

カラーパターン照明を用いた3次元浮遊砂濃度分布計測法の開発*

東北大学工学部 今田 遥介
東北大学大学院工学研究科 三戸部 佑太
東北大学大学院工学研究科 田中 仁

1. はじめに

海岸において発生する碎波は、多くの土砂を巻き上げ輸送することで沿岸域における地形変化を支配する。碎波時には、碎波先端部で発達する乱流に加え波峰付近における水平渦や碎波背後に生じる斜め下方に軸をもつ渦（いわゆる斜降渦）などの大規模渦が形成され、複雑かつ3次元的な流れ場が生じている（灘岡ら, 1987）。このような碎波下における土砂の挙動を調べることは困難であり、その輸送メカニズムはいまだ明らかにされていない。この数十年間、輸送メカニズム解明のため水理実験における浮遊砂濃度の計測が数多く行われてきている。既往の多くの研究において濁度計等の計測器を用いて浮遊砂濃度分布の計測が行われてきたが、このような計測はある点での濃度の時系列を取得する点計測であるため、3次元かつ複雑な流れ場における空間分布を把握できない。そこで画像計測法により浮遊砂濃度の空間分布を取得する試みが行われてきている（佐藤ら, 1991など）。画像計測法では、水中における浮遊砂濃度に依存する散乱光強度分布によって決定される撮影画像の輝度分布に基づいて浮遊砂濃度分布を特定する。この計測方法では、水槽内の流れを乱さず、かつ瞬間的な浮遊砂の分布を得ることができる。しかしながら、従来の画像計測法は水槽側壁近傍の2次元的な濃度分布を計測するものであり、3次元かつ複雑な碎波下の流れ場における浮遊砂輸送過程を十分に説明することができていない。そこで本研究では実験において浮遊砂の3次元的な濃度分布を計測する新たな画像計測法を開発する。

2. 計測アルゴリズム

本研究ではデジタルカメラおよびプロジェクタを用いて浮遊砂濃度を計測する。カメラに対する奥行き方向に色合いを変化させた照明（カラーパターン照明）をプロジェクタから照射し、浮遊砂による散乱光をデジタルカメラで撮影する（図-1 参照）。これにより撮影される浮遊砂の散乱光の色はカメラとの距離に応じて変化するため、撮影画像から抽出した各色の輝度分布からそれぞれの色の層内での2次元的な浮遊砂濃度分布を決定できる。各色に対応する奥行き方向座標を予め取得し、それをもとに合成することで1枚のカラー画像から瞬時の3次元的な浮遊砂濃度を取得する。

3. 計測実験

本計測法の実用性を評価するため、1辺 10cm、壁面の厚さが 2mm の透明アクリル製の水槽

* Imaging technique for measuring 3D distribution of suspended sediment concentration with color pattern illumination, by Yosuke Imada, Yuta Mitobe and Hitoshi Tanaka

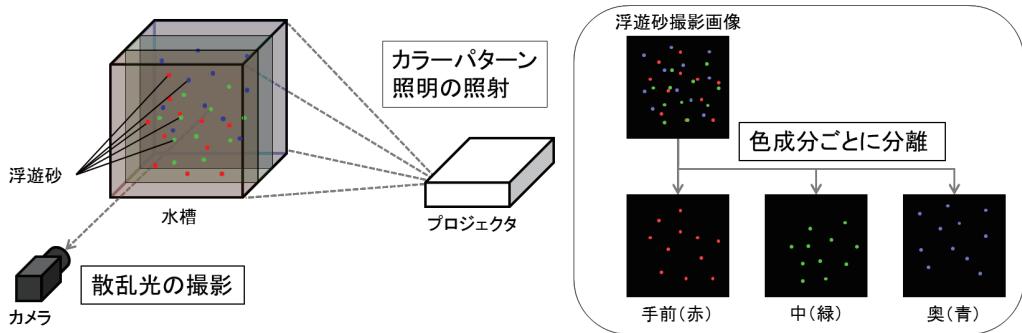


図-1 計測法のイメージ

を用いて試験計測を行った（図-2）。粒径 0.34mm の硅砂および水を水槽に投入し、攪拌した際に巻き上がる砂にプロジェクタからカラーパターンを照射し、その散乱光をカメラにより撮影した（図-3）。カメラのレンズと水槽壁面の距離は 53cm、プロジェクタのレンズと水槽壁面の距離は 52cm とし、カメラの撮影方向とプロジェクタの投影方向が直交するように配置した。各色の層の幅はプロジェクタからの距離に応じて変化するが、本実験ではプロジェクタからの距離に対して計測領域が十分小さいため、その影響を無視できるものとした。今回の計測実験では、最も簡単なケースとして赤・緑・青の 3 色によるカラーパターン照明を用いた。画像解析方法と計測結果を次章に示す。

