

置き土材料の流下・堆積過程の予測技術 —現地調査と数値解析の比較を踏まえて—

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム
北海道大学 工学研究院
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム

○平松 裕基
岩崎 理樹
川村 里実

近年、全国各地で土砂還元の方策の一つとして、置き土等が実施されている。札内川では自然再生事業の一環として、下流側の砂州発達や河道攪乱等を狙いとした置き土が実施されている。この取り組みの中で、フラッシュ放流時の置き土材料の輸送距離を調べるという貴重なデータが収集された。本研究では、過年度に開発した置き土材料の輸送過程を表現するモデルを用いることによって、現地河川で置き土された材料の輸送距離をどの程度再現できるのかを検討した。その結果、モデルで得られる輸送距離は、現地で観測された結果と概ね一致することがわかった。

キーワード：土砂還元、予測技術、数値解析

1. はじめに

ダムや河川構造物の整備等によって治水安全度を向上させてきた一方で、これらの整備によって土砂移動の連続性が遮られた結果、河道への土砂供給量が減少している。その影響は河床低下だけでなく、粗粒化が生じるなど生態系にも及んでいる。近年、河川環境を改善するため、全国各地で河道への土砂還元を目的とした置き土などの試みが実施されている。例えば十勝川水系の支川の一つである札内川では、礫河原再生の取り組みの一環として、河道攪乱を狙った置き土が実施されている¹⁾。その検討では、置き土の効果を検証するために置き土材料に追跡用の礫を混合させ、ダムからのフラッシュ放流後にその位置が調査されている。その結果、置き土材料が移動した範囲を明確にするとともに、置き土が直下流の砂州の発達に寄与したことが示されている。

ただし、上述の札内川で実施されたような実河川での調査には多大な労力が必要となることなどから、数値解析によって置き土材料を追跡することができれば対策の効果を検証するに当たって有益な情報となる。しかし、一般的な河床変動解析手法では置き土材料を追跡することができず、各地点での河床変動量と混合比率に基づいて置き土の効果を評価するほかない点が課題として挙げられる。そこで、濱木ら²⁾³⁾、岩崎ら⁴⁾は元々の河床材料と同じ粒径の材料が供給された場合でも、供給砂礫の流下・堆積過程を表現できる数値解析手法を開発した。本研究では、このモデルに斜面崩落の影響も考慮した手法を用いて、置き土された材料の流下・堆積過程を把握することを目指した。

これまでに、置き土の効果に関して様々な検討が行われ、置き土による河床変動や河岸侵食などの応答に関して調べられている⁵⁾⁶⁾⁹⁾。また、ダム直下のように極端に大きな礫によって河床が構成されている場における流砂、河床変動特性に関する検討⁷⁾¹⁰⁾が実施された結果、従来の河床変動解析の枠組みでは説明し得ないことなどが指摘されている。

ここで、置き土の効果を評価しようとする際に考えられる課題について説明する。置き土した材料と元々の河道内の土砂が一緒になって流下し、流下した土砂は河道内に堆積・流下を繰り返しながら、置き土の影響が下流側に伝搬していくことになる。そのため、置き土した材料と元々の河道内の土砂が区別できないことから、置き土の効果がわかりにくいといったことが課題として挙げられる。このような課題を踏まえると、置き土材料が河道内をどのように移動していて、どのように河道内に広がっていくかを把握できる数値解析手法を開発することは重要であると考えられる。

一連の研究¹⁰⁾では基礎的な水理実験を別途実施しており、本予測モデルによって置き土材料の広がり方がどの程度再現できるかを検証した。本研究ではこの検討を踏まえて、札内川で観測された置き土材料の輸送状況の調査結果と、置き土材料の輸送状況を表現できる数値解析モデルを用いた計算結果とを比較することによって、置き土材料の輸送距離が実河川を対象とした場合にどの程度表現できるかを調べた。本論文ではこれによって得られた結果を報告するものである。

