

六角川における音響式SS測定装置の実用化試験

FIELD EXPERIMENT ON THE ACOUSTIC SUSPENDED SEDIMENT PROFILER IN THE ROKKAKU RIVER ESTUARY

横山勝英¹・梅田 信²・和田昌行³

Katsuhide YOKOYAMA, Makoto UMEDA and Masayuki WADA

¹正会員 博(工) 首都大学東京大学院准教授 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学生会員 首都大学東京大学院 土木工学専攻(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

An Acoustic Suspended Sediment Profiler (ASSP) was developed based on the sound property reflected from suspended sediment in the water. The device was examined in the Rokkaku River Estuary where the suspended sediment concentration (SSC) varied from 100mg/L to 30,000mg/L. It was possible to measure the high concentrations over 20,000mg/L by a sound of 200kHz but the measurement limit of a sound of 960kHz was concentrations of 5,000mg/L. A new formulation on the propagation loss produced by suspended sediment particles was proposed. The SSC profiles calculated with the formula agreed with the measured values better than the profiles calculated with the theoretical propagation loss applied in clean water. The fact that the optical backscatter turbidity sensor and ADCP could not work in the high concentrations over 20,000mg/L showed the advantage of the ASSP.

Key Words: SSC, echo intensity, propagation loss, high concentration, frequency

1. はじめに

河川や貯水池, 河口沿岸の地形・底質を適正に管理してゆくことは河川管理上の重要な課題であるが, そのためには河道において洪水時の流砂量を直接モニタリングすることが望ましい。

著者らはこれまでに, 濁度計¹⁾や超音波流速計²⁾による浮游砂モニタリング手法を提案してきたが, 濁度計では鉛直分布計測が困難であり, 超音波流速計では高濃度計測が困難といった問題を有していた。そこで次の段階として, 洪水時の高濃度土砂の鉛直分布を安全に計測するために魚群探知機を用いた安価な音響式SS測定装置の開発に取り組んでいる³⁾。しかし, これまでの実験・解析では, 土砂濃度の推定精度が高いとは言えない状況にあった。

今回は装置の精度向上を目指して, 超音波の周波数の違いによる土砂への応答特性の違いを調べるとともに, 音波の水中での減衰効果として土砂による濃度減衰式を新たに提案する。この方法を用いて佐

賀県六角川の感潮域のSS流動状況を再現し, 音響式SS測定装置(Acoustic Suspended Sediment Profiler; ASSP)の有用性と濃度減衰式の適合性を調べる。

2. 実験方法

(1) ASSP の構成

試作したASSPの構成図を図-1に示す。ASSPはトランスデューサと超音波受発振回路, 高速AD装置とPCから構成される。トランスデューサはセンサー直近の不感帯を低減するために送信と受信を分離している。周波数は200kHzと960kHzの2種類を用いた。960kHzは沿岸・湖沼用の超音波流速計の周波数に近く, 200kHzは魚群探知機の周波数である。超音波受発振回路は最適な発振方法を探るために出力, パルス幅, 周波数が可変となっている。トランスデューサで受信された超音波は受発信回路を通じて電圧出力されるため, 高速AD装置によってデジタル信号に変換してデータをPCに取り込む。

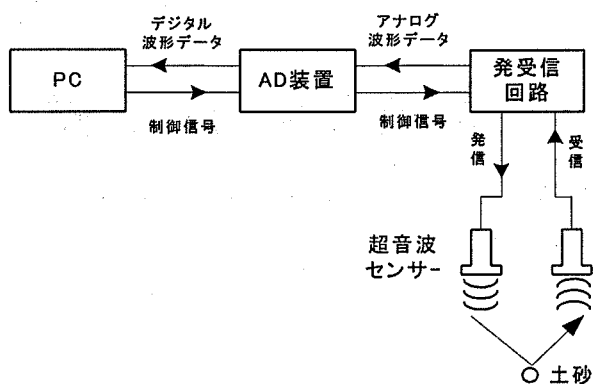


図-1 ASSPの構成図

洪水時の使用方法としては、トランスデューサと制御装置類は分離して有線式とし、トランスデューサのみを小型模型ボートの船底に装着して、これを水面に着水させることを予定している。トランスデューサは市販の魚群探知機を利用すれば数万円であるため、洪水時に流木等の衝突によって破損あるいは流失しても消耗品と考えて交換すればよい。

