流速プロファイルに与える影響評価

ASSESSMENT OF ADCP CARRIER BOAT ON FLOW VELOCITY PROFILE

新井章珣¹・手計太一²・橘田隆史³・吉川世里子³・笹川幸寛³ Shojun ARAI, Taichi TEBAKARI, Takashi KITSUDA, Yoriko YOSHIKAWA and Yukihiro SASAKAWA

1学生会員 学士 富山県立大学大学院工学研究科環境工学専攻(〒939-0398 富山県射水市黒河5180) ²正会員 博士(工) 富山県立大学准教授 工学部環境・社会基盤工学科(同上) ³株式会社ハイドロシステム開発(〒550-0022 大阪府大阪市西区本町3-2-18ハイドロ第一ビル)

In revising the river erosion control technical standards survey in June 2012, observation using aDcp (acoustic Doppler current profilers) as one of the methods of flow observation work is published as one of the standard methods. It is well known that the observation results differ depending on the observation environment and observation conditions such as the difference in the structure of the boat mooring aDcp. In this study, we investigated the relationship between the flow velocity data and the rocking behavior of the mooring boat in three mooring boats: Riverboat, High Speed Riverboat, and 3m Riverboat. As a result, in the analysis of the observation results of aDcp in the future, it was considered that it is necessary to compare the relative frequency distribution of the flow velocity value and the rocking of the mooring boat, not to analyze by only the simple flow velocity value. In addition, clarifying the structural condition of the boat by these to be possible to assess the uncertainty of aDcp.

Key Words: aDcp, Riverboat, Pitching, velocity profile, PDF, Relative frequency

1. はじめに

近年,急速に河川の流量や流速の観測手法や河川測量 が高度化されつつあり,現業での利用でも徐々に高度な 観測手法が広まっている. acoustic Doppler current profiler (以下, 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¹⁾.

平成24年6月に河川砂防技術基準調査編が改定された. これは平成9年以来の改定であった.これは国土交通省 水管理・国土保全局により発行されている.

今回の改定により,流量観測業務における観測手法の 一つとしてaDcpを使用した観測が新たな標準手法の一つ として掲載された²⁾.一般に, aDcpを利用した流量観測 では,観測される全メッシュに加え,左右岸,河川表面, 河床の不感帯の補正をすることで解析値として流量が算 出される.また,観測環境条件によっては,観測された 流速値を鉛直平均し、河積を乗じることで流量値を算出 する方法などもある.しかしながら、いずれの手法も aDcpを係留するボートの構造の相違といった観測環境や 条件によって観測結果が異なることはよく知られている. これまで多くの研究では、水理条件に主眼を置くもの が多く、特に精度評価については盛んに研究されている. 吉見ら(2016)は、確率過程論を導入し、入力が持つ不確 定性や不確実性が出力に及ぼす影響を明らかにする理論 的枠組みを示した³⁾. また, 野本ら(2016)はH-ADCPによ る流速の計測誤差により、流量推定の不確実性を評価し た4. しかし、流速の不確実性に関する研究は多くはな いのが実情である. そこで本研究の目的は、aDcpの係留 ボートの構造の違いが流速プロファイルに与える影響と aDcpによる流速値の信頼幅を明らかにすることである. 本研究では、最も標準的に販売されているRiverboat、そ れの高流速対応用に改良されたHigh Speed Riverboat, さ らに急流河川の激しい流況にも対応できる3m Riverboat の3つの係留ボートにaDcpを搭載し、流速データ特性と 係留ボートの揺動の関係について検討を行った.

2. 観測地点

本研究における観測地点を図-1に示す.本研究では新 潟県および長野県を流れる一級河川である信濃川を対象 河川とした.信濃川中下流部は多雨多湿の日本海性気候 であり小千谷市から長岡市の勾配は1/700~1/1,300,中 流部の長岡市の年間降水量は約2,300 mmであることから, 中下流域では拡散型の氾濫により広範囲にわたる浸水な どダメージポテンシャルが極めて大きい⁵.

