

研 究

TRMM 降雨レーダ機能確認モデルの開発と実験

佐竹 誠^{*1} 花土 弘^{*2} 佐藤 健治^{*2} 堀江 宏昭^{*2} 熊谷 博^{*2}
井原 俊夫^{*3} 古津 年章^{*4} 岡本 謙一^{*5}

(1996年5月17日受理)

DEVELOPMENT AND MEASUREMENTS OF A TEST MODEL
FOR FUNCTIONAL VERIFICATION
OF TRMM PRECIPITATION RADAR (PR)

By

Makoto SATAKE, Hiroshi HANADO, Kenji SATO, Hiroaki HORIE, Hiroshi KUMAGAI,
Toshio IHARA, Toshiaki KOZU, and Ken'ichi OKAMOTO

TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) is an earth observation satellite project jointly conducted by Japan and the United States of America, the objective of which is the quantitative measurement of rainfall in the tropical and sub-tropical regions by using the first precipitation radar onboard a satellite. Since 1987, the Communications Research Laboratory has conducted a feasibility study of the Precipitation Radar (PR) onboard TRMM, and developed several kinds of critical components, such as an eight-element active array antenna, solid state power amplifiers, low noise amplifiers, and PIN-diode phase shifters. A test model for functional verification of PR was then assembled with these newly developed components. The present paper describes the characteristics of the developed critical components and the test model for functional verification of PR. The experiment results using the test model conducted to verify the basic performance of PR are also described.

[キーワード] 熱帯降雨観測衛星, 衛星搭載降雨レーダ, クリティカルコンポーネント, 機能確認モデル.

TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), Spaceborne precipitation radar, Critical components, Test model for functional verification.

1. はじめに

TRMM 計画は、世界で初めて降雨レーダを衛星に搭載して、熱帯から亜熱帯にわたる領域の降雨の測定をめざす日米共同の地球観測衛星プロジェクトである。本プロジェクトは、降雨量の定量的かつ3次元分布測定を通して、熱帯の積雲対流を中心とした大気大循環の駆動機

構の解明と、それにより引き起こされる地球規模の水・エネルギー循環の解明に貢献することを目的としている。地球規模の降雨現象は、エル・ニーニョ等の異常気象や気候変動にも深く関係しており、これらの問題に対するTRMM 観測の寄与が強く期待されている⁽¹⁾。

これまで、通信総合研究所は、宇宙からの降雨観測をめざして、1985年以来、米国 NASA と共同で航空機からの降雨観測実験を行い、宇宙からの降雨観測のための観測手法及びデータ解析アルゴリズム等の研究を実施してきた。1987-88年には、日米共同の TRMM フィージビリティスタディが実施され、この中で、通信総合研究所は降雨レーダのシステム検討を担当した⁽²⁾。これらの

*1 宇宙開発事業団 地球観測センター
*2 関東支所 地球観測技術研究室
*3 電磁波技術部
*4 地球環境計測部 電波計測研究室
*5 地球環境計測部

成果を受けて、1988年度以来、TRMM 搭載降雨レーダの主要構成部品（クリティカルコンポーネント）である電子走査アンテナ、固体送受信機等の開発を開始した。1993年までにこれらのコンポーネントを組み合わせた降雨レーダ機能確認モデルを製作し、衛星搭載降雨レーダとしての基本的性能の確認実験を行った。これらの成果は、宇宙開発事業団に引き継がれ、同事業団により、開発モデル及び衛星搭載モデルの製作が実施された。現在、宇宙開発事業団により開発された降雨レーダ搭載モデルは米国 NASA に輸送され、TRMM 衛星本体への組み込みが進行中である。

本報告では、当所で行ってきた TRMM 降雨レーダ実現のためのクリティカルコンポーネント及び機能確認モデルの開発、及びその実験結果について報告する。

第1表 TRMM 搭載降雨レーダに対するミッション要求条件

周波数	14 GHz帯
衛星高度	350 km
走査角	±17°
レンジ方向分解能	< 250 m
水平方向分解能	約4 km (直下点)
最小観測可能降雨強度	< 0.5 mm/h (雨の頂上で)
観測高度範囲	15 km ~ 0 km (直下点のみ地表面下 -5 kmまで)
独立なサンプル数	> 64
アンテナサイドローブレベル	グラウンドクラッターの 影響を除去できること

2. TRMM搭載降雨レーダの概念検討

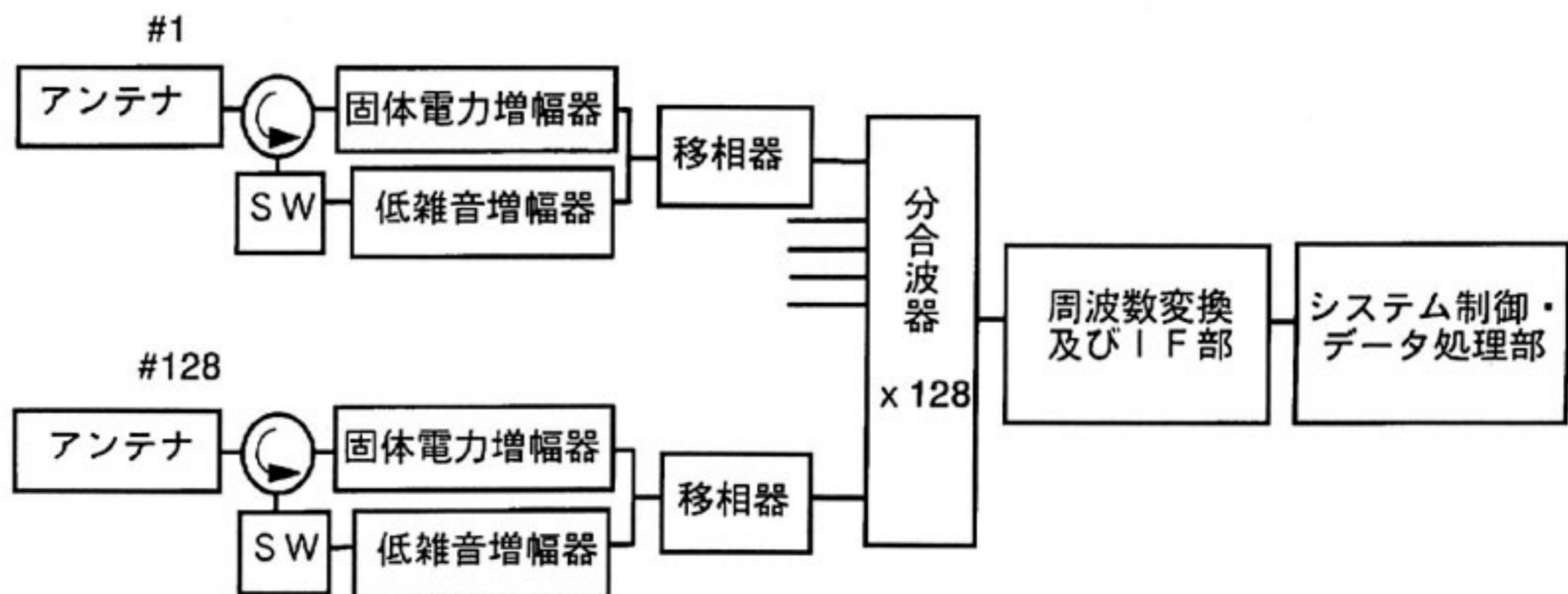
1987年から1988年に行われた TRMM 計画のフィージビリティスタディの結果についてはすでにいくつか報告が行われている^{(2),(3)}。当所は、第1表に示される米国 NASA 側の提案による TRMM 降雨レーダのミッショ

