

同調液体ダンパーに関する非線形波動シミュレーションとその実験的検証—長方形容器の場合—
Simulation of nonlinear waves in rectangular tuned liquid damper(TLD) and its verification

藤野陽三¹⁾ ベニート M. パチェコ²⁾
孫 利民³⁾ ピヤワット チャイセリ³⁾ 磯部雅彦⁴⁾

By Yozo FUJINO, Benito M. PACHECO, Li-Min SUN,
Piyawat CHAISERI and Masahiko ISOBE

A nonlinear model based on the shallow water wave theory is developed to simulate the liquid motion in a rectangular TLD container. Liquid damping is semi-analytically evaluated. Wave height, base shear force and energy dissipation of the rectangular TLD under sinusoidal excitation are also obtained from a shaking table experiment. It is found that motion of shallow liquid is strongly nonlinear. Good agreement between the simulation and the experiment is shown when no breaking wave occurs. An experiment on interaction between TLD and a SDOF-structure is also made to examine the effectiveness of TLD and the validity of the TLD model developed in this study.

1. まえがき

容器内の液体の動揺を利用したダンパーには種々の利点があり¹⁾、建設工学の分野で最近とくに活発な研究^{2~6)}が行なわれ、風によるタワー系構造物の微振動を抑制する目的で一部実用化されている⁷⁾。最近では液柱管とオリフィスを組み合わせたものも提案されている⁸⁾。液体の動揺をダンパーとして利用する考えは以前から発表されている(例えば文献9-12)が、しかしながら、液体の複雑な動きがからむだけに従来の研究は実験的なものがほとんどで、工学的に使いやすい数学モデルの開発が遅れているのが現状である¹³⁾。

本論文で対象とするのは、矩形容器内の浅い液体の動揺を利用した同調液体ダンパー(TLD)であり、その非線形波動を浅水波理論を用いてシミュレーションすることを考える(ただし砕波は考えない)。次に、振動台を用いたTLDの正弦加振実験を行ない、シミュレーション値と比較し、その妥当性を示す。最後に、一自由度弾性構造物にTLDを付加したときの効果を実験的に確認し、またTLDと構造系との相互作用を考慮した数値シミュレーションの有効性を示す。

1) 東京大学 工学部・総合試験所 助教授

2) 東京大学 工学部・土木工学科 講師

3) 東京大学 大学院博士課程土木工学専攻

4) 東京大学 工学部・土木工学科 助教授

2. 定式化

2. 1 支配方程式

図1に示す矩形容器内の水(巾2a、奥行b、水深h)の液面動揺を2次元問題として考える。水は浅水状態($h/a \ll 1$)にあるとする。座標系X-Zは容器とともに動くとし、容器は水平運動 X_s を受けるとする。

容器内の非線形スロッシングについてはすでに数多くの報告がなされている(例えば文献14、15、16)。以下の定式化は基本的には過渡応答も取り扱える清水・葉山¹⁷⁾に従うが、波の減衰については準解析的なアプローチを試みる。

容器に対する水粒子の相対水平速度 u 、相対鉛直速度 w に関する2つの連続の式と運動方程式を出発点とし、境界条件をみたす解を求める。

容器内の水は非圧縮性、渦なしとする。連続の式は

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

である。液体(水)の粘性は低いので、粘性の影響は底面での境界層内(図2)にのみあるとする(表面、側面の影響については後述)。すなわち、境界層の上ではポテンシャル流と考える：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \ddot{X}_s \quad (-(h-h_b) \leq z \leq \eta) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (-(h-h_b) \leq z \leq \eta) \quad (3)$$

また、境界層内部では

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \ddot{X}_s \quad (-h \leq z \leq -(h-h_b)) \quad (4)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g \quad (-h \leq z \leq -(h-h_b)) \quad (5)$$

ここで、 g :重力加速度、 p :圧力、 ρ :密度、 ν :動粘性係数、 X_s :容器の変位、 h_b :底面境界層の厚さ。 h_b は R_e 数の2分の1乗に逆比例し、水粒子の振幅に比例するが、ここで扱う液体の動きでは、 h_b は h のおよそ数%と見積られる¹⁸⁾。境界条件は

$$u = 0 \quad \text{on the wall} \quad (x = \pm a) \quad (6)$$

$$w = 0 \quad \text{at the bottom} \quad (z = -h) \quad (7)$$

$$w = \frac{D\eta}{Dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad \text{at the free surface} \quad (z = \eta) \quad (8)$$

$$p = p_0 = \text{const.} \quad \text{at the free surface} \quad (z = \eta) \quad (9)$$

である。

ここで、ポテンシャル Φ として変数分離型の $\Phi = F(x, t) \cosh[k(h+z)]$ (k は波数)を仮定する。このことにより u と w の関係が一意的に決まることになる。連続の式を $-h$ から η まで積分し、自由表面での波高 η と流速 $u(\eta)$ に関する式とする。運動方程式については圧力 P を消去し、これによりもう一つ $-h$ から η まで積分し、波高 η と自由表面での流速 $u(\eta)$ に関する式とする。運動方程式については圧力 P を消去し、これによりもう1つの η と $u(\eta)$ に関する式を導く、すなわち

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + h\sigma \frac{\partial(\Phi u(\eta))}{\partial x} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} u(\eta) + (1-T_H^2) u(\eta) \frac{\partial}{\partial x} u(\eta) + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + gh\sigma \Phi \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\nu \int_{-h}^{-(h-h_b)} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz u(\eta) - \ddot{X}_s, \quad (11)$$

