

# 有機物と鉱物から形成されるフロクの構造特性に関する研究

広島大学大学院工学研究科 ○学生会員 小枝豪志  
 広島大学大学院工学研究院 正会員 日比野忠史

## 1. はじめに

有機懸濁粒子の挙動を解析する場合には、衝突を繰り返しながら成長し形成された凝集体（フロク）の沈降速度の把握が必要となる。一般に、フロクの沈降速度 ( $V_f$ ) はフロク径 ( $D_f$ ) の関数であり、両者の間には、

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

というべき乗則が成り立つ ( $\alpha$  はある定数) (足立ら, 2003)。フロクの密度が大きさによらず一定であり、粒子の形状が球であれば、 $V_f$  が粒径の 2 乗に比例し、ストークス則で表わすことができる。しかし、フロクの形状は様々に抵抗係数、密度が異なるため  $\alpha$  は 2 をとらず  $\alpha$  は 0.6~1.5 の範囲で沈降速度は測定されることが多い。一般に、フロクが成長し大きくなるとフロクは空隙を持ち線に近い形状になるため密度が小さくなると言われている。このようなフロクを構成する懸濁粒子 (直径  $d_0$ ) の数 ( $i$ ) とフロク径 ( $D_f$ ) には、(2) 式の関係がある。

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

(2) 式は、フロクの構造が自己相似なフラクタルになっていることを意味する。 $D$  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、 $D=3$  の時フロクは最密な構造を持つ球体になる。なお、(1) の  $\alpha$  は  $D$  から 1 を引いた値に相当する。

有機懸濁粒子は、様々な種類の有機物と鉱物である土粒子から形成されたフロクとして海中で運動している。有機物は沈降過程において凝集、分解の影響を受け、懸濁粒子の密度やその構造は付着する有機物と液体の特性によって変化する。有機懸濁粒子が淡水中から海水中に流出すると複雑な挙動を示す。例えば、塩分は鉱物の凝集を促進することが知られており、有機物に対する塩分による凝集効果は鉱物に対するものとは異なると考えられる。

本研究では、有機泥に付着する有機物量の異なる試料を作成し、作成した試料の沈降速度からフラクタル次元を算出した。さらに、塩水による凝集の効果を純水中の沈降に伴う粒度分布の変化、沈降速度、フラクタル次元を比較することで検討した。

## 2. 沈降過程での粒度分布変化を利用した沈降速度の推定

### (1) 粒度分布の変化の測定

レーザー回折式粒度分布計 (島津製作所社製: SALD-2000J) を用いて沈降する有機懸濁粒子の粒度分布を断続的に測定することで、沈降に伴って変化する有機懸濁粒子の粒度分布を測定した。粒度分布の測定毎時に、レーザーを照射したときの光の反射強度 (光

表-1 実験試料の条件と解析結果

Case No.	試料概要					解析結果
	試料	採取場所	有機物除去方法	塩分 [psu]	IL [%]	フラクタル次元 [-]
Case 1	採取状態の沈降泥	海田湾	-	0	15.5	1.8
Case 2	有機物除去した沈降泥		過酸化水素水		10.7	2.0
Case 3	有機物除去した沈降泥		強熱後 (600 °C)		-	2.1
Case 4	ベントナイト	-	-	-	-	3.4
Case 5	採取状態の沈降泥	海田湾	-	30	15.5	1.5
Case 6	有機物除去した沈降泥		過酸化水素水		10.7	1.7
Case 7	有機物除去した沈降泥		強熱後 (600 °C)		-	2.7
Case 8	ベントナイト	-	-	-	-	1.3

沈降泥: セディメントトラップによる捕捉物, 過酸化水素水: 過酸化水素水により有機物除去した試料  
 強熱後: 600 °C で加熱し有機物除去した試料, フラクタル次元: 中央沈降速度の累乗近似により算出

強度)の時間平均値(平均光強度)を読み取った。測定高さは2.8 cmである。測定時の水温は10℃前後に保ち、蒸留水に表-1に示す資料を混合し静置した後、光強度を測定した。採取試料には塩分が含まれているが、懸濁物量に比べて蒸留水は含水量の100倍のオーダーであるため、塩分は0としている。測定の時間間隔は最小で30秒程度、測定時間は沈降速度に依存して20~180分程度であった。測定に用いた試料の概要は表-1に示されている。

