

# H-ADCPの有効計測範囲の検討

## STUDY ON EFFECTIVE MEASUREMENT RANGE OF H-ADCP

二瓶泰雄<sup>1</sup>・岩本演崇<sup>2</sup>・谷古宇洋介<sup>3</sup>

Yasuo NIHEI, Hirotaka IWAMOTO and Yosuke YAKOU

<sup>1</sup>正会員 博(工) 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

<sup>2</sup>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(同上)

<sup>3</sup>非会員 学(工) 埼玉県杉戸県土整備事務所(〒345-0036 埼玉県北葛飾郡杉戸432)

For further progress of H-ADCP measurement, it is necessary to evaluate the measurement range of the H-ADCP under various flood conditions in which the measurement range decreases due to significant acoustic attenuation. We examined the measurement range of the H-ADCP under various water environment conditions and measurement setting of the H-ADCP using field data continuously measured by the H-ADCP in large rivers. The results indicate that the attenuation parameter of acoustic beam  $a$  may be accurately evaluated with turbidity, particle diameter of suspended sediment and cell size of the H-ADCP. Using the above relation, we can evaluate the measurement range of the H-ADCP under various turbidity and particle-diameter conditions.

**Key Words:** H-ADCP, measurement range, echo intensity, discharge measurement, turbidity

### 1. はじめに

ゲリラ豪雨に代表される降雨形態の変化や水利用の高度化を踏まえると、高精度化・省力化・高効率化を可能とし、低水時から大出水時までカバーする河川流量モニタリング手法の整備は急務の課題である。河川流量は、長年にわたり統一された手法により継続的に観測されている一方で<sup>1)</sup>、上記の要請に応えるべく様々な流量観測法が開発・検討されている<sup>2)-7)</sup>。

このような要望を可能とする手法の一つとして、一台で流速横断分布計測を可能とする水平設置型超音波ドップラー流速分布計(Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler, H-ADCP)計測技術と数値計算技術を統合した流量モニタリングシステム(以下、本システムと呼ぶ)が構築されている<sup>8),9)</sup>。本システムでは、ある高さに固定設置したH-ADCPにより流速横断分布を計測し、数値シミュレーションにより力学条件を満たした形で横断面全体に流速データを内外挿し、流量を算出する。従来のH-ADCPによる流量観測では、鉛直昇降装置を用いるなどハード面で高価で大がかりな装置を必要としたが<sup>6)</sup>、本システムはそれらの問題を解消し、かつ、対数則等で流速を内外挿する方法<sup>7)</sup>よりも高精度である<sup>8),9)</sup>。

本システムはこれまで江戸川や隅田川、荒川における流量計測に長期間適用され、低水時から出水時まで概ね高精度であることが確認された<sup>8)-12)</sup>。しかしながら、洪水時の高濁度時では、H-ADCPで送受信する超音波が

水中で減衰するため、H-ADCPの流速計測範囲が減少し、流量推定精度は低下する。H-ADCPの流速計測範囲に関しては、濁度等の様々な環境条件やH-ADCPの計測設定条件により変化することが予想される<sup>13),14)</sup>。水中での超音波減衰の研究は多く行われているが<sup>15)</sup>、H-ADCPを用いた流量観測の適用範囲や条件はあいまいなままである。さらに、本システムの数値解析では、計測精度が保たれている流速データを同化する必要があるが、そのデータ同化範囲の決定法は不明確なままである。

本研究では、従来まで不明確な洪水時のH-ADCPの有効計測範囲を定量化することを試みる。そこで連続観測を行っている江戸川や隅田川、荒川における洪水時観測結果等を用いて、水中での超音波の伝播・減衰特性に対する環境条件(濁度、粒径分布)や計測機器条件(H-ADCPの周波数や測定層厚等)の影響を明らかにし、様々な条件下における有効計測範囲の算定結果を提示する。

### 2. 現地観測の概要

#### (1) H-ADCPについて

H-ADCPは、流速とともに、超音波の反射強度に関する横断分布を計測することが可能な機器である。この反射強度とは、H-ADCPから発射された超音波が水中散乱体により反射され、H-ADCPで受信された超音波の強さであり、単位は独自に基準化されているcountというものである<sup>16)</sup>。このように超音波が水中を伝播する際には、

