

# 現地河川におけるICタグ技術を用いた置き土追跡調査 と数値解析による土砂移動状況の再現計算

INVESTIGATIONS OF THE BEDLOAD SEDIMENT TRANSPORT IN A NATURAL RIVER  
USING IC-TAG MONITORING TECHNIQUE AND NUMERICAL SIMULATIONS

濱木道大<sup>1</sup>・岩崎理樹<sup>2</sup>・井上卓也<sup>2</sup>・清水康行<sup>3</sup>

Michihiro HAMAKI, Toshiki IWASAKI, Takuya INOUE and Yasuyuki SHIMIZU

<sup>1</sup>正会員 株式会社 開発工営社 (〒060-0004 北海道札幌市中央区北4条西5丁目1番地)

<sup>2</sup>正会員 寒地土木研究所 寒地河川チーム 研究員 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

<sup>3</sup>フェロー 北海道大学 工学部工学研究院 教授 (〒060-0813 北海道札幌市北区北13条8丁目)

Sediment transport is a most important piece of controlling the morphological evolution of the bed in rivers, however, it is generally hard to understand the transport processes, in particular, in natural streams because of the difficulties of monitoring and modelling. In this study, we first perform a monitoring of the transport process of sediment (more specifically, gravels transported as bedload) in a natural river using an IC-tag technique. The bedload transport caused by a bankfull-scale discharge of the river is measured by tracking a hundred of IC tag-embedded gravels. We then conduct numerical simulations to reproduce the monitored bedload transport and depositional patterns of gravels using an Euler-based bedload tracer transport model coupled with a 2D morphodynamic model. The results show that the model reasonably predicts the monitored distribution of the gravels deposited in the river, suggesting that proposed model can be used to quantify the bedload transport processes in field-scale rivers.

**Key Words :** *sediment replenishment, tracers, IC-tag, vertical dispersion, numerical calculation*

## 1. はじめに

これまでの治水・砂防事業等により、流域の土砂動態は大きく変化してきており、水-土砂災害に対する安全度は大きく向上した一方で、土砂の連続性が変化し、河床低下や海岸侵食といった問題も合わせて顕在化してきた。これらの問題は、流域における総合土砂管理において解決されるべき課題と位置づけられ、ダム等に貯留されているような余剰土砂を、土砂が不足している地点にどのように効果的に還元していくかといった試みが行われている。そのような対策の一つとして、ダム排砂や置き土等の土砂還元を行い、河床低下や粗粒化した粒度分

布の回復を期待する試みを実施されている<sup>1)</sup>。しかしながら、現地河川において土砂還元に対する河床や粒度のレスポンスをモニタリングすることは非常に困難であり、これが土砂還元の影響を評価する際の問題となっている。

河川における土砂動態のモニタリング手法として、ICタグ等の発信器を用いたトレーサー手法が数多く実施されている<sup>2)3)4)5)</sup>。これらは、測定期間内に移動した土砂の移動距離や分布を把握出来る有力な手法といえるが、一般に調査コストが高いことと、トレーサーの発見率が低いことが問題点としてあげられるだろう。それに対して、数値計算モデルを用いて、河床と粒度の変化を計算して、土砂還元の影響を明らかにする研究も盛んに行われている<sup>6)7)8)9)</sup>が、一般的な河床変動モデルは、トレーサー手法

とは異なり、土砂の移動過程を把握することができない。

このような問題を踏まえ、著者らは従来の河床変動解析モデルの枠組みに新たに土砂トレーサーモデルを導入し、河床変動と同時に河川に投入された土砂がどのように移動するかを把握する手法の開発を行ってきた<sup>10)11)</sup>。

これらの検討では、構築したモデルが実験スケールのトレーサーの移動過程を予測出来る可能性があることがわかってきた一方で、現地河川におけるモデルの検証に課題を残していた。ICタグ等から得られる現地における土砂移動過程をモデルで再現できれば、モニタリングにおけるトレーサーの発見確率の低さといった問題点をカバーする技術となりうると考えられる。

本研究では、現地河川において河道内に供給された土砂を、ICタグ技術を用いた発信トレーサーによって追跡し、その調査結果を用いて土砂トレーサーモデルの精度検証を行った。

