

水工学シリーズ 12-A-2

総合洪水解析システム（IFAS）による 水文データ不足流域における洪水予測

土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター

深見 和彦

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2012年8月

Flood Forecasting in Poorly-Gauged River Basin

Using Integrated Flood Analysis System (IFAS)

深 見 和 彦

Kazuhiko FUKAMI

1. はじめに

洪水予測は、河川流域内の雨量や水位・流量といった気象・水文状況を迅速かつ的確にモニタリングし、その情報をもとにして洪水の将来動向に関する予測(大雨や、河川の水位・流量、氾濫の水位などの予測)を行うことである。その予測情報があつて初めて、河川・洪水管理の責任者は、洪水被害の危険性を具体的かつ定量的に判断することができ、危険にさらされる脆弱な地域における防災担当者や住民にその情報を伝えることができる。それは、河川・洪水管理の現場での水防活動や流域住民の避難警戒活動を迅速かつ的確に行うための基礎情報であり、全ての水害軽減活動の出発点といえる。

今、発展途上国では、かつての我が国と同様に、急速に都市への人口集中が起きている。従来遊水地としての機能を果たしていた水田等の農地や洪水氾濫原が都市化され、水害への脆弱性が増している(図1)。とくに川沿いは水や食料・輸送手段の確保が容易で快適に生活できることから、通常の安全な土地には暮らせない貧しい人々が多く暮らしている。一方で、そのような居住域を守る堤防や洪水調節施設等の治水投資は目先の経済開発優先の政策の中で抑制され、治水施設整備は遅れがちである。したがって、定量的な洪水予測に基づく洪水予警報システムの整備は、発展途上国においても水害を迅速かつ効率的に減らすための極めて有効な手段と期待されている。

一方、2010年7月末から発生したパキスタン・インダス川洪水や、2011年9月以降に顕在化したタイ・チャオプラヤ川洪水などは、大規模な洪水ハザードによって生じる低平地・氾濫原での氾濫災害の恐ろしさをまざまざと見せつけたものとして記憶に新しい。特に后者では、世界のサプライチェーンを寸断することで世界経済に多大な損害を与え、洪水氾濫リスクを事前に評価して必要な対策をとっておくという当たり前のことの重要性を、改めて再認識させる災害になった。アジアモンスーン域にある多くの発展途上国では、今でも、このような大規模な洪水氾濫災害が毎年どこかで起きているのが現状である。これらのしばしば長期間に及ぶ洪水氾濫の状況を



図1 川沿いに集まる住居群(フィリピン、マニラ)

(竹内邦良氏撮影)

正確に把握し予測することは、事前の治水・防災対策立案やリアルタイムでの減災活動にはいうまでもなく、発災後の復旧・復興活動にとっても重要である。

(独) 土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター (International Centre for Water Hazard Risk Management under the auspices of UNESCO、略して UNESCO-ICHARM または単にアイチャームと呼ぶ) では、我が国とは自然・社会経済・技術的条件が異なる発展途上国等の河川流域においても、効果的な洪水予警報システムの整備や洪水氾濫リスク情報の提供を迅速かつ効率的に実施できるようにするための研究開発を行っている。水文情報が乏しい河川流域における洪水解析モデルや洪水予警報システムの整備を促進するための総合洪水解析システム (IFAS: Integrated Flood Analysis System) の開発や、広大な氾濫原における洪水氾濫解析を降雨流出と一体で効率的に行うことの出来る降雨流出氾濫解析モデル (RRI Model = Rainfall-Runoff-Inundation Model) の研究開発等を進めているところである。本稿では、IFAS を中心として、その概要と適用事例を紹介するとともに、グローバルな展開が求められる水文学としての観点も含め、今後の課題について議論したい。

2. 発展途上国に特有の課題

IFAS の紹介をする前に、洪水予警報がその機能を十全に発揮することで洪水災害軽減に結び付けるために必要となるいくつかの前提条件についての、我が国と発展途上国の違いについて議論をしておきたい。

まず第1に、洪水を予測するために必要となる降雨量や水位・流量等の気象・水文観測データがリアルタイムで必要である。但し、「リアルタイム」という言葉において念頭にある時間スケールは河川流域のスケールによって異なる。日本では、主要な一級河川では1時間単位でのデータ収集がかつては一般的であったが、近年は、10分単位でより迅速に雨量・水位情報をテレメータで収集する体制が整えられている。また、都市域の小河川では、10分で1m34cmもの水位上昇が生じて痛ましい水難事故が発生した2008年7月の兵庫県都賀川水難事故に代表されるように、10分間隔でも不十分なケースもあり、1分ごとという高時間分解能で網羅的な降雨分布を把握できる X バンド MP レーダの整備につながっていることは周知の通りである¹⁾。一方、インダス川やメコン川といった大陸スケールの大河川本川における季節的洪水では、水位上昇速度が遅いことから、日本のように10分～1時間単位のデータを収集せずとも、日単位程度のデータで対応が可能なケースも想定し得ることは念頭においてよい。しかし、いずれにしても、そもそも気象・水文観測所の設置箇所数が少なすぎる (インダス川の事例では、雨量観測所の設置密度は、およそ1万 km² に1箇所である。利根川流域全体で2箇所も雨量計が無い状況を想像していただきたい。)、設置してあっても発展途上国では維持管理のための機材や予算・人材が確保できず観測データの精度が悪い、もしくは得られない、といったケースが発展途上国では頻繁に見られるのである。特に流域が複数の国にまたがる国際河川では、国際間での水文観測データの流通が制限されて河川上流側の雨量・水位情報が下流側の国に伝達されないことも決して稀ではない。

上記は、洪水流出の予測の基盤となる、降雨～流出関係の解析 (= 流出解析) における水文観測データ = 入力データ確保の観点における問題点であるが、洪水氾濫解析においては、それに加えて、河道断面のみならず流域氾濫原での詳細な地形 (標高) 把握、というもう一つの大きな課題が立ちはだかる。日本では、航空機搭載レーザープロファイラによる高解像度・高精度の標高データが広い地域で利用可能 (平成22年5月時点で国土の45%が公共目的観測でカバー²⁾) となっており、25cm～数m程度の空間分解能と30cm程度の高さ精度を有する高品質のデジタル標高データ (DEM) を用いて氾濫解析を行うことが可能となってきている。しかしながら、

発展途上国では、そのような高品質データはまだごく一部でしか利用できない。もし存在したとしても、一般に非公開で、政府機関以外は閲覧・利用できない、といった事例が多い。

第2に、観測データを元に洪水や氾濫を予測計算でき、かつ、その計算結果を洪水防災担当者にとってわかりやすい形で分析・表示できるシステムが必要である。しかし、そのようなシステム構築には多額の費用がかかるのが一般的で、システムの構築や維持管理のために高度なノウハウを有する人材が必要であり、発展途上国では大きなハードルとなる。

第3に、現地での防災担当者や流域住民のニーズに合致する情報を迅速かつ確実に届ける情報ネットワークが必要である。たとえば、日本には「消防団」という真にマルチ・ハザード対応(消防・地震防災から水防まで対応)の世界的にも稀なボランティア組織が存在するとともに、いざというときに草の根レベルでの情報連絡網としても機能する自治会等の地域コミュニティもまだ生きている。しかし、発展途上国では、情報通信インフラ整備が立ち遅れる一方、予警報情報を正確に理解して的確なアクションを起こすことのできる人的ネットワーク=防災コミュニティそのものが現地にないことも多い。

本稿で紹介する IFAS は、特に最初の2つの前提条件を踏まえ、洪水予測のための基本情報である上流域の地上水文情報の収集や、システム構築のためのリソース確保に制約のある発展途上国等の河川流域においても、洪水予警報システムもしくは洪水リスク評価システムの構築を早期に低コストで実現することに焦点をあてて開発を行ったものである。

ところで、第1の前提条件において示唆したように、水害が集中しているアジアのモンスーン地帯には、東南アジアのメコン川やイラワジ川など、数十万 km² を超える大河川流域が多い。そこでは日本で見られるような中小支川での急激な出水だけではなく、数カ月かけてゆったりと洪水ピークが形成される季節的洪水がみられる。そのような洪水に見舞われる平野域では、日本で一般的な3時間～1日後といった短時間の水位予測ではなく、数日～1週間以上の時間スケールでの中長期的な水位予測

も重要である。その情報は、水位の増減に合わせて季節的に住居を移動する人々をはじめとする流域住民や氾濫源内に立地する工業団地等における資産の被害軽減はもちろんのこと、洪水氾濫を逆に水資源として灌漑(かんがい)のために利用している農地での作付け計画策定も含めて、洪水とともに生きる人々にとって大きな価値のある情報である³⁾。このような中長期的な予測のためには、上流水位情報をみているだけでは不十分であり(図2)、上流

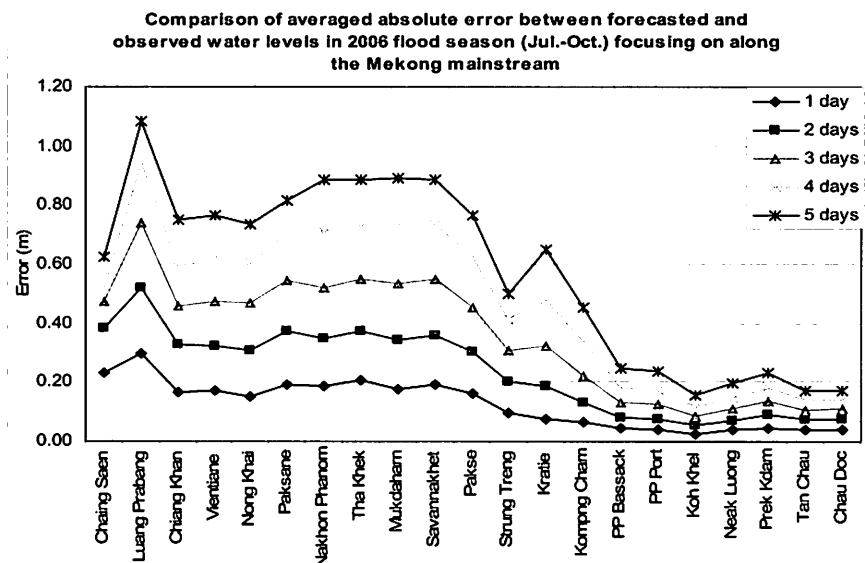


図2 メコン川におけるリードタイム(1～5日)毎の水位予測の精度(2006年洪水期の実績)※左側が上流、右側が下流。下流側は水理解析により高精度の水位予測が達成されているが、上中流側では精度が悪いことがわかる。)※Apirumanekul (2006)より引用

