

衛星降水マップを用いた 日本域の洪水シミュレーション

瀬戸心太¹・沖大幹²・芳村圭³

Shinta SETO, Taikan OKI, and Kei YOSHIMURA

¹正会員 博士(工学) 東京大学地球観測データ統合連携研究機構/
東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

²正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

³正会員 博士(工学) カリフォルニア大学サンディエゴ校スクリプス海洋学研究所/
東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

In these days, several kinds of global precipitation maps derived from satellite observations have become available. Some of them have resolutions of 1 hour and 0.1 degree, which seem to be good enough to be used for hydrological purposes including flood detection. As a basic research to develop operational flood detection systems by using satellite precipitation maps mainly for developing countries in near future, we conducted river discharge simulations all over Japan by using several precipitation dataset and evaluated the ability of flood detection. The simulation system is based on “Today’s Japan” developed by Yoshimura et al.¹⁾. The GSMaP product can detect the precipitation events which caused flood disasters, but the precipitation amount is generally underestimated, consequently the river discharge is not well simulated in many cases. The GSMaP product adjusted by using monthly and 1 degree rain gauge information can be used to detect flood events as well as hourly rain gauge observations. The underestimation in precipitation estimates by the GSMaP product should be physically modified.

Key Words : global precipitation map, GSMaP, river discharge, AMeDAS, flood disaster

1. はじめに

近年、衛星観測を利用した高分解能の全球降水マップ(以下、衛星降水マップ)の開発がさかんである。衛星降水マップとして先駆的なものに、GPCP IDD²⁾がある。GPCP IDDは、マイクロ波放射計SSM/I、マイクロ波サウンダTOVS、静止気象衛星等の赤外雲画像による衛星観測を、地上雨量計を用いて補正することで、時間分解能1日、空間分解能1度で作成されている。近年は、CMORPH・PERSLANNなど、さらに高分解能の衛星降水マップが登場している。

GSMaP(Global Satellite Mapping of Precipitation)^{3),4)}は、日本で開発された衛星降水マップである。GSMaPは、以下の複数のプロダクトを含む。GSMaP_TMIは、熱帯降雨観測衛星TRMMに搭載されたマイクロ波放射計TMIによる推定プロダクトであり、同じくTRMM搭載の降雨レーダPRから作成した降水タイプ等のデータベースを参照することに特徴がある。GSMaP_MWR⁵⁾は、

GSMaP_TMIと、そのアルゴリズムを他のマイクロ波放射計(SSM/I, AMSR-E等)に応用して得られた降水推定値を複合して作成した降水マップで、分解能は6時間・0.25度である。GSMaP_MWRに、マイクロ波サウンダAMSUを用いたNOAAによる降水推定値を加えてサンプリング欠損域を補った降水マップがGSMaP_MWR+である。さらに、静止気象衛星の雲画像から降水の移動を推定して、GSMaP_MWR+を内挿した1時間・0.1度分解能の降水マップがGSMaP_MVK⁶⁾である。

著者らは、衛星降水マップを用いた途上国で実用的に使える洪水監視システムを開発することを目指して、そのプロトタイプとなる日本域河川流量シミュレーションシステムを開発した。日本域は、地上ベースの雨量・流量観測が密に展開されており、衛星降水マップを洪水監視に用いる実用的な意味は乏しいが、降水マップの精度検証および洪水監視に求められる分解能などシステム要件の検討には非常に適している。

2. 日本域河川流量シミュレーション

(1) Today's Japan

日本域の河川流量シミュレーションを行うにあたり、芳村ら¹⁾が開発したToday's Japanを用いる。Today's Japanは、陸面モデルにIso-MATSIRO⁷⁾、河道網モデルにJ-TRIP⁸⁾を使っている。また、降水量・気温等各種気象要素の入力データは、GPVデータとして配信されている気象庁メソ気象モデル(JMA/MSMモデル)による予報結果から作成している。シミュレーションの分解能は、1時間・0.1度である。対象範囲は、日本全域である。

