

衛星による高精度高分解能全球降水 マップの作成

研究代表者
岡本 謙一

衛星による高精度高分解能全球降水マップの作成

大阪府立大学大学院工学研究科 岡本謙一

1. 研究の目的と背景

地球的規模の降水分布とその変動は、気候変動や異常気象現象と深い関わりがあり、人間活動や社会システムに重要な影響を及ぼす。信頼性のある観測に基づく地球的規模の降水マップの作成は、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。このため、衛星からのリモートセンシングがほぼ唯一の手段となる。

衛星データを用いた降水分布図は、静止気象衛星搭載の赤外放射計データ等を主に使用して、*GPCP(WCRP/GEWEX)、*CMAP(NOAA/CPC)の降水分布図に代表されるように1970年代後半あたりから作成されてきた。しかし、赤外放射計は、雲の下層部の降雨の有無に関わらず、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。

現在、降水観測に適した5台(TRMM/TMI, Aqua/AMSR-E, DMSP F13, F14, F15/SSM/I)以上の衛星搭載マイクロ波放射計が軌道上にあり、その数は今後増加し、衛星からの降水観測にとってマイクロ波放射計は中心的センサとなって行くものと考えられる。本研究は、将来多数の衛星からの観測が期待されるマイクロ波放射計観測データを用いて、信頼できる降水物理モデルに基づいた降水強度推定アルゴリズムを開発し、熱帯降雨観測衛星(TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission)搭載降雨レーダ(PR)、静止衛星の赤外放射計データをも総合的に利用して衛星データのみを用いた全球の高精度高分解能降水マップを作成することを目的とした。

(*本資料で用いる英文略語表を纏めて最後に示す)

2. 研究手法・体制

全球降水マップを作成するための中心的課題は、衛星搭載マイクロ波放射計データを解析処理する信頼できるアルゴリズムの開発である。アルゴリズムは、現実の衛星搭載降雨レーダ(現在はTRMM以外にはない)や地上レーダ等による降水観測データから抽出された降水情報から作られた降水物理モデルに基づくことにより精度の向上を図った。このため、TRMM降雨レーダ(PR)データや、地上の高機能・高精度レーダ群による観測データの蓄積が必要になってくる。本研究チームでは、このために、地上レーダ観測グループ、降水物理モデル開発グループ、降水強度推定アルゴリズム開発グループ、及び全球降水マップ作成グループの4グループを組織し、相互に連絡を密にして研究を進めた。図1に研究全体の構成を示す。

研究の流れとして、まず地上レーダ観測グループでは、高機能・高精度な地上降雨レーダ群で、定常観測と集中観測によって降雨の三次元構造を詳細に観測し、降雨情報(特に、降水粒子の鉛直プロファイル)についてのデータベースを作成し、降水物理モデル開発グループの利用に供した。地上観測によって作成された降水マップは、衛星搭載マイクロ波放射計データから作成されるローカルな降水マップの検証用としても利用された。

降水物理モデル開発グループでは、TRMM降雨レーダ(PR)データベースや地上レーダ観測データベース等を用いて、降水を特徴づける物理量である、降水タイプ分類、降水の鉛直プロファイル、雨滴粒径分布、融解層構造等について、放射伝達方程式に利用可能な降水物理モデルを作成した。

降水強度推定アルゴリズム開発グループでは、降水物理モデルに基づいてマイクロ波放射計アルゴリズムの開発を行った。研究開始当時は、NASA/GSFCが開発した雲解像モデルの出力に基づく降雨物理モデルを用いるGPROF(Goddard profiling)アルゴリズムが、衛星搭載用マイクロ波放射計アルゴリズムのde facto standardとして世界的に広く用いられていた。しかし、当チー

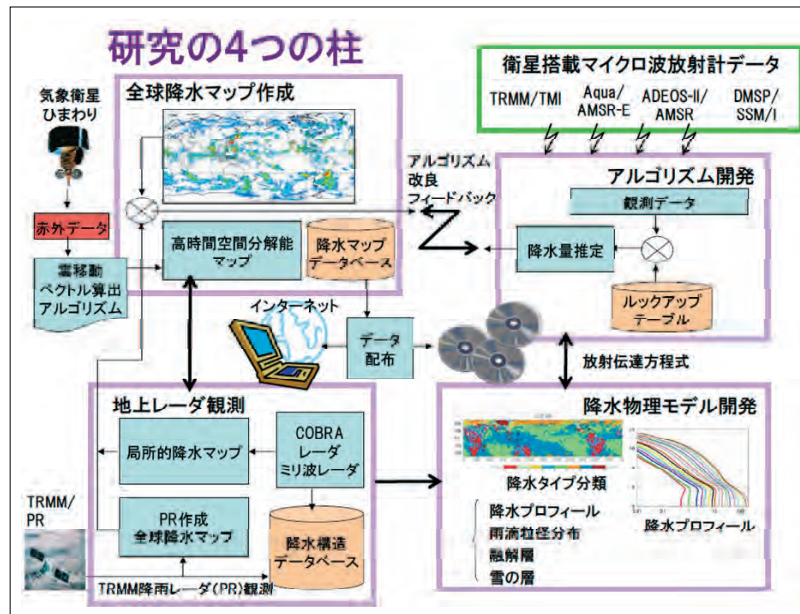


図1 研究全体の構成

ムはこの様なアプローチを取るのではなく、観測データ等の現実的な降水物理モデルを用いる気象研究所の青梨和正氏が基本的な枠組みの開発を行った青梨アルゴリズムを原型とした。そして、青梨アルゴリズムに、当チームが開発した降水物理モデルを順次組み込むと共に、同アルゴリズムの本体の改良を行っていった。青梨アルゴリズムは、マイクロ波放射計によって観測された各周波数における輝度温度と、放射伝達方程式によって計算される輝度温度との差が最も小さくなるような降雨量を、最小二乗法により推定するアルゴリズムである。具体的には、降水物理モデルを取り入れた放射伝達方程式に基づいて輝度温度と降水強度の関係を表すルックアップテーブルを作成し、最も良く観測輝度温度データを再現できる降水強度の値を決定した。青梨アルゴリズム本体の改良とは、陸上で主に用いられる散乱アルゴリズムの二周波化（85GHz と共に 37GHz の利用を行うこと）、陸上、海上、ならびに海岸における降雨有無の判定法、降雨の非一様性補正法などの改良を意味する。

