

観測情報の乏しい発展途上国で運用可能な洪水予測システムの開発 ～全球規模の衛星降雨観測・降雨予測情報の活用～

Abdul Wahid Mohamed RASMY・牛山朋来・安川雅紀・深見和彦

1. はじめに

洪水早期予警報システム (FEWS) は、世界でも深刻化する洪水被害の軽減に向けて最も効果的なツールのひとつと認識されており、仙台防災枠組み2015～2030(SFDRR)¹⁾および国連持続可能な開発目標(SDGs)²⁾でも、2030年までに全世界でFEWSの設置を促進することを目標の一つに挙げている。近年では、人工衛星観測データを利用した降雨観測技術、降雨流出氾濫モデリング、定量的アンサンブル降雨予測、情報通信技術等が進歩し、それらの高度技術を統合することで、データの乏しい発展途上国を含めてFEWS設置を通して洪水災害リスク低減を目指すことが可能になると期待されている。そこでICHARMでは、それらの最新の技術を統合し、世界各地、特に発展途上国でも運用可能な統合洪水情報システム(IFIS: Integrated Flood Information System)のプロトタイプを開発した。さらに、それを2017年6月の歴史的豪雨災害を受けたスリランカ国・カルー川を対象として実装し、実運用を開始した³⁾。このIFISの概要について、スリランカ国・カルー川での初期検証事例を通して紹介する。

2. IFISプロトタイプのシステム構成

IFISプロトタイプシステムは、図-1に示すようにa)データ収集・統合モジュール、b)降雨流出氾濫シミュレーター、c)リアルタイム後処理・表示モジュール、d)リアルタイムデータ・情報伝達モジュールから構成される。

2.1 データ収集・統合モジュール

データ収集・統合モジュールは、地上観測、衛星観測、数値気象予測の各データ収集・統合モジュールである。降雨データは、リアルタイムの

洪水監視・予測に利用する流出解析モデルの主要な入力データであるが、高い時空間密度で地上雨量データをリアルタイムで収集するのは容易ではなく、世界の多くの地域でこれを期待することはできない。一方、人工衛星に搭載されたマイクロ波センサによって宇宙から降雨をモニタリングする技術は近年急速に発展し、全球規模の観測を実現するとともに、時空間分解能の高解像度化とデータ提供時間遅れの短縮が図られてきており、水関連災害管理分野においても期待が高まっている。宇宙航空研究開発機構(JAXA)と米国航空宇宙局(NASA)が共同で立ち上げた全球降水観測計画(GPM)に基づくJAXAの衛星雨量プロダクト(GSMaP)は、世界中で準リアルタイム(遅れ時間1.5～4時間程度)での衛星雨量入手を可能とした。しかし、衛星雨量は様々な誤差の影響を受けるため、水文分野では、その観測精度を改善するために、地上雨量データセットを用いたバイアス補正を実施するのが一般的である。しかしながら、スリランカ国・カルー川流域(面積2,700km²)内には、リアルタイムでデータを収集できる地上雨量計が存在していなかった。このため、リアルタイムでデータを収集できる地上雨量計を独自に5基設置し、上述のJAXA提供の準リアルタイム全球衛星雨量プロダクト(GSMaP-NRT)⁴⁾を、その地上雨量データを用いてバイアス補正して統合し、10kmメッシュの雨量データ(準リアルタイムの衛星・地上統合雨量プロダクト)を作成することとした。また、気象庁が提供している東アジアおよび西太平洋での10分毎(日本域では2.5分毎)の雲データを取り込むことで、早期警戒・準備を促すための広大なインド洋上の大雨と雲生成の監視を行う。

