

ビデオ画像を用いた砕波点付近の浮遊漂砂現象の解析

佐藤 慎 司*・久保田 洋 次**

1. はじめに

砕波点付近では砕波水塊の突入により極めて高濃度の浮遊砂雲が形成されるため、一般に漂砂量も大きい。海浜変化の数値計算においても、砕波点近傍は実験結果との不一致が生じる地点のひとつであり、計算の予測精度を高めるためには砕波による底質の輸送機構を合理的に取り込むことが必要である。砕波による底質の巻き上げ機構を把握しようとする試みは、室内実験と現地観測により継続されてきた。

Kana (1978) は現地観測で砕波による浮遊砂巻き上げ量を計測し、巻き波型砕波では特に高濃度の浮遊砂雲が形成されることを報告した。Nielsen (1984) は没水型のサクション採水器を用いて現地観測を行い、時間平均浮遊砂濃度の鉛直分布を得た。Shibayama ら (1986) は室内実験で浮遊砂濃度を詳細に計測し、浮遊砂雲の移動を数値計算により追跡する手法を示した。また佐藤ら (1989) は、広範な条件のもとで砕波点付近の浮遊砂濃度分布を計測し、光学式濃度計の記録から気泡の影響を除去する方法を検討するとともに砕波による巻き上げ総量を評価する算定式を提案した。しかし、巻き上げ現象の間欠性や気泡の混入などにより、実験室においても砕波点付近の浮遊砂濃度の計測は困難であるため、現象の解明が遅れている。

このような非定常性の強い現象を解明するためには、オイラー的な計測とあわせて巻き上げ現象の空間像を把握する手法を併用することが重要である。本研究では画像処理の手法を応用して、ビデオ画像を用いて浮遊砂濃度と浮遊砂の移動速度を推定する手法を開発し、室内実験によりその適用性を検討した。

2. 実験方法

実験は砕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することにより行った。ビデオ画像には、ビデオデッキに接続したタイマーによる時刻表示

とともに位置補正の基準となる不動点を数点写し込むようにした。撮影した画像をコマ送り再生し、各画像のビデオ信号をボードを介してパソコンに取り込むことにより、一コマ当り 200×256 画素の 64 階調 RGB 輝度としてディスクに記録した。

水槽実験に先立ち、浮遊砂濃度と輝度との線形性を確認するためにキャリブレーションを行った。攪拌水槽を用いて定常な浮遊砂濃度場を作成し、水槽側面から均質な光源のもとでビデオカメラで撮影すると同時に採水により浮遊砂濃度を計測した。撮影に際しては、水を黒色のポスターカラーで染めてガラス側壁極近傍の浮遊砂のみがビデオ画像に写し込まれるようにした。採水点での輝度 I と濃度 C との関係は図-1 に示したように RGB いずれの輝度も線形であることが確認された。光源とカメラの相対位置を様々に変えて撮影した結果、撮影条件によって感度は異なるものの線形性は極めて良いことを確認した。

