砂層内での有機微細粒子の移動に関する実験的研究

An Experimental Study on Organic Fine Particles Movement in a Sand Column

TOUCH NARONG¹ · 駒井克昭² · 中下慎也¹ · 日比野忠史³

Narong TOUCH, Katsuaki KOMAI, Shinya NAKASHITA and Tadashi HIBINO

The aim of this study is to investigate a movement mechanism of organic fine particles (OFP) in a sand column, which is a useful knowledge in a restoration of aggravated tidal flat and a construction of man-mad sandy tidal flat. It was found that Hagen-Poiseuille equation could express the characteristics of flow in the sand column; and the pressure loss inside the sand column considering OFP could be formulated theoretically. The movement of OFP in the sand column estimated from the formula was verified by experiments. Moreover, the organic properties of OFP strongly affected the movement; namely, decomposed OFP were easy to travel through the sand column.

1. はじめに

人工干潟の造成が行われているが、生態系の形成不良 等の重大な問題が指摘されている(花輪・古南,2002). 人工干潟では、単に地形が維持され、生物が棲息するこ とが造成目的だけでなく、近年ではアサリ等の有用二枚 貝が棲息可能な干潟を創造すること等も求められてい る.干潟に有用二枚貝を棲息させるためには地盤内に地 下水があることが主要な条件の1つであることがわかっ てきた.例えば、干渇地盤内での地下水の流れは地盤内 に棲息する生物に対して餌や酸素を供給する役目を果た している(日比野ら,2006).砂層内における地下水の 流れと有機微細粒子(有機物が付着した土粒子)の移動 を把握することは干渇環境の改善・創造のために極めて 重要な課題である.

地盤内での物質移動に関する従来の研究では,砂層内 での汚染物質の挙動等が着目され,例えば,間隙内での 物質の拡散(Van Kooten, 1996)について様々な研究が 行われている.近年では,間隙内での物質の移動は溶解 性物質だけでなく,間隙内で付着する物質の状態を考慮 すること(Fabriceら, 2007),さらに,間隙内での物質 移動をモデル化すること(Cherblancら, 2007)まで行わ れている.しかしながら,従来の研究では地下水の流れ によるフロック化した有機微細粒子の輸送を明らかにし たものはない.有機微細粒子の粒度分布幅が広い(1µm ~75µm)場合には間隙内での粒子間の付着・移流機構 が従来の均等粒子モデルより,さらに複雑になると考え られる.本研究の目的は干潟地盤内での地下水の流れに よる有機微細粒子の複雑な輸送機構を明らかにすること

1	学生会員	修(工)	広島大学 工学研究科 JSPS特别研究員 DC
2	正会員	博(工)	広島大学 工学研究院 助教
9	工会日	持(丁)	亡白十兴 工兴研究院 准据运

である.このため,砂層内での物質輸送による圧力損失 と砂層内に残留する有機微細粒子量との関係を実験的に 明らかにし,従来の浸透理論を発展させた理論式を提案 する.さらに,提案式を現地に適用するために砂層内で の有機微細粒子の移動に及ぼす砂層の特性(間隙,粒径 等),浸透流量,および有機微細粒子に含まれる有機物 の特性(質と量)に対する提案式の有効性について検討 した.

2. 実験概要

(1) 実験装置

本研究に用いた実験装置を図-1に示す.実験装置は直 径が5.1cm,長さが45cmの円柱パイプで作成され,右側 には鉛直方向に1cmの間隔でマノメータを付けている. 水位差を付与することで,定常浸透流を生じさせること ができ,水位差を変化させる(0~34cmまで可能)こと で,異なる浸透流量が得られる.試料下部には140µmメ ッシュのネットをフィルターとして用いた.実験では, 圧力損失をマノメータで測定し,同時に浸透流量も測定 した.



3 正会員 博(工) 広島大学 工学研究院 准教授

(2) 実験に用いた試料および実験条件

a)実験試料

実験では3種類の砂,現地砂(平均粒径0.470mm,粒 子密度2.55g/cm³),市販砂(平均粒径0.593mm,粒子密 度2.65g/cm³),混合砂(平均粒径0.527mm,粒子密度 2.60g/cm³),およびアルミナボール(粒径2mm,粒子密 度3.60g/cm³)を用いた.また,有機汚濁の進んだ海田湾 海底に堆積した有機微細粒子(OFP)を浸透水に混合す る粒子材料として用いた.初期有機微細粒子の特性値を 表-1,各試料の粒度分布の特性値を表-2に示した.

