

戦-31 無人自動流量観測技術と精度確保に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 23

担当チーム：水災害研究グループ（水文）

研究担当者：深見和彦，菅野裕也，萬矢敦啓

【要旨】

非接触型流速計（電波式流速計）を活用して連続的な河川流量を計測する無人自動流量観測システムを構築する技術を確認することを目的として、電波式流速計による表面流速値および実測の水面勾配から電波式流速計の区分断面内平均流速に変換する流速補正係数を算出するための理論モデルを提案した。また、そのモデルを現地の電波式流速計システムに適用し、Acoustic Doppler Current Profiler（ADCP）による流量観測データとの比較検証を行った。その結果、電波式流速計は実用に資する精度を確保していることを確認したものの、上記モデルにより水面勾配を用いて算出した流速補正係数は ADCP 計測結果から算出されるものと必ずしも一致せず、水面勾配の計測方法等に課題があることを指摘した。

キーワード：自動流量観測，非接触型流速計，ADCP 計測，流速補正係数

1. はじめに

河川計画・管理の基礎となる流量データについて、情報公開等の新たなニーズに対応しつつ、省コスト・省人型で安定した精度を確保できる観測手法を確立することが求められている。近年では流水の流速を無人で連続的に計測する新世代の計測技術が利用可能となってきており、例えば表面流速分布を計測する技術として、ビデオ画像を用いたもの¹⁾、超音波技術を用いたもの²⁾³⁾⁴⁾、Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler (H-ADCP)を用いたもの⁵⁾⁶⁾が紹介されてきている。これらの新しい計測技術の特性・限界を把握した上で有効に活用し、省コスト・省人型の観測手法を開発するとともに、既存の流量観測技術も含めた流量観測データの信頼性を確保することが必要である。このような背景の基に、土木研究所を中心とした研究グループは複数の設置型表面流速計を比較検討して電波型及び超音波型の非接触流速計が、流量観測目的として実用に資する技術であることを確認した⁷⁾⁸⁾。しかしながら、無人・自動計測技術を目指す視点から見ると、河床変動により河積の変化、更正係数の流量規模に応じた変化があった場合の影響や流速計データ欠測の影響等を考慮していない点に不確定要素が残っている。一方 Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)は洪水流水中の 3 次元流速分布、断面積の計測が可能な計測器であるが、ADCPが小型化したこと、木下らによる無人ボートの開発等の業績⁹⁾を経て、洪水中的の実現象を正しく捉えることも可能になってきて

いる。ADCPによる観測結果の知見を適切に取り入れることができれば非接触型流速計による自動かつ連続的に流量観測を行うシステム開発への展望が開かれることになる。

本研究は、設置型流速計（ここでは非接触型電波式流速計）を用いた代表流速の計測、鉛直方向流速分布を考慮するための流速補正係数の算出、洪水中的の変動する河積の算出の計 3 つの項目を自動計測することで流量観測システムを構築する技術を確認することが目標である。

今年度はX川Y観測所において、ADCPを用いた流量観測による基準流量の測定、電波式流速計を用いた表面流速の自動計測、複数の水位計を用いた水面勾配から算定する流速補正係数の算定、ADCPを用いた河床高計測に関する結果を報告すると共に、そこから出てきた流量自動観測の可能性と今後への課題を整理する。

2. 自動流量計測システム

2.1 表面流速の計測と観測サイト

表面流速の計測は、ドップラー効果を利用して、電磁波で水面流速の計測を行う。電波式流速計の計測サイトは日本国内でも数カ所設けられていて、既に計測が実施されている。多くの場合、150～800m程度の河道幅に5～10台のセンサーが設置されている。本研究では、X川Y観測所に設置されている流速計を用いる。ここには600mの川幅に電波式流速計のセンサーが10台設置されている。同観測測線は、複断面水路であり、300mの高

水敷と 300mの低水路で構成されている。10 台のうち 7 台のセンサーは低水路に設置され、自動で流速を観測している。どのセンサーも計測範囲は 0.5~20 m/s, 角度 45 度で下向きに設置されている。詳細は深見ら (2008)⁹⁾を参照されたい。また水面勾配を算出するために観測に用いる橋直上流, 上流, 下流, その左右岸に約 500m間隔で合計 6 台のダイバーズ式水位計を設置した。