諸要因による音波エネルギーの伝播損失  $T_l$  が生じる<sup>17)</sup>。洪水時のような高濁度時には、次式のような形で伝播損失  $T_l$  が与えられている<sup>18)</sup>。

$$T_l = k \log r + 2\alpha \cdot r + \beta \cdot \text{Turb} \cdot r \quad (1)$$

ここで、 $\text{Turb}$  は濁度、 $r$  は超音波センサーからの距離、 $k$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  は超音波の損失に関わる係数を表す。上式右辺第一項は発散損失、第二項は吸収損失、第三項は土粒子による減衰損失を各々表し、洪水時には第三項が卓越し超音波を著しく減衰させる。また、第三項の係数  $\beta$  は、浮遊物質の粒径に強く依存することが知られており、洪水時の超音波減衰特性を把握するには、濁度と共に浮遊物質の粒径の実測データを収集することが不可欠である。

## (2) 現地観測方法

観測サイトは、**図-1** に示すように、順流域の江戸川・野田橋（河口から+39km）と感潮域の隅田川・白鬚橋（+9km）、荒川・西新井橋（+14km）である。設置場所は全河川ともに低水路側岸付近であり、低水時では低水路の対岸まで超音波が到達することを確認している。各地点に設置された H-ADCP（Workhorse, Teledyne RDI 製）の周波数と設定条件を**表-1** に示す。江戸川と隅田川では周波数 600kHz、荒川では周波数 300kHz の H-ADCP を用いる。測定層厚は、江戸川では 0.5m であるが、低水路幅の大きい隅田川や荒川では 3.0m としている。観測期間としては、江戸川では 2006 年 6 月 6 日から、隅田川では 2007 年 7 月 12 日から、荒川では 2008 年 7 月 2 日からそれぞれ開始し、現在でも観測中である。

このような H-ADCP 計測と同期して、超音波減衰と密接に関連する濁度及び浮遊物質粒径の計測を行う。ここでは、上記の 3 地点において、ワイパー付光学式濁度計（Compact-CLW, JFE アレック(株)製）を H-ADCP センサー近傍に設置し、濁度の長期連続観測を行っており、観測期間は H-ADCP と同じである。なお、濁度は、低水路内では、洪水時でも概ね一様であり、計測地点の影響は少ない<sup>19)</sup>。また、河川水中の浮遊物質の粒径を調べるために、自動採水機（6712 型ウォーターサンプラー、Teledyne ISCO 製）を設置し、高濁度となる出水時を対象として採水観測を行い、得られたサンプル水を持ち帰り、浮遊土砂の粒径分析を行った。この粒径分析には、レーザー回折式粒度分布測定装置（SALD-3100, 株島津製作所製）を用いる。観測方法や結果の詳細については、重田ら<sup>20)</sup>を参照されたい。本論文においてデータ解析対象とする出水イベントは、洪水規模が大きく高濁度が観測されたイベントとして 2007 年では台風 0704 号（7/15-17, 江戸川）、台風 0709 号（9/6-10, 江戸川と隅田川）、台風 0720 号（10/27-28, 隅田川）、2008 年では前線性豪雨



図-1 観測地点

表-1 H-ADCP の設定条件

	周波数 [kHz]	測定層厚 [m]	対岸までの距離 [m]
江戸川・野田橋	600	0.5	43
隅田川・白鬚橋	600	3.0	135
荒川・西新井橋	300	3.0	118

