

不確実性への対応による流域治水機能の 質的向上 -太田川を事例に-

RAISING THE FUNCTION OF FLOOD CONTROL IN BASIN QUALITILY BY
THE REDUCTION OF UNCERTAINTY -A CASE STUDY OF THE OOTA RIVER-

尾澤卓思¹・福岡捷二²・後藤岳久³

Takashi OZAWA, Shoji FUKUOKA and Takehisa GOTO

¹非会員 中央大学大学院 理工学研究科 都市人間環境学専攻 博士課程後期課程 (〒112-8551 東京都文京区春日一丁目13-27)

²正会員 フェロー 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日一丁目13-27)

³正会員 中央大学研究開発機構准教授 (〒112-8551 東京都文京区春日一丁目13-27)

気候変動の進行に伴い、流域治水施策の整備量や施設数という量的拡大と併せて治水計画や施策の不確実性の減少という質的充実による治水機能の向上が重要となる。本研究では、太田川水系において小流域における多点水位観測による流出解析の再現性向上、再現性の良い洪水解析モデルを用いて洪水調節施設の安全度評価及び洪水流の全エネルギー水頭を用いた洪水リスクの評価、さらに高リスク箇所において堤防脆弱性指標により堤防破壊のリスクを評価し、堤防余裕高の活用を提案した。また治水計画における不確実性を整理し、治水計画立案プロセス及び治水計画実施プロセスにおける不確実性への対応について検討した。今後流量負荷の増加が懸念される中で河道・堤防における安全性の評価方法の確立と余裕高の活用による堤防機能の質的充実（危機管理型堤防）の実現を目指している。

Key Words: River Basin Disaster Resilience and Sustainability by all, Uncertainty of the flood control plan, Total energy head, Levee vulnerability index, Levee height

1. はじめに

気候変動の影響により、水災害の激甚化する中で、河川整備基本方針の見直しが行われており、降雨量の増加により、洪水流量の増加が想定されている。こうした中で河川対策に流域対策を組み合わせる流域治水が重要となっている。流域水害対策計画を策定して流域治水を行う特定都市河川のみならず一般河川において流域治水を計画的に着実に実施することが求められる。今後気候変動の進行に伴い、流域治水施策の整備量や施設数という量的拡大と併せて、治水計画や施策の不確実性の減少という質的充実による治水機能の向上が治水効果の確保において重要となる。特に流域、河川において実効性ある貯留機能の確保や流量負荷の増大が懸念される河道の安全性の確保は不可欠である¹⁾。

本研究では、図-1のように多点水位観測により小流域の水収支から流出形態、流出量を明確にして、洪水調節施設（貯留機能）の評価を行うとともに、河道において全エネルギー水頭による水位上昇リスクの評価及び堤防

の破壊の安全性評価を組み合わせ、流域治水機能の質的向上を図る。

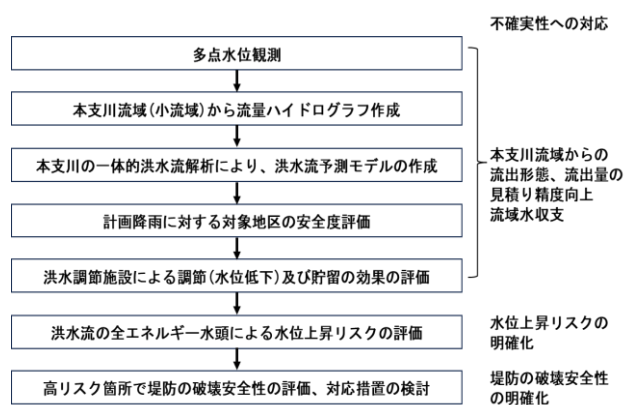


図-1 研究フロー図

2. 治水計画の不確実性

治水計画は、発生頻度が少なく、時空間的に一様でない自然現象を対象としており、観測により現象の把握に

治水計画の策定と実施のプロセスにおける不確実性
(データの信頼性を除く要因)

1. 気候変動による不確実性
 - ・想定外力 (降雨量等の規模、時期)
2. 治水計画の不確実性
 - ・流域対策の貯留量
 - ・流域対策の持続性、継続性
 - ・洪水調節施設等の調節量
 - ・超過外力の発生
 - ・整備途上、未整備区間の影響
 - ・河道・堤防の安全性

