

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

FLOOD FLOW OBSERVATION IN SHIMANTO RIVER GUDO POINT USING UNMANNED BOAT EQUIPPED WITH ADCP

岡田将治¹・橘田隆史²・森本精郎³・増田 稔³

Shoji OKADA, Takashi Kitsuda, Seiro MORIMOTO and Minoru MASUDA

¹正会員 博士(工学) 高知工業高等専門学校 建設システム工学科 (〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1)

²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)

³非会員 国土交通省四国地方整備局 中村河川国道事務所(〒787-0015 高知県四万十市右山2033-14)

In recent years, river flow measurement equipment such as ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers) has come down in cost and instrumentation technology has improved. As a result, developments of new flow measurement techniques and data correction methods are actively advancing. We measured the flood flow of Typhoon No.5 in the Shimanto River at Gudo point in 2007 using an unmanned boat equipped with ADCP. From the measurement results, we report on boat operation in high velocity currents, methods of correcting measured data, and accuracy evaluation methods concerning moving observation using ADCP.

Key Words: *Acoustic Doppler Current Profiler, Accuracy evaluation method of river flow measurement, Shimanto River*

1. 序論

近年, ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)を中心とした河川流況計測機器の低コスト化, 計測技術の向上に伴い, 高精度化を目的とした新たな計測手法やデータ補正方法の開発が活発に進められている。

ADCPを用いた河川の流況計測手法は, 固定測線式とボート等を用いた移動観測式に大きく分類できる。さらに, 洪水流計測に限定すれば, 前者はH-ADCPを用いて水平方向に横断流速分布を計測する手法であり, 後者は無人ボートにADCPを搭載し, 横断方向に曳航観測を行う方法である。H-ADCPを用いた固定測線方式の場合は, 鶴見川や大橋川に設置されている自動昇降・回転タイプ¹⁾のものを除けば, 全断面の流速分布を計測できないものの, 平水時から洪水時まで常時流速分布を取得できるため, 出水時における計測も行われるようになってきた。二瓶ら²⁾はH-ADCPで計測された流速分布と数値解析法を組み合わせた流量推定手法を開発し, 江戸川で検証している。移動観測では木下ら³⁾によるラジコンボートによる洪水流観測が先駆的に行われてきたものの, 専用ボートと高いレベルの操作技術を必要とすること等から, その他の洪水流観測事例は少ないのが現状である。しかしながら, 固定測線式に比べ, 移動観測では断面内の詳細な流速分布が計測できることから, 平水時からどの程

度の洪水流まで精度良く計測が可能かを明らかにすることは, 今後さらに重要と考えられる。ADCP計測データに関する精度検証や計測精度が低下する状況における補正技術については, 米国において早くから検討されており, USGSでは流量計測精度を5%以内に収めるガイドライン⁴⁾を策定するとともに, Muller⁵⁾は計測精度が低下する河床変動の大きい場合の補正方法を提案している。しかし, 日本のように河床勾配が大きく, 流出形態が異なる河川においては, 毎秒3mを超える高速流にも対応できる計測手法や目的に応じた計測データの補正手法の確立が重要となる。ADCPを用いて計測されたデータの精度に関しては, 移動観測の場合, 一測線に対する超音波の発射回数, 移動するボートの速度, ボートのローリングやピッチング等の影響を受けるため, 固定測線式のように単純に求められないとの理由から, 基本的な考え方が示されていないが現状である。このような技術的課題を背景として, 本研究では四万十川具同地点を対象として, 洪水観測事例としてはほとんど報告されていないADCPを搭載した無人ボートによる観測結果を報告する。特に, 橋脚の下流側からロープでボートを横断方向に曳航観測を行う場合の高流速場における操作性およびADCPで計測されたデータの新しい補正方法を示すとともに, 移動観測データに関する計測精度の一評価方法について提案する。

