

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

Key points for developing water discharge measurement techniques
using ADCP from field engineers' perspective

萬矢敦啓¹・菅野裕也²・深見和彦³

Atsuhiko YOROZUYA, 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 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)

³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)

Acoustic Current Profilers (ADCP) are the only device that can measure three dimensional velocity profiles and river bed conditions even during flooding. To fully exert ADCP, it is extremely important to understand their limitations and employ peripheral devices (PDs) effectively. The limitations of ADCP originate from an assumption commonly seen in similar devices. This paper presents flow types which can be measured by ADCP with the limitations, the appropriate usage of PDs combined with ADCP, as well as few technical aspects related to obtaining water discharge values.

Key Words : *Acoustic Doppler Current Profiler, water discharge measurement, limitation, peripheral devices*

1. はじめに

自然河川で流況を把握することはそれほど簡単ではない。特に洪水時の河道内には、流木やゴミなどの流下物が存在すること、また場合によっては河川表面が大きく振動することで、計測を行うという行為そのものに対して恐怖を感じることもある。著者らが経験した必ずしも流量は大きくないが、流況として厳しかったときの表面流速は、最も早いところで6m/s、水面の振動は1m程度あった。そのような状況において、河床がどのように変化しているのか、掃流砂ほどの程度あるかなどは、現象的にも非常に興味深く、かつ工学的にも重要であり、このような現象を把握することができる唯一の計測機器がADCPである。しかしながらADCPがどれほど優秀であったとしても、ADCP単体だけでは河川の流況計測は成り立たず、それを完成させるためには、ADCPを河川表面に接触させるための船体¹⁾²⁾³⁾、ADCP自体の移動速度を計測するためのGPS、また計測の効率をよくするためのデータ転送システム等が必要である。これらの機器を組み合わせることで、ADCPは河川のモニタリング機器としては無限の可能性を持つが、一方で、計測原理故の注意点なども

考慮する必要がある。ここでは安全・確実に信頼性の高い計測を実行するために著者らが議論してきた事を、最も基本的なことから最新の内容にわたり報告したい。なおADCPを用いた計測に関しては、ラジコンボートを使用する方法¹⁾、ADCPを川底に沈めて計測する方法²⁾等、複数の手法があるが、ここでは橋上操作艇を用いた手法を基本として議論を進める。

2. ADCPの計測原理と使用限界

(1) ADCPの計測原理

ADCPの計測原理に関して説明する論文は複数あるため、詳細については参考文献⁵⁾⁶⁾を参照されたい。ここでは著者らの議論が明確になるよう、必要な部分だけ掻い摘み説明を行う。

図-1はADCPの計測原理の概要を示す。図が示すように、多くの profiler 型の流速計は複数の音波をトランスデューサ (図中のADCPの写真の部分) から角度 θ で照射する。ここで実際に計測しているのは、ドップラー効果による音波の周波数の変化であり、これをビーム方向の流速に変換している。この図では二つのトランスデュー

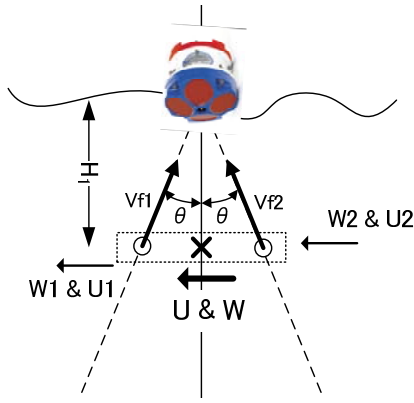


図-1 ADCPの計測原理

サを用いた概念を示しているが、実際には三次元の流速計のため、4つのビームを使用する場合が多い。ここではビーム1により計測されたビーム方向の流速が V_{f1} 、ビーム2により計測されたビーム方向の流速が V_{f2} となるが、これらの流速は、計測地点(ここではトランスデューサから H 離れた場所)の局所的な流速(ここでは $U_i, W_i, i=1, 2$)の合成値に他ならない。それらを式(1)、(2)とする。

$$V_{f1} = W_1 \cos \theta + U_1 \sin \theta \quad (1)$$

$$V_{f2} = W_2 \cos \theta + (-U_2) \sin \theta \quad (2)$$

厳密には $U_1 \neq U_2, W_1 \neq W_2$ であるが、それを $U_f = U_i, W_f = W_i$ とするとこのような流速計測機器の特徴がある。このような手法を用いた計測はADCPだけではなく、気象庁が風の風向風速の計測に実運用しているドップラーソーダも同じような仮定を用いている。このような仮定をすることで、 H_f における流速値(U, W)を以下のように得る。

$$U = \frac{V_{f1} - V_{f2}}{2 \sin \theta} \quad (3)$$

$$W = \frac{V_{f1} + V_{f2}}{2 \cos \theta} \quad (4)$$

ここでは H_f における計測値だけを考慮しているが、あらゆる H における計測を瞬時的(通常の観測では1~2秒に一回程度の出力)に行うことができる。ただしトランスデューサ付近の上層不感帯(音波を安定させるのに必要な助走区間)、サイドローブが影響することによる下層不感帯が存在する。また流速値を算出するための計測間隔(Control Section: CS)は

$$CS = 2H_1 \tan \theta \quad (5)$$

となり、 H_f が大きくなればなるほど、CSも大きくなることから計測条件が一定でないことも、特徴の一つである。

上記の議論は、二つのトランスデューサを用いた結果であるが、同様にして他の二つを用いて、式(6)及び(7)が示すように V, W を出力する。

$$V = \frac{V_{f3} - V_{f4}}{2 \sin \theta} \quad (6)$$

$$W = \frac{V_{f3} + V_{f4}}{2 \cos \theta} \quad (7)$$

式(4)、(7)が示すように異なるビーム方向流速から二つの異なる流速値 W が出力されることがわかる。このとき両者が完全に等しければ上記の仮定が100%成立していることになるが、実際の流況では一般的にこの値がゼロになることは稀である。ADCPはこの両者の差を ΔW として式(8)のように計算して、出力している。

