

2Way 河道蛇行部河床の 洪水応答特性とその変遷予測手法

寒地土木研究所 道央支所 永多 朋紀
寒地河川チーム 安田 浩保
北見工業大学 社会環境工学科 渡邊 康玄

標津川では、我が国初の蛇行復元事業の一環として、分流部に旧川蛇行部への導水を目的とした越流堰を有する 2Way 河道を設置して種々の調査研究が進められている。この蛇行部の河床高さは、春期の融雪出水と夏期の大規模出水に応答している事が明らかにされつつある。本研究では、この応答特性とともに、一次元河床変動計算に基づく蛇行部河床の簡便な変遷予測手法を示し、これらの知見に立脚した蛇行河道の維持に求められる指標を提案する。

キーワード：標津川, 蛇行復元, 2Way 河道, 1次元河床変動計算, 分流堰高

1. はじめに

北海道東部の標津川（図-1）では自然復元事業の一環として蛇行復元事業が行われている。ここで行われている蛇行復元の試みは 2ウェイ河道と呼ばれ、直線化河道と旧川蛇行区間の双方で通水可能な状態を維持するところに大きな特徴がある。また、平常時は主に旧川へ流量を配分し、洪水時には直線化河道で多くの流量を分担できるよう、直線化河道と旧川の分岐点（上流側の接続点）に分流堰が設けられている。これにより、平常時は蛇行区間への十分な流水が確保され、自律的な河道維持が可能となり、蛇行部特有の豊かな生態系の定位置が期待される一方、洪水時には直線化河道を通して速やかな洪水流の流下が可能となり、近年要望が高まってきている河川環境の保全と治水安全性の両立が計られている。

しかし、2002年春の通水開始から6年以上が経過した現在、湾曲部内岸には大きな砂州が形成され、外岸では河岸浸食が進むなど、河道形状は通水初期と比べ急速かつ大規模な変化を遂げている。

本文では、まずこの河道変遷について俯瞰し、次に、分流堰の高さに対する蛇行区間の河床高の応答について論じることで、従来から指摘されてきた蛇行区間の自律的な維持の可能性について言及する。

2. 蛇行復元試験区間の河道変遷

(1) 試験区間の概要と近年の洪水履歴

本文で対象とする標津川の蛇行復元試験地（KP8.5）は、図-2中の水色で着色された区間は、河跡湖となっていた旧川跡をそのまま利用し、同図中の橙色に着色された区間については新たに開削を行い直線化河道と接続されている。そして、その断面形状は、河跡湖を利用した区間については事業着手時の断面形状をそのまま利用し、開削区間については台形断面が採用された。また、同図中の紫色で



