デジタルカメラを用いた粘着性底泥の 再懸濁試験装置の開発と現地適用

山本浩一¹・速水祐一²・中野龍一³・神野有生⁴・関根雅彦⁵

¹正会員 山口大学准教授 大学院理工学研究科(〒755-8611山口県宇部市常盤台2丁目16-1)

E-mail:k_yama@yamaguchi-u.ac.jp

²佐賀大学准教授 低平地沿岸海域研究センター(〒840-8502佐賀県佐賀市本庄町1)

E-mail:hayami@saga-u.ac.jp

³日本道路株式会社(〒755-8611山口県宇部市常盤台2丁目16-1)

E-mail:nakanoR@civil.yamaguchi-u.ac.jp

⁴正会員 山口大学助教 大学院理工学研究科(〒755-8611山口県宇部市常盤台2丁目16-1)

E-mail:kanno@yamaguchi-u.ac.jp

⁵正会員 山口大学教授 大学院理工学研究科(〒755-8611山口県宇部市常盤台2丁目16-1)

E-mail:ms@yamaguchi-u.ac.jp

フロクの粒径を観察しながら粘着性底泥の再懸濁速度を測定できる装置を開発し、現地に適用した。フロクの粒径が1 mm以下ではほぼ均一の限界せん断応力を持っていたが、山口湾の現地底泥では0.4 Paを超えると1 mm以上のフロクは再懸濁を開始し、かつ粒径に応じて限界せん断応力が増加することが明らかになった。これは底泥の侵食の形態が0.4 Pa程度の限界せん断応力を境にfloc erosionからmass erosionに遷移することを示していると考えられた。

Key Words : resuspension flux, erosion, floc, sediment, digital camera

1. 背景・目的

河口・沿岸域における懸濁粒子の挙動を数値計算等で再現するうえで常に問題となるのが粘着性底泥の再懸濁速度である。河口・沿岸域における懸濁粒子は、粘土粒子やシルト粒子単体で存在することはまれで、藻類やデトリタスなどが絡まりあった凝集体(フロク)で存在することが多い¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。また、懸濁物質が底面に堆積すると、フロクが構造を保ったままお互いに結合し、ゆるやかに脱水することで圧密が進行する。

シルトや粘土、有機物を主成分とする粘着性堆積物の底質は、波や流れによりひきおこされる底面せん断応力によって再び水中に巻き上げられて懸濁物質になる。底泥が再懸濁されるに当たっては、一般に、再懸濁するか否かの限界のせん断応力が導入されることが多く、再懸濁速度、すなわち底泥の単位時間当たりの再懸濁量は底面せん断応力と限界せん断応力の関数となる。こうした粘着性底泥の巻き上げフラックス $E(t)$ については、限界せん断応力 $\tau_b(t)$ を導入して、底面せん断応力 τ_e の関数として、

$$E(t) = F(\tau_b / \tau_e(t) - 1) S(\tau_b - \tau_e(t)) \quad (1)$$

の形に書かれる⁶⁾。ただし、 F は過剰せん断応力 $\tau_b / \tau_e(t) - 1$ の関数であり、 $S(x)$ はステップ関数である。ここでステップ関数 $S(x)$ は $S=0 (x<0)$ 、 $S=1 (x>0)$ となる関数である。

底泥が再懸濁する際はフロクとして再懸濁するが、粘着性底泥の巻き上げフラックスについてはその粒径が議論されることがほとんどなく、懸濁物質濃度で議論されることがほとんどであった。これは従来、再懸濁時の粒径を把握することが困難であったからである。

そこで本研究では再懸濁時のフロクの粒径を測定することができる装置を開発し、現地の底泥について、再懸濁限界せん断応力を粒径別に明らかにすることを目的とした。

2. 研究方法

(1) 再懸濁試験装置の概要

再懸濁試験装置一式はデジタルカメラを挿入するアクリル製のカメラハウジングと挿入されたカメラの直前に設置されたアクリル製再懸濁装置、それを保持する金属製架台からなる(図-1)。カメラハウジングはあえて水密構造をとらず、防水型デジタルカメラ(15 m 防水)を封入できるようになっている。現地実験時にはアクリルハウジング内に清水を予め満たしておく。

