河川技術論文集, 第18巻, 2012年6月

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

A NEW METHOD FOR MEASURING LOCAL FLOWS AROUND RIVER BANK USING ADCP

輿石大[1]・内田龍彦[2]・長谷川賢市[3]・内藤ゆう子[4]・福岡捷二[5]
Masaru KOSHIISHI, Tatsuhiko UCHIDA, Kenichi HASEGAWA, Yuko NAITO and Shoji FUKUOKA

[1]学生会員　中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 博士課程前期課程
（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）
[2]正会員　博(工)　中央大学研究開発機構（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）
[3]正会員　国土交通省北陸地方整備局 富山河川国道事務所（現在 北陸地方整備局 河川管理課）
[4]正会員　国土交通省関東地方整備局 京浜河川事務所（現在 関東地方整備局 河川計画課）
[5]フェロー　工博 Ph.D.　中央大学研究開発機構（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

The revetment works are made to protect against bank erosion. However, it also causes bed scouring along revetments. One of the authors has developed a natural bank protection works with large stones based on field experiments in the Jyoganji river. But it is difficult to measure detailed velocity distributions, and hence to know actual conditions of local flows attacking on revetments, anemometers which measure a single point like an electromagnetic current meter require a lot of works for getting entire velocity distributions. And it is difficult to measure velocity at deep water depth due to hydrodynamic forces by currents. Therefore, we develop a new method for measuring the local flow applying acoustic Doppler current profiler (ADCP) which can obtain vertical velocity distributions at the flow above the water surface. In this paper, reliability of this method is evaluated for local flow fields attacking on revetments in the Jyoganji river filed experiment.

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

１．序論

コンクリート護岸は河岸を直接防護する一方で，最大洗堀深の増大や下流部に新たな水衝部を形成する等の問題が報告されている[1)]．常願寺川では，この問題を解決するために，巨石付き盛土砂州による河岸際に流れを集中させない河岸防護工法について，現地試験施工や現地実験による検討が精力的に行われている[2)]．技術的に信頼できる洗掘対策工法を確立するためには，構造物周辺の局所流場を明らかにするとともにそれを再現出来る解析法を構築することが重要である．内田・福岡[3)]は水深積分した渦度方程式を用いることで平面二次元解析の枠組みにおいて流れの三次元性を取り込むことのできる解析モデル(底面流速解析法)を提案している．しかし，現地スケールの詳細な流速分布は計測することが困難であり，護岸近傍の激しい局所流場への適用性は明らかでない．電磁流速計等の点計測タイプの流速計では水深方向に多点計測する労力が大きいことに加え，水衝部の激しい流れ場では支持鋼が大きな流体力を受けるため，計測自体が困難となる．近年，水深方向の流速分布を水面付近から計測できる線計測タイプの超音波ドップラー式多層流向流速計(ADCP)[4)]を利用した，洪水流の流速分布の把握や河川流量観測への適用が行われている[例えば, 5)]．ADCPは水面付近から流速鉛直分布を計測するため，実河川洪水流の計測への適用性が比較的高い．しかし，異なる4つの方向へと発射されるビームを用いて鉛直方向の流速分布を計測するため，断面形が急変する河岸付近において計測誤差が大きくなることが報告されている[5),6)]．Detertら[7)]は縦断方向に断面形の変化が無い実験水路において1D-ADCPを用いて1本のビーム方向流速値から主流速の鉛直分布を精度良く計測できることを示している．このことから，ADCPの流速計測において，異なる地点で測られた4つのビーム方向流速値を同時に用い

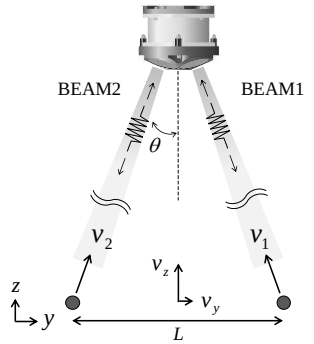

図-1　ADCP流速計測法の枠組み

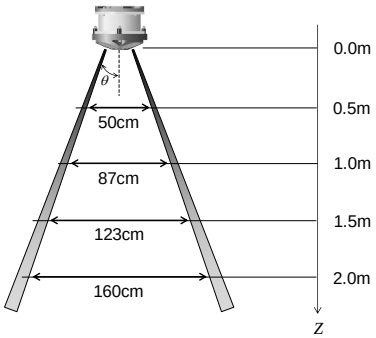

図-2　ADCPビームの広がり

ることにより生じる空間的な誤差が，ADCPの計測精度を低減させていると考えられる．特に，堤防護岸沿いの洗掘部では河床形状や流速分布が局所的に大きく変化するため，この誤差は大きくなる．

