

音響式 S S 測定装置の開発に関する研究

DEVELOPMENT OF ACOUSTIC TECHNIQUES FOR SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION MEASUREMENT

横山勝英¹・梅田 信²・山崎久勝³

Katsuhide YOKOYAMA, Makoto UMEDA and Hisakatsu YAMAZAKI

¹正会員 博(工) 東京都立大学大学院講師 土木工学専攻(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

²正会員 博(工) (財)ダム水源地環境整備センター 研究第二部(〒102-0083 東京都千代田区麹町2-14-2)

³非会員 (財)河川環境管理財団(〒104-0042 東京都中央区入船1-9-12)

Field experiment on acoustic backscatter of suspended sediment was undertaken in Rokkakugawa-river estuary to establish the suspended sediment concentration (SSC) monitoring technique for measuring high concentrations exceeding 5,000 mg/L and to obtain vertical distributions. A sound of 200 kHz frequency was emitted from the transducer, and it was detected in the direction of the suspended sediment; the transducer received the detected sound. A separate transducer and an integrated transducer were examined. The blank space after the separate transducer was 0.5 m, shorter than 2.5 m for the integrated transducer. The output power of 1-5 W for the sound is appropriate to measure concentrations of 100-20,000 mg/L. Ambiguity of response was the minimum for 32-64 pulses. The relationship between the sound echo intensity and SSC was formulated in consideration of propagation loss; SSC profiles are successfully reproduced by echo intensity profiles for the frequency of 200 kHz, the sound power of 4.3 W, and the sound of 32 pulses.

Key Words: SSC, echo intensity, separate transducer, frequency, power, sound pulses

1. はじめに

河川水系において総合土砂管理を計画する際には、当該河川の土砂移動状況を把握する必要がある。土砂は流送形態によって掃流砂と浮遊砂、ウォッシュロードに分類されるが、このうち掃流砂を現場でモニタリングする実用的な方法は存在しない。浮遊砂とウォッシュロードに関しては(以後、SSと総称する)様々な方法が提案されている。

SSモニタリングの基本的手法は採水であるが、観測と分析に多大な労力を要し、特に感潮域や貯水池など流れが複雑な水域ではSSの時空間分布も複雑であるため、採水点数が莫大になる欠点がある。

濁度計は懸濁水中の光の透過率や反射率によって濁りを計測しており、現在のところSSモニタリングの最も有効な手法である。著者らは濁度計の使用方法について、粒度分布に関する情報を得られないものの、事前に河川ごとにSSと濁度の相関関係を調べ

ておけば、濁度からSSを推定できること示した^{1),2)}。

ただし、濁度計はセンサーの周囲数センチの範囲しか計測しておらず、また5,000mg/Lを越える濃度レンジ(カオリン換算)を持つ測定機がほとんど無い。洪水時の河川や排砂中のダム貯水池の下流、高濁度水塊の出入りが激しい感潮域などでは濃度の鉛直分布を計測することが望ましいが、これを濁度計で行うのは濃度レンジやコストの面で難しい。

こうした問題を考慮して、著者らは超音波流速計によるSSモニタリングを提案している^{3),4)}。超音波流速計は水中の懸濁質により音波が反射する性質を利用してドップラー効果から流速を推定しているが、反射強度からSS濃度を推定することも可能である。また、伝搬方向に層分割して計測するため、濁度計では計測が困難な前述の水域において流速とSS濃度を同時計測し、SSフラックスを算出することができる。なお、DRL Software社ではRDI製ADCPの出力をSS換算するソフトウェアを開発しており、超音波流

表-1 計測の設定

Transducer	出力 (W)	パルス
一体型 200kHz	136	22波 (0.11ms)
	45	
	15	
	4.2	
	1.5	
	0.55	
分離型 200kHz	0.18	128波(0.64ms) 64波 (0.32ms) 32波 (0.16ms) 16波 (0.08ms)
	4.3	

