

礫河原再生に向けたダム洪水調節方法変更の可能性～和賀川上流の湯田ダムを例として～

石川 忠晴¹・河内 敦²

¹正会員 工博 東京工業大学 名誉教授 (〒251-0035 神奈川県藤沢市片瀬海岸 2-4-15)

E-mail: workishikawa0612@yahoo.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 工博 (株)東京建設コンサルタント 環境防災研究所 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-15-6)

E-mail: kawachi-a@tokencon.co.jp

ダムによる洪水調節は河道の掃流力を減少させる。そのため下流河道において砂州の固定化と樹林の繁茂により礫河原が消失しつつある。本研究では、礫河原の樹林化が著しい北上川右支川の和賀川について、上流の湯田ダムの洪水調節方法を変更することによる河床礫移動の促進可能性を検討した。まず出水時の湯田ダム流入量と和賀川流量の統計解析からダム調節容量に十分な余裕のあることを確認し、和賀川河道の洪水流下能力の範囲内での洪水時ダム放流量の増加可能性を検討した。その結果、生起確率 1/5 の河道流量を約 1100 m³/s から 1800 m³/s に増加できることがわかった。続いて浅水流モデルを用いて流量増に伴う掃流力の変化を計算し、和賀川河道で支配的な 10cm 径の礫の移動性を改善できることを示した。

Key Words: nature restoration, gravel riverbed, dam operation rule, stochastic analysis, numerical flow analysis

1. はじめに

上流のダムにおける洪水調節に伴い、下流の礫床河道において滯筋と砂州の比高差が増大するとともに、砂州上の掃流力が減少して細粒分の堆積や樹林の発達が顕著になっている¹⁾。このような河相の変化は、河道粗度の増大という治水上の問題を生じさせるほか、河川生態系に大きな影響を与え^{2,3)}、礫河原喪失による河川親水性の劣化も生じさせている。また河道内の樹林化に伴いハリエンジュ等の外来性樹木の侵入および繁殖が助長されている⁴⁾。

そこで樹林化抑制と礫河原再生を目的とした事業が実施されている。一つは剥皮による枯死や伐採という樹木の直接的除去だが、手間や費用がかかる。また河道内樹木は成長が速いため^{4,5)}、一旦除去してもいずれ再生する可能性が高い。また間接的方法として、河床掘削により滯筋の短絡化や蛇行化を生じさせ、増水期における砂州河岸や砂州面の土砂移動を促す試みも行われている^{6,7,8)}。しかし上流での洪水調節による掃流力減少のために、現状では十分な効果は見られていない。この問題の解決にあたっては、根本原因である上流ダムの洪水調節方法の再考が必要になると思われる。

ところで、利水による河川流量減少が河川環境に及ぼす影響を軽減する目的で、河川管理では維持流量という概念が導入されている。維持流量は、動植物の保護および生息地の保全、河川景観の保全、流水の清潔性の維持等のための最低流量であり、渇水時においてもダム等からの補給により保持されなければならないとされている^{注1)}。しかし河川の自然性の保全については、低水管理だけでなく、出水時の河道地形の変化も含めた大きな時間空間の中で検討されるべきとの見方もある⁹⁾。

一方、近年の異常洪水の頻発化に伴い、ダムの事前放流、堤体嵩上げ、利水容量の治水活用等による洪水調節能力の増強が考えられている^{注2)}。また下流河川の改修事業の進捗に伴い、計画最大放流量を増加して治水容量を節約できるようにした例もある^{注3)}。それらは全て下流の治水安全度向上を目的としたものだが、計画最大放流量の増加は下流河道の掃流力を増大させるので、礫河原再生の手法としても期待できると思われる。

そこで本研究では、洪水ピーク流量低減という治水上の要請と礫河原再生という環境上の要請への対処を結び付け、樹林化による礫河原消失の著しい北上川右支川の和賀川について、上流にある湯田ダムの洪水調節方法の変更可能性を検討した。

