

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06584

研究課題名(和文) 干潟域の干出・冠水が駆動する流れ-底質間相互作用の解明と干潟環境の時空間変動予測

研究課題名(英文) Study on the interaction between flow and sediment in the intertidal zone, and spatiotemporal prediction of tidal flat conditions

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：泥質干潟における細粒底質の特性把握、および凝集性懸濁物質の動態予測に向けた試みとして、粘土鉱物の沈降・自重圧密特性の評価、凝集を考慮した懸濁物質輸送モデルの構築、および今津干潟を対象とした現地観測と数値計算を実施した。その結果、凝集性懸濁物質の沈降特性や堆積物の自重圧密特性に関する知見を得た。さらに、数値計算により、干潟域への護岸建設によって生じる凝集性懸濁物質動態の変化特性を明らかにするとともに、今津干潟を事例として、底質輸送を駆動する一要因としての長周期湾水振動の特性についても検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、沿岸域の疲弊は著しく、赤潮、貧酸素化、さらには漁獲量減少が深刻である。沿岸域の再生にとって、干潟域が有する高い生物生産性や水質浄化機能が果たす役割は大きい。本研究では、粘土鉱物の沈降・自重圧密特性に関する貴重な知見を得るとともに、凝集性底質輸送モデルを構築した。干潟域における物理過程の実態解明、および水質動態予測技術の確立に資する本研究の取組みは、沿岸開発や温暖化が干潟域・沿岸域の水質や生物生息環境にもたらす影響の把握や持続可能な海域利用に関する諸検討への応用も期待される。

研究成果の概要(英文)：As an attempt to understand the dynamics of cohesive sediments in muddy tidal flats, evaluation of the properties of silt and clay related to sedimentation and self-consolidation, development of a sediment transport model considering flocculation, numerical simulations for the Imazu tidal flat were carried out. As a result, an environment for evaluating the settling velocity of suspended particle matter was established, and the characteristics related to the sedimentation and the self-consolidation of fine sediment were evaluated. Numerical experiments also revealed changes in sediment transport due to the construction of a revetment in the intertidal zone. Furthermore, numerical simulations were carried out to understand the characteristics of low-frequency oscillations that would be the driving force on sediment transport in the Imazu tidal flat.

研究分野：環境水理学

キーワード：干潟 沿岸環境 潮汐 潮間帯 自重圧密 底質輸送 沈降速度

1. 研究開始当初の背景

干潟は、生物多様性を維持する機能（生育・生息地機能）、静穏な漁場の提供（供給機能）、栄養塩等の除去や CO₂ 濃度の調整（調整機能）、人と自然の出会いの場の提供（文化機能）等、様々な生態系サービスを提供する場である。干潟域の生物生産力は、沿岸域の中でもとりわけ高いとされている（松田：2014）。本研究の対象である泥質干潟は、シルト・粘土で構成され、勾配は極めて緩やかである。従って、潮差が比較的小さい場合であっても、潮間帯の面積や入退潮量の規模は大きい。この広大な領域において、干潮時には太陽放射や水分の蒸発等、冠水時には潮流や波浪の影響を受け、環境が大きく変動する。また、干潟では、河川によって運搬・供給された土砂や有機物が、潮流や波浪などの物理作用、凝集などの化学作用、底生物などによる生物作用の影響を受けながら、繊細なバランスの下で地形や生態系を維持している。このように、干潟周辺の水質動態や生物生息環境が、潮汐、波浪、河川流、およびそれらによる流体運動の影響を強く受けるにも関わらず、干潟域の物理過程に関する知見は乏しく、生物分野に比べて遅れている（Perillo *et al.* : 2009）。これらのことから、干潟域における海水流動や底質状態の時空間変動の詳細な把握は、海域環境や生物生息環境の保全などの観点から極めて重要な研究課題である。

