

底泥の巻き上がりに及ぼす浸透流の影響

The Effect of Pore Water Infiltration on the Re-suspension of Sea Bottom Sediment

金キョンヘ¹・阿部真己²・駒井克昭³・日比野忠史⁴

Kyung-Hoi KIM, Masami ABE, Katsuaki KOMAI and Tadashi HIBINO

In order to clarify the effect of pore water infiltration on the re-suspension of sea bottom sediment, expansion and re-suspension experiment of sea bottom sediment in pore water infiltration field was carried out. By supplying infiltration flow to the organic mud, water content of organic mud was increased. Increase of water content mainly depends on not only the amount of organic matter (IL) but also the decomposition rate (C/N ratio). Water content and infiltration flow influenced on the re-suspension of organic mud. And it is experimentally clarified that organic mud re-suspend under 4 cm/sec current velocity, which is observed on sea bottom, by decrease of critical erosion threshold in the pore water infiltration field.

1. はじめに

閉鎖性の強い湾奥域には様々な種類の有機物を多く含む底泥が堆積している。底泥は有機物の巻き上がりや溶出などによって海水の水質悪化や貧酸素水塊などを発生させ底生生物の棲息を阻害する等の問題を有している。海底に堆積した有機物（有機泥）に起因する水環境問題を改善するためには底泥の巻き上がり機構を明らかにして、海域の特性に適応した対策を実施する必要がある。

一般に、底泥の巻き上がりは海底面に働くせん断応力によって海底面が破壊され、有機泥が乱れによって上昇することで起こると言われている。しかし、広島湾奥部では海底堆積泥内で間隙水が浸透することで600%を越える含水比まで堆積泥を膨張させ、有機泥が巻き上がりしやすい状態を形成し、通常巻き上がりが起こらない遅い流速でも底泥が巻き上がることが報告されている（今川ら，2007）。

底泥を構成する有機泥は土粒子に有機物が付着してフロック化し、幾何学的な形状を有しているために、未分解の有機物を多く含んだ底泥では間隙水の浸透により含水比が増加し易い状態にある。底泥の含水比が大きくなると堆積粒子の浮力を増大させる効果や、堆積泥内で間隙水の浸透場が発達した場合には流れが粒子に働く揚力を増大させ底泥の巻き上がり現象を促進される効果があることが考えられる。

本研究では、広島湾海底で採取された底泥を対象として有機性状（IL, C/N比）が異なる有機泥を用いた浸透流場での膨張特性を把握すること、その特性を考慮した巻き上がり実験を行うことで底泥の巻き上がりに及ぼす浸透流の影響を明らかにすることを目的としている。

2. 浸透流による底泥の膨張

(1) 間隙水浸透による底泥の膨張実験

有機物量および有機物の分解状態が異なる底泥を対象として、間隙水の浸透による有機泥の巻き上がりの有無を確認すること、および浸透流の堆積泥層の膨張に及ぼす効果を把握するため、図-1に示す実験装置を用いて間隙水浸透（膨張）実験を実施した。本実験では堆積泥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浸透流を起こしている。堆積泥層は上向き流れのある状態で有機泥を混合した海水を水槽内に流入させ、有機泥を沈降させて作成した。水頭差が1cmと0cmである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。

有機物の含有量と分解度の異なる採取泥を用いて、有機物性状の泥層膨張に及ぼす影響を検討した。表-1には

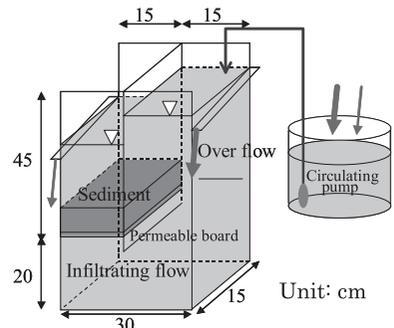


図-1 底泥間隙水浸透実験装置

- | | | | |
|---|------|------|---------------------------|
| 1 | 学生会員 | 修(工) | 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 |
| 2 | 学生会員 | | 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 |
| 3 | 正会員 | 博(工) | 広島大学准教授大学院工学研究科社会環境システム専攻 |
| 4 | 正会員 | 博(工) | 広島大学助教大学院工学研究科社会環境システム専攻 |