## (2) 沈降速度の推定手法

沈降速度の推定は西村ら(2009)の手法によっており、以下に推定法の概略を述べる。図-1に示すように、平均光強度とSSは線形関係にある。さらに、光強度が粒径の関数であることから、光強度から測定領域内に残存する粒子の体積割合に換算することができる。図-2には懸濁物の初期体積を基準(100%)として測定範囲内に残留する粒子の粒度分布の経時変化を示している。30μmを超える粒径粒子は時間の経過に従って顕著な減少があるのに対し、10μm以下の粒子の変化は小さいことがわかる。同径粒子の体積割合に着目して残留粒子の体積割合の経時変化を表すと図-3のようになる。図中には、30~70μmの4つの範囲にある粒径の初期値からの体積の時間変化を示している。図-3では、残留粒子の体積割合の減少率が直線(一定)ではないことから同径粒子においても同一の沈降速度ではなく、沈降速度は分布を持っていることがわかる。各時間ステップでの粒子体積の減少割合から沈降速度は(3)式によって推定される。

$$w_i = \frac{dv_i \cdot y}{dis_i \cdot dt_i} \quad (3)$$

ここに、 $w_i$ : 沈降速度[cm/s],  $y$ : 測定領域の高さ[cm],  $dv_i$ : 同一の沈降速度をもつ粒子群の減少体積割合[%],  $dis_i$ : 同一の沈降速度をもつ粒子群の初期体積割合[%],  $dt_i$ : 減少体積割合に対する時間[s]である。

## (3) 有機懸濁粒子への有機物の付着結合状況の確認

有機懸濁粒子の鉱物と有機物の付着状況は顕微鏡を用いて確認された。さらに、有機物の沈降速度に及ぼす影響を把握するために作成された試料(表-1)についても顕微鏡写真により粒子の結合状態が確認された。

## 3. 有機懸濁粒子の沈降特性

### (1) 沈降速度の分布

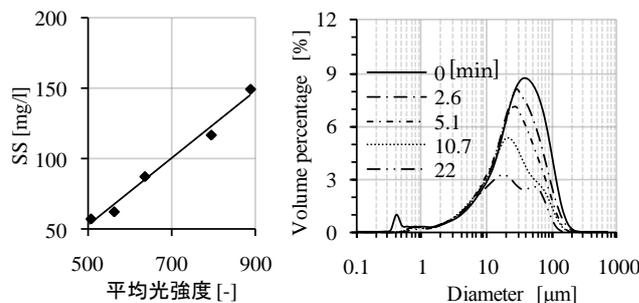


図-1 SS と平均光強

図-2 Case 1 の粒度分布の時間

度の関係

変化

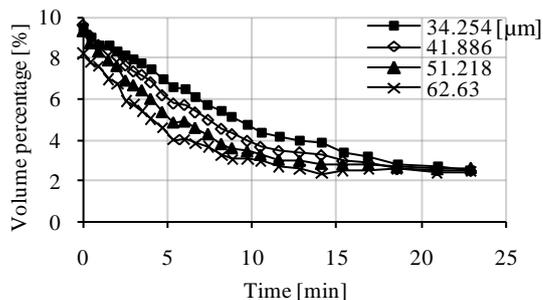


図-3 Case 1 の粒径別の体積割合の時間変化

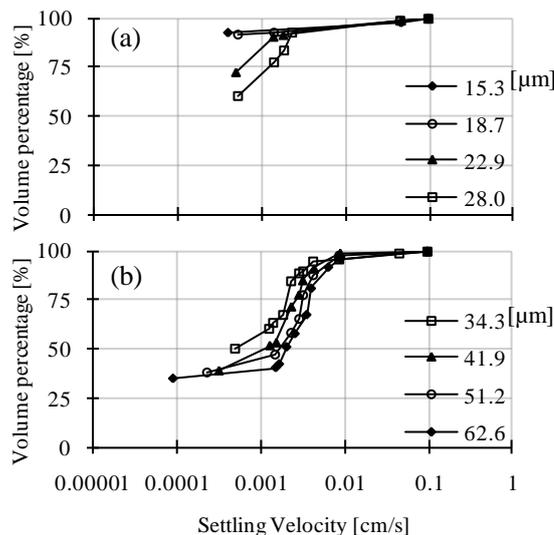


図-4 沈降速度分布 (Case 1)

