

# 振動流下における高濃度浮泥層の流動特性と その保持機構に関する研究

山西博幸\*・楠田哲也\*\*

## 1. はじめに

柔らかい底泥が広く堆積した河口・沿岸域では、波や流れにより底泥から微細粒子が上層水中へ巻き上げられ静穏域などで底面に非圧密の状態では沈積する場合や、あるいは上層水中まで巻き上げられずに底泥面上を流動する場合に高濃度浮泥層が形成される。この浮泥は外力の周期的な変動にともない、その層厚や層内濃度を変化させつつ水平輸送される。その水平輸送速度は小さくても物質輸送量としてはかなりの大きさとなることが知られている。したがって、この高濃度浮泥層が高濃度の状態を維持しながら定常的に流動する機構の解明は、微細な粒子の輸送量を定量化する際に極めて重要となる。また、汚濁物質が微細粒子群に吸着され水域内を移動することも合わせて考慮すれば、シルテーション問題は物理学的にも水質学的にも重要な問題である。本研究ではこのような観点から、振動流下で形成される高濃度浮泥層に関する実験を行い、それらの結果に基づき理論的考察を加え、沈積後底泥化せず浮泥として存在しうる機構を解明しようとするものである。

## 2. 高濃度浮泥層内の流動モデル

### (1) 基礎式

振動流下で形成される高濃度浮泥層内の流動機構を把握するため、層内流動のモデル化を行った。上層水層と高濃度浮泥層の二層構造として、本モデルの座標系を図-1のように定めた。基礎式を導くに当たってまず必要となるのは高濃度浮泥層内の流動を定量的に捉えるための構成方程式である。一般に底泥は、ビンガム流体、擬塑性流体あるいは粘弾性塑性流体といった非ニュートン流体として表現されることが多い。しかしながらこれら非線形性の強い構成方程式を用いて流れ場を解析することは實際上難しいので、工学的な立場での流動モデルの構築を想定すると、より簡易な構成則が望まれる。したがって、ここでは高濃度浮泥をニュートン流体として扱うものとする。このモデルから求まる流体運動と実測

結果との比較を行い、本モデルの妥当性について検討する。

まず、本モデルにおける仮定を以下に示す。

- a) 各層とも水平方向にのみ移動する。
- b) 上層水の流速  $U$  は時間のみの関数である。
- c) 運動方程式中の移流項は無視しうる。
- d) 鉛直方向で圧力振幅は全て一様とする。
- e) 各層内での見かけ動粘性係数と見かけ密度は一定である。

上述の仮定及び従来の研究(例えば、中野ら、1987; 山西ら、1992)をもとに上層水層と高濃度浮泥層内での運動方程式をたてるとそれぞれ次のようになる。

上層水層

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p}{\partial x} \dots\dots\dots (1) \\ \frac{\partial u_1}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2} \dots\dots\dots (2) \end{cases}$$

高濃度浮泥層

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $U$ : 無限上方での流速(時間のみの関数)、 $p$ : 圧力、 $u$ : 水平流速、 $\rho$ : 見かけ密度、 $\nu$ : 見かけ動粘性係数、 $x$  と  $z$  はそれぞれ水平・鉛直方向の座標であり、 $x$  軸は高濃度界面を原点とする。なお、添字 1, 2 はそれぞれ上層水、高濃度浮泥層の各層を意味する。

(1)~(3)式を解析的に解くために次のように複素数表示の解を仮定する。

$$U = -i\tilde{U}e^{i\omega t} \dots\dots\dots (4)$$

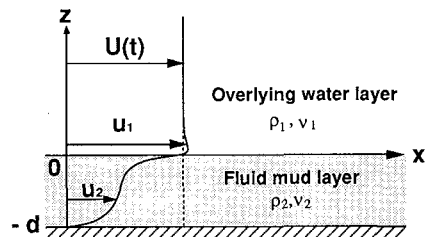


図-1 浮泥流動の模式図

\* 正会員 工修 九州大学助手 工学部建設都市工学科  
 \*\* 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科

$$\begin{aligned} \hat{u} &= -i\hat{u}e^{i\omega t} \dots\dots\dots (5) \\ u_2 &= -i\hat{u}_2e^{i\omega t} \dots\dots\dots (6) \\ \hat{U} &= a\omega \dots\dots\dots (7) \\ \partial p/\partial x &= -\hat{p}_*e^{i\omega t} \dots\dots\dots (8) \\ \hat{p}_* &= \rho_1 a \omega^2 \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ここで、 $\hat{u}$  :  $U$  に対する  $u_1$  の相対速度 ( $=u_1-U$ ),  $a$  : 振幅,  $\omega$  : 角振動数 ( $=2\pi/T$ ,  $T$  : 周期),  $t$  : 時間,  $i$  は虚数単位で  $i^2=-1$  である。

