

波による底泥の浮遊機構に関する研究

柴山知也*・中西雅明**・石原 肇***・佐藤慎司****

1. 序 論

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。東京湾内などにおけるヘドロも軟らかい底質粘土と同様の性質をもっており、粘土の挙動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結び付いている。本研究の目的は海底に堆積した底質粘土が表面波の作用によって再び海水中に浮遊する過程を解析し、浮遊量の評価手法を開発することである。このような堆積底泥が波に対して安定であるか否かは堆積物からの栄養塩類等の溶出の問題とも結び付いているが、泥粒子そのものの挙動も、海洋における生態系に影響する浮遊粒状物質の供給源として重要であると思われる。このような泥粒子は比較的海水中へ浮遊しやすく、また一度浮遊するとフロク化しない限りなかなか沈降しないという特性を持っており、海域の汚染物質として重要である。しかしながら底質粘土が粘性を持つために現象が複雑であり、また実験にあたって条件を制御しにくいことから、従来研究されることが少なかった。そこで本研究では波による軟らかい底質粘土の輸送現象のうち、特に粘土層表面から水層への浮遊現象に着目し、実験的・理論的に解析することとする。

波による底泥の挙動に関する理論的研究は Gade¹⁾ に始まる。彼は底泥を粘性流体と仮定し、長波の仮定の下に理論的に粘土底層上を進行する水表面波の減衰率を求めた。一方、Dalrymple and Liu²⁾ は粘土層内の流速場を求める二層流体モデルを定式化し、さらに境界層近似を用いて粘土層内の流速場の解析解を得ている。最近 Hsiao and Shemdin³⁾ や Yamamoto et al.⁴⁾ は粘土層を粘弾性体として取り扱っている。以上の取り扱いとは主として粘土底面上を進行する水表面波の減衰を求めるための研究である。一方底泥の物理的性質については大坪、村岡⁵⁾ の研究が先駆的なものであるが最近、鶴谷ら⁶⁾ が塩水と第二底泥グループ（ベントナイト）の底泥を混ぜ

合わせると流動特性が第一底泥グループ（カオリナイト系）に近いものとなることを指摘している。粘土の輸送については永井ら⁷⁾ が造波水路を用いた実験を行ない、層内質量輸送についての実験結果を得ている。さらに底泥輸送に直接着目した研究としては層内質量輸送を取り扱った柴山ら⁸⁾ の研究がある。この他に五明ら⁹⁾ および鶴谷ら¹⁰⁾ の底泥の挙動に関する研究も最近の研究成果として注目される。

大坪、村岡⁵⁾ によれば底泥はその物性から第一底泥グループ（カオリナイト系）と第二底泥グループ（ベントナイト系）に分類できる。本研究ではこれら二つのグループの底泥について造波水路を用いて波作用下で室内実験を行ない、それらの挙動を観察した。その結果、上記二つの底泥グループではその輸送機構が異なり、カオリナイトについては粘土層内質量輸送と水層に浮遊した粘土の輸送が主要な要因となり、またベントナイトにおいては水層に浮遊した粘土の輸送が支配要因になることが分かった。本研究ではさらにカオリナイト、ベントナイトそれぞれについて浮遊機構を次のように検討した。

2. カオリナイト粘土に関する検討

(1) 実 験

まずカオリナイト粘土の浮遊について検討した。実験は図—1 に示す中型二次元造波水路を用いて行ない、水路中央底部に 3 m にわたって粘土を入れる観測部分を設置した。観測断面において、水層厚は 50 cm、粘土層厚は 20 cm である。含水比 100-350% のカオリナイトを底泥として用いた。波の条件は粘土層端部で波高 11-12 cm、周期 1.7 s とした。粘土の基本的特性としては粒度分布、比重、粘度を測定した。また波作用下の実験では、底泥の挙動の観察、底泥含水比鉛直分布の時間的変化の計測、水層内浮遊底泥濃度の場所的分布および時間的変化の計測を光学式濃度計を用いて行なった。実験開始後、比較的短時間で浮遊底泥濃度は定常状態に達した。また、底泥の底面からの飛び出しについては、観察の結果、水-粘土界面での粘土のずりはがし過程が支配的であった。そこで界面での粘土-水の間の相対速度に注目して検討した。さらに低含水比領域では粘土の弾性

