

# 23.ADCP係留ボート構造の違いが 流速値に与える不確実性評価

新井 章珣<sup>1\*</sup>・手計 太一<sup>2</sup>・橋田 隆史<sup>3</sup>・吉川 世里子<sup>3</sup>・笹川 幸寛<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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）

<sup>2</sup>富山県立大学工学部環境・社会基盤工学科（〒939-0398 富山県射水市黒河5180）

<sup>3</sup>株式会社ハイドロシステム開発（〒550-0022 大阪市西区本田3丁目2-18ハイドロ第一ビル）

\* E-mail: [t857001@st.pu-toyama.ac.jp](mailto:t857001@st.pu-toyama.ac.jp)

現在の流量観測業務においてADCPを使用した観測は、その応用性の高さから多岐に渡り使用されている。また、近年の流量観測においては「不確実性」が重要視されており、日本においても観測機器による不確実性の解明は喫緊の課題である。不確実性に関する研究は様々に行われているが、ADCPを係留ボート起因の不確実性は未だ明らかになっていない。本研究ではADCP観測における流速の信頼幅を明らかにすることを目的とし、ADCPの反射強度を使用した不確実性評価を行った。その結果、RBと3m RBの反射強度の挙動に大きな相違が見られ、係留ボート構造の違いが顕著に表れた。

**Key Words :** ADCP, Riverboat, Reflection intensity, Pitching, Rolling

## 1. はじめに

近年、河川流量観測の観測手法の高度化、また、平成24年6月の河川砂防技術基準調査編の改定に伴い、流量観測業務の手法の一つとしてADCPによる観測が確立され、頻繁に利用されるようになった<sup>1)</sup>。ADCPを用いた洪水流量観測では橋上操作艇やラジコンボートを使用した観測が主だったものとなっている。以上の事より、ADCPを使用した観測に大きな幅が出来てきた。ADCPを使用する係留ボートや搭載する機材の相違によって観測結果が異なることはよく知られている。

近年の流量観測においては不確実性が重要視されるようになってきた。これまでに流量に関する研究などは多く行われてきた。Hening(2018)<sup>2)</sup>はADCPの不確実性が観測や解析でのどの要素に起因しているを明らかにした。また、吉見ら(2016)<sup>3)</sup>は確率過程論により入力を持つ不確実性が出力に及ぼす影響を評価する枠組みを提示した。しかし、我が国においてADCPを係留するボートが観測結果である流速に与える不確実性に関する研究は多くない。そこで本研究ではADCPを係留するボート構造の違いがADCPの反射強度に与える影響を評価することを目的とした。

## 2. 観測条件

本研究で使用したADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)はTeledyneRD Instruments社製である。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<sup>4)</sup>。

比較を行った係留ボートは、著者らが所有するRiverboat(以降、RB)と株式会社ハイドロシステム開発が所有するHighSpeed Riverboat(以降、HSRB)、株式会社水文環境が所有する3m Riverboat(以降、3m RB)の3種である。使用した係留ボートの仕様を表-1に示す。

表-1 各係留ボートの仕様

| Name                                                  |        | Riverboat (RB)                                                                        | HighSpeed Riverboat (HSRB)                                                            | 3m Riverboat (3m RB)                                                                  |
|-------------------------------------------------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Appearance                                            |        |  |  |  |
| Boat type                                             |        | Trimaran                                                                              | Fast flow velocity type:Trimaran                                                      |                                                                                       |
| 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 equipment included battery and boat(kg) |        | 25                                                                                    | 35                                                                                    | 50                                                                                    |

本観測で使用したADCPコマンドを表-2に示す。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。本研究では新井ら(2019)<sup>9)</sup>が観測地点としていた地点を観測地点とした。

