

インドネシア国ソロ川流域におけるリアルタイム洪水予警報システムの構築

INSTALLATION OF REAL TIME FLOOD ALERT SYSTEM IN BENGAWAN SOLO RIVER BASIN, INDONESIA

鍋坂誠志¹・藤岡 奨²・宮本 守³・杉浦 愛⁴
岡積敏雄⁵・田中茂信⁶・深見和彦⁷

Seishi NABESAKA, Susumu FUJIOKA, Mamoru MIYAMOTO, Ai SUGIURA
Toshio OKAZUMI, Shigenobu TANAKA, Kazuhiko FUKAMI

¹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)

²正会員 工博 (独) 水資源機構朝倉総合事業所第二調査設計課 (〒838-0019福岡県朝倉市上秋月1373-1)

³正会員 工博 (独) 土木研究所 ICHARM (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁴正会員 Ph. D (独) 土木研究所 ICHARM (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁵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)

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

⁷正会員 工修 国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

The authors installed a flood alert system based on IFAS (Integrated Flood Analysis System) in Bengawan Solo river basin under the Asian Development Bank funded Technical Assistance Project 7276-REG project. In Indonesia, real time hydrological data was not sufficient because there was a lack of knowledge, framework, budget and motivation. Therefore, at first the authors installed a near real time flood alert system based on satellite rainfall estimates data. After the installation by local engineers of stations measuring real time hydrological data, the authors then upgraded the flood alert system to a real time one integrating those new hydrological data.

Key Words : *IFAS, Distributed hydrological model, Insufficiently gauged basin, satellite based rainfall, Flood alert System*

1. はじめに

インドネシア国ソロ川はジャワ島中東部を西南から北東へ流下する河川で、約16,000km²と日本の利根川とほぼ同じ流域面積を持つジャワ島最大の河川である。図-1にソロ川の流域平面図を示す。流域には3つの活火山が存在し、土砂災害の多い流域である。2010年には、メラピ火山が噴火した事は記憶に新しい。火山噴火、地震災害、洪水および土砂災害による被害が報告される流域である。

ソロ川は、公共事業省ソロ川管理事務所(Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo)が管理しており、同事務所は水位観測、雨量観測などの水文観測および洪水予警報を行っている。また一方で水資源公社(Perum Jasa Tirta 1)も管理を行っており、2つの組織が同じ河川で管理、洪水予警報を行っている。

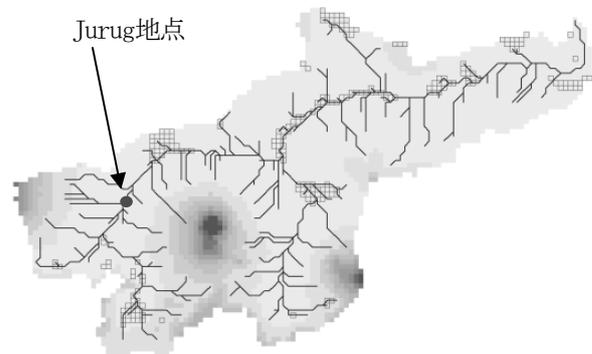


図-1 IFASで構築したソロ川流出解析モデルの流域平面図

2. ソロ川の洪水被害状況

インドネシア国ソロ川では、2007年に大洪水が発生し、土石流災害、橋梁の崩落、地滑り、床上浸水などの被害が報告されている。この時の最も大きな人的被害として、上流域の地滑りで71名の被害者が報告されている¹⁾。

