

# 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

地球規模の降水分布とその変動は、人間活動や社会システムに重要な影響を及ぼす。信頼性のある観測データに基づく地球規模の高精度高分解能降水マップの作成は、気候変動に伴う降水量変動のモニタリング、水循環モデルの構築、私達の生活に密接にかかわっている水資源管理および農業生産性予測等の社会基盤にとって必要不可欠なものである。

しかし、全球の降水量を均質な精度で観測するのは、容易ではなく、衛星からのリモートセンシングがほぼ唯一の手段である。そのため、衛星データを用いた降水分布図の作成は、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、従来より行われてきた。しかし、この手法では、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水強度を推定しており、降水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、マイクロ波放射計の温度校正方法が改良されたことに伴い、GPROF (Kummerow, 2001) に代表されるようなマイクロ波放射計アルゴリズムが開発され、降水強度の推定精度が飛躍的に向上している。これは、マイクロ波放射計が、降雨からの放射を、赤外放射計に比べて、より直接的に観測していることによる。

現在、降水観測能力を有する5台程度のマイクロ波放射計が軌道上にあり、その数は今後増加する予定である。即ち、衛星からの降水観測ミッションにとって、マイクロ波放射計は将来、中心的なセンサとなって行くものと考えられる。一方、マイクロ波放射計とは異なる測定原理により降雨を観測する、熱帯降雨観測衛星 (TRMM : Tropical Rainfall Measuring Mission) 搭載降雨レーダ (PR) は、降水の3次元観測が可能で、降雨プロフィールに加え、エコー頂高度、融解層高度などの情報を得ることが出来る。そのため、他のセンサのアルゴリズム開発に対して多大な影響を与えている。しかし、TRMMにおいても

PRとTRMM搭載マイクロ波放射計 (TMI) のアルゴリズムは、共通した降水物理モデルに基づいて開発されたものではなく、結果的には、PRとTMIで観測した降雨強度には、未だに有意な差が生じている。この差を埋めるため、降雨レーダ等で観測された現実の降雨情報を正しく反映した降水物理モデルから出発したマイクロ波放射計アルゴリズム開発の必要性が指摘されている。

以上のような状況の中で、衛星搭載降雨レーダと整合性のある高精度なマイクロ波放射計アルゴリズムを開発しておけば、マイクロ波放射計の単独ミッションにおいても、高精度な降水リトリバルが可能になる。

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、TRMM/PRデータ、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て全球の高精度、高分解能降水マップを作成することを目的とする。さらに本研究により開発された手法はTRMMを継承して2010年頃の打ち上げが予定されている二周波降雨レーダを搭載した主衛星と、マイクロ波放射計のみを搭載した8機程度の副衛星から構成されるGPM (Global Precipitation Measurement : 全球降水観測計画) などの、将来の衛星データを用いた降水マップ作成に寄与することができる。

## 2. 研究手法・体制

本研究チームは、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から構成され、相互に連絡を密にし研究を進めている。当研究チームの愛称は、GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation) であり、開発中のアルゴリズム、作成した全球降水マップの名称としても用いている。図1にGSMaPの全体構成を示す。

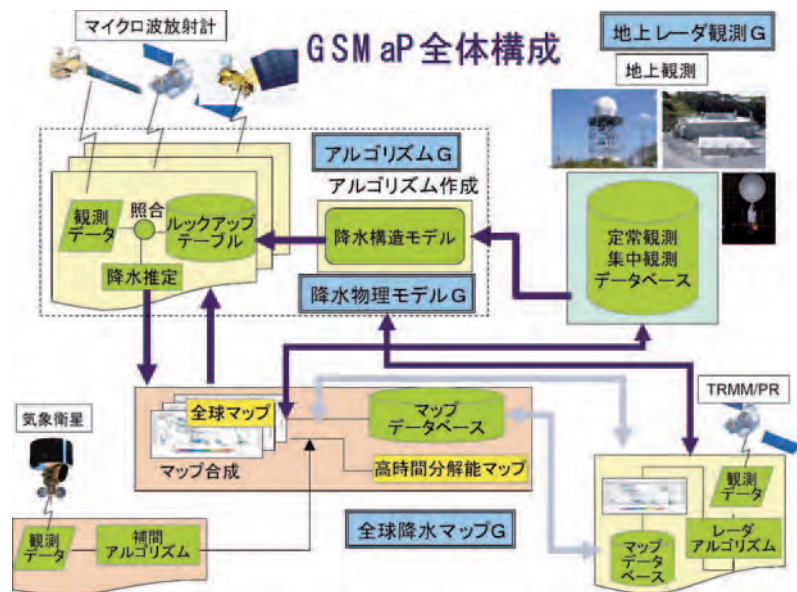


図1 GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation) の全体構成

地上レーダ観測グループにおいて、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ィール）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する。また、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る。次に、降水物理モデル開発グループでは、地上レーダ観測データベースや TRMM/PR データ等を用いて、降水を特徴づける物理量である、降水の鉛直プロフィール、雨滴粒径分布、融解層構造等について、マイクロ波放射計観測と関連付けるための放射伝達方程式に利用可能な降水物理モデルを作成する。さらに、降水強度推定アルゴリズム開発グループにおいて、3章で詳述する青梨アルゴリズムを基礎としたマイクロ波放射計アルゴリズムの開発を行う。青梨アルゴリズムとは、当研究チームのメンバーである気象研究所の青梨和正氏が基本的な開発を行ったアルゴリズムを指し、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放射輝度温度と、放射伝達方程式によって計算される放射輝度温度との差が最も小さくなるような降水量を、非線形最小二乗法により推定するアルゴリズムである。最後に、全球降水マップ作成グループ