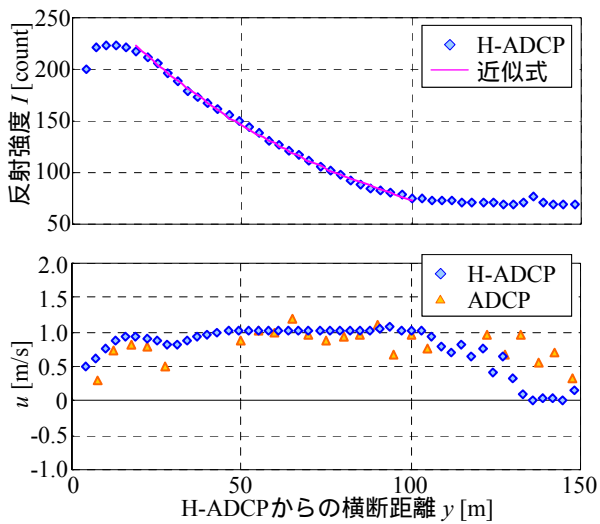
（8/29-9/2, 3 河川）の 4 つとする。

上記の結果から H-ADCP の有効計測範囲への水中環境条件の影響を抽出することは可能であるが、H-ADCP の設定条件についてはデータの制約が多い。そこで、設定条件の中で最も重要な H-ADCP の測定層厚を様々に変化させた現地観測を別途行った。ここでは濁度が時間的に概ね変化しない平常時において、江戸川と隅田川にて H-ADCP の測定層厚のみを 0.5m, 1.0m, 2.0m, 3.0m, 4.0m と変化させて H-ADCP 計測を行った。これらの観測を江戸川では 2008/12/22, 隅田川では 2008/12/11 に実施した。なお、測定層厚と同じく重要な H-ADCP の周波数の影響に関しては、周波数以外の設定が同じである隅田川と荒川の観測結果を比べることにより、H-ADCP の周波数が超音波減衰特性に及ぼす影響を検討する。

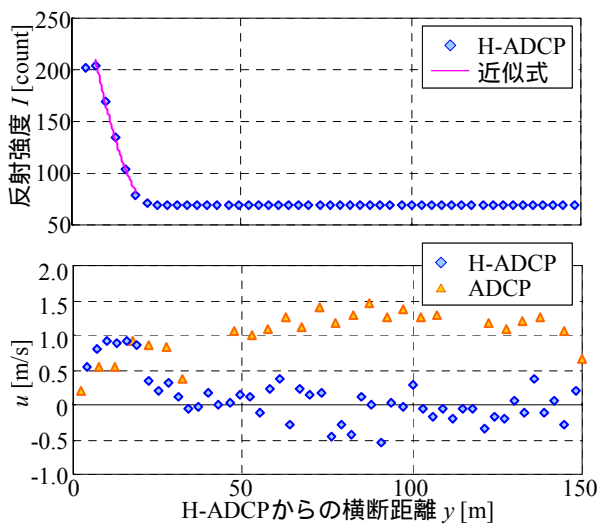
## 3. 観測結果と考察

### (1) 反射強度横断分布の基本的特徴

洪水時における超音波反射強度の横断分布特性やそれが流速計測精度に及ぼす影響を把握するために、低濁度時と高濁度時における反射強度  $I$  と主流方向流速  $u$  の横断分布を**図-2** に示す。ここでは、台風 0709 号時における隅田川・白鬚橋の H-ADCP データを例として、低濁度時（2007/9/7 5 時、濁度 134FTU）と高濁度時（同日 17 時、1392FTU）の結果を表示している。また、流速データには、流量計測精度検証用として行われた ADCP（Workhorse 1200kHz, Teledyne RDI 製）による観測結果も表示している<sup>10)</sup>。この ADCP 流量観測は H-ADCP 設



(a) 低濁度時 (2007/9/7 5時, 濁度 134FTU)



(b) 高濁度時 (2007/9/7 17時, 濁度 1392FTU)

図-2 低・高濁度条件下における反射強度  $I$  と主流方向流速  $u$  の横断分布 (隅田川・白鬚橋, 台風 0709 号出水時)

置地点から約 200m 上流にある白鬚橋上で行われている。これらの結果を見ると、低濁度時には、反射強度  $I$  は H-ADCP からの横断距離  $y$  と共に緩やかに減少し、 $y=110\text{m}$  付近にてほぼ一定 (70) となる。このとき H-ADCP の流速値は  $y=85\text{m}$  まで概ね ADCP による流速観測値と一致しており、周波数 600kHz の H-ADCP における本来の計測範囲 (=70~100m) と対応した結果となっている。一方、高濁度時には、反射強度  $I$  は横断距離  $y$  と共に一旦増加し、その後指数関数的に急激に減少しており  $y=25\text{m}$  付近において反射強度  $I$  は一定値となる。このような反射強度の横断分布と連動して、H-ADCP による流速値は反射強度が 100count 以下となる  $y=20\text{m}$  以降に急激に減少し、ADCP 観測値との差が顕著になっている。これは、高濁度水塊により超音波が著しく減衰し、反射強度  $I$  の小さい範囲では流速計測誤差が増加してい