本研究においてはADCP観測における反射強度の比較を行った。ADCPは下方に4か所のビームを装備している。それぞれのビームの位置図を図-1に示す。

### 3. 観測結果・考察

新井ら(2019)<sup>9)</sup>は係留ボート構造の違いが揺動や流速プロファイルに与える影響を評価した。ADCPの揺動の相対頻度分布において規定範囲を $\pm 15^\circ$ として検討を行った結果、 $1520 \text{ m}^3/\text{s}$ と $911 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $411 \text{ m}^3/\text{s}$ の結果において、RBのみがADCPの揺動であるPitchingとRollingが $\pm 15^\circ$ を超過する結果となった。また、最浅層から1 m毎の確率密度関数(以降、PDF)を流量規模毎、係留ボート毎に比較を行ったところ、浅層ではHSRBや3m RBよりもRBの方がPDF値は高くデータのばらつきは少なかったが、深層にいくにつれてRBよりもHSRBや3m RBの方がPDFの値が高くなり、RBは深層にいくにつれてデータのばらつきが多くなった。結果、水深が深くなるにつれてRBの方が不確実性の幅が大きくなると考えられた。以降、本研究においては係留ボートの相違による比較を行うため、最も流量規模が大きかった $1520 \text{ m}^3/\text{s}$ における観測結果の比較を行う。

図-2, 3に $1520 \text{ m}^3/\text{s}$ の際のRBと3m RBの観測結果の流向流速ベクトル図を示す。RBの結果に着目すると、流向流速を表すベクトルが密でないことから欠損が非常に多いことがわかる。また、上方と下方にスパイクが多く発生しており、河床が正確に捉えられていない。3m RBの結果に着目すると、RBと比較してデータが密であり、欠損は非常に少なく、河床も正確に捉えることが出来ている。

図-4, 5にRBと3m RBの、最浅層から1 m毎の流速のPDFとヒストグラムを示す。観測時間間隔はそれぞれRBが1.65 s、3m RBが1.60 sであることからアンサンブル数の母数はそれぞれRBが374個、3m RBが376個とである。RBの結果に着目すると、最浅層では観測結果の欠損率が45.5 %を記録しており観測を行った時間内の約半数が欠損しているという結果となった。深層にいくにつれての欠損率の変動は非常に小さいが、最深層である5.29 mにおいては欠損率は50.5 %を記録しており、半数以上が欠損しているという結果となった。次いで3m

表-2 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 |      |        |      |        |      |        |      |

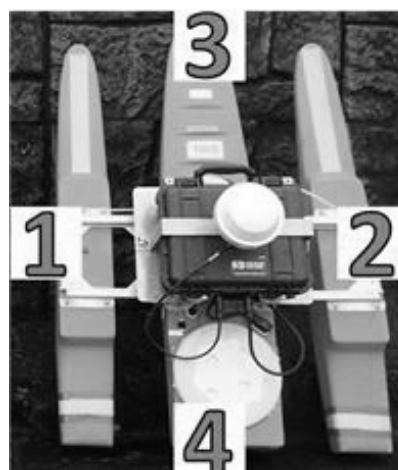


図-1 各ビームの位置図

RBの結果に着目すると、最浅層における欠損率は2.7 %で、RBと比較して非常に欠損率が小さいという結果となった。水深5.28 mでは欠損率は41.2 %まで上昇するものの、水深4.28 mまでは欠損率は15 %以内を記録しており、鉛直方向でも安定した観測が行なえていると考えられる。新井ら(2019)<sup>9)</sup>は、3種のボートで、最浅層から1 m毎のPDFを示した。その結果、浅層ではRBの方がPDFは高い値を示したものの、深層にいくにつれてHSRBや3m RBの方がRBよりも高い値を示し、鉛直方向の観測結果の妥当性はRBよりもHSRBや3m RBの方が高く、RBの鉛直分布の不確実性の幅が大きいという事が示唆された。本研究における結果も同様に、RBよりも3m RBの方が全層において観測結果の妥当性が高いことが確認できた。また、3m RBは全層においてPDFとヒストグラムは同様の分布を示す傾向にあったが、RBは深層にいくにつれて分布が異なっていく傾向があった。

図-6に $1520 \text{ m}^3/\text{s}$ の際の最浅層の流速のエラー値と各ビームの反射強度の時系列図を示す。図中の灰色の範囲が流速のエラー値を記録した範囲を示しており、各ビームの時系列の反射強度をそれぞれの色で示している。RBの観測結果に着目すると、流速がエラー値を記録し