* 正 会 員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** 学生会員 東京大学大学院工学系研究科

*** 正 会 員 (株)東洋エンジニアリング

**** 正 会 員 工博 横浜国立大学助手 工学部建設学科

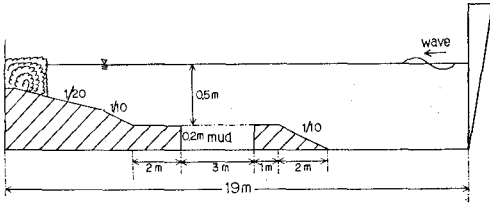


図-1 実験装置

的挙動が問題となるため、粘土を粘弾性体と仮定して Hsiao・Shemdin³⁾ の理論を用いて水-粘土の相対速度を算定した。

(2) Hsiao・Shemdin³⁾ のモデル

Hsiao・Shemdin³⁾ は底泥を粘性と弾性の両方が作用する粘弾性体と仮定してせん断応力とせん断ひずみとの関係を次式で表わした。

$$\tau = G\varepsilon + \mu \dot{\varepsilon} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 G はせん断定数、 μ は粘性係数、 ε はせん断ひずみ、 $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$ である。図-2 に示すように x 軸を水平方向、 z 軸を鉛直方向にとれば粘土層内の運動方程式は

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho_m} \nabla^2 u + \nu \nabla^2 \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial t} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho_m} \nabla^2 w + \nu \nabla^2 \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial^2 p}{\partial z \partial t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここで、 u, w はそれぞれ x, z 方向の流速、 ρ_m は底泥密度、 p は圧力、 $\nu = \frac{\mu}{\rho_m}$ である。周期的な解を得るために k を波数、 ω を角振動数として流れ関数を

$$\phi = S(z)e^{i(kx - \omega t)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

と置く。さらに以下に示す水層に関する方程式と境界条件とを組み合わせることにより、これらの方程式を解くことができる。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$p = 0 \quad \text{at } z = h \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad \text{at } z = h \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$p_{\text{water}} = p_{\text{mud}} \quad \text{at } z = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)_{\text{mud}} = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$w_{\text{water}} = w_{\text{mud}} \quad \text{at } z = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$u = 0 \quad \text{at } z = -H \quad \dots\dots\dots (11)$$

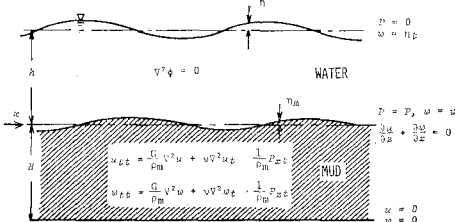


図-2 記号の定義

$$w = 0 \quad \text{at } z = -H \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 ϕ は水層の速度ポテンシャル、 h は水層厚さ、 η は水面高さ、 H は底泥厚さである。

(3) 底泥飛び出し率の評価

定常状態に達した浮遊底泥濃度から、底泥の飛び出し率 P_m (g/cm²・s) を逆算し、初期含水比 w_0 を用いて整理すると、図-3 のようになり、含水比 200% 付近にピークを持つことがわかる。ここではさらに Hsiao・Shemdin³⁾ の理論によって求めた界面での相対速度を正しいと仮定した。その際粘性係数 μ は柴山⁸⁾の方法を鶴谷⁶⁾のデータで修正したものを用いて評価した。またせん断定数 G の値は種々の値を代入して計算し、粘土の挙動と比較検討したが結局 $G=0$ として計算した値

