

## TRMM 降雨レーダデータ処理解析アルゴリズムの概要

岡本 謙一<sup>\*1</sup> 井口 俊夫<sup>\*2</sup> 阿波加 純<sup>\*3</sup> 熊谷 博<sup>\*4</sup>  
 ロバート・メネギーニ<sup>\*5</sup> 佐竹 誠<sup>\*6</sup> 古津 年章<sup>\*2</sup>  
 (1996年5月29日受理)

### OUTLINE OF THE TRMM PRECIPITATION RADAR DATA PROCESSING AND ANALYSIS ALGORITHMS

By

Ken'ichi OKAMOTO, Toshio IGUCHI, Jun AWAKA, Hiroshi KUMAGAI,  
 Robert MENEGHINI, Makoto SATAKE, and Toshiaki KOZU

The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) is a satellite mission for measuring tropical and subtropical rain using the first spaceborne precipitation radar (PR). TRMM will be launched in the summer of 1997. The standard data processing and analysis algorithms of TRMM PR are also being developed by an international TRMM PR team selected by the Joint Research Announcement of TRMM to process and analyze TRMM PR data as soon as possible after the initial test of the TRMM PR instrument. This paper outlines the TRMM PR data processing and analysis algorithms, and the development scheme and schedule of the standard TRMM PR algorithms designed by the TRMM PR team will be introduced. First, the total algorithm system with the flow diagram will be discussed, and then an outline of each standard algorithm will be presented. The validation methods of the algorithms are also introduced. A fundamental method is directly comparing the PR data with the ground-based radar data gathered by the TRMM ground truth and validation team. Also the airborne radars at the Jet Propulsion Laboratory in the USA and at CRL operate at the same frequency band as the TRMM PR and employment of these radars will be a useful validation method.

[キーワード] 熱帯降雨観測衛星, 降雨レーダ, データ処理, アルゴリズム, 検証.

TRMM, Precipitation radar, Data processing, Algorithm, Validation.

#### 1. はじめに

TRMM (熱帯降雨観測衛星) は, 地球的規模の気候変動に大きな影響を及ぼす熱帯および亜熱帯の降雨分布を観測する目的の日米共同の衛星計画であり, 1997年夏

季に我が国の H-II ロケットで打ち上げる予定である。TRMM は世界で初めての人工衛星搭載用の降雨レーダを搭載する。また, TRMM 搭載降雨レーダのデータ解析処理アルゴリズムについても現在開発の最終段階にある。本解説では, TRMM 搭載降雨レーダのデータ解析処理アルゴリズムの全体像を概観的に紹介し, TRMM 降雨レーダデータの利用を考えているユーザの便宜に供することを目的とする。

地上の降雨レーダは, 広く実用されており, 降雨減衰の影響の少ない低い周波数帯が用いられている。富士山レーダは 2.9GHz 帯を, また気象庁現業の降雨レー

\*1 地球環境計測部  
 \*2 地球環境計測部 電波計測研究室  
 \*3 北海道東海大学 工学部  
 \*4 関東支所 地球観測技術研究室  
 \*5 NASA/Goddard Space Flight Center  
 \*6 宇宙開発事業団 地球観測センター

ダは5.3GHz帯を用いている。衛星搭載用の降雨レーダは、衛星搭載条件の制約から、アンテナ開口径を初め、ハードウェアの寸法・重量を小さくする必要があるため、地上で用いられている降雨レーダの周波数よりも高く、降雨減衰の影響を被る周波数帯を選ばざるを得ない。TRMM搭載降雨レーダでは現実には、13.8GHz帯の周波数が用いられており、降雨減衰補正を如何に行うかが降雨強度抽出アルゴリズムの中心的な課題となる。降雨レーダの最大の特徴は、直接降雨強度の三次元分布を求めることができることである。特に、地球的規模の熱収支に重要な役割を果たす潜熱の分布と密接な関係にある降雨強度の鉛直分布は、降雨レーダ以外の方法では直接的に求めることができない。

また、降雨レーダの水平分解能は約4kmであり、同じく降雨強度の水平分布を観測することができるマイクロ波放射計の分解能に比べて格段に優れている。衛星搭載用の降雨レーダは、グラウンドクラッタの影響を受けるために、マイクロ波放射計に比べて広い範囲を走査することができないが、陸上、海上の区別なく降雨の観測を実施することができるという長所を有する。

降雨レーダアルゴリズムはIFOV (Instantaneous Field Of View 瞬時視野) 単位の降雨強度を初めとして、降雨の高さ、ブライトバンドの有無の判定、降雨のタイプの分類等、降雨についての種々の物理量を算出することを基本とするが、同時に地表面の散乱係数の算出をも行う。また、最近研究が急激に進んだ統計的手法を用いて、ある広い領域 (例えば緯経度 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ の領域) の月平均降雨強度を推定することもできる。

本解説ではTRMM降雨レーダデータ解析処理アルゴリズムの開発体制、開発計画等について第2章で紹介する。第3章では、降雨レーダ解析処理アルゴリズムの全体構成ならびに個々のアルゴリズムの紹介を行う。第4章ではアルゴリズムの出力結果を検証する方法について紹介する。

