

# ADCPを搭載した橋上操作艇による 洪水流観測技術の進展

## DEVELOPMENT OF FLOOD FLOW OBSERVATION TECHNOLOGIES USING TETHERED BOAT EQUIPPED WITH ADCP

岡田 将治<sup>1</sup>  
Shoji OKADA

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 高知高専 准教授 環境都市デザイン工学科 (〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1)

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, Evaluation index of river flow measurement, Vessel fluctuation, Inclination sensor*

### 1. はじめに

数年前まで浮子観測以外で洪水流量を計測することは困難と考えられてきたが、近年、洪水観測技術を大きく向上させるような機器や計測技術の開発、それを活用した観測事例も多く紹介されるようになり、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を計測できるという認識に変わりつつある。特に、ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers)は3次元流速分布と河床形状を計測できる有効な手法として、研究者、実務者を問わず幅広く活用されている。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<sup>1), 2)</sup>を構築しており、計測技術およびデータ品質管理についてはほぼ確立している。一方、日本国内においては、同様な検討がなされておらず、ADCPが普及し始めた初期の段階では、現場の流況に応じて計測条件の設定や計測データを処理できる技術者が少なかったため、不慣れた観測者が条件を適当に設定して、十分なデータが取得できないという状況も度々あったようである。さらに、ADCPの計測設定条件や計測手法に応じて計測データの精度、すなわち計測値に含まれる誤差分の標準偏差(筆者らが後に偏差流速と定義)が異

なることが知られておらず、観測者も発注者側もADCPで計測したデータはすべて同様の精度を有すると誤って認識している場合が多い。

筆者らは、ADCPの有用性や今後の発展性を認識したうえで、河川の流量観測の一手法として早急に技術の標準化を進めるため、その基礎となる計測手法に加えてデータ処理および観測データの品質管理を行うための精度評価の3つの技術検討を進めてきた。特に、国内におけるADCPを用いた河川流況計測は、高流速で水面が大きく変動する流れ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等へのニーズも高まっていることから、ADCPの移動観測についてはUSGSが提案する手法をそのまま取り入れるのではなく、わが国の河道特性、流況特性に対応できる日本独自の技術の確立が重要と考えた。

本稿では、著者らがこれまでに検討を進め、現在実務レベルで多く活用されているADCPを搭載した橋上操作ボートを用いた洪水流の移動観測技術について、データ処理法や計測精度評価技術についてまとめる。さらに洪水流観測を想定して、ボートが傾斜・揺動がADCPの水深および流速計測値に及ぼす影響に関する詳細な検証事例を紹介する。

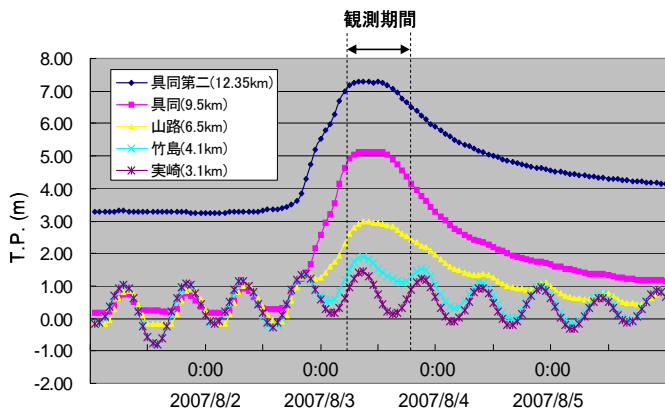


図-1 四万十川における2007年台風5号接近・通過時の水位ハイドログラフ(2007年8/1～8/6)



図-2 ADCPを搭載する橋上操作艇の計測状況



図-3 2007年台風5号出水時の四万十川具同地点の流況

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	60層
1アンサンブル時間	4sec
ウォーターピング数	10ping
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	4.31cm/s

## 2. 橋上操作艇によるADCP洪水観測技術の構築

### (1) 四万十川におけるADCP橋上曳航観測

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年度から検討を進めている。その一環として、2007年の台風5号襲来時にADCP搭載橋上操作艇を用いて洪水流量観測を行った。

図-1に示す全長1.22 m、全幅0.81 m、重量6 kgの高密度ポリエチレン樹脂製の小型軽量ボートを使用した。この橋上操作艇は、USGSのMichaelら<sup>6)</sup>が行った実験結果に基づいて開発され、USGSの河川流量観測用標準橋上操作艇としても採用されており、現在世界中で最も多く利用されているものである。図-2に2007年台風5号接近・通過時の四万十川の各水位観測所の水位ハイドログラフを、図-3に観測時の四万十川具同地点(河口から9.5km)の状況を示す。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=3.89 m)から13:00(H=3.88 m)まで3.90 m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8.32 m(7/15 3:00)であったこと、水防団待機水位が5.00 m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程度であったことから、ほぼ同じ水理

条件の下で計測が行われたといえる。ADCPの計測条件は、表-1に示すようにウォーターピング(流速分布を計測するために発射する超音波)数を10、計測層厚0.25 m、計測層数60層とし、対地速度を計測するボトムトラックはONとした。以上の計測設定条件から、固定観測を行う場合の理論上の流速計測値に含まれる誤差の標準偏差は4.31 cm/sとなる。この値が次章で示すADCPで計測したデータの精度評価法に大きく関係する。

ADCPを搭載したボートに80 mのロープを結び、四万十川橋下流側歩道から約10 m下の水面に降ろし、橋から約50 m下流にある浮子観測に用いる第1見通し線上下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300 m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。洪水流量観測で使用した橋上操作ボートにも hidroシステム開発社製のデータ転送システム(Remo ADCP)を搭載しており、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。

### (2) 航跡が蛇行する場合の航跡直線化手法の適用

流況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、橋上操作艇を直線的に曳航させることが難しい。そのため、図-4に示す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右岸側の主流部では、ボートの転覆を極力回避するため、流れに逆らわずに蛇