域全体での降水量分布とそこからの流出量の評価が、洪水予測精度改善のカギとなる。

一方、大河川沿いの洪水 (riverine flood) に比べると、ハザードそのものとしてははるかに小規模ながら、しばしば大きな人的被害をもたらす Flash Flood も、防災・減災の観点からは無視できない。ちなみに、Flash Flood は、日本語では「鉄砲水」と訳されることが多いが、WMO (世界気象機関) では、a flood of short duration with a relatively high peak discharge と定義され⁴⁾、USGS (米国地質調査所) では the result of heavy or excessive amounts of rainfall within a short period of time, usually less than 6 hours, causing water to rise and fall quite rapidly⁵⁾ と定義されるなど、世界的に見ると、日本語の「鉄砲水」から与えられる印象よりも広義で用いられていることから、「急激な増水を伴う洪水」と訳す方が適当であろう。すなわち、前出の都賀川出水はもちろんであるが、それ以外にも、日本で言うところの中規模程度以下の河川における洪水は、ほとんど Flash Flood と言ってよい。それにも関わらず一般にそのように認識されていないのは、日本の場合、一般には上流側に密な雨量・水位観測網が存在するため、世界的に見れば十分短時間と認識される6時間程度以下の豪雨による洪水でも、その多くは迅速に下流側での洪水発生を予測でき、河川管理者や住民にとってはもはや「Flash」ではないためであろう (もちろん、国内中規模の河川でも、観測施設が不十分な中山間地などではそうでないこともある。)。しかし、発展途上国に多く見られる水文観測が不十分な河川では、洪水規模を適切に予測できる十分な観測データが迅速に得られないが故に、数千 km² を超えるような上流域面積を有する地域での洪水でも、下流住民にとっては「Flash」的に突然やってくる洪水なのであり、それは Flash Flood と呼ばれることになる。こういった Flash Flood は、降雨から洪水到達までの時間が短いことから、上流域の降雨分布から把握しておくことで、下流側での洪水流出を迅速かつ適切に予測することが重要であることは論をまたない。

3. グローバルな衛星・GIS 情報を活用することで地球上の任意河川流域での洪水流出解析を可能とする IFAS

3.1 開発のコンセプト

我が国の河川計画・管理では、洪水流出解析モデルとして、貯留関数法等の集中定数型モデルが伝統的に長らく利用されてきた。これらのモデルは、河川流域を数 10～数 100km² のサブ流域に分割し、サブ流域毎に少ない定数でモデルを構成でき、モデル同定も比較的容易であることから、シナリオベースの河川計画立案等に有利である。しかし、基本的に Data-driven モデルであり、モデル定数は降水量と河川流出量の入出力関係から経験的に求める必要があり、河川流域内の降水量分布や流量データについて、長期にわたる高品質のデータベースが存在することがモデル構築の条件となる。このため、水文観測データの乏しい河川で、同じ手法をそのまま採用することは一般に困難である。

そこで、ICHARM では、水害が頻発する発展途上国に多い水文観測データが不十分な河川でも、洪水流出解析によるハザード分析や、リアルタイム洪水予測システム整備による早期警報システムの早期立ち上げを可能とすることを目的として、分布定数型の流出解析モデルを基盤としつつ、必要な入出力インターフェースや解析ツールを一体化した、総合洪水解析システム (IFAS: Integrated Flood Analysis System) を(社)国際建設技術協会、および民間9社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(2005～2007 年)^{6),7),8),9),10)}。その後、ICHARM において改良・機能拡張を継続し^{11), 12)}、現在

Ver.1.3βをICHARM ウェブサイトにおいて無料で公開している

(<http://www.icharm.pwri.go.jp/research/ifas/index.html>)。また、ウェブサイト上では、現段階ではまだ一般公開していないが、AutoIFAS と呼ばれる、IFAS を基盤としてリアルタイム・オンラインでの洪水予測計算を行うための支援ツールを併せて開発している。すなわち、IFAS 単独では、流出解析システムであり、流出計算をするときに、解析対象期間の最初から計算を始める必要がある。AutoIFAS を追加インストールすることにより、解析対象期間の最初に戻ることなく、前時刻までの計算結果を記憶し、前時刻からの追加分のみを計算することが出来るようになった。これにより、広大な河川流域においても迅速かつ効率的に計算結果を得ることができるようになった。また、所定様式でアップされる地上雨量データや、ウェブやFTP サイト上の衛星雨量を自動で読みに行く機能も付加しており、IFAS とのセットで、直ちに洪水予測システムを構築することを可能としている。

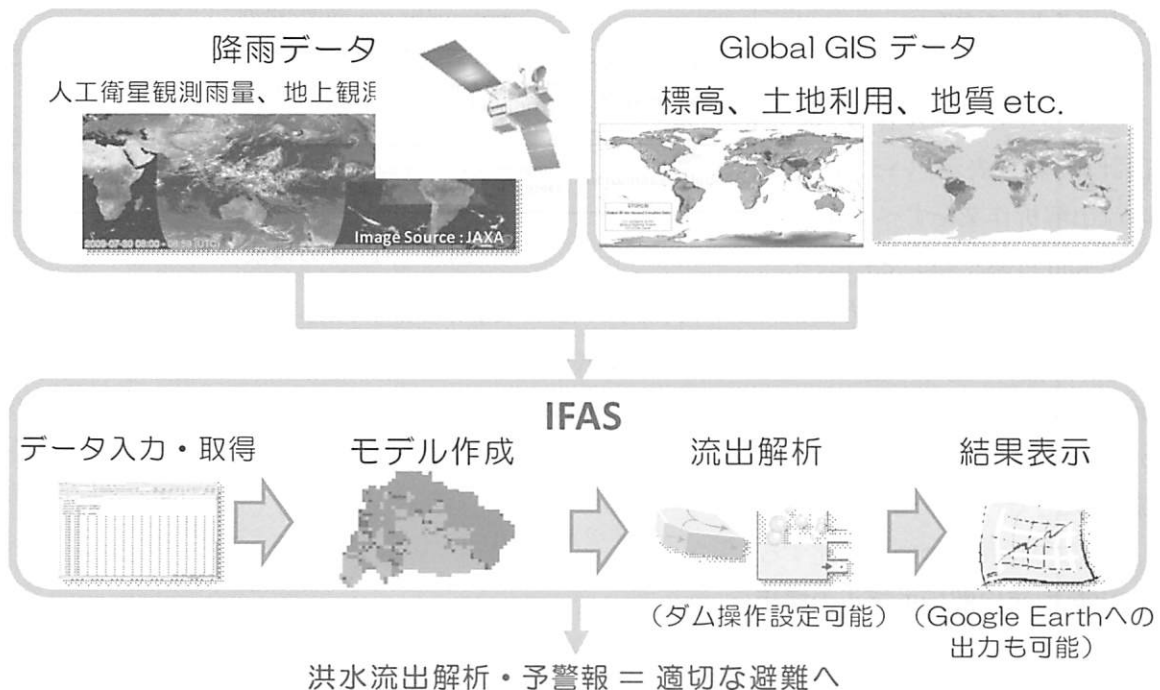


図3 IFAS の概念図

IFAS の開発コンセプトを以下および図3に、また IFAS (Ver.1.3) の基本構成を図4に示す。

- ① 過去の水文資料がなくても洪水流出解析モデルの構築を可能とするために、グローバルに入手可能な地形データ(DEM)や、土地利用・土質・地質などの流域内の地理・地質的な特性によりパラメータの一次近似推定が可能である分布定数型モデルを洪水流出解析モデルとして標準装備する。
- ② 上記モデルのパラメータ設定に必要となるGISデータとして、全世界で網羅的に整備され、インターネットを通じて一般に無償公開されているデータベースを入力する機能を標準装備する。これらの機能により、過去の水文資料や現地の詳細なGISデータが存在しない河川流域でも、洪水流出解析モデルの構築が可能となる。
- ③ GIS解析モジュールを内部に実装することにより、流出解析モデル定数をGISデータから解析・設定する作業をIFASシステム単体のみで可能とする。すなわち、高価なGIS解析ソフトがなくても、IFASソフト単体のみでモデル構築作業が可能となる。
- ④ 地上水文情報(雨量)が乏しい地域においても洪水流出解析や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、インターネットを通じて世界的に無償で入手可能な衛星観測雨量を取

り込むインターフェースを標準装備する。これにより、インターネット接続環境さえあれば、IFAS ソフトウェアをインストールし洪水流出解析モデルを構築した当日から、任意の河川流域の豪雨情報の収集と流出計算を可能とする。もちろん、高精度を担保するためには、定量性が高く、より信頼できる雨量データの入力が必要である。

- ⑤ 様々な条件下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標準的に備え、同一条件での計算結果の比較を出来るようにする。

