

衛星観測による全球降水マップの開発と社会での実利用推進

—2019年度岸保・立平賞受賞記念講演—

青 梨 和 正*・久保田 拓 志**

1. はじめに

このたび「衛星全球降水マップ Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP)」の開発と実利用の推進について、2019年度の岸保・立平賞をいただき、たいへん光栄に思います。ご推薦して下さった先生方と日本気象学会の皆様へ厚くお礼申し上げます。またこれまで GSMaP プロジェクトと一緒に仕事をして下さった多くの方々に深く感謝致します。

筆者らは熱帯降雨観測衛星 (TRMM) や全球降水観測 (GPM) 計画等の衛星観測データを用いて、GSMaP の中心的なセンサであるマイクロ波放射計用の降水推定アルゴリズムを開発してきました (Aonashi *et al.* 1996 ; Aonashi and Liu 2000 ; Kubota *et al.* 2007 ; Aonashi *et al.* 2009)。また降水マップを作成するシステムの構築に取り組み、現在、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が GSMaP の降水量データを準リアルタイムで提供しています (可知ほか 2011 ; 久保田ほか 2013 ; Kubota *et al.* 2020)。GSMaP プロダクトは JAXA のホームページなどで公開され、JAXA が運用する「世界の雨分布速報」の登録者は世界の約140ヶ国に広がっています。

本稿では、衛星観測からの降水のリモートセンシング (第2節)、GSMaP アルゴリズムの概要 (第3節)、

JAXA 地球観測研究センター (EORC) における GSMaP プロダクトや GSMaP を用いたホームページの紹介 (第4節)、GSMaP の利用 (第5節)、さらには性能向上に向けた取り組み (第6節) を紹介することで受賞への謝意を表したいと思います。

2. 衛星観測からの降水のリモートセンシング

「降水」は地球システムを構成する最も重要なパラメータのひとつで、気象、気候、洪水、農業など、さまざまな分野における基礎情報です。

しかし、従来の地上観測 (雨量計や降水レーダ) は陸上の一部に限定されていました。Kidd *et al.* (2017) は、1個の雨量計が仮に25km四方を代表すると仮定した場合でも、地上雨量計は陸域の23%程度、海上も含めると6%程度しかカバーしていない (北緯60度～南緯60度を対象とした値) ことを述べています。従って、全球的な降水 (特に、熱帯の海上で発生、発達する熱帯低気圧) の把握には、衛星観測データが不可欠です。

現在降水のリモートセンシングに使われる主な衛星観測センサは、降水レーダ、マイクロ波放射計、赤外放射計の3種類です。第1図に、TRMM による九州南海上の降水擾乱の観測事例を示します。

降水レーダは、自らが送信したマイクロ波の降水粒子による後方散乱を計測します。このため、第1図aのように降水強度を精度よく推定しますが、降水レーダを搭載する衛星は TRMM 衛星と GPM 主衛星のみであり、降水レーダの観測幅も狭いため、観測機会に限られます。

マイクロ波放射計は、地球大気からのマイクロ波を受信し、大粒径の水粒子である、雨や固体降水粒子のシグナルを見ることができます (早坂 1996 ; 岡本ほか

* 京都大学大学院理学研究科/宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター。

aonashi.kazumasa.3z@kyoto-u.ac.jp

** (連絡責任著者) 宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター。

kubota.takuji@jaxa.jp

—2021年6月14日受領—

—2021年10月7日受理—

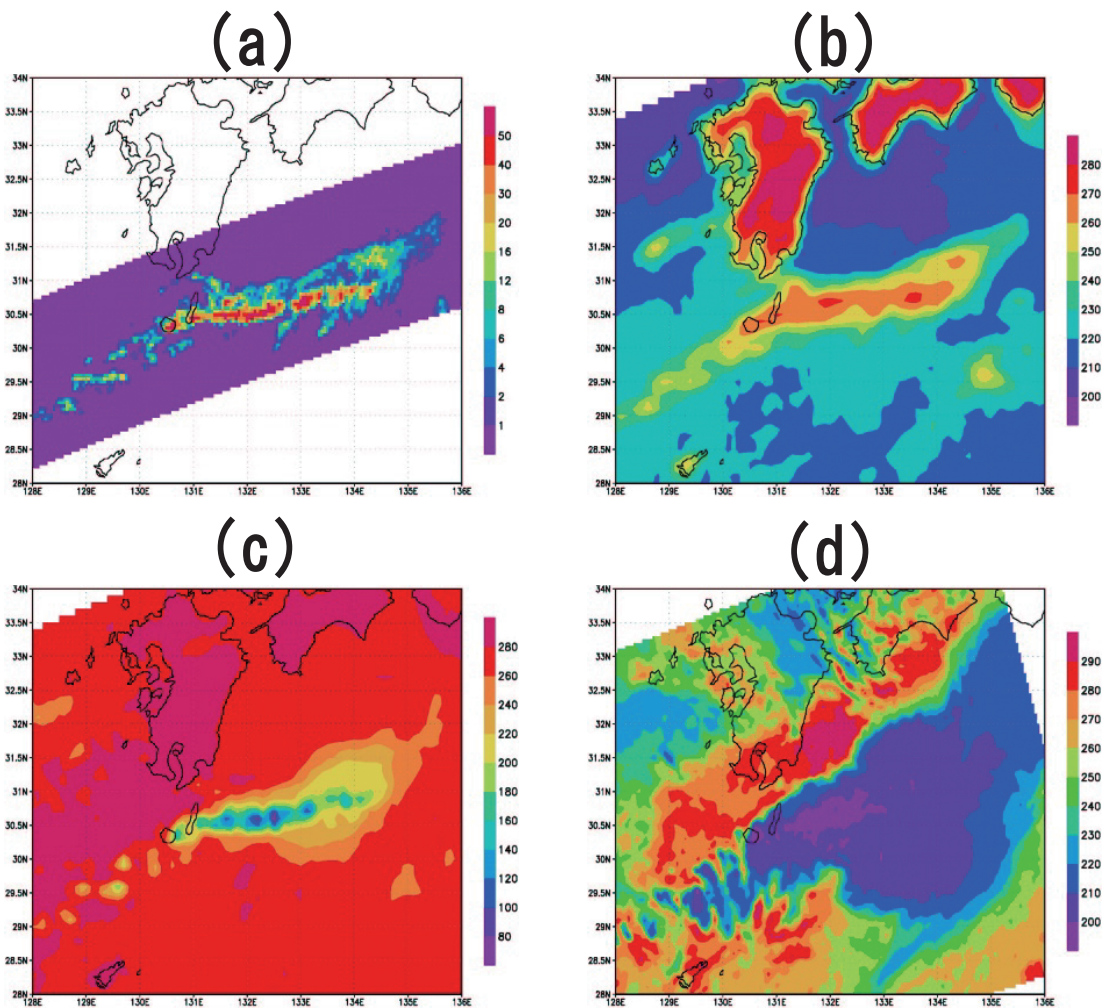
2009). 第1図bと第1図cでは、海上の強雨域が、低周波では高温域(第1図b)、高周波では低温域(第1図c)として表現されています。マイクロ波放射計は低軌道の地球観測衛星に多く搭載されているので、降水レーダより観測機会が多くなります。

