

超音波流速計による浮遊土砂移動量の推定方法

横山 勝英*・宇野 誠高**・森下 和志***・河野 史郎***

超音波ドップラー流速計は、計測の原理上、出力される反射強度が浮遊土砂濃度と相関が高い。本研究ではこの性質を利用し、流れが時空間的に複雑に変動する河口域の浮遊土砂動態を定量的にモニタリングする方法を検討した。感潮河道での 1 年にわたる現地計測結果から、Narrow Band タイプの超音波流速計を用いて反射強度を SS に換算する式を作成し、さらに塩水遡上量と河川流量を既知の水量として観測流速を平均流速に変換した。SS と流速の鉛直分布から年間の土砂移動量を計算し、感潮区間への堆積量を推定したところ、現地踏査結果とオーダー的に整合した。これより、一台の超音波流速計から断面通過土砂量を長期的に把握できることが示された。

1. はじめに

河川感潮域では潮汐と河川流の相互作用により塩水密度流が遡上後退を繰り返しており、また塩水楔の先端付近には高濁度水塊 (Turbidity Maximum) が発生するため、流れと土砂濃度の時空間分布が複雑になっている。例えば、多摩川、白川では通常の土砂濃度が 10 mg/l 前後であるが、高濁度水塊の遡上時にはそれぞれ 100 mg/l、500 mg/l に達する。その継続時間は 30 分～1 時間程度であり、一潮汐の間でわずかな時間帯にしか生じない (横山ら, 2001b)。

河川感潮域の密度流や物質濃度の調査は、通常は、採水分析法や自記式計測機 (水質、流速) の設置により行われる。しかし、前者は採水及び分析の労力の点から、連続モニタリングが実際上不可能である。また、多摩川河口では過去に 2 回、物質動態の調査が行われたが (伊藤ら, 1977; 建設省京浜工事事務所, 1999)、計測間隔が 1 時間ないし 2 時間であったため、短時間に通過する高濁度水塊の存在は捉えられていない。

これに対し、自記式計測機では時間的な連続計測は可能だが、1 点計測であるため水深方向に多数設置する必要がある。しかし、航路利用者や漁業者への配慮などの面から実際には困難である。

このような場所では超音波流速計により流速の鉛直分布をモニタリングすることが有効である。さらに川西ら (1996)、Zhu ら (2000)、横山ら (2001a)、山崎ら (2002) は超音波流速計の反射強度と土砂濃度の相関が高いことを示しており、土砂濃度の鉛直分布をモニタリングすることも可能であると考えられる。

そこで本研究では、超音波流速計による河口域の土砂動態モニタリング技術の確立を目指して、土砂濃度、流量及び通過土砂量の長期計算精度について検討した。

2. 現地計測

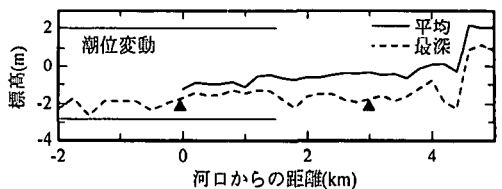
(1) 計測方法

テスト場所は熊本県白川の河口であり、感潮区間が 4.4 km ある。白川河口は有明海に面しているため、干満差が最大で 4 m 程度ある。干潮時には海面が最深河床よりも低くなるため、河道の塩水は全て流出し、一方、上げ潮時には海水が河川水を押し上げながら強混合状態で逆流する。そのため、感潮区間における河川水と海水の出入を比較的単純化して考えることが出来る。

図一にテスト場所の河床縦断面図を示す。超音波流速計は河口 0 km と河道 3 km の褶筋部の河床に埋設し、2000 年 11 月から 10 分間隔で測定している。測定層厚は 0.2 m、河床面からのブランクは 0.2 m である。両地点に NORTEK 社 Aquadopp (Narrow Band type, 2 MHz) を設置し、機種比較のために RDI 社 ADCP (Broad Band type, 1.2 MHz) を 3 km に併設した。以下、前者を NB タイプ、後者を BB タイプと称する。

