

間隙水浸透場における有機泥の巻き上がりに関する研究

Study on Upwelling of Organic Mud in Pore Water Infiltration Field

今川昌孝¹・日比野忠史²・駒井克昭³・松永康司⁴

Masataka IMAGAWA, Tadashi HIBINO, Katsuaki KOMAI and Yasushi MATSUNAGA

From past studies, it was clarified that the movement of pore water in the sea bed is the main cause of high turbidity layer generating over the sea bed, and the pore water keeping ability of the setting mud is depend on the organic matter adhering to the soil particles. It is thought that the organic matter makes the pore space increasing and the expansions of the mud layer. In this study, the organic mud property (IL, D_{50} , C/N) with the pore water moving is discussed by analyzing the observation data, and the relationship between the organic matter content and the sediment expansion mechanism is cleared by the pore water infiltration experiment.

1. はじめに

広島湾海底には、栄養塩を多量に含んだ有機泥が堆積している場が多い。ヘドロ化した有機泥の巻き上がりは栄養塩の溶出や海底層の貧酸素化を引き起こす要因として考えられる。海底において有機泥は 300 % 以上の高含水比の状態では堆積しており、高含水比化（膨張）した浮泥層では有機泥の巻き上がり（栄養塩の溶出や貧酸素化）を促進させることが指摘されている（田多ら, 2004）。現地海底泥が高含水比状態を維持する要件として、浮泥層を含む表層堆積泥内への海水の流入や微細土粒子に吸着した有機物の水分保持能力が関係していることが既往の研究から推測されている。

本研究においては、広島湾における底泥の巻き上がりの発生状況を捉えるため、現地観測により成層状況や堆積泥内の水温分布の連続測定を行うとともに、定期的に海底泥を不攪乱採取することにより含水比、有機物含有量等、海底に堆積した有機泥の性状把握を行った。海底泥内の有機物は土粒子に吸着し、間隙を増大させる効果を持つとともに間隙水を保持し、海底表層堆積泥の膨張を維持させていることが考えられる。本論文では海底高濁度層の形成機構の解明を目的として底泥に含まれる有機物量とその性状に着目し、有機物の量と性状が有機泥の水分保持能力に及ぼす影響について検討した。

2. 広島湾における海底高濁度層の形成

(1) 海底堆積泥性状の季節変動

広島湾奥海域において海底堆積泥の不攪乱採取、採取

泥の分析、および海底濁度と海中～海底～堆積泥内における温度の連続測定を行なった。

a) 堆積泥の不攪乱採取調査の概要

海底堆積泥性状の季節変動を知るため 2005 ～ 2006 年の夏季～秋季の期間を中心に太田川河口と呉湾沖南奥 (ST. 1 と ST. 2, 図-1) において堆積泥採取を行った。本調査では堆積泥内の間隙水の動き、泥内の有機物の量と性状の季節変動を重点に解析した。堆積泥は柱状採泥機を用いて不攪乱採取しており、各観測点で採取された 4 本の堆積泥を表層から 2 cm 毎にスライスし、4 サンプルを混合して、層毎の含水比、強熱減量値 (IL), 酸化還元電位 (ORP), 懸濁態有機炭素 (POC), 懸濁態有機窒素 (PON) 等について分析を行った。

b) 堆積泥性状の季節変動特性

図-2 には 2005 年, 2006 年に採取された柱状泥の含水比, IL, ORP, D_{50} の鉛直プロファイルの 2 年間の季節変動が示されている。広島湾奥に位置する呉湾沖南奥 (ST. 2) での含水比の季節変動が顕著であり、夏季には含水比が表層で最大 600 % にまで達している。これに対し、太田川河口 (ST. 1) での含水比は ST. 2 よりも数

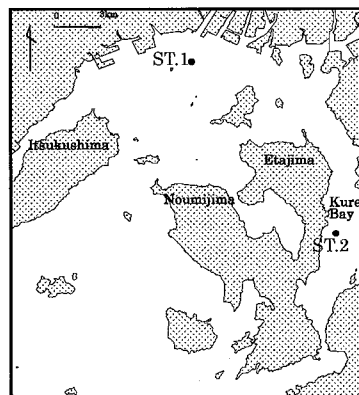


図-1 観測地点と地形概要

1 学生会員	広島大学大学院工学研究科
2 正 会 員 博(工)	広島大学准教授大学院工学研究科
3 正 会 員 博(工)	広島大学助教大学院工学研究科
4 正 会 員 工修	国土交通省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所

