

札内川における礫河原再生に向けたダム放流実験について

EXPERIMENTAL FLOW RELEASE BY A DAM FOR REPRODUCING GRAVEL BED IN SATSUNAI RIVER

柳屋圭吾¹・泉典洋²・柿沼孝治³・武田淳史⁴

Keigo YANAGIYA, Norihiro IZUMI, Takaharu KAKINUMA, and Atsushi TAKEDA

¹フェロー会員 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 Ph. D. 北海道大学工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 工博 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁴非会員 北海道開発局 帯広開発建設部 (〒080-8585 帯広市西4条南8丁目)

In the Satsunai River, increasing of vegetation and decreasing of gravel bed causes serious problems such as increases in flood risk or changes in wild life species. Therefore, Hokkaido Development Bureau, the management authority, is performing field experiments to sweep away vegetation and reproduce gravel bed by artificial flash flood with the use of snow melting water released from Satsunaigawa Dam. During this performance, variety of measurements such as discharge, elevation changes, and vegetation changes are carried out. Authors studied the accuracy of discharge measurements by floats and a microwave meter. Also, the authors performed one dimensional and two dimensional flow calculations, compared the results to observed data, and showed good applicability as well as some lessons to learn.

Key Words: artificial flash flood, discharge measurement, numerical simulation, iRIC

1. はじめに

札内川は、上流に札内川ダムを有し、河床勾配が1/106-405(直轄管理区間)の急流河川である。河道には、広い礫河原がみられ、北海道指定の天然記念物であるケショウヤナギなど礫河原に依存する生態系が形成されている。札内川は土砂移動が激しいため、水制工を整備し流路の安定を図ることで礫河原は概ね維持されてきた。しかし、近年、年最大流量や融雪期流量の減少傾向により、一部区間で礫河原への樹木(主にヤナギ類)の定着、滞筋の固定化と河床低下が顕著化してきており、動植物への影響もみえ始めた¹⁾²⁾。このため、国土交通省北海道開発局と寒地土木研究所とは、礫河原河川の維持復元を目指し、札内川ダムによる計画放流と流路の一部掘削等の組み合わせによって、自然攪乱による礫河原の再生と環境回復の取り組みを行っている。この取り組みにより、河道の攪乱有無と流況の関係、河床材料が移動する水量の閾値、冠水範囲とヤナギ類実生の流亡との関係、種子散布時期が異なるヤナギ類の実生の定着状況の知見等を得ることができた³⁾。本研究は、平成25年度に行ったダムからの計画放流(図-1)とあわせて実施した各種

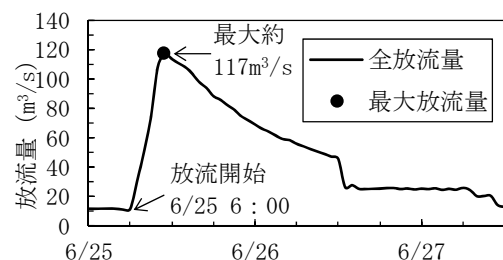


図-1 H25. 6. 25～26のダム放流状況

観測・調査のうち流量観測に着目して、浮子、電波式流速計など複数の観測結果を比較検討するとともに、一次元水理計算モデルの計算結果を検証した。また、下流の一地点で横断方向に密に流速観測を行ったので、二次元計算モデルによる流況を再現し、無次元掃流力の計算値と、河岸浸食箇所との比較を行った。

