

## 2-3 全球降水観測衛星計画と二周波降水レーダの研究開発

### 2-3 *Global Precipitation Measurement program and the development of dual-frequency precipitation radar*

井口俊夫 沖 理子 Eric A. Smith 古濱洋治  
IGUCHI Toshio, OKI Riko, Eric A. Smith, and FURUHAMA Yoji

#### 要旨

全球降水観測計画(GPM)は熱帯降雨観測計画(TRMM)に続く宇宙からの降水観測ミッションである。その目的は、科学研究だけでなく、天気予報の改善や水資源管理へのデータの応用といった実利用を含む。多くの実利用に供するため、複数の低軌道周回衛星を使うことにより観測頻度を高め、約3時間ごとの全地球上の降水の状態を明らかにし、その分布データを準実時間で世界に配信することを目指している。全体計画の中で重要な役割を担う主衛星には、降水の高感度、高精度、高分解能観測を可能にする二周波降水レーダ(DPR)が搭載される。GPMの概要、課題等とともに、DPRの役割と開発に関して記述する。

The Global Precipitation Measurement program is a mission to measure precipitation from space, and is a similar but much expanded mission of the Tropical Rainfall Measuring Mission. Its scope is not limited to scientific research, but includes practical and operational applications such as weather forecasting and water resource management. To meet the requirements of operational use, the GPM uses multiple low-orbiting satellites to increase the sampling frequency and to create three-hourly global rain maps that will be delivered to the world in quasi-real time. A dual-frequency radar (DPR) will be installed on the primary satellite that plays an important role in the whole mission. The DPR will realize measurement of precipitation with high sensitivity, high precision and high resolutions. This paper describes an outline of the GPM program, its issues and the roles and development of the DPR.

#### [キーワード]

全球降水観測計画, 二周波降水レーダ, 降水分布, 水循環, 天気予報  
Global Precipitation Measurement, Dual-Frequency Radar, Precipitation Distribution, Water Cycle, Weather forecast

## 1 はじめに

世界の環境の変化は現在の重大関心事の一つである。環境を規定する種々の要素の変化が環境に与える影響を評価するためには、それらの要素の現状、他の要素との関係、そしてそれがどのように環境全体に影響を与えるかを知る必要がある。環境を規定する要素は非常に多数存在するが、それらの中でも、降水は我々の生活

と密接に関連しており、非常に重要な要素の一つである。雨が降りすぎると洪水が起こり、少なすぎると旱魃になる。農作物の収量は降水量に大きく依存する。天気予報の予報量としても、降水は、気温、風速とともに3大重要要素を成している。さらに降水は、潜熱加熱を通して大気大循環を規定し、気候変動を表す変数である。また、大気海洋相互作用の重要要素でもある。

降水はこのように我々の環境を規定する重要

な要素であるにもかかわらず、雲モデル、気象モデル、気候モデルなどにおいて、非常に不確かな要素の一つである。空間的にも時間的にも変動が大きい、全球にわたる降水の正確な分布は把握されていない。全球の降水の空間的・時間的分布を知ることは、天気や気候のシステムの理解を深めるために欠かせないことである。

全球降水観測計画 (Global Precipitation Measurement (GPM)) は、このような現状にあつて、世界の降水を正確かつ高頻度で観測することにより、天気予報や気候モデルを改善し、水循環の理解を深めるために計画された衛星計画である。米国航空宇宙局 (NASA) と宇宙開発事業団 (NASDA) がその実現可能性を検討している。本文では、この計画の概要を説明するとともに、通信総合研究所 (CRL) が主に関与する GPM 衛星主衛星に搭載予定の二周波降水レーダについて述べる。

## 2 全球降水観測計画(GPM)

GPM の活動は三つの作業分野から構成される。衛星からの降水観測、衛星データの検証、そしてデータの配布である。衛星からの降水観測の部分は更に大きく二種類に分けられる。一つは、熱帯降雨観測衛星 (TRMM) に類似した衛星による観測で、この主衛星には能動型の観測装置である降水レーダと受動型の観測装置であるマイクロ波放射計が搭載され、高精度観測を行う。もう一つは、マイクロ波放射計を搭載した複数の極軌道衛星群による観測である。主衛星の役割は、降水分布の構造を精度よく観測し、微物理に関連した量を推定することである。他方、他の衛星群は観測頻度を高め、変動の激しい降水システムに対して時間的に十分頻繁なサンプルを確保するために用いられる。

