

超音波を用いた浮遊砂計測法の開発に関する研究

Development of Measurement of Suspended Sediment using Ultrasonic Wave

加藤 茂¹・Syamsidik²・岡辺拓巳³・青木伸一⁴

Shigeru KATO, SYAMSIDIK, Takumi OKABE and Shin-ich AOKI

The purpose of this study is to develop a measurement method for suspended sediment using ultrasonic wave. Some experiments were carried out to measure suspended sediment concentration and echo intensity reflected by suspended sediment in a tank, and the relationship between measured concentration and echo intensity was investigated. The experimental results show that the relationship is consistent in the experimental condition with the wide range of sand grain size and mass concentration without information of sand grain size in suspended sediment, while the measurement by an optical turbidity sensor needs this information to estimate mass concentration from turbidity. Furthermore, it is indicated that the measurement method using ultrasonic wave may be possible to measure suspended sediment spatially.

1. 緒言

フィールドでの浮遊砂計測では、直接採水による長期または連続計測が困難であるため、濁度計による代替計測が行われることが多い。しかし、光学式の濁度計では、光の透過率や反射率から濁度を推定するため、得られるデータが浮遊砂の粒径や材質、色、周辺環境（自然光の強弱等）によって変化することが指摘されている（横山，2002；Hofmannら，1995；川西ら，2006）。また、透過率または反射率と濁度の関係自体がホルマジン標準液を用いて得られた校正式であり、濁度計で得られた値をそのまま浮遊砂濃度として見なすことはできない。そのため現地での採水サンプルを用いて、計測対象ごとの濁度－濃度の検定が必要である。近年では、既存の超音波計測器（流速計や水位計など）を用いた濁度計測も試みられている（泉宮ら，1999；Chansonら，2006）が、超音波計測データのキャリブレーションのために濁度計との併用が必要であるなど、汎用的で超音波計測器単体の濃度計測にまでは至っていないのが現状であると言える。また、従来の光学式濁度計（特に反射率を用いた濁度計）では、センサーの計測面近傍（十数cm程度以内）にある浮遊物質からの反射率を計測しているのみであるため、我々がそれを計測位置周辺での浮遊砂濃度と考えるためには、浮遊砂の発生がある程度の領域（例えば数m四方）で一様であり、その中の僅かな一部分（数cm四方）を代表範囲として計測している、と考える必要がある。しかし、現地での浮遊砂の発生は時間的にも空間的にも間欠的な場合も多く、上記のような空間的な均一性

を仮定することは困難である。従って、より現地での浮遊砂の発生状況および浮遊砂濃度の定量的な把握を行うためには、時間・空間的に計測が可能であることが望まれる。そこで本研究では、光による濁度計測では問題となる濁質の粒径や色への依存性が無い、もしくは光に比べて小さいと考えられる超音波を用いることで、超音波反射エコーを用いた浮遊砂濃度の定量計測手法の開発を試みる。

2. 超音波ソナーの概要

本研究では、本多電子株式会社が製作した超音波送受波器（超音波ソナーと専用アンプ）を用いた。このソナーは同じ振動子によって、超音波の発信と受信を行い、発信される超音波の周波数（発信周波数）は1MHzである。また、対象物等により反射してきた超音波（反射エコー）の計測サンプリングは8MHz（時間分解能： 0.125×10^{-6} s）であり、反射エコーの音圧強度が ± 1 V（分解能：12ビット）の範囲の変動データとして得られる。超音波ソナーは専用のアンプを経由してパソコンに接続されており、このパソコンにより超音波発信の制御および計測データの保存が行われる。

得られた反射エコーデータの時間情報に水中での音速を掛けることで、超音波ソナーから超音波が反射した計測対象物（ここでは浮遊砂を想定）までの距離が推定できる。したがって、超音波の発信をある時間間隔で繰り返すことにより、超音波送波線上での浮遊砂の空間分布が時系列データとして得られる。

3. 浮遊砂計測実験

超音波ソナーで得られる浮遊砂からの反射エコーと浮遊砂濃度の関係を明らかにするために、室内実験を行っ

1 正会員 博(工) 豊橋技術科学大学准教授 工学教育国際協力研究センター
2 博(工) 豊橋技術科学大学産官学連携研究員
3 修(工) 豊橋技術科学大学産官学連携研究員
4 正会員 工博 豊橋技術科学大学教授 工学部建設工学系