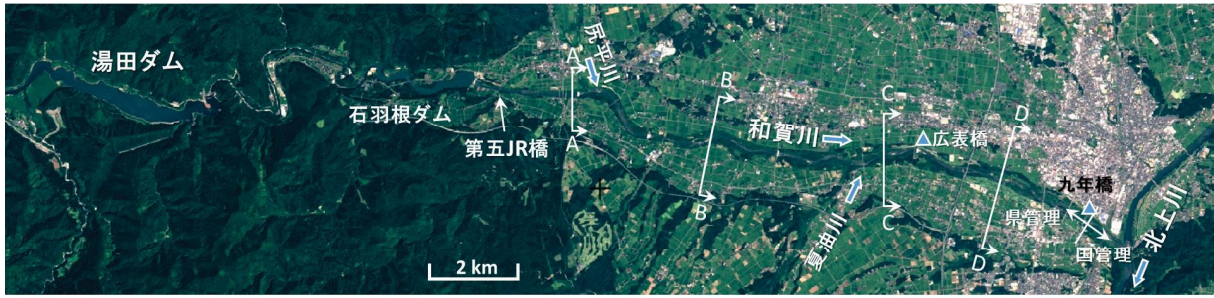


図-1 和賀川河道の全景^{注6)}

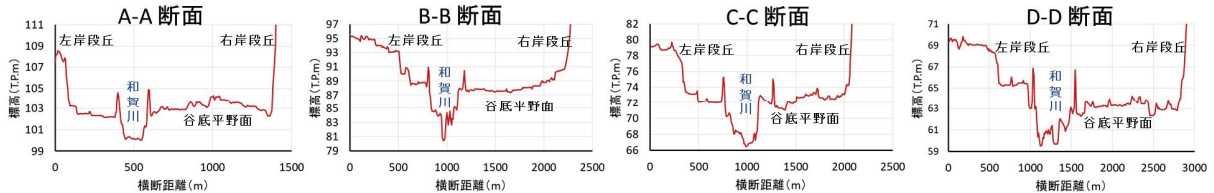


図-2 和賀川流域の横断地形特性

2. 研究対象について

(1) 和賀川流域

和賀川は、北上川上流区間の 74.5 KP (KP: 岩手・宮城県境からの距離標) で合流する右支川で、流域面積は 890 km² ^{注4)}、幹川流路延長は 80 km である。北上川合流点より約 20 km 上流には、洪水期治水容量 7781 万 m³ を有する湯田ダムがある。このダムは、1947年カスリン台風による北上川大水害の翌年に策定された北上川五大ダム計画^{注5)}に基づき 1964 年に竣工した。集水域は和賀川流域の過半を占める 583 km² である。

図-1 に湯田ダムより下流の航空写真 (全国最新写真^{注6)}) を示す。同ダム下流 6 km にある石羽根ダムは有効貯水量が 158 万 m³ の灌漑・発電目的のダムで、洪水調節には寄与しない。なお、和賀川が北上川に合流する手前の約 1 km 区間のみが国管理で、その上流は支川も含めて岩手県管理となっている。

4測線 (A-A~D-D) における地形横断図を図-2 に示す。和賀川は河岸段丘に挟まれた幅 1.5~2.0km の帯状の低地を流れ、大きな集落および街道は左岸台地上にある。曾ては段丘の間の低地を移動して流れたと考えられるが、開析に伴い現在は深さ 2~4 m の掘り込み河道となり、その両岸には高さ 2~4m の築堤がなされている。

(2) 和賀川の河道計画と湯田ダムの洪水調節計画

和賀川の高水流量配分図 (治水安全度 1/50 相当) ^{注4)} および湯田ダムの洪水調節計画図^{注7)} を図-3 に示す。石羽根ダム下流での和賀川計画流量は 940 m³/s、北上川への合流量は 1400 m³/s である。この数値は現在進行中の北上川本川河川整備計画^{注8)} に対応しているが、同基本方針

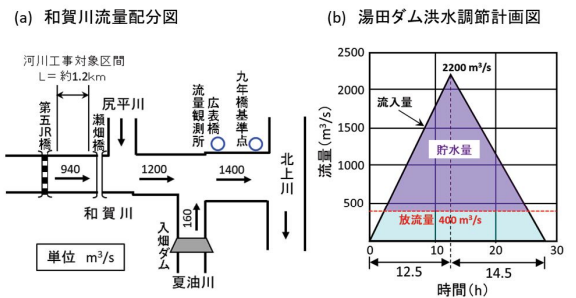


図-3 和賀川および湯田ダムの治水計画

^{注9)}での合流量は 1800 m³/s とされているので、将来的に変更される可能性がある。なお、現在の和賀川河川整備計画は 2003 年に策定されているが、大部分の築堤はそれ以前に完成していたため、図中に「河川工事対象区間」と記されている 1.2 km 以外についての粗度係数および計画高水位等は定められていない^{注10)}。なお右支川の夏油川 (げとうがわ) にある入畑ダムは集水面積 38 km² の県管理多目的ダムで、自然調節により洪水ピーク流量 520 m³/s を 160 m³/s に減じるとされている^{注11)}。

湯田ダムの想定流入波形は、1947年カスリン台風時の実績をもとにピーク値 2200 m³/s、継続時間 27 時間の三角波形と定められ、計画放流量は 400 m³/s で一定とされている。なお、この洪水調節計画はダム運用開始時 (1965 年) から現在まで変わっていない。

1965 年から 2017 年の 53 年間に 106 回の洪水調節操作が行われ^{注7)}、中小洪水を含めて下流への流量を大幅に減少させている。因みに、2011 年 6 月にダム運用開始後第二位の出水が発生したが、下流での氾濫は全く生じなかった。この時の最大流入量は 1975 m³/s、放流量は 395

m³/sであった。国土交通省は湯田ダムによる洪水調節がなかった場合の水害を推定しているが、それによれば、**図-1**の第五 JR 橋下流の約 0.7km²で氾濫が生じ、約 50 戸が浸水したものとされている^{注7)}。