赤外放射計は、静止衛星等に搭載されているため、観測頻度は非常に多くなります。しかし、雲の上層部からの放射輝度温度を観測するため、降水との相関は低くなります。第1図dでは、輝度温度の低い領域が広範囲にわたっていて、強雨域の判別が困難です。

衛星観測から全球的な降水を推定するプロジェクト

は TRMM や GPM を通じて飛躍的に発展してきました。

TRMM は1997年11月に打ち上げられ、2015年4月に観測を終了するまで17年の長期にわたって観測を継続しました (Kummerow *et al.* 1998; 岡本 2019)。TRMM は「雨」の観測に特化した最初の衛星計画であり、マイクロ波放射計 TMI と、日本が開発した世界初の衛星搭載型降雨レーダ PR が搭載されています (Kozu *et al.* 2001; Takahashi *et al.* 2016)。TRMM 衛星の打ち上げで、マイクロ波放射計と降雨レーダの同時観測が実現することにより、マイクロ波放射計の降



第1図 九州南海上の降水擾乱に対する熱帯降雨観測衛星 (TRMM) の観測事例。(a) 降水レーダ (降水強度 mm hr^{-1}): 精度が高い、観測幅が狭く観測機会に限られる。(b) マイクロ波放射計 (19GHz 垂直偏波輝度温度 K): 海上で雨からの放射に感度がある。(c) マイクロ波放射計 (85GHz 垂直偏波輝度温度 K): 海陸とも雪・霰の散乱に感度がある。(d) 赤外放射計: (雲頂温度 K) 降水と相関小。

雨推定アルゴリズムの開発は大きく進展しました (Aonashi and Liu 2000 ; Kubota *et al.* 2007 ; Aonashi *et al.* 2009等)。

GPM は、TRMM の成果を引き継ぎつつ、その拡大・拡張ミッションとして全球の降水をより高精度・高頻度に観測する衛星計画として日米共同で開発が進められてきました (Hou *et al.* 2014 ; Skofronick-Jackson *et al.* 2017 ; Kidd *et al.* 2020)。その中心となる GPM 主衛星は、種子島宇宙センターより、2014年2月に打ち上げられました。第2図に GPM 計画の概念図を示していますが、計画の中心となり高精度を達成する GPM 主衛星と、高頻度観測を可能とするコンステレーション衛星群から構成されています。GPM 主衛星は、日本が開発した二周波降水レーダ DPR (TRMM 降水レーダ PR の後継) (Kojima *et al.* 2012 ; Kubota *et al.* 2014 ; Iguchi 2020 ; Masaki *et al.* 2020 ; Seto *et al.* 2021) と、米国が開発した GPM マイクロ波放射計 GMI (TRMM マイクロ波放射計 TMI の後継) の2種類のセンサを搭載しています。さらに、GPM パートナーとなる各国機関が打上げ・運用するマイクロ波放射計を搭載した複数の衛星 (コンステレーション衛星群) と連携することで、全球降水の高精度・高頻度観測を実現し、科学研究と共に実利用も目的としています。

日本において開発された衛星全球降水マップ GSMaP は、2002年から2007年までの期間で実施された、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 (CREST) 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

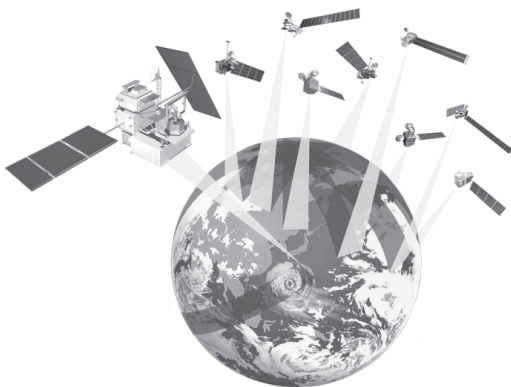
立大学大学院工学研究科教授(当時))により開発されました。2007年以降は、JAXA GPM 標準プロダクトとして、JAXA 降水観測ミッションサイエンスチームにより引き続きアルゴリズム開発が行われています。現在 GSMaP の空間分解能は緯度経度0.1度格子、時間分解能は1時間で、2000年3月から現在に至る約20年間以上のデータが利用可能です。

3. GSMaP アルゴリズムの概要

GSMaP プロジェクトでは、上記の3種類の衛星観測センサのデータを組み合わせて、高分解能、高頻度の降水データを作成しています。GSMaP 降雨推定アルゴリズムは、主に3つのアルゴリズムから構成されています (Kubota *et al.* 2020)。1つめはマイクロ波放射計用の降水推定アルゴリズムです (Aonashi *et al.* 1996 ; Aonashi and Liu 2000 ; Kubota *et al.* 2007 ; Aonashi *et al.* 2009)。第1表に GSMaP で利用しているマイクロ波放射計のリストを示します。JAXA が開発し、2012年5月に打上げられた水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W) に搭載されている高性能マイクロ波放射計2 (AMSR2) は、マイクロ波イメージャの1つです (Imaoka *et al.* 2010)。AMSR2は、有効径2.0mの展開型反射鏡により空間分解能を向上させ、観測幅は1450kmです。また大気温度や水蒸気高度分布を測定するセンサであるマイクロ波サウンダも GSMaP では降水推定に用いています。マイクロ波放射計の詳細は Aonashi and Ferraro (2020) をご参照ください。

マイクロ波放射計用のアルゴリズムでは、観測された輝度温度に対して、降水物理モデルを仮定し、放射伝達方程式を計算して、輝度温度と地表降雨強度の関係をテーブル化し、観測値に近い輝度温度を与える地表降雨強度を解としています。大気情報として、気象庁の全球客観解析値および全球予報値が使われています。過去期間については、気象庁55年長期再解析 (Kobayashi *et al.* 2015 ; Harada *et al.* 2016) を利用しています。

アルゴリズム内でどのような降水物理モデルを仮定するかは精度に大きく影響を与える要素で、GSMaP 研究チームでは TRMM/PR や GPM/DPR から得られる降水物理情報を利用するための研究活動を行ってきました。アジアモンスーン域で効果が大きい地形性降雨推定の改良については重(2020)をご参照ください。またセンサの仕様に対応して、マイクロ波イメージャ



第2図 GPM 計画の概念図。DPR を搭載し、高精度観測を行う GPM 主衛星と高頻度観測を可能とするコンステレーション衛星群から構成される。

用のアルゴリズム (Aonashi *et al.* 2009), NOAA 衛星搭載の AMSU-A/AMSU-B といったマイクロ波サウンダ用のアルゴリズム (Shige *et al.* 2009; Kida *et al.* 2018), DMSP 衛星搭載の SSMIS といったマイクロ波イメージャ/サウンダ用のアルゴリズム (Kubota *et al.* 2011) があります。

2つめのアルゴリズムは、マイクロ波-赤外複合アルゴリズムです。マイクロ波放射計の観測だけでは、高い時間分解能の全球降水マップを作成する際に、空間的に未観測領域が残るといった問題があります。一方、赤外放射計は静止気象衛星に搭載され、時空間的な観測頻度は卓越していますが、前述したように、降雨の直接観測が困難という問題があります。このため GSMaP では、赤外放射計を直接的に降雨推定に用いるのではなく、赤外放射計のデータから推定される雲移動ベクトルにより、降雨域を移動させることで補間する手法を採用しています。さらにカルマンフィルタを用いて、移動した降雨の成長・減衰を推定することで精度を高めています (Ushio *et al.* 2009)。

