

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

EFFECT OF FLUCTUATION OF A MOVING BOAT EQUIPPED WITH ADCP ON VELOCITY-PROFILES AND WATER-DEPTH MEASUREMENTS

岡田将治¹・萬矢敦啓²・橘田隆史³
Shoji Okada, Atsuhiro 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 土木研究所水害・リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 茨城県つくば市南原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)

To have a better understanding of ADCP instruments and develop a system for the highly accurate measurement related to water discharge, velocity profiles and bathymetries, authors focus attention on a build-in inclination sensor in ADCP, which is a liquid-surface-detection type. The field measurement with a floating vessel in Japan involves high velocity and vibration of water surface, which might induce the major sources of error related to a vessel fluctuation. Therefore, in this paper, authors quantitatively evaluate the influence of vessel fluctuation on ADCP measurement with 1) developing a measurement system with employing an MEMS inclination sensor, 2) conducting experiments in an experimental pool with the system, and 3) conducting the field measurement. The authors find out characteristics of the build-in inclination sensor of ADCP, apply the knowledge to actual discharge measurements, evaluate the systematical measurement error, and introduce the possible solution for eliminating missing values.

Key Words: *Acoustic Doppler Current Profiler, High accurate measurement, Vessel fluctuation, Inclination sensor*

1. 序論

近年、河川流況計測において、ADCP(Acoustic Doppler Current Profilers)が有効な観測手法のひとつと認識されるときともに、研究者、実務者を問わず多くの観測事例がみられるようになった。海外においては、米国のUSGSを中心としてADCPを用いた計測技術やデータに関する精度検証技術を構築しており、技術的にほぼ確立してきたといえる^{1)・2)}。国内においても、平水時におけるADCPの計測精度評価については、木下³⁾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、流出入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。しかしながら、我が国において観測対象となる洪水流は、毎秒3mを超える高流速であるとともに、水面が大きく波立つような流況であり、平水時での精度検証結果をそのまま適用できるとは考え難い。すなわち、我が国の洪水時の流況特性に対応できる計測技術の標準化やADCP観測の高精度化のためには、洪水流の計測時に起こりうる状況を想定した上で、計測誤差

の発生要因の解明や補正方法の検討が重要課題であると考えられる。筆者ら⁴⁾は、ADCPの計測設定条件から算出される固定観測(線データ)における流速誤差の標準偏差を偏差流速と定義して、それを空間的に拡張することにより、断面流量に対して偏差流量比を、流速分布に対して偏差流速比とする計測精度評価指標を提案した。また、平水時(流速1m/s程度)および洪水時(流速3m/s程度)の計測データを比較し、洪水時にはADCPを搭載したボートが揺動しやすく、その結果として水深や流速分布の計測精度が低下する可能性を指摘した⁵⁾。さらにADCPに内蔵されている傾斜センサーは、液面検知式であり、洪水時のように揺動周期が短い場合には、センサーの特性上、揺動に対して追従できていない可能性があることから、これらの計測特性も併せて検証する必要がある。

また、ADCPを用いた河川計測分野では、流況のみの計測から流況と河床変動の同時計測技術の検討^{6)・7)}が進められており、ADCPで計測される河床近傍流速と水深(河床高)の値が重要な指標となるため、これらの定量的な評価は新しい技術の確立に対して避けて通れない課題となっている。このような背景から、本研究では、ADCPの洪水流計測に多く用いられている橋上からの曳

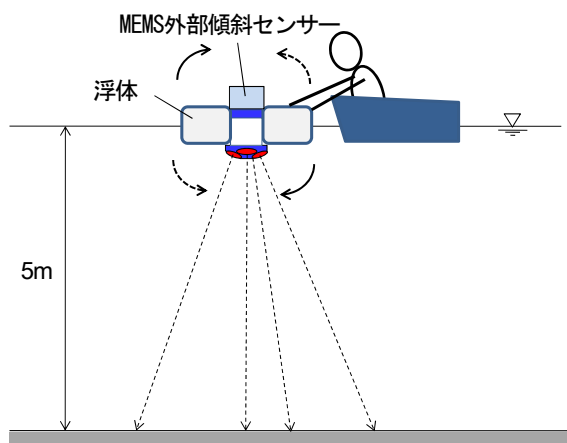


図-1 大型水槽におけるADCP搭載浮体の揺動実験

表-1 ADCPの計測設定と揺動実験条件

Workhorse ADCP 600kHz	
計測モード	WM1
計測層厚	0.50m
計測層数	30
アンサンブルタイム	0.28秒
Water ping 数	1
ボトムトラック機能	ON
固定観測における 流速誤差の標準偏差	13.62cm/s
揺動周期	1, 1.5, 2, 4 秒

