

# 底泥床上の底面せん断応力と底泥運動

中 野 晋\*・鶴 谷 広 一\*\*

## 1. ま え が き

閉鎖性の内湾や内海では有害物質を含んだ底泥が厚く堆積しているところが多い。底泥は含水比が高く軟弱であり、流れや波の作用により容易に再浮上や流動が生ずる。とくに底泥の再浮上現象や底泥内間隙水の流動は底泥中の栄養塩の溶出現象と深く結びついているため、底泥の挙動が河口周辺や沿岸域の水環境に与える影響は大きい。また中国、タイ、インドネシアなどのアジア諸国では港が河川部や河口周辺部に建設されることが多いが、河川上流部や浅海部から多量のシルトや粘土が流入し、港湾や航路が埋没して大きな問題となっている。これらのことからシルトや粘土を多く含む底泥や浮泥の移動現象は環境および漂砂の両面から注目されている問題であり、海外技術協力の観点からも至急に研究開発すべき問題となっている。

軟らかい底泥床上を波が進行する場合には波と底泥の相互干渉により大きな波高減衰が生じることがよく知られており、1958年のGade<sup>1)</sup>の研究をはじめとして現在まで数多くの研究が発表されている。Gade, Dalrymple and Liu<sup>2)</sup>はともに底泥をニュートン流体として扱い、波高減衰率や波長の変化について検討している。これに対し、Hsiao and Shemdin<sup>3)</sup>やMacpherson<sup>4)</sup>は底泥をVoigt型の粘弾性体として解析している。またYamamoto et al.<sup>5)-7)</sup>は底質層を連続層状の弾塑性体と考える理論を展開し、波の減衰は土粒子間のクーロン摩擦によると述べている。とくにこの研究では砂床から粘土床まで広い範囲の底質に適用できるという利点を備えている。これらの理論による波高減衰率などの計算では底泥の粘性係数や弾性係数の値によってその結果は大きく異なる。底泥は一般に非ニュートン流体であり、強度や流動についての底泥の特性は複雑であり、粘性係数や弾性係数などの特性値はあまり明らかになっていない。したがっていずれの研究においても計算精度は底泥特性値の与え方にかなり依存しており、この点が波と底泥の相互干渉を計算する上での最も大きな障害になっている。

そこで著者ら<sup>8)</sup>は底泥の流動特性に基づいて粘性係数を合理的に決定するため、相当粘度を用いた解析手法を提案している。この方法では底泥内の運動状況に応じた代表粘度の推定が可能である。

波による底泥の移動に関しては底泥内の質量輸送を調べた永井ら<sup>9)</sup>、柴山ら<sup>10)</sup>、鶴谷ら<sup>11)</sup>などの研究、波による底泥粒子の再浮上を調べたThimakorn<sup>12)</sup>、小蔵ら<sup>13)</sup>、柴山ら<sup>14)</sup>の研究などがあるが、造波水槽を用いた実験的研究がほとんどであり、理論的に底泥の再浮上機構を検討したものはあまり見あたらない。

そこで本研究では著者らがさきに提案している相当粘度を用いた粘性流体多層モデルにより、底泥表面付近の運動を調べ、波による底泥粒子の再浮上機構についての基礎的知見を得ようとしたものである。

## 2. 相当粘度を用いた粘性流体多層モデルの概要

まず、この研究で用いる波と底泥の相互干渉についての理論モデルについて概説する。

底泥の粘度や密度の空間分布が考慮できるように、底泥層を多層に分割し、水層も含め $n$ 層の系を考える。 $\hat{u}_i$ ,  $\hat{w}_i$ ,  $\hat{p}_i$ をそれぞれ第 $i$ 層における水平流速、鉛直流速、圧力とする。また $\rho_i$ ,  $\nu_i$ を第 $i$ 層における密度、動粘性係数とする。運動方程式、連続式は

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_i} \frac{\partial \hat{p}_i}{\partial x} + \nu_i \left( \frac{\partial^2 \hat{u}_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{u}_i}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \hat{w}_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_i} \frac{\partial \hat{p}_i}{\partial z} + \nu_i \left( \frac{\partial^2 \hat{w}_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{w}_i}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x} + \frac{\partial \hat{w}_i}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

