

干潟地盤内での微細粒子の移動に関する基礎的事項の解明

Mechanism of Fine Particles Movement Caused by Groundwater Flow in Tidal Flat

トウ ナロン¹・駒井克昭²・日比野忠史³・中下慎也⁴

Narong TOUCH, Katsuaki KOMAI, Tadashi HIBINO and Shinya NAKASHITA

In the previous studies, it was pointed out that mahogany clams live at the deep layer (80cm from ground surface) of the tidal flat located at the midstream of Hiroshima's Ota River. It is believed that a current of water transports organic matter for food into the deep layer of the tidal flat. In this paper, a series of field observations and laboratory experiments was undertaken to look into the mechanism of organic matter movement under the effects of groundwater flow. In the field observations, variations in fines content and ignition loss provided evidence that organic matter was transported by groundwater flow to the deep layer of the tidal flat. From the laboratory experiment results, the permeability and the critical condition of organic matter movement were demonstrated with respect to the void ratio and velocity of the groundwater flow.

1. はじめに

河川の断面構造によって、河口干潟に堆積する土砂の粒度は大きく変わってくる。太田川放水路中流域に形成された河口干潟では、海域から有機泥の輸送量が約10g/m²/h (長戸ら, 2007) であるにもかかわらず、地下水の流動性が高く、微細粒子(シルト・粘土+微細有機物)の干潟地盤への堆積が少ないために、微細粒子が多く含まれる場では生存できないイソシジミが優占して棲息している。さらに、洪水後に60cm以上の土砂が堆積した地盤において、大潮干潮時の地下水位面下約20cmの地盤下80cmでイソシジミが多量に棲息し続けていたことが確認されている(日比野ら, 2006)。地盤下80cmでのイソシジミの棲息は干潟地盤内において、酸素や餌となる干潟表面に堆積した有機物を地盤内へ供給する流れが存在していることを示している。

本研究では、堆積砂内での微細粒子の移流メカニズムを解明するために、地下水流によって地盤内で移動する微細粒子の動きを現地観測および室内実験により検討する。室内実験では、地下水浸透によって浸透層から流出する微細粒子量と浸透流量を測定し、間隙比と透水係数の関係を推測することで輸送される微細粒子の挙動を明らかにする。

2. 干潟地盤内における微細粒子移動の把握

(1) 広島デルタ河川に堆積する微細粒子の特性

広島デルタを流れる太田川では、広島湾での4mを越す潮差があるため、河口干潟には広島湾から微細粒子(有機泥)が輸送・堆積されている。出水や植生(海藻草類)等の河川環境によって微細粒子の堆積量は大きく変動する。微細粒子が干潟表層に堆積し始めると干潟表面に有機泥層

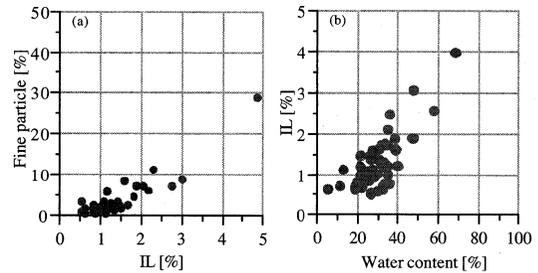


図-1 広島デルタ河川干潟における堆積泥(a)強熱減量と細粒分含有率, (b)含水比と強熱減量の関係

を形成し、表層からの微細粒子の地盤内への供給が制限され、地盤表層が還元化する等、微細粒子の堆積は干潟環境を大きく変化させる。

図-1には広島デルタ河川(上流~河口)干潟で採取した干潟表層堆積泥の(a)強熱減量(IL)と微細粒子(75 μ m以下)含有率の関係, (b)含水比と強熱減量の関係が示されている。干潟へ堆積する微細粒子には有機物が含まれ(75 μ mの細粒分の質量の約1/3が有機物であり、広島湾海底泥の2倍程度)、微細粒子の堆積によって地盤表層材料の含水比状態が増加し、地盤の保水能力が高くなることがわかる。地盤内に含有される細粒分の過度の堆積が干潟地盤内の浸透能、保水力や微細粒子の移動量を変化させ、干潟環境を悪化させることが予想される。

