

河道幅が漸縮する湾曲部における流水流路幅の 経年変動に関する研究

Study on fluctuations of flow pathway width in a curved channel with channel width narrowing

早川博¹・北尾智紀²・松原健也²・市川嘉輝³
Editorial COMMITTEE, Japan SOCIETY and River ENGINEERING

¹正会員 博(工) 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

²学生会員 北見工業大学大学院 博士前期課程社会環境工学専攻 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

³非会員 国土交通省北海道開発局釧路開発建設部 (〒085-0017 釧路市幸町10丁目3番地釧路合同庁舎)

In the Kushiro Wetland, old river reconstruction project, which shifts the channel of the current straightened river to the old meandering one, started from 2006 and was completed in 2011. This study focuses on river bed fluctuation of the curved channel with channel width narrowing, where is located in the inlet of the old meandering river with 30(m) width from straightened one with 80(m). From field survey, in response to change in water and sediment discharges, significant streamwise variation in water flow width in the curved channel adjusts in order to establish the dynamic equilibrium. Along the outer bank of curved channel, the secular bed deposit beside the outer bank is increasing, and as a result, the main streamline flows into the old river along the inner bank as left bank. Moreover, this narrowing curved channel easily leads to overspill some flood water including rich suspended sediment and to deposit some fine sand near channel side flood plain. We intend to explain above significant bed variations by using movable bed experiments with the distorted model and the numerical simulations.

Key Words : nature restoration, curved channel, river bed fluctuation, flow pathway, channel width narrowing

1. はじめに

釧路川では自然再生事業の一つとして釧路湿原の辺縁部に位置する茅沼地区において、河川環境の保全・再生や湿原再生、土砂流入抑制を目指し、過去に直線化された河道をかつての蛇行河川へ戻す旧川復元事業が計画され¹⁾、写真-1に示す旧川区間の河道を復元後、2010年2月に河道を旧川に切替え、2011年に直線河道の埋戻しと右岸残土の撤去を完了した²⁾。川幅80mの直線河道から幅30mの旧河道へ切替えた流入湾曲部（距離標KP33.4地点）では、当初、湾曲河道外岸沿いに河床洗掘が進み、そこが流水流路（水みち）になると想定していたが、切替え後の状況は外岸沿いに土砂が堆積して埋め戻され、自律的に流路幅を徐々に狭めながら湾曲部内岸に沿って流れ、旧川河道にすり付く流水流路が形成されている。これは、藤田³⁾が指摘した河道セグメント2-2の砂床河川において河川改修などで拡張した低水路内の一部に土砂が堆積して新たに形成された河岸や高水敷をきっかけに川幅が縮小する川幅縮小メカニズムに類似している。

また、旧川復元によって川幅が半減する流入河道部では、写真-2のような河道溢水が容易に起こり（点線の範囲）、洪水出水時の浮遊土砂を氾濫原に運搬・沈砂する土砂流入抑制の役割を果たしている。この役割を維持するためにも、流入河道部の将来的な河床変動や流路変動を把握する必要がある。

本研究の目的は川幅が漸縮する流入湾曲部に形成される流路の形成メカニズムを解明することであり、現地調査から流路の経年変動を明らかにし、その流路変動特性を室内実験等で再現・検証を試みた。

