

進行波の波高減衰に及ぼす底泥物性の影響

Damping of Water Waves Propagating over a Mud Bottom

糸洲長敬*・柴田善弘**・瀬戸雅文*・中村 充***

Chohei Itosu, Yoshihiro Sibata, Masabumi Seto and Makoto Nakamura

Soft muddy bottoms have significant effects on damping coefficient of water waves which propagate over them. Model tests of wave damping are done for two different mud materials (kaolinite mud, bentonite mud) and these results are compared with the theoretically predicted results. The theoretical damping rates determined by assuming a viscoelastic mud layer agree well with the rates obtained by experiments that kaolinite is the bottom mud materials. In the case of bentonite mud, the predicted results by viscous fluid model agree well with experimental results.

keywords; wave-mud interaction, damping coefficient, viscoelastic mud, voigt body.

1. はじめに

浅海の砂泥底では波や流れの作用によって容易に底質が巻き上げられ、隣接海域へ拡散・沈降すると海藻や底棲生物の死滅・発育障害等の生物環境の悪化を生起したり、港湾においては航路や泊地の埋没の原因となる。隣接水域への濁水の拡散予測は、底泥の巻き上げ・沈降量や拡散係数等が明かであれば拡散問題として解析が比較的容易になる。流れの存在下における底泥の巻き上げについては、底泥の限界掃流力や巻き上げ速度を、次元解析や密度流のアナロジーからの無次元量で整理したり^{1,2)}、底泥のビンガム降伏値やペーン試験値^{3,4)}で表示することが試みられている。また、底泥の掃流現象について交換面の乱れから巻き上げ量の評価を試みたものがある⁵⁾。しかし、底泥の構成物質、水温、間隙水中の塩類濃度によって底泥の物性が変化するため⁶⁾、現象が複雑になり明確なメカニズムの解明には至っていない。

波作用下における底泥と波の相互作用については、永井ら⁷⁾、五明ら^{8,9)}、柴山ら¹⁰⁾、鶴谷ら¹¹⁾、Gode¹²⁾、Dalrympleら¹³⁾、糸洲ら¹⁴⁾の研究があり、これらはいずれも底泥をNewton流体として取り扱っている。またYamamotoら^{15,16)}、Hsiaoら¹⁷⁾は底泥に弾性変形成があることから粘弾性流体として解析している。しかし波動場下での底泥の流動特性が不明なため波と底泥の相互作用による現象は未だ解明されていない。

本論文では底質と波の相互作用による顕著な現象として、底質粘土土を進行する表面波の波高減衰現象に着目し、底泥物性と波高減衰に関して底質と波の動的相互作用の理論的・実験的検討を行う。

2. 理論的解析

ここでは底泥をNewton流体としてDalrymple・Liu¹³⁾の与えたNewtonモデルとHsiao・Shemdin¹⁷⁾のVoigt型粘弾性モデルのモデル基礎にして解析を進める。

A) Newton モデル

現象は鉛直に次元的であるとし水深を h 、底泥層厚みを d 、 x 軸を静水面に、 y 軸を静水面から鉛直上向きにとると、線形化した運動方程式及び連続の式は

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_i} \frac{\partial p_i}{\partial x} + \nu_i \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_i} \frac{\partial p_i}{\partial y} + \nu_i \left(\frac{\partial^2 V_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_i}{\partial y^2} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x} + \frac{\partial V_i}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

ここで、添え字の i ($=1,2$) はそれぞれ上層、下層(底泥層)を意味し、 ρ は密度、 ν は動粘性係数、 p はDynamic pressureで $p_i = p_i^t + \rho_i g y + p_i^0$ 、 p_i^t はTotal pressure、 p_i^0 は $i=1$ のとき0、2のとき $(\rho_2 - \rho_1) g h$ で定

* 正会員 東京水産大学水産学部 (108 港区港南4-5-7)

** 日本酸素株式会社

***正会員 福井県立大学

義する。 U_i 、 V_i はそれぞれ水平及び鉛直方向の流速で、 p_i 、水面変位及び泥面変位 η_i とともに次のように周期関数を仮定する。

$$\begin{aligned} U_i &= u_i \exp [i (k x - \sigma t)] , & V_i &= v_i \exp [i (k x - \sigma t)] , \\ p_i &= P_i \exp [i (k x - \sigma t)] , & \eta_i &= a_i \exp [i (k x - \sigma t)] . \end{aligned}$$