観測結果が欠測している際、ビームの反射強度が弱くなっている傾向がある。しかし、ビーム3のみは定量的に同様の反射強度を示す傾向にある。次いで3m RBの結果に着目すると、全ビームの反射強度に大きな変動は見られず、どのビームも定量的に同様の反射強度を示している。時系列で反射強度の比較を行った結果、係留ボートに相違が顕著に表れた。

図-7に1520 m<sup>3</sup>/sの際のRBと3m RBの各ビームのPDFとヒストグラムのグラフを示す。RBの結果に着目すると、図-6で見られたように、ビーム3のみがPDFの値が非常に高く、ビーム3の反射強度にばらつきが少ないことがみてとれた。また、ビーム1, 2, 4はPDFの値が小さく反射強度の時系列の変動が大きいことがわかる。それと比較し、3m RBはビーム1, 2, 3, 4の全てのビー

ムのヒストグラムは同様の分布を示しており、PDFも同様である。また、PDFの値に着目すると、定性的に同様の分布を示し、ピーク値に大きな差は見られない。

図-8, 9にRBと3m RBの流速のエラー値、PitchingとRolling、ビーム1～4の反射強度の時系列を示す。最も上段が流速のエラー値を黒で示している。その下段が、上から順にPitching, Rolling, ビーム1, 2, 3, 4を示している。また、それぞれにおいて数値が高いものほど濃い暖色、数値が低いものほど濃い寒色で示している。RBの結果に着目すると、図-6でも見られた、ビーム3のみが定量的に一定の反射強度を記録していることが確認できた。流速のエラー値とビームの反射強度に着目すると、ビーム1, 2, 4の3ビームの反射強度が弱くなり変動が見られた際に流速のエラー値が多く観測されている。

