

平成 30 年 6 月 24 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420503

研究課題名(和文) フロックのポーラス構造に起因する沈降速度変動が成層海域の栄養塩循環に及ぼす影響

研究課題名(英文) Settling velocity variation caused by porous structure of aggregated particle matter in stratified waters and its effect on distribution of nutrient salts.

研究代表者

齋田 倫範 (SAITA, Tomonori)

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号：80432863

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、沿岸域における凝集性懸濁物質の動態把握を目的とした沈降・自重圧密に関する実験、ならびに浅海域における構造物築造が凝集性懸濁物質動態に与える影響に着目した数値計算を行った。その結果、九州西岸の主要内湾に供給される細粒土砂の沈降・自重圧密に関連する基本的な特性とその地域性が確認された。また、フロックを形成する基本粒子に作用する浮力のみでは説明できないような著しい沈降速度低下が、密度躍層において生じる可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：In this study, experiments on settling and self-weight consolidation and 2D numerical simulation focused on the effect of a coastal structure on cohesive sediment transports are carried out to figure out a behavior of cohesive sediments in a coastal zone. As a result of a series of experiments, basic and regional characteristics of settling and self-weight consolidation of fine sediments supplied into major inner bays located to the west coast of Kyushu island are clarified. And it is implied that significant decrease in settling velocity of flocs at pycnocline is possible, which cannot be explained only by a buoyant force acting on primary particles composing flocs.

研究分野：環境水理学

キーワード：フロキュレーション フロック フロック径 沈降速度 フラクタル次元 凝集

## 1. 研究開始当初の背景

近年、我が国の沿岸域では赤潮や貧酸素水塊の形成が深刻な問題となっている。赤潮の消長には、懸濁物質による海域の濁りが影響する(宇野木ら<sup>1)</sup>)。枯死した赤潮は、デトリタスとして沈降する過程で微生物に分解され、その一部は溶存態の栄養塩として表層に回帰する(中谷ら<sup>2)</sup>)。また、有機懸濁物質の分解は酸素消費を伴うため、貧酸素水塊の形成にも寄与する。更に、無機懸濁物質による吸脱着も栄養塩の動態に大きく影響する(徳永ら<sup>3)</sup>など)。このような背景から、水環境問題の原因を解明し、適切な対策を講じるには、懸濁物質の動態把握が不可欠である。

## 2. 研究の目的

沿岸域における水環境問題の原因を解明し、適切な対策を講じるには、懸濁物動態とそれに付随する栄養塩動態の把握が不可欠である。また、漁業振興の観点からも、有機懸濁物質や栄養塩の動態把握は、重要な研究課題である。一方で、近年の海岸地形の改変やそれに伴う潮汐・潮流の変化といった物理環境の変化に対する水環境の応答を定量的に評価するには至っていない。

本研究の最終的な目的は、海域の物理環境の変動に対する水質や生態系の応答を定量的に評価できる数値モデルの構築である。特に本研究課題では、懸濁物質の動態に着目し、成層海域における懸濁物質の挙動に関する検討を中心に実施した。

## 3. 研究の方法

(1)九州西岸の主要内湾に供給される細粒土砂の沈降・圧密特性の評価

実験用試料は、九州西岸の主要内湾に流入する12河川(本明川、塩田川、瑞梅寺川、多々良川、六角川、嘉瀬川、筑後川、菊池川、白川、緑川、氷川、球磨川)の干潮域で採取した。採取した試料を75 $\mu$ mのふるいにかけて細粒分のみとし、過酸化水素で有機物を除去して実験に用いた。実験では、沈降筒として2L(内径80.5mm)のメスシリンダーを使用した。沈降筒に塩分20の塩水と試料を入れ、水柱の高さが400mmになるようにし、十分に攪拌した後に測定を開始した。測定項目は、上層水と懸濁水間の界面位置である。各試料に対して、試料濃度(以下、SS濃度)を変えた4ケースを設定して実験を行った。

