ADCP 観測における 新たなノイズ除去アルゴリズムを用いた 有効流速値算出手法の提案

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 ・中村 要介¹

1正会員 三井共同建設コンサルタント株式会社(〒141-0032品川区大崎一丁目11番1号

ゲートシティ大崎ウエストタワー15 階)

E-mail: arai-shojun@mccnet.co.jp (Corresponding Author)

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 (〒939-0398 射水市黒河 5180)

3正会員 株式会社ハイドロシステム開発(〒550-0022 大阪市西区本町 3-2-18 ハイドロ第一ビル)

本研究の目的は、ADCP 観測において、最も普及率が高い Riverboat に最適化した流速値ノイズ除去アルゴリズムを提案することである。アンサンブル偏差流速 Δv_l を用い、反射強度や Correlation に関する感度分析することで最適な閾値を求めることができた。特に Δv_l が 0.4 m/s の場合において有効流速値が既往手法を上回り、かつ、有効流速値の頻度分布の偏りが少なかった。本提案アルゴリズムにより有効流速値が増加することから、ADCP 観測の不確実性の解明に貢献することができる。本提案アルゴリズムはRiverboat に最適化していることから、我が国における急流河川での利用が可能である。

Key Words: ADCP, noise filter, ensemble deviation flow velocity, uncertainty of measurement discharge

1. はじめに

近年、浮子法に代表される既往の流量観測手法に代わ る様々な流量観測方法が提案されている中,平成24年6 月に河川砂防技術基準調査編が改定され、 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)を用いた観測が洪水 流量観測における標準手法の一つとして掲載された ¹⁾. また、流量観測の高度化や多様化に伴って、流量値の不 確実性を評価することが重要になっている. ISO では既 に、流量観測結果に不確実性を併記することが推奨され ている. A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement によ ると、全ての測定にはある程度の不確実性が存在し、測 定結果だけでは成り立たず、測定の不確実性を併記する 場合にのみ有効性や有用性が認められる². 一方, 日本 ではこれまで測定誤差という幅を用いることが多かった. ここで、「不確実性」とは、測定結果に対する疑念を定 量化したもので、偏差量を示し幅で表記される. それに 対し、「測定誤差」とは、真値が存在する前提での測定 結果の差を表している. 今後, 流量観測結果に不確実性

の幅を示すことが流量観測の高度化・多様化に伴う喫緊の課題である.

最近,精力的に ADCP の不確実性に関する研究が行わ れている. Stephanie et al.(2017)は、モンテカルロシミュレ ーションを使用して ADCP 測定の不確実性を評価した³. Hening(2018)は、ADCP 観測における不確実性が水深や ADCP 測定プログラム, 各層の外挿誤差や ADCP による 流れの乱れ等、どのような要因によって生じるかを明ら かにした⁴. Juan et al.(2007)は, ADCP 観測における総合 的な不確実性に対する、それぞれの要因の相対性な不確 実性を推定する枠組みを提案した 5. 上述に示す要因以 外にも、ADCP を係留するボートが不確実性を発生させ る要因として懸念されている. ADCP を係留するボート には一般に広く利用されている Riverboat(以降, RB)や高 流速対応型に改良された High-Speed Riverboat(以降, HSRB),より激しい流況に対応できるように改良された 3m Riverboat(以降, 3mRB)等が挙げられる.しかし,現 在これらに適用するノイズ除去アルゴリズムは ADCPの 計測原理に沿り、かつ経験則に基づく手法が一般化され

ており,科学的な評価は十分ではない.なお,ノイズ除 去アルゴリズムとは,ADCP で計測したデータに含まれ るノイズ成分を除去する手法のことを示す.

そこで本稿では、ADCPの不確実性を明らかにするために、ノイズ除去アルゴリズムに着目した.特に、最も一般に普及している RB を対象に、現在推奨されているノイズ除去アルゴリズムに代わる、RB に最適化した新たなノイズ除去アルゴリズムを提案し、既存手法との比較検討を行った.

