

一般座標系底面流速解法による河川合流部の解析

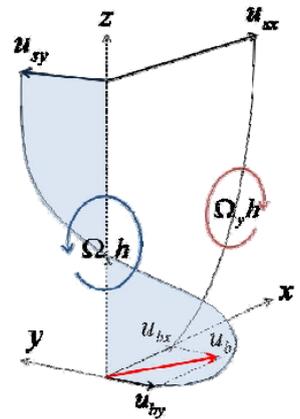
中央大学大学院 学生会員 ○奥石 大  
 中央大学研究開発機構 正会員 内田 龍彦  
 中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二

1. 序論

本川と支川の二つの流れが角度を持って合流する箇所における流れの解析には、三次元性を考慮できる解法が必要である<sup>1)</sup>。内田・福岡は浅水流方程式に加え、水深積分した渦度の輸送方程式を解くことで圧力や流速の鉛直分布を直接計算することなく、半直接的に底面流速を解析する方法を検討してきた<sup>2),3)</sup>。本研究では実河川で計測されたデータ<sup>4)</sup>を用いて本解析モデルの適合性を検証することを目的としている。

2. 解析モデル

図-1に底面流速解法の枠組みを示す。本解析法では、河床からわずかに上の面を底面とし、水深積分した渦度と水表面流速を用いて底面流速を式(1)で表す。流速鉛直分布は三次多項式で仮定し、水深平均流速  $U_i$ 、水表面流速  $u_{si}$ 、底面流速  $u_{bi}$ 、水面における流速鉛直勾配ゼロを与えれば式(2)が得られる。基礎方程式には、一般座標系浅水流方程式に加えて、一般座標系水深積分した渦度方程式(3)と水表面の運動方程式(4)を用いる(ここでは $\xi$ 方向のみ示す)。



$$u_{bi} = u_{si} - \epsilon_{ij3} \Omega_j h \quad (1), \quad u'_i = u_i - U_i = \Delta u_i (12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) - \delta u_i (4\eta^3 - 3\eta^2) \quad (2)$$

$$\frac{\partial J \Omega_i h}{\partial t} = J \left( ER_{\alpha i} + P_{\omega i} + \frac{\partial h \Delta \eta D_{\omega \xi}}{\partial \xi} + \frac{\partial h \Delta \xi D_{\omega \eta}}{\partial \eta} \right), D_{\omega \xi} = \overline{\omega_\xi u_i} - \overline{\omega_i u_\xi} + \frac{v_i}{\sigma_\omega} \left( \frac{\partial \Omega_i}{\partial \xi} + \cos \theta^{\eta \xi} \frac{\partial \Omega_i}{\partial \eta} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_{s\xi}}{\partial t} + \tilde{u}_{s\xi} \frac{\partial \tilde{u}_{s\xi}}{\partial \xi} + \tilde{u}_{s\eta} \frac{\partial \tilde{u}_{s\xi}}{\partial \eta} - \tilde{J} (\tilde{u}_{s\eta} - \tilde{u}_{s\xi} \cos \theta^{\eta \xi}) \left( \tilde{u}_{s\xi} \frac{\partial \theta^\xi}{\partial \xi} + \tilde{u}_{s\eta} \frac{\partial \theta^\xi}{\partial \eta} \right) = -g \left( \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \cos \theta^{\eta \xi} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) + P_{s\xi} \quad (4)$$

図-1 底面流速解法の枠組

( $i,j=1,2(x,y)$  方向),  $u_i$ :  $i$  方向流速,  $U_i$ :  $i$  方向水深平均流速,  $u_{bi}$ :  $i$  方向底面流速,  $u_{si}$ :  $i$  方向表面流速,  $\Delta u_i = u_{si} - U_i$ ,  $\delta u_i = u_{si} - u_{bi}$ ,  $\eta = (z_s - z)/h$ ,  $z_s$ : 水位,  $h$ : 水深,  $\epsilon_{ij3}$ : エディトンのイプシロン,  $ER_{\alpha i}$ : 水面と底面に垂直な渦の回転,  $D_{\omega \xi}$ ,  $D_{\omega \eta}$ : 水平方向の移流, 回転・伸縮, 分散, 乱流混合による  $i$  方向渦度のフラックス,  $P_{\omega i}$ :  $i$  方向渦度の生産項,  $\tilde{u}_{s\xi}$ : 反変  $\xi$  方向水面流速,  $\tilde{u}_{s\eta}$ : 反変  $\eta$  方向水面流速,  $\tilde{u}_{se\xi}$ : 平衡状態の水面流速,  $P_{s\xi}$ :  $\xi$  方向せん断力項)

