

日本におけるADCPを用いた高水流量観測手法

Method of water discharge measurement during flood
using Acoustic Doppler Current Profiler in Japan

萬矢敦啓¹・岡田将治²・橘田隆史³・深見和彦⁴

Atsuhiko YOROZUYA, Shoji OKADA, Takashi KITSUDA 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 博士(工学) 高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科 (〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1)

³正会員 修士(農学) (株)ハイドロシステム開発 (〒550-0022 大阪市西区本田3丁目2-18ハイドロ第一ビル)

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)

Many devices with different principles, such as current meters, float-type measurements, non-contact current meters, have been used to conduct discharge measurement. Among them, acoustic Doppler devices with a profiling technique loaded on boats are the only tool capable of water discharge measurement without any hydraulic assumption. In 1981, Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) were developed by RD Instruments Inc. initially for marine measurement, but have been also applied by many river engineers to river discharge measurement. Since the beginning of the 2000s, the United States Geological Survey (USGS) has developed criteria for Quality Assurance (QA) as well as guidelines associated with ADCP measurement. However, they are not easily applicable to flood flows, for example, in Japanese rivers, characterized by high unsteadiness, loose boundary, and, above all, rough water surface. Therefore, we have developed an ADCP measurement system as well as concept of QA which are suitable for measuring in Japan. Finally, we compiled them as the water discharge measurement method using ADCP in Japanese rivers.

Key Words : *Acoustic Doppler Current Profiler, discharge measurement, Quality Assurance, peripheral devices*

1. はじめに

河川の流水を計測するための手法として、異なる複数の計測原理が提案されてきている。例えば電波¹⁾²⁾³⁾⁴⁾、音響⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾、画像⁹⁾技術等である。これらの手法の多くは河道内の流速の一部を計測するものであり、流速計測手法として、また連続無人観測として実用に資する技術として認知されている。その中でも、ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)をボートに搭載する横断観測が、水理学的な仮定を必要とせずに、流量値を算出することができる唯一の計測手法である。ADCPはTeledyne RDI社(以下、TRDI社)により1980年代初頭に開発され、当初は海洋計測として使用された。その後河川計測にも使用され始め、例えば2000年になると、米国地質調査所(USGS)は計測データの品質管理手法¹⁰⁾、計測手法のガイドライン¹¹⁾を提案している。しかしながらこれらの手法は主に大陸河川における計測手法であり、日本に代表されるような急勾配河川で適用することは容易ではない。その理由として例えば流量値の強い非定常性、河床面積

動速度の非定常性及び横断的な分布状況等が挙げられるが、その中で最も難しい問題は洪水時の河川水の高流速と水面の振動状況である。

日本におけるADCPを用いた観測は、金木ら¹²⁾によるもの、木下¹³⁾による洪水観測を皮切りに、徐々に観測事例が増えてきた。ADCPを用いた横断観測を成功させるための必須項目は、ADCPを搭載する船艇である。現に、木下はラジコンボートを中心にして多くの船艇の開発を行った¹³⁾。日本でも使用されてきたリバーボートは当初、USGSらの検討により設計されている¹⁴⁾。一方、著者らは、橋梁の上から作業員がロープを用いて船艇を操作する方法を前提とした橋上操作艇の開発を進めてきた。そこでは水面変動の激しい流況の中で上記のリバーボートを含めて4つの橋上操作艇を用いて、揺動の少ないボートの提案を行った¹⁵⁾。その後、同橋上操作艇を用いた、日本の河川特有の難しい条件での計測成功事例が報告されてきている¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾。