た。実験には、豊浦砂、三河珪砂7号（以下、珪砂）および自然海浜から採取した砂を用いた。豊浦砂と珪砂の中央粒径 d_{50} はそれぞれ0.21mm、0.16mmである（図-1）。自然砂は、ふるい分け試験により0.3～0.35mmの間の砂のみを抽出して用いた。浮遊砂濃度の計測には、以下の2種類の方法を用いた。

(1) レーザー回折式浮遊砂濃度計を用いた濃度計測

全面アクリルで作られた実験水槽（長さ1.5m、幅0.75m、深さ0.75m）を用いた。水槽内に、超音波ソナーとレーザー回折式浮遊砂濃度計（LISST-100）を設置し、反射エコーと浮遊砂濃度（体積濃度）の同時計測を行った（図-2）。超音波ソナーとLISSTの設置位置は、反射エコー計測にLISST本体からの反射の影響が無いことを確認して決めている。LISSTは計測ウィンド内のオプティカルパス（5cm）上を通過する砂の濃度を計測するため、超音波ソナーによる計測データとの比較ではLISSTの計測位置の直上に相当する部分での計測データを用いた。LISSTでは2秒平均値（6サンプルの平均値）の計測を行った。

LISSTは砂粒子によるレーザー光の回折から粒子径（32代表粒径）を推定し、この情報とレーザーの透過度

から各粒径の体積濃度を推定している（Agrawalら、1994、2000）。その計測アルゴリズムから、LISSTでは体積濃度計測に、従来の光学式濁度計による濁度計測のような粒径への依存性はほとんど無いとの報告（Traykovskiら、1999）もあるため、今回の実験で濃度計測に用いた。ただし、計測性能としては粒径の計測可能範囲は0.0025～0.5mmとされているものの、室内実験により0.25mmより大きな砂粒子では、その粒径を正しく評価できていないことも示されている（Traykovskiら、1999）。したがって、図-1の粒度分布を考慮し、豊浦砂と珪砂を用いた実験でのみ、LISSTによる濃度計測を行った。また、32代表粒径毎に得られた体積濃度を総和することで全体の体積濃度が得られるが、上記の理由から32粒径中0.39mmと0.46mmの値はデータ解析でも用いないこととした。

実験では、採水ピンで砂と水を混ぜた後、その濁水を計測想定位置（LISSTの計測部がある位置の水面）付近に注水することで、沈降する浮遊砂を発生させた。それを図-2のように配置した超音波ソナーとLISSTで計測を行った。体積濃度から重量濃度への変換は、今回実験で用いた砂の密度を全て 2.65g/cm^3 と仮定して計算を行った。

(2) デジタルビデオカメラを用いた濃度計測

前述のように、LISSTでは0.25mmより大きな粒径では計測に誤差が生じやすい。また、濁水を注水して浮遊砂を発生させる方法では、高濃度浮遊砂の発生に限界があった。そのため、高濃度および0.25mmよりも大きな粒径を対象とした実験では、小型のベルトコンベアーを用い、連続的に定量の砂を水槽に投入することで、高浮遊砂濃度を発生させる方法を用いた。また、そのときの浮遊砂濃度の測定は、砂粒子の沈降速度から推定する方法を用いた。実験には、側面がアクリルで作られた幅の狭い水槽（長さ1.7m、幅0.1m、深さ1m）を用い、水槽端に設置した超音波ソナーで浮遊砂からの反射エコーを計測すると同時に、投入された砂の水中での落下の様子を、デジタルビデオカメラ（DVC）で水槽外から撮影した（写真-1）。ベルトコンベアーから投入された砂の質量 W （g）と投入に要した時間 T （s）も同時に計測している。ここで、水槽内での砂の落下が定常状態であると仮定し、撮影されたビデオ画像から砂粒子の沈降速度 w_f （m/s）と砂が通過する水柱の断面積 A （ m^2 ）を求めることができれば、そのときの浮遊砂濃度 C （g/l）が推定できる。さらに、ベルトコンベアー上に敷きつめた砂の幅は約0.06mであり、水槽の幅 B が0.1mと狭いため、投入された砂は水槽の幅（奥行き）方向全体に行き渡ると仮定すると、側面から撮影したビデオ画像より水中での落下している砂の幅 L （m）を計測すれば、 A を求めることがで

