

2台のH-ADCP計測とDIEX法に基づく 複断面河道の洪水流量計測 ～台風1112号出水を例に～

A RIVER-DISCHARGE MONITORING IN A COMPOUND CHANNEL
WITH MEASUREMENTS OF TWO H-ADCPs AND COMPUTATION
BY DIEX METHOD: AN EXAMPLE OF FLOODING OF TYPHOON NO.1112

御厨純¹・二瓶泰雄²・鈴木大樹¹・中山朝陽³

Jun Mikuriya, Yasuo NIHEI, Taiki SUZUKI and Tomoharu NAKAYAMA

¹学生員 学(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²正会員 博(工) 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科(同上)

³非会員 東京理科大学 理工学部土木工学科(同上)

A discharge monitoring system with velocity measurement by two H-ADCPs and numerical simulations using DIEX method was applied to flood-discharge monitoring in a compound channel in Edogawa River under flooding due to typhoon no.1112. In the present system, we used two H-ADCPs in which one was installed in the main channel and the other in the floodplain. The results indicate that the calculated velocity and discharge using the present method with two H-ADCPs give good agreements with the field data measured by ADCP. The relative errors of calculated discharge by the present method using two H-ADCPs are appreciably lower than that using a H-ADCP. This fact demonstrates that the present method using two H-ADCPs are useful to monitor flood discharge in a compound channel.

Key Words : discharge measurement, H-ADCP, DIEX method, compound channel, Edogawa River

1. 序論

近年の八ッ場ダム建設是非をめぐる議論を始めとして、「ダムによらない治水」の検証が全国各地の河川で行われている¹⁾。そこでは河川管理上最重要項目である「基本高水」の検証が必要となることもあり、このために河川における流量観測技術の精度検証・高度化や新計測技術の導入は極めて重要である。

流量観測の新計測技術としては ADCP が最も注目を浴びているが²⁾、ADCP による流量観測を行うには、一般に、河川横断面内にて ADCP を何らかの形で移動させる必要があり、自動連続計測への適用には非現実的である。一方、同じドップラー技術に基づく水平設置型超音波ドップラー流速分布計 H-ADCP (Horizontal ADCP) は、わずか一台である高さの流速横断分布を計測でき、自動連続計測に最適な機器の一つである³⁾。また、H-ADCP では「線」流速データしか計測できないため、流量算出に必要な「面」流速データを推定するための新たな数値解析

技術として力学的内外挿法 (Dynamic Interpolation and EXtrapolation method, DIEX 法) が構築されている^{4), 5)}。

この 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) はこれまでに様々な河川の流量計測に適用され、その妥当性や有効性が幅広い条件下で検証されている^{4) ~8)}。今後、本システムの適用範囲を更に拡張する上では、我が国の一般的な河道断面形である複断面河道の洪水流量モニタリングに本システムを適用して行くことは必須であり、その基礎的検討を江戸川で既に行っている (岩本・二瓶⁸⁾、以下前報と呼ぶ)。しかしながら、前報では H-ADCP1 台を低水路のみに設置していたが、幅数百 m の複断面河道全体にわたり流速計測するのは非現実的であり、本システムの精度向上のためには複断面河道内における H-ADCP の設置・設定条件 (台数、周波数、計測モード等) を検討することは必須である。

著者らは、本システムに基づく複断面河道流量観測の高精度化・汎用化を目指して、複断面河道を有する江戸

川において、低水路1台、高水敷1台の計2台のH-ADCPを2009年に設置し、高水敷が冠水する程度の中・大規模出水の観測に備えていた。紀伊半島を中心に大雨をもたらした台風1112号接近により、江戸川においても中規模出水が発生した。本論文では、この台風1112号出水を例として、2台のH-ADCP計測を用いる本システムによる複断面河道の洪水流量モニタリングを行い、本システムの有効性を検討することを試みる。この出水時では、同時にADCP観測⁹⁾を行い、本システムの流速・流量推定精度を検証する。さらに、ここで得られた結果を活用して、擬似的にH-ADCPの設置・設定条件を変化させ、それらが流速・流量推定精度に及ぼす影響も検討する。