(2) 降水マップ

Today's Japanを一部変更して、入力データのうち降水量を、衛星降水マップ等から与えられるようにした。本研究では、表-1に示す6つの降水量データをそれぞれ用いたシミュレーションを行った。衛星降水マップとしては、GPCP 1DD(略称：GPCP)、GSMaP_MWR+(略称：MWR+)、GSMaP_MVK+(略称：MVK+)を用いる。前述したように、GPCPとMWR+の分解能は1時間・0.1度よりも粗いため、単純分割して入力した。

検証用に、アメダス雨量計(時間分解能1時間)のデータを、距離の2乗に反比例した重みをつける方法で空間方向に内挿し、0.1度のグリッドデータ(略称：AMDG)を作成した。なお、今回使用したアメダス雨量計の数は全部で1471点であり、平均間隔は約17kmである。

さらに、比較のため、AMDGをGPCPと同じ1日・1度分解能にスムージングした降水量データ(略称：AMD2)を用いる。また、MVK+を、1か月・1度の期間平均降水量がアメダス雨量計と一致するように、降水量を定数倍して補正した降水量データ(略称：MVKG)も用いた。

(3) 2004年の洪水

本研究では、2004年の6月から10月を対象とする。この年10個の台風が日本に上陸し、また7月には新潟・福島および福井で豪雨災害が発生している。

なお、各シミュレーションは共通の初期値を用いて2004年1月から開始した。初期値にある積雪量などの影響は、5月までにおおむね解消されていると考えられる。

(4) 検証用河川水位データ

シミュレーションされた河川流量を検証するために、国土交通省が水文水質データベース⁹⁾により公開している河川水位データを用いる。これは、全国109の一級水系に属する観測点で自動観測された水位データである。水位を流量に変換したデータは、本論文執筆時点(2007年9月)において、2004年分は公表されていない。なお、2003年以前については流量年表¹⁰⁾により既に公開されている。そこで、2003年のデータから、水位Hと流量Qの関係を、QをHの2次曲線に近似して求め、これを2004年のデータに適用して、流量データを得た。地点によっては、2次曲線での近似が十分でない場合があり、この

表-1 本研究で用いる降水データの一覧。

降水データ	略称	時間分解能	空間分解能
アメダス雨量計	AMDG	1時間	0.1度
アメダス雨量計 (スムージング)	AMD2	1日	1.0度
GPCP 1DD	GPCP	1日	1.0度
GSMaP_MWR+	MWR+	6時間	0.25度
GSMaP_MVK+	MVK+	1時間	0.1度
GSMaP_MVK+ (雨量計補正)	MVKG	1時間	0.1度

MLIT Observation Sites on J-TRIP
red circle : observation sites
colored grids : upstream area

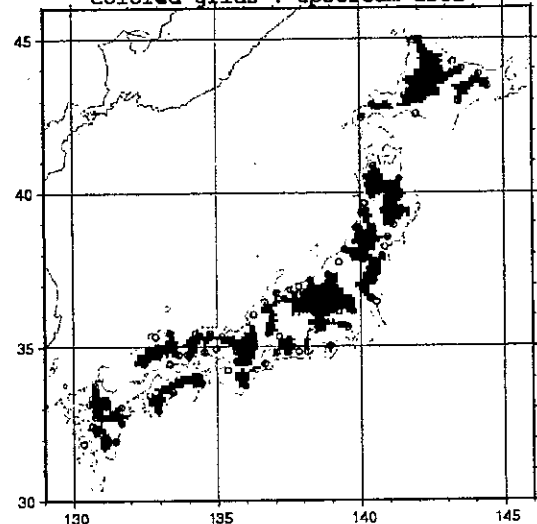


図-1 検証対象とする水位観測点(赤○で示す)とその集水域(隣接する流域に異なる色をつけて示す)。

手法が適用できない場合もあった。ここで用いる2004年の流量は暫定的なものであり、近い将来確定値が公表された際には検証を再度行う必要があると考えている。ちなみに、本論文執筆時点では2003年のGSMaP_MVK+が作成されていないため、2003年をシミュレーション対象期間としていない。

本研究にあたり、363点の水位データを取得した。観測点の緯度・経度と対応するJ-TRIPのグリッドを調べ、

- (I) J-TRIPでの水系名が実際の水系名と一致する
- (II) J-TRIPで表現される集水域面積が、国土交通省による公称値の1/2以上、2倍未満である

