

水文気象データが乏しい山地流域における降雨流出解析の検討 —ベトナム中部 Huong 川を例として—

高良 圭*・小山 直紀*・山田 正*

Consideration of Rainfall-runoff Analysis in Mountainous Basin with Scarce Hydro-Meteorological Data -A Case Study on Huong River in Central Vietnam-

Kei KOURA*, Naoki KOYAMA* and Tadashi YAMADA*

Abstract

In Vietnam, typhoons frequently cause flood damage, resulting in loss of life as well as damage to agriculture and aquaculture. Central Vietnam is dotted with dams with huge water storage, which could be utilized to mitigate flood damage. In this study, the reproducibility of inflow into dams was examined using observed rainfall data for a river basin in central Vietnam. The results showed that the inflow into dams could be reproduced in general, but not sufficiently during some periods. One possible reason for this was that rainfall was not sufficiently observed. Therefore, effective rainfall was inversely estimated from actual dam inflows. The results suggest that rainfall was not sufficiently observed during the periods when inflow to the dam was not sufficiently reproduced.

1 はじめに

ベトナム社会主義共和国（以下、ベトナムと記す）では台風の襲来に伴う洪水が頻発し、人的・経済的被害が毎年のように発生している。当該地域におけるこのような洪水に関して、Chinhら[1]はベトナム中部のQuang Binh省において過去の洪水痕跡から浸水図を作成し、作成した浸水図と人口や土地利用の空間分布の関係から、流域や河川に沿った地域で洪水リスクが高いことを示している。また、Vuら[2]はベトナム中部のQuang Nam省において過去の洪水3事例を対象に、各洪水がもたらした農業への直接被害額を推定し、洪水の発生時期が農作物の損害において重要であることを示している。さらに、Bangaloreら[3]はベトナムの現在人口の約3分の1が25年確率の洪水に暴露されており、気候変動による海面上昇シナリオ下では、暴露される人口が13%~27%増加する可能性があることを示している。ベトナム天然資源環境省の報告[4]では、ベトナム国土全体の21世紀末における年間降水量は、1980年から1999年と比較して5%増加すると予想され、その増加率は南部と比べて北部において高いことが示されている。

洪水に対応する手法の一つとして、ダムによる洪水調節がある。これは洪水時に、上流からの流水を一定量貯めこみ、下流への流量を調節して、洪水被害を軽減する効果を持つ。ベトナムの河川流域では、1970年代以降に、人口増加に伴う電力需要の高まりと、豊富な水資源を背景に、水力発電ダムの整備が進められてきた[5]。これらのダムを効果的に運用することでダム下流域での洪水被害を軽減できる可能性がある。

一方で、洪水調節を適切に行うためには、流量の予測が重要となる。流量の予測手法として、対象流域において降雨から流出流量を評価する流出解析モデルを構築し、上流域の降雨を入力データとした解析を行うことで流量を予測する手法がある。したがって、流量予測は可能な限り詳細な観測降雨データに基づくことが望ましく、構築したモデルの妥当性を示す手法として、過去の洪水に対する再現性を評価する手法が用いられている。しかし、観測網が十分に整備されていない流域では、観測降雨データが乏しく、

*中央大学理工学研究所 東京都文京区春日1-13-27

データがあったとしても時空間的に不十分であることが多い。そのため、高精度な流量の予測は困難である場合が多い。このような観測降雨データの不足に対応する手段としては、衛星観測による降雨データの活用が有効な手段となっている。しかし、GsMaPやCMORPH等の衛星観測によるグローバルな降水量データプロダクトは、ベトナム中部において、地上雨量計による観測値と比較して過小評価であることがTrinh-Tuanら[6]によって示されている。したがって、現況の観測降雨データから過去の洪水を再現可能な精度を持つモデルを構築可能であるかについては検討すべき重要な事項である。

以上を踏まえ、ベトナムにおける観測降雨データを活用し、所要の精度を持った流出解析モデルを構築することで、既存のダムを有効活用した洪水管理が可能であることが考えられる。

