

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 29 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289161

研究課題名(和文) 砕波・遡上帯での高濃度底質移動フラックス計測と統合漂砂モデルの開発

研究課題名(英文) High-precision sediment flux measurement and integrated sediment transport evaluation in swash zone

研究代表者

岡安 章夫 (Okayasu, Akio)

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：20213994

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：平面バックライトとストロボを併用し、広いレンジで底質濃度と底質移動速度の2次元分布を同時計測できる高精度室内画像計測手法を考案した。ドライベッド上の遡上波について、流速、底質フラックスの詳細な検討を行い、1) 境界層厚は遡上初期に増大し、流速反転時に減少、引き波時に再び増加すること、2) 遡上時乱れ強度は引き波時の約2倍となること、また、遡上帯の最浅部では底面付近の乱れが支配的であること、3) 底質移動フラックスについては、沖向きフラックスのピークが岸向きより有意に大きいこと、また、遡上初期と最終位相では強い乱れや濃度の非平衡が強く表れこれまでの漂砂量式では評価が難しいこと、などが分かった。

研究成果の概要(英文)：A wide-range high-precision image-based measurement system with a planer backlight and dual stroboscopic lamps for simultaneous measurement of 2-D sediment concentration and sediment transport velocity was developed. Detailed investigations of flow velocity and sediment flux of swash events on a dry bed were performed and the following results were obtained. 1) Boundary layer thickness increases at the early stage of run-up, decreases at the flow reversal phase and increases again at the backwash, 2) turbulence intensity at the run-up phase can be twice that at the time of backwash, turbulence near the bottom is dominant at the toe of swash, 3) the peak of onshore directed sediment flux is significantly larger than that for the offshore direction, and the conventional sediment transport models cannot evaluate sediment transport flux well at the early phase and the final phase of the swash events due to strong turbulence and non-equilibrium state of concentration.

研究分野：海岸工学

キーワード：遡上帯 漂砂 底質移動フラックス 画像流速計測 透過型濃度計 段波砕波

### 1. 研究開始当初の背景

水流による底質輸送は、水圏環境を規定する重要な要因である。海岸侵食をはじめとする海岸地形変化予測や、高波や津波といった大規模災害時の地形・構造物変形予測・評価に際して、高精度の底質（土砂）移動予測が不可欠である。これまでに底質輸送（漂砂フラックス）を予測するため多くの基礎的研究が行われてきた。しかしながら、現地や実験室等における底質輸送の高精度計測は難しく、定量的な議論は多分の不確定性（基本的にはオーダーの議論）を伴って行われてきた。この底質移動の定量評価のために、これまで多くの観測や実験がなされており、漂砂量を評価するモデルも提案されてきた。しかし、砕波を含む極浅海では、大きな流速変動と広い濃度レンジのため、濃度の局所変動および漂砂フラックスを高精度に評価することが困難であった。これは特に、底質輸送量が大きい遡上波先端や底面近傍での高濃度域での移動量評価が十分でないため、高濃度域での高精度な底質移動量計測が望まれていた。底質移動量としての漂砂フラックスは、底質濃度に底質移動速度を乗じて算出する。底質移動速度についても、流速計を用いた点計測のほか、画像解析を用いた Particle Image Velocimetry (PIV) などの手法により、面的流速情報が得られている。これらの手法において、トレーサーとして底質粒子そのものを用いれば、底質移動速度を計測することは原理的には可能である。間欠性と非定常性の強い流速場において、底質移動フラックスを評価するためには、底質濃度場と底質移動速度場の両方を同時に計測する必要がある。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究ではまず、室内実験において、砕波遡上帯の流体運動について PIV による流速測定を行い、乱れや底面剪断応力の詳細な評価を行う。続いて遡上波による底質移動評価を念頭に、低濃度の浮遊漂砂からシートフロー状態の非常に高濃度の広いレンジで、底質濃度と底質移動速度の 2 次元分布を同時計測できる手法を考案し、非定常乱流下での面的漂砂フラックスを高精度かつ高速に評価可能とする手法の開発を行う。これを用いて、遡上波における流速および底質濃度の高精度計測を行う。

PIV 光源として 1W のグリーンレーザーによるシート光を、あるいはさらに高速度での撮影のため、ダブルパルス Nd:YAG レーザーを用いて、底質移動速度場を計測する。パルスレーザーは、高強度であると共に同質な 2 回の発光を高精度にコントロールでき、高速度カメラの撮影間隔と同期させた 2 つの連続画像を取得することが可能である。一方底質移動速度計測には、バックライトとして平面光源である EL シートおよび前方光源として 2 連ストロボスコープを用いる。ストロボスコープは極短時間の発光時以外には透過

型濁度計測を阻害しないので、砕波遡上帯や底面近傍の高速度・高濃度での底質移動フラックスを精度良く評価でき、波浪（特に砕波波浪）による底質移動全体について基本的な情報を得ることができる。

