

インドネシア Citarum 川上流域の降雨・流出解析に関する基礎的検討*

日本大学工学部土木工学科 神谷青佑

日本大学工学部土木工学科 朝岡良浩

日本大学工学部情報工学科 若林裕之

1. はじめに

インドネシアにおいて農林水産業は主要産業の 1 つで、2018 年の名目 GDP 構成比は 12.8% を占める。気候変動の影響に伴い高温障害、旱魃、洪水によって農業生産の低下が予想されている¹⁾。このため、インドネシア政府は食料安全保障や農家の取得向上を政策上の優先課題の一つとして位置位置づけて、2012 年雨期作より農業保険事業を開始し、2015 年雨期作には 16 州にまで拡大して実施した。2016 年乾期作からは米を生産する全ての州を対象に損害補てん型農業保険を実施し

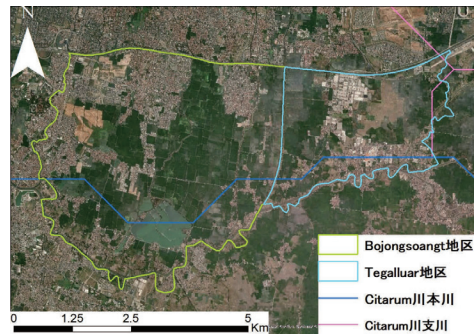


図 1 Bojongsong 地区および Tegalluar 地区

ている。農業保険制度によって農家に補償金を支払う際、農業保険の担当者が被害状況を現地調査がするが、被害状況を個々に調査するには多くの時間と労力を要するという問題が伴う。

インドネシアでは、雨季に洪水・氾濫による浸水が発生する。水田耕区の浸水被害のモニタリングに関しては、西ジャワ州の Bojongsong 地区および Tegalluar 地区 (図 1) をパイロットエリアとして、浸水被害の広域モニタリング手法の開発が進められている。人工衛星は広域の水域モニタリングに効果的と考えられ、特にマイクロ波センサは雲の影響を受けにくいことから、雨季乾季にかかわらず地表面をモニタリングできる。Wakabayashi et al., (2019) は Sentinel-1 衛星の C バンド合成開口レーダを用いて雨季の浸水域を抽出した。竹田ら (2020) は、Sentinel-1 衛星の観測周期が 12 日であるため、人工衛星の観測周期を補う方法として、二次元浅水方程式を基礎式とする内水氾濫モデルを用いて高い時間インターバルで浸水域を計算した。衛星観測による浸水域とシミュレーションの浸水域を比較したところ、シミュレーションの浸水域は過大推定となり、この要因として、対象エリアを流れる Citarum 川からの外水氾濫の寄与を無視できず、内水氾濫だけでは浸水域を十分に再現できないことを示した。

外水氾濫を数値計算は、計算領域の上流端に河川流量の境界条件を設定して、河川水と氾濫水の流れを計算する手法の他に、流域の降雨・流出・氾濫過程を一括して数値計算する手法がある。本研究は Citarum 川上流域を対象として、降雨・流出・氾濫過程を一括して扱う数値解析手法において、降雨・流出解析の妥当性を検討する。

*A Fundamental Study on Runoff Analysis with a Numerical Simulation in the Upstream Area of the Citarum River basin, Indonesia by Seisuke Kamiya, Yoshihiro Asaoka and Hiroyuki Wakabayashi

2. 対象地域

Citarum 川の全長は約 350km, 流域面積は約 6000km² である。本研究は流出解析の範囲を Citarum 川の上流域 (図 2) に設定した。具体的には, Nanjiung 地点の上流域である。対象地域の Bojongsoang 地区と Tegalluar 地区において東から西に向かって Citarum 川が流れ, 雨季には浸水被害が発生する。

