

地球観測に関する科学アドバイザリ委員会
降水観測ミッション(PMM)分科会 後継ミッション検討グループ報告書

将来の降水観測ミッションへの提案

2016 年 1 月 初版
2019 年 3 月 A 改訂
2021 年 7 月 B 改訂

地球観測に関する科学アドバイザリ委員会
降水観測ミッション(PMM)分科会
後継ミッション検討グループ

内容

1. はじめに（高橋暢宏、山本晃輔）	2
1.1 背景・経緯	2
1.2 国内外の状況	3
1.3 本報告書の位置づけと構成	5
2. 降水観測に関する重要課題	6
2.1 雲・降水システムの理解	6
2.1.1 降水システムの全球的把握（中村健治）	6
2.1.2 雲・降水システムの特徴、発達の過程（増永浩彦、高薮縁、安永数明）	9
2.1.3 雲物理過程の理解（高橋暢宏）	12
2.1.4 台風（青梨和正、広瀬正史）	16
2.1.5 弱い降水、降雪、局地的降水（広瀬正史、重尚一）	20
2.1.6 雲・放射との関係（鈴木健太郎）	24
2.2 高解像度全球数値モデルとの連携	28
2.2.1 数値天気予報（岡本幸三、幾田泰醇）	28
2.2.2 雲解像モデル（三好建正、佐藤正樹）	31
2.3 極端現象モニタリングと応用	38
2.3.1 地球温暖化問題（高薮縁、鈴木健太郎）	38
2.3.2 降水モニタリングによる極端現象の検出（山地萌果）	42
2.3.3 降水モニタリングによる気候変動の検出（金丸佳矢、沖理子）	43
2.3.4 社会インフラとしての降水データの利活用	49
2.4 降水観測に関する重要課題のまとめ（山地萌果、高橋暢宏）	57
3. 将来の降水観測ミッションの検討	59
3.1 Ku 帯ドップラ降水レーダ	59
3.2 その他の挑戦的な将来ミッション	63
3.2.1 偏波観測機能の追加	63
3.2.2 小型降水レーダコンステレーション	65
3.2.3 静止降水観測レーダ（上土井大助）	68
4. まとめ・ミッション実現に向けて・（山本晃輔、高橋暢宏）	73
付録 1：最小測定降雨強度（感度）の算出の際に用いた DPR 仕様の定義	75
付録 2：執筆協力者名簿	76
付録 3：仕様検討チームの活動	77

1. はじめに（高橋暢宏、山本晃輔）

1.1 背景・経緯

人工衛星からの降水観測としては静止気象衛星による赤外放射輝度温度情報を用いた推定やマイクロ波放射計による物理的な推定が行われてきたが、地球全体の大気の循環を理解する上では十分な精度に達しておらず、より直接的な観測となるレーダを用いた観測が必要とされていた。熱帯降雨観測衛星（Tropical Rainfall Measuring Mission: TRMM）はその様な状況下で誕生したものであり、1997年に打ち上げられた。TRMMは日米の共同ミッションであるが、最も重要なセンサである降雨レーダ（Precipitation Radar: PR）は日本側が開発した。以来、TRMMは地球全体の降水情報のスタンダードとしてマイクロ波放射計による降水推定アルゴリズムの大幅な改善や熱帯域での降水システムに対する理解の進歩、これまで観測の無かった地域での降水の日変化等数々の成果が上げられている。これらの研究成果はレーダ・マイクロ波放射計・静止気象衛星の情報を組み合わせた1時間ごとの全球降水マップ（GSMaP）の開発につながった。

TRMMの後継ミッションであるGlobal Precipitation Measurement（GPM、2014年打上げ）では、TRMM時代におけるレーダとマイクロ波放射計のシナジーのコンセプトを拡張し、さらに、観測範囲をTRMMの熱帯・亜熱帯から全球降水（降雨、降雪）に拡大することにより、地球上のほとんどの降水を捉えることを目指した。そのため、GPMの主衛星に搭載されたレーダは二周波降水レーダ（DPR: Dual-frequency Precipitation Radar）であり、感度の向上と雨・雪の判別にも応用可能となった。近年では雹や霰といった強い固体降水の世界分布図の作成も可能になっている（Iguchi et al. 2018）。GPM主衛星は2017年に3年間の定常運用期間を終了し後期運用へと移行したが、すべての機器類は極めて良好な状態を維持しており、現在TRMMのデータと合わせると約22年に及ぶレーダによる降水データレコードが蓄積されている。

また、2022年度に打上げを予定している雲エアロゾル放射ミッションEarthCAREでは、JAXAは情報通信研究機構（NICT）と共同でW-Band（94GHz）において世界初の衛星搭載ドップラレーダである雲プロファイリングレーダ（CPR）を開発し、日本が優位性を持つレーダ技術の発展を図っている。

降水関連の継続的に重要な研究テーマとしては、地球温暖化に伴う気候変動の評価が挙げられる。温暖化に伴う水蒸気の増加や地球の循環場の変化などによる極端な降水による災害が発生している一方で世界的には干ばつが頻発している地域もあり、これらを全球規模で継続的・定量的に把握し、状況の変化を理解する必要がある。同様に、地球温暖化の評価と予測に用いられる現在の数値気象・気候モデルの解像度はTRMM/PRやGPM/DPRと同程度になりつつあるため、雲・降水プロセスの理解がより重要になり、降水レーダ搭載の衛星観測との緊密な連携が求められている。今後は、観測研究（衛星観測）をモデル研究（理論）との両輪として推し進めてゆく必要がある。

また、TRMM、GPM と継続されてきたレーダを用いた降水観測ミッションは TRMM 開発当初には、熱帯の潜熱加熱による全球の循環のメカニズムを探ることを第 1 目標にしたプロセス研究のミッションであったが、GPM の時代には新たな科学研究として中高緯度の降雪に関する研究や雨滴粒径分布に関する研究等が生まれてきた一方で、高時間分解能の全球降水マップ (GSMaP) の開発・利用といった社会的（実利用的）な役割も求められてきており、将来的には降水情報を利用する様々な分野への応用が期待されている。

1.2 国内外の状況

地球観測衛星をめぐる国内の動向としては、文部科学省の地球観測推進部会において「GEOSS 新 10 年実施計画の検討に向けた我が国の地球観測の方針」の中間取りまとめが行われ、その中の「今後の地球観測の取組に当たっての基本的考え方 2. 地球観測の実施」において (1) 地球観測の実施体制 (2) 国際的な地球観測 (3) 長期的な地球観測の維持 (4) 最新の技術を活用した地球観測の 4 項目を掲げている。特に (3)、(4) においてはこれまで、TRMM や GPM で培ってきたものをベースに更に発展させることと読み取れる。日本学術会議の地球惑星科学委員会 地球・惑星圏分科会からは、記録として「我が国の地球衛星観測のあり方について」がまとめられており、降水観測に関してはこれまでの TRMM 等の成果を踏まえた上で、今後の展望のまとめとして 5 項目を挙げているが特に (2) の「日本の先導分野と継続的な国際貢献の重要性」では明確に日本の強みである衛星搭載レーダ技術を活かした科学的・社会的な貢献を訴えている。

一方で、内閣府の宇宙開発戦略本部による宇宙基本計画の工程表では、GCOM シリーズや TRMM・GPM 等に代表される大気地球観測衛星は「その他のリモートセンシング衛星」に分類され、このカテゴリーのみ現在運用中・開発中のミッションを除いてロードマップが示されていない状況である。このような状況を打開すべく、関連 25 学協会の参加によるタスクフォース会合・リモートセンシング分科会 (TF) では「衛星地球観測ミッション公募」を実施し、日本が国策として推し進めるべき地球観測ミッション提案を広く学界・産業界から募集しその優先順位付けを行っている。公募により選定されたミッションは同じく TF より発行される「地球観測グランドデザイン」中の「5 年以内に実現あるいは開発に着手すべきミッション (短期計画)」に掲載され、学界からオーソライズされた衛星観測ミッションとして公表されている。グランドデザイン初版 (2018) では簡易的な公募プロセスを経て 5 つのミッションがこの短期計画に選定されており、「アクティブセンサによる降水観測 (GPM 後継)」も継続が必要な重要なミッションとして記載されている。同年、さらに間口を広げて行われた「衛星地球観測ミッション公募 第一回試行」の結果でも第一期短期計画に選定されており、優先的に実現すべき地球観測ミッションの一つとして、2020 年制定のグランドデザイン A 改訂版に掲載されている。

衛星からの降水観測については、国際的な枠組みや組織からも気候変動や水資源管理と

いった点で継続的な観測が求められている。例えば、WCRP の **grand challenges** で掲げられている 6 つの挑戦 (**challenges**) のうち、**Regional Climate Information**、**Changes in Water Availability**、**Science Underpinning the Prediction and Attribution of Extreme Events** においてレーダ観測を含む衛星からの降水観測が必要な観測として挙げられているほか、**Clouds, Circulation and Sensitivity** においてはモデルの高度化が挙げられており、その意味では雲や大気循環のモデル研究に資する衛星観測が必要である（将来的には降水にたどりつくことを前提として）。また、WMO の **Vision for GOS (Global Observing System) in 2025** の報告書では、**Additional operational missions in appropriate orbits** の 1 つとして **Precipitation radars operated in conjunction with passive MW imagers in various orbits** が示されており、それを受けて IPWG は CGMS ヘコニカル走査のマイクロ波イメージャと降水レーダの長期観測を提言 (**recommendation**) している。

また、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** がリリースされ、NASA、NOAA および USGS の今後 10 年の活動計画への指針が示された。降水観測関係では **Clouds, Convection, and Precipitation (CCP)** が **Designated Observable**（最も優先度が高く、特定の観測計画が必須である観測対象）と判断され、予算規模 800 億円の大型ミッションとして記載された。CCP の推薦される観測手法の候補には「**Radar(s)**」が明記されている。また本文中には、CCP 同様 **Designated** ミッションであるエアロゾル観測とのシナジーによる、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促進への期待が述べられている。

これらの提言を受け、NASA は **Aerosol**、CCP の合同観測ミッション (**ACCP**) の検討を開始し、その検討手法についてまとめた **ACCP Study Plan** を制定した (2018)。ACCP ミッション検討は NASA/JAXA にとどまらない国際チーム (**ACCP Study Team**) によって行われ、日本からは本検討グループの委員も多数参加した。2021 年 5 月、NASA は **ACCP Study Team** の提案の中から 1 つの観測アーキテクチャ (**D1A**) を採用し、観測システムコンセプトを固めるプリフェーズ A に移行した。D1A では、極端気象や気候変動を駆動するエアロゾル、雲、対流、降水の統合的観測を通してそれらのプロセスを明らかにすることを目指した計 5 基の衛星による観測アーキテクチャである。JAXA は、NASA ACCP プリフェーズ A 検討においても、引き続き国際調整を実施している。なお、JAXA 衛星の軌道は、傾斜軌道を優先に検討を実施中であり、MDR までに確定する予定である。

我が国としては日本の明確な強みであるレーダによる降水観測の技術・アルゴリズム開発をもってこの ACCP ミッション検討に加わり、高度化した降水観測を軸として、エアロゾル・雲も含めた科学的理解を深めることが期待される。

1.3 本報告書の位置づけと構成

GPM 利用検討委員会・後継ミッション検討分科会では、2015 年から継続的に後継ミッションについて議論を重ねてきており、その詳細は報告書にまとめられている。本報告書はその改訂版という位置づけであり、前節で述べた昨今の国内外の次期降水観測ミッションの機運の高まりを踏まえ、次期降水レーダの科学的・社会的目標についてより具体化し、それらの実現に必要な仕様検討結果をまとめるものである。

報告書改定に際し、まず JAXA においてこれまでの国内外の将来降水観測に関する技術動向を調査し、委員へ展開した。これらの技術情報をもとに、それぞれの分野の専門家である各委員に対し、今後重要となる科学の諸課題とそれらの解決に必要な観測手法についてアンケートを募った。以下、第 2 章ではアンケート結果を基に、降水観測に関する重要課題に関して降水観測衛星データがどのような可能性やブレイクスルーをもたらし得るか、さらには社会インフラとしての降水データの利活用の可能性について、それぞれの分野での専門家による議論を載せている。第 3 章では、第 2 章でまとめられた重要課題を効果的に解決へと導く、考えられる観測手法についていくつか例を挙げながら詳細な検討結果を示している。また、第 4 章を全体のまとめとしている。

参考文献

T. Iguchi, N. Kawamoto and R. Oki, 2018: Detection of Intense Ice Precipitation with GPM/DPR, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **35**, 491–502, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0120.1>.

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（初版）.

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）, 2020 : 地球観測グランドデザイン（A 改訂版）.

THE NATIONAL ACADEMIES PRESS, 2018: Thriving on Our Changing Planet A Decadal Strategy for Earth Observation from Space.

Goddard Space Flight Center, Langley Research Center, Jet Propulsion Laboratory, Marshall Space Flight Center, Ames Research Center, and Glenn Research Center, 2018: Aerosols and Cloud-Convection Precipitation (ACCP) Study.

S. Braun et al. 2021: Aerosol, Cloud, Convection, and Precipitation (ACCP) Science & Applications

PMM 利用検討委員会後継ミッション検討分科会, 2015: 平成 27 年度 PMM 利用検討委員会後継ミッション検討分科会報告書 将来の降水観測ミッションへの提案.

2. 降水観測に関する重要課題

本章では、有識者へのアンケートや会合での議論をもとに、降水観測に関する重要課題として、①降水システムの理解、②高解像度全球数値モデルとの連携、③極端現象モニタリングと応用、の3つの柱を設けて以下小項目にまとめた。

2.1 雲・降水システムの理解

2.1.1 降水システムの全球的把握（中村健治）

2.1.1 (1) TRMM の成果

1997 年 11 月に打ち上げられ、17 年もの間、継続観測を行った TRMM はもともと「flying rain gauge」のコンセプトであった。1980 年代初期に衛星搭載のマイクロ波放射計により降雨が観測されることが実証され、衛星による全球規模の降水観測の検討が始まった。その頃はマイクロ波放射計による降水強度推定には大きな不確定性があり、衛星搭載のレーダの必要性が強調された。TRMM はこの流れの上で提案されている。TRMM の当初の設計寿命は3年であったが、結局17年の長きにわたって観測が続けられた。これにより、当初の「flying rain gauge」の概念を大きく超える成果を挙げた。

TRMM 搭載の降雨レーダ (PR) は期待された衛星降水強度推定精度の向上に大きな成果を挙げた。PR は 13.8GHz という降雨レーダとしては高い周波数の電波を使用している。このため降雨減衰が無視できない。これは当初は一つの欠点とも考えられたが、表面散乱法の開発により、総降雨減衰量を用いた降雨減衰量補正の手法が開発された。そして低軌道衛星からのレーダ降雨観測という特殊な状況に対応する、衛星からの降水強度推定法という新たな分野が開けた。

PR はその3次元観測能力により地表面付近の降水強度だけでなく、降水システムの構造の観測を行った。これにより熱帯・亜熱帯域の降水システムの構造の気候的特徴を初めて示すことができた。この降水システムの構造は、ほぼ同時観測しているマイクロ波放射計 (TMI) による降水強度推定の精度向上に大きく寄与し、さらには他の衛星に搭載されているマイクロ波放射計の降水強度推定の精度向上に寄与した。これにより、GSMaP など衛星データによる世界の降水マップの精度向上がなされた。このマップは0.1度グリッド、1時間の時間分解能となっている。これによりいわゆる *ungauged region*、*poorly gauged region* の洪水予測に道が付けられた。またいわゆる極端現象の分布、頻度などの地球環境変化に伴う変化把握に緒が付けられた。

データ同化による利用は衛星データ利用の大きな方向の一つである。TMI の放射輝度温度は SSM/I や AMSR などとともに洋上の水蒸気分布に大きな寄与をしている。PR のデータの同化はチャレンジングな課題であるが、徐々に進歩している。また GSMaP の降水分布データの同化も研究が進められている。これらから TRMM は当初の研究衛星としての性格から実用衛星としての性格も持つようになった。

2.1.1 (2) GPM/DPR の成果

2014 年 2 月に打ち上げられた GPM 主衛星の二周波降雨レーダ (DPR) は順調な観測を続けている。DPR は Ku/Ka 帯の 2 周波の電波を使用することにより、雨域での降水強度推定の精度向上と、固体降水の観測を目的としている。固体降水は、粒子の大きさだけでなく、形状、密度、組成などが多様であり、固体降水の降水強度推定はチャレンジングな課題となっている。DPR は PR の後継センサであり、PR の観測の継続という意味も持っている。気候システムの研究では長期の安定した観測データが必要である。PR は直接に比較すべき他のレーダが無かったこともあり、その直接観測量の精度は PR の内部校正や外部校正で決定されていた。DPR の打上げ、運用開始から 1 年間、TRMM PR との同時期観測ができたため、PR と DPR の Ku 帯レーダとのほぼ直接のデータ比較が可能となった。これにより、異なった衛星上の類似のセンサの長期にわたるデータの安定性という新たな課題が生じた。他の地球観測衛星でも、シリーズで打ち上がる衛星センサのデータの継続性は作業としては地味ではあるが大きな課題であると同時に重要な仕事である。衛星搭載降水レーダでも DPR により同じ課題が現れたと言える。

TRMM は PR、TMI、可視・赤外放射計 (VIRS) という降水観測パッケージ、そして降水センサではないが雷センサ (LIS) を持ち、複合センサによる降水システムの準同時観測が大きな意義のあることを証明した。また限られた走査幅を持つ PR、その 3 倍以上の走査幅を持つ TMI、そして他の衛星上のマイクロ波放射計による全球観測へとつなげる衛星群のシステム (constellation) が有効であることを示した。これは主要国の宇宙機関から成る地球観測衛星委員会 (CEOS) において他の constellation のプロトタイプとなった。

しかしながら TRMM PR の感度は 17dBZ 程度、水平分解能は 5km 程度と地上の降雨レーダにはとても及ばない性能である。水平分解能の制限は降水システムの詳細把握を困難にする。地上の降雨レーダの水平分解能は 1km 以下であり、地上レーダの 5km の分解能を想像するとその程度が理解できよう。またアルゴリズムの面ではいわゆる beam filling 問題を引き起こしている。これは DPR の二周波解析の大きな障害の一つとなっている。

TRMM PR による降水システムの構造の気候値は、鉛直プロファイルを利用した層状性／対流性降雨、降水高度、また水平規模の分布である。日周変化、季節変化、また ENSO などに伴う年々変動も得られているが、これは多数のデータの集積によっており、もちろん個々のシステムの時間変化は追うことができない。

感度は DPR ではかなり改善が見られた。降雨観測としては DPR の 15dBZ 程度はかなり満足できる感度である。しかし、降水システムの今後の方向の一つとして雲から降水への変化がある。ある程度濃い雲を目標としても、0dBZ 程度の感度が必要とされる。

降水強度の精度は年々変動などの検出には十分なレベルに達している。しかしながら、温暖化に伴うと予想されている降雨量の増大の検出には精度は足りない。このレベルは Engineering な校正では届かないレベルであり、海面散乱強度を使うなど自然ターゲットを利用する方法が試されている。マイクロ波放射計では深宇宙を見る、などしているが、こ

れも自然ターゲットの利用ともいえよう。

TRMM では降水システムの時間変化は直接には観測されていない。降水分布については GSMaP のように複数のマイクロ波放射計データと静止軌道上の気象衛星の赤外雲画像による内挿により 1 時間レベルでは作られているが、降水分布に限られている。TRMM PR と静止軌道からのデータを利用しての気候値としての降水システムの変化や、TMI と PR による日周変化の気候値の差異から降水システムの変化も検出されているが、個々のシステムについてのものではない。

2.1.1 (3) GPM/DPR の限界と今後

GPM の目標はその名前のとおり全球の降水量測定である。このためには高緯度の固体降水の観測が必要である。これから DPR の目標の一つは固体降水による降水量推定となっている。地上でも固体降水による降水量推定はむづかしい。地上雨量計による観測も風による補足効率の大きな変動があり、その補正が必要である。DPR の 2 周波のデータを利用した固体降水の降水量推定は未だ十分には成功しているとはいえない。しかし、雹の検出などでは DPR の強みが生かされている。極域の観測は constellation の衛星群の活用である程度は補償できるが、衛星搭載レーダによる直接観測は実現されていない。極域の降水量は小さくいわば砂漠のような状態ではあるが、全球の水循環の収支を閉じさせるためには極域を含めた観測が必要であるが実現されていない。

全球数値モデルは時空間分解能の向上、物理モデルの高精度化など大きく進展している。モデルの分解能は衛星観測の分解能を凌駕しつつある。モデルによる DPR また GPM のデータ同化は進展している。ここでは鉛直プロファイルの同化も行われている。同化はモデルによる高度な力学的整合性を持ったデータ補完技術といってもよい。ここでは観測だけによる現象の把握は必ずしも必要ではなく、精度と頻度のあるデータであれば何でも利用できる。しかし観測は物理モデルの向上、そして新たな現象の発見のために必要であり、観測の充実は不可欠である。

精度に問題があるとはいえ、全球の降水観測は GSMaP や IMERG などの精度向上である程度達成されたといつてよい。また全球の 3 次元構造や日周変化を含めた降水システムの形態、気候値はかなり把握された。今後、進むべき方向は、(1) 全球水収支を閉じさせるための固体降水を含めた精度の高い全球降水量測定と、(2) 降水システムの力学的観測、であろう。(2) では雲から降水への変化や降水システムの時間変化の観測が必要となる。(1) と (2) の目標は相補的である部分と相反する部分があり、どちらを主体とするかにより観測システムが変わる。それぞれの目標のために必要な測器等は少し異なるが、以下のようになろう。

- ・固体降水を観測するために、レーダならば 10dBZ よりよい感度、雲から降水への変化をとらえるためには 0dBZ よりよい感度が必要。
- ・急激な降水を逃さないための 1 時間以内の頻度、降水システムのライフサイクル観測にも

必要。また Nowcasting による水災害防止のためにも必要。現在の GSMap などの精度の限界の一つは衛星の観測頻度にあり、その限界を突破するためにも必要。

- ・ 走査幅：500km。一つの降水システムを十分に含むことができるために必要。また十分な観測頻度を得るためにも必要。
- ・ 水平分解能 1km：個々の降水システムの詳細把握のために必要。また現在 DPR で問題となっている beam filling 問題の回避につながる。
- ・ 多視線方向 Doppler 機能：降水域内の力学構造の把握のため必要。
- ・ 降水粒子の判別機能：多周波数、多偏波が必要である。また 180GHz 帯も含めた GMI のようなマイクロ波放射計が必要である。
- ・ 十分な校正機能：長期変動の検出のため観測値の長期にわたる確度が必要。

これらは科学目的のためとなっているが、気象水文災害被害の減少のためには予測と現況把握（nowcasting）が必要であり、特に予測の向上のためには科学的理解が土台となる。また地球温暖化などの地球規模気候変化に伴う水資源管理や生態系保全などでは長期予測が必要であり、ここでは科学的理解が不可欠となる。天気予報の精度向上が科学的理解の進展を土台としていることを思い起こすべきであろう。

2.1.2 雲・降水システムの特徴、発達過程（増永浩彦、高薮縁、安永数明）

2.1.2 (1) 背景

TRMM PR は、降水の三次元構造を中低緯度帯（約 35 S–35 N）の全域にわたって観測することを可能とし、これにより衛星以外では観測の難しい場所における降水（例えば、急峻な山岳域における地形性降水や、陸地から遠く離れた海洋上における大規模に組織化した降水等）に関して、数多くの新しい知見が得られた。特に、これまで別々に観測・研究されてきた内陸の降水システムと海洋上の降水システムを、同じ測器（精度）の観測データから俯瞰できるという衛星観測の利点は大きく、降水の発生・発達過程の“統一的”な理解が大きく進んだ。一方で、幾つかの技術的課題も明らかになっている。その一つとして、凍結降水粒子（雪・霰）や雲粒に対して十分な検出感度がないことが挙げられる。

例えば、不安定な大気成層の下で発生する 1 つ 1 つの積乱雲スケールの短時間の極端降水（例えばゲリラ豪雨等）の形成では、凍結過程を含んだ「冷たい雨」が重要である。一方で、大規模な豪雨災害を引き起こすような雲クラスターや梅雨前線などのより組織化した降水や長時間持続する集中豪雨では、凍結過程を含む深い層状性の降雨に加え、凍結過程を経ずに（水蒸気と水の相変化だけで）降雨が形成される「温かい雨」の過程が本質的に重要である事が分かってきた（Hamada et al. 2015）。こうした災害に関わる様々なタイプの積乱雲の発達過程を明らかにするためには、特に凍結粒子を高い感度で検出し降水形成過程における「温かい雨」と「冷たい雨」それぞれの役割をより深く理解することが、科学的、防災上の両方の観点から重要な課題である。

凍結降水粒子の観測能力向上は、人為起源CO₂の増加に伴う気候変動に関しても緊急性の高い課題である。例えば極域は、全球的に見てとりわけ地球温暖化の影響を受けやすい地域として知られている。極域の降雪量や降水の特徴の変化（雪主体の降水から雨主体の降水へ）を高い感度で観測できることは、高緯度域の水害対策や水資源管理という面から重要であるだけでなく、地球のアルベドの変動を通じた温暖化の加速やそれに伴う急激な気候変動の兆候をいち早く捉えるという面からも重要である。特に、北極域では海水域面積が1979年以降長期的に減少しているという事実に加えて、この2－3年には南極の海水域面積も激しい減少傾向を示しており（気象庁「海水域面積の長期変化傾向」より）、衛星観測による精度の高い降雪量の広域測定の実現化が強く望まれる。また、低緯度域においても地球温暖化の兆候は、成層圏の循環を中心に顕在化していることが明らかになっている。この成層圏の循環の変化は、対流圏下層の降水活動の変化の（受動的な）バロメータとして重要なだけでなく、それ自身が（能動的に）対流圏上層の氷粒子に影響を与えている可能性が示唆されており、気候変動予測における大きな不確実性の1つである凍結降水粒子（巻雲）の生成・維持過程の理解という点からも氷粒子に関する観測能力向上が強く望まれる。

CloudSat 衛星搭載 W 帯レーダの登場により、雲粒や凍結粒子に対する検出感度は TRMM PR から大幅に向上したが、CloudSat レーダは降雨による信号（レーダエコー）の減衰が顕著であり、豪雨災害で特に重要な大気下層の極端降水を捉えることが出来ない。GPM 搭載 DPR は PR と CloudSat の弱点を補い合う優れた観測装置であり、さらに二周波観測の情報を利用した固相液相判別や粒径分布の推定に優れ、衛星降水観測に新たな地平を拓く可能性を秘めている。一方、DPR であっても 10dBZ を下回るエコーは検出が難しく、“雲粒・雲氷から降水粒子にいたる降水システムの全貌”を捉えるためには、さらに高感度の衛星レーダの開発も必要である。

数値シミュレーションの出力値（地表面降水量など）を衛星データプロダクトと比較する研究は広く行われているが、数値モデルに内在する素過程（降水粒子の形成過程・成長過程などの雲微物理過程等）の再現性を評価するのは、現時点の衛星観測から得られるデータ（情報）が一部の降水粒子に偏っていることから容易ではない。“雲粒・雲氷から降水粒子にいたる降水システムの全貌”を捉える衛星レーダ開発は、雲降水粒子の物理特性を詳細に調査する新たな研究手段の提供をもたすとともに、数値気象予報や気候変化予測に用いられる数値モデルにおける物理過程の表現力の向上（雲微物理パラメタリゼーションの改良等）を通じて、予報・予測精度の向上にも大きく寄与することが期待される。