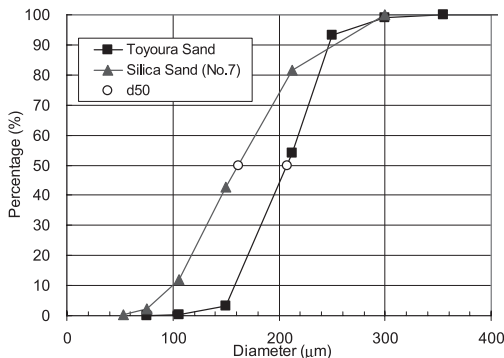


図-1 実験に用いた砂の粒径分布および中央粒径

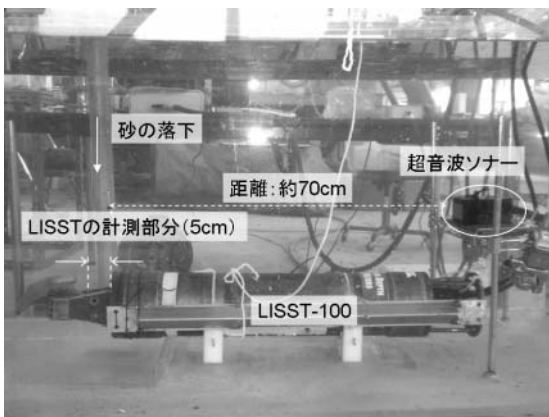


図-2 超音波ソナーとLISSTの配置

きる（写真-1）．最終的に， C は以下の式で推定できる．

$$10^{-3}WT^1 = Aw_f C = BLw_f C \quad \dots\dots\dots (1)$$

(3) 実験データの解析方法

超音波ソナーでは8MHzで反射エコーの音圧強度が取得されるため，1回の超音波送受波で，ほぼ0Vを中心とした $\pm 1V$ 範囲内での変動データが $0.125 \times 10^{-6}s$ 間隔で得られ，計測範囲を2mとすると約21,000個のデータ（距離分解能：約0.1mm）が得られる．図-3に計測データの

一例を示す．本研究では一次解析として，得られた変動データを二乗し，その1cm毎の平均値を求めた．LISSTおよびDVCで得られた濃度データとの比較では，それをさらに時間平均または空間平均することで，濃度データと反射エコー強度データとの比較を行った．以下，本論文では上記のように二乗し空間・時間平均した音圧強度の平均変動エネルギー相当量をエコー強度と呼ぶ．

4. 実験結果

(1) 浮遊砂濃度計測

図-4は，LISSTで得られた体積濃度と超音波ソナーで得られたエコー強度の時系列を比較した一例である．エコー強度は，空間分布データからLISST計測位置に相当する地点（超音波ソナーから約0.7～0.75m）でのデータの平均値を用いた．この実験では，先に発生させた浮遊砂が全て沈降したことをパソコン画面にリアルタイム表示した超音波画像（反射エコーの計測データ）で確認しながら，同じ実験砂で複数回繰り返した．図中の○と■は，それぞれ濁水が超音波ソナーの計測範囲に到達したときのエコー強度のピーク値とそれに相当するLISSTによる体積濃度のピーク値である．図-2のような配置であるため，ピーク値の出現はエコー強度のほうが少し先行しており，対応するピークの○と■が比較のペアとなる．このような時系列が実験砂ごとに得られる．このピーク値のみをデータから抽出し，豊浦砂（ $d_{50} = 0.21mm$ ）で37データ，珪砂（ $d_{50} = 0.16mm$ ）で28データ，ふるい分けで粒径を限定した珪砂（0.150～0.212mm）で16データの合計81データが得られた．図-5は，これらのデータのエコー強度 E と濃度 C の関係を示している．粒径毎および全データでの回帰式とその相関係数もあわせて示している．粒径の違いによる影響としては，粒径が小さくなると回帰式の傾きが大きくなる傾向が確認できる．この傾向は，同じ濃度に対して粒径が小さくなるほどエコー強度が小さくなることを示している．これは，粒径が小さくなるほど，同じ濃度の濁水中での粒子個数（粒子濃度）が増加するた