以上からわかるように和賀川自体は氾濫の生じにくい河川である。そこに大容量の湯田ダムを建設した目的は、北上川本川への合流量の削減であった^{注9)}。北上川には現在でも無堤部が残されているが、五大ダム計画時の治水安全度はさらに低く、主要な支川からの合流量の削減が重要であったからである。その結果、和賀川自体の洪水氾濫はほとんど全くなかったと言える。

(3) 湯田ダム建設後の和賀川河床の変化

前節のデータ整理から、湯田ダムは“中小洪水も含めて”和賀川の流量を大幅に低下させていると言える。その流量減少は土砂移動を不活発にし、河道内樹林の拡大を生じさせている。**図-4**に和賀川下流部の河床状態の変化を示す^{注8)}。湯田ダムが竣工した 1964 年以前は礫河原が広がっていたが、竣工後は樹林化が徐々に進み、2011 年には低水路内の砂州も樹林に覆われている。そこには外来種であるハリエンジュが多く含まれていることから、国土交通省は国管理区間における伐採や樹皮剥ぎによるハリエンジュ増殖抑制のための事業を実施し、礫河原再生に一定の効果があったとしている^{注12)}。しかし、湯田ダムによる洪水調節が今後も従来どおり行われれば、河床の礫の移動は不活発なままであるから、樹林が遠からず復元する恐れが高いと思われる。

そこで本研究では、湯田ダムの洪水調節能力と和賀川河道の洪水流下能力の比較に基づき、治水と環境のバランスという観点から、和賀川下流河道の礫河原の再生および維持の可能性を検討した。

3. 湯田ダムおよび和賀川に関するデータ解析

(1) 湯田ダム流入量と和賀川洪水量の年生起確率分布

前述のように湯田ダムでは 1965 年から 2017 年の 53 年間に 106 回の洪水調節がなされ、流入量と放流量の最大値が整理されている^{注13)}。同一年に複数回の操作があった場合は第二位以下の流量データを除き、**図-5**に赤点で示す年最大流入量の生起確率分布を得た。なお計画放流量 400 m³/s に達する出水のなかった年（合計 9 年）については記載がないので、生起確率には算入するが流入量の値はプロットしていない。また同図の黒丸は湯田ダム建設計画に用いられた大荒沢堰堤（ダム計画地点近傍）での 15 年間（1941～1955）のデータである¹⁰⁾。なお、図中の直線は両データが概ね一つの対数正規分布に従うことを示すために目視により引いたものである。

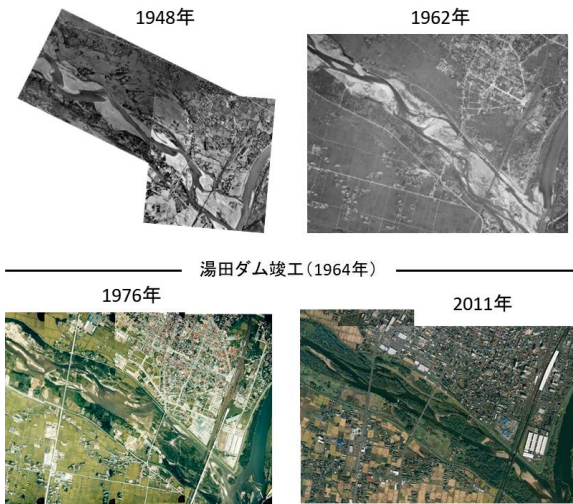


図4 和賀川下流部の河床状態

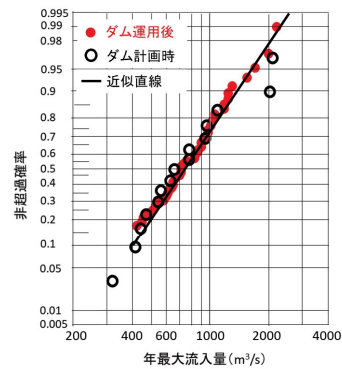


図5 湯田ダム年最大流入量の生起確率

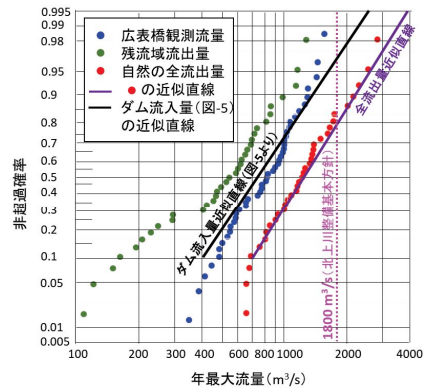


図6 自然状態の和賀川年最大流量の生起確率

そこで湯田ダムの年最大流入量の生起確率分布を図中の黒実線で近似すると、**図-3 (b)**に示した想定流入波形のピーク値 (2200 m³/s) の回帰年は約 100 年（非超過確率 0.99）となる。また洪水調節開始流量 (400 m³/s) の回帰年は約 1.1 年（非超過確率 0.1）である。