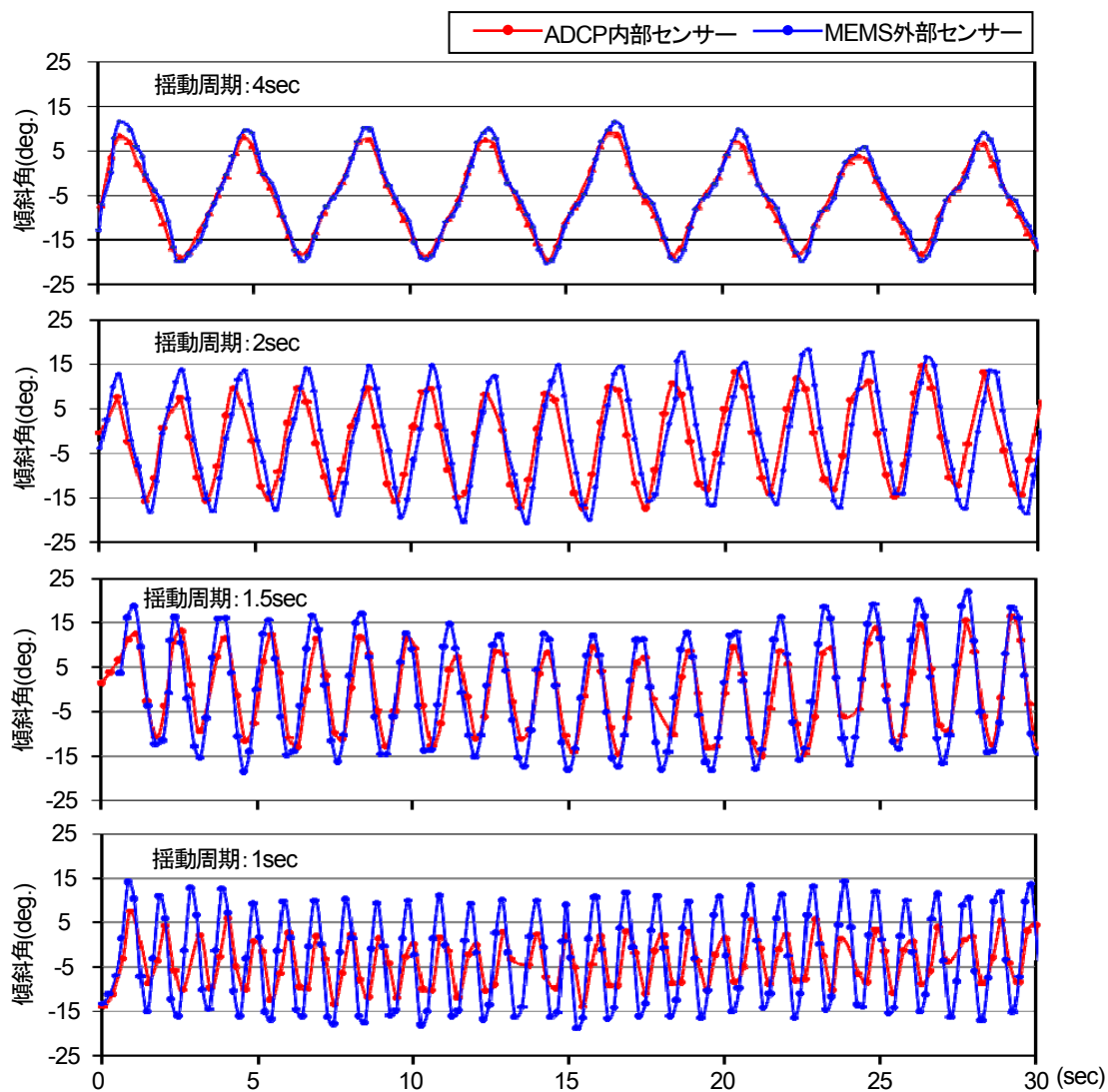


図-2 ADCP内蔵傾斜センサーとMEMS外部傾斜センサーの比較

表-2 各揺動周期におけるADCP内部センサーとMEMS外部センサーの振幅の比

揺動周期	①ADCP振幅(deg.)	②MEMS振幅(deg.)	①／②
4sec	12.89	14.71	0.88
2sec	12.77	16.39	0.78
1.5sec	11.36	15.83	0.72
1sec	6.30	13.56	0.47

