非接触型電波式流速計を用いた洪水流量 自動観測手法の一考察

A STUDY OF AN AUTOMATIC WATER DISCHARGE MEASUREMENT SYSTEM USING A NON-CONTACT CURRENT METER

萬矢敦啓¹・大平一典²・菅野裕也³・深見和彦⁴ Atsuhiro YOROZUYA, Kazunori ODAIRA, Yuya KANNO, and Kazuhiko FUKAMI

¹正会員 Ph.D. 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター(〒305-8516 つくば市南原1-6)
 ²正会員 国土交通大学校(〒187-8520 東京都小平市喜平町2-2-1)

³正会員 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター(〒305-8516 つくば市南原1-6)

⁴正会員 修士(工学) 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)

Authors developed an automatic discharge measurement system composed with non-contact current meters for observing representative velocity distribution, an echo sounder for monitoring river bed, and water gauges for estimating the correlation coefficient. For verification purposes of the system, Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) on unmanned boat was employed when flooding occurred. The authors verified the non-contact current meter measures an appropriate water surface velocity compared with ADCP measurement. Assuming the ADCP measurements as the true discharge, a comparison was made between them and the results from the automatic measurement system. From the comparison, the importance of each component is clarified for completion of the system. This paper described the system including the theoretical aspects, as well as experienced flooding.

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

1. はじめに

現在用いられている流量観測手法の多くは昭和30年代 初頭までに確立した技術に依存したままであるが、近年、 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いる. 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、著者ら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、上記の無人・自動計測技術に共通 することは、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を考慮していな

い点に不確定要素が残っているという点である.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[®]を経て,洪水中の実現象を正しく捉え ることも可能になってきている.すなわち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.

著者らは、このような流量自動観測システムの構築を 目標とした研究を進めている¹⁰. すなわち、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こと が目標である.ここで言う流速補正係数は一般的に言わ れている更正係数に近いが従来の観測手法である更正係 数とは異なるため本報告では「流速補正係数」を採用し ている.また著者らは電波式測線に音響測深器を用いて 洪水中の河床高自動計測を試みているが、今回はこの結

果に関しては議論しない.

本論文は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 観測の可能性とまたその課題を整理する.

2. 自動流量計測システム

(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、現在でも計測が 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)ⁿ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)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,本論文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.

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

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, β =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.

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{\beta h}\right) + \frac{U_{\beta h}}{u_*}$$
(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¹¹¹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*_{βh}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.

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

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.

(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.

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

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、本論文では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.

(3) 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



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

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.

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, 著者らの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がある. 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

(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.●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. △は●の区分断面毎の平均値, ○は電波式流速計の計測値,□は式(4)(α=0.85, β=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.

一般的にADCPが計測する横断計測は●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△は ○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. また口は電波式流速計や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,又はそれによる式(4)の 検証が必要となる.本論文では試験的に□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. 一連の洪水観測の初期に計測された河床高(一点鎖 線)と図-1でADCPにより計測したこの河床高(実線)を 比較すると両者は異なり、場所によっては1mから1.5m程 度の差があった.

(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, 〇は図1で示



した電波式流速計の区分断面内で平均した値、■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(β=1)を式(3)に代入した結果である. ○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■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13が、本観測結果では河床波の種類が不 明確なため結果に対してこれ以上深く議論しない. 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■の結 果はADCPで直接的に換算した〇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、本論文では、ADCPによる直接的な流速プロファイル計測値に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



図-3 ADCP及び水面勾配から算出した摩擦速度の関係

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%

表-1 自動流量観測の種類

を用いる.

(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 となる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),全てに式(4)を採用する方法の3 種類を想定した. 流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 中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(■) を,図-5ではCase3,Case4及び同基準流量(■)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,Case 1を除いて比較的安定した算出結果となっているが、そ



図-5 流量と水位の時間変化

れぞれの結果には若干の違いが見られる. Casel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,これはすなわち現況の手法である. 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ときとして出力 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段面の流量値を算出 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(補正値),流速補正係数 (0.85),洪水中の河床高(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(燈色の実線)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. 結論と今後の課題

本論文から以下の結論を得た.

- 本論文では、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.
- 実測の水面勾配を用いて算出した流速補正係数(式
 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Case 3 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 法を確立すること,

- 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ことである.
- 3) 流速補正係数による誤差は過去の知見²から5%程度 と見積もることができそうである.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 表する.

参考文献

- 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.
- 山口高志・新里邦生:電波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.
- ご瓶泰雄,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.
- ്
 萬矢敦啓ら:流量観測高度化に関する富士川南部観 測所における取組,土木技術資料52-3,pp.40-43,2010
- Nezu, I., and et al. (2007); Turbulence structure in unsteady depth-varying open-channel flows, J. Hydraulic Eng., Vol.123, pp.752-763
- 山本晃一:構造沖積河川学-その構造特性と動態-, 山海堂, 2004

(2010.4.8受付)