2. 流量観測箇所及び観測手法

札内川ダムの放流実験では、前章に述べたように様々な取り組みと、それらに関する各種観測を行っているが、

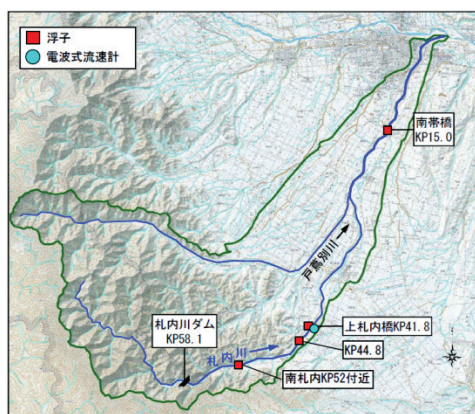


図-2 流量観測所位置図

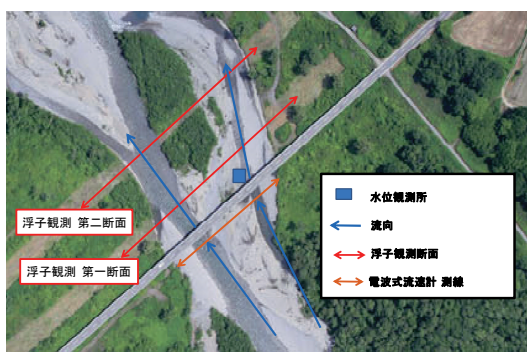


図-3 観測位置図（上札内橋付近）

ここでは流量観測について述べる。午前6時からのダム放流の伝播をとらえるため、国土交通省北海道開発局が管理する南札内観測所（kp52付近）、上札内観測所（kp41.8）、南帯橋観測所（kp15.0）において、それぞれ午前8時、午前10時、午後5時から概ね1時間毎に浮子による流量観測を行った（図-2）。ここで、kpの後の数字は、札内川の十勝川合流点から上流に向かった概ねの距離を表す。今回の放流では、計画流量1,400 m³/s（南帯橋）に対して117 m³/s程度（ダム地点）と小規模であり、流水が滞筋に分派することが予想されたので、滞筋が1本に集中するkp44.8地点に臨時観測地点を設けて、浮子による流量観測を行った。それ以外の観測所では水位自動観測が行われており、水位-流量関係（HQ式）によって流量が換算できる。ただしHQ式の精度は、当該年度1年間の観測結果から検証することが必要であり、本論文に記載する換算流量は検証前の暫定値であることを断わっておく。

上札内観測所では、より正確な流量の算定と、平面流況を観測する目的で横断方向に2m～4mピッチで電波流速計により流速観測を行った。表-1に計測装置の仕様、図-3に浮子観測箇所、電波式流速計観測箇所、及び水位計（上札内観測所）の位置を示す。電波式流速計は図-4に示すように、上札内橋の歩道上に三脚で設置し、目標の側点に計測装置を向けて一定時間計測し、所定の距離を移動し次の観測を行うことを繰り返し、約100mの測



図-4 電波式流速計による計測の様子

表-1 電波式流速計の仕様

観測機器	電波式流速計
社名	横河電子機器株式会社
型名	WJ7661
計測原理	マイクロ波のドップラー効果
使用電波	NON 24.15Ghz 7mWtyp
計測範囲	0.5m/s～20m/s
測定精度	±計測値の2%
分解能	0.01m/s
計測時間間隔	1,2,5,10,20,60,秒から選択

線上の流速を計測した。なお、砂州で陸上になっている区間は計測を行っていない。計測は1地点10秒間行い、その間の平均値を採用した。瞬間的に計測される流速値は計測装置を向けた方向の値であるが、概ね流線は上札内橋に直角の方向であり、10秒の間で流向は微小に振れるので、10秒平均値は当該地点の流向成分と考えられる。

3. 数値計算手法

(1) 一次元モデルによるダム放流伝播計算

一次元水理計算モデルによりダム放流の下流への伝播を計算する。モデルは筆者らが所属する寒地土木研究所が開発し公開しているiRIC CERI1D⁴⁾を用いる。流れの基礎式は、連続式 (1)と運動方程式 (2)である。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial}{\partial x} (z+h) + \frac{gn^2 u^2 S}{R^{1/3}} = 0 \quad (2)$$

ここで、 A は流積、 Q は流量、 z は河床高、 h は水深、 n はManningの粗度係数、 u は x 方向の流速、 S は潤辺、 R は径深、 t は時間、 x は縦断距離、 g は重力加速度で9.8である。

次に計算条件について述べる。計算範囲は、札内川 kp3.0（札内橋：十勝川合流点から約3km）からkp58.0（札内川ダム直下）までである。モデルに取り込む地形

表-2 一次元計算条件

地形	上流端流量	下流端水位	粗度係数
Kp3～48 : 横断測量 Kp49～58 : LP測量	札内川ダム の放流量 (支川合流 は未考慮)	札内橋の観 測水位	0.03