ADCPを用いた観測は前述の橋上操作艇の他、多くの周辺機器を組み合わせることで初めて可能となる。それ故に、それぞれの周辺機器の使い方及び選択によっては十

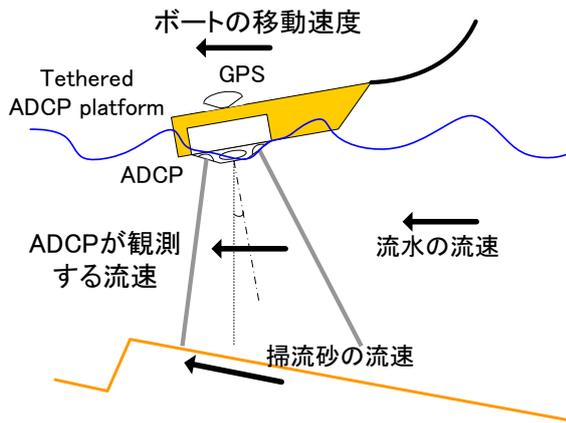


図-1 移動計測の概念図

分に高い精度の計測が出来ない場合も生じる。また計測のためのコマンドに関しても多くの選択肢があることから、精度に影響を及ぼす場合も出てくる¹⁸⁾。

そのような問題意識のもとで、土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) や国内の多くの研究者・技術者が、国土交通省等と連携しながら、流量観測技術の高度化の取り組みを進めてきた。著者らは、それらに関連したADCPの横断観測に関する既往の技術論文及び報告書等を基に、日本の河川に代表される急流河川におけるADCPを用いた標準的な流量観測手法を提示することを本報告で試みる。具体的にはデータ欠損の少ない観測を遂行するためのADCP観測に必要な周辺機器¹⁵⁾²⁰⁾²¹⁾、高い品質の観測結果を得るためのコマンド設定、橋上操作艇の操作方法、精度の定量評価¹⁸⁾¹⁹⁾である。本報告では周辺機器の選択に関して特に重点的に説明することとし、データの品質管理に関する詳細は岡田らの論文²²⁾を参考にされたい。また著書らは、これらの議論をまとめるためにADCPを用いた高水流量観測マニュアルの作成を試みている。最後にその概要を紹介する。

2. ADCP観測に必要な周辺機器

ADCPを用いた流況及び流量観測を行うにあたり、安全であること、安定した計測であること、計測値の信頼性が高いことが求められるが、そのためには複数の周辺機器が必要となる。具体的には、(1)GPS、(2)橋上操作艇、(3)データ転送装置、(4)外部コンパスである。この章ではそれらの必要性を説明する。

(1) GPS

図-1はADCPによる移動計測に関する概念図である。ADCPに限らず、観測船（ここでは橋上操作艇）に搭載した計測機を移動させて計測する場合、一般的に次の式のようなになる。

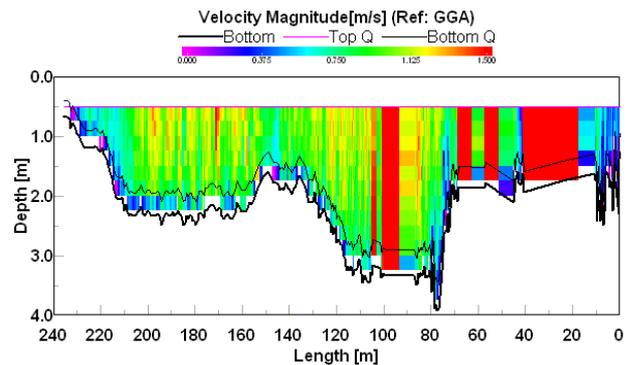


図-2 絶対流速分布と河床形状¹⁹⁾

$$\vec{V}_{abs} = \vec{V}_{non-reference} + \vec{V}_{boat} \quad (1)$$

式(1)の左辺が計測結果として必要な流速（図-1の流水の流速）、右辺第一項がADCPの出力結果（図-1のADCPが観測する流速）、右辺第二項が観測船の移動速度（図-1のボートの移動速度、すなわちADCP本体の移動速度）となる。式(1)が示すように、流水の流速の計測精度を向上させるには、ADCPの計測精度もさることながら観測船の移動速度に対する精度を上げる必要がある。観測船の移動速度を計測するために、WH-ADCPはボトムトラック機能を内蔵している。それが出力する速度は対地速度と呼ばれており、河床が移動しないという条件において、これを観測船の移動速度と考えることができ、またこの計測精度も高い。しかしながら、河床が移動する場合はその限りではないばかりか、逆にそれを掃流砂の速度とし、掃流砂量として換算する手法も提案されている²³⁾²⁴⁾。このような条件では高い精度を持つGPSを併用し、そこで得られる位置情報の時間差分から観測船の移動速度を算出する必要が生じる。RTK-GPSを使用するには、GPS端末が二台、その両者でデータの交換をするための無線機が必要で、全体のシステムを構成するためには、ADCP本体以上の価格が必要である。また、橋上操作艇を用いる際の水面状況の激しさ、観測準備などの手間、トラブルシューティング等を考えると、観測機器全体を含んだシステムの構成は単純であることが望ましい。近年はVRS-RTK-GPSが日本国内で使用可能となり、RTK-GPSの半分以下の価格でありながら、GPS機器単体で高精度の観測が可能になっている。これらを用いることで観測船の移動速度を正しく計測することができる。RTK-GPSの位置情報の精度は数cmでありその差分から移動速度を求めると、オーダーで数cm/s程度となる。また最近では、VTG(Vector track an Speed over the Ground)を取得できるGPSが比較的安価に購入できるようになってきた。この情報は衛星とGPS本体のデータ通信に使用している電波のドップラー効果による周波数変化を活用し、GPS本体の移動速度を算出するものである。位置情報とは独立して移動速度を算出している点に特長がある。