本研究では流速，水面形の計測と流れの解析を組み合わせた局所流場を明らかにする手法を構築するために，水衝部における局所流の流速分布計測法を開発し，浅川現地観測により検証する．そして，2011年常願寺川現地実験へ適用し，堤防護岸沿いに発生した水衝部における局所流の構造を把握するとともに，現地スケールの局所流場における底面流速解析法の適用性を検証する．

２．ADCPを用いた局所流計測法

ADCPは4つのトランスデューサーから超音波を発射し，水中の散乱体(微生物，懸濁物質)が反射した超音波のドップラーシフトを利用して3次元流速鉛直分布を測る多層流向流速計である[4]．図-1にADCP流速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)．通常のADCP流速計測では，流速値$v(v_y, v_z)$は，θ=20°で発射される各ビーム方向の流速値v_1, v_2を用いて，区間Lにおいて流速を一定と仮定することで式(1)から計算される．

$$v_y = \frac{-v_1 + v_2}{2\sin\theta},\quad v_z = \frac{v_1 + v_2}{2\cos\theta} \tag{1}$$

また，ADCPは内部に液面センサーを持ち，ADCPの傾きを計測し，補正している．ここで，区間Lは水深に比例し，1.0m毎に約0.7mの広がりを持つため（図-2:θ=20°），局所的に流速が大きく変化する箇所や水深

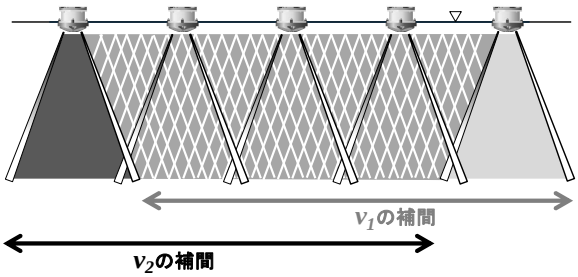

図-3　v_1,v_2の補間

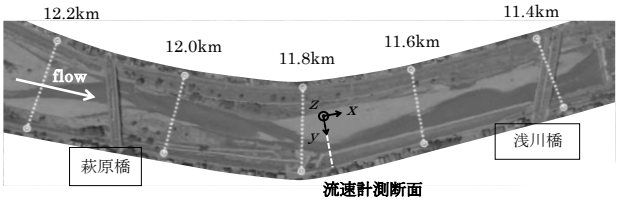

図-4　調査地点 浅川11.75km右岸水衝部

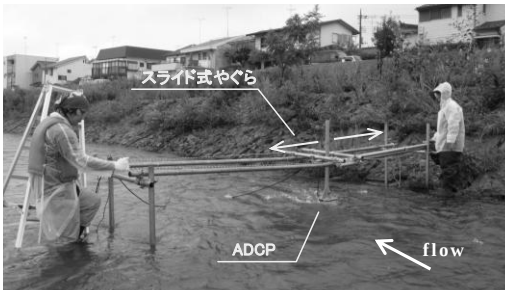

図-5　計測風景

の深い箇所では流速一定の仮定が問題となる．そこで，本計測法では，図-3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を個別に取得し，計測領域内においてそれぞれ空間的に補完し，再び重ね合わせることで任意の点の流速$v(v_y,v_z)$を計算する．即ち，連続計測されたビーム方向流速値v_1,v_2は異なる時刻において計測されるが，平均流速は時間的に変化しないとしている．一般に洪水流の時間変化は緩やかであり，観測期間において流れ場は大きく変化しないことから，この仮定は洪水時の計測においても大きな問題とならないと考えられる．周期的な流速変動が生じている箇所では，1地点の計測時間を長くするか横断方向の測点数を細かく設定し，計測データを時空間的に平均する必要がある．なお，縦断方向流速v_xについては，横断方向・鉛直方向流速に比べ，ビームの広がる区間Lにおける流速変化が小さいとし，通常の流速一定の仮定を用いて計算する．また，河床，壁面近傍において4本のビームの内1本のデータが取得できない場合，残り3本のビームデータから流速が計算できる[4]．通常の計測法では，4方向へ広がるビームからエラーを含まない3ビームを用いて，ビームの広がる範囲で流速を一定として三次元流速を計算する．本計測法は縦断方向へは流速一定の仮定を用いるものの，v_1,v_2を補間して求めるため，縦横断方向に流速一定の仮定を用いる通常計測法に比べ，精度の向上が期待できる．

