

〔特集〕実河川における洪水観測技術

河川砂防技術基準調査編に準拠した ADCP による洪水流量観測手法について

*(株)ハイドロシステム開発 大阪本社 橋田 隆史†
 ***(株)ハイドロシステム開発 東京支店 下田 力
 ***(株)ハイドロシステム開発 東京支店 疋田 真

THE FLOOD MEASUREMENT METHOD OF USING ADCP ADHERENCE TO TECHNICAL STANDARDS FOR RIVERWORKS : PRACTICAL GUIDELINE FOR METHODS OF INVESTIGATION

Takashi KITSUDA, Hydro Systems Development ,Inc. Headquarters

Chikara SHIMODA, Hydro Systems Development ,Inc. Tokyo branch

Makoto HIKIDA, Hydro Systems Development ,Inc. Tokyo branch

1 はじめに

平成24年6月に河川砂防技術基準 調査編(以下、新技術基準)が15年ぶりに大幅改定され、Web上で公開されている。河川砂防技術基準とは、河川整備計画、河川施設の設計及び維持管理の適正な実施に資することを目的として、現状の技術水準に照らし合わせて基準となる調査方法を規定したものであり、国土交通省 水管理・国土保全局よって発行されている¹⁾²⁾。これは、国土交通省所掌の水文観測のみならず、国内における水文観測実務全般において参考となる技術指針であろう。今回の改定では、洪水流量観測手法として ADCP を用いた観測(以下、ADCP 洪水流量観測)が新たに標準手法の一つとして掲載された。著者等が構築してきた ADCP 洪水流量観測システム³⁾は、新技術基準に準拠しており、さらに最新の技術を適用させた改良を図っている。本報では、当該システムについて、最新の情報も交えながら、機器構成、観測計画の立案、観測方法および流量算出に関する基礎技術について述べる。

*〒550-0022 大阪市西区本田 3-2-18 ハイドロ第一ビル

†E-mail: t-kitsuda@hydro-sys.com

**〒132-0015 東京都江戸川区西瑞江 3-19-10

2 河川砂防技術基準の主な改定内容

2.1 新技術基準における ADCP 観測の位置づけ

新技術基準では、主要な流量観測手法の一つとして、橋上係留船等(以下、橋上操作艇と記述)に搭載して移動しながら断面観測する手法について詳細に記載されている。橋上操作 ADCP を使用する状況としては、従来の浮子観測では精度的に問題が生じるケースや観測に時間がかかりすぎるケースなどが挙げられており、短時間に断面横断観測が可能な本手法が推奨されている。また、非接触式の電波ドップラー流速計や画像解析法などの固定観測法を実施する際には、リファレンスとして ADCP による観測を実施し、測定ポイントの検討や流量算出の際の更正係数などの検証を行う必要性が記載されている。この様に、浮子観測の代用として、もしくは固定観測法のリファレンスとして ADCP の活用が明記された。

橋上操作 ADCP を用いる優位点としては、(1)短時間で断面の流速分布が計測できること、(2)断面形状が同時に計測出来ること、(3)断面流速分布の想定部分が小さいこと、などが挙げられている。これ以外にも、RTK-GPS の搭載により河床移動速度が計測出来る点や濁り分布が解析できる点も有効であろう。

2.2 適用範囲

本手法は、橋梁から徒歩もしくは台車で曳航することが前提であるため、橋梁の下流側に歩道が存在する必要がある、トラス橋の場合や歩道が整備されていない場合は実施困難である。また、(1)流速6.0m/s以上、(2)多量の流下物で水面が埋め尽くされている状況、(3)水面の波高が50cmを越え船の揺動が激しく転覆の恐れがある状況、(4)水面波浪が激しく船の傾斜が20度を超える状況、などでは適正なデータ取得が難しくなるため、水面の状況が落ち着くまで待機するなどの対応が必用である。

3 ADCP による最新の洪水流量観測手法

3.1 機器構成

新技術基準では標準的な機器構成として、ADCP、RTK-GPS、ADCP を搭載する舟(橋上操作艇)、遠隔操作装置、橋上から舟を安全に係留するための架台、が選定されている。またオプションとして、音響測深器、VTG が出力できる RTK-GPS またはトータルステーション、GPS コンパス、などが挙げられている。これら機器一式および全てを搭載した状況を図1に示す。