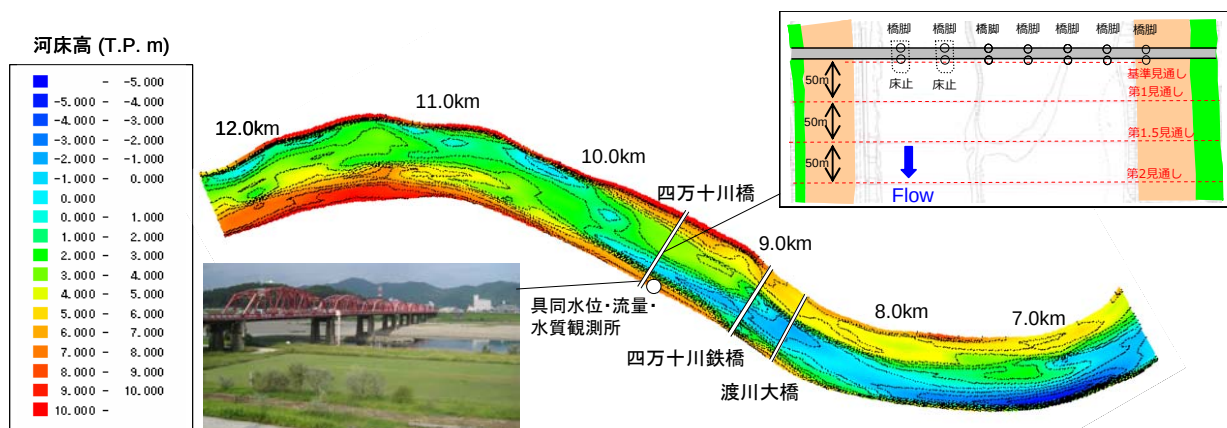


図-1 四万十川の平面図(河口から7km～12km)と河床高コンター(H17年測量データ)

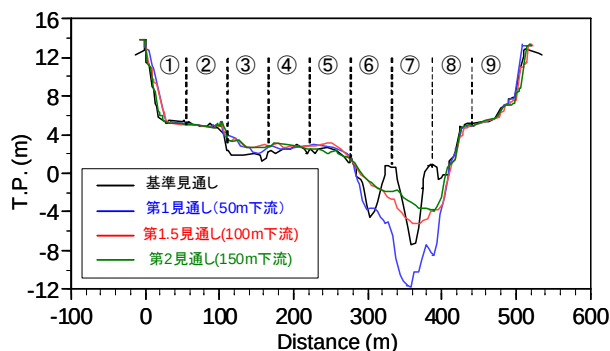


図-2 四万十川橋(9.5km)直下流の横断河床形状
(H19年測量データ)と橋脚設置位置の投影図

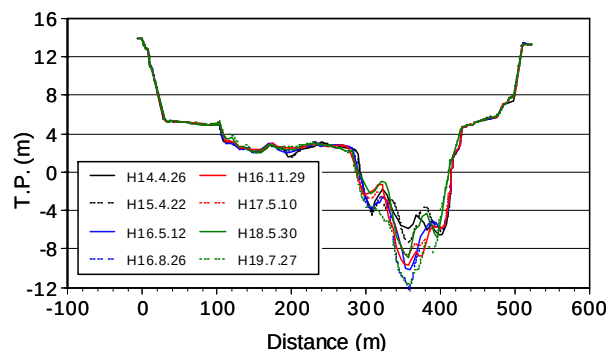


図-3 四万十川具同地点第1見通し断面における横断
河床形状の経年変化(H14～H19)

2. 四万十川具同地点におけるADCPを用いた流況計測

四万十川具同地点における流量観測精度向上を目的として、管理者である国土交通省中村河川国道事務所と高知高専が共同で2007年度から検討を行っている。初年度にあたる今年度は、洪水時の流況を把握するためにADCPを搭載したボートを用いて曳航観測を行うとともに、従来の計測方法である浮子観測との比較を行うこととした。

(1) 四万十川具同地点付近の河道特性

図-1に四万十川の7kmから12km区間の平面図とH17年の測量結果(200mピッチ)に基づいた河床高コンターを示す。本研究で観測の対象とした具同地点は河口から9.5km地点に位置する。また、この地点は四万十川の基準点となっており、中規模以上の洪水時には「四万十川の赤鉄橋」として有名な四万十川橋から浮子観測を行っている。図-2に具同地点付近の横断河床形状と橋脚の設置位置を示す。具同の水位・流量観測地点は四万十川橋の直下流に位置しており、低水路内に6本、高水敷上に2本の橋脚が設置されている。特に滞筋内の2本の橋脚には洗掘対策の床止工がT.P.2mの高さまで施されており、出水時に浮子観測を行う際には橋脚および床止工の後流の影響を大きく受ける可能性もある。その影響

