

1. 6 水文情報の乏しい地域における人工衛星雨量情報の現地利活用に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 22

担当チーム：水災害研究グループ（水文）

研究担当者：深見和彦、杉浦友宣、鍋坂誠志、
猪股広典、馬籠 純、小澤 剛、川上貴宏

【要旨】

本研究は、発展途上国など水文情報が乏しい地域において人工衛星雨量情報を活用して、洪水流出解析及び洪水予警報が適切に行えるよう人工衛星観測雨量データの補正手法の検証、改良とケーススタディを踏まえた総合洪水解析システム（IFAS）の改良を行うものである。今年度は、ネパール、台湾およびインドネシア等における地上観測雨量を用いて、これまでに開発した人工衛星観測雨量の補正手法の検証を行うとともに、人工衛星雨量データの精度向上を目指して新たな補正手法について検討を行った。また IFAS 導入のケーススタディとして、インドネシア国ソロ川の現状を踏まえ、洪水流出解析と洪水予警報を実現するための IFAS の改良を行った。

キーワード：洪水予警報、人工衛星観測雨量、補正手法、総合洪水解析システム、ソロ川

1. はじめに

近年、世界的に洪水による災害が増加しており、河川整備が十分に進んでいない発展途上国においては、その被害軽減のために、予警報システムの配備が求められている。しかしながらこれらの国々においては、洪水予測の際に必要な雨量や流量といった基礎的な水文データが不足しており、洪水予警報の配備が十分には進んでいない現状にある。このような状況の中で近年、人工衛星から地球上の雨量を観測する技術が開発されるとともに、観測結果がインターネット等を通じて公表されつつある。水文チームではこれまでに、これら水文情報が乏しい地域での洪水予警報システムの整備に向け、人工衛星観測雨量を洪水予測に用いるための補正手法¹⁾や、それを実装し人工衛星観測雨量を用いた洪水予測システム構築の基盤ツールとなる総合洪水解析システム（Integrated Flood Analysis System, IFAS）を開発した。

本研究では、これまでに開発した人工衛星観測雨量補正手法の精度向上や現地状況に応じたシステム改良を行うこととしている。このため今年度は、台湾、インドネシア、パキスタンで地上観測雨量を収集し、人工衛星観測雨量補正手法の精度検証や精度を向上させるための新たな補正手法について検討を行った。またインドネシア国ソロ川を対象とし、導入後の運用を現地職員が行えるようワークショップを開催し、技術力向上を図るとともに、現地で意見交換を行って IFAS の改良点を抽出した。

本報告では、人工衛星雨量データの補正と現地状況を踏まえた IFAS の改良点について抽出し、機能増強などの改良を行った。

2. 衛星観測雨量の世界各国での精度・不確実性評価

今年度は衛星観測雨量を用いた洪水予警報システムの実運用へ向け、世界各国の異なる降雨タイプを対象とした衛星観測雨量の精度・不確実性評価および衛星観測雨量補正手法の適用性について検討した。その結果を踏まえ、改良版補正手法の開発および検証を実施した。

本研究では衛星観測雨量として GSMaP を利用している。GSMaP には複数の種類のプロダクトがあり、中でも準リアルタイム版の GSMaP_NRT²⁾（マイクロ波放射計データと赤外雲移動ベクトルを用いた時間分解能 1 時間、空間分解能 0.1 度のプロダクト）は、配信時間遅れが比較的 4 時間と短いことから、雨量観測所が乏しい開発途上国河川流域における洪水予警報への適用が期待されている。

衛星観測雨量補正手法の詳細については一昨年度の報告書に記載したため、ここでは省略する。補正手法の概要は、衛星観測雨量を用いて、3 時間累加雨量の各メッシュの雨量分布状況からその雨域移動量を推定し、その移動量に応じて衛星雨量に補正係数を乗じるものである。これは雨域移動量が大きい時に衛星雨量の誤差が大きいという、「GSMaP（下記参照）の地形性降雨に対する過小評価特性」に基づいて開発された補正手法である。

2.1 対流性降雨を対象とした精度評価：インドネシア

2.1.1 対象流域と検証期間

ここでは、日本のような台風性降雨や前線性降雨とは異なる降雨特性を持つ地域として、対流性降雨によって洪水被害が頻発しているインドネシア国ソロ川流域を選定した。ソロ川流域は雨季に発生する対流性の集中豪雨により毎年のように洪水被害が発生している。

対象流域は、図-2.1に示すとおりインドネシアのジャワ島中央部に位置しており、約16,000km²の流域面積をもつ。対象降雨は地上観測時間雨量データが観測されている2009年11月～2010年1月および、地上観測日雨量データが観測されている2007年12月～2008年12月のデータとした。



図-2.1 対象域：ソロ川流域 位置図

2.1.2 検証結果（時間雨量）

図-2.2に時間雨量観測所の位置図を示す。合計7箇所の観測所が上流域に集中して設置されている。この場合、下流域の降雨分布が不明であるため、流域平均雨量として雨量値の精度を検証することができない。そのため本研究では時間雨量観測所が設置されている上流域における流域平均雨量値について衛星雨量と地上観測雨量を比較した。その結果を図2.3に示す。GSMaP NRTは地上雨量を適切に再現できていないことが分かる。これより、降雨分布状況を瞬時値で表現しているGSMaP NRTは、時空間的に局所的に発生する対流性降雨を再現することが難しいといえる。衛星雨量補正手法を開発する場合、地上雨量と衛星雨量の間に相関関係がある必要がある。しかし、インドネシアの降雨において時間スケールで衛星雨量と地上雨量の関係は、無相関である。昨年度の成果では、日雨量で比較した場合には地上雨量と衛星雨量の間にある程度の相関関係が見られ、補正式を作成することが出来た。この成果を踏まえて、1時間データの精度検証から時間解像度を下げる（粗くする）ことにより地上雨量と衛星雨量の相関関係を見たものが図-2.4である。これより、3時間、12時間累加雨量では1時間雨

量と同様に相関関係はほとんど見られないが、24時間雨量でみたときに洪水被害が発生した日雨量（図中赤丸）に限りある程度の相関関係が地上雨量と衛星雨量の間に見られるのがわかる。1時間雨量スケールでは対流性降雨を表現することはできなかったが、日雨量スケールという時間的にマクロな雨量分布を見ればある程度の再現性が得られていることがわかる。対象流域には日雨量観測所が129箇所設置されていることから、次項において日雨量データを対象とした精度評価を行なう。