一方、新技術基準の発行以降、ADCP や GPS コンパスが一体となった RTK-GPS の最新機種が登場しており、より合理的な機器構成が実現しているため、これらも踏まえた機器構成を以降に示す。



図1 可搬型洪水観測システムの機器構成

3.2 ADCP の機種選定

ADCP のメーカーは国内外に複数存在するが、本報では Teledyne RD Instruments 社(以降、TRDI 社)製の ADCP を対象とする。TRDI 社製品は、新技術基準の機器構成に対応可能であること、世界シェアが8割以上と販売実績が多く機器の信頼性が相対的に高いこと、国内においても洪水観測の実績が豊富で多くのケーススタディーが可能であることなど、メリットが多い。

洪水観測における ADCP の機種選択肢としては、Workhorse ADCP 1200kHz、600kHz、および新型の5Beam 型 RiverRay600kHz が挙げられる。1200kHz タイプは層厚を小さく設定できるが最大水深 20m 以浅の制約がある。600kHz タイプは層厚が大きくなるものの、最大水深 40m まで計測可能であり、かつ相対的に濁りに強いというメリットがある。国内では圧倒的に 1200kHz の使用例が多いが、両者の長を兼ね備えた新機種が開発されたので後述する。

3.3 5Beam 型 RiverRay600kHz の登場

TRDI 社から流量観測専用の ADCP として 5Beam 型の RiverRay600kHz がリリースされた(図2)。当機は、センサーがフラットなフェーズドアレイタイプであること、測深用の鉛直ビームを備える 5Beam 型であること、ユーザーコマンドが最小限化されていることなどが最大の特徴である。フェーズドアレイタイプとは、単一フラット面に千数百個におよぶ微小な素子を配列させ、電子制御で音波の位相を変調させて発射角度をコントロールする技術であり、低周波・大出力のセンサーをコンパクトに製造できるメリットがある。当機は、低周波高出力センサーによって、高濁水による超音波減衰や河床計測のロストを低減するメリットがある。また、従来の 600kHz タイプは実用観測層厚が 50cm 程度と大きいことがデメリットであったが、当機はパルスコヒーレント技術の採用により、低周波ながら層厚 10、20、40、80cm の自動切り替えが可能となっている。要するに、低周波タイプのロングレンジ・高濁度耐性と、高周波タイプの高い空間分解能を併せ持つタイプといえる。また、フルオートモデルであるため、従来のような観測設定が不要となり、ユーザーは開始と終了時に命令を送るだけで観測出来る。このため、観測者の技量によってデータ取得精度に違いが生じることが無く、誰が観測しても一定のデータ品質が確保されるというメリットがある。表1に水深毎の観測層厚設定を示す。

表1 River Ray 観測層厚設定

水深 : D	表層厚	表層数	下層厚
0.45m > D	N/A	N/A	N/A
2m > D	10cm	N/A	0
4m > D > 2m	20cm	10cm	3 または 2
10m > D > 4m	40cm	10cm	5
D > 10m	80 cm	10cm	5



A. センサー B. 橋上操作艇搭載状況

図2 River Ray600kHz タイプ

3.4 オプション機能の特長と適用限界

流速計測精度を高めるためのオプション機能としては、High Resolution (Mode5,8,11), および High Speed Sampling (Mode12) が存在する。High Resolution モードはパルスコヒーレントと呼ばれる計測原理を採用しており、水深が浅く流速が遅い場合に高精度計測が可能となる。一方、High Speed Sampling Mode は、通常の ping に加えて高速発信が可能な sub ping を打つことで、時間あたりの ping 数を増加させ、計測精度を高めるものである。なお、ping 数と std の関係は Mode1 と同じである。表2に、各モードの適用条件を示した。High Resolution (Mode5,8,11) では流速上限値が定められているため洪水観測には不向きである。一方、Mode12 は計測条件に縛られずに流速精度を高めることが可能であり、洪水観測には Mode12 が適している。

