

2ウェイ低水路を有する河川における 河床変動計算に関する研究

STUDY ON SIMULATION OF RIVERBED CHANGE FOR TWO-WAY CHANNEL RIVER

横山洋¹・渡邊康玄²・鈴木優一³

Hiroshi YOKOYAMA, Yasuharu WATANABE and Yuichi SUZUKI

¹正会員 工修 北海道開発土木研究所 河川研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)

²正会員 工博 北海道開発土木研究所 河川研究室 (同上)

³正会員 北海道開発土木研究所 河川研究室 (同上)

A project for river-restoration on the Shibetsu River was launched in 2000. For meander restoration, test flow of water started in March 2002 in a bifurcated channel formed by connecting the pre-improved channel (oxbow) with the present straight channel. In the eighteen months that have elapsed, the riverbanks and riverbed in the test section have greatly changed.

To analyze hydraulic phenomena under various conditions, this study aimed to develop a numerical calculation method that enables estimation of flow and riverbed evolution. We made calculations that reproduce riverbed evolution for the test section. The reproducibility was verified by comparing calculation results and measurements. We clarified the applicability and applicable range of the calculation method.

Key Words: Two-way main channel, Restoration of meandering river, 2-D shallow water equations, Numerical simulation

1. 序論

わが国では明治以降, 多くの沖積河川において治水安全度の確保のための水位低下や農地開発のための地下水位低下を目的に, 河川改修や蛇行河道のショートカットが急速に進められ, 従来は蛇行していた河川が直線化されることとなった。しかしながら近年では河川環境を取り巻く情勢が変化してきており, 河川環境保全への要望が大きくなっている。こうした中, 1997年の河川法改正が契機となり, 自然生態系の復元等河川環境に配慮した川づくりが行われるようになってきた。

北海道東部を流れる標津川では, 2000年から「自然復元型川づくり」の試みが全国初の事例として進められている。自然復元を行うに当たり, 先例がないため河川工学的にも生態工学的にもどのような現象が生じるかが不明確であった。このため, 試験的に一部旧河道(三日月湖)を利用し現河道(直線河道)と接続させた2ウェイ河道での試験施工が2002年3月から開始されており, 1年6ヶ月が経過した。この間, 試験区間では河岸や河床が大きく変動している。この様な事業を実施するに当たり, 洪

水時を含めた流れや河床変動を予測しておくことは, 河道計画策定および河道維持管理上非常に重要である。

蛇行河川の流れ・河床変動に関する研究は現在までに数多くなされている。例えば清水¹⁾は蛇行河川の河床変動について2次元浅水流方程式による数値計算モデルを構築し, 実河川への適用を行っている。また複断面蛇行水路に関して福岡らはその水理学的特性を実験²⁾及び数値解析³⁾により明らかにしている。

一方蛇行復元後の標津川のような, 直線低水路と蛇行低水路が複合・併存する複断面流れについての研究例は少ない。例えば佐藤らは, 蛇行水路と直線水路を複合させた水理模型実験を行い, 河床変動と砂州の挙動について考察を行っている⁴⁾。しかし実験では設定条件及び実施可能な回数に限りがあり, 数値計算モデルの開発は複雑な河川形状、多様な条件下における水理現象解析に大きく資するといえる。

本研究では直線と蛇行水路が複合した流れの数値計算モデルを開発することを目的としている。本論では最初に計算モデルの概要を示す。その後標津川改修工事区間を対象にした河床変動再現計算を行い, 計算結果と実現