2. 研究の目的

近年、沿岸域の疲弊は著しく、赤潮、貧酸素化、漁獲量減少が深刻である。沿岸域の再生にとって、干潟域が有する高い生物生産性や水質浄化機能が果たす役割は大きい。一方、例えば、埋立てによる干潟の消失など、海域における種々の物理的変化と水環境劣化との因果関係を解明するには至っていない。すなわち、沿岸域における水環境問題の解決には、物理的な変化に対する水質や生態系の応答を定量的に評価するための取り組みが不可欠である。特に、干潟域は沿岸域の水環境を規定する重要な領域であるにも関わらず、干潟域の物理過程に関する知見が不足している。本研究では、干潟域およびその周辺の水質動態を定量的に評価する手法の確立を目的とし、潮汐による干潟上の海水流動とそれに伴う底質輸送に関する数値モデルの構築、およびそれらに関わる凝集性細粒底質の特性把握を実施した。

3. 研究の方法

本研究では、干潟を有する沿岸域の環境悪化の原因究明や干潟域の生物生息環境評価に利用可能な精度の数値モデルの構築を目標とし、潮汐による干潟上の海水流動とそれに伴う底質の状態や懸濁物質（SS）濃度の変動に的を絞って、細粒底質の特性把握と数値モデルによる諸検討を実施した。具体的には、以下の(1)～(3)を中心に研究を実施した。

(1) 粘土鉱物の沈降・自重圧密特性の検討

干潟域の冠水・干出による底質の状態変化を検討するための数値モデルの構築の向け、細粒底質の沈降・自重圧密特性、およびそれらの塩分依存性に関する実験を行った。これにより、Gibson の圧密方程式を基礎式とする数値計算に関わる各種パラメータを評価した。試料には、複数の河川感潮域で採取した底質、および一般的な粘土鉱物であるカオリン、および有明粘土に含まれるとされるモンモリロナイトを用いた。

(2) 干潟域の干拓による凝集性懸濁物輸送特性の変化に関する検討

泥質干潟域における SS 輸送の基本的な特性の把握を目的として、凝集性を考慮した SS 輸送モデルを実装した鉛直 2 次元潮汐・潮流数値モデルを構築し、干潟域への護岸建設と懸濁物輸送特性との関係に関する検討を実施した。計算では、潮汐振幅、護岸の有無や護岸の位置を種々変えた計算条件を設定し、干潟域から沖方向に流出する SS 輸送量を評価した。

(3) 今津干潟における長周期水位変動に関する検討

実海域を対象とした 3 次元数値シミュレーションへの展開に向けた取り組みとして、福岡県今津干潟およびその周辺で水位、流速、濁度の観測を実施した。また、水位観測結果において、今津干潟において継続的な長周期水位変動が確認されたことから、この水位変動の基本特性や博多湾の湾水振動との関連性を数値計算によって検討した。

4. 研究成果

(1) 粘土鉱物の沈降・自重圧密特性の検討

① 凝集性細粒土砂の沈降速度に関する検討

凝集性細粒土砂の沈降速度評価のための実験環境を整備し、河川感潮域で採取した SS の沈降特性を調べた。沈降実験には、デジタルマイクロスコープ（朝日光学社製 MS-200+MS-Z60；以下、マイクロスコープ）を取り付けた実験水槽を用いた。マイクロスコープで粒子の沈降状況を撮影し、フロック径と沈降速度を画像解析によって計測した。画像解析で粒子の沈降速度を評価する際、微小時間を隔てて得られた 2 つの画像（以下、フレーム）内の粒子を抽出し、遺伝的アルゴリズムを利用して粒子追跡（粒子対探索）を行った。沈降粒子の追跡の際、異粒径粒子の混在（沈降速度差）による粒子のオーバーラップ、マイクロスコープの画角の小ささによる粒子のフレームアウト、および被写界深度の浅さに起因する粒子抽出の失敗などにより、一方のフレームにのみ存在する粒子（以下、孤立粒子）が多く発生した。本研究では、孤立粒子に関係する粒