(2) 実験概要

音響実験は佐賀県六角川で2003年3月10日および11日に実施した。計測内容は音響反射強度とSS、濁度、塩分、水温、流速の鉛直分布である。SSは採水により、濁度・塩分・水温は多項目水質計（アレック電子、AAQ-1183）により、流速はADCP（RDI製ワークホース1, 200kHz）により計測した。音響計測はASSPを用いて行い、パルス数、出力、周波数を変化させて各設定で10秒ずつデータを記録した。これらの1シリーズの計測を5～10分で行い、全39シリーズを実施した。詳細は既報³⁾を参照されたい。

(3) 検討方針

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。

これまでに200kHzについてSSと音響反射強度の相関性に関する解析を行い、以下のような結論を得ている³⁾。①分離型トランスデューサを用いることでセンサー前面の不感帯を大幅に低減できる、②出力は1～5W程度がよい、③パルス数は32～64程度がよい、④このときSSが2,000～20,000mg/Lの範囲で反射強度との相関が見られる。

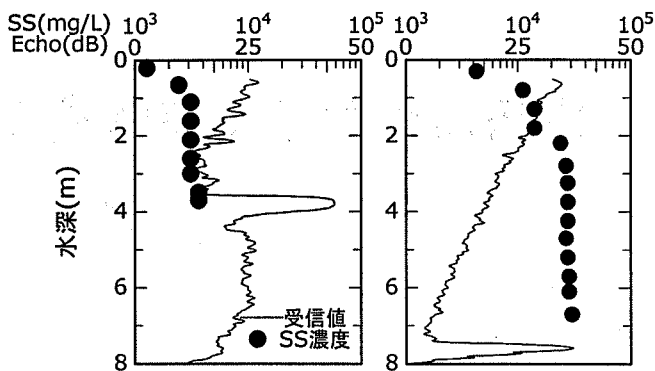


図-2 SS・反射強度の鉛直分布 (200kHz)

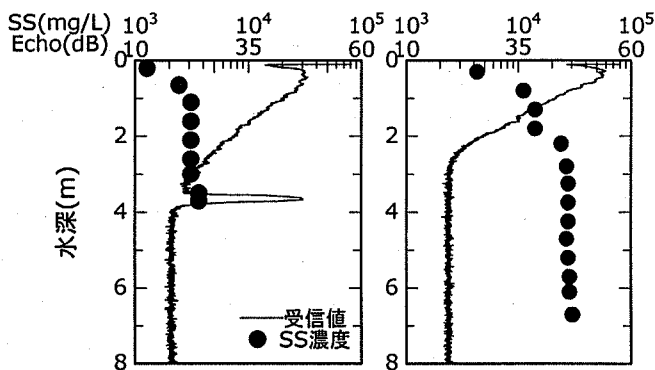


図-3 SS・反射強度の鉛直分布図 (960kHz)

さらなる精度向上のためには、周波数を上げることとSS推定式の改善が考えられる。そこで960kHzについて同様の実験を行って200kHzとの違いを検討し、さらに懸濁土砂による音響減衰式を考案する。

3. 周波数による反射特性の違い

図-2に200kHzのSS・反射強度の鉛直分布を、図-3に960kHzに関する同様の図を示す。なお、反射強度は次式を用いて基準電圧からの相対的なデシベル値で表した。

$$Echo = 20 \log_{10} \left(\frac{MV}{BV} \right) \quad (1)$$

ここで、Echo：反射強度(dB)、MV：測定電圧(mV)、BV：基準電圧(mV)であり、200kHzの基準電圧は10mV、960kHzでは1mVとした。

図からトランスデューサからの距離が遠くなると反射強度が低下する様子が読み取れる。また、左図は低濃度、右は高濃度時の状況であるが、同一水深でみると200kHzでは濃度が上昇すると反射強度も高くなっている。960kHzでは水深1mよりも上層で同様の傾向が見られるが、1mより深い場所ではむしろ高濃度時の方が反射強度が弱い。