象と比較し、再現性について検証する。最後に高水敷の冠水も含めた出水時の河床変動予測計算を行った。

2. 計算モデルの概説

合流、分流を含む流れは水平方向に加えて鉛直方向にも混合を生じ、また高水敷と低水路の境界でも流速差及び急激な地形変化により複雑な流れとなる。厳密に流れと河床変動を解くには鉛直方向の流れも考慮した3次元計算が望ましい。しかし3次元計算に要する時間は膨大なものとなり、河川への適用は現状では困難である。そこで実河川においては平面2次元な流れ及び河床変動が把握できればある程度現象を予測可能と考え、以下に示す2次元浅水方程式を一般座標系に変換して用いた。なお移流項には1次精度風上差分法を用いている。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (1)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (2)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここで u, v : x, y 方向の流速成分, g : 重力加速度, h : 水深, H : 水位, n : 底面粗度係数。また ν_t : 渦動粘性係数であり、カルマン定数 $\kappa (=0.4)$, 摩擦速度 U_* , 水深 h を用いて次の式で表す。

$$\nu_t = \frac{\kappa}{6} U_* h \quad (4)$$

続いて流砂量式を示す。流砂はここでは単一粒径で掃流砂のみ考慮し、評価式には芦田・道上の式を用いるものとする。

$$q_b = 17.0 \tau_*^{1.5} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \sqrt{sgd^3} \quad (5)$$

ここで τ^* : 無次元掃流力, τ_{*c} : 無次元限界掃流力, s : 砂の水中比重 ($=1.65$), d : 砂の平均粒径である。

流線主流方向及び法線方向の底面近傍流速 u_b^s, u_b^n は以下の式(6), (7)で表す。

$$u_b^n = (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (6)$$

$$u_b^s = - \frac{(u^2 + v^2)^{1/2} N^* h}{r_s} \quad (7)$$

ここに N^* : Engelundの定数 ($=7.0$)である。また r_s は

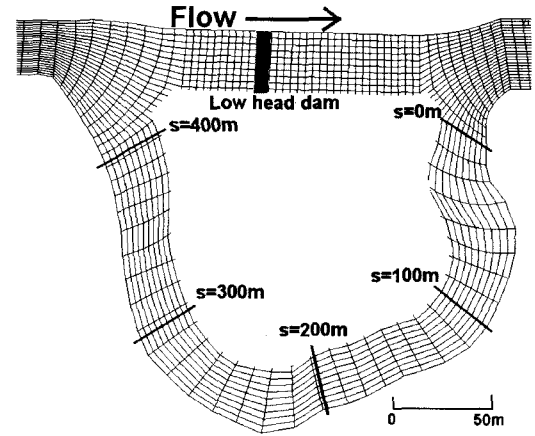


図-1 標津川蛇行復元試験区間の計算格子 (左が上流)

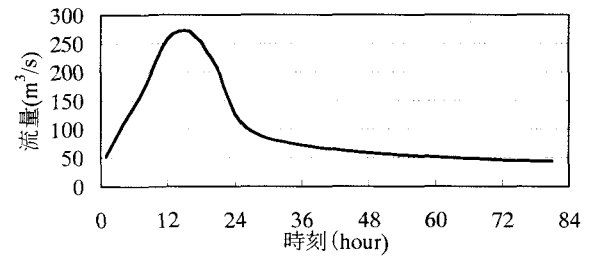


図-2 夏季出水のハイドログラフ

流線の曲率であり、以下の式を用いた⁵⁾。

$$\frac{1}{r_s} = \frac{1}{(\sqrt{u^2 + v^2})^3} \left[u \left(u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left(u \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \quad (8)$$

座標変換後の ξ, η 軸方向への流砂量の分配には局所的な河床勾配を考慮した以下の式を用いた。

$$q_b^\xi = \xi_r q_b \frac{u_b^\xi}{\sqrt{u^2 + v^2}} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \left(\xi_r \frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \eta_r \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \cos \theta \right) \quad (9)$$

$$q_b^\eta = \eta_r q_b \frac{u_b^\eta}{\sqrt{u^2 + v^2}} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \left(\xi_r \frac{\partial z_b}{\partial \xi} \cos \theta + \eta_r \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right) \quad (10)$$

