招待論文-

熱帯降雨観測衛星搭載降雨レーダの研究開発とその観測成果

岡本 謙一^{†a)} 重 尚一^{††}

TRMM Precipitation Radar and Its Observation Results

Ken'ichi OKAMOTO^{†a)} and Shoichi SHIGE^{††}

あらまし 熱帯降雨観測衛星(TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission)は,1997年11月28日に打 ち上げられて以来,現在に至るまで,約10年以上も順調に,熱帯・亜熱帯降雨の観測を継続している.TRMM は,世界で初めてのアクティブフェイズドアレー方式の降雨レーダ(PR)を搭載しており,台風などをはじめ とする様々な降雨システムの三次元構造の観測にその威力を発揮してきた.論文では,TRMM 衛星のミッショ ンの目的,搭載センサの概要,TRMM 降雨レーダシステムの概念設計時の諸検討,TRMM 降雨レーダシステ ムの概要,TRMM 降雨レーダデータ解析処理アルゴリズムシステム,様々な観測成果(台風,潜熱加熱など), TRMM を継承する全球降水観測計画(GPM: Global Precipitation Measurement)主衛星搭載2周波降水レー ダ(DPR)並びに更に次世代の衛星搭載の降雨レーダ技術についての展望などについて解説する. キーワード 熱帯降雨観測衛星,降雨,降雨レーダ,降雨レーダアルゴリズム,全球降水観測計画衛星

1. まえがき

降水は,地球的規模の水循環,エネルギー循環,大 気大循環の駆動源であり,気候変動や異常気象現象と 深いかかわりがあり,人間活動や社会システムに重要 な影響を及ぼす.信頼性のある地球的規模の降水観測 データは,水循環モデルの構築,生態系環境の維持, 農業生産等の社会基盤にとって必要不可欠なもので, 人類にとっての昔からの重要な課題であった.地上雨 量計による観測は本質的に点観測であり,全球規模の 降水量の時間空間変動を正確に測定することは困難で ある.また,地上の降雨観測網は,北半球の先進国地 域に偏在している.とりわけ,熱帯地方は,大部分が 海洋や熱帯雨林に覆われており,地上からの降雨観測 が困難である.このため,衛星からのリモートセンシ ングがほぼ唯一の観測手段となる.既に1970年代か ら,静止気象衛星やNOAA衛星搭載の赤外の雲画像

†鳥取環境大学環境情報学部,鳥取市

Faculty of Environmental and Information Studies, Tottori University of Environmental Studies, 1–1–1 Wakabadai-kita, Tottori-shi, 689–1111 Japan

^{††} 大阪府立大学大学院工学研究科,堺市 Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai-shi, 599-8531 Japan

a) E-mail: kokamoto@kankyo-u.ac.jp

を通して,降水量を推定してきたが,赤外放射計は, 雲の下層部の降雨の有無にかかわらず,雲の上層部か らの放射輝度温度情報のみから降雨強度を推定して おり,降雨そのものを直接観測することが困難である という,原理的な問題を有している.これに対して近 年,赤外放射計に比べて降雨からの放射をより直接的 に観測できる衛星搭載のマイクロ波放射計が全世界で 利用されるようになってきた.衛星搭載マイクロ波放 射計の実現以来,降水強度の観測は信頼に値する定量 的なものとなってきた.このことは,熱帯降雨観測衛 星(TRMM:Tropical Rainfall Measuring Mission) 搭載の世界で初めての降雨レーダの実現によって更に 加速された.以下,TRMM 搭載降雨レーダとその観 測成果について紹介する.

2. 熱帯降雨観測衛星(TRMM)衛星の 概要

全世界の降雨量の 2/3 以上を占める熱帯降雨は,地 球規模の大気循環を駆動するエンジンの役割を果たし ている重要な物理量であるにもかかわらず,観測が困 難な量である.特に,熱帯太平洋域では広大な海洋が 広がっており,陸上では熱帯雨林が広がっており,観 測データは非常に少ない領域である.したがって,熱 帯降雨を観測するためには衛星観測しか方法がないと いっても過言ではない.このために,降雨観測センサ を搭載した TRMM 衛星が計画された [1].

TRMMは, 1997年11月28日打ち上げられた日 米共同の人工衛星であり, エルニーニョ現象をはじ めとする地球的規模の気候変動に影響を及ぼす熱帯 及び亜熱帯降雨を観測することを目的とする[2],[3]. TRMM の軌道は,高度 350 km (衛星のミッション寿 命を延ばすために 2001 年8月から, 大気密度の薄い 高度 402.5 km に上昇), 軌道傾斜角 35°の円軌道で あり,経度 0°~360°,緯度 ±35°の範囲を緯度経度 5°×5°の格子に分けて,各格子ごとの月平均降雨強 度を 20%の精度で観測することを目的とした.軌道 傾斜角 35°をとったのは,熱帯,亜熱帯降雨(特に 梅雨前線)の観測頻度を増やすためであったが,これ によって同時に,様々な地方時刻で降雨観測を行うこ とができるようになった.通常の地球観測衛星は,極 軌道に近い軌道傾斜角を有する太陽同期軌道をとり, 地方時がほぼ同じ時刻において地表を観測する.しか しながら,降雨の日周変化が顕著な熱帯・亜熱帯(特 に陸上)において,特定の地方時のみ降雨を観測すれ ば,観測降雨強度にバイアスを有することになるので, TRMM 衛星は様々な地方時刻で降雨観測を行う必要 があった.

TRMM 衛星の外観を図1 に示す.TRMM 衛星 は,降雨観測用のセンサとしてマイクロ波放射計 (TMI:TRMM Microwave Imager),可視赤外放射 計(VIRS:Visible Infrared Scanner)並びに我が国 が世界で初めて開発した衛星搭載用降雨レーダ PR (Precipitation Radar)を搭載している.TMIは,米 国の軍用気象衛星 DMSP 搭載のマイクロ波放射計 SSM/I の流れをくむ機械的走査型のマイクロ波放射



Tropical Rainfall Measuring Mission(TRMM)

図 1 TRMM 衛星 Fig. 1 TRMM satellite.

