

護岸水衝部における三次元流れの 解析法の改良と課題

DEVELOPMENT OF BOTTOM VELOCITY COMPUTATION METHOD FOR THREE-DIMENSIONAL FLOWS AROUND RIVER BANKS

輿石大¹・平塚真理子²・内田龍彦³・福岡捷二⁴

Masaru KOSHIISHI, Mariko HIRATSUKA, Tatsuhiko UCHIDA and Shoji FUKUOKA

¹正会員 株式会社大林組(〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

²正会員 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所(〒230-0051 神奈川県横浜市鶴見区鶴見中央2-18-1)

³正会員 博(工) 中央大学研究開発機構准教授(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

⁴フェロー 工博 Ph. D. 中央大学研究開発機構教授(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

There is increasing interest in flow configurations around banks for a reliable bank protection. We have proposed a new numerical analysis method, Bottom Velocity Computation method based on depth integrated model for three-dimensional flow configurations in laboratory channel and field experimental channel with large scale. While the method provided good agreement with measured data in laboratories, results in the large scale experiment were not enough to reproduce flow configurations, because complex velocity distributions and turbulence motions in the vicinity of bottom depend on variations of complex geometries and bed material distributions in rivers. In this paper, the applicability of the bottom velocity computation method for flows with large scale is discussed by using measured data of field experiment in the Asa river.

Key Words : *bottom velocity computation method, vorticity, secondary flow, revetment, ADCP, field experiment*

1. 序論

護岸等水衝部の洗掘対策工法を確立するためには、洪水時の水衝部の流れ構造を明らかにする必要がある。著者らは、広域の流れと構造物周辺の局所的な流れを同時に解析するため、平面二次元解析の枠組みにおいて、浅水流場の仮定を用いずに三次元流れを計算できる準三次元解析法(底面流速解析法)を開発してきた¹⁾。底面流速解析法は実験室における、狭い水路の小規模河床形態、構造物周りの流れや河床変動、複断面蛇行流路の河床変動等を説明出来ることを示してきた²⁾。

著者らは^{3), 4)}、この解析法の現地水衝部流れへの適用性を検証するため、2011年常願寺川現地実験において水衝部付近の観測を実施し、解析結果と比較、検証した。解析結果は実測結果の特徴は捉えたものの、これまでの実験室での観測データに対する検証結果と比較して再現性は低く、水衝部となる護岸壁面近傍の流れの集中を表現できず、二次流強度が実測の半分程度となる等、流れ構造を説明するには至らなかった。これは、現地の流れは

実験室水路の流れと比較して、流路形状の変化や河床表層の粒径が大きく粒度構成が場所ごとに变化する影響を受けており、水路形状が単純で粒径や粒度構成の制限を受ける実験室水路の流れよりも複雑であるためと考えられる。このため現地の流れでは、底面近傍の流速分布や乱れ構造が実験室と大きく異なると考えられ、実験室で得られたモデル係数をそのまま適用できない可能性がある。現地水衝部へ適用可能な解析モデルを構築するためには、多様な流路形状や粒度構成、河床抵抗分布を有する現地スケールの観測結果を用いて、解析モデルの適用性の検証と改良をすることが不可欠である。

