

全地球上の雨と雲を観測する電波センサ技術

奥村 実・宮谷 聰・深津 彰
山佐 靖彦・神原 直樹

要 旨

GPM主衛星に搭載する二周波降水レーダ（DPR）は、1997年に打ち上げられ現在も運用中である熱帯降雨観測衛星搭載降雨レーダ（TRMM/PR）の後継機であり、Ku帯とKa帯の2つのレーダにより、高緯度地方を含む地球上の降水分布を観測します。また、EarthCAREに搭載する雲プロファイリングレーダ（CPR）は、現存する衛星搭載雲レーダの約10倍の高感度で全地球上の雲を観測します。また、衛星搭載ミリ波レーダとして、世界初のドップラー速度計測機能を有しています。これらの技術は、今後の地球観測・安全保障に関連する衛星搭載レーダなどに活用していきます。

キーワード

●人工衛星 ●地球観測 ●降雨レーダ ●降水レーダ ●フェーズドアレイアンテナ
●雲レーダ ●ドップラーレーダ ●CFRPコア ●ゲルマニウム蒸着

1. まえがき

近年、地球温暖化など地球規模の気候変動が注目されています。このような気候変動に影響を与える要因として雨や雲の分布がありますが、陸上だけでなく海上まで含めて全地球上の分布を知るために、衛星を利用した観測が、ほぼ唯一の手段となります。NECと東芝は1997年11月に打ち上げられた熱帯降雨観測衛星搭載降雨レーダ（TRMM/PR¹）の開発を担当し、世界初の衛星搭載用降雨レーダを実現させました。TRMM/PRは3年の設計寿命を大幅に上回って13年経過した現在も運用中であり、高い評価を受けています。更に、現在NECとNEC東芝スペースシステム（以下、NECと記す）は、TRMMの後継ミッションとして、日米共同開発中である全球降水観測計画の主衛星に搭載される二周波降水レーダ（GPM/DPR²）、及び日欧共同開発の地球観測衛星である雲エアロゾル放射ミッションに搭載される雲プロファイリングレーダ（EarthCARE/CPR³）の設計と製造を行っています。本稿では、これらの衛星を利用した雨と雲の観測センサについて紹介します。なお、NECの電波センサとしては、これ以外に合成開口レーダ（SAR）があります。これについては、本特集

の論文「総合宇宙利用システムの普及を促進する小型SAR衛星技術」で紹介しています。

2. 二周波降水レーダ（DPR）

TRMM/PRは、衛星軌道上から地球に向かってKu帯の電波を送信し、雨滴によって散乱される電波を受信するレーダでした。GPM/DPRでは強い雨の観測に適したKu帯降水レーダ（KuPR）に加え、弱い雨の観測に適したKa帯のレーダ（KaPR）を追加することにより、幅広く降水を観測できるようになります。また、KuPRもTRMM/PRに比べ、送信電力の増加などで性能向上が図られています。

DPRは宇宙航空研究開発機構（JAXA）殿と情報通信研究機構（NICT）殿が協力して開発を進めており、米国NASAが開発するGPM主衛星（図1）に搭載され、2013年度にJAXA殿のH-IIAロケットで打ち上げられる予定です。

NECは、JAXA殿との契約によりDPRの設計と製造を行っています。現在は、実際に打ち上げるプロトフライトモデル（PFM）の製作が完了し、試験を実施中です。

¹ TRMM/PR : Tropical Rainfall Measuring Mission/ Precipitation Radar

² GPM/DPR : Global Precipitation Measurement/ Dual-frequency Precipitation Radar

³ EarthCARE/CPR : Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer/ Cloud Profiling Radar



©JAXA

図1 GPM主衛星の外観



写真1 KuPR (左) 及びKaPR (右) 外観 (白い部分がアンテナ系、側面にはOSR保護カバーを装着)

2.1 DPRの概要

(1) 外観と構成

KuPRとKaPRは箱型の構造をしており（写真1）、大きさはKuPR：2.6m×2.4m×0.7m、KaPR：1.3m×1.5m×0.8mです。構造体の中にはそれぞれ、送受信系（TRS）、周波数変換・中間周波数部（FCIF）、システム制御・データ処理部（SCDP）が搭載されており、構造体の地球方向側にはアンテナ系（ANT）が取り付けられています。構造体の側面には、排熱のためにOSR（Optical Solar Reflector）を張り付けており、それ以外の外表面は、アンテナを除いて主にゲルマニウム蒸着の熱制御フィルムで覆われています。