b)実験方法および実験条件

実験は水のみの浸透特性(圧力損失)を評価するため の浸透実験と砂層内での有機微細粒子の移動を検討する ための粒子の移動実験を図-1に示した装置を用いて行っ た.浸透実験では、まず水道水で満たした水槽中で気泡 を除去した試料を締め固め、様々な間隙率の試料を作成 する.次に、水位差を付与して鉛直下方向の浸透流を生 じさせ、浸透流量および圧力水頭を測定する.有機微細 粒子の移動実験では、浸透実験と同様に、初期の浸透流 量と圧力水頭を測定する.次に、有機微細粒子を混ぜた 水道水を浸透させ、圧力損失と浸透流量の変化を測定す る.浸透実験に用いた砂層の締め固め条件は表-3に示し ている.表-4には移動実験の条件を示した.

3.砂層内での圧力損失の評価

一般に層流状態での浸透の理論式として, Hagen-Poiseuille則に径深(流れ断面積は間隙面積, 潤辺は平均 粒径から求めた表面積)を導入した式が用いられる. 圧 力損失は流体と粒子との摩擦によって生じると仮定し, (1) 式のように表される.また,実験式として用いられ ているErgun式では,圧力損失は(2) 式のように表される.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{72\mu v_s}{D_e^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \qquad (1)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{\mu (1-\varepsilon)^2 v_s}{D_e^2 \varepsilon^3} + 1.75 \frac{\rho (1-\varepsilon) v_s^2}{D_e \varepsilon^3} \qquad (2)$$

ここに、 ΔP :土粒子による圧力損失 [dPa], *L*:試料の 長さ [cm], μ :粘性係数 [g/cm/s], v_s :断面平均流速 [cm/s], D_e :球状に換算した有効粒径 [cm], ϵ :砂層の 間隙率, ρ :流体の密度 [g/cm³] である. 径深を導入し た換算レイノルズ数 (Re_m) は (3) 式のように表される.

(3) 式を用いれば、摩擦抵抗係数は次のように表される.

表-1 有機微細粒子の特性値

OFPの種類	C/N比	含水比[%]	有機物量[%]
OFP0-2	11.9	351	12.6
OFP20-22	13.3	174	10.9

表-2 各材料の特性値

特性値	KS	MS	KMS	OFP
D10 [mm]	0.43	0.50	0.46	0.004
D20 [mm]	0.50	0.58	0.52	0.007
D50 [mm]	0.70	0.89	0.80	0.018

試料	乾燥質量 [g]	砂層の厚さ [cm]	体積 [cm ³]	間隙比	有効粒径 [mm]	粒子密度 [g/cm ³]	
KS1	307	9.3	189	0.573			
KS2	307	9.7	197	0.639	0.470	2.55	
KS3	307	9.9	202	0.681	0.470		
KS4	400	11.8	241	0.537			
MS1	400	11.3	231	0.534		2.65	
MS2	400	11.7	239	0.583	0.502		
MS3	400	11.2	229	0.516	0.593		
MS4	400	12.6	257	0.637			
KMS1	400	11.2	225	0.483			
KMS2	400	11.4	233	0.514	0.527	2.60	
KMS3	400	11.9	243	0.580			
AB1	500	11.0	225	0.622			
AB2	500	10.7	218	0.574	2.000	3.60	
AB3	500	10.7	218	0.574			

表-3 作成した砂層の締め固め状態(浸透実験の条件)

表-4 有機微細粒子の移動実験での条件

試料	間隙比	初期浸透流量 [cm ³ /s]	流入濁質濃度 [mg/L]	実験時間 [min]	砂の種類	OFPの種類	浸透水の塩分 [psu]
Case 1	0.598	1.1	121			OFP0-2 (C/N ratio=11.9) 0	
Case 2	0.528	1.3	122		VS		
Case 3	0.528	2.6	114	60	KS		0
Case 4	0.528	1.3	113			OFP20-22	
Case 5	0.528	1.3	111		MS	(C/N ratio=13.3)	

 (注) KS:現地砂(太田川,己斐),MS:市販砂,KMS:混合砂(50%KS+50%MS),AB:アルミナボール 有機微細粒子として海田湾海底に堆積した有機泥(OFP)を用いており.例えば,OFP0-2は0から2 cm海底有機泥である. 砂層内での圧力損失を評価するには砂層の間隙比と砂 粒子の有効粒径が必要となり,砂層の間隙比は(6)式 を用いて求める.また,砂粒子の有効粒径は粒子を球と 仮定し,体積平均粒径を用い,(7)式で求める.