図-3 著者らが作成したトリマラン型橋上操作艇¹⁵⁾



図-4 市販の高流速低揺動型曳航ボート

RTK-GPSを用いて高い計測精度を確保するためにはRTKモードで計測することが必須となる。しかしながら計測条件が悪化すると例えばNMEAフォーマットであれば、GPS quality indicatorが「4」から「5」となり、観測船の移動速度の算出に大きな誤差をもたらす、突発的に大きな流速値を算出したりすることがある。その事例を図-2に示す。このようなことが起きた時は、二つの選択肢があり、一つはこれらのデータを採用しないこと、VTG情報を用いて補正することなどである。しかしながら実際には、GPSの計測精度が落ちることによって発生するこのような流速値の誤差に関しては、後者の補正方法でかなり補正できることがわかっており、後者の方法で積極的に補正することが推奨される。まこれらの詳細は参考文献を参考²⁰⁾にされたい。

(2) 橋上操作艇

揺れにくい船艇を用意することは、確実な計測を行う上で必須項目となる。これまで著者らは複数の機会を経て、市販のトリマラン型の橋上操作艇や著者らの作成してきたモノハル型の橋上操作艇などを試行してきたが、最終的には図-3及び図-4が示すトリマラン型の橋上操作艇のデータ取得率が最も高い事がわかった¹⁵⁾。

すなわち、橋上操作艇を高流速に対応できるトリマラン型とすることで過去に著者らが作成したモノハル型と比較するとデータ取得率が飛躍的に向上した。特に水面が波立つような状況の中で、モノハル型はその波の震動を船艇全面で受けるため、揺れが激しく、時に跳躍をし、ADCPのデータ取得率が極端に低下した。WH-ADCPは傾きが15度以上になると、データを欠損とするように設計されているためである。ADCPそのものはプロファイラ技術であり、大きく傾いたときにデータ欠損とする

表-1 図-4と同等の橋上操作艇を用いた観測結果の成功事例

計測場所	観測された最大流速	観測者
千代田実験水路	6 m/s	北海道開発局 帯広開発建設部
利根川大正橋	5.5 m/s	株式会社水文環境
黒部川	4 m/s	富山県立大学
黒部川新川黒部橋	3.5 m/s	土木研究所

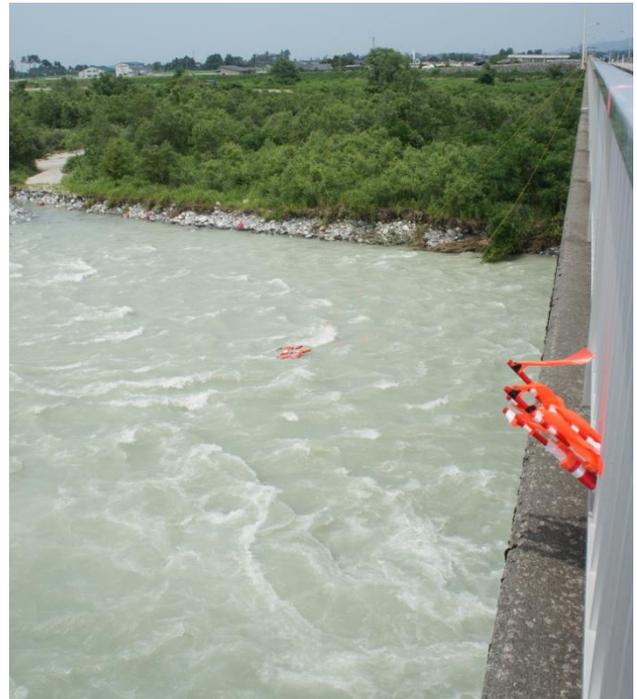


図-5 黒部川新川黒部橋における観測事例（写真中央は高流速低揺動型曳航ボート、ここでの最大の表面流速は3.5 m/s程度、周囲の水面状況は白波が立ち大きく振動している）

設定は妥当とも言える。したがって、水面が揺れたとしても船は揺れない船艇にすることが理想的な対処法である。実際に図-3及び図-4の高流速に対応できるトリマラン型橋上操作艇は、同じ実験条件において、揺れが極端に軽減された。撮影したビデオから、水面の波がメインハルとサイドハルの間から抜けている様子が明確に確認され、波の震動の影響が低減されていることが要因であると推定された。なお、トリマラン型の場合、モノハル型に比較すると水面に浮遊している流下物に絡まりやすいのではないかと、という懸念がある。図-3で示すような流下物よけのゲージの搭載も選択肢の一つとして考えられるが、実際のゲージの効果については残念ながら確認できていない。今後の課題は、このゲージによる流下物よけの効果、ゲージの流体抵抗による余分な揺れの発生状況の確認等である。しかしながらこれまでの流量観測の事例では、トリマランに流下物が引っ掛かるような事例は紹介されていない。洪水中には葦のような草が固まりとなって流れていることが良くあるが、トリマラン型