本研究では、これまでの研究課題⁴⁾を踏まえ、平水時の浅川現地水衝部において詳細な観測を実施し、現地水衝部の三次元流れの解析法を検討する。

2. 2012年浅川現地観測概要

図-1に調査対象地点の航空写真と河床形状コンターを示す。航空写真は平成20年9月時点の流路形状であり、

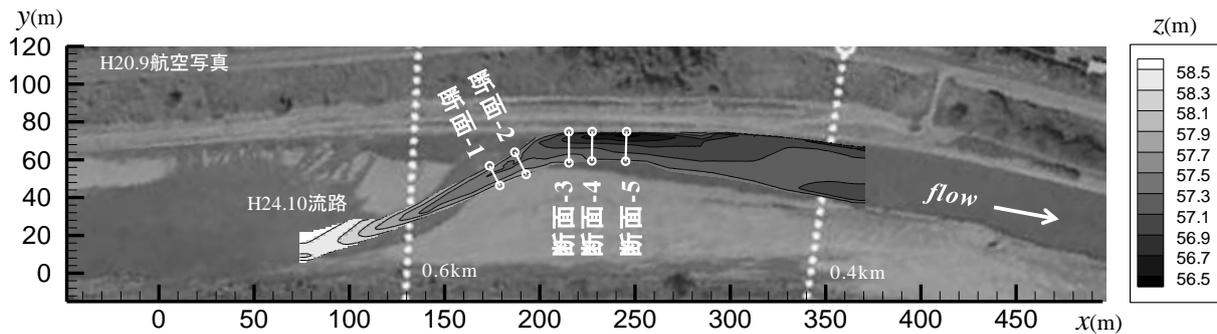


図-1 浅川現地観測 対象地点全景

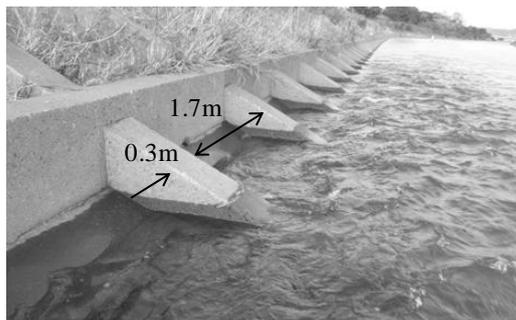


図-2 護岸形状

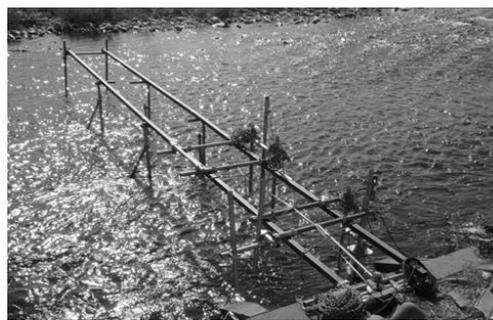


図-3 可動式レール

河床形状コンターは平成24年10月に実施した本現地調査の測量結果より作成した流路形状である。調査対象地点は浅川0.5km付近であり、この区間は、堤防、低水路線形ともに曲率を有している。左岸外岸の護岸(図-2)沿いは経年的に洗掘傾向にあり、深掘れが下流へと延伸しているため、この地点の流れと河床形状を把握することは重要である。本調査では、平水時の流れを対象とし、ADCPを用いた流れと河床形状の同時観測法⁴⁾より、水衝部の断面-3~5において三次元流速分布と河床形状の計測を行った。対象地点全域の縦断水面形と河床形状をトータルステーションより計測した。また、常願寺川現地実験の検討から、水衝部へ接近する流速データが重要であると分かったことから、これらについても二次元の電磁流速計を用いて断面-1, 2において計測した。計測にはRD Instruments社製 Workhorse ADCP Rio Grande, JFEアドバンテック社製2軸電磁流向流速計AEM213-Dを用いた。図-3に示す可動式レールを設置し、ADCPを固定したやぐらを左岸から牽引し、横断方向に約0.1m毎にサンプリング時間15.0sで計測した。図-4に水衝部の断面-3~5におけるADCP河床形状計測法による計測結果とトータルステーションによる計測結果の比較を示す。ADCPの河床形状計測結果は4つのビームの内、横断方向へ発射されるBEAM1とBEAM2の計測結果を示す。ADCP計測結果はトータルステーションの計測結果と非常に良く一致している。なお、左岸付近においてADCP計測結果では、護岸の凸部が見られるが、トータルステーションの測量結果は護岸の詳細な形状を計測していないため滑らかな河床形状となっている。