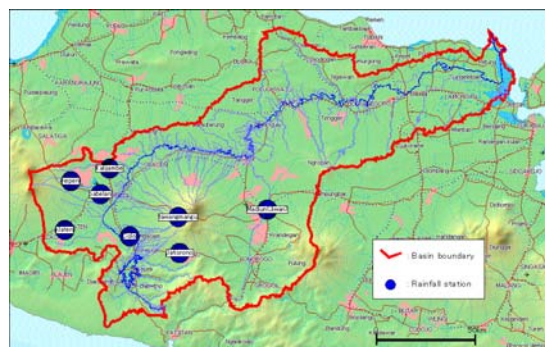


図-2.2 時間雨量観測所 位置図

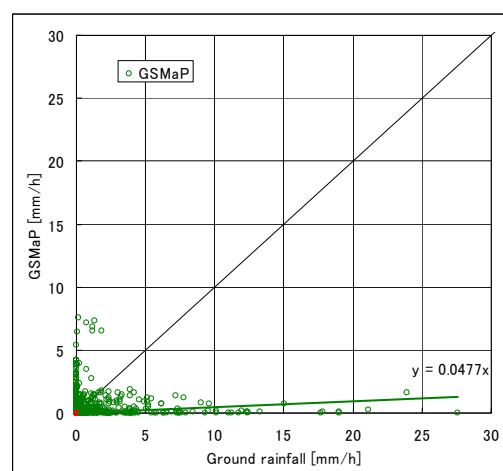


図-2.3 地上雨量と GSMaP[mm/h]の関係
（上流域平均雨量）

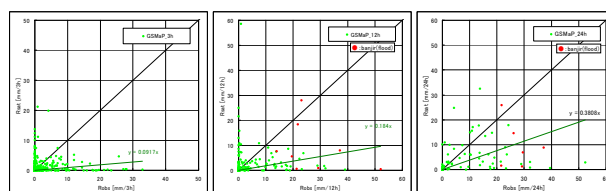


図-2.4 累加した地上雨量と GSMaP の関係
（左図：3時間、中央：12時間、右図：24時間）

2.1.3 検証結果（日雨量）

図-2.5に日雨量観測所の位置図を示す。合計129箇所の観測所が設置されている。これら収集した地上雨量

データを用いて2007年12月～2009年12月の約2年間の衛星雨量と地上観測雨量を流域平均雨量について比較した。その結果を図-2.6に示す。20mm/day以上の強雨については過小評価傾向にあるが、20mm/day以下の弱雨については適切に再現できているものと過大、過小評価されたものが混在している。本研究は洪水をもたらす豪雨を対象に検討していることから、この2年間の全降雨データのうち、対象流域内で実際に洪水被害が生じた降雨日のデータのみ抽出したものが図2.7である。洪水被害についてはBBWS Bengawan Soloが毎年発行している洪水レポート「LAPORAN PELAKSANAAN PIKET BANJIR」に記載されている情報を参考にした。図-2.7より、20mm/day以下の降雨については概ね良好に再現されているが、20mm/day以上の豪雨については過小評価傾向であることがわかる。この相関関係を用いて作成したGSmaP補正式が図-2.8であり、補正前後のGSmaPと地上雨量との関係を示したものが図-2.9である。これよりほとんどの洪水イベントについて適切に補正できたことがわかる。しかし、この補正手法は本来、地形性降雨を対象とした補正手法であり、それをここでは対象流域全体に対して適用しているため、地形性降雨が発生しない地域についても補正を行なっている状態である。そのため数百km²スケールで評価すると意図しない補正がされている地域も想定されるが、流域平均日雨量で見れば降水量の推定が可能であるといえる。

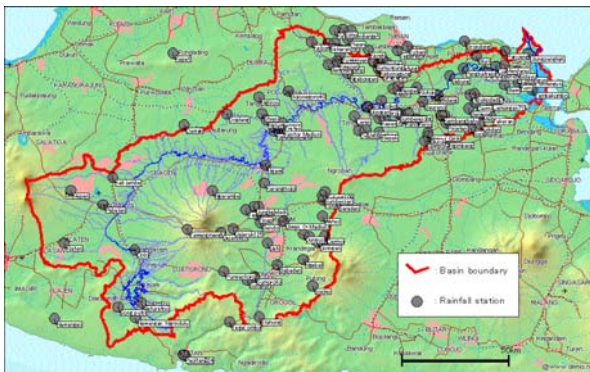


図-2.5 日雨量観測所 位置図

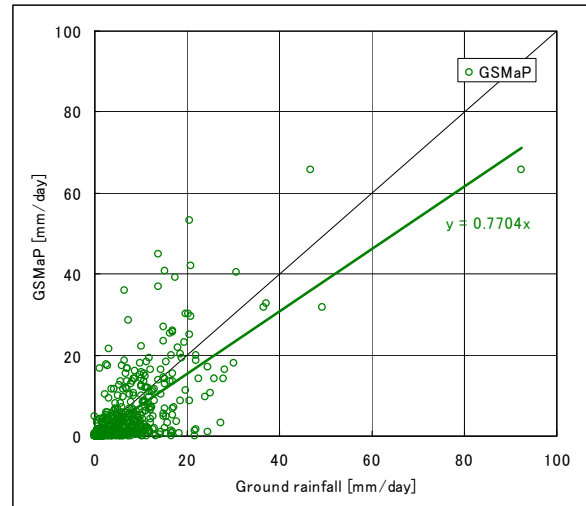


図-2.6 地上雨量とGSmaP[mm/day]の関係
(流域平均雨量)

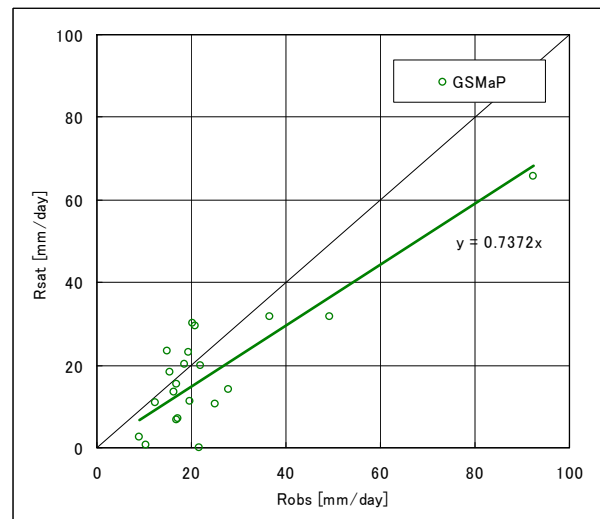


図-2.7 地上雨量とGSmaP[mm/day]の関係
(流域平均雨量) (洪水イベントのみ)

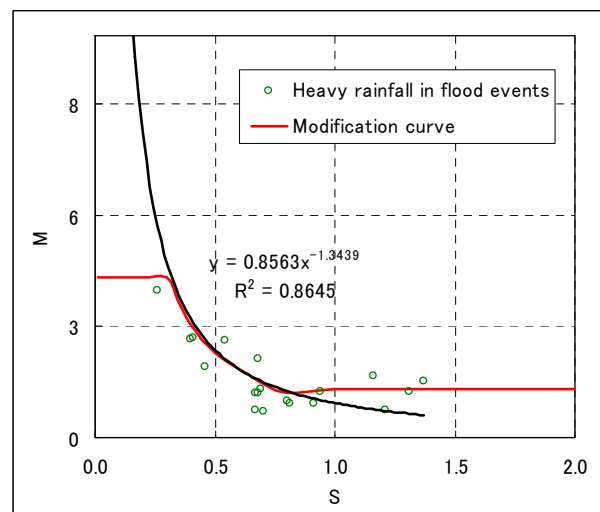


図-2.8 流域移動指標'S'と補正係数'M'の関係

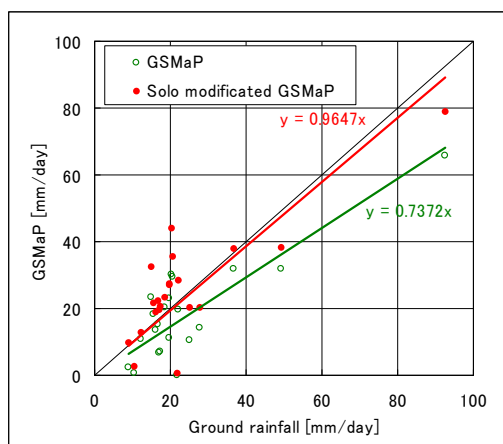


図-2.9 地上雨量と GSMaP[mm/day]の関係
(流域平均雨量) (洪水イベントのみ)



図-2.10 対象域：台湾 位置図

また図中には、マイクロ波放射計による観測がされた時刻 (図中黄色○) およびマイクロ波放射計による観測からの経過時間 (図中緑○、緑○が長く連なればその時間数分マイクロ波放射計による観測が行なわれていないことを示す。)を併記している。図中より、地上雨量に対して GSMaP_{NRT} は過小評価傾向にあることがわかる。また、日本式および台湾式の補正雨量は、マイクロ波放射計による観測がある程度の頻度で行なわれている期間については良好に補正されている。しかし、8月7日12時~16時頃のように、マイクロ波放射計による観測が長時間されていない時間帯では、補正雨量値が過大に補正されているのがわかる。その原因を把握するため、当該時間帯 (8月7日14:00~16:00 (UTC)) の3時間累加雨量を対象とした GSMaP と地上観測雨量の降水量分布図を図-2.12に示す。これより、GSMaPの降水量分布が実際の降水量分布と異なっていることがわかる。以上より、当該時間帯では実際と異なる3時間の降水量分布 (つまりは雨域の移動量) に基づいて補正したことにより、雨量値が過大に補正されたことがわかる。ここで、GSMaP_{NRT} は、マイクロ波放射計による観測が行なわれない期間において、赤外放射計の観測により得られる雲移動ベクトルを用いて降雨分布を移流させる補間方法をとっている。そのため、マイクロ波放射計による観測が長時間 (例えば10時間以上) 行なわれない場合、それだけ実際の雨域分布状況と GSMaP の雨域分布状況が大きく異なる可能性がある。その場合、図-2.11のように実際の雨域分布状況を全く反映していない雨域分布について補正を実施することで、過大な補正雨量を算定してしまう。その例が図-2.11の8月6日17時~4時ごろや8月7日8時~15時ごろ、8月8日10時~17時頃のような補正雨量値が突出した期間である。実際の洪水予警報システムに当該補正手法を導入した場合、このような異常値が算出されることが考えられる。そのため、実運用のためには、