ン要求条件に沿って、システム検討を行い、衛星搭載降雨レーダとしての基本的な設計を行った。その後、これらの結果を基にして、現在の TRMM 搭載降雨レーダの方式として、14 GHz 帯で128 素子からなるアクティブアレイ方式のレーダが決定された。レーダの基本的な構成を第1図に示す。この方式では、RF 部は、固体電力増幅器 (SSPA: Solid State Power Amplifier)、低雑音増幅器 (LNA: Low Noise Amplifier) 及び PIN ダイオード移相器等の固体素子から構成される。さらにアンテナは、アクティブアレイ方式と整合性が高く、かつ電子走査が可能な導波管スロットアレイアンテナを用いる。このようなアクティブアレイ方式は、個々の素子の送信電力は小さく、少数の素子が故障しても、全体の機能低下をもたらさないため信頼性が高いという長所がある。さらに従来の送信管を使用する方式と比べ、長寿命であり、かつ高圧電源が不要な点において優れている。

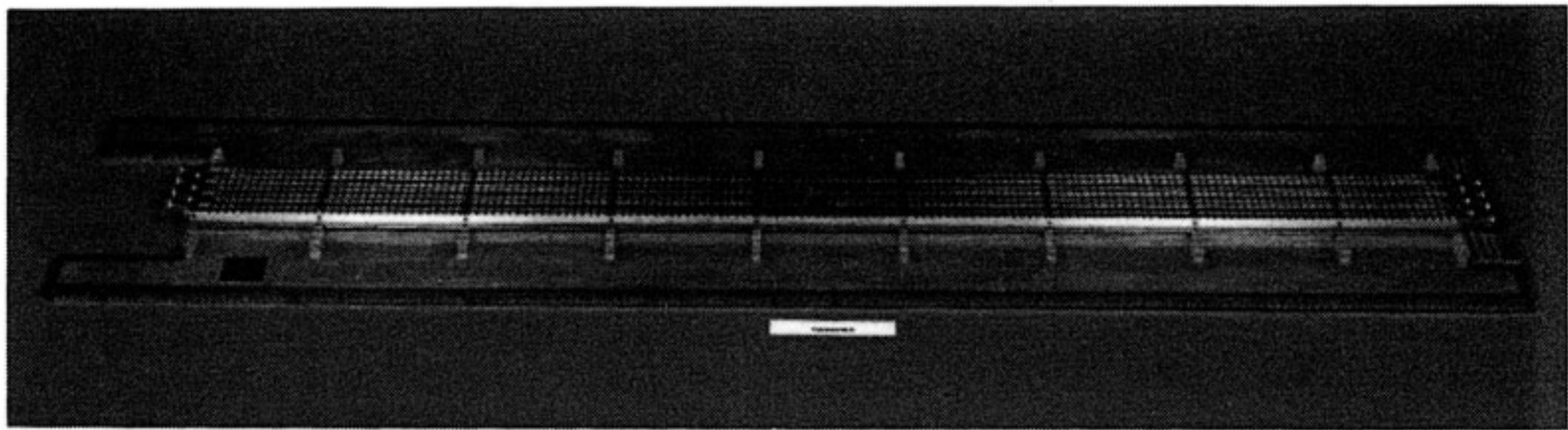
3. クリティカルコンポーネント及び機能確認モデルの開発

3.1 クリティカルコンポーネントの開発

上記のアクティブアレイレーダを実現するために、クリティカルコンポーネントとして、8 素子導波管スロットアレイアンテナ、固体電力増幅器 (SSPA)、低雑音増幅器 (LNA)、5 ビット PIN ダイオード移相器及びサーキュレータ、分合波器等の開発を行った。このうち、8 素子導波管スロットアレイアンテナは、128 素子アレイアンテナの部分モデルとして、試作したもので、外観図を第2図に、主要な性能を第2表に示す。このようなアクティブアレイ方式では、アンテナの性能は、RF 部の性能と一体となって決まる。従って、送信時と受信時のアンテナ特性は同一にはならない。導波管軸方向での