2. 2 代表流速値の計測を前提とした流速補正係数モデル

従来の浮子観測, 電波式流速計, 画像解析, H-ADCP などの流速計は河道の流れの一部を計測する部分計測にすぎないため, 部分計測結果を流量に換算するためには区分断面内において鉛直方向流速を何らかの方法で算定して, 計測された流速値を平均流速に変換する必要がある。一方電波式流速計, 画像解析等の流速計は表面流速を計測しているが, H-ADCP は水位に応じて水深方向の計測位置が異なるため, あらゆる計測手法に応じた変換係数を用意しておくことが望ましい。浮子流量観測ではこの係数を更正係数としているが, 本報告で説明する係数はより一般的なものとして区別するため流速補正係数と呼ぶ事にする。ここでは鉛直方向流速分布を対数分布則に従うと仮定して, 部分計測値, 水面勾配から流速補正係数を算出する方法を説明する。ここでは完全粗面に適用される対数分布則から始める。

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{k_s} \right) + A_r \quad (1)$$

ここで, $u(z)$ は水深 z における流速, u_* は摩擦速度, k ($=0.4$) はカルマン定数, k_s 相当粗度高さ, A_r ($=8.5$) は普遍定数である。 A_r 及び k_s に関しては平面の実験水路では議論されているものの, あらゆる河床波が存在する実河川での適用に関しては若干の疑問点が残る。ここではある水深 βh において計測された流速 $U_{\beta h}$ (β は 0~1 の数字をとり, $\beta=1$ のとき表面流速を意味する) を真値であると仮定して式(1)を以下のように展開する。

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{\beta h} \right) + \frac{U_{\beta h}}{u_*} \quad (2)$$

ここで着目すべき点は, 式(2)はカルマン定数を除きすべて計測値で構成されている。カルマン定数は非定常性の影響で変化することが指摘されている¹⁰⁾が, その変化による影響はごくわずかであるため, ここでも一定値として扱う。今, 式(2)を河床から水面まで積分することで鉛

直方向の平均流速 U を計算し, それを $U_{\beta h}$ で割ることで流速補正係数 α の式を以下のように算出する。

$$\alpha = \frac{U}{U_{\beta h}} = 1 - \frac{(1 + \ln \beta)}{k \cdot U_{\beta h}} \cdot \sqrt{ghI} \quad (3)$$

ここで I は水面勾配である。式(3)が示すように, ある点での流速と水面勾配が計測できれば, 補正係数は決まることになる。

2. 3 代表流速計測に異常や欠測があった場合の計測値補完手法の提案

式(3)をさらに展開すると以下の式を得る。

$$U_{\beta h} = \frac{U}{\alpha} = \frac{(1 + \ln \beta)}{(1 - \alpha) \cdot k} \sqrt{ghI} \quad (4)$$

この式は, 逆に流速補正係数をあらかじめ設定できれば, 水面勾配測定値から代表流速値を評価できることを意味する。この式は, 電波式流速計による表面流速計測の異常値や欠測値の補完に有効と期待されるが, その一方で, 流速補正係数をあらかじめ仮定しておくことにより, 電波式流速計の計測値がなくても水面勾配の測定値から流速推定ができることも意味している。式(4)は Chezy 式とほぼ同様の式であるが, 本報告では ADCP による計測結果から算出した流速補正係数と式(4)から算出した流速補正係数を簡単に比較するため, この式形のまま今後の議論を進める。

