

## II-431 周期的掃流場におけるSSと底泥の挙動に関するシミュレーション

岩手大学工学部 正員 海田輝之 大村達夫 大沼正郎  
九州大学工学部 正員 楠田哲也

1. はじめに 本研究は周期的に底面剪断応力を変化させた室内実験でのSSと底泥の挙動について、一定の剪断応力の下での巻き上げあるいは沈降単独の実験とシミュレーションの結果を用いて検討したものである。

2. 実験結果 試料として筑後川河口で採取した底泥（シルト74%、粘土25%、平均粒径 $7\mu\text{m}$ 、比重2.52）を用い、円形回転水路で底面剪断応力 $\tau$ を $\tau[\text{N/m}^2]=0.4\cos^2(\pi t/6 \times 60 \times 60)$ 、但し、 $t$ は[s]に従って変動させた場合のSSの経時変化を図-1に示す。また、1周期内でのSSの挙動は3つの領域に分けられ、①巻き上げ、②分散した状態での大きな粒子からの沈降、③凝集沈降、により主に支配されていることが分かっている<sup>1)</sup>。以下では1周期を3つに分け、 $\tau \leq 0.025 \text{ N/m}^2$ 以下では③、 $\tau$ が最表層の $\tau_{ce}$ （巻き上げの限界剪断応力）より大きいと①、その他では②が生じるとした。

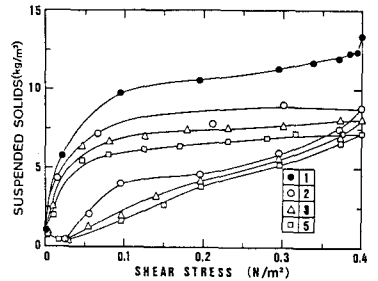


図-1 SSの経時変化(実験値)

### 3. シミュレーションの手法

①巻き上げ領域<sup>2)</sup> 種々の一定剪断応力の下での巻き上げ実験での初期の巻き上げ速度のデータから、巻き上げのフラックス $F_e$ を

$$F_e[\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}] = 0.00917(\tau/\tau_{ce} - 1)^{1.9} \quad (1) \text{とした。但し、}\tau_{ce} \text{は}$$

底泥最表層の固体分率 $(1 - \varepsilon)$ の関数として、

$$\tau_{ce}[\text{N/m}^2] = 6.5(1 - \varepsilon)^{1.6} \quad (2) \text{とした。}$$

②分散した状態での沈降領域<sup>3)</sup> 主流部ではSSの鉛直方向の分布がないという実験結果、粘性底層内で粒径の2乗に比例する揚力が働くという仮定のもとで、各粒径ごとの物質保存式は

$$\frac{\partial C(D, t)}{\partial t} + \frac{\beta}{18\mu H} (\rho_p - \rho_f) g (D^2 - D_c D) C(D, t) = 0 \quad (3)$$

となる。ここで、 $C(D, t) = \frac{1}{H} \int_0^H C(D, t) dh$

$\mu$ : 粘性係数、 $H$ : 水深、 $D$ : 粒径、 $\rho_p$ 、 $\rho_f$ : 粒子及び水の密度、

$D_c$ : ある $\tau$ のもとで沈降し得ない最大の粒径、であり、実験及びシミュレーションの結果から、 $D_c = 1.34 \times 10^{-4} \tau$

である。(3)式を積分し、 $D_c$ の意味を考慮すると

$$\begin{aligned} \overline{C(D, t)} &= C(D, 0) \exp\left[-\frac{\beta}{18\mu H} (\rho_p - \rho_f) g \int_{t_c}^t (D^2 - D_c D) dt\right]_{D > D_c} \\ \overline{C(D, t)} &= \text{const.} \quad D \leq D_c \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $t_c$ は粒径 $D$ の粒子が $\tau$ の低下に伴い $D_c$ になる時刻であり、 $t$ は $t_c$ からの経過時間である。全体としての濃度 $C$ は、初期の粒度分布が対数正規分布に従う( $D_{50} = 7\mu\text{m}$ 、 $\log \sigma = 0.575$ )ので、

$$\overline{C}(t) = \int_0^{D_c} C(D, 0) dD + \frac{0.4343}{\sqrt{2} \log \sigma} \int_{D_c}^{\infty} \left[ \frac{1}{D} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{\log(D/D_m)}{\log \sigma}\right)^2\right\} - \frac{\beta}{18\mu H} (\rho_p - \rho_f) g \int_{t_c}^t (D^2 - D_c D) dt \right] dD \quad (7)$$

また、 $\beta$ の値はシミュレーションの結果から0.7とした。

③凝集沈降領域 現在のところ凝集沈降を表す簡便な式がないので、実験結果から沈降フラックス $F_d$ を  $F_d[\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}] = 420 C^2$  (8)とした。

次に、底泥の流動を表す基礎式として<sup>2)</sup>

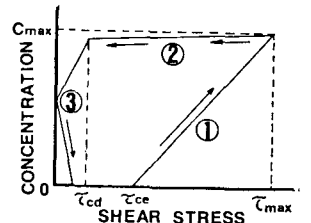


図-2 1周期内でのSSの挙動

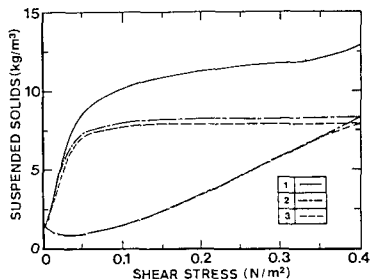


図-3 SSの経時変化(計算値)

$$\tau = -(\tau_y + \gamma P_s) - \mu_f \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{for } |\tau| \geq \tau_y + \gamma P_s$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \text{for } |\tau| < \tau_y + \gamma P_s \quad (9)$$

$$\tau_y = \alpha \int_0^t \frac{\partial u}{\partial x} dt + \tau_{y0} \quad (10) \quad \mu_f = 10 \tau_y \quad (11)$$