により、図-2に示す四万十川橋から下流約100m区間においては河床形状が縦断方向に大きく変化している。特に、図-3に示す第1見通し断面においては近年の出水前後の横断測量データを重ねると、平成14年4月には最深河床高が-4mであったものが平成16年11月以降は-12m程度まで洗掘傾向にあり、その後は堆積し、最新データでは再び洗掘が生じている。この地点では中規模から大規模の出水の前後では洪水中に河床変動が生じており、中規模以上の出水時には流速分布とともに河床形状を計測しておくことが望ましい。

(2) ADCP搭載無人ボート(River Boat)による洪水流観測

これまで、ADCPの移動観測は専用ラジコンボートを除けば洪水流の観測に不向きとされてきた。その原因にはADCP観測専用の小型ボートがなかったことが挙げられる。本観測ではTelradyne RDI社が独自に開発したADCPを搭載可能な専用ボート(以下River Boatと記す)を用いることとした。このRiver Boatは、全長1.22m、全幅0.81m、重量6kgの高密度ポリエチレン樹脂製の小型軽量ボートで、4.5m/sの流れまで計測できるように設計されており、USGSの河川流量観測用標準橋上操作艇として採用されている。ADCPを搭載したRiver Boatによる洪水流計測は、2007年台風5号による出水を対象とした。図-4に2007年台風5号接近・通過時の四万十川の

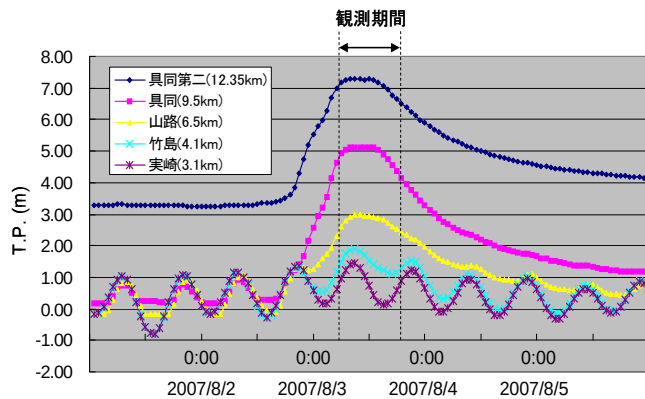


図-4 四万十川における2007年台風5号接近・通過時の水位ハイドログラフ(2007年8/1~8/6)

各水位観測所の水位ハイドログラフを示す。具同地点の水位は8月2日20:00頃から上昇し始めたため、観測はボートを曳航する際の安全性を考慮して翌3日6:00から開始し、同日18:00まで12時間行った。ピーク水位は、具同水位標で8:00(H=3.89m)から13:00(H=3.88m)まで3.90m程度であった。前月に起きた台風4号による出水ではピーク水位が8.32m(7/15 3:00)であったこと、水防団待機水位が5.00mであることから、この出水は具同地点においては小規模洪水に位置づけられる。また、観測期間における具同第2、具同および山路の各地点の水位データから水面勾配を求めると、1/1300から1/1400程度であり、ほぼ同じ水理条件の下で計測が行われたといえる。流速計測には、TRDI社のADCP(Work Horse 600kHz)を同社製のRiver Boatに搭載し、ロープに繋いだボートをオペレーターが四万十川橋上を移動しながら計測した。ADCPの計測条件は、計測モードをハイスピードサンプリング(Mode12)、ping数10、計測層厚0.25m、計測層数60層とし、ボトムトラックはONとした。この条件で固定観測を行う場合の理論上の流速計測誤差の標準偏差は4.31cm/sとなる。

ADCPを搭載したRiver Boatに80mのロープを結び、四万十川橋下流側歩道から約10m下の水面(観測時)に降ろし、橋から約50m下流にある浮子観測に用いる第1見通し線上付近を通るように横断方向に移動しながら計測を行った。観測期間中の水面幅は約300mであり、1回(片道)の計測に要する時間は約15分間で、2回(往復)の計測を1セットとして、1時間隔で1セットを行った。また、従来の計測方法と比較するために、同じ時刻に浮子による流速観測も行った。ADCPで計測した流速分布、水深データはハイドロシステム開発社製のデータ転送システム(Rimo ADCP)によって堤防上の車内のPCに無線LANでリアルタイムに転送されるため、従来のボート観測とは異なり、各時間の流速分布、河床形状、流量の計測状況をその都度確認しながら行うことができる利点は大きい。ただし、ADCPで計測される河床形状は、鉛直下向きに対して約20度傾いていることから、河床形状の急変地点では音響測深器と比較して計測精度が低下する。