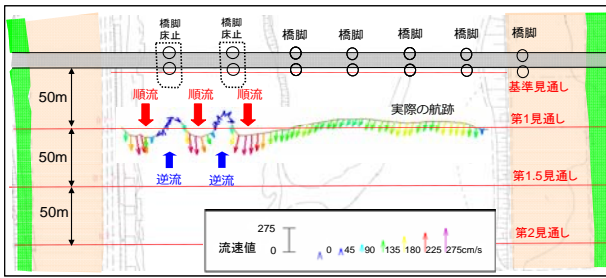


図-4 橋上操作艇の航跡と水深平均流速ベクトル

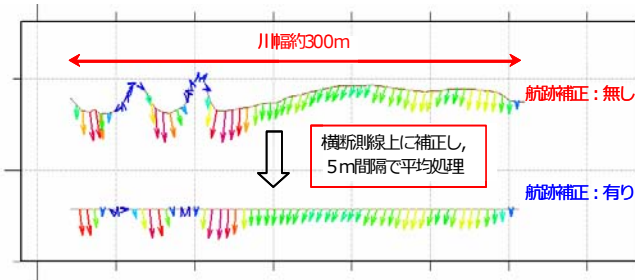
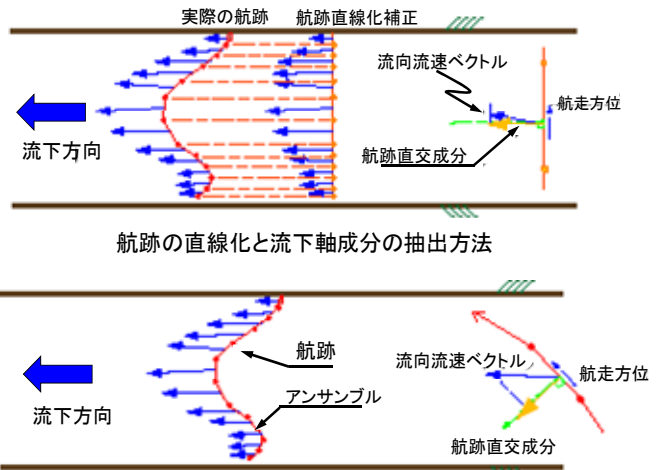


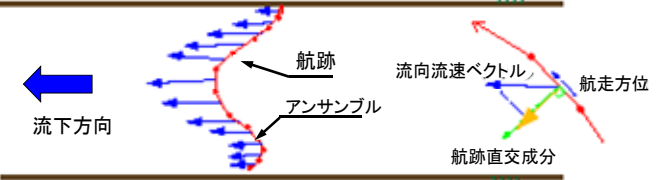
図-5 航跡補正前後の水深平均流速ベクトル

行させながら横断方向に計測せざるを得ない。

Telrdyne RDI社の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る。しかし、河床形状、流速分布については図-5上図の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、示した蛇行して計測した場合の航路、流速分布および河床形状を直線化する補正を行った。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い、図-5下図が得られた。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。つぎに、流下軸方向への直線化補正の妥当性を検証するために、ADCPの計測データ処理ソフトWinRiver(TRDI社)、航跡直線化補正後流速および航跡直交成分流速を用いた断面流量換算値を比較した。流速の算出方法は図-6に示す。その結果、表-2に示すように、平水時および洪水時においても、換算流量値に有意な違いは見られず、流量値の差は最大1.3%であった。この流量差の原因は、河床付近の流速値の補完方法に起因するものであったが、断面内の流量値に影響するものではないことがわかった。したがって、補完法の違いによる有意な差はなく、浮子観測やH-ADCP等との比較を行うために航跡の直線化補正を行っても差し支えないことが明らかとなった。



航跡の直線化と流下軸成分の抽出方法



航跡直交成分の抽出方法

図-6 航跡直線化による流下軸成分および航跡直交成分の流速抽出方法

表-2 航跡補正による算出流量の比較

流量算出方法と流量値(m <sup>3</sup> /s)		
WinRiver (TRDI 社)	航跡直交成分	航跡直線化
1942	1922	1915
2006	2029	2037
1956	1906	1900

### (3) 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から確認されていない。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、作業条件を整えば、この橋上操作艇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、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

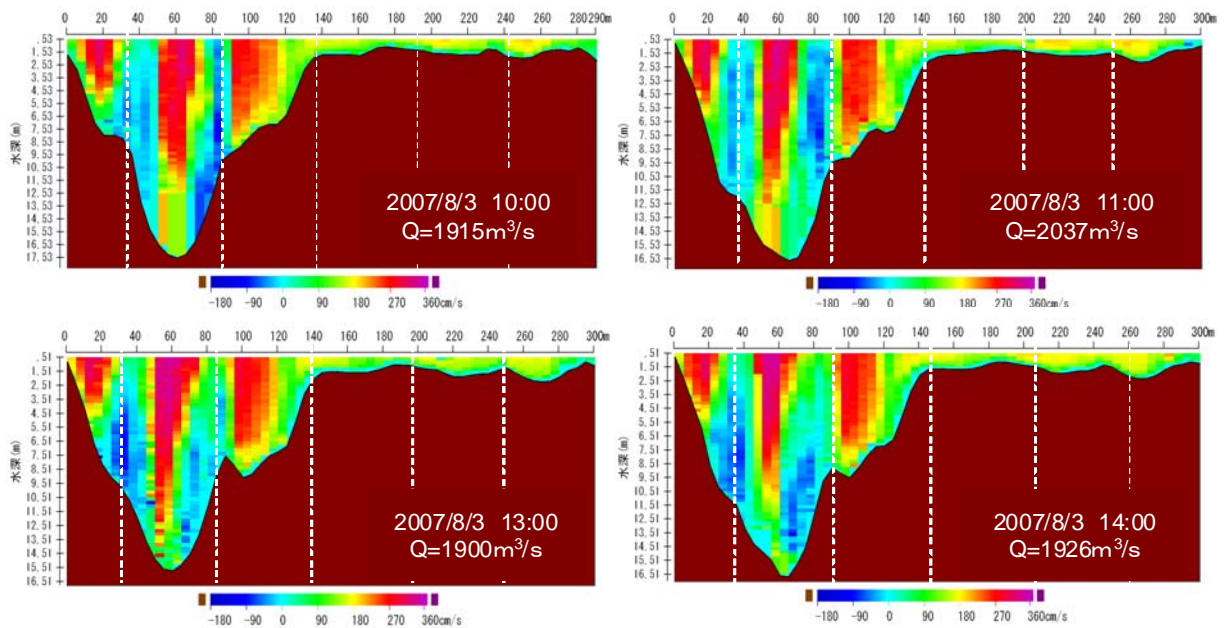


図-7 ADCPで観測した航跡補正後の横断河床形状と流速分布および流量

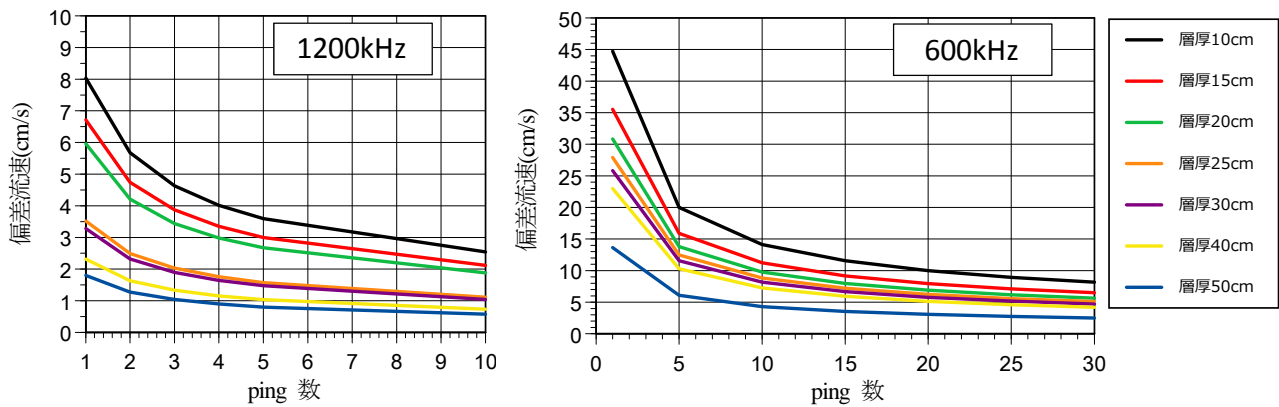


図-8 ADCPの観測層厚, ping数と流速精度(偏差流速)の関係

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、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。

