

2. 水文・水質・気象**■** 2026年8月25日(火) 9:00～10:40 | **■** 第7会場(501教室)**[7-1] 水文・水質・気象①：河川流出・洪水・負荷量**

座長: 吉田 貢士(東京大学大学院新領域創成科学研究科)

9:00～9:15

[7-1] 石垣島轟川流域における出水特性とSS流出動態

*中野 拓治¹、大澤 和敏²、藤川 智紀³、中村 真也¹、鶴木 啓二⁴ (1. 琉球大学 農学部、2. 宇都宮大学 農学部、3. 東京農業大学 地域環境科学部、4. 土木研究所 寒地土木研究所)

9:15～9:30

[7-2] 長期低週単位データによる年間河川負荷量の推定について

*多田 明夫¹、大西 健太²、田中 健二¹ (1. 神戸大学大学院農学研究科、2. 森永乳業)

9:30～9:45

[7-3] 公共用水域（河川）の年河川負荷量推定について

*遠藤 友紘¹、田中 健二¹、多田 明夫¹ (1. 神戸大学大学院農学研究科)

9:45～10:00

[7-4] 筑後川流域における模擬水位を活用した未経験規模洪水のリアルタイム予測手法の開発

*田畑 俊範¹、菱田 祥子²、原田 昌佳¹、尾崎 彰則³ (1. 九州大学大学院農学研究院、2. 九州大学大学院生物資源環境科学府（修了生）、3. 九州大学熱帯農学研究センター)

10:00～10:15

[7-5] ため池流域における洪水流出モデルの再現性評価と流出特性の解明

*寺家谷 勇希¹、小嶋 創¹、吉迫 宏¹ (1. 農研機構)

10:15～10:30

[7-6] 河川内工事における非出水期河川流量についての考察

*沢邊 哲也¹、西出 浩幸¹、森田 孝治¹ (1. サンスイコンサルタント株式会社)

10:30～10:40

セッション総括

石垣島轟川流域における出水特性と SS 流出動態

Runoff and SS Transport Characteristics in the Todoroki River Basin, Ishigaki Island

○中野 拓治*, 大澤 和敏**, 藤川 智紀***, 中村 真也*, 鶴木 啓二****

○Takuji Nakano *, Kazutoshi Osawa**, Tomonori Fujikawa***, Shinya Nakamura *, Keiji Unoki ****

1. はじめに

近年、気候変動等による豪雨の増加や土地利用変化等で陸域の土壌侵食と海域への土砂流出が大きな課題となっている。沖縄県では、第2次沖縄県赤土等流出防止対策基本計画（以下、基本計画という）が策定され、土壌侵食・土砂流出の状況や対策効果を適切に評価する方法が求められている。農業農村工学会農地保全研究部会の研究チームでは、沖縄県轟川流域を対象に「陸域と海域をつなぐ土砂動態の健全化に向けた土壌侵食・土砂流出の統合評価法の構築」に取り組んでおり、この取組の一環として当該流域における出水特性と SS 流出動態について検討したので、概要を報告する。

2. 研究方法

本研究では、石垣島轟川流域（流域面積：10.3 km²）において 2021 年 4 月 26 日～2022 年 12 月 31 日の連続モニタリング観測で得られた河川水量（10 分間毎）と SS 濃度データに用いた。期間中に観測された降雨イベントに伴う出水と SS 流出の検討・考察を行い、土砂流出動態の把握を試みた。観測データの多変量解析には、エクセル統計 2024 アドインソフトを使用し、降雨イベント毎の流量-SS 濃度の散布図から SS 流出 LQ 式 ($L=aQ^b$: L は SS 量 (kg/s), Q は流量 (m³/s), a , b は係数) を算出した。

3. 結果と考察

3.1 石垣島轟川流域の概況と出水特性

石垣島轟川流域は、主に変成岩と多孔質な琉球石灰岩に覆われ、流域面積 (10.3 km²) の概ね 8 割が農地 (2016 年 : 8.1 km²) である。土地利用形態は、さとうきび畑が農地面積の半分ほどを占め、次いで、牧草地・牧場、パインアップル畑の順となっている。観測期間中に 31 回の降雨イベント (降水量 : 6.5～230 mm) があり、降雨規模 (降雨イベントの降水量) が 10mm 程度を超えると出水が認められ、降雨規模に応じて出水量は 61m³ から 917,773 m³ (平均 : 159,850 m³) に増加した。出水時のピーク流量も、降雨イベントの降水量に伴って 0.03 m³/s から 22.3 m³/s (比流量 0.003～2.17 m³/s・km²) に増加し、出水時の流出率とピーク流量には降水量、時間降雨強度 (時間平均降水量・時間最大降水量)、10 mm 以上の先行降雨発生からの経過日数が関与し、次の重回帰式 (自由度調整済重相関係数 : 0.708) が得られた。

$$R_{uof} = 0.18R_t + 1.19R_h - 0.59M_r + 3.1 \quad (1)$$

$$Q_{max} = 29.4R_t + 152R_m - 62.6M_r + 1050 \quad (2)$$

ここで、 R_{uof} : 出水時の流出率 (%), Q_{max} : ピーク流量 (m³/10 min), R_t : 降水量 (mm), R_h : 時間平均降水量 (mm/h), R_m : 時間最大降水量 (mm/h), M_r : 10mm 以上の先行降雨発生日からの経過日数 (d) である。

降雨イベントの降水量が大きく、降雨強度 (時間平均降水量・時間最大降水量) が大きい降雨パターンほど、降水量に占める雨水の地下浸透量が少なくなり、出水時の流出率やピーク流量が大きくなることが示された。10 mm 以上の先行降雨発生からの

* 琉球大学 農学部 (Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus)

