

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

SPECULATION OF MEASUREMENT ACCURACY EVALUATION METHOD FOR MOVING OBSERVATION USING RADIO-CONTROLLED BOAT EQUIPPED WITH ADCP

橘田隆史¹・岡田将治²・新井 励³・下田 力⁴・出口 恭⁵

Takashi KITSUDA, Shoji OKADA, Rei ARAI, Chikara SHIMODA and Takashi DEGUCHI

¹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)

²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)

³正会員 博士(工学) 大阪府立大学 (〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1番1号)

⁴正会員 修士(工学) (株)エス・イー・エイ (〒279-0043 千葉県浦安市富士見3-16-3)

⁵正会員 修士(工学) (株) ニュージェック (〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)

In recent years, many cases about the river flow measurement using acoustic Doppler current profiler (ADCP) were reported. However, accuracy evaluation method of the movement observation using ADCP has not been clarified. In this report, we suggest a new reference index of accuracy evaluation for discharge (stream flow) measurement from the measurement results of radio-controlled boat and towing boat. In addition, operability and the measurement performance of the radio controller boat (Q-Boat) equipped with ADCP were examined.

Key Words: *Acoustic Doppler Current Profiler, Evaluation method of measurement accuracy, Moving observation, Radio-controlled boat*

1. 序論

河川における様々な水理・水質・土砂動態に関わる諸問題を検討する際には、信頼性の高い現地観測の実施が不可欠であり、近年では河川の流況計測にADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)を用いた計測事例が多く見られるようになってきた。しかしながら、ADCPは航走断面の詳細な流速分布が得られる利便性を持つ反面、流況、河床変動の有無、機器の設定条件や計測方法によって、その信頼性が大きく異なることはあまり知られていない。わが国においては“ADCP計測データ”の信頼性に関する検証、議論が十分に行われていないため、ADCPの有効性については評価が二分されているのが現状であり、計測毎の誤差範囲や信頼性を示す標準的な指標が求められている。

ADCPの計測精度検証については、国内では木下¹⁾によっていち早く実施され、土木研究所の長大検定水路でWater Pingの検定、さらに新潟東港において流出量の全くない条件でWater PingとBottom Pingから得られる計測値を比較し、4往復8回の計測において、mm単位の流速誤差であったことを示している。また、近年では島田ら²⁾が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)を変えた計測を行

い、固定観測で得られた値と比較検証を行っている。これらの検討結果から、平水時観測についてはADCPの計測精度の高さが実証されており、計測器そのものの信頼性は疑う余地はない。一方、河川計測へのADCPの導入が日本よりもいち早く普及している米国においては、USGSが策定した流量観測のデータ品質管理に関するガイドライン⁴⁾が示されており、2往復計測、4断面の流量平均値からの偏差(5%以内)を閾値としている。しかしながら、同ガイドラインにおいても、実際に取得した計測したデータの精度評価については明確な指標が示されていない。国内におけるADCP観測計測は、高流速場の横断面流量計測にとどまらず、河川構造物や樹木群周辺の流れ場の計測等への応用観測も行われている現状から、ADCPの移動観測データについては日本独自の精度評価法の確立が重要となる。

筆者ら³⁾は、四万十川において橋上からADCP無人ボート(River Boat)を用いた曳航観測で約2000m³/s(最大表面流速3.5m/s)の洪水流を計測するとともに、計測精度の評価指標として、固定観測における計測条件から得られる流速計測誤差の標準偏差に基づいた偏差流速比、偏差流量比を提案している。本研究では、ADCPの移動観測における計測精度の定量評価手法について、橋上からの曳航計測およびラジコンボートを用いた流況計測結果から考察すると