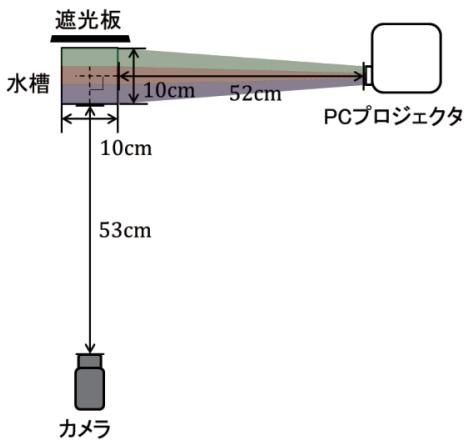


図-2 実験装置平面図

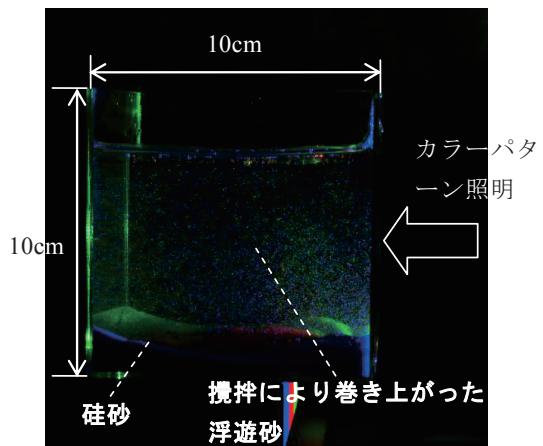


図-3 撮影画像例

4. 画像解析方法

通常、デジタルカメラで撮影したカラー画像の各画素の色は RGB（赤・緑・青）の 3 成分の値によって記録される。したがって、今回の実験で用いた赤・緑・青の 3 色による照明光の場合、各色の輝度分布は RGB 各成分の撮影輝度分布として簡単に分離することができる。

撮影画像から各色の層の輝度分布を抽出後、その各色の輝度分布から浮遊砂濃度分布を決定する。浮遊砂の写り方はカメラの撮影解像度と浮遊砂の粒径に依存しており、カメラの撮影解像度が高く砂の粒径が大きい場合、砂粒子による散乱光は輝点として撮影される。そのため、輝点を撮影画像から検出しその重心位置を求め、その分布に基づいて浮遊砂数密度分布を決定できる。一方、カメラの撮影解像度が低く砂の粒径が小さい場合は、砂粒子の散乱光を輝点として撮影できず浮遊砂濃度に応じた散乱光強度分布が撮影される。水中のある点における散乱光強度は入射光強度およびその点における散乱媒質すなわち浮遊砂の濃度に比例するため（Lambert-beer の法則）、キャリブレーションを行い予めその比例定数を取得することで撮影輝度分布から直接濃度分布を推定できる（神田ら、1998；神田ら、1999）。本実験で使用した粒径 0.34mm の珪砂の場合、浮遊砂の散乱光は輝点として撮影されたため（図-4 参照），以下では前者の方法について画像解析方法の詳細を示す。

4.1. 色の補正・抽出

プロジェクタから照射されたカラーパターン照明の色はプロジェクタ光源の特性や、砂表面の分光反射率、レンズの分光透過率、カメラのカラーフィルタ等の多様な条件に応じて変化するため、一般的に投影画像の色と異なる色で撮影される。ここで投影画像の RGB 値 $[R_0 \ G_0 \ B_0]$ から撮影 RGB 値 $[V_R \ V_G \ V_B]$ への色の変化を、色変換行列 \mathbf{F} を定義し、以下のように表す。

$$\begin{bmatrix} V_R \\ V_G \\ V_B \end{bmatrix} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} R_0 \\ G_0 \\ B_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} \equiv \begin{bmatrix} F_{RR} & F_{GR} & F_{BR} \\ F_{RG} & F_{GG} & F_{BG} \\ F_{RB} & F_{GB} & F_{BB} \end{bmatrix} \quad (1)$$