ここに z_b : 河床高, u_b^ξ, u_b^η : 底面近傍流速の ξ, η 方向成分, $\xi_r = \Delta \xi / \Delta s$, $\eta_r = \Delta \eta / \Delta n$, μ_s, μ_k : 河床材料の静止摩擦係数及び動摩擦係数 (本計算では $\mu_s \mu_k = 0.45$), θ : ξ 軸と η 軸のなす角である。砂の空隙率は0.4で計算を行った。

3. 実河川2ウェイ水路への適用

(1) 計算条件

本計算モデルの適用性を検証するため、標津川蛇行復元試験区間の河床変動予測計算に適用した。図-1は計算格子である。灰色でマスクされた領域は、恒常的に流れ及び河床変動計算を行わないダミー領域である。図-1中のSは合流点からの距離である。

計算の諸条件を示す。上流端での流量設定は2002年4月融雪洪水時の流量平均値 $47 \text{ m}^3/\text{s}$ を1週間与えた融雪出

水時、及び同年10月2～4日のハイドログラフ（図-2）を与えた夏季出水時の2ケースで行った。下流端境界条件は流下方向の水深変化がないものとした。河床材料平均粒径 d は現地データに基づいて11mmとした。マンニングの粗度係数 n は現地で小規模河床形態が生じていないことから、平坦床の抵抗則として以下の式(11)で得られる値を用いている。

$$n = \frac{d^{1/6}}{6.9\sqrt{g}} \quad (11)$$

2ウェイ部分における両低水路の初期河床形状は、融雪出水時の場合は2002年3月の測量結果、夏季出水の場合は同年9月の測量結果を用いる。なお2ウェイ部分上下流に延びる直線河道の水路初期形状は矩形断面としてすりつけを行い、縦断勾配は計画値である1/800を用いている。また堰上では洗堀は生じないことから、堰に該当するメッシュでは計算中に河床高が堰の標高よりも低くなる場合は河床変動を計算しないという簡易な方法で、その影響を計算に取り込んでいる。

(2)融雪出水計算結果

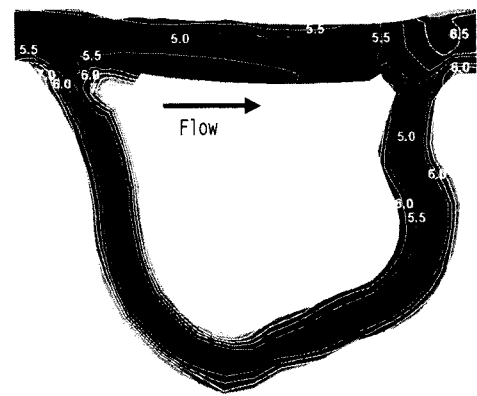
まず融雪出水による河床変動を検証する。図-3(a)は融雪出水前（3月）、(b)は出水完了後（7月）の現地河床高である。現地3月河床は計算初期河床形状としても用いた。図-4は通水開始1週間後の河床形状計算値である。

合流地点直下流での初期河床において左岸側にあった堆積が、融雪出水後の現地7月河床では流失しており、右岸側も出水前後を比べると洗堀の傾向にある。計算値でも同様の傾向が出ており、シミュレーションによる合流点直下の現象再現は概ね良好といえる。一方堰下流では計算において明らかな河床の上昇を示しているのに対し、現地では明確な変化は見られない。

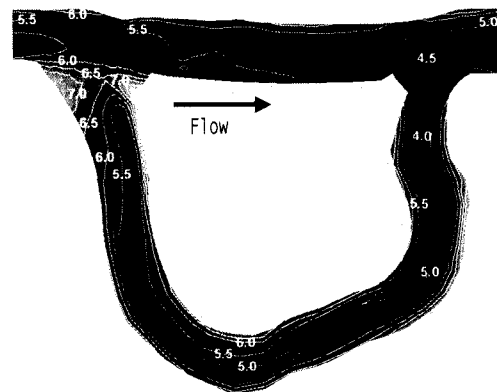
蛇行水路をみると、現地河床は流入口ならびに流入口右岸から水路前半部にかけて上昇傾向にあり、蛇行の頂部付近では外岸側に洗堀がみられる。また合流部手前では水路中心部から左岸寄りに洗堀が生じている。しかし計算結果では蛇行部での河床変動は分流・合流点近傍以外ではほとんど生じていない。