もに、国内では初となる市販ADCP専用ラジコンボートの操作性や計測性能についても明らかにし、洪水流観測への適用に向けた今後の課題について示す。

2. 橋上操作ボート(River Boat)および市販ラジコンボート(Q-Boat)で観測対象とする出水規模

図-1は木下ら⁹⁾が示した洪水時におけるADCP流量観測法の適用条件図に筆者ら³⁾が行った橋上操作艇(River Boat)と本研究で用いる市販ラジコンボート(Q-Boat)で観測対象とする出水規模の領域を追加したものである。木下らは観測が阻害される条件として、1) 流速の過大(瞬間最大表面流速 5m/s以上)、2) 水面波 $Fr=0.65$ 以下、3) おびただしいゴミや立木、4) 中州などの立木による阻害、5) 強すぎる風雨、6) 夜間の視認不能等を挙げている。ADCP移動観測では、詳細な流速分布が計測可能である反面、上記の阻害要因への対策は容易ではない。したがって、洪水時の流量ハイドログラフの計測精度の向上には、横断流速分布の常時観測が可能である固定式H-ADCPと移動観測の利点を組み合わせた計測技術の確立が今後さらに重要となる。本研究グループでは、ADCPによる移動観測の基礎技術として、同様な阻害条件下において、小規模から中規模出水を対象とした計測精度の評価手法を確立するとともに、流速分布計測の高精度化および河床形状計測を当面の検討課題として位置づけている。これらの技術が確立できれば、河川構造物や樹木群周辺の流れ場の計測や河床変動の計測にも応用できる可能性が高い。橋上からの曳航観測はコスト面、高度な技術を必要としない点および高流速(River Boat観測³⁾では3.5m/s程度)に対応できる点で有利であるが、ラジコンボート観測は橋上操作計測が橋脚後流等の影響により困難な場合に、計測の行いやすい任意の断面を選択できる点でその適用範囲は広い。

3. 四万十川具同地点における平水時流況のADCP移動観測

(1) 市販ADCP専用ボート(Q-Boat)の仕様

本観測では、市販(Ocean Science社製)のADCP搭載用ラジコンボート(以下、Q-Boat)を用いた。Q-Boatは、全長2.13m、全幅0.71m、重量(ADCPを除く)33kgのポリウレタン製ボートであり、左右独立した水中プロペラを有し、内蔵バッテリーにより約2時間航行することができる。木下ら⁹⁾のラジコンボートは、洪水観測向けに空中プロペラ式を採用しているが、本観測で用いたQ-Boatは水中プロペラ式のため、水面付近を流下するゴミ等が障害物となり、洪水時の観測条件には制約を受ける。また、対水速度は最大で約4.5m/sであるため、国外で2.5m/sを超える流況計測に成功した事例⁶⁾も報告されているが、計測可能な流速としてはその半分

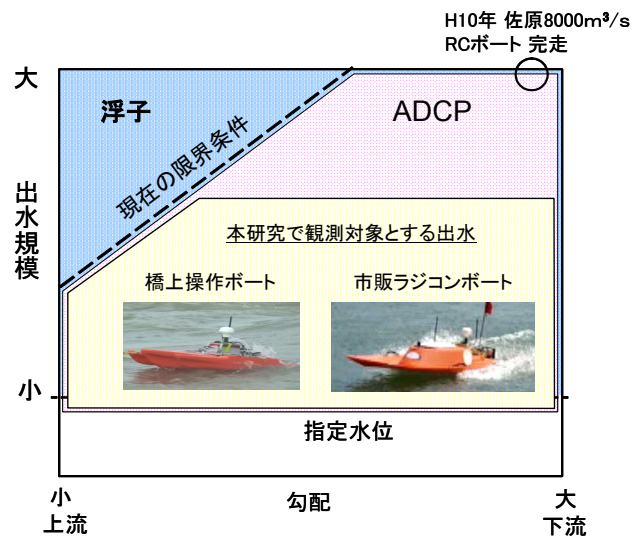


図-1 本観測手法で対象とする出水規模

〔木下ら⁹⁾による洪水時におけるADCP流量観測法の適用条件図に加筆〕

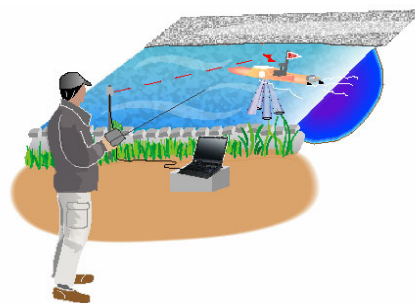


図-2 ラジコンボート観測の概要

〔ラジコンボートからリアルタイムでパソコンに計測データが転送されるため、操縦者は流速分布、水深、航跡を確認しながらの計測が可能〕

表-1 ADCPの計測設定条件

計測モード	12(ハイスピード)
計測層厚	0.25m
計測層数	30層
1アンサンブル時間	2.5s
ウォーターピング数	30ping
ボトムトラック機能	ON
固定観測における流速計測誤差の標準偏差	2.5cm/s

