

世界初！宇宙から雲の上下の動きを測定できる 雲プロファイリングレーダ

～ EarthCARE 衛星搭載
雲プロファイリングレーダ (CPR) について ～

世界で初めて雲や降水の鉛直速度を計測できる雲プロファイリングレーダを搭載した衛星が打ち上げられた。ここまでに至る NICT の取り組みと今後について紹介する。

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
研究マネージャー 堀江 宏昭



EarthCARE 衛星軌道上イメージと搭載センサ

まえがき

EarthCARE 衛星 (和名: はくりゅう) が 2024 年 5 月に米国ヴァンデンバーグ宇宙軍基地から SpaceX 社のロケット Falcon 9 にて打ち上げられた。地球温暖化による異常気象・極端現象を感じずにはいられない昨今だが、地球温暖化予測が計算に使用している予測モデルにより大きく結果が異なることをご存じだろうか。雲粒が降雨へ成長する雲・降水過程は、豪雨等を予測する数値気象モデルや将来の気候を予測する数値気候モデルで重要な役割を果たしている。気候変動に関する政府間パネル (IPCC^{*1}) のレポートでも温暖化予測の最大の不確定要素は雲であり、予測に使用する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。EarthCARE (Earth Cloud Aerosol and Radiation Explorer、和名: 雲エアロゾル放射ミッション) は、日欧が協力して 2004 年に欧州の第 6 次 Earth Explorer ミッションに採択された衛星プロジェクトであり、雲プロファイリングレーダ (CPR)、大気ライダ (ATLID)、多波長イメージャ (MSI)、および広帯域放射収支計 (BBR) の 4 つのセンサが搭載されている (冒頭の図)。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のがこのプロジェクトである。搭載センサのうち CPR は日本が、情報通信研究機構 (NICT) と宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が共同開発し、他の 3 つの搭載センサおよび衛星本体は欧州宇宙機関 (ESA) が開発した。搭載センサの Level 1 処理 (工学値変換) はそれぞれのセンサ開発者が行い、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。日本はプロダクトの配布を JAXA が、欧州は ESA が行っている。CPR 開発の分担について、JAXA が搭載センサの開発、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。

CPR の実現

NICT は 1998 年の航空機搭載雲レーダ (SPIDER) [2] の開発や、日米共同プロジェクトである熱帯降雨観測衛星 (TRMM) に搭載された降雨レーダ (PR) を JAXA と共同開発した経験をもとに、JAXA が公募したミッション実証衛星 (MDS) に雲レーダを提案し、2000 年に採択されたが、ロケットの失敗によりミッションがキャンセルされた。米国航空宇宙局 (NASA) が開発し、2006 年に打ち上げられた CloudSat 衛星 [3] に搭載する CPR の送信管の開発に協力する一方で、衛星搭載雲プロファイリングレーダの研究を続けていた。CloudSat 衛星開発当時は、

^{*1}気候変動政府間パネル IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) は、世界気象機関 (WMO) 及び国連環境計画 (UNEP) により設立された政府間組織であり、各国の気候変動に関する政策に科学的な基礎を与えることが目的である。世界中の科学者の協力のもと、文献 (科学誌に掲載された論文等) に基づいて、気候変動に関する最新の科学的知見の評価を提供する。

技術的に上下の動きを測るドップラ速度計測は不可能と思われていたが、実現性検討によりドップラ速度測定が可能であることが判明した。そのころ欧州で第6次 Earth Explorer ミッションの公募があった。日米共同プロジェクトである全球降水観測計画 (GPM) に搭載する二周波降水レーダ (DPR) を共同で開発した経験もあり、衛星開発の経験豊富な JAXA と雲レーダ開発や設計・性能評価の経験がある NICT が共同で CPR を開発することにして、ESA と共同でミッション公募に応募した EarthCARE 衛星が 2004 年に採択された。最終的にはウクライナ情勢の影響で使用するのが米国のロケットになるなど、多数の国際的な協力の末に打上げまで至ったことを記しておく。

CPR の性能

EarthCARE/CPR の観測概念図を図 1 に示す [4]。EarthCARE 衛星は高度約 400km を 25 日かけて 389 周する軌道となっている。アンテナビーム幅は狭く、照射範囲は直径 750m 程度であり、真下のみ観測する。衛星の速度は約 7800m/s であり、約 500m 毎に水平積分する。観測高度は地表下 1km から 20km までであるが、緯度により 18km まで、あるいは 16km までを選択できる。通常の観測では緯度 60 度以内を高度 20km (現在は 18km に変更) まで、それ以外を高度 16km までを観測する。あとで述べるドップラ速度の計測精度は観測高度が低い方が有利になるため、雲の存在確率を考慮して選択した。鉛直分解能は 500m であるが、雲頂高度などを精度よく検出するため 100m 毎にサンプリングする。雲検出の感度は CloudSat 衛星より約 200km 低い軌道でもあり、約 4 倍感度向上し、 $-35\text{dBZ}^{\ast 2}$ (10km 積分時) となっている。