(2) 境界条件

基礎式の解を求めるための境界条件を次に示す。

$$\begin{aligned} z \rightarrow \infty \text{ では,} \\ u_1 &= U \dots\dots\dots (10) \\ z=0 \text{ (界面) では流速と応力の連続より,} \\ u_1 &= u_2 \dots\dots\dots (11) \\ -\rho_1 \nu_1 (\partial u_1 / \partial z) &= -\rho_2 \nu_2 (\partial u_2 / \partial z) \dots\dots\dots (12) \\ z=-d \text{ (流動底面) では non-slip 条件により,} \\ u_2 &= 0 \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

(3) 解析解

(1)~(3) 式を (10)~(13) 式の境界条件のもとでの解は次式となる。

$$\begin{cases} u_1 = -i \left[ (1 - e^{-\lambda_1 z}) \hat{U} + e^{-\lambda_1 z} \hat{u}_i \right] e^{i\omega t} \dots\dots\dots (14) \\ u_2 = -i \left[ \left( 1 + \frac{\sinh \lambda_2 z}{\sinh \lambda_2 d} - \frac{\sinh \lambda_2 (z+d)}{\sinh \lambda_2 d} \right) \frac{\hat{p}}{\rho_2 \omega} \right. \\ \left. + \frac{\sinh \lambda_2 (z+d)}{\sinh \lambda_2 d} \hat{u}_i \right] e^{i\omega t} \dots\dots\dots (15) \end{cases}$$

ここで、

$$\begin{aligned} \hat{u}_i &= \left( \rho_1 \nu_1 \lambda_1 \hat{U} + \rho_2 \nu_2 \lambda_2 \frac{1 - \cosh \lambda_2 d}{\sinh \lambda_2 d} \frac{\hat{p}}{\rho_2 \omega} \right) \\ &\div \left( \rho_1 \nu_1 \lambda_1 - \rho_2 \nu_2 \lambda_2 \frac{\cosh \lambda_2 d}{\sinh \lambda_2 d} \right) \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

$$\lambda_1 = (1+i)\sqrt{(\omega/2\nu_1)} \dots\dots\dots (17)$$

$$\lambda_2 = (1+i)\sqrt{(\omega/2\nu_2)} \dots\dots\dots (18)$$

3. 振動流下における高濃度浮泥の流動実験

(1) 実験方法

図-2は本実験で用いた、全長5m、幅及び高さ0.2mの正方形断面を有するU字型振動流水槽である。試料には有明海に注ぐ佐賀県六角川河口部における現地泥を用いた。これは干潮時に水面下より露呈してくるガタ土上の浮泥を直接採取したものである。これを海水と十分に混合させて所定の濃度となるように調整した後、振動流水槽内へ素早く注水し実験を開始した。実験中は水路側面に設置した間隙水圧計や差圧計を用いて上層水や高濃度層内の圧力を測定した。また、水路壁面から濃度界面高の経時変化を目視し、ビデオカメラやモータードライ

