

衛星による高精度高分解能全球降水マップの作成

High Precision and High Resolution Global Precipitation Map from Satellite Data

○岡本謙一 (大阪府大)¹・井口俊夫²・高橋暢宏²・佐藤晋介 (情報通信研究機構)²・
阿波加 純 (北海道東海大)³・古津年章 (島根大)⁴・福地 一 (首都大)⁵
K. Okamoto¹, T. Iguchi², N. Takahashi², S. Satoh², J. Awaka³, T. Kozu⁴, and H. Fukuchi⁵

¹Department of Aerospace Engineering, Osaka Prefecture University, 1-1, Gakuen-cho, Sakai, 599-8531, Osaka, Japan,
TEL/FAX: 072-254-9241, E-mail: Okamoto@aero.osakafu-u.ac.jp

²National Institute of Information and Communications Technology

³Hokkaido Tokai University

⁴Shimane University

⁵Tokyo Metropolitan University

1. 研究目的

地球的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的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。

本研究は、今後益々多数の衛星に搭載することが期待されているマイクロ波放射計を中心とした衛星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、降雨レーダ(PR)データ、静止衛星の可視・赤外放射計データをも総合的に利用し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。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、東京大学、大阪大学、首都大学東京、科学技術振興機構から約30名が参加している。本研究チームの愛称として、GSMaP(Global Satellite Mapping of Precipitation)を用いているが、開発中のアルゴリズムの名称ならびに作成中の全球降水マップの名称としてもGSMaPを用いている。

2. 研究概要

本研究は、Fig. 1に示す様に4つの研究の柱から構成される。それらの柱は、(1)地上レーダ観測、(2)降水物理モデル開発、(3)アルゴリズム開発、及び(4)全球降水マップ作成である。

地上レーダ観測では、地上レーダを用いた、降雨の定常的な観測と集中的な観測を実施して、降雨情報についてのデータベースを作成する。降水物理モデル開発では、地上レーダ観測データベース、熱帯降雨観測衛星(TRMM)降雨レーダ(PR)データ等から抽出した降水を特徴づけるパラメータ、例えば降水の鉛直プロフィール、融解層構造、雨滴粒径分布などのデータから降水物理モデルを作成する。マイクロ波放射計アルゴリズムについては、気象研究所の青梨博士が開発した決定論的なアルゴリズムを基本とし、現実の降水を反映する降水物理モデルを取り入れた放射伝達方程式に基づくアルゴリズムを開発する。アルゴリズムでは放射伝達方程式に基づいて輝度温度の計算を行い、各周波数の観測輝度温度データを最も良く再現できる降水強度の値を非線形最小二乗法によって降水強度推定値とする。得られた種々の衛星の降水強度データを合成して全球の降水マップが作成されるが、静止衛星の赤外データから算出した雲移動ベクトルを用いた補間アルゴリズムにより高時間・空間分解能のマ

ップも算出される。また、全球降水マッププロダクトは、TRMM PR から作成された降水マップ等と比較し、精度等が検証・評価され、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。

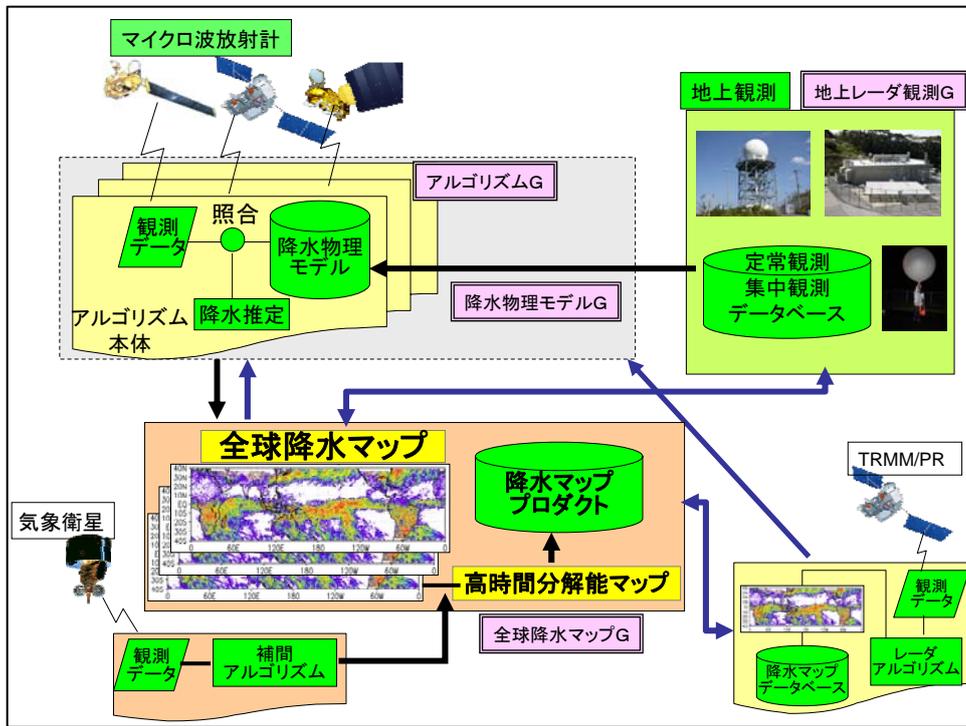


Fig. 1 Whole structure of the GSMaP(Global Satellite Mapping of Precipitation) research project.