$$\Delta W = \frac{V_{f1} - V_{f2} - V_{f3} + V_{f4}}{2 \cos \theta} \quad (8)$$

(2) 実験水路における比較観測

図-2は実験水路におけるADCPと電磁流速計の流速比較結果である。用いた水路の全長;35m, 幅;1m, 流量;500L/s, 河床勾配;1/1200, 河床粗度を加えるためにピラミットマット(高さ2.0mm, 幅5.0mm)を敷き詰めている。ここで用いたADCPは、StreamProADCP及び、point measurementとして電磁流速計を用いている。電磁流速計は点計測であり、計測位置の違いによる計測条件は一定である。他方、ADCPは式(5)が示すように計測位置によって計測条件が若干異なる。

図-2が示すように、ADCPの結果と電磁流速計の結果は全体的にはほぼ等しく、全体的な流速差は5%程度である。電磁流速計による結果は、下層から中層にかけて対数則に近い分布を示している。また上層の水面付近では流速が遅くなっているが、これは本実験の水路幅・水深比が2程度であることが原因と考えられる⁷⁾。一方、ADCPの結果は下層付近では電磁流速計の結果と良く合うが、上層付近では若干流速が遅くなる傾向にある。David et al⁸⁾が示しているように、上層付近ではADCP本体が水中に没していることから、それ自体が抵抗となり、流速が遅くなっていると推定される。ここで特筆すべき点は、式(5)から計測間隔(CS)は水路底面付近で最も大きくなること、下層付近は河床の影響で流速の乱れが大きいこと

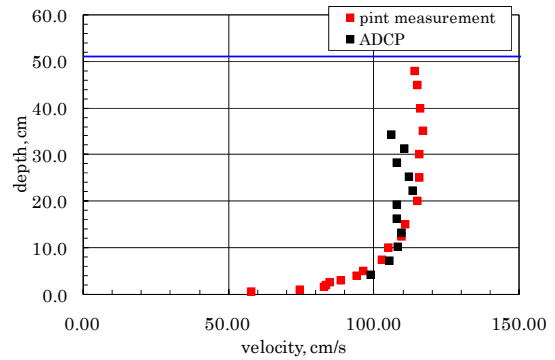


図-2 電磁流速計とADCPによる比較観測

から、ADCP観測では下層付近の流速計測が最も苦手であることが想定される。しかしながら計測結果は電磁流速計に比較するとほぼ等しいことがわかった。

(3) 鉛直方向流速分布の算定方法

乱流の教科書に示されているように鉛直方向の流速分布は複数の異なるサイズの渦によって決まる⁹⁾。その中で最も大きなサイズの渦は、水深規模のものである。その渦を含めてそれより小さいあらゆる大きさの渦により流速が分布することになる。著者らは、ADCPにより得られた流速分布をフーリエ級数展開することで最もらしい分布を得る手法を提案している¹⁰⁾¹¹⁾。ここではその概要に触れることにする。式(9)は一般的なフーリエ級数の展開式である。

$$u(z) = \sum_{k=1}^{k_{mode}} u_{kc} \cos\left(\frac{\pi(k-1)z}{h}\right) + \sum_{k=1}^{k_{mode}} u_{ks} \sin\left(\frac{\pi(k-1)z}{h}\right) \quad (9)$$

ここで $u(z)$ はある高さ z での算定された流速値、 u_{kc} 、 u_{ks} はフーリエ係数、 h は水深、 k_{mode} はフーリエ級数の項数である。ここでは解析に用いた実験結果（図-2と同じ水路を用いた移動床実験の結果）から得られた流速分布を用いて解析の一例を説明する。この図-3は計測された主流方向の流速分布、誤差流速、式(9)を用いて算定した流速分布を示す。このとき式(9)の k_{mode} は ∞ である。この条件で算定した流速分布は観測結果を忠実に再現してしまうため、 $u(z)$ は観測結果同様に凸凹になる。ここで問題になるのは、 k_{mode} をどの程度にすべきかという議論である。ここで議論を少し戻す。図-3に示されている ΔW は式(8)のように示されるが、ここには計測手法の限界ばかりでなく、音響計測機器としてのバラつきなども含まれていることが想定される。すなわちADCPが計測する最も詳細な流速分布とは計測結果から ΔW 程度の流速差を持つものということになる。逆に言えばこれ以上細かい流速分布はADCPでは議論することができない。この考え方をもとに、著者らは式(10)を用いて算定手法を考案した¹⁰⁾¹¹⁾。

$$\frac{1}{n} \sum [u(z) - u_{ob}(z)]^2 \cong \frac{1}{n} \sum \Delta W^2 \quad (10)$$

ここで $u(z)$ は式(9)、 $u_{ob}(z)$ はADCPによる計測結果、 ΔW は式(8)によるADCPの計測結果である。この式を用いた著者らの算定手法とは、 k_{mode} を徐々に増やしていき、式(10)を満たしたときの k_{mode} を採用するというものである。すなわちここで決定した k_{mode} 以上を構成する小さな渦は、計測誤差として判断し採用しない。ここで特徴的なのは、 k_{mode} はある一定の値ではなく、その場で計測された流況に応じて変化することになる。またさらに特徴的なことは、 k_{mode} 以上の小さな渦が構成する流速分は、ADCPでは実質議論することが不可能であるが、それ以上の大きな渦が構成する流速分布は、かなり正しく計測する事を示唆するものである。図-4は上記のアルゴリズム