ここで、

$$\sigma = \tanh(kh)/(kh), \quad \Phi = \tanh(k(h+\eta))/\tanh(kh), \quad T_H = \tanh(k(h+\eta)). \quad (12)$$

2. 2 波の減衰

TLDでは共振状態の液面動揺を対象にしているので、波の減衰評価は波高、波力の予測に大きな影響を及ぼす。清水・葉山¹⁷⁾は波動の減衰を液面の自由振動実験により求め、それを運動方程式の中に取り入れている。ここでは、底面、側面での境界層、表面での寄与にわけて考える^{18, 19)}。式(11)の右辺の第一項は底面の境界層による減衰項で

$$\nu \int_{-h}^{-(h-h_b)} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz = -\frac{1}{\rho} \tau_b, \quad (13)$$

と表わせる。ここで $\tau_b = \rho \nu (\partial u / \partial z)_{z=-h}$ は底面せん断応力である。Jonsson²⁰⁾に従って、底面がなめらかな場合の底面境界層はRE数 $= U_b^2 / \omega \nu$ （ここで U_b =正弦波振動状態での（境界層直上における）水粒子速度 (u_b) の振幅、 ω =角振動数、 ν =液体（水）の動粘性係数 $(=0.01 \text{ cm}^2/\text{sec})$ ）はおおよそ 10^4 を境界にして、層流状態と乱流状態に区分される。ここで扱うTLD容器の加振状態（3章、4章）では共振時のRE数は $3 \times 10^3 \sim 4 \times 10^4$ 程度となることが後述の数値シミュレーションよりわかっている。かなりのケースにおいて共振時にはRE数が 10^4 を越えており、従って底面境界層が乱流状態にあると考えられる。このことをふまえて波の減衰を見積ることとする。底面でのせん断力 τ_b を

$$\tau_b = \rho f_b |u_b| u_b / 2 \quad (14)$$

と表わすと、乱流境界層のときには f_b はwave friction factor f_w に等しいと考えてよい。乱流境界層といってもRE数は 10^4 から大きくはずれるわけではないので、 f_w の評価式として次式を用いる（文献20）。

$$f_w = 2 / \sqrt{Re} = 2 \sqrt{\omega \nu / U_b} = f_b \quad (15)$$

τ_b の形として線形表示

$$\tau_b = \rho f_b C_e u_b / 2 \quad (16)$$

を仮定し、式(13)と式(15)との一周期 $T = 2\pi / \omega$ あたりの仕事 W が等しくなるよう等価な係数 C_e を決める。すなわち

$$W = \int_{-T/2}^{T/2} \tau_b u(n) dt, \quad (17)$$

より

$$C_e = \frac{8}{3\pi} U(n).$$

したがって式(11)の減衰項は

$$\frac{\nu}{(n+h)} \int_{-h}^{-(h-h_b)} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz = -\frac{1}{(n+h)} \frac{8}{3\pi} \sqrt{\omega \nu} U(n). \quad (18)$$

となる。

Van dorn²¹⁾は、この減衰項だけでは波の減衰を表すには不十分であると報告している。Miles^{22, 23)}は底面境界層による減衰に $(1 + (2h/b) + S)$ を乗じることが提案している。ここで b は容器の巾であり、 $2h/b$ は側壁の境界層の寄与を幾何学的にとらえ、係数で表わしたものである。 S は‘surface contamination’の影響（文献24）を示す係数であり、0と2の間の値をとることが理論的に明らかにされているが²³⁾、ここでは‘fully contaminated surface’に対応する1を用いることとする^{23, 25)}。以上のような底面、側壁、表面の減衰への寄与を考慮すると減衰項である式(18)は（ここで扱う浅水状態では1%程度の誤差で $u_b = u(\eta)$ であるので）

$$\frac{v}{(\eta+h)} \int_{-h}^{-(h-h_b)} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz = -\lambda u(\eta), \quad (19)$$

$$\text{ここで } \lambda = \frac{1}{(\eta+h)} \frac{8}{3\pi} \sqrt{\omega v} (1+(2h/b)+S). \quad (20)$$

となる。式(20)に示すように減衰項の係数 λ は水深 h に反比例しており、水深が深くなると相対的に液面動揺の減衰が小さくなることを示している。

なお、清水・葉山らの実験¹⁷⁾による、浅い水深状態の自由振動状態の液面動揺($h/a=0.1$)の λ と、式(20)から求まる λ とはよい一致を示すことが確認されている¹⁸⁾。

文献20、24に示されているように線形理論によれば正弦波振動状態の τ_b と u_b の間には位相差 $\pi/4$ がある。この位相差により生ずる減衰効果を等価な速度比例の係数として表わすと式(20)の係数は $8/3\pi$ ではなく $1/\sqrt{2}$ となり、

$$\lambda = \frac{1}{(\eta+h)} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega v} (1+(2h/b)+S). \quad (21)$$

となる。これは、式(20)の値より若干小さい。文献23、25では式(21)の η をとったものを液面動揺解析に用いている。しかし、式(21)はあくまでも正弦波の水面波形のもとでの評価であり、共振状態ではTLDの液面は小振幅加振であっても($RE=3 \times 10^3$ のオーダー)かなり非線形のため波頭が尖った状態になっている(例えば図5b))。すなわちこれは高次振動数モードが重畳していることを意味している。このことを考えると u_b と τ_b の等価な(実質的な)位相差 $\pi/4$ より小さくなる。すなわち式(21)は過小評価になっていると考えられる。3章の非線形波動シミュレーションでは両者による値を比較のために示す(図7)が、差は小さく、ここでは式(20)による評価を基本に考えることにする。

