

衛星による水循環観測グランドプラン

令和元年 5 月 8 日

衛星による水循環観測グランドプラン策定委員会

目次

1.	はじめに	1
2.	水循環に関わる社会的要請と衛星観測	1
2.1.	水循環研究の重要性	1
2.2.	衛星水循環観測の果たす役割	3
3.	水循環に関する衛星観測の現状	5
3.1.	水循環に関する世界の衛星観測の現状	5
3.2.	水循環に関する日本の衛星観測とその成果	8
3.2.1.	衛星観測から得られた主な成果	8
3.2.2.	複数衛星等の複合利用による成果	11
4.	今後の課題と将来衛星ミッション	14
4.1.	科学的課題と研究テーマの整理	14
4.1.1.	短時間スケールの監視と予測(数時間～月)	14
4.1.2.	気候の監視と予測(月～30年以上のトレンド)	16
4.2.	科学的課題の解決に向けたミッション要求の整理	18
4.3.	新たなミッションの提案	21
4.3.1.	マイクロ波放射計	21
4.3.2.	降水レーダ	21
4.3.3.	その他ミッション	22
5.	おわりに	24
	参考文献	25
	付録 A 国際枠組みおよび政策文書	26
	付録 B 複数衛星等の複合利用	30
	付録 C 海外の衛星観測の将来計画の状況	34
	付録 D 新たなミッションのシステム仕様案	37
	D1 マイクロ波放射計	37
	D2 アクティブセンサによる降水観測	38
	付録 E 衛星による水循環観測グランドプラン策定委員会 委員名簿	39

1. はじめに

衛星による水循環観測グランドプランでは、気候変動による影響を含めた様々な時空間スケールでの水循環変動に関する重要課題のうち、衛星による観測が有用である科学的課題を特定した上で、複数衛星データを横断的に活用して日本が取り組むべき活動、および将来衛星ミッションへの要求を明確にする。日本の衛星観測が、気候変動の監視及び気象予測の精度向上のため、将来の地球上の水の分布とその予測に関わる科学的課題とその解決を通じて、気候変動の影響への適応や対策等に関する政策立案や、水災害や気象予測に関わる情報提供などの実利用へ貢献することを期待する。

なお、本グランドプランは今後 10 年程度を想定して策定したものであるが、衛星地球観測の進展や社会状況の変化に応じて、適時改訂することとする。

2. 水循環に関わる社会的要請と衛星観測

2.1. 水循環研究の重要性

水は生命の源であるとともに、その循環・移動により我々人類の住む地球表層環境を規定し、地球の気候形成や生態系等の生物地球化学的循環(Biogeochemical Cycle)に大きな影響を与えるという点で、地球環境を決定づける最も重要な物質の一つである。水循環とは、太陽エネルギーを主因として引き起こされる、地球における継続的な水の循環のことである。水は、時には固相・液相・気相間で相互に状態を変化させながら相互に作用し、地球上を絶えず循環している(図 1)。水循環を構成する各要素は、主として降水や蒸発散、河川流出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。

水循環は大気循環と密接に関連する。地表面での蒸発・凝結、降水・降雪やそれに伴う潜熱、水蒸気の移動(輸送)は、直接的に放射収支の構成要素として働く一方で、大気と海陸を繋げる熱エネルギーの移動に寄与する。

地球表面の 7 割を構成する海洋のうち、水循環変動と直接的に関係する海洋の表層及び数百 m 深程度の上層は、海上を吹く風の力が成因となって生じる循環によって支配されているだけでなく、水循環における主要な水蒸気供給源であり、海面の潜熱・顕熱フラックスとして大気へ熱を供給している。

陸上の水は、河川・湖沼・地下水や氷河・氷床として存在し、人間が利用可能な淡水資源となっている。地球上の淡水の約七割は氷河氷床であり、その量の増減は陸上の淡水貯蔵を変えるほか地球の日射に対する反射率にも影響を及ぼし、さらに河川や海洋に流れ込むことにより、海洋環境に影響を及ぼし、たとえば海面上昇や海氷生産量を左右する。海氷は地球における日射の反射率を変化させ、海洋と大気間の熱交換や運動量の決定に大きく影響する。

生物圏と水循環の観点では、水循環フラックスは植生・土地被覆変化によって常に変化し、陸

域の地表面エネルギー収支に大きな影響を与える。土壌や植物からの蒸発・蒸散とその変化は、生態系の健全性・作物生産量や地球気候に影響を及ぼす。地球システムの中で、量だけでなくどのような質の水がどのように動き、貯蔵されているかは、生物圏の物理・化学的構造、生物多様性、生産性を定める。水は堆積物からバクテリアまであらゆる種類の物質を運ぶ仲介物質として、地球の物質循環の主要な構成要素としても働く(図 1)。

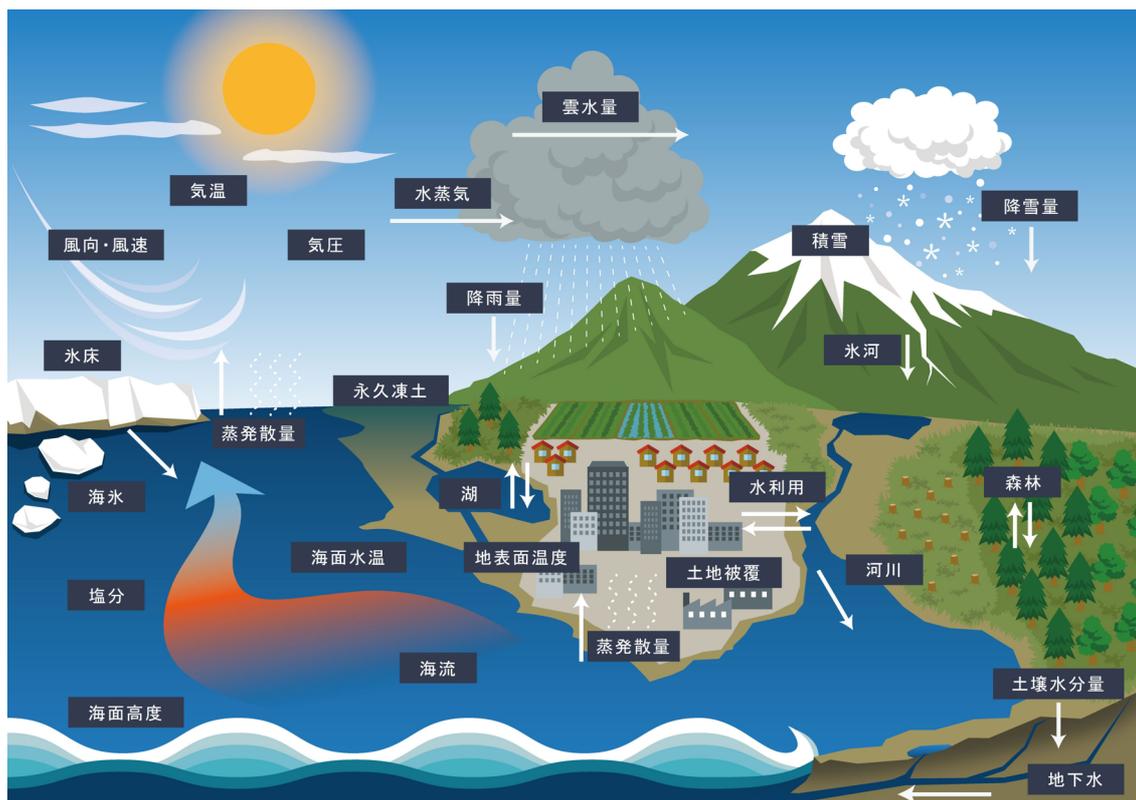


図 1 水循環観測に関わる諸物理量の概要。矢印はフラックスを示す。

水循環の変動は気候変動と密接な関係があり、気候変動による水循環の変化が、翻って気候を変化させる。気温の上昇は、海洋から蒸発する水蒸気量を増加させる。水蒸気そのものが温室効果を招く一方、その増加はエネルギー収支を通じて全球的な降水量を増加させ、地域的な降水の極端化はすでに観測されている。降水の地理的分布の変化は、結果としてごとの植生や蒸発散を変化させ、それがまた地球上の水の分布を変えることになり、さらに気候へのフィードバックがかかる。また、豪雨の増加や氷河の融解により、洪水の頻度が増加する地域がある一方、乾燥地域では、干ばつの頻度が増加することも予測され、水不足の頻度も増加することが懸念される。海洋への温暖化の影響は、表層や深層の海洋循環の変化だけでなく、海面の熱膨張や氷床の融解を通じて、海面水位の上昇を招く。さらには、気温上昇により、海水域の面積が縮小することに伴い太陽放射の吸収が増加し、さらに加速的に気温が上昇することや、結氷が遅れた水面

からの加熱や蒸発による降水の増加が予測されている。

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、日本を含めた世界全体における水循環変動の監視・予測に関する研究を推進することは、我が国として急務であるといえる。

2.2. 衛星水循環観測の果たす役割

気候変動による自然的、社会的な様々な影響が懸念されており、影響を軽減するためには、科学的な知見に基づいて分析と対策を講ずる必要がある。付録 A にまとめた通り、国内外で様々な枠組み・取決めがされている。このような状況において、衛星による水循環観測は、特に、「客観的」かつ「均質」なデータを「全球規模」かつ「定期的」に得られるという点で、極めて重要と位置付けられている。また、衛星観測により得られる水循環に関する物理量は多岐にわたるが、必ずしも必要なすべての物理量を網羅できているわけではなく、またその精度にもばらつきがあるほか、観測頻度も必ずしも十分ではないのが現状である。それらを鑑み、水循環に関する諸課題のうち、今後衛星観測により得られる知見が特に大きな進展をもたらすと考えられ、かつ、日本が世界を牽引することができると考えられるものを以下に示す。

課題1) 「降水(降雨・降雪)などの水循環諸量の定量化」

人類にとって最も身近な陸域の水資源(河川・湖沼・地下水など)や、大気と相互作用する海洋、並びにアルベド変化により気候変動に大きく影響する雪氷の将来変化を推定する上で、降水をはじめとした水循環に関する物理量の定量化は最も重要な課題である。同時に、数値モデル(気象モデル、気候モデル、海洋モデル、陸面モデルなど)の境界条件となる地表面・海面情報の精緻化も重要な課題である。

課題2) 「雲・降水プロセスの理解」

雲は地球温暖化予測の不確実性の主要因の1つと言われており、雲の生成から降水に至る一連のプロセスを理解することが、気候モデル予測の精度向上につながる。雲・降水の種類や三次元分布は放射エネルギー収支に大きく影響し、降水に伴う潜熱は大気エネルギー収支の主要な要素をなしている。雲・降水の三次元分布の継続的な観測によるプロセス理解が大きな課題である。

課題3)「雪氷圏の変動監視」

雪氷圏の変動は、地球のアルベドの変化に直結し、全球エネルギー収支に影響する。雪氷圏における降雪パターンの変化は、地域スケールから全球スケールへの気候へのフィードバックだけでなく、淡水資源の変動にもつながり、その変動の監視・予測は重要な課題である。