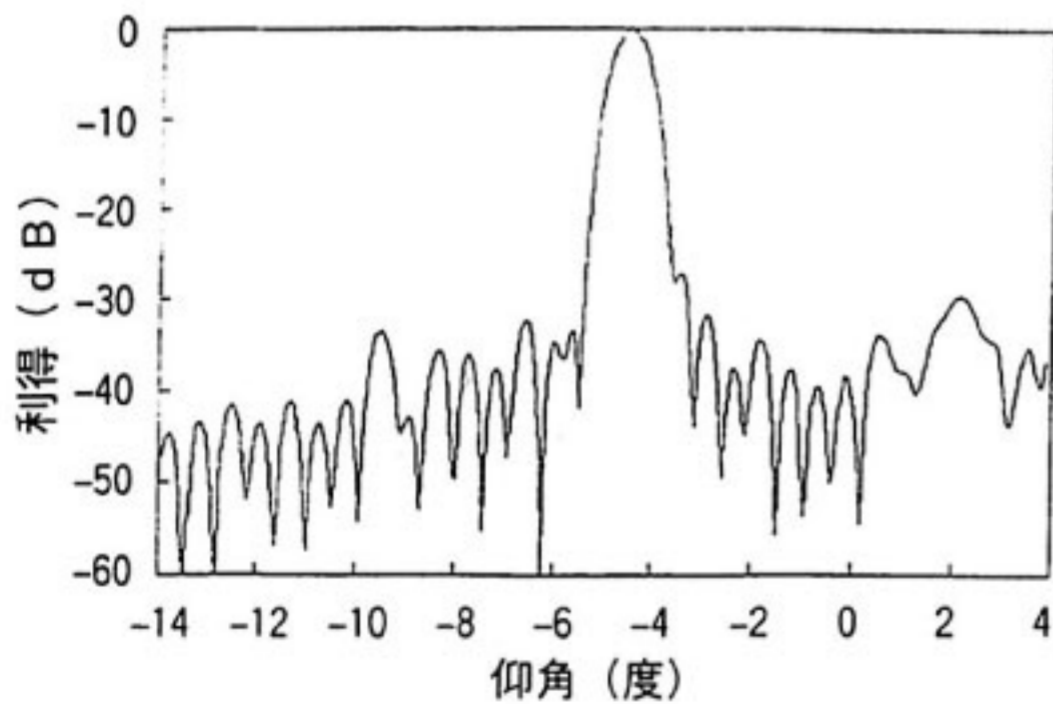
第1図 アクティブアレイ方式による TRMM 搭載降雨レーダの基本的な構成図



第2図 8素子導波管スロットアレイアンテナの外観図

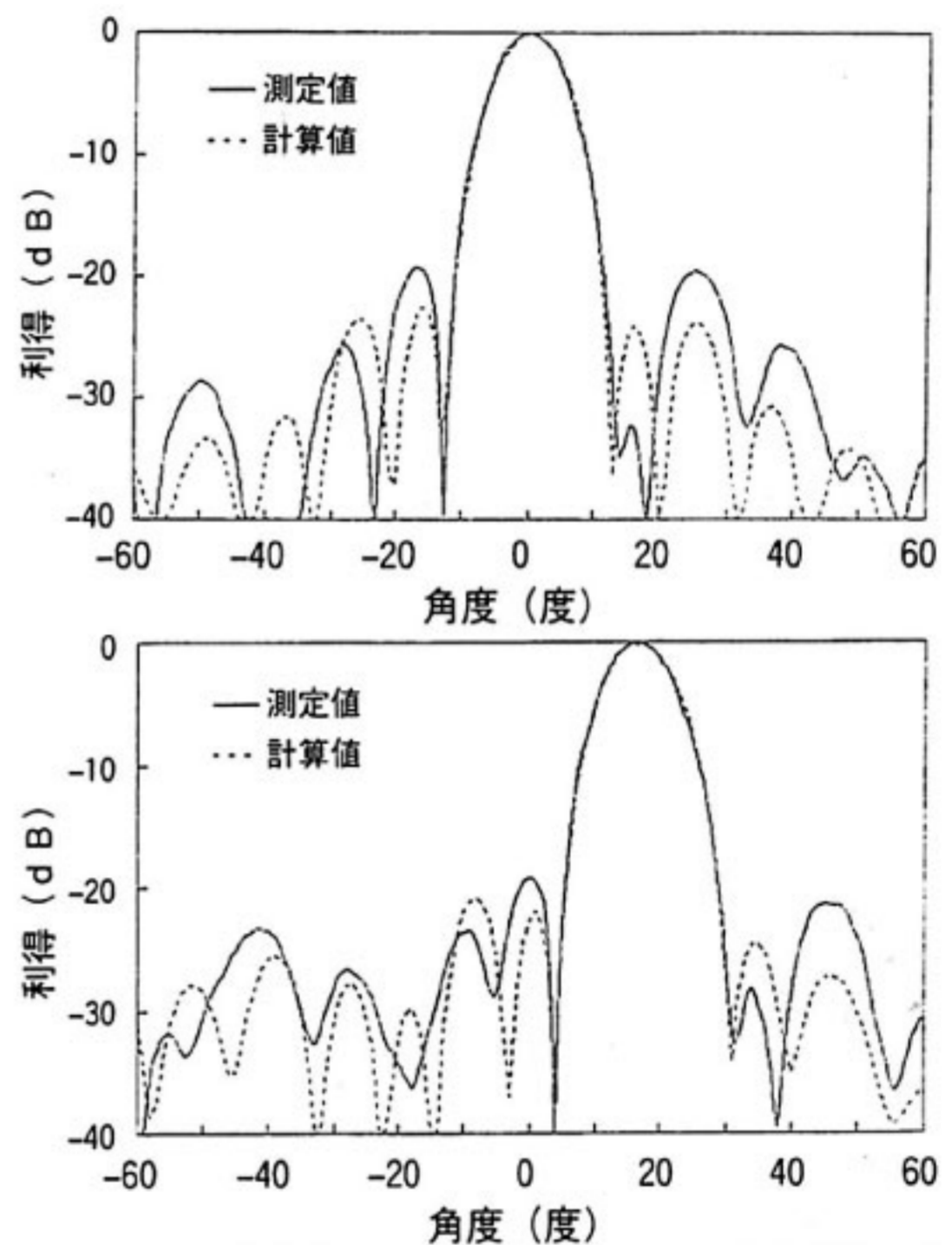
第2表 8素子導波管スロットアレイアンテナの主要特性

	送信	受信
中心周波数	13.8 GHz	
バンド幅	±10 MHz	
長さ	2.2 m	
スロット間隔	16 mm	
偏波	水平偏波	
利得	35.9 dBi	35.7 dBi
ビーム幅		
管軸方向	0.71° ± 0.01°	0.71° ± 0.01°
直交方向	10.19° ± 0.51°	10.53° ± 0.53°
サイドローレベル		
管軸方向	-27.0 dB	-27.0 dB
直交方向	-17.8 dB	-16.7 dB
指向精度(直交方向)	±0.36°	±0.36°
ビームチルト角	4°	4°
走査角(直交方向)	±17°	±17°



第3図 8素子導波管スロットアレイアンテナの導波管軸方向の受信アンテナパターン

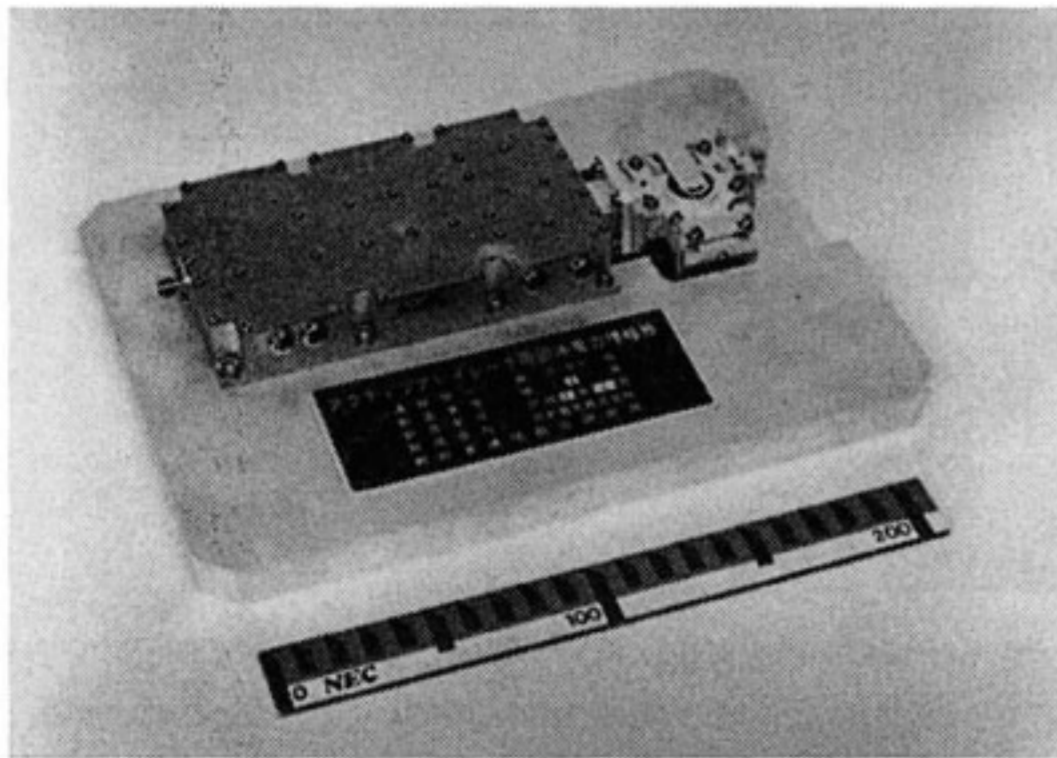
受信アンテナパターンを第3図に示す。アンテナのビーム方向は、機械的な中心方向よりも4°ずれている。サイドローレベルは-27dBである。管軸方向のビーム幅は、約0.7°で実際のTRMM-PRと同じである。導波管軸と直交方向のアンテナパターン例としてビーム走査角が0°と17°における送信パターンを第4図(a)