** 宇都宮大学 農学部 (School of Agriculture, Utsunomiya University)

*** 東京農業大学 地域環境科学部 (Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture)

**** 土木研究所 寒地土木研究所 (Civil Engineering Research Institute for Cold Region, PWRI)

キーワード : SS 流出動態, 流出特性, LQ 式, 連続モニタリング観測, 沖縄県赤土等流出防止対策

経過日数が長くなると、地表が湿潤状態から乾燥した状態になり、雨水の地下浸透量が増えることで地表水の流出率とピーク流量が低下したものと推察された。

3.2 SSの流出動態

石垣島轟川流域出水時の最大 SS 濃度と SS 量には、降水量，時間最大降水量，降雨継続時間が影響し，表土を下流へ流すのに十分な降水量と大きな降雨強度が与えられると，土壌粒子が地表水中の懸濁物質（SS）として流出するものと考えられ，次の重回帰式（自由度調整済重相関係数：0.902）が求められた。

$$SS_{\max} = 3.23R_t + 13.6R_m - 5.85D_r + 49.3 \quad (3)$$

$$LS = 565R_t + 751R_m - 971D_r - 6,982 \quad (4)$$

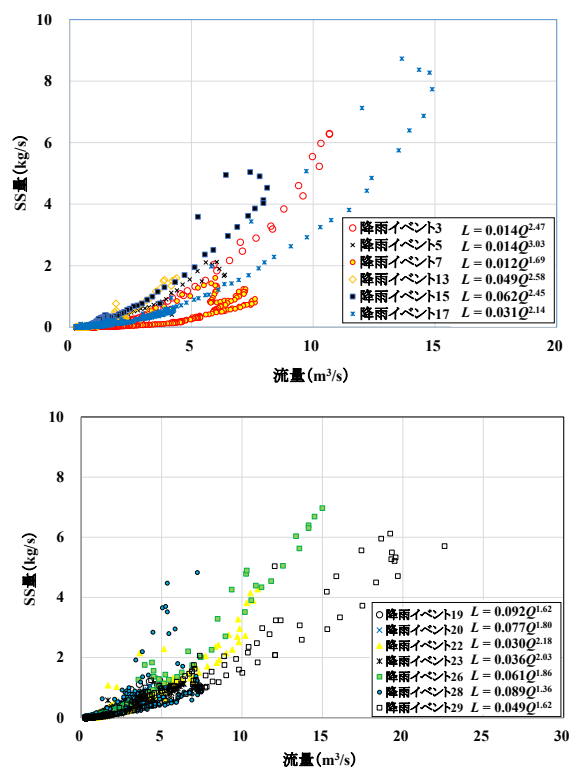
ここで， $SS_{\max}$ ：出水時の最大 SS 濃度（mg/L）， LS ：降雨イベントに伴う SS 流出量（kg）， D_r ：降雨継続時間（h）である。

降雨継続時間が長くなるほど，平均降雨強度が小さくなり，浸食量と下流へ SS を流す掃流力が低下したことで，出水時の最大 SS 濃度と SS 量の減少を生じたものと推察された。SS 流出の LQ 式の a 値・b 値は，降雨強度（時間最大降水量，時間平均降水量）が大きい降雨イベントで大きな値を示し，ほとんどの降雨イベントにおいて増水過程と減水過程で流出 SS 量のヒステリシス現象がみられた（Fig.1）。これは，降雨強度の大きな降雨イベントでは降雨による表土の侵食が促進されて SS 流出量が増加し，増水過程の流量の増加割合より早いペースの SS 濃度上昇と，減水過程の流量の減少割合よりも早いペースの SS 濃度低下によるものと考えられた。出水初期では侵食・輸送された土砂によって高い SS 濃度が流出したのに対して，出水ピーク後は侵食よりも降水で希釈された低い濃度の SS 流出となったことで，同一の流量における SS 濃度は増水過程より減水過程で低い値が観測されたものと推察された。

轟川流域における現況（2021 年）の年間土砂（SS）流出量として，基本計画では 6,365 t/年が設定されているが，観測データによる実測土砂（SS）流出量は 454 t/年と算定され，両者の土砂流出量には 10 倍以上の大きな乖離が認められた。基本計画の土砂流出量は，平均的な年間降水量条件下で発生する土壌侵食量であり，2021 年の年間降水条件や轟川の土砂堆積・運搬過程等が考慮されていないことなどから，轟川から海域への土砂流出量に比べて大きな値になったものと考えられた。土壌侵食・土砂流出の現状把握と対策効果については，基本計画に掲げられた現況・目標値と SS 流出動態を踏まえた海域への土砂流出量との比較・検証による評価の重要性が明らかになった。

4. まとめ

沖縄県石垣島轟川流域の流出特性と SS 流出動態の把握を通じて，土壌侵食・土砂流出の現状と対策効果の評価・検証を行うことが重要であり，今後，本研究成果が土壌侵食・土砂流出対策の計画・実施に活用され，陸域と海域をつなぐ土砂動態の健全化に寄与することを期待している。



注：総流出 SS 量が 5t 以上の降雨イベント

Fig. 1 出水時の流量と SS 流出量の関係

長期低週単位データによる年間河川負荷量の推定について Estimating annual river loads using long-term weekly monitoring data

○多田 明夫^{*1}, 大西 健太^{*2}, 田中 健二^{*1}

○Akio TADA^{*1}, Kenta ONISHI^{*2}, Kenji TANAKA^{*1}

1. はじめに 河川を通じて下流に運ばれる物質の総量である河川負荷量の年単位値は、集水域や下流受水域の水質管理に重要な数値であるが、その信頼しうる推定は容易ではない。著者は、公共用水域（河川）の水質観測頻度である月 1 回程度の低頻度水質観測値が数十年間などの長期にわたり観測されている場合に、信頼しうる年河川負荷量の推定を可能とする推定量である Bias-corrected weighted regression estimator (BCwRE) を開発した（多田・田中，2025）。しかしながら，研究機関では，より高頻度の水質モニタリングデータが得られている場合がある。例えば，河川水質のより詳細なモニタリングを目的として，週 1 回の採水が数十年にわたり実施されているようなケースである。このような頻度の水質データに基づいても，信頼しうる年河川負荷量の推定が可能かどうかはこれまで十分に検討されていない。このため，本研究では長期間にわたる週単位の水質モニタリングデータに基づく年河川負荷量の推定について検討した。

2. 負荷量推定法 BCwRE (bias-corrected weighted regression estimator) では，まず，loess 回帰により次式の rating curve (RC) による個々の日平均濃度の推定値を計算する。

$$\ln c_{RCi} = \beta_{0i} + \beta_{1i} \ln q_i + \beta_{2i} (\ln q_i)^2 + \beta_{3i} T_i + \beta_{4i} \sin 2\pi T_i + \beta_{5i} \cos 2\pi T_i \quad (1)$$

ここで c_{RCi} は i 日における loess RC による河川濃度推定値， q_i は i 日の河川の日流量， T_i は 1 年の長さを 1 として表したある起点から i 日までの通算時間， $\beta_{0i} \sim \beta_{5i}$ は i 日における偏回帰係数である。この c_{RCi} を用いて，BCwRE (L_B) は次式で計算される。

$$L_B = \frac{L_{HT}}{L_{MHT}} L_M = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{c_i q_i}{p_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{c_{RCi} q_i}{p_i}} \right) \sum_{j=1}^N c_{RCj} q_j \quad (2)$$

