

2025 年度

「GPM および衛星シミュレータ合同研究集会」

要旨集

GPM/PMM/EarthCARE の最近の進展

久保田拓志¹

(1:宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター)

要旨

2014年2月に打ち上げられた全球降水観測計画(GPM)主衛星には、宇宙航空研究開発機構(JAXA)および情報通信研究機構(NICT)が開発したDPRが搭載されており、12年間以上の観測を継続している。JAXAと欧州宇宙機関(ESA)は、雲エアロゾル放射ミッションEarthCAREを開発し、同衛星は2024年5月に打ち上げられた。EarthCARE衛星には、JAXAおよびNICTが開発した雲プロファイリングレーダ(CPR)が搭載されている。CPRは世界初の衛星搭載W帯(94GHz)ドップラーレーダであり、雲内部構造や鉛直運動の観測を可能にする。GPM主衛星およびEarthCARE衛星はいずれも高度400~450kmの低軌道衛星であるが、GPM主衛星は非太陽同期軌道を、EarthCARE衛星は太陽同期準回帰軌道を採用している。これらの軌道特性の違いにより、両衛星の軌道が同時刻に交差する場合には、両者の観測データを組み合わせて利用することが可能となる。JAXAは、GPM主衛星とEarthCARE衛星による同時観測データを統合した雲・降水関連データセットの提供を、2025年11月より開始した。またGPMやEarthCAREで得られた成果を踏まえた将来の宇宙からの降水観測ミッションとして、JAXAは高感度Ku帯(13GHz)ドップラー降水レーダ(KuDPR)を搭載した降水観測ミッション(PMM)を開発している。Ku帯レーダは強い降水強度でも観測可能であるため、特に活発な対流域において世界で初めての情報を提供することが期待される。EarthCARE/CPRやPMM/KuDPRによる降水の鉛直運動に関する観測は、数値天気予報モデルにおける雲・降水過程の高度化に貢献することが期待できる。

線状降水帯集中観測における熊本と長崎での地上観測データを用いた

2025年8月線状降水帯事例の降水特性解析とGPM衛星プロダクト評価

辻宏樹¹, 正木岳志¹, 東上床智彦¹, 瀬戸心太², 山本晃輔³, 久保田拓志³

(1:RESTEC, 2:長崎大学, 3:JAXA/EORC)

要旨 2022年度から気象研究所を中心とする線状降水帯の機構解明・予測技術向上のための集中観測として、熊本(熊本地方気象台、2023年度以降東海大学熊本キャンパス)と長崎(長崎大学)にマイクロレインレーダ(MRR)と光学式ディストロメータ(Parsivel²)を設置し、観測を続けている。線状降水帯に関する研究は近年多くなされているが、モデルデータを用いた研究が多く、高頻度な地上観測に基づき実際に豪雨をもたらした降水システムの特徴を調べた研究は少ない。GPM主衛星による3次元の衛星観測は線状降水帯の解析に有用な情報を得られるが、線状降水帯が頻発する地域における精度検証は行われていない。本発表では熊本と長崎に設置した観測機器のデータを用いた2025年8月10日から11日の線状降水帯事例の解析結果と、GPM主衛星プロダクト評価について報告する。解析にはMRRとParsivel²の観測データに加え、GPM KuPR V07データを用いた。MRRは観測サイト直上6kmまでの大気を観測し、降水量や粒子落下速度などを得る。Parsivel²は降水量や粒径分布を観測している。どちらも時間解像度は1分である。

暖候期(5月—10月)における降水ありマッチアップデータ(GPM地表付近降水あり、Parsivel²でマッチアップ時刻から10分以内に降水あり)を用いてGPMとParsivel²の降水量を比較した。2022年から2025年の期間において熊本で10事例、長崎で9事例のマッチアップデータが得られた。降水粒子がGPMのクラッタ高度から地上までSeto et al. (2013, SOLA)を参考に 4.17 m s^{-1} で落ちたと仮定した場合に地表まで落下する時間を加味して両者の降水量を比較したところ、相関係数はそれぞれ0.63と0.57であった。これに対して、MRR観測データから得られた粒子落下速度を用いた場合、相関係数はそれぞれ0.92と0.51であった。熊本では大きく改善したものの、長崎では若干の低下となった。長崎ではMRRを使ったマッチアップのほうが大きく外れる事例が2事例あった。この2事例は前線の通過時の観測であり、降水の時間変化が大きい。現状ではマッチアップの数が少なく、このような特定事例が統計に与える影響が大きい。引き続き観測を継続し、事例を増やすことで検証の有効性を向上させたい。

2025年8月10日夜から11日にかけて、九州地方で線状降水帯が発生し、熊本と長崎の観測サイトを通過した。この期間の粒径分布をParsivel²観測データから計算したところ、熊本では時間とともに粒径中央値(D_0)と数密度(N_w)が小さくなる傾向が確認できた。長崎では熊本のような明瞭な時間変化は見られなかったものの、全体の分布は熊本と同様であった。これらの粒径分布をDolan et al. (2018, JAS)による統計調査と比較したところ、主に熱帯海洋で見られるwarm rain過程を伴う降水システムと整合的な分布であることが明らかになった。以上の結果は、熱帯海洋のような湿潤環境場で発達する降水システムが日本で豪雨をもたらすことを指摘する一連の先行研究(Tsuji et al. 2021, GRL など)をサポートしている。

チベット域における地上ドップラーレーダ観測を用いた 衛星搭載降水レーダ降水タイプ分類アルゴリズムの開発

正木 岳志^{1,2}, 重 尚一¹

(1:京都大学, 2:リモート・センシング技術センター)

要旨衛星搭載降水レーダ (TRMM PR や GPM DPR) による降水タイプ (対流性・層状性) 分類は降水量推定や潜熱加熱推定に直接影響する重要な要素である。しかし、夏季チベット高原においては対流性降水が卓越することが知られているにもかかわらず、TRMM PR の降水タイプ分類標準アルゴリズム (CSF アルゴリズム) では、対流性降水ピクセルが層状性として誤分類される事例が複数報告されている。本研究では、1998 年夏季にチベット高原で実施された X バンドドップラーレーダ観測を用いて、CSF アルゴリズムの改良を目的とした検証・開発を行った。CSF アルゴリズムは主に V 法と H 法の 2 つ手法から構成される。ブライトバンド (BB) の検出を主要な機能のひとつとする V 法においては、夏季チベット高原でドップラーレーダ観測により明瞭な BB が確認されているにもかかわらず、衛星観測では BB がほとんど検出されていないことが明らかとなった。これは、0 °C 高度が地表面付近に位置することにより、従来の BB 検出アルゴリズムが適切に機能していない可能性を示唆している。本研究では、このような条件を考慮した新たな BB 検出手法を開発し、チベット高原における BB 検出性能を改善した。一方、降水ピクセルの水平分布を評価する H 法については、対流性降水ピクセルの誤分類のほとんどが H 法に起因していることがわかった。この誤分類の原因を調べるため、ドップラーレーダ観測によるメソスケールの発散を用いて CSF アルゴリズムの検証を行った。ケーススタディの結果、典型的な孤立した深い対流に対してアルゴリズムは良好に機能する一方で、層状性降水に埋め込まれた対流は誤分類されることが明らかとなった。誤分類されたケースにおいては、ドップラーレーダ観測による発散プロファイルは明確に対流的特徴を示しているにもかかわらず、CSF アルゴリズムでは層状性として分類されていた。これは、メソスケールの発散を用いて夏季チベット高原の降水タイプ誤分類を初めて実証した研究である。さらに、この誤分類は主として CSF アルゴリズムの H 法における Peakedness 関数に起因していることが分かった。埋め込み対流および弱い対流性降水の検出を強化することを目的とした再分類を行った結果、より妥当な対流性降水の割合が得られた。

降雪粒子種別の散乱モデルを用いた GPM/DPR による降雪強度推定

辻泰成^{1,2}, 瀬戸心太³, 濱田篤¹, 久保田拓志²

(1 : 富山大学, 2 : JAXA, 3 : 長崎大学)

要旨

降雪は地球の水循環およびエネルギー収支を構成する主要な要素の一つである。特に、降雪に伴う潜熱加熱の空間分布は大気循環に影響するため、降雪の鉛直構造の把握は不可欠である。しかし、海洋上や山岳域、高緯度地域では地上観測網が十分に整備されておらず、地上観測のみで降雪の全球分布を把握することは困難である (Kidd et al. 2017)。そのため、衛星搭載降水レーダーは降雪強度の空間分布を全球規模で推定する有用な手段となる (Levizzani et al. 2011)。

13.6 GHz および 35.5 GHz の 2 周波降水レーダー (DPR) を搭載した全球降水観測 (GPM) 主衛星は、降雪強度の全球的な鉛直プロファイルの把握が期待されている (Hou et al. 2014; Skofronick-Jackson et al. 2017)。しかし、GPM/DPR が推定する降雪強度は、地上・衛星・航空機からの推定値と比較して相対的に過小となる傾向が報告されている (Casella et al. 2017; Skofronick-Jackson et al. 2019; Liao et al. 2022)。降雪強度の推定精度は粒径分布だけでなく、バルク密度や形状などの粒子特性にも強く依存するため、DPR の観測情報のみでこれらの不確実性を十分に拘束することは困難である。実際、GPM/DPR の降雪強度推定アルゴリズム

(2ADPR V07) では、バルク密度と形状を一意に仮定したうえで粒径分布パラメータを同時に推定しており、実際の粒子特性と整合するように仮定することが求められる。

近年、雪と霰を識別する手法の開発が進められており、粒子特性の拘束に有用となる可能性がある。そこで本研究では、識別結果に基づき、雪および霰の散乱テーブルを選択的に参照する手法を 2ADPR V07 に組み込み、降雪強度推定への影響を評価する。

雪および霰の散乱特性の計算には、ミー散乱理論、T-Matrix 法、DDA 法など、様々な手法が提案されている (Mishchenko and Travis 1998; Draine and Flatau 1994)。本研究では、雪および霰をそれぞれ、バルク密度 0.1 g cm^{-3} ・軸比 0.6、バルク密度 0.5 g cm^{-3} ・軸比 1.0 の回転楕円体と簡易的に仮定し、T-Matrix 法により後方散乱断面積および消散断面積を計算した。誘電率は氷と空気の混合物の有効誘電率として扱い、マクスウェル・ガーネット混合則により算出した。また、粒径分布には融解直径に対するガンマ分布を仮定した (Testud et al. 2001; Tokay et al. 2023)。ただし、雪・霰の識別手法は $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温面より上層にのみ適用可能であるため、 $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温面より下層では 2ADPR V07 の仮定に従った。

雲プロファイリングレーダー (CPR) を搭載した CloudSat 衛星と GPM/DPR が同時観測した、2014 年 11 月 24 日 18 時 (UTC) のカナダ・オンタリオ州周辺の降雪事例を対象に検証を行った。本手法による降雪強度の推定値は、2ADPR V07 の推定値と比べて相対的に大きくなった。一方、CloudSat/CPR が推定する降雪強度と比較すると、本手法の推定値は同程度の値を示した。これらの結果は、DPR による降雪強度推定が相対的に過小となる傾向があるという先行研究の報

告と整合的であり、本手法が降雪強度推定の改善に有用である可能性を示唆する。今後は、複数事例への適用による統計的検証を行うとともに、散乱特性の仮定に対する推定結果の感度を評価する予定である。

衛星降水プロダクトの DPR 固液情報と降雨頂高度を使った瞬時値比較

古澤(秋元)文江¹, 増永浩彦¹

(1:名古屋大学宇宙地球環境研究所)

要旨

様々な機関から衛星データを用いた降水プロダクトが提供されているが、プロダクト間には様々な点で違いがある。昨年度 GPM に基づいた液体降水(雨)、固体降水(雪)に着目した比較研究を対流性、層状性、その他に、分けて行った結果を報告した。今回は降雨頂高度にも着目した研究を行ったので報告する。使用した降水プロダクトは 2019 年 1 年間の GSMaP v8, IMERG V07, cmorph V1.0CDR などである。基準としたのは、GPM-DPR-DPR V07 precipRateNearSurface (RR) である。固液の相情報として、同 GPM の flagSurfaceSnowfall を使用した。また、降雨頂高度には、同 GPM の heightStormTop (SH) を、対流層状分類には、同 GPM の typePrecip を使用した。陸面・海面・沿岸の分類においては GPM の landSurfaceType は使用せず、SRTM を利用した。調査する降水プロダクトの最小時空間時間分解能の範囲に含まれる GPM DPR-DPR の対流・層状・その他の分類毎の、観測回数やその際の降雨量・降雪量・降雨頂高度などの 2 次元分布を作成し、陸・海・沿岸毎に、かつ、緯度毎に 7 つに分けた上で、最小時空間分解能で各降水プロダクトの降水量 (unconditional rain rate) と比較した。この際、他の特徴が含まれないケースだけを選び出している。

最初に、基準となる DPR-RR の SH 依存性を降水の特徴毎に調べた。その結果、海上の層状性降雨は概ね正相関を示していた。ただ、熱帯に近い程背の低い降雨は少ない。雪は相関が顕著ではなく、緯度に依らず ~ 0.7 mm/hr で ~ 2.8 km の高度にピークがある。陸上はチベットなど地形の影響があるものの層状性降雨は同様な正相関があり海上より少しだけ背が高く、降雪も高緯度で 3 km、低緯度で 7.5 km と背がより高い所にピークがある。一方、対流性降雨では、昨年報告した降雨強度が 2 つのグループに分かれる様子が、RR と SH の関係にも見られた。大きな RR は大きな SH を持ち、逆に小さな RR は小さな SH を持っていて、その間(海： ~ 1.1 mm/hr, ~ 3 km/陸： ~ 1.2 mm/hr, ~ 4.5 km)にはデータが少ない事が分かった。これは層状/対流, 降雨/降雪の分類による人工的な可能性が考えられる。低い集団の数の方がずっと多いが、広いレンジで相関は正になっていて、傾きは低緯度程早く SH が高くなる。また対流性降雨は ~ 4 mm/hr にデータが集まるという特徴もある(陸で顕著で高度は様々、強雨の閾値によるものと思われる)。降雪は緯度に依らず、海は ~ 1.1 mm/hr で ~ 3 km の高度に、陸は ~ 1.2 mm/hr で ~ 4.5 km の高度にピークがある(降雨が少ない値と一致)。対流性にも、チベット等の陸の影響が顕著に見られる。