3. 太田川水系における治水計画の検討

さらに、治水計画の実施プロセスの段階として洪水全エネルギー水頭²⁾を算出し、計画高水位より高い水位を生じる可能性のある堤防箇所において、余裕高での堤防の浸透破壊の安全性評価を行い、余裕高を活用する危機管理対応型の堤防について考察する。

一級水系太田川は、平成17年9月に観測史上最大の洪

令和4年9月洪水を対象に図-4に示す多点配置で観測したデータを用いて洪水予測モデルを構築し、平成17年9月洪水で検証を行った。検証結果の一例として図-7痕跡水位縦断分布図を示す。概ね水位を再現できている。また流出量の検証は、図-8に飯室地点のものを示す。浮子観測がピークまでなかったため、貯留関数法との比較も行っており、概ね再現できていることがわかる。



- 482 -

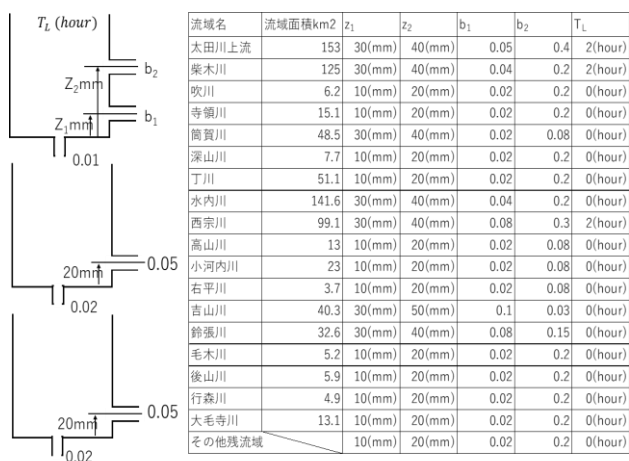


図-5 タンクモデル及び流出孔係数

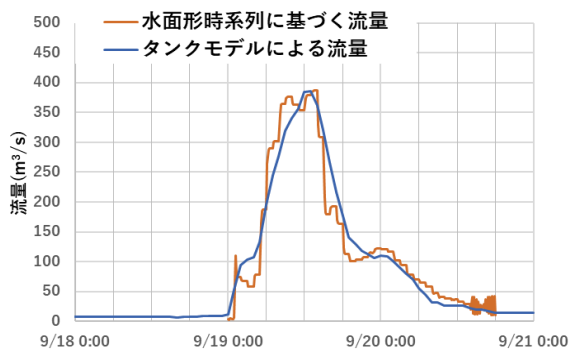


図-6 タンクモデルの流出量（柴木川での検証例）

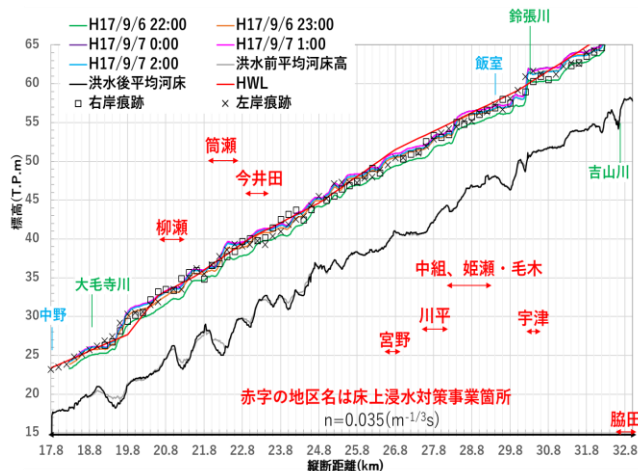


図-7 H17.9 洪水痕跡水位縦断分布図(検証計算)