ここで， p_i は水質試料のサンプリング確率， n はサンプル数， N は負荷量計算対象年度の総データ数（日単位なら 365/366）， L_{HT} ， L_{MHT} ， L_M は，それぞれ HT 推定量，RC による年河川負荷量計算値の HT 推定量，RC による年河川負荷量計算値である。なお L_B の信頼区間はブートストラップ法により計算し，bootstrap 複製回数は 2,000 回とした。

3. データと評価方法 米国のエリー湖に流入する Cuyahoga 流域（面積 1,830km²，農地，林地，市街地の面積率はそれぞれ 20.8%，33.6%，39.5%）からの 1985～2018 年の日単位の水質濃度と流量のデータセット（USGS，2016；Heidelberg University，2019）を用い，週 1 回の定期調査相当の（週内の採水日をランダムに選ぶ）方法で収集した単年度あたり 50 個程度の標本に基づき，SS，TP，SRP（Soluble reactive phosphorus），TN，NO₃（亜硝酸塩＋硝酸塩），TKN（総ケルダール態窒素），Cl，SO₄，Si，EC の 2007 年の年河川負荷量を計算した。推定量の信頼性の評価は，母集団から週 1 回のランダム抽出標本を Monte Carlo 法で 2,000 組リサンプリングし，各々の標本に対し，後

（所属）^{*1} 神戸大学大学院農学研究科，Graduate school of agricultural science, Kobe university, ^{*2} 森永乳業，Morinaga milk, （キーワード）河川負荷量，週単位観測，非超過確率，信頼区間，被覆確率

述の非超過確率と信頼区間を bootstrap 法（BCa 法）で計算して行った．

4. 結果と考察 0.025～0.995 までの範囲で 0.025 刻みの 41 段階の bootstrap 複製値のパーセンタイル値に対して、真値に対する非超過確率の値を 2,000 回のモンテカルロ評価により計算した．信頼区間が真値をその内部に含む確率は実際の非超過確率の値から計算可能である．例えば両側 90%信頼区間の被覆確率は、5%と 95%のパーセンタイル点での非超過確率の差である．この名目上の非超過確率（パーセンタイル）の値 p_n と実際の非超過確率の値 p_{cal} の一致度の指標 pE (%) を次式で計算し、評価に用いた．

$$pE = \text{sgn}\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(p_{cali} - p_{obi})\right] \times \frac{1}{n}\sum_{i=1}^n|p_{cali} - p_{obi}| \tag{3}$$

ここで、 $\text{sgn}(\cdot)$ は $\cdot$ の符号、 n は評価水準数 ($n=41$) である．この pE の式の p_n と p_{cal} を信頼水準の値と被覆確率の値に置き換え、 $n=19$ (0.05～0.95 の 0.05 刻みの 19 信頼水準数) れば、 pE 値は信頼区間の信頼度の指標としても利用できる．この pE 値がゼロに近いほど p_n と p_{cal} は 1:1 に近づき、より信頼しうる区間推定であると判断できる．

表 1 に、非超過確率と信頼区間の被覆確率に対する pE 値と、95%信頼区間幅の真値に対する比率の 2,000 回のモンテカルロ評価での中央値 $rCIW_{95}$ を示した．CI と EC の被覆確率と TP と TKN の非超過確率で pE 値の絶対値が 5%以上となったが、それ以外の項目では非超過確率も被覆確率も pE 値の絶対値は 5%未満であり、十分に信頼しうる推定が行えていると判断した．

表 1 Cuyahoga 流域（2007 年）の年河川負荷量の推定結果

指標	水質項目									
	SS	TP	SRP	NO23	TKN	TN	Cl	SO4	Si	EC
pE (%) (非超過確率)	-3.4	-3.8	2.5	0.84	-3.9	-2.7	6.3	2.4	2.1	5.0
pE (%) (被覆確率)	3.3	5.2	-4.2	-1.5	5.1	0.48	4.5	4.1	3.0	2.8
$rCIW_{95}$	1.4	0.58	0.27	0.15	0.43	0.23	0.38	0.11	0.13	0.23

なお、月 1 回のモニタリングの場合と比較して、データ量の増大に伴う推定量の分散（ばらつき）の減少よりも偏りの減少の方が大きく、結果的に被覆確率が課題となる傾向が見られた．この問題を軽減するために、loess 回帰の計算条件（重みを設定する範囲を規定する半窓幅の値、重み付き回帰での過適合対策など）の“レシピ”の調整が必要となった．これらの詳細については発表時に説明する予定である．

5. おわりに loess 回帰を用いた RC と HT 推定量を組み合わせることで、数十年にわたる週単位採水データに関しても、信頼できる信頼区間が構成可能となったと考えてられる．月 1 度の採水データよりも週 1 度の採水データの方が利用できる情報量が増え推定が容易になると予想していたが、実際にはその逆であったのは意外であった．

参考・引用文献

Heidelberg University. (2019). Heidelberg University National Center for Water Quality Research Tributary data download [data file]. Retrieved from <https://ncwqr.org/monitoring/data>
多田明夫・田中健二 (2025), 長期低頻度データによる年間河川負荷量の推定について, 2025 年（第 74 回）度農業農村工学会大会講演会
U.S. Geological Survey. (2016). National water information system data available on the World Wide Web (USGS water data for the nation) [Data file]. Retrieved from <http://waterdata.usgs.gov/nwis/>, <https://doi.org/10.5066/F7P55KJN>

公共用水域（河川）の年河川負荷量推定について Estimation of annual river loads of public water bodies (rivers)

○遠藤 友紘, 田中 健二, 多田 明夫

○Tomohiro Endo, Kenji Tanaka, Akio Tada

1. はじめに 河川を通じて下流に流下する物質の年間の総量である年河川負荷量は、湖沼や河川等の公共用水域で、適切な水質管理を実施する上で重要な指標である。多田・田中¹は、日本の公共用水域（河川）で実施されている月1回の水質モニタリングのような、数十年の長期間にわたる低頻度水質データに対し、信頼しうる年河川負荷推定量を与える Bias-corrected weighted regression estimator (BCwRE)を開発した。このBCwREの検証では、月1回の頻度で時間的にランダム抽出された水質データを前提としていた¹。しかしながら、公共用水域（河川）での採水日は実際のところ時間的にランダムに決定されていない。この実際の採水状況を考慮した年河川負荷量の推定の検討は不十分である。本研究では、実際の水質観測点でのサンプリングをより忠実に考慮した採水方法で収集された長期間の月1回の水質データに基づき、BCwREによる年河川負荷量推定の結果を報告する。