衛星降水観測におけるもう一つの課題として、観測頻度の限界が挙げられる。TRMM 衛星が同一地点に回帰する頻度は、比較的条件の良い中緯度でも一日 1 から 2 回程度であった。一方、メソ対流系の寿命は数時間から 1 日前後であり、TRMM のような低軌道衛星単独で同一の降水システムを複数回観測できるチャンスは非常に限られている。したがって、降水ライフサイクルの直接観測は、一機の低軌道衛星観測では原理的に困難である。しかし、十分な時間サンプリングを用いることにより、個々の降水システム観測をライフサイクル

の文脈に位置づけ、その特徴を抽出・整理することができれば、発達初期段階にある降水システムをいち早くとらえて来るべき豪雨の予測することが可能となるかもしれない。最近の計算機的能力向上と数値モデルの発展から、天気予報においてメソ対流系の陽な表現が可能になった。しかし積乱雲やメソ対流系の発生・発達の場所やタイミングをモデルで正確に予測することは依然難しい。もし衛星観測から降水のステージを同定し、数値モデルの計算結果をリアルタイムに補正しながら予報を提供できるようなシステムが構築されれば、全球降水監視網として防災面の技術革新となり得る。そういった観点からは、降水のステージを正確に同定できる観測範囲と、十分な数のサンプリングを可能にする観測頻度の確保が重要である。ただし降水システムは、陸上・海上を問わず特定の時刻に発生・発達しやすい傾向にある事が分かっており、時間固定のサンプリングでは特定のステージばかりをサンプリングすることになる。このことから降水の全ステージに対して同数程度のサンプリングを得ることを重視する場合には、(従来通り)“太陽と同期しない”(非同期の)軌道のオペレーションが望まれる。

2.1.2 (2) 将来衛星ミッションへの期待

GPM DPR の後継観測装置として、降水検出感度の向上と観測幅の広角化をはかる DPR2 が検討されている。感度向上は上述の通り凍結降水粒子の観測に新たな展開をもたらすことが期待される。また観測幅の拡大により、GPM DPR では捉えにくかったメソ対流系の全体像をより完全に近い形でとらえることが可能となる。また Ku 帯レーダ直下観測データにドップラ計測機能が加われば、雲内鉛直流の実観測データを得ることができる。EarthCARE 衛星搭載 W 帯レーダと違い雲粒落下速度の推定は Ku 帯の検出限界を越えると思われるが、一方 W 帯ではエコー減衰が激しく観測困難な強降水域内の鉛直流速を観測できる利点がある。対流雲内の上昇流速は多くの雲解像モデルにおいて再現性が低いことが知られており、衛星ドップラレーダは貴重な観測資料を提供すると期待される。

一方、複数小型衛星の編隊飛行による熱帯降水観測は、低軌道衛星の原理的限界であった時間サンプリングの問題に、画期的な解決をもたらすだろう。ナウキャストに直接応用可能な観測頻度を十分確保することは依然困難と思われるが、降水ライフサイクルの理解深化につながる観測資料を与える前例のない観測網の礎となり、科学的なブレイクスルーが期待される。簡易な降雨レーダを搭載する小型衛星編隊飛行は米国で具体的な検討が始まっており、米国 Decadal Survey の今後の動向にも注視しつつ、国際協力の枠組みの中で日本の存在感をいかに発揮していくべきか、戦略的な検討が不可欠である。TRMM 以来の実績から技術的優位性が明らかな DPR2 を小型衛星編隊の「旗艦」として位置付けるなど、大型レーダの先進性と小型衛星群の経済性を組み合わせたハイブリッド型計画も視野に入れるべきである。

さらに長期的な衛星計画の展望として、静止衛星搭載降水レーダが検討されている。実現すれば、個々の降水システムのライフサイクルを連続的にとらえることが可能となり、極端

降水の早期検出を通じたナウキャストに革新がもたらされるだろう。静止衛星搭載レーダの空間解像度は、個々の積乱雲を解像する目的には必ずしも十分でないが、小型衛星編隊飛行など先行する衛星ミッションで得られる科学的知見をアルゴリズムに応用しつつ、東アジア・オセアニア地域全体にとって有益な豪雨監視網が構築可能と期待される。

2.1.3 雲物理過程の理解（高橋暢宏）

TRMM や GPM による降水観測の第 1 の目標はレーダを中心とした定量的な降水量の把握であり、TRMM では熱帯域亜熱帯域を GPM では中高緯度までを観測範囲としてきた。TRMM や GPM の観測により、地球全体での降水量の精度の高い推定が可能となった上、継続的な観測により 20 年を超える長期的な降水レコードを提供できるようになってきた。一方で 2006 年に打ち上げられた CloudSat と CALIPSO や 2021 年に打ち上げが予定されている EarthCARE では雲レーダとライダーを組み合わせた観測により、TRMM や GPM では計測できない雲や氷晶、さらには弱い降水を観測することが可能となった。これらの観測により水蒸気を除いた大気中の水物質を全球で計測するツールが揃ったことになる。これらの観測データは、地球温暖化などの気候変動問題において、温暖化の降水への影響の評価などに活用されることが期待されているが、研究の対象はさらに雲や降水の形成プロセスを全球的に把握することにシフトしつつある。逆に、これらの観測が揃って初めて全球ベースでの水循環や雲や降水の形成プロセスの研究が可能になったと言える。さらに、雲物理過程の全球での理解は数値気候モデルの高度化に寄与することが期待でき、将来予測の精度向上に寄与できる。

降水プロセスに注目した研究は TRMM や GPM を用いてもなされてきた。例えば、対流性降水と層状性降水の分類 (Awaka et al. 2007) 自体も降水プロセスの特徴を示すものではあるが、それを基にした研究 (Schumacker and Houze 2003 など) や降水の地域ごとの日変化に関する研究は数多くなされてきている (Nesbit and Zipser 2003; Bowman et al. 2005; Hirose and Nakamura 2005 など) ほか、エコー頂の観点と降水強度の観点での極端降水現象の違いを明らかにした研究 (Hamada et al. 2015) も降水プロセスに対する知見を与えるものである。GPM 搭載の 2 周波降水レーダはその目的の 1 つとして雨と雪の分離を掲げており降水粒子タイプ分類や降水プロセスの研究に寄与できる情報を提供しているほか、雹のような激しい対流により生じる降水粒子の検出もなされている (Iguchi et al. 2018)。しかしながら、これらの研究は雲物理過程の素過程を総合的に理解するところまで至っていない。即ち、エアロゾル・水蒸気・雲 (水・氷)、降水 (雨、雪、霰、雹) の把握のみならず、雲内の力学 (特に、鉛直流) を把握することが大きな目標になる。

エアロゾルは地球の放射収支における不確定要素の高い物質であるほか、雲生成における凝結核の役割を果たすことにより、雲、さらには降水の生成にも大きな影響を与える。例えば、大量の凝結核が存在すれば生成される雲粒子の数濃度も増加しアルベドを変化させる一方でサイズが減少するため降水になりにくくなり雲の寿命を変化させること (第 1 種・

第 2 種間接効果) はよく知られている (Ramachandran 2018)。雲生成については、エアロゾルと水蒸気の役割が大きく、雲粒子が成長しある大きさに達する高度 (気温) により降水プロセスが暖かい雨 (warm rain) になるか冷たい雨 (cold rain) になるかが変わるとも言われており (Suzuki et al. 2011) 降水の発生と雲粒の成長の関係をグローバルに把握しておくことは温暖化の評価の重要な要素になる。詳細については Rosenfeld (2018) を参照されたい。放射収支の観点では降水雲の雲頂付近の降水粒子 (主に氷晶) のタイプの違いが放射の特性を変えることも指摘されており (Wyser 1999)、これらの正確な把握が重要である。

雲・降水過程を考える上では降水雲の発達過程を把握することも重要である。一般的な積乱雲のライフサイクルでは発達初期から成熟期まで上昇気流が現れ、上空の降水粒子を上昇気流が支えきれなくなると降水粒子の落下が始まり、そのドラッグや降水粒子の蒸発により下降気流が発生し、積乱雲が消滅する。上昇気流は下層の水蒸気の供給源となり、降水粒子の生成に大きく寄与する。特に強い上昇気流は霰や雹の生成にも寄与する。また、上昇気流は成長した降水粒子 (大粒の雨、霰、雹) を上空に留める役割も有しており、降水雲のライフサイクルや地上降水の分布にも変化をもたらす。上昇気流中での霰の形成は雷をもたらす電荷の分離過程とも密接に関連しており (Takahashi 1978)、霰や雹の存在は雷発生のプロキシとなり得る。人工衛星の観測はスナップショット的な観測であるため、降水雲の発達のプロセスを追うことは難しいため発達のプロセスを代表するパラメータを観測することが求められる。最も有効であると考えられる観測はドップラ速度の観測である。または、レーダによる時間差の観測を行うことにより降水雲の発達を把握する方法も考えられる。雹や霰の存在は極端気象にも直結すると考えられるので、これらの全球での把握は、温暖化の影響として極端現象の増減の評価に直結する。

降水量の推定自体においても雲物理過程の理解の深化が必要なところが残されている。現在注目されているのは、地形性降雨である。降水システムの深さに対してもたらされる降水強度が強いことが知られており、seeder-feeder メカニズムや warm rain プロセスなどの理解のもとに降水強度を推定することが精度向上に繋がる。また、seeder-feeder メカニズムは地形性降雨だけでなく前線性の降水においても存在すると指摘されており (Jonas 1999)、これらを抽出できる観測が必要である。さらに、弱い降水 (特に降雪) の的確な推定は、地球全体の水循環を考える上では重要である。また、マイクロ波放射計による降水推定アルゴリズム (e.g., Aonashi et al. 2009) では降水プロファイルを仮定しているが、その推定精度の向上には放射特性の異なる降水粒子タイプを特定する必要がある。

雲物理過程と密接に関係するものの 1 つとして、降水効率が挙げられる。降水効率は、潜熱加熱とリンクするほか降水から大気や地表面へのフィードバックにも関係するため、地球温暖化の影響を評価する上で重要なパラメータとなるほか、数値モデルにおけるパラメタリゼーションにも重要な要素となっており、それを精度よく推定するためには正確な降水の推定も重要になっている (Jonas 1999)。降水効率の定義はいくつかあるが、例えば凝結量に対する降水量の割合、又は、水蒸気の収束量に対する降水量の割合として定義される

ことが多い (Sui et al. 2007)。実際に降水効率を求める場合には再解析データなどによる水蒸気場や雲水量と観測された降水量を用いることが多いため、それぞれの推定を向上させることが重要である。Lau et al. (2003) では TRMM/TMI の雲水量と TRMM/PR の降水量を用いた降水効率と海面水温との対応を評価しており、レーダを用いた全球観測が有効である。

これらのことを踏まえた観測システムを考える。まず、降水観測について考えると、降水量を正確に計測するとともに雹や霰を分類することが求められる。GPM/DPR の開発によりある程度分類が可能であることが分かってきており、DPR の機能は有益であると考え。一方で、降雪を考えた場合にはより感度を上げる必要がある。エアロゾルを含む雲と降水の相互作用に関連した観測を考えるとこれまで行われてきた赤外域の複数バンドを用いて雲の有効半径の推定やライダーと雲レーダの組み合わせた観測が重要であると考え。これらと降水観測有機的に結びつけた観測を行うことによりセンサ間のシナジー効果が上がる。凝結核となるエアロゾルの基礎的な研究には航空機などの in-situ 観測が重要であり、その知見を衛星のデータを用いて全球に拡張するためのプロセス研究は重要な課題である。実際には航空機観測と衛星観測の同時観測などが必要になる。降水システム中の上昇流・下降流の計測を行うためにはドップラ速度の計測が有益である。ただし、フットプリントの大きさを現在の DPR よりは小さくしないと観測可能な現象が制限される。激しい降水をもたらす積乱雲では一般的に強い降水域はおよそ 5~10km 程度であり、その中での強い上昇気流域の大きさは 1km オーダである (Jonas 1999)。またドップラ速度の情報は降水粒子タイプ (落下速度) にもリンクしているので、降水粒子のタイプ分類が高度化され、雲内での鉛直流の情報がわかると必然的に降水量の推定精度が向上されることも期待される。

以上をまとめると、気候変動を正確に把握するためには、降水粒子を正確に把握する必要があり、既存技術でも複数センサの観測を組み合わせることにより、それらが実現可能なレベルまで達している。

観測システムとしては、EarthCARE タイプの観測 (Lidar+ドップラ機能を持つ雲レーダ、光学イメージャ) と分解能、感度などの機能を向上させた DPR タイプのレーダが望ましい。雲レーダについては DPR とシナジー観測することを考えると走査幅を広げることが望まれる。逆に DPR タイプのレーダについては、感度は例えば雲レーダ観測と DPR の観測における Mie 散乱の効果の差 (dual frequency ratio: DFR) が数 dB 以下に収まるとすると通常 TRMM/PR で使われている k-Z モデルでは 10dBZ 以下まで感度を下げることが必要である。分解能については、ドップラ速度計測で降水雲内の上昇・下降気流を効率的に計測するためには、少なくとも上昇気流域の面積と同程度の分解能を必要とする。上昇流域の大きさは降水雲のタイプにもよるが積乱雲を考えると現在の DPR のフットプリントでは大きすぎると考えられる。

参考文献

- Aonashi, K., J. Awaka, M. Hirose, T. Kozu, T. Kubota, G. Liu, S. Shige, S. Kida, S. Seto, N. Takahashi, and Y. N. Takayabu, 2009: GSMaP passive, microwave precipitation retrieval algorithm: Algorithm description and validation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87A**, 119-136
- Awaka, J., T. Iguchi, and K. Okamoto, 2007: Rain type classification algorithm. Measuring Precipitation from Space: EURAINSAT and the Future, V. Levizzani, P. Bauer, and F. J. Turk, Eds., *Springer*, 213–224.
- Bowman, K. P., J. C. Collier, G. R. North, Q. Wu, E. Ha, and J. Hardin 2005: Diurnal cycle of tropical precipitation in Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite and ocean buoy rain gauge data. *J. Geophys. Res.*, **110**, D21104, doi:10.1029/2005JD005763.
- Hirose, M., and K. Nakamura 2005: Spatial and diurnal variation of precipitation systems over Asia observed by the TRMM Precipitation Radar, *J. Geophys. Res.*, **110**, D05106, doi:10.1029/2004JD004815.
- Hamada, A., Y. N. Takayabu, C. Liu, and E. J. Zipser, 2015: Weak linkage between the heaviest rainfall and tallest storms. *Nat. Commun.*, **6**(6213), doi:10.1038/ncomms7213.
- Iguchi, T., N. Kawamoto, and R. Oki, 2018: Detection of Intense Ice Precipitation with GPM/DPR. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **35**, 491–502, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0120.1>
- Jonas, P., 1999: Precipitating cloud systems, Chapter 3.4 Global Energy and water cycles (K. A. Browning and R.J. Gurney ed.), Cambridge Univ. Press
- Lau, K. M., and H. T. Wu 2003: Warm rain processes over tropical oceans and climate implications, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2290, doi:10.1029/2003GL018567, 24.
- Nesbitt, S. W., and E. J. Zipser, 2003: The diurnal cycle of rainfall and convective intensity according to three years of TRMM measurements, *J. Clim.*, **16**, 1456 – 1475.
- Ramachandran, S. Atmospheric Aerosols: Characteristics and Radiative Effects, Chapman and Hall/CRC, 2018. ProQuest Ebook Central
- Rosenfeld, D., 2018: Cloud-Aerosol-Precipitation Interactions Based of satellite Retrieved Vertical profiles of Cloud Microstructure, In T. Islam, Y. Hu, A. Kokhanovsky and J. Wang (Eds.) Remote Sensing of Aerosols, Clouds, and Precipitation, Elsevier, pp.129-152.

- Schumacher, C., and R. A. Houze Jr., 2003: Stratiform rain in the Tropics as seen by the TRMM Precipitation Radar. *J. Climate*, **16**, 1739–1756.
- Sui CH, Li X, Yang MJ 2007: On the definition of precipitation efficiency. *J Atmos Sci* **64**: 4506–4513
- Suzuki, K., G. L. Stephens, S. C. van den Heever, T. Y. Nakajika, 2011: Diagnosis of the Warm Rain Process in Cloud-Resolving Models Using Joint CloudSat and MODIS Observations, *J. Atmos. Sci.*, **68**, 2655-2670.
- Takahashi, T., 1978: Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1536-1548.
- Wyser, K. (1999), Ice crystal habits and solar radiation. *Tellus A*, 51: 937-950.
doi:10.1034/j.1600-0870.1999.00027.x

2.1.4 台風（青梨和正、広瀬正史）

台風は、熱帯海上で発生する低気圧である。台風は、組織化された積雲対流と大規模な渦循環が協力的に相互作用することで維持される(Ooyama 1964)。台風の構造や、発達を決める重要なファクターは、積雲対流による非断熱加熱の台風中心に相対的な位置、高度、強度である。しかしながら、海上にある台風中心部の降水強度の現場観測データは不足している。このため、宇宙からのレーダ観測は、台風に伴う海上の降水の3次元分布を把握するうえで代替できない価値がある (NASA 2007)。貴重なデータを最大限活用するため、瞬時の降水鉛直情報を数値モデルに適切に採り入れるための研究が進展している (Kotsuki et al. 2014; Okamoto and Aonashi 2016)。また、精確な測定と多様な事例の検証を通して得られる実証的な知見を集積することにより、台風の構造や特性の理解が進み、長期的に備えを強化することができる。将来の衛星搭載降水レーダがもたらす高感度・高分解能・高頻度の空間情報によって地上では得難い包括的なデータベースが構築され、台風の全体像や動態に関する診断能力の向上と実利用の進展が期待される。

衛星搭載降水レーダは、サンプリングの制約はあるものの、台風中心部の降水観測データとして貴重である。地上観測では観測位置の問題が大きく、強雨域における減衰の問題もある。雲に感度がある赤外放射計では眼が見えないことが多々ある (e.g., Kodama and Yamada 2005)。雨を観るマイクロ波放射計にも課題がある。例えば、Zagdonik et al. (2013) は TRMM PR と TMI による熱帯低気圧の眼の壁雲やレインバンドなどの降水推定の比較を行い、強い熱帯低気圧の内部コア域では TMI 推定値が過小評価になることを示している。これはマイクロ波放射計の水の放射を捉える低周波数帯の空間分解能の粗さやアプリアリな降水鉛直分布データベースに下層で雨が集中する事例が選択されなかったことが問題と考えられる。この結果は、特殊な降水システムの降水鉛直構造情報の長期的な蓄積と活用が、インパクトの高い現象を精確に把握するために重要であることを示している。また、実時間の情報として、円形不降水域の検出や中心付近の線状降水域の分布の把握も中心を決定す

るために参照価値がある。衛星搭載降水レーダは高分解能で各高度の降水エコーを探知できる強みがあるが、下層に集中する強雨の精確な把握については減衰補正や地表面クラッター等の不確実性があり、さらに高い精度（空間分解能）で継続的に実態を掴む観測の実現が望まれる。観測幅の増大は瞬時の空間的な情報量を上げ、短期間のサンプル数を増やすため、社会的インパクトの大きい実時間の台風の特徴を高分解能・高空間整合性（低ノイズ）をもって議論できることが期待される。

高感度化によって降水システム上部の氷部分の理解につながることに重要な意味がある。台風は水蒸気の潜熱によって発達・維持している。各高度の降水データから推定される潜熱加熱分布情報と鉛直探査計による観測を併せて、雲降水システムの構造と温暖核の実態を明らかにしていくことも重要である。衛星搭載降水レーダの高解像度化・高感度化による台風の状況把握の鮮明化が実現すれば、Dvorak 法の発展（e.g., Hoshino and Nakazawa 2007）や急発達の徴候の精査（e.g., Kieper and Jiang 2012）、中心位置同定や壁雲付近の強雨推定の高精度化などを通して、台風の理解が深まり、台風の進路・降水の予測精度向上に資する。広域長期の精確な空間データは、他の把握手法の比較検証を通じて、温暖化に伴う台風の個数や強度の変化（Patricola and Wehner 2018）を議論するためにも役立つであろう。

TRMM PR の長期蓄積データにより、台風に伴う降水の軸対称構造や非対称性、これらと台風の急発達に関連、その地域性、台風に伴う雨の時間変化、降水タイプ別の降水鉛直断面等、多くの気候学的特徴に関する知見が得られている。例えば、Yokoyama and Takayabu (2008)は台風の軸方向の降雨頂や層状性降雨の割合などを調査し、台風の構造に見られる特異な特徴を明らかにした。Lonfat et al. (2004)はマイクロ波放射計データを用いて熱帯低気圧の非対称性を示し、Chen et al. (2006)は、海盆ごとの熱帯低気圧の非対称性をもたらす風のシア等の影響を説明した。Hence and Houze (2012)は TRMM PR データを用いて、降水の非対称構造や海面水温の影響等を調べている。Jiang et al. (2011)は TRMM の複合データによる熱帯低気圧に関する降水システムデータベースを作成し、鉛直構造の地域性や熱帯低気圧に伴う降水の日周変化を示した。熱帯低気圧と深い対流との差異についても理解が進んでいる(Jiang and Tao 2014; Jiang et al. 2018)。熱帯低気圧発生時における降水タイプごとの降水鉛直構造の時系列変化等 (Fritz et al. 2016)、条件別の集合特性に関する研究が展開されている。また、GPM DPR による熱帯低気圧の観測事例数の蓄積に伴い、台風内部の雨滴粒形分布など微物理過程に関する観測的知見が増えつつある (Chen et al. 2019; Huang and Chen 2019)。今後、GPM DPR データと併せて、さらに各種データ間の物理量推定の整合性や高分解能の地域的特徴・メカニズム理解に関する理解の進展が期待されるが、気候変動に伴う海域ごとの応答を見るためには長期に亘る衛星搭載降水レーダデータが必要である。

台風の強度変化、特に急発達について、そのメカニズムの解明は不十分である。Miyamoto and Takemi (2013, 2015)は、数値実験で、台風中心付近の温位の軸対称化が急発達に重要

であることを指摘した。Cecil and Zipser (1999)は、台風中心周辺で平均したマイクロ波放射計の高周波の散乱シグナルがその後の台風の強度変化と相関を持つことを示した。Keiper and Jiang (2012)は、マイクロ波放射計データを使って、目の壁のリング状の降水域の形成が、その後の急発達と関連することを示した。また、Shimada et al (2017)は、各種の衛星データから推定した全球降水マップ(GSMaP)データを使って、台風中心から 100 km 以内の降水分布の軸対称性とその後の台風の強度変化を調査した。今後、急発達メカニズムの解明に、台風中心付近の衛星搭載降水レーダによる詳細な観測データと精巧な数値予報モデルの比較が不可欠である。

今後、衛星搭載降水レーダデータを用いた研究の進展が特に期待されるのは、台風の発生についてのメカニズムとその環境依存性等の解明である。このためには、広域・長期・高精細な衛星搭載降水レーダデータの取得と、雲解像モデルや雲・エアロゾル観測データ、マイクロ波放射計データ等との融合による、包括的なアプローチが必要である。特に、雲解像モデルには、雲物理過程を表現するスキームにバイアスがあるので(例えば、Eito and Aonashi 2009)、衛星搭載降水レーダデータを用いたスキームの改良などが不可欠である。

参考文献

- Cecil, D. J., and E. J. Zipser, 1999: Relationships between tropical cyclone intensity and satellite-based indicators of inner core convection: 85-GHz ice-scattering and lightning. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 103–123, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<0103:RBTCLIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<0103:RBTCLIA>2.0.CO;2).
- Chen, F., Y. Fu, and Y. Yang, 2019: Regional variability of precipitation in tropical cyclones over the western North Pacific revealed by the GPM Dual-frequency Precipitation Radar and microwave imager. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 21, 11281–11296.
- Chen, S. S., J. A. Knaff, F. D. Marks Jr. (2006): Effects of vertical wind shear and storm motion on tropical cyclone rainfall asymmetries deduced from TRMM. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 3190–3208
- Eito, H. and K. Aonashi, 2009: Verification of hydrometeor properties simulated by a cloud-resolving model using a passive microwave satellite and ground-based radar observations for a rainfall system associated with the Baiu front, *J. Meteor. Soc. Japan*, **87A**, 425–446.
- Fritz, C., Z. Wang, S. W. Nesbitt, and T. J. Dunkerton, 2016: Vertical structure and contribution of different types of precipitation during Atlantic tropical cyclone formation as revealed by TRMM PR. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 894–901.
- Fudeyasu, H., and Y. Wang, 2011: Balanced contribution to the intensification of a tropical cyclone simulated in TCM4: Outer-core spinup process. *J. Atmos. Sci.*, **68**, 430–

449, doi:10.1175/2010JAS3523.1

- Hoshino, S. and T. Nakazawa, 2007: Estimation of tropical cyclone's intensity using TRMM/TMI brightness temperature data. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 437-454.
- Huang, H. and F. Chen, 2019: Precipitation microphysics of tropical cyclones over the western North Pacific based on GPM DPR observations: a preliminary analysis. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 6, 3124-3142.
- Jiang H., C. Liu, and E. J. Zipser, 2011: A TRMM-based tropical cyclone cloud and precipitation feature database. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 1255-1274.
- Jiang H., and C. Tao, 2014: Contribution of tropical cyclones to global very deep convection. *J. Climate*, **27**, 4313-4336.
- Jiang H., J. P. Zagrodnik, C. Tao, and E. J. Zipser, 2018: Classifying precipitation types in tropical cyclones using the NRL 37 GHz color product. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 5509-5524.
- Kieper M. E., H. Jiang, 2012: Predicting tropical cyclone rapid intensification using the 37 GHz ring pattern identified from passive microwave measurements. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L13804, doi:10.1029/2012GL052115.
- Kodama, Y.-M. and T. Yamada 2005: Detectability and configuration of tropical cyclone eyes over the western North Pacific in TRMM PR and IR observations. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 2213-2226.
- Kotsuki, S., K. Terasaki, and T. Miyoshi, 2014: GPM/DPR precipitation compared with a 3.5-km-resolution NICAM simulation, *SOLA*, **10**, 204-209.
- Lonfat, M., F. D. Marks, and S. S. Chen, 2004: Precipitation distribution in tropical cyclones using the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) microwave imager: A global perspective. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1645-1660.
- Miyamoto, Y., and T. Takemi, 2013: A transition mechanism for the axisymmetric spontaneous intensification of tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 112-129, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-0285.1>.
- Miyamoto, Y., and T. Takemi, 2015: A triggering mechanism for rapid intensification of tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 2666-2681, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0193.1>.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2007: Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Senior review proposal. 1-47.
- Okamoto, K. and K. Aonashi, 2016: Experimental assimilation of the GPM Core Observatory DPR reflectivity profiles for Typhoon Halong (2014). *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 2307-2326.
- Ooyama, K., 1964: A dynamical model for the study of tropical cyclone development.