表-1 間隙水浸透場での膨張実験ケース

実験ケース	水頭差 (cm)	IL (%)	C/N	実験後の平均含水比 (%)
E-1	0	11.9	-	315
E-2	0	12	-	343
E-3	0	12.6	-	337
E-4	0	12.64	12.85	351
E-5	0	13.52	-	271
E-6	0	14.05	10.78	660
E-7	0	16.94	-	421
E-8	0	13.50	14	321
E-9	1	11.9	-	490
E-10	1	12.64	12.85	607
E-11	1	13.5	-	570
E-12	1	13.5	14	544
E-13	1	13.52	-	477
E-14	1	14.05	10.78	717
E-15	1	16.94	-	619
E-16	1	1.64	17.25	194

実験で使用された広島湾各地 (E-1 ~ 15) や広島湾旧大田川 (E-16) で採取した有機泥の性状を示している。有機泥の性状としてILとC/N比を示したが、C/N比と浸透流速 (安定時) は当初その重要性を認識しておらず測定されていない。間隙水の浸透下において堆積厚さの変動から膨張量 (底泥層厚さ) を測定した。実験開始72時間後には全ての実験で底泥層厚さの変動がないことが確認されたため、72時間での底泥層厚さから膨張量を評価した。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} (%) を含水比として (1) 式により含水比が算出された。

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

ここに、 M_s は使用泥乾燥重量 (g)、 V は全体積 (cm^3)、 ρ_s は泥粒子密度 ($2.5\text{g}/\text{cm}^3$)、 ρ_w は海水密度 ($1.02\text{g}/\text{cm}^3$) である。

(2) 浸透流による海底堆積泥の膨張

図-2と図-3は浸透流場でのILおよびC/N比に対する含水比の応答を示している。現地での泥内の水温分布から求められた最大浸透流は $1 \times 10^{-7} \text{cm}/\text{sec}$ 程度であった (日比野ら, 2006)。本研究では $0.00015 \sim 0.003 \text{cm}/\text{sec}$ の範囲で浸透流が発生する水頭差1cmと浸透流のない水頭差0cmで膨張実験が行われた。全ての実験ケースで浸透によって巻き上がりは起こらず、底泥の膨張のみが生じることが確認された。これらの結果から現地においても浸透流のみでは有機泥の浮遊が起こらないと判断できる。

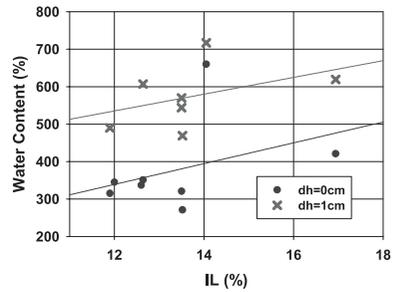


図-2 ILと含水比の関係 (浸透による含水比の増大)

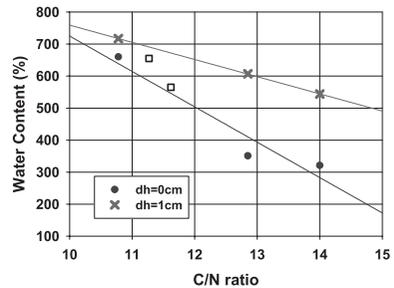


図-3 C/N比と含水比の関係 (□は次章に示す巻き上がり実験で作成された泥層でのC/N~含水比関係)

