

# 衛星による降水観測を用いた陸面水文過程準リアルタイムシミュレーション

瀬戸 心太, 芳村 圭, Hyungjun Kim, 沖 大幹 (東京大学 生産技術研究所)  
seto@iis.u-tokyo.ac.jp

## ABSTRACT

昨年の生研フォーラム(芳村ほか「気象庁GPVを用いた陸面水文過程準リアルタイムシミュレーション」)で紹介されたToday's Earthの降水量入力データを衛星観測による高解像度降水マップで置き換えてYesterday's Earthを構築した。これは、将来的にグローバルな洪水監視システムとしての活用を目指すものであり、本研究ではそのための準備として、降水量および流出量・河川流量について複数の降水マップの相互比較およびGPCC(雨量計),GRDC(河川流量)などの実測データを用いた検証結果を示す。

## 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。

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	○	×	×	×	○	GMWR
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	○	○	×	×	○	GMOR
SCaMPR	4km	15分	○	○	×	×	△	×

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>9)</sup>により開発された水循環予測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、降水プロダクト間の降水量とYEを通してシミュレーションされた流出量についての相互比較結果を示す。さらに、シミュレーションされた河川流量について実測データによる検証を行う。最後に、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

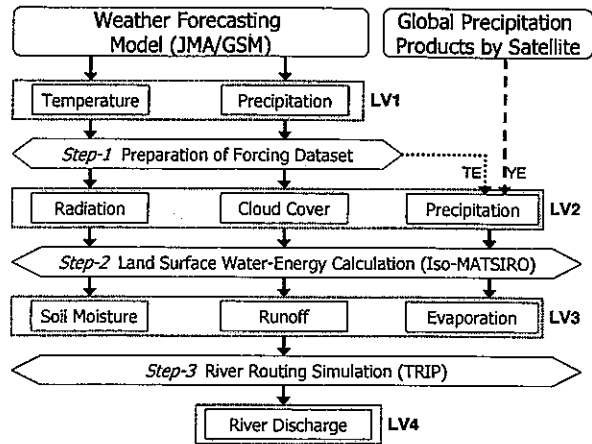


図-1 Today's Earth (TE)とYesterday's Earth (YE)に共通するシステム概要。LV2降水量プロダクト作成部分のみ、点線がTE、鎖線がYEについての場合を示す。

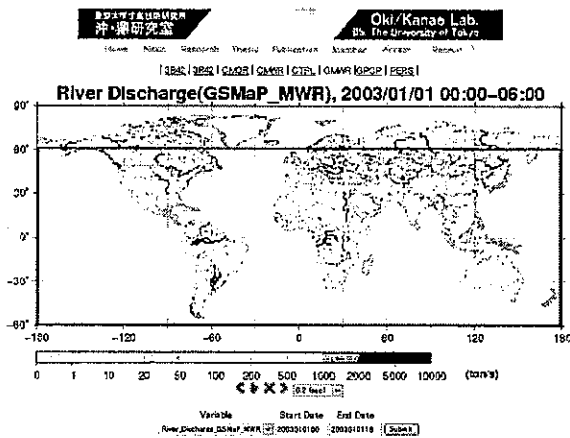


図-2 Yesterday's Earthの結果を表示するWeb画面例

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)、AMS、AMSREの最大6機のマイクロ波放射計による降水リトリバ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Version 4.7.2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、スピンアップ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。

### 3. 各降水プロダクトの降水量および各降水プロダクトから計算される流出量の相互比較

Yesterday's Earthの8つのシミュレーション間の降水量・流出量の相互比較および独立した観測データとの比較を行う。

#### (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

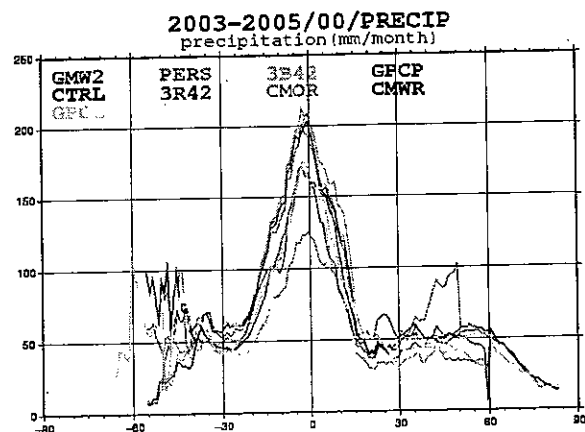


図-3 各シミュレーションで使用した降水プロダクトおよび雨量計(GPCP)・TRMM/PR(3A25)の緯度別平均降水量。2003-2005年の年平均、mm/monthで表す。

