

# 衛星による降水観測を利用した グローバルな洪水監視システムの開発に向けて

TOWARD GLOBAL FLOOD MONITORING SYSTEM  
BY USING SATELLITE PRECIPITATION MEASUREMENT

瀬戸心太<sup>1</sup>・キムヒュンジュン<sup>2</sup>・芳村圭<sup>3</sup>・沖大幹<sup>4</sup>  
Shinta SETO, Hyungjun KIM, Kei YOSHIMURA, and Taikan OKI

- <sup>1</sup> 研究員 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)
- <sup>2</sup> 研究員 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)
- <sup>3</sup> 助手 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1) /  
海外特別研究員 日本学術振興会(スクリプス海洋学研究所)
- <sup>4</sup> 助教授 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

This paper introduces semi real time global river discharge simulation system using satellite observations of precipitation as preliminary study for developing global flood monitoring system. The system is called "Yesterday's Earth" as the main part of the system is common to a real time global river discharge forecasting system "Today's Earth". Yesterday's Earth consists of three parts. (1) Preparation of forcing datasets using 7 kinds of global precipitation products and outputs of weather forecasting model (JMA/GSM). (2) Calculation of water and energy balance at the land surface by Iso-MATSIRO. (3) Simulation of river discharge by TRIP. There are significant differences of precipitation and river discharge among simulations.

**Key Words :** *global precipitation map, GSMaP, Iso-MATSIRO, TRIP, flood monitoring system*

## 1. 序論

熱帯降雨観測衛星 (TRMM) に搭載された降雨レーダ (PR) はその観測原理から、マイクロ波放射計 (MWR) や赤外放射計 (IR) など従来の衛星搭載センサよりも、降水強度のリトリバル精度が高いと考えられている。ただし、その観測は熱帯域で数日に1回程度であり、例えばグローバルな洪水監視システムといった水文学的な実利用を考えた場合に、十分な観測頻度とは言えない。また観測可能範囲も南北の緯度35度以内に限定されている。

このため、1997年以来10年近く運用されているTRMMの後継として、全球降水観測 (GPM) 計画が予定されている。GPMは主衛星と副衛星群で構成される。主衛星には2周波降水レーダ (DPR) とマイクロ波放射計 (GMI) を搭載して、南北65度までを観測する。DPRは、0.2mm/hの弱い雨でも検出可能なように設計されており、また2周波の情報を組み合わせることで雨滴粒径分布 (DSD) の不確実性による誤差を軽減し、PRよりさらに高いリトリバル精度を実現できるものと期待されている。副衛星群に搭載され

るマイクロ波放射計は、GMIを含めて8機を目標としており、実現すれば全球を平均3時間に1回観測できることになる。その場合、衛星による降水プロダクトを、洪水監視などに実利用することがより現実的な目標となる。

複数の衛星搭載センサによる観測を利用して、全球の降水プロダクトを作る研究は、すでに多く行われている。その代表的なものを表-1に示す。なかでも、GPCP<sup>1)</sup> や CMAP<sup>2)</sup> は先駆的な存在である。GPCPは月単位のプロダクトであったが、1996年10月から、時間解像度が1日、空間解像度が緯度経度1度のGPCP 1DD<sup>3)</sup> の作成を開始した。GPCP 1DDは、マイクロ波放射計SSM/I、マイクロ波サウンダTOVS、赤外放射計といった衛星搭載センサから得られた降水量分布を、雨量計による月降水量と合うように補正している。

TRMMの打ち上げ以降、より高い精度と解像度を目指して、多くの降水マップが開発されている。その一覧を表-1に示す。これらの相互比較や地上検証を目的としたPEHRPPと呼ばれる国際プロジェクトも行われており、多くの降水プロダクトが参加している。GSMaP<sup>4)</sup> (=Global Satellite Mapping of Precipitation) も、こうした降

水プロダクトのひとつである。GSMaPは、科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究推進事業(CREST)による研究プロジェクトの一つとして、2002年11月から5年間の予定で研究している。なお、研究プロジェクト自体をGSMaPと呼ぶこともある。