2. 研究の概要

(1) 解析モデルの概要と計算条件

計算は iRIC Nays 2DH¹²⁾ 上で行っており、置き土材料のように輸送過程を把握したい材料を追跡できるモデルを加える形で数値解析を行った。計算に用いた基礎式は、流れに関しては非定常の平面二次元浅水流方程式を一般座標系で解いており、流砂量は芦田・道上の式¹³⁾、掃流砂量ベクトルは渡邊の式¹⁴⁾、河床変動量は Exner の式、二次流による河床近傍流速の算定には Engelund の式¹⁵⁾を用いており、この点については一般的な河床変動解析の取り扱いとの大きな違いはない。

一般的な河床変動解析では河床材料と同じ粒径の土砂が河道内に供給された条件下では二つを分けて取り扱うことはない。濱木ら²⁾、岩崎ら⁴⁾は粒径別の体積保存則と同様に、追跡したい材料の体積に関する保存則から以下の式を導いた。

$$(1 - \lambda) \left(L_a \frac{\partial f_a}{\partial t} + f_l \frac{\partial \eta}{\partial t} \right) = - \frac{\partial q_{bx} f_a}{\partial x} - \frac{\partial q_{by} f_a}{\partial y} \quad (1)$$

ここで、 λ : 空隙率 (= 0.4)、 L_a : 交換層厚、 f_a : 交換層内の追跡したい材料の混合比率、 f_l : 交換層と遷移層の間の追跡したい材料の混合比率、 f_t : 遷移層内の追跡したい材料の混合比率、 η : 河床高、 q_{bx} 、 q_{by} : x 、 y 方向の単位幅流砂量である。 f_l は河床上昇時は交換層内の比率 f_a 、河床低下時は遷移層内の比率 f_t となる。本研究でも一般的な河床変動解析と同様に、河床を鉛直方向に交換層、遷移層、堆積層に分けて追跡したい材料の体積保存の関係を満たすような計算を行った。式(1)は粒径別の体積保存則と同じであるため、追跡したい材料の各粒径階で計算された変動量を全粒径階で加え合わせたものが河床変動量となる。また、混合粒径河床の遮蔽効果は、浅田の式¹⁰⁾によって評価されている。

上記の式(1)のみではイメージがわきにくいので、粒度分布の設定方法について簡単に補足する。図-1は数値解析の対象範囲を示したものである。図中の青色あるいは赤色で塗りつぶされた範囲が解析対象範囲であり、このうち赤色の部分が置き土された範囲を示している。置き土材料と元々の河道内の材料を構成する土砂の粒径が全て異なる場合には、従来の数値解析手法でも置き土材料の輸送状況を把握することができる。しかし、置き土材料と元々の材料に同じ粒径が含まれていると、その粒径の土砂については置き土材料か否かを区別することができない。そこで、例えば置き土材料も元々の材料も三粒径の材料から構成するとした場合について考えてみる。その場合の河床材料の粒度分布の設定を示したのが表-1である。粒径が $D_1 \sim D_3$ までの三粒径とし、置き土範囲以外に相当する青色の部分の構成比率を $f_1 \sim f_3$ 、置き土の範囲に相当する赤色の構成比率を $f'_1 \sim f'_3$ と設定する。



図-1 解析対象範囲

表-1 置き土材料と元々の河道内の材料とを区別する粒度分布の設定の例

粒径	領域	
	置き土区間以外	置き土区間
D_1	f_1	0
D_2	f_2	0
D_3	f_3	0
D_1	0	f'_1
D_2	0	f'_2
D_3	0	f'_3

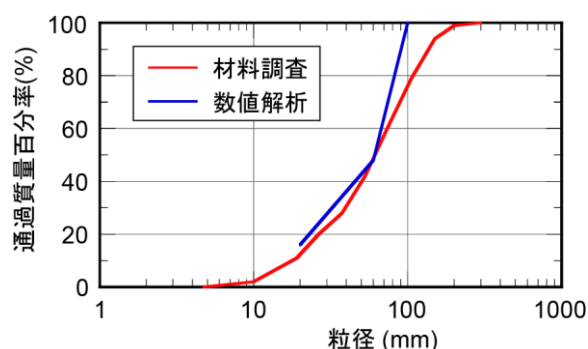


図-2 河床材料の粒度分布

ただし、赤色の範囲の粒度分布の鉛直方向の設定は、置き土が敷設されている高さは $f'_1 \sim f'_3$ 、それより下方の高さは $f_1 \sim f_3$ とした。すなわち、従来の数値解析では三粒径から河床が構成される計算を行っていたが、このモデルでは六粒径の計算を行うことによって、置き土材料の輸送過程を把握しようとするものである。