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、①H-ADCPによる「線」流速計測と、②DIEX法に基づく「面」流速・流量算出の2つのサブシステムから構成されている^{4)・5)}。サブシステム①のH-ADCP計測では、上述したように、低水路1台、高水敷1台を設置した状況を模式的に示している。この場合、本システムでは、濁水時から大出水時まで計測することを念頭にしているため、低水路に設置されるH-ADCPの計測位置は、常時冠水する高さとする必要があり、このH-ADCPの計測範囲は、一般に低水路内に限定される。そのため、高水敷上の流速データを取得するために、高水敷にもH-ADCP1台を設置する状況を想定している。この場合でも、H-ADCPからの距離が離れると超音波ビームが水面・底面に当たるため、高水敷全体にわたり流速計測するのは難しくなるが、コスト面を考慮して、ここでは高水敷1台を採用している。

一方、②の数値解析サブシステムでは、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 は水深をそれぞれ表す。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。

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

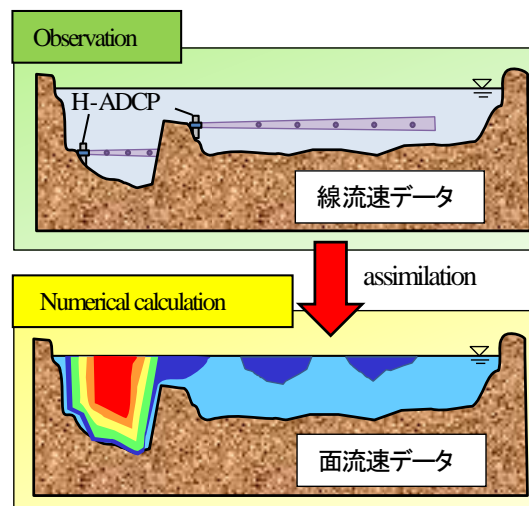


図-1 本流量モニタリングシステムの概要

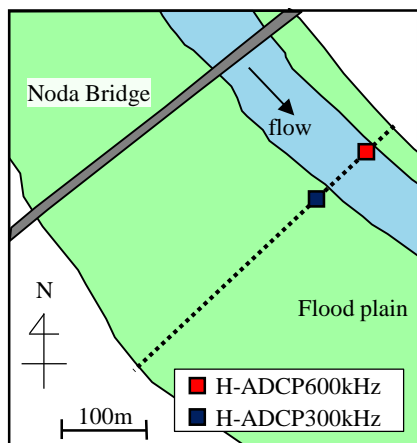
ここで、 $\overline{A_H}$ は水深平均水平渦動粘性係数、 C_f は底面摩擦係数(= $gn^2/D^{1/3}$, n : マニングの粗度係数)である。なお、付加項 Fa は二瓶・木水⁴⁾と同様に鉛直方向に一樣として与えている。なお、前報では、高水敷に繁茂する植生群落の効果を考慮するために、式(1)、(2)中に植生抵抗項を考慮していたが、本論文ではこの項を含んでいない。植生抵抗項中のパラメータ(植生密度)を現地植生分布に基づいて精緻に与えるのは容易ではなく、高水敷の流速計測を行っていない前報では、その植生パラメータをチューニングする必要があった。一方、高水敷にもH-ADCPが設置されている本論文では、H-ADCPデータを数値解析に同化することにより、付加項を介して植生効果を取り込むことができるため、植生抵抗項を含まない基礎式を用いることができ、それが前報よりも本システムが大きく進展している部分である。

3. 本システムに基づく江戸川洪水流量モニタリングの概要

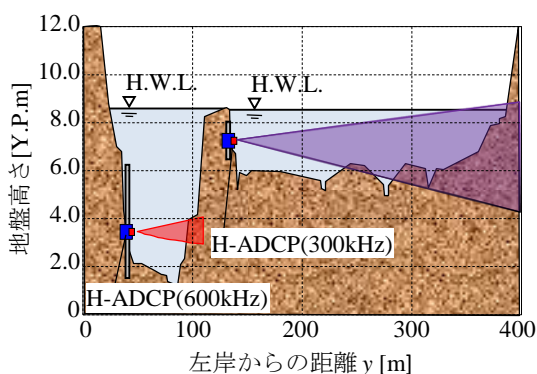
(1) 現地観測の概要

観測対象サイトは、著者らが長年流量計測を行っている江戸川中流部・野田(河口から39km)であり、その平面図と横断面図を**図-2**に示す。この横断面では、堤間幅が約400m、低水路幅が約100mであり、高水敷は右岸側に大きく広がっている。また、右岸側高水敷はゴルフ場として利用されており、樹木が点在すると共に、ヨシ群落が存在している¹⁰⁾。出水前後の横断測量を行ったところ、顕著な河床変動は観測されなかった。

