

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820195

研究課題名(和文)3次元浮遊砂濃度分布計測法の開発による砕波下の浮遊砂輸送機構の解明

研究課題名(英文)Image measurement method for three dimensional distribution of suspended sediment under complex turbulent flow condition

研究代表者

三戸部 佑太(Mitobe, Yuta)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60700135

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：砕波下のような複雑かつ3次元的な流れの下での浮遊砂の輸送過程を明らかにすることを目的として3次元浮遊砂濃度分布の画像計測手法の開発を行った。開発する手法ではプロジェクターからカメラに対する奥行方向に色合いを変化させた照明を照射し、その浮遊砂による散乱光をカメラにより撮影する。これにより得られる各色の層内における浮遊砂の分布を合成することで3次元的な分布を取得する。適用試験を実施し、本手法により妥当に3次元的な浮遊砂濃度分布の時々刻々の変化を計測可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：This study proposed a new imaging technique to measure three dimensional distribution of suspended sediment. In this technique, color pattern illumination, which has different color layers, is projected from a PC projector, and scattered light by the suspended sand are recorded by a digital camera. Based on the intensity distributions of each color in the image, two dimensional distributions of number density of the sand are obtained for each color layer, and a three dimensional distribution is composed from these two dimensional distributions. In a series of physical test, reasonable three dimensional distributions were successfully obtained.

研究分野：海岸工学

キーワード：画像計測 浮遊砂濃度 3次元計測 水理実験

1. 研究開始当初の背景

(1) 海岸において発生する砕波は、沿岸域における地形変化を支配する。砕波時には、砕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砕波背後に生じる斜め下方に軸をもつ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おり<sup>①②</sup>、こうした流れによって底面の土砂が巻き上げられ、輸送されることにより沿岸の地形変化が生じている。地形変化の予測等のために砕波下における土砂の輸送メカニズムの解明が必要とされているが、こうした不規則性の強い流れ場での土砂の挙動を空間的に把握することの困難さから、いまだ明らかにされていない。

(2) 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<sup>③④⑤⑥</sup>。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次元かつ複雑な砕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。

2. 研究の目的

(1) 本研究は浮遊砂の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ことを目的とする。また、開発する画像計測手法により砕波下における土砂輸送過程を明らかにすることを最終的な目的とするものである。

(2) 波や流れによる地形変化過程に関する実験は多数実施されており、水中における土砂輸送過程の空間分布の時々刻々の変化を計測することが必要とされている。本計測手法は本研究のみならず多様な水理実験において有用となるツールとなるものである。

3. 研究の方法

(1) 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新たな画像計測手法を開発する。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)。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。また、図-1は3色の場合の計測を表している。カラーパターンとして使用する色の数は抽出できる2次元輝度分布の数に対応しており、より多くの色を用いるほどカメラ奥行き方向に解像度が高い3次元浮遊砂濃度分布を取得することができる。また、本計測手法から取得される3次元浮遊砂濃度分布から浮遊砂輸送量の空間分布を推定する手法を提案する。

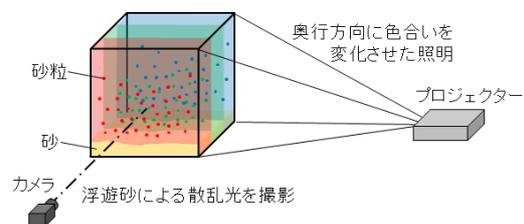


図-1 計測手法のイメージ

(2) 本計測手法の適用性及び計測精度を確認するため、小型の透明アクリル製水槽に水および浮遊砂を投入し、計測実験を実施した(図-2)。また、浮遊砂の代わりに個数を把握してある中立粒子を使用して計測を実施し、計測結果の空間積分値と総個数を比較することで計測精度の検証を実施した。