さて、ダム残流域からの流出に関するデータはなく、また湯田ダムデータはピーク流量のみであるから、時系列に基づく収支計算はできない。そこで夏油川合流点直下流の広表橋で 1977 年から得られている毎時流量^{注14)}を

用いて出水ごとのピーク流量の相関を調べた。図-6に広表橋の年最大流量の生起確率を青点で示す。仮に湯田ダムでの洪水調節がなかった場合の流量を次式で求めて赤点で描き込んだ。紫の実線はその近似直線である。

$$Q_{H1} = Q_{H0} + (Q_{I\text{-}Max} - Q_{O\text{-}Max}) \quad (1)$$

ここに Q_{H0} は広表橋での当該出水での観測流量最大値、 $Q_{I\text{-}Max}$ と $Q_{O\text{-}Max}$ はその出水での湯田ダムの流入量と放流量の最大値、 Q_{H1} はダムによる洪水調節がなかった場合の広表橋流量の推定値である。また図-6の緑点は次式で計算される湯田ダム下流残流域からの流量 Q_R である。

$$Q_R = Q_{H1} - Q_{I\text{-}Max} = Q_{H0} - Q_{O\text{-}Max} \quad (2)$$

非超過確率 0.3 以上の領域において、緑点は図-5に引かれたダム流入量生起分布の近似直線（黒実線）に概ね平行に並んでおり、次式で近似できる。

$$Q_R = \alpha \cdot Q_{I\text{-}Max} \quad (\alpha \approx 0.65) \quad (3)$$

α の値はダム集水域と残流域の面積比（0.53）に近い。以上の計算は流量時系列の収支解析ではなくピーク流量値の差し引きであり、あくまで概算である。しかしダム集水域と下流残流域の流出量のオーダは概ね把握できていると思われる。図-6に紫線で示した全流出量の近似直線から、湯田ダムによる洪水調節が行われない場合に和賀川下流流量が北上川整備基本方針に規定される流量 $1800\text{m}^3/\text{s}$ に達する頻度は5年に1回（非超過確率が0.8）である。また100年に1回の出水（非超過確率が0.99）は $3000\text{m}^3/\text{s}$ を超える可能性がある。

(2) 和賀川下流河道の流下能力

夏油川合流点下流の6 km 区間について、横断面データをもとに和賀川河道の洪水流下能力を概算した。河川管理施設等構造令による余裕高を勘案し、堤防天端より1 m 低い水位を河道満杯水位として想定した^{注1)}。北上川合流点から1 km ごとの想定水位と（低い方の）堤内地盤高を、滯筋に沿った河床縦断面図とともに図-7に青点と緑点で示す。河床には砂州や堰による凹凸が見られるが、それらを無視すれば、河床勾配は概ね0.0022で一定である。設定水位および堤内地盤と河床との差は、下流1~3 km で小さく、上流4~6 km で大きい。これは上流部ほど河道の下刻が進んでいるためであると考えられる。

前述したように和賀川河道の計画粗度係数は設定されておらず、また、図-4に示した写真からは河道粗度が経年的に変化しているものと推察される。そこで粗度係数をパラメータとして、断面ごとの等流状態での洪水流下能力を次式で概算した。