データは、kp3.0からkp48.0（大臣管理区間上流端）まではkp0.2ピッチの横断測量データを、kp49.0からkp58.0までは放流実験後のLP測量データ（約1.0mメッシュ精度）から約1.0kmピッチで作成した横断地形を用いた。これらの地形データをiRIC CERIIDに取り込み、縦断方向に1.0kmピッチ、また、水位から流積を算定するため横断方向に20分割した計算格子を作成した。なお、縦断方向の地形データは約2.0kmピッチであるが、iRIC CERIIDでは前後の地形データを補間して約1.0kmピッチの計算格子を自動作成した。マニング粗度係数は過去の再現計算を参考に0.03、計算上流端（kp58.0）からダム放流量、計算下流端（kp3.0）に札内橋水位観測所の観測実績水位を与える。なお、支川合流や樹木については、考慮していない。計算条件を表-2にまとめる。

(2) 二次元モデルによる平面流況計算

二次元計算モデルにより一部区間の平面流況を計算する。モデルは公開されているiRIC Nays2D³⁾を用いる。iRIC Nays2Dは移動床計算も行えるが、ここでは固定床として計算を行った。流れの基礎式は、連続式 (3)と運動方程式 (4), (5)である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -hg \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + D^x \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -hg \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + D^y \quad (5)$$

ただし、

$$\frac{\tau_x}{\rho} = C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \quad \frac{\tau_y}{\rho} = C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (6)$$

$$C_f = \frac{gn^2}{h^{1/3}} \quad (7)$$

$$D^x = \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial(hu)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial(hu)}{\partial y} \right] \quad (8)$$

$$D^y = \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial(hv)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial(hv)}{\partial y} \right] \quad (9)$$

ここで、 h は水深、 t は時間、 u は x 方向の流速、 v は y 方向の流速、 g は重力加速度、 H は水位、 τ_x は x 方向の河床せん断力、 τ_y は y 方向の河床せん断力、 C_f は河床せん断係数、 n は粗度係数、 ν_t は渦動粘性係数、 ρ は水の密度である。なお、渦動粘性係数はゼロ方程式モデルを用いる。

次に計算条件について述べる。計算の目的は、上札内橋(kp41.8)で行った電波式流速計による流速計測から得られた横断方向の流速分布と計算値を比較するものである。このため、計算範囲は図-5に示すとおり、上札内橋の直下流のkp41.4から、上流側は助走区間を考慮してkp46.0までとする。モデルに取り込む地形データは、前述のLP測量データを用いた。なお、LP測量では水面以下は計測できないので、水面高が河床高となる。参考としてkp42.0における横断測量とLP測量から作成した横断図を重ねて図-6に示す。低水路の最深部以外は概ね合致しているのがわかる。この地形データをiRIC Nays2Dに取り込み、縦断方向に約8m、横断方向に約4mに分割した計算格子を作成した。メッシュ分割数は58,617個である。マニング粗度係数は一次元計算と同様に0.03とした。算上流端（kp46.0）から上札内観測所のピーク流量である127m³/sを流況が安定するまで（約7,800秒間）与え、計算下流端（kp41.4）は平均河床勾配に応じた等流水深を与える。計算条件を表-3にまとめる。

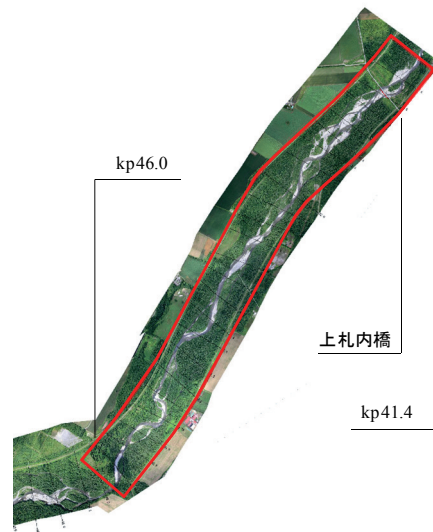


図-5 二次元計算範囲

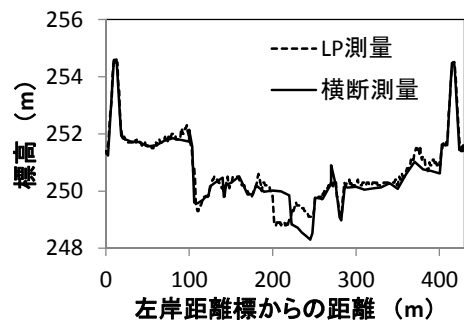


図-6 横断測量とLP測量の比較(kp42.0)

