

静水中における微粒子の沈降特性と残留濃度算定手法に関する研究(II)

九州大学工学部 学生員 古塚 靖浩

九州大学工学部 正 員 古賀 憲一

九州大学工学部 正 員 栗谷 陽一

九州大学工学部 正 員 楠田 哲也

1. まえがき 著者らは、水域における微粒子の沈降現象の解明、微粒子の濃度予測を最終目的として種々の実験的検討や凝集沈降基礎式に対する理論的検討を加えてきた。本研究は、前報に引き続き、粒子の粒度分布形に相似性を仮定することによって、残留濁質量の計算式を導出し、静止海水中における微粒子の沈降特性について実験的検討を加え、計算式の妥当性を検討したものである。

2. 残留濃度の算定式 静水中における粒子の凝集沈降に関する基礎式は次式で表される。

$$\frac{\partial r(\omega)}{\partial t} + \frac{\partial (r(\omega) \cdot v(\omega))}{\partial z} = \frac{1}{2} \omega \int_0^\infty F(\tilde{\omega}, \omega, \tilde{\omega}) \frac{r(\tilde{\omega}) r(\omega - \tilde{\omega})}{\tilde{\omega}(\omega - \tilde{\omega})} d\tilde{\omega} - r(\omega) \int_0^\infty F(\omega, \tilde{\omega}) \frac{r(\tilde{\omega})}{\tilde{\omega}} d\tilde{\omega} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 $r(\omega, z, t)$: 時間 t , 場所 z における質量 ω なる粒子の質量濃度 (以後 $r(\omega)$ と略記する), $v(\omega)$: 沈降速度, $F(\omega, \tilde{\omega})$: 衝突頻度を示す関数, である。

粒子の分布形に相似性を仮定し、次のようにおく。

$$r(\omega) = \frac{\psi(z, t) \cdot \varphi(\xi)}{\bar{\omega}(z, t)} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 ξ : 無次元化粒子質量で $\xi = \omega / \bar{\omega}(z, t)$, $\bar{\omega}$: 任意時間, 任意水深における代表粒子の質量, ψ : 任意時間, 任意水深における粒子の質量濃度, φ : 粒子の分布関数, である。

粒子の沈降速度 v と粒径 d と質量 ω との関係は、一般に次式で表される事が実験的に確かめられている。

$$v = v_0' (d/d_0)^m \quad \text{又は} \quad v = v_0 (\omega/\omega_0)^P \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 v_0' , v_0 は各々 $d=d_0$, $\omega=\omega_0$ なる粒子の沈降速度, m , P , は指数であるが、 $P=m/1+m$ なる関係がある。

粒子の衝突関数 F については衝突現象が粒子の沈降速度差による場合は次式で与えられる。

$$F = d_0 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot k_1 \frac{v_0}{\omega_0^{1+m}} (\omega_1^{1+m} + \omega_2^{1+m})^2 \cdot \left| \omega_1^{1+m} - \omega_2^{1+m} \right| \dots\dots(4)$$

$$= k_2 \bar{\omega}^{\frac{2(1+m)}{1+m}} f(\xi_1, \xi_2) \quad \dots\dots(5)$$

$$\text{ただし、} k_1 = \left(\frac{2 \cdot d_0^m}{3 \pi \mu v_0} \cdot \frac{\rho_c - \rho_w}{\rho_c} \right)^{\frac{1}{1+m}},$$

g : 重力の加速度, μ : 流体の粘性係数, ρ_w : 流体の密度, ρ_c : 粒子を構成している固形分の密度,

$$f(\xi_1, \xi_2) = (\xi_1^{\frac{1}{1+m}} + \xi_2^{\frac{1}{1+m}})^2 \cdot \left| \xi_1^{\frac{1}{1+m}} - \xi_2^{\frac{1}{1+m}} \right|, \text{である。}$$