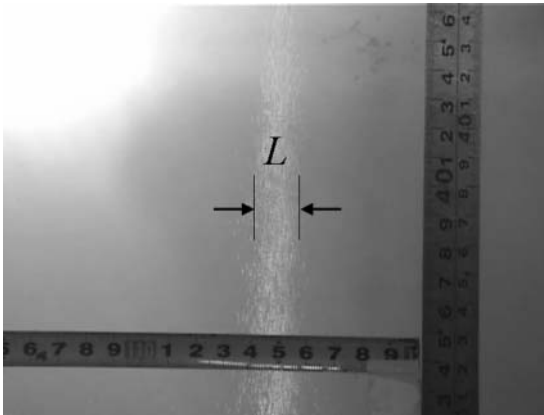


写真-1 ベルトコンベアーで投入した砂の落下の様子

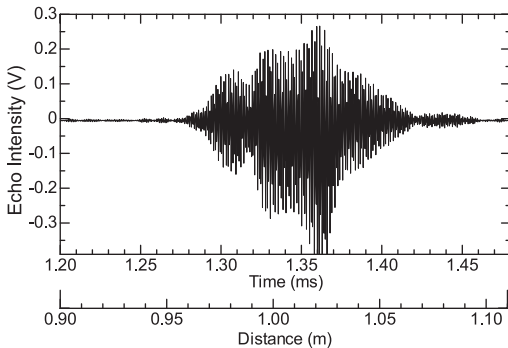


図-3 超音波ソナーによる音圧強度変動の計測結果例

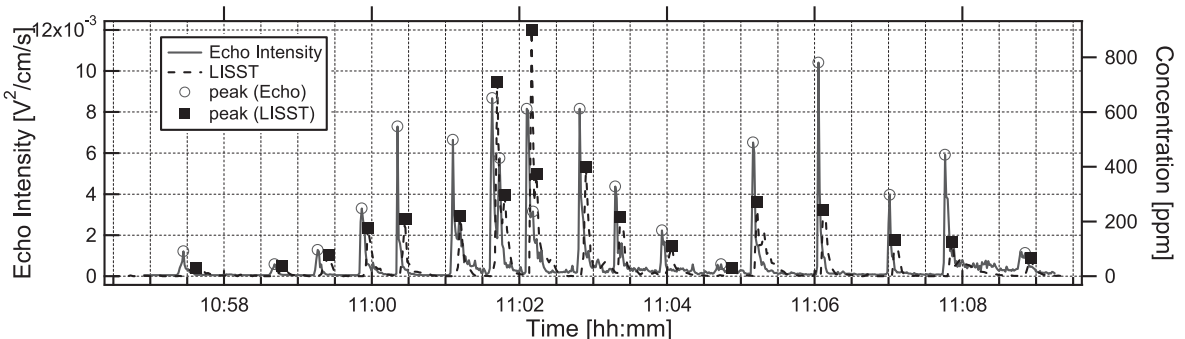


図-4 反射エコー強度（ソナー）と体積濃度（LISST）の計測結果の比較（豊浦砂のケースの一例）

めに、超音波の散乱が多くなるためであると考えられる。しかし、各実験毎の回帰式の傾きは、全データでの回帰式の傾きに対してそれほど大きな差は生じなかった。

図-6はDVCによる浮遊砂濃度の推定結果を示している。この実験では約7gの自然砂 ($d_{50}=0.3\sim0.35\text{mm}$) をベルトコンベアー上に敷きつめ、ベルトの移動速度を変化させることで(5ケース)、発生する浮遊砂濃度を変化させた。また、各ケース(移動速度)で同様の実験を5回実施した。今回の実験では、約2~11g/lの浮遊砂を発生させることができた。また、各ケースの推定結果に比較的バラツキは少なく、実験に再現性があることが確認できた。

図-7は、各実験で得られた浮遊砂濃度 C とそのときに得られたエコー強度 E の対応関係を示している。小粒径・低濃度の場合(図-5)と同様に、若干のばらつきは見られるものの、 C と E の間には線形の関係が確認でき、回帰式の傾きも図-5での傾き(84.9)とかなり近い値(88.2)が得られた。これより、小粒径・低濃度から大粒径・高濃度の広い範囲の粒径・濃度条件において、粒径・濃度レベルに因らないほぼ一定のエコー強度-濃度の対応関係が

得られた。

図-8は、従来の光学式濁度計による粒径依存性の確認実験結果を示している。粒径によって、濁度と濃度の関係は明らかに異なっており、同じ濃度に対して $d_{50}=0.13\text{mm}$ の砂を含む濁水は $d_{50}=0.3\text{mm}$ の砂から成る濁水に比べて、1.5倍程度の濁度を示している。したがって、光学式濁度計で得られた濁度を用いて浮遊砂濃度を議論するためには粒径の情報が必要不可欠であることが明らかである。それに対して、本研究で試みている超音波を用いた浮遊砂計測では、濃度計測結果及ぼす粒径の影響は小さく、本手法は濃度の定量計測において有効であるとともに、光学式濁度計よりも優位性を有していると考えられる。