は、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、さらなるアルゴリズムの改良・開発へとフィードバックする。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、それぞれに対してマップを作成し、その効果の評価を行っている。一方、高時間、高空間分解能のマップ作成手法として、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補間するアルゴリズム開発をマイクロ波放射計アルゴリズムと平行して行っている。

本研究チームには、大阪府立大学、情報通信研究機構、宇宙航空研究開発機構、気象研究所、防災科学技術研究所、島根大学、北海道東海大学、首都大学東京、東京大学、科学技術振興機構から約30名の研究者が参加している。

### 3. 降水強度推定アルゴリズム

ここでは、本研究の根幹をなす衛星搭載マイクロ波放射計による降水強度推定アルゴリズムの原理と本研究チームで採用しているアルゴリズムの特徴について述べる。

衛星搭載マイクロ波放射計が観測するのは、簡単に言えば、地球表面からの放射に降水粒子による放射（吸収）や散乱の効果が加わったものであ

る。マイクロ波帯では降水粒子の放射や散乱の効果は、降水粒子が液体（雨）か、固体（雪、霰等）かで異なり、さらに、波長によっても変化する。地球表面からの放射も海上と陸上で異なり、海面からの放射は射出率が小さいため低い放射輝度温度になっているのに対して、陸面からの放射は射出率が1に近い物理的な温度に近い放射輝度温度となる。波長（周波数）依存性をみると長波長帯（1 cm 以上；30GHz 以下）では、液体の水粒子からの放射の効果が卓越するため、海上のように海面からの放射が小さい領域では、降雨域が高放射輝度温度域に対応する。しかし、陸上では陸面からの放射が大きいため区別が難しい。一方、短波長帯では雪や霰などの固体降水の散乱の効果が大きくなるので、上層に雪などが多く存在する領域が低放射輝度温度域となる。これらのマイクロ波の特徴から、1）長波長帯では、海上の放射輝度温度が、海面から0℃高度まで積算した降水量と対応する；2）短波長帯では、海陸とも放射輝度温度が、0℃高度より上層の固体降水量の積算値と対応する；と概ね見なすことができる。

降水強度推定アルゴリズムは、マイクロ波のこのような特徴を利用して、海上では主に長波長帯のチャンネルで観測する降雨からの放射による放射輝度温度上昇から降水強度を推定し、陸上では短波長帯のチャンネルで観測する固体降水からの散乱による放射輝度温度降下から降水強度を推定する。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（降水プロフィール、雨滴粒径分布、降水粒子が雨から雪に変わる高さ、即ち0℃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。このことからわかるように、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。

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, 85.5GHz 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。このアルゴリズムでは、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、これを基に非一様な降水に対する放射輝度温度を計算している。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。

マイクロ波放射計の降水強度推定アルゴリズムでは、より現実的な降水物理モデルを構築することや、0℃高度以上の固体降水による散乱情報から地表面付近の降水量を推定する陸上用のアルゴリズムを改良すること、が重要であり、これらがアルゴリズム開発研究の中心となっている。

## 4. 研究成果

### ①地上レーダ観測グループ

本グループの目的は、高機能・高精度な地上降雨レーダ群で降雨の三次元構造の詳細な観測を行い、降水データベースを構築し、降水物理モデルの開発に役立てることである。この降水データベースは、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にも利用される。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 5 GHz 偏波ドップラー降雨レーダ（COBRA）、400MHz ウインドプロファイラ（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 2 周波マルチパラメータレーダ（35GHz と 95GHz；MP-Ka/W）、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 グループと協力して「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 2 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。観測期間中に取得されたデータや画像は，以下の Web にて公開している。

<http://www3.nict.go.jp/dk/c218/okn-baiu04/index.html>

現在，これまでに取得した観測データの解析を行って，雨滴粒径分布などの降水物理量の導出およびそのデータベース作成を進めている。COBRA データを処理した減衰補正済み偏波パラメータ，降雨強度，雨滴粒径分布パラメータの4次元データベースが完成に近づいている。また，事例解析により，対流性，層状性等の降水タイプ

別の鉛直構造（降雨強度、粒径分布、偏波パラメータ）のモデル化への取組みを進めている。

観測事例として，鉛直上向きの連続観測を実施した MP-Ka レーダによる高度時間断面図を図3に示す。本事例では，12～15時 JST(日本標準時)に対流性降雨が大宜味サイト上空を通過後，16～24時 JST まで層状性の降雨域におおわれていた。