式(20)による波の減衰の評価はあくまでも今回対象とした実験ケースでのRE数範囲を念頭において一次近似値として求めたものであり、一般性があるわけではない。非常に微小な振幅を対象とし、RE数が低く、また液面の動揺が共振状態においても線形系から大きくはずれない場合には式(21)の方が適切であろうし、論理的にも明快である。また逆に、RE数が 10^4 を大きく上回るような場合には式(14)による f_b は小さすぎ、式(20)過小評価になっている可能性が高い。

波の減衰すなわち λ の評価については今後さらに検討する必要があると考えている。

2. 3 数値シミュレーション

これらの連立した2つの式(式(10)、式(11)および式(19))を千鳥(staggered)メッシュによる差分法を用いて数値的にとく。求まった波高 η と表面水粒子の流速 $u(\eta)$ からベースシア $F(t)$ 、1サイクルあたりのエネルギーロス ΔE (=ベースシア $F(t) \times$ 振動台変位 $X_s(t)$ を一サイクルにわたって積分したもの)を算出する。実際には $k=\pi/(2a)$ を仮定し、波の分散性は差分のメッシュのとり方を工夫し、離散化により生じる数値分散で満たされるようにする¹⁷⁾。

3. 振動台によるTLDの加振実験結果と非線形波動シミュレーション結果との比較

3. 1 実験の概要

振動台上にTLDをのせ、正弦波加振状態での波高 η 、ベースシア $F(t)$ 、1周期ごとのエネルギーロス ΔE を測定した(図3)。波高計は図3に示すように一方の壁近くに設置した。容器のサイズは巾 $2a=59\text{cm}$ 、奥行 $b=33.5\text{cm}$ で水深 $h=3.0\text{cm}$ である(図4)。液面動揺の第一次固有振動数 f_w は線形理論によれば、

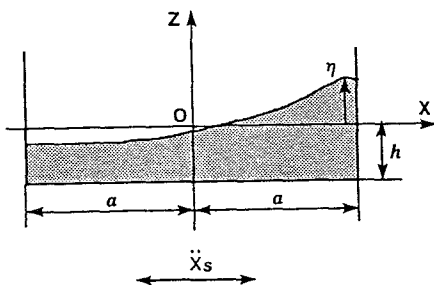


図1 水平加振 X_s を受けるTLDと座標系
(X - Z 座標はTLDに固定したもの)

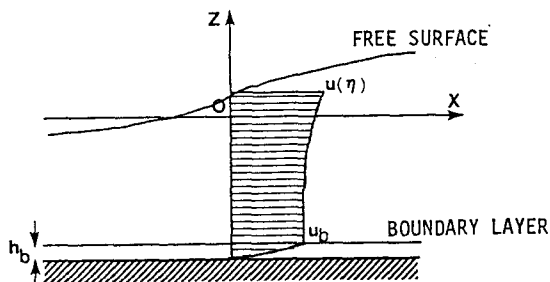


図2 TLD内液体の水平粒子速度の
プロファイル

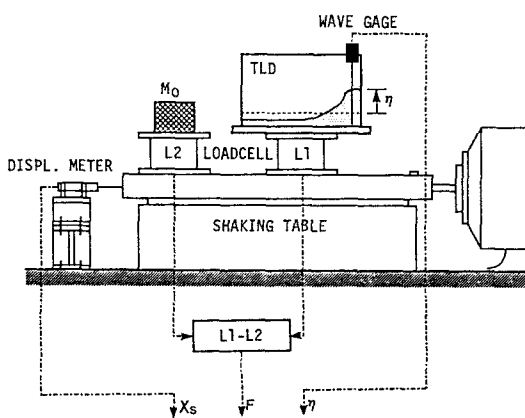


図3 振動台による加振実験(力、波高の測定)

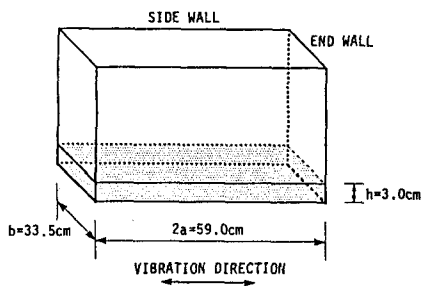


図4 実験に用いたTLD容器

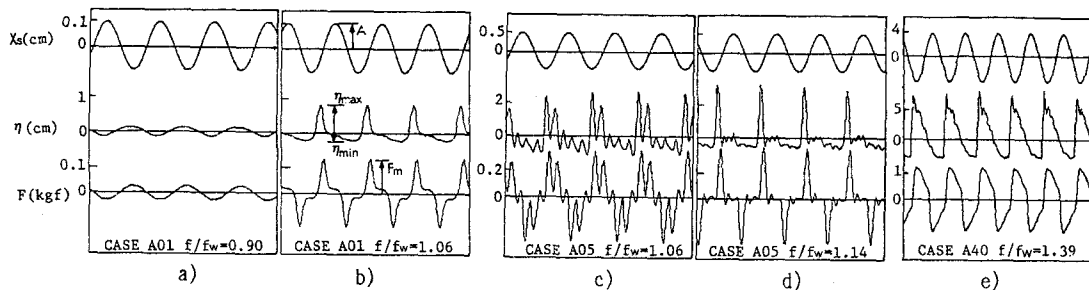


図5 振動台変位 X_s と波高 η 、ベースシア(力) F (f : 加振振動数)

