

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

PROPOSAL OF TETHERED ADCP PLATFORM FOR HIGH-SPEED FLOW MEASUREMENTS

萬矢敦啓¹・岡田将治²・橘田隆史³・菅野裕也⁴・深見和彦⁵

Atsuhiko YOROZUYA, Shoji OKADA, Takashi KITSUDA, Yuya KANNO and Kazuhiko FUKAMI

¹正会員 Ph.D 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)

²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)

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)

⁴正会員 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)

⁵正会員 修士(工学) 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)

When flow regime observation is conducted with a tethered ADCP platform at a point where the water table fluctuates violently during flooding, missing data is more likely to result from the oscillation of the platform. To conduct safe and reliable observation, minimization of two aspects, the oscillation and the impact of floating debris, should be carefully considered for architecting tethered ADCP platforms. In this study, the authors conducted flow regime observation at a high-velocity point in the Tonegawa River with a total of four tethered ADCP platforms. Each platform was mounted with an ADCP, RTK-GPS and MEMS inclination sensor. Based on the knowledge of the observation, the authors proposed a suitable platform structure to conduct actual flood discharge observation for appropriate safety and measurement accuracy.

Key Words: Acoustic Doppler Current Profiler, Tethered Platform, Discharge observation,

1. 序論

近年, Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)を用いた洪水時の流況計測は, 機器本体の小型化やデータ通信システム等の高度化によって, 橋上操作艇あるいはラジコンボートを用いる手法が主流となり, 従来計測が不可能と考えられてきた洪水流の鉛直・横断流速分布, 河床高の計測が可能となってきた. 著者ら¹⁾は, 四万十川において橋上操作艇を用いた曳航観測により, 約2000m³/s(最大表面流速約3.5m/s)の洪水流を計測し, ほぼ同じ水理条件における計測結果の相対誤差が5%以内であることを示している. また, 高流速で水面が大きく変動する洪水流計測を想定し, ボートが揺動することによる流速および水深計測値に及ぼす影響について, 大型水槽実験および現地観測から定量的に評価している²⁾. さらに, ADCPの応用観測技術として, 散乱強度を用いた浮遊砂量の推定技術³⁾もほぼ確立されており, Rennieら⁴⁾, 著者ら⁵⁾は, ADCPで対地速度が計測できることを利用し, 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すれば, ADCPのみで洪水流量, 掃流砂および浮遊砂量の計測が可能になるが, これらの

機能を最大限に生かすためには, 洪水時においても, 安全にかつ確実にデータを取得するためのADCPを搭載する船艇が必要となる. USGSのMichaelら⁶⁾は, モノハル(単胴船), カタマラン(双胴船), トリマラン(三胴船)の船体構造の異なる計8種類の橋上操作艇を試作し, 種々の流速場(0.6~3.6m/s)における安定性と引張抵抗を調べた結果から, トリマラン型の船艇が最も適していることを結論付けている. また, この結果に基づいて開発された橋上操作艇は現在世界中で最も多く利用されている. 日本国内においては, 木下ら⁷⁾は河川下流部におけるADCP搭載ラジコンボートの計測手法を提案し, 複数の船艇を用いて多数の洪水観測実績をもつ. 洪水時の河道にはゴミや流木を含めた流下物が多く, それらの船艇への衝突や絡まりは, 高価な計測機器の損失や船艇の作業員の人命に関わる大きな問題を招きかねない. さらに, 洪水時の水面変動が激しい地点におけるADCPを用いた流況観測では, 船艇の揺動によってデータ欠損が生じやすくなるため, 安全に, かつ確実に観測を遂行するためには, 橋上操作艇の構造条件として, ①データ欠損が生じないような揺動を最小限に抑えること, ②流下物に対