このような課題に対して、衛星水循環観測を通じて、地球上の水の流動、分布、水資源として活用できる量および、これらの予測を含めた時間変化をより定量的に明らかにしていくことが求められている。

3. 水循環に関する衛星観測の現状

3.1. 水循環に関する世界の衛星観測の現状

地球観測センサは高分解能センサと中分解能のグローバルセンサ、静止軌道センサに分かれる。このうち高分解能センサは光学センサと合成開口レーダに、中分解能のグローバルセンサは必須気候観測要素(Essential Climate Variables: ECVs)の監視を対象とするセンサと、プロセス研究を対象とするセンサに分かれる(TF 地球科学研究高度化ワーキンググループ, 2017)。水循環に関する諸物理量について、マイクロ波放射計、雲・降水レーダ、中分解能の光学放射計、マイクロ波散乱計、静止気象衛星搭載の光学センサなど、様々なセンサによる衛星観測が米国、欧州、インド、中国、日本などによって実施されており、これらの概要を表1に示す。

2.2 節で示した水循環に関わる課題1)「降水(降雨・降雪)などの水循環諸量の定量化」に最も貢献できるセンサは、マイクロ波放射計(イメージャ、サウンド)、降水レーダや雲レーダ、ライダー(特に雲ライダー)である。例えば、降水の定量化において、降水レーダはこれまで大気中の降水の三次元分布の高精度での把握や降雨・降雪の識別に大きく貢献してきた。一方で、観測幅が狭く、運用中のセンサが全球降水観測(Global Precipitation Measurement: GPM)主衛星搭載の二周波降水レーダ(Dual-frequency Precipitation Radar: DPR)と、Cloudsat 搭載の雲レーダしかないことから、広域かつ高頻度に観測することができないという問題がある。このため、積算量のみを観測するが観測範囲の広いマイクロ波放射計も多く用いられてきた。熱帯降雨観測衛星(Tropical Rainfall Measuring Mission: TRMM)において、レーダとマイクロ波放射計の同時搭載が初めて実現し、以降、降水推定アルゴリズムが改良されてきた。雲降水現象は、時間変化の速い現象であり、究極的にはこれらのセンサによる静止衛星軌道での連続観測が理想であるが、技術的課題が多く実現していない。河川流量などの衛星で直接観測できない物理量についても、数値モデルと観測を組み合わせることで定量化が進みつつある。また、数値気象予報モデルの境界条件である海面水温や海水密接度は、全天候で観測可能なマイクロ波放射計の果たす役割が大きいですが、解像度が光学イメージャに比べて粗いという問題がある。大気・海洋・陸での水循環に関する数値モデルの空間分解能の向上が進む将来においては、衛星側の空間分解能向上にも大きな要望がある。

課題2)「雲・降水プロセスの理解」には、様々な周波数のレーダやライダー、全球光学イメージャや新世代静止衛星搭載の光学イメージャの観測が必須である。TRMM 衛星搭載の降雨レーダ(Precipitation Radar: PR)は世界の雨の三次元分布を明らかにしてきた。さらに、後継の二周波降水レーダの時代になると、プロセスの理解に必要な降雨・降雪の判別や降水の粒径分布の情報が得られるようになった。雲レーダとライダーの組み合わせは、気候変動予測の不確定性の要因となっている雲・エアロゾル相互作用の解明に必要な観測データを提供できる唯一のツールであり、Cloudsat と Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation(CALIPSO)

で実現した。将来の Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer (EarthCARE) ミッションでは、その役割を担う以上に、世界で初めてとなるドップラ計測機能により、雲中の大気の運動の情報が得られることが雲降水プロセスの理解を促進することが期待されている。雲やエアロゾルの面的観測では全球光学イメージャの利用が主流であり、これまでの 15 年間スタンダードだった中解像度撮像分光放射計 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: MODIS) の後継として活用できるセンサが、日本の多波長光学放射計 (Second-generation Global Imager: SGLI) のほか、米国・欧州でも打ち上げられて、機能・性能を向上している。2016 年のひまわり 8 号以降、順次打ち上げられている新世代の静止衛星搭載の光学イメージャは、観測チャンネルが大幅に増加し、時空間分解能の向上が進んだことから、雲やエアロゾルの推定も可能となり、全球光学イメージャとの組み合わせを含めて、今後の貢献が大いに期待される。

課題3「雪氷圏の変動監視」の対象領域である雪氷圏は高緯度・極域が大部分の領域を占めているため、静止気象衛星は利用できないことから、極軌道衛星搭載のマイクロ波イメージャ、全球光学イメージャ、合成開口レーダが主に研究に利用されている。極域は冬季に太陽光が得られない時期が長く、天候が悪い時期も多いことから、昼夜を問わず全天候で観測可能なマイクロ波を利用したセンサ(マイクロ波イメージャ、合成開口レーダ)が重要な役割を担っている。また、山岳地域の雪氷の変動も重要であり、その監視には高分解能の光学イメージャや合成開口レーダが利用されている。DPR は南北緯度 65 度付近までしか観測できないことから、極域では利用できないが、低・中緯度の山岳地域では活用されている。高解像度の高性能マイクロ波放射計 2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2: AMSR2) は降雪推定に必要な高周波チャンネル (160, 183GHz 付近) を持っていないことから、高緯度での降水観測は解像度が 3 倍以上粗いのセンサ (Special Sensor Microwave Imager/Sounder: SSMIS) に限定される。また、欧米では、高度計測のライダー、重力ミッションが存在し、氷床質量変動や陸水貯留量などに新たな知見をもたらしている。

地球観測衛星データの利用の現状として、国際的な枠組みでのデータ公開・共有が急速に進んでいる。観測データは科学的課題の解決だけでなく、気象予報や洪水や干ばつの災害警報など現業機関での成果の活用も進んでいる。現業利用においては即時的な意思決定への活用のため、観測データのリアルタイム性なども要求されつつある。さらに、衛星観測の長期蓄積が進んでおり、ECVs の気候データレコード (Climate Data Record: CDR) の作成が欧米を中心に進んでいる。衛星による CDR は、全球を均質に観測するために非常に重要であり、長期間データを蓄積し、品質を高めることで、気候変動のトレンドが検知できるレベルになりつつある。

表 1 世界の衛星観測の現状(2019年1月現在)。該当センサ搭載の衛星名を記載。衛星開発国と異なる場合は、センサ開発国の欄に記載。日本のみ承認済みの将来計画を括弧で記載。

	日本	米国	欧州	中国	インド	主な物理量
マイクロ波イメージャ	GCOM-W	DMSp, Coriolis, SMAP	SMOS	HY-2, FY-3		水蒸気量、降水量、海面水温、海上風速、海水、土壌水分等
マイクロ波サウンダ		Aqua, NOAA-15/18/19/20, NPP	Megha-Tropiques, MetOp-A/B/C,	FY-3		気温・水蒸気量の3次元分布、降水量
降水レーダ	GPM-Core					降水の3次元分布
雲レーダ	(EarthCARE)	Cloudsat				雲の3次元分布
マイクロ波散乱計			MetOp-A/B/C	HY-2	ScatSat-2	風向・風速
マイクロ波高度計		Jason-CS	Jason-CS, Sentinel-3, SWOT	HY-2	SARAL	海面高度
ライダー	(ISS-MOLI)	IceSat-2, ISS-GEDI	CALIPSO, ISS-CATS, ADM-Aeolous			森林バイオマス(MOLI)、氷床厚(Icesat)、雲特性(CALIPSO)、風向・風速(ADM-Aeolous)
全球光学イメージャ	GCOM-C	Terra, Aqua, NOAA-15/18/19/20, MetOp-A/B/C, NPP	Sentinel-3	FY-3		雲特性、水蒸気量、積雪、氷河、海水、土地被覆等
赤外サウンダ		Aqua, NOAA-15/18/19/20, NPP	MetOp-A/B/C	FY-3		雲特性、気温、水蒸気量など
合成開口レーダ	ALOS-2, (ALOS-4)		Sentinel-1, TanDEM-X, TerraSAR-X			土地被覆、葉面積指数、バイオマス、海水等
高分解能光学センサ	(ALOS3)	Landsat-8	Sentinel-2, SPOT-6/7	YaoGan-29		土地被覆、葉面積指数、バイオマス、雲特性等
重力ミッション		GRACE-2				陸域貯水量
新世代静止搭載光学イメージャ	Himawari-8/9	GOES-17/18		FY-4A		雲特性、水蒸気量、積雪、氷河、海水、土地被覆など

3.2. 水循環に関する日本の衛星観測とその成果

日本は、水循環観測において、特に、マイクロ波帯を用いた、大気や地表面の水に関する物理量の観測について高い技術を有しており、高性能マイクロ波放射計 (Advanced Microwave Scanning Radiometer: AMSR) シリーズや、TRMM、GPM 主衛星搭載の DPR の開発・運用を通じて、水循環物理量の変動監視や定量的観測によって、これまで長期に渡って世界を牽引してきた。また、ひまわり衛星による雲観測など種々の地球観測衛星の開発、運用とそれらのデータを活用した水循環に関する情報の作成をこれまでに実施してきた。日本がこれまで蓄積してきた本分野に関する資産を有効に活用することで、効果的・効率的な科学的成果の創出と、安心・安全な国民生活への貢献が期待される。

日本の衛星ですでに運用が開始されているもの、またミッションへの要求が明確になっているものについて、概要とその成果を下記に記載する。現在、日本は、特に水循環観測に重要な衛星として、ひまわり、水循環変動観測衛星 (Global Change Observation Mission-Water: GCOM-W) AMSR2、GPM 主衛星搭載 DPR、陸域観測技術衛星 2 号 (Advanced Land Observing Satellite-2: ALOS-2) Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar-2 (PALSAR-2)、気候変動観測衛星 (Global Change Observation Mission-Climate: GCOM-C) 搭載 SGLI の5つの衛星・センサを運用している。また、EearthCARE の打上げも計画されていることから、衛星による水循環観測がこれまでになく充実しており、多くの成果が創出されている。

3.2.1. 衛星観測から得られた主な成果

1) ひまわり

ひまわり1号が 1977 年に打上げられて以降、現在はひまわり8、9号が運用されており(9号は待機運用中)、静止軌道上から台風や低気圧の動きの把握や、上空の風・雲の高度や種類・海面水温などの様々な情報が算出され、日々の気象予報に活用されている。メディアなどでも天気予報で毎日画像が雲の動きとして紹介されており、最も身近な地球観測衛星である。また、世界気象機関(WMO)の推進する気象衛星観測網の一翼を担っており、国内のみならず観測範囲に含まれているアジア太平洋域へもデータを配信しており、これらの国での台風、サイクロンなどの実況監視等を通じて防災対応に大きく貢献し、国際貢献度も極めて高い衛星である。ひまわり8/9号は、観測波長数、空間分解能の性能が強化されており(16 バンド、0.5-2km 空間分解能)、気象のみでなく総合的な環境監視が可能となっており、様々な分野での活用が進んでいる(Bessho et al., 2016)。また、高軌道傾斜角や極軌道の降水レーダ、雲レーダやマイクロ波放射計により観測が可能な、高緯度地域、雲の中(雨)、鉛直構造の情報を併せて活用することで、相補的であり効果的な観測が可能となることから、静止衛星と低軌道衛星の複合利用が進展しつつある(3.2.2、付録 B に詳細を記載)。

