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

FFECT 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^{1),2)}を構築しており、技術的にはほぼ確立し てきたといえる. 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. 流水に対するADCPの精度検 証事例としては、島田4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, 二瓶らりは江戸川の小規模出水時 (350~570m³/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. しかしながら、我が国において観測対象と なる中規模出水以上の洪水流は、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、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. 著者らは四万十川 において平水時(流速1m/s程度)および洪水時(流速3m/s程 度)に計測したデータを比較した結果から、ADCPを搭載 したボートの揺動が水深や流速分布の計測精度を低下さ せる可能性があることを指摘した⁶. すなわち, 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 い可能性があることから、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れば、前述の既往の研究で得ら れたADCPの計測精度と同程度と考えることができる.

このような背景から、本研究ではADCPの洪水流計測

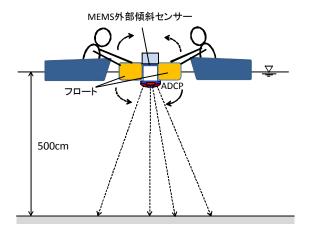


図-1 大型水槽におけるADCP搭載浮体の揺動実験

に多く用いられている橋上からの曳航観測を想定して、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。

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⁷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、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 条件を想定していると考えてよい. ちなみに,

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			
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			

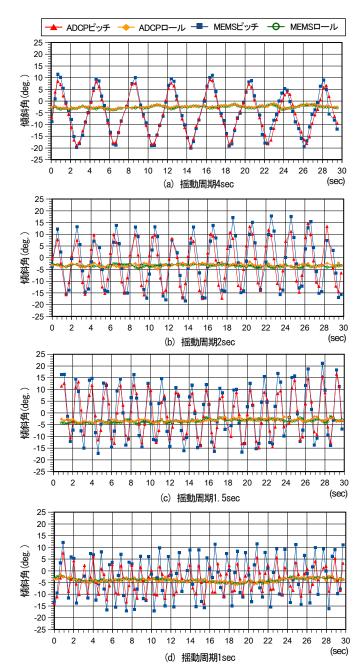


図-2 ADCP内蔵傾斜センサーとMEMS傾斜センサーで 計測された各揺動周期における傾斜角の時系列

表-2 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

MEMSセンサーの計測範囲はロール \pm 180度、ピッチ \pm 90度である。

(2) ADCPとMEMS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傾斜角を用いた補正 法の効果

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-3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

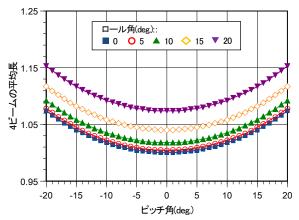


図-3 水深1の水槽における傾斜角(ピッチ・ロール)と ADCPの4ビームの平均長の関係

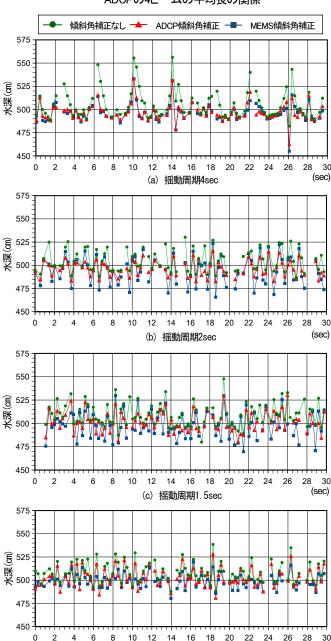


図-4 ADCPの4ビームの平均長とADCPおよびMEMS傾斜センサー データを用いた傾斜角補正による水深の比較

(d) 摇動周期1sec



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)

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±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 -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 し)と図-2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±20度程度に なるときには、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±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-4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

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				
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	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*				

※ ビーム方向の流速成分を出力する

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4や二 瓶ら⁵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-5に観測地点付近の平面図を示す. この地点では、平水時においのても流速が最大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、Rimo 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. 表-3に観測に用い

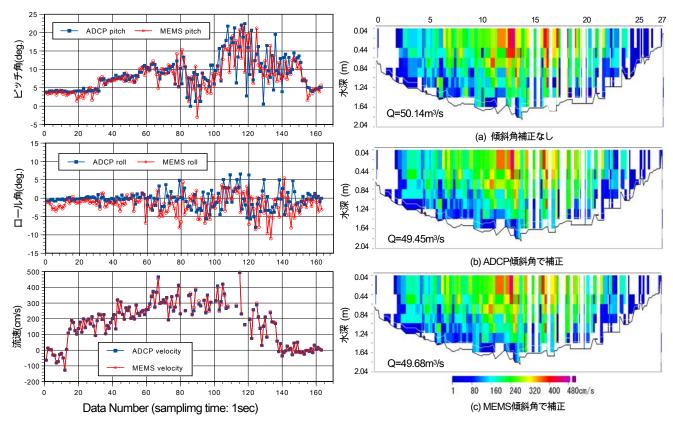


図-6 ADCPおよびMEMSセンサーで計測した傾斜角の時系列と水面下50cmにおける流下軸方向の横断流速分布

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,ロール角の時系列と傾斜角補正を行った水面下50cmにおける流下軸方向の流速分布を示す.流速値の傾斜角補正にはTeledyne RDI社が公表している方法®を用いている.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

図-7 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

表-4 ボートが流下軸に対面する場合の傾斜角 補正8 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 ロール角がともに10度傾斜していれば98.53と計算される.

いとき生じていることがわかる.

図-7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-6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、同様にみてよい。断面流量を算出した結果、傾斜角補正をしなかった場合に50.14m³/s、ADCPの傾斜角で補正したものが49.45m³/s、MEMSの傾斜角で補正したものが49.68m³/sとなり、差は約1%でほぼ同じ値をとる結果となった。

この理由について考察するために,表-4にこの傾斜角 補正方法®を用いて,ボートが流下軸に対面する(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 場合は1.47%小さく出力され,15度の場合でも3.18%で ある. 断面内では傾斜角補正によって、補正していない 流速値から大きくなるアンサンブルと小さくなるアンサ ンブルが混在しており、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みられなくなると 考えられる. また、大型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および水深の計測精度低下に ついても、大きな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(ロール、ピッチがともに)10度で1.5%程度であり、流量換算を行っても同程度の差が生じる程度であることが明らかとなった.

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登 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.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(ADCP の計測値)15 度を閾値とすれば、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、揺動周期が2 秒以上であれば計測精度としては5%を確保することができる。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。これは、現地観測結果から、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も傾斜角が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。
- (3) 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 大きい流況に対しても既往の研究で明らかにされて いる計測精度で観測可能であることを示した事例と なった。本現地観測で得られたこれらの結果につい

ては、ADCPの計測精度評価を行う上での重要な知見になるだけでなく、流況と河床変動の同時計測技術の検討^{9,10}において、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、今後も引き続き異なる河道条件や洪水でも同様な観測を行う予定である.

謝辞:本研究は(財)河川環境管理財団の河川整備基金の 助成(21-1212-012)を受けている。また、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

- 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
- 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) 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) 橘田隆史, 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
- 7) 岡田将治, 橘田隆史, 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
- 8) TELEDYNE RD INSTRUMENTS: ADCP Coodinate Transformation, Formulas and Calculations, P/N 951-6079-00, 2008
- Rennie and et al.: Measurement of bed load velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler, J. Hyd. Eng., Vol. 128, No.5, 2002
- Yorozuya A. and et al.: Development of a sediment discharge measurement system with ADCP, FLUCOM2009, 2009

(2009.9.30受付)