

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)	所属	役職	
	にへい やすお 二瓶 泰雄	東京理科大学 理工学部土木工学科	准教授	
②研究テーマ	名称	感潮区間に適した河川流量連続モニタリングシステムの開発		
	政策領域	[分野]	地域課題分野 (河川)	融合技術 (リモートセンシング、非破壊検査、認知行動学 等)
		[公募課題]		
③研究経費 (単位: 万円)	平成26年度	平成27年度	平成 年度	総合計
※端数切り捨て。	245万円	238万円		484万円
④研究者氏名 (研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)				
氏名	所属・役職 (※平成28年3月31日現在)			
大槻 順朗	東京理科大学・助教			
永野 博之	東京理科大学・助教			
⑤研究の目的・目標 (申請書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)				
<p>本研究では、感潮区間に適した流量連続モニタリングシステムの開発と汎用化を試みる。ここでは、一台で流速横断分布計測が可能な H-ADCP による流速計測技術と力学的内外挿法 DIEX 法 (Dynamic Interpolation and EXtrapolation method) に基づく数値解析技術を融合した流量観測法をベースとする。今年度の具体的な研究開発内容は以下のとおりである。</p> <p>1) 海水遡上は無いが $H-Q$ 関係が成り立たない中川の流量観測基準点 (吉川) に本モニタリング手法を適用し、長期連続流量モニタリングを開始する (H26～)。</p> <p>2) 本観測法における H-ADCP の適切な配置や台数、設定を検討する。また、H-ADCP 観測法の変更に合わせて DIEX 法の高度化を行う。</p> <p>3) 低水時・洪水時にて ADCP 等を用いた検証用流量観測データを収集し、本手法の精度検証を行い、本手法の流量推定誤差を 5%以下とすることを目標とする。</p>				

⑥研究成果

(様式 E-10と同じ内容について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

1. はじめに

時々刻々と変化する河川流量は、一般には、各地点の水位流量曲線（H-Q式）と水位観測値から算出される。それに対して、感潮河川では、潮汐の影響により、流速鉛直分布の変化が大きく、かつ、水位と流量が一意的の関係にならず、H-Q式の適用は困難である。そのため、一般的な流量観測点は、河口から離れた順流域にしか設けられておらず、河口を含む感潮域の流量データは上流側の順流部の流量値を合算して推定する他にない。このようなことから、感潮河川において新たな流量モニタリングシステムを確立することは急務の課題である。

現在の流量観測技術としてはADCPを用いた方法が最も注目を浴びているが、ADCP流量観測を行う場合には、一般的に横断面内にてADCPを何らかの方法で移動させる必要があり、自動連続計測への適用は非現実的と言える。一方、同じドップラー技術による水平設置型超音波ドップラー流速分布計H-ADCP（Horizontal-ADCP）は、わずか一台で固定した高さの流速横断分布を自動連続的に計測することが可能であり、最適な機器の一つである。また、H-ADCPでは「線」流速データのみの計測を行うため、流量算定に必要な「面」流速データを推定するための数値解析技術（力学的内外挿法、Dynamic Interpolation and Extrapolation method, DIEX法）による次世代流量観測システムが構築されている。このシステムを順流域では江戸川中流、感潮河川では隅田川・荒川・相模川の流量計測にそれぞれ適用した結果、洪水流を含む長期間の流量推定精度が概ね良好であることが示されている。このように、H-ADCP計測とDIEX法による数値シミュレーションを融合した流量モニタリングシステム（以下、本システムとする）はこれまでに様々な河川に適用され、その妥当性や有用性は幅広い条件下で検証されており、特にH-Q式の使えない感潮域での流量観測においては極めて有望であると言えるが、本格的な実用化には至っていない。

本研究では、本システムをH-Q式の使えない感潮河川である中川に適用し、その有用性を検討すると共に、本システムの実用化を図ることを試みる。本システムによる流量推定結果と別途行われたADCP移動観測法による流量観測結果を比較し、感潮域の流量モニタリングに対する本システムの有用性を検討する。