３．浅川現地水衝部への適用と本計測法の検証

(1) 浅川現地調査概要

調査地点は**図-4**に示す浅川11.75km右岸水衝部である．この箇所では堤防線形・低水路線形ともに曲率を持ち，右岸に水衝部が形成されており，下流の浅川橋付近まで低水路護岸が敷設されている(**図-5**)．調査時の水理条件は平均水深0.55m，水面幅9.13m，平均流速0.37m/s，流量1.86m^3/sである．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-6**にADCP計測範囲・電磁流速計計測点を示す．黒枠線で囲むADCP計測範囲では，この区間にレールを設置し，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10.0sで計測した(**図-5**)．**図-6**の黒十字のプロットは電磁流速計の計測点を示し，横断方向0.5m，鉛直方向0.15m毎にサンプリング時間30.0sで計測している．

(2) 本計測法と通常計測法による計測結果の比較

図-7にADCP本計測法・通常計測法と電磁流速計の縦断方向流速コンターと二次流ベクトルを示す．電磁流速計は2軸タイプを用いたため，二次流はy方向流速のみを示す．また，ADCPは機器の特性より水面と河床付近に計測不能領域が存在するため[4]，これらを除いた範囲を示す．いずれのADCP計測法も主流速分布を比較すると，右岸の護岸際で生じる高流速域等，電磁流速計と同程度の結果となっている．一方，二次流分布を比較すると，ADCP通常計測法の結果は電磁流速計の結果と異なっている．これに対し，本計測法は電磁流速計の計測結果や，一般的な湾曲二次流場の流速分布[8]との比較から概ね妥当な結果と考えられる．本計測法では，電磁流速計と比べて局所的に流速が変化しており，複雑な流速分布となっている．これは，本計測法では電磁流速計に比べ空間解像度を細かく計測（横断方向(0.1m間隔)・水深方向(0.1m間隔)）しているためである．ただし，本計測法はサンプリング時間(10.0s)が短いため，この影響が流速分布に含まれていることも考えられ，適切な計測方法についてはさらに検討する必要がある．**図-8**に**図-6**中(a),(b),(c)における縦断方向流速v_x，横断方向流速v_yの鉛直分布の電磁流速計，ADCP本計測法・通常計測法の比較を示す．縦断方向流速分布(v_x :**図-8上段**)については，本計測法・通常計測法共に電磁流速計と同程度の結果だが，3本のビームから流速が計算される範囲に対応する河床近傍において本計測法は計測精度が通常計測法と比較して若干向上する．また，横断方向流速分布(v_y :**図-8下段**)は，主流方向と比較して2つのADCP計測法の差が大きい．特に河床付近において本計測法は精度が向上している．これらは，ADCPの異なる観測点のビームを採用し，空間的に補間することで解像度が上がったためである．水衝部等の局所的な二次流が生じる箇所では，横断方向流速v_y，鉛直方向流速v_zが局所的に大きく変化するため，これらをどこまで解像できるかが重要となる．本調査は新しいADCP計測法を検証するために比較的単純な断面において平水時に行われた．一般に，我が国に

