

浮遊粒子の粒度及び濃度分布の同時計測に関する基礎的研究

柿 木 哲 哉*・辻 本 剛 三**

本研究は浮遊砂量を定量的に明らかにするため、浮遊砂の粒度分布を同時計測できる濃度計測手法を開発することを目的とする。浮遊砂濃度計測は光学式濁度計等による接触・点計測が一般的である。また、面的・非接触で計測可能な画像解析による方法もあるが、これは画像輝度の濃淡から濃度を推定する所に弱点を持つ。そこで本研究では砂粒子そのものを画像から直接判読し、濃度を推定することを試みた。また、粒子サイズも同時に取得できるため、浮遊砂の粒度分布計測についても検討を加えた。その結果、本手法は浮遊粒子の粒度と濃度分布を同時計測でき、その適用範囲は従来の手法と同程度で、さらに壁面近傍まで計測可能であることが分かった。

1. はじめに

波動場での砂移動の問題は海岸浸食や土砂堆積の研究で重要な位置を占め、多くの研究者がこの過程のモデル化を試みており、数多くの実験が行われている。これまでも海底面における砂輸送のプロセスを明らかにすべく数多くの振動流下における砂輸送の室内実験が行われているが、底面からの砂の巻き上げや沈降、さらにこれが渦の形成とどの程度関係があるのかなど、未だによく分かっていない部分がある。

浮遊砂濃度計測手法としてサイフォンを用いた採水による方法や各種濁度計を用いた方法などが一般的であるが、これは接触計測・一点計測であるという弱点がある。一方、この弱点を克服するものとして非接触・面的計測可能な画像解析や CT (日野, 1997, 1998) を用いたものが提案されるようになった。八木・首藤 (1987) は写真機とスリットストロボを用いた浮遊砂濃度の測定を行っている。これは、1 周期を 16 分割した各位相ごとに砂漣の上下流 2 領域の砂粒子静止画像をそれぞれ撮影し、砂粒の個数を測定するものである。佐藤・久保田 (1991) は碎波点における浮遊砂の巻き上げ過程を CCD ビデオカメラで撮影し、画像解析により浮遊砂濃度と浮遊砂の移動速度を推定する手法を提案している。

また、浮遊泥を扱ったものとして、神田ら (1998, 1999) がある。これは、画像の輝度情報をもとに浮遊泥濃度の空間分布を推定する手法で、輝度-浮遊泥濃度関係式を光の基礎理論から誘導し、一様濃度場での可視化画像から濃度を求めている。光の多重散乱の効果を導入し、一様濃度場の場合には効果をあげているが、非一様な濃度場での計測については困難であると述べている。Sleath・Wallbridge (2002) は画像解析を用いて浮遊砂濃度を計測し、砂移動と砂漣上に形成される渦には関係があることを明らかにしたが、定性的なものであるにとどまっており、定量的な検討をするまでには至っていない。

画像解析の弱点として、次のような問題点が挙げられる。①流体中の粒子が光の減衰や散乱を招き、質の良い可視化画像を得ることが難しい。その結果、②均一なものを撮影したにもかかわらず、得られる可視化画像は不均一な輝度分布を呈する。

写真-1 は容量 2 L のビーカー内に作成した一様濃度場の可視化断面 (高さ 12 cm, 幅 9 cm, 砂の中央粒径 0.28 mm) を撮影した画像の 1 例である。写真は見やすくするため実際の画像の白黒を反転させている。写真中の小さな黒い点が可視化された砂粒子を表している。写真中の領域 1 と領域 2 は同程度の濃度場であるにもかかわらず、この様に明暗のある画像になっている。

そこで本研究では画像輝度の濃淡から濃度を推定するのではなく、画像解析により砂粒子そのものを画像から直接判読し、濃度を推定することを試みた。また、このとき得られる情報は主として抽出粒子の位置ベクトルであるが、同時に粒子径も得ることができるので、画像解析を用いた浮遊砂の粒度分布を同時計測できるため、この方法についても検討を加えた。

