイクロ波の間に存在するテラヘルツ波など、これまでの地球観測でほとんど利用されてこなかった波長帯での新しいセンサの開発と利用研究も、今後の技術進展のために力を入れるべきと考えられる。

ここまで、陸域生態系の中でも主に森林を念頭に論じてきたが、他にも乾燥地（砂漠）、半乾燥地（草原）、寒冷地（ツンドラ）、湖沼を含む湿地などのモニタリングも重要である。これらの地域では、環境変動に敏感な生態系に適応した伝統的な生活様式の多様性が見られる。先住民族の社会や文化の保全という観点においても注視すべきホットスポットである。一方で、近年、乾燥地や半乾燥地では砂漠化や干ばつによる水資源の枯渇、ツンドラ地帯では火災の大規模化・高頻度化などの問題が生じている。また、北半球の高緯度地域や高地では、温暖化が地球平均の 2 倍以上で進んでおり、永久凍土層の融解やそれに伴う地表面状態の変化（地盤沈下や乾燥化など）とその上にある建物やインフラ設備の破壊、CO<sub>2</sub> やメタンなどの温室効果ガスの放出、凍土中に存在する地下氷中の水銀の河川流出による環境悪化などが問題視されている。例えば、永久凍土のモニタリングでは、干渉 SAR による地盤変動の抽出情報から地下の凍土層の動態を把握する試みが行われている。また、同じく SAR データによる土壌活動層深の推定なども試みられている。また、湖沼の環境監視のため水質や表面温度などの観測や、生物多様性保全の観点からの湿地の観測も重要である。しかし、これらの観測は一部の地域における解析事例にとどまっており、今後は北極周辺やチベット高原などの広大な永久凍土層の全体像を観測する必要があるだろう。

### (3) 将来の成果や技術の見通し

森林・陸域生態系の衛星観測では今後、様々な意味で「バイアス（体系的なノイズ）のない計測法」が強く求められるだろう。というのも、森林・陸域生態系は、物理的な計測や理解が通用しやすい大気や海洋と異なり、多種多様な「生き物」（人間を含む）の影響が強い世界なので、地域や時代による不均一性や変動が激しく、統一的な取り扱いが困難であり、どうしても「むら」が生じがちなのである。

たとえば森林バイオマスは森林構造に強く依存し、森林構造は地域によるばらつきが大変に大きい。従って、衛星データから森林バイオマスを推定するには、対象地域に特化した統計モデルがよく用いられる。しかし炭素蓄積量が政策的・経済的な意味や価値を持つには、このような、ある意味、場当たりのやり方では説得力に欠ける。国～全球レベルの広域での推定が可能な、バイアスのない汎用性の高い統一的な手法が必要なのである。

一般に、衛星データから物理量を求める際に発生するバイアスの原因は大きく 2 つに整理される：モデル（衛星データと物理量を対応付ける関係）におけるバイアスと、衛星データ自体のバイアスである。

モデルには放射伝達・物質輸送などの物理プロセスや対象の構造・機能を定式化して表現したメカニ

スティックなモデルと、経験則に基づいた統計モデル（機械学習）がある。前者は対象を特徴づけるパラメータの精度、後者は統計的学習（フィッティング）の基礎となる「教師データ」の量と質に大きく依存する。これらの不足がモデルにバイアスをもたらす（実際、教師データに存在するバイアスが機械学習の性能を大きく落とすことは一般によく知られている）。これらのデータは地上観測や、より高精度なリモートセンシング（ドローン、航空機を含む）から得られる。これらを系統的・戦略的に取得し、データベースとして育てていくことが重要である。

そこで重要なのは地上観測ネットワークやシチズンサイエンス、人流分析やソーシャルセンシングとの連携である。実際、森林・生態系・生物多様性に関するこれらのデータは膨大に得られるようになってきた。しかし、これらの活動において、対象地域や対象生態系（種）の選択は、社会資本の有無や文化・趣味といった選好性が強く働くことで、データの量や質にバイアスが生じる。これに対して、衛星は、上述の制限とは無関係に、ボーダーレスに地球上を公平に毎日観測している。衛星観測は地上観測と相互補完することで、バイアスの少ない（世界共通・公平・シームレスな）評価を実現するという役割が求められるだろう。ただし、地上観測と違って、衛星観測では物理的・原理的に直接観測不可能な項目がある。それを補完・克服する観測システム（衛星のみならず様々な手法を統合化する）を目指すべきである。

衛星データ自体に存在する以下のようなバイアスについても克服していく必要がある。

- 感度やダイナミックレンジの不足。たとえば光学センサや SAR から森林バイオマスや葉面積指数を推定する場合、高いバイオマスや葉面積指数では飽和する。
- 観測条件のバイアス。雲の有無、軌道が固定されることによるレーダ入射角・方位角の固定、地形的に日陰・レーダシャドウになるところのバイアス、重要ターゲットのあおりをうけて観測機会が減るといふバイアス。
- 長期観測におけるバイアス。センサが交代する時に、観測体制やセンサ仕様・感度が継続されないことによる。新たな観測手法・センサが望まれる一方で、基本をきちんと続けることが必要である。
- サイズバイアス。観測対象が小さく断片化してしまうと見えない。大きなものを優先的に見てしまう。
- 日周バイアス。太陽同期軌道の限界（午前や午後の特定時刻しか見えない）。TRMM や GPM のような太陽非同期軌道や、静止衛星による日周観測が必要。
- 偽相関によるバイアス。たとえば乾燥化によって林野火災が発生し、バイオマスバーニングエアロゾルが大量排出されることで大気補正が不十分になり、その結果、植生量の乾燥ストレス等による減少として誤認される。

これらに留意したうえで、森林・陸域生態系の将来の観測に有用と思われるセンサとして以下を挙げる。

- Lバンドを中心とした SAR。日本のユニークな貢献。森林バイオマスのダイナミックレンジが広い。干渉性が高い。過去のデータアーカイブが生きる。
- マイクロ波放射計。AMSR 後継。湛水域マッピング、積雪域マッピング、植生水分量、地表面温度は陸域生態系で重要な情報になり得るが、解像度がネック。現在の～10 km を～1 km 程度に改善することを目指して高解像度化を。

- 静止光学衛星。高頻度観測（～数分）によって、被雲のバイアスや日周バイアスを大きく低減できる。高解像度化（～数 10m）によって、アプリケーションの幅が増える。データ転送容量の確保が課題。
- 3次元立体視センサ。PRISM、AW3Dの貢献。高精度化。ライダーと補完しあって、樹高の wall to wall 計測が可能。AW3D 高解像度データについては、ステレオ視による樹冠抽出が理論上可能であるが、LiDAR データと遜色ない樹冠形状プロファイルを抽出するにはさらなるアルゴリズムの改善が必要である。
- GCOM-C/SGLI による多方向観測は、地上部バイオマスの計測や陸上の大気中エアロゾル観測に多大な成果をあげつつある。将来、大規模火山活動などによる日射減少、気温低下などの比較的短期間に起こる地球規模の環境変化がもたらす植生変動をモニタリング・対処するために太陽同期中程度解像度衛星による全球多方向観測の進化が望まれる。
- 極軌道高解像度光学衛星。ALOS-3 後継。Sentinel-2 との相互運用性を高め、Sentinel-2 との国際コンステレーションを目指す。それによって発言力を高める。
- 熱赤外放射計(TIR)。GCOM-C/SGLI や ASTER/TIR の技術継承を。TIR を生態系観測に活かす研究開発を。
- 夜間光観測センサ。DMSP/OLS、VIIRS と、海外センサが成果を出しているが、人間活動のモニタリングに重要なので、SGLI 後継機として期待したい。高解像度化（～100 m）を狙って欲しい。静止衛星でできると素晴らしい。
- 走査型 LiDAR。これまでの衛星ライダーでは数ラインのレーザ光を発射するのみであったところ、走査型することで観測フットプリント密度の大幅な向上が期待できる。
- 月をプラットフォームにした観測。超長期観測に適した安定したプラットフォーム。直径 30m クラスの鏡を置けば、静止軌道から 10m 解像度観測と同じような性能が得られる。データの保管は、JAXA の月観測で見つけた洞窟にサーバーを置く。電力は月表面に置いた太陽電池パドルで確保。ムーンゲートウェイ構想にのる。
- 成層圏からの観測。ミレニアムプロジェクトで上がった成層圏プラットフォームに準じた観測。国土保全のための植生観測、防災、減災目的の観測などに役立つ。通信事業、空中三角点の展開と測位など民間需要にも貢献。宇宙空間からのデータダウンリンクの中継点として活用。このシステムの技術を海外にも輸出を視野に入れる。
- 衛星搭載降水レーダの森林・生態系応用。土地被覆、バイオマス。鳥の群れの観測も検討の価値がある。

これらはいずれも空間解像度・時間解像度の向上が望まれる。それにはコンステレーションによるブレイクスルー、特にバースタティックレーダーやフォーメーションフライトによる合成開口などに挑戦することも意義があるように思われる。

#### 2.1.4. 大気汚染物質の監視と緩和策・適応策への貢献

過去の国際社会問題の発生とその進展の経緯を踏まえ、将来の社会情勢を見据えての今後の地球規模の課題の一つとして中長期的に監視すべきパラメータに大気汚染物質がある。欧米においては1960～1970年代に大気汚染の状況が悪化したが、その後技術改良により、現在は改善されている。一方、インドなどの発展途上国においては、現在も大気汚染の問題は深刻であり、その状況把握には衛星観測が大きな役割を果たす。また、観測データと数値モデルによる短時間予測ができるようになり、適応策の策定に貢献している。長期的には、大気汚染低減のための国際的な枠組みや技術開発のあり方にも資するものである。

過去からの問題として監視と国家間調整が試みられている越境汚染の問題があり、特に発展途上国の社会経済活動に伴う大気汚染物質の発生の増加が予想されている。なぜならば、今後の世界の人口変化予測によれば、インドやアフリカ諸国での人口爆発とそれに伴う多くの社会インフラの整備と社会経済活動の急激な増加が高い確率で見込まれているため、たとえ先端技術をそれらの産業界に導入しようとも、世界がこれまでのようにエネルギーとして化石燃料の消費が中心となっている社会構造である限りは、大気汚染による人々の健康被害は避けられないからである。さらに、歴史上も過去に大規模な火山噴火によって大量の大気汚染物質が大気中に放出されるという事象が定期的に観測されており、今後も同様の自然災害による大気汚染が懸念される。そして、大気汚染物質の移流や越境汚染の問題は国家間の課題をより深刻化させる可能性がある。さらに、今後の気候変動に伴って森林火災等の発生の増加や砂漠化が進むことにより、地球環境の保全のためには衛星による大気汚染物質のグローバルな監視とその情報の利活用がより重要となる。

大気汚染物質には、人々の健康に被害をもたらす、オゾン ( $O_3$ )、メタン ( $CH_4$ )、工場や自動車から排出される二酸化窒素 ( $NO_2$ ) をはじめとする窒素酸化物 ( $NO_x$ )、化石燃料の燃焼や火山の噴火などによって発生し、酸性雨などにより問題となる二酸化硫黄 ( $SO_2$ ) をはじめとする硫黄酸化物 ( $SO_x$ )、不完全燃焼に伴って発生する一酸化炭素 ( $CO$ )、さらに砂塵や黄砂など大気中を浮遊している粒子状物質 (PM; Particulate Matter)、粒径が  $2.5\mu m$  以下で人々の呼吸器系や循環器系に被害をもたらす可能性のある微小粒子状物質 (PM<sub>2.5</sub>) などがあり、これらの大気汚染物質は1990年代から日米欧の衛星で監視がなされてきた。

また、大気中の滞在時間 (寿命) が短く、地球温暖化と大気汚染の双方に影響を与える物質 (主に対流圏オゾン、メタン、黒色炭素 (BC; Black Carbon) は「短寿命気候汚染物質 (SLCP: Short-Lived Climate Pollutants)」と呼ばれ、地球温暖化問題と大気汚染問題の同時解決に向けてその削減対策が注目されているため、今後の衛星観測が重要視されている。なお、SLCPは排出源が局所的であり、実態把握のためには高い空間分解能 (1kmクラスの観測) が必要とされている。

1970年代以降、世界で最初の地球環境問題となってオゾン層の破壊については、衛星観測によってオゾンホールなどの実態が明らかとなり、紫外・可視・赤外・マイクロ波などの分光計によって様々な衛星がオゾンとその破壊機構に関連する大気微量成分 (硝酸、フロン類、硝酸塩素、極成層圏雲等) の監視を行い、欧米の衛星では現在もそれらの監視を続けている。なぜなら、オゾン層の破壊はそれ自体に進行がないかを注視する必要があるとともに、オゾン層の破壊が成層圏の寒冷化をもたらす、それが地球温暖化の促進にも繋がるという科学的な説があり、地球温暖化や気候変動と無関係ではないと考えら



れているからである。オゾンとオゾン層の破壊に関連する物質の監視は、今後も必要とされている。たとえば、1987年のモントリオール議定書によって国際社会が特定フロンの使用を禁止したにもかかわらず、近年にはその大気中の濃度の減少が緩やかとなり、世界のどこかで特定フロンを大気中に大量に放出されていることが示唆された。これについては、ある研究者グループが NOAA やヨーロッパの観測データに基づいて大気輸送モデルの逆推定計算によってその発生源の地域が特定された。その論文

(<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1193-4>) は 2019 年に Nature 誌の Research Letter で報告されている。

大気汚染の観点のみならず、気候変動に影響を与える人為起源すなわち燃焼起源の温室効果ガスを特定する場合にも、CO や NO<sub>2</sub> と、CO<sub>2</sub> との同時観測は有用な情報を与える。人工衛星からの観測では地球全体を対象にできるが、一方で観測データには測定誤差があるため、大気中に長期に蓄積された CO<sub>2</sub> と燃焼により排出された CO<sub>2</sub> を発生源別に分離するのは困難である。そこで、燃焼とともに CO<sub>2</sub> と同時に発生する CO や NO<sub>2</sub> が、CO<sub>2</sub> の排出源同定とその排出量推定に有効となる可能性がある。それらの観測衛星としては日本では GOSAT-GW が、欧州では CO2M が計画されている。

大気汚染については、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、KARI (韓国) のそれぞれが静止衛星計画を進めている。KARI は、紫外・可視光を計測し、エアロゾル、オゾン、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、BrO、OCIO、HCHO 等を観測する静止環境監視分光計 (GEMS; Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer) を搭載した「千里眼 2B」衛星を 2020 年 2 月に打ち上げた。その観測データは 2021 年からの配信を予定している。ESA はエアロゾル、雲、オゾン、トレースガスの観測を行うセンサ (UVN; UV-Visible-Near infrared imaging spectrometer) を搭載した「Sentinel-4」静止衛星を 2023 年 10 月に打ち上げる予定で計画を進めている。NASA は GEMS と同等のスペックを持った TEMPO (Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution) 衛星の製作を 2018 年に完了しており、2022 年の打ち上げを目標に計画を進めている。静止軌道からの連続的な観測を行うことで、越境・地域大気汚染の実況解析、大気汚染物質放出源とその時間変動の把握、エアロゾル・オゾンの光化学過程および輸送過程といったプロセス研究の促進、森林火災や火山噴火など突発現象の監視などが期待できる。これらを通じて汚染物質排出量に関する国際交渉や健康や農業被害に関する調査研究へ資することも期待できる。また、データ同化を通じた黄砂・紫外線および光化学スモッグ予測の精度向上、オゾンおよびエアロゾル分布の精緻化による数値天気予報の精度向上につながる可能性がある。

日本は大気汚染衛星観測分野では世界に大きく遅れをとっているが、現在と将来における気候変動の監視を目的とした日本の観測衛星によって、エアロゾル、メタン、一酸化炭素、さらに将来的には二酸化窒素などの観測データが、一部の大気汚染物質の監視データとして役立つことになろう。

## 2.2. 気候変動の監視と予測

### 2.2.1. 気候変動緩和策への貢献

昨今と将来の気候変動をもたらしている要因にはいくつかの要素が関わっていると考えられているが、産業革命以降の人為起源による温室効果ガスの急激な増加が主要因であるとされている。2021年のIPCC第一作業部会の第6次報告書（自然科学的根拠）でも「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。大気、海洋、雪氷圏及び生物圏において、広範囲かつ急速な変化が現れている。人為起源の気候変動は、世界中の全ての地域で、多くの気象及び気候の極端現象に既に影響を及ぼしている。」と結論づけている。

気候変動への時宜を得た（すなわち手遅れとならない）適切な緩和策を世界で検討し実施するには、的確な現状把握と精度の高い将来予測が不可欠である。そのため、人工衛星による温室効果ガスをはじめとする気候変動関連パラメータの長期に亘るグローバルな観測データが必要とされている。気候変動の緩和策に必要な関連パラメータは、大気、海洋、陸域のそれぞれで観測される必要がある。それらのグローバルまたはローカルな情報を把握するために、これまで地上観測ネットワークや各種プラットフォーム（地上、船舶、航空機等）、そして各国の人工衛星が利用されてきている。特に人工衛星は単一の測定器で短時間に広域かつ均質に測定ができることから、グローバルの状況把握には不可欠なプラットフォームであると言える。さらに、現在及び将来的には人工衛星の空間分解能もより高くなってきており、地球上のホットスポットの発見と気候変動パラメータの精度の高い定量把握が可能となりつつある。

気候変動に伴う地球環境の変化を具体的かつ正確に把握・予測することを目的に、2004年に国際的に必須気候変数（ECV; Essential Climate Variable）が全球気候監視システム

（GCOS）によって制定された。2006年には、衛星観測による ECV も選定されている。ECV とは、地球の気候を特徴づける因子である物理学的・化学的・生物学的変数、あるいはそれらを組み合わせた変数のことで、現時点で大気に 18、雪氷圏に 4、生物圏に 8、水圏に 5、海洋圏に 19 の計 54 の変数が特定されている。ECV に係る観測により得られた気候データレコード（CDR; Climate Data Record）は、1)気候変動を理解し予測するため、2)気候変動の影響を緩和し、適応するための手段の指針とするため、そして、3)気候変動のリスクを評価し、異常天候の潜在的な原因を明らかにするために必要な実証的証拠となる。

気候変動の主要因とされている温室効果ガスの世界における専用衛星による観測は、日本の温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）から始まった。1997年に日本の京都で開催された国連気候変動枠組条約（UNFCCC）の第3回締約国会議（COP3）で締結された京都議定書では、それぞれ締約国に対して「気候系、気候変動の悪影響並びに種々の対応戦略の経済的及び社会的影響に関する不確実性を減少させるため、科学的及び技術的研究に協力し、『組織的観測の体制の維持及び発展』並びに資料の保管制度の整備を促進」することを求めた。GOSAT はその第一約束期間

（2008年～2012年）における二酸化炭素とメタンの衛星観測を目標に、宇宙航空研究開発機構、国立環境研究所、環境省の連携主体のもと、JAXA では 2003 年度からプロジェクトが開始され、2008 年度の 2009 年 1 月に打上げが成功した。GOSAT は 5 年間の定常観測の予定であったが 2022 年 7 月現在も運用観測を続けている。その後、後継機の GOSAT-2 が 2018 年 10 月に打ち上げられ、二酸化炭素、メタン、一酸化炭素を主要な観測対象として運用観測を継続している。また、

2023年には温室効果ガス・水循環観測技術衛星（GOSAT-GW）搭載の温室効果ガス観測センサ3型（TANSO-3）が二酸化炭素、メタン、二酸化窒素の地球表面の二次元的な観測を開始する予定である。GOSAT シリーズは全球の温室効果ガス濃度の変動監視を目的にしているが、さらに世界の気候変動研究とその政策分野からの要請に基づいて、世界各国の温室効果ガスのホットスポットと言われているメガシティからの放出状況の監視を目標に加え、観測が立案されている。また GOSAT は世界最高の分光分解能を有する特性を利用して、世界で初めて衛星からの光合成による蛍光（solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF)）観測に成功し、二酸化炭素吸収に関する指標の一つとなっている。

また、国連気候変動枠組条約（UNFCCC）の第21回締約国会議（COP21）において合意された「パリ協定」の目的達成を評価するため、パリ協定の第14条に規定された「グローバル・ストックテイク」に貢献するため、衛星観測データが求められている。人為起源の吸排出量推定のためのプロダクトとして衛星によるCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>観測データが、自然起源の吸収放出量推定のためのプロダクトとして衛星によるAFOLU（農業、林業、その他の土地利用）部門の観測データが利用される。グローバル・ストックテイクは5年ごとに評価するための制度であり、最初のグローバル・ストックテイクは、2023年に予定されている。

大気観測では、大気中の温室効果ガスや気候変動をもたらす微粒子（エアロゾル、雲）、短寿命気候汚染物質（SLCPs）の濃度、放射収支（フラックス）等が必要とされるパラメータである。世界の炭素循環研究では、放射収支計算などに基づくモデルを利用した数値シミュレーションが主要な役割を担うが、その入力データとして様々な位置と時刻における観測データが必要となる。温室効果ガスとしては二酸化炭素が中心となるが、近年は、二酸化炭素よりも寿命が短い微量でも温暖化に大きく寄与するメタン、対流圏オゾン、ブラックカーボン等の短寿命気候汚染物質（SLCPs）が、それらの対策によって即効的な温暖化緩和効果が期待されることから、その観測が必要とされている。エアロゾルや雲にも人間活動の影響が及んでいるが、自然変動も含め、それらの相互作用やプロセス、気候応答に関する理解度は不十分な点もあり、今後の観測と研究が必要とされている。

海洋が温暖化すると、その三次元的な循環が変化し、大気との熱や水蒸気の交換パターンが変化することで気候変化を引き起こす要因となるほか、温暖化による海洋内部への酸素供給の減少と合わせて海洋生態系の変化も引き起こされる。また、化石燃料消費によって人為的に排出されたCO<sub>2</sub>のおよそ23%は、物理化学的に海洋に吸収されている。海洋はCO<sub>2</sub>を吸収することで、その大気中のCO<sub>2</sub>濃度の増加を抑制しているが、これは海水に炭酸を加えていることに相当し、弱アルカリ性の海水は産業革命以来、中性方向に「酸性化」している。海洋の酸性化もまた、海洋の生態系に深刻な影響を広範かつ長期に及ぼすと危惧されることから、「もうひとつの二酸化炭素問題」と呼ばれている。こうした海洋の物理的・化学的な変化の実態や原因を、それらの気象・気候や生態系への影響を含めて理解し、気候変化の予測や防災のほか、海洋の持続的な利用に役立てて行くことは、海洋からさまざまな恩恵を受けている世界の多くの国々にとって喫緊の課題である。

地球温暖化の主要因となる二酸化炭素排出を含む炭素収支を定量的に評価することを目標として、大気中のCO<sub>2</sub>量の観測を日米の人工衛星が行っている。（中国も3機の衛星を打ち上げ、運用しているが、そのCO<sub>2</sub>観測濃度データは公開されていない）。

衛星による大気中温室効果ガス観測の日本を含む世界の動向は、主に4つの方向に集約される。第1には、温室効果ガス濃度の全球分布とその時空間変動を長期間にわたって観測すること、第2には、全球分布だけではなく、メガシティをはじめとする人為起源の排出ホットスポットを定量的に監視すること、第3には、静止衛星を用いて雲の影響のない特定地域を時間的に密に観測すること、第4には複数の小型衛星を用いて主要な温室効果ガスであるメタンの監視を行うことである。

CO<sub>2</sub>の主な吸収源となる陸域での森林バイオマス量の評価については、日本ではALOSシリーズ（「だいち」）、GCOM-C（「しきさい」）、宇宙ステーション搭載植生ライダーMOLI（2024年度予定）などが担っている。

地球の放射収支を大きく左右するエアロゾル・雲～降水のプロセスの正確な理解や、時間的変化の早いこれらの観測的把握が、放射収支から気候変動を評価する上で重要である。我が国では気候変動に関わるエアロゾル・雲の観測としてはGCOM-Cがあり、高頻度に高い空間分解能でエアロゾル・雲～降水のプロセスを測定する衛星には、静止気象衛星GMS（「ひまわり」）がある。さらに2023年度打ち上げ予定のESAとの共同ミッションEarthCAREに搭載されるドップラー雲レーダ、高分解能分光ライダー、可視赤外イメージャ、ブロードバンド放射収支計により新たなデータの取得が期待される。

今後の気候変動の緩和策に必要なパラメータを把握する世界の動向としては、人工衛星については次世代静止気象衛星に見られるように、さらなる高空間分解能化（1kmから500mに）と高速スキャン、そして、イメージャのほかにサウンダや雷センサ等の複数の機能のセンサを搭載することが計画されている。更に国際的には、それぞれの地域をカバーする宇宙先進国の役割分担として、将来的には気象パラメータとともに大気汚染物質や温室効果ガスの同時観測を行う静止衛星の開発が求められており、それらは検討されつつある。

### 2.2.2. 気候変動影響の監視

IPCC 第 1 作業部会の第 6 次評価報告書では、人間活動による気候への影響が顕在化していることを、「疑う余地がない」と、強い表現で断定している。また、異常気象や海洋熱波など以前とは異なる現象が増加している。このような状況の中で、地球規模で気候の変化を捉えることのできる衛星観測の重要性は、以前にも増して高まっていると言える。本節では、衛星観測により変化の検出が可能な気候変動影響を大気、海洋それぞれの分野で項目としてあげ、各項目について現状の概観と将来的な開発目標について記述している。なお、陸域の分野については、第 2 部 2.1.3 森林をはじめとする陸域の環境にかかる現状把握及び利活用への貢献に参照されたい。

#### (1) 大気・極端現象

##### (1) -1 台風

台風を含む熱帯低気圧の気候的特性、活動度の長期変動を監視するためには、全球スケールで高頻度の観測が可能な静止気象衛星のネットワークが必要である。熱帯低気圧の信頼のおける気候特性の変化は静止気象衛星網が整備された 1980 年代以降に限られる。これまでの 40 年間のデータで、熱帯低気圧の活動度の変化が数十年規模の自然変動なのか地球温暖化に伴う長期変化なのかは議論となっている。今後の地球温暖化の影響がより顕著となると予想されるが、熱帯低気圧の特性の気候変動の影響を理解するためには、安定的に静止気象衛星網を維持していく必要がある。

熱帯低気圧の強度や構造を正確に把握することは、短時間の数値予測だけのためでなく、気候特性の監視のために必要である。このために、熱帯低気圧の鉛直構造や地表付近の状況を人工衛星観測によって監視する必要がある。水蒸気・温度場の鉛直分布の観測のためにマイクロ波・赤外サウダが利用され、雲降水の鉛直分布の観測には降水・雲レーダ、ライダーによる観測が利用される。海上風速の観測のために、散乱計・合成開口レーダ・GNSS 等による観測が必要とされる。風の空間的な分布の観測には、静止気象衛星による 1 分スケールでの高頻度観測による熱帯低気圧の内部領域における衛星大気追跡風観測やドップラーライダーによる風の直接観測が利用できる。

熱帯低気圧に伴う降水について、地球温暖化に伴って増大が予想されている。熱帯低気圧に直接・間接的に伴う降水の気候特性、地域分布や年々変動、長期変化を監視することが重要となっている。降水レーダやマイクロ波による降水の人工衛星観測、およびこれらを包括的に利用解析した高空間・時間分解能（10km スケール、1 時間）の降水データベースを開発改良させる必要がある。

##### (1) -2 集中豪雨

世界各地で「経験したことがない」といった洪水被害が後を絶たない。IPCC AR6 によると、中緯度陸上で大雨頻度が増えている地域が大多数であるにも拘わらず、要因を人為起源に明確に帰着できる地域は少ない。これは、豪雨のメカニズムがよく理解されていないことの証左である。

豪雨は、概して非常に背の高い積乱雲からもたらされると考えられてきた。しかし長期の衛星搭載降雨レーダ観測から、集中豪雨が必ずしも非常に高い対流を伴うものではないことが示された。西日本の 2018 年 7 月豪雨も、夕立の積乱雲ほどの高さはなく雷も少ない雲から大雨が降り続いた結果であった。豪雨の主要因は、大気不安定にある場合と、大気中の多量の水蒸気量にある場合とがある。後者

の環境ではメソスケールシステム（MCS）が発達し、日本の広域豪雨はこのようなものが多い。さらに風の鉛直シアや上空のジェット気流の蛇行も豪雨に影響する。

このように集中豪雨の支配要因とメカニズムは多様であるが、将来は気温上昇による大気水蒸気量が増加するため、特にMCSによる豪雨の増加が懸念される。降雨特性の変化を監視するため、Ku帯ドップラーレーダ観測に加え、複数のマイクロ波放射計、雷観測も有効である。雲のレーダ・ライダー観測は雲微物理を含めた理解に必要である。環境場の監視のため、地表面温度と気温・湿度鉛直分布（赤外およびマイクロ波サウンダ）、風の鉛直分布（ドップラー風ライダー）の衛星観測が有効である。可能ならば静止衛星搭載が望ましい。

### **(1) -3 猛暑、熱波**

極端気象の一種である熱波は健康被害や農作物被害をもたらす。また熱波は生態系にも影響するほか、森林火災の一因にもなっており、大気環境にも大きな影響を及ぼす。その発生にはブロッキングなどが寄与していることが知られており、大気大循環場の継続的な監視が重要であるが、これについては次節で述べる。ところで、陸域における熱波は直接観測も可能であり、比較的検出しやすい。ここでは、衛星データがより有用であろう海洋熱波について大気との関係も踏まえて詳細に述べることにする。異常な海面水温上昇が一定期間持続する海洋熱波は、珊瑚の白化や海洋生態系の変化、局所的な大気循環の変化を通じて社会に影響を及ぼす。1980年代以降に限っても既に海洋熱波の年間発生日数や発生面積が増加していることが分かっている。また、今後地球温暖化の進行に伴い全球でさらに加速することが予想されているため、現況や長期変化の監視・予測は重要である。海洋熱波の検出には衛星観測による海面水温の日データが貢献しており、長期変化監視のためにこの観測体制の維持が肝要である。海洋熱波の発生機構を把握するには海面熱フラックスや海流、海上風の観測や推定も必要となり、日中と夜間の4回/日以上での観測が望ましい。湾スケールでは生態系や漁業への影響の理解のために100m程度、沿岸域では例えば黒潮の貫入を解像できる2-5km程度、大洋の内部領域では中規模渦を捉えるために10km程度の解像度が期待される。さらに、海洋混合層の変動や長期変化もその発生と変化に寄与するため、海洋表層水温・塩分の鉛直構造の把握も望まれる。

### **(1) -4 大規模循環場**

大気の大規模循環場は、低緯度帯はハドレー循環、中高緯度は温帯低気圧に代表される総観規模擾乱に支配される。その狭間に形成される梅雨前線を例に挙げるまでもなく、温帯と亜熱帯の境界に位置する日本の気候は、気候変化に伴う大規模循環場の微細な変動に敏感である。したがって、自然災害に強い持続可能な社会構築にあたり、大気大規模循環場の監視と変化検出は極めて重要である。また、近年は地球温暖化に伴い、ハドレー循環の下降流の位置が高緯度にシフトすることが知られており、その監視には衛星観測が必要不可欠である。

