

波による軟らかい底質粘土の質量輸送

柴山 知也*・滝川 浩**・堀川 清司***

1. はじめに

海岸構造物を建設する場合、特に大河川の河口付近では軟らかい粘土底質上での設計を考慮しなければならない。また、東京湾内などにおけるヘドロも軟かい底質粘土と同様の性質をもっており、波による粘土の輸送について研究することは、これらの湾内における底質浄化の問題とも密接に結びついている。

波作用下の粘性底質の挙動に関する研究は Gade¹⁾ 以来いくつかある。Gade¹⁾ は底泥を粘性流体として扱い、長波の場合について、波高の減衰率を求めている。また Dalrymple・Liu²⁾ は、境界層近似を行って、ポテンシャル理論による解に上層及び下層の境界層における回転流速成分を加えることにより、粘土層内流速場の解析解を得ている。この他に Hsiao・Shemdin³⁾ は粘土層を粘弾性体として取り扱い、波高減衰を求めているし、Yamamoto et al.⁴⁾ も粘弾性体として取り扱っている。以上の取扱いは主として底質粘土の存在による表面波高の減衰の効果に注目したものであるが、一方、粘土の質量輸送については、永井ら⁵⁾ が、質量輸送速度についての測定例を示しているものの、系統的な取り扱いが行われていないようである。また Zhao⁶⁾ は底泥の挙動についての過去の研究結果をとりまとめている。

本研究では以上に挙げた既往の研究を踏まえ、波による軟らかい底質の輸送現象のうち、特に粘土層内の波動による質量輸送に注目し、実験的、理論的に解析を行うこととする。

2. 実験方法

実験は長さ 11 m、幅 0.2 m、高さ 0.3 m の小型二次元造波水路を用いて行い、水路中央底部に 2 m にわたって粘土を入れる観測部分を設置した。図-1 に概略図を示す。観測断面において、水層厚は 10 cm、粘土層厚は 9.5 cm である。底質粘土としては、含水比 200～500% のカオリナイト（真比重 2.67、中央粒径 0.0012

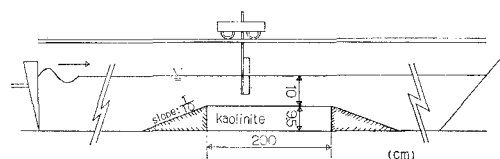


図-1 実験装置

mm) を用い、波の条件は粘土層端部で波高 1.5～1.7 cm、周期 1 s とした。測定項目は含水比および粘度の時間的な変化、水面波高減衰率、界面波の波高、粘土層内の質量輸送速度である。

まず底質粘土の作成方法について述べる。一般に任意の含水比の粘土を作成するには次の 2 つの方法が考えられる。すなわち、粉末カオリンと水を水槽中でかき混ぜ、沈澱、圧密させる方法（沈澱法）がまず考えられる。この方法は自然状態の粘土に近い状態を再現することができ、高含水比の粘土層を作成する場合には容易であるが、一方、低含水比の粘土層を作る場合には時間がかかりすぎる欠点がある。低含水比の粘土を作成するためには、水と粘土を混合し、電動攪拌機を用いて混ぜ合わせることもできる（攪拌法）。この場合には、均一の含水比の粘土をつくるのが容易であるが、粘土塊をよく練る必要がある。本研究では低含水比の実験を行うために、攪拌法を用いた。なお、粘土のチクソトロピー、フロック化などの影響を実験を通して均一にするため、実験は攪拌後直ちに開始することとした。

本研究では粘土を粘性流体として解析しようと試みた。粘度は一般に含水比によって変化し、またカオリン粘土が擬ニュートン流体であるため、ずり速度によっても変化する。そこでここでは単一円筒回転粘度計（ずり速度は 13 1/s、24.4 1/s の 2 段階に切り換えることができる）による計測結果に、大坪・村岡⁷⁾ の与えている実験曲線を参考にして図-2 に与えるような簡易算定図を作成し、粘度の評価を行うこととした。

含水比の測定には採泥器を用い、1 cm³ ほどのサンプルを採取して計測した。水面波高の測定には容量式波高計を用いた。また、界面波高の測定は、水路中央部にポイントゲージを挿入し、静水時の界面と、界面波の峰の高さの差を測定し、その差を界面波の振幅とした。な