表-3 二次元計算条件

地形	上流端流量	下流端水深	粗度係数
LP測量	127m ³ /s一定	等流水深	0.03

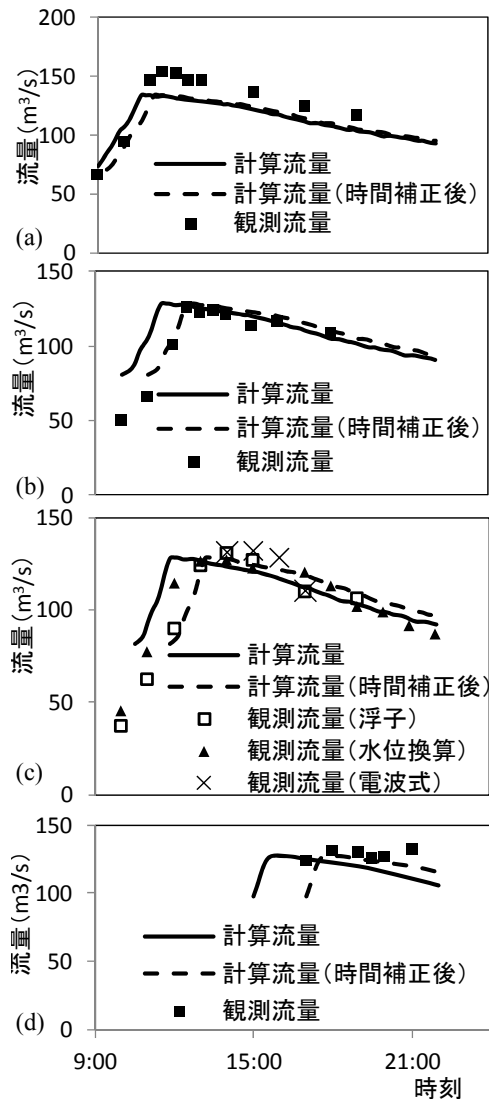
(a)南札内観測所、(b)臨時観測所、
(c)上札内観測所、(d)南帯橋観測所

図-7 一次元計算結果と観測流量の比較

4. 観測結果と計算結果の比較

(1) 一次元計算

ダム放流量及び、各地点の観測流量及び計算流量の時間変化を図-7に示す。なお、上札内橋観測所のみ浮子計測の他に、水位からHQ式により換算した流量及び、電波式流速計の流量を示した。また、計算では、ダム下流の残流域からの流入は考慮していない。このため、各地点に、ダム放流前の基底流量として当日午前6時の流量を計算結果に一律に加えてある。南札内観測所を除くと、

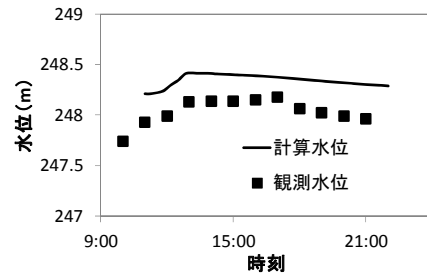


図-8 一次元計算結果と観測水位の比較(上札内橋)

概ねピーク流量は再現できている。しかし、ピーク流量の到達時刻は計算が早い。ピーク流量到達時刻を合わせるには、補正時間は南札内観測所、臨時観測所、上札内観測所、南帯端観測所それぞれ、概ね30分、60分、80分、120分であった。補正後では、南札内観測所を除けば、各地点においてピーク流量とその前後の流量とも概ね再現性が確保できていることがわかる。また、上札内観測所の観測結果について述べる。同観測所では浮子及び電波式流速計による流量観測、水位観測を行った。図-7(c)に、浮子を□印、電波式流速計を×印、水位換算を▲印で示してある。なお、電波式流速計による計測は午前10時ごろから午後17時ごろまで6回行ったが、1回の計測に1時間程度を要し、ピーク到達前は計測中に流量が大きく変化したため、ピーク到達後の結果のみプロットし、時間は計測時間帯の概ね中間とした。浮子と水位換算流量を比べると、ピーク到達前は水位換算流量が大きい傾向にあるが、ピーク到達以降は概ね同様の傾向にある。また、電波式流速計は、ピーク付近で若干大きい傾向にあるが、大きく離れてはいない。