全球降水マップ作成グループは、開発したアルゴリズムを用いて種々の衛星データから降水強度を算出し、それらを合成して全球の降水マップを作成・評価した。評価においては、当チームのアルゴリズムを用いて計算された降雨強度やマップの形で表現された全球の降水強度分布図を TRMM 降雨レーダより計算された降水強度や、GPROF

アルゴリズム等を用いて作成された降水マップと比較して評価した。また、地上観測データである、世界各地の地上雨量計データ（例えば、GPCC）や地上レーダ観測データを用いて局所的に、あるいはレーダー・アメダス解析雨量図を用いて広域的に、雨量の評価を行った。評価結果は、さらなるアルゴリズムの改良・開発へとフィードバックした。実際のアルゴリズム開発では、導入可能となった降水物理モデル等の一つ一つを導入し、マップを作成し、その効果の評価を行った。

また、マイクロ波放射計データから作られた全球降水マップを静止気象衛星の赤外放射計データを用いて計算した雲移動ベクトルなどを用いて補間するアルゴリズムを開発し、それを用いて高時間・高空間分解能のマップを作成した。作成された全球降水マップは、DVD あるいは、インターネット経由で全世界のユーザに発信した。

なお、当研究チームのニックネームとして、GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation) を用いている。また、開発中のアルゴリズムの名称や作成した全球降水マップの名称についても、GSMaP を用いている。この名称は、WMO 等の支援の下に高時間・高空間分解能の全球降水マップを作成している世界的研究グループである IPWGW (International Precipitation Working Group) / PEHRPP (Program to Evaluate High Resolution Precipitation Products) の活動などを通して、世界的にも認知されるようになった。

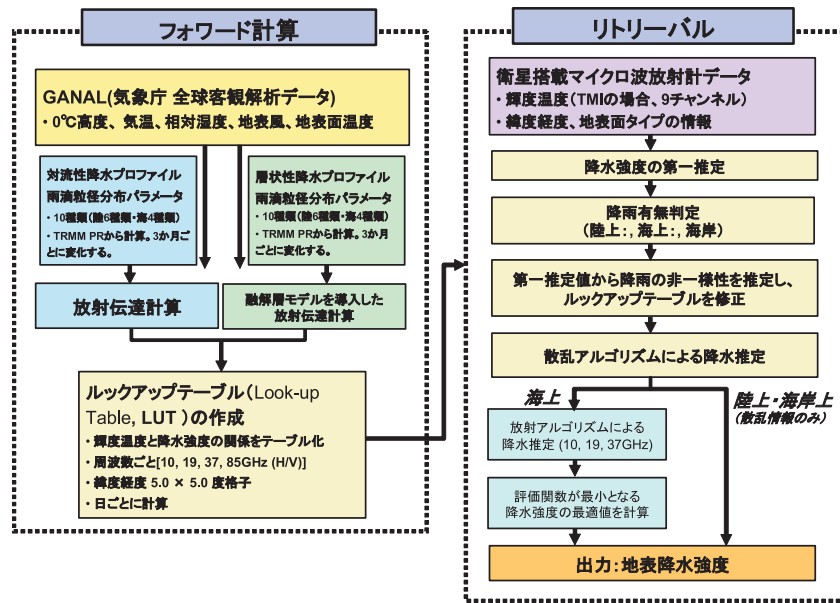


図2 GSMaP_MWR アルゴリズムのフローチャート

3. 降水強度推定アルゴリズム

本研究チームでは青梨アルゴリズムを基礎として、これに改良を加える形でアルゴリズム開発を実施している。青梨アルゴリズムは、Aonashi and Liu (2000) による TRMM 搭載の TMI 用の降水リトリバルアルゴリズムを基にしている。このアルゴリズムの基本的な考え方は、TMI を例にとると 10.7, 19.7, 85.5 GHz の垂直偏波の観測放射輝度温度と最もよく合う降水強度を求めることである。図2に本研究で開発した GSMaP_MWR アルゴリズムのフローチャートを示す。即ち、フォワード計算部分において放射輝度温度の上昇や下降と降水強度の関係は放射伝達方程式によって結びつけられる。即ち、ある降水強度を持った降水物理モデル（対流性降雨と層状性降雨の分離、降水タイプ、降水プロファイル、雨滴粒径分布、融解層高度、など）を放射伝達方程式に取り入れて、衛星が観測する放射輝度温度を計算する。具体的には、事前に仮定した降水物理モデルに基づき、様々な降水強度に対してすべての観測周波数に対する放射輝度温度計算を行い、降水強度と放射輝度温度の関係をテーブル化し（ルックアップテーブル）、その対応をもとにして観測データから降水強度を推定している。したがって、降水強度推定アルゴリズムにおいて降水物理モデルが重要な役割を果たしている。リトリバル部分は「降水強度の第一推定」→「陸上、海上、ならびに海岸線における降雨判定」→「非一様性の補正」→「散

乱アルゴリズム」→「放射アルゴリズム（海上のみ）」という流れを持っている。

GSMaP_MWR アルゴリズムでは、降水強度と放射輝度温度の関係を与えるテーブル作成において、まず、一様な降水に対する計算を行い、降水強度の第一推定値から降雨の非一様性を推定して、非一様性の修正を行っている。降水が観測視野の中で非一様である場合、たとえ観測視野内での平均的な降水強度が同じであっても放射輝度温度が異なるため、このような補正が必要になっている。また、このアルゴリズムは液体降水と固体降水を分ける 0℃ 高度を、不確かさのある観測データから推定するのではなく、気象庁の全球客観解析データをもとに決定していることも特徴として挙げられる。

4. 研究成果と考察

①地上レーダ観測グループ

本グループの目的は、高機能・高精度な地上レーダ群等で降水の3次元構造の詳細な観測を行い、観測データから降水物理パラメータの導出手法を開発し、良質なデータベースを作成することによって、降水物理モデル開発グループによる降水物理モデルの作成、及び全球降水マップ作成グループによるローカルな降水マップの検証に役立てることである。そのため、情報通信研究機構(NICT) 沖縄亜熱帯計測技術センターの5GHz 偏波ドップラー降雨レーダ(COBRA)、400MHz ウィンド