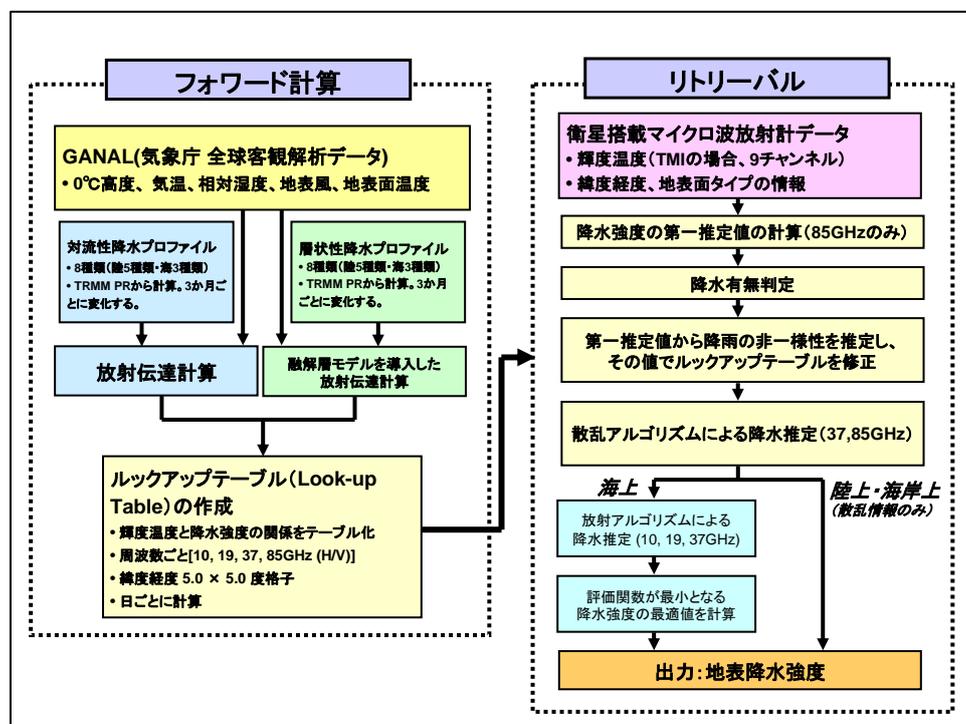


Fig. 2 Flow diagram of GSMaP microwave radiometer algorithm

3. 研究成果と今後の取り組み

マイクロ波放射計アルゴリズムの概要を Fig. 2 に示す。フォワード計算の部分では、TRMM/PR のデータを用いて、3 ヶ月ごとに、降水タイプを陸上 5 種類、海上 3 種類の 8 つに分類する。また、タイプごとに対流性降水と層状性降水に分類し、降水強度別に TRMM/PR の降水プロフィールの特徴を抽出する。次に GANAL データを用いて環境場に関する物理量を導入すると共に、層状性降水には、融解層モデルを組み込み、放射伝達方程式を計算し、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する。リトリーバルの部分では、このテーブルを用いて、85 GHz の観測輝度温度より降水強度の第一推定値を求め、降水の非一様性を計算し、ルックアップテーブルを補正する。また、GSMaP 独自の陸上降水有無の判定法を導入する。その後、陸上では、37, 85 GHz の散乱アルゴリズムを、また海上では、10, 19, 37 GHz の放射アルゴリズムをそれぞれ用いて、陸上、海上の降水強度を算出する。