$$Q = \int \frac{1}{n} h^{5/3} I^{1/2} dy \quad (4)$$

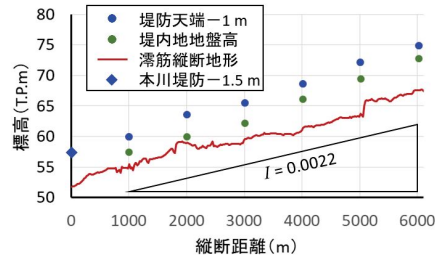


図-7 滯筋縦断分布と河道容量推算水位

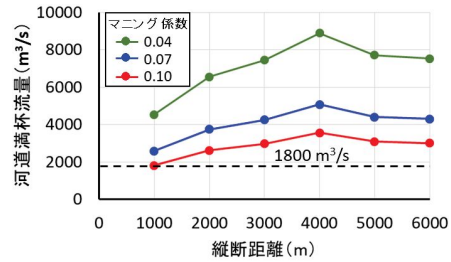


図-8 築堤後の河道満杯流量の河道粗度依存性

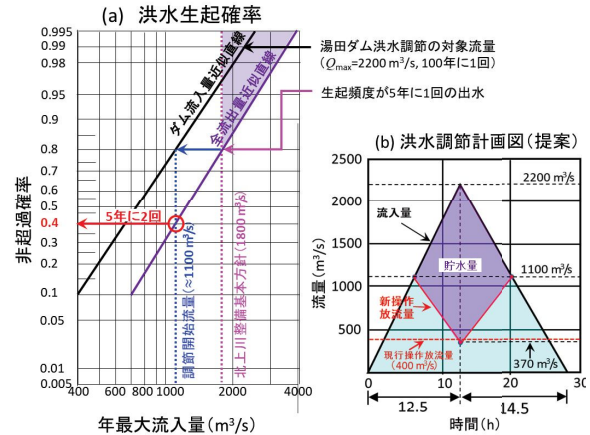


図-9 和賀川 $1800\text{m}^3/\text{s}$ 対応のダム調節

ここに Q は流量、 n はManning係数、 h は水深、 I は河道勾配（0.0022）、 y は横断方向距離である。

計算結果を図-8に示す。図中の $1800\text{m}^3/\text{s}$ は北上川水系河川整備基本方針^{注9)}に規定されている和賀川合流量である。なお $n=0.04$ という値は礫河原を想定し¹⁾、 0.10 は密生した樹木群落を想定した値だが¹²⁾、ここではあくまで河道の洪水流下能力のオーダを推定するためのパラメータである。この図から、 $n=0.10$ としても現在の河道断面で $1800\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流下能力があると考えられる。なお、図-6に青点で示した広表橋流量は、観測開始以来 $1500\text{m}^3/\text{s}$ を超えたことはない。

(3) 下流河道流量 $1800\text{m}^3/\text{s}$ に対応する洪水調節

図-6の赤点および紫線からわかるように、湯田ダムによる洪水調節がない場合の $1800\text{m}^3/\text{s}$ を超える流量の発生頻度は5年に1回（非超過確率が0.8）程度である。そこで和賀川下流河道の流量を $1800\text{m}^3/\text{s}$ まで許容するダム操

作を, 前頁の図-9 に示すように考えた.

図-9 (a)の斜めの黒線は年最大のダム流入量の生起確率 (図-5 参照), 紫線はダムがない場合の和賀川流量の生起確率を示している (図-6 参照). 下流河道の流量を $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ に抑えるには, 紫色でハッチした超過洪水量を湯田ダムで貯留する必要がある. 洪水調節発生年の生起確率は 0.80 なので, 調節開始流量は約 $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ となる.

式(3)で示した関係は各出水での最大流量に関するものだが, 出水イベント内の流量に便宜的に仮定すると, 下流流量を $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ に保つ条件は以下のように書かれる.

$$Q_o(t) \approx 1800 - 0.65 Q_I(t) \quad (5)$$

ここに $Q_I(t)$ はダムへのピーク流入量, $Q_o(t)$ はそれに対応する放流量である. その結果, 計画流入ハイドログラフの調節波形は図-9 (b)のように描かれる. 図-3 (b)に示した現行操作と比較すると, ダムに貯留する水量 (紫のハッチ部分) は $1/2$ 程度になっている. つまり治水容量の半分を温存できるわけで, 計画規模の出水が続けて2つ発生した場合にも対処可能となる. 近年, 今後の気候変動による豪雨の増加に備えるために事前放流や利水ダムの活用が検討されているが, 湯田ダムの場合は, 現行の操作ルールを再考して治水容量を効率的に運用することも考えられるわけである.

4. 流量増加に伴う和賀川河道の礫移動の可能性

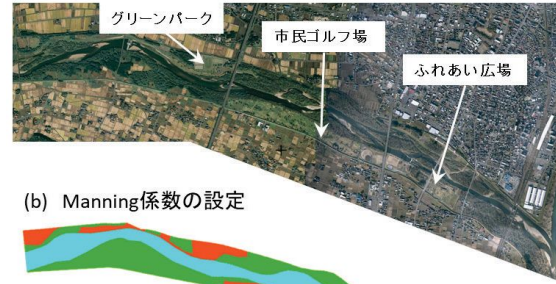
本章では数値シミュレーションにより定常流での平面流況を計算して河床せん断力の分布を求め, 河床の礫の移動可能性を検討する.

(1) 数値シミュレーションの方法

非構造三角形格子に基づく浅水方程式¹³⁾を用いた. 計算モデルの詳細は同文献を参照されたい. 計算区域は夏油川合流点下流から北上川合流点までの 6 km とし, 堤防は不透過境界とした. 地盤高は国土地理院の基盤地図情報 (数値標高モデル 5 m メッシュ) を用いた. 河川流量は $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ と $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ の2種類とした. 前者は図-9 に示す洪水調節の結果であり, 非超過確率は 0.8 (回帰期間: 5 年) である. 後者は調節開始流量 $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ (非超過確率: 0.4 , 回帰期間: 2.5 年) だが, 図-3 に示した現行の操作は, 図-6 の青点からわかるように非生起確率 0.8 (回帰期間: 5 年) となっている. なお計算下流端の水位は, 実際には北上川本川の洪水状況に依存するが, ここでは断面形状での等流状態を仮定して与えた.