降水は移り変わりが激しいため、TRMM のような低軌道の周回衛星による観測ではサンプル間隔が長く、降雨分布の変化を追うことは難しい。実用的な意味で、数値予報、データ同化、洪水予報などを改良するためには、少なくとも約3時間程度の時間間隔で降水の情報が必要である。そして、この3時間ごとの全球の降水観測を周回衛星を用いて実現するには、SSM/I のよう

なマイクロ波放射計を搭載した極軌道衛星が最低8機必要である。

TRMM 型の主衛星は GPM において基本的な役割を果たす。主衛星に搭載される降水レーダと多周波マイクロ波放射計により得られる詳細な降水に関する情報に基づき、他の衛星に搭載されたマイクロ波放射計のデータが較正され、検証されるからである。GPM の全体プログラムにおいて基本観測装置となる降水レーダは、CRL と NASDA により開発される予定である。このレーダは Ku 帯と Ka 帯の二周波を用いたレーダである。Ku 帯のレーダは TRMM の降雨レーダ (PR) とほぼ同じ規格のものであり 13.6GHz の電波を用いる。Ka 帯は 35.5GHz を使い、GPM で新たに加わることになる。二周波を用いることにより、観測可能な降水強度の範囲を広げ、特に中高緯度の弱い雨や雪の観測を可能にする。また、二周波で観測されるエコーの減衰差に関する情報を用いることにより、雨滴粒径分布 (DSD) の分類が実現できることが期待されている。二周波レーダ (DPR) により得られる DSD の情報は、レーダ自身だけでなく、マイクロ波放射計による降雨強度推定の誤差を小さくするために用いられる。主衛星は 2007 年ごろ NASDA の H-IIA ロケットにより打ち上げられる計画である。マイクロ波放射計を搭載し極軌道を飛ぶ副衛星は、NASA、NASDA や他の機関の国際協力により打ち上げられ、やはり 2007 年ごろに予定の衛星群が実現することを目指している。取得されたデータはデータセンターに転送され、そこで処理され、3時間ごとに全球の降水地図を作成することになる。

GPM は TRMM の降水観測範囲を高緯度に広げ、全球の降水分布をより完全かつ正確に得ようとするものである。TRMM の降雨レーダ (PR) は海上と陸上の両方で、正確な降雨データと降水システム内の降雨の3次元構造を与えてきた。このようなレーダによってしか得られない性質のデータの範囲が GPM ではほぼ全球に広がることになる。さらに、3時間ごとの全球降水地図は数値天気予報や水資源管理などの現業部門で活用されるものと期待される。

### 3 科学的目的

GPMの実現により発展が期待される学問分野としては、気候、気象、水循環の三つの分野が考えられる。

気候研究においては、GPMにより長期間蓄積された降雨量のデータは気候モデルの試験や改良に用いることができる。現在の全球気候モデルでは地球温暖化に伴う降水量の変化を正確には予測できないといわれている。GPMにより得られるデータは、特にTRMMや他の衛星データ、あるいは地上観測データと組み合わせることにより、降水分布の長期変動を検出することにつながる可能性がある。

天気予報においては、降水データを数値天気予報モデルに同化することにより予報精度が格段に向上する。この精度向上はTRMMのデータを用いた事例解析で証明されている。GPMにより得られる3時間ごとの降水データは、現業予報の精度向上のためのデータ同化を可能にする。GPMデータは全球の降水と水蒸気分布の高精度解析、あるいは台風や強い低気圧などの高頻度かつ正確な観測と解析に寄与すると期待されている。このような解析を通して、数値天気予報モデルの改良がもたらされる。そして、それは各種のスケールでの長期予報の改善にもつながる。