(2) 主要機能と性能

DPRは、衛星高度によりパルス繰り返し周波数（PRF）を変えながら電波を送出し、雨滴による散乱信号（エコー）の強度を測定します。衛星高度によりPRFを変えながら観測する機能は、TRMM/PRから新たに追加されたものです。雨滴からの散乱信号は、中間周波数帯に変換された後に、

対数検波します。その後AD変換され、積分処理などのデジタル信号処理を行い、衛星本体を介して観測データを地上へ送ります。

KuPRとKaPRの主要機能と性能をそれぞれ以下に示します。

- ・観測降雨強度：KuPR 0.5mm/h～、KaPR 0.2mm/h～
- ・観測高度範囲：地表～19km
- ・観測走査幅：KuPR 245km、KaPR 125km
- ・衛星からの高度情報によるPRF可変機能
- ・搭載機器の内部・外部校正機能
- ・衛星と独立した熱制御機能

2.2 機能・性能を実現するための技術

KuPRとKaPRは、電波を送信してから雨滴からのエコーが受信されるまでの時間により、降水量の高度分布を知ることができます。更に、衛星の進行方向と直交する方向にアンテナビームを走査する機能を有しております、三次元的な降水分布を測定することができます。このアンテナビーム走査を実現するために、KuPR及びKaPRともフェーズドアレイアンテナ方式を採用しています。アンテナ系は128本のアンテナ素子から構成されており、各アンテナ素子で送受信する電波の位相を制御することにより、電子的にアンテナビームを走査します。このため、各アンテナ素子には、送受信する電波を増幅するための固体電力増幅器（SSPA）、及び低雑音増幅器（LNA）とともに移相器を内蔵するT/R Moduleが接続されています。T/R Moduleは搭載スペースを削減するため8台ずつにまとめて、T/R UNITとしています（写真2）。

また、T/R UNITに内蔵されるSSPA及びLNAは、軌道上で厳しい温度環境に曝されても利得変化を生じないように精度の高い温度補償が施されており、安定したデータ取得ができるように設計されています。

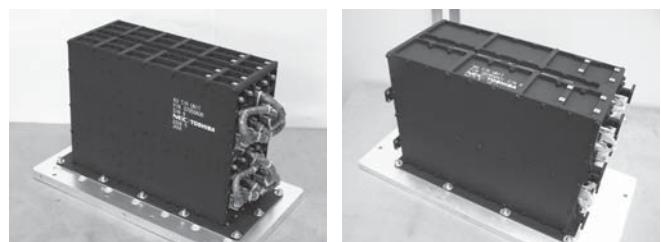


写真2 Ku T/R UNIT (左) 及びKa T/R UNIT (右)

3. 雲プロファイリングレーダ (CPR)

EarthCARE（図2）は、鉛直方向の雲粒やエアロゾル（大気中に存在するほこりやちりなどの微粒子）の分布や、雲粒が上昇・下降する速度を、全地球上で観測する衛星です。計測結果は、雲・エアロゾルによる放射収支メカニズムを解明し、気候変動予測の精度を向上させることに利用されます。

CPRは、衛星軌道上から地球に向かってミリ波帯電波を送信し、雲粒によって散乱される電波を受信するレーダです。従来以上の大型反射鏡と大電力送信により、現存する衛星搭載雲レーダの約10倍の高感度で雲の観測を行うことができます。また、衛星搭載ミリ波レーダとして世界初のドップラー速度計測機能を有し、全地球上で雲の鉛直構造だけでなく、雲の上昇・下降の動きを知ることができます。

EarthCAREは、JAXA殿とEuropean Space Agency (ESA) が共同で開発しています。CPRは、JAXA殿とNICT殿が協力して開発を進めており、NECは、JAXA殿との契約により、CPRの設計と製造を行っています。現在は、地上試験モデルを製作して開発試験を実施中です。

3.1 CPRの概要

(1) 外観と構成

CPRは、主反射鏡（MREF）、展開機構（DPM）、保持解放機構（HRM）、支持構造（STR）、準光学給電部（QOF）、プラットフォームから構成されます（図3）。プラットフォーム内部には、送受信サブシステム（TRS）、信号処理部（SPU）、ヒータ用スイッチ（HSW）が搭載されます。プラットフォームの外表面は、排熱のためにOSR（Optical Solar Reflector）を張り付けており、それ以外



