

有機泥を構成する土粒子の沈降特性からわかるフロック構造の解析

広島大学大学院工学研究科 学生会員 ○岡村宏信

東亜建設工業 正会員 小枝豪志

広島大学大学院工学研究科 正会員 中下慎也

広島大学大学院工学研究科 正会員 日比野忠史

1. はじめに

海底や干潟において土壌環境に及ぼす微細粒子の影響は様々な形で現れており、微細粒子の物理、化学特性を知ることにより生態系の改善を効果的に行うことが可能となる。しかしながら、微細粒子の構造は極めて複雑であり、粒子密度や形状などの基本的な物理量でさえ明確に捉えることができていない。著者らは、これまでに微細粒子に含まれる有機物性状によって変わる有機泥の沈降や砂地盤内での輸送機構について明らかにしてきた。既往の研究では、レーザ回折式粒度分布計を用いて、沈降速度を推定する手法を確立した。この手法では粒子個々の粒子径と沈降速度を直接計測することができる。ただし、有機泥が長辺を半径とする球の体積を持つと仮定し、数個の同径粒子の集合体であるとして沈降速度から求められた代表するフラクタル次元および有機泥の密度を求めている。したがって、算出に用いたフラクタル次元はフロックを形成する粒子構造がフロック径によらず一定としている。このため、正しい沈降速度が測定されるにもかかわらず、有機泥密度を直接測定しているとは言えない。本論文では、顕微鏡画像から微細粒子のフロック構造をミクロな視点でとらえ、構成粒子の直径と個数からフラクタル次元（形状）を算出し、直接測定した沈降速度と形状を与えることで微細粒子の密度を推定手法を検討した。

2. フラクタル次元によるフロック構造のモデル化

フロックの沈降速度 (V_f) はフロック径 (D_f) の関数であり、両者の間には形状で決まる α を用いて(1)式の関係が成り立つ (α はある定数) (足立ら, 2003)。

$$V_f = D_f^\alpha \quad (1)$$

フロックの密度が大きさに依らず一定であり、粒子の形状が球であれば、 V_f が粒径の 2 乗に比例し、ストークス則で表すことができる。しかし、フロックの形状は複雑な構造を持ち、実際には α は 0.6~1.5 の範囲で

沈降速度が測定されることが多い。一般に、フロックが成長し大きくなると、粒子間にできる間隙のため密度が小さくなる。このようなフロックを構成する懸濁粒子（直径 d_0 ）の数 (i) とフロック径 (D_f) は、(2)式の関係で近似できる。

$$i = \left(\frac{D_f}{d_0} \right)^D \quad (2)$$

(2)式は、フロックの構造が自己相似なフラクタルを仮定している。 D はフラクタル次元であり、幾何学的構造を特徴づける量である。(2)式の D は 1~3 の範囲で変化し、 $D=3$ の時フロックは細密な構造を持つ球体になる。(2)式を用いてストークス則を表わすとフロックの長辺を半径とした球の体積を持つ有機泥の沈降速度は(3)式で表すことができる。

$$V_f = \frac{g}{18\mu} (\rho_s - \rho_w) \left(\frac{D_f}{d_0} \right)^{D-3} D_f^2 \quad (3)$$

ここに、 μ は粘性係数、 ρ_s は粒子の密度、 ρ_w は水の密度である。本研究ではフロック構造の形状を直接測定することにより、フラクタル次元を推定し、(3)式を用いてフロックの密度の推定を行う。フロック構造の計測は走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて行われた。沈降速度は西村ら (2009) によって確立されたレーザ回折式粒度分布計 (島津製作所社製: SALD-2000J) を用いて推定した。なお、本手法の測定誤差は 10% 以下であることが報告されている (小枝ら, 2011)。

3. フロック構造による分類

(1) 沈降速度の違いを利用した試料の選別方法

顕微鏡画像から微細な粒子を代表する粒径を推定するためには適切な粒子のサンプリングが必要となる。本研究では、サンプリングによる誤差を小さくするため、フロック構造による分類を行った。本研究に用いた有機泥は広島湾奥部に位置する呉湾にてエクマンバージを用いて採取されたものである。測定に用いた有機泥の有機性状が表-1 に示されている。複雑なフロッ

