

波による底泥の質量輸送速度

柴山 知也*・佐藤 慎司*・平出 和也**・青木 徹***

1. 緒 言

波による軟らかい底泥の輸送機構は十分に解明されているとはいえない。従来の海岸での漂砂現象の解析は主に非粘着性底質を対象として行なわれており、粘着性底質が問題とされることは比較的少なかった。しかし近年東南アジア諸地域や中国での沿岸開発、あるいは我が国における熊本新港の建設などにおいて、軟らかい底泥の挙動が問題となることが多くなって来た。また、底泥の挙動は東京湾などの環境問題を論ずる際にも重要である。

本研究の目的は、波による軟らかい底泥の輸送現象の内、輸送量の主要な部分をしめる底泥層内の質量輸送現象に着目し、実験的及び理論的解析を行なうことである。また、浮遊した底泥の輸送を考える際には水層における波による質量輸送速度が問題となるためこれについても考察を加える。

2. 底泥の挙動と輸送機構

底泥は沈降特性、流動曲線、浮遊特性から2つのグループに分けることができる(大坪, 村岡¹⁾)。これらの性質を特徴づけるものは、底泥粒子表面に付着した陽イオンである。第一の底泥グループは Al^{3+} , Ca^{2+} , H^{+} などが付着したカオリナイトで代表され、第二の底泥グループは Na^{+} が付着したモンモリロナイトで構成されるベントナイトで代表できる。第一の底泥グループでは沈降に際して明らかな界面が形成され、また流動曲線には降伏値が存在する。一方、第二の底泥グループには沈降に際して明瞭な界面はみとめられず、また降伏値も存在しない。柴山ら²⁾ が述べているように第一底泥グループでは水層への浮遊、泥層内の質量輸送いずれもがおり、第二底泥グループでは主に水層への浮遊が底泥の輸送機構となる。なお、ここでいう二つの底泥グループは先に述べたように吸着陽イオンの状態によってその性質が決定されるが、CEC 試験などを行なわないでも、そ

の沈降状態によって、凝集性が強く界面沈降を起こすものを第一底泥グループ(カオリナイト系)、分散性が強く自由沈降するものを第二底泥グループ(ベントナイト系)と分類する事ができる。一般に海水中で形成される底泥は第一底泥グループ(カオリナイト系)のものが多く、第二底泥グループ(ベントナイト系)は湖における底泥など、特殊な場合に限られる。

図-1に底泥輸送モデルの解説図を示す。波による底泥の輸送形態およびその量は波高、周期、水深などの波に関する性質と底泥の物性(そのなかには粘性係数、粘着力、弾性係数、粘土層の厚さなどが含まれる)によって決定される。さらにその輸送形態は底泥層から水層へ浮遊した浮泥の輸送によるものと底泥層内の波動運動による質量輸送の二つがある。浮泥の濃度分布については柴山ら²⁾ が行なったように、底面での飛び出し率を境界条件として水層内の拡散方程式を解き、浮泥分布を求めることが必要となる。さらに浮遊輸送量は本論で後述するような、運動する底泥床上を進行する水の波による水層内質量輸送速度、あるいは流れなどを考慮して算定する必要がある。

3. 粘土層内質量輸送

第一底泥グループ(カオリナイト)においては底泥層

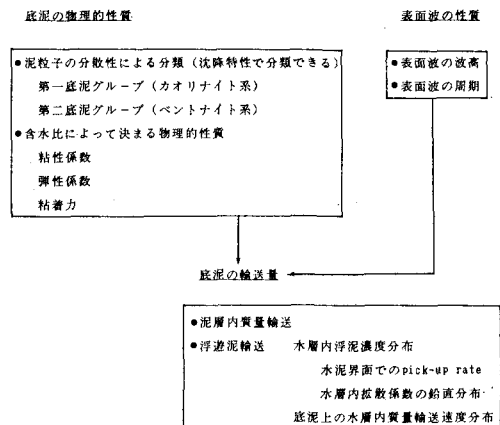


図-1 底泥輸送の説明図

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** (株)スターツ

*** 学生会員 横浜国立大学大学院工学研究科

内質量輸送は広い含水比の領域で起こる。それに対して第二底泥グループ(ベントナイト)では高い含水比のもとでのみ生じる。柴山ら³⁾は底泥層内の流速場を、底泥を粘性流体と仮定し、Dalrymple and Liu⁴⁾の与えた境界層近似を用いて計算し、層内質量輸送速度を算定する理論式を求め、さらにその結果をカオリナイトを用いて室内実験で求めた結果と比較検討した。しかしながら彼らの取り扱い Stokes drift の成分のみを取り扱っており、理論的な扱いとしては不十分である。そこで本研究では、底泥の波による質量輸送速度を定量的に評価するために以下に示す理論的方法と実験的方法により検討した。