## 2. ICタグ技術を用いた置き土追跡調査

### (1) 対象河川

置き土追跡調査の対象河川は、河床勾配1/160、代表粒径100～150mm、セグメント1の1級河川であり、近年河床低下が進行し問題となっている河川である。上流域ではダムや砂防堰堤が整備されていることに加え、対象区間の直上流1～2kmの区間で露岩箇所が点在しており、将来的な土砂供給の増加がほとんど見込めない区間である。特に河床低下に伴う2極化（最深河床高の低下、砂州上の樹林化）が問題となっており、河床低下対策が検討され置き土試験等が実施されている。

### (2) 調査方法

発信トレーサーには、高価だが電池内蔵で探査範囲が広いアクティブ型（TR-052、大きさ約5cm、探査範囲約10m）と、安価だが電池非内蔵で探査範囲が狭いパッシブ型（HPT23、大きさ約2cm、探査範囲約0.3m）の2種類のICタグを使用した。表-1に使用したICタグの諸元を示す。

設置方法は、①現地材料の採取・削孔、②ICタグの埋め込み、③蛍光塗料で着色、④IDの記載、⑤現地横断測線上への設置の手順で実施した。現地材料は最大粒径程度( $d=200\sim300\text{mm}$ )の礫を5個、 $D_{50}$ ～代表粒径程度( $d=50\sim150\text{mm}$ )の礫を100個採取し、ICタグの大きさを考慮して、最大粒径程度の礫にアクティブ型を、 $D_{50}$ ～代表粒径程度の礫にパッシブ型を図-1のように埋め込んだ。

設置測線は、設置後の横断変化を把握するため、経年的に測量されている大横断測量断面と、置き土箇所の直近の測量測線の2測線とした。図-2に配置平面図を示す。地域住民の利用が盛んな箇所であったため、第3者による不用意な改変を予防するため、すべて水中に設置した。

表-1 使用したICタグの諸元

| 項目       | アクティブ型                                     | パッシブ型                                           |
|----------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 型番       | TR-052                                     | HPT23                                           |
| 大きさ(mm)  | $\phi 46\times H51$                        | $\phi 3.85\times H23$                           |
| 周波数(kHz) | 8～20                                       | 134.2                                           |
| 探査可能範囲   | 約10m                                       | 約0.15～0.30m                                     |
| 探査方法     | 可搬型探知機による直接探査                              | 可搬型探知機による直接探査                                   |
| 電池       | 内蔵                                         | 非内蔵                                             |
| 有効期間     | 約2ヶ月                                       | 半永久                                             |
| 個体識別     | 個別ID設定可能                                   | 個別ID設定可能                                        |
| 設置方法     | 現地の最大粒径程度( $d=200\sim300\text{mm}$ )の礫に埋込み | 現地の $D_{50}$ 程度( $d=50\sim150\text{mm}$ )の礫に埋込み |
| 設置数      | 5                                          | 100                                             |
| 発信方法     | 増水により転倒することで発信開始                           | 探知機から無線信号を受信してIDを伝送                             |



図-1 発信マーカ（左図:アクティブ型、右図:パッシブ型）

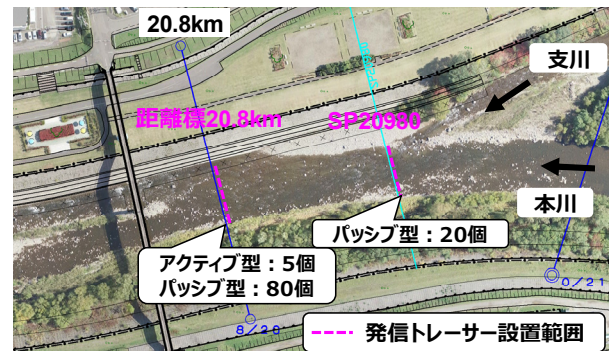


図-2 配置平面図



図-3 ICタグトレーサーの探査状況

調査方法は、出水後に現地を徒歩により踏査し、図-3のようにICタグの探知機を用いて直接搜索し、発見した発信トレーサーの識別IDとGPS情報を記録した。発信トレーサーは8月に設置し、9月に平均年最大流量以上の出水があったため、10月に調査を行った。