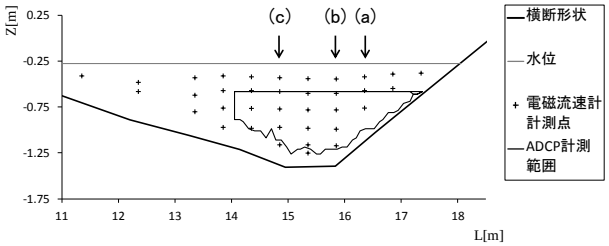

図-6　ADCP, 電磁流速計測定箇所

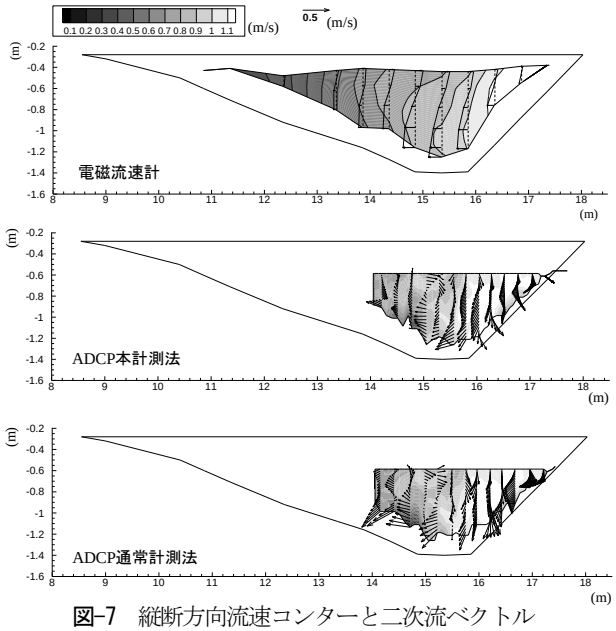

図-7　縦断方向流速コンターと二次流ベクトル

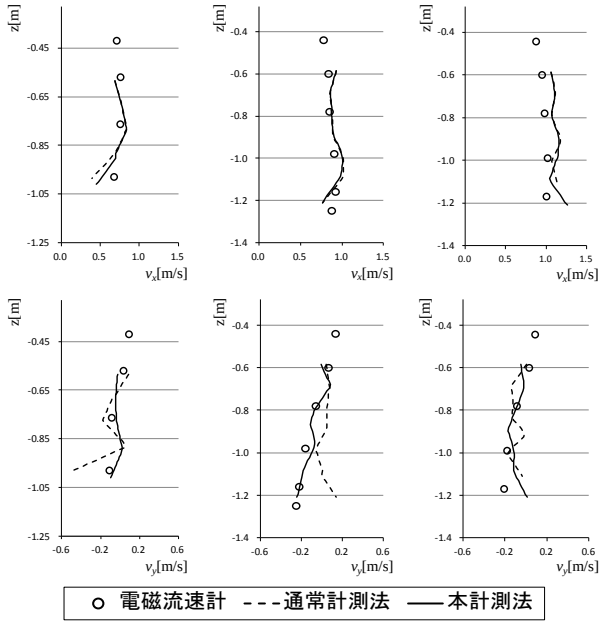

図-8　縦断方向流速v_x, 横断方向流速v_yの比較
（上段:v_x,　下段:v_y）

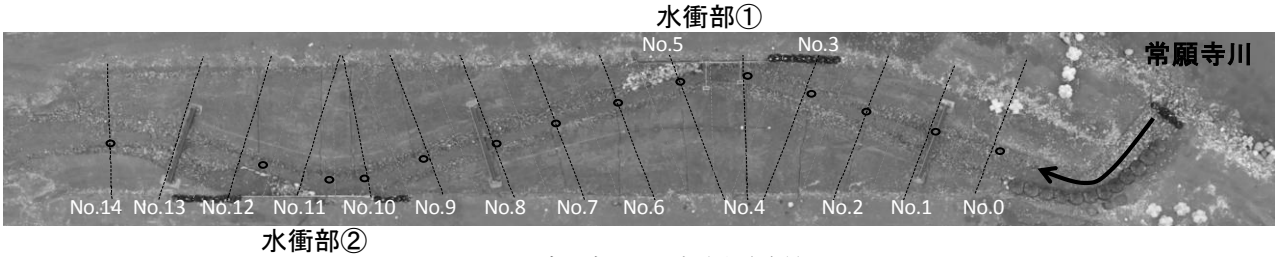

図-9　常願寺川現地実験水路全景

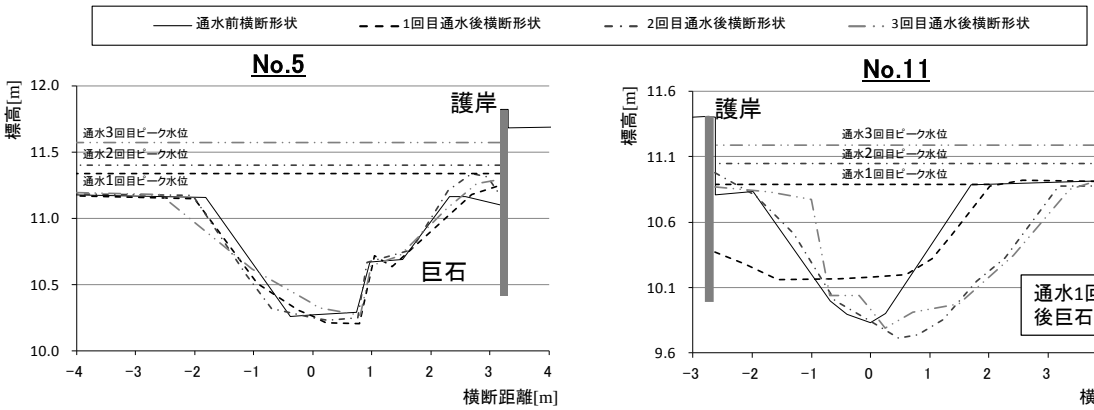

図-10　通水による水衝部①No.5の横断形状の変化

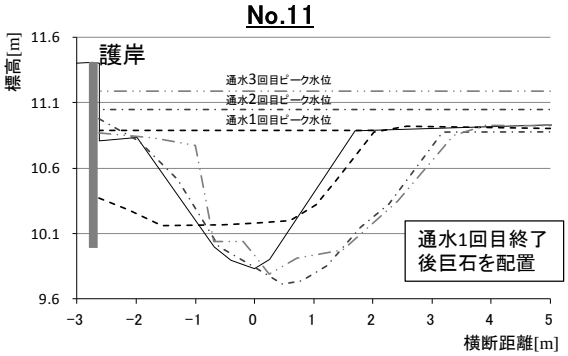

図-11　通水による水衝部②No.11の横断形状の変化

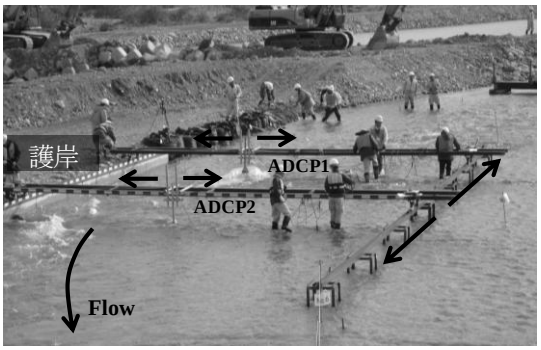

図-12　水衝部①通水2回目流速計測風景

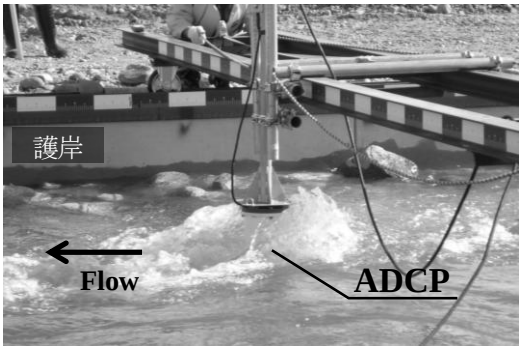

図-13　水衝部①通水2回目ADCP近景

多くみられる複断面水路等では，洗掘が問題となる堤防・低水路護岸付近において河床形状や地被状況が複雑に変化するため，より複雑な流速分布を有する．また，洪水時には水深が深くなりビームの広がり幅も大きくなるため本計測法は有効と考えられる．

４．常願寺川現地実験への適用

(1) 常願寺川現地実験概要