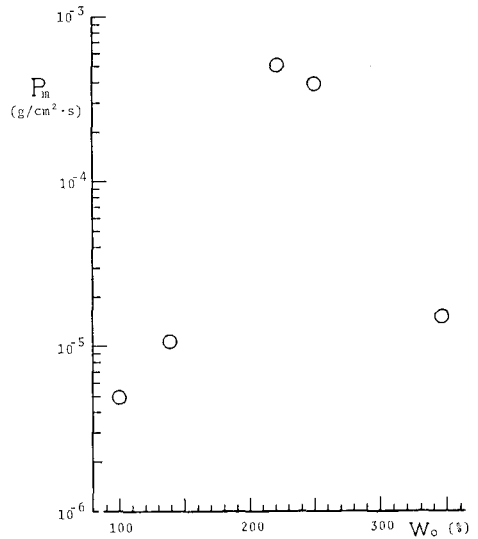


図-3 底泥飛び出し率と含水比の関係

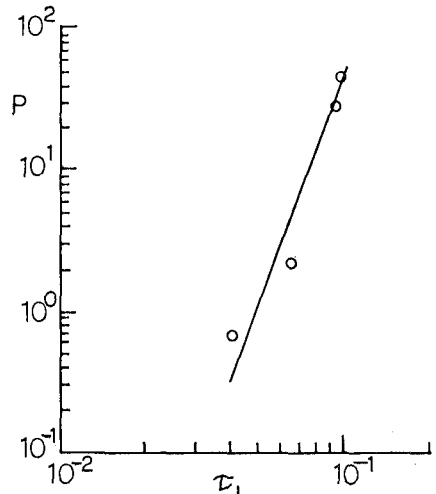


図-4 無次元飛び出し率と無次元掃流力の関係

を用いた。更に粘土表面から突出した泥粒子について Jonsson¹¹⁾ の波による摩擦係数を用いて粒子にかかるせん断力を見積った。さらに底泥が波から受けるせん断力と底泥のせん断強度の比を見積り、実験から求めた無次元飛び出し率との関係を求めた。図-4 にその結果と回帰直線を示す。図で縦軸 P は大坪・村岡¹²⁾ にならって

$$P = \frac{A_1 P_m \mu}{A_2 \rho_m d_m \tau} \dots \dots \dots (13)$$

で表わされる (A_1 : 粒子の面積に関する形状定数, A_2 : 粒子の体積に関する形状定数, μ : 粘土の粘度, ρ_m : 泥粒子密度, d_m : 粒径)。また横軸 τ_1 は

$$\tau_1 = \tau / \tau_2$$

で表わされる (τ_2 : 破壊限界掃流力 N/m)。以上より弾性の効果を考慮し、界面における水と粘土の相対速度を計算することにより、底泥の飛び出し量を底面せん断力より見積ることが可能となる。

3. ベントナイト粘土に関する検討

(1) 実験とその結果

実験には図-1 に示した水槽を用いた。底質粘土としては含水比 200-800% のナトリウムモンモリロナイトを主成分とするベントナイトを用い、波の条件はカオリナイトの場合と同様に粘土層端部で波高 11-13 cm, 周期 1.7 s とした。粘土の基本的特性としては粒度分布, 比重, 粘度, 粘着力を測定した。また波作用下の実験では、底泥の挙動の観察、底面に形成される ripple (泥れん) 形状の計測、底泥含水比鉛直分布の時間的変化の計

測、水層内浮遊底泥濃度の場所的分布および時間的変化の計測を行なった。

まず底泥の挙動について述べる。一定の波の条件のもとに底泥の含水比を変化させると、含水比が大きくなるにつれて、(a) 表面粒子の初期移動の開始、(b) リップル (泥れん) の発達、(c) 泥層の振動、(d) 泥層の破壊、(e) 泥層の流体としての波動運動、が順に観察された。この運動形態の変化を水粒子運動による底面摩擦応力の振幅 (τ) と粒土の粘着力 (C) との比で整理し、またそれぞれの運動形態の様式を示したのが図-5 である。図で底泥層の破壊が起こる場合には現象は定常的とはならず、接水面積が増えるにつれてまた底泥塊が自由に運動するにつれて、底面付近の浮遊泥濃度が加速度的に増加していくことが観察できた。

