

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

QUALITY-ASSURANCE PLAN FOR DISCHARGE MEASUREMENTS USING ADCP IN JAPANESE RIVERS

岡田 将治¹, 萬矢 敦啓², 橘田 隆史³
Shoji OKADA, Atsuhiko YOROZUYA and Takashi KITSUDA

¹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)

²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)

³正会員 修士(農学) (株)ハイドロシステム開発 (〒552-0007 大阪府大阪市港区弁天5丁目10-23)

The authors have been developing an accuracy-evaluation method for flood flow observation with an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). Several field measurements were conducted under severe ADCP measurement conditions characterized by high velocity and highly-frequent water-surface vibration. This paper described main factors influencing measurement accuracy related to velocity/water-depth measurements and reviewed previous observation results. To finalize the development of the accuracy-evaluation methods using "Deviation Discharge Ratio", the authors conducted field measurements under severe conditions with highly sophisticated devices and verified the method with high-quality data sets. Finally it was applied to previous flood observation results obtained in the Shimanto River. .

Key Words : *Acoustic Doppler Current Profiler, Quality- Assurance Plan, Deviation Velocity, Deviation Discharge Ratio*

1. 序論

近年、洪水流観測技術を大きく向上させるADCPに代表される計測機器の開発やそれらを活用した研究も多く報告されるようになってきたことから、条件さえ整えば洪水時においても詳細な流速分布や河床形状の計測が可能になってきた。これらの計測技術が進展していく過程においては、計測したデータの品質管理手法についても当然検討しておく必要があるが、わが国で観測の対象となる高速で、かつ水面が大きく変動する洪水流の観測精度評価については、その難しさから十分な検討がなされてこなかった。しかし、近年の日本国内におけるADCP観測技術へのニーズは、河川の断面流量計測にとどまらず、浮遊土砂量の推定や河床変動の同時計測等まで広がっており、ADCPを用いた流量観測手法をいち早く進めてきたUSGS(U.S. Geological Survey)が提案する手法¹⁾をそのまま採用するのではなく、河川の流況特性や今後の観測者のニーズに対応できる日本独自の評価手法

の確立が必要となる。筆者らは、これまでADCPを用いた計測手法やデータ処理技術の検討に併せて、計測精度評価法についても検討を進めてきている。特に、ADCPを搭載したボートの移動観測で得られた流量の精度評価指標として、単位移動距離あたりの流速計測値に含まれる計測誤差の標準偏差を偏差流速と定義²⁾し、流速場および断面流量の計測精度をそれぞれ偏差流速比、偏差流量比と提案している。しかしながら、これらの評価指標を適用するには、各地点における水深および流速が高い精度で確実に計測できていることが前提条件となる。

本稿では、ADCPを用いて計測した流量データの品質管理手法について、はじめにUSGSが提案しているQA(Quality-Assurance) Planを概説する。つぎに、日本の河川の洪水観測に適用する場合の課題を挙げ、各課題について筆者らが検討してきた成果をまとめる。最後に、四万十川における2009年台風9号出水中の5000m³/sおよび4000m³/s規模の洪水流観測結果を用いて、著者らが提案する偏差流速比および偏差流量比を適用した計測精度の検証事例を示す。