2.2 台風性降雨を対象とした精度評価：台湾

2.2.1 対象流域と検証期間

ここでは、海外の河川流域における IFAS 導入 (衛星観測雨量を用いた洪水予警報システムの実運用) を鑑み、数万 km² スケールの領域を対象とした精度評価を実施する。対象域は台湾全土 (流域面積：36,180km²) とし、対象降雨は日本と同様の台風性降雨とした。対象降雨イベントは2009年8月に台湾で700名以上の死者・行方不明者を出した台風「Morakot」である。

総降雨量は約3,000mmに達する地点もあり、死傷者・行方不明者数は700名以上に及んだ。ここでは、この降雨イベントの台湾全土について空間平均した雨量を用いて衛星雨量データの精度検証および補正手法の適用性について検証した。

対象域は、図-5に示すとおり台湾全土の約36,300km²であり、対象とする降雨は台風Morakotの台風上陸から通過するまでの88時間分の時間雨量データである。なお、検証に利用した衛星降雨データはJAXAが配信している準リアルタイム時間雨量データ：GSMaP_{NRT}とした。

2.2.2 検証結果

図-2.11に地上観測雨量、GSMaP_{NRT}、日本の吉野川流域の降雨イベントデータを用いて作成した補正式 (以下、日本式) による補正雨量および台湾の降雨イベントデータを用いて作成した補正式 (以下、台湾式) による補正雨量のハイトグラフを示す。雨量値はすべて台湾全土について空間平均化した雨量を示している。

マイクロ波放射計による観測が長期間行われていない場合のGSMaP雨量値および補正手法の取り扱いについて、別途検討する必要がある。

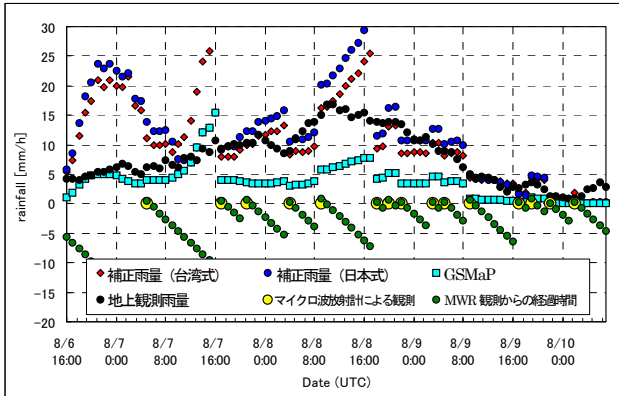


図-2.11 地上雨量、GSMaP、補正雨量（日本式、台湾式）
ハイトグラフおよびマイクロ波放射計による観測状況

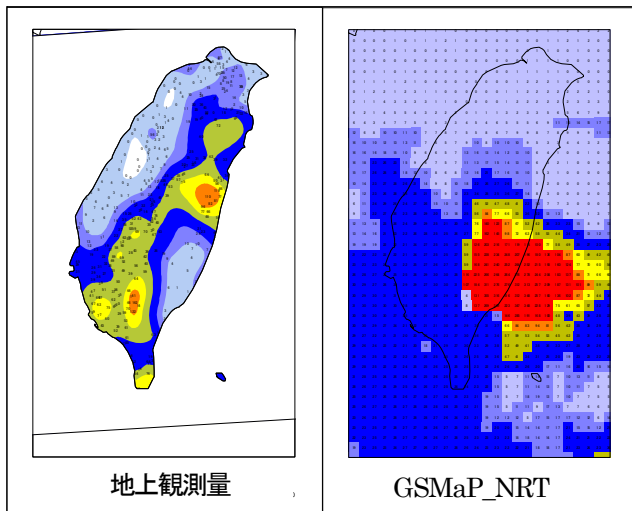


図-2.12 地上雨量（左図）およびGSMaP（右図）の
3時間累加雨量分布図（8月7日 14:00～16:00 (UTC)）

2.3 モンスーンを対象とした精度評価：パキスタン

2.3.1 対象流域と検証期間

ここでは、モンスーン特有の豪雨を対象としてGSMaPの精度評価およびGSMaP補正手法の適用性について検証する。対象とした流域はパキスタン国カブール川流域（流域面積：92,605km²）であり、当該流域では2010年7月末から8月にかけて約2,000名の死者数をもたらした甚大な洪水被害が発生している。対象降雨はこの洪水期間中で最も降雨量が多かった7月27日から31日の5日間の日雨量とした。地上観測雨量はPMDにより公開されている地上雨量計7箇所を利用し、地点ごとおよび流域平均雨量値について精度検証した。

2.3.2 検証結果

図-2.13に流域内に設置されている地上雨量観測所7箇所すべてについてGSMaPとの関係を示している。いずれの観測所においても大幅な過小評価傾向であることがわかる。また、流域平均雨量と比較したものを図-2.13に示しているが、ここでも過小評価傾向である。この降雨に対してGSMaP補正手法を適用した結果も同図に示されているが、ある程度補正は機能しているが、地上雨量と比較した場合には過小傾向にある。しかし、この検討では92,605km²に地上雨量観測所が7箇所のみであるため、地上雨量値にも多くの誤差があることに留意する必要がある。

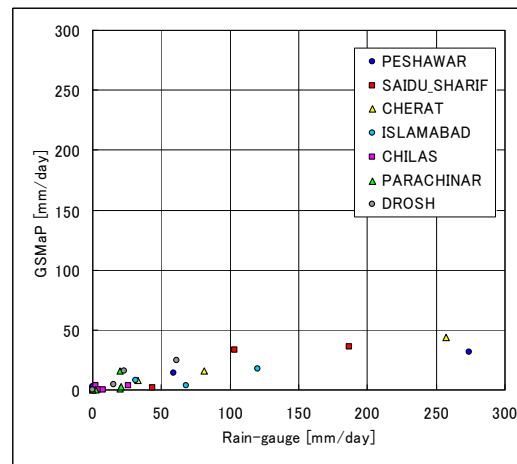


図-2.13 地上雨量（7観測所）とGSMaP[mm/day]
（雨量観測所地点ごと）

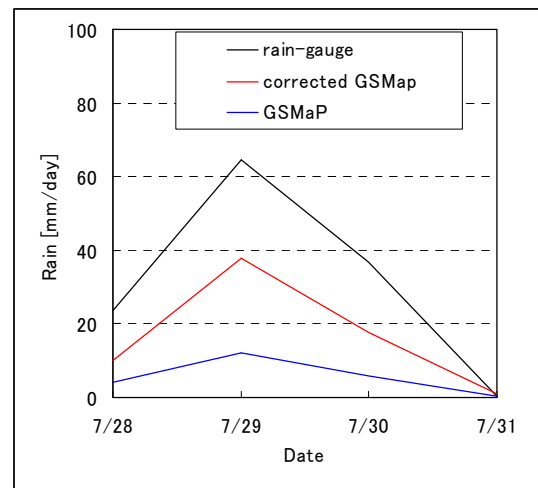


図-2.14 地上雨量、GSMaP、補正GSMaP[mm/day]
（流域平均雨量）

また、GSMaP_NRTはインダス川上流域の広範囲において欠測域が存在していることが判明した（図-2.15 インダス川上流域）。これは、GSMaP_NRTには固体降水の変換アルゴリズムを持っていないため、雨として再現していないことに起因している。さらに、世界のデータで当該