2015年から毎年4月に土木学会流量観測技術高度化研 究小委員会の一環として新潟県小千谷市内の信濃川水系 信濃川旭橋において産学官合同で流量観測が実施されて いる.上述の地点を本研究における観測地点とした.

3. 使用機器・使用データ

本研究で使用したaDcpはTeledyneRD Instruments社(以降,TRDI社)製のADCPである.ここで、aDcpは一般名称、ADCPは商標名称を示している.TRDI社製品は、新技術基準の機器構成に対応可能であること、世界シェアが8割以上と販売実績が多く機器の信頼性が相対的に高いこと、国内においても急流河川を含む洪水流量観測の実績が豊富であることからTRDI社製品を使用した².

本研究では、著者らが所有しているRiverboat(以下, RBと略す)、株式会社水文環境が所有している3m Riverboat(以下, 3m RBと略す)、株式会社ハイドロシス テム開発が所有しているHigh Speed Riverboat(以下, HSRBと略す)の3種類の係留ボートを使用した.それぞ れの係留ボートの仕様を表-1に示す.

それぞれの観測年月日におけるADCPコマンドを表-2 に示す. ADCPを使用した観測は2015/4/24, 2016/4/28, 2018/4/19,20, 2018/12/18,19の合計6回実施した. 各観測 日において,毎年4月に実施したものはそれぞれ上述し た合同観測で行っている観測であり,12月に実施したも のは富山県立大学のみで観測を実施したものである. 各 観測年月日におけるADCPのコマンドは土木研究所が決 定した共有のコマンドを利用して観測を実施している. 4月の観測はそれに従い,12月の観測は2018年4月の観測 で使用したコマンドと同様のコマンドを使用した.

本研究の比較に使用した流量値は、水文水質データ ベースより取得した小千谷観測所の流量の確定値である. 2018年は流量の確定値が存在しなかったことから著者ら による推定流量値を示している.本研究では他の観測日 と比較して流量が多かった2015年 (1520 m³/s)と、流量 が多く観測データ数が多い2018年4月 (910 m³/s)の3 観測日における観測結果に着目し解析を行った.括弧内 は解析時間内の平均流量を示している.なお、同観測日 において完全な同地点・観測時間で観測を行うことは困 難であるため、本稿では、近傍地点に係留し、ほぼ同時 間内のデータを利用した.

4. 観測結果

(1) 係留ボートの揺動

ADCPの係留ボートの3つの揺動成分の概略図を図-2 に示す.Headingは河川の流下方向によって変動するた め、本稿はPitchingとRollingに着目する.Pitchingと Rollingの相対頻度を算出したものをそれぞれ図-3と図-4 に示す.係留ボートの揺動は、最大20。まではADCP 内蔵の傾斜計により自動的に補正される.20。を超え てADCPが傾いてしまった場合、的確な観測が出来なく なる^の.揺動が±20。を超過するとデータ欠損が生じや すく、計測できたとしても実水深よりも10%程度大きく 出力され、揺動が±15。程度の範囲内であれば補正を 行わなくても計測精度は5%程度に収まる⁷.以上を鑑み、 本研究ではADCPの揺動の範囲を±15。として検討を 行う.図-3のPitchingの相対頻度分布から、流量が410



図-1 観測地点の地図⁸⁾ 表-1 3種類の係留ボートの仕様

	Name	Riverboat	HighSpeed Riverboat	3m Riverboat					
Ap	opearanze	Contraction of the second seco							
B	Soat type	トリマラン	高流速対応型:トリマラン						
Corresponding flow velocity(m/s)		~3.5	~6.0						
	Length	120	152	300					
Size(cm)	Width	80	124	130					
	Height	18	18	18					
Weight of all machine and battety(kg)		25	35	50					