2. USGSのQA(Quality-Assurance) Planの特徴

USGSでは、2005年にADCPで計測したデータに関する品質保証についてとりまとめた技術レポート¹⁾を発行している。このレポートには、単に計測された流量データに関する事項だけではなく、データの品質を確保するための計測地点の選定方法、適切な計測システムの構成、機器の設定、移動床テストの必要性に関する診断方法、ADCPの設定方法、ADCPで計測された流量データの収集と考察方法や機器テスト等についても詳細に記載されている。その中から特筆すべき事項についていくつか挙げると、移動床テスト(Moving-Bed Test)は、ADCPのボトムトラッキング機能では河床変動が顕著な場合に流速値の計測精度が低下する課題に対して事前に実施する。河道内の定点にADCPを静止させ、ボトムトラッキング機能を用いて10分間計測する。河床が移動している場合には、ADCPを静止した状態でも上流方向に移動している様に算出される。10分間に移動した距離を1秒間あたりの平均流速に換算することにより、河床が移動するによる流量算定誤差を評価する。この結果から、移動床速度が断面平均流速の1%を超える場合にはこの方法を使用することとしているが、DGPSを高い精度で使用できない地点があることやADCPの内蔵磁気コンパスとGPSの方位のズレが換算流量に大きく影響する等の課題が挙げられている。そこで、Mueller³⁾は、DGPSを使用しない4種類の計測方法を検討し、その中でも固定した始点から河川を横断し、対岸に着いたら始点に戻る往復観測を行い、ボトムトラッキング機能で算出された航跡の終点と始点の距離と航行時間から河床の移動速度を求め、流量を補正する方法(Loop Correction Method)が最も実用的であることを示している。また、ADCPで計測された流量の品質管理については、USGS独自の“5%ルール”と呼ばれる手法が示されている。これは、まず2往復分(4回分)の計測値の平均し、各計測値の相対誤差が5%以内であれば、その値を計測流量として採用し、5%を超える場合にはさらに2往復計測を行い、合計8回分のデータを平均して計測流量とするものである。この手法は非常に明確であり、米国だけでなく世界中に広まっていることから、一般的にADCPを用いた断面流量計測では、往復した計測値の相対誤差5%以内を目標値とする場合が多い。アメリカの河川の洪水流を想定すれば、USGSが掲げるすべての注意事項を順守すれば問題なくクリアできると考えられる。しかし、この手法が日本の河川の洪水流観測にそのまま適用可能であるかについては疑問が残る。次章では、筆者らが日本の河川におけるADCP流量観測データの品質管理手法の構築に向けた課題として、検討を行ってきた成果についてまとめ、ADCPを用いた流量計測技術の現状を示す。

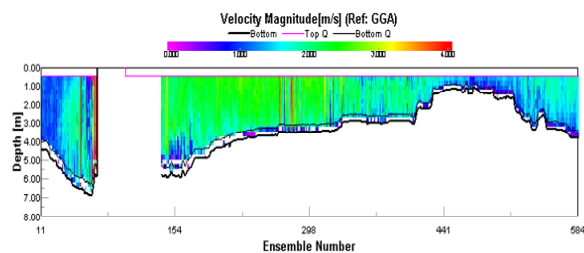


図-1 データ欠測が多いADCP流況観測事例⁶⁾

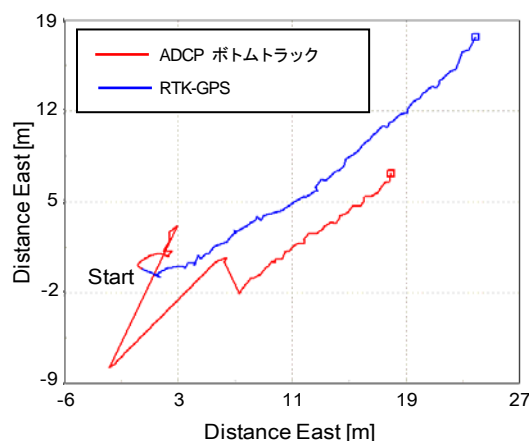


図-2 ADCPのボトムトラッキング機能とRTK-GPSによる航跡の比較

3. 日本のADCP流量観測にUSGSの品質管理手法を適用する場合の課題とそれら検討事例

アメリカと日本の河川の洪水流の違いを考えた場合、まず思いつくのは、流速の大きさと水面の変動である。これはUSGSが指摘する河床変動が生じる場合の課題とも重なる点である。最近の観測事例では、ボートの移動速度をRTK-GPSによる高精度な測位データから求め、流水と河床の速度を算出する方法が一般的となっているため、データさえ取得ができればMuellerが提案する手法を用いる必要性はなくなっている。

