

# 千代田新水路における土砂挙動について

帯広開発建設部 帯広河川事務所 計画課 ○飛田 大輔  
増田 宏幸  
福島 秀次

十勝川中流部に位置する十勝川千代田新水路は、流下能力の不足を解消することを目的として整備され、洪水時は分流堰の起伏式ゲートを開けて新水路に流水を流下させるものであり、平成19年4月より運用を開始している。新水路は、治水と環境の機能を維持するための適切な分流管理が必要であり、運用に伴う流況や分流量、これらに伴う土砂移動特性を適切に把握することが重要となる。そこで、分流堰のゲート操作を考慮した平面2次元河床変動数値計算モデルを構築し、既往出水の再現計算を行い、モデルの検証を行った。また、再現計算の結果から分流点周辺の流況及び土砂移動特性を把握し、維持管理のための基礎資料に資するものである。

キーワード：分流堰、河床変動、維持管理、数値計算

## 1. はじめに

十勝川中流部（KP42.5～KP45.3）に位置する十勝川千代田新水路（以下、「新水路」）は、流下能力不足を解消することを目的として、現低水路（以下、「本川」）の右岸側の高水敷を掘削した低水路である。また、新水路の右岸高水敷には、河川の連続性を保つための2種類の魚道<sup>1)</sup>が設置されている。図-1に新水路の状況を示す。新水路の上流側には、鋼製起伏式ゲート（扉高3.91m、扉幅43.3m）を4門配置した分流堰を設けている。ゲート配置は右岸側から順に第1ゲート～第4ゲートであり、第3ゲートと第4ゲート間に背割堤（延長1,310m）を設置している。新水路の運用は、平水時は本川に流水を流下させ、洪水時はゲートを開けて新水路に水を流すものであり、平成19年4月より運用を開始している。運用に伴い、洪水時は本川側の流量は減少し、新水路側へ流量が分

配されるため、分流点付近の流況や土砂移動が大きく変わる。また、新水路は河川の分合流点になるため、治水と環境の両機能を維持するための適切な分流管理が必要となるが、出水中の河床変動を把握することは困難である。よって、新水路の運用にあたっては、水位や分流量に対して、流水の分流に伴う分流点付近の流況や河床変動が与える影響を適切に把握することが維持管理上において重要となる。分合流部に関する研究は多くなされており、佐藤ら<sup>2)</sup>は、蛇行河川の復元を目的とした模型実験により、流況や河床変動特性の検討を行っている。数値解析については、横山ら<sup>3)</sup>は平面2次元数値解析、重枝ら<sup>4)</sup>は準3次元数値解析を用いた検討を行っている。また、ゲートを有する分流堰の洪水解析として、岡田ら<sup>5)</sup>は斐伊川放水路分流堰における出水を対象に内田・福岡<sup>6)</sup>の一般底面流速解析法を適用し、分流堰のゲート操作を再現した河床変動解析を行っている。