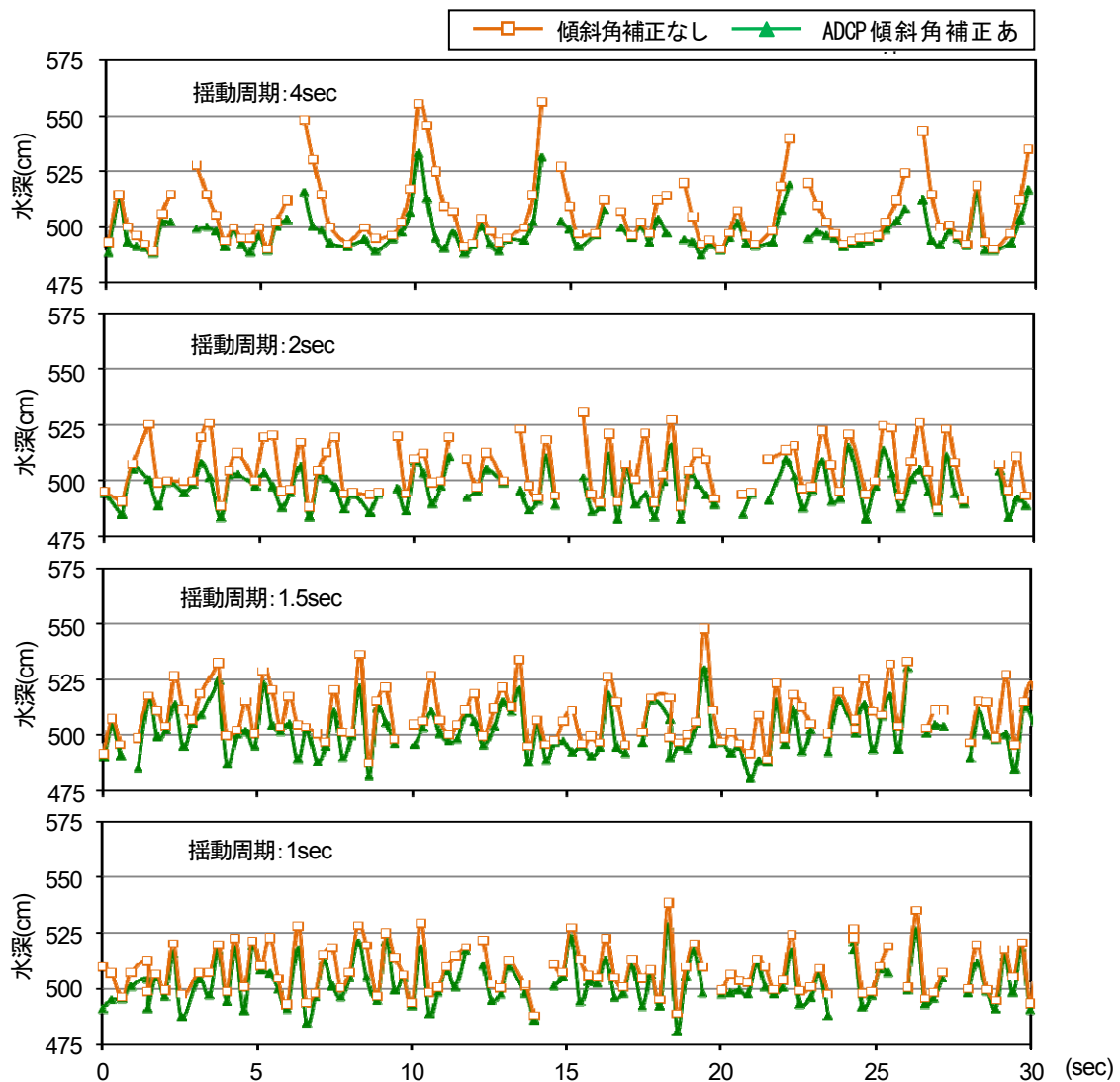


図-4 ADCPの計測値を用いた傾斜角補正の有無による水深の比較

航観測を想定し、はじめに大型水槽(25m×25m×5m)において、ADCP搭載ボートに高精度傾斜センサーを設置して種々の周期で揺動させる実験を行い、ADCPの傾斜角および水深に関する計測特性を調べる。つぎに、利根川平成大橋下流の高流速部において、ボートに水槽実験と同様な計測システムとRTK-GPSを搭載して流況計測を行い、ボートの揺動が流速分布および水深の計測値に及ぼす影響を明らかにする。

2. 大型水槽を用いたADCPの傾斜角、水深計測特性に関する揺動実験

(1) 揺動実験の概要

ADCPの傾斜角および水深の計測特性を明らかにするため、幅25m×奥行25m×水深5mの大型水槽を用いて揺動実験を行った。図-1に示すADCPを設置した浮体に高精度のMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)傾斜センサー(Xbow社製：NAV440)を搭載し、周期的な揺動を手動で与えて、2種類の傾斜センサーで傾斜角を連続的に

計測し、ADCPでは水深計測も同時に行った。

表-1にADCPの計測設定と実験条件を示す。実験にはTeledyne RDI社製のADCP(Workhorse600kHz)を使用し、一般に用いられる計測モード(WM1)で層厚0.5m、層数30とした。ウォーターピングは、計測精度を高めるために通常は複数回発射してアンサンブル平均を行うが、ここではADCPの基本性能を調べるために1ピングとした。