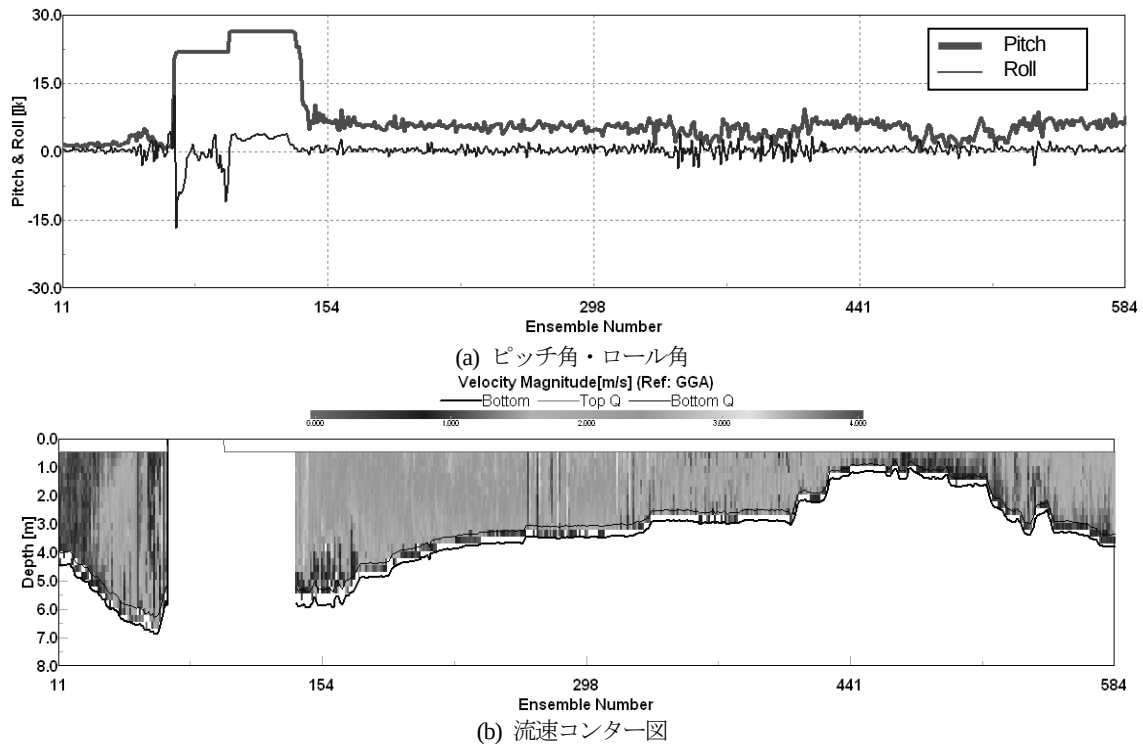


図-1 データ欠測が多いADCP流況観測事例

する課題を最小限に抑えることが重要となる。

このような背景から、当研究グループでは、これまでわが国の洪水流特性に対応できるADCP流況観測を遂行できるような船艇の開発を進めてきた。本研究では、利根川の高流速部において、計4台の橋上操作艇にADCP、RTK-GPSおよびMEMS傾斜センサーを搭載して流況観測を行い、安全性および計測精度向上の観点から洪水流計測に適した船艇構造について提案する。

2. ADCP搭載ボートを用いた観測データの計測精度

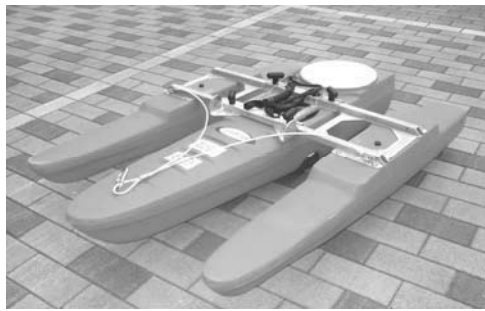
ADCPを搭載した橋上操作艇やラジコンボートで観測を行った際の計測精度の評価指標として、筆者ら¹⁾は固定観測における計測設定条件から得られる流速計測誤差の標準偏差を空間的に拡張した偏差流速比、偏差流量比を提案している。しかしながら、非常に厳しい水理条件下において行われる洪水観測においては、データ欠測が生じる場合があり、現時点ではこの影響を考慮した指標とはなっていない。図-1に一般的な流量観測地点において橋上操作艇を用いて流況計測を行った事例を示す。図-1(a)は傾斜角(ピッチ角・ロール角)を、図-1(b)は流速コンター図を示す。両図の横軸は左岸からの距離を表している。流心部付近は比較的流速が大きく、大部分がデータ欠測となっており、その区間では傾斜角が大きくなっている。ボートによるADCP観測において、データ欠測は一般にボートが水面を跳躍してADCPのトランスデューサー(振動子)部が水面上に出てしまう場合、あるいはボートの揺動が大きく