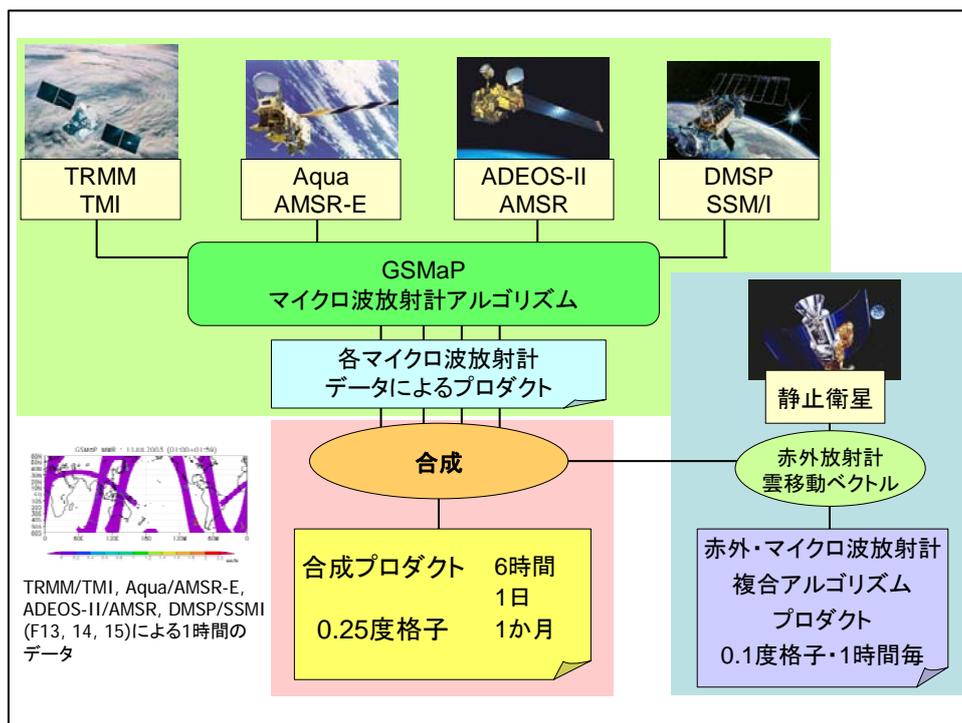


Fig. 3 Composition of GSMaP products

全球降水マップ作成においては、Fig. 3 に示すように、衛星ごとの GSMaP アルゴリズムを用いて、6 機の人工衛星搭載マイクロ波放射計データ (TRMM/TMI, Aqua/AMSR-E, ADEOS-II/AMSR, DMSP-F13, 14, 15/SSM/I) を解析し、求められた降水量を合成し、 0.25° 格子の様々な時間分解能の全球降水マップを得る。更にこのマップに、静止気象衛星搭載赤外放射計データから求めた雲移動ベクトルを適用することによって、高時間・空間分解能 (0.1° 格子, 1 時間) の全球降水マップが作成される。

Fig. 4 に現在のアルゴリズム (V4.7.2) を用いて各種衛星搭載マイクロ波放射計データを処理し得られた全球降水マップを示す。TRMM/TMI については、1998-2005 年の 8 年間のマップを作成している。Aqua/AMSR-E 及び DMSP-F13, 14, 15/SSM/I については、2003-2005 年の 3 年間のマップを作成している。またこれらのデータを合成した 2003-2005 年の 3 年間のマイクロ波放射計のみの複合全球降水マップ GSMaP MWR を作成している。さらに赤外線データから算出された雲移動ベクトルから雨域の移動を推定し、GSMaP MWR に応用して複合マップを作成する。

Fig. 5 に示す様に，TRMM/TMI の観測データを用い GSMaP アルゴリズムおよび GPROF アルゴリズム (NASA/GSFC 作成の TRMM/TMI 標準アルゴリズム) から求めた降水量を陸海，季節ごとに帯状平均し，TRMM/PR から求めた降水量と比較すると，海上では，GPROF は特に熱帯収束帯で過大評価であるが，GSMaP は TRMM/PR とよく対応する．一方，北半球冬季中緯度海上で GSMaP は過大評価，GPROF は過小評価となる．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するが，GSMaP は TRMM/PR とよく対応している等の特徴がわかる．

マイクロ波放射計データのみを用いて作成された全球降水マップ(V4.7.2)

マップの名称	マイクロ波放射計(人工衛星)	作成されたマップの期間
GSMaP TMI	TMI(TRMM)	Jan 1998 - Dec 2005
GSMaP AMSR-E	AMSR-E(Aqua)	Jan 2003 - Dec 2005
GSMaP AMSR	AMSR(ADEOS-II)	Apr 2003 - Oct 2003
GSMaP SSM/I	SSM/I(DMSP F13, F14, F15)	Jan 2003 - Dec 2005

マイクロ波放射計及び赤外放射計データを用いて合成された全球降水マップ

マップの名称	データソース	作成されたマップの期間
GSMaP MWR (0.25°×0.25°: 6hr~)	GSMaP TMI GSMaP AMSR-E GSMaP AMSR GSMaP SSM/I	Jan 2003 - Dec 2005
GSMaP MV_RT, GSMaP MVK_RT GSMaP MV, GSMaP MVK	GSMaP MWRと赤外雲 移動ベクトル	July 2005