ここで、 i は虚数単位、 σ ($=2\pi/T$, T は周期) 角周波数、 k ($=k_r + i k_i$)は複素波数で、虚部 k_i は波高減衰係数を意味する。

これらの式と式(1)~(3)から、 V_i に関する次の微分方程式が得られる。

$$v_i^{(4)} - (k^2 + \lambda_1^2) v_i^{(2)} + k^2 \lambda_1^2 v_i = 0 \quad (4)$$

但し、 $\lambda_1^2 = k^2 - (i \sigma / \nu_1)$ 、肩付き括弧の数字は y に関する微分を意味する。

式(4)の解はA~Hを積分定数として

$$v_1 = A \sinh (k (h+y)) + B \cosh (k (h+y)) + C \exp (\lambda_1 y) + D \exp (-\lambda_1 (h+y)) \quad (5)$$

$$v_2 = E \sinh (k (h+y+d)) + F \cosh (k (h+y+d)) + G \exp (\lambda_2 y) + H \exp (-\lambda_2 (h+y+d)) \quad (6)$$

従って、A~Hと a_2 、 k の10個の未知数が決定できれば完全に解けたことになる。これらの未知数は水面、界面、底面における10個の境界条件式より求めることが出来る。

図1に一例として上層にケロシン、下層に砂糖水 ($\nu_2=0.001, 0.002 \text{ m}^2/\text{s}$ とする) がある場合を想定して、 $t=0.5\text{sec}$ のとき、底泥の流動境界層の厚みを表す指標を $d (\sigma / 2 \nu_2)^{1/2}$ と波高減衰指標 $k_i (g h)^{1/2} / \sigma$ との関係を示した。 $d (\sigma / 2 \nu_2)^{1/2}$ がある値で波高減衰はピークをとり、粘性係数 μ_2 が増加する(密度が小さい)につれピークの $d (\sigma / 2 \nu_2)^{1/2}$ 値は小さくなり、波高減衰も大きくなる特性を示す。

図2は波高減衰と泥層深さの影響を調べるために、相対水深 d/h が0.15, 0.3, 0.5の場合について、 $d (\sigma / 2 \nu_2)^{1/2}$ と波高減衰の関係を計算したものである。減衰は相対水深が大きくなるにつれて大きくなりピーク位置は動粘性が小さいほうにずれる。

B) Voigt粘弾性モデル

図3に示すように、 x 軸を静止底泥面に、 y 軸を鉛直上向きにとり、水層は非圧縮・渦無し運動を仮定する。底泥のせん断応力を τ 、 G をせん断弾性係数、 μ を動粘性係数、 ϵ をせん断歪として、底泥の応力-歪関係はVoigtモデルで次のように仮定する

$$\tau = G \epsilon + \mu (d \epsilon / d t) \quad (7)$$

この式を線形化した二次元の Navier-Stokes方程式に代入し、時間 t で微分して整理すると、底泥層内の運動方程式は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} &= J \nabla^2 u_2 + \nu_2 \nabla^2 \frac{\partial u_2}{\partial t} - \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial^2 p_2}{\partial x \partial t} \\ \frac{\partial^2 v_2}{\partial t^2} &= J \nabla^2 v_2 + \nu_2 \nabla^2 \frac{\partial v_2}{\partial t} - \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial^2 p_2}{\partial y \partial t} \end{aligned}$$

但し、 $\nu_2 = \mu / \rho_2$ 、 $J = G / \rho_2$ である。

式(8)(9)の周期解得るために Stream function $\psi = s(y) \exp (i (k x - \sigma t))$ 、 $u_2 = \partial \psi / \partial y$ 、 $v_2 = -(\partial \psi / \partial x)$ を仮定して解くと

$$s = A \exp (k y) + B \exp (-k y) + C \exp (m y) + D \exp (-m y) \quad (10)$$

$$\text{ここで、} m = k [1 - (\sigma^2 / k^2 (J - i \sigma \nu_2))]^{1/2} \quad (11)$$

