

2 フェーズ1 自然災害に対する予測・検知

2 *Phase 1 Sensing, Forecasting Natural Disasters*

2-1 NICTにおける衛星搭載降水レーダーおよび雲レーダーの小史と今後の展望

2-1 *A Brief History and Future Outlook of Spaceborne Precipitation and Cloud Profiling Radars at NICT*

堀江 宏昭 金丸 佳矢

HORIE Hiroaki and KANEMARU Kaya

地球温暖化に伴う雲・降水の変化を正確に把握することは、気候の現状を監視し、気候変動メカニズムの理解と将来予測の高度化に資するとともに、豪雨・洪水などの水災害リスクを早期に検知し、社会のレジリエンス向上に貢献するうえで重要である。NICTでは、電波資源の有効活用に向けて、マイクロ波・ミリ波帯の通信品質に大きな影響を及ぼす雲・降水の分布や特性を把握するための技術の研究開発を長年にわたり進めてきた。本稿では、その研究開発の一環として取り組んできた衛星搭載降水レーダーおよび雲レーダーについて、GPM（全球降水計画）およびEarthCARE（雲エアロゾル放射ミッション）を中心に、その歴史やNICTの貢献ならびに今後の展望を紹介する。

Understanding changes in clouds and precipitation associated with global warming is crucial for monitoring the state of the Earth's climate, advancing our understanding of climate change mechanisms and future projections, and improving societal resilience through the early detection of water-related disaster risks such as heavy rainfall and flooding. As part of its efforts to promote the effective use of radio spectrum resources, NICT has conducted long-term research and development on technologies for observing the distribution and characteristics of clouds and precipitation, which strongly affect the propagation of microwave and millimeter-wave radio waves. This paper reviews the history of spaceborne precipitation and cloud radars developed through these activities, focusing on the Global Precipitation Measurement (GPM) and Earth Cloud, Aerosol and Radiation Explorer (EarthCARE) missions. NICT's technical contributions and future perspectives are also presented.

1 まえがき

豪雨や異常気象への関心が高まるなか、都市化の進展により局地的な豪雨が社会・経済活動へ及ぼす影響は増大している。さらに、グローバル化した現代社会では、大雨・洪水・干ばつなど世界各地の気象災害がサプライチェーンを介して私たちの日常生活にも影響を与える。このため、地球温暖化に伴う気候変動を予測し、その影響に備えることが重要な課題となっている。その予測に用いられる気候モデルは年々高度化しているものの、依然として不確実性を伴う。その主要な要因の1つが雲の気候に与える影響である。雲は、太

陽から地球へ届くエネルギーの一部を宇宙空間へ反射することで地表を冷やす働きを持つ一方で、地表や大気から放射される赤外線を吸収・再放射して地球を暖める働きも持つ。このため、雲がどの高度にどれだけ存在するか、どのような性質を持つかによって、地球全体のエネルギー収支は大きく変化する。地球の気候が変化したときに雲の量や高度、種類がどのように変化し、その結果として温暖化を強めるのか、それとも弱めるのかという効果は「雲フィードバック」と呼ばれる。現在の気候モデルでは、この雲フィードバックの評価に依然として大きな不確実性が残されており、気候変動に関する政府間パネル(IPCC: Intergovernmental

Panel on Climate Change) 第6次評価報告書 [1] でも気候感度の不確実性を左右する主要な要因の1つとされている。こうした不確実性を低減し、将来の気候予測の精度向上につなげるためには、地球規模で雲の三次元分布やその放射特性を精密に観測することが不可欠である。このため、雲・エアロゾル・放射の相互作用を観測する日欧共同「雲エアロゾル放射ミッション」(EarthCARE : Earth Cloud, Aerosol and Radiation Explorer) 衛星が2024年に打ち上げられた [2]。EarthCAREは、衛星に搭載した「雲プロファイリングレーダ」(CPR : Cloud Profiling Radar) や大気ライダーなどから雲とエアロゾルの鉛直構造を観測し、雲が地球の気候に果たす役割の解明を目指している [3][4]。

一方、雲が成長して形成される降水についても、地球温暖化に伴ってその量や強度、雨と雪の割合がどのように変化するかには未解明な点が多く残されている。大気中の水蒸気量の増加によって豪雨が激化することが予測されているが、その変化は地域や季節によって異なり、将来予測には依然として不確実性が存在する。このような降水の実態を地球規模で把握するために日米を中心に国際的に進められているのが「全球降水観測」(GPM : Global Precipitation Measurement) である [5][6]。GPM計画は、世界各地の雨や雪を継続的かつ高精度に観測し、水循環の理解を深めることを目的としている。さらに、得られた降水データは、気象予報や洪水・土砂災害の監視、水資源管理、農業利用など、私たちの社会生活を支える様々な分野で活用されている。すなわちGPM計画は、気象学・気候学の発展に貢献するだけでなく、防災・減災や社会経済活動を支える実利用にも大きく貢献する国際衛星計画である。GPM計画の主衛星は2014年に打ち上げられ、その主要観測装置として「二周波降水レーダ」(DPR : Dual-frequency Precipitation Radar) が搭載されている。DPRは、従来の降水レーダーよりも高い精度で降水の三次元構造や雨滴・雪粒子の特性を観測することを可能にし、降水メカニズムの理解や降水強度推定精度の向上に大きく貢献してきた [5][7]。主衛星は打ち上げから12年以上にわたり運用が継続されており、地球規模の降水観測データが蓄積されつつある。今後は、この長期観測データを活用することで、気候モデルが予測する降水量や降水パターンの長期的変化を観測から検出し、気候変動予測の検証や精度向上につなぐことが期待されている [1]。

GPMおよびEarthCAREの起源は、「熱帯降雨観測計画」(TRMM : Tropical Rainfall Measuring Mission) にまで遡ることができる。TRMM衛星は、熱帯域における降水の全球的な分布とその変動を定量的に把握することを目的として1997年に打ち上げられ、2015年

まで運用された。TRMM、GPM、EarthCAREは、それぞれ異なる時代に計画・実現されたミッションであるが、多くのNICT研究者が世代を超えてその開発と運用に携わってきた。TRMMに至る研究開発の経緯や歴史については優れた解説 [8][9] が既に公表されているため、本稿ではそれらに譲ることとし、GPMおよびEarthCAREを中心に、NICTが果たしてきた役割と技術的貢献を紹介する。

衛星ミッションは国際協力の下で推進される大規模プロジェクトであり、国内においても宇宙航空研究開発機構 (JAXA) をはじめとする多くの研究機関・大学・企業との連携によって成立している。本稿では、NICTが長年培ってきた電波計測・リモートセンシング技術に焦点を当て、GPMおよびEarthCAREの発展とともにその技術的貢献を振り返る。さらに、これらのミッションで得られた知見を踏まえ、次世代衛星ミッションへの展開と今後の展望について述べる。