の2.2m/s程度と考えられる。しかし、市販で入手性が高い点や軽量コンパクトな利点もあり、適用を中規模出水までに限定すれば、今後、有効な計測ツールとなり得る。

(2) Q-Boatを用いた四万十川における平水時流況観測

平水時の流況観測は、四万十川の具同地点(河口から9.3km)付近において、2008年3月22日の9:00-12:00の時間帯に行った。直上流(河口から9.5km)は、四万十川の基準観測地点になっており、著者ら³⁾が橋上からRiver Boatで洪水観測を行っている地点は河口から9.4km地点にあたる。観測期間中の水位は、前日からの降雨の影響により、平水

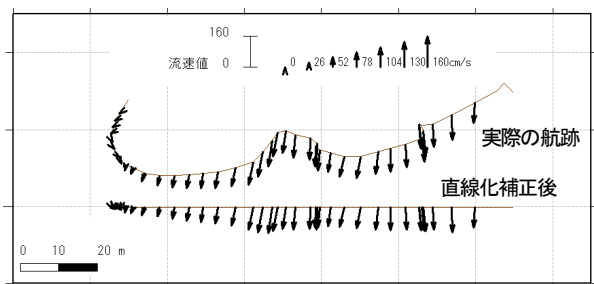


図-3 Q-Boat観測航跡と直線化補正結果

表-2 航跡補正後の流量算出結果

	流量算出方法と流量値(m³/s)		
	WinRiver	航跡直交成分	航跡直線化
洪水時 (RiverBoat)	1942	1922	1915
	2006	2029	2037
	1956	1906	1900
平水時 (Q-Boat)	243	237	234
	253	250	248
	270	247	247

時に比して1m程度(T.P.=1.44m)上昇しており、水面幅は約100mであった。Q-BoatにTRDI社のADCP (Work Horse1200kHz)を搭載し、四万十川9.3km地点付近を横断方向に航走(平均航行速度0.7～0.8m/s)して計測を行った。ADCPの計測設定条件は、計測モードをハイスピードサンプリング(Mode12)、計測層厚0.25m、計測層数30層とし、ボトムトラックはONとした。この条件では、1アンサンブルデータ当たりの理論上の流速計測誤差の標準偏差は2.5cm/sとなる。図-2にラジコンボート(Q-Boat)による観測概要を示す。Q-Boatにはハイドロシステム開発社製のADCP遠隔オペレーション装置(RemoADCP)を搭載しており、計測される流速、水深データはリアルタイムで堤防上の観測基地(車等)に転送されるため、ラジコンボートの操縦者は、流速分布、水深、航跡等を確認しながら計測を行うことができる。また、ラジコンボートの総重量は機器を含めて約40kgと2、3人で持ち運び可能な軽さであるため、出水時でなければ操船員とADCP操作員の2名体制で十分計測可能であることがわかった。

4. 航跡が蛇行する場合の補正方法に関する考察

(1) ADCP航跡補正の必要性

Q-Boat観測による航跡図を図-3に示す。Q-Boatの航跡は、パソコンの画面でリアルタイムに確認できるため、計画通りの測線を航走させることができる。しかし、流速変化の大きな断面内においては、ボートを直線的に航走させることが困難であり、特に、橋脚後流付近など順流と逆流が混在する区間などでは航跡が大きく蛇行する。このため、水面幅より航走総距離が長くなり、航走距離を基準に流量演算する