また、200kHzは河床まで一定の割合で反射強度が

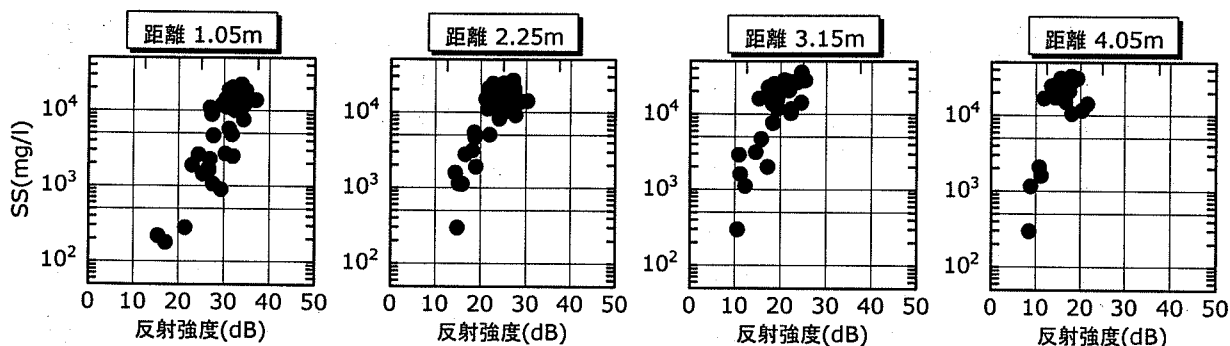


図-4 反射強度とSSの相関図(200kHz, 32パルス)

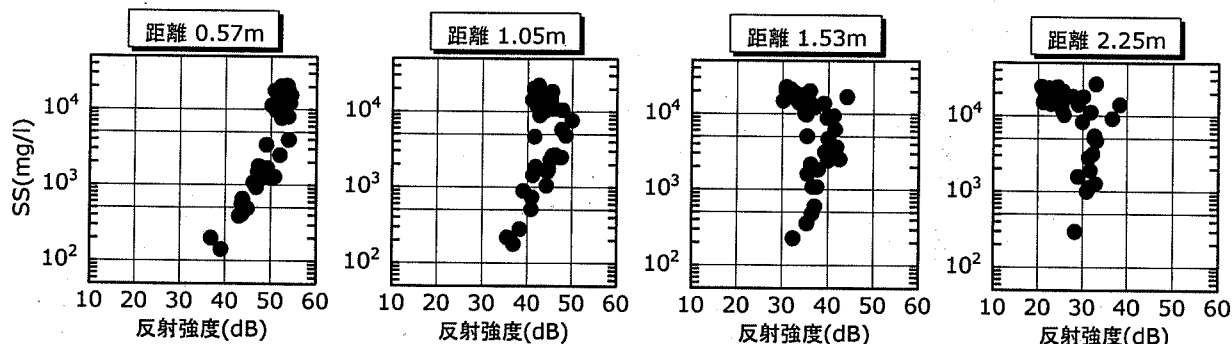


図-5 反射強度とSSの相関図(960kHz, 128パルス)

低下し、河床からの強い反射が得られている。一方、960kHz は高濃度時に水深 2.5m 付近で最低値まで減衰しており、河床からの反射も得られていない。

次に、反射強度とSSの相関図を図-4 (200kHz) と図-5 (960kHz) に示す。上部の数値はセンサーからの距離である。これより、200kHz ではいずれの水深・濃度でも指数関数的な相関が見られ、SS 計測のレンジは 20,000mg/L 程度である。一方、960kHz では途中で反射強度が減衰しており、SS の計測レンジは 5,000mg/L と大幅に低下した。

以上より、音波のSSに対する適切な応答は、200kHz では数万 mg/L かつ水深 8m 程度の範囲まで得られるのに対し、960kHz では数千 mg/L かつ水深 2～4m までの限定された範囲でしか得られないことが分かった。

4. 濃度減衰式の提案

(1) 濃度減衰の考え方

清水中を音波が伝播する際の損失は、拡散損失と減衰損失の和として表される。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、次式で表される⁴⁾。

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

ここで、 T_l : 伝搬損失 (dB)、 k : 拡散損失係数、 r : セン

サーからの距離 (m)、 α : 吸収係数 (dB/m) である。吸収係数は周波数の関数である。拡散損失係数 k は円筒拡散では 10、球面拡散では 20 と言われている。

さて、これまでの解析³⁾では(2)式を用いてきたが、SS と反射強度の相関を十分に表現できず、SS の推定精度が低い問題があった。(2)式はSS がほとんど無い清水中で適用されており、懸濁粒子によって音波の進路が妨げられることを想定していないためだと考えられる。