2. 観測地点

本研究では新潟県を流れる一級河川である信濃川を対象とした. 土木学会水工学委員会観測技術高度化研究小委員会の活動の一環として,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おり,本稿では本地点における観測結果を用いて報告する. 本観測地点の勾配は約 1/600,計画高水流量は11,000 m³/s,平均低水流量は300 m³/s である⁹.

3. 使用機器・使用データ

本研究で使用した ADCP は Teledyne RD Instruments 社(以 降, TRDI 社)製である. TRDI 社製の ADCP は, 平成 24 年6月に改訂された河川砂防技術基準調査編に準拠して いること,世界シェア8割以上と販売実績が豊富で機器 の信頼性が高いこと,国内においても洪水流量観測の実 績が豊富でケーススタディが可能であることから TRDI 社製を使用した⁷.

それぞれの係留ボートの仕様を表-1 に示す.本研究 では,RB,HSRB,(株)水文環境が所有している,日本 の急流河川に対応可能な 3mRB の3 種類の係留ボートを 使用した観測結果の比較検討を行った.大きな相違点は 適用流速範囲である.

本稿で比較検討をした観測日の ADCP の観測コマンド と実験観測時間内の平均流量を表-2 に示す. ADCP の観 測コマンドは河川砂防技術基準調査編で推奨されている 値を基に決定している.本研究の比較に使用した観測時 間内平均流量は,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.最も流量が大きか ったのは2015年4月の1,520m³/s,最も小さかったのは, 2018年12月の411m³/sである.本稿においては最も流量 規模が大きかった2015年4月の1,520m³/sの観測結果を 利用して,新しいノイズ除去アルゴリズムの開発とその 適用性について検討した.

4. 観測結果

これまでの著者らの研究によって、係留ボートの揺動 による ADCP の流速値の品質に与える影響は非常に大き いことがわかっている^{8,9}.本稿では、既往の ADCP の ノイズ処理において重要な指標の一つである Correlation と流速値について解析を行った.

Correlation は ADCP の出力データの品質を評価するパ ラメータの一つである. 散乱粒子の分布が位相測定の間 でどれだけ変わるかを相関値で判断するための指標であ る.本研究で用いた Workhorse ADCP は、比較的短い2つ の超音波パルスに位相変調をかけてつなげ、2つ1組の パルスを発信している. この2つのパルスはトランスデ ューサーから発信された後,水中の散乱体で反射し,ト ランスデューサーに戻る. この戻ってきた1つ目のパル スと2つ目のパルスのドップラーシフトの相関具合を数 値化して表したものが, Correlation である. Correlation 値 はADCPの各トランスデューサーの値が存在するため、 Beam1~4の4つのデータが存在する. Beam1~4はそれ ぞれ上部から見て、左方に Beam1、右方に Beam2、前方 に Beam3, 後方に Beam4 に位置している⁸. ADCP の Correlation は任意に設定された基準値に対して判断され, ADCP コマンドに組み込まれている. 計測されたデータ の Correlation 値が基準値より大きい場合,計測場の連続 性が高く、逆に Correlation 値が基準値より低い場合、デ ータから削除される 10.

1,520 m³/s における RB の観測結果において最も浅い層 である水深 0.29 m(以降,表層)の各 Beam の反射強度,各 Beam の Correlation,流速のエラー値の時系列を図-1 に示 す. 図中上方は,Beam1~4の反射強度を示しており, カラーマップは反射強度が高いほど赤,低いほど青で示 している.同図中中段には,Beam1~4の Correlation を示

衣 てれてれの外留か一下の九球							
Name		Riverboat	HighSpeed Riverboat 3m River				
		(RB)	(HSRB)	(3m kB)			
	Appearanze	and the second					
	Boat type	Trimaran	Fast flow velocity type:Trimar				
Cor	responding 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 battery(kg)		25	35	50			