図-1 標津川的位置

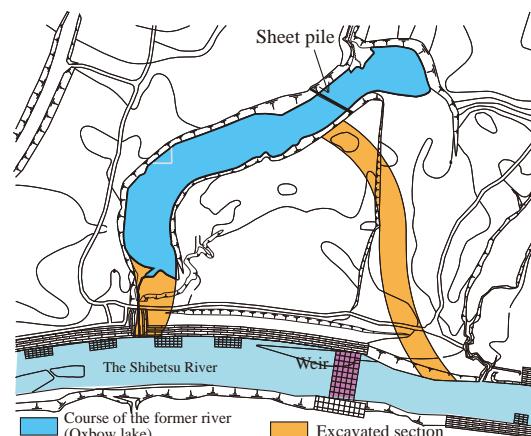


図-2 蛇行試験区間の本川との接続状況

着色された蛇行区間と直線化河道との分流点下流側には、流量配分を調整するためのもぐり堰が設けられた。この堰頂の高さは、通水が開始された2002

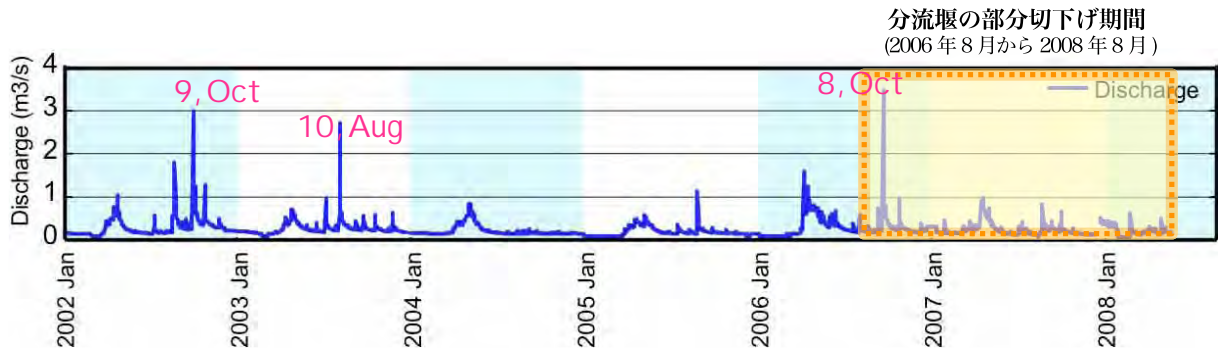


図-3 合流点観測所の流量時系列 (図中の赤字は大規模洪水の生起月日)



図-4 2008年9月の蛇行復元試験区間

年3月から2006年8月までは横断方向に一樣の高さで設置されていたが、2006年8月から2008年8月までのおよそ2年間のみ、中心の一部が50cmだけ切り下げられ、その後、2008年8月より横断方向に一樣な高さの堰に復元された。

標津川の河口から5.4km上流に位置する合流点観測所における、2002年1月から2008年7月までの流量の時系列変化を図-3に示す。この図から、蛇行復元事業の開始以後、比較的規模の大きな洪水を2002年10月、2003年8月、2006年10月の計3回にわたって経験していることがわかる。

(2) 通水開始から堰の改修前後までの河道変遷

図-4は2008年9月に撮影された擬似的垂直写真である。この写真から、現在の河道形状は、前述した3度の大規模洪水や分流堰の改修などを経て、特に目立った砂州を有していない改修直後の河道形状(図-2)と比べ、少なくとも合計4カ所、(1)分流点直後の右岸側、(2)その下流の曲頂部内岸、(3)さらに少し下流の右岸側、(4)そして仮設橋下流の左岸側に明瞭な砂州が形成されていることが分かる。

標津川技術検討委員会が提示しているように、本文で対象としている蛇行区間では、前節で挙げた

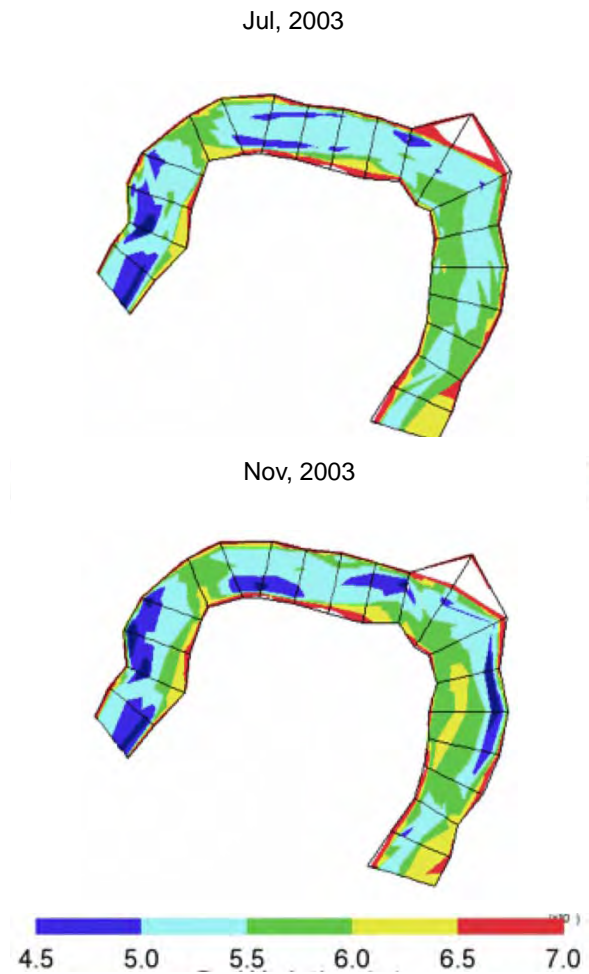


図-5 洪水後の河道形状 [上段(a)2003年7月計測、下段(b)2003年11月計測]