2011年常願寺川現地実験は堤防護岸際の浸食・洗掘機構の解明と洗掘解析法の検討を目的として行われた[9]．**図-9**に水路全景図を示す．実験水路は流路全長170.0m，堤間幅20.0m，縦断勾配1/200の中に幅4.0m，深さ1.0mの低水路を有する複断面蛇行水路である．コンクリート製の垂直護岸(**図-12, 13**参照，以下護岸)を上流の水衝部①，下流の水衝部②に設け，約7.0m^3/s，7.6m^3/s，13.7m^3/sの全3回の通水を行った．**図-10**，**11**に水衝部①，②における各通水時のピーク水位，通水終了後の横断形状を示す．水衝部①には護岸前面に予め巨石を有する盛土砂州を用いた河岸防護工を配置し，**図-10**に示すように，通水2回目以降に河床変動がほとんど生じない条件で水衝部の局所流計測を実施した．水衝部②では通水1回目は巨石を持たない砂州を配置し，砂州の流失と護岸際の洗掘の発達特性を調べ，大きな河岸浸食が生じることが分かった(**図-11**)[9]．このことから，流速計測を行う水衝部①は，大きな洗掘，浸食力を有する局所流場であると言える．また，水衝部②では，通水1回目終了後に砂州を復元し，巨石を有する砂州を用いた河岸防護工を配置し，通水2回目，3回目において効果を検討した(**図-11**)[9]．**図-12, 13**に水衝部①の流速計測風景を示す．可動式のレールを設置し，**図-14**に示すa～g 断面においてADCPを用いて縦横断的に流速分布を計測した．また，**図-13, 15～21**からも分かるように，浅川の場合と比べて流速が大きく激しい流れであり，ADCPの喫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，断面c,e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．ADCP，電磁流速計には浅川現地