#### (4) ADCPで計測したデータの精度評価指標の提案

これまでADCPを用いた流況観測の計測精度評価に関する検証事例として、平水時におけるADCPの計測精度評価については、木下<sup>3)</sup>によっていち早く実施され、土木研究所の長大検定水路においてADCPのウォーターピング(流速分布を計測するために発射する超音波)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ウォーターピングと対地速度を計測するボトムピング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、ミリメートル単位の流速差であったことを示している。実河川の流水に対するADCPの精度検証事例としては、島田<sup>4)</sup>らは石狩川の平水時において、ADCPを搭載した

ラジコンボートによる移動観測と設置型ADCPの比較を行って、ピング数(超音波の発射回数)とボートの走行速度の違いによる両者の相対誤差の関係を調べている。また、二瓶ら<sup>5)</sup>は江戸川の小規模出水時(350~570m<sup>3</sup>/s程度)において、ADCPの移動観測と定点固定観測で得られた流量を比較し、相対誤差が1.6~7.8%であったことから、ADCPの移動観測精度が高いことを示している。

図-8に固定観測における1200kHzタイプおよび600kHzタイプのADCPの設定層厚とピング数による流速計測精度の関係を示す。標準モード(WM1)では1ping当たりの流速計測値に含まれる誤差分の標準偏差(著者らは偏差流速と定義している)は、一般に用いられる1200kHzタイプの場合、層厚25cmで13.6cm/sで、600kHzタイプでは28cm/sとなる。また、ADCPの計測精度は、観測層厚にも大きく依存しており、層厚を小さくするほど、水深方向の解像度は増えるが、各グリッドの計測精度は小さくなることがわかる。600kHzタイプは、1200kHzタイプに比べて計測精度は劣るものの、濁度が大きい流れの計測や河床が移動する場合の計測に向いて

おり、対象とする流れ場に応じて対応する必要がある。本観測で用いたハイスピードサンプリングモード (Mode12)では1ピングの間に補助的なサブピングを高速連射することにより、同じ層厚、計測時間でも誤差流速は4.31cm/sまで向上される。逆にいえば、同じ計測精度を求めるのに、計測時間を短くすることができ、移動観測に向いているといえる。設定層厚の増加による計測精度の減少傾向をみると、層厚25cmより小さくする場合に、精度が大幅に減少する。また、ピング数は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、ピング数20程度が効果的に精度を確保できる設定といえる。

図-8に示したADCPの計測設定条件と計測精度の関係については、一般に多く知られておらず、計測を専門にやっている技術者の経験的に理解されている程度であった。対象とする流れ場の水深、濁度、必要とする層厚数、計測精度、計測時間等、さまざまな流れの条件におけるこれらの関係性を理解したうえで、観測条件を決定することが計測精度を向上させるうえで重要である。

固定観測では、機器の計測設定条件が決まれば、同地点に発射する超音波の発射回数(ウォーターピング数)が多いほど得られたデータの計測精度は高くなる。したがって、移動観測の場合にも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のが望ましい。しかしながら、実際には各地点の流速によってボートが上下流方向に流される場合やボートの揺動(ローリングやピッチング)による誤差を小さく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図-9に示すように固定観測の精度の“線”的な考え方を“面”的に拡張し、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算出することが重要となる。ここに、移動観測における計測精度を表す指標として、単位移動距離あたりの流速計測値が含む誤差流速の標準偏差を偏差流速(Deviation Velocity)、偏差流速を断面全体で積分したものを偏差流量と定義する。流れ場の精度評価には、各グリッドにおける偏差流速と流速計測値の比である偏差流速比を、断面流量の精度評価には、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提案する。例えば、USGSの流量観測に係わるガイドラインのように、往復計測を行った際の横断面流量誤差が5%以内であっても、ADCPの計測設定条件および計測方法により、この指標が異なるため、計測したデータの精度評価が容易となる。図-10に図-7で示した洪水時(流量2000m<sup>3</sup>/s程度)の計測時におけるボートの揺動、流速分布、偏差流速コンター、偏差流速比コンターを示す。偏差流量は約5m<sup>3</sup>/sであった。順流域と逆流域が交互に生じている区間では、ボートをゆっくりと移動させながら計測でできなかったため、偏差流速が大きくなり、それに伴い、逆流域における偏差流速比が6~12%であった。

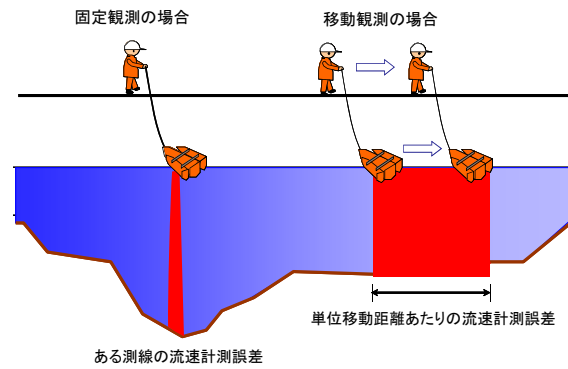
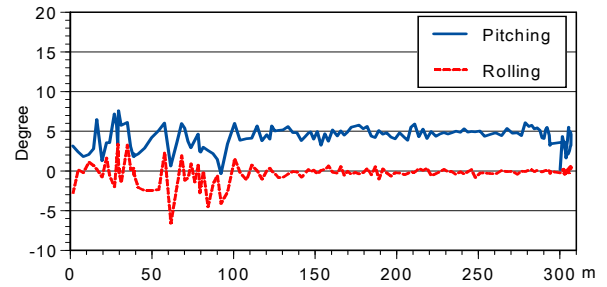
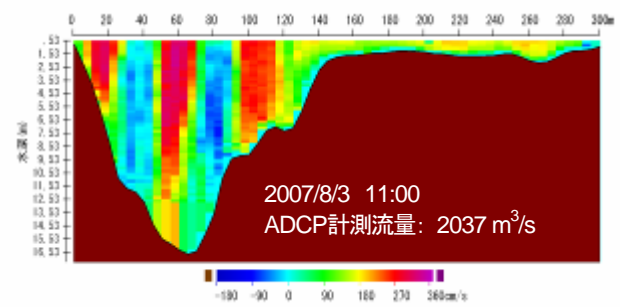