なお、本稿ではミッション名、観測センサー名、機関名などの略称を多数使用するため、本文末に略語一覧を掲載した。

2 TRMMからGPM・EarthCAREへ

GPMやEarthCAREの検討は1990年代まで遡る。当時、日本では TRMMの打上げに向けた開発が進められていた一方で、その後継となる次世代地球観測衛星ミッションの検討も始まっていた。TRMMは、熱帯・亜熱帯域における降水の定量的観測を目的とした日米共同ミッションである。地球に入射する太陽エネルギーの一部は海面からの蒸発によって水蒸気となり、大気中を輸送された後に雲として凝結し、最終的には雨や雪として地表へ戻る。この水循環に伴う相変化は大気循環の重要な駆動源であり、降水の三次元構造を把握することは地球の気候やその変動の理解につながる。特に地球全体の降水の多くが熱帯海洋域で発生することから、TRMMには降水の鉛直構造を観測するため、JAXAとNICT (当時はNASDAとCRL) が共同開発した「降雨レーダ」(PR : Precipitation Radar) をはじめとする観測機器が搭載された。PRは宇宙からの高精度な降水観測を世界で初めて実現し、1997年から2015年まで17年以上にわたり地球規模の降水変動観測に貢献した。一方で、衛星ミッションの開発には長期間を要するため、TRMMの打上げ前から後継ミッションの検討が進められていた。TRMMの設計寿命は3年2か月であり、観測を途切れることなく継続するためには、早期から次世代計画を具体化する必要があったからである。当時検討されていた主な構想の

1つは、TRMMで実証された宇宙からの降水観測をさらに発展させ、全球規模で高頻度・高精度な降水観測を実現するミッションであった。もう1つは、地球の放射収支と気候変動との関係を理解するため、雲やエアロゾルの三次元分布を高精度に観測するミッションであった。ちょうど同じ時期、地球環境問題への関心の高まりを背景として、欧米を含む各国でも地球観測衛星計画の検討が進められていた。降水観測ミッションについては米国で進められていた計画との国際連携によりGPMへと発展し、雲・エアロゾル観測ミッションについては欧州で進められていた計画との協力を通じてEarthCAREミッションへと結実した。**3**以降では、GPMおよびEarthCAREの概要を紹介するとともに、それぞれのミッションにおいてNICTが担った役割と技術的貢献について述べる。

3 GPM

3.1 GPMの目的

GPMはTRMMの後継・拡大ミッションで、全球の降水分布を高精度・高頻度観測を通して気候変動・水循環変動の解明を目的とした国際協力ミッションである。TRMMの目的は科学研究としての色合いが濃かったが、GPMでは得られた観測データは数値天気予報の精度向上や豪雨・洪水の早期警戒など、防災・減災への貢献や水資源管理や農業分野への活用といった実社会での利用も目的としている。GPMの目的を実現するため、DPRとマイクロ波放射計（GMI：GPM Microwave Imager）を搭載したGPM主衛星の高精度な降水観測と、降水に関する情報を取得可能なマイクロ波放射計を搭載した複数の衛星で構成するコンステレーション衛星の高頻度観測が組み合わせて利用される。GPM主衛星はアメリカ航空宇宙局 NASAとJAXAが共同開発し、GPM主衛星に搭載されるDPRはJAXAとNICTが共同開発、GMIはNASAが開発した。コンステレーション衛星群は、GPMパートナーとなる各国の宇宙機関が主衛星と同時期に打ち上げるマイクロ波放射計搭載の衛星群である。

GPM主衛星に搭載されたDPRはTRMM衛星に搭載されたPRに比べて降水観測機能が強化された。GPMが目指す全球規模での降水観測となると、TRMMで対象とした熱帯域で起こ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しつつ高感度化するとともに、弱い雨や降雪の観測に有利なKa帯が追加された降水レーダーである。そして、DPRは2つの周波数帯の電波を用い、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1はDPRの初観測画像（日本時間2014年3月10日22時39分頃）[10]を示す。DPRは日本の東海上（北緯40度、東経167度付近）にある発達した温帯低気圧に伴う降水の鉛直分布を観測した。

DPRの降水観測データは、コンステレーション衛星群に搭載されたマイクロ波放射計データから地表面降水量を推定するときの基準として利用される。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の降水分布を高頻度に観測することは難しい。そこでGPMでは、DPRが観測した降水の三次元構造や降水粒子に関する情報と、同じ衛星に搭載されたマイクロ波放射計GMIの同時観測からえられたマイクロ波輝度温度を組み合わせることで、マイクロ波放射計の観測値から地表面降水量を推定するアルゴリズムを構築している。このアルゴリズムをコンステレーション衛星群のマイクロ波放射計データにも適用することで、降水レーダーを搭載していない衛星からも高精度に降水量推定できるようになる。その結果、複数の衛星による観測を統合的に利用することが可能となった。さらに、GPMでは、主衛星やコンステレーション衛星群による観測データに加え、静止気象衛星による雲画像や世界各地の地上雨量計の観測データも組み合わせ、高頻度かつ高精度な全球降水分布の把握を実現している。図2に示す衛星全球降水マップ（GSMaP: Global Satellite Mapping of Precipitation）は、JAXAが提供する全球降水データプロダクトであり、GPMをはじめとする複数の降水観測衛星のデータを統合して作成されている[11]。GSMaPでは、世界中の降水分布を1時間ごとにリアルタイムで把握することができ、地上観測網が十分に整備されていない海洋上や発展途上国を含めて、全球規模で均質な降水情報を提供している。GSMaPは、水循環や気候変動の監視といった科学研究に利用されるだけでなく、豪雨や洪水の予測・早期警戒、防災・減災活動、農業における水管理、水力発電の運用支援、感染症の流行環

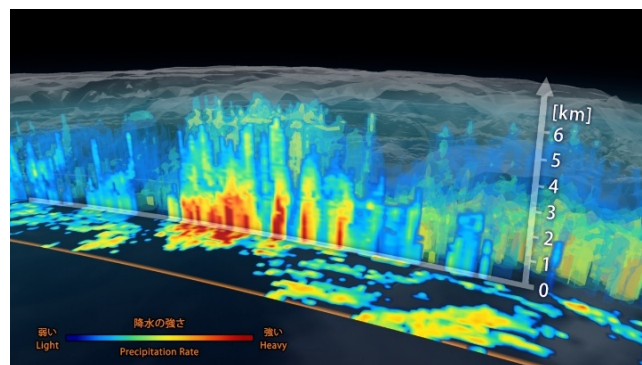


図1 DPRによる降水の三次元分布 © JAXA/NASA [10]

