

熱帯降雨観測衛星

Tropical Rainfall Measuring Mission

川西 登音夫
KAWANISHI Toneo

高山 清市
TAKAYAMA Seiichi

奥村 実
OKUMURA Minoru

中塚 大貴
NAKATSUKA Hirotaka

地球規模の気候変動の解明や、環境変化のモニタに重要な熱帯地域の降雨強度とその分布にかかわるデータを取得することを目的として、1997年11月28日、日米共同プロジェクトで熱帯降雨観測（TRMM：Tropical Rainfall Measuring Mission）衛星が打ち上げられた。

TRMMに搭載された降雨レーダ（PR：Precipitation Radar）は、世界で初めてのアクティブフェーズドアレーアンテナを採用した衛星搭載降雨レーダである。このPRは、98年1月末に軌道上初期機能確認試験を無事終了し、定常運用段階へと移行された。そして、降雨の水平分布や三次元構造など、今まで明らかにされていなかった地球規模の観測データを次々と地上に送ってきている。

The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Satellite was launched on November 28, 1997 as a joint project between the United States and Japan. The purpose of this project is to clarify changes in global weather and acquire data on the strength and distribution of rainfall. These data are important for monitoring changes in the Earth's environment.

On board the satellite is a precipitation radar (PR) system, which is the first active phased array radar system for rainfall measurement. This is the first time in the world that this type of radar system has been deployed by satellite. The initial on-orbit checkout was successfully completed at the end of January 1998. We then received data from the PR system including the horizontal distribution and three-dimensional structure of rainfall, which had previously never been clarified.

1 まえがき

全世界の降雨量の2/3を占めるといわれる熱帯降雨は、大気・海洋循環の駆動源として地球環境の維持・変動にきわめて重要な役割を担っている。しかし、この降雨観測はほとんど行われておらず、将来的にも地上と船舶からの観測だけでは全世界的な観測は不可能である。

TRMMは、熱帯・亜熱帯地方の降雨の状態を衛星から長期間にわたって観測するものであり、衛星本体を米航空宇宙局（NASA）が開発し、この心臓部になるPRおよび地上システムを宇宙開発事業団との契約に基づいて東芝が担当した。

TRMMは、97年11月28日、種子島宇宙センターからH-IIロケット6号機により、技術試験衛星7型（ETS-VII）とともに打ち上げられ、現在、順調に飛行を続け観測データを送り続けている。

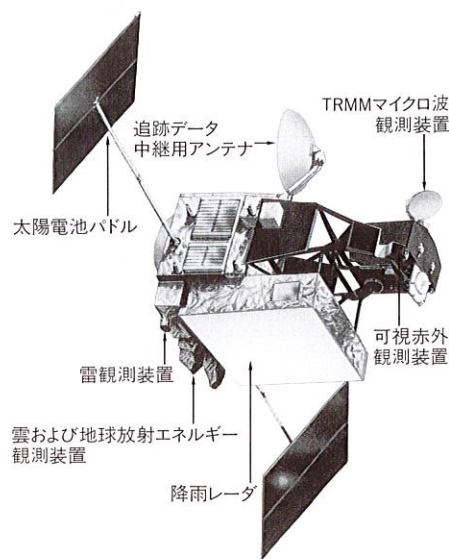


図1. TRMM衛星 日本と米国の共同プロジェクトとしてNASAが開発を担当したTRMM衛星。東芝は世界初の衛星搭載降雨レーダとなるPRの開発を担当した。（写真提供：宇宙開発事業団）

TRMM spacecraft

2 TRMM衛星

TRMM衛星は、図1に示すような外観・構成をしており、衛星構体には2翼の太陽電池パネル、データ中継衛星（TDRS）との通信を行う高利得アンテナ（HGA）、また、降雨レーダのほかに、TRMMマイクロ波観測装置（TMI）、可視赤外観測装置（VIRS）、雲および地球放射エネルギー観測