プロファイラ (WPR)、24GHz マイクロレインレーダ (MRR)、防災科学技術研究所 (NIED) のミリ波ドップラーレーダ (MP-Ka)、マイクロ波放射計などのリモートセンサと、ディストロメータ (雨滴粒径分布測定装置)、雨量計などの地上観測測器を用いて2004年5月22日から6月9日にCREST-LAPS チーム (研究代表者: 名古屋大学 中村健治教授) と協力して「2004年沖縄梅雨集中観測 (Okn-Baiu-04)」を実施した。この観測の概念図を図3に示す。その結果、梅雨前線に伴う対流性・層状性の降雨、寒冷低気圧に伴う浅い対流性降雨、台風に伴う降雨等のデータを取得することができた。観測データに加えて、関連する衛星データや数値予報結果を掲載したwebページ及びデータカタログ(CD及び冊子)を作成・配布した。さらに、開発した手法等を用いて降水物理量を導出し、データベースを作成してCDを配布した。

COBRA データによる降雨強度分布は、全球降水マップ作成グループにより、GSMP アルゴリズムで作成された降雨量プロダクトの地上検証のために利用された。400MHz WPR データからは降雪層を含む降水粒径分布を導出し、MRR、2DVD データと組み合わせて、地上から降水頂までの粒径分布の鉛直プロファイルのデータベースを作成することができた。MP-Ka レーダと400MHz WPR のデータを用いて、固体降水層の氷水量 IWC 等の鉛直プロファイルを導出した(図4)。この結果を利用して鉛直積算氷水量 IWP と地上降雨強度 R の関係を調べることにより、固体降水層のモデル化に利用可能な情報が得られた。また、COBRA による偏波パラメータの活用により、降水粒子の分布を直接的に考慮した新しい概念に基づく降水タイプ分類を提案し、対流性降水域の融解層高度を初めて統計的に整理することができた。

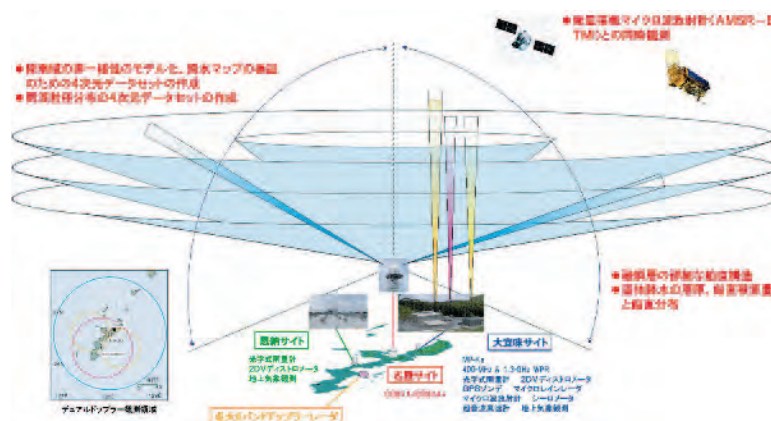


図3 2004年沖縄梅雨集中観測 (Okn-Baiu-04) 概念図

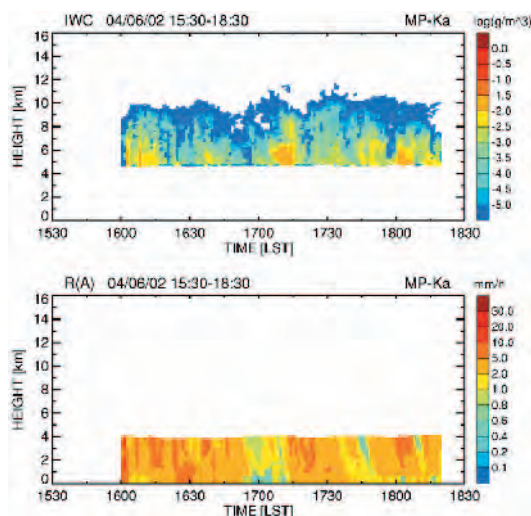


図4 2004年6月2日16:00-18:20について導出した(上)固体降水層の氷水量 IWC と(下)降雨層の降雨強度 R の時間高度断面図。

②降水物理モデル開発グループ

本グループの目的は、降水強度推定に必要な降水物理モデル (降水構造、雨滴粒径分布など) を、TRMM PR で用いられている降水物理モデルまたは TRMM PR から得られる降水物理情報と共有することにより、信頼度の高いモデルとして構築することである。

マイクロ波放射計観測のみでは降水プロファイル情報を得ることができないため、適切な降水プロファイルを与えることが降水強度推定精度の向上につながる。地球上で観測される降水雲は大きく対流性と層状性に分けられるが、時間・空間的に詳細な降水プロファイルを与える方が降水推定精度向上に役立つ。しかしながら、計算機資源の効率化やアルゴリズムの汎用性を考えるとなるべ

く少ない情報で降水の特徴を表わすことが必要になる。そこで、TRMM に搭載されている降雨レーダ (PR) および雷センサ (LIS) を用いて地球上の地域的な降水の特徴を明らかにし、それを基に降水タイプ分類を行った。まず TRMM/PR からの対流・層状降水の割合、降水頂、降水の日変化の情報等から降水を分類し、さらに TRMM PR の降雨量と共に LIS の雷データを併用し、降雨量/発雷比 (RPF: Rainyield Per Flash) を用いた降水タイプ分類を行った。最終的な分類は、陸上で6種類、海上で4種類となった (図5)。

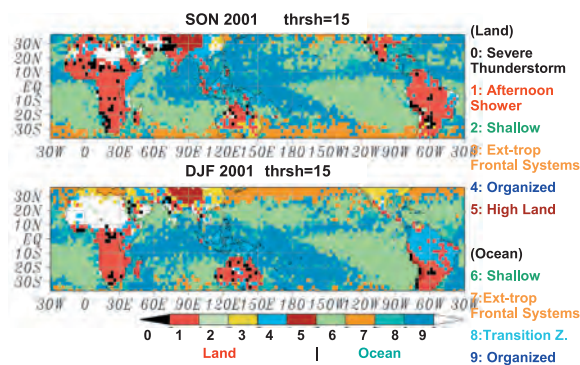


図5 RPF 値を利用して改良した新しい降雨タイプ分類の例。2001年9-11月と12-2月期。陸上6種類、海上4種類の計10種類に分類した。

降水タイプのデータは3ヶ月毎、2.5度格子毎に作成し、降水プロファイルだけでなく、雨滴粒径分布情報を対応させている。これまでは放射伝達計算に従来のマーシャル-パルマー型の粒径分布を用いていたが、降水タイプ分類の全球的分布と TRMM/PR から求めた雨滴粒径分布パラメータの分布の相関が良いため、TRMM/PR から求めた雨滴粒径分布パラメータにより得られる雨滴粒径分布モデルを採用して放射伝達計算を行っている。