ソロ川は、日本の河川とは状況が異なり、堤防が整備されている区間は長くない、掘り込み河道の区間が大部分を占める。そのため、日本の河川のように、下流域で人の住まいの高さよりも大きな位置エネルギーを持った水が、堤外地を流下するような状況になる区間があまり見受けられないため、破堤、越水による犠牲者が出にくい状況にあると推察できる。洪水によって水位が高くなり浸水はするものの、その水位上昇速度は緩やかで、人的被害はあまり見受けられず、経済的な被害が大きい。河川沿いの住民の住まい方については、そもそも洪水の経験が多いこと、被害を受けやすい場所は裕福でない人の割合が高いことから、家屋内に価値の高い資産を置いておらず、被害の出にくい住まい方をしているものと見受けられた。洪水による主な被害としては、河川沿いの主要産業が農業であるため、農産物の減産、脆弱なインフラの損壊や通行止めなどによる経済的損失が主な被害である。

3. ソロ川における水文観測と洪水予警報の体制

ソロ川流域の水文観測の状況について、観測機器の近くに住む住民にデータ収集を委託し、人間の目視によってデータを記録する方法が用いられている。平常時は1日1回、洪水時のみ3時間に1回または1時間に1回というように頻度を増やして人間が値を読んで記録する方法が取られている。洪水時のみ観測者が値を読む頻度を上げ、毎時電話連絡によって公共事業省ソロ川事務所がデータを収集していた。このデータを元に、水位相関法によって、上流域の水位観測所のピークを観測した時刻とその規模から下流域の洪水ピーク到達時刻とその規模を予測し、洪水予警報に活用していた。近年、ソロ川事務所は水位、雨量の自動観測設備の整備を進めてきており、流域面積約16,000km²のソロ川で37カ所のリアルタイム自動観測所の整備が進められている。

4. 総合洪水解析システム

洪水予警報システムを構成する流出解析システムに総合洪水解析システム (Integrated Flood Analysis System : IFAS) を適用した。図-2にソロ川の洪水予警報システム構築に用いたIFASのコアエンジンである土研

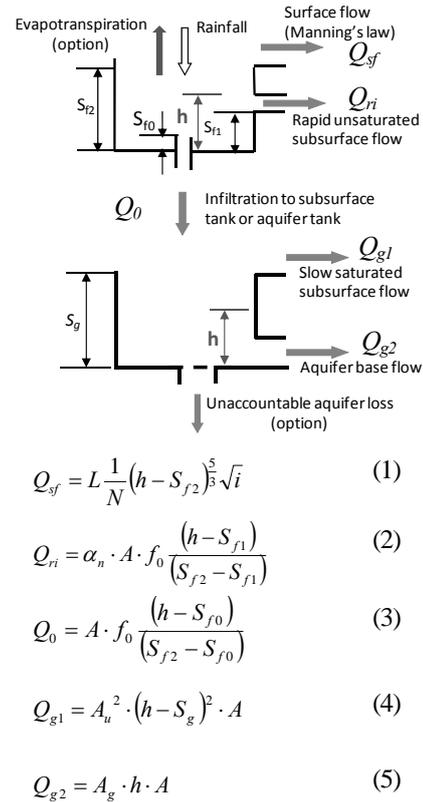


図-2 2段タンク土研分布モデル

分布モデルの模式図と計算式を示す。ここに、式(1)は表面流出量 Q_{sf} (m³/s)の式で、 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 : 勾配である。式(2)は、早い中間流出量 Q_{r1} (m³/s)の式で、 A : メッシュ面積(m²)、 S_{f1} : 早い中間流発生高さ(m)、 α_n : 縦方向と横方向の浸透の比率係数、 f_0 : 最終浸透能(cm/s)である。式(3)は、地下水タンクへの浸透量 Q_0 (m³/s)の式で、 S_{f0} : 地下浸透発生高さ(m)、式(4)は、帯水層タンクの遅い中間流出量 Q_{g1} (m³/s)の式で、 A_u : 流出基底係数、 S_g : 遅い中間流発生高さ(m)、式(5)は、帯水層タンクの基底流量 Q_{g2} (m³/s)、 A_g : 基底流出係数である。