装置（CERES）、雷観測装置（LIS）の五つの観測装置が搭載されている。

H-IIロケットにより打ち上げられたTRMM衛星は、軌道制御の後、高度350km、軌道傾斜角が35度の円軌道を約

90分で周回し、ミッション寿命である3年間降雨などの観測を行う。

3 降雨レーダ

TRMMに搭載された降雨レーダは、世界で初めて衛星に搭載された降雨観測用レーダで、目的は、降雨の三次元構造、特に垂直分布を観測することと、海洋および陸域の定量的観測を行うこと、降雨構造に関するデータをTMIによる降雨観測精度の向上に役だてることにある。

3.1 降雨レーダの構成

図2に降雨レーダの構成を示す。PRは、アンテナ系、送受信系、信号処理系、構造系、熱制御系、計装系の六つのサブシステムからなる。

アンテナ系は、128素子の導波管スロットアレーアンテナで構成する平面アレーアンテナで、開口径2.1×2.1mである。

送受信系は、128個の固体電力増幅器(SSPA)と低雑音増幅器(LNA)、5ビットの移相器を含んだ16台の分合波器2、16分配器と送受分離用サーキュレータを含む分合波器1、送受信系への入出力信号レベルを調整するための送信・受信系駆動増幅器(TDA/RDA)およびこれらに電力を供給する電源からなる。

信号処理系は、周波数変換・IF(中間周波数)部とシス

テム制御・データ処理部で構成される。周波数変換・IF部は、送信パルスの発生、受信信号の周波数変換、増幅、対数検波などの機能を持ち、システム制御・データ処理部には、ビーム走査などにかかわる送受信系の制御、観測データのサンプリングとバケット化、ハウスキーピングテレメトリ/コマンド処理などの機能がある。

なお、送受信系の電源、TDA/RDA、信号処理系の周波数変換・IF部、システム制御・データ処理部は、冗長構成を採用している。

構造系は、電子機器を搭載するための箱形プラットフォームを形成し、平面アンテナを取り付けた構造である。

熱制御系は、温度環境を最適なものにするため、温度制御を行っている。アンテナ面は白色塗装を施してあり、アンテナ面以外は多層熱遮断材(MLI)を取り付けている。

3.2 降雨レーダの動作

図3に降雨レーダの観測概念を示す。降雨レーダは、送受信系とアンテナ系からなるアクティブフェーズドアレーアンテナにより、ビームを走査しながら衛星の軌道運動を利用して、観測幅220kmの領域を連続的に観測する。各ビームの地上でのフットプリントは約4.3kmである。また、地表面から高度15kmまでの垂直方向を分解能250mで観測するため、三次元的に降雨エコーを収集可能となる。