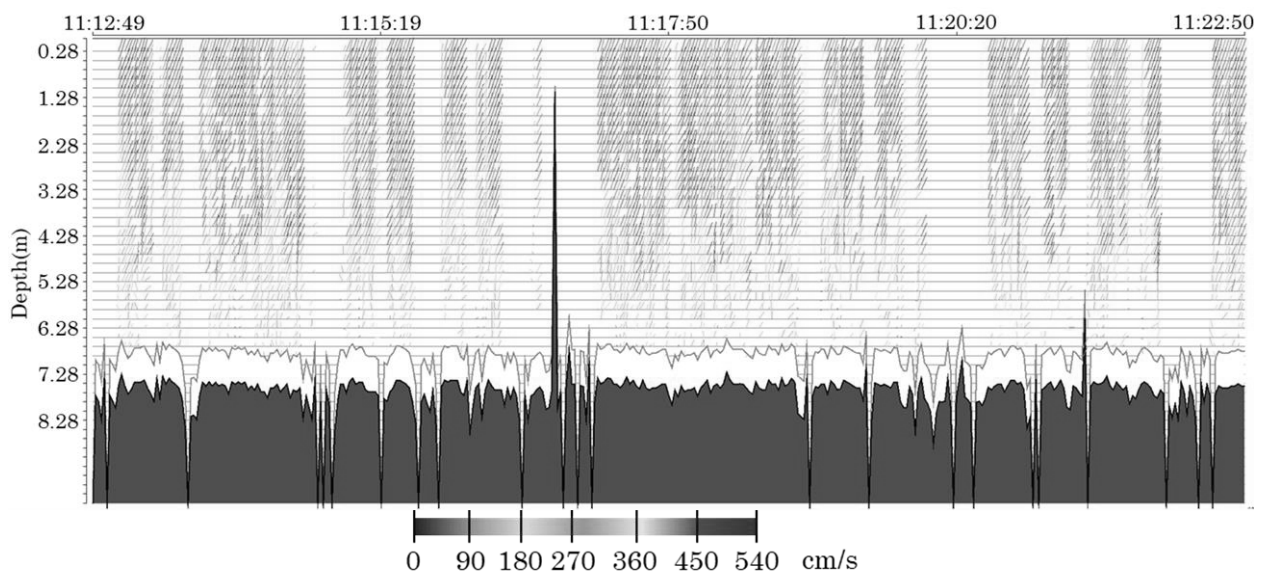


図-2 1520 m<sup>3</sup>/sの際のRBの流向流速ベクトル図

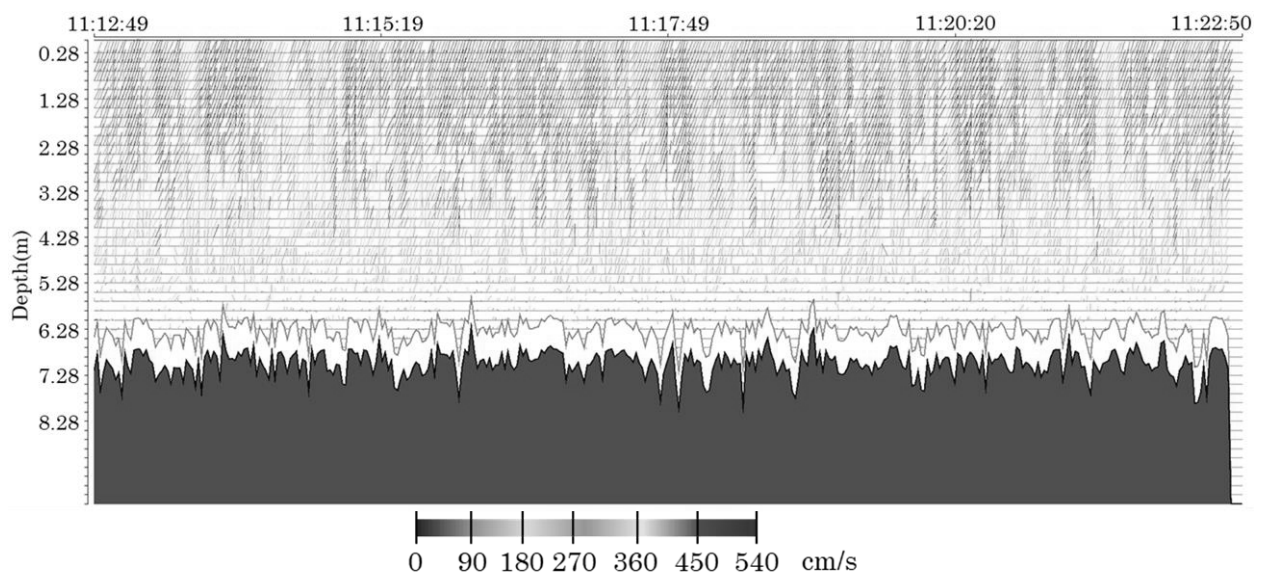


図-3 1520 m<sup>3</sup>/sの際の3m RBの流向流速ベクトル図