IFASは、GUI環境を持った分布型流出解析モデルを構築し、解析することができるソフトウェアである。このソフトウェアは、(独)土木研究所、(一社)国際建設技術協会、(株)建設技術研究所、日本工営(株)、パシフィックコンサルタンツ(株)、八千代エンジニアリング(株)、いであ(株)、(株)建設技研インターナショナル、(株)東京建設コンサルタント、(株)ニュージェック、国際航業(株)との共同研究によって開発し、その後(独)土木研究所が改良を継続しながら、(独)土木研究所ICHARMホームページにて無償配布している。サイトに書かれている同意条項に承諾し、Eメールアドレスをサイトに登録することで誰でもダウンロード可能である。解析や水文観測に十分な予算が確保できない開発途上国の流域で、高度な教育を受ける機会や技術的な枠組みを持たない現場技術者を主たる想定利用者として開発されており、洪水予

表-1 ソロ川流出解析モデル構築条件等

項目	内容
DEM	Globalmap (Elevation) を一部補正
土地利用	Globalmap (Landcover)
Gridサイズ	2km
流域界データ	HydroSHEDS Basin boundary data を一部補正
土研分布モデル	2段タンク分布型流出解析モデル

警報システム導入後も現地技術者が自身でモデル構築、パラメータ調整、解析の一連の操作を行えるようにすることを目指している。上記のことを実現するため、以下の開発コンセプトを設定している。

- ・高度なコンピュータ言語の知識、技能がなくてもモデル構築ができるようGUIを備える。
- ・GUIは操作だけでなく、一つ一つの操作ステップの結果を逐次画面に表示することにより、ユーザー自身が図化しなくても確認できる機能を備える。
- ・無償のソフトウェアとし、無償でインターネットでダウンロードし、入手可能な全球データを用いてモデル構築、解析ができる。
- ・貯留関数法のような多くの洪水データを含む長期間の水文データを必要とするモデルではなく、水の空間分布を3次元的に表現できる分布型モデルを解析モデルに用いる。

表-1に、ソロ川のモデル構築条件を示す。

5. 洪水予警報システムの構築

(1) リアルタイム・準リアルタイム洪水予警報システムを構成するサブシステム群

IFASには、IFAS本体をベースとして、自動で雨量データ取得、解析、ハイドログラフ描画、アラート発出までを行う洪水予警報システムを構築することが可能なサブシステムを備えている。

- ・IFAS：流出解析モデル構築、解析、結果表示
- ・衛星雨量ダウンローダー：期間設定をして人工衛星雨量データをダウンロードするモジュール
- ・AutoIFAS：IFASで構築したモデルを1時間に1回データを入力してリアルタイム計算を行うモジュール
- ・MySQLデータ取得モジュール（ソロ川用）

上記のシステムを組み合わせ、自動に動作するよう設定しておくことで、図-3のようにデータ取得と洪水予警報を可能とするものである。

IFASで解析を行う際には、洪水の原因となる降雨の降り始めよりも少し前の時刻から、降雨データが必要となる。いざ、解析が必要となったときに降雨データがない場合には大量のデータをダウンロードする必要がある。しかし、インドネシアのような開発途上国では、電力供