Fig. 4 Examples of global precipitation maps

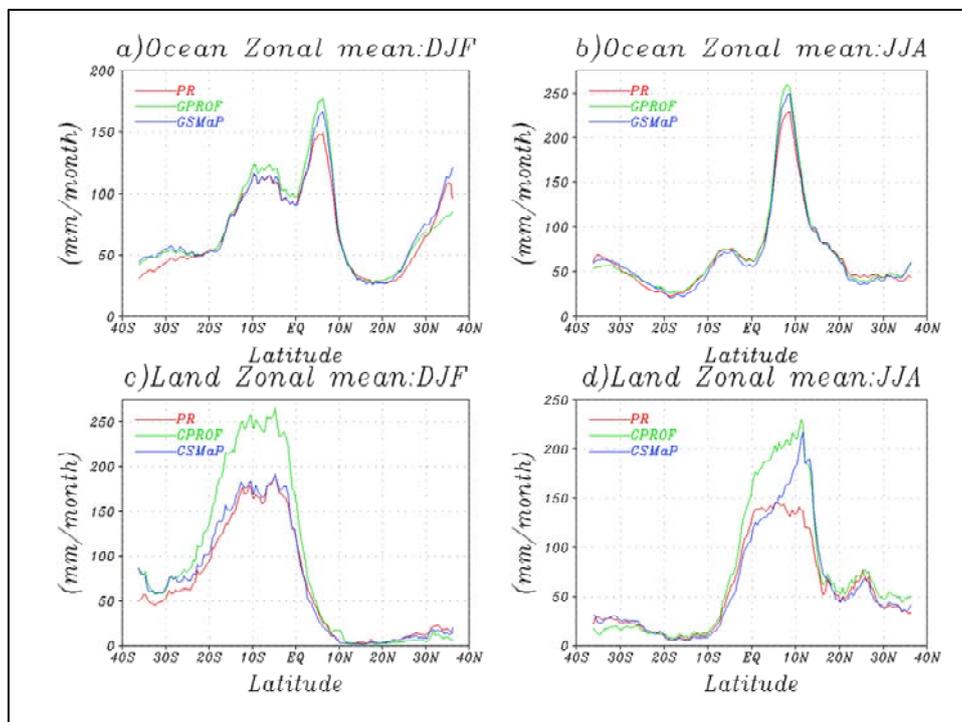


Fig. 5 Comparisons of zonal mean rain rates retrieved from TRMM/TMI by GSMaP, GPROF and PR algorithms (1998-2004)

GSMaP アルゴリズムを用いて作成された全球降水マップの一例として、TRMM/TMI による 8 年間 (1998-2005 年) 平均の降水量の気候値を Fig. 6 に示す。図は、 0.25° 格子で、上図は 1 月期、下図は 7 月期の全球の降水マップを示す。

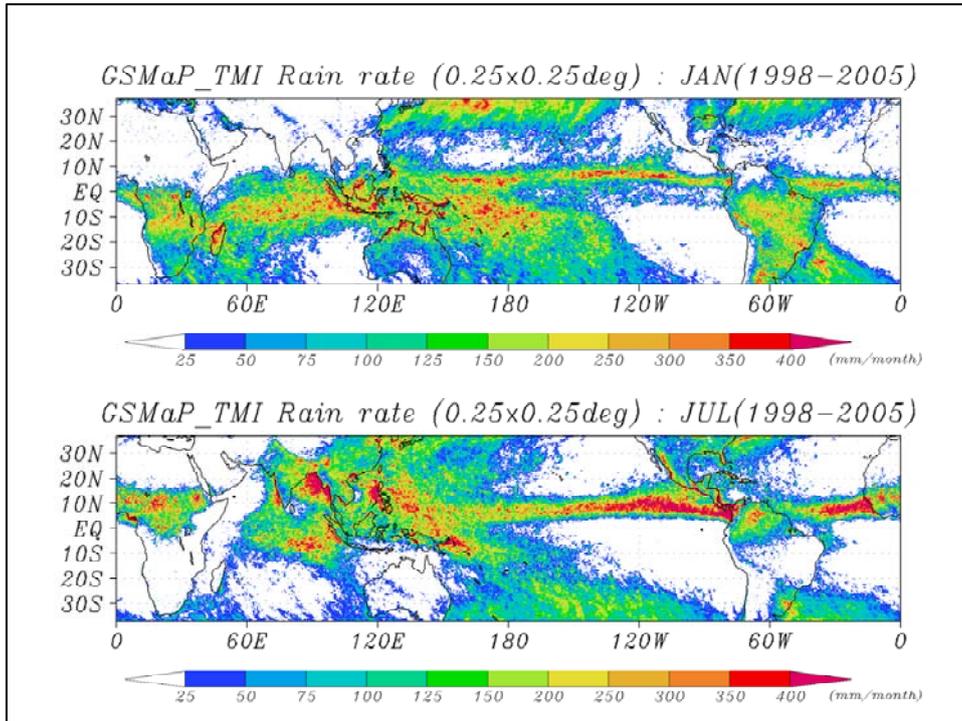


Fig. 6 Examples of global precipitation map from TRMM/TMI by GSMaP algorithm (1998-2005)