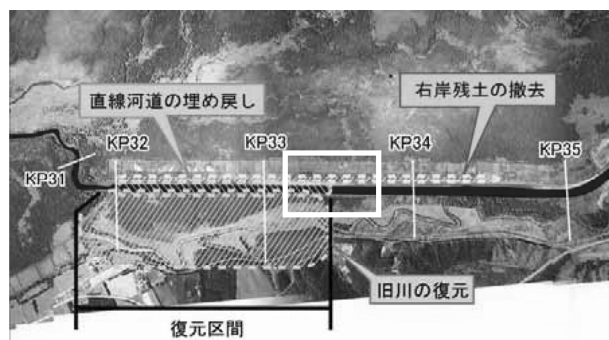


写真-1 釧路川旧川復元事業（茅沼地区）¹⁾

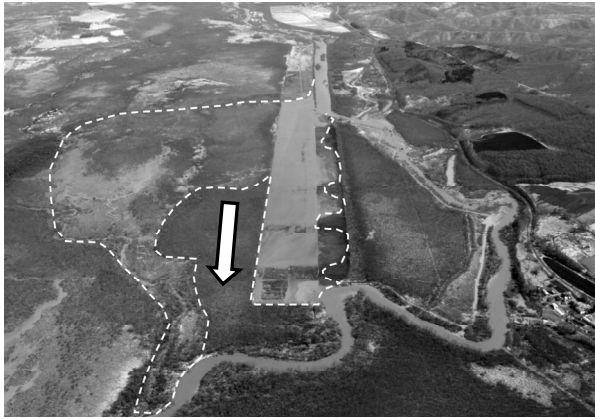


写真-2 旧川復元区間の融雪出水時(2011年4月25日16時)

2. 茅沼地区旧川復元事業と流入河道部の状況

釧路湿原の辺縁部に位置する標茶町茅沼地区は、釧路川が激しく蛇行し、出水により氾濫の危険があることから1973年に河道を直線化する新水路工事に着工し、1980年に完了した。この工事により地下水位が低下し、洪水の氾濫頻度を低下させると共に、川の周辺が乾燥化して農地、牧草地として利用できるようになったものの、その反面、雄大な蛇行した景観が見られなくなり、単調な直線河道の風景となっている。また、直線化した河道は旧川よりも川幅を拡幅したため、氾濫頻度は減少したものの、下流の湿原内への土砂流入量が増加し、湿原の乾燥化の一因と考えられた。

そこで、湿原への影響を軽減し、河川本来の生態系の保全と回復、復元を目標に旧川復元事業が計画され²⁾、2006年から事業を開始し、2011年3月に完了した³⁾。復元事業は写真-1に示す距離標KP33.4地点(単位: km)において直線河道(本川)を蛇行する旧川へ切り替え、KP32.0で再び旧川から本川へ戻す事業である。旧川への切り替え通水は2010年2月に実施され、通水直後の2010年3月と通水前の2009年10月に本川・旧川の流況調査が実施されている²⁾。

本研究では写真-1の枠線で囲まれた旧川へ流入する湾曲河道部(外岸の交角が50度)に注目する。ここで、本川の直線河道は川幅80m、河床勾配1/1,900、平均粒径2~4mmの河道セグメント2-2に区分され、旧川部の流入部は川幅30m、河床勾配1/400である。

(1) 調査方法と調査結果

現地調査は写真-3に示す本川がKP33.4からKP33.6の200m区間、旧川が工事測点SP2200からSP2350の150m区間で実施した。この区間は釧路開発建設部の調査区間²⁾と重複している。陸域の調査は本川区間を20m間隔でトータルステーションを用いて河道横断測量した。本川と旧川の流水流路区間は船外機付ゴムボートに超音波流速計ADCP (Teledyne RD Instruments製ADCP Stream-Pro、最大測定レンジ6m)とDGPS (Hemisphere A100)を搭載

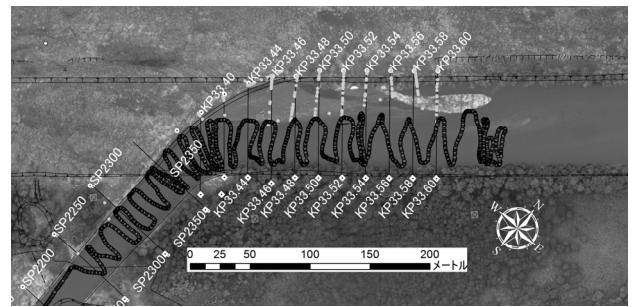


写真-3 流入湾曲部(KP33.4付近、2013年9月撮影)とゴムボートによる調査航跡(2014年10月調査時)

し、DGPSで航路位置を確認し、流路に直交させ左右ジグザグに航行しながら下流から上流へとADCPによる水深 h と流速 V の移動観測をした(写真-3参照)。ADCPの計測間隔は約1秒で、層厚10cm間隔で流速を計測し、河床高 z は複数地点で観測した水位をもとに任意地点の水位 H を補間し、任意地点の河床高 z (z =水位 H -水深 h)を算出した。なお、2013年10月、2014年10月の調査ではRTK-GPSを用いて得られた測定位置と水位をADCPに同期させて河床高を求めた。