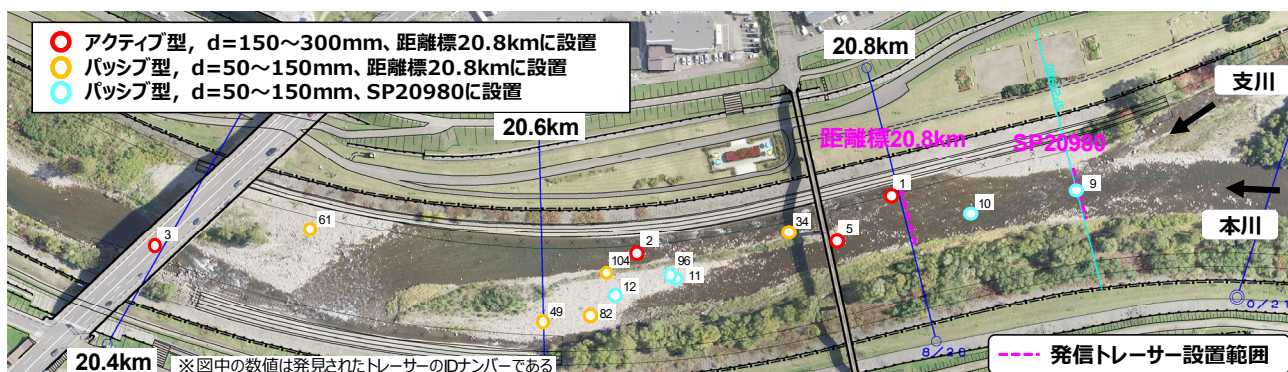


図-4 発信トレーサーの探査結果位置図

### (3) 調査結果

調査の結果、図-4、表-2に示すように最大粒径程度のアクティブ型は5個中4個、 $D_{50}$ ～代表粒径程度のパッシブ型は100個中10個を発見した。パッシブ型の発見率が低かった要因として、探査可能範囲が0.15～0.30mと小さいため、砂州中に深く埋没したトレーサーや水深の深い箇所へ堆積したトレーサーは発見できなかったことが挙げられる。

図-4から、トレーサーの発見された位置を比較すると、最大粒径程度のトレーサーの全てが水中部または水際で発見されており、砂州上で発見されなかった。一方、平均粒径程度のトレーサーは10個中7個が砂州上で発見された。このことから、今回の出水において、最大粒径程度の礫はみお筋部を移動し、平均粒径程度の礫はみお筋だけでなく、砂州の上も移動したことが伺える。

また、発見した発信トレーサーは、図-5のように表面の塗装と記載したIDが摩耗によりほとんど剥げており、探査機を用いなければIDの識別が不可能な状態であった。

図-6に発見した発信トレーサーの粒径と移動距離の関係を示す。図-6のプロットの右側の数値はID識別No.である。粒径が小さいほど移動距離が増加すると想定していたが、粒径と移動距離に明確な傾向は見えなかった。特に、粒径の大きいアクティブ型のNo.3が最も移動距離が長くなっており、事前の想定とは異なる結果となった。この要因として、距離標20.4kmより下流では、みお筋部の水深が深く、そこにパッシブ型のトレーサー（平均粒径程度）が堆積しても、センサーが反応せず発見できなかった可能性が挙げられる。

## 3. 土砂トレーサーモデルによる再現計算

### (1) 計算モデル

調査結果をもとに、著者らの構築した土砂トレーサーモデルにより、置き土試験箇所表層に設置した発信マーカの移動分散状況の再現計算を実施した<sup>10)11)</sup>。モデルの詳細については既報の通りであるが、本研究では単一粒径河床を対象として構築した既報のモデルを混合粒径