大気循環を直接観測することは難しいが、雲を観測することで、その実態を把握することができる。たとえば熱帯収束帯における雲の形成、亜熱帯高圧帯における晴天域はハドレー循環を反映したものである。雲の水平分布、雲頂高度の観測には可視赤外イメージャが重要な役割を果たす。また、水蒸気場や降水の空間分布の全球観測から大規模循環の実態を描出することができる。AMSR-Eから

AMSR2 並びに 2023 年度打ち上げ予定の AMSR3 に至る我が国のマイクロ波放射計は、水蒸気と地表面降水量の長期観測にもとづく気候データレコードの維持に欠かせない観測手段の一つである。また AMSR シリーズは、海面水温や海上風速観測データを提供し、海上の大気循環場を駆動する要因である熱・水蒸気供給量の推定にも重要な役割を果たしている。AMSR3 以降の後継センサの安定的な確保に向け、NASA や ESA と密接な連携を維持しつつ、マイクロ波放射計の長期的な開発・運用を JAXA が積極的に推進していくことが望まれる。

さらに大規模循環場等の気候変動監視のためには、再解析データセットも有用である。再解析データセットは、主に現業気象機関が気象予測のために開発したデータ同化システムと、気温、水蒸気、風、気圧などを直接あるいは間接的に観測する多様かつ大量な地上・衛星観測データを用いて作成される。そのため、JAXA や宇宙機関においては、これらの衛星観測が、長期に渡って高品質に提供できる体制が望まれる。

## **(2) 海洋**

### **(2) -1 海面水位**

気候変動による氷床や氷河の融解、及び水温上昇に伴う海水の膨張を通して、世界平均の海面水位は近年 1 年当たり 3.6 mm (3.1~4.1 mm) の速さで上昇している (IPCC、2019)。ただし日本付近では、10-20 年周期や 50 年以上の周期が卓越し、一貫した上昇トレンドは検出できない (文部科学省、気象庁、2020)。海面水位上昇は、海岸の消失や高潮の被害増大などの影響をもたらすため、詳細な現況認識と予測の必要性は高い。気候変動影響の中でも時間スケールの長い海面水位上昇には、長期的観測体制の維持が重要であり、これは上述の世界平均のトレンドと日本付近の周期的変動の相違の原因の理解にもつながる。また海面水位上昇の把握のためには、氷河や氷床の消長の観測、ジオイドの高精度な確定も、衛星観測を用いて進める必要がある。さらに中規模渦や沿岸波による異常潮位の影響を把握し、気候変動に起因する海面水位上昇を十分な精度で捉えるためには、沿岸域においても 1-2cm 程度の精度の観測が必要である。沿岸潮位計で観測される潮汐を除く日本沿岸域の水位変動の標準偏差が 10cm 弱程度であり、1、2cm の精度で沿岸まで精度よく衛星で観測できれば、黒潮変動などが、沿岸へ与える影響を面的に捉えることができ、メカニズムの理解に役立つ。沿岸付近の衛星観測は陸からのノイズの影響を受けやすく、現状では観測精度が不十分なため、新規センサ開発を急ぐ必要がある。

### **(2) -2 黒潮、親潮**

黒潮や親潮などを含む海洋表層循環は、様々な時空間スケールの大気海洋相互作用を通じて気候システムの形成に寄与し、また、気候変動の影響を大きく受けている。また、黒潮大蛇行などの大きな変動は、沿岸地域の気候変動や水産資源環境、海上交通、漂流ゴミ追跡などを通して人間社会活動にも影響をもたらす。従来、海洋表層循環系の海盆スケールでのモニタリングは、海面高度計、マイクロ波放射計、マイクロ波散乱計などを用いて行われてきた。最近では、これらの衛星観測と現場観測のデータを同化した海洋データ同化システムの開発・運用も実用レベルまで進んできている。

今後これらの衛星センサによるモニタリングを継続・発展させ、観測精度や時空間分解能の向上を図る

ことが科学研究、実利用の両面で非常に重要であろう。観測の継続によって、10年以上のスケールの変動現象の監視とメカニズム解明に貢献できると期待される。また、次の20~30年間の大きなテーマとしては、100 km以下のサブメソスケールの変動現象の観測と理解が挙げられる。サブメソスケールの変動は、海洋表層の物質循環や生物・化学過程にもつながる魅力的なテーマである。

## (2) -3 低次生態系・海洋酸性化

海洋低次生態系の構成要素の一つである植物プランクトンは海洋食物網の基盤であり、その量（クロロフィル濃度）と有機物の生産量（基礎生産量）は、高次の海洋生物の分布や生態に影響するとともに、二酸化炭素を有機物として固定し深層へ輸送することで、地球規模の炭素循環にも大きく寄与する。また、基礎生産で使われる栄養塩類（硝酸塩、リン酸塩、ケイ酸塩、鉄など）の循環とも深い関係を持つ。さらに、植物プランクトン群集組成（グループ、サイズ）は、生態系の構造と食物網の長さや物質循環と関係がある。

これらのパラメータは海色センサを用いて、外洋域では1 km–9 km、沿岸域では200 m–1 kmの空間解像度で推定・監視されており、気候変動との関係も研究されている。しかしながら、沿岸域における空間解像度は十分ではない。100 m以下の空間解像度かつ1日複数回の時間解像度を持つセンサを開発することで、人間活動と陸の影響を多大に受ける沿岸域と、より大きなスケールで変化する外洋域の相互関係を解明することが可能となり、気候変動に対する適応や人間による負荷の削減など資源の持続的利用に繋がる。さらに、波長分解能を向上させることにより、植物プランクトン群集組成をより詳細に推定可能となり、気候変動が海洋生態系および物質循環へ与える影響の理解に繋がると考えられる。

また、海洋酸性化は特定の種類の植物プランクトンやサンゴ、貝類に深刻な栄養を与える。酸性化を衛星で直接監視することは困難であるが、上記の空間解像度と波長分解能の向上は、海洋酸性化による植物プランクトン群集組成の変化やサンゴの分布の変化を捉えることに寄与すると考えられる。

## (3) 雪氷圏

### (3) -1 降雪、積雪、海氷

大陸上の積雪域は、冬期の北半球陸域の約6割を覆い陸面の太陽光反射率を大きく左右し、また大気―陸面間の断熱層として陸面の過度の冷却を防いでいる。極海に浮かぶ海氷域も、暗い海面の太陽光反射率を変化させるとともに寒冷な大気と温暖な海洋を遮断する断熱層の役割を果たし、大気・海洋場そして海氷自身の成長量に影響を及ぼす。したがって積雪・海氷域の面積・厚さの変動は、地球の気候変動を監視する上で最重要の観測対象の一つである。近年の衛星観測により、積雪・海氷のどちらも面的に縮小傾向にあることが明らかであり(IPCC、2021)、全球を高頻度に観測できる中程度分解能の光学放射計（SGLIタイプ）とマイクロ波放射計（AMSR2タイプ）による継続的な観測体制の維持が重要である。また、積雪や海氷の厚さ計測については、海外において能動型センサ（光学ライダーICESat2とレーダ高度計CryoSat2）による観測が行われているが、観測幅が狭く現時点では観測頻度が非常に少ない。また雪氷圏における降雪パターンの変化は積雪や海氷の変動にもつながる。降雪変動の監視・予測は重要な課題であり、高精度観測の降水レーダ（能動型、DPRタイプ）



プ) と広域観測のマイクロ波放射計(受動型、AMSR2タイプ)の観測が必要である。海外機関とも協力して受動・能動型センサを複数機で観測する体制を構築し、積雪・海氷・降雪の面的・量的分布を高頻度に把握していくことが望まれる。

### 2.2.3. 気候変動の予測精度の向上への貢献

#### (1) 全球エネルギー・水循環とその物理プロセス理解の必要性

気候変動の理解と予測における基本的な課題は、全球規模のエネルギー・水循環とその様々な時空間スケールでの変動メカニズムの解明である。この循環は地球表層の水のリザーバーである海洋・雪氷圏・陸面・大気の4つのサブシステム間のフラックスが担っている。その支配プロセスは温室効果気体や大気汚染物質の排出変化に対する地球環境の応答を決めているため、長期的な気候予測の精度向上にはこれらの物理過程の定量的理解と適切なモデリングが必要である。近年の衛星観測の進歩はこうした物理過程で繋がれたサブシステムの様々な側面を同時に観測することを可能にしつつある。その観測情報に基づいてエネルギーと水のサブシステム間のフラックスが定量化されるようになってきたが（図1.1）、その変動を決める物理過程の理解は依然として大きな課題として残されている。これらの物理過程は全球平均的な意味でのエネルギー収支・水循環の変化だけでなく、大気海洋結合系の様々な気候変動モードの振る舞いや熱波や豪雨・干魃などの極端気象現象の発現メカニズムにも深く関わる。したがって、地球温暖化の緩和にとって特に重要な今後数十年において、衛星観測によってこれらの物理過程を幅広い時空間スケールで観測的に理解し、その知見を適切に活用して数値気候モデリングの精度を向上させていくことは喫緊の課題である。このためには、海洋・雪氷・陸面・大気のサブシステム間でのエネルギー・水・炭素のやり取りを様々な時空間スケールで定量化する必要がある。本項では、気候変動にとって基本的な重要性を持つエネルギー・水のフラックスとそれに関わる物理過程に主に着目して、衛星観測の現状と課題を整理する。

これら4つのサブシステムはエネルギーを介した気候影響の点では等しく重要だが、水の貯留量においては海洋：96.5%、雪氷圏：1.7%、陸面/地下水：1.8%、大気：0.001%と大きく偏っており、この特徴が気候予測を難しくしている。例えば、大気の水はその極めて僅少な存在量にもかかわらず水蒸気・雲の放射効果や降水による潜熱加熱・淡水供給を通じて他のサブシステムに顕著に影響する。このため、エネルギーと水の結合系である気候の長期変動を定量的に評価するためには、サブシステム間で幅広いオーダーにわたって変動する水の挙動をいかに高精度に観測・モデリングできるかが鍵となる。

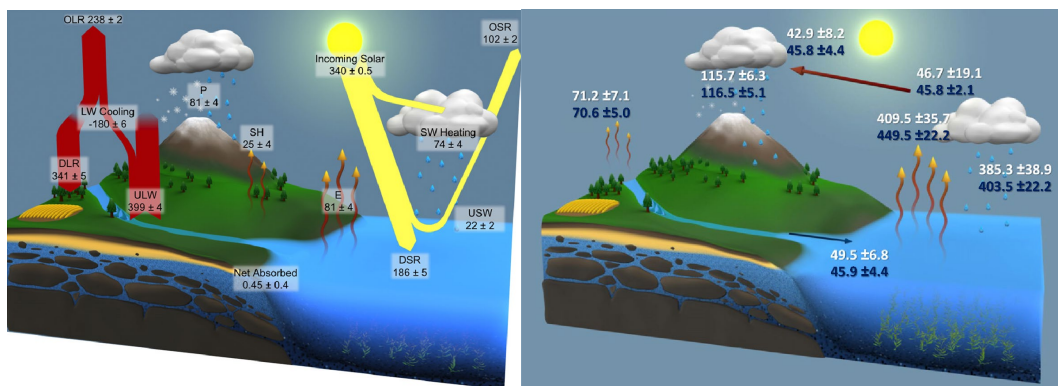


図 1.1: 現在の衛星観測情報に基づいて推定される全球平均のエネルギー収支(左; 単位は  $Wm^{-2}$ ; L'Ecuyer *et al.*, 2015)と水収支(右; 単位は  $10^3 km^3 yr^{-1}$ ; Rodell *et al.*, 2015)。右図において、白色の数値は衛星観測と同化モデルからの推定値を示し、青色の数値はエネルギーと水の収支を整合的に閉じさせる拘束条件によって最適化された値を示す。

このようなサブシステム間の相互作用が全球規模で端的に現れた現象として、気候変動に伴う海水準の変動がある。近年の衛星観測によれば、全球平均の海面高度の上昇は重力場計測衛星 GRACE で捉えられた海水質量の増加と ARGO 等の現場観測で捉えられた海水熱膨張（＝海洋熱吸収）からなる（図 1.2）。前者はさらに氷床質量変動や大気水循環を介した陸水変動の寄与から理解され（Fasullo *et al.*、2013; Reager *et al.*、2016）、後者は大気上端での放射収支の不均衡と整合すること（Loeb *et al.*、2012）がわかってきた。この例が示すように、サブシステム間の相互作用を伴う気候変動の解明には複数の衛星観測情報を組み合わせることが有効であり、最近では観測パラメータを様々に複合した解析によって、サブシステム間のフラックスに関わる物理プロセスを観測的に診断することも可能になりつつある。以下ではこれらの点にも留意して、4つのサブシステム各々について、エネルギー・水フラックスの気候変化プロセスを定量化し、そのモデル表現を改良するために将来望まれる衛星観測情報について整理する。

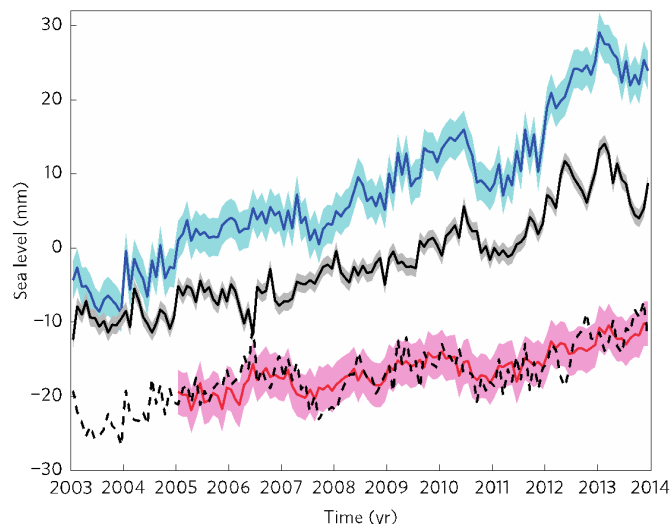


図 1.2: 衛星観測から得られた全球平均海面高度の変動（青色）とそれに対する海水質量の変動（黒色の実線）および現場観測から得られる海洋貯熱量の変動（赤色）の寄与。黒色の破線は海面高度の変動から海水質量の変動の寄与を差し引いたものを示し、これが赤色の線とよく一致することから、海面高度の変動は海水質量と海水熱膨張の変動の寄与の和であることがわかる。Llovel *et al.* (2014) より引用。

## (2) サブシステムごとの課題と展望

### (2) -1 大気

大気は気候変動に伴う様々な気象現象や人間生活に直接関わる熱波や豪雨などの極端現象が生じる舞台である。これらが発現するメカニズムをその背景となっている全球的な気候変動も含めて理解するためには、大気中および地表面を介した他のサブシステムとのエネルギー・水収支の変動とその支配プロセスを幅広い時空間スケールで定量的に把握することが必要である。しかしながら、現在の観測的理解では、全球エネルギー・水収支は大気内部と地表面で完全に整合的には閉じていない。このことは、大

気上端での放射収支の不均衡が海洋熱吸収と連動していることや、地表面収支が大気と陸域・雪氷圏の間でのフラックス交換を直接意味することからも全球的な気候予測にとって主要な障害となっている。この問題は、各要素フラックスを定量化するための大気の観測情報が限られていることに起因するが、特に不確実性が大きいのは、エネルギー収支と水循環を本質的に繋いでいる雲・降水の物理過程の理解とモデリングである。雲・降水に伴うエネルギー・水フラックスの定量化は、二酸化炭素に代表される長寿命の温室効果気体やエアロゾルを含む短寿命気候強制因子（SLCF）が引き起こす気候変動の予測にとって中心的な課題となっている。

雲・降水の気候影響を理解するには、地球表層全体の 0.001% に過ぎない大気の水のうち、その大部分（99.9%）を占める水蒸気（気相）から僅かな質量比（0.1%）の雲（液相・固相）が生成し、その一部が降水によって消滅する一連の過程をそのエネルギー・水収支への影響も含めて精度良く捉える必要がある。雲の生成・消滅には、対流や大循環などのマクロな力学・放射過程と雲・降水粒子の形成・成長に関わるミクロな微物理過程が SLCF とも相互作用しながら幅広い時空間スケールで作用しているため、これらの様々な物理過程を観測的に理解した上で、適切にモデリングする必要がある。近年の能動型衛星の実現がもたらしたエアロゾル・雲・降水の鉛直分布の観測情報は、従来の受動型衛星とも複合的に用いられて、地表面放射収支や大気の潜熱加熱の定量化を進展させてエネルギー・水の大気・地表面への分配の定量的描像を更新するとともに、これらのフラックスを規定する物理諸過程（雲放射過程・雲微物理過程・降水過程・対流過程など）の観測的な診断を次第に可能としてきた。これによって、数値気候モデルの雲・降水についても、その各種物理特性（雲水・雲氷混合比、降水強度・頻度、雲・降水粒子の熱力学的相など）の 3 次元的な空間分布の検証が進んだだけでなく、それらを適宜組み合わせることで物理素過程の表現（パラメータ化）に立ち入って評価されるようになってきた。これらの進展は能動型・受動型を含む多波長・多センサ衛星の複合利用によるところが大きく、個々の観測変数に着目していた従来の“変数指向”から、観測変数間の関係性に着目してそれを決めている素過程を診断する“プロセス指向”へと衛星観測のパラダイムが変遷しつつあることを意味している。

今後数十年においては、この方向性を大気の諸過程について積極的に推し進め、それを通じて数値モデルにおける大気物理過程の表現を適切に高度化していくことが重要である。このためにまず、現存する（および打上げ予定の）JAXA 地球観測衛星搭載の各種センサ（GCOM-C/SGLI、GCOM-W/AMSR2、GPM/DPR、GOSAT2/CAI2、EarthCARE 搭載の 4 センサ）から得られる水蒸気・雲・放射・対流・降水・エアロゾルの観測変数を国内外の他機関衛星のものとも適切に組み合わせ、エネルギー・水のフラックスに関わる様々な大気物理過程を“逆推定”することが重要である。特に、大気の物理過程を特徴づける時間次元での物理量変化を観測的に診断することにより、主要な大気物理過程である水蒸気・雲・降水の湿潤物理過程のありようを大規模循環場や SLCF との相互作用も含めて全球規模で明らかにすることを目指すべきである。これが既存の衛星の複合利用でどこまで可能であるのかをまず検討した上で、既存の衛星では捉えられない主要な湿潤物理過程の要素を洗い出し、それらを診断するために観測変数・軌道・センサをどのように組み合わせた衛星観測をデザインすべきかを NASA/AOS など関連する海外の衛星計画との連携も含めて詳細に検討する必要がある。より具体的には、雲・降水に関わる湿潤物理過程を循環場・SLCF との相互作用も含めて定量的に把握するために、水平方向に数 km、鉛直方向に数 100m、時間方向に数分のオーダーで大気の主要な要素（気

温・水平風などの基本的な気象要素に加えて水蒸気・雲・降水・対流・放射・エアロゾル) の4次元時空間分布を全球至るところで捉えることが望ましい。このような時空間的に高解像度の大気モニタリング情報は、究極的には衛星観測だけでなく、その観測情報が適切に同化された数値モデルによって生成されるべきものとも考えられ、そのために衛星データのモデルへの同化手法の高度化やモデルそのものの大気物理過程を衛星観測に基づいて改良していくことが重要である。すなわち、今後数十年の間には、衛星データと数値モデルが一体となったシステムによって、過去から現在の大気物理状態を衛星観測と整合的に理解・監視するとともに、それを時間的に外挿して将来変化を精度良く予測できる基盤を構築することが課題となるであろう。このためには、時間変化のメカニズムを決めている大気物理過程に関する観測的知見を雲・降水・対流・放射過程のパラメータ化を高度化する形で数値モデルに“貯蔵”していくとともに、そのための衛星観測のデザインを観測システムシミュレーション実験(OSSE)等によって数値モデルと緊密に組み合わせることで詳細に検討する必要がある。その検討の過程において、特に雲・降水・対流について上記の4次元時空間解像度を部分的に達成する衛星観測が国際協力も含めて今後10年程度で実現することが望ましい。

温室効果気体に関しては、大気中の二酸化炭素濃度の将来予測を気候変化や土地利用、植生の変化も含め、地球表層の炭素循環の解明を図ることで精緻化することが重要である。そのためには、基本となる大気中の二酸化炭素濃度の全球観測を衛星と地上・船舶観測、数値モデルによるシミュレーションにより推進することが望まれる。さらに発生源別の排出量、植生別光合成による吸収量の評価には空間分解能が高い航空機観測などともみあわせた評価も重要である。化石燃料燃焼起源のCO<sub>2</sub>排出量推定には、高温燃焼にともない排出される二酸化窒素(NO<sub>2</sub>)との同時観測も有効である。同様に、メタン等他の温室効果気体の時空間変動についても衛星観測と他の手法の連携が重要である。大気中の温室効果気体の時空間変動は海洋や陸域とも強く関係しており、地球システムモデルの改良とともに、今後、どのような衛星観測がなされるべきかについて、中長期的に展望すべきである。

## (2) -2 海洋

海洋は様々な時空間スケールで大気と相互作用し、気候システムの形成や変動に大きく寄与している。大気と海洋は海面を通して運動量、熱、淡水や二酸化炭素などの物質をやり取りしており、その単位時間・単位面積当たりの輸送量を海面フラックスと呼ぶ。衛星観測を用いて、全球の海面フラックスの変動を推定する試みは1990年代から行われてきた(Kubota *et al.*、2002; Tomita *et al.*、2019など)。マイクロ波散乱計(海上風速・風向)、マイクロ波放射計(海上風速、海面水温、水蒸気量、降水量)、マイクロ波高度計(海面高度、海流)などが主に用いられてきた。全球海洋を繰り返し、長期にわたって、継続的に観測する手段は衛星観測以外には考えられない。現在の海面フラックスデータセットの典型的な時空間分解能は、25 km、1日程度である。

将来的には、個々の観測物理量およびこれらを組み合わせて推定する海面フラックスの精度および時空間分解能の向上が必要である。特に、中緯度海洋のメソ・サブメソスケールの変動現象によって海面フラックスが変動を受け、大気の変動に影響を与える「気候系のホットスポット」が最近注目されている(Nakamura *et al.*、2008; Masunaga *et al.*、2020など)。20~30年後には、5 km、6時間程度の時空間分解能の実現を期待したい。また、海面フラックスの精度向上には、新しい観測手

段の開発も望まれる。特に、従来直接観測の手段がなかった海面直上（大気境界層内）の気温や湿度、下向き長波放射などの物理量が観測できれば飛躍的な精度向上が期待できる。2000年代以降、SMOS、Aquarius、SMAPなどのL-バンドマイクロ波放射計によって海面塩分が観測できるようになり、海洋表層過程を通じた降水－蒸発の淡水フラックスと海面塩分との関連にも注目が集まっている。

海洋はまた、人間活動によって排出されるCO<sub>2</sub>のうち1/4ほどを吸収している。吸収されたCO<sub>2</sub>はその後、植物プランクトンによる光合成で有機炭素に変換され、動物プランクトンによる捕食などを経て一部は深海に達する。こうした過程を地球システムモデル中で正確に記述し将来の大気中二酸化炭素濃度を予測することで、精度の高い気候変動予測に結びつけることが期待される。

人工衛星による観測が可能な海洋生態系に関する変数としては、海洋表層のクロロフィル量が最も基本的なものと言える。地球システムモデルにより再現されるクロロフィル量の検証に用いることで、気候変動予測の精度向上につながることを期待できる。また、植物プランクトンの種組成を把握することも、炭素循環の理解にとって重要である。例えば、円石藻など炭酸カルシウム殻を形成する一部のプランクトンはアルカリ度の変化を通じ、光合成とは異なった影響を炭素循環に与えるし、ケイ藻など大型植物プランクトンは必要とする栄養塩にも差異がありまた枯死後の沈降速度が大きく、海洋中の物質循環過程において特徴的な役割を果たす。現在、円石藻のブルームは可視光センサにより検出が可能になっている(Moore *et al.*, 2012)が、こうした種の識別を可能にする観測を一層進め、植物プランクトン群衆の種組成を詳細に把握することが理想である。さらに、植物プランクトンの光合成は中規模渦やフィラメントの存在といったメソスケール(O(10km))～サブメソスケール(O(0.1km))の減少による栄養塩の鉛直・水平輸送により活発化されることが知られている(Mahadevan, 2016)。そのため、現状のSGLIセンサの250m解像度を、50m程度にまでさらに向上させることが望ましい。

亜熱帯ジャイアに代表される貧栄養海域への窒素、リンといった栄養塩の供給や、いわゆるHNLC（高栄養塩低クロロフィル）海域への鉄分供給に関しては、大気を経由してエアロゾルによる輸送の重要性が指摘されている。特に鉄分の供給については、エアロゾルの起源や、輸送中に受ける化学的変性が、海洋中での生物学的活性に大きく関わってくる(Ito *et al.*, 2019)。今後は、温室効果気体や大気汚染物質の排出規制に伴いエアロゾルの排出量も大きく変化することが想定されている。このため、エアロゾルの粒径分布や組成などを詳細に把握しながら、クロロフィル等海洋生態系の活性を示す基本的な変数との同時観測を進めることが、気候変動予測にとって本質的に重要となる。

## (2) -3 陸域

陸域は、言うまでもなく人間が生活する基盤であり、そこでの水の動態・エネルギーの動態を詳細に理解することは極めて重要である。しかし陸域は本質的に大気や海洋よりも遥かに不均一かつ多様であることが、その理解を難しいものになっている。こうした困難の中、衛星観測は、広範囲かつ詳細な観測が可能という利点を活かし、陸域の水・エネルギー動態、すなわち降水量・積雪分布・表層土壌水分・地表気温・風速・湿度・短波放射量等のモニタリング、及び地形や土地被覆等を含む周辺情報の提供に対し、様々な側面で極めて重要な役割を担ってきた。具体的には、降水量については、TRMMに端を発したGPMを主体としたGSMaPが広く認識されている。積雪分布や表層土壌水分の推計には、MODIS



や AMSR を用いたプロダクトが、数値標高モデル (DEM) については、NASA の SRTM-3 や JAXA の AW3D30 などがプロダクトとして公開している。DEM については、用途によっては大きな誤差があることがわかっているので、それらを補正しつつ合成した、MERIT DEM (Yamazaki *et al.*, 2017) などが作られている。土地被覆データの生成、及び植生指数をもちいた生態系モニタリングも盛んに行われており、JAXA が農水省と協力して提供している農業気象情報衛星モニタリングシステム (JASMAI) は、農業にまつわる衛星観測情報のポータルとして役立っている。1970 年代に開始した地球表層観測用の光学衛星 Landsat は今も継続しており、2021 年 9 月には 9 号の打ち上げが予定されている。数十年に渡る地形の移り変わりの詳細をモニタリングするだけでなく、例えば Pekel *et al.* (2016) は過去三十年間の歴代 Landsat の観測データを使って、同一地点での観測頻度は年に数回程度であるものの、約 30 メートルという空間解像度で水面域の形を明らかにしている。光学衛星の弱点である夜間・雲の問題を解決した合成開口レーダ (SAR) による水面モニタリングも、JAXA の ALOS-2、ESA の Sentinel-1、DLR (ドイツ航空宇宙センター) の TerraSAR-X などによって進められている。

Piao *et al.* (2020) では、衛星技術によって大規模な植生監視が可能になった 1981 年以降、陸域での植生の活性度が世界的に増加していること (Global Greening ; 全球緑化 ; 図 2.1) が非常に信憑性の高い事象だと述べられている。原因として、人間活動による農業や植林に加え、CO<sub>2</sub> 増加による施肥効果が大きいと指摘されている。全球緑化との関連が指摘されているのが、Global Terrestrial Stilling (全球陸域弱風化) である。しかしながら、Zeng *et al.* (2019) では、モデルで推計された全球緑化による粗度の上昇による地表風の弱まりは観測結果ほど大きくなく、10 年単位の海洋・大気の内部振動によって決定されている可能性があることが示されている。全球陸域弱風化は、海洋での風速の強まり (Young and Ribal, 2019) と関係しているという見方は地球物理的に整合的であり、今後地球システムとして整合的な説明が得られることが期待されている。一方 Pascolini-Campbell *et al.* (2021) では、重力観測衛星 GRACE (及び GRACE フォローオン) による陸域水貯留量 (TWS) の観測を主に用いて、陸域からの蒸発量が 2003 年から 2019 年の間に約 10% 増加したと述べている (図 2.2)。降水量・流出量 (の代わりとしている河川流量) の傾向の不確実性も大きいため、今後さらなる検証が必要である。

こうした全球での衛星観測から得られた傾向は、数値気候モデルにおける物理過程の表現 (プロセス) やそれらの複合的な応答 (システム) を理解することにすでに役立っているものもあるが、今後は、複数の衛星観測の結果を包括的に用いることで、モデルのシステムとしての改良を通じて総合的な不確実性を抑えていくという努力が必要となってくるだろう。

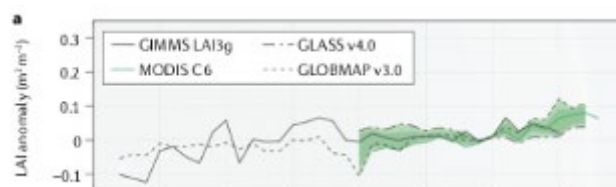


図 2.1 : 全球陸域平均の LAI の経年変動 (左端:1980 年、右端:2020 年; Piao *et al.*, 2020)

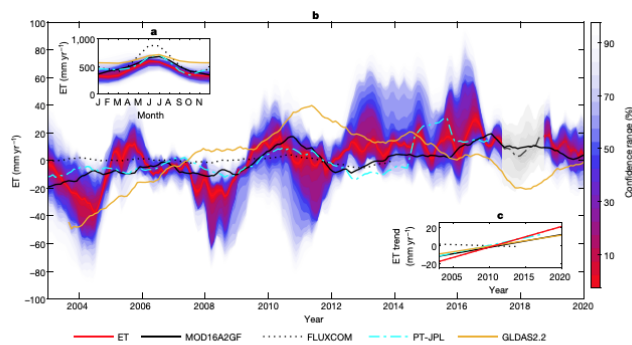


Fig. 2 | Comparison of ET with other products. a. Long-term mean (2003–2019) seasonal cycle of ET compared with other ET products. b. Time series of ET with seasonal cycle removed and a moving average of 15 months applied for ET (red line), FLUXCOM (dotted black), GLDAS2.2 (orange), MOD16A2GF (black) and PT-JPL (dashed cyan). c. The trend in ET for each of the smoothed time series calculated for the available period of the time series in b. The shading (a, b) represents the confidence intervals for the ensemble of ET. The mean of the bootstrapped data used for gap-filling ET is plotted in b (dashed black line) as well as the corresponding confidence intervals (grey shading).