2. 4 基準流量の計測

ADCP を搭載した橋上操作艇を用いて流量計測を実施した。観測には Teledyne RDI 社製の ADCP (Workhorse 1200kHz) を使用し, 一般に用いられる計測モード(WM1)で層厚 25cm, 層数 59, WP 及び BP を 5 とした。結果 1.63 秒に一回のアンサンブル値, ボートの移動速度は 1m/s 程度に抑えているため, 計測間隔は 1.65m 程度ある。横断計測は 1 回 10 分程度であるため, 往復の計測値を平均した。左右両岸付近の不感帯流量に関して, 流速は線形的に減少し河岸で零になること, ここでの断面積を水面と計測の最端で構成される直角三角形と想定して求めた。この想定は単断面河道には適用できる可能性があるものの, 複断面水路では難しいと考えられるため, 後述の配慮をする必要がある。またこの洪水では河床面の移動が確認されていることから, RTK-GPS を搭載し, 位置情報を同期させて観測を行っている。

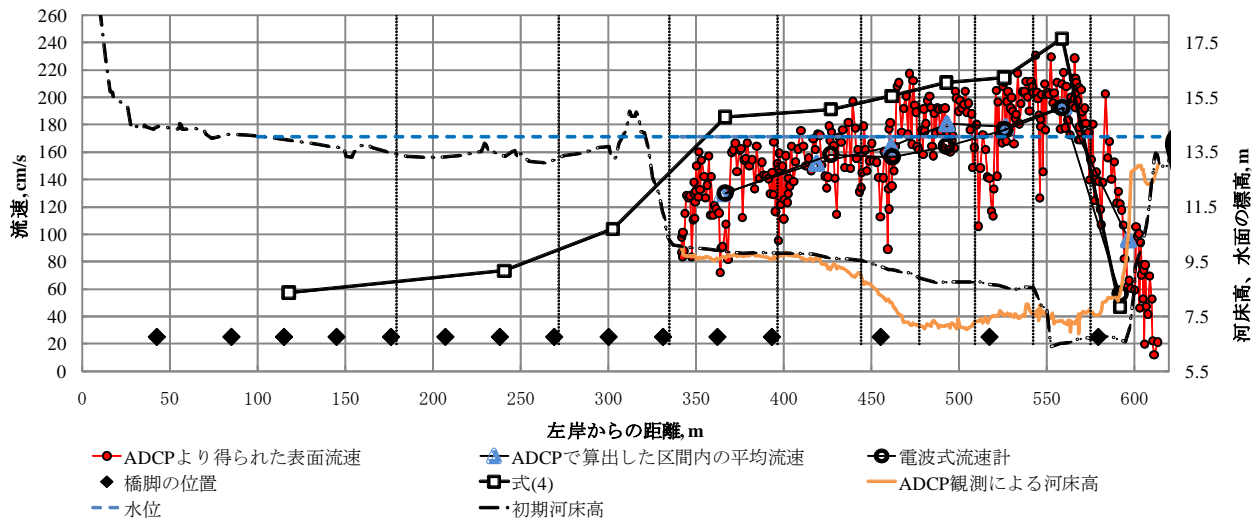


図-1 異なる流速計測手法により算出した流速の横断分布

RTK-GPS と ADCP の同期観測を行う場合、RTK-GPS の位置座標の差分としてボートの流速を算出し、そのボートの移動速度と ADCP の出力する速度をベクトル換算して流速値を算出している。それ故に、本観測のような移動観測の場合、位置情報の精度が ADCP の流速結果の精度に反映させることになる。紙面の都合上本報告では示さないが、土木研究所におけるこれまでの経験によると RTK-GPS は例え RTK モードの計測を行っているとしても、隣り合うアンサンブル値の位置が極端に異なることがあり、それ故に ADCP の出力結果が極端に大きくなることもある。このような場合は Vector Track and speed over Ground (VTG) 情報を使用することでこの問題を回避することができる。VTG は位置情報とは独立した手法として移動速度を算出しているため、移動速度の計測精度が高い。本報告で示す流速分布はボートの移動速度が 1.5m/s を超えた場合は VTG 情報を採用している。

3. 結果と考察

3.1 水平流速分布

図-1 は横断方向の流速分布を示す。横軸は左岸からの横断距離、左縦軸は流速、右縦軸は標高を示す。その他橋脚の位置◆、電波式流速計の区分断面の境界；点線を示す。赤●は ADCP により算定した表面流速を示す。これは同計測値に対数則を仮定し、それを水面まで外挿した結果である。青△は赤●の区分断面毎の平均値、黒○は電波式流速計の計測値、黒□は式(4)($\alpha=0.85, \beta=1$)の算定値を示している。さらに、ADCP により計測した河床高、電波式流速計の初期河床高、計測当時の水位を示す。