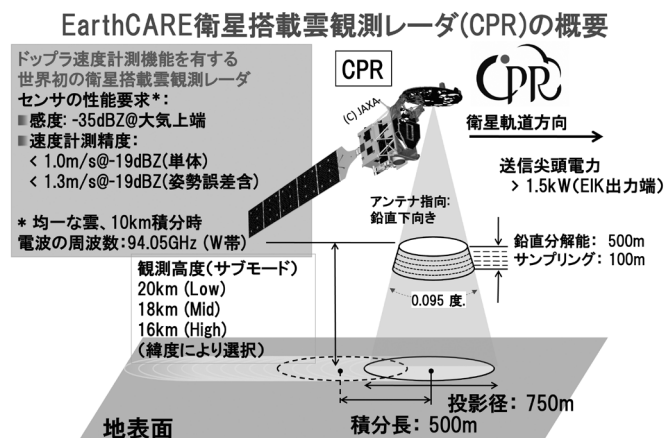


図 1 CPR の測定概念図

粒の小さい雲粒子を観測するのに必要な感度を達成するため使用する電波はミリ波である W 帯^{*3}の周波数 94GHz を使用している。この感度を達成すれば地球の放射収支に影響する氷雲の 98% のほか、層積雲 (水雲) の 50% を観測できるとされている [1]。世界で初めて計測するドップラ速度の精度は、センサ単体で 1m/s 、姿勢誤差を含む場合は 1.3m/s である。Z 因子だけでは識別が難しい雲とドリズル (drizzle) と呼ばれる弱い雨の判別に鉛直速度を使用できる。また、雲の上昇・降下速度を検出する目的もある。

CPR の取得データ

図 2 は衛星打ち上げ 1 ヶ月後に公開 (リンクを [E] に示す) した CPR の初観測画像で、3 次元的に示した図である。衛星から世界で初めて計測した鉛直方向のドップラ速度データで事前の実現性検討の通りに示すことができた。図 3 は詳しい断面図を示す。2024 年 6 月 13 日に CPR が日本の東海上にある梅雨前線上の雲域を捉えたときのものである。図 2 (左図) および図 3 (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 13km に達する雲があり、350km に渡って地表に達している。その上方では高度約 5km 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 3 内に示す点線は気象庁メソ数値^{*4}予報モデル GPV (Grid Point Value) 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 2 (右図) および図 3 (下図) は鉛直方向のドップラ速度で、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 3 (右図) の横軸 700km 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

^{*2} dBZ: Z 因子のデシベル (dB) 表記、Z 因子: レーダ反射因子のこと。レーダ散乱断面積ともいう。レーダで測定された雨・雲粒子の散乱断面積を単位体積当たりの粒子の直径の 6 乗に比例する量に変換したもの。Z = $\sum D^6$ (単位: mm^6/m^3)
“初画像”では専門用語を排するために正確では無いがレーダ散乱強度と言い換えた。

^{*3} W-band ともいう。慣用的に使われている周波数帯名の一つ。IEEE (電気電子学会) の定義で 75-110GHz の周波数帯を指す。

^{*4} メソ数値予報モデル: 気象庁の予報モデルで、5km のグリッド、3 時間毎の予測を計算するモデル。全球の予報モデルよりは細かいグリッド、細かい時間分解能であるが、局地モデルより荒いグリッド、荒い時間分解能である。

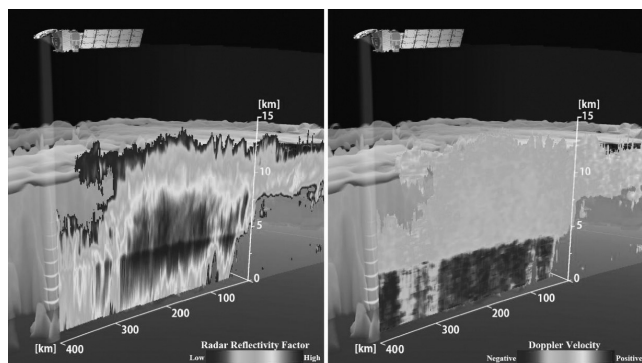


図2 CPRの初画像 ©JAXA/NICT/ESA

CPRのレーダ反射強度(左)とドップラ速度(右)の高さ分布を3次元的に示した図。雲の水平方向の分布は、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。