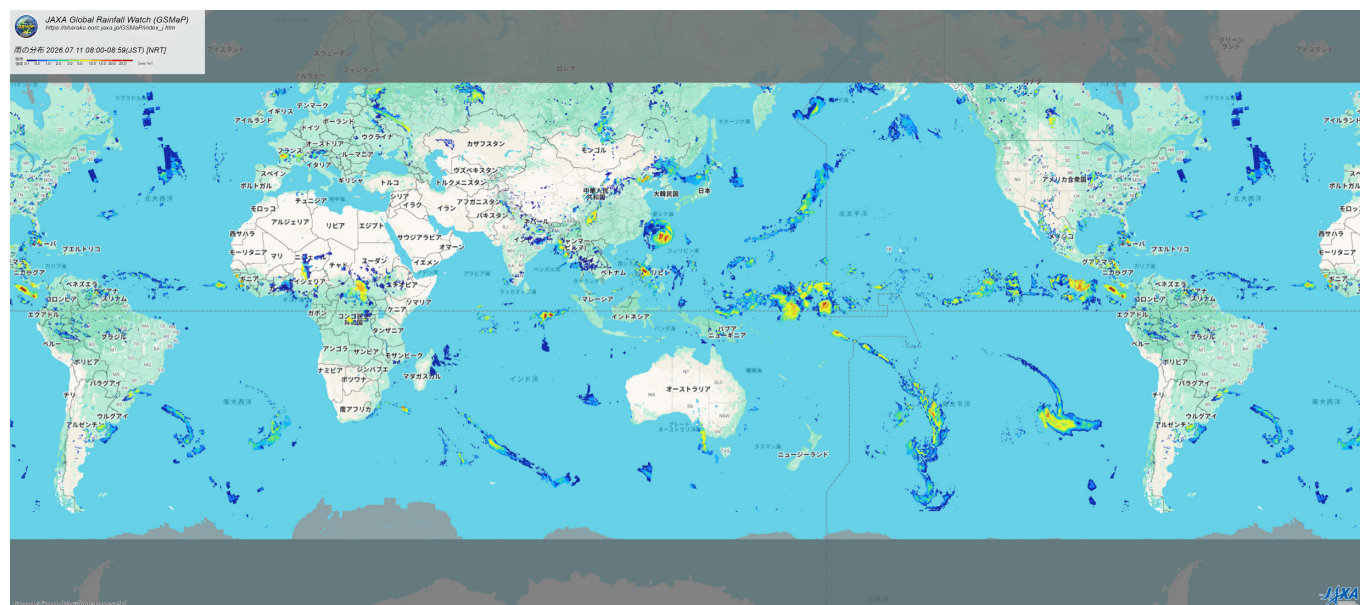


図2 GSMaPによる世界の雨分布 (2026年7月11日08 JST) © JAXA

境の把握など公衆衛生分野にも活用されている。また、ウェブサイトを通じて一般にも公開されており、教育や防災学習の教材としても利用されるなど、その活用分野は幅広い。世界中の降水状況を継続的に監視できるGSMaPは、GPMの成果を社会に還元する代表的なプロダクトである。

3.2 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であるため、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3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、検討当初においてKaPRは別のレーダー方式も検討された[12]。KaPRを構成するKa帯のフェイズドアレイアンテナの部分

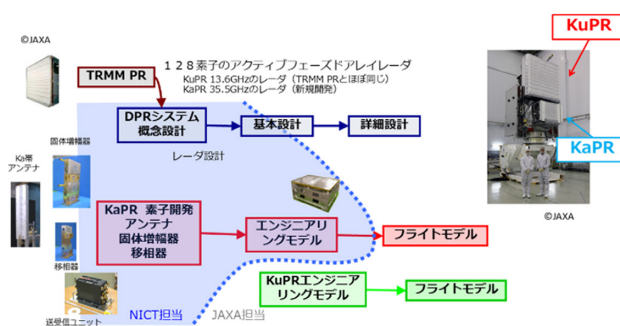


図3 DPR開発における分担 (写真の一部は©JAXA)

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。

DPRの高精度な降水観測を実現するためには、衛星観測データと地上観測データとの比較によるアルゴリズムおよびプロダクトの検証が不可欠である。NICTは、GPM主衛星の打ち上げ前後を通じて、JAXAが開発したKa帯検証用レーダーを用いた各種観測実験に参画し、DPR観測データの検証に貢献した。具体的には、NICT沖縄電磁波技術センターにおいて降雨観測実験を実施したほか、富士山五合目と山麓の公園を結ぶ観測経路において、雨から雪へ変化する境界領域である融解層の観測実験を行った。さらに、新潟県長岡市では防災科学技術研究所と長岡技術科学大学との間で、山形県蔵王では降雪を対象とした観測実験を実施し、雨だけでなく雪を含む様々な降水現象に対す

るDPRアルゴリズムの精度評価を行った[13]。

これらの地上観測実験で取得された詳細なデータは、衛星が観測した降水分布との比較に利用され、DPRによる降水量推定や降水粒子判別アルゴリズムの改良・検証に大きく貢献した。その成果は、GPMプロダクトの精度向上を通じて、全球降水観測の信頼性向上にも役立てられている。

3.3 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強度に変換する処理(アルゴリズム)が必要となる。GPM/DPRの降水強度変換アルゴリズムは、TRMM/PRで開発された降水強度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、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12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主衛星の衛星高度を407 kmから442 kmへ変更したため、それに伴うDPR運用モードの変更を行った[14]。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開発を進めた。

4 EarthCARE

4.1 EarthCAREの目的

地球温暖化予測に使用している気候モデルの最大の不確定要素は雲であり、気候モデルの改善には雲の鉛直分布、また雲とエアロゾル(大気中の微粒子)の相互作用の全球的な把握が必要とされている。そのため、日欧共同プロジェクトであるEarthCAREミッションは、「雲プロファイリングレーダー」CPR、「大気ライダー」ATLID、「多波長イメージャ」MSIおよび「広帯域放射収支計」BBRの4つのセンサーを搭載し(図4)、CPRとATLIDにより雲・エアロゾルの鉛直分布を、MSIにより雲の水平分布を、BBRにより大気上端の放射を測定することにより、雲・エアロゾルの相互作用、また地球の放射収支を明らかにする。搭載センサーのうちCPRは日本、NICTとJAXAが共同開発し、他の3つの搭載センサーおよび衛星本体はESAが開発した。搭載センサーのLevel 1処理(工学値変換)はそれぞれのセンサー開発者が行い、Level 2処理(雲水量などへの物理量変換)は日欧それぞれが行い、両者の成果物

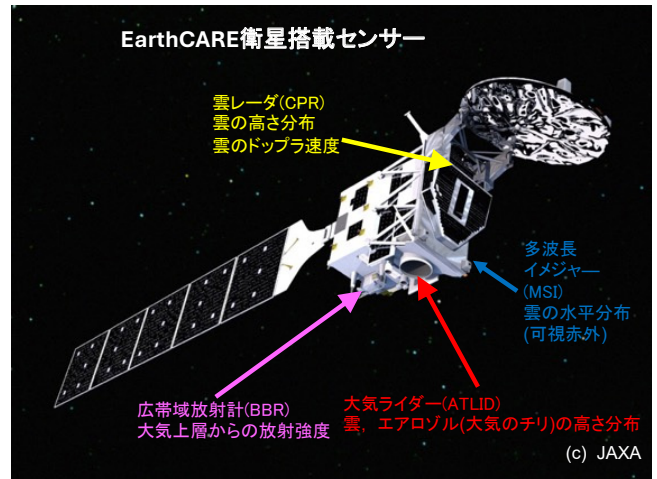


図4 EarthCARE衛星軌道上イメージと搭載センサー

としてのプロダクトを双方が配布する方式となっている。CPR開発の分担について、JAXAが搭載センサーの開発、地上システムの開発・運用、プロダクトの提供を担当し、NICTがCPRの性能評価、CPRデータの地上処理アルゴリズム開発を担当し、CPRの校正・プロダクトの検証を実施する。