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2003-2005年平均の降水量を緯度別平均として示す。8つのシミュレーションに加えて、TRMM/PR(3A25)および雨量計(GPCP)による推定値を合わせて示す。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/月で最小であり、3A25がそれに次いで小さい。CTRL、GPCP、およびGPCPでの補正が入っている3B42、GPCPは約170mm/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、3R42の誤判定と見られるシグナルは、2003年に最も高く、2004年以降は弱まっている。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。

地域別にみると(図略)、ある程度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-4に, 2003-2005年平均の流出量について緯度帯別の平均を示す. 独立した観測データとして, UNH/GRDC composite runoff field<sup>12)</sup>を示す. ただし, このデータは2003-2005年のものではないために, 参考として示す. 基本的に降水量と同様の結果であるが, 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. すなわち, 緯度0度付近で, 降水量は約120-200mm/月の間に分布しプロダクト間の差は2倍以下であるが, 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. UNH/GRDCの結果は3R42等降水量200mm/月程度を示したプロダクトを用いた結果と比較的近い. 3R42等は雨量計を基準にすれば過大評価との指摘がされるが, 流出量データからは妥当な結果であると結論されることになる. この点, 今後より詳細に確認することが必要である. 緯度15度以上より外側では流出量は急激に減少する. 北緯20-30度付近で8つのシミュレーションのうちCTRLのみにピークがみられるが, この傾向はUNH/GRDCによって支持されている. 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. ただし3R42の結果は飛びぬけており, UNH/GRDCにもこの傾向は見られないことから, やはり3R42の過大評価であると考えられる。

## 4. 各降水プロダクトから計算される河川流量の相互比較および実測データによる検証

各シミュレーションで計算された河川流量について, 実測データを用いた検証を行う. 実測データはGRDC(Global Runoff Data Center)から入手したものである. 現在までにわれわれが入手しているデータは, ほとんどが2000年までのものであった. このため, 2003年以降のシミュレーションと直接比較することはできない. そこで, GRDCデータについては1901年から2000年までの間で利用可能な年のデータを平均して月流量データセットを作成した. 一方, シミュレーションについては2003年から2005年を平均することで, 月流量データセットを作成した. GRDCデータセットに示されている各観測点の緯度・経度をもとに, シミュレーション河川流量を対応させるグリッドを決定する. ただし, そのまま対応させたのでは流域面積が大きすぎるケースがあるため, 必

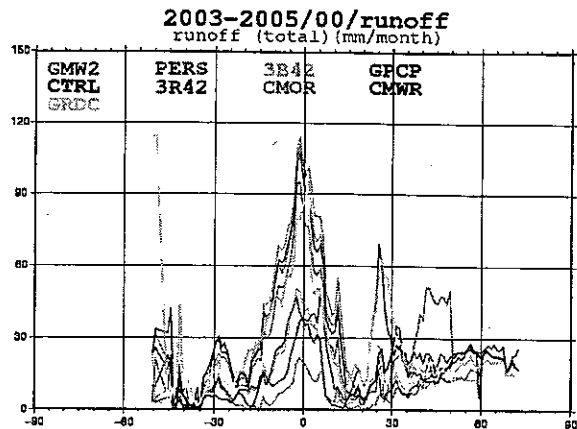


図-4 各シミュレーションによる緯度別平均流出量. 2003-2005年の年平均, mm/monthで表す. 参照用にUNH/GRDCのcomposite runoff fieldを示す.

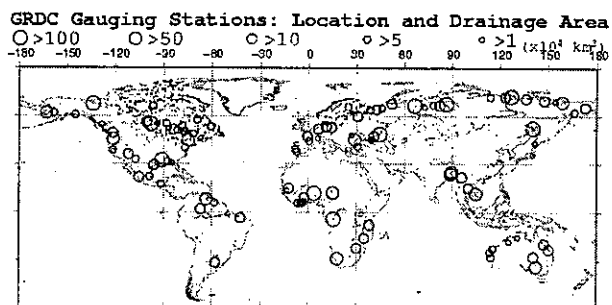


図-5 本研究で用いたGRDC河川流量データの観測点およびその集水域面積の規模(丸の大きさで示す).