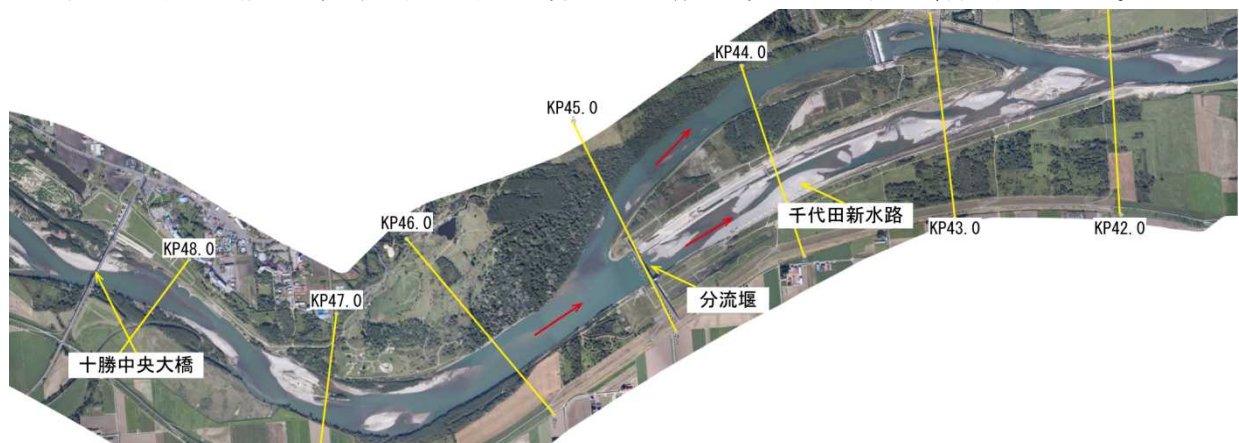


図-1 千代田新水路（平成25年11月撮影）

このように、河川の分合流点における流況や河床変動の予測手法は重要となる。そこで、本研究では、分流堰のゲート操作による分流を考慮した平面2次元数値計算モデルを構築し、既往出水の再現計算を行い、分流点周辺の流況や土砂移動特性を把握した。

## 2. 解析手法

### (1) 流れの基礎式

分流点や合流点及び分流堰周辺の局所的な現象を含めた河床変動を精度良く解析するためには、3次元の流れの影響を考慮することが必要である。しかし、本研究では平面的な流況や河床変動を大局的に把握することが可能であれば、土砂移動に与えるインパクトを予測することが可能と考えた。そこで、流れの基礎式は非定常二次元浅水流方程式とし、一般座標系に変換した流れの連続式と運動方程式を用いた。乱流は、ゼロ方程式モデルで与える。また、樹木群の抵抗についても考慮し、マンニングの粗度係数と同様に底面摩擦とした形で透過係数を与えた。透過係数は(1)式を用いる。

$$k_s = \sqrt{\frac{2g}{a_w C_d}} \quad (1)$$

ここで、 $k_s$ ：樹木の透過係数、 $a_w$ ：単位体積流域中の樹木の投影面積、 $C_d$ ：樹木群の抗力係数、 $g$ ：重力加速度である。 $a_w$ は単位面積あたりの繁茂する樹木本数と幹の胸高直径の積で表される。

次に、渦動粘性係数 $\nu_t$ は(2)式で与える。

$$\nu_t = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (2)$$

ここで、 $\nu_t$ ：渦動粘性係数、 $\kappa$ ：カルマン定数(=0.4)、 $u_*$ ：摩擦速度、 $h$ ：水深である。

### (2) 河床変動の基礎式

流砂の輸送について、掃流砂量は芦田・道上の式、その直角方向は長谷川の式を用いる。また、無次元限界掃流力は岩垣の式を用いる。これらより求めた掃流砂量より、一般座標系で表した流砂の連続式である(3)式によって、河床変動高を求める。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{z}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left[ \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \frac{q_b^\phi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \frac{q_b^\phi}{J} \right) \right] = 0 \quad (3)$$

ここで、 $z$ ：河床高、 $J$ ：ヤコビアン、 $\lambda$ ：空隙率、 $q_b$ ：単位幅あたりの掃流砂量、添え字 $\phi$ はそれぞれ主流方向とその直角方向を表す。

### (3) ゲート操作のモデル化

ゲート操作は、操作規則の条件に基づき、倒伏操

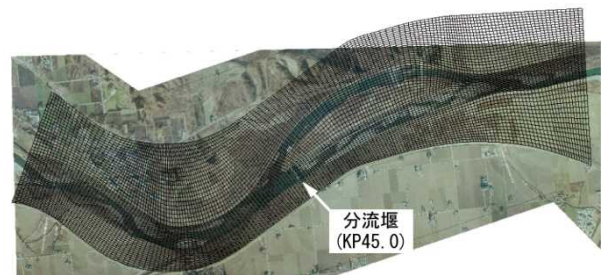


図-2 計算対象区間の初期地形と計算格子

作と起立操作をモデル化し、ゲートからの越流量の計算を行う。計算手順(①～⑤)の概要を示す。ここでは、倒伏時の操作のみ示す。なお、操作規則の詳細については省略する。