* 正会員 工博 東京大学講師 工学部土木工学科

** 正会員 東京ガス(株)

*** 正会員 工博 東京大学教授 工学部長

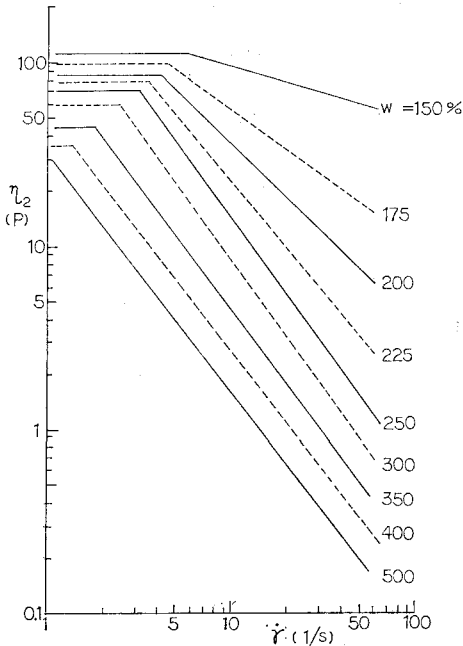


図-2 粘度算定図 (η_2 : 粘度, $\dot{\gamma}$: ずり速度, w : 含水比)

お, ガラス面における界面波高は壁面の影響によって, 水路中央部のものよりもかなり小さい値をとるため, 界面波高の代表値とはなり得ないと考えられる. 永井ら⁵⁾も指摘しているように, 界面波は表面波に比して若干位相が先行していることが観察できた.

質量輸送速度の計測には直径 5 mm, 長さ 1 cm の中空ポリエチレンチューブを用い, 内部に粘土を注入してトレーサーとして用いた. 粘土層内の各所に色別したトレーサーを埋め込み, 深さ別, 場所別の質量輸送速度を求めた. その際, 壁面から 2~3 cm 程度までの領域は, 壁面境界の影響により水路中央部に比べて著しく異なった挙動を示すため, この部分の結果は解析の対象としなかった. 壁面付近には, 波の進行と同一方向の質量輸送に対応する, 沖向きの戻り流れが集中的に存在しているものと考えられる.

3. 理論的解析

ここでは Dalrymple・Liu²⁾の与えた粘土層内流速場の解析解を用いて, 質量輸送速度を求める. 図-3 に示すように記号を定義する. 図で ρ は密度, ν は動粘性係数, 添字 1 と 2 はそれぞれ水層及び粘土層を表わす. また, η , ξ はそれぞれ水面, 界面の変位, h , d はそれぞれ静水時の水層厚, 粘土層厚である. 今, 表面波形を

$$\eta = ae^{i(kx - \omega t)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

で与えれば, 上層, 下層それぞれの非回転流速場の速度ポテンシャルは,

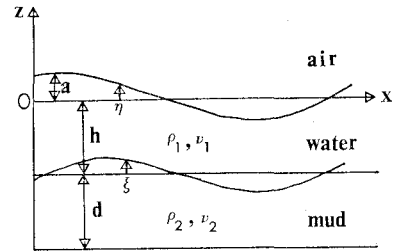


図-3 記号の定義

$$\phi_1 = -(iga/\sigma) \sinh kz [(\sigma^2/gk) + \coth kz] \cdot e^{i(kx - \omega t)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\phi_2 = -(iga/\sigma) (\cosh kh / \sinh kd) \cdot \cosh [k(z+h+d)] \cdot [(\sigma^2/gk) - \tanh kh] \cdot e^{i(kx - \omega t)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる. ここで波数 k は分散関係式

$$\sigma^2/gk = [-l + (l^2 - 4mn)^{1/2}] / 2m \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$l = (\rho_2/\rho_1) \tanh [k(h+d)] [1 + \tanh kd \tanh kh]$$

$$m = (\rho_2/\rho_1) + \tanh kh \tanh kd$$

$$n = [(\rho_2/\rho_1) - 1] \tanh kh \tanh kd$$

から求められる. 一方界面境界層の影響による粘土層内回転流速の水平成分 U_2 は次式で与えられる.