なお、GSMaP の標準プロダクトや準リアルタイムプロダクトでは、赤外放射計のデータとして、米国海

洋大気庁 (NOAA) 気候予測センター (CPC) が作成している、Globally-merged full-resolution (~4 km) IR Data (Janowiak *et al.* 2001) を利用しています。この IR データは、気象庁、欧州気象衛星開発機構 (EUMETSAT), NOAA の静止気象衛星データから全球画像を合成しています。

3つめのアルゴリズムは雨量計による調整アルゴリズムです。マイクロ波-赤外複合アルゴリズムを適用した降水推定値と NOAA CPC によって配布されている CPC Unified Gauge-Based Analysis of Global Daily Precipitation プロダクト (Chen *et al.* 2008) を入力として、降水強度の値を調整します。調整後の雨量は、最尤推定法に基づいており、24時間の積算雨量が、NOAA/CPC 雨量計プロダクトと類似するよう制限することによって得られています (Mega *et al.* 2019)。

これらのアルゴリズムを通じて、最終的に、水平分解能が緯度経度0.1度格子で、時間分解能が1時間の降雨量が北緯60度~南緯60度の範囲で作成されます。第3図は全球降水マップの空間分解能の比較を示しています。TRMM 登場以前の全球降水マップの代表格

第1表 GSMaP で利用しているマイクロ波放射計のリスト (2021年4月現在)。センサ種別でイメージャはI, サウンダはS, イメージャサウンダはI/Sで示す。

衛星名	センサ名	センサ種別	GSMaP での利用状況
GPM Core	GMI	I/S	2014年9月3日以降, 利用開始
TRMM	TMI	I	2015年4月8日運用停止
AQUA	AMSRE	I	2011年10月4日運用停止
GCOM-W	AMSRE2	I	2013年7月1日以降, 利用開始
DMSP-F13	SSM/I	I	2009年11月18日運用停止
DMSP-F14	SSM/I	I	2008年8月24日運用停止
DMSP-F15	SSM/I	I	2006年8月以降, 海上の降雨のみ利用。 2014年9月2日より利用停止。
DMSP-F16	SSMIS	I/S	2010年6月11日以降, 利用開始
DMSP-F17	SSMIS	I/S	2010年6月11日以降, 利用開始 2017年1月25日より利用停止
DMSP-F18	SSMIS	I/S	2013年7月1日以降, 利用開始
DMSP-F19	SSMIS	I/S	2015年3月25日以降, 利用開始 2016年2月11日より利用停止
NOAA-N18	AMSU-A/MHS	S	2014年9月2日以降, 利用開始 2018年10月23日より利用停止
NOAA-N19	AMSU-A/MHS	S	2011年8月1日以降, 利用開始
MetOp-A	AMSU-A/MHS	S	2011年8月1日以降, 利用開始 2019年12月16日より利用停止
MetOp-B	AMSU-A/MHS	S	2014年9月2日以降, 利用開始
MetOp-C	AMSU-A/MHS	S	2020年9月17日以降, 利用開始

として、NOAAの気候予測センターのグループによるCMAP（水平分解能：緯度経度2.5度格子，時間分解能：5日平均/月平均）(Xie and Arkin 1997)や、NASA/GSFCのグループによるGPCP-1DD（水平分解能：1度格子，時間分解能：日平均）(Huffman *et al.* 2003)を挙げるすることができます。また、TRMM標準プロダクトであるTMPA 3B42 (Huffman *et al.* 2007)は、0.25度格子の3時間平均のプロダクトです。第3図は2003年9月8-12日の5日積算値で、CMAP、GPCP-1DD、TMPA 3B42、GSMaPの比較を行っていますが、全球降水マップの高解像度化がよくわかります。

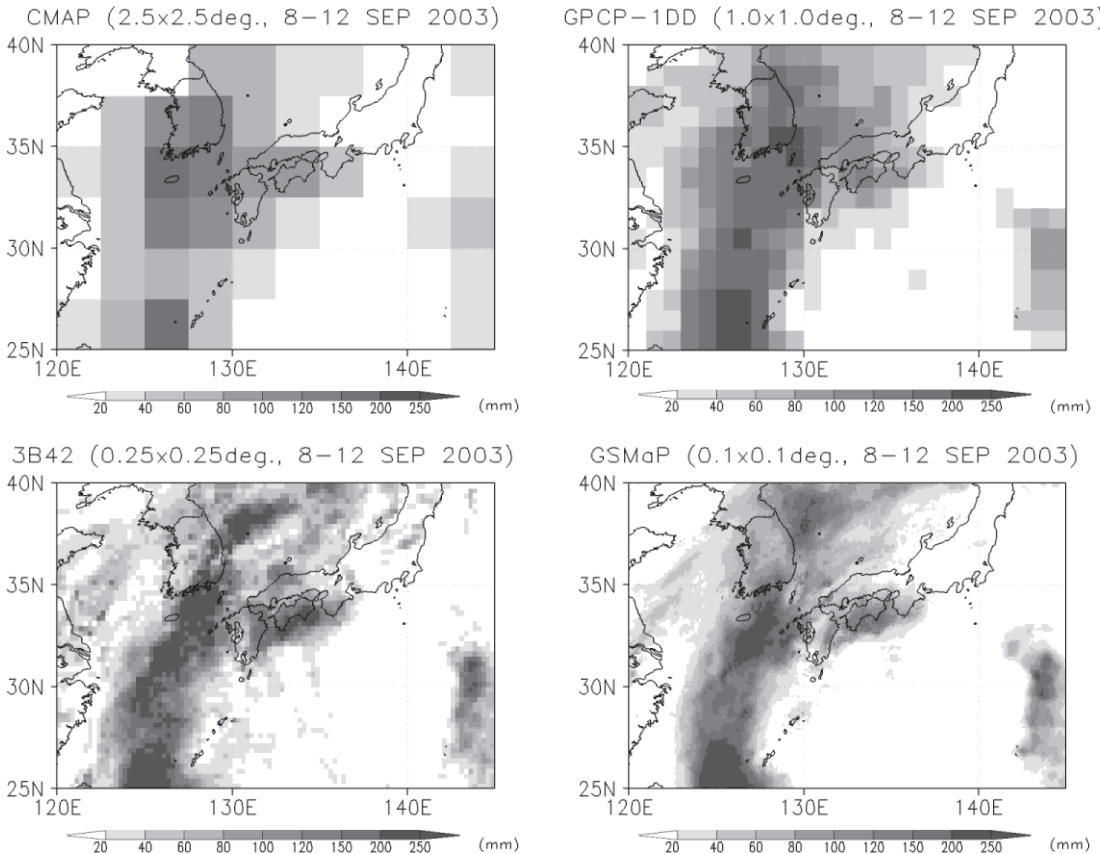
地上観測データを用いたプロダクトの検証は、GSMaPの精度を確認するとともに、アルゴリズムの課題を抽出するために重要な研究です。これまで筆者らが関わった検証研究として、気象庁解析雨量による研究 (Kubota *et al.* 2007, 2009, 2020；可知ほか 2011；Takido *et al.* 2016；Yamaji *et al.* 2021)，米国の