2) GCOM-W と AMSR シリーズ

JAXA が開発した高性能マイクロ波放射計 (AMSR) シリーズは、多波長・多偏波かつ大口径アンテナを持つ高空間分解能のマイクロ波放射計であり、それまでのスタンダードであった米国の SSM/I シリーズの空間分解能を大きく改善すると共に、地表面や海面に感度のある C バンド (6GHz) 帯を搭載した初めての衛星搭載マイクロ波放射計のシリーズである。AMSR シリーズは水循環に関わる多様なデータを提供することで、気象学、水文学、雪氷学、海洋学等のコミュニティ間の交流を促進し、水循環研究の学際的な発展に大きな役割を果たした。とくに極域では、AMSR シリーズを使って、地球温暖化の影響を受けやすい北極や南極の海氷面積の監視、グリーンランド氷床の大融解の検出、沿岸での海氷生産量の解析から得られた未知の南極底層水の発見、などの科学成果が多く得られている。また、研究から現業利用への移行としては、気象庁やヨーロッパ中期予報センター (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts: ECMWF)をはじめ、世界各国の気象機関での AMSR シリーズの利用実証が AMSR-E 時代から始まっており、現在は GCOM-W 搭載 AMSR2 センサの輝度温度や水蒸気量、土壌水分量、海面水温等のデータが気象機関で定常的に利用され、気象予測や台風解析・海面水温解析等の精度向上に役立てられている。このため、雲の影響を受けずに地表面・海面を観測可能というマイクロ波放射計の全天候観測の能力、大口径アンテナによる高空間分解能観測、海面水温等を観測可能な C バンド帯の搭載等を継続した、後継センサによる観測継続への要望が強い。

2002 年 5 月に打ち上げられた米国 Aqua 衛星搭載の AMSR-E (2011 年 10 月まで運用)、2002 年 11 月打ち上げの環境観測技術衛星 (ADEOS-II) 搭載の AMSR (2003 年 10 月まで運用)、2012 年 5 月に打ち上げの GCOM-W 搭載の AMSR2 (2019 年 1 月現在運用中)によって、AMSR シリーズで約 15 年の継続観測を行っており、後期利用を継続することで、長期に均質な水循環データセットを提供することができる。また、GCOM-W の観測データの CDR 化を進めることで、気候変動研究や長期再解析データ等での利用の拡大を図ることができる。

3) GPM と TRMM

日本と米国の共同ミッションである GPM 主衛星に搭載されている二周波降水レーダ (DPR) は、TRMM 衛星搭載の PR の経験を引き継ぎ、衛星降水レーダ気象学という新たな学問分野を熱帯から中高緯度に発展させた。DPR は 2 周波を利用することにより、PR に比べて、降水推定感度を格段に向上させ、観測対象を熱帯の強い降雨から、中高緯度の弱い雨や雪まで拡張することができた。また、これらの降水レーダと同一衛星に搭載されているマイクロ波放射計 (TRMM Microwave Imager: TMI、GPM Microwave Imager: GMI)との同時観測により、TMI、GMI のみならず、他衛星に搭載されているマイクロ波放射計による降水強度推定の精度向上に大きく貢献した。

TRMM 及び GPM で衛星降水レーダ観測は 20 年を超える実績があり、降水レーダによる精確な三次元降水情報の活用によって水循環収支に係る知見は着実に進展してきた。GPM が TRMM とのオーバーラップ期間をもって運用できたことの意義は大きく、連続性を考慮した三次元の降水観測データも利用可能となっている。GPM の後期利用を継続し、TRMM から蓄積された衛星降水レーダ観測データを用いて、AMSR シリーズと同様に CDR 化を後期利用期間に進めることで、気候変動予測モデルの検証や長期再解析データ等への利用拡大を目指す。

降水レーダ観測による三次元の降水情報は、降水特性の解明にも大きく貢献してきた。層状性・対流性の違いや冷たい雨・暖かい雨それぞれのプロセスの重要性に関する研究も多くなされている。このようなプロセス解明によって得られた知見の活用によるモデルの高度化や、降水レーダの三次元情報を用いたデータ同化による初期値の改善を通じて、気象・気候モデルの予報精度向上にも貢献している。また、地球の水・エネルギー循環にとって重要な大気潜熱加熱の三次元分布データを初めて降水観測に基づいて作成・提供してきた。

GPM のプロダクトの 1 つであり、DPR の三次元情報を活用して開発された衛星全球降水マップ (Global Satellite Mapping of Precipitation: GSMaP) はリアルタイムで提供され、地上観測が不足しているアジアを中心に多くの国々の気象・防災機関などによる現業利用が進み、社会インフラとしても定着しつつある。

4) ALOS-2 搭載 PALSAR-2

Japanese Earth Resources Satellite -1 (JERS-1)、Advanced Land Observing Satellite (ALOS) 初号機は L バンド合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) を搭載し、L バンドの電波を衛星から地表面に照射し、地表面からの反射波を受信することで、昼夜を問わず、地表面状態の数日～数か月周期の変動を検出することを可能とした。その特徴を生かし、陸域水循環の分野では、ヒマラヤや極域山岳や南極氷床やグリーンランド氷床周縁部に存在する氷河の分布や流動速度、氷河末端に発達する氷河湖の分布・監視に役立てられてきた。その役割は現在運用中の ALOS-2 に搭載された PALSAR-2 にも引き継がれている。氷河以外にも、PALSAR-2 の後方散乱強度から陸上の積雪深を推定する研究等も行われているが、現時点では地表面や積雪内の含水率の影響有無を調査する段階で、実用的な観測までは至っていない。

PALSAR-2 では、陸上の氷河・積雪以外にも、氷床から分離して海上に浮かぶ冰山や海水等の監視を行うことも可能である。また、海氷監視の分野では、海面に浮かぶ海氷の詳細な分布を数 m から 100m の空間分解能で捉えることが可能である。しかし、移動速度が速い海氷分布を日々追跡するには ALOS2 の回帰日数では時間頻度が足りないため、例えばオホーツク海や北極海沿岸の特定エリアに観測域を限定し、スナップショット的に観測した画像を船舶の安全航行支援に資する情報として利用されているにとどまっている。

5) GCOM-C

GCOM-C は多波長光学放射計 (SGLI) を搭載し、水循環の駆動源となる放射収支に関わる雲・エアロゾルや地表・雪氷面のアルベド、蒸発散に関わる植生や地表・水面の温度等を広域で観測する。また、水循環変動や水資源利用の結果として現れる植生 (大規模農業や、沿岸海洋生態系を含む)、地表面温度、積雪等の変動監視やそのプロセス研究に貢献できる。さらに、モデル推定結果との比較検証等を通じ、水循環の変動予測や地球環境の応答予測の精度向上へ貢献することが期待される。

また、近年、地球温暖化の進行に伴い、グリーンランド氷床周縁域の表面において、雪氷微生物の繁殖に伴うアルベドの低下 (暗色化) とそれに伴う氷床融解が進行していることが、MODIS 等の衛星光学センサによる観測で明らかとなっている。SGLI は、250m という高分解能で可視～熱赤外域の光を観測可能であり、氷床暗色域監視とその変動メカニズムの把握、さらにアルベドの低下をもたらす積雪の粒径の増加の観測、そしてそれらの数値モデル化に貢献できると期待される。

6) EarthCARE (2021 年度打上げ予定)

日本と欧州が協力して開発を進めている EarthCARE では、4つの搭載測器 (雲レーダ・ライダー・イメージャ・広帯域放射計) から雲・降水・エアロゾル・放射場の三次元構造を推定することで、雲・降水・エアロゾルの動態やそれらの相互作用を明らかにすることで、気候変動予測の精度向上に貢献することを目的としている。特に、世界で初めて雲の鉛直運動に関する情報を全球規模で観測的に得ることで、雲の生成・消滅に関わる素過程の実態を明らかにし、陸面水循環の供給源となる降水形成の理解を深める。さらに、エアロゾル・雲・降水に関する微物理特性からその放射フラックスへの影響評価まで統合的に観測することで、水循環と密接に関わる地球の放射収支の全体像の理解を更新することを目指す。EarthCARE 観測データを CloudSat/CALIPSO をはじめとする A-Train 観測データと合わせることで、10 年以上の3次元雲・エアロゾル長期データセットを構築する。このようにして得られたデータセットや大気科学的知見は、数値気候モデルにおける大気粒子と放射場の再現性を評価・改良し、気候変動予測の精度向上に大きく貢献する。

3.2.2. 複数衛星等の複合利用による成果

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開発が進んでいる。また、これらの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が進んでいる。これらの成果の一覧を下記に示し、詳細は付録 B に示す。

1) 複数衛星データを利用したプロダクト開発

複数の衛星から得られた観測データを複合することにより、単独の衛星では作成できない高頻度かつ欠損のない全球プロダクトを作成している。

- ・ Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP): 複数の衛星 (GPM-Core GMI, TRMM TMI, GCOM-W AMSR2, Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) シリーズ SSMIS, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) シリーズ Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU)、Meteorological Operational Satellite (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、実時間から約 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)。最近、領域を限定して実時間で配信するリアルタイム版 (GSMaP_NOW) も公開している。
- ・ 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

2) 長期データセット構築

複数衛星データを活用し、気候変動研究に利用可能な長期データセットを作成している。気候変動のトレンドの検出にも利用可能となってきた。

- ・ JAXA Satellite Monitoring for Environmental Studies (JASMES): MODIS、GCOM-C などを活用し、短波放射、地表面温度、雲量、積雪、海氷などの気候変数の長期データセット
- ・ マイクロ波放射計による長期海氷データセット: 複数のマイクロ波放射計データを利用した日平均の海氷データセット (海氷密接度、海氷面積)
- ・ Japanese Ocean Flux Data Sets with Use of Remote Sensing Observations (J-OFURO): 複数のマイクロ波放射計やマイクロ波散乱計を用いた、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日平均のデータセット
- ・ TRMM と GPM の連続性を考慮した校正係数を、両者に適用して作成した熱帯の 20 年以上におよぶ降水三次元長期データセット

3) データ同化

2000年代以降、気象モデルへの衛星データの同化は、気象庁やECMWFなどの各国気象機関で現業利用が進んでいる。他方、気象モデル以外への衛星データの同化については、まだ研究要素が高いものが多いが、近年の衛星観測の性能向上やデータ量増加、計算機能力の向上により、急速に研究が発展している。