2. 日本の一級河川での採水状況 日本の一級河川では、公共用水域（河川）として水質データが月1回の頻度で観測されている。水質観測方法は「採水日は、採水日前において比較的晴天が続き水質が安定している日を選ぶこと」とされている²ため、実際のサンプリングはランダムではない。本研究ではこのサンプリングの具体例として、揖保川（兵庫県）の山崎地点での33年分（1980～2018年の内、欠測値がない年）の月1回の全窒素（TN）濃度データ（国土交通省³）と全期間の日流量データ（建設省河川局⁴；国土交通省河局⁵；日本河川協会⁶）を用いた。山崎地点では、1980～1996年では第3水曜日、1997～2018年では第1水曜日を中心に採水が行われ、採水予定日の流量が大きい（おおむね90m³/s以上の）場合は、次の週の水曜日以降に採水日を振替えていた。図1は33年間の水質観測日の日流量分布と、全期間（33年間）の日流量分布の比較であるが、水質観測日の流量分布は低流量側に偏っている。

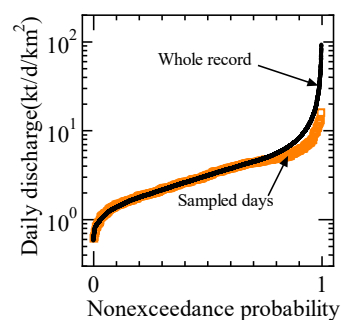


図1 流況曲線(揖保川 TN)

3. 使用データ 年河川負荷量推定の検証には長期間の連続した日流量・日水質濃度データが必要のため、米国のエリー湖への流入河川の1977～2019年の日単位の水質と流量データ（USGS⁷；Heidelberg University⁸）を利用した。推定対象はCuyahoga流域の2007, 2016年, Great Miami流域の2007, 2008, 2014年, Honey流域の2007, 2012, 2013年, Maumee流域の2013年, Rock流域の2008, 2012, 2015年の12組の年河川負荷量とし、懸濁物質（SS）、全リン（TP）、溶存反応性リン（SRP）、TN、亜硝酸塩＋硝酸塩（NO₂3）、総ケルダール態窒素（TKN）、塩素（Cl）、硫酸塩（SO₄）、ケイ素（Si）、電気伝導率（EC）の10項目についての、計120データセットを評価対象とした。

4. 標本抽出方法と負荷量推定法 母集団からの標本抽出に利用するサンプリング確率を、実際

（所属）*神戸大学大学院農学研究科, Graduate School of Agricultural Science, Kobe university

（キーワード）年河川負荷量、一級河川、長期間データ、低頻度データ、信頼区間

の水質観測ルール，つまり月内の定週の曜日を優先して高流量時の採水を避ける採水ルールを模擬して，次のように定義した．①第 nX 曜日 ($n=1\sim4$, X =日曜～月曜) をランダムに決定する．②決定した第 nX 曜日から第 $4X$ 曜日までの X 曜日と第 $4X$ 曜日から月末までを抽出の候補日とする．③候補日の流量に応じて，流量による重み w_{qi} (式 1) を割り当てる． q_i , q_{20} , q_{85} , q_{98} はそれぞれ月内 i 日目の流量，年流量の 20%値，85%値，98%値である．④決定した第 nX 曜日から第 $4X$ 曜日と

$$w_{qi} = \begin{cases} 200 & (q_i < q_{20}) \\ 400 & (q_{20} \leq q_i < q_{85}) \\ 200 & (q_{85} \leq q_i < q_{98}) \\ 1 & (q_{98} \leq q_i) \end{cases} \quad (1)$$

$$w_{di} = \begin{cases} 15 & \text{第}nX\text{曜日} \\ 3 & \text{第}(n+1)X\text{曜日} \\ 2 & \text{第}(n+2)X\text{曜日} \\ 1 & \text{第}(n+3)X\text{曜日} \sim 28\text{日} \\ 0.5 & 29\text{日} \sim \text{末日} \end{cases} \quad (2)$$

末日に応じて日付重み w_{di} を式 (2) により割り当てる．⑤この 2 つの重みの積を計算し，和が 1 になるようにスケーリングしたものをサンプリング確率 p_i とし， p_i を用いた逆関数法により標本抽出を行う．この方法（低流量採水）で抽出された水質標本を用いて，BCwRE により年河川負荷量とその信頼区間を計算する．BCwRE の計算方法については多田・田中¹を参照されたい．推定量の信頼性は以下の方法で評価した．Monte Carlo 法にて母集団から標本を 2,000 組抽出し，標本毎に負荷推定量とその信頼区間を推定し，信頼区間の被覆確率 cv_i (信頼区間がその内部に真値を含む確率) を計算した．この被覆確率と名目上の信頼水準 pv_i の平均誤差の要約値である pE 値 (式 3) を，5~95%の範囲の (5%ごとの) 19 段階の信頼水準の値から計算し，信頼区間の信頼性評価に用いた．比較のため，月 1 回のランダム採水 (ランダム採水) による標本に基づく BCwRE による負荷量

推定も実施した．

$$pE = \text{sgn} \left[\frac{1}{19} \sum_{i=1}^{19} (cv_i - pv_i) \right] \times \frac{1}{19} \sum_{i=1}^{19} |cv_i - pv_i| \times 100 \quad (3)$$

5. 結果と考察 表 1 はランダム採水と低流量採水での年河川負荷量の 120 データセットに対する pE 値の分級結果を示す．この表から，ランダム採水と比べて，低流量

表 1 年河川負荷量の pE 値 (%) の度数分布

抽出方法	$pE(\%)$				
	$pE < -10$	$-10 \leq pE < -5$	$-5 \leq pE \leq 5$	$5 < pE \leq 10$	$10 < pE$
ランダム採水	5	6	103	4	2
低流量採水	7	17	90	5	1

採水では被覆確率が低下していた．低流量採水では負の値の pE が増加しているため，過少評価 ($cv_i < pv_i$) の負荷量推定結果が増えていた．これは高流量時の水質データが採水されなくなることが原因と考えられた．公共用水域 (河川) の水質データから信頼しうる年河川負荷量推定を行うためには，今後，この被覆確率の低下を軽減するような手法の改良が必要である．

