

川幅漸縮・勾配急変湾曲河道区間の河床変動に関する基礎的研究

Study on Morphological Variations in Gradually Contracted Curved Open Channels with Change of Bed Slope

北見工業大学工学部
北見工業大学大学院
岩田地崎建設(株)

正会員 早川 博(Hiroshi Hayakawa)
学生員 ○宮野 遼(Ryo Miyano)
非会員 竹田俊太郎(Shuntaro Takeda)

1. はじめに

釧路湿原は釧路川に沿って広がる日本最大の湿原であり、野生生物の重要な生息域、かつ、人間にとって河川の流量変動を緩和する遊水地、あるいは水質浄化や地域の気候変動の緩和などの側面を持つ。近年、湿原中心部への土砂流入によって湿原の乾燥化が進み、2006年から湿原への土砂流入軽減と生態系の保全と回復、復元を目標とした旧川復元事業がスタートし、釧路湿原の源流部、標茶町茅沼地区で最初の旧川復元事業が2011年に完了した^{1,2)}。事業の効果として、①蛇行河道の生息環境が復元、②湿原植生の再生、③湿原中心部への土砂流入量の軽減、④湿原空間の復元、がほぼ期待通りの成果を得ている³⁾。

次の旧川復元区間としてヌマオロ川が検討されている。茅沼地区との違いは、直線化された河道へ流入土砂の堆積により河床高が上昇し、旧川河道の河床高との比高差が大きくなり、旧川への河道切替え部が急勾配となることである。本研究はこのような河道が急勾配で川幅が徐々に狭まる旧川切替え湾曲河道部を対象として、川幅、河道曲率、河床勾配の条件を変化させた場合の河床変動について検討する。

2. ヌマオロ地区の旧川復元

ヌマオロ川は茅沼地区に続く旧川復元箇所を検討の中で、①流域面積あたりの土砂流出量が最も多く旧川復元による湿原中心部への負荷軽減効果が大きいと期待される、②1947年(昭和22年)から2013年(平成25年)にかけてヌマオロ地区のヨシ群落の面積が約8割減少しており、湿原植生の変化が顕著で旧川復元による植生回復効果も期待される、③旧川復元箇所の周辺に民有地や農地がなく、社会的影響が少ないと考えられる、等の理由から、次の旧川復元事業の実施地区に選定された⁴⁾(写真-1)。ヌマオロ川は釧路川河口から約30km付近で釧路川本川と合流し、流域面積85.9km²、流路延長17.9kmの河川であり、合流部のヌマオロ地区は釧路湿原国立公園の指定区域に位置している。

ヌマオロ川は写真-1の直線化された河道部が図-1に示すように流入土砂の堆積により河床上昇が顕著であり、旧川河道との比高差が大きい。そのため、旧川への河道切替え部(追加距離SP6092～SP6200)は河道勾配が急変し、更に川幅も旧川へ徐々に狭めながら湾曲させて摺り付けることになる。一方、写真-2の茅沼地区復元水路は直線河道から旧川への河床高の変化はそれほど極端ではない。したがって、本研究では茅沼地区旧川復元では問題とならなかった急勾配条件下における湾曲河道の河床変動を検討し、今後の旧川復元事業の一助とする基礎的な研究である。



写真-1 ヌマオロ地区旧川復元対象区域⁴⁾

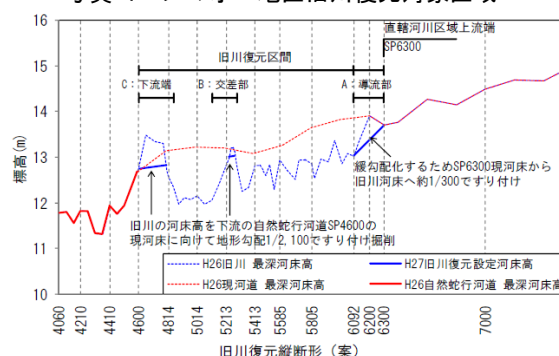


図-1 ヌマオロ川河床縦断面図(最深河床高)⁴⁾



写真-2 茅沼地区旧川復元事業区間(2014/10)