- ・ 気象予報: 気象庁では現状は海上のマイクロ波晴天域のデータおよび降水レーダのデータを同化
- ・ 陸面水文シミュレーション: JAXAと東京大学の連携で、陸面シミュレーションモデルや河川氾濫モデルの入力として、GSMaP等による降水量や衛星観測データを利用
- ・ GSMaP理研ナウキャスト: JAXAと理化学研究所で、GSMaPを用いた短時間降雨予報
- ・ 衛星同化気象プロダクト: JAXAと理化学研究所、東京大学の連携によりGSMaP等の衛星データを同化して作成した気象プロダクト(NICAM-LETKF JAXA Research Analysis ; NEXRA))
- ・ 海中天気予報: JAXAと海洋研究開発機構(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology: JAMSTEC)、名古屋大学の協力連携により、3km空間分解能の領域海洋モデルへの衛星海面水温の同化を行い、1時間毎の海面及び海中の物理量(水温、塩分濃度、海流等)を予測
- ・ エアロゾル予測: JAXA・気象庁気象研究所・九州大学の連携により、ひまわりから推定したエアロゾルを全球エアロゾル輸送モデルに同化してエアロゾルの飛来を予測
- ・ 海氷分布の季節予報: 東京大学及び北極域研究推進プロジェクト(ArCS)の活動において、AMSR2海氷データを用いて北極海海氷分布の季節予報を実施

4) 意思決定支援システム

ユーザが必要とする特定の情報について関心領域を切り出すなどの可視化処理を行い、ウェブシステムを構築して情報提供しており、農業や気象分野などで現業利用されている。

- ・ JAXA's Satellite Monitoring of Agrometeorological Information (JASMAI), JAXA's Satellite based Monitoring Network system for FAO AMIS Market Monitor (JASMIN): 農業気象に関わる情報(GSMaP、土壌水分量、地表面温度などのプロダクトを時空間的に加工)を、農水省などの現業機関に提供するシステムを開発
- ・ 台風・ハリケーン解析: 気象庁やNOAAでは、台風やハリケーンについて、静止気象衛星やマイクロ波放射計の観測情報を利用して、中心位置や強度を推定し、将来の発達・衰退の予測や判断に利用

4. 今後の課題と将来衛星ミッション

地球観測衛星が取り組むべき重点課題(2.3 節)を受けて、日本が取り組む科学的課題と、その解決に向けた研究テーマを 4.1 節に示す。また、4.2 節にこれらを踏まえて課題解決のために必要となるミッション要求の整理、4.3 節に新たな衛星ミッション提案を記載する。

4.1 科学的課題と研究テーマの整理

水循環に関わる研究は、衛星データによる観測と、数値モデルによる解析・予測の両者の連携によって実施すべきである。たとえば、衛星観測が水循環研究において中心的な役割を果たしている物理量(降水量や海氷など)に加えて、衛星からの観測のみでは算定が難しいが、課題解決の鍵となる物理量(河川流量や土壌水分など)を、数値モデルを通じて推定し、利用するため、数値モデルとの連携が重要である。また、数値モデルの予測精度向上において、衛星データは「衛星データ同化等による初期値の改良」、「プロセス解明によるモデルの高度化」によって利用される。データ同化は、モデルの初期値の改善に効果があるため、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直接的に貢献する。これに対して、衛星観測から得られた知見が生かされたモデルの中の様々な物理過程の改良は、時間スケールの短いものから長いものの幅広いレンジの予測に貢献する。

このような衛星とモデルの連携方法の違いを考慮すると、衛星のデータ同化による直接的な効果が大きい短時間スケール(4.1.1 節参照)と、気候スケール(4.1.2 節参照)で時間スケールを分類し、2.2 節の課題と対応付けし、必要な研究テーマをまとめる。

4.1.1 短時間スケールの監視と予測(数時間～月)

気象の監視、数値気象モデルの改善や水循環シミュレーションの精緻化を目的として、以下の研究テーマを実施すべきである。

1) 課題1)「雲・降水(降雨・降雪)など水循環諸量の定量化」に関連した研究テーマ

【雲・降水過程の現況監視】

日々の気象において、近年は豪雨や干ばつなどの極端現象や台風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現象に対応するためにも、降水量観測を継続しつつ、頻度・精度・分解能の改良を図って、一層の定量化を図っていく必要がある。

防災的観点で重要な台風については、様々な研究によって進路の予測は改善されてきている一方で、台風の強度予測は未だ改善の余地があるとされている。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る。気温・水蒸気・風といった台風周辺の気象環境場の正確な観測・把握が必要である。

近年では、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ため、ROS の高精度での検出が期待されている。

【データ同化による気象予測の向上】

データ同化による気象予測の向上のためには、データ同化システムの高度化、モデルの高精度化に加え、モデル初期値の改良のための観測データの高度化が必要である。既に大量かつ多様な衛星データが同化されているが、全球規模での 3 次元的な風観測や、気温・水蒸気の高頻度・高鉛直分解能の観測は十分ではない。さらに、雲・降水プロファイルの観測データは、データ同化システムではまだ十分に活用できておらず、検証での利用にとどまることも多いが、同化システムやモデルが高度化するに伴い、これらのデータの利用も進みつつあり、今後さらに重要性が増すと考えられる。

【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、降水やその変動が実際に我々の生活において、利水・治水の観点からどう影響を及ぼすのかを、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。降水をはじめとした高度化された衛星データを活用した、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。

2) 課題2)「雲・降水プロセスの理解」に関連した研究テーマ

【雲・降水プロセスの解明とモデルの改良による気象予測の向上】

雲・降水は、全球の水循環の重要な要素であると同時に、雲を介して放射収支とも影響しあっており、それらの相互作用は非常に複雑である。このため、雲から降水にな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、次項(4.1.2 節)で示す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。

雲・降水のプロセスを理解するには、まず気温・水蒸気・風といった環境場を従来以上に正確に捉える必要がある。TRMM、GPM、Cloudsat、CALIPSO などの能動型センサを搭載した衛星により、雲・降水の鉛直の内部構造が明らかになり、近年では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・降水の物理過程の知見は大きく進展している。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必要である。今後は、高感度・高解像に加え、高度化・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、高精度化された気温・水蒸気・風解析と合わせて、その物理過程の理解に貢献するとともに、改良されたモデルも組合せた包括的なアプローチをしていくべきである。

3) 課題3)「雪氷圏の変動監視」に関連した研究テーマ

【海水・雪氷分布の現況把握および短期予測精度向上】

地表面の短波・長波放射収支に大きな影響を及ぼす海水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重要である。

現在、海水に関しては、GCOM-W 搭載 AMSR2 により全球の海水分布を日々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水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水分布特に境界域での正確な分布把握が求められている。さらに海水の発達・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水分布、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、4.1.1 節 1) の【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。

4.1.2 気候の監視と予測(月～30年以上のトレンド)

気候モデルによる予測の精緻化を目的として、以下の研究テーマを実施すべきである。

- 1) 課題1)「雲・降水(降雨・降雪)など水循環諸量の定量化」、および、課題2)「雲・降水プロセスの理解」に関連した研究テーマ

【気候変動による雲降水システムへの影響の解明】

TRMM/GPMによる降水の三次元情報の長期蓄積により、降水量のトレンドのみならず、降水の性質の変化もとらえることが可能となっている。たとえば、鉛直プロファイルを含めた、地域による雨の降り方の変化を明らかにすることは、気候変動による降水特性の変化を予測する上で重要な情報となる。これまで降水レーダは20年以上の蓄積があり、この観測を継続して、長期モニタリングによって、温暖化による台風や極端降水の変化の精確な把握に活用する。

気候モデルの物理プロセスの改良による予測精度向上の観点からは、4.1.1 節 2)で示した、雲降水プロセス解明による気候モデルの高度化が必要である。

【大気海洋間の水・エネルギーフラックスの変動把握と気候変動に伴う影響の解明】

大気海洋間の水・エネルギーフラックスの衛星観測は、高空間解像度で海面水温や海上風速を推定できる AMSR シリーズが加わることで、より正確な推定ができるようになってきた。しかしながら、気候変動シグナルの抽出には、より高精度で長期一貫性のあるフラックス推定が必要である。地球温暖化による大気海洋間の熱・淡水交換の変化や水循環の理解に必要な大気海洋間の熱・運動量・淡水フラックスの定量的推定を行うと共に、データの高精度化及び長期データセットを構築し、長期変動の把握が必要である。

日本周辺においては、海洋から大気への熱放出のホットスポットである日本周辺の黒潮などに伴う水温フロントの変動への地球温暖化の影響が大きいと、関連する衛星観測データを長期に蓄積することが必要である。これにより、大気海洋相互作用の変化による地域気候への影響の解明に資することが期待される。

【気候変動による陸域水循環変動の解明・モデリング】

気候変動に伴う陸域水文過程の変動解明に当たり、水・熱・エネルギー的観点から整合性のある長期データセットの作成が必要不可欠である。近年、4.1.1 節 1)の【水文モデルとの統合利用の高度化】に記述した衛星観測と陸面シミュレーションモデルの複合利用が水収支推定の精緻化に貢献することが、複数の流域で確認されている。今後、このようなモデルの改良、高空間分解能化を通して、全球スケールでの長期的な水循環の変動解明が必要である。

2) 課題3)「雪氷圏の変動監視」に関連した研究テーマ

【極域の海水・雪氷などの環境変動監視と水収支過程の解明】

雪氷圏の縮小は地球温暖化によって加速すると考えられている。雪氷圏の水収支過程の解明においては、全球を広く高頻度に観測可能なマイクロ波放射計による雪氷圏の物理量(海水密度、積雪深、降水量等)の観測による変動監視の継続とプロダクトの推定精度の向上が必要

である。現状は、3.1 節の通り、降水レーダや高解像度のマイクロ波放射計が南北緯度 65 度までしか観測できないため、極域での降雨量・降雪量の推定精度が低い。全球での降水量把握及び定量化のためには、極域についても降雨・降雪の区別や降水量推定の精度の向上が必要である。

近年の地球温暖化によりグリーンランド氷床上の融解が進み、氷床域の縮小が著しい。融解に寄与する氷床アルベド低下の発生の有無を、SGLI をはじめとした全球光学イメージャを用いて監視するとともに、マイクロ波放射計などの他衛星データや、現地の気象データや地上観測データを組み合わせて、衛星観測データの検証を行う。さらに、氷床融解に伴う海面上昇量の見積りに必要となる数値モデルの開発が重要である。

【温暖化の影響を含む極域・海水変動の予測】

温暖化のシグナルを顕著に示す指標である極域の海水変動の把握のためには、AMSR シリーズをはじめとしたマイクロ波放射計観測データを用いた海水域分布・面積の長期観測データの作成を今後も継続し、過去 40 年間で減少トレンドが見られる北極域や、近年急激に減少傾向を示している南極域の海水面積について、長期的なトレンドを監視する必要がある。