また，400MHz WPR によって観測されたスペクトルデータから大気エコーと降水エコーを分離し，降水スペクトルから粒径分布の鉛直プロフィールを導出している。

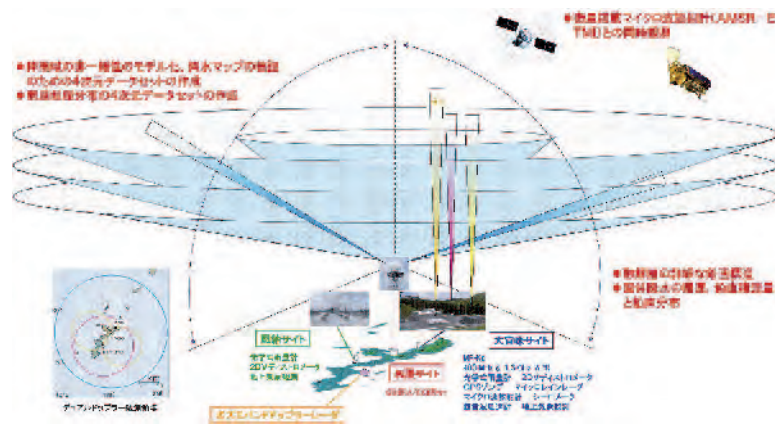


図2 2004年沖縄梅雨集中観測 (Okn-Baiu-04) の観測概念図

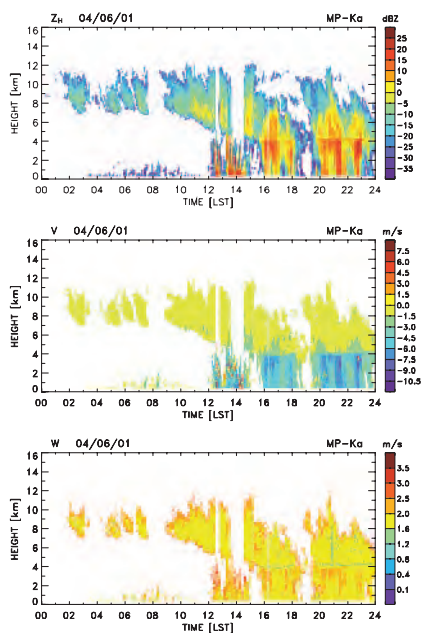


図3 MP-Kaレーダで観測された2004年6月1日の高度時間断面図。上から反射強度，ドップラー速度，スペクトル幅。

## ②降水物理モデル開発グループ

本グループは，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）に関して，降雨レーダで用いるモデルと整合性を有する降水物理モデルを構築しリトリバルアルゴリズムへ導入することを目的としている。これまで，研究ポイントの洗い出しを行い，検討すべき降水物理モデルの項目を「降水プロフィールモデルの導入」，「融解層モデルの導入」および，「雨滴粒径分布モデルの導入」と決定した。

マイクロ波放射計が観測するのは降水層による放射および散乱の積算量であるため，マイクロ波放射計による降水量の推定にはプロフィール情報が重要である。これまで，降水プロフィールは，例えば鉛直方向に一様なものが用いられてきたが，本研究では，降水タイプ毎のプロフィールを用いることにより，実体により近いモデルをアルゴリズムへ導入することを目指した。降水タイプについては，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7つのタイプに分類できることが明らかになり、(即ち、海上では「浅い雨」,「温帯低気圧に伴う雨」,「組織化したメソスケールの雨」の3タイプ、陸上はそれらに「夕立」が加わった), それに地域的に特殊であるチベットを加えた8つの降水タイプ(陸上5つ、海上3つ)毎、かつ降水強度別に特徴的な降水プロフィールの抽出を行った。図4に示すこれらの降水プロフィール情報を用いてリトリバルを行った結果、従来の降水プロフィールを用いてリトリバルを行った場合に比べて改善が見られた。

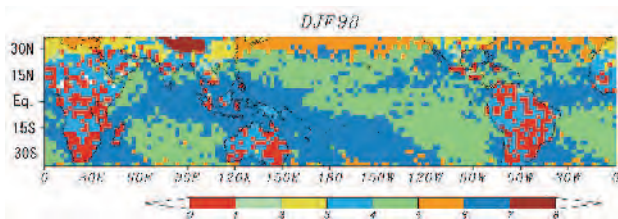


図4 降水タイプ分類(1997年12月—1998年2月)。タイプ毎の降水の特徴は、タイプ1「夕立」、タイプ2「浅い雨(陸上)」,タイプ3「温帯低気圧に伴う雨(陸上)」,タイプ4「組織化したメソスケールの雨(陸上)」,タイプ5「浅い雨(海上)」,タイプ6「温帯低気圧に伴う雨(海上)」,タイプ7「組織化したメソスケールの雨(海上)」,タイプ8「チベット域」,をそれぞれ示す。