また、超音波流速計による水量及び土砂量の計算精度を検証するために、各地点の底面上 0.25 m で濁度モニタリングを実施し、さらに 2001 年 9 月 4 日に濁度・SS・塩分・水温の鉛直分布を 10 分間隔で 36 時間にわたって計測した。本研究では、流れの向きを河川から海域に流出する方向をプラスとして全ての解析を進める。

感潮区間への淡水流入量は上流 (河道 13 km) で河川管理者が計測した流量を用いた。河川流量は H-Q 曲線から推定されているが、年間の流出率を計算して、流量値が大きな誤差を持っていないものと判断した。



図一 白川感潮区間の縦断面図

* 正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究室
** 正会員 環修 筑波大学大学院環境科学研究所
*** 国土環境株式会社

(2) 機種を選定

超音波流速計は、超音波が懸濁粒子に当たって反射する際に生ずるドップラーシフトを解析して流速を求めており、超音波の反射強度は懸濁粒子濃度に比例すると考えられる。ここで超音波流速計はNBタイプとBBタイプに大別されるが、機種（超音波技術）の違いにより土砂濃度の応答特性も異なる可能性がある。そこで、両者を同一地点（河道3 km）に設置して比較した。なお、音波が干渉しないように発振時間帯をずらした。

各センサーの反射強度とSSの時系列を図-2に示す。両項目は同じ位置のデータを比較している。これよりNBタイプは2つの波形の相似性が非常に高く、一方でBBタイプは相似性が低い。なお、別の水域でセンサー周波数1.0 MHz、1.5 MHzのNBタイプを使用した際にも高い相似性が見られた。したがって、土砂濃度を推定するにはNBタイプの超音波流速計が適していると判断した。

ただし、Zhuら(2000)、山崎ら(2002)らは海域での調査においてBBタイプでも相関がみられると報告しており、両タイプの違いについてはより多面的な比較検討が必要である。

3. 土砂濃度の推定方法

先ほどの検討をふまえ、NBタイプの超音波流速計について、反射強度から土砂濃度を推定する方法を述べる。なお、計算方法の詳細は既に報告しているため(横山ら, 2001a)、ここでは概要と新たに分かった情報を述べる。

水中における音波の伝搬損失は次式で表される。

$$T_1 = k \log r + 2\alpha r \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 T_1 : 伝搬損失、 r : センサーからの距離、 k : 拡散損失係数、 α : 吸収係数である。

36時間観測からSSの詳細な鉛直分布時系列が得られているので、水深毎に反射強度との関係を整理したところ、河道3 kmについて図-3が得られた。これより反射

強度とSSのあいだに相関が見られるので、この関係を伝搬損失を考慮して式に表すと次のようになる。

$$40 \log C = I - B + T_1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 C : 土砂濃度、 I : 反射強度、 B : 基準音圧である。(1)式を(2)式に代入すれば土砂濃度が求まる。なお、音響強度は[count]という単位で表され、1 count が0.43 dBに相当する。

各係数のうち、 α は周波数の関数としていくつかの式が提案されており、周波数が2.0 MHzの時には α の平均値が2.8 count/m である。

残りの係数の B と k は、これまでの経験から測定の設定（周波数、測定層厚、層数、平均化時間など）によって変わることが分かったが、現段階ではそれらを定式化出来ていない。そのため、各サイトでのSS計測値を用いて個別にキャリブレーションする必要がある。

図-3の相関を表現できるように B と k を調整すると、次式が得られた。

$$40 \log C = I - 60 + 45 \log r + 5.6r \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、河口0 kmについても反射強度とSSの相関図を作成して同様の作業を行い、次式を得た。