参考・引用文献

1) 多田明夫・田中健二 (2025) 長期低頻度データによる年間河川負荷量の推定について，2025 年 (第 74 回) 度農業農村工学会大会講演会，2) 環境庁 (1971)，水質調査法，環境庁水質保全局長通達，昭和 46 年 9 月 30 日環水管第 30 号，入手先<<https://www.env.go.jp/hourei/05/000140.html>> (参照：2025 年 10 月 21 日)，3) 国土交通省 (1980~2018)，水文水質データベース，入手先<<http://www1.river.go.jp/>> (参照：2025 年 9 月 22 日)，4) 建設省河川局 (1980~2000)，流量年表 昭和 53 年~平成 10 年，5) 国土交通省河川局 (2001~2010)，流量年表 平成 11 年~平成 17 年，6) 日本河川協会 (2011~2015)，流量年表 平成 18 年~平成 24 年，7) U.S. Geological Survey. (2016) . National water information system data available on the World Wide Web (USGS water data for the nation) [Data file] . Retrieved from <http://waterdata.usgs.gov/nwis/>, <https://doi.org/10.5066/F7P55KJN>, 8) Heidelberg University. (2019) . Heidelberg University National Center for Water Quality Research Tributary data download [data file]. Retrieved from <https://ncwqr.org/monitoring/data>

筑後川流域における模擬水位を活用した未経験規模洪水の リアルタイム予測手法の開発

Development of a Real-Time Flood Prediction Method for Unprecedented Events Using Simulated Water Levels in the Chikugo River Basin

○田畑 俊範* 菱田 祥子** 原田 昌佳* 尾崎 彰則***
TABATA Toshinori HISHIDA Shoko HARADA Masayoshi OZAKI Akinori

1. はじめに 気候変動に伴う豪雨の頻発化・激甚化により、農業・人的被害の軽減に向けたリアルタイム洪水予測の重要性が高まっている。深層学習を用いた水位予測は、高速かつ高精度な手法として注目されているが、未経験規模洪水に対する外挿予測の不確実性が課題である。これに対し、物理モデルにより生成した模擬水位を教師データとして活用する手法が提案されているが、多数のダムを有する大流域への適用には課題が残る。本研究では、筑後川流域を対象に、模擬水位の生成手法を提案し、未経験規模洪水に対する高精度なリアルタイム洪水予測モデルの構築を目的とする。

2. 対象流域およびデータ 対象は図1に示す筑後川流域（流域面積 2860 km²）とし、予測対象地点は中流域の片ノ瀬水位観測所とした。2002年～2023年の22年間における雨量観測所36地点および水位流量観測所10地点のデータを用いた。洪水イベントは、片ノ瀬において水防団待機水位（6.7 m）を超えた31イベントを抽出し、各イベントをピーク前後120時間と定義した。また、片ノ瀬において最高水位を記録した平成29年7月九州北部豪雨（以下、2017年7月洪水）を未経験規模洪水として検証用データとし、残りの30イベントを学習データとして用いた。

3. 模擬水位の生成 模擬水位の生成は、(1)各洪水イベントの降雨の引き伸ばしによる模擬降雨の生成、(2)分布型流出モデルによる模擬降雨に対する流量計算、(3)水位流量曲線による水位への変換の3段階で生成した。以下に各手順の詳細を記す。

(1) 模擬降雨の生成 30洪水イベントの降雨を対象に、ティーセン法により算出した流域平均雨量から72時間最大雨量期間を抽出し、グンベル分布に基づく確率降雨（10年・50年・100年）に一致するよう降雨強度を引き伸ばした。その際、3日間の降雨パターンを保持するため、確率降雨に基づく日配分雨量に従い、各観測所の降雨量の引き伸ばし比率を算出した。降雨波形が不自然なものや1時間雨量が極端に大きいケースを除外し、47イベントを流量計算に用いた。

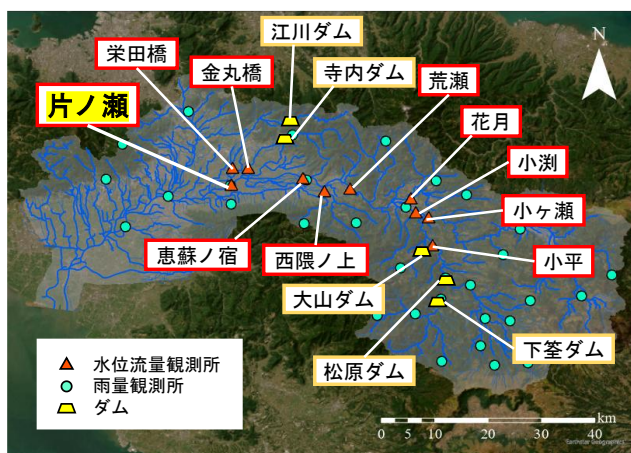


図1 筑後川流域および各観測所の概要
Fig. 1 Overview of the Chikugo River Basin and observation stations.

*九州大学大学院農学研究院（Faculty of Agriculture, Kyushu University），**九州大学大学院生物資源環境科学府（修了生）（Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University, Alumnus），***九州大学熱帯農学研究センター（Institute of Tropical Agriculture, Kyushu University）

筑後川流域，LSTM，分布型流出モデル，リアルタイム予測，未経験規模洪水

(2) 流量計算 生成した 47 イベントの模擬降雨を入力として、図 1 に示すダム 5 基の操作を考慮した土地利用別タンクを導入した分布型流出モデルにより流量を算定した。

(3) 水位変換 計算流量を流域内 10 地点の観測所における水位流量曲線により水位へ変換

し、模擬水位を得た。教師データには、ピーク時刻の 72 時間前～48 時間後の計 121 時間（約 5 日間）の模擬水位を用いた。

4. リアルタイム洪水予測モデルの構築 洪水予測モデルには LSTM を用い、片ノ瀬水位観測所におけるリードタイム (LT) 1 h, 2 h, 3 h の 3 モデルを構築した。入力 は 10 地点（片ノ瀬および上流 9 地点）の過去 15 時間の水位とし、中間層は LSTM 層と全結合層から構成した。教師データには 47 イベントの模擬水位を用い、leave-one-out 交差検証により精度評価を行った。模擬水位活用の有効性を検証するため、観測水位のみを教師データとしたモデルも構築した。この場合、洪水時とダムの運用条件を一致させるため、使用可能なイベントは 4 イベントに限定された。ハイパーパラメータは両モデルで同一とした。

5. 結果と考察 2017 年 7 月洪水を対象とした予測の結果について、評価指標を表 1 に、ハイドログラフを図 2 に示す。観測水位のみで学習した場合はピーク水位を大きく過小評価した。これは、学習データの範囲を超える外挿となるためである。一方、模擬水位を用いた場合、LT=1 h～3 h のすべてにおいて水位変化を良好に再現した。RMSE は観測水位のみの場合と比較して約 34%～43% 改善し、ピーク水位誤差も約 2 m 改善された。これにより、模擬水位を用いた学習が未経験規模洪水に対する予測性能の向上に有効であることが示された。

6. おわりに 本研究では、筑後川流域において模擬水位を活用したリアルタイム洪水予測モデルを構築した。その結果、未経験規模洪水に対しても高精度な予測が可能であることを示した。本手法は、大流域における洪水予測の高度化に有効であり、農業被害の軽減や農地の用排水管理の適正化への貢献が期待される。

表 1 各モデルによる予測精度の比較
Table 1 Comparison of prediction accuracy between the two models.