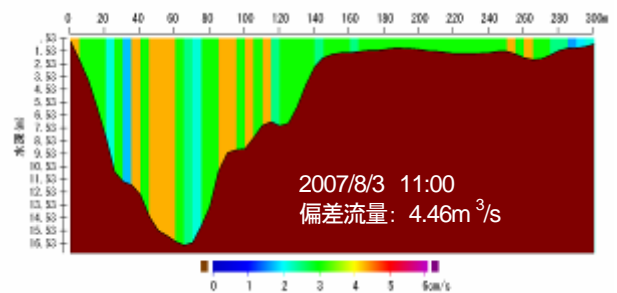
図-9 移動観測データの精度評価手法のイメージ



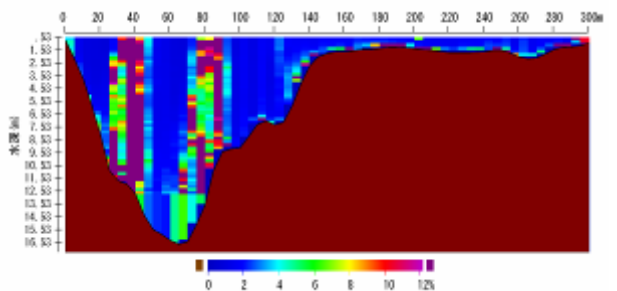
(a) River Boatの揺動 (2007/8/3 11:00)



(b) 流速コンター (2007/8/3 11:00)



(c) 偏差流速コンター (2007/8/3 11:00)



(d) 偏差流速比コンター (2007/8/3 11:00)

図-10 四万十川具同地点において洪水時に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

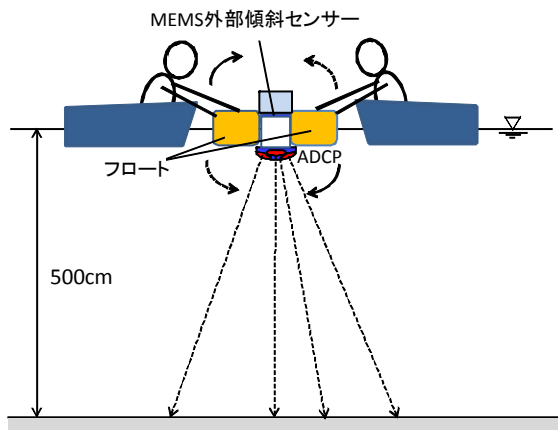


図-11 大型水槽におけるADCP搭載浮体の揺動実験

また、出水時に橋上から曳航観測を行っているため、流速も大きくボートはほぼ上流向きであり、図-10(a)に示すボートの揺動をみると、ローリング(横揺れ)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(縦揺れ)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。ボートの傾斜および揺動が計測値に及ぼす影響については次章で示す。

### 3. 橋上操作艇の計測時の揺動がADCP計測値に及ぼす影響

我が国において観測対象となる中規模出水以上の洪水は、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、既往の平水時や小規模出水時における精度検証結果をそのまま適用できるとは考え難い。木下<sup>3)</sup>は、静止水における精度検定の結果が洪水のように激しい流動水に適用して真値が得られているのかという他者からの批判に対して、検定は静止水、実際の使用は流動水であり、それを疑うことは当時のわが国の検定全てを疑うことになり、絶対流量値を正しく把握できるのは流量がゼロの場合のみであると考え、批判に顧慮せず現地観測を行ったとしている。しかしながら、図-10で示したように、洪水時には操作艇が揺動し、それによって水深や流速分布値に及ぼす影響を検証する必要がある。これは、ADCP観測では一般にボートの傾斜角補正を行っていないこと、ADCPに内蔵されている傾斜センサーが液面検知式であり、揺動周期が短く振幅が大きい場合に追従できていない可能性がためである。したがって、ADCPの揺動(傾斜角)の計測特性およびそれが流速分布および水深の出力値に及ぼす影響を定量的に評価でき、データ補正法が確立できれば、ADCPが洪水時においても十分な精度で計測可能であるという検証になり得る。このような背景から、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のMEMS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

表-3 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
ウォーターピング数	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

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を搭載した流況計測を行い、ボートの揺動が流速計測値に及ぼす影響を明らかにする。

#### (1) 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

ADCPの傾斜角および水深の計測特性を明らかにするため、図-11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-3に揺動実験で用いた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。(水槽の水深は5mであるため、データが得られる層数は10層である。)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データをアンサンブル平均するが、ここではADCPの基本性能を明らかにすること、ADCPおよびMEMSで出力される傾斜角データを比較することを目的とするために1ピングとした。浮体に与える揺動周期は、図-10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秒の4ケースとし、メトロノームを使用して1軸(ピッチ:縦揺れ)方向に、ADCPの傾斜センサーの計測範囲(±20度)を考慮して傾斜角15~20度を目標に揺動を与えた。つまり、本実験で与える揺動周期および振幅の条件は、ADCPで洪水流計測を行う際の最も厳しい流況を想定していると考えてよい。なお、MEMSセンサーの計測範囲はロール±180度、ピッチ±90度である。