の橋上操作艇はそれらの上をそのまま越えており、多くは問題となっていない。

図-3のトリマランと図-4の高流速低揺動型曳航ボートを比較すると図-4のボートは耐揺動に対する性能に関しては同等又はそれ以上であることを確認した。また図-4の写真右上にはADCPを含めたその他の周辺機器をまとめたユニットが示されているが、これは観測現場の作業を熟知した技術者が単純化したものである。このようなユニットを含めた橋上操作艇を用いることは、観測の準備の時間を短縮し、初期設定を的確に行うことができ、確実に観測を実施する上でメリットは大きい。

図-4の高流速低揺動型曳航ボートが日本の市場に流通し、すでに複数の高流速条件下で計測が行われている。表-1は著者らの観測結果も含めて図-4の橋上操作艇及び同等の船艇を用いた、高流速条件下での計測成功事例に関して、著者らが写真等情報提供を受けたものを示している。これを見ると、かなり厳しい流速条件下で計測が成功していることが理解できる。また定量的な流速値は不明であるが、海外にもそのような厳しい流況条件下での観測成功例が複数あるようである。これらの一部は、例えばインターネット動画サイトのYoutubeにおいて、「High Speed Riverboat」と検索すると、「Oceanscience High Speed Riverboat」として図-4と同じ色、黄色の船艇等複数の画像を閲覧することができるが、これらは基本的には同じ船艇である。これらの映像によってはかなり厳しい流況におけるボートの挙動を見ることが出来る。また図-5に著者らが黒部川新川黒部橋で計測したときの観測状況を示す。このときの表面流速はそれほど速くはないものの、水面には白波が立ち、大きく振動している。このときのフルード数は0.7程度であったが、橋上操作艇は安定していた。

(3) データ転送装置

観測を成功させる上でデータ転送装置の役割は大きい。WH-ADCPで観測を行う上で、データ転送装置は三つの役割を担う。それらは1) 観測が確実に実行されていることを確認すること、2) WH-ADCPとGPS、音響測深機等を同期させること、3) 流況や河床高をオンラインでモニタリングすることである。

最も重要なのは一つ目の項目である。本報告のADCPを用いた流量観測は複数の電子機器に依存しているため、何らかの原因で不具合が発生する可能性がある。個々の機材のみならず、ケーブルやバッテリーに至るまで、すべての構成要素が完全になって初めて正しい観測が可能になるため、観測を実行する技術者はデータの取得状況を常に観察する必要がある。観測の開始時のみならず、橋上操作艇を橋からおろして水面に着水するとき、観測中に橋上操作艇が転覆したときなど、特に橋上操作艇が大きな衝撃を受けた時、何らかの原因でデータ転送が切れる場合がある。そのようなときは直ちに橋上操作艇を



図-6 ラジコンボートの一例

引き上げ、原因を解明し修正し、再度、観測を実行しなければならぬ。それゆえ、データの転送状況、観測の実行状況を常に確認する必要がある。

二つ目の項目は例えばRD社が配布しているWinRiverを用いて三つのデータを同期させることである。これを行うことで観測中における大雑把な流量の算出が簡単になり、データの後処理も簡単になる。

最後の項目は、現場の流況、河床高を把握することで、ADCPで観測すべき領域の決定に役立つ。

(4) 外部コンパス

ADCPは自らの方位情報を得るために内部に磁気コンパスを有している。ここから得られる情報によりADCPの向き、流向などが算出されているため、曳航観測には重要な周辺機器の一つである。しかしながら河道内に設置されたH鋼や矢板護岸、水管橋などの鋼構造物による磁場は観測結果に大きな影響を与えることが知られている。また前述のようにADCPの観測船には複数の周辺機器を搭載する必要があり、十分に注意を払っていても、わずかでも方位情報に誤差を生じさせるような磁気が存在することがあれば、流量値にも影響が及ぶ。この問題は特にラジコンボートの設計に大きな影響を与えた。例えば図-6は著者が過去に試作したラジコンボートの一例である。ここではラジコンエンジンが強い磁場になること、ADCPのトランスデューサ表面を常に水没させておく必要があることから、ADCP本体をラジコンボートの船尾に搭載する必要が生じ、一方で、船体全体として極端に大きくならないこと等の制約から、結果として図-6に示すような船艇が試作された。この船の特徴は写真が示すように船尾にGPSのアンテナを設置しその下にADCPが搭載してあること、また船艇の中央より前のネット内にガソリンエンジンを搭載していること、エンジンの後方に赤い筒のような構造があるがこの中心にファンがあることである。この船は船首方向に重心があること、エンジンによる推進力が中央付近から発生することから、エンジンで加速すると船首が水面に突入する