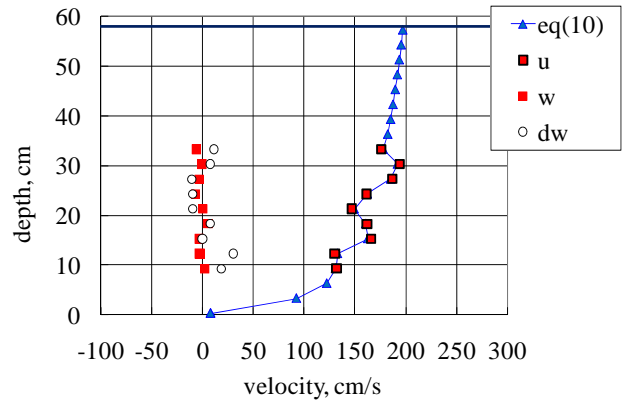


図-3 解析に用いた流速分布：主流方向流速，誤差流速の鉛直分布，式(10) ($k_{mode}=\infty$ の時)を用いた分布

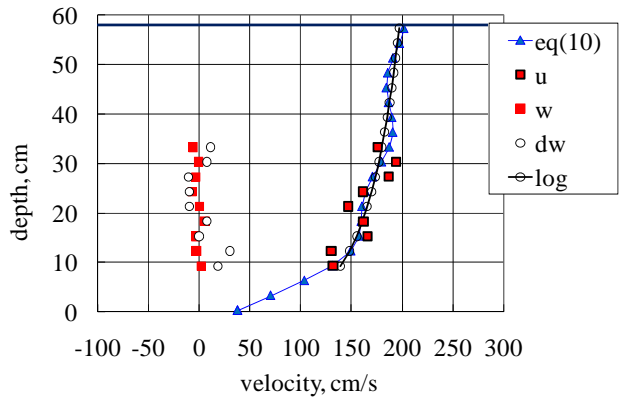


図-4 解析に用いた流速分布：主流方向流速，誤差流速の鉛直分布，式(10) ($k_{mode}\neq\infty$ の時)を用いた分布

により算定した流速分布を示すが、eq(10); \blacktriangle は計測結果のばらつきの間を、 dW 程度の流速差を持ちながら分布していることがわかる。またlog; \circ は、対数則を計測範囲に適用して最小二乗法により求めた曲線であるが、これもまた同様に dW 程度の流速差を持ちながら分布している。

(4) 実河川での鉛直方向流速分布

前節の議論は実験水路内で計測された結果をもとに議論を進めているが、実河川での計測に関しても議論を進めなくてはならない。すなわちここでの水深は50cm程度であるが、水深が5~10mのように大きくなった場合、どのような議論が必要かということである。洪水時の実河川において他の計測機器とADCPの比較観測を行うことは極めて難しいことから、図-2で示したような計測結果は稀であるが、上記の式(9) (10)を用いた議論は実河川においても同様の議論となる。すなわち式(10)で決定され、式(9)で採用される k_{mode} 以下の渦が構成する流速が計測の対象なのであれば実河川での流況もADCPは十分計測をすることができることが理解できる。別の言い方をすると渦の議論に関して相似関係が成り立つという意味である。ここでいう計測が可能な流速分布とは流量計測に最も重要な主流方向の鉛直流速分布を想定している。観測の対

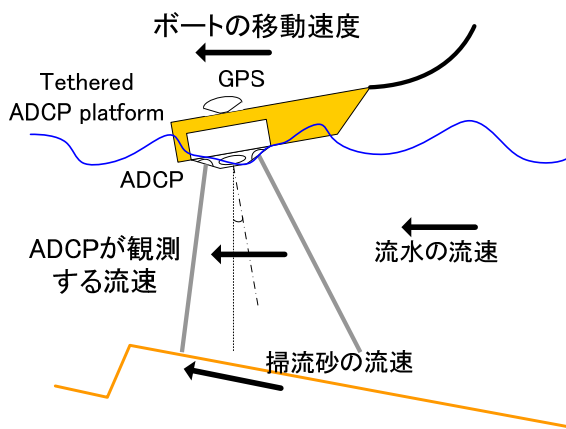


図-7 移動計測の概念図

象が河道湾曲部の二次流の場合、数値計算などを用いて詳細に検討する必要がある。また並列螺旋流のような水深と同規模の渦が逆向きに存在するような現象を考える必要がある場合、少し問題が生じる。これに関しては萬矢らの検討¹²⁾を参照されたい。

(5) コマンドの設定方法

WH-ADCPを使用するにあたり、コマンドの設定が必須となる。またこれらのコマンドにより計測条件を決定することとなる。多くのコマンドは観測対象の水深等の条件に合わせる必要があるためPlan ADCP等を用いて決定することになるが、その他のコマンドとして最も重要なことは観測の精度を保つことにある。詳細は岡田らに詳しい¹³⁾。

(6) ADCPの計測に関する若干の注意点

Work Horse (WH)-ADCPを含めた船体に搭載する種類のADCPは傾斜センサーが内蔵されていて、流れによる船体の揺動でADCPが傾斜したとき、ADCPが出す音波が傾くことによる流速値を補正している。岡田らはWH-ADCPに搭載されている傾斜センサーが液面検知式であることに着目し、そこから派生する傾斜センサーの揺動追従性などの問題点を示唆し、大型水槽での実験及び実河川での観測を実施した¹⁴⁾¹⁵⁾。結果WH-ADCPは、たとえ水面が激しく振動するような観測条件であっても、流量を正しく計測していることを示した。

一方、WH-ADCPは流向を求めるため磁気コンパスを採用している。しかしながら磁気コンパスは、搭載する船艇や計測環境によって影響を受ける。例えば搭載する船艇に強い磁場を作るようなエンジンや、ネジなどどのような小さなパーツにさえも金属が使用されている場合、ADCP周辺の磁場を狂わせ、結果流速計測に誤差が生じる原因となる。これらの影響を排除するため、RD社が発行しているWinRiver User GuideはCompass Correctionのやり方を説明している¹⁶⁾。また磁気コンパスが示す方角と実際の方角には偏角の影響で若干のずれがある。また