式(11)は $J=0$ のとき、(4)式における λ_2 に等しい。定数A~Dは水波の解と境界条件式から決定できる。

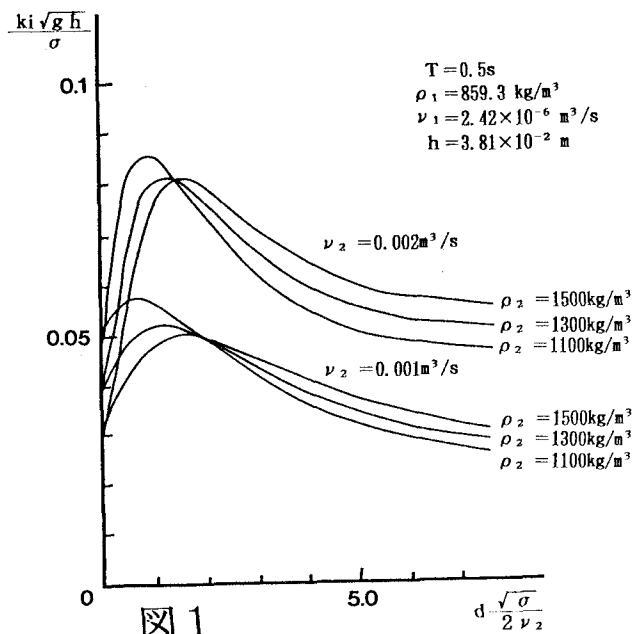


図1

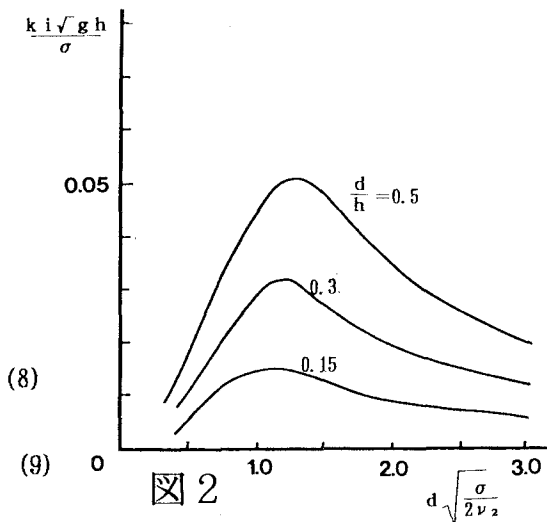


図2

水波の解は非圧縮、非回転を仮定すると速度ポテンシャル ϕ が導入され、

$$\phi = -\frac{i a_1 g}{\sigma} [\cosh k (y-h) + (\sigma^2/gk) \sinh (k (y-h))] \exp (i (k x - \sigma t)) , \quad (12)$$

また、分散関係式は $\gamma = \rho_1/\rho_2$ として、

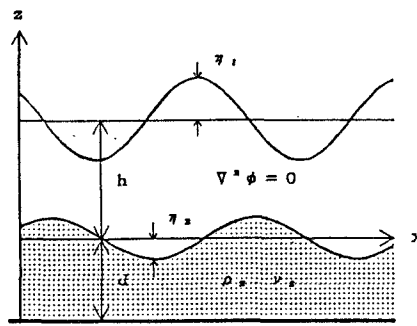
$$k = \frac{\sigma^2}{g} \frac{1 + \tanh k h \Omega}{\tanh k h + \Omega} . \quad (13) \quad \text{ここで} \quad \Omega = \gamma \frac{(m^2 - k^2) \omega_1}{(m^2 + k^2) \omega_2 - k^2} .$$

$$\begin{aligned} \text{および} \\ \omega_1 &= \sinh k d \cosh m d - \frac{k}{m} \cosh k d \sinh m d . \\ \omega_2 &= \sinh k d \cosh m d - \frac{k}{m} \cosh k d \sinh m d . \end{aligned}$$

複素波数 k が求まると水波の変位は $\eta = a_1 \exp (-k_1 x) \exp (i (k_r - \sigma t))$ として減衰係数 k_1 が求められる。

式(13)において $d=0$ 、や $G=\infty$ および $\gamma=0$ のときは、 $\sigma^2 = g k \tanh k h$ で、これは固定床における分散式に等しい。

式(13)は割線法の拡張であるMuller法で近似的に解いた。



- 境界条件
- (i) 水面での条件 ($z=h$)
 $P_1 = 0 \quad v_1 = \frac{\partial \eta_1}{\partial t}$
 - (ii) 界面での条件 ($z=0$)
 $\frac{\partial u_2}{\partial z} + \frac{\partial v_2}{\partial x} = 0$
 $P_1 = P_2 \quad v_1 = v_2$
 - (iii) 底面での条件 ($z=-d$)
 $u_2 = 0$
 $v_2 = 0$