$$40 \log C = I - 77 + 53 \log r + 5.6r \quad \dots\dots\dots (4)$$

同じ設定で計測したにもかかわらず2地点で B と k が異なる理由として、SSの性状の違い考えられる。反射強度には浮遊粒子の粒径や密度が反映される。白川の感

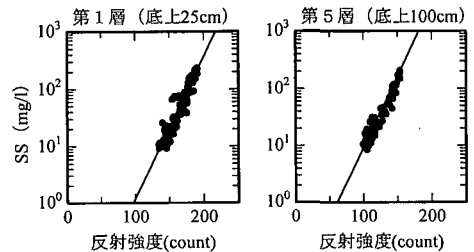


図-3 反射強度とSSの水深別の相関

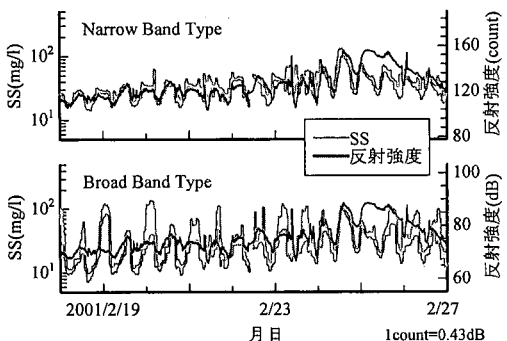


図-2 機種別の反射強度とSSの時系列

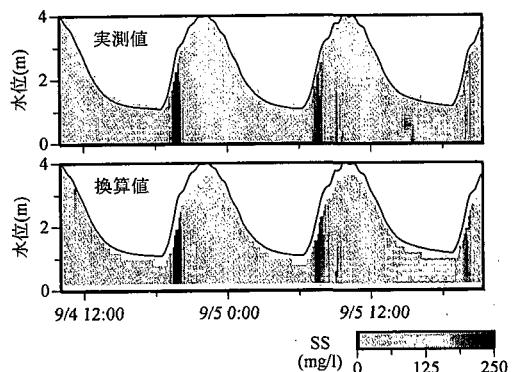


図-4 SS鉛直分布時系列の実測値と計算値

潮区間では塩水フロントの遡上に伴って高濁度水塊が成長してゆくが(横山ら, 2001b), この過程で土砂粒子のfloc化によって粒径や密度が変化している可能性がある。

得られた土砂濃度の推定式を用いて, 反射強度からSS鉛直分布を計算すると, 図-4 のようになった。計算結果は実測値をよく再現できており, NBタイプの超音波流速計により土砂濃度を推定できることが示された。

4. 流量の計算方法

(1) 流速の補正係数

次に, 流量(断面通過水量)の計算方法について検討する。河川では横断面内で見たとき主流部の流速が最も大きく, 河床や岸に近づくほど流速が低下する。本研究では超音波流速計を河床の1点に設置して流速の鉛直分布を計測しているため, 河道断面を通過する水量を求めるには, 各水深の流速を横断方向の平均流速に変換する必要がある。そこで, 横断方向の平均流速とそれから計算される断面通過水量を次のように設定する。

$$V_i = \beta v_i \dots\dots\dots (5)$$

$$Q = \beta \sum_{i=1}^n v_i S_i \dots\dots\dots (6)$$

ここで, V : 横断方向の平均流速, v : 測定流速, Q : 通

過水量, i : 河床を基準とした測定層の位置, β : 流速補正係数, S : 測定層の横断面積である。

流速補正係数 β は, 既知の水量と超音波流速計から計算される水量の比較から求められる。既知の水量としては, 次を示す理由から感潮河道を満たす塩水の容積と, 上流の河川流量を使用した。

36時間観測の結果, 感潮区間での塩水と淡水の分布状況は図-5 (0 km), 図-6 (3 km) のとおりであった。これより, 白川の感潮河道では干潮時に塩水がほとんど流出し, また上げ潮時には強混合で海水が逆流し, 河口0 kmでは全水深が塩水に, 河道3 kmでは塩淡水界面が表層付近に存在する。そのため, 一回の上げ潮で感潮河道を満たす塩水遡上量は塩水層に相当する河道容積に等しくなる。この検討は, 河床地形データと2001年9月4日の36時間観測から得た塩水層厚のデータを用いて行った。