こうした降水プロダクトを洪水予報/監視に利用する検討もすでに行われている。国際洪水ネットワーク(IFNet)が開発したGFAS(=Global Flood Alert System)は、地上観測網が充実していない発展途上国向けに、TRMMなどから得られた降水プロダクトを用いて、過去の降水履歴と比較して、洪水の危険性がある場合に通報するシステムである。さらに、現在開発中のGFAS2では、流域ごとに用意した分布型流出モデルに衛星による降水プロダクトの入力を行い、洪水の予警報を行うことを目指している。

本研究では、全球一律に利用できる洪水監視システムの構築を目指す。本稿では、衛星降水プロダクトを利用した準リアルタイムの陸面水循環シミュレーションシステムについて述べる。これは、芳村ら<sup>5)</sup>により開発された水循環予報システムの一部であるToday's Earth(TE)のシステムを、入力となる降水量データについて衛星降水プロダクトを利用するように変更したものであり、Yesterday's Earth(YE)と呼ぶ。以下、システムの概要説明に続いて、異なる降水プロダクトを用いたシミュレーションの比較を行う。その後、比較結果についての考察と、まとめを述べる。

## 2. システムの概要

図-1に、TEとYE共通のシステム構成を示す。システム構成は、(1)陸面への外力データの整備、(2)陸面モデルIso-MATSIRO<sup>6)</sup>、(3)河道流下モデルTRIP<sup>7)</sup>の3つからなる。

### (1) 外力データの整備

外力データとしては、気象庁の全球予報モデル(JMA/GSM)による予報値を利用している。これは、GPVデータとして、気象業務支援センターから研究用に配布されているものである。予報値には、地表面の降水量、地表面と指定気圧面での水平風速・相対湿度・気温・気圧等が含まれている。これらをLV1データとする。LV1データは、6時間間隔、緯度経度1.25度の格子点データである。ここから、雲量・可降水量・地表面下向き短波放射・同長波放射を推定し、地表面気温、地表面気圧、地表面相対湿度とともに、Iso-MATSIROに入力する。なお、入力の際には、緯度経度1度の格子平均値に変換する。Iso-MATSIROへの入力をLV2データとする。

### (2) 陸面モデルIso-MATSIRO

陸面モデルとして用いられるIso-MATSIROは、MATSIRO

に水同位体過程を導入し、さらに基底流出等の水文過程に改良を加えたものである。Iso-MATSIROから出力され

表-1 主な全球降水プロダクト一覧。左から、プロダクト名、空間解像度、時間解像度、マイクロ波放射計(MWR)の利用、赤外放射計の利用、地上雨量計の利用、数値気象モデルまたはその出力値の利用、実時間利用の可否、本研究で使用する場合の実験名(×は利用せず)を示す。

プロダクト名	空間	時間	MWR	赤外	雨量計	NWP	実時間	実験名
GPCP	2.5°	1ヶ月	○	○	○	×	×	×
CMAP	2.5°	5日	○	○	○	×	×	×
GPCP 1DD	1.0°	1日	○	○	○	×	×	GPCP
GSMaP MWR	0.25°	6時間	○	×	×	△	△	GMWR
PERSIANN	0.25°	6時間	△	○	×	×	△	PERS
CPC MWCOMB	0.25°	3時間	○	×	×	×	○	CMWR
TRMM 3B42RT	0.25°	3時間	○	○	×	×	○	3R42
TRMM 3B42	0.25°	3時間	○	○	○	×	×	3B42
GSMaP MVK	0.1°	1時間	○	○	×	△	△	×
CMORPH	8km	30分	○	○	×	×	○	CMOR
SCaMPR	4km	15分	○	○	×	×	△	×

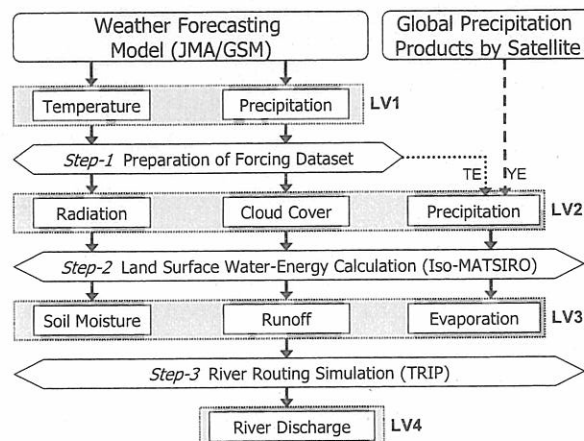


図-1 Today's Earth(TE)とYesterday's Earth(YE)に共通するシステム概要。LV2降水量プロダクト作成部分のみ、点線がTE、鎖線がYEについての場合を示す。

