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

UNCERTAINTY ANALYSIS ON RIVER DISCHARGE EVALUATED BY H-ADCP MEASUREMENT AND DIEX METHOD

> 野本雄基¹·二瓶泰雄²·柏田仁³ Yuki NOMOTO, Yasuo NIHEI and Jin KASHIWADA

1学生会員 学(工) 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻修士課程 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

²正会員 博(工) 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山﨑2641)

3正会員 パシフィックコンサルタンツ㈱ (〒300-4204 つくば市作谷642-1)

This study aims to present the uncertainty analysis of river discharge evaluated by H-ADCP measurement and dynamic interpolation and extrapolation (DIEX) method, which has been developed to evaluate cross-sectional velocity from measured line-velocities. We gave artificial errors for measured velocity and setting conditions in the DIEX method when evaluating river discharge. Monitoring data for discharge at Naka River was used for the uncertainty analysis. The results indicate that measuring errors of velocity and setting conditions of the DIEX method did not influence significantly on discharge evaluation due to numerical algorithm of the DIEX method. This means the robustness and applicability of the present monitoring system to evaluate river discharge.

Key Words: discharge, uncertainty analysis, H-ADCP, DIEX method

1. 序論

洪水流量観測の標準法である浮子測法^{1),2)}は、急な出水により観測に間に合わないことや超過洪水時には作業の危険性が伴うことに加え、観測精度に難があるなど、様々な課題が浮き彫りになっている^{3),4)}.一方、現在まで流速計測新技術として、超音波ドップラー流速分布計(Acoustic Doppler Current Profiler、ADCP)⁵⁾や水平設置型超音波ドップラー流速分布計(Horizontal-ADCP)⁶⁾、STIV(Space Time Image Velocity)等の画像解析法⁷⁾、電波流速計⁸⁾が幅広く活用され、その熟度が増している。

流量算出には、上記の「点」、「線」流速計測技術と、それら「点」、「線」流速データを「面」流速や流量に補間する流速内外挿技術から構成される。これら流速計測技術のみでは限界があるため、流速内外挿技術として水理解析技術の適用も進みつつある。特に、著者らの独自技術である力学的内外挿法(Dynamic Interpolation and EXtrapolation method, DIEX法)は、横断面内の「点」もしくは「線」流速データを、力学条件を満たした形で横断面全体に内外挿して流量を推定する手法であり、河

川流解析では珍しいデータ同化手法を組み込んでいる⁹~¹¹). 適用対象の流速計は、開発当初はH-ADCP⁹~¹¹)であったが、その後、浮子や電波流速計、画像解析法等あらゆる流速計に適用可能な形に進展している¹²~¹⁴ . 流量観測では、流速計測値から横断面内の内外挿操作を経て一つの流量値を求めるが、流速や水深等の観測誤差や流速内外挿時の誤差等により流量計測値はある範囲の不確実性を有し、それらを定量評価することは上記の新技術を幅広く適用する上では必須である.

そこで本研究では、H-ADCP計測とDIEX法の融合技術による流量推定値に対する不確実性を明らかにすることを目的とする.ここでは、まず、①現地観測において生じ得る計測誤差として、H-ADCPによる流速計測誤差を人為的に設定し、流速誤差が流量推定誤差に及ぼす影響を定量的に検証する.また、②水理解析に用いる数値モデル(DIEX法)上の設定条件である入力条件(水位勾配I)やモデルパラメタ(粗度係数n)、H-ADCPの計測範囲(データ同化範囲)を様々に変化させて、それらが流量推定精度に及ぼす影響を把握する.