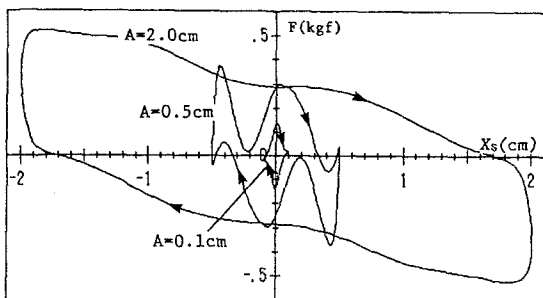


図6 振動台変位 X_s とベースシア F
との位相平面図

$$f_w = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\pi g}{2a} \tanh\left(\frac{\pi h}{2a}\right) \right)^{1/2} = 0.458 \text{ Hz}, \quad (22)$$

水ははじめ静止状態とし、加振振幅 A ($A=0.1\text{cm}$ 、 0.25cm 、 0.5cm 、 1cm 、 4cm)、加振振動数 f ($0.8 < f/f_w < 1.5$)を変化させて実験を行い、液面高さ η 、ベースシア F を測定した¹⁰⁾。

3. 2 実験結果

図5に振動台変位 X_s 、波高 η およびベースシア F の測定例を示す。図からわかるように、加振振動数 f 、加振振幅 A を若干変化させるだけで、波の形が著しく変化し非対称になる(図(b)、(d))、あるいは高次モード(一周期内で2つ以上の波が存在)が出現する(図(c))。このように、浅水状態の液面動揺は極めて非線形性の強い現象であり興味深い。振幅が大きいと波高 η およびベースシア F の形がかなり様相の違ったものになる(図(e))が、これは砕波のためである。なお、波力によるベースシアが正と負で対称形となるのは、一周期で波が2つの壁面に1度ずつぶつかるため(向きが逆)である。

図6に示すのは、ベースシア F と台変位 X_s との関係である。大振幅時($A=2\text{cm}$)にはすでに砕波状態にあると思われるが、ループは矩形に近く、スリップタイプの様相を呈している。 $A=0.5\text{cm}$ の時は複雑な形をしているが、これは図4(c)に示したように高次モード(1周期に2つの波の峰)が生じているためである。

3. 3 シミュレーション値との比較

実験結果と2節の定式化によるシミュレーションとの比較を図7に示す。図中の η' は波高 η を水深 h で無次元化したものであり、 F'_m 、 $\Delta E'$ は各々ベースシア最大値 F_m を $m_w \omega^2 A$ 、エネルギーロス ΔE を $m_w (\omega A)^2/2$ (m_w :水の質量、 ω :角周波数、 A :振動台振幅)で無次元化したものである。なお、シミュレーションにあたっては基本的には波の減衰は式(20)により評価した。図7(a)、(b)、(c)の波高応答曲線においては、比較のために式(21)を用いた場合の結果を点線で示す。いずれの場合も波高予測に有意な差はない。

加振振幅が大きくなるとピークを与える振動数(共振振動数)が高周波側にずれ、ハード型非線形となっていることがわかる。なお、加振振幅 $A=4\text{cm}$ のときには f/f_w が1.5に達しても振幅(η 、 F)のドロップはみとめられなかった。砕波が生じていないと考えられる無次元波高 $\eta'_{\max} (= \eta_{\max}/h) \sim 1$ 以下の場合(図7 a, b, c)には、波高、ベースシア最大値 F_m 、 ΔE いずれにおいてもシミュレーションと実験結果との整合性が高い。ただし、加振振幅が大きくなると(図7(c))、シミュレーションによる波高、ベースシアの予測値は共振点付近で実験値を少し上回るようになる。この場合のRE数は 2×10^4 を越えており、式(20)による波の減衰評価が過小評価になっているためとも考えられる。

砕波が生じていると考えられる図7の(d)では砕波を考えていないシミュレーション値、特に波高は過大評価となる。

図8に示すように静止時からのベースシアの過渡時刻歴応答においても極めて整合的である。図7 a, b, cにおいて、加振振動数の変化に対して段差を示すのは図4に示すように非線形性のため高次モード(2次、3次)がある帯域で励起されるためである。図9にベースシア $F(t)$ と台変位 $D(t)$ の関係の例を示すが、実験値とシミュレーションはよい一致を示している。

図7において、加振振幅 A が大きくなると波高 η' は増すが、 F'_m 、 $\Delta E'$ は低下する。さらに振幅が大きくなると($> 1\text{cm}$ 、図7 c, d)、砕波が生じ波高はあるレベル以上に大きくならず、砕波のため高減衰系のシステムに移行し、水の有効質量が低下し、 F'_m 、 $\Delta E'$ はさらに低下する。これは、大振幅時にはTLDのダンパーとしての効率が低下することを示唆している。また、大振幅時には広い振動数範囲にわたり、 F'_m 、 $\Delta E'$ はフラットに近くなり、同調があまり重要でないことを示している。これらの結果は自由振動実験から求まったTLDの特性¹³⁾と整合的である。