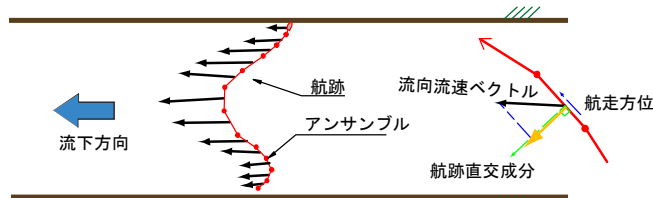


図-4 航跡の直線化と流下軸成分の抽出方法

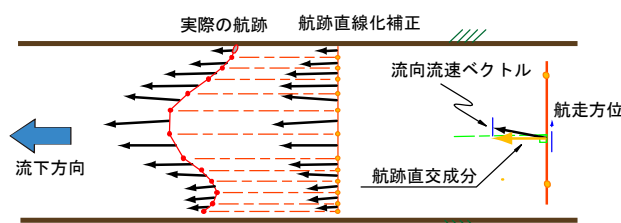
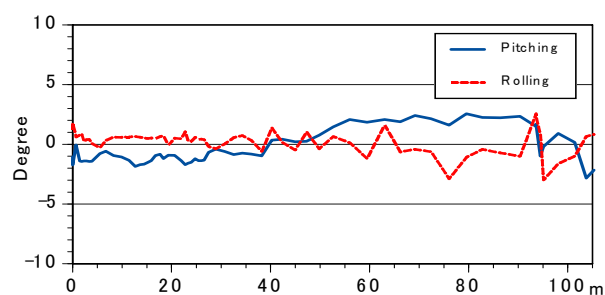


図-5 航跡直交成分の抽出方法

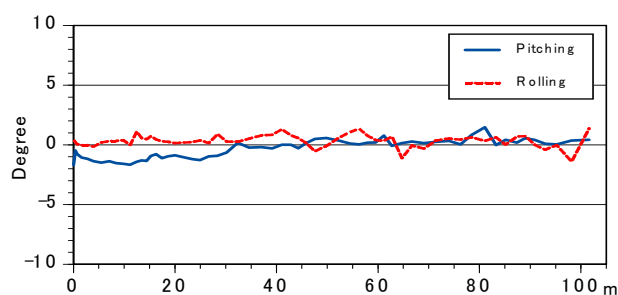
と過大に算出される問題が生じる。ラジコンボートに限らずADCP曳航観測においては、対象とする流速が大きくなるほど航跡が湾曲や蛇行する場合が一般的であるため、正しく流量算出するためには航跡補正を行う必要がある。また、浮子観測や今後普及していくと考えられる固定測線式のH-ADCP等の横断方向に直線的に計測されたデータとの比較ができる点においても、この補正法の検討は重要である。

(2) 航跡補正の方法に関する考察

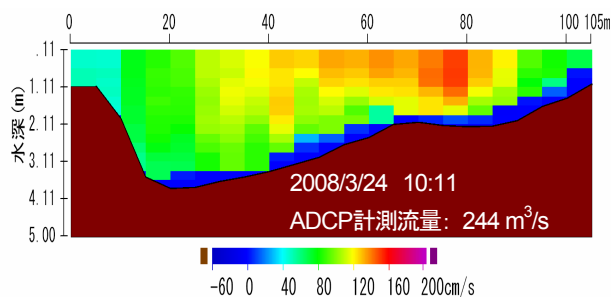
蛇行したADCP航跡の補正法としては、図-4に示すように横断方向に任意の測線を設定し、その測線上に航跡を投影して直線化させる手法がある。ADCPでは各データ取得間の航走方位と距離が得られるため、1アンサンブルデータ毎に横断測線上に投影して航跡を補正し、さらに航跡に直交する流速成分を抽出して、流下軸成分流速とする。これにより、航走距離と水面幅が一致し、流下軸成分の流速値を用いることで、正しい流量計算が可能となる。なお、TRDI社のADCPの標準ソフト(WinRiver)で流量を算出する場合には、図-5に示す航跡に直交する流速成分を積分していく方法が一般的に用いられている。この方法を表計算ソフト上で再現し、流量算出した結果と前者を比較すると、両者の差は最大で1.3%であった。差が生じた原因としては、河床付近の流速値補完によるものと考えられ、補完方法の違いによる流量値に有意な差はない。WinRiverで算出された流量は、スパイクノイズなどの除去ができないため、他の手法で得られた値とかなり異なる結果となっている。さらに、水文観測指針に準拠する場合には、航跡を直線化補正して流量算出する手法が近く、他種法との整合も取りやすい。このため、現場では手軽に計算できる航跡直交成分による流量算出法で確認しながら観測を行い、正式な流量算出につい