欠測についてみたところ、高標高部の降雪については欠測扱いとなっており、寒冷地域では広範囲で降水量を観測することができていない。

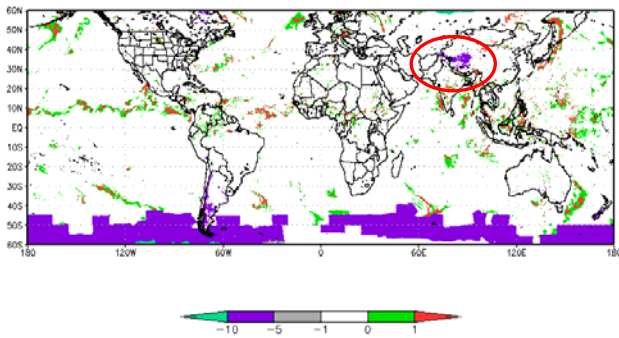


図-2.15 GSMaP 固体降水判定欠測領域 (紫色)

2. 4 衛星観測雨量の精度評価に関するまとめ

本項から得られた成果をまとめて以下に示す。

- 1) 衛星観測雨量データ :GSMaP はあらゆる降雨タイプ (台風性、対流性、モンスーン) について過小評価傾向であることが分かった。特に強雨については過小評価が著しい。
- 2) 既往のGSMaP 補正手法は地形性降雨に対するGSMaPの過小評価特性を改善することができる有効な手法である。さらに他のデータ、情報を用いずに補正が実施できる点で水文情報の乏しい地域における利便性が高い。しかし、補正手法は地形性降雨を対象とした補正手法であり、地形性降雨が発生しない領域においては適用できないという欠点がある。
- 3) マイクロ波放射計による観測頻度が低い場合、GSMaPの降雨分布が実際の降雨分布を再現できなくなり、精度が低下することが分かった。マイクロ波放射計による観測頻度を3時間に1回以上に増大させる全球観測計画 (GPM : Global Precipitation Measurement) の実現が衛星雨量の精度向上に寄与するところは大きいといえる。
- 4) 高標高部の降雪判定について、降水量に変換するか、降雪量を評価するアルゴリズムが必要であることが判明した。

近年、水文情報の乏しい地域においても複数の地上雨量観測施設が整備されつつある。新たな衛星雨量の補正手法として、リアルタイムの地上雨量データを用いて衛星雨量のリアルタイム補正が考えられる。これが可能になれば既往のGSMaP 補正手法のように地形性降雨の有無に関わらず適用できる。

以上より、次項において地上観測雨量データを用いた衛星観測雨量データの補正に関して検討する。

3. 地上雨量データを用いた衛星雨量補正手法の開発

地上雨量データを用いた衛星雨量データの補正 (以下、地上雨量補正) はレーダー雨量の地上雨量補正と同じ概念で実施できる。日本で採用されているダイナミックウィンドウ法などを用いて地上雨量に対する衛星雨量の比を衛星雨量に掛け合わせることで補正が可能となる。途上国では日雨量データが整備されていない場合が多い。しかし、日雨量ごとに地上雨量を用いて衛星雨量を補正する場合、マイクロ波放射計による観測頻度に伴う誤差が大きくなることが想定される。そのため、本研究では不確実性を出来る限り少なくするという考えの下、衛星雨量データがマイクロ波放射計により観測された時刻を対象に、時間雨量データを用いた補正手法について検討する。

また、地上雨量データを用いて衛星雨量を補正する場合、補正の精度は地上雨量観測所の設置密度に大きく依存する。そのため、補正手法を選定した後、地上雨量観測所の設置密度と補正後衛星雨量の精度について検証する。この関係性が明確になることで、衛星雨量を洪水予測等に利用している防災担当技術者が、地上雨量整備をどの程度進めれば衛星雨量の精度が向上するか定量的に理解できる。これは現地の地上雨量整備の推進に寄与することが考えられる。

3. 1 地上雨量補正手法の選定

地上雨量補正手法はレーダー雨量の地上雨量補正の技術が応用できる。例えば、日本で採用されているダイナミックウィンドウ法や既往の研究ではCokriging、距離重み法 (IDW : Inverse Distance Weighted interpolation) などを用いて衛星雨量を補正する。水文情報 (特に地上雨量データ) の乏しい地域において地上雨量補正を実施する場合、密な地上雨量データを利用するダイナミックウィンドウ法は適用できない。また、Cokriging 法は複数の地上雨量データから空間相関性を見出し、それと衛星雨量の空間相関性、それらの組み合わせを用いて降雨分布を推定するが、水文情報の乏しい地域では雨量観測所数が少ないため、地上雨量の空間相関性が求められない場合が出てくる。一方で、IDW 法はCokriging のような空間相関性を利用しないため一般的には精度は劣ると言われているが、雨量観測所数に依存せずに補正が常に実施できる点から、補正の際の制限がない。以上の理由から、本研究ではIDW 法を用いて地上雨量補正を実施し、その補正後衛星雨量の精度と地上観測施設の密度との関係性について検証する。

3. 2 使用したデータおよび地上雨量補正手順

地上雨量観測所密度と合成雨量の精度の関係について明らかにするためには時間雨量データが高密度に整備されている領域が必要である。また、雨量計設置密度が非常に低い地域（例：数万 km²に1つの観測所）も検討に含むため、数万 km²スケールの領域が適している。以上を考慮して、対象域は台湾全土（面積：16,180km²）とし、2章でも利用した台湾全土で観測されている時間雨量データを用いて検証する。対象とした時刻は図-2.16に示すピーク雨量前、ピーク雨量時、ピーク雨量後、無降雨域を含む後期降雨時の4時刻分（4時間）で、いずれの時刻も衛星雨量データはマイクロ波放射計を用いて推定された雨量データを採用している。これら雨量データについて、地上雨量観測所密度を以下の密度に間引いたものを用意し、この地上雨量データと衛星雨量を合成させた。なお、多く地上観測所が間引かれた場合には観測所の雨量値に精度が大きく依存することが想定されるため、ここでは1/5143km²以上に間引いたものについては3ケースの配置について準備し、合計22ケースについて検討した。

（地上雨量観測所密度の検討ケース）

1/167km², 1/228km², 1/400km², 1/800km², 1/1000km², 1/1573km², 1/2010km², 1/3000km², 1/5143km², 1/12,060km², 1/18,090km², 1/36,180km²

本研究において採用した地上雨量補正手法の手順を以下に示す。

- 1) 全ての地上雨量観測所地点において、補正倍率（地上雨量／衛星雨量）を算定する。…Aとする。
- 2) AについてIDW法を適用し、対象域全域の補正倍率分布を算定する。補正倍率分布はGSMaPのメッシュサイズである0.1度格子ごとに算定する。…Bとする。
- 3) 上で求められた補正倍率分布：Bを衛星雨量生値に乗じることで、補正後衛星雨量（補正雨量）を算定する。

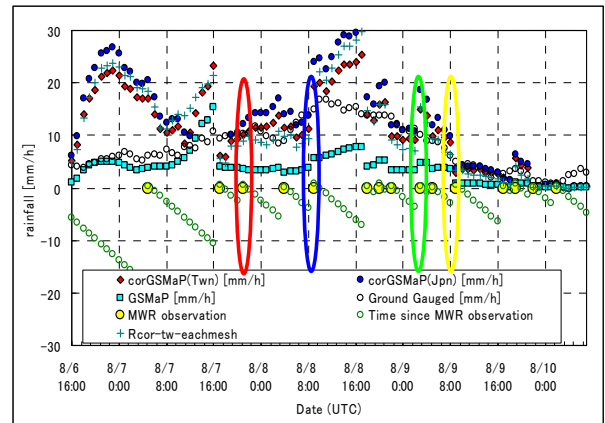


図-3.1 地上雨量補正を実施した時刻
(赤、青、緑、黄色で示した4時刻)