図 2.2: 全球陸域平均の蒸発散量の経年変化 (Pascolini-Campbell *et al.*, 2021)

## (2) -4 雪氷圏

雪氷圏は地球温暖化に対して最も脆弱な地域の一つである。また、北極域ではアイス・アルビード・フィードバック効果などの温暖化増幅メカニズムにより温室効果気体による地上気温の上昇量が全球平均に比べ大きいことが知られている (Yoshimori *et al.*, 2014)。現在、グリーンランド氷床の質量損失 (図 2.3a) や北極海の海氷減少など北極域を中心に急激な雪氷圏の変化が観測され (IPCC, 2021)、南極域でも南極氷床の質量損失 (図 2.3b) や南極海の海氷減少が起こり始めている。産業化以前と比べて全球平均気温上昇が 2℃を超える温暖化が進行する場合、南極氷床の不安定化やグリーンランド氷床の不可逆的質量損失により、継続的な海面上昇が起こることが懸念されている (IPCC, 2021)。これら雪氷圏の変化は当該地域だけでなく、地球規模の気候・環境変化をもたらすため、現在進行しつつある雪氷圏変動の実態把握、変動メカニズム解明、正確な将来予測が必要である。現在観測されている氷床質量損失の原因は、氷床から海洋への氷の流出と氷床表面融解に伴う質量損失が、降水による涵養を上回るためである (van den Broeke *et al.*, 2009)。古気候の再現や将来予測に用いられる氷床モデルや気候モデルでは、表面融解過程は主に気温の関数として表現されることが多いが、実際には積雪粒径、裸氷域面積、雪氷微生物、光吸収性不純物に関する氷床表面アルベドなどの物理過程が関係している。このため、近年の領域気候モデルによる氷床質量収支の研究では、それらへの取り組みが始まっている (Fettweis *et al.*, 2020)。一方、温暖化に伴う気温変化だけでなく、雲分布の変化が雪氷面上の放射収支、氷床の質量収支、海氷の融解に与える影響は、雪氷面アルベド、雲物理特性、海氷の物理特性などに依存するため、実態把握と共に大気—雪氷相互作用の再現性の高いモデル化が必要である。しかし、雪氷圏変動の実態把握のための現地観測は困難なことが多いため、衛星観測による実態把握と共に各種物理過程の衛星観測が重要となる。ここで、衛星観測に求められるものは、実態把握のための長期観測と物理過程のモデル化 (メカニズム解明) のための詳細な観測である。雪氷圏の衛星観測では、(1) AVHRR や MODIS 等の光学センサによる積雪分布 (例えば、Hori *et al.*, 2017) と (2) AMSR タイプの受動型マイクロ波センサによる海氷密接度 (例えば、Comiso *et al.*, 2017) の観測の歴史が長く、共に 1978 年以降のデータセットが整備されている。また、(3) SGLI タイプの多波長イメージャによる雪氷表面物理量観測、ICESat や Cryosat-2 等の衛星搭載の光学・レーダ高度計や GRACE 等の重力観測衛星による質



量収支観測は 2000 年代以降継続的に行われるようになった。長期観測の視点から(1)や(2)の観測を同一の空間分解能で維持・継続できるハードウェア仕様にすると共に、前述した物理過程のモデル化の精度を向上させるために、(3)の観測精度の向上をハード・ソフトの両面から推進（ハードウェア的には多波長イメージャの場合、観測頻度を維持した状態で雪氷面の物理量を詳細に観測可能な 100–250m 程度、マイクロ波放射計は現行機 AMSR2 の倍以上に高分解能化して海外の同型センサとの連携を可能にする仕様の達成し、高分解能化された観測データを活かすアルゴリズムを開発）する必要がある。そのために我が国が現有する SGLI 及び AMSR2 の後継機による観測継続および後継機開発を主体的かつ確実に進めると共に、海外の研究機関とも協力して重力観測衛星、衛星高度計と連携した観測体制の構築を進める必要がある。

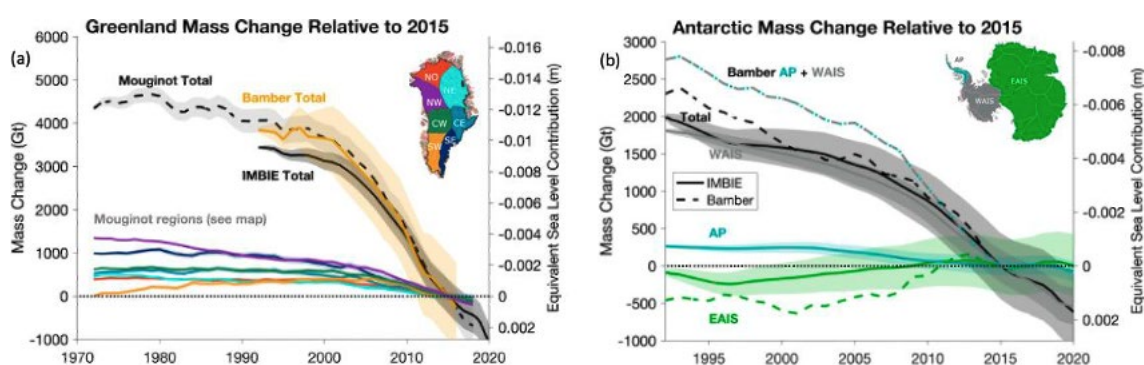


図 2.3:(a)グリーンランド氷床と(b)南極氷床における 2015 年を基準とした質量収支の変化。図の左側の軸は氷床質量、右側の軸は海水準への寄与を表す（IPCC、2021）。

### 3. 人間社会への貢献

#### 3.1. 農業

##### 3.1.1. 農業分野の課題と地球観測衛星の利用

###### (1) 地球規模課題としての農業

農業の地球規模課題は、人類を「飢えさせない」こと、つまり「食料安全保障」と、資源を枯渇させることなく、地球システムの中で自然生態系と人間が共存して、食料生産を持続的に可能とする「持続可能な農業」の両立である（Foley et al.、2011）。

現在約 8 億人が栄養不足であり、人口増加と経済発展による嗜好の変化（動物性タンパク質の摂取増）により、2050 年の 100 億人の食料需給を満たすには現在よりも 50%の食料増産が必要とされている（FAO レポート）。人口増加による食料需要の増大に加えて、気候変動も食料の安定供給にリスクとなりつつある。すなわち、気温や降水量の変化によって、世界各地・作物ごとに増収あるいは減収が見込まれている。干ばつや洪水といった極端現象の増加によって、前例の無い減収が報告されている地域も多く存在する。また、人間が直接消費する食料は、カロリー基準でその約 23%が国際的に取引されており、グローバルな作柄や農業市場を考慮することは、食料安全保障において不可欠となっている。

他方、農業は地球環境に大きな負荷をかけており、その持続性が深刻な危機に直面している。温室効果ガス全体の 21-37%は食料システム、すなわち農林業その他の土地利用（AFOLU: Agriculture、Forestry and Other Land Use）、食料の保管、包装、輸送、処理、小売、消費に由来する（IPCC、2019）。さらに、1961 年から作物単収は 2 倍に増加したが、それは主に窒素肥料や灌漑によるものであり、窒素汚染、農薬汚染、灌漑による暑熱化や、病原虫の発生、水資源の枯渇などの負の側面を伴っている。農地拡大のための森林伐採などの土地被覆変化は地域の気候環境に影響を与えている。食料生産はエネルギー生産（バイオエネルギー）や他セクター（産業分野など）での土地利用・水資源利用とも競合するため（Water-Energy-Food NEXUS）、適切な資源配分が必要である。

国連持続可能な目標（SDGs）では Goal 2 が「飢餓をゼロに」となっているが、飢餓の撲滅や生産性向上の他にも、生態系を維持し、土地と土壌の質を改善させるような持続可能な食料生産システムを確保し、強靱（レジリエント）な農業を実践する、といった事項も目標に掲げられている。

###### (2) 国内政策課題の整理

食料安全保障と持続性の両立は日本国内の農業政策でも重要である。まず食料自給率が低いこと（カロリーベースで 40%程度）が大きな安全保障リスクである。また、農業従事者が急激に減少・高齢化しており、農業自体の存続が危ぶまれている。このような背景を受けて「食料・農村・農業基本計画」（2020 年 3 月、閣議決定）では、農地の集積・集約化や農地の効率的な管理、食料安全保障の確立、スマート農業の加速化、農業のデジタル化、災害・家畜疾病・気候変動といった農業の持続性を脅かすリスクへの対応強化、SDGs を契機とした持続可能な取組の後押しなどの施策が記載されている。衛星データの活用については、「将来的な世界の食料需給を見据え、食料供給のリスク等に対応するため、中長期的な需給予測を実施するとともに、衛星データを活用し、食料輸出国や発展途上国等

における気象や主要農作物の作柄の把握・モニタリングを充実させるための研究を行う」と記載されている。

地球環境の持続性への影響については、特にゼロカーボンを目的として、「みどりの食料システム戦略」（農水省；2021年5月）によって、ゼロエミッション化、化学農薬や輸入原料/化石燃料を原材料とした化学肥料の使用削減、有機農業の拡大、事業系食品ロスの半減、労働生産性3割向上といった目標が定められた。また、欧米とは気象条件や生産構造が異なるアジアモンスーン地域の新しい持続的な食料システムの取組モデルを先駆的に構築していくことも記載されている。

### (3) 農業分野での衛星地球観測の利用

食料安全保障や持続可能な農業といった課題に対して、衛星データは、特にその広域観測性を生かして活用されてきた。すでに民間企業によるサービスが提供されている事例もある。農業分野での衛星データのエンドユーザは幅広く、農家/農業法人、地方自治体、政府、国際機関など多岐に渡り、それぞれが必要とするデータ・情報の種類やスケールも異なる。

農地は時間的な変化が大きいと高頻度かつ定期的な観測性も重要である。近年はドローンでの圃場観測が盛んだが、地球観測衛星は地域～全球規模での作物の作付けから収穫までを適時監視できるところに特徴がある。1972年のLandsat-1号の打ち上げ当初から、農業は主要な利用分野の一つであり、広域の穀物収量把握/予測に衛星が活用されてきた。2011年のG20農業大臣/サミットでは、GEOGLAM（全球農業監視イニシアチブ）が立ち上げられ、宇宙機関や農業関連の国際機関などが、衛星データを活用して全球の作況情報作成し、その成果がFAOなどで活用されている

(<http://www.amis-outlook.org/index.php?id=48514>)。日本でも様々な検討が農水省や傘下の研究機関、大学などにより、水稻をはじめとした作物の作付面積や生育状況の把握、耕作放棄地の把握などの検討が行われてきた。また、食料安全保障に関連して、世界の耕作地の作物生産状況把握のため、農水省はJAXAの技術支援を受けて、2021年より衛星データを活用した世界の農業気象を監視するシステムの運用を開始している（農林水産省、2021）。

農業での主要な利用分野をスケール別に整理すると、圃場、地域/国、全球に大別できる。圃場スケールでは、主に精密農業（スマート農業）に向けた営農判断（生育判断による施肥の最適化、収穫適期判断）と品質評価（葉色によるコメのタンパク量、水分量等）での活用があり、高分解能商業用衛星やドローンの利用が進んでいる。また、持続可能性の観点から、このスケールでの営農活動の環境負荷とその軽減に関する把握・評価（施肥最適化による過剰な施肥の削減、水資源利用最適化、有機栽培）が今後重要になるだろう。地域/国スケールでの利用は、国土（農地）管理、農業統計、農業被害把握といった分野での活用がある。すなわち、農業政策の基盤となる基盤地図（圃場ポリゴン、作付面積、耕作放棄地等）や収量予測、干ばつや洪水などの災害の発災前の早期警戒および発災直後の早期把握などである。全球スケールでは、食料安全保障のための生育監視/収量予測での活用がされている。気候変動は極端現象の増加を伴いながら収量へ大きな影響を及ぼしつつあるため、世界の主要耕作地における主要作物の生育状況や収量見込みを早期かつ正確に把握することは、日本および世界の食料安全保障において、より重要性が増しつつある。

### 3.1.2. 農業分野での利用状況

本項では農業分野での利用として、基盤地図、生育監視/収量予測、精密農業（スマート農業）、持続可能な農業の観点から述べる。

#### (1) 基盤地図

農業の基盤地図は、作付作物、作付面積、作物暦、圃場ポリゴン、耕作放棄地、地形など多岐にわたる。必要な空間分解能も圃場管理・精密農業では1 m 以下、全球の収量推定では数 km と幅広い。

作付作物・作付面積・作物暦（作付け・収穫等のタイミング、二期作・二毛作などの有無）は作物の収量を決定づけるファクターであり、需給変動に大きな影響を与える。作付けや作物暦は季節ごとに（もしくは日ごとに）変わるため、高頻度での観測が必要である。主に光学センサが使われているが、雲の多い地域では SAR の活用が有効であるように（熱帯域の水田など）、対象地域の特徴に応じて適したセンサが使われる。JAXA は、特に雲量の多い熱帯域を対象として ALOS-2/PALSAR-2 を活用した水田マッピング（INAHOR）を実装・展開している。

圃場ポリゴンは農協、農業共済など地域の圃場を対象とした業務で活用されることが多い。圃場の集約化などで圃場区画は変化してくため、定期的な更新が必要である。農水省が空中写真や衛星画像を用いて整備している。とりわけ農水省は、農地情報の一元的な収集・管理方法やその効果的な活用のために「農地情報のデジタル地図化」を推進しており（農林水産省、2021）、圃場ポリゴンの更新や、各種申請に関わる現地の農地状況の確認、災害時の農地被害の把握などへの衛星データの活用を検討している（農水省、2020年）。衛星搭載の光学センサによる多方向観測やレーダによって作成されるデジタル標高モデル（DEM）も、耕作地の把握や耕作適地評価のために補助的に活用されるため基盤地図として重要である。

#### (2) 生育監視/収量予測

作物生育は、食料という観点だけでなく、地球システムにおける水循環やエネルギー循環、物質循環（炭素・窒素等）循環などの観点でも重要である。

作物の生育監視に使われる衛星データは、主に農業気象データ（降水量、日射量、土壌水分量、地表面温度など）と、生育状況に関するデータ（植生指標、葉面積指数、バイオマス、水ストレスなど）に分けられる。これらは互いに組み合わせられて活用されることで大きな効果を生む。たとえば作物モデルや生態系モデルなどの数値モデルへ入力（データ同化）され、収量推定/予測、障害や病害虫の発生リスク評価に活用される。

農業気象は数時間から毎日の高頻度観測が欠損なく継続されることが必要である。というのも、農業気象は刻々と変化するものであり、なおかつ作物生育は農業気象の現在値だけでなく、むしろ過去（少なくとも生育開始時）からの積算に大きく影響を受けるからである。また、洪水や干ばつなどの極端現象は作物の生育や収量に大きな影響を与えるため、これらの現象を面的に把握するために広域かつ高解像度の観測も重要である。JAXA は農業気象アジアの水稲の作柄見通しのために農業気象情報をアジア各国の農業統計官向けに一般公開しており、作柄情報の作成に活用されている。

(<http://suzaku.eorc.jaxa.jp/JASMIN/index.html>)。日射量(MODIS、GCOM-C、ひまわり)、降水量(GSMaP)や土壌水分量(GCOM-W)が主に用いられており、今後はGCOM-CやGCOM-WによるLSTにも期待が大きい。

生育状況も(農業気象ほどではないものの)刻々と変わるため、それなりに高い観測頻度(項目によるが概ね毎日~毎週)が要求される。一方、生育状況は農地単位で変わるので、高い空間分解能が必要なことが多いが、その場合は頻度が犠牲になる。植物生育状況に関して近年開発が進んでいる新たな観測物理量としては、マイクロ波放射計による植生光学的厚さ(Vegetation Optical Depth; VOD)や精密分光放射計による太陽光励起クロロフィル蛍光(Solar Induced chlorophyll Fluorescence; SIF)がある。これらは現状では空間分解能が低いために活用は限定的だが、前者は高頻度で(雲被覆にかかわらず)観測可能なこと、後者は植物生理状態(光合成回路の活性)が観測可能なことから、将来的に重要になる可能性がある。

### (3) スマート農業(精密農業)

スマート農業分野では既に多くの民間サービスがリモートセンシングデータ(衛星に限らない)を活用している。エンドユーザー(農家や農業生産法人)は、最大収量、最高品質の作物を効率的に生産、収穫するために必要な情報を必要としており、データそのものでなく、そのような情報を提供するためのソリューションビジネス化が進展している。

具体的には、葉色診断(クロロフィル量、タンパク量、水分量)や生育診断(植生指標、葉面積指数)のデータが実際の農作業(播種、施肥、収穫、水管理など)やその最適化に活用されている。品質評価(コメ、コムギ、茶など)にも活用されて、農産物に付加価値を与えている。主に可視から近赤外の分光反射データが利用されており、レッドエッジの波長帯の有効性も実証されている。ハイパースペクトルデータの活用も進んでいる。

スマート農業に活用されるデータは、多くの用途で数m以下(場合によっては0.1mや0.01m程度)の空間分解能が望まれる。適時観測のための即応性や高頻度観測も必要とされる。費用対効果など社会経済面での評価も必要であり、最も要件の厳しい応用分野である(井上、2011; 2019)。このような要件を満たすのは、現在はドローンが最も近い。実際、ドローン技術の急速な発展と普及(価格低下)も相まって、スマート農業ではドローンの活用が大きく進んでいる。従ってスマート農業へ衛星観測を活用するには、ドローンとの役割分担・棲み分けを熟考し、衛星が得意としドローンが苦手とする、広域的・長期的・周期的な観測(降水量、日射量など)に活路を見出すべきだろう。

### (4) 持続可能な農業

農業は土地被覆改変(森林伐採)、水資源減少、土壌汚染、水質汚染、大気汚染といった環境負荷を生じる。その結果、地球環境の持続性(気候変動や生物多様性)に悪影響を与えている。ところがこれらは農業生産者自身への直接的な損失にはなりにくく(負の外部性)、故に彼らが主体的に対策するインセンティブは働きにくい。しかし、これを放置すると農業自体の持続性もやがて危機に陥る。実際、気温上昇を1.5℃や2℃に留めるというパリ協定目標は、他の分野の温室効果ガス排出を全部止めたとしても、食料生産で排出される分だけで既に困難であるという報告もある(Clark et al.,

2020)。従って、JAXAのような公的な研究機関が農業生産活動の環境影響に関する測定・報告・検証 (Measurement、Reporting and Verification; MRV) に貢献することが必要である。

例えば、農地における温室効果気体の排出は、農地の分布や作付けによって大きく変わるため、モデルによる予測が難しい。そこで、陸域観測衛星で農地・作付けを把握し、大気観測衛星で大気計測を行うことで、農地（水田等）からの温室効果気体（CO<sub>2</sub>やメタン）の排出量のMRVが可能になる。これに気象データを加えてモデルと融合利用することにより、予測や評価も可能になる。農業由来の土地被覆変化の影響も未知な面が大きい。たとえば森林の伐採によって農地を拡大すると地域の降水量が減少し、農業生産はむしろ落ちる可能性が指摘されている(Leite-Fiho et al., 2021)。農地の拡大によって気温上昇が抑制されるという報告 (Liu et al., 2021) がある一方、灌漑農地の増加によって湿度が上がり地域が暑熱化したという報告 (Mishra et al., 2020) もある。バイオマス作物の作付拡大によって、水不足が深刻化するという報告もある(Stenzel et al., 2021)。これらの影響評価は必ずしも（スマート農業のような）高解像度は必要とせず、むしろ広域をカバーする高頻度観測が重要であり、大気・気象・水循環などの多岐に亘る環境データとの組み合わせも重要であるため、衛星観測に適していると考えられる。

また、効率的に食料生産を行うために、どのような場所が農地に適しているかの適地適作評価に衛星観測による気象情報や地形データの活用も検討されてきた。農作物の生育状況を観測することにより、過剰な施肥や水資源利用の削減に貢献することが期待できる。

一方、農業は環境に良い影響も有する。それが「農業・農村の多面的機能」であり、「国土の保全、水源の涵養（かんよう）、自然環境の保全、良好な景観の形成、文化の伝承等、農村で農業生産活動が行われることにより生ずる、食料その他の農産物の供給の機能以外の多面にわたる機能」とされている（農水省; [https://www.maff.go.jp/j/nousin/noukan/nougyo\\_kinou/](https://www.maff.go.jp/j/nousin/noukan/nougyo_kinou/)）。伝統的な農業は各地域の気候・生態系と調和する文化の中心であり、農業による生物資源利活用が一種の「捕食者」として働くことで、地域の生物多様性や景観が形成・維持されてきた面がある（生物文化多様性、あるいは、いわゆる里山）。このような農業の多面的機能や生物文化多様性の評価において、地球観測データによる土地被覆や生態系の情報は重要な働きをする。たとえば、農地は周辺に草原を有することで訪花昆虫が増えること(Nagano et al., 2021)や、農地は小規模な方が単収は多くて生物多様性も豊富であること(Ricciardi et al., 2021)などが報告されており、農地とその周辺の土地被覆の情報（過去のアーカイブも含めて）は重要である。JAXAでは震災・原発事故の影響によって、東北被災地の水田が大きく耕作放棄され草原化した様子を継続的に監視・報告しているが、そのような情報が農業と環境の長期的な評価に重要である。

### 3.1.3. 農業分野での社会実装に向けて

農業分野ではユーザも用途も多岐にわたるため、多様な情報が必要であり、実際、光学センサ、マイクロ波放射計、レーダなど様々な衛星センサのデータが農業分野で活用されてきた。スマート農業に関する民間ソリューションビジネスや、政府の食料安全保障に関する情報収集など、既に社会実装が進んでいる事例もある。さしあたって、圃場ポリゴンの整備・更新まで含んだ基盤地図の整備が進み、いつでもどこでもどれくらい作物が作付けされ、収穫できそうかという情報がタイムリーに得られるようになると、農業統計その

ものや食料安全保障を含めた農業政策への活用が進み、国際的にも食料価格の乱高下を軽減するといった SDGs の目標にも貢献できるだろう。そのためには、作付け作物や時期の把握、生育状況の監視、農業気象の観測や予測、収量推定・予測モデルとの融合利用において、それぞれのプロダクトの一層の高度化（時空間解像度の高度化・高精度化）が必要であり、モデルとの融合利用も進める必要がある。例えば、地球規模の作物収量予測では、全球の作物ごとの作付分布図がないことが課題となっており、その整備に関する研究が求められている。また、気候変動は作物収量を減らす効果と増やす効果があり、その影響は地域によって異なるため、地域ごとの作付け・生育・収量の変化を測定・報告・検証（MRV）するための研究開発も必要である。

衛星データの農業利用は衛星コミュニティ以外にも拡大しつつある。さらに利用を拡大するためには、ユーザの利便性向上のため、各種モデルやシステムでのデータ利用のために、API を経由したデータ検索および提供機能や、雲フラグなどの品質情報の信頼度向上、観測からデータ配布までの時間短縮などについての環境整備も必要である。

また、これまでは政府衛星が主であったが、民間企業（特にスタートアップ企業）による小型衛星のコンステレーションが活発化し、そこから得られる高空間分解能・高頻度データを用いたビジネスモデルが多く出てきており、農業分野も主たるターゲットとなっている。今後の政府衛星のプロジェクトは、このような動きと相補的に活躍できるようなデザインが必要である。すなわち、これらの小型衛星では実現しにくい長期・高頻度・広域観測や高い幾何精度・放射精度を活かすこと、具体的には農業気象データ、正確なベースマップ（ポリゴン情報なども含む）の整備、校正基準の提供などである。

その点では、静止軌道からの超高頻度観測は政府衛星に大きく期待される分野であろう。センサやアンテナを大型化して、可視・近赤外で数 10m、マイクロ波放射でも数 km の空間解像度を実現することで、農業気象や作物暦、農業被害などの観測が大きく発展するだろう。また、GCOM-C/SGLI や ASTER/TIR の経験を活かして、数 m ~ 数 10m の空間解像度の地表面温度(LST)が高頻度で得られれば、乾燥ストレスなど作物の生育状況を把握する上で有用だろう。

冒頭で述べた通り、変動する地球環境下において、「食料安全保障」と「持続可能な農業」の両立は重要な地球規模課題である。これまでは作物生産量把握や生産性向上にデータを活用する「食料安全保障」に対する取り組みが大部分を占めてきたが、SDGs やみどりの食料システムで目標設定されたように、環境負荷の軽減や生物多様性に配慮した「持続可能な農業」が求められている。この「持続」は地球環境の持続と農業の持続の両方を意味する。もとより地球環境が持続しなければ農業は持続しない。その観点で、農業以外の分野との関係・連携についても総合的に検討する必要がある。

## 3.2. 公衆衛生

### 3.2.1. 公衆衛生分野の課題と地球観測衛星の利用

#### (1) 環境と健康

環境とは「生物や人間の個体（主体）を取り巻く全てのもの」であり、物理的・科学的・生物的環境、心理・社会文化的環境など様々な要因があり、環境の把握は健康へのリスク評価において重要である（鈴木ら、2016）。人間の健康を守るためには、周辺環境を考慮する必要があり、One Health（人の健康を守るためには動物や環境も考慮、地球上には人間以外の多くの物がさまざまな環境の中で生きており、ヒト-動物-環境の相互作用を考慮する必要）や Planetary Health（人間の健康と文明社会は、自然システムが繁栄し、それを賢く管理することによって可能になる）のような概念が近年重要性を増してきている。

人を取り巻く環境が人間に与える影響は甚大であり、WHOによると、世界の死亡要因の上位10要因のうち3要因、低所得国では上位6要因が感染症となっている（WHO、2020）。また、約3百万人が大気汚染に起因した疾病で死亡しており（WHO、2016）、5歳以下の子供の約170万人が大気汚染、安全な水、衛生状態など環境リスクに関連した疾病で死亡している（WHO、2017）。このように人間を取り巻く様々な環境要因が人間の健康に影響を及ぼしているが、それと同時に人間活動によって環境を改変しており、改変の結果の一つが気候変動である。

気候変動に伴う温暖化や降水量の変化、極端気象の増加などによる健康影響が予測されており、すでに顕在化している。例えば、気温上昇による直接的な健康影響として、強力な熱波や火災による負傷、疾病及び死亡リスク増大が挙げられる。間接的な影響としては、食物・水媒介感染症や動物媒介感染症のリスク増大、高緯度/高標高地域への感染症拡大や、作物の収量減による低栄養リスクの増大などが懸念されており、その影響は地域によって異なる（IPCC、2014）。日本では、2018年に気候変動適応計画が閣議決定されており、「健康」分野には、気温上昇による超過死亡や熱中症に対する気象情報の提供や注意喚起、予防・対処法の普及啓発、熱中症発生状況等に係る情報提供や、デング熱などの感染症に対して、気温上昇と感染症の発生リスクに関する科学的知見の集積の必要性が述べられている。

持続可能な開発の観点から、SDGs（持続可能な開発目標）においても、Goal 3（すべての人に健康と福祉を）が健康に関する目標となっており、特に公衆衛生に関連するターゲットとして、「3.3 2030年までに、エイズ、結核、マラリア及び顧みられない熱帯病といった伝染病を根絶するとともに肝炎、水系感染症及びその他の感染症に対処する」、「3.9 2030年までに、有害化学物質、並びに大気、水質及び土壌の汚染による死亡及び疾病の件数を大幅に減少させる」などが設定されている。

#### (2) 地球観測衛星データの利用

健康を考える上で環境の把握は重要であり、地上観測機器や踏査によって情報が収集されてきたが、地上観測で収集できる環境情報は限られてきた。一方、地球観測衛星は広域を面的に観測しており、特に物理的な環境要因の把握において有用なツールである。広域の物理的な環境情報（大気環境、気象、土地被覆に関わる情報など）を定期的に取得することができる。さらに、夜間光、ヒートアイランドなど人間活動の結果としての環境変化も把握することができる。近年は、地上センサが増大し、連続的



かつ詳細な観測データを得ることができるようになりつつあるが、地球観測衛星データはすでに過去 30 年分以上のデータが全球規模で空間データ（格子データ）として蓄積されている。したがって、地上計測による環境情報が不足している開発途上国や、過去の大量の環境情報が必要なリスク評価、面的なリスク評価を行う際に地球観測衛星データは唯一の情報となり、極めて有用と言える。

地球観測衛星データの公衆衛生分野における環境疫学研究への活用は、暑熱や大気汚染など直接的な曝露量の評価への利用と、感染症を媒介する生物やウイルスなどの生息適地評価をするための間接的な利用に分けられる。それぞれにおいて、疾病や媒介生物と衛星による環境情報との関係を特定し、この知見を基礎とした時空間的な疾病リスクのモデル開発およびリスクの推定/予測が行われている。

地球観測衛星の運用が開始された 1970 年代より、その観測データは環境疫学分野でも限定的にはあるが活用されてきた（Beck et al., 2000）。活用された環境情報別では、土地被覆や土地利用の把握に活用した事例が多く、広域の地表面の情報が有用であることが示唆されている

（Herbreteau et al. 2005）。また、疾病別では、約 70%が感染症、17%が大気汚染を対象としていることが報告されている（Dietrich et al., 2018）。衛星観測から得られる環境情報と環境疫学分野での主な利用例を表 1 に示す。気象、土地被覆、人間活動、大気汚染で大きく分類し、それらと関連する疾病の対応をまとめてある。地球観測衛星から得られる多種多様な情報が活用されている。実際の活用事例については次節で詳述する。

表 1 衛星観測による環境情報と公衆衛生分野での主な利用

大項目	衛星観測による環境情報	公衆衛生分野での主な利用
気象	地表面温度	熱中症/熱関連死、媒介生物生息適地評価
	日射量	熱中症/熱関連死、媒介生物生息適地評価
	水蒸気量	熱中症/熱関連死、媒介生物生息適地評価
	降水量	媒介生物生息適地評価
	土壌水分量	媒介生物生息適地評価
	海面温度	特定疾病（コレラなど）の流行解析
土地被覆	土地被覆分類図	媒介生物生息適地評価、細菌/汚染物質などの流出解析
	植生指標(NDVIなど)	熱中症/熱関連死、媒介生物生息適地評価、細菌/汚染物質などの流出解析
	地形	媒介生物生息適地評価、細菌/汚染物質などの流出解析
人間活動	土地被覆変化（森林伐採など）	熱中症/熱関連死、媒介生物生息適地評価
	夜間光	光害
	ヒートアイランド（LST）	熱中症/熱関連死
大気汚染	エアロゾル光学的厚さ(AOD)	呼吸器系疾患
	森林火災（hotspot）	呼吸器系疾患
その他	海面高度	特定疾病（コレラなど）の流行解析
	クロロフィルa濃度	特定疾病（コレラなど）の流行解析、水質汚染

### 3.2.2. 公衆衛生分野での利用事例

本項では地球観測衛星データを活用した公衆衛生分野での利用状況について、1) 感染症、2) 非感染症（大気汚染による呼吸器系疾患など）、3) 非感染症（熱中症/熱関連死、その他環境要因と疾病）に分けて述べる。

## (1) 感染症

感染症に関する事例は最も多く、感染症を媒介する生物（蚊、ハエ、ダニなど）の生息適地評価と、マalaria、コレラ、フィリア、日本脳炎、デング熱などの疾病との分析が行われている。降水量、気温、土壌水分量、植生指標（NDVI）、土地被覆、人間活動（夜間光、土地利用変化）などの衛星観測による環境情報が媒介生物の生息適地評価（媒介生物の生息域、個体数、密度などの生態系モデリング）に活用されている。その中でも最も事例が多い疾病はマalariaであり、マalariaの発生や発生リスクの空間的分布を推定するために、土地被覆情報（耕作地、森林、牧草地、道路、湿地など）や気象情報が活用されている。初期は AVHRR や Landsat による土地被覆情報などが多く活用されてきたが、IKONOS 以降は高空間分解能の衛星データによる詳細な土地被覆情報なども活用されてきている。さらに近年では、降水量や LST、土壌水分などの気象関連の衛星データも適地評価に活用されており、様々な地域を対象として、モデリングおよびリスク評価が実施されている。日本においては、気温上昇による媒介生物を介した感染症の拡大が懸念されており、将来に備えた知見の収集という意味でも推進する必要があるであろう。