図-2に2006年5月2日(大潮干潮時)に測定された放水路中流域砂干潟地盤内の(a)強熱減量と微細粒子含有率, (b)間隙比の鉛直分布を示す。地下水面下での微細粒子含有率(重量比)は1%程度、間隙比は0.5~0.9程度であることがわかる。間隙比は地盤表層で高く(e=1.05)、下層に向かって減少する傾向にある。

1 学生会員 広島大学大学院工学研究科
2 正会員 博(工)広島大学大学院 助教 工学研究科
3 正会員 博(工)広島大学大学院 准教授 工学研究科
4 学生会員 博(工)広島大学大学院工学研究科

(2) 微細粒子の地盤内への流入量の把握

太田川放水路中流域に形成された干潟地盤内において微細粒子の移動を把握するために現地実験を行った。実験では、地盤内に50cm×50cm×80cmの実験槽（側面を1mmメッシュの網で被覆）を設置し、実験区内には微細粒子を取り除いた現地干潟材料を投入した。実験開始から4週間後に実験槽内の砂を鉛直方向10cm毎に採取し、有機物と微細粒子の増加量を測定することで微細粒子の移動について検討を行った。

図-3に現地実験結果を示す。有機物、微細粒子とも実験開始時の値よりも大きくなり、微細粒子が輸送されていることがわかる。さらに、大潮干潮時の地下水面（LLWL）付近と表面付近では、微細粒子の含有率が変化している。特にLLWL付近での微細粒子の増加量が多く、地下水位の上昇・下降により微細粒子が輸送されていると考えられる。

3. 微細粒子の移動特性の実験的把握

土田ら（2006）は、室内実験により微細粒子が10%程度含まれる砂層において、潮汐に相当する一次元水圧変動を載荷した場合に、間隙水圧の発生時間が深さ方向に異なるために、砂層表面に層内に含まれたシルト分が流出し、試料の表面に堆積することを明らかにした。地下水による微細粒子の移動には間隙水の流れ、砂層の間隙構造、微細粒子含有率、微細粒子の粘着力（有機物含有量）などの要因が関係すると考えられる。

本実験では、砂粒子で形成される骨格（間隙）内を浸透流によって輸送される微細粒子の移流機構を明らかにする。このため、浸透層内の間隙変化と流速の関係から微細粒子の移動に伴う透水係数の変動機構を明らかにする。さらに、微細粒子含有率の異なる成層浸透層内において、微細粒子の移動に伴って生じる成層構造の緩和が浸透層内での間隙水流れに与える変化を把握する。

(1) 実験概要および用いた材料

図-4に本実験で用いた浸透流水槽を示す。本水槽は中央部に仕切りを入れることで、水槽水位を0~20cmまで変動させることができ、水頭差を付与することで、飽和状態での定水位透水試験が実施できる。実験では、異なる2ケースの浸透層を作成し、砂層内での微細粒子の挙動特性を検討している。浸透層の表面から4cmの高さに濁度計（ALEC-AAQ1183）を設置し、連続的に濁度を測定することで、浸透層表面からの微細粒子の流出を把握した。また、越流量（浸透量）を測定（水頭差を付与してから3分後）し、定水位透水試験の定義より、透水係数を算出した。

実験に用いた材料は広島湾海底から採取した堆積有機泥（湿潤密度1.20g/cm³、含水比330%、強熱減量11%）および市販の乾燥砂（土粒子密度2.53g/cm³、粒径1.18~1.7mm、透水係数0.045cm/s）である。図-4中に示した混合砂層は