次に、図-8に上札内観測所における計算水位と観測水位の結果を示す。なお、図-7(c)と同様に時間補正した。図-8により、計算結果が大きい傾向であることがわかる。

(2) 二次元計算結果と流速観測結果

ここでは、図-3に示した横断測線に沿って、電波式流速計の観測値と計算流速（流向成分）を比較する。前節でも述べたが、電波式流速計による計測では流量変化の大きい時間帯の時点流況を捉えられなかったため、ここでは流量がほぼ一定とみなせるピーク流量付近の14時の計測結果を用いた。一方、計算では上札内観測所で観測されたピーク流量を計算上流端から与えている。図-9に平面流況の計算結果を、図-10に測線上の計算と観測の比較を示す。ここで、縦軸は流速、横軸は測線の左岸側端からの距離、実線は計算値、■印は観測値を表す。この測線上には中間に砂州があるため、流速分布には二山のピーク値があるが、計算値は概ねの傾向を再現している。ただし、観測中に砂州は冠水していないので、観測値は砂州部でゼロなのに対して、計算では冠水しているので流速が出ている。また、二山のうち左岸側において、計算値の方が観測値より小さい傾向にあるのがわかる。

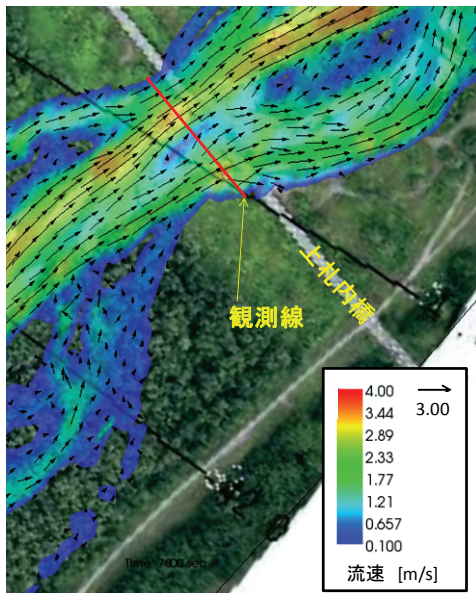


図-9 二次元計算の平面流速分布（上札内橋周辺）

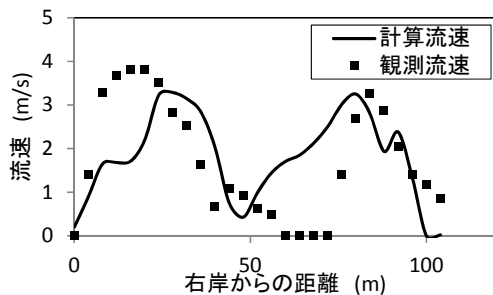


図-10 二次元計算結果と流量観測結果の比較

5. 考察

(1) 一次元計算

a) 流量

南札内観測所を除くとピーク流量の再現は良好であった。南札内観測所における浮子観測のピーク流量は $153\text{m}^3/\text{s}$ で、ダム放流のピーク流量 $117\text{m}^3/\text{s}$ に比べて大きい。ダム地点から同観測所まで約 8.5km の間に大きな流入支川はなく、午前6時の流量 $16.1\text{m}^3/\text{s}$ を加算しても大きすぎる。浮子観測の実施測線や精度に問題があった可能性があり、今後の精査が必要である。

次に、到達時間について考察する。計算と観測のピーク到達時間の差は、下流になるほど大きい。粗度係数が適切ではなかった可能性も考えられるが、与えた粗度係数は過去の出水時観測結果も考慮して設定された値であり、大きく外れているとは考えられない。試みに、粗度係数を 0.05 として計算したところ、上札内観測所のピーク到達時間は元の計算に比べて40分遅くなったが、それでも依然として観測より40分早い。別の要因として、網状の滞筋の影響が考えられる。今回のダム放流程度では、