る、例えば流出量や土壌水分量は、LV3データとなる。

### (3) 河道流下モデルTRIP

河道流下モデルTRIP(=Total Runoff Integrating Pathways)の全球1度グリッド版を利用した。LV3データである流出量を入力とする。出力の河川流量はLV4データとなる。

### (4) Today's Earthの運用

TEはリアルタイムシミュレーションである。1日に2回(05Z, 17Z)、気象業務支援センターより、00Zおよび12Zから始まる84時間予報を入手し、上記の(1)-(3)の処理を行い、LV1-4の各変数について全球分布図を作成して、画像およびアニメーションの形式でWeb公開している<sup>8)</sup>。

### (5) Yesterday's Earthでの変更点

YEのTEとのもっとも大きな違いは、降水量として衛星による降水プロダクトを利用している点である。YEでは、表-1に示した7つの降水プロダクトを利用して、それぞれシミュレーションを行っている。GSMaP\_MWR<sup>9)</sup>は、序論

で紹介したGSMaPプロダクトの一つであり、TMI、SSM/I(3機)、AMSR、AMSREの最大6機のマイクロ波放射計による降水リトリーバル結果を合成したものであり、その空間解像度は緯度経度0.25度、時間解像度は6時間である。なお、GSMaPは現在開発中のため随時バージョンアップがされているが、今回使用したのは本稿執筆時点で最新のVersion4.7.2である。降水プロダクトにGSMaP\_MWRを利用したシミュレーションをGMWRと呼ぶ。

その他、3B42(3B42)、3B42RT(3R42)、CMORPH<sup>10)</sup>(CMOR)、CPC\_MWCOMB(CMWR)、PERSIANN<sup>11)</sup>(PERS)、GPCP1DD(GPCP)を利用している。ここで、括弧内はシミュレーション名を表す。GPCP1DD以外は、空間解像度0.25度、時間解像度6時間、またはそれより高い解像度を持っている。このため、Iso-MATSIROへの入力に当たっては、単純平均により1度、6時間に変換している。GPCP 1DDは、時間解像度が1日のため、単純にこれを分割して6時間降水量としている。

データの欠損、サンプリングの不足、降水プロダクトの処理範囲緯度の外側、そのほかアルゴリズム上の理由等で、1度、6時間の中に降水量データが得られない場合は、JMA/GSMの降水量で置き換えている。赤外放射計を使わないGSMaP\_MWR、CPC\_MWCOMBは6時間では完全に全球をカバーできず必ず無観測域が存在する。また、GPCP 1DDは90度まで完全に全球をカバーするが、PERSIANN、3B42、3B42RTは緯度50度まで、CMORPH、CPC\_MWCOMB、GSMaP\_MWRは緯度60度までしか処理されていない。なお、(1)の外力データ整備で雲量の推定に降水量が使われているが、この降水量には常にJMA/GSMの降水量を利用する。つまり、衛星による降水プロダクトの利用は厳密にはLV2からとなる。

YEでは2003年1月1日分から計算を開始した。2003年については、スピニングのため繰り返して計算した。降水データがリアルタイムで入手できる3R42は00Z-12Zの計算を21Zに、12Z-翌00Zの計算を翌09Zに行っている。また、CMOR、CMWRについては00Zから始まる1日分の計算を翌日の22Zに行っている。PERSについては、リアルタイム処理が行われているが、われわれは直接入手できていない。そのほか、リアルタイム処理のないGPCP、3B42、GMWRとともに、数ヶ月遅れで不定期に計算・更新されている。YEとTEでは計算期間の開始などが微妙に異なるために、TEと同じくJMA/GSMの降水量を用いたシミュレーションもYEで改めて行い、CTRLとしている。CTRLは、00Zから始まる1日分の計算を当日の18Zに行っている。全8つのシミュレーションは、少なくとも2005年12月31日分まで終了している。