偏角の程度は計測する地域によってもことなるため、適切な値を用いてWinRiver内で調整する必要がある。

3. 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)データ転送装置、(3)橋上操作艇である。この章ではそれらの必要性を説明する。

(1) GPS

図-7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。

$$\vec{V}_{abs} = \vec{V}_{non-reference} + \vec{V}_{boat} \quad (11)$$

式(11)の左辺が計測結果として必要な流速（図-7の流水の流速）、右辺第一項がADCPの出力結果（図-7のADCPが観測する流速）、右辺第二項が観測船の移動速度（図-7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(11)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。そのような条件では高い精度を持つRTK-GPSを併用することが必須となる。この高い精度の位置情報の時間差分から観測船の移動速度を算出することになる。RTK-GPSを使用するには、GPS端末が二台、その両方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った。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高精度の観測が可能になった。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。ここでは、位置情報とは独立した手法で移動速度を算出

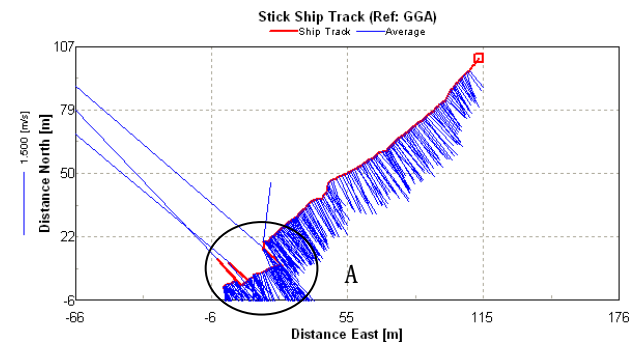
している。

一方Navcom社SF-2110M/RはStarFireシステムを利用しているが、VRS-RTK-GPS単体の金額以下で50cm以内の測位精度と、VTGは3cm/s速度精度を持つ。またその上位機種であるNavcom社SF-3050は10cm以内の測位精度と、VTGは1cm/s速度精度を持つ。このGPSの最大の特徴は、世界中どこで計測しても同じ精度が得られることである。例えばSF-2110Mを用いてメコン川で流量観測を行う場合、相対位置情報は50cm程度の精度で、速度情報は3cm/s程度の精度で流速値を得ることが可能となる。ここで重要なのは川幅が1kmになるような大河川では、計測位置の相対誤差が50cm程度であることはほとんど問題にならず、それよりも流速値が3cm/s程度の精度で計測されることが重要である。このことから日本においてVRS-RTK-GPSで計測するのと同じような精度で、同様にメコン川でも流量観測が可能となる。詳細は販売メーカーのHP等を参照されたい¹⁷⁾。

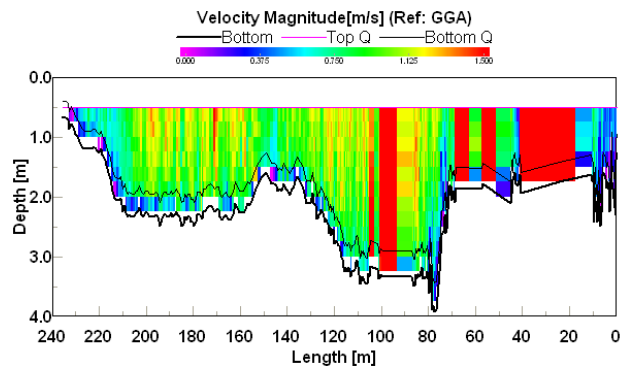
(a) RTK-GPSの位置情報に異常値が発生したときの例

RTK-GPSを用いて計測するときの注意点は、RTKモードで計測するという点である。たとえ高精度・高価格の観測機器を準備したとしても、計測条件が悪くなり観測がRTKモードでなければ、観測船の移動速度の算出に大きな誤差をもたらす事になり、結果正しい流速値が算出されない。これを調べるためには、例えばNMEAフォーマットであれば、GPS quality indicatorが「4」である必要がある。以下に、GPSのクオリティが確保されなかったときの計測例を示す。

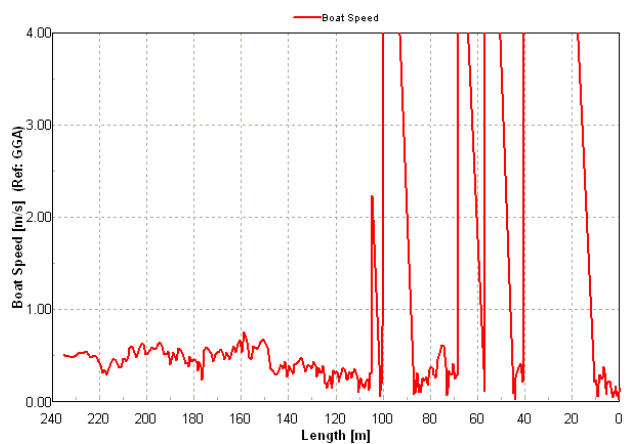
図-8a)b)c)は橋上操作艇を用いたADCPとVRS-RTK-GPSの同期観測結果の一例である。これらの図はTeledyne RD Instruments社のWinRiverを用いて描画した。図-8a)はADCP観測時の航跡及び平均流速を示す。このときの橋上操作艇の移動は右岸から左岸へ向かって行われ、流向は北西から南東となっている。図中の領域Aが示す付近で航跡に4カ所程度の不連続な点が生じている。そのときの河床高、絶対流速分布を図-8b)に示す。流速は0~1.5m/s程度の値を持つが、ところどころ流速が極端に早い部分が存在する。例えば20~40m, 60m近辺に2カ所、100m近辺に1カ所である。ここでは同時に位置アンサンブルあたりの距離が大きくなっている。図-8c)はRTK-GPSから算出した橋上操作艇の移動速度を示す。橋上操作艇の移動速度は、作業員がロープを用いて橋上を歩きながら操作したため、作業員が歩く程度の早さにはならない。ここでは0.5m/s程度である。しかしながら2m/sを超えるような場所が5カ所存在する。この位置は図-8b)で流速が早くなっている位置と同じであった。このようなことがおきている場所と図-8a)の橋上操作艇の航跡の不連続点是对応している。図-8a)b)c)から言えることは、GPSが出力する座標値が異常値を持つと、航跡が示すように極端な不連続性を示し、その座標値の時間差