浸透のない場合に比較して約1cmの水頭差で発生した浸透流によって堆積泥の含水比は200%程度の増大 (膨張) が確認された。有機物含有量が多い有機泥は高い平均含水比を維持できており、有機物の保水能力が高いことがわかる (図-2)。ただし、IL~含水比関係にバラツキがあるのは保水能力が有機物量のみには依存するのではなく、有機物の分解度にも依存するためである。C/N比は有機物の分解度の指標として用いることができ、C/N比が10程度の有機泥は未分解の有機物を含み保水能力が高いことがわかっている (永尾ら, 2005)。例えばE-6で使用された試料はIL=14.05%に対する含水比が660%であるが、図-3に示すように試料のC/N比は10.78であり、分解度の小さい有機物を含んでいる。浸透がないにも関わらず含水比が660%の高含水比状態であったのはE-6の試料には分解度の小さな有機物を含んでいるためであり、本実験結果は妥当な現象と言える。図-3ではILが12.64~14.05%の範囲の試料を用いての関係が整理されているが、C/N比と含水比には一定の関係が見出される。膨張量 (保水能力) は、底泥に含まれる有機物の性状と量に依存しており、ILとC/N比が底泥の膨張量を求める支配的な要因であることが示唆される。ただし、この点については今後実験例を増やして明確にしていく必要がある。

図-4はE-12, 13, 16での浸透流速と L/L_0 の時間変動を示している。 L_0 は沈降開始後6時間の泥厚、 L は各時

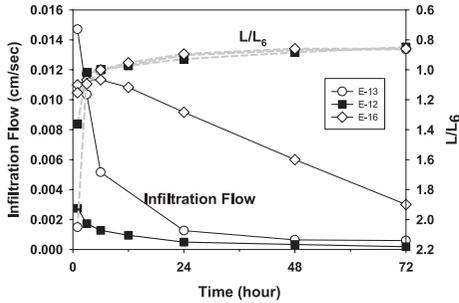


図-4 含水比と浸透流速の関係

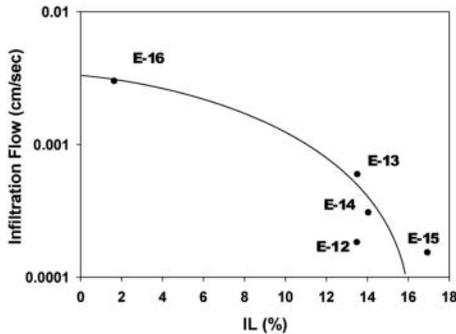


図-5 ILと浸透流速の関係

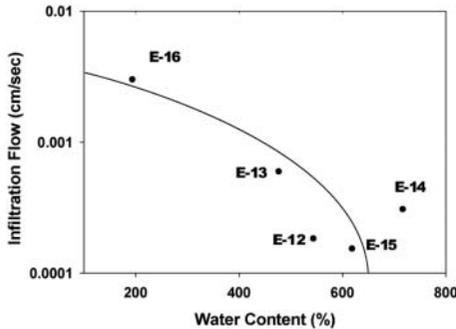


図-6 含水比と浸透流速の関係

間での泥厚である。全ての実験で時間経過とともに泥厚と浸透流速の減少(圧密)が確認された。E-12, 13では圧密が安定した48時間以降に一定の浸透流速を示している。しかし、砂分を多く含むE-16においては、初期に沈降した砂分の間に細粒分が入り込むために、圧密が安定した後も浸透流速の減少が継続していると考えられる。また、E-12, 13においても浸透流の減少傾向が異なっており、有機物の性状が浸透(膨張)場に影響を与えていることが考えられる。

図-5, 6は水頭差1cmの実験での含水比と浸透流速の関係を示している。ここで用いた浸透流速は72時間後に計測された流速を用いている。浸透流速は与えた水頭によって一定の流速が得られるのではなく、圧密状態によ