比較的規模の大きな洪水によって河床高が全体的に上昇し、その上昇分は融雪出水や平常流量の流れによってゆるやかに低下する挙動を示す。図-5(a)に示した2003年7月の河道形状の計測結果からは、2002年10月の洪水に対する蛇行部河床高の応答状況に加え、前述した4カ所の砂州の形成時期やその規模を捉えることができる。例えば、2002年10月の洪水後、台形状に開削されたはずの曲頂部内岸側で、現在も見られる砂州の原型が形成し始めていることが分かる。また、同図(b)2003年11月の河道



図-6 蛇行復元試験区間の疑似垂直化写真とその時期の蛇行部における流量配分比（上段）

形状の計測結果からは、2003年8月の洪水が前年の洪水の際に形成された砂州をさらに発達させ、より明瞭なものとしていたことが分かる。

図-6は2002年6月から2008年9月までの同区間の疑似垂直写真と撮影年月日、さらにその時期における流量配分比を示したものである。おおむね毎年2回、5月・11月の平水時に撮影が行われているが、2002年10月分についてのみ洪水中の写真となっているため、他の写真と比較を行う際には注意が必要である。これらの写真を流量配分比を組み合わせながら見比べると、2006年8月に分流堰の部分切り下げが行われるまでは、流量配分比は70%程度を維持し、おおむね同様の川幅を有していたことが分かる。一方で、堰の部分切り下げ以後は、流量配分比は20%程度まで急激に減少し、川幅は蛇行区間の全域にわたって狭小化の傾向を強めていることが分かる。すなわち、2002年3月の通水開始時に設定された分流堰の形状であれば、この蛇行区間の河道形状は、ある程度の変動は有るものの、自律的に維持される可能性が高いと言える。

(3) 堰頂高の復元後から現在までの河道変遷

前述までの通り、分流堰の高さが2006年8月に部分的に引き下げられたことで、蛇行区間への流入水量が減少し、これが要因となって河床高の全体的な上昇傾向が続いたと考えられる。そして、2008年

8月に分流堰が元の形状に復元された結果、流量配分比はそれまでの20%程度から60%程度まで大幅に回復し、復元後わずか2ヶ月程度で蛇行区間の縦断的な河床形状は、2006年8月の堰高切り下げ以前とほぼ同様となっていたことが分かった。

3. 蛇行復元試験区間の分流堰に対する応答

これまで、分流堰の高さに応答する流量配分比や流砂量配分比についての議論はいくつかなされてきたが、現状において、これら諸量を上流側の境界条件とした蛇行区間内の河床高への縦断的な応答についてはほとんど調べられていない。前章までに述べた通り、蛇行区間への流量配分比の復元によって、現在の河道形状は2006年8月の堰高切り下げ以前のそれと類似した形状になりつつある。

本章では、この分流堰切欠き復元前後の期間を対象として、1次元河床変動計算に基づく蛇行復元試験区間の分流堰に対する応答について考察を行う。

(1) 1次元河床変動計算の支配方程式

対象区間の水面形を求める1次元不等流計算の基礎式は、

$$\frac{dH}{dx} + \frac{d}{dx} \left(\alpha \frac{V^2}{2g} \right) + i_e = 0 \quad (1)$$