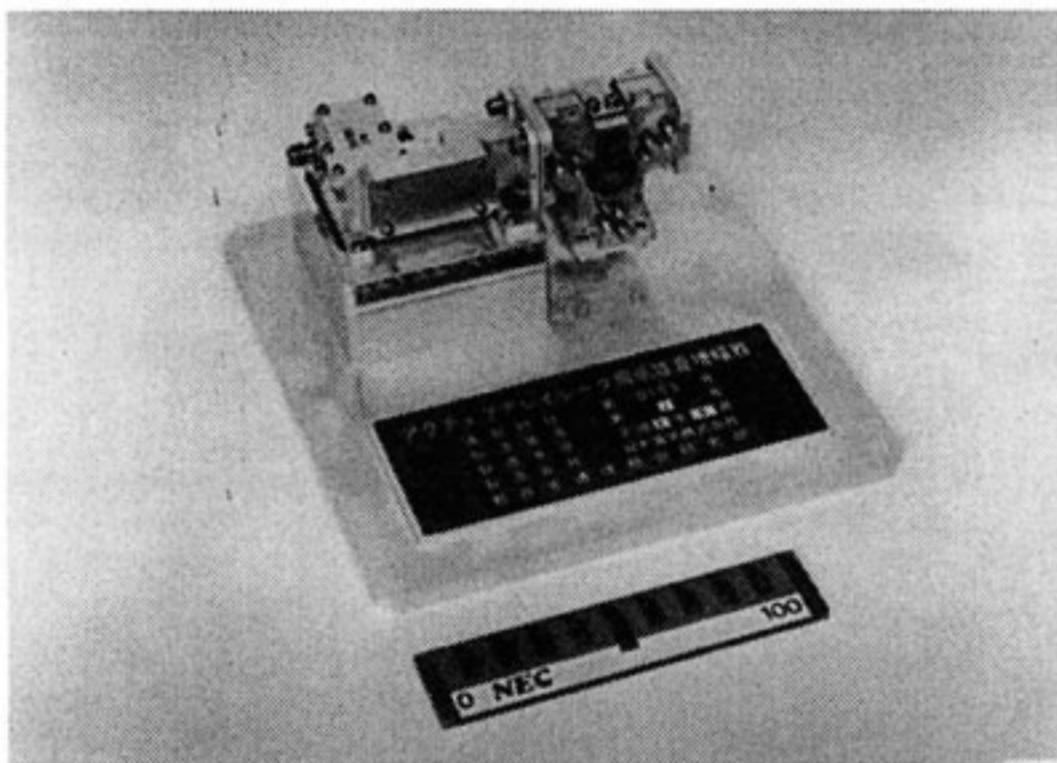
第4図 8素子導波管スロットアレイアンテナの導波管軸と直交方向の送信アンテナパターン：(a)走査角0°；(b)走査角17°

(b)に示す。図中の実線は実測値であり、破線は給電点における振幅、位相の実測値をもとに計算により求めたパターンである。実線と破線の差は、アンテナ測定における周囲の影響とも考えられるが、詳細な解析は行われていない。なお、(a)、(b)両図ともビーム幅は約10°、サイドローレベルは-18dBである。本アレイアンテナはわずか8素子から構成されているため、サイドローレベルを実際のTRMM-PRの要求値まで下げることは困難である。

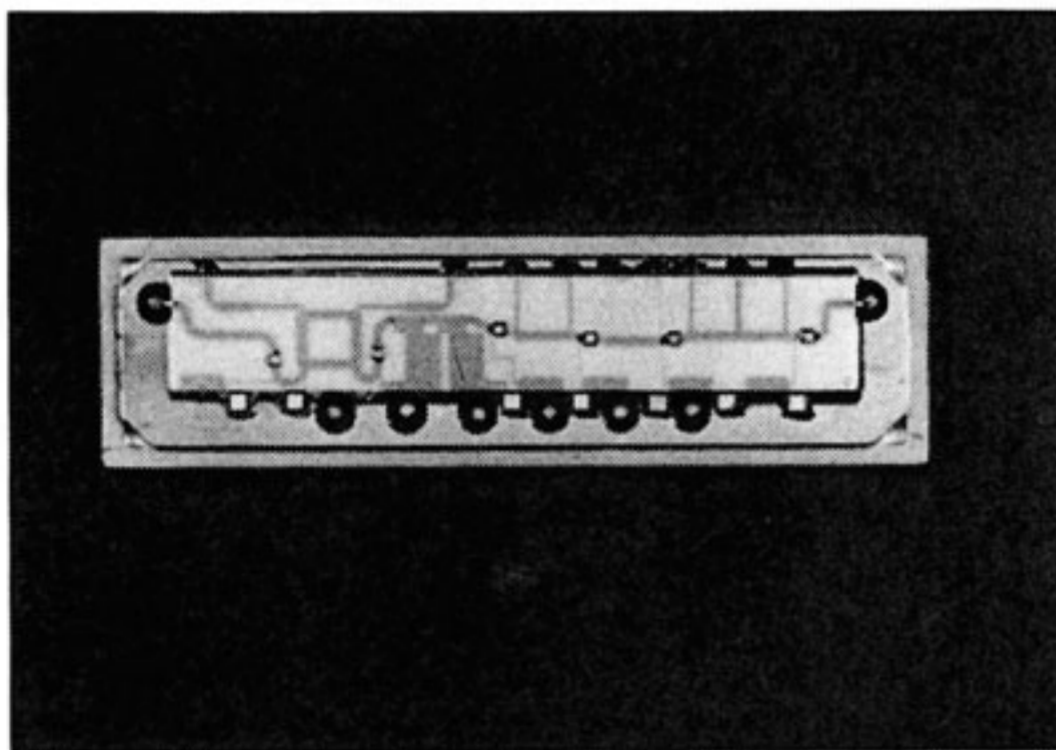
固体電力増幅器(SSPA)、低雑音増幅器(LNA)、5ビットPINダイオード移相器の外観を各々第5、6、



第5図 固体電力増幅器(SSPA)の外観図



第6図 低雑音増幅器(LNA)の外観図



第7図 5ビットPINダイオード移相器の外観図

7図に示し、主要性能を第3表にまとめて示す。これらの性能は当所で開発された素子の性能であって、衛星搭載モデルにおいては、性能や効率がさらに改善されたものが使われている。

3.2 機能確認モデルの開発

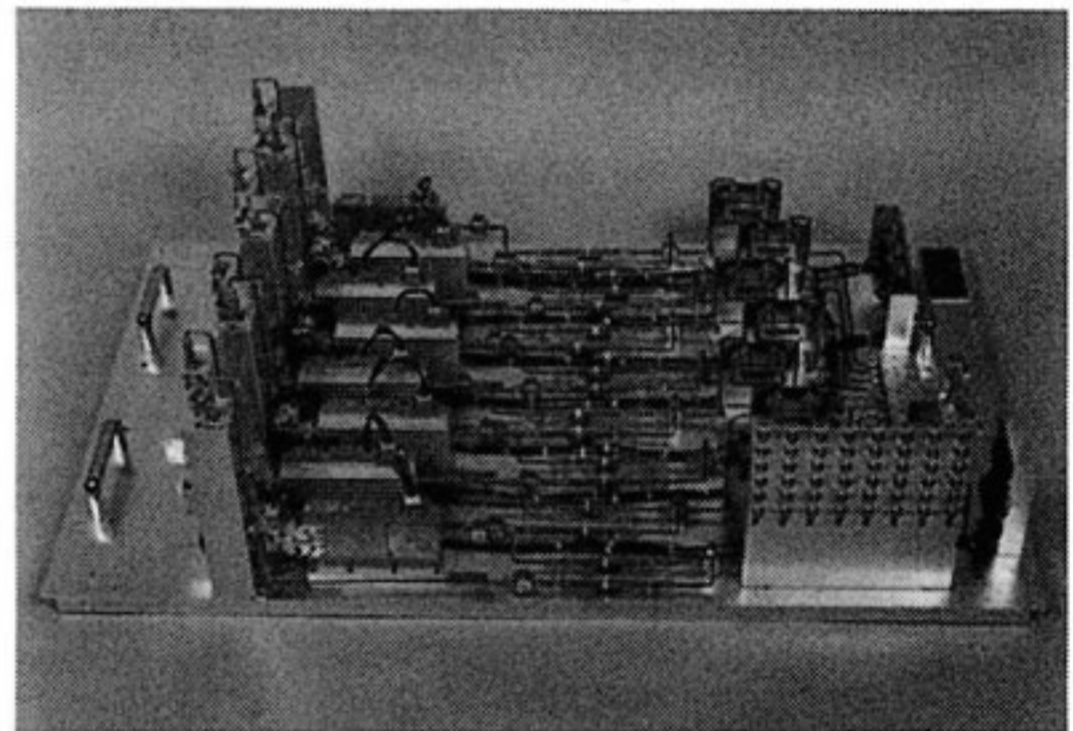
以上述べた素子を使い、降雨レーダの機能確認モデルを製作した⁽⁴⁾。これは、衛星搭載のフルモデルが128素