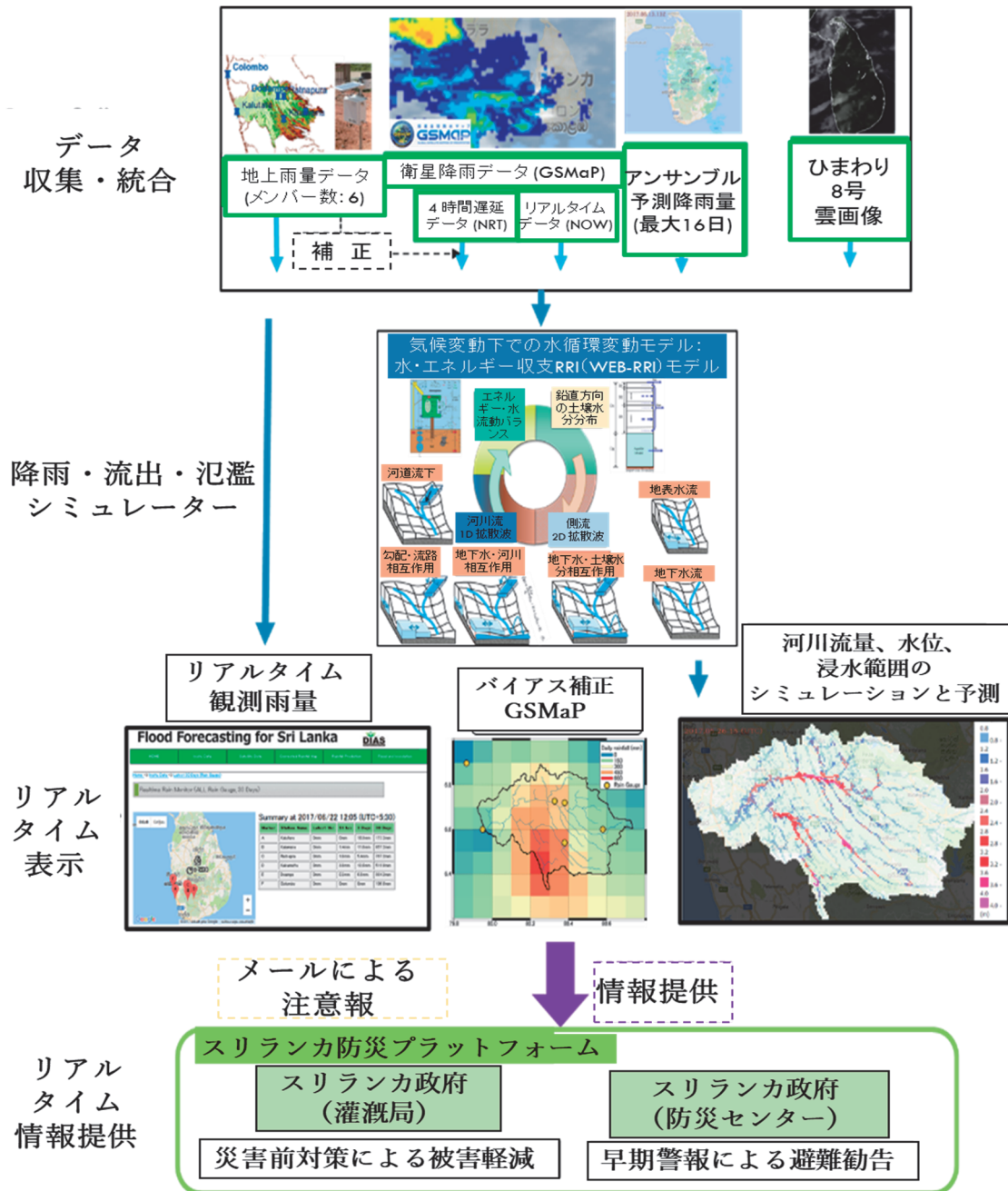


図-1 スリランカ国カルー川のIFIS概念図

また、洪水予測において長いリードタイムを確保するために、数値気象予測モデルから得られる定量的降雨予測を利用することは重要である。但し、降水量をある特定の領域に対し決定論的に予測する場合、大気プロセスの複雑性（カオス性）のため確保できるリードタイムが高々数時間という点で限定的となる。そこで、降雨予測に与える初期条件の不確実性を逆に利用し、わずかに異なる初期値から複数の予測計算結果（アンサンブルメンバーと呼ぶ）を得るアンサンブル予測手法の活用が期待されている。これにより、より広い時