- Geofisica International (Mexico), 4, 187-198.
- Patricola, C. M., and M. F. Wehner, 2018: Anthropogenic influences on major tropical cyclone events. *Nature*, 563, 339-346.
- Shimada, U., K. Aonashi, and Y. Miyamoto, 2017: Tropical cyclone intensity change and axisymmetry deduced from GSMaP. *Mon. Wea. Rev.*, 145, 1003-1017, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0244.1>.
- Yokoyama, C. and Y. N. Takayabu, 2008: A statistical study on rain characteristics of tropical cyclones using TRMM satellite data. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 3848-3862.
- Zagrodnik, J. P., and H. Jiang, 2013: Comparison of TRMM precipitation radar and microwave imager rainfall retrievals in tropical cyclone inner cores and rainbands. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 29-42, doi:10.1029/2012JD017919.

2.1.5 弱い降水、降雪、局地的降水（広瀬正史、重尚一）

世界をめぐる水の変動状況と影響を正確につかむために、微弱な降水から強雨までの精確な観測情報の開発と蓄積が待たれている。センサの感度向上は降水の検出精度を決定づける重要課題であり、降水推定に関する不確実性を軽減し、雲降水システムの全体像をまるごと把握することによって、より精確な降水推定とそのデータ利用の推進に寄与することが期待できる。

弱い降水は、多雨域では総降水量に対する割合が小さいものの、頻度が高い。例えば、熱帯西部太平洋のクエゼリン環礁における検証実験では、TRMM PR は 17dBZ 以下の降水を捕捉できないために降水量としては約 2%、降雨面積としては 46%を見逃していると評価されている (Schumacher and Houze 2000)。コロラドや雨季のアマゾンで行われた TRMM 地上検証実験からも同程度の欠損量が報告されている。Berg and L'Ecuyer (2010)は Cloudsat 搭載の雲レーダと比較し、TRMM PR が見逃している弱い雨は観測域全体で平均すると 10%程度の寄与になると見積もっている。特に亜熱帯高圧帯などにおける見逃しの影響が大きい。降雪についてはさらに影響が顕著であり、氷の誘電率が水に比べて非常に小さく、発達高度が低いため、降水の有無を正確に探知することも難しい。こうした背景の中、GPM DPR は 15.5dBZ までの高感度化を達成し、約 21%の検出率向上を実現したが (Hamada and Takayabu 2015)、依然として最小感度以下の降雪が多いことも指摘されている (Aoki and Shige 2021; Kulie and Bennartz 2009; Lin and Hou 2012)。さらなる感度向上は冬季の豪雪地域などにおける降水サンプル数の飛躍的な増大をもたらすだろう。衛星搭載雲レーダ・ライダー観測による巻雲の検知が雲の気候値を更新し、気候モデルの精度検証に使われているように、衛星搭載降水レーダの強みである微弱な降水エコーの検出能力を強化することで、中高緯度の降水システムの動態を捉え、広域水収支の理解向上へ寄与することが望まれる。また、山岳域や海上の降水把握は地上からでは困難であるが、弱い降水はこうした観測困難域において高頻度で発生しており、地域によっては水収支の要と

なっている。日本でも山岳域や海岸付近の降水変動を解析するには元データが不十分である箇所もあり、衛星レーダ観測という視座による降水検出は依然として有用である。微弱なエコーの検出に優れたセンサとして、2006 年以降運用されている Cloudsat CPR（雲レーダ）と 2021 年度打ち上げ予定の EearthCARE CPR の活用も期待できる。近年は Cloudsat CPR のデータ蓄積に伴い、成層圏に至る深い対流の気候学的特徴の理解も進んできたが（Takahashi and Luo 2014）、様々な地域時刻で発達する雲の面的な情報を得るためには太陽非同期衛星に搭載した高感度の新たなレーダが必要である。

弱い降水に関する瞬時の情報も貴重である。降水有無の判別、降水パターン識別を高感度・高解像度で観測する全球規模のレーダ情報は、世界各地の多様な観測データや数値モデル出力との比較検証研究において重要な参照情報を提供する（e.g., Leinonen et al. 2015）。現在、地上フェイズドアレイレーダ等の測器が豪雨をもたらす上空の降水コアも解析対象とし、複数観測データを統合した短時間降水情報が雨の移動を地理情報と併せて実感できるほどに発展している。衛星による降水観測も微小な降水粒子を感知できるほどの高感度化・高解像度化を目指す、雲降水システムの境界部分まで含めた雲微物理の議論を加速していくだろう。降水システムの縁辺部まで網羅する情報が得られれば、モデル等の比較検証を通して局域降水現象の理解を深め、再生可能エネルギーの需給予測等、様々な局面で社会の自然感覚を高めることにつながる可能性がある。また、都市の人間活動と局所気候の関係についても議論が進んでいる（e.g., Schultz et al. 2007; Shepherd 2005）。地域環境に密接に関連する降水システム上部の微弱なエコーの振る舞いを均一に掴むことが可能であれば、山や都市の存在と地域環境との関連をより適切に知ることができるだろう。高感度かつ長期のデータによって、温暖化による無降水日数等の状況を精度よく理解することも必要である。無降水状態の精確な把握は、次世代静止地球観測衛星による非降水性の雲の識別、マイクロ波放射計による陸上降水量推定に必要とされる陸面射出率の推定、マイクロ波放射計の非一様性効果の評価、干ばつ指数の評価、植生研究や生活情報等、様々な用途が考えられる。

地形による降雨の強化・集中化といった地形性降雨の解明は学術的にも、防災の観点からも重要な課題である。約 40km 以上の水平分解能で捉える事ができる中・大規模山岳域の雨量分布については、風上側斜面における強制上昇流による雨の強化によって説明されてきた。一方、防災の観点から重要である小規模急峻地形の降雨への影響については、数 km の水平分解能での雨量分布の観測データが不足しており気候学的な平均描像すら得られていなかった（Roe 2005）。TRMM PR が 16 年間の長期観測に成功したことによって、水平分解能約 5km（Shige et al. 2017）ならびに約 1km（Hirose and Okada 2018）の降雨量気候値マップが作成されてきたが、TRMM PR は山岳域では地表面クラッターによる干渉を受けやすく、山肌近くまで直接的に観測出来ない。このため、山肌近くの降雨量は上空の観測データから外挿して求めており、外挿の際の仮定が大きな誤差要因となる（Hirose et al. 2021）。このように地形性降雨を精確に捉えるためには、地表面クラッターによる干渉

を軽減したプロファイリング能力の増強が必要である。

感度向上の追求による上空の降水情報の増強は、地上の降雨強度推定の精度向上にも利用できる。TRMM PR の観測する降雨頂は実際の降水システムの頂よりも数 km 低く、氷の解釈が不確実であることから上空の降水構造の理解は未明の部分が多い。Zipser and Jiang (2003)は氷推定における粒径分布などの不確実性を指摘しているが、いずれにしても高緯度観測や浅い雨の推定には感度向上が比較研究を進めるための必須の条件である。赤外放射計やマイクロ波放射計が検知する上空の雲情報を用いた降水推定も今後も引き続き検討される。例えば、Liu and Seo (2013)が雲レーダを用いたように、高周波数帯のマイクロ波放射計観測値と併せて氷の推定精度を高めるためにプロファイリング能力は有用である。また、前述のように地表面クラッターによる干渉を受けやすい山肌に沿う浅い雨や降雪の状況を推定するため、降水システム上部の微細なエコー情報が得られれば下層の推定の高度化につながる可能性がある。特に山岳域の低高度の降水観測は国際河川の流量予測などの水文学的利用の高度化にも資する。

降雪強度の定量的な推定も難易度が高く、観測技術の進展が望まれる課題である。GPM DPR 観測から、高緯度における大部分の降水が低高度の雲から弱い雨や雪としてもたらされていることが明らかとなり、二周波情報を利用した雨雪判別や雹の識別に関する研究が進展しているが (Iguchi et al. 2018)、多様な状態の雪を精確に捉えるためには、複数周波数あるいは二重偏波等の高機能かつ多面的な観測・研究を展開していく必要がある。また、エベレストなどの氷河の質量収支を求めるためには、高山地域の尾根や山頂付近における地表付近の高度に集中する雨・雪の理解が必要であるものの、現在は限られた現地観測データから外挿した情報によって議論されており、観測誤差が顕著であることが指摘されている (e.g., Salerno et al. 2015; Sakai et al. 2015; Viste and Sorteberg 2015)。

他国の水問題の状況を知るために、国境を越えた地域間比較を通して普遍性と多様性の理解を深めることも重要である。さらに、TRMM PR が space truth として地上レーダ検証に用いられた例があるように、衛星データが世界のインフラを強化するための橋渡しをすることも考えられる。これまで TRMM PR や GPM DPR はその強みを生かして、統計的・平均的な降水情報を提供してきた。データが蓄積されることで、感度不足やクラッター干渉などの問題によって捉え難い降水の見逃しの問題があることが明らかになってきた。山岳域の雨、霧雨、降雪、浅い雨などの検知は今なお不十分であり、その観測性能の追求は、数値モデルや河川流量予測の精度向上などにつながる。衛星搭載降水レーダ以外の雨に感度のある広域降水観測はこうした繊細な対象を原理的に苦手としている (e.g., Lin and Hou 2012)。幅広いレンジのエコーで構成される降水システムの構造を精確に捕捉できる能力は比類ない強みとなる。精度の高い全球規模降水データが世界の基盤情報として提供される未来に向けて、雲と雨の構造理解を連結するため、弱い降水の把握は重要度が高い課題であると考えられる。

参考文献

- Aoki, S. and S. Shige, 2021: Large precipitation gradients along the south coast of Alaska revealed by spaceborne radars. *J. Meteor. Soc. Japan*, **99**, 5–25.
- Berg, W., and T. L'Ecuyer, 2010: The distribution of rainfall over oceans from spaceborne radars. *J. Appl. Meteor. and Climatol.*, **49**, 535–1063.
- Hamada, A., and Y. N. Takayabu, 2015: Improvements in detection of light precipitation with the global precipitation measurement dual-frequency precipitation radar (GPM/DPR). *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **33**, 653–667, doi:10.1175/JTECH-D-15-0097.1.
- Hirose, M., and K. Okada, 2018: A 0.01° resolving TRMM PR precipitation climatology. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **57**, 1645–1661.
- Hirose, M., S. Shige, T. Kubota, F. A. Furuzawa, H. Minda, and H. Masunaga, 2021: Refinement of surface precipitation estimates for the Dual-frequency Precipitation Radar on the GPM Core Observatory using near-nadir measurements. *J. Meteor. Soc. Japan*, **99**, doi:10.2151/jmsj.2021-060.
- Iguchi, T., N. Kawamoto, R. Oki, 2018: Detection of intense ice precipitation with GPM/DPR. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **35**, 491–502.
- Kulie, M. S. and R. Bennartz, 2009: Utilizing Spaceborne Radars to Retrieve Dry Snowfall. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **48**, 2564–2580.
- Leinonen, J., M. D. Lebsock, S. Tanelli, K. Suzuki, H. Yashiro, and Y. Miyamoto, 2015: Performance assessment of a triple-frequency spaceborne cloud-precipitation radar concept using a global cloud-resolving model. *Atmos. Meas. Tech.*, **8**, 3493–3517.
- Lin, X. and A. Y. Hou, 2012: Estimation of rain intensity spectra over the continental United States using ground radar-gauge measurements. *J. Climate*, **25**, 1901–1915, doi:10.1175/JCLI-D-11-00151.1.
- Liu, G., and E.-K. Seo, 2013: Detecting snowfall over land by satellite high-frequency microwave observations: The lack of scattering signature and a statistical approach. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 1376–1387.
- Roe, G.H., 2005: Orographic precipitation. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **33**, 645–671.
- Sakai, A., T. Nuimura, K. Fujita, S. Takenaka, H. Nagai, and D. Lamsal, 2015: Climate regime of Asian glaciers revealed by GAMDAM glacier inventory. *The Cryosphere*, **9**, 865–880.
- Salerno F., et al. 2015: Weak precipitation, warm winters and springs impact glaciers of south slopes of Mt. Everest (central Himalaya) in the last 2 decades (1994–2013). *The Cryosphere*, **9**, 1229–1247.
- Schultz D. M., S. Mikkonen, A. Laaksonen, and M. B. Richman, 2007: Weekly precipitation cycle? Lack of evidence from United States surface stations. *Geophys.*

Res. Lett., **34**, doi:10.1029/2007GL031889.

Schumacher C., and R. A. Houze, Jr., 2000: Comparison of radar data from the TRMM satellite and Kwajalein oceanic validation site. *J. Appl. Meteor.*, **39**, 2151-2164.

Shepherd, J. M., 2005: A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future. *Earth interactions*, **9**, 12, 1-27.

Shige, S., Y. Nakano and M. K. Yamamoto, 2017: Role of orography, diurnal cycle, and intraseasonal oscillation in summer monsoon rainfall over the Western Ghats and Myanmar coast. *J. Climate*, **30**, 9365-9381.

Takahashi, H. and Z. J. Luo, 2014: Characterizing tropical overshooting deep convection from joint analysis of Cloudsat and geostationary satellite observations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, 112-121.

Viste, E., and A. Sorteberg, 2015: Snowfall in the Himalayas: an uncertain future from a little-known past. *The Cryosphere*, **9**, 1147-1167.

2.1.6 雲・放射との関係（鈴木健太郎）

雲・降水過程と放射過程は地球のエネルギー収支の中で密接に関係している。地球の気候を形成する放射エネルギーの伝達には雲が深く影響し、降水の生成に伴う潜熱は大気を顕著に加熱することで地球のエネルギー収支の主要な要素をなしている。全球平均では、地球大気は短波と長波を合わせた正味の放射によって冷却されており、それが潜熱および顕熱による加熱と釣り合うことで、地球大気のエネルギー収支が維持されている。このように、地球の放射収支と水循環は降水に伴う潜熱を介して密接に結合しており、顕著な放射影響を持つと同時に降水を生成する雲は、気候システムの中で放射収支と水循環を繋ぐ本質的な役割を果たしている。このことは、地球温暖化に伴う気温変化（気候感度）と降水量変化（水循環感度）の不確実性が雲の変化の不確実性を介して結ばれている (Mauritsen and Stevens, 2015; Watanabe et al. 2018) ことにも現れている。

このような地球のエネルギー収支のわずかな変動が地球温暖化に代表される重大な気候変化を引き起こすため、エネルギーの収支決算を閉じた形で精度良く把握することは喫緊の課題である。そのためには、エネルギー収支を構成する様々な要素フラックスを観測的に定量化する必要があるが、現段階では観測情報が限られているために、エネルギーの収支決算は全球的に閉じていない。ERBE や CERES などの衛星からの放射観測によって、大気上端での放射収支は比較的捉えられるようになってきたが、気候変化や人間生活に直接関わる地表面エネルギー収支の把握には未だ大きな不確実性が伴っている。これは、大気中に存在する水蒸気・エアロゾル・雲などの放射影響の定量化が難しいことに起因するが、特に雲がもたらす放射影響には大きな不確実性が存在し続けてきた。この主因には、雲の放射影響を決定づける高度分布の観測情報が長い間欠けていたことが挙げられる。

こうした中、CloudSat や CALIPSO といった能動型センサを搭載した近年の衛星観測の発

達(Stephens et al. 2008; Winker et al. 2010)は、従来の受動型センサではわからなかった雲の鉛直内部構造を明らかにしつつあり、その放射影響や降水生成特性に関する知見は近年飛躍的に進展している(Stephens et al. 2018)。その結果、雲の分布の三次元的な把握が可能になっただけでなく、雲内部に存在する粒子のサイズ・質量・相・形状に関する情報も得られるようになってきた(e.g. Kikuchi et al. 2017; Matus and L'Ecuyer, 2017)。これは全球気候モデルの雲の表現にも新たな拘束条件を与え、例えば、世界のモデルが共通して抱える雲相のバイアスの同定・補正(McCoy et al. 2015; Kay et al. 2016)や、それによる気候感度の制約(Tan et al. 2016)が可能になってきた。また、地表面に対して”盲目な”能動型センサは、地表面の影響を強く受ける受動型センサでは難しかった雪氷圏での雲・降雪の観測にも威力を持ち、北極海水の減少やグリーンランド氷床の融解への雲放射効果の影響(Kay et al. 2008; Van Tricht et al. 2016)や、南極氷床の消長への降雪の寄与とその海水準変動への示唆(Boening et al. 2012; Palerme et al. 2017)などが明らかになってきた。

雲に関するこれらの新しい観測情報は、その放射影響を従来よりも精度良く定量化することを可能にし、不確実性の大きかった地表面での放射収支の評価に更新をもたらしている。これは全球エネルギー収支の全体像にも見直しを迫りつつあり、雲の鉛直分布に関する観測情報がなかった時代の描像(e.g. Trenberth et al. 2009)と比べて、地球大気の温室効果を表す大気から地表面への下向き長波放射の大きさは 10Wm^{-2} 以上上方修正される傾向にある(Stephens et al. 2012)。これと整合するには、地表面エネルギー収支を構成する他の要素、特に降水に伴う潜熱が顕著に増加しなければならず、このことは全球平均の降水量がこれまで過小評価されてきた可能性を示唆している。実際、雲レーダ・降雨レーダをそれぞれ搭載した CloudSat 衛星・TRMM 衛星の時空間的に限られた同期観測によると、熱帯域での降水量は、弱い雨を検知できなかった TRMM 降雨レーダのみで得られるものよりも 10%程度大きくなることが指摘されている(Berg et al. 2010)。これは上に述べた下向き長波放射の上方修正とも定量的に整合する傾向にある。一方、Ka 帯の降水レーダを搭載した GPM 衛星の実現によって、TRMM 搭載の Ku 帯の降水レーダに比べてより弱い雨が熱帯から中高緯度にかけて検知可能になったが、その感度の違いによる降水量の増分は 2%程度にとどまり(Hamada and Takayabu, 2016)、上述のエネルギー収支のギャップを埋めるには至っていない。このことは、全球エネルギー収支の中で雲と降水の観測情報は整合しておらず、放射収支と水循環は未だ整合的に定量化されていないことを意味している。この不整合を埋めるには、雲レーダと降水レーダを同時に搭載することによって雲から弱い雨を経て強い雨までをカバーする衛星観測が必要である。

このような雲と降水の同時観測は、雲からどのように降水が生成するかをとらえる上でも重要である。雲の粒子は大気中に浮遊する微粒子(エアロゾル)を凝結核・氷晶核として生成され、水蒸気の凝結・昇華や衝突・併合過程によって成長することで降水をもたらすが、この一連の粒子成長プロセスは、降水そのものの頻度や強度だけでなく、雲の放射特性に影響する微物理構造を大きく左右する。したがって、雲と降水を同時に測ることによって降水

生成の微物理プロセスをとらえることは、水循環と放射収支を繋ぐ雲の本質的な役割を理解するために極めて重要である。能動型センサの実現は、従来の受動型センサとの組み合わせとも相俟って、このような粒子成長プロセスの観測的診断を可能にしつつある(e.g. Suzuki et al. 2010)が、雲から降水に至るプロセスの全貌を明らかにするためには、雲・ドリズル・降水を切れ目なくカバーする観測が必要である。

現状の全球気候モデルや多くの雲解像モデルでは、このような雲の粒子成長に関わる微物理プロセスは不確実性の大きいパラメータ化で表現されている。この不確実性は雲の放射効果を通じて 20 世紀の気温変化のモデル再現性を左右するほどの影響を持つため(Golaz et al. 2013)、それを観測的に拘束することは気候変化予測の観点からも重要である。雲レーダ搭載衛星の実現はこれを可能にしつつあり、モデルは共通して降雨生成が早すぎるバイアスを持つ(e.g. Stephens et al. 2010; Suzuki et al. 2015)ことがわかってきたが、その補正は雲の放射効果を非現実的な方向に変化させ、気温変化の再現性といった気候の巨視的な側面でのモデル性能をかえって悪化させてしまうことも同時に明らかとなってきた(Suzuki et al. 2013; Jing and Suzuki, 2018)。このことは、雲の二つの側面である降雨生成と放射影響の関係性が未だ十分に理解されておらず、数値気候モデルもそれに起因する本質的な補償誤差を抱えていることを意味している。

これを解決するには、雲・降水の生成・消滅に関わる力学過程と粒子成長に関わる微物理過程の相互作用、さらにその放射影響を総合的に理解することが必要である。現存する衛星観測情報を用いて、雲の力学的特徴と粒子の相や形状などの微物理構造を結びつける努力は始まっている(e.g. Kikuchi and Suzuki, 2019)が、その際に鍵となる雲内部の上昇流や粒子の落下速度に関する直接的な観測情報は現状では得られていない。日欧合同で打ち上げ予定の EarthCARE 衛星に搭載されるドップラ雲レーダから、雲粒子に関してはこれらの情報が得られることが期待されるが、それをさらに降水粒子についても同時に観測することによって、雲生成の力学過程に起因する雲粒の成長とその帰結である降水粒子の落下過程までを包括的にとらえることが必要である。その上で、こうした観測的知見にもとづいて全球気候モデルの”アキレス腱”である雲・降水素過程の表現を改良・高度化することを通じて、放射収支と水循環を繋ぐ雲のはたらきを適切にモデリングし、全球エネルギー収支・水収支を様々な時空間スケールで整合的に”閉じる”研究が今後の重要課題である。

参考文献

- Berg, W., T. L'Ecuyer, and J. M. Haynes, 2010: The distribution of rainfall over oceans from space borne radars. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, **49**, 535-543, doi:10.1175/2009JAMC2330.1.
- Boening, C., M. Lebsock, F. Landerer, and G. Stephens, 2012: Snowfall-driven mass change on the East Antarctic ice sheet. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L21501, doi:10.1029/2012GL053316.

- Golaz, J.-C., L. W. Horowitz, and H. Levy, 2013: Cloud tuning in a coupled climate model: Impact on 20th century warming. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 2246-2251, doi:10.1002/grl.50232.
- Hamada, A., and Y. N. Takayabu, 2016: Improvements in detection of light precipitation with the global precipitation measurement dual-frequency precipitation radar (GPM DPR). *J. Atmos. Ocn. Tech.*, **33**, 653-667, doi:10.1175/JTECH-D-15-0097.1.
- Jing, X., and K. Suzuki, 2018: The impact of process-based warm rain constraints on the aerosol indirect effect. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 10729-10737, doi:10.1029/2018GL079956.
- Kay, J. E., and Co-authors, 2008: The contribution of cloud and radiation anomalies to the 2007 Arctic sea ice extent minimum. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L08503, doi:10.1029/2008GL033451.
- Kay, J. E., and Co-authors, 2016: Evaluating and improving cloud phase in the Community Atmosphere Model version 5 using spaceborne lidar observations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 4162-4176, doi:10.1002/2015JD024699.
- Kikuchi, M., and Co-authors, 2017: Development of algorithm for discriminating hydrometeor particle types with a synergistic use of CloudSat and CALIPSO. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**, doi:10.1002/2017JD027113.
- Kikuchi, M., and K. Suzuki, 2019: Characterizing vertical particle structure of precipitating cloud system from multi-platform measurements of A-Train constellation. *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2018GL081244, in press.
- Matus, A. V., and T. S. L'Ecuyer, 2017: The role of cloud phase in Earth's radiation budget. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**, 2559-2578, doi:10.1002/2016JD025951.
- Mauritsen, T., and B. Stevens, 2015: Missing iris effect as a possible cause of muted hydrological change and high climate sensitivity in models. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/NGEO2424.
- McCoy, D., and Co-authors, 2015: Mixed-phase cloud physics and Southern Ocean cloud feedback in climate models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 9539-9554, doi:10.1002/2015JD023603.
- Palermé, C., and Co-authors, 2017: Evaluation of current and projected Antarctic precipitation in CMIP5 models. *Clim. Dyn.*, **48**:225-239, doi:10.1007/s00382-016-3071-1.
- Stephens, G. L., and Co-authors, 2008: CloudSat mission: Performance and early science after the first year of operation. *J. Geophys. Res.*, **113**, D00A18, doi:10.1029/2008JD009982.
- Stephens, G. L., and Co-authors, 2010: Dreary state of precipitation in global models. *J.*

- Geophys. Res.*, **115**, D24211, doi:10.1029/2010JD014532.
- Stephens, G. L., and Co-authors, 2012: An update of Earth's energy balance in light of the latest global observations. *Nature Geoscience*, **5**, 691-696, doi:10.1038/NGEO1580.
- Stephens, G. L., and Co-authors, 2018: CloudSat and CALIPSO within the A-Train: Ten years of actively observing the Earth system. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 569-581, doi:10.1175/BAMS-D-16-0324.1.
- Suzuki, K., T. Y. Nakajima, and G. L. Stephens, 2010: Particle growth and drop collection efficiency of warm clouds as inferred from joint CloudSat and MODIS observations. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 3019-3032, doi:10.1175/2010JAS3463.1.
- Suzuki, K., J.-C. Golaz, and G. L. Stephens, 2013: Evaluating cloud tuning in a climate model with satellite observations. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 4464-4468, doi:10.1002/grl.50874.
- Suzuki, K., and Co-authors, 2015: Evaluation of the warm rain formation process in global models with satellite observations. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 3996-4014, doi:10.1175/JAS-D-14-0265.1.
- Tan, I., T. Storelvmo, and M. D. Zelinka, 2016: Observational constraints on mixed-phase clouds imply higher climate sensitivity. *Science*, **352**, 224-227, doi:10.1126/science.aad5300.
- Trenberth, K. E., J. T. Fasullo, and J. Kiehl, 2009: Earth's global energy budget. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **90**, 311-324.
- Van Tricht, K., and Co-authors, 2016: Clouds enhance Greenland ice sheet meltwater runoff. *Nature Communications*, **7**:10266, doi:10.1038/ncomms10266.
- Watanabe, M., and Co-authors, 2018: Low clouds link equilibrium climate sensitivity to hydrological sensitivity. *Nature Climate Change*, **8**, 901-906, doi:10.1038/s41558-018-0272-0.
- Winker, D., and Co-authors, 2010: The CALIPSO mission: A global 3D view of aerosols and clouds. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1211-1229, doi:10.1175/2010BAMS3009.1.