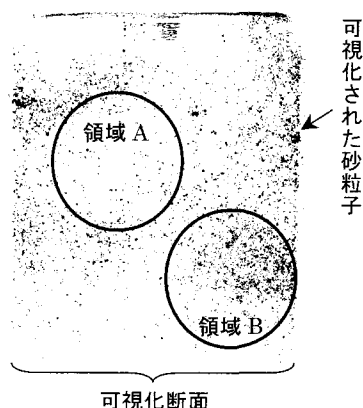


写真-1 可視化画像の1例

* 正会員 博(工) 神戸市立工業高等専門学校講師 都市工学科

** 正会員 工 博 神戸市立工業高等専門学校教授 都市工学科

2. 基本性能実験

(1) 可視化実験の概要

なるべく不定な要素を排除すべく簡単な実験を行った。図-1は可視化実験の模式図である。図に示すように深さ20 cm、直径13 cm、容量2 Lのビーカーに $D_{50}=0.28$ mmの砂を入れ、スターラーで攪拌しなるべく一様な濃度を生成し、可視化した。可視化には日本カノマックス社製ダブルパルスNd:YAGレーザーを使用し、撮影にはRoper Scientific社製のMEGAPLUS MODEL ES1.0を使用した。なお、レーザーシートは水表面の形状の影響を避けるため、図-1に示すようにビーカーの側方からガラス越しに照射した。ビーカーのガラス壁においてレーザーが若干屈折するため、カメラと可視化断面が直角になるように調整したあと撮影した。

(2) 画像解析

図-2は可視化画像中の粒子1個分についての輝度分布で、粒子中心を通る水平方向軸に沿ったものである。また、これは粒子径の異なる2パターンを並べて描画したもので、実線の方が点線の方に比べ、若干粒子径が大きくなっている。

本研究で行う浮遊砂濃度計測もしくは粒度計測の画像解析においては、これらの輝度分布を元に粒子の位置や大きさを決定するが、まず粒子位置については輝度のピークをもって粒子位置とした。ただし、図-2中の実線のように、輝度値が最高値255で頭打ちになり、ピークが

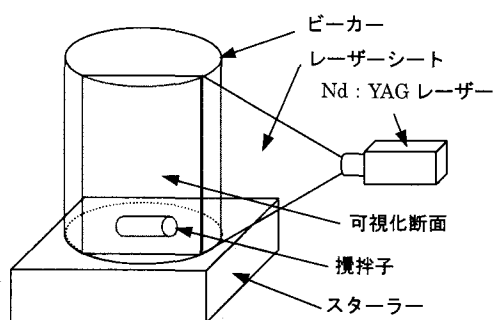


図-1 可視化実験の模式図

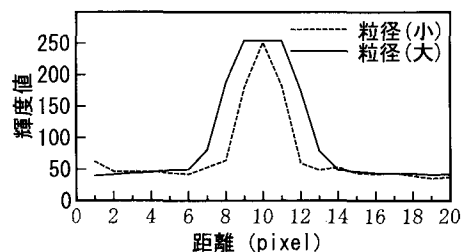


図-2 粒子1個あたりの輝度分布

平坦になった場合は、その中心をピークの存在点として対処した。次に、粒子径についてであるが、輝度の勾配が立ち上がる点を粒子の外縁とし、その両端を結ぶ線が粒子の直径、すなわち粒子径を与えるものとした。

(3) 多重散乱の影響について

本実験では可視化断面の作成に指向性・配向性の高いレーザーを用いているため、基本的に可視化断面の厚さは1 mm程度に抑制されている。しかしながら、図-3に示すように、砂粒子の濃度が上昇するにつれて、砂粒子で散乱したレーザー光がその周りの砂粒子を照らすため、実際に画像に写りこむ可視化断面の厚さは1 mmよりも何倍か厚くなることが実験の結果より分った。

図-3 (a) はビーカーを上から見た平面図で、図-3 (b) はビーカーを横から見た側面図である。また、その様子を示したものが写真-2で、図-3 (b) の側面図の左端側に対応する。なお、図は見やすくするために白と黒を反転させて表示している。写真-2中の黒い点が砂粒子で、濃い黒の点がレーザーシート内の砂粒子で、色の薄い点がレーザーシート外の砂粒子である。