表−1 それぞれの係留ボートの仕様

表-2 ADCPの観測コマンドと実験観測時間内の平均流量

Observation day	2015/4/24
Average discharge(m ³ /s)	1520

Boat type	RB	3mRB		RB	3mRB	
Measurement mode		12	Number of Water-Pings	3		
Sub-Pings		3	Bottom track function		5	
Measured layer thickness(m)	0.2		Number of Bottom-Pings		3	
Number of measurement layer		50	Standard deviation of velocity		8 51	
Ensemble time(s)	1.61	1.52	error in fixed observation(m/s		0.51	



- STEP3. -0.4 m/s≤Δv_i≤0.4 m/s ではなかった場合, 棄却す る. (Δv_i:アンサンブル偏差流速)
- STEP4. STEP3 で棄却した流速値について, STEP2 で 採用した流速値を用いてアンサンブル偏差流速 を算出し,感度分析を基にした閾値範囲内を採 用する.

以下に、これらの設定根拠を詳述する.

a) STEP1

既往のノイズ除去アルゴリズムの閾値では、Correlatio nが64 count以下の場合棄却する.著者らがCorrelationに 関して解析を行った結果、4Beam中2Beam以上のCorrela tionが64 count以下のアンサンブルにおいて、流速がエラ 一値を示すことを明らかにした.また、Correlationの閾 値に関する感度分析を行った結果、59 count 未満の場合、 算出される流速値は定量的に変動が認められなかった.

以上の結果より,新しいノイズ除去アルゴリズムでは, 4Beam 中 2Beam 以上の Correlation が 59 count 以下の場合に おいて棄却することとした.

b) STEP2

既往のノイズ除去アルゴリズムにおいては、エラー流 速の値が0.2m/s以上の場合、棄却する.しかしながら、 これは経験則で提案された閾値である.著者らがエラー 流速に関して解析を行った結果、係留ボートの違いや流 速値との因果関係は小さいことが明らかとなった.エラ 一流速は観測場の乱れ具合を示している指標であり、一 般的には実観測流速値を上回った場合、観測場の乱れが 非常に大きいとされる.以上の知見より、新しいノイズ 除去アルゴリズムにおいては、エラー流速値が実観測流 速値以上の場合、棄却することとした.

c) STEP3

図-2 新たに提案するノイズ除去アルゴリズム

しており, Correlation が 64 count 以下(既存のノイズ除去 アルゴリズムにおける Correlation 値の閾値)を記録した 場合, 黄で示している. 同図中下段には流速がエラー値 を示した場合,黒で示している.反射強度と Correlation の関係性に着目すると、Correlation が黄色の時間帯では、 反射強度が青色を示している. つまり, 反射強度と Correlation の相関性は非常に高いことが分かる. なお, Beam3の反射強度は全体に高い値を示していたことから、 Correlation 値も 64 count 以下を記録することがなかった. 逆に, Beam3 以外の Beam の Correlation 値は 64 count 以下 を記録する頻度が多かった.これは超音波の特性上,水 中で気泡が発生したり,係留ボートが波の影響で跳躍す ることで、ADCP が水中及び水面から離れ、反射強度が 低くなり、それに伴って Correlation 値が低くなったと考 えられる. その要因としては, 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 Beam3 付近には気泡が発生しにくい という特徴を有するためと考えられる. また, その気泡 を含んだ水流が後方に位置する Beam1, 2, 4付近に流れ 込むことで, Beam3 以外の Correlation 値が下がったと考 えられる.

次に、Correlation と流速のエラー値に着目する. 4Beam 中 2Beam 以上で、Correlation 値が 64 count 以下を記録した 場合、流速がエラー値を記録する傾向にあった. 以上よ り、流速との相関性が高かった Correlation 値を、新たな ノイズ除去アルゴリズムにも適用することとした. なお、 Correlation 値は既存のノイズ除去アルゴリズムでも用い られている評価項目である. STEP3, STEP4 ではアンサンブル偏差流速を使用して 流速の棄却を方法を検討した.ここで,アンサンブル偏 差流速とは,Hening(2018)の半経験値モデル内で使用さ れているアンサンブル偏差流量の原理を流速値に応用し たものである¹¹⁾.