図-12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

表-4 各揺動周期におけるADCPとMEMS傾斜センサーの振幅比

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

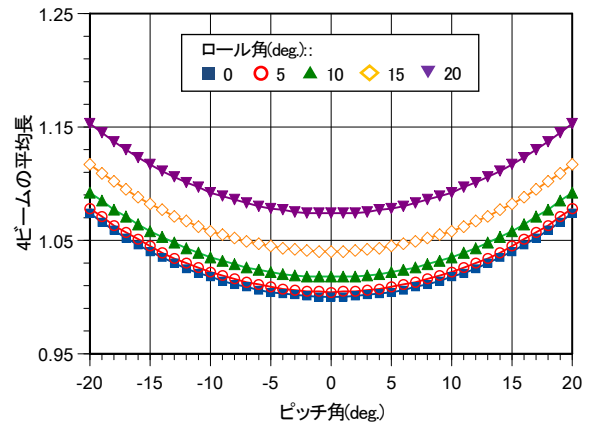


図-13 水深1の水槽における傾斜角(ピッチ・ロール)とADCPの4ビームの平均長の関係

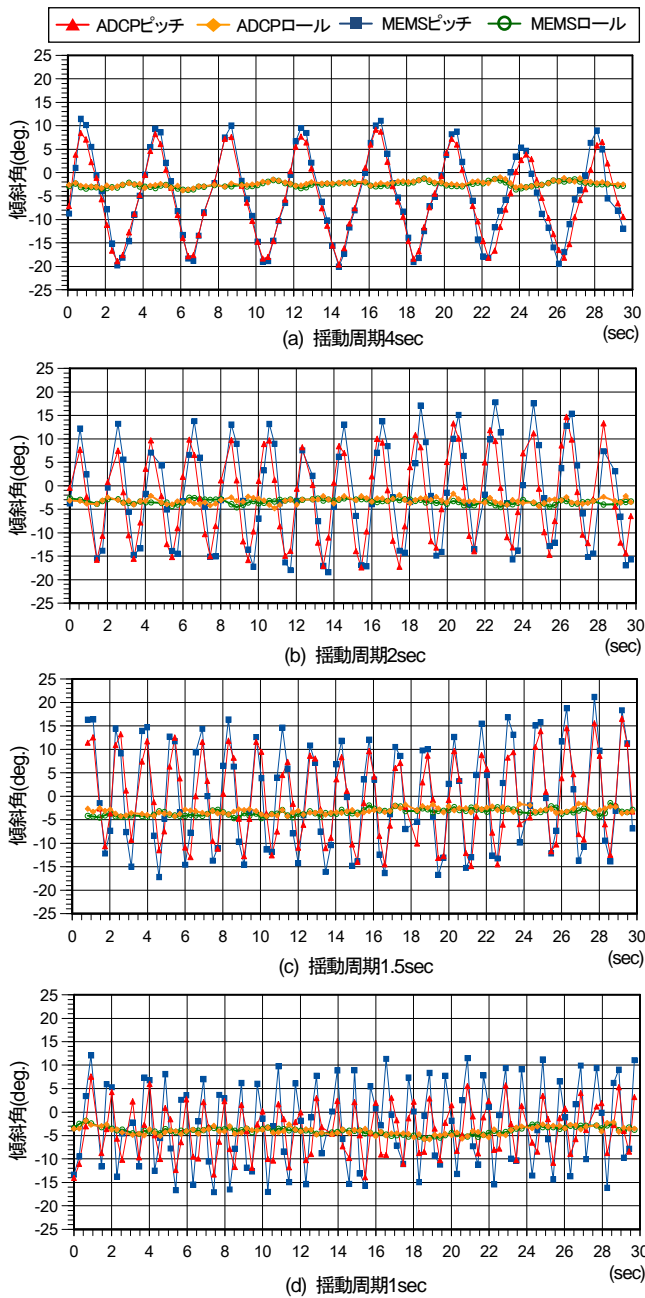


図-12 ADCP内蔵傾斜センサーとMEMS傾斜センサーで計測された各揺動周期における傾斜角の時系列

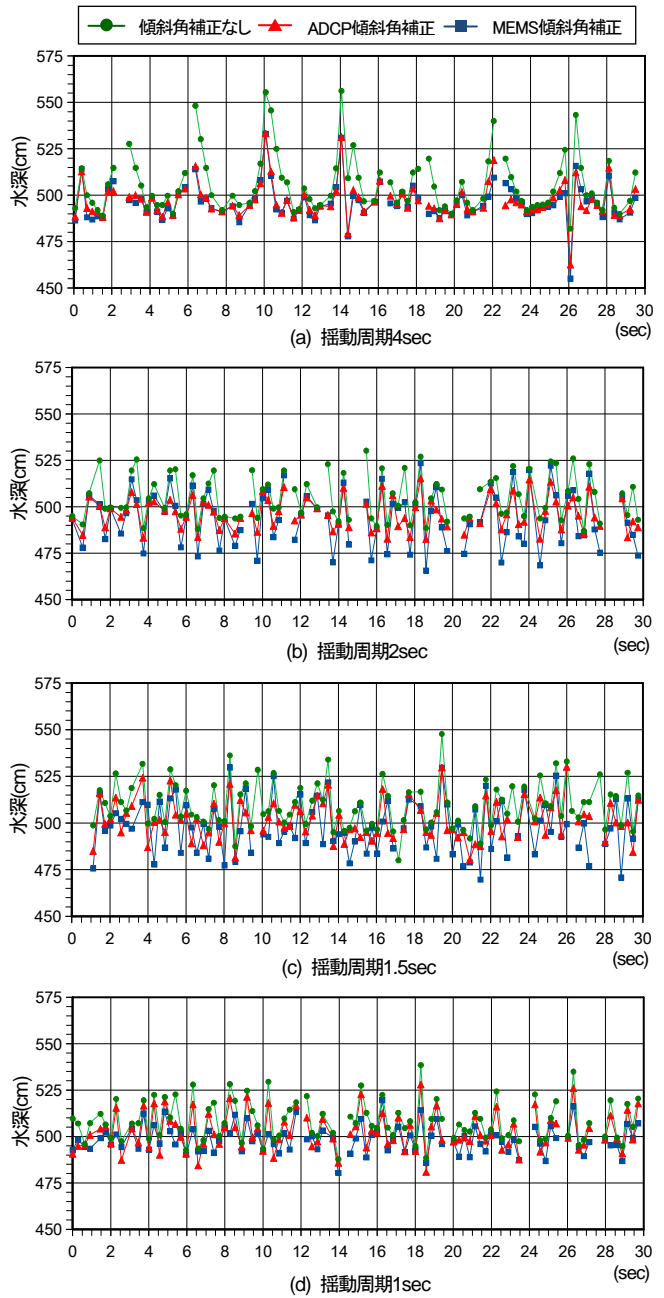


図-14 ADCPの4ビームの平均長とADCPおよびMEMS傾斜センサーデータを用いた傾斜角補正による水深の比較

ン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-4に示す。MEMS傾斜センサーがおおよそ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。

つぎに、水深計測値に関する考察と傾斜角を用いた補正法の効果について検討する。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の平均値をその地点の水深として出力する。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、河床が平坦な基準化された水深1の水槽を想定して、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、図-13に示すようにピッチ角およびロール角が0度のときには、水深は実際の値である1(最小値)となり、同様に5度のときに1.009、10度のときに1.035、15度で1.082、20度で1.153と傾斜角が大きくなるほどビーム長の平均値は実際の水深よりも大きくなる。特に傾斜角が10度から15度の差が大きく、本実験において設定した揺動の振幅(1軸方向のみに $\pm 15$ 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およびMEMS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-14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(傾斜角補正なし)と図-12に示したADCPとMEMSセンサーで計測した傾斜角を用いて補正した場合を比較したものである。MEMSセンサーデータについては、出力タイミングがADCPと同じではないため、データ間を線形補完して同期させる形とした。4つのトランスデューサーのうち、ひとつでも欠測した水深データについては図から除いている。図-2と図-4の比較から、傾斜角が $\pm 20$ 度程度になるときは、ビーム長(水深)の欠測が生じやすく、計測できた場合でも実際の水深よりも10%(50cm)程度大きい値を出力しているデータもみられる。また、揺動周期が4秒および2秒のケースでは、傾斜角が $\pm 15$ 度以下であれば図-3で試算した通り、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ほとんどの値が5%(25cm)程度に収まっている。周期がそれよりも短くなると、ADCPとMEMSの計測値の差が大きくなるため、15度よりも