次に、GSMaP と IMERG の各段階のプロダクトについて見ていく。降雨は DPR と同様に SH との相関

が見えている。層状性の結果、陸の GSMaP-mwr, mvk には SH や DPR-RR は連続的だが、一定の降雨量・降雪量になってしまっている所がある。降雪量の特徴は海上でも見られる。DPR-RR に見られたチベットの影響は GSMaP-gauge と IMERG の雪に見られた。次に対流性の結果、GSMaP-Gauge の大きな RR と SH の集団だけ、他と大きく異なり、正の相関はあるものの RR が極端に小さい。この原因は、雨量計補正により広く小さな降雨に変換された結果だと考えられる。GSMaP-mwr, mvk は陸の背の高い約 5 mm/hr の降雨量が DPR-RR より大きい場合がある一方、海の 10mm/hr 以上の降雨では過小になる場合がある。IMERG は海上では大きな RR と SH の集団は DPR とほぼ一致しているが GSMaP-mwr, mvk 同様 10 mm/hr 以上の降雨では過小になる場合がある。背の高さに関わらず、雨量の小さな集団は RR の過大評価が顕著である。陸上では IMERG-CAL の傾きが DPR-RR よりやや早く SH が高くなる。対流も層状も全プロダクトで、SH が高い時 DPR より強い降雪が存在する事で正相関に近くなる。DPR で other の場合、DPR の RR は非常に小さいが、より大きな RR が存在する。

軌跡解析を用いた低気圧性降雪におけるレーダ・ライダ観測の調査

高畑愛里沙¹, 端野典平¹

(1:高知工科大学)

要旨

A-Train 衛星群や EarthCARE などに代表される衛星観測は、全球規模で雲と降水に関する物理量を推定するためには欠かせない観測である。しかし、氷粒子の多様な形状や密度に起因して、その推定量には不確実性が伴う。低気圧性降雪の場合には、地表数キロ付近において卓越する微物理過程が高度とともに変化することがある。これはレーダ観測における「ブラインドゾーン」の直上における観測が地表での降雪量に単純には結びつかないことを意味する。本研究では、数値気象モデルによる降雪事例の再現とトラジェクトリ解析を実施することで、雲微物理過程に対応した雲レーダやライダのシグナルの変化を理解することを目的とする。

対象事例は全球降水測定寒期降水実験(GCPEx)[1]で観測された、2012年2月17日から18日にかけての温暖前線に伴う降雪事例を対象[2]とする。気象モデルとしてUWNMS、雲微物理スキームとして晶癖予測スキームAMPS[3]を用いる。初期・境界条件としてECMWF再解析データを使用する。本研究では同期間の航空機観測データとの比較検証を行う。解析では雪片形成過程が卓越する航空機観測地点、および前線南側に位置し雲粒捕獲過程が卓越する地点Sを選定し、粒子群の軌跡に沿った微物理過程や粒径分布(PSD)の変化を調査する。

航空機観測地点での解析では、高度1.5kmを境として、上空と地表付近にサンプルを分け、PSDパラメータの比較を行った。その結果、観測と数値実験の双方において、これら高度帯によってパラメータの変化する方向が反転していることが確認された。上空では雪片形成過程の時間変化と整合的な変化(粒径増大を示唆する方向)であるのに対し、地表付近では粒径の減少を示唆する挙動が確認された。これは観測データおよび数値実験ともに、地表付近が氷に対して未飽和環境にあることに対応しており、地表面付近では昇華過程が活発であることがわかった。

数値実験による地点 S の解析では、トラジェクトリ解析により空気塊の過冷却水域通過履歴を追跡することで雲粒捕獲過程に伴う質量増加率と実効衝突効率の算出を行った。これにより従来のオイリアン解析では難しかった、粒子の視点で微物理過程の定量化が可能になった。また、レーダ反射因子、ライダー後方散乱係数、およびドップラー速度の観測空間において、卓越する微物理過程との対応を特定した。

参考文献

- [1] Skofronick-Jackson, G. et al., 2015: Global precipitation measurement cold season precipitation experiment (GCPEX): For measurement's sake, let it snow. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 96, pp. 1719–1741.
- [2] Naeger, A. R., and A. L. Molthan, 2017: Evaluation of cloud microphysical schemes for a warm frontal snowband during the gpm cold season precipitation experiment (GCPEX). *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 145, pp. 4627–4650.
- [3] Hashino, T., G. de Boer, H. Okamoto, and G. J. Tripoli, 2020: Relationships between immersion freezing and crystal habit for Arctic mixed-phase clouds – a numerical study. *J. Atmos. Sci.* Vol. 77., pp. 2411–2438.

冬季新潟県十日町市におけるフラックス走査型ディストロメーター

観測データの解析

中井専人¹, 熊倉俊郎², 勝島隆史³, 本吉弘岐¹, 山下克也¹

(1: 防災科研, 2: 長岡技大, 3: 森林総研十日町)

要旨

固相／混相(mixed phase)降水の定量的降水推定(quantitative precipitation estimation: QPE)の検証には、極めて多様な粒子特性を把握する必要がある。この目的には、レーザー光膜を通過する粒子による遮蔽光量を測定するフラックス走査型ディストロメーター (flux-scan type (optical) disdrometers, 以下 FSD)が多く用いられてきた。本研究では FSD の全粒子ロギング記録(PE)を用いた統計解析を行った。観測データとして、森林総合研究所十日町試験地(新潟県十日町市)露場設置の防風ネット内における、FSD の一機種 Thies 製 LPM の PE と高分解能降雪強度計の値を用いた。観測期間は 2017/2018 冬季より 2024/2025 冬季まで 8 冬季である。

このデータから CMF 法により個々の粒子の質量(mg)や mass flux (mg m s^{-1})が得られ、解析時間間隔での代表的な粒径 D_{cmf} (mm)、落下速度 V_{cmf} (m s^{-1})、降水粒子分類(hydrometeor classification, HC)、降水強度 R ($\text{kg m}^{-2} \text{ hour}^{-1} \approx \text{mm hour}^{-1}$)を得た。雲物理で一般的な数濃度、粒径分布、混合比、粒径分布中央値 D_0 (mm)は 3 次元空間に対する値であり、FSD 観測から求めるためには、レーザー光膜検知領域の面積に加えて、メタデータであるサンプリング空間の高さを個々の粒子の落下速度と解析時間間隔から得る必要がある。

2022/2023 冬季において、FSD 観測による降水粒子特性に数時間から数日の長さで類似の特徴が継続する傾向がみられ、降水粒子特性の統計解析結果とメソスケール降雪系の特徴を関係

づけられる可能性が示唆された。そこで、 D_{cmf} , V_{cmf} 、また粒径分布の指数関数近似のパラメーター(Slope, Intercept)を同時観測した気温 $T(^{\circ}\text{C})$ と降水強度 $R(\text{mm hour}^{-1})$ によってスライスして降雪粒子特性を調べたところ、降水強度が大きくなるにつれて、雪片、雨ともに小粒子の寄与が小さくなり、雪片は大粒子が増えて粒径分布が広がり、雨は全粒径の数が増えるという特徴が見られた。一方、FSD 観測値から CMF 法を応用して降水強度を推定したところ、同時観測した高分解能降雪強度計に比べて過少評価となった。

そこで、解析手法を整理点検して改良し、問題点と誤差要因について議論することを目的に発表することとした。主な改良点として、気温の代わりに推定含水率でスライスした解析、及び、粒径分布についてガンマ分布近似の表現を試みている。

IMPACTS 航空機観測を用いた 3 周波レーダとマイクロ波放射計による 雲氷・固体降水複合推定アルゴリズムの検証

小原慧一^{1,2}, 増永浩彦²

(1: JAXA/EORC, 2: 名古屋大)

要旨

降水を伴う雲における雲氷・固体降水粒子の微物理特性を正確に把握することは、雲と降水の形成・発達メカニズムに関する理解を深める上で極めて重要である。Earth Cloud Aerosol and Radiation Explorer (EarthCARE) は、世界初のドップラ観測機能を備えた W 帯 Cloud Profiling Radar (CPR) により、雲の微物理特性と大気鉛直流の観測が可能である。さらに、同時に搭載された Atmospheric Lidar (ATLID) および Multi-Spectral Imager (MSI) と観測を組み合わせることで、雲氷の多様な微物理特性の不確実性を制約する可能性を秘めている。しかし、厚い雲内部の凍結粒子の観測に関しては、ATLID と MSI が観測する可視光・赤外波長域では信号は強く減衰するため、結局 CPR の観測情報のみに依存することになる。CPR レーダ反射因子のみからは、雲氷量・粒径・数密度・形状などの切り分け（同時推定）が困難であるため、降水を伴うような厚い雲の内部における雲氷・固体降水粒子の微物理特性のリトリバルには、依然として大きな不確実性が残されている。

本研究では、この課題に対応するため、W 帯ドップラ雲レーダ・Ku/Ka 帯降水レーダ・マイクロ波放射計の観測を複合的に活用した雲氷・固体降水粒子のリトリバルアルゴリズムを開発する。これらのセンサーは全て厚い雲の深部内部に対して異なる感度を持つため、多面的な雲微物理特性の観測情報を提供する。本アルゴリズムは Optimal Estimation をベースとし、これらの能動・受動マイクロ波観測すべてと整合するような雲氷量・数密度・重みづけ平均粒径・粒子落下速度・大気鉛直流の鉛直分布を推定する。

本発表では、このアルゴリズムの検証のため、Investigation of Microphysics and Precipitation for Atlantic Coast-Threatening Snowstorms (IMPACTS) フィールドキャンペーン

ンにおける航空機観測データを用いた。精度は粒子形状の仮定に強く依存し、適切な非球状氷粒子形状を仮定した場合、現場プローブ観測値と統計的に良好な一致を示すことが分かった。さらに、複数の能動・受動マイクロ波センサーの相乗的利用により、雲の深部での精度が向上することが示された。最後にこのアルゴリズムを EarthCARE-GPM のマッチアップ観測に適用した結果についても紹介する。

Understanding and Constraining Global Storm-Resolving Simulations Using EarthCARE and ORCESTRAs Observations

Woosub Roh¹ and Masaki Satoh^{1,2}

(1:AORI, the university of Tokyo 2:Typhoon Science and Technology Research Center, Yokohama National University,)

Abstract

Global storm-resolving models (GSRMs) simulate mesoscale convective systems at kilometer-scale resolution, allowing more direct comparisons with active satellite observations that have similar spatial sampling. This capability reduces reliance on subgrid-scale assumptions and enables physically consistent model–observation evaluation.

The EarthCARE satellite, equipped with a Doppler cloud profiling radar (CPR), provides a new benchmark for testing both cloud microphysics and atmospheric dynamics in GSRMs. Its Doppler velocity measurements make it possible to simultaneously assess hydrometeor fall speeds and vertical air motions, offering valuable constraints on convective updrafts and cloud structure. Satellite simulators enable quantitative comparisons by converting model output into synthetic radar signals.

The ORCESTRAs field campaign (August–September 2024) provides complementary multi-platform observations of organized convection in the tropical Atlantic ITCZ, combining measurements from research aircraft, a research vessel, and ground-based systems.

We use EarthCARE and ORCESTRAs observations to constrain a 3.5-km-resolution NICAM simulation. We compare vertical cross-sections and contoured frequency by altitude diagrams (CFADs) of radar reflectivity and Doppler velocity between NICAM and observations from EarthCARE and the HALO aircraft. These comparisons demonstrate how combined satellite and field observations can directly constrain cloud microphysical and dynamical processes, providing guidance for improving global storm-resolving models.

ECOMIP Update Toward Revealing Vertical Velocity Structures in Deep Convection through EarthCARE–Kilometer-Scale Model Synergy

Masaki Satoh^{1,2}, Woosub Roh¹, Shunsuke Aoki³, Takuji Kubota³

(1: Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo,

2: Typhoon Science and Technology Research Center, Yokohama National University,

3: Earth Observation Research Center, JAXA)

Abstract

The vertical velocity structure in deep convection remains one of the most uncertain aspects of mesoscale convective systems (MCSs). In numerical models, vertical velocity spectra are not adequately resolved at kilometer-scale (km-scale) resolution, while observational estimates of vertical velocity have been sparse and lack global coverage. The EarthCARE satellite provides the first global observations of vertical velocity through its Cloud Profiling Radar (CPR), which measures radar reflectivity and Doppler velocity worldwide. These unprecedented observations offer a new opportunity to evaluate the dynamical structure of MCSs. In this study, we analyze EarthCARE CPR observations by comparing them with global and regional kilometer-scale simulations participated in ECOMIP (EarthCARE and ORCESTRa Model Intercomparison Project; <https://www.earthcarescience.net/projects/ecomip>). We compare the model outputs with EarthCARE data and other field campaign data. Specifically, we apply the Joint Simulator for Satellite Sensors (J-Sim) and directly compare the simulated signals with the EarthCARE observations.