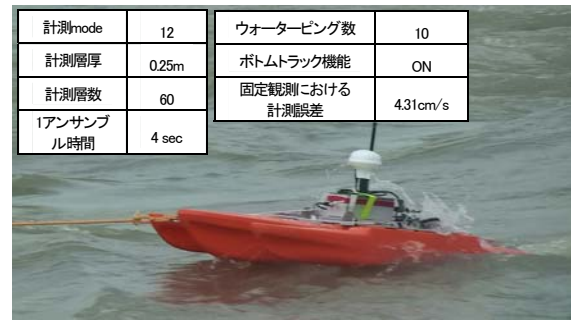


写真-1 ADCP、無線データ転送システムを搭載したRiver BoatおよびADCPの計測設定条件

3. ボートが蛇行する場合の流速分布・河床形状の補正法

流速計測を行った具同地点のように、直上流の河道内に橋脚が多く設置されている場合には、後流の影響を大きく受け、River Boat を直線的に曳航させることが難しい。そのため、図-5の流速ベクトルに示すように順流域と逆流域が交互に現れる断面では、転覆を避けるため、流れに逆らわずに蛇行させながら横断方向に計測せざるを得ない。観測に用いたADCPに付属する計測データ描画ソフト(WinADCP)では、航跡が蛇行する場合でも、ADCP内部の磁気コンパスとボトムトラッキング機能により、進行方向に対して垂直方向の流速成分を算出するため、断面内の流量値の算出は可能であった。しかし、河床形状、流速分布については図-5に示すような航跡に沿った形状となることから、本研究では浮子観測や今後普及していくと考えられる固定観測式H-ADCP等、横断方向に直線的に計測されたデータとの比較ができるように、蛇行して計測した場合の航路、流速分布および河床形状の補正を行った。本観測で計測した断面の水面幅は約300mであったが、航跡に沿った移動距離は蛇行したことで約340mとなり、実際の水面幅より約40m長くなる。そこで、これらの計測データを5m間隔で平均化処理し、航跡を横断測線に沿って投影補正を行った。5m区間に含まれる計測データ数はボートの移動速度によって異なり、1-10個であった。この場合の計測精度については5章で述べる。図-6に補正後のRiver Boatの航跡と水深平均流速ベクトルおよび横断河床形状、流速分布を示す。航跡補正の結果、得られた河床形状は、図-2の第1見通し断面(四万十川橋の下流50m)の横断河床とほぼ同様な形状を示していることがわかる。