アンサンブル偏差流速とは、流速の変動値を2アンサ ンブルで検討するのではなく、算出したいアンサンブル の前後1アンサンブルずつの合計、3アンサンブルを使 用して、流速の変動量の検討を行う手法である.

アンサンブル偏差流速の算出をしたい時間を t, 流速 値を v_t とする. このアンサンブルの偏差流速を算出する 場合, この前後のアンサンブルであるt-lとt+lのそれぞ れの流速値 v_{t-1} と v_{t+1} を用いて算出する. つまり, v_{t-1} , v_{t+1} の2点を用いて線形内挿を行い, その結果と v_t の差 分によってアンサンブル偏差流速を(1)式で算出する.

$$\Delta v_i = v_i - \hat{v}_i \tag{1}$$

ここで、 Δv_i はアンサンブル偏差流速、 v_i は時間iにお ける実観測流速値、 \hat{v}_i は線形内挿を行って算出した時間 iにおける値である. その概略図の一例を**図-3**に示す.

全アンサンブルのデータを使用し、アンサンブル偏差 流速の算出を行った.アンサンブル偏差流速については、 試行錯誤的に感度分析を行った.その結果、±0.4 m/s 以 下では算出される流速値に変動は認められず、また、± 0.5 m/s 以上においては有効流速値に偏りが認められた. 以上の結果から、アンサンブル偏差流速の閾値を±0.4 m/s とした.ここで、有効流速値とは、新しいノイズ除 去アルゴリズムを用いて取捨選択を行ったデータのうち、 有効性の高いと思われる流速値のことを示す.

d) STEP4

各 STEP 処理後における流速の変動の例図を図-4 に示 す. STEP4では、STEP3で棄却されているものの中(図中 オレンジ)から、有効性の高い流速値を判別することを 目的として、棄却判定を検討した. STEP4 においては、 STEP3 で棄却されたデータに着目し、その前後のアンサ ンブルの流速値を用いて線形内挿を行い、STEP3 で棄却 された流速値のアンサンブル偏差流速を算出した. この 線形内挿は、棄却された流速値の1点(STEP3で棄却され た流速値)と、その前後の2点(STEP3で有効であると判 断された流速値)の3点を使用する手法である. これは、 STEP3 で棄却された流速値の数に関係なく、棄却された 流速値全てにおいて算出した. それを Δv_l とすると、式 (1)と同様に以下のように求められる.

$$\Delta v_l = v_l - \hat{v}_l \tag{2}$$

ここで、 Δv_l は STEP3 で棄却された流速値のアンサン ブル偏差流速(図-4)、 v_l は STEP3 で棄却された実観測流 速値、 \hat{o}_l は線形内挿を用いて算出した値である.

次章には、Δv_lの閾値を決定するため、表-3のような ±0.5 m/s~±0.1 m/sの0.1 m/s毎に感度分析を行った.



	Case01	Case02	Case03	Case04	Case05
∆v _l の閾値 (±m/s)	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1

6. 感度分析結果

感度分析結果は表層と水深1.29mを比較した.各層の 平均流速と平均アンサンブル偏差流速のプロファイル図 を図-5に示す.各層のアンサンブル偏差流速に着目す ると,表層ではアンサンブル偏差流速の変動量が非常に 大きく,水深1~3m付近では非常に安定している,以 上より,表層と水深1.29mの2層において比較を行った.