この横断面において、**図-2**に示すように、H-ADCPを低水路と高水敷にそれぞれ1台ずつ設置する。機種としては、低水路にはH-ADCP600kHz、高水敷には同300kHz(共に、Teledyne RDI製)である。低水路では、既設の水位標にH-ADCPを右岸向きに固定し(左岸側堤防天端からの横断距離=46.1m、高さ=3.41Y.P.m)、高水敷では、単



(a) 平面図



(b) 横断面図

図-2 観測サイト (江戸川野田橋)

管を組み立てた架台を設置し、それにH-ADCPを同じく右岸向きに取り付ける ($y=137\text{m}$, $z=7.23\text{Y.P.m}$)。設置期間としては、低水路では2006年6月6日から現在まで、高水敷では2010年7月1日から現在までである(ただし、2009年度には高水敷にH-ADCP600kHzを設置していた)。

この2つのH-ADCPの設定条件や基本性能については表-1に示すとおりである。濁度増加に伴う超音波減衰効果を減少させるため¹¹⁾、計測層厚(横断方向の計測分解能)は低水路では3.0m、高水敷では4.0mとし、層数はそれぞれ20層、70層としている。この表に示すように、高水敷に設置した周波数300kHzタイプのH-ADCPは、低濁度時には最大400m計測できるが、超音波ビームの広がり幅が1度であるので、超音波ビームが対岸に届く前に水面または底面に当たってしまう。今回のH.W.L.時の計測範囲は、図-2に示すように、H-ADCPから100m程度となっている。

H-ADCPには水位計測機能は付いていないため、流量算定には別途水位計測を行う必要がある。そのため、低水路では、国交省が野田において計測している水位観測データを用いる。一方、予備観測結果より、同一横断面における低水路と高水敷にて水位差があることが判明していたので、高水敷においてもH-ADCP付近において自記式水位計(U20 Water Level Logger, Onset社)を設置し、10分間隔で水位計測を行った。なお、高水敷には、本論文の

表-1 H-ADCPの設定条件と基本性能

項目	600kHz	300kHz
設定層数	20	70
設定層厚[m]	3.0	4.0
測定間隔[分]	10	10
不感帯幅[m]	3.98	6.17
最大測定範囲[m]	80~140	160~400
ビーム数	3	2
ビーム幅 θ_v [°]	1	1
ビーム発射角 θ_H [°]	25	10
測流範囲[m/s]	± 10	± 5

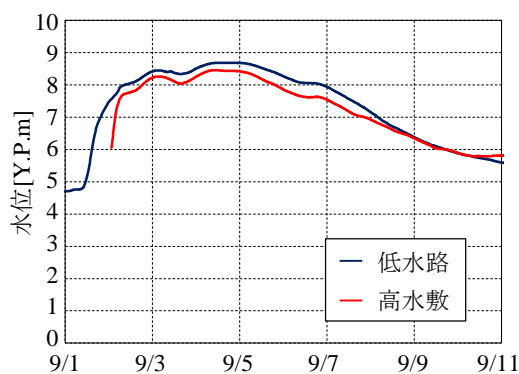


図-3 低水路と高水敷における水位の時間変化

計測横断面やその上・下流に複数の水位計測を行っており、この結果に関しては、別途報告する予定である。

観測期間となる台風112号接近時における野田橋での水位の時間変化を図-3に示す。ここでは、前述した低水路と高水敷の水位データを表示している。これより、H.W.L.は2011年9月4日17時に8.69Y.P.m(低水路)を記録し、2007年台風9号以来の出水となった。また、8.0Y.P.m以上の高水位が2日を越える洪水継続時間の長い出水であった。ここで注目すべき点は、低水路と高水敷の水位差が洪水期間中明確に継続し、最大で0.23mの水位差となった点である。そのため、低水路と右岸側高水敷は基本的には分断された状態となっていた。