そこで水中の懸濁粒子による拡散・吸収・散乱の効果を加味することとする。損失は対象水深までの単位水柱に存在する粒子量によって生ずるものと考え、式形は水の拡散損失と減衰損失を参考にして、対数型と直線型を試す。これを式で表すと濃度減衰項 $f(C, r)$ は次の 5 通りが想定される。

$$\log(r \times C) \quad (3)$$

$$C \times \log(r) \quad (4)$$

$$r \times \log(C) \quad (5)$$

$$r \times C \quad (6)$$

$$\log(r) \times \log(C) \quad (7)$$

ここで C : SS 濃度 (mg/L) である。

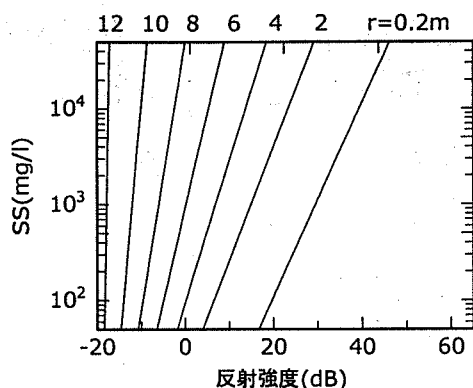


図-6 (5)式による解析結果(200kHz)

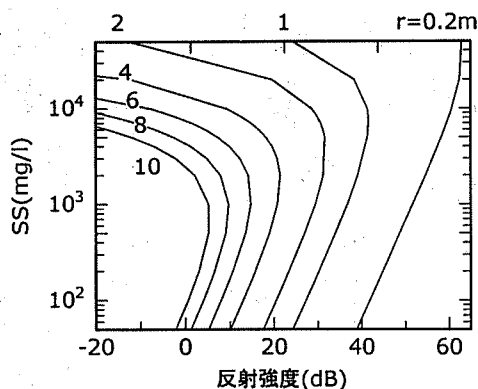


図-7 (6)式による解析結果(960kHz)

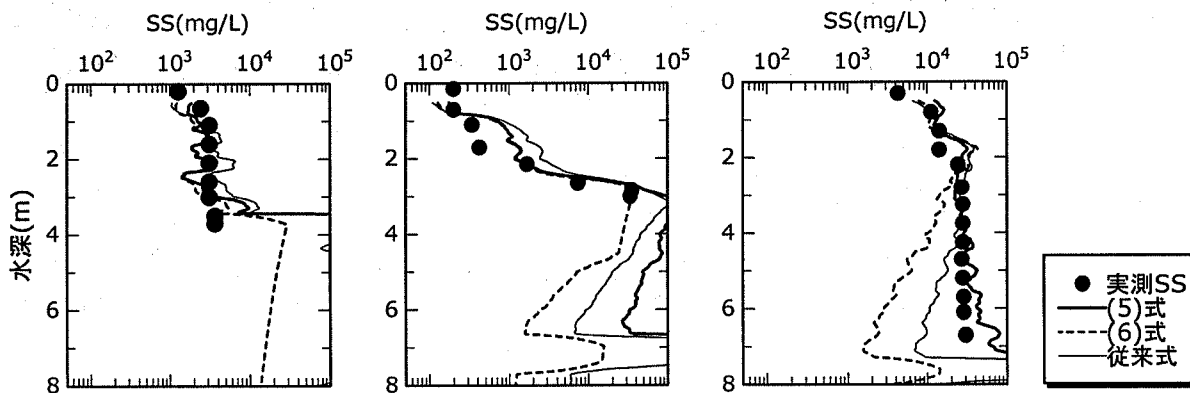


図-8 鉛直分布の解析例 (200kHz, 32パルス)