流水は低水路のうち滞筋に沿って流れた。図-5からわかるように、札内川の滞筋は約 0.2km ピッチの横断測量結果を補完するだけでは表しきれず、計算の流路が実際より短いと考えられる。次に、上流での誤差を排除するため、南札内、臨時、上札内、南帯橋それぞれ直下流の観測所間のピーク時刻の差を比較してみる。計算では、それぞれ60分、20分、220分、観測では、それぞれ60分、30分、300分である。南帯橋ではピーク流量が不明確であったことを考慮すれば、概ねピーク時刻の差は再現できたと考えられる。

b) 水位

図-8に示したように、上札内観測所では計算水位の方が観測より大きかった。誤差の要因としては、計算で用いた横断測量後にも出水があったため、滞筋が動いていたことなどが考えられる。

(2) 二次元計算

a) 流速

計算では、概ねの流速分布を再現できたが、ここでは誤差が生じた要因を考察する。まず、計算では地形にLP測量結果を用いているが、LP測量では水面以下は測れていない。このため計算では水面高が河床高になっており、同じ流量でも水位が高く、砂州が冠水したと考えられる。図-11に、ダム放流前後に現地測量した河床地形と、計算格子の河床地形を示す。横軸は測線上の左岸側からの距離、縦軸は標高である。また同図には比較時点における計算水位及び観測水位を示してある。計算の河床地形は、中間の砂州は概ね表現されているものの、その両側の滞筋深部は十分表現できていない。以上から、実際の観測時には、流れが2つの滞筋に集中し早い流れが観測されたのに対して、計算では水面幅が広くなり流速が小さめに算出されたと考えられる。流速が小さく算出される別の要因として、次のことがあげられる。計算で算出されるのは水深平均流速であり、一方、観測は表面流速を計測している。通常、電波式流速計で計測された表面流速に修正係数を掛けて水深方向平均流速に換算するが、今回の計測では、水深方向の流速計測は行っておらず修正係数を算出していない。試みに、図-7(c)に示した、浮子及び電波式流速計から算出した流量の比が修正係数に相当すると考え、ピーク流量付近の14時と15時における両値の比を求めたところ、それぞれ 1.00 と 0.96 であった。一方、図-10の計算ピーク値と観測ピーク値の比は、左岸側で 0.86 、右岸側で 0.99 であり、一律の補正では説明できず、左岸側の流量低下は、やはり砂州冠水の影響が大きいと考えられる。ただし、修正係数に関して、宮村ら⁵⁾、及び深見ら⁶⁾の既往研究では $0.85 \sim 0.90$ が適正としているが、今回のように水深が 1m 程度で流速が 3m/s 以上の急流河川での適用事例は少なく、今後の観測で水深方向の流速を同時に計測するなど、さらなる検討が必要と考えられる。

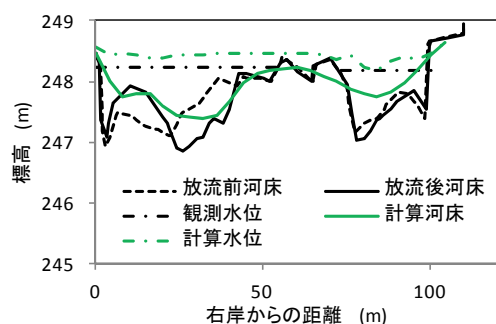


図-11 二次元計算と現地観測の比較（河床高，水位）

次に，左岸側のピーク値の横断位置の誤差を考える。ダム放流前後の測量断面をみると，左岸側の滞筋が放流前後で変化している。ピーク流量を観測した時点では，これら2つの断面の間だったと考えられる。一方，計算ではダム放流後に行ったLP測量の河床地形を用いている。このため，左岸側ではピーク値の位置が合わず，放流前後の滞筋が変化していない右岸側では概ねピーク値の位置が合っていたと考えられる。