傾斜角が15度程度よりも大きくなる場合に発射した超音波が受信できないことによって生じる。データ欠損が生じた場合には、通常、近傍の計測値を用いて内挿補完を行い、断面全体の流速分布および水深を算出し、断面流量を求めるが、欠測する箇所の多くは高流速部であり、図-1(b)のように連続的に生じる場合は断面流量の算定精度が大きく低下することが懸念される。したがって、断面流量の計測精度を向上させるためには、ADCPの計測設定条件および計測時間から決定される偏差流速(質)に併せて、船艇の形状等に影響されるデータ取得率(量)も考慮する必要がある。

3. 洪水流観測に適した橋上操作艇の検討

(1) 本研究で用いる橋上操作艇の特徴

図-2に本研究で用いた4種類の橋上操作艇を、表-1にその諸元を示す。図-2(a)はMichaelら⁶⁾の引張抵抗と安定性の実験から総合的に優れるとされた一般的なトリマラン型のボートである。これは船艇の取り回しがしやすいよう船艇全体の長さを短くし、かつセンサーの重量を船艇全体で十分に支えることができるようにサイドハルの容積を増やしている。図-2(b)は高速流速時においても揺動が小さく安定的にデータ取得できることを目的として、USGSが基本設計を行った高速・低揺動型の浮体ボートである。Type Aの基本設計を踏襲したうえで、全長を20%程度サイズアップして縦揺れへの安定性を向上させたことと、サイドハルの設計を大幅に改善して横揺れの安定性を向上させている。図-2(c)は船艇の横揺れ



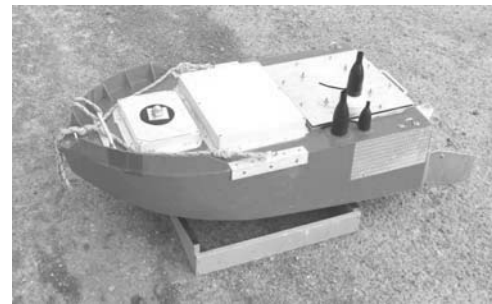
(a) Type A (従来の橋上操作艇)



(b) Type B (TypeAよりも細めの形状)



(c) Type C (浮遊物対策ガイドを設置)



(d) Type D (モノハル形状)

図-2 本研究で用いた4種類の橋上操作艇

表-1 本研究で用いた橋上操作艇の諸元

	Type A	Type B	Type C	Type D
形状	トリマラン			モノハル
全長(mm)	1200	1513	1750	900
全幅(mm)	810	1236	970	450
高さ(mm)	270	275	225	220
重量(kg)	7	15	17.5	5
材質	ポリウレタン	ABS	木板にFRPを塗布	

表-2 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	0.2m
計測層数	15
アンサンブルタイム	1.08 秒
ウォーターピング 数	1
ボトムトラック機能	Mode5
固定観測における 流速誤差の標準偏差	26.3 cm/s (single ping) 8.34cm/s (10 ping)
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

