

# 波とやわらかい底質粘土との相互干渉に関する実験

永井紀彦\*・山本督夫\*\*・Ludwig Figueroa\*\*\*

## 1. ま え が き

ミシシッピなどの大河川の河口近海では、石油掘削のためのプラットフォームやパイプラインなどの海洋構造物が、数多く計画、建設されている。大河川の河口近海は、一般に非常にやわらかい粘度底質となっているため、海洋構造物の設計にあたっては、底質粘土の挙動による波の変形と波による底質粘土の挙動を明確にする必要が生ずる。波と底質との相互干渉に関する理論は、Putnam<sup>1)</sup>、Reid-Kajiura<sup>2)</sup>、Gade<sup>3)</sup>、Hunt<sup>4)</sup>、Dalrymple-Liu<sup>5)</sup>、Hsiao-Shemdin<sup>6)</sup>、Yamamoto<sup>7),8)</sup>らによって展開されているが、実験的な検討例は数少ない<sup>9)</sup>。

本研究は、2次元造波水路を用いて、波とやわらかい底質粘土との相互干渉に関する実験を行ない、底質の影響による波の波長と波高の変化、および波の作用による底質粘土の運動と波の進行方向への底質粘土の質量輸送現象を解明したものである<sup>10)</sup>。

## 2. 実 験

実験に用いた2次元造波水路は、図-1に示すように長さ18m、幅0.85m、高さ1.2mでピストンタイプの造波板を備えたものである。水路の中央部に長さ10mにわたってベントナイト粘土を設置し、粘土の流失を防ぐために両側をベニヤ板で仕切った。ベントナイトと海水を十分に混合させた状態を初期状態とし、自然に圧密を進行させたので、図-1に示すベントナイトの厚さ $h_s$ は圧密の進行とともに減少し、それと同時に水深

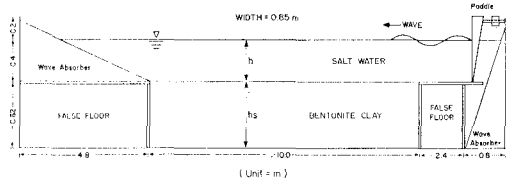


図-1 実験水路

- \* 正会員 GRA Student, Univ. of Miami, Ocean Eng.  
(運輸省港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室)  
\*\* 正会員 P.H.D Professor, Univ. of Miami, Ocean Eng.  
\*\*\* P.H.D Assistant Professor, Univ. of Miami, Civil Eng.

$h$ は増加した。 $h_s$ の値は、実験期間中、混合後7日の厚さ70cmから、混合後79日の厚さ52cmまで変化した。

Vane Shear Testによって底質粘土のせん断強度を測定した。容量式波高計とペンレコーダーを用いて波の波高と周期を測定した。波高計をのせた架台を水路上端に設置されているレールに沿って25cmごとに移動させ、波高減衰を測定した。水路側面のガラスを通して写真を撮り、波の波長を測定した。8mmカメラを用いて底質粘土の運動を測定した。マーカーとしては、径2mm、長さ0.85m(水路幅に等しい)、比重1.3(底質粘土にほぼ等しい)の棒を用いた。この棒を粘土中に沈め、水路側面のガラスを通して見える径2mmのマーカーを追跡することによって、水路幅方向に平均化された底質粘土の運動を測定した。さらに、ガラス面に沿って鉛直直線上に染料を粘土に加え、波による底質粘土の質量輸送現象を目視した。

## 3. 底質粘土のせん断強度

図-2は、Vane Shear Testによって測定された底質粘土のせん断強度を示したものである。縦軸の $z$ は、粘土表面を基準に下方を正とした鉛直座標を意味し、横軸の $S_u$ は、粘土のVane Shear強度をPa単位で示したものである。(1Pa=1N/m<sup>2</sup>)測定は、混合後23~24日、49日および79日に、鉛直方向5~10cm間隔に、それぞれ4~8回おこなわれた。図中の測定値は、中央に平均値を示し、測定値の標準偏差を左右に示したものの