表-2 発見した発信トレーサーの移動距離

| No. | 設置測線    | 粒径 (mm) | 移動距離 (m) | 発見箇所   | 形式* | 備考            |
|-----|---------|---------|----------|--------|-----|---------------|
| 1   | 20.8km  | 253     | 7        | 水深1m以上 | A   | 最大粒径程度        |
| 2   | 20.8km  | 239     | 142      | 水深1m以上 | A   | 最大粒径程度        |
| 3   | 20.8km  | 207     | 393      | 水深1m以上 | A   | 最大粒径程度        |
| 5   | 20.8km  | 166     | 48       | 水深1m以上 | A   | 最大粒径程度        |
| 34  | 20.8km  | 109     | 63       | 水深1m未満 | P   | 代表粒径程度        |
| 49  | 20.8km  | 108     | 197      | 砂州上    | P   | 代表粒径程度        |
| 61  | 20.8km  | 85      | 309      | 砂州上    | P   | $D_{50}$ 粒径程度 |
| 82  | 20.8km  | 73      | 173      | 砂州上    | P   | $D_{50}$ 粒径程度 |
| 104 | 20.8km  | 58      | 160      | 砂州上    | P   | $D_{50}$ 粒径程度 |
| 9   | SP20980 | 126     | 2        | 水深1m未満 | P   | 代表粒径程度        |
| 10  | SP20980 | 129     | 59       | 水深1m未満 | P   | 代表粒径程度        |
| 11  | SP20980 | 134     | 215      | 砂州上    | P   | 代表粒径程度        |
| 12  | SP20980 | 118     | 248      | 砂州上    | P   | 代表粒径程度        |
| 96  | SP20980 | 77      | 217      | 砂州上    | P   | $D_{50}$ 粒径程度 |

※ A：アクティブ型，P：パッシブ型

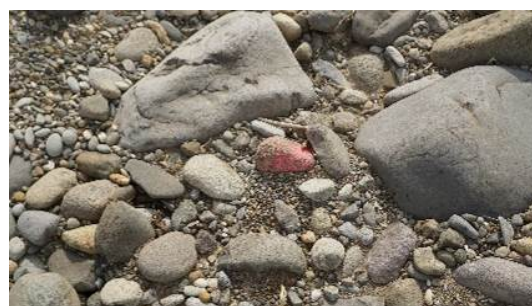


図-5 発見された発信トレーサー

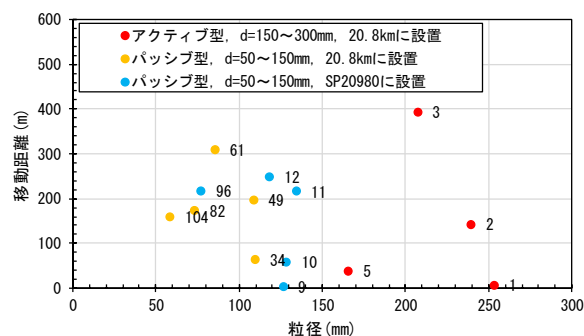


図-6 発信トレーサーの粒径と移動距離

モデルに拡張して用いているため、その概要について以下に述べる。

本研究で用いる土砂トレーサーモデルは、一般的な河床変動モデルに、着色した土砂のようなトレーサーの移動分布を計算可能なモデルを導入したものである。このモデルでは、ある体積の土砂に含まれるトレーサーの割合を交換層モデルにおける土砂の連続関係より計算し、通常ラグランジュ的に追跡することが望ましいトレーサーの移動を、トレーサー濃度の時空間変化としてオイラー的に計算していることに特徴がある。従って、トレーサーの保存式は通常の交換層モデルを導入した混合粒径モデルと同様の形式となる。交換層における土砂トレーサー体積濃度を $f_m$ と定義し、図-7に示すように交換層における水平方向のトレーサー粒子の質量保存に加え、交換層下部を流砂が移動することによって生じる交換層-遷移層間のトレーサー粒子の交換（鉛直分散）を考えることで、トレーサー濃度に関する支配方程式は以下のように表される。

$$(1-\lambda)\left(e_m \frac{\partial f_m}{\partial t} + f_l \frac{\partial \eta}{\partial t}\right) + \frac{\partial q_b f_m}{\partial x} + D \cdot f_m - E \cdot f_l = 0 \quad (1)$$

$$f_l = f_m : \frac{\partial \eta}{\partial t} > 0, \quad f_l = f_l : \frac{\partial \eta}{\partial t} < 0 \quad (2)$$

ここで、 $\lambda$ ：空隙率、 $e_m$ ：交換層厚、 $f_m$ ：交換層におけるトレーサー濃度、 $f_l$ ：交換層と遷移層の間のトレーサー濃度、 $f_l$ ：遷移層におけるトレーサー濃度、 $\eta$ ：河床高、 $t$ ：時間、 $q_b$ ：単位幅流砂量、 $D$ ：交換層から遷移層への堆積量、 $E$ ：遷移層から交換層への巻き上げ量である。これらは均一粒径を対象としたモデルであるが、トレーサー濃度や流砂量を粒径階に区分し、適当な流砂量式を用いることで混合粒径河床に対するモデルとすることができる。ただし、既報では、交換層と遷移層間のトレーサー移動（鉛直分散）を規定する $E$ 、 $D$ については、平衡状態を仮定するために、 $E = D$ の関係としていたが、混合粒径河床においてはこの関係は一般に成立しないため、本計算では無視している。この点については、今後の課題となるが、後に示す均一粒径を想定した計算においてこの項の影響はそれほど大きくないことがわかったため、本研究における条件では、混合粒径における影響も小さいものと考えられる。