<https://www.nict.go.jp/press/2024/06/27-1.html>

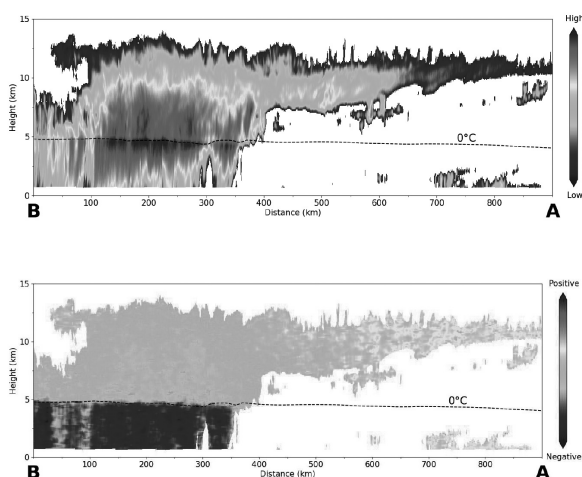


図3 CPRの初画像 ©JAXA/NICT/ESA

図2左や図3下は「レーダ反射強度」の高さ分布を示す。図2の左側は幅約300km、上空約13kmに達する下層から上層まで発達した雲構造を示しており、その雲構造から上層雲が図3の右側へ広がっている様子がわかる。

している。雲内部に上昇流が存在することを示している。

この後、CPRの初期機能確認や校正作業を終え、2025年1月からLevel 1プロダクトが、2025年3月からLevel 2プロダクトがJAXAのG-portalサイト[A]で公開されている。また、他のセンサのLevel 1プロダクトおよびLevel 2プロダクトも公開されている。EarthCAREの特徴である、複数センサによる同時観測について、2つのセンサの複合プロダクトも既に公開されているが、3センサおよび4センサの複合プロダクトは2025年12月に公開が予定されている。なお、NICTは、JAXAと協力してCPRのLevel 1処理アルゴリズムを、またハードウェアに近い部分のLevel 2処理アルゴリズムを担当している。なお、NICTのEarthCARE特設サイトへのリンクを[B]に、JAXA、ESAのEarthCAREサイトへのリンクを[C]、[D]に示す。

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するために、打ち上げ前に各装置の温度による利得変動などを測定した校正テーブルを作成しておく必要がある。一部のパラメータは機器内部に校正源を持ち、運用中にその校正データを取得している。Level 1処理では、これら校正テーブルや校正源の情報をを用いた補正により工学値を算出している。算出された値が確からしいか、別の方法で確かめる必要があり、それを外部校正という。EarthCARE/CPRでは、3台の能動型レーダー校正器(図4、Active Radar Calibrator; ARCと略す)を使用した外部校正を実施することにした。ARCはCPRから送信されたパルス信号を受信するだけでなく、そのタイミングと位相情報を保存し、地表面の反射と区別するために規定の遅延時間だけ遅らせて、保存したパルスの情報をCPRに向かって固定の電力で送信する機能を有している。この機能により、CPRの送信電力をARCの受信電力値から、CPRの受信電力をARCの送信電力値から、補正することができる。アンテナの照射径は約750mであり、真下からずれると電力が弱くなっていくため、精度良くCPRの送信電力や受信電力を計測することは困難である。そのため、外部校正は間隔を離れた3台のARCを使用することにし、3台の位置と測定電力値からフィッティングにより、電力値を求める。このとき、3台のARCの測定値にバイアスがあるなど測定精度が悪いと電力推定ができなくなる。図に示したARCは校正源やパワーメータを装備しており、衛星通過前後にARC自身の校正をすることで、測定精度を担保する。1回や2回の外部校正結果だけでは、大気減衰

などの環境の影響が大きいため複数回の結果で評価する必要がある。CPRのLevel 1プロダクトを公開する際には、外部校正で評価した送信電力値や受信電力値の結果を校正値として適用している。

Z因子やドップラ速度と言ったプロダクトについては、ARCとは別に、別の装置で検証することが必要である。NICTは地上検証用雲観測レーダーを準備[4]



図4 能動型レーダー校正器 (Active Radar Calibrator; ARC)

ラック上部に送受信器およびアンテナ、ビルトイン校正器、ラック内にパワーメータ、IF部、制御装置などを収容

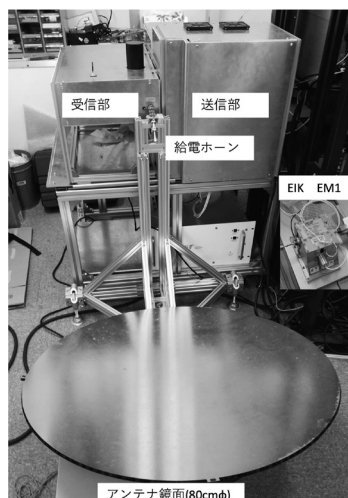


図5 地上検証用 W 帯高感度雲観測レーダー

の實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 日に一回しかないため、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こととしている。