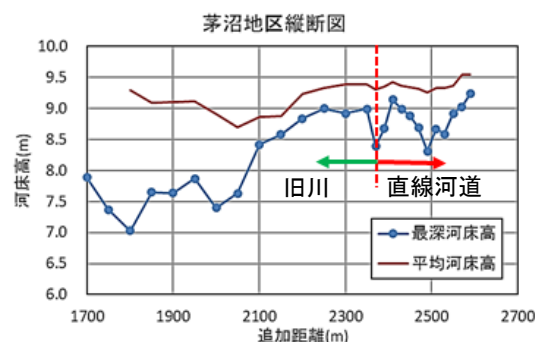


図-2 茅沼地区旧川復元事業区間の河道縦断面図

3. 基礎的な水理実験による河床変動の検討

ヌマオロ地区の旧川復元河道は上流直線河道区間の河床勾配が約 1/860 で、旧川区間が約 1/2,100 であるため、その間を結ぶ切替え湾曲河道が 1/300 とやや急勾配となり、かつ、河道幅が直線区間の約 20m から旧川区間の 10m 以下まで狭くなり、さらに流況は切替え湾曲河道の曲率半径の影響も受けることになる。したがって、このような湾曲河道部の川幅、河道勾配、湾曲部曲率半径の 3 要素をパラメータとする湾曲河道部における河道変動を明らかにすることが必要となる。なお、切替え湾曲河道の線形は図-3 にあるように追加距離 SP6399 (KP6.3) から河床勾配を変化させ、SP6200 が湾曲部入口、SP6120 が湾曲部出口で、そこから勾配の緩い旧川に接続する。試行的に茅沼地区と同様な線形(線形 A)と曲線長の長い線形(線形 B)の 2 案を検討する。

本報では最初に直線河道において川幅と河床勾配の 2 要素からなる基礎的な検討(ケース A)と、次に川幅、河床勾配に湾曲部曲率半径の 3 要素を加えた湾曲河道の基礎的な検討(ケース B)を行った。なお、下流の旧川蛇行河川区間は河道幅を狭めた直線河道に単純化し、本研究では切替え湾曲部前後の河床変動に注目した。また、ケース B の実験は曲率半径を変えると下流の旧川河道部の擦り付け箇所も位置を変える必要があるため、本研究では曲率半径を固定した実験条件のみ(線形 B)を検討した。

3.1 歪模型の相似則

本研究では黒木・岸の中規模河床形態の領域区分図⁵⁾の無次元パラメータ、無次元掃流力 τ_* (縦軸)と $BI^{0.2}/h$ (横軸)を一致させる相似条件を適用した。領域区分図の縦軸の無次元掃流力 τ_* は

$$\tau_* = \frac{h_P I_P}{s_P d_P} = \frac{h_M I_M}{s_M d_M} \quad (1)$$

である。また、領域区分図の横軸の無次元パラメータは

$$\frac{B_P I_P^{0.2}}{h_P} = \frac{B_M I_M^{0.2}}{h_M} \quad (2)$$

である。ここで、 h : 水深、 I : 河床勾配、 s : 河床材料の水中比重、 d : 河床材料の粒径、 B : 川幅であり、添え字 P は原型値を、添え字 M は模型値を表す。実験スペースの制約条件から、模型の川幅 B_M を $B_M = 0.3$ m とすると原型の直線河道区間の低水路川幅 $B_P = 20$ m から川幅 B の水平縮尺比 $B_R = B_P/B_M = 66.7$ となる。ここで、添え字 R は縮尺比を表す。実験は均一粒径砂を用い、原型の平均粒径 d_P が河床材料調査⁴⁾(図-4)から $d_P = 1.5$ mm であり、模型の粒径は河床波に砂澱を発生させないため、 $d_P = 0.59$ mm (4 号珪砂)を実験に用いると、 $d_R = 2.542$ となる。歪模型における水平縮尺 B_R と鉛直縮尺 h_R の比、歪比 $n (= B_R/h_R)$ は水路勾配の縮尺比 I_R の逆数($n = 1/I_R$)なので式(1)、式(2)から歪比 n を導くと歪比は $n = 15.2$ となる。したがって、原型の直線河道区間の河床勾配 $I_P = 1/860$ から、模型水路の河床勾配が $I_M = 1/56.5$ となる。また、以上の相似条件から流量の縮尺比 Q_R を求めると、 $Q_R = s_R^{1/6} \cdot n^{-19/30} \cdot B_R^{5/2}$ より

$$\therefore Q_M = s_R^{1/6} \cdot n^{-19/30} \cdot B_R^{5/2} \cdot Q_P \quad (3)$$