要に応じて隣のグリッドに移すなどの修正を行った. これは合流点前後の流域面積の大幅な変化等が1度グリッドの河道網では十分表現できないためであり, やむを得ない処置と考える. 図-5に本研究で使用した105か所の流量観測点の位置と集水域面積の階層を示す. 1つの流域に利用可能な観測点が2つ以上ある場合には, 原則として最下流に位置するもの(集水域面積が最大のもの)を選択した. 以下にいくつかの代表的な流域についての結果を, 月流量時系列とTaylorダイアグラム<sup>13)</sup>で示す.

図-6にDanube川(45.22N, 28.73E, 集水域面積807,000km<sup>2</sup>)での結果を示す. すべてのシミュレーションで相関係数0.8以上と季節変化の再現は良好である. 3R42が過大評価なのは先にのべたように積雪の誤判定によるものである. 年流量では3R42以外は過小評価であるが, 変動幅は過大評価である. シミュレーションではダムによる調整効果が入っていないことが1つの原因として考えられる. 図-7にCongo川(4.3S, 15.3E, 集水域面積3,475,000km<sup>2</sup>)における結果を示す. この地点では, 3R42など4つのプロダクトが大きな過大評価を示しているのに対して, そのほかの4つは過小評価となっている. GPCP雨量計で補正されている2つのプロダクトが最も低い値を示しているが, この流域では雨量計密度が十分でないことと関係があるかもしれない. 同様の傾向は二

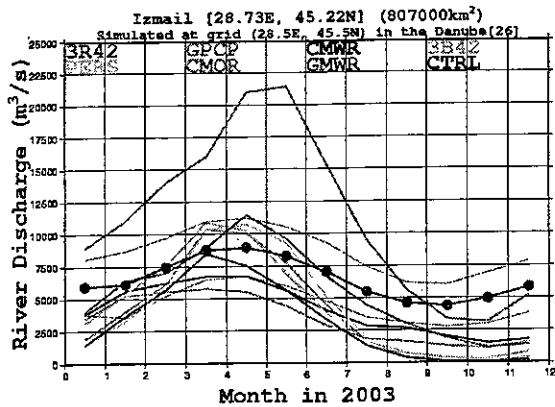


図-6 Danube川におけるシミュレーション流量と観測流量の比較評価。

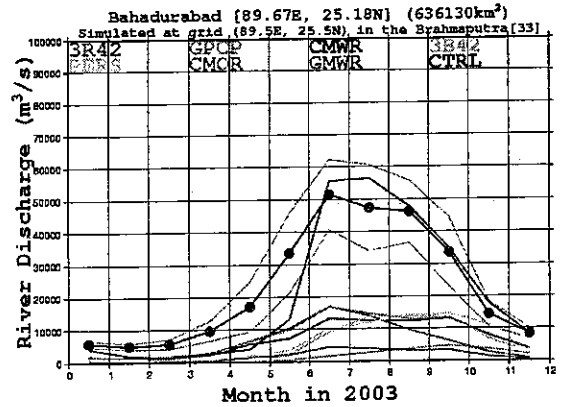
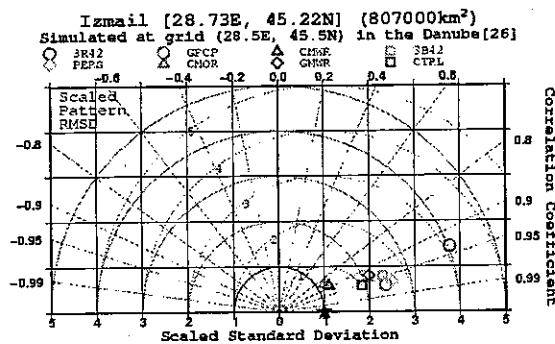