ADCPを搭載するボートの揺動・跳躍が顕著に生じる場合には、データの取得率が低下し、流況が激しい区間では、図-1に示すようにデータ欠測が生じることもあるため、この課題への対策が重要と認識されている。また、図-2のように河床が移動してない場合でも、ADCPのボトムトラッキングだけでは正確な航跡を取得できない状況が起こる。この事例からもADCPの洪水流計測にRTK-GPSを併用することが有効であるといえる。さらに、データが取得できた場合でも、水面変動が大きく、ボートが揺動する場合には、ADCPでは水深の傾斜角補正を行っていないこと、傾斜角補正を行っている流速についても、ADCPに内蔵されている傾斜センサーが旧式の液面感知タイプで短い揺動周期に対して追従できない可能性があることから、ADCPの計測精度低下を指摘した⁴⁾。

著者ら⁵⁾は、大型水槽を用いて静水中でADCP搭載

ボートを種々の周期で揺動させ、傾斜角および水深の計測特性を検証している。その結果、厳しい洪水流観測を想定した条件(揺動振幅 ± 15 度が定常的に続く)において、ボートの揺動周期が1~2秒程度まで短くなると、ADCPの内部傾斜センサーが追従できず、傾斜角を過小評価(周期1秒では約1/2)すること、ボートの傾斜角(ADCPの計測値)15度を閾値とすれば、傾斜による補正を行わずに単純にADCPの4つのビーム長さを平均値して水深とする場合でも、計測精度5%以内を十分確保できることを明らかにした。さらに、現地河川において高速流の流量観測を行った結果、高精度のMEMS傾斜センサーを用いて揺動による流速計測値の補正を行っても、図-3に示すように断面積分した流量値に補正前との有意な差が見られなかった。この結果は、傾斜角補正法を用いて流速値に与える影響を調べた結果⁹⁾と一致するものである。すなわち、ADCP搭載ボートの傾斜角はロール角が0度で、ピッチ角が ± 5 度であれば、実際の流速よりも0.37%小さく出力され、ピッチ角が ± 10 度でも、1.52%小さく出力される程度である。ADCPの計測特性として、経験的にデータ欠損が生じない傾斜角15度以内では流速は実際の値よりも最大5%程度小さく出力される一方、水深は実際の値よりも最大5%程度大きく出力されることが要因であり、傾斜角補正を行うことによって、各地点の傾斜角および水深に応じて補正前の単位幅流量が大きくなるアンサンブルと小さくなるアンサンブルが混在し、横断方向に断面積分して流量換算すると有意な差がみられなくなる。この計測で得られた結果は、洪水観測の精度評価において重要な知見となった。

この検討成果を発展させる形で、急流河川の高流速場においても適用可能な揺動を最小限に抑えてデータ欠損が生じにくく、かつ流下物に対して衝突や絡まりにくい橋上操作艇の仕様についての検討も行っている⁹⁾。さらに、ADCPに内蔵された磁気コンパスが河道内に設置されたH鋼や矢板護岸などの鋼構造物による磁場や観測船に搭載された金物等の影響を受けて方位情報に誤差が生じ、流量値の精度低下が生じる課題に対して、外部のGPSコンパスを利用することで、磁場という不確実な要素の影響を完全に排除し、安定した観測データを取得できるようにした⁷⁾。

上記の研究成果によって、日本の洪水流特性である高流速で、かつ水面変動が大きい流れに対しても、データを高い精度で確実に取得する技術についてはほぼ確立されたといえる。その上で、取得したデータの品質管理には、著者らが提案する単位移動距離あたりにADCPの流速計測値に含まれる誤差流速の標準偏差で表される偏差流速(Deviation Velocity)を用いる。この偏差流速を断面全体で積分したものを偏差流量と定義し、断面流量の精度評価指標として、偏差流量と計測した断面流量値の比である偏差流量比を用いる⁸⁾。著者らがこれまでにADCPを用いた洪水流量観測を行った経験から、橋上を