4.2 CPRの実現

NICTは、TRMM/PRの開発で培った衛星搭載技術と、1998年に開発した「航空機搭載雲レーダ」[19](SPIDER: Special Polarimetric Ice Detection and Explication Radar)で培った技術・知見をもとに、JAXAが公募した「ミッション実証衛星」MDS(Mission Demonstration Satellite)計画に衛星搭載雲レーダーを提案し、2000年に採択された。当時、雲の鉛直構造を宇宙から直接観測できるセンサは存在せず、衛星搭載雲レーダーは雲・降水過程の理解を大きく前進させる観測技術として期待されていた。MDSに搭載予定であった雲レーダーでは、後にNASAのCloudSat衛星に搭載されたCloud Profiling Radar(CPR)と同じ高出力送信管を使用する計画であったことから、NICTは送信管の開発にも協力していた。しかし、2003年のH-IIAロケット打上げ失敗の影響によりMDS計画は中止となり、衛星搭載雲レーダーの実現は一旦見送られることとなった。

それでも、NICTは衛星搭載雲レーダーの研究開発を継続した。特に、より広い観測幅を確保するための5ビームアンテナの検討や、雲や降水粒子の運動を捉えるためのドップラー速度計測技術の研究が進められた。当時、衛星搭載雲レーダーによる鉛直風速の計測は技術的に極めて困難と考えられていたが、詳細な実現性検討の結果[20]、十分な精度でドップラー速度を測定できる可能性が示された。これにより、雲の分布

だけでなく、雲内部の上下運動まで観測できる新しい衛星ミッションの実現が視野に入るようになった。

ちょうどその頃、欧州宇宙機関 (ESA) は Earth Explorer 第6号ミッションの公募を開始していた。そこで、NICTとJAXAが雲プロファイリングレーダ (CPR) を担当し、ESAと共同で地球観測ミッションを提案した。その提案がEarthCAREであり、2004年にESAのEarth Explorerミッションとして採択された。

EarthCAREは、雲・エアロゾル・放射の相互作用を全球規模で観測し、気候変動予測の不確実性低減に貢献することを目的とした国際共同ミッションである。しかし、世界初となるドップラー速度計測機能を有する衛星搭載雲レーダーの開発は技術的難易度が高く、計画は長期にわたるものとなった。さらに打上げ直前にはウクライナ情勢の影響により当初予定していたロケットを変更する必要があるなど、多くの困難を乗り越えなければならなかった。その結果、EarthCAREは採択から20年後となる2024年に打ち上げられ、NICTが長年にわたり取り組んできた衛星搭載雲レーダー研究がついに実を結ぶこととなった。

4.3 CPRの性能

EarthCARE衛星は、高度約400 km、回帰日数25日の太陽同期軌道を採用した。搭載される雲プロファイリングレーダ (CPR) は、薄い雲まで高感度に観測することを目的としており、そのためアンテナビームを鋭く絞っている。地上での観測幅は直径約750 mと狭く、衛星直下方向のみを観測する。

衛星は約7,800 m/sで飛行しており、観測データは飛行方向に約500 mごとに積分して取得される。鉛直方向の観測範囲の上限は、観測対象とする緯度帯に応じて高度20 km、18 km、または16 kmに設定され、下限は高度-1 kmである。後述するドップラー速度の観測精度は、観測高度の上限を低くするほど向上する。そのため、高高度の雲が比較的少ない北緯・南緯60度 (現在は40度に変更) 以上の高緯度域では上限高度を16 kmに設定し、それ以外の領域では高高度の雲の観測機会を確保するため20 kmに設定 (現在は18 kmに変更) している。送信パルス幅によって決まる鉛直分解能は500 mであるが、雲頂高度や雲底高度をより高い精度で推定するため、受信信号は100 m間隔でサンプリングされる。EarthCARE衛星は、CloudSat衛星より約200 km低い軌道高度を採用することで観測対象に近づくとともに、CPRは大口径アンテナを採用することで観測感度を大幅に向上させている。その結果、10 km水平積分時に約-35 dBZの雲検出感度を実現し、CloudSatと比べて約4倍高い感度を達成した。これにより、CloudSatでは検出が困難で

あった光学的に薄い巻雲や境界層内の薄い雲についても、より高い精度で観測することが可能となった。この高い観測感度を実現するため、CPRではCloudSatと同様に、ミリ波 (W帯の電波・周波数94 GHz) を使用している。この感度により、地球の放射収支に大きな影響を及ぼす氷雲の約98 %に加え、層積雲などの水雲の約50 %を観測できると見積もられている [15]。また、CPRは衛星搭載雲レーダーとして世界で初めてドップラー速度観測機能を備えている。ドップラー速度の観測精度は、センサー単体では1 m/s、衛星の姿勢誤差を含めた場合でも1.3 m/sである。雲レーダーの反射強度 (レーダー反射因子 Z) だけでは区別が難しい雲粒子とドリズル (drizzle: 霧雨状の弱い降水) の識別にドップラー速度が利用できる。さらに、ドップラー速度から雲粒子の鉛直運動を推定できるため、雲内部の上昇流や下降流の観測への活用も期待されている。

4.4 CPRの取得データ

図5に、衛星打ち上げから約1か月後に公開されたCPRの初観測画像 [16] を示す。図は雲の鉛直構造とドップラー速度を3次元的に可視化したものである。CPRは衛星搭載雲レーダーとして世界で初めてドップラー速度の観測を実現し、事前に見積もられていた性能を実観測によって確認することができた。図6は詳しい断面図を示す。2024年6月13日に日本の東海上にある梅雨前線上の雲域をCPRが捉えたときのものである。図5 (左図) および図6 (上図) はZ因子で、色が濃いところが大きな値、強い散乱を表す。高度13 kmに達する雲があり、水平方向350 kmにわたって地表に達している。その上方では高度約5 kmあたりで水平に段差のような線が見えるが、これは雲粒が溶けて降雨になる融解層を示している。図6内に示す点線は気象庁メソ数値予報モデルの初期値から算出した0 °Cの高さを示す。地表面に近づくにつれて、散乱が弱くなるように見えるのは、波長の短いミリ波を使用しているため、電波が雨滴で減衰していることを示す。図5 (右図) および図6 (下図) は鉛直方向のドップラー速度で、濃い色は下向きの速度を示している。こちらもZ因子と同じような高度に段差の線が見られるが、よりはっきりしていて、一様に速い落下速度となっていることがわかる。これは、融解層で解けた雨滴が大きな粒径となり、速い速度で落下していることを示している。また、図6 (右図) の横軸700 kmあたりの雲は、少し濃い色となっているが、これは上昇する速度を示している。雲内部に上昇流が存在することを示している。