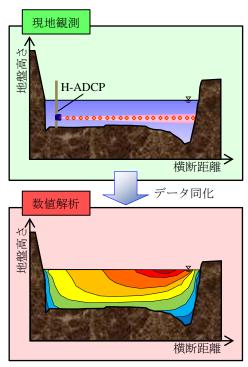


図-1 本システムの概要

2. 研究方法

(1) 本システムの概要

図-1はH-ADCP計測技術とDIEX法に基づく河川流計算技術による流量観測システムの模式図を示す。このように、H-ADCPにより固定されたある高さの線流速データを取得し、DIEX法により線流速データを面流速データや流量に変換する。このH-ADCPは、必ずしも対岸まで流速分布を取得できるわけではない。それは、H-ADCPから発信される超音波が水中にて減衰して対岸まで届かない、もしくは、発信された超音波が途中で水表面や底面に接触してしまうためである。特に、前者の超音波の減衰は、高濁度時に顕著になり、高濁水が流れる洪水時にはこの超音波減衰は大きな課題である。

DIEX法の基礎方程式に関しては、過去論文 9 $^{-11}$ に既出であるが、後述の誤差解析結果の解釈に必要となるので、簡単に記述する。DIEX法では、基礎方程式となる簡略化された運動方程式(式(1))と、付加項 F_a 算出に用いる式(1)に水深平均操作を施した式(2)を連立させる。

$$gI + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + F_a = 0$$
 (1)

$$gI + \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{A_H} \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} \right) - \frac{C_f}{D} \underline{u}^2 + F_a = 0 \tag{2}$$

ここで、uは主流方向流速、y、 σ は横断・鉛直方向、 A_H 、 A_V は水平・鉛直渦動粘性係数、Dは水深、Iは水位勾配、gは重力加速度、 $^-$ は水深平均値、 C_I は底面摩擦係数

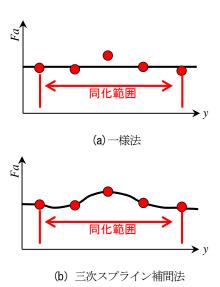


図-2 付加項Faの補間方法

 $(=gn^2/D^{1/3}, n: マニングの粗度係数)$ をそれぞれ表す.式(1)としては,三次元運動方程式から移流項や主流方向乱流拡散項等の観測困難・微小項を省略し,その代わりに付加項 F_a を導入している.

上記の基礎式に対して差分法を用いて計算を行うが、式(2)の差分方程式に対して、流速観測値を代入し、付加項 F_a を求める。流速観測位置毎に得られた付加項 F_a を横断方向に内外挿する際には、流速観測値の誤差を考慮するために、付加項のバラつきに観測誤差が反映されているものと見なす。すなわち、 $\mathbf{2-2}$ に示すように、付加項 F_a の平均値を横断面内に一様に与える方法(以下、一様法)、最小二乗法により三次スプライン関数で近似する方法(以下、三次スプライン補間法)を用いる。更なる詳細な計算方法や手順に関しては、二瓶・木水 9 を参照されたい。

(2) 現地モニタリング状況と検証用観測の概要

本研究では、図-3に示すように、東京湾に注ぐ一級河川である中川・吉川橋の下流側(河口部から30.5km)に設置したH-ADCPのデータを用いる。ここでは、低水路左岸に周波数300kHzのH-ADCP(Teledyne RDI製)を高さ0.8[A.P.m]の位置に設置した。計測条件は層厚0.3m、層数35層、計測間隔10minとした。観測期間は2014年7月17日~2016年2月9日までである。なお、本観測サイトは感潮域に位置し、塩水遡上は認められないものの、上げ潮時には逆流(流向:上流向き)が生じる。

検証用流量データを取得するために、ADCPによる移動観測をH-ADCP計測断面より約400m下流に位置する吉越橋にて実施した。ADCPの設定としては、鉛直方向0.2m、横断方向2.5m間隔とし、流速横断分布と流量を得た。観測は、表-1に示すように、出水時と低水時に行われた。出水時は、台風1418号(2014年10月6、7日)と関

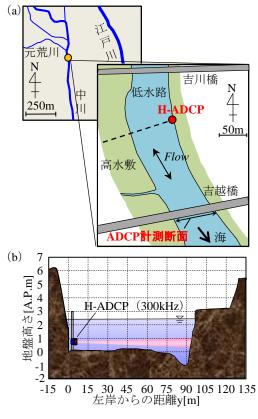


図-3 観測サイトの中川・吉川橋地点 ((a) 平面図, (b) 横断面図)

東・東北豪雨となった台風1518号(2015年9月11日)である. 低水時は, 大潮時(2014年11月7日)と小潮時(2015年12月4日)である. 表中のデータ数nはADCP移動観測時における往復(往路・復路)のデータの数である.

