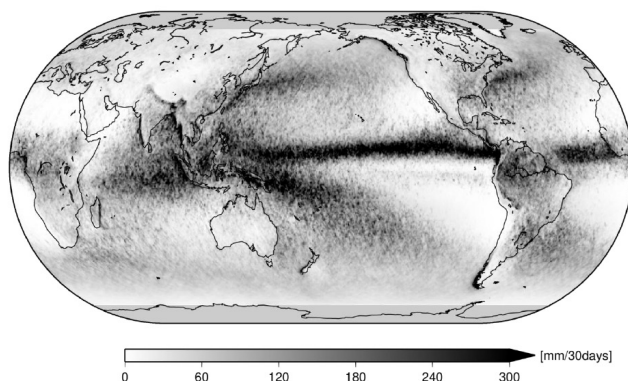


# 10周年を迎えた全球降水観測計画と NICT

～ JAXA と進めた雨雲を味方にする「二周波降水レーダ」の研究 ～

GPMCore DPR precipRateNearSurface (2014/03-2025/02)

全球降水観測 (GPM) 計画の主衛星に搭載された「二周波降水レーダ」(DPR) は 2014 年 2 月に H-IIA ロケットで打ち上げられて、2024 年に打ち上げ後 10 周年を迎えた。NICT は DPR を JAXA と共同開発したが、そこに至るまでの道のりもまた 10 年以上の月日をかけてきた。本記事では GPM における NICT 研究開発の歴史を手短に紹介しつつ、今後の展開について述べる。



GPM DPR から観測された地表面降水量の気候値  
(2014/03-2025/02 までの 11 年分)

国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT)  
電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター  
リモートセンシング研究室  
研究員 金丸 佳矢

## はじめに

天気予報のコーナーではよく目にする「ひまわり画像」から私たちは日本付近の雲の動きを知ることが出来る。これは、静止気象衛星「ひまわり」が約 36,000 km 上空の宇宙から可視光や赤外線を用いて雲を観測しているからで、遠隔 (リモート) から対象物に触れずにその形や性質を測定する (センシング) 技術の代表例のひとつと言える。しかし、ひまわりの雲画像だけからその場所の雨の有無を調べることは難しい。もちろん、「火のない所に煙は立たぬ」の様に、雲のない所から雨は降らないのである程度の絞り込みは出来るが、雨の降らない曇りの日があるように、上空からの雲画像のみでは雲の下にある雨の存在やその量の正確な把握は容易ではない。雨を測る正確な方法は現地に赴いてその量を測ることだが、雨の分布を測るために雨量計を大量に設置するのは維持管理が大変だ。そこで利用されるのが電波、特にマイクロ波による観測である。マイクロ波は雲を透過する性質があるので、マイクロ波を用いた雨のリモートセンシング技術の研究開発が長年進められてきた。その実用例が気象レーダーによる雨観測である。レーダーは、RADAR Detection And Ranging の略語で、自ら電波を発射して、対象物 (ここでは雨や雪を含めた降水) によって反射した信号とその遅延時間から算出される距離を計測する。電波は、雨や雪の存在量が多いと受信信号も強くなるので (雨による減衰の影響もある)、工学値である信号強度から物理量である降水量に変換することが出来る。私たちが雨の分布を容易かつ正確に知ることが出来るのは、長年の研究によって電波に対する

雨の影響の理解とその影響を正確に測る計測技術の進化によるものである。

一方で世界から見ると、地上雨量計や気象レーダーによる降水の観測網が実現されているのは先進国に限られる (図 1)。国境をまたぐ国際河川では遠く離れた上流で降る雨を把握し水害に備えることが必要となるが、自然環境や紛争地域などによって観測が難しい場所もある。台風などは陸地から遠く離れた海上から発生し近づいてくる。地球規模で降水分布を把握するとなると、地球表面を均一に繰り返し観測することができる宇宙からの観測がほぼ唯一の観測手段となる。