さいごに

EarthCARE/CPR の現状について、NICT が担当している部分を中心に、校正・検証されたプロダクトを提供する取り組みを紹介した。

雲粒が降雨へ成長する雲・降水過程は、豪雨等を予測する数値気象モデルや将来の気候を予測する数値気候モデルで重要な役割を果たしている。世界で初めて雲の上

して、CPR よりも高い感度 (-40 dBZ) を有する W 帯高感度雲観測レーダー (HG-SPIDER) がある。2020 年 7 月のコロナ禍の中に、統計的に有意となる長期間のデータを取得するため、連続運用を開始している。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

下の動きを全球で観測されることで、雲・降水過程のメカニズムの理解を進め、数値モデルの改良が期待される。今後、この CPR のプロダクトを用いて、他の研究機関と共同で解明を進めていくことにより、気象予測や気候予測の精度向上への貢献することを目指している。

謝辞

CPR の観測の實現まで 20 年という長い月日がかかり、現在関わっている方以外に、既に現場を離れた方、退職されたりされた方が多数おられる。これらの NICT 関係者、また共同開発先である JAXA の関係者、ESA 関係者、また国内外のサイエンスチーム関係者など、全ての関係者に感謝する。

ARC の改修・運用、地上検証用 W 帯雲観測レーダーの運用など、本件の一部は、総務省から受託した「電波伝「電波伝搬の観測・分析等の推進」の支援を受けて行われた。

<“レーダー”、“レーダー”の表記について>

- ・一般的な名称の“レーダー”を使用した。
- ・固有名詞は、そのままとした。(雲プロファイリングレーダー、高感度雲レーダー、等)
- ・報道発表 (CPR の初画像) からの引用については、そのままの表記とした。

<引用文献>

- [1] A. Illingworth, et. al, "The EarthCARE Satellite: The Next Step Forward in Global Measurements of Clouds, Aerosols, Precipitation, and Radiation", AMS, Bulletin of the American Meteorological Society, Volume 96, Issue 8, 2015
- [2] Horie, H. et. al, "Development of a 95-GHz Airborne Cloud Profiling Radar (SPIDER) - Technical Aspects-", IEICE Trans. Commun., E83-B, no.9, pp. 2010-2020, 2000.
- [3] Stephens G., et. al, "The CloudSat Mission and the A-train", Bull. Amer. Meteor. Soc., vol.104, pp.171-1790, 2002.
- [4] "衛星センサによる宇宙からの地球環境観測", NICT 季報, リモートセンシング技術特集号, Vol.65, No.1, 2019

<リンク>

- [A] JAXA の G-Portal サイト
<https://gportal.jaxa.jp/gpr/>
- [B] NICT の EarthCARE/CPR 特設サイト
<https://www2.nict.go.jp/res/earthcare/>
- [C] JAXA の EarthCARE サイト
<https://www.jaxa.jp/projects/sat/earthcare>
- [D] ESA の EarthCARE サイト
https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/EarthCARE
- [E] NICT 報道発表 (プレスリリース) サイト
<https://www.nict.go.jp/press/2024/06/27-1.html>

堀江 宏昭



●略歴：電気通信大学電気通信学研究科博士前期課程修了（修士）後、1998 年通信総合研究所（現 NICT）入所。大学時代から引き続き現在までリモートセンシングの研究に従事。1994-1996 NASA ゴダード宇宙センターで降雨レーダーの研究に従事、その後航空機搭載雲レーダーの開発に従事。2007-2009 EarthCARE/CPR プロジェクト移行のため JAXA に出向。その後、CPR および CPR 関連の研究・開発に従事、現在に至る。日本リモートセンシング学会・日本気象学会所属。

●研究内容：1996 年の航空機搭載雲レーダーの開発を開始して以降、雲レーダー関連の研究に従事。衛星搭載雲レーダーの性能定義や地上検証用雲レーダーの設計からデータ処理手法の研究のほか、レーダー以外にも ARC の高度化など、ハードウェアに関するノウハウが必要な設計からデータ処理まで幅広く研究開発を実施。

●今後の展望：将来にわたり、必要になった新しい観測装置を実現させるため、これまでの研究の成果・蓄積したハードウェアに関する経験・ノウハウを次の世代に伝承したい。



衛星打上後初めて開催された EarthCARE の科学者とセンサ開発者の JMAC 会議
JMAC: Joint Mission Advisory Group
全てのセンサで正常にデータが取得されてホッとされた様子が伝わる
(背景は「はくりゅう」 於 ライデン、オランダ 2024 年 9 月)