このときの輝度の分布を表したものが図-4である。実線がレーザーシート内の濃い黒の点で、点線がレーザーシート外の薄い点1個分の輝度の分布である。

これを見ると、レーザーシート内の点の輝度はピーク値が輝度の最高値255であり、なおかつ平坦なピーク値を持つ。それに対し、レーザーシート外の点は輝度の最高値が高々70~80であり、レーザーシートの中と外では輝度の最高値が全く異なることがわかる。

このように、レーザーシート内外で輝度の分布形並びに最高値が全く異なることから、本手法ではこの特性を利用し、可視化画像からレーザーシート外の粒子情報を削除し、シート内の粒子情報だけを抽出することにした。

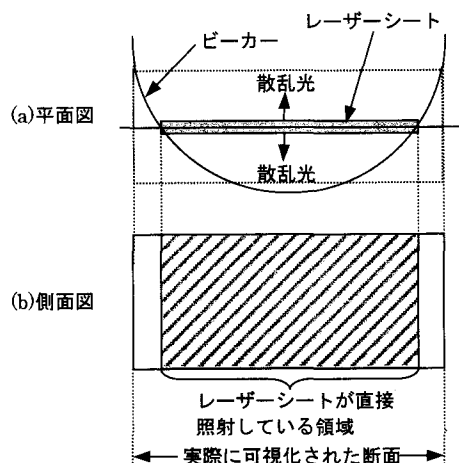


図-3 可視化における多重散乱の影響

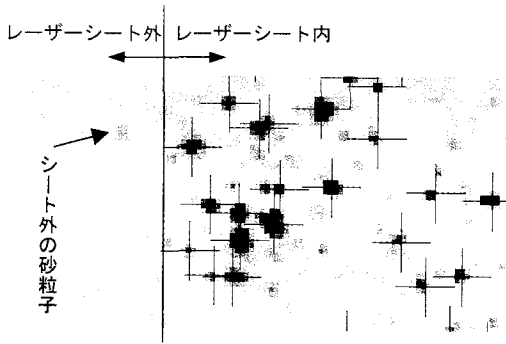


写真-2 レーザシート内外の砂粒子の写り方

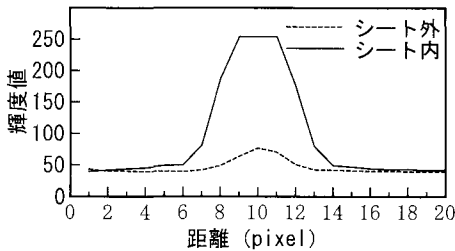


図-4 レーザシート内外の粒子の輝度分布

写真-2 に示した十字印は画像解析により抽出した粒子の位置を示したものである。更に、この特性を利用し、可視化断面の奥行き方向のシート外粒子の削除も行った。

(4) 画像解析の精度

次に、まず画像解析のチェックとして、抽出された粒子の個数と理論的に得られる個数の関係を調べた。例えば 1000 ppm の場合を考え、レーザシートによって可視化された断面内の平均的な砂粒子数を概算する。レーザシートにより可視化される空間のサイズを図-5 のようであったとし、断面内の砂粒子数を X 個とおけば、レーザシート内の砂の全質量 Wg は、砂の粒径 d を 0.28 mm、比重 w を 2.3、砂粒子を球形と仮定すると、

$$W = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^3 \times X \times w$$

$$= \frac{4}{3} \pi \left(\frac{0.28 \times 10^{-1}}{2} \right)^3 \times X \times 2.3 \quad \dots\dots(1)$$

である。次に、可視化されている断面の容積を V とすると、濃度 1000 ppm (1 g/L) の容積 $V=10.8$ ml 中に存在する砂粒の質量 S は 0.0108 g である。ここで $W=S$ なので、

$$\frac{4}{3} \pi \left(\frac{0.28}{2} \right)^3 \times X \times 2.3 \times 10^{-3} = 0.0108 \quad \dots\dots(2)$$

