

蛇行流路の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 A NEW METHOD FOR MEASURING AND CALCULATING THREE-DIMENSIONAL FLOWS AND BED-FORMS AROUND RIVER BANKS IN MEANDERING CHANNELS

土木工学専攻 12号 興石 大

Masaru KOSHIISHI

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、洪水時の流れ構造を明らかにする必要がある。この流れ構造は、水衝部周辺の局所的な地形に加えて、上下流の河道線形や水位縦断分布等により大きく変化する。このため、洪水期間を通して広い範囲の観測、解析とともに、対象地点における流れと河床形状の詳細な観測、解析が必要となる。そこで、内田・福岡¹⁾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)を検討している。本研究では、ADCP ビームデータを個別に利用する三次元流れと河床形状の同時観測法を開発する。この観測法と浅水流場の仮定を用いない底面流速解析法を2011年常願寺川現地実験へ適用し、観測法、解析法の検証と実スケールの局所流場の構造を検討する。

2. 常願寺川現地実験概要

2011年常願寺川現地実験の水路全景図を図-1に、実験条件を表-1に示す。水路は複断面蛇行水路であり、コンクリート製の垂直護岸(図-2参照、以下護岸)を上流の水衝部に設けた。図-2に水衝部の流速計測風景を示す。図-1内の黄枠線で示す流速計測範囲において、可動式のレールを設置し、RD Instruments社製 Workhorse ADCP Rio Grande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10.0sで計測した。また、本実験は最大流速2.5m/s程度と流速が大きく激しい流れであり、ADCPの吃水をやや大きくしたため、送受信面の水深と合わせて、水面から0.4m程度の区間が計測不能であった。本実験ではこれを補完するため、二つの断面において電磁流速計を用いて水面から0.15m付近の計測も行っている。

3. ADCPを用いた流れと河床形状の観測法

(1) 三次元流速分布計測法

図-3にADCP従来計測法の枠組みを示す(ここではy-z平面のみ示すが、x-z平面においても同様である)。従来のADCP流速計測では、測定箇所流速値 v (v_x, v_y, v_z)は、 $\theta=20^\circ$ で発射される各ビームにより、幅 L だけ離れた位置で計測されるビーム方向流速値 $v_1 \sim v_4$ を用いて、式(1)から計算される。

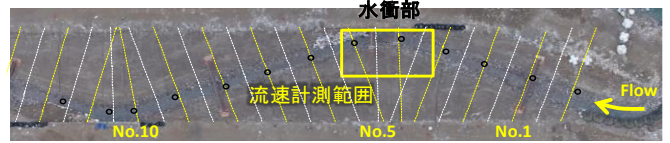


図-1 常願寺川現地実験水路水衝部

表-1 実験条件

	断面平均流速 [m/s]	水面幅 [m]	平均水深 [m]	フルード数	流量 [m ³ /s]
低水路	1.4	5.0	0.7	0.53	5.2
高水敷	0.8	15.0	0.2	0.57	2.4
全断面	1.1	20.0	0.3	0.64	7.6