2. 本流量モニタリングシステムの概要

本流量モニタリングシステムは、図-1に示すように、現地観測によるH-ADCP「線」流速計測と、DIEX法に基づく「面」流速・流量算出の2つから構成されている。前者では、低水路左岸側にH-ADCPを設置した様子を模式的に示している。一方、後者では、ある横断面を計算対象として、三次元ナビエ・ストークス方程式における移流項や非定常項を省略し、代わりに付加項 Fa を加えた次の基礎式を用いる。

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

ここで、 u は主流方向流速、 A_H と A_V は水平・鉛直渦動粘性係数、 g は重力加速度、 I は水面勾配、 D は水深をそれぞれ示している。サブシステム①によって得られた流速データを数値シミュレーションに同化する際には、この付加項 Fa を介して行っており、式(1)を水深平均した次式を用いている。

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

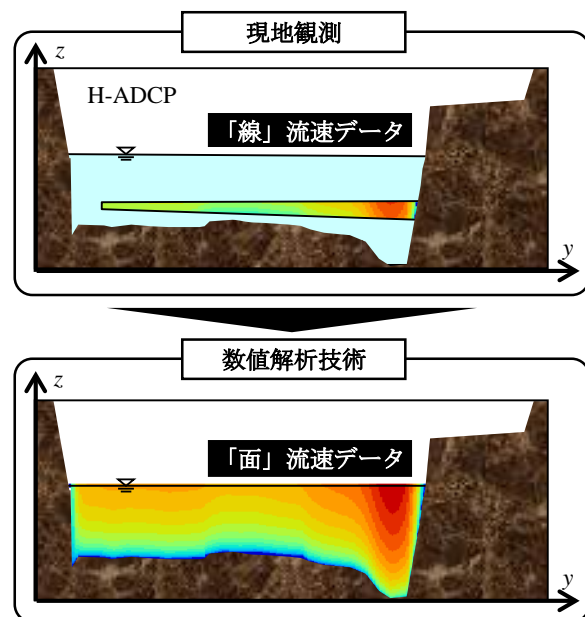


図-1 本流量モニタリングシステムの概要

⑥研究成果 (つづき)

ここで、 $\overline{A_H}$ は水深平均水平渦動粘性係数、 C_f は底面摩擦係数 ($= gn^2/D^{1/3}$, n : マニングの粗度係数) である. なお, 付加項 Fa は二瓶・木水 (2007) と同様に鉛直方向に一様として与えている. なお, 計算方法等の詳細については, 著者らの論文を参照されたい

3. 中川における流量計測の概要

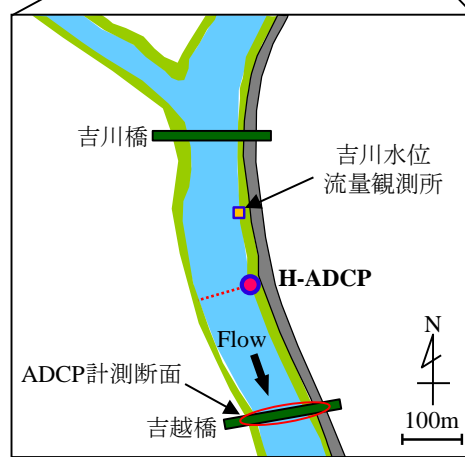
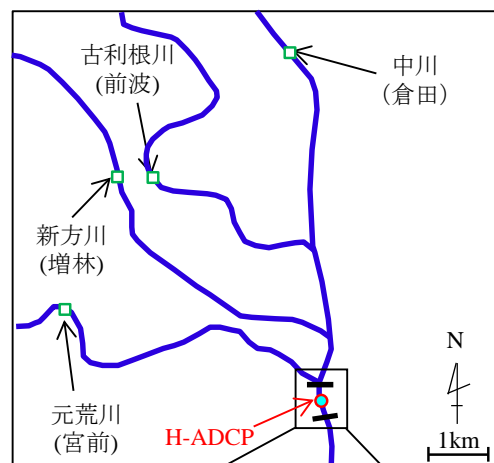
(1) 現地観測の概要