(2) 流入湾曲河道部の河床高経年変化

流入湾曲河道部において、2010年3月に旧川へ切替えて通水した直後から2014年10月までの河床高の経年変化を、写真-3を背景とした図-1~図-4で示す。

河道を旧川に切替え通水した直後の2010年3月の状況が図-1である。KP33.64付近に位置する切替え前から存在していた砂州の下流に、KP33.50付近の河道中央を背とする細長い舌状の砂州が形成されている。流水部は左岸の内岸とこの砂州の間を流れ、本川を締め切った湾曲部外岸が水衝部となって旧川へ流れ込んでいる。この外岸水衝部前面の河床では、まだ、極端な河床洗掘は見られない。なお、平水時の水位は標高10.5m前後であり、この地盤高の等高線が砂州前縁線に相当する。

次に図-2は、旧川へ河道を切替えてから約2年を経過した2012年10月の状況である。図-1と比較すると、KP33.50付近にあった砂州が右岸側岸付近を埋め戻しながら下流へ移動し、湾曲部外岸に達して塞ぎ止められている。一方、湾曲部内岸は堆積傾向にあり、その結果、左岸と砂州前縁の間を直進してきた流水流路は、内岸堆積部を回り込むように湾曲部外岸に当たり、局所洗掘を増大させて旧川へと転じている。この時、本川側で約40mの流路幅が旧川の川幅30mへと徐々に摺り付いている。

2010年3月に河道を切替えてから2011年3月までに本川の埋め戻し工事が完了し、併せてこの湾曲部で右岸氾濫原への溢水を促すために右岸高の切り下げが行われた。この地点で溢水する水位は上流KP45に位置する標茶水位観測所(国土交通省)の観測水位⁴⁾との対応関係から、2011年右河岸切り下げ後は標茶観測所の水位が19.2m以上で写真-2のように溢水しており、2011年は10数回、

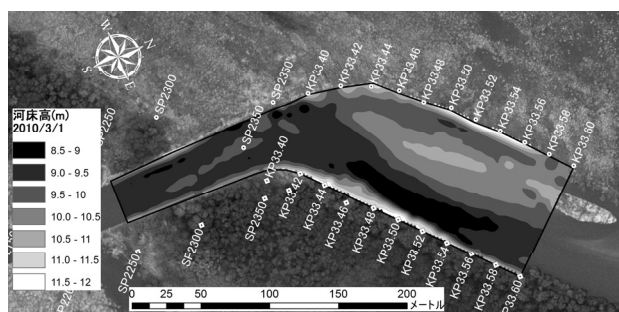


図-1河床高平面図(2010年3月, 釧路開発建設部河床高データ提供)

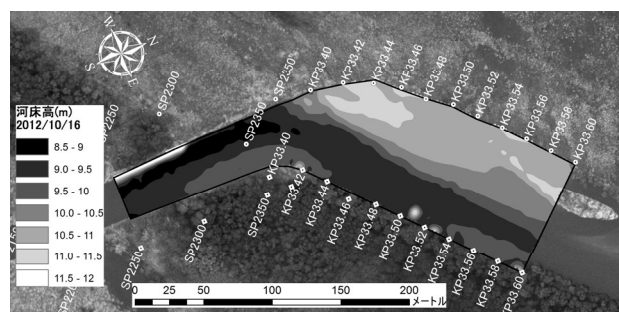


図-2河床高平面図(2012年10月)

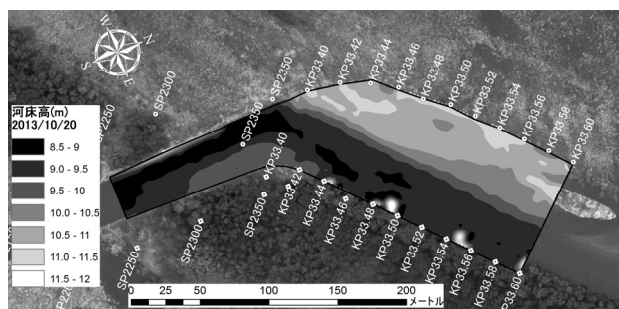


図-3 河床高平面図(2013年10月)