計算区間の高水敷には図-10 (a)に示すように公園などがあり, 他の部分は低水路砂州も含めて樹林に覆われている. そこで Manning の粗度係数を図-10 (b)のように仮

(a) 河道内の利用と地被状態



(b) Manning係数の設定

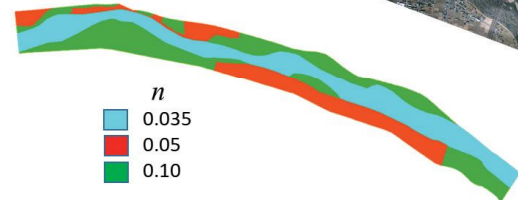


図-10 河道内地被状態と Manning の粗度係数の設定

(a) $Q = 1100 \text{ m}^3/\text{s}$

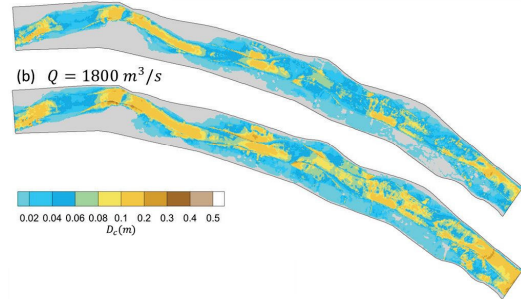


図-11 移動限界粒径の分布

定した. 高水敷は樹林帯 (濃緑: 0.10) と公園等 (朱色: 0.05) とし, 低水路内は滞筋, 砂州, 河岸を含めて礫河原 (水色: 0.035) とした. 低水路の砂州と河岸は現在は樹林に覆われているが, 仮に樹林がなくなった場合に礫河原が維持できるかどうかを調べるものである.

(2) 数値シミュレーションの結果

数値シミュレーションで得られた u_*^2 (u_* は摩擦速度) から次式で計算される移動限界礫径¹⁴⁾の分布を計算した.

$$u_*^2 = 0.05 s g D_c \quad (6)$$

ここに g は重力加速度, D_c は移動限界礫径, s は礫の水中比重 (1.65) である. なお, 上式は主に砂を用いた水理実験に基づいているが, 10 cm 程度の径の礫を用いた実験でも概ね成立することが確認されている¹⁵⁾.

それぞれのケースについての結果を図-11 に示す. 高水敷の冠水しない部分は灰色で示している. 和賀川下流部の河床礫径は $5 \sim 10 \text{ cm}$ であるから^{注10)}, 低水路の砂州および低水路河岸の礫は平均して 5 年に一回は移動することになる. 河道内樹林の形成に要する時間は必ずしも明確でないが, 図-4 の 1976 年の航空写真では最下流部を除き低水路砂州の外縁に樹林が見られないことから, 低水路全域に樹林が広がるには 10 年程度かかるものと

思われる。なお荒川河川敷で自然発芽したハリエンジュが4年後に5.5mの高さに成長したという報告⁴⁾や、伐採後の伐採株から萌芽して3年後に4mに成長したという報告⁹⁾があるので、単木が成長に要する期間はもっと短い可能性がある。しかし、図-9で仮定した洪水調節条件では、 $Q=1100\text{m}^3/\text{s}$ が平均して2.5年に1回、 $Q=1800\text{m}^3/\text{s}$ が5年に1回生じることになるので、樹木の成長が抑制される可能性は高いと思われる。

5. おわりに

本研究の結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 湯田ダムの洪水調節方法を現在の図-3 (b)から図-9 (b)に変更することにより、和賀川下流河道では平均2.5年に1回の頻度で $1100\text{m}^3/\text{s}$ 以上、5年に1回の頻度で $1800\text{m}^3/\text{s}$ の流量が期待できる。その結果、河床で支配的な粒径10cmの礫が移動可能となり、樹木の再生を抑制できる可能性がある。
- (2) 図-9 (b)の方法によれば、湯田ダムの対象洪水(年生起確率1/100)に対しても下流河道の流量が北上川河川整備方針に規定される $1800\text{m}^3/\text{s}$ 以内となる。また図-3 (b)と図-9 (b)の比較からわかるように、洪水調節に必要な貯水容量(紫色の部分)が約1/2に節約できることから、仮に計画対象規模の洪水が2つ続けて来襲した場合でも概ね対処できることになる。

本研究は一つのケーススタディとして行われたが、本川への合流量削減のために建設された大型治水ダムの洪水調節が支川の河川環境に同種の問題を発生させている恐れはあると思われる。ダム操作ルール見直しの機会^{注2)}に併せて検討することが望まれる。