さらに小さい値を閾値とする必要がある。いずれにしても、ADCPの傾斜センサーの計測範囲は20度であるが、実用上は傾斜角15度以下を閾値とすることが望ましいといえる。傾斜角が大きい地点の水深値についてはADCPで計測したデータを用いて、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向上させることができる。

図-14のMEMSセンサーデータを用いた傾斜角補正では、(b)周期2秒と(c)周期1.5秒において、補正した水深値が実際よりも過小に評価しているのは補完によるMEMSの傾斜角データとADCPのビーム長データの同期が不十分であるため生じたと考えられる。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。

## (2) 利根川における高速流の現地観測

大型水槽実験において、ボートが揺動する場合のADCPの水深計測値に対して、傾斜角が15度以下であれば補正を行わなくてもほぼ5%程度と十分な計測精度を有することが明らかとなった。この結果に基づいて、揺動が流速分布に及ぼす影響を検討するため、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。揺動による計測精度への影響を検証するには、島田ら<sup>4)</sup>や二瓶ら<sup>5)</sup>のように、ほぼ同じ地点で固定観測と移動観測を同時に行って比較するのが合理的であるが、計測条件が厳しいことから、計測精度を低下させる要因をボートの傾斜角のみと仮定した上で、各地点における流速分布を傾斜角に応じて補正を行い、補正の有無の違いから考察することとした。図-15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、専用ボートには1200kHz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。ボートに搭載したこれらの計測機器のデータは、Remo ADCP(ハイドロシステム開発社製)を用いて、出力間隔1秒に同期させて河岸に設置したノートPCにリアルタイムに送信させた。図-16に計測システムの概要を、表-5に観測に用いたADCPの設定条件を示す。



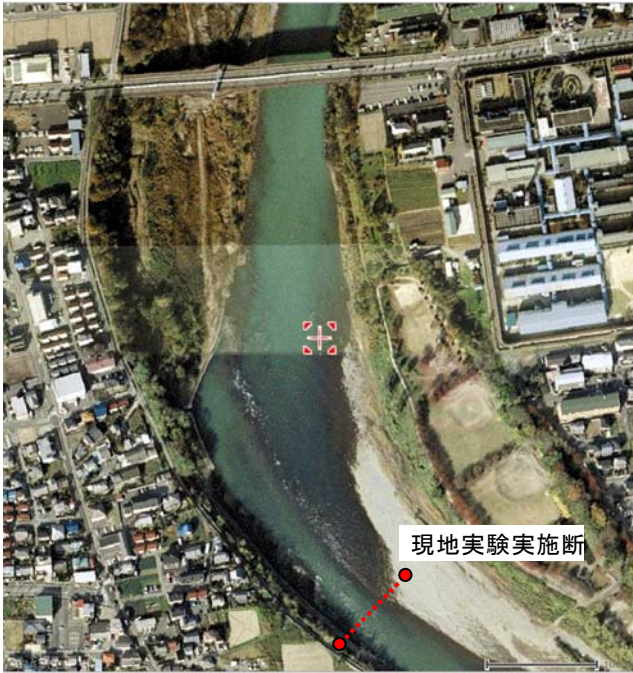


図-15 現地実験実施箇所(利根川大正橋付近)の平面図と平水時の流況

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、超音波のビーム方向成分を出力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と計測精度としては比較的大きい値となるが、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-17に専用ボートにADCP、RTK-GPSおよびMEMS傾斜センサーを搭載し、高速流において実験を行っている状況を示す。河道中央部では毎秒4m程度の流速であった。

高速流計測に対してRTK-GPSを併用することの有効性を示す事例として、図-18にADCPのボトムトラックとRTK-GPSによる航跡の比較図を示す。ADCPのボトムトラック機能は、対地速度を計測することにより、ボートが移動する場合でも流水速度を算出できる機能であるが、本観測のように河床が移動する場合、あるいは水面が大きく揺動するには対地速度を計測するボトムピングが受信できずにデータ欠損を生じることがある。図のように同じ位置からスタートしても、その後青線のRTK-GPSの航跡は安定して位置を捉えている一方で、赤線のADCPのボトムトラックによる航跡は急に大きく位置が変化する状況がみられ、実際に計測している地点の座標を正しく出力できていない。ボートが揺動するほどの流況でなく、河床変動がほとんど生じていない場合には安価なD-GPSを使用して、大まかな位置座標を求めることも可能であるが、ADCPによる流況と河床変動の同時計

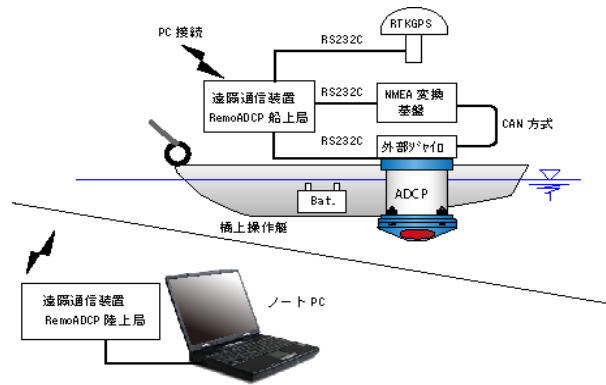


図-16 現地実験に用いた計測システムの概要

表-5 利根川観測における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
ウォーターピング数	1
ボトムトラック機能	ON
偏差流速※1	26.28cm/s
計測コーディネーション	ビームコーディネーション※2

※1 固定観測における流速誤差の標準偏差

※2 ビーム方向の流速成分を出力する



図-17 ボートにADCP、RTK-GPS、MEMS傾斜センサーを搭載して揺動実験を行っている状況

測技術への応用を考えると、高精度のRTK-GPSを併用することが望ましいといえる。

図-19にADCPの内部傾斜センサーとMEMSセンサーで得られた傾斜角から、流速値を補正する方法の概念図を示す。本研究では、Teledyne RDI社が公表している方法<sup>6)</sup>を用いている。縦揺れ(ピッチ)方向のみの傾斜を考えると図中の方程式を解いて、流下軸方向および鉛直方向成分の流速を補正する。同様に、横揺れ(ロール)方向についても流下軸に対して直交方向と鉛直方向成分の流速を求める。図-20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、ロール角の時系列と傾斜角補正を行った水面下50cmにおける流下軸方向