以上河床変動計算と現地河床の比較結果をまとめると、直線河道部では部分的に現地傾向を再現しているものの、分流、合流点付近及び蛇行水路内の再現性は十分とはいえない。そこで図-5に示す無次元掃流力 τ^* の分布を見ることとする。粒径11mmの限界無次元掃流力 τ^* は岩垣の式によると0.05であるが、蛇行水路内では広範な領域で $\tau^* < \tau^*$ となっている。現在のシミュレーションモデルでは簡単のため土砂の粒径を平均値で評価しているが、実際の河床ではより細かい粒径も相当混在しており、これらが平均粒径規模の砂礫より小さい流速でも掃流され、単一粒径とは異なる河床変動を示すと考えられる。

なお蛇行部への流入流量は、融雪出水期の実測で全流



(a) 出水前（02年3月測量）



(b) 出水後（02年7月測量）

図-3 現地河床高（融雪出水）

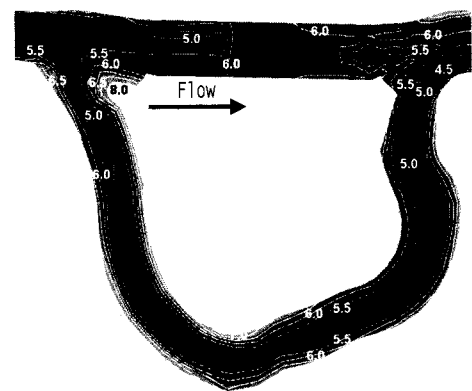


図-4 計算河床高（融雪出水開始1週間後）

量の約6割が流入しているのに対して、計算でも通水終了時には全流量の約6割となり、流量配分は現地を再現できている。

(3)夏季出水計算結果

続いて夏季出水について結果を示す。図-6(a)は夏季出水前（9月）、(b)は出水終了後の現地河床高である。出水前河床(a)は計算初期河床形状に用いた。図-7(a)は流量

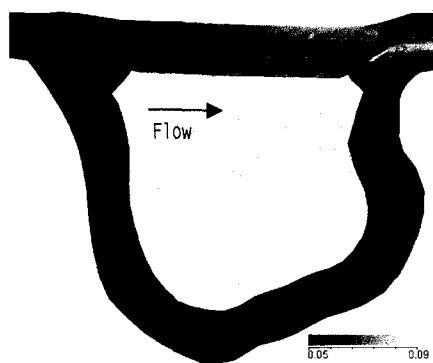
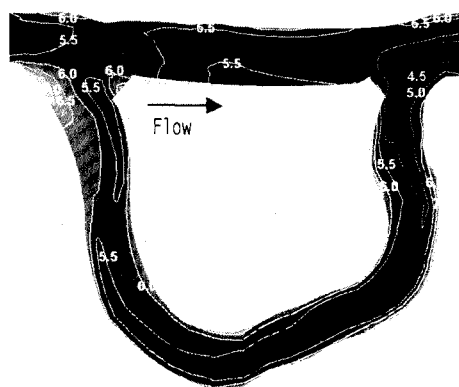
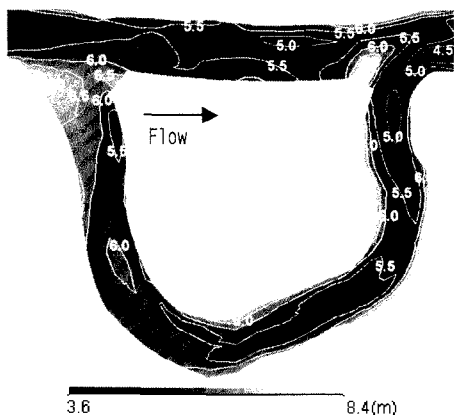


