

ADCP係留ボートの構造が 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、入力を持つ不確実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)、低水流量かつ観測データ数が多い2018年12月 (410 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⁶⁾。揺動が±20°を超え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	
Appearance				
Boat 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		
Size(cm)	Length	120	152	300
	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	12				1			
Sub-Pings	3							
Measured layer thickness(m)	0.2							
Number of measurement layer	50							
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	5			
Bottom track function	5		5		5			
Number of Bottom-Pings	3		3	5	5			
Standard deviation of velocity error in fixed observation(m/s)	8.51				11.42			
Measurement coordination	Earth coordinate							



図-2 係留ボートの揺動の概略図

m^3/s , $910 \text{ m}^3/\text{s}$ 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 m^3/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 $\pm 15^\circ$ 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 m^3/s と1520 m^3/s の際の観測において、RBのみが $\pm 15^\circ$ 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量、括弧内はそれぞれの解析期間における最浅層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 m^3/s を記録した2015/4/24の結果、910 m^3/s の2018/4/20の結果、410 m^3/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 m^3/s と410 m^3/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 m^3/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 m^3/s のRBと3m RBの流速プロファイル(左図)と流量が910 m^3/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

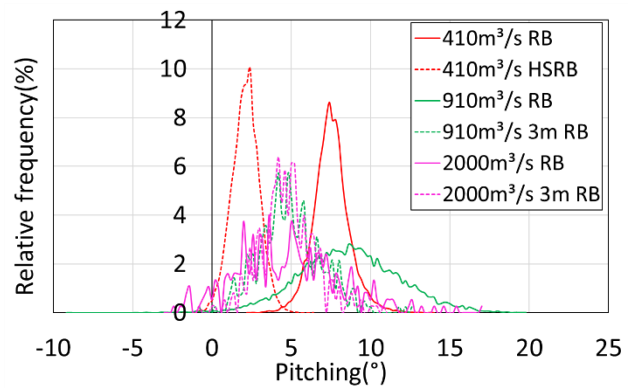


図-3 Pitchingの相対頻度分布図

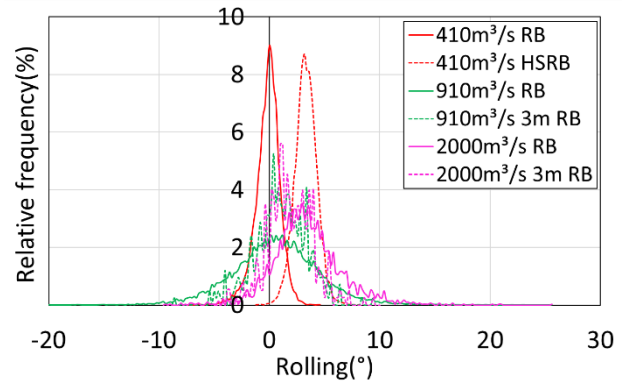


図-4 Rollingの相対頻度分布図

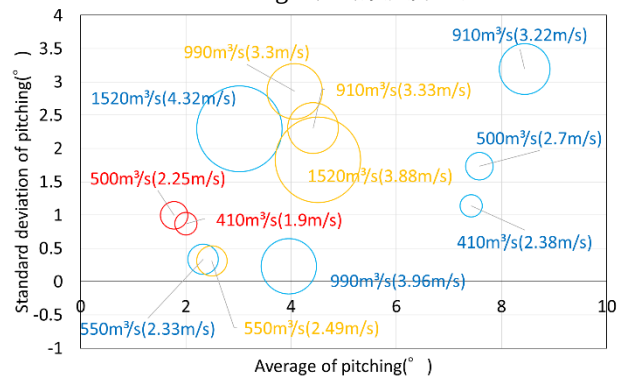


図-5 全観測日のPitchingの平均値と標準偏差の分布

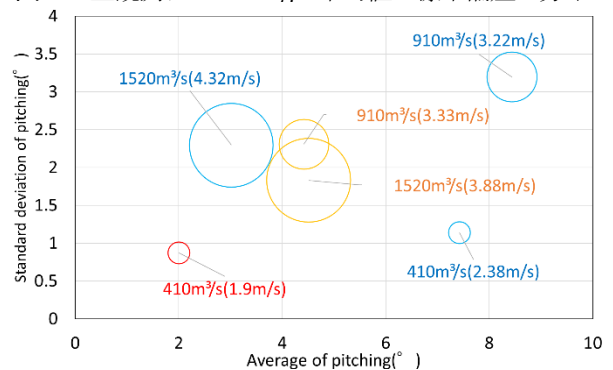


図-6 3観測日のPitchingの平均値と標準偏差の分布

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3m RBを示している。

1520 m^3/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6 mでは3m RBの平均流速が大きく0 m/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、