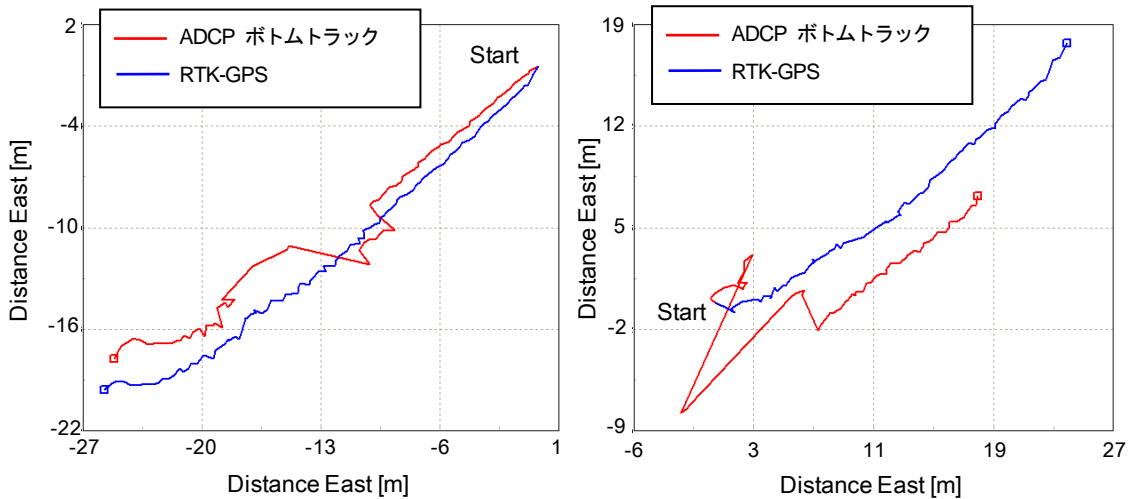


図-18 ADCPのボトムトラッキング機能とRTK-GPSによる航跡の比較

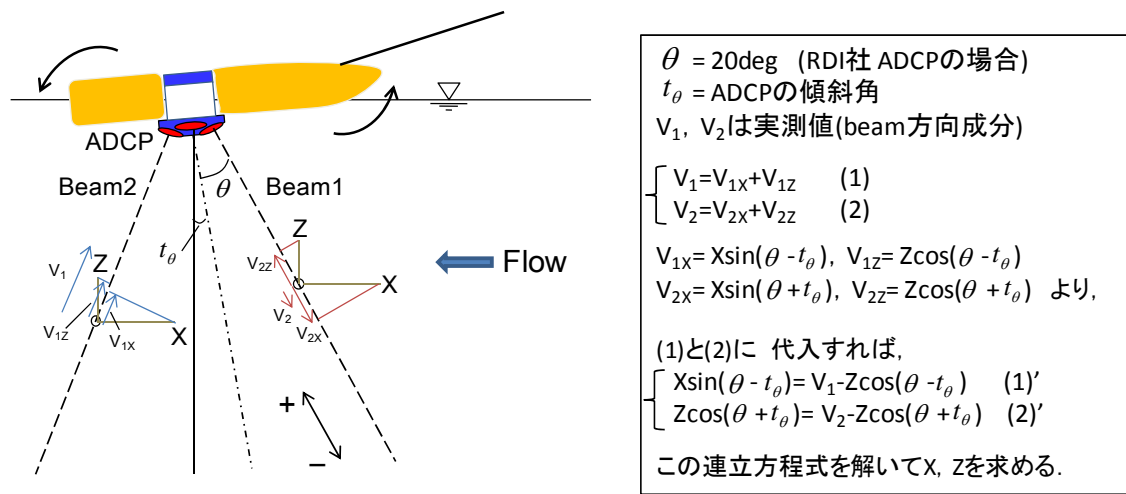


図-19 ADCPおよびMEMS傾斜センサーで得られた傾斜角を用いた流速補正方法 (ピッチ(流下方向に対して縦揺れ)方向にのみ傾斜する場合)

の流速分布を示す。両者の流速と傾斜角を比較すると、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、ピッチ角の周期は2秒から3秒、ロール角の周期は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。

つぎに、図-21にADCPおよびMEMS傾斜センサーの傾斜角補正の有無による流下軸方向の流速コンターおよび断面流量の比較を示す。横軸は左岸からの距離で図-20と異なるが、横断方向にほぼ等速度で計測を行っているため、同様に考えてよい。通常、データ欠測が生じた場合は内挿補完を行って断面内の流速分布図を作成する

表-6 ボートが流下軸に対面する場合の傾斜角補正<sup>8)</sup>による流下軸方向流速値への影響(%)

		ロール角(deg)				
		0	5	10	15	20
ピッチ角(deg)	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	0.37	0.37	0.36	0.35	0.33
	10	1.52	1.50	1.47	1.41	1.34
	15	3.40	3.37	3.30	3.18	3.02
	20	6.03	5.98	5.86	5.65	5.37

※ あるグリッドの実際の流速を100とすると、ピッチ角およびロール角が15度傾斜していれば96.70となる。

が、ここでは各計測グリッドにおける傾斜補正の影響の検証を目的としているため、補完していない。断面流量を算出した結果、傾斜角補正を行わなかった場合に48.00m<sup>3</sup>/s、ADCPの傾斜角で補正したものが49.85m<sup>3</sup>/s、MEMSの傾斜角で補正したものが49.91m<sup>3</sup>/sとなり、傾斜角補正の有無による差は約2%であり、ADCPとMEMSの傾斜角を用いた補正による流量差はほとんど無いという

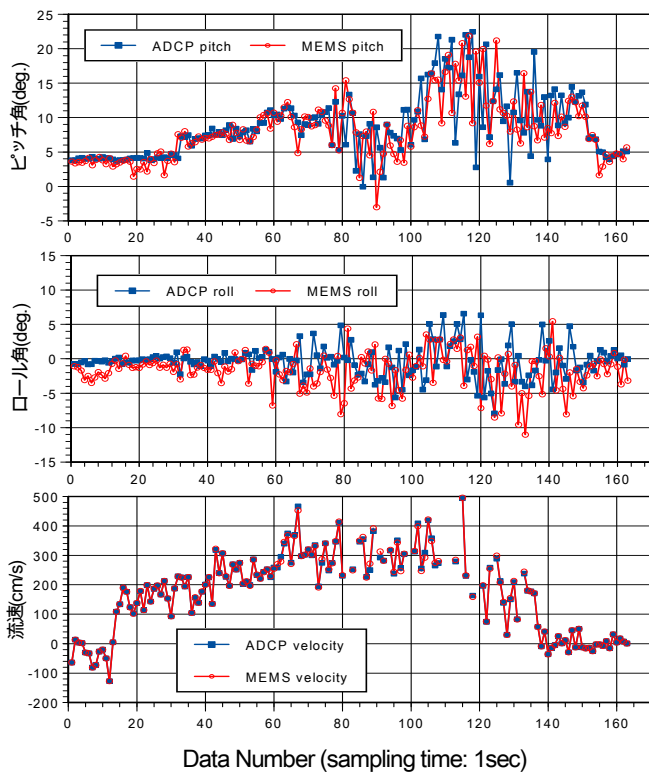


図-20 ADCPおよびMEMSセンサーで計測した傾斜角の時系列と水面下50cmにおける流下軸方向の横断流速分布

結果となった。

この理由について考察するために、表-6にこの傾斜角補正方法<sup>6)</sup>を用いて、ボートが流下軸に對面する(船首が上流を向く)状況で、傾斜角(ピッチ角, ロール角)を種々変化させた場合の流速値の補正効果を示す。ピッチ角が0度の場合には、流下軸方向の流速値はロール角の影響を受けず、両者が5度傾斜する場合には0.37%, 10度の場合には1.47%, 15度の場合には3.18%小さく出力されることになる。したがって、図-21において、ADCPの傾斜角を用いて補正を行った後の流速値がMEMSより大きくなったのは、計測された傾斜角が小さかったため、流速の補正量が小さかったことが主な原因として考えられる。また、図-20においては傾斜角補正によって、補正していない流速値から小さくなるが、水深は傾斜によって大きく算出するため、断面積分して流量換算する際にキャンセルされることから有意な差が生じなくなるものと考えられる。なお、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、水深に違いは見られなかった。