図-5 計算による無次元掃流力の分布(通水終了時)
白線は $\tau^*=0.05$ を示す。

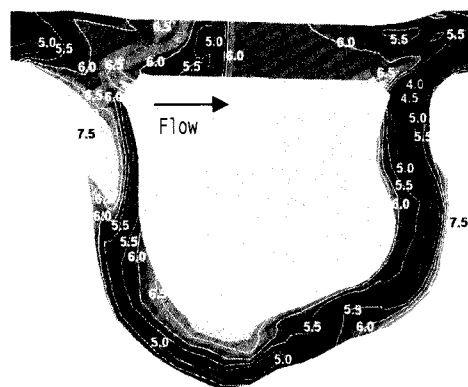


(a)出水前 (02年9月測量)

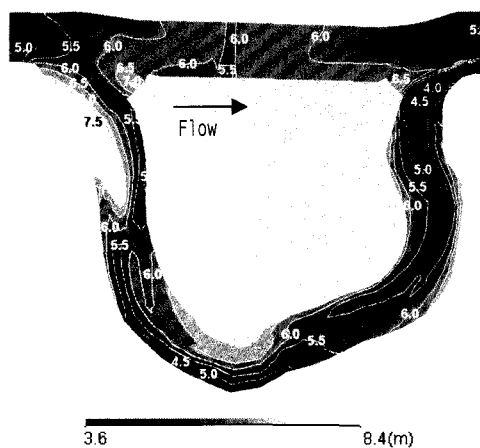


(b)出水後 (02年10月測量)

図-6 現地河床高(夏季出水)



(a) 流量ピーク時 (通水開始15時間後)



(b) 計算終了時

図-7 計算河床高(夏季出水)

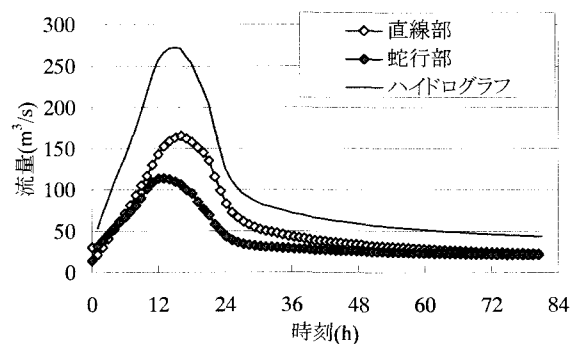


図-8 計算による直線及び蛇行部流量(夏季出水)

ピーク時(通水開始15時間経過)の、(b)は出水終了時の計算河床高である。

蛇行水路入口の現地河床では、出水前は右岸に堆積、左岸に洗堀が存在する。同様の傾向は計算でも見られるが、実測値の方が蛇行入口の河床高が高い。また現地蛇行水路内では流入口から右岸側に堆積が発達しており、左岸側には洗堀がみられる。計算では流量ピーク時に蛇行部流入口から右岸側に沿って土砂堆積が生じ、左岸側は河岸近傍で洗堀されている。これらは出水終了時計算値をみてもほぼ同様の形状である。なお堆積、洗堀ともに計算結果は現地よりも高低差、規模ともに大きい。

直線河道の計算河床形状は融雪出水時と同様、堰下流

では堆積傾向にある。堰直上流では流量ピーク時は著しい洗堀が見られるが、洪水終了時には幾分埋め戻されている。合流部及びその下流を見ると、現地で出水後に生じた合流点から直線河道中心部にわたり生じている堆積は、計算ではその規模が小さく再現されている。まとめると河床変動の傾向を再現している箇所もある一方で、堰近傍では再現性は不十分といえる。

蛇行部への流入量を図-8に示す。流量ピーク時の蛇行部分担流量は全流量の1/3、通水終了時は約4割であり、大規模流量時には直線部が多く流量を分担するとともに、平水時には蛇行部に相当の流量があるといえる。