また、TRMM/PRで用いられている融解層モデルをリトリバルアルゴリズムに導入して、降水強度についてTRMM/PRとの比較を行うと融解層導入後のほうがPRが与える降水強度との対応が良くなることが明らかになった。TRMM/PRで用いられている雨滴粒径分布をマイクロ波放射計アルゴリズムの雨滴粒径分布モデルとして利用することについては、その妥当性をTRMM/PRで用いられている雨滴粒径分布を実際の地上観測で得られた雨滴粒径分布と比較することにより検討している。

### ③降水強度推定アルゴリズム開発グループ

本研究グループでは、青梨アルゴリズムを基礎にして、グループ独自のマイクロ波放射計アルゴリズム開発を目指し、研究を進めている。これまで、本体の「降水リトリバルアルゴリズムの改良」,「陸上降雨判定アルゴリズム開発」,「放射伝

達モデルによるアルゴリズム評価」,「数値雲モデルによるアルゴリズムの評価」などの課題に取り組んでいる。海上降水のリトリバルに関して、本研究のアルゴリズム(GSMaP)とGPROFを用いてTMIデータからリトリバルされた降水強度とTRMM降雨レーダ(PR)で観測された降水強度を比較すると、図5に示すように、GPROFは10mm/hr以下の降水を過大評価する傾向があるのに対してGSMaPはTRMM/PRとより1対1に近い対応を示すことが分かり、GSMaPが充分成熟していることをうかがわせる。ただし、GSMaPは、背の高い降水に対して降水強度を過大に評価する場合があります、散乱アルゴリズムの改良の必要性が明確になった。「陸上降雨判定アルゴリズムの開発」については、TRMM/PRとTMIの同時観測データを利用して無降雨時の85GHzと21.3GHzの放射輝度温度データベースを作成し、それらの線形回帰式の誤差の標準偏差を利用した閾値を定め、観測された85GHzの放射輝度温度が閾値よりも低いときは降水ありと判定している。GSMaPのアルゴリズムに、この降雨判定手法を導入して長期間のデータを処理した。図6にTRMM/PRを基準としたときのGPROFとGSMaPの降雨判定に起因する降水強度推定誤差を示す。GSMaPは全体的にやや過大評価する傾向があるが、GPROFと比較して誤差の絶対値は小さくなっている。

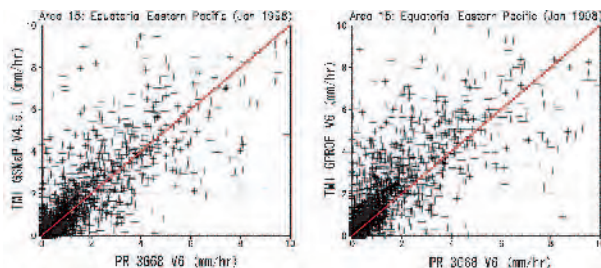


図5 1998年1月熱帯太平洋(北緯0-10度、西経100-150度)に於いて、TRMM降雨レーダ(PR)で観測された降水強度とGSMaP(左図)及びGPROF(右図)を用いてTMIからリトリバルされた降水強度の散布図。



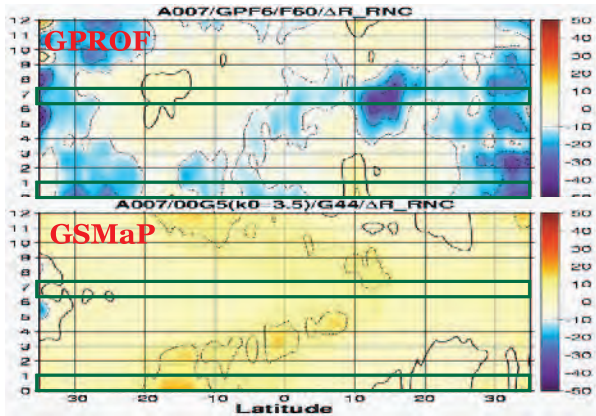


図6 GPROFとGSMaPの陸上降雨判定に起因する降水推定誤差(経度平均)の緯度-月別分布。

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.4.5)による処理状況を表1にまとめる。

表1 データ処理状況

センサ名	処理済みの期間
TMI	1998年1月～2000年12月 2003年1月～2004年12月
AMSR-E	2003年1月～2004年10月
AMSR	2003年4月～2003年10月
SSM/I(F13, F14, F15)	2003年9月

一例として、TMIによる5年間(98, 99, 00, 03, 04年)の降雨量の気候値を図7に、AMSR-Eによる2003年6月から8月の3ヶ月の平均降水マップを図8に示す。

現在、降水強度推定アルゴリズム開発グループと協力して編成した研究チームによって、作成した最新バージョンの月平均降水マップを評価し、アルゴリズム開発にフィードバックしている。降水マップの評価は、帯状平均値(緯度変化)、帯状平均値(経度変化)、選定領域におけるヒスト