表2 各モードの適用条件

	流速上限	水深上限	層厚	Std/ping
Mode5	最大 1.0m/s	3.5m	10cm	0.4cm/s
Mode8	最大 2.0m/s	3.5m	25cm	5.0cm/s
Mode11	水深×相対流速 ≤ 1.0m/s	4.0m	10cm	0.7cm/s
Mode12	Mode1 に準拠			

3.5 橋上操作艇の種類

急流場においても揺動が小さく、安定して ADCP 観測を行う目的で、著者らはハイスピード型(設計流速 6.0m/s)の橋上操作艇を研究開発してきた⁴⁾。橋上操作艇の基本設計に際し、モノハルタイプとトリマランタイプの船体設計を行い、1/3 スケールの模型により土木研究所内の実験水路で挙動試験を実施し、基本構造の妥当性を検証した。また、試作機を含む4種類のボートに ADCP とモーションセンサー (MEMS) を搭載し、実河川にて検証を行った。その結果、船体基本構造としてはトリマランタイプが有利であり、モノハルタイプは水面形の影響を受けやすく、ジャンピングや前後へのポーポイジングなどが生じやすいことが確認された。

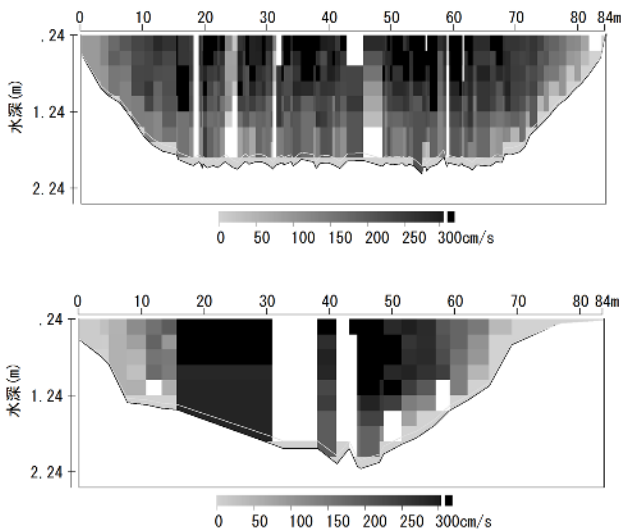
トリマランタイプの揺動を抑制するためには、サイドハルの長さ・浮力・取付位置、および船体全長と重心等が影響するため、船体安定計算により最適な船体バランスを導き出した。また、橋梁と水面の高低差が大きい場合は船首が上方に傾斜しすぎて ADCP の傾斜補正限界である 15° を越えることもあるため、重心バランスをユーザーが容易に変更できるように、前方にも収納ハッチを設けて、バッテリー配置などによって前後の重心バランスを調整させやすくした。図3に従来型のリバーボートとハイスピード型リバーボートの写真を示す。



(a) RiverBoat (b) HighSpeedRiverBoat

図3 橋上操作艇の種類

図4は利根川前橋付近で水面揺動が激しい急流場を選定し、従来型のリバーボートとハイスピードボートを用いて流速の比較観測を行った結果である。リバーボート(下図)は船体揺動が激しいために欠測が多くデータ品質も悪いが、ハイスピード型(上図)ではデータ欠損が少なく、最大流速 3.0m/s の状況下で、安定的に、かつ安全にデータを取得することができた。リバーボートの場合、揺動安定性や転覆のリスク、データ取得率などを考慮すると、流速 3.0m/s 程度が実用限界と考えられる。一方、ハイスピード型のボートでは、水面揺動の影響が抑えられてコントロールしやすくなったこと、揺動によるデータ欠損が著しく改善されたことなどから、高速流に強いことが確認された。



上段：ハイスピード型ボート 下段：従来型リバーボート

図4 ハイスピード型ボートの比較観測

3.6 遠隔通信装置 RemoADCP

ADCP の観測中にリアルタイムにデータを PC へ取込み、水深、最大流速、データ欠損の程度などを把握することは、観測データの品質を維持する上で重要であり、新技術基準にも述べられている通りである。リアルタイムにデータを取得するには、遠隔通信装置が必要であるが、著者等は遠隔通信装置の新機種(RemoADCP ver3)を開発し、マルチパスの低減による通信安定性の改善、通信距離の強化、などの改良を図った。また、従来型は観測途中で通信が途切れた場合はデータ取得ソフトである WinRiver 上で一旦観測を中断し、スタートから再計測させる必要があったが、新型では再接続さえできれば観測が継続できるように改善した。