計である.観測周波数は,10.65,19.35,21.3,37, 85.5 GHz の 5 周波数を有し, 21.3 GHz 以外は, 垂直 偏波と水平偏波の受信ができる 9 チャネルの全電力タ イプの受信機から構成される.入射角 49°の円錐状機 械的走査を行い,走査幅は760kmである.水平距離 分解能は,6~50km である.海上の降雨観測には,主 に低い周波数帯による降雨からの放射の観測データが 用いられ,陸上の降雨観測には高い周波数帯による降 雨上空の雪氷の散乱の観測データが利用される. VIRS は、観測波長が、0.63、1.61、3.75、10.8、12 µmの 5 波長であり, 走査幅 720 km のクロストラック(衛 星進行方向と直角)走査を行い,水平距離分解能は 2km である.可視から赤外までの五つの波長の放射を 受信し, 雲画像を取得する. PRは, 雨滴によるレー ダ送信電波の散乱電力を受信して,降雨強度を推定す る. PR は, パルスレーダであり, レンジ方向の分解 能を有する.これによって降雨の三次元的構造を観測 することが可能であり,これまで観測が困難であった 台風やハリケーンの内部構造を観測することに成功し てきた.また,エルニーニョの時期と通常の時期とで は,降雨の全世界的な分布が大きく異なることを明確 に示すことに成功した.また, TRMM 衛星は, この ほかに, CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System: 雲及び地球放射エネルギー観測装置) と LIS (Lightning Imaging Sensor: 雷観測装置)と 呼ばれるセンサを搭載している. CERES は, 可視か ら赤外までの広いスペクトル帯の雲及び地球表面から の放射を受信する.LISは, 雷の放電頻度の地球規模 での分布を測定する.TRMM 衛星の設計は,3年で あるが, 1997年11月28日の打上げ以来, 設計寿命 をはるかに超えた現在に至るまで,約10年近く降雨 データを収集しつつある.この間, CERES 以外のセ ンサは,不具合なく動作し,データの収集を続けてい る.また,衛星の本体であるバス機器も太陽電池パド ルの駆動系に劣化が見られる以外は順調に動作して いる.

TRMM 降雨レーダシステム

3.1 TRMM 降雨レーダの概念設計

TRMM 衛星の構想は, 1985 年ごろに米国 NASA ゴ ダード宇宙飛行センターの G. North, T. Wilheit, 並 びに O. Thiele たちによって提案された.同年, NASA ゴダード宇宙飛行センターで開催された TRMM に 関する国際科学会合の後, 1986 年 6 月に開催された 表 1 TRMM 降雨レーダに対するミッション要求条件 Table 1 Mission requirement for the TRMM precipitation radar.

Frequency	13.8GHz
Satellite altitude	350km
Scan swath	215km(contiguous mapping)
Scan angle	± 17 $^{\circ}$
Range resolution	≤250m
Horizontal resolution	around 4 km at nadir
Minimum measurable rain rate	0.5 mm/h at storm top
Observation Range	at nadir 15 km + 5 km(mirror image)
	other than at nadir 15 km / $\cos\theta$ $_{\rm n}$
	(θ , is the maximum scan angel)
Number of independent samples	around 64
Antenna sidelobe level	low enough to suppress the effect of
	ground clutter for low rain rates

宇宙分野における日米常設幹部連絡会合(SSLG)に おいて,日米共同で新規の協力項目として提案,承認 された.同年12月より,米国側の強い要請によって, SSLG のもとで日米両国の科学者を集めて様々な観点 から Feasibility Study が約1年間実施され, 1988年 4月に報告書が完成した.同 Feasibility Study におい て,当時の郵政省通信総合研究所は降雨レーダを担当 し,NASA 側の科学者側によって示された最低限度の ミッション要求条件に基づいて,様々なタイプの降雨 レーダについて検討した[4],[5].このミッション要求 条件を表1に示す.周波数については,当初は,宇宙 研究用に二次業務として割り当てられていた周波数の うちの2周波数(13.8 GHz, 24.15 GHz)を対象とし て考えたが,衛星搭載の重量,寸法並びに消費電力の 制限から,最終的には,13.8 GHzの1 周波数のレー ダとなった.降雨減衰の影響を極力減らすためにも, 水平方向の分解能の約4kmを達成するためにも,ま た H-II ロケットに搭載可能なアンテナサイズ (約3m 以下)を実現するためにも, 13.8 GHz の周波数の選 択は妥当なものであったと考えられる.走査角(ある いは走査幅)は、大きいほどよいわけであるが、走査 角が大きくなると、アンテナビーム幅とパルス幅で決 まるレンジビンの鉛直分解能が急激に劣化すること, サイドローブから混入するグランドクラッタが増加す ること、一つのアングルビン(アンテナビームが指向 する方向)方向の独立サンプル数を確保する必要があ ることなどの条件から走査角はむやみには大きくす ることはできない.また,マイクロ波放射計で採用さ れているコニカルスキャンは,独立サンプル数を確保 するためには不利であり,結局アンテナビームは,鉛

直下方向を中心にして,衛星の進行方向に直交する平 面内を往復走査する方式をとることにした.アンテナ ビームが走査範囲をすき間なく走査するには,衛星が 水平分解能の約4kmの距離を移動する時間の間(衛 星の地表軌跡の移動速度を 7.3 km/秒とするとき,約 0.6 秒となる) に ±17° の範囲を走査する必要がある. このような高速でアンテナビームを走査するには,機 械的な走査よりも電子的な走査が有利となってくる. PRの概念設計において、レーダタイプを選択する主 要技術課題として,(1)パルス圧縮方式か,通常の非 圧縮パルスレーダか,(2)パッシブアレー方式か,ア クティブアレー方式か,(3) 導波管スロットプラナー アレーアンテナ方式かオフセットシリンドリカルパラ ボラアンテナ方式か,の3点が比較検討された[6].結 論的には,パルス圧縮方式は,地表面クラッタの影響 を受けないで降雨を観測するためには,レンジサイド ローブレベルを -60 dB 程度に抑える技術開発の必要 性があることから採用されなかった.アンテナの開口 径は,アンテナビーム幅,利得,サイドローブ特性な どによって決まる.アレー素子間隔は,最大走査角に おいてグレーティングローブの生じないための条件よ り決まる.導波管スロットプラナーアレーアンテナの 場合のアンテナ開口径は,約2.1mとなる.一方,シ リンドリカルパラボラアンテナのビーム走査方向の寸 法は,ビーム走査を行うため一次ホーンアンテナの配 列の長さよりもかなり大きく約3mとなる.このた めに,また,アンテナタイプとしては,搭載性の観点 から小さい占有面積をもつ導波管スロットプラナーア レーアンテナが選ばれた.