である。ここで $\nu_i$ は次式のように運動場から決定される。

$$\nu_i = \left( \mu_B + \frac{\tau_y}{\sqrt{4|II_{ei}|}} \right) / \rho_i \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $\mu_B$ と $\tau_y$ は底泥がビンガム流体で表されるときの塑性粘度と降伏値である。また、 $|II_{ei}|$ は各層のひずみテンソルの第2不変量の1周期平均値で

$$4|II_{ei}| = 2 \left( \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial \hat{w}_i}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial z} + \frac{\partial \hat{w}_i}{\partial x} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

\* 正会員 工修 徳島大学講師 工学部建設工学科

\*\* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室長

で表される。水面および界面の変位  $\eta_i$  を

$$\eta_i = a_i \exp \{i(kx - \sigma t)\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

で表す。ここで  $k$  は波数,  $\sigma$  は角周波数である。とくに波数  $k$  は複素数で,

$$k = k_r + ik_i \quad \dots\dots\dots (7)$$

で表される。以上の関係式に対し,  $\hat{u}_i$ ,  $\hat{w}_i$ ,  $\hat{p}_i$  の周期解を仮定して, 各層の運動を解析する。その際, 仮定した各層の動粘性係数が式(4)を満たすまで繰り返し計算を行う。

### 3. 実験の概要

実験に用いた水槽は長さ 11 m, 幅 0.4 m, 高さ 0.5 m の 2 次元造波水槽で, 中央部 4 m の部分に底泥床を設けている。底泥として所定の含水比になるように水道水を混合したカオリナイト (ASP 600) を用いた。水深は 20 cm と 30 cm, 底泥厚さは 10 cm と 20 cm の条件で行った。

水層の流速測定は 2 成分電磁流速計 (計測技研製) を用いて行い, 底泥内の圧力変動の測定は小型間隙水圧計 (ST 研究所製, 直径 10 mm) を底泥表面から約 2 cm および 5 cm 下に設置して行った。また底泥粒子の運動振幅の測定はマーカーとして直径 3 mm, 長さ約 40 cm, 比重 1.36 のアクリル棒を底泥内に沈めて, 水路側壁のガラス面からビデオ撮影することにより行った。

### 4. 水粒子と底泥粒子の運動についての検討

#### (1) 水粒子速度

図-1 は底泥床上的の水粒子速度の全振幅の鉛直分布を示している。波の周期は 0.784 s, 底泥の含水比  $W$  は 246% で底泥厚さが 20 cm で造波装置側の底泥床端から 1.5 m ( $x=1.5$  m) の水路中央での測定結果である。

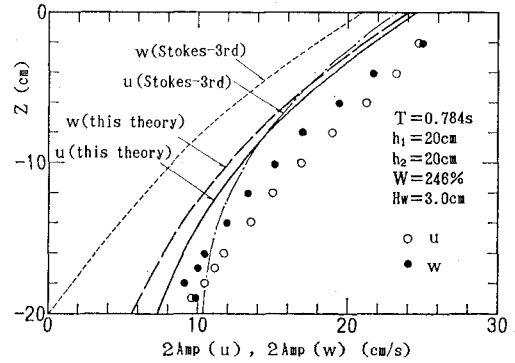


図-1 水粒子速度の全振幅の鉛直分布

図中には前述したモデルによる計算結果 (太線) と固定床に対する Stokes の 3 次近似による計算結果 (細線) を同時に示している。前述のモデルでは波高減衰も同時に計算できるため, 波高減衰が大きくても, 底泥床上的の水路方向の各点の水粒子速度が計算できる。しかし各点の波高推算値と実測値に差が出る場合にはその差が流速の計算値に影響を与えるので, 流速の測定点での波高実測値を用いて計算している。

このモデルでは底泥床表面で水平および鉛直流速が 0 ではなく, 底泥粒子速度に連続しているため, それぞれの鉛直分布形は Stokes の 3 次近似解に比べ, 実験値に近くなっている。しかし計算値の絶対値は実験値に比べて 2 割程度小さくなっている。この相違はある位置での水および底泥の波動運動が沖側の波動の伝播の結果であることや  $x=0.5$  m と 1.5 m の間で 3.8 cm から 3.0 cm と 2 割程度も波高が減衰していることなどによると考えられる。

図-2 は水面下 6 cm ( $z=-6$  cm), 底泥床上 6 cm と 2 cm ( $z=-14$  cm,  $-18$  cm) における水粒子速度の位

