

## 1-1 人工衛星情報等を活用した洪水予警報のための基盤システム開発に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 20

担当チーム：水災害研究グループ水文チーム

研究担当者：深見和彦、杉浦友宣、猪股広典

### 【要旨】

本研究は、発展途上国など水文情報が乏しい流域において効率・効果的に洪水予警報システムの配備が行われるよう、人工衛星により観測された雨量データを用いて流出解析を行う基盤ツールの開発を行うものである。本研究では、まず、洪水予測に用いるにあたり衛星観測雨量の精度検証を行うとともに、その結果を基に補正方法の開発を行った。あわせて、衛星観測雨量取り込み機能や開発した補正機能を実装するとともに、グローバル GIS データを用いて流出解析モデルを作成する機能を備えた総合解析システム(IFAS)の開発を行った。このシステムを利用することにより、インターネットに接続できるパーソナルコンピュータのみで一連の流出計算・洪水予測を行うことが可能となり、洪水予警報システム構築の第一歩を踏み出すのに役立つものと考えられる。

キーワード：発展途上国、洪水予警報、人工衛星雨量データ、分布型流出モデル、総合洪水解析システム

### 1. はじめに

水関連災害は、人類の持続可能な開発、貧困の削減に向け克服すべき課題の一つで、近年、人口増加、資産の集中・高度化に伴い被害・影響が増加している。河川整備が十分ではない諸国においては、水災害に関する人的被害軽減の観点から、災害時における住民避難等の行動が確実に実行されるのが重要であり、このためには、ハザードマップ等による危険性の周知や、洪水予警報の発令による避難の有無の判断が必要となる。しかしこれらの国々では、費用的な問題や降雨情報の不足等の理由により、洪水予警報システムの整備が必ずしも十分に進んでいない状況にある。また国際河川の流域では、上流地域に位置する他国の水文データが得られないために、適切に洪水予警報システムの構築ができないといったケースも見られる。

本研究では、これら水文データの乏しい地域において、迅速かつ効率的に洪水予警報システムの構築が可能となるよう、地上観測雨量がなくても人工衛星によって観測された雨量情報を用いて洪水予測を行うためのツールの開発を行った(図 1)。本研究では、まず衛星観測雨量の精度検証を行うとともに、この結果を基に、洪水予測に衛星観測雨量を利用するための補正方法を開発した。またこれらの成果に加え、水文情報が乏しい地域でも洪水予測が可能となるよう、GISデータを利用したパラメータ推定機能を含むモデル作成機能、分布型流出解析モデルによ

る流出解析エンジン、結果表示機能など、一連の流出計算機能を備えた総合洪水解析システム(Integrated Flood Analysis System、以下単に「IFAS」とする)の開発を行った。

本報告では、洪水予警報に衛星観測雨量を用いるにあたり、その精度や開発した補正方法、IFAS の機能等について報告を行う。

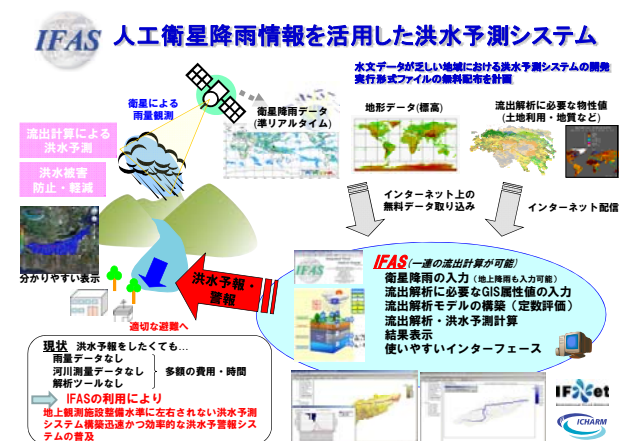


図 1 IFAS による洪水被害軽減のイメージ

## 2. 衛星観測雨量の精度検証

### 2.1 対象とする人工衛星プロダクトの選定

ここで示す「人工衛星によって観測された雨量情報」とは、主に衛星搭載のマイクロ波放射計による降雨観測マップを示す。衛星データを用いた降水分布図は静止気象衛星搭載の赤外放射計データを元にして1970年代から作成されていたが、マイクロ波放射計搭載の衛星が5台(TRMM/TMI, Aqua/AMSR-E, DMSP F13,F14,F15/SSM/I)以上に増えたことから、より降水観測に適した同センサーによる降水マップが作成されるようになった。

現時点でIFASでの利用が期待される衛星降雨プロダクトとしてはCMORPH、3B42RT、GSMaPの3つが、表1に示すように空間解像度が0.1°~0.25°、時間解像度が1~3時間で、配信遅れ時間も4~12時間であるため、発展途上国などが有する国際河川流域での洪水予警報への利用価値が高い。一方で、これらのプロダクトは月単位、日単位での精度比較は行われてきたが、時間単位、特定領域での精度比較はあまり行われていないことから、精度の検証が必要となる。

表1 主な衛星降雨プロダクト一覧表

Product	Source Data	Longitude range (deg.)	Latitude range (deg.)	Spatial Resolution (deg.)	Temporal Resolution
CMORPH (by NOAA)	TRMM/TMI, Aqua/AMSR-E, AMSU-B, DMSP/SSM/I and IR	0~360	60S~60N	0.25	3h
3B42RT (by NASA)	Aqua/AMSR-E, AMSU-B, DMSP/SSM/I and TRMM/TMI and IR	0~360	60S~60N	0.25	3h
GSMaP_MVK+ (by JAXA)	TRMM/TMI, Aqua/AMSR-E, ADEOS-II/AMSR, SSM/I, IR data and AMSU-B	0~360	60S~60N	0.10	1h

図2に吉野川流域(流域面積=3,750km<sup>2</sup>)における3つのプロダクトにおける地上観測降雨データ(以下、地上降雨)との比較事例を示す。表示期間は2004年7月30日~8月1日及び8月16日~18日であり、地上降雨は流域内64箇所の地上降雨観測データをティーセン分割し流域平均値として比較した。その結果、全体的に地上降雨よりも過小評価傾向であるが、その差は一定ではなく、8月16日~18日では地上降雨と同程度になるなど、一定倍率の補正が適用できないことがわかる<sup>12)</sup>。さらに3B42RTはややばらつき大きい結果となっておりCMORPH、GSMaP

とは異なる傾向を示す。これは3B42RTがマイクロ波放射計のほかに赤外放射データを降雨量推定に利用していることに起因している。CMORPHとGSMaPはともに赤外放射データを移動ベクトルとして利用しており、同様の傾向を示している。これらの結果と時空間解像度を考慮し、本研究で対象とする衛星降雨プロダクトをGSMaPとした。