謝辞: 本研究を開始するにあたり、国土交通省東北地方整備局河川計画課および河川管理課に検討の構想を説明して了承いただいた。また、同整備局北上川ダム統合管理所と岩手県土整備部河川課より各種資料および情報を提供いただいた。記して謝意を表す。

NOTES

- 注1) 国土交通省水管理・国土保全局：正常流量検討の手引き(案)，平成19年9月。
- 注2) 国土交通省水管理・国土保全局：異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能と情報の充実に向けて(提言)，平成30年12月。
- 注3) 独立行政法人水資源機構一庫ダム管理所：一庫ダムの洪水調節方法を変更，令和元年6月13日。
- 注4) 岩手県：一級河川北上川水系北上圏域河川整備計画，平成15年9月。(資料により数値は若干異なる。)

- 注5) 国土交通省東北地方整備局北上川ダム統合管理所：「北上川と五大ダム」
- 注6) 国土地理院：地理院地図/GISマップ。
- 注7) 国土交通省東北地方整備局：平成27年度東北地方ダム管理フォローアップ委員会湯田ダム定期報告書(概要版)平成28年1月。
- 注8) 国土交通省東北地方整備局：北上川水系河川整備計画[大臣管理区間]，平成30年6月。
- 注9) 国土交通省水管理・国土保全局：北上川水系河川整備基本方針，平成24年11月。
- 注10) 岩手県土整備部河川課からの情報提供による。
- 注11) 岩手県：県土整備部が管理しているダム，令和4年2月。
- 注12) 国土交通省東北地方整備局：河川事業再評価，北上川総合水系環境整備事業[説明資料]，令和2年12月。
- 注13) 湯田ダム洪水実績表(北上川ダム統合管理所提供)。
- 注14) 広表橋毎時流量表(北上川ダム統合管理所提供)。
- 注15) 河川管理施設等構造令第二十条三項。
- 注16) 令和元年度北上川ダム浸水想定区域図等検討業務報告書(北上川ダム統合管理所提供)

REFERENCES

- 1) 辻本哲郎，村上陽子，安井辰弥：出水による破壊機会の減少による河道内樹林化，水工学論文集，第45巻，pp.1105-1110，2001。[Tsuji moto, T., Murakami, Y. and Yasui, T.: Growth of vegetation in fluvial-fan segment due to decrease of destruction of vegetation by floods, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, No.45, pp.1105-1110, 2001.]
- 2) 高木麻衣，中村太土：ダムによる流量調節が河畔林に及ぼす影響について——北海道の札内川の事例——，日本森林学会誌，Vol. 85, No. 3, pp. 214-221, 2003。[Takagi, M. and Nakamura, F: The downstream effects of water regulation by the dam on the riparian tree species in the Satsunai River, *J. of the Japan Forest Society*, Vol. 85, No.3, pp. 214-221, 2003.]
- 3) 五味高志，大平充：生態系ネットワークのインターフェースとしての礫河原：流域の時空間スケール整理，日本緑化工学会誌，Vol. 44, No. 3, pp. 489-493, 2019。[Gomi, T. and Ohira, M.: Gravel riverbed as an interface for ecosystem networks: spatio-temporal scale organization of watersheds, *Journal of the Japanese Society of Revegetation Technology*, Vol. 44, No. 3, pp. 489-493, 2019.]
- 4) 崎尾均：なぜハリエンジュは日本の河川流域で分布を拡大したのか，日本緑化工学会誌，Vol. 40, No. 3, pp. 465-471, 2015。[Sakio, H.: Why did the black locust expand broadly at the river basin in Japan, *Journal of the Japanese Society of Revegetation Technology*, Vol. 40, No. 3, pp. 465-471, 2015.]
- 5) 萱場祐一，田屋祐樹，槇島みどり，赤松史一，中西哲，三輪準二：河道内樹木の再繁茂抑制技術について～効果的な河道内樹木の管理に向けて～，土木技術資料，Vol. 57, No. 2, pp. 14-19, 2015。[Kayaba,