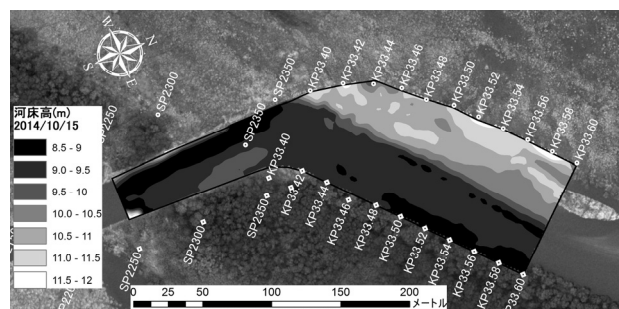


図-4 河床高平面図(2014年10月)

2012年は融雪出水期と晩秋11月が長期間に渡って溢水した⁵⁾。この標茶観測所での水位19.2mを $H-Q$ 式から流量に概算すると約50 m^3/s であり、オソベツ川などの支流からの流入流量を考慮して、溢水時の流量は約100 m^3/s と推定できる。河道切替え前の本川直線河道での河道満杯流量は約150 m^3/s であり、湾曲部右岸高を切り下げることで溢水頻度が高くなっている。また、2012年の融雪出水時に観測された標茶観測所での水位20.5mは約160 m^3/s であり、そのとき湾曲部では250 m^3/s を超える流量規模と推定される。つまり、図-2に示す河道の状況は、2012年の融雪出水の影響を反映した結果である。

図-3は更に1年後の2013年10月の状況である。標茶観測所では、2013年4月7日に2012年を超える約250 m^3/s の融雪出水が観測され、湾曲部では350 m^3/s を超える規模と推定される。また、9月16日も標茶観測所で約300 m^3/s を超える流量が観測され、湾曲部では500 m^3/s に迫る出水と推定される。しかし、図-3の河床高は前年と比べても大きく変化しておらず、河道切り替え前から存在していたKP33.60付近の右岸砂州もフラッシュされることなくその形状を保ち、流水部がやや河床低下しただけである。流水部の流路幅も2度の大きな出水を経験したにもかかわらず前年から大きく変化せず、現状の流路幅は藤田³⁾が指摘した低水路河道において川幅が流況に応じて自律的に縮小するメカニズムと類似している。つまり河道の側岸部に形成された高水敷、ここでは既に存在していた砂州がきっかけとなり、流況に応じて右岸側岸前面の堆積を徐々に進め、そこが高水敷となって自律的に流路幅を縮小するメカニズムが、この川幅が漸縮する湾曲河道部においても働いていると考えられる。

最後に図-4は2014年10月の状況である。河道切り替え以前から残存しているKP33.60付近の右岸砂州は、砂州上

の植生が繁茂したままであり、出水で移動した形跡はみられない。その下流の右岸前面の堆積は前年よりやや増加しているだけで、流水部の流路幅も前年と同程度であった。

(3) 横断形状の経年変化

調査区間の横断面図は、KP33.40～KP33.60については旧川切り替え前(2009年10月)、切り替え直後(2010年3月)、2012年11月、2013年10月と2014年10月の5回の調査結果を図-5に示す。なお、本研究で調査した2013年10月と2014年10月は陸上調査で得られた結果だけを示す。なお、2010年3月と2012年11月は北海道開発局釧路開発建設部の調査データであり、流水部の河床高も測量している。

KP33.40～KP33.44の区間は旧川への河道切り替えによって河道が埋め立てられ、川幅が狭くなっている。KP33.44の横断面は河道切り替え直後から右岸部に土砂が堆積し川幅が約20mも狭くなり、上流から右岸砂州が移動している。同様にKP33.44～KP33.54の右岸部は2012年11月までに堆積が進んでおり、図-1～図-4に示す右岸砂州の移動・堆積状況が理解できる。前述したように2013年は融雪出水と9月に中規模(500 m^3/s 程度)出水を経験したものの、横断形状は大きく変動していない。特にKP33.60付近に位置する砂州は、砂州表層が繁茂した植生によって保護され、固定化された砂州となっている。

前述したように、KP33.60付近の砂州が藤田³⁾の指摘した川幅縮小メカニズムにおいてきっかけとなる河岸や高水敷に相当し、KP33.40～33.60間に堆積している砂州前縁部の横断勾配が川幅縮小メカニズムの必要条件である急な河岸横断勾配の条件と、更に砂州頂部の標高も平水位の変動幅内にある条件を満たしている。