The figure presents the first multi-model ECOMIP analysis of vertical velocity and compares it with CPR vertical-velocity retrievals. We will then apply J-Sim to all model datasets to enable direct comparison with the CPR signals, and statistically compare them using the CFAD. In my presentation, we introduce the current status and milestones of the ECOMIP project, along with key findings from these analyses.

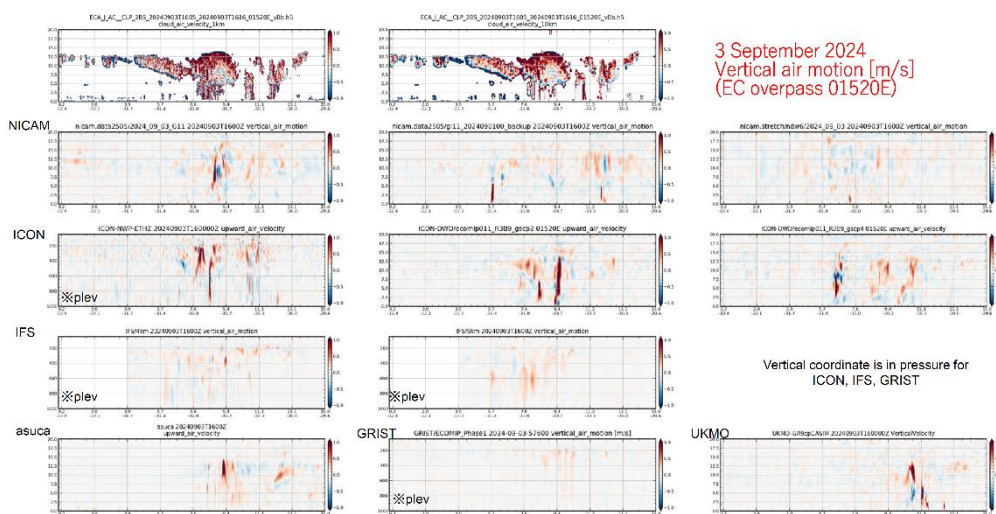


Figure: Cross sections of vertical velocity along the EarthCARE overpass in the tropical Atlantic on 3 Sep. 2024. The top two panels show the EarthCARE retrievals in the 1-km and 10-km averaging modes.

Development and Evaluation of Joint-Simulator for Predicted Particle Properties (P3) Scheme

Jin-De Huang¹, Tomoki Miyakawa¹, Woosub Roh¹, Masaki Satoh¹

1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Japan

Email: jdhuang@aori.u-tokyo.ac.jp

Abstract

Predicted Particle Properties (P3, Morrison and Milbrandt, 2015) microphysics scheme is widely used by several forecast and climate models around the world. The unique aspect of P3 is the use of a single free-evolving category to represent ice microphysical processes. In the EarthCARE-ORCESTRa Model Intercomparison and evaluation Project (ECOMIP), participating models with P3 cannot apply Joint-Simulator to generate radar and lidar variables because of the special treatment of ice particles in P3. This study aims to implement P3 in Joint-Simulator and evaluate its results with EarthCARE data. We perform two NICAM hindcast simulations of hurricane Humberto with the single-moment scheme (NSW6) and P3. Both simulations have reasonable evaluations of intensification, even though the strength is underestimated. P3 simulation has less cloud liquid water and ice compared to the NSW6 simulation, but the melt equivalent effective radius in the P3 simulation is larger than that of the NSW6 simulation. These differences compensate with each other and then result in similar distributions of simulated radar reflectivity. On the other hand, the distribution of simulated Doppler velocity in the NSW6 simulation is comparable to the EarthCARE observation. However, Doppler velocity in the P3 simulation is quite large in the convective region, which is not reasonable. We will further check and include P3's relationship between diameter and vertical velocity to produce reasonable Doppler velocity.

Pythonで衛星シミュレーターを動かす

金丸佳矢¹

(1:NICT)

要旨衛星搭載センサーは電磁波が主に用いられており、所望とする物理量ではなく観測対象と電磁波の相互作用によって生じた電磁波の強さを計測する。衛星観測データを使った利用研究を実施する場合、電磁波の強さから物理量への変換されたプロダクトを使うことが一般的だが、結果の解釈には観測対象に関する知識に加えて、放射や散乱に関する知識が必要となる場面に出くわすことがある。そのような場合、衛星シミュレーターの利用が有用である。衛星シミュレ

ーターは衛星搭載センサーの測定量を数値気象モデルなどの入力値をもとに再現できるように放射や散乱に関する計算機能を整備したソフトウェア群を指し、日本では名古屋大学で開発する Satellite Data Simulator Unit (SDSU) や JAXA が開発する Joint-Simulator (J-SIM) などがある。これらの衛星シミュレーターは科学技術計算を目的として高い計算効率や精度を追求するため、Fortran や C 言語などで実装されることが多い。Python などの最新のプログラミング言語と比べて Fortran や C 言語は可読性や開発効率の面で劣る場合があり、教育現場や研究の初期段階での利用においては障壁となりうる。そのため、近年は Python を活用した衛星シミュレーターの開発や整備が進められている。Python は豊富な科学計算ライブラリや可視化ツールとの連携が容易で、教育・研究の現場での利用に適している。Python ベースの衛星シミュレーターを整備することで、より多くの学生や研究者が衛星観測データを用いた研究に取り組みやすくなり、衛星観測データの理解や応用の促進が期待される。

本発表では、SDSU や J-SIM の計算機能を Python から利用可能にするインターフェースと簡単なチュートリアルを整備したので、その紹介をする。

超水滴法へのレーダーシミュレータの適用：

BIN 型データを用いた場合の性能評価

荏澤雄太郎¹, Manhal Alhilali², 島伸一郎², 松岸修平¹, Woosub Roh¹,

端野典平³, 宮川知己¹

(1: 東京大学 AORI, 2: 兵庫県立大学, 3: 高知工科大学)

要旨

超水滴法 (Shima et al. 2009, 2020) とは、似た特性を持つ雲粒子集団を”超水滴”として代表させる雲微物理スキームであり、各超水滴を Lagrange 的に追跡することで雲粒子の時間発展を計算する。超水滴は様々な特性 (粒径、密度など) を持つことができ、既存の雲微物理スキームと比べて高い自由度で雲粒子を計算可能なことが特徴である。近年では、現実事例を対象とする超水滴法を用いた数値実験が行われ始めており、超水滴法で計算された雲と観測データの比較も行われている (e.g., Chandrakar et al. 2024)。超水滴法で計算された雲の評価において、航空機観測に基づく雲粒子の粒径分布との比較はされている一方で、超水滴法用の衛星シミュレーターが無いことから、衛星・地上レーダーデータとの比較は限定的である。Bulk 法や bin 法に適用可能な既存のシミュレーターは、雲水・雨・氷・雪・霰などに関する仮定 (または陽に計算) された粒径分布関数を基にレーダー変数を計算するが、超水滴法はそのような雲粒子のカテゴリーを考慮していないため、超水滴のカテゴリー分けに不確実性が生じる。また、偏波レーダーにおいては氷粒子の形状や方向なども重要になるが、パラメタリゼーションなどによりこれらを表現しているシミュレーターが多い。このように、超水滴が持つ特性を衛星シミュレーターに適切に与える手法は確

立されていない。そこで本研究では、超水滴法用の衛星・レーダーシミュレータの開発に向けて、既存のシミュレータに超水滴法を適用した場合の性能を評価した。

本研究では、観測キャンペーン CAMPE²x (Reid et al. 2023) で観測された warm rain 事例を対象に、液相のみを考慮した数値実験を行った。また、計算された超水滴を基に、数値モデルの各格子における粒径分布を作成し、これを Joint-Simulator (Hashino et al. 2013) に与えた。シミュレータにおいては、観測データに沿って、W, Ka, Ku バンドの反射強度を計算した。数値実験の結果、モデルは雲構造や粒径分布を良く表現した。また、シミュレータで計算された反射強度は、モデルで計算された雲構造に整合的であった。雲域における CFAD (Contoured Frequency by Altitude Diagram) については、観測一実験間で似た概形を示した一方で、W バンドにおける下層の鉛直勾配は数値実験結果で過小評価された。本発表では、超水滴法から得られる粒径分布を Joint-Simulator に与えた場合の結果について議論する。

EarthCARE 衛星搭載のドップラーレーダにより観測された 波状構造の全球分布と力学的特性の解析

森田隼一朗¹, 高橋暢宏²

(1:名古屋大学理学部地球惑星科学科、2:名古屋大学宇宙地球環境研究所)

要旨

2024年5月に打ち上げられた EarthCARE 衛星搭載の雲プロファイリングレーダ (CPR) により、雲粒子の鉛直ドップラー速度を全球にわたって観測することが可能になった。CPR の観測では、ドップラー速度の上昇領域と下降領域が水平方向に交互に並んだ数十から数百 km に及ぶスケールの波状構造をしばしば観測している。雲内部の波動を直接捉えられる人工衛星は前例がなく、波状構造がどこでどのように観測されるかは不明である。CPR が観測する現象を正しく理解することは EarthCARE ミッションの発展という観点でも重要であるため、本研究は CPR が観測する雲内部の波状構造の全球分布と力学的特性の解明を目的とする。

ドップラー速度の観測データから波状構造を検出するため、連続ウェーブレット変換 (CWT) を用いた。2024年12月から2025年11月の1年間のドップラー速度の観測データに対して各高度で衛星進行方向に CWT を適用し、振幅 0.5 m/s を超える波長 5~30 km の波が水平・鉛直方向に 2 km 以上連続して含まれる構造を波として検出した。検出された波の代表事例について、MSI や ERA5 の大気再解析データなどを用いて詳細解析を行った。

検出された波は、高緯度の山岳地帯・海岸沿いなどの地形が急峻な地域の対流圏下層に集中していた。これらの波は主に、安定な大気下で地形の影響を受けて発生する山岳波であると考えられる。南極大陸リーセル＝ラルセン半島における事例では、下層風が半島に向かって吹き付け、その風下側で波が観測されており、山岳波の特徴と一致した。熱帯収束帯の対流圏上層でも波が多く検出された。

アフリカ大陸中央部における事例では、発達した対流雲の雲頂付近で波が検出され、MSI によって波に対応した同心円状の雲列が観測されていた。Meteosat Third Generation に

よる時系列雲画像では、この波がアンビルの広がりと共に同心円状に伝播する様子が捉えられていた。これは強い上昇流が対流圏界面に衝突することで発生する、対流活動に伴う重力波であることを示唆している。さらに、検出された波の各事例について、Kelvin-Helmholtz 波 (KH 波) の発生指標であるリチャードソン数を算出し、KH 波の分布を推定した。太平洋上における事例では、波が観測された高度で強い風の鉛直シアが存在し、そのシアベクトルが波に伴う雲列と直交しており、KH 波の特徴と一致していた。

EarthCARE-GPM 同時観測データセットを用いた 大気鉛直流と非断熱加熱率の比較解析

青木 俊輔¹, 久保田 拓志¹, 重 尚一²

(1: JAXA/EORC, 2: 京都大学理学研究科)

要旨

降水システムから放出される潜熱やその周囲の雲に伴う放射加熱は、多様なスケールの大気循環を駆動し、地球大気の大気鉛直エネルギー輸送において重要な役割を果たしている。熱帯降雨観測衛星 (TRMM) および全球降水観測計画 (GPM) ミッションにおいては、衛星搭載の Ku 帯降水レーダ観測を用いて、降水システム内での凝結や蒸発に伴う潜熱加熱率の 3 次元プロファイルが推定されてきた。また、W 帯レーダ・大気ライダー・多波長イメージャを組み合わせた観測を行う A-Train 衛星群や雲エアロゾル放射 (EarthCARE) ミッションにおいては、雲周辺の放射加熱率プロファイルが推定されてきた。これらの非断熱加熱率は、前者は雲解像モデル、後者は放射伝達モデルによるシミュレーション結果を援用することで、衛星観測から算出された雲降水物理量を基にした推定がなされている。一方で、EarthCARE 衛星に搭載された雲プロファイリングレーダ (CPR) は世界初の衛星搭載ドップラーレーダであり、観測された鉛直ドップラー速度から雲内部の大気鉛直流を算出することが試みられている。

理想的には、大気鉛直流は熱力学的な収支を通して非断熱加熱プロファイルと対応関係にあることが期待される。そこで本研究では、CPR のドップラー速度観測から推定された大気鉛直流と、GPM 潜熱加熱プロダクト (SLH) で推定された潜熱加熱率、EarthCARE 4 センサ複合プロダクト (ALL_RAD) で推定された放射加熱率の 3 者を用い、各プロダクト間の鉛直プロファイルの整合性を調査した。解析にあたっては、EarthCARE-GPM 同時観測データセットで提供されている 1 年半以上にわたる両衛星の軌道交差事例を用い、降水タイプごとに鉛直プロファイルの統計比較を行った。層状性降水における潜熱プロファイルは融解層より上層では加熱、下層では弱い冷却を示すが、これに対応するように上層での上昇流と下層での 0 m/s に近い大気鉛直流が確認された。また、対流性降水においては対流圏全層にわたる深い潜熱加熱に対応した上昇流が確認された。放射加熱率の絶対値は潜熱加熱率と比較すると 1 桁小さく、大気鉛直流との関係は明瞭ではなかった。

本研究で取り扱う潜熱・放射加熱率や大気鉛直流といった物理量は、センサの観測特性や前段となる雲降水微物理の推定に起因する数多くの不確実性がリトリバルに存在することに加え、

観測的に検証することも困難である。本研究で実施したような相互比較が、こうした最終プロダクトの信頼性を評価・改善するための一手段となりうるのではないかと提案する。

EarthCARE/CPR-GPM/DPR 同時観測データに基づく

層状性降水の降雪微物理特性

大畑静佳¹, 重尚一¹, 青梨和正¹, 青木俊輔²

(1:京都大学理学研究科, 2:JAXA)