上記のモデルを、iRICのNays2DH<sup>[12]</sup>に組み込んで使用した。流れの計算は、一般座標系の非定常平面2次元浅水流モデルを用い、流砂量は掃流砂のみを対象とした。掃流砂量式は芦田・道上による式<sup>[13]</sup>、横断方向の流砂量式は長谷川の式<sup>[14]</sup>、トレーサー濃度の保存には芦田らによる多層モデル<sup>[15]</sup>を使用した。

## (2) 計算条件

計算条件は、現地の大横断測量結果から河道形状を設

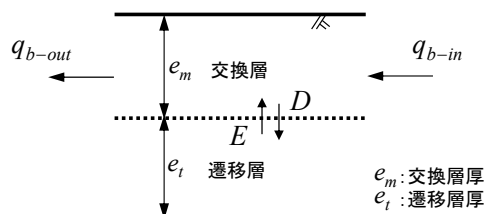


図-7 モデルにおける土砂収支の概念図

表-2 計算条件

| 項目     | 設定値                                                                                                 |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 計算区間   | 発信トレーサー設置箇所を含む5km程度の区間                                                                              |
| 河道形状   | 平成27年河道（出水前の最新河道形状）                                                                                 |
| 計算格子   | 流下方向：約20m間隔、横断方向：約10m間隔                                                                             |
| 計算時間間隔 | 0.25sec                                                                                             |
| 粗度係数   | マニングストリックラ型により設定                                                                                    |
| 樹木     | 投影面積密度 $a_v=0.28$ 、抗力係数 $C_d=1.20$                                                                  |
| 橋脚     | 投影面積密度として橋脚毎に設定                                                                                     |
| 流量     | 平成30年9月出水流量ハイドロ（ピーク流量660m³/s）<br>※融雪期平均流量程度200m³/s以上を抽出して設定<br>※平均年最大流量は約480m³/sであり、概ね5年に1度程度の中規模出水 |
| 起算水位   | 等流起算（ $i=1/160$ ）                                                                                   |
| 河床材料   | 平成28年度調査結果、計算区間の平均粒径 $d_m=118\text{mm}$                                                             |
| 固定点    | 高水敷、床止工、帯工、根固め                                                                                      |
| 土砂供給   | 静的平衡（上流区間が露岩区間のため土砂供給なし）                                                                            |
| トレーサー  | 距離標20.8kmの表層0.3mに設定（平均粒径の2倍程度）                                                                      |

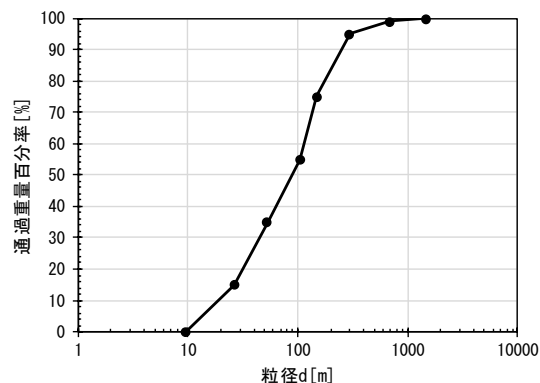


図-8 計算に用いた粒度分布

定し、9月出水時の時刻流量のうち、現地 $D_{50}$ ～代表粒径程度の粒径が移動を開始する200m³/s以上（融雪期平均流量程度以上）を抽出して設定した。発信トレーサーは距離標20.8kmに設置したものを対象とし、平均粒径の2倍程度の交換層厚と同じ表層0.3mの範囲に設定した。その他の計算条件は、表-2のように設定した。なお、これらの計算条件は既往の主要洪水において再現性の確認を行ったものである。