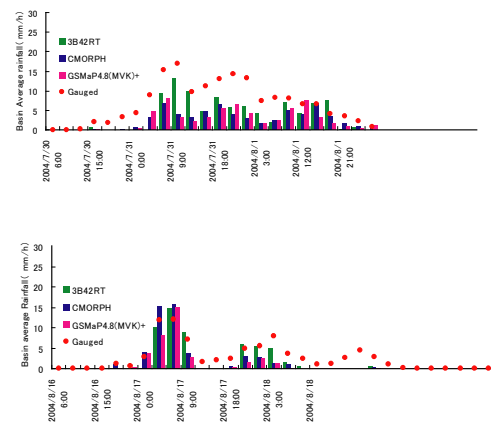


図2 各衛星降雨プロダクトと地上降雨の比較結果

GSMaPプロダクト<sup>34)</sup>は、観測データ等の現実的な降水物理モデルを放射伝達方程式に取り入れた降雨強度推定アルゴリズムを用いて詳細な降雨パターンに対応できるようになっている。表2に現在のGSMaPプロダクトの一覧表を示す。このうちGSMaP\_MVK<sup>5)</sup>はGSMaP\_MWR(マイクロ波放射計のみを使った降水マップ)を元に赤外雲移動ベクトルとカルマンフィルタを用いて補間した高解像度データである。またGSMaP\_NRTはフォワード計算のみで配信遅れ時間4時間の準リアルタイムデータである。本研究では最も精度が高いデータであるGSMaP\_MVK+で比較を行った。

表2 GSMaP プロダクト一覧表(2009年3月現在)

product	period	sensor	longitude range (deg.)	latitude range (deg.)	spatial res. (deg.)	temporal res.
GSMaP_MWR(+)	Jan. 2003 - Dec. 2006	TRMM/TMI,Aqua/AMSR-E,ADEOS-II/AMSR, DMSP/SSM/I(F10, 11, 13, 14, 15)	0-360	60S-60N	0.25	1h
GSMaP_MVK(+)	Jan. 2003 - Dec. 2006	TRMM/TMI,Aqua/AMSR-E,ADEOS-II/AMSR, DMSP/SSM/I(F13,14,15), GOES-8/10, METEOSAT-7/5 & GMS by NCEP/CPC	0-360	60S-60N	0.1	1h
GSMaP_NRT	Dec.2007 - present	TRMM/TMI,Aqua/AMSR-E, DMSP/SSM/I(F13,14,15), GOES-11/12, METEOSAT-7/8 & MTSAT by JWA	0-360	60S-60N	0.1	1h

(+) products use the data from AMSU-B sensors as well

表 3 検証流域及び期間選定一覧表

country	target basin	basin area (km <sup>2</sup> )	number of event	temporal resolution	comparison time	average rainfall for selected events	event year
Nepal	Bagmati	4,790	9 events	daily	24h	80.2mm/24h	2004~2006
Australia	Murray*	86,620	5 events	daily	24h	11.4mm/24h	2004・2005
Ethiopia	Awash*	10,930	18 events	daily	24h	15.6mm/24h	2004
Bangladesh	Surma*	10,870	51 events	daily	24h	43.6mm/24h	2004
UK	Thames	13,040	11 events	hourly	24h	11.6mm/24h	2004~2006
USA	Yazoo	42,350	7 events	hourly	3h	22.1mm/3h	2005
Japan	Yoshino	3,750	9 events	hourly	3h	57.3mm/3h	2004
Japan	Tone	16,800	3 events	hourly	3h	30.0mm/3h	2004
Japan	Sendai	1,600	11 events	hourly	3h	57.4mm/3h	2004・2006

※地上降雨のデータ存在状況から、対象流域の一部の流域にて比較した流域

## 2.2 対象流域の選定

GSMaP\_MVK+ (以下、MVK+) の地上降雨に対する精度を確認するため、世界各国での比較を行った。ただし、地上降雨の収集は各国の整備状況によって異なるため、入手可能であった国を選定し、主要な流域もしくは過去に被害のあった流域を対象とした。表 3 に検証対象流域一覧表を示す。選定した流域は 9 流域 7 カ国 (ネパール、オーストラリア、エチオピア、バングラデシュ、イギリス、アメリカ、日本) であった。対象期間は MVK+ のデータ作成期間内 (2003 年 1 月 ~ 2006 年 12 月) の降雨イベントとし、観測頻度 (日雨量・時間雨量) により比較する時間解像度を変更した。

## 2.3 比較結果

図 3 に時間解像度別の地上降雨 - MVK+ 関係図を示す。これによると算定時間分解能に関係なく、全体的に過小評価傾向であり地域 (国・流域) による大きな特徴は見られないことがわかる。つまり MVK+ 自体の特性、例えば降雨イベントの違いによって過小評価であったり、同程度であるといったことが関係している可能性が伺える。

そこでより詳細な検証を行うために、地上降雨のデータ精度が比較的高い日本 (吉野川流域) にて、再度詳細な分析を行うこととした。もし MVK+ の地上降雨に対する特性を見出すことができ、補正方法を作成できれば、世界にも適用できる可能性がある。

次章では補正手法の開発を前提とした詳細検討結果について述べる。

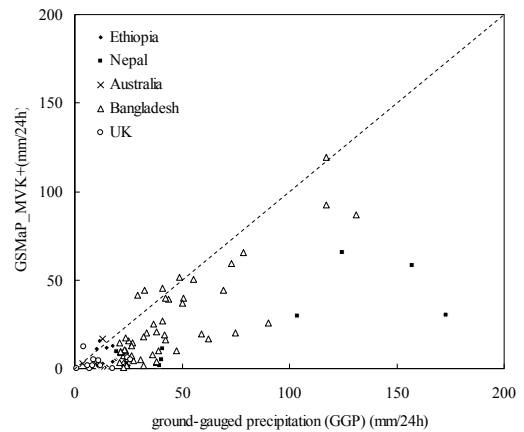


図 3(1) 地上降雨 - MVK+ 比較図 (24h)

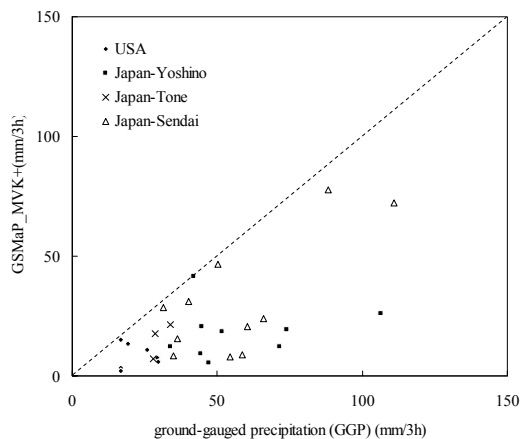


図 3(2) 地上降雨 - MVK+ 比較図 (3h)