さらに、4.1.1 節 3) で記載した複数衛星の観測データを用いた解析により、高頻度・高分解能化した海水分布プロダクトを利用し、海水分布の季節予報の精度検証・改善に貢献することが期待される。北極海航路の利用には、船舶や港のインフラ整備と産業の趨勢をにらむ 20 年、30 年間といった長期の傾向予測、つぎに年間航行スケジュールを考える季節海水予測情報が必要とされる。季節変化傾向については、冬季の間の海水成長が春以降の海水減少予測にとって重要であることがわかっており、冬季成長を海水の移動と集積から予測する活動が実施され、世界最高水準の予測成果をあげている (Sea ice outlook: <https://www.arcus.org/sipn/sea-ice-outlook>)。一方で、長期の傾向予測については、まだ研究の途上にあり、今後の改良が望まれている。

4.2 科学的課題の解決に向けたミッション要求の整理

4.1 節で整理した JAXA が取り組むべき科学的課題の解決のためには、新たな物理量の観測や観測性能の向上 (頻度、空間分解能など)、さらには継続的な観測が必要である。4.1 節に示した科学的課題の解決に向けて、現在の地球観測衛星において課題となっている事項と、要求される観測の対応を、表3にまとめる。

表3 科学的課題の解決に向けた現在の地球観測衛星の課題と観測要求事項

科学的課題と研究テーマ	現在の衛星観測の課題	将来の観測への要求
短時間スケールの監視と予測 / 課題1)「雲・降水(降雨・降雪)などの水循環諸量の定量化」 / 課題2)「雲・降水プロセスの理解」		
<p>【雲・降水過程の現況監視 / データ同化による気象予測の向上】</p> <p>【雲・降水プロセスの解明とモデルの改良による気象予測の向上】</p>	<p>[継続性]</p> <ul style="list-style-type: none"> データ同化のための既存観測の継続性 台風の三次元降水状況のデータ蓄積が少ない <p>[観測物理量]</p> <ul style="list-style-type: none"> 全球での降雨・降雪量の監視が不十分 (DPR は高緯度域の観測が不可であり、AMSR2 は降雪観測ができない) 気温・水蒸気・風といった環境場の三次元観測の広域連続観測の不足 雲降水に関する詳細な微物理情報(鉛直混合など)の不足 <p>[観測機能・性能]</p> <ul style="list-style-type: none"> DPR は観測幅が狭いため、GSMaP に利用できない 弱い降水が捕らえられない 観測頻度の向上 	<p>[継続性]</p> <ul style="list-style-type: none"> マイクロ波放射計及び降水レーダによる観測の継続 <p>[観測物理量]</p> <ul style="list-style-type: none"> 高緯度を含めた全球の降雪量観測 大気中の気温、風、水蒸気の三次元分布計測 大気中の雲降水の鉛直観測 <p>[観測機能・性能]</p> <ul style="list-style-type: none"> 降水レーダの観測幅の拡大による台風など極端現象の捕捉率向上、全球降水マップ直接利用 高感度化による DPR 最小感度以下の弱い降水の観測 静止・コンステレーション衛星による高頻度観測
短時間スケールの監視と予測 / 課題1)「雲・降水(降雨・降雪)などの水循環諸量の定量化」		
<p>【水文モデルとの統合利用の高度化】</p>	<p>[継続性]</p> <ul style="list-style-type: none"> 長期データセット構築に必要な既存観測の継続性 植生分布や土地被覆の現況把握の高精度化 <p>[観測物理量]</p> <ul style="list-style-type: none"> 全球での降雨・降雪量の監視が不十分 <p>[観測機能・性能]</p> <ul style="list-style-type: none"> DPR は観測幅が狭いため、GSMaP に利用できない DPR は観測幅が狭いため、極端現象の補足が不十分 弱い降水が捕らえられない 	<p>[継続性]</p> <ul style="list-style-type: none"> マイクロ波放射計及び降水レーダによる観測の継続 グローバル光学イメージャによる観測の継続 <p>[観測物理量]</p> <ul style="list-style-type: none"> 高緯度を含めた全球の降雪量推定 <p>[観測機能・性能]</p> <ul style="list-style-type: none"> 降水レーダの観測幅の拡大による台風などの極端現象の捕捉率向上、全球降水マップ直接利用 高感度化による DPR 最小感度以下の弱い降水の観測
短時間スケールの監視と予測 / 課題3)「雪氷圏の変動監視」		
<p>【海水・雪氷分布の現況把握および短期予測精度向上】</p>	<p>[継続性]</p> <ul style="list-style-type: none"> 長期データセット構築に必要な既存観測の継続性 <p>[観測物理量]</p> <ul style="list-style-type: none"> 全球での降雨・降雪量の監視が不十分 <p>[観測機能・性能]</p> <ul style="list-style-type: none"> 海水の観測にはマイクロ放射計の空間分解能が不十分 	<p>[継続性]</p> <ul style="list-style-type: none"> マイクロ波放射計による観測の継続 <p>[観測物理量]</p> <ul style="list-style-type: none"> 高緯度を含めた全球の降雪量推定 <p>[観測機能・性能]</p> <ul style="list-style-type: none"> マイクロ波放射計と他衛星を複合利用した高空間分解能化、アンテナの大型化による空間分解能の向上

科学的課題と研究テーマ	現在の衛星観測の課題	将来の観測への要求
気候の監視と予測 / 課題1)「雲・降水(降雨・降雪)などの水循環諸量の定量化」 / 課題2)「雲・降水プロセスの理解」		
【気候変動による雲降水システムへの影響の解明】	<p>[継続性]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 長期データセット構築に必要な既存観測の継続性 ・ 台風の三次元降水状況のデータ蓄積が少ない <p>[観測物理量]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 全球での降雨・降雪量の監視が不十分 <p>[観測機能・性能]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ DPR は観測幅が狭いため、極端現象の補足が不十分 ・ 弱い降水が捕らえられない 	<p>[継続性]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ マイクロ波放射計及び降水レーダによる観測の継続 <p>[観測物理量]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高緯度を含めた全球の降雪量推定 <p>[観測機能・性能]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 降水レーダの観測幅の拡大による台風などの極端現象の捕捉率向上 ・ 高感度化による DPR 最小感度以下の弱い降水の観測
【大気海洋間の水・エネルギーフラックスの変動把握と気候変動に伴う影響の解明】	<p>[継続性]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 長期データセット構築に必要な既存観測の継続性 	<p>[継続性]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ マイクロ波放射計による観測の継続
【気候変動による陸域水循環変動の解明・モデリング】	<p>[継続性]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 長期データセット構築に必要な既存観測の継続性 ・ 植生分布や土地被覆の現況や変動把握の高精度化 <p>[観測物理量]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 全球での降雨・降雪量の監視が不十分 <p>[観測機能・性能]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 弱い降水が捕らえられない 	<p>[継続性]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ マイクロ波放射計及び降水レーダによる観測の継続 ・ グローバル光学イメージャによる観測の継続 <p>[観測物理量]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高緯度を含めた全球の降雪量推定 <p>[観測機能・性能]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高感度化による DPR 最小感度以下の弱い降水の観測
気候の監視と予測 / 課題3)「雪氷圏の変動監視」		
<p>【極域の海水・雪氷などの環境変動監視と水収支過程の解明】</p> <p>【温暖化の影響を含む極域・海水変動の予測】</p>	<p>[継続性]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 長期データセット構築に必要な既存観測の継続性 <p>[観測物理量]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 全球での降雨・降雪量の監視が不十分 <p>[観測機能・性能]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 極域の降水レーダ観測がない 	<p>[継続性]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ マイクロ波放射計及び降水レーダによる観測の継続 <p>[観測物理量]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高緯度を含めた全球の降雪量推定 <p>[観測機能・性能]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 降水レーダによる極域観測

すべての課題で共通する現在の衛星観測の課題は、継続性である。気象予報や気候研究で利用されているマイクロ波放射計や降水レーダは、将来の計画が大幅に減少している、もしくは、見通しが立っていないなどの懸念がある。課題1)と課題2)では、観測する物理量が不十分であることや、現在の観測での機能や性能が不十分であることに起因する問題が存在する。衛星による観測頻度と空間解像度の向上については、時間スケールの短い現象を対象とする短期スケールの科学的課題において改善要望がある。数値モデルの時空間解像度の向上がさらに進むことが

予想されることから、これらへの要望は今後増加していくと考えられる。

4.3 新たなミッションの提案

科学的課題の解決に向けたミッション要求の整理(4.2 節)を受けて、日本が実施すべき将来衛星観測として、以下のミッションを提案する。海外の衛星観測の将来計画(付録 C)や日本がこれまでに蓄積した技術やデータを考慮すると、特に雲・降水過程の理解、雪氷・海氷観測においては、マイクロ波放射計や降水レーダ衛星が最も優先して取り組むべきミッションであるとする。また、これらのミッションよりは優先度が劣るものの、科学的課題の解決に向けて重要となる、その他のミッションについても本項でまとめる。

4.3.1 マイクロ波放射計

3.2.1 節の GCOM-W および AMSR シリーズによる成果を受けて、後継センサ(以下 AMSR3)開発への要求は国内外で高まっている。

AMSR3 で必要となる主な仕様を付録 D1に示す。これらのミッション要求は、平成 29 年度の GCOM 総合委員会/AMSR2 後継センサミッション検討委員会において議論された結果をもとにまとめられている。AMSRシリーズについては、気象や水産の分野で現業利用が進んでいることや、気候変動研究での利用の観点から、後継センサの速やかな打ち上げと現状の観測能力の継続が最優先のユーザ要求となっている。その一方で、固体降雪量の推定や数値予報モデルの水蒸気解析に貢献する高周波数帯のチャンネル追加や、空間解像度の向上などが、将来マイクロ波放射計への要求として、利用者から挙がっている。2018 年 12 月に改訂された宇宙基本計画工程表では、2022 年頃に打ち上げ予定の温室効果ガス観測衛星 3 号(Greenhouse gases observing satellite-3: GOSAT-3)との相乗りによる搭載が検討されている。

AMSR シリーズは水に関するさまざまな物理量を全球で高頻度かつ高分解能で観測可能であるため、2.2 節における課題1)~3)のすべての解決に貢献できる。AMSR3 の実現によって、現在の観測の課題である、マイクロ波放射計の継続観測と降雪量の全球観測を実現できる。さらに、新規に追加を検討している高周波チャンネルの 183GHz 帯に複数チャンネルを持つと、数値気象予報において重要な初期値となる水蒸気鉛直情報の取得が可能となる。

4.3.2 降水レーダ

3.3.2 節の GPM/DPR による成果を受けて、後継センサ(以下 DPR-2)開発への要求は国内外で高まっている。

DPR-2 の主な仕様を付録 D2 にまとめる。これらの要求仕様は PMM 利用検討委員会・後継ミッション分科検討会で議論された現状案であり、今後国内外での科学者・実利用者などでの議論

を経て確定されるものである。特に DPR-2 については NASA の(A-)CCP ミッション(付録 C2 参照)への相乗り搭載を行うことにより、NASA センサとの複合利用によって雲・降水プロセスの理解の促進が期待されるため、JAXA は今後 NASA と共同で観測システムの検討を深化させていくべきである。なお、NASA の(A-)CCP 観測ミッションは 2027 年頃の打ち上げを目標としている。