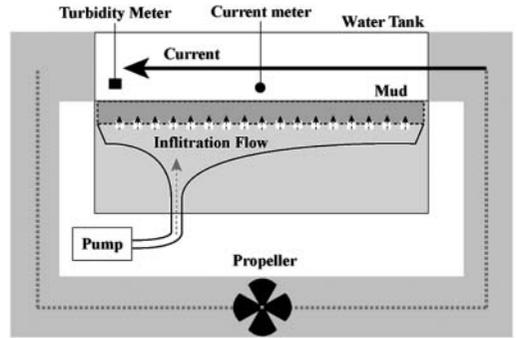


図-7 浸透流場での底泥の巻き上がり実験装置

表-2 間隙水浸透場での底泥巻き上げ実験ケース

実験ケース	底泥作成方法	浸透流 (cm/sec)	IL (%)	C/N比	実験後含水比 (%)
R-1	沈降	0	10.34	-	223
R-2	沈降	0.00017	10.06	11.62	565
R-3	沈降	0.00032	8.95	-	430
R-4	沈降	0.00121	9.39	11.27	655
R-5	沈降	0	9.90	-	464
R-6	流し入れ	0	10.64	-	285
R-7	流し入れ	0	6.03	-	102

て逐次流速が変化していること、浸透流速は沈降泥の圧密と共に低下する特性を有しているが、発生する浸透流速は有機物量のみによって決まらず、有機物の性状にも依存していることがわかる。

含水比が高い試料は有機物を多く含んでおり、水は有機物に保持されている。図-6から含水比が高くなると浸透流速が遅くなっていることがわかる。E-16の試料は75 μ m以上の粒子の割合が60%以上含まれる泥(IL=1.64)であり、透水性が高くなることは自明である。含水比が高くなるのは有機物の保水能力が高い有機物の量が多く付着しているためであり、それら(付着した有機物)が土粒子の粒子間に空隙が形成することで浸透性が大きくなると考えられるが、実際には浸透速度が遅くなっている。これは有機物に保水された水の吸着力が浸透圧力よりも大きく、実質の浸透面積が小さくなるために透水流速が低下することが考えられる。

3. 底泥の巻き上がりに及ぼす浸透流の効果

(1) 浸透流場での底泥巻き上がり実験

底泥の巻き上がり実験は図-7に示す中央部に底泥層(浸透トレイ(幅23cm×流れ方向長さ40cm×厚さ5cm))を設置した回流水槽(幅30cm×長さ130cm×高さ30cm)を用いて行われた。底泥層は膨張実験と同様に上向きの浸透流を与えながら海水に混合した有機泥を72時間でト

レイに沈降, 堆積させて作成した. 比較のため含水比を調節した有機泥を浸透なしてトレイに流し入れて作成した底泥層での実験も行った. 底泥の巻き上がり量は図-7の濁度計の位置(底泥からの高さ10cm)にレーザーを通し, レーザーの減衰量から換算している. 底泥層の作成条件や浸透流の強度が底泥の巻き上がりにおよぼす効果(巻き上がり機構)は巻き上がった泥の鉛直Flux, 粒径分布および限界せん断応力から評価した. せん断応力は流速の鉛直流速分布から計算した摩擦速度を用いて算出された.

実験は呉湾南奥(R-1, 2, 3, 4, 6)と海田湾(R-5, 7)で採取された海底泥表層の泥を用いて行われた. 表-2には各ケースの実験条件と用いた底泥の有機物性状, 実験後の含水比を示している. R-1, 3, 6の実験では採取後約2年経過し分解が進んだ試料を使用している. これらの採取場所, 有機泥の詳しい特性は, 日比野ら(2006), 今川ら(2009)を参考にされたい.

(2) 浸透流による底泥巻き上がり量の変動

図-8にはせん断応力と巻き上がりフラックスの関係, 図-9には含水比と限界せん断応力の関係が示されている. 浸透流によって430%以上の含水比状態になっており, 膨張実験結果(図-2と図-3)と同程度の浸透速度と含水比状態を再現できている. この結果から本実験では浸透による膨張現象は再現できていると言える.

