

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18124

研究課題名(和文)河口干潟のヘドロ化機構の解明とヘドロ化抑制手法への応用

研究課題名(英文)Clarification of sludge sedimentation mechanism in tidal flat and its application to restore method for tidal flat

研究代表者

中下 慎也(Nakashita, Shinya)

広島大学・工学研究院・助教

研究者番号：90613034

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ヘドロ化機構の解明に向けて有機泥に吸着する陽イオンの種類や濃度、有機物の付着量を変化させた場合の有機泥の液性限界値(=流動性)の変化を明らかにした。研究結果より、吸着イオン量が液性限界値に与える影響が少ないこと、間隙水のイオン強度が高いほど液性限界値が低くなることを明らかにした。また、過酸化水素を添加し、有機物の付着量を低下させた結果、有機物量1.5%の低下に対し、液性限界値が42%低下したことから、有機物量が液性限界値に与える影響が大きいことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Aggravation of tidal flat caused by excess deposition of sediment. Property of sediment greatly changes by amount of organic matter, ion of pore water. Considering cohesion and repulsion of sediment based on DLVO theory, ionic strength of pore water and adsorbed ion are important parameters determining electric double layer thickness and surface potential. It is expected that when the ionic strength becomes higher, the electric double layer becomes thinner and sediment tends to aggregate easily. In this study, to understand the sludge sedimentation mechanism, relationship among liquid limit (=liquidity), adsorbed cation of sediment, ion concentration, and amount of organic matter.

The results revealed that amount of adsorbed ion have a little effect for liquid limit. Ionic strength have a strong relationship to liquid limit, when ionic strength become increase, liquid limit become decrease. When amount of organic matter decrease 1.5%, liquid limit decrease 42%.

研究分野：海岸工学

キーワード：巻き上がり 液性限界値 吸着イオン 間隙水のイオン強度 電気二重層厚

### 1. 研究開始当初の背景

汽水域や海底に堆積した泥の輸送や堆積循環を考える上で、泥の巻き上がりやすさを把握することは非常に重要である。泥の巻き上がりやすさは限界せん断応力によって議論されており、そのパラメータとしては含水比や有機物量などが考慮されてきた。一方で電気化学的な面から巻き上がりを見ると、有機泥の凝集力は泥粒子の引力と反発力によって定義され、泥粒子の凝集力にはイオン濃度や表面電位、吸着イオンなどのパラメータが重要である。特に河川感潮域に堆積する有機泥は河口からの距離に依存して間隙水のイオン濃度が空間的に変化することから、同じ物理性状を持った有機泥であっても、空間的にその性状が変化する可能性がある。粘土工学分野やコロイド化学分野などにおいては、単純な微細土粒子（ベントナイトやカオリンなど）に対して電気化学的な面から粒子のフロックについて研究されているが、微細土粒子に有機物が吸着した有機泥については有機物の特性が様々であり現象の把握が難しいことから、有機泥を対象とした研究は少なく、その特性は明らかになっていないのが現状である。

### 2. 研究の目的

泥のせん断応力はフォールコーン試験から得られる貫入深さと関係することが報告されており、貫入深さが増加する（液性限界値が低下する）とせん断応力が低くなる。本研究では泥の巻き上がりやすさの指標としてフォールコーン試験から得られる液性限界値に着目した。

本研究では泥のせん断応力と相関のある液性限界値に着目し、有機泥に吸着する陽イオンの種類や量、間隙水のイオン濃度を变化させた場合の液性限界値の変化について検討した。さらに、有機泥の性状を支配する大きな要因の一つである有機物量にも着目し、有機物量を変化させた場合の液性限界値の変化についても検討した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 使用した泥の性状と液性限界値の測定

