

# 標津川蛇行分岐部における流砂量配分と河床の堆積・浸食

Bed evolution of a bifurcated area with meandering channel in the Shibetsu River

北海道大学大学院工学研究科  
北海道大学大学院工学研究科  
(独)北海道開発土木研究所  
北海道開発局 釧路開発建設部

学生員 ○ 藤田 将輝 (Masaki Fujita)  
正員 長谷川和義 (Kazuyoshi Hasegawa)  
正員 渡邊 康玄 (Yasuharu Watanabe)  
空閑 健 (Takeshi Kuka)

## 1. はじめに

近年、河川生態系の保全や自然河川の復元への要望が高まりをみせており、自然環境に配慮した多自然型の川づくりが求められている。

このような中、自然復元事業の一環として、現在、直線化された標津川の蛇行を復元しようという試みが標津川の一部区間を対象に進められている<sup>1)2)</sup>。蛇行復元をはじめとする河川の自然復元計画は欧米において多くの実行例が存在しているが、これまで日本でこのような取り組みは行われておらず、標津川の蛇行復元は全国初の大規模な自然復元のモデルケースとして、重要な役割を持つものといえる。

現地における通水試験では、現状の通水能力を保つため、図-1に示すように現行の直線河道とその付近に三日月湖状に残っていた旧川蛇行部とを接合し、その両方に通水させるという形式がとられており、蛇行河道側の流れを確保するよう、分岐部下流に堰を設けている。

ここで、分岐部周辺での流れの特性ならびに流砂量の配分は重大な関心事であり、長期的な現象として河床が低下するのか、上昇するのかを判断する際の材料となる。

流砂の移動量を計算するには河床近傍での流速が必要となるが、本研究では川合<sup>4)</sup>の方法にしたがい、ポテンシャル流を利用し、下層流速を得た。それをもとに掃流砂量を計算し、分岐部周辺での土砂流出入の収支より、生ずるであろう河床変動量を予測するとともに、その特性に関しての考察をおこなった。

## 2. 分岐部周辺の流れの解析

ここでは、分岐部周辺の流れについて、河合<sup>4)</sup>の方法によりフーリエ級数を用いてポテンシャル流れの解析解を誘導するとともに、ポテンシャル流を利用した下層の流れの解析を行う。

### 2.1 ポテンシャル流れ

分岐部周辺の平均的な流れとして、ポテンシャル流れをフーリエ級数を用いて導出する。まず、蛇行復元部における分岐部を図-2のようにモデル化し、流れ関数を $\psi$ とすると次式が成り立つ。

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (2)$$

$$v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (3)$$

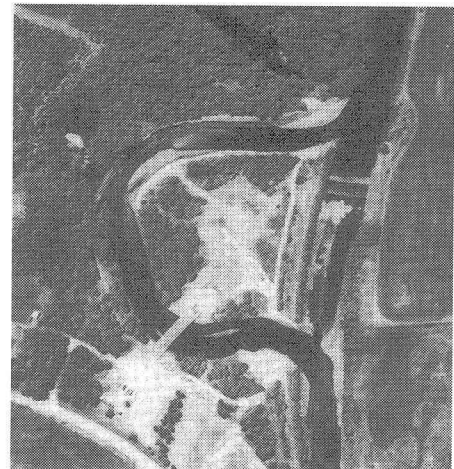


図-1 現地航空写真

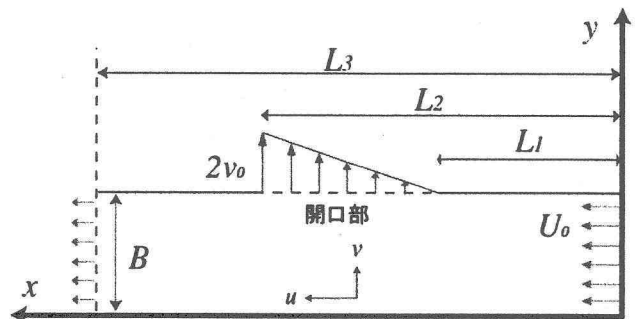


図-2 分岐部のモデル

式(1)を以降に示す4つの境界条件を用いて解くことにより分岐部周辺の流れ関数を得ることができる。

境界条件についてであるが、まず式(4)は $x=0$ において $x$ 軸方向流速 $u$ が $u=U_0$ で一様であることを、式(5)は $x=L_3$ において $x$ 軸方向流速 $u$ が一様であることを意味している。また、式(6)は $y=0$ で $y$ 軸方向流速 $v=0$ ということである。なお、 $y=B$ での境界条件についてであるが、開口部の流速分布として図-2に示すような上流端で $v=0$ 、下流端で $v=2v_0$ となる三角形分布を仮定し、それ以外の部分では $v=0$ とすることで式(7)および(8)で表現される。