- ⑥ 洪水予測計算に必要なデータ取り込み、モデル作成、流出計算、結果表示といった一連の流出解析作業をすべて IFAS 上で実行可能とするとともに、その

のために必要となる入出力画面について、グラフィカルでわかりやすいインターフェースとし、洪水解析に関わった経験のある技術者であれば誰でも使いやすいシステムとする。

- ⑦ 発展途上国が自ら所有者意識を持ってシステムの構築・維持管理ができるように、実行形式プログラムファイルとマニュアルを無償で配布するとともに、操作方法の理解と習熟を図るための研修等をセットで実施することで、世界への普及を図る。

以下、これらの特長について詳述する。

3.2 分布定数型流出解析モデルの採用

前項で既に述べたように、IFAS の特徴の一つは、従来より我が国で広く河川計画や洪水予警報に用いられてきた実績のある集中定数型流出解析モデルではなく、土木研究所が 1980 年代末から開発を行ってきたメッシュ(方形グリッド)ベースの分布定数型流出解析モデルである土研分布モデル(Ver.1⁶⁾:洪水・低水両用3段モデル、Ver.2⁷⁾(図-3):洪水用の簡略化2段モデル)を採用したことである。これにより、水文観測データが不十分な発展途上国の河川でも、グローバルに入手できる DEM を基盤として流域界・落水線網・河道網を半自動的に作成することで、自動的にメッシュ間の水の流入出を定義できることになり、流域スケールでの流出解析モデルを効率的に構築することが可能となった。

一般に、分布定数型流出モデルは、河川流域を数 10m～数 km スケール程度以下のメッシュ単位もしくは斜面要素単位に分割して、物理的にせよ概念的・経験的にせよ、目的量を評価するために重要な水文素過程を陽な形で追跡する構造を持つモデルである(図5)。したがって、そのメッシュ・斜面要素単位では、水文素過程を支配する物理的条件はほぼ均一であると仮定することで、そのメッシュ・斜面要素単位でのモデル定数を、そこでの地形や土地利用・土壌・地質情報と関連づけて設定することができると見なされる^{注)}。

注)実際には、例えば斜面勾配などの地形は言うまでもなく、土壌の透水性係数を始め、様々な地理・地質・水理・水文特性値は、メッシュ・斜面要素の中でも当然ばらついている。そのばらつきが大きい場合は、水文素過程の多くが非線形である以上、その結果としての平均的な応答特性と、斜面勾配や間隙率・透水性係数などを平均値で一定と仮定して計算した応答特性が無視できない

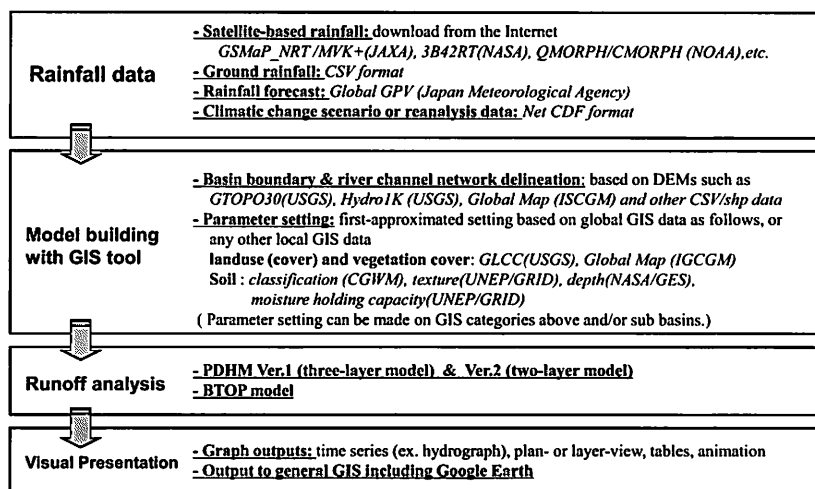


図4 IFAS の構成

レベルで異なってくる可能性がある。このようなサブグリッド(メッシュ)スケールにおける不均質性の影響についても、国内外で多くの研究が行われてきている。例えば、Kavvas ら(2004)³⁾が示した、地点スケールの基礎方程式をサブグリッド内でのモデル変数・定数の確率的なばらつきも考慮に入れながら空間積分することで、確率的な空間積分偏微分方程式を構成することで、サブグリッドスケールの不均質性の影響を理論的に水文流出解析に組み込む手法は、その典型的な研究成果の例である。

IFAS では、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モデル Ver.1 と同 Ver.2 を実装している。また、別途、山梨大学を中心に開発された BTOP モデルを実装した IFAS-BTOP も準備している。これらのモデルは、それぞれの流出素過程の支配方程式を直接解くモデルではないという意味では、Physically-based ではなく、Conceptual な分布モデルと言える。

土研分布モデル Ver.1 は日本の山地河川流域において長期・短期流出両用モデルとして当初開発された、概念的(conceptual な)分布定数型流出モデルである¹⁴⁾。一方、土研分布モデル Ver.2 は、Ver.1 を洪水予測用途に用いるために簡略化することで高速化を図ったモデルである¹⁵⁾。ここでは、後者の Ver.2 を例にして解説する。

土研分布モデル Ver.2 は、各メッシュにおける浸透・貯留・流出プロセスを2層のタンクモデルで表現するとともに、それぞれの孔か

らの流出・浸透は、Manning 式(表面流出)および横方向と下方向への Darcy 式で表現する(図6)。いわゆる菅原のタンクモデルは、流域を1つの(3~)4段直列タンクで表現するため、各タンクの孔からの流出成分は、必ずしも表面流出、中間流出、地下水流出とそのまま対応しているわけではなく、流域の地形形状、落水線網・河道網による集水過程の影響も含んだ流出成分分離となっている。したがって、各孔からの流出係数は、過去の水文資料データベースから経験的に決めるのが一般的である。それに対し、土研分布モデルでは、物理的条件を均質と仮定するメッシュ毎の直列タンクであることから、それぞれのタンクの孔からの流出は、表面流出、中間流出、地下水流出の各成分にそのまま対応すると仮定できる。この仮定に基づき、各孔からの流出について、

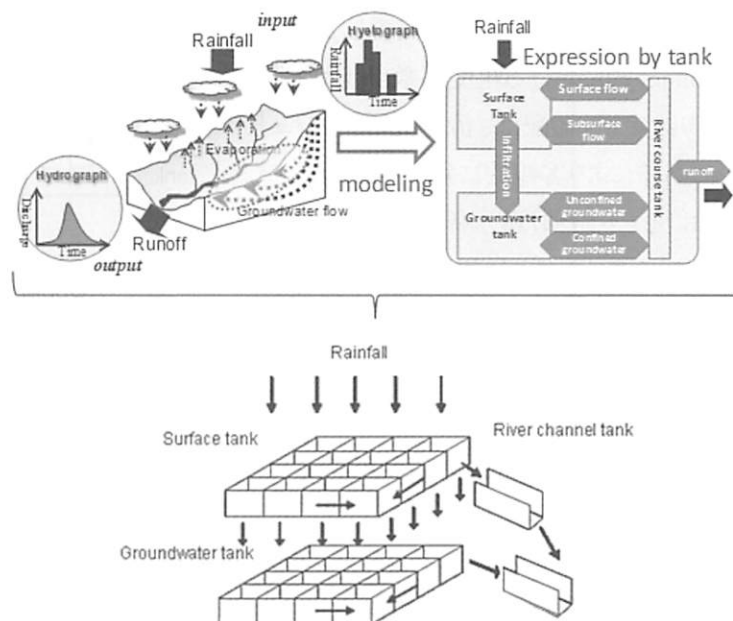


図5 土研分布モデル(Ver.2)概念図

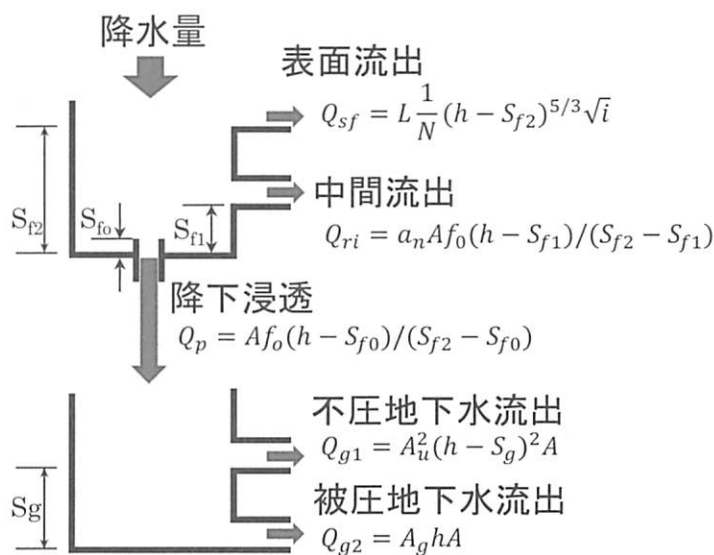


図6 土研分布モデル(Ver.2)におけるメッシュ単位での水文素過程モデル化

Manning 式や Darcy 式で表現している。Manning 式における粗度係数は土地利用により設定し、勾配は、流出先のメッシュとの標高差により客観的に定める。Darcy 式における(不飽和)透水係数は、土地利用もしくは土壌(土性)分類によって決める飽和透水係数と上層タンク内水位により決める。なお、不圧地下水と被圧地下水の流出

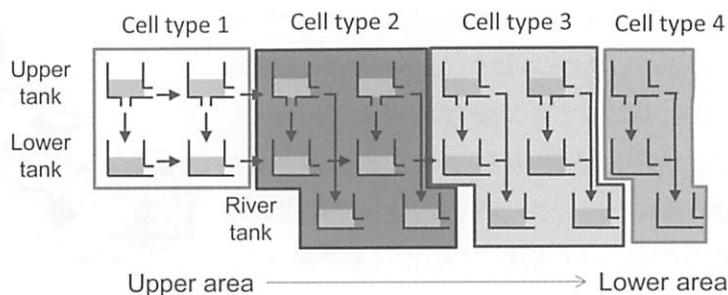


図7 河道モデルの設定(4種類)

