

4 衛星センサによる宇宙からの地球環境観測

4 *Global Environmental Observation from Space by Satellite-borne Sensors*

4-1 EarthCARE 搭載雲レーダーの開発とアルゴリズム開発

4-1 *Development of the EarthCARE Cloud Profiling Radar and its Data Processing Algorithm*

大野裕一 堀江宏昭 佐藤健治

Yuichi OHNO, Hiroaki HORIE, and Kenji SATO

地球温暖化予測モデルの不確定要素のひとつである雲・エアロゾルの気候への影響を明らかにするために、日欧で協力して EarthCARE という衛星計画を進めている。この衛星に搭載する雲の鉛直断面を観測する雲レーダー (CPR) を JAXA と NICT で協力して開発してきた。本稿では CPR のハードウェアについて紹介するとともに NICT が主に開発に関与している CPR の地上データ処理アルゴリズムの概要について述べる。

EarthCARE is a joint satellite mission between Japan and Europe. This mission aims to clear cloud and aerosol's influence to global climate that is one of unknown factors for global warming prediction models. The cloud profiling radar (CPR) installed in the EarthCARE satellite has been developed in Japan in cooperation with NICT and JAXA. In this paper, the CPR hardware is introduced and outline of the CPR ground data processing is explained.

1 まえがき

雲は地球の放射収支に大きく寄与している一方、その全球的な様相、特に鉛直分布の情報は不足している、地球温暖化予測モデルの大きな誤差要因となっている。気象衛星の観測では雲の水平分布は把握できるが、雲の高さ、厚さ、重なった雲の下の雲の様子など放射収支に重要な鉛直情報は制約されている。そうした状況の中、温暖化の予測誤差を減らすために雲や大気微粒子 (エアロゾル) や放射収支を全球的に把握するアースケア (EarthCARE) と呼ばれる衛星ミッションが欧州宇宙機関 (ESA) と宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と NICT によって計画され、2007 年から開発が続けられている [1]。ESA が衛星本体、大気ライダー、多波長イメージャ、広帯域放射収支計の開発及び打ち上げ、打ち上げ後の衛星運用を担当して、JAXA と NICT はこの衛星に搭載する雲レーダー (CPR: Cloud Profiling Radar) の開発を担当している。雲レーダーとはミリ波という高い周波数を利用したレーダーで、雲から反射されてきたエコーの距離と受信強度により、雲の構造や雲粒子の量などが推定できる。衛星からカメラやライダーなどの光学的な手法で雲を測定しよう

とすると、上空の雲で遮られ、下層の雲の情報が得られないということがあるが、CPR はそうした制限を受けることなく、雲の鉛直構造をとらえることができる。雲の放射収支には鉛直構造の把握が重要であり、CPR は EarthCARE ミッションの中で欠かすことのできない重要な測器である。雲レーダーは米国航空宇宙局 (NASA) が 2006 年に打ち上げた CloudSat 衛星に初めて衛星搭載され、全球の雲分布を明らかにするなど大きな成果を上げてきた [2]。EarthCARE/CPR はそうした全球雲観測を引き継ぐとともに、CloudSat より高い受信感度でエコー強度の弱い薄い雲の観測が増えることにより、雲の放射収支の精度を高めることが期待されている。NICT は熱帯降雨観測衛星 (TRMM) 搭載の降雨レーダーの開発経験があることから衛星搭載気象レーダーのパイオニアとして、JAXA と協力しながら EarthCARE/CPR の実現に貢献してきた。本稿では CPR のハードウェアの紹介をするとともに NICT が特に大きく寄与してきた CPR の地上データ処理アルゴリズムについて記述する。