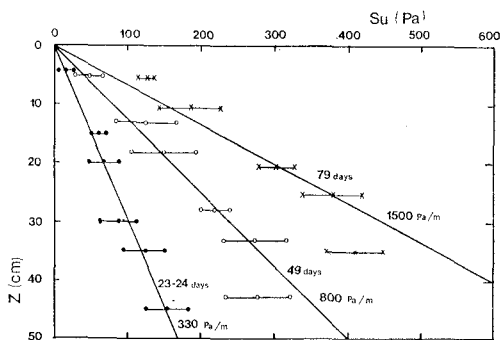


図-2 Vane Shear 試験結果

である。

図-2 で測定された粘土の Vane Shear 強度  $S_u$  は、最大値でも約 400 Pa であり、本実験で用いた底質粘土は非常にやわらかいものであることがわかる。 $S_u$  は各圧密の段階ごとに  $z$  に比例して増加している。 $z$  方向への  $S_u$  の勾配は圧密の進行とともに増加し、混合後 23~24 日では 330 Pa/m、49 日では 800 Pa/m、79 日では 1500 Pa/m となっている。

#### 4. 波長の変化

写真-1 は、波長測定のために撮影された写真の一例であり、混合後 11 日、平均波高 11 cm、周期 1.01 秒のケースである。底質粘土の表面が波によって上下に振動していることがわかる。

図-3 は、測定された波長と、固定床あるいは深海波として微小振幅波理論から計算された波長との比較を示したものである。横軸には波の周期を、縦軸には波長を示しており、混合後 11 日 ( $h=34$  cm) と混合後 24 日 ( $h=40$  cm) の測定結果をプロットしている。図中に  $L_0$  として示された曲線は深海波の波長の計算値であり、 $L$  として示された 2 本の曲線は、それぞれ水深 40 cm、34 cm の固定床として計算された波長の値である。

測定された波長は、固定床として計算された値よりも長く、固定床と深海波の場合の中間の値を示しており、底質粘土の影響によって波長が変化することがわかる。なお、波の非線型性によっても波長が若干長くなると

が Stokes 3 次理論から明らかにされているが<sup>11)</sup>、図-3 に示される波長の変化量は、Stokes 3 次理論から求める変化量よりはるかに大きく、波の非線型性だけでは図-3 を説明できないことが確認されている<sup>12)</sup>。

#### 5. 波高の減衰

図-4 は、底質粘土上を伝わる波の波高減衰測定結果である。混合後 23~24 日に周期 1.5~1.54 秒の波を 5 通りの波高に関して作用させ、波高減衰を測定した。横軸の  $X$  は波の進行方向を示し、縦軸には対数値で波高を示している。波高減衰係数  $D$  は、式 (1) によって定義されるが、図-4 においては、 $D$  は最小自乗法によって求めた直線の勾配として求めることができる。

$$H = H_0 \exp(DX) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに  $H$  は波高、 $H_0$  は  $X=0$  における波高である。実験値は、これらの直線の上下を周期的に振動して分布しているが、これは水路端部からの反射波による影響である。

Run 230 と 231 は、平均波高がそれぞれ 12.7 cm、14.1 cm と比較的近い値になっているが、 $D$  の値もそれぞれ  $-0.072$ 、 $-0.069 \text{ m}^{-1}$  と近い値を示している。このことは、実験の再現性・精度が良いことを意味している。底質粘土の影響による波高の減衰量は大きく、Run 227 では 8 m の間に波高が 2 cm から 0.2 cm へと 1/10 になっているのは注目値する。 $-D$  の値は波高の減少とともに増加する傾向にあることが、図-4 から読み