4. ADCPと浮子による流量観測結果

(1) ADCPによって観測された具同地点流量

図-7に補正されたADCP横断流速分布、河床形状および断面流量を示す。全断面を計測できずに途中で転覆し

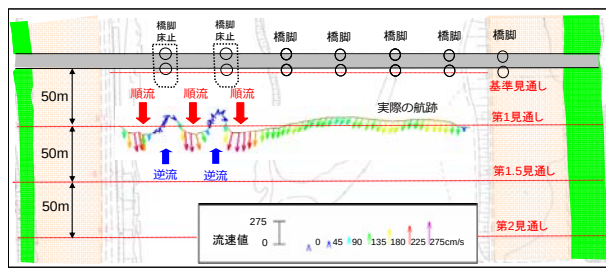


図-5 RiverBoatが蛇行しながら計測した航跡、水深平均流速ベクトルと河床形状、流速分布

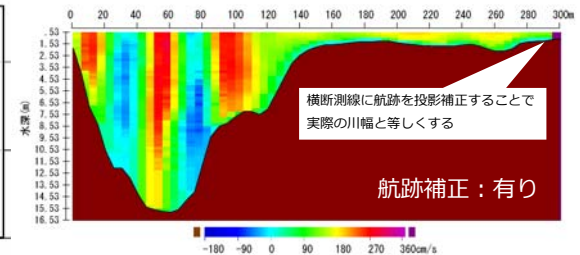
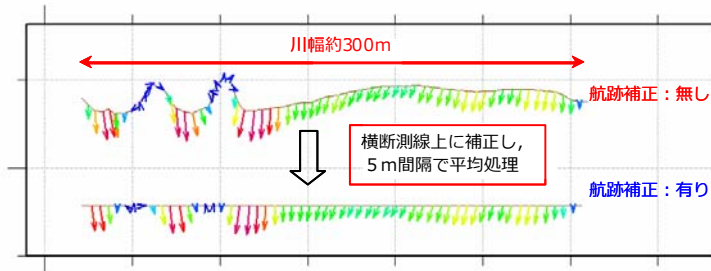
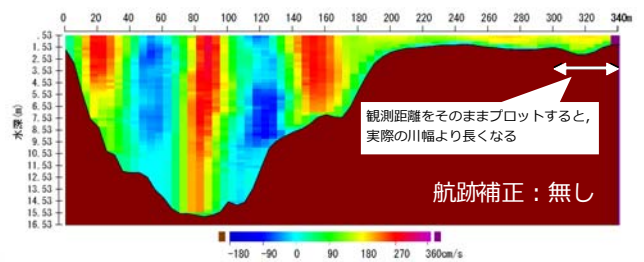


図-6 補正後のRiverBoatの航跡、水深平均流速ベクトルおよび河床形状、流速分布

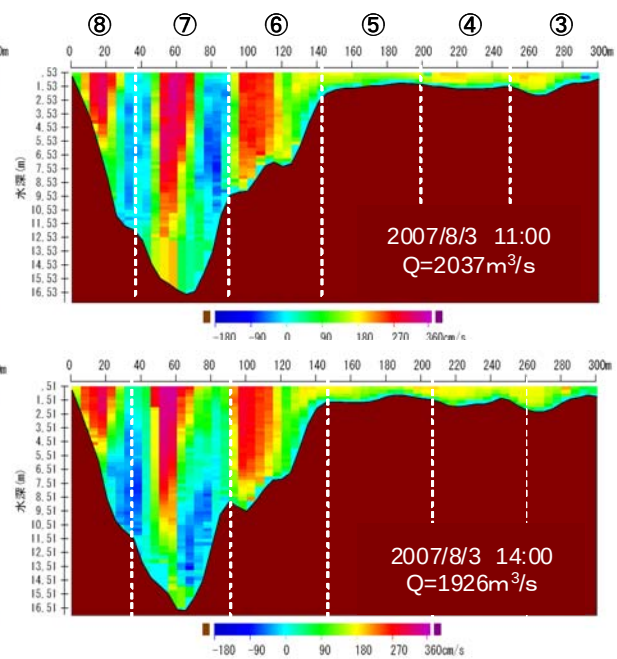
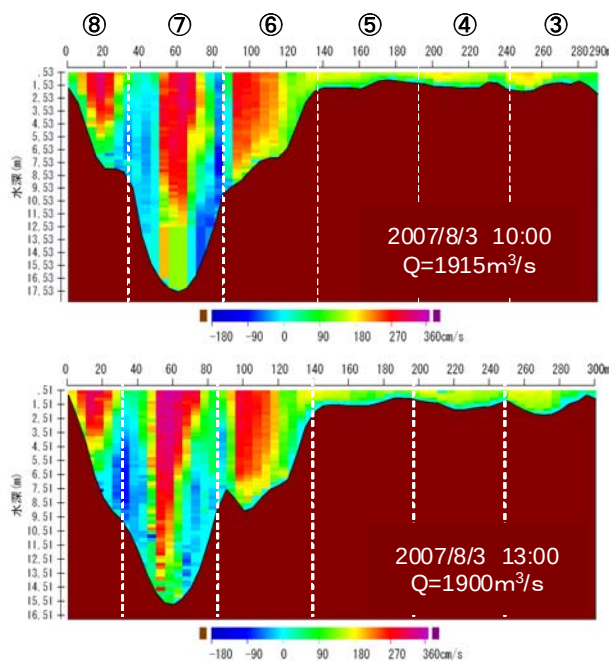


図-7 ADCPで観測した補正後の横断河床形状と流速分布および流量

たケースについては、断面流量換算ができないため、ここでは省略している。流量値の算出に際しては、水面付近の約50cmの未計測エリアは水面近傍の計測データを用いて外挿補間を行い、河床付近の未計測エリア(約50cm)については、河床の移動速度をゼロと仮定して線形補間している。また、河床変動が大きい際に見られる河床の滑りについては、600kHzタイプのADCPを使用したこと、出水が小規模のものであったこともあり確認されていない。各時刻の流速分布を比較すると、順流と逆流の生じている区間がはっきりと確認でき、同じ箇所でも同程度の流速が生じている。10時から14時の時間帯で水理条件がほとんど変化していないことから、これらの時間帯の流れはほぼ定常状態であったと考えられる。また、図-7より、計測された4回分の断面流量の平均値