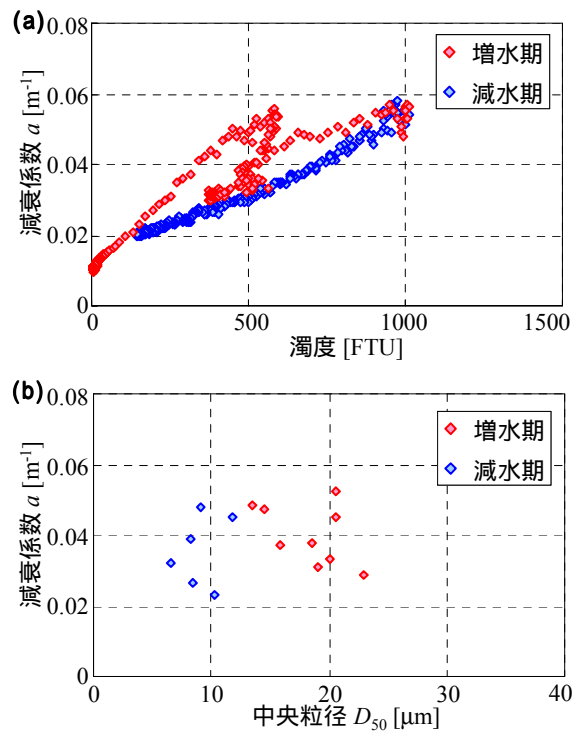


図-3 反射強度の減衰係数  $a$  と濁度 (a) 及び中央粒径 (b) の相関関係 (江戸川・野田橋, 台風 0709 号出水時)

ることが分かる。

上述した超音波反射強度の減衰特性を定量的に評価するために、図-2 に示すように、反射強度  $I$  の横断分布に対する次の指数関数を近似式として適用する。

$$I(y) = Ce^{-ay} \quad (2)$$

ここで、 $C, a$  は係数であり、特に  $a$  は反射強度の減衰を表すパラメータ (以下、反射強度の減衰係数と呼ぶ) である。同図に示されるように、反射強度が減衰する様子は、式(2)により良好に表されている。このように、様々な環境条件及び H-ADCP の設定条件下における係数  $C, a$  を算出することにより、反射強度横断分布や H-ADCP の有効計測範囲を推定し得るものと考えられる。

## (2) 様々な条件下における反射強度の減衰係数 $a$

H-ADCP の反射強度データから得られた減衰係数  $a$  と水中の環境条件である濁度と浮遊土砂粒径の相関図の一例を図-3 に示す。ここでは、江戸川・野田橋における台風 0709 号出水時データを表示しており、増水期と減水期は分けている。また、浮遊土砂の粒径データとして中央粒径  $D_{50}$  を用いる。まず、濁度との相関図を見ると、濁度が大きくなると減衰係数  $a$  も大きくなっているものの、同一濁度条件でも増水期と減水期では減衰係数  $a$  が異なっており、減衰係数は濁度のみの一意の関数となっていない。一方、中央粒径についても、減衰係数は一意の関数となっていない。また、増水期の中央粒径は減水期よ

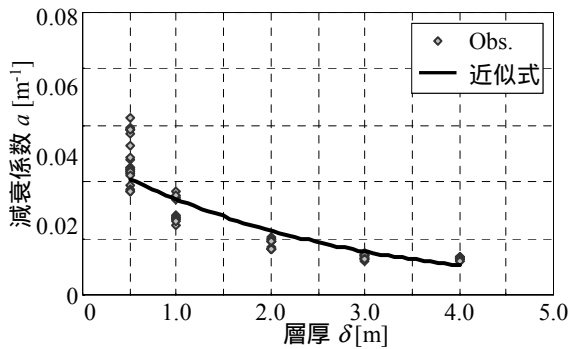


図-4 反射強度の減衰係数  $a$  と測定層厚  $\delta$  の相関関係(江戸川・野田橋, 平常時, 2008/12/22)

りも大きく,これが上記の濁度と減衰係数  $a$  の相関関係が増水期と減水期とで変化している一因であると考えられる.次に, H-ADCP の計測条件の影響を見るために,平常時,同一濁度条件下において測定層厚  $\delta$  を変化させた時の反射強度の減衰係数  $a$  の結果を図-4 に示す.ここでも江戸川・野田橋において2008/12/22に行われた観測値(濁度 4.6FTU, 中央粒径  $6.4\mu\text{m}$ )を表示している.このように,減衰係数  $a$  は,測定層厚  $\delta$  とともに指数関数的に減少している.