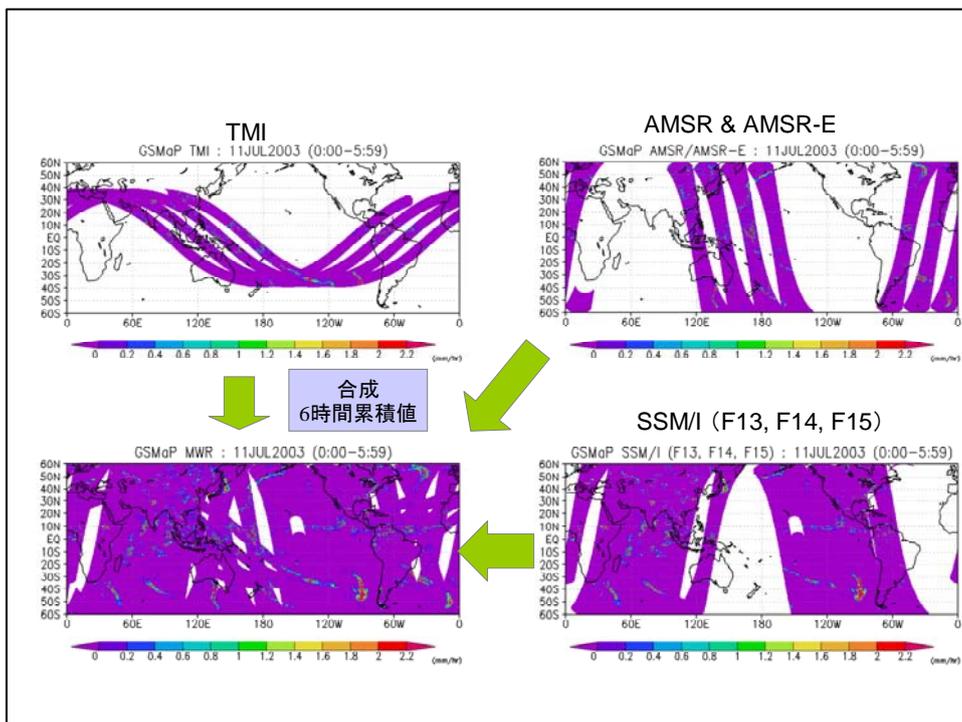


Fig. 7 Examples of combined precipitation map from TMI, AMSR-E, AMSA and SSM/I (6 hours)

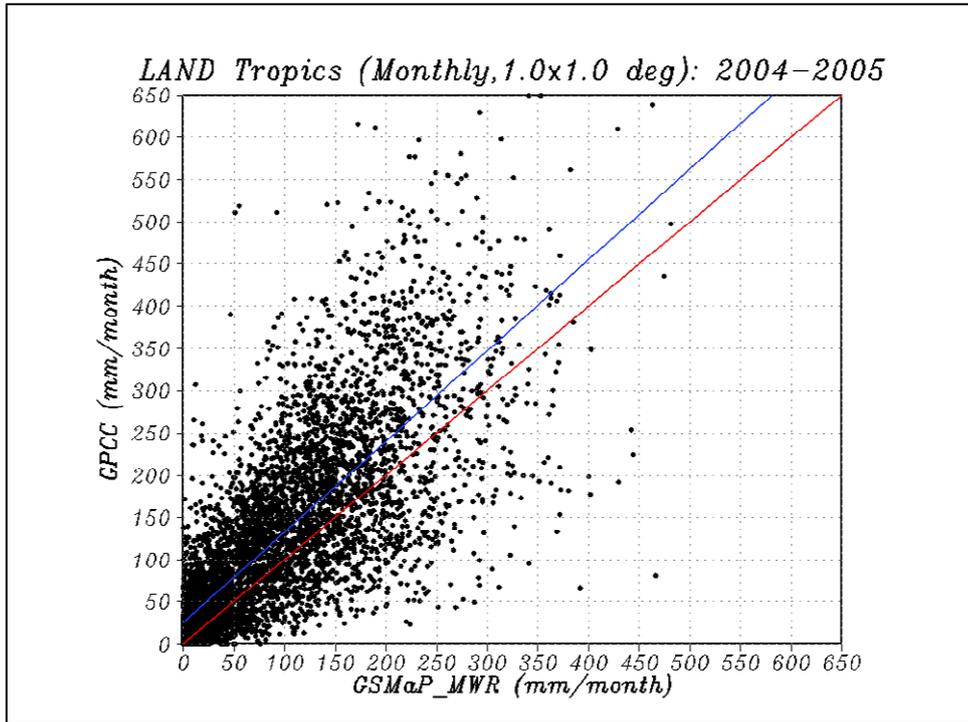


Fig. 8 Comparisons of GSMP combined microwave radiometer monthly rain rates with GPCP rain gauge analyses over 15N-15S during 2004-2005.