これを変形すると、

$$\begin{bmatrix} R_0 \\ G_0 \\ B_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{RR} & F_{GR} & F_{BR} \\ F_{RG} & F_{GG} & F_{BG} \\ F_{RB} & F_{GB} & F_{BB} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_R \\ V_G \\ V_B \end{bmatrix} \quad (2)$$

となる。したがって \mathbf{F} を求めることで撮影 RGB 値から投影画像の RGB 値を推定できる。ここで、赤 ($[R_0 \ G_0 \ B_0] = [1 \ 0 \ 0]$)、緑 ($[R_0 \ G_0 \ B_0] = [0 \ 1 \ 0]$)、青 ($[R_0 \ G_0 \ B_0] = [0 \ 0 \ 1]$) の単色光を投影した場合、その撮影 RGB 値はそれぞれ $[V_R \ V_G \ V_B] = [F_{RR} \ F_{RG} \ F_{RB}]$, $[F_{GR} \ F_{GG} \ F_{GB}]$, $[F_{BR} \ F_{BG} \ F_{BB}]$ となるので、赤・緑・青の 3 色の照明に対する浮遊砂の撮影 RGB 値を取得することで \mathbf{F} を求めることができる。この方法により色補正を行った画像（図-5）から RGB 各成分を分離することで、赤・緑・青各色の輝度分布を抽出する。

4.2. 輝点の検出

今回の計測実験においては水槽内の水に含まれる微粒子による照明光の散乱が生じたため、浮遊砂の写っていない背景部分にわずかながら輝度の分布が見られた。さらに、散乱に伴う透過光の減衰によってプロジェクタからの距離に応じて、輝点および背景双方に輝度の減少がみられた。そのため、撮影画像全体で一定の閾値を設定し輝点を検出することは困難であり、本研究では局所平均化フィルタを用いて輝点の検出を行った。元の輝度分布とフィルタリング後

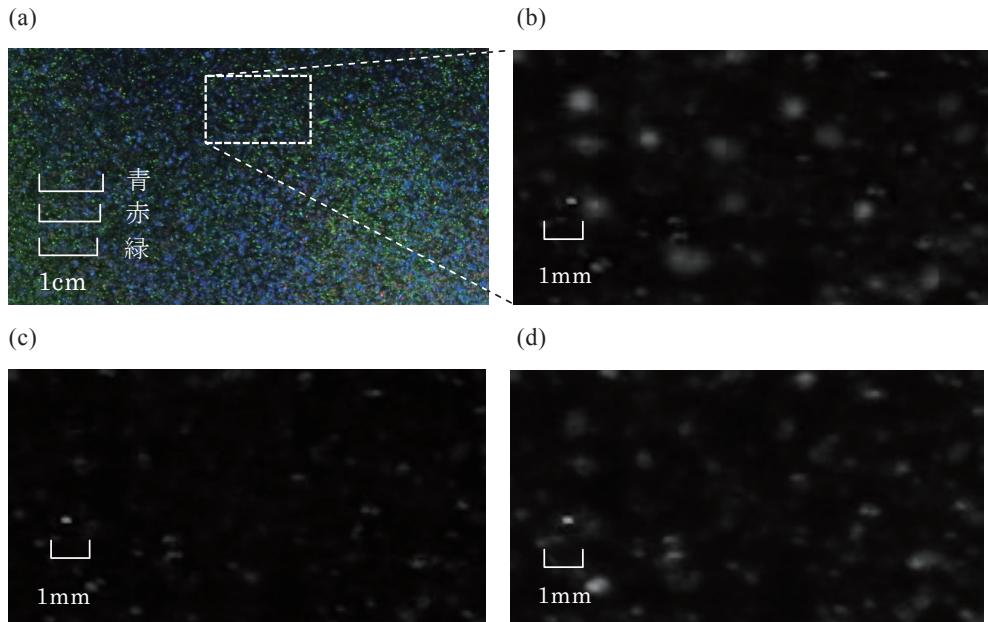


図-4 補正前の撮影画像 (a) およびRGB各成分における点線部分の拡大画像
(b:青・奥行き0~3.3cm, c:赤・奥行き3.3~6.7cm, d:緑・奥行き6.7~10cm)