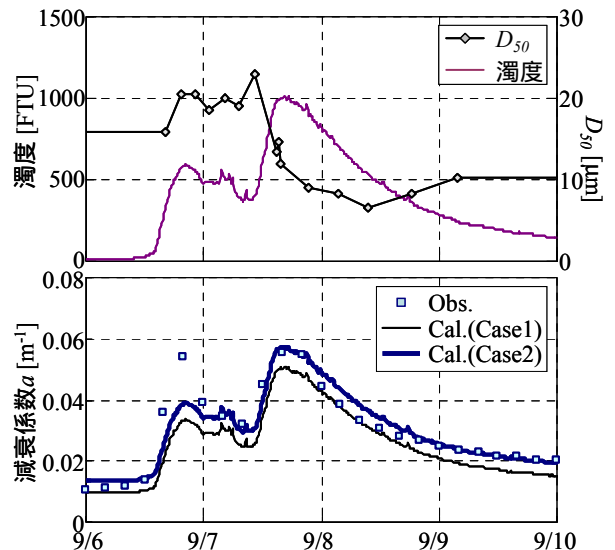
以上の結果より,反射強度の減衰係数  $a$  は,濁度  $Turb$  や中央粒径  $D_{50}$ , 測定層厚  $\delta$  の影響を強く受けていることが分かる.そこで,減衰係数  $a$  とこれらの諸条件に関する二種類の回帰分析を試みる. Case1 としては,濁度のみを対象とし, Case2 としては,上記の3項目を対象とする.周波数 600kHz の H-ADCP が使われ,観測データも豊富な江戸川と隅田川の観測データを対象として, Case1 と2 の回帰分析結果は,以下のように得られた.

$$\text{Case1: } a = 4.12 \times 10^{-5} Turb + 0.0091 \quad (3a)$$

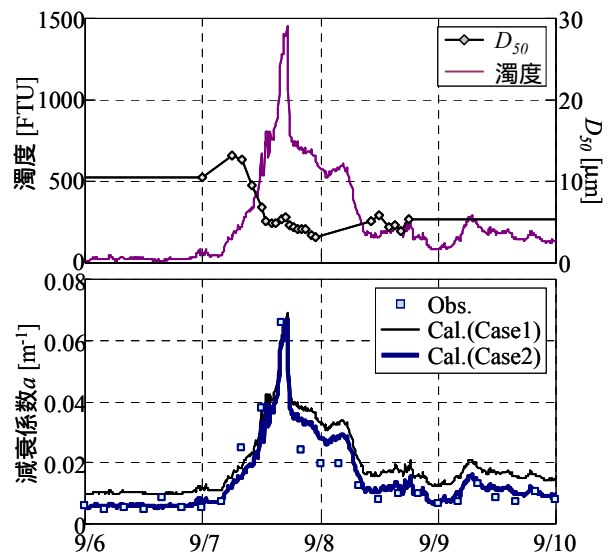
$$\text{Case2: } a = 4.40 \times 10^{-5} Turb + 2.85 \times 10^{-4} D_{50} - 2.71 \times 10^{-3} \delta + 0.0099 \quad (3b)$$

ここで,  $Turb$  や  $D_{50}$ ,  $\delta$  の単位は FTU,  $\mu\text{m}$ , m である. 両ケースの決定係数  $R^2$  は Case1 では 0.80, Case2 では 0.91 であり, Case2 の方が減衰係数の推定精度が向上した.

このことをより詳細に検討するため,台風 0709 号出水時(野田橋,白鬚橋)における反射強度の減衰係数  $a$  に関する観測値と2ケースの推定値の時系列変化を図-5 に示す.ここでは,濁度と中央粒径の時間変化も合わせて表示している.これより,濁度のみを考慮する Case1 における  $a$  の推定値では,一部分では観測値と一致するものの,全般的には誤差が見られる.一方, Case2 における  $a$  の推定結果は増水期・減水期共に概ね良好に観測値と一致しており,それが両河川共に見られる.さらに,両河川における全観測データに対して,反射強度の減衰



(a)江戸川・野田橋



(b)隅田川・白鬚橋

図-5 濁度と中央粒径(上)及び減衰係数  $a$  の観測値と推定値(下)の時系列変化(台風 0709 号出水時)

係数  $a$  の観測値と推定値の相対誤差を算出したところ, Case1 では 40%, Case2 では 14% となり, Case2 の方が相対誤差は小さい.以上の結果より,濁度のみならず,中央粒径や測定層厚を考慮することで,反射強度の減衰係数  $a$  を概ね良好に推定し得ることが示された.