グラム解析、散布図解析、降水タイプ別解析などを用いて、TRMM/PR, GPROF作成マップとの比較・解析を実施している。TRMM/PRは、現在の所、最も信頼出来る降水強度をリトリーブすることが出来ると考えられており、GSMaPの評価においてもTRMM/PRを基準としている。

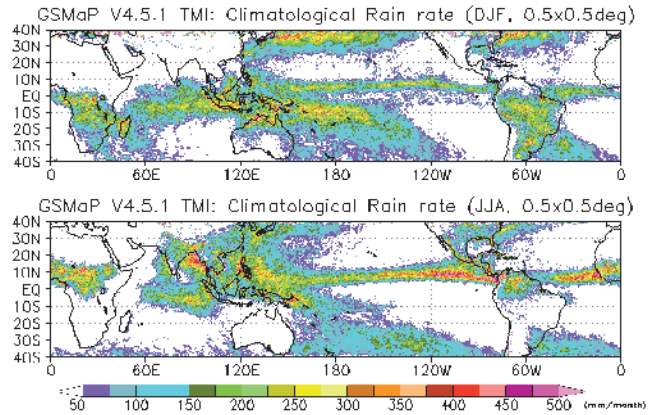


図7 GSMaP/TMIによる98, 99, 00, 03, 04年の平均降水マップ。12～2月平均値(上)。6～8月平均値(下)。(mm/month)

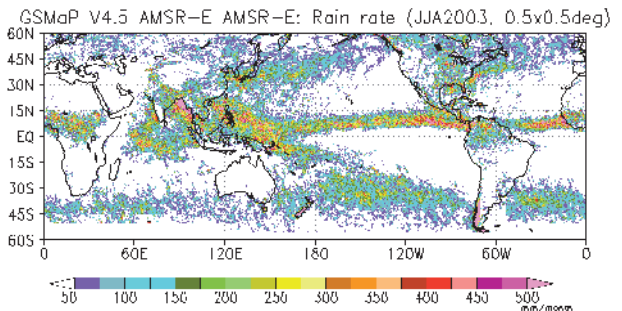


図8 AMSR-Eデータを用いて作成された月平均降水マップの例(2003年6月, 7月, 8月, mm/month)。

他のアルゴリズムとの比較の例として、TRMM/TMIの観測データに対してGSMaP Ver.4.5およびGPROFを用いて求めた降水量を陸海、季節ごとに帯状平均してものを、図9に示す。海上では、GPROF(3G68TMI)は特に熱帯収束帯でTRMM/PR(3G68PR)を基準として過大評価であるが、GSMaP(GSMaP TMI)はTRMM/PRとよく対応している。一方、北半球冬季中緯度海上でGSMaPは過大評価、GPROFは過小評価、陸上では、GPROFはすべての季節を通じて、熱帯の降水量が多い領域で過大評価している等の特徴が明らかになった。