全球の水循環研究においては、GPMにより実現される時間的にも空間的にも密な降水観測が、地球上の水循環の不確定性を大幅に小さくし、水文モデルの改良につながる。GPMデータは、水循環の変動を定量的に把握し、その変動の元となる機構を理解するという中心的課題の解決に役立ち、水循環における人間活動起源による変動と自然変動を分けることができるかもしれない。また、天気予報の精度向上により、洪水予測と水資源管理も大きな恩恵を受けることになる。

GPMにおける科学研究の範囲は、TRMMに比べ広がっている。これは、気候だけでなく、水文学や天気予報の研究課題を含んでいるからである。しかし、これらの三つの分野はそれぞれ独立したものでなく、互に関連している。それぞれの分野からの知識を総合し、境界分野や

より広い分野の問題を解決することが期待されている。例えば、地球の気温や他の気候変数の変化に対して、降雨や降雨構造はどう対応して変化するのか？どれほど直接に地表面の水は降雨や蒸発と関連しているのか？地球システムがどのように変化しており、その結果が地球上の生命に与える影響を理解するためには、我々は、それを観測し、理解し、そしてモデル化する必要がある。そのためには、地球全体の水循環の速度が変化しており、その変化に一定の傾向が存在することを明らかにする必要がある。循環の高速化は、蒸発の加速、全球平均降水量の増加、そして一般に極端現象、特に旱魃と洪水の増加につながる可能性があると考えられている。

さらに、GPMは多くの周辺研究分野にも影響を与えるだろう。そのような分野としては、雲システムと放射、海面・陸面と大気の相互作用、海洋過程の淡水による強制、海洋の塩分モデル、水文気象学や炭素の同化モデルの開発、土壌水分とその洪水・旱魃予測への影響、水蒸気の輸送、等々が考えられる。

### 4 GPMにおけるDPRの重要性

GPMにおけるDPRの重要性は、他の受動型観測装置では得られない物理量をレーダーデータからは推定できることにある。具体的には、降雨構造、降雨強度、雨滴粒径分布(DSD)、減衰の経路積分値などである。

最新の設計では、DPRはKu帯とKa帯のレーダーで構成される。Ku帯のレーダーは、幾つかの改良点はあるが、基本的にはTRMMの降雨レーダー(PR)と同じものである。Ka帯のレーダーは弱い降雨や降雪の検出を可能にする(図1)。これら二つのチャンネルからのデータを組み合わせることにより、雨滴粒径分布のパラメータの推定が一周波の場合より正確に行えるようになる。Ka帯のレーダーは二つの観測モードを準備し、それらを走査ごとに切り換えながら運用することを考えている。一つは高感度モードであり、弱い雨や雪の検出に使う。他の一つはKu帯のレーダーと観測ビームを一致させたモードであり、KaとKuの両チャンネルでのレーダー観測体積を一致させることにより、同一散乱体からの二周波による