パッシブアレー方式とは,送信機及び受信機に システム全体で共通の進行波管増幅器(TWTA: Travelling Wave Tube Amplifier)及び低雑音増幅 器(LNA:Low Noise Amplifier)を用い,アレーア ンテナの動作に必要な給電部の位相制御を受動素子 で行う方式のことをいう.移相器としては,5ビット のフェライト移相器が選ばれた.パッシブアレー方 式は,構成が単純で軽量であるという利点がある反 面,TWTA の故障が直ちにレーダシステム全体の機 能低下に結び付くという欠点を有する.パルスTWTA は,特殊な高圧の電源回路を必要とし,高圧対策及び 他の機器に与える EMC 対策も重要な技術課題とな る.アクティブアレー方式とは,アレー素子のそれぞ れに移相器と固体増幅器(SSPA:Solid State Power Amplifier),LNA の能動素子を組み合わせる方式をい う.PRでは,アレー素子数は128となるので,送信 用増幅器として小型軽量で位相特性の安定したGaAs FETのSSPAの使用を考えた.移相器としては,損 失が約5dBと大きいものの,小型軽量な5ビットの PINダイオード移相器(PHS)を使用した.アクティ プアレーの場合,送受信の移相器の損失はそれぞれ後 段に位置するSSPA及び前段に位置するLNAで補償 することができる.アクティブアレー方式は,素子数 が多く,構成が複雑で重量が大きくなる反面,少数の アレー素子が故障しても,それがレーダシステム全体 の大きな機能低下に結び付かないという利点を有する. 結局のところ,素子数が多く構成が複雑で重量が重く なるという欠点を有するものの,フェイルセーフ機能 をもつアクティブアレー方式を採用することにした.

3.2 TRMM 降雨レーダの概要

PR は, Feasibility Study の後, 1988~1991 年ご ろにかけて当時の郵政省通信総合研究所において,導 波管スロットアレーアンテナ, SSPA, LNA, PHS な どの Critical Components の試作が行われ, 1/16 の スケールの Bread Board Model (BBM)を製作した. BBM による機能性能を確認後, Engineering Model, Proto Flight Model の開発のため, プロジェクトは当 時の宇宙開発事業団に引き継がれた.

宇宙開発事業団で開発した PR の主要諸元を表 2 に 示す [7], [8]. PRは,周波数が13.8 GHz帯で動作す る 128 素子の一次元アクティブフェイズドアレーレー ダであり,5ビットのPHSを制御して,電子的にアン テナビームを衛星の進行方向と直角方向に,地上軌跡 にすき間が出ないように走査する. 走査幅は, 215 km である.アンテナビーム中心の走査角は,±17°であ り,アンテナビーム幅 0.71°を有するアングルビンが 走査角±17°の範囲に49個存在する.送受信系は, 128 素子の SSPA, LNA 及び PHS より構成されてお リ,128本の導波管スロットアンテナを並べた平面ア レーアンテナと結合されている.アンテナ開口径の寸 法は,2.1m×2.1mである.送信ピーク電力は,約 700 W である.高度 350 km より,雨域の頂きで降雨 強度 0.5 mm/h の降雨を観測することができる.直 下点の水平距離分解能は,4.3km,レンジ分解能は 250 m である.四つの観測モードについて,表3に示 す [7], [8]. 通常, 走査角 ±17°の範囲について, 地表 面から高度15kmの範囲の降雨並びに地表面エコー を 250 m のレンジ分解能で観測する. ミラーイメージ の観測モードでは,直下点についてのみ,0~5kmの

表 2	TRMM	降雨レーダの主要諸元

Table 2 Main	system	parameters	\mathbf{of}	Ρ	R
--------------	--------	------------	---------------	---	---

Item	Description
Frequency	13.796 GHz, 13.802 GHz
Sensitivity	S/N per pulse ≥ 0 dB for 0.5mm/h at rain top
Swath width	215 km
Observable range	From surface to the height 15km, 5km mirror image at nadir
Horizontal resolution	4.3 km(at nadir)
Range resolution	0.25 km
Antenna type	Planar array, 128-element slotted waveguide
Gain	47.4 dB
Beam width	0.71 ° ×0.71 ° (at nadir)
Aperture	2.1 m ×2.1 m
Scan angle	± 17 (cross-track direction)
Transmitter/Receiver type	SSPA and LNA(128 elements)
Peak power	708 W
Pulse width	1.67 µs
PRF	2776 Hz
Noise figure	5.1 dB
Dynamic range	79 dB
Independent sample number	64
Data rate	93.4 kbps
Mass	465 kg
Power consumption	217 W

表 3 四つの観測モードにおけるレーダデータ収集パラ メータの要約

Table 3Summary of radar data collection parametersin four observation modes.

Type of radar echo	Description
Normal rain and surface echoes	Surface to at least 15 km altitude, 250 m
	interval.
Mirror image echoes	0.5 km altitude, 250 m interval, nadir
	only.
Oversampled surface echoes	Surface echo peak \pm 0.5 km, 125 m
	interval, scan angle $\pm 10^{\circ}$.
Oversampled rain echoes	Surface to 7.5 km, 125 m interval, scan
	angles over $\pm 3.5^{\circ}$.

高度のミラーイメージが 250 m のレンジ分解能で観測 される.ミラーイメージとは,地表面で散乱された電 波が上空の降雨によって地表面方向に散乱され,それ が地表面によって再度散乱されて受信されるエコーを 意味し,地表面(主に海面)をミラーとした鏡面対称 の位置に見かけ上現れる降雨エコーである.他の観測 モードには,レンジ分解能の半分の 125 m の間隔で, 限られた走査角の範囲において表面エコー並びに降雨 エコーを詳細に観測する(オーバサンプル)モードが ある.PRは,各独立サンプル数 64 を確保するため に,周波数アジリティという手法を用いている.これ は,13.796 GHz 及び 13.802 GHz の 6 MHz (パルス 幅 1.67 µs の逆数の約 10 倍)離れた 2 周波数のパル スのペア 32 組を各アングルビン方向に送信して,独 立サンプル数 64 を確保するという方式である.降雨

Block diagram of the TRMM PR



Fig. 2 Block diagram of the PR.

エコーの受信強度は,空間内の降雨粒子の配置の変動 によって一発一発の各パルスごとに変動するため,何 発かのパルスに対応する独立した降雨エコーを平均化 することによって受信強度の標準偏差を軽減して平均 受信強度を求めることができる.降雨の受信強度は指 数分布に従うので,64個の受信エコーの平均を行う ことによって,受信エコーの標準偏差を約0.7dB程 度に抑えることができる.このために,TRMMでは, 独立サンプル数 64 を確保している.また,同レーダ のブロック図を図2に示す.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構成される.送信経路では,周 波数変換・IF部 (FCIF)からのRF信号は,分合波 器1(DIV/COMB1)で16分割され,更に分合波器2 (DIV/COMB2) で8分割された後,128分割された 信号が128本の導波管スロットアンテナに入力される. PHSは,分合波器2に含まれている.受信経路は,送 信経路の逆をたどる、信号処理系は、FCIF 部とシス テム制御・データ処理部(SCDP)から構成される.