また、検証用観測として、二種類のADCP観測を実施している。まず、本システムの観測横断面よりも200m上流の野田橋において、ADCP移動観測法⁹⁾を実施している。これは、高水敷が冠水した2011年9月2日~6日の日中に合計25往復観測を行っている。このデータを用いて、本システムの流量推定精度を検証する。次に、本研究において新たに高水敷に設置したH-ADCP300kHzの流速計測精度を検証するために、本システムの観測横断面の右岸側高水敷の140~370m地点において、ADCPを鉛直下向きに固定し、1分間計測して、各地点の流速鉛直分布データを取得する。これを同年9月2日10時、14時、4日18時の計3回にわたり実施した。

表-2 DIEX法における計算条件

	H-ADCP 台数	付加項補間法	
		低水路	高水敷
Case1	1台	一樣法	-
Case2	2台	一樣法	一樣法
Case3	2台	一樣法	三次スプライン補間法
Case4	Case2, 3で同化範囲を減少させる.		

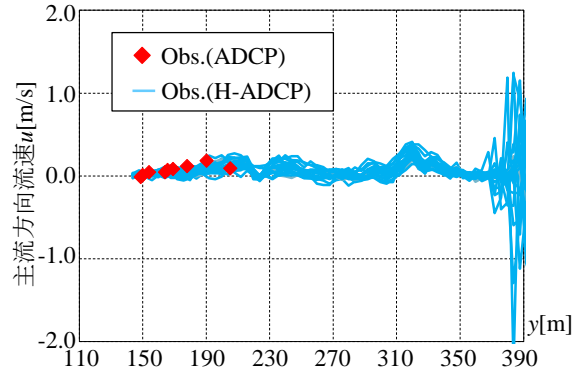
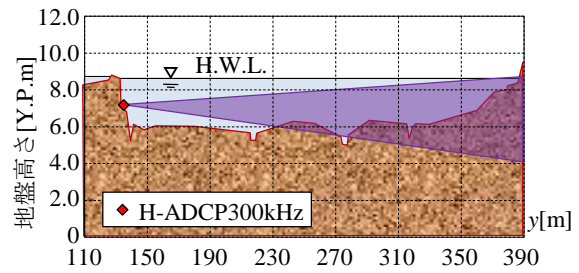
(2) 計算条件

DIEX法における計算条件について記述する。計算期間は、2011年9月2日から7日までとする。計算格子幅は、横断方向に関しては、低水路・高水敷共に0.5mとする。計算格子数は、鉛直方向には100、横断方向には828としている。データ同化範囲 Y_{max} に関しては、低水路では、基本的には、高濁度化による超音波減衰効果を考慮するために、反射強度のある閾値を設定していたが、本論文で対象とする台風1112号出水では、この閾値を下回る反射強度は観測されなかった。そのため、流速計測精度の検証結果より与えられ、初期に設定した $Y_{max}=36m$ とした。高水敷におけるデータ同化範囲 Y_{max} に関しては、H-ADCPより発信される超音波ビームが水面または底面に当たる位置とする。また、マンシングの粗度係数 n は低水路、高水敷それぞれ $0.035m^{-1/3}$ 、 $0.040m^{-1/3}$ とする⁸⁾。その他のパラメータについては、前報を参照されたい。

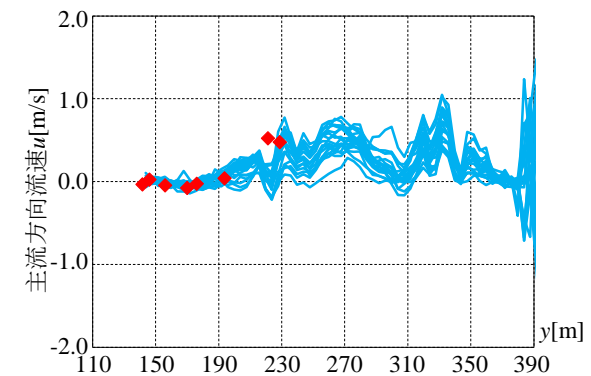
2台のH-ADCP流速データを同化データとして取り込み、それから計算される付加項 Fa の内外挿操作としては、「3次スプライン補間法」⁴⁾と付加項を横断方向に一樣とする「一樣法」⁸⁾が挙げられる。今回の出水は、横断面において低水路と高水敷が完全に繋がっておらず、分断して流れているため、付加項の補間操作についても低水路と高水敷について別々に行う。このことを反映し、本論文の目的の一つであるH-ADCPの設置・設定条件と流量推定精度の関係を見るために、表-2に示す4ケースの計算条件を設定する。ここでは、H-ADCPの台数と付加項の補間法により、H-ADCP1台（低水路のみ）で一樣法を用いるCase1、H-ADCP2台（低水路と高水敷）で一樣法を用いるCase2、同じく2台で補間法は低水路では一樣法、高水敷では三次スプライン補間法を用いるCase3を設定する。またCase4では、台数と補間法はCase2, 3と同じであるが、低水路と高水敷の同化範囲を元々の範囲 Y_{max} の $\alpha\%$ ($\alpha=10$ から100に設定)と短くし、計算結果に対する同化範囲の影響を見る。