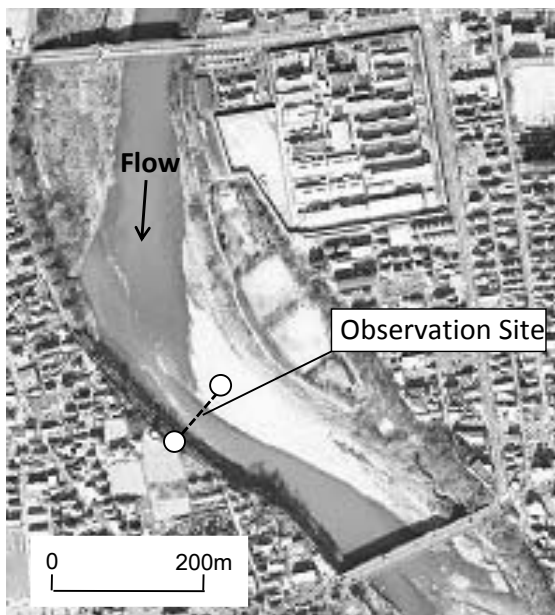
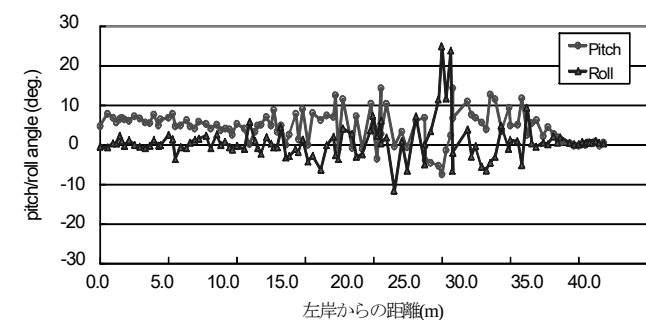


図-3 利根川現地観測地点付近の平面図
(前橋市平成大橋下流地点)

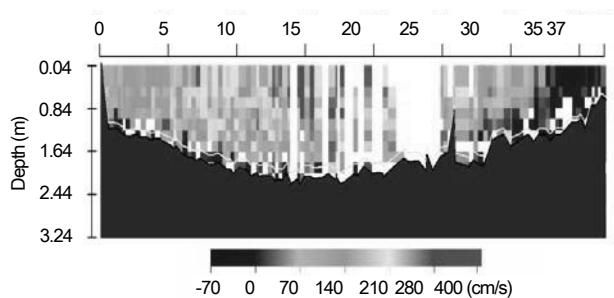
を最小限に押さえることに配慮した設計に基づいたトリマラン型のボートである。この特徴はセンサーの重量をメインハルの浮力で主に支え、サイドハルの役割は船艇の横揺れを抑えるためだけにある。その結果、他のボートと比較するとメインハルの容積が大きくサイドハルが小さくなっている。さらに、流下物への対策のため、浮遊物対策のゲージを設置している点が特徴的である。図-2(d)は流下物に対して最も安全と考えられ、著者らが検討を続けてきたモノハル型のボートである。

(2) 利根川高流速部における現地実験

図-3に現地実験を行った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、実際の洪水観測を想定した計測が常時可能である。現地では約40mの川幅に対して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