第3表 固体電力増幅器(SSPA)、低雑音増幅器(LNA)、5ビットPINダイオード移相器の主要性能。通信総研で最初に開発されたもので、機能確認モデルに使用された。いずれも中心周波数13.8GHz、バンド幅：100MHz。

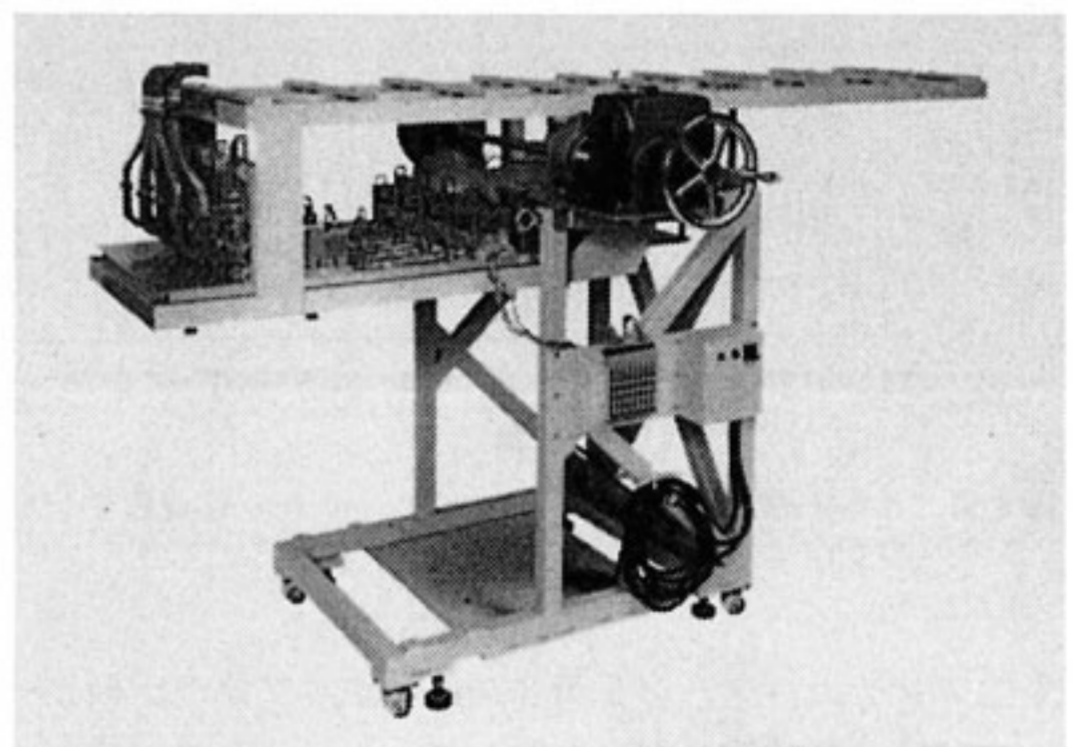
固体電力増幅器(SSPA)	
出力レベル*	40, 39, 36, 32 dBm
利得*	45, 44, 41, 37 dB
帯域内振幅偏差	< 0.1 dB p-p
帯域内位相偏差	< 4° p-p
効率	> 15 %
重量	450 g
低雑音増幅器(LNA)	
利得	30 dB
雑音指数	< 1.8 dB
重量	145 g
PINダイオード移相器	
ビット数	5(11.25°, 22.5°, 45°, 90°, 180°)
挿入損失	< 6 dB
位相誤差	< ±5°
振幅誤差	< 1 dBp-p
消費電力	0.2 W
重量	94 g

不等号は8素子の内の最悪値を示す。

*アレイ上の位置により、4通りの性能の素子を開発した。



第8図 機能確認モデルRF部の外観図



第9図 アンテナ部、RF部、及びIF(中間周波数)部を一つの架台上に取り付けた機能確認モデルの外観図

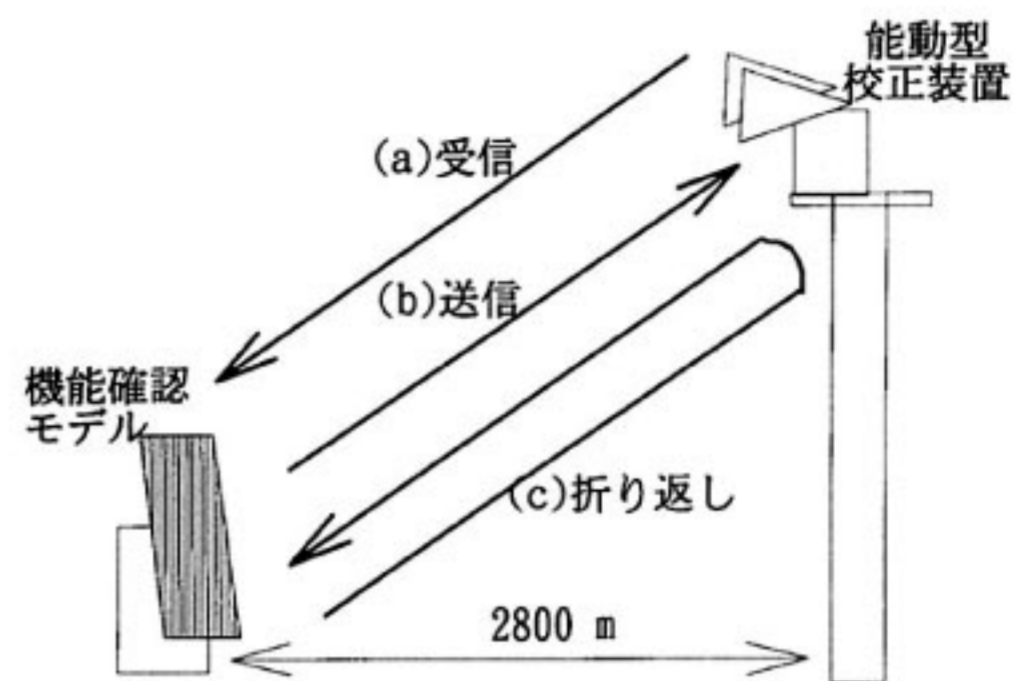
子であるのに対して、中心部の8素子からなる部分モデルである。第8図に、本モデルのRF部の外観を示す。

また、実際にレーダとしての測定を行うために、一つの架台上にアンテナ部と RF 部、さらにパルスの発生及び受信信号検出等の機能をもつ IF（中間周波数）部を取り付けた機能確認モデル試験装置の外観図を第 9 図に示す。

本モデルでは、フルモデルと同様に導波管軸と直交方向に、アンテナビームを、 $\pm 17^\circ$ の範囲で走査できる。ただし、移相器の切り換えは、手動スイッチで行うため、高速のアンテナビーム走査はできない。モデル全体での送信電力は約 12W である。さらにフルモデルと同じく、周波数アジリティ方式を採用している。これは受信データの独立サンプル数を増やすために、13.796GHz と 13.802GHz の 6 MHz 離れた 2 周波で送信パルスを相次いで送信するもので、受信側では、両者を切り分けて、別々に信号を検出する。本モデルでは、両周波数成分を切り分けるために、受信 IF 部に SAW（表面弾性波）フィルターを使用している。