表-2 それぞれの観測日のADCPコマンド

	Apr-15		Apr-16		Apr-18		Dec-18			
Boat type	RB	3mRB	RB	3mRB	RB	3mRB	RB	HSRB		
Measurement mode		1	2			1	l			
Sub-Pings		3	3		/		/			
Measured layer thickness(m)	0.2									
Number of				5	0					
measurement layer				J	10					
Ensemble time(s)	1.61	1.52	1.67	3	1.57	1.49	1.55	1.38		
Number of Water-Pings		3	3	5		Ę	5			
Bottom track function		5		5	5					
Number of Bottom-Pings	3		3		5					
Standard deviation of										
velocity error in		8.	51		11.42					
fixed observation(m/s)										
Measurement coordination	Earth coordinate									



図-2 係留ボートの揺動の概略図

m³/s, 910 m³/sでは高流速対応型のHSRBと3m RBよりも RBの方がPitchingの値が高いことがわかる. 1520 m³/sで は同様の分布を示しているが, RBよりも3m RBの方が 高い値を示している. また, RBの結果の一部では Pitchingの基準範囲である±15 °を超過する観測環境で あったことがわかる. Pitchingは係留する際のロープの 材質や長さ等にも影響されるといった他の観測環境要因 も考えられる. 図-4のより, 流量が910 m³/sと1520 m³/s の際の観測において, RBのみが±15 °を超過していた. RollingはRB, 3m RB, HSRB共に平均値は0 °に近い分 布を示した.

(2) Pitchingと流量, 流速の関係性

全観測日におけるPitchingの平均値と標準偏差の分布 をそれぞれの解析期間の平均流量と平均流速で示したも のを図-5に示す. 図中の数値はそれぞれの解析期間の平 均流速値を示している.また,図中の色は青がRB, 橙が3m RB,赤がHSRBを示している.多くの観測日に おいて3m RBやHSRBよりもRBの方がPitchingの平均値は 高い.また,Pitchingの標準偏差は3m RBやHSRBよりも RBの方が高い値を示している結果が多くみられる.以 上の事より、3m RBやHSRBの方がRBよりもPitchingの値 が0°に近く,さらにPitchingのデータの散らばりが小 さいことがわかる.

流量規模ごとに比較を行うため、1520 m³/sを記録した 2015/4/24の結果、910 m³/sの2018/4/20の結果、410 m³/sの 2018/12/18の結果を抽出したものを図-6に示す. この図 から、流量が910 m³/sと410 m³/sを記録した観測日におい てはPitchingの平均値は3m RBとHSRBよりもRBの方が高 い値を示している. 流量が1520 m³/sの時は、Pitchingの 平均値は3m RBの方が高いという結果になっている. し かし全観測日において3m RBとHSRBよりもRBの方が標 準偏差は高く、RBの方がデータにばらつきが認められ る.

(3) 流速プロファイルと相対頻度

図-7は流量が1520 m³/sのRBと3m RBの流速プロファイル(左図)と流量が910 m³/sにおける最浅層から1 m毎の流速プロファイルに各層の相対頻度分布(右図)を示し



た. 流速プロファイルの中心マークは各層の平均流速, また,各層の流速値の最大値と最小値の幅を示している. 寒色系がRB,暖色系が3mRBを示している.

1520 m³/sの流速プロファイルにおいて,浅層の平均流 速はRBと3m RBは同様の値を示している.流速の最大 最小幅はRBよりも3m RBの方が大きい層が見られるが 概ね同様の幅を示している.しかし、底層に近づくにつれても3m RBの方が平均流速は小さくなり、水深約6m では3m RBの平均流速が大きく0m/sに近づいている.しかし、最大最小の幅を比較するとRBの方が幅は大きく 各層のデータにばらつきが多い.

図-7の910 m³/sの流速プロファイルでは、表層付近で はRBと3m RBの平均流速と相対頻度分布は同様の分布 を示している.しかし、底層に向かうにつれて3m RBの 方が相対頻度分布に偏りが見られ、水深6 m以深におい ては流速が0~1 m/sに近い値を計測している.また、3m RBの方が深度方向への平均流速の減少率が大きい.流 速プロファイルの水深がRBと3m RBで差異があるのは、



 図-7 左:流量1520 m³/sの流速プロファイル
右:910 m³/sの1 m毎の流速プロファイルの各 層の相対頻度分布

0.020 -0.018 -0.016 -0.014

P 0.012 및 0.010

0.008 -0.006 -0.004 -0.002 -

Velocity(m

観測地点が全く同じでないことに起因している.