す。

一般的に ADCP が計測する横断計測値は赤●が示す通り凸凹している。また橋脚の後流の影響を受け流速が極端に小さくなる場所があるが、区分断面の平均値としては青△は黒○に極めて近い値を示す。個々にみると違いはあるが、計測位置が厳密には一致していないことも原因であり、区分断面スケールでは概ね一致していると評価できる。また黒□は電波式流速計や ADCP による区分断面平均値と比較すると常に 1.2 倍程度大きい。これは水面勾配の計測誤差に起因している可能性がある。水面勾配の的確な計測、流速補正係数の算出などが課題である。一方、左岸側の高水敷では、流速が遅く電波式流速計は計測限界を下回っていることから欠測し、水深 1m 以下であるため ADCP による計測も難しい。このような領域では、他の流速計を使用した補助的な計測、又は式(4)を活用した流速値の補完的な推定が必要となる。本報告では試験的に黒□の流速分布が正しいと仮定して高水敷の流量値を算出したが、この区分流量は流量全体の 10% 以下であったことは付記しておく。一連の降水観測の初期に計測された河床高 (黒一点鎖線) と図-1 で ADCP により計測したこの河床高 (燈色の実線) を比較すると両者は場所によっては 1m から 1.5m 程度異なる。

3.2 流速補正係数理論モデルの検証

図 2 は ADCP により直接的に算出した流速補正係数と式(3)を比較したものである。横軸は無次元掃流力、縦軸は流速補正係数を示す。これらの係数は、赤○は図 1 で示した電波式流速計の区分断面内で平均した値、黒■は電波式流速計の区分断面内の平均水深、水面勾配から電波式流速計の計測値 ($\beta=1$) を式(3)に代入した結果で

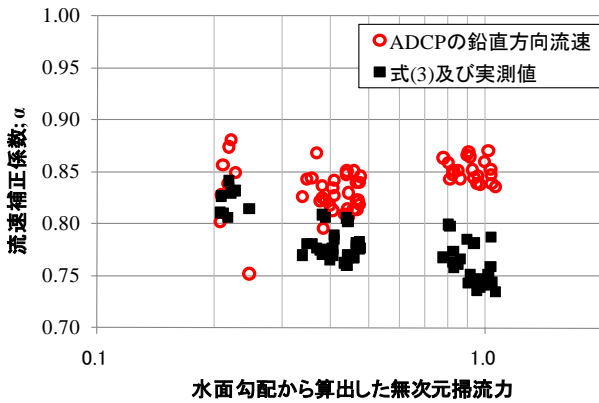


図-2 流速補正係数と無次元掃流力の関係

ある。赤○が示す通り、流量規模が小さいとき（無次元掃流力が小さいとき）流速補正係数は大きくばらついているが、流量規模が大きくなるにつれて同係数が徐々に一定値に収束している。そのときの数値はほぼ0.85であることわかる。一方黒■は流量規模が大きくなるに従い、流速補正係数は徐々に小さくなり、最小でも0.73程度まで下がる。このような掃流力の規模に応じた流速補正係数の減少は、例えば山本（2004）の知見と比較してもそれほど悪くない結果に見えるが、本観測結果では河床波の種類が不明確なため、これ以上議論することはできない。翻って算定方法に関して着目すると式(3)は二つの計測結果に依存している。すなわち電波式流速計による表面流速と複数の水位計による水面勾配の算出である。図1で示した通り、電波式流速計の結果はADCPの観測結果と比較してもそれほど悪い結果ではなかった。一方、複数の水位計より算出する水面勾配は計測方法が確立されていないために、不確定な要素が大きい。それが原因で黒■の結果はADCPで直接的に換算した赤○と比較すると異なることが考えられる。