(2) 空間分布計測への適用性

図-9は、上記実験で得られたエコー強度のコンター図

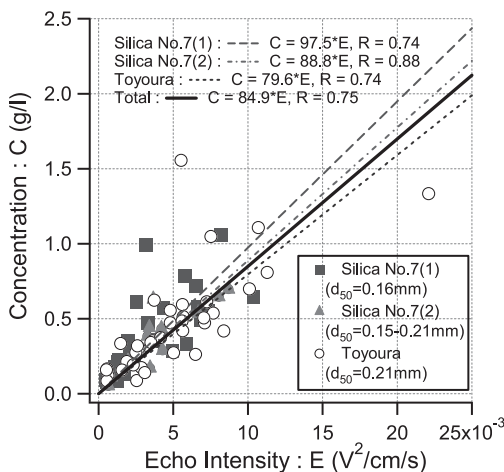


図-5 エコー強度と濃度との関係

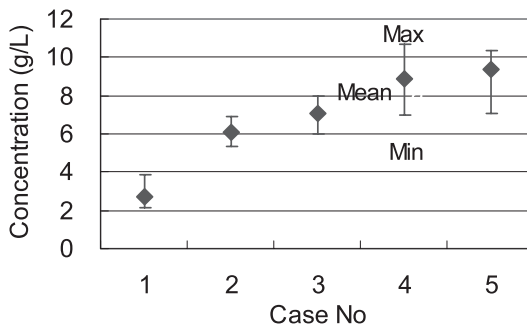


図-6 浮遊砂濃度の発生範囲

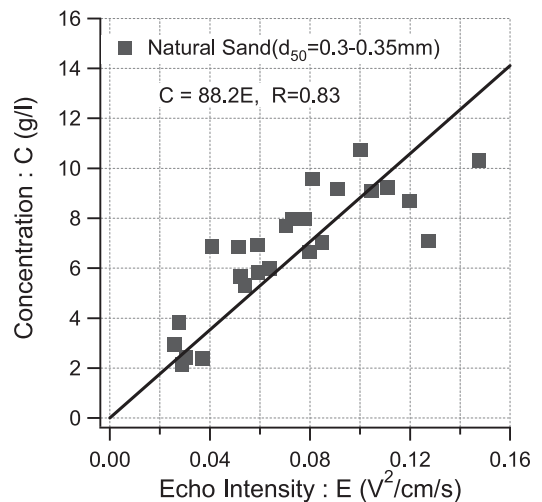


図-7 大粒径・高濃度条件でのエコー強度と濃度との関係

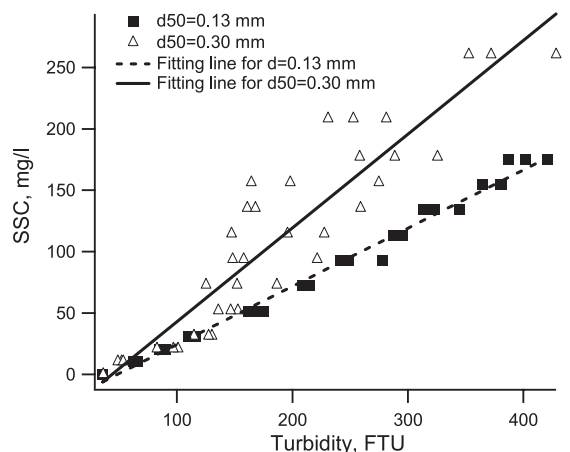


図-8 光学式濁度計による濁度計測での粒径依存性

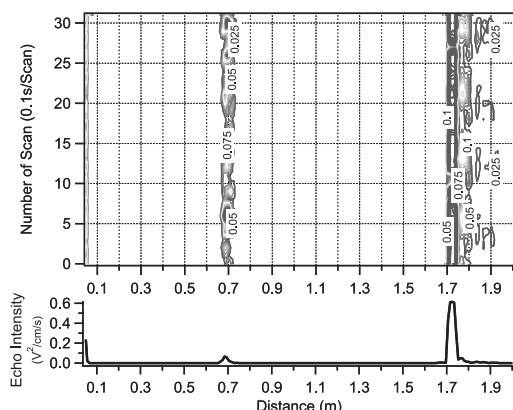


図-9 浮遊砂発生時のエコー強度の時間・空間分布と送波線上での空間分布図

(上段)とそのデータ中のある瞬間でのエコー強度の空間分布(下段)の一例である。実験水槽の長さは約1.7mである。この実験では、ソナーから約0.7mの位置に砂を投入しているが、0.7m付近で反射エコーが得られており、本研究で用いた超音波ソナーは、非常に高い空間検出性能を有していることが確認できた。また、1.7m付近にも非常に強い反射エコーが検出されている。これは、浮遊砂で超音波が全て反射されることなく、一部は浮遊砂背後にある水槽壁にまで到達しているためである。また、水槽壁から反射エコーも途中の浮遊砂に阻害されることなくソナーへ到達しており、正確な水槽壁の位置を検出できている。ここで用いたデータは、DVCとベルトコンベアーを用いた実験(図-6)のケース5の1つである。このときの浮遊砂濃度は10g/lであり、このような高濃度条件下でも浮遊砂の発生位置と、その背後の壁の位置を正確に検出できていることから、本計測方法では超音波送波線上に存在した浮遊砂群を空間的に計測することが可能であると考えられる。

5. 結語

現在、浮遊砂濃度の計測としては、濁度計による濁度計測が濃度計測の代替計測として用いられているが、一般的に光学式濁度計では、計測結果に及ぼす濁質の特性(粒径や色など)の影響が問題となる。そこで、本研究では濁質の粒径や色への依存性が少ないと考えられる超音波を用いた浮遊砂濃度の計測手法の開発を試みた。本研究で得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 豊浦砂($d_{50} = 0.21\text{mm}$)、珪砂($d_{50} = 0.16\text{mm}$)、粒径幅を限定した珪砂(0.150~0.212mm)および自然砂(0.3~0.35mm)の4種類の粒径を用いた浮遊砂濃度の計測実験を行い、反射エコー強度と濃度の対応関係を調べた。その結果、粒径によって僅かにエコー強度と

濃度の関係が異なるが、それほど大きな差ではなく、広い範囲の粒径・濃度条件下でほぼ一定の対応関係を得ることができた。これにより、粒径に関する情報が得られなくとも、エコー強度から浮遊砂濃度の推定が可能であると考えられる。

- (2) 浮遊砂濃度の発生位置を正確に検出できた。また、このときの浮遊砂濃度は10g/lの高濃度な状況であったにもかかわらず、浮遊砂の背後にある水槽壁の位置も浮遊砂と同様に、非常に精度良く検出できていることが確認できた。これは、超音波が非常に高濃度の浮遊砂に到達した場合でも、全て反射されるのではなく、その一部は浮遊砂の背後まで到達し、そこで新たな物質によって反射されていることを示している。したがって、超音波を用いた浮遊砂計測法では、超音波送波線上に存在した浮遊砂群を空間的に計測することが可能であると考えられる。