の2つの条件で選別を行った。さらに、各一級水系について条件(I),(II)をみたま観測点のうち、原則として水系内で最も集水域面積が大きい地点を選択した。この結果、一級水系109のうち、77の水系に各1つの観測点を選択することができた。選択された観測点とその集水域を図-1に示す。残りの水系のうち、25水系はJ-TRIPで表現できないため、5水系は条件(I),(II)をみたま観測点がないため、2水系はH-Q曲線の作成に問題があるため、観測点が得られなかった。なお、77の観測点集水域面積(公称値)の合計は、日本全体の約42%を占める。

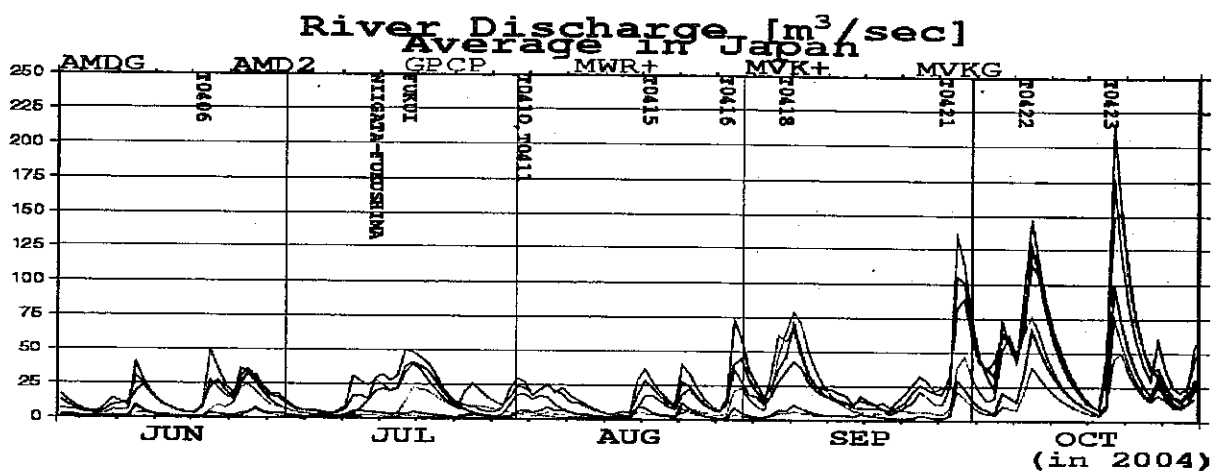
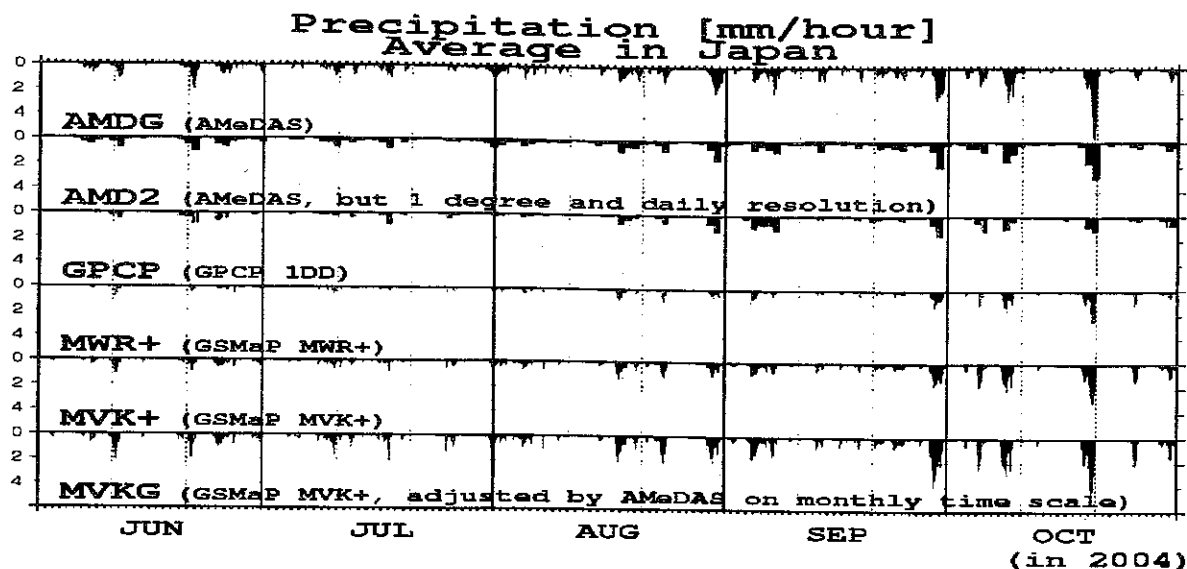