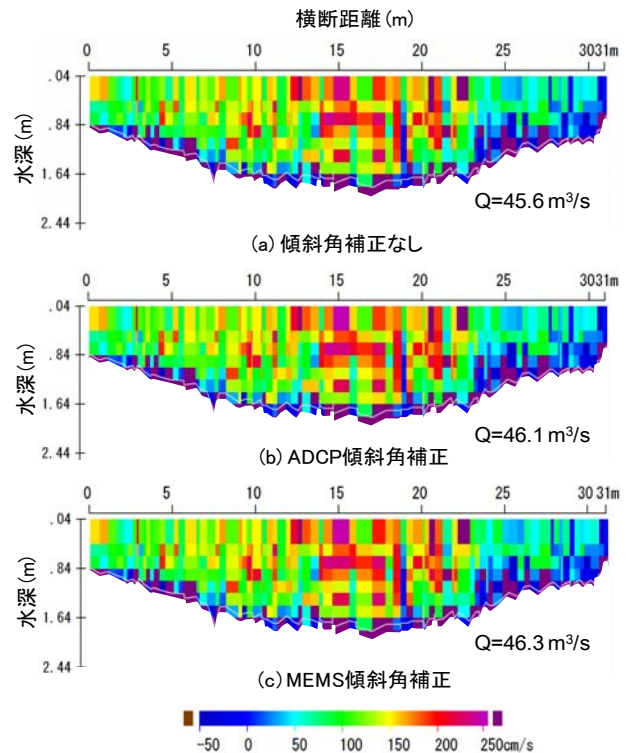


図-3 ADCPおよびMEMSセンサーの傾斜角補正の有無による流下軸方向の流速分布の比較

計測しながら横断移動する速度は、0.5~0.75m/s程度であり、水面幅が400mの河川では往復2回分の計測を行うのに途中の作業を含めて20分から30分を要する。USGSの流量観測ルールに従えば、2往復4回分のデータを取得するのに40分から1時間を要し、往復の流量の相対誤差が5%を超えれば、さらに2往復分のデータを取得する必要がある。アメリカの河川に比べて非定常性が強い日本の河川では、1時間の間に水位が変化し、流況が変わることも一般的であり、2往復分のデータの相対誤差が5%を超えることも予想されることから、この手法をそのまま適用することは難しい。一方、筆者らが提案する手法では、基本は浮子観測と同様に、1時間ごとに往復2回分のデータを取得することとしているが、不慮の事態で片道1回分の計測データしか得られない場合であっても偏差流量比を算出することが可能であり、洪水観測の実状に即した精度評価手法といえる。次章では、四万十川において5000m³/s級の洪水流量データを用いて、偏差流量比を算出し、精度評価を行った結果を示す。

4. 四万十川における2009年台風9号洪水観測データの計測精度評価

2009年に現地観測を行った四万十川の洪水流に適用し、流量観測精度について考察する。図-4に四万十川具同地点における2009年台風9号出水時のほぼピーク時の状況を、図-5に橋上操作艇による曳航計測状況を示す。ピーク時には高水敷も2m程度冠水しており、複断面流れの状



図-4 2009年台風9号による出水状況(ピーク水位)



図-5 橋上操作艇による曳航計測状況

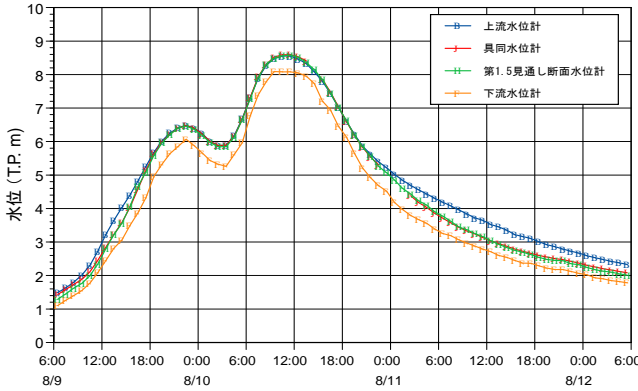


図-6 2009年8月9日～12日における具同地点上下流の水位ハイドログラフと観測期間

況であった。図-6に2009年8月9日～12日における具同地点上下流の水位ハイドログラフを示す。四万十川流域では、8月6～7日にかけて累計100mm程度の降雨があり、8日に一旦収まったものの、日本の南で台風9号が発生し、その影響を受けて9～10日朝にかけて累計450mm程度のまとまった降雨により、水位が上昇した。