ク構造をもつ有機泥を、比較的単純な構造の有機物群を研究対象とするために、採取された有機泥から 30 min で沈降する有機泥と 6.6 h 後にも浮遊する有機泥を取り出した。分類作業には縦 39 cm、横 56 cm、高さ 31 cm の容積約 6800 cm³ の容器が用いられた。6.6 h 後にも浮遊する有機泥(Case 1(a))の分類方法は以下のようになる。①容器内に淡水と有機泥を投入し攪拌する。②6.6 h 静置した後、水面から約 3 cm までの濁水をサイフォンにより採水する。③以降、攪拌、沈降、採水の作業を繰り返すことで 6.6 h で沈降しない試料を分類した。30 min で沈降する有機泥(Case 2(a))の分類方法は、①容器内に淡水と有機泥を投入し攪拌する。②30 min 静置した後、上澄を全て取り除く。③残った有機泥を再び攪拌、沈降、除去を繰り返し、30 min で沈降する試料を分類した。沈降速度によって分類後、さらに各々の試料に過酸化水素を用いて有機物を除去する(フロック構造を壊す)ことで、有機泥を単純な構造を持つ粒子の集合に分類した。

(2) 過酸化水素によるフロック構造の破壊

過酸化水素により有機物を除去(フロック構造を破壊)した。図-1 に過酸化水素を添加する前後の粒度分布が示されている。沈降速度の速い有機泥で構成される Case 2 では粒度分布の中央粒径は小さく変化しており、フロック構造が破壊され比較的単純な構造群に分類されていることが確認できる。

(3) 分類された試料の粒子特性

沈降速度別に分類された試料の粒度分布が図-2、同試料の沈降速度分布が図-3 に示されている。沈降する粒子の粒径は沈降しない粒子よりも大粒径であることから沈降により 2 つの特性の異なる有機泥群を取り出すことができた。なお、量粒子群には 3~30 μm の範囲に同粒径で沈降速度の異なる粒子が存在している。10 μm 程度の粒子はそれぞれのケースで存在するが、過酸化水素添加前では 100 倍程度の沈降速度の値の差が存在することが確認できる。一方、過酸化水素添加後にはそれぞれのケースの値が近づいていることがわかる。このことから、単純な構造の粒子は粒径毎に一樣な沈降速度の値を持つことが理解できる。

4. 有効密度推定手法の確立

フロック構造からフラクタル次元を推定するには、フロック径、フロックを構成する粒子の粒径と数が必要となる。ここではフロックの粒径、フロックを構成

表-1 有機泥性状

試料	試料概要	D ₅₀ [μm]	IL ₆₀₀ [%]
Case 1(a)	6.6時間後の浮遊物	2.0	12.4
Case 2(a)	30分以内の沈降物	29.7	9.1
Case 1(b)	Case 1 の試料に過酸化水素添加	2.0	8.8
Case 2(b)	Case 2 の試料に過酸化水素添加	17.0	8.0