3.3 降雨レーダのデータ処理

降雨レーダにより取得したデータは、サイエンステレメ

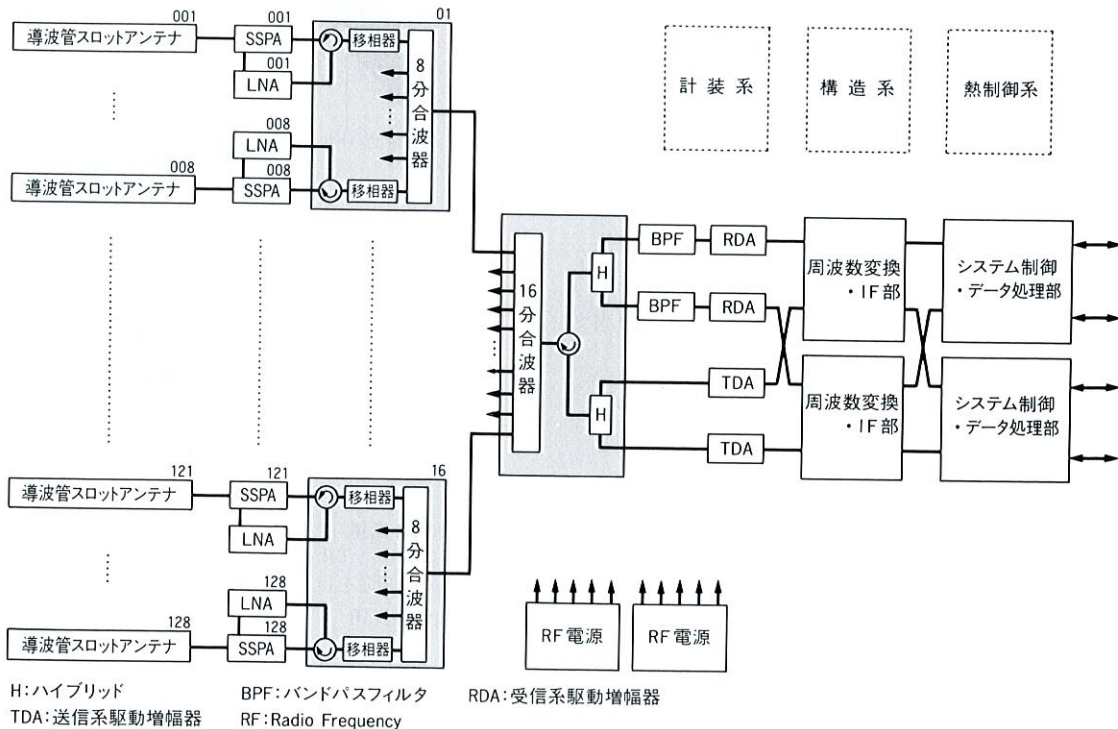


図2. 降雨レーダの構成 128系統のアンテナ、送受信コンポーネントで構成されるアクティブフェーズドアレーアンテナを採用しており、電子的にビーム走査を行う。

Configuration of precipitation radar

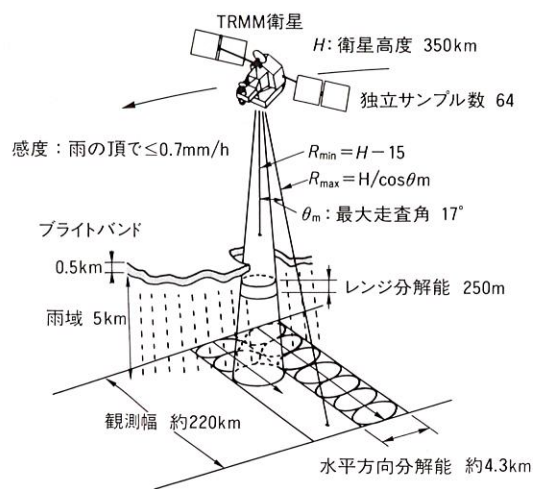


図3. 降雨レーダの観測概念 三次元的に降雨エコーを収集しながら、観測幅 220 km の領域を連続的に観測することができる。

Observation concept of precipitation radar

トリとしてデータ中継衛星 (TDRS) を介して、NASA の地上局 (ホワイトサンズ局) に送信される。NASA では、データを時刻順に並べるなどの処理 (レベル 0 処理) を行い、国際回線を通じて宇宙開発事業団地球観測センター (EOC) へ送られ、TRMM 降雨レーダデータ処理システムで画像化などのデータ処理が行われる。

4 開発経緯

降雨レーダは、96年6月に米国メリーランド州にあるNASAゴダードスペースフライトセンター (GSFC) でNASA側に引き渡され、TRMM衛星本体へとインテグレートされた。その後、以下の三つの試験を経て、定常運用へと移行している。

4.1 NASAにおけるインテグレーション試験

TRMM衛星へのインテグレーション後、総合電気性能試験 (CPT)、電磁適合性試験 (EMI/EMC)、熱平衡/熱真空試験 (TBT/TVT)、機械環境試験などを約1年半にわたり行った。図4は、機械環境試験中のTRMM衛星のようすを写したものである。

4.2 種子島における射場試験

TRMM衛星は、97年8月、米国から種子島宇宙センターまで運ばれ、打上げ前の最終確認試験を問題なく終了し、日米共同開発の衛星としては初めて日本のロケットに組み込まれることになった。