## 2. 降雨レーダアルゴリズム開発<sup>(1)-(3)</sup>

降雨レーダアルゴリズムの開発については、レーダハードウェアに密接に関係している宇宙開発事業団が開発を担当している部分を除いて、日米共同のレーダチームにおいて打ち上げ直後の利用に間に合うことを目指した標準アルゴリズムの開発を進めている。標準アルゴリズムは日米双方の処理システムにインストールされて運用される。日本側の処理システムは、宇宙開発事業団地球観測センター (NASDA/EOC: National Space Development Agency of Japan/Earth Observation Center)、米国側の処理システムはアメリカ航空

宇宙局ゴダード宇宙飛行センター (NASA/GSFC) のTSDIS (TRMM Science Data and Information System) に整備される。

### 2.1 降雨レーダチーム

第1次の降雨レーダチームは、米国NASAが1990年に発出したTRMMのための研究公募 (Research Announcement of TRMM (NRA-90-OSSA-15)) に基づいて結成された。同研究公募に対して、通信総合研究所より当時の電波応用部電波計測研究室の岡本謙一と古津年章が応募し、それぞれ降雨レーダチームのチームリーダーとチームメンバーに選ばれた。他の降雨レーダチームのメンバーは、NASA/GSFCのR. MeneghiniとD. Atlasおよびジェット推進研究所 (JPL: Jet Propulsion Laboratory) のE. Imであった。降雨レーダチームの役割は、TRMM打ち上げ (1997年夏季を予定) に間に合うように降雨レーダデータを処理するアルゴリズムを開発すること、ならびに同アルゴリズムの検証法について検討することであった。第1次レーダチームは、3年間 (1991-1993) の活動により標準アルゴリズムの構成を纏めた。

1993年に発出された日米共同の研究公募 (Joint Research Announcement, NRA-94-MTPE-01, JRA-93-002) に於いて第2次の降雨レーダチームが日米双方に形成された。このチームは、1994年8月より1997年7月までの間が責任期間であるが、TRMM打ち上げ後の初期チェック段階におけるアルゴリズムの機能・性能の確認を行うために、次のチームへの移行期間は次のチームを助けて活動することになる。第2次の降雨レーダチームの構成メンバーを第1表に示す。通信総合研究所の地球環境計測部の岡本謙一が、日米双方のレーダチームのリーダー (TL) を担当している。日本側のレーダチームは、通信総合研究所の古津年章がサブリーダー (Sub-TL) を、米国側のレーダチームはNASA/GSFCのR. Meneghiniがサブリーダーを担当している。また、相互の活動の整合性をとるために、日米共同のJoint Radar Teamが作られ、標準アルゴリズムについては日米共同で共通のものを作成している。第2次降雨レーダチームは、基本的には第1次降雨レーダチームによって決定された路線を引き継いで活動を続けている。降雨レーダチームは、降雨レーダデータから降雨に関する各種物理量を抽出するアルゴリズムの開発 (方式の提案、アルゴリズムのコード化、試験、文書化、検証) についての全ての責任を有している。

### 2.2 アルゴリズムの開発計画

アルゴリズムというと数式のイメージを連想するが、ここではもっと広義に用いられており、ほぼ計算機プロ

第1表 降雨レーダチームメンバー

氏名	所属
(1)日本側チームメンバー	
岡本 謙一(TL)	通信総合研究所
古津 年章(Sub-TL)	通信総合研究所
井口 俊夫	通信総合研究所
熊谷 博	通信総合研究所
阿波加 純	北海道東海大学
P. Amayenc	CETP(France)
(2)米国側チームメンバー	
K. Okamoto(TL)	CRL(Japan)
R. Meneghini	NASA/GSFC(USA)
E. Im	JPL(USA)
F. Li	JPL(USA)
P. Amayenc	CETP(France)

TL:Team Leader

CETP:Centre d'etude des Environnements Terrestre et  
Planetaires

(地球・惑星環境研究センター:フランス)

JPL:Jet Propulsion Laboratory

(ジェット推進研究所)

グラム,あるいはソフトウェアと同義語の様に用いられている。アルゴリズムの開発フェーズにより,Version 1, Version 2, Version 3, Version 4 に別れている。以下に定義を書く。Version 1は,未だ計算機言語によるコード化はされておらず,これから開発するアルゴリズムを文書の形で表現したものをいう。Version 1の文書は,(1)アルゴリズムの目的(どんな機能を有するのか),(2)用いる計算手法,(3)入力データ,(4)出力プロダクト,(5)他のアルゴリズムとのインターフェース,(6)所要メモリサイズの概算値,(7)演算時間の概算値,(8)問題点等について記述している。

Version 2はC言語あるいはFORTRAN言語によってコード化されたソースプログラムであり,NASA/GSFCのTSDISから提供されるI/O toolkit(データ入出力用のサブルーチン)を装備していない。機能的には,完成品に比べて75%の機能性が要求されている。TSDIS(あるいはNASDA/EOC)に納入するときには,アルゴリズム試験用のテストデータとテスト方法についても示すものとされている。Meta Data(算出する物理的意味を有する出力データに付随した補助データ:通常ヘッダに記述される)についての予備的な記述ならびにBrowse Dataについての予備的な記述も同時に求められている。Browse Dataとは,ユーザが短時間のうちにデータを検索するために作られる分解能を落としたデータのことである。

Version 3はC言語あるいはFORTRAN言語によってコード化されたソースプログラムであり,NASA/GSFCのTSDISから提供されるI/O toolkitを装備している。機能的には,完成品に比べて90%の機能性が要求されている。TSDIS(あるいはNASDA/EOC)に納入するときには,アルゴリズム試験用のテストデータとテスト方法についても示すものとする。Meta Dataについての記述ならびにBrowse Dataについての記述も同時に求められている。