- Y., Taya, Y., Makishima, M., Akamatsu F. Nakanishi, T. and Miwa, J.: Controlling method of regeneration of riparian trees for effective riparian trees management, *Civil Engineering Journal*, Public Works Research Institute, Vol. 57, No. 2, pp. 14-19, 2015.]
- 6) 都築隆禎, 児玉好史, 瀧健太郎, 後藤知子: 猪名川における河原再生について～試験施工における仮説の検証(中間報告)～, リバーフロント研究所報告, No. 18, pp. 41-49, 2007. [Tsunami, T., Kodama, Y., Taki, K. and Goto, T.: Restoring the gravel bars of the Ina River: verifying a hypothesis by experimental river works (interim report), *Report of Japan Riverfront research Center*, No. 18, pp. 41-49, 2007.]
 - 7) 松田浩一, 内堀寿美男, 清水義彦, 石原正義, 藤堂正樹: 固定化砂州での掘削路開削による洪水攪乱の誘発と樹林化抑制対策に関する研究, 河川技術論文集, 第16巻, pp. 235-240, 2010. [Matsuda, K., Uchibori, S., Shimizu, Y., Ishihara, M. and Todo, M.: Study on riverbed deformation caused by flood disturbance resulting from channel excavation and forestation control measures on a stable gravel bars, *Advances in River Engineering*, Vol. 16, pp. 235-240, 2010.]
 - 8) 山口里実, 渡邊康玄, 武田淳史, 住友慶三: 流路の固定化が進行した河道における効率的な旧流路回復手法に関する検討, 河川技術論文集, 第21巻, pp. 217-222, 2015. [An effective method for restoring the former water courses of a river where the water courses are well established, *Advances in River Engineering*, Vol. 21, pp. 217-222, 2010.]
 - 9) 知花武佳, 原田守啓: 河川におけるマクロスケールの現象を大局的に捉えるアプローチの有効性, 応用生態工学, 18巻, 1号, pp. 47-52, 2015. [Chibana, T. and Harada, M.: Effectiveness of comprehensive approaches to macro-scale phenomena in rivers, *Ecological and Civil Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp. 47-52, 2015.]
 - 10) 建設省東北地方建設局湯田ダム工事事務所編: 湯田ダム工事誌, 東北地方建設局出版, p. 1-22, 1966.
 - 11) 門田章宏, 鈴木幸一, 森一庸: 急勾配礫層河道における流水抵抗に関する研究, 水工学論文集, 第45巻, pp. 619-624, 2001. [Kadota, A., Suzuki, K. and Mori, K.: Study on flow resistance over steep-slope gravel-bed, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol. 45, pp. 619-624, 2001.]
 - 12) 米谷駿一, 道奥康治, 神田佳一, 入江良幸, 坂本知奈美: 樹木粗度を有する交互砂州地形の相当粗度, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 71, No. 4, pp. I_631-I_636, 2015. [Kometani, S., Michioku, K., Kanda, K., Irie, Y. and Sakumoto, C.: Equivalent Mannings's roughness coefficient of vegetated alternative bars, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser.B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 71, No. 4, pp. I_631-I_636, 2015.]
 - 13) 赤穂良輔, 前野詩朗, 高橋巧武, 吉田圭介, 石川忠晴: 微地形を考慮した氾濫解析手法の検討と鬼怒川洪水氾濫域を対象とした数値実験, 土木学会論文集 B1, Vol. 74, No. 4, I_1441-I_1446, 2018. [Akoh, R., Maeno, S., Yoshida, K., Takahashi, Y. and Ishikawa, T.: Study of inundation flow analysis considering small topography and numerical experiment of the Kinu River, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser.B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 74, No. 4, pp. I_1441-I_1446, 2018.]
 - 14) 岩垣雄一: 限界掃流力に関する基礎的研究 (I) 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第41号, pp. 1-21, 1956. [Iwagaki, Y.: Hydrodynamical study on critical tractive force, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, No. 41, pp. 1-21, 1956.]
 - 15) 田畑茂清, 市ノ瀬栄彦: 大礫の限界掃流力に関する実験的研究, 新砂防, 23巻, 4号, pp. 13-19, 1971. [Tabata, S and Ichinose, H.: An experimental study on critical tractive force of cobble gravels, *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol. 23, No. 4, pp. 13-19, 1971.]

(Received May 31, 2023)

(Accepted September 12, 2023)

POSSIBILITY OF GRAVEL RIVERBED RESTORATION BY CHANGING THE FLOOD REGULATION RULE AT UPSTREAM DAMS --- A CASE STUDY OF YUDA DAM ON THE UPPER WAGA RIVER ---

Tadaharu ISHIKAWA and Atsushi KAWACHI

Gravel riverbeds are disappearing due to the growth of forests in river sections downstream from dams because of the reduction of tractive force by flood control. In this study, the measures to activate riverbed gravel movement by changing the flood control rule was examined for the Yuda Dam upstream of the Waga River, a right tributary of the Kitakami River, where the gravel riverbed is remarkably forested. First, it was confirmed that the Yuda Dam has sufficient flood control capacity from the statistical analysis of the inflow to the Yuda Dam and the flow rate of the Waga River at the time of flood as well as the capacity analysis of the downstream channel. Next, the increase in discharge from the dam during floods was examined within the range of the flood flow capacity of the Waga River channel. The result suggested that the river discharge with a probability of occurrence of 1/5 can be changed from about 1100 m³/s to 1800 m³/s by increasing in the minimum flood discharge. Finally, we calculated changes in bed tractive force using a shallow water flow model and showed that the above changes in the flood control rule can increase the mobility of 10-cm-diameter pebbles which is dominant in the Waga Riverbed.