YEもWebで試験公開を行っている。画面のスナップショットを図-2に示す。ただし、画像を作成しているのは降水量と河川流量のみである。なお、TEには水蒸気追跡モデルや水同位体過程シミュレーションを含むが、YEにはこれらは含まれない。

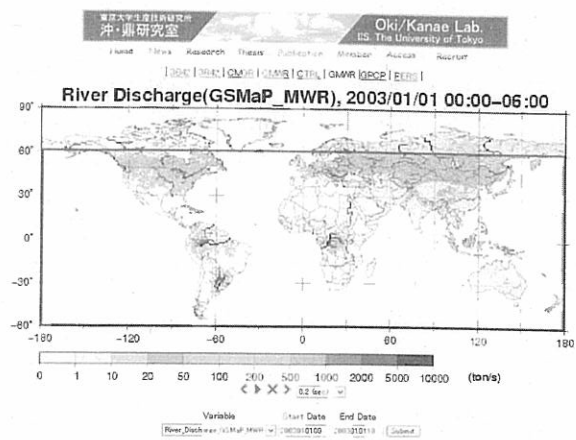


図-2 Yesterday's Earthの結果を表示するWeb画面例

### 3. 異なる降水プロダクトを利用したシミュレーション間の比較

Yesterday's Earthの8つのシミュレーション間の降水量・流出量・河川流量の比較を行う。

#### (1) 降水量

各シミュレーションで利用した降水プロダクトを比較しておく。なお、ここで降水量はLV2データとして利用されるものであり、すなわち、欠損域をモデル予報値で埋めている場合がある。また、緯度平均などの際には陸上グリッドのみを対象としている。

図-3に2003年・年平均の降水量を緯度別平均として示す。緯度0度付近を見ると、3R42、PERS、CMOR、CMWRが約200mm/月であるのに対して、GMWRは約120mm/月で最小と、プロダクト間の差が大きい。CTRLと、雨量計での補正が入っている3B42、GPCPは約160mm/月と中間的な値をとっている。緯度30度付近にかけては、プロダクト間の差が縮小する傾向にある。北緯20-30度付近ではCTRLがやや突出した値を示す。北緯30度以上では、3R42が高緯度ほど高い降水量を示している。これは、積雪による輝度温度低下を降水によるシグナルと誤判定したものであり、すなわち3R42の過大評価と考えられる。南緯30度以上は陸面の面積が少ないため、はっきりした傾向は見られない。なお、2004年、2005年(図は省略)でも同様の傾向を示すが、3R42の誤判定と見られるシグナルは、2003年に比べて減っている。この点については、アルゴリズムが改良された可能性がある。

図-4に各1度グリッド別に2003年・年平均の降水量が最大となる降水プロダクトおよび最小となる降水プロダクトを示している。ある程度地域ごとにまとまった特性が見られる。PERSは、サヘル・モンゴルなどの半乾燥域で最大となる。CMORは、アマゾン西部・サハラ砂漠・ア

フリカの南大西洋側・オーストラリア西部などで最大となる。CMORでは雲移動ベクトルを使い降雨域の移動を再現している。このため、海洋上からの降雨域が移動しやすい大陸西部でCMORが高い降水量を出しやすいのではないかと推測できる。GPCPは地中海沿岸域で最大となる場合が見られる。3R42は、北緯40-50度帯で最大となる場合が多いが、前述のようにこれには積雪を誤判定した影響が多く含まれるだろう。インド・中国・北米の大西洋側では、CTRLが衛星プロダクトよりも高い降水量を与えている。最小値を与えるプロダクトは、GMWRとなる場合が多い。ただし、北米西部・アフリカ南部は3B42が、サヘルからサハラ砂漠南西部にかけて、およびブラジルの内陸部ではCTRL、またオーストラリアや中東の乾燥域では3R42が最小となっている。

降水量プロダクト間の差は、年平均値でも大きいがある程度の地域性があることから、その原因を探る手がかりとなりそうである。今後、各プロダクトの作成方法から、差の原因を吟味する必要がある。