(3) 不確実性解析の方法

本システムの流量推定値の不確実性を把握するべく,

- ① 流速観測値の誤差
- ② DIEX法の設定条件の誤差(H-ADCPの計測範囲,水位勾配I, 粗度係数n)

に着目し、これらの条件が流量推定値にどのような影響を及ぼしているのかを調べる. 表-2は、不確実性解析用に設定した条件を示す.

このうち①では、本システム中のH-ADCPにおける流速観測結果に誤差を含むことに着目する.解析に用いる流速uについては、次式を用いて観測誤差を考慮する.

$$u = u_{obs.} + u_{ref.} \times a_u \times x \tag{3}$$

ここで、 u_{obs} は流速観測値、 u_{ref} はH-ADCP計測精度(=0.61cm/s)、 a_u は流速誤差検証用の比例倍率(=0~100)、xは乱数(=-1~1)を表す.上式を用いて、 a_u の大きさを変え、かつ、それぞれ100パターンの乱数を生成し、DIEX法による流速分布・流量算出を行い、検証用流量観測データと比較することで、流速観測誤差が

表-1 検証用流量観測のデータセット

ĺ	流況	イベント	目付	ADCPデータ数
ĺ	出水	台風1418号	2014年10月6日	19
			2014年10月7日	12
		台風1518号	2015年9月11日	8
	低水	大潮	2014年11月7日	22
		小潮	2015年12月4日	25

表-2 不確実性解析用の設定条件

検証事項	検証項目	誤差の与え方
流速誤差	流速u	$a_u = 0 \sim 100$
入力条件	水位勾配I	$7/10^{7} \sim 7$
モデル パラメタ	粗度係数n	$0.010 \sim 0.050 [\text{m}^{-1/3} \text{s}]$
H-ADCP 計測範囲	データ 同化範囲	2~26層

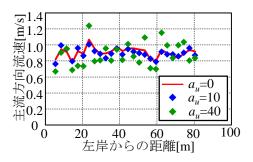


図-4 観測誤差を含むデータの与え方(流速誤差, 2014/10/6 11:00)

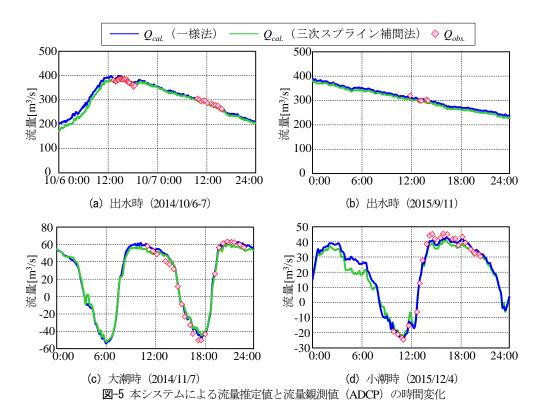
流量推定誤差に及ぼす影響を評価した. **図-4**は元々の流速観測データ $(a_u=0)$ と共に、観測誤差を含む流速値 $(a_u=10, 40)$ の流速横断分布を例示する.

上記②では、本システムにおいて現地観測で得られたデータからDIEX法により流量を算出する過程で、DIEX法の設定条件が流量推定精度に及ぼす影響について検証する。ここでは、H-ADCPの計測範囲(データ同化範囲)やモデルパラメタ(粗度係数n)、入力条件(水位勾配)に着目し、これらの値を様々に変化させた時の流量推定精度を調べる。各条件の設定範囲は表-2に示すとおりである。

3. 結果と考察

(1) 本システムにおける流量推定精度

流量推定精度に対する各ファクターの不確実性解析の結果を示す前に、H-ADCP計測とDIEX法に基づく本流量モニタリングシステムの精度検証結果を記述する. 図-5は本システムによる流量推定結果の時系列データを出水時(2014/10/6-7と2015/9/11)と大潮時(2014/11/7)、小潮時(2015/12/4)に分けて表示している. 図中には、ADCPによる検証用流量観測結果も合わせて表示してい