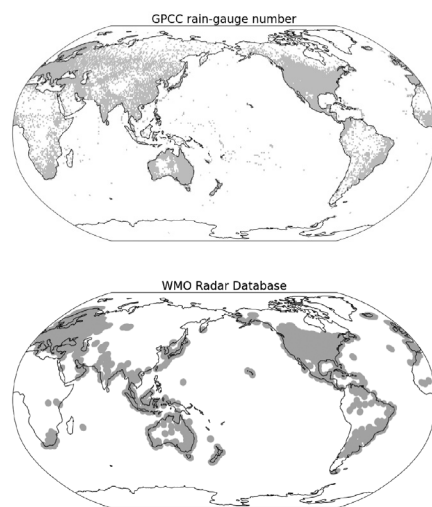


図 1 (上) ドイツ気象局によって収集された雨量計が存在する場所  
(2000/01-2016/12 の 17 年分)  
(下) 世界気象機関の気象レーダーデータベースによってカバーされる観測範囲  
(観測範囲を半径 300 km と仮定)

本記事で紹介する全球降水観測 GPM (Global Precipitation Measurement) 計画の主衛星に搭載された「二周波降水レーダ」DPR (Dual-frequency Precipitation Radar) は、雨を測る気象レーダーを地球周回軌道の人工衛星に搭載して、世界中の降水を測るために開発された。GPM 主衛星は 2014 年 2 月 28 日午前 3 時 37 分に H-IIA ロケットにより種子島宇宙センターより打ち上げられた。DPR は観測を順調に続けて、2024 年 2 月に 10 周年を迎えた (記事執筆時には 11 年を越えて運用中)。打ち上げに至るまでの道のりもまた 10 年以上の月日をかけてきた。本記事では GPM や GPM における NICT 研究開発の歴史を手短に紹介しつつ、今後の展開について述べたい。

## GPM の目的

GPM は熱帯降雨観測衛星 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) の後継・拡大ミッションで、DPR とマイクロ波放射計 GMI (GPM Microwave Imager) を搭載した主衛星、マイクロ波放射計を搭載した複数のコンステレーション衛星群により、気候変動・水循環変動の解明のために全球の降水分布を高精度・高頻度観測を行う国際協力ミッションである。GPM 主衛星はアメリカ航空宇宙局 NASA と宇宙航空研究開発機構 JAXA が共同して開発し、DPR は JAXA と NICT が共同して開発、GMI は NASA が開発した。TRMM は日米共同ミッションで、熱帯域・亜熱帯域の降雨を定量的に把握することを目的として 1997 年から 2015 年まで観測が行われた。見出し画像にあるように地球上で起こる降水の多くは熱帯域そして海上で起きている。そのため、DPR の先代にあたる「降雨レーダ」PR (Precipitation Radar) が現在の JAXA と NICT によって開発され、(地球周回軌道をもつ) TRMM 衛星に搭載された PR は宇宙から