数値解析の条件としては、以下のように設定した。境界条件は、下流端水位および上流端流速を等流条件とした。河床材料の粒度分布を示したのが図-2であり、図中の赤線が河床材料調査の結果、青線が数値解析時に設定した粒度分布である。粒度分布については調査結果を踏まえて決定したものの、ここでは材料の移動特性を確認することを主たる目的としているため、簡単のため三粒径から構成されるものとした。なお、置き土材料は敷設

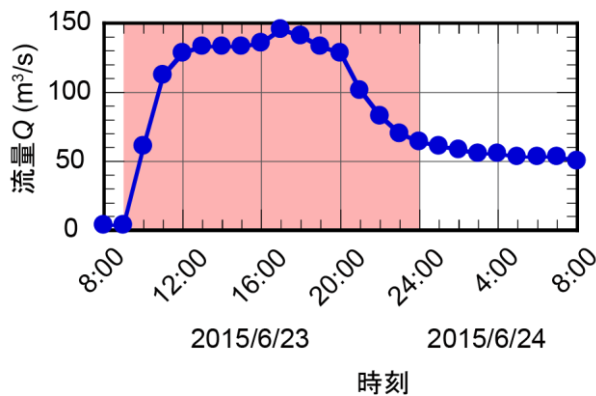


図-3 放流時の流量ハイドログラフ：赤色で塗りつぶされた時間帯を対象として計算を行った

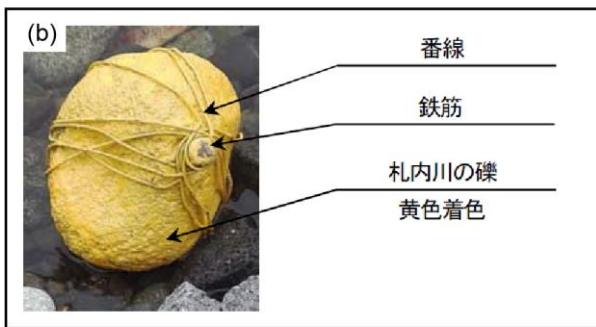
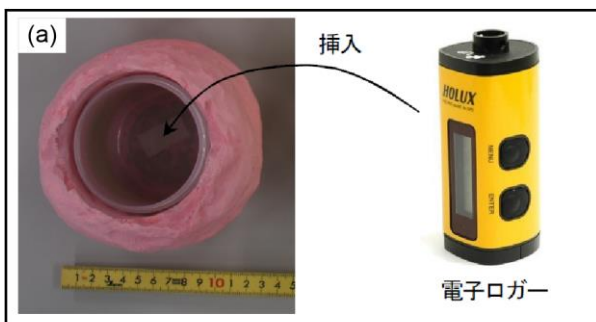


図-4 置き土に混合させた材料¹⁾より引用

位置付近から採取した土砂を用いているため、置き土材料と元々の河道内の材料の粒度分布は同じに設定した。交換層厚は青線の最大粒径に相当する0.1 m、堆積層厚は0.5 m、メッシュサイズは1 m、マンニングの粗度係数は低水路内を0.031、高水敷を0.050とした。また、高水敷の植生の密生度は永多ら¹⁷⁾を参考に0.03 m²とした。