水位は図-4に示す通称赤鉄橋と言われる四万十川橋に国土交通省が設置した具同水位観測所において計測しているが、上下流区間の流況を把握する目的で橋から上流側350m地点、下流側100m(浮子観測区間の中間地点)および250mの地点に簡易水位計を計3台設置している。

洪水流観測は、2名の観測者がロープに繋いだADCP専用ボートを四万十川橋上から約50m下流の最深河床断面付近を横断方向に約450m(ピーク時)曳航させて行っている。本観測では1回(片道分)の計測時間をおよそ10～12分間(横断移動速度0.6～0.75m/s程度)とし、単位移動距離あたりのADCPの超音波の発射回数を多くして偏差流速を小さく抑え、横断面内の平均的な流況場を計測している。これについては、往復計測を行った際の断面流速分布がほぼ同様になることから確認している。一方、1回の流量計測に時間を要してしまうことから、断面流量としては往復計測を行った際の平均値を採用している。2009年8月10日の洪水期間中に計16回(8往復分)のデータを得ることができた。洪水流量としては四万十川では中規模クラスであるが、ADCPで橋上観測を行った公表データとしては、これまでで最大級であることを特筆し

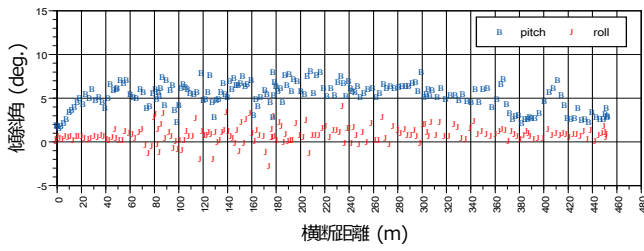
表-1 四万十川現地観測におけるADCPの計測設定条件

| Workhorse ADCP 1200kHz | |
|------------------------|--------------------------|
| 計測モード | Mode12 |
| 計測層厚 | 0.30m |
| 計測層数 | 1-3往復目：70層 4-8往復目：65層 |
| アンサンブルタイム | 70層：3.31秒 65層：3.14秒 |
| ウォーターピング数 | 5ピング (サブ3ピング) |
| ボトムトラック機能 | 有り (5ピング) |
| 固定観測における偏差流速 | 3.28cm/s |

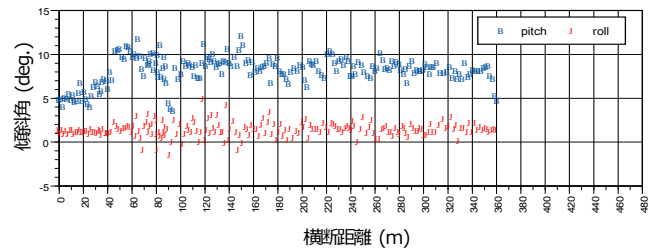
ておく。この観測では、ADCPが計測したデータを無線で岸に設置した専用PCに送信し、リアルタイムに流速分布、断面流量が把握することができる現在最も良く用いられている手法を採用している。表-1にADCPの計測設定条件を示す。水位に応じて計測層数とアンサンブルタイムを変更して観測を行っており、固定観測における偏差流速は3.28cm/sである。

図-7にADCPで計測した流量5095m³/sおよび3992m³/s時の(a)傾斜角、(b)流速分布、(c)偏差流速分布、偏差流量および偏差流量比、(d)偏差流速比分布を示す。横軸は観測開始点(右岸水際)からの横断距離を表している。