EarthCARE衛星は打ち上げ後、CPRの初期機能確認および校正作業を順次実施し、2025年1月からCPR

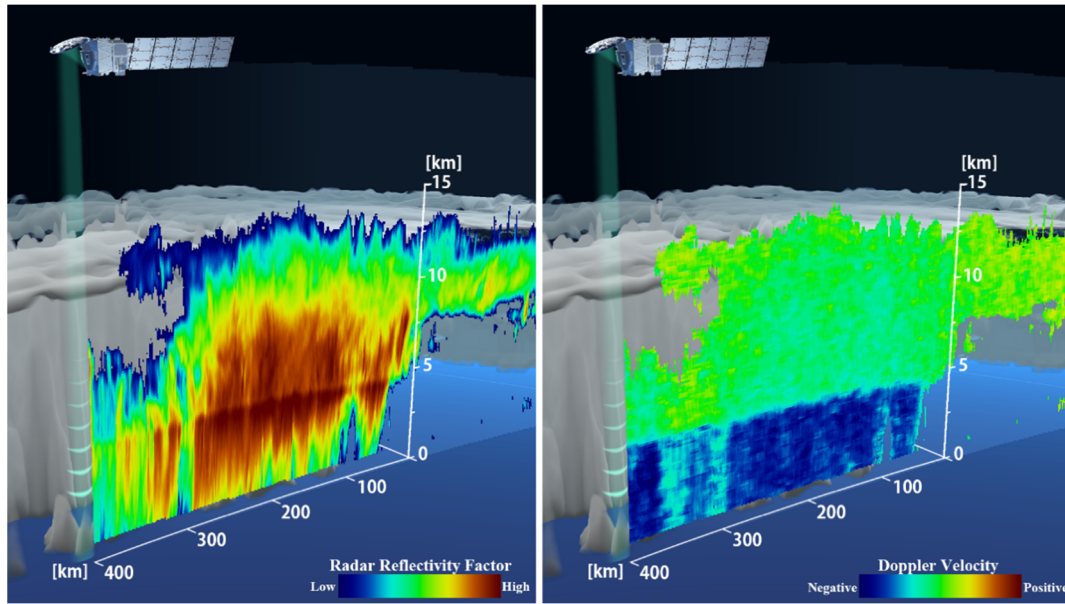


図5 CPRの初画像 (C) JXA/NICT/ESA)

CPRの反射強度 (左) と上下方向のドップラー速度 (右) の高さ分布を3次的に示した図。雲水平方向の分布は、気象衛星「ひまわり9号」データを利用している。ひまわり9号データは気象庁から提供を受けた。

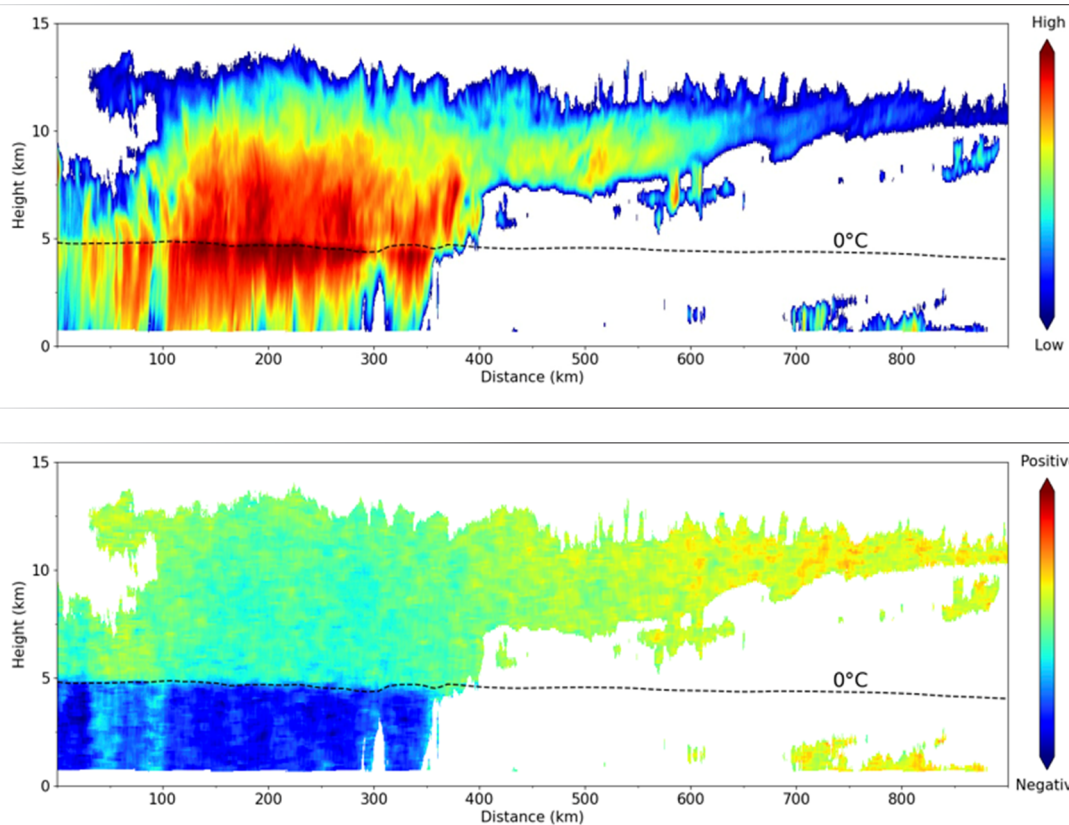


図6 CPRの初画像 (C) JXA/NICT/ESA)

レーダー反射強度 (上) および上下方向のドップラー速度 (下) の高さ分布を示す。幅約300 km、上空13 kmに達する下層から上層まで発達した雲構造を示している。図中の点線は0℃の高さで、これより下では早い落下速度になっていることがわかる。

のLevel 1プロダクト、2025年3月からLevel 2プロダクトがJAXAのG-Portalを通じて公開されている。また、CPR以外の搭載センサーについても、Level 1およびLevel 2プロダクトの公開が同時に進められた。

さらに、EarthCAREの大きな特徴である複数センサーの同時観測を活用した複合プロダクトについても開発が進められ、2025年12月に複合プロダクトが公開された。

2 フェーズ1 自然災害に対する予測・検知

NICTは、JAXAと協力してCPRのLevel 1処理アルゴリズムの開発を担当するとともに、Level 2処理アルゴリズムのうちレーダー信号処理や物理量推定などハードウェアに近い部分の開発を担当しており、EarthCAREデータ利用基盤の構築にも貢献している。