巻き上がり実験によって次の①~④の現象を確認した. ①浸透がない場で沈降, 堆積(圧密)した場合, 底泥の含水比が300%程度以下に維持され, 現地で測定された4倍(約20cm/sec)の流速下においても巻き上がり量は微量(0.19Paのせん断応力で 10^{-6} mg/cm²/s)である. ②400%を超える含水比の底泥層では限界せん断応力が0.02~0.04Pa(流速=4~8cm/s)程度で巻き上がりが発生し, 流速の増加に伴って指数的に巻き上がり量が増大する. ③浸透流を与えることによって限界せん断応力は0.03Pa(流速=6~7cm/s)以下まで低下し, 巻き上がり量は激増する. しかし, 浸透流速の増加に対して巻き上がり量は大きく変動しない. ④底泥層に0.00017cm/sec程度の浸透流があれば400%以上の高含水比の堆積状態が維持され, 現地で観測される4cm/sec程度の底層流速場において巻き上がりが起こることが実験的に証明された.

底泥の巻き上がり現象は含水比に依存することが明らかにされた. しかし, 図-9に示したR-3とR-5の実験結果では含水比の小さいR-3での限界せん断力が小さくなっていること, 図-8に示すように浸透により巻き上げ量が1オーダー程度増大することから, 単に含水比状態に巻き上がり現象が支配されているわけではないことがわかる. 以下では浸透流が巻き上がりおよび影響を評価することを行う.

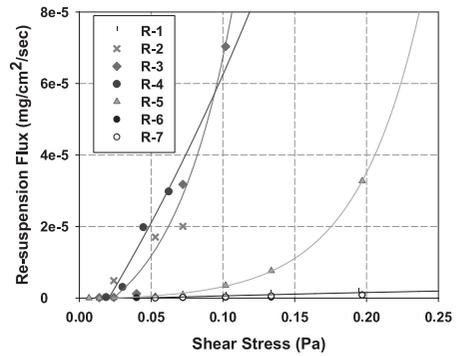


図-8 せん断応力と巻き上がり flux の関係

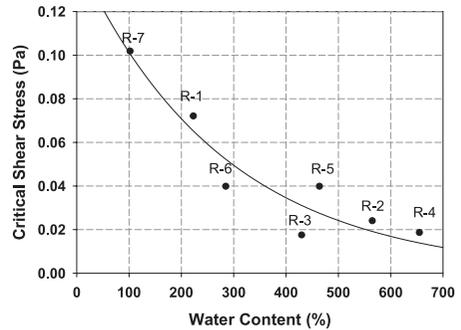


図-9 含水比と限界せん断応力の関係

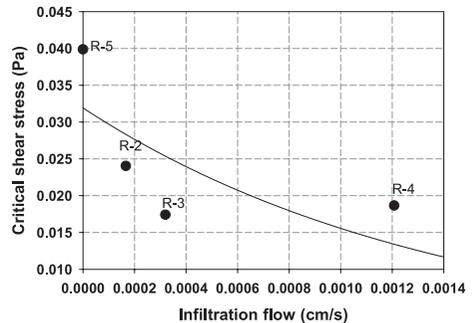


図-10 浸透流と限界せん断応力の関係

図-10は浸透流と限界せん断応力の関係を示している. 限界せん断応力は浸透流によって0.02Pa程度まで低下しており, 浸透流が巻き上がりの発生を促進していること, R-3とR-4では浸透速度の遅いR-3で限界せん断応力が小さくなっており, 巻き上がり状態の浸透流速への依存度が小さいことがわかる. 浸透流が起こることにより, 底泥が膨張することに加えて, 浸透流が堆積粒子に働く揚力が大きくなることで底泥の巻き上がりの発生が促進されることが予想される. ただし, 浸透による膨張効果があるにも関わらず, 浸透流速の効果が顕著に現れていないのは, 小さな浸透によっても限界せん断応力が小さく, 巻き上がり易い状態が形成されることを意味している.