また、気候変動の監視指標を含んだ環境情報と感染流行に関する事例もあり、例えば、コレラ流行と海面温度（エルニーニョ南方振動: ENSO やインド洋ダイポール現象: IOD などの指標も含む）、海面高度（SSH: Sea Surface Height）、クロロフィル濃度などとの関係の解析も行われている。COVID-19 などの新興感染症などについても、流行が環境条件と関連している可能性がある場合、環境曝露との関連性を検討する際に衛星データによる環境情報の活用が期待される。

## (2) 非感染症（大気汚染による呼吸器系疾患など）

大気汚染は心血管、上気道に関連する疾病、肺がんによる死亡率、急性呼吸器感染症による小児死亡率のリスク要因とされている。特に、PM2.5（微小粒子状物質、Particulate Matter）は、気管（気管支）がん、肺がん、心肺疾患、呼吸器感染症を引き起こす。衛星観測から PM2.5 自体は直接観測できないものの、衛星観測によるエアロゾルの光学的厚さ（Aerosol Optical Depth: AOD）と、地上計測による PM2.5、地上観測装置、土地被覆情報、気象データなどを活用し、PM2.5 推定の回帰モデルを構築することにより、AOD から広域の PM2.5 を推定し、健康影響との関連を検討した研究が数多く行われている。呼吸器系疾患への影響や、妊婦・新生児への健康影響（出生児の低体重、妊娠期間の短期化）の解析などが実施されている。また、PM2.5 の主要な発生源として、衛星観測による林野火災（耕作地での残滓の燃焼も含む）のホットスポット情報と疾病の関係を調査した事例もある。また、近年は ICT、IoT 技術の進展によって簡易かつ安価な地上観測装置が容易に入手・設置できるようになっており、これらで計測された地上観測データと衛星観測の AOD を組合せた事例もある（例えば、Gupta et al. 2018）。

しかしながら、衛星で計測できる AOD は地面から大気上端までの気柱全体のエアロゾルであるため、地表付近の状態を知るためにはエアロゾルの高度分布の情報が重要であり、また、エアロゾルの組成（硫酸塩、硝酸塩、有機エアロゾル、黒色炭素、土壌粒子、海塩粒子など）によって健康への影響が異なるとされており、これらの組成をモデルなども活用して推定して情報提供されることが期待される。さらに、通常疾病情報は日単位で収集されているため、雲被覆を考慮した上で、実際にどれくらいの頻度で

AOD が利用できるかという点も重要である。

### (3) 非感染症（熱中症/熱関連疾病、その他環境要因と疾病）

気温上昇による直接的な影響として熱中症/熱関連死がある。再解析データ（気候データセット）から作成した Heat Index などを用いた疫学研究も近年広く実施されている（例えば、Urban、2021）。再解析データは様々な気象変数が利用可能であるもの、空間解像度が数 10km 程度であるため、衛星観測データを用いた解析は、緑地などの土地被覆との関係も含めて、より空間的に詳細な暑熱環境の分析が行えるところに特徴がある。LST、日射量、水蒸気量データなどを活用して熱ストレスの曝露量と健康影響との因果関係が解析されている。例えば、2003 年 8 月にヨーロッパで発生した熱波に対して、NOAA AVHRR の LST を活用し、65 歳以上の高齢者に対して地表面温度と死亡率の関係が解析されている（Laaidi et al., 2011）。この熱波に対して、米国の Landsat-5 のデータから作成した地表面温度、植生指標と死亡率との関係を分析した結果、住居外の高い温度（地表面温度）は死亡リスクを上げる要因となる一方、植生指標が高く植生が多いほどリスクを下げる要因となったことも報告されている（Vandentorren et al. 2006）。また、長期（10 年分以上）の LST データを活用した高齢者のリスク評価など多くの事例がある。その他の暑熱曝露に対する健康影響への利用事例として、下痢症や小児の肺炎と LST の関係解析も実施され、極端な低温/高温は健康に影響することが指摘されている。これらにおいて面的かつ 10 年分以上の LST データは唯一かつ重要な環境情報となっている。ただし、街区スケール（数 m-数 10m）での解析が可能な分解能を有する高頻度の熱赤外データは無く、雲被覆による実質的な観測頻度低下も課題である。

さらに今後、温暖化によって暑熱曝露は増大すると予測されており、都市部においてはヒートアイランド現象の影響も複合的に受けるため、面的な LST をこれらの影響評価に活用していくことは重要性がより増すであろう。加えて、地球観測衛星データ活用により、将来の気候変動の予測が高精度化されれば、暑熱による将来のリスクについてもより確度の高い評価に貢献できる。

その他の環境要因の把握や疾病との関係性の解析として、都市緑地と出生時の健康状態、干ばつ状況と呼吸器系疾患、夜間光データを活用した光害（夜間光データ）、花粉症のリスク評価目的として土地被覆（反射率と NDVI）を活用した花粉量推定などの事例がある。衛星データ（降水量、土地被覆、地形など）と水文モデルを利用した環境汚染物質把握の事例として、銅山由来の重金属（Cu Pb）の空間分布推定、耕作地由来の農薬使用による地下水への硝酸性窒素、殺虫剤成分の流出解析と空間分布の評価がある。これらの解析には GIS も活用されており、空間的な評価ができることが特徴である。

#### 3.2.3. 今後のさらなる活用に向けて

地球観測データの公衆衛生分野への利用については、すでに多くの研究事例が蓄積されつつあるが、社会実装（現場でのリスク評価や実際の対策などでの利用）に向けては、さらなる研究の蓄積が必要であり、実際に情報を活用するための社会実装プロトタイプの実例創出の研究開発を進めていく必要がある。そのためには様々なステイクホルダー（研究者、行政、病院、国際機関など）との協働が必須となる。また、地球観測コミュニティと公衆衛生分野、さらには関連する学問分野との分野間連携が重要であ

る。そのためには、地球観測コミュニティ外でも地球観測データが使いやすいように、データ解析プラットフォームや API (Application Programming Interface) などの整備も含めた、ユーザに親和的なデータ利用環境を構築することも重要な課題である。また疫学データは日単位で記録されていることが多いため、このような情報と対応付けた解析をするには、時空間的に欠損のないデータを整備することも課題である。しかしながら、衛星観測のみでは解決できない課題であるため、モデルとの融合利用や空間統計学的手法の活用が有効であろう。さらに、AOD や LST は環境を把握するうえで有用な物理量ではあるものの、疫学研究では通常 PM2.5 濃度や気温が用いられるため、疫学研究で用いられる指標と衛星観測データが相互利用できるようにするための研究開発も必要である。

現在は、ウェアラブル端末などでも生体情報が取得/記録されており、IoT 機器でも気象や大気などの環境情報が取得されている。これらは詳細な位置情報も併せて取得され、膨大な情報が蓄積されてきている。これらの情報と膨大な衛星データを融合し、さらにはデータサイエンスも活用して、人間の健康を支援する情報を提供できるような社会の実現に向けた取組みも重要である。例えば、個人の時事刻々と変化する位置情報と衛星データによる面的な環境情報を利用することで、様々な曝露量をより詳細に推定できれば、都市部での暑熱曝露の研究（熱中症とヒートアイランド、緑地によるリスク緩和効果等）などでも有効であろう。より個人にカスタマイズした情報提供のためには、空間的に詳細な環境情報が必要となり、例えば幹線道路沿いの大気汚染の把握や、より詳細な地物の情報（3次元のランドスケープ、インフラ施設の場所など）などが必要となるかもしれない。これらのデータを活用した「曝露量-健康影響」のモデリングにおいては AI 技術の利用も有効であろう。さらに、長期の疫学データを用いてモデリングをする際には過去データが必要であり、過去の衛星データの高品質化（高空間分解化など）に AI を用いた研究なども実施されており、重要な研究課題である。

公衆衛生分野では多様な環境情報が疾病との関係把握やリスク評価に用いられており（表 1）、前章までに述べられてきた気象、災害、水資源、海洋、森林、大気監視における観測データを総合的に活用することができる。公衆衛生分野に限らないが、地球観測衛星データ利用を取り巻く状況が近年劇的に変化してきている。官民間問わず運用中の地球観測衛星の増大によって、毎日大量の衛星データがより高精度（時間/空間/波長分解能）で取得されるようになってきており、衛星観測による環境情報が爆発的に増加している。データのオープン&フリー化や、インターネットを通じたデータ提供が一般化しており、データへのアクセス性も大きく向上している。民間企業による小型衛星のコンステレーション観測は高空間分解能と高頻度観測を実現しており、データアーカイブは近年に限られるものの、詳細な土地被覆とその変化を把握することが可能であるため、このような観測データとの相補的な利用も検討する必要がある。また、気候変動や社会経済の将来予測を用いて感染症や暑熱曝露による健康被害や労働生産性低下などの健康影響評価も実施されている。（例えば、González et al., 2021、Zhao et al., 2021）前節までの議論のように、地球観測衛星データ活用して気象・気候予測を高精度化することができれば、暑熱などの曝露量をより正確に把握することができ、将来の気候変動に伴う健康リスク評価の精度向上にも貢献することが期待される。

### 3.3. エネルギーの安定的な確保

はじめに、エネルギー分野において最近の大きなトピックスの一つとして、2020年10月26日第203回臨時国会の所信表明演説において、菅義偉内閣総理大臣から「2050年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことが宣言された。これはもちろん、地球温暖化への対策を図るために、二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの排出量から、森林などによる吸収量の差を実質ゼロにすることを意味する。現在、年間12億トンを超える温室効果ガスを排出している日本において、大変チャレンジングな目標と言える。

カーボンニュートラル・脱炭素社会の2050年までの実現に向けては、2030年までの取組みが重要と言われている。このために以下のような取組みが進められており、それぞれ衛星地球観測が貢献できると考えられる。

#### 3.3.1. 再生可能エネルギー(風力、水力、太陽光、地熱、バイオマス、波力等)の利用拡大推進

再生可能エネルギーは各法律によって複数定義されているが、例えば「エネルギー供給事業者による非化石エネルギー源の利用及び化石エネルギー原料の有効な利用の促進に関する法律」(エネルギー供給構造高度化法)では、「太陽光、風力、その他非化石エネルギー源のうち、エネルギー源として永続的に利用することができると認められるものとして政令で定めるもの」とされており、太陽光、風力、水力、地熱、太陽熱、大気中の熱その他の自然界に存在する熱、バイオマスが挙げられている。

再生可能エネルギーはエネルギーの自給率を高めるほか、IPCC第4次評価報告書、スターン報告などでも地球温暖化への対策の一環として挙げられ、その効果は数ある緩和手段の中でも最も大きい部類に入るとされている。また近年は、関連産業そのものが急速に拡大しており、環境対策と同時に景気の刺激を狙った政策を打ち出す国も見られる。このため今後の市場拡大やコスト低減を見越して、世界各地で導入の動きが活発であることも事実である。

一方、導入や運用に当たっては下記のような短所や課題も指摘されている。

- エネルギー資源が偏在し適地も偏在するため事前の調査が必要。
- 既に利用されている用途との競合による価格高騰や紛争の発生。
  - バイオエタノールへの転用による穀物や果実の高騰。
  - 地熱発電に温泉の熱を利用することによる観光業との競合。
  - 潮力発電・波力発電・海流発電と漁業権の競合。
- 生産規模が小さいことによる環境負荷の増大や価格競争力の弱さ。
- 環境基準による設置制限
  - 国立公園内における開発の制限(地熱発電、水力発電)
- 販売方法や情報開示による販売不振、正しい知識もしくは間違った知識の浸透による販売不振など。
- 時間帯や季節、天候による出力変動や資源分布地域の偏在によるエネルギー需給ギャップ(風力発電の出力変動、太陽光発電の出力変動などの例がある)。
- エネルギー密度が低いことによる物理的な制限。ただし、地熱発電や太陽熱発電などはエネルギーの集中が可能。

- 風力発電所のバードストライク問題

これらの課題に対して、地球観測衛星の貢献として以下が想定される。

- 適地の選定や事前調査・安定供給のための予測

いずれの再生可能エネルギーについても、自然の力を利用するために適地の選定が必要となる。このためには、地形や土地利用・土地被覆状況の把握と人間の住環境を含む周辺環境への影響評価が必要であり、条件によっては既往の利用用途との競合調査も可能と考えられる。これらの評価には、ALOS シリーズのような 3 次元計測可能な高分解能系光学衛星(地形)、ハイパースペクトルセンサ(樹種分類、土壌評価、土地被覆や環境評価)、熱赤外センサ(地熱)や SAR(沿岸海上風や海流等)が貢献できる。

また、事前調査の一環として電力供給見込みの推定のシミュレーションが重要となるが、このためには上記の周辺環境情報に加え、気象状況等の広域・長期観測データが必要となる。静止気象衛星ひまわりに加えて、環境系衛星として GCOM シリーズ(可視・赤外放射計、マイクロ波放射計)から得られる地表面日射量や雲量変動(太陽光)、地表面温度(地熱)、また降雨レーダやマイクロ波放射計による雨分布(水力)、陸上および沿岸域における風速・風向(風力)などの時間的・季節的変動の把握が重要となる。

合わせて、発電施設や関連設備(送電線等)、運用後の保守性、耐災害性(地すべり、水害、台風、津波、竜巻、地震、火山活動等からの安全性評価)なども考慮する必要があり、やはり周辺環境の詳細調査として高分解能衛星による地理空間情報の整備・更新が有効と考えられる。

- 稼働状況や環境モニタリング

設備稼働後は、稼働状況の把握や周辺環境への影響評価・モニタリングが必要となる。このためには前述のような周辺環境情報の定期的な観測・更新、気象状況の継続的なモニタリングが重要となる。

折しも報道によれば、経済産業省は環境省と連携し、地熱発電所を増やすため国立公園内などに適地を見つける調査を本格化する。予算は現地調査のためだが、適地・候補地の調査や周辺の環境モニタリングなど、上記のような目的や利用用途に沿って衛星データも活用することが可能である。

### 3.3.2. 二酸化炭素回収・貯留技術(CCS)・二酸化炭素回収・利用・貯留技術(CCUS)

カーボンニュートラルに向けた取組みの一つとして、「二酸化炭素回収・貯留技術」(Carbon dioxide Capture and Storage、CCS)や、「二酸化炭素回収・利用・貯留技術」(Carbon dioxide Capture、Utilization and Storage、CCUS)の検討が進められている。CCUSとは、工場や発電所等から排出される二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を大気放出する前に回収し、地下 800m 以深の貯留層へ貯留したり、再度利用したりする技術であり、それぞれの事業条件に適したプロセス検討、貯留適地調査、モニタリングが課題となっている。

CCS は、セメント工場やバイオマス発電所などの大規模な汚染点源から発生する CO<sub>2</sub> を回収し、貯留場所に輸送し、大気の影響のない場所、通常は地下の地層に堆積させるプロセスである。目的は、重工業により大気中に大量の CO<sub>2</sub> が放出されるのを防ぐことであり、地球温暖化や海洋酸性化への影響を緩和するための潜在的な手段と言われている。CO<sub>2</sub> は数十年前から石油の回収強化など様々な

目的で地層に注入されてきたが、CO<sub>2</sub>の長期貯留は比較的新しい概念である。最新の従来型発電所に CCS を適用した場合、CCS なしの場合と比較して、大気中への CO<sub>2</sub> 排出量を約 80～90%削減することができるが、システムコストは生産されるエネルギーのワット時当たり 21～91%増加させると推定されている。2019 年時点において、世界では 17 の CCS プロジェクトが稼働し、年間 31.5 百万トンの CO<sub>2</sub> を回収している(うち、3.7 百万トンは地質学的に貯蔵)。バイオマスと組み合わせれば、CCS は正味のマイナス排出量になる可能性がある。CO<sub>2</sub> の貯蔵は、深い地層において鉱物炭酸塩の形で行われることが想定されている。米国国立エネルギー技術研究所 (NETL) は、北米には現在の生産率で 900 年分以上の二酸化炭素を貯蔵するのに十分な地質層の容量があると報告している。海洋深層貯留は、海洋を酸性化させる可能性があるため利用されていない。

このように、CCS・CCUS は CO<sub>2</sub> 削減において有望と考えられる一方、まだ研究段階の技術と言える。事業条件に適したプロセス検討、貯留適地調査、モニタリングが課題であり、特に地下貯留の安全性に関する長期的な予測が非常に困難で不確実であり、一部の CO<sub>2</sub> が大気中に漏れ出す危険性が指摘されている。しかしながら、この実現に向けて例えば適地調査には地形情報やリニアメント抽出による地層判読、周辺環境のアセスメント、また稼働後には InSAR による地盤変動、温室効果ガス観測センサによる CO<sub>2</sub> の漏れ検知、などのモニタリングが求められる。

### 3.4. 鉱物資源の安定的な確保

2020年12月に公開された自由民主党の新国際秩序の下での資源・エネルギー戦略に向けた提言では、「第6次エネルギー基本計画（素案）」にも記載された資源の安定供給の確保が重要となっている。エネルギー安全保障を含む我が国の総合的な安全保障や国民の安全・安心の観点からは、逼迫しているエネルギー資源の効率的探査および近年増大する地震、津波、台風等の自然災害や地球規模での環境問題等に対応するため、高頻度で継続的な地球観測の重要性が認識されている。

地球観測データの中でも、石油資源の遠隔探知能力の向上・地球環境保全に有効な植生分布・汚染状況の観測精度の向上等を可能とするミッションとして、JERS-1に搭載された光学センサ OPS や NASA EOS-TERRA に搭載されている ASTER のような可視近赤外・短波長赤外・熱赤外域をカバーする光学センサと、地形情報の抽出のための合成開口レーダ(SAR)の組み合わせというのが JERS-1、ALOS シリーズとして継続されている。特に鉱物の含まれる岩石に太陽光が当たると、特定の波長が吸収されて特徴的な分光波形を得ることができる。これを OPS や ASTER による複数の短波長赤外域（特に 2200nm 帯）で観測すれば、鉱物が存在する地域を見分けられることが分かった。特に ASTER における継続的な短波長赤外域による観測と地質学の知見を組み合わせることで、貫入鉱床などの地下に眠る鉱物の存在を宇宙からマッピングできることを実証した。

さらに、ASTER よりも高い波長分解能を有するハイパースペクトルセンサ(HS)へのニーズが高まっている。世界で最初の衛星搭載 HS は 2000 年、NASA が打上げた衛星 EO-1 に搭載されたハイペリオンである。ハイペリオンの空間分解能 30m、観測幅 7.5km、観測波長帯は 400~2500nm を 220 チャンネルで観測したが、あくまでも技術実証の位置付けであった。また、2011 年に中国が打ち上げた宇宙ステーション実験機「天宮 1 号」には HSI が搭載された。HSI のデータを使ってゾイサイト、マイカ、石英、ソーダライト、ドロマイト、アクチノライトといった金属・鉱物資源のマッピングを行うことに成功したという成果が公表されているが、データそのものを公開されておらず中国外での利用はできていない。国際宇宙ステーション(ISS)では、2009~2014 年に Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO)が NASA により運用された。日本においても、経済産業省による宇宙実証用ハイパースペクトルセンサ HISUI が 2019 年に上げられ、ISS に搭載され、石油や鉱物といった資源探索などへの活用が始まっている。HISUI は空間分解能 20~31m、観測幅 20km、観測波長帯は 400~2500nm で 185 チャンネルで観測することができる。ASTER では鉱床探査の道標となる鉱物 10 種類程度を見分けられたが、HISUI ではこれを 30 種類程度まで増やしている。HISUI はイタリアが 2019 年 3 月に上げた PRISMA に続き、世界で 4 番目の HS となった。今後、2020 年代半ばにかけて、ドイツが EnMAP、米国が EMIT の打ち上げを計画中であり、2026 年には欧州コペルニクス地球観測計画の一環として CHIME、NASA Decadal Survey でも SBG や HS が計画されている。

宇宙 HS に対する大きな期待の一つは新たな海底油田の発見である。海底のさらに地下に埋もれた石油を宇宙からどのように探し出すか、手がかりになるのがオイルスリックと呼ばれる海面に浮かぶ油膜である。海底の油田から自然ににじみ出た石油が海面に広がり、鏡のように太陽光を反射する。海水とは反射の仕方が異なり、油膜ができていない領域を HS 画像の中で判別することで潜在的な油田の存在を探ることができる。また、地上の油田の探査には地形情報が重要であり、SAR によるリニアメント抽出が有効であり、さらに油田掘削にともなう地殻変動のモニタリングには干渉 SAR 技術が有効である。



また近年では、各種資源探査に関わるロジスティクスに対する支援や開発後の環境モニタリングも大きな課題となっている。ロジスティクス支援においては地形・3次元情報が重要であり、稼働状況把握のため車両台数のモニタリングにもニーズがある。環境モニタリングにおいては、開発後の泥水や周辺環境の継続的な把握が重要である。

### 第3部 衛星観測が果たすべき役割とその技術的実現解

#### 1. はじめに

第二部において示された衛星地球観測の分野で日本が目指すべき成果(目標)の実現に際しては、個々の地球観測ミッションを有機的に連携させ、総合的なシステム(System of systems)として、我が国が取り組むべき重要事項への貢献を果たすことを目指し、衛星観測に係る戦略的・統合的なプログラム(戦略的衛星リモートセンシングプログラム(仮称))のもと、衛星観測に係る整備・運用・推進活動を進める構想を描いた。図3-1.1に戦略的衛星リモートセンシングプログラム(仮称)の概要を示す。

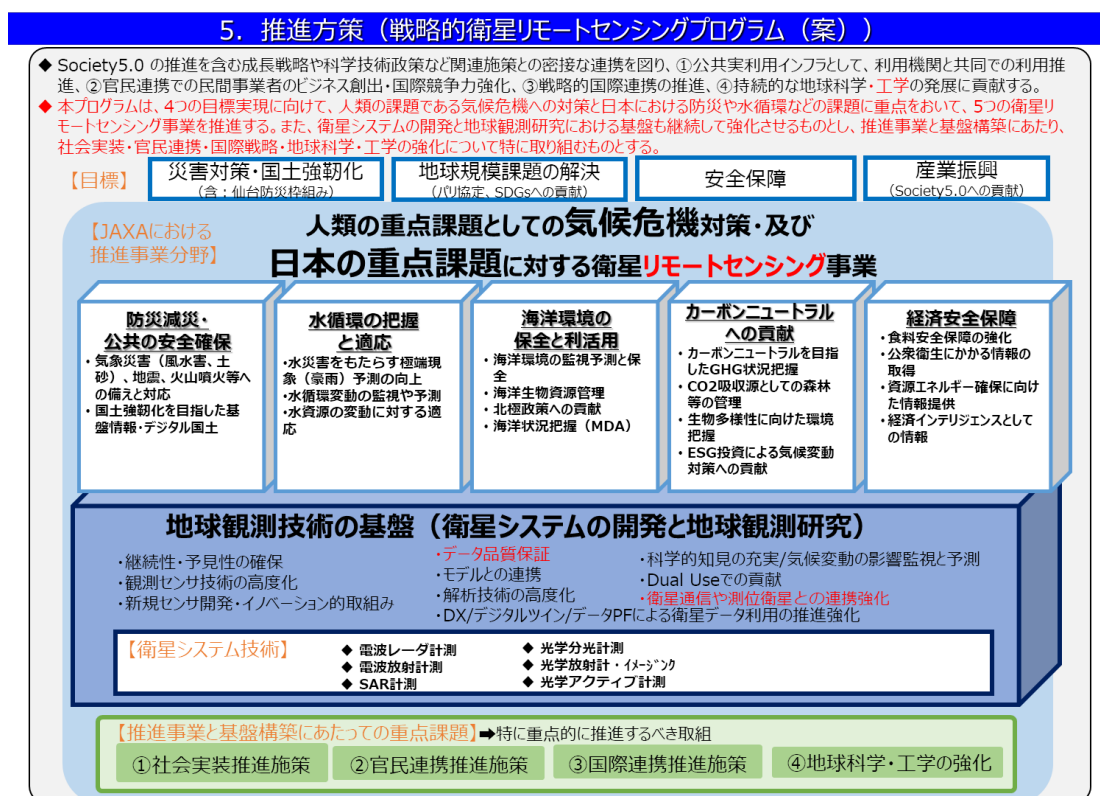


図3-1.1 戦略的衛星リモートセンシング(仮称)概要

戦略的衛星リモートセンシングプログラム(仮称)では、人類の重点課題としての気候危機対策、及び日本の重点課題に対する衛星リモートセンシング事業として、防災減災・公共の安全確保、水循環の把握と適応、海洋環境の保全と利活用、カーボンニュートラルへの貢献、経済安全保障の5分野を識別した。それを踏まえて、各分野における衛星観測で目指すべき方向性とその技術的実現解を検討した。技術的実現解の概要を次節に記す。なお、本実現解の検討にあたっては、第二部で示された主に科学的側面のシナリオをベースに、JAXAの衛星開発・運用、利用推進活動に基づいた実利用側面を加え、分野毎に日本の目指すべき成果(目標)とその達成に必要な物理量・観測情報とその要件を識別し、その実現に向けた将来的な技術的実現解の方向性を検討した。これらの詳細は関連文書(1)にまとめているので、参照されたい。なお、全ての観測情報・物理量は、単独の計測手段では十分に応えることがで

まず、様々な特性を有する衛星・センサデータを複合的に解析することで導出が可能となることを念頭に、複数計測手段での実現と、地上における統合的な解析技術・システムの必要性を検討した。また、プログラム化の目的である各種地球観測衛星データを有機的に連携させ、総合的なシステムとして最大限の効果を得るため、JAXA が開発・運用する衛星のみならず、国内の民間企業を含めた各種機関が整備・運用する衛星や海外衛星等も最大限に活用する前提で必要な観測情報・物理量の実現を目指すこととした。さらに、社会定着には衛星観測情報が“発展しながら継続”することが重要であり、限られた資源(人・資金)でそれを成し得るため、積極的な海外・民間との連携・活用を図りながら、観測情報・物理量の戦略的選択に伴う小型・低コスト化等を図って利用者への移管あるいは民間事業性の開拓を模索するなど、データ継続のための工夫を検討しつつ、資源を技術発展に振り向けることを目指した。

なお本実現解は今後、時勢の変化や海外動向、技術発展状況等も踏まえつつ、適時、持続的に見直しを図っていく。

## **2. 重点的推進事業 5 分野の実現解概要**

### **2.1 防災減災公共の安全確保**

#### **2.1.1 分野の方向性**

本分野では、「気象災害（風水害、土砂）、地震、火山噴火等への備えと対応」および「国土強靱化を目指した基盤情報・デジタル国土（の構築）」の2つを方向性の基本シナリオとし、短期的には各種災害における事前の防災活動や発災時の対応、復興時に資する基盤情報のさらなる精緻化を図り、さらに将来的には気候変動の将来予測を踏まえたハザードマップや、リアルタイムのハザードマップ更新に資する観測情報の提供により目前の災害への備えと対応を精緻化し、死傷者の大幅減へ貢献する。そのために、まずはより最新の発災前情報を整備し、発災時には発災前後での比較による正確な状況変化・被災状況を把握し、迅速に情報提供することで、行政等の被災後活動へ貢献する。将来的に“把握”から目前の災害リスクの“予測”に繋げるためには予測モデルの精緻化が必要であり、そのためには地表面の精緻な3次元情報とその時間変化の情報が必要となる。

上記に示した中長期的目標の達成に必要な観測情報として、①地形情報/変化（DSM/DTM）、②土地被覆・土地利用、③地殻変動、④被害状況、発災に伴う各種関連情報を識別し、これらの観測情報に直接紐づく各観測技術の実現性について、以下に整理する。技術の方向性としては、これまで基本的に2次元情報中心だった衛星データを定常的な3次元情報の取得へ拡大し、さらには時系列・観測頻度の観点を加えた4次元情報の取得までを目指す。またアクティブ計測の高度化、小型衛星との連携による高時間分解能（高頻度）観測、静止衛星を用いた常時観測などの実現を推進する。

#### **2.1.2 地形情報/変化（DSM/DTM）**

本分野においては、発災時、昼夜天候を問わず取得可能な SAR 画像からより迅速かつ正確に被災情報を抽出するための高精度な SAR ARD（正確な高度情報を用いてオルソ・斜面補正され、地図投影が可能なプロダクト）の創出や、2.1.4 項に記載するような微細な地殻変動の検知により、被災状況の把握のみならず発災前のリスク検知に繋げることが重要であり、そのためには正確かつ最新の3次元の地形情報(DSM/DTM)が不可欠である。また、3次元の地形情報と実際の発生個所の情報に基づく

災害リスクの評価・解析や、海岸工学・河川工学上行われる各種シミュレーションに活用することで対策の確度を高め、防災に“備える”ことも重要である。

光学のパッシブ観測としては、地球低軌道周回(LEO)衛星については中大型衛星による高分解能イメージング、100 kg級衛星を中心とした中分解能、キューブサット衛星等による低分解能、それぞれの特色を活かした観測のトレンドが今後も継続していくと考えられ、特に観測頻度・高時間分解能観測の観点で、大型・中型・小型衛星の連携の重要性はさらに増大することが考えられる。地上分解能の観点からは光学系の製造技術はほぼ成熟しており、今後は最新技術の導入による焦点面検出器の高感度化、観測波長、特に短波長赤外、中波長赤外、熱赤外線への観測域拡大により、地物からより多様な情報を取得する方向に進むと考えられる。特に中波長赤外～熱赤外線は地表面・海面の熱的変化を感知し、夜間観測が可能であることから、その重要度は極めて高くなっていく。近年、赤外域においては高感度検出器の開発および冷凍機の小型軽量化が急速に進んでおり、赤外線観測の欠点であった地上解像度の問題も、低～極低軌道周回の 100kg～中型衛星で対応していく方向に進むと予想され、熱赤外においても数メートル以下の観測は十分可能となることが見込まれる。

今後は地理空間情報の精緻化の観点で高精度な 3 次元情報の取得がますます重要になる。民間企業による小型衛星開発が進み、指数関数的に軌道上の機数が増えているのに伴い、これまで政府衛星が中心であった全球レベルの DSM の取得に対しては、今後、民間の事業も活発になっていくと予測される。小型衛星の場合、正確な標高抽出に必要な地表面位置決定精度に課題があるが、政府が開発する高精度・高分解能中大型衛星と小型衛星の連携による民間 3D プロダクトの精度向上といったスキームの構築も求められる。

光学パッシブ観測から得られる DSM の標高精度は、地表面画素位置決定精度とステレオ視の B/H により地上分解能の数倍程度に制限されるため、より精緻な 3 次元情報の取得には、今後、衛星搭載ライダーによるアクティブ計測の重要度が増していくと考えられ、現在、ライダー技術に係る基盤技術実証に向けた ISS 搭載用ライダー (MOLI) を研究開発中であるとともに、ALOS-3 の後継機での活用を含めた実装方策の検討を進めている。ライダー搭載衛星による DSM/DTM 製作に必要な地盤面高さの観測は各国で進んでいるが、大出力レーザーによる衛星の電力リソース増や発振器の寿命による短いミッション期間の改善、また、衛星リソースの制約からライダーの観測点数を増やせないため、特にクロストラック (CT) 方向において離散的な計測しかできない (隙間なく観測することができない) ことなどの課題がある。そこで、次期陸域観測に期待される詳細な 3 次元地形情報の実現には、高分解能な光学ステレオ計測と高度計ライダーの融合が有力な実現解として考えられる。これにより、光学ステレオ計測により取得した DSM に含まれる衛星の指向決定値に依存した誤差を高度計ライダーの計測値で補正しつつ、森林下の地盤面からのライダー反射信号を活用して、DTM の算出が期待できる。高度計ライダーは、自身の送信したレーザー光の反射を受信して、信号波形から距離を求めるシンプルな手法であり、今後様々な分野において期待される各種地球観測用ライダーの最も基本的な計測手法である。高度計ライダーの開発・運用は、今後の地球観測に求められる鉛直情報の増強に期待が寄せられる光学アクティブ計測技術の基礎を築くことに繋がる。