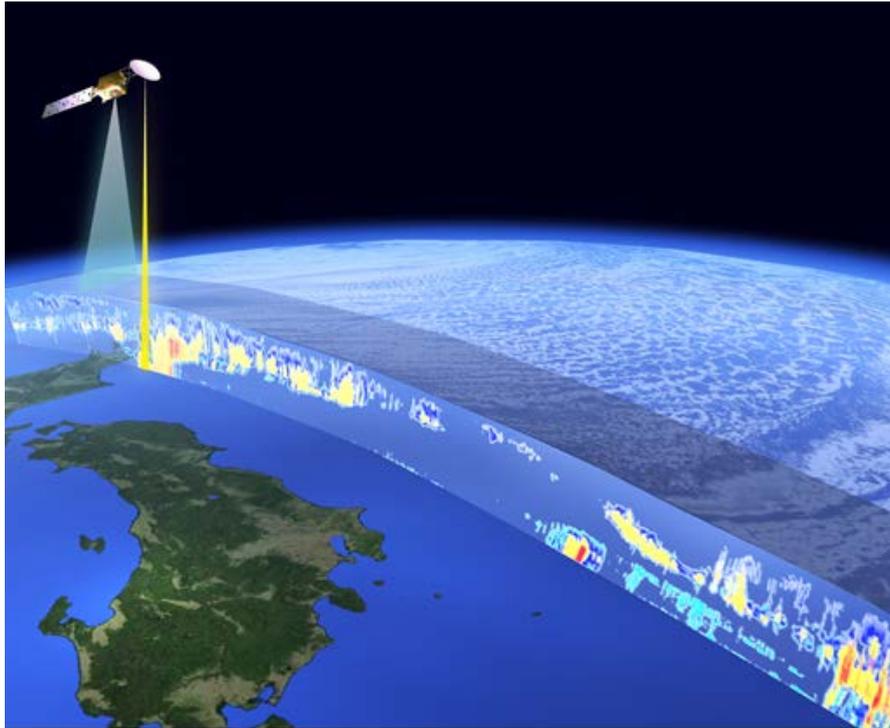


図1 EarthCARE 衛星の観測概念図

2 EarthCARE 衛星搭載雲レーダー (CPR)

図1にEarthCAREの観測概念図を示す。EarthCARE衛星は高度400 kmを約90分で地球を一周する。地方時14時に赤道を通過する太陽同期極軌道であり、地球の自転と共に観測位置は経度方向に少しずつずれていく。こうして全球を観測しながら25日後にほぼ元の位置に回帰する。CPRは衛星の進行方向先端に取り付けられたアンテナから衛星直下にパルス状の電波を発射して、雲エコーを受信する。エコーが返ってくるまでの時間から高度ごとの雲の情報が取得できる。衛星軌道に沿ってこの図のように雲の鉛直断面図が得られることになる。EarthCARE衛星に搭載された他のセンサ(大気ライダー、多波長イメージャ、広帯域放射収支計)も同様に衛星の直下周辺を観測することで、総合的に雲・エアロゾルの放射収支に関する観測が行われる。

図2はCPRの外観図である。打ち上げ後に軌道で展開する直径2.5 mの大きなアンテナ(主反射鏡)と送受信機やデータ処理部が入っているプラットフォームからなっている。この大きなアンテナによりCloudSat雲レーダーに比べて約5 dB大きなアンテナ利得(往復)を持ち、感度の改善に貢献している。アンテナビーム幅は約0.1度で地表でのフットプリントは700 m以下である。CPRの周波数は94.05 GHzで波長は3.19 mmである。送信機の最終アンプにはCloudSatと同様にEIKと呼ばれるクライストロン送



図2 CPRの外観図

信管を採用して1.5 kW以上のピーク送信電力を確保している[3]。

送信パルス幅は3.3マイクロ秒で500 mの距離分解能に対応する。パルス繰り返し周波数は衛星高度や観測最大高度に応じて変更するが6100-7500 Hzの範囲



図3 フライト試験中の CPR

で設計している。パルス繰り返し周波数は CloudSat に比べて高いが、これは主に CPR のドップラ観測を実現させるためである。衛星は移動速度がかなり速いため、パルス繰り返し周波数が低いとパルス間の受信エコーの相関が減少してドップラ速度測定精度が極端に悪化してしまう。そのため、できるだけ高いパルス繰り返し周波数が望ましいが、一方、パルス繰り返し周波数が高すぎると観測高度範囲が狭まってしまう。そのため雲の出現高度範囲を考慮して、それに応じた最適なパルス繰り返し周波数を設計する必要がある。CPR のデータ処理部にはエコー強度を測定するための対数検波器とともに受信波の位相を検出するための IQ 検波器が備わっていて、IQ 検波器の出力をパルスペア処理することでエコーのドップラ速度を検出する [4]。雲エコーのドップラ速度を観測することで粒子の判別（雲、霧雨、雨）や粒子の大きさ推定に役立つと期待しているが、3 で示すように様々なドップラ速度の誤差要因があり、地上処理アルゴリズムでどこまでこの誤差を低減できるかが課題である。

2015 年に CPR はフライトモデルの組立てが終ってフライト試験（図 3）を開始したが、熱真空試験の最中に従系の高出力送信機が突然停止するという現象が発生した。その原因の特定に長く時間がかかったが、現在は EIK を駆動する高圧電源装置の不具合だと判明

して、海外のメーカーに返送し、修理をしているところである。この修理が終われば CPR を再度組立てて最終確認試験を行い、ESA に引き渡し衛星に搭載する予定である。衛星の打ち上げは 2021 年を予定している。