図-2 各シミュレーションによる全日本域平均の降水量(上)および河川流量(下)の時系列。2004年6-10月。背景を黄色で示したのは洪水災害の発生期間であり、黒字はその主な原因(Tは台風の略)を示す。

3. シミュレーションの比較・検証

(1) 概要

6つのシミュレーションについて、全日本域平均の降水量と河川流量の時系列を図-2に示す。主な洪水災害の発生した期間は背景を黄色で示す。降水量で見ると、いずれの降水データでも災害発生期間と降水の多い期間は比較的よく対応している。ただし、絶対値をみると降水データによる違いが大きい。たとえば、台風23号(10月18-21日)によるピーク降水量を見ると、アメダスでの値に比べて、衛星降水マップの値は低い。また、ピーク降水量には降水データの時間分解能の違いも影響する。

河川流量で見ると、アメダス雨量計を利用したAMDG実験では、主な洪水発生期間内に必ず流量ピークが現れているのに対して、衛星降水マップの場合は必ずしもそうではない。MWR+実験、MVK+実験では、後半の3つの

台風以外で明確なピークが見られない。6-9月前半の洪水期間に降水は示されているが、量的に十分でないためである。降水量と流量の関係は線形ではないから、ある程度の降水量がないと流量に反映されない。また、GPCP実験は6-9月前半についても、ある程度流量が再現されているが、ピークが洪水期間からずれている場合も見られる。

アメダス雨量計をスムージングしたAMD2実験は、AMDG実験に比べてピークの値が低い傾向が見られる。スムージングにより、強い雨が平均化して弱められ、土壌水分として蓄積される水量が増えるためである。MVK+実験では、洪水の再現ができない場合が多いが、月単位でアメダス雨量計と合うように補正したMVKG実験では、AMDG実験と同様に洪水期間と流量のピークがよく一致している。月単位以下の細かなスケールでの補正をしたわけではないから、MVK+が洪水を引き起こす強い雨のタイミングをとらえていることを示している。