また同様の理由から, 一潮汐の通過水量を積分すれば河道の塩水量は0となるため, 累積通過水量と上流からの淡水流入量(河川流量)が等しくなる。ただし, 淡水流量が少ない場合は各地点間でタイムラグが生じるため, 精度向上のために1ヶ月間の累積を計算して検討した。

(2) 計算結果

塩水遡上量の計算結果を表-1に示す。超音波流速計から計算される河口0 kmの塩水遡上量が115万 m^3 であるのに対し, 河口から感潮区間の上端までの満潮時の

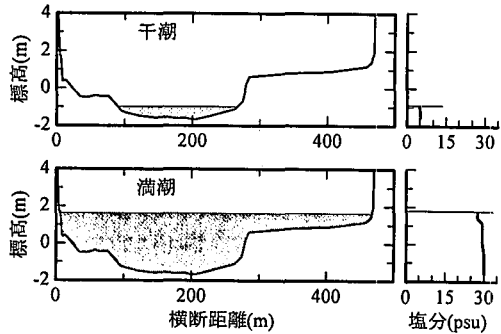


図-5 0 km 横断面における塩水と淡水の分布状況

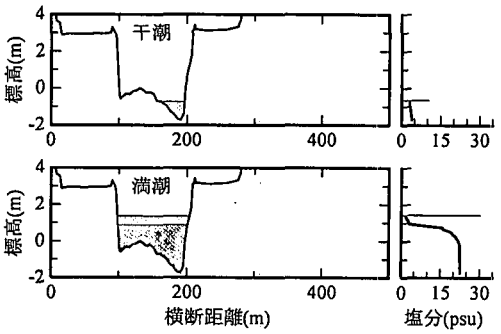


図-6 3 km 横断面における塩水と淡水の分布状況

表-1 塩水遡上量の計算結果と河道容積の比較

	塩水遡上量 超音波流速計より	河道容積 地形と塩水層のデータより
河口0 km	115.3	122.5 (0~4.4 km)
河道3 km	20.6	33.0 (3~4.4 km)

単位: 万 m^3

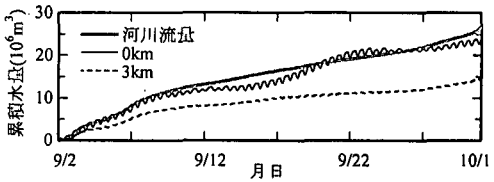


図-7 淡水流量の計算結果と河川流量の比較

表-2 流速補正係数の比較

	9月		11月	2月	3月
検討方法	塩水遡上	淡水流量	淡水流量	淡水流量	淡水流量
$\beta(0 \text{ km})$	1.1	1.1	0.7	0.9	1.0
$\beta(3 \text{ km})$	1.6	1.5	1.0	1.0	1.0

塩水層に相当する容積は122万 m^3 となった。従って β (0 km)は1.1となった。一方、河道3 kmについては、この地点を遡上した塩水量が20.6万 m^3 で、3 kmより上流の満潮時の河道容積が33万 m^3 となり、 β (3 km)は1.6となった。

次に、淡水流量の計算結果を図-7に示す。これより、河川流量と河口0 kmの累積水量はほぼ一致しており β (0 km)は1.1となった。一方、河道3 kmの累積水量は少なく、 β (3 km)は1.6となった。

以上の2種類の検討結果をまとめると表-2になる。また他の期間についても同様の計算をした。他の期間は塩水層厚のデータを取得していないので、淡水流量の比較のみであり、また1ヶ月連続で超音波流速計が正常に動作したのは2001年9月、11月、2002年2月、3月の合計4ヶ月であった。

これより、9月については、2つの方法で求めた流速補正係数 β が地点ごとに概ね一致していることから、 β の信頼性は高いと考えられる。

ここで、超音波流速計は溺筋の河床に埋設したので、横断面内の最強流速を計測していると考えられる。そのため、 β は1以下になるはずであるが、9月の計算結果はいずれも1以上となった。一方、9月以外は β が1以下になっている。9月は計測期間のうちで最も河川流量が少ない時期であったため、各地点において流速の横断分布形状が変化して最強流速を計測していなかった可能性がある。