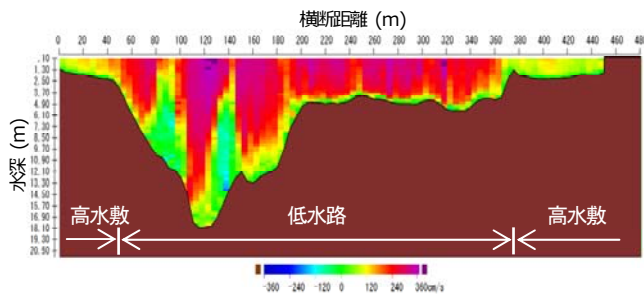
図-7(a)の傾斜角と図-7(b)の流速分布を併せてみると、低水路区間の流速が2m/sを超える流れ場では、ピッチ角が定常的に7度～10度となっており、ロール角は濡筋部(横断距離40m～360m付近)において揺動がみられる。この区間では表面付近の流速が毎秒3.5mを超える地点もあり、さらに橋脚および床固工の後流による周期的な渦が発生し、横断方向に移動させる際にボートの揺動振幅が±3度程度になっている。また、橋脚および床固工の影響により低流速域が確認でき、どちらの流量規模においても同様な流速分布が形成されている。この地点では近年局所的洗掘が進んでいることから、著者らの研究グループ⁹⁾では本観測結果を用いて3次元流況解析を行って詳細な流れ場を明らかにし、洗掘対策や洪水時の浮子を用いた流量観測精度向上のための基礎資料としている。つぎに、著者らが計測精度評価指標として提案する偏差



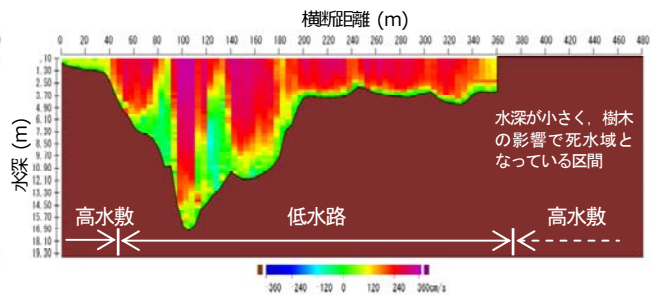
(a) ADCPの傾斜角 ($Q=5095\text{m}^3/\text{s}$)



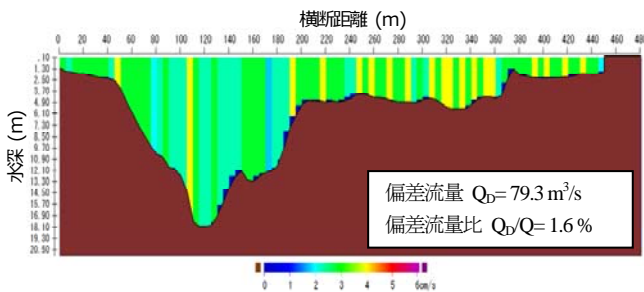
(a) ADCPの傾斜角 ($Q=3992\text{m}^3/\text{s}$)



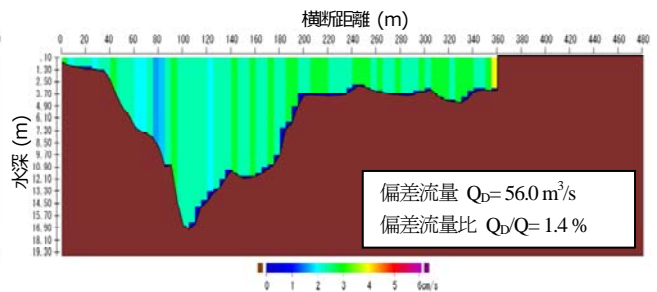
(b) 流下軸方向の流速分布 ($Q=5095\text{m}^3/\text{s}$)



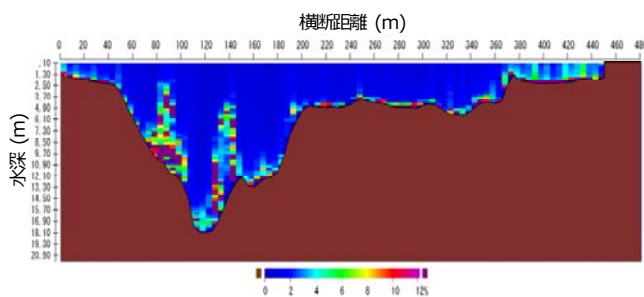
(b) 流下軸方向の流速分布 ($Q=3992\text{m}^3/\text{s}$)



