

フィリピン・カガヤン川流域における 現行の洪水予測手法の水文学的課題と 改善に向けての提案

HYDROLOGICAL ISSUES OF EXISTING FLOOD FORECASTING METHOD
AND SUGGESTIONS FOR IMPROVEMENT IN THE CAGAYAN RIVER BASIN,
PHILIPPINES

宮本守¹・岡積敏雄²・鍋坂誠志²

Mamoru MIYAMOTO, Toshio OKAZUMI and Seishi NABESAKA

¹正会員 博士(工学) (独)土木研究所 ICHARM (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 工修 (独)土木研究所 ICHARM (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

The Cagayan River basin which is largest river basin in the Philippines has severe problems of flood management. Regarding to flood forecasting, the water level correlation method has been applied to flood management as the existing method of the Cagayan River basin during flooding. However, accuracy of water level correlation method is not sufficient, because it cannot include the spatial distribution of rainfall and influence of flood control such as dam operation.

In this study, accuracy of existing method is evaluated and hydrological challenges are clarified for establishment of effective flood early warning system. Not only evaluation of existing method, flood forecasting method based on IFAS which is the distributed hydrological model developed by ICHARM et al., is also proposed. The advantages of IFAS are verified in terms of forecasting accuracy and lead-time. Moreover, the potency of satellite-based rainfall as the supplementary information is examined for considering the spatial distribution of rainfall.

Key Words : *Flood forecasting, Water level correlation, IFAS, satellite-based rainfall, Cagayan River basin, Philippines*

1. はじめに

台風の常襲地帯であるフィリピンは、毎年のように水災害が発生している。近年では、2009年に発生した台風Ketsanaにより約67万人が被災し、2011年に発生した台風Nesatでは200万人以上が被災し総被害額は約114億ペソにまで達した¹⁾。フィリピンでは、JICA等の協力のもとにパンパンガ川、アグノ川、ビコル川、カガヤン川、パシッグ・マリキナの5流域においてすでに洪水監視システムが導入され、科学技術省の大気地理天文局(Philippine Atmospheric Geophysical and Astronomical Service Administration, 以下PAGASAとする)により河川の監視および警報体制がリアルタイムで管理されている。この洪水監視システムは、既設の5流域以外でも今後さらに導入が進められる予定である。またフィリピンでは洪水被害軽減のために、洪水予警報システムの整備以外

にも様々な洪水対策が取り組まれているが、雨期の台風による降雨の集中性の高さや信頼性の高い水文データの蓄積が十分ではないことなどの難しさがあるため、前述したような甚大な水害被害は依然として発生している。フィリピン最大の河川流域であるカガヤン川流域においても他流域と同様に雨期に洪水が頻発しており、下流に位置するTuguegarao Cityでは、ほぼ毎年浸水被害が発生している。特に2006年に発生した台風Agatonはカガヤン川流域の中下流部を中心に甚大な被害をもたらした。

本研究では、より効果的な洪水予警報システムの構築を目的として、カガヤン川流域における現行の洪水予測手法の精度を検証し、その適用範囲と水文学的課題を明らかにした。さらに、(独)土木研究所ICARMらが開発した洪水解析モデルIntegrated Flood Analysis System (IFAS)を適用することで、分布型流出モデルによる洪水予測の長所を予測精度とリードタイムの側面から検証した。著者らはインドネシア・ソロ川流域において洪水解