3. 解析に用いたデータ諸元

解析対象は図-2に示すアメリカ、イリノイ州を流れる KASKASKIA RIVER(KR)と、その支川である COPPER SLOUGH(CS)の合流地点である。ここでは Rhoads ら<sup>4)</sup>により流速分布や粒度分布等が調査された1992年3月20日の観測データを用いる。観測で得られた水理量は表-1に示すとおりである。

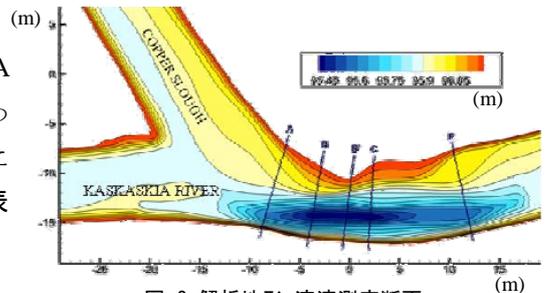


図-2 解析地形, 流速測定断面

表-1 実測水理量

1992年3月20日					
	Q	M	A	V	D
KR	0.29	46.90	1.83	0.16	0.27
CS	0.51	170.60	1.53	0.33	0.20

Q:流量( $m^3 s^{-1}$ ), M:運動量フラックス( $kgms^{-2}$ )

A:断面積( $m^2$ ), V:水深平均流速( $ms^{-1}$ ), D:平均水深(m)

4. 結果と考察

図-3に水深平均流速ベクトルの実測値(黒矢印)と解析値(赤矢印)を示す。～線はCSとKRの流体の境界を表している。実測では、断面A~Bでは境界が右岸付近まで達し、最大流速域は水路中央より右岸寄りに発生している。また、断面B',Cでは左岸に剥離域が生じている。これは、実測データは流量比(CS/KR)1.74であるためCSの流れが相対的に大きな運動量を有すること、また、平均水深( $D_{KR}=0.27, D_{CS}=0.20$ )が低い流れであるため地形の影響を強く受け、合流後KR左岸の砂州によりCSからの流れが大きく曲げられるためであると考えられる。断面B'~Eでは水路中央付近でやや流速が低減し、その両側で速い流速域が形成されている。これは、後述するように、CSの大きな流入曲率により発達する二次流により流速分布が複雑に変化したためであると考えられる。解析では、断面Aにおいて

キーワード 河川合流部 二次流 水深積分渦度 底面流速解法 水表面流速 一般座標系

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27-31214 中央大学研究開発機構 TEL 03-3817-1611