地上レーダによる研究 (Tian *et al.* 2010；Kubota *et al.* 2020)，地上雨量計データによる研究 (Kubota *et al.* 2007；Shrestha *et al.* 2011；Tashima *et al.* 2020) 等を進めてきました。さらにユーザによる様々な地域におけるGSMaPの検証結果が示されています。

2016年7月に開催したJAXA/EORC水循環ワークショップでは、プロダクトの信頼性を示す指標が気象水文のユーザの利用に役立つとの議論がありました。その議論をきっかけとして開発したGSMaPプロダクトの信頼度フラグを2017年5月から提供しています。Yamaji *et al.* (2021) は、信頼度フラグの大小が気象庁解析雨量で評価されたGSMaPの性能の高低とよく対応していることを示しました。

4. JAXAにおけるGSMaPプロダクトやGSMaPを用いたホームページの紹介

JAXA/EORCでは、準リアルタイムでGSMaPデー



第3図 全球降水マッププロダクトの空間分解能の比較。(左上) CMAP, (右上) GPCP-1DD, (左下) 3B42, (右下) GSMaP。久保田ほか (2013) から引用。

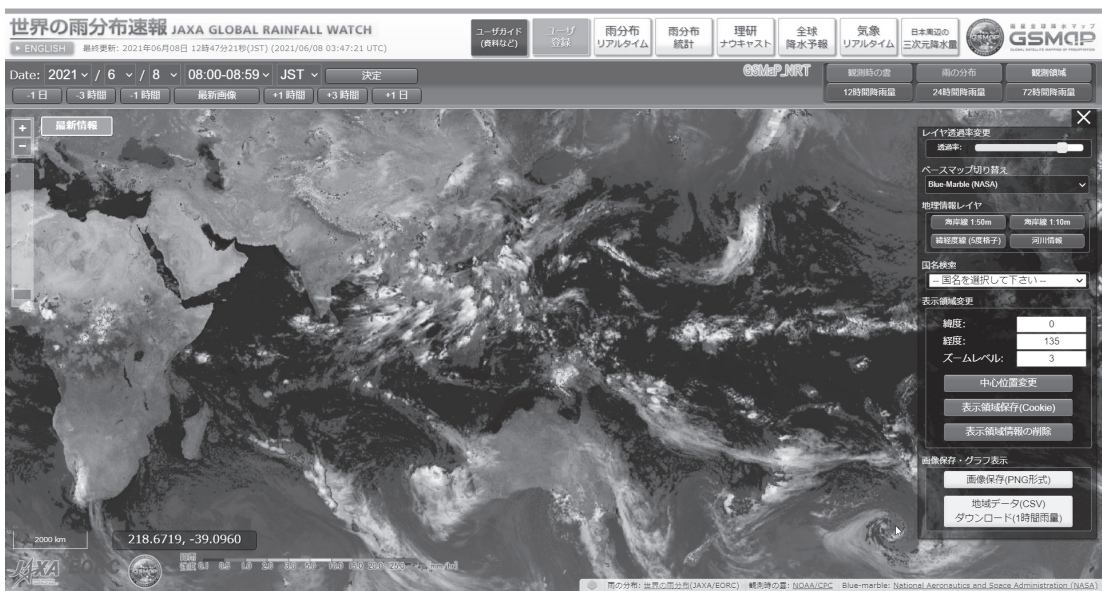
タを作成・公開することが可能なシステムの構築を行ってきました(可知ほか 2011; 久保田ほか 2013)。このシステムは「世界の雨分布速報」システムとして、2007年秋以降、定常運用とデータ公開を行っています(JAXA 2007)。本システムでは、観測から約4時間後に全球降水マップデータが提供されると同時に、ブラウザ画像、バイナリやテキスト形式のデータ等を、ウェブサイトから公開しています。第4図に「世界の雨分布速報」(https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/index_j.htm 2021.10.7閲覧)のホームページ画像を示します。HDFフォーマットのGSMaPプロダクトは地球観測衛星データ提供システムG-Portal (<https://gportal.jaxa.jp/gpr/> 2021.10.7閲覧)から取得が可能です。

利用ユーザから4時間というデータの提供時間遅れを軽減することへの要求が多かったため、2015年11月に、GPM新規開拓プロダクトとしてGSMaPリアルタイム版(GSMaP_NOW)の公開を開始しました(http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP_NOW/index_j.htm 2021.10.7閲覧)。これは、観測時間遅れをほぼ0分にしたもので、観測後30分のデータ待ち合わせの後に作成した30分前の降水分布に、前時刻の雲移動ベクトルを適用し、未来方向に30分外挿して、「ほぼリアルタイム」の1時間降水量としたものです(Kubota *et al.* 2020)。2015年11月に日本の静止気象衛星「ひまわり」

の領域における実時間の降雨分布の提供を開始しました。2018年11月からは、EUMETSATの静止気象衛星Meteosat観測領域まで対象領域を拡張し、2019年6月にNOAAの静止気象衛星GOESデータを追加することで、全球に拡張しました(JAXA 2019a)。これにより、世界中の雨の様子をリアルタイムにウェブ上で閲覧できるようになりました。

さらに2020年3月からは、豪雨や干ばつなどの降水変動監視のための新しいGSMaPウェブサイト「世界の雨分布統計」を公開しました(JAXA 2020)。このウェブサイトでは「1日・3日・5日・7日・10日・月」単位の平均降水量や、Tashima *et al.*(2020)の手法に基づく豪雨指数や干ばつ指数を表示可能です。

また、理化学研究所(理研)三好建正チームリーダーの研究グループや東京大学大気海洋研究所佐藤正樹教授の研究グループと共同で、GSMaPを用いた気象予測の研究に取り組み、その成果の活用としてホームページを運用しています。2017年8月以降、理研データ同化研究チームで作成されているGSMaPデータを用いた降水ナウキャスト技術(Otsuka *et al.* 2016, 2019)に基づく予報データ(GSMaP_RIKEN Nowcast; GSMaP_RNC)を理研のホームページ、ならびにJAXAの理研ナウキャストウェブページで公開してきました(JAXA 2017)。またGSMaPをデータ同化する数値天気予報システム(Kotsuki *et al.* 2017,



第4図 「世界の雨分布速報」の例。(https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/index_j.htm)。

2019a) を JAXA のスーパーコンピュータによりリアルタイムで実行し、「世界の気象リアルタイム NEXRA」として2018年11月から公開しています (JAXA 2018). さらには, Kotsuki *et al.* (2019b) の手法に基づき, GSMaP_RNC と NEXRA を組み合わせた 5 日後までの予報データを, 理研のホームページ, および, 「GSMaP×NEXRA 全球降水予報」で2020年 8 月より公開しています (理研ほか 2020).

さらに JAXA は東京大学生産技術研究所芳村 圭教授の研究グループ共同で陸面水循環シミュレーションシステム Today's Earth (TE) を開発しています (Ma *et al.* 2021). TE 全球システム (TE-Global) で GSMaP を入力した陸面モデルや河川氾濫モデルの出力結果が TE-Global のホームページで公開されています (<https://www.eorc.jaxa.jp/water/> 2021.10.7閲覧).