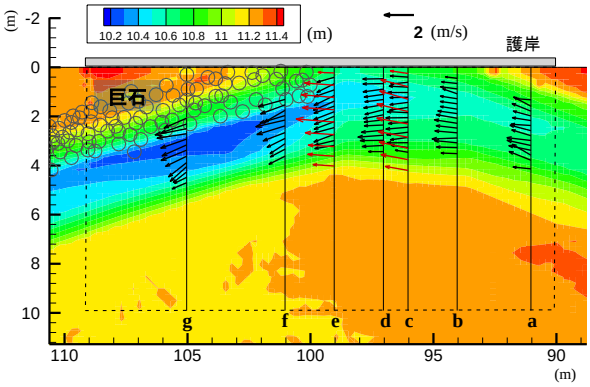

図-14　水衝部①通水2回目水面(赤)・底面(黒)流速

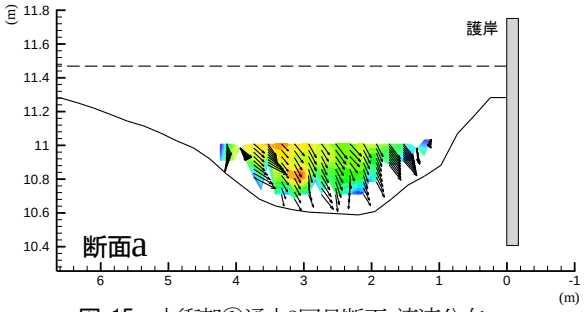

図-15　水衝部①通水2回目断面a流速分布

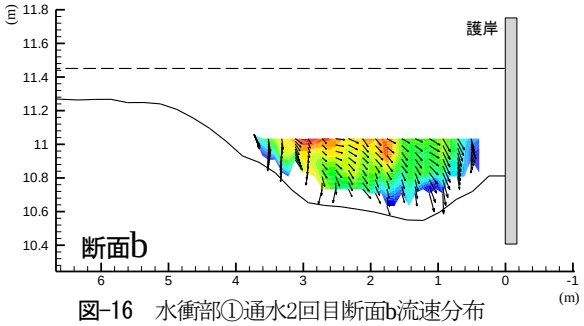

図-16　水衝部①通水2回目断面b流速分布

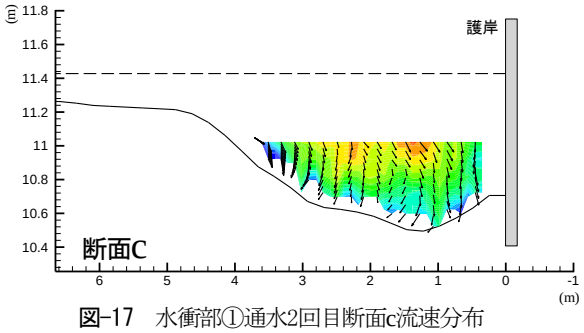

図-17　水衝部①通水2回目断面c流速分布

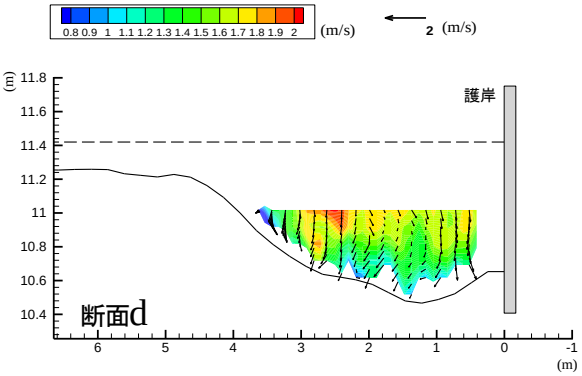

図-18　水衝部①通水2回目断面d流速分布

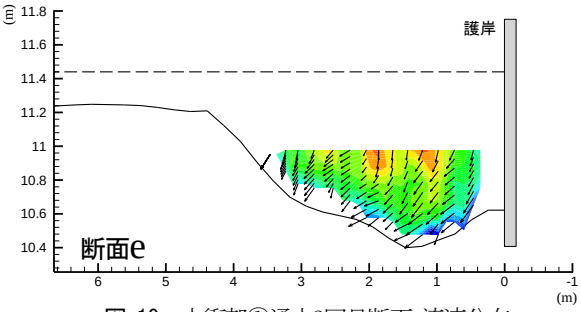

図-19　水衝部①通水2回目断面e流速分布

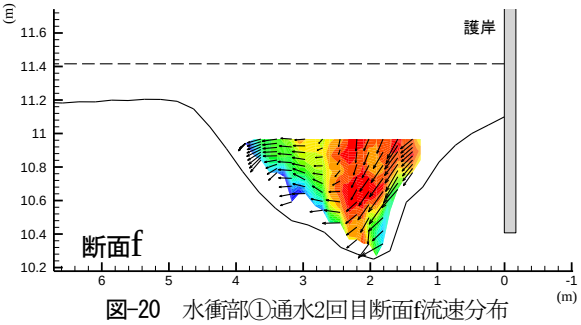

図-20　水衝部①通水2回目断面f流速分布

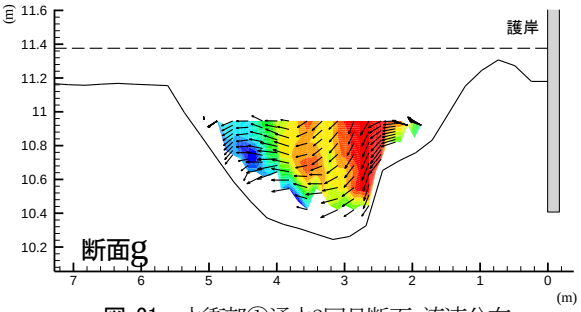

図-21　水衝部①通水2回目断面g流速分布

調査と同様の機種を用いた．

(2) 水衝部①流速計測結果

図-14にADCP本計測法による計測結果より，底面流速ベクトルを黒実線の矢印，電磁流速計計測結果より水面流速ベクトルを赤実線の矢印で示す．底面流速は水深の70%の深さの流速とし，水面流速は水面から0.15mの高さの電磁流速計の計測値を示している．断面a～dにかけて，低水路内岸の底面流速が大きくなっている．通水前に掘削した法勾配1:1.5の断面形状は，内岸が削られ，例えば断面b(図-16)ではおよそ1:2の緩やかな形状となっている．断面c,eにおいて流速は水面付近では右岸側へ向かっているが，底面付近では内岸へ向かっており，二次流が発生していることが分かる．図-15～図-21にADCP本計測法によ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．河床形状は2回目通水後に5m間隔で測量されたデータをADCPの計測結果を考慮し，補間して作成したものを用いている．主流速分布では断面a～bにかけて，低水路内岸側に主流が発生している．主流は断面c～eにかけて徐々に右岸へと遷移し，断面f, gでは外岸の右岸際で生じ，底面付近においても大きな流速となっている．これは，右岸の護