対象サイトは, 江戸川と荒川に挟まれた位置にあり, 東京湾に流入する中川である. 観測地点は, 図-2 (a) に示す吉越橋より約 200m 上流部 (河口から約 30.5km) であり, 潮汐の干満の影響を受ける感潮域に位置する. また, この地点の横断面形は同図 (b) に示すように, 低水路幅約 95m, 右岸側に高水敷が存在する複断面河道となっているが, 高水敷まで冠水することは年に数回ほどしか無く, 基本的に単断面河道と見なされる. この横断面の低水路左岸側において, 同図 (b) のように, 周波数 300kHz の H-ADCP (Workhorse 300kHz, Teledyne RDI 製) を高さ A.P. +0.8m, 左岸からの距離 0.5m の位置に右岸側を向くように設置した. H-ADCP の設定としては, 層厚は 3.0m, 層数は 35, 不感帯幅は 5.18m, サンプル間隔は 10 分としている. 観測期間は 2014 年 7 月 17 日から現在までである.

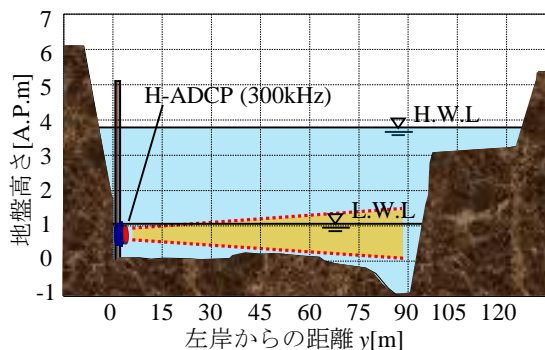
(2) 計算条件

DIEX 法における計算条件について, ここで記述する. 流速・水位の計測値を用いて DIEX 法により流量を推定する. 解析対象期間は 2007 年 7 月 17 日から 11 月 8 日までとし, この期間中には, 台風 18 号による出水が発生した. この期間の最高水位は図-2 (b) に示すとおりであり, 高水敷まで横断面全体が冠水した. データ同化範囲としては, H-ADCP により計測される反射強度が大きく変化する手前までの範囲とし, 具体的には最大範囲を 5.68m (第 1 層) $\leq y \leq 80.68\text{m}$ (第 26 層) とする. また, この範囲内で反射強度の閾値 ($=150 \text{ count}$) を上回るデータしか用いないこととする. また, 計算格子幅は, 横断方向に関しては, 0.5m とする. 計算格子数は, 鉛直方向に 100, 横断方向 289 としている. マニングの粗度係数 n は低水路, 高水敷それぞれ $0.035\text{m}^{1/3}\text{s}$, $0.040 \text{ m}^{1/3}\text{s}$ とする.

H-ADCP による流速データを同化データとして取り込み, そこから計算される付加項 Fa の内外挿操作としては, 3 次関数的に近似する「3 次スプライン補間法」と付加項を横断方向に一様とする「一様法」が挙げられる. ここでは, 3 次スプライン補間法を用いる Case1, 一



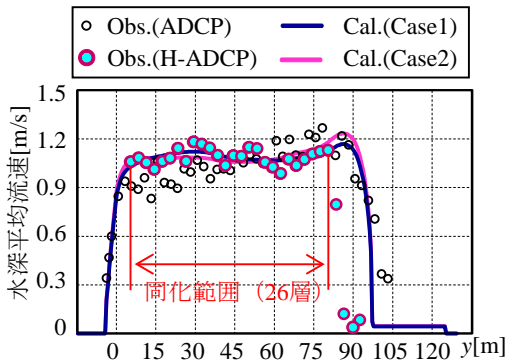
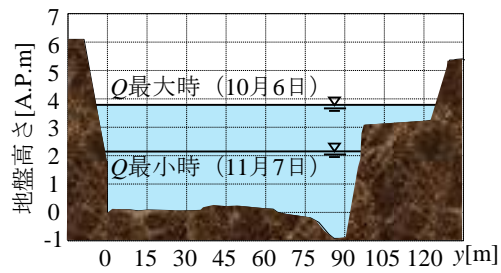
(a) 平面図



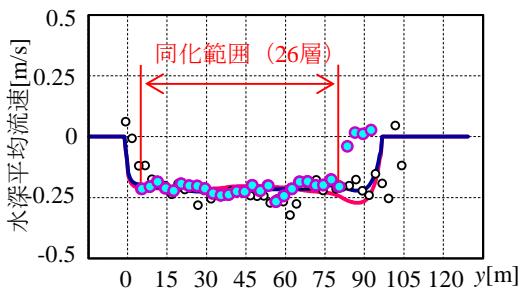
(b) 横断面図

図-2 観測サイト (中川・吉越橋)

様法を用いる Case2 とする.