(4) 河岸浸食と河岸近傍流速の関連性

標津川では蛇行水路の開削後，流入部付近を中心に河岸浸食が生じた．そこで浸食の要因について水量との関連を調べる．鈴木ら⁹⁾は標津川の河道災害の要因を検証する中で，河岸浸食と河岸近傍流速及び偏倚流速（断面平均流速との差）に相関性があることを示している．そこで計算で再現された河岸近傍流速と河岸浸食量の関連性について検証する．

図-8に2002年3月測量時を基準とした現地河岸浸食幅の変遷と融雪出水及び夏季出水ピーク時の兩岸近傍流速及び偏倚流速を示す．偏倚流速 u' は以下の式で定義した．

$$u' = u_{wall} - u_m \quad (12)$$

ここに u_{wall} ：河岸近傍流速， u_m ：断面平均流速である．

融雪出水が終了した7月の現地河岸浸食は合流点付近及び250mから上流側の区間で見られ，特に240m～300mの右岸及び350mから上流の左岸で顕著である．河岸浸食幅と計算による河岸近傍流速及び偏倚流速の間には明瞭な相関性は見られない．特に350mから上流側の分流点付近までの左岸近傍流速は小さいにも関わらず，現地では大きく浸食されている．分岐点近傍では流れの3次元性が強く，河岸近傍流速によるせん断力以外の要因で河岸浸食が進行したとも考えられる．偏倚流速は全体的に小さく，河岸浸食との相関は見られない．

夏季出水後の10月の河岸浸食を見ると，7月までに浸食された区間で浸食がさらに進行しており，特に流れの分岐点に近い左岸350mから上流で進行が著しい．左岸350mから上流側の河岸近傍流速及び偏倚流速はともに大きく，右岸でも河岸近傍流速及び偏倚流速が大きい箇所と河岸浸食が進行した箇所はある程度重なっている．

なお100m～240mは相当の流速にも関わらず河岸浸食幅が小さい．この区間は三日月湖部分であり河岸が植生に覆われているため，新規に掘削された上下流区間に比べて浸食への抵抗が大きいことが考えられる．

以上まとめると，夏季出水規模では計算による河岸近傍流速及び偏倚流速が大きい箇所と，河岸浸食が生じる箇所は重なる傾向が窺え，河岸近傍流速と河岸浸食にはある程度の関連性が推測できる．流量規模が比較的小さいときや3次元性の流れが強いと考えられる箇所では浸食と河岸近傍流速及び偏倚流速は関連性が薄い．河岸近傍計算流速を用いた浸食予測は，夏季出水程度の洪水で生じる河岸浸食予測に，ある程度有効な手法といえる．

4. 複断面2ウェイ流れの予測

前章では2ウェイ低水路のみの流れと河床変動を論じてきたが，出水規模がさらに大きくなれば高水敷も冠水し，一層複雑な流況や河床変遷が生じる可能性がある．河道計画策定あるいは河道維持管理を行う上で，高水敷冠水を考慮した流れと河床形状の予測は重要である．本章では2ウェイ低水路を有する複断面水路の流況を計算