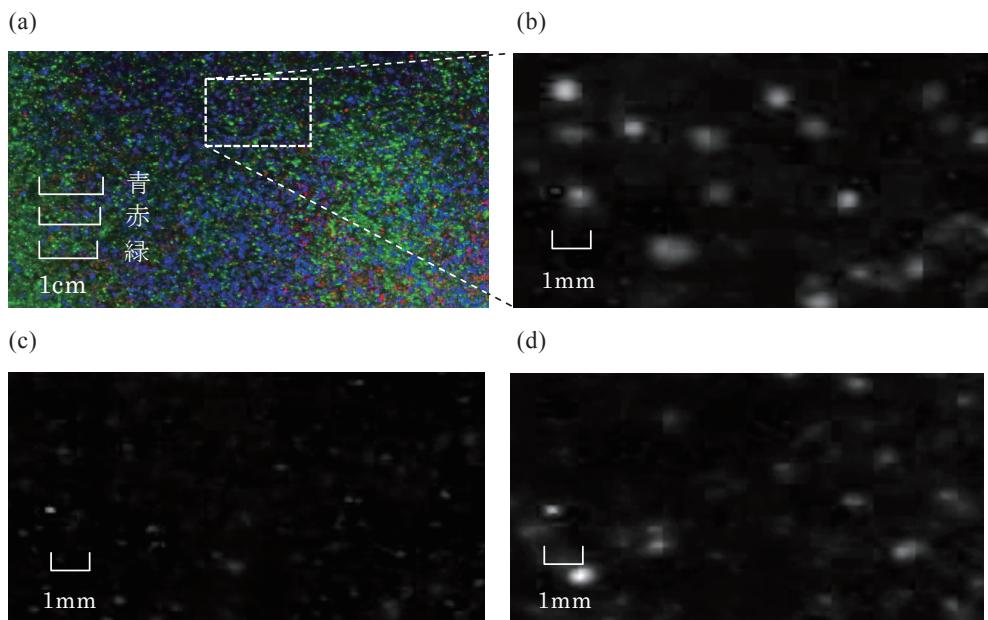


図-5 補正後の撮影画像 (a) およびRGB各成分における点線部分の拡大画像
(b:青・奥行き0~3.3cm, c:赤・奥行き3.3~6.7cm, d:緑・奥行き6.7~10cm)

の輝度分布の比をとることで、周囲の明るさに対する相対的な輝度のピークとして輝点を検出できる。なおノイズによる輝度ピークの誤抽出が生じたため、10pixel以下の輝点を除去した。検出した輝点について輝度による加重平均をとることで重心位置を算出し、これを浮遊砂の撮影画像座標として決定する(図-6)。

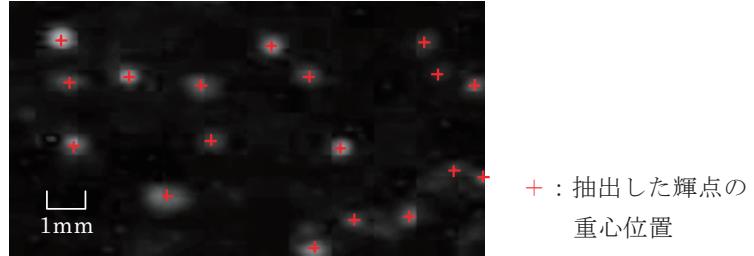


図-6 輝度分布(図-4(b))からの輝点検出結果。図中の点は検出した重心位置

4.3. 座標変換と数密度分布の決定

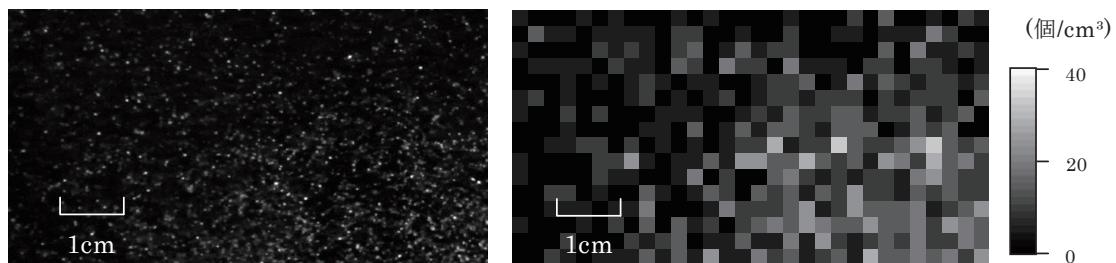
抽出した浮遊砂の画像座標を決定後、浮遊砂画像座標を実座標に変換し、これに基づいて数密度分布を決定する。実験時に予め実座標が既知の格子点を描いたグリッドボードを撮影し、その実座標と撮影画像座標の関係に基づき、浮遊砂画像座標を実座標へ変換する。以上により取得した浮遊砂実座標群から任意に設定した格子内における浮遊砂の個数を求めて数密度分布を決定する。