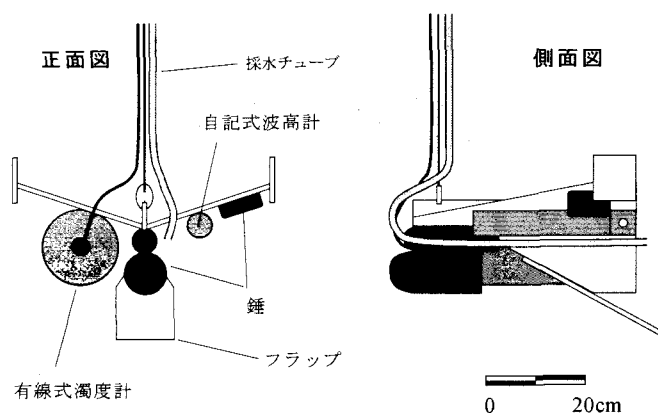


図-1 SS計測装置の概要

速計によるSSモニタリングは一般化しつつある。

しかし超音波流速計の問題点として、高価であること(300～600万円)、また著者の経験によれば計測可能な濃度の上限が500～2,000mg/Lであることが挙げられる。これらの問題点を解決するために、本研究では市販の魚群探知機(10万円程度)を改造して高濁度場での音響計測を行い、SS測定装置としての性能を評価した。

2. 実験

(1) 基本原理

水中を音波が伝搬する際にはエネルギーが伝搬損失によって減衰する。伝搬損失は拡散損失と減衰損失の和として表され、拡散損失は距離の対数に比例して変化する幾何学的効果、減衰損失は吸収、散乱、その他の影響によるもので距離に比例する効果として説明される。そのため、基本的には音の反射強度は距離とSS濃度によって決まる。

さらに、音波のような粗密波の基本特性として、周波数が高くなるほど反射反応の距離分解能は高くなるがエネルギー減衰が著しくなる。また、発振出力が増大すれば到達距離は長くなるものの媒質中の微弱な変化に対する反応が悪くなり、パルス幅を長くすれば透過能力は向上するが反応の空間分解能が低下する。このように、音波の発振に関する制御因子は背反した効果をもたらすため、SSを計測するための最適な組合せをチューニングする必要がある。

(2) 音響装置

音響実験には2つの装置を用いた。1つは市販の魚群探知機(光電製作所製CVS-118)であり、もう1つは魚探の回路をベースにした超音波発振装置(特注品:光電製作所製)である。いずれの装置も発振出力とパルス幅を可変に、また受信電圧をアナログで

外部出力できるように改造ないし製造した。

発信周波数は魚探として一般的な200kHzを用い、2つの装置で同じ型のトランスデューサを使用した。ただし、魚群探知機では送受信を1つのトランスデューサで行い、超音波発振装置では送信体と受信体を分けた。送受信一体型では超音波を発振している時間帯にトランスデューサ直近から帰ってくる反射波を捕らえることが出来ないため、「ブランク領域」が長くなってしまう。そこで送受信一体型と分離型を用いて、ブランク領域の短縮化について比較を行った。計測設定を表-1に示す。

アナログ出力された音響信号は高速AD変換装置によってデジタルデータ化し、パソコンに記録した。魚群探知機の出力は信号波形のピークを包絡した値であるため、超音波の周波数よりも低いサンプリング周波数で取得した。超音波発信装置の出力は生の信号波形であるため、超音波の10倍のサンプリング周波数で取得し、デジタルデータをプログラム処理してピーク包絡線を作成した。

(3) 実験方法

実験水槽の条件としてSS濃度は数千mg/L、水深が数メートル必要であるが、このような水槽を作成するのは困難であったため、同様の条件を満たす現地河川を探したところ佐賀県の六角川が選定された。

六角川は有明海の湾奥部に位置し、感潮区間には0.01mm程度の粘土が堆積している。既往の調査⁵⁾によれば、有明海特有の潮汐の効果で0.7m/sに達する強い往復流が発生し、粘土が巻き上げられてSSが数万mg/Lの状態で移動している。日常的に強く濁っているため、本研究に最適のフィールドであり、六角川の感潮区間において実験を行った。

小型作業船に音響センサー一式と高速AD装置一式、SS計測装置一式を搭載して水上で計測した。音響センサーは水面から20cm程度水没させて舷側に固定した。解析に必要なデータは音響強度の鉛直分布

