

# 標津川蛇行試験地の合流部ポテンシャル解析

Potential flow analysis on the confluence of oxbow channel in the Shibetsu River site

北海道大学工学部土木工学科	学生員	林 昌宏 (Masahiro Hayashi)
北海道大学大学院工学研究科	フェロー	長谷川和義 (Kazuyoshi Hasegawa)
(独)北海道開発土木研究所	正員	渡邊 康玄 (Yasuharu Watanabe)
北海道開発局 釧路開発建設部	正員	大串 弘哉 (Hiroya Ohgushi)

## 1. はじめに

北海道標津郡中標津町標津岳に源を発し、オホーツク海に注ぐ2級河川である標津川において蛇行復元が計画されている。この計画を進めるために北海道開発局釧路開発建設部の手によって、現地における蛇行通水試験が実施されている。

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**に示すように現状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、蛇行河川側の流れを確保するため、分岐部下流に堰を設けている。

現地における蛇行通水試験が実施されてから今年で4年経過したが、その間に合流部付近においては河床洗掘が続き深掘れの問題が生じている。深掘れのために河床勾配がきつくなり蛇行水路の流れが緩やかにならず、魚の生息環境が十分に確保されずにいる。合流部における対策が問題となっている。

試験地の流路変動に関し、分岐部については長谷川・藤田ら<sup>1)2)</sup>により流量配分比や河床の堆積・侵食の研究がなされている。しかし、合流部における河床低下などの問題は手つかずの状態であり、その周辺流れの解析を行うことは、長期的な河床の低下を検証する際の基礎となり、また重要事項である。

合流部の流れを解析するにあたって、分岐部のポテンシャルモデル(河合モデル<sup>3)</sup>)を合流部に適用できるように発展させ、つまり、上層の流れにおいては二次元ポテンシャル流れを用い、下層の流れにおいては上層の流れを用い河合の方法にしたがい導出することにする。それをもとに実測値と理論値の比較および考察を行った。

## 2. 合流部周辺の流れの解析

ここでは、合流部周辺での流れを解析するにあたって、河合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、その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

合流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、試験地における合流部を**図-2**のようにモデル化し、流れ関数を $\psi$ とする。ここで、この流れ関数 $\psi$ を合流前の流れ関数 $\psi_1$ と合流によって生じる流れ関数 $\psi_2$ に分けると、次式が成り立つ。

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 \tag{1}$$



図-1 現地写真

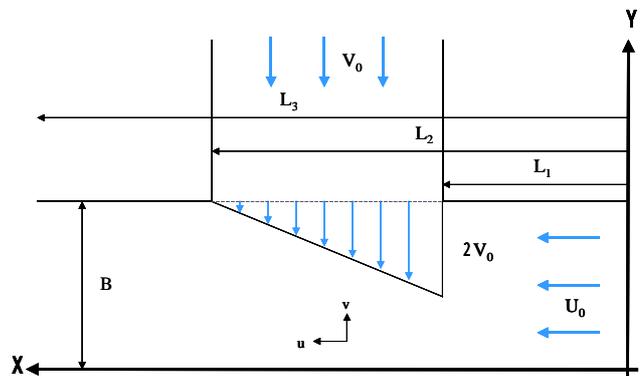


図-2 合流部のモデル

これを、 $y$ によって偏微分すると次式ようになる。

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{\partial \psi_1}{\partial y} + \frac{\partial \psi_2}{\partial y} \tag{2}$$

上式の右辺第1項は流れ関数の定義より

$$\frac{\partial \psi_1}{\partial y} = U_0 \tag{3}$$

となるので、**式(3)**を**式(2)**に代入して  $y$  で積分すると**式(4)**のようになる。

$$\psi = U_0 y + \psi_2 \tag{4}$$

したがって、未知関数 $\psi_2$ のみであり、次式が成り立つ。

$$\frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial y^2} = 0 \tag{5}$$

$$u_2 = \frac{\partial \psi_2}{\partial y} \tag{6} \quad v_2 = -\frac{\partial \psi_2}{\partial x} \tag{7}$$

**式(5)**を以降に示す5つの境界条件を用いて解くことに

より合流部周辺の流れ関数を得ることができる。

$$u_2 = \frac{\partial \psi_2}{\partial y} \Big|_{x=0} = 0 \quad (8)$$

$$v_2 = -\frac{\partial \psi_2}{\partial x} \Big|_{y=0} = 0 \quad (9)$$

$$v_2 = -\frac{\partial \psi_2}{\partial x} \Big|_{y=B, 0 \leq x \leq L_1, L_2 \leq x \leq L_3} = 0 \quad (10)$$

$$v_2 = -\frac{\partial \psi_2}{\partial x} \Big|_{x=L_3} = 0 \quad (11)$$

$$v_2 = -\frac{\partial \psi_2}{\partial x} \Big|_{y=B, L_1 \leq x \leq L_2} = \left\{ \frac{2V_0}{L_2 - L_1} (x - L_1) - 2V_0 \right\} \cos \theta \quad (12)$$