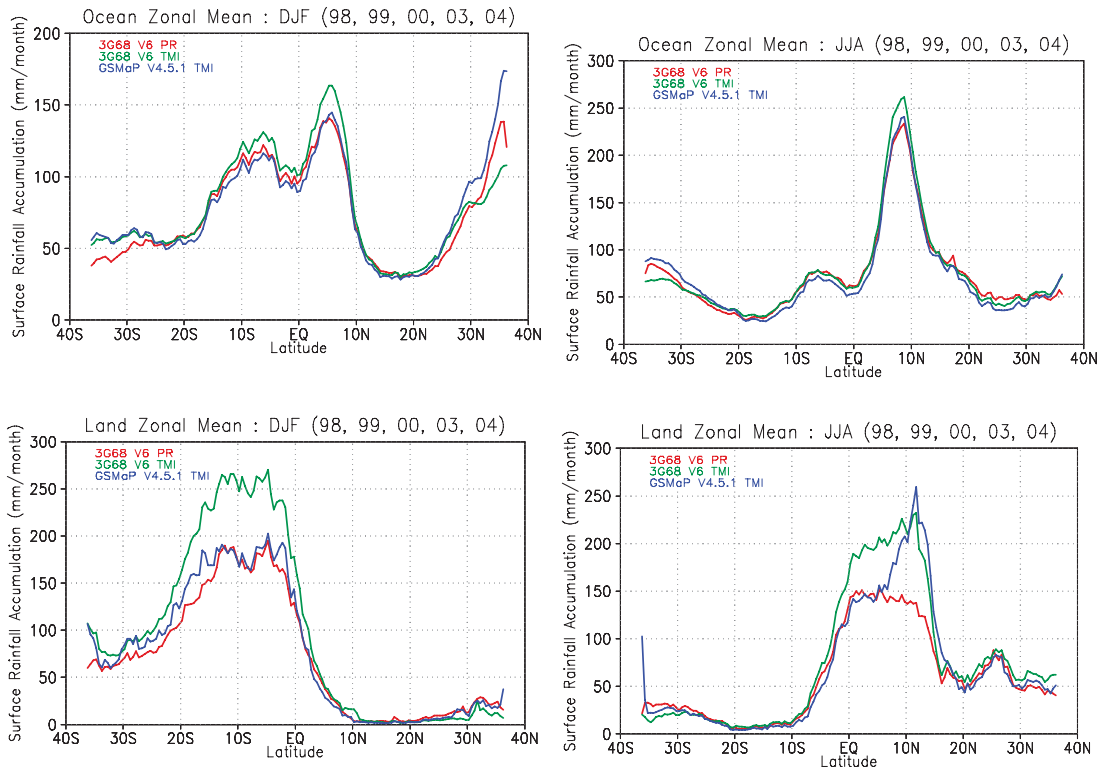


図9 GSMaP TMI, 3G68PR, 3G68TMI (GPROF) で算出した降水強度の帯状平均値の比較。陸海及び夏冬毎に分類されている。

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、本研究では、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10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。その結果、図11に示されるような0.1度、1時間の高時間、高空間分解能降水マップを作成することが出来た。赤外放射計データは、降雨強度の

算出に用いられているのではなく、雨域の移動ベクトル算出のために用いられており、作成されたマップはマイクロ波放射計による精度の良い降水強度を維持している。

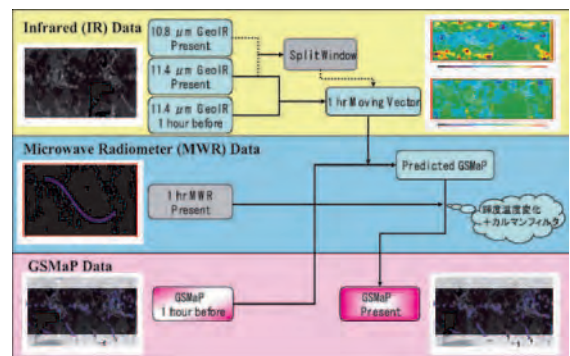


図10 高時間、高空間分解能マップ作成用マイクロ波・赤外放射計複合アルゴリズムのフロー。



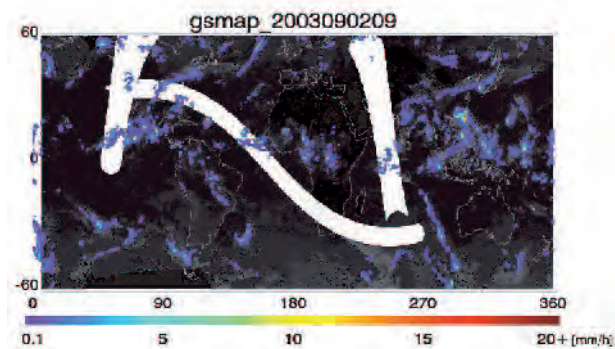


図 11 作成された時空間分解能, 1 時間, 0.1 度の降水マップの一例.

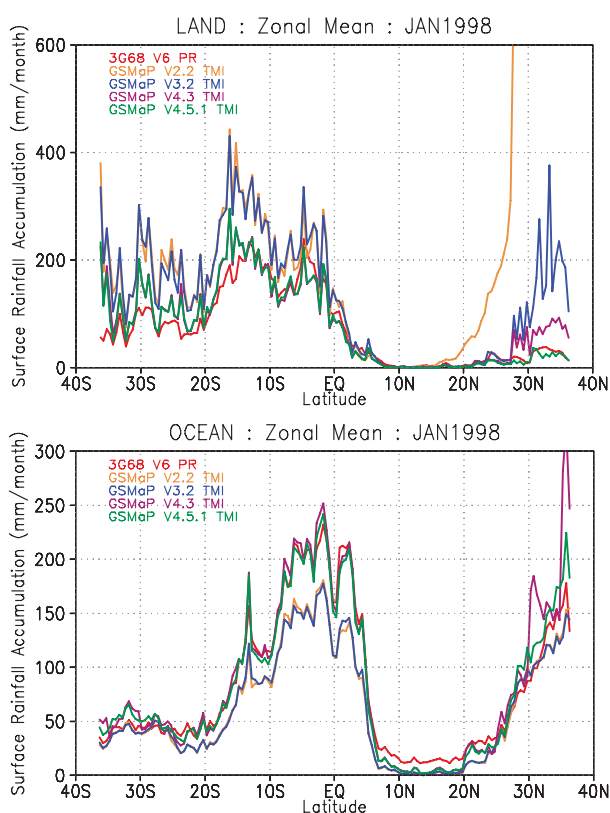


図 12 バージョン毎の比較を示す図. 1998 年 1 月の緯度平均降水量. (上図は, 陸域上であり, 下図は海域上である.)