米国のデータ処理施設のあるTSDISへの納入スケジュールは1997年8月の打ち上げを想定した場合,Version 1は1994年12月,Version 2は1995年3月,Version 3は1996年6月,Version 4は1996年12月と決められている。NASDA/EOCへの納入スケジュールについては明確に規定されていないがTSDIS納入後1~2カ月を予定している。

### 2.3 アルゴリズムの更新と再処理

TRMM打ち上げ後,約2カ月の初期チェックが終了したのち,降雨レーダアルゴリズムはデータ処理を開始するが,打ち上げ後6ヶ月間はアルゴリズムのチェック期間になっている。この期間の間にアルゴリズムに何らかの不具合が発見されれば改修され,日米合同のTRMMサイエンスチームがアルゴリズムの機能・性能に問題が無いことを確認した後に一般ユーザにデータが提供される。TRMMサイエンスチームは,研究公募によって選ばれた研究者から構成され,各センサチーム,グラウンドツルースチーム等に分かれる。降雨レーダアルゴリズムの初期機能・性能の確認作業はレーダチームが中心になって実施する予定である。一般ユーザへの処理済みデータの提供は打ち上げ後6ヶ月経過した時点からNASA/GSFCにあるEOSDIS(Earth Observation System Data and Information System)から行われる。

降雨レーダアルゴリズムは,TRMM降雨レーダが初めての衛星搭載システムであり前例が無いとため,時間とともに改良される可能性があることが打ち上げ前から予想されている。これは降雨レーダのみの問題ではなく,すべての降雨観測センサに共通の課題であるが,降雨レーダでは,とくにその可能性が高いと考えられる。このため,アルゴリズムの更新と再処理(更新されたアルゴリズムを用いて,打ち上げ後の全データを再度初めから処理しなおし配布すること)が打ち上げ前から考えられており,日米のデータ処理システムもそれに対応できるように設計されている。TRMMサイエンスチームメンバーは,自分が新しくアルゴリズムを開発し,そのアルゴリズムの処理結果が標準アルゴリズムより優れていると判

断した場合は、サイエンスコントロールボードにその旨を提案することができる。サイエンスコントロールボードはTRMMのサイエンスに関する最高の決定機関である日米のJTST (Joint TRMM Science Team) の諮問によって任命され、新規に提案されたアルゴリズムと既存の標準アルゴリズムの処理結果の比較を行う。その結果が妥当なものであれば、新しいアルゴリズムは日米の再処理用の処理施設に移され、既存の他のアルゴリズムとのインターフェース等で問題が無いことを確認後、ルーチン的な処理のラインに移される。このアルゴリズムの更新と再処理は、1年間に一度の頻度で実施される可能性がある。

### 3. 降雨レーダアルゴリズムの概要<sup>(1)-(3)</sup>

#### 3.1 全体構成と出力データ

降雨レーダ標準アルゴリズムは処理のレベルに応じて1B, 1C, 2A, 3Aと分類される。これらの各レベルの出力をまとめて第2表に示す。第2表では各レベルの出力が定性的データと定量的データに分類されて示される。レベル1B, 1C, 2Aは、各瞬時視野(IFOV)方向のデータを取り扱う。IFOVはアンテナビームが指向する方向であり、ビーム幅(0.7°)によって決められ、アングルビン方向ともいう。アングルビン方向の中はパルス幅によって決まる(250 m)レンジビンによって区分される。