(9)式は底泥がビンガム流体としての挙動を示し、さらに有効応力 $P_s$ に比例する力が剪断に抗する事を示す。(10)式は底泥の降伏値 $\tau_y$ が初期値 $\tau_{y0}$ から底泥の変形速度の時間積分値に比例して増加することを示す。また、底泥は圧密を受けるとした。初期状態として最大剪断応力の時に全ての粒子が浮遊しているとした。計算は差分法で $\Delta t=30s$ 、 $\Delta w=0.1kg/m^2$ とし、SSおよび底泥中の粒径分布を考慮した。

**4. シミュレーションの結果及び考察** 図-3にSSについての計算結果を示す。計算では実験値よりも周期回数の小さな時に定常状態に入る傾向があるが、第3周期までは現象を良く示しており領域の分割と各現象の表示式の妥当性を示している。図-4は第1周期の $t=0$ 分から第2周期の最大剪断応力時までの3.で示した②→③→①領域のSS中の粒度の計算結果である。図-5は巻き上げが始まる直前の底泥 $0.1kg/m^2$ ごとの粒度の計算結果を示し、最下層を1としている。この分布は周期を繰り返してもほとんど変化しなかった。なお図-5中の破線は $t=0$ 分でのSS中の粒度であり、底泥各層の粒度とは全く異なっている。図-6は実験終了時の底泥の粒度の鉛直分布である。これらの結果から、まず、分散した状態での沈降(0~140分)では $\tau$ の低下に伴い大きな粒子から $D_c$ に達して、沈降を開始するため、SS中の大粒子の存在量が低下していくが、 $10\mu m$ 以下の小粒子の存在量は変化していない。

そのため底泥の粒度の計算結果では図-5の1~9の下層部では比較的大きな粒子のみが堆積している。実験では若干この領域でも凝集沈降が起こり下層部でも小粒子が堆積している。この点についてはさらに検討する必要がある。凝集沈降(160~240分)では $F_d$ を粒度にかかわらずSS濃度の2割に比例するとしているため、表層近くの10~18の底泥の粒度は変化していない。これは実験結果でも同様である。次に、巻き上げ時(240~360分)では、表層から徐々に巻き上げられるとしているため、表層部の小さな粒子のみが巻き上げられ、SS中の粒度はほとんど変化していない。これ以降小さな粒子のみが巻き上げ、沈降を繰り返し図-5中の図-5の1~5の底泥は水理条件、例えば最大剪断応力が大きくなるというような変動がなければSSの増減には関与しなくなる。図-7は第5周期の巻き上げ直前の底泥の鉛直方向の固体分率を、図-8は実験終了時のものを表わしている。計算結果は概ね実験値を表しているといえる。

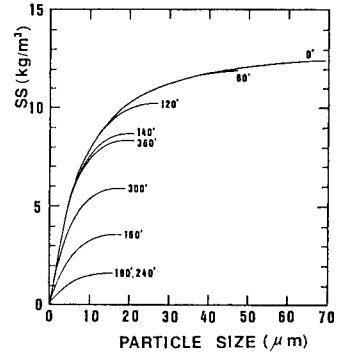


図-4 SS中の粒度の変化 (計算値)

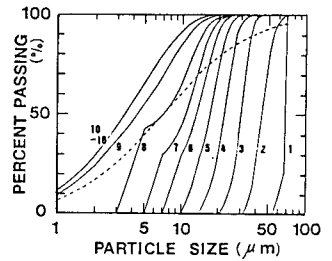


図-5 底泥の粒度の変化 (計算値)

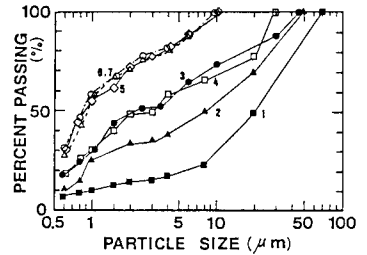


図-6 底泥の粒度の変化 (実験値)

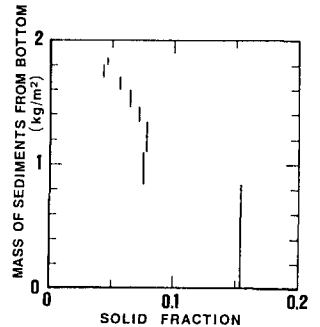
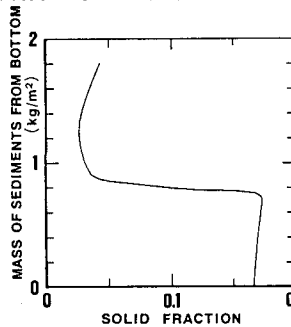


図-7 底泥の固体分率(計算値) 図-8 底泥の固体分率(実験値)

<参考文献>1) T.Umita et al, The behaviour of suspended sediments and muds in an estuary. Wat. Sci. and Tech., Vol.17, pp915-927(1984) 2) T.Umita et al, A model of soft cohesive sediments. 3rd Int. Sympto. on River Sedimentation, pp1658-1667(1986) 3) T.Kusuda et al, Depositional process of fine sediments. Wat. Sci. and Tech., Vol.14, pp175-184(1982)