また、水位に関しては、図-3に示す低水路と高水敷の水位差を考慮して、低水路内と高水敷（右岸側）において、それぞれの観測値を与える。

4. 結果と考察



(a)9月2日10時 (水位: 7.74Y.P.m)

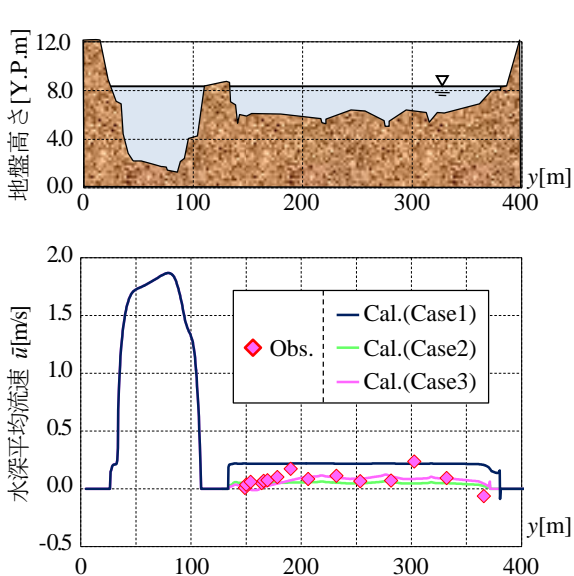


(b)9月4日18時 (水位: 8.44Y.P.m)

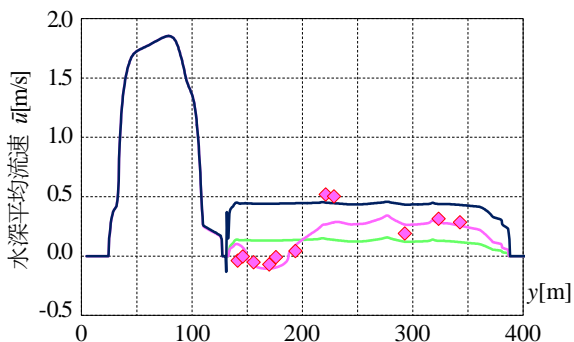
図-4 高水敷の H-ADCP 計測高さにおける H-ADCP と ADCP の主流方向流速横断分布の比較

(1) 高水敷におけるH-ADCPの流速計測精度

高水敷に設置されたH-ADCPの流速計測精度を調べるために、H-ADCPとADCPによる主流方向流速の横断分布を図-4に示す。ここでは、H-ADCPの計測高さに合わせるように、ADCP観測データを抽出している。また、9/2 10時と9/4 18時の結果について、H-ADCPは対岸付近までの計測値を、ADCPについてはデータ同化範囲（H-ADCPの超音波ビームが水面もしくは底面に当たるまでの範囲）をそれぞれ表示している。また、H-ADCPデータについては、ADCP観測時間に合わせて3時間分の結果を図示している。これより、両時刻ともに、H-ADCPの流速値は同化範囲においてはADCP観測結果と概ね一致しており、H-ADCPによる流速計測が良好に行われていることが分かる。なお、同化範囲外では、超音波ビームが水面もしくは



(a) 9月2日10時



(b) 9月4日18時

図-5 水深平均流速横断分布の観測値と推定値の比較 (Case1~3)

は底面に反射し計測範囲は不明確になるものの、対岸に達していると考えられる $y > 370\text{m}$ を除き、H-ADCPデータがADCP観測課結果よりも大幅にずれることなく推移していることは確認されており、今後、これらの流速データの取り扱いについて検討する予定である。