したがって、実験の流量条件は式(3)に原型河川の流量条

件を与えて所定の模型流量を算出することができる。

3.2 実験概要

ケース A の模型実験は可傾斜直線水路(全長 14m, 幅 0.3m)に図-5 に示す河道幅を 0.3m(原型 20m)から 0.15m(原型 10m)に変化させた模型水路を設置し、河道部には実験砂を敷き均し移動床とする。なお、旧川河道区間は旧川河道の満杯流量を通水した場合に溢水するので、

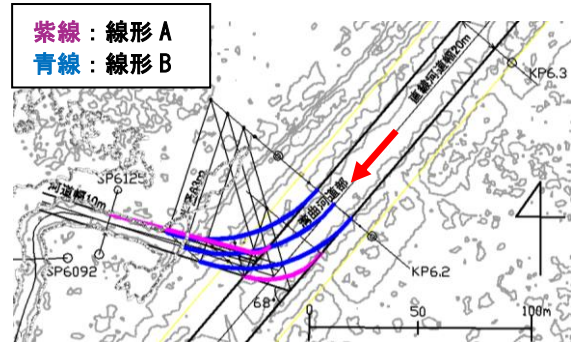


図-3 旧川切替え湾曲河道部の平面図(試行案)

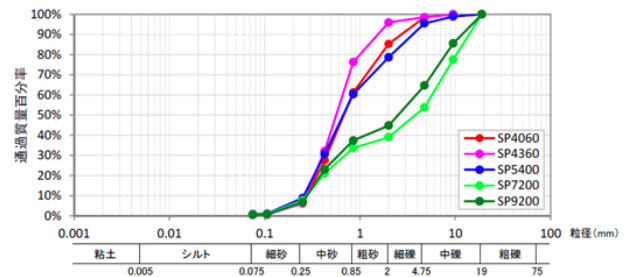


図-4 スマオロ川の河床材料調査⁴⁾

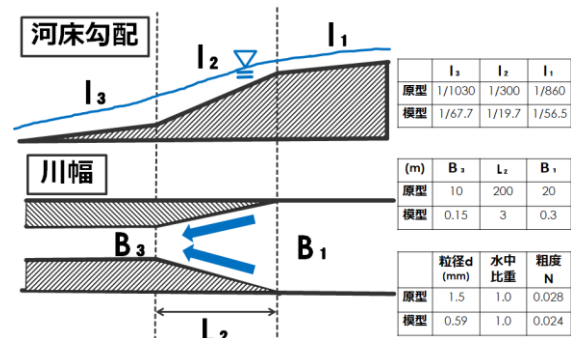


図-5 直線水路の諸量(ケースA)

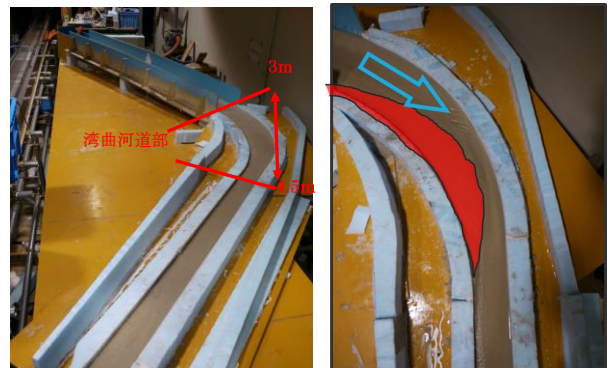


写真-3 湾曲水路の実験(ケースB)

(左: 水路全景, 右: $Q_P = 5\text{m}^3/\text{s}$ の湾曲部の状況)

初期河床砂面を予備実験から求め、河岸下 2.6cm とした。

また、**ケース B** の模型実験は**写真-3** に示すように可変勾配ステージ式水路(全長 12m, 幅 1.2m)に切替え湾曲水路を設置し、旧川河道部は溢水した流れが移動床河道部へ戻らないように外側に排水路を設けている。

3.3 実験条件

(1) ケース A : 直線河道で河道幅と河床勾配変化

ケース A は直線河道において川幅を漸縮させ、その区間の河床勾配を急勾配とした場合である。流量条件は旧川河道の平水流量 $Q=1.8\text{m}^3/\text{s}$ と旧川河道満杯流量の $Q=4\text{m}^3/\text{s}$ から、 $Q_P=2\text{m}^3/\text{s}$, $3\text{m}^3/\text{s}$, $4\text{m}^3/\text{s}$ と $5\text{m}^3/\text{s}$ の定常流量 4 ケースである。対応する実験流量 Q_M は式(3)からそれぞれ $Q_M = 0.309\text{l/s}$, 0.464 l/s , 0.618 l/s と 0.773 l/s を通水し、旧川河道部で溢水する条件下で川幅漸縮河道区間の河床変動を調べた。なお、通水時間は 30 分である。