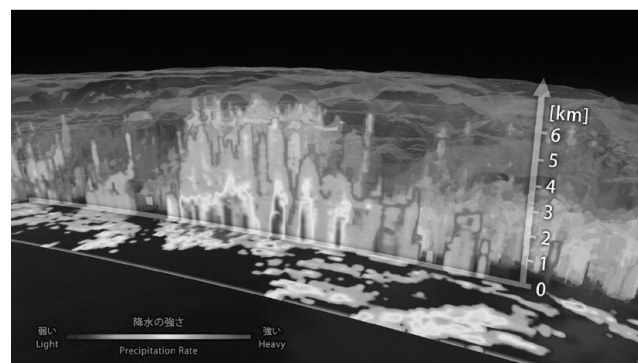


図2 DPRによる降水の三次元分布  
© JAXA/NASA

高精度な降水観測を世界で初めて実現した。しかし、GPM が目指す全球規模での降水観測となると、熱帯域で降る雨よりも弱い雨や高緯度で起こる雪の観測が必要となる。DPR は PR で採用された Ku 帯の周波数を引き続き採用するとともに、弱い雨や降雪の観測に有利な Ka 帯の二つの周波数を採用した降水レーダーである<sup>\*1</sup>。そして、DPR は 2 つの周波数の電波を用い、それら観測値の違いを基に雨と雪の識別や雨粒の大きさと数の関係を求めることで、降水の強さをより精度よく求めることが可能となった (図 2)。また、降水の時空間変動は大きいので、地球を周回する衛星 1 つだけの観測から全球規模で降水分布を高頻度に観測することは難しい。DPR と同時に観測している GMI データをもとに、コンステレーション衛星群に搭載されているマイクロ波放射計から地表面降水量を求める手法を構築し、静止気象衛星の雲画像や地上雨量計などを組み合わせつつ高頻度かつ高精度な降水分布の把握を

<sup>\*1</sup>Ku 帯や Ka 帯といった呼び方は米国電気電子学会 IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.) で定義される特定の周波数帯を指す。Ku 帯は 12GHz から 18GHz を、Ka 帯は 26.5GHz から 40GHz の範囲としている。PR は 13.8GHz の周波数を、DPR は 13.6GHz と 35.5GHz を利用している。身の回りで使われている電波で例えると、Ku 帯は BS/CS といった衛星通信に使われ、Ka 帯は衛星通信でも使われるが、日本では 2020 年から始まった第 5 世代移动通信システム (5G) でも使われている。

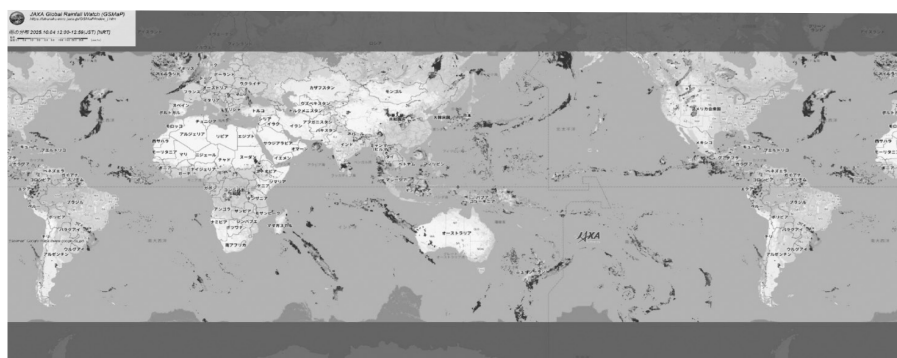


図3 GSMaPによる世界の雨分布 (2025年10月4日12JST)  
© JAXA



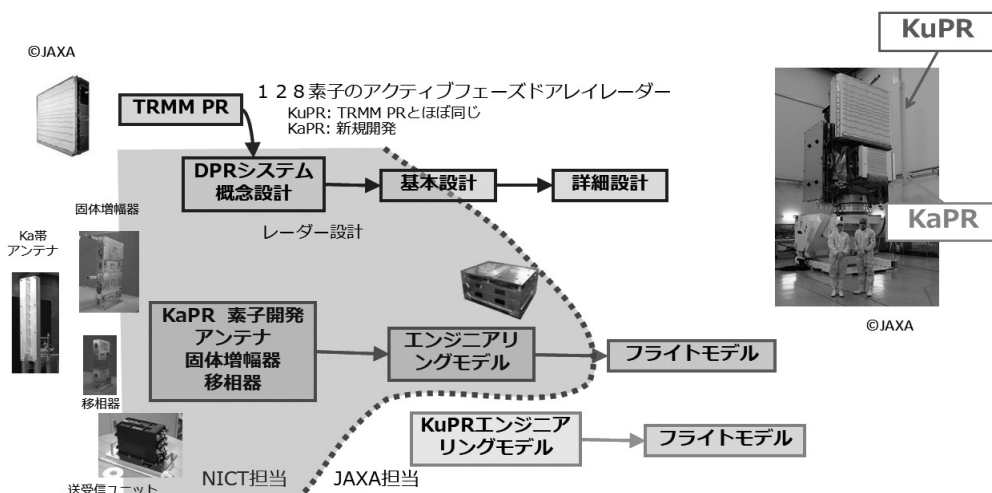


図4 DPR 開発における分担 (写真の一部は ©JAXA)