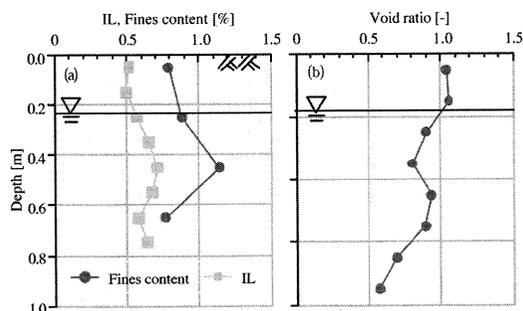


図-2 砂干潟地盤内における鉛直方向の(a)強熱減量と細粒分含有率、(b)間隙比(水位は観測時の地下水位)

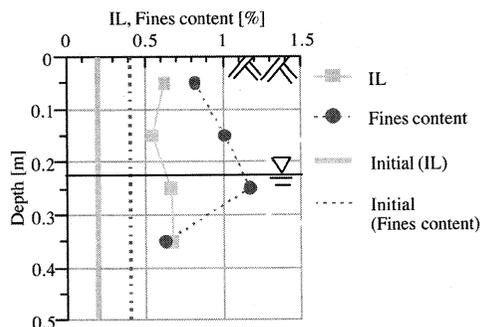


図-3 現地実験における鉛直方向の強熱減量と細粒分含有率の変化(水位は大潮干潮時の地下水位)

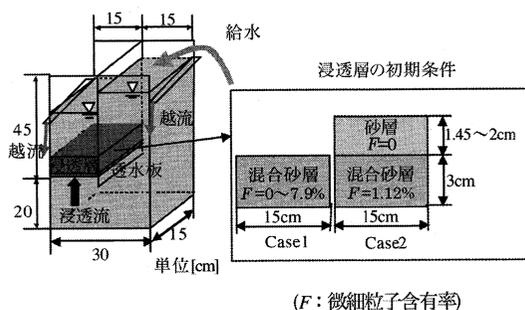


図-4 浸透流実験装置

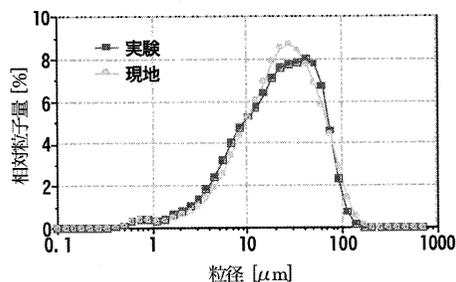


図-5 実験に用いた微細粒子の粒度分布

表-1 浸透層の初期条件

(a) Case1

浸透層	粒径(mm)		微細粒子		乾燥質量(g)		初期間隙比
	砂	微細粒子	含有率F[%]	微細粒子	砂	微細粒子	
1			0.00		0.0	0.0	0.71
2			0.56		5.6	5.6	0.62
3	1.18	0.15 以下	1.13	1000	11.3	11.3	0.54
4			1.69		16.9	16.9	0.47
5	2.26	22.6	22.6		0.41		
6	3.39	33.9	33.9		0.30		
7	4.51	45.1	45.1		0.20		
8	7.90	79.0	79.0		0.15		
9	0.42	0.15 以下	0.56		5.6	5.6	0.51
10			1.13		11.3	11.3	0.44
11			1.69	16.9	16.9	0.38	
12	0.85		2.26	22.6	22.6	0.32	

(b) Case2

浸透層	粒径(mm)				微細粒子		乾燥質量(g)				初期間隙比		
	砂		微細粒子		含有率F[%]		砂		微細粒子		上層	下層	
1	0.42	1.18										0.63	
2				0.15		1.13	700	1000		11.30		0.22	0.54
3	0.85	1.70		以下								0.18	