CPRは打ち上げ以降、安定して観測を継続しており、執筆時点で約2年間の観測データが蓄積されている。図5および図6に示したような観測事例も全球規模で数多く取得されつつあり、EarthCAREはこれまでにない詳細な雲観測データを提供している。図7はCPR観測から求めた2年間平均の雲量分布を示したものであり、熱帯収束帯や中緯度低気圧帯などに対応した明瞭な地域性が見られる。

EarthCAREの最大の特徴は、このような全球の雲分布を把握できるだけでなく、雲内部の鉛直構造やドップラー速度を同時に観測できる点にある。今後さらに観測データが蓄積されることで、雲の形成・発達過程や降水生成過程の理解が進むとともに、気候変動予測における大きな不確実性要因である雲フィードバックの解明にも大きく貢献することが期待されている。

4.5 CPRの校正・プロダクトの検証

取得した数値データを送信電力や受信電力などの工学値に変換される。この処理をLevel 1処理と呼ぶ。Level 1処理を正確に行うためには、打ち上げ前に各装置の利得の温度特性などを校正テーブルとして整備しておく必要がある。一部の機器には内部に校正源が搭載されており、運用中に取得した校正データを利用して、機器特性の変化を補正することができる。しかし、校正テーブルや内部校正源を用いて算出した送信電力や受信電力が確からしいかを、独立した方法によって確認する必要がある。そこでEarthCARE/CPRでは、3台の「能動型レーダー校正器」ARC (Active Radar Calibrator、図8)を用いた外部校正を実施している。ARCはCPRから送信されたレーダーパルスを受信し、その受信時刻と位相情報を保存する。その後、地表面の自然反射と区別できるよう、あらかじめ設定した時間だけ遅延させた上で、保存した信号を既知の送信電力でCPRへ再送信する機能を有している。この仕組みにより、ARCで受信した信号からCPRの送信電力を評価できるほか、ARCが送信した信号に対するCPRの受信応答からCPRの受信系の特性を、評価することができる。一方でCPRのアンテナビームは非常に鋭く、地上での照射範囲は直径750 m程度しかない。ビーム中心からわずかに外れただけでも受信電力が大きく低下するため、精度良くCPRの真の送信電力や受信電力を評価することは難しい。このため、外部校

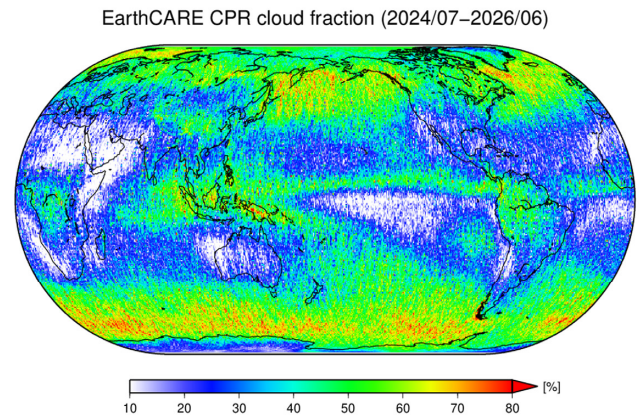


図7 EarthCARE/CPRから得られた雲量2年平均 (2024/07から2026/06)



図8 能動型レーダー校正器 (ARC) を3台並べた様子 (動作確認時。実際には約400 m間隔で配置する。)

正は一定間隔で配置した3台のARCを使用し、それぞれの位置と測定電力値からビームパターンを推定することで、ビーム中心における電力値を内挿して求めている。この方法では、3台のARCの測定値に系統的なずれ(バイアス)が存在すると正確な測定ができなくなる。そのため、各ARCは高精度な内部校正機能が搭載されており、衛星通過の前後にARC自身の校正を実施することで、測定精度と測定値の一貫性を維持している。また、外部校正の結果には大気減衰や気象条件などの環境要因による影響が含まれるため、1回や2回の観測結果だけで評価することは適切でない。実際には外部校正結果を蓄積・解析し、その統計的な結果に基づいて、CPRの送信電力や受信電力を評価している。2025年に公開されたCPRのLevel 1プロダクトでは、このような外部校正によって得られた送信電力値や受信電力値の評価結果が校正値として反映されており、観測データの信頼性向上に活用されている。

Level 1プロダクトのうち送信電力や受信電力などについては、ARCを用いた外部校正によって高い精

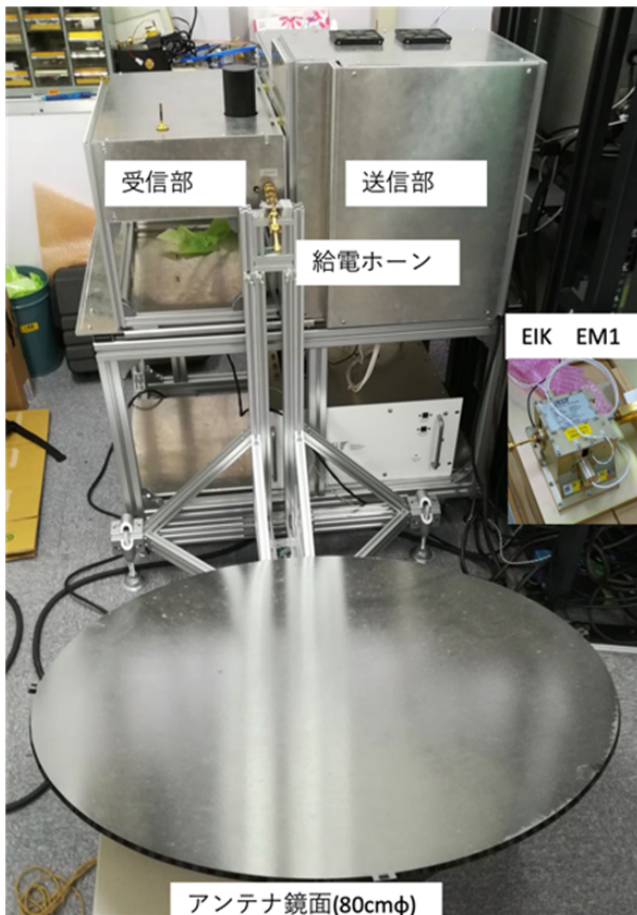


図9 地上検証用高感度雲観測レーダ (HG-SPIDER)

度で検証することができる。しかし、レーダー反射因子 (Z因子) やドップラー速度といったプロダクトについては、ARCだけでは十分な検証を行うことができない。そのため、これらのプロダクトについては、独立した観測システムとの比較による検証が必要となる。NICTでは、このような地上検証を目的として、高感度雲レーダ (HG-SPIDER) を運用している。HG-SPIDERは94 GHz帯のW帯雲観測レーダーであり、EarthCARE/CPRを上回る約 -40 dBZの高い感度を有する。統計的に有意な検証データを取得するため、2020年7月から連続観測運用を開始している。HG-SPIDERは、既存技術を有効活用することで高性能かつ低コストなシステムとして整備された。送信部にはCloudSat/CPRのために開発された大電力送信管の機械振動モデルを活用し、アンテナ反射鏡にはEarthCARE/CPRの実現性検討で製作された1/3スケールモデルを流用している。このように既開発資産を積極的に活用することで開発コストを抑えながら、地上設置型の雲観測レーダーとして世界最高レベルの感度を実現している。使用している大電力送信管はCloudSat/CPRの機械振動モデルを流用しており、アンテナの反射鏡はEarthCARE/CPRの実現性検討の