(2) ケース B : 湾曲河道で河道幅と河床勾配変化

ケース B は**図-3** に示す原型の湾曲河道(曲率半径 $R_p=63\text{m}$)において川幅を漸縮させ、かつ湾曲河道区間の河床勾配を急勾配とした場合である。流量条件は**ケース A** と同じである。

3.4 実験結果と考察

(1) ケース A : 直線河道で河道幅と河床勾配変化

旧川河道の平水流量相当の $Q_P=2\text{m}^3/\text{s}$ を通水した場合(**図-6 上図**)、直線河道の流れは現地河川と同様に川幅一杯を流れるのではなく、水路の一部に浮州が形成されてその間を縫う様に流路幅が河道幅より狭い状態で流れる。また、川幅漸縮区間に流れ込むと、流速増加と共に河床が急勾配となっているので掃流力を増し、次第に河床が低下し始める。一方、下流の旧川との接続部では河道狭窄部となって流速が増加するが、そこから旧川河道の河床勾配が緩やかになるため、土砂は堆積して河床が徐々に上昇する。その結果、通水初期に旧川河道部で溢水していなかったのが次第に溢水を始める。ただし、その溢水量は僅かである。次に流量を増加させ、旧川河道満杯流量の $Q_P=4\text{m}^3/\text{s}$ に増加させる(**図-6 下図**)と、直線河道区間を川幅一杯に流れるようになり、砂州も形成された。その砂州が川幅漸縮部に到達すると、川幅が狭くなる流速増加と河床勾配が急になることと相まって掃流力が大

きくなるため流砂の移動速度も加速され、その結果、河床形態は平坦河床へと移行した。川幅漸縮部はほぼ平坦河床となり、旧川河道部との接続部直前で一旦河床が洗掘されるものの、緩勾配の旧川河道区間に入ると溢水して流れが減速し、旧川の河床が上昇して旧川の両岸に砂が堆積し始める。更に流量を $Q_P=5\text{m}^3/\text{s}$ に増やすと川幅漸縮部は平坦河床となり、旧川河道部の溢水範囲が下流域へと広がるようになる。

図-6 はまた、2 次元浅水流モデル(iRIC Nays2DH⁶⁾)を実験結果に適用し、解析結果と比較した。両者を比較すると、川幅漸縮区間の河床低下の状況が良好に再現されている。また、川幅が半減した旧川河道の流入部も河床高に極端な差は認められず、2 次元浅水流モデルの再現性が確認できる。

(2) ケース B : 湾曲河道で河道幅と河床勾配変化

写真-3 (右) は流量 $Q_P=5\text{m}^3/\text{s}$ の場合の通水 30 分後の河床の状況である。湾曲部外岸沿いに河床洗掘が進み、内岸は堆積傾向にあることがわかる。直線河道からの流れが直進して湾曲部外岸に水衝部を作り、そこで向きを転じた流れが外岸沿いに流下し、徐々に流路幅を広げながら旧川河道に摺り付いている。その際、湾曲部の河床勾配が急であるため、流速が加速されて河床洗掘が活発となり、流路幅が狭くなったと考えられる。**図-7** の湾曲部出口付近の河床横断変化は、流量増加と共に内岸側へ流路を拡幅しながら旧川河道へ流入している。

4. 現地スケールの切替え湾曲河道の河床変動解析

ヌマオロ地区旧川復元区間の切替え湾曲河道として、**図-3** に示す**線形 A** と**線形 B** の試行案を河床変動解析⁶⁾によって検討する。

4.1 検討条件

計算格子は**写真-1** に示す切替え湾曲河道を含む追加距離 SP5800 から SP6600 の河道範囲を対象に、旧川の河道幅約 10m に合わせて縦・横に約 2m の計算格子とした。切替え湾曲河道の線形は、茅沼地区と同じく兩岸の交差部に曲率半径の小さい単曲線の挿入(交角: 外岸 68 度, 内岸 65 度, 曲率半径: 外岸 32m, 内岸 7.4m)とした**線形**