図-8 Brahmaputra川におけるシミュレーション流量と観測流量の比較評価。

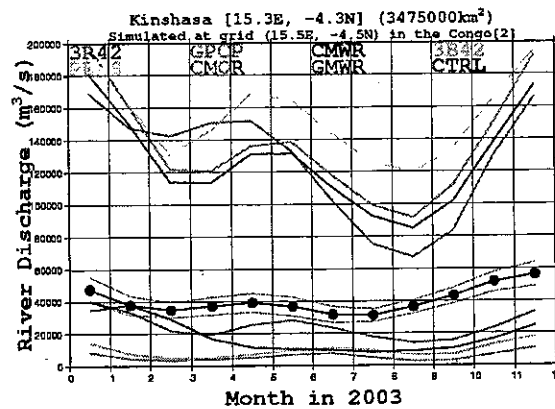
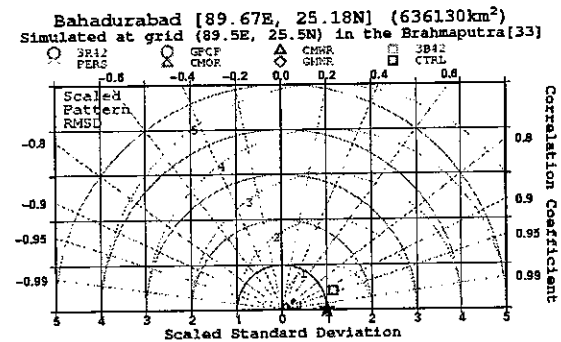


図-7 Congo川におけるシミュレーション流量と観測流量の比較評価。

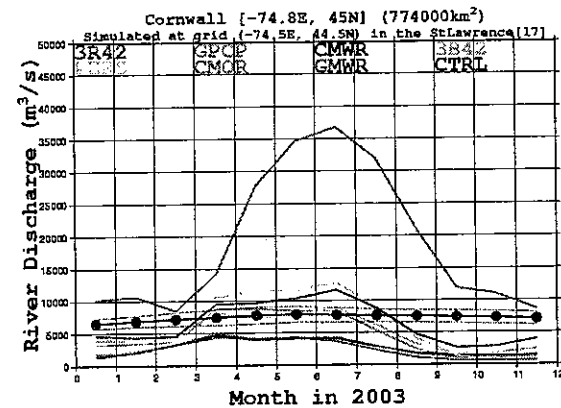
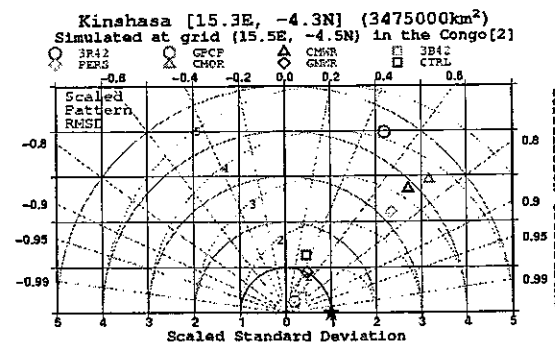
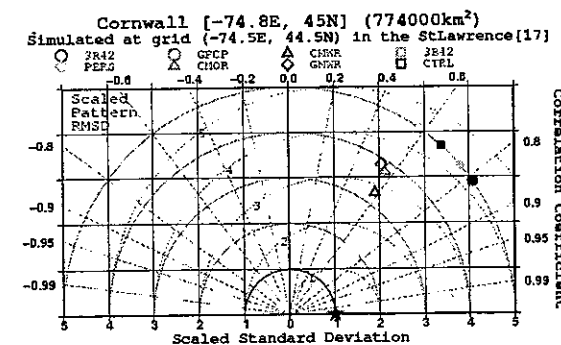


図-9 St. Lawrence川におけるシミュレーション流量と観測流量の比較評価。



ジェール川流域などアフリカ熱帯域で広く見られる。図-8に Brahmaputra 川 (25.18N, 89.67E, 集水域面積 636,130km<sup>2</sup>) における結果を示す。CTRLは観測流量と年