要旨

降雪微物理特性の正確な全球推定は降水過程の理解に不可欠であるが、衛星搭載レーダーによって降雪の雲粒捕捉成長（ライミング）の度合いを特徴付けることは依然として大きな課題である。本研究では、EarthCARE 衛星搭載雲プロファイリングレーダー（EarthCARE/CPR）と GPM 主衛星搭載二周波降水レーダー（GPM/DPR）による 1 年間の全球（65° S-65° N）同時観測データセットを用いて、層状性降水の融解層上空に分布する降雪の微物理特性を解析した。

具体的には、EarthCARE/CPR のドップラー速度を GPM/DPR の二周波リトリーバル手法（Akiyama et al., 2025）に統合し、体積加重平均粒径（Dms）、総粒子数濃度（Nt）、およびライミングの指標である雲粒捕捉量（effective Liquid Water Path; ELWP）を同時に推定した。本手法により、従来のレーダ反射強度のみを用いた手法では困難であった、ライミングの度合いの推定を可能にした。

統計解析の結果、推定された ELWP の頻度分布は約 0.1 kg m^{-2} にピークを持つことが示された。鉛直プロファイルでは、融解層に向かって Dms と ELWP が高度低下とともに増加し、一方で Nt は減少する傾向を示した。これは、下層に向かった衝突併合成長およびライミング成長と整合的である。特に、 -6°C から -3°C の間で Dms が特に増加する層が確認でき、この温度域が粒子併合の主要な層であることが示唆された。

また、相関解析により、降水強度（R）と液体相当体積加重平均粒径（Dm1）の相関係数は -0.065 と極めて低いことが分かった。このことは、GPM/DPR の標準プロダクトで仮定されている R-Dm 関係では、GPM/DPR が観測する降雪の典型的な微物理特性を反映しない可能性を示唆している。対照的に、Nt は Dm1 と強い負の相関（ $r=-0.85$ ）を示しており、今後の降雪リトリーバルにおける有力な制約条件となり得ることが示唆された。

基本雲プロダクトの高度化について

半田太郎, 丸山拓海, 佐伯悠樹, 坂下卓也

(気象庁)

要旨

気象衛星センターでは、基本雲プロダクトという衛星プロダクトを作成している。基本雲プロダクトは、静止気象衛星「ひまわり」の観測値と数値予報データから雲の有無（雲マスク）や雲頂高度、雲相といった雲に関する物理量を推定するプロダクトである。現在の基本雲プロダクトの雲マスクは、特定の領域で精度が低いことが知られている。また、その推定結果が特定の雲判定テストに支配されることや、数値予報など衛星観測以外のデータの影響を受けるといった課題がある。そこで当センターでは、雲マスクの精度やデータの独立性を高めることを目的として、機械学習を利用した、ひまわり観測データのみから雲の有無の識別手法の開発を行なっている。

昨年度の「GPM および衛星シミュレータ合同研究集会」では、教師ラベルとして現行プロダクトを採用し、ランダムフォレスト (RF) やニューラルネットワーク (NN) による学習を試行した。極軌道衛星 (Aqua/MODIS) の雲マスクを用いた比較検証の結果、NN を用いて判別結果の閾値を調整することで、現行プロダクトとの一致率が高いモデルを構築できる可能性を示した。

本年度の開発では、さらなる精度向上と空間情報の活用を目的に、画像セグメンテーションに特化した AI モデルである「U-Net」を導入した。U-Net は、エンコーダによる大域的な特徴抽出とデコーダによる詳細な情報の復元に加え、スキップ接続によって圧縮過程で失われる微細な位置情報を補完できる。これにより、一ピクセルごとの判定では捉えることが難しかった雲の広がりや模様を、つながりのある「面」の情報として捉えられるようになる。本研究では、U-Net を用いた初期検証（実験 1・2）で顕在化した、オーストラリア陸域の誤判別や赤道域での判定過多という課題に対し、MODIS の雲マスクをベースとしつつ現行手法が得意とする領域の「晴れ」情報を統合して正解データを再定義する「ハイブリッド学習（ラベル修正）」を適用した。このアプローチにより、現行手法との高い整合性（一致率 0.96）を維持しつつ、初期検証時点での課題の領域における判別性能の向上が確認された。定量評価においても、日中・夜間、陸上・海上の全ての条件下で MODIS と同等の高い判別性能が得られており、外部データに依存しない機械学習ベースの雲マスク算出手法の有用性が示された。

静止気象衛星ひまわり 8/9 号の時間領域解析による積乱雲 anvil の追跡

加藤 慶¹, 高橋 暢宏²

(1:名古屋大学 環境学研究科, 2:名古屋大学 宇宙地球環境研究所)

要旨

EarthCARE 衛星や NASA の INCUS 計画に代表されるように、近年の衛星による雲降水観測の焦点は積雲や積乱雲の単一時刻の静的な状態（分布）の把握から、ドップラー速度データの利用や複数衛星による編隊観測を用いた時間差のある観測による動的な変化（ダイナミクス）の抽出へとシフトしつつある。将来の観測ミッションにおける衛星編隊観測の時間差は 2 分程度と想定されているが、静止気象衛星ひまわり 8/9 号による日本域での 2.5 分毎（および広域 10 分毎）の高頻度観測は、このような時間領域解析を現行の観測網で試行・評価するための極めて有効なプラットフォームとなり得る。本研究では、その実証的な解析対象として、比較的スケールの大きい積乱雲アンビルを選択した。

積乱雲の発達に伴い圏界面付近で形成されるアンビルの急拡大は、対流に伴う強い上昇流が圏界面に達し、それ以上高い高度へと発達できないために水平方向へと発散することで生じる。その際、輝度温度の時間差分 ($dTBB/dt$) を算出すると、上層における強い発散を反映した特徴的な楕円状の急冷域が顕在化する。本研究では、 $dTBB/dt$ を圏界面発散の代理変数と捉え、その物理的特徴を抽出することで、積乱雲のライフサイクルのうち、発達期および成熟期の動態把握を試みた。

算出された $dTBB/dt$ 場には、目的とする対流活動とは異なる多様な時空間スケールの変動が重畳しているため、目的とするアンビル由来の物理構造のみを抽出することは困難である。そこで、圏界面における発散が示す「楕円状の輝度温度変化場」という形状的な特徴に着目し、深層学習を用いた物体検出モデル YOLOv12 を用いて、複雑な構造をした $dTBB/dt$ 場から目的の物理構造をロバストに認識・追跡する手法を考案した。なお、解析対象には、日本域における複数の対流事例を用いた。

提案手法により、積乱雲が十分に発達した広範な雲域を形成する前の対流初期段階において、特徴的な楕円状構造を検出・追跡することができた。従来の輝度温度分布 (TBB 場) のみを用いた解析は、雲域の正確な広がり把握の上で不可欠であるが、その形状から発達の段階を特定するには限界があった。これに対し、時間差分を用いる本手法は、対流活動に伴う変化の勢いのみを強調して抽出できるため、環境風による移流と能動的な発達を分離して評価できる可能性が示唆された。

本研究により、静止気象衛星による高頻度観測データに対する時間領域解析が積乱雲のライフサイクル、特に初期発達プロセスの評価に有効であることが示された。これは、将来の衛星観測ミッションにおける編隊観測によるアルゴリズム開発に向けた現行データを用いた予察的な知見を提供すると考えられる。特に、ひまわり衛星の日本域における 2.5 分毎の観測は、将来の衛星編隊観測の時間差（約 2 分）と物理的にほぼ同等であることから、今後、本検証を進めることで、次世代観測ミッションの概念実証としての役割を果たすことが期待される。

静止衛星ひまわりを用いた熱帯鉛直積算水蒸気量推定アルゴリズム開発

伊藤誠人¹, 増永浩彦²

(1:名古屋大学大学院環境学研究科, 2:名古屋大学宇宙地球環境研究所)

要旨

熱帯における降水と水蒸気の関係性は着目する時間スケールに依存して複雑に変化することが知られており、数時間から数日程度の降水ライフサイクルに伴い変動する降水-水蒸気相互作用のメカニズムは十分に理解されていない。メカニズムの更なる理解のために、熱帯海洋上における鉛直積算水蒸気量（以下、CWV）の高頻度な観測が望まれる。CWV を広域観測する唯一の手法は衛星観測である。地球観測を行う衛星は大きく分けて低軌道衛星と静止衛星の 2 種類が存在し、それぞれの衛星観測には利点と欠点がある。低軌道衛星の利点として多彩なセンサが搭載されていることが挙げられ、その 1 つであるマイクロ波放射計は CWV の観測に適している。ただし低軌道衛星の性質上、同一地点は 1 日に 2 回程度のみ観測頻度のため数時間から数日程度の熱帯降水ライフサイクルの観測には最適な観測手法とは言えない。静止気象衛星ひまわりは 10 分の頻度でフルディスク観測が可能だが、技術的な理由により静止衛星にマイクロ波放射計の搭載は実現されていない。

本研究では低軌道衛星 GCOM-W 搭載マイクロ波放射計 AMSR2 とひまわり衛星搭載可視赤外放射計 AHI の同時観測事例を抽出し、ディープラーニングを用いて高時間分解能の全天候型 CWV 推定アルゴリズム開発を試みる。各チャンネルの CWV に対する感度を精査した結果、対流圏上層・中層の水蒸気に感度を持つ $6\mu\text{m}$ 帯の水蒸気チャンネルに加え、 $10\mu\text{m}$ 帯の窓チャンネルが $35\text{kg}/\text{m}^2$ 以上の湿潤な領域では CWV 推定に最適であることが確認された。そこで水蒸気にほぼ感度のない $3.9\mu\text{m}$ を事実上の「窓」チャンネルとして活用し、 $3.9\mu\text{m}$ と $6\mu\text{m}$ 帯～ $10\mu\text{m}$ 帯を組み合わせることで CWV 推定精度が向上することを見出した。ただし $3.9\mu\text{m}$ は短波の影響を受けるため、日中の観測では sun glint 域を対象から除く必要がある。

全天候アルゴリズム開発に当たって、赤外輝度温度から雲の寄与を除外する必要がある。雲域が時間と共に変動しやすいことに着目し、推定時刻の前後 2 時間以内の輝度温度も学習に含めリトリバルの入力とすることで、全天候 CWV 推定を可能とした。

AMSR2 の CWV を教師ラベル、AMSR2 のマッチアップ時刻とその前後 2 時間における AHI の輝度温度ならびに split window の輝度温度差分値を入力データとして、学習済みモデルを構築する。学習済みモデルをもとに AHI の輝度温度を入力とし CWV を出力とするアルゴリズム開発を行う。

2016 年の北緯 30 度から南緯 30 度の海洋上におけるデータを用いて学習済みモデルを構築し、2017 年の同地点のデータでその検証を実施した。AMSR2 の CWV と学習済みモデルが推定した CWV の相関係数を求めたところ、all sky における相関係数は 0.924、clear sky における相関係数は 0.954 を示した。

研究集会当日では、アルゴリズムの概要と学習済みモデルの初期検証結果を中心に発表する予定である。

衛星搭載雲レーダーデータ同化のための雲パラメータ調査

及川 栄治, 岡本 幸三

(気象研究所)

要旨

気象庁で現業運用している数値予報システムでは様々な衛星の観測データが天気予報の改善のために利用されているが、CloudSat 衛星や EarthCARE 衛星に搭載されている雲レーダー CPR による周波数 94GHz のレーダー反射因子の観測は、観測範囲が衛星直下に限定されていること、気象モデルの雲の予測不確実性が大きいこと、同化システムで雲を扱うことが依然として困難であることなどの理由から、数値予報システムのデータ同化には利用されてこなかった。気象庁の全球データ同化システムでは、放射伝達モデル RTTOV を利用して衛星観測による放射輝度を同化している。RTTOV version 13 以降ではレーダーシミュレーターの機能が追加され、レーダー反射因子の計算が可能である。それにより、CPR で観測される雲の鉛直分布だけでなく、レーダー反射因子も気象庁全球モデル GSM のモデル検証やデータ同化に利用可能となった。そこで、我々は、GSM の雲や水蒸気の鉛直構造の予測精度向上を目的として、CPR のレーダー反射因子のデータ同化実験を行う予定である。

本研究では、データ同化を行う準備として、CPR のレーダー反射因子の観測と整合する RTTOV の雲・降水粒子のパラメータ調査を行う。まず、2024 年 8 月の GSM の計算結果と、EarthCARE 衛星の CPR とライダーの 2 センサ複合雲プロダクトの雲の鉛直分布の比較を行った。GSM との比較のため、EarthCARE 衛星雲プロダクトで推定された雲水量・雲氷量に関しては、有効半径 50 μm 以上の粒子の雲水量を雨の濃度、有効半径 50 μm 以上の粒子の雲氷量を雪の濃度として取り扱った。GSM と EarthCARE 衛星の雲・降水粒子の濃度の緯度高度断面図を比較したところ、雲・降水各種の高度分布がおおむね一致していたことから、GSM による雲のモデル再現性や EarthCARE 衛星雲プロダクトの降水粒子の取り扱いの妥当性が確認できた。ただし、高度 10km 以上の雲氷や雪の濃度は EarthCARE 衛星雲プロダクトと比べて GSM が過小評価していた。また、CPR で観測されたレーダー反射因子と GSM の雲・降水分布から RTTOV を用いて計算したレーダー反射因子を比較すると、高度 4km 以下で GSM のレーダー反射因子が過大評価となる傾向がみられた。一方、EarthCARE 衛星雲プロダクトの雲・降水分布から RTTOV を用いて計算したレーダー反射因子は、CPR で観測されたレーダー反射因子と比較して、高度 10km 以上で過大評価となる傾向が見られた。レーダー反射因子の観測値と EarthCARE 雲プロダクトを用いた計算結果が異なる要因のひとつとして、EarthCARE 衛星の雲リトリバルと RTTOV での雲の取り扱いの違いが考えられるため、レーダー反射因子に対する氷粒子の形状や粒径分布の感度実験を行い、最適な雲パラメータを調べる予定である。