したがって、本研究で調査した流入湾曲部の河床変動

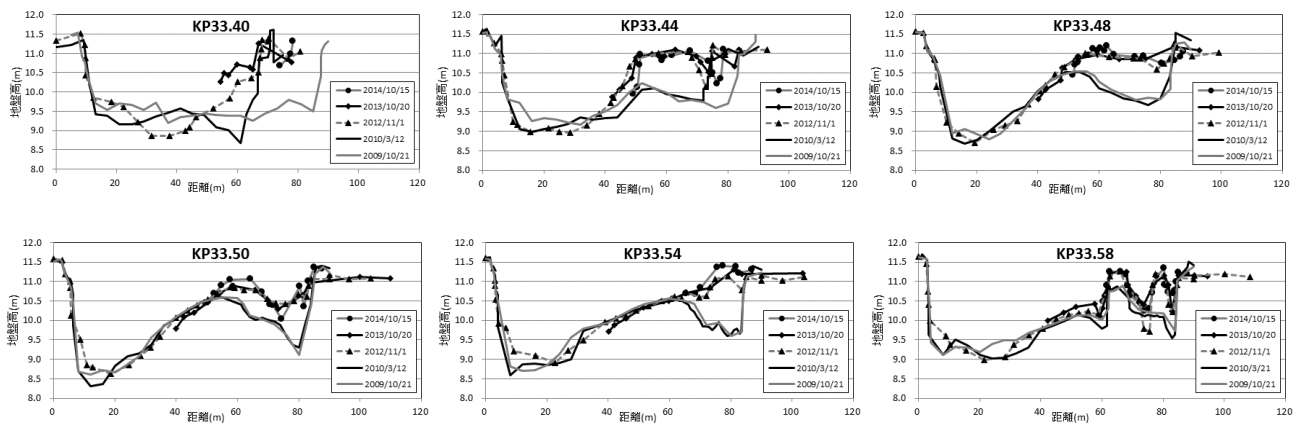


図-5 横断面の経年変化 (KP33.40～KP33.58)

は、藤田³⁾の川幅縮小メカニズムと同じ流路形成過程を示すことが想定される。

3. 歪模型実験による流路形成過程の検討

水理模型実験は釧路川茅沼地区の旧川復元区間の湾曲河道部 KP33.40～KP34.00(本川区間)と SP2200～SP2350(旧川区間)を原型とし、湾曲河道部周辺に形成される流路の形成条件を検討するため、溢水を前提とした原型河川の河床変動を再現・検証する。

(1) 歪模型実験の概要

模型水路は可変勾配ステージ式水路(全長12m、幅1.2m)の上に、建築用断熱材を加工して製作した。実験室の都合上、原型は左岸方向へ旧川が蛇行しているのに対して、模型水路は写真-4のように右岸方向へ蛇行させた。また、本研究では実験スペースの制約もあり、原型と模型の水平縮尺と鉛直縮尺の比が異なる歪模型水路実験手法⁹⁾を導入した。本手法は移動床河川の河床変動を検討する際に、河床形態の領域区分を支配する無次元パラメータ、例えば無次元掃流力 τ_* や水路幅 B と水深 h の水路



写真-4 歪模型水路の全体

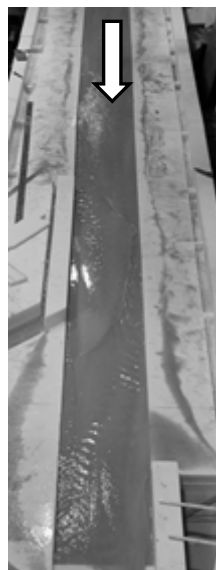


写真-5 直線水路実験

幅・水深比 B/h を原型と模型とで一致させることで、河床形態の再現性に注目した手法である。流れの相似条件(フルード則)は満足していないものの、河床変動に関しては良好な再現結果が得られている⁷⁾。

本研究では図-6に示す黒木・岸の中規模河床形態の領域区分図⁸⁾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。実験スペースの制約から川幅 B の水平縮尺比 $B_R = B_P/B_M = 200$ とし、河床波に砂漣を発生させない条件から模型砂の粒径 $d_M = 0.59$ mm(4号珪砂)を用いると、相似条件は表-1となる。また、流量の縮尺比 Q_R は次式となる⁹⁾。