濃度分布の時間変化を Case 4-7 について図-6 に示す。図より全体として浮遊砂の場合と同様に底面付近に

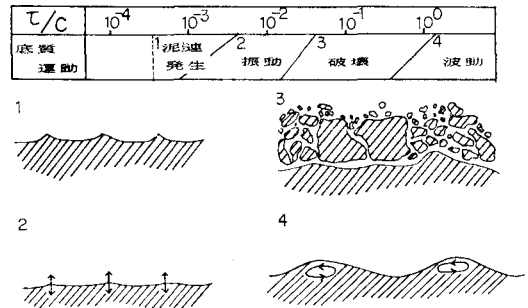


図-5 ベントナイトの挙動の変化

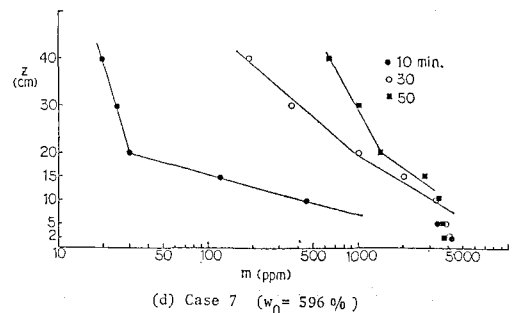
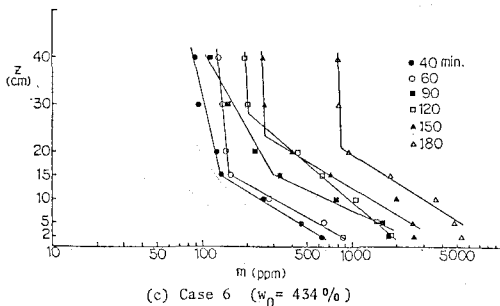
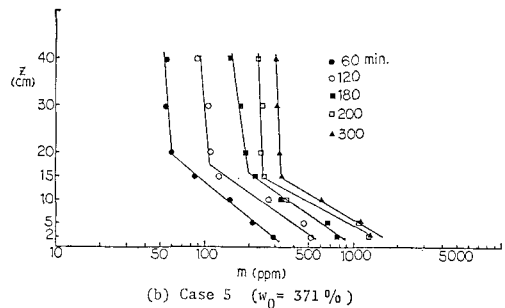
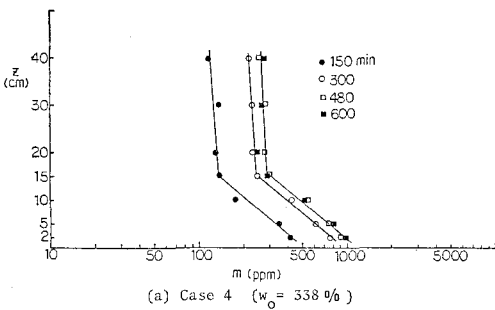