- ①ゲート高について、全閉・半開・全開の3通りの定数を設定する。
  - ②ゲート操作の判断基準水位(分流点及び千代田中央大橋)が半開の基準条件を超えた場合、はじめに第1ゲートの高さを半開(半開後は全開)に設定し、越流量を計算する。
  - ③第2ゲート～第3ゲートまで②の処理を順次繰り返す。
  - ④ゲート操作の判断基準水位が全開の基準を超えた場合、②と③の処理を行う。
  - ⑤第4ゲートの倒伏条件を超えた場合は、ゲートを全開に設定し、ゲート高と越流量を計算する。
- ゲートを通る流砂量の計算については、ゲート高が半開と全開時に行う。ゲートからの越流量 $Q$ については(4)式で求める。

$$Q = C \cdot B \cdot H^{3/2} \quad (4)$$

ここで、 $Q$ ：越流量、 $C$ ：越流係数(ゲート毎に異なる)、 $B$ ：越流幅(ゲート幅43.3m)、 $H$ ：基準面からの越流水深である。

本モデルは、計算を行うための利便性を高めることや解析効率の向上を目的に、河川横断データからの地形の再現性に優れ<sup>7)</sup>、結果の可視化や地形データの編集及び計算格子を作成するための機能を有するフリーソフトウェアのiRIC<sup>®</sup>に対応させ検討を行う。

## 3. 既往出水の再現計算

### (1) 計算条件の概要

構築したモデルについて、既往出水の再現計算を行い、再現性の検証を行う。再現計算は、新水路の運用開始後において洪水規模が大きく、出水時間の長い、平成22年8月出水(十勝中央大橋ピーク流量 $1,693\text{m}^3/\text{s}$ <sup>9)</sup>)と平成23年9月出水(同ピーク流量 $3,183\text{m}^3/\text{s}$ )を対象に計算を行う。図-2に初期の河