(a) ADCP観測の航跡



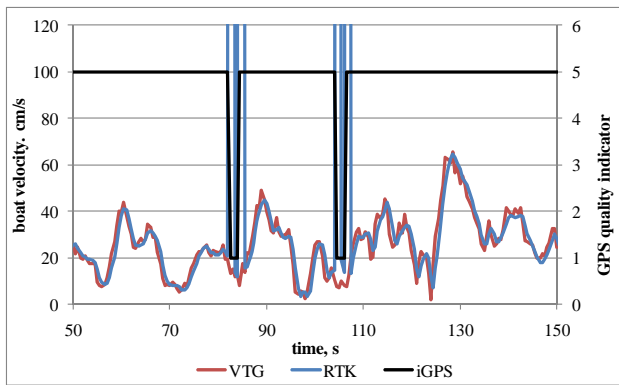
(b) 絶対流速分布と河床形状



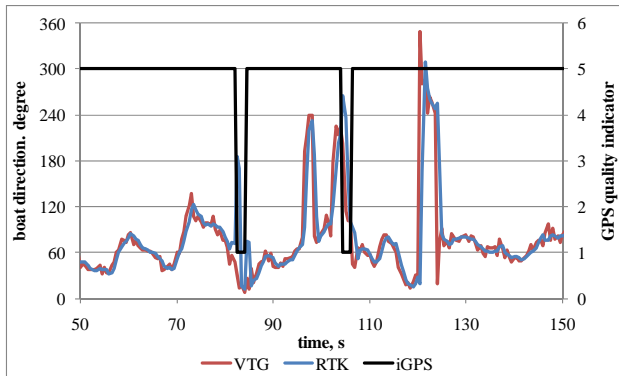
(c) ボートの移動速度

図-8 WinRiver を用いた計測結果の一例

分から算出される橋上操作艇の移動速度も異常値となる。このため式(11)が示すように、橋上操作艇の移動速度の異常値は計測された絶対流速（流水の流速）に異常値として反映されるということである。この一連の観測でGPSのクオリティは時系列として観測当初「5(Float RTK-GPS)」、途中「1(GPS単独測位)」、最終的には「4(RTK)」となった。このような計測状況の観測結果は本来であれば「正しい観測」として採用すべきでは無いのかも知れない。しかしながら、現場における洪水観測では、電子機器を扱っている以上、あらゆる問題が起きる可能性があり、さらに洪水のピークが短時間を通りすぎる可能性もある。このような状況の中で、現場の技術者が苦労して取得したデータを不採用にするのは何とも切ない話である。次の節ではGPSの異常値が発生したと



(a) 移動速度とGPS quality indicator



(b) 移動方向とGPS quality indicator

図-9 ボートの移動方向・速度の時系列

きのデータを正しい流量観測結果として採用するための工夫を説明する。

(b) VTG情報を利用することの意味

図-9(a) (b)はボートの移動方向・速度とGPS quality indicatorの時間変化を示す。これらら図-8と同じ観測結果を用いて、その特徴的な一部を取り出した。青線が示すRTKはGPSの位置情報からそれらを時間的な差分を取りさらに時間を合わせるための平均を取っているため、かなり平滑化されている。他方VTGは生データである。両者を比較するとVTGは若干凸凹している。しかしこの凸凹加減は数cm程度であるため、数10cm程度の流速の凸凹を議論するうえでは無視できる程度である。またiGPSで示すGPS quality indicatorはこの一連の間では「5(Float RTK-GPS)」であり、約80秒と105秒に一度、「1(GPS単独測位)」になっている。このとき、RTKは速度、方向ともVTGとは大きく異なる結果となった。特に速度に関して1400cm/s程度の数字を持つが、これは前述のように歩く速度から考えると明らかに異常値である。他方、それ以外のGPS quality indicatorが「5」又は「4」のときの両者を比較するとほぼ等しい。そのときの両者の差は、数cm/s程度となった。すなわちRTK-GPSが計算する位置座標はそのときのモードにより大きく依存し、VTGはそれによらず最もらしい値を算出することが理解できた。