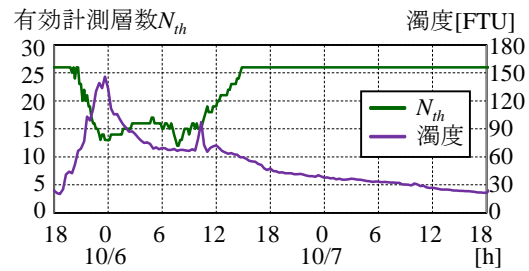
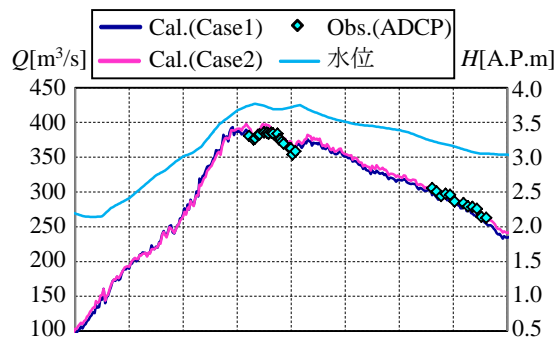


(a) 出水時 (2014年10月6日 15:10)

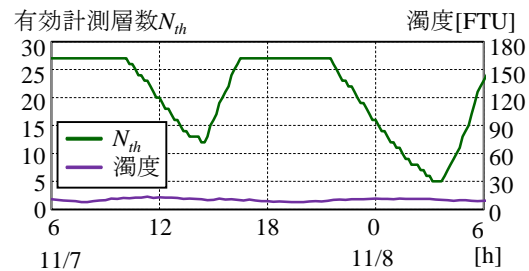
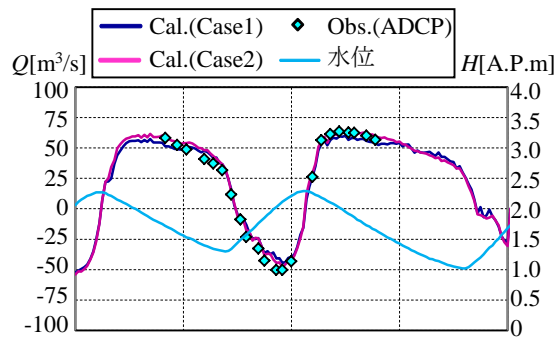


(b) 低水時 (2014年11月7日 17:40)

図-3 水深平均流速横断分布の観測値と推定値の比較



(a) 出水時 (2014年10月6~7日)



(b) 低水時 (2014年11月7日)

図-4 流量 Q ・水位 H ・有効計測層数 N_{th} ・濁度の時系列データ

⑥研究成果 (つづき)

4. 結果と考察

(1) H-ADCP の流速推定精度

H-ADCP を用いた本システムによる流速分布の再現性を調べるために、本システムと検証用 ADCP による水深平均流速の横断分布を比較したものを図-3 に示す。ここでは、H-ADCP と ADCP 計測それぞれ同時刻に計測されたものが示されている。また、同図 (a) には出水時、同図 (b) では低水時における流速横断分布をそれぞれ示している。これより、3 次スプライン補間法を用いる場合