計算ケースは、河床材料を計算区間の平均粒径 $d_m=118\text{mm}$ で単一粒径とした場合（Case1）と混合粒径として粒径毎に移動範囲を予測した場合（Case2）の2通



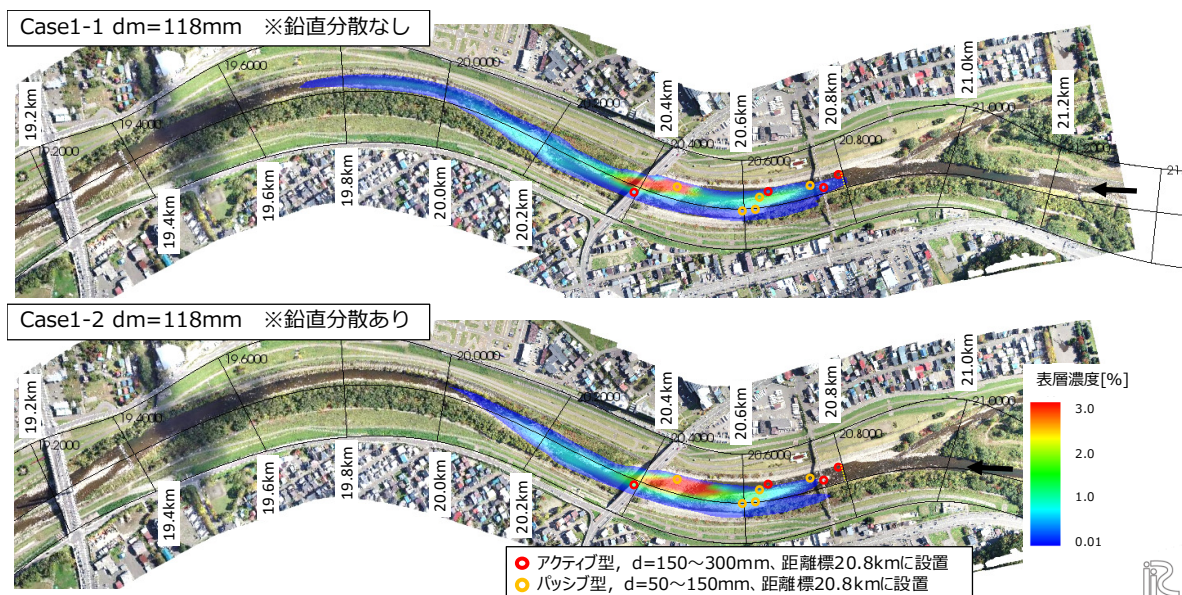


図-9 計算表層トレーサー濃度コンター図 (Case1, 単一粒径)