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial y} \right|_{x=0} = U_0 \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right|_{x=L_3} = 0 \quad (5)$$

$$-\frac{\partial \psi}{\partial x} \Big|_{y=0} = 0 \quad (6) \quad -\frac{\partial \psi}{\partial x} \Big|_{x \leq L_1, L_2 \leq x, y=B} = 0 \quad (7)$$

$$-\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{2v_0}{(L_2 - L_1)} (x - L_1) \Big|_{L_1 \leq x \leq L_2, y=B} \quad (8)$$

結局、式(1)を以上の境界条件を用いて解くと、分岐部の流れ関数  $\psi$  が得られることになるが、ここで流量の分岐配分比を  $\kappa$  とすると、連続の関係から  $U_0$  と  $v_0$  の間には式(9)が成り立ち、流れ関数の式から  $v_0$  を消去することができる。

$$\kappa = v_0(L_2 - L_1) / U_0 B \quad (9)$$

以上のことから、流れ関数  $\psi$  は式(10)の形で表される。

$$\psi = U_0 y - \kappa U_0 B \sum_{n=0}^{\infty} C_n \sin \frac{mx}{L_3} \sinh \frac{my}{L_3} \quad (10)$$

ただし

$$m = \frac{2n+1}{2} \pi$$

$$C_n = 4 \frac{\frac{L_3}{L_2 - L_1} \sin \frac{mL_2}{L_3} - 2 \left( \frac{L_3}{L_2 - L_1} \right)^2 \sin \frac{m(L_1 + L_2)}{2L_3} \sin \frac{m(L_2 - L_1)}{2L_3}}{m^2 \sinh(mB/L_3)}$$

また、任意点における各方向の流速成分は式(10)を偏微分することによりそれぞれ、式(11)(12)で表される。このようにして、分岐部周辺の流れを求めることができた。

$$\frac{u}{U_0} = 1 - \kappa \frac{B}{L_3} \sum_{n=0}^{\infty} m C_n \sin \frac{mx}{L_3} \cosh \frac{my}{L_3} \quad (11)$$

$$\frac{v}{U_0} = \kappa \frac{B}{L_3} \sum_{n=0}^{\infty} m C_n \cos \frac{mx}{L_3} \sinh \frac{my}{L_3} \quad (12)$$

## 2.2 下層の流れ

続いて、分岐部周辺における河床近傍の流速を求める。下層の流れは分岐に伴って生ずる二次流によって、ポテンシャル流よりも分岐水路の側に曲げられることになる。川合<sup>4)</sup>は前項において得られたポテンシャル流に、分岐に伴う二次流の影響を考慮することにより下層の流れを表現している。すなわち、分岐部の平均的な流れであるポテンシャル流れの流速を  $V_b'$ 、二次流の流速を  $V_b''$  とすると、下層の流速  $V_b$  は次式で表される。

$$V_b = V_b' + V_b'' \quad (13)$$

また、ここで二次流の評価には湾曲流において提唱されている二次流速を採用しており、式(14)で表される。

$$V_b'' = N_* \frac{h}{r} u_b \quad (14)$$

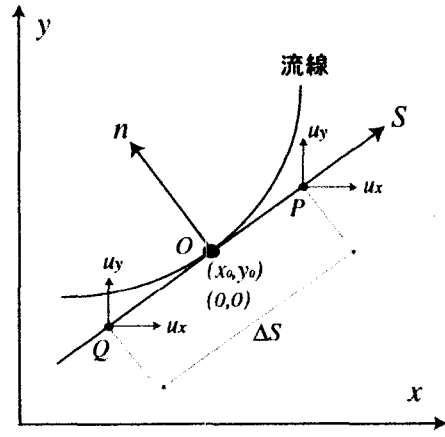


図-3 曲率に関する説明図

ここで、 $N_*$ :係数、 $h$ :水深、 $r$ :水路の曲率半径、 $u_b$ :底面流速である。

実際に計算するにあたり、水深  $h$  については、比エネルギーが一定であることを仮定し、式(15)により求める。

$$\frac{U_0^2}{2g} + H_0 = \frac{u^2 + v^2}{2g} + h + z \quad (15)$$

なお、各点での曲率半径は同一流線上の流速の差異により計算される。図-3に示したように  $x$ - $y$  平面上の任意点  $(x_0, y_0)$  を原点として、その点での流線の接線方向を  $s$  軸、その直交方向を  $n$  軸として新たに  $s$ - $n$  座標系を設定すると、任意点における曲率  $1/\gamma$  は次式で示される。