(2) 上記の手法を実験室内において小型および大型水槽を用いた段波遡上波による流速、底質移動速度計測および底質濃度計測に応用する。まず、得られた流速情報から段波遡上波における流速変動特性を検討し、遡上帯の底面境界層を含む流速分布、乱れ特性、および底面せん断力等について解析・検討を行う。また、移動床においても同様の実験を行い、底質移動速度と底質濃度分布から底質フラックスを計算し、遡上帯における底質フラックスの時空間分布を評価する。ネットの底質移動量や底質フラックスの変動特性を評価し、局所漂砂量則との比較も行い、遡上帯における底質移動モデル（漂砂量モデル）の適用性を検討する。

### 3. 研究の方法

(1) 水深の非常に小さい遡上帯での流速特性を解明するために、高分解能粒子像流速測定 (PIV) 技術を開発した。遡上帯（境界層）の特徴である、垂直方向の速度勾配が大きく、境界と垂直な速度成分が小さい遡上波内流速の特徴から、従来に比して、流下方向に長く、鉛直方向に小さい長方形の追跡領域を設定した。また計算を高速化するため、適応型高速フーリエ変換 (FFT) アルゴリズムに基づく反復相互相関スキームを適用し、精度向上を図った。

(2) 小型段波水槽 (7.1m x 0.3m x 0.7m) を用い、勾配 1/6 の透明傾斜板を備えたガラス側壁水路内で発生させた段波遡上波について、PIV による流速計測を行った。2000fps、1/4000 秒のシャッタースピード、600 x 220 画素 (FOV) の CCD カメラを用いて、40 μm/ピクセルの空間分解能で斜面平行方向速度および垂直方向速度を計測した。流速乱れ強度については、従来からの位相平均法その他、新たに移動平均法を用いて評価した。

(3) 大型水路を用いた実験は、一方の端に 1/10 の透明斜面を備えた段波水路 (15m x 1.8m x 1m) を使用して実施した。段波貯水部と水平床部の初期水深はそれぞれ 750mm と 50mm であった。100 回の試行 (段波造波) を行い、境界層速度測定のための小計測領域のケース (50 回) と、全水深対象の大計測領域のケース (50 回) を行った。光源に高性能ダブルヘッド Nd:YAG レーザーを使用し、画素数 1280 x 1024 ピクセルで 100 μs 遅延を有する 2 画像ペアの PIV 画像対を 10ms 毎に得た。小領域計測時の解像度は 12 μm/ピクセルであった。

(4) 底質移動実験は小型段波水槽で行った。実験に用いた砂の中央粒径  $d_{50}$  は 0.16mm であり、段波水槽の貯水深は 20.0cm、水平床上の初期水深は 2.0cm に設定した。各段波遡上試行において砂浜は均さずに 20 回繰り返した。移動床端から 30cm の地点に、バックライトとして、壁面に平行に平面光源 (EL シート；長さ 20cm、高さ 15cm、厚さ 0.07cm) を前面ガラス面から 1.5cm 内側に設置した。高速度カメラの解像度は  $66 \mu\text{m}/\text{ピクセル}$  であった。これと前述の PIV を併用し、流速 (底質移動速度)、濃度同時計測を行った。

(5) 上述の段波遡上波に対して、得られた流速 (底質移動速度) データと底質移動フラックスを用いて、現在底質移動量評価に広く使用されている Bagnold 型のエネルギーモデルと Shields 数を用いた漂砂量モデルの 2 つの半経験的底質輸送モデルの検証を行った。

#### 4. 研究成果

(1) 開発された底質濃度、底質移動速度の 2 次元計測手法について、底質フラックスを計算し精度の検証を行った。単純な沈降場での予備検定の結果、底質移動フラックスの計測誤差は、10% 未満であることが確認された。また、測定範囲は  $300\text{g}/\text{l}$  までとすることができた。

(2) 小型実験水槽を用いた滑面上の遡上波計測の結果、遡上時の最大流速は引き波時の最大流速より 25% 程大きく、境界層内の位相進みが遡上、引き波時を通してほぼ全時間で観測された。水平流速の鉛直変化率より評価された境界層厚は、遡上初期に増大し、流速反転時に向けて減少、引き波時に再び増加することが確認された。流速乱れ強度については、移動平均法によるものは位相平均法によるものに比べて 1 オーダー低い値となったが、流速分布の時空間変化を見る限り、移動平均法によるものの方が減少に合致していると考えられた。移動平均法により評価された遡上における乱れエネルギーは、引き波時の約 2 倍となることが示された。水面近くでの乱れエネルギー強度が底面付近の 15% 程度であることから、遡上帯の最浅部では底面付近で生成された乱れが支配的であることが分かった。

(3) 大型水槽を用いた遡上波計測実験については、擬定常状態を仮定した対数則により底面剪断応力を評価した。開発した PIV 手法を用いることにより、底面の極近傍での流速まで考慮することが可能となり、適切なせん断力評価が可能となった。これにより推定されたせん断力は従来の 2~3 倍大きいこと、底面摩擦係数もそれに応じて大きいことが分かった。