$$U_2 = C_2 \cdot \exp [(1+i)(\sigma/2\nu_2)^{0.5}(z+h)] e^{i(kx - \omega t)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし

$$C_2 = \frac{gka}{\sigma \sinh(kh)} \frac{(\rho_2/\rho_1)^2}{[1 + (\rho_2/\rho_1)(\nu_2/\nu_1)^{0.5}]} \cdot \left\{ (\sigma^2/gk) - \frac{1}{2} \sinh(2kh) \right. \\ \left. \cdot [\coth kh + \coth kd] [(\sigma^2/gk) - \tanh kh] \right\}$$

である. また底面境界層の影響による粘土層内回転流速の水平成分 U_3 は次式で与えられる.

$$U_3 = C_3 \cdot \exp [-(1+i)(\sigma/2\nu_2)^{0.5}(z+h+d)] \cdot e^{i(kx - \omega t)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし

$$C_3 = -\frac{gka}{\sigma} \frac{\cosh kh}{\sinh kd} \left[\frac{\sigma^2}{gk} - \tanh kh \right]$$

これらの結果からそれぞれの鉛直成分 W_2 , W_3 も境界層近似と質量保存則から求められる.

以上の Dalrymple・Liu²⁾の結果に基づき, ここでは粘土層内質量輸送速度を計算する. 式(3)の速度ポテンシャルから粘土層内非回転流速成分 u_2 , w_2 を求めれば質量輸送速度 U_m は次式により求められる (―― は時間平均を表わす).

$$U_m = \overline{u_2 + U_2 + U_3} + \frac{\partial(u_2 + U_2 + U_3)}{\partial x} \int (u_2 + U_2 + U_3) dt$$

$$+ \frac{\partial(u_2 + U_2 + U_3)}{\partial z} \int (w_2 + W_2 + W_3) dt \dots\dots\dots (7)$$

図-4 に水面波高 1.4 cm, 周期 1 s の場合の 1/10 周期ごとの $(u_2 + U_2 + U_3)$ の深さ方向の分布を含水比別に示し, 図-5 には表面波高を与えた場合の $z = -15$ cm における質量輸送速度の算定結果を含水比及び波高をパラメータとして示す. 図-6 は質量輸送速度の鉛直方向分布を含水比別に, 水面波高 1.4 cm, 周期 1 s の場合を例として示したものである.

Dalrymple・Liu²⁾ はこの他に波高減衰定数, 界面波高を求める式なども提案しているが本論では省略する.

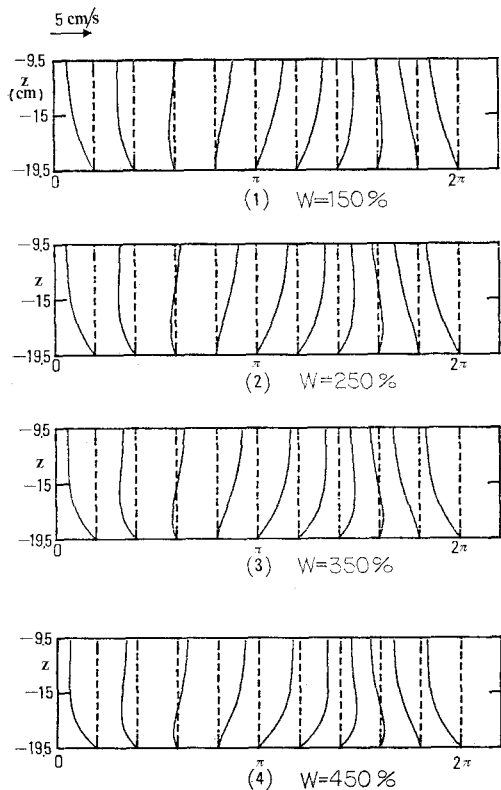


図-4 粘土層内水平流速の時間的変化

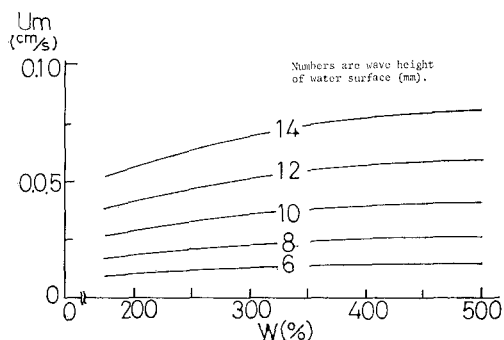


図-5 質量輸送速度 U_m の理論値 ($z = -15$ cm)