2.2 高解像度全球数値モデルとの連携

2.2.1 数値天気予報（岡本幸三、幾田泰醇）

気象庁の数値予報システムにおいて、衛星降水プロダクトは数値予報モデルの検証及びデータ同化を用いた初期値作成に利用されている。例えば、全球的な降水分布プロダクトは、全球数値予報モデルの積雲対流スキームを始めとした様々な物理過程の検証に用いられる。また DPR や PR などの衛星搭載降水レーダの反射因子プロファイルは、気象庁の領域モデルであるメソモデルや局地モデルの雲物理過程の検証に用いられている。

気象庁では全球解析、メソ解析、局地解析という3つのデータ同化システムを運用しており、降水観測に直接関わる衛星データとしてはマイクロ波センサや降水レーダが同化されている。メソ解析では、マイクロ波イメージャから算出された降水強度が同化されており、降水予測の改善に寄与している。さらにマイクロ波センサの輝度温度が、全球・メソ・局地解析で同化され、降水に限らず気温や風などの解析・予測の改善をもたらしている。この輝度温度の同化は、2019年1月時点では晴天域のデータだけを対象としているが（Kazumori 2014; Ikuta 2017）、雲・降水の影響を受けた輝度温度データの同化に向けた開発が行われており、台風等の数値予報精度の向上をもたらすことが確認されつつある（Geer et al. 2018）。

衛星搭載降水レーダの同化は、2016年3月から現業メソ解析に導入された（Ikuta 2016; 気象庁・国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 2016）。その同化手法は、DPRの反射因子プロファイルから相対湿度プロファイルを推定し、4次元変分法でデータ同化するものである。解析と予測を繰り返すデータ同化サイクルで継続的にDPRを同化し続けることで、モデルの初期値の水蒸気プロファイルの解析精度が向上し降水予測精度が改善することが確認されている。平成27年9月関東・東北豪雨を対象とした同化実験では、DPRを同化することによりリードタイムが30時間を超える予測において降水予測精度が顕著に改善した（図2.2.1-1）。さらに4次元変分法を高度化し、アンサンブル予測の誤差情報を用いたハイブリッドデータ同化手法を実装した次世代データ同化システムにおいて、反射因子を直接同化する開発も行われている（Ikuta 2018）。またこれらに先立ち、研究ベースの同化システムを用いて、DPRの反射因子プロファイルの数値予報へのインパクトが調査された（Okamoto et al. 2016）。ここではマイクロ波イメージャ GMI の降水域輝度温度と DPR を同時に同化することにより、台風中心付近の構造を精緻に解析でき、進路予測を改善することが確認された（図2.2.1-2）。

このようにマイクロ波センサや降水レーダは、今日の数値予報システムにとって重要な役割を果たしており、その観測情報をさらに有効に活かすべく同化システムの高度化に向けた研究・開発が行われている。一方で、現在のマイクロ波センサや降水レーダは、現業利用、特にメソ解析や局地解析のように高頻度に更新される解析システムでの利用と言う観点では、観測頻度やカバレッジが十分とは言えない。例えばメソ解析は3時間ごとに実行されるが、解析時間によってはマイクロ波イメージャが日本付近を十分にカバーできない時間帯がある。また降水レーダは単独の衛星にしか搭載されておらず、観測幅も狭いため、台風等の顕著な現象を必ずしもとらえることが出来ない。さらに高分解能化・高精度化する数値予報モデルやデータ同化システムにとって、高精度、高分解能、かつ多様な情報を持つ観測は今後さらに重要となる。例えば、複数の周波数帯の反射因子・偏波情報やドップラ速度の同時観測により、固体降水粒子の粒径分布や粒子形状、落下速度などの高精度な情報を熱帯から極域まで定常的に得ることができるようになれば、数値予報モデルにおける雲・放射・雲物理過程などの改良や、観測シミュレーションに用いる放射伝達モデルの改良、そし

てそれらを用いたデータ同化システムの改善が期待できる。

さらに、高頻度・定常的な衛星降水観測が実現し、観測からデータ受信までの時間（レイテンシー）が十分短くなれば、数値予報システムのみならず、予報現業での利用も期待できる。例えば、地上レーダ観測圏外の海上における、降水・擾乱の監視や、ナウキャストの高度化に有効である。

参考文献

気象庁,国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構, 2016: 全球降水観測計画（GPM）主衛星観測データの気象庁での利用について.平成 28 年 3 月 24 日報道発表資料.

Geer AJ, Lonitz K, Weston P, Kazumori M, Okamoto K, Zhu Y, Liu EH, Collard A, Bell W, Migliorini S, Chambon P, Fourri e N, Kim MJ, K opken-Watts C, Schraff C. 2017: All-sky satellite data assimilation at operational weather forecasting centres. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, <https://doi.org/10.1002/qj.3202>.

Ikuta, Y. 2016: Data assimilation using GPM/DPR at JMA. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **46**, 1.11-1.13

Ikuta, Y. 2017: Assimilation of Satellite Soil Moisture Contents and Clear-sky Radiance in Operational Local NWP System at JMA. *JpGU-AGU Joint Meeting 2017*.

Ikuta, Y. 2018: Assimilation of GPM/DPR in Km-scale Hybrid-4DVar System at JMA. *AGU Fall Meeting 2018*.

Kazumori M., 2014: Satellite radiance assimilation in the JMA operational mesoscale 4DVAR system. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 1361–1381, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00135.1>.

Okamoto, K., K. Aonashi, T. Kubota and T. Tashima, 2016: Experimental assimilation of the GPM-Core DPR reflectivity profiles for Typhoon Halong 2014: *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 2307-2326. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-15-0399.1>

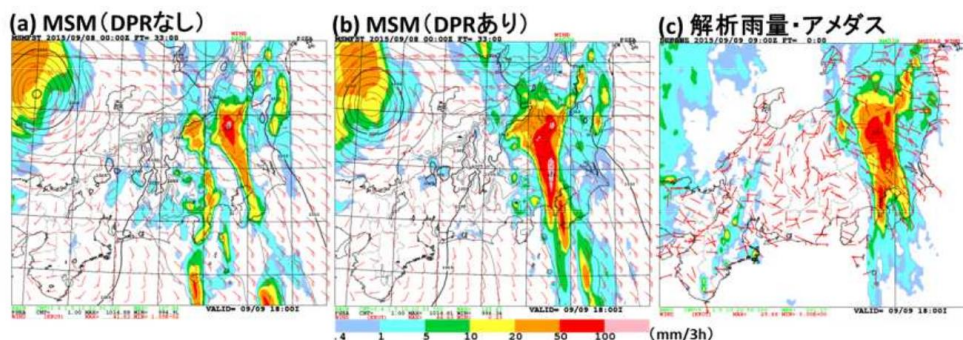


図 2.2.1-1 2015 年 9 月 9 日 18 時の前 3 時間降水量（カラー、単位：mm/3 時間）及び地上風（矢羽、単位：kt（長い（短い）矢羽 1 本は 10 kt（5 kt）））の分布。(a) MSM の 33 時間予測値（DPR なし）、(b) MSM の 33 時間予測値（DPR あり）、(c)解析雨量及びアメダス

観測値。ただし、(a)と(b)には海面更正気圧（コンター、単位：hPa（間隔は 1hPa））も重ねて描画している。（気象庁,国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構, 2016）

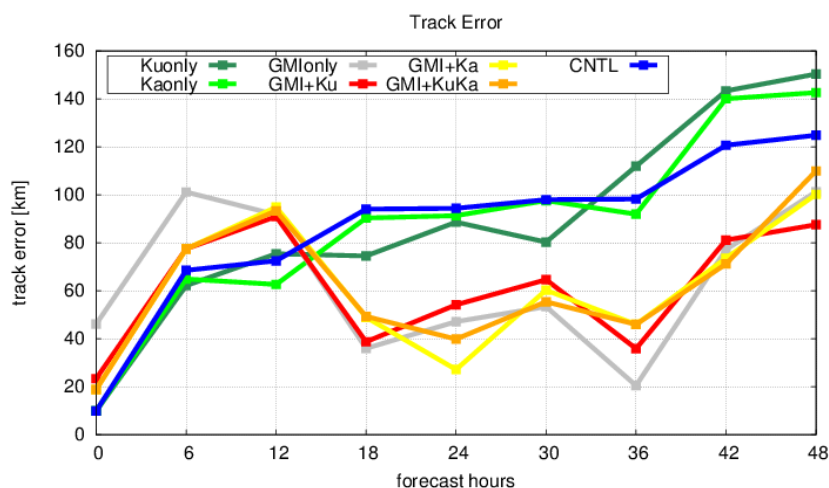


図 2.2.1-2 2014 年大 11 号台風 Halong に対し、2014 年 7 月 31 日 12UTC のデータ同化結果を初期値とした 48 時間予報までの進路予報誤差(km)。各線は同化実験の構成の違いを表し、それぞれ GMI,DPR と同化しない(CNTL)、KuPR のみ同化(Kuonly)、KaPR のみ同化(Kaonly)、GMI のみ同化(GMlonly)、GMI と KuPR を同化(GMI+Ku)、KaPR を同化(GMI+Ka)、GMI、KuPR、KaPR 全てを同化(GMI+KuKa)を意味する。GMI と DPR を同時に同化した場合(GMI+Ku,GMI+Ka,GMI+KuKa)に、この予報期間を通して台風中心位置の誤差が最も小さいことを示している（Okamoto et al. 2016）。

2.2.2 雲解像モデル（三好建正、佐藤正樹）

衛星降水観測データと高解像度全球数値モデルとの連携として、以下の視点が考えられる。第一に、気候予測モデルの高度化である。衛星降水観測データによって数値モデルの雲・降水プロセスを検証・改良を進めることにより、気候変動・地球温暖化の監視・予測能力の向上を図ることができる。第二に、衛星降水観測データを使った数値モデルデータ同化によって、降水プロダクトの高度化が期待できる。第三に、次世代数値天気予報のパイロットスタディとしての役割を期待できる。水平解像度が数 km 程度以下の高解像度全球数値モデル（全球雲解像モデル）は現業予報には導入されていないが、最近、全球雲解像モデル国際比較実験 DYAMOND(<https://www.esiwave.eu/services/dyiamond>)に 9 グループが参加し、研究機関・現業機関を含めて今後の急速な普及が予想される。このような状況のもと、衛星降水観測データを含む衛星観測と高解像度全球数値モデルの融合による将来の気象気候予報への利活用の可能性を検討すべく研究を進めることが必要であり、ポスト「京」に向けた重点課題研究でもその重要性が指摘されている。以下、特に第一、第二の方向性について説

明を加える。

第一に、衛星降水観測データと高解像度全球数値モデルによる気候予測モデルの高度化は、世界気候研究計画（World Climate Research Programme; WCRP）の今後の最重要課題の一つである「雲・循環・気候感度」“Grand Challenge: Clouds, Circulation, and Climate Sensitivity”において強調されている点である(Bony et al. 2015)。地球温暖化予測の精度向上のために、気候予測モデルの最大の不確定要因である雲・降水プロセスを地球観測衛星によって監視し、気候予測モデルを観測によって検証・改良を進める必要がある。もちろん、雲・降水だけではなく、放射、海洋・海氷・雪氷・陸面状態等の観測が、気候変動・地球温暖化監視に必要である。地球温暖化は遠い将来に予測されることなく、現実に関わりつつある脅威であることを考えると、近未来の気候変動の精度よい予測のために、気候予測モデルの高度化を不断に継続する必要がある。

第二に、衛星降水観測は、全球の広い範囲を一様な条件のもとで観測可能なことが利点である。全球を対象とするシミュレーションモデルである全球雲解像モデルのモデル検証やデータ同化を行うことで、衛星降水観測の特長を活かした利用が期待できる。数値モデルのモデル検証を通じて、雲微物理過程の改良に役立てられるほか、雲微物理過程に関するメカニズム解明につながる。また、数値モデルを使ったデータ同化により、衛星降水観測データを最適に取り込んだ全球一様の降水プロダクトが作成できる。降水のモニタリングが困難な途上国や新興国では、全球を対象とした降水プロダクトは防災等に有効である。

雲解像モデルは、大気中の雨、あられ、雪等の水物質を3次元的に直接シミュレーションする。衛星搭載レーダは、大気中の水物質による反射強度を観測するため、雲解像モデルによるシミュレーションと直接比較できる。Kotsuki et al. (2014)は、実際の GPM/DPR 観測値と解像度 3.5 km の正 20 面体型全球非静力学大気モデル NICAM (Tomita and Satoh 2004; Satoh et al. 2008; Satoh et al. 2014) によるシミュレーションを比較し、モデルに系統的なバイアスがあることを見出した。Kotsuki et al. (2014)では、NICAM による解像度 3.5 km の全球雲解像シミュレーションで得られた大気中の水物質質量に、Hashino et al. (2013)による衛星 Joint-Simulator を適用し、GPM/DPR に相当する反射強度を算出して、実際に観測された反射強度と比較・検証した。

モデルと観測との比較、モデルの結果の観測データによる検証ができるようになると、データ同化によってシミュレーションを改良することにつながる。Terasaki et al. (2015)は、正二十面体型全球非静力学モデル NICAM に局所アンサンブル変換カルマンフィルタ LETKF (Hunt et al. 2007)を適用した NICAM-LETKF データ同化システムを開発した。このシステムを使って、Kotsuki et al. (2017)は、GPM を含む複数の衛星データから算出した全球降水プロダクト GSMaP(Ushio et al., 2009)の同化に成功した。降水データを同化して数日を超える中期予報を改善することは困難な課題として知られている。Bauer et al. (2011)は、数値天気予報モデルへの降水観測データの同化の現状をレビューし、降水データ同化が困難である大きな要因として、1) 線形化された湿潤物理過程が必要となること、2)

降水観測データ及びモデル摂動の非ガウス性、の 2 点を挙げた。これに対し、Lien et al. (2013)は、1) モデルの非線形性を直接扱えるアンサンブルデータ同化手法を用いること、2) 降水量の確率分布をガウス分布に変換すること、の 2 点の解決策を適用し、理想化された実験でうまく動作することを示した。さらに Lien et al. (2015a; 2015b)は、NCEP 全球予報システム GFS (Global Forecasting System)の低解像度版を使って、実際の TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA, Huffman et al. 2007)の降水量データを同化し、中期予報を改善するという画期的な結果を得た。この際、降水変数のガウス分布変換のため、過去 10 年分の解析データをもとに作成した確率密度関数 PDF を使った。観測とモデルとで異なる PDF を持つため、それぞれ異なるガウス分布変換を適用する。この取り扱いは独創的であり、これにより観測とモデルの間にあるバイアスは自動的に除去される。Kotsuki et al. (2016)は、これらの成果に基づき、過去 30 日分のデータのみに基づいて確率密度関数 PDF を作成する手法を新たに開発し、全球降水マップ GSMaP の同化によって 5 日予報を明確に改善することに成功した。図 2.2.2-1 に Kotsuki et al. (2017)によるガウス分布変換の例を示す。これにより、降水変数を同化する技術を確立した。

このガウス変換の技術を応用すると、NICAM シミュレーションによる降水量と GSMaP 観測データとの系統的な誤差を解消し、NICAM の降水データをあたかも GSMaP 降水データのように変換することができる。具体的には、NICAM 予報データをガウス分布変換した後、GSMaP データに基づいたガウス分布変換の逆変換を適用することで、図 2.2.2-2 の左上の NICAM 降水データを右下のように変換できる。これにより、NICAM に GSMaP 降水データを同化して、GSMaP のような降水プロダクトを NICAM から作成できるようになる。

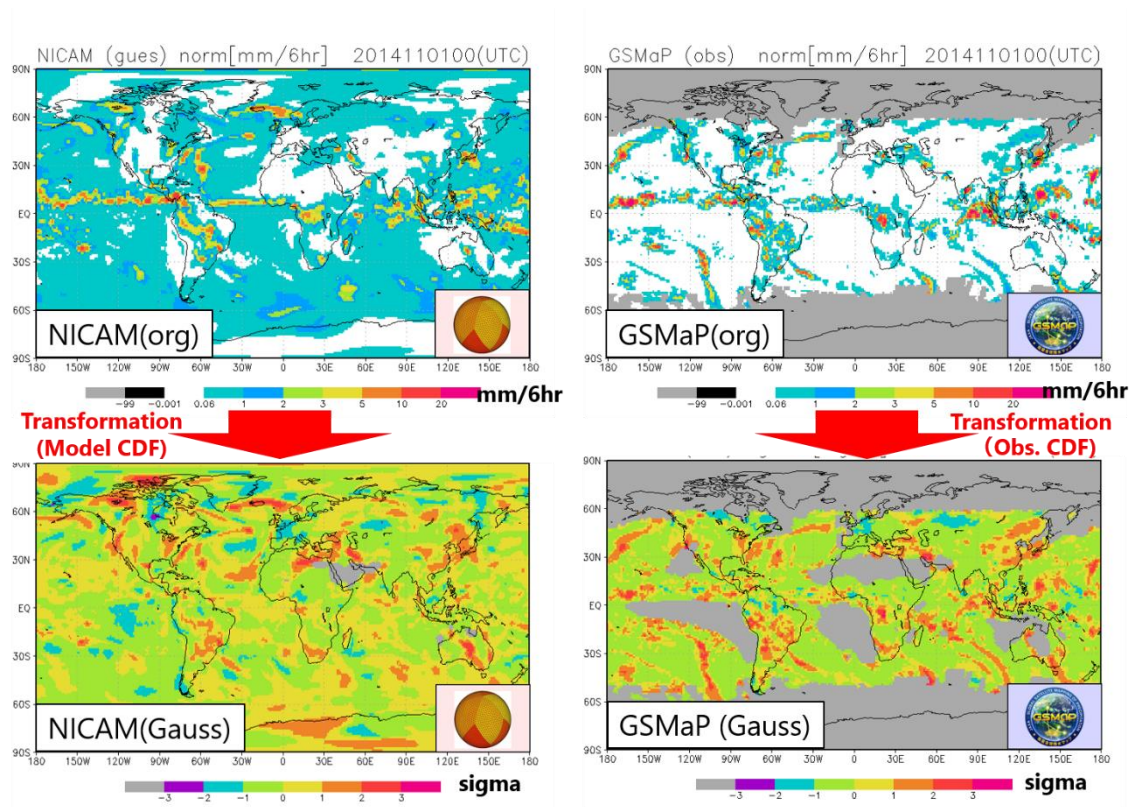


図 2.2.2-1 2014 年 11 月 1 日 00UTC における降水量データのガウス分布変換の例。左列：NICAM 予報データ、右列：GSMaP データ。上段は降水量(mm/6h)、下段はガウス分布変換後の変数（単位は標準偏差）を示す。

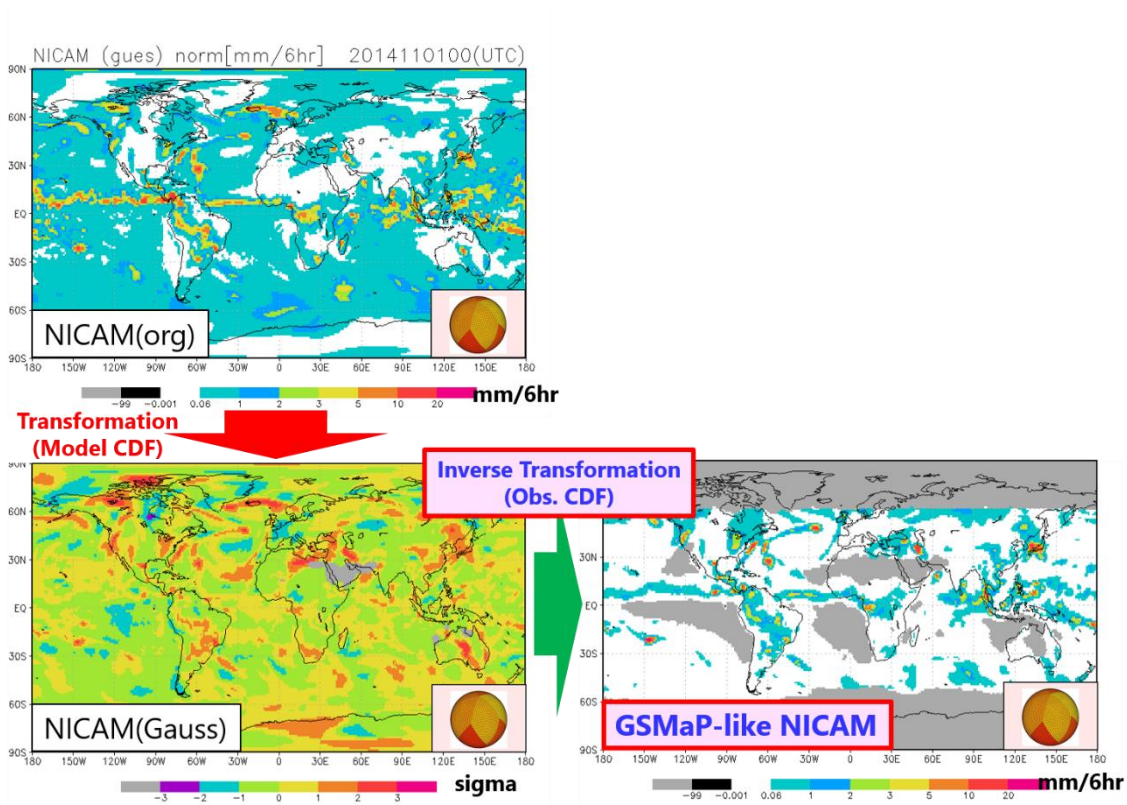


図 2.2.2-2 ガウス分布変換の応用による NICAM 降水量データを GSMaP のように変換した例。図 2.2.2-1 に示したのと同じ時刻（2014 年 11 月 1 日 00UTC）。

さらに、Kotsuki et al. (2018)は、NICAM-LETKF データ同化システムを用いて、NICAM の不確実なモデルパラメータを自動推定する手法を開発した。データ同化によって、モデルの予測値と実際の観測値の差異を最小化するようなモデルパラメータ推定を行うことができる。Kotsuki et al. (2018)は、低解像度の NICAM を使い、大規模凝結パラメタリゼーションにおける雨生成効率に関するパラメータを、GSMaP データを用いて推定し、降水予測の改善を得た。

NICAM-LETKF データ同化システムを用いると、GSMaP と NICAM の両方を活かすことで、全球降水マップ GSMaP データをインプットとして、これを将来に外挿（予測）していくシステムが可能となる。GSMaP と雲解像モデルの双方を活用した、より高度なレベル 4 プロダクトへの道が拓かれる。将来予測へとつなげることで、時間方向への拡張にもなる。さらに、LETKF を使うと、GSMaP に限らず、マイクロ波や赤外の放射計や衛星搭載レーダの反射強度、その他様々な衛星データを統合して同化していくことが可能であり、広い範囲を一樣に観測する衛星データの特長を活かした精度の高い全球降水プロダクト作成につながっていく。またこの際に得られる新しいデータ同化手法の知見は、前節で述べられた数値天気予報の高度化にも直結し、更なる衛星降水観測データの高度利用にもつながる。

上記のような GPM 等の衛星降水観測データと NICAM-LETKF によって作成されたデ

ータ同化プロダクトは、地球観測衛星の情報をより活用するという点で、従来から現業センサーで作成されているデータとは異なる特徴をもつと考えられる。実際、NASA では衛星データを活用した独自の再解析データ MERRA を作成している。JAXA では現在、スーパーコンピュータ JSS2 を活用することにより、GSMaP 降水データを NICAM-LETKF により同化した独自の再解析データを作成している (NICAM-LETKF JAXA Research Analysis (NEXRA); https://www.eorc.jaxa.jp/theme/NEXRA/guide_j.htm)。Kotsuki et al. (2019)は平成 30 年 7 月豪雨のメカニズムを調べるために、NEXRA を初期値に用いた高解像度のシミュレーション研究を実施した。図 2.2.2-3 は NEXRA による降水のアンサンブル計算例である。今後は、降水観測データに加えて、様々な地球観測衛星データを活用した、さらなる高解像度の再解析データの作成に期待がかかる。

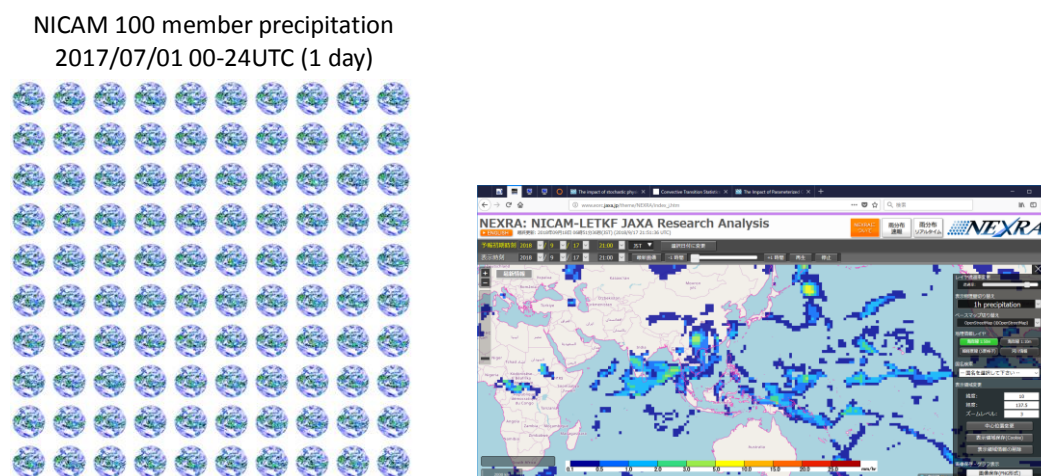


図 2.2.2-3 NICAM-LETKF JAXA Research Analysis (NEXRA) による公開サイト https://www.eorc.jaxa.jp/theme/NEXRA/index_j.htm とアンサンブル計算例。

参考文献

- Bauer, P., G. Ohring, C. Kummerow, T. Auligne, 2011: Assimilating Satellite Observations of Clouds and Precipitation into NWP Models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **92**, ES25-ES28. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2011BAMS3182.1>
- Bony, S., Stevens, B., Frierson, D. M. W., Jakob, C., Kageyama, M., Pincus, R., Shepherd, T. G., Sherwood, S. C., Siebesma, A. P., Sobel, A. H., Watanabe M., Webb, M. J., 2015: Clouds, circulation and climate sensitivity. *Nature Geoscience*, **8**, 261-268, <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo2398>.
- Hashino, T., M. Satoh, Y. Hagihara, T. Kubota, T. Matsui, T. Nasuno, and H. Okamoto, 2013: Evaluating cloud microphysics from NICAM against CloudSat and CALIPSO,

- J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 7273-7292, doi:10.1002/jgrd.50564.
- Huffman, G.J., R.F. Adler, D.T. Bolvin, G. Gu, E.J. Nelkin, K.P. Bowman, Y. Hong, E.F. Stocker, D.B. Wolff, 2007: The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis: Quasi-Global, Multi-Year, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scale. *J. Hydrometeor.*, **8**(1), 38-55.
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a local ensemble transform Kalman filter. *Physical D*, **77**, 437-471.
- Kotsuki, S., K. Terasaki, and T. Miyoshi, 2014: GPM/DPR Precipitation Compared with a 3.5-km-resolution NICAM Simulation. *SOLA*, **10**, 204-209. doi:10.2151/sola.2014-043.
- Kotsuki, S., T. Miyoshi, K. Terasaki, G.-Y. Lien, and E. Kalnay, 2017: Assimilating the Global Satellite Mapping of Precipitation Data with the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model NICAM, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**, 631-650, <https://doi.org/10.1002/2016JD025355>.
- Kotsuki, S., K. Terasaki, H. Yashiro, H. Tomita, M. Satoh and T. Miyoshi, 2018: Online Model Parameter Estimation with Ensemble Data Assimilation in the Real Global Atmosphere: A Case with the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) and the Global Satellite Mapping of Precipitation Data. *J. Geophys. Res.*, **123**, 7375-7392. doi:10.1029/2017JD028092
- Kotsuki S., Terasaki K., Kanemaru K., Satoh M., Kubota T. and Miyoshi T., 2019: Predictability of Record-Breaking Rainfall in Japan in July 2018: Ensemble Forecast Experiments with the Near-real-time Global Atmospheric Data Assimilation System NEXRA. SOLA, <https://doi.org/10.2151/sola.15A-001>.
- Lien, G.-Y., E. Kalnay, and T. Miyoshi, 2013: Effective Assimilation of Global Precipitation. *Simulation Experiments. Tellus*, **65A**, 19915. doi:10.3402/tellusa.v65i0.19915
- Lien, G.-Y., E. Kalnay, T. Miyoshi, and G. J. Huffman, 2015a: Statistical properties of global precipitation in the NCEP GFS model and TMPA observations for data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, in press.
- Lien, G.-Y., T. Miyoshi, and E. Kalnay, 2015b: Assimilation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis with a low-resolution NCEP Global Forecasting System. *Mon. Wea. Rev.*, in press.
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, and S. Iga, 2008: Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Comp. Phys.*, **227**, 3486-3514.