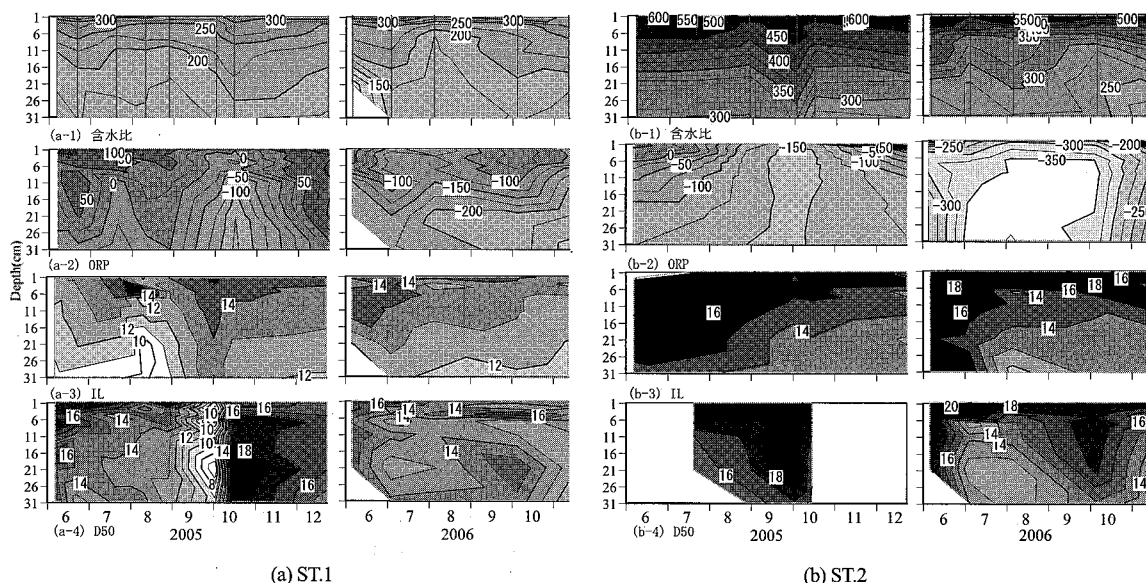


図-2 堆積泥性状の季節変動，上段から1)含水比(%), 2)ORP(mV), 3)IL(%), 4)D₅₀(μm) (上段図中の縦線は観測日を示す)

100%小さく，季節変動も小さい傾向にある。この傾向と同様にST.1ではILが小さく，ORPは大きな値を示している。含水比の変動は両地点において表層のみに留まらず，泥深30cmにまでおよんでいることがわかる。ORP, IL, D₅₀とも含水比の変動によく対応しており，泥内の間隙水の移動との関連が考えられる。

夏季には堆積泥内の含水比が上昇するとともに，還元的な状態が強くなる（ORPが負）傾向にある。有機物含有量はST.1で少ない傾向にあり，ST.1では10～15%程度，ST.2では12～18%程度の変化がある。D₅₀は表層で大きく，深層では小さくなる傾向にある。有機泥は分解とともに粒径が小さくなることからD₅₀は有機泥の分解指標として考えると，ST.1ではST.2に比較してD₅₀が小さいこと，さらにORPが高く，有機物量も少ないことから，ST.1は分解が進みやすい環境，または未分解の有機物の堆積が少ない環境にあるといえる。

図-3には(a)不攪乱採取された堆積泥のIL～含水比関係および(b)10～50μm粒径粒子の含有率～IL関係が示されている。図-3(a)から有機物量の増大に伴って含水量が増大しており，土粒子に有機物が多く吸着した状態にある堆積泥での保水能力が高まっていることがわかる。さらに10～50μmの粒径粒子の含有率と有機物量との相関がよいことから(図-3(b))，有機物は10～50μm以下の粒径の細かい土粒子と結合していることが推定される。