すなわち、式(8)は  $x=0$  において、 $\psi_2$  による  $x$  軸方向流速  $u_2$  が  $u_2=0$  であることを、式(9)は  $y=0$  において、 $\psi_2$  による  $y$  軸方向流速  $v_2$  が  $v_2=0$  であることを、式(10)は  $y=0, x=0 \sim L_1, L_2 \sim L_3$  において、 $\psi_2$  による  $y$  軸方向流速  $v_2$  が  $v_2=0$  であることを、式(11)は  $y=0$  において、 $\psi_2$  による  $y$  軸方向流速  $v_2$  が  $v_2=0$  であることを意味している。また、式(12)については合流部における境界条件を示しており、上流部で  $v_2=2V_0$ 、下流部で  $v_2=0$  となる三角形分布を仮定している。

以上の境界条件をふまえ式(5)を解くことにより、合流部の流れ関数  $\psi_2$  が計算され、流れ関数  $\psi_2$  は式(13)の形で表される。

$$\psi_2 = \sum_{n=0}^{\infty} H_m \sin\left(\frac{n}{L_3} x\right) \sinh\left(\frac{n}{L_3} y\right) \quad (13)$$

ただし、

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

$$H_m = -\frac{4V_0 L_3 \cos \theta}{n^2} \frac{\sin\left(\frac{nL_1}{L_3}\right) - \frac{2L_3}{n(L_2 - L_1)} \sin\left(\frac{n(L_2 + L_1)}{2L_3}\right) \sin\left(\frac{n(L_2 - L_1)}{2L_3}\right)}{\sinh\left(\frac{nB}{L_3}\right)}$$

式(13)を式(4)に代入することにより流れ関数  $\psi$  が求まり、次式のようになる。

$$\psi = U_0 y + \sum_{n=0}^{\infty} H_m \sin\left(\frac{n}{L_3} x\right) \sinh\left(\frac{n}{L_3} y\right) \quad (14)$$

また、任意の点における  $\psi_2$  の各方向の流速成分は式(14)を偏微分することによりそれぞれ、式(15)、式(16)で表される。このようにして、合流部周辺の流れを求めることができた。

$$u = U_0 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n}{L_3} H_m \sin\left(\frac{n}{L_3} x\right) \cosh\left(\frac{n}{L_3} y\right) \quad (15)$$

$$v = -\sum_{n=0}^{\infty} \frac{n}{L_3} H_m \cos\left(\frac{n}{L_3} x\right) \sinh\left(\frac{n}{L_3} y\right) \quad (16)$$

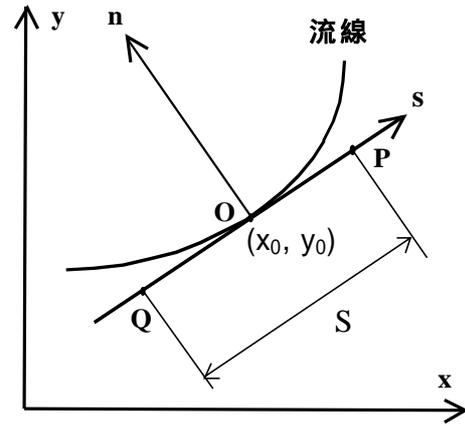


図-3 曲率に関する説明図

## 2.2 下層流れ

続いて、合流部周辺における河床近傍の流速を求める。下層の流れは流線の曲がりによって生じる二次流によって、ポテンシャル流よりも合流部の側に曲げられることになる。河合は前項において求められたポテンシャル流に、合流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、合流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。

$$V_b = V_b' + V_b'' \quad (17)$$

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(18)で表される。

$$V_b'' = N_* \frac{h}{r} u_b \quad (18)$$

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

実際計算するに当たり、水深  $h$  については、事前に測定してある現地調査データを用いる。

曲率半径については、同一流線上の流速の差異により計算される。図-3に示すように  $x$ - $y$  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  $1/r$  は次式で表される。

$$\frac{1}{r} = \frac{u \frac{\partial v}{\partial s} - v \frac{\partial u}{\partial s}}{q^2} \quad (19)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial s} &= \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial s} \\ &= \frac{\partial u}{\partial x} q + \frac{\partial v}{\partial y} q \end{aligned}$$