ここで、(2), (5)式を用いて(1)式を簡略化すると次式を得る。

$$\frac{\partial r(\omega)}{\partial t} + v(\omega) \frac{\partial r(\omega)}{\partial z} = \bar{\omega}^{-1+m} \psi^2 g(\xi) \quad \dots\dots(6)$$

$$\text{ただし、} g(\xi) = \frac{k_2}{2} \xi \int_0^\infty \frac{f(\xi, \xi - \xi)}{\xi(\xi - \xi)} \varphi(\xi) \varphi(\xi - \xi) d\xi$$

$$- k_2 \varphi(\xi) \int_0^\infty \frac{f(\xi, \xi) \varphi(\xi)}{\xi} d\xi$$

(6)式を ω について0から ∞ まで積分し、また、(6)式に $v(\omega)$ を乗じて同様に積分すれば、

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\partial (\psi)}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots(7)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + K_1 \frac{\partial (\psi^2)}{\partial z} = K_2 \psi^{1+m} \psi^{1-\frac{1}{m}} \quad \dots\dots(8)$$

$$\text{が得られる。ただし、} \psi(z, t) = \int_0^\infty r(\omega, z, t) d\omega$$

$$\psi(z, t) = \int_0^\infty v(\omega) r(\omega, z, t) d\omega \quad \dots\dots(9)$$

$$K_1 = \frac{\int_0^\infty \varphi(\xi) \xi^{2P} d\xi}{(\int_0^\infty \varphi(\xi) \xi^P d\xi)^2} (\geq 1) \quad \dots\dots(10)$$

$$K_2 = \left(\frac{\omega_0}{v_0} \right)^{1+m} \left(\int_0^\infty g(\xi) \xi^P d\xi \right)^{-\frac{1}{m}} \quad \dots\dots(11)$$

質量平均沈降速度 U_c は、(9)式より次式で得られる。

$$U_c(z, t) = \frac{\psi(z, t)}{\psi(z, t)} \quad \dots\dots(12)$$

(10), (11)式で示される K_1 , K_2 については各々、粒度分布形状、粒子の衝突付着総合効率を巨視的に示すパラメータである。

K_1 , K_2 , 初期条件, 境界条件を与えれば形式的には、(7), (8), (10), (11)式により任意時間における濃度分布が得られ、残留濁質量 W_r は、 H を水深として

$$W_r = \int_0^H \psi(z, t) dz \quad \dots\dots(13)$$

で求められる。

3. 実験装置と方法 実験に用いた沈降筒は、図-1に示す高さ1mの亚克力製の角筒(10cm×10cm)である。沈降筒は回転軸を中心として鉛直状態から水平状態まで回転可能である。沈降筒は攪拌槽も兼ねている。微粒子の沈降重量を得るための沈降皿を最下部に設け、

沈降皿と直視天秤を連結する白金線は、攪拌軸のパイプ中を通っている。海水(比重1.025)は、福岡県宗像郡津屋崎沿岸(沖合400mの地点)から採水した。海水から懸濁質を除去するために、粒状活性炭および $0.45\mu\text{m}$ のグラスフィルターでろ過した。濁質としては市販カオリンASP-600(比重2.66, 平均径 $0.6\mu\text{m}$)を海水に一週間以上浸したものを

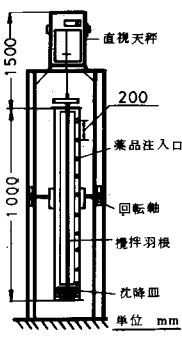


図-1. 実験装置

を用いた。実験方法としては、まず鉛直に保った沈降筒に海水を満たし一昼夜放置し、予め室温と液温の温度差が生じないようにしておく。つぎに、筒を水平にし、所定の攪拌強度($G=100\text{sec}^{-1}$)で攪拌を行いつつ注入口より濁質を注入する。攪拌終了後、筒を鉛直にし(この時を沈降開始時刻とする。)以後、所定の時間間隔で側壁に設けた採水口より採水を行ない、残留濁度分布の測定を行なう。以上の操作を初濃度を変えて行う。