図 3

図4は底泥の粘性指標 $v_2/(\sigma h^2)$ に対する水波の減衰指標 k_1/k_0 (k_0 は固定床上の水波の波数) の計算値を底泥のせん断弾性指標 $J/(\sigma^2 h^2)$ をパラメータにして示してある。この図によると、(a): 同一の $v_2/(\sigma h^2)$ にたいして $J/(\sigma^2 h^2)$ 値が大きいほど、減衰指標 k_1/k_0 は小さくなること、

(b): $v_2/(\sigma h^2)$ が小さい領域では k_1/k_0 は増加関数で、ある値で極大値をとりその後は減少関数となること、(c): $J/(\sigma^2 h^2)$ が大きくなると k_1/k_0 の極大値は $v_2/(\sigma h^2)$ が大きくなる方にずれること、などの特徴がある。

(a)については、弾性変形はエネルギー消費に直接関与しないから $J/(\sigma^2 h^2)$ が増大することは k_1/k_0 を小さくし、(b)については、せん断変形によるエネルギーはせん断変形を θ 、変形速度を $\dot{\theta}$ とすると $dE = \tau \theta d\ell = \rho v \theta \dot{\theta} d\ell$ で表され、 $v_2/(\sigma h^2)$ が大きくなるとせん断変形によるエネルギー消費は増大するが、ある値を越えると変形及び変形速度が小さくなりエネルギー消費が減少し、それに比例して k_1/k_0 は変化するからである。(c)については、 $J/(\sigma^2 h^2)$ が大きくなると変形及び変形速度は弾性変形への依存度が高くなり、 $v_2/(\sigma h^2)$ の影響が相対的に小さくなるためと解釈できる。

図5は周期 $T=1.05$ s、 $d/h=0.35$ のとき、減衰の極大値の位置の $J/(\sigma^2 h^2)$ と k_1/k_0 の関係を γ 別に示したものである。これより、減衰の極大値の位置は $J/(\sigma^2 h^2)$ によっても指数関数的に減少していることがわかる。また、 $J/(\sigma^2 h^2)$ と $v_2/(\sigma h^2)$ との関係は直線的で $v_2 = (J/\sigma) - 0.055 \sigma h^2$ で表すことが出来る。これは、波浪強制振動に対する弾性振動と粘性振動の共振に関係するものと考えられる。

3. 実験方法

実験に用いた水路は、図6示すように長さ25m、幅1m、高さ1.5mでピストンタイプの造波板を備えたもので、水路幅が0.4mになるようにベニヤ板出仕切り、水路の中央部に長さ2.5m、深さ7cmの窪みを設け、試料泥を敷き詰めた。容量式波高計4本を1mの間隔で水路中央に沿って取り付け、水波の波高減衰係数の算定に利用した。試料泥は、ベントナイト粘土、カオリン粘土および東京湾のヘドロで、これら試料泥の物理特性を表1に示す。試料泥の含水比を、ベントナイト粘土は約200~260%で8種類、カオリン粘土は約85~140%、6種類とし。この含水比の範囲は、下限を攪拌機により泥を均一に混ぜることができた含水比、上限は圧密の影響を受けず実験時間中に顕著な含水比変化を起こさない含水比とした。またヘドロは314%及び413%の2種類とした。沖側入射水波の周期を1.05秒、波高は0.3~8.5cmの13種とした。