次に複数の水位計を用いた水面勾配の算出結果の検証を行うために図-3を用いる。ここでは独立した二つの手法を用いて摩擦速度を算出した。一つはADCPにより観測した鉛直方向の流速分布及び式(1)を用いて算出した摩擦速度を算出し、それを図-1で示した電波式流速計の区分断面内を平均する手法である。もう一つは、複数の水位計から算定した水面勾配及びADCPが計測した河床高から摩擦速度を算出する手法である。図-3は前者を横軸に、後者を縦軸にプロットした結果である。両者は理論的には一致するものと期待されたが、実際に比較してみるとそれほど合致していない。

以上、図-2及び図-3の考察を総合的に判断し、本報告では、ADCPによる直接的な流速プロファイル計測値に

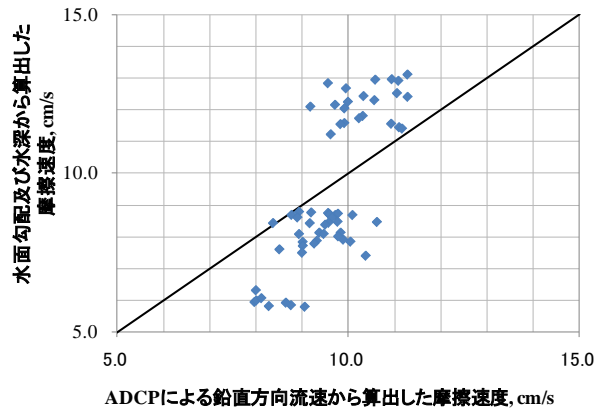


図-3 ADCP及び水面勾配から算出した摩擦速度の関係

表-1 自動流量観測の種類

Case	流速	流速補正係数	河床高	ピーク流量の基準流量との誤差
1	実測値	0.85	一定	-20%
2	式(4)による補正・補完値	0.85	一定	-15%
3	式(4)による補正・補完値	0.85	更新	-5% 以下
4	式(4)による推定値	0.85	更新	+28%

基礎をおく流速補正係数推定値を採用することとする。すなわち、次章の流量の算定には流速補正係数として0.85を用いる。

山口らによるとこの論文でいうところの流速補正係数は0.85~0.9としているため、本論文で0.85を用いることは妥当であると考えられる。しかしながら山地河川等での急勾配で無次元掃流力が大きな観測所における知見が必要であり、今後は図-2で議論したような知見から流速補正係数の変化の範囲を理解する必要がある。

3.3 自動流量計測システムによる流量計測

自動流量計測を実行するために表-1に示すとおりCase 1~4の流量を比較する。これらの違いは流量算出に必要な三つの構成要素である部分計測を用いた表面流速値、流速補正係数、及び河床高の組み合わせによるものである。表面流速値に関しては、電波式流速計の実測値をそのまま採用する方法（表1の実測値）、異常値やデータ欠損が生じた場合に式(4)を用いる方法（式(4)による補正・補完値）、電波式流速計による計測値は用いずに全てに式(4)を採用する方法の3種類を想定した。流