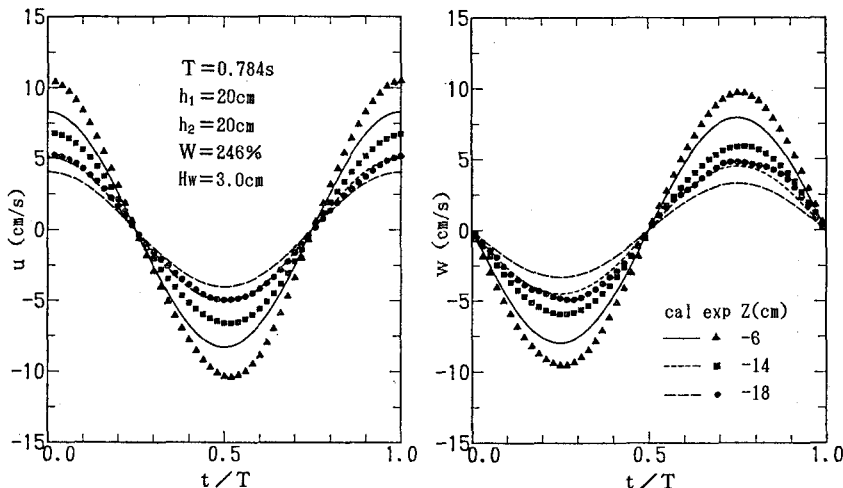


図-2 水粒子速度の位相変化

相変化を示している。図-1でも明らかにように実験値が計算値より大きくなっているが、その位相による変化はほぼ正弦的である。

### (2) 底泥粒子運動

図-3はアクリル棒の運動から求めた  $x=1.5\text{ m}$  における底泥粒子の水平運動の全振幅  $U_{xx}$  および鉛直運動の全振幅  $U_{zz}$  を示したもので、底泥厚さが  $20\text{ cm}$  の時の測定結果である。ここでもその位置での波高を用いて計算している。現地泥などに比べ均質であるカオリナイト泥の場合にも底泥運動は場所によって大きく運動しているところとそうでないところが見られ、測定値はかなりばらついている。 $T=1.2\text{ s}$  のケースの  $U_{xx}$  のように実測値と計算値がかなり違っているものもあるが、この違いは運動の不均質性によるものと考えられ、この計算で平均的な底泥粒子の運動が表現できていると考えられる。

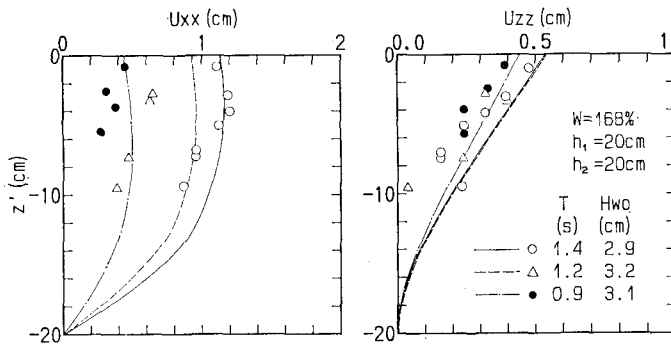


図-3 底泥粒子運動の全振幅の鉛直分布

### (3) 底泥内圧力変動

波によって底質内に生じる圧力変動は海底地盤内の有効応力を低下させるため、海底地盤の液状化の原因として砂地盤および粘土地盤について、有効応力の理論に基づいて多くの研究がなされている。軟らかい底泥の場合

には底泥粒子を囲む間隙水の量が多いため、場合によっては底泥粒子は間隙水中に浮遊しているような状況にある。この場合には底泥粒子が受け持つ有効応力は小さく、波による圧力変動の大部分は間隙水圧の変動となる。したがって軟らかい底泥に限れば有効応力と間隙水圧を区別しなくても検討できると考えられる。

図-4は底泥内圧力変動の全振幅の鉛直分布について示したものである。左側の図は底泥厚さが  $10\text{ cm}$  のケースであり、右側の図は  $20\text{ cm}$  のケースである。ともに計算に用いた波高は測定点 ( $x=2.5\text{ m}$ ) の位置での値を用いている。計算値はいずれも実験値より小さくなっている。底泥内の圧力変動も水粒子速度と同様に沖側の波の影響を受けていることからその位置での波高を用いた計算値が小さくなったと考えられる。波の周期が短くなるにつれて底泥内圧力変動の全振幅は小さくなっており、周期が短くなると底泥に及ぼす影響が小さくなるこ