### (3) H-ADCP の有効計測範囲

上述した結果に基づいて, H-ADCP の有効計測範囲を算出する.有効計測範囲としては,図-2 に示したように,反射強度がある値よりも低下する横断位置を知る必要がある.そこで,前節で求めた反射強度の減衰係数に基づいて得られた反射強度の横断分布の推定値と観測値を図-6 に示す.ここでは,隅田川における台風 0709 号出水時を例として,低濁度時(2009/9/7 4:20,濁度:91FTU,

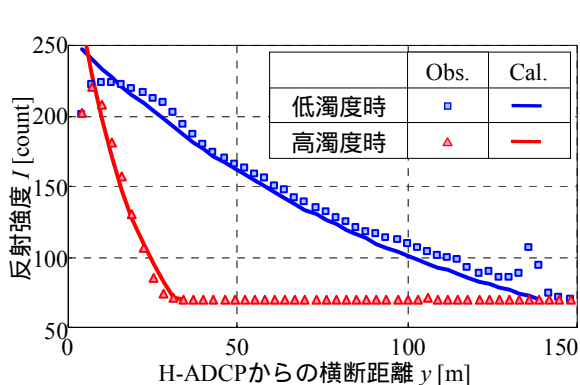


図-6 反射強度横断分布の観測値と推定値の比較（隅田川，低濁度時：207/9/7 4:20，高濁度時：同日 15:30）

$D_{50}$ ：12.5 $\mu\text{m}$ ）と高濁度時（同日 15:30，濁度：1042FTU， $D_{50}$ ：5.1 $\mu\text{m}$ ）の結果を表示する．また，推定値としては，濁度と中央粒径，測定層厚を考慮した場合（Case2，式（3b））における反射強度の減衰係数  $a$  及び次式による係数  $C$  を用いたものである．

$$C = 7.72 \times 10^{-2} \text{Turb} + 1.03 D_{50} + 15.0 \delta + 191.8 \quad (4)$$

ここで，変数の単位は式（3b）と同じである．なお，図中では反射強度がほぼ一定の部分では，推定値は表示されていない．本論文で求めた反射強度の係数  $a$  や  $C$  に基づく推定値は低濁度時と高濁度時共に観測値と良く一致している．これより，式（3b）や（4）による反射強度横断分布の推定値は概ね良好であることが示された．

この推定法に基づいて，様々な濁度と中央粒径，測定層厚条件下において得られた H-ADCP の有効計測範囲の推定結果の一例を図-7 に示す．ここでは，この推定法により得られる反射強度横断分布データから，反射強度がある閾値  $I_{\min}$  以上の部分を有効計測範囲と見なしている．本論文では，図-2 に示される H-ADCP の流速計測誤差を参考にして， $I_{\min} = 90\text{count}$  としている．これより，測定層厚  $\delta$  が 0.5m の場合における有効計測範囲は，濁度 100FTU では最大 60m，1000FTU では 20m 程度となっている．一方，測定層厚  $\delta$  が 3.0m の時の有効計測範囲は，濁度 100FTU では最大 140m と大幅に増大しているが，1000FTU では約 25m となっており， $\delta = 0.5\text{m}$  の時よりもわずかに増加する程度である．このように，有効計測範囲を大きくするには測定層厚を大きくする必要があるが，その効果は高濁度時には相対的に小さい．また，低濁度時（ $<100\text{FTU}$ ）では，中央粒径が小さいほど有効計測範囲は増加するものの，高濁度時では粒径による有効計測範囲の変化は小さい．このように，低濁度時では，粒径や測定層厚により有効計測範囲が変化するものの，高濁度時では有効計測範囲は濁度のみによりほぼ決定されている．また，図-7 の結果から H-ADCP の有効計測