である。これを一般断面に拡張し、数値計算を可能にする差分式は、

$$\begin{aligned} & \left[H_2 + \frac{Q^2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{n_{2i}^3} h_{2i}^3 \Delta y_{2i} \right)}{2g \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{n_{2i}} h_{2i}^{\frac{5}{3}} \Delta y_{2i} \right)} + \frac{\Delta x}{2} \frac{Q^2}{\left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{n_{2i}} h_{2i}^{\frac{5}{3}} \Delta y_{2i} \right)^2} \right] \\ & = \left[H_1 + \frac{Q^2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{n_{1i}^3} h_{1i}^3 \Delta y_{1i} \right)}{2g \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{n_{1i}} h_{1i}^{\frac{5}{3}} \Delta y_{1i} \right)} - \frac{\Delta x}{2} \frac{Q^2}{\left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{n_{1i}} h_{1i}^{\frac{5}{3}} \Delta y_{1i} \right)^2} \right] \quad (2) \end{aligned}$$

である。

なお、断面間の逐次計算には1階ニュートン法を用い、打ち切り誤差を $e = 0.0001$ として計算、平均流速公式にはマンングの式、

$$V_i = \frac{1}{n_i} r_i^{\frac{2}{3}} i_e^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

を使用した。

ここで、 H :水位 [m]、 h :水深 [m]、 Q :蛇行部流量 [m^3/s]、 V :平均流速 [m/s]、 g :重力加速度 [m/s^2]、 n :粗度係数、 i_e :エネルギー勾配、 α :エネルギー補正係数、 N :横断分割数、 Δy :横断分割幅 [m]、 Δx :縦断分割幅 [m]、 r :径深 [m] とし、式-(2)で各変数に付された番号はそれぞれ、1が上流側断面、2が下流側断面を示す。

流砂量については Meyer-Peter&Muller の流砂量の式、

$$q_B = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{1.5} \sqrt{sgd^3} \quad (4)$$

を用い、河床変動量を求める流砂の連続式は、

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial}{\partial x} (q_B B) = 0 \quad (5)$$

である。

さらにこれを数値計算を行うために差分化(後進差分)した式は、

$$\Delta z_j = -\frac{1}{1-\lambda} \frac{[(q_B B)_j - (q_B B)_{j+1}]}{\Delta x B_j} \Delta t \quad (6)$$

である。

なお、計算を行う断面形状は、式-(2)より求められた水位縦断から水位面以下となる部分の平均河床高を求め、図-7中の下段赤線で示す縦断線形となった。また、川幅は、同図中の上段黒線で示す、砂州等の水位面以上となる部分を控除した川幅の縦断線形から、主流と思われる流路以外をさらに控除し、加えて、湾曲部の測線と主流線との傾きを補正することで得られた同図中の上段赤線で示す縦断線形とした。これらを入力値とし、縦横断的な変化を有する矩形断面を仮定した1次元河床変動計算を行う。

ここで、 q_B :単位幅当たりの掃流砂量 [m^2/s]、 τ_* :無次元掃流力、 τ_{*c} :無次元限界掃流力、 s :砂粒の水中比重 [g/cm^3] (1.65)、 d :砂粒の粒径 [cm]、 z :平均河床高 [m]、 t :時間 [s]、 λ :河床砂の空隙率 (0.4)、 B :川幅 [m]、 Δz :河床変動量 [m]、 Δx :縦断分割幅 [m]、 Δt :計算時間間隔 [s] とし、式-(6)で各変

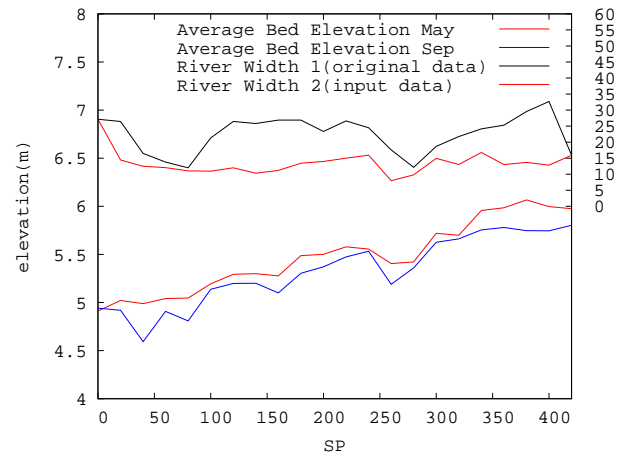


図-7 流量 $10.0 \text{ m}^3/s$ における平均河床高と川幅の縦断変化(上段:川幅、下段:平均河床高)