そこで本研究は、ベトナム中部の河川流域において流出解析モデルを構築し、観測降雨データによるダム流入量の再現性について検証した。

2 ベトナム全土の基礎情報

2-1 標高と人口の分布

Fig-1 にベトナム全土の標高図及び人口分布図を示す。標高図より、北部から中部にかけての内陸側は標高の高い山地となっており、沿岸部は標高の低い低平地となっていることがわかる。また南部はメコンデルタ地域であり、内陸側から海側まで低平地となっていることがわかる。人口分布図より、北部では首都ハノイの周辺及び沿岸部、中部では沿岸部、南部では内陸側から海側まで人口が密集している地域となっていることがわかる。さらに、標高図と人口分布図の比較から、沿岸部の低平地に人口が集中していることがわかる。

2-2 ベトナムにおける過去の洪水災害の概要

Table-1にアジア防災センター[7]の発表による、ベトナムにおける過去の洪水災害の概要を示す。ベトナムでは洪水災害が毎年のように発生しており、その発生区域に着目するとベトナム中部で発生頻度が高いことがわかる。発生時期に着目すると、8月から11月の期間で発生しており、これはベトナム中部において雨期とされる9月から12月の期間と概ね一致している。ベトナム中部における近年の洪水被害では、1999年11月に発生した洪水が最も深刻であり、局地的には1日当たりの降雨量が1,300 mmを超え、全壊家屋5,500棟、3億ドルもの経済被害が生じた[8]。

2-3 過去にベトナムに襲来した台風

Fig-2 に1950年～2021年にベトナムを通過した台風の経路図を示す。同図は、NOAA（アメリカ海洋大

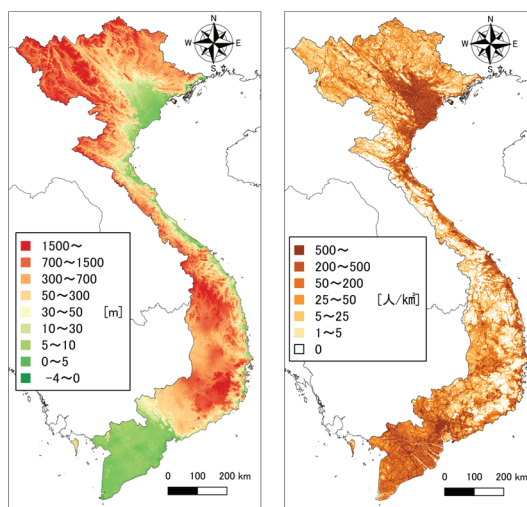


Fig-1 Elevation map (left) and population distribution map (right) of Vietnam. [Population concentrated in low-lying coastal areas.]

Table-1 Overview of past flood disasters in Vietnam. [The frequency of occurrence is high in central Vietnam.]

発生年月	死者(人)	区域
1999年11月	535	中部
2002年10月	132	南部
2003年11月	50	中部
2004年11月	42	中部
2005年9月	59	中部
2006年10月	41	中部
2007年10月	88	北部・中部
2008年8月	133	北部
2009年9月	162	中部
2010年8月	10	中部
2011年10月	73	中部
2013年10月	31	中部
2016年11月	24	中部
2017年11月	110	北部・中部
2020年10月	111	中部

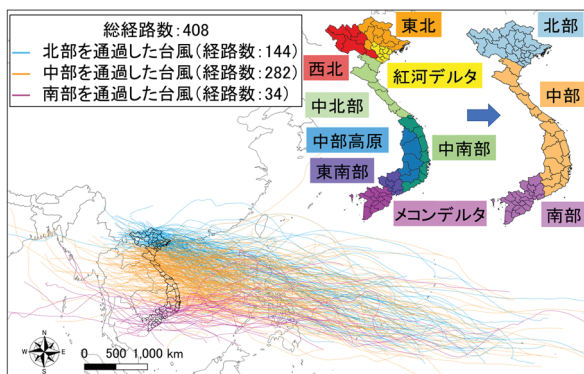


Fig-2 Path map of past typhoons that passed through Vietnam (1950~2021).
[Frequently passes through central Vietnam.]