表層における観測データ,既往のノイズ除去アルゴリ ズムで算出した結果(以降,既往手法),各 Case の有効デ ータの割合を表-4 に示す.有効データの割合に着目す ると,既往手法では 70.09%であるのに対し,CaseO1 と CaseO2 では既往手法よりも有効データの割合は高く, CaseO3~05 では低い結果となった.また,表層における 既往手法と CaseO1を適用した結果の時系列図を一例とし て図-6 に示す.図に着目すると,4~5 m/s付近の流速値 はほぼ同様の分布を示している.その中でも,既往手法 では抽出されていないものの,CaseO1で有効とされてい る流速値が認められた.また,既往手法では抽出されて いるものの,CaseO1では棄却されてしまっている流速値 も認められた.逆に,4 m/s以下や5 m/s付近では既往手 法では有効とされているものの,CaseO1では有効と判断 されていない観測結果が存在した. 次に、水深 1.29 mにおける観測データ、既往手法、各 Caseの有効データ数、有効データの割合を表-5に示す. 有効データの割合に着目すると、既往手法は 68.65 %で あったのに対し、Case01 と Case02 では既往手法よりも有 効データの割合が高く、Case03~05 では既往手法よりも 低くなる結果となり、表層と同様の結果となった.また、 Case02 と観測データの時系列を比較したところ、水深 1.29 m の方が表層よりもデータのばらつきが大きいもの の、表層とほぼ同様の傾向が認められ、その傾向は表層 よりも顕著に認められた.

水深1.29mの各 Case の有効データの相対頻度分布を図 -7 に示す.これに着目すると,表層の結果と同様に, 流速4~5m/s付近においては全 Case の頻度に大きな変動 は認められなかった.しかし,流速4.25m/s以下,4.75 m/s以上において,CaseO1のみが頻出する流速値が認め られた.表層,水深1.29mの両者において,流速4.25m/s 以下と4.75m/s以上のCaseO2~05の頻度分布は類似傾向 を示していた.表層の結果では,流速4~5m/s付近の頻 度は各 Case において大きな変動は認められなかった. しかし,流速4.25m/s以下においては,CaseO2~05と比 較し,CaseO1のみ流速値が頻出することが認められ, 4.75m/s以上においても同様の傾向が認められた.

7. 結論

本稿では、ADCPの係留ボートの違いによる流速観測 結果への影響評価を基に、RBに最適化した新しいノイズ 除去アルゴリズムを開発することを目的とした.

1,520 m³/s における RB の観測結果を用いて Correlation の解析を行った結果,反射強度と Correlation は関係性が 強かった. また, Correlation と流速のエラー値の関係性 を明らかにすることができた.

これまでの著者らの解析結果を基に, RB の対応流速 を超過した観測結果を用いての新しいノイズ除去アルゴ リズムを提案し, アンサンブル偏差流速を用いて感度分 析を行った. その結果, 各 Case における出力結果に顕 著な違いは認められなかった. Case01,02 は既往手法よ りも多くの有効流速値を算出することが可能であった.

Case02~05 の有効流速値の頻度分布には,顕著な違いは 認められなかった.しかしながら,Case01は他のCaseと 比較して,流速4.25 m/s以下と流速4.75 m/s以上において 頻出する流速値が認められた.

Case01 では算出される有効流速値が多いものの, 頻度 分布に偏りが生じるため, その有効性は低いと考えられ る.また, Case02~05 においては, 頻度分布に大きな偏 りは認められず, Case02 のみ, 既往手法よりも多くの有 効流速値を算出することが可能であった.つまり,



図-5 各層の平均流速と平均アンサンブル偏差流速のプロ ファイル図

表-4 表層における観測データ,既往手法,各Caseの有効 データの割合

	観測データ	既往手法	Case01	Case02	Case03	Case04	Case05
総データ数(個)	2842						
有効データ数(個)	2215	1992	2045	1994	1967	1916	1872
有効データの 割合(%)	77.94	70.09	71.96	70.16	69.21	67.42	65.87

Case02 で示した 0.4 m/s を図-2 の STEP4 に適用することで,他の Case よりも更に,既往手法より有効性の高い 有効流速値の算出が可能であると考えられる.