また，有機物量に対して含水比が一意的に決まってい

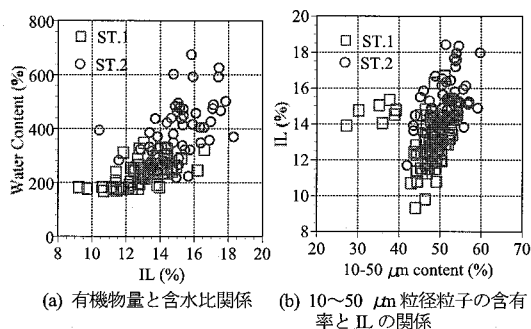


図-3 有機物量と含水比，粒径の関係

ないことから(図-3(a))，堆積泥の膨張状態(高含水比状態)は有機物の量のみではなく，性状(鮮度)にも依存されることが予想される。結合する有機物が新鮮な場合，体積が大きく(密度が小さく)，保水力は非常に高くなると考えられる。海面で形成された有機泥は沈降過程を経て海底に堆積し，圧密されながら，分解されていく。有機物の分解が進むに連れて保水能力は小さくなり，含水比が低下する要因となる。これらのことから堆積泥の含水比は泥内に流入する海水の量と土粒子に吸着する有機物の性状によって決まる間隙水の保持能力によって決定されることが推定できる。

(2) 堆積泥内の間隙水浸透の可能性

a) 泥温の連続測定調査の概要

海底における高濁度層の形成(有機泥の巻き上がり)と堆積泥内での間隙水の流動を把握するために，堆積泥

の柱状採泥と併せて、太田川河口 (ST. 1, 平均水深 15 m) において 2006 年 6 月 6 日～10 月 28 日まで海中 (海底から 7 m と 12 m) および堆積泥内 (海底上 10 cm～泥深 50 cm までの 10 cm 間隔) に水温センサー (compact-TD, Titbit), 海底上 10 cm に濁度センサー (compact-CLW) を設置し, 10 分間隔でのデータ取得を行なった。

b) 海底濁度の上昇と堆積泥の含水比状態の変化

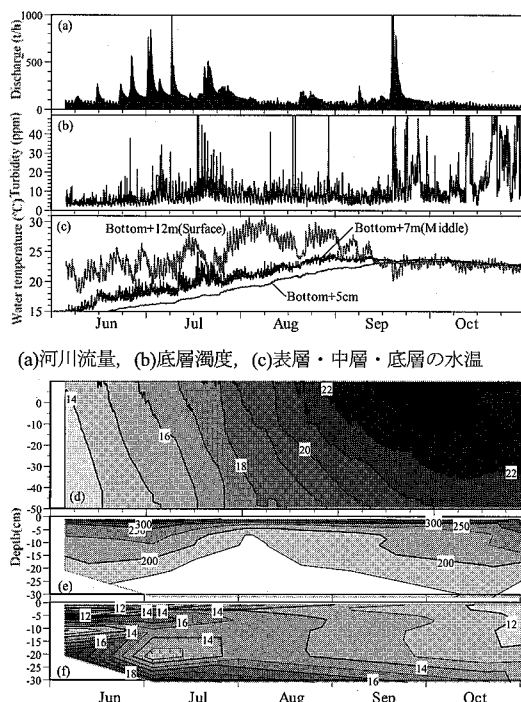
図-2 で示したように, 堆積泥が数 10 cm にわたって高含水の状態になるためには, 新しい浮遊泥の堆積, あるいは浮泥層への海水の浸入 (間隙水の移動) が必要になる。含水比が小さくなるためには堆積泥からの排水が行なわれること, 含水比が大きくなるためには海水あるいは間隙水の堆積泥への流入が必要である。図-4 に 2006 年の調査結果 (a) 太田川流量, (b) 底層濁度, (c) 表層・中層・底層の水温, (d) 泥内温度プロファイル, (e) 堆積泥の含水比 (図-2 に示した 2006 年のデータ), (f) 堆積泥の POC と PON の比) が示されている。なお, 図 (a) と図 (d) で 9 月の洪水後に含水比の上昇が遅れてみえるのは, 採泥観測が洪水の約半月後に行われたためである。

図-4 では泥内への温度の伝播は海水温が高くなるに連れて遅くなっており, 間隙水の流入と関係が考えられる。泥深 20 cm 程度までの水温勾配は堆積泥含水比の低くなる 8 月に小さくなっており, 含水比の低下にともなって泥内から排水が行われたことが考えられる。また, 泥深 50 cm までの水温勾配は底層水温が最も暖かくなる 9 月初旬に最も大きい, 泥内に浸入してきた水分が停滞し有機泥を膨張させていることが推定できる。