子対の誤検出を回避するための仮想粒子を導入することで、粒子追跡効率の向上を図った。これにより、粒子追跡時の粒子対の誤検出頻度が減少し、30~40%の解析効率の向上がみられた。作成した粒子追跡アルゴリズムによって、河川感潮域で採取された底質試料の沈降速度を解析し、粒径と沈降速度の関係からブロックのフラクタル次元を推定したところ、筑後川と白川のブロックのフラクタル次元として、1.5~1.6程度の値を得た。

②高濃度懸濁物質の沈降特性に関する検討

凝集性細粒土砂の干渉沈降時の特性、およびそれらの塩分依存性の把握を目的とし、沈降筒による沈降実験を行った。実験試料として、河川感潮域で採取した底質、一般的な粘土鉱物であるカオリン、および有明粘土に含まれるとされるモンモリロナイトを用いた。沈降筒には2lのメスシリンダーを使用した。沈降筒に試料と塩水(NaCl水溶液)を入れて、十分に攪拌した後に懸濁水と上層水の界面の位置を測定した。各試料に対して、沈降筒内の試料濃度と塩分を変えた実験を行った。

実験結果から、齋田ら(2014)と同じ方法で単粒子沈降時の沈降速度、および各塩分におけるゲル化濃度を決定した。カオリン、モンモリロナイト、筑後川、六角川のゲル化濃度は、それぞれ、約70 g/l、約442 g/l、約84 g/l、約103 g/lの値を示し、モンモリロナイトの場合に、塩分の増加に伴うゲル化濃度の減少が見られた。カオリンについても、塩分増加に伴ってゲル化濃度がわずかに減少したが、モンモリロナイトと比べて変化が小さく、本研究における実験条件の範囲内では明確な塩分依存性は見いだせなかった。

③堆積物の自重圧密特性に関する検討

堆積物の圧密排水には透水係数が関係するが、堆積物の透水係数は堆積物の圧密状態に依存する。そこで、圧密過程に移行した後の界面位置の変化を調べるために、前述②の一部の実験条件について測定を36時間継続し、Merckelbach *et al.* (2004)の方法によって、沈降筒内に沈殿(堆積)した試料の圧密排水に係わるパラメータの検討を行った。

圧密過程に移行した後の界面位置の時間変化から、沈殿した試料内の間隙構造の特徴を表すフラクタル次元と透水係数評価式中の係数(K_k)を決定した。フラクタル次元の値は、カオリンで約2.7、モンモリロナイトで約2.4であった。また、カオリンの場合には、塩分の増加に伴ってフラクタル次元がわずかに減少した。一方、カオリンの K_k はモンモリロナイトの K_k より小さく、かつ塩分増加に伴って K_k の値が増加した。この K_k の大小関係や変化傾向は、フラクタル次元の値から推察される沈殿試料内の間隙構造の違いと対応している。また、河川感潮域採取した試料では、例えば、筑後川、白川、六角川のフラクタル次元としておおよそ2.6~2.7、 K_k の値として 1.2×10^{-8} mm/s~ 6.1×10^{-7} mm/sの値を得た。

(2)干潟域の干拓による凝集性懸濁物輸送特性の変化に関する検討

凝集性を考慮したSS輸送モデルを実装した鉛直2次元潮汐・潮流数値モデルを構築し、潮間帯への護岸建設に対するSS輸送特性の応答を調べた。構築した流動モデルの基礎方程式は、 σ 座標系で記述した鉛直2次元の運動方程式、連続の式である。干潟部の処理には、内山(2004)の冠水・干出スキームを採用した。凝集性を考慮したSS輸送モデルの基礎方程式は、 σ 座標系で記述したSSの濃度と数密度に関する移流拡散沈降方程式である。また、底質の侵食(巻き上げ)と堆積を表現するため、底面せん断応力が限界せん断応力を超える場合に侵食、下回る場合に堆積が生じるよう、海底面における境界条件を設定した。フロキュレーションの影響と沈降速度の評価にはWinterwerp(2002)のモデルを採用した。SSに関する諸量については、六角川感潮域の底質の値を用いた。