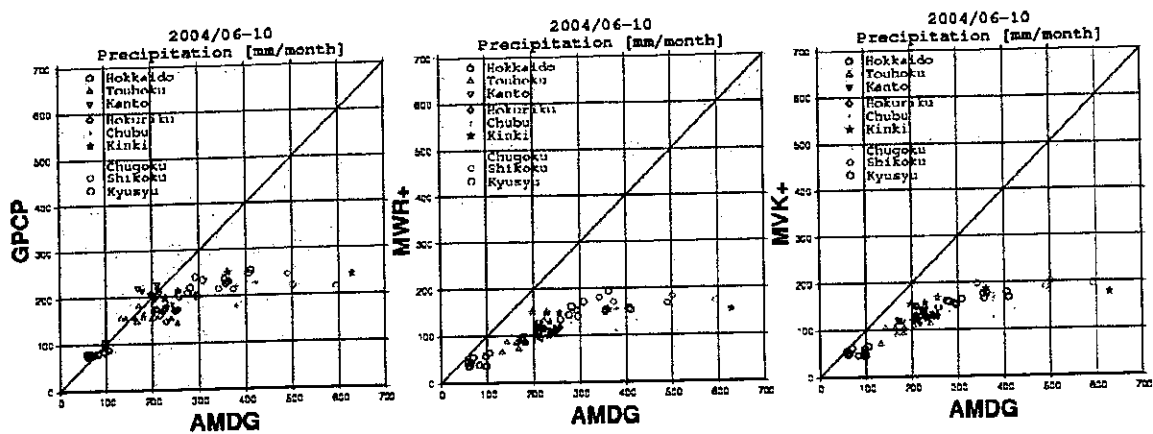


図-3 衛星降水マップとアメダスの期間平均降水量(2004年6-10月)比較。観測点の集水域ごと、地域別にシンボルを変更。

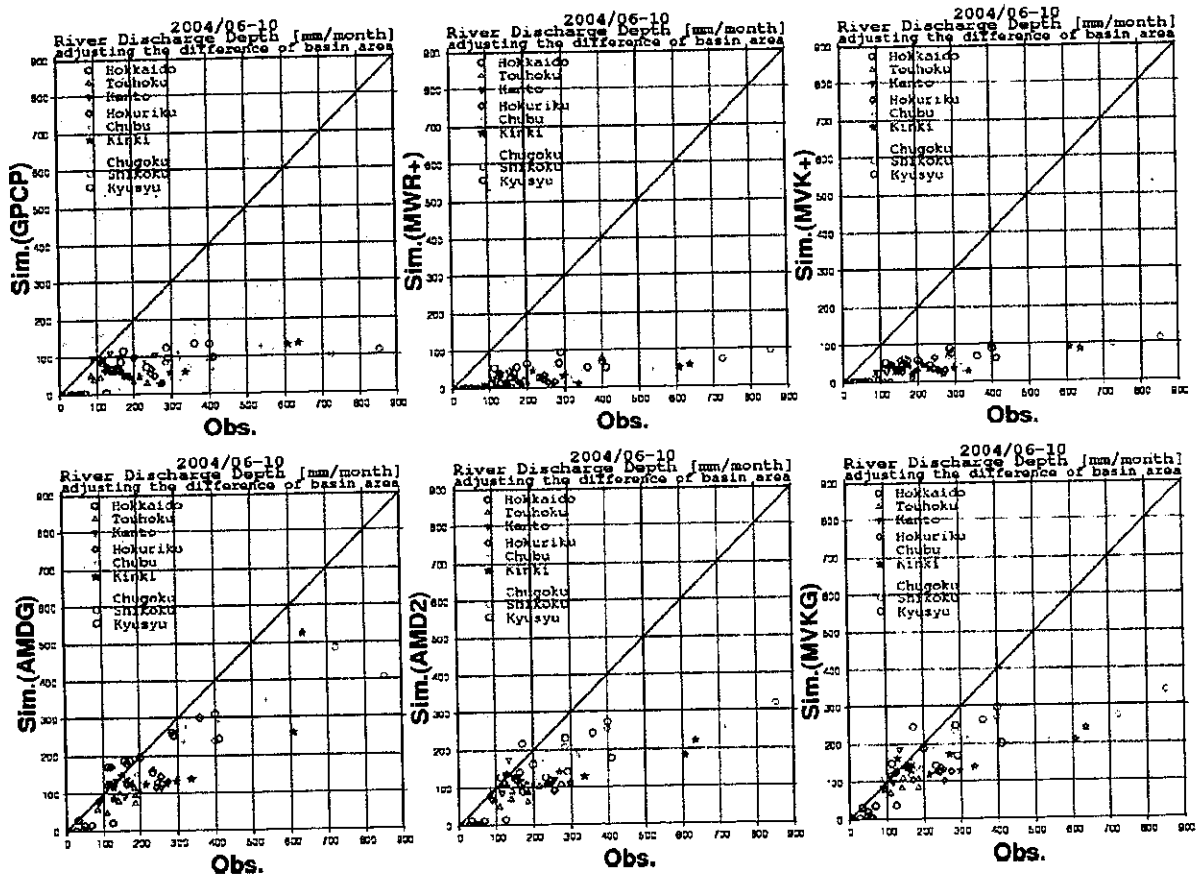


図-4 各シミュレーションと観測の期間平均(2004年6-10月)河川流出高の比較。

(2) 流域別降水量の比較

衛星降水マップの降水量を、77の観測点の集水域単位で、アメダス雨量計と比較して図-3に示す。比較的降水量の少ない北海道・東北・関東・北陸・中国などの地域で、GPCPのアメダス雨量計に対するバイアスは小さいが、降水量の多い中部・四国・九州では、300mm/monthを超える降水量を再現できず過小評価になっている。