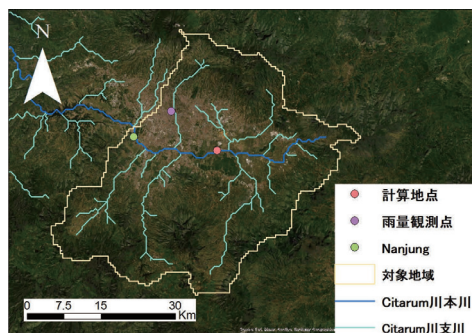


図 2 流出解析の対象地域

3. 研究手法およびデータセット

本研究は降雨・流出・氾濫を一体的に扱う RRI モデル⁴⁾ (Rainfall-Runoff-Inundation Model) を対象地域に適用した。対象地域を 15"メッシュに分割し, 拡散波近似した二次元浅水方程式を展開する。各メッシュを河道部もしくは流域部に分類し, 流域部では地中部の降雨流出過程も取り扱う。以下に二次元浅水方程式を示す。

$$\text{連続の式:} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = r - f \quad (1)$$

$$\text{運動方程式}(x\text{方向}): \quad \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial uq_x}{\partial x} + \frac{\partial uq_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} \quad (2)$$

$$\text{運動方程式}(y\text{方向}): \quad \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial vq_y}{\partial x} + \frac{\partial vq_x}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} \quad (3)$$

ここで, u , v は x , y 方向の流速, q_x , q_y は x , y 方向の流量フラックス, h は水深, H は水位, τ_x , τ_y は x , y 方向の剪断応力, r は降雨強度, ρ は水の密度, f は鉛直浸透強度, t は時間である。計算時間間隔 $dt=600s$ とした。

RRIモデルに入力する標高データ (図3) および流向データ (図4) をHydroSHDESより取得した。雨量データは衛星全球降水マップのGSMaP_MVKプロダクトを用いた。河道部は集水面積に閾値を設けて判定した。雨量データの空間分解能0.1°, 観測インターバルは1時間である。数値計算の対象期間は2018年9月から2019年5月までの9ヶ月間である。また, 対象地域の乾期と雨季を判別するためにBandung市内の地上観測点の降雨データを用いた。