以上のことから、ADCP搭載ボートが揺動する場合の計測精度低下の要因を傾斜角のみと仮定すれば、ボートが傾斜することによる流速値への影響は、傾斜角15度でも3%程度であり、流量換算を行っても最大で同程度の差が生じる程度であることが明らかとなった。

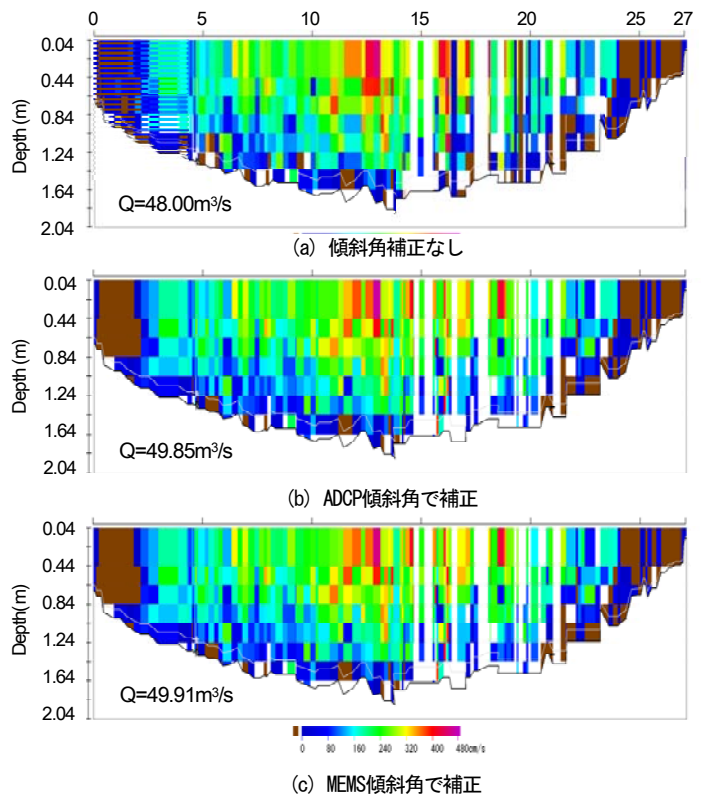


図-21 ADCPおよびMEMS傾斜センサーの傾斜角補正の有無による流下軸方向の流速コンターの比較

#### 4. おわりに

本稿では、まずADCPを用いた洪水流量観測精度の向上を目的として、四万十川具同地点において行った洪水時の橋上操作艇による流況観測結果から、航跡補正による流速補完法および移動観測における計測精度評価法を検討した。ADCP搭載ボートの航跡が蛇行する場合の航跡補正方法として、航跡を直線化して流量を算出する手法を提案し、一般に用いられる航跡直交成分を用いて算出した流量と同程度となることを示した。その結果、浮子観測やH-ADCPで計測したデータとの比較が容易になった。さらに、ADCPの計測設定条件から得られる固定観測の計測精度の考え方に基づいて、移動観測データの計測精度を評価する新しい指標として偏差流速を提案し、偏差流量、偏差流速比は、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。洪水時にボートが傾斜および揺動する場合には、水深・流速計測値に影響を及ぼし、計測精度が低下する可能性があり、定量的な評価と検証が必要と結論付けた。

これらの結果に基づいて、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MEMS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。大型水槽を

用いた揺動実験において、本実験で設定した厳しい洪水流観測を想定した条件(揺動振幅±15度程度)では、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、揺動周期が2秒以上であれば計測精度としては5%を十分確保できることを明らかにした。

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、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。これは、ADCPの計測特性として、搭載したボートが傾斜する場合に15度を閾値とすれば、流速は実際の値よりも最大5%程度小さく出力されるのに対して、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る。傾斜角が15度以下を抑えることができれば計測精度は最大でも5%程度と考えればよいことがわかった。これらの結果は、厳しい条件の洪水流計測においても、ボートの揺動自体が水深および流速値に及ぼす影響は小さいという著者らが当初想定していたものと異なるものである。しかし、木下が行った静水中におけるADCPの計測精度検証結果に基づいて、流水中における精度検証を行った点は今後の洪水観測において極めて重要な知見となった。

ただし、洪水流況と河床変動の同時計測技術の構築に向けては、現地観測においてボートの傾斜角が15度を超える場合に流速欠損が多く生じたことから、揺動の小さい船艇設計および洪水計測手法の工夫はデータの取得率を向上させるとともに、計測精度の確保のために重要な課題といえる。この点についても、著者らが既に検討している<sup>7)</sup>が、誌面の関係上、割愛させていただく。

ADCPを用いた計測技術は、超音波の散乱強度を用いた浮遊砂量の推定技術<sup>8)</sup>もほぼ実用化段階に入っており、さらに、Rennieら<sup>9)</sup>、萬矢ら<sup>10)</sup>はADCPで対地速度が計測できることを利用して、RTK-GPSを併用した河床移動速度および掃流砂計測技術の開発を試みている。こ

れらの計測技術が確立できれば、ADCPのみで洪水流量、掃流砂および浮遊砂量の同時計測が可能となり、実河川における洪水時の流れと流砂現象の解明に大きく寄与するものと考えられる。

## 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(超音波流速計)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録, 2006.
- 4) 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回年次学術講演概要集, II-106, 2007.
- 5) 色川有, 二瓶泰雄, 北山秀飛: ADCPによる流量計測精度の基礎的検証, 土木学会第61回年次学術講演概要集, II-219, 2006.
- 6) TELEDYNE RD INSTRUMENTS: ADCP Coordinate Transformation, Formulas and Calculations, P/N 951-6079-00, 2008
- 7) 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, 2010.
- 8) Rennie and et al.: Measurement of bed load velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler, J. Hyd. Eng., Vol. 128, No.5, 2002.
- 9) 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.
- 10) 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, 土木学会 水工学論文集, 第54巻, 2010.

(2010. 7. 20受付)