2018年8月27日と2022年7月12日の局地的極端降水2事例における

降水の地上落下時間の推察

岩下 久人¹

(1: 明星電気株式会社)

要旨

POTEKA 気象観測装置は、“小型かつ軽量でどこにでも設置できる”をコンセプトに、明星電気株式会社により独自開発された。POTEKA は降水量を含む 8 つの気象要素を観測可能で、降水強度、前 1 分間降水量、前 1 時間降水量について 1 分毎に観測データを記録可能である。更に、POTEKA は気象庁検定も有しており、観測データは気象業務法の下で日本の天気予報においても使用可能である。2026 年 2 月現在、日本全国に約 800 台の POTEKA が設置され、地上気象観測を継続している。この観測網は、気象庁アメダスのような全国一様性は無いが、局所的には約 1~10 km 間隔の稠密な気象観測網を有する地域も存在する。特に関東平野では、現在、POTEKA は約 240 台で観測を行い、約 1~2 km 間隔の非常に稠密な観測網が複数存在する。

2018 年 8 月 27 日と 2022 年 7 月 12 日、関東平野において局地的な対流性降水が発生した。その際に、偶然にも上空を GPM/DPR が通過した。この 2 つの局地型対流性降水事例は、どちらも POTEKA 地上観測において約 100 mm の前 1 時間降水量を観測する地点が現れるような猛烈な降水事例であった。気象庁の突風データベースによると、2018 年 8 月 27 日事例では、地上でダウンバーストによる甚大な突風被害が確認された。一方で、2022 年 7 月 12 日事例では特に突風被害の報告は確認されなかった。これらの 2 事例において、それぞれ約 100 mm の前 1 時間降水量を観測した 2 地点では、前者事例では降水量の他にも、気温急低下、気圧急上昇、風速急上昇など他の気象要素も非常に激しく変化していたのに対し、後者事例では他の気象要素に大きな変化は見られなかった。

2 事例において、2018~2022 年の 5 年間の間、関東平野で存続できた POTEKA 約 120 台を利用し、POTEKA 地上降水強度と GPM/DPR 上空降水強度とを比較することとした。気象学において、一般的に降水落下時間は約 5 分であると伺うことが多い。そのため、POTEKA 地上降水強度は GPM/DPR 通過時刻の 5 分後のデータを利用することとした。GPM/DPR 通過時刻は、2018 年 8 月 27 日事例では 18 時 21 分、2022 年 7 月 12 日事例では 21 時 49 分であったため、1 分毎に記録を残す POTEKA ではそれぞれ 18 時 26 分と 21 時 54 分とした。比較の結果、ダウンバースト被害のあった前者事例では相関値は 0.166 となり悪かったが、突風被害の無かった後者事例では相関値は 0.805 で良好であった。

GPM/DPR では、Version7 より降水強度データに高度情報が付加されたことを確認した。これにより、おおまかではあるが POTEKA 観測点周辺直上の降水強度に関する高度プロファイリングデータを作成できるようになった。強引ではあるが、この高度プロファイリングされた GPM/DPR 降水強度が全て、一定速度で一様に地上落下していくと仮定し、それを POTEKA 前 1 分間降水量の 1 分毎時系列データと比較することで、簡易的に降水落下速度の推察もできるようになった。今回は、この推察結果について報告させて頂く予定である。

3 台の X バンド MP レーダとタイムラプスカメラから推定した気流場と 降水粒子タイプに基づく孤立積乱雲のライフサイクル

佐部利魁人¹, 高橋暢宏², Sophia Lestari², 加藤慶¹

(1:名古屋大学環境学研究科, 2:名古屋大学宇宙地球環境研究所)

要旨

積乱雲のライフサイクルは、発達期、成熟期、衰退期と区分してそれぞれのステージでの特徴が論じられてきた(例えば、Byers and Braham 1949)。一方、積乱雲は時空間スケールが小さいため、従来の観測網においてそのライフサイクル全体を詳細に捉えた研究はそれほど多くない。既存のライフサイクルモデルは、上昇流と降水域が1対1で対応するものである単一セルを想定したものが多く、実際には複数の降水セルが関与して寿命を延ばす事例も知られている(Moroda et al. 2021)。そこで本研究では、2024年8月9日に愛知県東部で発生した孤立積乱雲を対象に、3台のXバンドMPレーダXRAIN(Maesaka et al. 2011)と高解像度タイムラプスカメラを用いた統合解析を行い、そのライフサイクルにおける降水構造および力学・微物理過程の変化を明らかにすることを目的とした。このケースにおいて、対象とした積乱雲は発生地点でほぼ動かずにライフサイクルを終えたため、従来のXバンドレーダ観測ネットワークを用いて、発生から消滅までの全ライフサイクルにわたる詳細な観測が可能になった。さらに、周囲の雲が観測を妨げなかったため、タイムラプスカメラによる積乱雲の発生・発達過程の観測も可能となった。

解析には、デュアルドップラー解析(pyDDA)による三次元風速場の推定(Jackson et al. 2019, 2020)、二重偏波パラメータに基づく降水粒子判別(Kouketsu et al. 2015)、およびタイムラプスカメラによる雲発達の追跡を行った。その結果、以下の主要な知見が得られた。

本事例について外観上は単一の孤立積乱雲であったが、内部では複数の降水セル(Cell A-E)が次々と発生・発達するマルチセル型の構造を有していることが明らかになった。特に、中心的なセル(Cell B)が発生から1時間以上にわたり維持され、その周囲で局所的な世代交代が繰り返されることで、従来の単一セルモデル(30~60分)の寿命を超えて活動が継続したことが示された。また、XバンドMPレーダにおけるレーダ反射因子差(Z_{DR})の正の領域が0°C高度を超えて存在する Z_{DR} columnと、推定された上昇流の時空間分布に関して高い整合性を持つことが確認された。降水粒子タイプの三次元分布を各セルのライフサイクルや上昇流との関係を定量的に評価した結果については、積乱雲のライフサイクルの段階に応じて卓越する降水粒子タイプが明瞭に変化することが定量的に示された。

対流性雲内の上昇流域における 0°C 高度付近の微物理学的特徴

鈴木賢士¹, 國弘真緒², 原優里佳^{1,3}

(1: 山口大学大学院創成科学研究科, 2: 山口大学農学部, 3: 鳥取大学連合農学研究科)

要旨

これまで我々は、降水粒子撮像ゾンデを用いた現場観測から、大雨をもたらす降水雲内の、特に固体降水粒子の振る舞いに注目して研究を進めてきた。Suzuki et al. (2014) は、ビデオゾンデで観測された丸い霰に注目し解析を行い、Hara et al. (2024) は、鮮明な粒子撮像が可能になった新しい Rainscope ゾンデ (Suzuki et al. 2023) を用いて、梅雨期の対流性雲内の 0°C 高度すぐ上に存在する霰は上空の霰と異なり凍結粒子起源であることを示した。一方、強い上昇流域を伴った積乱雲内では大きな扁平した雨滴が上空に運ばれる。このような場合、偏波降雨レーダー観測によれば、0°C 高度よりも上空に大きな正のレーダー反射因子差 Z_{DR} (Z_{DR} カラム) が観測されることが知られており、既往研究では Z_{DR} カラムの存在した降水セルがその後発達することが示されている。また、全球降水観測計画 (GPM) 主衛星に搭載されている二周波降水レーダ (DPR) は、固体と液体の降水粒子が混在する融解層領域の上端の高度を示す binMixedPhaseTop とよばれるプロダクトを提供しているが、binMixedPhaseTop は暖候期の雷を伴う対流性降雨でしばしば検出されることが示されている (鈴木ら 2021)。しかしながら、 Z_{DR} カラムや binMixedPhaseTop が検出される対流性雲内の上昇流域における 0°C 高度付近の微物理構造はよくわかっていない。そこで本研究では、これまで注目してこなかった 0°C 高度より上空に存在する雨滴と凍結粒子に注目して、最近の Rainscope ゾンデによる観測データだけでなく、1990 年代のビデオゾンデ観測データにまで遡って解析した。

本研究では、1993 年から 2022 年までに実施された降水粒子撮像ゾンデを用いた観測の中から、凍結粒子が存在している 22 事例を解析対象とした。観測データは、梅雨期の鹿児島や沖縄などに加え、アジアモンスーン地域 (タイ、インドネシア等) で実施されたビデオゾンデおよび Rainscope ゾンデ放球により得られた降水粒子情報である。近年の観測では新しく開発された Rainscope ゾンデが用いられ、得られる鮮明な画像より精度の良い粒径情報 (粒径、円形度、落下速度など) が得られるが、1990 年代のビデオゾンデはカメラの解像度も低かったことから、数値データとして残っている平均粒径 (長径と短径の平均値) のみを解析に用いることとした。

解析の結果、上昇流が強い対流性降水雲の Z_{DR} カラムが存在するような強い降雨域内の雨滴粒径分布を得ることができた。実際の雲内の降水粒子の粒径分布を知る手段は限られており、本研究で明らかになったこの雨滴粒径分布は非常に貴重な観測データである。また、0°C 高度付近の雨滴の凍結による水の集中化が降水強化の重要なプロセスのひとつであることに加え、凍結プロセスが活発な事例では -10°C 高度以下で氷晶が極端に少ないことも明らかになったが、二次氷晶核形成や上昇流の強化とも関連してさらなる観測研究が必要であると考えている。

二重偏波レーダーと MU レーダーの同時観測による

強い層状性降水の鉛直構造と降水過程の推定

松永創太¹, 重尚一¹, 大畑静佳¹, 後藤悠介², 篠田太郎², 橋口浩之¹

(1: 京都大学, 2: 名古屋大学)

要旨

従来、メソ対流系 (MCS) に伴う豪雨は活発な対流性領域に起因しており、層状性領域の寄与はその降水強度の弱さから二次的なものであると考えられてきた。しかし、近年のレーダー解析は、比較的強い降雨が長時間持続する場合、層状性降水であっても著しい積算降水量をもたらしていることを示している。したがって、GPM/DPR 等の衛星降水レーダーにおける降水種別判定の高度化や、降水過程推定の精度向上には、こうした層状領域内部の力学的・雲微物理学的メカニズムの解明が重要である。

本研究では、これらのメカニズムを正確に特徴付けるため、大気の鉛直運動と降水粒子の特性を統合的に観測することに焦点を当てた。観測手法には、VHF 帯大気レーダー (MU レーダー) と X バンド二重偏波ドップラーレーダーによる鉛直同時観測を用いた。MU レーダーは雨雲内部の鉛直流を計測し、降水粒子成長の基盤となる力学的環境を提示する。さらに、仰角 20° で取得した X バンドレーダーのデータに対し、Ryzhkov et al. (2016) に基づく準垂直プロファイル (QVP) 解析を適用した。QVP 解析は、円錐走査を行う偏波レーダーのパラメーター (Z_{DR} など) を方位角方向に平均化して鉛直プロファイルを得る手法であり、天頂観測では得ることができない、降水粒子の扁平率に関する情報を抽出できる点に大きな利点がある。

本研究では、台風の接近によって活発化した梅雨前線に伴って線状降水帯が発生し、日本国内の広範囲に大雨がもたらされた、2023 年 6 月 2 日の豪雨事例を解析対象とした。滋賀県甲賀市における観測の結果、層状性降水により地上で比較的強い雨 ($10\sim 20$ mm/h) が観測された期間中、雲内の上昇流速は平均 $0.8\sim 1.0$ m/s、最大 2.0 m/s に達しており、Houze (2014) が示す典型的な層状性降水の鉛直流速 (約 0.1 m/s) を上回ることが明らかになった。これと対応して、QVP 解析では融解層より上層における反射因子差 (Z_{DR}) が 0 dB に近い値を示しており、比較的強い上昇流が雲内でのライミングを促進し、あられを形成させたことを示唆している。これは、同時に実施されたラジオゾンデ観測によっても裏付けられており、融解層付近で激しい着氷を示すラジオゾンデの異常な振動が記録されている (Liu et al., 2023)。

以上の結果から、強い層状性降水が持続するメカニズムとして、中層の比較的強い上昇流によって活発に雲粒が供給され、それに誘発された着氷成長 (riming) によって霰が落下しながら急速に成長したことが示唆される。

GPM KuPR を用いたモンゴルの夏季降水特性の研究

藤波初木¹, 藤井ひなこ¹, 金森大成², 檜山哲哉¹

(1:名古屋大学, 2:神戸学院大学)

要旨

半乾燥域のモンゴルでは, 夏季 (6~8 月) に年降水量の約 6 割の降水がもたらされる. 夏季降水は, 中部から北部にかけて広がる草原や森林などの植生を維持するために重要である. モンゴルでは静止気象衛星や地上気象観測による雲量や降水量などの変動特性が研究されてきた. しかし, 使用できるデータの制約もあり, モンゴル全域にわたる詳しい降水特性の研究を行うことは困難であった. そこで, 本研究は 11 年間 (2014 年から 2024 年) の GPM 主衛星搭載の降水レーダのデータを用いて, 夏季のモンゴルにおける気候学的な降水特性を明らかにすることを目的とする. 本研究では, GPM 主衛星に搭載されている降水レーダ (Ku-DPR) の Level-2 version 7 product のデータを使用した. 使用した要素は, 地上降水量, 各高度の降水量および降水タイプ分類である. 解析は空間解像度約 5km のパスデータから 0.1 度格子のデータに変換して行った. また, 地上降水量データから降水頻度と降水時降水量も計算した. 大気循環場の解析には 1 時間間隔, 0.25 度格子の ERA5 を使用した. 解析期間は 2014 年から 2024 年までの夏季である. 夏季のモンゴルの大気下層では, シベリアからの南向き水蒸気フラックスが, モンゴル北部から中部に位置するヘンティエー山脈とハンガイ山脈周辺に流入している. 夏季降水量は, そのヘンティエー山脈周辺とハンガイ山脈の北側斜面で特に多い. これらの領域では, 北側斜面と南側斜面で対照的な降水特性が見られた. 風上である北側斜面では南側斜面よりも降水頻度が顕著に高く, 層状性の降水が多かった. これは水蒸気を含んだ北風が, 山岳の北側斜面によってゆっくりと持ち上げられることによって生じていると考えられる. 一方, 降水時降水量は, ハンガイ山脈北側斜面からセレンゲ川流域 (ハンガイ山脈北側からロシアとの国境付近に広がる流域) とハンガイ山脈の南側から南東側斜面で大きく, 対流性降水が全降水量の 30%から 60%を占めていた. 降水量の多い領域では, 午後に極大を示す降水量の日変化も顕著であった. また, 降水量の多い領域は, 北方林と草原が分布する領域と一致している. これらの領域の地表面熱フラックスは, 南部の砂漠地域と比較して, 潜熱が多く顕熱は相対的に小さくなっており, 植生を介した地表面での蒸発散が重要であることを示唆している. また, これらの植生がある領域は, シベリアから広がる永久凍土帯の南限とも一致している. これらの領域では, 凍土を維持する機構として凍土・植生・降水系の相互作用が重要であることも示唆している.