降水レーダは、2.2 節の課題1)と2)の解決に主に貢献する。DPR-2 によって、現在の観測の課題である観測頻度が低いことや、弱い雪が捕捉できない問題を解決することで、降水の三次元分布の高精度な把握や、降雨・降雪の識別、降水の粒径分布などの観測を通じて、降水の定量化や雲・降水プロセスの理解を促進できる。また、将来の降水レーダミッションについては、国際協力の枠組みによる、雲レーダやライダーによる観測との連携が大いに期待されており、これらの連携観測によって初めて実現可能となる科学研究も多い。

4.3.3 その他ミッション

【グローバル光学イメージャ】

3.2.1 節で述べた GCOM-C 搭載 SGLI は、雪氷、地上アルベド、陸域生態系などの水循環に関わる幅広い物理量が観測可能であり、上記2つのミッションよりは優先度がやや劣るものの、海外を見ても SGLI の後継となる中分解能の光学センサは観測頻度・分解能のバランスから効果的でニーズが高く、自国で持つべき基本的なセンサとして、今後検討すべきミッションであると考えられる。

グローバル光学イメージャは、大気においては雲やエアロゾル、陸面や海氷面においては、アルベドや雪氷の情報を全球で高頻度かつ高分解能で提供できるため、主に課題2)と3)の解決に貢献できる。課題2)では雲レーダやライダーとの連携、課題3)ではマイクロ波放射計や合成開口レーダとの連携によって、大きなシナジーが得られる。

【ハイパースペクトル赤外サウンダ、マイクロ波サウンダ、風ライダー】

気象予報の精度向上においては、現在、水蒸気・気温・風の広域・高頻度な三次元(水平・鉛直)分布と、雲・降水の広域・高頻度な三次元(水平・鉛直)分布の観測が不足している。水蒸気・気温の三次元分布を観測するセンサとして、ハイパースペクトルの赤外サウンダ、マイクロ波サウンダ、大気中の風の三次元分布を観測するセンサとして、ドップラ風ライダー、ハイパースペクトルの赤外サウンダ、マイクロ波サウンダ(高頻度観測に基づく tracking)、雲降水の三次元分布を観測するセンサとして、マイクロ波サウンダ、広域をスキャンするレーダー・ライダーが必要である。さらに、広域かつ高頻度の観測を実現するためには、これらのセンサを、静止衛星に搭載するか、あるいは、複数の低高度衛星によるコンステレーションによる高頻度観測を行う必要がある。静止衛星については、単機では全球を観測できないが、現在「ひまわり」が観測している日本及びアジア

ア域のみの観測であっても、海上での台風発生・発達域での観測情報など、予測精度向上に寄与すると期待できる。

これらのセンサによる三次元情報は、数値気象予報モデルの初期値としても、また、雲・降水プロセスの解明の上でも重要であり、主に課題1)と2)の解決に貢献できる。

【大口径マイクロ波放射計(静止衛星)】

マイクロ波放射計(イメージャ、サウンダ)の静止衛星搭載は、世界でもまだ実現していない。高頻度の水蒸気観測を可能にする静止衛星搭載のマイクロ波放射計は、集中豪雨や台風など、短時間スケールの気象予報の精度向上につながる。しかし、静止衛星に搭載するためには、大口径のアンテナ開発が必須であり、静止軌道への前段階として、極軌道衛星搭載の大口径アンテナの開発が望まれる。極軌道での大口径アンテナの実現は、マイクロ波放射計の最大の弱点である空間分解能を向上するものであり、水循環研究のみならず、水産や海洋監視などの現業分野からもニーズが高い。現在、AMSR2の2.0mがマイクロ波放射計としては世界最大であることから、将来の大きな開発目標となりえる。

大口径のマイクロ波放射計は、現在のマイクロ波放射計による観測の課題である空間解像度を大幅に向上するものであり、課題1)~3)のすべての解決に貢献できる。ただし、静止衛星に搭載した場合は極域の観測ができなくなるため、課題3)の雪氷圏の監視への貢献は限定される。

【観測頻度向上に向けたミッション(静止サウンダ、小型衛星コンステレーション)】

水蒸気や気温の鉛直分布も含めた高頻度・広域の観測は、現在もある程度観測システムが構築されているが、頻度は不十分であるため、赤外・マイクロ波のサウンダを搭載した静止衛星や小型衛星を含む低高度衛星のコンステレーションにより、観測頻度を向上させる。

これらのミッションによる観測頻度の向上は、気象予報モデルへの高頻度な水蒸気や気温の初期値提供を実現することから、主に課題1)の解決に貢献する。

5. おわりに

本グランドプランでは水循環に関する衛星観測の現状を俯瞰し、科学的課題の解決に向けた将来ミッションの提案を行った。衛星観測は全球規模の水循環を観測、理解する上で必要不可欠のツールであり、データ蓄積も進んできて気候変動影響のトレンド検出も可能となってきた。しかしながら、より高精度での観測、プロセスの理解の深化のためには、これまで観測できなかった物理量の新たな観測や、観測できているものの空間分解能や観測頻度が不十分な物理量については観測性能の向上を実現することが重要となる。水循環における科学的課題の解決に向けたミッションは 4.3 節の通り多岐に渡っており、実現のための技術水準もそれぞれ異なっているが、いずれも重要なミッションである。

一方、我が国は厳しい予算状況にあり、限られた予算の中で水循環観測研究を進展させるには、優先度を徹底的に検討して実行することが重要であり、優先度を議論する上では、科学的課題の解決とともに、防災、減災、水資源、環境保全などにおいて社会にどう貢献できるかという社会への説明責任も考慮する必要がある。この科学的課題の特定と社会への説明責任については、研究者(データ利用者)間で広く議論し、コミュニティの同意を得ることが求められる。さらには、技術開発によるコストパフォーマンスの改善も重要な点である。本グランドプランでは、現在の状況に対応して科学的課題と優先度の議論を行ってまとめたが、今後も同様の活動を衛星技術や社会状況の変化に応じて継続的に実施していくべきである。

本文書において示した今後のミッション提案の実現に対して関係各所での検討を期待したい。

参考文献

Bessho, K., Date, K., Hayashi, M. et al, 2016, An Introduction to Himawari-8/9 – Japan’s New-Generation Geostationary Meteorological Satellites, Journal of the Meteorological Society of Japan, 94(2), 151–183.

Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX), 2013, GEWEX Plans for 2013 and Beyond: GEWEX Science Questions, GEWEX Document Series No. 2012-2,
http://www.gewex.org/gewex-content/uploads/2015/02/GEWEX_Science_Questions_final.pdf
(2019年1月閲覧)

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2018. Thriving on Our Changing Planet: A Decadal Strategy for Earth Observation from Space. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/24938>.

World Climate Research Program (WCRP), 2019;
<https://www.wcrp-climate.org/grand-challenges/grand-challenges-overview>
(2019年1月閲覧)

World Weather Watch, 2005, https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_986.pdf (2019年1月閲覧)

外務省, 2015, https://www.mofa.go.jp/mofaj/na/na1/us/page3_001206.html (2019年1月閲覧)

気象庁, 2018, 2030年に向けた数値予報技術開発重点計画.
https://www.jma.go.jp/jma/press/1810/04b/nwp_strategic_plan_towards_2030_181004.html
(2019年1月閲覧)

気象庁, 2019; https://www.jma-net.go.jp/sat/himawari/mtsatsat_info.html (2019年1月閲覧)

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 リモセン分科会), 2018, 地球観測グランドデザイン.

JAXA, 2019; http://www.jaxa.jp/about/iso/sdgs/index_j.html (2019年1月閲覧)

TF 地球科学研究高度化ワーキンググループ編, 2017, 地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析 気象研究ノート 第234号. 日本気象学会.

日本学術会議 地球惑星科学委員会 地球・惑星圏分科会, 2017, 我が国の地球衛星観測のあり方について.

水 循 環 基 本 計 画 , 2015 ,
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/mizu_junkan/pdf/honbun.pdf
(2019年1月閲覧)

文部科学省, 2011,
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/shiryo/attach/1311934.htm

(2019年1月閲覧)

付録 A 国際枠組みおよび政策文書

【Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)】

温室効果ガスによる外部強制に伴う放射収支の変化は、気温の変化(気候感度)と降水量の変化(水循環感度)に深く影響する。そのため、IPCCの第5次報告書では、「気候変動による水循環の変化は、多様な影響とリスクをもたらす可能性がある」と報告されている。IPCCの気候予測・評価にとって重要なモデル比較プロジェクトは、世界気候研究計画(World Climate Research Programme: WCRP)の傘下のコアプロジェクトによって推進されている。

【World Climate Research Programme (WCRP)】

WCRPは、気候予測と人間活動の気候影響把握の推進と振興を目的として、1980年に世界気象機関(WMO)と国際学術連合会議(ICSU)の協力によって組織された。その中で、気候学研究における最重要課題(Grand Challenge)として以下の7つを掲げている(WCRP, 2019): ① 氷の融解と全球的な影響; ② 雲、循環及び気候感度; ③ 炭素フィードバックと気候システム; ④ 気象と気候の極端現象; ⑤ 世界の食糧供給源のための水; ⑥ 地域的な海面変動と沿岸への影響; ⑦ 短期の気候予測。

WCRPのコアプロジェクトの一つである全球エネルギー・水循環観測研究計画(GEWEX)は、地球の水循環と大気・地表面における放射フラックスを理解することを目的としており、WCRP Grand Challengeへの貢献として4つの問いが掲げられている。特に、下記2つの問いに対しては、日本が開発する衛星ミッションによる貢献が期待されている(GEWEX, 2013)。それらは、「降水の観測と予測: 降水の変動と変化をよりよく理解・予測するにはどのようにすれば良いか」、そして「水・エネルギーの循環とプロセス: 現在と変化する気候における水とエネルギーの交換による影響と不確実性の理解を深め、普及させるには、どのようにすれば良いか」である。前者の問いにおいては、日米共同ミッション「全球降水観測(Global Precipitation Measurement: GPM)」と日欧共同ミッション「雲・エアロゾル・放射ミッション(Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer: EarthCARE)」が全球の降水の把握に貢献することが明記されている。後者の問いでは、地球の放射収支や雲・エアロゾル・降水相互作用による気候影響の理解向上にEarthCAREが資することが言及されている。また、WCRPと同様に世界気候計画(World Climate Programme; WCP)のサブプログラムである世界気候観測システム(Global Climate Observing System; GCOS)は、包括的な気候監視のための観測要求を「必須気候変数(ECV)」として定め、国連気候変動枠組条約(UNFCCC)等における意思決定に貢献する重要な情報源とされている(文部科学省, 2011)。