数値計算の対象地形は、干潟縁辺部の勾配を1/100、干潟部の勾配を1/1000とし、水平格子間隔は100 m、鉛直方向の層数は10層とした。計算では、開境界に周期12.42 hの水位変動を与えた。水位変動の振幅(以下、潮汐振幅)は、1.0 m、2.0 m、2.5 m、3.0 mとし、潮汐振幅、護岸の有無、潮間帯と護岸の相対的な位置関係を種々変えた計算を実施した。

潮間帯の沖に設定した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(以下、SS通過量)と護岸の位置との関係から、全てのケースにおいて、護岸を平均汀線位置より沖側に設置した場合にSS通過量が減少することが確認された。特に、潮間帯の沖側端に設置したケースでは、SS通過量がほぼゼロとなった。護岸を沖側に設置するほど水深平均SS濃度が小さくなっていったことから、護岸を平均汀線位置より沖側に設置した場合のSS通過量の減少については、入退潮量の減少に伴う底質巻き上げ量の減少によるものと判断された。

一方で、平均汀線位置に護岸を設置した場合にSS通過量が極大を示した。護岸が有るケースと無いケースとで検査断面におけるSSフラックスの水深積分値を比較すると、護岸の設置によってSSフラックスの変動幅が小さくなること、特に下げ潮時の沖向きSSフラックスが相対的に大きく減少することが確認でき、これらの結果としてSS通過量が極大を示したと考えられる。また、水柱中の総SS量は、上げ潮時の底質の巻き上げの影響で満潮時付近に増大するが、護岸が設置されることで、上げ潮後半から下げ潮前半にかけて水柱中の総SS量が大きく減少することが確認された。この水柱中の総SS量の急減がみられた時間帯の少し前にブロックの成長に伴う沈降速度の増大が生がみられ、かつ増大の程度は護岸がある場合のほうが大きかったことから、以下のように考えられる。護岸を潮間帯中央付近に設置した場合、上げ潮最強時に底質の巻き上げによって水柱中のSS量が増大する。その後、干潟域を遡上する海水が護岸に到達するこ

とで、上げ潮後半～満潮にかけてフロックが成長し、沈降速度が大きくなる。その結果、満潮時前後に沈降・堆積が活発に生じ、水柱中の総 SS 量が減少した状態で下げ潮を迎えるため、SS 通過量（正味の沖向き輸送）が減少するような変化が生じる。なお、下げ潮に沈降速度の減少がみられたが、これは SS 濃度の低下で凝集が起こりにくくなり、形成されたフロックの崩壊が卓越するためと考えられる。

(3) 今津干潟における長周期水位変動に関する検討

① 今津干潟における水位観測

福岡県今津干潟（瑞梅寺川河口干潟）周辺において水位観測を実施した。観測では、浜崎今津漁港内、および今津干潟に注ぐ江ノ口川の感潮域周辺に圧力式水位計（Onset 社製 HOB0 U20）を設置した。観測期間は、2018 年 9 月 13 日～10 月 13 日であり、水位を 1 分間隔で記録した。全測点において冠水状態が継続した小潮期を中心とする 2018 年 9 月 15 日～9 月 22 日の水位データに気圧補正を施した後、スペクトル解析を行ったところ、周期 30～60 分の長周期振動が継続的に発生していることが確認された。長周期水位変動の周期帯、および水域（干潟域）の規模や形状に基づく考察から、この長周期水位変動は、干潟外からの長周期波の入射による干潟奥部を腹、狭窄部付近を節とする副振動に関連するものと推察される。