図7に試料泥の含水比と動粘性係数の関係をずり速度別に示した。

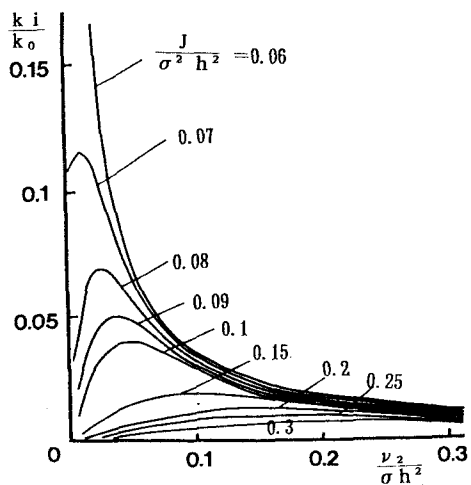


図 4

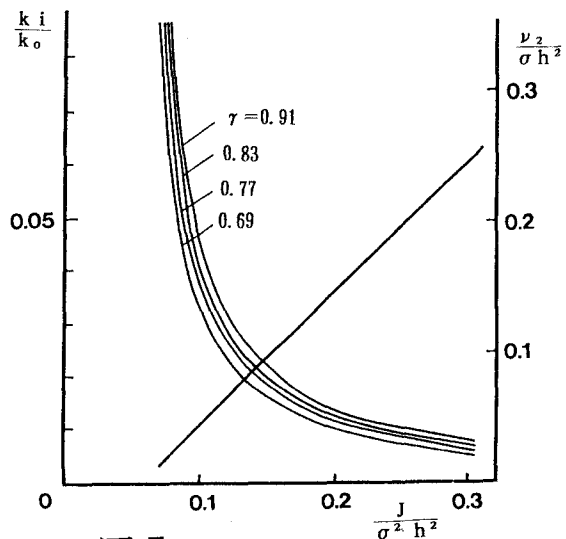


図 5

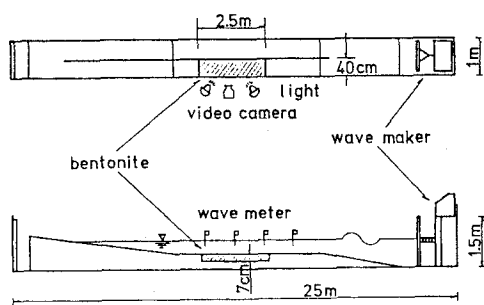


図 6

表-1. 泥の物理特性

	ベントナイト	カオリン	ヘドロ
塑性限界	25 %	25 %	55 %
液性限界	160 %	48 %	180 %
塑性指数	135 %	23 %	125 %
中央粒径	3.4 μm	3.2 μm	2.8 μm
粒子比重	2.6	2.8	2.6
強熱減量			約17 %
粒度組成			
砂	4 %	0 %	2 %
シルト	42 %	19 %	37 %
粘土	54 %	81 %	61 %

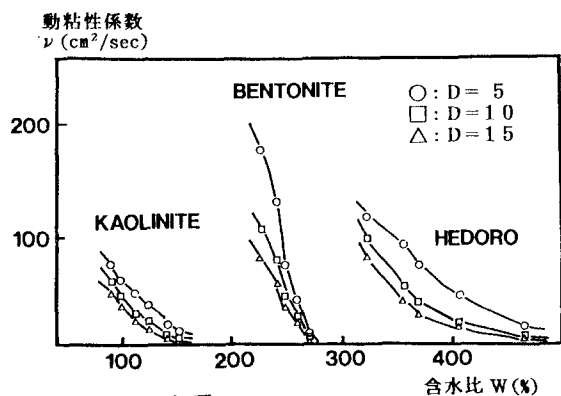


図 7

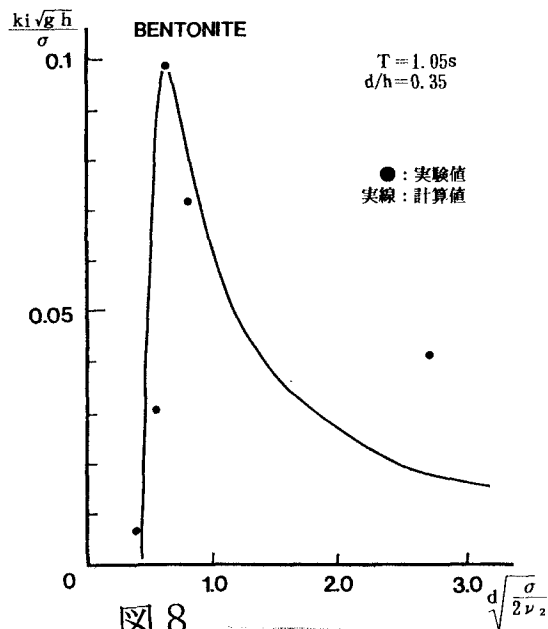


図 8

4. 実験と理論との比較

図8はベントナイト粘土の場合、Newtonモデルによる理論値と実験値との比較をしたもので、 $d(\sigma/2v_2)^{1/2}$ が大きいところで不一致が見られるが、全体として理論値と実験とはよくあっている。これに対し、カオリン粘土およびヘドロの場合には図9、図10に見るように理論値と実験値はかなりずれている。ベントナイト粘土のように粘性流体の挙動を示すような泥ではNewtonモデルを使えるが、カオリン粘土やヘドロのような非ニュートン流体の流動特性を有する泥ではNewtonモデルは適用出来ないことがわかる。