【World Weather Watch (WWW)】

WMO が推進する他の中核的なプログラムとしては、1963 年に策定された世界気象観測計画 (WWW) がある。WWW は、世界的に調和した気象観測網の構築を核とする計画で、これまで全球的な衛星・地上観測網の整備、データ処理・通信システムのネットワーク構築、気象予報技術の発展のなどに利用されてきた。WWW のコアコンポーネントである全球監視システム (Global Observing System: GOS) には、日本の衛星からは、「水循環変動観測衛星 (GCOM-W)」、「気候変動観測衛星 (GCOM-C)」、「GPM 主衛星」、「静止気象衛星やひまわり」などが構成している (World Weather Watch, 2005)。

【Sustainable Development Goals (SDGs)】

持続可能な開発目標 (SDGs) は、2001 年に策定されたミレニアム開発目標 (MDGs) の後継として、2015 年 9 月の国連サミットで採択された「持続可能な開発のための 2030 アジェンダ」にて記載された 2016 年から 2030 年までの国際目標であり、持続可能な世界を実現するための 17 のゴール、169 のターゲットから構成されている。17 のゴールのうちの水循環観測・研究が直接的に関係するものは「6.水・衛生」、「13.気候変動」であり、JAXA 地球観測衛星の貢献が検討されている (JAXA, 2019)。また、地球観測に関する政府間会合 (GEO) は、衛星、海洋及び地上観測を統合した複数の観測システムからなる全球地球観測システム (GEOSS: Global Earth Observation System of Systems) を推進するための国際的な枠組として設立された。GEO では衛星観測は GEOSS の中の重要な観測として位置づけられている。

【我が国の気象予測と防災】

我が国における防災分野では、静止気象衛星「ひまわり」が我が国及び東アジア・西太平洋域内の各国における天気予報や、台風・集中豪雨、気候変動などの監視・予測、船舶や航空機の安全確保に貢献する (気象庁, 2019)。このような静止気象衛星や、JAXA が開発する極軌道衛星は、世界気象観測網の一翼としても、世界気象機関 (WMO) が提唱する世界気象監視計画 (WWW) の重要な役割を担う。また、2018 年に発表された気象庁の「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、重点目標として「豪雨防災 (早期警戒・避難の実現)」、「台風防災 (数日先予測の高精度化)」が挙げられている。この目標達成のための技術革新の一つである「次世代技術による地球の観測ビッグデータ活用」として、衛星データの活用が記載されており、静止気象衛星の利用だけでなく、マイクロ波や赤外の鉛直探査計や放射計データが精度の高い初期値の作成に必須であることや、これまで行われていなかった雲や降水の影響を受けた観測データの利用に重点に取り組むことが記述されている。

【水循環基本計画】

国内においては、平成 27 年度に「水循環基本計画」が閣議決定された。これは、我が国の水循環に関する施策の総合的かつ計画的な推進を図るための基本的な計画として策定され、その計画には、科学技術の振興における全球観測を活用した調査研究として、SAR 衛星群・光学衛星群・光学衛星群、環境観測衛星群による観測システムの構築や、さらには地上観測・数値モデルとの融合による水循環データセットの構築が組み込まれている。また、国際協力としては、GEO やアジア・太平洋地域宇宙機関会議 (APRSAF) などの国際協力などの活用へも言及されている(水循環基本計画, 2015)。水循環基本計画に盛り込まれた施策の取組状況や、水循環の現状と課題は、「水循環白書」において年度単位で具体的に報告されている。平成 29 年度の水循環白書では、水循環基本計画における科学技術の振興として、「ALOS-2(陸域観測技術衛星 2 号)」、「GCOM-W」、「GPM 主衛星」などによる地球観測の推進に関する取組や GCOM-C の打上げ・観測開始、ALOS-3 と ALOS-4 等の研究開発への言及がある。

【北極研究長期構想】

日本の北極研究の長期の方向性を検討した「北極研究長期構想(2018 年改訂)(<http://www.wjcar.org/documents/longterm201809zouho.pdf>)」では、様々な観測分野において衛星観測が不可欠であること、10~20 年後を見据えた戦略においても重要な位置を占めること、研究基盤の整備として主要項目に挙げられている(P.188~190 参照。北極関係では、北極科学大臣会合でも日本の貢献として衛星観測を紹介している(https://www.arcticsscienceministerial.org/files/BMBF_ASM2_Broschuere_V1_A4_webRZ_bf.pdf)。

【気候変動適応法】

本法律は、平成 30 年 12 月に施行され、平成 30 年 7 月豪雨に代表される近年の大雨の頻度の増加や、農作物の品質低下、動植物の分布域の変化、熱中症リスクの増加などを受けて、我が国における気候変動適応に関する取り組みを関係者が一丸となって適応策を強力に推進するべく施行された。環境省による概要(http://www.env.go.jp/earth/tekiou/tekiouhou_gaiyou.pdf)によれば、国は、気候変動適応計画(<http://www.env.go.jp/earth/tekiou/tekioukeikaku.pdf>)に基づき農業や防災等の各分野の適応を推進し、その進展状況についての把握・評価手法を開発する、とある。また気候変動影響評価がおおむね5年ごとに行われ、その結果等を勘案して計画が改定される予定である。

計画中には、基本戦略の一つとして「陸上の定点観測、高山帯から沿岸域に至るまでの様々な生態系の観測、船舶やアルゴフロート等による海洋・極域の観測、航空機による観測、人工衛星等によるリモートセンシングによる観測などを、効果的に組み合わせる」とあり、よ

り具体的には衛星観測データ同化による漁場予測や、海外における食料供給動向に関する情報の補完・強化のための衛星観測データ活用(土壌水分等)などが記載されている。

付録 B 複数衛星等の複合利用

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いる。また、これらの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、現業期間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。これらの成果の例を下記に示す。

1) 複数衛星データを利用したプロダクト開発

複数の衛星から得られた観測データを複合することにより、単独の衛星では作成できない高頻度かつ欠損のない全球プロダクトを作成することを目的としている。以下に主なプロダクトを記載する。

- ・ 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>)。最近、領域を限定して実時間で配信するリアルタイム版 (GSMaP_NOW) も公開している。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) 長期データセットの構築

複数衛星データを活用し、気候変動研究に利用可能な長期データセットを作成している。以下に現在公開中の主なデータセットを記載する。

- ・ JAXA Satellite Monitoring for Environmental Studies (JASMES): MODIS、GCOM-C などを活用し、短波放射、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水データセット: 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～現在の日平均の海水データセット(海水密接度、海水面積)を開発・提供している(https://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JASMES/climate_v3/index_j.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, Coliris/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>)

3) データ同化

2000 年代以降、気象モデルへのマイクロ波放射計の同化は、気象庁や ECMWF などの各国気象機関で現業利用が進んでいる。他方、気象モデル以外への衛星データの同化については、まだ研究要素が高いものが多いが、近年の衛星観測の性能向上やデータ量増加、計算機能力の向上により、急速に研究が発展している。

- ・ 気象予報: 気象庁の現業数値予報システムにおいて、2003 年からマイクロ波放射計 (SSM/I, TMI) のメソモデルでの同化が開始、2004 年に AMSR-E のメソモデルでの同化開始、2006 年に SSM/I, TMI, AMSR-E の全球モデルでの同化開始、2013 年に AMSR2 のメソモデル・全球モデルでの同化開始、2016 年に GMI 及び DPR(降水レーダ) のメソモデルでの同化と GMI の全球モデルでの同化開始、2017 年に GMI, AMSR2 の局地モデルでの同化が開始するなど、現業的に利用されている。気象庁では、現状は海上のマイクロ波晴天域のデータのみを同化しているが、将来的には、すでに ECMWF で現業化されているように、陸域も含めた全天候(雲・降水域を含む)のデータ同化を目指している。
- ・ 陸面水文シミュレーション: 陸面シミュレーションモデルや河川氾濫モデルの入力として、GSMaP 等による降水量や衛星観測データを利用し、河川水位や氾濫面積などの予測精度を向上し、洪水予警報に役立てる取り組みが複数進んでいる。東大と JAXA では、全球 50km および日本域 1km 解像度の陸面シミュレーションシステムと河川氾濫モデルを統合した Today's Earth システムを開発し、3 時間毎の陸面水文量のシミュレーションおよび河川流量を作成・公開している(<https://www.eorc.jaxa.jp/water/TE-global/>)。また、土木研究所が開発している統合洪水解析システム(IFAS)は、JAXA-土木研究所の協力で、ユネスコ IHP の受託の下でパキスタン気象局の現業システムに導入され、GSMaP を入力とした洪水

予警報が実施されている。また、東大において、AMSR シリーズの輝度温度を地表面モデルに同化することで、「アフリカの角」地域での 2011 年干ばつについて、1 年前の時点での干ばつ予測の再現実験に成功した。この成果は農業干ばつの予警報システム構築に貢献している。

- ・ GSMaP 理研ナウキャスト: JAXA との協力に基づき、理化学研究所で、GSMaP を用いた短時間降水予報手法が開発され、「世界の降水予報 GSMaP 理研ナウキャスト」として Web から画像およびデータが公開されている (<https://weather.riken.jp/jp/gsmmap/gsmmap.html>)。
- ・ 衛星データ同化気象プロダクト: JAXA・理化学研究所・東京大学の連携により、数値気象予測モデル(Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model; NICAM)とデータ同化システム(Local Ensemble Transform Kalman Filter; LETKF)を用いて JAXA スーパーコンピュータで GSMaP 等の衛星データを同化した気象プロダクト NICAM-LETKF JAXA Research Analysis (NEXRA) を作成し、「世界の気象リアルタイム」(https://www.eorc.jaxa.jp/theme/NEXRA/index_j.htm)として画像が公開されている。:
- ・ エアロゾル予測: JAXA・気象庁気象研究所・九州大学の連携により、ひまわりから推定したエアロゾルを全球エアロゾル輸送モデル(MAGINGAR)に同化し、エアロゾルの飛来予測のシミュレーションを可能にした。このモデル結果は JAXA ひまわりモニタから公開している (<https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/>)。今後、GCOM-C/SGLI 等のエアロゾルデータに拡大すると共に、気象庁が 2019 年度に改訂を予定しているエアロゾル予測にも適用される予定である。
- ・ 海中天気予報: JAXA と JAMSTEC、名古屋大学の協力連携により、3km 空間分解能の領域海洋モデルへの衛星海面水温(AMSR2, WIndsat, GMI, ひまわり, MODIS, SGLI 等)のデータ同化による 1 時間毎の海中の物理量の解析と予測(海中天気予報)が実現している。現在、日本周辺海域の衛星海面水温をデータ同化して作成したモデル海面水温は JAXA から、その他の海中の物理量については JAMSTEC からデータが公開されている (https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/ocean_model/index_j.html?date=2019011705)。
- ・ 海水分布の季節予報: 東京大学及び北極域研究推進プロジェクト(ArCS)の活動において、AMSR2 海水データを用いて北極海海水分布の季節予報を実施し、2015 年夏季の予測について実測値との差が 2%(世界トップクラス)で面積予測に成功し、近年急速にニーズが増加している北極海航路での利用の実現性が高まった。毎年の海水予測は、ArCS のウェブページで公開されている (<https://www.arcs-pro.jp/>)。