(2) 流速推定精度

2台のH-ADCPを用いた本手法による流速分布再現性向上効果を確認するために、水深平均流速の横断分布に関するADCPによる観測値と本手法による推定値を比較したものを図-5に示す。ここでの推定結果は、H-ADCPを低水路に1台のみ用いた場合 (Case1) と計2台用いた場合 (Case2, 3) について、図-4と同じ時刻の結果が表示されている。また、低水路では、どの計算結果についても同じになることに注意されたい。これより、H-ADCP1台のみの場合 (Case1) では、高水敷における流速が過大評価されており、観測値とのずれが最も大きい。それに対して、H-ADCP2台を用いる場合には、高水敷での流速レ

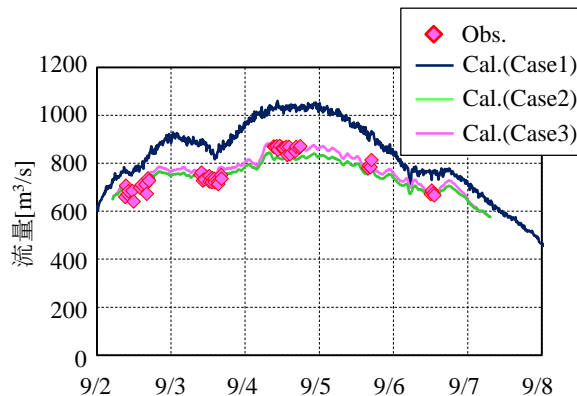


図-6 流量の時系列変化に関する観測値と推定値の比較 (Case1~3)

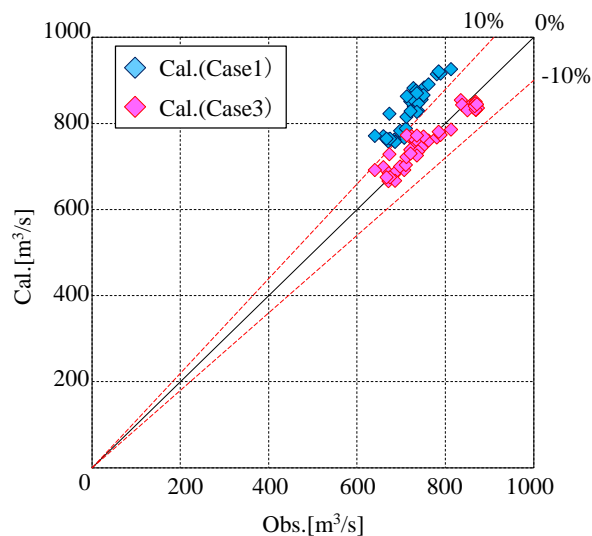


図-7 流量に関する観測値と推定値の相関図 (図中の実線、点線は推定結果の誤差 0, $\pm 10\%$ を示す, Case1 と 3)

ベルは観測値と一致するものの、その精度は付加項に対して三次スプライン補間法を用いるCase3の方が高くなっており、その差は流速分布の凹凸が大きい9/4 18時の結果で顕著である。H-ADCPを2台用いることにより、流速推定精度が明確に向上すると共に、付加項の補間方法がこの精度に関連していることが示された。

(3) 流量推定精度

本手法に流量推定精度の検証をするために、対象出水時における流量の時系列変化を図-6に示す。ここでも図-5と同様に、観測値とCase1~3の推定値を図示している。これより、H-ADCP1台のみ用いたCase1では、流量を過大に評価しており、図-5の流速推定値と符合した結果となっている。一方、H-ADCP2台したCase2と3では概ねADCPによる観測値と一致しており、三次スプライン補間法を用いたCase3の方がやや精度が高い。

より詳細に流量推定精度を検証するため、流量の観測値と計算値の相関図を図-7に示す。ここでは推定値としては、Case2と3の違いがそれほど明確でなかったため、Case2は省略している。これより、H-ADCP1台のCase1の推

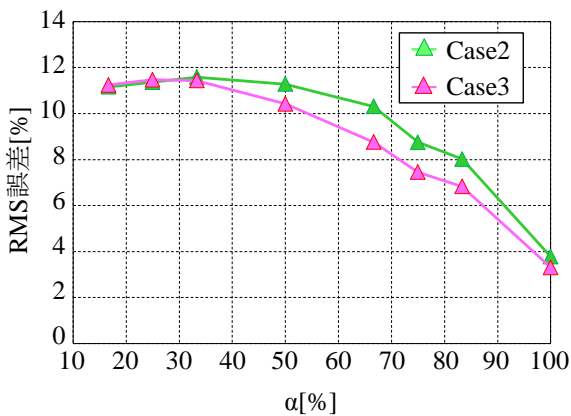


図-8 様々な同化範囲の減少率 α における流量推定誤差 (Case4)