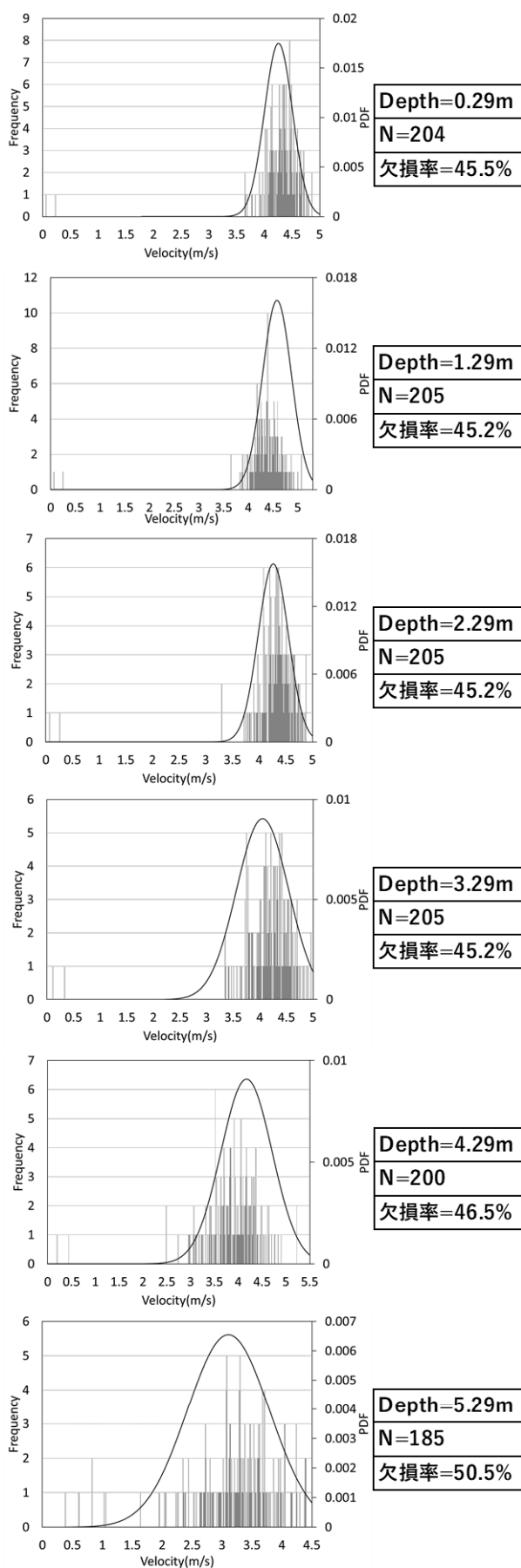


図-4 1520 m<sup>3</sup>/s の際の RB の最浅層から 1 m 毎の PDF とヒストグラム

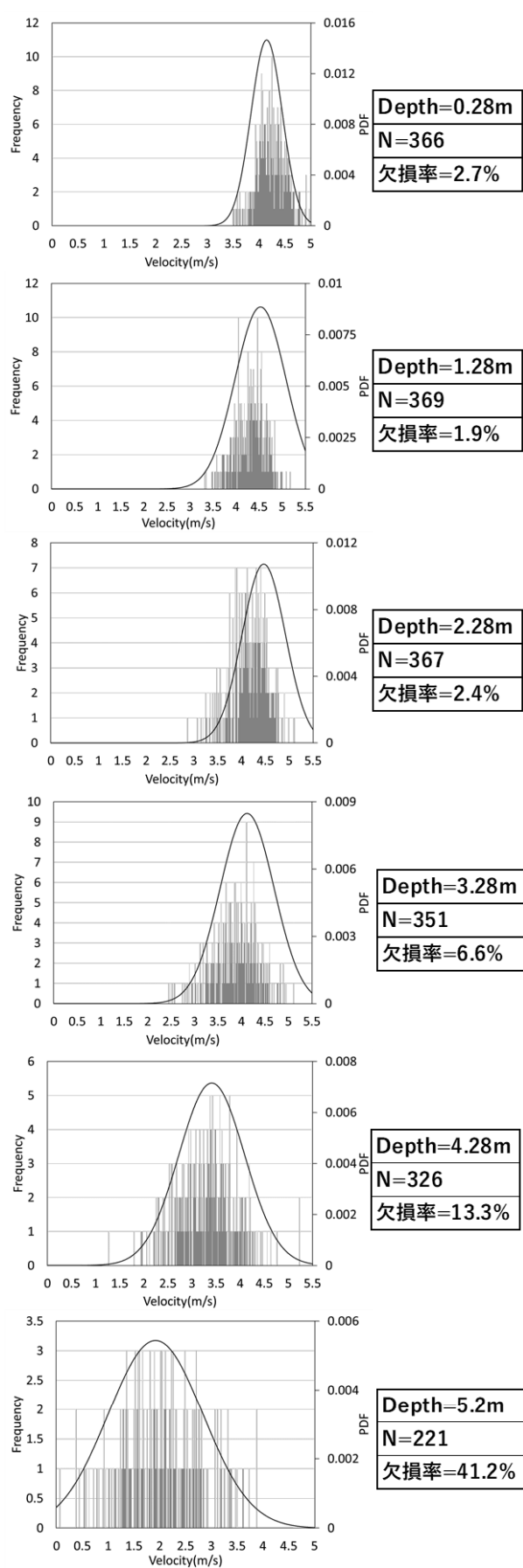