に相当すると考える下層タンクの流出係数については、安藤ら(1980)¹⁶⁾に従い、下層タンク内貯水位のそれぞれ2乗および1乗に比例するとしている。

河道流については次のように考えている(図7)。当該メッシュよりも上流側の面積を参照し、斜面最上流部で河道が存在しないと考えられる地点の上流域面積、晴天時は涸れ川だが雨天時のみ表面流出からの補給により流水が流れると考えられる地点の上流域面積、地下水からの補給により常時流水が存在すると考えられる地点の上流域面積、さらにそれらの小流路が集まって Kinematic Wave 法による洪水追跡を行うべき主要な河道が形成される上流域面積、のそれぞれの閾値をあらかじめ設定しておくことで、地形に即した河道網の自動作成を可能としている。すなわち、流域内のメッシュは、河道が存在しないメッシュ、降雨時の表面流出時のみに河道が存在するメッシュ、常時流水が見られる河道が存在するメッシュ、及び、洪水追跡を行うべき主要な河道が存在するメッシュ、と言った具合に、当該メッシュの上流域面積(流入メッシュ数)の範囲毎に4つのタイプに分類されることになる。なお、河道幅 B は、上流域面積のべき乗に比例するとしたレジーム則により与える。複断面としての断面情報を設定することも可能である。

土研分布モデル Ver.1 は、3層モデルである点が Ver.2 と異なっている。すなわち、上層＝表層タンクと下層＝地下水タンクの間には遅い中間流出を考慮するための不飽和層タンクを挿入した形となっており、中間流出を2成分に分けて評価することができ、地下水タンクとの役割分担も明確化していることから、低水流出を含めた連続的な長期流出計算の適合度を高めることができる。

なお、蒸発散量については、米国 NOAA が公表している再解析気候値(NCEP-DOE Reanalysis 2)による1979年1月より2008年1月までの月平均日蒸発散量値(1.9度グリッド)を与えることで、世界の任意地域でのモデルの機動的な運用性を確保している。積雪・融雪過程については、土研分布モデル Ver.1 には本来は組み込まれているが、IFAS への実装にあたっては、深刻な洪水災害が相次いでいる熱帯モンスーン地域を中心とした温暖多雨地域での利活用をまず想定していたことから、今のところ IFAS にはまだ実装していない。

上記の土研分布モデルは、モデル構造が簡便で、浸透・貯留・流出特性を透水性・保水性と絡めて簡潔に表現していることから、当該メッシュの土地条件(地形、土地利用、土壌、地質等)との関連性を議論しやすい。また、分布定数型モデルとしては高速かつ安定性が高く、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¹⁷⁾。

一方、BTOPモデル(The Block-wise use of TOPMODEL)¹⁸⁾は TOPMODEL¹⁹⁾の概念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性もすでに十分検証されている物理的分布型モデルである。国内のみならず様々な条件下の海外流域での適用実績が豊富である。

以上の3つのモデルを適宜使い分けることによって、中小河川から大河川まで、Flash Flood から季節的洪水

まで、幅広い洪水事象に対応することを可能とする構成とした。

3.3 グローバル GIS 情報を入力し、GIS 解析処理を行うシステムの実装

分布定数型流出解析モデルの場合、目的とする水文量(ここでは洪水流出量)を評価するために支配的となる水文素過程を陽な形で表現していることから、それらの素過程を規定するモデル定数は、Data-driven である集中定数型流出解析モデルにおけるモデル定数に比べて、現地の土壌・地質等の条件と関連づけやすい。一方、DEM や土地利用を含め、地球規模で多くのデータセットが整備され、公開されている。これらのデータセットを直接入力し処理するシステムとすれば、世界中どこでも、任意の河川流域に対して容易に分布定数型流出解析モデルの構築を行うことができるようになると期待される。そこで、IFAS では、分布定数型流出解析モデルのパラメータ設定に必要な GIS データとして、全世界で網羅的に整備され、インターネットを通じて一般に無償公開されているデータベースを入力するとともに、それらのデータベースを適宜組み合わせることで流域内の落水線網・河道網やモデル定数の分布を評価・設定する機能を標準装備している。

例えば、流域の形状、落水線網・河道網を作成するために必要となる DEM としては、ISCGM: International Steering Committee for Global Mapping(地球地図国際運営委員会)が推進・整備している Global Map(地球地図)²⁰⁾における DEM や、USGS(米国地質調査所)の GTOPO30²¹⁾といった全球で整備済みの約 1km(30 秒)グリッドの DEM データを直ちにダウンロードして読み込むことのできるインターフェースを標準装備している。これらの DEM データをもとに、落水線網(及び河道網)を作成する方法は以下のとおりである。各流出成分は、メッシュのある格子点から最急下り勾配の方向の格子点に移動するものとする。方向は斜め方向も含め 8 方向を探索する。しかし、当該格子点の標高が周囲の 8 地点より低い窪地が生じ、流れの方向が決まらない格子点が時々発生する。この場合は、当該格子点の標高より低く、かつ最急下り勾配となる格子点を、8 方向のさらにもう 1 メッシュ先毎の 3~5 方向までを対象として 8 方向毎に 1 つずつ探索する。その結果、8 方向の仮想流路が仮設定されるが、その中で、ルート上の最大標高が最も小さい経路を選定する。それでも決められないときは、ルート上の縦断面積が最も小さい経路を選定する。これにより、DEM データから落水線網を自動的に作成することが可能となる。なお、流域界の設定については、2通りの方法を準備している。一つは、入力された DEM に即して落水線網を構築し、解析対象とする流域末端を指定することで流域界を評価する方法、もう一つは、流域界を外データとして強制的に与え、それに合うように標高を微修正しつつ落水線網を構築していく方法である。このようにして、グローバル DEM データに基づく流域の地形情報を基盤として、流域内の落水線網、河道網、河道勾配、上流域面積に応じたレジーム則による河道断面の設定等を行う機能を、IFAS は有している。

モデル定数については、現行バージョンの IFAS では、浸透・貯留・流出といったメッシュ毎の流出素過程について、当該メッシュの土地被覆もしくは土地利用条件によって、第 1 次近似的には規定できると仮定している。すなわち、上記の地球地図や USGS の GLCC データセットによる土地被覆(もしくは土地利用)データを入力し、その被覆カテゴリを森林、低木~裸地、耕地、都市域、水域の 5 つのサブカテゴリに集約した上で、それぞれのサブカテゴリ毎に、土研分布モデルの表面流出や浸透・保水能、中間流出・地下水流出に係る諸定数の標準的なデフォルト値を与えておく。これに

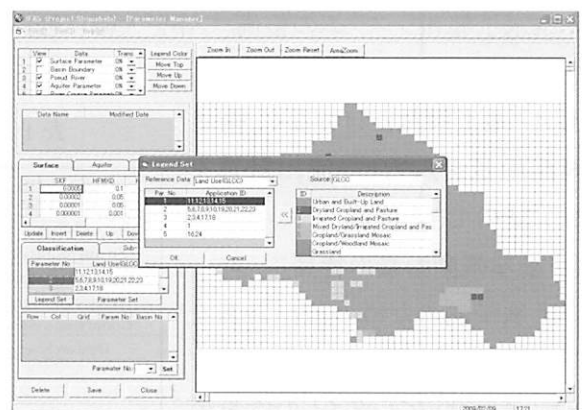


図8 土地利用(被覆)条件による
モデル定数の設定画面

より、グローバルな土地被覆情報から、自動的にモデル定数が設定され、前述の地形由来の諸情報と併せて、世界中どこかの河川流域でも分布型流出解析モデルを迅速に構築することを可能にした(図8)。ここで、土地被覆条件毎に与えたモデル定数標準値は、民間との共同研究開発時に、国内、タイ、及び、フィリピンの複数河川での当時の適用事例を基盤として、どの流域でも全体としてハイドログラフ適合度を高めることができる組み合わせとして仮設定したものである。また、UNEP/GRID による Soil Texture および Soil Water Holding Capacity、および、NASA/GES DISC による Soil Depth といった情報も標準でそのまま入力可能としているが、現時点ではそれらの情報も活用したモデル定数標準値は未設定である。したがって、デフォルト標準値といっても、それはあくまで暫定値にすぎず、その後の多くの適用事例を踏まえつつ、設定手法も含めて随時見直していくことが必要である。また、そもそも、ここで言うところのデフォルト標準値は、単なる1次的・平均的な近似値にすぎない。本来は、対象河川流域の土地条件と透水・保水・流出特性との関係を明らかにした上で、流域毎に最適化した上で設定すべきものである。実際には、流域の土地条件と水理水文パラメータとの間の関係を明らかにできる情報を確保することは一般には難しいため、目的とする対象水文量の評価精度を高めるように、諸定数設定値のチューニングを行うことが、通常とることのできる手段となる。

しかしながら、このパラメータの半自動設定機能は、実際に世界の様々な河川流域に分布定数型流出解析モデルを適用することを強力に支援する、非常に現実的で有用なツールであることも明らかである。少なくとも、DEM 情報をベースに、流域内の水系ネットワーク＝集水過程をほぼ的確に再現できていることがベースとしてあるため、あとは雨量情報や初期条件で大きな誤りを与えない限りは、通常は、相当程度、現地観測データとある程度の比較に耐える1次近似ハイドログラフを再現する。あとは、それを出発点として、現地観測資料を参照しながらモデル定数のチューニングを図れば良い。全球任意河川流域での流出解析モデル構築と現地観測データによる詳細なカスタマイズの両者の可能性を保持していると言える。次なる問題は、いかにして、信頼できる精度の良い現地水文観測資料、特に、雨量情報を得るかが大きな問題となる。それについては、次項で詳述する。