図2 EarthCAREの外観

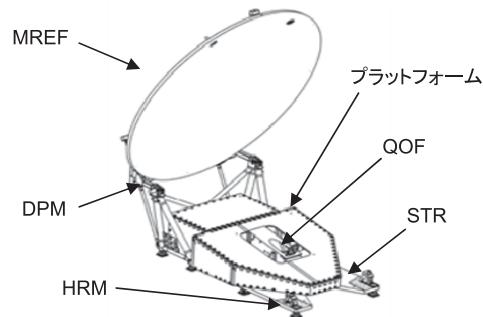


図3 CPRの外観・構成（MREF展開状態、熱制御フィルムを除く）

の外表面は、主にゲルマニウム蒸着の熱制御フィルムで覆われています。MREFは、打ち上げ時は収納され、軌道上で展開します。なおQOFとTRSの開発は、NICT殿とJAXA殿が担当されています。

(2) 主要機能と性能

CPRは、衛星高度によりパルス繰り返し周波数（PRF）を変えながら、94GHz帯の電波を送出し、雲粒による散乱信号（エコー）の強度及び位相のプロファイルを測定します。雲からの散乱信号は、中間周波数帯に変換された後に、強度は対数検波、位相はIQ検波します。その後AD変換され、積分処理などのデジタル信号処理を行い、衛星本体を介して観測データを地上へ送ります。

CPRの主要機能と性能を以下に示します。

- 最小検出感度：-35dBZ以下@Top of Atmosphere
- ドップラー速度精度：1.0m/s以下
- 搭載機器の内部・外部校正機能
- 主反射鏡の展開と保持機能及び熱制御機能

3.2 機能・性能を実現するための技術

(1) システム・信号処理部

CPRの観測範囲は直径約700mであり、衛星は対地速度約7km/sの超高速で移動しているため、観測範囲をわずか0.1秒で通過します。この高速の状況下で、雲粒の鉛直方向の速度を所定の精度で計測するためのシステム設計を、詳細なドップラー速度シミュレーションで確認しながら行っています。また、ドップラー速度精度の実現のためには、16bit分解能相当のAD変換が必要です。しかし、現状では衛星搭

載用として15bit分解能以上のAD変換器は存在しないため、14bit分解能のAD変換器とオーバサンプリングの信号処理技術を使って、要求される分解能を実現しています。

(2)高精度主反射鏡

CPRの高感度観測とドップラー速度計測を実現するために、開口径2.5mの主反射鏡（写真3左）には、従来の通常用アンテナよりも、高い鏡面精度（60 μm RMS以下）が要求されます。この精度要求を、軌道上の広い温度変動（約-50°C～+60°C）と厳しい重量制限という制約のなかで達成しなければなりません。そのために主反射鏡には、高弾性の炭素繊維強化プラスチック（CFRP）製表面板で、新規技術のCFRP製フレックスハニカムコア（写真3右）を挟んだサンドイッチ構造を適用しました。本コアにより曲げの柔軟性を保ったまま、主反射鏡面内・面外両方向の熱伸縮を低減させ、主反射鏡の製作時及び軌道上での変形を大幅に低減させています。¹⁾

(3)太陽光集光抑制

CPRは、通常運用中は地球を指向していますが、万が一衛星の姿勢異常により太陽を指向した場合、太陽光が主反射

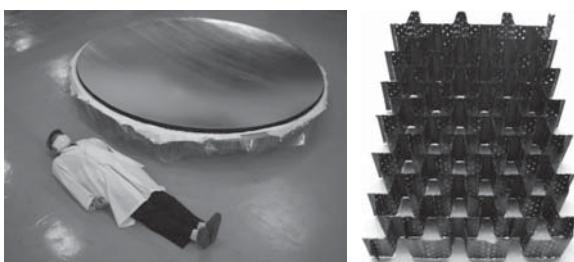


写真3 主反射鏡写真（左）、CFRPフレックスハニカムコア（右）

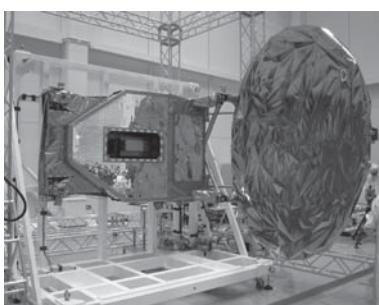


写真4 ゲルマニウム蒸着フィルムで覆った主反射鏡の反射面

鏡の焦点付近に位置するQOFに集光し、短時間で急激な温度上昇が起こる可能性があります。この集光を抑制するため、主反射鏡の反射面を、ゲルマニウム蒸着フィルムで覆い、太陽光を吸収・拡散させる技術を適用しています