揺動周期は、四万十川の洪水観測時⁴⁾のボートの揺動周期の値(1~2秒程度)を参考に4秒、2秒、1.5秒、1秒とし、揺動させる振幅は±15度として、縦揺れの1軸方向にのみ揺動させた。

(2) ADCPと外部傾斜センサーを用いた傾斜角の計測特性

図-2に各揺動周期におけるADCPの内部傾斜センサーとMEMS傾斜センサーで計測したピッチ角の時系列を示す。なお、傾斜角データは、機器の特性上、MEMS傾斜センサーは0.20秒、ADCP内部傾斜センサーは0.28秒ごとに出力されている。2種類の傾斜センサーの計測値を比較すると、周期4秒では振幅のピーク付近でADCPのセン

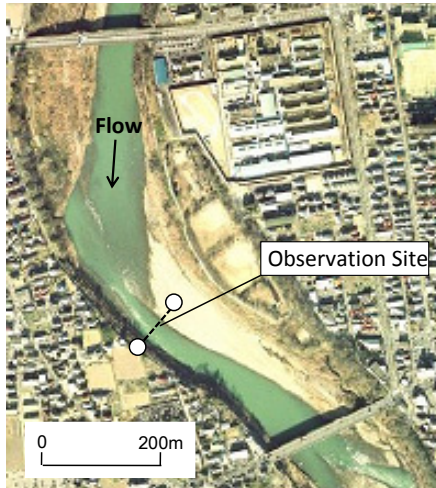


図-5 利根川現地観測地点付近の平面図
(前橋市平成大橋下流地点)

サーの値が若干小さくなっているものの、ほぼ同様な値を出力している。しかし、揺動周期が短くなるほど両センサーで計測された傾斜角のピーク値に差が生じ、ADCPに内蔵されている液面検知式の傾斜センサーでは追従できていないことが明らかとなった。実験から得られた各センサーの振幅の平均値と両者の比を表-2に示す。MEMS傾斜センサーがおよそ14度から16度の範囲の揺動振幅であるのに対して、ADCPの内部傾斜センサーの振幅の割合は、周期4秒で0.88、周期2秒で0.78、周期1.5秒で0.72、周期1秒では0.47となっている。すなわち、本実験条件では、1秒の揺動周期に対してADCPで計測する振幅が約1/2になることがわかった。