(4) 確率密度関数

図-8に最浅層から1 m毎に流速の確率密度関数(PDF)を 表したものを示す. 図中の青は流量1520 m³/s,緑が910 m³/s,赤が410 m³/sの観測結果を示し,実線がRB,破線 がHSRBと3m RBを示している. いずれの観測結果にお いても浅層においてはRBのほうがPDFの値が高くなっ ており,データのばらつきが小さい. 水深が深くなるに つれてPDFは小さくなる傾向にある. また,水深が深く なるにつれてRBよりも3m RBやHSRBの方がPDFの減少 割合は少なく,水深5 m以深ではRBよりHSRBや3m RB の方がPDFは高い値を示すことから,底層ではRBより も3m RBやHSRBの方がデータのばらつきが少ない.

流量が910 m³/sの際のPDFとヒストグラムを図-9に示 す. PDFとヒストグラムは同様の分布を示し, 観測デー タの頻度をPDFで仮定しても妥当であると考えられる.



図-8 各観測日における最浅層から1m毎のPDF(青:1520m3/s,緑:910m3/s,赤:410m3/s)

図-10に観測結果のPDFと相対頻度分布を示す. 寒色 系がRBを示し,暖色系が3m RBとHSRBを示している. また,実線がPDFを示し,破線が相対頻度分布を示して いる.また,ここでは最浅層と中間層,最底層の3層を 示している.最浅層と中間層ではPDFと相対頻度分布共 に同様の推移を示している.流量が1520 m³sの際の相対 頻度分布がPDFと違う分布を示している原因としては, 流量が多く,観測時間が約10分程度とかなり短くデータ 数が少ないことが原因として挙げられる.同様に,流量 が910 m³/s,410 m³/sの最底層においても水深が深くなる につれて観測データ数が少なくなったことにより相対頻 度分布の変動が大きくなったと考えられる.PDFや相対 頻度分布でも流速プロファイルと同様に,水深が深くな るにつれてRBよりも3m RBやHSRBの方が流速は遅くな り,最浅層と最底層の平均流速の差が大きくなっている.

(5) 係留ボート構造がPitchingに与える影響評価

図-11に流量が910 m³sの際の水深1 m毎の流速とアン サンブル毎のPitchingの変動値である Δ Pitchingの分布を 示し、表-3に各層の流速の平均値と標準偏差,分散の値 を示している. Δ Pitchingを比較すると, RBの方が大き い値を示している. 水深3 m以浅の流速値は, 3m RBの 方がデータのばらつきは大きい. 水深5 m以浅において は流速の標準偏差はRBの方が小さい値をとっているが, 水深6 m以深では3m RBのほうが小さくなっている. ま た,水深が深くなるにつれてRBの方が流速の減少割合 が大きい. 次いで Δ Pitchingと流速の関係性に着目する と, Δ Pitchingと流速値の因果関係は小さく, Δ Pitching が大きい際の流速値に特異性はみられない.

図-12に910 m³/sと410 m³/sの際の Δ Pitchingの相対頻度 をそれぞれ示す.図-12より、両観測日において±2° を境界としてRBと高流速対応型の3m RBとHSRBの相対 頻度の割合が逆転し、±2°を超過している場合はRB の方が割合は高く、±2°内の範囲では3m RBやHSRB の方が割合は高いことがわかる.

6. まとめ

係留ボートの揺動はRBと3m RB, HSRBに大きな相違 が見られた. Pitchingの平均値は3m RBやHSRBよりもRB の方が大きく,標準偏差も同様の傾向を示した.