図-5 1520 m<sup>3</sup>/s の際の 3m RB の最浅層から 1 m 毎の PDF とヒストグラム

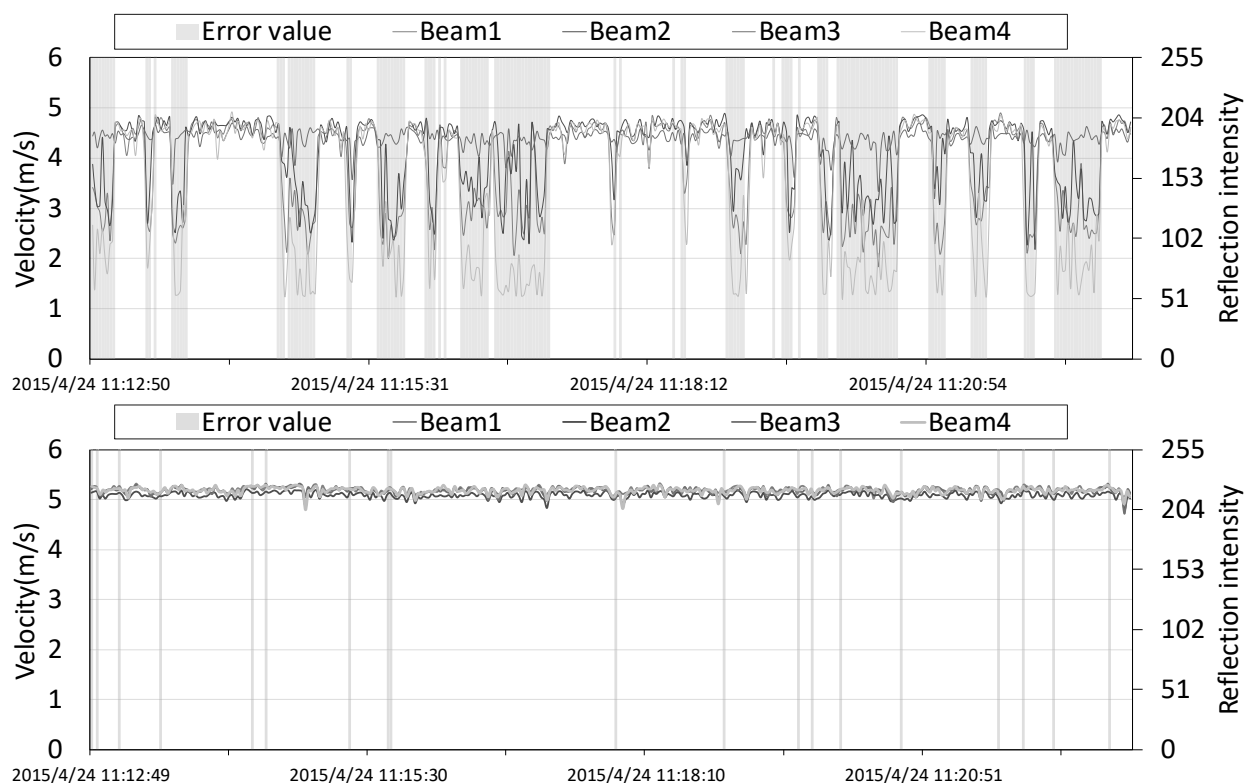


図-6 1520 m<sup>3</sup>/s の際の最浅層の流速のエラー値と各ビームの反射強度の時系列 (上: RB, 下: 3m RB)