3. 3 検証方法

地上雨量補正はGSMaP、3B42RT、CMORPHの3つの衛星雨量プロダクトを対象に、以下の比較検討することで地上雨量観測所密度と補正雨量の精度の関係について考察する。

- 1) 衛星雨量生値との比較
- 2) 衛星雨量プロダクト間の比較
- 3) 地上雨量コンターとの比較

1)において、衛星雨量生値と比較し地上雨量補正の精度向上効果を確認する。2)において、地上雨量を用いた地上雨量コンターと合成雨量を比較し、衛星雨量を利用した効果について確認する。また、3)に示すとおり、3つの衛星雨量プロダクトを対象に1)および2)の検討を実施することで、地上雨量補正に影響を与える誤差特性について考察する。

なお、精度検証に置いて用いた指標は以下の4つである。

- 1) Error rate (相対誤差) [%] :

$$(R_{sat} - R_{obs}) / R_{obs} \times 100$$

- 2) MAE(平均絶対誤差) :

$$\frac{\sum_{i=1}^N |R_{sat} - R_{obs}|}{N}$$

- 3) RMSE (平均二乗誤差) :

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (R_{sat} - R_{obs})^2}{N}}$$

- 4) CE (効率化係数) :

$$1 - \frac{\sum_{i=1}^N (R_{sat} - R_{obs})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{R}_{obs} - R_{obs})^2}$$

ここに、 R_{sat} : 衛星雨量、 R_{obs} : 地上雨量、 N : 地

上雨量観測所数、 \bar{R}_{obs} : 地上雨量の平均値

3.3 検証結果 (衛星雨量生値との比較)

図-3.2 から図-3.4 に衛星雨量プロダクトごとの地上雨量観測密度と各精度指標の関係を示す。地上雨量観測密度ごとに補正雨量値の精度がプロットされており、色の付いた横線(青、赤、緑、黄)がそれぞれ図-3.1の時刻に対応した衛星雨量生値の精度を示す。同じ色の線(衛星雨量生値の精度)と点(補正雨量の精度)を比較すると、プロダクト・時刻によらず、1/5000 km²以上密に地上雨量が整備されている場合には衛星雨量生値よりも補正雨量の精度が高いことがわかる。しかし、1箇所/10,000 km²以上に疎である場合には補正雨量が衛星雨量生値より精度が低下したケースが多くなる。また、1/5000 km²以上密の場合でも図-2.19のRMSEに示す3B42RTと地上雨量1/5000 km²を利用したケースのように、いくつかの場合では補正雨量が衛星雨量生値より精度が低下したケースが見られた。この補正雨量の降雨分布図(図-3.6)を見ると、補正雨量が過大に補正されていることが分かる。これは衛星雨量が極小である場合、地上雨量に対する衛星雨量の比(補正倍率)が数百倍等になり、それを周辺の衛星雨量グリッドへ乗じることで生じていることがわかった。そのため、「無降雨域を含む後期降雨時」などの降雨強度が小さい時に多く見られる。これより、補正倍率の上限値(閾値)については別途検討する必要があるといえる。

3.4 検証結果 (衛星雨量プロダクト間の比較)

衛星雨量プロダクトのオリジナルデータの雨量分布図と地上雨量分布図を比較したものを図-3.6に示す。その他の時刻でも同様の事が言えるが、3B42RTが最も降雨強度の強い領域を再現しており、CMORPHやGSMaPと比べてError rateやその他精度指標で見ても精度が高いことがわかった。しかし、これら衛星雨量プロダクトと地上雨量を合成した補正雨量を見ると、GSMaPやCMORPHの精度が高いケースもあった。その一例として図-3.7に2009/08/07 21:00UTC時におけるGSMaPと合成した補正雨量の降雨分布図を示す。地上雨量観測所密度ごとの精度指標の平均値を3プロダクトについて算定すると、GSMaPが最も精度が高かった。衛星雨量オリジナルデ

ータの降雨強度で見れば3B42RTが最も精度が高かったが、補正雨量を考えれば3B42RTよりも降雨強度の低いGSMaPと合成したものの精度が高いことになる。これは図-2.14に示すように、降雨強度の絶対量が地上雨量を再現することよりも、地上雨量との比率(補正倍率)が面的に一定である(衛星雨量が地上雨量を一律に過小評価している)ことが補正には重要であるといえる。これは本補正手法が補正倍率を地上雨量に対する衛星雨量の比で表していることに起因する。

3.5 検証結果 (地上雨量コンターとの比較)

地上雨量と衛星雨量を合成した補正雨量が地上雨量のみによって推定された降雨分布よりも精度が低い場合、合成する利点がない。そこで、本項では地上雨量データのみから推定される雨量(地上雨量コンター)と補正雨量の精度を比較する。GSMaPを用いた補正雨量の精度について、精度指標:CEの数値と地上雨量観測密度の関係を4時刻それぞれ示したものを図-3.8に示す。後半の2時刻においては特に前述した過大な補正によって補正雨量の精度が著しく低下している場合があるが、1/10,000 km²より密な場合まではほとんど両者の精度に差がないことが分かった。しかし、それ以上間引いた疎の場合、いずれの時刻においても補正雨量の精度が高い傾向にあった。これは、今回対象とした降雨が雨域スケール数万km²という台風性降雨であるため、衛星雨量が再現するマクロ的な降雨分布情報が活かされるのが1/10,000~20,000 km²以上に間引いた疎の場合になってくるためといえる。以上より、地上雨量コンターよりも衛星雨量と地上雨量を合成した補正雨量の精度が高くなる場合は1/10,000~20,000 km²以上に間引いた疎の場合であるといえる。しかし、その精度は地上雨量観測所が密に整備された状況と比較するとはるかに低く、洪水予測へ適用するには不十分であることに留意する必要がある。また、ここでは台風性降雨を対象とし、3つの雨量観測所の配置についても3ケースのみ対象とした結果であるため、他の降雨タイプの場合の精度検証や地上雨量観測所の配置についての検討ケース数を増加させる必要がある。さらに、ここでは4つの時間帯における1時間雨量について面積雨量評価精度の比較を行ったが、もっと長い時間スケール(例えば、一雨の総雨量など)で検討した場合は、衛星雨量情報を活用した補正合成雨量が優位となる条件領域の範囲がより広がる結果となる可能性もあり、更なる追加検討が必要である。

1.6 水文情報の乏しい地域における
人工衛星雨量情報の現地地利活用に関する研究

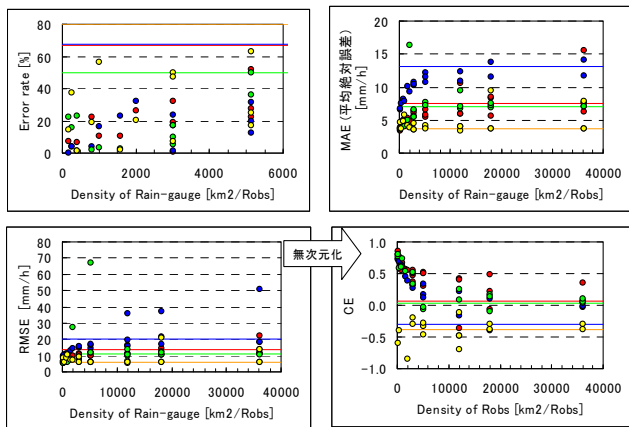


図-3.2 雨量観測密度と各精度指標の関係 (GSMaP)

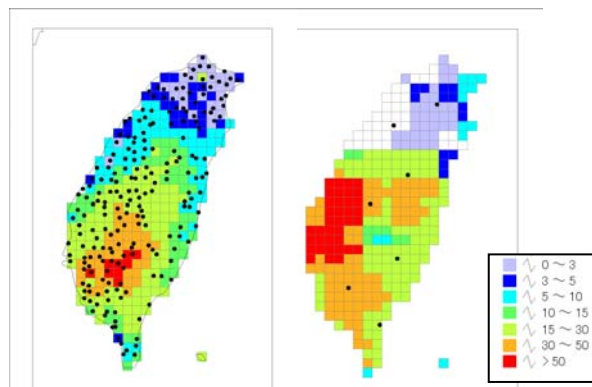


図-3.5 地上雨量 (左) と補正雨量 (右)
(3B42RT と地上雨量 1/5000km2 を合成)