平均および季節変化の双方で非常によい一致を示している。一方で、衛星観測を利用したシミュレーションはいずれも強い過小評価を示している。同様の傾向は、イン

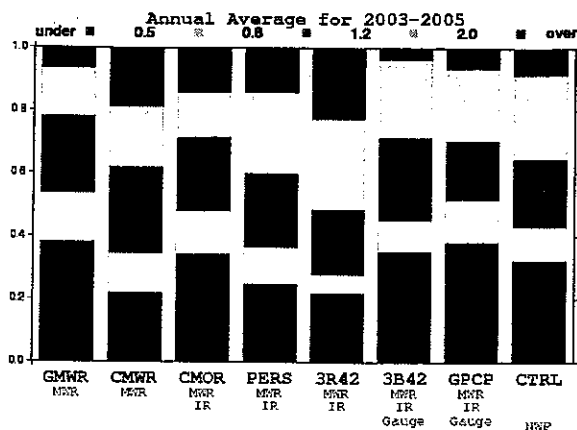


図-10 各シミュレーションによる年流量の評価結果. 該当する観測点の割合で示す.

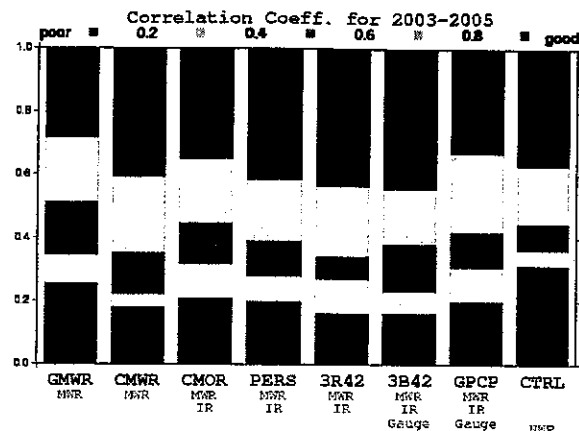


図-11 各シミュレーションによる季節変動(相関係数)の評価結果. 該当する観測点の割合で示す.

ドシナ半島で広く見られる. 図-9にSt. Lawrence川(45.00N, 74.8W, 集水域面積774,000km<sup>2</sup>)の結果を示す. この観測点は五大湖の下流に位置するため, 観測流量にほとんど季節変化が見られない. したがってダム・湖による貯留効果を入れていない現状のシステムでは再現できないのは当然である. また, Lena川(図略)では, 融雪出水のピークが合わないために季節変動を再現できていない.

図-10に各シミュレーションの年平均流量の比について評価した結果を示す. 全105の観測地点に対して, 強い過小評価(0.5未満), やや過小評価(0.5以上0.8未満), 良好(0.8以上1.2未満), やや過大評価(1.2以上2.0未満), 強い過大評価(2.0以上)であった観測点の割合を示す. GSMaP, 3B42, GPCPでは強い過小評価を示す観測点が4割近いが, 強い過大評価を示す観測点はわずかである. 一方, 3R42には強い過大評価を示す点・強い過小評価を示す点が各2割程度ずつある. 全体としてはバイアスが打ち消されていると言えるが, 流域単位では強いバイアスが存在していることに注意が必要である. 図-11は各シミュレーションの相関係数について評価した結果である. 全105の観測地点に対して, 悪い(0.2未満), やや悪い(0.2以上0.4未満), 普通(0.4以上0.6未満), やや良い(0.6以上0.8未満), 良い(0.8以上)結果を示した観測点の数を示している. 図-9の例に示したようにYEで利用している地表面モデル・河道網モデルの不完全性に依存する問題もあるが, 3R42では4割近くで良い結果を示しており, CTRLよりも良い結果となっている.

## 5. 2005年タイ北部洪水への応用例と課題

TE, YEは単なる河川流量の予測・再現にとどまらず, 洪水予測・監視システムとして発展させることを目的としている. そのためには, 月流量ではなく, やはり日流量での, とくに洪水等極端現象に対する精度を評価する必要がある. ここでは, ケーススタディとして, 2005年

表-1 2005年タイ国チェンマイにおける洪水とその被害概要. 最大水位はPing川P1観測点のもの.