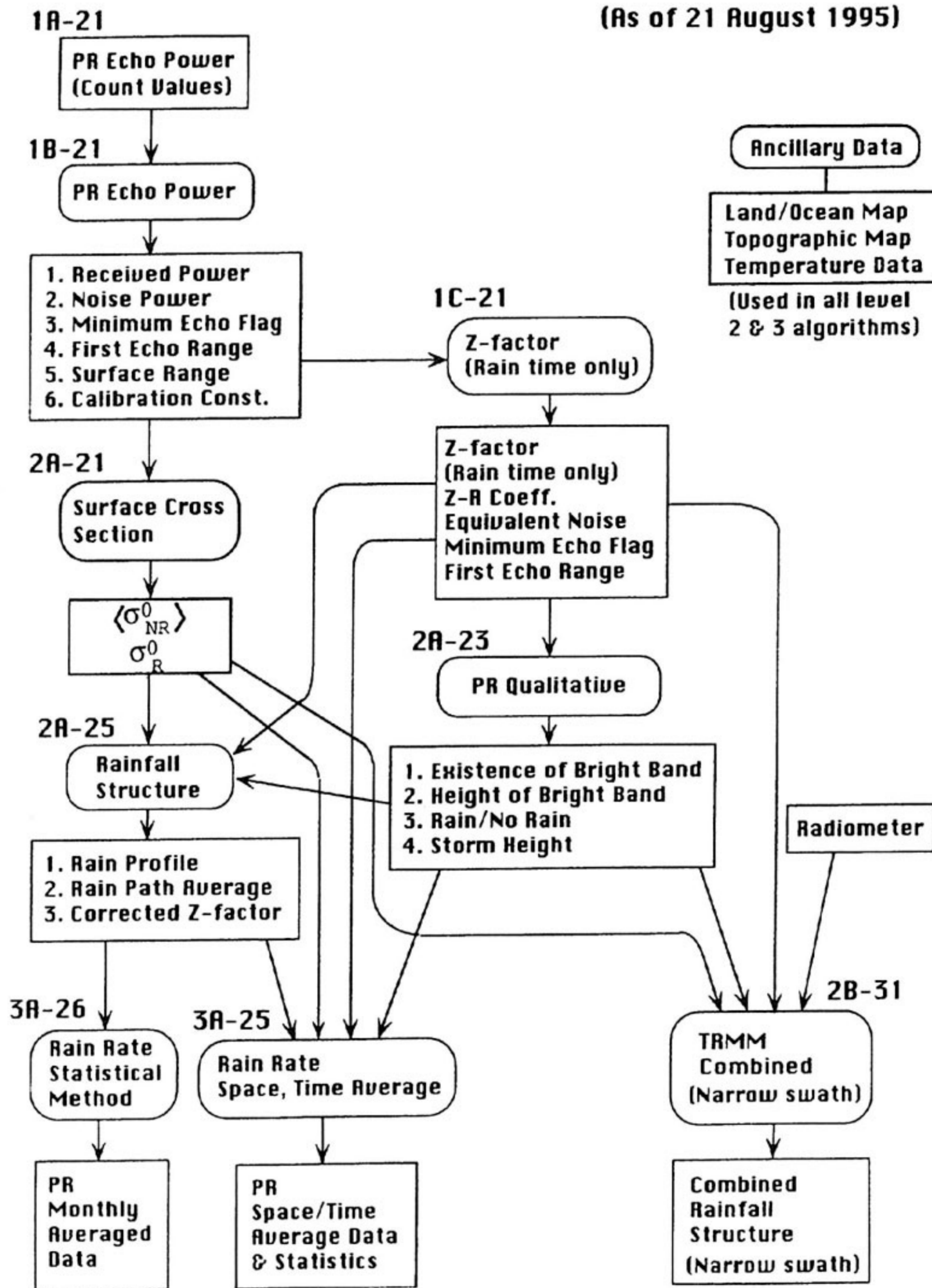
レベル1Bのプロダクトは、全受信電力(降雨散乱受信電力+ノイズレベル)ならびにノイズレベルである。ノイズレベルは降雨エコーの存在しないと考えられるレンジビンの受信電力値を平均して求められる。レベル1Bでは同時に、降雨の有無の判定と降雨の高さの推定を行う。これらの判定と推定結果はレベル2Aの出力に反映される。レベル1Cでは、レーダ反射因子のプロファイルがレーダ方程式より求められる。このレーダ反射因子は距離補正は施されるが、降雨減衰の補正が施されていない。レベル2Aではブライトバンドの有無の判定を行う。ブライトバンドがあるときはその高さを求める。また、降雨タイプの分類を行う。また、レーダ受信電力より地表面の散乱係数(単位面積あたりの散乱断面積)の時空間平均値を計算する。散乱係数は、陸上/海上、雨域/無降雨域および入射角に従って分類される。また降雨時のデータからは、散乱係数の降雨減衰量が計算される。レベル2Aの出力データの中で最も重要なものは瞬時視野内の降雨強度のプロファイルならびにパス平均降雨強度である。レベル3Aの出力データの代表は、緯経度5°×5°の領域の月平均降雨強度である。また、レベル1C, 2A出力の様々な物理量の平均値が求められる。第1図に降雨レーダアルゴリズムの全体フローチャートを示す。アルゴリズムは四隅が丸い長方形で、またプロダクトは四角形で示されている。

第2表 降雨レーダアルゴリズムの出力データ

出力レベル	定性的データ	定量的データ
1 B	・ 降雨の有無の判定	・ 全受信電力、雑音レベル、 ・ 降雨高度の推定
1 C		・ Z m (測定されたレーダ反射因子: 降雨減衰の補正は行っていない) のプロファイル
2 A	・ 降雨の有無の判定結果の出力 ・ ブライトバンドの有無の判定 ・ 降雨タイプの分類	・ ブライトバンドの高さ ・ 降雨高度の推定結果の出力 ・ 無降雨時の地表面散乱係数のデータベース(地上/海上の分類、入射角による分類) ・ 降雨時の地表面散乱係数の降雨減衰値 ・ 降雨強度プロファイル ・ パス平均降雨強度
3 A		・ 経緯度5°×5°の領域の月平均降雨強度 ・ 1C, 2Aの降雨出力データの統計値(平均、分散)

# TRMM PR Algorithm Flow

(As of 21 August 1995)



第1図 降雨レーダアルゴリズムの全体フローチャート

第3表 標準アルゴリズムの一覧

プロダクト番号	アルゴリズム名	担当者	出力プロダクト
1B-21	PR Calibration	宇宙開発事業団	・全受信電力、・雑音レベル
	Minimum Echo Flag	熊谷 博	・降雨の有無の判定 Flag ・降雨の高さ
1C-21	PR Reflectivities	宇宙開発事業団	・Zm(降雨時の散乱因子)のプロファイル
2A-21	散乱係数	R. Meneghini	・無降雨時の地表面散乱係数のデータベース(地上/海上の分類、入射角による分類) ・降雨時の地表面散乱係数の降雨減衰値
2A-23	PR Qualitative	阿波加 純	・ブライトバンドの有無 ・ブライトバンドの高さ ・降雨タイプの分類
2A-25	PR Profile	井口 俊夫	・降雨強度プロファイル ・パス平均降雨強度
3A-25	降雨パラメータの統計値	R. Meneghini	・1C-21, 2A-21, 2A-23, 2A-25 の出力データの時空間平均値 ・経緯度5° x 5° の領域の月平均降雨強度
3A-26	Statistical Method	R. Meneghini	・降雨強度の時空間平均値 ・経緯度5° x 5° の領域の月平均降雨強度

### 3.2 標準アルゴリズムの概要

第3表に標準アルゴリズムのプロダクト番号, アルゴリズム名, 担当者名, 出力プロダクトを纏めて示す. それぞれのアルゴリズムの概要を以下に示す.