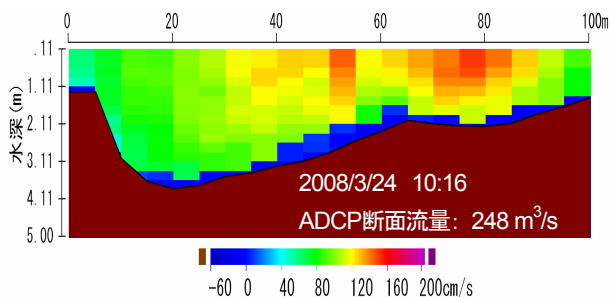
(a) River Boatの揺動 (2008/3/24 10:11)



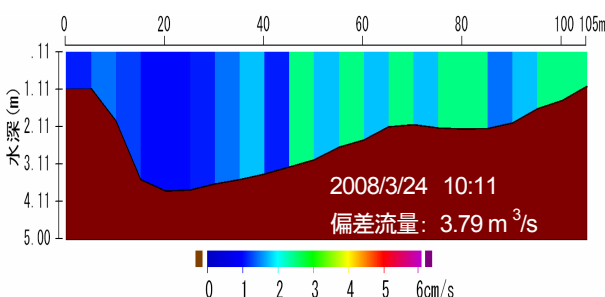
(a) River Boatの揺動 (2008/3/24 10:16)



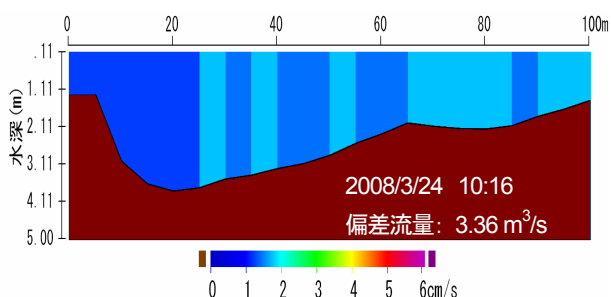
(b) 流速コンター (2008/3/24 10:11)



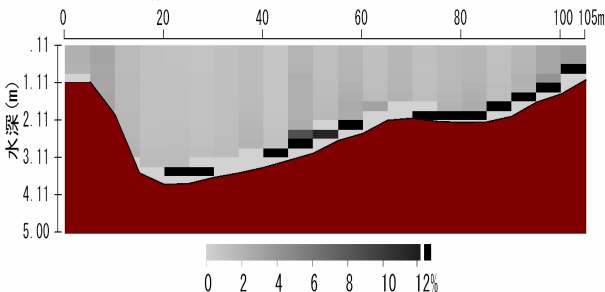
(b) 流速コンター (2008/3/24 10:16)



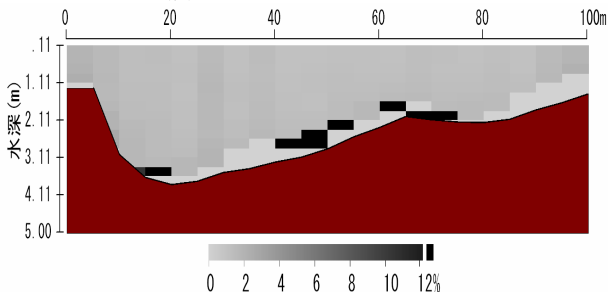
(c) 偏差流速コンター (2008/3/24 10:11)



(c) 偏差流速コンター (2008/3/24 10:16)



(d) 偏差流速比コンター (2008/3/24 10:11)



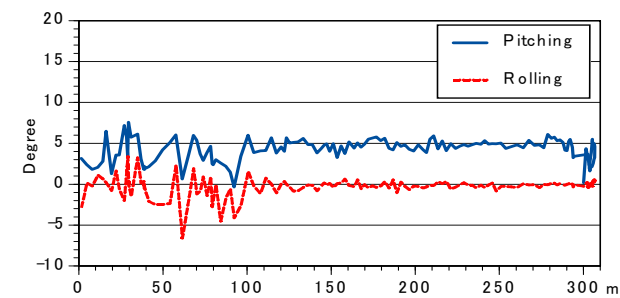
(d) 偏差流速比コンター (2008/3/24 10:16)