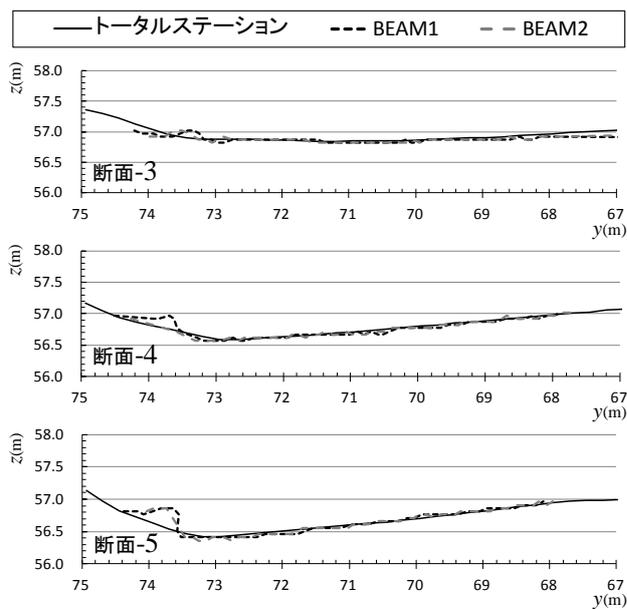


図-4 河床形状計測結果

3. 現地水衝部における三次元流れの解析法

図-5に底面流速解析法¹⁾の枠組みを示す。本章では解析法の主要な点を示す。底面流速解析法では、河床 z_0 からわずかに上の面 $z_b(z_b = z_0 + \alpha_b, \alpha_b \cong 0.05h, h$: 水深)を底面とし、底面から水面までの流れが解かれる。x, y方向渦度の定義式を水深積分すると、底面流速に関する式(1)が得られる。式(1)の右辺の未知量を各方程式より求めることで、水深積分モデルの枠組みにおいて、流速や圧力の鉛直分布の影響を受けた底面の流速が計算できる。

$$u_{bi} = u_{si} - \varepsilon_{ij3} \Omega_j h - \left(\frac{\partial W h}{\partial x_i} - w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

ここに、 i, j は1,2(x,y方向)であり総和規約に従う。 u_{si} : i 方向水表面流速, u_{bi} : i 方向底面流速, ε_{ij3} : エディトンのイプシロン, Ω_j : 水深平均 j 方向渦度, W : 水深平均鉛直方向流速, z_s : 水位, z_b : 底面高, w_s, w_b : 水面, 底面の鉛直方向流速である。

式(1)により底面流速を求めるため、水深積分連続式(2)、水深積分運動方程式(3)に加えて、水深積分渦度方程式(4)と水表面流速方程式(5)、水深積分鉛直方向流速式(6)、乱れエネルギー k の輸送方程式(7)を解く。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U_j h}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial U_i h}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j h}{\partial x_j} \right) = -\rho g h \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{\partial h d p_0}{\partial x_i} - d p_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} - \tau_{bi} + \frac{\partial h T_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$T_{ij} = 2\nu_i S_{ij} - \overline{u_i' u_j'}$$

$$\frac{\partial \Omega_i h}{\partial t} = E R_{\sigma i} + P_{\omega i} + \frac{\partial h D_{\omega ij}}{\partial x_j}$$

$$E R_{\sigma i} = u_{si} \omega_{s\sigma} - u_{bi} \omega_{b\sigma}$$

$$P_{\omega i} = C_{p\omega} \nu_{ib} (\omega_{bei} - \omega_{bi}) / h$$

$$C_{p\omega} = \kappa / \alpha, \quad \alpha = \kappa / 6.0$$

$$\nu_{ib} = \max(\alpha^2 h^2 \omega_{bi} \omega_{bi}, \alpha^2 h^2 \omega_{bei} \omega_{bei}, \nu_i)$$

$$D_{\omega ij} = -U_j \Omega_i + U_i \Omega_j + \overline{\omega_j' u_i'} - \overline{\omega_i' u_j'} + \nu_i \frac{\partial \Omega_i}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial u_{si}}{\partial t} + u_{sj} \frac{\partial u_{si}}{\partial x_j} = -(g - d p_{zs}) \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + P_{si} \quad (5)$$

$$k_1 \frac{\partial}{\partial x_j} \left(h^2 \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + \phi^p - \phi = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_i h}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k - \varepsilon \quad (7)$$

ここに、 ρ : 水の密度, g : 重力加速度, U_i : i 方向水深平均流速, τ_{bi} : i 方向底面せん断力, $d p$: 静水圧分布の偏差成分 ($p = \rho g(z_s - z) + d p$), $d p_0$: $d p$ の水深積分値, $d p_b$: 底面の $d p$, T_{ij} : 水平方向せん断応力, ν_i : 水深平均渦動粘性係数, S_{ij} : 水深平均流速のひずみ速度, $\overline{u_i' u_j'}$: 流速鉛直分布による運動量交換である。また、 $E R_{\sigma i}$: 水面と底面に垂直な渦の回転, $D_{\omega ij}$: 水平方向の移流, 回