#### (1) 1B-21 (PR Calibration)

本アルゴリズムは, 対数検波器の出力であるデジタルカウント値を工学値である降雨レーダ全受信電力値ならびにノイズレベル値にそれぞれ変換することを主要な目的とする. また, 受信電力値からレーダ反射因子(Z因子)に変換する校正係数やアンテナビームの指向方向の地表面上の緯度・経度の地理学的情報をも付加する. また, アングルビン方向を単位としてその方向の降雨の有無についての判定(便宜上, Minimum Echo Flagと呼ぶ)を行い, 降雨の有無のフラグを立てる. このとき, グラウンドクラッタが降雨判定に影響を与えないよ

うに, 各アングルビン毎にクラッタが出現するレンジピンを予測し, このレンジピンでは降雨判定を行わないようにしている. また, 降雨の高さの判定も行う(便宜上, First Echo Rangeと呼ぶ).

#### (2) 1C-21 (PR Reflectivities)

このアルゴリズムは, 1B-21で求められた全受信電力値とノイズレベル値を用いてレーダ反射因子を求めることを目的とする. 最初に全受信電力値よりノイズレベル値を差し引く. 次にレーダ方程式を用いて降雨散乱受信電力からレーダ反射因子(Z因子)を求める. 出力データ量を減少させるためにレーダ反射因子への変換は1B-21で降雨があると判定されたデータに対してのみ実行する.

#### (3) 2A-21 (散乱係数)

このアルゴリズムでは, 1B-21の出力データを入力

し、レーダ受信電力より地表面の散乱係数の時空間平均値を計算する。ここでは地表面を  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  の領域に分けて、瞬時視野が各領域内に入り込む散乱係数のデータを各領域毎に集め、その値を時間的に平均する。散乱係数のデータ量は時間とともに増加するため、時間と共に安定した平均値が求められる。地表面の散乱係数は、陸上/海上、雨域/無降雨域および入射角に従って分類される。また、降雨時には、散乱係数の降雨減衰量が計算される。この降雨減衰量は、Surface Reference Data として、2 A -25 において表面参照法を用いて降雨プロファイルを算出するのに用いられる。

#### (4) 2 A -23 (PR Qualitative)

このアルゴリズムは、降雨についての定性的な量の算出を行う。1 C -21 を入力データとして用い、1 B -21 で判定する降雨/無降雨の判定結果を出力する。また同様に 1 B -21 で推定する降雨の高さを出力する。また、降雨時には、ブライツバンドの有無の判定を行う。ブライツバンドがあるときはその高さを求める。また、降雨タイプの分類を行う。ブライツバンドのある雨は層状性降雨と判定する。層状性降雨以外の雨は対流性降雨とその他の降雨に分類される。対流性降雨のうち降雨の高さが  $0^\circ\text{C}$  高度よりも低いときは、Warm Rain と判定される。

#### (5) 2 A -25 (PR Profile)

このアルゴリズムは、降雨レーダで観測する最も基本的な降雨に関する物理量である降雨強度 (mm/h) プロファイルを算出する。まず降雨の分解能セル単位 ( $4\text{ km} \times 4\text{ km} \times 250\text{ m}$ ) ごとの降雨強度を算出する。次にあらかじめ定めた2つの高度 (2 km, 4 kmを想定) 間の平均降雨強度 (パス平均降雨強度) を算出する。降雨強度を算出する最適手法は背景が海上のとき、陸上のとき、強い雨、弱い雨のときに応じて異なる。このアルゴリズムには、種々のケースに対応できるように様々な降雨強度算出手法が組み込まれているが、降雨強度算出に用いた手法、降雨強度の算出精度についても出力する。入力データとしては、1 C -21, 2 A -21 及び 2 A -23 を用いる。

#### (6) 3 A -25 (降雨パラメータの統計値)

このアルゴリズムは、1 C -21, 2 A -21, 2 A -23, 2 A -25 で算出される幾つかの重要な降雨パラメータの時空間平均値を算出する。最も重要な出力は高度 2 km および 4 km における経緯度  $5^\circ \times 5^\circ$  の領域の月平均降雨強度 (mm/h) である。他のプロダクトは、1 C -21, 2 A -21, 2 A -23 及び 2 A -25 で得られる降雨パラメータのヒストグラム、降雨パラメータ間の相関係数の計算結果である。

#### (7) 3 A -26 (Statistical Method)

このアルゴリズムでは、Multiple Threshold Method と呼ばれる統計的手法を用いて経緯度  $5^\circ \times 5^\circ$  の領域の月単位の降雨蓄積量 (mm) 及び月平均降雨強度 (mm/h) を直接算出する。統計的手法で求められた月平均降雨強度と決定論的手法 (瞬時視野単位で求められた降雨強度) で求められた月平均降雨強度の比較によって相互の長所・短所を知ることができる。

