

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

野本雄基¹・二瓶泰雄²・柏田仁³

¹京都大学大学院 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)

E-mail: nomoto.yuki.77m@st.kyoto-u.ac.jp

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

E-mail: nihei@rs.noda.tus.ac.jp

³パシフィックコンサルタンツ(株) つくば技術研究センター (〒300-4204 つくば市作谷642-1)

E-mail: jin.kashiwada@tk.pacific.co.jp

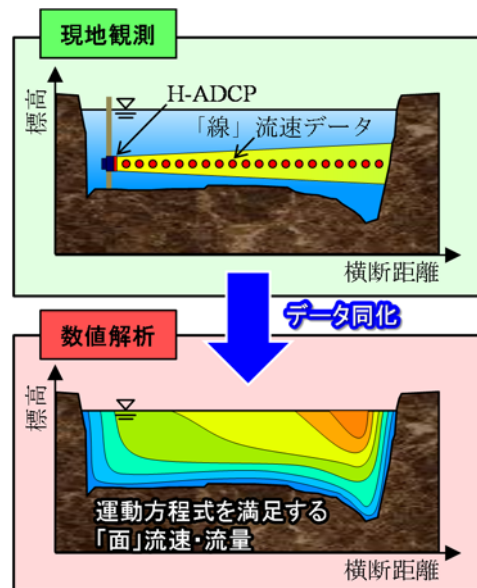
本研究では、H-ADCP計測とDIEX法(力学的内外挿法)による流量観測システムの不確実性解析を行った。現地観測において生じ得る計測誤差として、H-ADCPによる流速計測誤差を人為的に設定し、流速誤差が流量推定誤差に及ぼす影響を定量的に検証した。また、DIEX法の設定条件である入力条件やモデルパラメータ、H-ADCPの計測範囲(データ同化範囲)を様々に変化させて、それらが流量推定精度に及ぼす影響を評価した。その結果、DIEX法の数値計算アルゴリズムによって、流速観測誤差やDIEX法モデルの設定誤差が流量推定結果に大きく影響しないことが示された。すなわち、本システムは高い流量推定精度とロバスト性を有することが示された。

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は、急な出水時にはピークに間に合わない、超過洪水時には作業に危険が伴う、観測精度に難があるなど、様々な課題が指摘されている¹⁾。一方、今日では、流速計測の新技术として、ADCPやH-ADCP、STIV等の画像解析法、電波流速計が幅広く活用され、熟度が増している(例えは²⁾)。

流量観測技術は、上記の「点」・「線」流速計測技術と、「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。流量観測技術の高度化にあたって、流速計測技術のみへのアプローチには限界があるため、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、著者らが提案する力学的内外挿法(Dynamic Interpolation and EXtrapolation method, DIEX法)は、横断面内の「点」・「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算定する手法であり、河川流解析では稀なデータ同化手法を導入している(例えは³⁾、⁴⁾。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、流速の観測誤差や流速内外挿の誤差等により、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新技术を幅広く適用する上で必須である。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。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(DIEX法)上の設定条件である入力条件やモデルパラメータ、H-ADCPの計測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。

2. 研究方法

(1) 本システムの概要

図-1はH-ADCP計測とDIEX法に基づく河川流計算を融合した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、前者の超音波減衰は、高濁度時に顕著になり、洪水時には大きな課題となる。

DIEX法の基礎方程式に関しては、過去論文^{3) 4)}に既出であるが、後述の誤差解析結果の解釈に必要なため、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。

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

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

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、 $\bar{\quad}$ は水深平均値、 C_f は底面摩擦係数(= $gn^2/D^{1/3}$ 、 n : マニングの粗度係数)をそれぞれ表す。

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、図-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)、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³⁾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、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(図-3)。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。

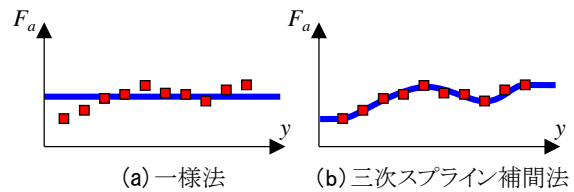


図-2 付加項 F_a の補間方法

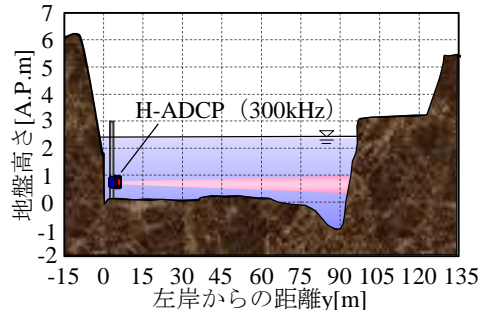


図-3 観測サイトの中川・吉川橋地点

表-1 検証用流量観測のデータセット

流況	イベント	日付	ADCPデータ数
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	$7/10^7 \sim 7$
モデルパラメータ	粗度係数 n	$0.010 \sim 0.050 [m^{-1/3}s]$
H-ADCP計測範囲	データ同化範囲	2~26層

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、流速横断分布と流量を得た。検証用観測は、表-1に示すように、出水時と低水時に行われた。

(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、②DIEX法の設定条件の誤差に着目し、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。

$$u = u_{obs.} + u_{ref.} \times a_u \times x \quad (3)$$

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、流速観測誤差が流量推定誤差に及ぼす影響を評価した。なお、本報では、紙面の都合から一部の結果のみを示している。

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）やモデルパラメータ（粗度係数 n ）、入力条件（水位勾配 I ）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。

