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

Modeling of Settling Velocity Considering Organic Property of Suspended Organic Matter

西村尚哉¹・TOUCH NARONG²・駒井克昭³・日比野忠史⁴

Hisaya NISHIMURA, Narong TOUCH, Katsuaki KOMAI and Tadashi HIBINO

It needs to estimate the accurate settling velocity of the suspended organic matter affected by the organic property in order to develop the pelagic-benthic coupled ecosystem model to evaluate coastal region where organic mud deposits in the bottom. In this study, laboratory experiment was performed to measure the settling velocity of suspended organic matter by particle distribution analyzing for organic matters (flocks). From the results, it was cleared that the effective density decreases with increasing of particle size. Comparing with this result and its organic property, it is understood that the settling velocity is affected by the structural property strongly. And the settling velocity model considering the organic properties was suggested.

1. はじめに

沿岸域に存在する有機懸濁物質は種々の有機物が土粒子に付着することによりフロックを形成している。さらに、有機物は沈降過程において分解が進むため、沈降速度の決定が非常に困難であることから、一定の沈降速度が与えられるのが一般的である。有機懸濁物質の沈降速度の見積もりにおいてはストークス則が用いられる場合が多い。この場合、沈降するフロックを球と仮定し、流体から受ける抵抗と密度差による駆動力（浮力と自重の差）が等しいと置くことで、フロックの沈降速度 V_f は、フロックの粒径 D_f を用いて(1)式で表される。

$$V_f = \frac{g}{18\mu}(\rho_f - \rho_w) \cdot D_f^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ_f : フロックの密度、 ρ_w : 流体の密度、 μ : 流体の粘性係数、 g : 重力加速度である。

沈降粒子を球として仮定したストークスの抵抗則から導かれる沈降速度は、沈降物の抵抗面積（粒径の2乗）に比例する。しかし、フロックは幾何学的構造（フラクタル構造）を有していることから、フロックの沈降速度の測定例は、そのほとんどが粒径の0.6～1.5乗に比例している。例えば、Dyer・Manning (1999) のElbe河口での測定結果ではフロックの粒径の1乗に比例している。粒径の0.6～1.5乗に比例する要因としてFennessy・Dyer (1996) は、フラクタル構造の違いによって流速が変化することを示している。有機物の分解に伴う性状やフロック形状の変化が沈降速度に及ぼす影響については、日比野ら (2008) が有機物と土粒子が付着した有機懸濁物

質の分解を考慮し、沈降中の粒子密度と粒径を時間の関数として定式化している。しかし、有機物の付着量や分解が、どのような幾何学形状の有機懸濁物質を形成し、沈降速度に影響を与えるかについては不明である。

本研究の目的は、フロック化した有機泥の沈降速度測定法を確立し、有機性状、フロック形状をパラメータとした沈降速度のモデル化を行うことである。ここでは、性状の異なる有機物の付着特性を表すパラメータとして、幾何学的構造を考慮することで沈降速度への有機物の付着する効果を組み入れている。

2. フロックの沈降速度とフラクタル構造

フロックを構成する粒子数 i とフロック径 D_f 、フロックを形成する個々の粒子の粒径 d_0 との関係はフラクタル次元 D を用いて、(2)式で記述できる。

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

フロックは種々の粒子が付着したものであり、個々の粒子が直接的に付着する形状($D=1$)から間隙なく球状に付着する形状($D=3$)までの付着形態が考えられる。有効密度（沈降に有効となるフロックの占める部分と周囲の流体との密度差） $\Delta\rho$ が、(3)式で表わされることから(1)式は(4)式として表わされる。

$$\Delta\rho = \rho_f - \rho_w = \frac{\rho_s - \rho_w}{d_0^{D-3}} \cdot D_f^{D-3} \dots\dots\dots (3)$$

$$V_f = \frac{g}{18\mu}(\rho_s - \rho_w) \cdot d_0^{3-D} \cdot D_f^{D-1} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ρ_s は構成する粒子の密度である。(1)式は全てのフロック密度が一定であれば、沈降速度は粒径 D_f の2乗に比例することを示しているが、小さな有機泥が相互に幾何学的に付着しているためにフロック密度がフラクタル次元 D に依存していること、沈降速度はフロック

1 正会員 修(工) 京都府庁建設交通部
2 学生会員 広島大学 大学院工学研究科
3 正会員 博(工) 広島大学助教大学院工学研究科
4 正会員 博(工) 広島大学准教授大学院工学研究科

図-1 SSと平均光強度の関係

図-2 Case2の粒度分布の時間の関係変化
(凡例は測定経過時間(min))