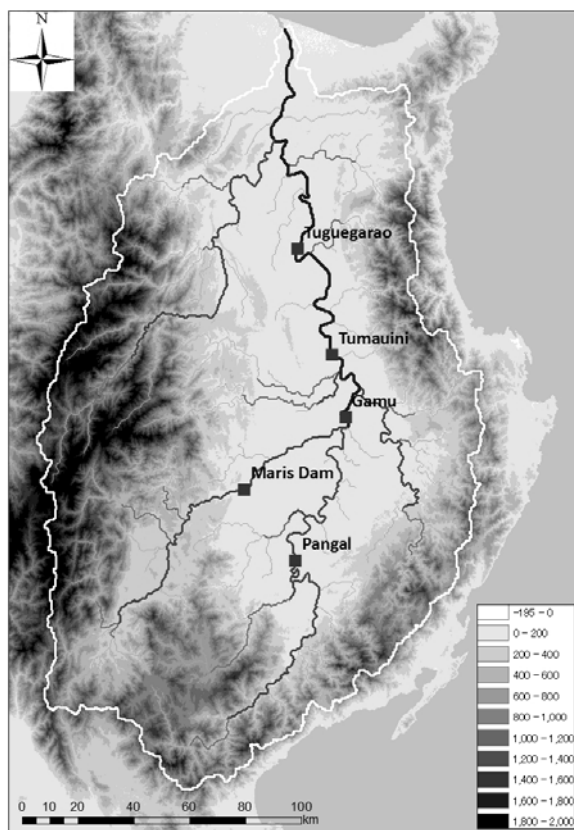


図-1 カガヤン川流域の地形と水文観測所

析モデルIFASを既に適用・導入しており、ソロ川流域における解析ではIFASによる洪水予測が洪水予警報に有効であることが確認されている²⁾。また、本研究では降雨の空間分布情報の向上を目的として、衛星雨量を適用した洪水予測手法の有効性を検証した。

2. カガヤン川流域の概要

流域面積が27,280km²のカガヤン川流域は、中央部に広大な平野を有する盆地地形である。流域内には11地点の地上雨量観測所が設けられており、そのうち7地点には水位計も設置されている。それらのうち5観測所がリアルタイムの洪水の監視・警報体制として用いられている。図-1はカガヤン川流域の地形および監視・警報システムに用いられている観測所を示している。また最大の支川であるマガット川には発電を主目的とする多目的ダムが建設されており、出水時には洪水調節の役割も果たしている。洪水氾濫は流域中央部のTumauni観測所や下流部のTuguegarao観測所周辺の平野で頻繁に発生している。

3. 現行の洪水予測手法

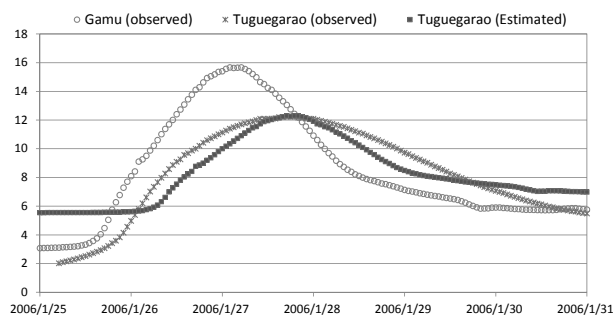


図-2 Tuguegarao地点における実測水位と現行の手法による予測水位

カガヤン川流域では、既往の洪水での上下流地点の水位の相関を用いて上流地点の水位から下流地点の水位を予測する水位相関法で洪水予測を行っている。洪水予測の対象としている観測地点はGamu, Tumauni, Tuguegaraoの3地点であり、予測のための水位データはリアルタイム監視システムに基づいている。各地点間の洪水の伝播時間は過去の洪水から決定した一定値を用いており、Gamu-Tumauni間は6時間、Tumauni-Tuguegarao間は9時間、Gamu-Tuguegarao間は15時間としている。水位相関は1次式で近似しており、例えばGamu-Tuguegarao間では式(1)で推定している。

$$H_T(t) = 0.5346 H_G(t-15) + 3.912 \quad (1)$$

ここに、 $H_T(t)$:時刻 t におけるTuguegarao地点の水位、 $H_G(t-15)$:時刻 t の15時間前のGamu地点の水位である。

図-2は式(1)を適用した2006年1月の洪水の水位予測の事例である。Tuguegarao地点における観測水位と予測水位のピーク値は非常に良く合っているが、水位の相関を線形関係としているためハイドログラフの立ち上がり部分および全体の波形は再現しきれていない。洪水予測は洪水予警報に資する必要があるため、ピーク値のみならず立ち上がり部分も重要であり、警戒・危険水位を超えるタイミングが最も重要となる。さらに水位相関法では降雨の空間分布を考慮できないため支川や残流域からの流入量が大きいケースでは定量的にも時間的にも再現することは難しい。