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。流量観測値 Q_{obs} と推定値 Q_{cal} の相関図を図-4に示す。ここでは、DIEXの一様法の結果を採用し、洪水時・大潮時・小潮時の全ての結果を示している。これより、流量推定結果は概ね $\pm 10\%$ 以内の誤差に収まっており、逆流時～出水時まで高い精度を示した。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。このように本システムは $H-Q$ 式に頼らず自動・無人・連続的に高精度の流量算出が可能であり、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。

(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-5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 を指し、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り、 $a_u=0$ と $a_u=40$ で大きな差異がない。また、付加項 F_a に関しても、観測値は $a_u=0$ と比べて $a_u=40$ では非常に大きくばらつくが、計算値は $a_u=0$ と40ではほぼ一致する結果となる。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かったものと推察される。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。

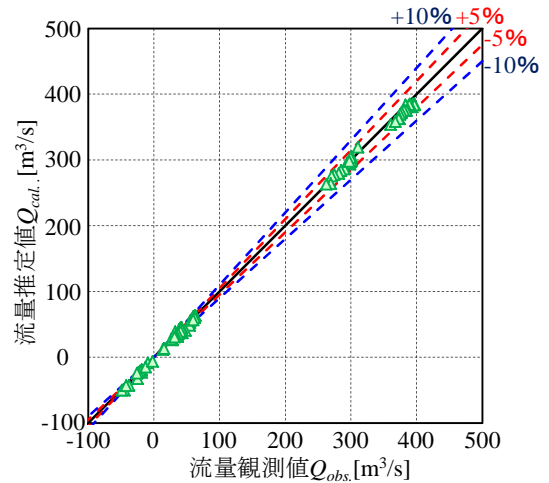


図-4 流量の観測値と推定値の相関関係（DIEX法のうち一様法を使用した推定結果を示す。図中の赤・青点線は誤差 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ を示す）

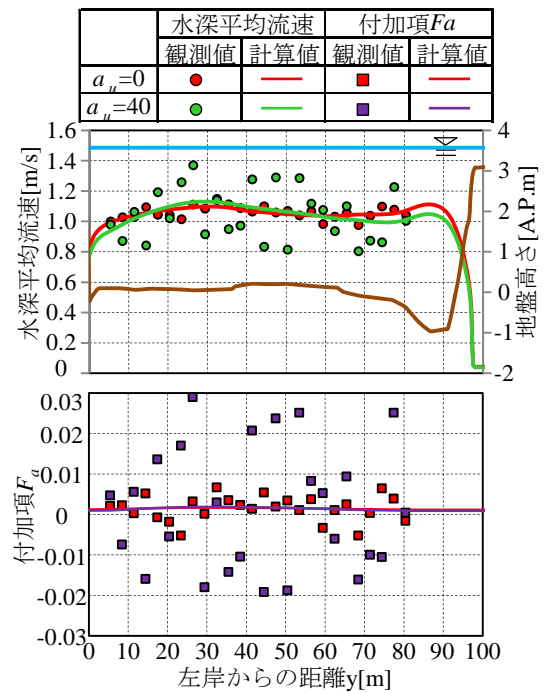


図-5 流速計測誤差が水深平均流速分布の推定値に及ぼす影響（2014/10/6 11:00）

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示す。まず、DIEX法におけるH-ADCP計測層数（＝データ同化範囲）を2～26層まで変えた場合における流量推定精度を図-6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 $10\text{m}^3/\text{s}$ 以下となった。これより、データ

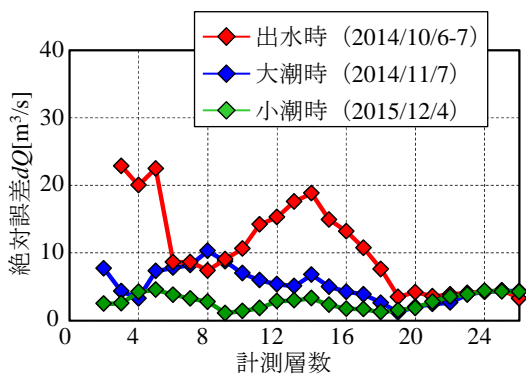


図-6 H-ADCP計測範囲と流量推定誤差の関係 (三次スプライン補間法)

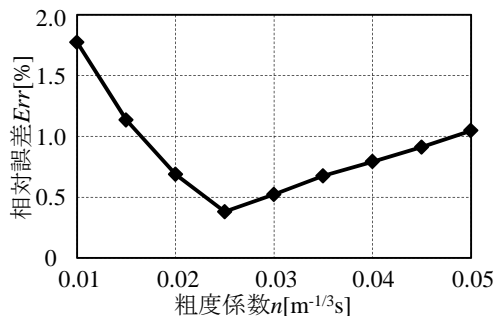


図-7 粗度係数 n と流量推定誤差の関係 (一様法採用)

同化範囲の大小による不確か性は小さいと考えられる。

次に、マニングの粗度係数 n を変化させたときの流量推定誤差の相対値 Err を図-7に示す。ここでは出水時(2014/10/6~7)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。同様の傾向は他河川でも確認されており³⁾、DIEX法では粗度係数の設定値に対する不確か性は小さいといえる。

最後に、水位勾配を観測値の平均値(=7/10⁵)を参考にして、その10⁻²~10⁵倍の水位勾配における流量相対誤差 Err を算出したところ、水位勾配に係らず流量値やその相対誤差は変化しなかった。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である。

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か性は小さい。

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) 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.
- 2) Gordon, R. L.: Acoustic measurement of river discharge, J. Hydraulic Engineering, Vol.115, No.7, pp.925-936, 1989.
- 3) 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.
- 4) 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, I_739-I-744, 2013.

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

Yuki NOMOTO, Yasuo NIHEI and Jin KASHIWADA

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.