次いでPitchingとRolling, 各ビームの反射強度に着目すると, Pitchingが高い値を示した際, ビーム1, 2, 4の反射強度が弱い値を観測する傾向にある。超音波の特性上, 水中で気泡が発生したり, 係留ボートが跳ねることによりADCPが水中及び水面から離れ, 反射強度は減衰する。図-8で見られたPitchingが高くなるとビーム3以外のビームの反射強度が弱くなる現象は, 係留ボートが波の影響を受けて揺動に大きな変動が発生した際, 係留ボートが傾き, また, 気泡の発生や係留ボートの上下動でボートが跳ねたことにより反射強度が弱まったと考えられる。ビーム3のみが定量的に一定の値を示す要因としては, 係留ボートの構造上, トリマランの形状により波を切るように設計されており, 最も先頭に位置するビーム3付近には気泡が発生しにくいという特徴を有するからであると考えられる。3m RBの結果に着目すると, 流速のエラー値はRBに比べて非常に少なく, PitchingとRollingの変動も少ない。ビーム2のみが定量的に弱い値を示しているが, これは観測状況に起因すると考えられ, 橋脚等の影響によりビーム2の位置に気泡が多く発生していた可能性が考えられる。RBと同様に, PitchingとRollingの値に変動が見られた際, 流速のエラー値が観測される傾向にあった。3m RBは高流速や高流量, 激しい流況にも対応することが出来る構造であり, 全ての機器を搭載した重量は約50 kgであることから, 波の影響を受けにくく, PitchingやRollingといった揺動が安定し, 係留ボートが跳ねることが無かったことから, 反射

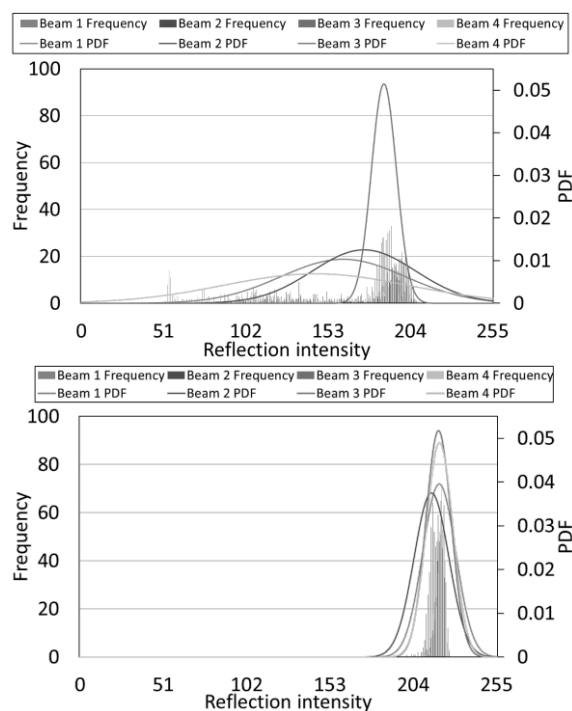


図-7 各ビームの反射強度のPDFとヒストグラム (上: RB, 下: 3m RB)

強度に大きな変動がなく, 観測した流速にエラー値が少なかったと考えられる。以上より, RBと比較し, 3m RBは安定していることから, Pitchingの変動が小さく反射強度が減衰せず, 係留ボート構造の違いが反射強度に顕著に表れた。

#### 4. まとめ

流量規模が $1520 \text{ m}^3/\text{s}$ の際のRBと3m RBの観測結果の比較を行った。流向流速ベクトル図で比較を行った結果、RBは流向流速ベクトルが存在していない範囲が多く存在し欠損が多いことが確認できた。また、上方や下方にスパイクが多く発生しており、河床が正確に捉えられていなかった。3m RBはRBと比較して欠損は少なく、河床も正確に捉えることができていた。

係留ボート毎に最浅層から1 m毎のPDFとヒストグラムの比較を行った結果、RBの結果では流向流速ベクトル図で見られた欠損が確認でき、3m RBは水深4.28 m以浅では欠損率は15 %以内に収まっていたものの、RBは最浅層で45.5 %を記録し、最深層においては50.5 %であり半数以上が欠損しているという結果となった。全層においてアンサンブル数に大きな差が見られた。3m RBは全層でPDF内にヒストグラムが分布していたものの、RBはPDFとヒストグラムの分布に相違が見られた。