（写真4）。94GHz帯電波への影響を最小限にするため、厚みが約25 μm の極めて薄いフィルムを複数つなぎ合わせ、開口径2.5mの大きさとしています。

4. むすび

世界初の衛星搭載用降雨レーダとして打ち上げられたTRMM/PRに続き、その後継となるGPM/DPRでは更なる観測性能向上を目指しています。また、世界初のドップラー速度計測機能を有するCPRの設計製造を通じて、レーダシステムと信号処理設計技術・高精度反射鏡設計製造技術・太陽光集光抑制技術などの技術力の向上を進めています。これらの技術は、今後の地球観測・安全保障に関連する衛星搭載レーダや、衛星全般に搭載される高利得・高指向精度アンテナなどに活用していきます。

参考文献

- 1) 木村ほか: 雲プロファイリングレーダ用低熱変形・高鏡面精度反射鏡の試作試験結果（第1回日本複合材料合同会議, 2010）

執筆者プロフィール

奥村 実
NEC東芝スペースシステム
技術本部
電波センサグループ
マネージャー
電子情報通信学会
日本リモートセンシング学会各会員

深津 彰
NEC東芝スペースシステム
技術本部
電波センサグループ
マネージャー
日本航空宇宙学会会員

神原 直樹
NEC東芝スペースシステム
技術本部
電波センサグループ
主任
日本航空宇宙学会会員

宮谷 晴
NEC東芝スペースシステム
技術本部
電波センサグループ
エキスパート

山佐 靖彦
NEC東芝スペースシステム
技術本部
電波センサグループ
マネージャー
電子情報通信学会会員

NEC 技報のご案内

NEC技報の論文をご覧いただきありがとうございます。
ご興味がありましたら、関連する他の論文もご一読ください。

NEC技報WEBサイトはこちら

NEC技報(日本語)

NEC Technical Journal(英語)

Vol.64 No.1 宇宙特集

特別寄稿：宇宙ソリューションで社会に貢献する時代へ
宇宙特集によせて
宇宙事業ビジョンとロードマップ
NECのグローバルな宇宙ソリューション事業への取り組み

◇ 特集論文

ロードマップ実現に向けた取り組み

宇宙技術とIT・ネットワーク技術の融合
宇宙分野におけるグローバル市場への参入戦略
「宇宙利用」のためのサービス事業の推進
先進的宇宙システム「ASNARO」の開発

ロードマップの実現を支える技術と製品 (人工衛星 / 宇宙ステーション)

国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう (JEM)」の開発
金星探査機「あかつき」の開発
小型ソーラー電力セイル「IKAROS」の開発
月周回衛星「かぐや」の開発
地球観測衛星（陸域観測技術衛星）「だいち」の開発
超高速インターネット衛星「きずな」の開発
総合宇宙利用システムの普及を促進する小型SAR衛星技術

ロードマップの実現を支える技術と製品 (衛星地上システム)

衛星運用を支える地上システム
衛星データの利用を促進する画像処理システム

ロードマップの実現を支える技術と製品 (衛星バス)

リモートセンシング事業を迅速に立ち上げる標準プラットフォーム「NEXTAR」
衛星機器を構成する標準コンポーネント

ロードマップの実現を支える技術と製品 (通信)

衛星通信を支える通信技術
世界で活躍する衛星搭載用中継機器

ロードマップの実現を支える技術と製品 (観測センサと応用技術)

観測衛星「いぶき」を支えた光学センサ技術と展望
全地球上の雨と雲を観測する電波センサ技術
リモートセンシングデータの向上を実現するSAR画像処理技術
衛星画像を活用した産業廃棄物監視システム

ロードマップの実現を支える技術と製品 (基盤技術)

宇宙技術を支える基盤技術や開発プロセス
月惑星探査を支える軌道計画と要素技術
宇宙用耐放射線性POL DC/DCコンバータの開発
宇宙開発向けプリント配線板の認定状況と今後の展開

ロードマップの実現を支える技術と製品 (誘導制御計算機)

ロケット用誘導制御計算機の変遷と展望

小惑星探査機「はやぶさ」

小惑星探査機「はやぶさ」の開発と成果

◇ NEC Information

NEWS

NEC C&C財団 25周年記念賞表彰式開催



Vol.64 No.1
(2011年3月)

特集TOP