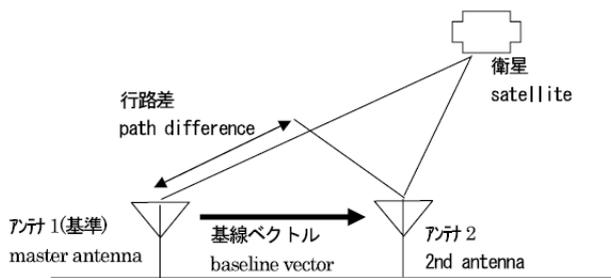


図-7 GPSコンパスの方位計算原理²⁶⁾

ような構造であり、残念ながらADCPを用いた洪水観測には不向きなラジコンボートとなってしまった。これらの問題を回避しつつラジコンボートを設計するためには、船艇が大きなものにならなくてはならない。また橋上操作艇本体についても、後述する外部コンパスが何らかの理由により故障した場合のことを考えて、磁気フリーの環境を用意しておくことが推奨されるべきである。

このように内部コンパスに関わる問題は既に認知されており、例えば、ADCPの開発会社であるTRDI社は、コンパスキャリブレーションを行うことをマニュアル²⁵⁾に明記している。しかし、そこに示された手法は日本の河川での適用はほぼ不可能に近い、河道内の鋼構造物などによる環境磁場には対処できない、という問題がある。磁場の影響を受けない外部コンパスとしては、大型船でADCP観測を行う際に利用されている光ジャイロやレーザージャイロと呼ばれるものがあるが、数百万円と高額である。一方、比較的安価なものとして、電子コンパスがあるが、これは半導体式の磁気コンパスであり、電子部品ではあるものの、結局磁場の影響を受けてしまう。このため著者は、価格も比較的安価で、近年海洋観測での使用実績が多くなってきているGPSコンパス²⁶⁾を使用した。GPSコンパスは、2つのGPS受信機を用いて、それらの相対的な位置関係からリアルタイムに方位を求めるものである。ADCPの橋上操作艇の場合、船首方向もしくは船首と直角方向に2つのアンテナを配置することが可能であるが、本研究では橋上操作艇のサイドハルを利用して2つのアンテナを装着させた。方位計測原理は図-7に示すとおり、まずアンテナ1(基準)からアンテナ2への基線ベクトルを算出させる。これは、衛星-アンテナ1間、衛星-アンテナ2間の両ベクトルの差、すなわち行路差をGPS電波の位相差から算出している。ここで衛星-アンテナ1間、衛星-アンテナ2間の両ベクトルの差から得られる両アンテナ間を結ぶベクトルを基線ベクトルとし、これを船首方位を決定するための目的量とする。衛星の位置に関してはGPSから得られるが、船の揺動による基線ベクトルの方向は未知である。ここでアンテナの方向を複数変化させながら幾つかの行路差を計算し、測定で求めた行路差と、計算で求めた行路差を比較し、誤差が最も小さくなる基線ベクトルを求めることで、真の基線ベクトルの方位を推定する。この計算を毎秒行え

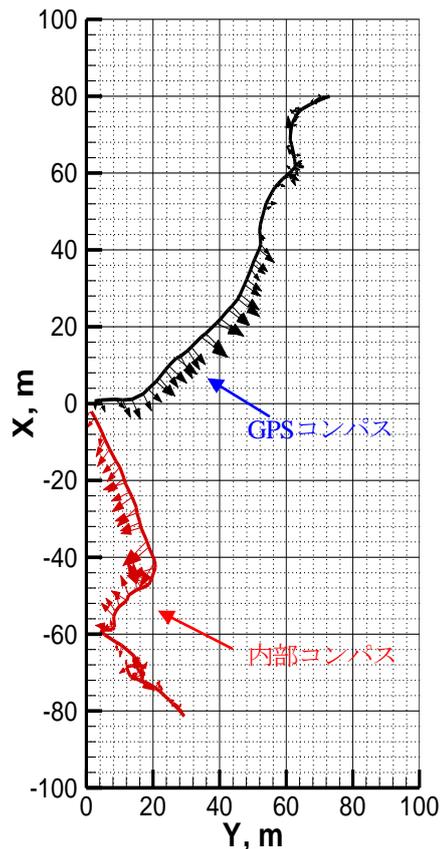


図-8 磁石を搭載した状態での観測結果
(流況及びボトムトラック航跡)

ば、リアルタイムで船首方位を得ることができる。

方位計測自体は一つのGPS衛星からの信号をベースにするが、最初に自器の位置を特定する必要があるため、通常のDGPSと同様に衛星を6個以上補足しなければならず、この衛星状態が悪いと方位も計測することができない。

また基線ベクトルはGPSアンテナの配置状況に依存することからミスアライメントを想定し、正しいアライメントの確認とその修正方法を議論しておく必要がある。大型船舶の船底にADCPを艀装しているケースでは、一定距離を直線的に航走させ、GPSによる航跡とボトムトラックによる航跡の偏角からGPSコンパスのミスアライメントを導く手法が用いられている。GPSコンパスの装着時にはこの様なキャリブレーションを事前に実施しておくことが必要である。ただしこのとき河床が移動していない場において行わなくてはならない。