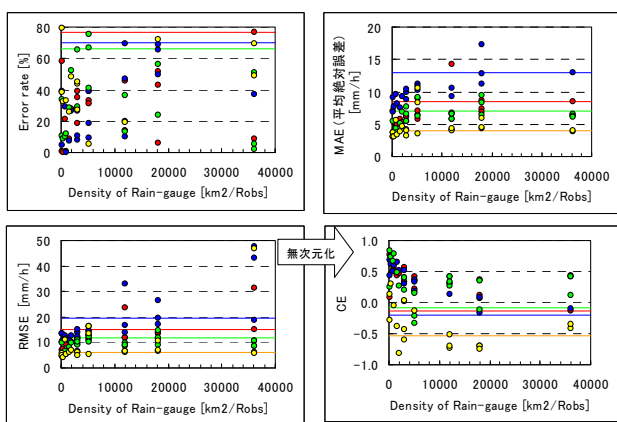


図-3.3 雨量観測密度と各精度指標の関係 (CMORPH)

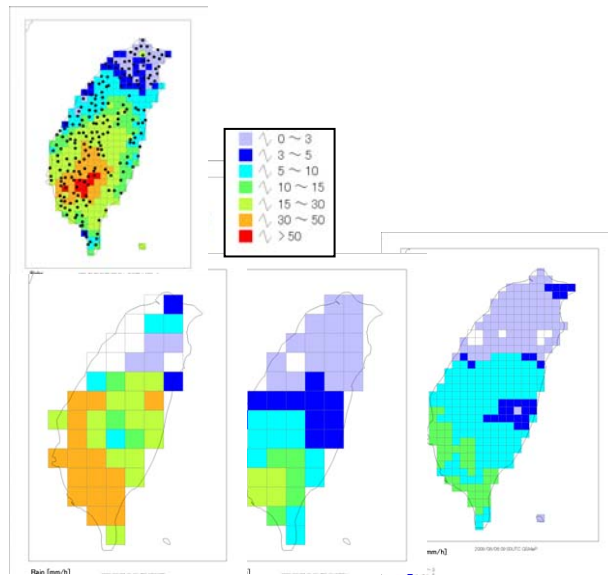


図-3.6 2009/08/08 09:00UTCにおける
地上雨量 (上段) と衛星雨量コンター図
(下段左: 3B42RT、中央: CMORPH、右: GSMaP)

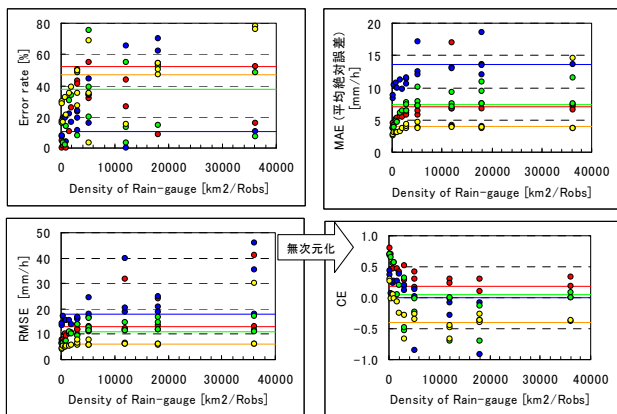


図-3.4 雨量観測密度と各精度指標の関係 (3B42RT)

1.6 水文情報の乏しい地域における
人工衛星雨量情報の現地利活に関する研究

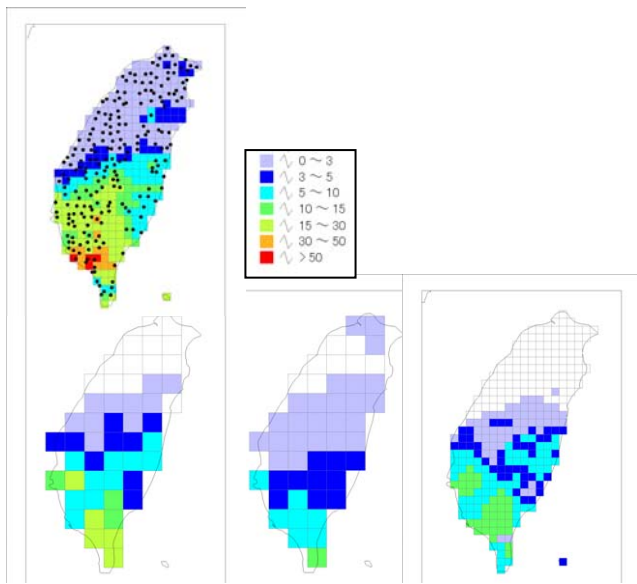


図-3.7 2009/08/07 21:00UTCにおける
地上雨量（上段）と衛星雨量コンター図
（下段左：3B42RT、中央：CMORPH、右：GSMaP）

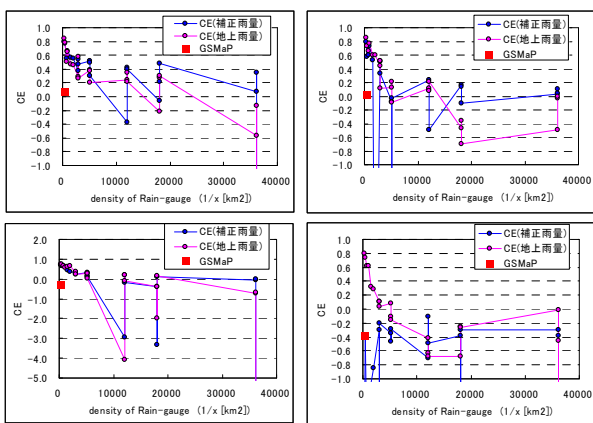


図-3.8 GSMaP を用いた補正雨量の各時刻の精度
（左上：赤、左下：青、右上：緑、右下：黄色で示す
図-2.16 の時刻の精度）

3.6 地上雨量補正手法に関するまとめ

本項から時間単位の雨量を対象として得られた検討成果をまとめて以下に示す。より長時間の雨量（例えば一雨総雨量）を対象とした場合には、異なる結論が得られる可能性があることも否定できない点に注意が必要である。

- 1) 衛星雨量生値と補正雨量の精度を比較すると、プロダクト・時刻によらず、1/5,000 km²以上密に地上雨量が整備されている場合には衛星雨量生値よりも補正雨量の精度が高くなる。

- 2) 1箇所/10,000 km²以上に間引いた疎の場合には補正雨量が衛星雨量生値より精度が低下したケースが多くなる。これは衛星雨量が極小である場合、地上雨量に対する衛星雨量の比（補正倍率）が数百倍等になり、それを周辺の衛星雨量グリッドへ乗じることで生じていることが理由である。そのため降雨強度が小さい時においても適切に補正を機能させるには、補正倍率の上限値（閾値）について検討する必要がある
- 3) 3つの衛星雨量プロダクトを用いた地上雨量補正を実施することで、地上雨量補正を効果的に機能させるには、用いる衛星雨量の降雨強度の再現性よりも、地上雨量との比率（補正倍率）が面的に一定である（衛星雨量が地上雨量を一律に過小評価している）ことが重要であることがわかった。これは本補正手法が補正倍率を地上雨量に対する衛星雨量の比で表していることに起因する。
- 4) 台風性降雨を対象とした場合、地上雨量コンターよりも衛星雨量と地上雨量を合成した補正雨量の精度が高くなる場合は1/10,000~20,000 km²以上に間引いた疎の地上雨量を用いた場合であることがわかった。しかし、その精度は地上雨量観測所が密に整備された状況と比較するとはるかに低く、洪水予測へ適用するには不十分であることに留意する必要がある。