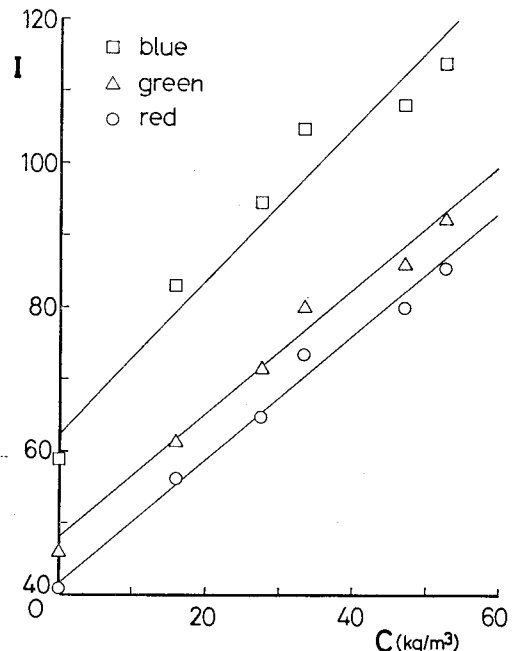


図-1 攪拌水槽における浮遊砂濃度と輝度の関係

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** (株)大林組

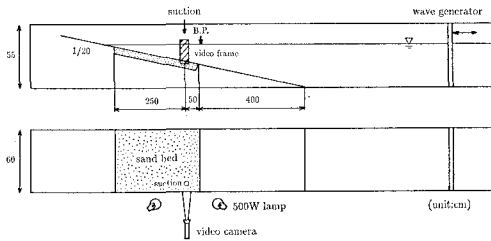


図-2 実験装置

表-1 実験条件

	T (s)	H_0 (cm)	h_i (cm)
Case 1	2.00	2.8	27.0
Case 2	2.00	8.0	31.0

次に水を黒色のポスターカラーで染めた二次元水槽に勾配 1/20 の斜面を設置し、巻き波型碎波の条件のもとで碎波点付近の浮遊砂濃度の計測を行った。図-2 に示したように碎波点付近の約 3 m の区間にトレイを設け、あらかじめ質量を測定しておいた粒径 0.2 mm の標準砂を平坦に敷き詰めた。周期 $T=2$ s、換算沖波波高 $H_0=2.7$ cm (ケース 1) と 7.8 cm (ケース 2) の二種類の波を用いて、碎波点がトレイの沖側端付近になるように水深を調整した。実験条件をまとめて表-1 に示す。ここで、 h_i は一様水深部における水深である。実験は邪魔な光が入らぬように配慮してすべて夜に行い、実験棟内の照明は全て消して、光源はランプのみにした。光源には 500 W の写真撮影用ランプを 2 個使用し、カメラをはさんで左右両側面に設置した。ビデオカメラの撮影範囲である約 20 cm×30 cm の領域に均等に光が当たり、かつ水槽側面からの強い反射光が直接カメラレンズに入らぬように注意した。

造波機を作動させ、定常な規則波が発生するようになったら、碎波点付近の底質の巻き上げ状況をビデオカメラで撮影する。同時にサクション採水法により、撮影領域中央断面の底面から 1 cm 毎の地点で浮遊砂濃度を計測した。採水には直径 3 mm のビニーパイプを用い、各点でそれぞれ約 40 秒間採水した。実験の継続時間は両ケースともに 30 分間とし、実験終了後、サクション採水地点に仕切りを挿入し、トレイ内前後の砂を別々に回収した。回収した砂を炉乾燥し、質量を計測することにより、採水地点での正味の漂砂量を算出した。その結果ケース 1 では、岸向きに 1.3×10^{-2} g/cm/s、ケース 2 では、沖向きで 2.3×10^{-2} g/cm/s となった。

それぞれのケースで連続する 5 周期分の約 100 画像をパソコンで処理し、濃度と移動速度の解析に用いた。また、一周期間の巻き上げ、沈降機構を詳細に把握するた

めに、典型的な巻き上げが見られた瞬間からはじめて 1/30 s 間隔の連続画像を 30 画像分解析した。最終的な相関法による移動速度の計算は多大の演算時間を必要とするため、データを大型計算機に転送して行った。

3. 浮遊砂濃度分布

図-3 はケース 2 に対して、サクション採水法により評価した時間平均濃度とビデオ画像の平均輝度との関係を示したものである。ケース 1 についても同様の検討を行った結果、今回の実験条件では緑の輝度が比較的広い範囲にわたって特に高い線形性を有することが確認されたので、以後の解析には緑の輝度を用いることにする。

図-4 の左側は典型的な巻き上げが見られた瞬間から 1/15 秒毎の浮遊砂濃度分布を示したものである。波の周期が 2 s であるから、8 画像で約 1/4 周期間の巻き上げの様子を示していることになる。図に示したのは、撮影画像の約 50% の部分であり、12×16 cm 程度の領域である。図の上部が水面、下部が砂面に対応しており、各図の下縁部に示したスケールは 25 画素毎に刻まれており、1 画素がほぼ 1 mm 四方の大きさである。図中の濃度値は、緑の輝度から図-3 の関係を用いて推定したものである。水面付近で高い輝度となっているのは、碎波によって発生した気泡が混入しているためである。底面付近に、約 10 kg/m³ にも達する高濃度の浮遊砂雲が発生し、上方へ巻き上げられていく程度がとらえられている。底面近傍に見られる浮遊砂雲の濃度は、佐藤ら(1989)の計測した浮遊砂濃度瞬時値ともほぼ一致する値である。