実験開始直後の界面降下速度は、試料の沈降速度とみなすことができる。そこで、1ケースあたり3回ずつ界面位置の測定を行い、回帰直線の傾きから沈降速度を評価し、得られた沈降速度とSS濃度との関係から、粒子間干渉に係わるパラメータ推定した。

次に、同様の実験を1ヶ月間にわたって行い、堆積物の自重圧密に係わるパラメータの推定を行った。堆積物の透水係数 $k$ 、および有効応力 $\sigma_z$ は、堆積物の圧密状態に依存する。本研究では、試料が細粒分のみで構成される

ことを考慮し、 $k$ と $\sigma_z$ を以下のモデル式<sup>5)</sup>で表現することとした。

$$k = K_k \cdot \phi_s^{\frac{2}{3-n_f}} \quad (1)$$

$$\sigma_z = K_\sigma \cdot \phi_s^{\frac{2}{3-n_f}} - K_{\sigma 0} \quad (2)$$

ここで、 $K_k$ 、 $K_\sigma$ は係数、 $n_f$ はフラクタル次元、 $\phi_s$ は底質の体積濃度、 $K_{\sigma 0}$ は定数である。

沈降筒下部に試料が沈殿し、圧密過程に移行した後は、Gibsonの圧密方程式によって現象が記述される。このとき、有効応力が十分に発現していない状況での解は、

$$h = \left( \frac{2-n}{1-n} \zeta_m \right)^{\frac{1-n}{2-n}} \left( (n-2) K_k \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \zeta_m \right)^{\frac{1}{2-n}} t^{\frac{1}{2-n}} \quad (3)$$

となる。また、圧密が進行し、体積変化速度が十分に小さくなった場合の沈殿物高さは、

$$h_\infty = \frac{n}{n-1} \frac{K_\sigma}{g(\rho_s - \rho_w)} \left( \frac{g(\rho_s - \rho_w)}{K_\sigma} \zeta_m \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (4)$$

となる。ただし、 $h$ は界面高さ、 $h_\infty$ は最終沈殿物厚、 $\zeta_m$ はGibson高さ、 $\rho_w$ は水の密度、 $\rho_s$ は試料の密度、 $g$ は重力加速度、 $t$ は時間、 $n$ は $2/(3-n_f)$ である。

本研究では、式(3)を用いて、沈降現象から圧密過程に移行した直後の界面位置の時間変化から $n_f$ と $K_k$ を評価した。また、式(4)を用いて、1ヶ月経過後の沈殿物の厚みから $K_\sigma$ を評価した。

## (2)ブロックの沈降特性の評価

上部に懸濁水供給用の整流板を設けた沈降試験用水槽(高さ1,300mm、幅230mm、奥行き25mm)を使用し、水槽下端から150mmの位置に固定したデジタルマイクロスコープ(朝日光学社製MS-200、MS-Z60)によって粒子の沈降状況を撮影した。対物レンズの倍率については、被写体であるブロックの形成状況に応じて60~200倍の範囲で選択した。

本節の実験には、前節の実験に用いた12河川の試料のうち、本明川、六角川、嘉瀬川、筑後川、菊池川、白川、緑川、球磨川の8河川の試料を使用した。試料の前処理については、前節と同じである。

## ①ブロックのフラクタル次元の評価

塩分20の塩水で満たした水槽の上部から試料水を供給して、粒子の沈降状況を撮影した後、本研究で作成した画像解析プログラムによって粒径と沈降速度を計測した。また、両者の関係から、各試料のフラクタル次元 $n_f$ を評価した。本研究で作成したプログラムによる画像解析の妥当性については、分散剤を添加した水とカオリンによる実験を行い、粒径と沈降速度の関係がストークスの式に従っているのを確認することで検証した。