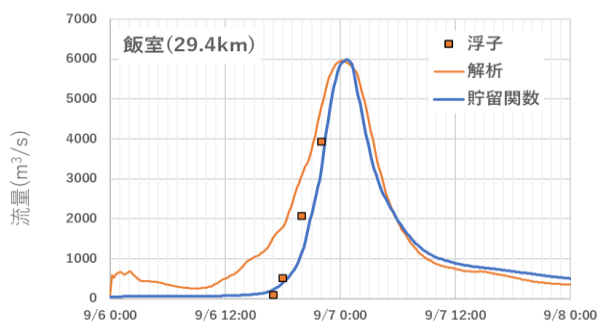


図-8 飯室地区流量（検証計算）

(2) 流域水収支を用いた洪水調節施設の検討

構築した洪水予測モデルを用いて計画降雨（1/200，昭和26年10月波形）のもとに，治水計画を検討した。洪水は，山間狭隘部において流量波形をほとんど崩さず流下し，図-9に示すように複数の床上浸水対策事業箇所において水位が計画高水位より高くなり，飯室地点（距離29km左岸周辺）で最も計画高水位から高い水位となっている。山間狭隘部の河道での水位低下には限界があり，上流域での洪水調節施設による水位低下が有効と考える。洪水調節施設について

では，最も水位上昇の厳しい飯室地点より上流域の流域水収支を算出して検討した。3(1)で述べた方法より算出した本支川の流量分担を図-10に示す。これをもとに効果的な洪水調節を行うことを目指して，約22.4%を分担する温井ダムのある滝山川に次いで約15.6%の洪水分担量を担う本川上流域の洪水流量をダムで低減させる案を考えた。飯室地点での水位を計画高水位以下とするため，一定量放流方式の洪水調節量約2000万m³のダムを本川上流域に設置の可能性を考慮して想定した。温井ダムや樽床ダム等の既存ダムの容量から見て洪水調節容量約2000万m³は相当量である。結果，図-11のように水位は，飯室地点を含む床上浸水対策事業の地点で計画高水位以下となり，図-9と比較すると全体的に水位低下がわかり，洪水調節施設の効果が確認できた。飯室地点では，図-12のようにピーク水位が低下して計画高水位を下回っている。また本支川洪水分担量（図-13）は整備前の図-10との比較からダム貯留量が大きく，下流への流出量も減少していることがわかる。またダムによる貯留と河道の水位低下により，河道貯留量は減少している。

治水計画策定の段階から不確実性への対応として，密な観測とそれを活かした同定，検証を行い，事象再現，解明に適したモデルを選定することで本支川の流出形態，流出量の見積もりを適正に行い，信頼性の高い治水計画の立案に資する。さらに実施の段階において危機管理に対応する堤防の評価など河道や堤防等の管理を検討する上で役立て，治水計画の立案から実施まで一貫した考え方に基づき不確実性の少ない解析を可能にする。

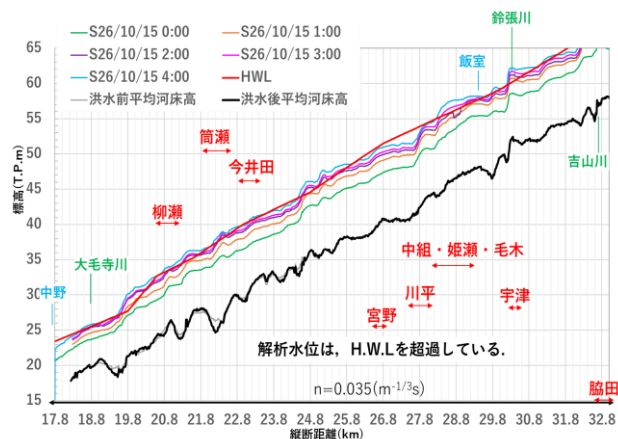


図-9 S26.10 洪水水位縦断図(現況河道)