(3) 水深計測値に関する考察と補正方法の検討

本研究で使用するADCPでは、鉛直下向きに対して20度の傾きで4方向に超音波を発射し、各ビーム長さをそれぞれ20度の傾斜分を補正した後にそれらを平均してその地点の水深を出力する。ADCPが傾斜する場合にはその影響は考慮されておらず、データ補正を行うには現時点では計測後に行う必要がある。

ADCPの水深計測特性を考察するために、河床が平らな水深1の水槽において、ADCPを傾斜させた場合に4つのトランスデューサー(振動子)で計測されるビーム長の平均値を計算した。その結果、ピッチ角およびロール角が0度のときには、水深は最小値の1となり、同様に5度のときに1.009、10度で1.035、15度で1.082、20度で1.153となる。本実験において設定した揺動の振幅(1軸方向のみに±15度)では、水深が最大で約4%大きく出力される。

つぎに出力された水深をADCPの内部センサーで計測した傾斜角を用いて補正を行う効果について考察した。

図-4は水槽の水深500cmに対して、通常ADCPで水深として出力される4本のビーム長さの平均値(傾斜角補正な

表-3 利根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	WM1
計測層厚	0.20m
計測層数	15
アンサンブルタイム	0.25秒
Water ping 数	1
ボトムトラック機能	On
固定観測における 流速誤差の標準偏差	26.28cm/s
計測コーディネーション	EX00000 ビームコーディネーション

し)と傾斜角を考慮して補正した場合を比較したものである。4つのトランスデューサーのうち、ひとつでも欠測したデータについては図から除いている。図-2において傾斜角が±20度程度になるときは、欠測が生じやすく、計測できた場合でも実際的水深よりも10%程度大きい値を出力している。また、傾斜角が±15度程度の範囲内であれば、先に試算した通り、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、計測精度としては5%以内に収まっている。さらに、ADCPで計測した傾斜角データを用いて、ポストプロセッシングの補正計算を行うことにより、計測精度をさらに向上させることができる。このことから、揺動が短時間であれば計測値に影響は少ないものの、橋上から観測のように、常にボートを傾斜させた状態で計測を行う場合には計測精度の低下を抑えるために、傾斜角を考慮した水深の補正を行うことが望ましい。

しかしながら、現地河川では本実験で用いた水槽のように河床が平坦ではないため、ADCPを曳航する断面において、河岸付近等の河床形状が場所的に大きく変化する場合には計測精度が低下する。例として、水深が5mの地点において、ADCPが4つのビームで水深を計測する河床の範囲は直径約3.6mとなる。このような断面での観測では、筆者らはボートに音響測深機を別途搭載して、鉛直下向きに計測することで精度低下を回避している。この場合、音響測深機とADCPのデータを同期させることにより、前述した水深の傾斜角補正も可能であり、水深データの取得率を向上も期待できる。

3. 利根川における高速流の現地観測

大型水槽実験で得られた知見に基づいて、利根川平成大橋下流付近において高速流の現地観測を行った。図-5に観測地点付近の平面図を示す。この地点では、平水時においても流速が最大4m/sを超え、水面が大きく変動す