(1) 理論的検討

本研究では水泥の二層粘性流体を仮定した Dalrymple and Liu⁴⁾の理論あるいはこれを Bingham 流体に適用するために多層粘性流体に拡張し、さらに相当粘度の概念を用いた中野ら⁵⁾の理論を基礎として、流速場を計算し、それを用いて Lagrange 流, Euler 流の質量輸送速度をそれぞれ求めた。多層粘性流体モデル⁵⁾を用いる場合、鉛直方向に分割した各層における粘性係数の求め方には含水比別に求めたずり速度-粘性係数の実験曲線より直接求めるかまたは中野ら⁵⁾の相当粘度法を用いる事ができる。相当粘度法では含水比が低い領域では粘度を少々低く見積る傾向があり、このような領域では実験曲線を用いた方が実験結果をよく説明し得る。

以下では流速場の求め方については多層粘性流体モデル⁵⁾を用いる事として、ここでは層内の流速場が求まった後の、質量輸送速度の求め方について述べる。Lagrange 流の水平方向質量輸送速度 U_L は水平流速 u と鉛直流速 w を用いて(水平方向に x 軸, 原点を水泥界面とし、鉛直方向に z 軸をとる)

$$U_L = \frac{\partial u}{\partial x} \int_0^t u dt + \frac{\partial u}{\partial z} \int_0^t w dt \dots\dots\dots (1)$$

として求める。次に Euler 流の質量輸送速度については以下のように考える。Dalrymple and Liu⁴⁾の取り扱いにおける基礎運動方程式は Navier-Stokes 方程式において移流項を無視したものであり、それによって計算された流速では Euler 流の質量輸送速度は計算できない。そこでこれらの式に移流項を加え、境界層の近似の下に時間平均を施した以下の式を考える。(第 j 層において)

$$w_j \frac{\partial u_j}{\partial z} = \nu_j \frac{d^2 U_{Ej}}{dz^2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで U_E は Euler 流の質量輸送速度である。これを連続式を用いて変形し、 z について積分することにより以下の運動量平衡式を得る。(――は時間平均を表わす)

$$(\overline{uw})_j - (\overline{uw})_\infty = \nu_j \frac{dU_{Ej}}{dz} \dots\dots\dots (3)$$

ここで $(\overline{uw})_\infty$ は境界層外縁での $(\overline{uw})$, ν は動粘性

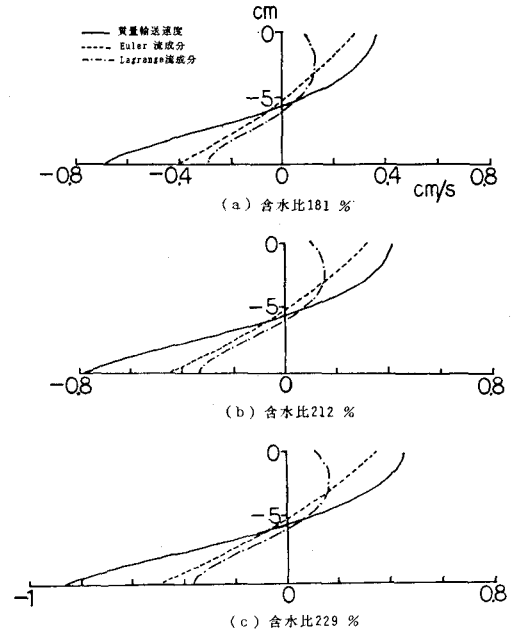


図-2 底泥層内質量輸送速度の算定結果

係数である。この式に多層粘性流体モデルで求めた流速値を代入し、泥層底面で0の境界条件を与えて鉛直方向に積分すれば、数値的に Euler 流の質量輸送速度を求めることができる。図-2に理論値の例として、後述する実験条件に即した条件を与えて、多層粘性流体モデルと相当粘度法を用いて求めた流速場を用いて計算した Euler 流, Lagrange 流の質量輸送速度およびそれらの和を示す。底泥層は10層に分割してある。また図-2では造波水路を用いた実験条件を考慮して、断面平均の質量輸送速度が0になるように戻り流れを差し引いた形で示してある。理論値においては含水比の変化による質量輸送速度の変化があまり顕著ではないようである。