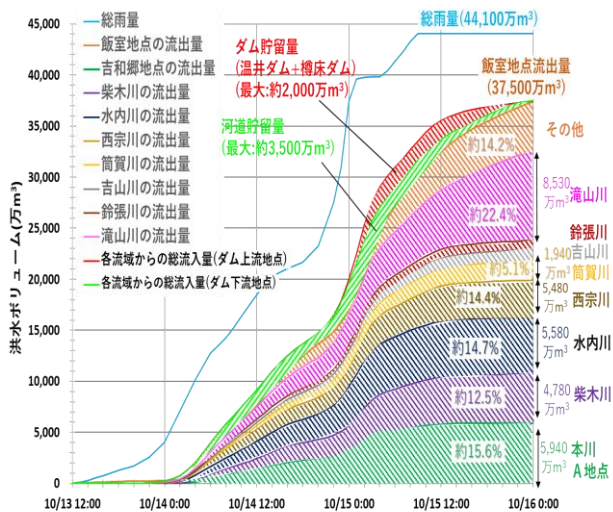


図-10 飯室地点上流の本支川洪水分担量

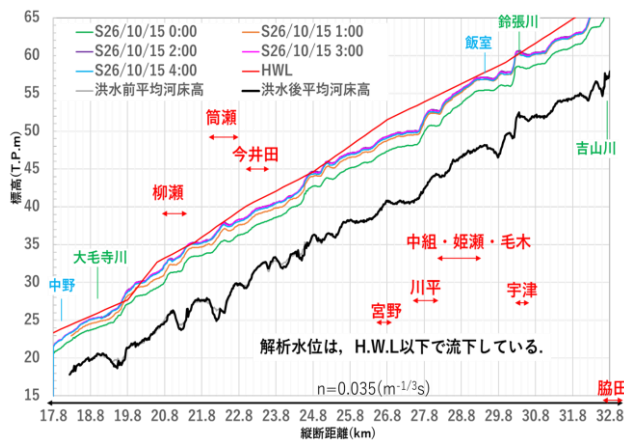


図-11 S26.10 洪水水位縦断面図 (新規洪水調節施設あり)

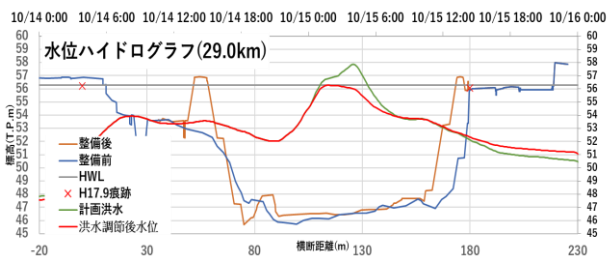


図-12 飯室地点水位ハイドログラフ

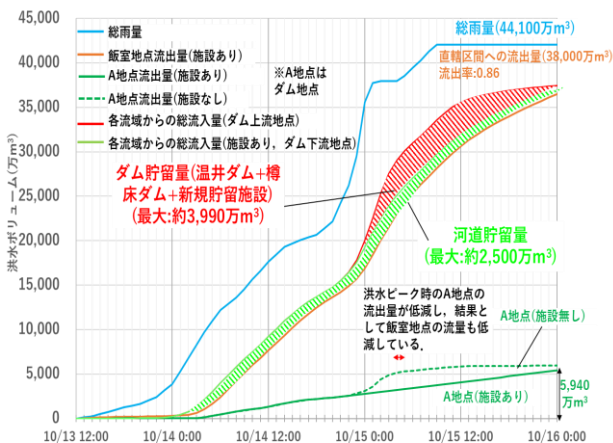


図-13 飯室地点上流の本支川洪水分担量 (新規洪水調節施設有)

今回は、密な観測による水面形を出発点とし、タンクモデルや Q3D-FEBS 法を用い、洪水の流出特性のわかる流域の水収支を明らかにして、洪水調節施設の効果を適正に評価できた。

(3) 全エネルギー水頭による水位上昇リスクと余裕高活用に向けた堤防の脆弱性の評価

太田川中上流の床上浸水対策事業では、平成17年9月洪水に対し、床上浸水を防ぐとともに、整備による下流への流量増加も抑制するため、計画高水位の高さで堤防を整備している。このため、越水を想定し、川表を石張りの護岸、川裏をブロックマット、天端を舗装している。本章では、太田川の将来計画 (新規洪水調節施設、計画堤防) を想定して、全エネルギー水頭による水位上昇リスクの高い箇所での堤防の浸透破壊の評価を行う。全エネルギー水頭の評価については、福岡らは、三次元洪水流について底面から水面までの全てのエネルギー分布を考慮した全エネルギー水頭の評価法を示している²⁾。ここでは、福岡らの方法を用いて算出した全エネルギー水頭最大値の分布を図-14に示す。距離標17km付近から71km付近までで計画堤防高を全エネルギー水頭が越えたのは、支川合流や堰等による影響がある数箇所、それ以外では全エネルギー水頭は概ね計画堤防高以下である。

床上浸水対策事業の対象地区で最も水位の高くなる飯室地点 (29km左岸) において、全エネルギー水頭は、計画高水位を1.4m高くなるが計画堤防高以下となっている。