4. 機能確認実験

本機能確認モデルを用いた実験では、アンテナ特性等の基本的測定の後、(1)能動型反射器⁽⁵⁾を用いた折り返し実験と、(2)降雨観測実験を行った。前者の目的は、アクティブアレイレーダのシステム利得を測定するとともに、TRMM 衛星が打ち上げられた後に実施される軌道上での PR の校正手法の研究を行うことである。本実験では、アクティブアレイレーダの送受アンテナ利得を求め、設計値と比較した。また、後者の降雨観測の目的は、実

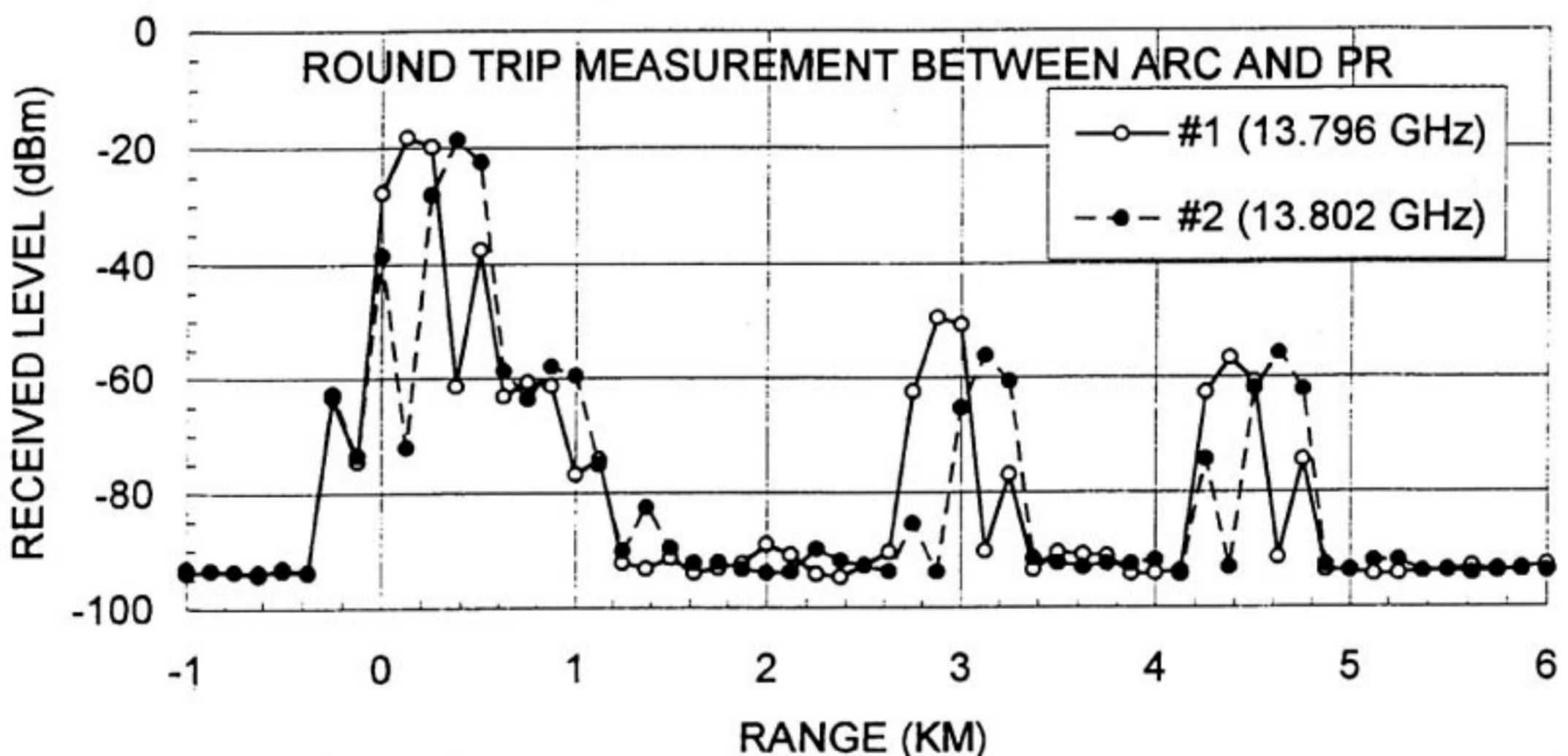


第10図 機能確認モデルと能動型校正装置の対向実験概念図

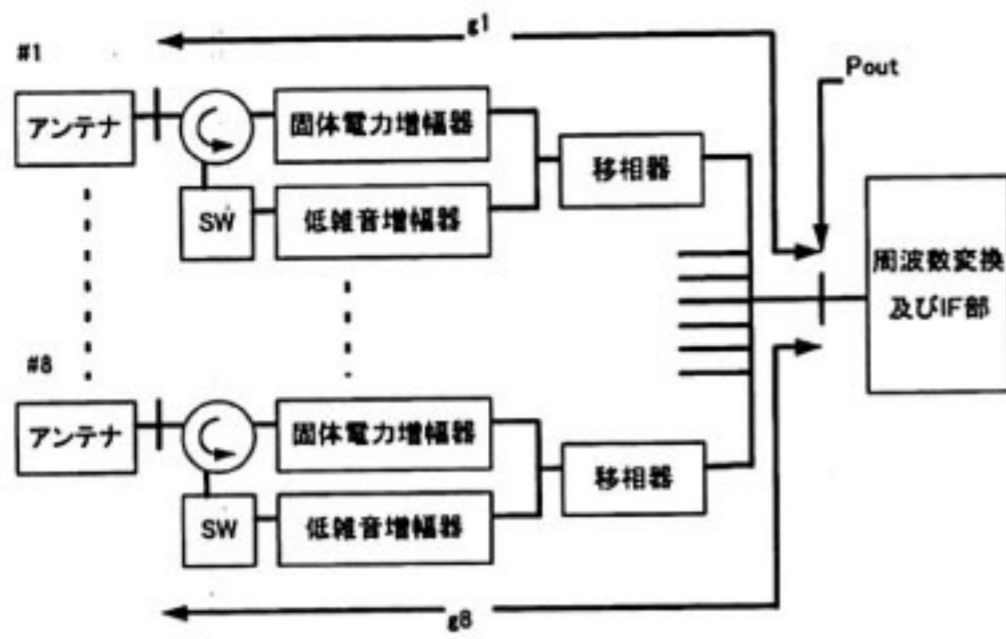
際の降雨を測定し、降雨レーダとしての基本的性能を確認することである。

4.1 能動型反射器折り返し実験

アクティブアレイレーダは、アンテナと送受信機が一体として働き、切り分けることができない。さらに、多数の素子が存在し、素子ごとの特性は分かっても、全体としての特性を直接知ることは困難である。このため、レーダシステムとしての特性を把握するためには、決まった散乱断面積を持つ反射体による反射波を測定する方法が用いられる。しかしながら、通常用いられるコーナリフレクタでは、十分な散乱断面積を得ることができない。このため、内部に増幅回路を持つ反射器である能動型校正装置 (ARC: Active Radar Calibrator) を別途開発した⁽⁵⁾。実際の TRMM 搭載降雨レーダの軌道上での校正にも、同種の能動型校正装置が利用される予



第11図 折り返し実験時の機能確認モデルの受信強度の時間変化。横軸はレーダとして動作したときの距離（レンジ）目盛りで示す。縦軸は分合波器を経て8本の素子の信号が合成された点で見た受信電力を示す。周波数アジリティに対応する2つのチャンネルの受信電力の時間変化を示す。



第12図 機能確認モデルのRF部だけの構成図。受信電力の測定点と各素子のRF部の受信利得 g_i （複素振幅利得）を合わせて示す。

定である。宇宙からの降雨観測では、地表面からは強いエコーが受信される。このため、地表においた校正装置の信号は地表面のエコーに埋もれてしまい、識別が困難になる可能性がある。このため、校正装置の内部には遅延回路を設け、校正装置の出力が地表面エコーと容易に識別できるように考慮した。