実験には2016年5月23日に広島県南部の海田湾、呉湾で採取された海底泥を使用した。採取時の含水比はそれぞれ222.8%、388.7%であった。

液性限界値はフォールコーン試験器（DH-22NM, 誠研舎）を用いて計測した。液性限界試験はJGS0142に基づき、貫入量が7-11 mmの範囲で2個以上、11-15 mmの範囲で2個以上、合計5個以上のデータを用いて流動曲線を作成し、貫入量が11.5 mmを示す含水比を液性限界値とした。

#### (2) 吸着イオンを変化させる手法と測定 (CASE1)

吸着イオンはイオン交換順位 ( $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} >$

$\text{K}^{+} > \text{Na}^{+}$ ) を考慮してイオン交換順位の高い  $\text{CaCl}_2$  溶液を用いて吸着イオンを変化させた。Case1-1は採取泥、Case1-2は採取泥の間隙水を脱イオン水に交換した泥、Case1-3は採取泥を0.5 mol/Lの  $\text{CaCl}_2$  溶液で2回攪拌させた後に間隙水を脱イオン水に交換した泥であり、それぞれの試料の吸着イオンと液性限界値を測定した。原泥の間隙水を脱イオン水に交換するために有機泥300 mLに脱イオン水500 mLを加え200 rpm、5時間で攪拌させた。その後10時間静置させ上澄み水の電気伝導度を電気伝導率計（ES-51, HORIBA）を用いて測定し、上澄み水を取り除いた。上澄み水の電気伝導度が0.1 S/m以下になるまでこの作業を繰り返した。なお、 $\text{CaCl}_2$  溶液のモル濃度は海水が0.5 mol/Lの  $\text{NaCl}$  溶液と考え、同程度のモル濃度になるように設定した。

#### (3) 間隙水のイオン強度を変化させる手法と測定 (Case2)

間隙水のイオン濃度は6000 rpmで20分遠心分離した後、コンパクトメータ・水質分析計（LAQUA Twin, HORIBA）を用いて  $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$ イオンを測定した。

液性限界値には間隙水のイオン濃度よりも溶液のイオン価数を考慮したイオン強度 ( $0.5 \times \text{イオン濃度} \times \text{イオン価数の2乗の総和}$ ) が関係することが予想されることから、間隙水をイオン濃度は等しいがイオン強度が異なる0.5 mol/Lの  $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{NaCl}$  溶液に交換したCase2-1とCase2-2、イオン濃度が0.2 mol/Lの  $\text{CaCl}_2$  溶液と0.6 mol/Lの  $\text{NaCl}$  溶液に交換したイオン濃度は異なるがイオン強度が0.6 mol/Lで等しいCase2-3とCase2-4を作成し、液性限界値を測定した。試料は間隙水を交換するために有機泥300 mLと交換対象の溶液500 mLを加え200 rpm、5時間で攪拌させた。その後10時間静置させ上澄み水の電気伝導度を測定し、上澄み水を取り除き、上澄み水の電気伝導度が交換対象の溶液とほぼ同程度になるまでこの作業をくり返した。

#### (4) 有機物量を変化させる手法と測定 (Case3)

実験に用いた海田泥はCase1、Case2と保管期間が異なるため液性限界値が13%程度高い(Case3-1)。この海田湾で採取された有機泥の乾燥重量1 gに対して過酸化水素水（濃度30%）を1 mL (Case3-2)あるいは2 mL (Case3-3)添加した試料を用意した。これらの試料を対象に強熱減量と粒度分布、吸着イオン、液性限界値の測定を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 吸着イオンと液性限界値の関係 (Case1)

図-1に吸着イオンを変化させた場合の流動曲線、表-1に各Caseの吸着イオン量と液性限界値を示す。Case1-2とCase1-3の液性限界値がほぼ同程度であることから、 $\text{Ca}^{2+}$ イオンの吸着イオン量に18 cmol(+)/kg程度の差

があっても、間隙水が脱イオン水で同じイオン強度に統一することで液性限界値に大きな差が生じないことがわかった。また、Case1-1と比較してCase1-2とCase1-3の液性限界値が高くなったが、採取泥の間隙水が海水であるため、間隙水が脱イオン水の場合と比較して電気二重層が薄くなり、凝集しやすくなったためである。