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{d^2 n}{ds^2} \Big|_{s=0, n=0} \quad (16)$$

ここで  $s$  方向、 $n$  方向の流速を  $u_s$ 、 $u_n$  とすると流線は次のように表される。

$$\frac{u_s}{ds} = \frac{u_n}{dn} \quad (17)$$

曲率を求めたい任意点を挟むように同一の流線上に  $P$  点および  $Q$  点を取り、その流速成分を  $u_{np}$ 、 $u_{sp}$ 、 $u_{nq}$ 、 $u_{sq}$  とすると式(16)(17)の関係より、曲率は次式のように差分化することができる。

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{u_{np}/u_{sp} - u_{nq}/u_{sq}}{\Delta s} \quad (18)$$

しかし、ここで  $P$  点および  $Q$  点を厳密に同一流線上の点として得ることは困難である。そのため、 $\Delta s$  を十分に小さくすれば、 $P$  点、 $Q$  点を任意点における流速の接線方向に、任意点をはさんで対称に  $\Delta s/2$  の距離にある点としてよいと考え、 $P$  点および  $Q$  点を図-3に示すようにとっている。

なお、各座標における流速の  $x$  方向成分を  $u_x$ 、 $y$  方向成分を  $u_y$  とした場合、 $u_s$  および  $u_n$  はその点での流れの方向が  $x$  軸となす角度を  $\delta$  として以下の式により容易に変換できる。

$$\begin{pmatrix} u_s \\ u_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} \quad (19)$$

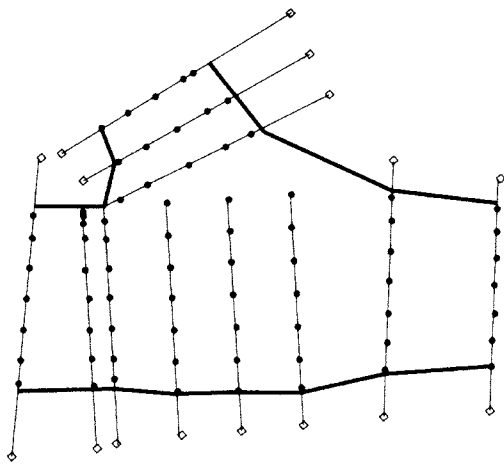


図-4 標津川蛇行分岐部の概形および流速観測点位置

### 3. 理論値と実測値の比較

#### 3.1 現地流速の測定

2003年5月27日、28日にかけて、標津川蛇行復元部において現地流速の測定が行われた。このときの流量はおよそ  $15\text{m}^3/\text{s}$  であった。蛇行分岐部においては、電磁流速計(アレック電磁流向流速計 ACM210-D)を用い、図-4に示す各観測点ごとに、水深によって可能な限り、水表面、2、6、8割水深で流速を測定した。

#### 3.2 理論値と実測値の比較

以上のようにして得られた流速の実測値より、平均流速および下層の流速を描き、理論値と比較したものが図-5である。ただし、分岐部下流(蛇行水路)の流速は先の理論で計算できないため、比較をおこなっておらず、図に示していない。

図-5(a)は平均流速の実測値と理論を比較したものであるが、これをみると分岐部周辺においてはその流れの方向、および流速を比較的よく表現できていることが確認できる。また、 $x=0$ の地点において実測値と理論値が大きく異なっているが、この相異に関しては、 $x=0$ における流量の測定値が他の場所での測定流量と異なっていることが確認されており、精確に流速が測定できていないためであると考えられる。

同様に、下層流速の実測値と理論値を比較したものが、図-5(b)である。この場合も理論値は実測値とよく一致している。このことから、先の理論により標津川蛇行復元部における河床近傍の流速が再現できているものと考えられる。したがって、この理論流速を用いて分岐部における流砂の移動量や堆積の傾向について調査することが可能である。

### 4. 分岐部周辺における堆積傾向の調査

分岐部における河床高の変化量を、下層流速の理論値より、掃流砂量を計算し、その収支より推定する。本研究では掃流砂量の評価にあたり縦断方向にMeyer-Peter, Muller式、横断方向に長谷川の式を用いた。また、無次元限界層流力の算定は岩垣公式によっている。