となり、これを計算し X を求めると、 X は約 410 個となる。また、実際に検出された抽出粒子の個数は 430 個前後

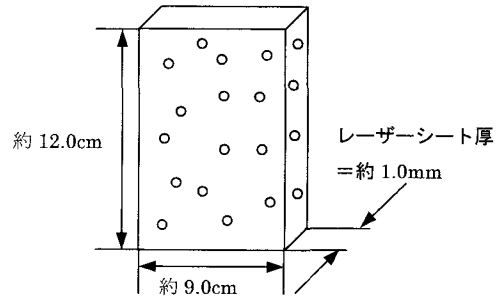


図-5 レーザシート内の粒子数 (計算値)

であった。写真-2 に示す通り、検出された粒子の位置も画像中の座標上に殆ど合致していることとあわせて考えると、これらのことから本手法の妥当性が確認できる。

(5) 本手法の適用範囲

次に、この手法の適用範囲を調べるため、濃度と抽出された粒子の個数の関係を図-6 に示す。これを見ると、多少のずれは見られるものの全体的に線形関係を保っていることが分かる。さらに特徴的なのは 7500 ppm まで頭打ちになることなく線形を保っているところである。これは従来の手法と同程度まで計測可能であることを示している。

(6) 粒度分布

図-7 は画像解析の結果得られた 1000 ppm の時の粒径加積曲線である。これを見ると D_{50} は 0.20~0.22 mm 程度であり、この実験には $D_{50}=0.28$ mm の砂を使用していることから概ね妥当な値であるといえる。

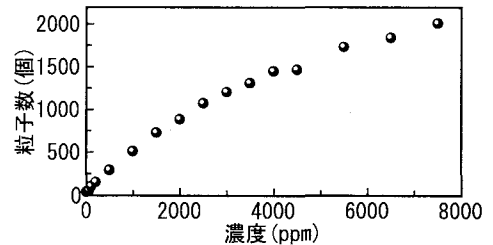


図-6 浮遊砂濃度と画像解析による砂粒子の検出個数

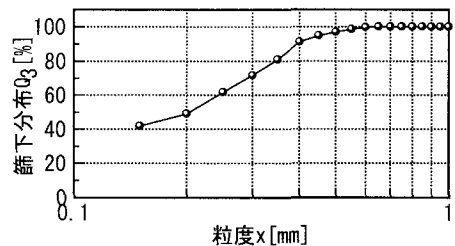


図-7 1000 ppm の時の粒度分布

3. 移動床上の浮遊砂濃度及び粒度計測

(1) 実験の概要

基本性能実験の結果、本手法の妥当性が示されたことから、2次元造波水路内に粒子径 0.28 mm の砂を用いた移動床部分を設け、静水深 40 cm、周期 1.2 s・波高 12 cm の規則波を入射し、浮遊砂濃度と粒度分布を計測した。

図-8 は可視化実験の様子を模式的に表したものである。まずレーザーを水槽側面からガラス越しに水平に照射し、撮影断面の直上まで入射させる。そして撮影断面の直上に予め設置しておいた長方形の反射鏡によりレーザーの進路を鉛直下方に変え、鉛直 2 次元の可視化断面を作成し、これを水槽側面からガラス越しにビデオカメラで撮影した。このとき反射鏡は水中に設置することになり、流れを若干乱すことにはなるが、本研究で対象としているのは底面近傍であるため特に問題はないとした。これにより自由水面の影響を受けることなく安定した可視化断面を作成することができた。

(2) 実験ケース

実験は 2 次元造波水路内に粒子径 0.28 mm の砂を用いた移動床部分を設け、周期 1.2 s・波高 12 cm の規則波を入射した。そのときの時間波形の 1 部を図-9 に示す。使用した波高計は容量式波高計で、波高の測定点は可視化断面の直上である。また、ビデオ画像の輝度は照明の照度やカメラの絞りのなどの相違による光の減衰・散乱などの影響を受けやすい。そこで、これらの影響をどの程