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

(2) 実験条件と実験方法

茅沼旧川復元事業の本川直線河道区間(KP32.0からKP35.0)の河道満杯流量は、原型の釧路川低水路河道の粗度係数 N_P が $N_P = 0.025$ に設定されている¹⁾ので、不等流計算から河道満杯時の水深を $h_P = 1.33$ m とおくと $Q_P = 150$ m³/s となり、模型流量 Q_M は式(1)から $Q_M = 2.28$ l/s となる。

表-1 相似条件

	川幅	砂粒径	砂水中比重	河床勾配
原型	$B_P = 80$ m	$d_P = 2$ mm	$s_P = 1.0$	$I_P = 1/1893$
模型	$B_M = 0.4$ m	$d_M = 0.59$ mm	$s_M = 1.0$	$I_M = 1/63.3$
縮尺比	$B_R = 200$	$d_R = 3.39$	$s_R = 1.0$	$I_R = 1/29.9$

歪比 $n = B_R/h_R = 1/I_R = 29.9$

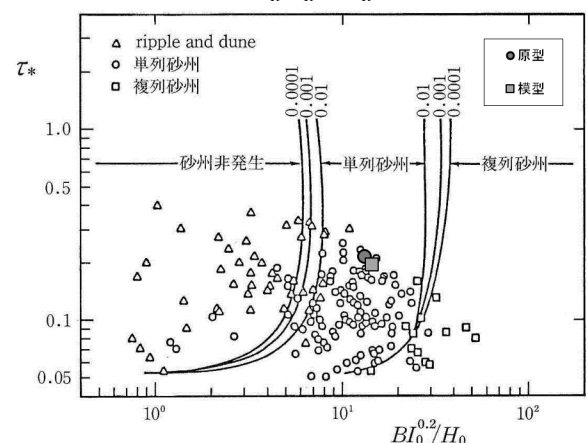


図-6 黒木・岸の領域区分図

予備実験によって粒径 $d_M=0.59$ mm の移動床水路の平均水深 h_M が $h_M=1.2$ cm となったので、粗度係数 N_M は $N_M=0.0137$ と逆算された。この原型と模型の水理量を用いて黒木・岸の領域区分図(図-6)にプロットすると、両者は完全に一致しないものの単列砂州領域の位置にあり、共に単列交互砂州が形成されることになる。ここで、写真-5は河道満杯流量時の模型流量 $Q_M=2.28$ l/s を与えた直線水路での予備実験の様子である。この予備実験は本川河道を旧川へ切替える前の直線河道における河床形態を再現するために実施した実験で、図-6の通り単列交互砂州の形成が確認できた。したがって、現地の本川直線河道区間に形成されている砂州も単列交互砂州に起因する砂州であることがわかる。

また、前節の現地調査結果から、湾曲部右岸の砂州の存在(KP33.60)が湾曲部の河床変動、特に流水部の川幅の決定に影響していることが指摘された。そこで、本実験は初期河床を平坦河床として通水するのではなく、予め河道満杯流量 Q_P を与えて湾曲部の直上流に交互砂州を形成・配置した状態から実験を開始する。つまり、本実験では、現地河川と同じく湾曲部右岸(本実験では左岸)に砂州が存在する条件で、川幅縮小メカニズムが機能するのに必要な砂州頂部の標高が平水位の変動幅内にある平水時の流量を与えて、湾曲部の流路がどのような挙動を示すのかを実験で確かめる。砂州頂部を水位が覆う平水流量として3ケース(原型流量 $Q_P=30, 35, 40$ m³/s, 模型流量 $Q_M=0.46, 0.53, 0.61$ l/s)の定常流量を2時間通水した。

(3) 実験結果と考察

現地調査から川幅縮小メカニズムを考える上で湾曲部右岸の砂州の存在(KP33.60)が重要視されており、この砂州が移動する場合と現地のように砂州上に植生で覆われて移動しない場合の湾曲部河道の河床変動と川幅変化について検討した。