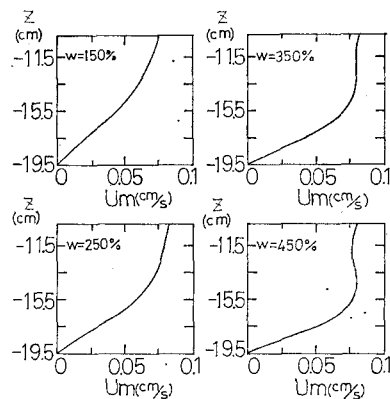


図-6 質量輸送速度鉛直分布の理論値

4. 解析結果

ここでは第2節に示した実験の結果について述べ, 第3節で述べた理論計算の結果と適宜比較する.

(1) 含水率の時間変化

一般に波作用下の底泥の含水率は, 界面での波動による水の混合・浸透と, 圧密とのつり合いによって決まると考えられる. 図-7 に静水中に放置した場合の深さ別の含水比の時間的変化を示す. 図より圧密の進行に伴って含水比が減少していく過程が読みとれる. 一方 図-8 に示したのは, 12 時間にわたって波を作用した時の含水比の時間的変化である. 初期含水比に比べて, 上層で

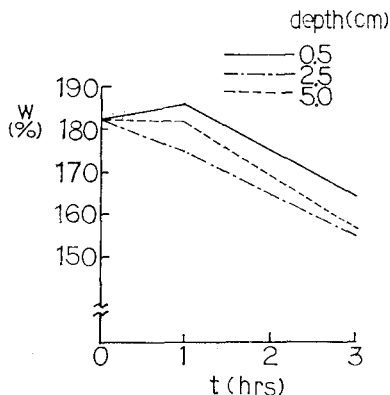


図-7 静水中での含水比の時間変化の例

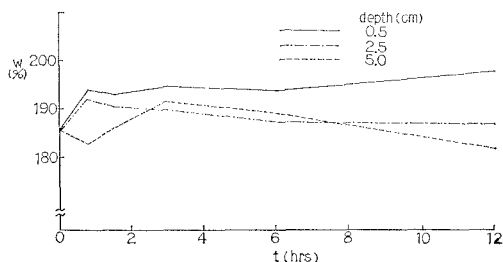


図-8 波作用下の含水比時間変化の例

は上昇し、中層、下層では変わらずに一定値を示している。これは以下のような理由によると考えられる。すなわち、上層では界面波によって水の粘土層への混合が発生する。一方、時間の経過に伴ない、圧密速度と波による水の浸透速度がつり合うと、含水比はその後一定の値をとるようになる。図-9 は上層のものについて、初期含水比別に波作用後 10 分間の含水比の上昇量を比較したものであるが、初期含水比 w_0 が高いほど、上昇量 Δw が増大することを示している。このような含水比の変化は、図-2 に示すように粘度の変化を伴ない、粘土の力学的な性質を変化させるために、底泥の輸送現象の解析にとって無視できない効果をもつと考えられる。

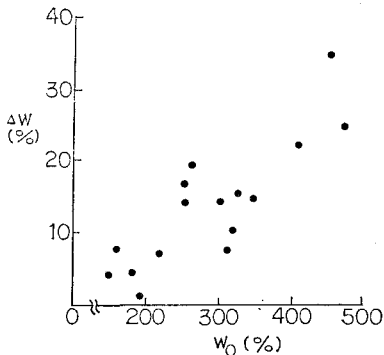


図-9 波作用 10 分後の含水比上昇量の比較

(2) 波高減衰

図-10 (1)~(10) に波高減衰の実験値と理論値 (Darlymple・Liu²⁾) を比較したものを示す。含水比が低い場合には、実験によって求めた減衰率は理論によるものよりかなり大きな値を示していることがわかる。この原因としては壁面の境界層の影響、低含水比領域での粘度の評価の問題、Darlymple・Liu²⁾ の境界層近似の仮定が特に高粘度の場合に成立していないことなどが考えられる。また波高減衰率の実験値を含水比別に整理すると、含水率 250% 付近にピークをもつことがわかった。理論値ではこのようなピーク値が存在しないことも今後の検討課題の一つである。