図-6 四万十川具同地点において平水時(2008年3月24日)にQ-Boatで計測したボートの揺動, 流速分布, 偏差流速コンターおよび偏差流速比コンター

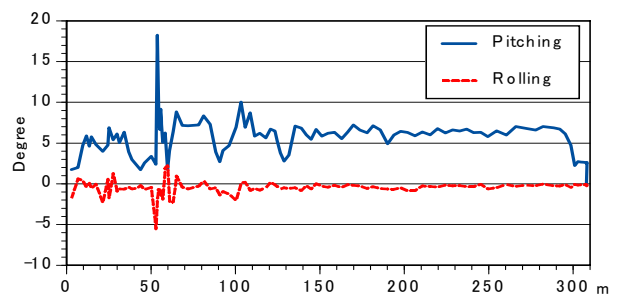
ては観測後に航跡直線化補正を行ったものを用いる等の使い分けが有効である。観測現場におけるADCPのオペレーションソフトは通常、前述のWinRiverが用いられているが、ノイズの補正機能が弱い点や、航跡直線化補正による流量算出機能が不十分なため、現場でも迅速に正確な流量を算出するための専用アプリケーションを独自に開発した。このアプリケーションは当社からVisual ADCP toolsという商品名で販売を開始している。

5. 移動流況観測における計測精度評価法に関する考察

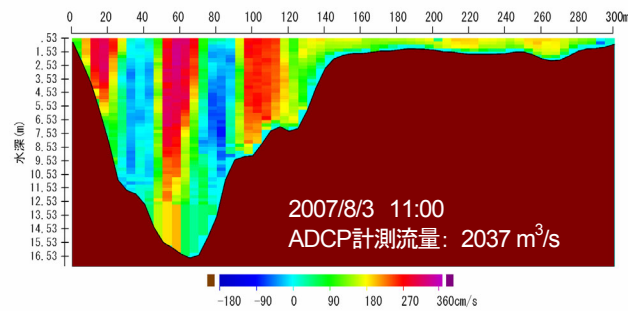
著者らはADCPを用いた移動観測における計測精度の評価指標として、表-1に示す固定観測における計測誤差の標準偏差(線データ)の考え方を空間データに拡張した偏差流速比を提案している³⁾。移動観測では通常、流れ場に応じてボート速度を変化させるため、場所によって計測する空間解像度が異なる。したがって、単位移動距離あたりの各グリッドの流速計測値に含まれる計測誤差の標準偏差を”偏差



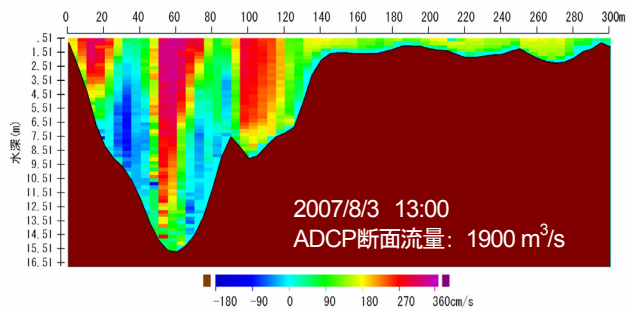
(a) River Boatの揺動 (2007/8/3 11:00)



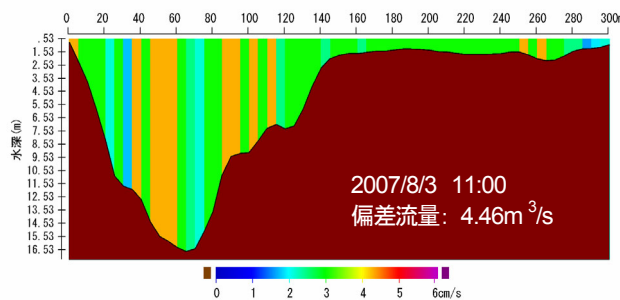
(a) River Boatの揺動 (2007/8/3 13:00)