日比野ら (2006, 2006a) は呉湾沖南奥 (ST. 2) での 2001 年からの 5 年間の観測によって以下の現象を見出している。

- ① 海底濁度は堆積泥内への海水の流出に伴って形成されている。
- ② 太田川デルタでの地下水位は海水位と河川水位との和で表されており, 河川流出の増大に伴ってデルタ地下水位が上昇している。このため, 海底に堆積した泥の含水比は河川流量に対応した変動をする。

図-4 から ST. 1 においても海底濁度は堆積泥が高含水比状態にあるときに高くなる傾向にあり, 海底濁度の上昇が堆積泥内の含水比の上昇 (間隙水の移動) と関連していることが示唆される。濁度の上昇は, 堆積泥中から間隙水の流出に伴って浮泥が海中に浮き上がることに よると考えられ, 間隙水の流動が海底濁度の上昇を引き起こす要因であることが推定できる。ただし, 日比野ら (2006b) は間隙水の流出では堆積泥が膨張するのみで, 堆積泥の巻き上がりは起こらないことを実験的に明らか



(a) 河川流量, (b) 底層濁度, (c) 表層・中層・底層の水温

(d) 泥内温度, (e) 含水比, (f) C/N 比の鉛直プロファイル

図-4 ST.1 における 2006 年の観測結果

にしている。堆積泥は泥層が膨張 (高含水比化) することによって, 小さな底面せん断力でも巻き上がりが起こり易くなることが考えられる。

太田川河口では底層濁度の上昇は成層期と成層消滅後では異なっており, 成層期には堆積泥の含水比低下時期, 成層消滅後には高含水比状態時に起こる傾向にある。成層消滅後には有機泥の沈降量が大きくなることから, 成層消滅後には海底に分解の進んでいない有機泥が堆積し, C/N 比が低下しているのがわかる (図-4)。図では成層消滅後に含水比が高くなっており, 含水比の上昇と C/N 比との関係が示唆される。

3. 底泥による間隙水の保持特性

(1) 間隙水浸透実験の概要

有機物量および有機物の分解状態が異なる堆積泥内において, 間隙水の浸透が有機泥の巻き上がりや堆積泥層の膨張に及ぼす影響を調べるため, 図-5 に示す実験装置を用いて間隙水浸透実験を実施した。本実験では有機泥を沈降・堆積させた水槽と海水供給水槽の 2 つの水槽に水頭差を付与することで, 海水位とデルタ地下水位との関係を再現し, 堆積泥層に鉛直上向きの間隙水浸透流場を作った。水頭 1 cm と 0 cm の実験結果を比較することで浸透による有機泥の膨張特性を検討した。

有機物の泥層膨張に及ぼす影響は, 有機物の含有量と

分解度の異なる採取泥を使用し、間隙水の浸透下において有機物量が高含水比状態を維持する機構を実験的に検討した。表-1 に本実験に用いた堆積泥の初期性状を示している。sample 1 は太田川河口 (ST. 1), sample 2, 3, 4 は呉湾沖南奥 (ST. 2) で採取された堆積泥である。ST. 2 での採取直後の含水比は ST. 1 に比較して数 100 % 程度高い含水状態にあり、堆積泥に含まれる有機物量は IL で 3 % 程度多い (表-1)。case1 では、有機物含有量が保水性に及ぼす影響、case2 では有機物の分解状態が有機泥の保水特性に及ぼす効果に着目した実験を行った。

(2) C/N 比を用いた有機泥の性状把握

前章でも示したように堆積泥の膨張量は有機物の分解度によって異なることが考えられる。堆積過程において有機泥は微生物による分解・無機化を受けているために鉛直的に有機物の性状が異なっている。本実験では有機物の性状 (分解度の違い) を C/N 比によって表している。これは有機物の C と N に着目した量であり、一般的に分解速度の速い有機物には C が多く含まれている。すなわち有機物の分解が進むにつれて C/N 比は大きくなっていくと考えられる。泥深の深い場所から採取された sample 3 の C/N 比は表層から採取された sample 4 の底泥の C/N 比よりも大きいことから sample 3 には分解の進んだ有機物が含まれていると判断できる。