### 3.3 Browse Data

Browse Data を作るアルゴリズムは Science Team から提供される標準アルゴリズムに基づいて NASA/TSDIS, NASDA/EOC によって作成される。基本的に Level 1, 2 の全アルゴリズムは各々 1 個の Browse Data を持つことになっている。Browse Data は原則として一日分のデータを軌道の上昇パスと下降パスに区別して各々 1 枚の画面としてディスプレイ上に表示することになっている。Level 3 については、緯経度  $5^\circ \times 5^\circ$  の領域の月平均降雨強度が標準プロダクトとして作成されるため Browse Data と標準アルゴリズム出力データの差は基本的にはない。

降雨レーダの Browse Data は 1 C -21, 2 A -21, 2 A -23, 2 A -25 に対して作られる。1 C -21 の場合、レーダ反射因子が水平分解能  $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 、垂直分解能 500 m の低分解能で表示される。表示においては TRMM 衛星の地上軌跡を中心に 3 本の走査幅のカラー映像データとして表示される。2 本は、2 km および 4 km の高さの CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) 映像 (水平断面図) である。3 本目はアンテナ走査の中央方向 (衛星姿勢の変動がなければ、鉛直下方向) の RHI 映像 (鉛直断面図) である。2 A -21 の場合、 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$  の分解能の地表面の散乱係数 (dB 表示) がカラー映像として表示される。

2 A -23 は水平分解能  $10\text{ km} \times 10\text{ km}$  の 3 本の走査幅のデータとして表示される。3 本の走査幅は、降雨/無降雨の分類、対流性/層状性の分類、ブライツバンドの高さをそれぞれカラー映像として表示する。2 A -25 は、レーダ反射因子の代わりに降雨強度が 1 C -21 と同様の TRMM 衛星の地上軌跡を中心にした 3 本の走査幅のカラー映像データとして表示される。

### 3.4 降雨レーダプロダクト検証のための中間プロダクト作成

降雨レーダチームは TRMM 降雨レーダデータから導出される様々な物理量 (Z 因子, 降雨強度, 降雨の種類等) の妥当性について検証する義務を負っている。検証のための地上レーダデータは Ground Truth and Validation (GV) Team から提供されるが、TRMM

搭載降雨レーダデータの検証はレーダアルゴリズム開発者の担当となっている。この作業を容易にするために標準プロダクトではない中間プロダクトの作成をすることが TSDIS, 降雨レーダチーム, TRMM Science Team 間で合意された。具体的には TRMM が地上の GV サイト近くの上空を通過した時間帯の TRMM 降雨レーダデータ, GV データのサブセットを作り, 月に一度の頻度で中間プロダクトとして出力する。TSDIS はこのための特別アルゴリズムを用意する。このプロダクトは標準プロダクトではなく, 約1カ月単位で更新され保存されない。

#### 4. 検証実験計画

TRMM 降雨レーダデータの検証手法として3種類の手法が考えられている。第1番目で最も基本的な方法は TRMM 降雨レーダと地上グラウンドトゥルスデータの直接比較である(4.1)。第2番目の方法は航空機搭載降雨レーダデータの利用である(4.2)。航空機搭載降雨レーダは, 衛星と同様に雨域の上空からの観測を行っており観測条件の似通ったデータの取得が期待される。また, 地上の降雨レーダではカバーできない海洋上や熱帯雨林等の非居住地域等の上空の観測には有効であろう。また第3番目の方法は散乱係数データの値が良く知られた地上対象物を利用することである(4.3)。

##### 4.1 地上検証実験データの利用

地上検証のために最も重要なものは, 良く校正された地上降雨レーダのレーダ反射因子データならびに地上の雨量計ネットワークおよび雨滴粒径分布測定装置のデータである。上記の様に観測時間, 観測場所が近接した TRMM 搭載降雨レーダデータと地上降雨レーダデータのサブセットデータがこのため用意される。

TRMM の GV サイトは主に米国側の GV Team によって用意されている。主要な GV サイトには地上降雨レーダ, 雨量計, 雨滴粒径分布測定装置等が整備されている。4つの主要な GV サイトは, オーストラリアのダーウィン(波長5cmの偏波・ドップラレーダ), フロリダ州のメルボルン(波長10cmのWSR88ドップラレーダ), クワジェリン環礁(波長10cmのWSR88ドップラレーダを計画中)ならびにテキサス州のヒューストン(波長10cmのWSR88ドップラレーダ)である。WSR88ドップラレーダは, Weather Surveillance Radar-1988 Doppler System のことで, 2700-3000 MHz 帯の周波数を用いた高感度, 高精度でレーダ反射因子, 動径方向の速度ならびにスペクトル幅を観測できるシステムである<sup>(4)</sup>。WSR88ドップラレーダは, 160台の降雨レーダで全米を覆う計画である米国の次世代レー

ダプログラムネットワークの中核を担うレーダとして期待されている。これらの GV サイトの地上降雨レーダデータ, 雨量計データ等は TSDIS に集められる。また, この他に, 米国側の GV Team によって, グアム等の10cmのWSR88ドップラレーダ, タイ国の10cmのドップラレーダ, イスラエル国エルサレムの10cmのレーダ, ブラジル国サンパウロの10cmのレーダ, 台湾の10cmドップラレーダが TRMM GV データとして利用される。我が国においては, 気象庁のレーダアメダス合成図, 気象庁の石垣島レーダ, 気象研究所の5cmドップラレーダ, 当所関東支所の5cmドップラレーダ, 京都大学のMUレーダ等の利用が検討されている。