5. GSMaP の利用

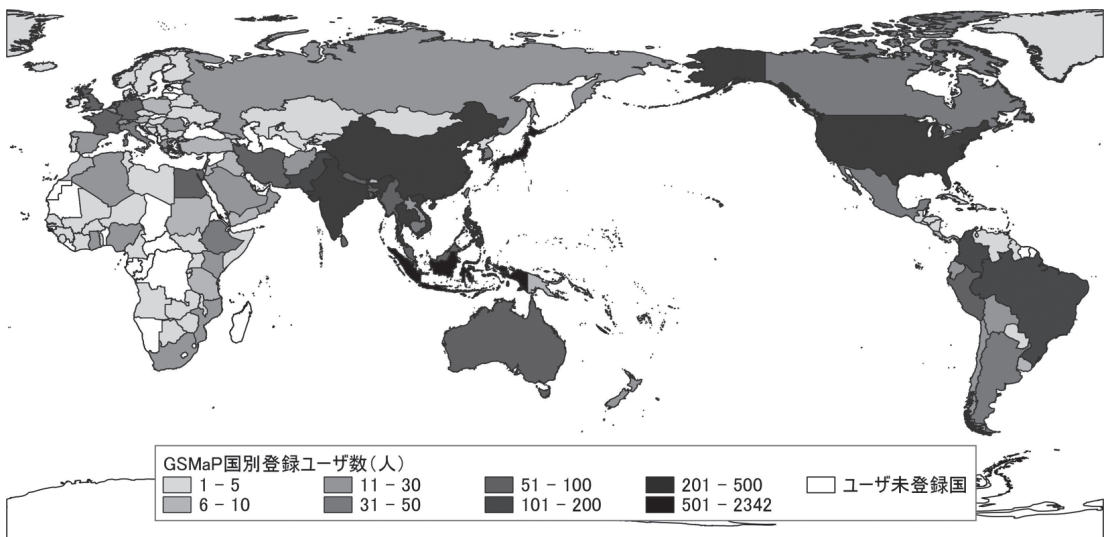
第 4 節で紹介した「世界の雨分布速報」では画像は自由に閲覧できますが, データ提供について, 登録を必要としています. 2021年 4 月末現在, 「世界の雨分布速報」の登録者は約7500名, 139か国に広がっています. 第 5 図に「世界の雨分布速報」の登録ユーザー約7500名の分布を示します. 地域別で見ると, アジアからの登録者は全体の78%を占めています. 日本国内からの登録者は全体の31%であるため, 日本を除くアジアからの登録者が, 日本国内よりも多い登録者数となって

います. これは日本国内では気象庁による地上観測測器が充実している一方, アジアの国々では地上観測設備が脆弱なため, 衛星による降水が有用であることが原因と考えられます. なお, アジアの内訳としては, インドネシア, インド, タイ, 中国, ベトナム, フィリピン, パキスタンの順で登録者が多くなっています. また機関別割合では, 大学が46%と最も高いですが, 実利用にも関連する政府機関・地方自治体が15%, 民間企業が11%を占めています.

GSMaP データを利用した学術論文の代表例として, 熱帯や中緯度の降水変動の解析や, 気象・気候モデルの検証を挙げることができます. GSMaP を用いた台風強度予測の改善手法の開発 (Shimada *et al.* 2018) は今後に期待ができる研究成果の 1 つです.

また実利用の推進として, 政府機関, 地方自治体, 民間企業との協力を進めています. 2019年 3 月, 気象庁と JAXA は共同報道発表「衛星全球降水マップ (GSMaP) の活用に向けた気象庁と宇宙航空研究開発機構の技術開発連携について」(気象庁・JAXA 2019) を実施し, GSMaP をナウキャスト地区特別気象センター業務に活用する技術開発連携を進めています.

世界気象機関 (WMO) は極端気象モニタリングプロジェクト SWCEM (Space-based Weather and Climate Extremes Monitoring) Demonstration Project (SEM DP) として, GSMaP データ等を用いた, 半旬〜月単位の極端気象モニタリングプロジェクトを, 東南



第 5 図 「世界の雨分布速報」の登録ユーザー約7500名の分布.

アジアと太平洋地域を対象に2018年1月から2年間、実施しました。2020年1月からはSWCEM in Operationとして継続されています。その成果はWMOの公式のジャーナルであるWMO BulletinにKuleshov *et al.* (2020a)としてまとめられています。またWMOが2019年の世界の気候について報告するWMO Statement on the State of the Global Climate 2019において、2019年のオーストラリアで発生した干ばつに関してGSMaP等を解析した結果がKuleshov *et al.* (2020b)として、掲載されています。

2019年4月10日より、GSMaPによる降水実況および予報情報が、日本気象協会が運営する天気予報専門メディアtenki.jpにて、「tenki.jp×JAXA世界の雨雲の動き」と題した新サービスとして、提供が開始されました(日本気象協会2019)。このコンテンツは、GSMaP_NOWをベースに、日本気象協会が開発した3時間先までの1時間毎の降水予報情報を提供します。東アジア、南・東南アジア、オセアニア、ハワイの4つのエリアでの降水実況・予報情報がtenki.jpから確認できます。

インドネシア気象局(BMKG)では現業的にGSMaPを取得し、降水監視や気象予報の検証として利用しています(Kubota2019)。また、干ばつや森林火災の可能性監視などの目的にも利用されています。

洪水分野では、GSMaPを入力とした洪水予警報システムやツールが、土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター(ICHARM)などで開発されています。例えば、豪雨により度重なる洪水の被害を受けるパキスタンにおいて、ユネスコプロジェクトとして、ICHARMがインダス川流域を対象に構築・導入した洪水予警報システム(Indus-IFAS)がパキスタン気象局(PMD)で現業的に利用されています(津田ほか2014)。

またタイ国水文情報機構(HII)とJAXAの共同研究で、GSMaPを使用した洪水予測システムと降雨監視システムを開発しました。GSMaPを用いたタイ国の降雨モニタリング情報は、2017年1月よりHIIのホームページに掲載されています(<http://djob.haii.or.th/drought/public/report/rainSatellite> 2021.10.7閲覧)。

JAXAは2018年度に電源開発株式会社と協定を締結し、主に水力発電分野でのGSMaPの実用性を確認するため、当該分野で重要となる長期GSMaPデータ(約15年分の日～年雨量)の精度検証を実施しました。

GSMaP精度や流出解析などの検証結果から、GSMaPのもつ誤差の特性を適切に考慮すれば有効に利用できる可能性があることが示された(森ほか2020)ため、協定を延長して協力を継続しています。

農業分野でも、GSMaPの利用が進みつつあります。農林水産省は2021年1月に農業気象情報衛星モニタリングシステム(JASMAI)を公開しました(農林水産省2021)。JASMAIは我が国の食料安全保障の確立に向け、衛星データを用いたリモートセンシング技術を活用し、海外の主要穀物生産地帯の気象情報等を地図上やグラフ形式で可視化して提供するシステムで、その降水量データとしてGSMaPが使われています。他にも、ミャンマーやタイを対象に、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と一般財団法人リモート・センシング技術センター(RESTEC)が共同で開発した事例もあります(RESTEC2019)。