電力に関しては、レーザーの電力効率を改善する研究の必要がある。衛星搭載ライダーのレーザーではレーザーダイオード (LD) 励起固体レーザーを使用するため、高効率の励起用 LD が必要である。衛星搭載

ライダーを目的として LD を開発することは不可能であるが、民生品 LD のアップスクリーニング使用を目指し、民生分野の技術更新と宇宙での使用可能性を継続的に実施する。また、固体レーザーの励起モジュール・増幅モジュールにおいては、励起効率、光-光変換効率を向上する研究を実施し、総合の電気光変換効率を向上させる。また、固体レーザーの温度条件や排熱を改善し、変換効率を向上する熱設計の検討も重要である。レーザーの寿命に直接的に効くものは LD であるため、動作デューティ、ディレーティングを最適化するとともに、LD についても動作温度をより適切化し、動作時間を長くする対策検討が必要である。

地図の精度向上の観点では、将来的に地盤面高さの参照ポイント、拘束ポイントを増やすために CT 方向の観測点を増加させることが望ましい。理想的には、地表面を全て観測するイメージングライダーが望ましい。短期的には、レーザーのビーム数を増やすことで観測点数を増やす方法が考えられる。また、一部の森林観測を諦めることになるが、検出方式をフォトンカウンティング方式に変更することで 1 フットプリントあたりの送信レーザー出力を低減させ、それによりビーム数を増加させて観測点数を増やす方法も考えられる。イメージングライダーでは、アバランシェフォトダイオードのアレイ化等によりライン観測できる検出器、ライン観測に対応したビーム形状を成型する送信光学系を研究開発することにより、25m 前後のフットプリントでキロメートルクラスの観測幅を持つイメージングライダーを実現できる。

観測点数以外として、地盤面高さ測定の正しさを向上させることで地図の精度の向上が図れる。地表面に構造物、特に森林がある場合、複数の反射信号があったり、森林の遮蔽により地盤面信号が減衰したりして、反射信号の地盤面のポイントを識別することが難しくなる。ライダーの波長を複数波長とし、波長毎の森林、地面の反射特性の違いによる各波長の信号変化の比を用いることで、地盤面を高精度に検知することが可能になる。実現のためにはレーザーの複数波長化が必要である。最も簡易な方法は、2 倍高調波を用いる方法であり、波長が半分のレーザーを追加することが出来る。一方、波長が半分のレーザーを用いることは、1 光子のエネルギーが上がり、光子がレーザー内部の有機物からコンタミネーションを発生させレーザー焼損故障させる事象「レーザー誘起コンタミネーション焼損」が発生しやすくなる。本事象を考慮した研究開発も重要である。

ライダーは、光の送信/受信間の時間から直接距離に換算することで、精度の良い鉛直情報を収集可能な計測ツールであり、今後の 4 次元情報の強化に重要な役割を果たすことが期待される。一方原理的に、面的に連続した計測は難しく、上記に記した光学ステレオ計測や下記に記載するタンデム SAR 計測を始め、他の面的計測手法との併用により、鉛直情報の検証データとして複合的に利用することがより有効である。

DSM や DTM は、2 機以上の SAR が同時あるいは短い時間間隔で干渉 SAR 観測を行うこと（タンデム干渉 SAR、あるいはバースタティック/マルチスタティック干渉 SAR）によっても作成することが可能である。空間分解能が光学センサに比べて劣ることや、サイドルックによる影などの欠点があるが、悪天候下でも観測をすることができるため、光学センサによる方法を補完して、高レスポンスかつ高精度に地形変化を追うことが可能となる。これまで、タンデム干渉 SAR による DSM 作成は、NASA/DLR/ASI による SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) や DLR による TerraSAR-X/TanDEM-X によるプロダクトが広く利用されているが、まだ L バンドによる観測は実現されていない。L バンドなどの比較的長い波長では、植生下の地表面からの散乱も得られるため DTM を得ることが可能であり、豪雨や噴煙

による電波減衰もわずかである。また、災害用途以外の利用（例えば森林バイオマスの推定など）も発展させることができる。ただし、タンDEM観測を実現しようとする場合、干渉性の時間劣化を抑えるために2機の衛星を近傍に飛行させる必要があり、開発コストが限られる中では、複数機の分散配置（コンステレーション化）による観測機会向上と相反する。観測の即時性も同時に向上させるためには、民間小型衛星や海外衛星との連携を合わせて進めていく必要がある。また、新たに多くの新規技術（フォーメーションフライト技術、衛星間の SAR 同期やデータ通信技術、タンDEM干渉 SAR データの解析技術など）を研究開発していく必要があり、まず小型衛星や航空機で段階的に実証することも考慮すべきである。一方、今後の技術開発によって、Xバンドの民間小型衛星でもタンDEM干渉 SAR が実現できるようになれば、観測機会の増加によりさらにタイムリーに地形変化を取得できる可能性が高まるとともに、民間サービスのオプション拡大にもつながる。したがって、観測情報の4次元化を進めるための策として、JAXAのLバンド SAR 衛星をさらに発展させてタンDEM干渉 SAR が可能なシステムを構築するとともに、小型 SAR 衛星にも適用可能な技術開発を行っていくことが有効と考えられる。

### 2.1.3 土地被覆・土地利用

土地被覆・土地利用の詳細については、2.4.2 節の記載を参照されたい。2.1.2 節に記載の DSM/DTM情報と複合的に解析することで、3次元の土地被覆・土地利用情報が目指す方向性である。

### 2.1.4 地殻変動

地殻・地表変動の観測は、事象前後の干渉 SAR 観測によって実現される。JAXA では、植生の多い日本国土の観測のために、植生下の変動を高精度に計測できるLバンドの SAR を代々開発してきており、ALOS-2 では L バンドにおける最高分解能の実現（電波法による許可帯域上限）、幅広い入射角選択および左右の観測方向変更を可能とすることによる迅速性の向上、高い軌道決定/制御精度の実現により、例えば箱根山の火山活動に伴う変位のように分散的に配置された地上測器では難しい局所的な地表変位を検出するなど、干渉 SAR 観測の性能を従来に比べて大きく向上させている。ALOS-4 では、デジタルビームフォーミング技術により観測幅を拡大し、観測頻度を年 20 回程度まで向上させることで、時系列干渉 SAR 解析（時系列に蓄積した多数の観測データにより誤差を低減し、数 mm オーダの変動を検出する技術）を日本全体で適用可能とする。それにより、事前に異変を検出する能力を高めることを目標としている。また、広域観測モードによる観測幅も 700 km まで拡大し、南海トラフ地震で想定される数百～1000 km スケールの地震に対しても、迅速な観測を可能としている。現在運用・計画されている海外の定常観測型の SAR 衛星（Sentinel-1、SAOCOM、NISAR、ROSE-L、Sentinel-1 NextGen 等）では、ALOS-2/4 よりも分解能が低く、入射角変更ができないため緊急の観測要求には対応できない。引き続き日本全体また海外の必要な地域に対して高精度な観測データを得るためには、同様の L バンド SAR 衛星による定期的な観測が必要である。今後さらに異変の検出精度を高めていくためには、高分解能観測の観測頻度およびカバレッジのさらなる向上を図ることや、多方向からの観測によって 3 次元（東西・南北・上下成分）の変位計測を可能にするといった技術開発の方向性が挙げられる。前者に対する技術実現策としては、デジタルビームフォーミング技術の高

度化や大型アンテナ技術の採用によって高い分解能・観測幅の両立をさらに進めることが一案である。後者に対しては、前述の観測幅拡大によって観測機会を向上させることで左右方向・昇降軌道の 4 方向観測を定常的に行えるようにする、あるいは複数機構成によって、左右方向の常時観測を可能としたり、傾斜軌道にも衛星を配置することで南北方向に感度の高い観測を可能としたりすることが考えられる。複数機構成を考える場合、開発コストの制約を考慮すると、従来よりもサイズを低減した同型衛星 2 機あるいは中・大型衛星と小型衛星との組み合わせなど、1 機あたりの機能性能を絞る必要があり、他のニーズとのトレードオフを考慮する必要がある。干渉 SAR 観測の高度化には、衛星技術だけでなくデータ解析の高精度化も重要であり、そのためには他センサとの連携が必要である。例えば、光学センサ等による高精度かつ新鮮な基準地形図 (DSM) の整備や、電離層や水蒸気ノイズ補正のために QZSS 補正情報や地上電子基準点のデータを活用することが挙げられる。一方、即時性のさらなる向上のためには機数の増加が必要であり、民間の小型 SAR による観測や、海外衛星と協力した観測体制を構築していく必要がある。

### 2.1.5 被害状況および発災に伴う各種情報

被災状況の迅速な把握のために、発災時の観測機会の向上、および、災害前の定期的なベースマップの更新が求められている。この実現のためには、第二部で述べられている通り複数機による総合的な観測システムが必要である。観測機会については、SAR の場合、ALOS-2 および ALOS-4 において、既に 1 機あたりで達成可能な限界 (ただし太陽同期軌道とした場合に限る) に達している。また、観測時刻の多様化を図る上でも、複数機が必須である。一方、高精度なベースマップを日本国内および海外の必要な地域に対して広域にかつ時系列に一定の頻度で更新するためには、観測精度や軌道・指向精度、観測可能データ量などの観点から、ALOS-2/3/4 と同じ中・大型サイズの衛星が必要になる。これらの事実や、他の利用ニーズや民間の開発動向を勘案すると、JAXA ではこれまで培った技術を活かし、基準衛星をさらに高度化させて災害前の定常的な観測を充実化する (災害前後比較用の広域のベースマップだけでなく、前述の情報 4 次元化や微小な地殻変動の異変検出を行う) ための技術開発を行い、発災後の観測機会向上については、近年増加する民間小型衛星との連携によって充実化していくことが考えられる。さらに即応性・連続性の観点から、静止軌道からの光学観測の実現も重要である。静止軌道上に設置できる光学系の物理的サイズで決まる地上分解能の制約があり、現在は可視 10m 級、赤外 100m 級の観測実現を目指したシステムが研究段階にある。静止常時観測による即応性・連続性を有する情報と詳細性を有する各種周回軌道衛星とが連携し、将来的には最適かつ自律的な軌道上観測ネットワークの構築が望ましい。なお、LEO 衛星においても様々な超解像技術による分解能向上が検討されており、それらの応用により静止軌道光学観測の分解能問題は今後大きく改善される可能性がある。また解像度 1m 以下等の高分解能な常時観測という観点では、一定範囲に帯空可能な飛行船プラットフォームからの観測も、一つの未来像として考えられる。

即時性の向上のためには、観測前後にかかる時間の短縮化も重要である。ALOS-2/3/4 では、観測要求作成・計画立案・コマンド作成/送信・観測データ伝送・データ処理に、数時間を要している。小型衛星では、現状、伝送性能等の制約があるためにさらに時間がかかっており、今後の技術発展が望まれている。この改善のためには、オンボード画像処理や衛星間データ通信、クラウドサーバの利用によるユ

ーザへのデータ伝送の高速化、他センサ・観測結果・地上インターネット情報（SNS 等）に基づく自律的な観測タスキング、FPGA や GPU を活用した地上データ処理高速化、AI 技術による自動解析、Analysis Ready Data（ARD）などのユーザフレンドリーなプロダクトやツール整備などの技術開発を行う必要がある。これらの技術は、異なるセンサ間および官民の衛星間で横断的に有益となりうる技術であり、世界の進展スピードも速い。そのため、産学官の連携で効率的に開発を進めていくこと、また世界の動向やニーズの変化に対応できるよう柔軟性のある開発方式や計画を考えることが重要である。

### 2.1.6 統合解析技術・システム

甚大化する災害に有効に対応するためには、発災前の基盤情報から発災時の様々な衛星・センサによる情報を総合的・複合的に処理・分析し、防災活動に効果のある情報を提供するシステムが必要である。現在 JAXA では、防災・災害対応を実際に行う国内外の機関（防災ユーザ）から緊急観測やプロダクト提供に係る要求を受け付け、複数の衛星の観測機会検索を行い、各衛星地上システムに緊急観測要求および災害対応プロダクト生産要求の送付を統合的に行う防災インタフェースシステムの運用を開始している。今後は様々な衛星・センサで取得された発災前後データから被害状況を自動判読する技術・システムへの実装などを検討していく。さらに将来的には、2.2 節で記載する GSMaP 等を始めとする降雨や土壌水分等、各種気象情報・環境情報のシステムとの連携により、被害状況に加えて、目前の災害リスクに係る準リアルタイムな予測の提供の実現が目指す方向である。

## 2.2 水循環の把握と適応

本分野では、今後極端現象（豪雨・台風等）のより高精度な予測と、地球温暖化による渇水リスク情報等の地域ごとの提供を進め、更なる豪雨や台風のメカニズムに係る詳細な理解に基づいた極端現象予測や渇水リスク情報提供により、水不足と食料生産への影響回避に貢献することが目指す将来像である。その実現に向け、衛星観測は、面的計測情報の精緻化に加えて、水蒸気、雲・降水等に係る 3次元計測能力の強化、各種小型等連携あるいは静止による高い時間解像情報の実現が必要となる。

### 2.2.1 水蒸気

本分野の目指す方向性に対して重要な物理量の 1 つである水蒸気については、観測密度の向上や水の同位体循環等を含めた面的情報の精緻化とともに、水蒸気量の鉛直情報の増強が求められる。これに対し、マイクロ波放射計により高頻度な水蒸気の水平・鉛直分布を計測しつつ、より細かい鉛直多層情報や同位体情報等を光学連続分光計測で収集し、更にアプリアリ等を必要とせず対象の高度情報を直接取得可能な光学アクティブ計測による高精度な鉛直情報が検証データとして加わることで、上記の方向性に応えていく。

線状降水帯の解明や極端現象（豪雨等）の予測に貢献する気温・水蒸気の鉛直分布観測においては、国内では気象庁等の有する地上観測網やひまわり後継衛星の動向も踏まえつつ、周回衛星の果たす役割と静止衛星とのシナジー効果を考慮した検討が必要となる。近い将来、静止衛星では赤外域での光学分光計測による気温・水蒸気のサウンディングが実現されていくものと考えられるが、雲の存在に



左右されずに観測が可能なマイクロ波サウンディングのニーズも引き続き高まると予想される。一方で空間解像度確保の観点から静止衛星マイクロ波観測は技術的課題が大きく、コンステレーションにより静止衛星と同等の頻度でマイクロ波サウンディングを実現することが周回衛星に求められるであろう。

従来、鉛直方向積算水蒸気は 22GHz 帯の水蒸気の吸収帯、気温の鉛直分布は 50GHz 帯の酸素の吸収帯で観測が行われてきたが、現在は 183GHz 帯での水蒸気鉛直分布の観測が主流となり、また、気温鉛直分布については、次世代で 118GHz 帯の酸素吸収帯を活用する動きがある。観測機器を小型化し、複数機を同時開発・打上げ・運用することが周回衛星による観測頻度向上の要件となることを考えると、高周波技術を活用した 118GHz 帯及び 183GHz 帯による気温・水蒸気サウンダの開発が実現解の一つとなる。また、大気のみを観測対象とする場合、地表入射角が一定である必要性は低いことから、オフナディア角一定のコニカル走査型ではなくクロストラック走査型を採用することが可能である。クロストラック走査では走査反射鏡のみを回転させればよいため、コニカル走査型に比較して機器全体の小型軽量化を図ることができる。

但し、いずれの走査方式に関しても、長年マイクロ波サウンダの開発・運用実績を有する海外機関が次世代の計画においてもが先行していることから、今後の動向を見極め、海外衛星から得られるデータを有効活用することも選択肢となる。

一方、AMSR3 では、AMSR2 から観測周波数範囲を拡大して 183GHz 帯に 2 チャンネル、165GHz 帯に 1 チャンネルを追加しており、水蒸気鉛直分布情報を気象庁等の各国気象機関に準リアルタイムで提供する計画である。さらに 50GHz 帯或いは 118GHz 帯の気温サウンダ追加、及び 183GHz 帯のチャンネル数増加を、フルモデルチェンジした AMSR3 後継として実現する可能性もある。これにより、多周波・多目的コニカルスキャン型マイクロ波放射計の高空間解像度(水平方向 15 km程度)の強みを活かしつつ、国際協力に基づく観測網の一翼を担うことができる。また、AMSR3 設計をベースとして 18GHz ~183GHz 帯に観測周波数を絞って目的を気象観測に特化し、且つ水平空間分解能を妥協することで、小型化した AMSR3 後継機を開発し、欧州等の気象衛星運用機関と観測時刻を分担することも実現解となる。

また、対流圏上層の雲氷やその粒径分布の観測においては 200GHz 以上の高周波数帯が求められるが、現在欧州が進めている EPS-SG の評価も踏まえてサブミリ波帯放射計の有効性・実現性を検討し、テラヘルツ技術を活用した技術実証を行う必要がある。

大気場の循環を評価する上で、同位体の空間分布は有益な情報となる。近年 GOSAT 等の高分光分解能の大気分光データより、H<sub>2</sub>O のカラム気柱量のみならず、HDO の全球カラム気柱量が導出されている。これらのデータにより水循環の水平空間移送に関して、新たな情報提供が可能となっている。また、鉛直移送を見た場合、従来の水蒸気のカラム気柱量に加え、SWIR と TIR の同時処理により、地表面から大気上層にかけ、11 層に分割した水蒸気プロファイルの導出に成功している事例がある。本プロダクトは現在 GOSAT/GOSAT-2 観測でのみ導出可能であるが、今後同種センサに拡張されることになると、水蒸気プロファイルの時空間観測の向上が期待される。

水蒸気の鉛直分布は複雑な構造を持つが、現在はマイクロ波、赤外のサウンダを用いて観測が行われている。これらのサウンダは、観測・データ解析手法の制約から高度分解能や観測精度に限界がある。水蒸気差分吸収ライダー（水蒸気 DIAL : Differential Absorption Lidar）は、エアロゾルや大気分子による散乱と、レーザー光が散乱される場所までに往復する間の対象分子の吸収を利用する。測定では対象分子の吸収の大きな波長（ON 波長）と小さい波長（OFF 波長）の 2 波長を用い、反射信号の減衰比を解析することによって対象分子の濃度分布を求める。2 波長を近接させることによりエアロゾルの散乱などの未知のパラメータは打ち消される。吸収の強さが上記 2 波長の間ぐらいとなる 3 波長目を追加し、観測高度領域を広げるケースもある。

このように直接的に観測を行うため、マイクロ波サウンダ、赤外サウンダに対して高度分解能、観測精度の点で優れており、また、アプリアリ情報を必要としない利点がある。

水蒸気の吸収線としては、820 nm、930 nm、1130nm、1360 nm、1850 nm 付近を中心とした吸収帯が存在する。最近では、アイセーフティの観点から許容量が可視領域に比べて相対的に高い赤外域のレーザーを使う例がある。これまでの衛星搭載ライダーは全て Nd:YAG レーザを使用しており、この実績を利用する場合、Nd:YAG レーザと QPM（Quasi Phase Matching）結晶を用いた OPG/OPA（Optical Parametric Generator/Amplifier）方式で 1360nm 帯のレーザーを使うことが効率的な技術開発になると思われる。ただし、1360nm 帯のレーザーの技術開発には大きい課題が多くある。まず、波長のずれは水分子による吸収量の変化に繋がり、水蒸気量導出の大きな誤差になるため、高精度に波長制御を実施する必要がある。波長制御の課題としては、種レーザーの高精度波長制御、QPM の高精度な温度制御が挙がる。QPM 結晶については放射線耐性の確認が不十分であり、今後、評価を実施するとともに、耐性が不十分な場合には対処の必要がある。ON 波長と OFF 波長の観測信号を比較する際、雲の有無、陸からの反射光の差が誤差要因となってしまうため、観測位置が変わらないようにサブミリ秒以下の短時間で波長を切り替える必要がある。この切り替え技術についても研究開発要素がある。これらを取り込んだうえでのレーザー要素技術の研究を進め、安定して動作するレーザー送信部を試作・確認する必要がある。また、1300nm 帯の光を効率よく観測する検出器も重要である。InGaAs の PD や APD が候補になり、メリット・デメリットを考慮したトレードオフを実施し、適切な検出器を選ぶ必要がある。

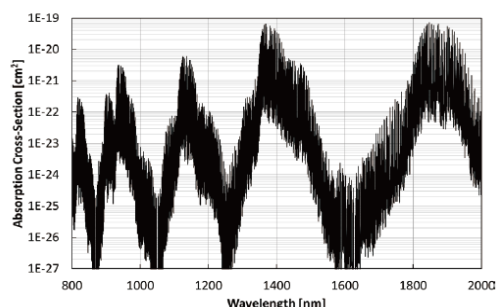


Fig. 1 水蒸気の吸収断面積  
(阿保 真, 2020)

### 2.2.2 雲・降水

雲・降水観測は精度の高い気象予測をするために必要な情報であり、衛星による全球の降水 3 次元観測データは既に現業機関により利用されている。予測における初期値を与えるだけでなく、数値モデルにおける観測周辺の気温・水蒸気や風の鉛直情報の最適化にも寄与しており、さらに、水文モデルに利用することで河川流量、洪水予測への利用も始まりつつある。このような雲・降水に関する衛星観測においては、これまでの降水観測を維持するとともに、感度向上による弱い降雨・降雪を含めた 3 次元情

報の精緻な把握や雲・降水の鉛直流速など新たな情報を取得するなど、高度化に対する要望も多い。また、将来的には雲降水粒子の形状情報の取得や降水観測の高頻度化によって、気象予測や水循環に関する予測が高精度かつ時空間的にも高分解能化されることも期待されている。

これらの要望、期待に対し、国際連携や民間進出機会の活用を行いつつ、我が国の基幹的衛星観測技術であるレーダ技術の優位性を確保した技術開発を進める。

まずは、運用中の降水レーダ（GPM/DPR）による Ku 帯、Ka 帯の降水観測を継続しつつ、これまで取得できていなかった雲の鉛直流速情報の取得を W 帯ドップラーレーダ（EarthCARE/CPR）の開発によって実現する。これらの衛星観測技術を活用し、次世代の降水レーダでは降水観測の感度向上と合わせて降水の鉛直流速情報の取得を行う Ku 帯ドップラーレーダへと発展させる。その際、国際協力により W 帯および Ka 帯レーダを搭載する中型衛星と連携を行うことで、多周波による粒子情報の取得も実現する。また、次世代降水レーダの開発・運用期間中は、海外の宇宙機関や民間企業による複数の小型降水レーダの計画があり、これらとの連携による高頻度観測の有効性の確認・実証活動なども進めたい。

小型コンステレーションによる高頻度観測の有用性が確認できれば、次々世代の降水レーダでは新たな基幹衛星としてそれまでにない情報の取得に向けた技術開発（大型軽量アンテナ、ビームフォーミング、多周波化、多偏波化、および降水 SAR 等）を行い、全球をカバーする小型コンステレーションとの連携により高度かつ高頻度な雲・降水情報の利用を可能とする。また、さらに将来的には、静止軌道からの常時降水観測を組み合わせることで、より時空間分解能の高い観測情報の提供へと発展することも視野に技術開発を進める。その際に観測精度や空間解像度を検討する必要がある。

### 2.2.3 風プロファイル、海上風速・風向

風向風速データは、全球・領域モデルによる数値予報・大気質予測に必要な初期値の改善、気候変動や様々な気象現象の研究において非常に重要である。直接観測である海洋ブイや船舶、自動気象観測ステーションは地表面付近の情報を広範囲に与えるが、風向風速の高度分布は得られない。地上設置型ウィンドプロファイラーは風の高度分布を与えてくれるものの、日本・西欧州及び北米等限られた地域にしか設置されていない。風向風速の高度分布は、ラジオゾンデや航空機観測によって与えられ、北半球の人口の多い地域で行われており、南半球ではほとんど行われていないため、大陸内陸部や海洋域は非常に大きな観測の空白域となっている。この地域での風観測の欠如は数値予報や数値予報を用いる解析において、不均一誤差といった問題を起こしており、空白域の観測が望まれる。

台風等の強風・強降雨下の海上風観測に対しては、マイクロ波放射計の空間分解能向上および SAR の観測頻度向上を検討する必要がある。マイクロ波放射計については、海洋分野においても同様の方向性であり、詳細は後述する。SAR については、既に運用されている ALOS-2/4 において、入射角変更および左右視切り替えによって 24 時間以内に任意の地点を観測可能としているため、台風周囲のみに限定すれば、最低 1 日 1 回という要求に対応できる能力はある。しかし、実際には他の観測要求との競合や 1 周回あたりの最大観測可能時間の制約があり、必ずしも要求を満たせるとは限らない。この課題を解消し、またさらに高い観測頻度を実現するためには、1 機あたりの観測幅を拡大しつつ、衛星機数を増やすことが必要である。そのための SAR 開発の今後の方向性として、デジタルビームフォーミング

等による広域観測モードのさらなる観測幅拡大や、中・小型衛星による複数機システムを可能とするための観測性能強化や低コスト化が挙げられる。また、1機あたりの最大観測可能時間の制約を緩和し、海洋の観測に充てられる時間を増やすことも必要である。そのために、オンボード画像処理による伝送データ量の低減や、データ伝送速度および蓄積量の向上といった研究開発が必要である。一方、要求を満足する高頻度観測システムを構築するのは JAXA のリソースのみでは難しく、外部機関との開発協力や海外・民間衛星との連携により進める必要がある。L バンドなどの低周波数の方が強風に対して感度を持つため有利と考えられているが、時間要求を満たすためには、CバンドやXバンドなどの他の周波数による SAR 観測の活用も検討すべきである。観測頻度とは異なる課題として、電離層や外来干渉波によるノイズ除去も、高精度な海上風推定に必要である。これは、観測対象からの後方散乱が小さい海洋観測において特に影響が大きい。そのため、電離層ノイズの補正が可能な 4 偏波観測の広域化やその他補正アイデアの検討、外来干渉波除去のためのオンボード検出機能や地上処理の高度化（機械学習の活用等）などの技術開発を行っていく必要がある。

ドップラー風ライダー（DWL）は、高い観測分解能、低いバイアス、高い観測精度による風向風速の高度分布を与えることができ、衛星に搭載して観測を実施することで、これまでの観測のギャップを埋めることができる。ESA は、全球での風観測を行うため世界で初めてとなる衛星搭載ドップラー風ライダー Aeolus を 2018 年 8 月に打ち上げ、大気風の観測を開始した。Aeolus は衛星の進行方向に対して 90 度真横に紫外域のレーザー光を射出し、1 視線方向（Line Of Sight: LOS）風速の高度分布を得ることができる。一方、NASA/NOAA では、赤外域のレーザー光を用い、反射光をヘテロダイン検波するコヒーレントドップラーライダーの検討を行っている。一方、NASA/NOAA では、赤外域のレーザー光を用い、反射光をヘテロダイン検波するコヒーレントドップラーライダーの衛星搭載化を目指して研究を行っている。波長域は異なるが、両者とも宇宙用高出力レーザーを必要としているが、宇宙用レーザーは戦略的に重要な技術であり公表されない要素が多々あるため、実現のためには自身での研究開発を行う必要がある。紫外域レーザーの場合、レーザー誘起コンタミネーションによってレーザーが停止したり、出力が大幅に減少したりすることが知られている。対策として与圧化した容器にレーザーを格納する必要があるが、日本のライダー開発においてもこの部分の経験は得つつあるが、1 光子あたりのエネルギーの大きい紫外光ではダメージがより大きくなるため、レーザー誘起コンタミネーションを更に考慮した大出力レーザーの研究が必須である。赤外域のレーザーにおいては、50W クラスのレーザーが必要であり、ドップラーライダー用の狭帯域の大出力レーザー、レーザーからの排熱等において課題があり、技術研究を行っていく必要がある。

衛星ライダー観測は観測幅、観測点が非常に狭いという課題があるが、衛星ドップラーライダーにおいても同様である。したがって、1機の衛星の観測では観測データが少なすぎ、限られた改善にしかならない。このため、国際協調により観測コンステレーションを構築することが重要である。それでも観測点としては不十分であり、面的観測を行える AMV 観測との融合や、数値モデルとの融合による全球風場の構築が有用である。これらの融合技術についても研究を進める必要がある。

#### 2.2.4 エアロゾル

水循環の解明においては、雲形成、降水形成の過程における大気中エアロゾル粒子の存在、相互作用が重要であり、また、エアロゾルそのものの吸収特性、散乱特性が気候変動に与える影響も小さくな

いため、エアロゾル粒子の物理的（粒形、分布等）や化学的情報（組成等）に係る観測データが求められている。エアロゾル観測データと数値モデル（エアロゾル化学輸送モデル、雲解像モデル等）を複合利用した観測・モデル研究により、エアロゾル・雲相互作用のプロセス理解の高度化、大気粒子の気候影響評価の不確実性の低減、気候変動予測精度の向上が見込まれ、大気質を悪化させるエアロゾル（火山噴煙、黄砂、バイオマス燃焼粒子、大気汚染粒子等）の輸送・拡散の監視・予測やそれらの影響評価（健康、植生への影響等）への活用も見込まれることから、高精度なエアロゾル観測の意義は大きい。人間生活等への影響評価や輸送、変質、沈着の予測精度向上などのためには高度分布の観測も重要である。

光学放射計での観測では、SGLI の近紫外バンドを用いた観測と偏光・多方向観測機能を用いた観測を用いて、エアロゾルの光学的厚さや粒形分布に関係するオングストローム指数などのグローバルな観測が行われてきた。SGLI の観測データは、エアロゾルに関わる雲や放射、物質循環変動のプロセス研究や気候変動モデルへの入力に必要なだけでなく、SGLI で開発したアルゴリズムを静止気象衛星に適用し、SGLI データと組み合わせ、中国から日本に飛来する黄砂のモニタリング等に活用する取り組みも始まっている。将来的には 1km 程度の分解能で 4 回/日程度の頻度での観測が求められており、観測バンドは限られるが時間分解能の高い静止衛星と、高精度で空間分解能の高い周回衛星のデータを組み合わせ、エアロゾルの時空間分布の観測を構築して行く必要がある。さらに、エアロゾル種別や起源を識別する情報を得られるよう、観測バンド等の機能を追加・強化する取り組みが必要である。