MWR+, MVK+は、いずれの流域でも過小評価であり、アメダス雨量計の半分よりやや多い程度である。なお、MVK+とMWR+では、MVK+が若干高い降水量を示す。

(3) 平均流量の検証

次に、河川流量観測値を用いて検証を行う。ここで、J-TRIPと実際の流域面積の違いを考慮するために、計算流量はJ-TRIPの流域面積、観測流量は国交省発表の流域面積で割って、流出高にして比較した(図-4)。

AMDG実験の流出高は多くの流域で観測よりやや低くなった。この原因として、アメダス雨量計や流量の観測(H-Q変換含む)自体にバイアスがある可能性のほか、雨量計の内挿手法、シミュレーションモデルのバイアスも考えられる。本研究で用いた内挿手法では、内挿後の降水量は観測点での降水量の最大値を上回ることはいない

め、面積平均で見れば、やや過小に評価されると考えられ、AMDG実験で流出高が過小評価になるひとつの理由と考えられる。

次に、衛星降水マップを用いた場合の流出高は、GPCP実験では150mm/monthを、MWR+実験およびMVK+実験では、100mm/monthを超えることがほとんどなく強い過小評価である。なお、GPCP実験では、降水データの分解能が低いことが過小評価の一因として考えられる。しかし、同じ分解能のAMD2実験はGPCP実験に比べて観測に近い流量を再現することから、分解能の低さが大きな原因ではない。ただし、雨量計で補正したMVKG実験は、AMDG実験と同様に、観測よりやや弱いもののおおむね良好に平均流量を再現している。

(4) 洪水検出能力

衛星降水マップを用いたシミュレーションは、期間を通してみると、降水量・河川流量において、過小評価の傾向にあることが示された。しかし、洪水監視システムとして特に重要なのは、洪水のタイミングが検出できるか否かである。以下では、洪水検出能力を表現するための指標を導入し、評価を行う。

まず、流量時系列を観測流量が高い順に並び変えて、基準化累積観測流量に直す。すなわち、 i 番目に高い観測流量については、1番目から i 番目に高い観測流量の合計を、期間中全 N 個の観測流量の合計で割ったものに変換する。シミュレーションの流量についても同様に、基準化累積計算流量を求める。ただし、シミュレーション流量についても、時系列の並び替えは、観測流量の順序で行う。このため、必ずしもシミュレーション流量の高い順には並ばない。

図-5のように、横軸に基準化累積観測流量、縦軸に基準化累積計算流量をとる。これにより、観測で流量が集中する時期(洪水期間)に、シミュレーションでも流量が集中しているかを判定する。利根川栗橋地点の場合、上位20%の流量が集中する期間を仮に洪水とするならば、この期間にシミュレーションはいずれも期間全体の10%程度の流量しか与えておらず、洪水検出能力は十分ではない。一方で、上位40%の流量を洪水とみなせば、GPCP実験以外は、洪水検出能力は十分あると言える。線が、1:1に近いほど、観測と同様に洪水時の流量集中を表現していることから、各線と1:1線との面積を2倍して1から引いた値を洪水検出指標(FDI)とする。FDIは0から1の値をとりうるが、この値が大きいほど、洪水検出能力が高いと判断できる。

各シミュレーションについて流域別のFDIを図-6に示す。AMDG実験では、四国や一部の小流域をのぞいてFDIが0.8以上と良好であるが、衛星降水マップを利用した各実験では、全国的にFDIが低い流域が目立つ。GPCP実験は、AMDG実験よりFDIが高い流域も一部に存在するが、MWR+実験やMVK+実験は、AMDG実験よりFDI