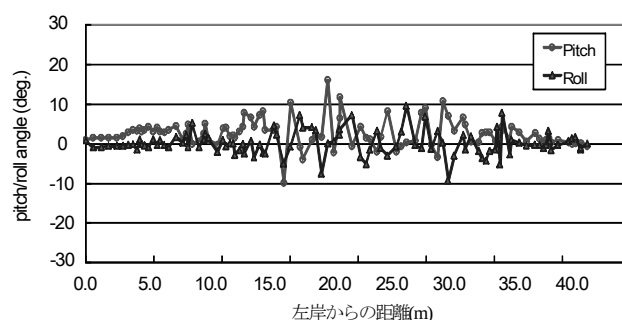


(a) ピッチ角およびロール角

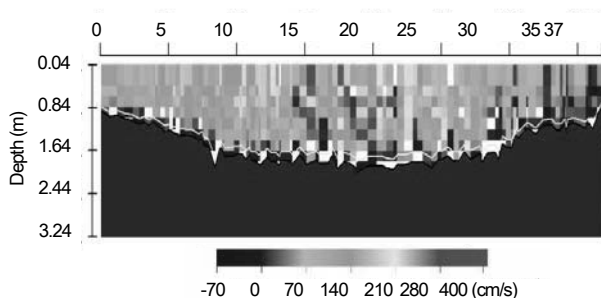


(b) 流速コンター

図-4 Type Aの観測結果

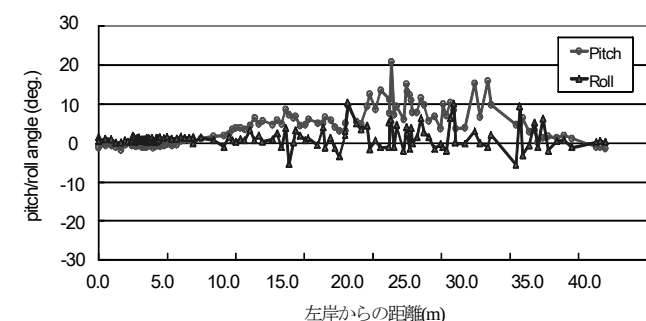


(a) ピッチ角およびロール角

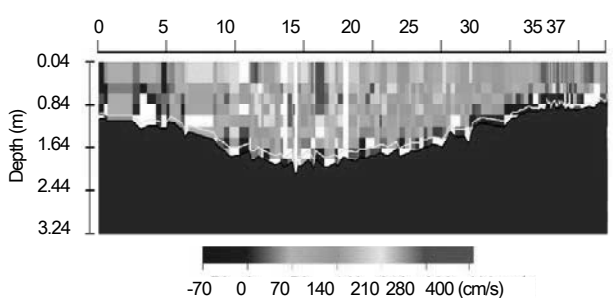


(b) 流速コンター

図-5 Type Bの観測結果

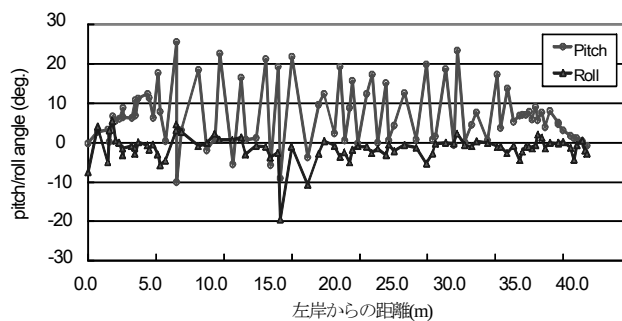


(a) ピッチ角およびロール角

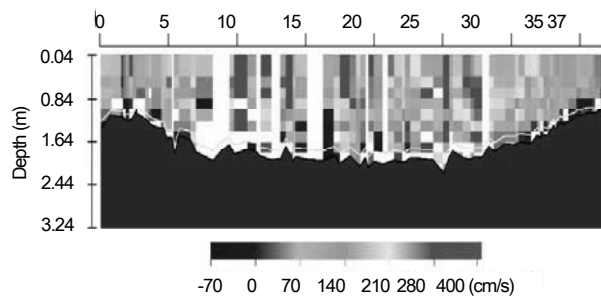


(b) 流速コンター

図-6 Type Cの観測結果



(a) ピッチ角およびロール角



(b) 流速コンター

図-7 Type Dの観測結果

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てリアルタイム計測を行った。表-2に観測に用いたADCPの設定条件を示す。計測モード、層厚、層数等は一般に用いられる設定条件であるが、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。また、流速を計測す

るウォーターピングは、通常、計測精度を向上させるために、なるべく多く設定するが、本観測では傾斜角(ピッチ角とロール角)のデータと流速データを同期させるために、1ピングとしている。そのため、1アンサンブルで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となるものの、川幅約37m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8.34cm/sとなり、偏差流速比も2-3%程度となるこ