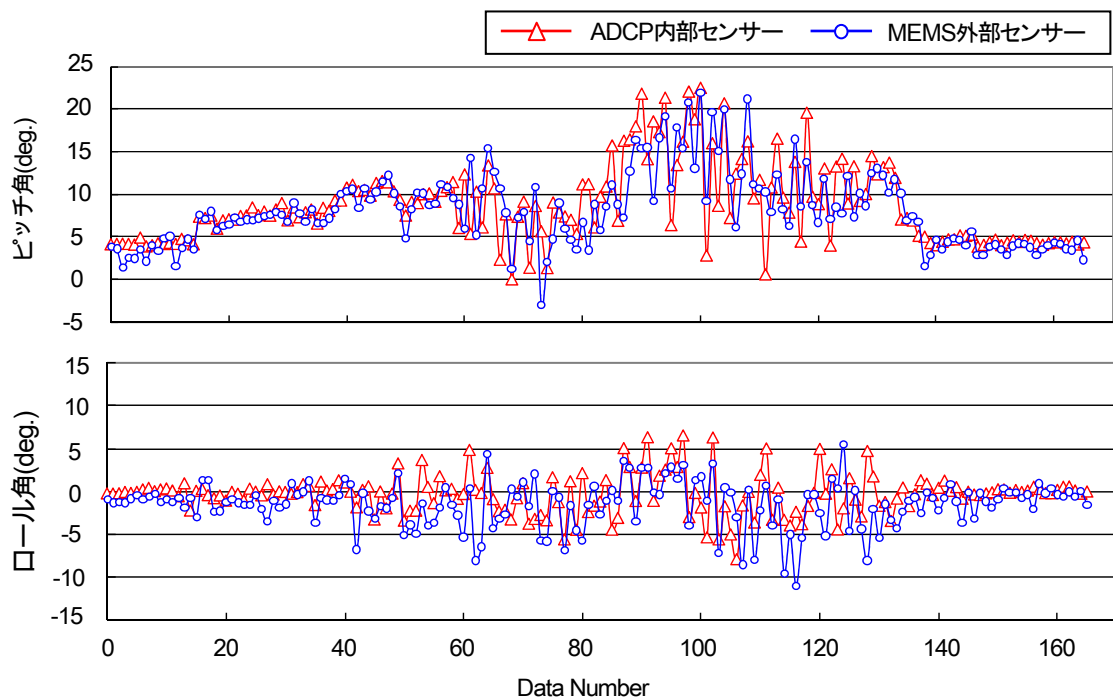


図-6 ADCPおよびMEMS傾斜センサーで計測した傾斜角の時系列

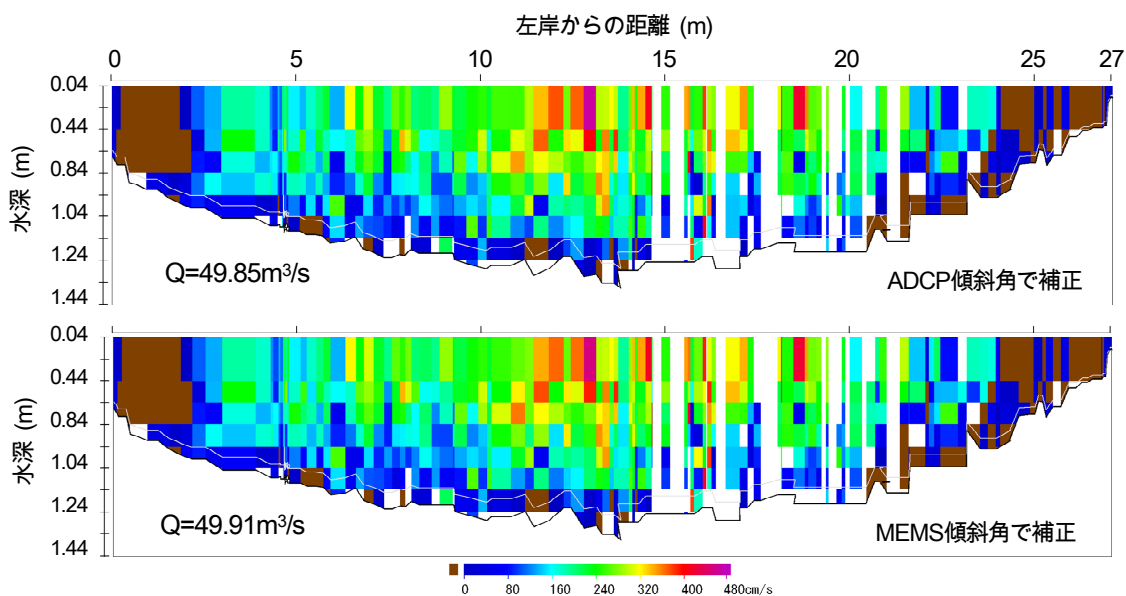


図-7 ADCPおよびMEMS傾斜センサーで計測した傾斜角で補正した流下軸方向の流速コンター

る流況であるため、洪水流を想定した条件で常時計測が可能である。現地では河川を横断するようにワイヤーを張り、専用ポートには200kHzタイプのADCP、MEMS傾斜センサー(シリコンセンシング社製)に加え、ボトムトラッキングが機能しない場合に正確な位置を計測するためのRTK-GPSも搭載して流況計測を行った。