4. 水位相関法による洪水予測の適用精度

カガヤン川流域で用いられている水位相関法の適用妥当性を明確にするために、各地点間の洪水伝播時間および水位相関のばらつきを分析した。その上で水位相関法による洪水予測が困難な場合の精度低下の要因を調べ予測精度向上のための可能性を検討した。

(1) 洪水時での各地点間の洪水伝播時間と水位の相関性

Gamu, Tumauni, Tuguegaraoの3地点間の水位の相関性を確認するために、洪水到達時間および3地点間の洪

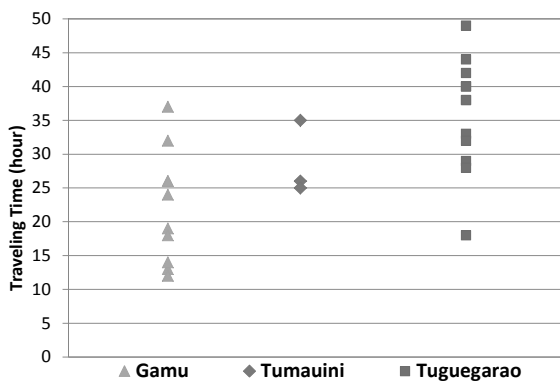


図-3 2003年以降の洪水での洪水到達時間

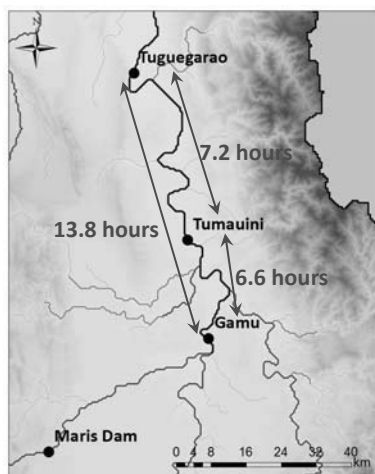


図-4 2003年以降の洪水から算出した平均洪水伝播時間

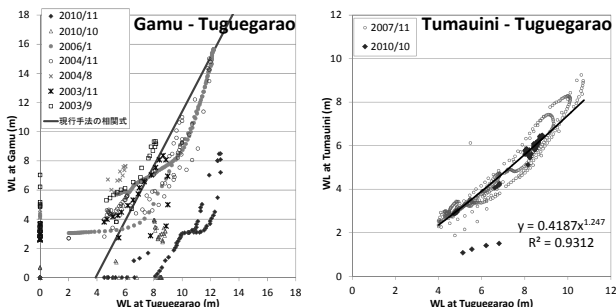


図-5 Gamu, TumauniとTuguegarao地点との水位相関

水伝播時間を2003年以降の洪水実績から算出した。洪水到達時間は、ハイエトグラフの重心から洪水のピークまでとして算出し、洪水伝播時間は、各地点間の洪水到達時間の差とした。図-3は2003年以降の洪水実績から算出したGamu, Tumauni, Tuguegaraoの3地点における洪水到達時間である。Gamu地点およびTuguegarao地点における洪水到達時間は最長と最短のケースで2倍以上の違いがあり、非常にばらつきが大きい。このことから、洪水の伝播時間を一定値としなければならない水位相関法では時間的に高精度な洪水予測は難しいと考えられる。洪水到達時間のばらつきの原因としては、降雨強度の空間分布、ダムによる洪水調節等が考えられる。図-4はGamu, Tumauni, Tuguegaraoの3地点間の洪水伝播時間