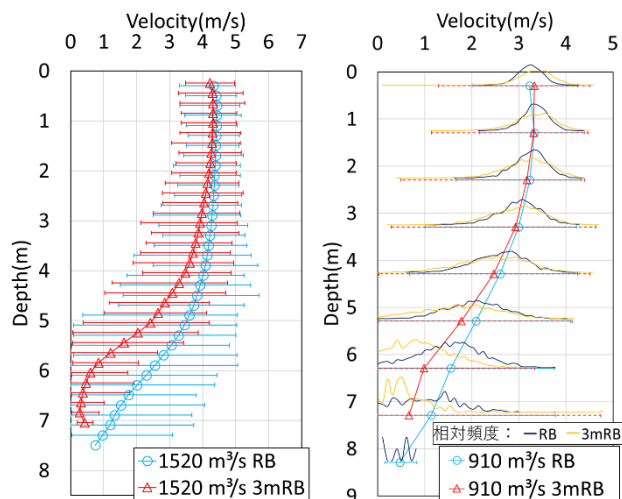


図-7 左：流量1520 m³/sの流速プロファイル
右：910 m³/sの1 m毎の流速プロファイルの各層の相対頻度分布

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。

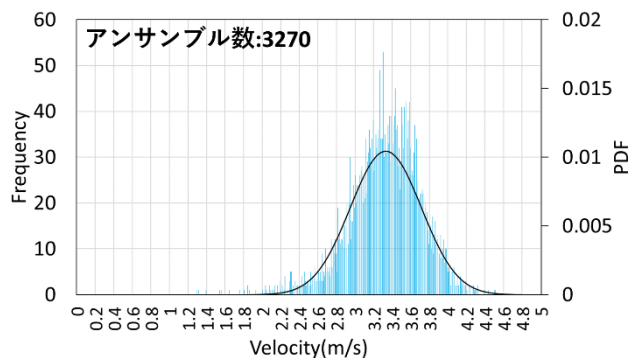


図-9 流量910 m³/sのヒストグラムとPDF

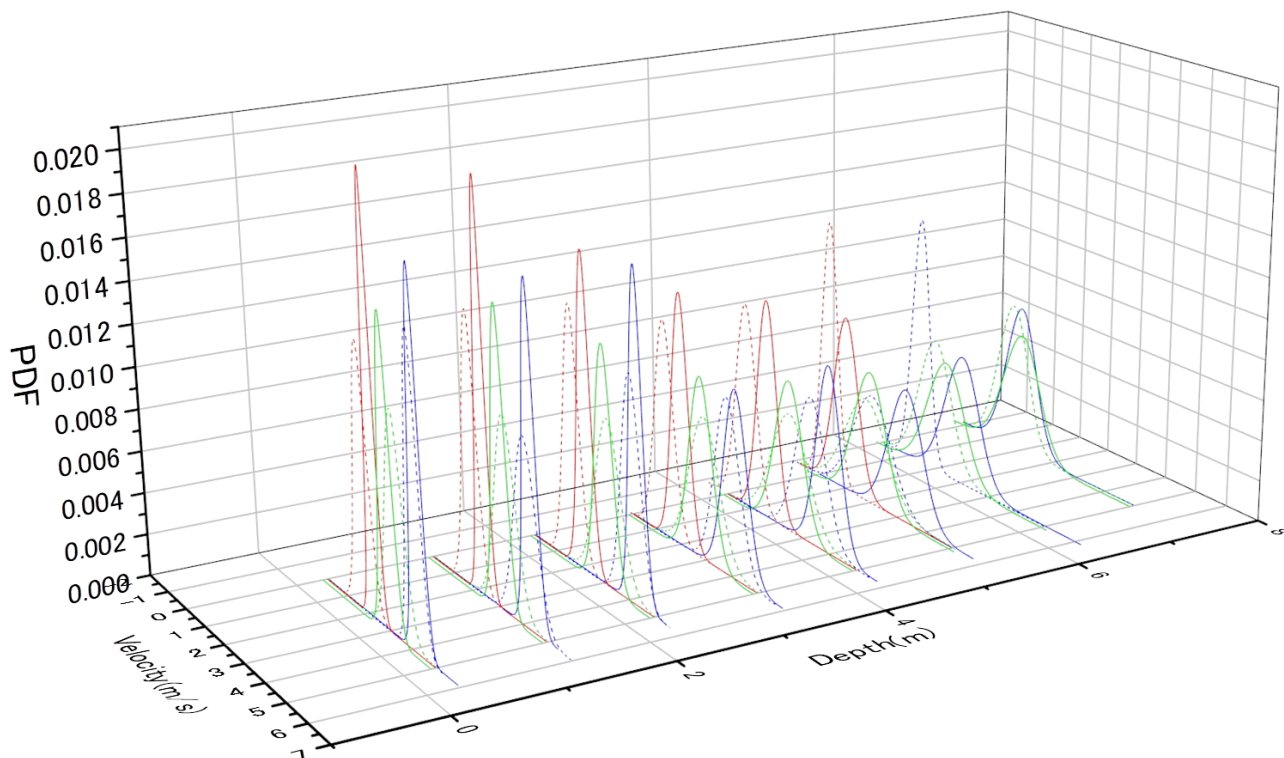


図-8 各観測日における最浅層から1 m毎のPDF(青：1520 m³/s, 緑：910 m³/s, 赤：410 m³/s)

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 m³/s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 m³/s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と流速の関係性に注目すると、 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 $\pm 2^\circ$ 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、 $\pm 2^\circ$ を超過している場合はRBの方が割合は高く、 $\pm 2^\circ$ 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

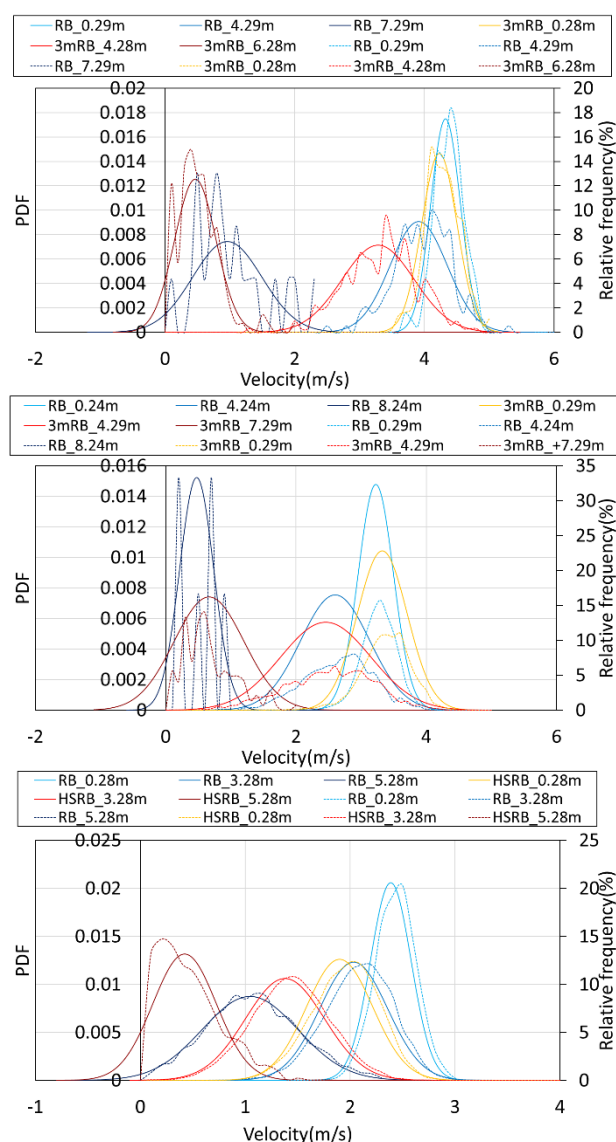


図-10 各観測日の最浅層と中間層、最底層のPDFと相対頻度(上: 1520 m³/s, 中: 910 m³/s, 下: 410 m³/s)

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が高いと考えられる。

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られる。 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、 $\pm 2^\circ$ 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られる。