図11～13にVoigtモデルによる理論値と実験値の比較を示した。カオリン粘土はVoigtモデルでよく評価できることがわかる。ヘドロについても実験ケースは少ないが粘弾性を考慮したモデルの方が現象をよく説明できそうである。

最後に実験を助力し討議に参加して下さった東亜建設工業の五明美智男氏に御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 大坪国順・村岡浩爾・高野恒雄：粘性土の限界掃流力について、第16回衛生工学研究討論会論文集、140-146、1980。
- 2) 大坪国順：底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究、国立公害研究所研究報告第42号、125-146、1983。
- 3) 青木美樹・首藤伸夫：粘性土堆積層の洗掘現象に関する研究、第26回水理講演会論文集、82-92、1982。
- 4) 栗谷陽一・楠田哲也・海田輝之：底泥の巻き上げに関する基礎的研究、第15回衛生工学研究討論会論文集、21-26、1979。
- 5) 住友 恒・石橋道夫・栗山由彦：波運動による底泥物質の掃流現象に関する基礎研究、第22回海岸工学講演会論文集、367-370、1975。
- 6) Raudkivi, A.J. and P.L. Hutchison: Erosion of Kaolinite Clay by Flowing Water, Proc. Roy. Soc. London, A337, 537-557, 1974。
- 7) 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、608-612、1983。
- 8) 五明美智男・矢内栄二・小島 洋・大槻 忠・糸淵長敬：進行波存在下における底泥の挙動および波高減衰に関する実験的研究、第32回海岸工学講演会論文集、263-267、1985。
- 9) 五明美智男・矢内栄二・堺 和彦・大槻 忠・糸淵長敬：波と底泥の相互干渉に及ぼす物性の影響について、第33回海岸工学講演会論文集、322-326、1986。
- 10) 柴山知也・滝川 浩・堀川清司：波によるやわ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、258-262、1985。
- 11) 鶴谷浩一・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、317-321、1986。
- 12) Gode, H.G.: Effects of a Nonrigid, Impermeable Bottom on Plane Surface Waves in Shallow water, Jour. of Marine Research, Vol.16, No.2, 61-82, 1958。
- 13) Dalrymple, A.R. and P.L.F. Lie: Waves over Soft Muds: a two-layer fluid model, Jour. of Physical Oceanography, Vol. 8, 1121-1131, 1978。
- 14) 糸淵長敬・五明美智男：波と底質粘土との相互干渉に関する実験的研究、水産土木、Vol.22, No.1, 1985。
- 15) Yamamoto, T., S. Takahashi and B. Schuckman: Physical Modeling of Sea-seabed Interactions, Jour. of Eng. Mech., Vol. 109, No. 1, ASCE, 54-72, 1983。
- 16) Yamamoto, T. and B. Schuckman: Experiments and Theory of Wave-soil Interactions, Jour. of Eng. Mech., Vol.110, No. 1, ASCE, 95-112, 1984。
- 17) Hsiao, S.V. and O.H. Shemdin: Interaction of Ocean Waves with a Soft Bottom, Jour. of Physical Oceanography, Vol. 10, 605-610, 1980。