岸沿いに生じる二次流が，主流速の運動量を左岸水面付近から右岸底面付近へと運んだためと考えられる．水衝部①では，巨石の大きな抵抗による水はね効果，根石による河床形状の安定により砂州が守られ，洗掘を防ぎ，断面形が維持されている（**図-10**）．しかし，巨石を配置していない水衝部②では，二次流によって抵抗の小さなコンクリート護岸近傍に運動量が輸送されるため護岸沿いに流れが集中し，土砂を輸送する底面流速は加速される．この結果，護岸際の局所洗掘，砂州の浸食が生じ，さらに流れを集中させるため，**図-11**に示すように1回目通水後に水衝部の下流砂州が大きく浸食を受けている．

現地スケールの局所流場の解析手法を検討する．上述してきたように，水衝部付近では強い下降流を伴う二次流が発生しており，圧力の静水圧分布等の仮定を用いた解析法は適切でないと考えられる．内田・福岡[3)]は静水圧分布等の浅い流れの仮定を用いずに水深積分モデルにより流れの三次元性を解析する底面流速解析法を開発した．この解析法は実験室スケールにおいて橋脚前面の局所流を計算できることが示された．ここでは，現地スケールの激しい水衝部における本解析法の適用性を検証する．**図-22**に実測と解析の縦断水面形を示す．解析値は実測値を概ね捉えている．**図-23**に水深平均主流速の横断分布の実測と解析の比較を示す．実測結果の水深平均流速はADCPと電磁流速計の計測結果を合わせて求めている．解析は全体の傾向は概ね一致している．また，解析流量7.5m^3/sに対し，実測流量7.6m^3/sであり，流速分布・水面形の計測結果と解析結果は全体的には整合性が取れていると考えられる．しかし，左岸堤防付近の高水敷流速が実測に比してやや小さく，低水路内岸の流速がやや大きくなっているなど局所的な水深平均流速場については特徴が未だ捉えられていない．今後は，これらの点について検討し，本実験で得られた詳細な流速分布と解析モデルを用いて，実スケールの局所流場について詳細に検討する．