### 3. 衛星降雨の補正方法の開発

#### 3.1 対象流域の選定

MVK+データの提供期間(2003年1月~2006年12月)内である2004年に台風による豪雨が多く、かつ地上観測施設が比較的密に配置(1箇所/59km<sup>2</sup>)されている吉野川流域(流域面積=3,750km<sup>2</sup>、図4)を対象流域としてMVK+と地上降雨の関係性を検討した。MVK+と地上降雨の比較方法としては、地上降雨量データが有している地形や高度の違いによる観測誤差の影響を最小限にするために、ティーセン法による流域平均雨量での検証を行うものとした。

表4に降雨イベント一覧表を示す。選定したイベントは9イベントであり、一連降雨ごとに地上降雨の最大時間雨量、総雨量、降雨継続時間を示す。

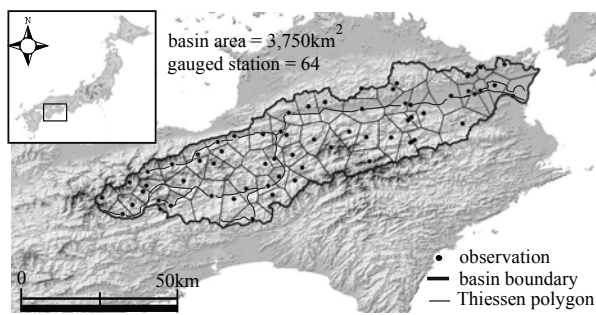


図4 対象流域ティーセン分割図(吉野川流域)

表4 降雨イベント一覧表(吉野川流域)

Event No	start date (UTC+9)	max (mm/h)	total (mm)	period (h)
No.1	2003/5/30 7:00	15.0	141.2	48
No.2	2004/6/19 14:00	16.3	152.8	49
No.3	2004/7/31 0:00	18.5	188.6	24
No.4	2004/8/17 18:00	14.5	246.1	67
No.5	2004/8/30 2:00	29.7	251.7	34
No.6	2004/9/28 12:00	27.7	237.8	40
No.7	2004/10/19 0:00	45.9	392.7	51
No.8	2004/9/6 0:00	16.0	176.1	47
No.9	2004/7/31 22:00	15.6	314.4	46

#### 3.2 比較結果

表4に示す9イベントでMVK+と地上降雨の関係について調べた。地上降雨及びMVK+ともに1時間単位での時間分解能を有しているが、前述した地上降雨の観測誤差やMVK+の時間分解能誤差(マイクロ波放射計データの観測は約3時間ピッチ、それ以外は補間)を考慮し、3時間累加時間における

評価を実施した。図5に3時間累加降雨における比較結果を示す。図中のプロットは各降雨イベントのピーク3時間累加降雨を抽出しており、降雨量の多い場合の地上降雨とMVK+(3h)の関係性を示したものである。

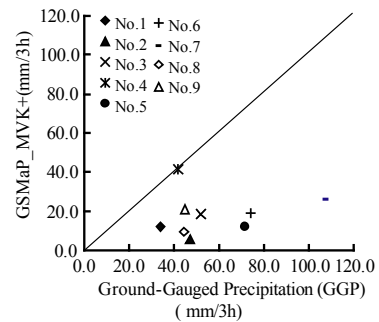


図5 地上降雨-MVK+比較図(3h)(吉野川流域)

これによると3時間累加降雨で比較した場合でも概ね過小評価傾向であることがわかる。しかし、この中ではNo.4のように必ずしも過小評価でないイベントも存在し、そのことがMVK+の補正を困難とさせており、一律のスケールで補正できない一因となっている<sup>6)</sup>。

その違いの要因の一つとしては、前線性降雨と台風性降雨の違いが考えられる。No.4は前線性降雨であるのに対し、他のイベントは台風性降雨であった。そこで図3に示すように誤差率 $\epsilon$ (式(1))と風速について調べた(図6a)。台風による降雨時には吉野川流域の特徴から地形性降雨が発生している可能性がある<sup>7)</sup>。地形性降雨の発生要因となる地形性上昇流は簡単に示すと山地の傾斜と水平方向の風速の積で表現されるため、過小評価の要因が地形性降雨であるとする、誤差率 $\epsilon$ と風速に関係性があると考えた。その結果、誤差率 $\epsilon$ と風速は比例することがわかった。

また、誤差率 $\epsilon$ とMVK+(3h)の流域内における標準偏差との関係について調べた(図6b)。一般的に、台風性降雨の場合には前線性降雨の場合に比べ時間降雨量よりも日単位降雨量が強くなる傾向がある<sup>8)</sup>。つまり短時間降雨が卓越するような変化の著しい降雨量の変化はない。加えて降雨域の移動が著しいことから、広範囲で同等の降雨量が持続すると考えられる。グリッド単位で求められるMVK+(3h)を吉野川流域に含まれる全グリッド数、35グリッドをサンプルとして標準偏差を求め、その値が小さい場合は流域内で同程度のMVK+(3h)が算定されてい

ることから、台風性降雨である可能性が高い。その結果、図 6 b)に示すように誤差率  $\varepsilon$  と MVK+(3h)標準偏差には反比例の関係があることがわかった。

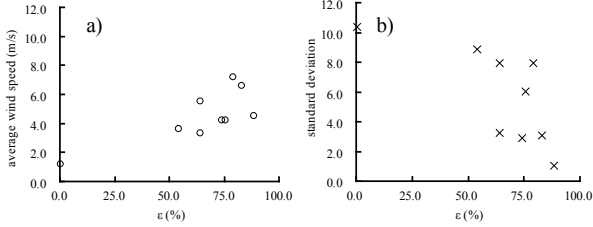


図 6 a)  $\varepsilon$  - 風速関係, b)  $\varepsilon$  - 標準偏差

$$\varepsilon (\%) = \frac{R_{obs}(n) - R_{sat}(n)}{R_{obs}(n)} \times 100 \quad (1)$$

$R_{obs}(n)$ : average basin rainfall based on GGP (mm/kh)  
 $R_{sat}(n)$ : average basin rainfall based on GSMaP\_MVK+ (mm/kh)  
 $n$  : number of rainfall events ( $n = 9$ )

### 3. 3 補正手法の提案<sup>9)</sup>

#### 3. 3. 1 補正手法の特徴

MVK+(3h)の標準偏差と誤差率  $\varepsilon$  との関係は一義的ではないことから直接補正を行うことはできない。さらに流域の平均値とのばらつきを示すため、流域面積に依存してしまう。

そこで対象とするグリッドとその周囲のグリッドにおける累加雨量との差によって降雨量の分布を表現し、その差が大きければ雨域があまり動かない前線性降雨であり、逆の場合は雨域の移動が速い台風性降雨であるとの仮定のもとに補正係数を設定する手法を考案した。この指標では MVK+のみを使って、各グリッド別に台風性降雨・前線性降雨の判定を行うことができるという特徴がある。