数に付された添字は下流側断面を j 、上流側断面を $j+1$ とする。また、限界摩擦速度 U_* は岩垣の式による。

(2) 計算条件の設定

今回計算対象とする 2Way 河道の蛇行部は、下流端の SP0 から上流端の SP420 までの総延長 420m の区間で、横断形状の測点断面は 20m 間隔で設けられている。また、対象区間の平均河道幅は約 50m で、縦横断方向の計算格子はそれぞれ、縦断方向に 22 分割、横断方向に 40 分割として不等流計算を行った。河道形状には、切り欠き復元前後の 5 月・9 月の横断測量データをそれぞれ使用した。

流量は切り欠き復元後の状況を想定して、 $10.0 \text{ m}^3/s$ を一定流量で 30 日間通水することとし、さらに、切り欠き復元前の流量を通水した場合の河床変動量との比較検証を行うため、 $3.0 \text{ m}^3/s$ についても同じく計算を行った。

下流端水位は、当年 5 月と 9 月に観測された蛇行部流量と下流端水位の実測値、さらに下流端断面の平均河床高を流量 0 における下流端水位として、この 3 点(図-8 参照)を最小 2 乗法によって線形近似し $10 \cdot 3 \text{ m}^3/s$ それぞれの流量について対応する水位の値を求めた。

以上の条件から、計算時間間隔 10 秒で河床高の更新を行い、これを 30 日間 (2,592,000 秒) 繰り返すことで、切り欠き復元から 1ヶ月が経過した 2008 年 9 月の河床縦断形状が再現されるかを検証する。

ただし、今回行った計算は、単一粒径一様河床砂礫を前提とした、掃流砂に浮遊砂を組み合わせた計算モデルであるが、河床材の平均粒径を変えて行った試行計算の結果、平均粒径 $d = 0.60 \text{ (cm)}$ で最も実測値に近い解析結果が得られたため、結果的に浮遊砂による河床変動量は考慮されていない。