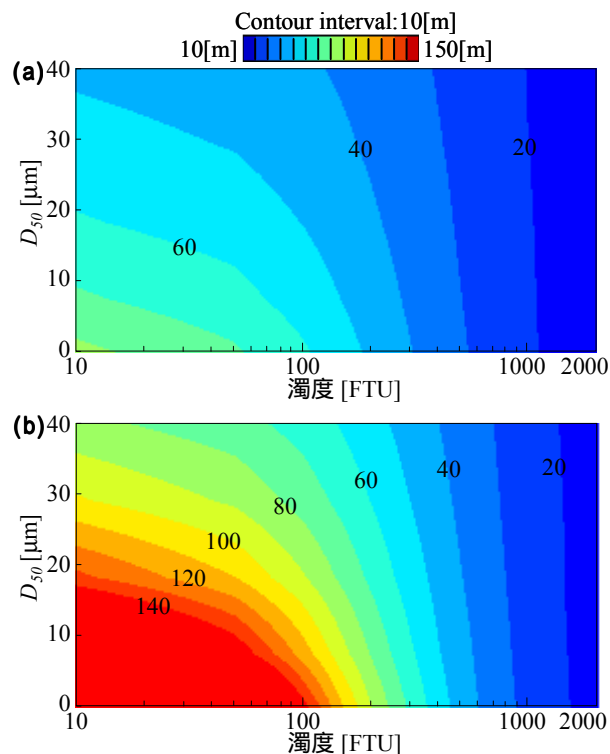


図-7 幅広い濁度・中央粒径条件下における有効計測範囲コンター（測定層厚として  $\delta = 0.5\text{m}$  (a) と  $\delta = 3.0\text{m}$  (b) の場合を示す．図中の数字は有効計測範囲を表す）

範囲を判定することは可能であり，今後の H-ADCP による流量計測の進展に大きく寄与するものと考えられる．

#### （4）H-ADCP の周波数による超音波減衰特性の違い

超音波減衰に対する H-ADCP の周波数の影響を調べるために，周波数を除いた H-ADCP の計測条件が同一である隅田川（周波数 600kHz）と荒川（300kHz）における濁度と減衰係数  $a$  の相関図を図-8 に示す．ここでは，減衰が顕著となる濁度 150FTU 以上の観測値を採用する．

これより，周波数 300kHz（荒川）を用いた時の減衰係数  $a$  は，同一濁度条件では，周波数 600kHz の条件（隅田川）よりも明確に小さくなっている．これより，周波数の低い H-ADCP の方が超音波減衰量は小さく，高濁度時観測に適していることが分かる．ただし，濁度・浮遊土砂粒径条件を揃えて有効計測範囲を求めた結果を比較すべきであるが，周波数 300kHz を用いた荒川では，観測を開始して一年以上経つが大きな出水イベントに恵まれていないため，観測データが十分に収集できていない．今後，多くの出水時データを集めて，周波数別の有効計測範囲の検討を行う予定である．

#### 4．おわりに

本研究では，自動連続的な流量モニタリング手法とし

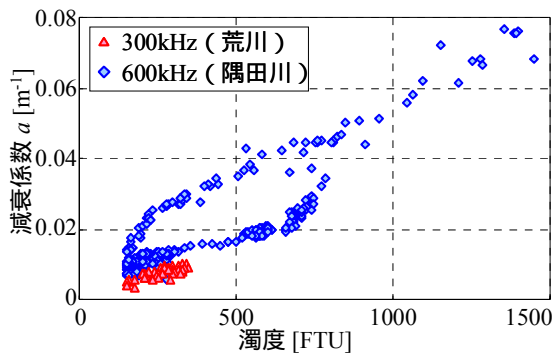


図-8 H-ADCPの周波数300kHz(荒川)と600kHz(隅田川)を用いたときの減衰係数 $a$ と濁度の相関関係の比較(濁度150FTU以上のデータを対象)

て有望な機器であるH-ADCPの有効計測範囲を評価するために、江戸川や隅田川、荒川の連続観測データを用いて、有効計測範囲に対する水中環境条件(濁度と浮遊土砂粒径)や計測機器条件(測定層厚や超音波周波数)の影響を調べた。得られた主な結論は、以下の通りである。