次にVTGとGGAを使用するときの利点と欠点を議論する。

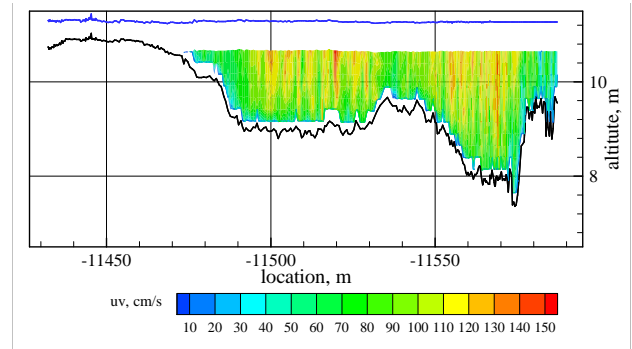


図-10 流速分布と河床高

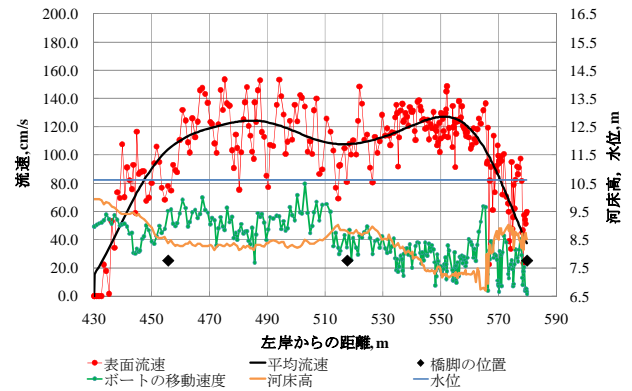


図-11 表面流速分布

ボートの位置を把握する上で、GGAの計測精度はGPS quality indicatorが「4」である限り数cmの範囲でかなり精度が高い。VTGの場合はボートの移動速度を時間積分して位置座標を算定するため、計測を開始してからの時間が長くなればなるほど移動の方向と速度の誤差が加算され、誤差が大きくなる。一方、橋上操作艇の移動速度を計測する上で、GGAとVTGはほぼ同程度の精度があった。しかしながらVTGは必ずしも万能ではない例を著者らは経験している。著者らが頻りに計測を行っている利根川の前橋付近²⁾¹⁴⁾¹⁵⁾における観測では、水面変動が非常に大きいことから橋上操作艇の抵抗と横断観測に使用しているワイヤーの張力のバランスが崩れ、橋上操作艇が前後に激しく動くことがあった。このとき橋上操作艇の移動速度が瞬間的に大きくなることになるが、このような状況で計測する場合、VTGの値は異常値に近い値を出力してしまうことがある。このことからVTGも万能ではないことがよく理解できる。

これらの知見を基に、日本国内においてADCPの観測にGPSを用いて行う場合の注意点を以下のように考える。

a) VTG情報を出力するGPSを用いる、b) GPS quality indicatorが「1」等の値を持つときは、それが「4」になるまで待つ、c) 仮に計測中にGPS quality indicatorが下がる可能性がある場合は、VTGを用いて橋上操作艇の移動速度とする。このような手法を用いて図-8(b)を描き直すと図-10になる。具体的には橋田ら¹⁸⁾が示した河川

横断方向に平行な測線への正射影を行っている。図-10が示すように図-8(b)に存在していたような極端に大きな流速分布がなくなった。また1アンサンブル毎のサイズもほぼ一定となっている。図-11は表面流速、平均流速、橋上操作艇の移動速度、河床高、水位の横断分布及び、橋脚の位置を示したものである。ここで表面流速とは鉛直方向の流速分布に対して対数則を用いて水面付近まで外挿した結果である。また平均流速の算出方法は参考文献¹⁹⁾を参照されたい。

図-11が示すように河床高は左岸からの距離が430mから510mの間では2m程度、520m付近には橋脚があるためか、若干浅くなり、その後右岸へ動くに従い徐々に深くなり570mの位置で最大値である4m程度の水深を取る。ボートの移動速度は左岸からの距離が430mから510mの間では60cm/s程度であり。それよりも右岸側では、40cm/s程度である。これは作業員の歩く速度や橋上操作艇を操るロープ操作によるため若干の振動や局地的に大きな値があるものの、概ね良好である。またこの振動は後述する表面流速の振動とは大きく異なる。この図の左側(450~510mの間)と右側(520~570mの間)で表面流速の振動の様子が異なることが興味深い。左側では振動の周期が数m程度であり、振幅も±40cm/s程度となる。一方右側ではそれほど明確な周期や特徴のある振動が認められない。左側の振動と並列螺旋流の関連性は不確定であるが、河床高がある区間に一定な場所でこのような振動が顕著に出ている。またそれとは別に橋脚の背後では後流による影響か、流速が小さくなっている。

(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²⁾。橋上操作艇の設計には、観測地点までの運搬、現場での取り回し、使用する観測機材の重量に十分耐える浮力、サイドハルのバランス等、多くのパラメータが存在する。そのような中で、現地実験、概略設計、室内実験、最後の現地実験を経て、図-12に示すトリマラン型の橋上操作艇を、国土技術政策総合研究所河川研究室と共同で作成した。現地実験の概要、結果の詳細は参考文献²⁾を参照されたい。ここでは結果の概略だけ述べる。

この橋上操作艇は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、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、データを欠損するように設計されていることが最大の原因である。一方、図-12のトリマラン型橋



図-12 著者らが作成したトリマラン型橋上操作艇



図-13 市販の高流速低揺動型曳航ボート
(ハイドロシステム開発社製)

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。このことは室内実験でも同様の結果が得られた。なお、トリマラン型の懸案事項は、モノハル型に比較すると水面に浮遊している流下物の絡まりである。図-12が示すよう、それを防止するためにゲージを搭載している。流下物に対するゲージの効果については残念ながら確認できていないが、ゲージの流体抵抗による観測への悪影響、すなわち余分な揺れは認められなかった。

このように図-12で示す橋上操作艇の概略設計はほぼ満足のできる形となったものの、実際に同橋上操作艇の普及には少し時間がかかりそうである。今後想定されることは詳細設計であるが、これらは、観測機材の実装のための工夫、船艇の素材等の全体のバランスを鑑みると、市販の製品を有効に活用できればより望ましいであろう。

例えば図-13の高流速低揺動型曳航ボート(ハイドロシステム開発社製)は、著者らのものと設計思想が近いと考えられる。実際、高流速低揺動型曳航ボートは前述の実験と同じ条件で現地実験を行っているが、著者らが開発したトリマラン型橋上操作艇と比較しても同等又はそれ以上の性能であることを確認した。また写真右上には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非常に重要な役割を担うことになる。