## (2) 流出量

図-5に、流出量について緯度帯別の平均を示す。基本的に降水量の結果を反映しているが、シミュレーション間の比率をとると、よりその差が拡大しているといえる。緯度0度付近で、降水量は約120-200mm/月の間となったが、流出量は約20-100mm/月の間に広がっており、最大と最小の差は約5倍である。これは洪水監視システムに適用する上で看過できない。緯度15度以上より外側では流出量は急激に減少する。最大でも20mm/月以下であり、GMWRなどは1-2mm/月程度まで低くなる。北緯30度以上ではやや緯度によって増加する傾向がある。これは、融雪による流出が大部分を占めていると見られる。

図-4と同様の図を2003年・年平均の流出量について作成したが、降水量の場合とほぼ同様の傾向が見られた。

## (3) 降水量と流出量の関係

降水量と流出量の関係を調べる。図-6は、横軸に降水量(mm/年)を、縦軸に損失量として、降水量マイナス流出量(mm/年)を取っている。上の図はGMWRにおける2003年・年平均の結果である。1つの点は、ある1度グリッドの結果を示している。横軸を100mm/年ごとのクラスに分割して、各クラスについて縦軸の平均をとったものが、直線である。大きなシンボルは、緯度帯10度ごとの平均値である。下の図に8つのシミュレーションの結果を合わせて示す(ただし、1度ごとの結果は省略した)。

GMWRは、降水量1000mm/年では約90%が損失となり、降水量1500mm/年では約85%が損失となっている。降水量2000mm/年以上では損失量は1500mm/年付近で安定している。ほかのシミュレーションに比べると、降水量に対する損失量が多い。使用した陸面モデルはすべて同一であるから、降水量の時空間分布特性の違いと考えられる。