TRMM 降雨レーダデータ解析処理ア ルゴリズム

PR データ解析処理用の標準アルゴリズムは,研究 公募によって選ばれた日米合同のTRMM PR サイエ ンスチームによって開発された[9].アルゴリズム及び そのプロダクトは,処理のレベルに応じて,Level1, 2,3と分類される.Level1,2は,各瞬時視野方向の データである.Level1は,レーダ固有の工学値(受 信電力値,ノイズレベル)及び降雨減衰を含んだレー ダ反射因子を与える.Level2は,降雨強度,地表面 の規格化散乱断面積(NRCS),及び降雨に関する定

TRMM Precipitation Radar Algorithm Flow



図 3 TRMM 降雨レーダアルゴリズムフロー Fig. 3 TRMM PR algorithm flow.

表 4 TRMM 降雨レーダ標準アルゴリズム

Table 4 TRMM standard PR algorithms.

Product No.	Name	Products	
1B21	PR calibration	Total received power, Noise Level, Rain/No rain,	
		Clutter contamination flag.	
1C21	PR reflectivities	Profiled Zm (radar reflectivity factors without	
		rain attenuation correction).	
2A21	Surface scattering	Path integrated attenuation (PIA) of σ^0 (in case	
	coefficient σ^0	of rain) and its reliability. Data base of σ^0 (ocean/	
		land, in case of no rain)	
2A23	PR qualitative	Detection of bright band, Bright band height,	
		strength, width, Rain type classification,	
		Detection of shallow isolated rain. Output of	
		rain/no rain flag, height of storm top.	
2A25	3-D PR profile	Range profiles of attenuation-corrected radar	
		reflectivity factors, rainfall rate. The estimated	
		near surface, and surface rainfall rate, and	
		average rainfall rate between the two predefined	
		altitude(2,4 km).	
3A25	Monthly statistics of	Space-time averages of accumulations of 1C21,	
	PR products	2A21, 2A23, 2A25.	
3A26	Space-time averages	Rain rate statistics over 5 degree x 5 degree x 1	
	of rain rates by	month space-time regions using a multiple	
	threshold method	thresholding technique.	

性的な情報(プライトバンドの有無,降雨タイプの分類)を与える.13.8 GHz の周波数は,降雨減衰の影響を受けるため,降雨減衰の補正を行ったレーダ反射 因子及び降雨強度を算出する必要があり,このための 特別のアルゴリズムが整備されている.Level3は, Level2のプロダクトを時間的,空間的に平均し,緯 度経度5°×5°の各格子における降雨パラメータの月 平均値を算出する.代表例は,月平均降雨強度である. 図3に,PRアルゴリズムシステムのフロー並びに相 互のアルゴリズムの入出力関係を示す.また,各アル ゴリズムの名称及びプロダクトを表4に示す.

1B21は、レーダエコーのディジタル値を工学値に

変換し,レーダ受信電力値(信号+ 雑音)及び雑音値 (ノイズレベル)を与える.また,受信電力の大きさ とあらかじめ定められたしきい値を比較して降雨の 有無を判定する.1C21は,降雨減衰の影響を含んだ レーダ反射因子 Zm のレンジプロフィールを与える. 2A21は,降雨域におけるパス積分減衰値(PIA)及 びその信頼度の値を与える.また,2A21は無降雨時 においては,地表面の規格化散乱断面積の値を算出す る. PIA は, 2A25 において表面参照法 (SRT)を用 いて降雨強度を算出するときに用いられる.無降雨時 の NRCS は, PIA 算出の基準として用いられる [10]. 2A23は,ブライトバンドの有無を判定し,ブライト バンドがあるときはその高さ,厚さ,レーダ反射因子 を求める.降雨タイプは、レーダ反射因子 Z の鉛直 分布及び水平分布を考慮して,層状性降雨,対流性降 雨,及びその他の降雨に分類される[11].ブライトバ ンドのあるときは,層状性降雨と分類している.また, 孤立した背の低い雨は,対流性の降雨と分類している. 2A25 は,降雨減衰補正を施したレーダ反射因子 Z_e を推定し, その Ze から妥当と考えられる Z-R 関係 を用いて降雨強度 R に変換するという方針をとって いる[12]~[14].

降雨レーダから距離 r の点における降雨減衰を含ん だレーダ反射因子 Z_m は,降雨減衰係数 k を用いて,

$$Z_m(r) = Z(r) \exp\left(-0.2\ln 10 \int_0^r k(s) \, ds\right) \quad (1)$$

と書き表せる.ここで,Zは,降雨減衰を含まない レーダ反射因子の真値である.

2A25 では, Z を求める際に, k と Z の関係を

 $k = \varepsilon \alpha Z^{\beta} \tag{2}$

のように仮定して,このときの $Z = Z_e$ とおいている.すなわち,式 (2)を式 (1)に代入し, Z_e に関する 微分方程式に変換し,

$$Z_e(r) = \frac{Z_m(r)}{\left(1 - 0.2\varepsilon\beta \ln 10 \int_0^r \alpha(s) Z_m(s)^\beta ds\right)^{1/\beta}} \quad (3)$$

を求めている.ここで $\varepsilon = 1$ が Hitschfeld-Bordan の 解に相当する [15].この解は,降雨減衰が大きいとき には,分母が0に近づき不安定になり,実用にならな いことが多い.そこで,2A25 では,安定した降雨減 衰補正を行うために,表面参照法(Surface Reference Technique)を用いている、衛星からレーダで降雨域 を観測すると、降雨の背景に地表面の強いエコーが受 信される.同一入射角において降雨域と無降雨域の地 表面のエコーの強さの差は、すべて降雨減衰によるも のと仮定して降雨減衰量を求め、制約条件とするのが 表面参照法の考え方である.つまり、降雨によって, 地表面の散乱係数は変化しないと仮定するわけである. 表面参照法によって推定される降雨減衰量 *PIA* は, 地表面までの距離を r_s とおくと,

$$PIA = \exp\left(-0.2\ln 10\int_0^{r_s} k(s)\,ds\right) \tag{4}$$

であり,これと降雨エコーから計算される地表面までの降雨減衰量,すなわち

$$\frac{Z_m(r_s)}{Z_e(r_s)} = \left(1 - 0.2\varepsilon\beta\ln 10\int_0^{r_s} \alpha(s)Z_m(s)^\beta ds\right)^{1/\beta}$$
(5)