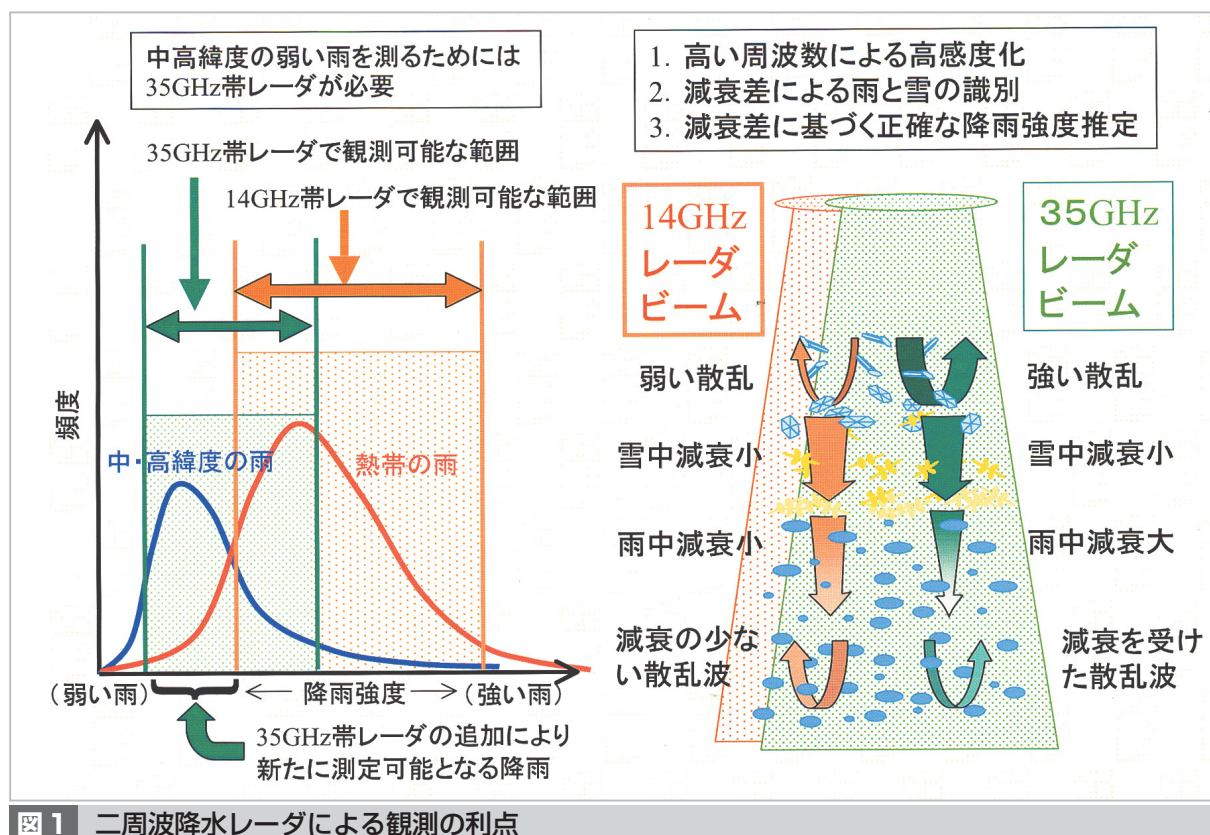


図1 二周波降水レーダによる観測の利点

エコー観測を実現するものである。このモードで得られたデータは、DSDのパラメータ推定に用いられる。ビーム一致モードでは距離分解能は250m、高感度モードでは500mを予定している。TRMMでの経験を生かして、KaとKuのどちらのチャンネルもアンテナはフェーズドアレイアンテナを用いる。

DPRは高分解能で降水粒子の分布に関する3次元の情報を与えてくれる。このようなデータは雨雲の構造を研究する上で非常に貴重なものとなる。DPRによりもたらされる高精度の降雨強度の推定値は、同じ主衛星に搭載されるマイクロ波放射計による推定値の較正に使われる。DPRのGPMにおける重要性は、DSDのパラメータとともに雨雲の構造に関する地域特性や季節特性が得られることにある。受動型センサーであるマイクロ波放射計による降雨強度推定アルゴリズムは、雨雲の鉛直構造を決定論的にしろ確率論的にしろ何らかの形で仮定しなければならず、降雨の鉛直構造に関する信頼できる情報は、降雨推定の確度を決める決定的要因である。DPRによりもたらされる降雨構造の統計は、放射計のアルゴリズムのためのデータベースと

して用いられ、降雨構造の不確かさを減らすために使われる。具体的にどのようにレーダのデータからの情報を利用するかは今後の大きな課題である。現在、TMIの降雨推定アルゴリズムで用いられているデータベースの改良にTRMMのPRデータを用いる検討がなされている。

## 5 課題

副衛星による衛星群を構成する上での問題の一つは、3時間ごとの全球観測をいかにして実現するかということである。GPMで予定されている副衛星は、GPM専用で打ち上げられる予定の2機ほどの衛星を別にして、それぞれ独自の目的を持った衛星であり、その目的に合った軌道に打ち上げられる。それらはどれも太陽同期軌道ではあるが、高度が異なるため一周に要する時間も異なっている。そのため、8機の衛星を用いても3時間以上の観測間隔を生じるところが出てくる。また、搭載されるマイクロ波放射計の規格も異なっており、高度の違いとともに、観測範囲や分解能の違いを生じる。高い空間分解能と広い観測可能範囲という要求条件は、GPM衛