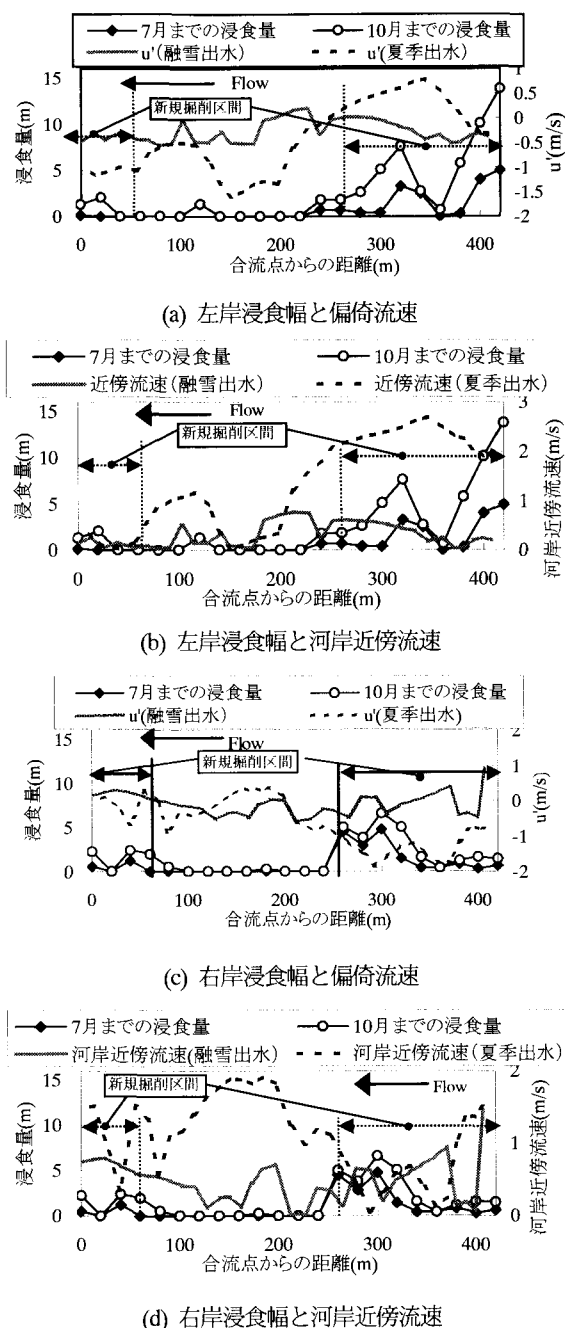


図-9 現地蛇行部河岸浸食幅と河岸近傍流速及び偏倚流速

した．直線低水路の有無による流況の違いを検証するため，低水路が蛇行水路のみの複断面流れの計算結果と比較する．なお計算結果を検証すべき実験あるいは現地データがないので，計算結果をもとにした流況予測を行うにとどめる．

(1) 計算条件

2ウェイ低水路の計算格子を図-10に示す．標津川に対して縮尺1/167を想定し，水路勾配は直線部1/800，低水路幅0.3m，全水路幅2m，高水敷上からの深さは1.7cmとした．蛇行水路の最大蛇行角は50°，蛇行長4.2m，底面粗度は低水路部で0.013，高水敷では0.02，河床変動は低

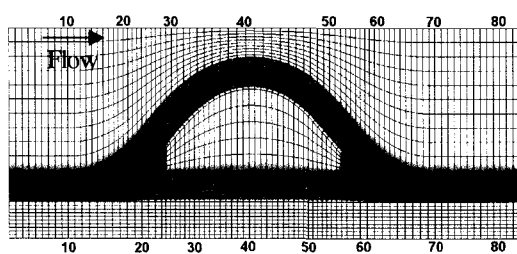
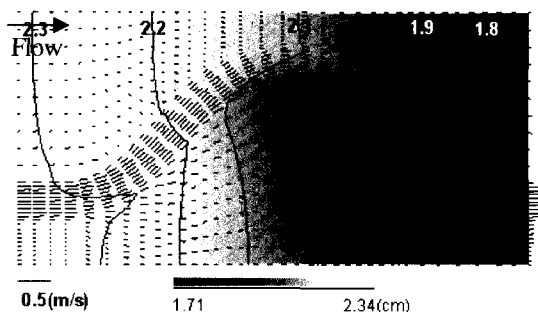
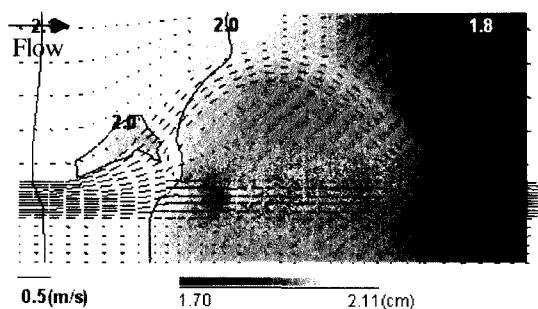