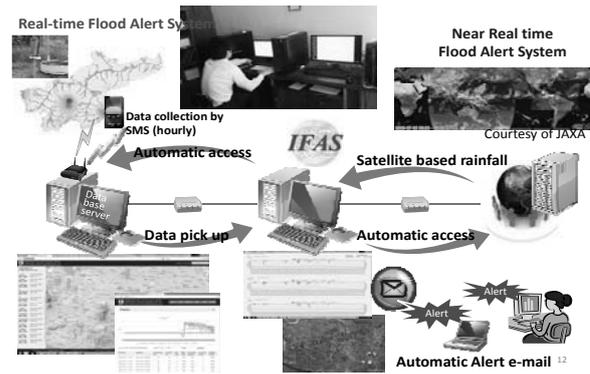


図-3 洪水予警報システム模式図

給が十分ではなく、頻繁に停電すること、それによってサーバーがダウンすることやインターネット回線も十分な容量があるわけではないため、いざ解析が必要となったときに大量のデータをダウンロードしていたのでは、ダウンロードに長時間を要し、流出解析を行えなくなる恐れがある。このため、いざというときにすぐに計算が始められるように、普段から自動で、こまめに1時間分（1ファイル）の衛星雨量データをダウンロードし、データを保存しておく機能を搭載している。1時間分であれば、約700KBのファイルであるため、途上国の容量の大きくない回線でも大きな負荷となることなくダウンロードが可能である。IFAS本体で、モデル構築、解析を行って、その川の性状を調べておき、いったんモデルを完成させてしまえば、自動でデータ取得、解析、アラート発出まで行えるシステム構成としている。

(2) Global Satellite mapping of Precipitation Near Real Time (GSMaP_NRT) の概要

IFASは水文観測情報が十分に得られない流域を対象として、洪水予警報の実現を目指してきた。地上雨量観測が十分に行われていない流域でも雨量データが得られるように、人工衛星で観測した雨量データをインプットデータとして利用するための、ダウンロード、解凍、当該流域範囲の切り出し、欠測補完、補正、ファイル生成、元ファイルの圧縮保存までの一連の作業工程を自動で行うインターフェースを備えている。当該データは、北緯60°～南緯60°の範囲で観測されたマイクロ波情報と、雲の移動ベクトルを合成させることによって作成された、観測および推定降雨プロダクトである。この衛星雨量プロダクトのうち、(独)宇宙航空研究開発機構が提供するGSMaPをICHARMが開発した補正手法³⁾⁴⁾を用いて補正し入力値として用いた。GSMaP_NRTの諸元を表-2に示す。衛星が地球を周回しながら計測しているため、ある程度の時間待たないとマイクロ波によって観測されたデータが少ない状態で全球の降水マップを作らなければならないため、GSMaP_NRTは、3時間衛星からのデータ収集を行って、1時間で全球の降水マップを作成する。

表-2 人工衛星雨量プロダクト比較

Product name	3B42RT	GSMaP	
Builder	NASA/GSFC	JAXA/EORC	
Coverage	60N~60S		
Spatial resolution	0.25°	0.1°	
Time resolution	3 hours	1 hour	
Delay of delivery	10 hours	4 hours	
Coordinate system	WGS		
Date archive	Dec. 1997~		Dec.2007~
Date source (Satellite/Sensor)	TRMM	TMI	TRMM
	Aqua	AMSR-E	Aqua
	DMSP	SSM/I	DMSP
	NOAA	AMSU-B	DMSP
	IR		IR

このため、観測から配信までに4時間の遅れがあることや、毎時刻マイクロ波による観測ができていないわけではない。この観測がない場合は、雲移動ベクトルと前時刻の降雨分布データを合成して、推定雨量としてデータが作成されている。このため強雨時に過小評価となったり、強雨の観測タイミングがずれて計測されることがあり、洪水予警報に用いる上で衛星観測雨量だけで十分とは言いきれない。それでも地上雨量観測情報がない流域においては、衛星雨量で広域な雨域情報をとらえることは可能であることや、衛星観測雨量だけでは洪水予警報には十分でないと感じることによって、地上雨量観測体制整備を促進させるインセンティブとなる。

(3) GSMaP補正

図-4はソロ川流域における地上観測雨量データと衛星観測雨量データの関係を示している。豪雨の時ほど過小評価する傾向がある。GSMaP_NRTそのままのデータでは過小評価することから、白石らによって開発された補正手法を適用した。これは雨域の分布の時間的変化と誤差の関係からGSMaPを補正する手法である³⁾⁴⁾。これに補正係数が極端に大きくならないよう上限値を設け、また雨量が少ない時には、誤差がさほど大きくないことから、補正しないよう適用下限値を設定した。この関係により導き出された補正式が図-5である。また、補正係数が流域によって異なるため、IFASには、この補正式の係数をユーザーが任意に設定できるようにインターフェースに調整機能を設けている。