図-6 ベントナイト浮泥濃度の場所的分布の時間変化

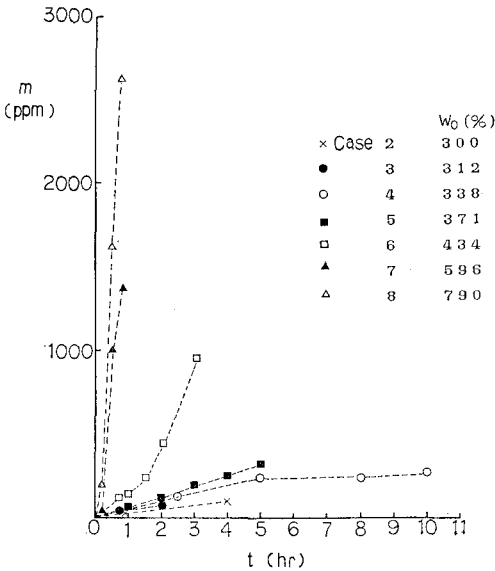


図-7 底面付近の濃度の時間変化

高濃度の層が存在することが分かる。ただし時間的に濃度が上昇傾向にあり、定常状態に達していない。この点について検討するため、界面から 20 cm の高さに注目してその点での濃度の時間的な変化を示したのが 図-7 である。Case 5 までは初期には濃度が増加しているが長時間経過すると一定値を示し、定常状態に近づいていく傾向がある。Case 6 では時間にほぼ比例しており、Case 7, 8 では時間の経過につれて急激な増加を示している。

(2) 浮泥濃度の算定方法

次に浮遊泥濃度の時間的な変化および場所的分布を以下

に示す一次元拡散方程式を非定常の境界条件のもとで数値的に解くことにより、記述することを試みた。

$$\frac{\partial m}{\partial t} = w_f \frac{\partial m}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial m}{\partial z} \right)$$

ただし、 m : 濃度、 w_f : 浮遊泥沈降速度であり、渦動粘性係数 ϵ_z は岸ら¹³⁾にならって、 $\epsilon_z = \kappa u_*^*(z+z_0)$ で与えた (κ : カルマン定数、 u_*^* : 底面摩擦速度振幅、 z_0 : 粗度)。さらに底面の境界条件は底泥の挙動の観測結果及び底面付近の濃度計測に基づき以下のように定めた。すなわち、底泥が振動して界面付近の含水比が時間と共に上昇する場合については底面基準点濃度を時間に比例して増加する関数であたえ、また底泥の破壊が生じ底面付近の濃度が加速度的に増大する場合には、時間の二乗に比例して増加する関数で基準点濃度を与えた。このようにして計算した結果と実験値とを比較したものが 図-8 である。図より底面境界条件を底泥の挙動に即して与えることにより濃度の時間変化をより良く説明できることがわかる。ただし計算に用いた渦動粘性係数は実際の値より大きめであるため鉛直方向の濃度差は小さく計算される傾向がある。

4. 第一底泥グループ (カオリナイト) と第二底泥グループ (ベントナイト) の比較

本実験で得られた第一底泥グループ (カオリナイト) と第二底泥グループ (ベントナイト) の性質の相違について沈降形態、含水比の時間変化をも含めて表-1 にまとめて示しておく。二つの底泥グループの性質の相違は、底泥の波による浮遊を検討する際、まず底泥の性質を把握する必要があることを示している。