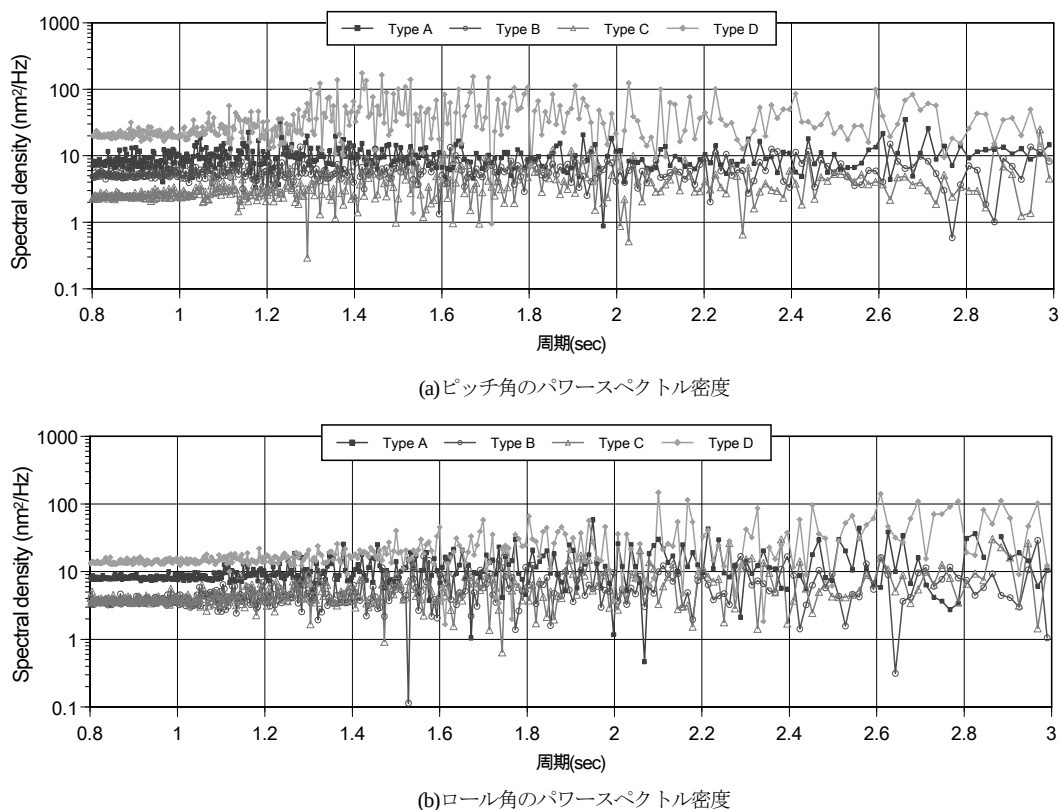


図-8 各ボートのピッチ角およびロール角のパワースペクトル密度

とから、計測精度は大きく低下していない。

(3) ボートの安定性とデータ取得率

図-4から図-7に各橋上操作艇で横断方向に曳航させて観測を行った際にADCP内部傾斜センサー(1Hz)で計測したピッチ角およびロール角と流速コンターを示す。横軸は左岸からの距離を表している。なお、ボートの対地速度を算出するボトムトラッキングは、このような流況下においてはほとんど機能しておらず、流速データを得るためにはRTK-GPSとの併用が必須であることがわかった。図-4のType Aでは、流心部付近においてピッチ角、ロール角が大きく変動し、その地点で連続的にデータ欠測が生じている。

図-5のType Bおよび図-6のType Cでは、横断面全体で欠測がほとんどなく、データが十分に取得できている。図-7に示すモノハル型のType Dでは、ピッチ角が20度を超えて大きく変動しており、データの欠測も多く生じている。Teledyne RDI社のADCPの仕様では、傾斜角が15度を超える場合には、計測データの精度が著しく低下するとされていることから、データが取得できた場合でも棄却することが望ましいといえる。

つぎに、各ボートの揺動に対する特性を詳細に考察するために、各ボートを流心部において係留し、MEMS傾斜センサー(5Hz)で5分間連続計測したデータからピッチ角およびロール角のスペクトル密度を計算した。その結果を図-8に示す。図より、ピッチ角、ロール角ともにモノハル型のType Dが最も揺動が大きく、ピッチ角についてはType Cが