- Satoh, M., H. Tomita, H. Yashiro, H. Miura, C. Kodama, T. Seiki, A. Noda, Y. Yamada, D. Goto, M. Sawada, T. Miyoshi, Y. Niwa, M. Hara, T. Ohno, S. Iga, T. Arakawa, T. Inoue, H. Kubokawa, 2014: The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: description and development. *Progress in Earth and Planetary Science*, **1**:18, doi:10.1186/s40645-014-0018-1.
- Terasaki, K., M. Sawada, and T. Miyoshi, 2015: Local Ensemble Transform Kalman Filter Experiments with the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model NICAM. *SOLA*, **11**, 23-26. doi:10.2151/sola.2015-006
- Tomita, H. and M. Satoh, 2004: A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. *Fluid Dyn. Res.*, **34**, 357-400.
- Ushio, T., T. Kubota, S. Shige, K. Okamoto, K. Aonashi, T. Inoue, N. Takahashi, T. Iguchi, M. Kachi, R. Oki, T. Morimoto, and Z. Kawasaki, 2009: A Kalman filter approach to the Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) from combined passive microwave and infrared radiometric data. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87A**, 137-151.

2.3 極端現象モニタリングと応用

2.3.1 地球温暖化問題（高薮縁、鈴木健太郎）

近年、世界の各地で豪雨や干ばつなどの異常天候の激甚化が報告されている。日本でも2018年には7月豪雨、持続的猛暑、台風21号や24号など、社会がほとんど未経験な規模の自然災害に次々に襲われている。特に近年の豪雨災害の激甚化に関しては、「疑いの余地なく」進行している地球温暖化（IPCC AR5）の影響が学術的にも指摘されている。

台風、低気圧、梅雨、豪雨、豪雪など、降水を伴う現象の強度や発生域の変化は社会生活に大きく影響する。また、例えば2011年11月のタイの洪水が日本のコンピュータ製品の供給に何ヶ月もの間影響を与えたように、グローバルな現代社会では特定の地域での極端な降水が離れた地域にも大きな影響を及ぼす。地球上の様々な地域の降水の異変（干ばつの頻発など）は、国際紛争の発端となるなどの非常に深刻な事態も招くこともある。

地球温暖化に伴い、大気中の水蒸気量は、飽和水蒸気圧を表すクラウジウス=クラペイロソンの関係にほぼ従い気温1度上昇と共に7%程度増加すると考えられている。一方で、地球上の総降水量は大気のエネルギー収支によって規定され、その変化は放射過程の気候変化と連動しているためCCと同率では増加しないことが指摘されている（Allen and Ingram, 2002）。また、過去100年の気候変化の地域的分布を見ると、気温はほぼ全球で上昇しているのに対し、降水は地域差のある非常に複雑な変化を示している（Allan et al. 2010）。しかしながら、社会的な影響の大きい極端降水（豪雨）に注目すると、大気水蒸気量の増加に伴って、強度が増加すると考えられている（Trenberth 1999; Allen and Ingram 2002; Pall et al. 2007）。実際、世界の各地で強雨の増加が観測されており、日本域でも気象庁の長期観測データを用いた研究により強雨の増加が確認されている（Fujibe et al.

2005; 藤部 2011)。

地球温暖化に伴う気候変化の予測には、コンピュータ上に作り出した仮想地球である気候モデルが用いられる。気候モデルでは、気候の構成要素である大気・海洋・陸面を離散的な格子に分割し、現在の気候（大気・海洋・陸面）状態から物理法則にもとづいて将来の気候状態を予測していく。現在の多くの気候モデルでは格子の代表的なサイズは 100km 程度と粗く、それよりも小さいスケールの現象である雲や降水の効果は多くの仮定にもとづいて近似的に表現される。これらをどのように表現するかは気候モデルにおける最大の不確実性のひとつである。例えば積雲対流の表現手法の選択ひとつで熱帯の循環が全く変わってしまうことが知られている(Stevens and Bony 2013)。大変精緻に組まれた積雲パラメタリゼーション(Arakawa and Schubert, 1974)でも熱帯収束帯のような地球スケールの降雨分布などが現実と異なってしまうことが指摘されている。さらに、上述のように、地球温暖化に伴い全球平均の総降水量の増加は緩やかであるものの極端降水である豪雨が急激なスピードで増えていることは、マクロなエネルギー収支だけでなく、ミクロな雨の“降り方”をモデルの中で精確に表現する必要性を意味している。このためには、雲・降水に関わる物理過程のモデル化表現を改善することが必須である。

衛星観測による現実の降水の全球観測は、雲降水過程をどうモデル化するべきかについての重要な示唆を与える。まず近年の高機能な降水の衛星観測では、TRMM や GPM 衛星搭載降雨レーダの登場は、これまで地上レーダ観測で構築されたレーダ気象学を全球に拡張した。つまり、全球レーダ気象学を可能にした。これにより、地球上のいかなる地域についても降水の詳細な立体構造を直接観測することを可能とし、降水の強弱のみならず特性についての観測を様々な地域で議論できるようになり、降水の特性がどのような環境因子で決まるかについての考察が格段に深まった。例えば、深い積雲対流の起動には、従来、大気境界層の水蒸気量が重要であると考えられ、気候モデルの表現でもそのような取り扱が多かったが、TRMM 降雨レーダ観測からは自由対流圏の湿度の重要性が指摘され (Takayabu et al. 2010)、数値モデルによる感度実験からも確認された (Hirota et al. 2011, 2013)。また、従来背の高い対流が強い降雨をもたらすと考えられていたが、TRMM 降雨レーダデータの解析により、極端に強い降水は、湿潤な大気状態でさほど背が高くない雨からもたらされていることが統計的に明らかとなった (Hamada et al. 2015; Hamada and Takayabu 2018)。実際、2018 年 7 月豪雨は、停滞した上層トラフがもたらした非常に湿潤な環境の中で高度 10 km にやっと届く程度の雨システムで生じた状況が解析され (Yokoyama et al., to be submitted)、地球温暖化に伴う大気水蒸気量の増加が豪雨の増加をもたらすという警鐘を鳴らした。レーダデータからはまた、地形性降雨では背は低いが降水量は多いことが解明され (Shige et al. 2013)、マイクロ波放射計による雨量推定の改良にも重要な情報を与えた。これらの結果は気候モデルにおける雨の表現方法に関しても重要な示唆を与えている。

このような降雨レーダ観測に加えて、近年実現された CloudSat 衛星搭載雲レーダは雨粒

よりもさらに小さい雲粒に感度を持つ。これらのレーダ観測は、雲降水システムの立体構造の観測を可能とただけでなく、従来の受動型の雲観測と組み合わせることで、雲物理過程の観測的診断をも可能にした(例えば Suzuki et al. 2010)。こうした新しい観測情報は、気候モデルの雲物理表現を素過程レベルで拘束するのに役立つ(Suzuki et al. 2013, 2015)だけでなく、全球大気を数 km の高解像格子に分解した全球雲解像モデルにおける雲・降水の表現方法を詳細に検証する研究にも用いられている (Matsui et al. 2009; Suzuki et al. 2011; Hashino et al. 2013; Roh and Satoh 2014)。

このように衛星観測が積極的に気候モデルの検証に用いられ始めている現状において GPM 後継ミッションに期待されることは、雲・降水現象の根幹となる雲微物理、乱流、積雲対流、メソスケール循環、総観規模循環、地球規模循環までのマルチスケール構造の各レベルにおいて、気候変化との相互作用の理解をなお一層進展させるとともに、その観測的知見にもとづいたモデル改良を通じて全球降水予測の精度を質的に向上させることである。これは、世界気候研究計画(WCRP)において大課題(Grand Challenges)のひとつにも挙げられている循環場と雲・降水過程の相互作用(Bony et al. 2015)の解明と方向性を一にする。そこで、GPM 後継ミッションによってアプローチされるべき科学的課題として、次の4つを設定する。すなわち、1. 雲の発生と雨の発生について、レーダ観測を生かして環境場と発生との関係を結びつける、2. 雲と降水の持続性を見積もり、地表面・大気循環へのフィードバックを解明する、3. 雲クラスターから MJO までの対流の組織化の環境を調べる、4. 豪雨のメカニズムとその発生に関与する環境条件を解明する。これらの課題へのアプローチを通して、雲降水微物理過程の理解、雲降水と大気力学との相互作用の理解(雲降水システムの発生維持メカニズム、降水強度の決まり方、力学場へのフィードバック)を通じた温暖化影響の把握の精確化と対策への貢献をめざす。

これらの研究課題に資するために、雲レーダ(W-band, Doppler)と降水レーダ(Ku-band)をともに搭載した衛星観測を GPM 後継のひとつの提案とする。雲は放射過程を通じて、降水は潜熱の移動および陸面への水の供給を通じてそれぞれ気候形成に重要な役割を持つ。これら二つは放射と潜熱の間のマクロなエネルギー収支(放射対流平衡)によって結びついており、ミクロな素過程レベルでも雲と降水とはひとつの連続した現象であるにもかかわらず、その理解は別々に行われがちであった。数値モデルも高解像度化、高精度化してきた現在、雲物理と降水過程を包括的に捉え、ミクロとマクロの連動の適切な理解にもとづいて放射対流のモデル化をより適切に修正していくことが、温暖化に伴う気候変動の影響をより精確に把握するために非常に重要である。

衛星観測の概要を下に記す。

- 雲レーダ(W-band, Doppler) + 降水レーダ(Ku-band)
 - 観測幅 : 500km (Ku)、100km (W)
 - 鉛直範囲 : 20km
 - 鉛直間隔 : 250m

水平間隔（分解能）：4km(Ku)、1km(W)

- 放射計： 水蒸気プロファイリング：SAPHIR
- 散乱計： スキャトロメタ

参考文献

- Allan, R. P., B. J. Soden, V. O. John, W. Ingram, P. Good, 2010: Current changes in tropical precipitation, *Env. Res. Lett.* **5**, 025205.
- Allen, M. R. and W. J. Ingram, 2002: Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, **419**, 224-232.
- Arakawa, A. and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus ensemble with the large-scale environment, Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674-701
- Bony, S., and Co-authors, 2015: Clouds, circulation and climate sensitivity, *Nature Geoscience*, **8**, 261-268, doi:10.1038/NGEO2398.
- Fujibe, F., N. Yamazaki, M. Katsuyama, and K. Kobayashi, 2005: The increasing trend of intense precipitation in JHapan based on four-hourly data for a hundred years. *SOLA*, **1**, 2005-2012.
- 藤部文明 2011：日本の気候の長期変動と都市化, *天気*, **58**, 5-11.
- Hamada, A., Y. N. Takayabu, C. Liu, and E. J. Zipser, 2015: Weak linkage between the heaviest rainfall and tallest storms. *Nat. Commun.*, **6**(6213), doi: <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms7213>.
- Hamada, A. and Y. N. Takayabu, 2018: Large-scale environmental conditions related to midsummer extreme rainfall events around Japan in the TRMM region, *J. Climate*, **31**, 6933-6945.
- Hashino, T., M. Satoh, Y. Hagihara, T. Kubota, T. Matsui, T. Nasuno, and H. Okamoto, 2013: Evaluating cloud microphysics from NICAM against CloudSat and CALIPSO. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 7273-7292, doi:10.1002/jgrd.50564.
- Hirota, N., Y. N. Takayabu, M. Watanabe, M. Kimoto, 2011: Precipitation reproducibility over tropical oceans and its relationship to the double ITCZ problem in CMIP3 and MIROC5 climate models. *J. Climate*, **7**, 4859-4873.
- Hirota, N., Y. N. Takayabu, M. Watanabe, M. Kimoto, and M. Chikira, 2014: Roles of convective entrainment in spatial distributions and temporal variations of precipitation. *J. Climate*, **27**, 8707-8723 doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00701.1>
- Matsui, T., X. Zeng, W.-K. Tao, H. Masunaga, W. S. Olson, and S. Lang, 2009: Evaluation of long-term cloud-resolving model simulations using satellite radiance observations and multifrequency satellite simulators. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**, 1261-1274,

doi:[10.1175/2008JTECHA1168.1](https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1168.1).

- Pall, P., M. R. Allen, and D. A. Stone, 2007: Testing the Clausius-Clapeyron on changes in extreme precipitation under CO₂ warming. *Climate Dyn.* **28**, 351-363.
- Roh, W. and M. Satoh, 2014: Evaluation of precipitating hydrometeor parameterizations in a single-moment bulk microphysics scheme for deep convective systems over the tropical central Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 2654-2673.
- Shige, S., S. Kida, H. Ashiwake, T. Kubota, and K. Aonashi, 2013: Improvement of TMI rain retrievals in mountainous areas. *J. Appl. Meteor. and Climatol.*, **52**, 242-254.
- Stevens, B., and S. Bony, 2013: What are climate models missing?, *Science*, **340**, 1053-1054, doi:10.1126/science.1237554.
- Suzuki, K., T. Y. Nakajima, and G. L. Stephens, 2010: Particle growth and drop collection efficiency of warm clouds as inferred from joint CloudSat and MODIS observations. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 3019-3032, doi:10.1175/2010JAS3463.1.
- Suzuki, K., G. L. Stephens, S. C. van den Heever, and T. Y. Nakajima, 2011: Diagnosis of the warm rain process in cloud-resolving models using joint CloudSat and MODIS observations. *J. Atmos. Sci.*, **68**, 2655-2670, doi:10.1175/JAS-D-10-05026.1.
- Suzuki, K., J.-C. Golaz, and G. L. Stephens, 2013: Evaluating cloud tuning in a climate model with satellite observations. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 4464-4468, doi:10.1002/grl.50874.
- Suzuki, K., G. Stephens, A. Bodas-Salcedo, M. Wang, J.-C. Golaz, T. Yokohata, and T. Koshiro, 2015: Evaluation of the warm rain formation process in climate models with satellite observations. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 3996-4014, doi:10.1175/JAS-D-14-0265.1.
- Takayabu, Y. N., S. Shige, W.-K. Tao, and N. Hirota, 2010: Shallow and deep latent heating modes over tropical oceans observed with TRMM PR Spectral Latent Heating data, *J. Climate*, **23**, 2030-2046.
- Trenberth, 1999: Atmospheric moisture recycling: role of advection and local evaporation, *J. Climate*, **12**, 1361-1381.
- Yokoyama, C., H. Tsuji, and Y. N. Takayabu, 2019: A Study on effects of an upper-tropospheric trough on the Heavy Rainfall Event in July 2018 over Japan, to be submitted

2.3.2 降水モニタリングによる極端現象の検出（山地萌果）

干ばつや大雨などの極端な降水現象は、人間活動に大きな影響を与えるため、降水を定量的にモニタリングして現状を把握することは、防災、水資源管理、農業等、様々な側面において非常に重要である。

南太平洋の気象防災機関では、GSMaPを降水の現況モニタリングに利用している。島嶼

地域では、地上観測網が不足している地域も多く、地上観測が整備されていても、島から離れた海上におけるサイクロンの動向を把握することは難しいため、衛星観測が有効な手段となる。静止気象衛星による時空間解像度の高い雲情報と組み合わせることで、より効果的に GSMaP を利用することができる。フィジー気象局をはじめ、ソロモン、トンガ、サモアなどの気象局公式ウェブサイトに GSMaP へのリンクが設定されており、現地の一般市民によるアクセスも確認できている。マイクロ波放射計が通過しなかった時刻における降水域の位置ずれや、マイクロ波放射計通過前後の降水量の急激な変化は、降水モニタリングで GSMaP を用いる上で留意が必要な課題であり、今後の改良が望まれる。また、島嶼国にクローズアップして用いることを考慮すると、0.1 度格子の解像度では粗く、解像度の向上も期待される。

世界気象機関（WMO）では WMO Space-based Weather and Climate Extremes Monitoring (SWCEM) Demonstration Project (SEMDP) として、東南アジア・太平洋地域を対象にした衛星データを用いた異常気象モニタリングのサブプロジェクトが 2018 年から 2 年間にわたって実施されている。これは衛星観測による面的な降水情報を活用し、週単位・月単位での極端現象をモニタリングする試みである。JAXA はデータ提供機関として準リアルタイム雨量計補正版 GSMaP を 18 年分作成して提供している。18 年の長期データとそれらから算出された気候値情報もあわせて提供していることが特徴的であり、パーセンタイル値等を用いて、気候学的に極端な降水を面的に検出することができる。

2.3.3 降水モニタリングによる気候変動の検出（金丸佳矢、沖理子）

宇宙から雨を測る。その象徴とも言える日本発および世界初の降雨レーダ PR を搭載した熱帯降雨観測 TRMM 衛星の運用目標は約 3 年であった。この目標は達成され、TRMM 衛星の運用および PR による降雨観測は結果として約 17 年の長期となった。これは衛星に搭載されたセンサの健全性だけでなく、H-II ロケット輸送能力の高さ(衛星軌道投入の精度が非常に高く衛星の燃料が節約された)、衛星運用(途中で衛星の燃料を節約するために衛星高度を変更した)や観測期間が太陽活動の静穏期と重なった幸運(燃料の節約につながる)によって実現されたことは忘れてはならない。その結果、全球降水観測計画 GPM の主衛星に搭載された二周波降水レーダ DPR は PR と連続する観測が出来た。DPR は PR の観測を受け継ぐだけでなく、PR では観測が難しかった弱い雨や雪の高精度な観測を行っている。

PR/DPR による雨の長期観測は、数年に一度の異常気象をもたらすエルニーニョ現象およびラニーニャ現象を複数回観測し、エルニーニョ/ラニーニャ現象同士を比較することが可能となった。地球温暖化に伴う将来の気候予測によると、エルニーニョ現象に伴う将来の降水変動は現在より強くなる可能性があることが挙げられている（IPCC, 2013）。したがって、過去に発生したエルニーニョ現象のふるまいの違いを理解することは、将来起こり得る雨の気候変動リスクの正しい予測に貢献することが期待される。図 2.3.3-1 はエルニーニョ現象が起きた 1997、2009 年(PR が観測)と 2015 年(DPR が観測)の北半球秋と冬

の雨の経年変動(気候値からの偏差)を示す。2015年のエルニーニョ現象は、20世紀最大とも言われる1997年のエルニーニョ現象以来の強いエルニーニョ現象であった。実際に2015年の雨の偏差は2009年のエルニーニョ現象より大きいことが分かる。また、強いエルニーニョ現象であっても2015年と1997年の雨偏差の分布は異なっている。このような比較はPRとDPRの校正精度を担保し、かつ同一アルゴリズムを適用することで初めて可能となった。

図2.3.3-1のようにPRの長期観測は雨の経年変動の挙動を把握することが可能となった。と同時に、PRの長期観測による独自性が他の衛星から観測された降水データの比較から分かりつつある。図2.3.3-2はPRの観測による雨の海上平均(青線)に加え、TRMMに搭載された別の観測センサであるマイクロ波放射計TMIが観測したもの(緑線)、全球降水気候計画GPCPによって作成されたもの(赤線)を示す。図2.3.3-2を見ると、17年間のTMIとGPCPの雨の時系列は似ている。これはGPCPがTMIとは別のマイクロ波放射計を使用してデータを作成していることを考えると納得が出来る。一方、PRの雨の時系列はやや異なる変動をもつ。特に1997年末や2009年末のエルニーニョ現象が発生している時期にPRとTMI/GPCPの差が大きい(Robertson et al. 2003; Wang et al. 2008)。したがって降雨レーダとマイクロ波放射計の異なる観測手法に由来する差が図2.3.3-2の雨の経年変動の差をもたらしていると考えられる。では一体何がその原因なのだろうか?その答えは雨の降り方の経年変動に関係していると思われる。まず、雨の降り方は主に2つにわけられ、短時間の強い雨を指す対流性の雨、弱い雨が長時間続くような降り方を示す層状性の雨、に大別できる。対流性・層状性の雨の違いは雨の鉛直構造から分類することが可能であり、PRのような降水レーダは雨の鉛直構造の観測から雨の分類を高精度に行うことが出来る。一方、TMIなどのマイクロ波放射計は観測原理的に雨の鉛直構造を観測することは出来ず、雨の分類は観測値の水平分布などから類推するほかない。図2.3.3-3は1997年12月から1998年2月の3か月においてPRとTMIがそれぞれの観測データからそれぞれが分類した対流性と層状性の雨の差を比較したものである。図2.3.3-2で見られる1997年末のPRとTMIの雨の時系列の大きな差は、対流性の雨の大きな差に起因することが分かる。エルニーニョ現象発生時に雨の降り方が変わっているとすると、その変化を捉えている可能性が高いのはPRだと示唆される。つまり、将来的に起こり得る雨の性質の変化を正しく知るためにはマイクロ波放射計だけではなく、降水レーダによる雨の3次元観測が不可欠であると思われる。

PR/DPRによる雨の気候変動検出への試みは、観測が長期的に継続することによって初めて可能となる。また、雨の長期的なトレンドは、PR/DPRデータ品質のわずかな変化(先に挙げたTRMMの高度変更や機器システムの長期的な変化、PR/DPRの機器の違いなど)によって埋もれてしまうほど小さな自然変動でしかない。図2.3.3-4はPRの17年分の観測データを丁寧に見直し、機器等のわずかな変化の影響などを除去(Kanemaru et al. 2015a; 2015b; 2017; 2019)して得られた17年の雨トレンドである(図2.3.3-2のPRの時

系列も同様に求めている)。図 2.3.3-4 の特徴的な雨トレンドの空間分布は 10 年から 20 年規模の雨の気候変動を映し出している可能性が高い。また PR/DPR はマイクロ波放射計からでは求めることが難しい雨の鉛直構造や雨の分類といった雨の性質の長期的な変化を捉える可能性を秘めている。また PR/DPR はマイクロ波放射計からでは求めることが難しい雨の鉛直構造や雨の分類といった雨の性質の長期的な変化を捉える可能性を秘めている。最近、PR と DPR とのデータ連続性を担保するための研究が進んでおり (Kanemaru et al. 2020, Masaki et al. 2021)、降水レーダ観測による降水気候変動の検出に向けた努力が続いている。

地球観測の時代は、遠い宇宙から地球を測ることに目的があった黎明期から、身近な宇宙から地球だけでなく人間社会を見守る成熟期に移っている。PR/DPR によって宇宙から雨や雪を測る、というその第一目的はほぼ達成されたと言える。と同時に、PR/DPR が測り続けたからこそ分かること（雨の性質の経年変化やその長期変化検出の可能性）が新たに明確にされつつある。PR/DPR によって降水レーダの長期観測は 23 年に及ぶことが期待されるが、地球温暖化の諸問題を科学的に論じるためには決して十分な長さとは言えない。また、運用の変遷や機器のわずかな変化に伴う観測データの品質変化の除去といった長期運用ならではの問題も新たに直面している。これらも全て、過去から現在の変遷を正しく知り、将来を正しく予測し、その対策を正しく行うために不可欠である。PR の 17 年およびそれを受け継ぐ DPR から描かれつつある 1 本の時系列の線は、PR/DPR を長期継続運用した実績をもつ日本にしか描けない真実を映し出すのかもしれない。

参考文献

- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- Robertson, F. R., D. E. Fitzjarrald, and C. D. Kummerow, 2003: Effects of uncertainty in TRMM precipitation radar path integrated attenuation on interannual variations of tropical oceanic rainfall, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1180, doi:10.1029/2002GL016416, 4.
- Wang, J.-J., R. F. Adler, and G. Gu, 2008: Tropical rainfall-surface temperature relations using Tropical Rainfall Measuring Mission precipitation data, *J. Geophys. Res.*, **113**, D18115, doi:10.1029/2007JD009540.