(3) 間隙水浸透場における有機泥の膨張特性

図-6(a) と図-7(a) には泥厚から換算された含水比の時間変動、図-6(b) と図-7(b) には各層 (1 cm 毎) での含水比と IL の関係が示されている。図-6 には case1 の結果、図-7 には case2 の結果が示されている。両図(a)に示された含水比は泥層全体の見かけの含水比のことであり、泥層厚が経時的に測定され、堆積泥全体の重量に対する間隙水重量の割合 $\bar{w}$ (%) が (1) 式で算出された。

$$\bar{w} = \frac{\rho_w \left(V - \frac{M_s}{\rho_s} \right)}{M_s} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 M_s は使用泥重量 (g)、 V は全体積 (cm^3)、 ρ_s は土粒子密度 (2.5 g/cm^3)、 ρ_w は海水密度 (1.02 g/cm^3) である。ただし、(1) 式で算出される含水比は堆積泥に有機物が含まれていないとして計算されているため、密度の小さい有機物が含まれる場合には含水比は小さく見積もられる。図-6(b)、図-7(b) に示した含水比、IL は実験終了後に層分けした後、有機泥の性状を直接測定したものである。

a) 有機物による保水特性 (sample 1 と 2 の比較)

間隙水の浸透がある場合には両サンプルとも高含水比状態が維持され、泥層が膨張していること (図-6(a))、

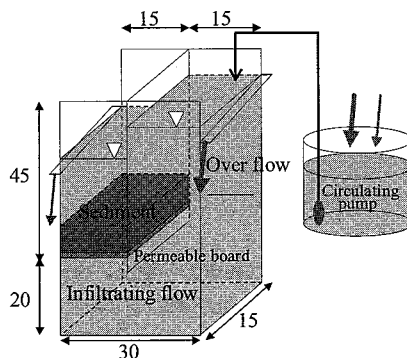


図-5 底泥間隙水浸透実験装置 (単位: cm)

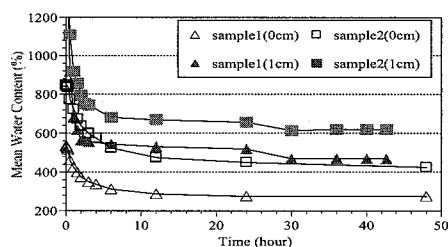
表-1 実験 sample の初期性状

試料名	使用泥量 (g)	含水比 (%)	IL (%)	C/N 比
sample1	370	252.9	13.52	
sample2	370	549.3	16.94	
sample3	370	261.9	12.64	12.85
sample4	370	407.2	14.05	10.78

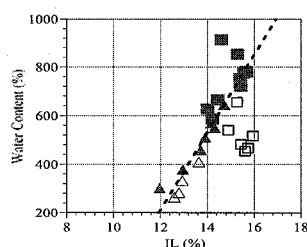
有機物量が多くなるにつれ含水比が上昇する傾向にある (図-6(b)) ことがわかる。これらの結果は土粒子に付着する有機物の量が堆積泥の高含水比状態を維持する要因の一つであることを示している。現地調査結果において、ST. 1 と ST. 2 で海底泥の堆積状況が異なるのは含有される有機物量が異なるため (図-3) であり、有機物量の多い ST. 2 での堆積泥の保水性が高いことがわかる。さらに、浸透がある場合には泥層厚の低下 (圧密) が収束に向かった後に 2 段階目の含水比 (泥層厚) の低下が見られる。これは浸透圧によって形成された膨張構造 (泥全体が持ち上げられる構造) が、浸透圧の増大によって壊れ微細な水道が形成されることで起こると思われる。

b) 有機物の分解性の違いによる保水能力特性 (sample 3 と 4 の比較)

分解の進んだ (C/N 比の大きい) 有機泥 (sample 3) では、case1 と同様に間隙水の浸透の影響が顕著に現れており (図-7(b) 中の破線)、有機物量の多い層で含水比は高い状態に維持されている。分解が十分に進んでない有機泥 (sample 4) では含水比に対する有機物の効果が異なって現れている。図-7(b) から C/N 比が 10.78 の sample 4 (実線) では、C/N 比が 12.85 の sample 3 (一点鎖線) に比較して有機物含有量の低下による含水比の低下が小さく、分解が進んでない試料 (sample 4) では有機物量が 10 % 程度であっても含水比は 400 % を越える高い状態を維持できること、浸透によって堆積層の含水比が高い状態で維持される特性を有していることがわかる。これは有機物の保水能力が分解度 (C/N 比)