※ 微細粒子含有率は砂の乾燥質量と有機泥の乾燥質量との比である。これを体積比に換算すれば約5倍大きくなる。

乾燥砂を過飽和状態にし、湿潤状態の有機泥を混合することで作成した。混合砂層に使用する微細粒子は海底から採取した湿潤状態で調整（貝殻等を除去）して混合している。実験で用いた微細粒子と現地干潟に堆積する微細粒子の粒度分布は図-5、浸透層の初期条件は表-1に示されている。

Case1では1.18~1.7mmと0.42~0.85mmの粒径の砂に0.15mm以下の微細粒子（図-5）を混合した。砂に混合する微細粒子の量を変えることにより、微細粒子含有率を変化させ、混合砂層での微細粒子が移動し始める間隙比と流速（透水係数）の関係を求めた。Case2では微細粒子を混合した砂層と砂粒子のみの砂層を重ねた二層構造の浸透層を用いた。下層にはCase1と同様の試料を用いて、微細粒子が1.12%含まれる混合砂層を作成した。上層には乾燥砂（土粒子密度2.53g/cm³、粒径0.42~0.85mm、透水係数0.03cm/s）を用いて砂層を作成し、下層に混合した微細粒子が上層に移動することによって変化する間隙比（微細粒子流入量）および透水係数（浸透流速）の変化を検討した。

実験では、粒径の大きい砂を使用し、砂量を一定にすることで混合する微細粒子の量に関わらず砂の骨格が再現されると仮定し、浸透層を作成した。混合する微細粒子は最大で8%であり、微細粒子を混合した場合にも浸透層の体積は砂のみで作成した場合と変化なく作成することができた。砂で形成される骨格（間隙構造）が微細粒子の混合に依らなければ、微細粒子は砂粒子で形成された間隙内に配置されたと考えることができる。さらに、実験は飽和状態で行われるため、試料の間隙比は次式によって求められる。

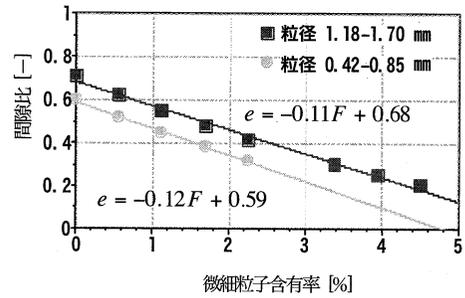


図-6 微細粒子含有率と間隙比の関係

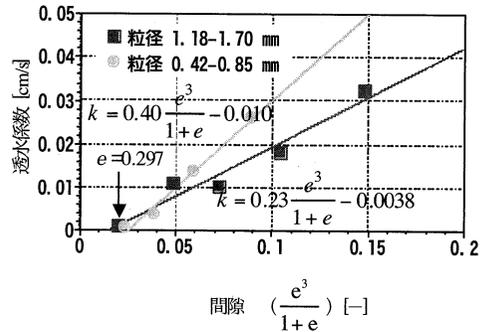


図-7 混合砂層の間隙比と透水係数の関係

$$e = \frac{V}{(W_{d(sand)} / \rho_{d(sand)}) + (W_{m(mud)} / \rho_{m(mud)})} - 1 \quad (1)$$

ここに、 V ：試料の体積[cm³]、 $W_{d(sand)}$ ：砂の乾燥質量[g]、 $W_{m(mud)}$ ：微細粒子の湿潤質量[g]、 $\rho_{d(sand)}$ ：砂の土粒子密度[g/cm³]、 $\rho_{m(mud)}$ ：微細粒子の湿潤密度[g/cm³]である。