計画堤防の余裕高の活用を想定して浸透破壊の安全性を検討する。飯室地点の地盤はボーリングデータから玉石混じり砂礫で透水性が高いと想定されるが、透水係数の情報が少ない。そこで危険側を想定し、基盤へ浸透せず堤体内へ浸透水が溜まりやすい不透水性基盤として、それに基づく指標を用いて検討した。検討にあたっては福岡、田端が不透水性基盤の堤防の浸透破壊を判定する条件である堤防脆弱性指標 t^* ⁵⁾を用いて判定する。

$$t^* = \frac{5kHT}{2\lambda b^2}$$

k (m/sec): 堤体の平均透水係数, λ : 空隙率, H (m): 堤防表法面における高水敷高からの洪水最大水位, b (m) 最大水位になった時の堤防敷幅, T (sec): 高水敷高から最大水位に上昇するまでの洪水継続時間

判定は、飯室地点の全エネルギー水頭及び計画堤防天端高での水位の場合を想定した。なお計画堤防高の水位の場合は、全エネルギー水頭の最高値と同時のタイミングで浸透破壊が発生したとして評価する。計画堤防の土質は、13km下流の堤防の透水係数を参考に $k = 1 \times 10^{-6}$ m/sec とし、 $\lambda = 0.4$ と仮定した。図-15に飯室地点 (距離標29km左岸) の計画堤防を入れた横断面と水位及び全エネルギー水頭のハイドログラフを重ねて示す。この結果より、図-13に示す b , H , T の数値から計画堤防天端の水位の場合、 $t^* = 1.06 \times 10^{-3}$ 、全エネルギー水頭の

場合、 $t^* = 8.84 \times 10^{-4}$ となった。福岡、田端は、堤体浸透に起因した鬼怒川等の堤防被災の分析と堤防模型被災実験により、 t^* が概ね0.1～1の範囲で堤防決壊、概ね0.01～0.1の範囲で裏法滑り、概ね0.001より大きい範囲で堤体漏水が生じていることを示している⁵⁾。今回は、現堤防及び今後の計画堤防の透水係数及び堤防基盤の透水係数が不明のため、堤体の透水係数を下流部の堤防の値から仮定し、危険側の不透水性基盤としていることから厳密な判定は難しいが、全エネルギー水頭の場合において0.001以下、計画堤防高の場合においてはほぼ0.001となっている。このことから、河川への流量負荷が増加しても浸透破壊の可能性は低く、余裕高の活用による流量対応で概ね問題はないと考える。侵食に関しては、高水敷の無い山間峡谷部の河道では、既設護岸が計画高水位までであるため検討しなかったが、今後土砂移動に伴う河床上昇による全エネルギー水頭の上昇の影響に留意する必要がある⁶⁾。また柳瀬地点（距離21km）は、最高洪水水位が計画高水位より約0.7m低いものの、全エネルギー水頭は、計画堤防高より約0.2m低いところまで上っている。山間峡谷部で大きな曲率の蛇行部の頭頂部に位置しているため、流速が大きい。しかし、堤内地盤高が高く、最高洪水水位が地盤高に達していないため、全エネルギー水頭が地盤高に達した時刻を用いて評価を行った。計画堤防高の場合で、 $t^* = 7.10 \times 10^{-4}$ であり浸透問題はないと言える。水衝部、支川合流部や河川横断構造物の存在など全エネルギー水頭の高い要因と堤防に及ぼす影響（越水、浸透、侵食）を考え、地形や背後地等の状況を踏まえて堤防の安全性を確保するとともに、余裕高に洪水水位が上昇しても浸透破壊等の安全性を確保した危機管理対応型の堤防（後述）を構築することが重要となる。

今後、こうした全エネルギー水頭を用いた評価が重要となってくる。こうした評価を行う上で重要なことは、河道内の全エネルギー水頭の分布とエネルギーの移動の流れ（水位、流速）と併せて分析することであり、河道等で河床変化等何が起こるか、特に計画高水位を超えるような洪水において想定される現象を読み解く鍵となる。