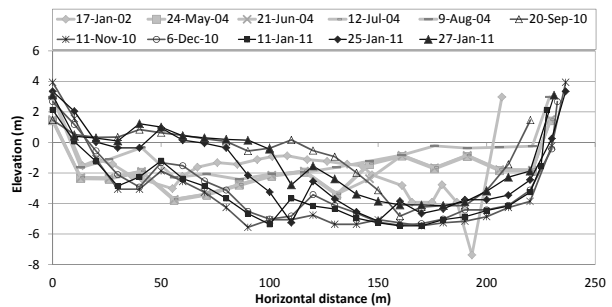


図-6 Gamu地点における河川断面の測定結果

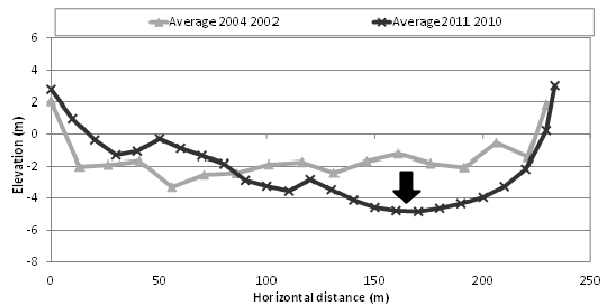


図-7 Gamu地点における河川断面の各年代の平均値

の平均値である。平均値は現行の水位相関法で用いている洪水伝播時間とほぼ同じ値である。

図-4に示した平均洪水伝播時間を用いてGamu-Tuguegarao間、Tumauni-Tuguegarao間の水位相関を図-5に示す。カガヤン川における洪水予測は管理上、上流のGamu地点およびTumauni地点の水位からTuguegarao地点の水位を推定している。Gamu-Tuguegarao間の水位相関は洪水イベントごとに大きく異なっており、水位予測に十分な相関性を有していない。図-2で前述した2006年1月の事例ではピーク値をよく再現できていたが、ピーク値以外の部分や他の洪水イベントでは現行の相関式とは一致しておらず、再現することが難しいことがわかる。その原因の1つとして、Gamu地点における洪水水位が年代によって大きく変化していることから、河川断面が変化していることが推察される。また、Tuguegarao地点における水位はTumauni地点における水位とは高い相関を示しているが、Tumauni地点における水位は欠測が多いため、相関を確認できたのが2洪水イベントのみであり相関性の検証には十分とは言えない。また、地点間の水位相関は線形関係ではないため、1次式では水位の相関を表現しきれない。

(2) Gamu地点における河川断面形状の変化

前節で述べたように、Gamu地点における洪水水位はイベントごとに大きく異なっており、河川断面が変化していることが推察される。水位相関法は既往の洪水の実績から地点間の水位相関を見出し、下流の水位を推定するため、河川断面形状が変化した場合、既往の実績をそのまま適用することができなくなる。そこで、Gamu地点における河川断面形状を経年的に調べた。図-6は2002

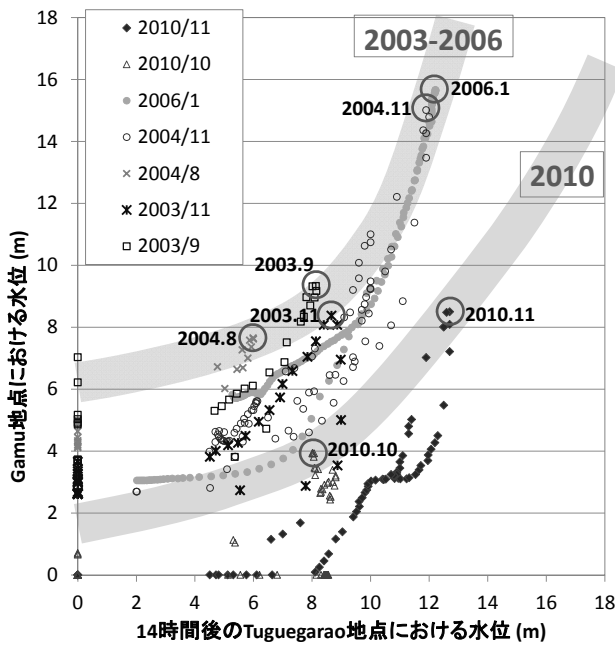


図-8 Gamu地点とTuguegarao地点のピーク水位の相関

年および2004年に計5回測定された河川断面と2010年および2011年に計6回測定された河川断面である。図-7は2002年および2004年に測定された断面形状の平均と2010年および2011年に測定された断面形状の平均である。Gamu地点における河川断面は顕著に変化しており、河床が洗掘により低下していることが明確に示されている。