- Kanemaru K., S. Kida, T. Kubota, M. Kachi, R. Oki, T. Iguchi, and Y. N. Takayabu, 2015a: Creation of TRMM PR data by minimizing the effect of the TRMM orbit boost, 2015-n-12, 30th International Symposium on Space Technology and Science
- Kanemaru K., T. Kubota, M. Kachi, R. Oki, T. Iguchi, and Y. N. Takayabu, 2015b: A DECADAL VARIABILITY OF SEMI-GLOBAL PRECIPITATION BY TRMM PR, FR1.G3.3, the IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, the International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2015
- Kanemaru, K., T. Kubota, T. Iguchi, Y. Takayabu, R. Oki, 2017: Development of a precipitation climate record from spaceborne precipitation radar data. Part I: Mitigation of the effects of switching to redundancy electronics in the TRMM Precipitation Radar. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 34, 2043-2057, doi:10.1175/JTECH-D-17-0026.1
- Kanemaru, K., T. Kubota, T. Iguchi, 2019: Improvements in the Beam-Mismatch Correction of Precipitation Radar Data After the TRMM Orbit Boost. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 57(9), 7161-7169, doi:10.1109/TGRS.2019.2911990, © IEEE
- Kanemaru, K., T. Iguchi, T. Masaki, T. Kubota, 2020: Estimates of Spaceborne Precipitation Radar Pulsewidth and Beamwidth Using Sea Surface Echo Data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 58(8), 5291-5303, doi:10.1109/TGRS.2019.2963090, © IEEE
- Masaki, T., T. Iguchi, K. Kanemaru, K. Furukawa, N. Yoshida, T. Kubota, and R. Oki, 2021: Calibration of the Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) Onboard the Global Precipitation Measurement (GPM) Core Observatory *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, doi:10.1109/TGRS.2020.3039978, © IEEE

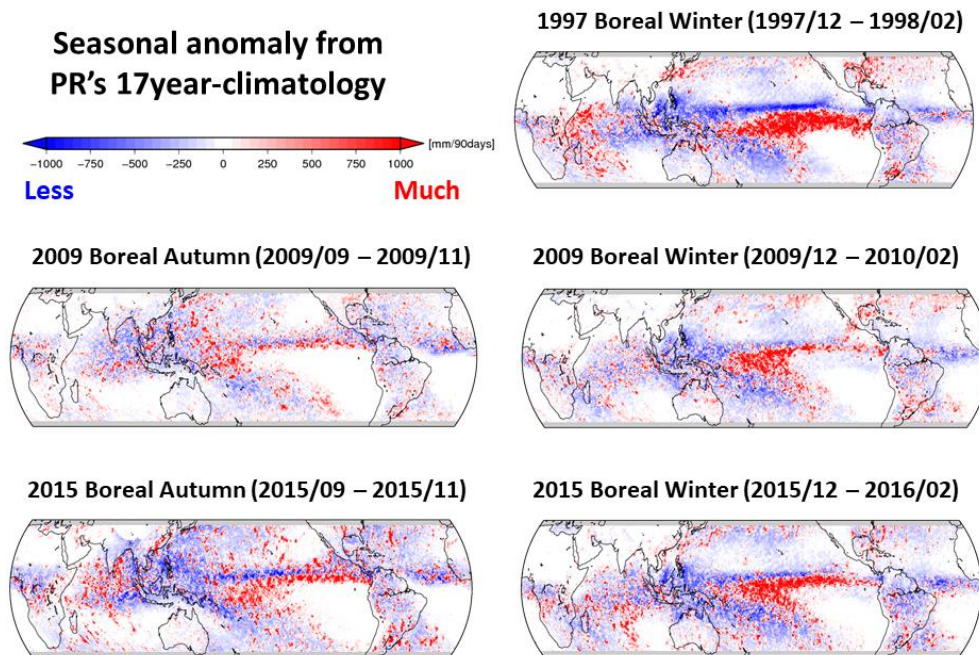


図 2.3.3-1 北半球秋および冬における各年の雨の空間変動(PR の 17 年分の季節気候値からの差)。1997, 2009 年は PR の観測。2015 年は DPR (KuPR)の観測。PR と DPR はそれぞれ DPRV05A 相当のアルゴリズムを適用した結果を用いた。

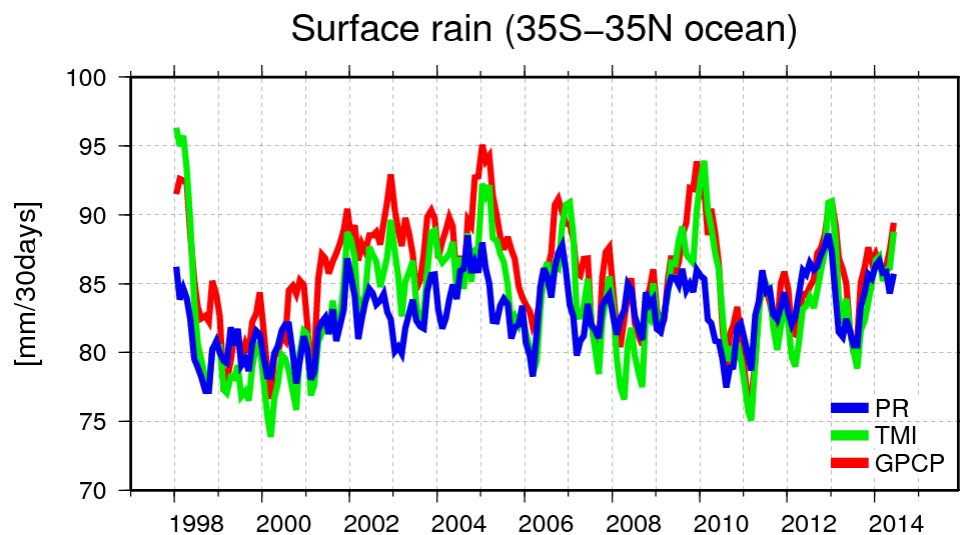
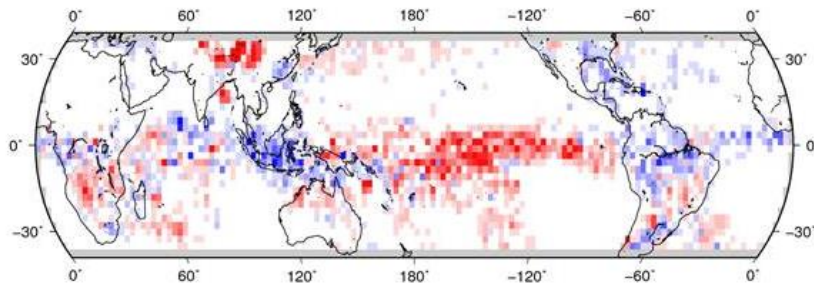


図 2.3.3-2 1997 年 12 月から 2014 年 7 月までの南緯 35 度から北緯 35 度まで海上平均した各月ごとの雨の 3 か月移動平均時系列。PR は青線、TMI は緑線、GPCP は赤線。

a) PRとTMIの対流性降水量の差 (TMI - PR)



b) PRとTMIの層状性降水量の差 (TMI - PR)

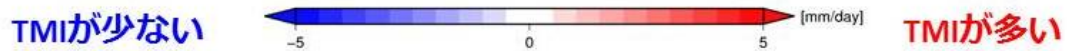
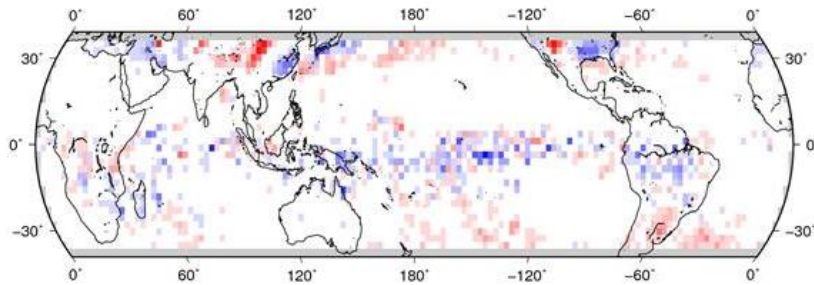


図 2.3.3-3 1997 年 12 月から 1998 年 2 月の 3 か月間でそれぞれの PR と TMI の雨の差 (TMI-PR)。上が対流性、下が層状性の雨。

PR linear change [mm/day/decade]

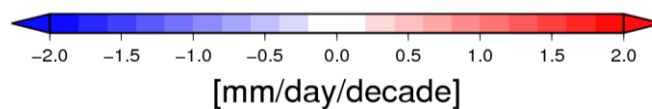
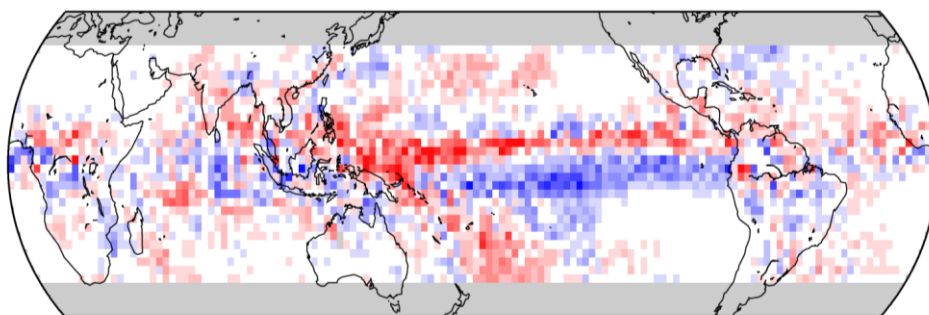


図 2.3.3-4 1997 年 12 月から 2014 年 7 月までの PR 観測から求めた雨の長期トレンド。

2.3.4 社会インフラとしての降水データの利活用

衛星観測による降水情報は、科学的な側面だけでなく、実利用においても重要な役割を担っている。以下に各分野における衛星降水観測データの活用について記す。

2.3.4 (1) 防災・災害監視

洪水予測・解析システム（土木研究所 ICHARM）

国立研究開発法人土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター（International Centre for Water Hazard and Risk Management, ICHARM）では、雨量等の現地データが十分に観測されていない河川流域においても効率的に洪水予警報システムが構築できるよう、入力データとして GSMaP などの人工衛星によって観測された雨量情報を活用している。

ICHARM が開発した GIS データを利用した降雨流出解析モデルとしては、IFAS（Integrated Flood Analysis System、IFAS）及び RRI モデル（Rainfall-Runoff-Inundation: RRI）等があり、ICHARM のウェブサイトにおいて無料で公開されている。土木研究所の研究開発プログラムや、ユネスコやアジア開発銀行（ADB）からの受託事業として、これまで IFAS や RRI モデルを活用した洪水予警報システムが、インドネシア国ソロ川流域、パキスタン国インダス川流域、フィリピン国カガヤン川流域に導入されており、JAXA と ICHARM が協力し、現地雨量計データにより補正された GSMaP データが入力に利用されている。

また、スリランカ南西部のカル川流域においては、流域における地上観測降雨データにより GSMaP_NOW がリアルタイムで精度の高い雨量データに変換されている。この雨量データは「水エネルギー収支降雨流出氾濫モデル（WEB-RRI）」に入力されることにより洪水流量、水位、浸水状況のリアルタイム監視に利用されている他、洪水予測のための降雨予測計算の検証データとしても利用されている。このシステム開発は、国際洪水イニシアティブ（IFI）※1）の枠組みのもとで、データ統合・解析システム（DIAS）※2）と協働して行われている。洪水監視・予測情報はスリランカ国のかんがい部局、災害管理部局など関係機関に提供されており、効果的な洪水対策や迅速な避難情報の発信により、洪水による人的被害の軽減、効率的な応急復旧等が図られることが期待される。このシステムは、今後、フィリピン、ミャンマー、インドネシア等にも展開を予定している。今後、地上雨量計やレーダ雨量計の展開と連携し、さらに観測精度、即時性の高い降雨情報が得られることが期待される。

*1） IFI とは、International Flood Initiative の略称。ユネスコ（UNESCO）、世界気象機関（WMO）、国連大学（UNU）、国連国際防災戦略（UNISDR）などの国際機関が世界の洪水管理推進のために協力する枠組みで、ICHARM は、IFI の事務局を担当している。

*2) DIAS とは、Data Integration and Analysis System の略称。文部科学省のデータ基盤の開発・統合利用プロジェクトで、多種多様かつ大容量な観測や予測のデータを収集、蓄積するとともに、社会経済情報などとの融合を行い、地球規模の環境問題や大規模自然災害等の脅威に対する危機管理に有益な情報へ変換し、国内外に実時間で提供するデータ基盤である。

確率雨量を用いた洪水警報システム（国際建設技術協会）

一般社団法人国際建設技術協会は、Global Flood Alert System ver.2（GFAS-II）を開発し、Web ベースで全球規模での洪水警報を行っている。GFAS-II は、FTP サイトよりオンタイムで入手した準リアルタイムの GSMaP 降雨量に対して、その降雨の生起確率規模を色分けしランク表示（解像度は約 10km メッシュ、データ更新は 1 時間）するシステムである。メッシュ毎に降雨の確率規模 2 年に 1 回、5 年に 1 回、10 年に 1 回および 30 年に 1 回を閾値として確率雨量を 5 ランクで表示し、高強度の降雨範囲や雨域の移動速度を視覚的に分かりやすく表示し、リスクに係る情報を提供している。Ver.2 では、媒体はこれまでのパソコンでの Web 画面のほか、災害時や避難先で確実に情報入手できるように、近年発展途上国でも普及が進むスマートフォン仕様も開発し、スマートフォンでのアニメーション表示も可能となっている。期待される効果としては、今後の気候変動等による水災害の激甚化、頻発化への対応が喫緊の課題となっている中、特に、発展途上国における被害軽減、災害適応能力の向上がある。さらに、2017 年 6 月からは GSMaP_NOW の利用を開始するとともに、確率雨量の閾値（分布形）の更新（最新プロダクト RNLver6 と MVKver6 の使用等）、動画表示時間の拡大および多言語化の拡充（ミャンマー語の追加）を図った改良版 ver2.1 を公開している。

水文モデルでの利用（芳村圭）

これまでの常識範囲を超えた、いわゆる極端現象が世界で頻発している近年の状況のなか、洪水と渇水をあわせた水災害を十分事前に予測し、適切な避難や防護対策を講じることが、人命ならびに資産・資源を守るという意味で世界規模の極めて大きな意義をもつ。しかしながら例えば、「明後日の〇〇川〇〇地点の水位は〇〇%の確率で危険水位に達するみたいだ。あのあたりには近づかないでおこう」とか「来月は雨がふらずこのままでは作物収量を〇〇%落とすほどの土壌水分になってしまう確率が高い。今のうちに灌漑用水を確保しておこう」といった具体的な意思決定ができるような段階には至っていない。こうした意思決定を近い将来に現実のものとするべく開発が進められているのが、JAXA と東大による Today's Earth（TE）システムである。具体的には、地球全体或いは特定の地域（現在は日本域）を対象とした、陸域表層でのさまざまな水文量（河川流量・氾濫面積・土壌水分量・蒸発量・積雪量・地下水位等）に関して、衛星観測降水量や同様な気象データ等を用いることによって現時点までの状態把握の精緻化を行った上で、その状態を初期値として近未来

の予測推計を行うことを試みている。特長の一つは、これまで特定の地域や流域での取り組みで頻繁に行われてきたようなパラメータのチューニングは撤廃し、用いるパラメータはすべて実在する観測可能な物理量に基づかせることで、全球的な空間転用性の高いモデルを開発し使用していることである。これまでの研究で、精度の良い陸域水文量の予測を行うには、現時点での陸域水文量の状態の把握を十分に行うことが重要であることがわかってきている。将来の陸域水文量の確率的な振れ幅を小さくするためにも、現状把握の精緻化は重要である。そのため TE では、いくつもの衛星による多種多様な地球観測データと最先端なモデルによるシミュレーションを高度なデータ同化技術や AI を駆使して融合し、様々な陸域水文量を高解像度・高頻度・高精度で推計するための研究開発を進めている。その際降水量観測データは間違いなく最重要であるため、GSMaP ファミリー及びその将来的な大幅改良には大いに期待している。

GPM 後継ミッションに対する豪雨災害軽減に関する期待（中北英一）

豪雨災害は、洪水による河川の氾濫、内水氾濫、ならびに土砂災害が主なものである。また、その際には国・県・地方自治体はダム操作による洪水抑制や堤防強化等の実時間強化、警戒情報の発令といった重要業務がある。また、住民からすれば自衛水防団による有事堤防監視や強化、住民への危機情報の周知などが行われる。それらのすべてに於いて、時々刻々と変化する上流域や近傍の降雨状況や予測情報が重要となる。

現在は、我が国では気象庁にとる気象レーダ群や国土交通省によるレーダ雨量計群による CX 合成 XRAIN 情報などきめ極めてきめ細やかで正確な降雨情報がある。広域に関しては、新生代のひまわり 8 号、9 号による広域でかつまま時間空間的に細やかな雲情報が得られる。この雲情報から、間接的にはあるが降雨情報も得られる。

しかし、広域な高い空間分化能での降雨情報は残念ながら得られない。勿論、中国大陆、台湾島、朝鮮半島、そして日本列島の気象レーダ情報が常時ネットワークとして活用できれば東アジアでのレーダ降雨情報は飛躍的に高度なものになり、特に東に位置する我が国では西からやってくる豪雨システムの早期からの探知に大きな役割を果たす。

さらに飛躍的に大きな情報をもたらしてくれる夢の豪雨監視体制が、静止気象衛星によるレーダ観測である。これにより、東アジアよりさらに広い領域での 3 次元的な豪雨情報をもたらされ、我が国だけでなく東アジア、東南アジア、太平洋諸島、オセアニアといった広大なエリアに台風や低気圧、前線による豪雨情報をもたらしてくれる。しかも、これまでの静止気象衛星とは異なり直接的に雨粒を観測するのでその定量的な精度が格段に向上し、広大なエリアでの洪水監視、洪水予測が可能となる。静止気象衛星により常時豪雨が直接監視できるようになることは気象学的にも水文学的にもそして洪水監視という水工学的にも長い間の夢であった。少なくとも 10 分程度～15 分程度の時間分解能、20 km 程度の空間分解で観測することができれば、洪水出水計算の入力としても定量的に使えるようになり、ある意味のパラダイムシフトをもたらすことになる。大きな期待を寄せたい。

2.3.4 (2) 農業（樋口篤志、大吉慶、山地萌果）

降水量は農業の分野においても重要な基本情報であるため、とくに観測頻度の高い GSMaP データを、地上観測が不足しているアジア地域で利用するための研究がいくつか進んでいる。

国内において、JAXA は、農水省食料安全保障室との協定に基づき、農水省が海外の作況判断をするための支援情報として、世界の主要耕作地帯の農業気象情報を農水省に提供しており、作付けや収穫に影響与える干ばつや多雨などの判断に GSMaP を活用している。

アジアにおいては、G20 農業大臣会合で採択された全球農業監視イニシアティブの一部として、アジアで重要穀物である水稲について、アジア水稲監視(Asia-RICE)イニシアティブが実施されており、JAXA が主導的役割を果たしている。JAXA は、東南アジア各国の農業省（7 カ国）と連携し、GSMaP を含んだ衛星観測による農業気象情報を活用して毎月水稲の作況情報を作成し、GEOGLAM を通じて毎月、国連食糧機関（FAO）の Agriculture Market Information System（AMIS）に情報を提供している。各国への農業気象情報の提供は JAXA が開発したウェブシステム（JAXA's Satellite based Monitoring Network system (JASMIN)）を通じて行っており、複数の異なる衛星・センサから作成された降水量、干ばつ指標、土壌水分量、日射量、地表面温度、植生指標を時空間的に再処理し、一元化した農業気象情報として提供を行っている。なお、Asia-RiCE 活動は、日本政府の「SDGs アクションプラン 2019」にも記載されている。

民間企業での活用事例としては、海外の小規模農家を対象に、GSMaP を活用した天候インデックス保険を、損害保険ジャパン日本興亜株式会社が一般財団法人リモート・センシング技術センターと共同で開発した事例がある。2018 年 12 月より、ミャンマーでパイロットプロジェクトが開始され、2019 年 2 月にはタイでの販売が開始されており、地上気象観測網が未整備で気候変動・気象災害に貧弱でもある発展地域においても、衛星観測による降水量を用いることで、天候インデックス保険が開発できることの実証となった。

食糧安全パッケージ（樋口篤志）

千葉大学を中心としたグループでは、「食糧安全保障パッケージ」における GSMaP の研究利用をこれまで実施している。食糧安全保障パッケージとは、衛星観測以外での広域推定が困難な日射・降水量を入力とし、統合陸面過程モデル (SiBUC) とイネの作物生長モデル (SIMRIW) を組み合わせることで広域におけるイネの生育過程および収量を推定し、さらに雲解像モデル (CReSS) と統合陸面過程 + 作物生長モデルを組み合わせる (CReSiBUC+SIMRIW) ことにより、1-5 日先の作物生長推定を行い、現況モニタリングから近未来予測までシームレスで繋ぐこと(図 2.3.4-1)を目指したものである。本研究利用は 2015 年度までの 3 年間プロジェクトとして実施した。その結果、当初目的である陸面過

去解析～速報解析～近未来予測までシームレスに実施することに成功した。得られた成果の検証も一部実施し、農業灌漑水として極めて重要となる積雪水量に直結する降雪量の改善が重要であるが、検証時の GSMaP は雪を明示的に扱っていなかったため、GSMaP は系統的に過小評価をしていたことが分かった（図 2.3.4-2）。

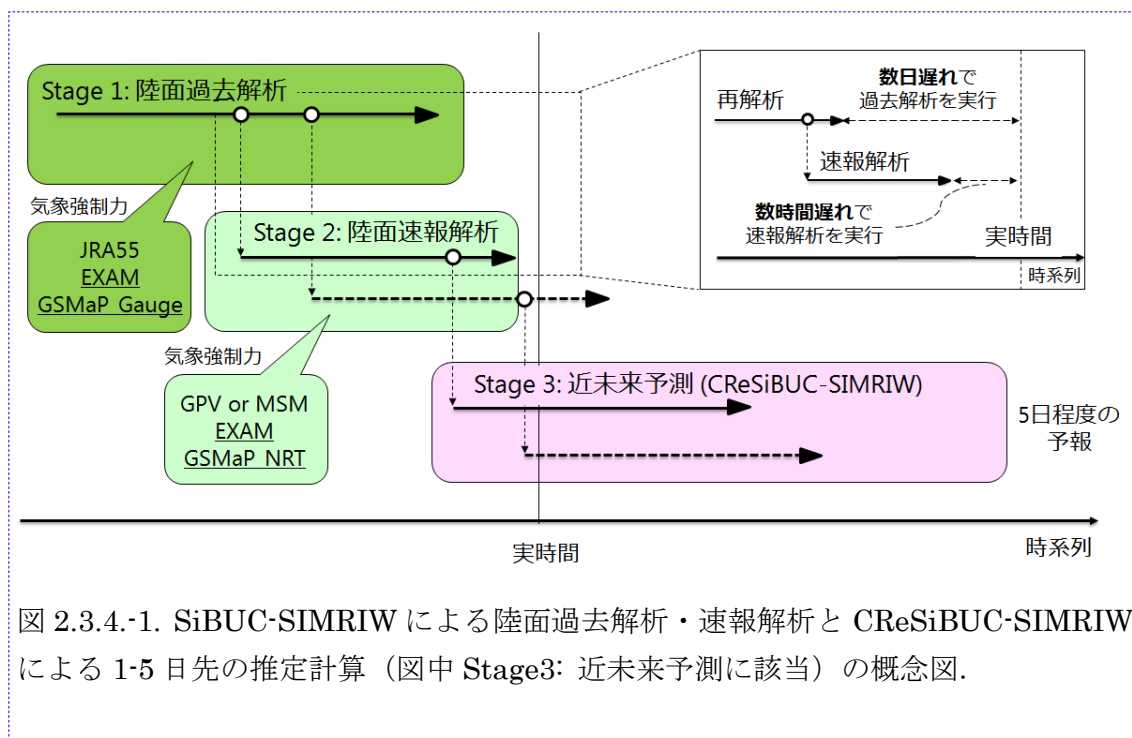


図 2.3.4-1. SiBUC-SIMRIW による陸面過去解析・速報解析と CReSiBUC-SIMRIW による 1-5 日先の推定計算（図中 Stage3: 近未来予測に該当）の概念図。

NRTとRALの検証（324地点の積雪深データ）

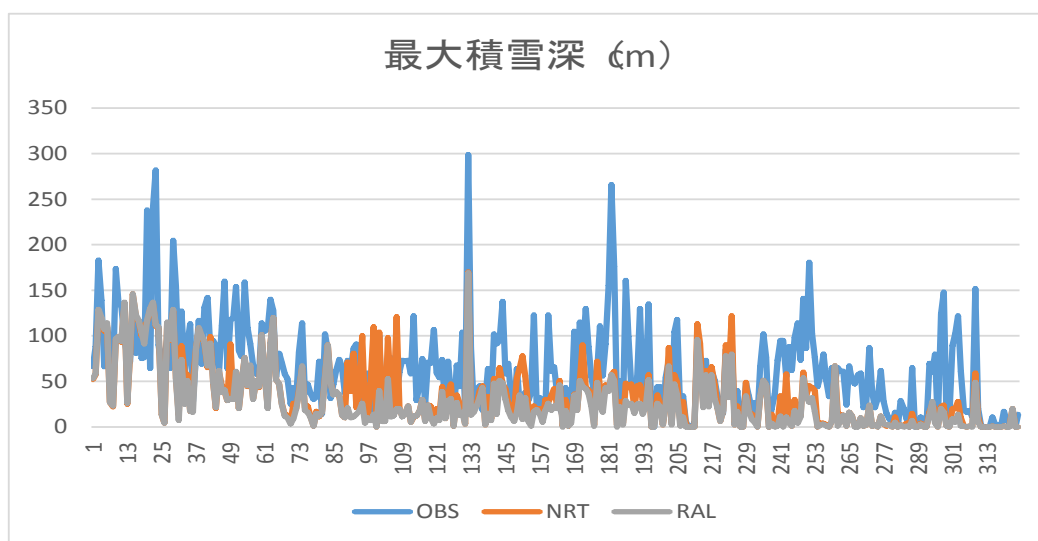


図 2.3.4.2 気象官署 324 地点の最大積雪深（青），および SiBUC 過去解析（RAL；灰色），同速報値（NRT；橙色）の最大積雪深．横軸は官署地点番号を示す．

本パッケージのアプローチによる衛星利用の観点から鑑みると，DPR2 には降雪に関わる各種要素（降雪量，粒子判別等）の精度向上，およびマイクロ波放射計による陸域降雪量推定アルゴリズムへの更なる貢献，を望みたい．特に水資源の観点から見た際には，山岳域での降雪精度向上に対する寄与は雨量計の多点展開を除けば衛星搭載レーダによる独壇場であり（地上設置レーダでは遮蔽効果がどうしても現れる），これに XRAIN による偏波情報より培った降水粒子判別技術の応用（例えば 中北ほか, 2009; Kouketsu et al., 2015），すなわち衛星搭載偏波レーダの登場，および有機的な利活用が期待される．

CRess: Cloud Resolving Storm Simulator (Tsuboki and Sakakibara 2002; Tsuboki, 2008)

CRessSiBUC: CRess with SiBUC (e.g., Souma et al. 2013)

SiBUC: Simple Biosphere Model including Urban Canopy (Tanaka 2004)

SIMRIW: Simulation Model for Rice-weather relations (Horie 1987)

参考文献

- Horie, T. 1987: A model for evaluating climate productivity and water balance of irrigated rice and its application to Southeast Asia. *Southeast Asian Studies*, **25**, 62–74.
- Kouketsu, T., et al., 2015: A hydrometer classification method for X-band polarimetric radar: Construction and validation focusing on solid hydrometers under moist environments. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **32**, 2052-2074.
- Tanaka, K., 2004: Development of the new land surface scheme SiBUC commonly applicable to basin water management and numerical weather prediction model. *Doctoral Dissertation, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto*; 289p.
- Tsuboki, K., and A. Sakakibara 2002: Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator. H.P. Zima, K. Joe, M. Sato, Y. Seo, and M. Shimasaki, Eds., *High Performance Computing, Springer*, 243-259.
- Tsuboki, K. 2008: High-resolution simulation of high-impact weather systems using the cloud-resolving model on the Earth Simulator. K. Hamilton and W. Ohfuchi, Eds., *High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean, Springer*, 141-156.
- Souma, K., et al., 2013: A comparison between the effects of artificial land cover and anthropogenic heat on a localized heavy rain event in 2008 in Zoshigaya, Tokyo, Japan. *Journal of Geophysical Research*, **118**, 11600-11610, doi:10.1002/jgrd.50850.

中北英一ほか, 2009: 偏波レーダーとビデオゾンデの同期観測および降水粒子タイプ判別, 土木学会水工学論文集, 第 53 巻, 361-366.