4) 意思決定支援システムの構築

- ・ JASMAI, JASMIN: 農業気象に関わる情報(GSMaP、土壌水分量、LST などのプロダクトを

時空間的に加工)を提供するシステムを開発し、日本の農水省(JASMAI - 農水省のみに公開)、および東南アジア各国の農業省などの現業期間での作物作況判断に活用されている(JASMIN - <https://suzaku.eorc.jaxa.jp/JASMIN/index.html>)。

- ・ 台風・ハリケーン解析: 気象庁や NOAA では、台風やハリケーンについて、静止気象衛星やマイクロ波放射計(AMSR2, GMI, SSMIS 等)の観測情報を利用して、中心位置や強度を推定し、将来の発達・衰退の予測や判断に利用している。さらに気象庁は、AMSR2 および Windsat の全天候海上風速プロダクトによる台風画像をアジアの気象機関に配信している。

付録 C 海外の衛星観測の将来計画の状況

C1 欧州

欧州では、現在運用中の極軌道気象衛星 MetOp シリーズの後継として、MetOp-SG の計画が進んでいる。MetOp-SG は 2 種類の衛星セットで構成され、MetOp-SG-A (2021 年頃打ち上げ予定) には、マイクロ波サウンダをはじめとした 8 センサが搭載され、MetOp-SG-B (2022 年頃打ち上げ予定) にはマイクロ波イメージャ、氷・雲イメージャ(ミリ波・サブミリ波)、マイクロ波散乱計などの 7 センサが搭載される予定である。

また、欧州委員会(EC)によって現在実施中の Copernicus 計画の次期コンポーネントとして、Copernicus Space Component (CSC) Expansion で、以下の3つの分野を識別し、優先度を置いている。3つの分野は以下の通りである。

- 1) 温室効果ガス監視(とくに欧州衛星で観測できていない人為起源 CO₂ の放出)
- 2) 極域監視(極域・北極の海氷密接度、地表面高度)および農業監視(熱赤外やハイパースペクトル観測で可能となるもの)
- 3) 採鉱・生物多様性・土壌水分等(現在利用できない周波数帯の観測を必要とするもの)

これらの優先分野に対応して、現在以下の6つの候補ミッションが提案され、2018年現在、ESAにおいてPhaseA/B1研究が実施されている。

- ・ 人為起源 CO₂ 監視ミッション
- ・ 高空間・時間解像度の地表面温度を観測するミッション(可視・近赤外・熱赤外イメージャ)
- ・ 極域の氷雪の地形を観測するミッション(陸氷高と海氷厚)
- ・ マイクロ波放射計ミッション(大型アンテナによる高解像度観測)
- ・ ハイパースペクトルイメージャミッション
- ・ Lバンド合成開口レーダミッション

候補の絞り込みは 2019 年に実施される予定である。上記の 6 つの候補ミッションの中で水循環に最も関係が深いのは、マイクロ波放射計ミッション(Copernicus Imaging Microwave Radiometer (CIMR))であるが、海氷を 5km 以下、海面水温を 15km 以下の空間分解能で観測するために、1.4 ~36GHz 帯の観測チャンネルと、約 7m の口径のメッシュアンテナを回転させるコニカルスキャン型のマイクロ波放射計として検討されている。また、MetOp-SG-B の搭載予定のマイクロ波放射計(18~183GHz 帯)とは緩やかなフォーメーション飛行(衛星軌道制御による完全な同期観測ではない)を行うことを検討している。

C2 米国

米国では 2018 年1月に全米科学アカデミーより地球観測に関する Decadal Survey(中身の説明)がリリースされ、NASA、NOAA および USGS の今後 10 年の活動計画(2017-2027)への指針

を示した。Decadal Survey ではまず解決すべき 35 の Key Science Questions を集約し、それらに答えるために観測すべき対象を、優先度を設けて示されている。最も優先度が高く、特定の観測計画が必須 (Designated) と判断された観測対象は 5 つで、以下のとおりである。

- ・ 雲・対流・降水
- ・ エアロゾル
- ・ 質量変化
- ・ 地表の生物学・地質学
- ・ 地表の変質と変化

これらの観測対象はすべて水循環問題に関係し、他分野を横断する課題であることが示されている (National Academy of Sciences, 2018)。

中でも水循環に関係の深い Aerosol と Clouds, Convection, and Precipitation (CCP) についてはいずれも予算規模 800 億円の大型ミッションとして推薦されており、CCP の Candidate Measurement Approach には TRMM、GPM での国際協力を経て日本の強みとなった「Radar(s)」が明記されている。本文中には、複数周波数によるレーダ観測とドップラ観測のシナジーにより、低い雲と高い雲の両方の鉛直プロファイル、ならびに微物理情報を提供することが望ましいこと、さらにはエアロゾル観測とのオーバーラップによるエアロゾルの降水システムへの間接的な寄与についての理解が進むことが期待されている。

これらの提言を受け、NASA は Aerosol・CCP の単独ミッションのみならず、合同ミッション (A-CCP) を視野に入れた検討を始めており、JAXAはこの検討に参加が決定している。検討結果は 2021 年までに国際検討チームによる study report としてまとめられ、2022 年 4 月には概念設計フェーズ (KDP-A) に移行予定である。

C3 中国

中国気象局 (CMA) は極軌道衛星の FY (Feng Yun) 1/3 シリーズと静止軌道衛星の FY2/4 シリーズの地球観測衛星を中心に開発してきた。現在は第 2 世代の FY3 (A、B、C、D)、FY4 (A) に移行しつつあり、極軌道衛星は 2025 年までにさらに 3 機 (E、F、G)、静止衛星は 2030 年までに 4 機 (B、C、D、E) の開発を計画している。なお、2017 年 11 月に打ち上げられた FY3D はマイクロ波のサウンダや放射計、広域光学センサなど合計 10 のミッション機器を搭載している。また、2021 年に FY3R として中国では初の降水レーダを搭載した衛星を打ち上げる計画がある。その他にも、温室効果ガスを計測する TANSAT や、高空間分解能・高波長分解能の光学センサや大気サウンダを搭載した GF (GaoFeng) シリーズ (2018 年 5 月に打ち上げられた GF-5 は 6 つのミッション機器を搭載) の衛星がある。

また、中国宇宙局 (CNSA) は海洋観測・監視を目的とした HY (Haiyang)-2 のシリーズを運用して

おり、マイクロ波放射計(海面水温が観測可能な 6GHz 帯を持つ)や散乱計、海面高度計を搭載している。HY-2A は 2011 年に打ち上げられ、後継計画として、HY-2B, HY-2C が予定されている。

付録 D 新たなミッションのシステム仕様案

D1 マイクロ波放射計

ミッション要求	実現方法	システム仕様
【水循環変動監視】 陸上を含む水蒸気量の変化	・ 既存の 18, 23GHz 帯を利用し、 水平偏波と垂直偏波の差から陸 上積算水蒸気量を推定	・ AMSR2 の機能性能維持(18GHz 及び 23GHz 帯の V/H 偏波) ・ 偏波差を利用した陸上積算水蒸 気量アルゴリズム開発
【水循環変動監視】 ・ 全球の降水(降雨+降雪)分布 ・ 雨の降り方の変化	・ 高周波数チャンネルを追加搭載 して降雪量を推定	・ 高周波チャンネル(166,183GHz 帯)の搭載 ・ 降雪量アルゴリズム開発
【気象】降雪量や高周波数の輝度 温度等の提供	・ 同上	・ 同上
【気象】日本付近観測データのレイ テンシ短縮、物理量プロダクトを 0.5 時間以内配信	・ 国内受信局へ観測データをリア ルタイム伝送 ・ データ処理・配信を高速化	・ 国内直接受信局への伝送・受信 ・ 準リアルタイムプロダクトの処理・ 配信
【水産】海面水温(SST)の空間分 解能向上(50km→20km)	・ 7G-SST(50km)と同等品質の 10G-SST(30km)プロダクトを開発 ・ 10GHz 高解像度輝度温度プロダ クト(20km)を開発し SST 算出に 使用	・ 10GHz 温度分解能の向上(詳細 は(3)) ・ アンテナパターン合成による高解 像処理、10G-SST の精度向上、 測定範囲拡張
【水産】沿岸から 20km 以遠 SST の 提供	・ 上記+陸放射の影響を補正	・ 陸放射の影響を補正する SST ア ルゴリズム改良
【継続】AMSR2 プロダクト長期間・ 継続提供	・ GCOM-W 観測プロダクトとの一 貫性・継続性の確保	・ AMSR2 の機能性能維持 ・ GCOM-W と類似の衛星軌道 ・ 長寿命化(7 年)

D2 アクティブセンサによる降水観測

ミッション要求	実現方法	システム仕様(案)
レーダを直接用いた GSMaP の開発により、極端現象の監視・予測精度を向上	<ul style="list-style-type: none"> DPR の観測幅 250km はマイクロ波放射計に比べ狭く、台風などの極端現象の補足率、全球降水マップ直接利用等に難があるので観測幅を拡大 	<ul style="list-style-type: none"> 観測幅2倍 Ku/Ka とともに約 500km
弱く背の低い降水も含めた高精度降水観測による、気候モデルの予測のばらつきの理解の深化	<ul style="list-style-type: none"> DPR は PR からの感度向上により高精度の降水観測を実現しているが、依然として最小感度以下の降水があることが指摘されているため(Lin and Hou, 2012)、感度を向上 	<ul style="list-style-type: none"> 更なる高感度化 Ku:15dBZ→0dBZ Ka:10dBZ→-10dBZ
雲降水に関する詳細な微物理情報を提供し、数値モデルへの同化を経て気象・気候モデルを精度向上	<ul style="list-style-type: none"> 大気の大循環を決める降水システムの鉛直混合の理解のため、世界でも例がない、衛星による降水粒子のドップラ観測(鉛直流観測)を実現 	<ul style="list-style-type: none"> ドップラ観測機能の追加 感度:2m/sec

付録 E 衛星による水循環観測グランドプラン策定委員会 委員名簿

(敬称略)

主査:

岩崎俊樹(東北大学)

委員:

大気分野:

高薮縁(東京大学)

高橋暢宏(名古屋大学)

海洋分野:

江淵直人(北海道大学)

陸域分野:

芳村圭(東京大学)

極域分野:

榎本浩之(国立極地研究所)

気候解析・IPCC 連携:

高薮出(気象研究所)

気候モデル連携:

佐藤正樹(東京大学)

気象予報連携:

岡本幸三(気象研究所)

事務局:

可知美佐子(JAXA/EORC)

大吉慶(JAXA/EORC)

竹野公子(JAXA/EORC、事務支援)

JAXA メンバー:

中島映至(EORC 参与)

松浦直人(EORC センター長)

沖理子

村上浩

堀雅浩

久保田拓志

菊池麻紀

山地萌果

小野温

山本晃輔