表-2 置き土に混合された材料の数量と発見数量¹⁾より引用

追跡礫	混入数量(個)	発見数量(個)
GPSロガー埋め込み型	6	3
鉄筋埋め込み型	11	7
安山岩	約6000	496

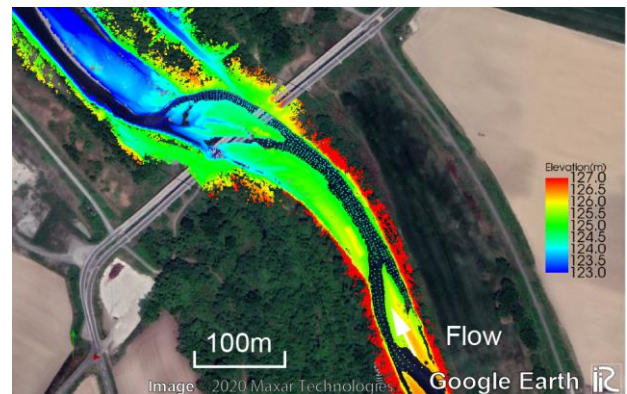


図-5 地形標高データ

(2) 現地調査の概要¹⁾

本研究では、2015年6月23日に札内川で実施されたフラッシュ放流時の置き土材料の輸送状況の再現計算を行った。この際の現地調査の詳細については、高橋ら¹⁾の報告を参照されたい。ここでは、その概要のみ抜粋して説明する。図-3は放流時の流量ハイドログラフを示したものであり、このうち赤色で塗りつぶされた時間帯を対象として計算を行った。

置き土材料と元々の河道内の材料とを判別するため、材料の追跡調査としては以下の手法が用いられた。置き土材料の一部として、以下の三種類の材料が混合されていた。一つ目は、図-4(a)に示すように、GPSロガーを埋め込んだ材料を敷設し、放流後に移動した場所を調べたものである。二つ目は、図-4(b)のように、鉄筋を埋め込んだ材料を敷設し、放流後に金属探知機を用いることによって移動した位置を調べたものである。これらの材料を用意することは非常に手間がかかることから、三つ目として、元々の河道内の材料とは異なる色の材料(図-4(c)のような安山岩)を混合することによって、色の違いから移動位置を特定しようとしたものである。表-2に、置き土材料として敷設した数量と、発見数量を示した。このように、安山岩以外の材料は0.6程度、安山岩は0.1程度の割合で発見されたことがわかる。

本研究で札内川を対象とした再現計算を行った理由としては、上述のような追跡調査が実施されていることのほかに、地形測量として高解像かつ高精度なデータが取得されていることが挙げられる。具体的には、LPデータが整理されているだけでなく、一般にLPデータでは水面下の河床高を正確に計測することは難しいことから、低水路内の河床高を別途3m間隔程度で測量しているデータが取得されていることにある。測量された地形標高