4.3 軌道上初期機能確認試験

H-IIロケットにより、無事に所定の軌道に投入されたTRMM衛星は、ハイゲインアンテナ展開、太陽電池パドル展開などのクリティカルフェーズを乗り越え、軌道上初期

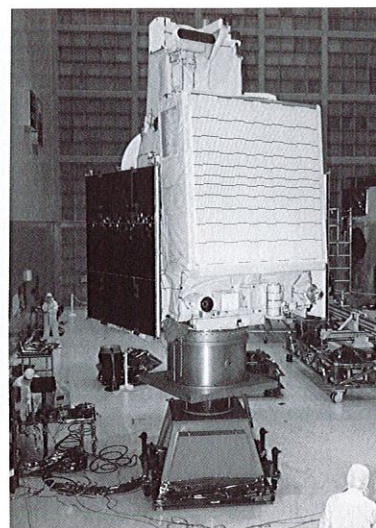


図4. 機械環境試験中のTRMM衛星 米国NASAゴダードスペースフライトセンターで、振動試験、音響試験を終了し、質量特性試験に移したTRMM衛星を示す。(写真提供: NASA)

TRMM spacecraft during mechanical environmental test (photo courtesy of NASA)

機能確認試験を開始した。降雨レーダとしては、テレメトリ/コマンド確認試験などの基本的な確認試験の後、郵政省通信総合研究所の関西支所 (神戸市) に設置した外部校正器 (ARC) を用いたアンテナパターン測定、キャリブレーションなどの試験を行い、機能・性能上の問題がないことを確認した。

5 観測性能

軌道上初期機能確認中の97年12月8日、TRMMがサイクロン (パム) の中心付近を観測した。TRMMの初画像である。

図5は高度2 kmでの降雨強度の水平分布を表している。渦を巻いているように見えるのがサイクロン (パム) である。サイクロンの中心は、南緯20度、西経161度付近の太平洋上である。南半球であるため渦巻きは時計回りとなっていることがわかる。北西から南東への2本の白い線は降雨レーダの観測幅 (220 km) を示している。図中のカラー表示は降雨データから求められた降雨強度で、暖色系ほど強い雨が降っていることを示している。

図6は線ABで切った降雨強度の垂直分布で、サイクロン内部の降雨の三次元構造をとらえたものである。カラーで示された断面はサイクロンの中心付近を含む降雨強度の垂直分布を、また、断面の後ろの白および灰色の立体は、レーダで測定された降雨エコーの高さ (降雨がある領域のもっとも高い所) を示している。垂直断面の左側に水色で示された降雨域の中に降雨のない白色域がある部分は、サイクロンの“目”の一部と思われ、その周りの強くかつ背の高い

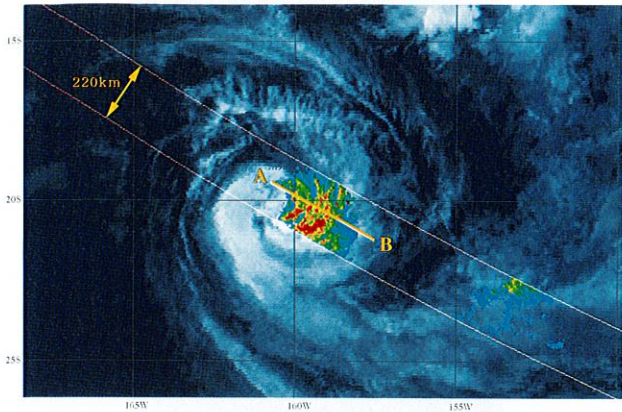


図5. サイクロン(パム)中の降雨の水平分布 高度2 kmでの降雨強度を示しており、サイクロンの“目”の東側だけに渦を巻くように強い雨(赤色)が降っているようすがわかる。(写真提供:宇宙開発事業団)