の有効密度に比例するため D_f の $D-1$ 乗に比例することを(3)式、(4)式は示している。本研究では、(4)式を用いることで、実験で得られた沈降速度からブロックの粒径と有効密度の特性を明らかにしている。解析では、有機性状から D を推定し、 D との関係から粒径と有効密度を推定している。

3. 粒度分布の時間変化からの沈降速度の推定

(1) 沈降粒子の粒度分布と残存量の測定

レーザー回折式粒度分布計(島津製作所社製: SALD-2000J)を用いて試料の粒度分布を連続的に測定することで、沈降により時々変化する有機懸濁物質の粒度分布を求めた。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(光強度)の平均値(平均光強度)を読み取った。実験では約10℃の蒸留水を用いている。測定時間の間隔は最小で30秒程度、測定時間は30～180分である。測定に用いた試料の概要は表-1に示されている。試料の採取は広島湾および太田川で行われた。Case.2～5はセジメントトラップによる捕捉泥、Case.6はプランクトンネットによって海面で採取したものである。

図-1に示すように、平均光強度とSSは線形関係にあり、測定領域内に残存する粒子量に変換することができる(最大で $\pm 0.02\text{mg/l}$ の誤差)。この関係を用いれば図-2に示すように沈降によって、初期値から時間的に減少する粒子量とその粒度分布を求めることができる。

図-3 Case2の粒径別の体積割合時間変化の(a)実験値と(b)沈降速度算出のための整理後の結果凡例は粒径(μm)を示す

図-4 沈降速度の推定手法

(2) 沈降速度の推定法

図-3にはCase2を例として粒径別の粒子体積の時間変化を示した。図では、22～42μmの範囲にある4つの粒径の体積の時間変化を示している。同じ体積を示す粒子群の体積変化が時間的に変化していることから、同じ粒子体積をもつ粒子群でも異なる沈降速度を有していることがわかる。同径粒子群(同じブロック体積を持つ沈降粒子)の体積の減少勾配が時間の経過とともに小さくなるのは、同径粒子群のうち沈降速度のより遅い粒子群が測定部に残存していくためである。

沈降速度を算出するために以下のような仮定をした。

- 懸濁物は測定領域内において均一な分布状態から沈降を開始する。
- 流れによる粒子同士の干渉(衝突, 粒子の分割, 結合)は無い。
- 最後の測定時に残留している同径粒子群の沈降速度は測定された最も遅い沈降速度と等しい。

表-1 実験に用いた試料の概要と解析結果

Case.No	試料概要					解析結果		
	Category	採取場所	採取位置	IL (%)	C/N ratio	D_p (μm)	$\Delta\rho$ (kg/m^3)	D
Case.1	ペントナイト	—	—	4.9	23.7	28	195	2.51
Case.2	沈降物	放水路河口	河床	9.1	15.5	34	31.8	1.64
Case.3	沈降物	天満川中流	河床	12.1	13.9	34	36.1	1.58
Case.4	沈降物	海田湾	中層	15.3	11.8	42	44.5	1.49
Case.5	沈降物	海田湾	海底	15.8	11.5	42	34.8	1.33
Case.6	浮遊懸濁物	海田湾	海面	80	7.6	42	13.1	1

沈降物：セディメントトラップ捕捉懸濁物，浮遊懸濁物：海面表層から採取した懸濁物

図-5 粒径に対する (a) 有効密度および (b) 沈降速度の実験測定結果
(各粒径の体積頻度を○の大きさに表現，中央値；●，モデル (8)，(9) 式による再現値；実線)

以上の仮定に従えば，同径粒子群の残存量は沈降により必ず低下するため，減少勾配は小さくなる（沈降速度の遅い粒子が残存する）。これに反するデータを削除すると，図-3 (a) は図-3 (b) となる。図-3 (b) を用いた同径粒子群の沈降速度の算出方法を図-4 に示した。図は異なる3つの沈降速度を持つ同径粒子群 ($i=1,2,3$) が存在する場合を説明している。この場合，測定領域 y に沈降速度の速いものから順に dis_i の体積割合で存在し，その沈降速度を w_i ，それぞれの測定時間の間隔を dt_i とすると， vol_i ， dis_i ， dt_i は図-4 に対応する値となる。図中の dv_i は沈降速度 w_i の粒子群が， dt_i 間に測定領域外に流出した体積，同じ流速を持つ同径粒子群の初期体積に対する流出体積