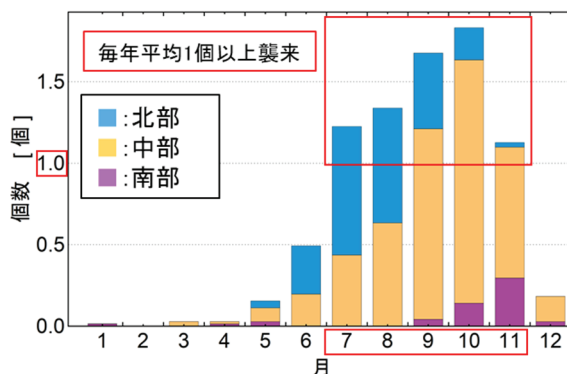


Fig-3 Average number of typhoons passing through Vietnam by month
[Many typhoons pass through from July to November.]

気庁)による過去の台風の経路データセットである IBTrACS からベトナムを通過したものを抽出して作成し、通過した地域(北部, 中部, 南部)によって色分けした。ここでの各地域区分は同図中に示すように、ベトナムの地方行政区分に基づいて、東北部, 西北部及び紅河デルタを北部と定義し, 中北部, 中南部及び中部高原を中部と定義し, 東南部及びメコンデルタを南部と定義した。各地域を通過した経路数(台風の個数)がベトナム全土を通過した総経路数に占める割合は中部で最も高く, 約 7 割であった。また, Fig-3 に IBTrACS のデータより集計した 1950 年~2021 年においてベトナムに襲来した台風の月別平均襲来数を示す。同図も Fig-2 と同様に通過した地域によって色分けした。同図より, 毎年の 7 月から 11 月の期間に平均して 1 個以上の台風がベトナムに襲来していることがわかり, 10 月に最もよく襲来することがわかる。加えて, ベトナム中部に襲来する割合が最も高く, 10 月に襲来する台風の約 8 割を占めている。

2-4 雨量観測体制の現状

Fig-4 にベトナム全土の既存の雨量観測所及び気象レーダの位置図を示す[9]。ベトナム全土において, 雨量観測所は 603 ヶ所存在し, その観測密度は約 550 km² につき 1 ヶ所である。これに対し日本においては, 国土交通省の雨量観測所が 2,812 ヶ所, 気象庁のアメダス観測所が 1,286 ヶ所, 合計で 4,098 ヶ所の雨量観測所が存在し, その観測密度は約 93 km² につき 1 ヶ所であることから, ベトナムの雨量観測所数は日本に比べて少なく, 観測密度が小さいことがわかる。河川流域スケールでの比較例として Fig-5 に示す Hue 省を流れる Huong 川流域に着目する。同図より当該流域において, 雨量観測所は 12 ヶ所存在し, その観測密度は約 233 km² につき 1 ヶ所である。これに対して同程度の流域面積である日本の荒川流域においては, 国土交通省の雨量観測所が 22 ヶ所, 気象庁のアメダス観測所が 7 ヶ所, 合計で 29 ヶ所の雨量観測所が存在し, その観測密度は約 101 km² につき 1 ヶ所である。

ベトナム全土において, 気象レーダは Cバンドレーダが 8 基, Sバンドレーダが 2 基存在する。ベトナムのほぼ全土がこれらの気象レーダの観測範囲でカバーされているが, これらは設置されてから数年しか経過しておらず, 現在はキャリブレーションを行っている段階であり, 実務的な運用はまだ開始されていない。

3 観測降雨データを用いたダム流入量の再現性

3-1 対象流域及び対象洪水の概要

対象流域は Fig-5 に示した Hue 省を流れる Huong 川流域である。当該河川の流路延長及び流域面積は, それぞれ約 102 km 及び約 2,800 km² であり, 流域内には Huong Dien ダム, Binh Dien ダム, Ta Trach ダムの 3 つのダムが存在する。Table-2 に各ダムの諸量を示す。当該流域は, 日本の東京を流れる荒川と同程度の流域面積であるが, 日本のダム(例えば, 荒川流域の滝沢ダムでは 6,300 万 m³)と比較して, 巨大な総貯水容量(約 4 億 m³~約 8 億 m³)を持つダム群が存在する。本研究における対象洪水イベントは 2020 年