ここでは、IFAS の機能により、過去の水文資料や現地の詳細な GIS データが存在しない河川流域でも、(精度確保は次の課題となるが) 1次近似的な洪水流出解析モデルの構築が可能となること、そして、それらの GIS 解析処理を行うためのモジュールを IFAS 本体に実装することにより、落水線・河道や諸モデル定数の設定といった GIS データから解析・設定する作業を IFAS システム単体のみで可能としていること、が重要である。しかも、IFAS は、実行形式プログラムをマニュアルとともに無償提供している。すなわち、高価な GIS 解析ソフトがなくても、無償の IFAS ソフト単体のみで全てのモデル構築・検証作業が完結できることになり、洪水流出解析システムや洪水予警報システムの整備コストを大幅に軽減できると期待される。発展途上国では、この点は、非常に大きなメリットとなり得る。

3.4 地上雨量だけでなく、衛星観測雨量を入力し、流出計算を行うことのできる機能

(1) 衛星観測雨量の特長

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準リアルタイムの雨量データが不可欠である。しかしながら、

表1 インターネットで入手可能な主な衛星観測雨量データ

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

2. で述べたように、発展途上国では、しばしば雨量観測ネットワークが非常に貧弱である。一方、現在では、表1に示すようにほぼ全世界をカバーするいくつかの衛星観測雨量データ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全世界でほぼ均質な精度で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・リスク分析時に必要となる過去のデータもある程度蓄積されている、④インターネットにアクセスするだけで入手が可能であり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一般に観測精度が劣る、また海外の多くのプロダクトでは、配信時間間隔が3時間毎と長く、かつ10時間程度以上もの配信の大きな遅れ時間がある等について考慮する必要がある。なお、ここで示している衛星観測雨量は、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である。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、より定量的な降水観測に適したマイクロ波放射計搭載の衛星が1990年代末以降増えてきた。そこでこれらの複数のマイクロ波センサーによる雨量観測値を複合的に活用することで、全球スケールでの降水マップが作成されるようになったのである。IFASのもう一つの大きな特長は、これらの地球観測衛星搭載のマイクロ波放射計観測データをベースとして、インターネット上で無料公開されている複数種類のグローバル／準リアルタイムの衛星雨量プロダクトを洪水流出計算のための入力データとして、そのまま利用可能とするインターフェースを装備している点である。

表1にあるNASA-3B42RT²²⁾やNOAA-CMORPH²³⁾は空間分解能 0.25° 、時間分解能3時間の全球降水データであるが、さらに高分解能を有するGSMaP(Global Satellite Map of Precipitation)が近年JAXAにより開発されている^{24),25)}。GSMaPには複数のプロダクトがあり、その中のGSMaP_MVK+はマイクロ波放射計やマイクロ波サウンダーから得られる降水強度にIRから得られる雲移動ベクトル情報を付加することで空間分解能 0.1° 、時間分解能1時間の高分解能を有するプロダクトである。これは過去のデータアーカイブである一方で、GSMaP_NRTはGSMaP_MVK+と同一の空間・時間分解能を有しながら、雲移動ベクトルを内挿ではなく前時間からの外挿処理とすることで、約4時間という短い配信遅れ時間を達成した準リアルタイムプロダクトである。そのため、GSMaP_NRTについては、雨量観測所が乏しい発展途上国の河川流域における洪水流出解析や洪水予警報への応用が期待される。

しかし、GSMaP_MVK+は地上雨量と比較して過小評価傾向であるという結果が報告されており²⁶⁾、洪水流出解析に対して適用するにあたり課題となっている。図9に、四国・吉野川流域、関東・利根川流域及び九州・川内川流域における3時間累加地上雨量および衛星観測雨量(GSMaP_MVK+)の相関図(黒プロット)を示す。これからも、衛星観測雨量は概ね過小評価傾向であることがわかる。したがって、少なくともこれらの過小評価傾向が見られる地域・時期においては、GSMaP雨量プロダクトを洪水解析に利用できるようにするために何らかの補

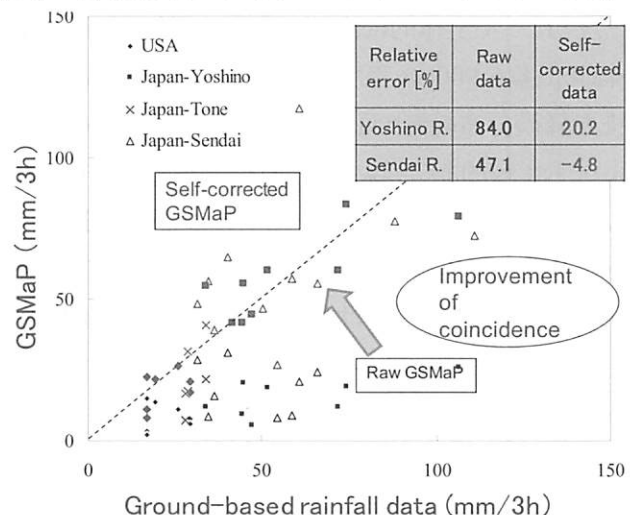


図9 地上観測雨量と衛星観測雨量(JAXA-GSMaP)の比較(流域平均ピーク雨量値。黒プロット:衛星雨量生値、赤プロット:白石ら(2009)の方法による衛星雨量自己補正値)

正を行う必要があると考えられる。

(2) 衛星観測雨量過小評価の自己補正手法の開発と適用

衛星観測雨量は、ピーク雨量を過小評価する傾向があるが、その特性は降雨イベントの違いにより異なり一様ではない。白石ら(2009)²⁷⁾は、四国・吉野川流域において GSMaP_MVK+による流域平均雨量と地上雨量によるティーセン平均雨量(時間～日)の関係を 2003 年から 2004 年にかけての豪雨事例を対象に分析した結果、雨域移動速度が速いほど強雨の過小評価度合いが大きいことを発見し、その関係を利用して、地上雨量観測データを用いることなしに衛星観測雨量を自律的に補正するアルゴリズムを開発した。その効果を図 9 に重ねて赤プロットで示す。吉野川流域だけではなく、利根川流域や川内川流域も含め、両者の相関を大幅に改善したことがわかる。IFAS にはこの白石らによる自己補正手法を実装している。GSMaP と IFAS の組み合わせによる自己補正衛星雨量は、地上雨量観測体制が不十分な河川において洪水予警報体制を構築するに当たって、一つの有効な情報源になるものと期待される。

図 10 は、総降雨量が地点によっては約 3000mm に達し、死者・行方不明者が 700 名以上に及んだ 2009 年 8 月に台湾を襲った台風 Morakot の総降雨量分布を衛星観測雨量 GSMaP により推定した結果を示す²⁸⁾。図 10 (左)に実測の総降雨量コンター図を、図 10(中央)に GSMaP(生データ)による対象期間内総降雨量コンター図を、図 10(右)に ICHARM が開発した雨域移動情報を活用した衛星観測雨量補正手法を用いて補正を実施した補正 GSMaP による総降雨量を示す。GSMaP 生データ(図 10(中央))では、実測雨量コンター図(図 10(左))と比べて全体的に降雨を過小に評価(実測で 2000mm 程度の総降雨量を 900mm 程度に過小評価)しているが、台湾南部に集中した降雨分布の偏り傾向は、GSMaP 生データ(図 10(中央))においても比較的よく再現できている。さらに、ICHARM において開発した雨域移動情報を活用した衛星観測雨量補正手法を用いて GSMaP 生データを補正することで、図 10(右)に示すとおり、若干領域を過大評価気味ではあるが、定量的な雨量値自体は実測雨量に近づき、台湾南部の強雨域を再現できている。以上の事例は、GSMaP 生データが雨量の空間分布を比較的的確に把握しているとともに、四国・吉野川の事例で最適化を行った ICHARM 開発の衛星雨量自己補正式のそのままの係数値の組み合わせによって、リアルタイム地上情報を全く用いることなく、定量的にも現実に近いレベルの豪雨域の降雨量を再現することができた事例である。

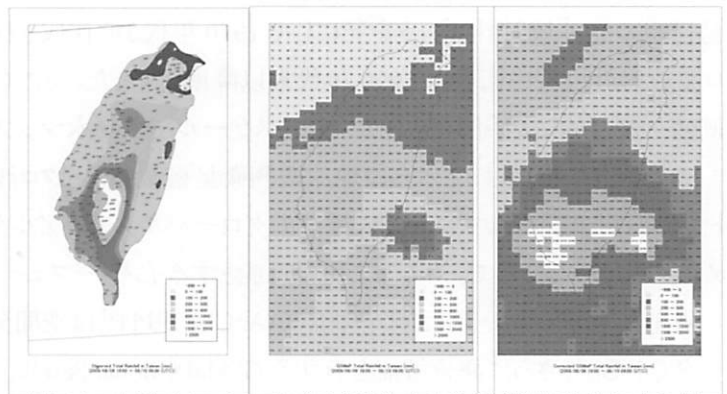


図 10 台風 Morakot における地上雨量と衛星雨量による総降雨量比較図(2009/08/06 18:00 ～ 08/10 09:00)(UTC)
(左:地上観測雨量、中央:GSMaP 生値、右:自己補正 GSMaP)

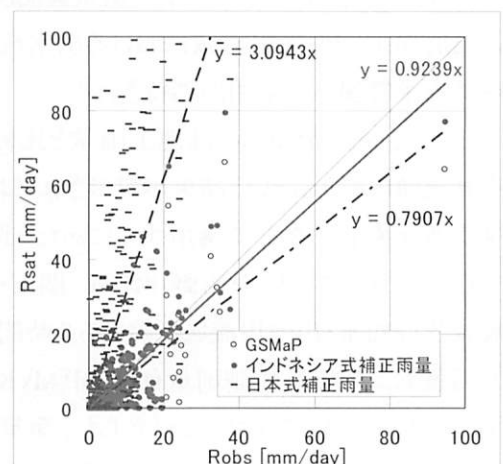


図 11 インドネシア・ソロ川有域における自己補正式係数最適化の効果(黒プロット:白石ら(2009)の係数使用、赤プロット:最適化係数使用)