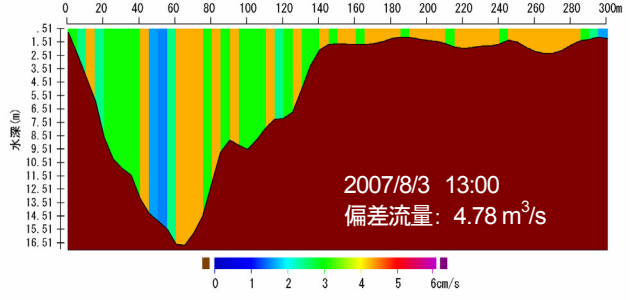
(b) 流速コンター (2007/8/3 11:00)



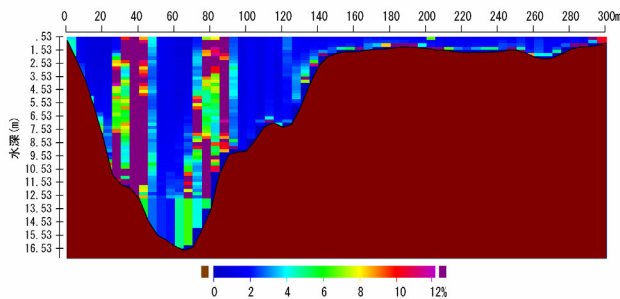
(b) 流速コンター (2007/8/3 13:00)



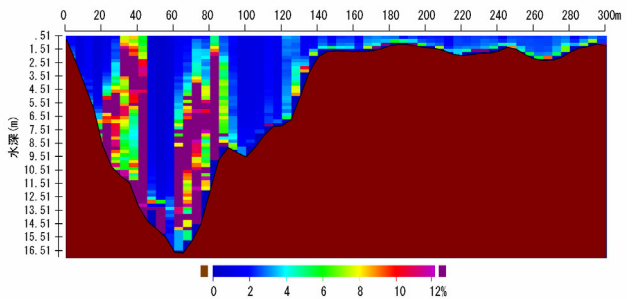
(c) 偏差流速コンター (2007/8/3 11:00)



(c) 偏差流速コンター (2007/8/3 13:00)



(d) 偏差流速比コンター (2007/8/3 11:00)



(d) 偏差流速比コンター (2007/8/3 13:00)

図-7 四十十川具同地点において洪水時(2007年8月3日)にQ-Boatで計測したボートの揺動, 流速分布, 偏差流速コンターおよび偏差流速比コンター((b)~(d)は文献³⁾より引用)

流速”, 各グリッドの流速計測値との比を“偏差流速比”として定義した. この偏差流速を横断面内で積分すれば, “偏差流量”, すなわち計測設定条件から得られる誤差のみを考慮した場合の計測流量誤差が得られる. この値と断面流量との比を“偏差流量比”と定義すれば, 計測した流量に対して, 何%程度の誤差を有するか定量的に表すことができる. また, 断面全体の流量ではなく, 流況(流速分布のみ)を対象とする場合には, 偏差流速比を用いて場所ごとの評価を行うことができる.

図-6にQ-Boatで計測したボートの動揺, 流速分布, 偏差流速分布および偏差流速比コンターを示す. 表面付近の流速はボートの移動速度 $0.7 \sim 0.8 \text{ m/s}$ に対して $0.5 \sim 1.4 \text{ m/s}$ であった. 図から, ボートの揺動は高流速の地点で大きくなる傾向が見られるものの, $\pm 2 \sim 3$ 度以内の安定した航行ができていていることがわかる. また, 計測された断面流量は, $244 \text{ m}^3/\text{s}$, $248 \text{ m}^3/\text{s}$ で, 両者の平均値からの偏差は1%以内に収まっている. 偏差流速から偏差流量を算出した結果, $3.79 \text{ m}^3/\text{s}$, $3.36 \text{ m}^3/\text{s}$ となり, 偏差流量比はそれぞれ1.6%,