LT (h)	観測水位を学習		模擬水位を学習	
	RMSE (m)	ピーク水位 誤差(m)	RMSE (m)	ピーク水位 誤差(m)
1	0.570	2.072	0.327	0.102
2	0.816	2.434	0.534	0.507
3	1.050	2.774	0.691	0.510

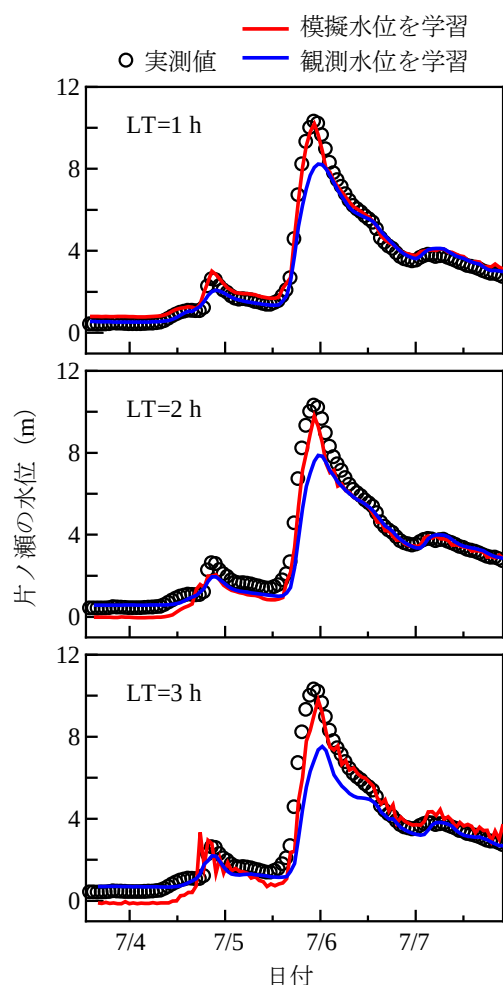


図 2 2017 年 7 月洪水における両モデルの水位予測結果の比較
Fig. 2 Comparison of predicted water levels by the two models for the July 2017 flood.

ため池流域における洪水流出モデルの再現性評価と流出特性の解明

Evaluation of Flood Runoff Models and Runoff Characteristics in Irrigation Pond Watersheds

○寺家谷 勇希*

小嶋 創*

吉迫 宏*

JIKEYA Yuki

KOJIMA Hajime

YOSHISAKO Hiroshi

1. はじめに

ため池の洪水調節効果や設計洪水位の設定に関わる貯留効果の評価にあたっては、流域からため池への流入量（以下、流域流入量）を適切に推定することが重要である。既往の技術資料¹⁾や研究^{2),3)}では、流域流入量を推定に洪水流出モデル（以下、モデル）として合成合理式や貯留関数法、タンクモデルが用いられている。しかし、ため池流域の流出特性に基づき各モデルによる流域流入量の再現性の比較検討は十分行われていない。本研究は、流域条件の異なる4ヵ所のため池を対象に各モデルを適用し、その比較からため池流域の流出特性を明らかにすることを目的とする。

2. 対象ため池と水文観測、対象降雨イベント

対象ため池は宮城県白石市の笠松溜池（以下、K池）と赤沢溜池（以下、A池）、静岡県掛川市の海老名池（以下、E池）と上の宮下池（以下、M池）である。表-1に対象ため池の諸元を示す。A池には圧力式水位計を、K池とE池、M池には圧力式水位計と転倒ます型雨量計を設置し、表-1に示した観測開始日から10分間隔で貯水位と雨量を観測した。対象ため池は全て自流域を持つため池である。A池の流域はK池の流域を包含しており、A池の流出解析には、K池の雨量データを用いた。対象降雨イベントは、観測開始日から2025年12月までの降雨のうち、24時間を超える無降雨期間を含まない一連降雨から抽出し、この中から総雨量100mm以上で1時間最大雨量が30mm以上かつ取水施設の操作による水位減少が認められない2回の降雨イベントを選定し、モデルのパラメータ同定期間（以下、同定期間）と検証期間に用いた（表-2）。

3. モデル概要

モデルの検証に用いる流域流入量（以下、観測流入量）は、3mm以下の水位変動を除去した貯水位を用い、土地改良事業設計指針「ため池整備」の「貯留効果の計算例」¹⁾に基づき、1分間隔で求めた。検討対象のモデルは、合成合理式¹⁾と貯留関数法⁴⁾、

表-1 対象ため池の諸元と観測開始日

Table1 Specifications of the Target Irrigation Ponds and Observation Start Date

名称	堤高 (m)	総貯 水量 (千 m ³)	満水 面積 (km ²)	洪水吐				流域 面積 (km ²)	流域の主な 土地利用	観測開始日
				型式	深さ (m)	幅 (m)	流量係数 (m ^{1/2} /s)			
K池	2.5	0.8	0.0022	水路流入式	0.86	0.60	1.39	0.055	山林	2022/3/2
A池	7.2	14	0.0083	越流堰式	0.49	2.61	2.0	1.093	水田, 貯水池, 山林	2022/3/3
E池	11.8	52.4	0.0125	越流堰式	1.2	5.05	2.0	0.449	山林, 茶畑	2019/2/21
M池	7.0	16	0.0070	越流堰式	1.7	10.8	2.0	1.445	貯水池, 山林, 茶畑	2019/2/22

注) 諸元の値のうち、「堤高」と「総貯水量」は農林水産省が公開している「農業用ため池一覧」に基づく値。「満水面積」は地理院地図より求めた値。洪水吐の「深さ」と「幅」は現地で計測した値。「流量係数」は洪水吐型式から判断される「土地改良事業設計指針「ため池整備」¹⁾」記載値。「流域面積」は国土地理院の基盤地図情報の5mDEMからArcGISの解析ツールで求めた値。