(3) ピーク水位の相関性

次に、Gamu地点における河床の低下を踏まえた上で、洪水イベントのピーク水位のみに着目して水位の相関性を検証した。図-8は2003年から2010年に発生した洪水のGamu地点とTuguegarao地点における水位の比較である。Gamu地点では河床の低下により洪水水位が低下しているため、2003年から2006年に発生した洪水と2010年に発生した洪水に分けてピーク水位を比較するとおおよその相関性を確認することができた。ピーク水位の相関性を確認するには洪水イベント数が不十分ではあるが、河床変動を認識したうえでピーク水位に着目すれば、水位相関法によってもある程度の精度での洪水予測を見込むことができる。ただし、ピーク水位に関しても線形関係では表現できていないことは留意すべきである。

5. 分布型モデルによる洪水予測

前述したように、水位相関法による洪水予測は限られた条件下では適用可能ではあるが、定量的かつ効果的な洪水予警報のための洪水予測としては不十分である。したがって、著者らは洪水予測手法の精度の改善を目的として分布型流出モデルを適用した。適用したモデルはICHARMらが開発した分布型流出モデルのIFASである。

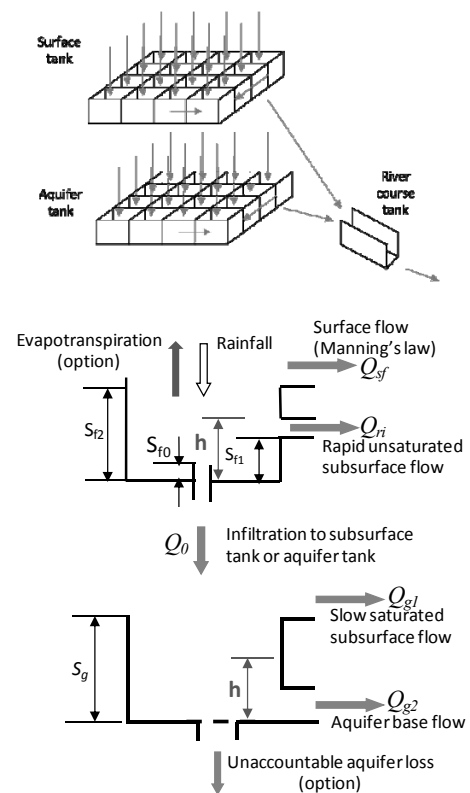


図-9 土研分布モデルの概略図

(1) IFASの概要

IFASは水文観測データが乏しい流域への適用を目的として(独)土木研究所ICHARMらが開発した分布型流出モデルである。解析モデルは土研分布モデルを踏襲しており、最大の特徴は、人工衛星情報から雨量や土地利用等の入力データを取り込んで解析することができる点である。図-9に土研分布モデルによる解析手法の概略図を示す。本研究では表層タンクと地下水タンクの2段とし、各タンクからの流出量を式(2)から(6)により算出した。河道流量についてはKinematic Wave法により解いている。

$$Q_{sf} = L \frac{1}{N} (h - S_{f2})^{\frac{5}{3}} \sqrt{i} \quad (2)$$

$$Q_{ri} = \alpha_n \cdot A \cdot f_0 \frac{(h - S_{f1})}{(S_{f2} - S_{f1})} \quad (3)$$

$$Q_0 = A \cdot f_0 \frac{(h - S_{f0})}{(S_{f2} - S_{f0})} \quad (4)$$

$$Q_{g1} = A_u^2 \cdot (h - S_g)^2 \cdot A \quad (5)$$

$$Q_{g2} = A_g \cdot h \cdot A \quad (6)$$

ここに、 Q_{sf} : 表面流出量(m^3/s), L : メッシュ長(m), N : マニングの粗度係数($m^{-1/3}/s$), h : 水位(m), S_{f2} : 表面流出発生高さ(m), i : 勾配 Q_{ri} : 早い中間流出量(m^3/s), A : メッシュ面積(m^2), S_{f1} : 早い中間流発生高さ(m) Q_0 : 地下水タンクへの浸透量(m^3/s), S_{f0} : 地下浸透発生高さ(m), Q_{g1} : 遅い中間流出量(m^3/s), S_g : 遅い中間流発生高さ(m), Q_{g2} : 基底流量(m^3/s), α_n, f_0, A_u, A_g : 係数である。