10月にベトナム中部に襲来した台風 Linfa による洪水とした。当該洪水では、対象流域内の複数の雨量観測所において、10月6日から10月10日までの4日間総雨量が1,200 mm以上となり、ベトナム政府の発表によるとベトナム中部において死者111名の人的被害が生じた[10]。また流域内の洪水痕跡観測地点の観測値によると、最大水深3.16 mの浸水被害が生じた。

3-2 解析手法

本研究では、Huong 流域のダム上流域において、雨量観測所の観測値を入力データとした流出計算を行った。当該計算には、今後行うダムの放流操作と下流の浸水状況に関する検討を踏まえ、流出計算、河道計算及び氾濫計算を一体的に行うことが可能である RRIモデル[11][12]を用い、ダム上流域における計算モデルを作成した。本モデルは斜面部と河道部を個別に扱っており、斜面部は2次元、河道部は1次元のモデルとして計算される。斜面部では2次元の浅水方程式を拡散波近似し、流量フラックスを水面勾配の関数として計算することにより、直接解法と比較して計算負荷を小さくしている。また、今後のベトナムにおいて、気候変動や都市化の進展に伴い土地利用が経年的に変化した場合に、流出パラメータの再調整が容易である点も RRIモデルを用いる有意な点である。計算モデルの空間解像度は緯度経度方向にそれぞれ30秒(約1 km)とし、入力する降雨データについては、Huong 川流域内の雨量観測所による1時間雨量を、ダム上流域のティーセン分割により得られた領域の各 Grid に与えた。流出計算における斜面タイプは、Huong 川流域のダム上流域が山地であることから、側方地中流と表面流を反映した斜面タイプを選定した。流出計算により、3つのダム地点における流量を求め、ダムの実績流入量と比較することで、観測降雨データを用いたダム流入量の再現性を検証した。モデル中の流出パラメータは、流量の計算値がダムの実績流入量を最も精度良く再現するように試行錯誤的に決定し、ハイドログラフの再現性の指標にはNSE(Nash-Sutcliffe 係数)を用いた。

3-3 流出計算結果

Fig-6に各ダム地点における流量の計算結果を示す。同図において流量の計算値を青実線、ダムの実績流入量を橙点、ダム流域平均雨量を図の上から下向きにハイトグラフで示している。Huong Dienダムでは10月1日から10月10日までの期間において、計算値と実績値が概ね一致しているが、その後から10

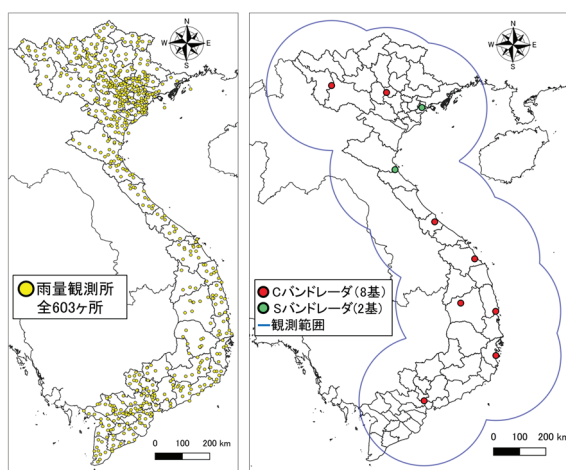


Fig-4 Location map of existing rain gauges (left) and meteorological radars (right) in Vietnam.

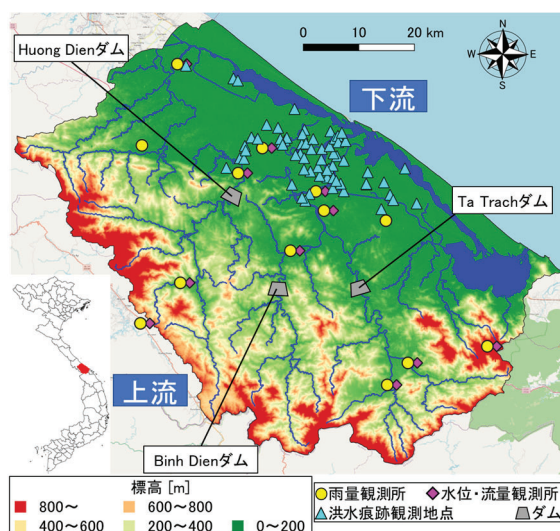


Fig-5 Huong river basin overview map
[Few rain gauges exist upstream of dams.]