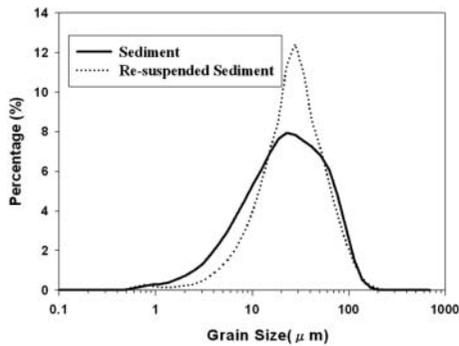


図-11 底泥と巻き上がった泥の粒度分布 (R-4)

浸透巻き上げ実験に用いた試料は全て呉済南奥海底で採取された底泥であり、有機泥の性状が類似の底泥では浸透に伴う巻き上げ効果は浸透流速に対する依存度が低いことが考えられる。今後、有機物の性状と浸透による巻き上げ効果について更なる研究を進めることが必要であるが、本研究では少なくとも浸透流によって限界せん断応力が低下することを明らかにできた。

(3) 巻き上がり泥の特性

巻き上がり実験終了後 (R-2)、巻き上がった底泥 (再浮遊泥) を回収し24時間沈降させ、その性状 (D_{50} , IL) を分析した。この結果と実験に用いた有機泥 (底泥) の性状を比較した。比較に用いた底泥は実験後巻き上がらずにトレイに残った底泥層表層の有機泥である。底泥層は沈降により作成されていることから、表層に沈降速度の遅い有機泥が堆積している。さらに、上向きの流れ (浸透) が存在する場で堆積が起こっていることから、浸透流がない場合に比較して土粒子構造が緩い膨張 (高含水比) 状態にある。

図-11にR-4での残留泥と巻き上がり泥の粒度分布が比較されている。一般的に粘着性の低い細かい粒子が巻き上がりやすいと言われているが、粒子内に有機物が多く含まれている場合には粒子径が大きく、かつ密度が小さい有機泥が巻き上がりやすくなることが考えられる (西村ら, 2008)。底泥と巻き上がり泥の D_{50} は20.6 μm と24.1 μm でほぼ同じである。しかし底泥は10 μm 以下の粒子が相対的に多く10~100 μm の範囲では再浮遊泥の比率が高いことがわかる。底泥層の作成時に底泥層表層に沈降した底泥は沈降速度の遅いフロック化した有機泥と考

えられる。R-4では10⁻³cm/secオーダーの浸透流速があり、抵抗が大きく軽い有機泥は浮遊しやすいことから、有機物の多く付着した有機泥が巻き上がっていると推定できる。これらの結果は、西村ら (2008) の河口域に沈降する有機泥には相対的に10~30 μm の粒子に有機物の付着が多く、沈降速度が遅いことと良く対応している。

4. おわりに

- (1) 現地で計測された浸透流より早い0.01cm/sec程度の浸透流のみでは有機泥の浮遊が起らない。しかし浸透流を与えることで底泥の膨張 (含水比の増加) が確認された。底泥の膨張量は有機物量 (IL) のみではなく、有機物分解度 (C/N比) が底泥の膨張量を求める支配的な要因であることが確認できた。
- (2) 底泥の巻き上がり現象は含水比や浸透流に依存することが明らかにされた。浸透流を与えることで限界せん断応力が低下し、現地で観測される4cm/sec程度の底層流速場において巻き上がりが起こることが実験的に証明された。
- (3) 浸透流を与えることにより、底泥の含水比が増大することに加えて、浸透流が堆積粒子に働く揚力が大きくなることで底泥の巻き上がりの発生が促進されることが予想される。
- (4) 流速の小さい場における底泥の巻き上がり現象の解明には浸透の他、様々な化学的、生物的影響を検討することが必要であるが、浸透流によって巻き上がりは促進されることを明らかにすることができた。

参考文献

- 今川昌孝・日比野忠史・駒井克昭・松永康司 (2007) : 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, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 1011-1015.
- 今川昌孝・日比野忠史・首藤啓・西田芳弘 (2009) : 海田湾に堆積する有機泥性状と水質の変動特性, 海岸工学論文集, 第56巻.
- 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巻 (2), pp. 916-920.
- 西村尚哉・駒井克昭・今川昌孝・日比野忠史 (2008) : 有機懸濁物質の形成に関する基礎研究 - 有機物の付着特性 -, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 1056-1060.
- 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, II-Vol.62, No.4, pp. 348-359.