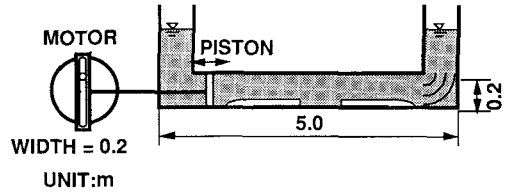


図-2 振動流実験装置

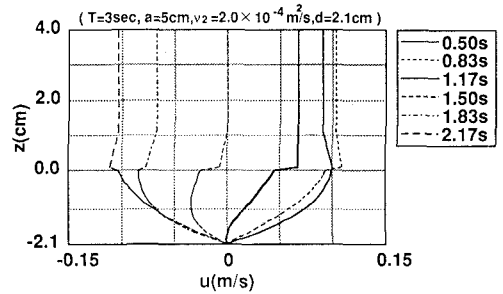


図-3 解析解の一例

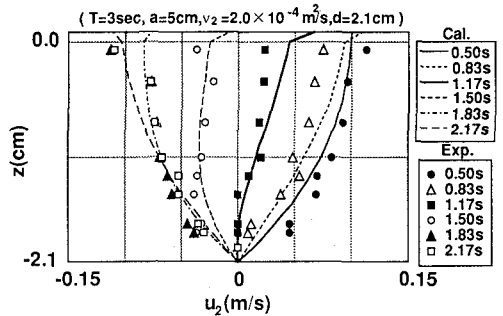


図-4 高濃度層内流速分布の計算結果と実測値

ブ付きカメラにより微粒子の運動を追跡した。さらに採水装置(鉛直方向数十点)より懸濁液を所定時間毎に採り、メンブレンフィルターにて濾過し濃度を測定した。

(2) 実験結果及び考察

a) 浮泥層内の流速分布と位相差について

図-3は上述のモデルから求まる解析解の一例である(周期  $T=3$  sec, 振幅  $a=5$  cm,  $\nu_1=1 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s,  $\nu_2=2 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s, 浮泥層厚  $d=2.1$  cm としている)。これによると振動流下で形成された高濃度浮泥層内の流動は上層部界面に作用する剪断応力  $\tau_i$  による下層への運動量輸送と層内に作用する水平方向の圧力勾配による流体加速によって支配されていることがわかる。また、波動境界層内では流速が反転する際、流速の先走りが見られる。さらに、高濃度浮泥層内では上層水流速が反転する前に下層部より流速の反転が生じていることもわかる。これは、高濃度浮泥層内の高粘性による流速の減速と水平方

向の圧力勾配  $\partial p/\partial x$  の影響によるものである。すなわち、高濃度浮泥層内に作用する水平方向の圧力勾配が正で上層水の流速が減少している過程では、層内粒子の流速は高粘性による運動エネルギーの損失によって上層水流速が転流する前に減少・停止し、上層水からそのまま作用する正の圧力勾配によって、上層水流速の向きとは逆方向へ流動することとなる。この高濃度層内の流速位相の先行は、筆者らがすでに行ってきた実験(山西ら, 1992)においても観測された現象であった。

図-4は図-3の条件で計算した高濃度浮泥層内の流速分布と水路壁面より観測した粒子の軌跡をもとに求めた流速分布とを同時に示したものである。なお、水路壁面での実測データは壁面での粘性効果を強く受けており、これを無視することはできない。したがって、ここでは水路水平面に対しても振動的な Poiseuille 流を仮定し、実測データの補正を行っている。

本モデルは、ニュートン流体としての構成則を用いた比較的簡単なモデルではあるものの、計算結果と実測値との一致度は良好である。また、この計算により求められる高濃度層内の見かけ動粘性係数  $\nu_2$  は水の動粘性係数  $\nu_w$  に比して200倍となる。一般に粘性係数(あるいは動粘性係数)は体積濃度と剪断との関数である(例えば, Kusudaら, 1994)。本研究の場合でも周期的に変動する剪断力のもとで時々刻々変化する見かけ体積濃度の変化を考慮することで、より厳密な流動モデルを構築することが可能である。

図-5は高濃度浮泥層内の各高さ毎での水平流速の時間変化である。下層に行くにしたがって上層水流速との

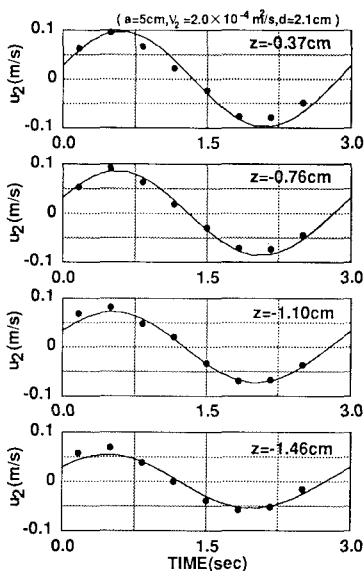


図-5 高濃度層内各高さ毎での水平流速の時間変化

位相差が徐々に大きくなるのがわかる。この位相差は(6)式の  $\hat{u}_2$  が複素数であることから次式のように変形することで求まる。

$$\begin{aligned} u_2 &= -i\hat{u}_2 e^{i\omega t} \\ &= -i(\hat{u}_R + i\hat{u}_I) e^{i\omega t} \\ &= -i\sqrt{\hat{u}_R^2 + \hat{u}_I^2} e^{i(\omega t + \phi)} \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