が一致するように ε を選び, その ε を用いて,式(3) より任意の距離 r における Z_e を計算するものである. 降雨減衰補正を必要とする最も遠い距離 r_s での降雨 減衰量を制約条件としているため,そこに至るまでの 任意の距離での減衰量が安定に求められる.ただし, 降雨減衰量そのものが少ない場合は,表面参照から推 定させる PIA 自体の誤差が大きくてあてにならない こと,並びにそのように降雨減衰量が少ないときは, Hitschfeld-Bordan の解が不安定にならないことなど から,2A25 では実際には,推定された減衰の大きさ に応じて表面参照法で得られた降雨減衰量の制限条件 の重みを変化させている.すなわち,式(4) と式(5) を等しいとおいたときに得られる ε ε ε_0 と書くと,

$$\varepsilon = (1 - w) + w\varepsilon_0 \tag{6}$$

で定義される ε を用いて,降雨減衰が少ない場合に, 表面参照法の誤差に補正が引きずられることを防いで いる.このようにして補正された Z_e に対して,妥当 と考えられる Z-R 関係を使って降雨強度を推定して いる.

3A25 は、1C21、2A21、2A23、2A25 の緯度経度 5°×5°または、0.5°×0.5°の領域における月ごとの 統計値(度数、平均値、標準偏差、ヒストグラム、相 関係数)を計算する.この中で特に重要なものは、緯 度経度5°×5°の領域の月平均降雨強度である.3A26 は、多重しきい値法という統計的手法を用いて、降雨 強度分布を対数正規分布と仮定したときの緯度経度 5°×5°の領域の月平均降雨強度を 3A25 とは独立に 算出する [16].

5. TRMM 降雨レーダの観測成果

TRMM 衛星が他の気象衛星と比べてユニークな点 は,降雨の三次元観測が可能な PR を搭載しているこ とである. PR によって海上の台風の中の降雨強度分 布の水平分布,鉛直分布が初めて得られた.図4は, アルゴリズム 2A25 の処理結果であり,海上の台風の 一例で, 2006 年8月30日に, 台風12号の目の上を TRMM 衛星がちょうど飛行している. 左図は,高度 2km における降雨強度の水平分布が背景の TRMM 衛星搭載 VIRS の赤外雲画像に重ね合わせて表示さ れている. 降雨レーダの走査幅 215 km が白い 2 本の 線で示されている.降雨レーダはグランドクラッタの 影響や鉛直分解能の劣化のために広い範囲が走査でき ないが,可視・赤外画像では得られない雲の下の降雨 域を明りょうにとらえて観測することができる.水平 分解能は,直下点で約4.9km,走査の端で約5.8km である.降雨強度の強さは色別に表示されている.台 風の目を囲む壁雲並びに眼の外側のスパイラルレイ ンバンド(らせん状降雨帯)において,30mm/h以 上の降雨強度が観測されている.右図は,降雨強度の

三次元分布であり、台風の目を含む鉛直面内の降雨強 度の鉛直分布を色別表示している.壁雲の降雨頂は スパイラルレインバンドに比べて高く、高度約13km にまで達しているのが観測されている.1998年の観 測開始以来、PRが観測してきた多くの台風は、台風 のデータベースとして、JAXA/EORCのTRMMの Home Page(http://sharaku.eorc.jaxa.jp/TYP_DB/ index_j.shtml)で整備され、台風の構造に関する研究 に貢献している.

低緯度の大気大循環では,水の相変化に伴う潜熱加 熱が重要な役割を果たしている.このため,熱帯・亜熱 帯域における潜熱加熱の四次元構造(三次元空間+時 間)の推定がTRMMの主要な科学目的の一つであっ た[17].降雨は,大気の激しい上昇下降運動に伴って 強く降る対流性降雨と,水平に広がった雲から長時間 しとしとと降る層状性降雨に大別されるが,両者で潜 熱加熱の鉛直分布(プロファイル)の構造が大きく異 なるため,潜熱加熱プロファイルの推定にとって,対 流性・層状性降雨の分類は極めて重要である.PRは, 層状性降雨の特徴である融解層に伴うプライトバンド の検出が地上レーダよりも容易であるため,対流性・ 層状性降雨の分類の精度が高く,潜熱加熱プロファイ ルの推定に適している.Taoらは,平均的な対流性・ 層状性加熱プロファイルを仮定し,PR から得られる



0 1 2 3 4 5 6 8 10 15 20 30 (mm/h)

- 図 4 TRMM 降雨レーダによる台風の三次元観測例(2006 年 8 月 30 日). JAXA/ NICT/NASA の共同プロジェクトによる(JAXA 提供). 左図: 高度 2 km にお ける降雨強度の水平分布,右図: 台風の目を含む鉛直面内の降雨強度の鉛直分布.
- Fig. 4 An example of the three dimensional observation of the typhoon by TRMM PR on 30 August 2006. Joint project by JAXA/NICT/NASA (Provided by JAXA). Left image: Horizontal distribution of rain rate at the altitude of 2 km. Right image: Vertical distribution of rain rate in the vertical plane including the eye of typhoon.

対流性・層状性降雨比から潜熱加熱プロファイルを求 める Convective-Stratiform Heating (CSH) アルゴ リズムを開発した [18].しかしながら,この手法は仮 定された加熱プロファイルに大きく依存し,地域的・ 季節的に大きく変化する対流性加熱プロファイルの変 化を考慮に入れることができない.

Shige らは, Takayabu による PR 降水プロファイル のスペクトル表示 [19] を基礎として, PR の鉛直情報 を積極的に活用する Spectral Latent Heating (SLH) アルゴリズムを開発した [20].このアルゴリズムは, 数値モデルに基づくシミュレーションデータから作成 した参照テーブルに基づいて降水に伴う潜熱加熱の鉛 直プロファイルを推定する.対流性・層状性降雨量比 のみから潜熱加熱プロファイルを求める CSH アルゴ リズムに比べて,

1. 降雨タイプや地上降雨強度だけでなく降雨の高 さ情報を用いているために,背の低い対流と背の高い 対流の潜熱加熱の違いが推定できる.

2. 層状性降雨に対しては融解層の降水強度を用いているために,地上無降雨でも潜熱加熱を推定できる. という特徴をもっている.

SLH アルゴリズムをグローバルな PR データに適用 するために,アルゴリズムを改良した結果,地上観測 値との良い一致が示された[21].また,熱帯太平洋上 の潜熱加熱プロファイルを推定したところ,潜熱加熱 プロファイルが対流性・層状性降雨比だけでなく,対 流性加熱プロファイルの変化に伴って大きく変化して いることが示された.SLH アルゴリズムは,潜熱加熱 量ばかりでなく水蒸気消失量の高度分布も推定するこ とができ[22],これらのデータは今後,気候モデルの 検証に役立つと思われる.