(Case1) と一様法を用いる場合 (Case2) どちらにおいても、水深平均流速の横断分布は概ね一致

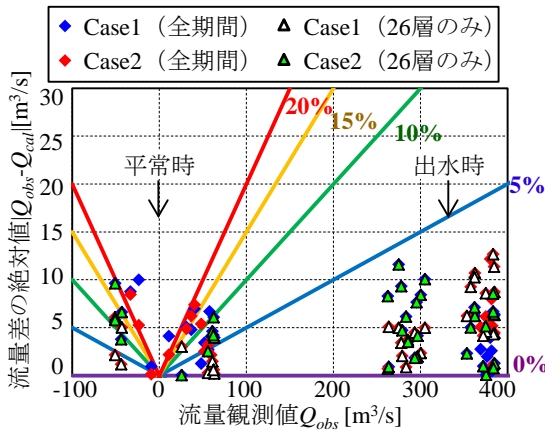


図-5 流量推定値と観測値の比較

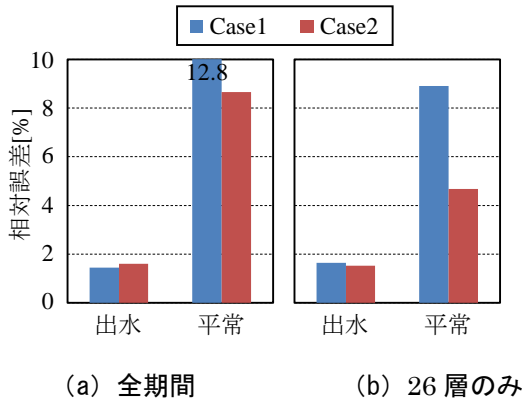
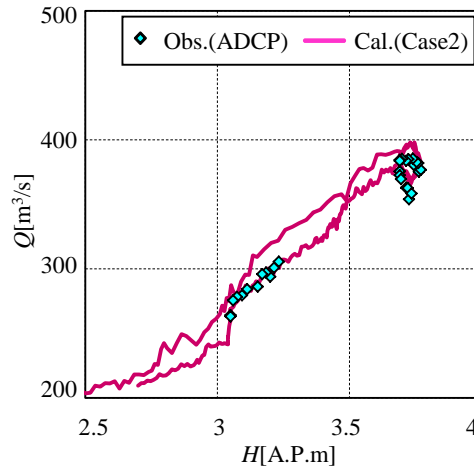
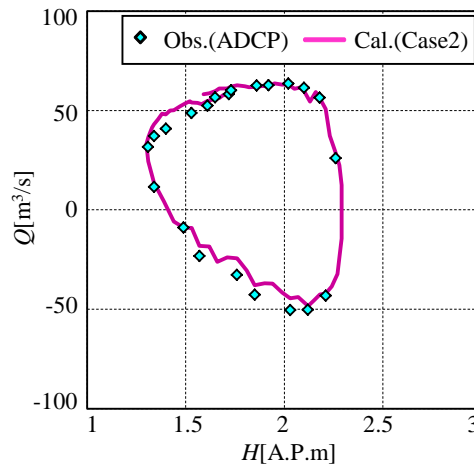


図-6 流量推定値と観測値の相対誤差



(a) 出水時 (2014年10月6~7日)



(b) 平常時 (2014年11月7日)

図-7 感潮域における H-Q 関係

⑥研究成果 (つづき)

している. このことから、本システムを用いることにより、どちらの補間方法においても感潮域特有の流速の逆流を精度良く再現できることが示された.

(2) 本システムの流量推定結果

感潮河川である中川における本システムの流量推定精度を調べるために、本システムによる流量推定値 Q_{cal} と検証用データとして ADCP 移動観測により取得される流量観測値 Q_{obs} の結果を図-4に示す. これより、出水時には高濁度、平常時には低水位により有効計測層数 N_{th} が小さくなっているが、3次スプライン補間法を用いる Case1、一様法を用いる Case2 どちらにおいてもその流量推定値は観測値と概ね一致しているが、出水時、平常時どちらにおいても Case1 より Case2 の方がやや精度が高い. より詳細に見るために、流量推定値と観測値の相関図を図-5に示す. このように出水時には概ね相対誤差5%以下となっているが、平常時には、元の流量が小さいため10%を上回る結果が得られている. ただし、流量誤差の絶対値は $10\text{m}^3/\text{s}$ を上回ることは無く、絶対的な誤差は小さいといえる. そこで、全機関の相対誤差の RMS 値を求めた結果 (図-6)、全期間では、出水時は Case1,2 共に2%以下、低水時には Case2 で約8%となっており、概ね良好な結果が得られた.

さらに、感潮域における H-Q 関係を比べたところ、低水時、出水時共に、大きなループを描くが、その様子を本システムは良好に再現できている (図-7). このように、本システムは、水位流量曲線が1価の関数とならない感潮域においても精度よく流量計測ができていることが明らかとなった.