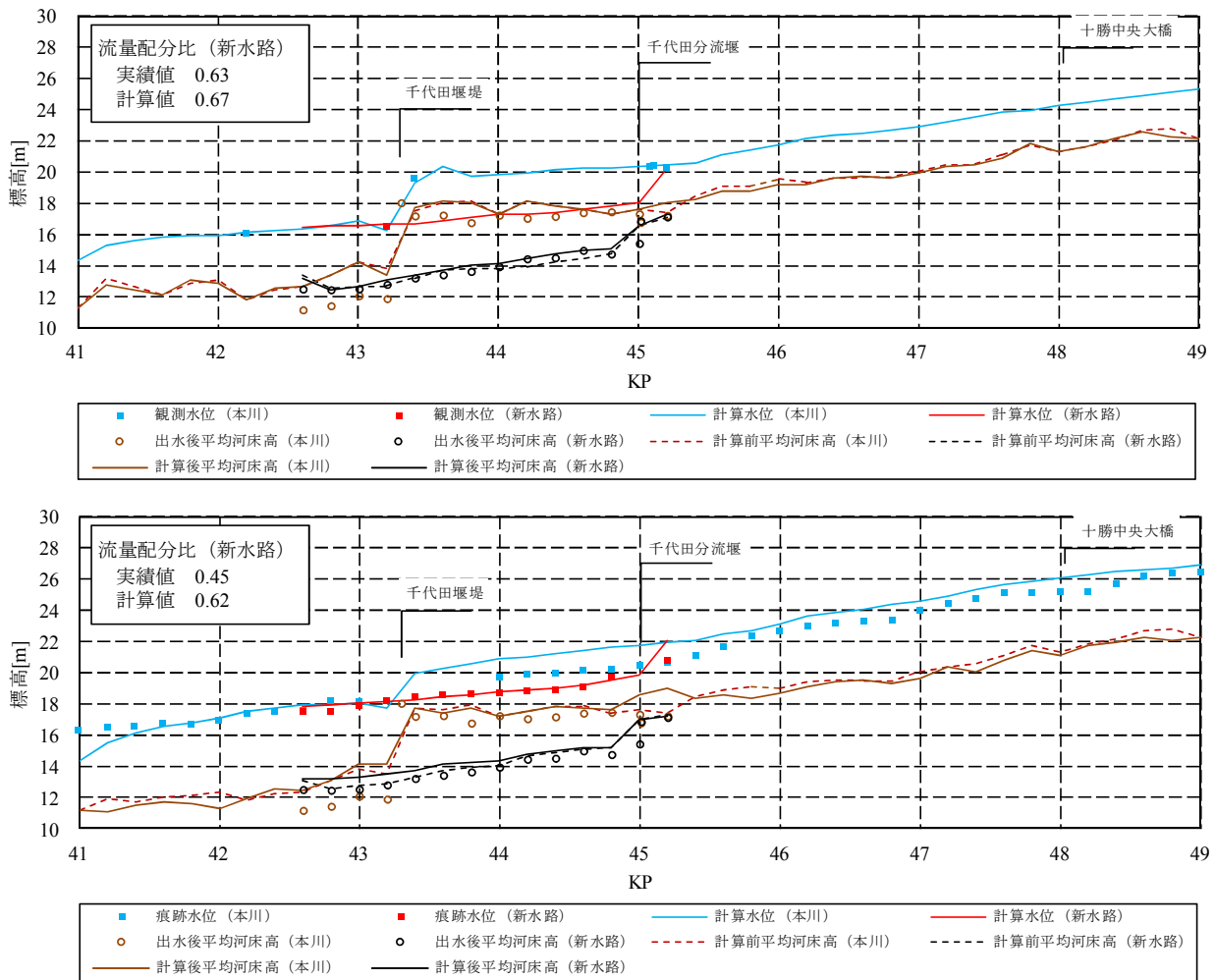


図-3 水位縦断と河床縦断の計算結果 (上段：平成22年8月出水、平成23年9月出水)

道形状と計算格子を示す。計算対象区間については、上流端は十勝中央大橋上流 (KP49.0)、下流端は KP41.0 (蛇行区間、支川である猿別川流入を避け、直線区間を設定) とした。また、本川と新水路で分合流する区間は 2way 河道として、中島部分を含めてモデル化した。それぞれの出水で作成に用いたデータは次の通りである。平成 22 年の低水路本川 (KP42.6 ~ KP45.1) と新水路 (KP41.8 ~ KP45.8) は平成 21 年横断測量結果、高水敷は平成 18 年 LP データ、これら以外は平成 18 年定期横断測量を用いた。平成 23 年の低水路は H22 定期横断測量、高水敷は平成 18 年 LP データを用いて作成した。分流点周辺の格子間隔は 20m ~ 25m 程度として、縦断方向に 183 メッシュ、横断方向に 58 メッシュの分割とした。低水路は移動床、高水敷は固定床とした。河床材料は単一粒径とし、平成 21 年度河床材料調査の結果を用いて平均粒径 16.61mm とし、マンギングの粗度係数は 0.028 で設定した。樹木の透過係数は、平成 21 年度と平成 22 年度の調査結果から河道計画検討の手引き<sup>10)</sup>により求め、河

道内樹木が繁茂する各区域に与えた。境界条件については、上流端は平衡流砂量とし、十勝中央大橋地点における時刻流量データ (平成 22 年 8 月 11 日 6 時 ~ 18 日 12 時、平成 23 年 9 月 2 日 0 時 ~ 10 日 6 時)<sup>9)</sup> を与えた。また、下流端については自由流出とした。

## (2) 再現性の検証

ピーク水位、河床高、ピーク流量時の流量配分比及び土砂収支量について、本モデルの再現性の検証を行った。

図-3 にピーク水位と平均河床高の縦断分布、流量ピーク時における新水路区間の流量配分比を示す。ピーク水位については、平成 22 年は観測水位、平成 23 年は洪水痕跡水位との比較である。平均河床高は出水後の測量結果、流量配分比は上流流量に対する割合である。