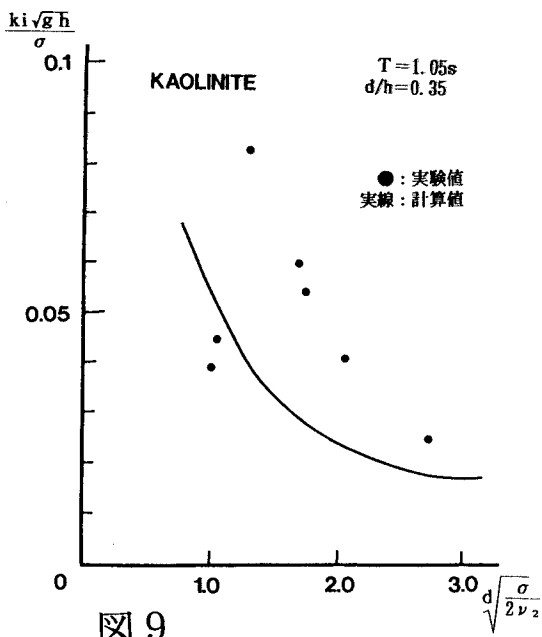


図 9

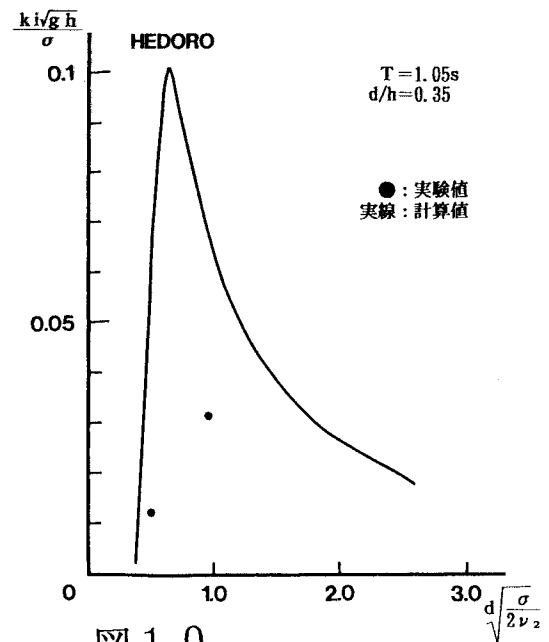


図 10

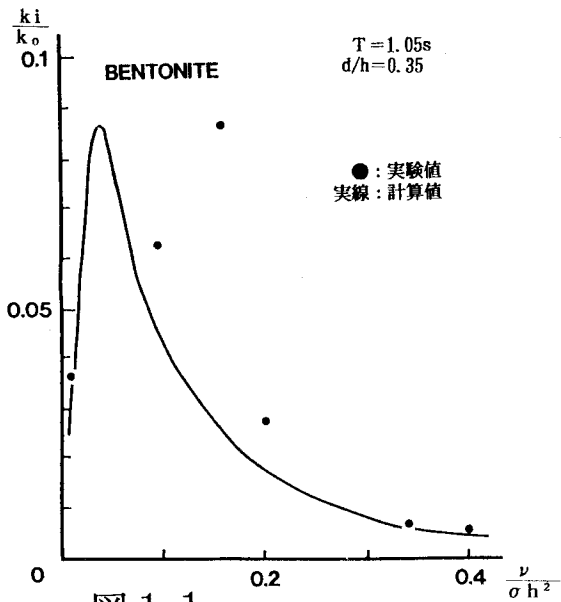


図 11

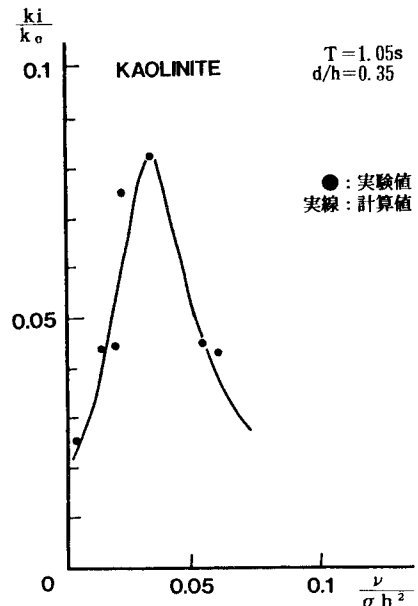


図 12

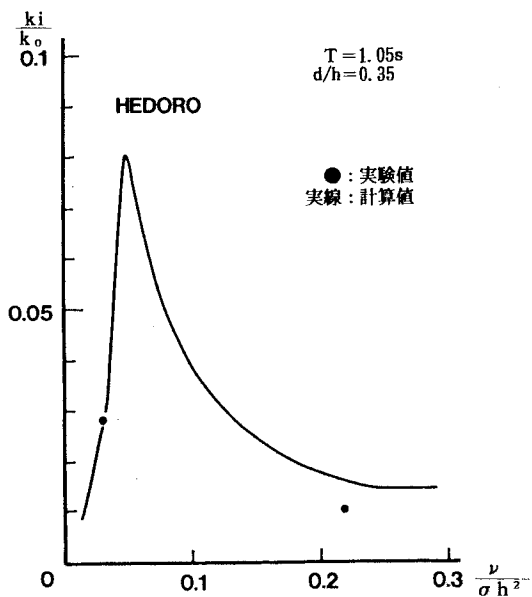


図 13