流路全長: 170.0m, 縦断勾配: 1/200

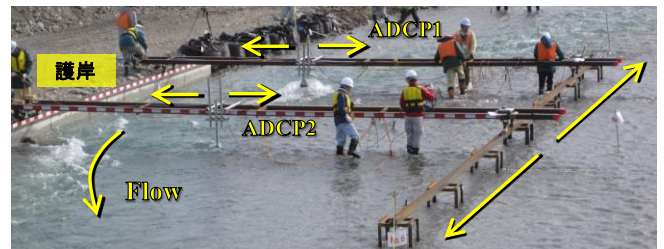


図-2 水衝部①流速計測風景

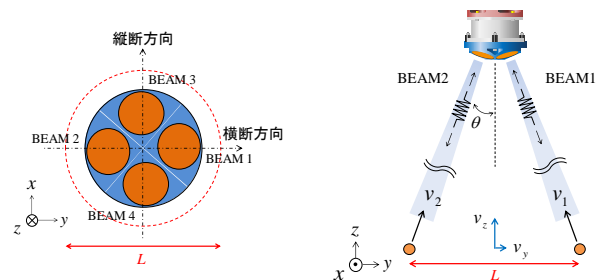


図-3 ADCP従来計測法の枠組み

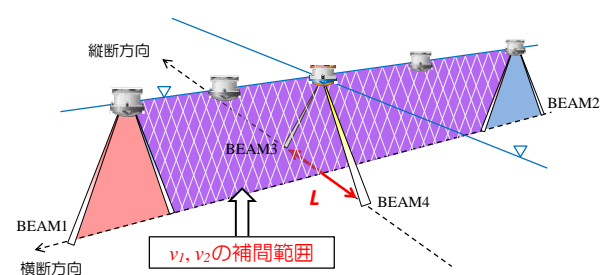


図-4 ADCP本計測法の枠組み

$$v_x = \frac{-v_3 + v_4}{2 \sin \theta}, v_y = \frac{-v_1 + v_2}{2 \sin \theta}, v_z = \left(\frac{v_1 + v_2}{2 \cos \theta} + \frac{v_3 + v_4}{2 \cos \theta} \right) / 2 \quad (1)$$

ここで、幅 L は水深に比例し、1.0m毎に約0.7mの広がりを持つため($\theta=20^\circ$)、局所的に流速が大きく変化する箇所や水深の深い箇所では誤差が大きくなる。そこで、本計測法では、図-4に示すように横断方向に連続的に計測されたビーム方向流速値 v_1, v_2 を個別に取得する。観測期間におい

て流れが定常であるとし、計測領域内においてそれぞれ空間的に補完した v_{1m} , v_{2m} を再び重ね合わせ、任意の点の流速 v (v_y, v_z) を式(2)より計算する。

$$v_y = \frac{-v_{1m} + v_{2m}}{2 \sin \theta}, \quad v_z = \frac{v_{1m} + v_{2m}}{2 \cos \theta} \quad (2)$$

また、縦断方向流速 v_x については、横断方向・鉛直方向に比べ変化が小さいことから、従来の方法を用いて式(1)、第一式で計算する。このように、独立した4本のビームを個別に取得し、時空間的に平均、補間し重ね合わせることで、水衝部の流れを精度よく計測出来、特に、河床付近において、4本のビームを平均する計測法と比較して精度が向上することが明らかとなっている。

(2) ADCP の流速計測ビームを用いる河床形状計測法

ADCP は流速計測用のビームの他に、河床形状計測用のボトムトラック (BT) ビームを有し、曳航観測では BT ビームから計測された ADCP の対地速度を利用し、流速計測値を補正する。BT モードの使用には、Intensity (振幅: dB), Correlation (相関: count) 値等の閾値を適切に設定する必要があるが、河床や水深、水質の条件によって変化するため、これらの閾値を予め設計することは困難である。そこで、本計測法では流速計測用のビームにより計測される各パラメータの鉛直分布を用いて、後処理により河床高を計測する方法を検討する。図-5, 6 に横断的に計測した Correlation 値, Intensity 値の BEAM1 計測結果をコンターで示す。同図にはトータルステーション (TS) により計測された河床形状を青の実線で示している。Intensity 値に比べて Correlation 値は河床高さ付近において明確な変化を示していることが分かる。また、Intensity 値は計測箇所や、計測断面によりばらつきが大きかった。このため本計測法では、Correlation 値の分布から河床形状を推定する。図-7 に Correlation 値が 210count の地点を河床面と定義した時の BEAM1, BEAM2 における河床形状の推定値と TS 河床形状計測値を示す。本実験では計測の測定層厚を 0.05m としたこと、河床表層の最大粒径が 0.1m 程度であることから、本計測法と実測では最大で 0.1m 程度の誤差が生じているが、実用上十分な精度で河床形状を推定できる。

4. 浅水流場の仮定を用いない底面流速解析法

底面流速解析法では、河床 z_0 からわずかに上の面 z_b を底面とし、水平方向渦度を水深積分することで底面流速 u_{bi} を式(3)で表わす。

$$u_{bi} = u_{si} - \varepsilon_{ij3} \Omega_j h - \left(\frac{\partial W h}{\partial x_i} - w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