(2) 実験

幅 60 cm, 深さ 55 cm, 長さ 17 m の造波水路を用いて実験を行なった。図-3に示すように水路中央部に厚さ 10 cm, 長さ 2 m に渡ってカオリナイト泥をしきつめ、トレーサーを粘土層内に埋め込むことにより、質量輸送速度を計測した。波の条件は泥層上で周期 1.50 s, 波高 7.8 cm とした。この条件の下で底泥の含水比を229, 212, 181%に変化させた。壁面での境界層の形成を防ぎ、壁面での slip 条件を確保する為に、壁面にシリコンオイルを

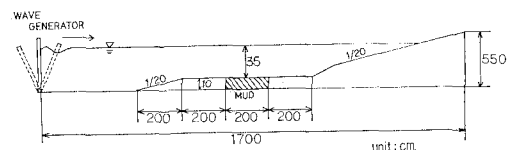


図-3 実験装置

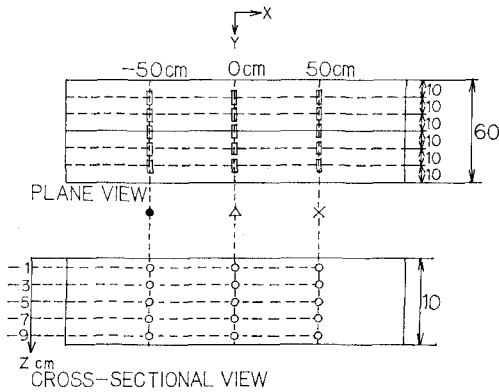


図-4 トレーサーの配置図

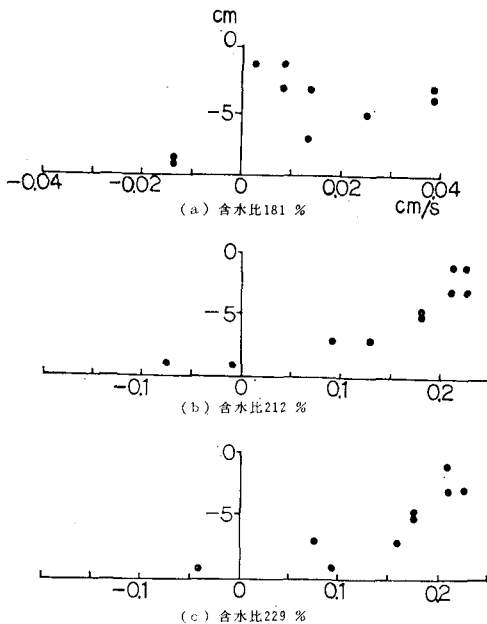


図-5 底泥層内質量輸送速度の実験結果

塗付する工夫を行なっている。深さ別の質量輸送速度を求めるために図-4に示すように深さ方向に別々のトレーサーを埋め込み、さらに底泥層全体にわたる流動が起る前に実験を終了する為に図-4に示したものと別、糸を付けて実験中にその移動を追跡可能としたトレーサーを埋設した。実験の継続時間は含水比によるが、229, 212%の場合で5分、181%で15分である。図-5に実験結果を図-2の理論値と対応する形で示す。

(3) 実験値と理論値の比較

2つの図を比較する事により、含水比が200%以上の場合には理論値と実験値が近似した値を示している事がわかる。それよりも低い含水比の場合には理論値の質量輸送速度が実験値よりも大きく、多層粘性流体モデルを用いた理論値では粘度を過小に見積っているようである。実験ではさらに含水比が低い174%, 151%の条件で

も糸付トレーサーの追跡を行なって、含水比が200%より小さくなると質量輸送速度の実験値が急速に小さくなることを確かめた。一方理論値はこの程度の含水比変化に対してはゆるやかにしか減少しない。そこでずり速度と含水比で与えられる実験曲線⁷⁾を用いて、最大限に粘度を高く見積って、同様の計算を行なった。その結果多少理論値と実験結果の一致度は向上するものの、その差は依然大きかった。これは200%以下の低い含水比の領域では弾性の影響を考慮せざるをえないためと思われる。