実現している。図3は、JAXAは衛星全球降水マップ GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation) として1時間ごとに全球の降水データを提供している。GSMaPは気候監視や気象監視といった科学研究だけではなく洪水予測や農業、水力発電、公衆衛生や教育といった様々な分野で利用されている。

## DPRのハードウェア開発

GPMのミッション実現やGSMaPによる高精度な降水分布の提供についてその中心的な役割を果たすのがDPRである。ここではNICTにおけるDPRの開発を紹介する。

先に述べたように、GPM DPRはTRMM PRをベースとしつつ機能を拡張したものなので、NICTは前身の電波研究所、通信総合研究所を通じ1970年代から宇宙からの降雨観測の実現に向けた研究開発を続けてきた。1997年に打ち上げられたTRMMの成功を受けつつ、NICTがDPR開発のための研究を着手したのは、1999年頃からである。2004年にはJAXAとNICTはGPM DPR開発および打ち上げ後の校正および検証に係る協定を締結し、DPR開発の分担を明確にしつつ共同開発を進めた。図4はDPR開発におけるJAXAとNICTの分担を示す。DPRは「Ku帯降水レーダ」(KuPR)と「Ka帯降水レーダ」(KaPR)の2つから構成され、NICTは新規開発となるKaPRの実現性検討やKaPRのエンジニアリングモデルの一部(電気システム)の開発を担当した。DPRはKu帯とKa帯ともにアクティブフェーズドアレイレーダー

であるが、検討当初はKaPRは別のレーダー方式も検討された。KaPRを構成するKa帯のフェイズドアレイアンテナの部分試作や高出力固体電力増幅器、移相器の試作や性能評価を行った結果を踏まえてKaPRはPRやKuPRと同じ方式で開発しても問題ないことが確認できた。これらの成果はDPRフライトモデルの開発を担当するJAXAに引き継がれた。

開発されたDPRが正しく動作しているのかを確認する校正器の開発についてもNICTが開発を一部担当した。また、Ka帯レーダーで雨や雪を観測したときのデータ解釈を容易にするために打ち上げ前の地上検証も実施した。Ka帯は周波数が高いため雨による信号減衰がKu帯と比べても大きく、また雪の種類によって信号強度の変動が大きい。JAXAが開発したKa帯検証用レーダーをNICTが所有する沖縄電磁波技術センターにて降雨観測実験を、群馬県蔵王にて降雪観測実験を実施することで打ち上げ後のデータ検証に貢献した。

## DPRのソフトウェア開発

DPRが観測する情報は電波と降水粒子とによって起こる電磁波の相互作用の結果であり、得られた情報から私たちが知りたい地表面の降水量に変換する処理(アルゴリズム)が必要となる。DPRの降水量変換アルゴリズムは、PRで開発された降水量変換アルゴリズムをベースにしつつ、国内外の研究者と協力しながら開発を進めてきた。その中でNICTは、DPRのハードウェア開発の経験を生かしてDPR工学値を正しく

出す校正に関するアルゴリズム開発や、二周波のレーダー情報から雪の種類を検出するアルゴリズムなどを開発してきた。

また、DPR は 2014 年から 10 年観測を続けている間にいくつかの運用の変更を行った。2018 年 5 月には KaPR 運用モードを変更、2023 年 11 月には GPM 主衛星の衛星高度が 407km から 442km への変更に伴う DPR 運用モードの変更を行った。これらの運用変更が起きても DPR の観測データの特性が大きく変わらないように DPR の運用モードを検討し、JAXA および DPR アルゴリズム開発者と協力しつつアルゴリズムを修正するなどして見出しの図 (DPR が観測した 11 年分の地表面降水量の分布図) が得られている。