る. ADCP観測では一往復の流量平均値を採用している. また,当該観測サイトには海水遡上は見られなかったことを確認している. これより,本システムは,出水時及び大潮・小潮時における流量の変化を良好に捉えており,推定値と観測値は概ね一致している様子が伺える. このように本システムはH-Q式に頼らず自動・無人・連続的に流量算出が可能であるため,感潮域のようにH-Q式が適用できない観測サイトにおける流量観測に適した手法といえる.

本システムの流量推定精度を定量的に調べるために,流量観測値 Q_{obs} と推定値 Q_{cal} の相関図を図-6に示す.ここでは,DIEXの一様法の結果を採用している.また,図中には,推定誤差を分かりやすくするために,誤差 ± 5 , 10%を点線で表示している.これより,流量推定結果は概ね $\pm 10\%$ の範囲に入っている.流量推定値の相対誤差 $Err = (Q_{cal} - Q_{obs})/Q_{obs}$ のRMS値を求めた結果,一様法では二つの出水時では1.2%,大潮時では5.5%,小潮時では5.3%と極めて小さい.一様法ではなく三次スプライン補間法を用いた場合でも流量推定誤差のRMS値は $1.3\sim11\%$ となった.このように,感潮河川における流量モニタリングとしての本システムの推定精度は良好であることが示された.

(2) 流速計測誤差による影響

観測誤差が流速推定結果に及ぼす影響を把握するため、 誤差検証用の比例倍率 a_u が0(誤差無し)と40における 水深平均流速分布の観測値およびDIEX法による推定結 果(三次スプライン補間法採用)を図-7に示す.ここで は、出水時データ(2014/10/6 11:00)を例示している.

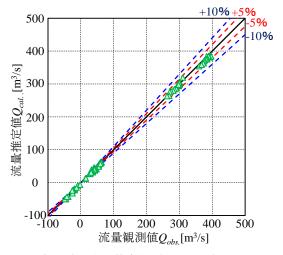


図-6 流量の観測値と推定値の相関関係 (DIEX法のうち 一様法を使用した推定結果を示す. 図中の赤・青点線は誤差±5, 10%を示す)

図中には、付加項 F_a の横断分布も合わせて表示している。なお、付加項 F_a における観測値は式(2)に流速観測値を代入して得られる F_a のことであり、計算値はこの F_a 観測値を内外挿して得られる結果である。これより、流速観測値では a_u =0よりも a_u =40の方が当然大きくばらつくが、DIEX法による流速分布推定結果は観測誤差に引きずられずに滑らかな分布形状となっていること、 a_u =0と a_u =40では大きな差異がないことが分かる。また、付加項 F_a に関しても、観測値は a_u =0と比べて a_u =40では非常に大きなばらつきとなるものの、計算値は a_u =0と40共にほぼ一致する結果となっている。このように F_a がほぼ一致するため、流速分布の推定値に大きな差が生まれな

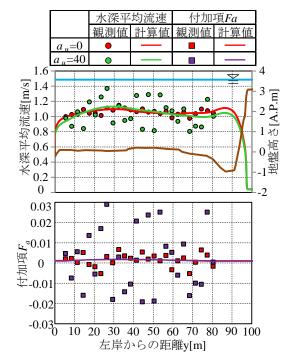


図-7 流速計測誤差が水深平均流速分布の推定値に及ぼす影響(2014/10/6 11:00)

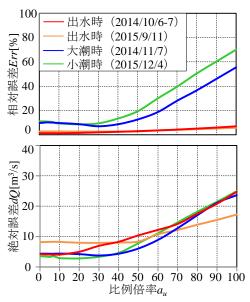


図-8 流速誤差と流量推定誤差の関係(上:流量の相対誤差 Err,下:絶対誤差 dQ,三次スプライン補間法を採用)

かったものと考えられる.以上より、DIEX法では流速 観測誤差の影響を減らしつつ流速内外挿操作が行われて いることが分かる.