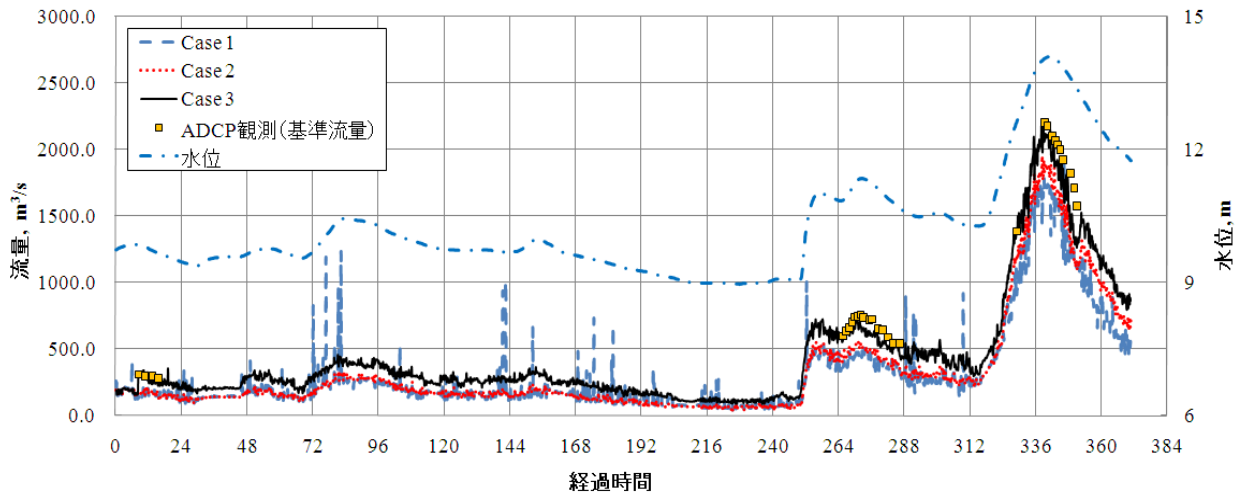


図-4 流量と水位の時間変化

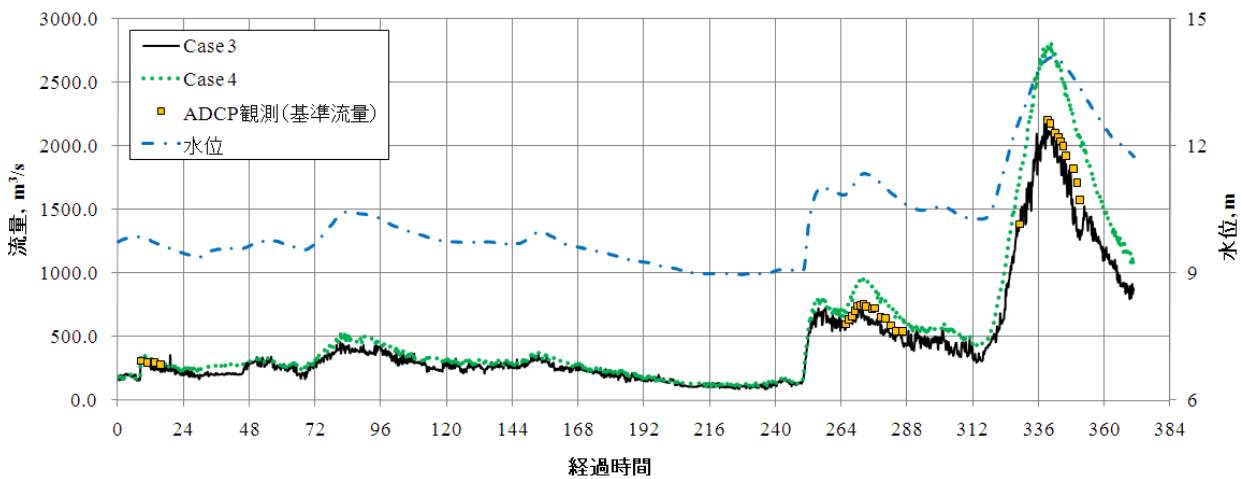


図-5 流量と水位の時間変化

速補正係数に関しては図2を用いて議論したとおり、水面勾配の算出方法の難しさから ADCP の鉛直方向流速分布から直接的に算出した 0.85 を採用した。河床高に関しては、年に数回程度の測量結果を洪水でも変わらないと仮定する方法（表1の一定）と ADCP による横断計測を行う毎にその結果を反映する方法（表1の更新）である。これらの要素を表1のように組み合わせて、Case1~4の4つの異なる流量算出手法による比較を行った。

図-4及び5は時間毎の流量値、及び水位の時系列を示す。図4ではCase1~3及びADCP観測による基準流量（燈■）を、図5ではCase3、Case4及び同基準流量（燈■）を示す。どの流量結果も水位の増減に応じて正しく追従し、Case1を除いて比較的安定した算出結果となっているが、それぞれの結果には若干の違いが見られる。Case1は流速を実測値、流速補正係数を0.85、河床高を一定として流量値を換算するが、これはすなわち従来の流量算出手法である。この図が示す通り、72時間、144