最も安定し、ロール角についてはType BとCが安定している。これらの結果は、現地で目視観察された状況と一致するものである。ピッチ(縦揺れ)に対する安定性には、水面波の波長に対する船体の長さ、重心位置が重要な要素と考えられ、船艇が比較的長かったType BとType Cが有利であり、特にType Cは重心位置も優れていた。一方、ロール(横揺れ)に対しては、サイドハルの構造が重要な要素となり、Type Aはサイドハルがメインハルに比べて大きすぎるためにロール角が大きくなったものと考えられる。Type BおよびType Cの船体構造は、サイドハルの長さがメインハルの約半分であり、さらに船体の後半分に取り付けていること、サイドハルの浮力が小さいために過大な復元力が加わりにくいことが安定性に寄与したものと考えられる。なお、Type Cは流下物対策のゲージを設置した状態で実験を行ったが、ゲージが流水を攪乱したり、船体の安定性に支障を来したりする状況は確認されなかった。Type Bのピッチ角の揺動がType Cに比べて若干大きかった原因については、重心が後部に偏在しているために揚力が働き、船首が上下に振れやすくなったことが挙げられる。これには、メインハルの重心を前方に移動させることにより、ピッチ角の揺動に対する安定性を向上させることができる。

(4) 流下物対策に関する考察

橋上操作艇の運用上の課題として、水面近傍の流下物への対応が挙げられる。特に夜間作業においては目視による回避行動が取りにくいいため、流下物を受け流す構造であることが求められる。Type Cに取り付けたゴミ除けゲージは、

大きな流木等の衝突から船体を守るために取り付けただけのものであるが、逆に細かなゴミが絡まりやすくなることが懸念される。本観測中は、ゲージが水面から若干上部に浮きあがる状態で維持されていたため、細かなゴミは引っかかり、観測に支障を来すことはなかった。ゴミ除けゲージの構造や性能については、今後の課題とし、実際の洪水観測にこれらの船艇を適用し、検証を行う予定である。

4. 結論

本研究では、船艇構造の異なる4台の橋上操作艇にADCP、RTK-GPSおよびMEMS傾斜センサーを搭載して洪水観測を想定した流況観測を行い、安全性および計測精度向上の観点から洪水流計測に適した船艇構造を検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 揺動に対する安定性はトリマラン型のType BおよびType Cが優れており、データ欠測も少なかった。Type Bは重心を若干前方にシフトさせることで、ピッチ方向の安定性向上の余地がみられたため、今後の改良が望まれる。一方、Type AはこれまでADCP搭載ボートとして普及してきたが、本観測条件のような高流速で水面が大きく変動するような水理条件においては、揺動の安定性が同型のType BおよびType Cと比べて安定性に劣り、データ欠測が多くなることが明らかとなった。
- 2) 本観測条件のような高流速場の流況観測においては、ADCPのボトムトラッキングが十分に機能せず、欠測が生じ、計測精度が低下するため、洪水流況および河床移動速度等の計測を行う際にはRTK-GPSを併用することが極めて有効である。
- 3) 洪水時における橋上操作艇を用いたADCP流量観測の標準的なシステム構成、観測手法およびデータ処理法を示すことができた。今後は、実際の洪水観測において実用性や観測精度、ゴミ回避能力などを検証していくこ

とが課題である。

謝辞：Type Cのボートは国土技術政策総合研究所河川研究室と土木研究所水文チームが共同で開発し、所有者は河川研究室である。本観測では同ボートを借用した。またType Cの設計およびパワースペクトルの解析にあたり、大阪府立大学工学部海洋システム工学科新井励助教にアドバイスを頂いた。さらに現地観測を行うにあたり、群馬県前橋土木事務所にご配慮いただいた。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 岡田将治, 萬矢敦啓, 橋田隆史: 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, 土木学会水工学論文集, 第54巻, 2010.
- 3) 橋田隆史, 岡田将治, 新井励, 下田力, 熊田康邦: ADCPを用いた河川流況計測法における課題と国内外における応用観測事例, 土木学会 河川技術論文集第12巻, 2006.
- 4) Rennie, C.D., et al: Measurement of bed load velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler, *J. Hyd. Eng.*, Vol.128, No.5, 2002.
- 5) 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.
- 6) Michael S. Rehm, James A. Stewart and Scott E. Morlock: Tethered Acoustic Doppler Current Profiler Platforms for Measuring Streamflow, USGS Open-File Report 03-237, 2003.
- 7) 木下良作: 河川下流部における洪水流量観測法に関する一提案, 水文・水資源学会誌, Vol.11, No.5, pp.460-471, 1998.

(2010. 4. 8 受付)