なお、ここで用いるGPSの位置情報の精度はDGPS程度であり、水平方向の精度は1m程度である。このことからここで用いるGPS情報をADCPの位置情報として使用するには精度が粗すぎ、2.(1)で述べたような高精度のGPS情報はいずれにせよ別に必要である。

一方、内部コンパスの方位精度は $\pm 2^\circ$ 程度とされているが、GPSコンパスの方位精度は $\pm 1^\circ$ 以内であり、より精度が高い。内部コンパスに関しては特にメーカー

表-2 観測時の流量値一覧

条件	測線	流量 (m³/s)			
		GPS コンパス		内部磁気コンパス	
		観測流量	往復流量差/ 誤差%	観測流量	往復流量差/ 誤差%
磁石無	1回目往路	86.5	0.8	90.3	2.90
	1回目復路	85.7	0.93 %	87.4	3.26 %
	2回目往路	87.2	1.0	91.1	4.30
	2回目復路	86.2	1.15 %	86.8	4.83 %
	3回目往路	88.5	2.0	87.6	3.70
	3回目復路	86.5	2.29 %	91.3	4.14 %
磁石有	1回目往路	79.3	1.1	62.6	69.40
	1回目復路	80.4	1.38 %	-6.8	248.8 %
	2回目往路	82.3	2.4	66.7	75.20
	2回目復路	79.9	2.96 %	-8.5	258.4 %

表-3 ADCP観測マニュアルの目次

1	総説
2	観測機器の構成
3	洪水流量観測方法
4	精度管理
5	安全対策
6	観測データの処理と流量算出
A. 1.	ADCP のテクニカルマニュアル
A. 2.	ADCP コマンドマニュアル
A. 3.	ADCP を用いた高水流量観測仕様書例
A. 4.	ADCP を用いた高水流量観測積算基準案
A. 5.	用語集

であるのに対して、内部磁気コンパスは3~5%程度であり、GPSコンパスを用いることで往復による流量差が少なくなることがわかる。他方、磁石を搭載した場合、内部磁気コンパスを用いた流量値は異常な値を示している一方で、GPSコンパスはその影響を受けず、磁石を搭載しない場合の流量値とほぼ同じ値が得られている。内部コンパスを用いた実際のADCP観測において、観測船のエンジンや、他の観測機材の中に磁場を発生させる物体が含まれていた場合などには、このような状況に陥ることは十分に考えられ、GPSコンパスの現場観測における効果は非常に大きいと期待される。

(5) 周辺機器に関するまとめ

ここまで4つの周辺機器に関して必要性を述べてきた。これらを組み合わせた結果として、全体的なシステム構成は図-9に示すようになる。これらは、ADCP本体、橋上操作艇、外部コンパス (GPS コンパス) , GPS (RTK-GPS) , データ転送装置 (RemoADCP) である。河口部での流況調査や低水流量観測等の場合、必ずしも橋上操作艇を使用する必要はなく、有人船を用いた方が高い観測効率が期待できる。しかしながら洪水観測の多くの場合は2章で紹介した周辺機器すべてを使用することを提案したい。

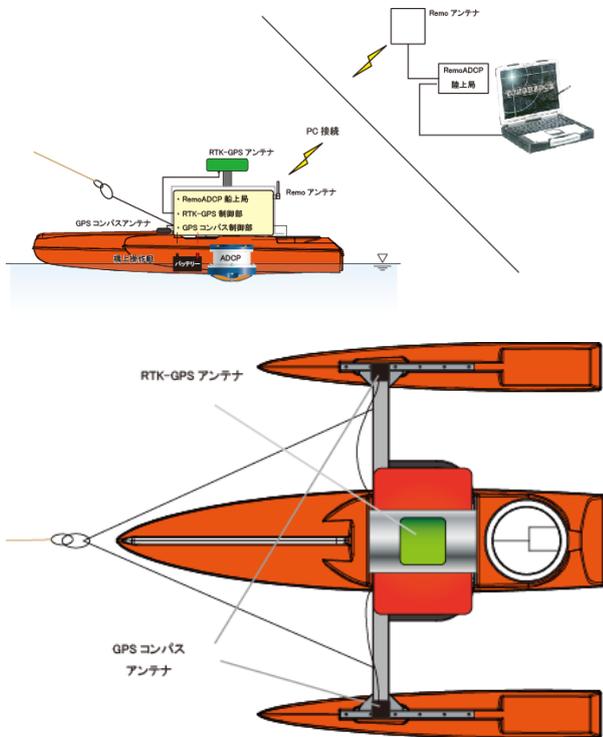


図-9 観測機材構成

のカタログなどには標記されていないため不明確ではあるが、Davidら²⁷⁾によると、船の加速度から起因する内部コンパスの追従の遅れが、流速計測値に対して少なからず影響を与えることを示唆していることを付記する。