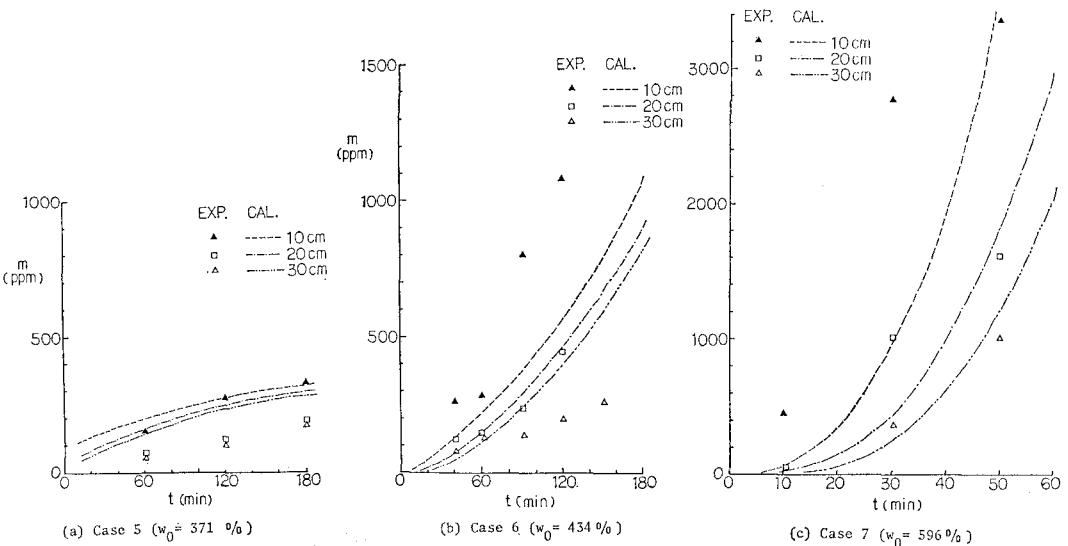


図-8 実験値と算定値の比較

表—1 カオリナイト底泥とベントナイト底泥の特性の比較

	カ オ リ ナ イ ト	ベ ン ト ナ イ ト
吸着陽イオン	Ca ²⁺	Na ⁺
沈 降 形 態	・界面沈降: 泥水層と清水層の間に明瞭な界面が見られる。	・自由沈降: 泥粒子が長時間浮遊し、界面が形成されない。
波作用下の浮泥濃度変化	・短時間で定常状態となる。 ・濃度がピークをもつ含水比が低い (本実験で200% 付近であった)。	・定常状態に達しない場合が多い。 ・濃度がピークをもつ含水比が高い (400% 以上となる)。
波作用下の底泥の挙動	・底泥の波動が広範囲の条件に対してみられる。 ・表層の含水比は時間とともにほとんど変化しない。	・底泥の挙動は含水比が高くなるにつれて泥澱発生、泥層振動、破壊、流体としての波動と変化する。 ・表層の含水比は時間とともに上昇し、定常状態にならない。
静水時における含水比変化	・深層部では短時間で急激に減少するのに対し、表層部ではゆっくり減少する。 ・減少の絶対量は比較的大きい。	・短時間で急激に減少するがその傾向は深さによらない。 ・減少の絶対量は比較的小さい。

5. 結 論

波による底泥の浮遊について検討し、以下の結論を得た。(a) カオリナイト粘土については粘弾性体モデルを用いて底面での摩擦応力を求め、底泥の飛び出し率との関係を求めた。(b) ベントナイト粘土については、底泥運動形態の違いによって境界条件を適宜与えることにより、非定常拡散方程式で浮遊底泥濃度分布の時間変化を説明できる。

本研究は文部省科学研究費 (一般 C No. 61550366, 代表者, 柴山知也) 及び河上記念財団工学助成金の援助を受けて行なわれたことを付記する。

参 考 文 献

- Gade, H. G.: Effect of nonrigid, impermeable bottom on plane surface waves in shallow water, Jour. of Marine Research, Vol. 16, No. 2, pp. 62~82, 1958.
- 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.
- 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.
- Yamamoto, T., S. Takahashi and B. Shuckman: Physical modeling of sea-seabed interaction, Jour. of Eng. Mechanics, Vol. 109, No. 1, ASCE, pp. 54~72, 1983.
- 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.
- 鶴谷広一・中野 晋・鷹濱 潤: 回転粘度計による底泥の流動特性の検討, 港湾技研資料, No. 556, 29 p., 1986.
- 永井紀彦・山本督夫・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.
- 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.
- 五明美智雄・矢内栄二・小島 洋・大槻 忠・糸刈長敬: 進行波存在下における底泥の挙動及び波高減衰に関する研究, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 263~267, 1985.
- 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.
- Jonsson, I. G.: Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th Coastal Eng. Conf., pp. 127~148, 1966.
- 大坪国順・村岡浩爾: 流れによる底泥の飛び出し率, 土木学会論文集, 第 375 号, pp. 43~52, 1986.
- 岸 力・榎 国夫・山崎貞元: 波動による底質の浮遊, 第 20 回土木学会年次学術講演会概要集, pp. 65.1~66.2, 1965.