５．結論

本研究ではADCPを用いた河川水衝部における局所流の流速分布計測法を開発し，浅川現地水衝部に適用し，検証した．また，2011年常願寺川現地実験に適用し，堤防護岸沿いに発生した水衝部における局所流の構造を計測した．その結果以下の結論を得た．

従来のADCP流速計測法では，流速が局所的に大きく変化する箇所や，水深の大きな箇所において，ADCPのビームの広がりに伴う計測誤差が大きくなる．

本計測法では，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ることを示した．

最大流速2.5m/s程度の激しい流れである2011年常願寺川現地実験において，本計測法は堤防護岸際に生じる局所流場の詳細な計測に成功し，実スケールの水衝部の3次元流れ構造を示した．

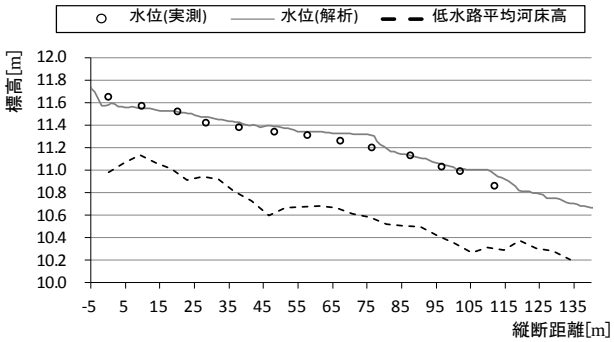

図-22　水衝部①通水2回目縦断水面形の実測と解析の比較

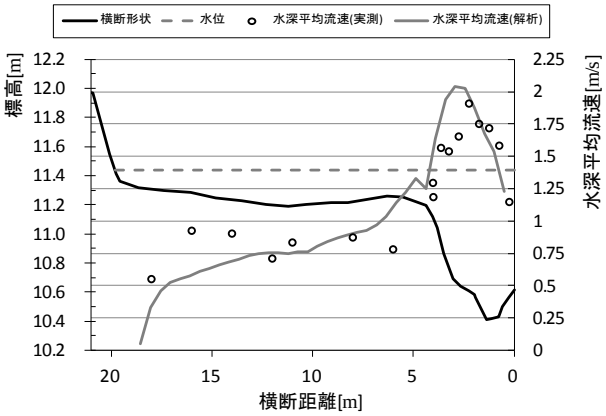

図-23　水衝部①通水2回目縦断方向水深平均流速の実測と解析の比較

参考文献

1) 長田健吾，安部友則，福岡捷二：急流河川における低水路護岸沿いの深掘れ流路形成とその特性，河川技術論文集，第13巻，pp.321-326，2007.
2) 藤本昌利，大熊義史，畠中泰彦，福岡捷二：急流河川における高水敷上の自然段差を利用した堤防浸食対策工法の検討，河川技術論文集，第16巻，pp.413-418，2010.
3) 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.
4) Teledyne RD Instruments : Acoustic Doppler Current Profiler Principles of Operation A Practical Primer, December, 2006.
5) 二瓶泰雄，色川有，井出恭平，高村智之：超音波ドップラー流速分布計を用いた河川流量計測法に関する検討，土木学会論文集B，vol.64，No.2，pp.99-114，2008.
6) Gunawan, B., Sterling, M., Tang, X., Knight, D. W. : Measuring and modelling flow structures in a small river, *River Flow*, pp.179-186, 2010.
7) Detert, M., Klar, M., Wenka, T., Jirka, G. H. : Pressure- and velocity-measurements above and within a porous gravel bed at the threshold of stability, Gravel-Bed Rivers VI, pp.85-107, 2008.
8) 福岡捷二：洪水流の水理と河道の設計法，森北出版，2005.
9) 小池田真介，石井陽，岩井久，石川俊之，福岡捷二：水衝部対策を施工した砂州による自然性の高い河岸防護工の創出，河川技術論文集，第18巻，2012.

（2012. 4. 5受付）