ここに、 $i, j=1, 2$ (x, y 方向), u_{si} : 水表面流速, Ω_j : 水深平均渦度, W : 水深平均鉛直方向流速, w_s, w_b : 水面, 底面の鉛直方向流速である。流速鉛直分布は式(4)の三次多項式を用いる。

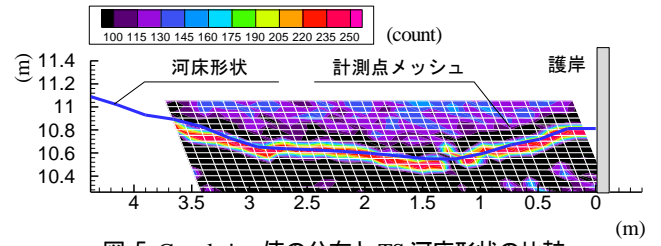


図-5 Correlation 値の分布と TS 河床形状の比較

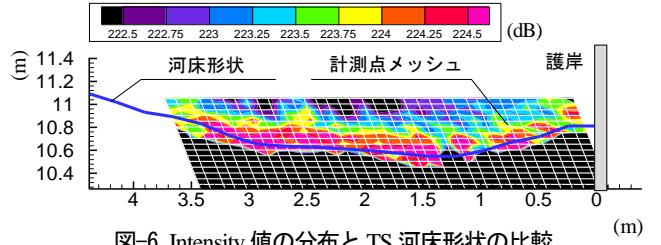


図-6 Intensity 値の分布と TS 河床形状の比較

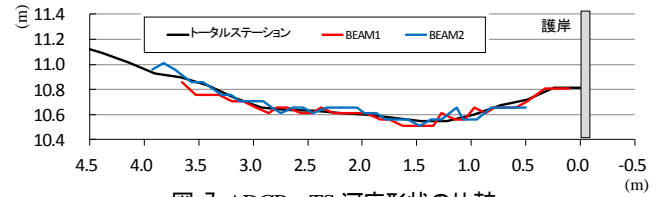


図-7 ADCP, TS 河床形状の比較

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

ここに、 U_i : 水深平均流速, $\Delta u_i = u_{si} - U_i$, $\delta u_i = u_{si} - u_{bi}$, $\eta = (z_s - z)/h$ である。ここで、対象とする流れ場の鉛直方向スケールが水平方向スケールに比べて十分小さいならば、式(3)の括弧付きの項を省略することができる (浅水流場の仮定¹⁾ と呼ぶ)。しかし、本研究で対象とする堤防護岸際の水衝部では、護岸前面で大きな下降流が生じ、水平方向スケールと鉛直方向スケールが同程度であり、括弧付きの水深積分鉛直方向流速に関する項を無視することができないことから、式(3)により底面流速を求めるため、連続式、水深積分運動方程式に加えて、水深積分渦度方程式(5)と水表面流速方程式(6)、水深積分鉛直方向流速方程式(7)を解く。

$$\frac{\partial \Omega_i h}{\partial t} = ER_{\sigma i} + P_{\omega i} + \frac{\partial h D_{\omega ij}}{\partial x_j} \quad (5)$$

ここに、 $ER_{\sigma i}$ は水面と底面に垂直な渦の回転, $D_{\omega ij}$ は水平方向の移流, 回転・伸縮, 分散, 乱流混合による渦度のフラックスである。分散項における渦度と流速の鉛直分布による二次の相関項については、仮定した流速鉛直分布を用いて水深積分することで求めている。渦度の鉛直分布は式(4)の一階微分としている。また、水深積分運動方程式の応力項においても同様に評価し、流速鉛直分布による水平方向の運動量輸送を考慮している。水表面流速方程式は、水面での運動学的境界条件、力学的境界条件を与えることにより式(6)で表わされる。

$$\frac{\partial u_{si}}{\partial t} + u_{sj} \frac{\partial u_{si}}{\partial x_j} = -(g - dp_{zs}) \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + P_{si} \quad (6)$$

ここに、 dp : 静水圧分布からの偏差成分であり、 dp_{zs} : 水面

における dp の鉛直勾配である。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り三次の流速鉛直分布式(4)を用いて与える。鉛直方向流速の積分値の時間変化量は式(7)から計算される。

$$k_1 \frac{\partial}{\partial x_j} \left(h^2 \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + \phi^p - \phi = 0 \quad (7)$$