定結果は10%を超える誤差が多く見られるのに対して、H-ADCP2台のCase3では概ね誤差は±10%以内になっている。また、観測値と推定値の間の誤差のRMS値をCase1～3において算出した結果、Case1, 2, 3ではそれぞれ17.1%, 3.8%, 3.3%となり、H-ADCP2台を用いたCase2, 3の精度が極めて良好である。以上より、H-ADCPを低水路・高水敷1台ずつ設置することにより、複断面河道の流量モニタリングを高精度でかつ汎用性高く実施可能であることが明らかとなった。

(4) 同化範囲が流量推定精度に及ぼす影響

上記のように、本システムでは、H-ADCPを2台用いることにより、流速・流量推定精度が良好であることが示された。このような精度は同化範囲(H-ADCPの計測範囲)に大きく影響を受けている可能性があるため、Case4により得られた様々な同化範囲における流量推定誤差のRMS値を図-8に示す。ここでは、Case2と3の結果を表示しており、 $\alpha=100\%$ はCase2, 3そのものの結果となる。これより、同化範囲が減少すると、誤差値は大きくなり、最大で11.6%に達するが、H-ADCP1台のCase1の誤差(17.1%)と比べると十分小さく、2台のH-ADCP計測の有効性が裏付けられたことになる。また、その誤差の増加量は三次スプライン補間法を用いるCase3の方が小さい。

5. 結論

本研究では低水路、高水敷にそれぞれ一台ずつ、計2台のH-ADCP計測とDIEX法に基づいて複断面河道の洪水流量モニタリングの精度向上を図ることを試みた。本システムの適用性を検証するために、台風112号による中規模出水時データを基として従来までに行われていた低水路1台での推定流量精度と比較することで検証を行った。その結果、本イベントにおいて2台のH-ADCPを用い

ることで明らかな流量推定精度の向上が確認され、流量推定誤差のRMS値は3%程度となった。以上より、H-ADCPを低水路・高水敷1台ずつ設置することにより、複断面河道の流量モニタリングを高精度に実施可能であることが明らかとなった。

今後も2台のH-ADCPを用いた観測を継続し、水面・底面での超音波ビーム反射後の流速値の精度検証やその計測位置が明らかになれば更なる精度向上が望める。また、H-ADCPの更なる活用法の検討を今後行う必要がある。さらに、付加項の内外挿方法により流速・流量推定精度が異なることから、この内外挿方法については今後も精査する必要がある。

謝辞：現地観測に際しては、国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所には様々なご協力を頂いた。また、大変な観測作業には、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生の惜しみないご協力のおかげである。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/tisuinoarikata/220927arikatapdf
- 2) Gordon, R. L.: Acoustic measurement of river discharge, *J. Hydraulic Engineering*, Vol.115, No.7, pp.925-936, 1989.
- 3) 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.
- 4) 二瓶泰雄, 木水啓: H-ADCP 観測と河川流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.64, No.4, pp.295-310, 2007.
- 5) Nihei, Y. and A. Kimizu: 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.
- 6) 木水啓, 二瓶泰雄: H-ADCP と DIEX 法を用いた河川流量計測法の洪水観測への適用, 水工学論文集, Vol.51, pp.1057-1062, 2007.
- 7) 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.
- 8) 岩本演崇, 二瓶泰雄: H-ADCP 計測と河川流シミュレーションに基づく複断面河道の洪水流量モニタリング, 水工学論文集, Vol.53, pp.1009-1014, 2009.
- 9) 二瓶泰雄, 色川有, 井出恭平, 高村智之: 超音波ドップラー流速分布計を用いた河川流量計測法に関する検討, 土木学会論文集B, Vol.64, No.2, pp.99-114, 2008.
- 10) 加茂川優紀, 二瓶泰雄: 出水時における河川内草本類の破壊条件に関する基礎的検討, 河川技術論文集, Vol.17, pp.239-244, 2011.
- 11) 二瓶泰雄, 岩本演崇, 谷古宇洋介: H-ADCP の有効計測範囲の検討, 水工学論文集, Vol.54, pp.1099-1104, 2010.

(2011.9.30 受付)