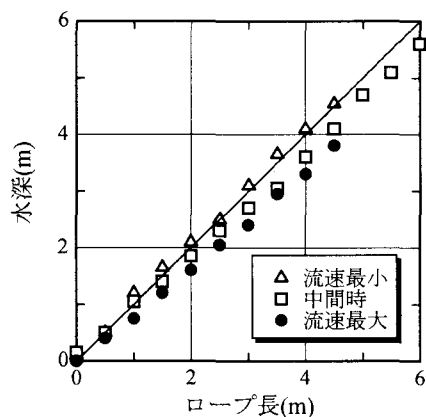


図-2 SS計測装置のロープ長と水深の関係

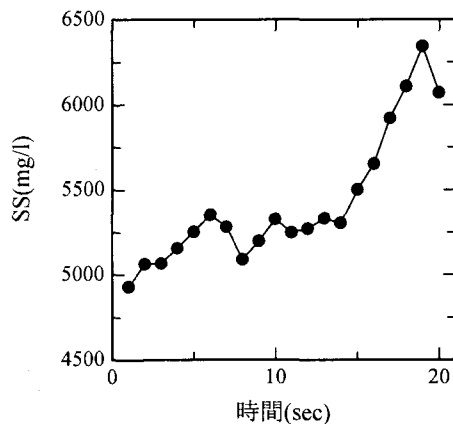


図-4 SSの時間変化

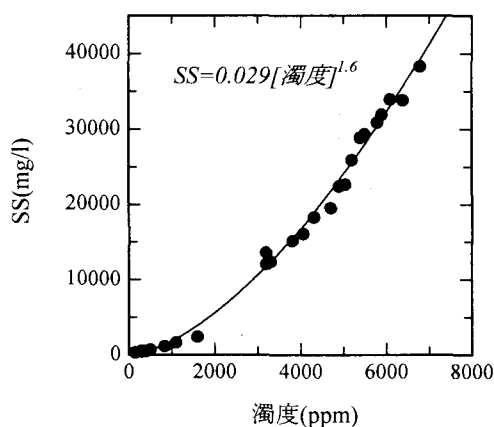
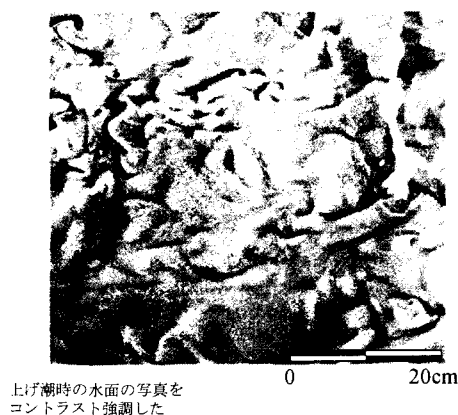


図-3 濁度とSSの相関



上げ潮時の水面の写真を
コントラスト強調した

図-5 濁りの不均一性

と対応するSSの鉛直分布である。冒頭で述べたようにSSの採水分析は多大な労力を要するので、最初にSSと濁度の相関図を作成するための採水を実施し、以後は濁度計測によりSSを推定することとした。

濁度計はカオリン換算で20,000mg/Lのレンジを持つ有線式高濃度濁度計（アレック電子ATU-3D、特注品）を用いた。六角川では流速が著しく速いため、水中に下ろした測器がほとんど水平に流されて鉛直下方に沈まない。

そのため、図-1に示すように錘付き水中翼にSS採水用のチューブと高濃度濁度計及び水圧センサー（アレック電子Compact-WH）を取り付けた。これら一式の重量は約15kgである。図-2に潜水ロープ長と水深の関係を示す。このように水中で0～30度の姿勢を保ったまま安定して潜航させることが出来た。

SS採取は計測初期に27回だけ実施し、以降は採水チューブを取り外して濁度計測のみを行った。SSと濁度の相関を図-3に示す。以後は、図中の相関式により濁度をSS換算して解析に用いた。

ここで、高濃度場での濁度の時空間変動は次のような状況であった。図-4に固定水深におけるSSの変動状況を示す。水中のある一点において、SSは20秒

間で5,000mg/Lから6,000mg/Lまで大きく変動している。図-5は水面の濁りの状況であるが、乱流を表すような濃淡が現れている。このようにSSは溶解性ではなく懸濁性であるために、高濁度時の分布は均一ではなく時空間変動が比較的大きい。

そこで、音響と濁度の計測を出来るだけ短時間に行うために実験を次の手順で実施した。音響計測のパターンは表-1に示したとおりであるが、1回の計測時間を10秒とすることで、設定の切り替えやケーブルの着脱などを含めて全パターン計測を5～10分以内終了させるようにした。また、濁度計は直読式であり数値をロガー等に記録することが出来なかったため、一水深で約30秒間固定して目視により濁度の変動パターンを読みとり、平均的な値を記録した。このようにして、0.5m間隔で濁度の鉛直分布を計測し、4～7mの計測を5～10分で終了させた。