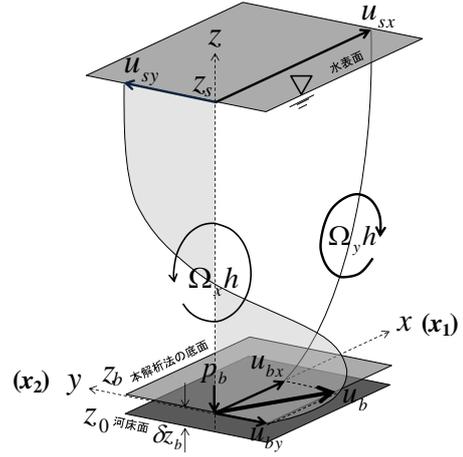


図-5 底面流速解析法の枠組

転・伸縮, 分散, 乱流混合による渦度のフラックス, $P_{\omega i}$: 渦度の生産項, ω_{bi} : 底面近傍の渦度, ω_{bei} : 底面流速 u_{bi} に対する平衡状態の渦度, $\overline{\omega_i' u_j'}$ は渦度と流速鉛直分布に関する二次の相関項である。 $\omega_{s\sigma}, \omega_{b\sigma}$ はそれぞれ u_{si}, u_{bi} の回転で評価する。また、 $d p_{zs}$: 水面における $d p$ の鉛直勾配 ($d p_{zs} = (2d p_b - 6d p_0)/h$)であり、生産項 P_{si} は、水面近傍において無限小の層底面に働くせん断応力である。また、 k_1 : 係数 ($=1/20$), $\phi = (Wh)^{n+1} - (Wh)^n$, $\phi^p = (Wh)^p - (Wh)^n$, $(Wh)^p$: $\delta \rho_i$ を用いた流速鉛直分布から連続式より計算される Wh , $\delta \rho_i$: $(Wh)^n$ を用いて式(1)から計算される $\delta \rho_i$, n : 時間ステップである。また、 $\nu_i = C_{\mu} k^2 / \varepsilon$, $C_{\mu} = 0.09$, P_k : 乱れエネルギーの生産項である。消散項 ε は水深と関連付け $\varepsilon = C_{\varepsilon} k^3 / \Delta$, $C_{\varepsilon} h / \Delta = 1.7$ で与える。

運動方程式(3)の底面の圧力偏差 $d p_b$ は水深積分した鉛直方向運動方程式の非定常項と水平せん断応力に関する項を省略した式(8)より求める。水深平均の圧力偏差 $d p_0$ は、既往研究¹⁾のように直線分布を仮定せず、式(9)で計算する。式(9)は、鉛直方向運動方程式を水面から任意高さまで積分した、任意高さの圧力偏差の式をもう一度積分して簡略化したものである。

$$\frac{d p_b}{\rho} = -\frac{\partial h W U_j}{\partial x_j} - \tau_{bj} \frac{\partial z_b}{\partial x_j} \quad (8)$$

$$\frac{d p_0}{\rho} = \frac{d p_b}{2} - \overline{w w_{\sigma}} \quad (9)$$

ここに、 $\overline{w w_{\sigma}}$ は鉛直方向流速の運動量交換である。

底面せん断応力は河床面 $z_0 = z_s - (h + \delta_b)$ を平均河床高とし(図-5)、非常に薄い渦層 δ_b において対数分布則が成立すると仮定すれば、式(10)より得られる。

$$\tau_b = \rho u_*^2 = \rho (c_b u_b)^2, \quad \tau_{bi} = \tau_b \cdot u_{bi} / u_b, \quad \frac{1}{c_b} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\delta_b + a k_s}{k_s} \right) + A r \quad (10)$$

ここに、 $u_b^2 = u_{bi} u_{bi}$, κ : カルマン係数, k_s : 相当粗度, $A_r = 8.5$, a は対数分布速の原点高と相当粗度 k_s の関係を表す係数である。

本解析法における流れの三次元性が考慮されるプロセスを説明する。本解析法では、流速鉛直分布を水深平均流速、水表面流速、底面流速を用いて、水面での速度勾配ゼロの条件を与えた式(11)の三次多項式で仮定する。渦度の鉛直分布は式(11)の一階微分としている。

$$u'_i = u_i - U_i = \Delta u_i (12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) - \delta u_i (4\eta^3 - 3\eta^2) \quad (11)$$

式(3), (4), (9)の上付きバーで示す渦度や流速の鉛直分布による二次の相関項や、式(4), (5), (7)の生産項は、仮定した鉛直分布を用いて求め、流速鉛直分布の変形による運動量輸送や乱れの生産を考慮している。また、それぞれの基礎方程式は流速鉛直分布を介して、生産項や分散項により相互に影響しながら一体的に解かれる。