Table-2 Specifications of dams within the Huong River Basin

ダム名	目的	流域面積 [km ²]	総貯水容量 [10 ⁶ m ³]
Huong Dien	発電・農水	707	820.7
Binh Dien	発電・農水・治水	515	423.7
Ta Trach	発電・農水・治水	717	646

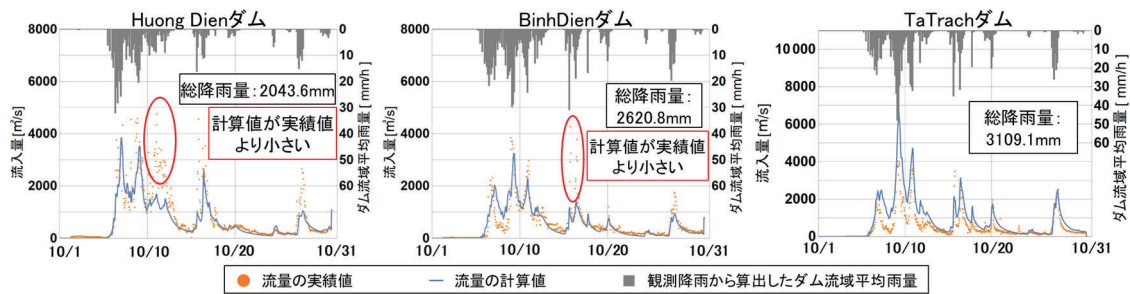


Fig-6 Results of runoff analysis for each dam

(Left: Huong Dien Dam, Center: Binh Dien Dam, Right: Ta Trach Dam)

[Calculated and actual inflow into dam are generally in agreement, but for some periods the calculated values are smaller than the actual values.]

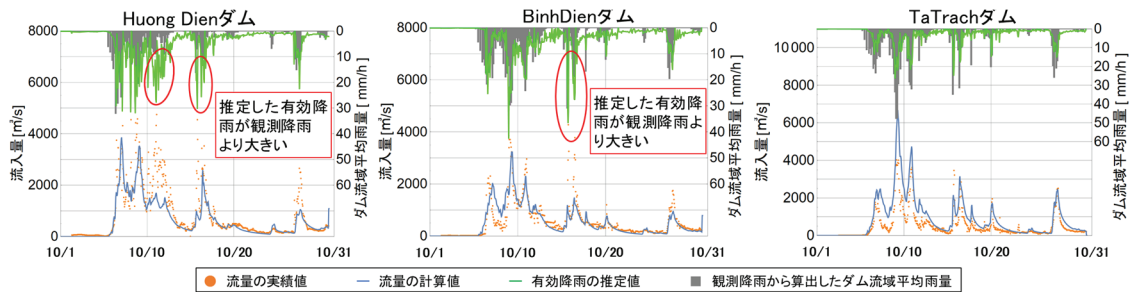


Fig-7 Results of inverse estimation of effective rainfall

[In periods when the calculated flow rate is less than the actual flow rate, the inversely-estimated effective rainfall exceeds the observed rainfall.]

月 14 日までの期間では計算値が実績値より小さくなっており、それ以降の期間では概ね一致していることがわかる。10 月 10 日の前後に着目すると、ダム流域平均雨量と流量の計算値は共に減少傾向であるのに対して、ダム流入量の実績値は減少傾向でないことがわかる。このことから、10 月 10 日から 14 日までの期間において、降雨が十分に観測されていないことが考えられる。Binh Dien ダムでは、10 月 1 日から 10 月 15 日までの期間において、計算値と実績値が概ね一致しているが、その後から 10 月 17 日までの期間では計算値が実績値より小さくなっており、それ以降では概ね一致していることがわかる。Ta Trach ダムでは、対象洪水の全期間において、流量の計算値と実績値の波形は概ね一致しているが、計算値が実績値より大きい傾向にあることがわかる。