間・空間に対して降雨予測の範囲・不確実性を推定することが可能となる。また、そこであらかじめ得られる予測誤差範囲情報は、降雨・洪水予測計算に避けられない誤差（豪雨の見逃し、外れ予測）による予警報の誤判断リスクを補完する情報として活用できる可能性がある。このことは、気象・水文観測が粗いことにより決定論的予測の精度確保が難しい発展途上国の河川流域では特に有効と期待される。

カルー川IFISでは、米国・国立環境予測センター（NCEP）の全球アンサンブル予測（GEFS）

のVer.10データには、1つのControl Runデータと20個のアンサンブル予測データメンバーが含まれるが、計算時間の短縮のため、Marsigliら(2005)⁵⁾が予測範囲の適合性の確保と大きな外れ予測の排除の両立に十分と報告したメンバー、すなわち、1つのControl runと偶数番号の10個のメンバーデータを採用した。これらのUTC時間0時予測を活用し、領域気象モデル(WRF: Weather Research and Forecasting)を用いて元の水平解像度60kmデータを24km、さらに4kmに2段階にダウンスケーリング(分解能精細化)し、後述する洪水予測計算への入力情報とした。

2.2 降雨流出氾濫シミュレーター

上記の降雨予測データを入力する洪水流出解析モデルとして、Rasmyら(2019)⁶⁾による定数分布型水文モデルであるWEB-RRIモデルを用いた。これは、RRIモデル⁷⁾の2D流動方程式と数値気象モデルの陸面境界サブモデルを改良したhydro-SiB2モデルを組み合わせることで、地表面における陸地・植生・大気相互作用、多層土壌水分動態、2次元側方流を内部的に計算することを可能とし、樹幹遮断、蒸発散、浸透、流出、および浸水の諸過程を一体で解析することのできるモデルである。これにより、洪水流出の立ち上がりのタイミングや初期損失に大きな影響を与える流域の乾湿度すなわち初期土壌水分条件をモデル内部で評価することができ、洪水発生前の基底流出量推定や、洪水発生のタイミング、洪水ピーク流量、および浸水深・範囲の評価精度を改善することが期待される。また、日本のような湿潤地での洪水流出のみならず、乾燥地/半乾燥地の洪水から低水に至る流出過程に影響を及ぼす水文過程の要素を表現していることは、IFISの世界的な汎用性を担保する意味で重要である。

2.3 リアルタイムデータ処理・表示モジュール

東京大学のデータ統合解析システム(DIAS)⁸⁾を利用することで、リアルタイムを含むデータアーカイブ、モデル計算のためのデータ処理・準備、モデル計算、計算出力の処理、および、データの可視化の作業環境を効率的に構築・実装した。

2.4 リアルタイムデータ・情報発信モジュール

本モジュールは、DIAS上でリアルタイムに可視化されたデータ・情報をもとに、電子メールによる警報の送信、ウェブサイト上でのリアルタイムのデータ・情報発信を行う。これにより、スリランカ国カルー川の利害関係者と政府機関に洪水災害に関する警報の伝達を行う。