4. 浅川現地調査結果と解析結果の比較

(1) 解析条件と解析法の改良

底面流速解析法を浅川現地調査に適用し、解析法の適用性を検証する。境界条件として、上流端流入量は上流部の水面形が合うように、下流端は計測水位を与える⁵⁾。河床の抵抗を表す a , k_s の分布は、実測の水位縦断分布や流量、流速分布を説明するように、 $a = 0.2$ (全区間), $k_s = 5.0\text{m}$ (縦断距離: 0~190m), 0.15m (縦断距離: 190~440m)を用いた。ここで、縦断距離: 0~190mで k_s が大きいのは、水深が浅い箇所においても渦度の計算が安定して行えるように、式(10)のように k_s に応じて原点位置を低くしているためである。即ち、 $a=0.2$ では c_b の最大値は0.22であり、水深より大きな k_s は c_b にこの値を与えていることを意味する。水衝部が形成されている左岸の護岸付近においても、護岸の複雑な形状(図-2)を解析地形において考慮することが困難であるため、地形はトータルステーションにより計測された滑らかな形状を与え、護岸形状による流体力を含めた護岸の全体的な抵抗として大きな $k_s = 5.0\text{m}$ を与えている。このように、粗度の大きな浅い流れの解析法には抵抗評価法などに課題を残しており、更なる検討が必要である。解析地形は縦断幅0.5m, 横断幅0.25mのデカルト座標メッシュに、トータルステーションとADCP観測法により詳細間隔で測られた河床形状の測定結果を利用する。

先の常願寺川現地実験での検討では、護岸沿いの流れの集中や、二次流強度等を説明するには至らなかった。そこでは、解析境界条件として、護岸付近や流入部における河床形状データ、水衝部へ接近する流速データを十分与えることが出来なかったことから、解析モデルの厳密な検証には至らなかった。本研究では課題として残されていた水衝部へ接近する流速分布を検証した。流速計

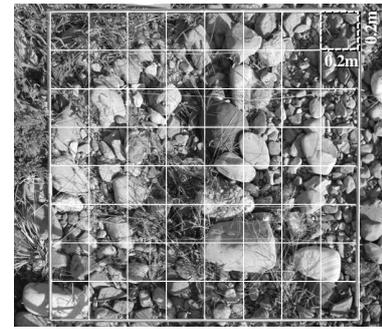


図-6 断面-1,2内岸砂州の表層写真

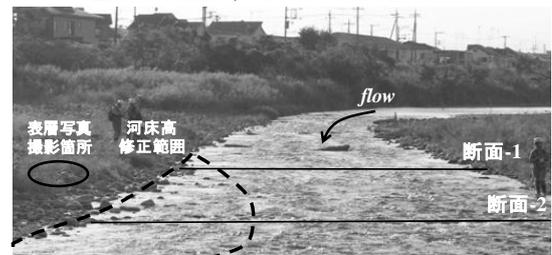


図-7 断面-1,2付近の流れの様子

測断面-1, 2付近は非常に水深が浅く(最大水深0.4m程度)粒径が大きいため(図-6: 最大粒径0.3m程度), 右岸付近では大きな礫が水面に露出しており(図-7), 河床形状の測量結果に含まれる粒径程度の大きさの誤差が流れの解析に大きく影響することが分かった。このため、断面-1, 2の水位と流速の計測結果を再現する様に、流れの様子を撮影した動画と写真(図-7)から、170~200m(図-1)付近内岸の河床高を調整した。

本解析法では、河床面 z_0 上に渦層 α_b を仮定し、水深積分渦度方程式(4)の生産項は、底面流速 u_{bi} に対する平衡状態の渦度 α_{bi} と底面近傍の渦度 α_b の交換で表す。係数(C_{po})は実験室水路で得られたモデル定数を用いて理論的に導かれた $C_{po} = \kappa/\alpha$ である。本調査地点のような水深が浅く粒径の大きな現地河川では、底面近傍の流速分布や乱れ構造が実験室と比べ複雑であると考えられ、この点を改良し、底面流速解析法の適用性を検討する。解析は2Case行い、Case1では、理論的に導出された $C_{po} = \kappa/\alpha$ を用いる。Case2では生産項の係数を0.1倍した $C_{po} = 0.1(\kappa/\alpha)$ を用いる。ただし、上流からの流入条件が変化しないように、解析の最上流端より縦断距離140m付近まではCase1, Case2共に $C_{po} = \kappa/\alpha$ としている。渦度方程式の生産項は、渦度をその場所の底面流速に見合う平衡状態の渦度に漸近させる働きを持つ。即ち生産項の係数を0.1倍したCase2は渦度方程式の移流や回転、伸縮、拡散項に比して生産項の働きを相対的に小さくし、渦度の非平衡性を大きくしたものである。