計算水位について、平成 22 年は観測水位を概ね再現出来ている。平成 23 年は分流堰上流と十勝中央大橋から千代田堰堤の本川側の計算水位が痕跡水位よ



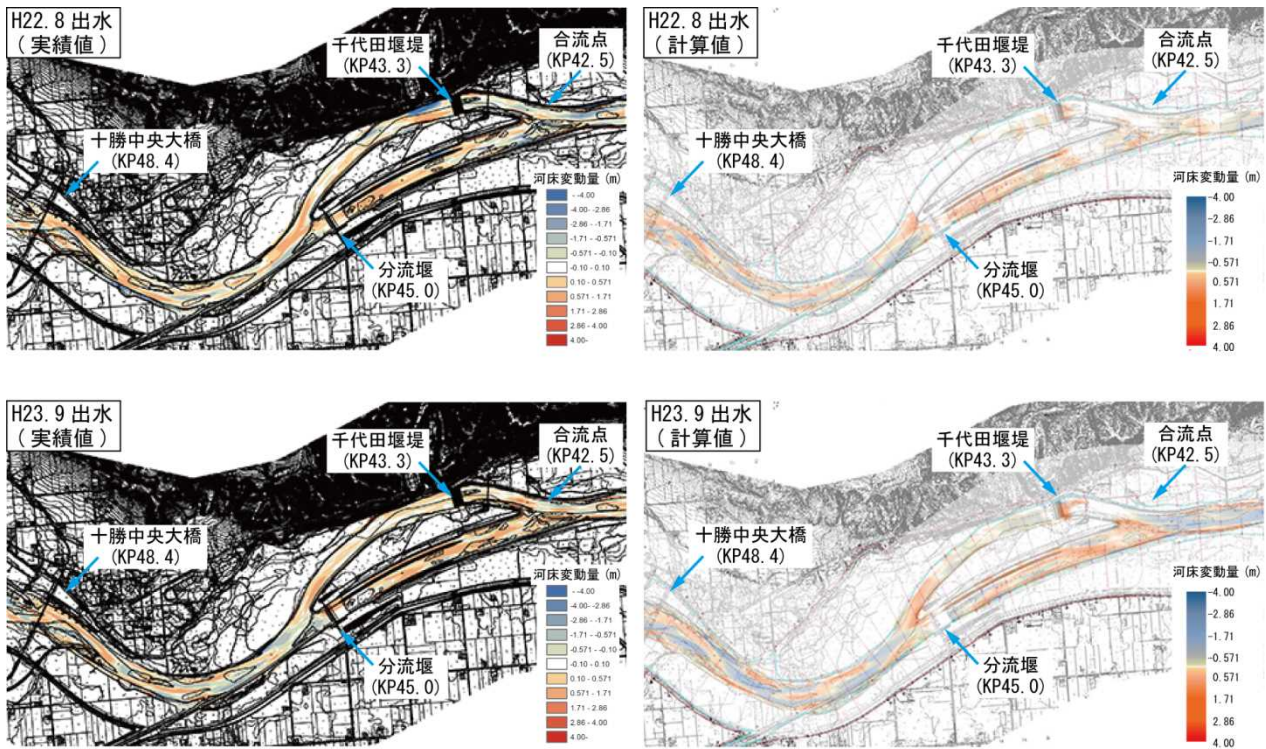


図-4 河床変動の計算結果（上段：平成22年8月出水、平成23年9月出水）

りやや高くなった。これは、メッシュ分割の粗さや樹木繁茂の影響に起因すると考えられ、再現性がやや低い結果となった。一方、新水路内と合流点の計算水位は、痕跡水位程度となっており、再現出来ている。流量ピーク時の新水路への流量配分比について、平成22年に若干のずれはあるが、概ね再現出来ている。平成23年については、実績値に比べ、やや高い。これは前述の通り、平成23年の計算結果は分流堰上流の局所的な水位の再現性が低く、水位が実績値に比べて高いため、ゲート流量がやや過大となった。平均河床高の計算結果については、それぞれ分流点上流と合流点下流は洗掘傾向、分流点と合流点及び新水路は堆積傾向となっており、概ね再現出来ている。

図-4 に出水後における河床変動コンターの比較を示す。左図は実績値、右図は計算値を示す。実績値は定期横断測量の結果を用いた。マイナスは洗掘、プラスは堆積を示す。実績値について、それぞれ分流点右岸で洗掘、分流点左岸の本川側と新水路で堆積が生じている。新水路の堆積については、平成22年は上流側に堆積が生じている。一方、平成23年は下流側で堆積傾向となっており、背割堤の下流から合流点までの区間に多く堆積している。これは、背割堤の下流区間では河床幅が拡大することで、流れの分散と掃流力の低下が生じ、堆積傾向になったと考えられる。計算結果について、平成22年は分流点