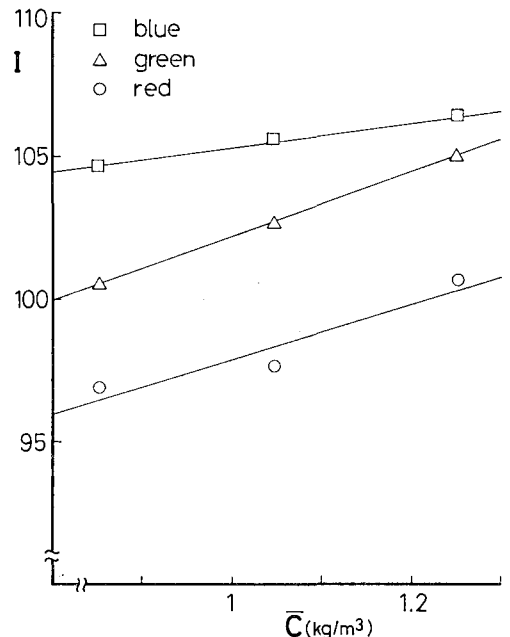


図-3 採水法による浮遊砂濃度と輝度の関係

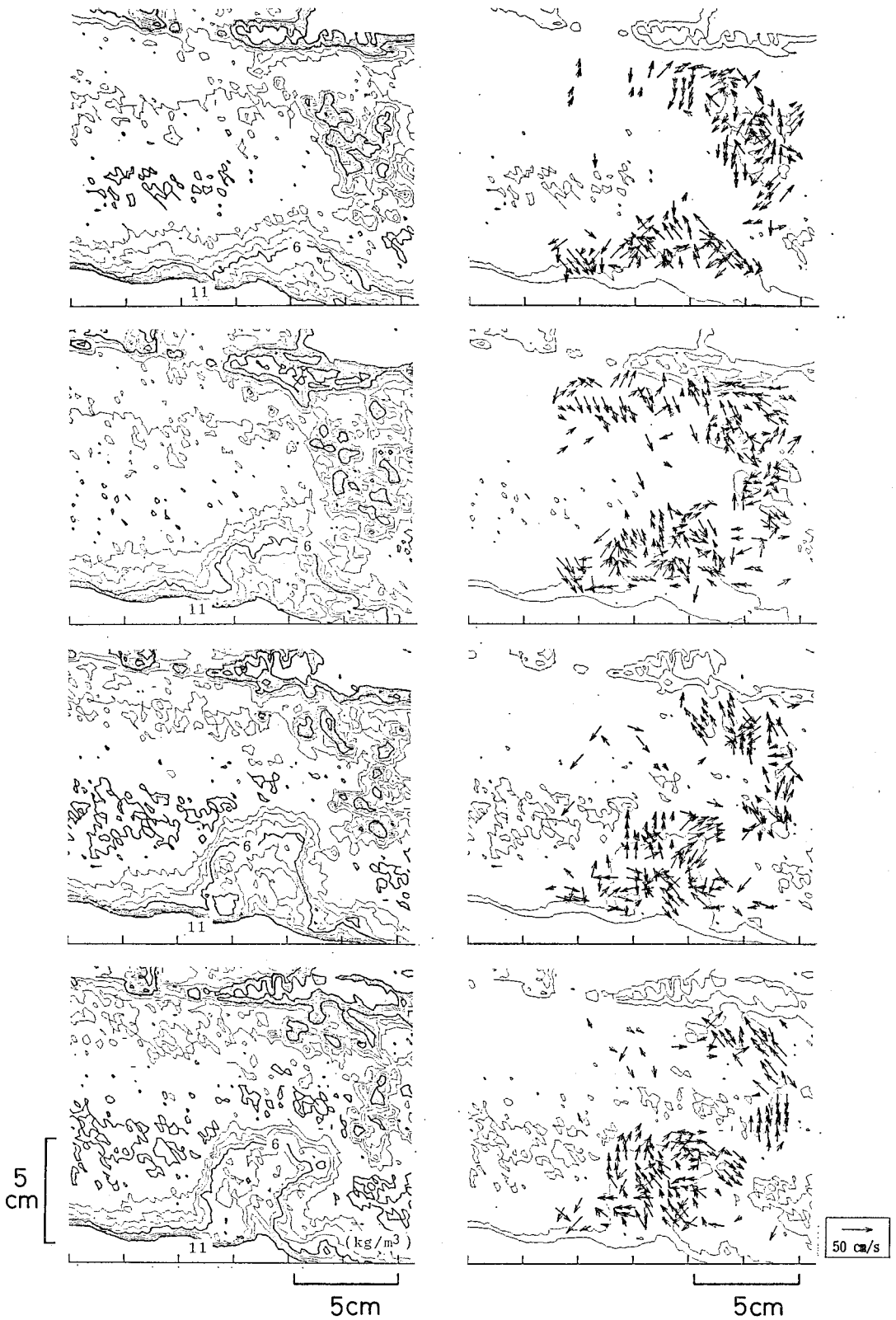


図-4 浮遊砂濃度と浮遊砂の移動速度の分布

4. 相関法による砂粒子の移動速度の推定

ある瞬間における輝度分布とその1/30 s後の輝度分布を用いて、相関法により砂粒子の移動速度を推定した。まず画像に写し込まれた数個の固定点を用いて画像相互のずれを補正した後、2画像の輝度分布に対して以下の相関解析を行った。