*農研機構（NARO） キーワード：ため池，流出モデル，流出特性，洪水流出

タンクモデル（直列４段型）⁴⁾とし、流域流入量（以下、計算流入量）を１分間隔で求めた。合成合理式による計算流入量の算定では、寺家谷ら⁵⁾による手法に基づき、同定期間のうち観測流入量（20%以上）を対象に誤差評価が最小となる、流出率を設定した。貯留関数法では、同様の手法⁵⁾でパラメータ「PとK、流域面積補正係数²⁾（以下、 α ）」を設定した。タンクモデルでは、同様の手法⁵⁾で、各段のパラメータ「流出孔係数と流出孔高さ、浸透孔係数、初期水深」と α を設定した。

4. 結果と考察

図-1に検証期間における観測流入量と計算流入量のピーク値前後のハイドログラフを示す。K池とE池では観測流入量がピーク後に短時間で減少し、K池は合成合理式でも洪水流出現象を比較的再現されたのに対し、E池は合成合理式ではピーク後の流域流入量の再現性が低かった。K池は流域が小さく山林のみで構成されるため、流出を降雨との線形関係で表現する合成合理式でも流域流入量を比較的再現できたのに対し、E池は山林主体であるが流域面積が大きいいため、流域流入量の減衰が遅くなり、合成合理式ではピーク後の流域流入量を再現できなかったと考えられる。A池とM池は、観測流入量がピーク後緩やかに減衰し、合成合理式による流域流入量の再現性が低かった。これは流域内にある水田やため池が有する貯留効果に因るものと考えられる。全対象ため池で、貯留関数法とタンクモデルの計算流入量に大きな差は見られなかった。これは、ため池流域の洪水流出では直接流出が大部分を占めるためと考えられる。

表-2 対象降雨イベント
Table2 Target Rainfall Events

対象	パラメータ同定/検証期間	降雨開始日 降雨終了日	1時間最大 雨量 (mm/h)	総雨量 (mm)	継続時間 (h:m)
K池 A池	パラメータ同定期間	2023.9.4 2023.9.7	31.5	155	86 : 00
	検証期間	2024.9.19 2024.9.25	32.5	115	142 : 10
E池	パラメータ同定期間	2023.6.1 2023.6.4	51	361	55 : 10
	検証期間	2025.9.4 2025.9.6	109	249.5	61 : 10
M池	パラメータ同定期間	2022.9.23 2022.9.25	61	307.5	66 : 20
	検証期間	2025.9.4 2025.9.6	71	198	61 : 10

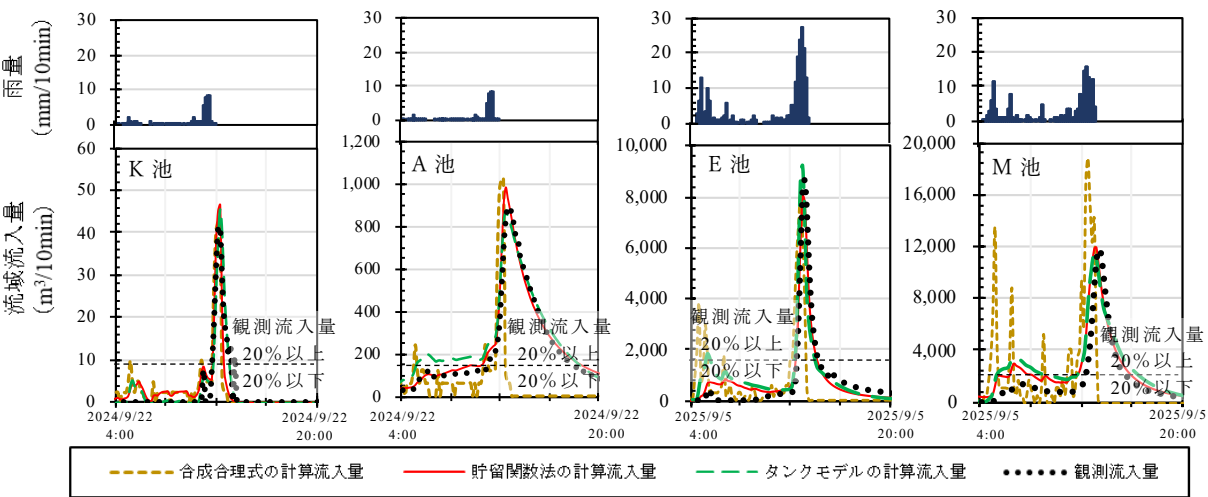


図-1 対象ため池の検証期間におけるハイドログラフ（ピーク値前後を図示）

Fig.1 Hydrograph during the verification period of the Target Irrigation Ponds

【引用文献】1)農林水産省農村振興局整備部（2015）：土地改良事業設計指針「ため池整備」，農業農村工学会，pp.165-176. 2)吉迫ら（2019）：減災対策を目的としたため池洪水流出モデル，農業農村工学会誌，87（5），pp.365-368. 3)加藤ら（2002）：実降雨のパターンを考慮したため池の洪水調節機能評価，農業土木学会論文集，222，pp.17-23. 4)農林水産省農村振興局（2019）：土地改良事業計画基準及び運用・解説 計画「排水」，pp.232-237. 5) 寺家谷ら（2025）：ため池の洪水流出現象を再現する流出解析モデルの比較，2025年度（第74回）農業農村工学会大会講演会要旨集，pp.165～166. 【謝辞】本報告の一部は農林水産省委託プロジェクト研究「ため池の適正な維持管理に向けた機能診断及び補修・補強評価技術の開発」（JP009839）で実施した。

河川内工事における非出水期河川流量についての考察

Considerations on Non-Flood Season River Flow During In-Channel Construction

○沢邊 哲也*

SAWABE Tetsuya

西出 浩幸*

NISHIDE Hiroyuki

森田 孝治*

MORITA Kouji

1. 発表の概要

近年、台風や異常気象による突発的な豪雨による水害が激甚化しており、河川洪水に対する堤防の安全強化や、既存ダムによる洪水調節などの取組みが展開されている。

これらの取組は、いわゆる「出水期」の洪水対策であるが、河川堤防、頭首工、樋門樋管など河川工作物の新築・改修工事は、「非出水期」に実施されることが多い。できるだけ出水量の少ない時期に実施し、仮設工事規模を最小限に抑えてコスト縮減を図るためであるが、想定以上の出水により工事が中止・中断されるケースが増えている。

現行の仮締切堤設置基準では、「過去5年1位」または「過去10年2位」のいずれか大きい方の流量が採用されるが、設計する対象年度により、設計流量が大きく異なり、むしろ近年では過少評価となるケースが見受けられることが判った。