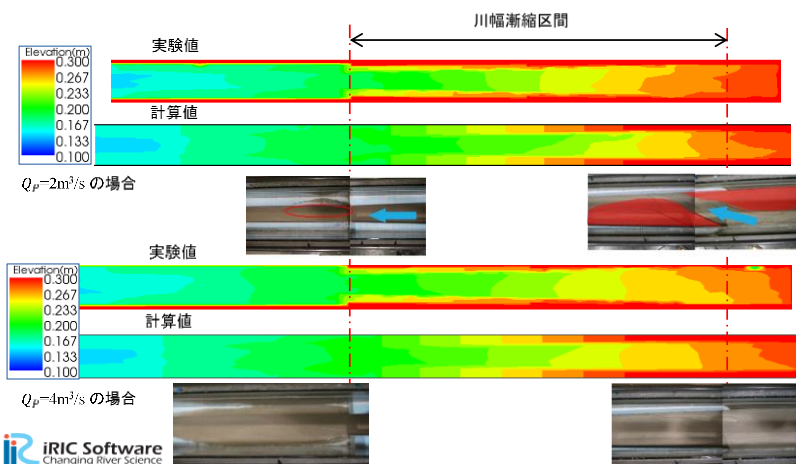


図-6 川幅漸縮・急勾配河道区間の河床変動(通水 30 分後の河床高)

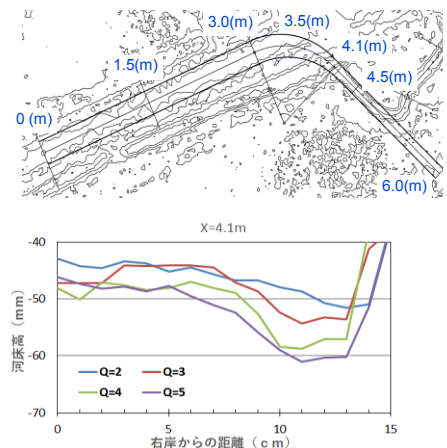


図-7 川幅漸縮・急勾配湾曲河道区間の河床変動(通水 30 分後)

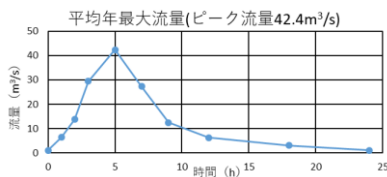


図-8 計算流量ハイドログラフ

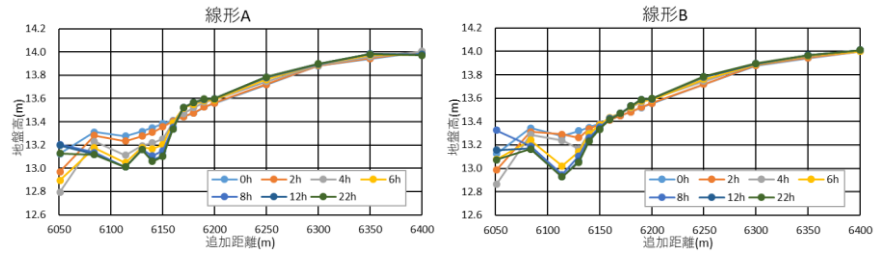


図-9 湾曲河道部の平均河床高縦断面図 (左: 線形 A, 右: 線形 B)

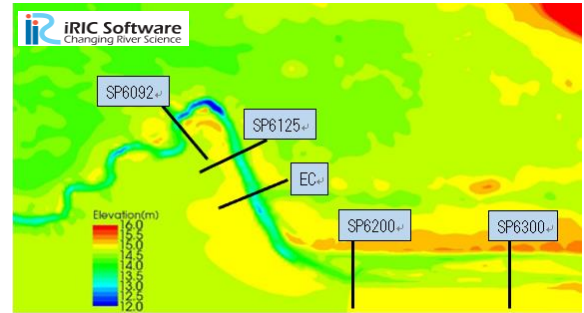
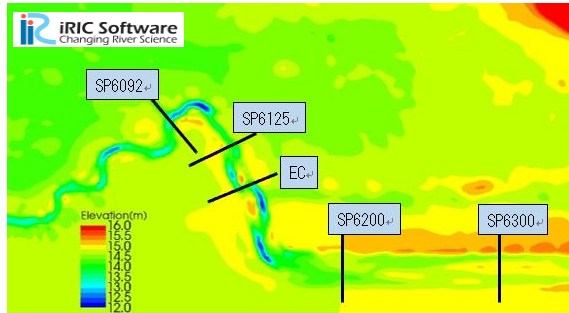


図-10 湾曲河道部の河床変動 (河床標高, 左: 線形 A, 右: 線形 B)