写真-1 波長測定の一例

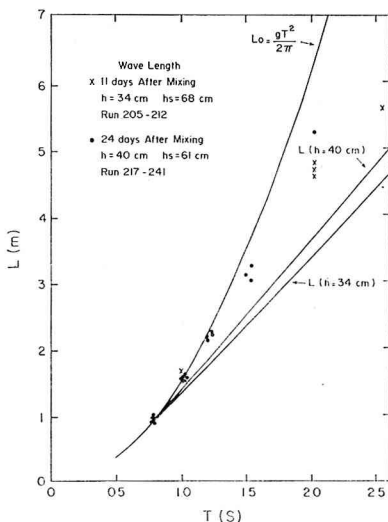


図-3 理論値と比較した測定波長

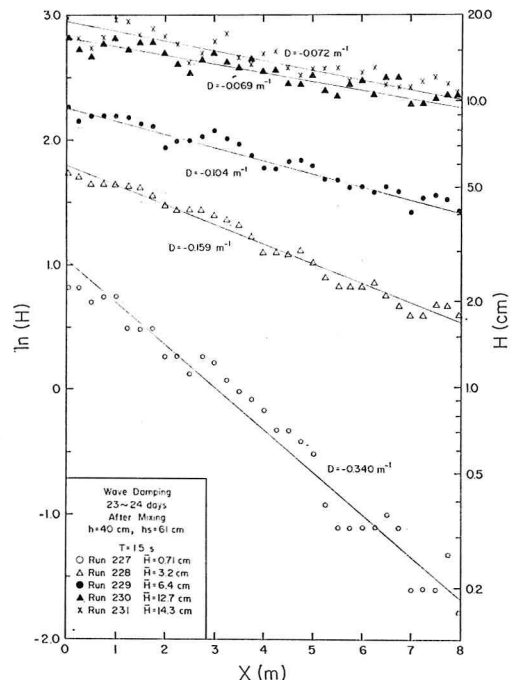


図-4 波高減衰 (混合後 23~24 日, 周期 1.5 秒)

取られる。

図-5は、図-4と同様に、混合後79日に周期1.5~1.55秒の波を5通りの波高に関して作用させ、波高減衰を測定したものである。図-5では、図-4とは傾向が異なり、 $-D$ は平均波高が8.3cmのRun 269で最大値を示し、それよりも波高の小さいケースでは、波高の減少とともに $-D$ が減少する傾向が読み取られる。圧密の進行によって底質粘土のせん断強度が強まることによって、図-4と図-5の傾向のちがいが生じたわけである。

図-6は、49ケースにおよぶ本実験の波高減衰結果に、Schuckman-Yamamotoによる実験値<sup>13)</sup>を加えて、波高減衰係数を波の条件と底質粘土のせん断強度によって無次元化して示したものである。縦軸には、波高減衰係数 $D$ を波数 $k$ ( $2\pi/L$ :  $L$ は波長)で除して無次元化

した値をとり、横軸には、底質表面における波の圧力振幅 $P_0$ と底質粘土のせん断強度の比を示す無次元量 $P_0k/Su'$ をとった。ここに $Su'$ は図-2で示された底質のVane Shear 強度の鉛直勾配を意味している。パラメーターとしては、波形勾配と水深波長比に相当する $ka$ ( $a=H/2$ )と $kh$ をそれぞれ用いた。

$-D/k$ は、 $P_0k/Su'$ が0.3~0.6で極大値を示し、その両側では $P_0k/Su'$ の増加あるいは減少に伴って減少している。固定床あるいは深海波の場合、底質の運動はおこらないため $-D/k$ はゼロとなるので、この傾向は妥当である。 $kh$ の増加に伴い $-D/k$ が減少しているのは、 $kh$ が大きいほど深海波に近づき底質の影響が小さくなるためである。 $ka$ が小さくなると、 $-D/k$ を極大とする $P_0k/Su'$ が若干小さくなるようである。

## 6. 底質粘土の運動

図-7は、8mm写真で追跡した底質粘土表面の運動を示したものである。底質表面の運動は、混合後9~49日、周期1~2秒の8ケースに関して求められた。横軸は底質表面波形の山から山までの一周期を分割した位相角を示し、縦軸は静水時の底質表面を基準とし上方を正とした鉛直座標を示している。各図中には、底質表面の運動幅 $\Delta z$ と、 $\Delta z$ を波高 $H$ で除し無次元化した $\Delta z/H$

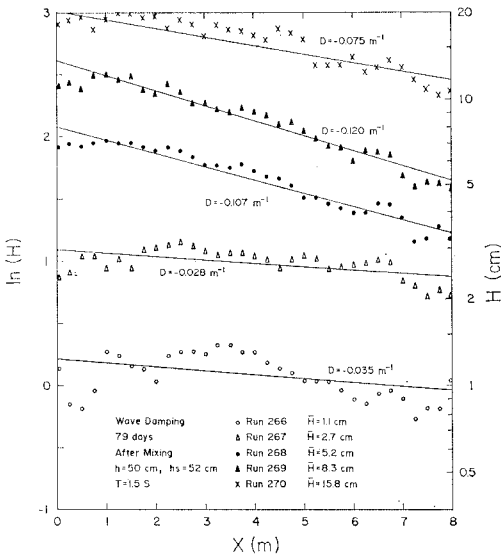


図-5 波高減衰 (混合後79日、周期1.5秒)