エアロゾルの高度分布を高精度に観測できるセンサはライダーのみである。その中で、光学特性、エアロゾル種の推定のために多波長で後方散乱係数、消散係数、偏光解消度を測定できるものはラマン散乱ライダーと高スペクトル分解ライダー（high-spectral-resolution lidar (HSRL)）がある。いずれも大気構成分子の散乱プロファイルを利用してエアロゾルによる減衰成分（消散係数）を測定する。ラマン散乱ライダーは昼間領域での観測が比較的難しいため、ここでは多波長の HSRL について記述する。HSRL はレイリー散乱を利用して、大気構成分子の測定を行う。レイリー散乱の中心波長はミー散乱と同じで、違いは散乱スペクトルの波長幅のみである。レイリー散乱は大気分子の運動によるドップラー幅が広いが、ミー散乱はほとんど送信レーザーと同じスペクトル幅である。HSRL では散乱光のスペクトル幅の違いを利用してレイリー散乱とミー散乱と分離する。そのために干渉計や分子フィルターを高分解能の分光素子として用いる。紫外・可視・近赤外波長域における多波長（355、532、1064nm）での偏光・HSRL 測定が実現すれば、既存の衛星ライダー観測に比して倍以上の観測情報を有した、大気粒子の全球 3 次元（鉛直 + 水平）分布を得ることができる。また、多種多様にわたる大気粒子の光学・微物理特性（消散係数、粒径分布、化学種など）の同時把握を実現し、これまででない量的・質的に確かな大気粒子情報を獲得することが出来る。HSRL ライダーは EarthCARE 搭載 ATLID で開発が進められており、技術的実現性は確認できている。今後の日本の技術課題としては、日本が実現していない高調波（355nm、532nm）を発するレーザー発振器の実現、より簡易な技術方式の実現、高度化・高性能化等が考えられる。

### 2.2.5 SST/LST、土壌水分（地表面蒸発散量）

海面水温(SeaSurface Temperature : SST)については 2.3.1 節に記載する。

水循環過程の解明においては蒸発散量も重要な要素であり、その算定において地表面温度(LandSurface Temperature : LST)・土壌水分量もパラメータの一つとして収集すべき情報として求められている。LST について、当面は 1 度程度の温度精度、全球 1km より高い解像度にて、特に時間単位の変化の把握ニーズに対し、解像度の観点で現状は不足するものの気象衛星の活用が有効であり、将来的にはさらに高空間解像観測(熱赤外 100-200m 級)を行う静止光学衛星の実現解が考えられる。

但し、日変化の大きい LST を数時間間隔で把握するニーズの実現にあたり、雲の存在は静止光学衛星にとっても大きな障害となる。そこで、空間分解能・精度ともに熱赤外観測には劣るが全天候型のマイクロ波放射計による補完が効果的である。これまでに 18~36GHz 帯のマイクロ波放射計による LST の推定が試みられており、AMSR-E、AMSR2 では空間分解能 15 km、精度 3~4K が達成されている。将来的にはアンテナ径拡大による空間分解能の向上及び継続的な検証・アルゴリズム改善による精度向上を図り、ニーズに応えていくことが考えられる。

また、土壌水分量については、AMSR-E、AMSR2 の主に C バンド(7GHz 帯)及び X バンド(10GHz 帯)を使用したプロダクトが継続的に提供されているが、空間分解能は C バンドの 50 km 相当であり、将来的には同じく空間分解能の向上を図っていくことが考えられる。一方、地表の植生や表面粗さによって土壌水分量の感度は下がり、その影響は周波数が高いほど大きくなること、また、周波数が低いほど表層深くまで観測可能であることから、欧米では L バンド(1.4GHz 帯)に特化したマイクロ波放射計による全球土壌水分量の観測が実現されている。これらのセンサはフェーズドアレイアンテナや大型開口アンテナにより L バンドで 50 km 程度の空間分解能を確保している。C、X バンドの空間分解能向上と L バンドの搭載による感度・精度の向上を視野に入れると、大型展開アンテナの採用が共通的な実現解の一つとなる。

永久凍土の融解は、温室効果ガスの排出要因となるだけでなく、融解による地盤沈下により建物やインフラを破壊し人々の生活に直接影響する。永久凍土の融解による地盤沈下の分布や速度を捉えるには SAR による干渉解析が有効であり、特に永久凍土の長期モニタリングには時間的な干渉性の劣化が少なく、かつ植生の影響を受けにくい L バンド SAR が必要である。永久凍土で生じる地盤沈下（サーモカルスト）は個々のサイズが小さいため高い分解能が必要となり、季節変化と経年変化を分離し時系列的に観測できる高頻度の観測も必要である。以上から、L バンド SAR で、10m 程度以下の分解能、1.5 ヶ月程度（年 8 回）程度以上の観測頻度を、長期にわたって行えば、永久凍土の融解の全容把握、予測、および災害の抑止への貢献が期待される。

### 2.2.6 積雪・降雪、氷河・海氷(グローバルな情報として)

淡水資源把握のため、全球積雪・降雪、氷河・氷床、海氷の分布や体積変動、融解等状況に係る情報の収集が求められる。これに対し、主に面的分布を、電波放射計測により空間解像度～数 10km でグローバルに日単位の変化を捉えつつ、SAR による～10m 解像度のより詳細な変化（月単位）を把握し、加えて光学イメージング（高分解能・ステレオ観測）による氷河・氷床の表層 3 次元の情報

収集が想定される。さらに、既存のセンサでは雪氷等の“高さ”に係る正確な計測は難しいところ、ライダー計測（離散的な計測点）を増強することにより、他の面的計測データとの複合利用により、体積変動のニーズに応える。

マイクロ波放射計による積雪深観測は、全球陸域を対象に計測範囲 1m 以下、空間分解能 30 km 程度で行われており、今後もアルゴリズムの改良や新規開発により精度の向上が見込まれる。また、海外の複数の放射計・サウダにより、G バンドを使用した降雪量の推定が可能となっており、これらの観測データは GSMAp でも利用されている。氷河・氷床の融解・流出は、海水温度上昇による熱膨張と並んで海面水位上昇の主要因とされており、その氷河、氷床の供給源は主に高緯度や山岳地帯の降雪であることから、その質量収支を把握、予測するうえで全球降雪量の観測は不可欠である。特に地上観測網が脆弱な高緯度・山岳地帯では衛星観測による高精度・高頻度な情報が求められる。頻度の観点では、既存の海外センサを活用しつつ、AMSR3 で追加される G バンド観測による確実な降雪量観測を実現し、さらにその後継機では G バンドの拡充により推定精度を向上することが考えられる。

極域の氷床・氷河・棚氷は、太陽光が少なく雲も多いことから光学衛星データが乏しく、SAR 観測が重要となる。氷の急速な移動・流出を捉えるために月単位の高頻度な観測が必要であり、またそれらの観測は干渉 SAR やオフセットトラッキング法により流速を精密に算出する観点から、同じパス、同じ観測モードでの定点観測で行うことが有効である。

海氷観測は、グローバルスケールではマイクロ波放射計によって、海氷密接度・海氷移動ベクトル・海氷表面の融解や海氷面温度等の情報が得られる。海氷密接度の空間解像度は、最も解像度の良い AMSR シリーズで 15km 程度、過去 40 年以降の蓄積のある SSM/I で 25km 程度である。AMSR2 では高周波帯(89GHz)を用いた 5km 解像度の海氷密接度も公開されているが、誤判定の要因のひとつである降水（89GHz に感度のある大気上層の氷晶）のフィルタリングが重要な課題であり、AMSR3 で追加される G バンドを活用することによる精度向上も期待される。他方、海氷縁などの領域の詳細構造を見る場合は、マイクロ波放射計と同様に昼夜・天候に左右されず、空間解像度が良い SAR 観測が有効であり、将来センサで観測幅が拡大することで、よりグローバルな情報としての用途が発展することが期待される。

### 2.2.7 河川・湖沼（グローバルな情報として）

水資源の変動、陸域環境モニタリングのため、グローバルな河川・湖沼の水量・水質・水温に係るデータ収集が求められる。水温・水質はともに、数 100m 以下(将来的には 100m 以下)の解像度にて、日内変化を捉えるために日に数回の観測が望まれることから、頻度の観点においては海外を含めた気象衛星データの更なる活用を図る必要があるが、内水観測には空間分解能が十分ではないことから、より高解像度の観測について、2.3.1 の節に記載するような各種光学放射計データとの連携・複合利用により応える必要がある。特に、従来より光学放射計で行ってきた海面水温や海色などの観測を、空間分解能を向上させることにより、内水・湖沼などの観測に適用することは有効である。また水量算定に資するデータとして、光学イメージング・SAR・電波放射計測による水域面積情報を収集しつつ、将来的にダム水位・国際河川水位の定期監視が想定されること、今後海外におけるニーズ要件を有識者に確認していく必要がある。

## 2.2.8 統合解析技術・システム(Today's Earth や GSMaP、他)

水循環を構成する諸量を全て衛星で観測することは不可能であり、現場観測も面的・時間的な代表性の問題が大きい。このため、複数の衛星データを利用して欠損を埋めるプロダクトや、数値モデルと衛星・現場観測を統合して解析や予測を行うための技術やシステムが必要であり、さらにこれらの技術の確立は予測の精度向上にもつながる。現在、JAXA では、複数のマイクロ波放射計観測を複合利用した全球 1 時間毎・0.1 度格子の全球衛星降水マップ(GSMaP)などの衛星複合プロダクトだけでなく、衛星データと数値モデルのそれぞれの欠点を補うための融合システムの開発・運用を外部研究機関と連携して進めている。例えば気象モデルに GSMaP などの衛星データを融合した NICAM-LETKF JAXA Research Analysis (NEXRA)、GSMaP 等の衛星データと陸面モデルを融合した Today's Earth (TE)、衛星海面水温等を海洋モデルに同化する海洋のシミュレーションシステム (JCOPE-T DA、LORA) 等は、衛星・現場観測・モデルを融合して水循環変動の解析や予測を行う技術・システムとして構築され、定常的に運用されている。将来的には、それぞれのモデルシミュレーションの空間・時間解像度の向上や予測精度の向上、新たな衛星データの同化などの技術の進展、さらには、現在大気・海洋・陸域に分かれている各数値モデルによるシミュレーションを統合した地球システムモデルの構築などが期待される。このような統合的なシステムは、異常気象や水災害などの短期的な監視・予測に貢献するだけでなく、気候変動の水循環変動への影響などの解析や将来予測など、長期的な気候変動研究・気候モデル開発とも連携させていくことが望ましい。

## 2.3 海洋環境の保全と利活用

本分野においては、社会が海洋状況の変化を理解し、対応することができる「予測できる海」「生産的な海」の実現に向けた各種モデルの精度向上や海洋資源（海洋生態系）の把握への貢献を目指す。そのため、海面水温や海色や日射、海上風速、降水、海面高度等の衛星データによる全球の面的変化や季節変化のタイミングや経年変化等の時間変化の把握に加え、沿岸域等の更なる情報の詳細化と、海面表層の観測情報によるモデルを介した海面下の情報の追加に応えていく。

### 2.3.1 SST

本分野の目指す方向性に対して重要な物理量の 1 つである SST については、気候変動の監視あるいは海洋生物資源の把握に必要な全球の高頻度観測とともに、環境監視のため沿岸域の高解像情報が求められている。また将来的には、船舶自動運行の実現に向けた海流予測等海洋モデルの精度向上の実現が期待されている。これに対し、マイクロ波放射計による全球低解像・高頻度観測と光学放射計による高精度・高空間情報で応える。

本分野において求められる全球海面水温観測については、マイクロ波放射計による 30~50 km空間分解能での 20 年程度の観測実績がある。昼夜を問わず全天候、低緯度から中緯度で平均 1 回/日程度の頻度で観測可能であり、これらの実績と一貫した観測を継続していくことが最低限必要である。

マイクロ波放射計による海面水温観測は、精度や空間分解能の点では赤外放射計に比較して劣り、特に空間分解能は 250m での全球観測が実現されている赤外放射計と 2 桁以上の差があることから、



沿岸の変化が大きい領域や細かい渦などの把握は赤外放射計に頼らざるを得ない。一方、全天候で高頻度観測が可能なマイクロ波放射計の需要は依然として残り、感度や空間分解能の継続的な向上が求められる。技術的には、海面水温に感度を有し、衛星地球観測（受動）に係る業務に割り当てられている 7GHz 帯及び 10GHz 帯の輝度温度観測を、より高感度化、高精度化、高空間分解能化することが今後の課題であり、各要素のバランスを取りつつ性能向上を図る必要がある。これらの課題は、同じく 7GHz 帯及び 10GHz 帯を利用する土壌水分量の観測にも当てはまる。

利用の観点からは 10 km 程度の空間分解能が目標とされており、これに対して、より鋭いアンテナビームを実現できる 10GHz 帯で 10km 空間分解能を達成することが当面の実現解となる。

なお、AMSR2 では 7GHz 帯を使用する 50 km 空間分解能が標準プロダクトとして設定されており、7GHz 帯に比べて感度が低く低温での推定が困難な 10GHz 帯の 30 km 空間分解能は研究プロダクトとして扱われていたが、アルゴリズム改善や検証の結果、10GHz 帯を使用した 30 km 空間分解能の精度が確認され、現在は一般公開され使用されている。但し、周波数割当上、7GHz 帯の帯域 350MHz に対して 10GHz 帯の帯域は 100MHz と狭く、ランダムな等価雑音温度が大きいデメリットを有する。AMSR3 では AMSR2 で確立した 10GHz 帯 30 km 空間分解能の海面水温を標準プロダクトとして定義するとともに、このランダム雑音性能を向上するため、10GHz 帯に 500MHz の帯域幅を有する新たな観測チャンネルを追加している。

以上より、AMSR3 で追加した広帯域 10GHz チャンネルの有効性評価を行いつつ、感度や精度を維持しながらアンテナ径拡大によって約 3 倍の 10 km 空間分解能達成を目指す。軌道高度を GCOM-W と同程度の 700 km 程度を前提とすると、AMSR3 のアンテナ開口径 2m を 3 倍の 6m 級にする要求となり、フェアリング収納性の観点から展開式アンテナや分割鏡によって実現する必要が生じるため、クリティカルな開発要素となる。カバーする観測周波数にも依存するが、7GHz、10GHz に留まらずより高い周波数も搭載する場合には、鏡面精度の確保など、より難易度が高い課題となる。また、AMSR3 で搭載している 89GHz～183GHz の高周波帯に対応する展開式アンテナの開発は現段階で成立性が低いいため、40GHz 帯程度までに周波数帯を絞ることが想定される。一方、感度に関しては、帯域幅の他に支配的要因となる積分時間、給電部損失や受信部 NF は同等を維持できることから大きな課題はない。但し、サンプル間隔を 10 km より狭くし隣接サンプル間のオーバーラップを確保する場合には、積分時間が短くなることから、感度(温度分解能)とのトレードオフが必要となる。また、精度については、搭載する校正系やアンテナパターン補正手法など、既存の技術や実績の範囲で対応可能と考えられる。

なお、欧州コベルニクスでは、大型展開アンテナを採用し、7GHz、10GHz を含む 37GHz 帯までを搭載するコニカルスキャン型マイクロ波放射計の計画があり、利用の観点で AMSR シリーズとの役割分担やシナジーも見込まれることから、今後の動向によっては技術開発においても連携し、国際協力により早期かつ効率的に実現することも可能性として考えられる。

いずれにせよ、これら海面水温を観測するための 7GHz 帯、10GHz 帯を有する運用中のマイクロ波放射計は数機に限定され、且つ将来計画も不透明であり、常時入手可能なマイクロ波 SST は世界的に希少価値が高いことから、一貫した継続的観測を可能とする AMSR3 以降の開発計画を早期に検討する必要がある。

海面水温観測については、空間分解能が高い熱赤外放射計の観測が、変化が大きい沿岸域や細

かい渦などの詳細な把握に有効であり、常時観測が可能であるが空間分解能に劣るマイクロ波放射計による観測と共に、複合的に利用されてきた。現在運用中の GCOM-C/SGLI による 250m 分解能海面水温観測は、グローバル観測衛星において世界で最も高い分解能を有しており、観測の継続とともに、沿岸域などの高解像度化が可能な現在の優位性をさらに伸ばす空間分解能向上(100m クラス)と、時間変化を把握するための観測頻度の向上(複数回/日)が求められている。

空間分解能については、ひまわり等の静止衛星は現状 1km クラスであり、沿岸等の観測に必要な高解像度化のためには、周回衛星による観測技術向上がベースとなる。実現に向けては、GCOM-C/SGLI で実現した SNR・観測精度等のセンサ性能を維持しつつ、高感度検出器による TDI 技術などにより 100m クラスへの空間分解能向上を目指す方向性が考えられる。

観測頻度については、静止衛星が最も高い時間分解能を確保できることから、1km クラスの観測が有効な外洋などの広域観測には、国内外の静止衛星データの活用を図ることが有効である。一方、100~250m クラスの空間分解能における観測頻度向上の実現には、周回衛星に搭載した複数センサを用いて複数の軌道から観測する必要があり、センサ小型化による他衛星への相乗りや民間を主体として立ち上がりつつある小型コンステレーションとの連携を考慮する必要がある。なお、民間でも動きのある熱赤外での小型コンステレーションについては、面的な温度分布の観測には有効であるが、リソースの制約から温度精度には劣ると予想され、高精度な GCOM-C/SGLI タイプの中型基幹衛星や静止衛星との相互校正により、温度精度を補完できる観測システムを目指し、民間との連携・分担を確立していくことが有効である。また、検出技術の高精度化や研究開発要素の高い小型衛星試験機の開発を、官民連携により実施することも視野に入れた連携方策を目指す。

上記を踏まえ、GCOM-C/SGLI の観測精度と空間分解能の優位性をさらに伸ばす方向性ととともに、国内外の静止衛星・小型衛星のミッションと連携した観測網の構築や、国際的な地位の向上に資する開発が JAXA の方向性としては重要であると考えられる。さらに 20 年程度先を見据えた将来的には、静止衛星による高空間分解能かつ高頻度観測の実現もターゲットになると考えられ、それらを見据えた技術的な研究開発も進める必要がある。

### 2.3.2 海色（水質）

海洋環境観測の分野では、海面水温と並んで、可視～短波長赤外によるマルチバンド観測による海色、海氷の観測も重要である。海色や海氷の観測では、海洋生物資源把握としての植物プランクトン・赤潮や水産資源の管理の分野にとどまらず、湖沼などの内水域の環境監視、極域を含む高緯度域の航行安全、海洋状況把握（MDA）や海底火山の噴火等の監視などの分野においても重要な位置づけとなっており、GCOM-C/SGLI からの観測の継続に加え、空間分解能向上(100m クラス)と観測頻度の向上(日単位の観測)が求められている。

空間分解能については、GCOM-C/SGLI で実現した SNR・観測精度等のセンサ性能を維持しつつ、陸域や雪氷と比較して輝度の低い海色観測に特化したセンサ設計や高感度検出器による TDI 技術などにより、100m クラス分解能への向上を目指す。また、観測頻度向上のためには、前項の SST でも述べたように、観測分解能は劣るが観測頻度が高い静止衛星データの活用や、センサ小型化による他衛星への相乗りなども視野に入れる必要がある。他のミッションとの連携も図っていく必要がある。また、下記

に示す海洋ライダーによる観測を、広域の光学マルチバンド観測データにより空間方向に補完して、広域の面的な情報として利用するなど、他センサとの同時搭載によるシナジーや付加価値向上を図ることも重要である。

上記を踏まえ、GCOM-C/SGLI の多波長・広域観測方式を継承しつつ、更なる高分解能化を目指す方向性のほか、目的を戦略的に絞って小型化・低コスト化し、将来的に利用者への移管や民間事業化等の方向性を模索する方向性や、他センサとの同時搭載による付加価値向上など、幅広い検討を進めて行く必要がある。

植物プランクトン観測としては、これまでのセンサは海洋表層を観測することが出来ていたが、海中の情報を得ることができなかった。これに対し、衛星ライダー-CALIPSO/CALIOP は、数十 m 程度までの水深においてプランクトンの分布等を観測できることを実証した。CALIOP は 532nm と 1,064nm を放射する単純な弾性後方散乱ライダーであり大気観測が主な目的であったが、532nm の交差偏波チャンネルを用いて海水表面の情報を除去して海中の信号を測定する手法を開発した。CALIOP 観測データを用い、MODIS と同様のグローバルデータが作成されている。ライダーは自身がレーザを発射して観測を行うため太陽角とは無関係であり、また、昼夜を問わずに観測できる点に利点があり、これまでの受動型の海洋観測センサにとって太陽天頂角が低い、極夜がある等の難しい条件のある高緯度地域の観測に有効である。高緯度海域では、海色記録の不完全さにより、プランクトンの年周期の重要なイベントを見逃してしまう可能性があるが衛星ライダー観測により対応が可能になる。衛星ライダーは観測範囲が衛星直下の 100m 幅程度に限定される課題があるが、極軌道衛星の場合、高緯度域では通過パスが多く観測頻度が高くできる利点がある。

海洋観測用衛星ライダーの今後の課題として CALIOP の仕様からの発展を考えると、現状では鉛直分解能が 23m と海中の情報を得るためには粗いことがあげられる。また、海中観測に使用できたレーザの波長は 532nm であり、海中観測には必ずしも適切でなかった。将来の仕様としては、鉛直分解能を 1m 前後まで上げること、海水表面の信号を分離するために高スペクトル分解ライダー（HSRL: High-Spectral-Resolution Lidar）とすることが考えられる。鉛直分解能を上げるためには高速 AD 変換と高速信号処理が必要になるが、レーザ高度計技術を応用することで実現可能と考えられる。分解能が上がることにより S/N は下がるため、検出器を高感度化するか、レーザ出力を上げるかの必要があるが、どちらについても実現のための技術研究が必須である。HSRL については EarthCARE/ATLID で開発を進めているため、技術的実現性は確認できていると考えられる。また、海洋観測としては、水中の透過性が高い点からより短波長のレーザが望ましい。400nm～500nm の波長が得られ、効率の高いレーザの研究が必要であり、また、レーザ波長が短くなることはレーザ誘起コンタミネーションダメージの発生確率が上がるため、十分な基礎実験により対策を確実に実施する必要がある。

### 2.3.3 海氷

マイクロ波放射計による海氷観測は、K バンド及び Ka バンドによる海氷密接度が主な観測プロダクトであり、衛星マイクロ波リモートセンシングの黎明期である 1970 年代から 40 年以上、我が国の AMSR シリーズだけでも 21 世紀初頭から約 20 年の気候データが揃っている。これらの長期観測データは、地球温暖化の影響が顕著に現れる極域海氷面積の減少傾向を如実に捉え、人類が直面する気候危機

の警鐘を鳴らす役割を果たしてきた。また、北極海航路や南極観測船の接岸ルート確保など、氷海域での船舶安全航行を目的として国内外で広く利用されている。

長期継続観測と並行して利用ニーズに応じたアルゴリズム開発も進められており、近年では、W バンドを使用した高空間解像度の海水氷密接度や高頻度観測の利点を活かした面相関による海水氷移動ベクトルが実用に供される精度に達している。また、厚さ 30 cm 以下の薄氷域の検出についても検証が進められている。さらに、海水氷厚や海水氷種別(一年氷・多年氷)、海水氷表面の融解度を、既存のマイクロ波放射計データから推定する取り組みも行われている。

これらの状況を踏まえ、気候変動監視や極域研究、船舶航行などの分野からのさらなるニーズに応えるため、新たなプロダクト開発とともに他種センサとの複合利用による補完やシナジーも考慮しつつ、多周波マイクロ波放射計による観測を継続・発展させる必要がある。

SAR や光学放射計と比較して全天候目つ高頻度観測という長所を有するマイクロ波放射計であるが、現状において、用途拡大の制約となる課題は空間解像度である。海水氷密接度に関しては、従来の K/Ka バンドを利用した AMSR2 プロダクトの水平空間解像度が約 15 km である。一方、欧州では、海水氷観測を第一の目的とし、K/Ka バンドで 5 km の空間解像度を実現するマイクロ波放射計の開発計画があり、L バンドも搭載して空間解像度 50 km 程度での塩分濃度も観測対象としている。上述した AMSR シリーズの W バンドを利用した新たな高解像度海水氷密接度プロダクトが約 5 km の水平空間解像度を達成していることから、本計画とは校正検証を含む利用分野における連携が考えられる。また、C/X バンドを利用する SST では目標とする空間解像度 10 km が明示されていることから、2.3.1 項で記載した通り観測周波数帯を C~Ka バンドまでの低周波数に絞って大型展開アンテナを実現することにより、副次的に K/Ka バンドによる海水氷密接度の空間解像度も向上する。さらに高精度・高感度な性能を兼ね備えた L バンドに観測チャンネルを付加し、塩分濃度の推定も可能とするような技術開発を海外と連携して進めることも一つの解となり得る。

SAR は、観測性能としては ALOS-2/4 で既に十分な空間分解能(数 m~100 m)を持ち、高緯度帯であれば 1 日に数回の観測機会がある。しかし、収集した観測データの軌道上記録・地上局への伝送能力やセンサの観測デューティ(駆動可能時間)の制約から、実際に極域全体を観測することは不可能である。他の分野と同様に、観測量を増加させるための研究開発を進めるべきであり、オンボード画像処理や圧縮センシング等の軌道上でのデータ量低減技術、データ伝送速度や蓄積量の向上などが技術方策として挙げられる。また、海水氷や陸上積雪は L バンドだけでなく C バンドも有用であり、異なる周波数を組み合わせることで海水氷の状態や厚さの違いをより捉えやすくなる。より高い頻度かつ情報量の観測を実現可能とするためには、例えば欧州 ESA の Sentinel-1 シリーズやカナダ CSA の Radarsat シリーズなどと継続的に協力を進めることが求められる。

海水氷分布の観測では、電波センサに加え、GCOM-C 等の光学放射計による 250m 分解能のグローバルな観測が行われてきた。光学放射計による観測は、マイクロ波放射計より分解能が 1 桁~2 桁高く、被雲域の観測は出来ないものの、SAR よりも広範囲の観測を高頻度に行うことが可能である。狭小で起伏に富む日本国土及び周辺海域の雪氷域を監視するためには、空間分解能 100-250m 程度を有する光学放射計による日単位の観測が求められている。上記の実現のためには、SGLI の性能を維持しつつ、高感度な検出器による TDI 撮像等により空間分解能 100-250m 程度への向上を目指

す。また、他衛星への相乗りなどによる観測頻度の向上を視野に入れて、観測ターゲットを特化することによるセンサ小型化による実現解も検討が必要である。

#### 2.3.4 海洋デブリ、海面高度、海洋塩分

海洋環境の保全の視点では、海洋デブリ、過剰な栄養塩類、油等による海洋汚染に関し、汚染源を特定して監視することで「きれいな海」の実現に貢献することができる。海洋デブリについては、自然物(海水等)と人工物(船舶、漂流ゴミ)の分離等を行いつつ、将来的にはリアルタイムモニタによる船舶運航上の不確定要素の排除が目指す方向性であり、加えて海洋プラスチック等の課題にも取り組む必要がある。いずれも、光学イメージングによる関連情報の収集が有望であるが、衛星から有効な観測を実現するための観測要件については、今後の研究課題である。また海面高度については、気候変動における大気海洋相互作用、海洋表層循環の把握に資する情報として、海洋モデルへのデータ同化情報として、衛星によるデータの収集が望まれる。将来的には全球 10km 間隔での計測によるサブメソスケールの変動把握が期待され、海面高度を高精度(計測誤差<10cm 級)かつ面的に計測可能な干渉 SAR 型高度計技術も研究を継続中である。チャレンジングな技術開発を有するミッションであり、先行する海外ミッション(SWOT)のデータや運用・利用状況等も踏まえつつ検討を進める必要がある。海面塩分については、2.3.3 節の記載を参照されたい。

#### 2.3.5 統合解析技術・システム

他分野のデータと同様に、水温、海色、海面高度、海上風速、海水等の多様な衛星データを最大限活かして必要な情報を得るためには、データの集約やある程度の I/F の一貫性の確保に加えて、物理・化学・生物過程が考慮された数値モデルに観測データを同化することが効果的である。データ同化によって欠損の無い情報になり時空間解像度が異なるデータを統合的に解析できると共に、現場データ(船舶、表層ブイ、アルゴフロートフロート)の同化等を通じ、直接衛星で観測しにくい海面下の情報を推測することにも繋がる。

現在は JAMSTEC の JCOPE-T DA のように海流や熱・エネルギー収支を考慮した物理モデルへの海面高度や海面水温等の同化が進められているが、今後はプランクトンの変動や沿岸での栄養塩の流入など化学・生物過程も考慮したモデルへの同化を進めることにより、欠損の無い海洋生態系や生育環境の監視、高次生態系モデルと連携した水産資源変動の評価、沿岸や全球スケールの物質循環の推定や炭素収支における各海域の役割の評価などにおける衛星データの一層の貢献が期待できる。

### 2.4 カーボンニュートラルへの貢献

2050 年カーボンニュートラルの世界を実現するためには、国際連携・協力のもとに、適切且つ効果的な政策を実行していく必要がある。そのためには、政策決定者に対し、行動強化を促す施策を決定することに必要な情報、つまり客観的な観測事実に基づく全球に渡る温室効果ガスの正味の排出量情報を、求められる要求の時空間解像度に応じタイムリーに提供する必要がある。また、施策の実施結果の見える化を実現し、施策のさらなる強化を促すための情報提供が必要となる。

この目的のためには、全球に渡り、どこで・どれだけの量の温室効果ガスが排出もしくは吸収・除去されて

いるのか明らかにし、温室効果ガスの排出量削減、吸収・除去力の強化を支援する情報提供が必要となる。カーボンニュートラルな社会実現に向けては大きく 2 つ、温室効果ガス排出量の時空間的動態把握（大気中温室効果ガス濃度の観測）および温室効果ガス吸収力として植物生態系の時空間的状態把握（土地被覆・土地利用、バイオマス、藻場等の沿岸環境）が鍵となる。

上記 2 本柱を実現する衛星観測技術として、温室効果ガスを観測する光学分光観測、土地被覆・土地利用、沿岸環境、森林バイオマスを評価する光学イメージングや光学アクティブ観測、SAR 観測の発展が必要となる。また、近年植物生態系による実効的な二酸化炭素吸収力を評価する上で光学分光計測にもとづく、植物蛍光観測が着目されており、直接的に植物活動を評価する指標として今後の発展が見込まれる。

#### 2.4.1 温室効果ガス排出量の時空間的動態把握（大気中温室効果ガス濃度の観測）

人為的な二酸化炭素の排出の過半は都市域からと言われている。そのため、今後は行政区画（都市レベル）単位における施策が、国際的にも重要な貢献をもたらすことになると考えられる。その政策決定を支援するためには、どこから・どれだけ温室効果ガスが排出もしくは吸収・除去されているかの情報を行政単位さらには事業所単位で評価可能となる世界が望まれる。行政区画を数十キロスケールと仮定すると、その区画の中における排出源別排出量を評価するためには、空間スケールとして行政区画よりも十分小さい、数キロからサブキロスケールでの観測情報提供が求められる。また、大気中に排出された温室効果ガスはその場に留まることなく、大気輸送により大気循環プロセスに取り込まれる。そのため、発生源から輸送される前の情報を引き出すには、モデルによる輸送過程の推定が必要となる。大気中での輸送は 3 次元構造（水平・鉛直）となるため、従来の観測（水平情報）のみでは、大気輸送を評価するための観測情報、すなわち鉛直分布情報が不足する。特に人間活動の影響を強く受けた地表付近の濃度情報（大気下層における鉛直分布情報）は有効な情報となり、温室効果ガス排出量の動態把握においては、必要な情報になってくると考える。