3R42はとくに損失量が小さいが、これは蒸発効率の低い40-50度の緯度帯に降水量が多いことが影響している。

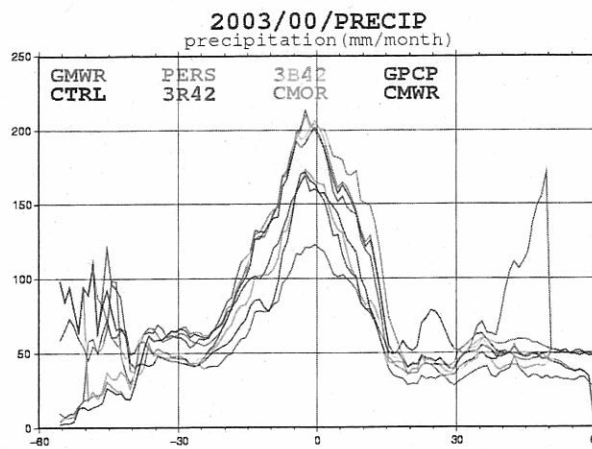


図-3 各シミュレーションで使用した降水量の緯度別平均。2003年の年平均、mm/monthで表す。

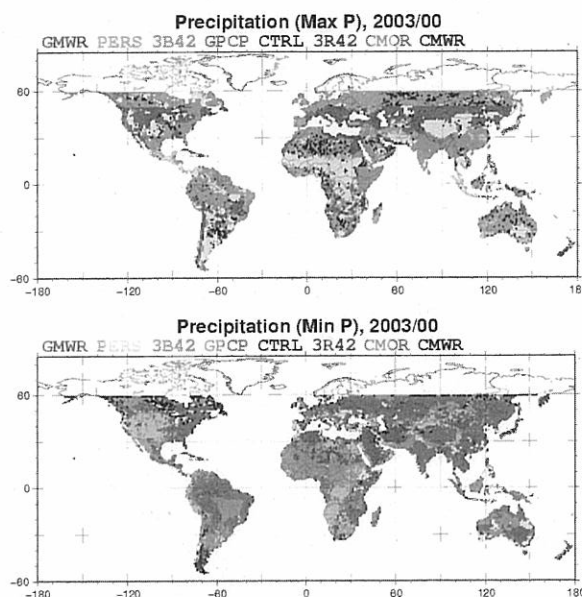


図-4 各シミュレーションで利用した降水プロダクトの比較。上が最大の降水量を与えるもの、下が最小の降水量を与えるもの。2003年の年平均について。

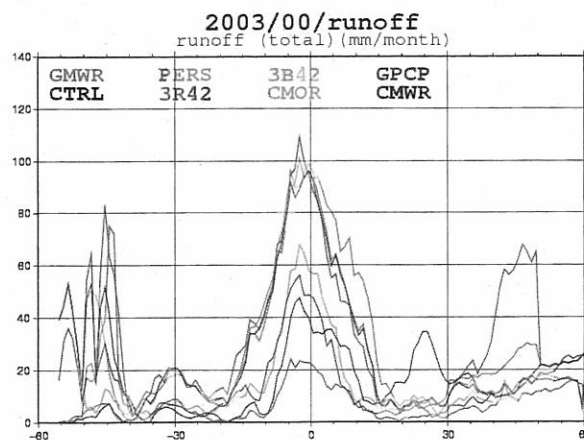


図-5 各シミュレーションによる流出量の緯度別平均。2003年の年平均、mm/monthで表す。



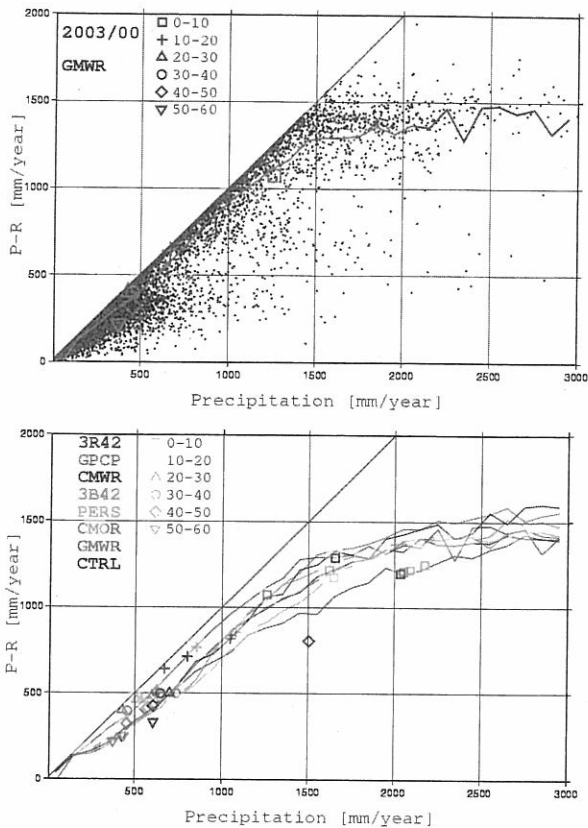


図-6 2003年年平均の降水量Pと、降水量P-流出量Rの関係。ともにmm/yearで表す。上の図は実験GMWRのみの結果であり、各点は1度グリッドに対応する。降水量別のP-Rを線で、緯度帯別の(P, P-R)の平均値を記号で示す。下の図は、8つの実験について、線と記号を重ねたもの。

#### (4) 河川流量

いくつかの地点における流量時系列の比較を図-7に示す。Nile川の河口付近(30.5E, 28.5N)での流量は、シミュレーション間の違いが極めて大きい。CMOR, CMWR, PERSが強く、2003年のピーク時には50000m<sup>3</sup>/sに達するが、3B42, GPCPではほとんど流量が生じていない。後者の2つのプロダクトはいずれも雨量計で補正をしているが、Nile川上流域には十分な雨量計網がないため降水量の誤差が大きいと推察される。GMWRは、わずかに流量を算出しているが、PERSなどの10分の1程度に過ぎない。Amazon川の河口付近(55.5W, 2.5S)での流量も、やはりシミュレーションによる差が大きい。この場合は、3B42, GPCPがCTRLと同じかそれ以上の流量を再現している。そのほかのシミュレーションによる流量の大小は、Nile川の場合と似ている。Amazon, Nileいずれの場合も、季節変化の位相についてシミュレーション間の目立った違いはない。