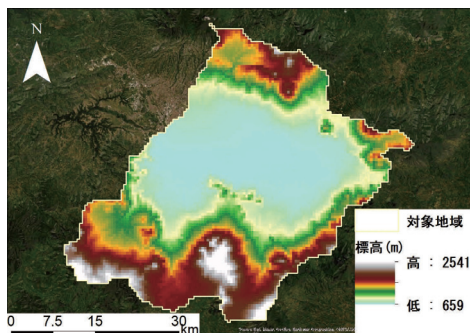


図 3 標高

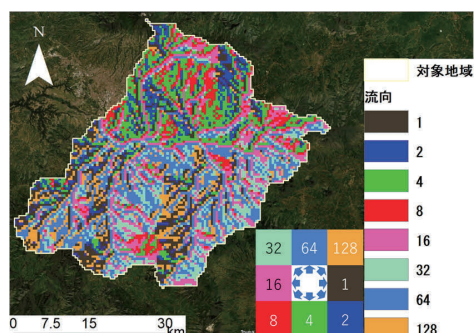


図 4 流向

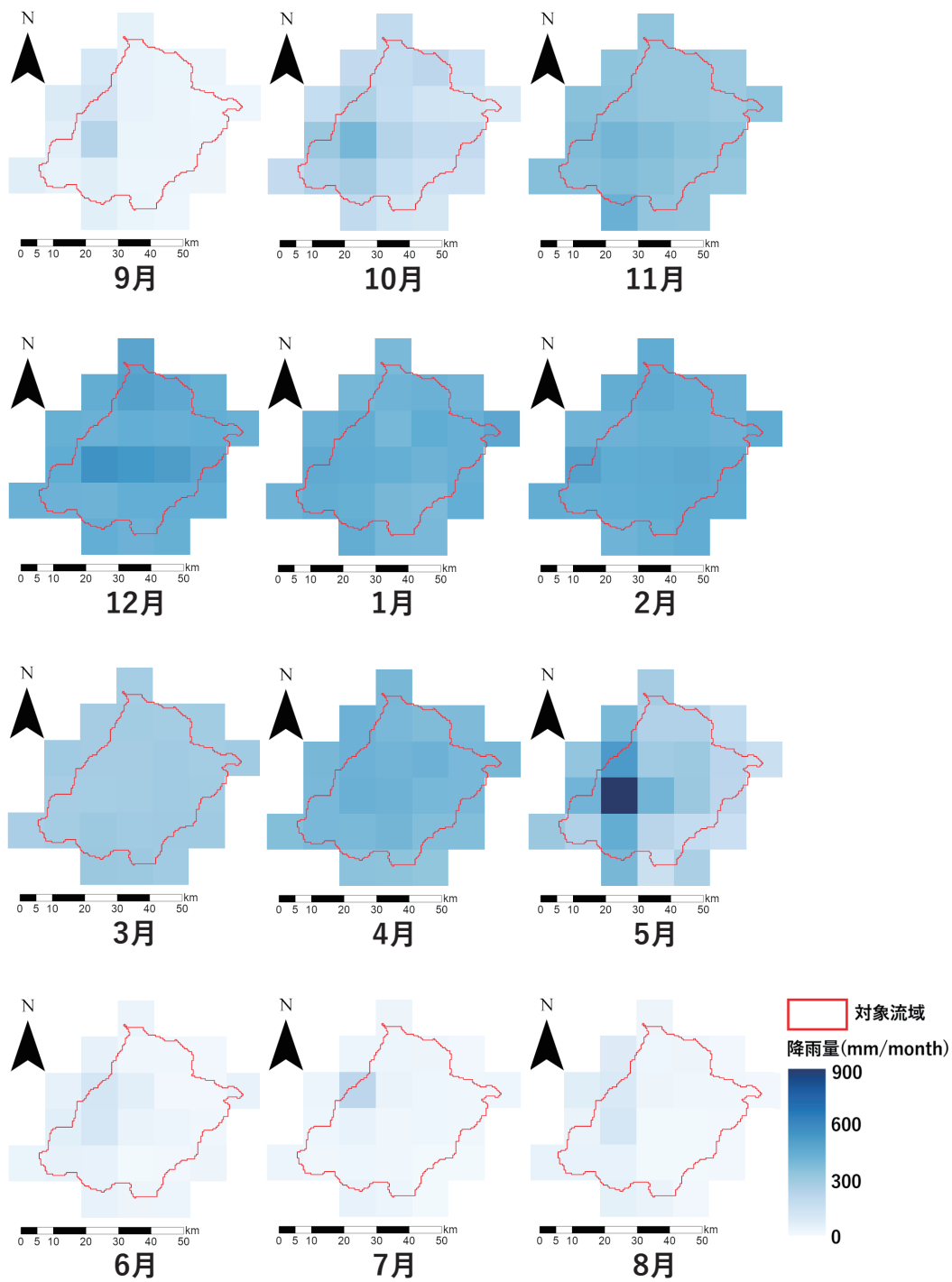


図5 月降水量 (2018年9月から2019年8月)

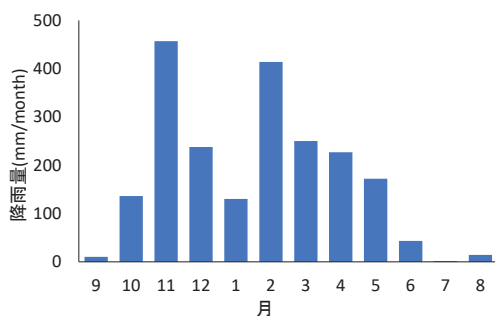


図 6 地上観測点の降雨量

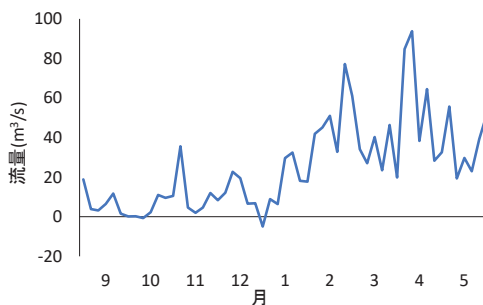


図 7 河川流量 (5日間の移動平均)