中で評価に用いた1/3スケールモデルを流用している。既開発品を使用することで費用を抑えた形で、地上設置雲観測レーダーとして最高の感度を達成している。CPRがこのHG-SPIDERの上空を通れば、両者のZ因子やドップラー速度などのプロダクトを直接比較することによる検証が期待できる。しかしながら、その機会は回帰日数の25日に1回しかないため、統計的な比較を併用することにより、プロダクトの検証を行う。

EarthCARE/CPRがHG-SPIDERの観測地点上空を通過した際には、両者がほぼ同じ雲を観測することになる。そのため、レーダー反射因子 (Z因子) やドップラー速度などのプロダクトを直接比較することができ、CPRの観測精度を評価するうえで非常に有効である。しかし、EarthCARE衛星の回帰日数は25日であり、同一地点での観測機会は限られている。そのため、個々の同期観測事例の比較だけでなく、長期間にわたり蓄積された観測データを用いた統計的評価を組み合わせることで、CPRプロダクトの総合的な検証を進めている。

このような地上観測との比較検証により、EarthCARE/CPRが提供するZ因子やドップラー速度の信頼性が確認されれば、全球規模で取得される観測データを用いて、雲や降水粒子の鉛直構造や運動の解析をより高い精度で行うことが可能となる。これにより、雲の形成・発達過程や降水生成過程の理解が進むとともに、気候変動予測における重要な不確実性要因である雲フィードバックの解明にも貢献することが期待される。

5 GPM・EarthCAREからPMM

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「降水レーダ衛星」PMM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」(KuDPR: Ku-band Doppler Precipitation Radar)を開発・搭載し、その観測データから得られる知見をもとにGSMaPを高精度化し、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である。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。EarthCARE/

CPRでは、大口径アンテナの採用によりアンテナビームを鋭くすることで、低軌道衛星の移動速度によって生じるドップラー広がりを抑制し、衛星搭載雲レーダーとして世界初のドップラー観測を実現した。しかし、KuDPRが使用するKu帯では同等のビーム幅を得るためにさらに大口径のアンテナが必要となるため、同手法の適用は容易ではない。そこでKuDPRでは、2つのアンテナを用いて、それらの受信信号に対して処理をすることで衛星移動に起因するドップラー広がりを軽減する方式を採用している。これは航空機搭載合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar; SAR) による移動体観測技術の応用であり、その実現性検討にはNICTが開発したPi-SAR2 (Polarimetric and interferometric airborne Synthetic Aperture Radar 2) の実験観測データを利用した。また、EarthCARE/CPRから得られる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おいて有用である。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。

TRMM・GPMの設計寿命は3年2か月にも関わらず、TRMMは17年半の運用が行われ、GPM主衛星は12年以上の運用が行われている。GPM主衛星については、衛星や機器に問題が無ければ2030年頃までの運用が期待されている [14]。また、EarthCARE衛星においても設計寿命は3年であるが、最新の見積もりでは2034年まで運用が続くことが期待されている [17]。雲や降水を高精度に測るセンサーの運用が長期的に継続されることによって、長期観測データから地球温暖化に伴う雲や降水長期変化の検知が期待される。図11はTRMM/PRとGPM/DPRから得られた地表面降水量の平均値である。熱帯域 (緯度35度以内) においてはPRとDPRの継続的な降水観測によって28年の降水データが蓄積され、近々30年を越えた降水データの蓄積が実現することになるだろう。しかし、地球温暖化に伴う降水量の長期変化量は非常に微小な値と予想され、センサーのわずかな性能や運用の変化によって埋もれてしまう程度である [18]。そのため、長期間にわたる観測データが蓄積されるだけでは十分ではなく、センサー性能の維持や継続的な校正、さらにはTRMM・GPM・PMMのような複数世代にわたるミッション間で整合的なデータセットを構築することが重要となる。このような必要性はEarthCAREについても期待が寄せられている。EarthCARE/CPRに先立って実現したCloudSat/CPRは2006年から2023年まで17年の長期観測が行われていて、EarthCAREにその継続的な観測が期待される。その際、自然変動とセンサー由来の変

TRMM/GPMCore KuNS precipRateNearSurface (1997/12–2025/11)

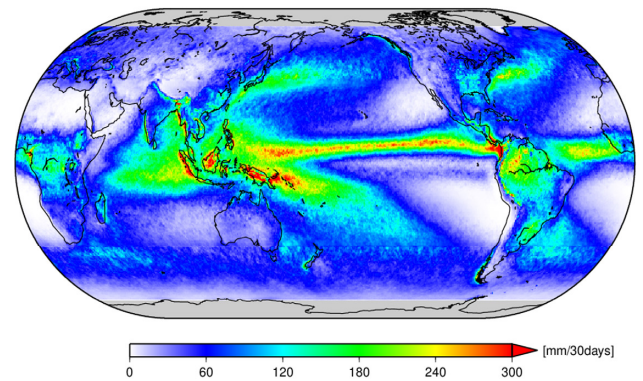


図11 TRMM/PRとGPM/DPR (KuPR) から得られた地表面降水量 (30日あたり) の平均値。PRは緯度35度までを1997/12から2024/07まで利用。KuPRは2014/08から2025/11まで利用しており、熱帯域 (緯度35度以内) においては28年平均となる。

動を適切に分離するためには、ハードウェアに関する知見だけでなく、観測対象の高度なデータ処理が求められる。NICTはその両面に関する実績があり、複数ミッションにまたがって実現した新旧のデータを統合する技術の確立においても重要な役割を担うことになるだろう。

6 まとめ

本稿では、GPMおよびEarthCAREにおけるNICTの取組を、衛星搭載雲・降水レーダー技術の歴史と今後の展望という観点から概説した。GPMでは、TRMMで実証された宇宙からの降水レーダー観測を発展させ、DPRによる二周波観測とGSMaPを通じた全球降水分布の把握に貢献してきた。EarthCAREでは、CPRにより雲の鉛直構造とドップラー速度を宇宙から観測する新たな技術が実現され、雲・エアロゾル・放射の相互作用を理解するための観測基盤が整えられた。

これらの成果は、過去の衛星ミッションの延長にとどまらず、将来の観測と社会課題への対応につながるものである。GPMの後継に相当するPMMでは、新たに降水雲内部の鉛直運動を捉え、GSMaPの高度化や水災害リスクの低減に貢献することが期待されている。また、TRMM・GPM・PMMにまたがる降水観測、CloudSat・EarthCAREにまたがる雲観測は、気候変動に伴う雲・降水の長期変化を検知するための重要な基盤となる。