#### 3. 3. 2 補正手法の概要

補正手法の概念図を図 7 に示す。式(2)、(3)に示すように累加雨量  $X_{i,j}$  をもとに周囲とのグリッド  $X_{i \pm 3, j \pm 3}$  との二乗誤差をとり、平均化したもの  $S_n^2$  とした。グリッドの選定は主に台風の経路を参考にし“X”パターンとした。台風は地球の自転の影響で北に向かう性質があるが、低緯度の上空では貿易風といった東風が吹いており、北西に進む。中・高緯度の上空では偏西風といった強い西風が吹いており、その後、方向転換して北東に進むことから、斜め方向の動きが多くなるためである。

また台風の移動速度はおよそ  $10 \sim 100 \text{ km/h}$ <sup>10)</sup> と変動幅が大きいため、約  $30 \text{ km/3h}$  つまり  $l=3$  とした。また流域内の平均  $S_n$  を  $\overline{S_n}$  とした(式(4))。これは雨域のスケールが  $10 \text{ km}$  程度の積乱雲から  $1,000 \text{ km}$  程度の中規模擾乱まで広がるものまで存在し、1 グリッドだけでは雨域の移動を判別できない可能性がある理由による。

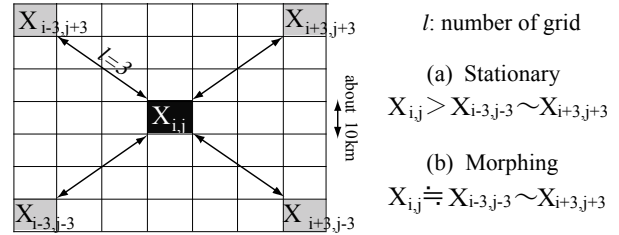


図 7 MVK+を用いた補正手法の概念図

$\overline{S_n}$  は誤差率  $\varepsilon$  と関連性があると推定されるが、簡略化のために、式 (5) に示す変数  $m_j$  を定義し、 $\overline{S_n}$  と  $m_j$  の関係を検討した<sup>11)12)</sup>。

$$X_{i,j} = \frac{1}{k} \sum_{t=1}^k x_{i,j}(t) \quad (2)$$

$$S_n^2 = \frac{1}{4} \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 (X_{i,j} - X_{i+6x-3, j+6y-3})^2 \quad (3)$$

$$\overline{S_n}(n) = \frac{1}{f} \sum_{r=1}^f S_n(f) \quad (4)$$

$$R_{obs}(n) = m_j \times R_{sat}(n) \quad (5)$$

$x_{i,j}(t)$  : GSMaP\_MVK+ rainfall at time  $t$  (mm/h)

$X_{i,j}$  :  $k$ -hour total rainfall in grid  $x_{i,j}$  (mm/h)

$k$  : time period (h), here,  $k=3$

$S_n$  : GSMaP\_MVK+ morphing index (mm/h)

$\overline{S_n}$  : average of  $S_n$  in the selected basin

$f$  : number of the grids in the selected basin

$m_j$  : correction rate of MVK+ to GGP

#### 3. 3. 2 ケーススタディ

吉野川流域において  $\overline{S_n}$  -  $m_j$  関係を作成した (図 8)。No.4 のような停滞性降雨の場合には、 $\overline{S_n}$  は大きく、 $m_j$  は小さくなる傾向がある。逆に No.3 のような移動性降雨の場合には逆の傾向を示す。その結果、 $\overline{S_n}$  -  $m_j$  関係は一つの曲線で表現され、累加時間 3 時間の時 ( $k=3$  の時) に、 $\alpha = -2.7425$ 、 $\beta = 6.2042$ 、 $R^2 = 0.848$  であった。

また、式(6)にてMVK(3h)を補正した結果、図9のように補正前に平均誤差率が64.8%であったのに対し、18.7%まで低減させることができた。

$$R_{cor}(n) = R_{sat}(n) \times 8.6 \quad \bar{S}_n(n) \leq 0.5$$

$$R_{cor}(n) = R_{sat}(n) \times [-\alpha \ln(\bar{S}_n(n)) + \beta] \quad 0.5 < \bar{S}_n(n) \leq 6.5 \quad (6)$$

$$R_{cor}(n) = R_{sat}(n) \times 1.0 \quad \bar{S}_n(n) > 6.5$$

$R_{cor}(n)$ : corrected average rainfall (mm/kh) in a selected basin  
 $k$ : time period (h) here,  $k = 3$ ;  $\alpha = -2.7425$ ,  $\beta = 6.2042$

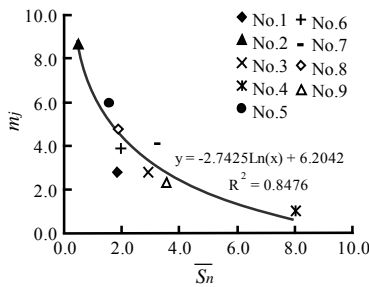


図8  $\bar{S}_n - m_j$ 関係 (吉野川流域)

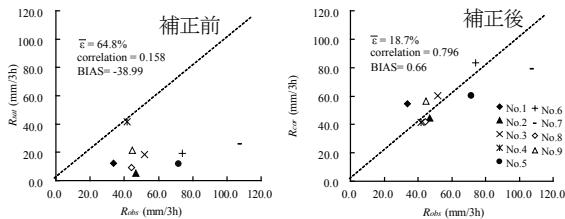


図9 提案した補正式によるMVK+(3h)補正結果 (吉野川流域)

### 3.4 補正手法の検証

ケーススタディで算出した  $\bar{S}_n - m_j$  関係の適用性を検証した。式(2)~(6)で示される補正式は台風性降雨と前線性降雨を  $\bar{S}_n$  で判別し補正を行う式であるため、台風性降雨と前線性降雨のイベントにて検証を行う必要がある。吉野川流域では2003~2004年の降雨イベントは補正式の作成で用いたため、2005年の降雨イベントを選定し検証した。また、吉野川流域と同様に台風性降雨と前線性降雨が共に発生する流域として、川内川流域を選定し、台風性降雨イベントと前線性降雨イベントを抽出し検証を行った。

#### 3.4.1 吉野川流域

吉野川流域における2005年に発生した降雨イベントは2005年9月4日~7日に発生した台風14号の

みである。一連降雨内のピークのみを対象にした場合、1イベントのみになるため、地上降雨量が30mm/3h以上の5イベントを選定した。図10(a)左に補正前の地上降雨-MVK+(3h)関係、右に補正後の結果を示す。プロットは台風性降雨と前線性降雨で区分したが、対象降雨イベントは台風性降雨のみだったため、前線性降雨は記載していない。その結果、誤差率は84.0%であったが、補正式の適用により、20.2%まで低減した。つまり、台風性降雨で過小評価であったが、補正式によって補正倍率が大きくなったことにより誤差率を小さくできた。