## 5. 考察・結論

図 12 は, 雨量推定がバージョンアップと共にもどのように向上してきたかを示している. 1998 年 1 月における陸域, 海域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 は, TMI に関しては, GPROF に比して, ほぼ遜色のない結果を得ることが出来た. 今後, AMSR や AMSR-E でも同様な結果が得られることが期待される. SSM/I についても, 既に開発に着手しており, 研究計画, 順調に進んでいるといえる. しかし, アルゴリズム開発については, まだ幾つか重要な課題が残されている. また, 当初計画に含まれていなかった高時間, 高空間分解能マップ作成用マイクロ波・赤外放射計複合アルゴリズム開発という新たな方向性が見えてきた. 今後, 全世界的にも同様な目的で降水マップを作成している IPWG (International Precipitation Working Group) /PEHRPP (Pilot Evaluation of High Resolution Precipitation Products) の活動に我が国を代表して参加すると共に, 諸外国のプロダクトに対抗して優れた独自色を出していきたい.

## 6. 今後の展開

TRMM/TMI のアルゴリズム開発については, ほぼ完成の領域に近いているが, 今後は, 融解層モデル, および雨滴粒径分布の情報を導入すること, ならびに散乱アルゴリズムを改良して, 陸上の降雨強度をより正しくトリバルすることがアルゴリズム開発の大きな課題となろう. TRMM の運用が最大 2012 年まで継続されることになれば, 15 年間に渡って TRMM/TMI を用いた緯度  $\pm 38^\circ$  の範囲の全球降水マップが, 取得されることになり, 水循環研究のみならず気象・気候変動研究にも有用である. Aqua/AMSR-E のアルゴリズム開発については, 高緯度地帯での陸上降水有無の判定手法の開発と, 降雨タイプの分類が課題となる.

DMSP/SSM/I アルゴリズム開発については, 10GHz のチャンネルがないため, 19.35GHz のチャンネルを利用せねばならない問題があるが, 強い降雨強度まで適用可能な偏波情報を利用したアルゴリズムを導入する予定である. DMSP/SSM/I については, アルゴリズム開発に目途がつけば, 1987 年に遡っての全球降水マップ作成を行うことが可能となる.

これらのマイクロ波放射計データのみに基づく降水マップは, 現在 30 分単位, 1 日単位, 月単位のマップが緯経度  $0.5^\circ$  のグリッドで作成されているが, 用途に応じて, その他の時間分解能を

有する降水マップの作成も可能である。また、緯経度 $0.1^\circ$ のグリッドを作成することも可能である。マイクロ波放射計データと、静止気象衛星の赤外放射計データから求めた雲移動ベクトルを組み合わせるにより高時間分解能(30分から1時間)、高空間分解能(緯経度 $0.1^\circ$ 程度)の降水マップを作成し、同じ目的を持った国際的なPEHRPPグループの活動に参加することも今後の課題となろう。また、同グループの活動に参加し、レーダ・アメダス合成図を用いた我が国周辺での降水マップの評価を試みたいと考えている。

また、マイクロ波放射計と降雨レーダを結合した信頼できるアルゴリズムの開発の課題がある。将来的には、2010年頃に日米を核とした全世界協力による全球降水観測計画(GPM)の時代が到来し、二周波降雨レーダを搭載したコア衛星とマイクロ波放射計のみを搭載した8機程度の副衛星群による全球降水観測が実現される予定であり、当研究チームが開発したアルゴリズムと降水マップ作成手法、評価手法は、GPM時代に大いに貢献するものと考えられる。

## 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.

Kummerow, C, Y. Hong, W. Olson, S. Yang, R. Adler, J. McCollum, R. Ferraro, G. Petty, D. Shin, and T. Wilheit, The evolution of the Goddard Profiling Algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors, *J. Appl. Meteor.*, 40, 1801–1820, 2001

## 7. 主要な成果報告等

### (1) 論文発表

1. Lutz, H-J., T. Inoue, J. Schmetz, Comparison of a split-window and multi-spectral cloud classification for MODIS observations, *J. Meteor. Soc. Japan*, 81, 623–631, 2003.
2. Reddy, K.K. and T. Kozu, Measurements of raindrop size distribution over Gadanki during south-west and north-east monsoon, *Indian Journal of Radio & Space Physics*, 32, 286–295, 2003.

3. Thurai, M., E. Deguchi, T. Iguchi, and K. Okamoto, Freezing height distribution in the tropics, *Int. J. Satell. Commun. Network*, 21, 6, 533–545, Dec. 2003.
4. Thurai, M., T. Iguchi, T. Kozu, J. D. Eastment, C. L. Wilson, and J. T. Ong, Radar observations in Singapore and their implications for TRMM Precipitation radar retrieval algorithms, *Radio Science*, 38, 5, 1086, 2003.
5. 瀬戸心太, 井口俊夫, 陸面放射輝度温度変動を考慮したマイクロ波放射計による陸水降水有無判定, *水工学論文集 第48巻*, 253–258, 2004.
6. 田川哲也, 花土弘, 岡本謙一, 古津年章, GPS搭載35.5GHz降雨レーダによる降雨観測に及ぼす地表面クラッタの影響評価とサイドローブクラッタの新しい低減手法の検討, *電子情報通信学会論文誌B*, J87-B(6), 883–892, June 2004.
7. Aonashi, K., N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, F. Liu, and K. Yoshida, Variational Assimilation of TMI Rain Type and Precipitation Retrievals into Global Numerical Weather Prediction, *Journal of Meteorological Society of Japan*, 82, 671–693, 2004.
8. Shige, S., 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. Applied Meteor.*, 43, 1095–1113, 2004.
9. Mardiana, R., T. Iguchi, N. Takahashi, and H. Hanado, Study of Quantization Effects on Rainfall Rate Estimation from GPM Dual-Frequency Radar, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 1(3), 220–223, 2004.
10. Mardiana, R., T. Iguchi, and N. Takahashi, A Dual-frequency Rain Profiling Method Without the Use of Surface Reference Technique, *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, 42(10), 2214–2225, 2004.
11. Meneghini, R., J. A. Jones, T. Iguchi, K. Okamoto, and J. Kwaitkowski, A Hybrid Surface Reference Technique and Its Application to the TRMM Precipitation Radar, *Journal of the Atmospheric and Oceanic Technology*,