以上より、超音波流速計により得られた流速鉛直分布

を地点ごとに補正して用いることで、断面通過水量を精度良く求められることが示された。

5. 断面通過土砂量の推定

(1) 計算方法

土砂濃度と平均流速の鉛直分布が推定されたので、これらを用いて次式により断面通過土砂量 F を計算することが出来る。

$$F = \beta \sum_{i=1}^n v_i S_i C_i \dots\dots\dots (7)$$

なお、土砂濃度は横断方向に一律と仮定している。白川感潮域での平水時の浮遊土砂は、 D_{50} が0.009 mm、 D_{90} が0.026 mmでありシルト・粘土であったため、横断方向には均一に浮遊していると考えた。この浮遊土砂が河口域に堆積した場合の密度は、同じ粒径の底泥の分析結果から1.3とする。

(2) 高濁度水塊による1回の土砂移動量

図-8に河口0 kmと河道3 kmにおける36時間観測で得られたSS時系列と、超音波流速計から得られた通過土砂量の時系列を示す。これより、SS濃度は上流に位置する3 kmの方が高いか同程度であるが、通過土砂量は0 kmの方が多いことが分かる。9月4日18時から翌朝6時の一潮汐あたりの正味の土砂移動量は、0 kmで-78 m^3 、3 kmで-35 m^3 と推定された。

つまり、浮遊土砂が河口から河道へと移流する間に、塩水フロントの前面に集積して高濁度水塊の濃度が上昇するが、それと同時にブロックを形成するために、沈降速度が増大して、通過土砂量でみると約5割の浮遊土砂が0~3 kmの区間に沈降、堆積したと考えられる。

(3) 年間の土砂移動量

ここでは、超音波流速計のモニタリング結果から計算される年間土砂移動量と感潮区間の地形変化量の整合性

表-3 月別の累積土砂移動量

	9月	11月	2月	3月
河口0 km	-2,000	800	-700	-180
河道3 km	-900	2,700	2,800	3,300
収支	1,100	1,900	3,500	3,480

(+の収支は推積)

単位： m^3

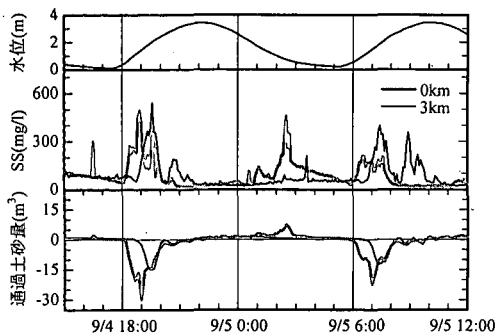


図-8 SS時系列と通過土砂量時系列

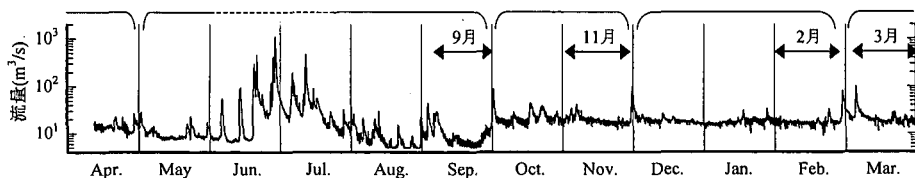


図-9 年間の流量区分 (2001年4月~2002年3月)

を検討する。

前述の通り、超音波流速計の連続データが取得できたのは2001年9月、11月、2002年2月、3月の合計4ヶ月であった。そこで、各月について4章で算出した流速補正係数を用いて移動土砂量を計算し、地点ごとに累積土砂移動量を得た(表-3)。

これより、各月で土砂移動の方向は異なるが、2地点間の収支としては0 kmと3 kmの間に常に堆積することが明らかとなった。次にこの結果を用いて、出水期を除く11ヶ月間の土砂堆積量を推定する。