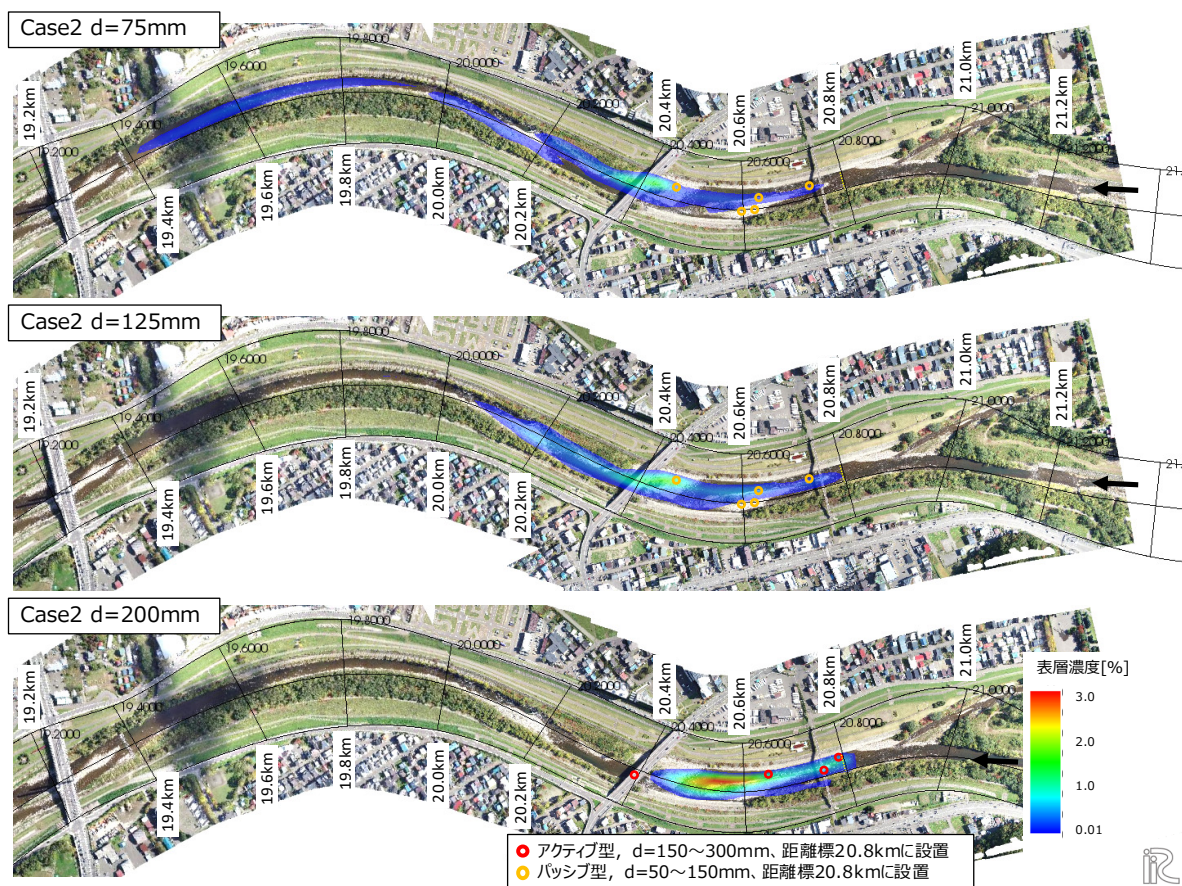


図-10 計算表層トレーサー濃度コンター図 (Case2, 混合粒径)

りを実施した。Case2の混合粒径の粒度分布は図-8のように対象とする各粒径階が20%程度の比率となるように設定した。Case1では鉛直方向の分散の有無を比較しているが、Case2では鉛直方向の分散を考慮していない。

### (3) 計算結果

計算結果について図-9、図-10にCase1とCase2の出水

後の計算表層トレーサー濃度コンター図を示す。この土砂トレーサーモデルでは、平衡流砂量式を基本としてトレーサーの移動分散状況を予測しているため、表層濃度の計算結果は平均的なトレーサーの移動分散状況を表しており、粒子の確率的な移動分散は考慮していないが、流れが空間的に変動していることにより、図に示すようにトレーサー濃度に分布が見られる。このコンター図は、

トレーサーの表層濃度分布を示しているが、投入したトレーサーが堆積しうる確率分布といえるものである。このため、このトレーサー濃度分布は、現地においてトレーサーが発見されうる範囲との解釈が可能であり、以下現地で発見されたトレーサー分布との比較を行う。

単一粒径として計算したCase1 (図-9) では、鉛直分散の有無によらず距離標20.4km右岸の砂州上で表層濃度が高く堆積しやすい箇所となっている。著者ら<sup>11)</sup>の既往研究によれば、鉛直方向の分散を考慮することにより、実験水路などの平坦河床条件下では再現性向上が期待できるが、交互砂州の移動など川幅スケールの動的な河床変動過程が支配的な場合の影響は相対的に小さくなるという結果を得ている。これと同様に、今回の計算においても鉛直分散の影響が小さくなったと考えられる。

混合粒径として粒径別のトレーサー移動分散状況を再現したCase2 (図-10) では、粒径によってトレーサーの堆積しやすい場所が異なる傾向が伺える。平均粒径程度の $d=125\text{mm}$ の表層濃度は、距離標20.4km右岸および距離標20.6km左岸の砂州上において高くなっている。一方、最大粒径程度の $d=200\text{mm}$ の表層濃度は、20.4km～20.8kmのみお筋部で高くなっている。この傾向は、2章の現地観測結果と概ね一致している。