また、温室効果ガス濃度そのものの変化量が極微量であるもの、燃焼時に同時に排出される二酸化窒素（NO<sub>2</sub>）や一酸化炭素（CO）をトレーサとして使用することにより、排出パターンの識別が容易になる場合もある。特に NO<sub>2</sub> は短寿命という性質から、発生源近傍に多く滞留することが多い。また、短寿命且つ変化量が大いという特徴を利用し、その時間変化量を追跡することにより、排出量の指標のみならず、風向・風速の指標になりうる可能性がある。これら燃焼時に温室効果ガスと同時に排出され、且つ観測が容易なガス種については、今後の排出量推計精度向上における重要な役割を担うことが期待される。

GOSAT により衛星を用いた温室効果ガス観測を実証して以降、各国宇宙機関が同種の観測技術を応用した衛星を計画・運用が開始されていることに加え、近年では民間主導となる観測も実現されつつある。また、観測目的においても多様化が進んでいる。GOSAT を始めとした、各国宇宙機関が運用・計画する衛星では、グローバルな二酸化炭素動態観測および、都市レベルの観測を行い、科学的に理解の促進、さらには脱炭素に向けた政策決定者に向けた情報提供の推進を目的としている。一方、民間主導の場合、事業所単位における漏洩検知およびその保全に活用することを目的としている。そのため、それぞれ測定対象とするガス種、導出精度が異なる。グローバル観測および事業所単位での観測、

それぞれにおいて利点がある。そのため、欧州における近年の例では宇宙機関衛星をもちいて、グローバルに観測を実施し、グローバル観測で特異点として識別された点について、民間衛星を用い局所的に高空間分解能で観測し、漏洩検知・抑制に繋げる取りくみが試みられている。今後は、本事例のように宇宙機関衛星が持つグローバル観測と、民間主導の事業所レベルの観測・評価を組みあわせることで、全球的なネットゼロに向けた官民一体となった評価・対策が推進されることが期待される。

植物生態系の吸収力評価においては、GOSAT データを元の実現した、植物蛍光観測による実効的な二酸化炭素吸収力評価が着目される。今後、森林管理による二酸化炭素吸収力の制御に関する施策を遂行する場合には、その評価単位として森林管理レベルの空間スケール、すなわちサブキロスケールでの評価が有用になると考える。

現在、温室効果ガス濃度の水平空間イメージと鉛直情報を同時に評価できる手法はない。先の通り大気動態を考慮した場合、同時に水平・鉛直情報を取得できることが望ましい。この目的達成のためには、既存技術の組み合わせ等による空間イメージと鉛直情報を同時取得する観測ハイブリット化などを検討していく必要がある。また、大気分光観測から温室効果ガス濃度を導出するアルゴリズムは日進月歩の状況である。衛星観測で取得できる情報には制約があるため、その制約の中でのバランス（空間分解能、波長分解能など）を最大限に考慮する必要がある。そのためにも、観測装置開発と処理アルゴリズムの連携、さらには結果を取り込むモデルとの連携が今後一層重要な役割を担うことになると思う。

#### 2.4.2 植物生態系の時空間的状态把握（表層環境（土地被覆・土地利用、沿岸環境）、バイオマス）

土地被覆・土地利用、藻場等沿岸環境動態の把握では、光学センサによる観測が主となる。国内外の多種多様な光学イメージングデータが利用可能であるが、今後更なる土地被覆分類等の高精度化等を図るためには、解像度や頻度に加えて波長情報の重要度が増していくものと考えられる。観測波長帯や波長分解能等は目的に応じて最適化する必要があり、それによって適切なセンサ方式が変わるため、具体的な対象と観測要件に係るより詳細な議論を要する。多波長情報収集の有力なツールの一つとなる空間解像度の高い連続分光計測（ハイパースペクトルセンサ）は、従来のライン検出器によるプッシュブルーム方式に加えて、近年、新たな観測方式と光学素子の検討が進んでおり、より高い空間分解能と波長分解能の両立が考えられる。加えて、2.1.2 節に記載の光学ステレオ視やライダー、SAR 等による DSM/DTM 情報等と複合的に解析することで、3次元の土地被覆・土地利用情報等の高度化も期待される。

##### 森林変化：

森林の増減や劣化等の変化をより高頻度かつ高空間分解能で観測するためには、1機あたりの観測能力を拡大しつつ、SAR/光学センサの併用や海外・民間衛星との連携を進める必要がある。JICA/JAXAによる熱帯林モニタリングシステム JJ-FAST では、ALOS-2のLバンドSARによる、観測頻度が年9回程度、空間分解能が25～100 m（ScanSARモード）の観測が用いられている。次号機のALOS-4では、デジタルビームフォーミング（DBF）により高分解能モードの観測幅を拡大し、ALOS-2と同じ頻度で空間分解能を10 mまで向上させることができる。さらに観測頻度を向上させる

ためには、DBF 高度化や大型展開アンテナ利用による観測幅のさらなる拡大や、データ伝送速度・蓄積量の向上やオンボード画像処理の実現による観測可能時間（観測デューティ）の向上などが方策として考えられる。複数の国～全球規模を対象にする場合、非常に大量のデータを伝送・処理することになるため、外部機関（利用者、海外機関、民間など）と共同で、衛星からの観測データの直接受信やデータ処理システムの整備・拡張などを進めることが必要である。また、JAXA による衛星だけでは、観測頻度を大きく向上することは不可能である。そのため、海外機関による広域観測型の SAR 衛星（現在運用・計画されているものとして Sentinel-1、NISAR、ROSE-L など）や光学センサ衛星（Sentinel-2 や Landsat シリーズなど）も活用し、総合的な森林観測システムとして頻度向上を図ることが必要である。一方、空間分解能については、L バンド SAR は、電波法による帯域幅制約から 3 m（レンジ方向）が上限である。また、前述の全球観測型の海外衛星の空間分解能も、5～30 m 程度である。森林劣化や再造林・植生回復の検出に必要となる 1 m 以下の空間分解能は、ALOS-3 のような高分解能の光学センサ衛星や、民間による商用小型衛星（光学センサ、X バンド SAR）が得意とする領域である。したがって、これら光学センサや X バンド SAR を組み合わせ活用していくのが良いと考えられる。

#### 森林バイオマスや樹冠構造：

森林バイオマスや樹冠構造の面的観測を高精度に実現するには、樹冠の形状や体積に感度のある 3 次元計測が必要である。衛星からの 3 次元計測技術として、衛星ライダー、光学ステレオ計測、タンデム干渉 SAR が有望であり、これらを組み合わせて利用することで、互いの欠点を補って利用ニーズに合ったプロダクトを提供することが可能になる。以下にそれぞれの特徴について記す。

宇宙からの光学アクティブ計測、すなわち衛星ライダーに寄せられる期待の中で最大のものは、観測カバレッジの拡張である。現状では、衛星の軌道に沿って 1 ビームもしくは数ビームのレーザー光で照射したフットプリントを観測しているため、森林など地表面の一部をサンプリング観測している状況である。これに対して、面的にくまなく観測するためには、イメージングライダーの開発が最も有効と考えられる。イメージングライダーとは、レーザー光が地表面を照射するフットプリントに対して 100 個以上の多数の受光素子を並べて観測することで、面的に連続した観測を可能にするセンサである。さらに、多数のレーザー光ビームを同時に照射することで、観測幅を数 km から 10km クラスに広げることが可能である。こうしたイメージングライダーの実用化にともない、全球を 1 年から数年の間隔で観測できるようになり、樹高や森林バイオマスの経年変化の情報を正確かつ面的にくまなく得ることができ、特にカーボンニュートラルをはじめ気候変動対策には多大な貢献が期待できる。

次に期待される技術として、レーザー光の発振周波数を 2 波長または多波長に増やすことが挙げられる。現状の衛星ライダー（地表面観測ライダー）では、Nd:YAG レーザの主波長である 1,064nm（近赤外）、または、高調波にあたる 532nm（可視緑色光）のどちらか 1 波長を利用するタイプが多い。これに対して、1,064nm と 532nm の 2 つの波長のレーザー光を同時に照射するライダーによる観測を実現できれば、特に地盤面識別の高精度化が期待できる。ただし、エアロゾル・大気ライダーの項でも述べた通り、日本では宇宙用 532nm レーザの開発実績が無いため技術開発が必要である。衛星ライダーによる森林観測では、レーザー光の反射波形を解析して樹高や森林バイオマスを推定することになるが、反射波形のどの部分が地面からの反射を表すか正確に特定できるか否かが、推定精度を左右する決定



的な要因となっている。現状の単波長のライダーでは反射波形の形状から地面の位置を特定せざるを得ないが、2 波長ライダーであれば、地面と植物との反射率が波長によって異なる特性を利用できる。例えば、波長 1,064nm と 532nm の反射波形から植生指標の鉛直分布を計算することが可能であり、そこから精度よく地盤面の反射位置を特定できる。地盤面位置の正確な特定は、樹高や森林バイオマスの推定精度の大幅な向上に直結する。さらに、森林観測に適した波長帯の検討も必要であるが、他の波長のレーザー光を利用することで、植物の生態学的機能について鉛直方向の分布を観測できる可能性もある。

また、レーザー光の高出力化も観測精度の向上が期待できる。現状では、森林観測を目的としたライダーである GEDI や MOLI のフットプリントは、直径 25m に設定されている。レーザー光の反射波形は、フットプリント内での地面の標高差が大きいくほど伸長してしまい、樹高や森林バイオマスの推定精度の低下を招く。そのため、フットプリントを小さくすれば地面の標高差は小さくなり、推定値の高精度化に寄与する。しかし一方で、レーザー光が樹冠で遮られて地面まで到達できないと、反射波形における地面の位置が不明瞭になり、逆に推定精度の低下に寄与する。これら 2 つの効果のバランスを考慮することでフットプリントの 25m 径が設定されている。しかし、レーザー光が高出力になれば、単位面積当たりのレーザーパワーが確保できフットプリントを大きくしても地面まで到達する可能性は高くなる。そのためには、レーザーの高効率化の技術研究が必要と考えられる。また、レーザー光の高出力化が実現すれば、大きいフットプリント径の中に小径のフットプリントを設定し、分割してデータを取得することで、森林、地盤面の両方を高精度に取得することが可能になる。

光学ステレオ計測や、上記ライダー計測との融合による DSM/DTM については、2.1.2 節 地形情報/変化 (DSM/DTM) を参照されたい。

SAR は、光学センサやライダーと比べて推定精度と解像度が劣るが、悪天候でも観測できるという利点がある。そのため、雲の多い熱帯域や山岳地帯が対象となる場合や、国全体を定期的に時系列で観測したい場合に、必要な技術となる。L バンドや P バンドのような低い周波数のほうが、森林内部まで電波が到達して森林バイオマスへの感度が高くなるが、P バンドは電波法による帯域幅割り当てが少ないため空間分解能が低く、また既存の地上レーダなどの電波干渉の懸念から、国によっては観測が許可されないという問題がある。したがって、日本としては、これまでの長期観測の継続性を維持できる L バンドを発展させていくことが望ましい。森林の 3 次元構造（後方散乱の分布）は、タンデム観測（2 機以上が同時あるいは短時間間隔で同一箇所 SAR 観測を行う）による多偏波干渉 SAR (PolInSAR) や SAR トモグラフィという手法によって計測することができる。これまで、航空機 SAR による実証結果は多く発表されているが、2 機タンデム体制の L バンド SAR 衛星がまだ実現されていないため、衛星による実証例は無い。タンデム観測を実現しようとする場合には、限られたコストの中で 2 機以上の複数機体制を構築することになり、例えば従来開発してきたシステムの低コスト化やサイズダウン、小型衛星を活用した実証、外部機関との協力などを検討する必要がある。森林変化観測や他の利用（災害や海洋）で要求される観測頻度向上の実現とは相反するシステムとなるため、観測頻度向上については海外や民間の衛星と連携することも考慮が必要である。また、PolInSAR やトモグラフィによる森林構造の観測は、偏波による散乱の違いを利用するため、4 偏波での観測が必要である。そのため、タンデム観測に必要な技術と同時に、4 偏波の観測性能の拡張（例えば観測幅の拡大など）も同時に研究開発を進め

ていくべきである。

### 2.4.3 統合解析技術・システム

カーボンニュートラルに向けた政策決定者に対し、行動強化を促す施策を決定することに必要な情報を、必要な粒度、必要なタイミングで提供できるシステムが求められる。このシステムにおいては、「GHG、森林バイオマス等の各種観測情報」、「排出インベントリ等の統計値データベース」、「排出量推計等を実施する計算処理モデル」等を連携させ、統合化アウトプットとして、「地域別等排出量・吸収量情報」などを作成し、作成した統合化アウトプットを簡易な表現にて「政策決定者への支援情報」として提供することが望ましい。

個々の観測については前述の通りとなり、今後はこれらの観測情報を統合し、観測情報・統計データ集積およびその解析するフレームワークを構築し、実運用を念頭としたエンドユーザへの情報発信手法の整備を含め、統合化解析・システム計画の策定・推進を実施する必要がある。

また、国内外の機関の同種の観測データやモデルとの比較検証を実施し、国際的に検証するためのフレームワークを構築する。そのフレームワークにおいて協力機関間でのデータ共有やアルゴリズム相互検証、解析結果の共有と普及を行うためのプラットフォームも構築する。

## 2.5 経済安全保障

経済安全保障の観点では、食料安全保障の強化や持続可能な農業評価、大規模感染症など公衆衛生への対策、(水資源を含めた)資源・エネルギーの確保、経済インテリジェンスなど、幅広い分野での貢献が期待される。求められる衛星情報は一例として、土地被覆・土地利用や耕作地マップの精緻化、日射量や降水量等の気象関連情報や、SIF、作物生育状況、大気環境としてのエアロゾル、再生可能エネルギーの対応策に資する適地評価のための地形情報や海上風情報、天然資源に係る資源マッピング、経済活動評価につながる人為的活動の把握等々、多種多様なユーザーが存在し、利用目的や観測情報の要件も多岐に渡る。当面、現場でのリスク評価や実際の対策での利用に向けたさらなる利用研究事例の蓄積と、情報を有効活用するための社会実装プロトタイプの実例創出に注力していく必要がある。幅広い観測情報の利用が考えられるところ、今後さらなる利用研究の進捗とともに観測情報に対する要求の抽出と見直しを図っていく方針のもと、現時点において本分野では、まずは気候変動下における世界の作物生産状況を把握し、食料の安定供給に向けた施策に貢献することを目指し、そのために強化が必要と考えられる観測情報(土地被覆・土地利用、耕作地マップ、SIF、土壌水分量)について記載する。

耕作地マップ：

農業分野、食糧安全保障の観点では、土地被覆・土地利用の精緻化や耕作地マップの精緻化が求められる。本分野のエンドユーザは、農家/農業法人～地方自治体/国～国際機関まで多岐に渡り、そのニーズによりローカル(～10m 分解能)から全球(～1km 分解能)まで観測のスケールが異なる。近年はドローン等による地域的な観測も行われているが、衛星からの観測は、広域な領域を定期的に観測できる点でメリットが大きい。また、農業分野では災害等発生時の耕作地の状況把握も重要となる。中分

解能衛星によりグローバルな把握と、地域的には高分解能衛星による詳細な観測を組み合わせることで、総合的な観測が可能となる。

ローカルな観測においては、比較的高い解像度(数 m 級)と、月 1 回もしくはそれ以上の頻度での観測が求められる。光学センサは空間分解能の高さや分光情報による作物種・生育状況の判断に利点があるが、熱帯地域など雲量の多い地域や季節においては、雲によって観測頻度に限界があるため、SAR を併用することが有効であり、直近では ALOS-3/4 と海外衛星 (Sentinel-1/2 や Landsat、NISAR、ROSE-L 等) を組み合わせ利用が望まれる。今後は他の分野と共通的な研究開発 (観測情報量やデューティの向上、衛星小型化・低コスト化) を進めつつ、将来の観測の継続性のために、民間の小型衛星やその他の外部機関とも協力した観測システムを検討する必要がある。

グローバルな観測においては、世界の大規模な耕作地における生育状況や収量見込みの精度向上の観点や、災害(浸水等)後の経時変化の把握の観点からも有効である。Sentinel や Landsat といった海外ミッションとの連携を図りつつ、それらのミッションでカバーできない GCOM-C/SGLI によるグローバル 250m 分解能観測の更なる分解能向上(全球: 100~250m)を目指した研究開発を行う必要がある。

#### SIF 観測:

近年作物の生育評価の指標として植物が光合成をする際に発せられる光 (太陽光励起クロロフィル蛍光:SIF) を用いた研究が進められている。SIF は植物による二酸化炭素の取り込みのみならず、植物の活性度を司る指標としても有効となる。自然条件で発せられるクロロフィル蛍光の観測は、非常に高い波長分解能を有する光学分光放射計により実現可能となる。今後、SIF を用いた植物生育度、収穫量等を評価していくためには、作付面積相当の区画での詳細な分布情報の取得が期待される。この目的に対しては、サブキロスケールの空間解像度と最適な収穫時期が予測できる程度の観測頻度 (1 回/日など) を実現する必要がある。現在運用されている GOSAT/GOSAT-2 では、直径 10km の観測が離散的に実施されている。海外衛星においては欧州の TROPOMI、米国の OCO-2/3 においてそれぞれ 7x7km<sup>2</sup>、1x2km<sup>2</sup> の空間分解能にて面的な観測が実施されている。本観測目的においては、サブキロスケールのイメージング分光計をもとにコンステレーション運用等により観測頻度を向上させることが望まれる。

なお、土壌水分量は 2.1 節、土地被覆・土地利用情報は 2.4 節の記載を参照されたい。

### 3. プログラムの実現に向けた技術的取組

各分野の技術的実現解を俯瞰すると、各分野において日本のプレゼンスを強化する衛星・センサを実現するために、分野あるいはセンサ横断的に必要となる技術が存在する。(例:大型アンテナ技術、ビームフォーミング技術、大出力宇宙用レーザー技術等) 今後、2 章に示す技術的実現解を念頭にそれらを識別・整理し、各分野で適切な時期に有効に活用できるよう、必要なフロントローディングやメーカを含めた開発体制の整備等、長期的・戦略的な技術開発についても検討を進める。

また、現時点のシナリオで想定される技術発展の方向性に加えて、新たな価値創出に向けた挑戦的な技術開発も進める必要がある。(例: 現在すでに JAXA で取組があるものとして、超広帯域アンテナ

技術（各種広帯域・多周波のレーダ/電波放射計への適用）、干渉 SAR 型高度計(海面高度計への適用)、高感度な超格子赤外検出器、テラヘルツ波観測技術\*(\*NICTと連携)等) 今後、萌芽的な技術を含めて整理するとともに、これらの技術開発の進捗状況も反映し、各分野の衛星利用シナリオを継続的に見直す必要がある。

更に、本プログラムの実現に向けた、モデル連携や解析技術・システムの高度化等地上セグメントに係る技術開発の他、軌道上データ処理や衛星指向管理、データ通信等高度化する衛星観測を支える技術・システム、測位衛星システムとの連携強化によるデータ高度化など、衛星・地上各セグメントの基幹的な技術・システムの開発事項についても識別・整理し、長期的・戦略的な開発の推進を検討する。

## 第4部 まとめ

### 1. はじめに

本将来ミッション検討タスクチームの議論は、衛星による地球観測の重要性が増す中で、我が国の宇宙基本計画における地球観測衛星の将来計画が必ずしも十分でないことを憂慮し、学术界と JAXA を中心に進められた。本報告書においては、第2部で20-30年先を見据え、日本が推進すべき地球観測衛星のあり方について科学的観点から科学・利用シナリオをまとめ、これに対して第3部で技術的観点での応答を含める形でプログラム化を図った。第4部ではこれらの議論をふまえて、JAXA の役割を再認識し、JAXA が取り組むべき技術開発、持続可能な衛星開発・運用の体制についての提言をまとめた。また、地球観測衛星データの更なる普及と利活用に向けて、長期観測の必要性、オープンデータ、使い勝手の向上など地球観測衛星を開発・利用する上で考慮すべき点を集約した。

### 2. 衛星地球観測における JAXA の役割

#### 2.1. JAXA の役割

宇宙産業や人工衛星をとりまく環境が急速に変化する中、産学官の目指す姿を想定し、JAXA の役割も変わって行くことが望まれる。JAXA の従来の役割は宇宙に関する科学技術の開発を推進し、①社会ニーズ(社会課題の解決) に対する衛星地球観測システムの実現解を提案、②衛星地球観測システムの利用出口を明確化し、社会実装(社会定着) へ橋渡しをすることであった。海外では既に Maxar 社の高分解能光学衛星や PlanetLab 社の小型衛星コンステレーション等、民間業者による衛星観測サービスが台頭しており、国内でも Synspective 社などによる小型 SAR 衛星コンステレーションの展開等が進んでいる。従来通り、知の探究をする学术界と JAXA が連携することで、衛星観測を向上させ社会ニーズに応えらるとともに、このように産業が拡大する中では、③多様なステークホルダーとの連携による効率的、発展的、かつ持続可能な衛星地球観測事業を実施することも新たな役割と考えられる。

具体的には、②における観測データの品質保証は JAXA・EORC の重要な役割である。特に気候変動の影響評価は、長期データの品質を維持することが極めて重要である。そのために、リトリバル前(放射量) とリトリバル後(地球物理量) の両方のデータを校正検証することが必要不可欠であり、それぞれの現場データを取得している機関やコミュニティ(観測ネットワーク) との連携協力を密にすべきである。

また、③ステークホルダーとの連携では産学官の目指す姿に関し、環境の変化をふまえ、JAXA は民間企業との棲み分けを意識し、国として持つべき技術開発要素に関しリスクが高く一民間企業では到底投資できない分野・技術開発にリソースを投じるべきである。また、リソースに限りがある中、1センサ・1衛星での社会課題の解決は難しいことから、他の宇宙機関との国際協力による目標の達成も戦略的に目指すべきである。

#### 2.2. JAXA が取り組むべき技術開発

20-30年先を見据えた JAXA が推進すべき地球観測衛星のあり方を考えるにあたっては、科学や未来社会を想定した上での技術開発に取り組む必要がある。そのため、学術分野との対話が必須であり、JAXA は研究者との科学技術開発の対話を重ねていくべきである。本将来ミッション検討タスクチームに

においても第 2 部で科学・利用シナリオが提言されており、これをふまえ、JAXA は地球観測衛星により何のために何を観測するのか、そして、そのための技術開発を検討、計画すべきとして科学者と技術者の議論を行った。

地球観測システムの技術開発において、観測すべき物理量やプロセスは科学的知見などふまえ変化していく。そのため、既存の衛星シリーズだけではなく、新規ミッションを立上げる必要がある。現行衛星シリーズの後継ではない新規ミッションのアイデアは TF にて公募が行われているが、これらは必ずしも JAXA で開発・運用を行うことを前提としていない。一方で、国のプロジェクトとして予算化するためには担当省庁の割り振りや優先順位付けが必要となる。TF にて科学的な優先順位付けを行い、JAXA における技術検討を経て、国際情勢や実現可能性を踏まえた優先順位が改めて決められる流れとなろう。予算の割当先を含め、JAXA の役割と観測継続への道筋を含む実施体制はミッションごとに検討する必要がある。

### 2.3. 持続可能な衛星開発・運用の体制

JAXA は研究開発機関故に、観測を継続するだけの後継ミッションは認められない。一方で、地球環境研究には、長期観測データが必須であり、そのミッションの成果を最大限活用するために今後も観測を継続し続けなければいけない。まずは現在運用中の衛星の後継機を実現させ、長期的に継続する開発・運用のサイクルに移行するために、ユーザ機関や民間業者を交えた体制を整えることが求められる。

そのためには、衛星地球観測全体をプログラムとして構成（プログラム化）し、各サブシステムの最適化と複合利用による成果の最大化を目指す関係機関の連携による態勢の構築が必要である。すなわち、既存の各衛星シリーズについても、継続発展をしながら、地上観測との連携なども含めた全体としてベストミックスである一つの地球観測システム（System of systems）として機能させるということである。この際、開発・運用の主体は可能な限り他機関・民間等に移管すること同時に取り組むべきである。

## 3. 地球観測衛星データの更なる普及と利活用に向けて

### 3.1. デジタルツインの普及と期待

総務省がまとめた情報通信白書（令和 3 年）において、デジタルツインが言及されている。“近年、IoT 等を活用して現実（フィジカル）空間の情報を取得し、サイバー空間内に現実（フィジカル）空間の環境を再現するデジタルツインが注目されている。デジタルツインを活用することで、リアルタイムで取得した情報をもとにサイバー空間上で現実空間の状況を把握すること、また、サイバー空間上で現実空間の分析やシミュレーションを行い、その結果を現実空間にフィードバックすることなどが可能になる。”というものである。業務効率化や付加価値情報創出の効果が、現時点でデジタルツインの活用が最も進んでいるのは、製造業、プラントエンジニアリング、国土計画・都市計画の 3 分野とされている。地球観測衛星データは高解像度モデルと融合したデジタルツインにより、国土計画・都市計画等の社会への利活用が期待されており、World Climate Research Programme (WCRP) の WCRP Strategic Plan 2019–2028 である Light House Activity の一つの柱として、“Digital Earth” の推進が提唱されている(<https://www.wcrp-climate.org/digital-earths>)。Digital Earth では、高性能コンピューティング（HPC）、ビッグデータ、AI の融合によるデジタル技術で、高解像度地球システムモデリングと

膨大な地球観測データの利活用の共同開発を推進する計画である。ESA では、2020 年秋には Digital Twin Earth としてプリカーサブプロジェクト Destination Earth (DestinE)を開始し、環境問題など喫緊の課題と目標に対して欧州の取り組みを強化している。日本では、地球衛星観測データを高解像度数値モデルに同化した現業気象予報システムや JAXA における「世界の気象リアルタイム」システム (NEXRA) によって創出されるデータが Digital Earth に貢献し、地球デジタルツインとして社会的に利活用される可能性がある。このような取り組みを通じて地球観測衛星データの利活用の拡大が期待できることから、新しいデジタル技術によるデータの利活用の動向に衛星データも適応していく必要がある。日本でも地球観測衛星データと高解像度モデルを融合した地球デジタルツインシステムの構築を意識的に推進して、気候変動課題などの地球規模課題の解決に向けたデータや情報の基盤の開発を推進するべきであろう。

### 3.2. 長期観測の必要性

気候変動や人間活動に伴う環境の変動は、長期的かつ連続的に生じる。また、火山噴火や大地震のように突発的に発生する現象もある。数年観測した程度では、その要因を理解し、将来の変動の予測や兆候を突き止めることは不可能である。また、現在の地球の診断記録をレガシーとして将来の人類へ残すことは、その時代を生きる我々の責務である。このとき、観測の中断や停滞は防ぐべきであり、そのためには地球観測システムの冗長性も不可欠である。その一方で、長期化による観測データ量の増加や長期的に均質な気候データレコード作成のための再処理など、地上のインフラの能力や機能の強化が不可欠であることから、衛星と地上はセットで検討すべきである。

### 3.3. オープンデータ

オープンデータは、少ない制約のもとで無償配布されるデータである。JAXA の地球観測データは貴重な資産だが、単に抱えているだけではその価値を活用できない。ユーザに利用してもらうことで有用な情報やサービスにつながる。ビッグデータの時代では、取得や再配布に厳しい制限のある「面倒くさい」データは、よほどのキラコンテツでない限り敬遠され、他のデータで代替されるだろう。従って、JAXA の地球観測は原則としてオープンデータとすべきである。これは政府 (総務省) の方針にも整合する。JAXA のオープンデータが基盤となって民間サービスが活性化することが期待される。一方で、オープンデータは民業圧迫や安全保障上の制約 (リモセン法など) が障害になることが多いが、ステークホルダーとの調整を行いつつ、オープンデータでできることを増やすことに注力すべきである。このとき、CC-BY ライセンスなどにより、データのポリシーや利用規約を明確にすることも忘れてはならない。

### 3.4. 使い勝手の向上

使い勝手の向上には、JAXA の衛星データをユーザにストレスなく利用してもらうための工夫やサービスが不可欠である。「面倒くさい」データは使ってもらえない。検索・取得を支援するデータベースとそのインタフェースは、見た目や直感的なわかりやすさだけでなく、信頼性、相互運用性や汎用性、長期運用性、大量処理 (バッチ処理) に配慮すべきである。また、特定の OS やブラウザ環境 (時代遅れの技術) にロックインされないサービスを提供すべきである。データの品質も使い勝手に大きく影響する。高品質の

analysis ready data が提供されるべきである。すなわち精度の高い各種補正が施され、品質保証（校正、幾何補正、雲フラグ等）が付加された物理量データが、環境依存性が少なくシンプルで一貫性があり標準化された形式で提供されるべきである。さらに、3.2 項で書かれているように長期観測によってデータ量が増加することで、これまでのようにユーザが自身の環境にダウンロードして利用するという従来の解析方法以外のデータへのアクセス方法の検討や対応も必要となってくる。

データにかかる様々な情報が整理されることで教育普及活動やキャパシティビルディングを外部機関や大学などが実施することが可能となり、JAXA の負担が減るとともに地球観測データの利活用が増えることが期待される。データをユーザと一緒に育てていって欲しい。使い勝手が良くなると、ユーザ・支持者が増える。ユーザ省庁がスポンサーとなって予算を拠出してくれるようになれば、JAXA 自身の予算は新たな研究開発に使い、さらにデータを出せる。そのような好循環につなげていくべきである。

#### 4. 提言

##### 提言①：「地球デジタルツイン」による4次元情報の強化

本稿では将来ミッション検討タスクチームのメンバーが作成する科学・利用シナリオを元に JAXA にて技術検討を行い、科学シナリオと技術シナリオの融合を試みた。その結果、農業など気候変動の影響を受ける産業にとって重要な気候変動への対策（緩和・適応）や頻発化・激甚化する気象災害の予測精度の向上には、予測モデルの改良、高度化が必須で、そのためには、**4次元情報(3次元+時間変化)の強化**が重要であると言える。

そのため、陸や大気を問わず、鉛直情報の収集に係る新たな技術獲得が不可欠であり、3次元データ取得に向けた研究開発が JAXA の目指す方向と言える。加えて国内外や民間事業者等の有する衛星能力の更なる活用による時間解像度の強化が期待される。

地球観測衛星データは、各種の数値モデルに入力・同化されることで予測・診断に貢献することができる。近年は特に「デジタルツイン」という、計算機内で限りなく精巧に対象を再現するアプローチが様々な分野で広がっている。「地球デジタルツイン」を目指す研究開発が活発化することを想定し、3次元、あるいは4次元情報の取得にかかる衛星観測技術の発展を目指すべきである。

##### 提言②：地球観測衛星計画のプログラム化

科学シナリオと技術シナリオの融合によるミッションの実現性や国際連携、社会情勢等を踏まえ計画案をまとめるにあたり、国家予算で実施する地球観測システム・サービスを維持・発展させ、予見性を確保するためには**プログラム化**が必要である。ここで言う「プログラム化」とは、個々の地球観測衛星ミッションが有機的に連携し、全体として目標を達成する態勢を構築することであり、以下の項目を含む。