3.7 音響測深器

新機種の 5Beam 型 RiverRay600kHz には測深用の鉛直ビームが利用できるため、断面測量精度の向上が図られている。一方、従来型の ADCP では 20 度の角度で発射される 4 本のビームで河床位を計測するため、水深に応じて各計測点の距離が離れるという問題がある。例えば河岸際や流心部など急激に水深が変化する際には、離散する 4 点の計測値が大きく異なることがあり、平均すると実際よりも浅めに計測される傾向にあり、これが断面積の計算に誤差をもたらすことがある。このため、従来型の ADCP を使う場合には、ADCP の真下にビームを発射して河床位を計測するための音響測深器を使うことが有効である。

3.8 GPS コンパス

河道内には矢板護岸、水管橋、高圧線の鉄橋、H 形鋼、床固めなど様々な磁場発生源が存在しており、これらが ADCP 内部の磁気コンパスに影響を及ぼす可能性がある。こうした不確定要素を排除するために、著者等は橋上操作艇に搭載できる小型の GPS コンパスを開発しており⁵⁾(G-com, HSD 社製)、新技術指針では推奨技術として紹介されている。

3.9 VRS-RTK-GPS コンパス

著者等は、GPS コンパス機能が付いた一体型の RTK-GPS (以下、RTK 一体型 GPS コンパス) を新たに採用した。RTK 一体型 GPS コンパスのメリットとしては、3.8 で述べた G-com に比べてマルチパスの影響が小さくデータ取得が安定していること、一体型によって搭載機器が一つ減るため省電力かつ省スペース化が図られたことなどが挙げられる。さらに、コストが従来の RTK-GPS 単体と同等であるため、RTK-GPS の導入を検討するならば、この RTK 一体型 GPS コンパスを選択するメリットは大きい。



図5 RTK-GPS コンパス搭載機

4 観測方法

4.1 横断観測方法

観測態勢は、橋上操作員 2 名、データ取得 1 名、安全管理者 1 名の最低 4 人必要であり、夜間には監視員を 1 名追加する必要がある。

橋上操作員は水面の状況を注視しながら移動式架台もしくは人力にて橋上操作艇を横断方向に曳航させる。観測範囲は河道内水面幅全てを計測することが望ましいが、樹林帯近くや浅瀬がある場合は、危険の無い範囲で観測すること。移動速度は 1m/s 以下の徒歩程度が目安である。

観測中は常に PC でデータをモニタリングし、データ欠損が多い場合は移動速度を遅くするか、観測設定の見直しを行う。観測毎に時刻、流量速報値、左右岸スタート、河岸までの推定距離、ファイル名などの必要事項を野帳に記録する。

4.2 標準的な観測設定

ADCP の観測に際しては現場の状況に応じて最適な設定を行う必要がある。主な設定項目としては、層厚(WS)、層数(WN)、Ping 数(WP,BP)、近接不測距離(WF)、最大レンジ(BX)、Ambiguity Velocity(WV)などが挙げられるが、ここでは観測精度を確保するための層厚と ping 数を中心に解説する。

ADCP の観測精度は ping 数に依存し、次式で表される。

$$\text{std}=1/\sqrt{N} \quad (\text{std}=\text{標準偏差}, N=1 \text{ データ ping 数})$$

一方で、ping 数を多くするとデータ取得時間が長くなり、横断方向の空間解像度が低下するという相反する問題があるため、むやみに増やすことは出来ない。徒歩(移動速度 1m/s 前後)で観測する場合、横断方向に 1~2m 間隔程度でデータ取得させるためには、1 データ取得を 2 秒以内に設定することが目安となる。なお、WP と BP は同数を設定することが推奨される。

図 6 に、ping 数と std(標準偏差)の関係を示す。層厚、データ取得時間、観測精度の最適バランスを考慮すると、1200kHz WM1 の場合、WS25,WP20 程度、600kHz の場合は、WS50,WP20 程度が適切であると考える。なお、WM12 の場合は通常の WP コマンドに加えてサブピングコマンド(WO)が設定可能で、WP 1ping に付属して発射する sub ping の数と間隔(ms)を設定できる。