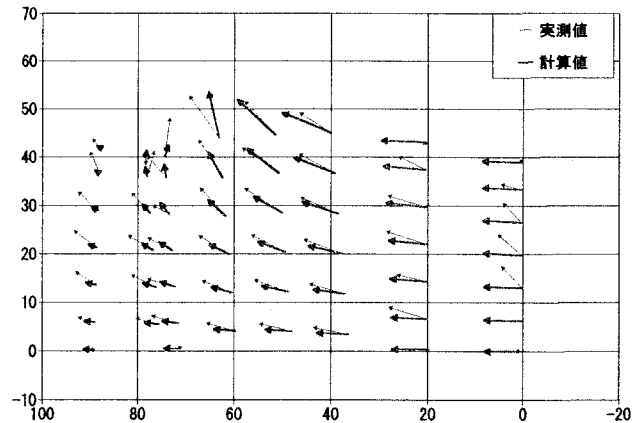


図-5(a) 理論値と実測値の比較(平均流速)

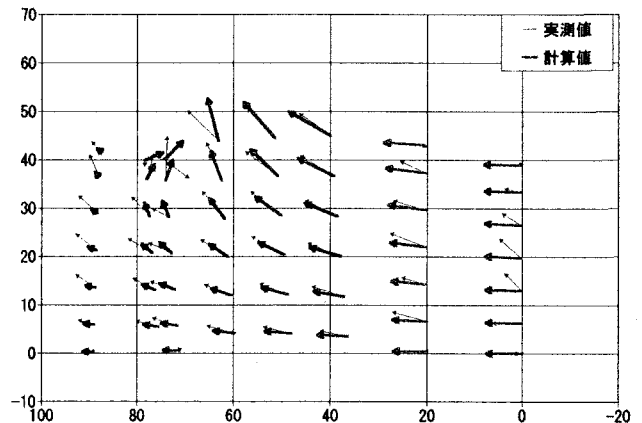


図-5(b) 理論値と実測値の比較(下層流速)

Meyer-Peter, Muller 式

$$\frac{q_b}{\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd^3}} = 8(\tau_* - \tau_{*c})^2 \quad (20)$$

$$\tau_* = C_f U^2 \frac{1}{sgd} \quad C_f = \frac{n^2 g}{R^{1/3}} \quad (21)$$

$$\tau_{*c} = \frac{U_{*c}^2}{(\sigma/\rho-1)gd} \quad (22)$$

$q_b$ : 流砂量,  $\tau_*$ : 無次元掃流力,  $\tau_{*c}$ : 無次元限界掃流力,  $U_{*c}$ : 限界摩擦速度,  $\sigma$ : 砂の密度,  $\rho$ : 水の密度,  $d$ : 粒径,  $C_f$ : 摩擦抵抗係数,  $n$ : Manningの粗度係数,  $R$ : 径深

長谷川の式

$$q_{by} = q_{bx} \left( \frac{v}{u} - N_* \frac{h}{\gamma} - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \frac{\partial z}{\partial y} \right) \quad (23)$$

$q_{bx}$ :  $x$ 方向の流砂量,  $q_{by}$ :  $y$ 方向の流砂量,  $\mu_s$ : 河床材料の静止摩擦係数,  $\mu_k$ : 河床材料の動摩擦係数

岩垣の式

本研究では、粒径  $d$  に平均粒径  $6.5\text{mm}$  を採用しており、無次元掃流力の算定は次式によった。

$$U_{*c}^2 = 80.9d \quad 0.3030 \leq d \quad (24)$$

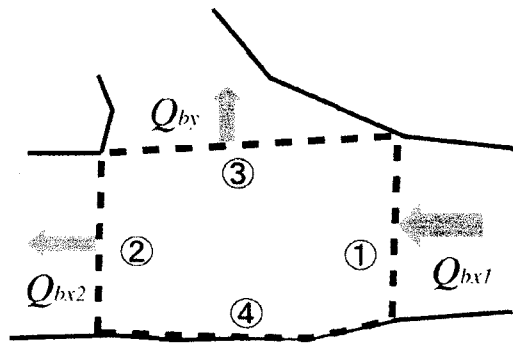


図-6 流砂量の評価について

ここで、ある流量が1日続いた状況を想定し、生じる河床高の変動について調査した。河床変動量は流砂の連続式に基づき、分岐部に流入する掃流砂量の収支より次式のように算定した。Aは検査断面内の面積である。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)A} (Q_{bx1} - Q_{bx2} - Q_{by}) \quad (25)$$

$$Q_{bx1} = \left[ \int_0^B q_{bx} dy \right]_{x=L_1} \quad Q_{bx2} = \left[ \int_0^B q_{bx} dy \right]_{x=L_2} \quad Q_{by} = \left[ \int_{L_1}^{L_2} q_{by} dx \right]_{y=B}$$