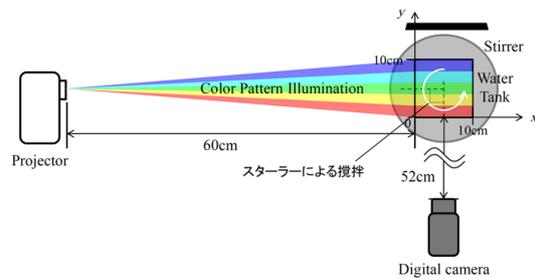


図-2 計測実験の実験装置

4. 研究成果

(1) 開発した計測手法の概要を以下に説明する。まず撮影したカラー画像(図-3(a))のRGB値( $R_c, G_c, B_c$ )をHSV値( $H_c, S_c, V_c$ )に変換する。変換したHSV値から以下のように色相類似度  $h^j$  を定義し、その明度  $V_c$  との積を計算することで、各色の輝度分布を決定する(図-3(b)(c)(d))。

$$h^j = \cos(H_c - H^j)$$

$$L^j = h^j V_c$$

ただし、 $H^j$  はプロジェクターから照射する照明自体の色相を表す。決定した各色の輝度分布  $L^j$  から輝度ピークとして輝点すなわち撮影画像中の砂粒子を検出する。ただし、複数の

色に対して同一位置に輝点が検出された場合、最も色相類似度の高い色をその砂粒子の色と決定し、他の色内ではその粒子を無視する。撮影画像内を格子状に分割し、各格子内の浮遊砂数をカウントすることで、各色、すなわち奥行方向に並ぶ各層に対する浮遊砂の数密度の2次元分布を決定することができる。あらかじめ各色の奥行方向の位置をキャリブレーションにより取得し、これを元に合成することで3次元的な浮遊砂数密度分布を決定できる。

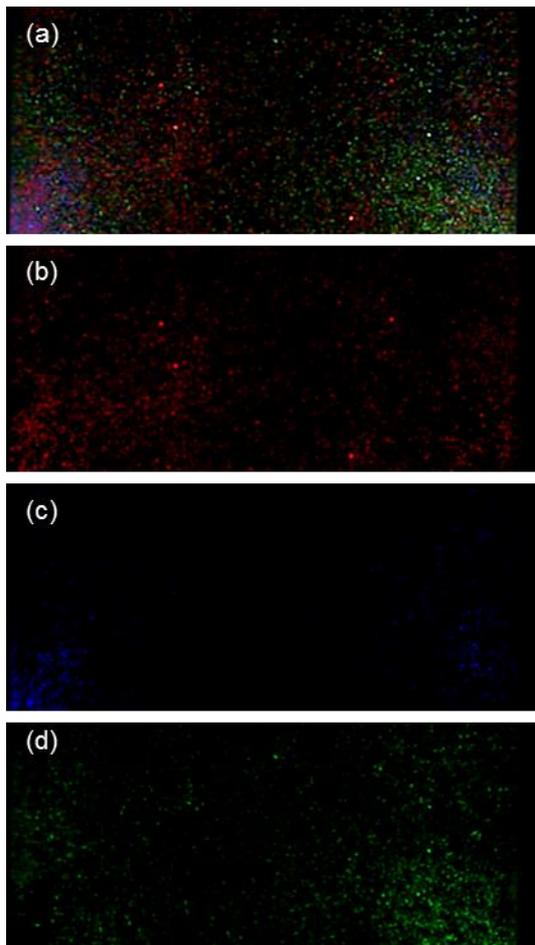


図-3 撮影画像の例と各色の輝度分布. 3色(手前から赤・青・緑)の場合

(2) 図-4は小型アクリル製水槽で実施した計測実験結果の例を示している。本実験では水槽中央においてマグネチックスターラーにより攪拌しており、水槽中央に対して対称な浮遊砂濃度分布となる。しかしながら、計測結果ではカメラ・プロジェクターから離れた領域において数密度が小さい結果となることがわかった(図-5)。

(3) 上述のように本計測法では浮遊砂を画像内での輝点として検出し、その分布から浮遊砂数密度分布を決定する。したがって、カメラやプロジェクターに対して奥側に位置する領域はカメラの撮影やプロジェクター照明の陰となり、これに対する補正が必要と