4. 結果と考察

GSMaP_MVK プロダクトの時間雨量を月雨量に集計した結果を図 5 に示す。また、2019 年 8 月までの地上観測点による雨量データを図 6 に示す。GSMaP_MVK プロダクトの降水量は 10 月以降に増加し、12 月に最大となり、それ以降は徐々に減少する。6 月から 9 月は乾季となり、降水量はほとんどない。地上観測雨量の降雨量は 12 月と 2 月にピークとなるが、GSMaP_MVK プロダクトと同様に 6 月から 9 月の降雨量は少ない。

RRI モデルを用いて推定した Bojongsoang 地区 (図 2) の河川流量を 5 日間の移動平均に換算した結果を図 7 に示す。河川流量のピークは 2 月と 4 月の 2 回発生する。具体的には、1 月上旬から 2 月下旬に増加、3 月上旬に減少し、4 月上旬には再び増加、5 月上旬以降は減少する。GSMaP_MVK プロダクトの降水量は 12 月に最大となるが、河川流量の 1 回目のピークは遅れて 2 月になる。また、12 月下旬から 1 月上旬にかけて流量がマイナスになる期間があるが、この要因として、対象地域の勾配 (傾斜角) が小さく、下流で支川が合流することから、背水が影響していると考えられる。標高データを用いて作成した河川部の傾斜角を図 8 に示す。

同地点における水深を 5 日間の移動平均にした結果を図 9 に示す。水深は河川流量と異なり、10 月以降の降雨の増加に対して早く反応し、11 月上旬から 4 月中旬まで安定して増加を続ける。上述のとおり、計算を出力した地点は勾配が小さいことから、流速が小さく、流量の増加が遅れると考えられる。2018 年 11 月 7 日、2019 年 1 月 19 日、4 月 11 日、5 月 17 日の水深を図 10 に示す。11 月、1 月、4 月の日付は各月で河川流量が最大となった時期である。また、5 月の日付は

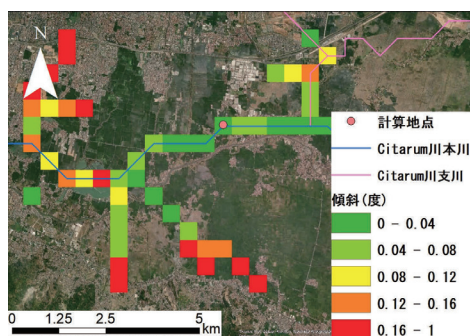


図 8 河川部の傾斜角

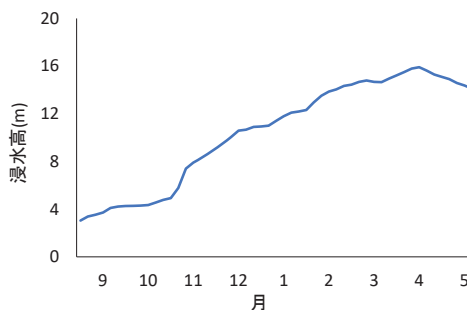


図 9 水深 (5日間の移動平均)