(2) 間隙比と微細粒子含有率および透水係数の関係

図-6には微細粒子含有率と(1)式を用いて算出した間隙比の関係、図-7には混合砂層の間隙比と透水係数の関係が示されている。図-6と図-7から1.18~1.7mm粒径の砂を用いたときの微細粒子含有率と間隙比の関係は(2)式、1.18~1.7mm粒径の間隙比と透水係数の関係は(3)式のように表すことができる。

$$e = -0.11F + 0.68 \quad (2)$$

$$k = 0.23 \frac{e^3}{1+e} - 0.0038 \quad (3)$$

ここに、 F ：微細粒子含有率[%]、 e ：間隙比、 k ：透水係数[cm/s]である。上式は、微細粒子含有率 $F=0$ のとき、 $e=0.707$ 、 $k=0.043$ cm/sとなり、1.18~1.7mm粒径の砂層（微細粒子が含まれない）での浸透状態（ $e=0.707$ 、 $k=0.045$ cm/s）の値に近い値である。また、細粒分（ $F=3.38\%$ ）が混入されている時には $e=0.297$ 以下の間隙では、透水性が非常に小さい値（ $k=2.8 \times 10^{-4}$ cm/s）であった。

(3) 地下水流に伴う微細粒子の移動 (Case1)

水頭差を増加させて、透水係数と濁度（流出微細粒子量）を測定した。実験結果を図-8と図-9に示す。図-8には水頭差の増加に伴う浸透流速（越流量から算出した流速）の変化が示されている。図-9には F を変化させて得られた微細粒子の流出に伴う透水係数の変化、図-9に示した微細粒子の流出率は浸透層上の浮遊物質濃度（SS）と流量から算出した。浸透層表面から高さ6cmの場所で採水された試料の濁度とSSの関係から得られた(4)式、および(5)、(6)式を用いて微細粒子の流出率を算出した。

$$SS = 0.0021 \times Turb - 0.0728 \quad (4)$$

$$M = SS \times Q \times t \quad (5)$$

$$\Delta M = \frac{M}{M_0} \times 100 \quad (6)$$

ここに、 SS ：浮遊物質質量[g/l]、 Q ：水頭差を付与したときの単位したときの単位時間当たりの流量[l/s]、 t ：水頭差を付与する時間[s]、 M ：微細粒子の流出量[g]、 M_0 ：初期の微細粒子量[g]、 ΔM ：微細粒子の流出率[%]、 $eTurb$ ：濁度[FTU]である。

浸透流速は圧力勾配（水頭差 / 試料高さ）に比例するため、浸透層の状態が変化しなければ、水頭差の増大に伴い浸透流速勾配（単位水頭あたりの速度増加）が一定になるが、図-8では浸透流速の上昇勾配が増加している。この現象は、微細粒子の流出によって浸透流速勾配の変化が生じることを示している。本実験では浸透流による浸透層の高さ変化は1mm程度の精度では確認できない微小な体積変化であったため、(5)式では、浸透流とともに流出した微細粒子が透水係数の増加に影響を及ぼすとしたと考える。すなわち、透水係数の変化は浸透流によって浸透層の間隙内で微細粒子が輸送されることで間隙容量が変化するために生じると考える。図-9では、透水係数は微細粒子の流出に伴い増加している。これは、砂の骨格が維持された状態で砂層の間隙にある微細粒子が流出することによって、間隙が増大し透水係数が増加したと考えられる。

次に、微細粒子の流出によって透水係数が増加する機構について考察する。微細粒子が移動し始めたときの間隙比と見かけの浸透流速（流量から算出した平均流速）との関係を図-10に示した。間隙比は測定された透水係数と間隙の関係（2節）から算出した。

図-10は微細粒子が移動する限界状態を示しており、図から浸透層内で微細粒子が移動する間隙比と流速の関係を知ることができる。浸透層内で形成された砂粒子の骨格が測定されれば細粒分含有率によって間隙比が求まり、微細粒子が移動するために必要な浸透流速が求められる。（直線より上回る流速があれば微細粒子が移動する）。さらに、図-10には砂の粒径によって直線が変化するため、砂の