3. 実験結果

(1) ブランク領域

図-6に送受一体型のトランスデューサを用いた実験結果の一例を、図-7に送受分離型の結果を示す。

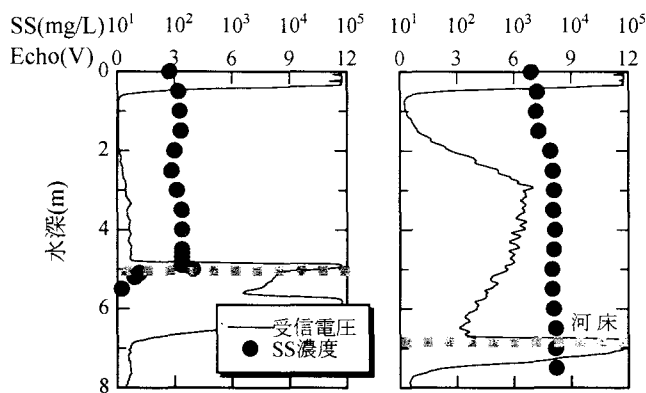


図-6 反射強度とSSの鉛直分布の例(送受信一体型)

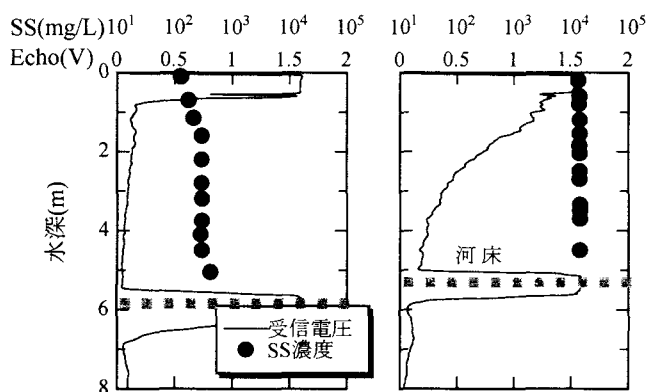


図-7 反射強度とSSの鉛直分布の例(送受信分離型)

反射強度が5～7m付近で急上昇しているのは、河床からの反射である。また、超音波が捉えた河床とSS(濁度計)の最深部の位置が一致していないが、六角川の川幅は50m程度であり、計測中に船が流されるとすぐに水深が1m程度ずれてしまうためである。

図-6の左側は低濃度時であり、SSが全層でほぼ100mg/L程度となっており、反射強度も弱い。これに対して右側は高濃度時であり、SSが5,000mg/Lとなっており反射強度も強くなっている。また反射強度の鉛直分布は、表層で飽和状態であるが一旦0Vまで低下し、水深2.5mでピークを迎えてから距離減衰が生じている。一方、図-7では反射強度が水面付近で飽和してそのまま距離減衰している。

以上より、200kHzの超音波はSS濃度に反応しており、送受一体型ではブランク領域が水深2.5mまでとなっているのに対して、送受分離型では水深0.5mであり、送受を分離することで水面付近まで計測が可能になることが確かめられた。