しかしながら、自己補正の式形は有効であるもの、地域やイベントによっては、それぞれ最適な係数値を採用した方が良い結果を生む事例があることが分かってきた。また、この自己補正式が有効であるための少なくとも一つの必要条件も見えてきた。

図 11 は、インドネシアのソロ川流域(16,100km²)において、2007 年 12 月～2008 年 12 月の期間の地上日雨量との比較を行った事例である。白石ら(2009)の係数をあてはめると同様に過大評価となった。そこで、20mm/day 以下の弱い雨量は GSMaP 生値でも比較的相関が良いためそのままとし、それを超える強雨のみについて、係数値を最適化することで、相関を改善した。しかし、それでもまだ衛星雨量が大きく過大にプロットされるデータが残っている。そのときの観測状況を調べてみると、

マイクロ波放射計を搭載した衛星が現実には飛来しないために観測できない時間帯に、静止衛星による赤外放射データを使って得られる雲移動ベクトルを用いて、過去のマイクロ波放射計観測雨量を外挿補間している時間帯に、誤差が拡大していることがわかった。図 12 は、上記の台風 Morakot による台湾豪雨について、台湾全土平均時間雨量について、GSMaP 生データ、白石ら(2009)の係数による GSMaP 自己補正雨量をプロットして比較したものである。ここでは、自己補正係数について、流域平均値ではなくグリッド別に最適化を行った台湾補正式による GSMaP 自己補正雨量も併せてプロットしている。マイクロ波放射計による実際の観測が行われた時刻から、赤外データによる外挿補間を行っている経過時間数を併せてプロットしているが、その経過時間が増えるに従って、GSMaP 自己補正雨量の誤差も拡大していることがわかった。以上より、衛星観測雨量を適切に補正させるためには、降雨発生・発達時により多い頻度でマイクロ波放射計による観測データがあることが望ましいことがわかる。

JAXA と NASA は現在、地球全体の雨や雪の降水を複数の人工衛星を使って観測する全球降水観測計画(GPM)を進めている。この GPM 計画により、マイクロ波放射計を搭載する副衛星群が複数打ち上げられることから、約 3 時間毎にほぼ全球で補間ではないマイクロ波放射計による観測が可能になる。現時点では、台湾や菊池川での事例でわかるように、6～7 時間以上もマイクロ波放射計による観測データが存在しないこともめずらしくはない。少なくとも3時間に1回の観測が可能となれば、その頻度の増大だけで、相当程度の精度改善が期待できる。この GPM 計画の完全実現に期待するところは大きい。

上記の事例は、主に地域によって、また、マイクロ波放射計観測データからの外挿状況によって、GSMaP 雨量の誤差特性が違うことを示したものであった。一方、そもそもこのような誤差が生じるマイクロ波放射計データからの降雨量逆推定アルゴリズムの原理に立ち戻って考えた場合、イベントや季節毎に誤差特性が変わる可能

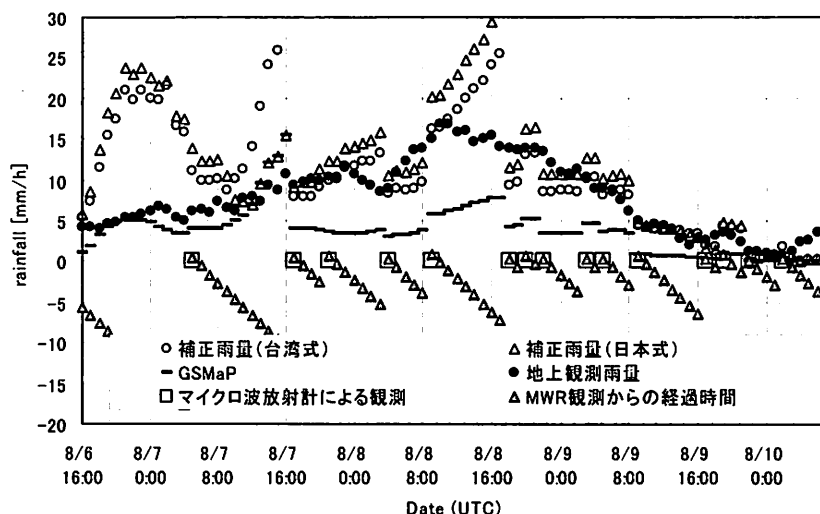


図 12 台風 Morakot における地上雨量、GSMaP 雨量、同自己補正雨量(白石ら(2009)の係数、台湾最適化係数)の関係の時系列変化(マイクロ波放射計による直接観測からの経過時間を同時にプロット)

性も指摘できる。GSMaP_NRT においては、世界を5度四方のグリッドボックスに分割し、そのボックス毎に、陸上では6種類の降水タイプ(降水鉛直プロファイル)を事前に設定するとともに、その降水タイプを3ヶ月毎に変化させている。このことは、仮に同じ特性の雨が3ヶ月毎に降ったとしても、逆推定アルゴリズムから算出される降雨量値が異なる可能性を示す。谷口ら(2011)²⁹⁾は、同じ台湾・台風 Morakot による豪雨事例を用いて、気象再解析データから風・水蒸気の収束場を抽出して地形性降雨の発生域を同定し、その領域に、地形性降雨に適した降水プロファイルに基づく逆推定式(Lookup Table)をあてはめることで、地形性降雨域における降雨量の過小評価の補正を試みている。工学的・経験的な補正を行う前に、気象モデル情報等を活用することで抜本的に衛星雨量観測値(逆推定値)そのものの精度を改善しようとする試みであり、今後の進展が期待される。

(3) IFAS において衛星雨量データを利用する意味

IFAS を開発した当初、衛星雨量を活用することで世界中どこでも洪水流出解析計算を可能としたことを特長

として強調したあまり、衛星雨量データがあれば、地上雨量は不要なのか、という誤解を受けることがある。この点について、ここで補足説明しておきたい。図 13 は、IFAS をミャンマー国のイラワジ川右支川のチンドウィン川(Hkamti 地点: 27,420km²)に適用した事例である。宇宙航空研究開発機構(JAXA)が準リアルタイムで提供している衛星雨量データ GSMaP_NRT について、ICHARM の自己補正手法³⁾を適用した上で IFAS に入力して 2008 年雨季の流出解析を行った結果である。決して高精度の結果が得られ

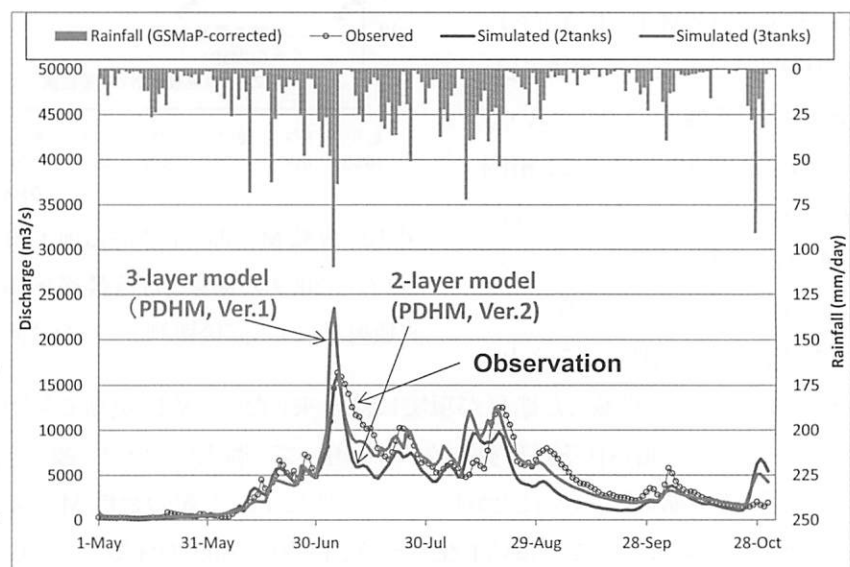


図 13 ミャンマー・Chindwin 川(27,420km²) への IFAS 適用事例(土研分布モデル Ver.1 (3 層)、Ver.2 (2 層)の比較)

ているとまでは言えないが、2008 年の特に大きく危険な3つの洪水を概ね検知できており、地上雨量計が1基しかない水文観測データ不足流域への衛星雨量活用事例としては成功と言ってよいであろう。しかしながら、上記の補正手法は常に適切に機能するとは限らず²⁸⁾、特に短時間に集中するスコール性の降雨が頻発する熱帯雨林地域等では、現段階では良好な結果を得ることは難しい。具体的なローカルな地先における避難の可否を判断することを目的とした洪水予警報として、