星の高度に課せられた相反する条件であることを覚えておく必要がある。衛星高度を高くすることにより観測範囲が広がるが、同時に観測の瞬時視野も広がり分解能が低下する。逆にいうと、比較的小さなアンテナ口径のマイクロ波観測装置でも、低高度の衛星に搭載することにより十分な分解能を確保できることも考えられる。

GPM専用の副衛星の軌道を適当に選ぶことにより、他の副衛星による観測範囲のすき間をうまく埋めるようにしなければならない。このとき何を基準に最適化を図るかが問題である。もしそれがサンプル間隔とするならば、サンプル間隔の最悪値を最小にするべきなのか、それともその平均値を最小にするべきなのか？また、そうした統計を取る期間はどれほどの長さにするべきなのか？1日か1月かあるいはもっと別の期間か？サンプルの一様性はどう評価すべきか？与えられた条件の下で、こうした問題に対する定量的な評価基準を策定し、評価することは大きな課題である。

DPRの開発に関する技術的課題は、与えられた質量、電力消費量、予算の制限の下で、その性能を最適化することである。ここでも、ミッションの目的に合わせて、要求条件の優先順位、最適化の評価基準が問題となる。具体的には、感度、観測幅、二周波レーダのビームの一致度などである。ビームの一致に関しては、Ku帯とKa帯のサンプル体積を数百メートル以下の違いで一致させることは技術的には可能なことである。しかし、この一致の程度を衛星打上げ後実際に検証することは非常に難しく、レーダの瞬時視野の範囲内に多数の同期した受信機と送信機を配置して較正データを取る必要があるだろう。そのような較正装置の開発や検証実験の費用なども考慮する必要が出てくる。

GPMの地上データ処理システムを設計するのも大きな課題である。主衛星からのデータだけでなく、異なる機関により運用される副衛星群からのマイクロ波放射計のデータを、準リアルタイムで集め処理しなければならない。また、複数の衛星からの処理データをうまく合成し、3時間ごとの全球降水分布を作成しなければならない。

## 6 降雨強度推定アルゴリズムと検証

主衛星搭載のDPRとマイクロ波放射計の降雨強度推定アルゴリズムは、ほぼTRMMのアルゴリズムの延長としてとらえることが可能である。しかし、次の二点において新しい研究が必要である。一つはDPRデータ処理のための二周波レーダアルゴリズムの開発、もう一つは多数の副衛星の放射計のデータの融合である。

DPRデータの処理における新課題は、平均粒径のような雨滴粒径分布に関する情報を二周波アルゴリズムを用いて取り出すことである。一般に二周波アルゴリズムでは、二つの周波数で観測されたレーダ反射因子の差を散乱断面積(実効レーダ反射因子)と消散断面積(減衰)のこれら二つの周波数での違いに起因しているとみなす。そして、二つの周波数のレーダビームは完全に一致しており、ビーム内では各距離において降雨の分布は一樣だと仮定されている。しかし実際には、これらの仮定は完全に満たされることはない。実際の降雨の非一樣分布がどのような統計に従っているかはよく知られていないため、これを無視したアルゴリズムによる降雨推定の誤差がどの程度かを早急に定量的に明らかにしておく必要がある。

規格の異なる複数の放射計からのデータを合成して、GPMとしての最良推定値を求める方法は新しい課題を生む。各放射計は大きさの異なる視野やサンプル間隔のデータを提供する。どのようにして異なった放射計から得られたデータを時間空間的に組み合わせ内挿するかを決めるには、定量的な指標が必要になる。

推定値の質を確保するためには、衛星データと降雨推定アルゴリズムの検証に力を入れなければならない。検証はその誤差評価を含め定量的なものでなければならない。それはアルゴリズム開発と密接に結びついている。この問題は非常に難しい問題であり、熟慮と作戦を必要とする。