1.4%であった。これらの結果と比較するために、著者らが出水時にRiver Boatを用いて移動観測を行った結果³⁾を図-7に示す。断面流量は2000m³/s程度になると、両者の平均値からの偏差は3.5%まで大きくなるが、USGSのガイドラインで規定されている閾値(5%以内)には収まっている。また、偏差流量は平水時における観測時と同程度の約5m³/sであった。この観測では、操作員がRiver Boatを橋上からロープで曳航させる方式で行っており、出水時であったため、流速も大きくボートはほぼ上流向きであった。その結果、ローリングは高流速部で若干変動するものの、ほぼ0度に近い状態であった。一方、ピッチングはロープの引っ張り力により、常に約5度の角度で傾斜しており、高流速部では10度を超える場合もみられた。

以上の観測結果の比較から、移動観測における計測誤差の主要因として考えられるのは、高流速および水面波によるボートの揺動の影響である。水面に対してボートが傾斜、時間的に揺動する場合には、主に2つの問題が生じる。1点目はロープの引っ張りにより、常に傾斜する場合で、4つのビームで計測する平均水深が大きくなるため、流量を過大に見積もる可能性がある。例えば、計測範囲の河床面が平坦で、ビームの配置と同方向にピッチングのみが生じる場合、水深は傾斜角5度で0.43%、10度で1.75%大きく評価される。2点目は、水面波によって、傾斜角が時間的に大きく変動する場合である。この場合には算出される流速値に影響を及ぼす可能性がある。ADCP内部のチルト・ピッチセンサーでは、超音波1ping毎に傾斜角を補正する仕様となっているが、動揺が激しい場合はこのチルト・ピッチセンサーの時間応答性がADCP計測に追従できず、流速値にスパイク(ノイズ)が生じることがある。こうした問題に対処するため、ADCPの外部に高精度ジャイロを設け、動揺補正精度を高めるアプリケーションも提供されているが、河川流計測分野での実績はほとんど無いため、ここではチルト・ピッチセンサーの角速度を指標にノイズをマニュアルで除去する方法を採用したが、今後は外部ジャイロによる高度なチルト・ピッチ補正の有効性についても検証する予定である。

5. 結論

本研究では、ADCP搭載ラジコンボートと独自開発した無線データ転送システムを組み合わせたリアルタイム河川流況計測システムを構築し、四万十川において平水時に流況観測を行い、以下の点を明らかにした。

- 1) 平水時における市販ラジコンボート(Q-Boat)の最大の対水船速は約2.2m/sであった。現地観測では同程度の流

れに対しては十分対応可能であることがわかった。

- 2) 航跡が蛇行する場合の航跡補正方法として、航跡直交成分および航跡を直線化して流量を算出する手法を提案し、一般的に用いられている手法に比べて、精度良く算出できることを示した。
- 3) 新しい計測精度の評価指標として、偏差流速比、偏差流量比を提案し、ボートの揺動が小さい平水時には、流量および流速分布の計測精度を示す有用な指標となり得ることがわかった。
- 4) 洪水時のADCP移動観測においては、ボートの揺動が流速計測値に大きく影響することがわかった。これらの影響が偏差流速比にどの程度影響するか、定量的な評価を行う必要がある。今後も同地点において、ADCP搭載したRiver BoatおよびQ-Boatを用いた洪水時の流況観測を予定しており、計測ボートの揺動が流速計測値に及ぼす影響について引き続き検討する予定である。

謝辞： 現地観測を行うにあたり、国土交通省中村河川国道事務所にご配慮いただいた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 木下良作：ADCPによる流量と流れの構造について、第4回河川環境管理財団研究発表会講演集、2006。
- 2) 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。
- 3) 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、工学論文集、第52巻、2008
- 4) Kevin A. Oberg, Scott E. Morlock and William S. Caldwell: Quality-Assurance Plan for Discharge Measurement Using Acoustic Doppler Current Profilers, U. S. Geological Survey, Scientific Investigation Report 2005-5183
- 5) 木下良作、中尾忠彦：ADCPによる河川流量の測定と河道水理機構の観測、土木学会誌、2007年10月号、pp.68-71
- 6) Nick Everard: Oceanscience QBoat-Performance of Remote Control ADCP Gauging Boat in UK Rivers, ADCPs in Action 2007

(2008.4.3受付)