図-7は図-4(a)に色の補正を加えた後RGBで分離した画像(左)と、格子間隔を0.25cm間隔に設定して求めた浮遊砂の数密度分布(右)を表している。今回開発する画像計測法では、このようにカメラ奥行き方向座標の異なる複数の層の浮遊砂濃度分布が取得できる。

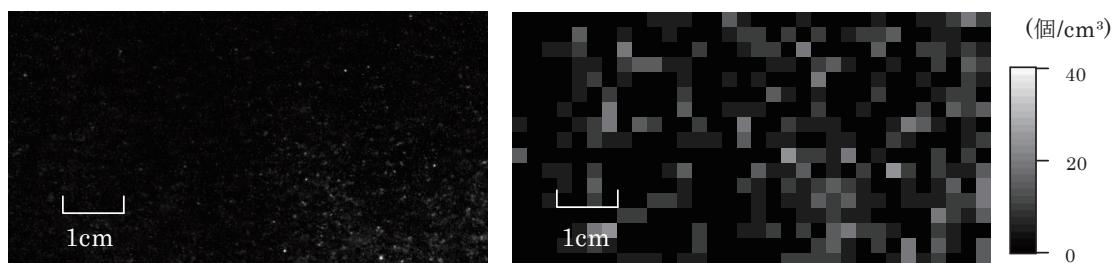
5. まとめ

本論文では、カラーパターン照明を用いて浮遊砂の3次元的な濃度分布を計測する画像計測法を提案し、小型の水槽にてその実用性を確認するための実験を行った。撮影画像から各色の輝度分布を抽出し、輝点として検出した浮遊砂の座標に基づき浮遊砂の数密度分布を決定できる。今後、詳細な精度検証を行う。また今回用いたカラーパターンは3色であり、これはカメラ奥行き方向に3層にしか分離できず、3次元的な浮遊砂濃度分布を計測するには不十分である。色を分離する方法を改良することによりカラーパターンの色の数を増やした画像を処理可能にし、計測をカメラ奥行き方向に高解像度化する。その後、造波水槽内で碎波により発生した浮遊砂の様子を動画撮影し、3次元浮遊砂濃度の時間変化を調べる実験に適用する。

(a)青：奥行き 0～3.3cm



(b)赤：奥行き 3.3～6.7cm



(c)緑：奥行き 6.7～10cm

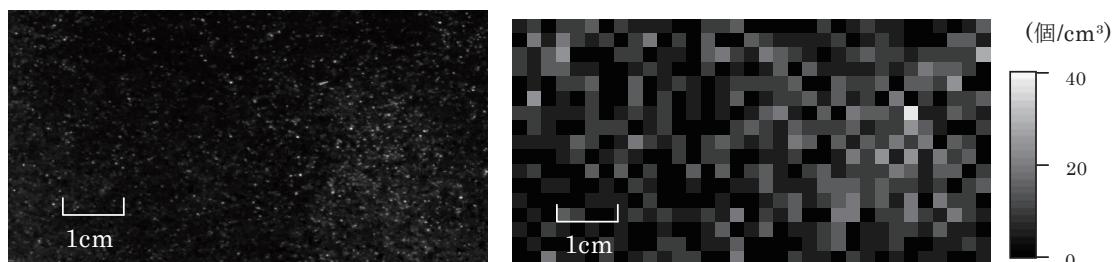


図-7 RGB 各色の輝度分布（左）と数密度分布（右）

参考文献

- 1) 瀧岡和夫・上野成三・五十嵐竜行： 碎波帶内の三次元的大規模渦構造と浮遊砂の現地観測， 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp.21-25, 1987
- 2) 佐藤慎司・久保田洋次： ビデオ画像を用いた碎波点付近の浮遊砂現象の解析， 第 38 回海岸工学論文集, pp.251-255, 1991
- 3) 神田徹・宮本仁志・東野誠・岩見収二： 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 卷, pp.553-558, 1998
- 4) 神田徹・宮本仁志・岩見収二： 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 卷, pp.767-772, 1999