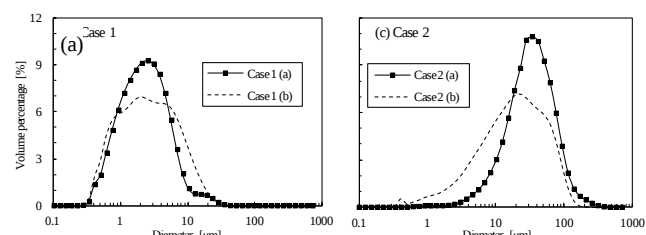


図-1 (b) Case 1(a), Case 1(b)の粒度分布, (c) Case 2(a), Case 2(b)の粒度分布

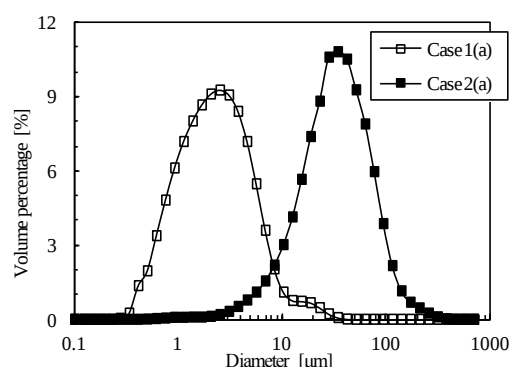


図-2 Case 1(a), Case 2(a)の粒度分布

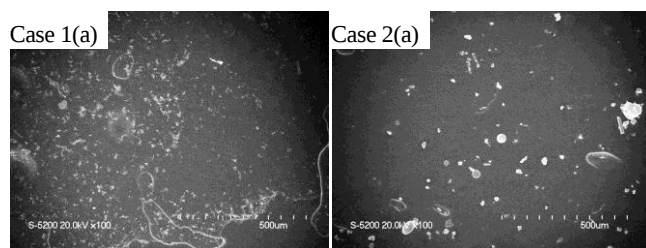


写真-1 Case 1(a), Case 2(a)の SEM 像(100 倍), Case 2(a)の粒径が比較的大きく粒度分布計の測定結果と対応している。

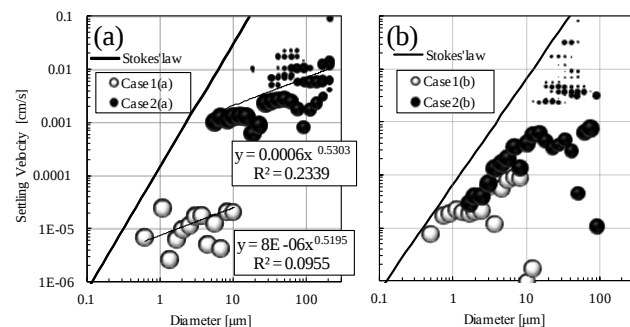


図-3 (a) Case 1(a), Case 2(a)の沈降速度分布, (b) Case 1(b), Case 2(b)の沈降速度分布

する粒子の粒径は画像解析により測定された。レーザ回折式粒度分布計は試料にレーザを照射した時に発生する回折・散乱光のパターンと同様のパターンを持つ球体の粒径を試料の粒径としている。回折・散乱光のパターンは粒子の大きさに依存するため、長辺を粒子の大きさを表す代表長さとし、粒径とした。また、SEMによる粒子径の測定ではすべての粒子を対象とすることは不可能であることから約 2000 個の粒子の内 150 個の粒子径について測定を行った。測定された粒子は粒度分布計を用いて推定された沈降速度の値を持つとし、それぞれの粒径に対応した沈降速度を与えた。粒子の有効密度は(3)式を変形した(4)式で求まる。

$$\rho_s - \rho_w = V_f \cdot \frac{18\mu}{gD_f^2} \left(\frac{D_f}{d_0} \right)^{3-D} \quad (4)$$

(1) 沈降速度の実験値から推定される有効密度

測定された沈降速度から(4)式を用いて有効密度を推定する。(3)式から沈降速度と粒径の関係は(5)式の関係が成り立つ。

$$V_f = \alpha \cdot D_f^{D-1} \quad (5)$$

(5)式は図-3 に示す沈降速度の分布の勾配はフラクタル次元から 1 を引いたものを表すことを示している。図-3 に示した沈降速度分布の平均的な勾配から Case 2(a)のフラクタル次元は 1.53~3 と推定できる。また、ブロックを構成する粒子の粒径 (d_0) は SEM を用いて図-4 のように測定された。ブロックを構成する粒子の粒径とブロック径の関係は指数関数で表わすことができ、統計的に 1%の有意水準で相関があると認められる。この関係を用いて D_f/d_0 の値を表わすと

$$\frac{D_f}{d_0} = 0.001D_f + 1.36$$

と表わすことができる。これを(4)式に代入し、(6)式を用いて有効密度を推定した。

$$\rho_s - \rho_w = v \cdot \frac{18\mu}{gD_f^2} (0.001D_f + 1.36)^{3-D} \quad (6)$$

(2) SEM を用いた有効密度推定手法

図-5、表-2 に SEM を用いたブロック構造の測定例を示している。ブロック構造を測定することで、ブロック径 (D_f)、ブロックを構成する粒子の粒径 (d_0) と数 (i) が得られる。これらの値を(2)式に代入することでフラクタル次元 (D) が得られる。 d_0 の値は一つのブロックにつき複数存在するが、それらの平均値を d_0

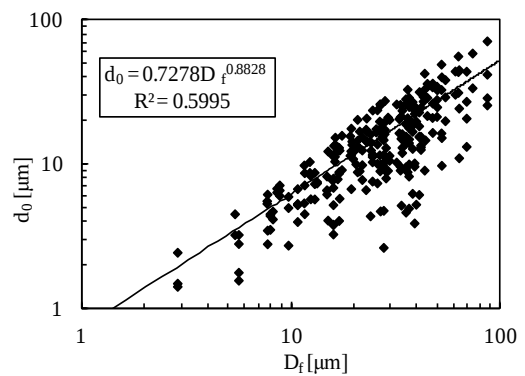


図-4 Case 2(a)の D_f と d_0 の関係

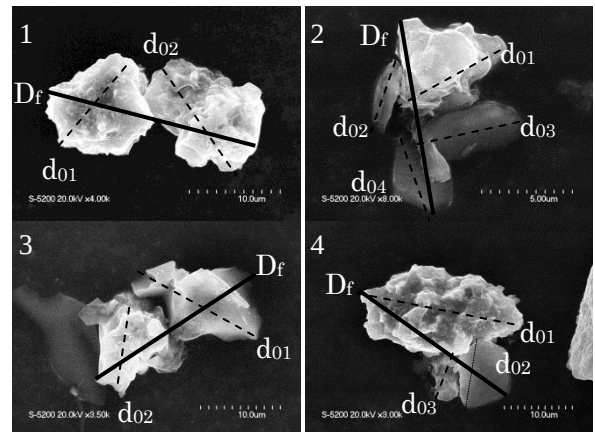


図-5 Case 2(a)の SEM 像の測定例

表-2 図-5 の SEM 像の粒子概要

No.	D_f [μm]	d_0 [μm]	D [-]
1	24.0	13.5	1.2
2	10.7	5.4	2.0
3	22.9	15.8	1.9
4	25.7	13.9	1.8