からの偏差は5%以内に収まっていることから、この時間帯の計測データはUSGSのガイドラインに基づいて考えれば十分な精度を有しているといえる。以上のことから、本観測地点のように、橋脚後流の影響が大きく、表面流速が3m/s程度の順流断面と1.5m/s程度の逆流断面が混在する断面においても、日中で視界が良いこと、水面上のゴミが少ない等、作業条件が整えば、River Boatを用いることにより高精度の流況計測が可能であることが明らかとなった。ただし、River Boatの操作性については、流速が3m/s程度の流れに対しても十分計測可能であったが、順流から逆流へ(あるいは逆流から順流へ)変化する地点付近においてはボートの操作が難しく、転覆した場合が数回あった。その場合には横断面内の全流速分布が計測できず、流量値の算出ができないため、

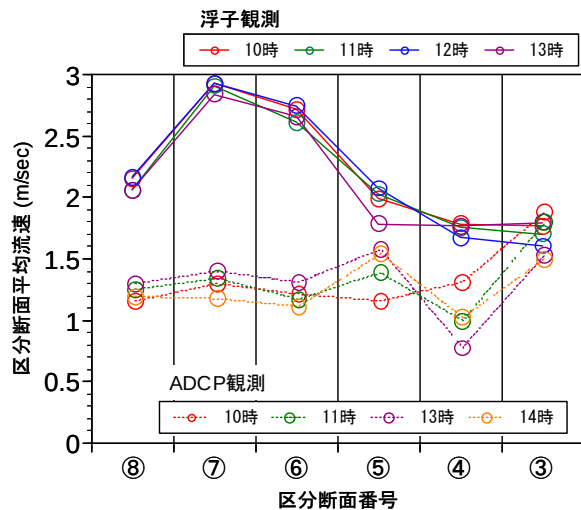


図-8 浮子とADCPで計測された各区分断面の平均流速

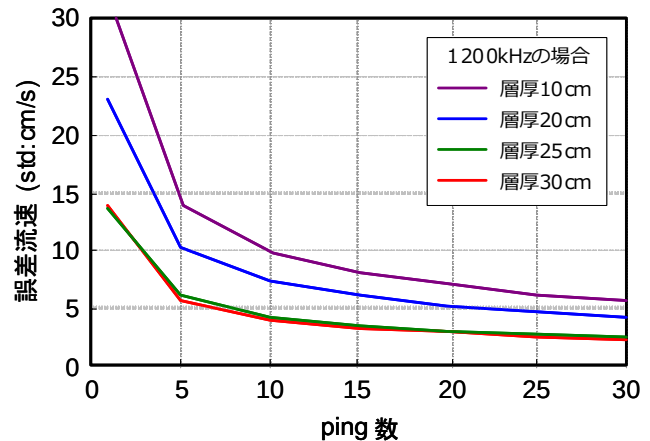


図-9 ADCPの観測層厚, ping数と流速精度の関係

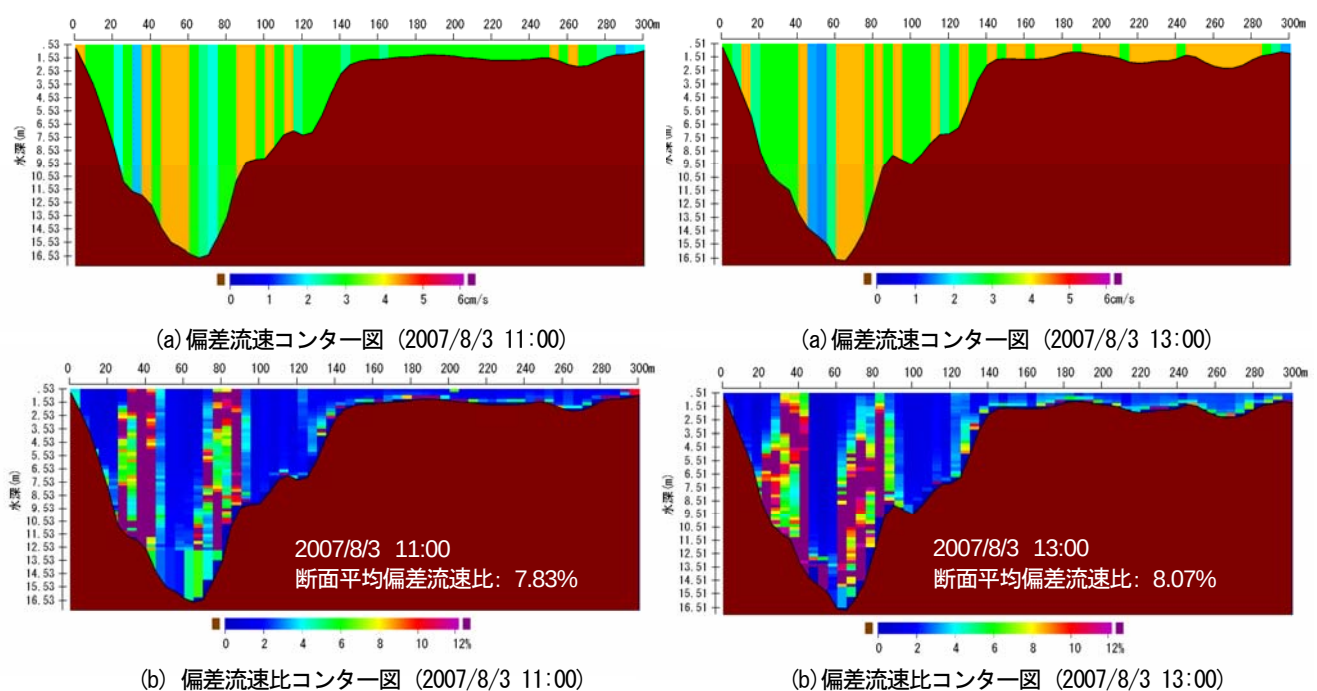


図-10 ADCPを用いた移動観測における新しい計測精度評価指標

ボートの構造を転覆しにくくする等の工夫が今後必要である。