a) 砂州が移動する場合

実験は河道満杯流量を与えて形成された砂州が湾曲部上流に達した状態を初期条件として、原型流量 $Q_P=30$ m³/sを2時間通水した状況が写真-6左であり、図-7左は水路底を基準とした河床高(単位: mm)である。前述した現地の河道と同様に、湾曲部外岸に土砂が堆積し、流水部が内岸沿いに流下して旧川河道に摺り付く状況が再現されている。次に原型流量を $Q_P=35$ m³/sへ増やしてもこの状況は同様であり、水深が増えた分、流水部が分派して外岸沿いの流路もみられたが、主流が内岸沿いにあるため、2時間後は図-8左のように内岸沿いの流路が形成され、旧川に摺り付いている。更に原型流量を $Q_P=40$ m³/sへ増やすと、流水部の分派・合流が活発となり、初期河床の砂州が徐々に浸食・洗掘されて2時間後にはほぼ消失し、湾曲部全幅が流水部となって旧川へ流入している。更に通水すると湾曲部外岸沿いに流路が形

成し始めており、上流部の砂州が消失してしまうと、湾曲河道で一般的に見られる河床形状が形成される。つまり、現地のような内岸沿いに流路が形成・維持されるには、上流部の砂州の存在が不可欠であると分かる。

b) 砂州が移動しない場合(砂州の固定化)

現地のKP33.60付近の砂州は砂州上に植生が繁茂し、中規模出水によってもフラッシュされずに固定化しているので、現地と同様にこの砂州を固定化した場合について検討した。

写真-6右、図-7右はKP33.60付近に固定化した砂州を配置し、原型流量 $Q_P=30$ m³/sの実験結果である。固定化した砂州により、前節の砂州が移動する場合より内岸沿いに流れが集中し、その流水流路幅も狭くなっている。流量を増加していくと、図-8右、図-9右のように固定化した砂州前面まで流水流路幅が広がり、現地と同様に固定化した砂州の直下流に土砂が堆積して外岸前面に砂州が形成され、その前面に現地と類似した流路が再現された。したがって、定性的ではあるが、現地の湾曲部上流の砂州の存在が流水流路の形成や更にはその流路幅を規定することが示された。

4. おわりに

本研究は2010年度に事業完了した釧路川茅沼地区旧川復元事業の事後評価モニタリングの一環として、旧川へ河道を切替える湾曲部における河道河床変動に注目した。流入湾曲部では直線河道の川幅が徐々に縮小し旧川の河道幅に摺り付く自律的な流路が観測されていた。この状況は藤田³⁾が言及した、拡幅した低水路河道において川幅が流況に応じて自律的に縮小するメカニズムと類似しており、本研究では定性的な検討であるが、川幅が漸縮する湾曲河道部において、湾曲部上流の砂州の存在が流水流路幅を自律的に規定するきっかけとなり、湾曲外岸側岸部に土砂を堆積させて流況に応じた流路が形成されることを明らかにすることが出来た。

将来的にこの河道の状況を維持し続けていくかは、湾曲部上流の砂州の挙動に左右される。現状ではこの砂州の下流側の堆積が進んでおり、更に湾曲部外岸前面に堆積して平水時でも水没しない河岸が形成されると、藤田が指摘した川幅縮小メカニズムの実証例となり、継続して流入湾曲部の状況を注視していく必要がある。

謝辞: 本研究の一部は(一財)河川財団河川整備基金25年度助成事業の支援を受けた。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 釧路開発建設部: 釧路湿原自然再生事業一茅沼地区旧川復元実施計画, 2006.
- 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一

茅沼地区の工事完了について、http://www.ks.hkd.mlit.go.jp/kasen/kushiro_wetland/pdf/rest/014/rest14_01.pdf, 2011.

- 3) 藤田光一：河道セグメント2における川幅縮小のメカニズムと予測技術，2007年度（第43回）水工学に関する夏期研修会講義集 A コース，土木学会水工学委員会・海岸工学委員会，pp.A-7-1～20，2007.
- 4) 国土交通省河川局：水文水質データベース，<http://www1.river.go.jp/>，2014.
- 5) 釧路湿原自然再生協議会：第16回旧川復元小委員会資料，http://www.ks.hkd.mlit.go.jp/kasen/kushiro_wetland/committee/rest/

016/d/rest16_00.pdf, 2013.

- 6) 内島邦秀・早川博：交互砂州河床河川の移動床歪模型の相似則に関する研究，土木学会論文集，No.479/II-25，pp. 71-79，1993.
- 7) 早川博・宮本大：岩床河川における瀬と淵の再生に関する研究，河川技術論文集，第15巻，pp.219-224，2009.
- 8) 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.