## 7 協力関係

GPMはその名のとおりに地球全体に関するミッションである。科学研究においても運用におい

ても国際協力が必要であり、各国の宇宙機関や政府機関、国際機関、研究機関の科学研究における参加が期待されている。

GPMのための衛星の開発分担はまだ明確には決まっていない。現在の見通しは次のようなものである。NASDAはNASAと協力してGPMの主衛星を開発し、GPMに寄与する。NPOESS/IPOはSSMIS観測装置2台とCMIS観測装置3台を持って計画に協力する。これに加えて、NASDAはGCOM-B1を準備し、NASAは1ないし2機のGPM専用副衛星を提供する。ESAも1ないし2機の副衛星の提供可能性を探っている。ISRO/CNESはMegha-TropiquesでGPMに参加する意向がある。

地上検証地点からのデータはGPM衛星群による降雨推定値の確度を高める上で欠かせないものである。日本と米国に加えて、検証地点を提供しようとしている国や地域として、オーストラリア、ブラジル、カナダ、英国、フランス、ドイツ、インド、イタリア、スペイン、台湾などがある。今後、参加国が増える可能性が大いにある。こうした検証地点からのデータの流れを構築することはGPMの成功にとって重要な要素である。

## 8 結論

TRMMはエルニーニョ、熱帯やモンスーンによる変動、大規模及び雲力学、日変化、そして熱帯における水循環に関して新たな知識をもたらした。GPMはTRMMの研究範囲を広め、高精度の全球の降水推定を可能にし、水循環の理解を深めるとともに、データ同化を通して予報精度を向上させる。

GPMは本質的に全地球規模の研究プログラムである。多くの参加者、協力機関、文化、衛星、装置、物の見方、データ源、データの流れ、処理システム、処理環境、ハードとソフトの構成、科学的興味、そして応用が含まれている。NASAとNASDAは協力関係を結び、科学的及び技術的概念の形作りを進めてきた。しかし、このミッションを構成し実行するには日米関係を超えたより広い協力が必要となる。協力こそがGPM

成功への鍵である。(本文はURSI Commission F, Open Symposium で発表した“Precipitation Observation from Space in the Next Generation: the Global Precipitation Mission”の論文の訳に加筆したものである。)

## 付録. CRLで開発中の35GHzレーダ用機器について

CRLでは1999年度から2001年度にかけて35.5GHz衛星搭載降水レーダのための高出力固体電力増幅器、移相器、導波管アンテナの開発を行ってきた。目標とするレーダの諸元を表1に示す。また、この開発においてのアンテナの設計目標を表2に示す。さらに、この開発により得られたこれらの機器の試作器の特性を表3、4、5にまとめておく。これらの試作器の諸元を元にレーダの感度を計算した。ただし、感度計算に用いた条件は以下のとおりである。衛星高度400km、ビーム幅0.7度、距離分解能250m及び500m、対数検波、二周波アジリティー、送信電力128W、受信機雑音 $-110.0\text{dBm}$ (距離分解能250m時)、給電損失1.0dB、フィルター損失1.3dB。また、雑音のサンプルにはエコーのサンプルの4倍のサンプルを使い平均を取るものとする。このような条件の下で、1パルス当たりのSN比が期待値として1になるエコー強度をレーダ反射因子で表すと、距離分解能250mの場合には $Z=22.4\text{dBZ}$ 、500mの場合には $Z=16.4\text{dBZ}$ となる。実際の観測では、多数のパルスにわたる平均を取るため、フェージング雑音を抑えることができ、最低検出感度を改良できる。TRMMのPRにおいて降雨検出に用いられているのと同じ基準で、雑音のばらつき(標準偏差)の3倍のエコー強度をエコーの検出基準とした場合の検出感度を表6に示す。Ku帯のレーダとビームを一致させた場合には、各ビームでのサンプルパルス数は、表の245kmの走査幅の時に相当する。表からおおよそ $12\text{dBZ}$ 、 $Z=200R^{1.6}$ のZ-R関係を使うと、 $0.2\text{mm/h}$ の雨が検出できることが分かる。