再懸濁装置 (H:130 mm×D:30 mm×W:30 mm)はアクリル製の角筒であり、カメラハウジングの正面に直接取り付けれた。再懸濁装置(図-2) は上方から底面に海水を吹き付けられるよう、内径 7mm のアクリルパイプが取り付けられている。再懸濁カラム側方にもアクリルパイプが取り付けられており、海水を船上のペリスタリックポンプで吸引することで海水をジェットとして底面に吹き付けることができる。

現地実験においては再懸濁試験装置の架台 (H:350 mm×D:500 mm×W:500 mm)にカメラハウジング、濁度計(アレック電子製 Compact-CLW)、電磁流速計(アレック電子製 Compact-EM)、水温塩分計(JEF アドバンテック社製 Infinity-CTW)、水深計を取り付けた。測定器の設置高さは濁度計が底上 10.5 cm、電磁流速計が底上 45.6 cm、水温塩分計が底上 10cm である。ハウジング内のカメラは市販の防水型デジタルカメラ(15m防水)を使用し、ハウジング上部にLEDライト(5 mm 白色 LED×7 灯, 20 m 防水)を取り付けた。

再懸濁試験装置を船上からロープで海底に着底させて引き上げるまでの間、デジタルカメラのマクロ動画機能を用いて撮影を行った。撮影時の解像度はフルハイビジョン(1080p)とした。カメラの高さは底面から 1 cm になるように調整した。実験時のカメラの視野は 1.5 cm×0.8 cm である。

(2) 再懸濁実験方法

再懸濁実験は船上のペリスタリックポンプで海底面に設置した再懸濁装置から海水を吸引し、カラム内に海水を導入し、海底面に吹きつけることで行った。流量を 6 段階(0.0075 L/s, 0.0137 L/s, 0.0200 L/s, 0.0267 L/s, 0.0333 L/s, 0.0370 L/s)に分けて底泥直上 6.5 cm より内径 7 mm のアクリルパイプから噴流を 1 分間ずつ底泥に吹き付けた。再懸濁装置から吸引した海水を船上で 1 分間採水することにより正確な流量を測定した。また、再懸濁装置から吸引した懸濁水は連続的に濁度を測定した。再懸濁カラム内の懸濁物質はデジタルカメラで映像を取得した。

(3) 再懸濁装置のキャリブレーション方法

宇部市の海岸にて採取した砂を 106~150 μm, 150~250 μm, 250~425 μm, 425~850 μm, 850 μm~2 mm の 5 段階にふるい分けて、各粒径集団毎に再懸濁試験を行った。アクリル水槽に予め砂を敷き、再懸濁装置を水槽内に鉛直に刺した。再懸濁装置内には 2cm の厚さになるように篩分けされた砂を封入しておいた。吸引するポンプの流量を変化させ、再懸濁

図-1 再懸濁試験装置の概要(単位:mm)

図-2 再懸濁装置

表-1 解析対象のブロックの粒径範囲

区分	粒径範囲	区分	粒径範囲
1	24.45μm 以下	9	95.02~106μm
2	24.45~36.76μm	10	106~150μm
3	36.76~48.21μm	11	150~250μm
4	48.21~55.21μm	12	250~425μm
5	55.21~63.24μm	13	425~850μm
6	63.24~72.43μm	14	850μm~2mm
7	72.43~82.96μm	15	2~5mm
8	82.96~95.02μm		

状況を肉眼で観察した. 再懸濁状況の判断のためには 4 つの基準を用いた. 以下に各基準を示す.

基準 1: 砂の一粒一粒が移動し始めた状態, 基準 2: 砂が底面から 2 cm の高さまで継続的に再懸濁する状態, 基準 3: 砂が再懸濁装置の吸引口に吸引され始める状態, 基準 4: 砂が継続的に吸引される状態とした.