降雨レーダ機能確認モデルと、能動型校正装置との折り返し実験を、鹿島宇宙通信センターにおいて実施した⁽⁶⁾。能動型校正装置は同センターから2800 m離れた火力発電所の煙突上のステージに機能確認モデルと対向して設置した。実験の概念図を第10図に示す。実験では、(a)能動型校正装置から送信し、機能確認モデルで受信する受信モード、(b)機能確認モデルから送信し、能動型校正装置で受信する送信モード及び(c)機能確認モデルから送信し、能動型校正装置で折り返し、機能確認モデルで受信する折り返しモードの3通りの測定を行った。能動型校正装置の送受信特性及び散乱断面積は校正されて既

知であるとする、(a)の受信モードでは、機能確認モデル側の受信機能の校正ができる。(b)では、機能確認モデルの送信機能が校正でき、(c)の折り返しモードにより機能確認モデルの送受信全系の校正ができる。

第11図に、折り返し実験時の機能確認モデル側での受信波形を示す。横軸は、機能確認モデルがレーダとして動作したときの距離（レンジ）を示す。縦軸は、8本の素子からの信号が分合波器を経て合成された点で見た受信電力を示す。この時の受信電力の測定点を示すために、機能確認モデルのRF部の構成図を第12図に示す。このなかで測定される受信電力は、 P_{out} で示されている。

第11図には、周波数アジリティの2つの周波数チャンネル（第1チャンネル：13.796GHz；第2チャンネル：13.802GHz）に対応する受信電力の時間変化が示されている。横軸の原点は、第1チャンネルの送信パルスの立ち上がり時間である。横軸の原点から約1 kmの間にある山は、送信パルスが受信側に漏れ込んだものである。

距離が2800 mの点に現れているピークは、煙突による反射エコーである。さらに煙突のエコーから1500 m後ろに現れているピークが能動型校正装置から折り返された信号である。これは校正装置内部の遅延量が10 μ sであることに対応している。この点の受信強度が測定で必要な値である。図中の両チャンネルの信号の各ピークの前後には小さなピークが現れている。これは受信回路内のSAWフィルタの特性に起因するものであり、本測定で必要な主ピークレベルの値には影響しない。

実験結果を整理し、機能確認モデルのレーダとしての性能をまとめた結果が第4表である。合わせて、同モデルの送受アンテナ利得を計算し、設計値との比較を示す。ここでは、能動型校正装置の送信電力、受信感度及びレー

第4表 機能確認モデルと能動型校正装置の対向試験の測定結果。2つの周波数チャンネルに対して3通りの測定方法に対する結果を示す。合わせて送受アンテナ利得を求め、設計値と比較した。

周波数チャンネル	測定法（機能確認モデルからみて）	機能確認モデルの性能の測定結果	機能確認モデルのアンテナ利得（設計値）
第1チャンネル (13.796 GHz)	受信モード	受信システム利得： 40.4 dB - 受信機RF部合算利得： -4.7 dB 差（受信アンテナ利得）： 35.7 dB	受信アンテナ利得 35.7 dB
	送信モード	E. I. R. P.（機能確認モデル）： 75.8 dBm - 全送信電力： -40.0 dBm 差（送信アンテナ利得）： 35.8 dB	送信アンテナ利得 35.9 dB
	折り返し	送受信システム利得： 116.6 dB	
第2チャンネル (13.802 GHz)	受信モード	受信システム利得： 40.2 dB - 受信機RF部合算利得： -4.8 dB 差（受信アンテナ利得）： 35.4 dB	受信アンテナ利得 35.7 dB
	送信モード	E. I. R. P.（機能確認モデル）： 75.7 dBm - 全送信電力： -40.0 dBm 差（送信アンテナ利得）： 35.7 dB	送信アンテナ利得 35.9 dB
	折り返し	送受信システム利得： 116.6 dB	

ダ断面積は校正されて既知であるとしている。以下に、機能確認モデルの送受信アンテナ利得の算出方法を簡単に示す。能動型校正装置からの送信により、機能確認モデルのアンテナ位置に作り出される電力密度を S とし、機能確認モデルのアンテナ素子の受信面積を A_e とすると、受信電力 P_{out} は次のように表せる。

$$P_{out} = \left| \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i=1}^n g_i \right|^2 S A_e \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 g_i は第12図中に示されているように i 番目の素子の RF 部において、途中の損失を含む複素振幅利得である。 n は素子数であり、ここでは 8 である。対向する能動型反射器の等価等方放射電力 ($E.I.R.P.(ARC)$) と、伝搬距離 r を用いて、電力密度 S は、

$$S = \frac{E.I.R.P.(ARC)}{4\pi r^2} \quad \dots\dots(2)$$

で与えられる。ここで、受信 RF 部の電力利得の 8 素子にわたる平均 (平均 RF 受信利得) は、

$$\overline{|g|^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |g_i|^2 \quad \dots\dots(3)$$

であり、これを(1)に代入すると、

$$P_{out} = S n A_e \overline{|g|^2} W \quad \dots\dots(4)$$

となる。ここで、 W は以下の式で与えられる。

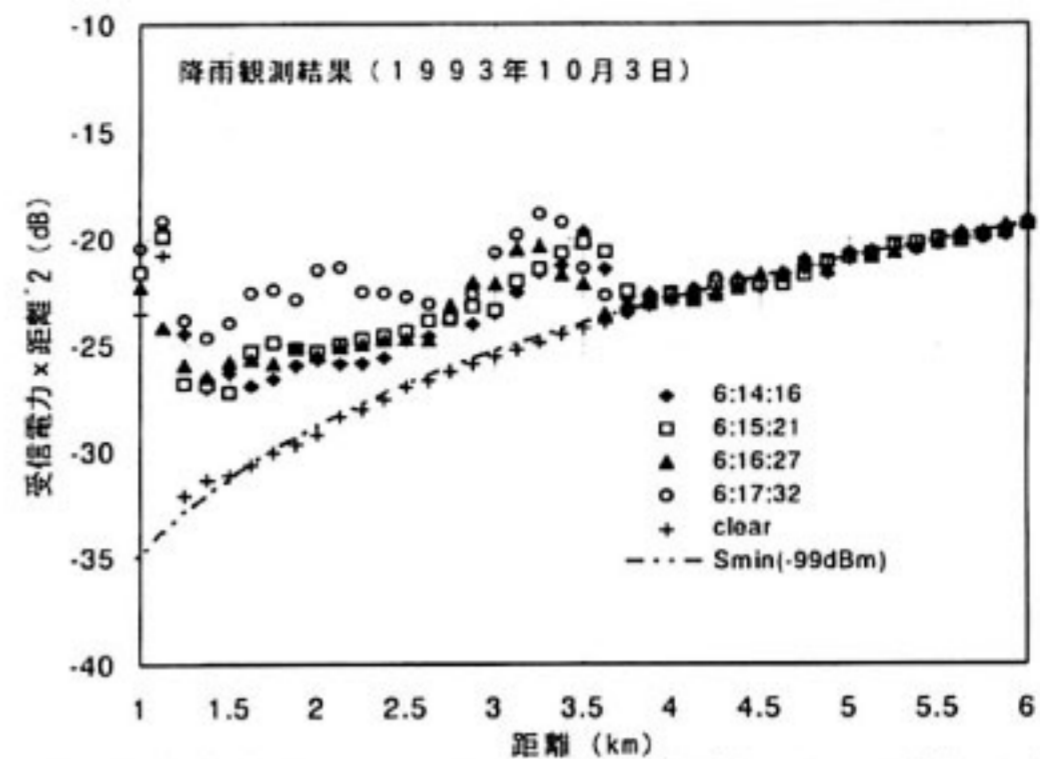
$$W = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i \right|^2 / \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |g_i|^2 \quad (0 \leq W \leq 1) \quad \dots\dots(5)$$