ここに, e: 砂層の間隙比, V: 試料の全体体積 [cm³], $W_s:$ 砂の乾燥質量 [g], $\rho_s:$ 砂粒子の密度 [g/cm³], $D_e:$ 砂の有効粒径 [cm], $n_i:$ 各ふるいに留まる粒子の 数 [個], $D_i:$ 各ふるいのメッシュの大きさ [cm], $W_{ri}:$ 各ふるいに留まる砂の乾燥質量 [g] である.

圧力損失は装置の壁面による損失と砂粒子による損失 があるが、本実験では装置の壁面による損失は精度が 1mmのマノメータで測定できない(無視できる)ため、 測定された圧力損失は砂粒子および砂粒子で形成された 間隙構造によって生じると考える.

浸透実験でのHagen-Poiseuille式(理論式,(1)式), Ergun式(実験式,(2)式)と実験値の比較を図-2に示 した.(1)式は砂粒子およびアルミナボールの実験値を よく再現できるが、(2) 式では実験値を表すことができ ていないことから,低レイノルズ数(Re_m<3)の流れ場 においては(1)式によって砂層における圧力損失を示 すことが妥当と考えられる.ただし、高レイノルズ数 (Re_m<3)の流れ場においては粒子が球状のアルミナボー ルを用いた場合の実験値が(2)式の計算値に近づいて おり、本実験よりも大きな間隙場、かつ間隙水の流速が 大きい場合にはErgun式を用いる必要がある. さらに, 図-2では、層流(Re...<3)の場合において砂粒子および アルミナボールの実験値の両方が(1)式の計算値とほ ぼ一致している. すなわち, 砂層内での流れが層流の場 合において、砂粒子の形状が圧力損失に及ぼす影響は小 さく、砂粒子の形状を球状と仮定しても良いと考えら れる.

4. 砂層内での有機微細粒子の移動

(1) 有機微細粒子の残留と圧力損失

砂層内での圧力損失は浸透流速に比例し,砂層の間隙率(間隙比)に反比例する((1)式).粒子の移動実験 Case 2と3における浸透流量の変化を図-3,一例として Case 2での圧力損失の変化を図-4に示している.図-3で は,有機微細粒子の浸透に伴って浸透流量(流速)が時 間的に減少しており,(1)式に従うと仮定すると,圧力 損失,あるいは間隙が減少していると考えられる.図-4 では圧力損失が時間の経過とともに増大していることか ら,有機微細粒子が砂層内で残留し,間隙が減少したと 考えられる.砂粒子に形成されている間隙の大きさ(骨 格構造)に変化がないとすれば,圧力損失の増加量から 砂層内での有機微細粒子の残留状態を推定することが可 能である.

(2) 砂層内での有機微細粒子残留量の定式化

砂粒子で形成された砂の間隙(骨格構造)が変化しな い状態で,有機微細粒子が砂層間隙内に残留することに よって流れの有効面積が減少し,圧力損失が増加する (超過圧力損失)とする.ここで,超過圧力損失は間隙 が減少することによって生じる圧力損失であるので全体 の圧力損失(ΔP)は超過圧力損失と砂層内での流れによ る損失の和と定義する.ここでは,有機微細粒子と流れ との摩擦によって生じる圧力損失は無視する.

有機微細粒子が砂層内に輸送され,残留するときの砂 層内の間隙比を(8)式のように表す.



図-2 換算レイノルズ数と摩擦損失係数との関係(砂層内での圧力損失はHagen-Poiseuille式で表される)









$$e = \frac{V - V_S - V_M}{V_S + V_M} \quad \dots \tag{8}$$

ここに、 V_s : 砂粒子の体積 [cm³]、 V_M : 有機微細粒子の 体積 [cm³] である. (8) 式を用いれば砂層内での圧力 損失を導いた概念と同様に、砂層内に有機微細粒子が含 まれた圧力損失は (9) 式のように表される.

$$\frac{\Delta P}{L} = 72\mu v_s V \frac{\left(\frac{V_s}{D_{es}} + \frac{V_M}{D_{eM}}\right)^2}{\left(V - V_s - V_M\right)^3} \dots (9)$$

ここに、*D_{es}*:砂の有効粒径 [cm],*D_{eM}*:有機微細粒子の有効粒径 [cm] である.(9) 式により残留する有機微細粒子の体積が推定できる.

有機微細粒子の残留質量は流入水と流出水の濁質濃度 差により以下のように算出した.浸透水に含まれる濁質 量は平均光強度(島津製作所,SALD-2000J)から求めた. 平均光強度と濃度(SS)との関係(図-5)から有機微細 粒子の質量に換算している.