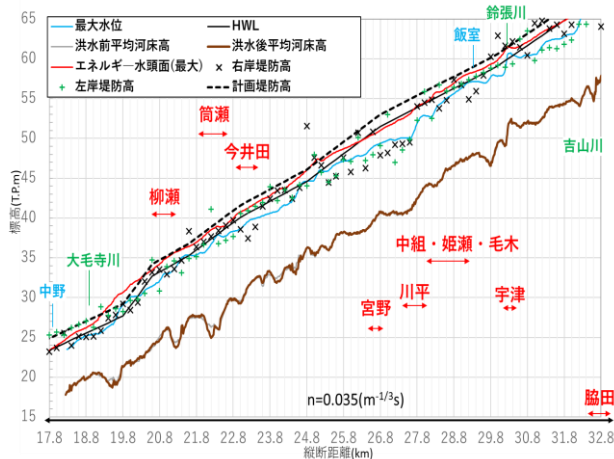


図-14 S26.10洪水全エネルギー水頭最大値縦断面図

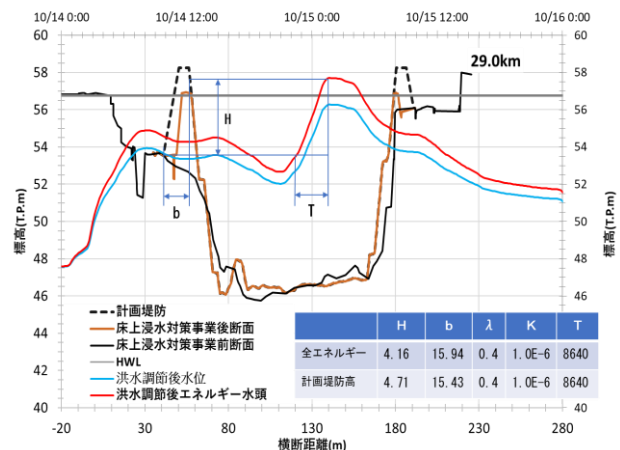


図-15 飯室地点(29km)横断面図

水位及び全エネルギー水頭最大ハイドログラフ

4. 不確実性への対応についての考察

(1) 治水計画の策定プロセスにおける不確実性への対応

太田川中上流部では、本支川の主な流域において多点で水位観測を行い、タンクモデルによる流出解析モデル、準三次元洪水流解析モデルを用いて、各流域からの流出量や流下する洪水流を適正に再現でき、流域の水収支の把握が可能であることを示した。これに基づき、洪水調節施設の効果も明確に評価することができ、床上浸水対策事業箇所の治水計画の実現を可能にする考え方を整理することができた。

このように小流域の流出量について、多点水位観測のデータを基に水面形の把握、流量ハイドロの作成、流出解析モデルの定数同定を行え、小流域の水理データの少ない方法とは異なり、小流域でのモデルの同定、検証を行うことで再現性を良くしている。小流域を基本に流域水収支を把握する方法は流域治水にとって有効である。そして、小流域を統合した大流域における本川、支川群を一体とした洪水流の解析が重要となる⁷⁾。危機管理型水位計等により、洪水位の観測が多地点で行うことが可能となっており、上流域まで含め今後の普及が期待される。

(2) 治水計画の実施プロセスにおける不確実性への対応

太田川中上流部において、従来の治水計画では評価しない全エネルギー水頭(最大)を用いた堤防の安全性の評価を行った。水位が上がってくると全エネルギー水頭も著しく大きくなる。水位が計画高水位より低い箇所でも全エネルギー水頭が計画堤防高に近いところまで達する場合もあった。洪水流は、支川の合流地点付近や構造物等の影響区間では、福岡が示したように洪水水位が計画高水位を越える場合が生じ、このとき全エネルギー水頭も高くなり、堤防天端高を越える可能性が高くなる²⁾。

従って水位が一部区間上昇することが起きる。こうしたことと、今後気候変動による影響、洪水調節施設の調節量や超過洪水等の不確実性を考慮すると、水位が計画高水位もしくは堤防天端高一余裕高すなわち計画高水位相当を越えると堤防は破堤するという評価をするのではなく、余裕高の活用による実質安全度の向上が重要になると考える。