また、周波数アジリティーの数を増やすなどの工夫をした場合に感度と消費電力がどう変わるかを表7に示す。

表1 Ka帯レーダの予定主要諸元

|                       |                            |
|-----------------------|----------------------------|
| Radar type            | Pulse radar                |
| Antenna type          | 128-elem. WG slot array    |
| Beam scanning         | Active phased array        |
| Frequency             | 35.55 GHz                  |
| Polarization          | Horizontal                 |
| TX/RX pulse width     | 1.57 / 1.67μsec (3 μsec)   |
| RX band width         | 0.6 MHz (0.3 MHz)          |
| Pulse rep. freq.      | 2235 Hz                    |
| Data rate             | 93.5 kbps                  |
| Mass                  | 290 kg (*)                 |
| Designed Life time    | 5 years                    |
| Sensitivity           | < 0.5 mm/h (0.2 mm/h)      |
| Horizontal resolution | 5.0 km (nadir)             |
| Range resolution      | 250 m (500 m)              |
| # of indpdt samples   | 64 (fading noise < 0.7 dB) |
| Swath width           | 245 km                     |
| Observable range      | Surface to 15 km (*)       |
| Dimensions            | 1.0 x 1.0 x 0.5 m          |

(\*印：変更の可能性大)

表2 Ka帯アンテナの設計特性

|               |                                                                                                 |                                         |         |           |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------|-----------|
| Antenna Type  | Planar Array, 128-element Slotted Waveguide Edge Slot Array(=Slot in E-plane), Nonresonant Type |                                         |         |           |
| Weighting     | Taylor Distribution (SL = -35 dB, N = 6)                                                        |                                         |         |           |
| Array Element | Along-Track                                                                                     | 5.69 mm                                 | 142     | 807.98 mm |
|               | Cross-Track                                                                                     | 6.33 mm                                 | 128     | 810.24 mm |
| Beam Width    | Along-Track                                                                                     | 0.71 deg                                |         |           |
|               | Cross-Track                                                                                     | 0.71 deg (nadir) – 0.74 deg (scan edge) |         |           |
| Gain          | 47.4 dBi                                                                                        |                                         |         |           |
| Sidelobe      | < -27 dB                                                                                        |                                         |         |           |
| VSWR          | < 1.2                                                                                           | Waveguide Loss                          | 0.71 dB |           |

表3 8素子Ka帯アレイアンテナの電気特性

|               |                                            |          |     |
|---------------|--------------------------------------------|----------|-----|
| Antenna Type  | 8-element Slotted Waveguide <sup>(1)</sup> |          |     |
| Weighting     | Taylor Distribution (SL = -35 dB, N = 6)   |          |     |
| Array Element | Along-Track                                | 5.69 mm  | 142 |
|               | Cross-Track                                | 6.33 mm  | 8   |
| Beam Width    | Along-Track                                | 0.71 deg |     |
| Gain          | 35.8 dBi                                   |          |     |
| Sidelobe      | -27.03 dB(@-54.4 deg)                      |          |     |
|               | -27.43 dB(@+42.4 deg)                      |          |     |
|               | -28.55 dB(@-1.13 deg)                      |          |     |
| Cross Pol     | -24.29 dB(@+43.0 deg)                      |          |     |
|               | -26.89 dB(@-53.8 deg)                      |          |     |
| VSWR          | < 1.1                                      |          |     |

表4 Ka帯固体電力増幅器(P-HEMT)の特性

| Serial Number | type       | Output Power (dBm)  | Average power Consumption | Estimated power consumption with lower supply voltage | Weight |
|---------------|------------|---------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------|--------|
| SN01301       | BA2500 X 4 | 34.58 (34.13-34.66) | 1238 mW (1193-1329)       | 858 mW                                                | 472 g  |
| SN01302       | BA2900 X 2 | 34.57 (34.23-35.13) | 1077 mW (1069-1100)       | 771 mW                                                | 471 g  |

(測定条件：中心周波数 35.55GHz、周波数範囲 35.5 - 35.6GHz、  
温度 - 20,+25,+50 度、パルス幅 1.67μsec、  
Duty 1%)