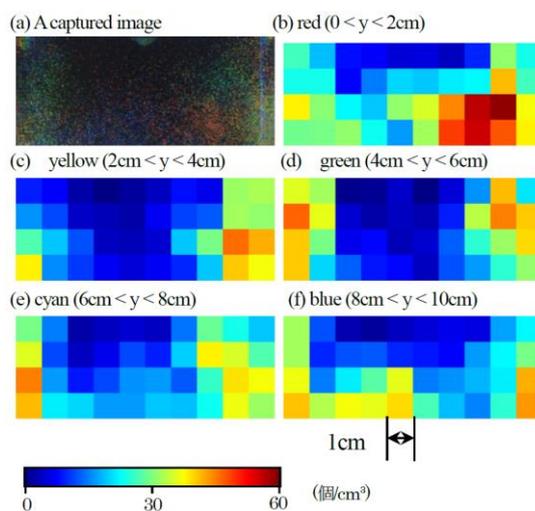


図-4 計測した3次元浮遊砂数密度分布の例(手前から赤・黄・緑・シアン・マゼンタ)

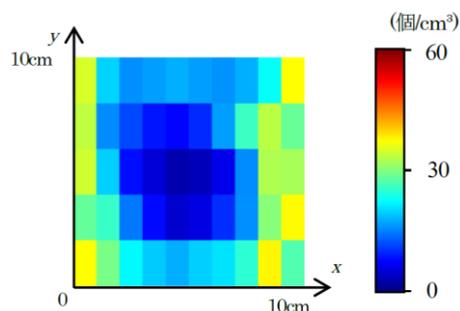


図-5 鉛直方向平均値の15回分の試行平均

なる。ここで、砂粒子の大きさを均一と仮定すると、計測された数密度からその背後の領域のうち陰となる領域の体積率を推定することができる。これを元に計算する補正値をかけることで浮遊砂数密度の補正を行う。陰の影響のないカメラおよびプロジェクターに対する手前側の領域から順に実施することで、領域全体の補正を行う。この補正により、奥行方向に不自然な数密度の低下が生じない妥当な計測結果が得られた(図-6)。また得られた3次元浮遊砂濃度分布に対し以下に示す浮遊砂の連続式を解くことで浮遊砂の移動速度を計算し、その密度との積から浮遊砂輸送量を推定できる。

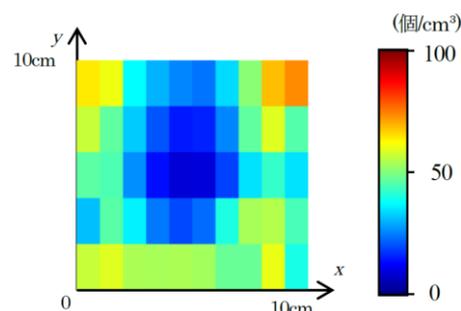


図-6 陰となる領域に対する補正後の鉛直方向平均値の15回分の試行平均

(4) 次に中立粒子を用いた精度検証を行った。計測により取得した3次元数密度分布を積分することで取得した水槽内における総個数と投入した粒子個数を比較することで、図-7は粒子個数を50個とした条件での結果を示したものである。これにより、本計測手法により取得した数密度分布が過小評価となることが明らかになった。前述の輝点の検出手法では輝度ピークを検出していたが、ノイズを除去するために輝度に閾値を設定することでこれを除去していた。そこで各色の輝度分布に対して2次元正規分布型のマスク関数との相関を計算しその分布のピークを輝点として検出する手法を適用した。これにより輝度に対する閾値をかけずに精度よく輝点の検出が可能となった(図-8)。輝点の検出率が向上した。