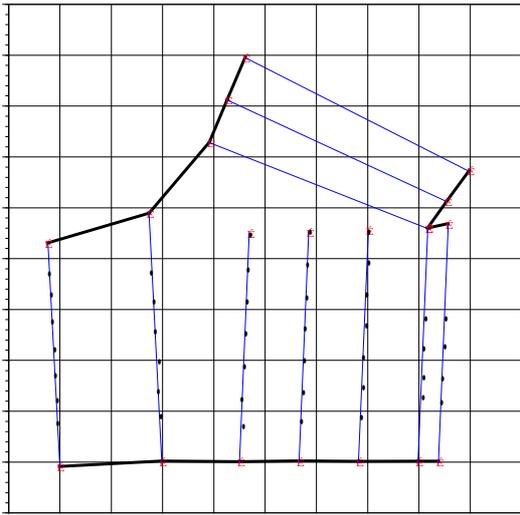


図-4 標津川蛇行合流部の概形および流速観測点位置

上式を式(19)に代入し整理すると式(20)で表される．

$$\frac{1}{r} = \frac{u^2 \frac{\partial v}{\partial x} + uv \frac{\partial v}{\partial y} - uv \frac{\partial u}{\partial x} - v^2 \frac{\partial u}{\partial y}}{q^3} \quad (20)$$

実際に曲率求めるに当っては、求めたい任意点を挟むように同一流線上にP点およびQ点を取り、中央差分法を用いて算出する．

### 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15m<sup>3</sup>/sであった．流速の測定においては、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ものである．

#### 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．

図-5(a)は平均流速の実測値と理論値を比較したものである．これをみると合流部周辺においては流向、および流速を比較的良好に表現できていることが確認できる．x=L<sub>1</sub>、およびx=L<sub>2</sub>付近において実測値と理論値が大きく異なっている．この相違に関しては、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、流速精度がよくないためと考えている．また、場所によっては十分な水深が確保されておらず、正しい測定ができなかったようである．

同様に、図-5(b)は下層流速の実測値と理論値を比較したものである．この場合も絶対値に隔たりがあるものの実測値と理論値はほぼ一致しており、よく表現できていることが確認できる．

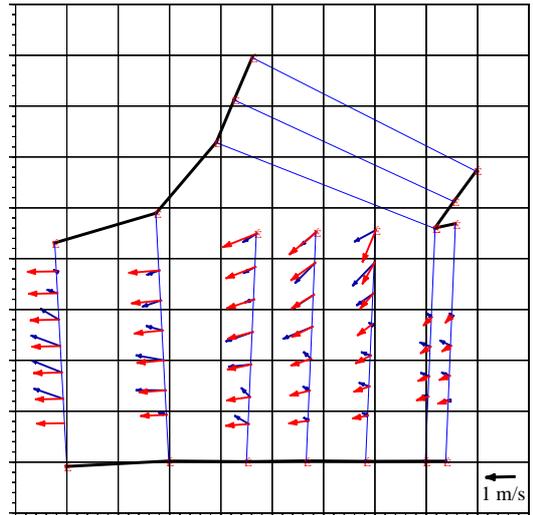


図-5(a) 理論値(赤)と実測値(青)の比較(上層)

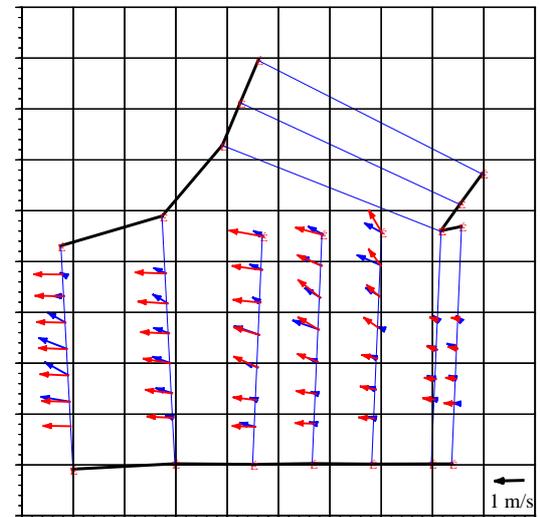


図-5(b) 理論値(赤)と実測値(青)の比較(下層)

以上のことから、先の理論により標津川試験地の合流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合流部における流砂量について調査することが可能である．

### 4. まとめ

以上のことをまとめると以下の通りである．

- 1) 河合の方法を用いて理論的に、標津川蛇行復元合流部における流れの再現ができた．
- 2) 理論値を用いて流砂量について調査が可能である

### 5. 今後の課題

- 1) 合流部付近の流砂量の評価
- 2) 理論値の三次元ポテンシャル解析
- 3) 検査断面内の局所変化の考慮

### 6. 参考文献

- 1) 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

- 2) 藤田将輝，長谷川和義，渡辺康玄，空閑 健：標  
津川蛇行分岐部における流砂量配分と河床の堆  
積・侵食，土木学会北海道支部論文報告集，第 60  
号，pp.370～373，2004
- 3) 河合茂：開水路分岐部における流量・流砂量に関  
する研究，京都大学学位論文，1991