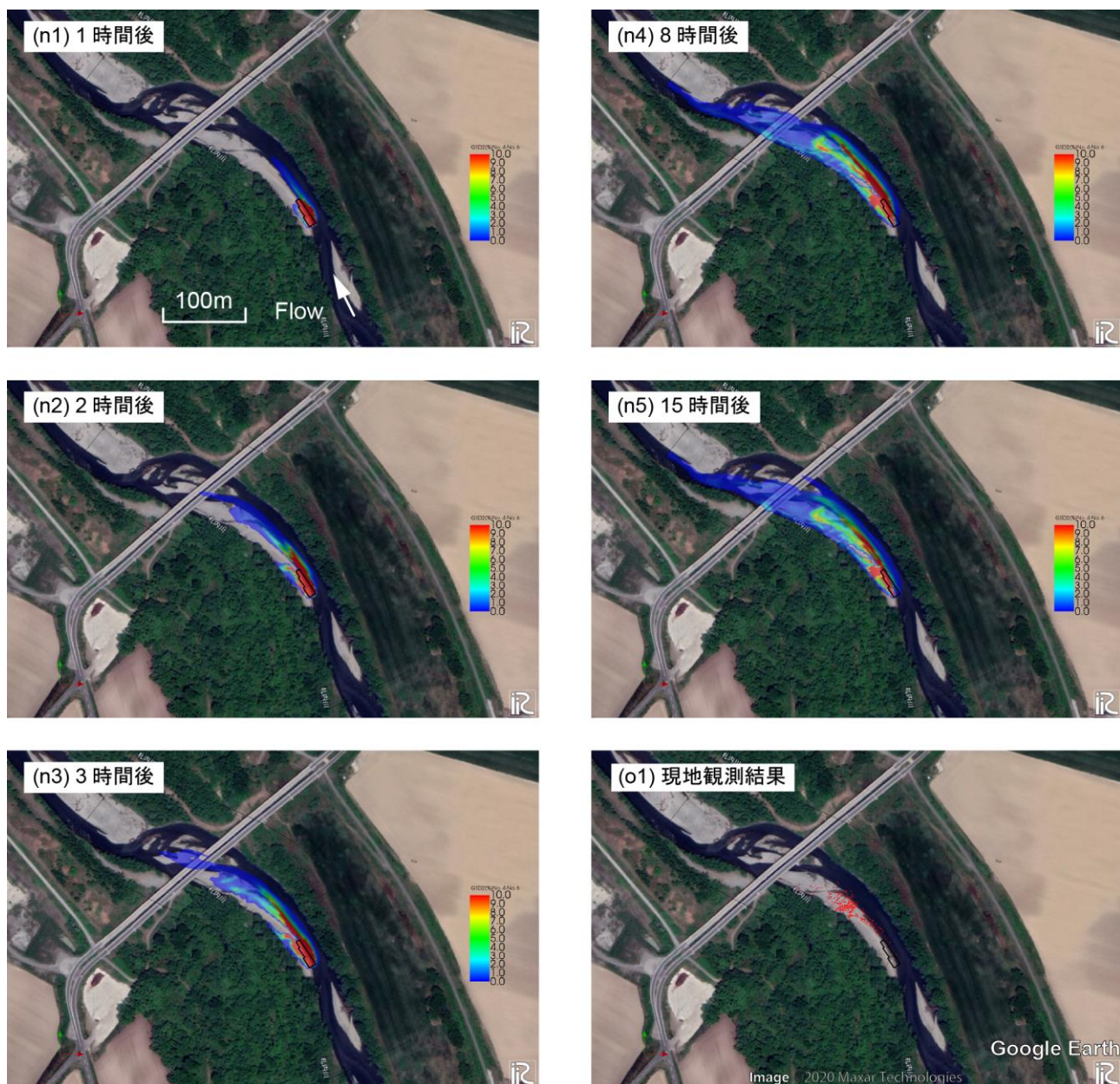


図-6 置き土材料の輸送過程：(n1)～(n5) 数値解析結果、(o1) 現地観測結果を示している。ただし、計算開始から、(n1)～(n3) 1 時間毎、(n4) 8 時間後（ピーク流量時刻）、(n5) 15 時間後（計算終了時刻）、(o1) 放流後の現地観測結果を示している。なお、黒枠は放流前の置き土の敷設位置を表している。

データを示したのが図-5である。この図中の低水路内に点在している点がその測量データである。このように、通常の出水とは異なり、放流前後の詳細なデータが存在するため、本研究では札内川を対象とした数値解析を行った。

3. 置き土材料の流下・堆積過程

現地河川では土砂の輸送過程を出水中に観察することは難しいものの、数値解析では各時刻の輸送状況を可視化することができる。図-6は置き土材料の輸送状況を示

したものである。(n1)～(n5)は数値解析結果であり、河床表層（交換層内）における置き土材料の混合比率の時系列変化を示したものである。(n1)～(n3)は計算開始から1時間毎の状況であり、(n4)、(n5)はそれぞれピーク流量時と計算終了時の状態を示している。このように土砂の輸送状況を把握し、可視化できることが数値解析の利点である。なお、図中の黒線は敷設した置き土箇所を表している。

図-6 (o1)は、GPSなどによる現地観測の結果を示したものである。(n5)と(o1)を比較すると、本予測モデルによって置き土材料の輸送距離がどの程度再現できているかわかる。本予測モデルはLagrange型（例えば、質点系の運動方程式のようにそれぞれの土砂の運動を追いか



図-7 最大粒径に相当する 100mm の材料の輸送状況
(計算終了後)