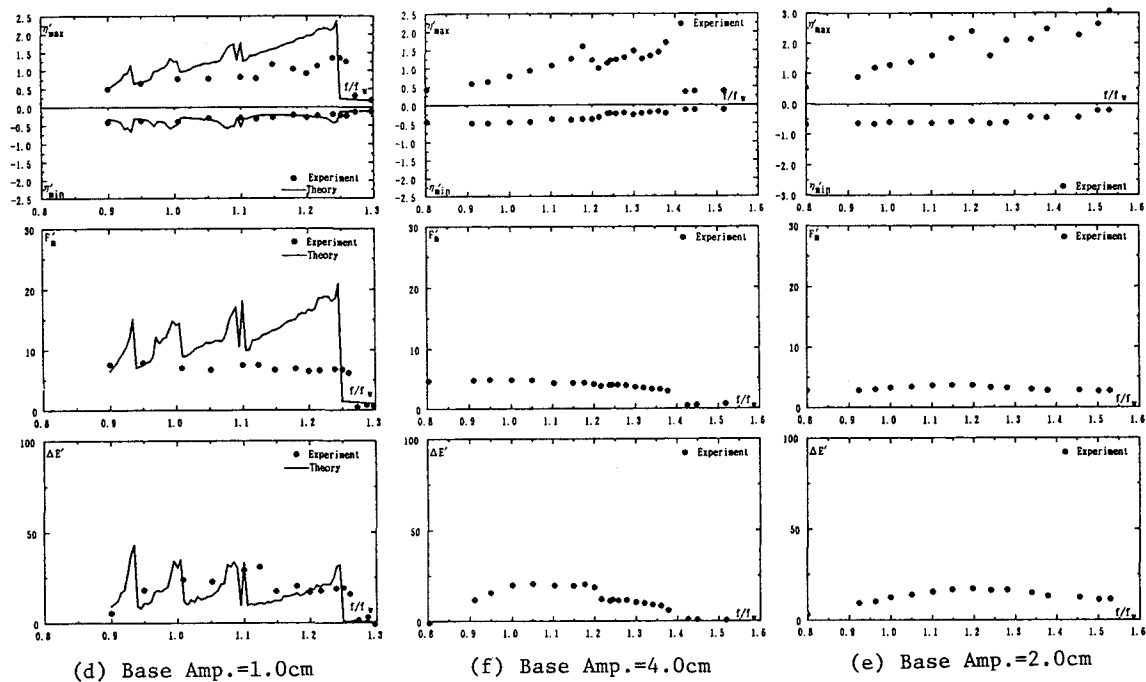
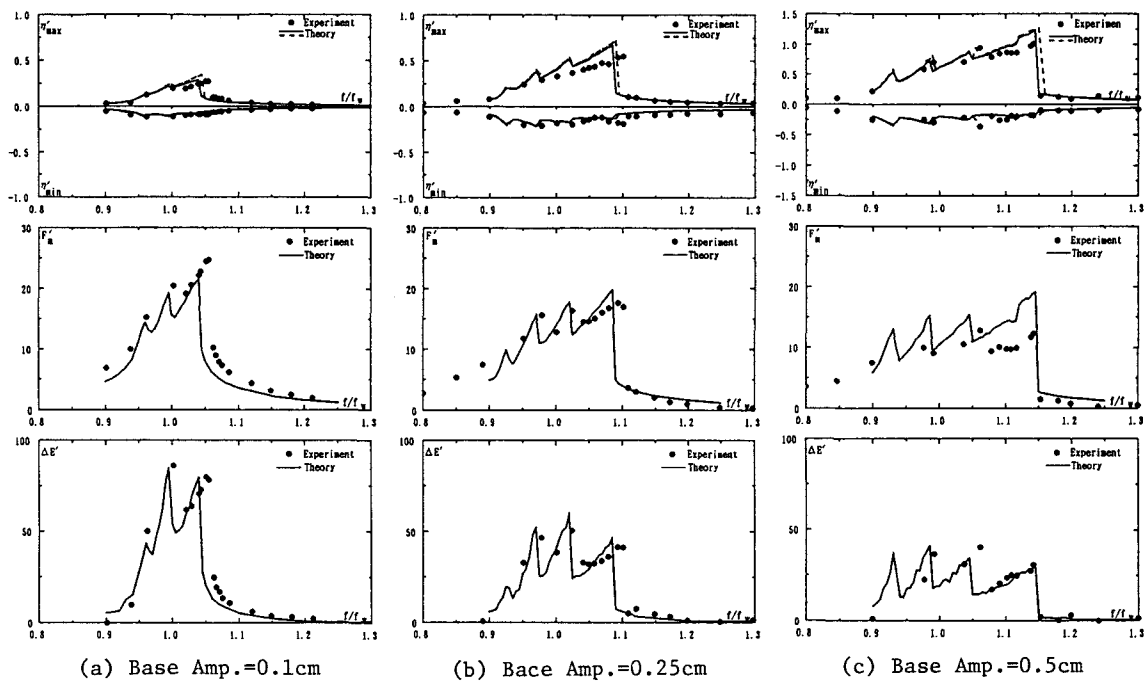


図7 各実験ケースにおける（無次元）波高 η' 、最大ベースシア $F'max$ 、
（一周あたりの）エネルギーロス $\Delta E'$ （ t は加振振動数、実線、点線はシミュレーション値）