- 21, 1645-1658, 2004.
12. Thurai, M., and H. Hanado, Melting Layer Model Evaluation Using Fall Velocity Spectra at Ku-band, IEE Proceedings—Microwaves, Antennas and Propagation, 151(5), 464-472, 2004.
  13. Kim, H.-K., D.-I. Lee, K. Iwanami, M. Maki, K.-E. Kim, and S.-N. Oh, Retrieval of Ice Crystal Size and Ice Water Content in Cirrus Using Dual Wavelength Cloud Radar, J. Korean Meteor. Soc., 40, 697-711, 2004.
  14. 播磨屋敏生, 桑田路子, 千葉ゆきこ, 真木雅之, 岩波越, 三隅良平, 朴相郡, 須藤美穂子, 2波長雲レーダによる巻雲の観測. 北海道大学地球物理学研究報告, 68, 1-10, 2005.
  15. 中川勝広, 北村康司, 花土弘, 高橋暢宏, 井口俊夫, 沖縄偏波降雨レーダ (COBRA) を用いた降雨の鉛直構造特性に関する研究, 土木学会水工学論文集, 49, 277-282, 2005.
  16. 瀬戸心太, リトリバーブル誤差と降雨判定誤差—TRMM/TMIとPRの月降水量推定値の比較—, 水工学論文集, 49, 271-276, 2005.
  17. Thurai M., E. Deguchi, K. Okamoto, E. Salonen, Rain height variability in Tropics, IEE Proceedings - Microwaves, Antenna and Propagation, 152(1), 17-23, 2005.
  18. 高橋暢宏, 重尚一, 佐藤晋介, 清水収司, 瀬戸心太, 衛星搭載マイクロ波放射計降水リトリバーブルアルゴリズムに関するレビュー PART I: 降水リトリバーブルの概要, 日本リモートセンシング学会誌, 25(1), 101-109, 2005.
  19. 飯田泰久, 岡本謙一, 牛尾知雄, 沖理子, レーダ・アメダス解析雨量を用いた太陽同期衛星群5機並びにTRMM衛星による降雨推定のためのサンプリングシミュレーション, 日本気象学会誌「天気」52(3), 155-162, 2005.
  20. 高橋暢宏, 重尚一, 佐藤晋介, 清水収司, 瀬戸心太, 衛星搭載マイクロ波放射計降水リトリバーブルアルゴリズムに関するレビュー PART II: 決定論的降水リトリバーブルアルゴリズム, 日本リモートセンシング学会誌 25(2), 221-230, 2005.
  21. Kozu, T., T. Shimomai, Zainul Akramin, Marzuki, Y. Shibagaki, H. Hashiguchi, 2005 : Intraseasonal variation of raindrop size distribution at Koto Tabang, West Sumatra, Indonesia, Geophys. Res. Letters, 32(7), L07803, doi : 10.1029/2004GL022340.
  22. 高橋暢宏, 重尚一, 佐藤晋介, 清水収司, 瀬戸心太, 衛星搭載マイクロ波放射計降水リトリバーブルアルゴリズムに関するレビュー PART III: 確率論的降水リトリバーブルアルゴリズム, 日本リモートセンシング学会誌 25(3), 289-303, 2005.
  23. 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.
  24. 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.
  25. 高橋暢宏, 重尚一, 佐藤晋介, 清水収司, 瀬戸心太, 衛星搭載マイクロ波放射計降水リトリバーブルアルゴリズムに関するレビュー PART IV: アルゴリズムの横断的比較, 日本リモートセンシング学会誌25(4), 384-398, 2005.
  26. Eito, H., K. Aonashi, G. Liu, C. Muroi, S. Hayashi, T. Kato, and M. Yoshizaki, Preliminary Comparison of AMSR-E Observation and Numerical Simulation with Cloud Resolving Model for Solid Precipitation in Winter During the Wakasa 2003, CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, Report No.35, 5-3—5-4, 2005.
- (2) 口頭発表
- ①国際会議発表: 72 件
  - ②国内学会等発表: 93 件
- (3) 特許出願 (国内1件)