ここまでの議論は以下のように総括できる。波による底泥の質量輸送速度の理論値と実験値を比較した結果、本研究の実験条件では、含水比200%以上の底泥については底泥を Bingham 粘性流体として計算した理論値で評価できるものの、それ以下の含水比ではせん断応力が降伏値に達しておらず、弾性の影響により理論値が実験値に比べて過大評価になる。

(4) 多層粘弾性体モデルへの拡張と弾性の影響の検討

以上の(3)の考察に基づいて多層モデルに弾性の効果を導入する。Dalrymple and Liu⁴⁾あるいは中野ら⁵⁾の方法では粘性係数を実数として取り扱ってきたがここでは Mcpherson⁸⁾にならって、以下に与えるように複素数化する。第 j 層において

$$\nu_{ej} = \nu_j + i \frac{G}{\rho \sigma} \quad \dots \dots \dots (4)$$

とおく。 G は弾性係数、 ρ は密度、 σ は角周波数である。ここで実数部は粘性の影響を、また虚数部は弾性の影響を与える。今、第 j 層において、移流項を無視した運動方程式を考える。

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_j} \frac{\partial p_j}{\partial x} + \nu_{ej} \left(\frac{\partial^2 u_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_j}{\partial z^2} \right) \quad \dots (5)$$

$$\frac{\partial w_j}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_j} \frac{\partial p_j}{\partial z} + \nu_{ej} \left(\frac{\partial^2 w_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_j}{\partial z^2} \right) \quad \dots (6)$$

複素係数 ν_{ej} の値を(4)式で与え、以下 u , w , p (圧力) η (界面変位) について(7)に示すような周期解を仮定する。 k を波数として

$$u_j = \hat{u}_j e^{i(kx - \sigma t)}, \quad w_j = \hat{w}_j e^{i(kx - \sigma t)}, \\ p_j = \hat{p}_j e^{i(kx - \sigma t)}, \quad \eta_j = \hat{\eta}_j e^{i(kx - \sigma t)} \quad \dots \dots \dots (7)$$

(5), (6)を t で微分することにより、(7)のような解を持つ支配方程式の表示は Hsiao and Shemdin⁶⁾ のものと一致し、以下ようになる。

$$\frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} = -\frac{1}{\rho_j} \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial p_j}{\partial x} + \nu_j \frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 u_j + \frac{G}{\rho} \nabla^2 u_j \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$\frac{\partial^2 w_j}{\partial t^2} = -\frac{1}{\rho_j} \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial p_j}{\partial z} + \nu_j \frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 w_j + \frac{G}{\rho} \nabla^2 w_j \quad \dots \dots \dots (9)$$

すなわち(4)のように表現することにより、弾性の効果をモデルに取り入れることができた。他に以下の連続式を用いる。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x} + \frac{\partial w_j}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

(5), (6), (10) に (7) を代入し、未知数は以下に示す境界条件を用いて決定する。境界条件等の取り扱いが多層粘性流体モデル⁵⁾とほとんど同様に以下のように示される。

水面に於いて ($z = \eta_1 + h_1$)

$$\frac{\partial \eta_1}{\partial t} = w_1 \quad (11)$$

$$p_1 - 2\rho_1\nu_1 \frac{\partial w_1}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

$$\rho_1\nu_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial z} + \frac{\partial w_1}{\partial x} \right) = 0 \quad (13)$$

界面において ($z = -\sum_{i=2}^j h_i$, $z=0$ は水泥界面を表わす)

$$\frac{\partial \eta_{j+1}}{\partial t} = w_j \quad (14)$$

$$u_j = u_{j+1} \quad (15)$$

$$w_j = w_{j+1} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \rho_j\nu_{ej} \frac{\partial w_j}{\partial z} - \rho_j g \eta_j \\ &= p_{j+1} - 2\rho_{j+1}\nu_{e(j+1)} \frac{\partial w_{j+1}}{\partial z} - \rho_{j+1} g \eta_{j+1} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & \rho_j\nu_{ej} \left(\frac{\partial u_j}{\partial z} + \frac{\partial w_j}{\partial x} \right) \\ &= \rho_{j+1}\nu_{e(j+1)} \left(\frac{\partial u_{j+1}}{\partial z} + \frac{\partial w_{j+1}}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