図-6は(9)式から推定した有機微細粒子の残留体積と 流入出する濁質の濃度差から算出した有機微細粒子の残留 質量との関係を示している.この図から,残留質量が0.3g 以下のときに有機微細粒子の残留体積と残留質量との関係 は高い相関が得られる.図中で実線①~③で示す直線の勾 配は砂層内に残留した状態での有機微細粒子の残留乾燥密 度を表しており,試料の条件に応じて変化している.

海田湾周辺にある有機微細粒子の密度は約1.04g/cm³ (西村ら, 2009) であるが、有機微細粒子同士の付着・ 凝集によって見かけの体積が増加するため、砂層内に残 留した状態での残留密度は低下する.本実験で得られた 残留密度(図-6,実線①~③の勾配)は乾燥状態で約 0.11~0.49g/cm³であるため、有機微細粒子が緩く堆積し た状態(フロック化)で残留したと考えられる.残留密 度は有機微細粒子のフロック化の結合状態によって変化 し、OFP20-22を用いたときの残留乾燥密度は0.49g/cm³ であった. 例えば、フロック化した有機微細粒子の含水 比が110%であれば、残留乾燥密度が0.49g/cm3(実線①) になり、含水比500%に増大すれば、残留乾燥密度が 0.17g/cm³(実線2)になる.実験では砂層の間隙内での 有機微細粒子の残留状態の観察が困難であるため, 有機 微細粒子のフロック構造を知ることができなかったが, 実験と同じ時間(60分)に静水中に有機微細粒子 (OFP0-2)を沈降・堆積させたときの含水比が約650%で, 湿潤密度は1.20g/cm³(乾燥密度が0.16g/cm³)であった. これと比較すれば、実験から得られた残留した有機微細 粒子の残留乾燥密度の値は妥当と考えられる.

(3) 浸透層内での有機微細粒子のフロック形成

残留量が多くなると残留乾燥密度(図-6中の破線)が 小さくなるのは有機微細粒子が集合体を形成し,見かけ



5,15,30,45,60 分の有機微細粒子残留量の累積

図-6 残留有機微細粒子の体積と質量との関係(乾燥密度)

の体積を増大しているためと考えられる。図-6から、残 留質量が0.3g以上のときに有機微細粒子の残留質量が多 くなるとともに,残留した有機微細粒子の粒子間距離が 小さくなり、粒子が緩く結合し、フロック状に積み重な っていくため、フロック体積が増大(含水比も増大)す ると考えられる. 金ら(2009) は浸透がない場において 有機微細粒子の圧密に伴って密なフロック(見かけの体 積が減少)が形成されるが、堆積層内に重力に逆らう浸 透流が生じると堆積した有機微細粒子が膨張する(見か けの体積が増大)ことを示しており、1.5×10-4~3.0× 10⁻³cm/sの浸透を与えることによって、堆積した有機微 細粒子の含水比が200%程度増大することを確認してい る.この現象が砂層内においても生じるとすれば、有機 微細粒子が緩く結合する状態は堆積方向に逆の流れが生 じることによって形成されると考えられる. さらに、こ の現象は有機物の性状にも依存している. 浸透する有機 微細粒子の種類を変えたCase 2とCase 4を比較すると、 C/N比の高い分解の進んだ有機微細粒子(Case 4)を使 用することで、有機微細粒子の残留体積が約1/5に減少 した. 図-6では残留体積が4.5cm3に対し0.9cm3に減少し ている.このことから、砂層内での有機微細粒子の挙動 は砂層内での流れや浸入する有機微細粒子の性質,特に, 分解度によって大きく変化することがわかる.

さらに,結合したフロックの形状(性状)は砂層や浸 透流の条件等によって変化し,間隙内の流れが速い場では, 残留密度を表す勾配(図-6の実線)が増大しており,有機 微細粒子同士のフロック化が起こりにくいと考えられる.

(4) 砂層内での有機微細粒子の挙動

a)残留量に及ぼす砂層特性(間隙比と粒径)の影響 砂層の間隙比を増加させたCase 2 (e = 0.528)とCase 1 (e = 0.598)を比較すると,有機微細粒子の残留質量 は減少する(図-6,0.4gに対し0.3g).これは砂層の間隙 が増大することで,有機微細粒子と砂粒子との抵抗が小 さくなり,有機微細粒子が流出しやすくなるためと考え られる.図-7に(8)式を用いて圧力損失(図-4)から求 めた砂層内での有機微細粒子の残留体積分布,および (1)式を用いて有機微細粒子を浸透させる前の圧力損失 (図-4)から求めた砂層の初期有効間隙比を示した.図-7 から有効間隙比が大きい層に有機微細粒子の残留体積が 大きいことがわかる.