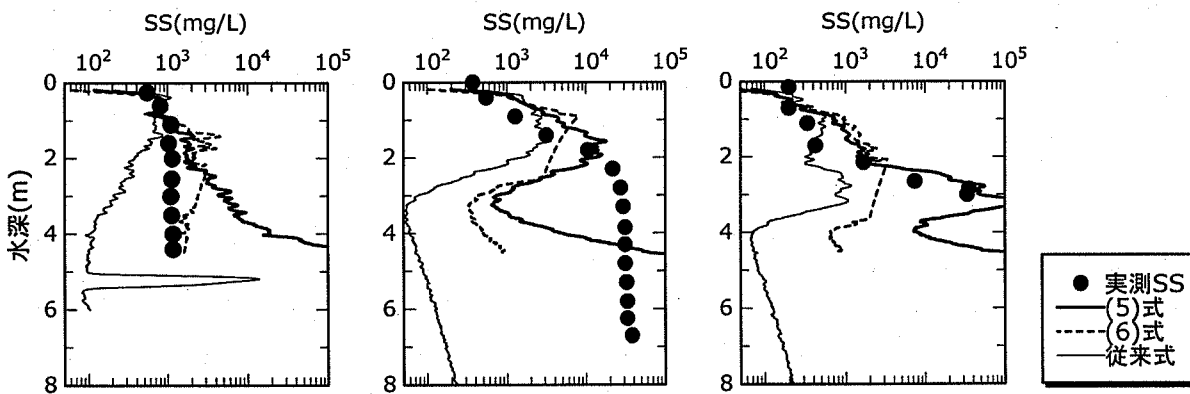


図-9 鉛直分布の解析例 (960kHz, 128パルス)

(2) 検証結果

反射強度とSSの相関は次式で表される。

$$10 \log C = I - B + k \log r + 2\alpha r + \beta f(C, r) \quad (8)$$

ここで I : 反射強度 (dB), B : 基準音圧 (dB), β : 濃度減衰係数である。

反射強度とSSの相関関係 (図-4, 図-5) は, 基本的には濃度の上昇に伴って反射強度が増大し, 距離の増加によって反射強度が減少するが, さらに高濃度時には音波が到達しにくくなって反射強度が減衰する特徴がある。このような濃度減衰特性を表現で

きる式形を調べたところ, (5)式と(6)式が選ばれた。(5)式によるSSの解析結果を図-6に, (6)式の結果を図-7に示す。

(5)式では直線的な関係が得られ, 水深の増大に伴って傾きが増加し, ある水深を超えると反射強度とSSが負の相関を持つ。200kHzの場合12.5mが適用できる限界であった。

(6)式では曲線的な関係が得られ, 960kHz (図-5)に見られた高濃度域における反射強度の減衰を表している。ただし, この式をそのまま用いると二価の結果が得られるので, 実際にはピーク反射強度までが適用範囲となる。また(6)式は解析的に解けず, 濃

度 C を仮定した収束計算が必要である。

(5)式と(6)式を用いた場合の鉛直分布の再現性を図-8(200kHz)と図-9(960kHz)に示す。図中には濃度減衰式を導入しない従来の解析結果も示している。200kHzの場合は、SS鉛直分布の再現性は水深が2mよりも浅い場所ではいずれの式でも大差ないが、全体的に見ると(5)式の再現性が最も高く、(6)式は従来式よりも劣っていることが分かる。(6)式は直線型であるため、濃度の増大に対する減衰が大きすぎる結果となった。

960kHzでは実験時の濃度が高すぎて推定可能な水深が3m程度までに限定されているために、濃度減衰式を導入した際の有効性がそれほど顕著に表れなかった。

以上より、水深12.5m程度までであれば、減衰が濃度の対数に比例する形式の(5)式が適していると言える。

5. 六角川のSS変動特性の再現

(1) 現地の流況

六角川は有明海の湾奥部に位置しており、最大6mにも及ぶ潮汐の影響を受ける。感潮区間は29kmであり、観測は河口から11kmの六角橋で実施した。図-10に観測地点における塩分・流速・SSの鉛直分布時系列を示す。SSは有線式濁度計の値から濁度-SS相関式を用いて推定したものである。流速とSSが下層で白抜きになっているのは、SS濃度が高すぎて計測不能だったことを示している。

塩水の流動状況としては、上げ潮の水位変化率が最も大きい10時頃に逆流流速も最大となり、満潮よりよりも若干遅れて12時30分に流れが停止し、塩分濃度も最大になった。その後、引き潮に転ずると流速が大きくなり塩分も低下してゆく。塩分や流速は鉛直方向にほぼ一様であったため、完全混合状態で塩水が流動していると言える。ただし、塩分は満潮時に表層が14.5psu、中層以下が13psuとなっており、表層の方が塩分が濃い状態にあった。

一方SSの挙動は鉛直一様ではなかった。逆流流速が最大となる10時頃には全層で濃度が15,000mg/Lであったが、塩水が進入してくるにつれてSS濃度が上昇して20,000mg/Lを超える。さらに、11時頃からは流速の低下に伴って表層濃度が低下して下層濃度のみが上昇し、満潮時には表層が300mg/L、下層が30,000mg/L以上になって極端に差がつく。その後、順流になると徐々に上下の濃度差が縮まってゆき、流速が最大になったときに全層で均一になる。