ここで、 $\hat{u}_R$ ,  $\hat{u}_I$  はそれぞれ  $u_2$  の実部と虚部を表し、 $\phi$  は位相差を表す。

$$\phi = \tan^{-1}(\hat{u}_I/\hat{u}_R) \quad (\text{rad}) \dots\dots\dots (20)$$

(20)式を用いて位相差  $\phi$  の鉛直分布を実験データとともに示したものが図-6である。実測データには多少のばらつきは見られるものの比較的良好に一致している。

b) 層内の流動に関わる外力について

図-7は間隙水圧計によって求められた圧力振幅  $\hat{p}/\rho_w g$  (静水圧分を除き、水頭換算したもので、 $\rho_w$  は水の密度)の鉛直分布の一例である。これから  $\hat{p}/\rho_w g$  はほぼ鉛直方向に一定であるので、基礎式を導く際に用いた仮定が妥当であることがわかる。

図-8は層内の剪断応力の振幅  $|\hat{\tau}|$  の鉛直分布の一例である。また、図-8と同一条件で界面での摩擦係数  $f_i$  を計算したところ  $f_i = 0.007$  であった。本実験条件内での高濃度界面は常に Kelvin-Helmholtz 型の安定条件を満

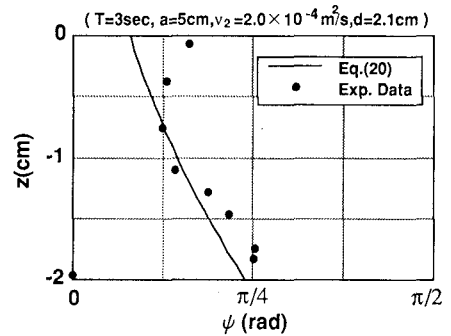


図-6 位相差  $\phi$  の鉛直分布

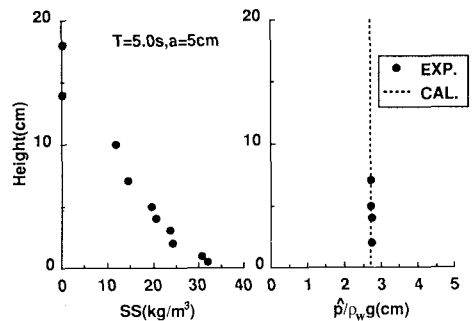


図-7 圧力振幅  $\hat{p}/\rho_w g$  の鉛直分布

足していた。なお、 $f_i$ の算定式は次式で与えられる。

$$f_i = 2|\bar{\tau}_i|/(\rho_1 \bar{U}^2) \dots\dots\dots (21)$$

高濃度浮泥の流動に関わる外力として作用する剪断応力と圧力勾配との影響比較を行うために、 $|\partial \bar{\tau}_i / \partial z| / |\partial p / \partial x|$ の計算を行った。上述の計算との比較からここでは  $d = 2.1 \text{ cm}$ 、 $\nu_2 = 2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ として周期  $T$ のみを変化させた(図-9参照)。図より長周期になるにしたがって、剪断応力による下層への運動量輸送が大きくなるが、周期10秒以上になると、その比率はほぼ一定となる。本研究が対象とする有明海沿岸域での波浪周期はおよそ3~5秒の範囲であり、この範囲でのこれらの比は0.25~0.35となる。以上から、浮泥流動に及ぼす外力としては  $(\partial \tau_i / \partial z)$ よりも  $(\partial p / \partial x)$ の方が大きいことがいえる。

c) 層内の動粘性係数について

本研究で用いた流動解析モデルは、中野ら(1987)が波動下における底泥内の質量輸送を論じる際に用いた粘性流体多層モデルへ拡張でき、また、このときの相当粘度の計算手法を用いることでKusudaら(1994)が提案する浮泥流動に関する構成方程式(22)式を用いた場合の流動計算も可能である。

$$\mu_a = \mu_w(6.1D^{-0.66} + 1) \times \left\{ 3.8 \times 10^3 \left( \frac{\rho_2 - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \right)^{1.7} + 1 \right\} \text{ (Pa}\cdot\text{s)} \dots\dots (22)$$