3 CPR のデータ処理アルゴリズム

EarthCARE 衛星に搭載された 4 つのセンサの観測データ（CPR も含む）は軌道上でまとめてデータ保存され、極域で ESA の衛星通信施設に伝送され、地上処理施設に送られる。このデータは再び 4 つのセンサごとに分けられて、各センサの地上データ処理を実施する。CPR の処理については JAXA のデータ処理システムで処理を行うために、ESA から JAXA にデータが転送されて、校正や物理値への変換をメインとしたレベル 1 処理を行う。レベル 1 処理された CPR のデータは日本側の CPR 高次処理に回されるとともに ESA 側も独自の高次処理を実施するために再び ESA 側にも送られることになる。

NICT はレベル 1 アルゴリズムのデータ処理手法の元となるアルゴリズム記述書（ATBD）を提供し、そのコーディングは JAXA 側で行われている。また、送信電力推定や地表面エコーの処理など一部の処理関数については NICT でコーディングしたものを提供している。一方、高次アルゴリズムについては、NICT 独自で CPR のレーダー特有の誤差補正手法を提案して、そのコーディングも実施している。例えば、水平距離積分を行うことでエコー強度やドップラ速度のランダム誤差を低減したり、数値モデルの気象データを使って大気による積算電波減衰量を計算してエコー強度を補正したり、地表面のすぐ上では受信フィルターの形に応じた地表面クラッタが生じるがエコーの強さを予測されるクラッタの大きさと比較することで地表付近の雲エコーを検出したり、地表面エコー強度の観測値から予測される強度からの差を算出してその上空の雲や雨による積算電波減衰値を出したりするアルゴリズムを開発している。また、ドップラ速度のデータ処理においてはレベル 1 では考慮していないドップラ折り返し補正やエコー強度の水平方向の不均一から生じる速度誤差の補正をするためにアルゴリズム開発も進めている [5]。

こうして各種補正された CPR のプロダクトは雲物理量を算出するさらに高次のアルゴリズムに利用されることになる。衛星気象レーダーによるドップラ観測は初の試みであり、そのアルゴリズム開発は手探りの部分も多いが地上や航空機搭載雲レーダーの経験を生かしながら進めている。図 4 は数値気象モデル

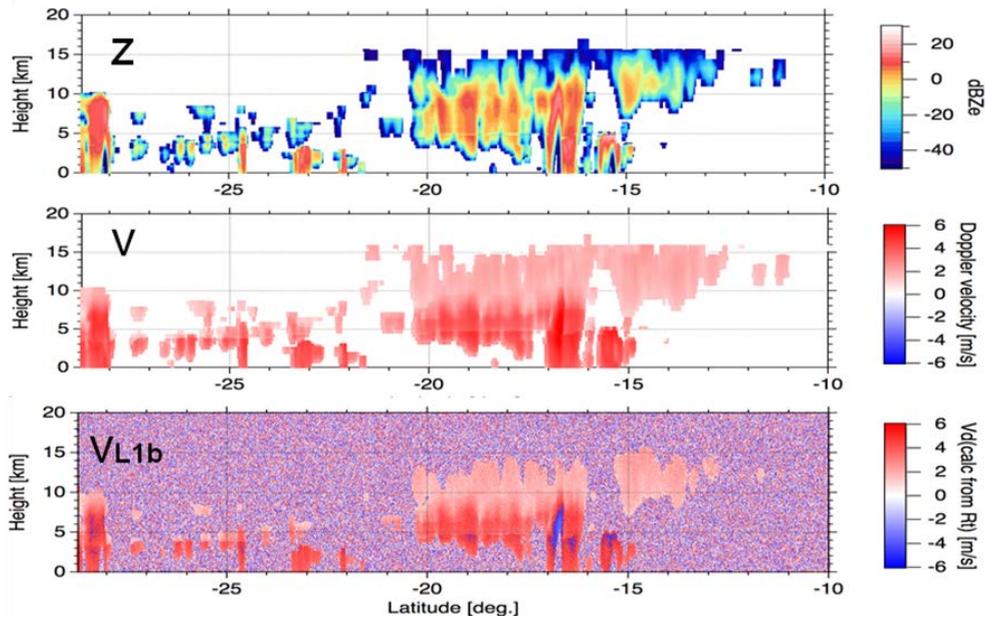


図4 数値気象モデル (NICAM) でシミュレートした雲のレーダー反射因子 (上) と鉛直速度 (中) 及びレベル1 処理後に得られる CPR のドップラ速度プロダクト (下)