ここに、 k_1 :係数(=1/20)、 $\phi=(Wh)^{n+1}-(Wh)^n$ 、 $\phi^p=(Wh)^p-(Wh)^n$ 、 $(Wh)^n$: δl_i^p を用いた流速鉛直分布から計算される Wh 、 δl_i^p : $(Wh)^n$ を用いて式(3)から計算される δl_i である。底面圧力に関する方程式は水深積分した鉛直方向運動方程式の非定常項とせん断応力に関する項を省略した式(8)から得られる。

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

本解析法では、圧力の非静水圧分布成分を直線分布で近似し、底面圧力と水深平均値が運動方程式に、水面における鉛直方向微分値を水表面流速方程式(6)に与える。また、これらの方程式は流速と圧力の鉛直分布を介して、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。

5. 常願寺川現地実験への適用

(1) 解析条件

境界条件には、水位を上下流に与える。低水路と高水敷の粗度分布は河床表層に存在する礫径の範囲内で、実測の水位縦断分布や流量、流速分布を説明するように、 $ks=0.2m$ (縦断距離:0~80m), $0.1m$ (縦断距離:80~120m), $0.25m$ (縦断距離:120~200m)を用いている。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、5.0m毎のTS測量結果に加えて、水衝部ではADCP本観測法を用い、詳細間隔で測られた河床形状の測定結果を利用する。

(2) 実測と解析の比較

図-8 に実測と解析の縦断水面形の比較を、図-9 に図-10 中の断面eにおける水深平均、水表面流速の縦断方向成分、左右岸水位の比較を示す。解析水位は120mより下流において実測を若干下回っているものの、水衝部①付近においては、左右岸の水位差を概ね説明出来ている(図-8, 図-9)。ただし、赤のプロットと実線で示す低水路水面形において、82m~110mの間で0.05m程解析値が高くなっている。この理由について以下に考察する。実測の水位は低水路と高水敷の境界付近において圧力式水位計により計測された。この付近は、図-10 に示す様に高水敷の流れが低水路に流入し、低水路と高水敷の間で複雑な運動量の交換が生じる箇所であり、図-9 の解析水位、水深平均流速の横断分布に示す様に、流速分布が局所的に変化するため、横断方向に大きな水面勾配を有する。解析では、水深平均流速、水表面流速の分布を概ね説明出来ているものの、後述するように主流