底面において ($z = -\sum_{i=2}^n h_i$)

$$u_n = 0 \quad (19)$$

$$w_n = 0 \quad (20)$$

以上のように粘性係数の評価のみをここでのように複素数化させても、基礎方程式 (5), (6) に周期解 (7) を仮定し、未定係数を式 (11)~(20) の境界条件式を用いて定めていくという方法で多層粘性流体モデル⁵⁾と同様の方法で計算を行なうことができる。

残念ながら自立しないような非常に軟らかい粘土(含水比100%以上)における G の値の実験的な評価法はいまだに確立されていないため、ここでは G の値を変化させることにより、質量輸送速度への影響を調べる。ここで ν_j の値は、実験曲線⁷⁾で与える。

図-6 に含水比 181% として粘度を計算し、弾性率 G を変化させた場合の底泥層内単位幅当たりの断面総質量輸送量の変化を示す。図で縦軸は戻り流れがないとしたときの断面の質量輸送量を示し、この量は図-2 を計算

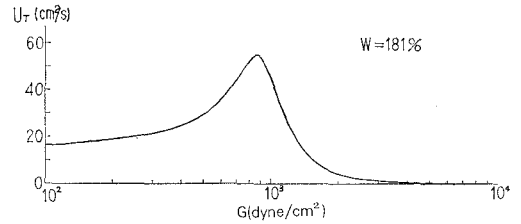


図-6 弾性係数 G の変化に伴う層内質量輸送流量の変化 (G : dyne/cm²)

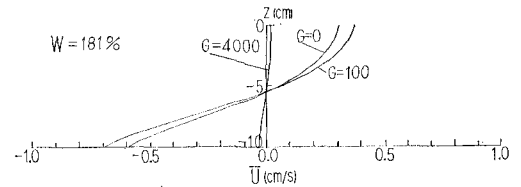


図-7 弾性係数 G の変化に伴う質量輸送速度分布の変化 (G : dyne/cm²)

した際の戻り流れの総流量に等しい。図より弾性係数が $8 \sim 9 \times 10^2$ dyne/cm² で表わされる範囲にピークがあり、入射波に対して底泥層が共振をおこしている。それ以降、質量輸送は急速に減少することがわかる。一般に含水比 100% 程度のカオリナイト粘土では 10^3 dyne/cm² 以上程度の弾性係数が報告されており、本ケースにおいてもその程度の値が妥当と推測される。このような範囲では質量輸送の値は弾性の影響によりかなり小さくなり、実験によって得られた結果と傾向が一致する。

図-7 にはやはり含水比 181% の場合の図-2 に対応図にする質量輸送速度分布図をいくつかの G について示してある。図に示すように G 値が 4×10^3 dyne/cm² 程度の値とすると実験値との対応が良くなる。 G の値を正確に計測することは当面の課題となる。

4. 水層内の質量輸送速度結論

先に 3.(1) において示した計算法により、底泥層内と同様に水層内の質量輸送速度をも同時に求めることができる。ここで求める水層内質量輸送速度は、浮泥の濃度分布と掛け合わせることで浮泥輸送量を求める場合に、必要となる。まず、本計算法の妥当性を確かめるために、底泥層を低い含水比 (30%) として固定床に近い条件で計算し、Longuet-Higgins⁹⁾ による固定床に対する質量輸送速度の鉛直分布と比較を行なった。その結果を

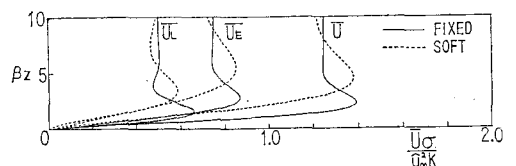
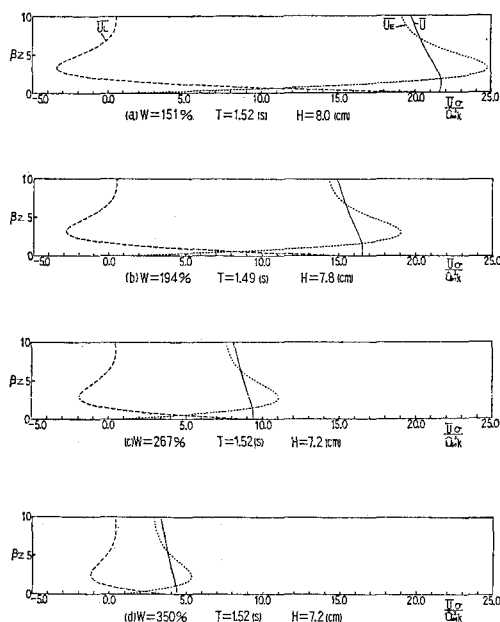