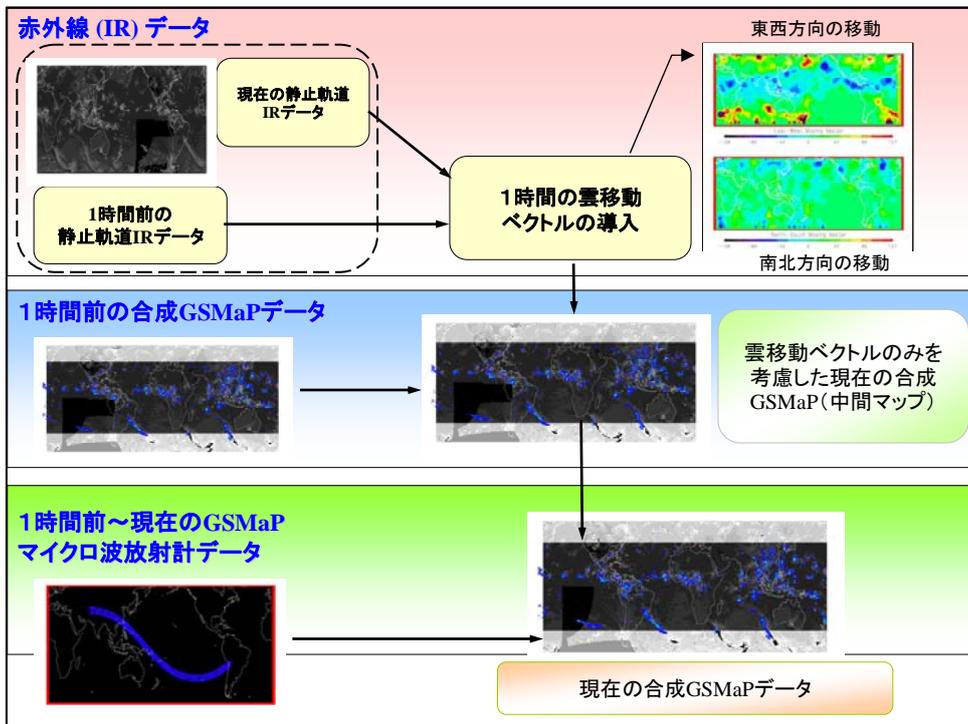


Fig. 9 Flow of IR and microwave radiometer combined algorithm for the high temporal and spatial resolution precipitation map.

マイクロ波放射計 (TRMM/TMI, Aqua/AMSR-E, ADEOS-II/AMSR, DMSP-F13, 14, 15/SSM/I) の6時間のデータからのマップの合成について Fig. 7 に示す. 1機の衛星のみによる観測では, 6時間の観測でも未観測域が多いが, 6機の衛星の観測データを合成すると未観測域は大幅に減少する. Fig. 8 は, 2004-2005年に於ける熱帯地方(15S~15N)の緯経度 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 格子ごとの月平均降水量を示したもので, 上記の6機の衛星搭載マイクロ波放射計による観測値と地上雨量計による観測値を散布図で比較したものである. 地上雨量計データは, GPCC(Global Precipitation Climatology Centre)によるものであり, 地上雨量計が1ヶ所以上ある格子点での比較を示している. 横軸(x)を6機の衛星搭載マイクロ波放射計による観測値, 縦軸(y)をGPCCの地上雨量計による観測値とすると, 回帰直線は, $y = 1.08x + 21.9$ (mm/month) となり, 衛星搭載マイクロ波放射計による観測値が過小評価している傾向を示す. 相関係数は, 0.80 である. マイクロ波放射計は, 低軌道周回衛星に搭載されているため, 複数の衛星を組み合わせたとしても, 3時間以内, 10数kmといった時間空間分解能の降水マップを作成する場合, サンプリングエラーの影響が顕著になる. また, サンプリングエラーを考慮する必要のない静止気象衛星搭載赤外放射計は, 降水からの放射を直接観測することはできない. このため, 本研究では, 両者の長所を相補的に利用し, 赤外放射計の雲画像から推定される雨域の移動ベクトルを用いて, マイクロ波放射計による観測と観測の間を補間する手法を開発し, 高時間・空間分解能マップを作成している. Fig. 9 は, この様子を示している. 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, 静止気象衛星で観測した現在及び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.