図-4に海田湾海底に埋設したセディメントトラップに捕捉された有機泥(Case 1, 採取要領は日比野ら, 2010参照)の同径粒子に対する同一の沈降速度を持つ粒子量の分布を示した。図から同径粒子であっても2ケタオーダー以上の速度の違いが現れていること、大径粒子の粒子群ほど沈降速度の速い粒子が多く含まれていることがわかる。すなわち、(1)式では粒径が大きい粒子ほど沈降速度は速くなるが、図-4から大径粒子群には、沈降速度が遅い粒子も多く含まれていることがわかる。これは大径粒子の沈降速度には付着する有機物の影響を強く受けるためである。今川ら(2009)は分解前後の有機泥の粒度分布から有機物は20~30

μm以上の粒子に多く含まれていることを示している。

## (2) 有機物と鉱物の沈降特性

Case 1~Case 4の初期粒度分布(図-5)および顕微鏡写真(図-6)から、海底に存在する有機泥には15%を超える有機物が付着しており、有機物は鉱物を結合する働きを有しており、有機物が付着することにより粒径が大きいフロックを形成すること、さらに、フロック径の増大は有機物によって起こっており、有機物量が多い試料ほど密度の小さいフロックを多く含んでいることがわかる。図-7に沈降速度と粒径の関係を示す。○の大きさは各粒径の同一の沈降速度を有する粒子群の体積頻度を示している。○は各同粒子径の沈降速度の分布を示しており、図-4と同じ意味を持つ。●は各粒径の沈降速度分布(○)の中間値(図-4(b)での50%となる沈降速度)を表しており、本論文では各粒径の代表流速としている。なお、粒子の沈降が速い場合や、光強度が安定しない等によって沈降速度分布のデータ数が十分に得られない場合がある。図-4(a)にはデータ数が少ない時の速度分布が示されている。このような場合には、加積曲線において50%を含む体積割合に相当する沈降速度を代表沈降速度としている。図-7上段(a1~d1)に示す純水中の沈降速度から、有機物量の減少に伴い沈降速度の勾配(フラクタル次元)が増加す

ることがわかる(フラクタル次元の解析結果を表-1に示す)。このことから、有機物量が減少するのに伴い密な構造を持ったフロックが存在するようになることがわかった。なお、ベントナイトに関しては、フラクタル次元が3を超える値となっているが、これは、10 μm

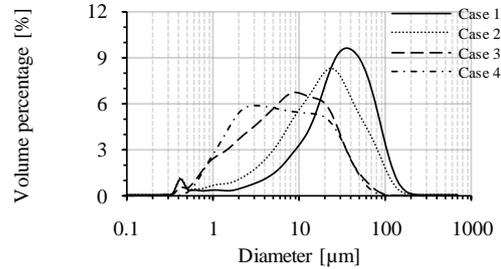


図-5 初期粒度分布の比較

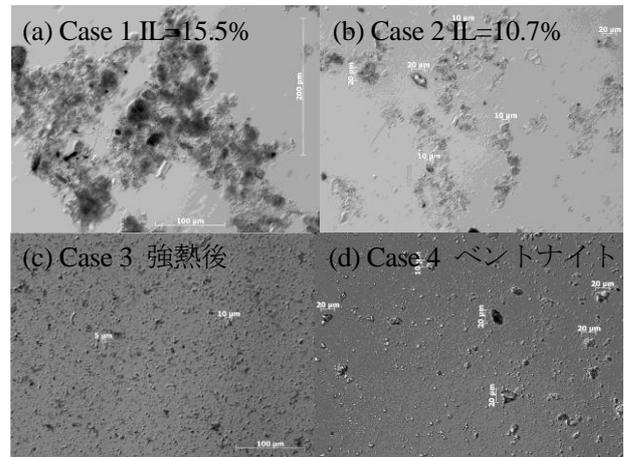


図-6 顕微鏡写真(×20)