流速プロファイルでは、浅層ではRBと3m RB共に同様の平均流速を記録しているが、底層にいくにつれて3m RBの方が流速値は乱れた.しかし、各層の流速の最大最小の幅を比較すると、RBよりも3m RBの方が小さく、データのばらつきは少ないと考えられる.底層の相対頻度分布はRBよりも3m RBの方が偏りは大きい.各層の流速値をPDFで比較したところ、浅層ではRBの方がPDFは高く、データにばらつきは少ないと考えられる.しかし、底層にいくにつれ3m RBやHSRBの方がPDFは



 m^{3}/s , \mp : 410 m^{3}/s)

高くなることから、底層付近の観測結果は高流速対応型 のものの方が妥当性は高いと考えられる.

PDFと相対頻度分布を比較したところ,最底層の相対 頻度分布は大きく乱れているものの,概ねPDFと同様の 推移を示していることから,PDFによる比較は妥当であ ると考える. Δ Pitchingと流速値に因果関係は見られな かったものの, Δ Pitchingの相対頻度分布を係留ボート ごとに比較したところ,±2°を境に明確な相違が見ら れた.これより,今後のADCPの不確実性解明において 上述した要素を用いて比較するべきであると考える.

謝辞:本研究で使用したADCPデータの一部は(国研)土木研究所 の小関博司博士より提供されたものである.また,土木学会流 量観測高度化研究小委員会の合同観測に参加させていただき観 測データを取得した.ここに記して感謝の意を表す.



図-11 流量910 m³/sにおける最浅層から1 m毎のΔPitchingと流速の分布

表−3	流量910 m³/sにおける最浅層から1 m毎の流速の平均と標準偏差,	分散
-----	-------------------------------------	----

	Sueface		Depth 1 m		Depth 2 m		Depth 3 m		Depth 4 m		Depth 5 m		Depth 6 m		Depth 7 m	
Velocity		Velocity		Velocity		Velocity		Velocity		Velocity		Velocity		Velocity		
Boat type	RB	3m RB	RB	3m RB	RB	3m RB	RB	3m RB	RB	3m RB	RB	3m RB	RB	3m RB	RB	3m RB
Average	3.23	3.33	3.33	3.32	3.23	3.17	2.99	2.93	2.60	2.46	2.09	1.78	1.56	0.99	1.14	0.67
Standard deviation	0.27	0.38	0.28	0.43	0.35	0.50	0.45	0.58	0.53	0.69	0.60	0.78	0.67	0.60	0.65	0.54
Variance	0.07	0.15	0.08	0.19	0.12	0.25	0.20	0.33	0.28	0.48	0.35	0.61	0.45	0.36	0.42	0.29

参考文献

- 萬矢敦啓,岡田将治,橘田隆史,菅野裕也,深見和彦:高 流速におけるADCP観測のための橋上操作艇に関する提案, 河川技術論文集,第16巻, pp.59-64,2010.
- 福田隆史,下田力,疋田真:河川砂防技術基準に準拠した ADCPによる洪水流量観測手法について,ながれ,第32巻, pp.377-382,2013.
- 3) 吉見和紘, Chao-Wen WANG,山田正,山田朋人:確率 過程論に基づいた降雨流出過程における不確実性評価の理 論的枠組の提示,土木学会論文集B1(水工学),第72巻,第 4号,pp.I_1225-1230,2016.
- 野本雄基,二瓶泰雄,柏田仁:H-ADCP計測とDIEX法に よる流量推定値に関する不確実性解析,河川技術論文集, 第22巻, pp.91-96,2016.
- 5) 国土交通省河川局:信濃川水系河川整備基本方針, http://w ww.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/pdf/shi nanogawa35-1.pdf, 2008.(2019/5/8閲覧)
- (国研)土木研究所水工研究グループ水文チーム:流量観測の高度化マニュアル(高水流量観測編)Ver1.2, https://www.pwri.go.jp/team/hydro_eng/manual.htm, 2016.(2019/3/31閲覧)
- 7) 岡田将治,萬矢敦啓,橘田隆史: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,水工 学論文集,第54巻, pp.1087-1092,2010.
- 8) Google : Google $\forall \gamma \gamma$, https://www.google.co.jp/maps?hl=j



(2019. 4. 2受付)