基準となる画像のある点を中心とする9×9画素の領域(テンプレート)をとる。そのテンプレート内の輝度分布と、その1/30 s後の画像の輝度分布との相互相関を計算し、相関値が最大となる点を移動後の点と推定した。相関のピーク値を探索する領域は、砂粒子の最大速度が30 cm/s程度であると考えて15×15画素の領域とした。相関解析においては、用いる2画像の時間間隔とテンプレートの大きさおよび探索領域の大きさの適切な設定が重要であり、これらの値が適切でないと不合理な結果となることがある。例えば、時間間隔を大きくとりすぎると、その間にテンプレート内で回転や剪断の変形が進む可能性があり、ピーク値の検出精度が悪くなる。また、時間間隔を小さくすると、移動する距離が小さくなり、画素の離散化に伴う誤差が問題となる。本研究では、これらの値を数種類に設定してそれぞれ相関法を適用し、試行錯誤により最適値を決定した。

図-4 右欄に、このようにして推定した砂粒子の移動速度分布を示す。矢印の始点が移動前の位置であり、終点が1/30 s後の移動位置を示している。移動後の位置は、相関値が最大となる地点を含めて周囲5点の相関値から2次曲線補間を行って求めた。また、浮遊砂濃度が2.5 kg/m³以上とみなせる地点のみで相関の計算を行っている。ビデオ画像をコマ送り再生した観察結果と比較

すると、砂粒子の移動状況を再現していると考えられる。

この様にして得られた移動速度と浮遊砂濃度とを掛け合わせることで浮遊砂フラックスを推定した。図-5は、一周期分の画像を解析して評価した砕波点における浮遊砂フラックスの鉛直分布である。水面付近では気泡の混入により輝度が高くなるため、みかけ上大きな値となっている。気泡の影響が少ないと思われる底面から4 cmまでの分布を積分して得られる断面漂砂量は、沖向きに2.1×10⁻² g/cm/sとなり、計測された正味の漂砂量とはほぼ一致することが確認された。

相関法による移動速度の推定精度は、画素の大きさと相関のピーク値の検出精度によって決まる。本研究では画素の大きさは1 mm四方、時間間隔が1/30 sであるから、離散化に伴う誤差は約3 cm/s程度であると考えられる。また、浮遊砂が拡散し濃度が全体的に薄くなると、輝度分布に強弱が現われず、相関値のピークを検出しにくくなり、不自然な推定結果となる部分が現れてくる。これらを考え合わせると、図-4に示されている移動速度の値は、巻き上げ直後の比較的条件の良い位相で、3 cm/s程度の誤差を含んでいるものと考えられる。

5. 結 論

本研究で得られた結論は以下のように要約できる。

- (1) ビデオ画像を処理することにより、画像上の輝度から浮遊砂濃度分布の瞬間像が推定できる。この手法を応用することにより、砕波による浮遊砂の巻き上げ過程を詳細かつ定量的に追跡できることがわかった。
- (2) 相関法により砂粒子の移動速度が推定でき、これを濃度と掛け合わせることで、浮遊砂フラックスが推定できる。推定された浮遊砂フラックスはほぼ妥当な値であることが確認された。

本研究では、比較的容易に取得できるビデオ画像記録から浮遊砂現象を解析できることを示した。しかし、個々の画像処理には、大型の計算機を用いても多くの記憶容量と演算時間を必要とする。より詳細で高精度の解析を行うためには、大量のデータ処理の効率化を図ることが課題である。

参 考 文 献

- 佐藤慎司・本間基一・柴山知也(1989): 砕波による底質の巻き上げ量の評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 279-283.
- Kana, T. W. (1978): Surf zone measurement of suspended sediment, Proc. 16th Conf. on Coastal Eng., pp. 1725-1741.
- Nielsen, P. (1984): Field measurements of time-averaged suspended sediment concentrations under waves, Coastal Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 51-72.
- Shibayama, T., A. Higuchi and K. Horikawa (1986): Sediment transport due to breaking waves, Proc. 20th Conf. on Coastal Eng., pp. 1509-1522.

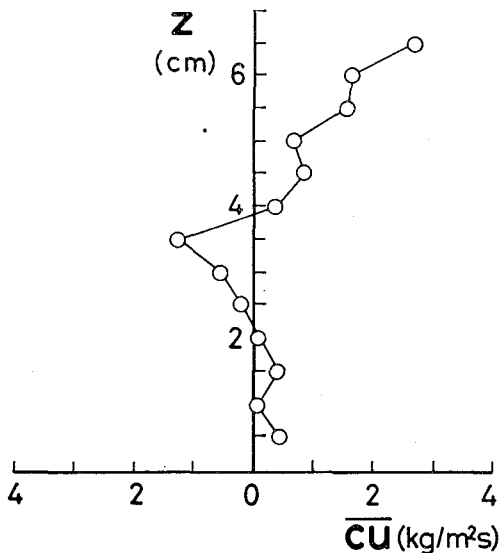


図-5 浮遊漂砂フラックスの推定