また、TRMM/PR で用いられている融解層モデルを放射伝達計算に導入し、降水タイプ毎の対流性・層状性の出現頻度で重みをつけてルックアップテーブルを作成している。

現在、GPROF をはじめ、マイクロ波放射計による降水強度推定アルゴリズムの降水物理モデルに、TRMM PR のデータを積極的に利用する試みが盛んに行われている。本研究チームでは、TRMM PR アルゴリズムを開発した経験を生かし、TRMM PR と世界的にも類を見ない共通性

を有する降水物理モデルの作成に到った。

③降水強度推定アルゴリズム開発グループ

本グループは、降水物理モデルグループによって開発された TRMM PR と共通な降水物理モデルの放射伝達計算部分への導入に加え、降雨判定 (陸上、海上、および海岸)、降雨の非一様性の補正、および散乱アルゴリズム、といったリトリバル部分について、TRMM PR の特性を活用して包括的に開発・改良をおこなった。

とりわけ大きな成果として、GPROF アルゴリズムで後回しにされてきた陸上降雨推定 (陸上降雨判定+散乱アルゴリズム) の改良があげられる。陸上降雨判定については、従来の手法がグローバルに一律な判定式を用いていたのに対して、陸面輝度温度の変動を表現できるデータベースを使ったことが大きな特徴である。その結果、従来の降雨判定よりも誤差の少ない降雨判定を実現できた (図6)。散乱アルゴリズムについては、従来の手法が85GHzの高周波数帯一周波のみを利用していただけに対し、85GHzと37GHzの降水頂に対する感度の違いに着目し、二周波を利用したことが大きな特徴である。

陸上の降雨推定に関して GPROF アルゴリズムでは、Ver.5 においては SSM/I で用いられてき

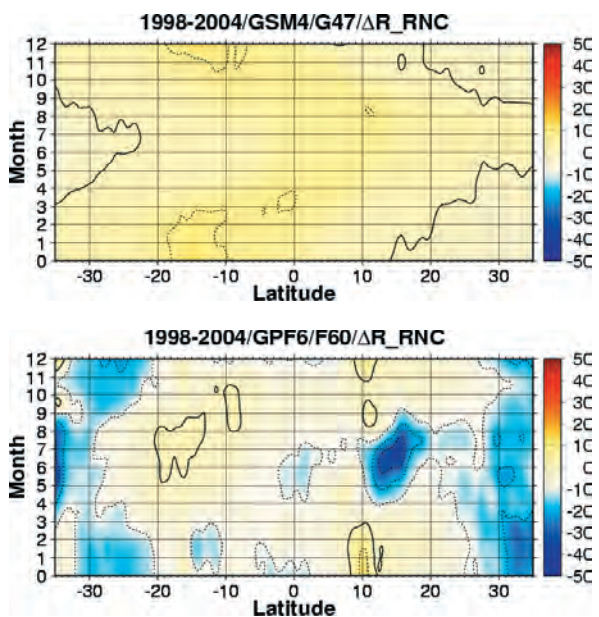


図6 GSMaP_TMI (Ver.4.7.0) [上] および GPROF (Ver.6) [下] の降雨判定誤差. 緯度および季節変化を示す. 1998-2004年の7年間のデータを利用.

た 85GHz からの非常に簡便で経験的な手法を用いており (Kummerow et al. 2001)、また Ver.6 におけるリトリバル部分での改良は海上降雨推定のみで、陸上降雨推定に関してはせいぜい雲解像モデルのデータベースを追加したに過ぎない (Olson et al. 2006)。これに対して我々は、陸域の降雨判定の開発・改良と共に、二周波散乱アルゴリズムの導入によって、これまでのマイクロ波放射計アルゴリズムの常識を越えるレベルで PR と一致する結果を得た。図 7 にアフリカ大陸における PR 2A25 降雨量、GSMaP 降雨量と PR 2A25 降雨量の差、GPROF 降雨量と PR 2A25 降雨量の差、の時間-緯度断面図を示す。アフリカ大陸の北緯 10 度付近では、PR でほとんど降雨を推定していない冬の時期に GPROF は降雨を推定している場合があり、陸域の降雨判定に大きなエラーが存在している。

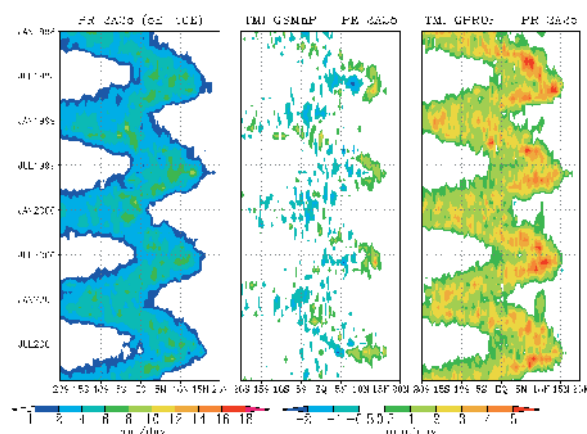


図 7 アフリカ大陸における [PR 2A25 降雨量], [GSMaP 降雨量-PR2A25 降雨量], [GPROF 降雨量-PR2A25 降雨量] の時間-緯度断面。

④ 全球降水マップ作成グループ

本研究グループの役割は、複数の人工衛星搭載マイクロ波放射計データから求められた降水量を合成、全球降水マップを作成、評価することである。更に高分解能化するため、静止気象衛星搭載赤外放射計データを用いた複合アルゴリズムの開発を行っている。

各グループによって得られた知見を元に改良された GSMaP アルゴリズムを用いて、降水マップを作成した。最新版のアルゴリズム (Ver.4.8.4) による処理状況を表 1 にまとめる。図 8 に、TMI, AMSR-E, AMSR, SSM/I を合成した

1998-2006 の 9 年間の月平均降雨量の降水マップ (GSMaP_MWR) を示す。図 9 は、1991 年 1 月～2006 年 12 月の赤道 (5S～5N) 上で平均した GSMaP_SSM/I の経度時間断面図である。ここで、