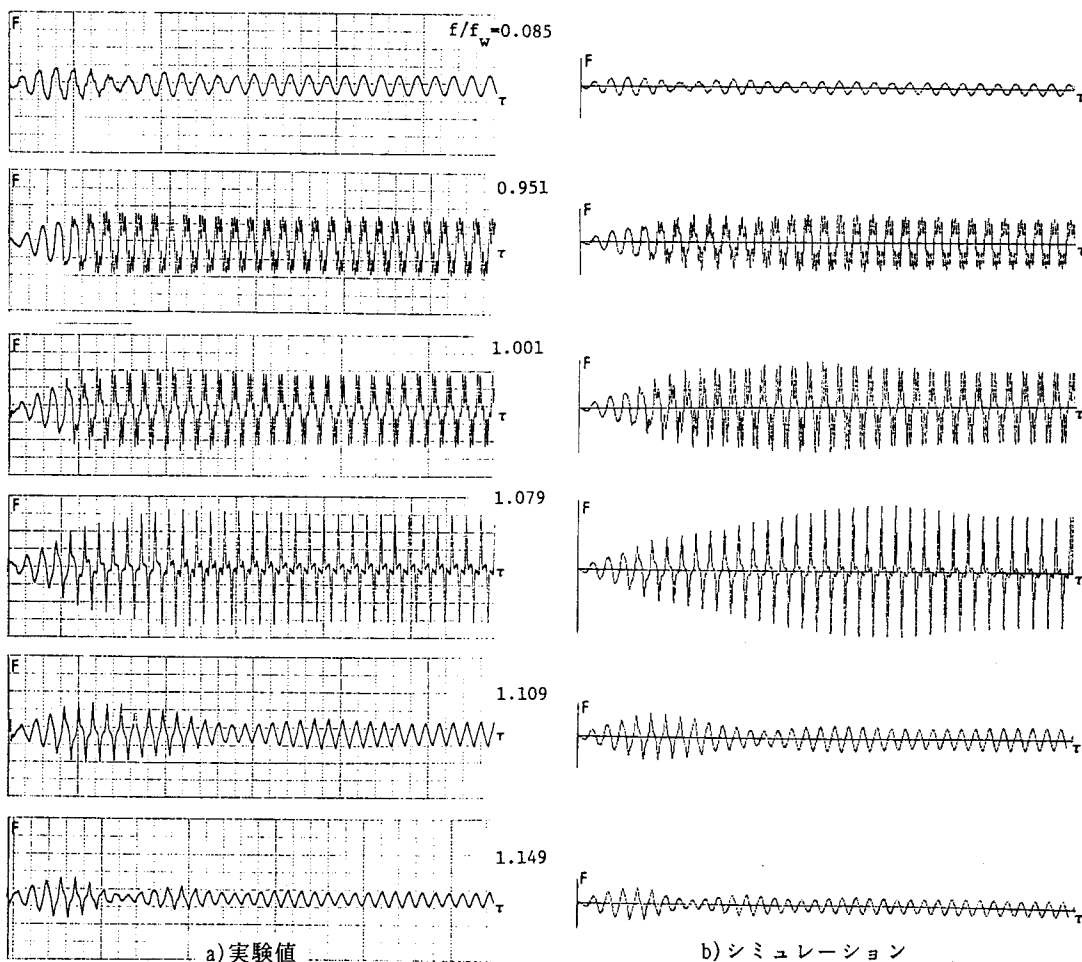


図8 加振振幅 $A=0.25\text{cm}$ におけるベースシア F の過渡応答における比較

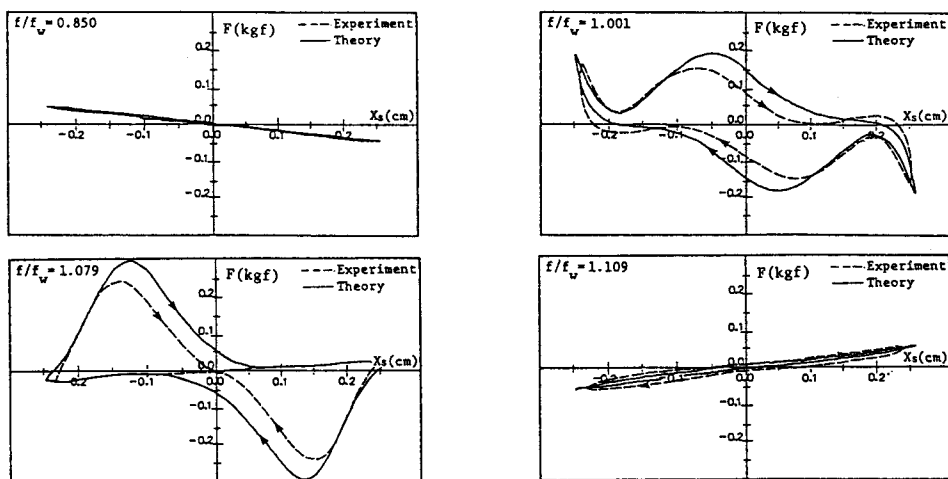


図9 振動台変位 X_s とベースシア F の位相関係 (加振振幅 $A=0.25\text{cm}$)

4. TLD-構造系の強制振動応答実験と数値シミュレーション

前節で、碎波が生じていると考えられる加振振幅以下では、非線形波動シミュレーションは実験値と十分整合しており、有効であることが示された。

図10に示すような1自由度弾性構造物にTLDが付加されたときの正弦波強制振動応答においても、2節で述べたシミュレーションの有効性を確認する目的で実験を行なった。

4. 1 実験

図11に示すせん断振子タイプ1自由度系プラットフォームにTLDと加振器をのせ、加振器の力を一定にコントロールした状態で加振振動数を変化させる実験を行なった。

1自由度系の質量 m_s は168kg、固有円振動数 f_s は0.91Hz、対数減衰率 $\delta_s=0.02$ である。

TLDの容器は市販されているビニール製矩形容器（長さ $2a=25.2\text{cm}$ 、巾 $b=32.2\text{cm}$ 、高さ 12cm ）（図11）を用い、水深 h を 2.1cm とし、構造系とほぼ同調させた（ $f_w=0.89\text{Hz}$ ）。ただし市販容器のため厳密な直方体ではなく、底面が若干そっており、またコーナーには丸みがついている。