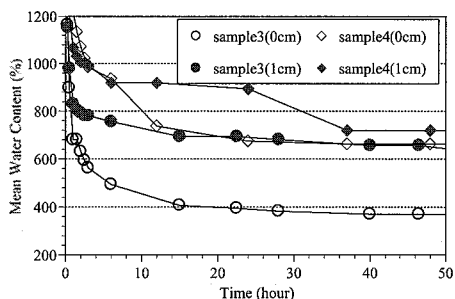


(a)平均含水比の時間変動

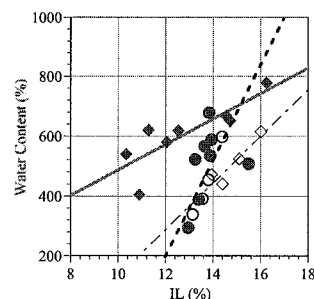


(b)含水比とILの関係

図-6 case1 (有機物量の効果) の実験結果



(a)平均含水比の時間変動



(b)含水比とILの関係

図-7 case2 (有機物の分解度の効果) の実験結果

によって異なるためであり、十分に分解されていない有機泥の保水能力が高く、流れに対する抵抗力（構造を維持する力）が大きいことが考えられる。

さらに、浸透を伴う圧密過程で含水比の低下がある（図-6(a)、図-7(a)）が、sample 4 での含水比の低下は極めて大きい。これは分解が進んでいない有機泥は膨張構造を維持する能力（流れに対する抵抗力）が高いため、浸透圧によってその構造が破壊されるとその沈降量が大きくなることが理解される。現地の堆積状況と対応させると分解が進んでいない有機物が堆積している場に浸透が起ると、圧密途中にある堆積泥は膨張する。この状態が維持されると 0.1 Pa 以下の小さいせん断力によって堆積泥は容易に破壊され有機泥が海中に巻き上がることが考えられる。

4. おわりに

(1) 広島湾における底泥性状の季節変動

- (a) 有機物量の多い湾奥での堆積泥含水比は有機物量の少ない河口に比較して数 100% 程度高い含水状態にあり、底泥に含まれる有機物量が保水能力に及ぼす影響が大きい。
- (b) 堆積泥が数 10 cm にわたって高含水の状態になるためには、新しい浮遊泥の堆積、あるいは浮泥層への海水の侵入（間隙水の移動）が必要になる。
- (c) 有機物は微細土粒子と結合し、有機泥（懸濁態）を

形成する。有機物が新鮮な場合、体積が大きく（密度が小さい）、保水力は高くなると考えられる。海面で形成された有機泥は海底に堆積、圧密されつつ、分解されていく。有機物の分解が進むに連れて保水能力は小さくなり、含水比が低下する要因となる。含水比は間隙水の流入量と有機泥による間隙水の保持能力によって決定されることが予想される。

(2) 底泥による間隙水の保持特性

有機泥が高含水比状態を維持する（堆積泥の保水能力）要因として、間隙水の浸透以外に底泥内の有機物と有機物の分解度（C/N 比）が考えられる。

参考文献

- 田多一史・日比野忠史・松本英雄・村上和男(2004): 間隙水の流動に伴う底質の性状変化, 海岸工学論文集, 第 51 卷(2), pp. 991-995.
- 永尾謙太郎・日比野忠史・松本英雄(2005): 広島湾における有機物の変動解析と栄養塩生成形態の把握, 海岸工学論文集, 第 52 卷, pp. 916-920.
- 日比野忠史・松本英雄(2006): 広島湾に分布する浮泥の特性と季節的な性状変化, 土木学会論文集, Vol. 62, No. 4, pp. 348-359.
- 日比野忠史・松本英雄・水野雅光(2006a): 太田川デルタ地下水の流動と海底濁度層の形成, 海岸工学論文集, 第 53 卷(2), pp. 1146-1150.
- 日比野忠史・小島佑允・村上和生・松本英雄(2006b): 間隙水浸透場における有機泥の膨張特性, 海岸工学論文集, 第 53 卷, pp. 1161-1165.