(4) リアルタイム水文観測設備とデータ伝送

公共事業省ソロ川事務所は、5分に1回雨量、水位、気象項目の観測を行って、1時間に1回、携帯電話のSMSによって自動で事務所にデータ伝送する設備の整備を進めている。電源供給がソーラーパネルとバッテリーで行われており、これらをボルテージコントローラで制御する方法を採用している。このため、日射量が減少した際に計測、記録、データ伝送ができなくなる欠点がある。各自動観測設備からSMSを通じてBBWSソロ川事務所へ送信

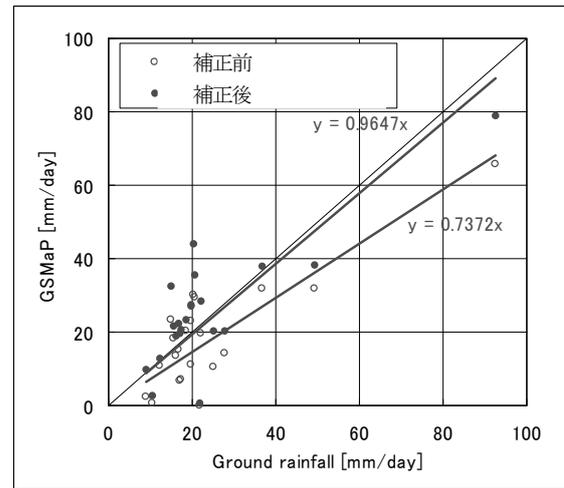
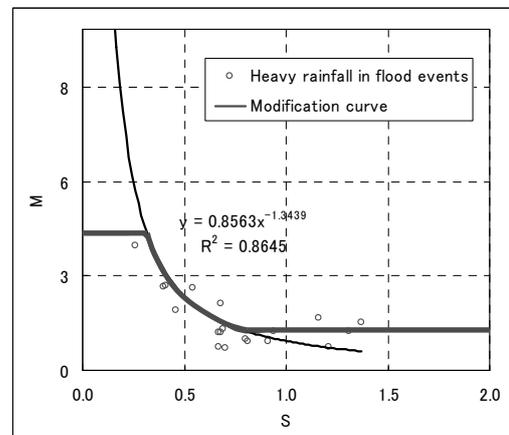


図-4 補正前後GSMaP_NRTと地上雨量の相関（ソロ川）



M = 4 (S ≤ 0.33)
M = 0.8563 × S^(-1.3439) (0.33 < S ≤ 1.2)
M = 1.2 (S > 1.2)
M: 補正係数, S: 雨域分布によりまるる指標

図-5 インドネシア国ソロ川用GSMaP_NRT補正式

されてきたデータは、MySQLのデータベースに格納される。計測は5分に1回行われているものの、送信されるのは1時間に1回である。このMySQLに格納されたデータをデータベースから抽出し、5分間値を12個合計し、1時間データにしてCSVフォーマットに入力し、所定のフォルダに格納する機能を備えた。AutoIFASには、補正した衛星観測雨量GSMaP_NRTおよび地上観測雨量データを選択して入力できる機能を装備した。IFASは、AutoIFASの設定に従い、1時間に1回この格納されたデータを読みに行き、IFASに雨量データを入力して流出解析を行い、自動でハイドログラフを更新する機能を備えている。この計算結果が観測所毎に設定された流量の閾値に達した場合、画面上にアラートを表示する機能と無償のEメールアカウントから、あらかじめAutoIFASに登録したアカウントにアラートメールを送信する機能を備えている。アラートの内容は、警戒レベル、地点名称、時刻などのテキスト情報の配信が可能である。