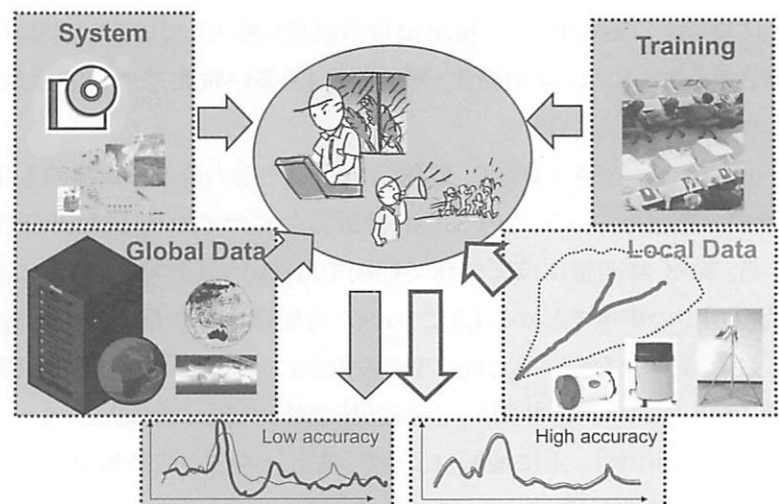


図 14 グローバルデータ活用を契機とした洪水予警報システム整備と、その精度改善のための水文観測ネットワーク整備の促進

高精度の洪水流出解析結果を確実に得るためには、流域の大きさ等による程度の差こそあれ、高密度な地上雨量および水位流量観測網が必要不可欠であることは言うまでもない。実は、同じことは、モデル定数をグローバルな GIS データから推定することの妥当性についてもあてはまる。あくまで、そこでの標準設定値は1次近似的な推定値に過ぎない。高精度の洪水予測計算を行うためには、雨量分布や水位流量に関する最も信頼できる現地観測データを用いた定数のチューニングが必要である。すなわち、現地の防災担当者は、グローバルデータを基盤として、水文観測データ不足流域でも洪水流出解析を可能とする IFAS を自らの力で構築し適用することで、洪水ハザードに対する情報ゼロの状況からはまずは解放されるが、しかし、同時にグローバルデータのみを頼ることの限界をも十全に理解するはずである。そこで、自らの問題意識のもとに、次のステップとして精度向上のための地上観測体制の強化を推進することになる(図 14)。このような Plan-Do-Check-Action (PDCA) サイクルをうまく機能させることで、IFAS が、洪水予警報システムの普及と精度向上について、発展途上国自らのオーナーシップ意識を持って迅速かつ効率的に推進する起爆剤となることを ICHARM は期待している。

4. IFAS の適用事例

すでにミャンマー・チンドウィン川への適用事例は述べたが、それ以外の典型的な事例を1つ紹介する。

図 15 は、2010 年にパキスタン・インダス川で発生した大洪水を IFAS で再現を試みた事例である。インダス川は、全体で 100 万 km² 以上という極めて広大な流域面積を有しており、中下流部での大規模な氾濫が注目を集めたが、実は、最も大きな人的被害が生じたのは上流部における Flash Flood によるものであり、最も大きな人的被害が生じていた右支川のカブール川のノウシェラ地点(上流域面積: 92,600km²)に適用を行った。

GSMaP_NRT の生データや NASA-3B42RT を用いたときは、洪水の立ち上がりをかなり過小評価しているが、ICHARM の GSMaP 自己補正雨量を用いたときに、水位計が破壊される前の水位・流量データが残っている

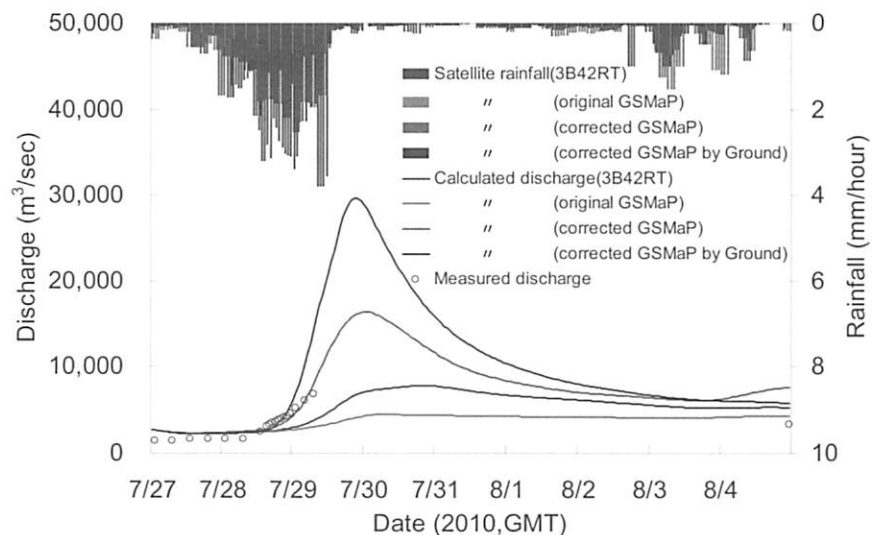


図 15 インダス川右支川カブール川(92,600km²)への IFAS 適用事例
(2010/7/27～8/5)

る洪水立ち上がり部について、モデル定数としてデフォルト値を使っているにも関わらず極めて良く再現した。一方、広大な流域内にわずか7箇所であるが、当時、日単位の地上雨量計データが利用可能であったため、衛星雨量生データのティーセン分割日雨量分布との比率による直接的な補正を試みた。その結果は、逆に流出波形を大きく過大評価することとなった。このような過大評価について、仮に降雨量観測値に原因を求めるならば、雨量計密度が粗いために、一部の強雨域に引っ張られて、狭くはない弱雨域でも大きな過小評価にもとづく補正係数を衛星雨量に対して与えてしまっているためと想定される。しかし、流量観測値に原因を求めるならば、観測所地点より上流側で洪水が氾濫することでピークが逡減していた可能性も否定できない。得られる現地

観測データや情報が限定され、かつ、その精度が十分明らかでない状況の中で降雨～流出解析を行うことの難しさを再認識させる事例である。但し、衛星雨量(自己補正值)のみを与えた流出解析でも、当地の Flash Flood による洪水流出の立ち上がりのタイミングを的確に再現することができたこと、また、当該イベントにおいては融雪流出の影響は小さいと考えられることは、少なくとも確からしいと言える。

5. 今後の課題

IFAS は、引き続き機能の拡張等のための改良を継続しているが、それと並行して、Ver.1.2 を公表した 2009 年 前後から、国内外において積極的に研修とセットにした普及活動を展開してきた。既に 50 ヶ国以上の技術者に IFAS の利用法に関するトレーニングを実施している。ICHARM としても、IFAS の実利用を直接展開するために、アジア開発銀行や国連ユネスコ等の支援による IFAS 基盤の洪水予警報システム整備プロジェクト(例:インドネシア・ソロ川、パキスタン・インダス川)に関与しているが、IFAS セミナーを受講した技術者が、現地河川において 独自に IFAS の適用を行う事例(例:台湾、ベトナム、インドネシア、ミャンマー)も少しずつ出てきている。このような積極的な展開の中で、様々な改良意見やニーズも明らかになってきているところである。

その中の一つは、氾濫解析・予測へのニーズである。日本では、ダムや堤防といった治水施設整備水準が比較的高いため、洪水氾濫が生じることを前提としない流出解析と河道内での水位予測が実態・ニーズと比較的合っている。しかし、治水施設整備水準が極めて低い発展途上国では、中下流部では高頻度に氾濫を繰り返しており、洪水氾濫が生じることを前提とした中下流部での流出・水位予測が強く求められる。また、洪水氾濫そのものの予測へのニーズも高い。しかし、現行バージョンの IFAS(Ver.1.3)では、河道追跡は Kinematic Wave 法に限定され、氾濫解析モジュールも含まれていない。

そこで ICHARM では、降雨、流出から氾濫に至るまでを一体的に解析する降雨流出氾濫解析モデル(RRI model: Rainfall-Runoff-Inundation model)の開発も並行して進めている^{30), 31)}。その最大の特徴は、氾濫原での浸水拡大過程や低平地を含めた降雨流出過程を適切に計算するため、拡散波近似した浅水方程式による 2 次元解析を実施し、各グリッドセルにおける流出方向とその流速を周囲グリッドセルの水位によって一体的に算定する点である。2011 年 9 月以降に顕在化したタイ・チャオプラヤ川における洪水氾濫災害では、ICHARM としてバンコク周辺の下流域では氾濫が長期化することを、衛星雨量と RRI モデルの組み合わせにより早い段階で予測し³²⁾、国内外の注目を集めた。国連ユネスコ支援によるインダス川への洪水予警報システム構築プロジェクトでは、極めて広大なインダス川流域を上中流部と中下流部に分割し、上流側に IFAS を適用した上で、その解析結果を下流側に構築する RRI モデルに与えることにより、それぞれのモデルの特長を生かしつつ、全体として効率的・実用的な極端洪水・氾濫の解析・予測システムを構築する計画としている。

一方、大陸スケールの大河川における季節的洪水に代表されるように、広大な河川流域では、洪水と低水、治水と利水が常に一体となって生起している。また、統合的な洪水管理はもとより、そもそも、統合的な水資源管理への機能拡張へのニーズは非常に高い。このため、ICHARM では、ダムにおける流水管理機能をより的確に再現できるようにすることを手始めに、人工的な水利用システムへの考慮など、統合的な水資源管理に資する基盤システムとしての機能拡張を今後実施していく計画としている。

しかしながら、IFAS 単体での全てのニーズへの対応や機能拡張には限界もあると想定される。国内外の最新の研究開発成果を迅速かつ柔軟に取り込み反映させることも今後ますます必要となると考えられる。このことから、IFAS としての簡便な適用性・機動性を生かしつつ、CommonMP の柔軟な拡張性もシステム開発を可能とするために、CommonMP への対応も今後行っていく計画としている。