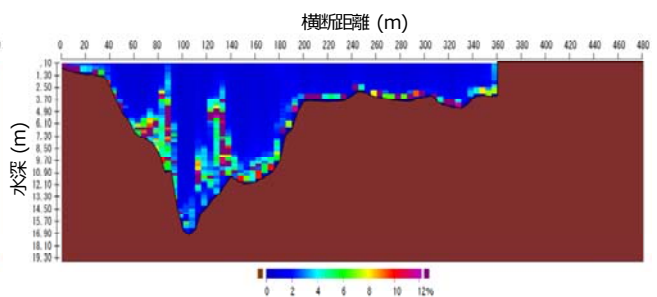
(c) 偏差流速分布 ($Q=5095\text{m}^3/\text{s}$)



(c) 偏差流速分布 ($Q=3992\text{m}^3/\text{s}$)



(d) 偏差流速比分布 ($Q=5095\text{m}^3/\text{s}$)



(d) 偏差流速比分布 ($Q=3992\text{m}^3/\text{s}$)

図-7 ADCPで観測した傾斜角，流速分布，断面流量，偏差流速および偏差流速比分布

流速をボートの単位移動距離(本観測では5mに設定)あたりのピング(超音波発射)数から、横断分布にしたものが図-7(c)である。ボートを移動させる速度によって、偏差流速は異なるものの、流速計測値に含まれる誤差の標準偏差は1cm/s~4cm/sである。この偏差流速を断面積分したものが偏差流量 Q_D であり、計測された断面流量 Q との比が偏差流量比である。流量が $5095\text{m}^3/\text{s}$ の場合、偏差流量 Q_D は $79.9\text{m}^3/\text{s}$ であり、偏差流量比は1.6%である。同様に流量が $3992\text{m}^3/\text{s}$ の場合には偏差流量 Q_D は $56.0\text{m}^3/\text{s}$ であり、偏差流量比は1.4%となる。したがって、本観測で得られた断面流量値に含まれる誤差分はわずか1.5%程度である。つぎに、図-7(d)に示す各グリッドの流速値と偏差流速の比をみると、全断面を通して1~2%である

が、構造物の後流の影響を受ける領域では流速が小さい分、偏差流速比は12%程度まで大きくなっている。偏差流速比を断面全体で平均すれば、前述の偏差流量比と基本的に同じであるが、計測した各グリッドの計測精度を評価できる指標として有効である。なお、偏差流速を算出する際の単位移動距離を2.5mとして計算した結果、流量 $5095\text{m}^3/\text{s}$ に対して偏差流量は $105.1\text{m}^3/\text{s}$ (偏差流量比:2.1%)、流量 $3992\text{m}^3/\text{s}$ に対して偏差流量は $79.4\text{m}^3/\text{s}$ (偏差流量比:2.0%)と偏差流量比は若干大きくなった。これは単位移動距離を小さくするほど、その区間における超音波の発射回数(ピング数)が小さくなるため、偏差流速が大きくなるためである。単位移動距離の取り方の目安としては、横断平均移動速度にADCPの計測設定条件であ

る1アンサンブルタイムを乗じて得られる距離を提案しておく。筆者らの経験上からもこの値は2.5～5m程度となり、この間の値であれば、単位移動距離の取り方を変えても上述の通り偏差流量比は2%程度で有意な差はみられていない。