図-6に破線で示されるように検査断面をとり、断面①を通過する流砂量を $Q_{bx1}$ 、断面②および断面③を通過する流砂量をそれぞれ $Q_{bx2}$ 、 $Q_{by}$ としている。断面④については壁面であるため流砂の流入はないものと考えた。各流砂量の積分を算定するにあたっては、それぞれの断面につき断面を10個に等分し、流砂量を合計している。また、式(23)中の横断方向勾配に関しては、微小時間ごとに生ずる河床の変動量を計算し、検査断面内と蛇行河道との間には断面③を境にそれだけの落差があるものと考え、これを川幅で割ることにより評価した。そうして得られた結果が図-7である。なお、各流量時における下層流速の計算に必要な分岐流量配分比、 $U_o$ 、 $H_o$ の算定は長谷川らの方法<sup>5)</sup>によっている。

図-7より、流量が少ない場合には河床は変化しないか、あるいは浸食を生じ、逆に流量が大きい場合には分岐部で堆積を生ずることが予想される。

これは、以下の理由によるものと考えられる。流量の小さい場合については、流量配分比が大きくなるため流れは主に蛇行部に流れ込む。そのため、断面②より流出する掃流砂量はあまり大きくないが、蛇行河道に流れこむ流量は大きくなる。そのため二次流の影響も相まって、断面③より流出する掃流砂量が大きくなり、全体として浸食に傾いているものと考えられる。

流量が大きい場合、流量配分比は小さくなる。蛇行河道の流量は流量と流量配分比の積に等しいが、実際に計算してみると蛇行部に流れ込む流量は大きく変化しないことがわ

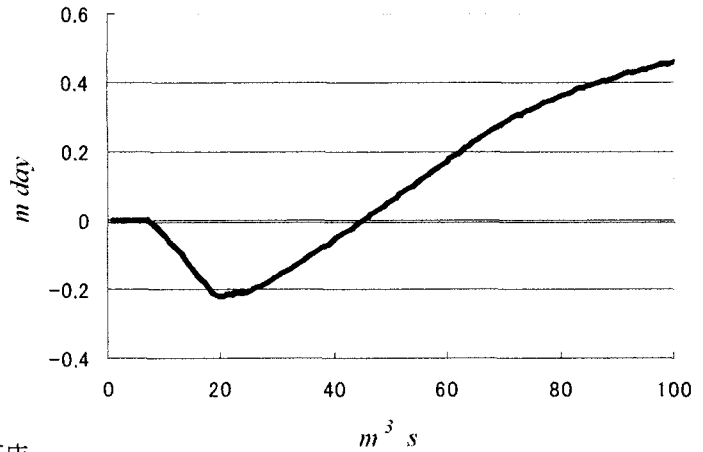


図-7 流量と河床高変化量の関係

かった。そのため、流量が増大し、分岐部に運び込まれる流砂量が大きく増加しても蛇後部へとでていく流量はそれほど変化せず、断面③からの流砂の流出は起こりにくい。また、直線河道においても分岐後の断面②において、流量の減少により流砂の流出量は断面①より流入してくる量を上回ることにはない。総流出量が総流入量に占める割合は大きくても、流入する絶対量が大きいため、結果的に堆積量も大きくなってしまふものと考えられる。

## 5. まとめ

以上のことをまとめると以下の通りである。

- 1) 川合の方法を用いて理論的に、標津川蛇行復元部における流れの状況を再現できた。
- 2) 分岐部における堆積・浸食の傾向を理論的に調査した。それによると、流量が小さいときには河床は低下し、逆に流量が大きいときは上昇すると考えられる。

## 6. 今後の課題

- 1) 堰からの流出流砂量の評価。
- 2) 検査断面内の河床の局所変化を考慮。
- 3) 横断方向勾配の時間変化を加味する。

## 参考文献

- 1) 標津川技術検討委員会：第1回 標津川技術検討委員会資料 2001
- 2) 標津川技術検討委員会：第2回 標津川技術検討委員会資料 2001
- 3) 標津川技術検討委員会：第3回 標津川技術検討委員会資料 2002
- 4) 川合茂：開水路分岐部における流量・流砂量配分に関する研究、京都大学学位論文、1991
- 5) 長谷川和義、藤田将輝、渡邊康玄、桑村貴志：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、第47回水理講演会論文集、pp. 529～534、2003