4 有効降雨の逆推定

前節の流出計算結果で示したように、流量の計算値と実績値は各ダムで概ね一致するものの、一部期間において両者の間に差異が生じた。この要因として、地下水への涵養や蒸発散のプロセスが反映されていないことや、降雨が十分に観測されていないことが考えられる。しかし、前者が要因である場合は、対象洪水の全期間においてある程度の差異が生じることが考えられる。ところが、流量ハイドログラフの通減部では差異がほとんどなく、一部期間においてのみ差異が生じていることから、ここでは、後者が要因であると結論付けた。なお、対象流域における各ダム上流域には雨量観測所が最も多い場合で 2 地点であり、上流域に雨量観測所が全く存在しないダムもある。したがって、本節における「降雨が十分に観測されていない」の意は、「空間解像度が疎である」よりも深刻な「未観測領域の存在が考えられる」の意であると解釈されたい。このような観測降雨データの乏しい対象流域においては、信憑性の比較的高い、ダムの実績流入量から有効降雨を逆推定することが、実降雨を評する手法として最適であると考えた。以上の点を踏まえて本節では、ダムの実績流入量を用いた有効降雨の逆推定について述べる。

4-1 有効降雨の逆推定手法

山田[13]は式(1)に示す単一斜面における降雨流出の基礎式を理論的に導いている。

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (r(t) - q_*) \quad (1)$$

ただし、

$$a_0 = aL^{\beta-1} = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}}L^{\frac{-1}{m+1}} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{m}{m+1} \quad (3)$$

ここに、 q_* : 流出高[mm/h], L : 流出寄与斜面長[mm], r : 有効降雨強度[mm/h], a 及び m は、流域の流出特性を表すパラメータである。式(1)を変形すると式(4)に示す有効降雨強度関数を表現することができる。

$$r(t) = q_*(t) + \frac{1}{a_0 q_*(t)^\beta} \frac{dq_*(t)}{dt} \quad (4)$$

この式(4)を用いることにより、ダムの実績流入量から有効降雨を求め、降雨の観測値から算出したダム流域平均雨量との比較を行った。式中の流出高 q_* には、ダムの実績流入量をダムの流域面積で除した値を用いた。また、式中のパラメータ a_0 及び β は、流量ハイドログラフの逓減部等の差異がほとんどない期間において、雨量観測所の観測値から求めたダム流域平均雨量と逆推定した有効降雨が概ね一致するように試行錯誤的に決定した。ところで流出寄与斜面長 L は、先に決定したパラメータ a_0 及び β と、流域の土壌・地形特性から求まる a から求めることができるが、この値が流出計算に与える影響は小さいことが呉ら[14]によって示されているため、その値に関して本論文では議論しないものとする。

4-2 有効降雨の逆推定結果

Fig-7 に有効降雨の逆推定結果を示す。この図において、逆推定した有効降雨を緑実線で示している。流量の計算値と実績値に差異が生じた期間の降雨に着目すると、Huong Dien ダムでは、逆推定した有効降雨が観測降雨から算出したダム流域平均雨量を上回っており、Binh Dien ダムでも同様であることがわかる。また Ta Trach ダムでは、対象洪水の全期間において、逆推定した有効降雨と観測降雨から算出したダム流域平均雨量の波形は概ね一致しているが、逆推定した有効降雨の方が小さい傾向にあることがわかる。このことから、対象洪水の一部期間において Huong Dien ダム及び Binh Dien ダム上流域では降雨が過小に観測され、Ta Trach ダム上流域では過大に観測されていることが示唆された。

4-3 ダムの運用による洪水管理に向けて

本章で示したように、観測降雨によってダムの実績流入量は概ね再現できたが、対象洪水の一部期間においては十分に再現できないことがわかった。その要因として、降雨の観測密度が小さく、ダム上流域において降雨が十分に観測されていない可能性が本検討により示唆された。対象流域において、特にダム上流域で降雨の観測密度を高めることで、観測降雨によるダム流入量の再現性を高めることができ、将来的にはリアルタイムの観測降雨データからダム流入量を予測できる可能性がある。また、既存の気象レーダの運用が開始されることでも同様の可能性が期待できる。さらに、ダム流入量の予測情報に基づく事前放流操作等のダムの運用によって、頻発している洪水被害を軽減できる可能性がある。