⑥研究成果 (つづき)

5. 本システムによる流量観測値の不確実性解析

(1) 解析内容

本システムの流量推定値の不確実性を把握するべく①観測誤差 (流速, 水深), ②DIEX 法の入力条件 (水位勾配 I) やモデルパラメタ (粗度係数 n), H-ADCP 計測範囲の影響を調べる. ①では, 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 ($=0.61[\text{cm/s}]$), a_u は流速用の係数 ($=1\sim 100$), x は乱数 ($=-1\sim 1$) でありモンテカルロ法により与える. 図-8 (a) 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. 同様に水深も計測精度 ($=2\text{cm}$), 係数 $a_h=1\sim 40$ と解析し一例を図-8 (b) に示す. ②では DIEX 法の入力条件 (水位勾配) やモデルパラメタ (粗度係数等), H-ADCP 計測範囲 (データ同化範囲) を様々に変化させ流量推定誤差を調べた. この解析を ADCP による検証用データが取得された期間を対象として行う.

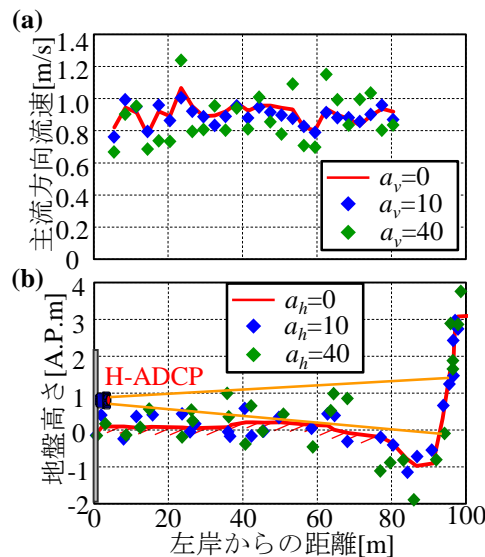


図-8 観測誤差を含むデータの与え方
(流速誤差(a), 水深誤差(b))

(2) 結果

1) 流速・水深誤差が流速推定結果に及ぼす影響

流速誤差が流速分布算出結果に及ぼす影響を把握するため, 流速誤差の比例係数 $a_u=0$ (誤差無), 40 における水深平均流速横断分布の観測値と DIEX 法の推定結果を図-9 (a) に示す. ここでは出水時データ (2014/10/6 11:00) を用いる. これより流速観測値では $a_u=0$ よりも $a_u=40$ の方が大きくばらつくが, 流速計算値については両者に大きな差はない. このように DIEX 法では流速誤差を減らす形で流速内外挿が実施できている.

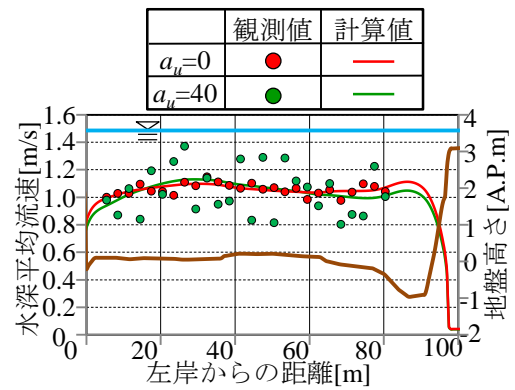
一方, 水深誤差の比例係数 $a_h=0, 40$ での水深平均流速横断分布の観測値と計算値 (出水時, 2015/9/11 13:40) を図-9 (b) に示す. 図中には地盤高の観測値 ($a_h=0, 40$) も示す. ここでの流速観測値 (同化データ) については, 用いる H-ADCP 観測結果は両ケース ($a_h=0, 40$) で同じであるが, 水深平均値に直す際に水深差に起因して流速値が異なる. これより, $a_h=40$ における水深データのばらつきに応じて流速観測値も上下し, 結果として, 流速横断分布の推定結果が $a_h=0$ と 40 では異なる. このように, 前述の流速誤差だけのケースよりも, 水深誤差のケースでは水深と流速の二重の誤差が含まれることになる.