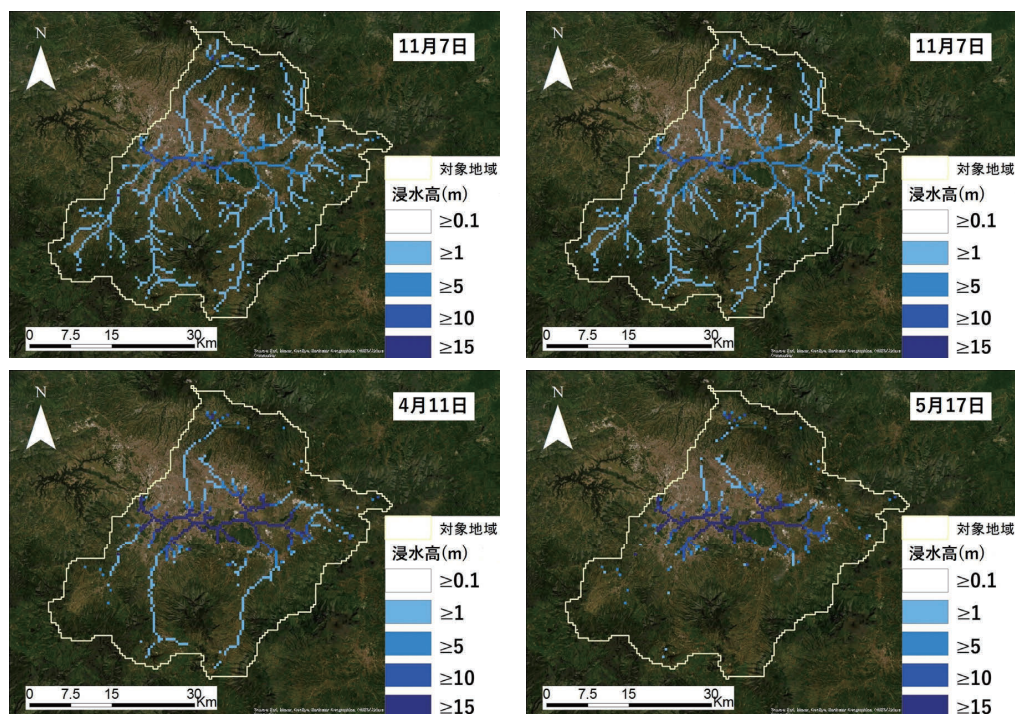


図 10 水深

河川流量が減少した時期である。Bojonsoang 地区では支川から Citarum 川に流入があり、11 月 7 日を基準とすると 1 月 19 日、4 月 11 日、5 月 17 日に高い。特に 5 月 17 日は支川の水深が小さいにも関わらず、Citarum 川の水深が高い状態が続くことから、これは河床勾配が小さいことにより本川の通水能力が低いことが要因と考えられる。以上より、Bojonsoang 地区では Citarum 川の河川水が停滞しやすく、浸水に対して外水氾濫の寄与が大きいと考えられる。

5. まとめ

本研究は RRI モデルをインドネシア Citarum 川の上流域に適用し、降雨流出解析を行った。Citarum 川が流れる Bojonsoang 地区の通水能力は低く、また、支川からの流入により、雨季に安定して河川水位が高くなることから、この地域の浸水被害に外水氾濫が寄与していることが示唆された。今後は蒸発散や河道断面を数値計算に組み込み、現地に即した降雨・流出・氾濫計算に取り組む予定である。また、衛星画像を用いて抽出した浸水域を用いて氾濫域のシミュレーション結果を検証する予定である。

謝辞

本研究の一部は JST/JICA SATREPS インドネシア案件の支援により実施された。また、土木研究所より技術支援を受けた。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) Naylor, R. L., Battisti, D. S., Vimont, D. J., Falcon, W. P., & Burke, M. B. (2007). Assessing risks of climate variability and climate change for Indonesian rice agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(19), 7752-7757.
- 2) Wakabayashi, H., Motohashi, K., Kitagami, T., Tjahjono, B., Dewayani, S., Hidayat, D., Hongo, C. (2019). Flooded area extraction of rice paddy field in indonesia using Sentinel-1 SAR data, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019; Vol. XLII-3/W7, pp. 73-76.
- 3) 竹田稔真, 河村弘仁, 朝岡良浩, 若林裕之. インドネシア Citarum 川流域の水田耕区における氾濫解析, *東北地域災害科学研究*, Vol.56, p.33-38, 2020.
- 4) 佐山敬洋, 建部祐哉, 藤岡 奨, 牛山朋来, 萬矢敦啓, 田中茂信. 2011 年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾濫予測, *土木学会論文集 B1(水工学)*, Vol.69, No.1, p.14-29, 2013.