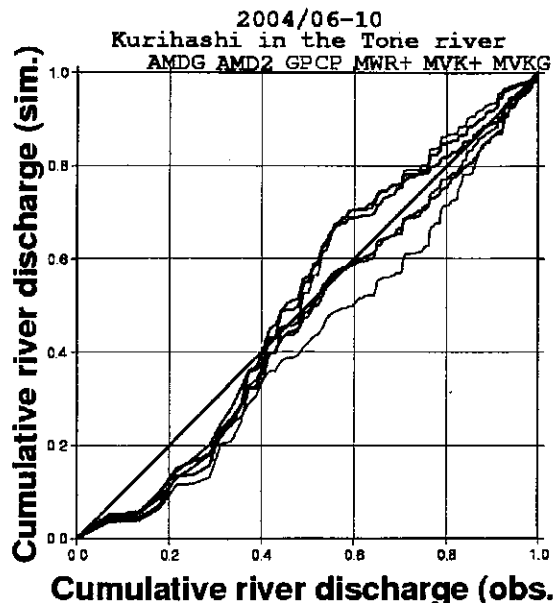


図-5 利根川の栗橋地点における観測とシミュレーションの基準化累積流量の比較。

が低い流域がほとんどである。MWR+実験とMVK+実験の比較では、MVK+実験の方がおおむねFDIが高い流域が多く良好である。AMD2実験はAMDG実験に比べて、洪水検出能力がやや低い傾向にある。すなわち、降水データの分解能は、洪水検出能力に多少影響する。しかし、GPCP実験は、分解能の同じAMD2実験と比べてもFDIが低い地域が多いことから、分解能以外の影響も大きい。雨量計で補正をしたMVKG実験は、一部流域ではAMDG実験よりも洪水検出能力が高い。

4. まとめ

近年高分解能化が進む衛星降水マップを用いて、日本域の河川流量シミュレーションを行い、衛星降水マップを河川流量の観点から評価した。今回用いた衛星降水マップは、アメダス雨量計と比べるといずれも過小評価であった。洪水が発生する直接の原因となる降水を完全に見落とすわけではないが、過小評価であるために流量に反映されにくい。また、流量を基準化したうえで、洪水のタイミングをとらえているかを、洪水検出指標FDIで判断すると、雨量計を用いたシミュレーションに比べて洪水検出能力が低いことが確認された。

衛星降水マップのうちGPCPは分解能が十分でないことも、洪水再現がうまくいかない理由のひとつとして考えられる。そのため、アメダス雨量計のデータをスムージングして、GPCPと同じ分解能で与えるAMD2実験を行った。AMD2実験はAMDG実験と比べると、期間を通じた流量がやや減り、また洪水検出能力もやや下がった。しかし、GPCP実験での精度低下はより大きく、分解能よりも降水量の過小評価の問題が大きく影響している。