3. カルー川への適用結果と考察

3.1 衛星・地上統合降雨プロダクト(GSMaPバイアス補正雨量)の性能検証

カルー川流域では、2017年5月25日(UTC時間)に、前例のない大雨により歴史的な洪水が発生した。図-2(a),(b)は、5基の地上雨量計から得たティーセン分割による日雨量分布と、バイアス補正後のGSMaP雨量(GSMaP-NRT)すなわち衛星・地上統合雨量による日雨量分布を比較している。図-2(a)に示すように、大雨(>450mm/日)は流域の中央部に集中しており、下流域では雨量は少なかった(50~100mm/日)。一方、衛星・地上統合雨量(バイアス補正GSMaP-NRT雨量)では、図-2(b)に示すように、地上雨量によるバイアス補正により、ティーセン分割雨量が示す大雨の位置・分布をかなり良好に捕捉・再現できることを確認した。

3.2 アンサンブル降雨予測の性能検証

2.1で述べた手法により領域気象モデル(WRF)でダウンスケーリングされ出力される11個のアンサンブル降雨予測データを使って、2017年にカルー川流域で発生した大雨を対象とした予測精度を検証した。図-3(a)~(c)は、2017年5月23日

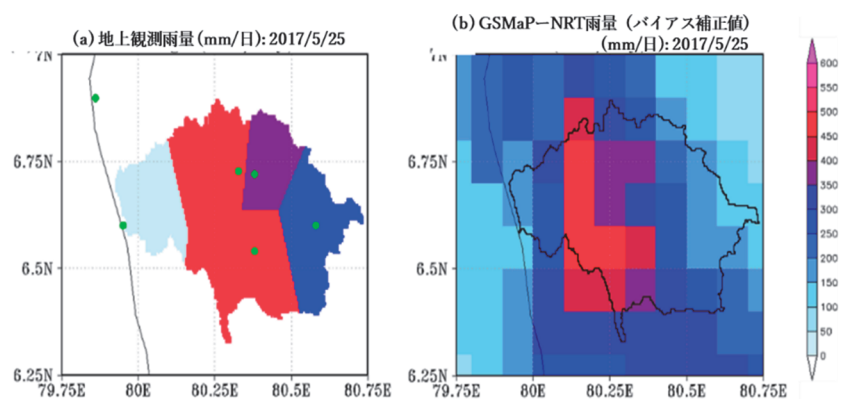


図-2 2017年5月25日(UTC時間)の日雨量分布(mm/day)の比較:
左側:(a)地上観測雨量値(Theissen法により内挿、緑色の点は地上雨量計の位置)
右側:(b)GSMaP-NRT雨量値(バイアス補正済み)

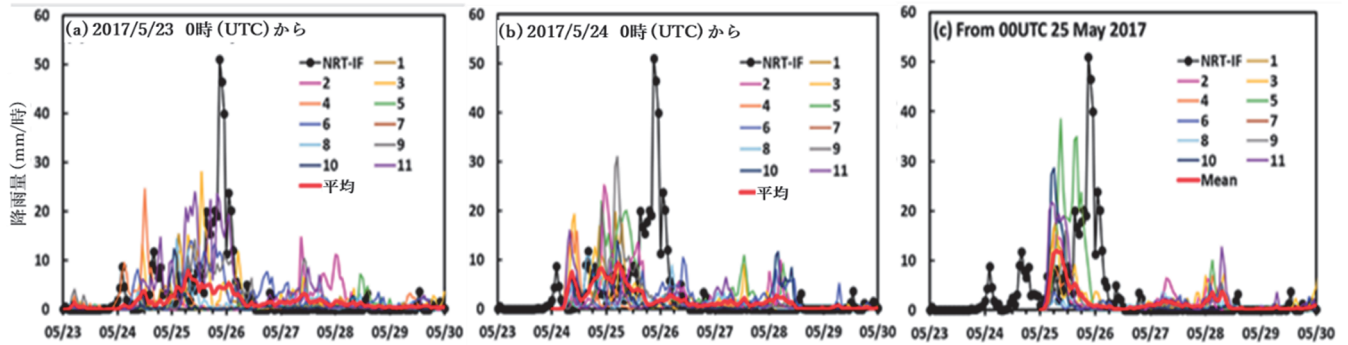


図-3 7日間雨量予測に関する流域平均WRFアンサンブル降雨強度とバイアス補正GSMaP-NRT降雨強度 (mm/hr) の比較：予測開始時はUTC時間a)2017年5月23日0時、b)2017年5月24日0時、c)2017年5月25日0時