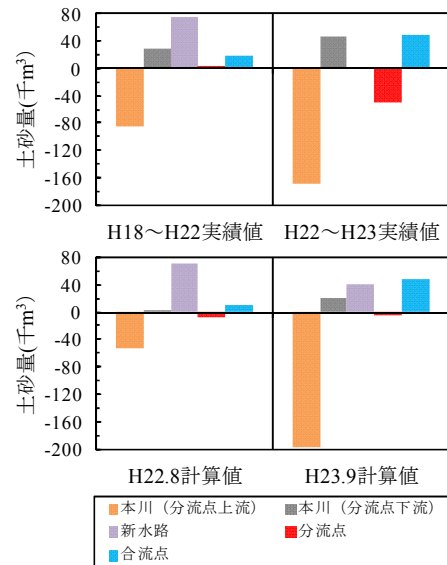


図-5 土砂収支量の計算結果

右岸の洗掘が大きく、平成23年は分流点右岸の洗掘が小さい。しかし、それぞれ分流点の上流側と右岸側の洗掘、分流点周辺と新水路で堆積については再現出来ている。

土砂収支の経年変化について、定期横断測量の結果との比較を図-5に示す。マイナスは洗掘、プラスは堆積を示す。領域区分については図-1に示す範囲のうち、本川（分流点上流）はKP42.6~KP43.3、分流点にはKP45.0~KP45.8、本川（分流点下流）はKP43.3~

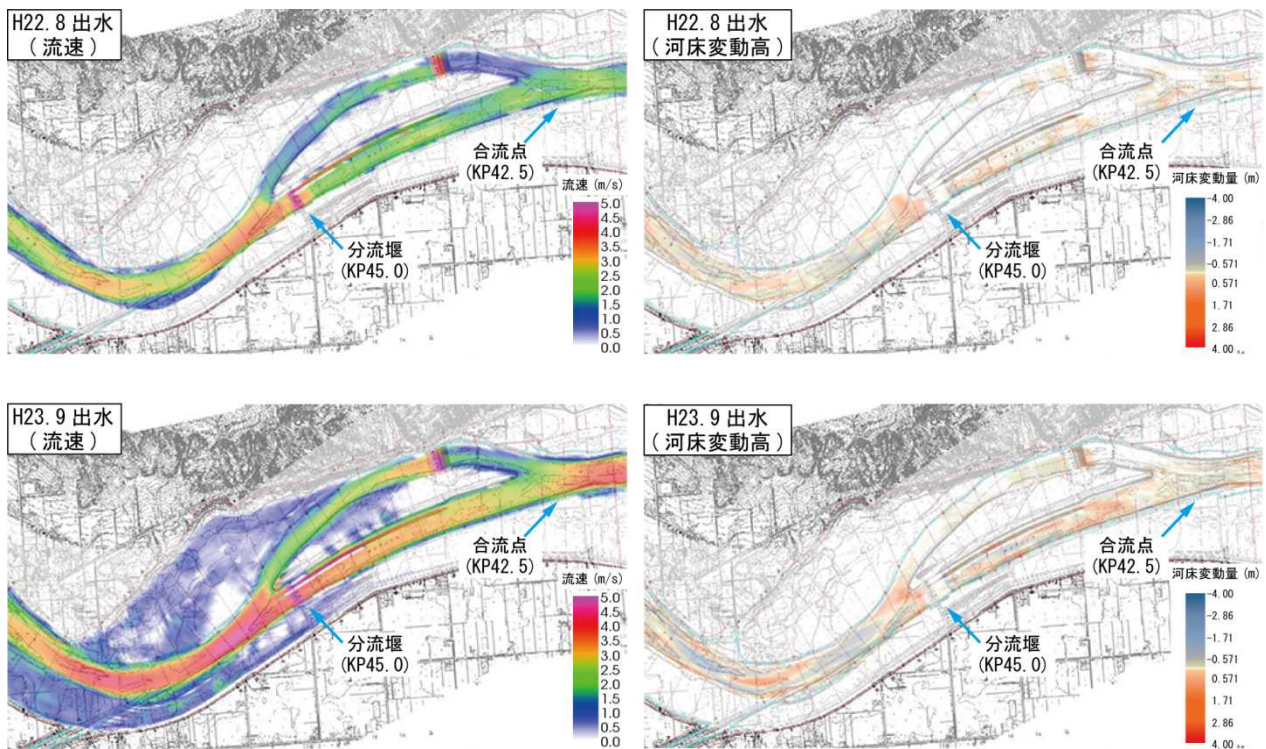


図-6 流量ピーク時の流速と河床変動の計算結果 (上段：平成22年8月出水、平成23年9月出水)