(NICAM) [6] で計算された雲のデータを基に CPR で得られるレーダー反射因子 (上) と鉛直ドップラ速度 (中) を計算したものである。このデータを基にビーム広がりから生じるドップラ測定誤差を付加しパルスペア処理を模擬して得られた CPR のレベル1 出力の鉛直ドップラ速度を図4(下) に示す。ランダム誤差が加わっているためレーダー反射因子の小さな領域では図4(中) に比べてばらついている。またレーダー反射因子の大きな領域の一部で元は下降速度 (暖色) の位置で上昇速度 (寒色) になっている領域が生じている。これはドップラ速度折返しが生じたためであり、高次処理でドップラ速度の折返し補正することによりこのエラーは補正される。

4 まとめ

CPR のハードウェアは様々なトラブルにより開発期間が長期にわたってきたが、関係者の献身的な努力でようやくその完成も見えてきた。CPR 地上データ処理アルゴリズムについてはハードウェアの試験により様々な CPR の校正値が得られて、ようやく本格的に調整できる段階に至った。これまでは仮の値によって作ってきたアルゴリズムを CPR 実機のデータに適用できるように調整を進めて、打ち上げ前までにその完成度を高めると同時に科学的な成果につなげるためのアルゴリズム開発も進めて EarthCARE ミッションの成功に貢献したい。

謝辞

EarthCARE ミッションは宇宙航空研究開発機構 EarthCARE/CPR プロジェクトチーム (敬称略: 富田英一、古川欣司、中塚大貴、會田芳久、関義広、岡田和之、丸山健太、草間哲、富山信弘)、衛星利用運用センター (多賀正敏、石原博成、黒岩かおり、野中和明)、地球観測研究センター (沖理子、久保田拓志、菊池麻紀、萩原雄一郎、吉田真由美、高橋千賀子) や国内外の CPR 開発メーカーの方々、データ処理アルゴリズムや検証に携わる大学や研究所のサイエンティストの方々、ESA 側エンジニアや欧州サイエンティストの方々の様々な方面でのたゆまぬ努力により開発継続されている。また、現在は職場を異動された元 EarthCARE プロジェクトチームの方々、特に EarthCARE ミッションの立ち上げをリードしてきた皆さま (宇宙航空研究開発機構の中島映至、木村俊義、元 NICT の熊谷博、黒岩博司) のこれまでの貢献なくして EarthCARE プロジェクトはここまで達成できなかったことも言及しておきます。ここに皆さまへの感謝の意を表し、謝辞とします。

【参考文献】

- 1 A. J. Illingworth, H.W. Barker, A. Beljaars, M. Ceccaldi, H. Chepfer, N. Clerbaux, J. Cole, J. Delanoë, C. Domenech, D.P. Donovan, S. Fukuda, M. Hidakata, R.J. Hogan, A. Huenerbein, P. Kollias, T. Kubota, T. Nakajima, T.Y. Nakajima, T. Nishizawa, Y. Ohno, H. Okamoto, R. Oki, K. Sato, M. Satoh, M.W. Shephard, A. Velázquez-Blázquez, U. Wandinger, T. Wehr, and G. van Zadelhoff, "The EarthCARE Satellite: The Next Step Forward in Global Measurements of Clouds, Aerosols, Precipitation, and Radiation," Bull. Amer. Meteor. Soc., vol.96, pp.1311-

1332, 2015

- 2 G. Stephens, D. Winker, J. Pelon, C. Trepte, D. Vane, C. Yuhas, T. L'Ecuyer, and M. Lebsock, "CLOUDSAT AND CALIPSO within the A-train", Bull. Amer. Meteor. Soc., vol.99, pp.569-581, 2018.
- 3 A. Roitman, D. Berry, and B. Steer, "State-of-the-art W-Band Extended Interaction Klystron for the CloudSat Program," IEEE Trans. Electron Devices, vol.52, no.5, pp. 895-898, May 2005.
- 4 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.
- 5 O. Sy, S. Tanelli, N. Takahashi, Y. Ohno, H. Horie, and P. Kollias, "Simulation of EarthCARE Spaceborne Doppler radar products using ground based and airborne data: Effect of aliasing and nonuniform beam-filling," IEEE trans. Geosci. Remote Sens., vol.52, no.2, pp.1463-1479, Feb. 2014.
- 6 M. Satoh, H. Tomita, H. Yashiro, H. Miura, C. Kodama, T. Seiki, A. T. Noda, Y. Yamada, D. Goto, M. Sawada, T. Miyoshi, Y. Niwa, M. Hara, T. Ohno, S. Iga, T. Arakawa, T. Inoue, and H. Kubokawa, "The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and Development," Progress in Earth and Planetary Science, 1, 18., 2014 doi:10.1186/s40645-014-0018-1.



大野裕一 (おおの ゆういち)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
主任研究員
レーダー気象

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
主任研究員
レーダーリモートセンシング

佐藤健治 (さとう けんじ)

電磁波研究所
企画室
研究マネージャー
レーダーリモートセンシング