時間等に複数のスパイクが見られる。これらは電波式流速計が時々出力する異常値及びデータ欠損によるものと考えられる。但し、ここでいう異常値は電波式流速計としては通常通り出力している値であり、比較観測をしない限り異常値と判定することは難しい場合が多い。またデータ欠損時はその断面の区分流量をゼロとして全断面の流量値を算出する設定としている。また338時間での流量が最大になるときの流量値と ADCP の観測結果を比較すると 20%程度過小に算出していることがわかった。

Case2は式(4)を用いて異常値を自動判定し補正するとともに、欠測値を補完する手法である。すなわち式(4)が示す流速値の2倍以上及び0.5倍以下の場合には電波式流速計の計測結果を異常値もしくは欠測値と判定し式(4)の結果を採用する。その結果Case2では大きなスパイク状の異常算出値はなくなった。338時間での流量が最大になるときの流量値と ADCP の観測結果を比較す

ると15%程度過小に算出し、さらに338時間での流量が最大になるときの流量値とADCPの観測結果を比較すると、Case1と比較して5%程度流量算出値が改善された。

Case3は補正した流速値(補正值)、流速補正係数(0.85)、洪水時の河床高(ADCP計測後に更新)を採用した結果である。算定流量値はADCPによる実測流量と極めて良く合致し、誤差は5%以内であった。ただし350時間近辺で流量値が大きく減少する現象が認められた。紙面の都合上図には示さないが、その時間帯において表面流速計測値が大幅に減少しており、その原因は現時点では不明である。但し、水面勾配が正しく算定され式(4)の算定結果の精度が上がれば、この部分でも適正な補正が可能となるものと期待される。

Case4は電波式流速計式(4)を用いて流速値を算出している。全体的にADCPの結果と比較すると大きめに算出しているが、水位の増減に応じた最も滑らかな曲線を示す。338時間では、ADCPの観測結果を比較して28%過大に算定している。これは図-1に示した式(4)の流速値が過大に算出するものと同程度である。以上の結果は表1にまとめた。なお、図-4が示す0~24時の間のADCP観測で得られた河床形状は図-1に示した初期河床に近い。その後、264時間後のADCP観測において、図-1の実測された河床高(橙色の実線)とほぼ等しくなり、その後はほとんど変化していない(紙面の都合上図は省略)。ここでの河床変化の影響を考慮するかしないかによって、Case2とCase3の流量算出結果に10%程度の差異が生じることとなった。このことから、河床変動が流量に無視できない影響を及ぼす場合の、洪水期間中の河床変動モニタリングの必要性が確認される。

4. まとめ

本報告から以下の結論を得た。

- 1) 本報告では、自動流量計測システムを構築するために、流速計測値の異常値や欠測値の補正・補完を行うための流速補正係数及び流速値補完に関する理論モデルを提案した。そのモデルをX川Y観測所の電波式流速計システムに適用し、その有効性について、様々な側面からの分析・検証を試みた。
- 2) 電波式流速計の計測結果は、ADCPにより計測した結果、実用に資する精度を確保していることがわかった。
- 3) 実測の水面勾配を用いて算出した流速補正係数(式(3))とADCPの鉛直方向流速から直接的に算出した流速補正係数を比較した結果、両者は必ずしも合致し

なかった。摩擦速度等を算出するための水面勾配の計測手法に課題が残されているものと考えられる。

- 4) 流速補完モデル(式(4))を適用するにあたって、いくつかのモデル設定の組み合わせによる流量算出値への影響分析を行った。その結果、ピーク流量を含めてADCP実測流量に最も合致する流量を算出したのは、電波式流速計による代表流速計測値に対して、流速補正係数を0.85と設定するとともに、異常・欠測時に今回提案した補完流速値(式(4))を採用し、出水期間中の断面変化も考慮するCase3であった。
- 5) 表-1に示されるように、流量自動計測の精度を確保する上で最も重要なのは、電波式流速計で計測した代表流速を有効に活用することであった。本観測結果では最新の河床高を使うか否かでの誤差は10%程度であった。
- 6) 洪水中に河床高が変化して河積の変化が流量値に大きく影響を及ぼす観測サイトでは、河床高の自動計測器を設置する必要がある。