表 1 GSMaP 降水量プロダクトの一覧表

	プロダクト名	期間	分解能
衛星搭載マイクロ波放射計ごとに計算した降水量プロダクト	GSMaP_TMI	1998/1～2006/12	時間：1時間、1日、1ヶ月 空間：0.25 × 0.25 度
	GSMaP_AMSR-E	2002/6～2006/12	
	GSMaP_AMSR	2003/4～2003/10	
	GSMaP_SSM/I	1991/1～2006/12	
複数マイクロ波放射計合成降水量プロダクト	GSMaP_MWR	1998/1～2006/12	時間：1時間、1日、1ヶ月 空間：0.25 × 0.25 度
	GSMaP_MWR+	2003/1～2006/12	
赤外・マイクロ波放射計複合降水量プロダクト	GSMaP_MV_RT(+), GSMaP_MV(+)	2004/1～2005/12	時間：1時間、1日、1ヶ月 空間：0.1 × 0.1 度
	GSMaP_MVK_RT(+), GSMaP_MVK(+)		

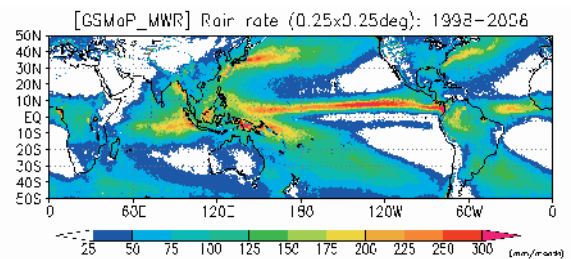


図 8 GSMaP_MWR による 1998 年から 2006 年の 9 年分の気候値

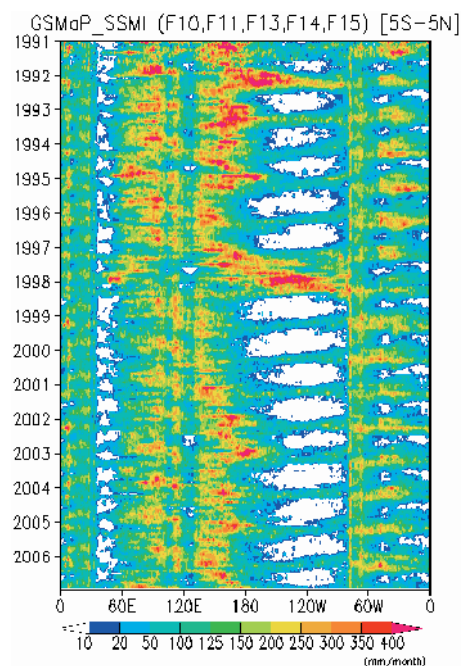


図 9 GSMaP_SSM/I データの 1991 年 1 月～2006 年 12 月の経度時間断面図。

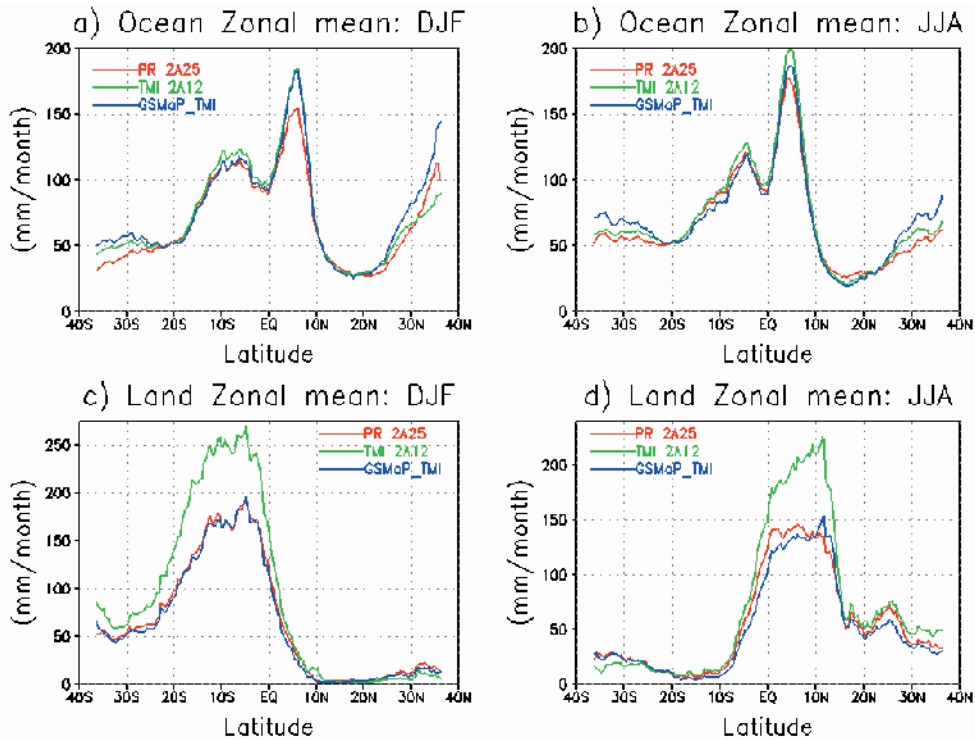


図10 1998～2006年の冬季(DJF)及び夏季(JJA)の帯状平均値の比較。(a)海上冬季,(b)海上夏季,(c)陸上冬季,(d)陸上夏季。

DMSP F10, F11, F13, F14, F15 に搭載されているSSM/I からリトリバーブルされた降水量を合成している。1991 春-1992 夏、1997 春-1998 春のエルニーニョ、1998 年夏-2000 年春のラニーニャに伴う西太平洋から東太平洋に亘る降水域の変化が見られる。

次に、GSMaP_TMI Ver.4.8.4 と TMI の標準プロダクトである GPROF アルゴリズムによる 2A12 Ver.6 とを、TRMM/PR 2A25 Ver.6 を基準値として用い、1998 年 1 月から 2006 年 12 月までの 9 年間で比較した。TMI プロダクトは PR の観測幅内の値のみを用いる。ここでは、緯度経度 0.5 度格子点値で比較を行った。