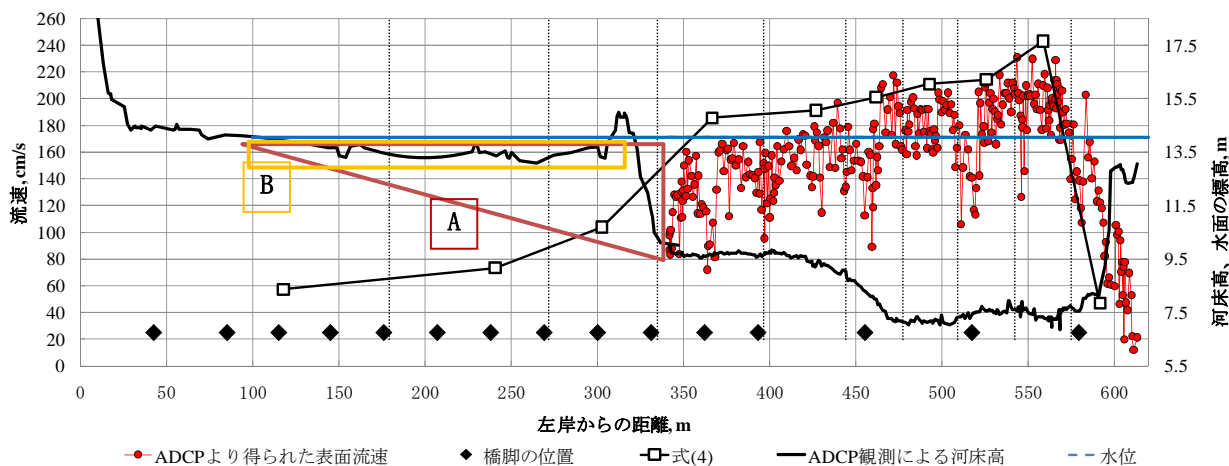


図-14 複断面開水路における流速分布の一例

(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ない。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。これを行うことでデータの後処理が簡単になる。また最後の項目は、流量観測を行う上で必要であるため、それは次の章で説明する。

橋上操作艇による洪水流量観測を実施する上で、これらの課題に適切に対処できるデータ転送・処理ソフトウェアを活用する必要がある(本報告では、株式会社ハイドロシステム開発製のRemo-ADCPを使用している。)

4. 流量観測・流量換算の注意点

(1) 流量計算方法

橋上操作艇を用いた流量観測における流量値の換算に関する詳細は、参考文献¹⁶⁾に詳しい説明があるが、実際に日本の河川で観測を行う上では、例えば橋田らの手法¹⁸⁾が参考になる。

(2) 不感帯の扱い

ADCPの計測では複数の不感帯が存在する。これらは、ADCPが使用している音波の特性や、橋上操作艇の運航状況に起因するものである。これらの多くは、参考文献¹⁵⁾で詳細に記述されているためここでは詳細は述べないが、著者らの経験による注意点だけを述べることにする。

初めに上層不感帯に関して、WinRiverUser's guide¹⁶⁾は三つの手法を説明している。それらは、constant method, power method, 3points methodである。上層不感帯の流量分担率は必ずしも小さくはないため、必ずどれかを使用する必要があるが、これらの手法を用いた流量値の違いは1%程度であり、どれを用いてもそれほど問題がないように思える。しかしながら、著者らは、図-2を用いて解説した通り、power methodのような鉛直方向の計測域の流速分布全体を用いた外挿方法が妥当であると考えられる。すなわち、前述の通り、計測した鉛直分布は、橋上操作艇が存在すること、水面に橋上操作艇が形を持つことにより計測域上層の流速は若干の影響を受ける⁸⁾。Constant methodや3points methodはその計測域上層の計測結果だけを用いて外挿することになり、上層付近の流速を低く見積もることになりかねないからである。

次に下層不感帯に関しては、power method と constant methodが存在するが、実際の河川の流れとしてnon-slipを仮定しpower methodを適用することが妥当であると考えられる。

最後に左右岸の不感帯に関して説明する。これは橋上操作艇が河岸にどの程度近づけるかによる。またWH-ADCPの洪水観測における計測は1m以上の水深を持つこと

が必要となる。ここでは前述の通り、データ転送装置により流況や河床高をオンラインでモニタリングしながら川岸に近づけるところまで近づくことで、流速値、及び河床高に関して仮定を極力なくすことが望ましい。また複断面開水路での流量換算に関する注意点は次の章で説明する。

(3) 複断面開水路で流量を算定するときの注意点

図-14は複断面開水路におけるADCP観測の結果の一例を示す。このとき、水位は高水敷よりも若干高い程度であった。このような状況のとき、高水敷での流速はWH-ADCPを用いて計測することが難しい。それゆえに橋上操作を低水路だけで終了させることは妥当であるが、左岸不感帯の分担流量を算出するときに若干の注意が必要となる。WinRiverにおけるデフォルト設定を用いた左岸不感帯の流量換算方法は、図-14が示すAのように河床高を仮定して換算することになる。単断面水路においてこのような手法は妥当であるが、図-14の場合はかなり過大評価をすることになる。本来は同図のBが示す領域程度の河積を見込むことが妥当であろう。また領域Bにおける流速分布に関しては、前述の通りWH-ADCPの計測は容易ではない。このような場合、この測線上下流において水面勾配を計測することで、ある程度の流速値を推定することは可能であると考えられる²⁰⁾。このとき算定された左岸の分担流量は全流量の10%程度であった。

最後に流量観測を行うにあたり1測線あたりにかかる時間は、1m/s程度の歩行速度、500m程度の測線長のとき8分程度の時間を有する。洪水の流れの非定常性を考えると1往復の平均を流量値とするのが良いと考える。