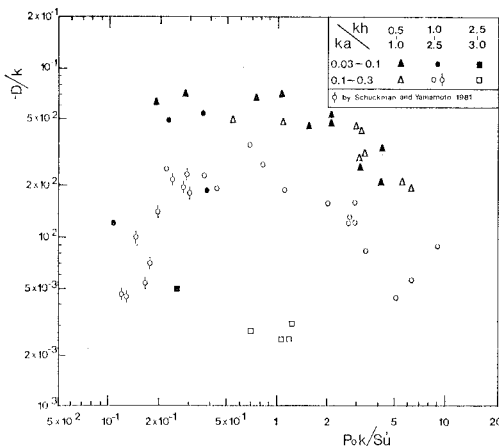


図-6 波高減衰係数算定図

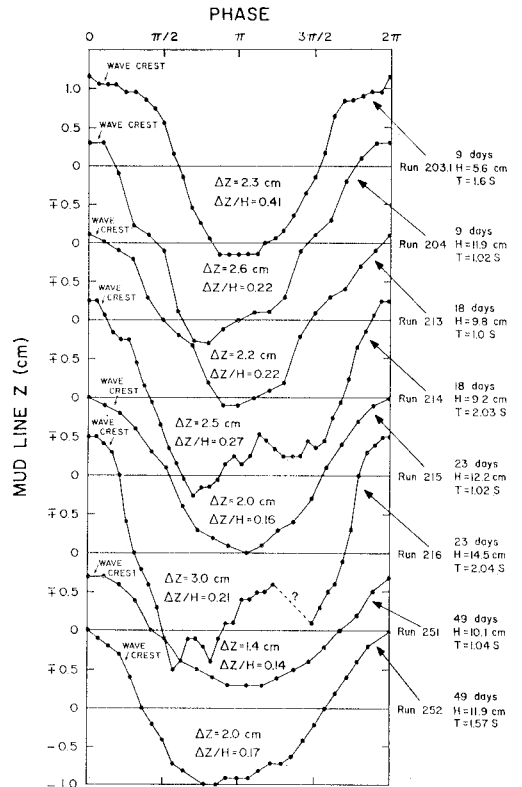


図-7 底質表面の運動

が示されている。さらに、波によって水位が極大値となるとき位相角が Wave Crest として図中に示されている。

周期がほぼ等しい Run 204, 213, 215, 251 では、それぞれ  $\Delta z/H$  が 0.22, 0.22, 0.16, 0.14 となり、圧密の進行とともに底質表面の運動が小さくなっていくのがわかる。また、同じ底質条件で周期の異なる波を作用させた Run 203.1 と 204, 213 と 214, 215 と 216, 251 と 252 をそれぞれ比較すると、どれも周期の長い波の方が  $\Delta z/H$  が大きくなっている。底質表面の運動の位相は、水位の位相よりもどのケースでも  $10^\circ \sim 45^\circ$  進んでいる。

図-8 は、底質中に埋めたマーカーを一周期にわたって追跡し、その運動軌跡を求めた一例である。波の作用によって、水粒子と同様に底質粘土も楕円運動をしていることがわかる。回転方向も水粒子と同じである。図-7 に対応して、底質粘土の運動の位相は、水粒子よりも若干進んでいることが、Wave Crest の表示からわかる。

図-9 左は、底質粘土の水平運動振幅  $U_{xx}$ 、鉛直運動振幅  $U_{zz}$  を、底質表面を基準に下方を正とした鉛直座標  $z$  の関数としてプロットした一例である。 $U_{xx}$  および  $U_{zz}$  は  $z$  の増加とともに指数的に減少していることがわかる。図中に示す曲線と式は、最小自乗法によって  $U_{xx}$ ,  $U_{zz}$  それぞれを  $z$  の指数関数として求めたも

のである。

図-9 右は、図-9 左で求められた関数から、式(2)で定義される底質粘土のせん断ひずみ  $\gamma$  を計算したものである。

$$\gamma = \frac{\partial U_{xx}}{\partial z} + \frac{\partial U_{zz}}{\partial X} = \frac{\partial U_{xx}}{\partial z} + k U_{zz} \quad \cdots (2)$$

ここで、波は進行波であるため、 $\partial U_{zz}/\partial X$  は、 $U_{zz}$  に波数  $k$  を乗じればよい。図中に点線で示す  $z$  の値は、7. で述べる底質の質量輸送がおこった  $z$  の限界を示している。

粘土の動的特性に関しては、石原<sup>14)</sup>などによって多くの検討がなされているが、せん断ひずみが 0.01 以上の場合に関してはまだ実験例がない。本実験結果の応用に関しては、現在、検討中である。