4. 結果と考察 (7), (8)式を解析的に解くのは困難であるため、数値積分により解を得た。数値解の結果を整理するため、次の無次元化を行った。

$$\bar{z} = z/z_0, \quad \bar{\psi} = \psi/\psi_0, \quad \bar{\eta} = \eta/H,$$

$$\bar{t} = u_{c0} \cdot t/H = \bar{z}_0/\psi_0 \cdot \bar{t}/H \quad (14)$$

ここに $\bar{z}_0$, ψ_0 , u_{c0} は各々 $t=0$ での $\bar{z}$, ψ , u_c の値, H は総水深である。無次元時間 $\bar{t}$ の算定には実測値の u_{c0} を用いている。

前報同様に、正規化残留濁度質量の時間変化についての計算値と実測値との合致性は、成長期、濃度減少期ともに良好である。図-3、図-4には濃度分布の時間変化を示している。図-3は初濃度が高い場合であり、図-4は初濃度が低い場合である。これらの図から、計算結果と実測値との残留濃度分布の合致性は双方とも良好のようである。すなわち、初濃度の高い場合、下層部において粒子の捕捉(成長)が実験で認められているが、数値計算結果もその傾向を良く表している。一方、初濃度が低い場合には、通常の沈降現象に近いような濃度分布となっているが、計算結果もその傾向を良く表している。詳細にみれば、初濃度の高い場合、若干、数値計算の分布に濃度の反転層が認められる。 $(\bar{t}=0.163)$ 、また、上層部付近の濃度は、実測

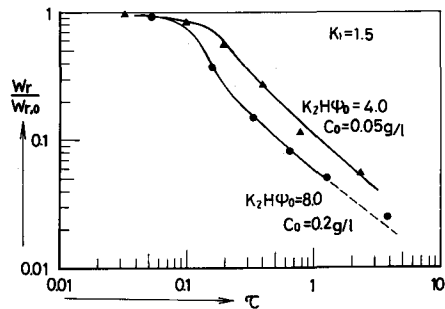


図-2. 正規化残留濁質量の時間変化

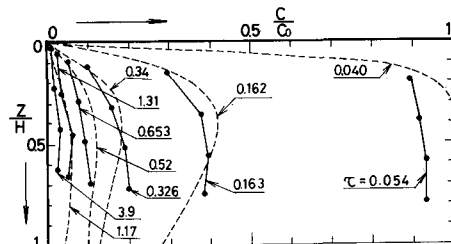


図-3. 残留濃度分布の時間変化 ($C_0 = 0.2 \text{ g/l}$)

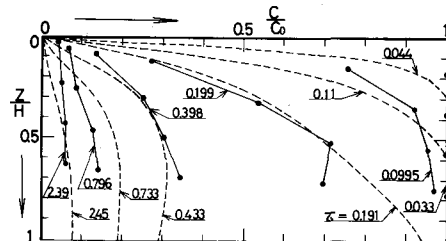


図-4. 残留濃度分布の時間変化 ($C_0 = 0.05 \text{ g/l}$)

の方が計算値より若干高くなる傾向が認められる。このことは付着効率の悪い微粒子が表層部に残されているためとも考えられる。いずれにしても本研究で行った範囲内では、 K_1, K_2 を定数としても残留濃度の算定は可能と考えられる。図-2に示す $K_2H_4O_6$ の値から K_2 を求めると $C_0 = 0.05 \text{ g/l}$ の K_2 の値は $C_0 = 0.2 \text{ g/l}$ の K_2 の値の約2倍となる。 K_2 に及ぼす初濃度の影響については不明な点もあるが、このことと、前述の表層部における微細粒子の残留特性、並びに、それを補正するための手法など今後の検討課題としたい。さらに、実際の海域の微粒子について濃度分布の計算手法を検討することも今後の重要課題であろう。

＜参考文献＞

- 1) 古賀 栗谷 楠田 島岡: 静水中における微粒子の沈降特性と残留濁度算定手法に関する研究, 衛生工学第19回 衛生工学研究討論会, P43~P48, 1983年。