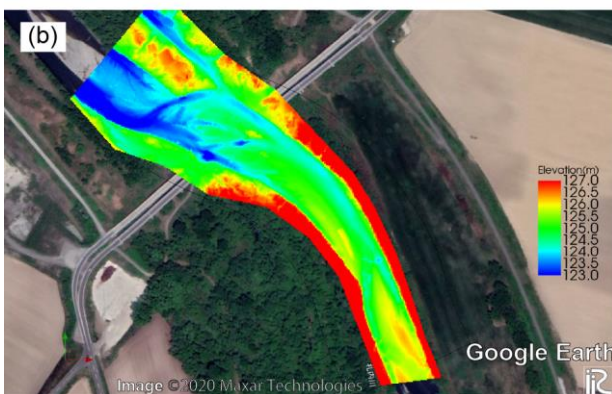
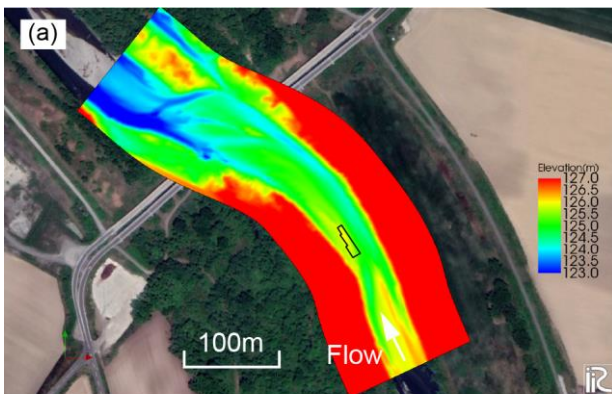


図-8 終了後の河床高コンター：(a)数値解析結果、
(b)現地観測結果

る形式)ではなく、Euler型(計算メッシュ内の流入出から変化量を算出する形式)の取り扱いとしている。そのため、数値解析から得られる結果は、置き土として敷設した一つ一つの粒子がどこまで移動したかではなく、各地点の置き土材料の混合比率の情報となる。そのため、(o1)のように各材料の移動位置ではなく、(n5)では混合比率が示されている。(o1)と(n5)を比較すると移動範囲が概ね一致していることがわかる。このことから本予測モデルによって、現地河川で観測された土砂の移動距離を再現できていることがわかる。

なお、(o1)の図を見る際には二つの注意点がある。一つ目は、水面下に没している材料は調査が困難であった

ため、低水路内を移動した材料等の移動位置に関しては図に反映されていないことが挙げられる。そのため、現地観測結果と比較して、数値解析結果の方が置き土材料の移動距離が大きくなったと推察している。また、図-4(a)から判断すると、GPSを埋め込んだ礫などは10cm程度であり、数値解析の最大粒径程度の大きさに相当する。そこで、図-7にはこの大きさの置き土材料の河床表層の混合比率を示した。図-7と図-6(o1)を比べると、低水路付近の輸送距離が概ね一致していることがわかる。このように粒径階毎の流下・堆積状況が把握することができる。なお、表-2でGPSを埋め込んだ礫の全てが発見できなかった理由としては、材料が水面下に没してしまうことや、河床表層よりも深い位置に入り込んでしまうことによって、位置情報が取得できなくなってしまったためと推察している。

二つ目は、現地調査では置き土材料の移動距離を調べることを目的としているため、フラッシュ放流中に移動した材料の調査が行われており、敷設位置に留まってしまった材料については土砂の移動距離がほとんどないため位置を測量していないことが挙げられる。そのため、(o1)の図中で初期状態の置き土敷設位置(図中の黒枠内)に赤点がないのは全ての材料が移動したことを示しているのではなく、移動した置き土材料のみの位置が示されているということを意味する。このことから、数値解析結果を示した(n5)では黒枠内に置き土材料が留まっていることが見て取れるものの、現地観測と数値解析で異なる傾向が得られたというわけでないことがわかる。

また、数値解析結果から、初期状態で置き土として敷設した土砂量のうち、何%が移動したかという値を算出した。ただし、前述の通りEuler型の取り扱いをしているため、置き土を敷設した位置からは移動したものの、初期状態の置き土の範囲内に留まっている場合には、置き土材料が移動していないという判定になる。このような条件の下で移動した割合を算出すると、45%程度が移動していたという結果が数値計算結果から得られた。放流後の現地河川でも全量が移動していたわけではないことを考慮すると、移動した割合は概ね妥当な範囲内の値であると推測している。置き土は様々な目的で実施されているため、それぞれの目的に合った形でその効果を評価するようなモニタリングが行われている。そのため、画一的に置き土の効果を評価する指標はない。しかし、置き土は敷設した位置に留まってしまわず、より多くの量が低水路に供給されることを狙っているため、このような値は一つの参考となると考えられる。