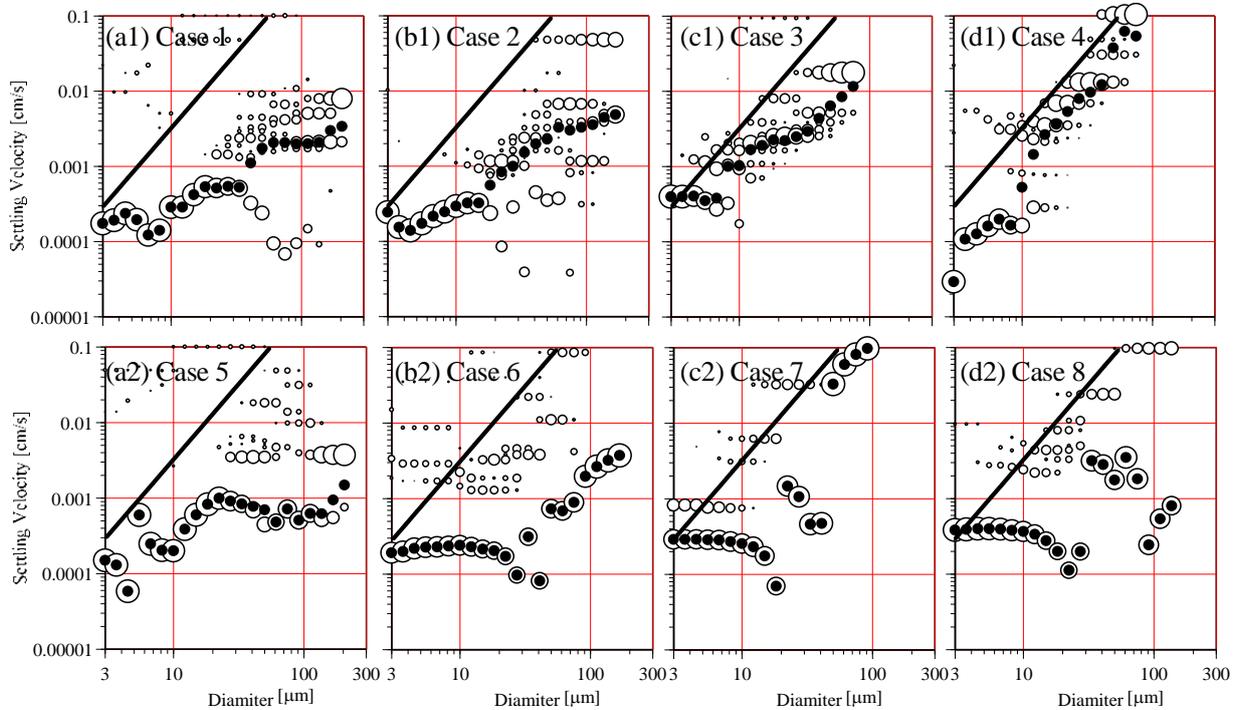


図-7 沈降速度分布と中間値

(a) IL=15.5%, (b) IL=10.7%, (c) 強熱後, (d) ベントナイト, 上段: 純水中の沈降速度, 下段: 塩水中の沈降速度 (図中の実線はフロック密度 2580 [kg/m<sup>3</sup>]とした時のストークス則による沈降速度)