教育目的の利用として、4次元デジタル地球儀「ダジック・アース」が挙げられます。GSMaPを利用した“最近の雲と雨の分布”がホームページ(<https://www.dagik.net/> 2021.6.11閲覧)で利用可能です。

本稿で紹介した利用事例の他にもいろいろな利用事例があります。JAXA/EORCでは、TRMM/GPM/GSMaPの利用事例集を作成し、ホームページ上で公開していますので、その事例集もご覧頂けると幸いです(JAXA2019b)。

6. GSMaPの性能向上に向けた研究の取り組み

最後に、GSMaPの性能向上に向けた研究の取り組みについて紹介します。GPM/DPRは2014年2月の打上げ以降、順調にデータを蓄積していますので、そのデータの活用が期待できます。GPM/DPRの3次元降水観測情報をもとにした降水推定技術の改良を、東京大学大気海洋研究所高敷 縁教授、京都大学大学院理学研究科重 尚一准教授、富山大学濱田 篤准教授と共同で進めています(Takayabu2008;重2020等)。またJAXAでは、GSMaPの高度化を目標の1つとする次期衛星搭載降水レーダの立ち上げに向け、実現性検討を進めています(Kummerow *et al.* 2020)。このようなミッションを通じて、地球規模での水課題に資する基盤情報として改良されたGSMaPデータの提供を継続していきたいと考えています。

現在のGSMaPは北緯60度～南緯60度の観測領域ですが、北緯90度～南緯90度に観測領域を拡張する予定

です。緯度60度～90度は寒冷域のため、領域拡張のためには、降雪推定手法の高度化が必要で、フロリダ州立大学 Guosheng Liu 教授と共同で開発を進めています。現在の降雪推定手法は雲プロファイリングレーダ (CPR) を搭載した CloudSat 衛星と GPM 主衛星の同時観測事例を集めたデータセット (Turk *et al.* 2021) に基づく手法 (Kubota *et al.* 2020) です。今後は、衛星搭載レーダとしては世界で初めてドップラー計測機能を有する CPR を搭載する雲エアロゾル放射ミッション EarthCARE (2022年度に打上げ予定; Illingworth *et al.* 2015; 菊池ほか 2019; 富田・久保田 2021) の利用に期待ができます。

機械学習も今後期待ができる手法の1つです。機械学習によりマイクロ波―赤外複合アルゴリズムを改良する研究を行っています (Hirose *et al.* 2021)。さらに、ひまわり 8 号の多チャンネルや高時空間分解データ利用による高精度化 (例えば Hirose *et al.* 2019; Ushio and Mega 2019) を千葉大学樋口篤志准教授や大阪大学牛尾知雄教授の研究グループと進めています。牛尾教授とは、NOAA/CPC 地上雨量計データに加えて、新たなデータセット、たとえば、GPCP 地上雨量計データ (Schneider *et al.* 2014) の利用検討も進めています。

海外機関との協力としては、インド宇宙研究機関 (ISRO) と JAXA の降雨プロダクトの検証・改良と利用研究に関する実施取決めに基づくアルゴリズム開発やインド国を対象としたプロダクト検証の研究 (Kumar *et al.* 2021) も進めています。

このような多くの方々との共同研究による GSMaP の性能向上や実利用の推進を今後も遂行し、衛星観測による全球降水マップの開発と社会での実利用推進に、引き続き貢献していきたいと考えております。

謝 辞

今回の岸保・立平賞受賞は多数の GSMaP 関係者の代表としていただいたものです。JST/CREST 時代からお世話になっている皆様、JAXA 降水観測ミッションサイエンスチームの皆様、気象庁気象研究所関係の皆様、リモート・センシング技術センターの皆様、JAXA の皆様に深く感謝します。

特に、岡本謙一鳥取環境大学名誉教授は、JST/CREST の研究課題の研究代表者として、GSMaP の開発で多大なリーダーシップを示して頂いたことは、現在に至る GSMaP の礎を築いて頂いたと深く感謝いた

します。

牛尾知雄大阪大学教授と重 尚一京都大学准教授とは、アルゴリズム開発やプロダクトの検証で密接な研究協力を進めてきたことについて深く感謝いたします。

高藪 縁東京大学教授には、TRMM や GPM のプロジェクトサイエンティストとして長年にわたりご指導を頂くとともに、GSMaP の名称をご提案して頂き、深く感謝いたします。

JAXA/EORC の沖 理子研究領域上席と可知美佐子研究領域主幹には、JAXA での GSMaP システムの構築や GSMaP の利用促進、ならびに TRMM、GPM や GCOM-W ミッションに関連して様々な支援を頂きました。

また本稿について、JAXA/EORC の田島知子研究開発員と山地萌果研究開発員に、記述についての助言を頂き、感謝いたします。

参 考 文 献

- Aonashi, K. and R. R. Ferraro, 2020: Microwave sensors, imagers and sounders. *Satellite Precipitation Measurement* (V. Levizzani *et al.*, eds.), Springer, Cham, 63–81.
- Aonashi, K. and G. Liu, 2000: Passive microwave precipitation retrievals using TMI during the Baiu period of 1998. Part I: Algorithm description and validation. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **39**, 2024–2037.
- Aonashi, K., A. Shibata and G. Liu, 1996: An over-ocean precipitation retrieval using SSM/I multichannel brightness temperatures. *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 617–637.
- 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.
- Chen, M. *et al.*, 2008: CPC Unified Gauge-based Analysis of Global Daily Precipitation. Western Pacific Geophysics Meeting, Cairns, Australia, 29 Jul. – 1 Aug. 2008.
- Harada, Y. *et al.*, 2016: The JRA-55 Reanalysis: Representation of atmospheric circulation and climate variability. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**, 269–302, doi:10.2151/jmsj.2016-015.
- 早坂忠裕 編, 1996: 地球環境のマイクロ波放射計リモートセンシング. 気象研究ノート, (187), 195pp.
- Hirose, H., S. Shige, M. K. Yamamoto and A. Higuchi, 2019: High temporal rainfall estimations from Himawari-8 multiband observations using the random-forest machine-learning method. *J. Meteor. Soc. Japan*,