表-3に観測に用いたADCPの設定条件を示す。計測モード、層厚、層数等は一般的な設定であるが、揺動による流速値を補正するために、超音波の方向成分を計測するビームコーディネーション(EX00000)を使用している。本観測においてもウォーターピング 1ピングあたり

の計測特性値を検証するために、大型水槽実験と同様な設定条件とした。そのため、計測される流速値に含まれる流速誤差の標準偏差(偏差流速)は26.38cm/sとなるが、川幅27mに対して、約3分間かけて計測(単位移動距離2mに対して10ピング超音波を発射)しており、各グリッドの平均的な偏差流速は7.34cm/sとなる。

図-6にADCPの内部傾斜センサーとMEMSセンサーで計測したピッチ角、ロール角の時系列を示す。図-7のADCPの内部センサーおよびMEMSセンサーで計測した傾斜角で補正した断面流速コンター図と併せて考察すると、河岸近傍の流速が小さい区間では、各センサーが計

測するピッチ角、ロール角とも傾斜角は小さく、両者の計測値もほぼ等しくなっている。しかし、主流部の流速が毎秒3mを超える高流速区間では、ボートの揺動により傾斜角が小刻みに変動し、ピッチの周期は2秒から3秒、ロールの周期は1秒から2秒となっている。計測された揺動に位相差が生じる場合には、両者の計測された傾斜角の差が10度を超える場合もみられた。また、流速の計測値に欠損が見られるのは、ピッチおよびロール角が15度を超えるときであり、揺動の周期が短く、振幅が大きいとき生じていることがわかる。図-7において、高流速部におけるデータ欠損を補完せずに流量を算出した結果、両者とも50m³/s程度でほとんど差が無い結果となった。断面内の流速分布について、傾斜による流速補正を行った結果、MEMS傾斜センサーによる補正で流速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ているものの、断面積分して流量換算した結果、それらが相殺されて差がなくなったものと考えられる。また、水槽実験で明らかとなった短い揺動周期時に生じる傾斜角の計測精度低下についても、水深に有意な差は見られなかった。

4. 結論

本研究では、洪水観測時のADCPを搭載したボートの揺動が水深および流速計測値に及ぼす影響を明らかにするために、大型水槽および現地河川において、ADCP搭載ボートに高精度傾斜センサーを設置して揺動実験および現地観測を行った。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 本実験条件(揺動振幅±15度程度)において、ボートの揺動周期が短くなると、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。
- (2) ボートの傾斜角が±15度以内であれば、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、計測精度としては5%以内に収まっている。さらに、ADCPで計測した傾斜角データを用いて、ポストプロセッシングの補正計算を行うことにより、計測精度をさらに向上させることができる。ただし、ADCPの計測特性上、河床形状が急激に変化する断面においては、鉛直下向きに計測する測深機を別途搭載して計測することが望ましい。加えて、高流速場では水深計測の欠測が多くなることから有用である。

- (3) 現地観測結果から、ボートの傾斜角が15度を超えると流速の欠損が多く生じることから、傾斜角が15度を超えないような船体の設計および計測手法の工夫は計測精度の確保のためにも重要である。
- (4) 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、断面積分した流量値に有意な差が見られなかった。この結果は、洪水流を想定した流れの計測においても、ボートの揺動が水深および流速値に及ぼす影響は小さいことを示唆するものであり、ADCPが高速で、かつ水面変動がある流況に対しても十分な精度で観測可能であることを示した事例となった。現地観測で得られたこれらの結果については、ADCPの計測精度を示す上で重要な知見であるため、他の河川の洪水でも同様な観測が必要と考えており、今後も引き続き検討を進める予定である。

謝辞：本論文で使用した利根川の現地観測データについては、国土技術政策総合研究所河川研究室から提供いただいた。記して感謝の意を表する。

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) David Mueller: Techniques for Measuring Stream flow with an ADCP in Moving-Bed Conditions, ADCPs in Action 2005.
- 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) 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，2008.3
- 5) 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，土木学会 河川技術論文集第14巻，2008.6
- 6) Rennie and et al.: Measurement of bed load velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler, J. Hyd. Eng., Vol. 128, No.5, 2002.
- 7) Yorozyua A. and et al.: Development of a sediment discharge measurement system with ADCP, FLUCOM2009, 2009.

(2009. 9. 30受付)