## ②密度成層形成下におけるブロックの沈降特性

塩分5の塩水を入れた水槽の下部から、ウランで着色した塩分35の塩水をゆっくりと注入し、水槽内に密度の異なる2層を形成

させた。カメラの撮影範囲内に密度の急変部が入るよう調整し、密度急変部でのフロックの沈降状況を撮影した。①の実験結果を踏まえ、筑後川の試料を実験に用いた。その他の実験方法は①と同様である。

### (3) 干潟域における凝集性懸濁物輸送に関する数値計算

本研究で作成した鉛直2次元懸濁物輸送モデルの基礎方程式は、 $\sigma$ 座標系で記述されたSS濃度に関する移流拡散沈降方程式とフロキュレーション（凝集とフロックの崩壊）を表す項を含むSSの数密度に関する移流拡散沈降方程式<sup>9)</sup>、および Reynolds 平均された Navier-Stokes 方程式である。計算結果として得られるSS濃度と数密度の関係からフロック径が計算される。渦動粘性係数の評価には  $k-\epsilon$  モデルを使用し、乱流シュミット数は1とした。海底面における境界条件として底質の巻き上げと堆積を考慮し、底面せん断応力が限界せん断応力  $\tau_c (=0.065\text{Pa})$  を超える場合に侵食、 $\tau_c$  を下回る場合に堆積が生じるよう設定した。計算対象地形については、干潟部の勾配を1/1000とし、その沖側に勾配1/100の区間を1.5km設けた。この干潟部から開境界までは水深20m（一定）として18.5kmの水平距離を確保した。計算では、開境界に振幅1.0~3.0m、周期12.42hの水位変動を正弦関数で与えた。計算格子間隔及び計算時間間隔は、 $\Delta x=100\text{m}$ 、 $\Delta \sigma=0.1$ 、 $\Delta t=0.01\text{s}$ とした。

## 4. 研究成果

### (1) 九州西岸の主要内湾に供給される細粒土砂の沈降・圧密特性の評価

沈降筒による実験結果により、粒子間干渉による沈降速度減少に係わるパラメータである  $c_{gel}$  を評価したところ、84.3~323.4 g/l の値であり、全体的に既往の研究結果より大きな値を示した。有明海北部の塩田川、六角川、嘉瀬川、筑後川の試料については、それぞれ 87.1 g/l、102.6 g/l、82.0 g/l、84.3 g/l であり、六角川の試料が若干大きめの値を示しているものの、本研究で得られた実験結果の中では比較的小さめの値を示した。白川の試料については、323.4 g/l と極めて大きな値を示したことから、追加の検討が必要と考えている。一方で、白川の北側に位置する菊池川と南側の緑川の試料については、それぞれ 199.9 g/l、181.9 g/l であり、両者は同程度の値を示した。さらに、白川の北側については、菊池川、筑後川、嘉瀬川の順、南側については、緑川、氷川、球磨川の順で  $c_{gel}$  の値が小さくなっており、阿蘇山からの距離に関係するような地域性も否定できない。この点については、本研究課題の期間中に明らかにすることができなかったため、引き続き検討を行いたい。

自重圧密に係わるパラメータについては、 $n_f$  の値が 2.621~2.671 であり、有明海北西側の本明川や塩田川、および八代海に注ぐ氷川、球磨川で相対的に大きな値を示した。 $K_k$ 、 $K_\sigma$

についても河川による違いがみられた。そこで、地域的傾向性を整理するため、標準化した  $n_f$ 、 $c_{gel}$ 、 $\log K_k$ 、 $\log K_\sigma$  を独立変数として主成分分析を行い、得られた主成分得点を用いたクラスター分析を行った。その結果、1) 本明川、塩田川、氷川、2) 六角川、嘉瀬川、筑後川、多々良川、瑞梅寺川、菊池川、緑川、球磨川、3) 白川の3グループに分けられた。