(3) 界面波高

図-11 に界面波振幅を表面波振幅 a で無次元化したものの含水比による変化を示す。図には表面波振幅 a を用いて算定した理論曲線も同時に示してある。波高減衰と同様に、実験値では極値があらわれることがわかる。

(4) 質量輸送速度

トレーサーの移動距離を時間で除して求めた質量輸送速度の粘土中層 ($z = -15$ cm) での値を含水比、波高別に示したのが 図-12 である。図には実験値を用いて描いた実験曲線も示してある。波高が大きいくほど質量輸送速度も大きく、また初期含水比 250% 付近に極値をもつことがわかる。ただし永井³⁾が指摘した「波高の 2 乗

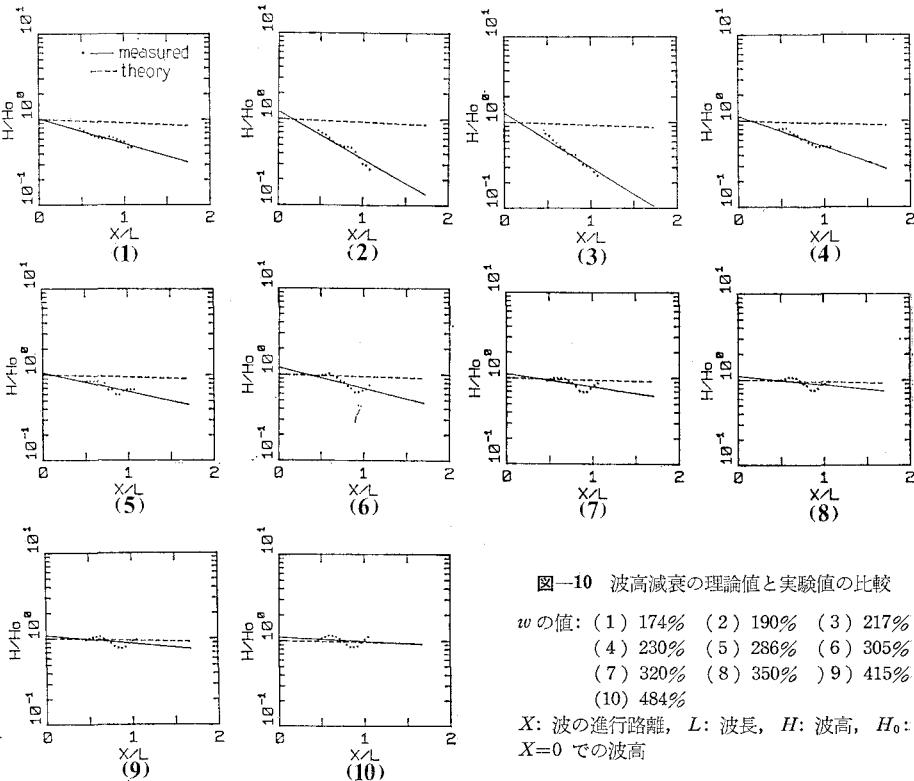
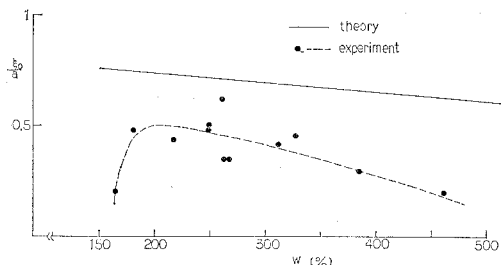