(2) ADCPと浮子観測データの比較

具同地点では、図-2のように橋脚の設置箇所に基づいて出水時の浮子観測の区分断面①～⑨を定めている。計測期間中は、区分断面③～⑧において冠水しており、断面③～⑤では水深が約1.5mで流れのほとんどは断面⑥と断面⑧間で流下している。図-8に各区分断面におけるADCPおよび浮子で計測された平均流速(速報値)を示す。なお、各断面に投下した浮子の種類と平均流速を算出する際に用いた更正係数は、測線③,④,⑤では1m浮子(更正係数0.91)、測線⑥,⑧では2m浮子(同0.94)、測線⑦には4m浮子(同0.96)である。図-8より水深が小さい断面③,④,⑤では、浮子観測の値が若干大きくなってはいるものの、その差は小さい。一方、断面積が大きく主流部

となっている断面⑥,⑦,⑧では、両者の計測値の差が大きくなっている。この差の原因は、実際には順流域と逆流域が混在する区間をひとつの区分断面としていることと断面内の流速の大きい箇所を流下する浮子の特性が挙げられる。ただし、本観測条件は低水路満杯流れ程度の小規模出水の場合であり、主流部の橋脚床止工部の水深が2m程度であったため、後流の影響が大きい流況であったと考えられる。流量規模によって橋脚後流の影響する区間が変化するため、過去の計測データの整理や異なる水位におけるADCPと浮子の同時計測を行い、さらに検証を行う予定である。