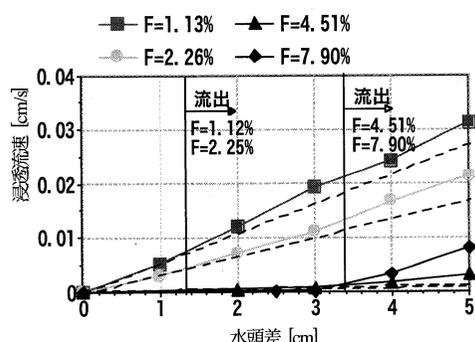


図-8 微細粒子の流出による浸透流速の変化(Case1)
(図中の破線は微細粒子流出前の流速の勾配を示す)

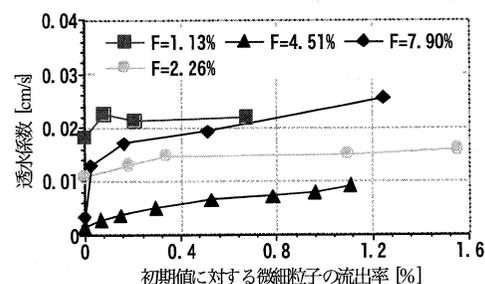


図-9 微細粒子の流出に伴う透水係数の変化(Case1)

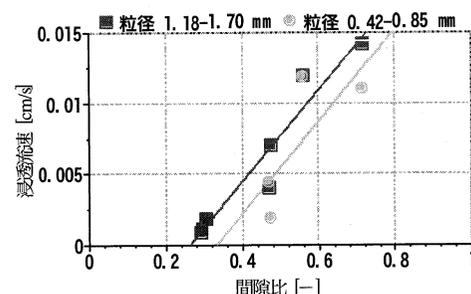


図-10 微細粒子が移動したときの間隙比と見かけ流速の関係 (Case1)

粒径が微細粒子の移動に影響を及ぼすと考えられる。

(4) 間隙水の流れに及ぼす微細粒子移動の影響 (Case2)

Case2として、間隙比が異なる上層砂層と下層混合砂層で形成された二層構造の浸透層内における微細粒子の移動に伴う間隙水の流れの変化を考察した。図-11には測定された水頭差と透水係数の関係が示されている。透水係数は越流量から二層の平均透水係数として求められた。水頭差を増加させることによって、透水係数が増加していることがわかる。これは下層の混合砂層に含まれる微細粒子が上層砂層内へ流出することで各層の透水係数が変化するためである。細粒分が3.5%程度含有される場合には間隙比が0.3程度になると、浸透流が起っていない(図-7)。しかしながら、微細粒子が混入されない場合には、上層砂層の間隙比が0.179の場合でも浸透流が生じている(図-11)。

成層構造を持つ浸透層での透水係数は(7)式で表され、二層の平均透水係数は間隙の小さい層の状態に依存する。

$$\bar{k} = \frac{L}{(L_1/k_1) + (L_2/k_2)} \quad (7)$$

ここに、 \bar{k} ：平均透水係数[cm/s]、 L ：浸透層の高さ[cm]、 L_1 ：混合層の高さ[cm]、 k_2 ：砂層の透水係数[cm/s]である。図-12は上層砂層に溜まった微細粒子量（残留量：混合砂層からの微細粒子流出量と砂層からの微細粒子流出量との差）と微細粒子の流出入によって変化する間隙比を示している。混合砂層からの微細粒子流出量はCase1の濁度より算出し、砂層からの微細粒子流出量はCase2の結果（濁度計の結果）から算出した。図-12より、水頭差の増加とともに微細粒子は下層混合層から上層砂層に輸送され、砂層内への微細粒子残留量の増加に従い上層の間隙比が減少することがわかる。

下層の透水係数を(3)式、上層の透水係数変化を(7)式を用いて算出し、図-13に示した。混合層から上層へ輸送された微細粒子は砂層内に蓄積されていき、透水係数を低下させていることがわかる。上層が緩い間隙（ $e=0.626$ ）の浸透層（水頭差が1cmのとき）では、下層浸透層の透水係数に依存するため、上層透水係数は下層の透水係数と一致している。さらに、微細粒子が下層から上層浸透層に流入すると上層の透水係数が低下し、下層の透水係数は上昇することで図-11に示す平均透水係数になる。