以下に外部コンパスの適用事例を示す。図-8は観測船に意図的に強い磁気を持つ磁石を搭載した場合の観測結果の一例を示す。GPS外部コンパスを用いた場合が、現場における状況を正しく示しており、内部コンパスを用いた結果は計測状況を全く反映しない結果となった。

次に、著者らが観測した複数の横断観測により得られた流量値を表-2に示す。磁石を搭載しない状態における流量値は、GPSコンパスによる往復流量誤差が1~3%程度

3. ADCPを用いた高水流量観測マニュアル (案)

著者らは、周辺機器の説明と使用方法、高い品質の観測結果を得るためのコマンド設定、橋上操作艇の操作方法、精度の定量評価に関して説明を行うために、ADCPを用いた高水流量観測マニュアル (案) の作成を試みた。ここにその概要を説明する。

ADCPを用いた高水流量観測マニュアルは二つで構成する。一つは主に河川管理者等の流量観測に関わる業務発注者に向けた簡易なマニュアルであり、もう一つは主に受注者等の技術者に向けたマニュアルであり、詳細な技術的な説明である。日本に流通している曳航型のAD-



図-10 モノハル型の橋上操作艇（著者らの試作ボート）

CPはTRDI社、ソソテック社の二社である。これらの二つには大きな違いがあるが、共通点も多い。また河川計測目的のADCPとしては、日本では現時点でTRDI社のものが多く利用されている。著者らが作成した二つのマニュアルのうち、前者に関しては両者の共通する項目を記述するように試みた。また後者に関しては、実際の運用で必須となる詳細な技術情報、またその解説を含んでいるため、TRDI社のADCPに関して説明している。表-3にADCP観測マニュアルの目次を示す。また付録には河川管理者が必要と思われる観測仕様書の作成例、観測の積算基準案を記載した。これにより予算申請から適正な価格での契約等、観測方法、観測結果の品質管理に至るまでADCP観測に関わる必要な情報を網羅した。

これらは土木研究所資料として公表する予定であり、土木研究所ICHARMのホームページからもダウンロードできるようにする予定である²⁹。

4. まとめ

著者らは本報告の中で、日本に代表される急流河川におけるADCPを用いた標準的な流量観測手法を提示することを試みた。ここでは主たる構成要素は二つあり、一つは周辺機器を駆使してデータ取得率・計測結果の質を向上させることである。もう一つは取得したデータの品質を評価することである。両者はお互いにフィードバックしなくてはならない。

このような新しい観測手法を今後確立していくために重要なことは、このような水理学的に仮定が少ない観測技術を用いた流量観測値が水文情報として継続的に取得・保存されていくことを目指すべきであることである。その観点からは、流況や洪水規模に応じて観測手法を変えることは望ましい状況ではない。例えばある流況まではADCPを用いて、それを超える流況では浮子測法を用いることにすると、一貫した精度管理が難しくなる。本報告で紹介した高流速低揺動型曳航ボートの性能の評価¹⁵をするまでは、このような選択を取らざるを得ない状況

は非常に多いと想定されていた。現に、著者らはかつて流速が6m/sを超える河道において、図-10のモノハル型の橋上操作艇を用いてADCP流量観測手法を試みた。写真は如何にも成功事例のように見えるが、このときのボートは大きく揺動し、かつ飛び跳ね、正常な計測結果を得られる状況ではなかった。この場所は本報告の表-1が示す利根川大正橋である。このような条件下では、発注者が苦勞して観測体制を整え、受注が観測準備を整え、橋上操作艇を水面に浮かべて計測を開始したとしても、データが全く取れないことが十分ありえる。しかし、その数年後、高流速低揺動型曳航ボートと同等の船艇を用いて、株式会社水文環境の井上氏は、ほぼ同じ流況におけるADCP横断観測を成功させた。これは技術の大きな進歩に他ならないと考えている。

また著者らはADCPに関する内部技術にもあらゆる視点から検証を行い、もし必要ならば周辺機器を使用することを提案してきた。その代表例が本報告でも紹介しマニュアルにも使用を義務づけた外部コンパスであり、その反対の例が傾斜計である。現況のWH-ADCPの内部傾斜計は液面検出タイプの静電容量変化型である。この内部傾斜計は、図-5や図-10で見られる水面状況においては、計測器の追従速度が遅くなり、それゆえに大きな誤差を生むことが想定された。これを検証するため、著者らはMEMS技術の加速度計を応用した高周波数の傾斜計を用いて、ADCPの揺動が流速値に与える誤差を検証した²⁹。幸いにしてその誤差はほとんどないことが実証されたため、ここでは別途の周辺機器を使用する必要はないと結論づけた。