比 dv_i/dis_i は w_i であるので領域 y に対する沈降高さは $(dv_i/dis_i) y$ となる。これらの値を用いて沈降速度は (5) 式によって表される。この時， $vol_i=dis_1+dis_2+dis_3$ である。

$$w_i = \frac{dv_i}{dis_i} \cdot y / dt_i \quad \dots\dots\dots (5)$$

図-5 に (a) 粒径と推定された沈降速度との関係，(b) 粒径と (3) 式から算出された有効密度との関係を示した。円の大きさは各粒径の体積頻度，●は各々沈降流速と有効密度の中央値を示している。実線は後に示される解析解である。

図-6 粒径とフロック密度の関係
(×は選定した粒径のプロット)

図-7 有機性状と物理特性の関係
(a)IL, (b)C/N比とフラクタル次元および平均有効密度の関係)

4. 有機懸濁物質の物理特性

(1) 有効密度の減少開始粒径

図-6には試料別の中央有効密度 (図-5 (b) の●) が示されている。粒径が20～40μmより大きくなると、フロック密度は減少し始めるが、その粒径は試料ごとに異なっている。これは西村ら (2008) が示した粒子径が30μm以下の粒子への有機物の付着量が30μm以上の粒子よりも少ないことと同様の結果を示している。ここでは、この粒径を有効密度の減少開始粒径 (D_{fb}) と決め、 D_{fb} 以下の粒径を小粒径、 D_{fb} 以上の粒径を大粒径とし、それらの粒径範囲の粒子をそれぞれ小粒径粒子、大粒径粒子として扱う。小粒径粒子の有効密度には多少バラつきがあるが、増加・減少傾向は顕著に現れていない。有機物を含まないベントナイトの有効密度は1600kg/m³であり、有機物が主に有機物のみで構成されていれば500 kg/m³程度の有効密度となる (西村ら, 2008)。図-5 (b) に示す実験値が、それらよりも小さい値を示すのはフラクタル次元が3よりも小さいためである。

フロック径に対して有効密度が一定となるのはフラクタル次元が3のときである ((3) 式)。小粒径粒子のフロックの有効密度が一定となっているのは、粒径が小さくなるにつれ、密度の小さい繊維状で保水能力の高い有機物の付着率は高くなるが、一方で、小粒径粒子は粒径が小さくなる程、形が単純化 (フラクタル次元は3に近づく) するためと考えられる。これに対して、大粒径粒子の有効密度は粒径 D_f の増大にともなって直線的に減少しており、(3) 式からフラクタル次元は3未満で一定の値をとる必要がある。フラクタル次元が一定となるのはフ

図-8 C/N比-6.625とKの関係

図-9 ILとDの関係

図-10 小粒径粒子のDと $\bar{\rho}$, D_{fb} の関係

図-11 推定値と実験値の (a) 有効密度, (b) 沈降速度の比較
(実験値は中央有効密度・中央沈降速度から求められており、試料、直線とも両図で同一の凡例を用いている)

ロックの粒子構造の発達に限界があり、有機物の特性に応じた構造が形成されるためと考えられる。

有機懸濁物質の物理性状である D_{fb} 、小粒径の中央有効密度の平均値 ($\bar{\rho}$: 平均有効密度) および、(3) 式の関係から大粒径のDを算出し、表-1にまとめた。

(2) 物理特性と有機性状の関係

図-7には (a) IL, (b) C/N比に対するフラクタル次元および平均有効密度の関係を示している。フラクタル次元は、ILが0に近づくとき3、ILが増えると1に漸近すること、C/N比と線形の関係があることがわかる。また、平均有効密度もIL, C/N比とフラクタル次元の関係と同様の減少・増大傾向を示している。フラクタル次元が有機性状に強い相関関係があることは、前節4. (1) で考察したフロックの粒子構造の発達が有機物の量と性状に依存していることを示しており、有機物量およびその分解度が粒子同士の付着を促進または抑制することで、構成されるフロックのフラクタル次元と有効密度の変動 (例えば減少開始粒径) を決定付けていると考えられる。

実験に用いた全サンプルのILとC/N比には負の相関があり、C/N比からだけでも D が線形に求まるが、必ずしも海域中の懸濁物のILとC/N比の実験に用いたサンプル同様の相関があるわけではない。フラクタル次元の有機物性状への依存傾向について、次章で考察する。

5. 有機性状を考慮した有機懸濁物質の沈降モデル

(1) モデルの考え方

- 有機懸濁物質であるフロックの沈降速度と有効密度は、有機物の付着量とその性状（分解度）によって変動する。
- フロックの有効密度は、小粒径では一定であり、大粒径の場合は粒径の増大にともなって減少する。
- 粒径の増大に伴う有効密度の減少は、フラクタル次元によって表される。
- フラクタル次元は、有機物の付着が無い（IL=0）とき3であり、付着量が多くなるほど小さくなる。また、有機物の分解度に依存する。
- 同径粒子に対する沈降速度の分布は有効密度によって決まる。