Chaophraya川の河口付近(95.5E, 16.5N)での流量については、まずCTRLの値が特に高いことが目立つ。経年変化をみると、CTRLでは、2003, 2005年に比べて、2004年が低いのが、衛星による降水プロダクトを用いたシミュレーションでは2004年が他の年より高いと、結果が一致

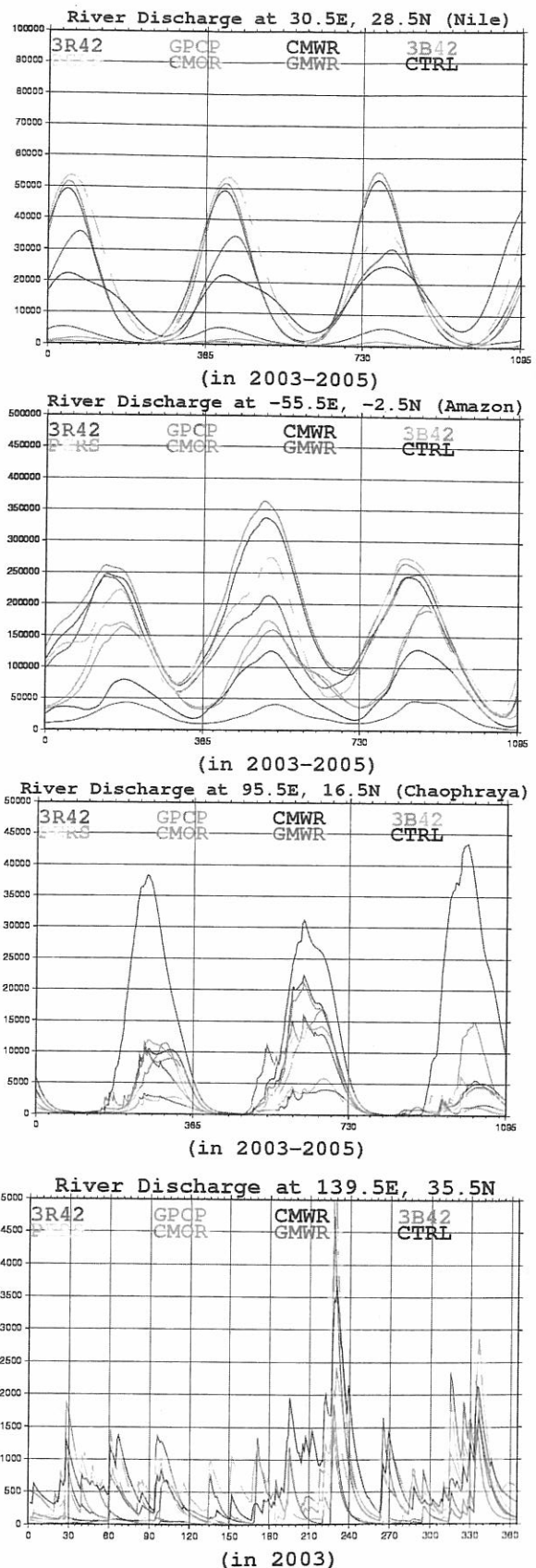


図-7 各シミュレーションにおける河川流量(m<sup>3</sup>/s)時系列の比較。上からNile川河口付近(30.5E, 28.5N), Amazon川河口付近(55.5W, 2.5S), Chao Phraya川河口付近(95.5E, 16.5N), 東京付近(139.5E, 35.5N)の場合。

しない。Mississippi川の河口付近(90.5W, 30.5N)での流量(図略)については、プロダクトごとにピークを取る時期にずれが見られる。とくに、2005年の2月頃にCTRL, 3B42, GPCPがピークを持つのに対して、GMWRは4月頃にピーク、3R42, CMOR, CMWR, PERSは9月頃にピークを取る。大河川河口付近では、流域全体の流出量が積分されるため、季節変化に対応する滑らかな変動が卓越している。

東京付近の1グリッド(139.5E, 35.5N)で見ると、降水に対応するとみられる流量の急激な増加が何度も見られる。イベントのピーク値は、3R42, 3B42, CTRL, GPCPなどで占められている。これらの出水が見られる場合でも、PERS, CMOR, CMWR, GMWRの流量はほとんど反応しない場合も多い。