5. 結論

本研究では、日本の河川の洪水流特性を考慮したADCP流量観測データの品質管理手法について考察するため、ADCPの計測値に影響を及ぼす要因に関する検討成果をまとめ、著者らが提案する評価指標を四万十川の洪水流量観測結果に適用した。わが国特有の高流速で、水面変動が大きい洪水流の観測を行う際には、河床変動による計測精度の低下およびボートの跳躍や計測適用範囲を超える揺動によるデータ欠損を最小限に抑えるためにADCPにRTK-GPSの併用が有効である。ADCP搭載ボートの揺動がADCPの水深および流速値に及ぼす影響は小さく、厳しい条件の洪水流計測においても傾斜角を15度以下に抑え、確実にデータを取得することができれば、各地点における単位幅流量の計測精度は最大でも5%以下に収まる。これらの成果から、高流速でも適用可能な橋上操作艇の仕様を検討し、外部GPSコンパス等の計測機器システムが構築され、確実にデータを取得するための技術はほぼ確立できた。計測データの品質管理については、ADCPの計測設定条件から算出される偏差流速を定義し、断面流量の計測精度評価指標としては、偏差流速を断面積分して得られる偏差流量と断面流量との比を偏差流量比として提案した。四万十川においてADCPを用いた洪水流観測では5000m³/s規模の洪水流量計測に成功した。さらに、著者らが提案するADCPの機器性能上の精度である偏差流速を適用した結果、単位移動距離を5mとした場合、ADCPで計測された断面流量に含まれる誤差流量の比を表わす偏差流量比は、5095 m³/sで1.6%、3992 m³/sで1.4%であった。木下¹⁰⁾が静水中においてADCPの計測精度検証を行った後、日本における洪水流の計測精度検証は困難と考えられてきたが、高精度の計測機器や通信システム等を用いた詳細な実験および現地観測を通じて、これらの計測特性を明らかにした点は今後の洪水流観測において極めて重要な知見となった。この成果により、著者らがこれまでに行ってきたADCPを用いた洪水流観測に係わる基礎的な観測技術、データ処理法および計測精度評価法がほぼ確立できたといえる。ADCPを用いた観測技術は、断面流量を計測する目的から今後さらに応用的なものへ発展が期待されている。特にADCPを用いた流況と河床変動の同時計測技術や浮遊砂濃度の推定技術の構築は、著者ら^{11),12)}の検討に限らず、国内外で精力的に進められており、これまで十分に計測されてこなかった実河川における洪水時の土砂移動現象

を解明していく可能性を持っている。

謝辞：四万十川の現地観測に関しては、国土交通省河川技術研究開発公募(地域課題分野)「ADCP観測および流況解析に基づいた浮子流観データの検証と河川計画への反映に関する研究」の一環として行った。国土交通省中村河川国道事務所には、資料提供や現地観測に際してご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Kevin A. Oberg, Scott E. Morlock and William S. Caldwell: Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers, U.S.G.S. Scientific Investigation Report 2005-5183.
- 2) 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, pp.919-924, 2008.
- 3) David Mueller: Techniques for Measuring Stream flow with an ADCP in Moving-Bed Conditions, ADCPs in Action 2005.
- 4) 橋田隆史, 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.
- 5) 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, pp.1087-1092, 2010.
- 6) 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, pp.59-64, 2010.
- 7) 萬矢敦啓, 岡田将治, 橋田隆史, 深見和彦: 日本におけるADCPを用いた高水流量観測手法, 水文・水資源学会河川流量観測高度化研究会, 河川流量観測の新時代, 第2巻, 2011.
- 8) 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, pp.1183-1188, 2011.
- 9) 門田章宏, 岡田将治: ADCPを用いた洪水流観測に基づいた橋脚構造物周辺の三次元流況解析, 水工学論文集, 第55巻, 2011.
- 10) 木下良作: ADCPと無人ラジコンボートで観測される洪水流量とその流れの構造について, 農業土木学会平成15年度応用水理研究部会特別講演録, 2003.
- 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方法, 水工学論文集, 第54巻, pp.1093-1098, 2010.
- 12) 橋田隆史, 岡田将治, 新井励, 下田力, 熊田康邦: ADCPを用いた河川流況計測法における課題と国内外における応用観測事例, 河川技術論文集, 第12巻, pp.133-138, 2006.

(2011. 7. 31受付)