図-8 固定床と底泥床上の質量輸送速度の比較



図—9 底泥床上的の水層内質量輸送速度分布

図—8 に示す。図で k は波数、 σ は角振動数、 z は界面からの距離、 u_0 は境界層外縁における水平流速振幅、 ν_1 は水の動粘性係数である。また、 $1/\beta$ は境界層厚さの尺度で、 $\beta = (\sigma/2\nu_1)^{0.5}$ である。この図によれば、底泥床の方が境界層が少し厚くなっているが、質量輸送速度の値はほぼ一致しており、この計算法は妥当であると思われる。

図—9 (a)~(d) は 4 種類の含水比について水層内質量輸送速度を計算したものである。この図では特に Euler 流の質量輸送速度が固定床に対するものと分布形状が大きく異なっている。また Euler 流の質量輸送速度、Lagrange 流質量輸送速度とも固定床の場合の 5~10 倍程度になっている。これらの 4 ケースを比較すると、含水比が低くなるにつれて、質量輸送速度が高くなっていくこともみられる。これらの効果は浮泥フラックスを算定する際に重要である。

こうした現象を検証するために、先に述べた実験中に水層に染料を入れてビデオカメラで撮影する方法を用いて観察した。実験では界面付近で染料が拡散してしまい、計測結果を定量化するにいたらなかった。しかしながら、界面付近で岸方向に大きく輸送されることは定性的に確認できた。

5. 結 論

底泥が第一底泥グループ（カオリナイト系粘土）であ

る場合について泥層内および水層内の質量輸送速度について検討し、以下の結論を得た。

(a) カオリナイト底泥の層内質量輸送速度については、底泥を粘性流体と仮定することにより、Dalrymple and Liu⁴⁾ の与えた二層粘性流体モデルあるいは中野ら⁵⁾ の多層粘性モデルを用いて泥層内の流速場を計算し、層内質量輸送速度を Lagrange 成分、Euler 成分それぞれについて数値的に算定するモデルを示した。その結果を室内実験で得られた結果と比較検討し、粘性流体モデルの適用限界を弾性体的な挙動と比較して検討した。さらに上記の理論を多層粘弾性体モデルに拡張し、弾性の影響を調べた。

(b) 底泥層が運動するために上部の水層での質量輸送速度は固定床の場合に比べて変化する。そこで水層についても上記の多層粘性流体モデルを用いることにより、質量輸送速度を Lagrange 成分、Euler 成分それぞれについて数値的に算定する方法を示した。これにより、浮遊底泥の濃度分布とかけ合わせることで、浮泥輸送フラックスが求められる。

本研究の過程で電力中央研究所、榊山勉氏に頂いた文献 (3) に対する貴重な御意見に対し、謝意を表する。また、本研究は文部省科学研究費奨励研究 (A) No. 6375 0519 (代表者・柴山知也) および五洋建設株式会社の研究費により行なわれたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 大坪国順・村岡浩爾: 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, 第 363 号, pp. 225~234, 1985.
- 2) 柴山知也・中西雅明・石原 肇・佐藤慎司: 波による底質粘土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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 中野 晋・鶴谷広一・鷹濱 潤: 相当粘度を用いた波と底泥の相互干渉についての計算, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 266~270, 1987.
- 6) Hsiao, S. V. and O. H. Shemdin: Interaction of ocean waves with a soft bottom, Jour. of Physical Oceanography, Vol. 10, pp. 1121~1131, 1980.
- 7) 鶴谷広一・中野 晋・鷹濱 潤: 回転粘土計による底泥の流動特性の検討, 港湾技研資料, No. 556, 29 pp., 1986.
- 8) McPherson, H.: The attenuation of waves over a non-rigid bed, J. F. M., Vol. 97, Part 4, pp. 721~742, 1980.
- 9) Longuet-Higgins, M. S.: Mass transport in water waves, Phil. Trans. Roy. Soc. of London, A. No. 903, Vol. 245, 1953.