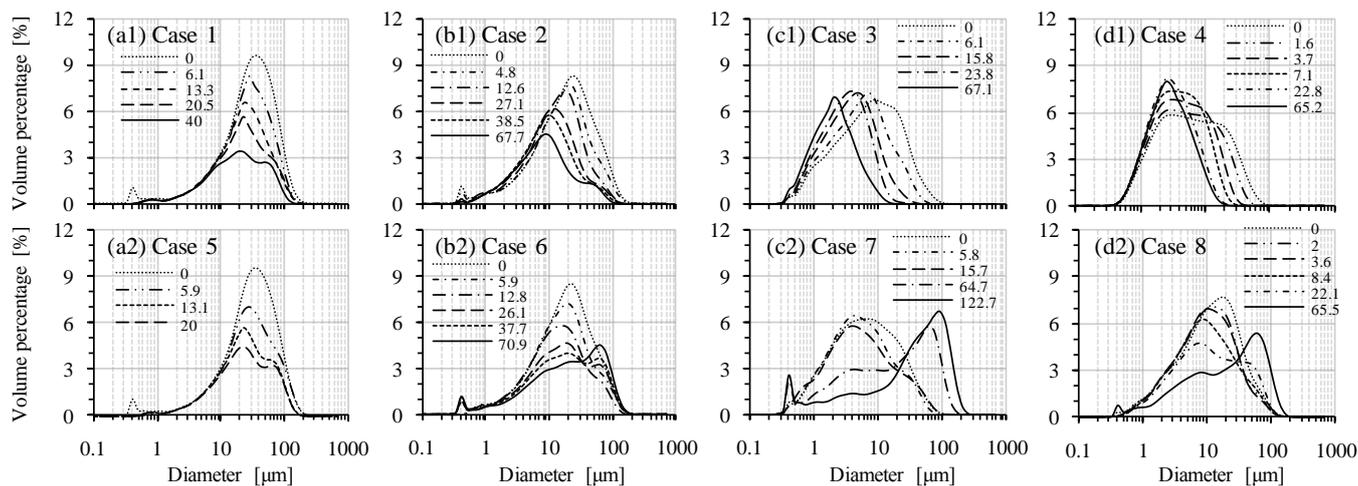


図-8 沈降に伴う粒度分布の経時変化

(a) IL=15.5%, (b) IL=10.7%, (c) 強熱後, (d) ベントナイト

上段：純水中の粒度分布変化，下段：塩水中の粒度分布変化（凡例は沈降実験開始からの経過時間[min]である）

以下の代表速度が速度分布のデータ数が少ない状態で決定されているため精度が低くなっており，その結果，フラクタル次元の精度も低く3を超す値となっている。

### (3) 有機物量と塩分がフロックに及ぼす影響

沈降に伴う粒度分布の変化から（図-8），純水中と塩水中で粒度分布の変化する形体が異なることがわかる。純水中では，粒径の大きい粒子の減少量が大きく，小さい粒子が残留する傾向にあるが，塩水中では逆に大きい粒子が残留することがわかる。また，この現象は有機物量の少ない試料ほど顕著となることが確認できる（図-8(a)~(d)の比較より）。これは，沈降過程において凝集が起きているためと考えられ，有機物量が少なくなると電気的に不安定な状態の粒子の割合が多く存在するようになることで，塩分による凝集の効果が大きくなったと考えられる。一方，有機物量の多い試料では，すでに安定したフロックが形成されており，塩分の効果は小さくなったと考えられる（図-8(a)）。さらに，大きい粒子が残留することから，塩分による凝集で生成されたフロックはゆるく大きいことがわかる。図-7 下段に塩水中の沈降速度を示す。上述したように，塩水中では沈降過程において凝集が起きていることが考えられる。これは，沈降速度推定手法の仮定（粒子同士の干渉（凝集・流れ）による影響は無い）を超えており，算出された沈降速度には凝集による影響が含まれている。塩水中の沈降速度（図-7 下段）と純水中の沈降速度（図-7 上段）を比較すると，塩水中では沈降速度の遅いフロックの割合が増加しており，純水中に比較して代表速度が減少する傾向にある。フ

ラクタル次元においても，600℃で加熱し有機物を除去した試料（Case 3 と Case 7 の比較）を除いて他のケースは，純水中に比較してフラクタル次元が減少することがわかる。このことから，塩水中では密度の小さい緩いフロックが多く存在するようになることがわかる。なお，Case 7 のフラクタル次元は，図-7(c2)に示すように70 μm以上の代表速度が一つ速度分布から決定されており，代表速度の精度が低くフラクタル次元の解析結果も精度が低くなっている。

## 5. 結論

有機物量の異なる試料を作成し，有機物量とフロックの構造の関係を検討した。速度分布とフラクタル次元から沈降速度の特性を検討した。

(1) 有機物量が減少するにつれてフラクタル次元は増加することがわかり，有機物量が少ないほど密な構造のフロックが存在することがわかった。

(2) 塩分による凝集の効果は有機物量が少ないほど顕著となり，塩水中で生成されるフロックの構造はゆるく大きなフロックであることがわかった。

### 参考文献

- 足立泰久，岩田進午：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，2003
- 西村尚哉，TOUCH NARONG，駒井克昭，日比野忠史：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.1，2009，pp1151-1155
- 日比野忠史，三戸勇吾，今川昌孝，駒井克昭，木村道夫：ヘドロ被覆設計のための海底有機泥挙動の把握，海洋開発論文集，第26巻，2010（投稿中）
- 今川昌孝，日比野忠史，首藤啓，西田芳弘：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，pp.1036-1040，2009