4. ケーススタディを踏まえた IFAS の改良

4.1 IFAS を用いたソロ川モデル

インドネシア国ソロ川について、IFAS を用いてソロ川の流出解析モデルを構築した。表-4.1 にモデルの概要を示す。

表-4.1 ソロ川モデルの概要

	内容	備考
標高データ	Globalmap(Elevation)	
土地利用データ	Globalmap(Land cover)	
表層地質データ	CGMW	
解析エンジン	土研分布モデル Ver. 2	
流域界データ	HydroSHEDS を基に作成	
セルサイズ	2km	

このモデルに、改良した GSMaP 補正手法を用いて流出計算を行った結果が、図-4.2 である。この結果から見ると、改良版補正手法を用いた雨量データで流出計算を行った結果が、洪水の波形を的確に表現している。このこ

とから、洪水予警報のタイミングを的確に捉えることが可能になると考えられる。全体的に流量の値が小さいため、地上雨量計データや、水位流量観測データを活用したフィードバック手法も含む補正手法を今後幅広く検討する必要がある。

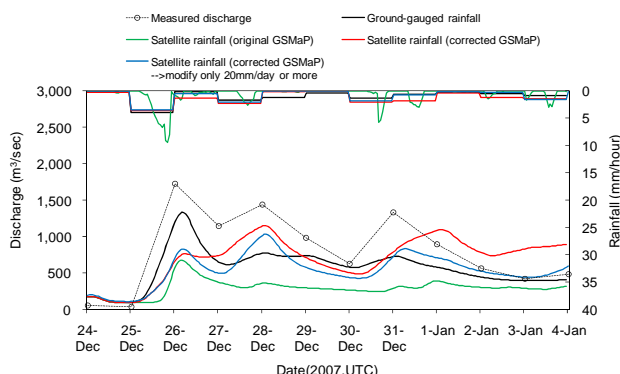


図-4.1 インドネシア国ソロ川 Jurug 地点計算結果

4.2 導入対象流域（インドネシア国ソロ川）の現状

インドネシア国ソロ川は、公共事業省ソロ川事務所が管理しており、洪水予警報を发出している。IFAS は、無料の地形データ、土地利用データを用いて、モデル構築を行い、無料の衛星観測降雨データを用いることとしている。これらの入手のためには、インターネットからダウンロードする必要がある。これまで、無料であれば、開発途上国などの水文情報が十分でない流域でもモデル構築が可能になると考え、IFAS の構築を進めてきたが、想定していなかった様々な環境の制約条件があることがわかった。

- ①電力供給が需要に追いついておらず、頻繁に停電する。
- ②インターネットプロバイダが突然回線を切断する。
- ③インターネットの回線速度が遅く（ダウンロード 140kb）、まとまったデータのダウンロードに非常に時間を要する。
- ④最新の計算機をそろえるだけの予算が確保できないため計算機資源が古く、IFAS を用いた計算の実行に十分な計算能力と記憶領域を有していない。

いざ、洪水の来襲が予想される段階において、上記①～③の状況が発生した場合、長期間の雨量データダウンロードを一括で行うと、ダウンロードだけに長時間を要し、計算を開始したくても開始できない。このため、普段からこまめにデータをダウンロードするモジュールを別途装備し、こまめに計算をしてアラートを発出する必要がある。

4.3 IFAS 改良点

IFAS ver1.2 は、GUI 環境を持った分布型洪水流出解析システムである。一般に分布型流出解析システムは、扱うデータ量が多く、集中型モデルと比較して多くの計算時間を要する。筆者がダム操作・管理に従事した際のただし書き操作や河川の急激増水を招く洪水流出の操作に直面した経験を基に考えると、適切なダム操作のためには、意志決定者が迅速に情報を入手し、流出計算を行い、その結果を考慮した上でダムの操作方法を検討し、下流域の流況の変化を即座に予見し、その都度瞬時的に的確な判断を行わなければならない。これらの判断のタイミングや洪水の規模を見誤り、適切に態勢構築ができなければ、その時点でダム操作は破綻することや、誤った操作を余儀なくされ、下流域で被害が出る事態を招く。つまり意志決定者の迅速かつ的確な判断を実現し得ない、多大な計算時間を要するシステムは実用に耐えない。洪水予警報であれば、洪水調節の最前線であるダム管理所ほどではないにせよ、的確な予警報発出の判断を行うためには、迅速な情報入手、流出計算を行い、意志決定者の判断及び避難のリードタイムをできるだけ多く確保できるシステムであることが極めて重要である。予警報システムの構築時には、この点について、特に留意する必要がある。ここで、IFAS の計算時間を見てみる。図-4.2 は、IFAS を用いて、計算対象期間別に流出計算に要する時間の関係を整理したものである。

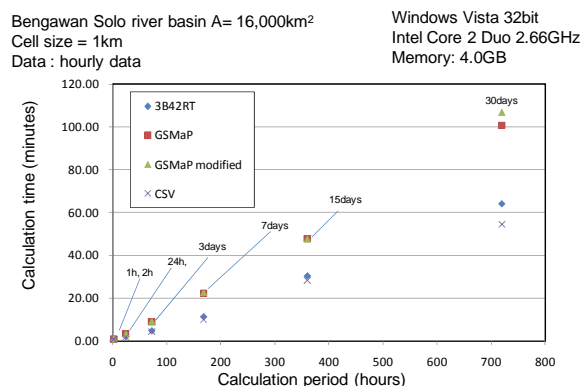


図-4.2 IFAS の計算対象期間と計算に要する時間の関係

ソロ川は、流域面積 16,000km² の河川で、洪水が発生する前の状態から計算を開始し、洪水流出の立ち上がりからピークまで計算するために、7 日間程度は最低必要となる。また場合によっては 15 日間洪水が継続することも想定される。この場合 IFAS は、1 ケースの計算に 30～40 分かかることになり、また数ケースの雨を考慮して計算した場合には、より多くの時間が必要になる。また、

1.6 水文情報の乏しい地域における人工衛星雨量情報の現地利活用に関する研究

IFAS ver1.2は、計算対象期間を変更すると、1時間分未来に時計が進んだだけで、IFASに取り込んだ雨量データを全て消去して、ほとんど同じデータを最初から取り込み直すようプログラムしているため、洪水が迫る中においても、多大な時間を浪費する欠点を抱えていた。これは、衛星観測雨量データの補正手法に起因している。衛星雨量データの補正は、最新時刻から3時間分さかのぼった雨データの移動量と誤差の関係から補正係数を設定するため、1時間新しいデータが追加された場合に最新時刻の補正雨量データが作成できないためである(図4-2上段)。洪水が迫る中、一刻も早く計算を終了させるため、衛星雨量データの補正手法を3時間毎の移動量から1時間の補正雨量を作成し、インポートした雨量データを全て削除しなくても新しいデータだけを追加して計算できるよう改良した(図4-2下段)。これにより雨量データのインポートから、計算終了までの時間を大幅短縮した。また、洪水が長期に継続する場合に備えて、計算期間を一度区切って終了させ、タンク状態を保存し、その状態を引き継いで、次の時間から計算させる機能を追加した。これにより、洪水が1ヶ月継続していても1週間毎に区切って計算を行うことが可能になった。従前のIFASでは、タンクの水位状態量は、パラメータから一律に決定するか、セル毎に水位を変える方法しかなかった。前者は、流域状態の継続性が失われ、後者は、極めて膨大な作業を要するため、洪水が迫っている中においてはほとんど不可能であった。この改良によって、洪水が長期化してもタンク状態量を適切に表現しながら、計算期間を分割し、計算結果が出るまでの時間を大幅に短縮した。

4.4 IFAS ver1.3 リアルタイム洪水予警報システム

4.2のとおり、開発途上国などの水文情報が不十分な流域においては、雨量データはこまめに入手し、こまめに計算を行っておく必要がある。またダウンロードはIFAS本体から切り離し、別のソフトで継続的にデータを蓄積していく必要がある。