2) 流速・水深誤差と流量推定精度の関係

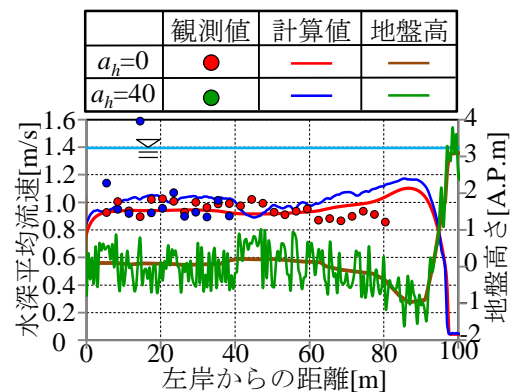
流速・水深の観測誤差が流量推定精度に及ぼす影響を調べるために、流速・水深誤差の係数 a_u , a_h と流量推定誤差の相関図を図-10に示す。ここでは、 $a_u=0\sim 100$, $a_h=0\sim 40$ とし、各係数における100ケースの流量推定誤差の中央値を表示する。また、対象データを出水・大潮・小潮時に分ける。これより、流速誤差では a_u が約 50 までは流量推定誤差は $10\text{m}^3/\text{s}$ 以下となり、 $a_u=100$ ではその誤差が $24\sim 32\text{m}^3/\text{s}$ となる。元々 ($a_u=0$) の誤差が $3.5\sim 4.2$ 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。これはDIEX法では流速観測誤差を考慮した形でデータ同化を行うためであると考えられる。一方、水深誤差に関しては、大潮時や小潮時における流量誤差は概ね低いが ($<15\text{m}^3/\text{s}$)、出水時では誤差が大きく $a_h=40$ では $43\text{m}^3/\text{s}$ になる。これは、水深誤差は前述のように二重の誤差が含まれることに加えて、水位 $3.0\sim 4.0\text{A.P.m}$ の出水時では水深誤差により水際位置が大きく変化する影響を受ける。これより、水深誤差の方が流量誤差よりも本システムの不確実性が増加する。

3) DIEX法の計算条件の影響

図-11は、DIEX法におけるH-ADCP計測層数 (=データ同化範囲) を1~26層まで変えた場合における流量推定精度を示す。ここでも出水・大潮・小潮時に分けて表示する。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、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。



(a) 流速誤差 (2014/10/6 11:00)



(b) 水深誤差 (2015/9/11 13:20)