5. まとめと今後の課題

本報告では、特にTeledyne RD社のADCPを用いて河川流況を計測する手法に関し、ADCPの計測原理及び計測限界、データ処理に関する注意点、周辺機器の必要性と注意点、最後に流量観測手法に関して実際に計測する技術者の目線で記述するように努めた。

これまでADCPの計測に関しては、計測に用いている大胆な仮定、流量の真値が不確定なことから、計測そのものに関して懐疑的な見方が多いように思われる。本報告、これまで著者らが書いてきた複数の文献は、著者ら自身によるものも含めてこれらの懐疑論における論点の一つ一つ応えることを主眼として書かれてきた。このため現場の計測作業において実は最も重要となる観測に関する仮定、それ故に生じる観測の限界、観測において注意すべき事項等、基本的な議論をまとめて議論することを試みたものである。もし本報告の議論が認められるのならば、橋上操作艇に搭載したADCPを用いた往復観測は、河

床高の測定、三次元流速分布等、他の観測機器では得ることが難しい情報を短時間で取得することができる稀有な計測機器であると認知されるべきである。また数ある他の流量観測手法と比較して最も仮定が少ない手法であることも、もっと広く理解されて良い。

今後必要なことは、他の観測手法との比較、流量観測に関して異なる計測結果が出てきた場合の合理的な説明、流況観測における観測限界の特定とその範囲内における実河川の流況の解明（特に河道湾曲部の二次流）である。またADCPを用いた観測項目として、実河川における掃流砂量計測の試みが数多く議論されてきた²¹⁾²²⁾。すなわちADCPを用いた観測では流量・流況から土砂の計測まで水文に関わる技術者ばかりでなく、河川工学者が必要な現象を理解することに大きく役立つことが期待される。

謝辞：本文で使用したADCPの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受けた。著者らの観測サイト²¹⁾¹⁵⁾は平水時においてもボートの挙動確認実験に適切な流れがある場所であるが、この地点は株式会社水文環境の井上拓也氏から紹介を受けた。また同観測地点での流量観測は洪水中の一級河川以上に危険であり難しい観測であったが、株式会社ハイドロシステム開発の高い技術により実行することができた。著者らの開発したトリマラン型の橋上操作艇の概略設計は大阪府立大学工学部海洋システム工学科新井励助教によるものである。最後に第一著者が国土技術政策総合研究所河川研究室に在籍していた当時、ADCP観測を始めるにあたり木下良作先生から多くの指導を受けた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.59-64，2010.6.
- 3) 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.
- 4) 横尾啓介・吉田静男・岡田幸七・野村佐和美：感潮域におけるADCPを用いた河川流量の推定，水工学論文集，第52巻，pp.931-936，2008.2.
- 5) 金子新，伊藤集通：ADCPの普及と海洋学の発展，海の研究，Vol.3，No.5，pp.359-372，1994.
- 6) Michael R. Simpson：Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler, USGS Open-File Report 01-1, 2001.
- 7) 例えば椿東一郎：水理学I，基礎土木工学全書6，森北出版，1973

- 8) David S. Mueller, Jorge D. Abad, Carlos M. García, Jeffery W. Gartner, Marcelo H. García, and Kevin A. Oberg: Errors in Acoustic Doppler Profiler Velocity Measurements Caused by Flow Disturbance, *J. Hydr. Engrg.* Volume 133, Issue 12, pp. 1411-1420, December 2007.
- 9) 例えば Hendrik Tennekes, John Leask Lumley: *A First Course in Turbulence*, Massachusetts institute of technology, 1972.
- 10) Atsuhiko Yorozuya, Sachio Shintaku, Keizo Ejima, Kazuhiko Fukami, and Hirokatsu Kanazawa, Development of a sediment discharge measurement system with ADCP, 10th international conference on Fluid control, measurements, and visualization (FLUCOME 2009), August 17-21, 2009, Moscow, Russia, full paper in CD-ROM
- 11) 萬矢敦啓, 岡田将治, 江島敬三, 菅野裕也, 深見和彦: ADCPを用いた摩擦速度と掃流砂量の算定手法, *水工学論文集*, 第54巻, pp.1093-1098, 2010.2.
- 12) 萬矢敦啓・宇野哲平・木下良作・山下武宣: ADCP 観測値を用いた新たな試み～高度処理について～, *土木学会第62回年次学術講演会*, 2-104, pp.207-208, 2007.
- 13) 岡田将治, 橘田隆史, 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観測, *水工学論文集*, 第52巻, 2008.
- 14) 岡田将治, 萬矢敦啓, 橘田隆史: 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, pp.1087-1092, 2010.2.
- 15) Shoji Okada, Atsuhiko Yorozuya and Takashi Kitsuda: Effect of Fluctuation of a Moving Boat Equipped with ADCP on Velocity-Profiles and Water-Depth Measurements, 33rd International Association of Hydraulic Engineering & Research (IAHR) congress, August 9-14, 2009, Vancouver, Canada, full paper in CD-ROM
- 16) RD instruments; WinRiver User Guide (www.adcp.com)
- 17) 測地衛星技術株式会社 (<http://www.gnss.co.jp>)
- 18) 橘田隆史, 岡田将治, 新井励, 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.
- 19) Yorozuya,A.,Fukami,K.,Shibata,N.,Kanno,Y.,and Imamura,H.; Flow characteristics in actual river based on field observations using ADCP, The Second International Symposium on Shallow Flows(ISSF2008), Hong Kong, 10-12 December, 2008. Abstract on p49; full paper in CD-ROM
- 20) 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, pp. 53-58, 2010. 6.
- 21) 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.
- 22) Atsuhiko Yorozuya, Shoji Okada, Yuya Kanno, and Kazuhiko Fukami: Bed-load discharge measurement by ADCP in actual rivers, *River flow*, 2010.9. Accepted

(2010. 7. 20受付)