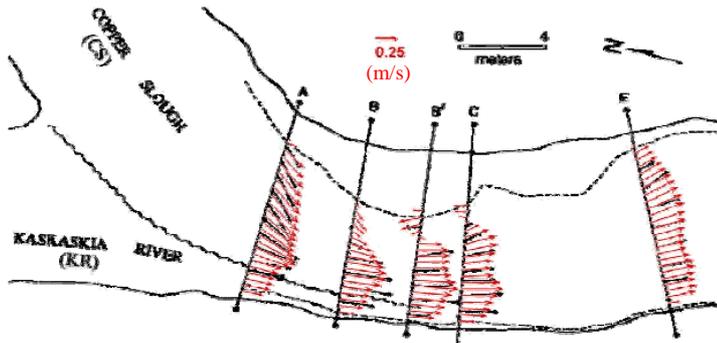


図-3 水深平均流速ベクトル

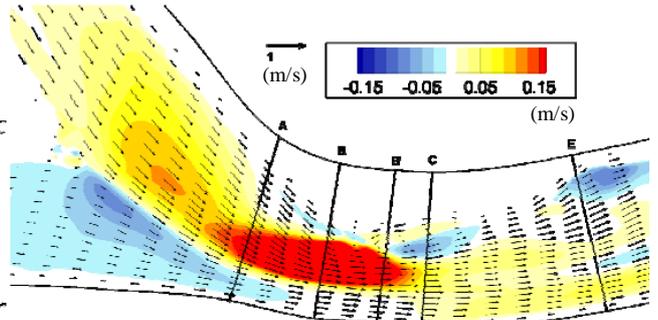


図-4 解析における水深平均流速ベクトルと二次流の関係

CS からの流れが実測に比べ小さな曲率で流入しているため、断面 A~B' での最大流速域がやや水路中央に移動している。この原因の一つに、合流後左岸の砂州の地形や抵抗を正しく評価出来ていないことが考えられる。断面 C では右岸際の流速がやや小さく、左岸際には逆流が生じているものの、断面 C~E での最大流速が二つの極を持って生じる点を再現出来ている。図-4 には解析の水深平均流速ベクトルと水深積分渦度の水深平均流速ベクトル方向成分をコンターで示している。合流部頂点より二つの対になる二次流が発生している。KR 側の二次流は発達せず、断面 A より下流では CS 側の二次流が卓越している。この二次流は、断面 A~B' において最も大きな値となり、断面 E 付近では減衰している。図-5~8 に断面 C, E における二次流速と主流速の鉛直分布をそれぞれ示す。断面 C (図-5, 6) では、二次流の影響により、水面付近の相対的に速い流体が KR 右岸の底面付近へ運ばれ、底面の遅い流体が KR 左岸の水面付近へ運ばれることで複雑な流速分布となっている。解析では KR 右岸に十分流れが寄っていないため主流速や二次流の中心がやや水路中央に寄っている。また、水路中央の鉛直方向に変曲点を二つ以上持つような複雑な流速分布は三次の流速鉛直分布関数を用いているため再現出来ていない。このように、水路中央付近では実測との違いが見られるものの、二次流場や二次流により形成される主流速の鉛直分布の歪みについては、その性状を概ね説明出来ている。断面 E (図-7, 8) では、二次流はほとんど減衰しているが、水路中央より左岸側において左岸へ向かう流速が生じ(図-7)、水路中央よりやや両側で水面付近において二つの最大流速域が発生している(図-8)。解析ではこれらの流速分布を概ね再現出来ている。以上より解析では、CS からの流入曲率が異なるものの、二次流が十分発達した断面 C より下流においては、水深平均の流れ場、二次流、主流速分布の特徴を概ね説明出来ており、本解析法は水表面の運動方程式と渦度方程式を解くことで、合流部の二次流の発達・変形機構とそれによる運動量輸送を評価出来ると考えられる。

5. 結論

本研究では一般座標系の底面流速解法を構築し、Rhoads, Kenworthy<sup>3)</sup>の実測結果に適用し検証した。その結果、合流部の二次流について、その特徴的な発達変形機構を概ね説明できることを示した。

参考文献

1) 福副達二：洪水の水理と河道の設計法森北出版2005 2) 内田晴彦, 福副達二：浅水流方程式と渦度方程式を連立した準三次元モデルの提案と開水路合流部への適用, 水工学論文集第53巻, pp.1081-1086, 2009 3) 内田晴彦, 福副達二：底面流場解法による連続する水没水帯群を有する流れと河床変動の解析, 土木学会論文集B1, Vol. 67, No. 1, 16-29, 2011 4) Rhoads, B. L. and Kenworthy, S. T. (1995). "Flow structure at an asymmetrical stream confluence." *Geomorphology*, 11, 273-293.

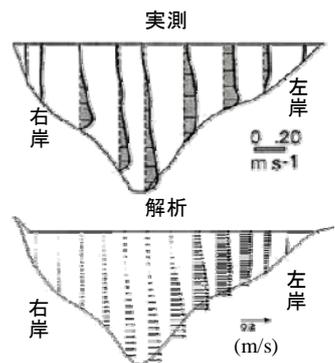


図-5 二次流の比較 (断面 C)

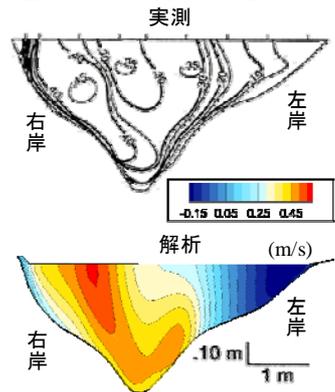


図-6 主流速の比較 (断面 C)

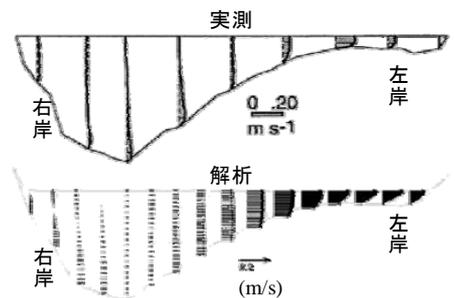


図-7 二次流の比較 (断面 E)

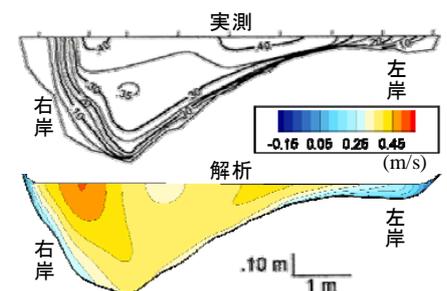


図-8 主流速の比較 (断面 E)