(2) フラクタル次元の推定

フラクタル次元 D を有機物の付着量と分解度の関数として(6)式で表す。

$$D = 3 - 2 \left(\frac{IL}{IL + K} \right) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 K は有機物の分解指数である。(6)式はILが0のとき D は3になり、新鮮な有機物が多くなるほど D が1に漸近するという現象を表現している。一次生産され枯死した有機物の分解度をC/N比-6.625（6.625はRedfield比）として表わす。C/N比-6.625と表-1の結果、(6)式から求められる K には線形の関係がある（図-8）ことがわかる。この関係から K を以下の(7)式で表す。

$$K = 0.797 \{ (C/N)_{ratio} - 6.625 \} \dots\dots\dots (7)$$

(6)式に(7)式を代入すれば、ILとC/N比から D が求まる。有機性状から算出される D 、ILおよびC/N比の関係を図-9に示す。図-9から、ILが大きくなるにつれ D が1に漸近し、その漸近の仕方はC/N比にも依存していることがわかる。ILが一定の場合、C/N比が大きくなると D も大きくなることから、分解の進行により保水能力の低い難分解性の有機物が残ること、または、構造的には密な状態になることが考えられる。

(3) 有効密度の減少開始粒径と平均有効密度の推定

図-10に表-1に示した小粒径（ $D_f < D_{fb}$ ）の D と $\overline{\Delta\rho}$ 、 D_{fb} の関係を示した。小粒径の $\overline{\Delta\rho}$ は D との関係（図-10（a））を指数近似することで(8)式として得られる。 D_{fb} はILとC/N比の関係から、主観的に決めたものであるが、IL値が大きくなると D_{fb} は小さくなり、C/N比が大きくなる

と D_{fb} は大きくなる特性から決めることができる。 D と D_{fb} は図-10（b）のように負の相関があり、これを指数近似で(9)式のように定式化した。

$$\overline{\Delta\rho} = 2.83 \cdot e^{1.66D} \dots\dots\dots (8)$$

$$D_{fb} = 59.1 \cdot e^{-0.30D} \dots\dots\dots (9)$$

沈降速度は、小粒径（ D_f 以下）では、(4)式に(8)式の有効密度を代入することで得られ、大粒径（ D_{fb} 以上）では、まず(3)式に(6)、(8)、(9)式から算出される D 、 $\overline{\Delta\rho}$ 、 D_{fb} を代入することで、右辺の係数 $(\rho_s - \rho_w)/d_0^{D-3}$ を算出し、これを(3)式に返して粒径に対する有効密度分布を算出する。得られた有効密度を(4)式に代入することで沈降速度が算出できる。図-5に本モデルから算出される粒径に対する沈降速度の値を実線で示している。図-11に実験値（中央値）と本モデルから算出される（a）有効密度、（b）沈降速度の比較を示した。実験値の中央有効密度・中央沈降速度に対して1/2~2倍の範囲で再現できた。

6. おわりに

- 沈降によって生じる粒度変化から、有機懸濁物質（フロック）のもつ沈降速度の分布を推定することができた。
- フロックの密度は小粒径では一定値であるが、有機物の含有量と分解度に依存した粒径（ D_{fb} ）から、粒径の増加にともないフラクタル次元によって決まる勾配でフロック密度は減少する。
- フラクタル次元をILとC/N比を用いて定式化した。この関係式から、分解度への依存も確認でき、分解度の上昇にともなってフラクタル次元が大きくなることがわかった。
- 小粒径フロックの平均有効密度と有効密度の減少開始粒径は有機性状に依存しており、フラクタル次元によって定式化することができた。
- 有効密度分布を表す実験式が提案され、実験値の1/2~2倍の範囲で中央沈降速度を再現できた。

参 考 文 献

- 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. 961-965
- 日比野忠史・永尾謙太郎・松永康司（2008）：有機泥の分解を考慮した沈降と堆積過程のモデル化，土木学会論文集B，第64巻，pp. 202-213
- K.R. Dyer, and A.J. Manning (1999) Observation of the size, settling velocity and effective density of flocs, and their fractal dimensions, *Journal of Sea Research*, Vol.41, 87-95
- M.J. Fennessy, and K.R. Dyer (1996) Floc Population Characteristics Measured with INSSEV during the Elbe Estuary Intercalibration Experiment, *Journal of Sea Research*, Vol.36, 55-62