## 7. 底質粘土の質量輸送

写真-2 は、底質粘土の質量輸送現象を示した写真である。左側の写真は波作用前のもので、鉛直直線上に染料を水路ガラス側面に沿って底質粘土に加えたものである。右側の写真は、周期 1 秒、平均波高 12.2 cm の波を 30 秒間作用させた後のものであり、底質表面から下方 8 cm の部分で底質粘土の質量輸送現象がおこっていることが、染料の動きから読み取られる。水路側面ガラス上に書かれたメッシュの間隔は、太線が 10 cm、細線が 2 cm である。この写真は、混合後 23 日に行なった実験を示したものであり、この時の底質粘土の Vane Shear 強度勾配  $Su'$  は、図-2 に示したように 330 Pa/m である。底質表面では、最大 20 cm、染料が波の進行方向

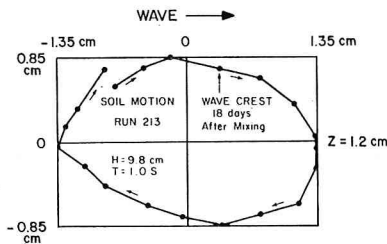


図-8 粘土粒子の運動軌跡の一例

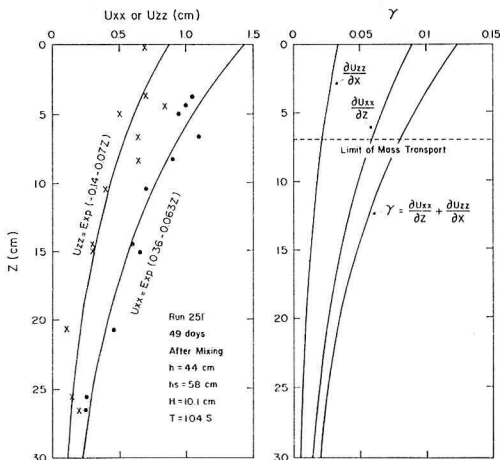
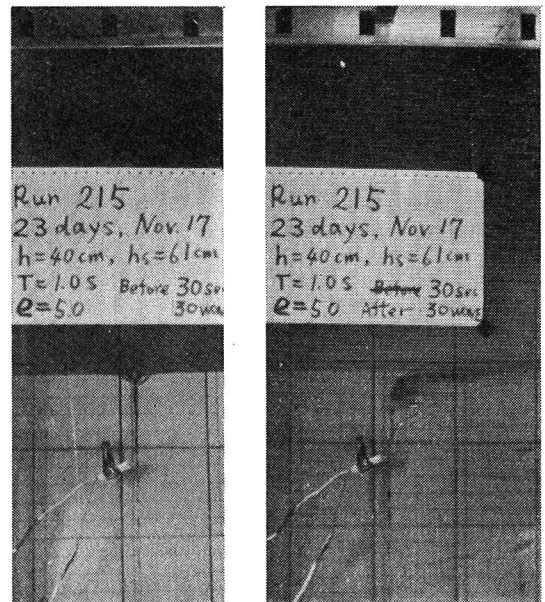


図-9 粘土粒子の水平・鉛直運動振幅



(a) 波作用前

(b) 波作用後

写真-2 底質粘土の質量輸送現象

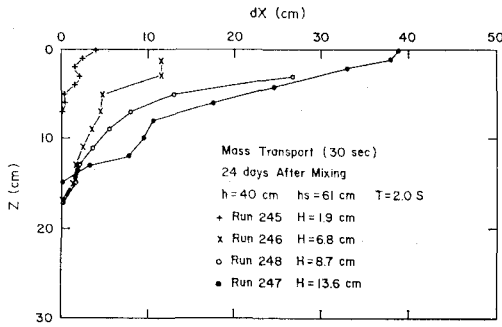


図-10 底質粘土の質量輸送量

に移動しており、この移動量は下方に向うにつれ、指数的に減少している。

図-10は、底質の質量輸送量  $dX$  を、底質表面を基準とし下方を正とする鉛直座標  $z$  に対してプロットしたものである。写真-2に現れた各  $z$  座標における染料の最大水平移動量を  $dX$  として定義した。混合後24日におこなった実験なので、この時の  $Su'$  もやはり  $330 \text{ Pa/m}$  である。図中には、周期2秒の波を4通りの波高で作用させた、4ケースの実験結果をとりまとめている。