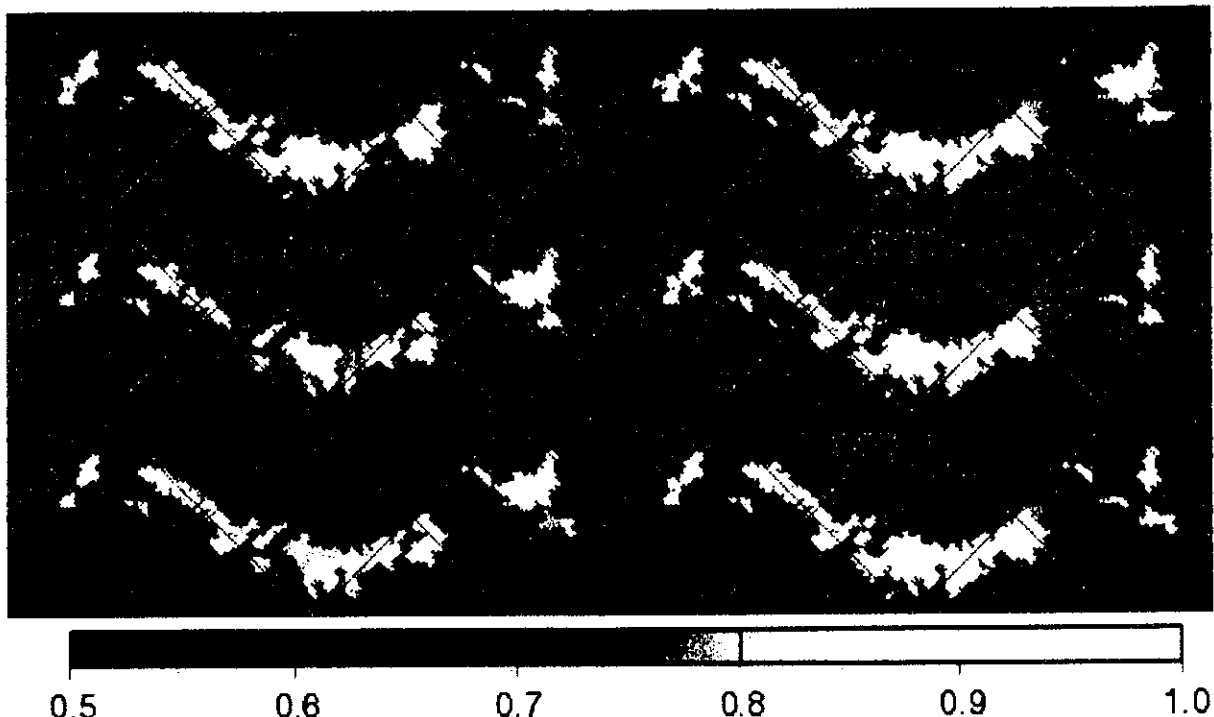


図-6 各シミュレーションによる洪水検出指標FDI.

GSMaPについては、過小評価の問題が深刻である。固体降水層の物理特性が十分解明されていないことが、過小評価の原因のひとつと考えられ、物理的な面からのアルゴリズムの改良が求められる。その一方で、実用的には、雨量計を用いた補正プロダクトを作ることも有用である。月雨量でアメダス雨量計を用いて補正したMVKG実験は、月単位降水量が同じAMD2実験と比べて、流量はやや増加し、洪水検出能力も多くの流域で優れているとの結果が得られた。なお、実時間で応用する際には、季節・地域ごとに、衛星降水マップの補正係数をあらかじめ決めておくなどの方法が必要となるだろう。

現在、GSMaPを含む複数の降水マップが、観測後数時間以内に作成されている。今後は、より実時間で応用を念頭に入れたシステム開発をすすめ、近い将来洪水監視システムとしての実用化につなげたい。

なお、本稿は水工学論文集第52巻掲載の論文『高分解能衛星降水マップによる日本域の洪水検出能力』として発表済である。

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「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)」および国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」の「データ統合・解析システム(代表：小池俊雄)」の成果の一部である。

参考文献：

- 1) 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.
- 2) Huffman, G.J., R.F. Adler, M.M. Morrissey, D.T. Bolvin, S. Cutris, R. Joyce, B. McGavock, and J. Susskind: Global precipitation at one-degree day resolution from multisatellite observations, *J. Hydromet.*, Vol. 2, pp36-50, 2001.
- 3) Okamoto, K., T. Iguchi, N. Takahashi, K. Iwanami, and T. Ushio: The global satellite mapping of precipitation (GSMaP) project, *the 25th IGRASS Proceedings*, pp3414-3416, 2005.
- 4) Okamoto, K., T. Iguchi, N. Takahashi, T. Ushio, J. Awaka, S. Shige, and T. Kubota: High precision and high resolution global precipitation map from satellite data, *ISAP Proceedings*, pp506-509, 2007.
- 5) 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.*, Vol.45, No. 7, pp2259-2275, 2007.
- 6) Ushio, T., K. Okamoto, T. Kubota, H. Hashizume, S. Shige, S. Noda, Y. Iida, K. Aonashi, T. Inoue, R. Oki, M. Kachi, N. Takahashi, and T. Iguchi: A combined microwave and infrared radiometer approach for a high resolution global precipitation mapping in the GSMaP project Japan, *the 3rd IPWG workshop*, 2006.
- 7) Yoshimura, K., S. Miyazaki, S. Kanae, and T. Oki: Iso-MATSIRO, a land surface model that incorporates stable water isotopes, *Global Planetary Change*, 51, pp90-107, 2006.
- 8) 岡澤毅:0.1度グリッド河道網を用いた日本域河川流量予測システムの開発, 東京大学修士論文, 2005.
- 9) 国交省:水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp>.
- 10) 日本河川協会:雨量・流量年表データベースDVD-ROM, 2007.