図 10(a)は冬季(DJF)、図 10(b)は夏季(JJA)の海上で帯状平均値を計算し、比較した結果である。熱帯海上では、GSMaP_TMI は 2A12(GPROF) に近く、2A12(GPROF) と比べるとわずかに小さい。2A25(PR) は GSMaP よりさらに小さい。北半球冬季中緯度海上では、GSMaP は 2A25(PR) より大きく、2A12(GPROF) は 2A25(PR) より小さい傾向がある。図 10(c)は冬季(DJF)、図 10(d)は夏季(JJA)の陸上の帯状平均値の比較である。陸上で、熱帯の降水量が多く、2A12(GPROF) は、2A25(PR) との違いが大きい、GSMaP は

全体的に 2A25(PR) とよく一致している。

マイクロ波放射計は、すべてが低軌道衛星に搭載されているため、3 時間以内、10 数 km といった分解能では、サンプリングエラーの問題が、複数の衛星を組み合わせたとしても、顕著である。そのため、赤外放射計から算出される雲の移動ベクトルを用いて、マイクロ波放射計による観測間隔を補間する手法の開発を行った。アルゴリズムの概要を、図 11 に示す。入力データは、1 時間前の降水マップ、1 時間前から現在までに観測されたマイクロ波放射計データから算出した降雨強度データ、現在及び 1 時間前の赤外放射計データである。1 時間前及び現在の赤外放射計データの雲の画像間での相互相関を計算し、その相互相関係数が最も大きくなるような画像間のバイアス値(移動ベクトル)を計算する。これを基に、1 時間前の降水マップにおける各ピクセルの降水を移動させ、さらに、1 時間前から現在までにマイクロ波放射計により観測された降水量を重ねることにより、現在の降水マップを得る。

さらに、時間の経過と共に推定雨量を移動ベクトルに基づいて移動させる通常の Forward プロセス(降水マップのプロダクト名は GSMaP_MV_RT)と共に、時間軸上で逆方向にマイクロ

波放射計による推定雨量を移動ベクトルに基づいて移動させる Backward プロセスを導入している。そして、Forward プロセスと Backward プロセスの重み付け平均を計算することにより、最終的なプロダクトとしている（プロダクト名は GSMaP_MV）。ただし、雲移動ベクトルのみの手法では、降雨量の増大や減少が、考慮されていないため、本研究では、カルマンフィルタによる補正を加えている。カルマンフィルタとは、雑音を含む観測値から真の値（信号成分）の最適な推定値を求めるフィルタ（アルゴリズム）であり、カルマンフィルタの導入により、降雨の増大・減少プロセスを考慮することが可能となる。カルマンフィルタを導入したプロダクト名は、GSMaP_MVK_RT および GSMaP_MVK である。

図 12 に、一例として、作成された 2005 年 7 月 8 日午前 0 時 (UTC) の降水マップ (GSMaP_MVK) を示す。黒く示された軌道の部分の降雨（青色）が過去 1 時間の間に 5 台のマイクロ波放射計によって新たに観測された降雨を示す。白い領域の降雨（青色）は、赤外放射計データを用いた 1 時間前の降水マップの移動とカルマンフィルタに推定によって補間されたものである。このように、マイクロ波放射計の未観測域が、IR データによる補間手法によって、補間され、南緯 60 度から北緯 60 度に至るほぼ全球の降水マップが時間分解能 1 時間、空間分解能緯度経度 0.1 度の分解能で作成される。IPWG/ PEHRPP にわが国を代表して参加し、レーダー・アメダス解析雨量マップを用いて、日本周辺の各国の高時間・高空間降水マップの検証を実施したところ、GSMaP 作成の高時間・高空間分解能降水マップは、少なくともわが国周辺においては、全世界の他の高時間・高空間分解能降水マップに遜色がないことが明らかに

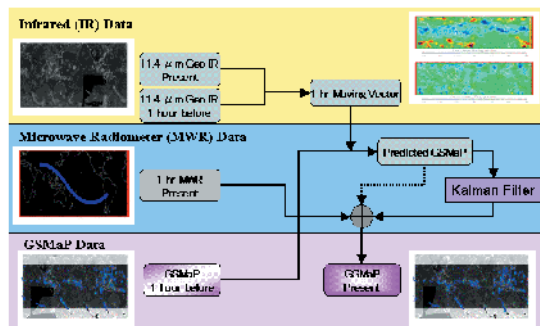


図11 高時間・高空間分解能マップ作成マイクロ波・赤外放射計複合アルゴリズムのフロー。

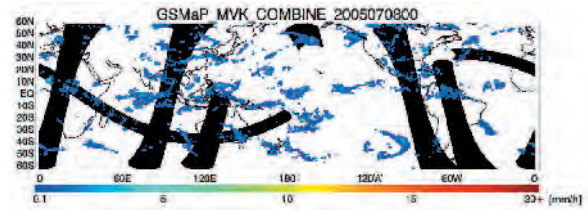


図12 作成された空間分解能 0.1° の全球降水マップの一例（時間分解能 1 時間）。背景が黒の部分 がマイクロ波放射計のみによる観測領域。

なった。一方、IPWG/ PEHRPP の比較の過程で、サンプリングエラーの更なる軽減に、本来は気温・水蒸気の鉛直高度分布を算出する目的で開発された NOAA15, 16, 17, 18 号衛星に搭載されたマイクロ波サウンダ AMSU データの利用が可能であることに気づき、NOAA がリトリバルした AMSU 降水量データ (Ferraro et al. 2005) と、当チームの GSMaP アルゴリズムによって当チームが解析したイメージャのデータを共に用いた全球降水マップを作成した（表 1 で、AMSU データを利用している場合に + が付く。+ は、+ が付いたプロダクトと付かないプロダクトの 2 種類があることを示す。）。AMSU によるマイクロ波サウンダの降水プロダクトを導入した GSMaP_MWR+ をレーダー・アメダス解析雨量マップを用いて検証したところ、GSMaP_MV や GSMaP_MVK と同程度に良い結果を示しており、マイクロ波サウンダによる降水推定はマイクロ波放射計による降水推定よりも精度の面では劣っているが、サンプリングエラーを減少させる効果が大きいことが分かった。

5. 結論

図 13 は、雨量推定がバージョンアップと共にどのように向上してきたかを示している。1998 年 1 月における海上、陸上それぞれにおける経度平均降水量が、アルゴリズムバージョン番号が上がるに従い、赤線で示した TRMM/PR による平均降水量に近づいていることが定量的に示されている。