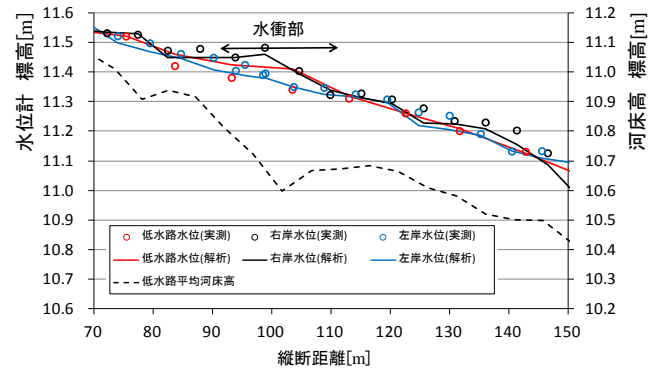


図-8 縦断水面形の比較

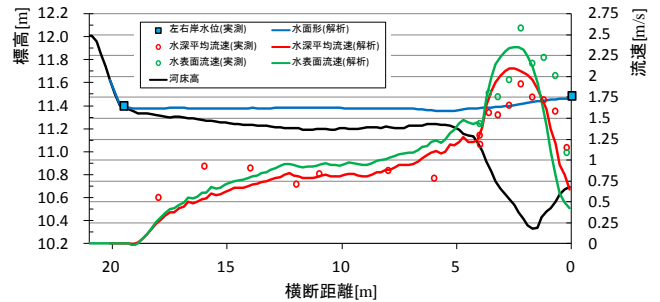
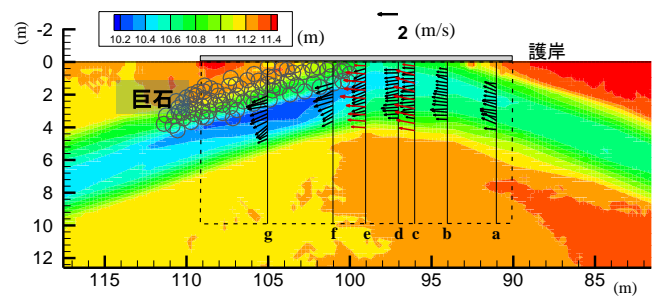
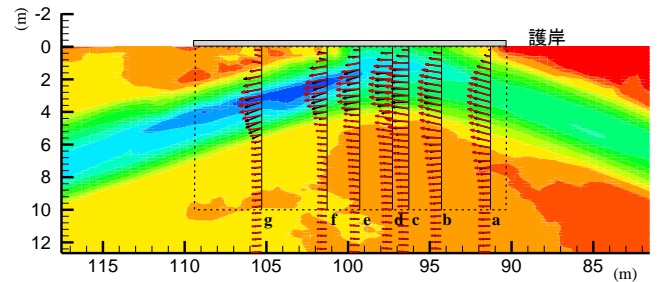


図-9 水表面・水深平均流速、左右岸水位(断面e)



(a) 実測結果



(b) 解析結果

図-10 水表面(赤)・底面(黒)流速

線が十分に右岸の護岸付近まで寄っていない。このため、低水路と高水敷の境界付近において水位が低下する箇所が実現と異なり、低水路の縦断水面形(図-8, 赤)に誤差が生じたものと考えられる。しかし、本解析では低水路内岸と外岸の水位差は0.05m程度(図-9, 0m~5m)であり、実測の水位差も同程度であること(図-8, 82m~110m)から、解析の水面形は概ね実測の傾向を再現していると考えられる。図-10 に底面流速ベクトルを黒実線の矢印、水表面流速ベクトルを赤実線の矢印で示す。実測値の底面流速は水深の70%の深さの流速とし、水表面流速は水面から0.15mの高さの電磁流速計の計測値をそれぞれ示している。解析値は本解析法により解かれる水表面、底面流速である。図-11