(2) 解析結果

図-8に実測と解析の縦断水面形の比較を示す。青と赤のプロットで示す実測の左右岸水位はトータルステーションの計測値であり、横断測量結果と同様に粒径程度の誤差を含むためばらつきが大きく、参考値として用いる。黒のプロットで示す実測の平均水位は横断面内の複

数の点において計測された水深を平均したものである。

図-9は断面-1, 2における水表面流速と水深平均流速, 水位の横断分布の比較を示す. 実測の水表面流速は水面より概ね0.1mの深さの計測値である. 図-8, 図-9において, 解析値はそれぞれCase1を破線, Case2を実線で示す. 解析水位は, 断面-2~5の水衝部付近において, 概ね水位縦断分布と水表面流速の横断分布を説明している (図-8, 図-9). 図-9断面-1では, 解析の水表面流速が若干大きい. これは, $x=0.0\sim 190.0\text{m}$ の範囲は水深の大きさに比して相対的に粒径が大きく, 粒度分布も場所ごとに変化するため, a, ks の値を一定で取り扱っていることに問題があると考えられ, 上述のように浅い流れの抵抗評価法は今後の課題である.

図-10は水深平均流速コンターを, 図-11は断面-3~5における流速鉛直分布をコンターで縦断流速(v_z), 横断流速(v_y)と鉛直流速(v_x)をベクトルで示す. 同図には電磁流速計で計られた水面付近の縦断流速コンターを合わせて示している. 実測の流速ベクトルは単純でなく, 大きく乱れている. 本調査地点は水衝部の上下流において, 水深 (図-8) や水面幅 (図-10) が急激に変化するため, $x=210.0\text{m}$ 付近 (図-10) の内岸で流線の剥離が生じ, ここから供給される乱れと平面渦が下流へと輸送され非定常性の高い複雑な流れ場である. 解析結果は時間的に変動しており, 変動周期は30.0s程度であった. 図-10, 11の解析結果は瞬間値を示している. 主流速分布は比較的単純な構造をしているため, 相対的に時間変動が小さいが, 二次流構造は複雑で時間変動が大きいことが分かる. 今回の観測時のサンプリング時間15.0sは二次流の時間平均流速場を検討するには不十分であったと考えられ, 観測時間については河幅や水深, 流路縦断形状を考慮し決定する必要がある. このため, 本研究では実測値については, 流速の大きさや方向から, 二次流セルの配置と強度について着目し考察する.

実測の縦断流速コンターに着目すると, 最大流速域は断面-3実測において $y=72.0\sim 73.0$ 付近の左岸近傍に, 断面-4実測では $y=72.5\sim 73.5$ であり, 縦断流速の運動量が左岸へ輸送されている. これは, 水衝部上流の右岸砂州と左岸の深掘れにより主流が左岸の護岸沿いに集中していること (図-9断面-2) と, 湾曲により二次流が生じ, 主流の運動量が右岸から左岸へと輸送されたためと考えられる. 断面-5実測では $y=71.0\sim 73.0$ 付近とやや右岸に移動している. これは, 左岸の護岸の形状 (図-2, 4) が流れに大きな抵抗として働き, 左岸付近の主流速を低下させたものと考えられる.

解析結果と実測結果を比較する. 二次流が最も発達する断面-4について, Case1の解析結果は常願寺川の検討結果⁴⁾と同様に二次流強度が小さく, 主流速は外岸に寄らず, 全体的に実測値に比べて鈍い流速分布となっていることが分かる. 一方Case2では, 断面-4において実測結果と同