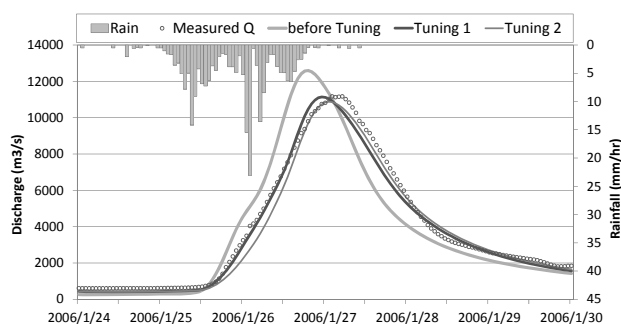


図-10 Gamu地点におけるIFASの解析結果

表-1 キャリブレーションで変更したパラメータ

	パラメータ		単位	Default	Tuning 1	Tuning 2
表層タンク	f_0	飽和透水係数（土地利用1）	cm/s	0.0005	0.0015	0.0015
		飽和透水係数（土地利用2）		0.00002	0.00006	0.00006
		飽和透水係数（土地利用3）		0.00001	0.00003	0.00003
	S_{f2}	表層タンク高さ（土地利用1）	m	0.1	←	←
		表層タンク高さ（土地利用2）		0.05	←	←
		表層タンク高さ（土地利用3）		0.05	←	←
	N	等価粗度（土地利用1）	$m^{1/3}/s$	0.7	0.6	0.6
		等価粗度（土地利用2）		2	0.6	0.6
		等価粗度（土地利用3）		2	0.6	0.6
	α_n	流出係数（土地利用1）	-	0.8	←	0.4
		流出係数（土地利用2）		0.6	←	0.3
		流出係数（土地利用3）		0.5	←	0.25
地下水タンク	A_u	遅い中間流の流出係数	$(1/mm/day)^{1/2}$	0.1	0.125	0.125
	A_g	基底流の流出係数	1/day	0.003	0.005	0.005
	S_g	地下水タンクの高さ	m	2	2.02	2.02
	h_{a0}	初期水位	m	2	←	←
河道	h_{r0}	河道の初期水位	m	0.2	0.15	0.15
	n	河道の粗度係数	$m^{1/3}/s$	0.035	←	←
	M	蛇行係数	-	1.4	2	2

(2) IFASの適用結果

カガヤン川の本川における出水時の流量観測データはGamu地点のみであるため、解析結果の検証はGamu地点とした。図-10はIFASによる洪水流量の解析結果である。キャリブレーション前の解析結果では実測値より早く流出している。表-1はキャリブレーションで変更したパラメータである。解析結果のハイドログラフは実測値より降雨に対する応答が早かったため、キャリブレーション後のパラメータは下層への浸透量を増加させるために透水係数を高くし表層タンクからの流出を少なくするように設定されている。その結果、洪水流量はIFASにより精度よく再現された。

(3) リードタイムの検討

IFASによる洪水予測は、降雨データから洪水流量を算出するため、上流地点の水位から推定する水位相関法よりリードタイムが長くなる。水位相関法では、Gamu地点の水位を参考にした場合は約14時間、Tumauini地点の水位を参考にした場合は約7時間のリードタイムが見込める。一方でIFASによる洪水予測では、Gamu地点までの洪水到達時間は約22時間、Tuguegarao地点までの洪水到達時間は約36時間であるため、解析時間やリアルタイム観測データの転送および入力に1、2時間要したとしてもGamu地点で20時間、Tuguegarao地点で34時間程度の