ここで、 $\mu_a$ :見かけ粘性係数、 $\mu_w$ :水の粘性係数、 $D$ :ざり速度、 $\rho_s$ :粘土粒子の密度(=2570 kg/m<sup>3</sup>)、 $\rho_w$ :水の密度(=1000 kg/m<sup>3</sup>)、である。

計算方法は、(1)、(2)式及び次式

$$\rho_2 \frac{\partial u_2}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_a \frac{\partial u_2}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (23)$$

で表示される流れ場を解き、この流れ場のもとで(22)式を用いて見かけ粘性係数を求める。この計算を見かけ粘性係数が収束するまで繰り返し、最終的にその状態での粘性係数を求める。また、層内の見かけ密度  $\rho_2$ の分布をFodaら(1993)と同様の形で表した((24)式)。

$$\rho_2(z) = \rho_1 + \Delta\rho(1 - z/d)^{0.25} \dots\dots\dots (24)$$

ここでは、 $\rho_1 = 1025 \text{ kg/m}^3$ 、 $d = 2.1 \text{ cm}$ とし、 $\Delta\rho$ は基準密度で実測データとの比較から  $\Delta\rho = 50$ とした(図-10)。図-11は上述の方法によって求めた見かけ動粘性係数  $\nu_a$ の鉛直分布の一例である。時々刻々変化する流れ場に於じた  $\nu_a$ が求められ、ここでも計算される  $\nu_a$ の値は水のものよりも10~100倍程度大きな値を示した。な

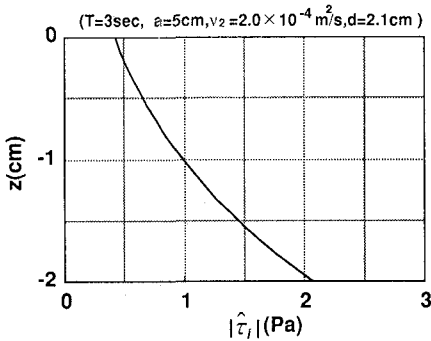


図-8 剪断応力の振幅  $|\bar{\tau}_i|$ の鉛直分布

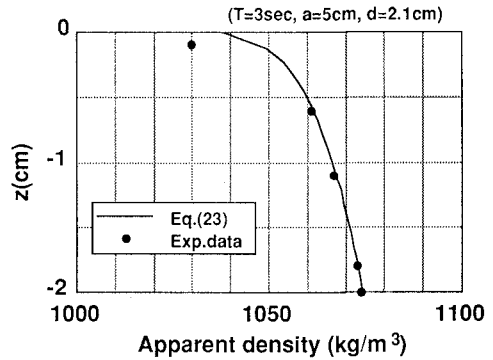


図-10 層内の見かけ密度分布

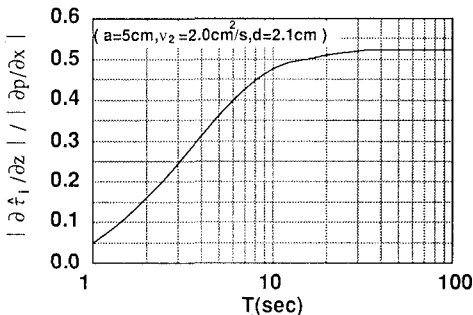


図-9  $|\partial \bar{\tau}_i / \partial z| / |\partial p / \partial x|$ と振動周期  $T$ との関係