表5 Ka帯5ビット移相器の特性

| Serial Number | Insertion Loss Mean (Max-Min) | Phase Error (RMS) | Average Power Consumption | Switching Time | Weight |
|---------------|-------------------------------|-------------------|---------------------------|----------------|--------|
| #1            | 7.9-8.2 (3.4)                 | 1.3-4.5 deg.      | 132-136 mW                | 0.06 μ sec     | 220 g  |
| #2            | 7.2-7.8 (3.7)                 | 1.1-3.2 deg.      | 125-132 mW                |                |        |
| #3            | 7.4-8.0 (3.4)                 | 1.5-4.2 deg.      | 131-134 mW                |                |        |
| #4            | 8.1-8.5 (3.4)                 | 1.2-3.3 deg.      | 125-128 mW                | 0.065 μ sec    |        |

(測定条件：35.55GHz(35.5 ? 35.6GHz)、  
(- 20℃,+25℃,+50℃))

表6 感度の見積り

| Swath width | N of beams | Obs. Time /beam | N of pulses | Effective S/N(dB) | $\sigma$ (dB) | $3\sigma$ S/N(dB) | Min dBZ            | Rain (mm/h)<br>$Z_e=200R^{1.6}$ | Min dBZ            | Rain (mm/h)<br>$Z_e=200R^{1.6}$ |
|-------------|------------|-----------------|-------------|-------------------|---------------|-------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------------|
|             |            |                 |             |                   |               |                   | Range res. = 250 m |                                 | Range res. = 500 m |                                 |
| 5 km        | 1          | 714.3 ms        | 4470        | 14.0              | 0.092         | -16.3             | 6.1                | 0.053                           | 0.1                | 0.004                           |
| 40 km       | 8          | 89.3 ms         | 558         | 9.5               | 0.256         | -11.1             | 11.3               | 0.185                           | 5.3                | 0.078                           |
| 100 km      | 20         | 35.7 ms         | 224         | 7.5               | 0.397         | -8.5              | 13.9               | 0.270                           | 7.9                | 0.114                           |
| 245 km      | 49         | 14.6 ms         | 68          | 5.0               | 0.696         | -4.4              | 18.0               | 0.486                           | 12.0               | 0.205                           |

(Number of noise samples is  $4 \times N$ )

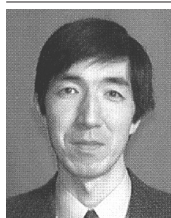
表7 種々のモードによる消費電力と感度の変化

|                            | Sensitivity improvement | Minimum detectable Z | Equivalent rain rate | Total power consumption |
|----------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| basic model                | 0 dB                    | 18.0 dBZ             | 0.486 mm/h           | 265 W                   |
| 3-freq. agility            | +0.9 dB                 | 17.1 dBZ             | 0.427 mm/h           | 291 W                   |
| 3-bit pulse compression    | +4.7 dB                 | 13.2 dBZ             | 0.244 mm/h           | 291 W                   |
| 4-freq. agility            | +1.5 dB                 | 16.5 dBZ             | 0.392 mm/h           | 317 W                   |
| 500-m res.                 | +6.0 dB                 | 12.0 dBZ             | 0.205 mm/h           | 317 W                   |
| 500-m res.+4-freq. agility | +7.5 dB                 | 10.5 dBZ             | 0.165 mm/h           | 421 W                   |

Basic model: 250-m resolution (pulse width:  $1.67 \mu s$ ), 2-freq. Agility, PRF=2820 Hz

## 参考文献

Furuhashi, Y., R. Oki, T. Iguchi, and E. Smith, "Precipitation Observation from Space in the Next Generation: the Global Precipitation Mission," URSI-F Open Symposium, Garmisch-Partenkirchen, Feb. 12-15, 2002.



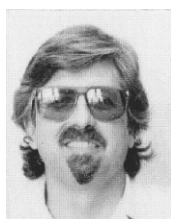
井口 俊夫

電磁波計測部門降水レーダグループリーダー Ph.D.  
電磁波リモートセンシング



沖 理子

宇宙開発事業団 衛星総合システム本部衛星プログラム推進部 副主任開発部員 博士(理学)  
気候学・気象学



Eric A. Smith, Ph. D.

NASAゴダード宇宙飛行センター 米国GPMプロジェクトサイエンティスト  
気象学、特に、衛星気象学、リモートセンシング、放射伝達及び環境水気象モデリング、全球水循環など



古濱 洋治

宇宙開発事業団理事 衛星システム本部長 工学博士