#### 3.4.2 川内川流域

提案した補正式が吉野川流域以外の流域についても適用が可能であるかを検証するために、川内川流域を選定した。川内川は九州の南部に位置し、吉野川同様に山地が南側に位置しており、台風時に地形性降雨が発生しやすい流域である。かつ梅雨前線による豪雨も多く、特に2006年7月の豪雨は梅雨前線が停滞し、流域内総雨量が1,200mmを越える豪雨が発生した。そのため、補正式の特徴である台風性降雨と前線性降雨の判別及び降雨量の補正の検証に適していると考えられる。

対象降雨イベントは2004年9月に発生した台風18号と前述した2006年7月梅雨前線とし、比較的強い豪雨を抽出するため地上降雨量が30mm/3h以上の降雨イベントを選定した。2004年9月5日~12日までの間に3イベント、2006年7月18日~23日の間に8イベントであった。図10(b)左に補正前の地上降雨-MVK+(3h)関係、右に補正後の結果を示す。プロットは台風性降雨と前線性降雨で区分している。その結果、台風性のイベントの誤差率は平均75.5%であったが、補正式の適用により、平均44.3%となり過大評価傾向になった。また前線性のイベントの誤差率は平均36.4%であったが、補正式の適用により、平均10.0%まで低減した。また、前線性のイベントの補正前の誤差率と補正後の誤差率の差が26.4%であったことから、補正倍率が小さかったことがわかる。これらの結果から補正式によって降雨タイプ(台風性、前線性)の違いを表すことができ、自律的に補正倍率を変化させることが確認できた。また台風時のイベントにおいて過大評価となったが、吉野川流域で算出した補正式及び  $\alpha \cdot \beta$  の値は他の流域に適用しても誤差を小さくできることが確認できた。

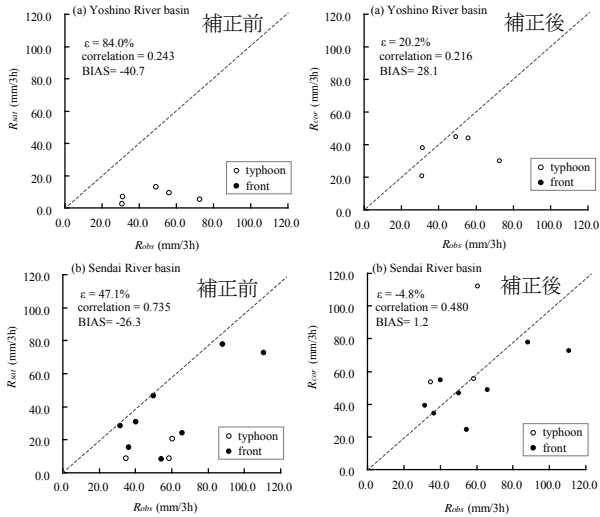


図 10 補正検証結果(上: 吉野川流域、下: 川内川流域)

### 3. 4. 3 世界各地での適用

2章で検証した世界各地の検証流域にて、提案した補正方法の適用性について確認した。図 12(a)に MVK+(3h)、図 12(b)に MVK+(24h)における補正結果を示す。ただし世界各地にて吉野川流域での補正式を用いた場合、流域面積に応じて過大評価となることが予想されるため、流域面積に応じて  $\overline{S_n}$  に倍率を与える必要がある。その結果、図 11に示すように流域面積に比例して倍率が変化することがわかった。その倍率を用いて流域補正を行った結果、MVK+(3h)は概ね精度よく補正されていることがわかる。

また、MVK+(24h)についてはモデルの適用範囲外ではあるが、発展途上国の観測頻度の現状を考慮して検証を実施した。ばらつきは大きくなるがある程度の補正が可能であることが示された。

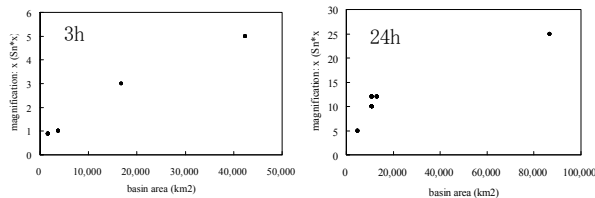


図 11 流域面積—流域補正倍率関係図

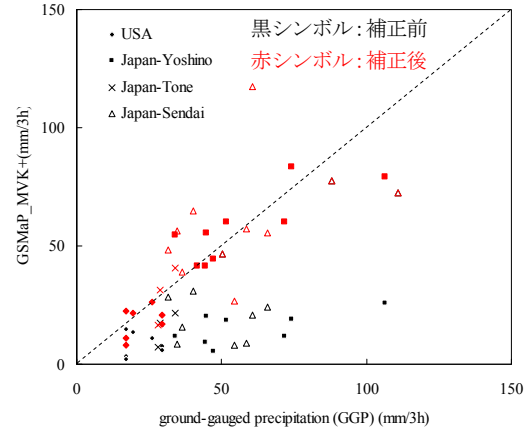


図 12 (a) 補正式を適用した地上降雨—MVK+(3h)比較図

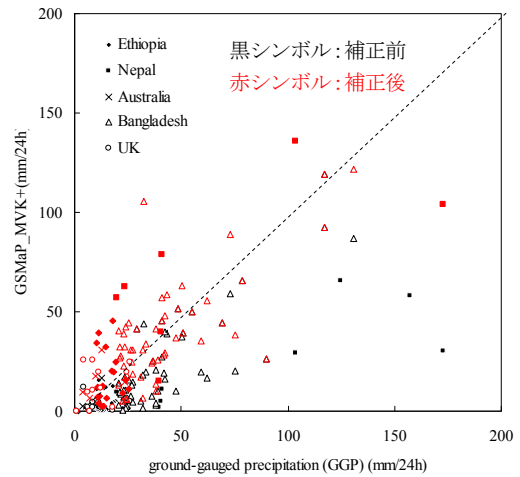


図 12 (b) 補正式を適用した地上降雨—MVK+(24h)比較図

### 3. 5 まとめ

本研究から得られた結果は、以下のようにまとめられる。

- 1) 世界7カ国9流域にて MVK+と地上降雨との比較を行い、概ね過小評価傾向であるが地域に関係なく、その差はばらつきが大きいことがわかった。
- 2) 吉野川流域における3時間累加雨量(強雨イベント)で MVK+と地上降雨との比較を行い、過小評価傾向である一因が台風性降雨であることを確認した。
- 3) 台風性降雨の特性は MVK+(3h)の降雨量の分布変化に関係し、それを表現することのできる  $S_n$  という指標を開発した。
- 4)  $\overline{S_n}$  (流域平均した  $S_n$ ) と補正倍率  $m_j$  との間に一義的な関係性があることから補正式を提案した。