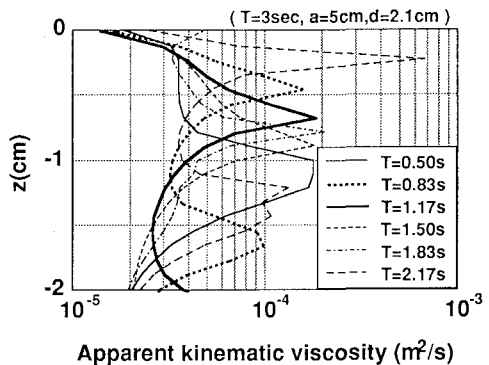


図-11 見かけ動粘性係数  $\nu_a$ の経時変化

お、(22)式でずり速度のべき乗の項が用いられているため、小さなずり速度では見かけ動粘性係数が極値を示す。粘性係数は基本的に体積濃度と剪断との関数となるが、さらに計算精度を上げるには、①小さなずり速度に対しては浮泥が弾性体あるいは粘弾性体として運動するといった条件を付加すること、②周期的に変化する剪断力の作用により見かけ密度（見かけ体積濃度）が変化すること、などを考慮する必要がある。

#### d) 保持機構について

高濃度浮泥層内の粒子群は沈積せず、ある層厚を保持しつつ流動していることは実験結果より明らかである（例えば、山西ら、1992）。この層厚が保持される理由として①剪断流場によって生じる混合の効果、②層内に作用する浸透水圧、③粒子間接触にともなう有効応力の影響などが考えられる。有効応力の効果は底泥の流動限界に関する判定指標とはなるものの、有効応力のみが浮泥層を保持する原因とはなり得ない。また上向きの浸透水圧の影響も無視できないものの（熊谷ら、1994）、これが高濃度層保持の主因とはならず、単に圧密を抑制する働きをもたらすものである。したがって、浮泥層は、層内の混合による上向きフラックスと粒子群の沈降による沈降フラックスのバランスによって保持される。

## 4. ま と め

(1) 振動流下で形成された高濃度浮泥層内の流動は、界面に作用する剪断応力  $\tau_i$  からの運動量輸送と層内に作用する水平方向の圧力勾配  $\partial p/\partial x$  による流体加速によって支配されている。これらの比  $|\partial \tau_i/\partial z|/|\partial p/\partial x|$  は、本実験の範囲では 0.25~0.35 であった。

(2) 高濃度浮泥下層部の流動は上層部の流動に比べて位相が進む。これは層内の粘性及び底面の存在による流体運動の減速と振動する水平方向の圧力勾配  $\partial p/\partial x$  による流体の加速とが相互に生じることによるものである。また、この位相差の支配因子は水平方向の圧力勾配

$\partial p/\partial x$ 、界面上で作用する剪断応力  $\tau_i$  及びこの運動量を下層へ伝達させる粘性効果である。なお、本実験範囲内の位相差の最大値は  $\pi/4$  であった。

(3) 流動計算より高濃度層内の粘性係数を決定した。これによると粘性係数は基本的に体積濃度と剪断との関数となるが、さらに計算精度を上げるには、小さなずり速度での浮泥の弾性的・粘弾性的挙動や周期的に変化する剪断力の作用により見かけ体積濃度が変化することなどを考慮する必要がある。

(4) 振動流場での高濃度層界面の抵抗係数  $f_i$  はおよそ  $10^{-3}$  のオーダーとなった。

(5) 高濃度浮泥層は層内の混合による上向きフラックスと粒子群の沈降による沈降フラックスとのバランスによって保持され、層内に作用する変動圧力や有効応力は高濃度層の保持に直接的な効果を与えない。

**謝辞:** 本研究の遂行に際し、財団法人中村治四郎育英会より補助を受けた。ここに記して謝意を表す。また、実験及び図面整理に協力下さった本学大学院学生熊谷博史君に感謝する。

## 参 考 文 献

- 熊谷博史・山西博幸・楠田哲也 (1994): 高濃度層の流動機構, 平成5年度西部支部研究発表会講演会概要集, pp. 350-351.
- 中野 晋・鶴谷広一・鷹濱 潤 (1987): 波と底泥の相互干渉による波高減衰と底泥の流動について, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第2号, pp. 171-212.
- 山西博幸・楠田哲也 (1992): 振動流下における高濃度層の形成・保持機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 286-290.
- Foda, M. A., Hunt, J. R. and Chou, H.-T. (1993): A nonlinear model for the fluidization of marine mud by waves, *J. Geophys. Res.*, Vol. 98, pp. 7039-7047.
- Kusuda, T., Watanabe, R. and Yamanishi, H. (1994): Mass fluxes in fluid mud layers on an inclined bed, 4th Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport Conference.