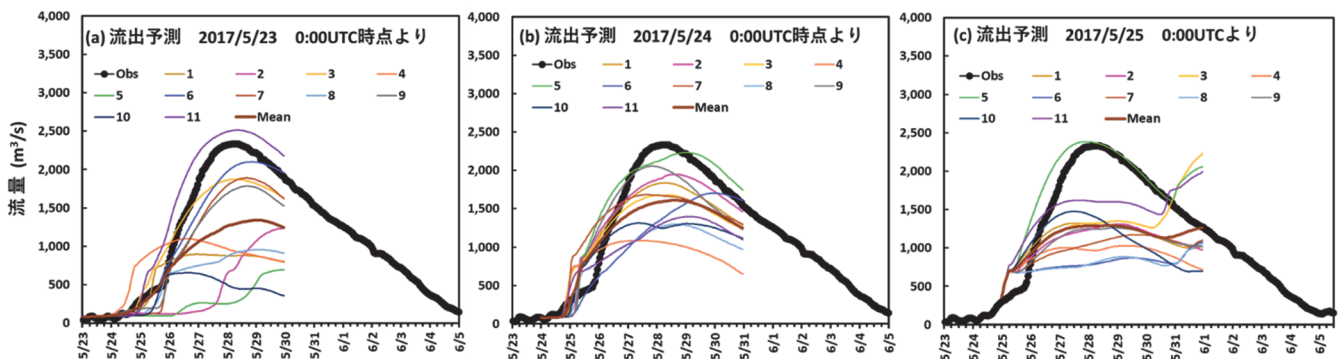


図-4 WRFアンサンブル降雨強度に対応するモデル予測流量群とプトゥポーラ地点観測流量の比較：予測開始時刻は UTC時間a) 2017年5月23日0時、b) 2017年5月24日0時、c) 2017年5月25日0時

から30日の7日間について、23日、24日、25日のいずれもUTC時間0時から実施したアンサンブル降雨予測データについて、アンサンブルメンバー毎の流域平均降雨強度と衛星・地上統合雨量プロダクト値（バイアス補正GSMaP-NRT降雨強度）を比較している。図-3 (a) に示すように、降雨ピーク生起の3日前から開始した予測では、24日から27日までの降雨ピーク予測（アンサンブルメンバー6、9、11）のタイミングは、観測のタイミングと一致している。しかし、予測した降雨強度はアンサンブルメンバー間で異なり、ピーク降雨量を著しく過小評価している。衛星・地上統合降雨プロダクトでは、強雨はUTC時間25日18時から26日6時まで集中しているが、アンサンブルメンバーの多くは、18時間ほど早いピークを予測している。この傾向は最大降雨の2日前からの予測を示す図-3 (b) でも見られる。図-3 (c) に示す25日UTC時間0時から開始された予測の場合は、全メンバーの推定平均強度は、他2例の予測と比較して高くなった。しかし、(a)(b)と同様に多くのアンサンブルメンバーにおいて降雨ピークが約18時間程度早く到達し早く収束する予測

となっている。その中で、アンサンブルメンバー5については、唯一観測に近いピーク降雨事象（総雨量）を捉えていた。

これらの検証結果から、2017年5月に発生した大雨に対して、タイミング・降雨強度の両者において降雨予測に依然として高い不確実性が残されていることが示された。しかし、降雨ピークが発生する3日前の早い段階で、既に大雨発生への注意シグナルを明確に読み取ることができることも同時に示しており、洪水予警報への活用可能性を示唆している。