## GPM から PMM へ

GPM 主衛星のミッション期間は 3 年 2 か月で、現在は後期利用期間として運用が続けられている。GPM の後継ミッションに相当するものとして 2023 年から降水レーダー衛星 PMM (Precipitation Measuring Mission) の開発が JAXA によって開始された。PMM では DPR の観測機能を高機能化した「Ku 帯ドップラー降水レーダー」KuDPR (Ku-band Doppler Precipitation Radar) を開発し、その観測データによって GSMap の高精度化につなげ、気象・防災情報の高度化への貢献などを通して頻発・激甚化する水災害の人間社会への影響軽減を目指している。大雨をもたらすような降水雲の発生・発達・衰弱する仕組みをより深く理解するためには、降水雲内における大気鉛直運動の情報取得が有用だ。KuDPR は衛星搭載降水レーダーとしては世界初のドップラー観測機能によって降水粒子の鉛直方向の動きを測定することを目指している。ドップラーレーダーは、レーダーと対象物 (ここでは降水粒子) との相対的な動きによって発生する周波数の変化を計測し、その変動量から降水粒子の動きを求めることが出来る。KuDPR で実現するドップラー観測機能は航空機搭載合成開口レーダー (SAR) による移動体観測技術が利用され、その実現性検討には NICT が開発した Pi-SAR2 の実験観測データが活躍した。また 2024 年 5 月に打ち上げられた雲エアロゾル放射ミッション EarthCARE (Earth Cloud Aerosol and Radiation Explorer) 衛星には JAXA と NICT が共同して開発した世界で初めて宇宙から雲のドップラー計測を実現した「雲プロファイリングレーダー」CPR (Cloud Profiling Radar) が搭載されている。

CPR のドップラー計測の観測結果は、KuDPR のドップラー計測のアルゴリズム開発に有用である。NICT は TRMM/GPM/EarthCARE で実現した衛星搭載雲・降水レーダーや航空機搭載 SAR の開発経験を活かしつつ、KuDPR のドップラー処理などアルゴリズム開発による協力を進めている。

## まとめ

GPM における NICT の研究開発の歴史を駆け足ながら紹介した。TRMM から GPM、GPM から PMM へと進むにつれ、観測データの取得や処理技術の向上 (技術獲得型の研究開発) からそれらのデータを活用し私たちの社会への貢献を意識した研究 (課題解決型の研究) へと変化している。衛星ミッションは 1 人や 1 機関で行うようなものではなく、個人の能力を活かしつつ国内および海外の研究者たちや利用者たちと協力しながらミッション実現を目指すものである。筆者は色々な経験をしつつその中心に近づいている今日この頃である。

この記事を書きかけに地球観測分野に興味を持っていただき、革新的な衛星レーダーのアイデアと一緒に考えてくれる人が現れれば幸いである。

### <参考文献>

- [1]JAXA 全球降水観測 (GPM)計画のサイト  
<https://www.eorc.jaxa.jp/GPM/>
- [2]NICTリモートセンシング研究室 衛星降水レーダープロジェクトのサイト  
<https://www2.nict.go.jp/res/satellite.html>
- [3]JAXA 降水レーダー衛星 (PMM)のサイト  
<https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/project/pmm/>

### 金丸 佳矢



- 略歴:名古屋大学大学院博士後期課程修了後、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、東京大学を経て、2019 年に NICT に入所。現在、NICT 電磁波研究所電磁波伝搬研究センターリモートセンシング研究室・研究員。博士 (理学)。
- 研究内容:人工衛星から電波を発射し、降水の強度分布を観測する衛星搭載降水レーダーのデータ処理や解析研究に従事する。

●研究者への道:子供のころから漠然と宇宙に興味があったが、気候変動といった地球環境問題への関心から気象に関する勉強や研究を志すようになりました。いざ研究にとりかかると、宇宙から観測した降水・雲リモートセンシングデータをい用いることになり、現在に至ります。

●今後の展望:これまで先人たちの多大なる努力によって実現してきた衛星ミッションですが、得られた衛星データは研究開発でありながらも社会的インフラとなりつつあります。その一方で、宇宙開発そのものは技術実証の場から産業利用の場へと変化をとげつつあります。多種多様な衛星データの特徴を生かしつつその中核となる衛星リモートセンシング技術の研究開発、その成果を生かした社会実装に取り組んでゆきたい。