- 5) 吉野川流域で算出した補正式を、同流域別期間及び川内川流域に適用した結果、ほぼ適用性が確認できた。
- 6) 吉野川流域で算出した補正式を世界各国の流域にて適用した結果、流域面積が大きくなるに従って過大補正となるため、流域補正倍率を考慮する必要がある。

なお、さらに実用性を高めるためには、地上降雨の値によって複数の補正式を設定することが望ましい。なぜなら、本補正手法は強い降雨への補正を主目的としており、雨域が動いていない弱い降雨時にも補正倍率を大きくしてしまうからである。そのため急に降雨量が増加する場合などには適用できるが、弱い長雨時などは、地上降雨を間接的に用いて別の補正式を適用する必要がある。

#### 4. 総合洪水解析システム (IFAS) の開発

##### 4. 1 システムの概要

IFASの開発コンセプトを以下に、IFASの起動画面を図 13に、IFASの基本構成を図 14に示す。

- ①地上水文情報が乏しい地域においても洪水予測が可能となるように、入力データとして地上観測雨量だけでなく衛星観測雨量を取り込むインターフェースを装備する。
- ②様々な条件の流域において最適な計算ができるよう複数の流出解析モデルをモジュールライブラリとして備え、比較が出来るシステムとする。
- ③過去の水文資料がなくても洪水解析を可能とするために、土地利用や土質・地質などの流域内の地球物理的な特性によりパラメータの一次推定が可能である分布型モデルを流出解析モジュールとして採用する。
- ④GIS 解析モジュールを内部に実装することにより、一般に無償で公開されインターネット等を通じて利用可能な全世界の GIS データに基づきモデルを作成したりパラメータを設定したりする作業を IFAS システム単体のみで可能とする。
- ⑤データ取り込み、モデル作成、流出計算、結果表示といった一連の解析が実行可能であるとともに、必要な標準的な入出力インターフェースを備える。
- ⑥発展途上国が自らシステム構築できるように、実行形式ファイルが無償で配布する。また研修等を実施し、操作の理解を助けるとともに普及を図る。



図 13 IFAS 起動画面



図 14 IFAS の構成

##### 4. 2 開発体制

開発にあたって、平成 19 年度までは ICHARM を中心とし、すでに国際洪水ネットワーク (IFNet) を通じて衛星観測雨量を活用した豪雨警報の提供 (GLOBAL FLOOD ALERT SYSTEM, GFAS)を行っている(社)国際建設技術協会、および民間建設コンサルタント 9 社(株式会社建設技術研究所、パシフィックコンサルタンツ株式会社、日本工営株式会社、株式会社ニュージェック、株式会社建設技研インターナショナル、八千代エンジニアリング株式会社、いであ株式会社、国際航業株式会社、株式会社東京建設コンサルタント)との共同研究により開発を行った。また平成 20 年度からは、共同研究の終了に伴い、参画者の合意のもとで ICHARM が著作権を一元的に保有して、必要な改良を行った。

##### 4. 3 主な機能

###### 4. 3. 1 衛星観測雨量の取り込み

洪水予測のための流出計算を行うためには、何らかのリアルタイムもしくは時間遅れのある準リアルタイムの雨量データが不可欠である。現在では、ほぼ全世界をカバーするいくつかの衛星観測雨量がインターネット上に公開されている。これら衛星観測



雨量は、①雨量計や伝送装置を設置することなくインターネットの HP からダウンロードするだけで瞬時に無償で降雨データが得られる、②対象流域だけでなく同一の精度で全世界の降雨データが得られ、国際河川の流域では他国に位置する上流域についてもデータが入手できる、③計画策定に必要となる過去のデータも蓄積されている、④インターネットにアクセスするだけで観測施設や伝送装置等の維持管理の必要がない、といったメリットがある。ただし地上観測雨量に比べて精度が劣る、また数時間の配信の遅れ時間がある等について考慮する必要がある。

IFASでは、表 5 に示す衛星観測雨量のダウンロードおよび読み込みが可能である。

表 5 IFAS で読み込み可能な衛星観測雨量プロダクト

Product name	3B42RT	CMORPH	QMorPH	GSMaP
Builder	NASA/GSFC	NOAA/CPC	NOAA/CPC	JAXA/EORC
Coverage	60N~60S			
Spatial resolution	0.25°	0.25°	0.25°	0.1°
Time resolution	3hours	3hours	30minutes	1hour
Delay of delivery	10hours	15hours	2.5hours	4hours
Coordinate system	WGS			
Data archive	Dec. 1997~	Dec. 2002~	Recent 2days	Dec.2007~
Data source	TRMM/TMI Aqua/AMSR-E AMSU-B DMS/SSM/I IR	Aqua/AMSR-E AMSU-B DMS/SSM/I TRMM/TMI IR		TRMM/TMI Aqua/AMSR-E ADEOS-II/AMSR SSM/I IR AMSU-B

前述のように衛星観測雨量は、特に強雨時において過小評価する傾向があるため、GSMaPの取り込みを行う際には、オリジナルデータをそのまま読み込む機能と、以下に示すように前述した手法により補正を行い読み込む機能を実装している (図 15)。

- None : 補正なし
- Type1 : セル単位で衛星観測雨量のみの補正
- Type2 : 流域単位で地上観測雨量を用いた補正
- Type3 : セル単位で地上観測雨量を用いた補正

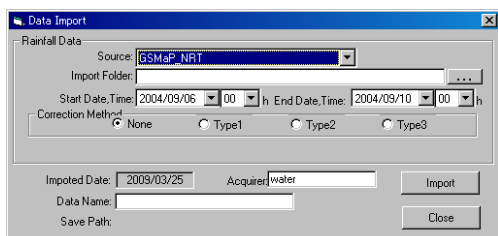


図 15 GSMaP 補正実行画面

#### 4. 3. 2 流出解析モデル

IFAS では、複数の流出解析エンジンをユーザーが選択できるようにすることを開発目標とし、デフォ

ルトの流出解析モデルとして土木研究所で開発された「土研分布型流出解析モデル ver2」<sup>13)</sup>を組み込むとともにあわせて山梨大学を中心に開発された「BTOP モデル」<sup>14)</sup>を実装することとした。

土研分布型流出解析モデル ver2 では、各メッシュ鉛直方向の流れを 2 つのタンクで表現すると共に、河道の流れを Kinematic Wave 法により表現している。モデル構造が簡便でパラメータチューニングが容易という特長があり、国内では適用実績が多い。

一方、The Block-wise use of TOPMODEL(BTOP Model)は TOPMODEL<sup>15)</sup>のコンセプトを拡張したものであり、山地流域のような小流域から大陸の国際河川といった大流域に適用可能な分布型モデルである。海外流域でも適用実績が多い。