Seasonal Variability of Stratiform and Convective Rainfall Structure During MJO Phases Over the Maritime Continent (MC)

Sopia Lestari and Nobuhiro Takahashi

Institute for Space-earth and Environmental Research (ISEE), Nagoya University

Abstract

Over the Maritime Continent (MC), complex interactions among the Madden–Julian Oscillation (MJO) phases, seasonal variability, and regional topography play a critical role in shaping local rainfall extremes. However, it remains unclear which type of rainfall, stratiform or convective, is predominantly modulated by the MJO. This study investigates seasonal variations in stratiform and convective rainfall during different MJO phases using GPM-DPR data during 2014–2022.

The results show that over the Sumatra region, the occurrence of both stratiform and convective rainfall is higher than over western Java during both active and suppressed MJO phases. In Sumatra, stratiform rainfall frequency is dominant over both oceanic and inland areas. Over western Java and Sumatra, particularly during the wet season (DJF; December–February), suppressed MJO phases generally induce a higher occurrence of both rainfall types, compared to active phases. During both active and suppressed phases, inland regions exhibit a higher frequency of reflectivity associated with stratiform rainfall than with convective rainfall.

Notably, during suppressed phases, high frequencies of both stratiform and convective rainfall occur across most seasons, whereas during active phases, the highest frequencies are primarily observed in DJF. In the DJF suppressed phases, over the northern Java Sea, convective rainfall with reflectivity values of 20–30 dBZ extends up to approximately 11 km, indicating deeper convection compared to the western ocean and inland regions (~8 km). In contrast, during suppressed phases in DJF and MAM (March–May), inland western Java exhibits shallower convection, characterized by the highest frequency of 20 dBZ reflectivity below 4 km.

Overall, our findings suggest that suppressed MJO phases may produce heavier rainfall than active phases over parts of the MC. Accurately distinguishing between stratiform and convective rainfall is therefore essential for improving quantitative precipitation estimation and enhancing flood early warning systems.

インド亜大陸北東部における雨滴粒度分布と降水システムの関係

村田文絵¹, 寺尾徹², H. J. Syiemlieh³, L. Cajee³, S. S. Kundu⁴,
S. A. Choudhury⁵, S. M. S. Hossain⁵, S. Yildiz⁶, F. Akter⁶, Y. Fujiyoshi⁷

(1:高知大学理工学部, 2:香川大学教育学部,
3:North-Eastern Hill University, India,
4:North Eastern Space Applications Centre, India,
5:Bangladesh Meteorological Department, Bangladesh,
6:University of Dhaka, Bangladesh, 7:北海道大学低温科学研究所)

要旨

私達はインド亜大陸北東部の山岳部豪雨地域と平野部を含む地域にディストロメータを設置し、観測を継続してきた。2017年に最初の2台を設置してから現在は5台に増えた。

本研究ではこれらの雨滴粒度計と、同じ領域においてリトリバルされたGPM DPR衛星による雨滴粒度パラメータを用いて、質量重みつき平均粒径(D_m), 降水強度(R), 一般化切片パラメータ(N_w)の間の関係を研究した。 $1.5 < D_m < 2.5$ mmをもつ降水は、 N_w が R を大きく左右する。それらは数十 mm h^{-1} 程度の高い R で特徴づけられるタイプAの雨($N_w \geq 36$ dB)と、数 mm h^{-1} 程度の低い R をもつタイプBの雨($N_w < 36$ dB)で構成される2山頻度分布を示す。プレモンスーン季の間、タイプBの雨が卓越する一方、モンスーン季はタイプAの雨がより卓越する。この特徴は平野部でも山岳部でも同様であった。先行研究と比較して、タイプBの雨は層状性降水を含む冷たい雨過程が卓越する雨であるのに対して、タイプAは対流性降水を主に含む暖かい雨過程が卓越する雨と考えられる。しかし、GPM DPRプロダクトは、タイプAの雨がほとんど存在しない。これらの結果は、タイプAの雨がインド亜大陸北東部のモンスーン季を特徴づける雨であることを示唆すると共に、GPM DPRプロダクトはQPEにとっても重要なこのタイプの雨を妥当にリトリブできておらず、その原因は N_w の妥当な推定ができていないためであることを示唆する。GPM DPRリトリバルにおける N_w の推定手法の改善のために、タイプAの雨がどのような環境場やどのような特徴を持った降水システムにおいて生じるのか明らかにする必要がある。

2024年3-10月にダッカに設置した雨滴粒度計から約6 kmの位置において、船舶レーダーを縦回しにした降水鉛直構造の観測を実施した。船舶レーダーは観測地点の周囲約10 kmのRHI画像を24 rpmの時間分解能で観測し、降水システムの背の高さや融解層の有無を判断できる。タイプAの雨は、サイクロンやモンスーン季の融解層を伴う層状性降水の中で強化される降水や、スコールライン内の対流性降水においてみられた。

衛星搭載降水レーダで観測された準停滞性対流バンドを伴う雨域特性 およびその大規模環境場について

横山千恵¹, 高薮縁¹, 久保田拓志²

(1:東京大学 AORI, 2:JAXA/EORC)

要旨

暖候期の日本において、準停滞性対流バンド (quasi-stationary convective band (QSCB); いわゆる線状降水帯) は局地的に持続的な強雨をもたらす。QSCB はしばしば階層構造を持ちメソスケールシステムの一部として現れるが、メソシステムの特徴は総観場・大規模場と関連して多様であり、QSCB の予測を困難にしている。一方、先行研究による衛星搭載降水レーダを用いた解析から、日本や世界における強雨や極端イベントの 3 次元降水特性にはいくつかのタイプがあり、それぞれが異なる大規模環境場の下で生じていることが明らかにされている。しかし、この観点から QSCB を伴うメソシステムを調査した研究は少ない。そこで本研究では、衛星搭載降水レーダ観測を利用して QSCB を含むメソシステムの降水特性や大規模環境場の特徴を明らかにする。特に、先行研究による強雨・極端イベントの特徴との比較において、QSCB を伴うメソシステムがどう位置づけられるか議論し、その仕組みの理解に繋げる。

この目的達成のため、「QSCB 雨域データベース」を作成する。まず、衛星搭載降水レーダが観測した一つながりの降水ピクセルを「雨域」として検出し、面積や対流性雨量比、高さの情報など雨域毎の特性を集約したデータベースを作成する。次に、気象庁の解析雨量を用いて QSCB を検出し、その情報をもとに抽出された「QSCB 雨域」のデータベースを構築し、解析する。さらに、ERA5 全球再解析データを用いて、QSCB 雨域の周辺 2.5 度格子の環境場を調査する。解析期間は 2004-2023 年 4-11 月である。

全 113 事例の解析から、QSCB 雨域の特徴の多様性が示された。面積の大小で大まかに 2 タイプに分類できた：面積の小さいタイプは対流雨が支配的であった。一方、面積の大きなタイプでは層状雨が対流雨と同程度に貢献しており、組織化した降水システムの特徴が示された。環境場の解析から、面積の小さいタイプは、境界層が湿潤で不安定な環境場で生じており、境界層を起源とする対流であることが示唆された。対照的に、面積の大きいタイプは、比較的安定な場で生じており、最下層を除いた中下層対流圏が非常に湿潤であった。このタイプは、対流圏の深い層にわたって大規模な水蒸気の変動を伴っており、QSCB 開始約 2 日前には中層で有意な湿潤化が開始されていた。これらの特徴は、面積の小さいタイプと大きく異なっており、先行研究における九州の強雨の特徴と概ね整合的である。現在、日本周辺の極端イベントとの比較を行い、QSCB 雨域との対応についても調べているところである。

地表面マイクロ波射出率の動的な推定手法の開発

内海 信幸¹, Mykhailo Lohachov¹

(1:東京科学大学)

要旨

マイクロ波放射計による降雪推定では、背景となる海面・地表面からのマイクロ波射出率を明示的に考慮することで、推定精度の向上が期待される。特に陸域および海氷域では、射出率が時空間的に大きく変動するため、これらの領域における射出率の把握には動的な推定手法が必要となる。本研究では、GMI 観測データおよび大気変数を用いて、降雪時を含む全天候条件下における GMI 各チャンネルの地表面射出率（海面を除く）を推定する手法を開発した。

提案する射出率推定モデルは、モデル内で推定した大気透過率に基づき、異なるサブモデルを選択する構造を持つ。晴天条件下では、簡略化した放射伝達式に現れる各変数（射出率を除く）をディープニューラルネットワーク（DNN）により推定し、放射伝達式を射出率について解くことで射出率を算出する。一方、非晴天条件と判定された場合には、DNN による直接推定により射出率を求める。本モデルは、GMI の 10.6~166 GHz の各チャンネルの射出率に加え、地表面温度も同時に推定する。モデルの学習および検証には、2015 年の大気条件に基づいて作成した GMI 仮想観測データベースを用いた。

積雪のない陸域、積雪域、および海氷域における一般的な気象条件下で検証を行った結果、推定射出率の平均絶対誤差は 10.6 GHz で 0.006 未満、166 GHz で 0.02 未満であった。また、提案モデルの射出率を用いることで、既存の射出率プロダクトを用いた場合と比較して、放射伝達シミュレーションによる観測輝度温度の再現性が向上することが示された。

GMI と AMSR3 用の新 GSMaP 降水域判定法の開発

青梨和正¹, 重尚一¹

(1:京都大)

要旨

従来の GSMaP マイクロ波放射計 (MWR) 降水域判定法（従来法）は、陸上と海岸で、DPR 観測値より、降水域を過小評価する。特に、西ガーツなどの地形性降水の過小評価が顕著である。一方、従来法は、海上で、DPR 観測値より、降水域を過大評価する。

本研究の目的は、これらの問題を軽減する、GMI と AMSR3 用の新しい降水域判定法を開発することである。本研究は、まず、サンプル数の豊富な GMI と DPR のマッチアップを使って、GMI 用の新降水域判定法を開発した。このために、DPR 降水域と非降水域の GMI の地表面射出率 (E_s)、輝度温度 (TB) の地上気温 (T_s) に対する比 (TB/ T_s) をチェックした。また、これらの地表面状態（特に

水面割合(FOW) や、地形性降水指標に依る変動を調べた。この結果に基づき、GMI の Es, TB/Ts, FOW, Ts, 地形性降水指標を入力として、DPR 降水域割合を回帰するモデルを開発した。次に、この GMI 用の新降水域判定法を AMSR3 に適用するために、AMSR3 TB から GMI TB を合成する線形回帰モデルを作った。

GMI 用の新降水域判定法の出力は、従来法より陸上、海岸(海上)の降水域割合が大きく(小さく)なって、DPR の観測値に近くなっている。また、従来法よりも DPR 降水割合との相関が向上した(特に海岸)。また、ビルマ西岸、インド西岸などの地形性降水の見逃しが減少している。また、本研究は、2025 年のいくつかの事例について、AMSR3 の従来法と新降水域判定法による降水域割合を DPR や地上レーダの観測と比較した。その結果、新降水域判定法は、従来法より陸上、海岸(海上)の降水域割合を大きく(小さく)リトリーブし、観測値に近くなっていることが分かった。

深層学習を用いたマイクロ波放射計からの降水強度推定

林浩希^{1,3}, 塩尻大也², 金丸佳矢³, 小槻峻司²

(1:千葉大学融合理工学府, 2:千葉大学国際高等研究基幹, 3:情報通信研究機構)

要旨

従来の GSMaP におけるマイクロ波放射計による降水強度推定では、輝度温度と降水プロファイルの対応関係を事前に構築した Look-Up-Table (LUT) を参照することで降水強度を推定している。LUT は周波数帯や陸域・海域などの条件に応じて構築され、各センサ特性を踏まえた経験的な最適化を必要とする。そのため、新規センサへの展開や応用に伴う整備コストが大きい点が課題である。さらに近年、高周波チャンネルを搭載した小型衛星の開発・計画が進んでおり、多様なセンサに柔軟に適用可能な降水強度推定手法の重要性が高まっている。深層学習は、高次元かつ非線形な輝度温度-降水強度の関係をデータ駆動で学習できることから、離散的な LUT に比べてより柔軟な対応関係を獲得できる可能性がある。そこで本研究では、LUT に代わる手法として深層学習を用いた降水強度推定を試みた。