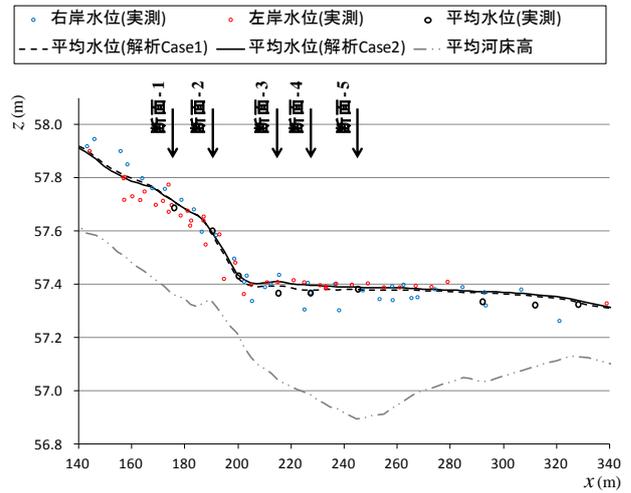


図-8 縦断水面形の比較

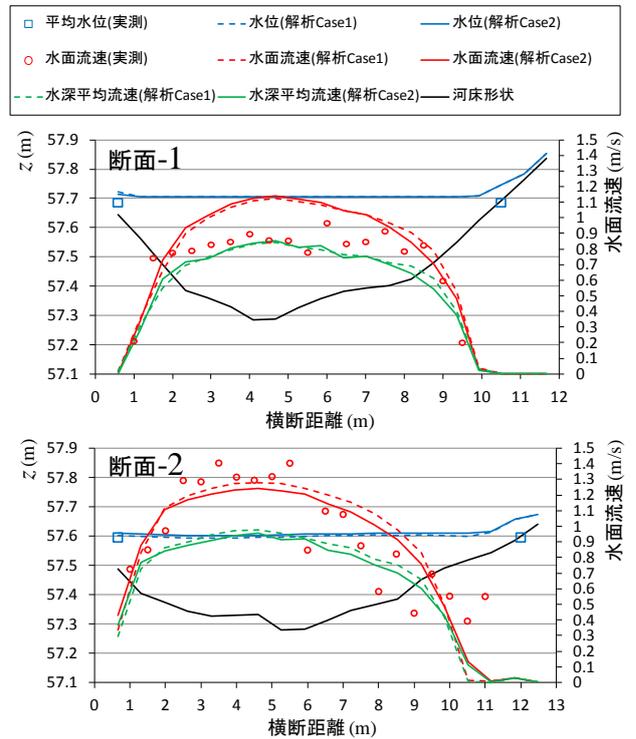


図-9 断面-1, 2の水表面, 水深平均流速と水位の比較

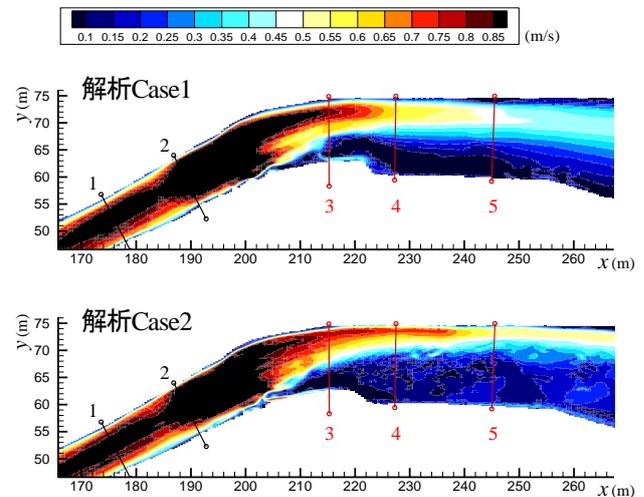


図-10 水深平均流速コンターの比較

程度の顕著な二次流が形成されており、外岸沿いの高流速域が確認できる。断面-5では護岸の抵抗により実測結果ではやや水路に移動しているが、解析結果では主流速は護岸に沿ったままである。これは解析では護岸形状に伴う抵抗を適切に評価できていないと考えられる。しかし、断面-4,5において、実測結果と同様に、内岸部(y=71.5~67.5付近)では複雑な二次流分布となっている。このことから、渦度方程式の生産項の係数を修正した解析Case2は、主流の遷移や二次流強度について再現性が改善されたと考えられる。しかしながら、実測値に変動による誤差が含まれることから、二次流構造の詳細な比較などは行えず、生産項の係数を精度良く見積もるには至らなかった。また、底面近傍の乱れ構造は水深と川幅や粒径の関係、流路形状により変化すると考えられるため、現地スケールの流速分布データの取得と、生産項の適切な評価法についてはさらなる検討が必要である。

5. 結論

浅川現地水衝部の流れにおいて底面流速解析法は、Case1では常願寺川現地実験の場合と同様に、壁面沿いの流れや二次流が小さく解析され、実測の複雑な二次流セルの配置を再現出来なかった。渦度方程式の生産項の係数(C_{pm})を修正し、渦度の非平衡性を大きくした解析Case2は、流路形状と接近流速により生じる主流の遷移や二次流強度について再現性が改善された。これより、複雑な水路形状、底面条件を有する現地水衝部の流れ場の解析では、底面近傍の評価法が重要となると考えられる。現地水衝部では個々の河道で特有の混合現象が見られることから、有効な解析モデルの構築のためにはより多くの観測データが必要である。特に、大きな河床材料からなる河道では、底面近傍の流速分布や乱れ構造については未解明の点が多く、その観測法も含め検討する必要がある。