最後に、図-8は河床高コンターであり、(a)は数値解析の計算終了後の結果、(b)は放流後の測量結果を示している。これらの図を比較すると、地形の変化に関しても概ね再現できているということがわかる。このように数値解析によって河床変動や置き土材料の流下・堆積過程を精度良く再現できたのは、高精度かつ高密度な詳細な

データが測量されていたためであり、札内川のフラッシュ放流時のデータは非常に貴重なデータであると考えている。

4. おわりに

本研究では、置き土材料の流下・堆積過程を把握することを目的とした検討を行った。札内川では置き土材料の移動距離を調べた貴重なデータが得られており、それと数値解析モデルによって得られた移動距離を比較した。その結果、両者が概ね一致したことがわかった。

このような数値解析手法があれば、置き土の敷設条件の違い（例えば、置き土敷設位置、土砂量、粒径）によって、置き土材料の流下・堆積過程への影響を把握することができる。置き土材料は敷設した位置に留まってしまいうのではなく、より多くの量の土砂が河道内に還元されるような敷設条件を検討することは重要であり、本予測モデルはそのような検討に活用できると考えている。

謝辞： 札内川を対象とした数値解析を実施するに当たり、必要な測量データ等は帯広開発建設部治水課より提供を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 高橋輝好、法村賢一、横濱秀明：札内川における礫河原再生の取り組みについて、第 59 回北海道開発技術研究発表会、環 16、2015。
- 2) 濱木道大、岩崎理樹、井上卓也、佐藤大介、サムナー圭希、清水康行：着色流砂実験によるトレーサの移動分散現象に関する実験と数値計算、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.74、No.4、pp.I_1033-I_1038、2018。
- 3) 濱木道大、岩崎理樹、井上卓也、清水康行：土砂トレーサの鉛直方向の分散を考慮した数値計算、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.74、No.5、pp.I_955-960、2018。
- 4) 岩崎理樹、Gary Parker、清水康行：自由砂州の影響を受けるトレーサの移動分散に関する数値計算、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.71、No.4、pp.I_877-I_882、2015。
- 5) 秋山瑤貴、渡邊康玄：砂州による河道攪乱に着目した効果的な置土位置の検討、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.74、No.5、pp.I_379-I_384、2018。
- 6) 櫻井寿之、福島雅紀、箱石憲昭：置土侵食過程の実験及び現地観測による考察、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.67、No.4、pp.I_805-I_810、2011。
- 7) 溝口敦子：二極化した粒度分布を有する河床と表層礫構造の取り扱いに関する考察、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.73、No.4、pp.I_871-I_876、2017。
- 8) Miwa, H. and Parker, G.: Effects of sand content on initial gravel motion in gravel-bed rivers, Earth Surf. Process. Landforms, 42(9), pp.1355-1364, 2017。
- 9) 福田朝生、福岡捷二、内田龍彦：移動床数値実験水路を流下する石礫粒子群の三次元運動、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.69、No.4、pp.I_1051-I_1056、2013。
- 10) 平松裕基、関根正人、劔持尚樹：骨格となる大礫を伴う河床の動的平衡状態の鉛直構造、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.71、No.4、pp.I_865-I_870、2015。
- 11) 平松裕基、川村里実、岩崎理樹、大串弘哉、河道内に供給された砂礫の輸送過程に関する実験と数値解析、寒地土木研究所月報、No.827、pp.13-20、2022。
- 12) iRIC Software、<https://i-ric.org/>
- 13) 芦田和男、道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文集、第 206 号、pp.59-69、1972。
- 14) 渡邊明英、福岡捷二、安竹悠、川口広司：河道湾曲部における河床変動を抑制する樹木群水制の配置方法、河川技術論文集、第 7 巻、pp.285-290、2001。
- 15) Engelund, F.: Flow and Bed Topography in Channel Bend, Jour. of Hydr. Div., ASCE, Vol.100. HY11, pp.1631-1648, 1974。
- 16) 浅田宏、石川晴雄：水流による河床砂礫の分級機構に関する研究(III)、電力中央研究所報告、第 71017 号、1972。
- 17) 永多朋紀、渡邊康玄、清水康行、井上卓也、船木淳悟：礫床河川における河道変化と植生動態に関する研究、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.72、No.4、pp.I_1081-I_1086、2016。