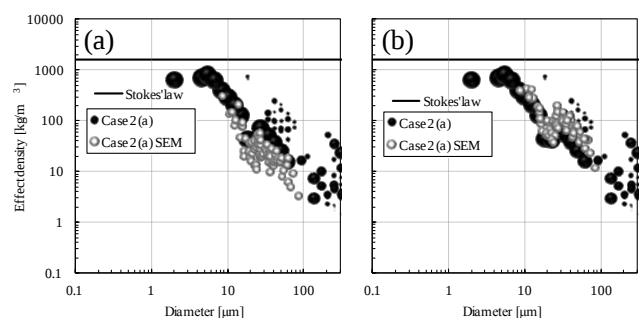


図-6 沈降速度から推定されるブロックの有効密度と SEM 像から推定されるブロックの有効密度 (a) ブロックを構成する粒子の平均径を d_0 とした場合 (b) ブロックを構成する粒子の内、最大の粒径を d_0 とした場合

とした。測定されたブロック径が粒度分布計により測定される粒径と対応するものとし、それぞれの粒径に対応したレーザ回折式粒度分布計により測定された実

測の沈降速度を与えた。これらの値を(4)式に用いることで、SEM 像から有効密度の推定を行った。

(3) フロック密度推定手法のモデル化

図-6(a)に沈降速度を(6)式に代入し推定される有効密度、図-6(b)に SEM 像を用いて(4)式から推定される有効密度が示されている。●のプロットのサイズは各粒径における沈降速度の頻度割合を示している。図-6(a)から分かるようにそれぞれの方法で推定されるフロックの有効密度の値は、プロットの勾配を平行移動したような値を持っている。(6)式に示されるように、有効密度のプロットの勾配はフラクタル次元の値に依存している。このことから、SEM を用いて個々の粒子のフラクタル次元を用いて有効密度分布を推定したもの(○)は、有機泥のもつ平均的なフラクタル次元の値に近づくことが示された。図-6(b)は SEM 像から推定される有効密度において、フロックを構成する粒子の粒径(d_0)を、フロックを構成する粒子の内最大の値を d_0 とした場合のものである。フロックを構成する粒子の粒径を最大のものであるとすることはフロックの構造がより密なものであるとすることになる。本手法はフロックを構成する粒子が球であると仮定した物であるが、実際の粒子は凹凸があり、複雑に絡み合っており、フロックを構成している。これにより、フロックの空隙は球とした場合より小さくなりフロックをより密であると捉える図-6(b)の方法で有効密度がより大きな値となったと考えられる。それぞれの手法により推定される有効密度の値は十分な精度で再現でき、本手法が SEM 像を用いた有機泥の有効密度の推定に適用可能であることが示された。これらの結果から、フロックを球形と捉えて測定するレーザ回折式粒度分布計を用いて推定される有効密度と、SEM を用いてフロック構造を考慮して推定される有効密度は十分な相関があることが示された。レーザ回折式粒度分布計を用いて有効密度を推定する手法の妥当性が示された。

5. おわりに

SEM を用いてフロックの密度を推定する手法を検討した。

(1)単純な構造の粒子は粒径毎に一樣な沈降速度の値を持つことが確認された。

(2)フロック径が増加するにしたがい、フロックを構成する粒子の粒径も増加することが確認された。

(3)SEM を用いてフロック構造のフラクタル次元を推定する手法の妥当性が示された。

(4)粒子形状を球として有効密度を推定する手法の妥当性が示された。

参考文献

- 足立泰久, 岩田進午(2003): 土のコロイド現象(土・水環境の物理化学と工学的基礎), 学会出版センター.
- 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質の沈降速度のモデル化, 海岸工学論文集, Vol.B2-65, No.1, pp1151-1155.
- 小枝豪志, TOUCH NARONG, 日比野忠史(2011): レーザ回折式粒度分布計による細粒子の沈降速度推定手法の確立, 海岸工学論文集, Vol.B2-67, No.2, pp1051-1055.