##### 4.2 航空機検証実験データの利用

TRMM と同様の13.8GHzの航空機搭載の降雨レーダは米国のジェット推進研究所と通信総合研究所とで整備されている。米国ジェット推進研究所のシステムは, ARMAR (The Airborne Rain Mapping Radar) と呼ばれておりそのシステムパラメータを第4表に示す<sup>(5)</sup>。ARMAR は通常 NASA の DC-8 に搭載される。アンテナビームは鉛直下方を中心にして往復走査される。ARMAR は多偏波ドップラレーダシステムであり, ラジオメータ機能をも合わせ有している。また, 高出力パルス, 高いレンジ分解能を得るためにパルス圧縮技術を応用している。

通信総合研究所の航空機搭載用のマルチパラメータ降雨レーダは CAMPR (The CRL Airborne Multi-

第4表 米国ジェット推進研究所の ARMAR のシステムパラメータ

Performance characteristics:	
Min. detectable reflectivity (10 km range)	10 dBZ
Range resolution	80 m
Horizontal resolution (12 km altitude)	800 m
Frequency	13.8 GHz
Polarization	HH, VV HV, VH
Antenna characteristics:	
Peak gain	34 dB
3-dB beamwidth	3.8°
Sidelobe level	-32 dB
Polarization isolation	-28 dB
Radar transmitter characteristics:	
Peak power	200 W
PRF	1 to 4 KHz
Number of transmit frequencies	1 to 4
Pulse duration	5 to 45 μsec
Chirp bandwidth	4 MHz
Radar receiver characteristics:	
Sampling frequency	10 MHz
ADC resolution	12 bits
Radiometer characteristics:	
Bandwidth	40 MHz
Temperature sensitivity (ΔT) per pixel	1 K



第5表 通信総合研究所のCAMPRのシステム諸元

送信尖頭出力	2 kW
中心周波数	13.8 GHz (Ku band)
アンテナの種類	導波管スロットアレイ
アンテナビーム幅	2.1° (along track) 4.4° (cross track)
アンテナ利得	33.1 dBi (V), 33.5 dBi (H)
アンテナ交差偏波レベル	-45 dB 以下
パルス幅	0.5, 1.0, 2.0 $\mu$ s
距離分解能	75, 150, 300 m
パルス繰り返し	2, 4, 8 kHz
ドップラー折り返し	$\pm 10.9, \pm 21.7, \pm 43.4$ m/s
送信パルスの偏波	H, V, HV, HHVV
搭載航空機	Beechcraft B-200
最高飛行高度	約 8000 m

parameter Precipitation Radar) と呼ばれている多偏波ドップラレーダシステムである。そのシステム諸元を第5表に示す<sup>(6)</sup>。CAMPRのアンテナは航空機胴体下部に取付けられ、アンテナのビーム方向を航空機の進行方向に直交する面内で左右に振ることにより、航空機下方ないし横方向の観測が可能である。走査可能な範囲は真下から右翼側に57°、左翼側に75°である。レドーム内には指向特性の等しい相隣り合う垂直偏波用と水平偏波用の二つのアンテナが納められており、どちらか一方のアンテナから送信し、散乱波は両方のアンテナで同時に受信できる。送受信の偏波はパルス毎に切り換えることができる。受信信号はIQ信号をそのまま記録するか、決められた数のパルスによる平均受信電力として記録するか選べる。

これらの航空機搭載降雨レーダはTRMM搭載降雨レーダにない、多偏波機能、ドップラ機能を有しているためデータ量が豊富であり、様々な降雨強度抽出アルゴリズムを適用することが可能であり、TRMM搭載降雨レーダよりも信頼性のある降雨強度を提供するものと考えられる。また、航空機搭載降雨レーダの空間分解能はTRMM搭載降雨レーダの空間分解能よりもはるかに良いため、TRMM搭載降雨レーダが被るビーム充満率の影響評価に役立てることができる。

#### 4.3 自然物体の散乱特性データの利用

入射角10°周辺の海面の散乱係数の大きさは風速に依存せずほぼ一定であり散乱係数の値の検証のために有効であることが人工衛星SEASAT搭載の海上風ベクトル観測用の14.6GHzの散乱計の観測からも知られている<sup>(7)</sup>。ジェット推進研究所の13.8GHzのARMARによるTOGA/COARE実験時の観測においては、2か月間の観測期間の観測値として入射角10°周辺の海面の散乱係数の値として8.5dB $\pm$ 0.5dBが報告されている。

また、アマゾンの熱帯雨林は広い領域にわたってほぼ

均一で散乱係数も入射角依存性が少なく、これまでも衛星搭載のレーダデータの検証に使われてきている<sup>(8)</sup>。SEASAT搭載の14.6GHzの散乱計の観測結果では、入射角が20°~70°の範囲にわたって極めて一様な散乱係数の値を示す( $\pm 0.5$ dB)ことが報告されている。TRMM衛星がアマゾンの熱帯雨林上空を通過する機会が多いため、有効な観測対象と考えられる。但しTRMM降雨レーダの場合入射角が最大17°であり、小さい入射角に対してどの程度散乱係数が安定なのか航空機を使って検証する必要がある。