既往手法とCase02の結果を比較したところ,既往手法 では有効とされているもののCase02では棄却されている データ,また,その逆も認められた.以上より,本稿で 開発した新たなノイズ除去アルゴリズムは,既往のノイ ズ除去アルゴリズムに代わるものではなく,全く新たな 有効流速値算出手法として用いることが可能である.加 えて,新しいノイズ除去アルゴリズムは RB に最適化さ れていることから,我が国における急流河川で RB を用 いた観測においては,既往手法よりも有効性が高い.

本研究で開発した新しいノイズ除去アルゴリズムは, RBの対応流速を超過した 1,520 m³/sの洪水イベントを対 象としたことで,それよりも小さい洪水イベント等にも 柔軟に対応可能であると考えられる.しかしながら,新 しいノイズ除去アルゴリズムは RBの観測結果に適した 閾値を用いて開発を行ったことから,3種類の ADCP 係 留ボートの中では RB に最適化したノイズ除去アルゴリ ズムである.

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.





表-5 水深 1.29 m における観測データ,既往手法,各 Case の有効データの割合



参考文献

- 国土交通省水管理・国土保全局:国土交通省河川砂防技術基準調査編,https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/,2014. (2020年6月7日閲覧)
- 2) Bell, S.: A Beginner's Guide to Uncertainty of Measureme nt, Measurement Good Practice Guide, 1999.
- 3) Stephamie A. Moore, Elizabeth C. Jamieson, Francois Rai nville, Colin D. Rennie, David S. Mueller: Monte Carlo A pproach for Uncertainty Analysis of Acoustic Doppler Cur rent Profiler Discharge Measurement by Moving Boat, Jou rnal of Hydraulic Engineering 143(3), 04016088, 2017.

- Hening, H.: Estimating Bias Limit of Moving-Boat ADCP StreamFlow Measurments, Journal of Hydraulic Engineer ing 144(6), 04018024, 2018.
- 5) Juan A. Gonzalez-Castro, Marian Muste: Fremework for E timating Ucertainty of ADCP Masurments from a Mving Bat by Sandardized Ucertainty Aalysis, Journal of Hydrau lic Engineering 133(12), 1390-1410, 2007.
- 国土交通省河川局:信濃川水系河川整備基本方針, 2008.
- 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.
- 新井章珣,手計太一,橘田隆史,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.
- 9) 新井章珣,手計太一,橘田隆史,吉川世里子,笹川 幸寛: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,第27回地球環境シンポジウム講演 集,pp.105-110,2019.
- 10) 国立研究開発法人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/man ual.htm, 2016. (2020年3月27日閲覧)
- Hening, H.: Estimating uncertainty of streamflow measure ments with moving-boat acoustic doppler current profilers, Hydrological Sciences Journal, vol.63, pp.353-368, 2018.

(Received June 30, 2020) (Accepted August 28, 2020)

PROPSAL OF THE METHOD ESIMATED FOR EFFECTIVE VELOCITY BY THE ADCP OBSERVATION USING A NEW NOISE REMOVAL ALGORITHM

Shojun ARAI, Taichi TEBAKARI, Takashi KITSUDA, Yoriko YOSHIKAWA, Yukihiro SASAKAWA and Yosuke NAKAMURA

The purpose of this study is to propose a flow velocity value noise removal algorithm optimized for Riverboat, which is the most used in ADCP observation. Using the ensemble deviation flow velocity Δv_l , sensitivity analysis performed of the reflection intensity and correlation an optimal threshold was obtained by using the following method. In particular, when Δv_l is 0.4 m/s, the effectiveness flow velocity value was higher than the previous method and the bias of the frequency distribution of the effective velocity values was small. The proposed algorithm increases the effective velocity, it can be used to clarify the uncertainty of ADCP observations and we could contribute to this. Since the proposed algorithm is optimized for Riverboat, it is possible to use for the rapid river in Japan.