幅広い誤差範囲における流速計測誤差が流量推定精度に及ぼす影響を把握するため、誤差検証用の比例倍率 a_u と流量推定誤差の相関図を図-8に示す。ここでは、比例倍率 $a_u=0\sim100$ に変化させ、各係数において実施した100パターンの乱数を与えて得られた流量推定誤差の中央値を示している。図中には、流量推定誤差として相対誤差Err及び絶対誤差dQ ($=|Q_{cal}-Q_{obs}|$) に分けて図示

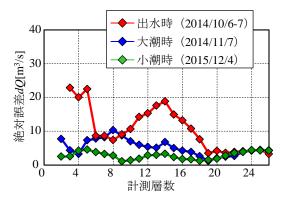


図-9 H-ADCP計測範囲と流量推定誤差の関係 (三次スプライン補間法)

している. これより、流量相対誤差Errは a_u <50までは20%以下ではあるが、それ以上では大潮・小潮時では右肩上がりで増加し、 a_u =100では60%前後まで到達する. 一方、絶対誤差dQは a_u <50まででは10m³/s以下であり、 a_u =100ではdQ=24~32m³/sである. 元々 (a_u =0)の誤差が3.5~4.2 m³/sであることを考えると、流量誤差の増加率は a_u =100では8倍となり、係数 a_u よりも大幅に低い、大潮時や小潮時のように元々の流量が小さいと相対誤差は50%を越えるが、絶対誤差で見れば20~30m³/sと小さい、これより、H-ADCP計測の過程で何らかの原因により流速計測結果に誤差を含んだ場合においても、本システムにより良好に流量を算出可能であることが示された.

(3) DIEX法の設定条件による影響

次に、DIEX法の設定条件が流量算出の不確実性に及ぼす影響を調べるために、まず、DIEX法におけるH-ADCP計測層数(=データ同化範囲)を $2\sim26$ 層まで変えた場合における流量推定精度を図-9に示す。ここでは出水時・大潮時・小潮時に分け、絶対誤差dQを表示する。これより、全体的には、データ同化範囲の大小に関わらず、DIEX法の流量算出精度は概ね良好であり、特に大潮・小潮時では誤差 10m^3 s以下となった。これより、本条件では、データ同化範囲の大小による不確実性は小さいものと考えられる。

次に、DIEX法のモデルパラメタであるマニングの粗度係数nを広範囲に変化させたときの流量推定誤差の相対値Errを図-10に示す。ここでは出水時データ(2014/10/6~7)のみの結果を表示する。粗度係数nを0.01~0.05[$m^{-1/3}$ s]と変化させた結果、n=0.025[$m^{-1/3}$ s]のときに誤差Errは最小値(=0.4%)となるが、上記のnの範囲では最大でも1.8%と流量推定誤差は極めて小さい。このような傾向は別の河川でも確認されており $^{9)}$ 、DIEX法では唯一のモデルパラメタである粗度係数の設定値に対する不確実性は小さいといえる。

最後に、入力条件である水位勾配を様々に変化させたときの流量推定値の相対誤差*Errを図*-11に示す、ここで

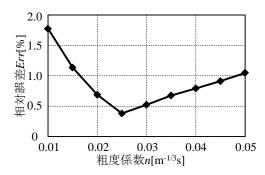


図-10 粗度係数nと流量推定誤差の関係(一様法採用)

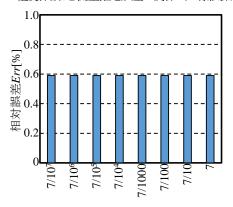


図-11 水位勾配 Iと流量推定誤差の関係 (一様法採用)

は、水位勾配の観測値の平均値(= $7/10^5$)を参考にして、その $10^2 \sim 10^5$ 倍の水位勾配における流量相対誤差Errを算出したものである。ここでも出水時($2014/10/6 \sim 7$)のみの結果を表示する。これより、水位勾配に係らず流量値やその相対誤差は変化していない。式(2)に対する差分式より、付加項 F_a の観測値は、水位勾配項と乱流拡散項、底面摩擦項から求められるが、乱流拡散項が一般に小さいため、水位勾配項の変化量(もしくは設定誤差)はそのまま F_a に反映することになる。底面摩擦項は流速観測値のみで決まるため、付加項と水面勾配項の和は変わらない。そのため、水位勾配項の設定の影響を極力受けずに流量算定が可能となっている。

4. 結論

本研究で得られた主な結論は以下の通りである.