(4) 図 1 に移動床斜面上で計測された底質濃

度、底質移動速度、底質フラックスの時空間変化の一例を示す。計測と解析の結果、遡上時の底面付近最大濃度は、引き波時のそれよりかなり大きく、最大速度に対する最大濃度の位相遅れが観測された。また、底質フラックスの最大値も引き波時より遡上時が大きく、本実験での最大底質移動フラックスはいずれも底面上  $0.25\text{cm} \sim 0.50\text{cm}$  の間で観測された。シートフロー状態での底質輸送は、遡上時が主体であり、最大シートフロー層の厚さは  $0.7\text{cm}$  に達し、その時の瞬間的な水深の 44% に相当した。また、レーザー距離計を用いた実験 (20 波の段波遡上) 前後の斜面高さの計測により、上記手法により評価されたネットの底質移動量が実測された斜面変化と良く一致することを確認した。

(5) Bagnold 型のエネルギーモデルも Shields 数を用いた漂砂量モデルも、遡上波による底質輸送を全時間帯に渡り適切に予測することはできないことが分かった。Bagnold 型のモデルは、遡上先端部を除いて遡上時については適用可能と評価された。一方 Shields 数型モデルは、底質輸送量の一般的な傾向は予測可能だが、量的にはかなり異なり、位相差も大きい。上記の主な理由は、これらのモデルは局所的な流体力に基づいているため、底質の非定常性と移流効果が大きい遡上帯での適用には限界があるためと考えられる。

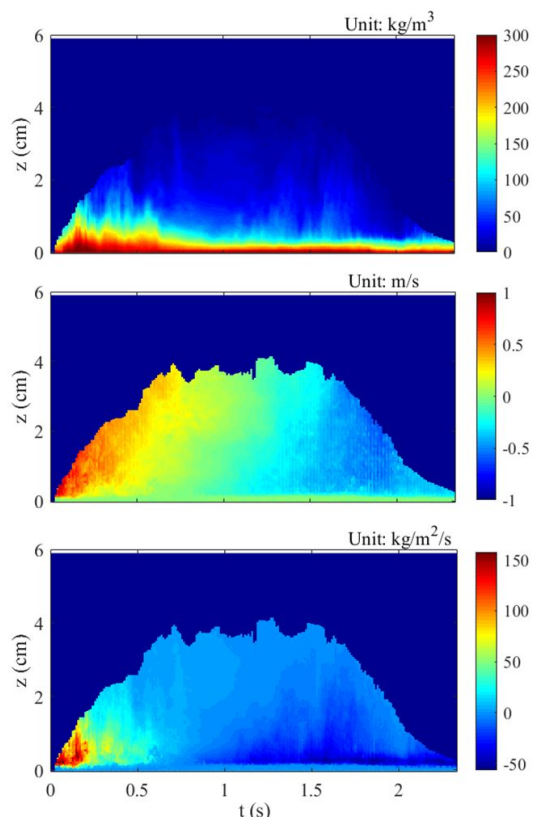


図 1 底質濃度、底質移動速度、底質フラックスの時空間変化計測例

## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計3件)

Lianhui Wu, Dejun Feng, Takenori Shimizono, Akio Okayasu, Laboratory Measurements of Sediment Flux and Bed Level Evolution in the Swash Zone, Coastal Engineering Journal, 査読有, 2016, 58(2),  
DOI:10.1142/S0578563416500042

Lianhui Wu, Dejun Feng, Takenori Shimizono, Akio Okayasu, Sediment Flux Measurement at High Concentration Based on Image Analysis with Combined Illumination, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2, 査読有, 2014, Vol. 70, No. 2, pp736-740,  
DOI:10.2208/kaigan.70.1\_736

Dejun Feng, Lianhui Wu, Takenori Shimizono, Akio Okayasu, Detailed Measurements of Boundary Layer Flow under Swash with High-resolution PIV, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2, 査読有, 2014, Vol. 70, No. 2, pp741-745,  
DOI:10.2208/kaigan.70.1\_741

### 〔学会発表〕(計2件)

Lianhui Wu, Dejun Feng and Akio Okayasu, Effect of Time History of Velocity on Instantaneous Sediment Transport in the Swash Zone, Coastal Dynamics 2017, 2017.

Lianhui Wu, Dejun Feng and Akio Okayasu, Takenori Shimozono, Laboratory Measurement of Sediment Transport under Dam-Break Waves Based on Image Analysis, Coastal Sediments 2015, 2015.

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

岡安 章夫 (OKAYASU, Akio)  
東京海洋大学・学術研究院・教授  
研究者番号：20213994

### (2)研究分担者

下園 武範 (SHIMOZONO, Takenori)  
東京大学・工学系研究科・准教授  
研究者番号：70452042

### (3)研究協力者

FENG, Dejun  
WU, Lianhui