(4) 画像解析方法

撮影した画像の解析方法は以下のように行った. マクロ撮影された動画を, 動画編集ソフトウェアを用いて 1 Hz の頻度で 1 分間, 60 枚の連続静止画を取得した. 例を図-3 に示す. これらの画像について画像解析ソフトを用いて 8 ビット画像に変換して, 背景を除去するため 59 枚の差分画像を作成(図-4, 図-5)し, 差分画像を 2 値化処理してフィレ径を計算し, これを粒径とした. 画像の解析範囲はレンズの歪みを考慮して画像中央 1 cm×0.8 cm のデータのみを粒子解析した.

再懸濁装置(図-2)内は奥行方向に 3 cm の厚みがあり, 手前側で再懸濁している粒子と奥側で再懸濁している粒子のみかけの粒径に差が生じる. フロックが手前側にある場合と奥にある場合で粒径を比較すると平均値に比べてそれぞれ +14%, -14% となった. 画像上でのピクセル数を実長に変換するに際しては, 再懸濁装置内の中央での換算係数 602.47 pixels/cm を用いた. 画像解析で得た粒子は表-1 に示す 15 分画に分割した.

画像上のフロックの数を粒子濃度に変換するための解析体積は四角錐と考え, (2)式からフロックの粒子個数濃度を算出した.

$$N(d) = \frac{\sum_{i=1}^k n_d(i)}{kV} \quad (2)$$

ここで, $N(d)$: 粒径 d の粒子の個数濃度 (m^{-3}), $n_d(i)$: 画像 i における粒径 d のフロックの粒子数, k : 差分画像数, V : 解析範囲の体積 (m^3) である. 粒径 d の粒子の再懸濁速度を(3)式より算出した.

$$E_f = \frac{N(d)Q}{A} \quad (3)$$

ここで, E_f : フロックの再懸濁速度 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), Q : ポンプ流量 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), A : 再懸濁装置の底面積 (m^2) である.

また, SS の再懸濁速度 E_t については以下の式より算出した.

図-3 再懸濁装置内で再懸濁した底泥粒子の元画像
(視野: 0.8 cm×1.5 cm)

図-4 差分画像生成のための画像スタック

図-5 生成した差分画像の例 (画像サイズ: 1.5 cm×0.8 cm)

$$E_t = \frac{\int [C_s(t) - C_b(t)] Q dt}{A} \quad (4)$$

ここで, $C_s(t)$: 再懸濁管内の SS 濃度 (g m^{-3}), $C_b(t)$: 再懸濁装置へ吸引する海水の SS 濃度 (g m^{-3}), Q : ポンプ流量 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), E_t : 単位面積あたりの再懸濁フラックス ($\text{g m}^2 \text{s}^{-1}$), A : 角筒の底面積 (m^2) である.

(5) 底泥分析方法

採泥された底泥試料については、含水比、強熱減量を測定したほか、レーザー粒度分析装置(HORIBA LA-920)を用いて、レーザー粒度分析を行った。

(6) 水質分析方法

採取された懸濁水は一定量を WhatmanGF/F フィルター(公称孔径 $0.7\mu\text{m}$)で吸引濾過し、 105°C で一晩乾燥させて SS 濃度を測定した。また、据え置き式濁度計 TU-2016(サトテック社製)を用いて、採水した試料の濁度を測定した。SS 濃度分析で測定した SS 濃度と、現地で採水した試料の濁度の関係(図-6)より、船上と海底面の濁度計で測定したそれぞれの SS 濃度を(5)式より推定した。

$$SS = 2.472 \text{ Turb} \quad (R = 0.915) \quad (5)$$

ここで、SS:SS 濃度(g m^{-3}), *Turb*:濁度(FTU)である。

(7) 現地調査方法

現地調査は 2013 年 12 月 25 日に行った。調査地点は山口湾 St.A(北緯 $34^\circ 01' 15.22''$, 東経 $131^\circ 23' 33.92''$)を対象とした(図-7)。