度受けるのかを調べるためカメラの絞りを変えながら実験を行った。

(3) 実験結果

図-10 は可視化実験の結果得られた画像の 1 例で、図の上下方向が実空間の鉛直方向を示し、図の左右方向が水平方向である。波は図の右から左に向かって入射しており、この画像の波の位相はトラフ付近である。各座標軸の値は pixel 表示であるが、このとき 1 pixel は実空間の 0.1 mm に対応している。従ってこの画像全体は鉛直方向 3.0 cm、水平方向 6.0 cm の空間を表している。また、移動床の底面付近に見られる小さな山は砂漣である。図は見やすくするため、実験により得られた可視化画像の色を反転させている。この図を見ると、砂漣上に見える黒い部分は浮遊砂群を表している。このとき波の位相は波の谷通過付近であったが、ゼロアップからクレスト通過時に巻き上げられた浮遊砂が沖方向に移送される状態を示すものとなっている。

図-11 は図-10 の可視化画像を画像解析した結果である。座標軸の属性は図-10 と同様である。図中の黒点は画像解析により抽出された砂粒子である。これより図-10 の可視化画像と粒子の空間分布が近似しており、粒子の抽出過程が適切に行われているのが分かる。

図-12 は図-11 の結果を基にして得られた粒子数密度の鉛直分布を表す。ここでいう粒子数密度は、ある一

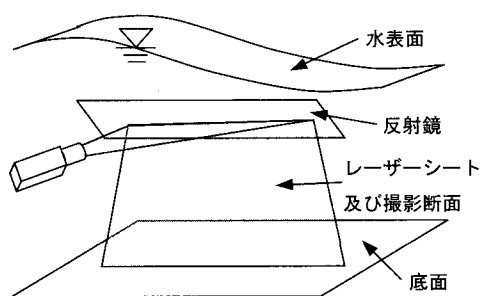


図-8 可視化実験の模式図

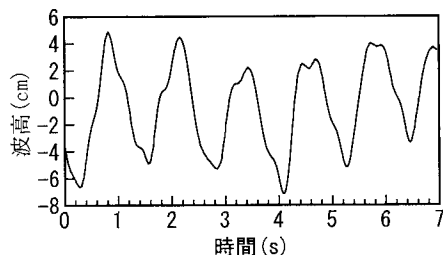


図-9 入射波の時間波形

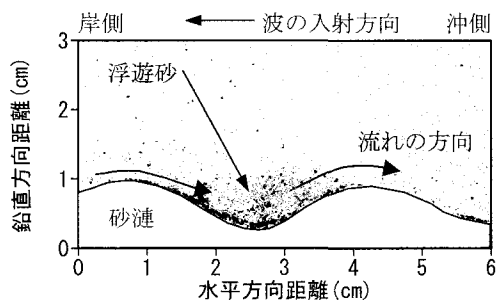


図-10 可視化実験の結果得られた画像

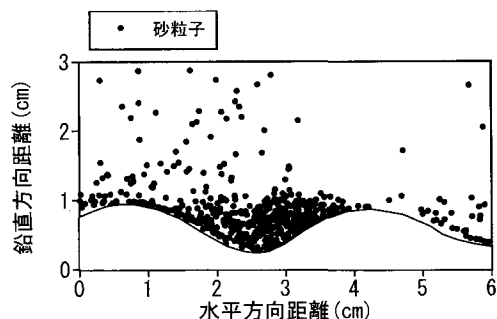


図-11 画像解析結果

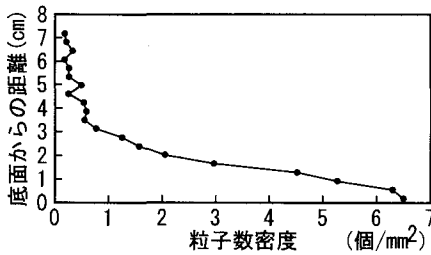
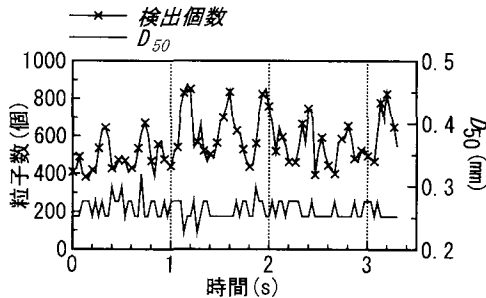