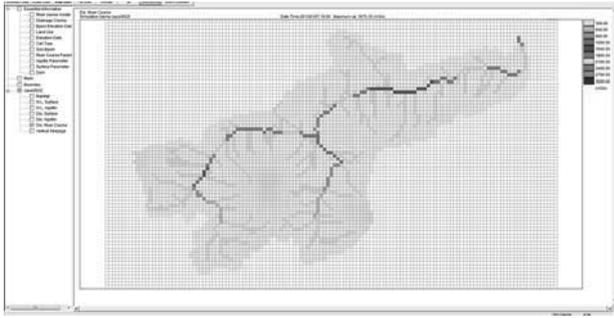


図-6 流出解析結果出力画面（流量変化平面図の例）

6. 解析結果

図-7に2012年12月30日から2013年1月9日までを対象として洪水流出解析を行った結果を示す。評価地点は、ソロ川上流域のJurug地点である。地上雨量観測所データと人工衛星観測雨量データを入力データとした解析結果を比較した。地上観測雨量データでは、当該期間に、323mmの降雨を観測しており、人工衛星は、290mmの降雨を観測している。1割ほど人工衛星観測雨量データは過小評価しているものと見受けられる。観測流量データ及

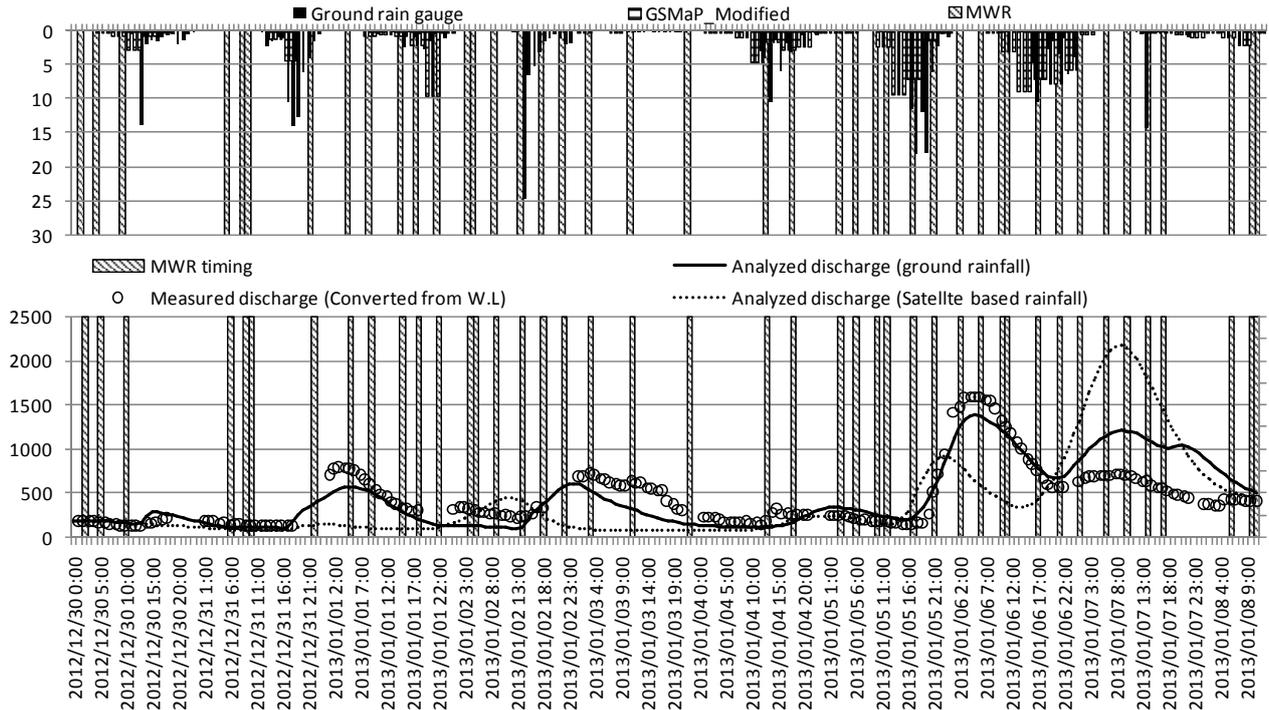


図-7 Jurug地点における流出解析結果

び解析流量データから流出量をそれぞれ比較する。観測水位データの欠測部分は、直線補完して、当該期間の総流出量で比較した。観測雨量データは、357百万 m^3 、GSMaPを用いた解析流量は322百万 m^3 、地上雨量を用いた解析流量は371百万 m^3 であった。観測値と比較すると衛星雨量を用いた解析結果は約10%過小評価であり、地上雨量を用いた解析結果は、約4%過大評価となった。波形について、観測流量、地上雨量解析流量は1月6日5:00がピーク流量を観測しているタイミングであるのに対し、衛星雨量は1月7日9:00に記録されており、洪水ピークのタイミングが大きすぎていた。このタイミングの誤差であるため、実用上の誤差はもっと大きく見積もるべきである。図-7中、人工衛星観測雨量データは、マイクロ波観測時間帯（斜線ハッチの棒グラフ：MWR timing）はマイクロ波センサーを搭載した人工衛星が当該流域を通過しマイクロ波観測を行った時間帯である。この時間帯と降雨のピークのタイミングがあてれば洪水の再現精度