- 97, 689-710.
- Hirose, H., T. Kubota, T. Tashima, T. Mega and T. Ushio, 2021: Histogram Matching to Improve Homogeneity in Satellite Merged Precipitation Products. *IEEE GRSL*, accepted.
- Hou, A. Y. *et al.*, 2014: The Global Precipitation Measurement Mission. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 701-722.
- Huffman, G. J. *et al.*, 2003: Global precipitation at one-degree daily resolution from multi-satellite observations. *J. Hydrometeorol.*, **2**, 36-50.
- Huffman, G. J. *et al.*, 2007: The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J. Hydrometeorol.*, **8**, 38-55.
- Iguchi, T., 2020: Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) on the Global Precipitation Measurement (GPM) mission's core observatory. *Satellite Precipitation Measurement (V. Levizzani et al., eds.)*, Springer, Cham, 183-192.
- Illingworth, A. J. *et al.*, 2015: The EarthCARE Satellite: The next step forward in global measurements of clouds, aerosols, precipitation, and radiation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **96**, 1311-1332.
- Imaoka, K. *et al.*, 2010: Global Change Observation Mission (GCOM) for monitoring carbon, water cycles, and climate change. *Proc. IEEE*, **98**, 717-734.
- Janowiak, J. E., R. J. Joyce and Y. Yarosh, 2001: A real-time global half-hourly pixel-resolution infrared dataset and its applications. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82**, 205-218
- JAXA, 2007: 熱帯降雨観測衛星 (TRMM) などを用いた「世界の雨分布速報」の公開について。
https://www.jaxa.jp/press/2007/11/20071114_trmm_j.html (2021.6.11閲覧).
- JAXA, 2017: 「GSMaP 理研ナウキャスト」(世界の雨分布予報データ) ウェブサイトを公開しました。
<https://www.eorc.jaxa.jp/news/2017/nw170807.html> (2021.6.11閲覧).
- JAXA, 2018: 地球が見える: シリーズ「衛星データと数値モデルの融合」(第3回)「世界の気象リアルタイム」の開始とそれを実現した最先端技術。
<https://www.eorc.jaxa.jp/earthview/2018/tp181114.html> (2021.6.11閲覧).
- JAXA, 2019a: 世界中の雨の分布がリアルタイムでわかります!。
<https://www.eorc.jaxa.jp/news/2019/nw190701.html> (2021.6.11閲覧).
- JAXA, 2019b: 雨のデータを使ってみませんか? TRMM/GPM/GSMaP の利用事例集。
https://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/data_utilization/2019_jireishu_j.pdf (2021.6.11閲覧).
- JAXA, 2020: 衛星雨データから見る世界の豪雨や干ばつ〜「世界の雨分布統計」ウェブサイトの公開〜。
<https://www.eorc.jaxa.jp/news/2020/nw200309.html> (2021.6.11閲覧).
- 可知美佐子, 久保田拓志, 牛尾知雄, 重 尚一, 木田智史, 青梨和正, 岡本謙一, 沖 理子, 2011: 複数の衛星搭載マイクロ波/赤外放射計の複合による「世界の雨分布速報」システムの構築とその利用. *電気学会 A 部門誌*, **131**, 729-737.
- Kida, S., T. Kubota, S. Shige and T. Mega, 2018: Development of a rain/no-rain classification method over land for the microwave sounder algorithm. *Remote Sensing of Aerosols, Clouds, and Precipitation (T. Islam et al., eds.)*, Elsevier, 249-265.
- Kidd, C., A. Becker, G. J. Huffman, C. L. Muller, P. Joe, G. Skofronick-Jackson and D. B. Kirschbaum, 2017: So, how much of the Earth's surface is covered by rain gauges? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 69-78.
- Kidd, C., Y. N. Takayabu, G. Skofronick-Jackson, G. J. Huffman, S. Braun, T. Kubota and J. Turk, 2020: The Global Precipitation Measurement (GPM) Mission. *Satellite Precipitation Measurement (V. Levizzani et al., eds.)*, Springer, Cham, 3-23.
- 菊池麻紀ほか, 2019: 雲エアロゾル放射ミッション「EarthCARE」一雲・エアロゾルとその放射影響の統合的観測一. *日本リモートセンシング学会誌*, **3**, 181-196.
- 気象庁, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA), 2019: 衛星全球降水マップ (GSMaP) の活用に向けた気象庁と宇宙航空研究開発機構の技術開発連携について。
http://www.jma.go.jp/jma/press/1903/28b/jaxa_jma_gsmap_20190328.html (2021.6.11閲覧).
- Kobayashi, S. *et al.*, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48, doi:10.2151/jmsj.2015-001.
- Kojima, M., T. Miura, K. Furukawa, Y. Hyakusoku, T. Ishikiri, H. Kai, T. Iguchi, H. Hanado and K. Nakagawa, 2012: Dual-frequency precipitation radar (DPR) development on the global precipitation measurement (GPM) core observatory. *Proc. SPIE 8528, Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization II*, 85281A, doi:10.1117/12.976823.
- 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**, 1-20, doi:10.1002/2016JD025355

- Kotsuki S., K. Terasaki, K. Kanemaru, M. Satoh, T. Kubota and T. Miyoshi, 2019a: 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, **15A**, 1-7.
- Kotsuki S., K. Kurosawa, S. Otsuka, K. Terasaki and T. Miyoshi, 2019b: Global precipitation forecasts by merging extrapolation-based nowcast and numerical weather prediction with locally-optimized weights. *Wea. Forecast.*, **34**, 701-714.
- Kozu, T. *et al.*, 2001: Development of precipitation radar onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **39**, 102-116.
- Kubota, T., 2019: GSMaP: Monitoring rainfall from space to protect communities. *Scientia*, doi:10.33548/SCIENTIA392.
- Kubota, T., S. Shige, H. Hashizume, K. Aonashi, N. Takahashi, S. Seto, M. Hirose, Y. N. Takayabu, T. Ushio, K. Nakagawa, K. Iwanami, M. Kachi and K. Okamoto, 2007: Global precipitation map using satelliteborne microwave radiometers by the GSMaP project: Production and validation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **45**, 2259-2275.
- Kubota, T., T. Ushio, S. Shige, S. Kida, M. Kachi and K. Okamoto, 2009: Verification of high resolution satellite-based rainfall estimates around Japan using gauge-calibrated ground radar dataset. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87A**, 203-222.
- Kubota, T., S. Shige, M. Kachi and K. Aonashi, 2011: Development of SSMIS rain retrieval algorithm in the GSMaP project. *Proc. ISTS*, 2011-n-46.
- 久保田拓志, 可知美佐子, 沖 理子, 2013: 衛星からの降雨観測と災害監視. *電気学会誌*, **133**, 141-143.
- Kubota, T. *et al.*, 2014: Evaluation of precipitation estimates by at-launch codes of GPM/DPR algorithms using synthetic data from TRMM/PR observations. *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, **7**, 3931-3944.
- Kubota, T., K. Aonashi, T. Ushio, S. Shige, Y. N. Takayabu, M. Kachi, Y. Arai, T. Tashima, T. Masaki, N. Kawamoto, T. Mega, M. K. Yamamoto, A. Hamada, M. Yamaji, G. Liu and R. Oki, 2020: Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) products in the GPM era. *Satellite Precipitation Measurement (V. Levizzani et al., eds.)*, Springer, Cham, 355-373.
- Kuleshov, Y., T. Kubota, T. Tashima, P. Xie, T. Kurino, P. Hechler and L. V. Alexander, 2020a: WMO Space-based Weather and Climate Extremes Monitoring Demonstration Project for East Asia and Western Pacific. *WMO Bull.*, **69** (1), <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/wmo-space-based-weather-and-climate-extremes-monitoring-demonstration-project> (2021.6.11閲覧).
- Kuleshov, Y., L. Bettio, T. Kubota, T. Tashima, P. Xie, T. Kurino and P. Hechler, 2020b: Drought monitoring in Australia utilizing products from the WMO space-based weather and climate extremes monitoring demonstration project. *WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019*, WMO No. 1248, 24.
- Kumar, P., R. M. Gairola, T. Kubota and C. M. Kishtawal, 2021: Hybrid assimilation of satellite rainfall product with high density gauge network to improve daily estimation: a case of Karnataka, India. *J. Meteor. Soc. Japan*, **99**, 741-763.
- Kummerow, C., W. Barnes, T. Kozu, J. Shiue and J. Simpson, 1998: The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **15**, 808-816.
- Kummerow, C. D., S. Tanelli, N. Takahashi, K. Furukawa, M. Klein and V. Levizzani, 2020: Plans for future missions. *Satellite Precipitation Measurement (V. Levizzani et al., eds.)*, Springer, Cham, 99-119.
- Ma, W. *et al.*, 2021: Applicability of a nationwide flood forecasting system for Typhoon Hagibis 2019. *Sci. Rep.*, **11**, 10213, doi:10.1038/s41598-021-89522-8.
- Masaki, T., T. Iguchi, K. Kanemaru, K. Furukawa, N. Yoshida, T. Kubota and R. Oki, 2020: 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.
- Mega, T., T. Ushio, T. Matsuda, T. Kubota, M. Kachi and R. Oki, 2019: Gauge-adjusted Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP_Gauge). *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **57**, 4, 1928-1935.
- 森 貴寛, 中村 滋, 山地萌果, 2020: 水力発電計画における河川流量推定への衛星全球降水マップ (GSMaP) の利用可能性. *電力土木*, (410), 57-61.
- 日本気象協会, 2019: JAXA の衛星観測データを活用した「tenki.jp×JAXA 世界の雨雲の動き」を提供開始～地上気象レーダでは観測できない低緯度地域の台風発生期の降水量分布が確認可能に～. <https://www.jwa.or.jp/news/2019/04/4222/> (2021.6.11閲覧).
- 農林水産省, 2021: 農業気象情報衛星モニタリングシステム (JASMAI) の公開について.