加振は正弦波加振として、定常応答に達したときの構造系の振幅 A と波高 η （波のぶつかる壁面近くで測定）を測定した。加振振動数は 0.005Hz きざみで変えている。図12に実験結果の例を示す。TLDがないときの1自由度系の共振時の振幅は 1cm 、 3cm としてある。図中の●印は加振振動数を徐々にあげていったとき、○印は加振振動数を徐々に下げていったときの構造系の振幅である。

次に、容器の向きを 90° 変え $2a=32.2\text{cm}$ として同様の実験を行った（図11）。質量比を低くするために仕切り板を入れている。このときの水深は構造系の固有振動数と同調させるために 3.6cm としてある。このときの液面動揺の一次固有振動数（計算値）は 0.90Hz である。加振振幅は図12のと同じく、TLDがないときの共振振幅が 1cm 、 3cm となる2ケースである。共振応答曲線を図13に示す。

4. 2 数値シミュレーション

1自由度系にTLDをのせたときの系（図10）を2章で述べた流体系の運動方程式と1自由度系の方程式との結びつけ、すなわち

$$\ddot{x}_s + 2\omega_s \zeta_s \dot{x}_s + \omega_s^2 x_s = \frac{1}{m_s} (F + F_e) \quad (23)$$

$$F = F(\eta, u(\eta), \ddot{x}_s) \quad (24)$$

として応答 x_s と波高 η を計算した。ここで固有円振動数 $\omega_s = \sqrt{(k_s/m_s)}$ 、減衰比 $\zeta_s = c_s/2m_s\omega_s = \delta_s/2\pi$ である。また F_e は正弦波外力であり、 F はTLDからくるベースシア力である。2節の計算方法に従い、応答 x_s 、波高 η が定常状態に達するまで時刻歴応答計算を続ける。なお、波の減衰は式(20)で評価した。

図12、13に示す実線はシミュレーションより求めた構造系の応答 x_s の振幅である。なお、点線はTLDをのせないときの応答である。

なお、液面動揺のRE数は $2a=25\text{cm}$ の向きにTLDをおいたとき、容器の振幅 $A_0=0.25\text{cm}$ で $RE=1.2 \times 10^4$ のオーダー、 $2a=32\text{cm}$ の向きにしたときは同じ振幅でおよそ $RE=2 \times 10^4$ である。

4. 3 実験結果とシミュレーション値との比較

図12a)は質量比1%の例である。実験結果によれば、ピーク振動はTLDを付加することにより10%程度に低下しており、TLDの有効性が確認できる。振動数を徐々に上昇させたとき（●印）、降下させたとき（○印）ともにほぼ同じ値であり、実験に再現性のあることがわかる。シミュレーション値は f/f_s が0.98付近

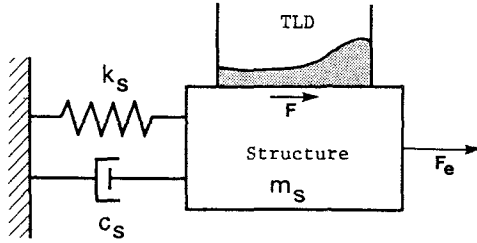


図10 1自由度構造物+TLD系

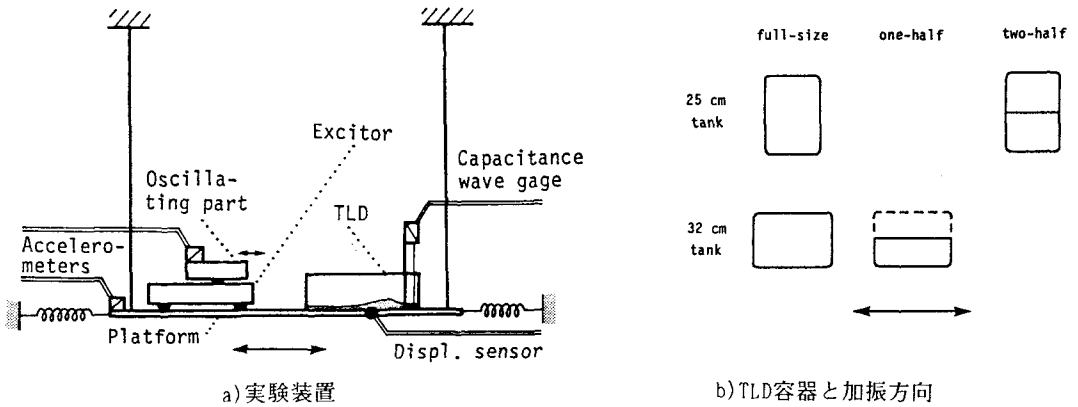
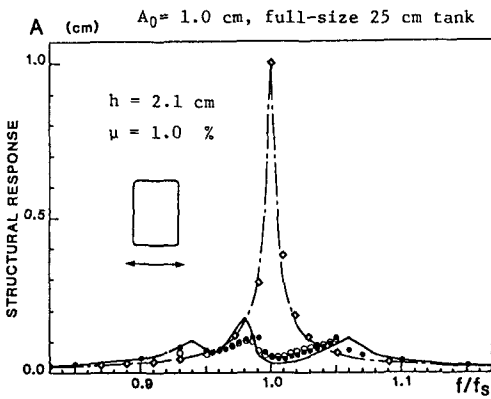
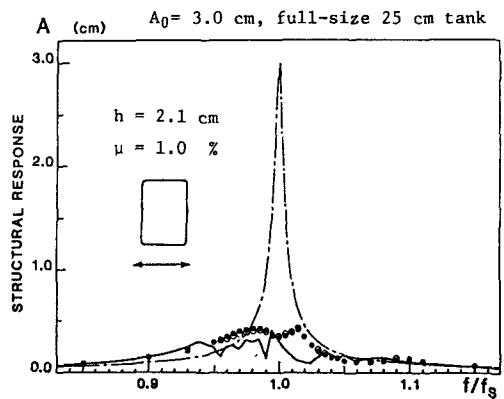