非出水期の河川流量の実態から、河川内工事における安全確保のため、非出水期の設計仮設流量を設定する必要がある。

2. 非出水期河川流量の検討対象河川と流量観測所

①鳴瀬川水系吉田川 流路長：43km / 流域面積：322km²

昭和61年、令和元年に大洪水により被災しており、特定都市河川流域に指定され、隣接の鶴田川流域を含めて、流域治水のための整備計画に着手している。

②球磨川水系球磨川 流路長：115km / 流域面積：1,880km²

過去に何度も洪水災害が発生しており、令和2年7月九州豪雨による人吉市の浸水被害令和6年3月大雨による改修工事中の遙拝頭首工の被災が記憶に新しい。

3. 非出水期の河川流量

①非出水期最大流量 突発的な出水があり、年によって出水量に大きな格差がある。

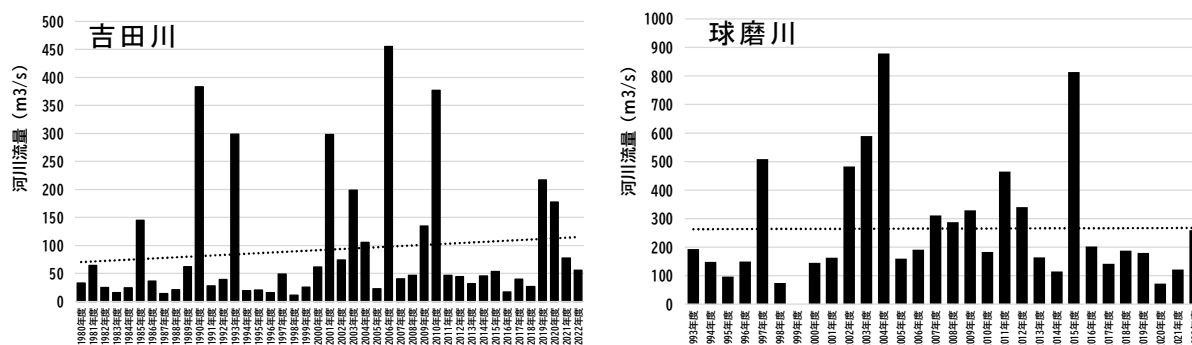


図1 非出水期最大流量 Fig1 Non-Flood Season River Flow

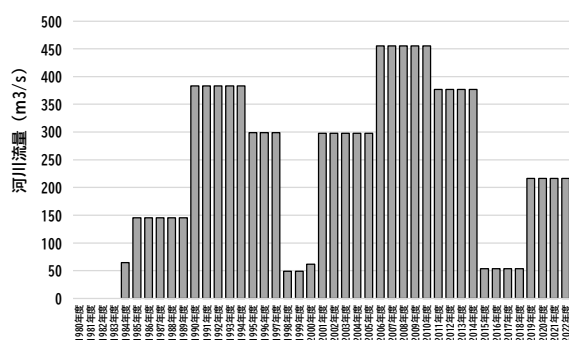
* サンスイコンサルタント株式会社 SANSUI CONSULTANT Co.Ltd

キーワード：河川内工事，非出水期河川流量

②過去 5 年 1 位の非出水期流量

5 年連続で出水が少ない期間もあり、過去 5 年 1 位では、年度により格差が大きい。

吉田川：50～450m³/s（格差約 9.0 倍）



球磨川：190～880m³/s（格差約 4.6 倍）

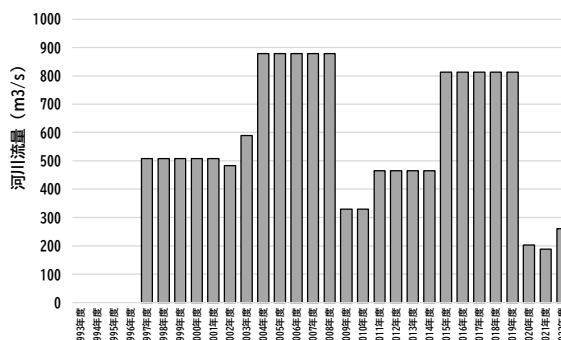
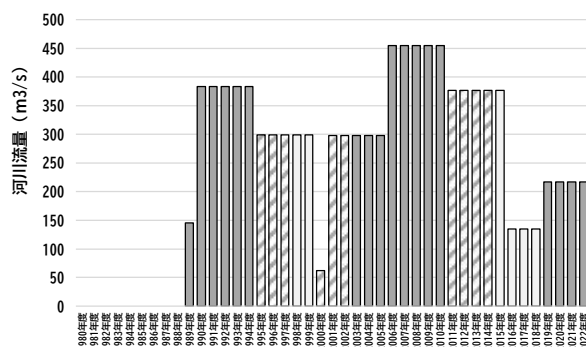


図 2 過去 5 年 1 位の非出水期流量

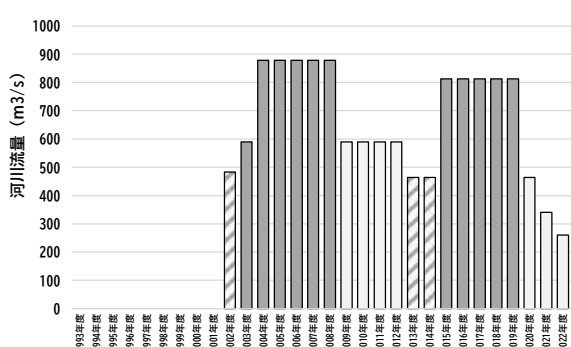
③設計に用いる仮設流量

基準では「過去 5 ヶ年間の時刻最大水位を目安」とし、当該水位が 5 ヶ年間で異常と判断される場合は「過去 10 ヶ年の二位の水位を採用することができる」とされている。年度による格差が解消されず、依然として年度により採用される設計仮設流量に大きな格差があることが判明した。

吉田川：60～450m³/s（格差約 7.5 倍）



球磨川：280～880m³/s（格差約 3.1 倍）



■：過去 5 年 1 位 □：過去 10 年 2 位 ▨：過去 5 年 1 位＝過去 10 年 2 位

図 3 過去 5 年 1 位または過去 10 年 2 位の大きな非出水期流量

4. 考察～まとめ

頭首工や樋門樋管などの河川工作物は、非出水期に施工されることが多いが、近年、施工期間中の異常出水による事故が多発している。過去に洪水被害が多発する経緯をもつ 2 河川について、非出水期の流量データを分析したところ、現行の仮締切堤設置基準（案）では、設計年度により流量が過少評価される可能性があることが判明した。

同基準改定では、堤防開削する場合、「非出水期の既往最大流量の 1.2 倍流量」を仮設流量とするように上方修正された。堤防開削を伴わない場合においても、過去の流量データの分析により、5 年 1 位、10 年 2 位にとらわれず、安全確保に必要な仮設流量の設定を提案していく必要があると考える。