謝辞: 本研究は、科学技術振興調整費「先端技術を用いた動的土砂管理と沿岸防災」(代表: 青木伸一, 豊橋技術科学大学)の関連研究として実施されたことをここに記します。また、本研究で使用した超音波計測器の製作および実験での使用に当たり、本多電子株式会社の関係諸氏には大変お世話になりました。

参 考 文 献

- 泉宮尊司・國田知基・泉 正寿・永松宏・石橋邦彦 (1999): 船体取付型 ADCP によるシルトおよび微細砂の濃度の時空間変動の現地観測, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.576-580.
- 川西 澄・稲田 景 (2006): 超音波流速計による浮遊粒子の粒径を考慮した浮遊砂濃度の測定法, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.1401-1405.
- 横山勝英 (2002): 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, pp.93-98.
- Agrawal, Y.C. and H.C. Pottsmith (1994): Laser diffraction particle sizing in STRESS, Continental Shelf Research, Vol.14, pp.1101-1121.
- Agrawal, Y.C. and H.C. Pottsmith (2000): Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport., Marine Geology, Vol.168, pp.89-114.
- Chanson, H, M. Takeuchi and M. Trevethan (2006): Using Turbidity and Acoustic Backscatter Intensity as Surrogate Measures of Suspended Sediment Concentration. Application to a Sub-Tropical Estuary (Eprapah Creek), Department Technical Report, No.CH60/06, Division of Civil Engineering, The University of Queensland.
- Hofmann, A. and J. Dominik (1995): Turbidity and mass concentration of suspended matter in lake water: A comparison of two calibration methods, Aquatic Sciences 57/1, pp.54-69.
- Traykovski, P., R.J. Latter and J.D. Irish (1999): A laboratory evaluation of the laser in situ scattering and transmissometry instrument using natural sediments, Marine Geology Vol.159, pp.355-367.