波高の増大によって  $dX$  は大きく増加しており、底質粘土の質量輸送量は、Stokes 理論による水粒子の質量輸送量と同様に、波高の自乗に比例することが示唆される。また、写真-2では表面の  $dX$  が  $20 \text{ cm}$  であるのに対して、図-10では波高がほぼ等しい Run 247 の表面の  $dX$  が  $40 \text{ cm}$  になっていることは、 $dX$  は波の周期によっても大きく異なり、周期の長い波の方が大きい値となることを意味している。

## 8. まとめ

本実験で得られた成果をまとめると、以下の通りである。

- (1) 底質粘土の運動によって、波の波長は固定床の場合より長くなり、深海波として計算される波長と、固定床として微小振幅波理論や Stokes 3次理論によって計算される波長との間の値となる。
- (2) 底質粘土の運動によって、図-4や図-5に示すように大きい波高減衰が測定された。波高減衰係数  $D$  を無次元化し算定表示する図-6を示すことができた。波高減衰係数は、波形勾配、水深波長比、および底質表面における波の圧力振幅と底質粘土のせん断強度との比の関数として、図-6に示されている。
- (3) やわらかい底質粘土は、波の作用によって水粒子と同方向の楕円運動を行なう。その位相は、 $10^\circ \sim 45^\circ$  水粒子より進んでいる。底質粘土の運動振幅は、水平鉛直方向とも表面で最大値を示し、鉛直下

向きに指数的に減少する。底質粘土の水平鉛直振幅分布から、底質粘土のせん断歪みを試算した。

- (4) 波の進行方向への底質粘土の質量輸送量が、染料の動きから測定された。底質の質量輸送量は、表面で最大値を示し、鉛直下向きに指数的に減少する。底質の質量輸送量は波高の自乗に比例するようであり、周期の長い波ほど大きい値となる。

謝 辞：本研究のための資金は、すべてアメリカ合衆国 National Science Foundation の Grant No. CEE 8117454 から山本に拠出されたものである。ここに謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) Putnum, J. A.: Loss of wave energy due to percolation in a permeable sea bottom, Transactions, American Geophysical Union, Vol. 30, No. 3, pp. 349~356, 1949.
- 2) Reid, R. O. and K. Kajiura: On the damping of gravity waves over a permeable seabed, Transactions, American Geophysical Union, Vol. 38, No. 5, pp. 662~666, 1957.
- 3) Gade, H. G.: Effects of a nonrigid impermeable bottom on plane surface waves in shallow water, Journal of Marine Research, Vol. 16, pp. 61~82, 1958.
- 4) Hunt, J. N.: On the damping of gravity waves propagated over a permeable surface, Journal of Geophysical Research, Vol. 64, pp. 437~442, 1959.
- 5) Dalrymple, R. A. and P. L. F. Liu: Waves over soft muds, A two-layer fluid model, Journal of Physical Oceanography, Vol. 8, pp. 1121~1131, 1978.
- 6) Hsiao, S. V. and O. H. Shemdin: Interaction of ocean waves with a soft bottom, Journal of Physical Oceanography, Vol. 10, pp. 605~610, 1980.
- 7) Yamamoto, T., H. L. Koning, H. Sellmeijer and E. V. Hijum: On the response of the poro-elastic bed to water waves, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 87, Part 1, pp. 193~206, 1978.
- 8) Yamamoto, T., S. Takahashi and B. Schuckman: Physical modeling of sea-seabed interactions, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, pp. 54~72, 1983.
- 9) Schuckman, B. and T. Yamamoto: Nonlinear mechanics of sea-bed interactions, Part II, Wave tank experiments on water wave damping by motion of clay beds, Technical Report 82-3, RSMAS, Univ. of Miami, 126 p., 1982.
- 10) Nagai, T., L. Figueroa and T. Yamamoto: Nonlinear mechanics of sea-bed interactions, Part III, Wave tank experiments on soil mass transport in clay beds associated with wave damping, Technical Report 83-8, RSMAS, Univ. of Miami, 61 p., 1983.
- 11) Skjelbreia, L. and J. Hendrickson: Fifth order gravity wave theory, Proc. 7th Conf. Coastal Eng., pp. 184~196, 1961.
- 12) 前出の 10)。
- 13) 前出の 9)。
- 14) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，pp. 196~202, 1976。