- (1) H-ADCPによる流速計測誤差を与えた形で流量を求めた結果, DIEX法は流速観測誤差の影響を減らしつつ流速内外挿や流量推定を良好に行っている.
- (2) DIEX法の設定条件として、同化範囲や粗度係数、 水位勾配を変えて流量を求めた結果、それによる差 異は小さく、設定条件に起因する流量算定結果の不 確実性は小さい.

謝辞:本研究の一部は、国土交通省河川砂防技術研究開発公募地域課題分野(研究代表者:二瓶泰雄)によるものである。本研究のADCP観測とデータ解析には、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏、特に卒業生の根岸大介氏(現清水建設(株)に大変なご助力を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本河川協会編:改訂新版建設省河川砂防技術基準 (案)同解説 調査編,pp.33-58,1997.
- 3) 深見和彦, 天羽淳, 大手方如, 吉谷純一: 流量観測に関する技術基準の課題と新しい技術開発への対応, 土木技術資料, Vol.45, No.2, pp.22-29, 2003.
- 4) 二瓶泰雄, 酒井雄弘: 実河川洪水流における浮子の更正係数, 土木学会論文集 B, Vol.66, No.2, pp.104-118, 2010.
- Gordon, R. L.: Acoustic measurement of river discharge, J. Hydraulic Engineering, Vol.115, No.7, pp.925-936, 1989.
- 6) 岡田将治,森彰彦,海野修司,昆敏之,山田正:鶴見川感 潮域における H-ADCP を用いた流量観測,河川技術論文 集, Vol.11, pp.243-248, 2005.
- Fujita, I., Watanabe, H. and Tsubaki, R.: Development of a nonintrusive and efficient flow monitoring technique: The space time image velocimetry (STIV), International Journal of River Basin Management, Vol.5, No.2, pp.105-114, 2007.
- 8) 山口高志,新里邦生:電波流速計による洪水流量観測,土 木学会論文集,No.497/II-28,pp.41-50,1994.
- 9) 二瓶泰雄, 木水啓: H-ADCP 観測と河川流量計算を融合した新しい河川流量モニタリングシステムの構築, 土木学会論文集 B, Vol.63 No.4, pp.295-310, 2007.
- Nihei, Y. and Kimizu, A.: A new monitoring system for river discharge with H-ADCP measurements and river-flow simulation,, Water Resources Research , Vol.44 , W00D20 , doi:10.1029/2008WR006970, 2008.
- 11) 原田靖生・二瓶泰雄・北山秀飛・高崎忠勝: H-ADCP計測 と数値計算に基づく感潮域の河川流量モニタリング ~隅 田川を例として~,水工学論文集,Vol.52,pp.943-948, 2008
- 12) 柏田仁, 二瓶泰雄, 髙島英二郎, 山崎裕介, 市山誠: 力学的内外挿法 (DIEX法) に基づく「点」から「面」流速データ推定法の構築, 河川技術論文集, Vol.17, pp.23-28, 2011.
- 13) 柏田仁, 二瓶泰雄, 山下武宣, 山崎裕介, 市山誠:電波流速計による表層流速計測とDIEX法に基づく流量推定手法の提案, 河川技術論文集, Vol.18, pp.393-398, 2012.
- 14) 柏田仁,藤田一郎,本永良樹,萬矢敦啓,二瓶泰雄,中島 洋一,山崎裕介:統一された流速内外挿法に基づく様々な 流速計測技術の流量推定精度,土木学会論文集 B1 (水工 学), Vol.69, No.4, L739-I-744, 2013.

(2016. 4. 4受付)