図-10 2ウェイ低水路複断面計算格子



(a) 2ウェイ低水路



(b) 蛇行低水路のみ

図-11 水位及び流速ベクトル (通水開始6時間後)

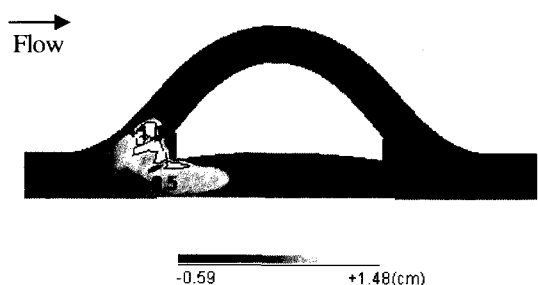


図-12 河床変動コンター (通水開始6時間後)

水路のみ生じ、河床材料は単一粒径で0.2mmに設定した。流量は標津川の計画流量を基に1.67(l/s)とし、上流端で流量、下流端で等流($dh/dx=0$)を設定している。計算の安定性向上のため、2次流の効果は入れていない。

(2) 計算結果

図-11は通水開始8時間後の2ウェイ低水路及び蛇行低水路の場合の水位コンター及び流速ベクトルである。平均水深から求めた相対水深²⁾は2ウェイの場合0.17, 蛇行のみの場合0.19である。流れは低水路に集中しており、2ウェイ低水路では直線部で最大流速が生じている。2

ウェイ低水路方式は蛇行低水路のみの場合に比べて高水敷の水深、流速ともに蛇行低水路のみの場合に比べて小さく、水路全体でみても水位は低くなっている。直線低水路の存在が流れに対する抵抗が小さくしたと考えられ、治水安全性向上が期待できる。

2ウェイ低水路の河床変動を図-12に示す。河床変動は蛇行部より直線部で著しい。直線部河床高は分岐部から合流点にかけては上昇傾向、それ以外では低下傾向である。蛇行部は流入部での堆積が顕著である。

5. 結論

得られた主要な結果を以下にまとめる。

- (1) 標津川蛇行復元試験施工区間において、融雪出水及び夏季出水を対象に計算を行った。融雪出水時の合流部下流、夏季出水時の蛇行流入部の河床変動など、計算結果はある程度現地河床変動の傾向を再現することができた。しかし低水路ならびに分合流点、堰付近では精度が十分でない箇所も見られた。今後土砂粒度分布の考慮等、モデル改善が必要と思われる。
- (2) 河岸浸食量と河岸近傍流速及び偏倚流速の関係を検証した結果、夏季出水では両者の間にはある程度の相関性が見られ、浸食予測を河岸近傍流速から予測する方法はある程度有用といえる。

謝辞：本研究を行うに当たり、国土交通省北海道開発局釧路開発建設部より現地資料の提供を受けた。また本研究は国土交通省北海道開発局の受託業務による補助を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 清水康行：沖積河川の流れと河床変動の予測手法に関する研究，北海道大学学位論文，1990
- 2) 福岡捷二，大串弘哉，加村大輔，平生昭二：複断面蛇行水路における洪水流の水利、土木学会論文集No579/II-41, pp.83-92, 1997
- 3) 福岡捷二，渡邊明英，岡田将治：静水圧近似3次元解析モデルによる複断面蛇行水路河床変動解析，水工学論文集第42巻，pp1015-1020, 1998
- 4) 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.719-703, 2002.
- 5) Shimizu,Y. and Itakura,T.: Calculation of flow and bed deformation with a general non-orthogonal coordinate system, Proc. of XXIV IAHR Congress, Madrid, Spain, C-2, pp.41-48, 1991.
- 6) 鈴木優一，渡邊康玄，長谷川和義，森明巨，空閑健：標津川蛇行復元における2way河道の通水直後の変化，水工学論文集第47巻，pp.703-708, 2003

(2003.9.30受付)