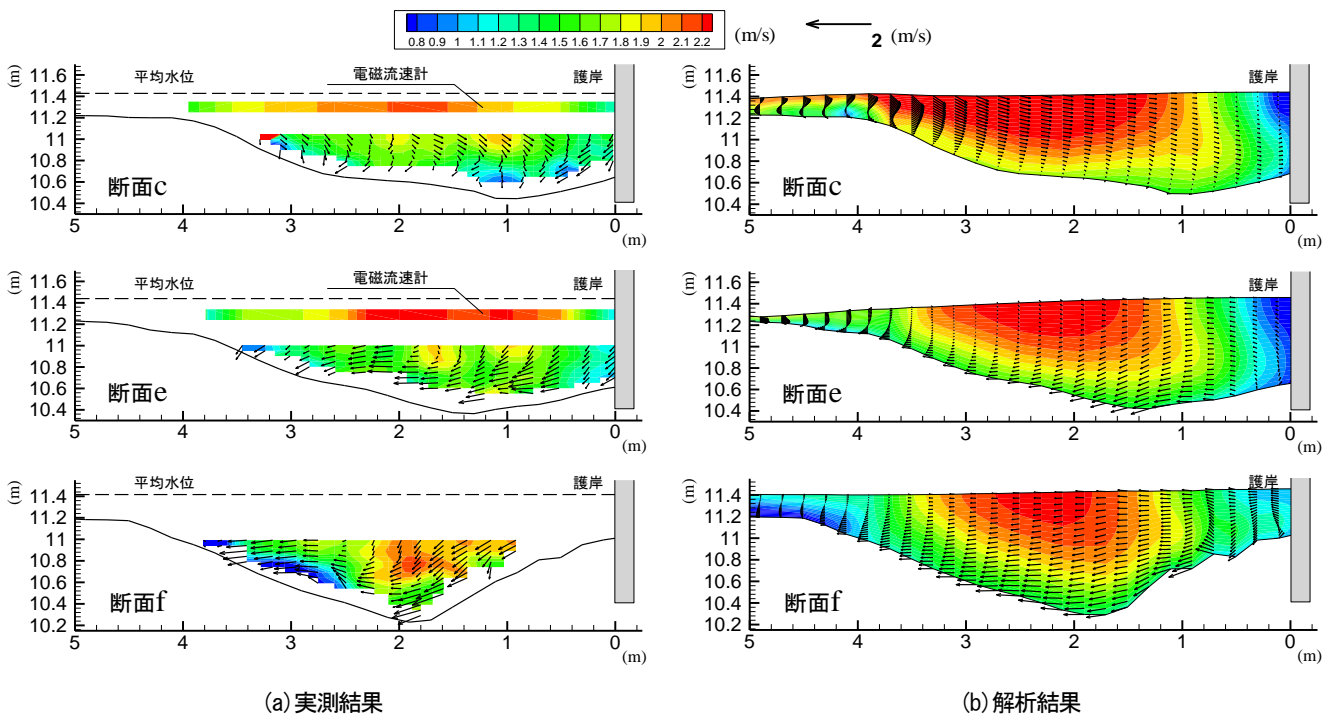


図-11 主流速コンター、二次流ベクトルの比較

に断面 c,e,f における流速鉛直分布をコンターで主流(v_x)、ベクトルで二次流(v_y, v_z)を示す。断面 c,e では電磁流速計の計測値から水面付近の主流速コンターを合わせて示している。実測では、断面 c~f 付近において、右岸の護岸付近で生じる下降流に伴う二次流が発達している様子が分かる(図-10, 図-11)。また、二次流により主流速の運動量が低水路内岸の水面付近から右岸へ運ばれ、断面 f では底面付近においても高流速域が発生している(図-11, 断面 f)。解析結果は二次流が実測に比べ小さく、断面 f における底面付近の速い主流速も再現出来ていない。この点について以下に考察する。本実験は図-11, 断面 c,e から分かる様に、主流速が水面付近で急激に大きくなっている。この接近流速の主流がもつ非常に大きな横断方向渦度が、護岸に衝突し流れが変わることによって、流下方向渦度へ変換され、強い二次流とそれによる外岸方向への運動量輸送を生じる複雑な流れ場となる。解析では、図-9~11 から分かるように、主流速の鉛直分布における水面付近の局所的な変化を説明出来ていないため、接近流速の持つ渦度が小さく、二次流や運動量の輸送が過小評価されている。この理由は、低水路や高水敷の河床抵抗分布や断面 No.0 (図-1) 上流の流入部における河床形状や粗度の評価が不十分であることが考えられ、今後の課題である。しかし、複雑な水路形状を有する本実験において、本解析法は二次流と運動量輸送の特性を概ね再現出来ていると考える。特に、流下方向に時計回りの二次流が生じる断面 e,f において、実測では 3~4m 付近において下降流が発生しているが、解析では絶対値が小さいものの、この点を再現出来ている。この下降流の発生原因は、

解析結果から、左岸の高水敷から低水路へ向かう流れと、右岸の護岸付近でもぐり込み低水路内岸へと向かう流れがぶつかるためと考えられる。このように、上下流の広い範囲で観測された水位や河床形状に加え、本観測法より計測された水衝部周辺の詳細な流速分布と地形データを利用し、流れ場全体を説明するように本解析法を適用することは、計測結果を補完し、水衝部流れの現象理解に有効であると言える。

6. 結論

本研究では、ADCP の流速計測ビームを用いた三次元流れと河床形状の観測法を開発し、浅水流場の仮定を用いない底面流速解析法を 2011 年常願寺川現地実験へ適用し堤防護岸際の局所流れへの適用性を検証した。その結果以下の結論を得た。

1. ADCP の 4 つの流速計測ビームを個別に用いて流れと河床形状を計測する本観測法は、構造物周辺の複雑な流れと河床形状の観測に有効である。
2. 本解析法は堤防護岸際局所流れにおける二次流と運動量交換の特徴を定量的に説明出来る。
3. 既存の水位縦断観測や横断測量結果に加えて、本観測法と本解析法を用い、これらを統合的に利用することで、構造物周辺における洗掘問題の現象解明と技術的な対策工法確立のための有効な知見を得ることができる。

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.