## 5. おわりに

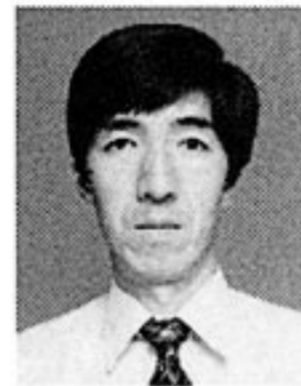
TRMM降雨レーダアルゴリズムの概要と検証法についてその概要を紹介した。TRMMは、1997年夏季にその打ち上げが予定されており、降雨レーダアルゴリズムも日米合同のサイエンスチームによって1996年12月を目標に現在開発が進められている。TRMM搭載の他の降雨観測用センサと異なり、降雨レーダは初めての衛星搭載用のシステムであり、データ処理アルゴリズムについて打ち上げ後、予想外の問題点が発生する可能性がある。その様な場合は、あらかじめ定められた手続きに従って処置して行きたい。今回のアルゴリズム開発は米国NASAのTRMM Science Teamとの共同開発の形で実行した。その過程の中で、米国側が日本側と比べて打ち上げのかなり早い時期(TRMMの場合6年前)からサイエンスチームを結成し、そのメンバーの意見を尊重してデータ処理システムを着実に構築して行くことを学ぶことができた。日本の様に仕様書を書けば契約会社に仕事に移管するのでは無く、研究公募に応募してきた研究者がチームを作り、自分達の意見を反映させながら絶えずデータ処理システム担当者と意見交換しながらアルゴリズムを開発して行くというのは我が国には無い経験であった。研究者自身がコード化の作業をして行くのである。面倒かもしれないが自分のアイデアが十分に反映されたアルゴリズムがフレキシブルに開発される。スケジュール管理は各チームリーダーとデータ処理システム担当者側の責任である。データ処理システムに納入されたアルゴリズムの単体試験、総合試験はデータ処理システム側が実施するが、サイエンス側がサポートする。一長一短はあるが今後新しいセンサのアルゴリズムを開発して行く上で米国のやり方を学んだことは良い経験であった。TRMM降雨レーダデータの利用を考えているユーザならびに同様な地球観測センサのデータ処理アルゴリズムの開発を今後予定している研究者の参考となれば幸いである。

## 参 考 文 献

- (1) TRMM サイエンスプログラム, 宇宙開発事業団地球観測データ解析研究センター, p.98, 1996年3月
- (2) TRMM Science Requirements, ed. by C. Kummerow, NASA/GSFC, August 30, 1995
- (3) TRMM Science Operation Plan, p. 122, NASA/GSFC, 1996
- (4) G.E. Klazura and D.A. Imy, "A description of the initial set of analysis products available from the NEXRAD WSR-88D system", Bulletin of the American Meteorological Society, 74, 7, pp. 1293-1311, 1993.
- (5) F. Li, S. Durden, E. Im, A. Tanner, W. Ricketts, W. Wilson, R. Meneghini, T. Iguchi and K. Nakamura, "Airborne rain mapping radar and preliminary observations during TOGA/COARE", Proc. IGARSS'93, pp. 832-834, 1993.
- (6) N. Takahashi, H. Kumagai, H. Hanado, T. Kozu and K. Okamoto, "The CRL airborne multiparameter precipitation radar (CAMPR) and the first observation results", Preprints of the 27th Conference on Radar Meteorology, pp. 83-85, 1995.
- (7) L. Schroeder, D. Boggs, G. Dome, I. Halberstam, L. Jones, W. Pierson, and F. Wentz, "The relationship between wind vector and normalized radar cross section used to derive SEASAT-A satellite scatterometer winds", J. Geophys. Res. 87, C5, pp.3318-3336, 1982.
- (8) I. Birrer, E.M. Bracalente, G. Dome, J. Sweet, and G. Berthold, " $\sigma^0$  signature of the Amazon rain forest obtained from Seasat scatterometer", IEEE Trans. Geos. and Remote Sens., GE-20, pp.11-17, 1982.



岡本 謙一  
Ken'ichi OKAMOTO  
地球環境計測部  
電波リモートセンシング  
E-Mail: okamoto@crl.go.jp



井口 俊夫  
Toshio IGUCHI  
地球環境計測部 電波計測研究室  
電波による降雨や海面状態のリモートセンシング  
E-Mail: iguchi@crl.go.jp



阿波加 純  
Jun AWAKA  
北海道東海大学工学部 電子情報工学科  
電波伝搬とリモートセンシング  
E-Mail: awaka@crl.go.jp



熊谷 博  
Hiroshi KUMAGAI  
鹿島宇宙通信センター 地球観測技術研究室  
大気のリモートセンシング  
E-Mail: kumagai@crl.go.jp

ロバート メネギーニ  
Robert MENEGHINI  
米国 NASA, Goddard Space Flight Center  
降雨のマイクロ波によるリモートセンシング  
E-Mail: bob@meneg.gsfc.nasa.gov



佐竹 誠  
Makoto SATAKE  
宇宙開発事業団 地球観測センター  
TRMM データ処理システムの開発



古津 年章  
Toshiaki KOZU  
地球環境計測部 電波計測研究室  
マイクロ波リモートセンシング  
E-Mail: kozu@crl.go.jp