2.3.4 (3) 気候・水資源管理 (可知美佐子、山地萌果)

首都大学東京において、中部ベトナムにおける GSMaP 降水量の地上降水量観測データによる較正に関する研究が実施された。中部ベトナムにおける GSMaP_MVK 月降水量を、現地水文気象局による地上雨量計観測データおよび地上雨量計を複合したデータセットである APHRODITE データによって精度を検討し、特に海岸部での精度が悪いことを指摘し、その精度改善のためにニューラルネットワークによる過去データを用いた補正を行うことで、精度向上を図る手法を開発した。海岸付近に山岳がある中部ベトナムでは、当時利用していた GSMaP_MVK データは、特に海岸部でのデータの精度が悪く、そのままでは、実利用には向かない欠点があった。期待される効果としては、海岸線付近に山岳をもつ地域における降水量の高精度での把握や、より短い時間スケールでの検討によって、実利用への応用も期待できる。

同じく首都大学東京において、雷被害の軽減のための基礎的資料を提示することを目的として、アフリカ大陸における雷活動の季節変化の研究に TRMM データが利用された。1998~2007 年の 10 年間の TRMM LIS および PR データを用いて、アフリカ大陸における、雷活動と降水の詳細な季節変化を把握した。TRMM データは降雨と雷活動を同時に観測するという利点がある反面、観測頻度が少ないため、多くの年を平均しないと正確な情報にはならないこと、年々変動の研究には不向きな事が欠点である。

また、首都大学東京では、現在、フィリピンにおける半月平均での降水量分布とモンスーン気流の季節変化の研究に、TRMM 3B42 降水量データを利用している。フィリピンでは現地の地上観測データが、山岳部や小さい島では不十分であるため、衛星によるデータ利用が有効であると考えた。TRMM データは観測頻度が低いため、長期間の平均をとらないと信頼できるデータにならない点が欠点である。しかし、衛星が長寿命だったため、気候値の信頼度が高まった。これらの研究結果は、地域スケールでのモンスーン気流と降雨の季節変化との関係の解明、モンスーン開始前の局地的な山岳降水の把握につながる事が期待される。

より実利的な観点では、ミクロネシア連邦コスラエ州の例があげられる。コスラエ州の資源管理局ウェブサイトには GSMaP へのリンクが設定されており、一般からも GSMaP へアクセスが可能となっている。南洋州の島国において、雨水は生活用水として貯水して用いられているため重要な水資源である。資源局職員によると、屋外設備が雨水によってダメージを受けないように、または屋外作業のスケジュールを決定するための重要な情報として用いているという。

2.3.4 (4) その他分野での利用（大吉慶、山地萌果、可知美佐子）

公衆衛生分野での環境疫学研究においても、感染症の患者数と降水量などの環境情報の関連性を解析するために GSMaP が利用されている。降水量の季節変動や年々変動は感染症の媒介生物の生息適地に影響を与えるものの、感染症のリスクが大きい途上国では地上観測による気象データが乏しいため衛星観測による環境情報は、疫学モデリングを行う上で有用である。JAXA が長崎大学と実施している共同研究においては、ケニアビクトリア湖畔を対象地域として、GSMaP などの地球観測衛星データと長崎大学が現地で収集した媒介蚊の数やマラリア患者数のデータを解析することで、両者の関連性を解析しているところである。また、長崎大学は地上雨量計も運用しているため、GSMaP との相違を比較するなどして、GSMaP の検証にも貢献している。JAXA が国立国際医療研究センター研究所と実施している共同研究においては、ラオスを対象地域として、マラリア患者数やメコン住血吸虫症患者数と GSMaP を比較した結果、年間降水量や特定の月の降水量が疾病の発生と有意な相関があることを確認している。今後は、より詳細な疫学モデルを構築して、早期リスク警戒情報の発出を可能とすることで、効果的かつ効率的な事前の予防策に貢献することが期待される。

教育の分野においては、Earth Literacy Program の開発したデジタル地球儀「触れる地球」のコンテンツに GSMaP が利用されている。「触れる地球」は直径 80cm の半球ディスプレイに毎日の気象、温暖化のシミュレーション、地震や津波の発生、渡り鳥の移動、都市人口の増加など、さまざまな地球規模の現象を投影し、また重ね合わせることで新世代の地球リテラシーを養うことができるデジタル地球儀で、学校、科学館・博物館や企業ミュージアムなどに導入されている。毎時更新される雲画像や MODIS による植生・氷雪など、さまざまなリモートセンシングデータがインストールされており、GSMaP による準リアルタイムの降水データもそのひとつである。「触れる地球」における衛星データの利用によって、地球規模－ローカル、短期－長期の現象の理解が可能となった。地球規模・長期間でデータをまとめることで、さまざまな教育的な効果を持ったコンテンツとして活用できる。

観光分野での利用も少しずつ広がってきており、マレーシア政府観光局では、日本語のウェブサイトにも GSMaP へのリンクが設定され、SNS などでも情報が配信されている。このことにより、マレーシアへ渡航予定の一般の方々からの GSMaP へのアクセスが増えている。

さらに、パナソニック株式会社エコソリューション社は、住宅という観点で GPM/DPR などの気象データを加工して、全国 100 地点の気象に関する指標を偏差化し、閲覧できるウェブサイトを 2018 年 12 月に公開した。人工衛星を、住宅という暮らしに身近なテーマを切り口として、民間企業で活用された事例であり、今後も様々な分野での応用が広がることが期待される。

2.4 降水観測に関する重要課題のまとめ（山地萌果、高橋暢宏）

本節では、2.1～2.3 章での科学・実利用における議論から、共通認識となっている雲・降水にかかる重要課題や問題意識についてまとめる。

気候変動や地球温暖化において、原因となる外力による放射バランスの変化のみならず、その影響評価のためには、水循環の変化を観測することが極めて重要である。図 2.4-1 に、気候変動に関わる気候システムの模式図を示す。温室効果ガスなどによる外力（放射強制力）によって放射バランスが変化し、地球全体が加熱・冷却されるが、外力に対してどの程度地球が加熱や冷却されるか、すなわち「気候感度」を考える上では、水循環の変化が重要となる。エアロゾル・雲・降水を介して放射バランスと水循環は密接に連動しており、放射の変化が雲・降水を変化させ、水循環全体が変わることで、干ばつや洪水などの極端な気象現象につながる。さらに水循環の変化が、放射のバランスにフィードバックして影響を与えることで、相互作用しながら気候が変動する。

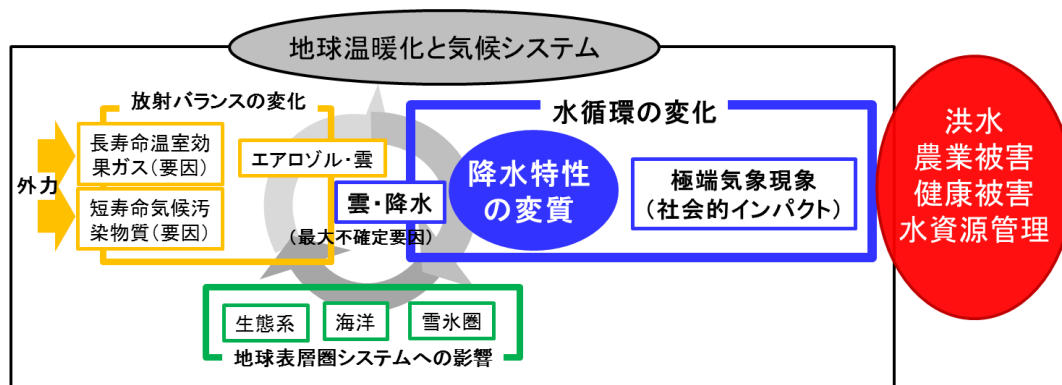


図 2.4-1 地球温暖化・気候変動に関する気候システムの模式図。

水循環の変化の精確な把握

水循環の観点における気候変動に対するアプローチとして、まずは「水循環の変化」を、精確に把握する必要がある。衛星降水レーダ観測によって、全球の水循環収支の観測が着実に進展してきている。TRMM によって熱帯の降雨の三次元観測が長期にわたって行われ、多くの知見がもたらされた。その後、GPM が打ち上げられ、観測領域が熱帯から中緯度まで広がり、Ku 帯だけでなく Ka 帯との二周波を用いた高感度な降水観測によって、雪などの固体降水も対象とした新たな知見が生まれつつある。また、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高精度高解像度の降水観測データが 20 年以上利用可能となっている。これまでの全球の水循環に関する研究では、数値モデルを用いて各要素の収支が見積もられているが、観測によって明らかになっている部分は未だ限られている。TRMM と GPM による観測によって、全球の水循環への理解は格段に進んできた。今後は、さらに高緯度極域までの弱い雨・雪も含めた全球の降水を高感度のセンサで観測し、雲レーダやマイクロ波放射計などの他衛星センサとのシナジーによって、全球水循環の収支を閉じさせることも、気候変動のような地球規模

の現象を解明していく上で必要不可欠であろう。

降水特性の変質の解明

また、「水循環の変化」(図 2.4-1 青枠)を考える上では、「降水特性の変質」、すなわち、雨雪の量の変化だけでなく雨雪の降り方の変化をとらえることが鍵となり、降水特性の変質によってもたらされる極端降水のメカニズム解明が防災上も重要となる。TRMM や GPM の衛星降水レーダによる三次元降水情報から、層状性・対流性の違いや、降水高度、雨滴粒径などの情報を活用することで、「冷たい雨」「暖かい雨」それぞれのプロセスの重要性や、降水に関わる素過程の解明が進んできた。数値モデルとの連携の観点からは、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ができる。さらに、衛星データを同化した高次プロダクトの開発も実現されており、衛星観測を活かして衛星では直接観測できない物理量のプロダクトの提供も可能となっている。今後は、エアロゾルと雲と降水、衛星とモデル、などの間のボーダーを取り払い、降水システムを統合的にとらえたプロセスの解明に対する多角的なアプローチが必要となる。今後の衛星観測を計画する上でも、このようなパラダイムシフトに対応し、エアロゾル・雲・降水の同時観測や鉛直流を含む力学の把握などに挑戦することが大きな目標となる。

社会インフラとしての衛星降水データの高度化

さらに、「水循環の変化」(図 2.4-1 青枠)における「降水特性の変質」の結果として、干ばつや洪水などの極端降水現象が発生する。これは社会へのインパクトも大きく、極端降水を監視して対応していくことが求められ、海陸問わず広範囲の降水システムを俯瞰できる衛星観測の利点は大きい。GSMaP は、国内のみならず海外の現業機関も含めてユーザが多く、気象・水文・防災・農業などを中心に、公衆衛生・教育・様々な利用用途のための利用されており、社会インフラとして定着しつつある。降水レーダ観測がより高頻度で行われるようになれば、GSMaP の精度の向上だけでなく、解像度の向上や極域への領域拡張、レーダを活かした新しいアルゴリズムの開発などが期待できる。科学的だけでなく、社会的にも衛星による降水観測は大きな意義があることから、衛星降水レーダによる観測を今後も継続し、今より高頻度での観測の実現が強く望まれる。

気候変動において、放射バランスと連動している水循環のもつ役割は非常に重要である。TRMM で熱帯の降雨を、GPM で熱帯から中緯度までの雨雪を観測し、水循環の変化の把握は着実に進んできている。長期の高精度なデータによって降水プロセスの理解も深まり、科学的に様々な成果が生まれてきた。GSMaP の開発・高度化により、実利用面においても、衛星降水観測の担う役割は大きい。今後は、水循環に閉じた世界でなく、放射も含めた大きな視野をもち、エアロゾル・雲や雲内の力学過程も含めた統合的な雲降水システムを解明していくことが必要であり、将来の降水観測ミッションとして、高頻度・高感度・高機能化された降水レーダ観測の検討を進めることが急務である。

3. 将来の降水観測ミッションの検討

前章では、科学的・社会的に重視すべき課題について、様々な観点からの議論がまとめられた。理想的にはこれらすべてを実現する将来センサの開発が求められるが、DPR 開発時からの技術の進展を考慮してもすべての要求仕様を一度に実現することは現実的とは言えず、優先順位をつけて検討する必要がある。

そこで本章では、1 章で言及した NASA ACCP ミッションとの連携で優先的に検討している降水レーダのセンサ仕様を 3.1 項に、その他の挑戦的な将来ミッションを 3.2 項にまとめた。

3.1 Ku 帯ドップラ降水レーダ

PMM 分科会後継ミッション検討グループの傘下に工学と科学の双方に見識の高い降水レーダの専門家による仕様検討チームを設置し、2020 年度～2021 年度にかけて集中的に降水レーダの仕様に関する検討を実施してきた（詳細は付録 3 参照）。

NASA ACCP ミッションとの協力で実現を目指す次期の降水レーダは、Ku 帯降水レーダにドップラ機能を付加して感度を向上させる。表 3.1-1 に仕様案を示す。

表 3.1-1 Ku 帯ドップラ降水レーダの仕様案

			ドップラ観測あり		
			低中緯度 & 極域		
アンテナ開口径	Along-Track	m	2.1		
	Cross-Track	m	2.1		
ドップラ観測		-	有	無	無
ドップラ測定精度 *4		m/s	0.40 @S/N=10dB (Z=19.26dBZ) 0.24 @S/N=20dB (Z=29.26dBZ)		
空間分解能 @Nadir @407km	Along-Track	km	5.0	5.0	5.0
	Cross-Track	km	5.0	1.0	5.0
空間サンプル間隔 @407km	Along-Track	km	1.00	1.00	5.0
	Cross-Track	km	直下のみ	1.00	5.0
距離分解能		m	500	500	250
レンジサンプル間隔		m	250	250	125
走査角 (土の両側に走査)		deg	直下のみ	0~0.284	0~17.04
走査間隔	Cross-Track	deg	直下のみ	0.1420	0.71
観測幅 @407km、ビーム端間		km	直下のみ	9	255
観測高度		km	15	18	18
ミラーイメージ		km	5.0	5.0	5.0 *7
キャッチングインデジャー		-	16	13	13
送信パルス幅		μs	3.2	3.2	1.6
二周波アジリティ		-	無	有	有
PRF @407km		Hz	5,787 *6	4,694~4,696	4,500~4,701
ドップラ観測サンプル数		-	214		
独立サンプル数 @407km @最大走査角		-	107	54 *1	54 *1
雑音サンプル数 @407km @最大走査角		-	5,974 *5	944 *1*2	1004 *1*2
Zmin @407km	Nadir	dBZ	9.26	9.26	15.28
	最大走査	dBZ			15.89
	(@KuPR PQR,常温)	dBZ	(19.38)		
Zs	Nadir	dBZ	3.80	5.61	11.63
	最大走査	dBZ			12.23
Rmin	Nadir	mm/h	0.06	0.08	0.19
	最大走査	mm/h			0.21
ピーク送信電力		W	2,907 (TRM 50Wmax)		
平均Duty比		%	2.0		
消費電力		W	610		
	(@KuPR ICD)	W	(446)		
質量		kg	444 *3		
	(@KuPR ICD)	kg	(472)		
データ量		kbps	4,538		
	(@KuPR ICD)	kbps	(114)		

*1 2周波アジリティを考慮

*2 雑音は125m間隔相当でサンプルし、2PRI分を取得するとした場合。

*3 非展開アンテナ(128素子、軽量化考慮)の場合、ノミナル値

*4 ドップラ測定精度 = $[\lambda^2 / (32 \pi^2 N_s \rho^2 T_s^2) \cdot \{(1+N/S)^2 - \rho^2\}]^{1/2}$
 $\rho = \exp[-8(\pi \sigma_v T_s / \lambda)^2]$ $\sigma_v = 3.1\text{m/s}$ (降水粒子のスペクトラムの広がりが3m/s + その他誤差)
 ここで、 λ :波長 N_s :サンプル数 T_s :サンプリング周期 N/S :S/Nの逆数

*5 最初のパルス送信からエコー受信までの間は雑音を取得し、125m間隔相当でサンプル。
 地上処理で観測データから降雨がないデータを抽出し、雑音サンプルとして加算する(1サンプル/PRI)。

*6 DPCA条件による

*7 ミラーイメージは直下のみ取得

表 3.1-1 では TRMM や GPM との継続性も考慮して観測幅は維持しつつ、感度を大幅に向上し、直下にドップラ観測機能を付加した仕様案となっている。主要な仕様について、その数値に至った議論の概要を以下に示す。

<ドップラ観測機能>

雨雲を含む全球の水循環に関する物理量を精緻化するためには、固相（雪）と液相（雨）の識別の正確さが求められる。両者では落下速度の違いが大きな特徴として挙げることができ、それが可能なドップラ観測精度が要求される。降水粒子の落下速度は形状や粒子サイズなどによるが、固層（雪）場合はおよそ $0.1\sim 2\text{ m/s}$ 程度であることに對し、液相（雨）の場合は $4\sim 6\text{ m/s}$ 程度である。従って、衛星直下のドップラ観測精度は 16 dBZ 以上の反射率を持つ一様な降水の場合の計測精度を 2 m/s 程度以下とすることが求められる。

これらの要求から、Ku 帯ドップラ降水レーダでは DPCA (Displaced Phase Center Antenna) 方式を採用している。本方式は、水平方向の衛星速度が混入してドップラ測定精度が劣化するという 1 アンテナによるドップラ計測手法の欠点を、衛星進行方向に並べた 2 アンテナを切り換えて受信することで衛星の動きを見かけ上打ち消す観測手法である。DPCA はアンテナ配置や PRF 等に制約は生じるがドップラ観測精度が改善する。表 3.1-1 で示すドップラ測定精度の値はビーム内のドップラ速度広がりによる誤差のみを見積もったもので、1 アンテナ方式に比べ $0.2\sim 0.5\text{ m/s}$ 程度速度精度が改善し $S/N=10\text{ dB}$ で 0.4 m/s 程度となる。ただし、最終的なドップラ観測精度は、この値に衛星姿勢の変動（傾きや鉛直方向の変動）等による誤差の混入を加味したものとなることに注意が必要である。

さらに、将来の降水レーダで鉛直のみならず水平の速度も観測できるかどうかを確認する目的で、試験的にオフナディア方向のドップラ観測モードも準備することが望まれている。

<観測高度>

最大観測高度の決定に際しては、降水頂高度の統計から妥当な数値を設定する必要がある。GPM/Ku-PR と Cloudsat/CPR のマッチアップデータを用いた統計では、赤道付近において降水頂高度が 18 km 程度となる頻度も無視できないことから、通常観測における最大観測高度は 18 km 以上と設定した。

ドップラ観測においては、最大観測高度を高く（低く）すると、ドップラ観測の精度が低く（高く）なるというトレードオフ関係がある（最小降水感度 (Z_s) の影響は比較的小さい）ため、両者の妥協点を模索する必要がある。GPM/KuPR の観測データから、降水エコー 15 dBZ 相当のパーセンタイル高度を算出した結果、降水頂高度が最も高い赤道付近においても、最大観測高度 15 km 以上であれば 99% 程度の降水を捉えられることが分かっている。表 3.1-1 では、最大観測高度 15 km でも上述したドップラ観測精度要求の 2 m/s 程度以下を実現できる可能性が高いことを示している。

また、観測高度の検討にあたっては、ミラーイメージ（鏡像エコー）の利用も検討に取り入れた。ミラーイメージは、一度地表面で反射されたマイクロ波が降水にあたり、再度地表面で反射されて受信されるものであり、マイクロ波の良い反射体である海面の上で見られる。直接受信される降水エコーとこのミラーイメージエコーの差は、主に地表面反射率と雨の減衰によるものであり、レーダ反射因子推定の推定精度向上に寄与できる可能性がある（Li and Nakamura 2002）。しかし、PR、DPR ではミラーエコー強度が弱く推定精度向上には寄与できていない。Ku 帯ドップラ降水レーダでは大幅に感度が向上するため、ミラーイメージは PR や DPR に比べより明瞭に観測されると予想され、直接エコーとミラーエコーとの比較からレーダ反射因子推定の精度向上が期待される。さらに直接エコーとミラーエコーのドップラ速度は、雨滴の落下速度が直接エコーとミラーエコーとでは逆となる一方、レーダビームの鉛直方向からのずれなどによるドップラ速度は直接エコー、ミラーエコーに同じように現れる。この現象はドップラ速度の検定に使える可能性がある。表 3.1-1 に示す仕様では、通常観測で直下のみ、高密度観測では全指向方向で 5km のミラーイメージ観測を想定しているが、今後ミラーイメージ観測についての詳細な検討が必要となる。

参考文献

Li, J., and K. Nakamura, 2002: Characteristics of the mirror image of precipitation observed by the TRMM precipitation radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19, 145–158.

3.2 その他の挑戦的な将来ミッション

3.1 で検討した Ku 帯ドップラ降水レーダに加え、本節ではさらに将来を見据えた挑戦的なミッションについての検討状況をまとめる。

3.2.1 偏波観測機能の追加

地上気象レーダでは、ドップラ観測機能や偏波観測機能を持つものが主流となっているが、衛星搭載降水レーダでは、これらの機能を持つものは運用されていない。これらの観測から得られる情報は衛星からの観測においても有用であると考えられる。本章では、高度化した DPR をベースに、アンテナサイズを DPR の 2 倍（アロングトラック方向）にし、KuPR にドップラ観測に加え、偏波観測機能（2 偏波観測）も追加するケースについて検討した。2 偏波観測は、送信パルス毎に H/V の切替を行い、送受の組合せは H/H、V/V のみとする。ただし、偏波観測のためには、H 偏波、V 偏波それぞれの導波管スロットアンテナの新規作製のための、大幅な設計変更が必要。表 3.2.1 に検討した仕様案を示す。

表 3.2.1-1 ドップラ・偏波観測機能追加

			DPR (仕様)	高度化した DPR	ドップラ・偏波追加
アンテナサイズ Along×Cross (m)	Ku		2.1×2.1	2.1×2.1	4.2×2.1
	Ka		0.8×0.8	0.8×0.8	1.6×0.8
観測幅 (km)	Ku		250	250	160 *1 250 *2 直下のみ *5
	Ka		125 (MS) 250 (HS)	250	160 *1 250 *2
最大観測高度 (km)	Ku		19	19	18 *1, *2 15 *5
	Ka		19	19	走査角 <8.52° : 11 ≥8.52° : 10
感度 (dBZ)	Ku	Zmin	23.15	17.9	14.3 *1 16.9 *2 11.2 *5
		Zs	18.19	12.6	11.2 *1 16.7 *2 6.0 *5
	Ka	Zmin	16.58 (HS) 23.15 (MS)	16.4	7.4 *1 13.4 *2
		Zs	11.8 (HS) 18.19 (MS)	11.6	3.3 *1 11.2 *2
独立 サンプル数 ／雑音 サンプル数	Ku		96/800	110/632	45/367 *1 18/ 75 *2 512/120 *5
	Ka		96/400 (HS) 96/800 (MS)	110/312	72/356 *1 36/160 *2
距離 分解能 (m)	Ku		250	250	250*1, *2 500 *5
	Ka		500 (HS), 250 (MS)	500	500
水平分解能 Along×Cross (km)	Ku		5×5 @Nadir 5×5.2 @最大走査	5×5 @Nadir 5×5.2 @最大走査	2.5×5 @Nadir 2.5×5.2 @最大走査
	Ka		5×5 @Nadir 5×5.2 @最大走査	5×5 @Nadir 5×5.2 @最大走査	2.5×5 @Nadir 2.5×5.2 @最大走査
ビーム数	Ku		49	49	49
	Ka		49	49	49
ピーク送信 電力 (W)	Ku		1012	1930	1930
	Ka		146.5	172.5	172.5
消費電力 (W)	Ku		446	401	700
	Ka		344	422	683
ハルス幅/ チャープ帯域幅 (μs/MHz)	Ku		1.6/-	1.6/-	16/6.7 *1 1.6/-*2 3.2/-*5
	Ka		3.2/-	3.2/-	50/2.4 *1 3.2/-*2
PRF @407km (Hz)	Ku		4,000 ～4,500	4,142 ～4,383	2,077～2,183 *1, *2 6,952 *5
	Ka		4,000～4,500	4,138～4,378	4,151～4,311
ドップラ観測 精度 (m/s)	Ku		—	—	1.3 @S/N=10dB
偏波観測	Ku		—	—	HH, VV
質量 (kg)	Ku		472	472	594
	Ka		336	336	375
サイエンスデー タレート (bps)	Ku		117,029	118,717	2,239,312
	Ka		81,920	59,500	71,558
HK データレート (bps)	Ku		1,024	1,024	1,024
	Ka		1,024	1,024	1,024

*1 パルス圧縮あり、*2 パルス圧縮なし、*5 ドップラ観測&パルス圧縮なし

3.2.2 小型降水レーダコンステレーション

(1) ミッション要求

衛星技術を活用してアジアの水問題に対応するため、小型化した DPR の KuPR を小型衛星バスに搭載した、低コストな小型降水レーダをアジアの開発途上国に導入し、複数の小型降水レーダ衛星コンステレーションについて検討した。

アジアの開発途上国の宇宙機関、気象機関、水資源管理機関や、日本の衛星降水観測に関する科学コミュニティの有識者の意見に基づき、小型降水レーダコンステレーションのユーザニーズ、プログラムニーズを識別し、以下のミッション目的、及び、ミッション要求案（表 3.2.2-1）を作成した。また、観測領域及び重点観測領域と観測カバレッジを図 3.2.2-1 に示す。

<ミッション目的>

高頻度 3 次元降水強度マップの取得とその直接利用による GSMaP の精度向上

表 3.2.2-1 ミッション要求案

項目	ミッション要求	備考
衛星機数	4 機	
衛星バス	NEXTAR300L を想定	
衛星打上げ国	東南アジア 4 か国	想定
軌道	太陽非同期軌道	
観測方式	Ku 帯降水レーダ	PR, DPR(KuPR)と同じ
観測領域	N/S30, E60-180	アジア太平洋地域
重点観測領域	N/S30, E90-150	打上げ国周辺地域
観測頻度	最大観測間隔 8 時間以内	重点観測領域
観測期間	5 年以上	
観測幅	800 km 以上	
最小観測可能降雨強度	1 mm/h 程度	
最高観測高度	15 km 以上	
最低降雨観測高度	地表より 4 km 以下	走査端
水平分解能	10×10 km 程度	
鉛直分解能	250 m 以内	
配信時間	観測から 30 分以内	重点観測領域
	観測から 3 時間以内	観測領域
打上げロケット	H3（デュアル）、PSLV など	想定
自立性	各国から追跡管制・運用管理実施	
コスト目標	衛星システム開発費 100 億以下	1 機目（実証機）
	70 億以下	2 機目以降

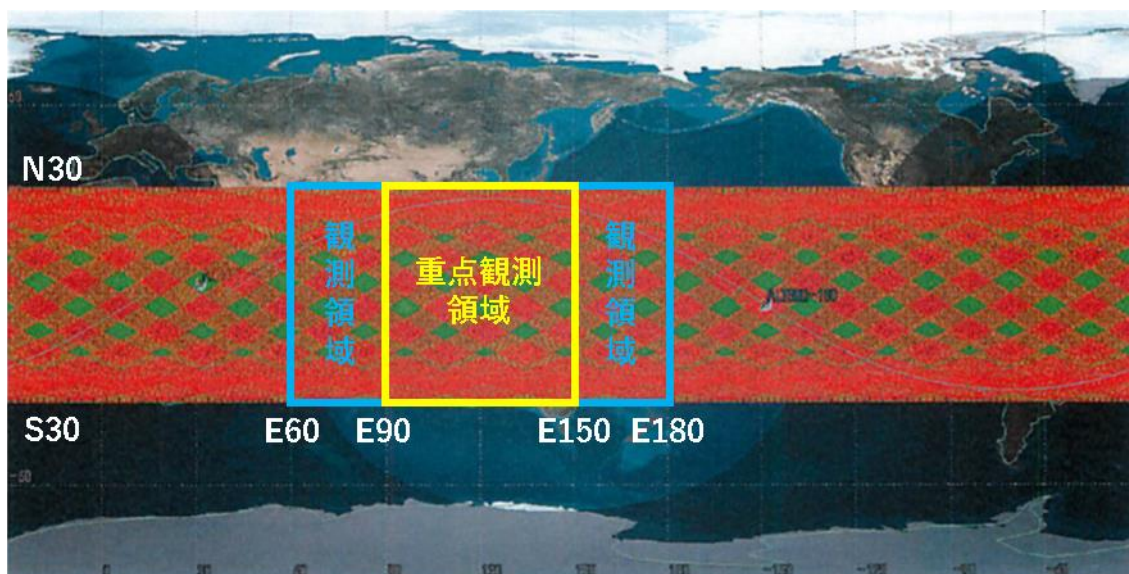


図 3.2.2-1 観測領域及び重点観測領域と観測カバレッジ

(2) 衛星仕様

ミッション要求（案）を実現するための、衛星仕様（案）を表 3.2.2-2 に、降水レーダ仕様（案）を表 3.2.2-3 に示す。アンテナサイズは DPR の Ku と一緒に、PRF を小さくし、デューティー比を小さくして消費電力をおさえる設計としている。また、図 3.2.2-2 に、衛星外観図示す。