TRMM が打ち上げられるまで,降水の三次元デー タは地上レーダの特別観測による空間的・時間的に 限定されたものしかなく,全球規模で地域的・季節的 特徴を調べることは不可能であった.PR によって降 水の三次元構造に関する「降水システム気候学」[23] が可能となり,対流性・層状性降雨量比[24]や降水プ ロファイル[25] などの時空間的変動が詳細に調べら れてきた.また,TRMM の特徴として,PR に加え て TMI, VIRS,LIS,CERES といった五つの異な るセンサによって同時に降水システムを観測している 点が挙げられる.近年,これら複数のセンサを融合的 に利用して,PR 単独では得られない情報を引き出す 試みが盛んに行われている.例えば,Takayabuは, PR と LIS を併用して計算される降雨量と発雷の比 (Rain-yeild flash: RPF)によって,これまでよく知 られてきたように降雨特性が大陸と海洋で分類される だけでなく,両者の中間的な特徴をもつ遷移域が大陸 周辺の海洋上に存在すること,また大陸上であっても モンスーン期の降水システムは遷移域の特徴をもつこ とを示した[26].

6. 全球降水観測計画 (GPM)

全球降水観測計画 (GPM: Global Precipitation Measurement)は,1機の主衛星と8機程度の副衛星 により3時間ごとの高頻度で高精度の全球降水観測 を行い,気候変動や地球規模の水循環に及ぼす降雨の 影響を解明するとともに,天気予報精度の向上,水資 源管理(洪水予測,河川管理,ダム貯水量の調節,農 業用水の確保),農業生産性予測などの実利用分野へ の降雨観測データの利用実証を行うことを目的とし た,日米を中心とした国際協力によって計画されてい るミッションである [27]. 主衛星の打上げは, 2013年 ごろの予定である. GPM 主衛星は, TRMM を継承 する衛星であり, 日米共同で開発を行う予定である. GPM 主衛星には,2周波降水レーダ(DPR)を搭載 し,同時に搭載されるマイクロ波放射計 GMI を校正 するとともに, GMI のアルゴリズム開発を通して, 副 衛星搭載のマイクロ波放射計をも間接的に校正する ことにより, 複数の衛星データを総合し, 高精度, 高 頻度の全球降水マップを作成する.マイクロ波放射計 を搭載した副衛星には,米国 NOAA の極軌道衛星, 中国の FY-3 (風雲 3 号), インド, フランス共同の Megha-Tropiques 衛星,我が国の GCOM-W 衛星な どが候補に挙がっている.

GPM 主衛星の衛星高度は,約407km,軌道傾斜 角は,65°である.またミッション期間は,設計寿命 3年,目標5年である.GPM 主衛星の軌道は,日周 変化の大きな降水を様々な時間帯で均等に観測するた めに,非太陽同期軌道が選ばれる.また,できるだけ 高緯度までのDPR 観測を実現するとともに,DPRの 狭い走査幅でも,できるだけ短期間で全球をカバーす るという要求条件から上記の軌道傾斜角が選ばれた.

GPM 主衛星搭載の DPR は, TRMM 降雨レーダ PR を継承するアクティブフェイズドアレーレーダ であり, TRMM PR を高性能化, 軽量化した Ku 帯 (13.6 GHz) 降雨レーダ(KuPR)に加え, 高感度化, 高精度化を目指した新しい Ka 帯(35.5 GHz) 降雨

Item	KuPR Description	KaPR Description
Frequency	$13.597~{\rm GHz},13.603~{\rm GHz}$	35.547 GHz, 35.553 GHz
Sensitivity	0.5mm/h	0.5mm /h (for R.R. 250 m) 0.2 mm/h (for R.R. 500 m)
Swath width	\geq 245 km	$ \geqq 120 \text{ km}(\text{ for R.R. } 250 \text{ m}) \\ \geqq 115 \text{ km}(\text{ for R.R. } 500 \text{ m}) $
Observable range	From surface to the height 18 km, 5 km mirror image at nadir	From surface to the height 18 km, 3 km mirror image at nadir
Horizontal resolution	5 km	5 km
Range resolution	250 m	250 m/500 m
Antenna type	Planar array, 128-element slotted waveguide	Planar array, 128-element slotted waveguide
Gain	47.4 dB	47.4 dB
Beam width	$0.71^\circ~\times 0.71^\circ$ (nadir)	$0.71^\circ \times 0.71^\circ$ (nadir)
Aperture	$2.1 \text{ m} \times 2.1 \text{ m}$	$0.8~\mathrm{m}~ imes 0.8~\mathrm{m}$
Scan angle	± 17 [°] (cross-track direction)	± 8.5 $^{\circ}$ (cross-track direction)
Transmitter/Receiver type	SSPA and LNA(128 element)	SSPA and LNA(128 element)
Peak power	\geq 1013.5 W	$\geq 146.5W$
Pulse width	1.60 μs	1.60 µ s
PRF	$1700 \sim 4500 \; {\rm Hz}$	1700~4500 Hz
Noise Figure	\leq 5.1 dB	\leq 5.6 dB
Dynamic range	\geq 70 dB	\geq 70 dB
Independent sample number	÷100	÷100
Data rate	$\leq 112 \text{ kbps}$	\leq 78 kbps
Mass	\leq 410 kg	\leq 320 kg
Power consumption	\leq 383 W	$\leq 297 \text{ W}$

表 5 GPM 2 周波降水レーダの主要諸元 Table 5 Main system parameters of GPM DPR.

レーダ(KaPR)から構成される.KaPRは,KuPR では測れない弱い雨や雪の検出に有効であり,両周波 数帯のレーダの異なるダイナミックレンジによって, 熱帯から高緯度までの降雪を含む降水量を高精度で観 測することができる.また2周波のアンテナビームを マッチングさせ,送信パルスタイミングを一致させる ことによって,2周波同時観測が可能となり,2周波 アルゴリズムによって雨と雪の識別,雨滴粒径分布の 推定が可能となり,高精度の降雨強度推定が可能とな る.DPRの主要諸元を表5に示す.

7. む す び

TRMM 降雨レーダは,世界初の衛星搭載降雨レー ダであり,我が国が開発したものである.TRMM 衛 星は,1997年11月28日以降,現在に至るまで約10 年間,何らの不具合もなく観測を続けている.アク ティブフェイズドアレー方式のレーダであるため,機 械的な可動部分がないこと,固体タイプの送受信素子 を使ったレーダであり,TWTAのような電子管に比 べて寿命が長いことがその理由であろう.TRMMの 成功を受けて,GPM 搭載のDPRもTRMMと同夕 イプのレーダが搭載される.宇宙分野においては,信 頼性と実績が重視されるゆえ,うまく動作している ものを他のものに置き換えることは通常敬遠される.