図-9 観測誤差が水深平均流速分布の推定値に及ぼす影響

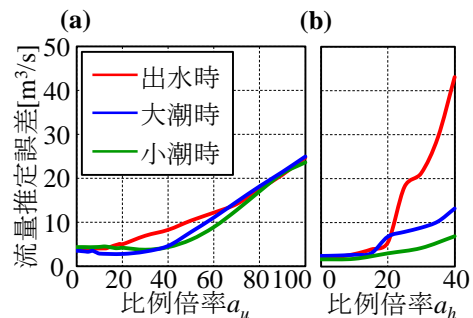


図-10 流速誤差(a), 水深誤差(b)と流量推定誤差の関係図

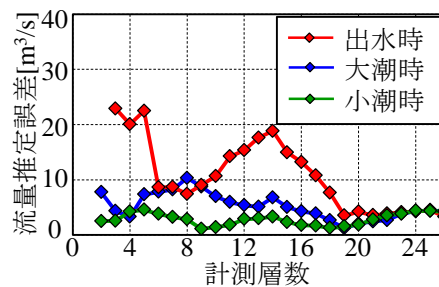


図-11 H-ADCP計測層数毎の流量推定精度

⑦研究成果の発表状況

- ・国際会議:IAHR2015へ論文掲載(査読付き)・発表
Yasuo Nihei, Daisuke Negishi and Jin Kashiwada: Continuous monitoring of river discharge in a tidal reach with an H-ADCP measurement and numerical simulation, Proc. of the 36th IAHR World Congress, 2015 (USB).
- ・2016年度河川技術シンポジウムに論文投稿(査読付き), 発表(一次審査通過, 二次審査中)
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, Vol.22, 2016(投稿中)。
- ・2016年度土木学会全国大会論文要旨投稿, 発表(査読無)
野本雄基・二瓶泰雄・柏田仁: H-ADCPとDIEX法の流量観測法における不確実性解析, 土木学会年次学術講演会講演要旨集, Vol.71, 2016(印刷予定)
- ・土木学会論文集(B-2)もしくはWater Resources Researchに投稿(予定)
タイトル: A new monitoring system of H-ADCP and DIEX method for river discharge in tidal rivers
- ・特許に関しては, 以下を取得している。
出願番号: 特願 2006-222683
発明の名称: 流量算出システム, 流量算出プログラム及び流量算出方法
タイトル: Continuous monitoring of river discharge in a tidal reach with an h-adcp measurement and numerical simulation
- ・研究開発成果としての事業化、製品化などの普及状況
DIEX法のソフトウェア化(“DIEX-FLOW”)の準備を進め, 現在, パシフィックコンサルタンツ(株)がH28年4月に販売を開始した。本研究の成果をDIEX-FLOWに組み込んでいく予定である。
- ・企業とのタイアップ状況:
いくつかの建設コンサルタンツと共同研究しており, 研究成果を上述の国土交通省発注業務に適用することによって, 成果の普及を行っている。

⑧研究成果の社会への情報発信

- ・マスコミなどへの情報発信はなし。
- ・研究代表者が, 国交省・関東地方整備局の関東地方河川技術懇談会(H27年12月8日開催)にて, 「H-ADCPを用いた流量モニタリング技術の展開」というタイトルで講演を行った。本懇談会には, 関東地方の学識経験者と各河川事務所所長が参加していた。

⑨表彰、受領歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

2015年度国土技術開発賞入賞

⑩研究の今後の課題・展望等

本研究期間では、当初の予定通り、感潮河川である中川の流量観測基準点において、本モニタリングシステムによる流量観測を開始し、1年半以上で継続した。その間、原因不明のデータ欠測を除き、問題なく流量の自動連続観測を遂行できた。

また、本システムの精度検証を低水時・出水時に行い、概ね良好な推定精度であることが明らかとなった。また、本観測地点では、水位と流量がループを描く典型的な感潮河川となっているが、その様子を本システムはほぼ完全に再現することができており、感潮域のようなH-Q式の適用が難しい地点においても十分ロバストで高精度な流量観測システムであることが検証された。また、流量推定値の不確実性解析を行い、本システムの核であるDIEX法は観測誤差やパラメータの不確実性の影響を減らした形で高精度を保持して流量算出が可能となっていることが示された。

ただし、より広範な条件下（H-ADCPの配置や台数、設定条件やDIEX法の設定）を変化させた検討は十分行えておらず、様々な河川における最適条件の選定方法の確立やそのマニュアル化が課題となる。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

本研究の成果は、河川管理上必要となる流量観測にて実際に適用される可能性を十二分に含んでいる。特に、中川のように、感潮域や河口堰の背水区間では、水位と流量の一価の関係が得られないため、従来の水位流量曲線（H-Q式）に基づく流量観測には限界がある。本流量モニタリングシステムは、H-ADCPによる流速計測技術と、DIEX法による流速内外挿技術の融合により、H-Q式に頼らずに流量の自動連続モニタリングが可能となる。そのため、これまで流量観測ができなかった地点も含めて流量観測が実現できる。

また、本モニタリングシステムは、浮子観測などと異なり、洪水時に河川に出掛けて観測を行う必要が無い。さらに、「H.W.L.を越える洪水時に危険で観測作業ができない」という状況でも本モニタリングシステムでは観測を行うことが可能となる。以上のことから、これまでの観測方法の限界を打破しつつ、リーズナブルなコストで高精度な流量観測が実現できることから、本システムの適用性は十分高いと思われる。

さらに、本モニタリングシステムの核であるDIEX法は、流速観測誤差や、モデルパラメータ、入力条件（水位勾配など）の不確実性の影響を減らした形で流量算出ができており、その意味では、汎用性が高い手法であるといえる。そのため、この手の業務に不慣れが民間業者にも簡便に使えるような状況になっており、河川流量観測業務にも取り込みやすいものと考えられる。