3.3 アンサンブル洪水予測の性能検証

Rasmyら (2019) ⁵⁾は、2.2で述べたWEB-RRIモデルをカルー川流域を対象として構築し、衛星・地上統合雨量プロダクトによるキャリブレーションおよび長期的な流出計算再現検証を既に実施しているが、ここでは、2017年の洪水事例を対象にアンサンブル降雨予測データを用いた洪水予測の性能検証を行った事例を示す。図-4 (a)～(c) は、プトゥポーラ観測所（上流域面積約2,500km²）で観測された河川流量と、アンサンブル降雨予測データをWEB-RRIモデルに与えて

予測した河川流量との比較である。予測計算は、2017年5月23日、24日、25日のいずれもUTC時間0時に開始したものを示している。図-4(a)に示すように、洪水生起の3日前にあたる23日の段階において既に、全アンサンブルメンバーが観測所付近での流量増加を予測している。アンサンブル平均を超えるメンバーは $1,000\text{m}^3/\text{s}$ （低洪水レベルの目安）を超えるピーク流量を予測し、75パーセンタイルより上位のメンバーは $1,400\text{m}^3/\text{s}$ （高洪水レベルの目安）を超えるピーク流量を予測している。アンサンブル平均流量も河川流量の増加傾向を示し、アンサンブル平均ピーク流量は低洪水レベル超の約 $1,300\text{m}^3/\text{s}$ となっている。アンサンブルメンバーによるピーク流量の不確実性範囲は約 $1,500\text{m}^3/\text{s}$ と大きい、高洪水レベルにも達しえる洪水の来襲を警戒すべきことを既に示している。

24日の降雨予測に基づく図-4(b)では、中央値(50パーセンタイル)を超えるアンサンブルメンバーが高洪水レベルを超えるピーク流量を予測し、かつ、不確実性の範囲が前日の予測と比較して減少している。結果的に、高洪水レベルの洪水来襲をこの時点の予測が最も的確に評価することとなった。

25日の降雨予測に基づく図-4(c)では、75パーセンタイルより下位のアンサンブルメンバーが高洪水レベルを超えるピーク流量を予測できていない。3.2で示したように、多くの降雨予測アンサンブルメンバーが早く降雨が収束する予測となっているためと考えられる。しかし、多くのメンバーがピーク付近の降雨量を過小評価しつつも、そのピーク生起予測のタイミングを早く予測していたことから、2つのメンバーを除いて、さらに流量が増加していくことで低洪水レベルを超えることは予測できている。また、降雨予測の適合度が比較的高いメンバー5では、流量増加傾向・ピークともにほぼ実観測に近い予測結果を示しており、現実には生起した洪水現象は、アンサンブル予測の誤差範囲に収まっている。

総合的に見て、早めの降雨ピーク生起予測が低めの降雨量予測値を補い、多くのアンサンブルメンバーにおいて、少なくとも河川流量の洪水立ち上がりとその後の増加傾向（低洪水レベル超え）を予測する結果を得ており、2017年洪水につい

ては、IFISにより被害をもたらす洪水来襲を予測できることを確認した。また、アンサンブルメンバーの中には、高洪水レベルを超える実際の洪水流出波形にほぼ適合する結果も含まれていた。1～数メンバーのみでは、それに対応した行動を決断する根拠とするには難しいと想定されるが、そのレベルの洪水を想定し得る状況であることを注意喚起し、必要な準備を進める意味では、カラー川にとって有効な情報と考えられる。