とがわかる。また図から判断すると底泥内圧力変動の深さによる変化は大きくないが、砂層の場合に透水係数が小さい場合や底質内に空気が含まれている時には圧力変動の減衰が大きくなるという報告<sup>15)</sup>もあり、さらに精密に議論するにはこれらの影響の考慮も必要であろう。

### (4) 底泥床土の底面せん断応力

これまで波による底泥粒子の再浮上量の推定を行うときには、底泥粒子に働く底面せん断応力を Jonsson の方法などから求め、これを底面せん断応力と底泥の

舞い上がり量についての実験式に適用して検討されることが多い。さて底泥表面が運動しているので底泥表面に働くせん断応力  $\tau_0$  は

$$\tau_0 = \mu_1 \left( \frac{\partial \hat{u}_1}{\partial z} + \frac{\partial \hat{w}_1}{\partial x} \right)_{z=-h_1} \quad \dots\dots\dots (8)$$

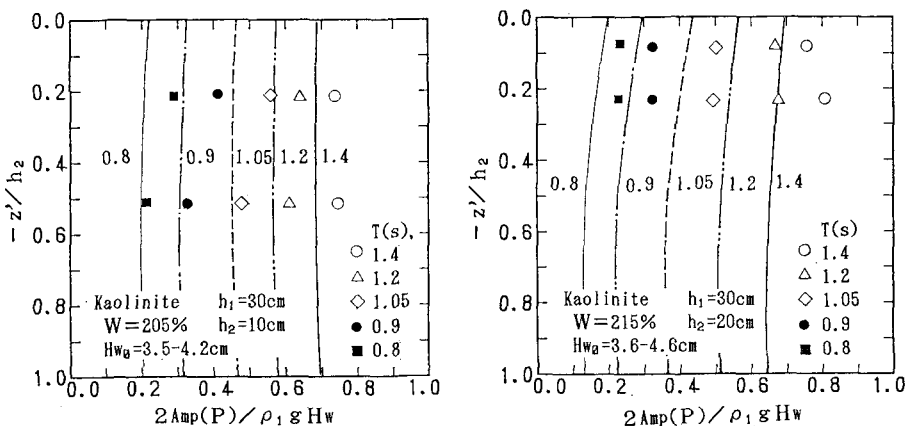


図-4 底泥内の圧力変動の全振幅の鉛直分布

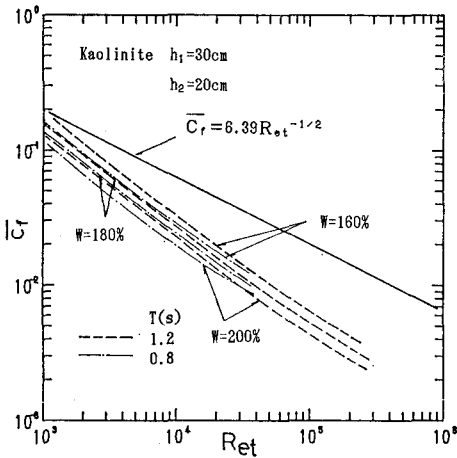


図-5 摩擦係数と波のレイノルズ数

で表される。Eagleson<sup>16)</sup>の表示にしたがい、底面の摩擦係数  $\overline{C_f}$  をつぎのように定義する。

$$\overline{C_f} = 2\overline{\tau_0} / \rho_1 u_b^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\overline{\tau_0}$ 、 $\overline{u_b^2}$  は  $\tau_0$  と微小振幅波理論による底面流速  $u_b$  の2乗を  $\tau_0=0$  となる位相  $\theta$  から  $(\theta+\pi)$  まで時間的に平均したものである。

固定床上の層流境界層では波のレイノルズ数  $Re_t (= u_b \max^2 T / \nu_1)$  を用いると

$$\overline{C_f} = 6.39 Re_t^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

が成立する。

図-5 は式 (9) で表される摩擦係数と波のレイノルズ数との関係について底泥床上での計算結果と式 (10) とを比較したものである。底泥床上での計算では式 (8) から求められた底面せん断応力  $\tau_0$  から式 (9) を用いて摩擦係数を求めた。底泥床上で計算された摩擦係数は水深、周期、波高、底泥厚さ、含水比など多くの因子に影響を受けるため、限られた計算条件内だけで一般的な特性を議論することはできないが、含水比が高く、軟らかい底泥床上では固定床上に比べ、摩擦係数が小さくなるのがわかる。これは底泥表面が運動していることにより、速度勾配が固定床上に比べ小さくなっているためである。