(2015. 4. 3受付)

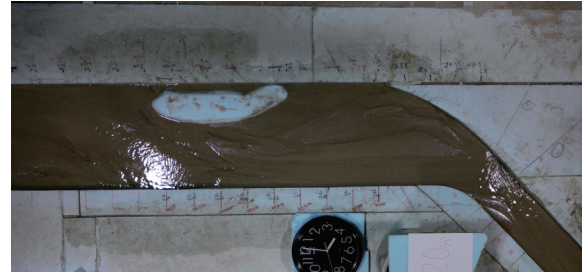
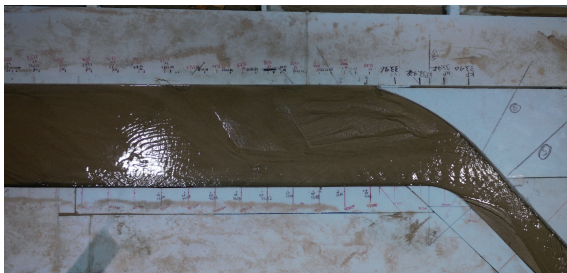


写真-6 原型流量 $Q_P=30(\text{m}^3/\text{s})$ の $t=120$ 分後の状況（左：砂州が移動する場合，右：砂州が移動しない場合）

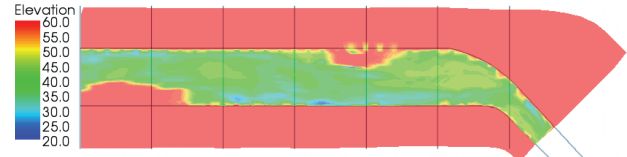
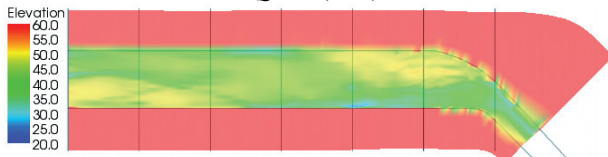


図-7 原型流量 $Q_P=30(\text{m}^3/\text{s})$ の $t=120$ 分後の河床高（左：砂州が移動する場合，右：砂州が移動しない場合）



写真-7 原型流量 $Q_P=35(\text{m}^3/\text{s})$ の $t=120$ 分後の状況（左：砂州が移動する場合，右：砂州が移動しない場合）

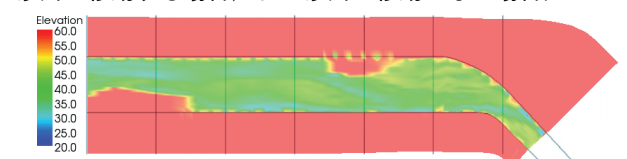
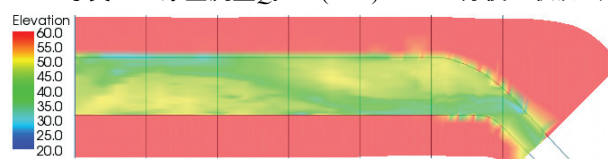


図-8 原型流量 $Q_P=35(\text{m}^3/\text{s})$ の $t=120$ 分後の河床高（左：砂州が移動する場合，右：砂州が移動しない場合）



写真-8 原型流量 $Q_P=40(\text{m}^3/\text{s})$ の $t=120$ 分後の状況（左：砂州が移動する場合，右：砂州が移動しない場合）

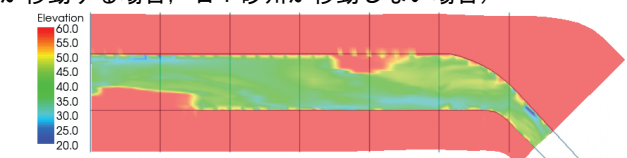
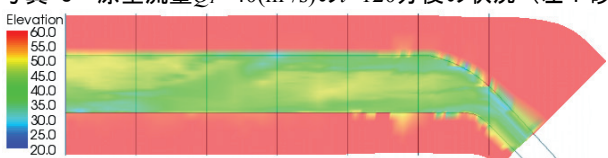


図-9 原型流量 $Q_P=40(\text{m}^3/\text{s})$ の $t=120$ 分後の河床高（左：砂州が移動する場合，右：砂州が移動しない場合）