4. まとめ

洪水災害による人的・経済的損失は世界で増加している。災害管理担当者は、資源の効率的な管理、効果的な減災戦略立案のために、水関連災害に関する信頼できるリアルタイム情報および予測情報を必要としている。本研究では、準リアルタイムの衛星・地上統合降雨プロダクト、アンサンブル降雨予測、及び、定数分布型水文モデル(WEB-RRIモデル)を活用した統合洪水情報システム(IFIS)のプロトタイプを開発し、スリランカ国カラー川流域で発生した歴史的洪水を対象として開発システムの検証を行った。その結果、衛星・地上統合降雨プロダクトについては、地上雨量によるティーセン分割雨量に近い雨量分布を再現できることを確認した。またアンサンブル降雨予測については、大きな不確実性が残るが、それに基づいて予測した河川流量は、洪水の増減予測と洪水ピーク流量の確率範囲の予測に関して明確なシグナルを示し、当該地域での洪水防災・減災への早期の準備対応を進める上で有用であると期待できる結果を得た。発展途上国に多く見られる気象・水文観測データに乏しい地域にとって、グローバルに利用可能な衛星雨量や降雨予測データを基盤にしたIFISは、洪水早期予警報システムを迅速かつ効率的に構築できる効果的な手法と考える。

なお、今回構築・実装を図ったカラー川IFISは、本報で対象とした2017年5月洪水のあと、大きな洪水を経験していない。アンサンブル降雨・洪水予測の精度・誤差範囲、ならびに、それに基づく洪水予警報の判断基準とその有効性について、継続して運用実績データを収集することで、さらに検討・検証を進めていく予定である。

IFISにおけるデータおよびモデル出力の視覚化、マッピング、およびリアルタイム情報伝達のためのシステムについては、今回は詳述しなかったが、IFISによるリアルタイム公開情報は<http://ff-srilanka.diasjp.net/> で閲覧可能である。

謝 辞

水文モデルの開発・検証に必要なデータを提供していただいたスリランカ国灌漑局および気象局、米国NASA、および、DIASを利用させていただいた東京大学に対して感謝の意を表したい。本研究は、JAXA・GPM ミッション (JAX-PSPC-438049) と文部科学省のDIAS-Waterプロジェクトの資金援助を受けて実施された。また、本報文の日本語訳初稿作成への大久保雅彦氏の支援に感謝する。

参考文献

- 1) 仙台防災枠組み2015～2030: http://www.wcdrr.org/uploads/Sendai_Framework_for_Disaster_Risk_Reduction_2015-2030.pdf
- 2) 国連持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals): http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E
- 3) 池田鉄哉、安川雅紀、アブドゥル・ワヒド・モハメッド・ラスミ、牛山朋来：スリランカへの洪水対策支援について、土木技術資料、第60巻、第5号、pp.32～35、2018
- 4) 宇宙航空研究開発機構(JAXA)：世界の雨分布速報（衛星全球降水マップGSMP）：
https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMP/index_j.htm
- 5) Marsigli, C., Boccanera, F., Montani, A. and Paccagnella, T.: The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system: validation of the methodology and verification, Nonlinear Processes in Geophysics, 12, pp.527-536, 2005
- 6) Rasmy, M., Sayama, T. and Koike, T.: Development of water and energy Budget-based Rainfall-Runoff-Inundation model (WEB-RR) and its verification in the Kalu and Mundeni River Basins, Sri Lanka, Journal of Hydrology, 579, 2019
- 7) Sayama, T., Ozawa, G., Kawasakmi, T., Nabesaka, S. and Fukami, K.: Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin, Hydrological Sciences Journal, 57:2, pp.298-312, 2012
- 8) データ統合解析システム：
<https://www.diasjp.net/>

Abdul Wahid Mohamed RASMY



土木研究所水災害・リスク
マネジメント国際センター
水災害研究グループ 主任
研究員、博士（工学）
Abdul Wahid Mohamed RASMY
Ph.D.

牛山朋来



土木研究所水災害・リスク
マネジメント国際センター
水災害研究グループ 専門
研究員、博士（地球環境工
学）
Dr. USHIYAMA Tomoki

安川雅紀



東京大学地球観測データ
統融合連携研究機構特任
助教、博士（工学）
Dr. YASUKAWA Masaki

深見和彦



土木研究所水災害・リスク
マネジメント国際センター
水災害研究グループ長
FUKAMI Kazuhiko