- <https://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/anpo/210112.html> (2021.6.11閲覧).
- 岡本謙一, 2019: 衛星搭載降雨レーダ. 日本リモートセンシング学会誌, **39**, 171-180.
- 岡本謙一ほか, 2009: 宇宙からのリモートセンシング. コロナ社, 294pp.
- Otsuka, S., S. Kotsuki and T. Miyoshi, 2016: Nowcasting with data assimilation: a case of Global Satellite Mapping of Precipitation. *Wea. Forecast.*, **31**, 1409-1416.
- Otsuka, S., S. Kotsuki, M. Ohigashi and T. Miyoshi, 2019: GSMaP RIKEN Nowcast: Global Precipitation Nowcasting with Data Assimilation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 1099-1117.
- RESTEC, 2019: 「天候インデックス保険」へのデータ提供について. http://www.restec.or.jp/notice/notice_year_2019/f22aia000000qfs.html (2021.6.11閲覧).
- 理化学研究所 (理研), 千葉大学, 東京大学, 宇宙航空研究開発機構, 2020: 衛星データと計算による世界の降水予報. 一理研とJAXAのwebで5日後までのリアルタイム降水予報を公開一. https://www.riken.jp/press/2020/20200820_2/index.html (2021.6.11).
- Schneider, U. *et al.*, 2014: GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. *Theor. Appl. Climatol.*, **115**, 15-40.
- Seto, S., T. Iguchi, R. Meneghini, J. Awaka, T. Kubota, T. Masaki and N. Takahashi, 2021: The precipitation rate retrieval algorithms for the GPM Dual-frequency Precipitation Radar. *J. Meteor. Soc. Japan*, **99**, 205-237.
- 重 尚一, 2020: 衛星観測に基づく潜熱及び降水量推定手法の開発とアジアモンスーン域での地形性降雨特性の解明—2018年度日本気象学会学会賞記念講演—. *天気*, **67**, 27-41.
- Shige, S., T. Yamamoto, T. Tsukiyama, S. Kida, H. Ashiwake, T. Kubota, S. Seto, K. Aonashi and K. Okamoto, 2009: The GSMaP precipitation retrieval algorithm for microwave sounders. Part I: Over-ocean algorithm. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **47**, 3084-3097.
- Shimada, U., H. Owada, M. Yamaguchi, T. Iriguchi, M. Sawada, K. Aonashi, M. DeMaria and K. D. Musgrave, 2018: Further improvements to the statistical hurricane intensity prediction scheme using tropical cyclone rainfall and structural features. *Wea. Forecast.*, **33**, 1587-1603.
- Shrestha, M. S., K. Takara, T. Kubota and S. R. Bajracharya, 2011: Verification of GSMaP rainfall estimates over the central Himalayas. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, **67** (4), 137-142.
- Skofronick-Jackson, G. *et al.*, 2017: The Global Precipitation Measurement (GPM) mission for science and society. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 1679-1695.
- Takahashi, N. *et al.* 2016: Overview of the end-of-mission observation experiments of precipitation radar onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission satellite. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **54**, 3450-3459
- Takayabu, Y. N., 2008: Observing rainfall regimes using TRMM PR and LIS data. *GEWEX Newsletter*, **18**, 9-10.
- Takido, K., O. C. Saavedra Valeriano, M. Ryo, K. Tanuma, T. Ushio and T. Kubota, 2016: Spatiotemporal evaluation of the gauge adjusted Global Satellite Mapping of Precipitation at the basin scale. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**, 185-195.
- Tashima, T., T. Kubota, T. Mega, T. Ushio and R. Oki, 2020: Precipitation extremes monitoring using the near-real-time GSMaP product. *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, **13**, 5640-5651.
- Tian, Y., C. D. Peters-Lidard, R. F. Adler, T. Kubota and T. Ushio, 2010: Evaluation of GSMaP precipitation estimates over contiguous U. S. *J. Hydrometeor.*, **11**, 566-574.
- 富田英一, 久保田拓志, 2021: 雲エアロゾル放射ミッション「EarthCARE」の開発状況. 日本リモートセンシング学会誌, **41**, 275-278
- 津田守正, 杉浦 愛, 佐山敬洋, 岩見洋一, 2014: インダス川流域を対象とした洪水予報システムの構築. *土木技術資料*, **56** (11), 34-37.
- Turk, F. J. *et al.* 2021: Applications of a CloudSat-TRMM and CloudSat-GPM satellite coincidence dataset. *Remote Sens.*, **13**, 2264, doi:10.3390/rs13122264.
- Ushio, T. and T. Mega, 2019: High Resolution GSMaP with Himawari 8. *Proc. 2019 IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, 4547-4548, doi:10.1109/IGARSS.2019.8898692.
- Ushio, T., K. Sasashige, 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.
- Xie, P. and P. A. Arkin, 1997: Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2539-2558.
- Yamaji, M., T. Kubota and M. K. Yamamoto, 2021: An approach to reliability characterization of GSMaP near-real-time precipitation product. *J. Meteor. Soc. Japan*,

99, 673-684.

Development of global precipitation map by satellite observations and promotion of its applications in society

Kazumasa AONASHI^{*1} and Takuji KUBOTA^{*2}

^{*1} *Graduate School of Science, Kyoto University / Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency.*

E-mail: aonashi.kazumasa.3z@kyoto-u.ac.jp

^{*2} *(Corresponding author) Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki, 305-8505, Japan.*

E-mail: kubota.takuji@jaxa.jp

(Received 14 June 2021; Accepted 7 October 2021)