(2) 発振出力がSS応答特性に及ぼす影響

最初にパルス数を22波に固定し、出力を136Wから0.18Wまで7段階に変化させた実験を実施した。図-8に反射強度とSS濃度の関係を出力別に整理した結

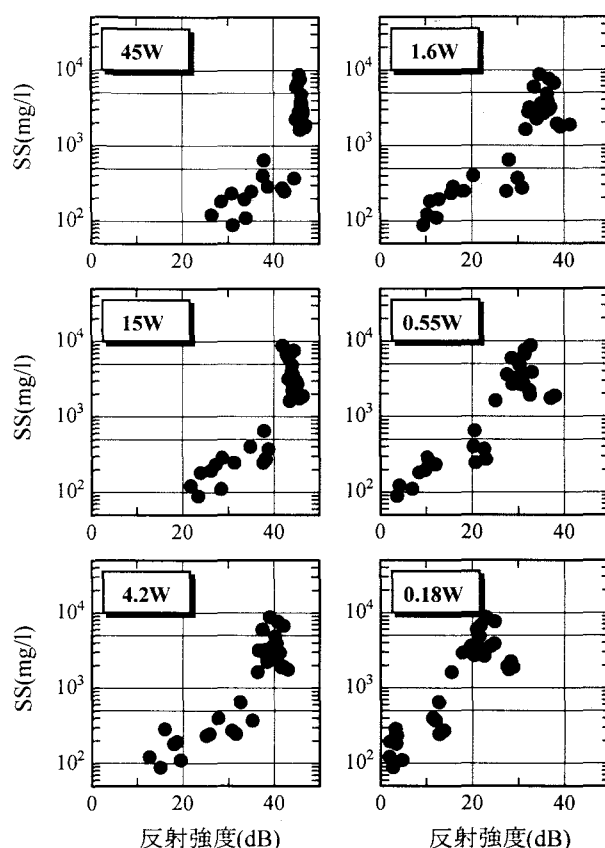


図-8 出力別にみた反射強度とSSの相関
(パルス数22, 水深2.5m)

果を示す。なお、反射強度は次式を用いてある電圧を基準にして相対的なデシベル値で表した。

$$Echo = 20 \log \frac{MV}{BV} \quad (1)$$

ここで、Echo: 反射強度(dB), MV: 測定電圧(mV), BV: 基準電圧(mV)であり、魚群探知機では基準電圧を50mV、超音波発振装置では10mVとした。以後の表示は全てデシベル値である。

これより、出力15W以上ではSSが1,000mg/Lを超える状態で反射強度が飽和していることがわかる。出力が強すぎると水中の懸濁物が多い状況ではノイズと化してしまい、反射強度の差異を判別できなくなる。出力4.2W以下ではそれぞれに相関性が見られるが、出力が下がると相関性がグラフの左側にシフトしてゆく。これは低出力では低濃度時の反応が弱く、検出が困難になることを示している。

したがって、2,000mg/Lを下回る低濃度状態を判別するには高出力が適しており、高濃度状態を判別するには低出力が適している。ただし、20,000mg/Lを超える超高濃度状態では出力が低すぎると音波が透過しない。以上を総合すると、数百～数万mg/LのSSを検出するには、1～5Wが適していると考えられる。

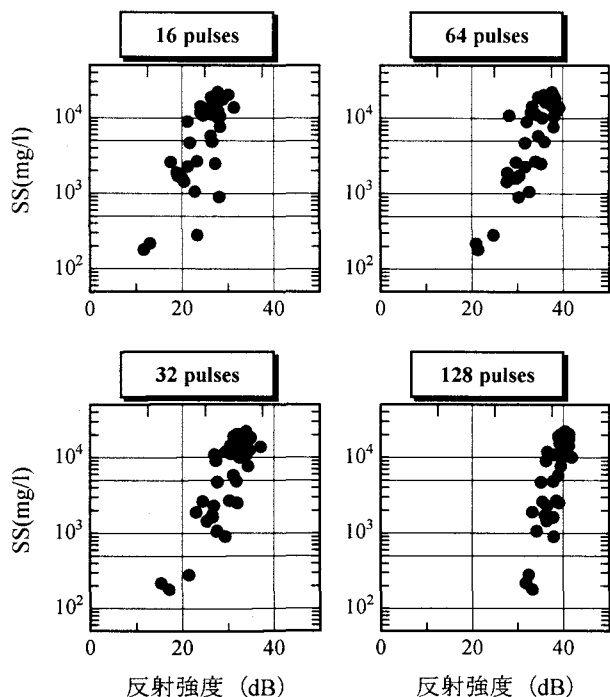


図-9 パルス別にみた反射強度とSSの相関
(出力 4.3W, 水深 0.75m)

(3) パルス幅がSS 応答特性に及ぼす影響

前節の結果を受けて、出力を 4.3W に固定し、パルス数を可変とした実験を行った。図-9 に反射強度と SS の関係をパルス数別に整理した結果を示す。これより、パルス数が 16 波の場合は分散が大きく、逆に 128 波では傾きが切り立っていることが分かる。これはわずかな反射強度の差が大きな SS の差になることであり、分解能が粗いことを表している。

他の水深でも同様の傾向が見られたが、32 波と 64 波は比較的分散が小さく、距離減衰も見られており相関性が高い。ただし、20,000mg/L を越える状態で相関性が線形性を保っていない。