今後期待されるものは、ここで提案した技術の普及である。ここで紹介したADCP観測のマニュアル（案）は技術の普及のために大きな役割を担うことが期待される。

謝辞：本文中の表-1に関して、寒地土木研究所寒地河川チーム島田研究員から、株式会社水文環境井上氏から、富山県立大学手計先生から貴重な情報を頂いた。また黒部川新川黒部橋における著者の観測においては、中央大学河川・水文研究室岡部技術員、学生、富山県立大学手計研究室の学生の協力を得た。また本報告で説明したいくつかの項目は、土木研究所が過去数年間にわたり国土交通省及び同国土技術政策総合研究所とともに連携して推進してきた流量観測高度化プロジェクトから得られたデータを使用している。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 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
- 3) 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.
 - 4) 萬矢敦啓・大平一典・菅野裕也・深見和彦：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, 土木学会河川技術論文集, 第16巻, pp53-58, 2010
 - 5) 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川での実地検証, 水工学論文集, 第50巻, pp. 709-714, 2006.
 - 6) 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.
 - 7) 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.
 - 8) 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.
 - 9) 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.
 - 10) Kevin A. Oberg, Scott E. Morlock, and William S. Caldwell: Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using Acoustic Doppler Current Profilers, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5183
 - 11) Michael R. Simpson : Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler, USGS Open-File Report 01-1, 2001.
 - 12) 金木誠・寺川陽・吉谷純一・松浦達郎：超音波ドップラー流速プロファイラーの河川流量観測への応用に関する研究報告書, 土木研究所資料, 3719号, 2000. 3.
 - 13) 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.
 - 14) Michael S. Rehm, James A. Stewart and Scott E. Morlock : Tethered Acoustic Doppler Current Profiler Platforms for Measuring Streamflow, USGS Open-File Report 03-237, 2003.
 - 15) 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, 土木学会河川技術論文集, 第16巻, pp. 59-64, 2010.
 - 16) 岡田将治, 橋田隆史, 森本精郎, 増田稔：ADCP搭載無人ボートを用いた四万十川具同地点における洪水流観測, 水工学論文集, 第52巻, 2008.
 - 17) 稲垣達弘・島田友典・横山洋・三宅洋：十勝川千代田実験水路における各手法別の流量観測, 土木学会河川技術論文集, 第17巻, pp41-46, 2011.
 - 18) 岡田将治・萬矢敦啓・橋田隆史・菅野裕也・深見和彦：ADCPを用いた洪水流観測の計測精度評価に関する総合的検討, 水工学論文集, 第55巻, pp1183-1188, 2011.
 - 19) 橋田隆史, 岡田将治, 新井勲, 下田力, 出口恭：ラジコンボートを用いたADCP移動観測の計測精度評価法に関する一考察, 河川技術論文集, 第14巻, pp.295-300, 2008.6.
 - 20) 萬矢敦啓・菅野裕也・深見和彦：河川実務者の観点から見たADCPによる流量観測技術開発の論点, 河川流量観測の新時代, pp. 46-55, 2010.
 - 21) 菅野裕也・萬矢敦啓・深見和彦：外部コンパスを併用したADCP観測に関する提案, 土木学会河川技術論文集, 第17巻, pp35-40, 2011.
 - 22) 岡田将治・萬矢敦啓・橋田隆史：日本におけるADCPを用いた流量観測データの品質管理手法の考察, 河川流量観測の新時代, 2011. (投稿中)
 - 23) Rennie, C.D., Millar, R.G., and Church, M.A.: Measurement of bedload velocity using an acoustic Doppler current profiler. J. Hydraulic Engineering, 128(5):473-483, 2002.
 - 24) 例えば萬矢敦啓・岡田将治・菅野裕也・深見和彦・大平一典：実河川における掃流砂量の計測手法に関する一提案, 水工学論文集, 第55巻, pp1171-1176, 2011.
 - 25) RD instruments; WinRiver User Guide (www.adcp.com)
 - 26) 高良裕二・小川浩治・鈴木弘也・中村幹男・柏柳太郎：GPSコンパス, 日本無線技報No.47 ,pp40-43, 2005.
 - 27) David Gaeuman and Robert B. Jacobson, Aquatic Habitat Mapping with an Acoustic Doppler Current Profiler: Considerations for Data Quality, U.S.G.S. open-file report 2005-1163.
 - 28) ADCPを用いた高水観測マニュアル(案)のダウンロードサイト(予定)：http://www.icharm.pwri.go.jp/research/flow-measurements-Jap/index_j.html
 - 29) 岡田将治・萬矢敦啓・橋田隆史：ADCP搭載ボートの観測時の揺動が流速分布および水深計測値に及ぼす影響, 水工学論文集, 第54巻, pp1087-1092, 2010.

(2011. 7. 31受付)