Horizontal distribution of rainfall in cyclone Pam

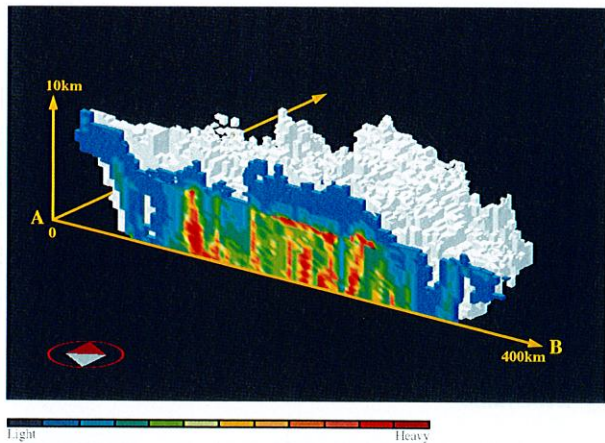


図6. サイクロン(パム)中の降雨の垂直分布 線ABで切った垂直断面からは強い雨の層が幾重にも重なっているようすが、また、後ろの白および灰色の立体からは降雨の三次元構造がわかる。(写真提供:宇宙開発事業団)

Vertical distribution of rainfall in cyclone Pam

降雨と、その外側に100 km以上広がった雨域構造が明りように観測されている。

軌道上での所定の試験項目を終了した後、降雨レーダは表1に示す性能をもつことが確認された。アンテナ系、送信系、受信系、信号処理系としての仕様はすべて満たしており、最小観測降雨強度は0.5 mm/hを達成していることが確認された。

6 あとがき

TRMM 搭載降雨レーダは、宇宙からの降雨観測を行う世界初のレーダシステムである。現在までの観測により、こ

表1. TRMM 降雨レーダの主要性能

Major performance specifications of TRMM precipitation radar

項目	仕様	軌道上確認結果
周波数 (GHz)	13.796, 13.802	同 左
送信電力分布	テイラー分布 (SL = -35 dB, n=6)	同 左
受信電力分布	テイラー分布 (SL = -35 dB, n=6)	同 左
送信電力 (dBm)	57.0 (500 W) 以上	58.5 (708 W)
ダイナミックレンジ (dB)	70 以上	80
アンテナ利得 (dB)	47.4 以上	47.4
アロングトラックアンテナパターン ビーム幅 (°)	0.71~0.74	0.74
サイドロープレベル (dB)	-27 以下	-28
クロストラックアンテナパターン サイドロープレベル (dB)	-27 以下	-28
最小観測降雨強度 (mm/h)	0.7 以下	0.5

SL: サイドロープ

れまでに得ることが不可能であった地球規模のデータが集積され、その有用性が確認されつつある。

今後、熱帯、亜熱帯地域の降雨データを観測して提供し続けることで、地球規模の環境監視に貢献するとともに、衛星搭載降雨レーダを用いた雨量レーダシステムの技術の確立を図る所存である。

謝辞

このTRMM 降雨レーダの開発にあたり、多大なご指導、ご協力をいただいた宇宙開発事業団、郵政省通信総合研究所、およびNASAのTRMM関係者各位に感謝の意を表する。



川西 登音夫 KAWANISHI Toneo

宇宙開発事業団 地球観測システム本部地球観測システム技術部主任開発部長。宇宙搭載機器・電波センサなどの開発に従事。電子情報通信学会会員。

National Space Development Agency of Japan



高山 清市 TAKAYAMA Seiichi

小向工場 宇宙情報システム技術部参事。宇宙搭載機器・電波センサなどの開発に従事。電子情報通信学会会員。

Komukai Works



奥村 実 OKUMURA Minoru

小向工場 宇宙情報システム技術部主務。宇宙搭載機器・電波センサなどの開発に従事。電子情報通信学会、日本リモートセンシング学会会員。

Komukai Works



中塚 大貴 NAKATSUKA Hirotaka

小向工場 宇宙情報システム技術部主務。宇宙搭載機器・電波センサなどの開発に従事。電子情報通信学会会員。

Komukai Works