謝辞: 本研究で使用了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。

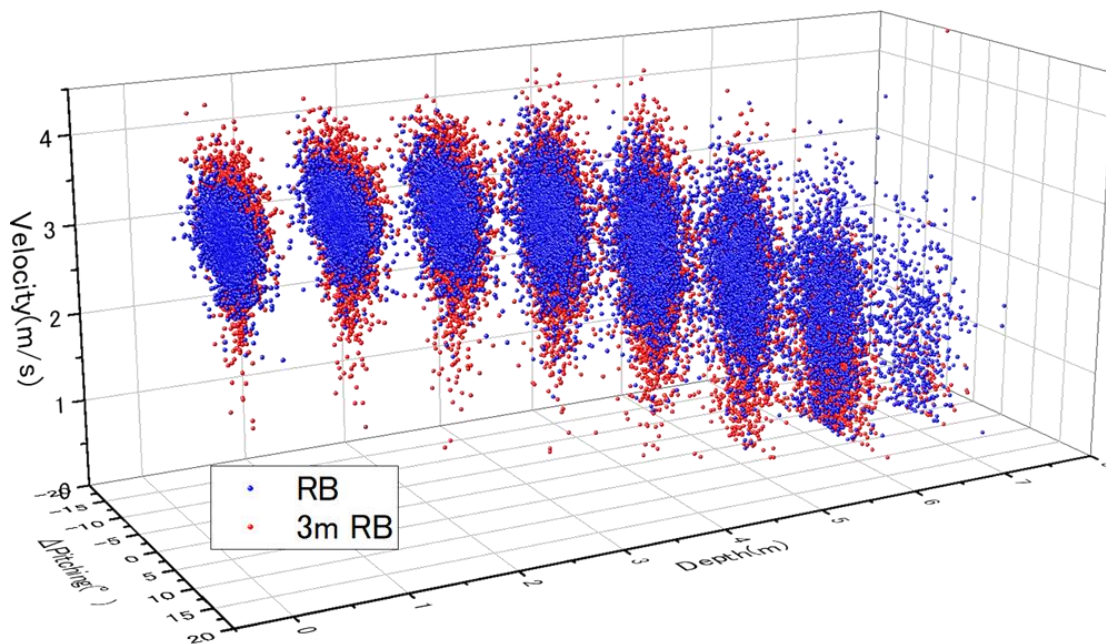


図-11 流量910 m³/sにおける最浅層から1 m毎のΔPitchingと流速の分布

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

	Surface Velocity		Depth 1 m Velocity		Depth 2 m Velocity		Depth 3 m Velocity		Depth 4 m Velocity		Depth 5 m Velocity		Depth 6 m Velocity		Depth 7 m 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

- 1) 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.
- 2) 橘田隆史, 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.
- 4) 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://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/pdf/shinagawa35-1.pdf, 2008.(2019/5/8閲覧)
- 6) (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 マップ, <https://www.google.co.jp/maps?hl=j>

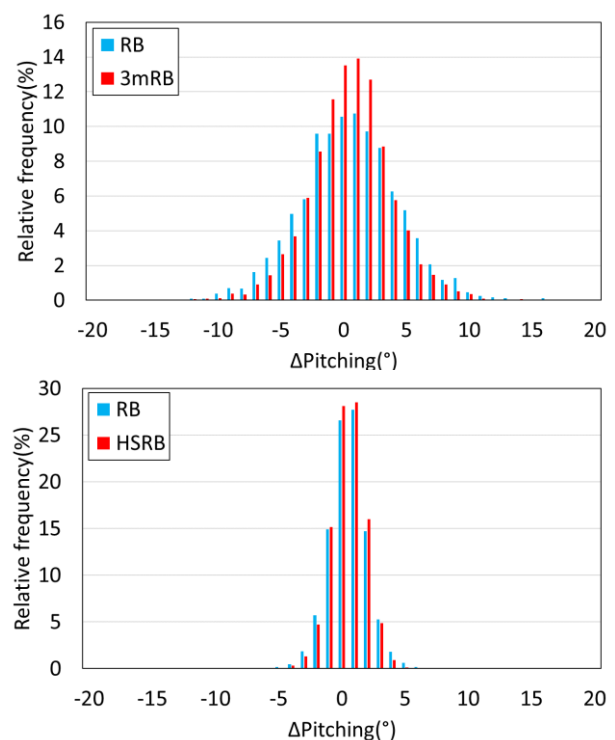


図-12 ΔPitchingの相対頻度(上: 流量910 m³/s, 下: 流量410 m³/s)

a&tab=rl, 2019. (2019/3/31閲覧)

(2019. 4. 2受付)