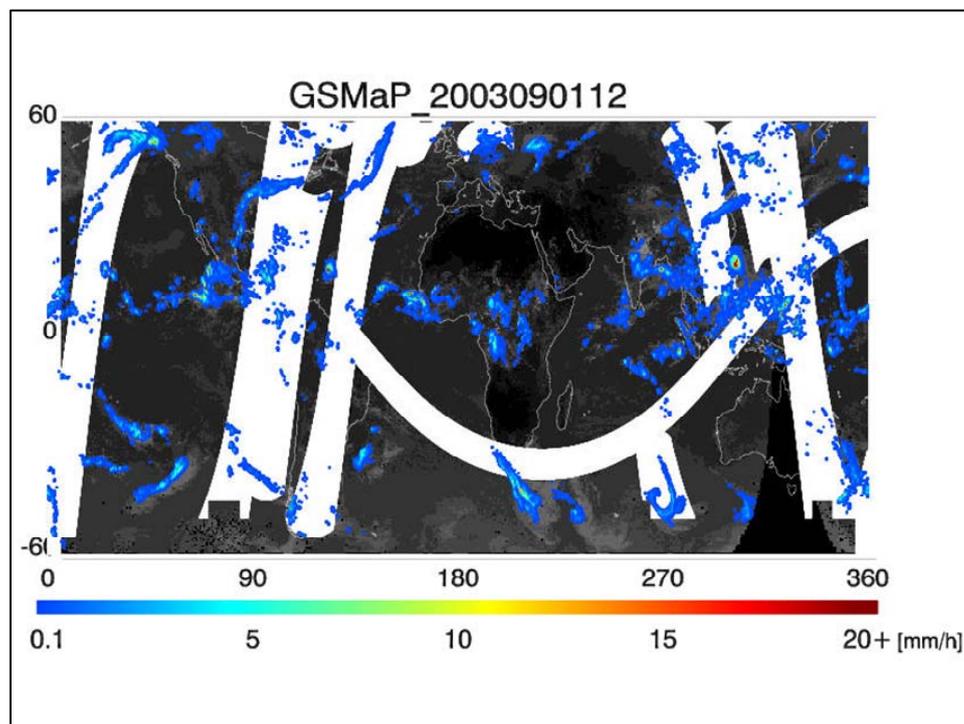


Fig. 10 Examples of high temporal and spatial resolution precipitation map (1 hour, $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$)

その結果, Fig. 10 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る. 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. 雨域の移動については, 過去から現在の Forward 法 (GSMaP MV_RT) に, 時間を現在から過去に遡って雲移動ベクトルを算出し雨域の移動を推定する Backward 法を重ね合わせる方法 (GSMaP MV), 物理的な雲移動ベクトルの算出に加えて, カルマンフィルタを用いた雨域の移動の高精度推定法 (GSMaP MVK_RT, GSmAP MVK) の開発などを進めている.

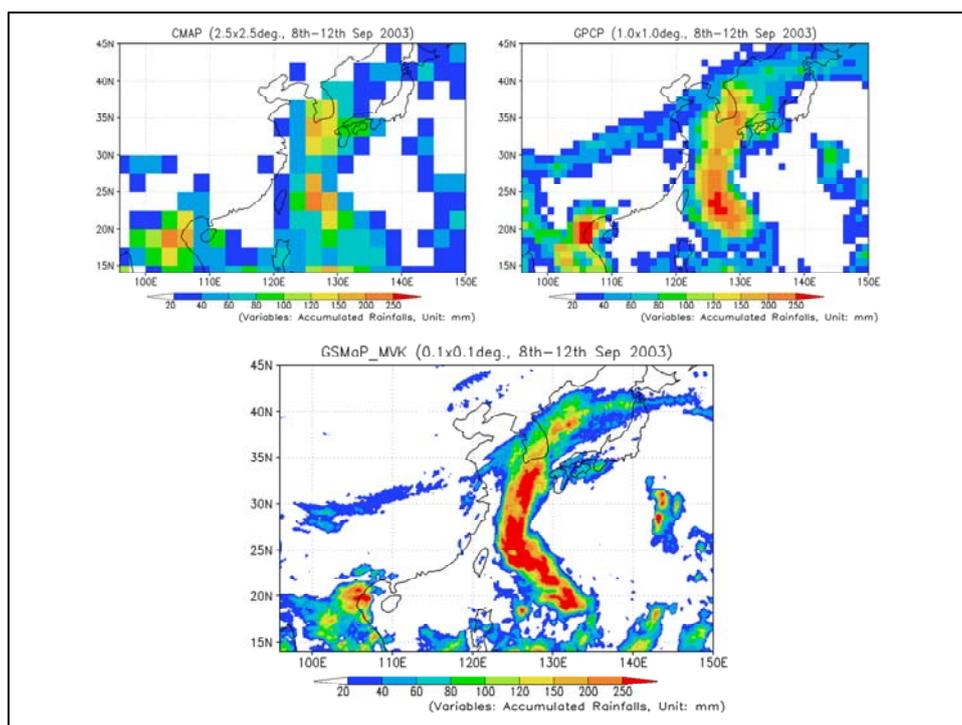


Fig. 11 Comparisons of precipitation maps
lower : GSmAP_MVK (0.1°), upper right : GPCP (1.0°), upper left : CMAP (2.5°)