本研究では、GPM 主衛星に搭載された GMI 輝度温度 (13 チャンネル) から、DPR が観測した地表面降水強度を推定する深層学習モデルを構築した。GMI と DPR は同一衛星に搭載され、ほぼ同時に観測されることから、時空間方向の対応付けに伴う不確実性が比較的小さく、深層学習の枠組みに乗りやすいデータ構造となっている。深層学習モデルには、NASA で開発が進められている GPROF-NN (Pfreundschuh et al., 2022) を参考に、多層パーセプトロンを基盤とした Quantile Regression Neural Network (QRNN) を用いた。QRNN では、観測に条件付けた地表面降水強度の事後分布を、分位点列として近似する。具体的には、複数の分位点に対応する推定値をニューラルネットワークが同時に出力し、それらを用いて累積分布関数 (CDF) を再構成する。訓練には、分位点損失を用い、分位点ごとの損失の総和を最小化することでモデルを最適化した。推論時には、再構成した CDF から期待値を算出し、地表面降水強度の推定値とした。

実験の結果、GMI 輝度温度を入力として推定した地表面降水強度は、DPR の降水分布を概ね再現しており、深層学習に基づく降水リトリバルの実現可能性を初期的に確認した。今後は、従来の LUT ベース手法との定量比較を通じて推定性能を評価するとともに、地表面降水強度に加えて DPR が観測する鉛直プロファイルを同時に推定する枠組みへ拡張する予定である。

静止気象衛星の赤外時系列情報を統合した深層学習による

マイクロ波放射計降水推定の高度化

松田拓巳¹，重尚一¹，青梨和正¹

(1: 京都大学大学院 理学研究科)

要旨

全球降水推定では、GPM Core 衛星の Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) を基準とし、Global Microwave Imager (GMI) などの受動マイクロ波 (PMW) 観測を用いたアルゴリズムが中核を担っている。近年は、DPR を教師データとした深層学習により PMW から降水強度を推定する研究が進展している。PNPR (Sanò et al., 2018)、DRAIN (Viltard et al., 2023)、および GMI から DPR 鉛直構造を再構成する手法 (Yang et al., 2024) などによって精度向上を達成してきた。一方、静止気象衛星 IR を用いた推定は物理的制約を受けるが、Hirose (2019) による多波長 IR とランダムフォレストを組み合わせた手法は暖かい雨の検出性能を改善した。また、降水場の再構成や観測空白の補完を目的とする研究 (例: PrecipGAN, AMT 2022) も報告されているが、主眼はあくまで空間的補完にある。

以上は、(1) PMW→DPR 写像の高度化、(2) IR 単独推定の改良、(3) IR による補間・再構成、の三方向に整理できる。一方、静止気象衛星の赤外時系列情報を統合し、マイクロ波放射計に基づく降水推定の高度化を目的としてその効果を検証した研究は少ない。

本研究では、GMI 輝度温度 (13 チャンネル) および海陸フラグを基本入力とし、ひまわり 8 号熱赤外 (TIR) 輝度温度をチャンネル方向に付加する構成を採用した。TIR は 10 バンド×N 時刻 (10 分間隔) として結合し、入力は設定により 14ch (GMI のみ)、24ch (GMI + IR 単時刻)、44ch (GMI + IR 3 時刻) となる。モデルには ResNet50 エンコーダを有する U-Net を用い、画素単位で降水強度を直接回帰した。教師データは GPM DPR L2 近地表降水強度であり、対数空間での平均二乗誤差 (MSLE) を損失関数として最小化した。ひまわりデータは GMI の観測スワス格子へ最近傍サンプリングでマッピングした。学習は固定サイズパッチを用いて実施し、無降水パッチは除外した。予備の実験として、対象期間は 2016-2018 年夏季 (JJA) の日本周辺域とし、2016 年を学習、2017 年を検証、2018 年をテストに割り当てた。

現時点の比較では、GMI + IR (3 時刻) 設定が MSLE において GMI 単体および GMI + IR (単時刻) よ

り低い値を示しており、赤外時系列情報の統合がマイクロ波放射計降水推定の精度向上に寄与する可能性が示唆された。

現在は、大気解析データの情報を含めた学習、時系列構造を明示的に扱う Convolutional LSTM (Shi et al., 2015) の導入、入力時系列長の最適化、特徴量設計の比較を進めている。発表では、設計間比較および事例解析結果を提示し、赤外時系列情報を統合した深層学習によるマイクロ波放射計降水推定の高度化の効果を検証する。

Improving GSMaP Precipitation Spatial Patterns and Diurnal Cycle

Konduru Rakesh Teja¹, Moeka Yamaji¹, Masafumi Hirose², Munehisa K Yamamoto¹,
Takuji Kubota¹, Hitoshi Hirose³ and Tomoo Ushio³

1. Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency, Tsukuba Space Center, Tsukuba, Ibaraki, Japan.
2. Meijo University, Nagoya, Aichi, Japan
3. Osaka University, Suita, Osaka, Japan

Abstract

In the satellite era, numerous sensors have been deployed to observe precipitation from space, spanning the electromagnetic spectrum from high-frequency visible bands to low-frequency microwaves. Each sensor type offers global precipitation estimates based on its unique sampling characteristics, yet these estimates differ in accuracy and temporal resolution. To mitigate these individual sensor limitations, multi-sensor has become a key focus. The Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP), developed by JAXA, exemplifies this approach by combining infrared (IR) and microwave observations to generate hourly global precipitation data. However, IR-based estimates, which depend on cloud-top brightness temperatures, often misrepresent the timing of precipitation peaks. In contrast, microwave-based estimates are physically more reliable but suffer from sparse temporal sampling because satellites observe any location only at specific time intervals, making complete diurnal sampling challenging. These constraints introduce temporal biases in IR-derived diurnal cycles within GSMaP, particularly over coastlines, mountainous regions, and oceans.

To overcome diurnal cycle limitations in GSMaP, we adopted a satellite data fusion strategy designed to enhance diurnal cycle of precipitation. This approach leverages extensive satellite observations from TRMM Precipitation Radar (PR) and GPM Ku-band Precipitation Radar (KuPR), collected across diverse diurnal phases, to construct a blended PR–KuPR dataset that provides the most comprehensive global diurnal sampling of precipitation. Building on this foundation, we implemented a data assimilation framework using a Kalman Filter to integrate the climatological diurnal cycle derived from PR–KuPR into the GSMaP algorithm. The resulting diurnal cycle-corrected (DCC) version of GSMaP significantly improves the depiction of precipitation diurnal cycle patterns over oceans, coastlines, and complex terrains.

This integration of PR and KuPR blended observations with data assimilation techniques represents a pivotal step toward reducing biases in satellite-based precipitation diurnal cycle products and enhancing their reliability for both scientific and operational applications. This advancement enables robust global climatological analyses of precipitation's diurnal variability, providing a more accurate foundation for hydrological studies, climate modeling, and extreme weather assessments.

アンサンブルデータ同化を活用した GSMaP の雨量計補正

武藤裕花¹, 小槻峻司^{1,2}

(1:千葉大学環境リモートセンシング研究センター, 2:千葉大学国際高等研究機関)

要旨

全球降水量の推定精度を向上させるためには、異種の降水量プロダクトを効果的に統合することが重要である。本研究では、アンサンブルデータ同化を活用し、GSMaP_MVK を雨量計観測と統合する手法の改善に取り組んだ。具体的には、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LEKTF) を用い、再解析 ERA5 の降水量から構築した気候学的な背景アンサンブルと NOAA CPC の雨量計観測を入力として解析値を得ることで、全球降水量分布を推定した。ここで、第一推定値として ERA5 の気候学的アンサンブルの平均ではなく、推定したい日にちにおける GSMaP_MVK の日降水量に差し替えることで、物理モデル由来の誤差相関情報を取り入れながら、GSMaP と雨量計観測を統合することを可能にした。

入力に用いたものとは独立な雨量計観測の月平均量 (GPCC) に対する精度評価の結果、本研究の推定値 (LETKF_G) は、第一推定値として用いた GSMaP_MVK や、雨量計補正プロダクト GSMaP_gauge よりも高精度であることが示目された。一方で、第一推定値に ERA5 の気候学的アンサンブル平均を用いた推定値 (LETKF_E) と比較すると、LETKF_G の精度は同等、もしくはやや劣ることが示された。同じ GPCC の雨量計観測の月別降水量に対して、5×5 度の格子ごとに Mean Absolute Difference を計算した結果、LETKF_G は GSMaP_gauge と比較して、山間地や低緯度帯、高緯度帯、雨量計密度の低いアフリカ大陸などで推定精度が高いことが示された。これは本研究において、ERA5 から背景誤差相関が計算されている効果だと考えられる。一方で、LETKF_G は LETKF_E と比較すると、高緯度帯、低緯度帯で推定精度が低いことが示された。

高緯度帯における推定精度が GSMaP_gauge、LETKF_G、LEKTF_E の順に悪い原因として、とりわけ冬季における高緯度帯での GSMaP_MVK の信頼性が低く、GSMaP_MVK との類似性が高い推定データほど、精度が低くなるためだと考えられる。今後は GSMaP_MVK の信頼性が低い格子点・時刻においては、GSMaP_MVK と ERA5 の気候平均の重み付け平均を第一推定値として用いることで、LETKF_G の推定精度をさらに向上させることができると期待される。また、LETKF_G の大きな課題として、GSMaP_MVK の値が雨量計観測よりも大きく過大評価であった場合に、本研究手

法では推定値に GSMaP_MVK の過大評価が大きく反映されてしまうケースが見られた。反対に、雨量計観測が過大評価であった場合にも、推定値に過大評価が反映されてしまうケースが見られた。これらの課題は、特に降水量が大きい低緯度帯での LETKF_G の精度の悪化につながっていると考えられる。今後は、観測誤差分散や背景誤差分散を観測値や第一推定値の大きさに応じて調整することで、これらの課題を解決できると想定している。

SSMIS に対する GSMaP マイクロ波放射計降水推定アルゴリズムの改良

山本宗尚¹, 久保田拓志¹

(1: JAXA/EORC)

要旨

GSMaP は GPM-constellation を構成する複数のマイクロ波放射計を用いて降水量を推定している。降水推定アルゴリズムの開発は、GPM 主衛星に搭載された二周波降水レーダと GPM マイクロ波放射計の同期観測データを利用して進める。この成果を、搭載周波数や Field of View の異なる他のセンサへ適用してきた。DMSP 衛星に搭載される SSMIS シリーズは、海上の相対的に強い降水に対しても良好な感度を持っている 10GHz 帯のチャンネルを搭載していない。このため、海上の降水推定アルゴリズムは独自に開発が進められた。GSMaP の最新版（プロダクトバージョン V05、アルゴリズムバージョン v8）を用いた、個別のマイクロ波放射計を検証した先行研究によれば、SSMIS で推定された降水量は moderate な降水が推定されにくく、強い降水がさらに過大推定する結果が得られている。降水推定精度は他の PMW センサの中で相対的に悪く、特に過大推定が GSMaP プロダクトの降水推定精度を下げることに對して少なからず寄与していることが判明したため、降水推定アルゴリズムの改良が期待されてきた。

この研究は、SSMIS による GSMaP 海上降水推定精度の向上を目的として、降水推定アルゴリズムの改良点を示すことである。SSMIS 海上降水推定では、10GHz 帯を用いた降水推定の代わりに、19GHz 帯の輝度温度偏波差 (emission index) を用いた推定降水量と、高周波数帯から推定した推定降水量を組み合わせる。本研究では、組み合わせに用いる重みの感度実験を行い、最適な重みに変更した。これに加え、入力輝度温度データのアップデートに伴う降水の非一様性や高周波数帯に対する推定降水量の修正係数や輝度温度補正值も再検討した。この結果、最新版で課題となっていた降水推定量のバイアスが縮減したことを確認した。本手法は、2026 年 8 月に予定されている次期メジャーバージョンアップ時に適用される予定である。

雲タイプ別降水補正手法による GSMaP_MVK アルゴリズムの改良

広瀬民志¹, 都築和馬¹, 山本宗尚², 久保田拓志², 牛尾知雄¹

(1: 阪大院工, 2: JAXA)

要旨

全球降水衛星マップ (GSMaP) は, 静止気象衛星 (GEO) の赤外 (IR) 輝度温度観測を用いて雲の移動ベクトルを算出している. これは, 前後時刻にマイクロ波放射計 (PMW) が観測した降水雲をトラッキングし, 複数の軌道衛星に搭載された PMW センサーによる降水観測網の隙間を補完するためである. さらに, 降水雲の発達・衰退に伴う降水強度の時間変化を考慮するため, 移動先の雲頂温度に対応するよう Kalman filter を用いて降水強度を補正している. しかし, 雲頂温度に基づく補正が施された GSMaP_IR プロダクトは, 地形性降水や強い降水を伴わない巻雲などに対して誤差が大きく, PMW 衛星による降水推定結果と比較して精度が低いという課題がある.

この問題に対処するため, 2026 年度に予定されている GSMaP_MVK アルゴリズムの大規模アップデートでは, PERSIANN-Cloud Classification System (Hong et al., 2004) を基にした雲タイプ分類法を導入予定である. 本手法では, GEO の IR 観測から複数の雲パッチを抽出し, 各雲パッチにおける IR 輝度温度の空間分布から複数の特徴量を算出することで自己組織化マップ (SOM) を作成する. SOM の 2 次元ノード空間では, 類似した特徴量ベクトルが近接して配置されるため, その位置情報に基づき雲タイプを分類することが可能となる. さらに雲タイプごとに GSMaP_IR と GPM DPR の同時観測標本を収集し, 降水強度の補正関数を作成することで, 特に地形性降水などの浅い雲からの降水に対する推定精度の向上を試みた.