吸着イオンは有機泥の凝集・反発に影響を与える要因の一つとして考えられていたが、本実験の結果から有機泥の流動性に影響を与えないことが明らかとなった。

(2) イオン強度の変化に伴う液性限界値の変化 (Case2)

図-2 に間隙水のイオン強度を変化させた場合の流動曲線、表-2 に間隙水のイオン濃度、イオン強度と液性限界値を示す。間隙水が同じイオン濃度であるがイオン強度が異なるCase2-1とCase2-2の液性限界値を比較するとイオン強度が高いCase2-1の液性限界値はCase2-2よりも20%程度低下することがわかった。また、間隙水のイオン濃度は異なるがイオン強度が等しいCase2-3とCase2-4の液性限界値は7%程度の差があることがわかった。図-3 に海田泥を対象とした試料の間隙水のイオン強度と液性限界値の関係を示す。イオン強度と液性限界値には強い相関関係があり、イオン強度が大きいくほど液性限界値が低くなることがわかった。

有機泥の液性限界値を決定する大きな要因がイオン濃度ではなく、イオン強度であることを明らかにした。図-3 には間隙水のイオン強度と液性限界値の関係が明確に示されており、有機泥の流動性を考慮する上でイオン強度を考慮することの重要性が示された。

(3) 有機物量の変化に伴う液性限界値の変化 (Case3)

有機泥を対象とした場合には吸着イオンや間隙水のイオン強度だけでなく、有機物量も液性限界値を変化させる要因である。そこで、過酸化水素水の添加量を変化させることで採取泥の有機物量を変化させた。図-4 に燃焼温度を変化させて測定した試料の減量率を示す。これまでの過酸化水素水を用いた有機物の除去を行った研究結果からは、有機泥の乾燥重量1gに対して10mL以上の添加で減量率が約5%まで低下することを示している。100-600区間での総減量率はCase3-1で11.9%、Case3-2で10.4%、Case3-3で9.2%であり、過酸化水素の1~2mL/gの添加によって有機物は全体の2~3割を除去できている。

図-5 に有機物量を変化させた場合の流動曲線を示す。Case3-1の液性限界値に対してCase3-2は42%、Case3-3は47%減少していることから有機物は泥の保水能力を高め、液性限界値に非常に大きな影響を与えていることがわかった。また、過酸化水素水を有機泥

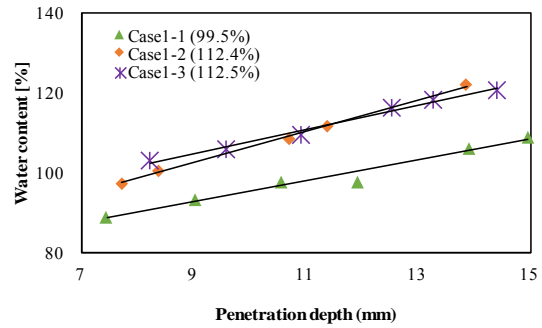


図-1 吸着イオンの違いによる流動曲線の変化

表-1 吸着イオンと液性限界値

試料名	主な吸着イオン [cmol(+)/kg]			間隙水	液性限界値 [%]
	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>		
Case1-1	4.17	16.50	1.64	Sea Water	99.4
Case1-2	0.80	18.05	1.13	脱イオン水	112.4
Case1-3	0.61	36.00	0.90	脱イオン水	112.5