#### 4. 3. 3 GIS データによるパラメータ推定とモデル作成機能

##### (1)河道網作成機能

IFAS では、全世界の数値標高データ (USGS-GTOPO30、水平解像度 30 秒)等を用いて、対象となるエリアの緯度・経度および流末をユーザが入力することにより、対象地域の標高データを任意のサイズのメッシュに分割し、各メッシュの標高に応じて自動的に流域界および河道網の作成を行うことが可能である (図 16)。また標高データに基づき河道網を作成した際、流下先なくなったメッシュ (窪地、図中の赤枠セル)が発生した場合には、自動的に高度修正を行い、全てのメッシュについて流下方向を決定し、河道網を作成する。また手動で、各メッシュ単位に流域内外の修正や高度の修正を行うことも可能である。

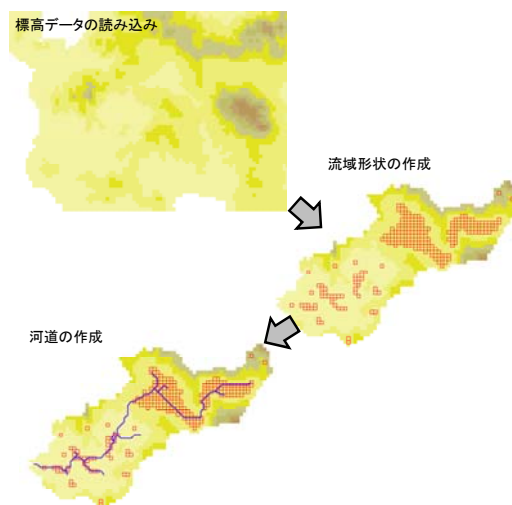


図 16 河道網作成機能

## (2)パラメータ推定機能

IFAS では、インターネットを通じて、土地利用や地質、土壌区分といったGISデータをダウンロードし、流出解析に必要なパラメータの推定を行う機能を有している。これは、ダウンロードした土地利用(USGS-GLCC)等の凡例区分に応じて自動的に各メッシュを区分し、あらかじめそれぞれの区分に対して著者らが試算した結果に基づき設定した目安となるパラメータの値を用いて流出計算を行うものである。このような機能を利用し、IFAS では、高価なGIS解析ソフトを別途準備する必要がなく、簡便に流出解析モデルを作成することが可能である。

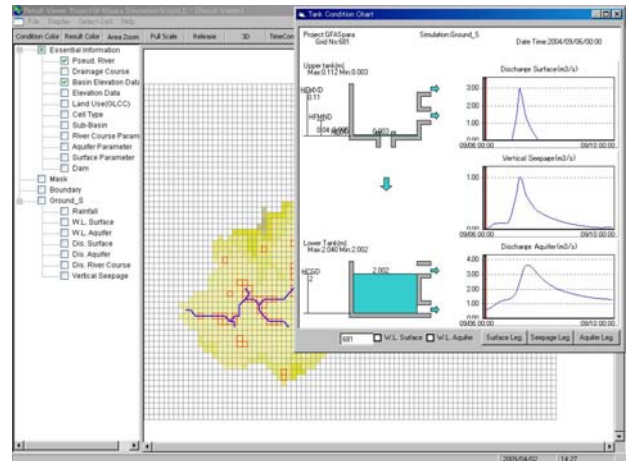


図 19 Google earth 上の表示例

## 4. 3. 3 結果表示機能

計算結果については、IFASの出力機能を用いて、時刻歴図(図18)、平面図、一覧表、アニメーション、タンクの概要図(図17)等の表示が可能である。また、利用者が計算結果を認識しやすいようにKML形式のファイルとして出力し、Google earth上で表示することも可能である(図20)。

なお、分布型流出解析モデルによる流出計算を行っているため、任意の地点の結果表示が可能となっている。

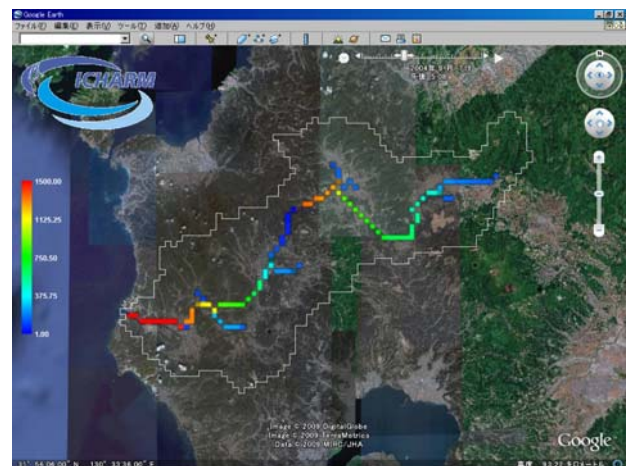


図 20 Google earth 上の表示例

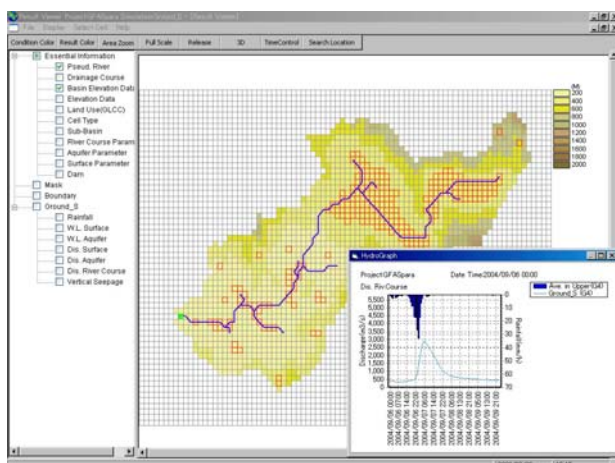


図 18 時刻歴図

## 4. 4 普及活動

ICHARMは、世界気象機関(WMO)の協力を得ながら国際洪水ネットワーク(IFNet)と共同で、アルゼンチン、エチオピア、キューバ、グアテマラ、ザンビア、ネパール、バングラデシュの7カ国から7名の参加者を招き、平成20年10月3日から8日にかけて衛星観測雨量を利用した洪水予警報システムの構築に関するトレーニングワークショップを開催した(写真1)。トレーニング後の参加者の評価を聞いたところ、地上観測雨量を用いずに衛星観測雨量を一次補正することで、洪水解析・予測に対する衛星雨量の利用性を高めた点や、流出解析モデル構築作業を大幅に簡便化できるGIS解析用の内部実装ツールやインターフェース機能などについて、特に高い評価を得ることができた。



写真 1 トレーニング実施状況

また、アジア水循環イニシアチブ(AWCI : GEOSS(全球地球観測システム))や、JAXA 等が推進するセンチネルアジア(アジア太平洋域の災害関連情報を共有する活動)においても、IFAS を活用した的確な洪水管理の推進を提案するなど、積極的にIFAS の普及活動を開始したところである。