b) 水位

図-11に示したように，水位に関しては計算の方が大きい。これは，地形の誤差によると考えられる。

(3) 無次元掃流力と河床変動

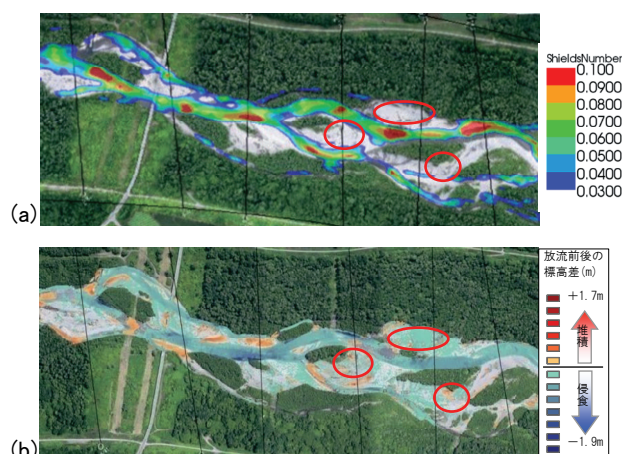
筆者ら³⁾は，ダム放流による河岸付近の流れと，ヤナギ実生の流失について検討を行い，河床材料が動く程度の無次元せん断力と関係付けられることを示した。ここでは，二次元計算で算出した無次元掃流力と，ダム放流前後のLP測量から読み取った河岸侵食・堆積の推定を比較してみた。上札内観測所周辺における比較検討結果を図-12に示す。なお，無次元掃流力 τ_* は次式(9)で求め，河床材料粒径は60mmとした。

$$\tau_* = \frac{n^2 u^2}{s d h^{1/3}} \quad (9)$$

ここで， n はマンニングの粗度係数， u は流速， s は河床材料の水中比重， d は河床材料粒径， h は水深である。侵食箇所と無次元掃流力が大きい箇所は概ね一致している。ただし，赤線で囲った箇所では，侵食が見られるが無次元掃流力は0.03より小さい。計算は樹木を未考慮で，流れが分散したことが要因の一つとして考えられる。

6. まとめ

一次元水理計算モデルにより，ダム放流水の伝播についてピーク流量とその到達時刻差は概ね再現できた。次に，二次元計算モデルにより，横断測線上の流況分布について概ね良好な再現を得るとともに，LP測量を用いることによる課題を明らかにした。なお，一次元，二次



(a)無次元掃流力の計算結果、(b)放流前後のLP測量比較

図-12 無次元掃流力の計算結果と河床変動量の比較

元ともに水位の再現性については課題が残った。次に，無次元掃流力を算出しダム放流前後のLP測量から読み取った河岸侵食・堆積と比較し，侵食箇所と無次元掃流力が大きい箇所が概ね一致していることを示した。このことにより，二次元計算モデルにより流況の変化を予測し，河岸の侵食や堆積などの攪乱を促進する放流量や放流方法が検討できる。本研究では，樹木を考慮しない固定床計算を行ったが，今後は，ヤナギ類実生の定着と関係するとされる河床変化や土砂移動，粒径変化，樹木の影響に着目して移動床計算を行うなど，さらに，ダム放流の樹林化の抑制効果等について検討を進める必要がある。

謝辞： 現地調査でご指導いただいた北見工業大学の渡邊康玄教授に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 土門ら：札内川ダム運用がケシヨウヤナギに及ぼす影響調査，土木学会第57回年次学術講演会，VII31-32，2002
- 2) Yabuhara, Y. and et al.: PREDICTING LONG-TERM CHANGES IN RIPARIAN BIRD COMMUNITIES IN FLOODPLAIN LANDSCAPES, River Research and Applications, River Res. Applic., 1535-1467, 2013
- 3) 柳屋ら：札内川ダム放流実験によるヤナギ類稚樹の流失特性に関する観測，土木学会論文集B1(水工学) Vol.70, No.4, I_1363-I_1368, 2014
- 4) iRIC: <http://i-ric.org/ja/>
- 5) 宮村ら：本格的な実用期を迎えた電波流速計『固定電波流速計&RYUKAN』，河川流量観測の新時代，第3巻，2012
- 6) 深見ら：ドップラー式非接触型流速計を用いた洪水流量の連続観測手法の現地検証～浮子測法との比較～，河川技術論文集，第14巻，2008

(2014. 4. 3受付)