(3) 解析結果

図-9 中の下段赤線が計算開始時点(切り欠き復元直後の 8 月を想定)の実測平均河床高を、上段赤

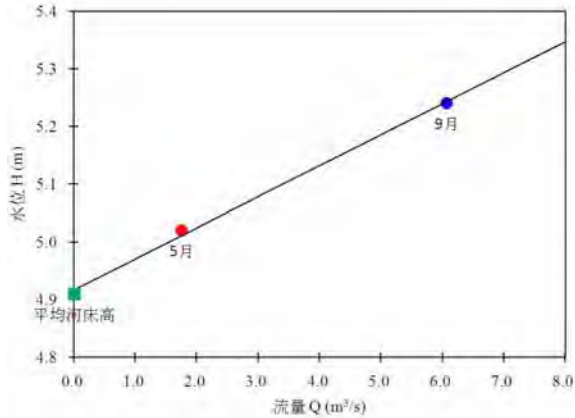


図-8 蛇行部流量と下流端水位の相関図

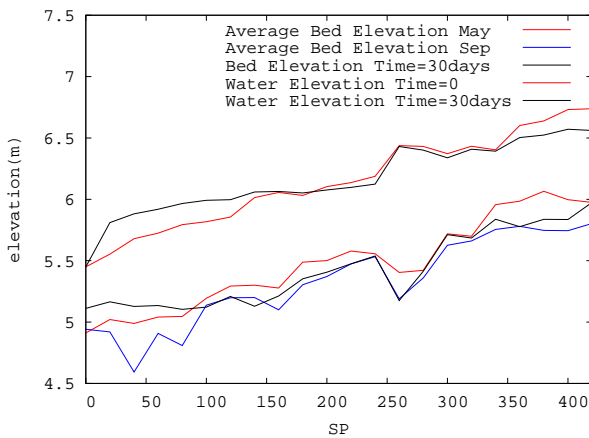


図-9 10.0 m³/s 水位面及び河床高の縦断面図

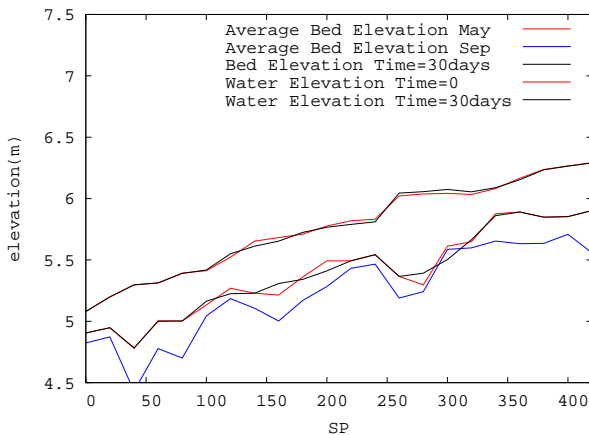


図-10 3.0 m³/s 水位面及び河床高の縦断面図

線がその計算水面形を示し、青線が切り欠き復元後1ヶ月が経過した9月時点における実測平均河床高を示す。下段黒線で示す流量10 m³/sを30日間通水させた後の計算河床高は、切り欠き復元後の9月の実測河床高に非常に近似した線形となっているのが分かる。

また、流量のみを3 m³/sに変え、ほぼ同じ条件の下で計算を行った結果を図-10に示す。図中の線形に対する彩色は10 m³/sと同様である。黒線が示

す計算河床高と、赤線が示す初期河床高がほぼ近似しており、このことから、流量3 m³/sの条件下では河床高にはほとんど変動が起きないと推察される。

以上の結果から、2008年8月に分流堰の復元改修が行われなかった場合、蛇行区間への流量配分比の減少とこれに伴う同区間の河床高の上昇傾向や、大規模洪水によってもたらされる分流点付近の局所的な河床高の上昇などが循環的に繰り返されることが予想されるとともに、今回行った、簡便かつ高速な演算が可能である1次元河床変動計算によって、2Way河道の蛇行区間における縦断的な河床変動量を、実用的な精度で予測できることが明らかにされた。

4. おわりに

本文では、標津川の蛇行復元試験区間における河道変遷を俯瞰し、現在優位となっている砂州の形成時期やその工事に対する応答量を示すとともに、このような2Way河道の維持管理に資する簡便かつ高速な演算が可能で1次元河床変動計算の適用性について述べた。

蛇行区間の縦断的な河床高は、分流堰の高さに対して非常に良い応答を示し、さらに、この応答特性を計る手段として、横断方向の物理量を1次元に簡略化し、流下方向のみの物理量を取扱う簡便な物理モデルによっても、おおむねその様子が再現可能になった。

つまり、簡便な1次元河床変動計算に基づく、今回対象としたような2Way流路蛇行部の河道維持に関する予測が、実用的な精度の範囲で可能であることが示された。

今後は、今回の計算を行う上で最も課題となった川幅の評価手法について多くの試行を重ね、計算精度を高めつつも、人為的な判断を極力排除できるような仕組みを確立することが望まれる。また、今回行った計算では10 m³/s通水時のSP0からSP80までの再現性は悪く、その理由の解明も併せて行っていく必要がある。

謝辞：本研究は、国土交通省北海道開発局釧路開発建設部の技術検討委員会における研究の一部として実施された。また、同開発建設部から貴重な現地地形の計測データを提供して頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 長谷川和義ら：標津川旧蛇行通水時の堰をともなう分岐流量配分比に関する研究，水工学論文集，Vol.47, pp.465-470, 2003.
- 2) 星清，清水康行ら：現場のための水理学，北海道開発局土木試験所 河川研究室，1988.
- 3) 日野幹雄，明解 水理学，丸善株式会社，pp.106-167, 1995.
- 4) 標津川技術検討委員会資料，北海道開発局釧路開発建設部，2004.
- 5) 標津川技術検討委員会資料，北海道開発局釧路開発建設部，2008.