しかし, TRMM PR は, 非常に部品数が多く, 重量 が非常に重い.また,アンテナは狭帯域,単偏波用で あり他の周波数,偏波との共用は不可である.将来の 降水観測ミッションにおいては,より詳細な降水雲の 構造,降水プロセスを観測するために,降水観測用の 13.6, 35.5 GHz に加えて雲観測用の 95 GHz 帯の周 波数並びに水平・垂直偏波を用いた同時観測が可能な マルチパラメータレーダに対する要望が出てくるもの と思われる.このために,更に次世代をにらんだ降雨 レーダの研究を継続することが期待される.このため には,シリンドリカルパラボラアンテナを用いた電子 走査型の降雨レーダ [28] や, 原点に戻って, Aqua 搭 載の AMSR-E のようなパラポラアンテナを円錐走査 するタイプのレーダの可能性も含めて可能なシステム を検討する必要があろう[29].気象庁が現在行ってい る数値予報において, TRMM TMI をはじめとするマ イクロ波放射計からの観測データが数値予報の初期値 作成のためのデータ同化に利用されているが, PRの データは利用されていない.これは,TMIの走査幅 (760 km) に比べて PR の走査幅が 215 km と狭いか らである.PRのアンテナ走査角を広くとると,鉛直 分解能が劣化し,様々な高度の降雨を同時に受信し, 高度方向の降雨の非一様性の影響を受けること,アン テナサイドローブからの地表面クラッタの影響を受け ることなどの問題が発生する.アンテナの走査角を広 げた場合の影響についての研究は最近行われ始めて いる [30], [31]. 実際の TRMM は,進行方向に垂直方 向にアンテナビームを走査しているが,この方向の走 査角は ±17°と狭いため, 具体的な検討においては, TRMM の進行方向に長いデータを切り出し,データ を 90°回転させ,このデータを真値として用いてアン テナビームを広く走査したときの観測距離の増加によ るアンテナビームの広がりやグランドクラッタの混入 によって,どの程度観測データが真値と比べて劣化す るのかをシミュレーション計算を行って評価している. アンテナは TRMM と同様な導波管スロットアンテナ を仮定している.評価では,真値とシミュレーション 値の相関係数や RMS 誤差を計算し評価している.予 備的な検討では,走査角を30度程度に広げた場合で も相関係数は 0.8 程度の値が得られており走査角を広 げられる可能性があることが報告されている.しかし, アンテナ走査角を広げた場合には,降雨域と衛星の距 離が増加し, TRMM と同様に 0.5 mm/h 程度の弱い 降雨強度を観測するには所用送信ピーク電力が増大し, その結果消費電力が増加する問題点がある.また,独 立サンプル数 64 を確保するには,GPM で用いられ ている PRF を走査角ごとに可変にする手法を用いて も走査角があまり広げられない問題点がある.更にグ レーティングロープを避けるために導波管の間隔を狭 くする必要があり,導波管の本数が増えて,重量が重 くなるような技術的な問題もある.これらの問題点を 解決するための今後のシステム検討の研究結果に期待 したい.

衛星搭載降雨レーダは, TRMM, GPM と我が国が 世界をリードして開発を進めてきた.引き続き,次世 代の衛星搭載降雨レーダの開発においても,我が国が 世界をリードして,より先進的な降雨レーダを実現す ることを希望したい.

TRMM 降雨レーダアルゴリズムについては,やは り我が国が主導権をもって日米協力のもとでこれまで 開発・改良を続けてきた経緯がある.現在の Version 6 において,雨量計と比較したとき,陸上の降雨強度を 20~50%過小評価している問題点が発生している.現 在の PR アルゴリズムは,1周波数レーダアルゴリズ ムとしては,限界にきていると思われるが,来年の 10月を目指して陸上の過小評価を緩和する Version 7 を開発している最中である.レーダのハードウェア 開発とアルゴリズム開発は,不離一体である.ぜひ, GPM の DPR の2周波アルゴリズムの開発[32]にお いても,世界をリードするアルゴリズムの開発を期待 したい.

文 献

- J. Simpson, ed., Report of the science steering group for a tropical rainfall measuring mission (TRMM), NASA/Goddard Space Flight Center, 94p., 1988.
- [2] 田中 佐, "TRMM 計画の概要," 日本リモートセンシン グ学会誌, vol.18, no.5, pp.13-27, Dec. 1988.
- [3] 岡本謙一, "熱帯降雨観測衛星," 信学技報, SANE 2006-115, Dec. 2006.
- [4] K. Okamoto, ed., "A feasibility study of rain radar for the tropical rainfall measuring mission," J. Commun. Res. Lab., vol.35, no.145, pp.109–208, July 1988.
- [5] 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, no.3. pp.257–268, May 1990.
- [6] 岡本謙一, "熱帯降雨観測衛星 (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)計画における降水測定システ ムの研究開発",天気, vol.41, no.7, pp.361–378, July 1994.
- [7] 古津年章,黒岩博司, "TRMM 搭載降雨レーダ",日本リ モートセンシング学会誌,vol.18, no.5, pp.28-39, Dec.

1988.