KP45.2、新水路は KP43.3～KP45.0、合流点は本川と新水路を含む KP41.6～KP43.3 の範囲である。平成23年の新水路の実績値については測量データが無いので算出していない。実績値については、それぞれ本川（分流点上流）や分流点で洗掘が生じ、流送された土砂によって分流点左岸の本川（分流点下流）と新水路に堆積が生じていることが分かる。計算結果については、それぞれ本川（分流点下流）の洗掘が実績値に比べて小さい。また、平成23年の分流点の洗掘は実績値に比べて小さいが、各領域における土砂収支の傾向は概ね同様である。

これらより、本モデルについては分流点周辺の流況や河床変動の傾向を概ね再現出来ており、新水路の運用における土砂挙動の解析に適用出来ることが分かった。

#### 4. 新水路の土砂挙動

今後の新水路の運用や維持管理に必要な土砂挙動を把握するため、新水路の運用によって生じる分流点周辺や新水路内の流況の変化と河床変動について計算結果に基づき検討を行った。

図-6 に流量ピーク時における流速（左図）と河床変動高（右図）を示す。河床変動高について、マイナスは洗掘、プラスは堆積を示す。流量ピーク時のゲート状態は、平成22年は第3ゲートまで全開、平

成23年は第4ゲートまで全開した時間帯である。分流点の流速については、それぞれゲート操作によって本川側と新水路側に流速差が生じ、新水路側に比べ、本川側の流速は小さくなっている。新水路内の流速は、縦断方向の分布に違いが生じており、流下とともに小さくなっている。一方、合流点から下流の流速は、分流区間に比べ、大きくなっている。河床変動については、それぞれ分流点の上流側と右岸側で洗掘、分流点周辺と新水路内で堆積が生じている。また、分流点から下流側の本川では河床の変化は小さい。新水路側へ流送された土砂の堆積については、平成22年の洪水規模で第3ゲートまで全開すると新水路の上流側となっている。一方、平成23年の洪水規模で第4ゲートまで全開すると、新水路下流から合流点にかけて堆積しており、図-5 に示すように合流点では経年的な堆積の進行が見られる。平水時の新水路では、4～8月は第1ゲートを半開とし通水、9～3月は魚道からの水のみが流れている状況<sup>1)</sup>である。よって、平水時では新水路に流れる流量は小さく、主流路と洪水で堆積した土砂に比高差が生じ、堆積した微細な土砂にヤナギ類や草本類が繁茂しやすい状況となる。これらは横山ら<sup>11)</sup>の調査報告でも顕著に繁茂する状況が確認されている。今後は、新水路の冠水頻度とヤナギ類や草本類の繁茂状況を把握するとともに、水理条件との関係を検証し、堆積土砂の維持管理手法を検討していく必要がある。