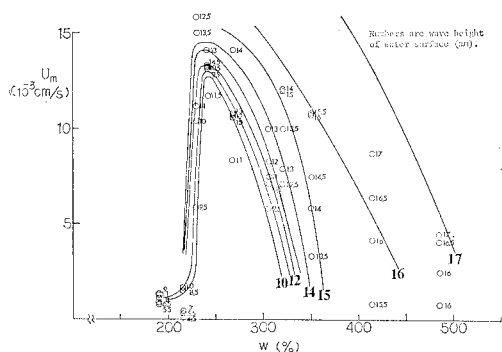
図-10 波高減衰の理論値と実験値の比較

w の値: (1) 174% (2) 190% (3) 217%
(4) 230% (5) 286% (6) 305%
(7) 320% (8) 350% (9) 415%
(10) 484%

X : 波の進行距離, L : 波長, H : 波高, H_0 :
 $X=0$ での波高



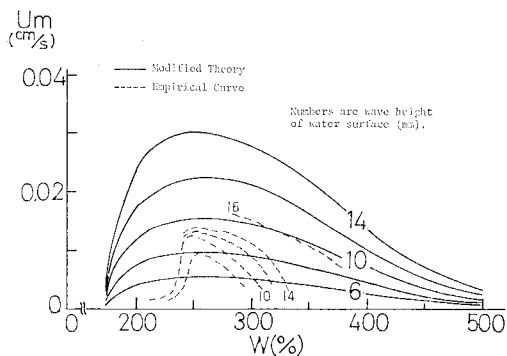
図—11 界面波振幅の実験値と理論値の比較（実験値は粘土層沖側端部より 60 cm の計測値）



図—12 質量輸送速度の実験値と実験曲線

に比例する」こととは異なった結果を示している。

図—5 の理論曲線と 図—12 の実験曲線を比べると、理論値が実験値の 2 倍程度の値となるようである。そこで 図—11 に与えた界面波高の実験曲線を用いて理論曲線を修正して、実験曲線と比較したのが 図—13 である。当然のことながら、含水比 250% 付近にピークをもつことを含めて、両者の一致度は良くなっている。



図—13 界面波高の実験値を用いて得た質量輸送速度の理論値と実験値の比較

5. 結 論

本研究では、波作用下の底泥の挙動について、理論的、実験的に検討を行い、以下に示す結論を得た。

a) 実験水槽内における質量輸送速度の計測により、質量輸送速度は含水比 250% 付近にピーク値をもつことがわかった。

b) 粘土層内の流速場を Darlymple・Liu²⁾ の与えた境界層近似を用いて計算し、質量輸送速度を算定する理論式を求めた。その結果を実験値と比較すると、界面波高に実験曲線を与えれば両者はかなり良く一致する。

c) 時間の経過に伴い、波の作用による粘土層への水の浸透速度と、圧密速度がつり合うまで粘土層の含水比は上昇し、その後一定の値となる。この場合、界面付近の含水比の上昇量が特に大きい。この含水比の変化は、粘度の変化を伴い、底泥の輸送量に効果を及ぼす。

d) 波高減衰率については実験値がある含水比でピークをもつのに理論値はピークがないなど両者が必ずしも一致しないことがわかり、その理由について考察した。また、界面波の振幅についても理論値と実験値とを比較した。

今後は理論的扱いの改良をはかると共にカオリナイトとは異った力学的特性をもつモンモリロナイトなどを用いた研究を行い、今回の結果と比較する必要がある。

本研究は、河上記念財団研究助成による研究成果である。また本研究を行うにあたり、東京大学の渡辺晃教授に多くの助言を頂いたことを記して謝意を表する。

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) Darlymple, 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) Yamamoto, T., S. Takahashi and B. Schuckman: Physical modeling of sea-seabed interaction, Jour. of Engineering Mechanics, Vol. 109, No. 1, ASCE, pp. 54~72, 1983.
- 5) 永井紀彦・山本督夫・L. Figuerou: 波とやわらかい底質粘土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.
- 6) Zhao, Z.: Study on the interaction between waves and moving bottom, Report of Coastal Eng. Labo., Univ. of Tokyo, 1984 (unpublished).
- 7) 大坪国順・村岡浩爾: 底泥の特性と限界掃流力の関連について, 第25回水理講演会論文集, pp. 73~78, 1981.