以上、大きな枠組みでの課題を述べたが、一方で、流出解析モデルそのものとしての本質的な技術的課題も数多く残されていると言わなければならない。例えば、洪水流出解析を行うための初期条件の設定手法である。例えば、連続的にモデルは計算しておき、初期条件を日頃から準備しておく方法が考えられるが、そこで流出計算結果が観測値と整合していない場合に、どのように初期条件を修正するか、という問題である。従来の貯留関数法等の集中定数型モデルでは、比較的単純なフィードバック手法で対応することが可能であったが、数多くのメッシュを抱える広大な河川流域における分布定数型モデルにおいては、そのフィードバック調整をどうすべきかについて、必ずしも手法が確立していない実態がある。もちろん、土研分布モデルを国内に適用するにあたっては、一つの方策はすでに提案済みであるが¹⁷⁾、さらに問題を複雑にするのは、そのようなシステムを、水文観測データが不十分な10万km²超スケールの河川流域にも適用しなければならない、という現実である。そもそも、降水量の分布を雨量観測整備が不十分な発展途上国の河川流域において、どのように定量的に精度良く把握するか、という最も重要な課題についても、現段階で明確かつ決定的な回答があるわけではない。例えば、インダス川上流域では、氷河・積雪域が広がっているため、現状では衛星雨量ではしばしば欠測が生じていることがわかっている。衛星雨量、地上雨量ネットワークの現実、ともに多くの課題を抱えている。そのような中で、グローバルな数値気象予測データをダウンスケーリング³³⁾や衛星雨量等との同化等を通して活用していく手法の開発と検証は、今後大いに進展を期待したい分野である。

また、インダス川のような急峻な高標高の氷河・積雪域や半乾燥地を含む河川への適用も今後ますます増えていくことを想定すると、積雪・融雪流出過程や、よりの確な実蒸発散量評価への対応がIFASにも必要である。降水量分布の評価と同様、ここでも、それらの信頼性の高い評価を可能とするための観測データの確保とセットとなった検討が必要である。さらには、洪水氾濫解析の妥当性を検証するための観測データが、質的・量的に不足している点も問題点である。これらの課題を克服するためには、地球観測衛星からのリモートセンシングによる積雪や洪水氾濫に関する物理的情報の収集と解析が、非常に重要な手段になるものと考えられる。

6. おわりに

ICHARMでは、発展途上国域で特に頻発している水災害を減らしていくための方策としての、洪水ハザード・リスクの定量的な理解の視点および洪水予警報システム整備の重要性を強く意識し、それらを実現する手段として、グローバルに入手可能な情報を活用した総合洪水解析システム(IFAS)やRRIモデルなどの研究開発を進め、現地ニーズの高まりに応じて、現地での適用・実践も推進しているところである。しかしながら、上に述べたように、積み残しの技術的課題も多い。水文データが不足している流域が世界にはまだ数多あるという現実をふまえて、現地のニーズに対応した技術的処方箋を的確に出せるようにするためにも、まだ多くの調査研究が必要である。我々は、例えば1万km²に1箇所しか雨量計がないという現実を認識した上で、現有の観測・モデリング・解析技術を如何に駆使して、的確に洪水・水資源管理を行っていくか、という、グローバルな展開を求められている水文学として、最も本質的で大きな課題に直面しているのである。これらの問題に挑戦する研究の進展を是非とも期待したい。

ICHARMとしても、引き続き、関連する機関・研究者の方々と連携しながら、この分野の研究を総合的に推進していきたいと考えている。皆様の連携と叱咤激励をお願い申し上げたい。

引用文献

- 1) 中北英一 (2010) レーダーによる降雨観測と予測の最新動向について、河川、No.762、pp.20-27.
- 2) 向山栄 (2012) 航空レーザ計測技術から考える地表面モデル、平成 24 年度特別講演シンポジウム予稿集「最近の地形の計測技術と応用地質学への適用」、日本応用地質学会、pp.2-10.
- 3) 竹内邦良 (2007) メコンの人々のためのメコン研究、竹内邦良・福嶋義宏編著「メコンと黄河－研究者の熱い思い－文部科学省人・自然・地球共生プロジェクト課題6「アジアモンスーン地域における人口・自然変化に伴う水資源変化予測モデルの開発」成果報告、pp.5-18.
- 4) WMO (1974) International glossary of hydrology, WMO-No.385
- 5) <http://ks.water.usgs.gov/waterwatch/flood/definition.html>
- 6) Fukami, K., N. Fujiwara, M. Ishikawa, M. Kitano, T. Kitamura, T. Shimizu, S. Hironaka, S. Nakamura, T. Goto, M. Nagai, and S. Tomita (2006) Development of an Integrated Flood Runoff Analysis System for Poorly-Gauged Basins, Proceedings of the 7th International Conference on informatics (HIC2006), vol.4, pp.2845-2852, Nice, France.
- 7) 土木研究所、国際建設技術協会、他民間9社 (2008) 発展途上国対応洪水予警報システムに関する研究開発、共同研究報告書、No.386、土木研究所.
- 8) 杉浦友宣、深見和彦、藤原直樹、浜口憲一郎、中村茂、弘中貞之、中村和弘、和田高宏、石川正人、清水敬生、猪股広典、伊藤和久(2008)衛星雨量情報を利用した洪水予測システム(IFAS)の開発、河川技術論文集、vol.14、pp.53-58.
- 9) 土木研究所 (2009) 統合洪水解析システム(IFAS version1.2)ユーザーズマニュアル、土木研究所資料、No. 4149.
- 10) Sugiura, T., K. Fukami, N. Fujiwara, K. Hamaguchi, S. Nakamura, S. Hironaka, K. Nakamura, T. Wada, M. Ishikawa, T. Shimizu, H. Inomata and K. Itou (2009) Development of Integrated Flood Analysis System (IFAS) and its applications, Proceedings of the 8th International Conference on Hydroinformatics, Concepción, Chile.
- 11) Sugiura, T., T. Kawakami, G. Ozawa, K. Fukami, J. Magome and S. Nabesaka (2010) Experimental application of flood forecasting system (IFAS) using satellite-based rainfall, Proceedings of the 9th International Conference on Hydroinformatics, China.
- 12) Miyamoto, M., A. Sugiura, T. Okazumi, S. Tanaka, S. Nabesaka and K. Fukami (2012) Suggestion for an advanced early warning system based on flood forecasting in Bengawan Solo River Basin, Indonesia, Proceedings of the 10th International Conference on Hydroinformatics, Hamburg, Germany.
- 13) Kavvas, M.L., Z.Q. Chen, C. Dogrul, J.Y. Yoon, N. Ohara, L. Liang, H. Aksoy, M.L. Anderson, J. Yoshitani, K. Fukami and T. Matsuura (2004) Watershed Environmental Hydrology (WEHY) model based on upscaled conservation equations: Hydrologic module, Journal of Hydrologic Engineering (ASCE), pp.450-464.
- 14) 吉野文雄、吉谷純一、堀内輝亮 (1990) 分布型流出モデルの開発と実流域への適用、土木技術資料、vol.32、No.2、pp.54-59.
- 15) 鈴木俊朗、寺川陽、松浦達郎 (1996) 実時間洪水予測のための分布型流出モデルの開発、土木技術資料、vol.38、No.10、pp.112-117.

- 16) 安藤義久、虫明功臣 (1980) 丘陵地の自然状態の小試験流域における水循環機構、第 24 回水理講演会論文集、pp.71-78.
- 17) 猪股広典、深見和彦 (2007) 吉野川流域広域(洪)水危険度判断支援システムの開発、河川技術論文集、vol.13、pp.433-438.
- 18) Takeuchi K. et al. (2007) A BTOP model to extend TOPMODEL for distributed hydrological simulation of large basins, Hydrological Processes, vol.22, No.17, pp.3236-3251, 2007.
- 19) Beven, K.J. and M.J. Kirkby (1979) A physically based, variable contributing area model of hydrology, Hydrological Science-Bulletin, vol.24, No.1, pp.43-69.
- 20) <http://www1.gsi.go.jp/geowww/globalmap-gsi/globalmap-gsi.html>
- 21) http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/gtopo30_info
- 22) Huffman, G.J., R.F. Adler, D.T. Bolvin, G. Gu, E.J. Nelkin, K.P. Bowman, Y. Hong, E.F. Stocker, and D.B. Wolff (2007) The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis: Quasi-Global, Multi-Year, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scale. Journal of Hydrometeorology, vol. 8, No.1, pp.38-55.
- 23) Joyce, R. J., J. E. Janowiak, P. A. Arkin, and P. Xie (2004) CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution.. Journal of Hydrometeorology, vol.5, pp.487-503.
- 24) http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP_crest/index_j.html
- 25) K. Okamoto, T. Iguchi, N. Takahashi, K. Iwanami and T. Ushio (2005) The Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) project, 25th IGARSS Proceedings, pp. 3414-3416.
- 26) 瀬戸心太、芳村圭、沖大幹 (2008) 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.
- 27) 白石芳樹、深見和彦、猪股広典 (2009) 雨域移動情報を活用した衛星観測雨量データ補正方法の提案ー吉野川流域の事例解析ー、水工学論文集、, 第 53 巻、pp385-390.
- 28) Ozawa, G., H. Inomata, Y. Shiraishi and K. Fukami (2011) Applicability of GSMaP correction method to Typhoon “Morakot” in Taiwan, 水工学論文集, vol.55, pp.445-450.
- 29) 谷口藍奈、重尚一 (2011) 山岳域におけるマイクロ波放射計を用いた降雨推定の改良に向けて、日本気象学会 2011 年度春季大会.
- 30) 佐山敬洋、深見和彦、田中茂信、竹内邦良 (2011) 降雨流出氾濫モデルによるサイクロナルギス高潮氾濫シミュレーション、水工学論文集、vol.55、S529-534.
- 31) 佐山敬洋、藤岡奨、牛山朋來、建部祐哉、深見和彦 (2012) インダス川全流域を対象とした 2010 年パキスタン洪水の降雨流出氾濫解析、土木学会論文集 B1(水工学)、vol.68、No.4、1493-498.
- 32) http://www.icharm.pwri.go.jp/news/news_j/111024_thai_flood_j.html
- 33) 牛山朋來、佐山敬洋、深見和彦 (2011) WRF による再現雨量を用いたパキスタン・カブール川洪水シミュレーション、土木学会第 66 回全国大会年次学術講演会講演概要集、II-179.