5. ADCP移動観測における計測精度評価法の提案

これまでADCPを用いた流況観測の計測精度評価に関する議論は、機器の性能から理論的に算出される固定式

観測におけるものが主であり、移動観測に関する報告は少ない。島田ら⁶⁾は平水時の流れに対してADCPを搭載したラジコンボートの速度と超音波の発射回数(ping数)を変えて計測を行い、同じ地点で行った固定観測値と比較しているが、精度評価法の提案には至っていない。今後、河川工学分野へのADCPの活用は、流量観測に限らず、河川構造物周辺、樹木群周辺の流況計測等の応用計測にも拡大すると予想されることから、機器の計測原理に基づいたADCPによる移動観測精度の評価方法を考察した。固定観測の場合、標準モード(WM1)では1ping当たりの流速誤差の標準偏差は層厚25cmの場合13.6cm/sである。本観測で用いたハイスピードサンプリングモード(Model12)では1pingの間に補助的なsubpingを高速連射することにより、同じ層厚でも流速計測値に含まれる誤差の標準偏差は4.31cm/sまで向上される。また、ADCPの計測精度は、観測層厚にも大きく依存しており、1200kHzタイプの場合には図-9に示すような関係となり、観測層厚は25cmよりも小さくすると計測精度は大きく低下する。また、ping数は20発付近で収束し、それ以上の精度向上は小さいため、1200kHzタイプで移動観測を行う場合には観測層厚25cm、ping数20程度が効果的に精度を確保できる設定と言える。つぎに、移動観測の場合には空間解像度を小さくするために可能な限り長い時間をかけて計測することが重要となる。しかし、現地観測においては、計測する流況に応じてボートのローリングやピッチングによる計測誤差を回避するために移動速度を調整することから、空間解像度は場所によって異なる。すなわち、移動観測の場合には固定観測の計測精度の考え方に加え、単位移動距離あたりの計測精度と始点から終点までの計測断面全体の平均的な計測精度を考慮する必要がある。ここに単位移動距離あたりの計測精度を表す指標として、単位移動距離あたりの各グリッドの流速計測値に含まれる誤差の標準偏差をTRDI社が定義するADCPの誤差流速(Error Velocity)と区別するために偏差流速と定義し、流速計測値に対するその比を偏差流速比とする。さらに、断面全体の計測精度の指標として、各グリッドの偏差流速比を計測断面全体で平均した断面平均偏差流速比を提案する。例えば、往復計測を行った際の横断面流量誤差が5%以内のデータであっても、ADCPの計測設定条件および計測方法によりこの値が異なるため、計測したデータの精度評価が非常に容易となる。

図-7の各時間(11時と13時)の流速分布について算出した流速偏差コンター図と偏差流速比コンター図を図-11に示す。その結果、偏差流速比は順流域では2%程度、逆流域では流速値が小さいため10%を超える箇所もあることがわかる。また、偏差流速比の断面平均値を計算した結果、11:00は7.83%、13:00では8.07%であった(同様に10:00は7.01%、14:00は6.25%)。ただし、算出にあ

たって流速が0cm/sに近いグリッドでは偏差流速比が極端に大きくなる等、課題は残るがUSGSが提唱する往復計測による流量誤差率の考え方に加え、新しい指標になりうると考えられる。また、ボートのローリング、ピッチングが流速値に及ぼす影響についても考慮していないため、これらの点について今後の課題とする。

6. 結論

四万十川における洪水流観測から、洪水中でも流速が3m/s程度、視認性が良く、流木等の浮遊物がない等の計測条件が整えばRiverBoatを用いて流量計測が可能であることを示した。この計測方法は中小規模出水に限定され、かつ離散的な横断面流速分布データしか得られないものの、固定観測式のH-ADCPによる水平流速分布の連続データおよび縦断面水面形を用いた流況解析⁷⁾等との組み合わせにより、従来よりも精度の高い流量ハイドログラフの推定が可能となる。また、移動観測において航跡が蛇行する場合でも、H-ADCP等の直線的に計測した流速分布と比較できるデータ補正手法を提案した。さらに、ADCP固定観測の計測精度に基づいて、移動観測データの計測精度の新しい評価指標として偏差流速比を提案し、本観測の往復流量誤差5%以内であることに加え、断面内を平均した偏差流速比が6-8%で計測していることを示した。

参考文献

- 1) 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, 第11巻, pp.243-248, 2005.
- 2) 木水啓, 二瓶泰雄, 北山秀飛: H-ADCPとDIEX法を用いた河川流量計測法の洪水観測への適用, 水工学論文集, Vol.51, pp.1057-1062, 2007.
- 3) 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.
- 4) 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
- 5) David S. Mueller, Chad R. Wabner: Application of the Loop Method for Correcting Acoustic Doppler Current Profiler Discharge Measurements Biased by Sediment Transport, U.S.G.S. Scientific Investigation Report 2006-5079.
- 6) 島田友典, 渡邊康玄: ADCPを搭載したラジコンボートによる流水中の流速測定精度, 土木学会第62回年次学術講演会概要集, pp.211-212, 2007.
- 7) 福岡捷二, 渡邊明英, 原俊彦, 秋山正人: 水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと貯留量の高精度推算, 土木学会論文集, No.761/II-67, pp.45-56, 2004.5.

(2007. 9. 30受付)