3. 研究結果および考察

(1) 再懸濁装置のキャリブレーション

各基準に対する噴射流量 Q と粒径 d の関係を図-8 に示す。噴流は瞬間的かつ一時的に砂を移動させるため、基準 1(砂粒が移動開始した状態)の判定が困難であった。すなわち、用いた最小の流量においても多少は間欠的に粒子が動いた。また、基準 3、基準 4 は再懸濁装置の構造に依存するため、一般性があるとはいえない。このため、本研究では基準 2 を粒子の移動限界とし、これに対応する摩擦速度を(6)式で示される岩垣公式⁷⁾を用いて算出した。

$$\begin{aligned} 0.1180 \leq d \leq 0.3030 : u_{*c} &= 134.6d^{32/22} \\ 0.0565 \leq d \leq 0.1180 : u_{*c} &= 55.0d \\ 0.0065 \leq d \leq 0.0565 : u_{*c} &= 8.41d^{11/32} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 u_{*c} :移動限界摩擦速度(cm/s), d :ふるい分けの平均粒径(cm)である。底面せん断応力は以下の式により算出した。

$$\tau_* = \rho u_{*c}^2 \quad (7)$$

ここで、 τ_* :底面せん断応力(Pa), ρ :水の密度(g/cm^3)である。基準 2 における移動限界の噴射流量 Q と粒径の関係(図

図-6 現地で用いた濁度計の濁度と SS 濃度の関係

図-7 現地調査地点

図-8 再懸濁実験時の砂の粒径とポンプ流量の関係

-9) により、底面せん断応力と再懸濁実験の噴射流量に関する近似式(12)を得た($R = 0.999$)。

$$\tau_* = 9.805 \times Q^{0.683} \quad (8)$$

ここで、 τ_* :海底境界面再懸濁試験のせん断応力(Pa), Q :海底境界面再懸濁試験のポンプ流量(L/s)である。

現地底泥の再懸濁試験にあたっては、(8)式を用いて噴射流量を底面せん断応力に変換した。

(2) 現地再懸濁試験結果

平成 25 年 12 月 25 日に調査地点 St. A で採取された現地底泥は粘土含有率 6%, シルト含有率 76%, 中央粒径 $16 \mu\text{m}$ のシルト質の底泥であり, 含水比 142%であった。強熱減量は 6.7%であった。

現地における再懸濁試験の結果, 再懸濁装置内のジェットの噴射に伴って底面からブロックが再懸濁した。再懸濁時のせん断応力 τ_* とブロックの再懸濁速度 E_f の関係の例を図-10 から図-12 に示す。これらの関係をすべての 15 分面の粒径について求めた。以上から各粒径のブロックの限界せん断応力を求めた。限界せん断応力は再懸濁速度と底面せん断応力の図に表される近似直線の x 切片である。その結果, 図-13 に示されるように各粒径の限界せん断応力が求められた。横軸は粒径範囲の最大値を用いている。粒径 $24 \mu\text{m}$ 以下のブロックに対しては, 底面せん断応力は 0.26 Pa であり, $425 \sim 850 \mu\text{m}$ は 0.33 Pa であったので, それほど大きな変化はなかった。しかしながら 1 mm を超える大きなブロックについては限界せん断応力が急に増大し, 0.51 Pa ($850 \mu\text{m} \sim 2 \text{ mm}$), 0.68 Pa ($2 \text{ mm} \sim 5 \text{ mm}$) となった。これは底質から再懸濁する際の形態に違いがあると考えられる。Winterwerp⁶⁾ は粘性性底泥の侵食形態を *entrainment*, *floc erosion*, *surface erosion*, *mass erosion* の 4 つに分類している。*entrainment* は高濁度な水塊が底質直上に存在している場合で, これが流体に連行される場合である。*floc erosion* はブロックが底質から分離して再懸濁する場合, *surface erosion* は底質の圧密・排水に伴って底質表面が水と置換するような場合, *mass erosion* は局所的に底質が引き剥がされるような非排水プロセスの侵食形態である。現地の底質の観察結果から, *entrainment* が生じるような高濁度な水塊が存在していることはなく, 非排水プロセスで侵食が進行することから, 粒径が 1 mm 以下については, *floc erosion* としての侵食の結果であり, 粒径 1 mm 以上では *mass erosion* による結果であると推察される。調査地点の底質では, 底面せん断応力 0.4 Pa を超える程度の流体力が加わると, 底質が *mass erosion* により侵食が進行することを示しており, かつ大粒径のブロックが再懸濁することがわかる。