が高くなる。対して、マイクロ波観測時間帯以外の時間帯は、雲の移動ベクトルと前時刻マイクロ波観測の降雨分布データを合成し、降雨分布を推定したデータであるため、比較的小さい降雨を見逃している傾向にあり、解析した流量も非常に小さい。人工衛星観測は、台風など強雨域が移動する降雨パターンは雲の移動でとらえやすいが、インドネシアでは、積乱雲の発達から豪雨に至るような降雨パターンが多いため、雲移動ベクトルと前時刻のマイクロ波観測の降雨データによって非観測時間帯の降水量を推定するGSMaPにとって、当該流域は不得手な流域であると考えられる。これに対して、地上雨量データを入力した解析結果は、観測された流量と増減のタイミングと得られた流量そのものも精度が高い。ただインドネシア国のインフラ整備の事情により、地上観測設備に対する電源が常時供給できておらず、ソーラーパネルとバッテリーで駆動しているため、日射量が減り、バッテリーを使い果たしてしまうと、観測所の計器や

データ送信システムが動かず、データが収集できない。

ソロ川事務所は、下流域の観測所においては、クラーヘン式を用いた水位相関法による洪水予測を行っている。今回、IFASをベースとした洪水予警報システムを導入して、ソロ川本川下流域における縦断方向のみに限った洪水ピークのタイミングと規模だけでなく、空間的な水の分布や、時系列的な河川流量の変化など、危険度をより細かく把握することが可能となった（図-6参照）。

7. 現地導入に際しての能力開発研修

IFASを現地に導入するに当たって、現地技術者を対象としたトレーニングワークショップを2009年から2012年にかけて計5回開催した。5回のうち2回は、公共事業省の技術者だけでなく、砂防部、気象気候地質部など、関係する他機関の技術者も参加した。水文学や土木工学の基礎知識がない技術者も少なくない上に、英語がほとんど話せない者も参加していた。この状況に対して、降雨から河川流量を推定する手法について、IFASの持つ描画機能を駆使し、極力自分が作業をしていることのイメージと解析の理屈をリンクさせ、理解しやすくするよう配慮してトレーニングを行った。また、英語だけでなく、インドネシア語、ジャワ語を話せる研究者を配置するとともに、トレーニング用のパソコンを4台準備し、容量や操作に支障のあるパソコンの代替機として用いてトレーニングを行った。