表 3.2.2-2 衛星仕様（案）

項目	衛星仕様（案）	備考
高度	800 km	
軌道傾斜角	30 度	太陽非同期軌道
質量	800 kg	
ミッション	384 kg	
バス	371 kg	マージン含む
推薬	45 kg（デオービット含む）	ミッション 5 年
発生電力	1200 W	EOL 最小
軌道上寸法	4.0×7.2×2.2 m	X×Y×Z
打上げ機	H3（デュアル）, PSLV	
最小機数	2 機×2 軌道面	同一軌道面内位相間隔 180° 昇交点赤経間隔 120°
平均観測間隔	6 時間以下	
最大観測間隔	8 時間	
観測デューティー	36%	60° E～180° E

表 3.2.2-3 降水レーダ仕様（案）

項目		降水レーダ仕様（案）	備考
高度		800 km	
SSPA 最大出力		11.4 W	
アンテナ素子数		128	
ピーク送信電力		1459.2 W	
アンテナ開口		2106 mm	
アンテナビーム幅		0.6° (CT)×0.7° (AT)	
PRF		970 Hz	
データレート		76.9 kbps	
外形寸法		2.5×2.5×0.64 m	X×Y×Z
分解能 (CT×AT)	直下	8.4×9.9 km	
	走査端	10.9×9.9 km	
最小観測降雨強度		0.98 mm/h	
走査幅/走査角		800 km / 26.2°	
走査周期		1495 ms	
アングルビン数		89	
レンジサンプル間隔		125 m	
最高観測高度		19 km	
最低観測高度		3.5 km	走査端

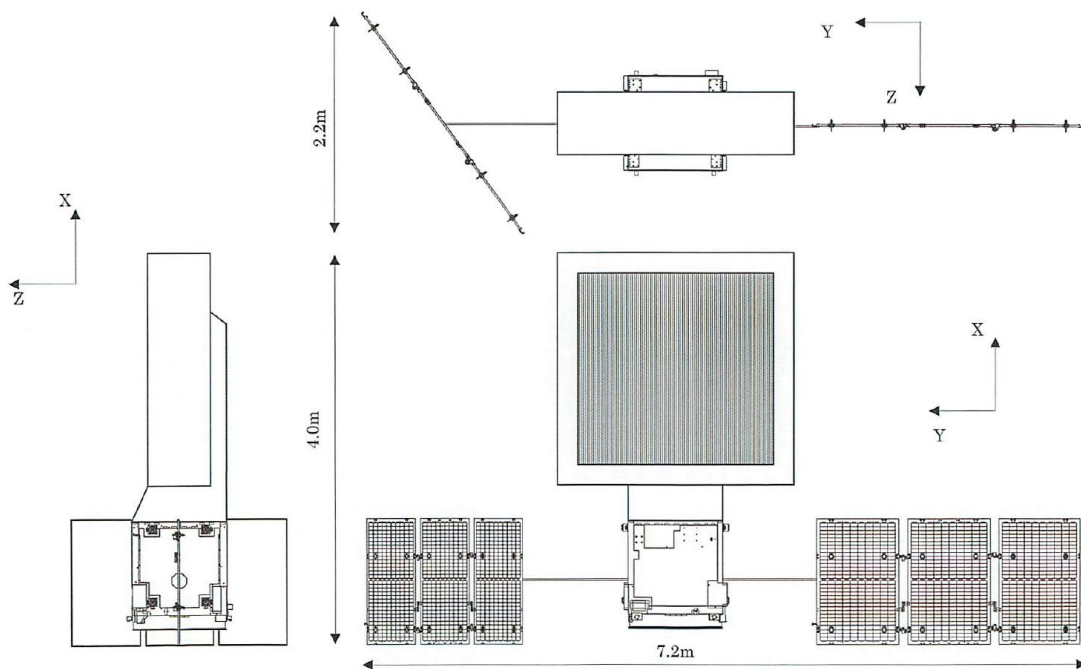


図 3.2.2-2 衛星外観図

3.2.3 静止降水観測レーダ（上土井大助）

本項では、近未来のターゲットとしている、静止衛星搭載降水レーダ（以下「静止降水レーダ」という）ミッションの検討状況を示す。

(1) ミッション概要

本ミッションは、GPM/DPR の技術を継承・発展させ、静止軌道からレーダによる降水観測を行うものである。静止降水レーダのイメージを図 3.2.3-1 に示す。

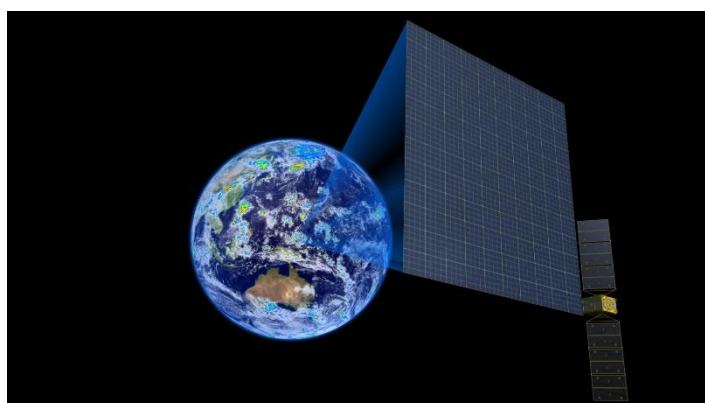


図 3.2.3-1 静止降水レーダのイメージ

ユーザへのアンケート結果や技術的実現性を考慮して設定している、ミッション要求（案）を表 3.2.3-1 に示す。なお、このミッション要求は、あくまで現状案であり、今後の検討結果をフィードバックして適宜更新する予定である。

表 3.2.3-1 静止降水レーダのミッション要求（案）

項目	要求
観測周波数	13.6GHz
水平分解能	20km 以下
鉛直分解能	500m 以下
感度	20dBZ 以下
観測範囲	赤道上の東経 135 度を中心とした半径 50 度の円内（図 3.2.2-2 参照）
観測時間	全域→降雨域→台風の観測を 1 時間以内
プロダクト	KuPR と同様
オプション	マイクロ波放射計同時搭載、又は、マイクロ波放射計観測モード追加

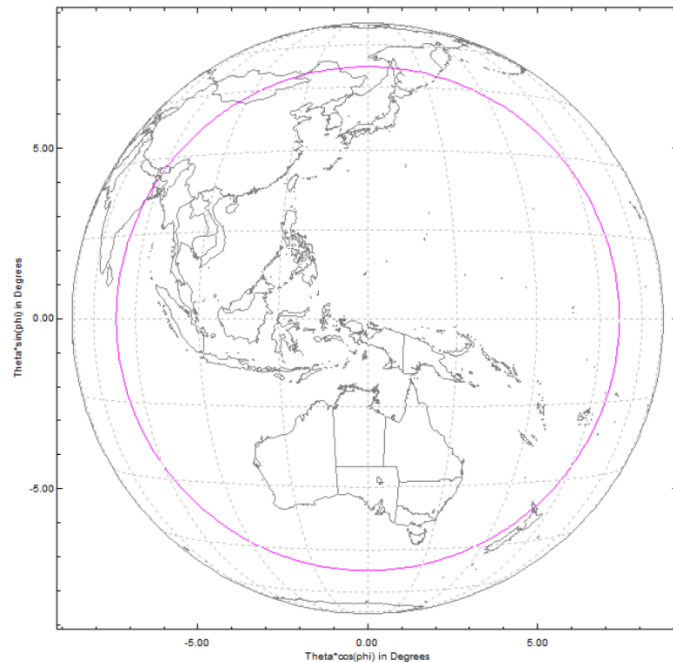


図 3.2.3-2 静止降水レーダの観測範囲

本ミッションの意義・価値については以下のように考えている。

①科学的観点

観測頻度向上により、降水をライフサイクル（生成期・発達期など）の文脈でとらえることができ、熱帯気象学への貢献、雲降水システムの構造・変動状況の理解、様々な気候のところでの降水の始まり、降水の形成によるシステムの発達などが観測できる。これにより局地的な降水システムの構造が把握でき、各地域における降水の日周期の整理、人口が少ない陸上・海上地域などの正確な降水量（気候・極値）の把握、対流と結合した赤道波の理解、数値予報モデルとの比較検証、及び、データ同化による数値予報精度向上が期待できる。

②社会的観点

観測頻度が高いため数値天気予報に直接同化できるだけでなく、現業の予報作業・台風解析での利用、豪雨などのイベントへの適応、発展途上国などの地上レーダの代用としての防災利用、降水生成期の段階で発達期を予期し警戒を出すといった早期予報技術の開発、応用分野としては、農業分野における水資源管理や水利施設管理などでの利用が期待される。

(2) システム概要

現状のミッション要求（案）に基づき、静止降水レーダのシステム概念検討を行った。その結果として、アンテナ部の構成（案）を図 3.2.3-3 に示す。アンテナ部は 10×10 枚

のアンテナパネルから構成され、アンテナパネルは 10×10 枚のサブアレイから構成される。静止降水レーダは、非常に大規模なフェーズドアレイアンテナであり、精密なビーム指向方向制御やアンテナ全体の変形の補償などのため、精密な振幅／位相制御が必要となる。このような精密な制御を行うためには、従来のアナログ減衰器／移相器を用いた制御よりも、**Digital Beam Forming (DBF)** 方式によるデジタル制御が適していると考えられる。これを踏まえた、システムブロック図（案）を図 3.2.3-4 に示す。

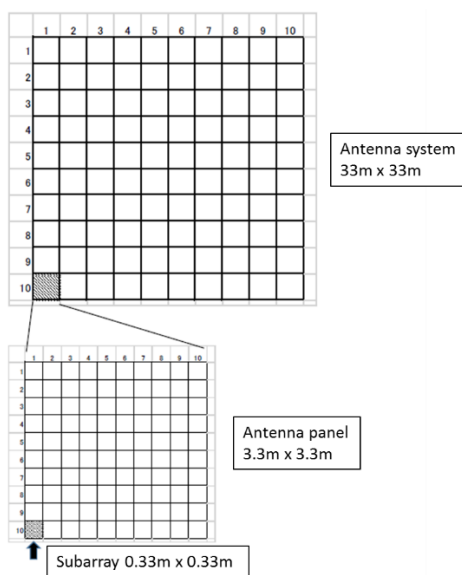


図 3.2.3-3 静止降水レーダアンテナ部の構成（案）

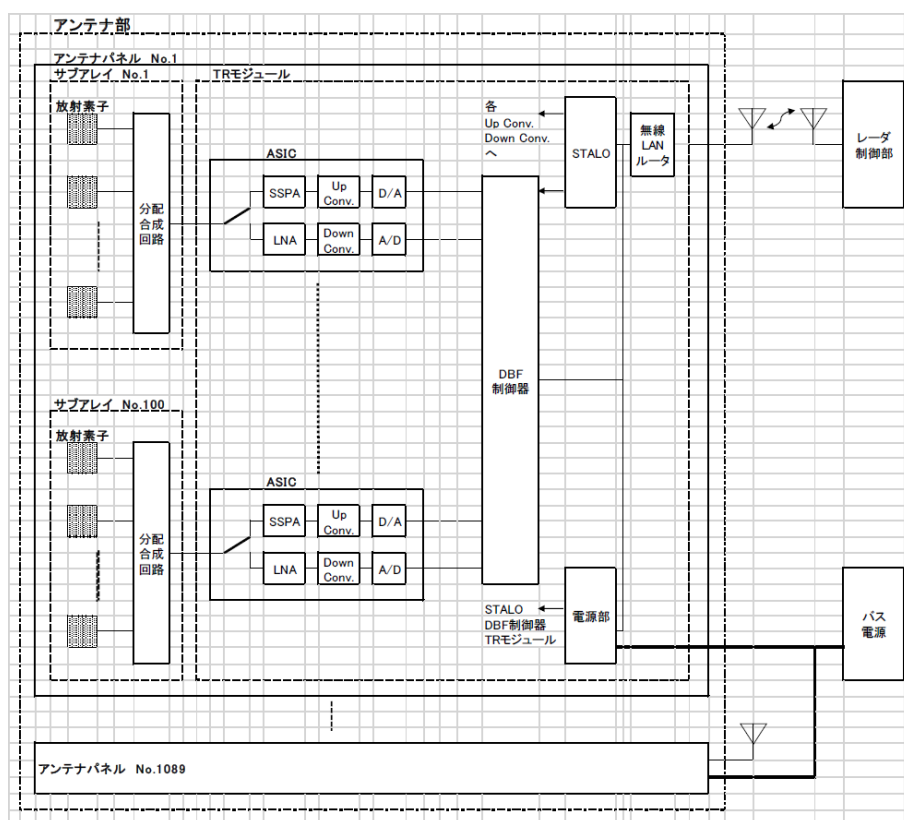


図 3.2.3-4 静止降水レーダのシステムブロック図（案）

(3) 検討状況

静止降水レーダのミッション検討およびシステム検討は継続して実施しているところであるが、それらの検討により抽出された課題への対応も並行して実施している。ここでは、クリティカルな3つの課題とそれらへの対応状況を以下に示す。

①30m 級大型平面アンテナの構築

静止降水レーダのシステム概念検討の結果、30m 級の大型平面アンテナが必要となっている。しかし、このような規模の平面アンテナは、従来の一次元展開機構を用いた方法では構築できない。そのため、新たな構築方法を確立する必要がある。これまでに、30m 級大型平面アンテナの構築を可能にする展開・結合機構を考案し、地上実験により同機構の概念実証を完了している。

②メインローブクラッタの除去

静止軌道から中緯度域以上を観測する場合、斜めからの観測（緯度 30 度では、入射角 35 度）となり、メインローブクラッタの影響により、低い高度の観測ができなくなるため、その対策が求められている。これまでに、ドップラ速度情報を活用した地表面エコーと降水エコーの分離方法を考案し、地上のレーダを用いた実験により、その原理が実現可能であることを確認している。

③観測データの同化

静止降水レーダによる観測データを数値天気予報に同化することを想定しているため、その有効性を評価する必要がある。これまでに、日本の気象防災で重要となる台風を主なターゲットとして、密な観測データが仮に得られた場合に、台風の発生、進路、強度の予測を改善するためのデータ同化手法を検討し、観測シミュレーションにより、その効果を確認している。

(4) HTV-X を用いた軌道上実験の検討

静止降水レーダの実現に向けて、HTV-X を用いた軌道上実験を検討してきた。本実験は、2022 年度打ち上げ予定の HTV-X1 号機の搭載機器・技術実証ミッションに採択されており、30m 級大型平面アンテナに適用する展開・結合機構の軌道上実証を目的とする。



図 3.2.3-5 HTV-X を用いた軌道上実験のイメージ

本実験では、HTV-X1 号機を軌道上プラットフォームとして活用し、展開型軽量パネルを軌道上で展開し、その際の展開挙動や展開後の構造特性を計測する。また、同パネルの一部に搭載した軽量平面アンテナで地上局からの電波を受け、受信レベルの計測を行う。さらに展開型軽量パネルを軌道上プラットフォームとして利用し、次世代宇宙用太陽電池セルの検証を実施する。

本実験の意義・価値については、以下のとおりである。

- ・本実験は、静止降水レーダに必要な 30m 級大型平面アンテナの実現に貢献する。
- ・本実験は、衛星搭載用平面アンテナ構造の大型化を可能にするものであるため、地球観測のみならず、通信、電波天文、災害監視・安全保障等の様々な分野の衛星搭載用アンテナ/レーダの性能を格段に向上させることに貢献する。
- ・本実験で検証する機構を発展させれば、宇宙太陽光発電システムのような超大型宇宙構造物を実現できる可能性がある。

4. まとめ - ミッション実現に向けて - (山本晃輔、高橋暢宏)

本報告書では、GPM 主衛星打ち上げから約 7 年が経った今日における降水観測に関連する科学の進展とその社会実装状況の現状をまとめるとともに、これからの課題とそれを解決に導く DPR 後継センサ (Ku 帯ドップラ降水レーダ) の具体的な仕様を検討した。

後継分科会委員からのアンケート結果のまとめとなる第 2 章の「降水観測に関する重要課題」からは、主として「感度の向上」「観測頻度の向上」「水平分解能向上」「ドップラ機能追加」などが DPR 後継センサに期待する各専門分野からの共通する要望として読み取れ、GPM では実現できなかった弱い降水 (弱い降雪など) の観測などの地球全体の水循環の把握や長期継続的なデータ取得による気候変動の検出に必要な情報の取得、GSMaP からの降水情報の信頼性の向上に資する観測が求められている。一方で、雲レーダ、ライダーなどとのシナジー的な観測が科学研究のブレイクスルーとなることも指摘されている。

これらすべての要求 (「感度の向上」「観測頻度の向上」「水平分解能向上」「ドップラ機能追加」) を実現するレーダの開発が理想的ではあるが、GPM 開発時からの技術の進展を考慮しても、供給可能な電力や搭載可能なセンサ口径などの制約条件から、一度に実現することは現実的とはいえず、優先順位をつけて検討する必要がある。報告書第二版では、これらの主要要求仕様のうち、それぞれに重心を置いて検討した結果を示した。これにより、一つの要求仕様実現にリソースを集中した場合に達成可能なセンサスペックの概要が明らかとなってきた。これを元に、ユーザ要求を踏まえて適切なリソース配分を検討し、第三版 (本報告書) の第 3 章に NASA ACCP ミッションとの連携で優先的に検討している降水レーダのセンサ仕様についてまとめた。TRMM や GPM との継続性も考慮して観測幅は維持しつつ、感度は大幅に向上し、直下付近では高密度観測並びにドップラ観測を行う仕様となっている。

PR・DPR で培ってきたアクティブフェーズドアレイレーダ技術、さらに EarthCARE/CPR で培ったドップラ速度計測技術は、世界の地球観測における日本の明確な強みである。それらの後継となる Ku 帯ドップラ降水レーダが上記の要求仕様を満たすことで、国内外問わず他分野からのニーズが高い全球降水マップの精緻化や、世界初の降雨のドップラ観測による気象・気候モデル改善などが期待できるため、Ku 帯ドップラ降水レーダは単一センサとしても非常に意義がある。また冒頭にも述べた通り、これまでの降水観測レーダは TRMM、GPM と続く日米共同ミッションに搭載されており、Ku 帯ドップラ降水レーダについても米国の ACCP ミッション参加を見据えて国際検討チームに参加し、議論が続けられてきた。ACCP ミッションへの参加により、米国側 W バンドレーダとあわせた 3 周波観測、もしくは同じく米国 Ku 帯レーダとの時間差観測のいずれかが実現する見込みであり、前者を取ればより弱い降水を含む全球降水量の定量化が、後者を取れば対流の時間発展の理解がさらに進むことが期待される。さらにエアロゾル観測が加わることで、エアロゾルによる雲微物理特性の変調や降水機構への影響までを統合的に理解することが可能になる。

本報告書でまとめた内容は、国際的な調整・議論を進める上でも基礎資料となるものであり、これをたたき台として、今後より具体的なミッション像の検討を加速させていくことが

重要である。

付録 1：最小測定降雨強度（感度）の算出の際に用いた DPR 仕様の定義

最小測定降雨強度の定義(計算方法)を以下に表す。

- (1) 降雨減衰の影響を除くため、降雨頂で最小測定降雨強度を定義する。ただし、降雨頂高度は地表面高度(地球楕円体の表面)と等しいとし、衛星高度は、407kmとする。
- (2) 降雨の有無を判別するための「しきい値」を降雨なしの場合のレーダ反射因子(Z)[信号電力]の分布関数の上側の標準偏差の2倍の点(2σ)に設定する。この、「しきい値」に対応する信号電力[レーダ反射因子(Z)]が、降雨がある場合の最小レーダ反射因子となるので、その値から最小測定降雨強度を求める。
- (3) 一般的に使われていて、弱い雨に有効と考えられている Z-R関係式 ($Z=200R^{1.6}$) を用いて、レーダ反射因子(Z)から降雨強度(R)に変換する。

上記(2)、(3)を、例えば、独立サンプル数(N)を96(48×2周波)、ノイズサンプル数(M)を400(50×4パルス×2周波)、とした時の最小受信強度(詳細設計検討結果である16.53 dBZ)を用いて、具体化した計算は以下のようになる。

信号電力 = 全受信電力 - 雑音電力

全受信電力の標準偏差: $\sigma_t = 5.57/\text{SQRT}(N) = 0.57 \text{ dB} \quad (N=96)$

雑音電力の標準偏差: $\sigma_n = 5.57/\text{SQRT}(M) = 0.28 \text{ dB} \quad (M=400)$

$T_e=328 \text{ K}(55^\circ\text{C})$ 、 $T_a=290 \text{ K}(17^\circ\text{C})$ 、 $\text{Efficiency}=0.95$ で計算したKaPRの雑音電力をZ因子換算で16.53 dBZであるとする、降雨判定条件(2σ をしきい値)を考えると、全受信電力の期待値は

$$16.53 + 2 \times \text{SQRT}(\sigma_t^2 + \sigma_n^2) = 17.8 \text{ dBZ}$$

と考えられる。その時の信号電力は、

$$10^{1.78} - 10^{1.653} = 15.22 \text{ (真数)} \rightarrow 11.83 \text{ dBZ}$$

気象庁等で一般的に使われていて、弱い雨に有効と考えられている Z-R関係式

($Z=200R^{1.6}$)を使うと、11.83 dBZは 0.20 mm/hrに相当する。

なお、エンジニアリング的なシステム性能としては、1パルスあたりの最小受信強度(Z因子換算:Zmin)の仕様を決めることが普通であるが、上記の最小受信降雨強度の計算では信号サンプル数とノイズサンプル数も変数となるので、全体システムの性能として考える必要がある。従って、独立信号サンプル数を決める可変 PRF テーブル、一部の送信パルスをオフして得るノイズサンプル数を最適化し、最小測定降雨強度(Z因子換算:Zs)を決める。

付録 2 : 執筆協力者名簿

氏名 (敬称略、五十音順)	所属
青梨 和正	気象庁 気象研究所
幾田 泰醇	気象庁 予報部 数値予報課
伊藤 弘之	国立研究開発法人 土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター
大野 裕一	国立研究開発法人 情報通信研究機構
岡本 幸三	気象庁 気象研究所
金丸 佳矢	国立研究開発法人 情報通信研究機構
神岡 誠司	一般社団法人 国際建設技術協会
古津 年章	国立大学法人 島根大学大学院 総合理工学研究科
佐藤 正樹	国立大学法人 東京大学 大気海洋研究所
鈴木 健太郎	国立大学法人 東京大学 大気海洋研究所
重 尚一	国立大学法人 京都大学大学院 理学研究科 地球惑星科学専攻
高橋 暢宏	国立大学法人 名古屋大学 宇宙地球環境研究所
高藪 縁	国立大学法人 東京大学 大気海洋研究所
中北 英一	国立大学法人 京都大学 防災研究所
中村 健治	獨協大学 経済学部 国際環境経済学科
樋口 篤志	国立大学法人 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター
広瀬 正史	名城大学 理工学部 環境創造学科
増永 浩彦	国立大学法人 名古屋大学 宇宙地球環境研究所
三好 建正	国立研究開発法人 理化学研究所 計算科学研究センター
安永 数明	国立大学法人 富山大学 都市デザイン学部地球システム科学科
芳村 圭	国立大学法人 東京大学 生産技術研究所

付録 3：仕様検討チームの活動

2020 年 4 月に JAXA 内で「ミッション定義フェーズ」にフェーズアップしたことに伴い、工学と科学の双方に見識の高い降水レーダの専門家を招集して仕様検討チームを結成し、集中的に議論することで、Ku 帯ドップラ降水レーダの仕様検討を加速させてきた。仕様検討チームでの検討結果は、PMM 利用検討委員会やその他の委員会において報告されている。

仕様検討チームの構成員は下記のとおり。

氏名 (敬称略、順不同)	所属	備考
高橋 暢宏	国立大学法人 名古屋大学 宇宙地球環境研究所	
中村 健治	獨協大学 経済学部 国際環境経済学科	
井口 俊夫	NASA Goddard Space Flight Center	
牛尾 知雄	国立大学法人 大阪大学	
妻鹿 友昭	国立大学法人 大阪大学	第4回以降参加
阿波加 純	学校法人 東海大学	第8回以降参加
花土 弘	国立研究開発法人 情報通信研究機構	
大野 裕一	国立研究開発法人 情報通信研究機構	
金丸 佳矢	国立研究開発法人 情報通信研究機構	
高薮 縁	国立大学法人 東京大学 大気海洋研究所	第9回以降参加
沖 理子	国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構	
古川 欣司	国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構	
岡田 和之	国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構	
金子 有紀	国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構	
山地 萌果	国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構	
山本 晃輔	国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構	

これまでの活動実績

- ・ 第 1 回：2020 年 5 月 1 日 9 時～10 時
- ・ 第 2 回：2020 年 5 月 15 日 9 時～10 時 30 分
 - 会議後、検討チーム員に仕様に関するアンケートを実施
- ・ 第 3 回：2020 年 5 月 29 日 9 時～10 時 30 分
- ・ 第 4 回：2020 年 6 月 4 日 9 時～10 時 30 分
- ・ 第 5 回：2020 年 6 月 19 日 9 時～10 時 30 分
- ・ 第 6 回：2020 年 6 月 25 日 13 時～15 時
 - ACCP study team に参加されている先生方に中間報告を送付し、先生方からご

意見を頂く

- ・ 第7回：2020年7月3日 9時～11時
 - ACCP study team の先生方のご意見を受けて議論。
 - 議論結果をもとに、PMM 後継検討グループに、検討した KuPR-2 仕様を中間報告し、アンケートを実施
- ・ 第8回：2020年7月17日 9時～11時
 - 実施したアンケート結果をもとに議論#1
- ・ 第9回：2020年7月31日 9時～11時
 - 高薮先生との意見交換+実施したアンケート結果をもとに議論#2
- ・ 第10回：2020年8月21日 9時～10時半
- ・ 第11回：2020年9月2日 9時～10時半
- ・ 第12回：2020年9月11日 9時～10時半
- ・ 第13回：2020年9月25日 9時～10時半
- ・ 第14回：2020年10月8日 8時半～10時
- ・ 第15回：2020年10月23日 9時～10時半
- ・ 第16回：2020年11月4日 9時～11時
- ・ 第17回：2020年11月19日 9時～11時
- ・ 第18回：2020年12月4日 9時～11時
- ・ 第19回：2020年12月19日 9時～11時
- ・ 第20回：2021年4月8日 9時～11時
- ・ 第21回：2021年4月22日 9時～11時
- ・ 第22回：2021年5月13日 9時～11時
- ・ 第23回：2021年6月11日 9時～11時
- ・ 第24回：2021年7月8日 9時半～11時