さらに,砂の有効粒径を0.47mm (Case 4)から 0.59mm (Case 5)に増大させると,同間隙比,同有機微 細粒子下においても図-6に示すように有機微細粒子の残 留質量が0.3gから0.2gに減少した.足立・岩田 (2003) は粒径が大きくなると粒子の表面張力が小さくなるた め,粒子間距離が同じならば粒子間の引力が減少するこ とを示している.本実験においても間隙が同じ砂層では, 砂粒径の増加 (Case 5)に伴い有機微細粒子の残留量が 少なくなっており,砂層に残留する有機微細粒子量は砂 層の間隙比のみならず砂粒径にも依存する.これらのこ とから有機微細粒子の残留は主に間隙内での流れに依存 することが理解される.

b)残留量に及ぼす有機微細粒子輸送量の影響

浸透流量(濁質は同濃度)を増加させた Case 2 (1.3cm³/s)とCase 3 (2.6cm³/s)を比較すると,浸透流速 が大きくなると有機微細粒子は残留しにくくなると考え られるが,同時に砂層内への有機微細粒子の輸送量も増 大するため,浸透流量は大きく減少している(図-3, Case 3).すなわち,浸透流速を増加させても,砂層内へ の有機微細粒子の残留量が増加する(図-6)ため,有機 微細粒子の通過能が低下することになる.

5.おわりに

干潟地盤内での地下水による有機微細粒子の輸送・残 留機構を明らかにすることを目的として,室内実験を行 った結果を以下にまとめる.

- (1)砂層内での圧力損失はHagen-Poiseuille式(換算レイ ノルズ数が3以下)で表すことができる。有機微細粒 子の残留量を推定するためにHagen-Poiseuille式を拡張 し、有機微細粒子が含まれる圧力損失式を提案した。
- (2) 有機微細粒子の性状は砂層内での残留に影響を与えるだけでなく,残留した有機微細粒子のフロック形成にも大きく影響を与える.分解の進んだ有機微細粒子



図-7 有機微細粒子の残留分布と初期砂層の有効間隙比(Case 2)(有機微細粒子は有効間隙比が大きい層に堆積する)

は砂層内に流出しやすく,フロックが形成されにくい こと,有機微細粒子のフロック形成は間隙水流れの挙 動に関係すること,間隙水の流速が速い場(小間隙比, 大流量)において,有機微細粒子のフロックが形成し にくいことがわかった.

- (3) 有機微細粒子の移動は砂層の間隙状態に依存し,砂層の間隙が小さくなると有機微細粒子の残留量が増加する. また,有機微細粒子は間隙が大きい層に多く堆積する.
- (4) 浸透流速を大きくすると、有機微細粒子が流出されると考えられるが、砂層内への有機微細粒子の残留量が増加するため、有機微細粒子の通過能が低下する.

謝辞:本研究は,科学研究費補助金基盤研究B(代表 者:日比野忠史)による助成を受けた.ここに記して謝 意を表する.

参考文献

- 足立泰久・岩田進午(2003):土のコロイド現象,学会出版センター, pp. 360-363.
- 金キョンヘ・阿部真己・駒井克昭・日比野忠史(2009):底泥 の巻き上がりに及ぼす浸透流の影響,海岸工学論文集, 第56巻, pp. 971-975.
- 西村尚哉 · TOUCH NARONG · 駒井克昭 · 日比野忠史 (2009): 有機性状を考慮した有機懸濁物質の沈降速度の モデル化,海岸工学論文集,第56巻, pp. 1151-1155.
- 花輪伸一・古南幸弘 (2002):人工干潟の問題点と課題,海洋 開発論文集,第18巻, pp.43-48.
- 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.
- Cherblanc, F., A. Ahmadi and M. Quintard (2007): Two-domain description of solute transport in heterogeneous porous media: Comparison between theoretical predictions and numerical experiments, Advances in Water Resources, Vol. 30(5), pp. 1127-1143.
- Fabrice, G., Q. Michel, C. Fabien, A. Z. Brendan and D. W. Brian (2007): Comparison of theory and experiment for solute transport in highly heterogeneous porous medium, Advances in Water Resources, Vol. 30(11), pp. 2235-2261.
- Van Kooten, J. J. A. (1996): A method to solve the advectiondispersion equation with a kinetic adsorption isotherm, Advances in Water Resources, Vol. 19(4), pp. 193-206.