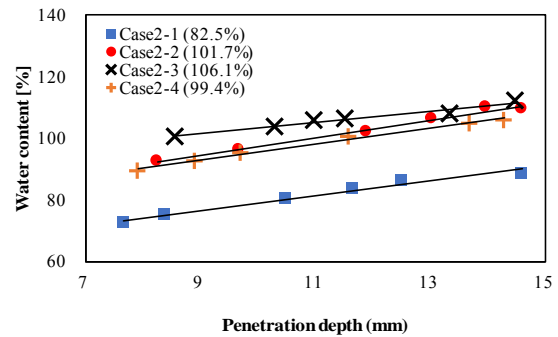


図-2 イオン濃度の違いによる流動曲線の変化

表-2 間隙水のイオン濃度・イオン強度と液性限界値

試料名	間隙水	イオン濃度 [mol/L]	イオン強度 [mol/L]	液性限界値 [%]
Case2-1	CaCl <sub>2</sub>	0.5	1.5	82.5
Case2-2	NaCl	0.5	0.5	101.7
Case2-3	CaCl <sub>2</sub>	0.2	0.6	106.1
Case2-4	NaCl	0.6	0.6	99.4

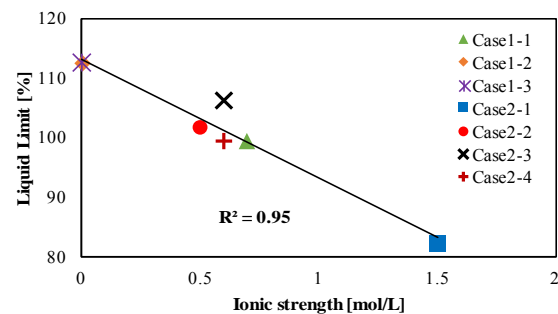


図-3 間隙水のイオン強度と液性限界値の関係

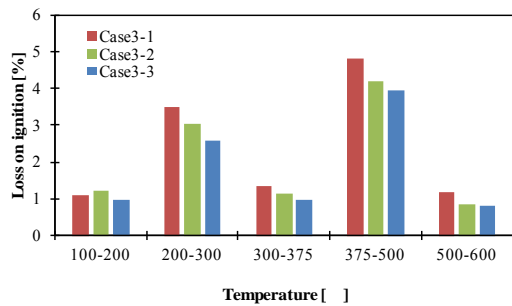


図-4 有機物分解による燃焼特性の変化

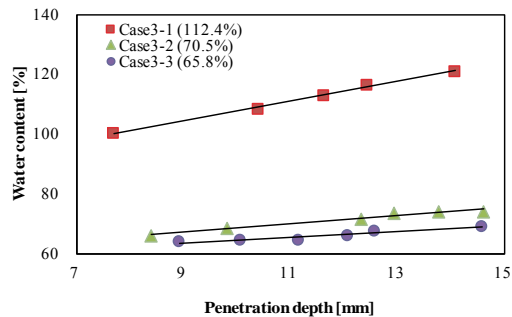


図-5 有機物分解による流動曲線の変化

の乾燥重量1gに対して1mL添加した時点で有機泥の液性限界値を急激に低下させることがわかった。

これまでの研究では過酸化水素は有機物が完全に除去されるまで添加するものであったが、本研究では1mL/g, 2mL/gの添加により、有機物の分解が2割程度進んだ試料を作成することに成功した。有機物量の低下は急激に液性限界値を低下させるという新たな知見を得た。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4件)

1. 中下慎也, 森本優希, 金城信隆, 日比野忠史 : 有機泥に吸着するイオンが泥の物理特性に及ぼす影響の把握, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, pp.1321-1326, 2016.11. (査読あり)
2. Narong Touch, Tadashi Hibino, Shinya Nakashita, Kenji Nakamoto : Variation in properties of the sediment following electrokinetic treatments, Environmental Technology, 38(3):277-284, 2016.7. (査読あり)
3. 森本優希, 中本健二, 中下慎也, 日比野忠史 : 堆積泥への灰分(ミネラル)の供給と消費機構, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.72, No.2, pp.658-663, 2016.6. (査読あり)
4. TOUCH NARONG, 金城信隆, 中下慎也, 日比野忠史 : 乾式燃焼法に基づいた堆積泥

の有機物形態を評価する手法, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.1417-1422, 2015.11. (査読あり)

[学会発表](計 0件)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

中下 慎也 (NAKASHITA SHINYA)

広島大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90613034