② 今津干潟における長周期水位変動に関する数値計算

今津干潟において、周期 30～60 分の長周期水位変動が観測されたことから、長周期波の入射に対する今津干潟の応答を数値計算によって調べた。数値モデルとして Princeton Ocean Model を用いた。計算対象領域は、今津干潟と博多湾南西部の今津湾を対象とする領域である。水位モニタリング地点は、干潟外から干潟奥部に向けて、干潟沖、干潟入口の狭窄部、干潟東部、干潟西部、瑞梅寺川河道（干潟奥部）の 5 点とした。入射境界には、全振幅を 0.05 m の波を与えた。入射波周期 15～80 分の範囲では 1 分間隔、80～200 分の範囲では 5 分間隔で入射波周期を変化させた計算を実施した。

計算の結果、入射波周期が 28 分の場合に、干潟入口の狭窄部における増幅率が 0.49 で最小となり、狭窄部が節、干潟奥部が腹となる振動が生じた。干潟内で増幅率が最大となる入射波周期 48 分の場合には、増幅率が干潟奥部で約 3.0 となった。この時、干潟入口の狭窄部付近でも 1.0 を越えており、狭窄部より東の干潟外（今津湾）に節を持つような振動系を示した。入射波周期が 100 分より長くなると、全地点で増幅率がほぼ 1.0 となり、顕著な共振は起こらず、今津湾側と同規模の水位変動に留まる。干潟入口の狭窄部から最も遠い干潟奥部を基準とすると、観測された長周期水位変動の周期帯と概ね対応する 35～60 分周期の波を入射させた場合に、増幅率が 2.0 を越える共振が生じることが確認された。ただし、干潟の微地形や干潟の冠水状態を考慮したより厳密な今津干潟の固有周期の評価や共振が今津干潟内の流況に与える影響の評価が課題として残された。

<引用文献>

- ①松田義弘, 沿岸環境破壊はなぜ続くかー干潟の物理過程が知られていないー, 沿岸海洋研究, 51 巻, 2 号, 2014, pp.103-110.
- ②Perillo G., E. Wolanski, D. Cahoon, M. Brinson, Coastal Wetlands, Elsevier, 2009, p974.
- ③Merckelbach L. M., C. Kranenburg, Equations for effective stress and permeability of soft mud-sand mixtures, Geotechnique, 54, No.4, 2004, pp.235-243.
- ④齋田倫範, J. C. Winterwerp, 底泥の自重圧密・侵食特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, 2014, pp.I_1116-I_1120.
- ⑤Merckelbach L. M., C. Kranenburg, Determining effective stress and permeability equations for soft mud from simple laboratory experiments, Geotechnique, 54, No.9, 2004, pp.581-591.
- ⑥内山雄介, 海底面の力学過程を考慮した冠水・干出スキームの開発と三次元 σ 座標海洋流動モデルへの適用, 海岸工学論文集, Vol. 51, 2004, pp.351-355.
- ⑦Winterwerp, J.C., On the flocculation and settling velocity of estuarine mud, Continental Shelf Research, 22, 2002, pp.1339-1360.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 齋田倫範, 澤井拓朗, 田井明, 橋本彰博	4. 巻 75 (2)
2. 論文標題 今津干潟における長周期水位変動と博多湾の振動特性の関係	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_157-I_162
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.75.I_157	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tomonori Saita, Toru Yamashiro	4. 巻 -
2. 論文標題 The Relation between Propagation Paths of Barometric Waves over the East China Sea and Sea-Level Fluctuations off the West Coast of Kyushu, Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 22nd IAHR-APD Congress	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 蔵田隆生, 齋田倫範, 進藤祐介, 西健一
2. 発表標題 干潟域への干拓堤防建設と凝集性懸濁物輸送特性に関する数値計算
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomonori Saita
2. 発表標題 Study on Cohesive Sediment Transport on a Muddy Tidal Flat
3. 学会等名 Engineer's week-2018: Technical Talks & Trainings, National Institute of Technology Karnataka
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橋本彰博, 豊池正應, 田井明, 齋田倫範
2. 発表標題 地形改変が博多湾の流動に及ぼす影響に関する数値計算
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019, 電気通信大学(東京都調布市)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋田倫範, 田井明, 橋本彰博
2. 発表標題 博多湾における長周期水位変動に関する検討
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関