5 本研究のまとめ

本研究では、ベトナム中部の Hue 省を流れる Huong 川流域を対象に、流出解析モデルを構築し、観測降雨データを用いたダム流入量の再現性を検証した。流出計算結果から、観測降雨によってダムの実績流入量は概ね再現できたが、対象洪水の一部期間においては十分に再現できないことが明らかとなった。この要因として、対象流域における降雨の観測密度が小さいことから、ダム上流域において降雨が十分に観測されていないことが考えられたため、ダムの実績流入量を用いた有効降雨の逆推定を行った。有効降雨の

逆推定結果から、ダムの実績流入量が十分に再現できなかった期間において、ダム上流域の降雨が十分に観測されていないことが示唆された。ダムの洪水調節による洪水管理に向けて、特にダム上流域で降雨の観測密度を高め、ダム流入量の再現性を高めることが重要であると本研究より示唆された。

今後は、標高の比較的低いダム下流域における降雨の観測値からダム上流域の降雨を予測する手法の検討や、ダム下流域において洪水氾濫解析を行い、ベトナムにおける洪水管理に向けた、効果的なダムの運用手法を提案していきたい。

謝辞：本研究は中央大学研究開発機構「気象センサー等を活用した水災害・水災害情報ソリューション研究展開ユニット」からの支援を受けて実施されている。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] Luu, C., Tran, H.X., Pham, B.T., Al-Ansari, N., Tran, T.Q., Duong, N.Q., Dao, N.H., Nguyen, L.P., Nguyen, H.D., Thu Ta, H., Le, H.V. and Meding, J.v.: Framework of Spatial Flood Risk Assessment for a Case Study in Quang Binh Province, Vietnam, *Sustainability. MDPI*, Vol. 12, No. 7, 2020.
- [2] Chau, V.N., Cassells, S. and Holland, J.: Economic impact upon agricultural production from extreme flood events in Quang Nam, central Vietnam, *Nat Hazards.*, Vol. 75, 2015.
- [3] Bangalore, M., Smith, A., and Veldkamp, T.: Exposure to Floods, Climate Change, and Poverty in Vietnam, *EconDisCliCha.*, Vol. 3, 2019.
- [4] Climate Change, Sea level rise scenarios for Vietnam, Ministry of Natural Resources and Environment, Hanoi, 2016.
- [5] 田中康寛：河川の特徴と歴史からベトナムの治水について考える，月刊誌「河川」，2022年4月号，pp. 41-50，2022.
- [6] Trinh-Tuan, L., Matsumoto, J., Ngo-Duc, Thanh., Nodzu, M.I. and Inoue, T.: Evaluation of satellite precipitation products over Central Vietnam, *Progress in Earth and Planetary Science* 6, 54, 2019.
- [7] 災害情報，アジア防災センター(Asian Disaster Reduction Center), https://www.adrc.asia/latest_j/, 2022.4 閲覧
- [8] ベトナム国中部地域災害に強い社会づくりプロジェクト事前調査・実施協議報告書，独立行政法人国際協力機構地球環境部，2001. 1.
- [9] No. 90/QD-TTg : 2030年を目標年次とする全国の天然資源環境の観測システムの2016年～2025年整備計画の承認に関する首相決定，ベトナム政府，2016.
- [10] ONLINE NEWSPAPER OF THE GOVERNMENT OF THE SOCIALIST REPUBLIC OF VIET NAM, <https://en.baohinhphu.vn/more-intl-aid-announced-for-flood-affected-people-in-central-region-11139575.htm>, 2022. 4 閲覧
- [11] Sayama, T.: Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Technical Manual, Technical Note of PWRI, No. 4277, Public Works Research Institute, 2014.
- [12] Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S. and Fukami, K.: Rainfall-Runoff-Inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin, *Hydrological Science Journal*, Vol. 57, Issue 2, pp. 298-312, 2012.
- [13] 山田正：山地流出の非線形性に関する研究，水工学論文集，47巻，pp. 259-264，2003.

- [14] 吳修一, 山田正, 吉川秀夫: 有効降雨の推定に関する研究, 土木学会論文集 B, Vol. 65, No. 3, pp. 231-245, 2009.