これより、六角川では流速が低下するとSSが分離・沈殿して、流速が増大すると下層に沈殿したSSが上層に連行されてゆくことを繰り返していることが分

かった。

先に、表層塩分が中・下層よりも高い現象を示した。この原因として、密度がSSと塩分によって規定されていることが考えられる。図-11に満潮時の水温、塩分、SS、流速の鉛直分布と密度分布を示す。

これより、SSが表層と中・下層で極端に差がついているため、高塩分層が上部に存在しても密度的には安定であることが分かる。また、流速を見ると表層では弱い逆流が見られるが、中層では停止している。満潮時の中・下層はSSが沈殿して30,000mg/Lを超えるため、粘性が高くなって流れにくくなり、表層に塩水が進入していると考えられる。

日本の他の河川では高濁度水塊のSS濃度が数万mg/Lに達することは無いため、塩分濃度が逆転するのは六角川特有の現象であると言える。

(2) ASSPによるSS分布状況の再現性

図-12にASSP(200kHz)による換算SSの鉛直分布図を示す。図-10と比較すると、換算SSは再現性の悪い部分が数箇所あるものの、全体的な傾向は概ね捉えられている。特に、有線式濁度計では満潮時の下層部分が計測限界を超えて反応しておらず、ADCPでは水深4mよりも下層には音波が到達していないが、ASSPではそうした高濃度領域が把握できている。

再現性が悪い原因は、一つには図-4に示した相関関係の分散性が考えられ、反射強度がSSのみに起因するという考え方の限界である。改善のためには、密度境界面の存在、SS以外の粒子性物質(プランクトン等)の存在などを考慮する必要がある可能性があるが、これらをパラメーターに導入すると計測の簡便性が失われる。

また、図-8の中央図に示したように、下層高濃度域でSS濃度が減少する傾向が発生していることも問題の一つである。こちらも上層と下層の密度差が大きすぎて、密度界面において反射強度が高めに出してしまうことが原因である。洪水時の河川では浮遊砂濃度がこのような分布をすることは無いと考えられるが、汎用的なSS測定装置とするには改善策を考える必要がある。

6. まとめ

音響式SS測定装置(ASSP; Acoustic Suspended Sediment Profiler)を開発し、その有用性と新たな濃度減衰式の適合性を佐賀県六角川で検討し、以下の結論を得た。

1)周波数200kHzと960kHzの反射特性の違いを調べたところ、200kHzでは濃度が20,000mg/L、水深が10m以上まで計測可能であるが、960kHzでは濃度が5,000mg/L、水深が2~4mまでが限界であり、高濃度時の

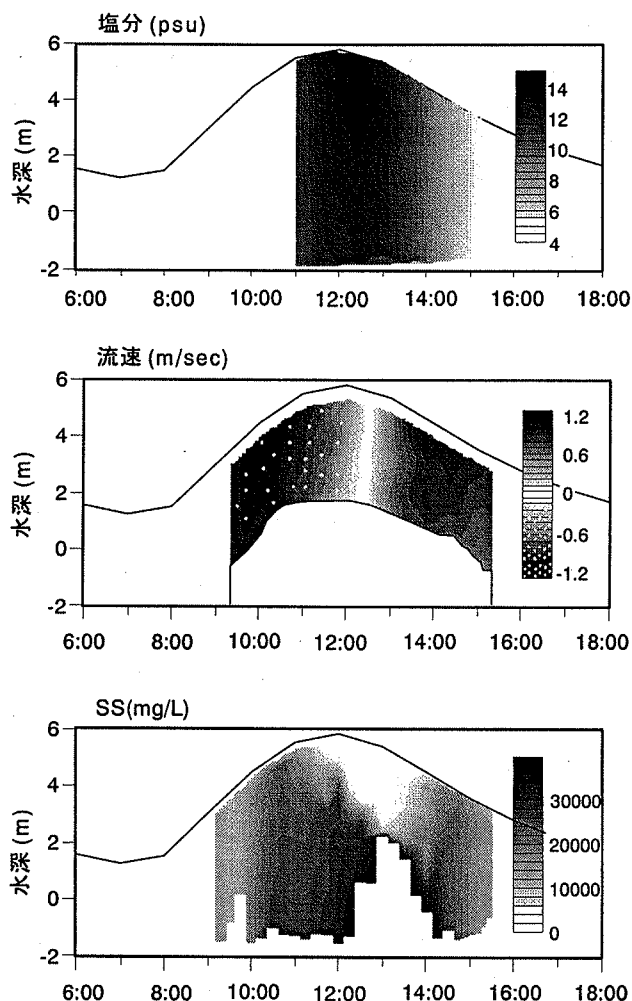


図-10 六角川感潮域の濁水流動状況 (2003/3/10)