32 波は空間分解能が約 12cm、64 波は空間分解能が約 24cm であり、河川や貯水池の SS 鉛直分布構造を把握するには十分な分解能であるといえる。

4. SS 濃度の推定

(1) 基礎式

水中の伝搬損失は拡散損失と減衰損失の和として表される⁶⁾。

$$T = k \log r + 2\alpha r \quad (2)$$

ここで、 T : 伝搬損失 (dB)、 k : 拡散損失係数、 r : センサーからの距離、 α : 吸収係数である。拡散損失係数は、円筒拡散の場合 $k=10$ であり、球面拡散の場合は $k=20$ と言われており、本研究では浅い水路で

の実験であるため円筒拡散の状態と考えた⁶⁾。吸収係数は周波数が 200kHz の場合に、 $\alpha = 0.05$ (dB/m) となる⁷⁾。この値は海水や湖沼などの清水中で得られたものであるが、濁水中での吸収係数の変化に関する文献が見あたらなかったため、便宜的に清水中でこの値を用いた。

また、音響反射強度と SS 濃度の関係について、伝搬損失を考慮した式は次のようになる。

$$10 \log C = I - B + T \quad (3)$$

ここで C : SS 濃度、 I : 反射強度、 B : 基準音圧である。

(2) 計算結果

第 3 章の分析結果から、超音波センサーとして次の組み合わせを選定した。

- ・ 周波数 200kHz
- ・ トランスデューサ 送受信分離型
- ・ 出力 4.3W
- ・ パルス数 32 波

この条件における SS と反射強度の関係を距離別にプロットすると図-10 が得られ、相関式は次のようになった。

$$10 \log C = I + 8 + 30 \log r + 2 \times 0.05r \quad (4)$$

この式を用いて、実験で得た反射強度の全データを SS に換算した結果、図-11 と図-12 が得られた。図-11 は時系列図に相当するもので、およそ 15 分間隔で計測した結果を並べている。図-12 は SS の鉛直分布図であり、様々な濃度の例を示した。

いずれも例外はあるものの 1,000 ~ 25,000mg/L の広い範囲である程度の再現性を得られた。

ただし、相関式と実測 SS の相関係数 (図-10) は 0.65 ~ 0.71 であり、今回の実験結果は濁度-SS の関係ほどには相関が高くない。また、図-11 では換算 SS が実測 SS から大きくずれている点がかかなり割合で見受けられる。

そのため、広い SS 濃度範囲で計測が可能であるということ、水面から水中の様子を簡易にリモートセンシングできるという利点は示されたものの、SS 濃度の推定精度は十分とは言えず、課題の残る結果となった。

5. 結論と今後の課題

本研究では SS モニタリング技術を提案するために、超音波を用いた簡易的な方法について検討した。得られた結論は以下の通り。

- 1) 超音波流速計 (数百万円) に比べて格段に安い市販の魚群探知機 (数十万円) 及び超音波発信装置

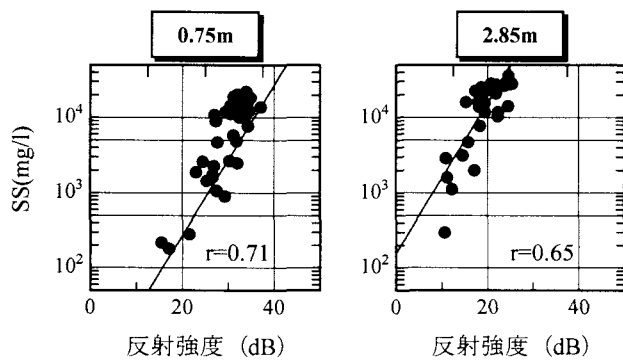


図-10 距離別の反射強度とSSの相関

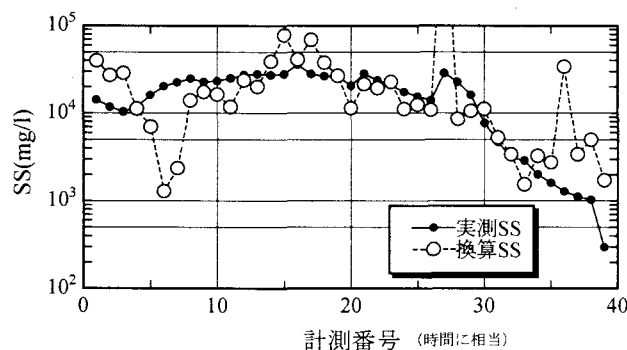


図-11 反射強度によるSSの推定結果(水深2.85m)