一方, GSMaP_IR では雨域の過大評価を抑制するため, IR 輝度温度に基づく雨域の cut-off 処理を実施している. このため, 降水強度補正のみでは浅い雲に伴う降水の見逃しを改善することが難しい場合が存在した. そこで本研究では, 雲タイプごとに cut-off に用いる IR 輝度温度の閾値を調整し, 地形性降水のような浅い雲からの強雨の見逃し率を低減しつつ, 上層雲域で見られる雨域の過大評価を抑制することを可能にした. 補正後の雨域に対して雲タイプ別の降水強度補正関数を適用した結果, インド西岸の山岳域など地形性降水が卓越する地域において, 従来の GSMaP_IR で見られた降水の見逃しおよび過小評価傾向が改善された. 本手法による GSMaP の時空間的不均一性の改善は, 今後の高時空間分解能化に向けた重要な改良であると考えている. 本研究は, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の第 4 回地球観測研究公募 (ER4GPF008) の支援を受けて行われたものである.

XRAIN と雨量計を合成した 1 分値降水強度プロダクトを用いた GSMaP の検証

瀬戸 心太

(長崎大学 総合生産科学研究科)

要旨

GSMaP の作成の際に、マイクロ波放射計で推定された降水強度を、観測時刻を含む 1 時間における推定値として割り当てている。また、GSMaP を検証する際には、例えば解析雨量のような 1 時間降水量データが使われることが多い。このように、GSMaP の作成・検証において、マイクロ波放射計による降水強度推定値の時間スケールと時間ラグが適切に考慮されているとは言い難いのが現状である。本研究では、日本域を対象に、国土交通省の地上レーダ XRAIN と気象庁および国土交通省の雨量計を合成して 1 分値降水強度プロダクト(1MPR)を作成し、それを用いて GSMaP の検証を行う。

1MPR 作成の概要を以下に示す。雨量計のある場所においては、瀬戸ら(2024)の方法により、雨量計の転倒までの転倒の発生時刻を推定し、その間の XRAIN の積算降水量が雨量計の観測雨量と合うように、XRAIN の降水強度を次式で補正する。

$$(\text{補正後の降水強度})=s \times (\text{補正前の降水強度})+c$$

補正後の降水強度>補正前の降水強度の場合は、 $s=1$, $c>0$ とする。補正後の降水強度<補正前の降水強度の場合は、 $s<1$, $c=0$ とする。次に、 s および c の値を時間平滑化と空間内挿する。空間内挿には、次式を用いる。

$$s = \left[Ws_0 + \sum_{i=1}^N \frac{D^2 s_i}{d_i^2} \right] / \left[W + \sum_{i=1}^N \frac{D^2}{d_i^2} \right] \quad c = \left[Wc_0 + \sum_{i=1}^N \frac{D^2 c_i}{d_i^2} \right] / \left[W + \sum_{i=1}^N \frac{D^2}{d_i^2} \right]$$

ただし、 N と i は内挿に使用する雨量計の数および番号、 d_i は雨量計 i からの距離(km)、 $D=111.111\text{km}$ 、 W は XRAIN の信頼度を表わす重み係数、 $s_0=1.0$ 、 $c_0=0.0$ である。 W は、最も近いレーダサイトからの距離に応じて決めている(瀬戸ら, 2025)。XRAIN の観測と地表面の高度差の影響を、以下のように補正した。最も近いレーダから仰角 1.8 度で観測されたものとして、XRAIN の観測高度を求め、降水の落下速度(250m/分)で割った値を時間差として、XRAIN の観測時刻から遅らせて 1MPR の時刻とした。また、X バンドレーダから 60km 以内または C バンドレーダから 120km 以内である場所を定量観測範囲内とみなして、検証の対象とした。

2022 年 6 月の GSMaP 標準プロダクト(V8)を検証した。タイムスタンプを参照し、マイクロ波放射計による推定値のみを抽出した。タイムスタンプに示された時刻を基準として、時間スケール(1 分, 10 分, 30 分, 60 分)および時間ラグ(-30 分から+30 分まで 1 分刻み)を変えて、1MPR の降水強度の平均値を求めた。対象とするすべてのデータを用いて GSMaP と 1MPR の相関係数を算出した。ラグが+10 分付近のとき、相関係数が最大となった。また、時間スケールが長いと、相関係数が高い傾向にあった。このことは、マイクロ波放射計の観測が地表面より高い位置の降水に依存していることを反映している。ラグや時間スケールについて、陸上と海上の違いは明確でなかった。また、相関係数の値は、海上の方が陸上よりも高かった。このことは、放射アルゴリズムの方が散乱アルゴリズムより優れていることを反映している。

地形勾配・風向が GSMaP 降水量のパフォーマンスに与える影響

野津 雅人¹, 松山 洋¹, 松本 淳^{1, 2, 3}

(1: 東京都立大学, 2: 横浜国立大学, 3: フィリピン・マニラ観測所)

1. はじめに

全球降水量推定データ GSMaP はマイクロ波放射計観測をベースとしている。マイクロ波観測は上昇流時に降水を過小評価する傾向がある (Shige et al. 2013) ので, GSMaP アルゴリズムでは, 大気客観解析データを元にした鉛直速度に基づく補正が行われている (Yamamoto and Shige 2015)。

著者のグループは伊豆諸島に雨量計を設置して, 既存の観測網を強化する形で観測を行っている。このことにより, 離島域における「島平均」降水量を GSMaP 降水推定と比較することで, 海洋域における GSMaP の再現性の性質を把握しようとしている。観測点付近の上昇流が GSMaP の再現性に与える影響を知ることで, GSMaP 再現性の性質をより正確に知ることができると考えた。

本稿は, 雨量観測点における鉛直速度を, 気象庁による風の観測および地形の分布から推定する。この推定鉛直速度と GSMaP の再現性の関係を調べた結果を報告する。

2. データと手法

GSMaP は標準プロダクト (MVK ver. 8) を用いた。地上観測データは, (1) 八丈島三根小学校の雨量計データ, (2) 気象庁による八丈島空港 (地点名: 八重見ヶ原) の風向風速を用いた。地形は ETOPO (NOAA National Centers for Environmental Information 2022) の 15 秒データを用いた。解析期間は 2022 年 3 月から 2024 年 9 月までの約 2 年半である。

3 時間降水量を解析対象とした。鉛直速度の計算には, 風向風速は中間時刻の値を用いた。GSMaP 降水量の再現性は地上降水強度依存性がある (Scheel et al. 2011) ので, 本稿の解析では, 3 時間降水量が 13.5–35.5 mm の事例のみを解析に用いた。鉛直速度 w は次式により推定した。 u はスカラー風速値, x は風上を正方向とした水平距離, z は標高である。

$$w = -u \cdot dz/dx$$

3. 結果・議論

鉛直速度が大きい (上昇流) ほど, 降水量の GSMaP / 地上観測比 (RatP_GsGg) は小さく, 全体的に GSMaP が過小評価している。個別の事例を見ると, 鉛直速度が負の領域 (下降流) では RatP_GsGg の幅が小さく 1 付近に集まる。一方で, 鉛直速度が正の領域 (上昇流) で RatP_GsGg の幅が大きい。横軸を鉛直速度, 縦軸を RatP_GsGg の対数値でとった散布図上では, 各事例は右上を直角とする直角三角形の領域に分布する。この「右上領域」は, 上昇流にも関わらず GSMaP による過小評価が目立たない事例である。

上記の散布図を風向ごとに検討した。上昇流は北～東風時, 下降流は南～西風時が中心である。これは本稿で取り上げた地点から見た風上の地形分布によるところが大きい。南～西風時であっても, 下降流が強い時ほど RatP_GsGg の値が 1 付近に集中していて, 弱いほど RatP_GsGg が 1 より小さい GSMaP 過小評価事例が増えるという傾向に違いはなかった。

上記の散布図を地上降水強度ごとに検討した。地上降水量が大きい場合 (3 時間雨量 20.0 mm 以上) に比べると, 小さい場合の鉛直速度と RatP_GsGg の相関が弱いように見える。GSMaP の過大・過小と鉛直速度の関係は, 強雨時に強くなる可能性がある。

4. まとめ

GSMaP 降水強度の再現性は下降流が強いほどよい。また、再現性のよい事例 (RatP_GsGg ~ 1) が弱い下降流および上昇流時にも存在するが、過小評価事例が顕著に増える。下降流が弱いあるいは上昇流時に過小評価の事例が増える一方で、再現性のよい事例が減少するわけではないことが分かった。本稿では、八丈島の一地点のみの結果を示したものである。今後は伊豆諸島の他島も含めた他の降水観測点に関する検討を行う予定である。

次期 GSMaP にむけたマイクロ波センサ間降水量補正モジュールの改良

吉田奈央¹, 久保田拓志¹, 山本宗尚¹

(1: JAXA/EORC)

要旨

地上観測データを用いた衛星降水プロダクトの検証は、その精度評価やアルゴリズム改良の観点から重要である。本研究では、気象庁が運用する解析雨量 (Radar-AMeDAS; RA) データを基準として、JAXA が開発・運用している Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) および NASA が開発・運用している Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) の降水推定値を評価した。評価対象は、日本の陸域と気象レーダー観測でカバーされる周辺海域とした。

月平均降水量に対する二乗平均平方根誤差 (RMSE) を比較した結果、特に夏季において、GSMaP は IMERG よりも大きな値を示す傾向が確認された。GSMaP で見られた夏季の誤差要因を明らかにするため、GSMaP マイクロ波放射計アルゴリズムに着目した。さらに、リトリーバル手法や精度の観点から、センサ種別および地表面種別に依存した特性を解析した。マイクロ波イメージャ (GCOM-W/AMSR-2 等) およびマイクロ波サウンダ (NOAA/N19, MetOp シリーズ搭載の MHS, AMSU-A 等) による降水推定は、概ね RA 観測と良好に対応した。一方で、DMSP 衛星シリーズに搭載された SSMIS による降水推定は、日本周辺海上において夏季に顕著な過大評価を示し、とくに 10 mm/h を超えるやや強い雨以上でその傾向が顕著であった。

さらに解析を進めた結果、GSMaP プロダクトバージョン 05 (アルゴリズムバージョン 8) から実装されているマイクロ波センサ間降水量補正モジュール (Method of Microwave Rainfall Normalization; MMN) (Yamamoto & Kubota, 2020) が、SSMIS の海上における過大評価を増幅している可能性が示された。そこで本研究では、Bouwer et al. (2004) を参考に、降水強度の平均値および標準偏差を用いた新たな MMN 手法を提案する。改良した MMN は、対象センサの平均降水量を GPM Core Observatory/GMI の平均降水量に近づけ、極端降水の寄与を抑制した結果、SSMIS における RMSE を効果的に低減した。本改良は、日本周辺域における GSMaP 降水推定の信頼性向上に寄与すると期待され、2026 年 8 月の GSMaP メジャーバージョンアップに実装される予定である。

次世代 GSMaP に向けた議論

山地萌果¹, 吉田奈央¹, 久保田拓志¹

(1: JAXA/EORC)

要旨

衛星全球降水マップ (GSMaP) は、2002 年から 2007 年にかけて実施された、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 (CREST) 研究領域「水の循環系モデリングと利用システム」の研究課題「衛星による高精度高分解能全球降水マップの作成」(研究代表者: 岡本謙一 大阪府立大学工学系研究科 教授) による研究成果をベースに開発されている。2007 年以降は、JAXA 降水観測ミッションサイエンスチームにより引き続きアルゴリズム開発が行われており、GSMaP の降水推定精度向上のため、JAXA は共同研究機関の研究者とともに、日々研究開発に取り組んでいる。

近年は、気象・気候監視、防災をはじめ幅広い分野での利活用も進み、利用ニーズの多様化・高度化も並行で進んでいる。また、機械学習や人工知能 (AI) の発展により、従来手法では対応が難しい課題も、新しいアプローチによって解決可能になってきている側面もあり、2026 年度に公開予定の次バージョンの GSMaP でも、一部機械学習による技術が取り込まれる予定である (2025 年度 GPM および衛星シミュレータ合同研究集会広瀬ほか)。

定量的な推定精度の向上においては、地上観測との融合が重要となる。GSMaP の補正に用いる雨量計データについて、現在は米国海洋大気庁気候予測センター (NOAA/CPC) による日雨量データを用いているが、ドイツ気象局 (DWD) による GPCC 月雨量データを用いることで、より多くの雨量計の情報を取り込むことが可能となるため、このような雨量計情報を取り込んだ気候学的な GSMaP データについても開発を計画している。また、降水レーダ衛星による日周期を補正する手法 (2025 年度 GPM および衛星シミュレータ合同研究集会 Konduru ほか) や、アンサンブルデータ同化の活用 (2025 年度 GPM および衛星シミュレータ合同研究集会 武藤・小槻) などの新しい手法も開発されてきている。

さらに、実利用の幅という観点では予測情報のニーズが多く、数値モデルとの融合も重要な開発課題となる。JAXA においても、GSMaP 理研ナウキャストや GSMaP 理研 AI ナウキャスト、また、NEXRA との連携により、研究開発を進めているところである。今後は、リアルタイム版 GSMaP_NOW からのシームレスなナウキャスト手法の開発等について、GSMaP_NOW そのものの高度化も含めた研究開発を強化していく予定である。

JAXA では、熱帯降雨観測衛星 (TRMM) や全球降水観測 (GPM) 計画主衛星に続く、降水レーダ衛星 (PMM) を開発中であり、研究集会においては PMM 時代を見据え、次世代 GSMaP の開発に向けたアイデアについて、現状の考えを報告し、議論する。