計測には適していないことが分かった。

2) 超音波の反射強度が高濃度時に減衰する現象を表現するために、清水中で適用される伝搬損失式にSSによる濃度減衰項を付加することを提案した。濃度減衰項としては濃度の対数に比例する形式が最も適していた。

3) 濃度減衰項を付加した伝搬損失式を用いて200kHzの反射強度から六角川のSS分布状況を推定したところ、有線式濁度計で計測されたSS分布をある程度再現できた。濁度計やADCPでは計測不可能な高濃度領域でもSS値を推定できる利点が示されたが、絶対値の推定精度は未だ十分とは言えず、さらなる改良が必要である。

4) 六角川では強混合状態で濁水が移動しているが、満潮時には流れが停滞するために懸濁粒子が沈殿して、下層に数万mg/Lもの超高濃度層が形成されていた。下層ではSSによって密度が重くなるため、表層に高塩分水が進入している様子が明らかになった。

謝辞：現地実験では、鶴見精機、アレック電子、国土環境(株)、首都大学東京大学院の新谷助手ならび

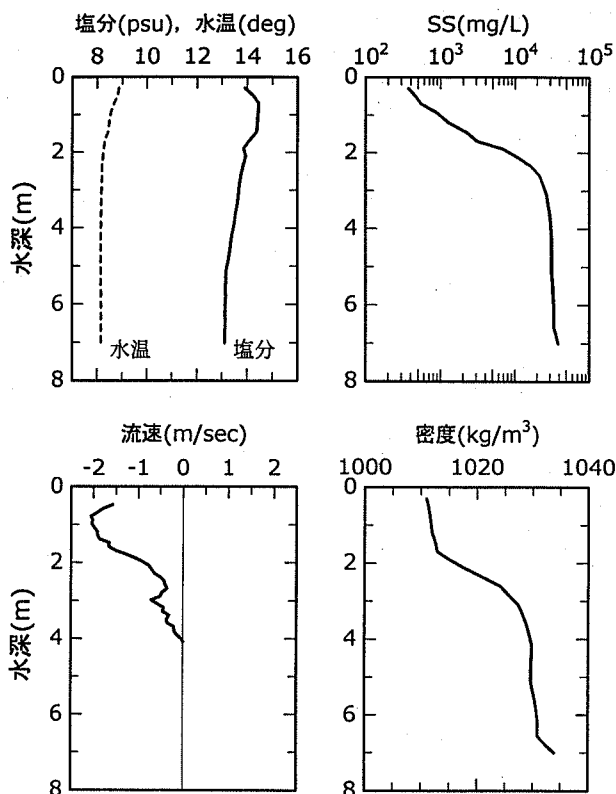


図-11 満潮時の塩分、水温、SS、流速、密度の鉛直分布

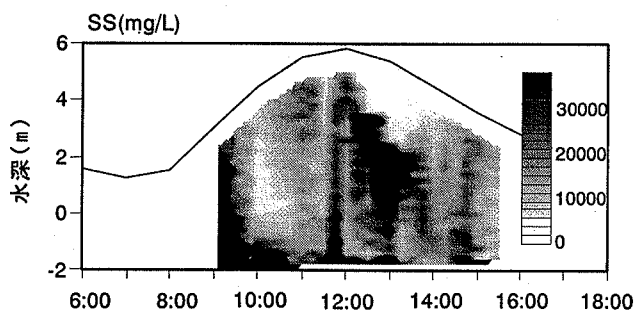


図-12 SS濃度分布の推定結果 (200kHz)

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, 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.
- 3) 横山勝英, 梅田信, 山崎久勝: 音響式SS測定装置の開発に関する研究, 水工学論文集, 第49巻, pp547-552, 2005.
- 4) Robert. J. Urlick: 水中音響の原理, 共立出版株式会社, pp. 99-110, 1978.

(2005. 4. 7 受付)