1. ミッション個々の衛星開発を**個別ではなく繋がりをを持った計画**とすること。
2. JAXA が研究開発を行い実証して終わりではなく、エンドユーザを明確にし、ユーザによる活用の中で、新たなニーズが生まれ、JAXA はそのニーズに技術開発で応えるという**サイクルを踏まえた計画**とすること。
3. JAXA で閉じたプロジェクトではなく、関係各省庁や民間が担う事業や学術分野が求める科学との関係を示し、**JAXA の役割を明確化**すること。



## 5. 結び

本将来ミッション検討タスクチームは、2020年11月20日の第1回会合から計8回の会合を経て、本報告書をまとめることとなった。本チームで議論する上で、まず我々は、「人類は、地球との共生を図りながら、持続可能な開発を行い、幸福に暮らす。」ことを目標として設定した。これを実現するにあたり、「複雑な地球環境システムを理解し、その現状や変動を把握することで、影響の緩和を目指すとともに将来を予測しながら適応」していかなければならないとして、

- 1) 相互作用する複雑な地球環境システムやそのつながり(プロセス)を把握し、
- 2) 変動する地球環境の予測能力を飛躍的に向上させるために、
- 3) 複数、多種類の衛星地球観測とその発展的継続が必要不可欠であり、
- 4) 地球科学の発展とともに、ビッグデータと数値モデルを活用した次世代型の研究、社会実装が必要である。

これらを実行する上では、提言の通り、診断・予測能力の獲得を目指した地球デジタルツインの構築、および戦略的・総合的な地球観測衛星計画のプログラム化に期待したい。

本報告書の提言が、地球観測衛星による災害対策・国土強靱化や地球規模課題の解決などへの貢献に20-30年先の未来まで活用されることを願う。

## 付録情報

### 1. 執筆者

#### 将来ミッション検討タスクチーム：

岩崎 俊樹（東北大学）座長  
本多 嘉明（千葉大学）  
増永 浩彦（名古屋大学）  
高橋 暢宏（名古屋大学）  
佐藤 正樹（東京大学）  
六川 修一（東京大学）  
岩崎 晃（東京大学）  
高薮 縁（東京大学）  
江淵 直人（北海道大学）  
横田 達也（東洋大学）  
河宮 未知生（海洋研究開発機構）  
鈴木 健太郎（東京大学）  
堀 雅裕（富山大学）  
奈佐原 顕郎（筑波大学）  
平譚 享（国立極地研究所）  
芳村 圭（東京大学）  
岡本 幸三（気象庁気象研究所）  
橋爪 真弘（東京大学大学院）

#### 執筆協力者：

酒井 直樹（防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門）  
市井 和仁（千葉大学 環境リモートセンシング研究センター）  
小林 秀樹（海洋研究開発機構 地球環境部門 北極環境変動総合研究センター）  
永井 信（海洋研究開発機構 地球環境部門 地球表層システム研究センター）  
青木 輝夫（情報・システム研究機構 国立極地研究所 国際北極環境研究センター）  
片岡 崇人（海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター）  
宮澤 泰正（海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 アプリケーションラボ）  
幾田 泰醇（気象庁気象研究所 気象観測研究部 第四研究室）  
澤田 洋平（東京大学 大学院工学系研究科）  
羽角 博康（東京大学 大気海洋研究所）  
弓本 桂也（九州大学 応用力学研究所）

## **JAXA 執筆者**

平林毅 (JAXA 地球観測統括)  
沖理子 (JAXA 地球観測研究センター)  
早坂忠裕 (JAXA 地球観測研究センター)  
大木真人 (JAXA 地球観測研究センター)  
大吉慶 (JAXA 地球観測研究センター)  
可知美佐子 (JAXA 地球観測研究センター)  
久保田拓志 (JAXA 地球観測研究センター)  
杉田尚子 (JAXA 地球観測研究センター)  
田殿武雄 (JAXA 地球観測研究センター)  
林真智 (JAXA 地球観測研究センター)  
水上陽誠 (JAXA 地球観測研究センター)  
村上浩 (JAXA 地球観測研究センター)  
今井浩子 (JAXA 衛星利用運用センター)  
松尾尚子 (JAXA 衛星利用運用センター)  
度會英教 (JAXA 先進光学衛星プロジェクトチーム)  
本岡毅 (JAXA 先進レーダ衛星プロジェクトチーム)  
須藤洋志 (JAXA GOSAT-2 プロジェクトチーム)  
岡村吉彦 (JAXA GOSAT-GW プロジェクトチーム)  
笠原希仁 (JAXA GOSAT-GW プロジェクトチーム)  
岡田和之 (JAXA Earth CARE / CPRプロジェクトチーム)  
今井正 (JAXA ISS搭載ライダー実証 (MOLI) プリプロジェクトチーム)

## 2. 衛星データプロダクト一覧

### (1) 複数衛星データを利用したプロダクト開発

- Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP): JAXA が作成している、複数の衛星 (GPM-Core GMI、TRMM TMI、GCOM-W AMSR2、DMSP シリーズ SSMIS、NOAA シリーズ AMSU、MetOp シリーズ AMSU、静止気象衛星 IR 等) を利用した全球降水マッププロダクト。南北緯度 60 度までの全球で、0.1 度格子で 1 時間ごとの降水強度データを作成し、観測から約 4 時間遅れで Web から画像とデータを公開している ([https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/index\\_j.htm](https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/index_j.htm))。同様の全球降水マッププロダクトとして、NASA が開発した TRMM 3B42、IMERG、NOAA が開発した CMAP、CMORPH などが存在する。
- Merged satellite and in-situ data Global Daily Sea Surface Temperature (MGDSST): マイクロ波放射計 (GCOM-W/AMSR2、Coriolis/Windsat) や赤外放射計 (NOAA/AVHRR、MetOp/AVHRR、Himawari-8/AHI) 及び現場観測データ (ブイ) による海面水温データを複合した、気象庁の全球日別海面水温分布。全球 0.25 度格子で日平均値として、毎日作成・公開すると共に、気象庁の現業数値予報モデルの境界条件としても利用している。

### (2) 現況監視のシステム構築

- JAXA ひまわりモニタ: 気象庁の静止気象衛星ひまわり 8 号/9 号による観測データについて、JAXA の地球観測衛星 (GCOM-C、GOSAT-2、EarthCARE など) と整合性のあるアルゴリズムを適用して、高次物理量を準リアルタイムで作成・提供・可視化している ([https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/index\\_j.html](https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/index_j.html))。
- 気象・水文利用ユーザからのより早いデータの提供時間へ要求を受け、開発された GSMaP リアルタイム版 (GSMaP\_NOW) を運用、提供している ([https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP\\_NOW/index\\_j.htm](https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP_NOW/index_j.htm))。2015 年 11 月に日本の静止気象衛星「ひまわり」の領域で開始後、静止気象衛星「Meteosat」データ、静止気象衛星「GOES」データを追加することで、2019 年 6 月以降、観測領域を全球で運用中。
- AMSR Environment Viewer: AMSR シリーズの標準・研究プロダクトについて、準リアルタイムで可視化を行っている。プロダクトは JAXA G-Portal (<https://gportal.jaxa.jp/gpr/>) や GCOM-W 研究プロダクト提供サービス ([https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM\\_W/research/resdist\\_j.html](https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_W/research/resdist_j.html)) から提供しているが、可視化サイトにおいても、選択した地点の時系列データをダウンロード可能。
- SGLI 準リアルタイムモニタ: 日本で受信した準リアルタイムのデータについて数時間後までに海面水温や海色や日射や海水分布等のプロダクトを作成し、画像とデータを公開している。同様な仕組みにより準リアルタイムで取得した MODIS や VIIRS の画像・データも作成・公開している。
- JAXA/EORC 台風速報: GPM や AMSR2 で、過去 2 か月に台風を含む熱帯低気圧を観測した場合に、切り出し領域の可視化 (画像、動画) を行い提、一般に公開している

- ([https://sharaku.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/typhoon\\_rt/main.cgi?lang=ja](https://sharaku.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/typhoon_rt/main.cgi?lang=ja))。速報ページは最近の観測の可視化のみだが、過去期間については JAXA/EORC 台風データベース ([https://sharaku.eorc.jaxa.jp/TYP\\_DB/index\\_j.html](https://sharaku.eorc.jaxa.jp/TYP_DB/index_j.html)) にアーカイブされている。
- 日本付近で降水を観測した際に、速報的に降水の三次元動画を自動で作成し配布するウェブサイト「JAXA 3D RAINFALL WATCH」を構築、公開している  
([https://www.eorc.jaxa.jp/GPM/3DRAIN/index\\_j.html](https://www.eorc.jaxa.jp/GPM/3DRAIN/index_j.html))。
  - 気象衛星ひまわりや GCOM-C で霧の現況監視の取り組みがある。例として、(財)日本気象協会の「ひまわり霧情報」(<http://micos-sb101.on.arena.ne.jp/fog-info/login.php>) を挙げることであげることができる。

### (3) 長期データセットの構築

- TRMM と GPM で共通的に適用可能なアルゴリズムやデータ校正作業による長期観測データの精度向上により、1997 年 12 月以降の TRMM と GPM による長期降水レーダプロダクトや長期潜熱加熱プロダクトを構築し、G-Portal (<https://gportal.jaxa.jp/gpr/>) から公開している。
- JAXA Satellite Monitoring for Environmental Studies (JASMES): MODIS、GCOM-C などを活用し、地表面日射量、陸面温度 (LST)、雲量、積雪、海氷などの気候変数の長期データセットを構築し、可視化して、公開している  
(<https://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JASMES/index.html>)。
- マイクロ波放射計による長期海氷データセット: JAXA において複数のマイクロ波放射計 (Nimbus-7/SMMR、DMSP/SSM/I、Aqua/AMSR-E、Coliris/Windsat、GCOM-W/AMSR2) データを利用した、1978 年 11 月～現在の日平均の海氷データセット (海氷密接度、海氷面積) を開発・提供している  
([https://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JASMES/climate\\_v3/index\\_j.html](https://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JASMES/climate_v3/index_j.html))。
- マイクロ波放射計 (AMSR シリーズ) のデータセット: AMSR-E、AMSR2 の AMSR シリーズの標準プロダクト (可降水量、雲水量、降水量、海面水温、海上風速、海氷密接度、土壌水分量、積雪深) について、整合性のあるアルゴリズムで処理することで長期データセットとして利用可能なプロダクトの提供を行っている。データについては JAXA G-Portal (<https://gportal.jaxa.jp/gpr/>) から提供している。なお、可視化画像は AMSR Environment Viewer (<https://www.eorc.jaxa.jp/AMSR/viewer/>) 提供している。
- 豪雨や干ばつなどの降水変動監視のための GSMaP ウェブサイト「JAXA 世界の雨分布統計」を公開中 ([https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP\\_CLM/index\\_j.htm](https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP_CLM/index_j.htm))。このウェブサイトでは 2000 年 4 月以降の「1 日・3 日・5 日・7 日・10 日・月」単位の積算降水量や、豪雨指数、干ばつ指数を表示でき、世界の豪雨や干ばつを容易にモニタリング可能。
- Earth CARE 研究 A-Train プロダクトとして、エアロゾル放射ミッション (EarthCARE) プロジェクトの JAXA EarthCARE サイエンスチームが開発したアルゴリズムにより作成した複数の衛星 (A-Train 軌道を飛行している CloudSat/CPR、CALIPSO/CALIOP、Aqua/MODIS 等) を利用した雲や大気微粒子 (エアロゾル) などの長期データセットを構築し、可視化して、公開し

ている

([https://www.eorc.jaxa.jp/EARTHCARE/research\\_product/ecare\\_monitor.html](https://www.eorc.jaxa.jp/EARTHCARE/research_product/ecare_monitor.html))。

- Japanese Ocean Flux Data Sets with Use of Remote Sensing Observations (J-OFURO): 東海大学を中心に複数のマイクロ波放射計 (GCOM-W/AMSR2、DMSPSSMIS、Colioris/Windsat 等) やマイクロ波散乱計 (MetOp/ASCAT 等) を用いて、大気海洋間の海面フラックスとそれに関連する物理パラメータの 0.25 度格子、日平均のデータセットを開発・提供している (<https://j-ofuro.scc.u-tokai.ac.jp/>)。
- TRMM と GPM の連続性を考慮した校正係数を用いて、TRMM および GPM の 降水データ (三次元降水量、降水タイプ分類、降水頂高度など) を統一フォーマットで作成して公開している。 (<https://www.eorc.jaxa.jp/GPM/archives.html>)
- JAXA/EORC 台風データベース: 1997 年 12 月以降、TRMM、GPM、AMSR-E、AMSR2 の各センサが台風を含む熱帯低気圧を観測した際にデータの領域切り出しを行い、可視化して、公開している([https://sharaku.eorc.jaxa.jp/TYP\\_DB/index\\_j.html](https://sharaku.eorc.jaxa.jp/TYP_DB/index_j.html))。

### 3. 参考文献

#### 第1部 衛星地球観測を取り巻く環境変化と課題

##### 学術会議 地球惑星科学委員会 地球・惑星圏分科会：

- 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 (2020)  
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t292-4.pdf>

##### TF リモセン分科会：

- 地球観測グランドデザイン (2020)  
<https://www.sal.t.u-tokyo.ac.jp/RsTaskforce/TF-GD-A20201030.pdf>

##### TF 地球科学研究高度化 WG：

- 地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析 (2016)  
<http://www.jsprs.jp/pdf/TF20160531.pdf>

##### TF 将来の静止衛星観測に関する検討会：

- 2019年度活動報告書 (2019)  
<https://www.sal.t.u-tokyo.ac.jp/Taskforce/2019MInT.pdf>

##### 文部科学省地球観測推進部会：

- 2017年提言「我が国の地球衛星観測のあり方について」とその後 (2019)  
[https://www.mext.go.jp/kaigisiryu/content/1422941\\_001.pdf](https://www.mext.go.jp/kaigisiryu/content/1422941_001.pdf)

##### JAXA：

- 海洋宇宙連携ユーズ要求書等 (2016)  
<http://www.sapc.jaxa.jp/work/ocean/>
- 衛星利用長期シナリオ (2018)
- 部門会議資料「衛星リモートセンシングに係る衛星利用長期シナリオ案について」(2018)
- 衛星による水循環観測グランドプラン (NDX-2019004)  
[https://www.eorc.jaxa.jp/news/2019/nw190909\\_01.pdf](https://www.eorc.jaxa.jp/news/2019/nw190909_01.pdf) (本文)  
[https://www.eorc.jaxa.jp/news/2019/nw190909\\_02.pdf](https://www.eorc.jaxa.jp/news/2019/nw190909_02.pdf) (要約版)
- 部門会議資料「衛星による水循環観測グランドプランの策定について」(2018)
- 「海外における衛星地球観測ミッション計画の調査分析」成果報告書(2020)

#### 第2部 衛星地球観測が目指す科学シナリオ

##### 第2章. 地球規模課題の解決への貢献

###### 2-1. 地球環境の保全と利活用の両立

###### 2-1-1 持続的な水資源の利活用への貢献

- Chen, J., Wilson, C., Tapley, B., 2013: Contribution of ice sheet and mountain glacier melt to recent sea level rise. Nature Geosci 6, 549–552.  
<https://doi.org/10.1038/ngeo1829>
- Fox-Kemper, B., H. T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S. S. Drijfhout, T. L. Edwards, N. R. Golledge, M. Hemer, R. E. Kopp, G. Krinner, A. Mix,

D. Notz, S. Nowicki, I. S. Nurhati, L. Ruiz, J-B. Sallée, A. B. A. Slangen, Y. Yu, 2021: Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [MassonDelmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

- Mudryk, L., Santolaria-Otín, M., Krinner, G., Ménégos, M., Derksen, C., Brutel-Vuilmet, C., Brady, M., Essery, R., 2020: Historical Northern Hemisphere snow cover trends and projected changes in the CMIP6 multi-model ensemble, *The Cryosphere*, 14, 2495–2514, <https://doi.org/10.5194/tc-14-2495-2020>.
- Ohki, M., K. Yamamoto, T. Tadono, K. Yoshimura: Automated processing for flood area detection using ALOS-2 and hydrodynamic simulation data, *Remote Sens.*, 12(17), 2709; <https://doi.org/10.3390/rs12172709> 2020.
- Velicogna, I., Mohajerani, Y., A. G., Landerer, F., Mougnot, J., Noel, B., et al., 2020: Continuity of ice sheet mass loss in Greenland and Antarctica from the GRACE and GRACE Follow-On missions. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL087291. <https://doi.org/10.1029/2020GL087291>
- 六川 修一、田口 仁、酒井 直樹: 衛星データ等即時共有システムと被災状況解析・予測技術の開発、<https://doi.org/10.11440/rssj.40.147>、2020.
- 芳村圭：数値洪水予測の改善に向けた衛星からの水面域抽出とシミュレーションとの融合、リモートセンシング学会誌、20

#### **2-1-2. 持続的な海洋の利活用への貢献**

- 伊藤大樹、瀬瀬慎也、須賀利雄: サブメソスケール現象 —これまでの成果と観測研究の展望—、*海の研究*、28(4、5、6)、75-95; [https://doi.org/10.5928/kaiyou.28.4-5-6\\_75](https://doi.org/10.5928/kaiyou.28.4-5-6_75)、2019.
- Kwok, R., S. Kacimi, M. A. Webster, N. T. Kurtz, A. A. Petty: Arctic snow depth and sea ice thickness from ICESat-2 and CryoSat-2 freeboards: A first examination, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 125; e2019JC016008, 2020.
- Ma, W., Y. Ishitsuka, A. Takeshima et al: Applicability of a nationwide flood forecasting system for Typhoon Hagibis 2019, *Scientific Reports*, 11, 10213; <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89522-8>、2021.



- Miyazawa, Y., S. M. Varlamov, T. Miyama, Y. Kurihara, H. Murakami, M. Kachi, : A nowcast/forecast system for Japan's coasts using daily assimilation of remote sensing and in situ data, Remote Sensing, 13, 2431; <https://doi.org/10.3390/rs13132431>, 2021.
- Parkinson, C. L., J. C. Comiso: On the 2012 record low Arctic Sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm, Geophysical Research Letters, 40, 1356-1361; <https://doi.org/10.1002/grl.50349>, 2013.
- United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development, <https://oceandecade.org>.
- United Nations Decade on Ecosystem Restoration, <https://www.decadeonrestoration.org>.

#### 2-1-4 大気汚染物質の監視と利活用への貢献

- 日本気象学会(2017) : 気象研究ノート第 234 号、地球観測の将来高層に関わる世界動向の分析、第 7 章 大気化学。
- 笠井康子他(2019) : 地球の健康診断 -温暖化対策効果の早期検証と大気汚染実態把握のための SLCP イメージング分光観測-, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会講演予稿スライド、[https://jpsac.org/wordpress/wp-content/uploads/2019/06/JpGU2019\\_presentation.pdf](https://jpsac.org/wordpress/wp-content/uploads/2019/06/JpGU2019_presentation.pdf)
- Rigby, M., Park, S., Saito, T. et al. (2019): Increase in CFC-11 emissions from eastern China based on atmospheric observations. Nature 569, 546–550. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1193-4>

## 2-2. 気候変動の監視と予測

### 2-2-1 気候変動緩和策への貢献

- 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 (自然科学的根拠) 政策決定者向け要約 (SPM) の概要 (ヘッドライン・ステートメント) 、<http://www.env.go.jp/press/109850/116628.pdf>
- GCOS\_Essential Climate Variables, <https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables/>
- 気候変動モニタリングのための必須気候変数 (ECV) — ECV インベントリー (Ver3) の公開 —、<https://www.eorc.jaxa.jp/news/2020/nw201130.html>
- 「グローバル・ストックテイク」 (EIC ネット 環境用語集より) 、<https://www.eic.or.jp/ecoterm/?act=view&ecoword=%A5%B0%A5%ED%A1%BC%A5%D0%A5%EB%A1%A6%A5%B9%A5%C8%A5%C3%A5%AF%A5%C6%A5%A4%A5%AF>
- Pierre Friedlingstein, et al.(2020): Global Carbon Budget 2020, Earth Syst. Sci.

Data, 12, 3269–3340, 2020, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>

- 研究開発戦略センター(2019) : 研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野「2. 1.6 気候変動観測」、[https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2018/FR/CRDS-FY2018-FR-01/CRDS-FY2018-FR-01\\_10.pdf](https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2018/FR/CRDS-FY2018-FR-01/CRDS-FY2018-FR-01_10.pdf)

### 2-2-2 気候変動影響の監視

- IPCC、(2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- IPCC (2019) IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)].
- 文部科学省、気象庁(2020) 日本の気候変動 2020 —大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書— <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>

### 2-2-3 気候変動の予測精度の向上への貢献

- Comiso, J. C., W. N. Meier, and R. Gersten (2017), Variability and trends in the Arctic Sea ice cover: Results from different techniques, *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, 6883–6900, doi:10.1002/2017JC012768.
- Fasullo, J. T., C. Boening, F. W. Landerer, R. S. Nerem, 2013: Australia's unique influence on global sea level in 2010-2011. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 4368-4373, doi:10.1002/grl.50834.
- Fettweis, X., S. Hofer, U. Krebs-Kanzow, C. Amory, T. Aoki, C. J. Berends, A. Born, J. E. Box, A. Delhasse, K. Fujita, P. Gierz, H. Goelzer, E. Hanna, A. Hashimoto, P. Huybrechts, M.-L. Kapsch, M. D. King, C. Kittel, C. Lang, P. L. Langen, J. T. M. Lenaerts, G. E. Liston, G. Lohmann, S. H. Mernild, U. Mikolajewicz, K. Modali, R. H. Mottram, M. Niwano, B. Noël, J. C. Ryan, A. Smith, J. Streffing, M. Tedesco, W.J. van de Berg, M. R. van den Broeke, R. S. W. van de Wal, L. van Kampenhout, D. Wilton, B. Wouters, F. Ziemann and T. Zolles, (2020): GrSMBMIP: intercomparison of the modelled 1980–2012 surface mass balance over the Greenland Ice Sheet, *The Cryosphere*, 14, 3935–3958. doi:10.5194/tc-14-3935-2020.

- Hori, M., K. Sugiura, K. Kobayashi, T. Aoki, T. Tanikawa, K. Kuchiki, M. Niwano, and H. Enomoto, (2017): A 38-year (1978-2015) Northern Hemisphere daily snow cover extent product derived using consistent objective criteria from satellite-borne optical sensors. *Remote. Sens. Environ.*, 191, 402-418. doi:10.1016/j.rse.2017.01.023.
- IPCC, (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K.
- Ito, A., Y. Ye, A. Yamamoto, M. Watanabe, and M. N. Aita, (2019) Responses of ocean biogeochemistry to atmospheric supply of lithogenic and pyrogenic iron-containing aerosols. *Geological Magazine*, 157: 741–756. <https://doi.org/10.1017/S0016756819001080>
- Kubota, M., Iwasaka, N., Kizu, S. et al., 2002: Japanese Ocean Flux Data Sets with Use of Remote Sensing Observations (J-OFURO). *Journal of Oceanography*, 58, 213–225. doi: 10.1023/A:1015845321836.
- L’Ecuyer, T. S., and Coauthors, 2015: The observed state of the energy budget in the early twenty-first century. *J. Climate*, **28**, 8319-8346, doi:10.1175/JCLI-D-14-00556.1.
- Llovel, W., J. K. Willis, F. W. Landerer, and I. Fukumori, 2014: Deep-ocean contribution to sea level and energy budget not detectable over the past decade. *Nature Climate Change*, **4**, 1031-1035, doi:10.1038/NCLIMATE2387.
- Loeb, N., and Coauthors, 2012: Observed changes in top-of-the-atmosphere radiation and upper-ocean heating consistent within uncertainty. *Nature Geoscience*, **5**, 110-113.
- Masunaga, R., Nakamura, H., Taguchi, B. and Miyasaka, T., 2020: Processes shaping the frontal-scale time-mean surface wind convergence patterns around the Kuroshio Extension in winter. *Journal of Climate*, 33, 3-25, doi.: 10.1175/JCLI-D-19-0097.1.
- Mahadevan, A. (2016): The impact of submesoscale physics on primary productivity of plankton. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 8, 161-184, doi:10.1146/annurev-marine-010814-015912.
- Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.). Cambridge University Press. (in press).
- Moore, T. S., M. D. Dowell, B. A. Franz, Detection of coccolithophore

blooms in ocean color satellite imagery: A generalized approach for use with multiple sensors. *Remote Sensing of Environment*, Volume 117, 2012, Pages 249-263, ISSN 0034-4257,

- <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.001>.
- Nakamura, H., Sampe, T., Goto, A. et al. 2008: On the importance of midlatitude oceanic frontal zones for the mean state and dominant variability in the tropospheric circulation. *Geophysical Research Letters*, 35, L15709, doi: 10.1029/2008GL034010.
- Pascolini-Campbell, M., Reager, J.T., Chandanpurkar, H.A. et al. A 10 per cent increase in global land evapotranspiration from 2003 to 2019. *Nature* 593, 543–547 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03503-5>
- Pekel, J.F., Cottam, A., Gorelick, N. et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 540, 418–422 (2016). [doi.org/10.1038/nature20584](https://doi.org/10.1038/nature20584)
- Piao, S., Wang, X., Park, T. et al. Characteristics, drivers, and feedbacks of global greening. *Nat Rev Earth Environ* 1, 14–27 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0001-x>
- Reager, J. T., A. S. Gardner, J. S. Famiglietti, D. N. Wiese, A. Eicker, and M. H. Lo, 2016: A decade of sea level rise slowed by climate-driven hydrology. *Science*, **351**, 699-703, doi:10.1126/science.aad8386.
- Rodell, M., and Coauthors, 2015: The observed state of the water cycle in the early twenty-first century. *J. Climate*, **28**, 8289-8316, doi:10.1175/JCLI-D-14-00555.1.
- Tomita, H., Hihara, T., Kako, S. et al., 2019: An introduction to J-OFURO3, a third-generation Japanese ocean flux data set using remote-sensing observations. *Journal of Oceanography*, 75, 171–194, doi: 10.1007/s10872-018-0493-x.
- van den Broeke, M. R., J. Bamber, J. Ettema, E. Rignot, E. Schrama, E., W. J. van de Berg, E. van Meijgaard, I. Velicogna, and B. Wouters, (2009): Partitioning recent Greenland mass loss. *Science*, 326, 984-986, doi:10.1126/science.1178176.
- Yamazaki D., D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O'Loughlin, J.C. Neal, C.C. Sampson, S. Kanae & P.D. Bates (2017): A high accuracy map of global terrain elevations
- *Geophysical Research Letters*, vol.44, pp.5844-5853, doi: 10.1002/2017GL072874
- Yoshimori, M., M. Watanabe, A. Abe-Ouchi, H. Shiogama, and T. Ogura,

(2014): Relative contribution of feedback processes to Arctic amplification of temperature change in MIROC GCM. *Climate Dyn.*, 42, 1613–1630, doi:10.1007/s00382-013-1875-9.

- Young, I.R., and A. Ribal. Multiplatform evaluation of global trends in wind speed and wave height. *Science*, 364, 548-552, (2019). <https://doi.org/10.1126/science.aav9527>
- Zeng, Z., Ziegler, A.D., Searchinger, T. et al. A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production. *Nat. Clim. Chang.* 9, 979–985 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0622-6>

### 第3章. 人間社会への貢献

#### 3-1 農業

- Clark, M. A., et al., 2020, Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets. *Science*, 370(6517), 705-708, DOI: 10.1126/science.aba7357.
- Foley, J. et al. 2011, Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478, 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>.
- IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, P.R. Shukla et al., (eds.).
- Leite-Filho, A.T., Soares-Filho, B.S., Davis, J.L. et al., 2021, Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. *Nat Commun* 12, 2591, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22840-7>.
- Liu, J. et al., 2021, Effects of Cropland Expansion on Temperature Extremes in Western India from 1982 to 2015, *Land*, 10(5), 489, <https://doi.org/10.3390/land10050489>.
- Ricciardi, V., Mehrabi, Z., Wittman, H. et al. Higher yields and more biodiversity on smaller farms. *Nat Sustain* 4, 651–657 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00699-2>.
- Stenzel, F., Greve, P., Lucht, W. et al. 2021, Irrigation of biomass plantations may globally increase water stress more than climate change. *Nat Commun* 12, 1512. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21640-3>.
- Nagano Y., Miyashita T., et al., 2021, Diversity of co-flowering plants at field margins potentially sustains an abundance of insects visiting buckwheat, *Fagopyrum esculentum*, in an agricultural landscape. *Ecological Research*, <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12252>.

- 井上吉雄、2011、食糧-環境インテリジェンスのための生態系リモートセンシング—問題解決に向けた信号データ利用法—、日本リモートセンシング学会誌、31、2-26.
- 井上吉雄、2019、リモートセンシングのスマート農業への実装に向けた研究開発の最前線—SIPプログラムによるリモートセンシングイニシアティブの活動概要—、39(5)、414-420.
- 農林水産省、2020、「デジタル地図」を活用した農地情報の管理に関する検討会 取りまとめ、<https://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/kihyo01/attach/pdf/200317-1.pdf>2021年8月17日アクセス
- 農林水産省、2021、プレスリリース 農業気象情報衛星モニタリングシステム（JASMAI）の公開について、<https://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/anpo/210112.html>2021年8月17日アクセス

### 3-2 公衆衛生

- 鈴木庄亮 編、2016、シンプル衛生公衆衛生学 2016.
- Beck L. R., et al., 2000, Remote Sensing and Human Health: New Sensors and New Opportunities. *Emerging Infectious Diseases*, 6(3): 217-227.
- Dietrich D., et al., 2018, *Journal of Medical Internet Research*, 20(6):e230, doi: 10.2196/jmir.9458.
- González, F. J. et al., 2021, Projecting the risk of mosquito-borne diseases in a warmer and more populated world: a multi-model, multi-scenario intercomparison modelling study. *Lancet Planetary Health*, 5: e404–14
- Gupta, P., et al., 2018, Impact of California fires on local and regional air quality: The role of a low-cost sensor network and satellite observations. *GeoHealth*, 2, 172–181, <https://doi.org/10.1029/2018GH000136>.
- Herbreteau V., et al., 2005, Sizing up human health through Remote Sensing: uses and misuses. *Parassitologia* 47:63-79.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]
- Laaidi K., et al., 2011, The Impact of Heat Islands on Mortality in Paris during the August 2003 Heat Wave. *Environmental Health Perspectives*, 120(2), 254-259.
- Urban A., et al., 2021. Evaluation of the ERA5 reanalysis-based Universal Thermal Climate Index on mortality data in Europe. *Environ Res.* 2021 Jul;198:111227. doi: 10.1016/j.envres.2021.111227. Epub 2021 May 8. PMID: 33974842.
- Vandentorren S., et al., 2006, August 2003 Heat Wave in France: Risk

Factors for Death of Elderly People Living at Home. *European Journal of Public Health*, 16(6), 583-591.

- WHO、2017、Don't pollute my future! THE IMPACT OF THE ENVIRONMENT ON CHILDREN'S HEALTH.
- WHO、2016、Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease.
- WHO、2020、The top 10 causes of death、<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>、accessed on 20 Aug 2021.

Zhao、Q. et al. 2021、Global、regional、and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study. *Lancet Planetary Health*, 5, e415–25.

#### 4. 関連文書

我が国の衛星リモートセンシングに係る衛星利用長期シナリオ中間とりまとめ案(JAXA 技術資料 FTP-2022001)