この様にしてマイクロ波放射計データと赤外線データを共に用いて作成された高時間・空間分解能のマップの例を Fig. 11 の下図(GSmAP MVK)に示す. Fig. 11 は, 日本付近における 2003 年 9 月 8 日から 12 日までの積算降水量分布を示す. 全球降水マップ作成プロジェクトとして米国による CMAP (緯度経度 2.5 度格子) 及び GPCP (緯度経度 1.0 度格子) が良く知られているが比較のため, これらも Fig. 11 の左上及び右上に示す. 台風の通過に伴う雨量の軌跡が現れており, CMAP や GPCP と比べて, GSmAP は空間分解能が優れていることが分かる.

4. まとめ

TRMM/TMI アルゴリズムの開発は, ほぼ目処がついて来た. 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±38° 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となろう. 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今後の課題となろう. 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

アルゴリズムの開発が進んでいる。DMSP/SSMI については、アルゴリズム開発に目途がつけば、1987年に溯っての全球降水マップ作成を行うことが可能となる。

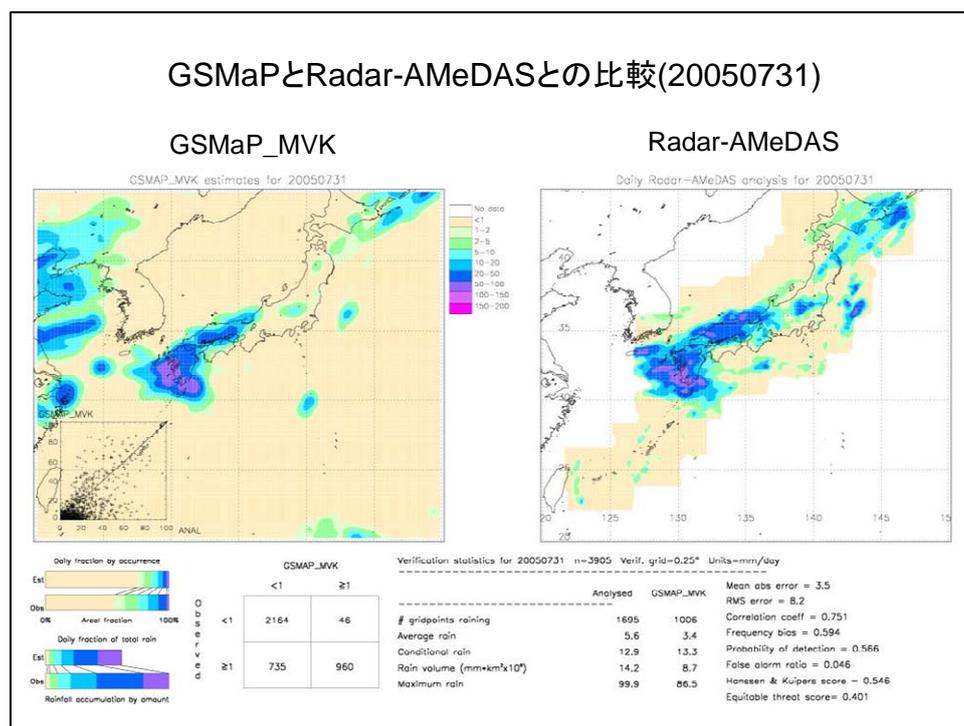


Fig. 12 Comparison of GSMaP (GSMaP_MVK) with Radar-AMeDAS composite map around Japan

当研究チームは、国際的にも高時間・空間分解能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している。活動においては、レーダ・アメダス合成図を評価用のツールズデータとして用いて、GSMaPを含むPEHRPP参加グループ作成のわが国周辺の降水マップの評価を試みている。Fig. 12は、GSMaP (GSMaP_MVK)とレーダ・アメダス合成図の比較の一例である。2005年7月31日の例で、両者の相関係数は、0.75と比較的高い値を示している。この比較は、当研究チームのHome Pageで公開されている。この他に、Home Pageでは、PEHRPP参加の全世界の他のグループ作成の高時間空間分解能降水マップのレーダ・アメダス合成図との比較も示されている。さらに、洪水予測等の目的のために準リアルタイムの降水マップ作成のニーズがあることも分かってきたので、当研究チームの開発している高時間・空間分解能降水マップ作成用アルゴリズムの実利用面への応用について、今後力を入れて行きたいと考えている。将来的には、2013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。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業(CREST)の研究領域「水の循環系モデリングと利用システム」における研究課題「衛星による高精度高分解能全球降水マップの作成」の助成

を受けて成されているものであり，ここに謝意を表します．また，日頃議論等を賜っている本課題の研究チーム各位に感謝いたします．