そこで、アクティブアレイレーダの受信アンテナ利得は以下の式で与えられる。

$$G_r = (4\pi/\lambda^2) n A_e W \quad \dots\dots(6)$$

実際の測定においては、与えられた S のもとで、平均 RF 受信利得 $(4\pi/\lambda^2) n A_e \overline{|g|^2} W$ (受信アンテナ利得と平均 RF 受信利得の dB 値での和) が測定値 P_{out} から計算される。ここで、平均 RF 受信利得 $\overline{|g|^2}$ は各アレイ素子の受信 RF 部の利得を平均して求める。第 4 表においては、このようにして求めた受信アンテナ利得は設計値と良い一致を示す。

機能確認モデルの送信側の機能測定のためには、能動型校正装置をレーダ波の受信機として使用する。機能確認モデルの各素子からの送信電力は、各アンテナ給電点において測定できるため、これらを合計して全送信電力を求めることができる。測定からは機能確認モデルの $E.I.R.P.$ が求められるため、全送信電力との差から送信



第13図 機能確認モデルによる降雨受信記録. 4つの異なる時間での鉛直方向の降雨プロフィールが示されている。縦軸は、受信電力に距離の2乗をかけたものである。推定される受信機雑音レベル (S_{min}) を合わせて示す。

アンテナ利得を求めることができる。送受信ともに測定から得られたアンテナ利得は、設計値とよく一致している。また、折り返しにおける送受信システム利得は、片道の測定の和によく一致しており、測定結果の信頼性が高いことを裏付けている。このような測定は、軌道上の TRMM-PR の校正としても定期的な実施される予定である⁽⁷⁾。今後さらに、能動型校正装置による長期的な校正精度の評価が必要である。

4.2. 降雨観測実験

機能確認モデルをレドーム付きのシェルター内に設置し、降雨測定を行った。このとき、アンテナは真上方向に向け、降雨の垂直プロフィールを測定した。本レーダは、送信機出力が小さいため、降雨レーダとしての感度は低い。近距離の降雨エコーは受信可能である。第13図に、降雨観測時の受信電力の距離特性を示す。縦軸は、受信電力に距離の2乗をかけたもので、降雨レーダで通常用いられるレーダ反射因子と比例関係がある。第11図で見たように、本レーダは、送信パルスの漏れ込みの影響がパルス送信後にも現れる。このため、距離にして1 km 以内では有意なデータがとれない。第13図はレーダからの距離が1 km 以上の範囲を表示している。

第13図の結果は1993年10月3日の降雨時のものであり、併せて降雨がないときの受信電力の距離特性も示されている。高度3.5km 以下で降雨による受信レベルの上昇が認められる。このときの雨量は、5 mm/h 程度である。本レーダの受信電力を降雨量に換算しても、概ね妥当な値が得られる。高度3.3km 付近の信号強度の上昇は、降雨の融解層 (ブライトバンド) に対応していると考えられる。これよりも高い高度では降雨のエコーは弱くなるため、受信機雑音に埋もれて検出されていない。同図には、最小受信感度 (S_{min}) を、RF 部入力端換算

で -99dBm とした雑音レベルのカーブが示されている。本モデルは、RF 部の利得が小さいことや、受信 IF 部で、広帯域のフィルターを使用している等の理由により、レーダ受信機としては感度は低い。

以上の結果は、TRMM 搭載の降雨レーダ方式による降雨観測機能を実証したとともに、マイクロ波帯におけるアクティブアレイレーダによる数少ない降雨観測結果と考えられる。アクティブアレイ方式を気象レーダに用いると、高速でかつ自由度の高いアンテナ走査やアンテナパターンの変形等が可能になり、各種の新しい応用の可能性も考えられる。

5. おわりに

通信総合研究所でこれまで、TRMM 搭載降雨レーダ実現のために実施してきた研究について報告した。TRMM 搭載用として、14GHz 帯における全固体素子からなるアクティブアレイ方式による降雨レーダを実現するため、アレイアンテナ及び送受信増幅器等のクリティカルコンポーネントの開発を実施した。さらに、8 素子からなる機能確認モデルを製作し、レーダとしての基本的特性を実証した。また、能動型校正装置による測定は、アクティブアレイレーダ全体としての性能を測定するためには有効な方法であることを証明した。今回の測定手法や解析手法は、TRMM 搭載降雨レーダの校正としてそのまま応用できるものである。さらに、機能確認モデルによる降雨測定では、降雨レーダの基本的性能を実証するとともに、マイクロ波帯アクティブアレイレーダによる降雨観測の可能性を示したものである。

現在、TRMM 搭載降雨レーダの開発は、宇宙開発事業団の手で実施され、これまでに開発モデル及び衛星搭載モデルが製作されている。引き続き衛星搭載降雨レーダの校正及び衛星観測結果の検証手法に関し検討し、TRMM 衛星観測から、より良い成果が得られるように努力する必要がある。

謝 辞

本研究は、宇宙開発事業団との緊密な協力及び支援のもとに実施されたものであり、関係各位に厚くお礼申し

上げます。さらに、機器開発にあたり、多大な努力を払われた株式会社東芝及び日本電気株式会社関係各位にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) J. Simpson, R. Adler, and G. North, "A proposed Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite", Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 69, No. 3, pp. 278-295, March, 1988.
- (2) K. Nakamura, K. Okamoto, T. Ihara, J. Awaka, and T. Kozu, "Conceptual design of rain radar for the Tropical Rainfall Measuring Mission", Int. J. Satellite Communications, Vol. 8, pp. 257-268, 1990.
- (3) K. Okamoto, ed., "Feasibility study of rain radar for the Tropical Rainfall Measuring Mission", J. Commun. Res. Lab., 35, 145, pp.109-208, July, 1988.
- (4) H. Kumagai, K. Okamoto, T. Kozu, T. Ihara, "Development of an eight-element-model for TRMM precipitation radar", O/E Aerospace and Remote Sensing, SPIE, Proceedings, Vol. 1935, pp. 12-16, Orlando, Apr. 1993.
- (5) 熊谷博, 古津年章, 岡本謙一, "TRMM 降雨レーダ能動型校正装置の開発", 通信総研季, 42, 3, pp.287-291, Sept. 1996.
- (6) H. Kumagai, T. Kozu, M. Satake, H. Hanado, and K. Okamoto, "Development of an active radar calibrator for the TRMM Precipitation Radar", IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol. 33, No. 6, pp. 1316-1318, Nov. 1995.
- (7) T. Kozu, T. Kawanishi, K. Oshimura, M. Satake, and H. Kumagai, "TRMM precipitation radar: calibration and data collection strategies", IGARSS'94, pp. 2215-2217, 1994.



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



花土 弘
Hiroshi HANADO
鹿島宇宙通信センター 地球観測技術研究室
レーダーリモートセンシング
E-Mail: hanado@crl.go.jp



佐藤 健治
Kenji SATO
鹿島宇宙通信センター 地球観測技術研究室
マイクロ波リモートセンシング
E-Mail: satoken@crl.go.jp



堀江 宏昭
Hiroaki HORIE
鹿島宇宙通信センター地球観測技術研究室
マイクロ波リモートセンシング
E-Mail: horie@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



井原 俊夫
Toshio IHARA
電磁波技術部
電波伝搬・ミリ波利用
E-Mail: ihara@crl.go.jp



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



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