A と、線形 A よりも緩やかな単曲線(交角: 68 度, 曲率半径: 63m)で接続する線形 B である。河床材料は河床材料調査結果⁴⁾から平均粒径が 1.5mm 前後と非常に細かく、河道溢水による河岸・氾濫原への堆積状況も検討するため、均一粒径ではなく混合粒径とし、掃流砂・浮遊砂として計算する。また、河道部と氾濫域の粗度係数 n は、河道部を $n=0.028$, 氾濫域を $n=0.16$ と設定した。

初期河床は平均河床高の平坦河床に流量 $Q=2.0(\text{m}^3/\text{s})$ を 48 時間通水後の河床とし、検討には図-8 の平均年最大流量 $Q_p=42.4(\text{m}^3/\text{s})$ ⁴⁾のハイドログラフを繰り返し与えた。

4.2 解析結果と考察

図-9 は上流の直線河道区間から旧川まで(追加距離 SP6092~SP6400)の最深河床高の縦断面図であり、横軸は SP6400 起点の流下距離である。平均年最大流量規模の出水では、基点から 200m の直線河道は勾配が急変する 100m から湾曲部までの 200m 区間がやや堆積傾向にあり、湾曲部に流入すると次第に河床低下が進み、旧川に接続して直ぐの湾曲部(280m 付近)で最深部となる。線形 B は湾曲部区間の河床変化が少ないものの、その代わり流れがスムーズとなって集中し、最深部が線形 A より大きい。

次に、図-10 は平均年最大流量 $Q_p=42.4(\text{m}^3/\text{s})$ を 6 回繰り返し与えた後の湾曲部付近の河床高平面図である。湾曲区間が短い線形 A では外岸側の洗掘が進み、そこで反転した流れが内岸に跳ね返って湾曲区間で蛇行がみられ

参考文献

- 1) 北海道開発局釧路開発建設部: 釧路湿原自然再生事業茅沼地区旧川復元実施計画, 2006, http://www.env.go.jp/nature/saisei/law-saisei/kushiro/kayanuma_full.pdf (2018/12/7 確認)。
- 2) 釧路湿原自然再生協議会: 第 14 回旧川復元小委員会資料, 茅沼地区の工事完了について, 2011, <http://www.hkd.mlit.go.jp/ks/tisui/qgmend0000001ahg-att/qgmend0000001amh.pdf> (2018/12/7 確認)。
- 3) 釧路湿原自然再生協議会: 第 20 回旧川復元小委員会資料資料④-1, 平成 28 年度茅沼地区旧川復元モニタリング調査結果について, 2016, http://www.hkd.mlit.go.jp/ks/tisui/qgmend00000008dy1-att/rest20_01.pdf (2018/12/7 確認)。
- 4) 釧路湿原自然再生協議会: 第 23 回釧路湿原自然再生協議会総会資料, スマオロ地区旧川復元実施計画(案), 2017, http://www.hkd.mlit.go.jp/ks/tisui/b0sadt00000045rs-att/23_04.pdf (2018/12/7 確認)。
- 5) 黒木幹男・岸力: 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, 第 342 号, pp.87-96, 1984。
- 6) iRIC Project: Nays2DH user manual (<http://i-ric.org/ja/>) (2018/12/7 確認)。

る。一方、湾曲区間が長く、曲率も緩い線形 B では湾曲区間内での局所洗掘は見られずない。その後、旧川に流入すると最深部となった湾曲部の外岸が後退し、その影響が旧川の下流河道にも伝播して次第に蛇行流路が発達する。ただし、その蛇行流路の発達に線形 A と線形 B との違いはほとんどなく、旧川に供給される流量条件に支配される。また、旧川は河道溢水が生じ易く右岸氾濫原に土砂を堆積させている状況が確認できた。

5. おわりに

本研究は釧路川旧川復元事業にみられる川幅の広い直線河道から川幅の狭い旧川河道へ切替える湾曲河道部に着目し、直線河道部の河床が土砂流入によって上昇し、旧川河床高との比高差が大きい場合の切替え湾曲河道の河床変動を室内模型実験と河床変動解析を適用して検討した。

川幅が漸縮し、勾配が急になる直線河道の河床変動は数値計算でも実験結果を良好に再現できた。また、実スケールの数値計算から、湾曲区間の河道線形の違いが河床変動に影響することが示され、旧川区間の蛇行発達が示唆された。

謝辞: 本研究の一部は(公)河川財団平成 28 年河川整備基金の助成を受けた。記して謝意を表する。