観測層厚と層数は最大水深を元に設定する必要があるが、最大計測レンジが大きくなるとデータ取得時間が長くなるため、最大水深の 2~3 割増し程度に設定することが望ましい。なお、ボトムトラック

機能の最大探知深度を設定するコマンド BX は単位が dm なので、20m まで計測したい場合は BX200 と入力する必要があり、注意が必要である。

4.3 洪水観測時に注意すべき観測設定

洪水観測の様に高速流を観測する場合は、Ambiguity Velocity(WV コマンド)の設定が重要となってくる。デフォルト値の WV170(機種によっては 175)では最大相対流速 4.2m/s までしか対応できず、これを超えるとエラー値が増える。WV コマンドはビーム放射軸方向の最大流速を設定するもので、次式で求められる。

$$\text{WV}=\text{水平最大流速} \times \sin(20\text{deg}) \times 1.2(\text{安全率})$$

ここで、水平最大流速は船速+実流速の和となる。例えば水平最大流速を 450cm/s と仮定した場合、最適な WV は 185 となる。

最大流速が 4.0m/s を超えることが想定される場合は、安全をみて WV を大きめに変更する必要がある。

また、ボトムトラックに関しても、ボトム認識感度をチューニングするためのエキスパートコマンドが幾つか存在する(BA,BC)。しかし、非常にデリケートな設定で、適切な使用方法が確立されていない。また、これらのコマンド変更で取得率が改善できる余地は少ないため、通常はデフォルト値が推奨される。

4.4 安全対策、機器流出対策

流速が 3.0m/s を越える場合はボートの微細なコントロールが難しくなり流木などがボートに掛かる恐れがあるため、専用の移動式架台を使うことが望ましい。

移動式台車の準備が出来ない場合であっても、流速がそれほど大きく無く、かつ水面のごみを回避出来る状況であれば人力による曳航観測が可能である。この場合は、アッセンダーを利用し、橋の下流側に命綱を架橋して曳航ロープの先端にカラビナを付け、命綱に係留することで安全に観測できる。流木などが掛かり制御不能となった場合は手綱を離し、さらに命綱の一方をリリースしてボートが河岸際に流されるまで待ち、出水終了後に回収するしかない。また万が一ボートが流出した場合に備えて、下流の道路や橋梁の状況を事前に把握しておくことと、GPS 発信器や GPS ロケータをボート内部に取り付けることも有効である。

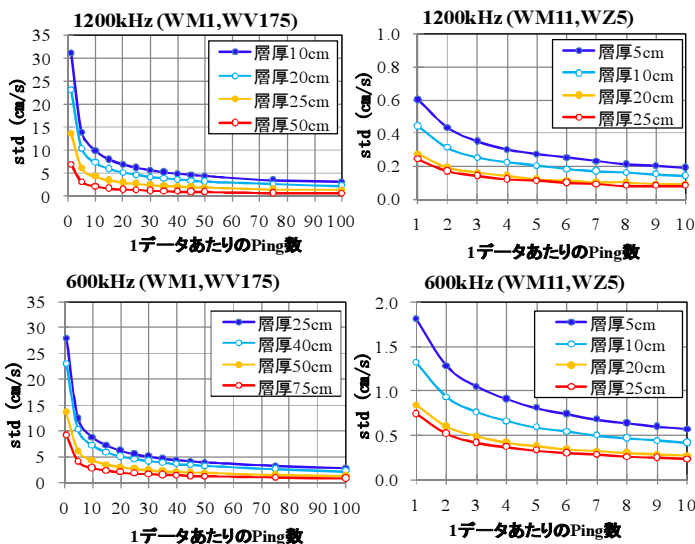


図 6 ping 数と std(標準偏差)の関係

5 流量算出方法

5.1 エラーチェックとノイズ除去

ADCP で計測したデータには様々なノイズ成分が混入することがあり、これを適正に取り除いた上で流量を算出する必要がある。データ品質を判断する項目としては、%Good(PG1,PG4), 反射強度, correlation, error velocity などの情報がバイナリーデータに記録されるため、これらを指標に棄却する。