GSMaP アルゴリズムは、TRMM/PR で約 9 年間にわたって観測された降水データならびに地上降雨レーダ観測データを基に作成された降水物理モデルに基づいており、その結果作成された TRMM/TMI の全球降水マップは予測されたように TRMM/PR の作成する全球降水マップと非

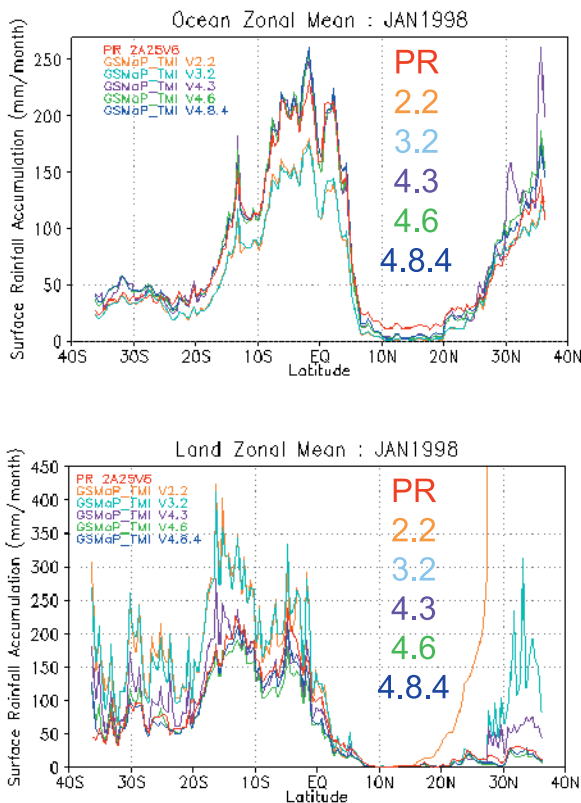


図13 1998年1月における(左)海上(右)陸上の帯状平均値の比較。赤はTRMM/PR 2A25 Ver.6。それ以外の色はGSMaP_TMIで、アルゴリズムのバージョンが異なるプロダクト。藍色は最新のV4.8.4でPRと良く一致している。GSMaP_TMIはPRの観測幅のみを解析に使用。

常に近いものとなっている。海上においては、NASA/GSFCが1990年以来開発し、現在も改良を続けている最新版のアルゴリズム (GRPOF Ver.6) の処理結果と比較しても遜色のない降雨強度を算出できるようになっている。陸上降雨推定においては、これまでのマイクロ波放射計アルゴリズムの常識を越えるレベルでPRの結果と一致に至った。研究の目標である信頼できる衛星搭載マイクロ波放射計アルゴリズムの開発については、ほぼ達成できたと考えている。

作成された全球降水マップをDVD (No. 1, No. 2は、国内ユーザ中心に、700部ずつ配布済、DVD No. 3は、本年10月を目標に作成中)、インターネット経由 (Home Page Addressは、<http://www.radar.aero.osakafu-u.ac.jp/~gsmmap/>) で全世界のユーザに発信した。また、開発したアルゴリズムについては、洪水予警報利用などの実利用目的のために、土木研究所 (PWRI) と宇宙航空

研究開発機構 (JAXA) が共同で実施中の、発展途上国向け洪水予警報システムに衛星推定降水量を利用することを旨とした「洪水予測実現のための衛星降水量推定精度向上及び利用手法の検討に関する研究」に提供した。

6. 今後の展開

GSMaP アルゴリズムおよびGSMaP アルゴリズムが教師役として用いたPR アルゴリズムが、地上雨量計に比べて地上降雨量を過少評価していることが最近明らかになってきた。TRMM/PRが用いている融解層よりも上空の雪の層のモデル化を正しく行う必要がある。観測データが、取得しにくい領域であるが、観測データを積み重ねて信頼できるモデルを作成し、PRとマイクロ波放射計アルゴリズムを一体として改良する必要がある。難しい問題であるが、安直な解決法を取るのではなく、これまで進めてきた正攻法で研究を進めるべきと考える。PR, GSMaP共に改良された融解層よりも上空の雪の層のモデルを導入することによってこの問題が解消されれば、開発途上国などの降水の地上観測のまばらな領域で、防災や洪水の対策への支援をすることが可能となるであろう。

軌道上に現在ある降水観測に適した5台 (TRMM/TMI, Aqua/AMSR-E, DMSP F13, F14, F15/SSM/I) の衛星搭載マイクロ波放射計に対して降雨推定アルゴリズムを開発したが、サンプリング頻度が十分ではない。来るべきGPM (Global Precipitation Measurement 全球降水観測計画) コア衛星運用時においても、NOAA15, 16, 17, 18号衛星に搭載されたマイクロ波サウンダ AMSU データを用いた降雨推定アルゴリズムが必要であり、GSMaP_MWRと共通した降水物理モデルに基づくGSMaP_AMSUアルゴリズムの開発を予定している。リトリバル部分に関しては新たな開発が必要であるが、本研究の降雨判定、非一様性の補正、ならびに散乱アルゴリズムの開発を通して培った経験と技術が、大きな威力を発揮するであろう。

参考文献

Aonashi, K. and G. Liu, 2000: Passive microwave precipitation retrievals using TMI during the Baiu period of 1999. Part I: Algorithm

description and validation, *J. Appl. Meteor.*, 39, 2024-2037.

Ferraro, R. R., and Coauthors, 2005: NOAA operational hydrological products derived from the Advanced Microwave Sounding Unit. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 43, 1036-1049.

Kummerow, C., and Coauthors, 2001: The evolution of the Goddard profiling algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors. *J. Appl. Meteor.*, 40, 1801-1820.

Olson, W., and Coauthors, 2006: Precipitation and latent heating distributions from satellite passive microwave radiometry. Part I: Improved method and uncertainties. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 45, 702-720.