## 5. まとめ

本研究では、衛星観測雨量の活用を念頭においた洪水予測システム IFAS の開発と、それに用いるための衛星観測雨量の精度検証、補正方法の開発を行うとともに、作成したシステムの普及活動を行った。インターネットから誰でも無料で入手できる衛星観測雨量を入力データとして採用できる IFAS を利用することにより、水文データの乏しい地域においても、インターネットに接続できるパーソナルコンピュータさえあれば洪水予測計算を行うことが可能となる。しかしながら、衛星観測雨量や標準的なパラメータを用いた流出予測には自ずと期待される精度に限界がある。当然のことながら現地の防災担当者は、次のステップとして精度向上のための地上雨量観測体制の充実に務めることが期待される。このような PDCA サイクルをうまく機能させることで、迅速かつ効率的に洪水予警報システムの普及と高度化を発展途上国が自らのオーナーシップ意識を持って推進することが期待される (図 20)。

今後は、本研究プロジェクトに引き続き実施される研究課外において、実際に現地技術者と一緒になって現地への導入を行いながら、現地で得られる雨量・流量データ等を基に衛星観測雨量補正手法のさらなる改良を行うとともに、実務上のニーズを踏まえた機能の追加、拡充汎濫解析モジュールや高度なハイドログラフ分析機能などの機能追加を行う予定である。

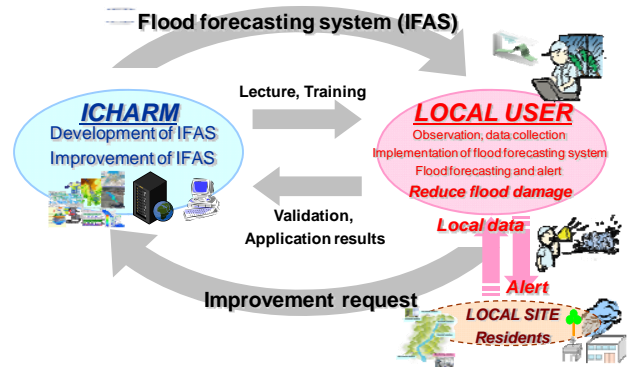


図 20 オーナーシップによる洪水予警報の高度化

## 参考文献

- 1) 瀬戸心太, 芳村圭, 沖大幹:「高分解能衛星降水マップによる日本域の洪水検出能力」, 水工学論文集, 第52巻, pp355-360, 2008.
- 2) Hapuarachchi P., H. Inomata, K. Fukami, M. Kachi and R. Oki, : "Applicability of satellite based precipitation data for near real-time flood forecasting", IPWG Workshop on the Evaluation of High Resolution Precipitation Products (PEHRPP), Geneva, 2007.
- 3) 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 2007 Proceedings, pp.506-509, 2007.
- 4) Okamoto, K., T. Iguchi, N. Takahashi, K. Iwanami and T. Ushio, : "The global satellite mapping of precipitation (GSMaP) project", 25th IGARSS Proceedings, pp.3414-3416, 2005.
- 5) Ushio, T., T. Kubota, S. Shige, K. Okamoto, K. Aonashi, T. Inoue, N. Takahashi, T. Iguchi, M. Kachi, R. Oki, T. Morimoto, and Z. Kawasaki, : "A Kalman Filter Approach to the Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) from Combined Passive Microwave and Infrared Radiometric Data", J. Meteor. Soc. Japan, in press, 2009.
- 6) 白石芳樹, 猪股広典, 深見和彦, Prasantha Hapuarachchi, 可知美佐子:「衛星降雨データの洪水予測への適用性及び誤差特性の検討」, 水文・水資源学会 2008年度研究発表会要旨集, pp.108-109, 2008.
- 7) Kubota T., T. Ushio, S. Shige, S. Kida, M. Kachi, and K. Okamoto, : "Verification of high resolution satellite-based rainfall estimates around Japan using gauge-calibrated ground radar dataset", J. Meteor. Soc. Japan, in press, 2009.
- 8) 浅井富雄, 武田喬男, 木村竜治:「大気科学講座2 雲や降水を伴う大気」, 東京大学出版会, pp.140, 1983.
- 9) 白石芳樹, 深見和彦, 猪股広典:「雨域移動情報を活用した衛星降雨データ補正方法の提案—吉野川流域の事例解析—」, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.385-390, 2009.
- 10) 気象研究所:「台風構造の変化と移動に関する研究—台

風7916の一生」, 気象研究所技術報告第14号,  
pp.85-94, 1985.

- 11) Shiraishi Y., K. Fukami and H. Inomata :  
“APPLICABILITY OF A CORRECTION METHOD  
USING RAINFALL AREA MOVEMENT OF GSMAP  
FOR REAL TIME FLOOD FORECASTING”, 4th  
IPWG Workshop on Precipitation Measurements  
Proceedings, pp.307-313, 2008.
- 12) Shiraishi Y., K. Fukami H. Inomata and M. Kachi:  
“Applicability of a correction method for real time  
flood forecasting based on satellite-based rainfall  
information”, 4th Conference of APHW Proceedings,  
Beijing, 2008.
- 13) 鈴木俊明, 寺川陽, 松浦達郎 : 「実時間洪水予測のための  
分布型モデルの開発」, 土木技術資料, Vol.38-10,  
pp.26-31, 1996.
- 14) Takeuchi K., Hapuarachchi P., Zhou M.C., Ishidaira H.,  
and Magome J. : “A BTOP model to extend  
TOPMODEL for distributed hydrological simulation  
of large basins”, HYDROLOGICAL PROCESSES,  
2007.
- 15) Beven KJ, Kirkby MJ : “A physically based, variable  
contributing area model of hydrology”, Hydrological  
Science-Bulletin 24(1), pp.43-69, 1979.

# **STUDY ON THE DEVELOPMENT OF A BASIC SYSTEM FOR FLOOD FORECAST AND ALERT BASED ON THE INFORMATION PROVIDED BY SATELLITES**

## **Abstract:**

The purpose of this study is to make a flood forecasting system which utilizes satellite-based rainfall data for developing countries. At first, we made some validation of satellite-based rainfall data compared with ground-based rainfall data. Because of underestimation of satellite-based rainfall value, we developed a modification method of satellite data. And we have developed a concise flood-runoff analysis system as a toolkit for supporting the effort of local engineers to start flood forecasting. This system implements interfaces to input not only ground-based but satellite-based rainfall data, GIS functions to construct flood-runoff models, a default runoff analysis model, and interfaces to display output results. We hope that this system will be useful for the immediate and efficient implementation of flood forecasting and warning systems in developing countries.

**Key words:** satellite-based rainfall data, Integrated Flood Analysis System, user-friendly interface, object oriented modeling