最浅層の流速のエラー値と各ビームの反射強度の時系列図を比較した結果、RBは各ビームの反射強度の変動が大きく、ビームの反射強度が弱くなった際に流速がエラー値を記録している傾向にあった。しかし、3m RBは全ビームが定量的に同様の値をしめしており、RBよりも反射強度の変動が小さかった。

ADCPの各ビームの反射強度のPDFとヒストグラムの比較を行った結果、RBはビーム3のみが定量的に強く、他のビームはばらつきがみられた。3m RBは全てのビームが定量的に強い値を示した。これは、係留ボートの特性上、最も先頭に位置するビーム3付近には気泡が発生しにくいことから、ビーム3のみが定量的に一定の値を示していたと考えられる。

時系列にて流速のエラー値とPitching、Rollingと比較を行った結果、RBはPitchingが大きくなった際に反射強度が弱くなり、流速のエラー値が頻出した。係留ボート

の相違が揺動や反射強度といった観測結果に顕著に表れる結果となり、揺動の変動がADCPの反射強度に大きな影響を与えていることが確認できた。また、揺動の変動により反射強度は弱くなることで、流速のエラー値が増加し、観測値の欠損につながると考えられる。

以上より、係留ボートの相違によりPitchingやRollingに大きな影響を及ぼし、また、観測した流速値や反射強度にも影響が大きいことが確認できた。HSRBや3m RBで観測を行うことが最適ではあるものの、RBで観測を行っても、流速のPDFやADCPの反射強度に留意し観測結果の解析を行うことで、より正確な観測結果を得ることが出来ると考えられる。

謝辞：本研究で使用したADCPデータの一部は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。

#### 参考文献

- 1) 萬矢敦啓, 岡田将治, 橋田隆史, 深見和彦：日本における ADCP を用いた高水流量観測手法, 河川流量観測の新時代, 2011.
- 2) Hening Huang : estimation Bias Limit of Moving-Boat ADCP Streamflow Measurements, J. Hydraul. Eng., 2018.
- 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) 橋田隆史, 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.
- 5) 新井章珣, 手計太一, 橋田隆史, 吉川世里子, 笹川幸寛：ADCP 係留ボート構造が流速プロファイルに与える影響評価, 河川技術論文集, 第 25 巻, pp.231-236, 2019.

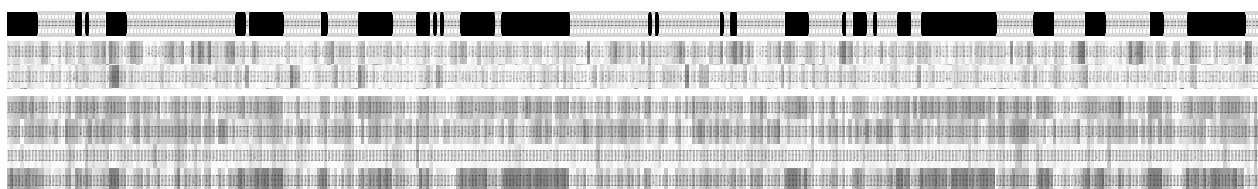


図-8 RBの流速のエラー値, PitchingとRolling, ビーム1, 2, 3, 4の反射強度の時系列図

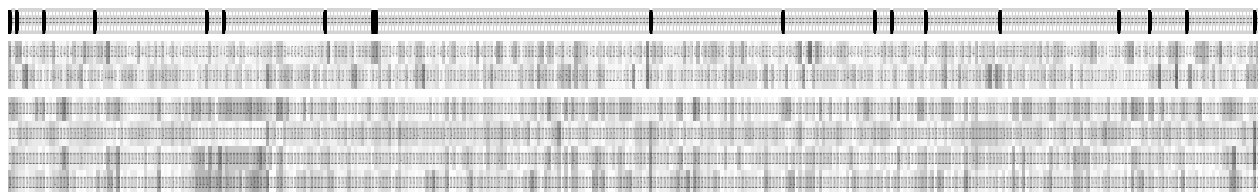


図-9 3m RBの流速のエラー値, PitchingとRolling, ビーム1, 2, 3, 4の反射強度の時系列図