一方で、長期変化の検出には、自然変動とセンサーの性能変化、運用変更、校正誤差に由来する変動を慎重に切り分ける必要がある。そのためには、衛星搭載レーダーのハードウェアに関する理解と、高度なデー

タ処理・校正・検証技術の双方が不可欠である。
NICTは、TRMM、GPM、EarthCAREを通じて培ってきた計測技術とデータ解析技術を活かし、将来予測や防災・減災に資する観測基盤の発展に貢献していく。

謝辞

TRMM・GPM・EarthCAREデータはJAXA地球観測衛星データ提供システム (<https://gportal.jaxa.jp/gpr/>) から入手した。

補足

本稿には”レーダー”と”レーダ”の表記が混在している。一般的な名称としては”レーダー”を使用している一方で、固有名詞については「」としつつ記述した。

略語一覧

ARC: Active Radar Calibrator
ATLID: Atmospheric Lidar
BBR: Broad-Band Radiometer
CPR: Cloud Profiling Radar
CRL: Communications Research Laboratory
DPR: Dual-frequency Precipitation Radar
EarthCARE: Earth Cloud Aerosol and Radiation Explorer
ESA: European Space Agency
HG-SPIDER: High-sensitivity Ground-based SPIDER
GMI: GPM Microwave Imager
GPM: Global Precipitation Measurement
GSMaP: Global Satellite Mapping of Precipitation
JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency
KaPR: Ka-band Precipitation Radar
KuDPR: Ku-band Doppler Precipitation Radar
KuPR: Ku-band Precipitation Radar
MDS: Mission Demonstration test Satellite
MSI: Multi-Spectral Imager
NASA: National Aeronautics and Space Administration
NASDA: National Space Development Agency of Japan
NICT: National Institute of Information and Communications Technology
Pi-SAR: Polarimetric and interferometric airborne Synthetic Aperture Radar
PMM: Precipitation Measuring Mission
PR: Precipitation Radar

RRL: Radio Research Laboratory

SAR: Synthetic Aperture Radar

SPIDER: Special Polarimetric Ice Detection and Explication Radar

TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission

【参考文献】

- 1 IPCC, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2021.
特に Chapter 7 “The Earth’s Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity”, Chapter 8 (Water Cycle Changes), Chapter 11 (Weather and Climate Extreme Events).
- 2 国立研究開発法人情報通信研究機構報道発表, 「EarthCARE衛星 (はくりゅう) 打ち上げ成功」, 2024年6月4日, (2026年7月29日参照).
https://rri.nict.go.jp/news/20240604_earthcare.html
- 3 T. Wehr, H. Kubota, M. Tzeremes, et al., “EarthCARE: ESA-JAXA mission for cloud, aerosol and radiation studies,” Bulletin of the American Meteorological Society, 2023.
- 4 B. Stevens and G. Bony, “What Are Climate Models Missing?,” Science, vol.340, no.6136, pp.1053–1054, 2013.
- 5 A.Y. Hou, R. Kakar, S. Neeck, et al., “The Global Precipitation Measurement Mission,” Bulletin of the American Meteorological Society, vol.95, no.5, pp.701–722, 2014.
- 6 Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Global Precipitation Measurement (GPM) Mission Overview.
- 7 M. Kojima, T. Iguchi, T. Kubota, et al., “Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) Development on the Global Precipitation Measurement (GPM) Core Observatory,” Proc. SPIE 8528, Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation V, 85281A, 2012.
- 8 寺門和夫: 宇宙から見た雨 熱帯降雨観測衛星TRMM物語, 企画: 宇宙航空研究開発機構, p.85., 毎日新聞社, 2015年
- 9 岡本 謙一, 衛星搭載降水レーダ, 日本リモートセンシング学会誌, . 39巻, 3号, pp.171–180, 2019.
<https://doi.org/10.11440/rssj.39.171>.
- 10 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構報道発表, 「全球降水観測計画主衛星 (GPM主衛星) の初画像について」, 2014年3月25日, (2026年7月29日参照).
https://www.jaxa.jp/press/2014/03/20140325_gpm_j.html
- 11 T. Kubota, 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, “Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) Products in the GPM Era,” Satellite Precipitation Measurement, Advances in Global Change Research, vol.67, pp.355–373, Springer, 2020, doi:10.1007/978-3-030-24568-9_20.
- 12 K. Okamoto et al., “A Feasibility Study of Rain Radar for the Tropical Rainfall Measuring Mission,” vol.35, no.145, pp.109–208, 1988.
- 13 Nakamura, K., et al., “Radiowave Scattering Characteristics of Melting Layer Measured by a Dual Ka-band Radar System,” Journal of the Meteorological Society of Japan, vol.99, no.4, pp.1099–1114, 2021. doi:10.2151/jmsj.2021-053.
- 14 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター, 「GPM主衛星のノミナル高度の変更について」, 2023年10月16日, (2026年7月29日参照).
<https://www.eorc.jaxa.jp/GPM/boost.html>
- 15 Illingworth, A. J., and Coauthors, 2015: The EarthCARE Satellite: The Next Step Forward in Global Measurements of Clouds, Aerosols, Precipitation, and Radiation. Bull. Amer. Meteor. Soc., 96, pp.1311–1332, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00227.1>
- 16 国立研究開発法人情報通信研究機構報道発表, 「雲エアロゾル放射ミッション [EarthCARE] 衛星 (はくりゅう) 搭載雲プロファイリングレーダ (CPR) の初観測画像を公開」, 2024年6月27日, (2026年7月29日参照).
<https://www.nict.go.jp/press/2024/06/27-1.html>
- 17 ESA, EarthCARE lifetime update: mission targets 2034 and beyond, (2026/07/13 閲覧)
<https://earth.esa.int/eogateway/news/earthcare-lifetime-update-mission-targets-2034-and-beyond>
- 18 Kanemaru, K., T. Iguchi, T. Masaki, N. Yoshida, and T. Kubota, 2024:

2 フェーズ1 自然災害に対する予測・検知

- Development of a Precipitation Climate Record From Spaceborne Precipitation Radar Data. Part II: Temporal adjustment of the calibration change using the ocean normalized radar cross section. J. Atmos. Oceanic Tech., 41, pp.921-933, doi:10.1175/JTECH-D-23-0151.1
- 19 H. Horie, T. Iguchi, H. Hanado, H. Kuroiwa, H. Okamoto, and H. Kumagai, "Development of a 95 GHz airborne cloud profiling radar (SPIDER) -technical aspects-", IEICE Commun., E83-B, 9, pp.2010-2020, Sept. 2000.
- 20 S. Kobayashi, H. Kumagai and H. Kuroiwa, "A Proposal of Pulse-Pair Doppler Operation on a Spaceborne Cloud-Profiling Radar in the W band," J. Atmos. Oceanic Technol., Vol.19, pp.1294-1306, Sept. 2002.



堀江 宏昭 (ほりえ ひろあき)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
研究マネージャー
レーダーリモートセンシング



金丸 佳矢 (かねまる かや)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
研究員
博士(理学)
衛星リモートセンシング