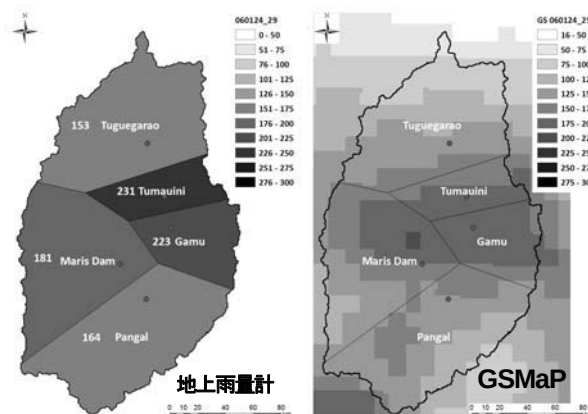


図-11 地上雨量計とGSMaPの空間分布の比較

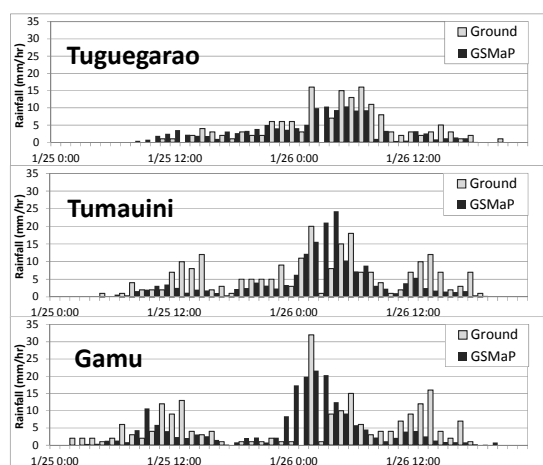


図-12 地上雨量計とGSMaPの降雨量の比較

表-2 各地点における地上雨量計と衛星雨量の総降雨量 (mm)

	Tuguegarao	Tumauini	Gamu
地上雨量計	153	230	219
衛星雨量	125	170	190

リードタイムを確保できることになる。なお、入力降雨に衛星雨量を適用する場合は、4、5時間の衛星雨量データの配信時間遅れを考慮する必要がある。

6. 衛星雨量の適用性の検討

カガヤン川流域では、11地点に降雨観測所が設置されているが、リアルタイムの監視によって洪水予警報に直接寄与しているのはダム流域を除く5地点である。したがって、出水時の洪水予測では約27,000km²の流域を5地点の雨量計で代表することになり、これらで降雨強度の分布を詳細に表現することは困難である。そこで本研究では衛星雨量を用いた洪水予測の有効性を検証した。衛星雨量にはJAXAが配信しているGSMaPを使用した。GSMaPでは10kmメッシュの降雨量が1時間間隔で配信されている。図-11は地上雨量計および衛星雨量の2006年1

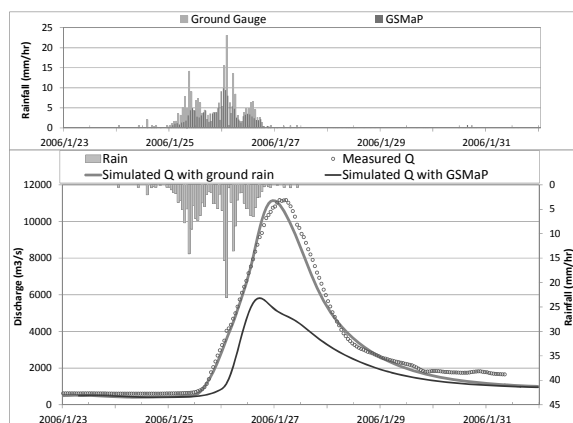


図-13 地上雨量と衛星雨量を用いた計算結果の比較
(2006年1月)