次にトレーサーの移動距離を比較する。最大粒径程度の $d=200\text{mm}$ は、アクティブ型の追跡調査結果とほぼ同程度まで移動し、発信トレーサーの移動状況を精度良く再現できている。一方、平均粒径程度の $d=125\text{mm}$ では、移動距離の予測結果が調査結果よりも大きくなっている。この要因として、2章でも触れたように、距離標20.4km下流ではみお筋部の水深が深く、現地観測においてトレーサーを発見できなかった可能性が挙げられる。予測計算においても、距離標20.4km下流では、砂州上では無く、みお筋部にトレーサーが堆積する結果となっており、 $D_{50}$ ～代表粒径程度の発信トレーサーはNo.3の発見箇所よりも下流の滞筋部に堆積している可能性が高い。また、Case1, Case2ともに表層濃度の予測結果が高かった距離標20.4km右岸の砂州上は、現地でも土砂堆積傾向にあり、この範囲に発信トレーサーが埋没している可能性が高い。ただし、この点については更なる追跡調査が必要である。

#### 4. まとめ

本研究では、現地河川におけるICタグ技術を用いた置き土土砂の追跡調査を実施し、土砂移動に対し支配的な平均年最大流量以上の出水時における土砂移動状況を概略把握した。調査手法に関しては、アクティブ型の発信トレーサーのほうが発見率が高く、パッシブ型は砂州中への埋没や滞筋部への堆積により発見率が低くなったものの、一洪水あたりの移動距離や分布について、貴重なデータを得ることができた。

一方、平面2次元河床変動解析モデルを改良した土砂トレーサーモデルで、これらの土砂移動状況をある程度予測できることを確認した。このことから、土砂還元効果の検証手法として本モデルの有用性を検証することができた。

今後、置き土やダム排砂などの土砂還元対策検討において、対策効果を検証する有用な解析手法としての活用が期待される。

**謝辞：**本研究の現地モニタリングにあたり、国土交通省北海道開発局札幌開発建設部札幌河川事務所より多大なご支援を頂いた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省 河川局 河川環境課：下流河川土砂還元マニュアル (案) 第2版, 2011.3
- 2) 角 哲也, 石田裕哉, 佐竹宣憲：ICタグ技術に応用した砂礫移動に関するトレーサ調査手法の開発, 水工学論文集, 第51巻, pp.631-636, 2007.
- 3) 角 哲也, 石田裕哉, 佐竹宣憲：ICタグ技術を用いたトレーサ調査手法による砂礫移動観測, 水工学論文集, 第52巻, pp.889-894, 2008.
- 4) 角 哲也, 石田裕哉, 佐竹宣憲：アクティブタグ技術に応用した砂礫移動に関するトレーサ調査手法の開発, 水工学論文集, 第54巻, pp.1123-1128, 2010.
- 5) 福島雅紀, 武内慶了, 箱石憲昭：砂礫の敷設・供給が下流河道へ与える影響とその応答速度, 河川技術論文集, 第15巻, pp.477-482, 2009.
- 6) 植木真生, 福島雅紀, 山下武宣：河道掘削及び砂礫の敷設供給に対する河床の応答, 河川技術論文集, 第12巻, pp.415-420, 2006.
- 7) 佐々木崇憲, 櫻井寿之, 箱石憲昭：三春ダム直下流における置土侵食の平面2次元河床変動解析, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, pp.253-254, 2008.
- 8) 武蔵由育, 志宇知誠, 山下正浩, 竹林洋史, 湯城豊勝, 鎌田磨人, 赤松良久, 河口洋一, 中田泰輔：置土された土砂の流下過程の数値解析モデルの構築と実河川における適用, 土木学会論文集B1 (水工学) Vol.67, No.4, I\_817-I\_822, 2011.
- 9) 有光 剛, 出口 恭, 大東秀光, 大江一也：置土を用いた湾曲部内岸の河床維持対策に関する研究, 土木学会論文集B1 (水工学) Vol.67, No.4, I\_811-I\_816, 2011.
- 10) 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ー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, I\_1033-I\_1038, 2018.
- 11) 濱木道大, 岩崎理樹, 井上卓也, 清水康行：土砂トレーサー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, I\_955-I\_960, 2018.
- 12) <http://i-ric.org/ja/>
- 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) 長谷川和義：非平衡性を考慮した側岸浸食量式に関する研究, 土木学会論文報告集, 第316号, pp.37-50, 1981
- 15) 芦田和男, 江頭新治, 劉炳義：蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析, 水工学論文集, Vol.35, pp.383-390, 1991.

(2019. 4. 2受付)