上層の浸透層が密な場合（ $e=0.179$ と 0.219 ）には、浸透速度の増大（例えば、水頭差が4cmのとき）によって微細粒子の残留量が急激に多くなっている（図-12）。間隙が密な場合には間隙内での微細粒子の残留量が大きくなり、地盤内の浸透能を低くすることがわかる。

4. おわりに

干潟に棲息する生物棲息環境を形成する地下水による微細粒子の輸送機構を解明することを目的として、現地実験および室内実験を行った結果、以下のことがわかった。

- (1) 潮汐変動に伴い微細粒子が干潟地盤内に輸送されている。特にLLWL付近での微細粒子の増加量が多く、地下水流が微細粒子を輸送していることがわかった。
- (2) 室内実験から、浸透流によって微細粒子が移動することを確認した。微細粒子の移動が砂粒子によって形成された骨格内の間隙を低下させることが、透水能力を低下させることを明らかにした。
- (3) 微細粒子は砂層の間隙比が0.179程度に詰まった状態であっても、砂層内で移動することができる。
- (4) 異なる間隙比を持つ地盤内では間隙の小さい場での浸透能によって透水係数が決定される。微細粒子の輸送によ

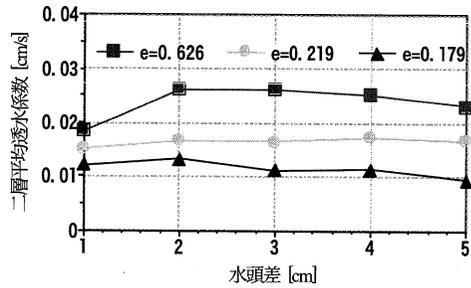


図-11 間隙比別の水頭差と平均透水係数の関係 (Case2)

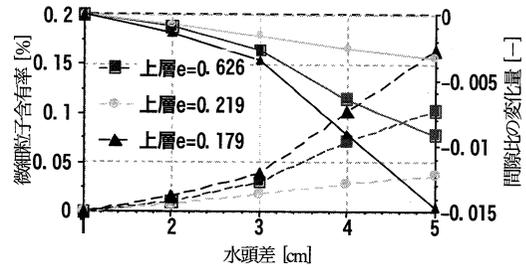


図-12 上層の微細粒子含有率と間隙比の変化 (Case2) (破線は微細粒子含有率を示している)

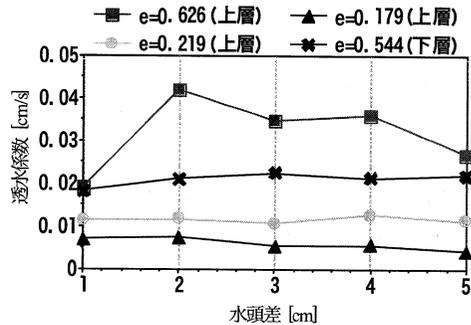


図-13 上層と下層の透水係数の変化 (Case2)

って間隙が変化するため、浸透層の透水性が平均化する。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金（代表者：岡田光正，課題番号：17201018）による助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 土田孝・吉牟田卓・浅海綾一（2006）：一次元水圧変動による海底地盤表層からの微細粒子移動に関する研究，海岸工学論文集，第53巻，pp.491-495。
 長戸宏樹・越智達郎・日比野忠史・福岡捷二（2007）：太田川河口域における有機泥の循環に関する基礎的研究，水工学論文集，第51巻，pp.1195-1200。
 日比野忠史・保光義文・福岡捷二・水野雅光（2006）：洪水に伴う河口干潟環境と生物生息の変化，河川技術論文集，第12巻，pp.431-436。