- [8] T. Kozu, T. Kawanishi, H. Kuroiwa, M. Kojima, K. Oikawa, H. Kumagai, K. Okamoto, M. Okumura, H. Nakatsuka, and K. Nishikawa, "Development of precipitation radar onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol.39, no.1, pp.102–116, Jan. 2001.
- [9] 岡本謙一,石戸喜夫, R. Meneghini, "TRMM 降雨レー ダアルゴリズム"日本リモートセンシング学会誌, vol.18, no.5, pp.40-51, Dec. 1988.
- [10] R. Meneghini, T. Iguchi, T. Kozu, L. Liao, K. Okamoto, J.A. Jones, and J. Kwiatkowski, "Use of the surface reference technique for path attenuation estimates from the TRMM precipitation radar," J. Appl. Meteor., vol.39, no.12, pp.2053–2070, Dec. 2000.
- [11] J. Awaka, T. Iguchi, and K. Okamoto, "Rain type classification algorithm," in Measuring Precipitation from Space — EURAINSAT and the Future, ed. V. Levizzani, P. Bauer, and F.J. Turk, pp.213–224, Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2007.
- [12] T. Iguchi, T. Kozu, R. Meneghini, J. Awaka, and K. Okamoto, "Rain-profiling algorithm for the TRMM precipitation radar," J. Appl. Meteor., vol.39, no.12, pp.2038–2052, Dec. 2000.
- [13] T. Iguchi and R. Meneghini, "Intercomparison of single-frequency methods for retrieving a vertical rain profile from airborne or spaceborne radar data," J. Atmos. Oceanic Technol., vol.11, no.6, pp.1507–1516, Dec. 1994.
- [14] 井口俊夫, R. Meneghini, "降雨レーダによる降雨強度推定", 月刊海洋, vol.31, no.6, pp.324–329, 1999.
- [15] W. Hitchfeld and J. Bordan, "Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths," J. Merteor., vol.11, pp.58–67, 1954.
- [16] R. Meneghini, J.A. Jones, T. Iguchi, K. Okamoto, and J. Kwiatkowski, "Statistical methods of estimating average rainfall over large space-timescales using data from the TRMM precipitation radar," J. Appl. Meteor., vol.40, no.3, pp.568–585, March 2001.
- [17] J. Simpson, C. Kummerow, W.-K. Tao, and R.F. Adler, "On the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)," Meteor. Atmos. Phys., vol.60, no.1, pp.19–36, 1996.
- [18] W.K. Tao, S. Lang, J. Simpson, and R. Adler, "Retrieval algorithms for estimating the vertical profiles of latent heat release: Their applications for TRMM," J. Meteor. Soc. Japan, vol.71, no.6, pp.685-700, 1993.
- [19] Y.N. Takayabu, "Spectral representation of rain features and diurnal variations observed with TRMM PR over the equatorial area," Geophys. Res. Lett., vol.29, doi:10.1029/2001GL014113, 2002.
- [20] S. Shige, Y.N. Takayabu, W.-K. Tao, and D.E.

Johnson, "Spectral retrieval of latent heating profiles from TRMM PR data. Part I: Development of a model-based algorithm," J. Appl. Meteor., vol.43, no.8, pp.1095–1113, Aug. 2004.

- [21] S. Shige, Y.N. Takayabu, W.-K. Tao, and C.-L. Shie, "Spectral retrieval of latent heating profiles from TRMM PR data. Part II: Algorithm improvement and heating estimates over tropical ocean regions," J. Appl. Meteor. Climatol., vol.46, no.7, pp.1098–1124, July 2007.
- [22] S. Shige, Y.N. Takayabu, and W.-K. Tao, "Spectral retrieval of latent heating profiles from TRMM PR data. Part III: Estimating apparent moisture sink profiles over tropical oceans," J. Appl. Meteor. Climatol., vol.47, no.2, pp.620–640, Feb. 2008.
- [23] 全球降水観測(GPM)計画—科学的・社会的期待,宇宙 研究開発機構地球観測研究センター,2007.
- [24] C. Schumacher and R.A. Houze, Jr., "Stratiform rain in the tropics as seen by the TRMM precipitation radar," J. Climate, vol.16, no.11, pp.1739–1756, June 2003.
- [25] M. Hirose and K. Nakamura, "Spatial and seasonal variation of rain profiles over Asia observed by spaceborne precipitation radar," J. Clim., vol.15, no.23, pp.3443–3458, Dec. 2002.
- [26] Y.N. Takayabu, "Rain-yield per flash calculated from TRMM PR and LIS data and its relationship to the contribution of tall convective rain," Geophys. Res. Lett., vol.33, L18705, doi:10.1029/2006GL027531, 2006.
- [27] E.A. Smith, G. Asrar, Y. Furuhama, A. Ginati, A. Mugnai, K. Nakamura, R.F. Adler, M.-D. Chou, M. Desbois, J.F. Durning, J.K. Entin, F. Einaudi, R.R. Ferraro, R. Guzzi, P.R. Houser, P.H. Hwang, T. Iguchi, P. Joe, R. Kakar, J.A. Kaye, M. Kojima, C. Kummerow, K.-S. Kuo, D.P. Lettenmaier, V. Levizzani, N. Lu, A.V. Mehta, C. Morales, P. Morel, T. Nakazawa, S.P. Neeck, K. Okamoto, R. Oki, G. Raju, J.M. Shepherd, J. Simpson, B.-J. Sohn, E.F. Stocker, W.-K. Tao, J. Testud, G.J. Tripoli, E.F. Wood, S. Yang, and W. Zhang, "International global precipitation measurement (GPM) program and mission: An overview," in Measuring Precipitation from Space — EURAINSAT and the Future, ed. V. Levizzani, P. Bauer, and F.J. Turk, pp.611-615, Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2007.
- [28] Y. Rahmat-Sami, J. Huang, B. Lopez, M. Lou, E. Im, S. Durden, and K. Bahadori, "Advanced precipitation radar antenna: Array-fed offset membrane cylindrical reflector antenna," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.53, no.8, pp.2503–2515, Aug. 2005.
- [29] 大利達也,岡本謙一,重 尚一,真鍋武嗣,"衛星搭載簡 易型降雨レーダのシステム設計"第44回日本航空宇宙 学会関西支部・中部支部合同秋季大会講演集,pp.61-64, Nov. 2007.

- [30] 渡邉圭太,岡本謙一,重 尚一,"次世代の衛星搭載降 雨レーダのシステム設計",信学技報,SANE 2006-115, Dec. 2006.
- [31] 渡邉圭太,岡本謙一,重 尚一,"次世代の衛星搭載降雨 レーダのシステム設計"第44回日本航空宇宙学会関西支 部・中部支部合同秋季大会講演集,pp.57-60, Nov. 2007.
- [32] K. Nakamura and T. Iguchi, "Dual-wavelength radar algorithm," in Measuring Precipitation from Space
 — EURAINSAT and the Future, ed. V. Levizzani, P. Bauer, and F.J. Turk, pp.225–234, Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2007.

(平成 19 年 11 月 30 日受付, 20 年 3 月 11 日再受付)



岡本 謙一 (正員:フェロー)

昭48 東大大学院理学系研究科博士課程 了.同年郵政省電波研究所(現,情報通信 研究機構)入所.地球環境計測部長,標準 計測部長,総合研究官を経て,平12退所. 平12~20大阪府大大学院工学研究科教授. 平20 鳥取環境大学環境情報学部教授.理

博.平 14 武田賞など受賞.人工衛星搭載電波リモートセンサ を用いた地球環境計測に関する研究に従事.



重 尚一

平 13 京都大学大学院理学研究科博士後 期課程了.同年宇宙開発事業団(現宇宙航 空研究開発機構)招聘研究員,平 16 大阪 府大大学院工学研究科助手,平 19 同助教. 博士(理学).気象・気候学,地球観測に関 する研究に従事.