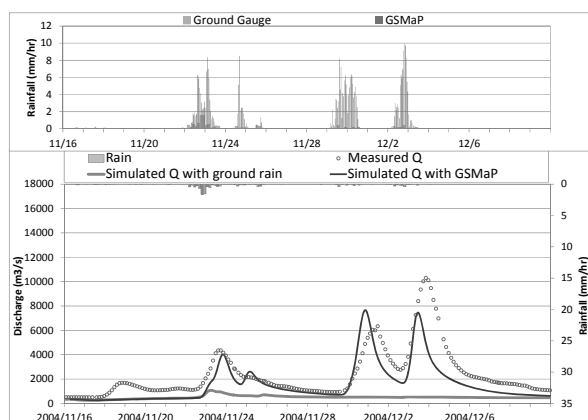


図-14 地上雨量と衛星雨量を用いた計算結果の比較
(2004年12月)

月洪水の総降雨量の空間分布である。空間分布は衛星雨量の方が優れているが、定量的には全体的に過小評価となっている。図-12は2006年1月洪水時のGamau, Tumauini, Tuguegaraoの3地点における地上雨量計の降雨量とその地点が位置するグリッドの衛星雨量の比較である。地上雨量計と衛星雨量の値は洪水期間を通じておおそ近い値を示しているが、表-2に示した総降雨量によると衛星雨量はどの地点においても過小評価になっており約8割程度である。

次に地上雨量および衛星雨量(GSMaP)を用いたIFASによる洪水予測結果を比較した。図-13は2006年1月の洪水時のGamau地点におけるIFASの解析結果である。地上雨量を用いた解析では精度よく実測値を再現できているが、衛星雨量を用いた解析では、どちらも降雨を過小評価しているため流量も実測値より小さい流量になっている。一方で、図-14は2004年12月の洪水時のGamau地点におけるIFASの解析結果である。2004年12月の洪水のケースでは、地上雨量計がほとんど降雨を測定できていないため洪水流量もまったく流出していないが、GSMaPを適用した解析では多少の相違はあるものの洪水の規模をおおよそ表現できている。2004年12月のケースのように、

例えば停電等の観測精度とは別の要因で地上雨量計の信頼性が著しく損なわれている場合では、衛星雨量による洪水予測は有効である。

7. おわりに

本研究では、フィリピン・カガヤン川流域を対象に現行の水位相関法による洪水予測の精度を評価した。その結果、カガヤン川Gamau地点では河床変動の影響が大きいため水位相関法を適用するには河川断面の形状を正確に把握する必要がある、その上でピーク水位に着目すれば水位相関法によっておおよその洪水の規模を予測することが可能であることが分かった。また、Tumauini地点では、Tuguegarao地点との水位相関を検証できる洪水実績が2イベントしか存在しないため洪水データの蓄積が期待されるところである。

分布型流出モデルIFASの適用による洪水予測では、正確な降雨データがあればキャリブレーションすることで洪水流量を高精度で予測できることが確認され、リードタイムも現行の水位相関法より2倍以上増加させることが可能であることがわかった。さらに衛星雨量を用いた洪水予測では、定量的な精度は地上雨量計に劣るものの空間的な雨域の把握や地上雨量計データの補完的な役割として利用可能であることがわかった。今後は、空間的かつ定量的に高精度な降雨データを洪水予測に活用することが課題であると考えられる。

謝辞：本研究の成果はアジア開発銀行の技術協力プロジェクト(TA7276)の成果の一部です。ここに記して謝意を示します。また、本研究で用いたカガヤン川流域の水文データはフィリピン国PAGASAから提供して頂いたものであり、衛星雨量GSMaPのデータは(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)のプロダクトです。ここに、貴重なデータを提供していただいた両者に深く謝意を示します。

参考文献

- 1) Pampanga River Basin Flood Forecasting and Warning Center, PAGASA: Typhoons “PEDRING” (NESAT) and “QUIEL” (NALGAE) September 26 to October 04 2011, *Post-Flood Report 2011-2*, 2012
- 2) Mamoru MIYAMOTO, Ai SUGIURA, Toshio OKAZUMI, Shigenobu TANAKA, Seishi NABESAKA and Kazuhiko FUKAMI: Suggestion for an Advanced Early Warning System Based on Flood Forecasting in Bengawan Solo River Basin, Indonesia, *Proceedings of 10th International Conference on Hydroinformatics*, IWA IAHR, No.0394, 2012

(2013. 4. 4受付)