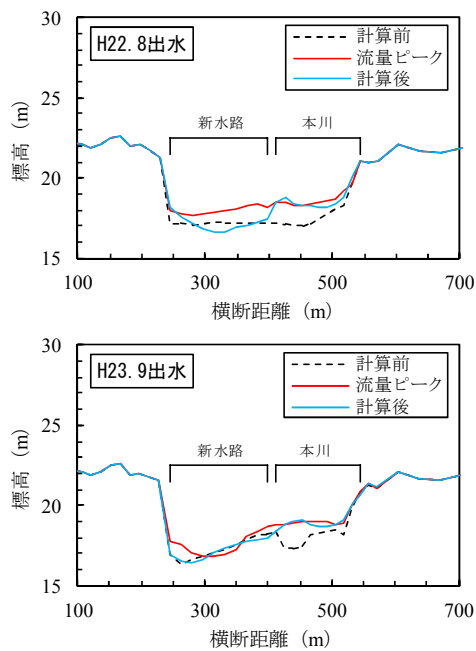


図-7 分流点 (KP45.3) における横断形状の変化

図-7 は分流点 (KP45.3) における初期河床 (計算前)、流量ピーク時及び出水後 (計算後) の横断形状を示したものである。流量ピーク時については、平成 23 年の出水において本川側の一部に洗掘が見られる以外は、本川側と新水路側で堆積傾向となっている。一方、ゲート操作の起立が終了した出水後 (計算後) では、新水路側に洗掘、本川側に堆積が生じている。これは前述の通り、新水路側が主流となるため、分流堰上流の土砂は洗掘、本川側では上流から流送された土砂が堆積するためである。よって、流量ピーク後の洪水後期では、分流点の本川側の堆積の影響により、流水が本川側へ流れにくくなる。また、本川側に堆積した土砂については、平成 22 年の計算後の河床高と平成 23 年の初期河床を比べると、洗掘されていることが分かる。これは、平水時又は中小規模洪水の流れにより土砂が流送されたことを示唆している。しかし、本川と新水路の分岐部の河床は大きく変化しておらず、分岐部の土砂は流送されにくく、堆積が進行しやすいことが分かる。

## 5. まとめ

本研究では、千代田新水路における分流点周辺の流況や土砂移動特性を予測するため、ゲート操作を考慮した平面2次元数値計算モデルを構築し、モデルの検証を行うとともに、流況や土砂移動特性を把握した。その結果を以下に示す。

①本モデルについては、分流点周辺の流況や分流量

及び河床変動を概ね再現でき、新水路の土砂移動特性の予測に適用可能であることを示した。しかし、分流堰付近における局所的な流れの再現性については十分ではなかった。

②新水路周辺の土砂移動については、ゲート操作により分流点の本川側と新水路側に流速差が生じ、新水路側が主流となることで、本川側に堆積、新水路側に洗掘が生じた。新水路内には堆積が生じ、洪水規模の違いにより、その分布範囲は新水路の上流側又は下流側となった。また、分岐部では土砂堆積が進行しやすい傾向となった。

③流量ピーク後の洪水後期では、分流点の本川側の堆積の影響により、本川側への流下が阻害される可能性が生じる。

今後は、これらの結果を踏まえ、適切に維持管理するための課題や対応策を整理していく必要がある。

## 参考文献

- 1) 島田友典, 林田寿文, 渡邊和好, 大角賢一: 十勝川千代田分流堰に設置した2種類の魚道における魚類遡上状況の検証, 河川技術論文集, 第20巻, pp.97-102, 2014.
- 2) 佐藤耕治, 渡邊康玄, 横山洋, 中津川誠: 分岐合流部を含む河道における砂州の影響, 水工学論文集, 第46巻, pp.719-724, 2002.
- 3) 横山洋, 渡邊康玄, 鈴木優一: 分岐・合流流れを有する河川における河床変動計算に関する研究, 北海道開発土木研究所月報, No.615号, pp.2-9, 2004.
- 4) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 坂本洋, 新谷恭平: 河川分流点周辺の流れと河床変動特性に関する研究, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.69, No.4, I\_985-I\_990, 2013.
- 5) 岡田裕之介, 大吉雄人, 福岡捷二: 斐伊川放水路への洪水分派に伴う分派点付近の本川河床変動に関する研究, 河川技術論文集, 第20巻, pp.247-, 2014.
- 6) 内田龍彦, 福岡捷二: 浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.68, No.4, I\_1225-I\_1230, 2012.
- 7) 中西哲, 傳田正利, 萱場祐一: 河川横断測量データを活用した河道内微地形復元手法について, 土木学会関東支部技術研究発表会, 第41巻, II-60, 2014.
- 8) 河川シミュレーションソフトiRIC, <http://i-ric.org/ja/>
- 9) 国土交通省水文水質データベース, <http://www1.nriver.go.jp/>
- 10) 河道計画検討の手引き, 財団法人国土技術研究センター編, 山海堂, 2002.
- 11) 横山洋, 矢野雅昭, 稲垣達弘, 林田寿文: 十勝川千代田新水路における河道内植生の消長について, 土木学会北海道支部年次技術研究発表会論文報告集, Vol.67, B-28, 2011.