柴山ら<sup>14)</sup>は波による底泥の飛び出し率と底面せん断応力の関係を実験的に調べているが、これによると波浪場では一様流中で大坪・村岡<sup>17)</sup>が求めた破壊限界掃流力の1/10以下の底面せん断応力で底泥粒子は浮上し始めている。この事実と同一波浪条件で底泥床面の底面せん断応力が固定床のものより小さいことを考え合わせると底泥粒子の舞い上がりの主要な作用力が底面せん断応力だけであるとは考えにくい。しかし底泥内の圧力変動や底泥波の碎波現象とは切り離せないものであり、その意味で底面せん断応力は波による底泥移動の重要なパラメー

タの一つと考えられる。

#### (5) 底泥波と底泥内の鉛直応力変動

図-6 に底泥波と鉛直応力変動  $\sigma_{zz} (= -\dot{p} + 2\mu\partial\dot{w}/\partial z)$  の計算結果を示す。この計算条件(含水比 180%, 水深 30 cm, 底泥厚さ 20 cm, 波高 3.5 cm)では底泥内の鉛直応力は水面(破線で示す)が谷の時に上向きとなり、水面が峰の時に下向きとなる。なお鉛直応力の大部分は圧力変動であるため、間隙水圧の変動とみることもできる。鉛直応力変動は深くなってもほとんど変わらず、位相変化も現れていない。また底泥波は水面波に対し、15°程度の位相の進みがみられる。

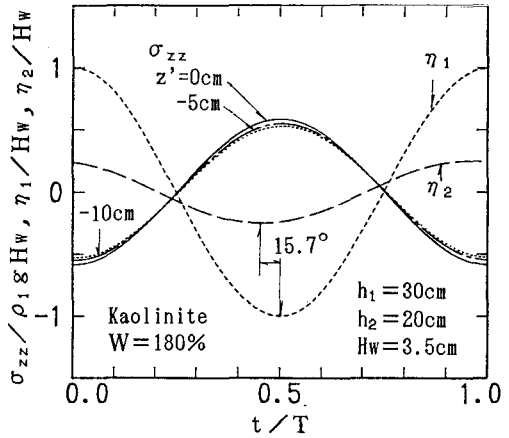


図-6 水面波、底泥波と底泥内鉛直応力の位相変化

#### (6) 底泥表面付近の水粒子と底泥粒子の運動

図-7 は底泥表面付近の水粒子および底泥粒子の速度変動を計算したものである。表面近くの底泥粒子は底泥波の通過する1/4周期前に上向きの最大速度で移動することがわかる。また底泥波が図-6 で示したように水面波に比べわずかながら位相が進んでいるため、底泥粒子の速度変動もまた底泥床直上の水粒子速度変動よりわず

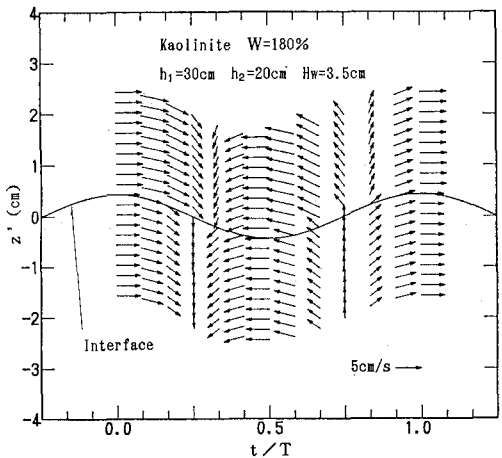


図-7 底泥表面付近の水粒子と底泥粒子の運動

かに位相が進んでいることがわかる。これらのことから底泥の舞い上がりはつぎのようにして生ずると考えられる。まず底泥粒子が底泥波が通過する少し前から上向きに加速され、慣性力などにより、底泥波の峰付近で底泥表面から分離する。さらに分離した底泥粒子が底泥粒子速度よりすこし遅れて上向き最大となった水粒子速度に捕捉されて、水層上部へと拡散する。実験でも碎波が底泥波の峰付近で生じ、その際に底泥表面から分離した底泥粒子が上向きの波の軌道流速に乗って舞い上がる状況が観察されており、これと底泥床近傍での速度変動から推測される舞い上がりの状況とはよく一致している。

## 5. ま と め

本研究は波による底泥の舞い上がり機構を検討する上で重要となる底面せん断応力や流体粒子速度などの底泥床面付近の特性について、粘性流体多層モデルを用いて計算し、考察したものである。この研究で得られた主要な結果をまとめると次のようである。