- 自動で衛星雨量データをダウンロードし、雨量データをストックする機能
- 雨量データを自動で補正し、IFASに取り込む機能
- 自動で流出計算を行い、設定した閾値を超えた場合にアラートを発出する機能

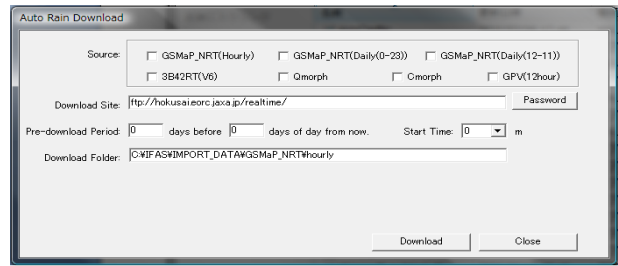


図-4.2 衛星雨量データ自動ダウンロード機能

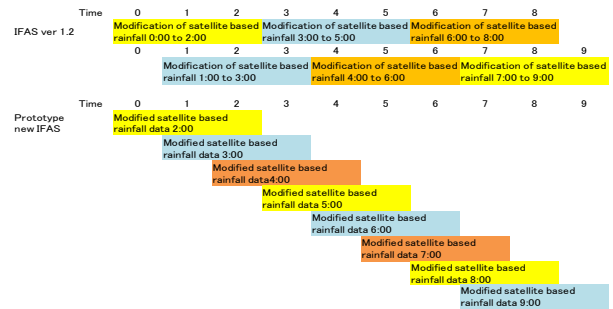


図-4.3 衛星雨量データインポートと衛星雨量データ

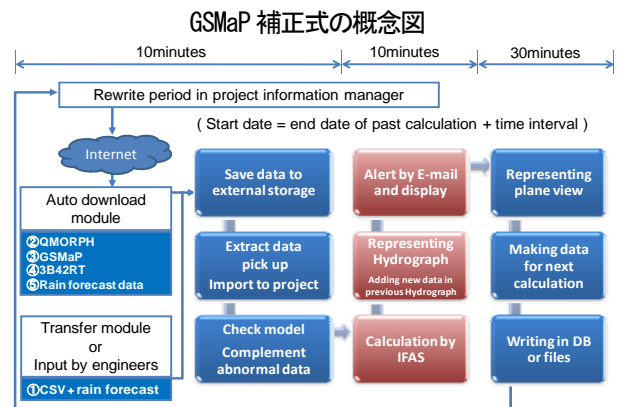


図-4.4 自動計算・自動アラート発出の流れ

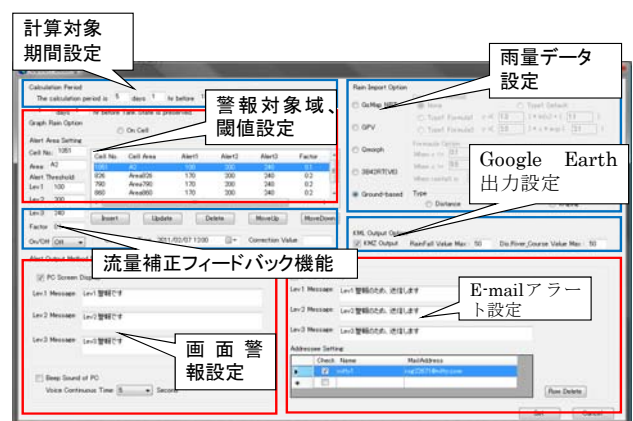


図-4.5 自動計算・自動アラート機能設定画面

5. まとめ

本研究では、水文情報が乏しい地域にIFASを導入することを念頭に置き、開発した人工衛星観測雨量補正手

法の検証及び精度向上を行うとともに、IFAS 導入河川としてインドネシア国ソロ川を選定し、現地でのワークショップ開催や意見交換を踏まえて、現地状況に応じたシステム改良を行った。これまでに開発した衛星観測雨量補正手法を海外の河川流域に適用し、現地の観測雨量値を利用し補正式を修正することで、世界各国の地域へ適用するため、精度を向上させた。これまで、流出解析ソフトウェアであった IFAS について、データ取得からアラート発出までに要する時間を大幅に短縮し、現場での予警報システムとしての機能を追加し、IFAS ver1.3 プロトタイプを完成させた。

IFAS を導入する予定のインドネシア国ソロ川では、例年 10 月頃から洪水期を迎える。インドネシア国公共事業省他、関係機関との調整の結果、2011 年 6 月頃に導入し、現地技術者によるテスト運用、改善要望などを踏まえ、2011 年 9 月末に納入完了する。この間、徹底的な動作テストを行い、水災害の軽減に資する信頼性の高い予警報システムを構築していく所存である。この間に得た知見を基に、世界中の水文情報が十分でない流域へ展開していきたい。

衛星観測雨量データの精度改善のための補正において、必要とされる地上雨量計のデータ密度が明らかとなったが、検討対象事例や条件（特に時間スケール）が限定されていることから、追試が必要である。また、今後は GPM 計画等の実現によって、観測頻度は改良される見込みであることから、それに対応して、GPM 計画後の衛星観測雨量データに対応した補正手法を開発していくことが重要である。さらに中長期的視点からは、衛星観測雨量データと予測雨量情報を組み合わせた新しい降雨プロダクトについて研究を進めていくことを考えている。

IFAS については、これまでのところ降雨-流出過程を

再現する流出計算ツールのみが実装されているため、今後は、洪水はん濫などの現象の解析や、水資源管理の共通基盤とするため機能をさらに拡張・充実させていく予定である。

参考文献

- 1) 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雨量データ補正方法の提案—吉野川流域の事例解析一、水工学論文集、第 53 巻、pp.385-390、2009.2.
- 2) JAXA/EORC：Global Rainfall Map in Near Real Time.
<http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/index.htm>
- 3) T. Ushio, 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. Submitted to J. Meteor. Soc. Japan, 2008.
- 4) Fahmi Hidayat, Harry M. Sungguh, Harianto：Impact of Climate Change on Floods in Bengawan Solo and Brantas River Basins, Indonesia, 11th International River symposium Brisbane, Australia 1-4 September, 2008.
- 5) Tomonobu Sugiura, Kazuhiko Fukami, Naoki Fujiwara, Kenichirou Hamaguchi, Shigeru Nakamura, Sadayuki Hironaka, Kazuhiro Nakamura, Takahiro Wada, Masato Ishikawa, Takao Shimizu, Hironori inomata, Kazuhisa Itou, DEVELOPMENT OF INTEGRATED FLOOD ANALYSIS SYSTEM (IFAS) AND ITS APPLICATIONS, 7th ISE & 8th HIC, Chile, 2009

1.6 STUDY ON AN EFFECTIVE AND EFFICIENT UTILIZATION OF SATELLITE-BASED RAINFALL DATA IN AN INSUFFICIENT HYDROLOGICAL INFORMATION AREA

Budgeted : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2009-2010

Research Team : Water-related Hazard research
Group(Hydrological engineering
research team)

Author : FUKAMI Kazuhiko
SUGIURA Tomonobu
NABESAKA Seishi
INOMATA Hironori
KAWAKAMI Takahiro
OZAWA Go

Abstract:

The purpose of this research is a development of correction method of satellite-based rainfall data and a improvement of function of IFAS (Integrated Flood Analysis System) for needs of local conditions in order to implement a flood alert system based on run-off analysis system effectively and efficiently in an insufficient hydrological information area. In this research, validation of a former developed correction method with satellite and ground-based rainfall and a study of new correction method in insufficiently gauged river basin was conducted in some basins in Taiwan and Indonesia. Moreover, a sensitivity analysis to clarify the effect of ground-based rainfall data on the improvement of satellite-based rainfall one was conducted with the Typhoon Morakot data in Taiwan in 2009. It was clarified the effect of ground-based rainfall data was very significant on the improvement of hourly satellite-based rainfall data. Finally, some necessary functions as a base for real-time flood forecasting and warning system were implemented on IFAS.

Key words: Satellite-based rainfall data, Integrated Flood Analysis System (IFAS), flood forecasting and warning system, Solo river basin