### (2) フロックの沈降特性の評価

#### ① フロックのフラクタル次元の評価

被写界深度の浅い高倍率撮影時に粒径評価精度が落ちるため、測定結果にばらつきが見られたものの、沈降速度の実験値がストークスの式で評価されるそれと比較して小さくなることが確認された。これは、粒子内部に空隙を有するフロックの場合には、同一粒径の非凝集粒子と比べて見かけの粒子密度が小さいためである。この影響を考慮した沈降速度の式は、以下ようになる<sup>9)</sup>。

$$w_s = \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{18\mu} D_p^{3-n_f} D^{n_f-1} \quad (5)$$

ここで、 $w_s$  はフロックの沈降速度、 $\rho_s$  は土粒子密度、 $\rho_w$  は水の密度、 $\mu$  は粘性係数、 $g$  は重力加速度、 $n_f$  はフラクタル次元、 $D_p$  はフロックを形成する基本粒子径、 $D$  はフロック径である。したがって、フロックのフラクタル次元  $n_f$  は、実験によるフロック径  $D$  と沈降速度  $w_s$  の関係から推定される。

本研究では、レーザ回折・散乱式粒度計（堀場製作所製 LA950）によって測定された試料の中央粒径  $D_{50}$  を基本粒子径として、実験結果に回帰曲線を当てはめ、フラクタル次元  $n_f$  を推定した。その結果、筑後川、白川、緑川以外の河川の試料では、 $n_f$  の値が 1.73~1.95 であった。河口域における凝集性懸濁物の  $n_f$  の値は 1.7~2.2 程度とされており、この範囲内の値が得られた。一方、筑後川、白川、緑川の  $n_f$  はそれぞれ 1.45、1.51、1.25 であり、他の河川よりも小さく、1.7 を下回っていた。これについては、試料の  $D_{50}$  が他の試料よりも大きかったことが影響していると考えられる。また、前節におけるフラクタル次元の評価結果と比較すると、同じ河川の底質を対象としているにも関わらず値に大きな乖離が見られる。これには、Gibson の圧密方程式の解を求める際に導入される仮定も影響しているが、堆積した試料の自重が内部の骨格構造、すなわち空隙量に影響を及ぼし、結果として堆積物の空隙がフロックのそれよりも小さくなるためと考えられる。

#### ② 密度成層形成下におけるフロックの沈降特性

実験水槽内に密度成層を形成させた実験では、密度を同様とした①の検討結果とほぼ同じ挙動を示す粒子が多く見られた一方で、①の実験結果よりも沈降速度が極端に小さい粒子が高頻度で検出された。小さな沈降速度を示した粒子の沈降速度減少量について

検討を行ったところ、フロックを形成する基本粒子に作用する浮力のみでは説明できず、むしろフロック密度の計算に上層水の密度、沈降速度式における浮力の評価に下層水の密度を用いた場合に想定される沈降速度減少量と同程度であった。このことから、フロック内部に上層の低塩分水を含んだフロックが密度急変部に侵入したことによって通常よりも大きな浮力を受けたことによる沈降速度低下と推察される。しかし、本研究では、有機物を除去した試料を用いたことにより、径の大きなフロックが形成されにくかったこと、形成されたフロックが極めて脆弱であったことなどから、多くの粒子が①の検討と同様の挙動を示す結果となったと考えられる。この点については、本研究で得た知見を踏まえ、引き続き検討を行う予定である。

### (3) 干潟域における凝集性懸濁物輸送に関する数値計算

数値計算により、海水が干潟を入退する際の汀線近傍で SS 濃度が高くなり、その傾向は上げ潮時に顕著であることが確認された。また、遡上フロント部でフロック径が特になくなる。これは、SS 濃度が高くなることで凝集が進行するためと考えられる。さらに、本研究では、潮間帯に干拓堤防を建設した場合の懸濁物輸送特性の変化に着目して検討を行った。ここでは、潮間帯沖側の検査断面における水深積分 SS フラックスの一潮汐積分値（以降、SS 通過量）を評価指標とし、干拓堤防の建設による SS 通過量の変化を調べた。潮汐振幅 1.0m, 2.0m とした計算では、堤防を沖側に設置するほど SS 通過量が減少することが確認された。これは、堤防を沖側に設置するほど干潟部への入退潮量減少、すなわち水平流速減少が生じ、それに伴って巻上げ量減少による SS 濃度低下が生じるためと推察される。