図-12 粒子数密度の鉛直分布 (画像解析結果)

図-13 解析領域内の粒子数と D_{50} の時系列

定面積当りの抽出された粒子数と定義する。また、今回は一定面積を 50×50 pixel とした。つまり、画像空間内の 1 pixel は実空間内の 0.1 mm であったことから、 $5.0 \text{ mm} \times 5.0 \text{ mm} \div 25 \text{ mm}^2$ 当りの粒子数ということになる。また、図-12 は図-11 中の砂漣上での粒子数密度の鉛直分布を示しており、図の横軸は粒子数密度、縦軸は画像空間内の底面からの距離を表し、単位は cm である。これを見ると水面から底面方向に指数的に砂粒子数が増加しており、底面の極近傍まで評価できているのが分かる。これは水面から底面に向かって浮遊砂濃度が指数的に上昇するという従来の知見と整合性が取れている。さらに、従来の計測では困難であった底面付近（底面から 5 mm 以内）の濃度についても計測可能である。

図-13 は解析領域内の砂粒子数と D_{50} の時系列を表している。波（周期 1.2 s ・波高 12 cm ）の通過によるものと考えられる浮遊粒子数のピークは 1 周期内 (1.2 s) に 2～3 回見られる。また D_{50} は粒子数がピークの時に

小さくなり、変動の幅は $0.23 \sim 0.32 \text{ mm}$ で、平均値は 0.26 mm であった。実験に使用した砂は $D_{50} = 0.28 \text{ mm}$ なので十分妥当な範囲である。

4. 結 論

本研究は浮遊砂量を定量的に明らかにするため、浮遊砂の粒度分布を同時計測できる濃度計測手法を開発することを目的とし、砂粒子そのものを画像から直接判読し、浮遊砂の粒度並びに濃度を推定する画像計測手法の開発を行った。その結果得られた結論を以下に要約する。

(1) 本手法は浮遊粒子の粒度と濃度分布を同時計測でき、その適用範囲は従来の手法と同程度であることが分った。

(2) 2 次元造波水路において、移動床上における浮遊砂濃度計測を行った結果、砂粒子の検出の状況は良好で、浮遊砂濃度の鉛直分布並びに時系列は従来の知見に沿うものであった。

(3) 2 次元造波水路において、移動床上における浮遊砂濃度計測を行った結果、従来の計測では困難であった底面付近（底面から 5 mm 以内）の濃度についても計測可能である事がわかった。

参 考 文 献

- 神田 徹・宮本仁志・東野 誠・岩見収二 (1998): 画像の輝度情報を用いた浮遊泥濃度の計測, 水工学論文集, 第 42 巻, pp. 553-558.
- 神田 徹・宮本仁志・岩見収二 (1999): 光の多重散乱の影響を考慮した浮遊物質濃度の画像計測法, 水工学論文集, 第 43 巻, pp. 767-772.
- 佐藤慎司・久保田洋次 (1991): ビデオ画像を用いた碎波点付近の浮遊漂砂現象の解析, 海工論文集, 第 38 巻, pp. 251-255.
- 日野幹雄 (1997): CT 型レーザー土砂濃度計の開発, 水工学論文集, 第 41 巻, pp. 1085-1090.
- 日野幹雄・佐藤行成 (1998): CT 型レーザー濃度計—仮想荷重法の応用による逆問題の解—, 水工学論文集, 第 42 巻, pp. 565-570.
- 八木 宏・首藤伸夫 (1987): 波・流れ共存場における砂漣上の浮遊砂濃度分布, 第 34 回海工論文集, pp. 251-255.
- John F. A. Sleath and S. Wallbridge (2002): Pickup from Rippled Beds in Oscillatory Flow, Journal of waterway, coastal and ocean Engineering, pp. 228-248.