開始	8月12日	9月11日	9月19日	9月27日	10月31日
終了	8月19日	9月13日	9月21日	9月30日	11月3日
豪雨原因	低気圧	低気圧	台風	台風	台風
最大水位(m)	4.9	3.81	4.71	4.93	3.79
死者数	0	0	1	6	0
負傷者数	88269	59193	72362	31322	不明
被害面積(ha)	8265	3853	2750	914	不明

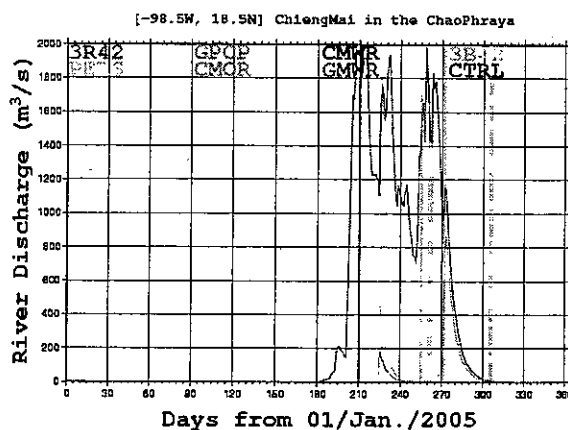


図-12 チェンマイ(18.5N, 98.5E)における各シミュレーションの流量. 網かけは表-2に示す洪水の期間.

にタイ北部で起こった洪水の再現を試みた例を紹介する. 2005年の8-11月にかけてタイ北部のチェンマイ市は5回の大きな洪水に見舞われた. 表-2に各洪水におけるPing川P1観測点での最大水位, 死者数, 負傷者数, 被害面積等を示す. 洪水のおもな原因は台風および熱帯低気圧によるもので, 一連の洪水で観測された水位と流量は過去50年で最大のものであったとされる<sup>14)</sup>.

図-12にチェンマイ市の緯度・経度と対応するグリッド(18.5N, 98.5E)におけるシミュレーション流量を示す. また, 背景の網かけ部分は表-2に示した5回の洪水の発生期間に対応する. このグリッドはTRIPで最上流域に位

置ることからroutingの効果は表れていない。このスケールでは、より細かい解像度の流路網を使う必要があるが、今回は試験的な結果として1度グリッドでの結果を示す。モデル予報値を利用したCTRLでは、第1から第4までの洪水イベントに対応して流量の増加を示している。しかしながら、衛星観測を利用した他のプロダクトでは、洪水イベントに対応した流量増加がほとんど見られない。当該グリッドにおける降水量と土壌水分量（第1層）の月変化をみると（図略）、CTRLに比べて、衛星観測の降水量は半分程度ではあるが、全く再現されていないわけではない。とくに3つの洪水が起きた9月の降水量は比較的CTRLに近い。しかしながら、8月までの降水量が十分でないことから、9月の時点で土壌水分量の蓄積が十分でなかった。このために、9月にある程度降水が再現されても、土壌の飽和が起こらず大きな流出の再現につながらなかったと考えられる。

## 6. まとめ

以上、現在開発中のYesterday's Earthについてその概要を説明した。地上観測が必ずしも十分でない特にアジアの発展途上国に対して、衛星による降水観測データの利用は大きな期待がかけられている。しかしながら、その観測精度には依然として大きな改善が必要であることが改めて明らかになった。年平均の降水量についてもプロダクト相互の乖離は大きい。また、観測流量を用いた検証では、複数のプロダクトについて、アフリカ熱帯域での強い過大評価、東南アジアでの過小評価が示された。

今後、Yesterday's Earthをグローバルな洪水監視システムとして発展させていくには、衛星による降水観測精度の向上とあわせて、より現実的な陸面水文過程の再現が必要である。特に、ダムや湖による貯留効果の導入と、融雪過程の改良がとくに重要である。

なお、本稿は、第一著者による第5回水文過程のリモートセンシングとその応用に関するワークショップ（土木学会、水文・水資源学会等共催）予稿集掲載の論文「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」を加筆修正したものである。

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. Hydrometeorol.*, 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. Hydrometeorol.*, 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, pp403-408, 2007.
- 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.*, accepted, 2007.
- 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. Hydrometeorol.*, 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) Fekete, B. M., C. J. Vorosmarty: High-resolution fields of global runoff combining observed river discharge and simulated water balances, *Global Biogeochemical Cycles*, 16, 10.1029/1999GB001254, 2002.
- 13) Taylor, K. E.: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, *Journal of Geophysical Research*, 106, 7183-7192, 2001.
- 14) 新井裕子, 鼎信次郎, 沖大幹: タイ国チェンマイにおける洪水予警報システムの現状と課題に関する研究, 水文・水資源学会2006年度研究発表会, 岡山, 2006.