8. まとめ

当該事例は、IFASを用いて、洪水予警報システムを導入した最初のプロジェクトである。当該プロジェクトにおいて、インドネシア国ソロ川で洪水予警報システムの導入を行い、以下の成果を得た。

- ・ 全球のデータを用いて流出解析ができる、ということを開発途上国であるインドネシア国の現場技術者に示した上で、正確な雨量観測データを得ることで、良い解析結果を得ることが可能になることの理解を深め、リアルタイム雨量観測、水位観測を促進させるインセンティブとした。
- ・ リアルタイム地上観測データを用いて解析することで、人工衛星雨量データを用いるよりも、リードタイムを3時間短縮し、精度の高い結果を得ることができた。
- ・ 直感的に自身が何をやっているのかがわかるGUIを備えた流出解析モデル構築機能を持つIFASを用いることで、高度な教育を受ける機会のなかった開発途上国の現場技術者が自身でモデル構築をできるようになった。
- ・ 水位相関法による洪水予警報よりも2次元的な広がりを持った情報を得ることが可能になり、よりの確に現

場の状況を把握した上で洪水予警報が可能となった。

今後は、人工衛星観測雨量データの補正手法についてさらに検討を続けていくとともに、プロジェクトが完了した後も、ソロ川の雨量観測、水位観測が継続して行われるように、定期的に公共事業省ソロ川事務所に対して必要な助言を行っていきつつ、IFASのヘルプデスクとして必要に応じて、ソロ川の技術者が困っているときには質問を受け付け、適切な洪水予警報が継続できるようにサポートしていくべきと考えている。

謝辞：当該業務は、アジア開発銀行との技術協力協定に基づくプロジェクトとして、アジア開発銀行から資金提供を受け、実施したものである。当該業務の遂行には、インドネシア国カウンターパートである公共事業省ソロ川事務所のGemala Suzanti氏、水文観測部のGunawan Frediyasto氏にデータ提供、現地情報の提供を受けて業務を実施した。また国際コンサルタントとして、オランダ国DeltaresのDr. Paolo Reggiani氏、インドネシア国内コンサルタントとして、インドネシア国水資源研究所のOkky Subrata氏、当土木研究所ICHARMの前担当者、Dinar Catur Istiyanto氏、川上貴宏氏（現（独）水資源機構）、小澤剛氏（現（株）建設技術研究所）の協力を得て遂行した。ここに記して深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Fahmi Hidayat, Harry M. Sungguh and Harianto: Impact of Climate Change on Floods in Bengawan Solo and Brantas River Basins, Indonesia, pp.1-15, 2009
- 2) Fahmi Hidayat, Floods and climate change observations from Java, CRBOM Small Publications Series, No. 10, pp.1-7, 2009.
- 3) 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, pp385-390, 2009
- 4) Yoshiki Shiraiishi, Kazuhiko Fukami, Hironori Inomata, “APPLICABILITY OF A CORRECTION METHOD USING RAINFALL AREA MOVEMENT OF GSMAP FOR REAL TIME FLOOD FORECASTING”, 4th IPWG Workshop on Precipitation Measurements Beijing, Proceedings, (2008), pp 307-313.
- 5) Barai Besar Wilayer Sungai Bengawan Solo, Laporan Monitoring Banjir, 2007, 2008, 2009
- 6) Mamoru MIYAMOTO, Ai SUGIURA, Toshio OKAZUMI, Shigenobu TANAKA, Seishi NABESAKA, Kazuhiko FUKAMI (2012): Suggestion for an Advanced Early Warning System Based on Flood Forecasting in Bengawan Solo River Basin, Indonesia, 10th International Conference on Hydroinformatics, 2012
- 7) http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP_crest/index_j.html
- 8) <http://www.iscgm.org/cgi-bin/fswiki/wiki.cgi>
- 9) <http://hydrosheds.cr.usgs.gov/index.php>

(2013. 4. 4受付)