参考文献

- 1) 内田龍彦, 福岡捷二: 浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法, 水工学論文集, 第56巻, pp. 1225-1230, 2012.
- 2) Fukuoka, S. and Uchida, T.: Toward Integrated Multi-Scale Simulations of Flow and Sediment Transport in Rivers, *Journal of Japan Society of Civil Engineering, Ser. B1(Hydraulic Engineering)*, Vol. 69, No.4, pp. II_1- II_10, 2013.
- 3) 奥石大, 内田龍彦, 長谷川賢市, 内藤ゆう子, 福岡捷二: ADCPを用いた局所流計測法の開発と堤防際の水衝部流れへの適用, 河川技術論文集, 第18巻, pp.239-244, 2012.
- 4) 奥石大, 内田龍彦, 福岡捷二: 護岸水衝部における三次元流れと河床形状の観測法と解析法の開発, 水工学論文集, 第57巻, 2013.
- 5) 福岡捷二: 洪水流の水理と河道の設計法, 森北出版, 2005.

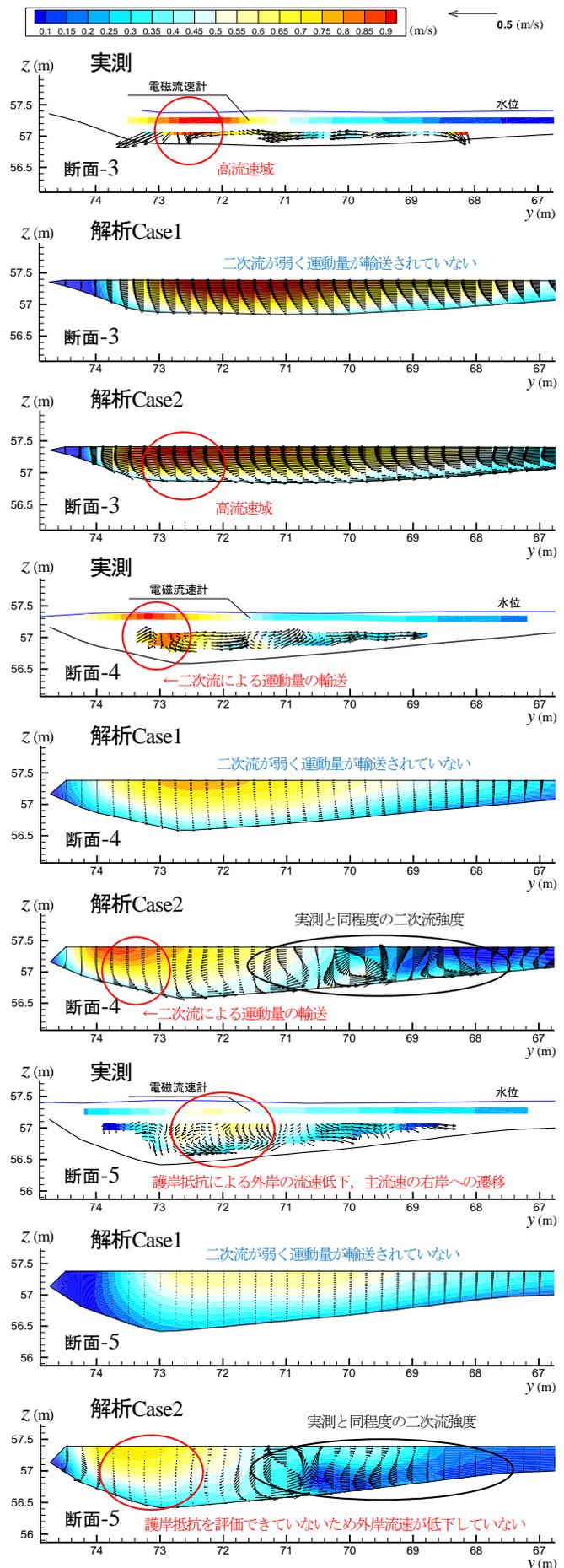


図-11 縦断流速コンターと横断、鉛直流速ベクトル