- 1) 超音波反射強度の減衰係数 $a$ は、濁度に加えて、浮遊土砂の中央粒径や測定層厚を考慮した式(3b)により、精度良く推定可能であることが示された。
- 2) この推定法に基づいて、様々な濁度・中央粒径・測定層厚条件下におけるH-ADCPの有効計測範囲コンター(図-7)を作成した。その結果、低濁度時では、粒径や測定層厚により有効計測範囲が変化するものの、高濁度時では有効計測範囲は濁度のみによりほぼ決定されることが示された。
- 3) このコンター図からH-ADCPの有効計測範囲を判定することが可能であり、今後のH-ADCPによる流量計測の進展に大きく寄与するものと考えられる。

なお、著者らの観測結果では、大河川では年最大規模洪水で濁度は500-1000 [FTU]以上となるため<sup>20)</sup>、図-7よりH-ADCP600kHzの計測範囲は大河川では決して十分と言えない。そのため、より低周波数のH-ADCPを導入するか、もしくは数値解析と組み合わせることで流速・流量を推定することは必須となると考えられる。また、より一般性の高いH-ADCPの計測範囲を得るために、今後多くの河川、洪水時の観測データを蓄積する予定である。

謝辞：本研究は、NEDO・平成17年度産業技術研究助成事業(研究代表者：二瓶泰雄)の成果の一部である。国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所と荒川下流河川事務所、東京都第五建設局には、現地観測実施に際して様々な便宜を図って頂いた。隅田川の現地観測では、東京都土木技術支援・人材育成センターの高崎忠勝氏に大変お世話になった。また、現地観測で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に多大なる御助

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) 建設省河川局,(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.35-58, 1997.
- 2) 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.
- 3) 藤田一郎, 河村三郎:ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み, 水工学論文集, Vol.38, pp.733-738, 1994.
- 4) Gordon, R. L.: Acoustic measurement of river discharge, *J. Hydraulic Engineering*, Vol.115, No.7, pp.925-936, 1989.
- 5) 中川一, 小野正人, 小田将広, 西島真也:横断平均流速の測定と流速分布の数値シミュレーションを組み合わせた流量測定技術の開発と大河川での実地検証, 水工学論文集, Vol.50, pp.709-714, 2006.
- 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.
- 7) Wang, F. and Huang, H: Horizontal acoustic Doppler current profiler (H-ADCP) for real-time open channel flow measurement: Flow calculation model and field validation, *XXXI IAHR CONGRESS*, pp.319-328, 2005.
- 8) 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, 土木学会論文集 B, Vol.64, No.4, pp.295-310, 2007.
- 9) Nihei, Y. and Kimizu, A.: A new monitoring system for river discharge with H-ADCP measurements and river-flow simulation, *Water Resour. Res.*, 44, W00D20, doi:10.1029/2008WR006970, 2008.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 柏田仁, 二瓶泰雄, 岩本演崇: H-ADCP を用いた洪水流量推定法の精度向上策の検討, 土木学会年次学術講演会講演要旨集, Vol.64, pp.67-68, 2009.
- 13) 土屋明訳者:水中音響の原理, 共立出版株式会社, pp.99-144, 1978.
- 14) RD Instruments: Principle of Operation: A Practical Primer, pp.29-30, 1999.
- 15) J. Sheng and A. E. Hay: An examination of the spherical scatterer approximation in aqueous suspensions of sand, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.83, No.2, pp.598-610, 1988.
- 16) 二瓶泰雄, 北山秀飛, 木水啓, 原田靖生: H-ADCP 計測と数値解析を組み合わせた浮遊土砂輸送量計測システムの提案, 河川技術論文集, Vol.13, pp.225-230, 2007.
- 17) 海洋音響学会: 海洋音響の基礎と応用, 成山堂書店, pp.32-33, 2004.
- 18) 横山勝英, 藤田光一: 多摩川感潮域の土砂動態に関する研究, 水工学論文集, Vol.45, pp.937-942, 2001.
- 19) 二瓶泰雄, 植田雅康, 木水啓: 江戸川における土砂濃度の横断・鉛直分布特性と土砂輸送量算定法の検討, 水工学論文集, Vol.50, pp.937-942, 2006.
- 20) 重田京助, 二瓶泰雄, 坂井文子, 大塚慧: 東京湾主要流入河川における浮遊土砂輸送特性に関する基礎的検討, 水工学論文集, Vol.52, pp.913-918, 2008.

(2009.9.30 受付)