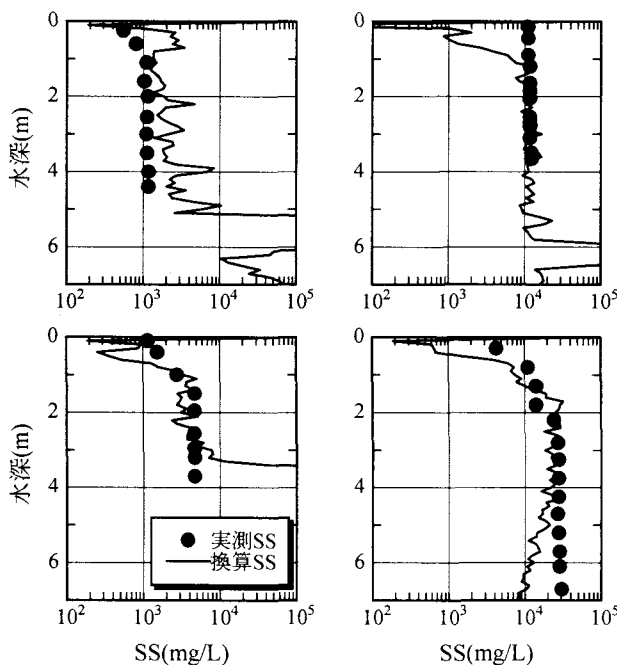


図-12 反射強度によるSSの推定結果(鉛直分布)

を用いてSSの応答特性に関する実験を行った。トランスデューサの周波数は200kHzであり、送受一体型と分離型をテストした。

- 2) ブランク領域は送受信一体型では2.5m、分離型では大幅に短縮して0.5mであった。

- 3) 発信出力は15W以上ではSSが2,000mg/Lを越える状態で反射強度が飽和し、4.2W以下では相関性が良いが、出力が下がると低濃度時の検出が困難になった。数百～数万mg/LのSSを検出するには、1～5W程度が適していると考えられる。
- 4) 出力を4.3Wに固定し、パルス数可変の実験を行った。パルス数が16波の場合には分散が大きく、128波では濃度分解能が荒かった。中間的な32波と64波は分散も小さく、距離減衰も見られており相関性が高い。32波は空間分解能が約12cm、64波は約24cmであり、河川や貯水池のSS鉛直分布構造を把握するには十分な分解能であるといえる。
- 5) 以上より、周波数200kHz、送受分離型、出力4.3W、パルス数32波の場合について、伝搬損失を考慮した音響反射強度とSS濃度の関係式を作成したところ、反射強度から推定したSS濃度は実測値をある程度再現できた。
- 6) 周波数が200kHzのトランスデューサではSS濃度が2,000mg/L以下及び20,000mg/L以上で再現性が悪くなることが示された。これを解決するには、例えば100kHzや1,000kHzなどの異なる周波数を組み合わせて計測を行うことが考えられる。今後、さらに性能向上に向けた改善に取り組んで行く予定である。

謝辞：六角川の現地実験では、鶴見精機の鈴木氏と石橋氏、アレック電子の三木氏、国土環境(株)高島氏と大角氏、東京都立大学大学院の新谷助手ならびに水工学研究室の学生諸氏に多大なるご助力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 横山勝英：濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察，土木学会論文集，No. 698/Ⅱ-58，pp93-98，2002.
- 2) 横山勝英，石川忠晴，梅田 信：濁質生産量の推定方法に関する研究，ダム工学論文集，Vol. 10，No. 4，pp. 311-322，2000
- 3) 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，第45巻，pp. 937-942，2001.
- 4) 横山勝英，宇野誠高，森下和志，河野史郎：超音波流速計による浮遊土砂移動量の推定方法，海岸工学論文集，第49巻，pp1486-1490，2002.
- 5) 二渡了，楠田哲也，大石京子：強混合河川六角川感潮部における懸濁物質濃度の変動特性，土木学会論文集，No. 452/Ⅱ-20，pp71-79，1992
- 6) Robert. J. Urlick: 水中音響の原理，共立出版株式会社，pp. 99-110，1978.
- 7) 実吉淳一，菊池喜充，能本乙彦：超音波技術便覧，日刊工業新聞社，pp. 168，1960.

(2004. 9. 30 受付)