様々な河道水理条件において幅広く適用可能な洪水流量自動観測システムを完成させるための以下のように今後の課題が明確になった。

- 1) 流速補正係数を算出するための水面勾配の算定手法を確立する必要がある。
- 2) 河床高自動計測により河積変化をモニタリングする手法を確立する必要がある。
- 3) 本論文では流速補正係数を0.85とした。これは知見²⁾から考えても妥当であると考えられる。しかしながら山地河川等での急勾配で無次元掃流力が大きな観測所における知見が必要であり、最終的には図-2で議論したような知見から流速補正係数の変化の範囲を理解する必要がある。

【謝辞】 ADCPを用いた流量観測結果は、国土技術政策総合研究所河川研究室から提供を頂いた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 例えば藤田一郎・河村三郎：ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み、水工学論文集、第38巻、pp.733-738,1994。
- 2) 山口高志・新里邦生：電波式流速計による洪水流量観測、土木学会論文集、No.497/II-28,pp.41-50,1994。
- 3) 中川一ら：横断平均流速の測定と流速分布の数値シミュレーションを組み合わせた流量測定技術の開発と大河川での実地検証、水工学論文集、第50巻、pp.709-714,2006。

- 4) 例えば川西澄ら：次世代超音波流速計による感潮域の流量と水温・塩分の連続モニタリング, 水工学論文集, 第53巻, pp. 1015-1020, 2009.
- 5) 岡田将治, 森彰彦, 海野修司, 昆敏之, 山田正：鶴見川感潮域におけるH-ADCP を用いた流量観測, 河川技術論文集, Vol.11, pp.243-248, 2005.
- 6) 二瓶泰雄, 木水啓：H-ADCP 観測と河川流計算を融合した新しい河川流量モニタリング, 土木学会論文集B, Vol.64, No.4, pp.295-310, 2007.
- 7) 深見和彦ら：ドップラー式非接触型流速計（電波・超音波）を用いた洪水流量の連続観測手法の現地検証～浮子測法との比較～, 河川技術論文集, Vol.14, pp.307-312, 2008.
- 8) 独立行政法人土木研究所, 財団法人土木研究センター, アジア航測株式会社, 小糸工業株式会社, 株式会社拓和, 株式会社東京建設コンサルタント, 横河電子機器株式会社：共同研究「非接触型流速計測法の開発」共同研究報告書, 土木研究所共同研究報告書, No.291, 2003
- 9) 木下良作：河川下流部における洪水流量観測法に関する一提案, 水文・水資源学会誌, Vol.11, No.5, pp.460-471, 1998.
- 10) Nezu, I, and et al. (2007); Turbulence structure in unsteady depth-varying open-channel flows, J. Hydraulic Eng., Vol.123, pp.752-763
- 11) 山本晃一：構造沖積河川学-その構造特性と動態-, 山海堂, 2004

A STUDY ON UNMANNED / AUTOMATIC RIVER DISCHARGE OBSERVATIONAL TECHNOLOGY AND ITS ACQUIRING ACCURACY

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2009-2011

Research Team : Water-related Hazard Research
Group(Hydrology)

Author : KAZUHIKO Fukami

YUYA Kanno

ATSUHIRO Yorozuya

Abstract : In this paper, we propose a theoretical model for an unmanned, automatic river discharge measurement system to eventually develop a method to estimate continuous river discharge in an unmanned, automatic and real-time manner. In this proposed model, a measurement system estimates continuous river discharge by observing actual water surface velocities with non-contact current meters (radio current meters) and also estimates average velocities in the zonal cross-sections of the meters by applying velocity correction coefficients calculated based on observed water surface slopes. We tested the model with a radio current meter system and compared the results with discharge data from an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) for verification. The comparison found that radio current meters provide measurements which are accurate enough for practical use. However, the velocity correction coefficients calculated from the water surface slopes were not necessarily agreeable with those based on the ADCP data, which requires further research to improve the method for water surface slope measurement.

Key words : Automatic discharge measurement, non-contact current meter, ADCP measurement, velocity collection coefficient