一方、潮汐振幅 3.0m とした計算では、堤防を沖側に移動させることによって岸向きの SS 輸送量が増加する結果となった。この理由を考えるため、検査断面における SS フラックスの水深積分値の変動を、堤防がある場合とない場合で比較すると、岸向きフラックスの増大より、むしろ下げ潮時の沖向きフラックスの減少が著しいことが確認された。また、堤防を設置することで上げ潮後半～満潮時の堆積フラックスが増加して水柱中の SS 量が減少していることや堤防設置によって満潮前後の時間帯にフロック径（沈降速度）が大きくなっていることが併せて確認された。以上のことから、干潟域に堤防を設置した場合、満潮時に堤防近傍で比較的径の大きいフロックが形成されて堆積傾向が強まり、下げ潮時の沖向きフラックスが減少すると推察される。

### (4) まとめ

本研究では、密度急変部での凝集粒子の沈

降現象に着目した実験を中心に実施した。実験水槽内の状況設定やフロック径の制御が容易ではなく、フロックの沈降特性の定量評価に対して十分なデータは得られなかったが、密度急変部において沈降速度が著しく低下する粒子が確認された。本研究課題で得た貴重な知見の活用に加え、実験と数値計算を併用するなどして、実海域における懸濁物質動態の高精度予測に向けて、成層海域におけるフロックの挙動に関する検討を引き続き行う予定である。

### 参考文献

- 1) 宇野木早苗, 佐々木克之, (2007): 有明海異変の発生システムについて, 海の研究, 16, 4, pp.319-328.
- 2) 中谷祐介, 西田修三, 森川千波 (2009): 大阪湾における有機懸濁物質の沈降分解過程に伴う栄養塩の鉛直輸送, 土木学会論文誌 B2, 65, 1, pp.996-1000.
- 4) 徳永貴久, 松永信博, 磯野正典 (2006): 有明海竹崎沖における底泥の栄養塩吸着, 水工学論文集, 50, pp.1471-1476.
- 5) Merckelbach, L.M., Kranenburg (2004): Determining effective stress and permeability equations for soft mud from simple laboratory experiments, Geotechnique, 54, 9, pp.581-591.
- 6) Winterwerp, J.C. (2002): On the flocculation and settling velocity of estuarine mud, Continental Shelf Research, 22, pp.1339-1360.

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 5 件)

- ① SAITA Tomonori, Study on cohesive sediment transport on a muddy tidal flat, ACCE Mangalore Centre Engineer's week-2018: Technical Talks & Trainings at Alva's Institute of Engineering & Technology, 2018.
- ② SAITA Tomonori, Study on cohesive sediment transport on a muddy tidal flat, ACCE Mangalore Centre Engineer's week-2018: Technical Talks & Trainings at National Institute of Technology Karnataka, 2018.
- ③ 蔵田隆生, 干潟域への干拓堤防建設と凝集性懸濁物輸送特性の関係に関する数値計算, 日本流体力学会年会 2017, 2017.
- ④ 田井明, 北川感潮域における出水時のカニ浮遊幼生の挙動, 日本流体力学会年会 2016, 2016.
- ⑤ 田井明, 河川汽水域に生息する甲殻類浮遊幼生の回帰戦略の解明, 環境水理部会研究集会 2016 in 香川, 2016.

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

齋田 倫範 (SAITA Tomonori)

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号：80432863

(2) 研究分担者

橋本 彰博 (HASHIMOTO Akihiro)

福岡大学・工学部・准教授

研究者番号：00366387