- ①水粒子速度や底泥内圧力変動の全振幅についての計算結果はその位置での波高を用いた場合、波高減衰の影響により実測値より小さい値となった。しかしその鉛直分布の傾向はこの計算でよく表せることが確認された。
- ②底面せん断応力について底泥床上での計算結果と固定床上の層流境界層の理論値を摩擦係数の形で比較した結果、底泥床では固定床に比べて、底面せん断応力が小さくなることがわかった。
- ③底泥内の鉛直応力は水面が谷の時に上向きの最大値をとり、峰の時に下向きの最大値をとる。
- ④表面近くの底泥粒子は底泥波の通過直前に上向きの最大速度で移動し、水粒子は底泥粒子に少し遅れて上向きの最大速度となる。これから底泥の舞い上がりは底泥波通過の少し前から上向きに加速された底泥粒子が底泥波の峰で分離し、水粒子の最大上昇速度に乗じて水層に拡散することにより生じていると考えられる。

謝 辞：最後に本研究を行うにあたり、運輸省港湾技術研究所前海洋水理部長田中則男博士（現日本テトラポッド(株)技術部長）、入江 功海洋水理部長 および港湾技術研究所シルテーション研究メンバーからは終始温かい御援助と御指導を受けました。また実験とデータ整理

などでは港湾技術研究所鷹濱 潤技官の協力を得ました。ここに付記し、感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) Gade, H. G.: Effects of a nonrigid, impermeable bottom on plane surface waves in shallow water, Jour. of Marine Research, Vol. 16, No. 2, pp. 61~82, 1958.
- 2) Dalrymple, A. R. and P. L. F. Liu: Waves over soft muds: a two-layer fluid model, Jour. of Physical Oceanography, Vol. 8, pp. 1121~1131, 1978.
- 3) Hsiao, S. V. and O. H. Shemdin: Interaction of ocean waves with a soft bottom, Jour. of Physical Oceanography, Vol. 10, pp. 605~610, 1980.
- 4) Macpherson, H.: The attenuation of water waves over a non-rigid bed, Jour. of Fluid Mech., Vol. 97, Part 4, pp. 721~742, 1980.
- 5) Yamamoto, T., H. L. K. H. Sellmeijer and E. V. Hiljium: On the response of a poro-elastic bed to water waves, Jour. Fluid Mech., Vol. 87, Part 1, pp. 193~206, 1978.
- 6) Yamamoto, T., S. Takahashi and B. Schuckman: Physical modeling of sea-seabed interactions, Jour. of Engineering Mech., Vol. 109, No. 1, pp. 54~72, 1983.
- 7) Yamamoto, T. and B. Schuckman: Experiments and theory of wave-soil interactions, Jour. of Engineering Mech., Vol. 110, No. 1, pp. 95~112, 1984.
- 8) 中野 晋・鶴谷広一・鷹濱 潤: 波と底泥の相互干渉による波高減衰と底泥の流動, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第2号, pp. 171~212, 1987.
- 9) 永井紀彦・山本哲夫・L. Figueroa: 波とやわらかい底質粘土との相互干渉に関する実験, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 608~612, 1983.
- 10) 柴山知也・滝川 浩・堀川清司: 波による軟らかい底質粘土の質量輸送, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 258~262, 1985.
- 11) 鶴谷広一・中野 晋・鷹濱 潤: 波と底泥の動的相互作用による波高減衰と底泥運動, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 317~321, 1986.
- 12) Thimakorn, P.: An Experiment on clay suspension under water waves, Proc. of 17th Coastal Engineering Conf., pp. 2894~2906, 1980.
- 13) 小藏紘一郎・日田 登・足立一美・楠田哲也: 流れと波による底泥の巻き上げ現象, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 332~336, 1986.
- 14) 柴山知也・中西雅明・石原 肇・佐藤慎司: 波による底泥の浮遊機構に関する研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 271~275, 1987.
- 15) 名合宏之: 変動水圧による砂層の液状化に関する研究, 第26回水理講演会論文集, pp. 589~594, 1982.
- 16) Eagleson, P. S.: Laminar damping of oscillatory waves, Proc. ASCE, Vol. 88, No. HY3, pp. 155~181, 1962.
- 17) 大坪国順・村上浩嗣: 底泥の物性および限界掃流力に関する実験的研究, 土木学会論文集, II, 第363号, pp. 225~234, 1985.