土砂移動の方向は、河川流量が少なければ塩水遡上が相対的に強くなるため逆流傾向となり、河川流量が多ければ順流傾向となることが分かっている(宇野ら, 2002)。

そこで図-9に示すように、2001年4月から2002年3月までの出水期(6月中旬～7月中旬)を除く11ヶ月を、流量ごとに4区分し、上記の計算結果を引き延ばして年間土砂堆積量を推定した。その結果、0 kmから3 kmの区間に26,000 m³堆積すると見積もられた。

ここで、目視と測量による河道内部の土砂の堆積・侵食の状況は次の通りであった。河床の滞筋周辺では1年間を通じて変化がなく砂質であった。一方、河岸部は泥質であったが、洪水により侵食が起こった。2001年6月の出水による侵食量は、正確には把握は出来なかったが(厚い泥層で歩けないため)目視の確認では水際の10～20 mの範囲が10～50 cmほど削れて崖状になり、その後、1年ほどで地形は再び元の状態に戻っていた。河道兩岸において幅10 m、厚さ50 cmの土砂が3 kmの距離で侵食されたと仮定し、これが1年で元に戻ったとすると堆積量は30,000 m³となる。つまり、年間では10⁴オーダーの泥質土砂が移動及び堆積していると推測される。

したがって、超音波流速計から推定される年間の土砂堆積量と地形の変化量はオーダー的に整合しており、実測堆積量が正確ではないという課題はあるが、長期的な計算精度が保証されていることが示された。

6. ま と め

本研究では、超音波流速計の反射強度が浮遊土砂濃度との相関が高い性質を利用し、土砂移動量を推定する方法を検討し、以下の結論を得た。

(1) 超音波流速計の機種(超音波技術の違い)によって土砂濃度への応答が異なり、Narrow Bandタイプの超

音波流速計が適していることが分かった。

(2) 音波の伝搬損失を考慮して、反射強度からSSの鉛直分布を推定する式を作成した。なお、係数は計測の設定を変えるごとに個別にキャリブレーションする必要がある。

(3) 河床設置型の超音波流速計では横断方向の流速分布が分からないため、塩水遡上量と上流の河川流量を既知の水量として、観測流速を平均流速に変換した。

(4) 上記で推定した土砂濃度と平均流速の鉛直分布から年間の土砂移動量を計算した。その結果、河口0 kmと河道3 kmの区間に堆積した浮遊土砂量が、現地踏査から推定された河岸泥質の移動状況を説明しうるオーダーであった。

(5) 以上より、一台の超音波流速計から断面通過土砂量を長期にわたって把握できることが示され、土砂動態モニタリングを行う上で非常に有効な手段であることが明らかとなった。

謝辞：本研究の実施にあたり、国土交通省熊本工事事務所より白川の流量データを提供していただいた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 伊藤雄二・馬場洋二 (1977): 多摩川における浮遊砂量と塩水遡の関係についての現地観測, 第32回年次学術講演会要集, 第2部, pp. 414-415.
- 宇野誠高・横山勝英・森下和志・高島創太郎・大角武志 (2002): 熊本県白川河口域における土砂動態, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 561-565.
- 川西 澄・小谷英史・余越正一郎 (1996): 超音波ドップラー流速計を用いた感潮域の流動と懸濁物質濃度の現地観測, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1086-1090.
- 建設省京浜工事事務所(1999): 平成11年度多摩川汽水域調査検討業務報告書.
- 山崎真一・山下俊彦・渡邊康玄 (2002): 融雪期に鶴川から沿岸海域に供給された浮遊物質の挙動, 水工学論文集, 第46巻, pp. 911-916.
- 横山勝英・藤田光一 (2001a): 多摩川感潮域の土砂動態に関する研究, 水工学論文集, 第45巻, pp. 937-942.
- 横山勝英・宇野誠高 (2001b): 河川感潮域における高濃度水塊の挙動—強混合河川の場合—, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 631-635.
- Zhu, X. H., Takasugi Y., Nagao M. and Hashimoto E. (2000): Diurnal cycle of sound scatterers and measurements of turbidity using ADCP in Beppu Bay, J. Oceanography, Vol. 56, pp. 559-565.