%Good は、1 データ取得に発射した ping 数の内、適正に受信・解析できた ping 数の割合を示し、PG1 は 3beam 計測時、PG4 は 4beam 計測時の値である。%Good の閾値は一概には言えないが、経験値として PG1 と PG4 の合計が 60~80%付近を棄却の目安としている例が多い。

反射強度は直接的にデータ精度を示す指標では無いが、干渉が生じた場合は示唆的な反応を示すほか、高濁度で減衰した場合などは著しく低下するため、データ異常を判定する補助的な指標として有効である。

Correlation とは、1ping を構成する 2 発の超音波受信波の類似性を示す指標であり、100%が 255count に該当する。計測されたデータの Correlation が高ければ、時差を持つ 2 発の超音波が同じ流れを計測しているとみなされ、データ品質が高いと判断される。デフォルトではこの数値が 64 を切ると Bad データとして棄却される。

Error velocity は 4 つの超音波ビームが計測している流れ場の均一性を判断する指標である。ADCP は 20° に開いた 4 本の超音波ビームを発射するために遠方ではある程度の広がりを持った空間を計測することになる。ADCP はこの各ビームの測流範囲が同じ流れ場であるという条件の元に流向・流速を算出しているが、実河川では必ずしもそうはならない。ADCP では対向する 2 本のビームおよびこれと直交するビームから 2 種類の z 成分(z1,z2)が求められるため、この差分を Error velocity として出力できる。Error velocity が小さいほど場が均一であり、大きいほど不均一であると判断できる。

5.2 流量算出手順

TRDI 社が無償提供している標準ソフトの WinRiver(WinRiverII)で簡便に流量計算させることができる。しかし、ノイズ成分の除去が自由に出来ないことや、激しい揺動が生じた際によくおこる航跡ジャンプ現象などを補正することが出来ない。また、水面や河床付近、および測岸の補完方法に自由

度が少ない。このため、できるだけ正確な流量値を得るためには観測者が独自に流量算出する必要がある。流量算出の手順としては、ノイズ除去と補完、表層・底層の補完、側岸の補完、航跡の直線化、流下軸成分流速の抽出、断面流量の算出、というステップが標準的である。

航跡が大きく蛇行した場合は航走距離が水面幅よりも過大になるため、蛇行航跡を横断測線上に直線化させて直交する流速成分(流下軸成分)を抽出する必要がある。この際に横断距離平均処理を行うことで、区分断面が整理され、浮子データなどと比較しやすくなる。

著者等は、これら流量算出に必要な手順を実装した、専用のソフト(VisualADCPtools)を開発した。

6 まとめ

河川砂防技術基準調査編に準拠した ADCP 洪水流量観測の概要と観測手法について取りまとめ、報告を行った。洪水時に精度良く流量観測できる移動観測手法としては、従来の浮子法にこれまで大きく依存してきたが、ADCP の洪水観測技術がここ数年著しい進歩を遂げており、苦手とされてきた河川洪水観測においても十分に実用的な成果が得られるようになった。しかし、その取り扱い方法やデータ処理については個々人の技量に委ねられているのが現状であり、標準的な技術指針の確立が望まれるところであろう。

引用文献

- 1) 五道仁実, 中村圭吾, 小川隆文, 藤田光一, 福島雅紀: 河川砂防技術基準調査編改定の取り組みとこれからの河川技術の展開, 河川技術論文集, 第 18 巻, 2012.6
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局: 河川砂防技術基準 調査編, 2012.6
- 3) 橋田隆史, 下田力, 疋田真, Hening Huang: ADCP による河川洪水観測の先進技術と観測に際しての基礎的な技法について, 河川流量観測の新時代, 2010.7
- 4) 萬矢敦啓, 岡田将治, 橋田隆史, 菅野裕也, 深見和彦: 高速流における ADCP 観測のための橋上操作艇に関する提案, 河川技術論文集, 第 16 巻, 2010.6
- 5) 菅野裕也, 萬矢敦啓, 橋田隆史, 井上拓也, 深見和彦: 外部コンパスを併用した ADCP 観測に関する提案, 河川技術論文集, 第 17 巻, 2011.7