#### 4. まとめ

本研究では、衛星観測による全球降水プロダクトを利用した陸面水循環シミュレーションシステムを構築した。一部の降水プロダクトを利用したシミュレーションについては、観測から1日以内の準リアルタイムでの処理とWebへの公開が可能である。今回利用した8つの降水プロダクト間の差は大きく、熱帯域では年平均値に2倍近い開きがあった。GSMaP\_MWRは、多くの地域でもっとも低い降水量を与えるプロダクトであった。GSMaPでは、TRMM/PRプロダクトと物理的に整合性を持ったマイクロ波放射計用アルゴリズムの開発を独自に行ってきた。その結果、陸上ではTMIとPRの降水プロダクトの差が小さくなったことが確認されている<sup>12)</sup>。今回の結果から示唆されるGSMaP\_MWRの過小評価は、TRMM/PR自体が陸上で過小評価傾向にあるためと考えられる。PRによる過小評価の問題は、従来から多くのケーススタディで指摘されているが、改めてTRMM/PRアルゴリズムの見直しの必要性が高まっている。降水量の差は、流出量・河川流量に変換すると、さらに顕著となる。河川流量の観測値を用いた検証も、今後洪水監視システムとしての開発を進めるにあたり、非常に重要である。

謝辞：本研究は、科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業 発展研究(SORST)「衛星観測・モデル統合によるアジア環境、災害評価システムの構築(代表：安岡善文)」および同機構の戦略的創造研究推進事業(CREST)「衛星による高精度高分解能全球降水マップの作成(代表：岡本謙一)」の一部である。ここに記して、謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Adler, R.F., G.J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, and P. Arkin: The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present). *J. Hydrometeor.*, 4, 1147-1167, 2003.
- 2) Xie P., and P. A. Arkin: Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 2539-2558, 1997.
- 3) Huffman, G.J., R.F. Adler, M. Morrissey, D.T. Bolvin, S. Curtis, R. Joyce, B. McGavock, J. Susskind: Global Precipitation at One-Degree Daily Resolution from Multi-Satellite Observations. *J. Hydrometeor.*, 2, 36-50, 2001.
- 4) Okamoto, K., T. Iguchi, N. Takahashi, K. Iwanami, T. Ushio: The Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) Project. *IGARSS*, Seoul, Korea, 2005.
- 5) 芳村圭, 岡澤毅, H. Kim, 瀬戸心太, 小岩祐樹, 沖大幹, 鼎信次郎: 気象庁メソ予報モデルGPVを用いた日本域河川流量予測システムの構築と検証, 水工学論文集, 第51巻, 投稿中.
- 6) Yoshimura, K., S. Miyazaki, S. Kanae, T. Oki: Iso-MATSIRO, a land surface model that incorporates stable water isotope, *Global and Planetary Change*, 51, 90-107, 2006.
- 7) Oki, T., Y.C. Sud: Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) A global river channel network, *Earth Interactions*, 2, 1998.
- 8) <http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/Earth/>
- 9) Kubota, T., S. Shige, H. Hashizume, K. Aonashi, N. Takahashi, S. Seto, M. Hirose, Y.N. Takayabu, T. Ushio, K. Nakagawa, K. Iwanami, M. Kachi, K. Okamoto: Global Precipitation Map using satelliteborne microwave radiometers by the GSMaP Project: production and validation, *IEEE Tran. Geosci Rem. Sens.*, submitted.
- 10) Joyce, B.J., J.E. Janowiak, P.A. Arkin, P. Xie: CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution, *J. Hydrometeor.*, 5, 487-503, 2004.
- 11) Sorooshian, S., K-L. Hsu, X. Gao, H.V. Gupta, B. Imam, D. Braithwaite: Evaluation of PERSIANN System Satellite-Based Estimates of Tropical Rainfall, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, 2035-2046, 2006.
- 12) 瀬戸心太, 久保田拓志: GSMaP\_TMIプロダクトにおける陸上降水強度の評価, 水文・水資源学会2006年度研究発表会, 岡山, 2006.

(2006. 10. 23. 受理)