堤防は、洪水時の風浪、うねり、跳水等による一時的な水位上昇や、洪水時の巡視や水防活動を実施する場合の安全の確保、流木等流下物への対応等に対して余裕の高さを用意している。この高さを越水、浸透、侵食に対する安全性の確保や、気候変動や治水計画の不確実性に伴う河道への流量等負荷の増加への対応や避難活動における避難時間（リードタイム）の確保等に活用し、これを可能にする危機管理対応型の堤防が今後必要とされる。水位が計画高水位より上昇しても余裕高の範囲内であれば、安全に洪水の流下が可能となるように、堤防の安全性の評価方法と必要な強化措置の確立が重要である。

5. おわりに

流域治水機能の質的向上として、①小流域における多点水位観測とALB測量による詳細な河道測量で洪水の流出解析の再現性を向上②再現性の良い流域水収支の解析により洪水調節施設の必要性及び安全度を評価③全エネルギー水頭により水位上昇のリスクを評価④高リスク箇所において堤防脆弱性指標により堤防破壊のリスクを評価及び堤防余裕高の活用の提案を行った。貯留を主とした流域の対策には不確実性がある中、信頼性の高い河川対策に力を入れることは重要である。特に今後流量負荷の増加が懸念される河道・堤防において水位上昇リスクに対し、堤防破壊に対する安全性を評価し、安全性確保の上で、余裕高の活用は治水のみならず水防・避難活動等にも有効な対応となる。

最後に治水計画の不確実性の観点からまとめる。

① 治水計画の策定プロセスにおける不確実性への対応
小流域を基本単位に多点水位観測を行い、再現性の良い流出解析を行う。これにより流域の水収支を明確化し、治水計画の基本となる流量や貯留量等を的確に把握する。こうした方法は、小流域の観測データの少ない方法とは異なり、小流域でのモデルの同定、検証を行うことで再現性を良くしている。得られた河川への流出量をもとに準三次元洪水流解析を用いて一次元や二次元の解析では再現できない複雑な流れ（水位、流速等）を再現するこ

とができる。このように事象の再現精度の向上により不確実性を減少するのみならず、全エネルギー水頭での評価など治水の要諦となる現象を把握し、信頼性の高い河道計画や施設計画を立案する。

② 治水計画の実施プロセスにおける不確実性への対応
再現精度の高い流れ等の事象をもとに堤防脆弱性指標等様々な評価方法を用いて、河道や堤防等の施設の安全性を評価することにより、河道・堤防等施設の活用、運用、管理の最適化を図り、河川管理のみならず防災活動やまちづくり等に貢献する。特に計画上の確実な機能の確保のみならず気候変動や流域治水に存在する不確実性への補完機能の確保も考慮する。

流域治水において、整備量や施策数という治水対策の量的拡大と併せて治水計画の不確実性の減少や施設等の信頼性の向上という質的充実による治水機能の向上が、安全を考える上で重要な取り組みとなる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、ご協力をいただいた国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所に謝意を表する。

参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水水面形観測情報の広域的・統合的活用による流域治水の考え方の構築に向けて、河川技術論文集，第23巻，pp.252-256，2017。
- 2) 福岡捷二，加藤宏季：超洪水流の時空間三次元エネルギー分布に基づく河道計画・設計法，河川技術論文集，第30巻，pp.411-416，2024。
- 3) 国土交通省中国地方整備局：太田川水系河川整備計画，2023。
- 4) 竹村吉晴，福岡捷二：波状跳水、完全跳水及びその減勢区間における境界面(水面・底面)上の流れの方程式を用いた非静水圧三次元解析（Q3D-FEBS），土木学会論文種B1(水工学)，Vol.75，No.01，pp.61-80，2019。
- 5) 福岡捷二，田端幸輔：浸透流を支配する力学指標と堤防浸透破壊の力学相似条件—浸透流ナンバーSF_nと堤防脆弱性指標 Γ ，土木学会論文種B1(水工学)，Vol.7，No.5，I_1435-1440，2018。
- 6) 後藤岳久，後藤勝洋，加藤宏季，福岡捷二：大規模洪水時における砂州の発達に伴う洪水流の三次元エネルギー分布の変化に基づく河川構造物の被災機構，第12回河川堤防技術シンポジウム論文集，pp.33-36，2025。
- 7) 福岡捷二：近年の洪水被害を踏まえた流域治水を考える，河川技術論文集，第28巻，pp.457-462，2022。

(2025. 4. 3受付)