図-14 に現地底質における濁度計から算出した再懸濁フラックスのせん断応力に対する変化を示す。濁度の再懸濁は底面せん断応力が 0.4 Pa を超えたところから急激に大きくなっており, 限界せん断応力はあきらかではないものの, 大粒径のブロックが再懸濁するような条件で盛んに再懸濁が発生していることがわかる。湖沼の底泥の場合, *mass erosion* が生

図-9 基準2の場合のポンプ流量のせん断応力への変換

図-10 再懸濁速度と底面せん断応力の関係 ($24 \mu\text{m}$ 以下)

図-11 再懸濁速度と底面せん断応力の関係 ($425 \mu\text{m} \sim 850 \mu\text{m}$)

図-12 再懸濁速度と底面せん断応力の関係 ($2 \text{ mm} \sim 5 \text{ mm}$)

じ始める限界せん断応力は0.29 Pa~1.12 Paの例⁸⁾があり、今回の限界せん断応力も同等の範囲であった。

図-13 現地底質における再懸濁時の粒径による
限界せん断応力の変化

図-14 現地底質における濁度計から算出した再懸濁フラックスの
せん断応力に対する変化

4. 結論

市販のデジタルカメラを利用してフロックの粒径を観察しながら粘着性底泥の再懸濁速度を測定できる装置を開発し、山口湾底泥に適用した。フロックの粒径が1 mm以下ではほぼ均一の限界せん断応力を持っていたが、1 mm以上のフロックは粒径に応じて限界せん断応力が増加した。これは floc erosion と mass erosion の境界に相当すると考えられ、mass erosion の場合大粒径で再懸濁するといえる。また、せん断応力が高まるとさらに大きな粒径で再懸濁することが示された。

参考文献

- 1) Ayukai, T. and E. Wolanski : Importance of biologically mediated removal of fine sediments from the Fly River plume, Papua New Guinea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **44**, 629-639, 1997.
- 2) Fabricius, K. and E. Wolanski: Rapid smothering of coral reef organisms by muddy marine snow. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **50**, 115-120, 2000.
- 3) Wolanski, E., S. Spagnol, T. Ayukai. Field and model studies of the fate of particulate carbon in mangrove-fringed Hinchinbrook Channel, Australia. *Mangroves and Salt Marshes*, **2**, 205-221, 1998.
- 4) Wolanski, E., R. Richmond, L. McCook, H. Sweatman: Mud, marine snow and coral reefs. *American Scientist*, **91**, 44-51, 2003.
- 5) Wolanski, E., R.H. Richmond, G. Davis and V. Bonito: Water and fine sediment dynamics in transient river plumes in a small, reef-fringed bay, Guam. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **56**, 1029-1043, 2003.
- 6) Winterwerp J.C. and W.G.M. van Kesteren : Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment, *Development in sedimentology*, **56**, Elsevier, 2002.
- 7) 水理公式集, 土木学会, 平成 11 年版, 156-159, 1999.
- 8) Widdows, J., Frend, P.L., Bale, A.J., Brinsley, M.D., Pope, N.D. and Thompson, C.E.L., : Inter-comparison between five devices for determining erodability of intertidal sediments, *Continental Shelf Research* **27**, 1174-1189, 2007.

DEVELOPMENT OF NEW EROSION MEASUREMENT DEVICE FOR COHESIVE SEDIMENT WITH DIGITAL CAMERA AND ITS APPLICATION

Koichi YAMAMOTO, Yuichi HAYAMI, Ryuichi NAKANO, Ariyo KANNO and Masahiko SEKINE

We developed bland new device for measuring erosion rate for the cohesive sediment with ordinary water proof digital camera. This device can measure eroded mud particle size and erosion rate simultaneously. As a result of the applying to the estuarine cohesive mud in the Yamaguchi Bay, Japan, we could clarified that there was a border of the floc erosion and mass erosion for bottom shear stress around 0.4 Pa in the cohesive sediment of te Yamaguchi Bay. The floc sizes were larger in the mass erosion compared to the floc erosion.