7. 主要な成果報告等

(1) 原著論文 (国内誌 18 件、国際誌 26 件)

(掲載予定 3 件を含む)

以下、主なもの 10 件を示す。

1. Seto, S., N. Takahashi, and T. Iguchi, Rain/no-rain classification methods for microwave radiometer observations over land using statistical information for brightness temperatures under no-rain conditions, *J. Appl. Meteor.*, 44(8), 1243-1259, 2005.
2. 牛尾知雄, 岡本謙一, 井上豊志郎, 重尚一, 橋爪寛, 飯田泰久, 全球雨量マップ作成のための雲赤外データ利用の検討について, *日本リモートセンシング学会誌* 25(4), 367-371, 2005.
3. Iida, Y., K. Okamoto, T. Ushio, and R. Oki, Simulation of sampling error of average rainfall rates in space and time by five satellites using radar-AMeDAS composites, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01816, doi:10.1029/2005GL024910, 2006.
4. Shige S., H. Sasaki, K. Okamoto, T. Iguchi, Validation of rainfall estimates from the TRMM precipitation radar and microwave imager using a radiative transfer model: I. Comparison of the version-5 and -6 products, *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, doi: 10.1029/2006GL026350, July

2006.

5. Takayabu N. Y., Rain-yield per flash calculated from TRMM PR and LIS data and its relationship to the contribution of tall convective rain, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L18705, doi:10.1029/2006GL027531, Sept 2006.
6. Ushio T., D. Katagami, K. Okamoto, and T. Inoue, On the use of split window data in deriving the cloud motion vector for filling the gap of passive microwave rainfall estimation, *SOLA*, Vol. 3, 001-004, doi: 10.2151/sola, February 2007-001, 2007.
7. Kozu T., K. K. Reddy, S. Mori, M. Thurai, J. T. Ong, D. N. Rao, and T. Shimomai, Seasonal and diurnal variations of raindrop size distribution in Asian monsoon region. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 84A, CPEA Special Issue, 195-209, 2006.
8. 佐々木宏, 重尚一, 岡本謙一, TRMM 降雨プロダクト検証のための輝度温度シミュレーションの高度化, *日本リモートセンシング学会誌*, 27(2), 153-166, 2007.
9. Aonashi, K., T. Koike, K. Muramoto, K. Imaoka, N. Takahashi, G. Liu, and Y.-J. Noh, 2007, Physical Validation of Microwave Properties of Winter Precipitation Over the Sea of Japan, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 45(7), 2247-2258, 2007.
10. Kubota, T., S. Shige, H. Hashizume, K. Aonashi, N. Takahashi, S. Seto, M. Hirose, Y. N. Takayabu, K. Nakagawa, K. Iwanami, T. Ushio, M. Kachi, and K. Okamoto, Global Precipitation Map using Satelliteborne Microwave Radiometers by the GSMaP Project : Production and Validation, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 45(7), 2259-2275, 2007.

(2) 口頭報告

- ① 国際会議発表 : 182 件 (招待講演 : 15 件)
- ② 国内学会等発表 : 153 件 (招待講演 : 3 件)

(3) 特許出願 (国内 1 件)

(4) 受賞

1. 2002年武田賞 岡本謙一 (Charles Elachi, 畚野信義と共同受賞)「地球環境モニタリングのための人工衛星搭載マイクロ波レーダの開発」2002年11月20日
2. 平成18年度 土木学会 水工学論文奨励賞 瀬戸心太「TRMM/PR 降雨強度推定アルゴリズムの再検討－表面参照法に起因するバイアス－」(土木学会 水工学論文集 第50巻掲載論文に対して) 2007年3月6日
3. 平成19年度科学技術分野の文部科学大臣表

彰 科学技術賞 (研究部門) 井口俊夫「衛星搭載レーダを用いた降雨強度推定アルゴリズムの開発研究」2007年4月17日

4. 2007年猿橋賞 高藪縁「熱帯における雲分布の力学に関する観測的研究」2007年5月26日

(5) 報道

1. 衛星レーダで降雨の原因分析, 日経産業新聞, 2004/06/19

英文略語表

AMSR: Advanced Microwave Scanning Radiometer : 高性能マイクロ波放射計
AMSR-E: AMSR for EOS (Earth Observing System)
AMSU: Advanced Microwave Sounding Unit : 改良型マイクロ波サウンダ
CMAP: CPC Merged Analysis of Precipitation
COBRA: CRL Okinawa Bistatic Polarimetric Radar : NICT 沖縄偏波降雨レーダ
CPC: Climate Prediction Center
DMSP: Defense Meteorological Satellite Program : 米軍気象衛星プログラム
GEWEX: Global Energy and Water Cycle Experiment : 全球エネルギー・水循環観測計画
GPCC: Global Precipitation Climatology Centre
GPCP: Global Precipitation Climatology Project
GPM: Global Precipitation Measurement Mission : 全球降水観測計画衛星
GPROF: Goddard Profiling Algorithm : NASA/GSFC 開発マイクロ波放射計アルゴリズム
GSFC: Goddard Space Flight Center : ゴダード宇宙飛行センター
GSMaP: Global Satellite Mapping of Precipitation
GSMaP_MWR: GSMaP_MicroWave Radiometer
GSMaP_MV: GSMaP_Moving Vector
GSMaP_MVK: GSMaP_Moving Vector with Kalman Filter
GSMaP_MV_RT: GSMaP_MV_Real Time
GSMaP_MVK_RT: GSMaP_MVK_Real Time
IPWG: International Precipitation Working Group
IWC: Ice Water Content : 氷水量
IWP: Ice Water Path : 積算氷水量
JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency : 宇宙航空研究開発機構
LAPS: Lower Atmosphere Precipitation Study
LIS: Lightning Imaging Sensor : 雷観測装置
MP: Multi-Parameter Radar: 防災科学技術研究所のマルチパラメータレーダ
MRR: Micro Rain Radar : マイクロレインレーダ
NASA: National Aeronautics and Space Administration : アメリカ航空宇宙局
NICT: National Institute of Information and Communications Technology : 情報通信研究機構
NIED: National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention : 防災科学技術研究所
NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration : アメリカ海洋大気圏局
PEHRPP: Program to Evaluate High Resolution Precipitation Products
RPF: Rainyied Per Flash : 降雨量／発雷比
PR: Precipitation Radar : 降雨レーダ
PWRI: Public Works Research Institute : 土木研究所
SSM/I: Special Sensor Microwave Imager : DMSP 搭載マイクロ波放射計
TMI: TRMM Microwave Imager : TRMM マイクロ波観測装置
TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission : 熱帯降雨観測衛星
WCRP: World Climate Research Program : 世界気候研究計画
WPR: Wind Profiling Radar : ウインドプロファイラ
2DVD: Two Dimensional Video Disdrometer : 二次元ビデオ雨滴粒径分布観測装置