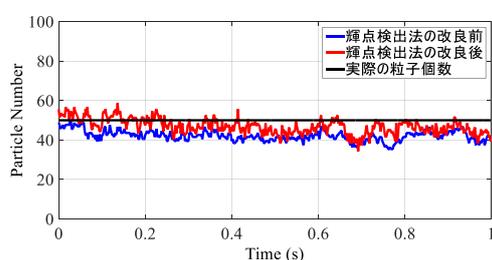


図-7 計測結果と粒子投入個数の比較。青：輝点検出法の改良前，赤：改良後

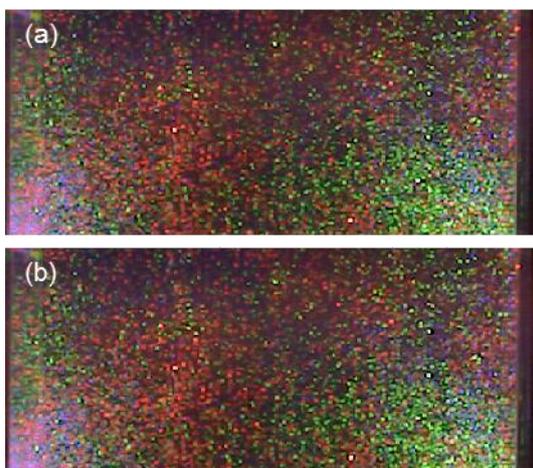


図-8 輝点検出法改良前後の輝点検出結果

#### <引用文献>

- ① 日野幹雄，灘岡和夫，小俣篤，"砕波帯内の乱れの組織的渦構造と水粒子運動について,"海岸工学講演会論文集，第31巻(1984),pp.1-5.
- ② 灘岡和夫，上野成三，五十嵐竜行，"砕波帯内の三次元的な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(2003), pp.21-25.
- ③ 八木宏，首藤伸夫，"波・流れ共存場における砂漣上の浮遊砂濃度分布,"海岸工学講演会論文集，第34巻(1987), pp.251-255.
- ④ 佐藤慎司，久保田洋次，"ビデオ画像を用

いた砕波点付近の浮遊砂現象の解析,"海岸工学論文集，第38巻(1991), pp.251-255.

- ⑤ 柿木哲哉，辻元剛三：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,"海岸工学論文集，第51巻(2004), pp.1446-1450.
- ⑥ 柿木哲哉，辻元剛三，"波打ち帯における底面露出時を含めた漂砂量の画像計測,"海岸工学論文集，第54巻(2007), pp.491-495.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 今田遥介，三戸部佑太，田中 仁：3次元浮遊砂濃度分布の可視化計測法の開発及び浮遊砂輸送量の算定への応用，平成26年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集，査読無，II-22，2015 (CD-ROM).
- ② 今田遥介，三戸部佑太，田中仁：3次元浮遊砂濃度分布の可視化計測法の開発，日本流体力学会年会2014，査読無，099，pp.1-5，2014 (USB) .
- ③ 今田遥介，三戸部佑太，田中 仁：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，東北地域災害科学研究，査読無，第50巻，pp.205-210，2014 (CD-ROM).
- ④ 今田遥介，三戸部佑太，田中 仁：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，平成25年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集，査読無，II-45，2014 (CD-ROM).

[学会発表] (計 5 件)

- ① 今田遥介：カラーパターン照明を用いた3次元浮遊砂濃度分布の可視化計測法の開発，第71回土木学会年次学術講演会，2016年9月，東北大学(宮城県・仙台市)。
- ② 今田遥介：3次元浮遊砂濃度分布の可視化計測法の開発及び浮遊砂輸送量の算定への応用，平成26年度土木学会東北支部技術研究発表会，2015年3月，東北学院大学(宮城県・多賀城市)。
- ③ 今田遥介：3次元浮遊砂濃度分布の可視化計測法の開発，日本流体力学会年会2014，2014年9月，東北大学(宮城県・仙台市)。
- ④ 今田遥介：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，平成25年度土木学会東北支部技術研究発表会，2014年3月，八戸工業大学(青森県・八戸市)。
- ⑤ 今田遥介：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，平成25年度東北地域災害科学研究集会，2014年1月，山形大学(山形県・鶴岡市)。

[図書] (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕 該当なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三戸部 佑太 (MITOBE Yuta)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：60700135

### (2) 研究協力者

今田 遥介 (IMADA Yosuke)