図11 加振器を用いた1自由度構造物（プラットフォーム）+TLD系の実験



a) 水深 $h = 2.1$ cm、質量比 $\mu = 1$ %



b) $h = 2.1$ cm、 $\mu = 1$ %（大振幅）

図12 正弦波加振による応答曲線（一点鎖線：TLDなし、●○：実験値（TLDあり）、実線：シミュレーション（TLDあり））

で若干実験値とずれるが、ほぼ実験値と対応しているといえよう。両者の間にある差は、前述のようにTLDの容器として市販のボックスを用いたため、完全に直方体でなく、そのことも影響しているものと思われる。

なお、図12a)の場合、 f/f_g が1.015～1.040の間では構造物（1自由度プラットフォーム）の応答並びにTLDの液面動揺に‘うなり’現象が観察された（図14）。

間仕切りをした容器（図11参照）を使つての質量比1%の実験値も行ってみた。図12a)の場合と本質的な差異はないはずであるが、仕切り板なしの実験（図12a）のときに見られた $f/f_g=1.015\sim 1.040$ におけるうなり現象は認められなかった。

図12d)に示すのは、質量比1%（仕切り板なし）における応答であるが、TLDなしの状態では共振振幅が3cmとなるように加振力を大きくした場合である。このときも図12a)の場合と同じように応答は10%程度に低下している。シミュレーションによる応答予測値は実験値を下回る傾向にあり、TLDの効果を過大評価しているといえる。これは加振力は前の実験ケースに比べて大きく、当然TLDの波高も高く砕波状態に突入していたためであると考えている²⁶⁾。すなわち、今回のシミュレーションモデルは砕波が生じない前提で導かれており、砕波が生じるとベースシアPを過大評価することがわかっており（3節図7d）、このために図12b)のような結果になったものと思われる。また、シミュレーションによるTLDの波高計算値も大きく、砕波が生じてもおかしくないという結果を得ている。ただし、砕波といってもそれほど目立つものが生じていたわけではなく、実験において明白な砕波を確認することはできなかった。

図15a, b, c, dにTLDの液面動揺の測定値とシミュレーション値との比較を示す。加振力は小さい方（TLDがないときの構造物の共振応答振幅 $A_0=1$ cmの場合）である。 $f/f_g=0.96$ の場合（図a）には実験、シミュレーションとともに1周期にピークが2つあり、2次モードが励起されている。これはTLDの非線形性のために起こる現象である（2節、図5）。

$f/f_g=1.0$ では両者にはほとんどの差がないが（図b）、 $f/f_g=1.03$ ではかなりの差が生じている（図c）。すなわち、実験では前述のうなりが生じている。ただし、まん中に仕切り板を入れた場合（図d）には両者にはほとんど差がない。シミュレーションモデルは2次元の扱いであるのに対し、実際のTLD内の水の動きは3次元であり、容器の中が大きくなると3次元的な水の動きがあらわれ、シミュレーションと実験値との間にギャップが生じたと考えることができる。なお、仕切り板がないとき $f/f_g=1.03$ でうなりが生じるが平均的な応答についてはシミュレーションによる応答とほぼ同じである（図12a）。

容器の向きをかえたときの実験の結果とシミュレーションの比較を図13a, bに示すが、ともにかなりよい一致を示している。なお、構造物の共振振幅を3cmにしても図12d)のときの水深 $h=2.1$ cmに比べ深い（3.6cm）ので砕波状態にはなっていない。

構造物にTLDを実際に設置するときには、容器のサイズ、水深 h 、質量比などをパラメトリックに変化させ、種々の実用面から制約条件の中で最適な値を探していく必要があるが²⁶⁾、ここで開発されたTLDのモデルはこのとき有用になると期待している。

5. あとがき

矩形容器のTLDを対象にした非線形波動解析を実施し、砕波が生じない範囲では実験値と高い整合を示すことが確かめられた。また、TLDを設置した1自由度系（TLD-構造系）の正弦波（ただし、比較的小振幅）による強制振動実験を行ない、TLDの有効性を確認した。さらにこの非線形波動解析を用いてTLD-構造系の数値シミュレーションを行い、その妥当性を示した。

液体の動揺を利用したダンパー、TLDは、既存のTMDなどに比べ、微小振動でも確実に作用する、水深を調節することにより同じ液体を2方向の振動に対するダンパーとして使える、架設時などの制振に簡便に

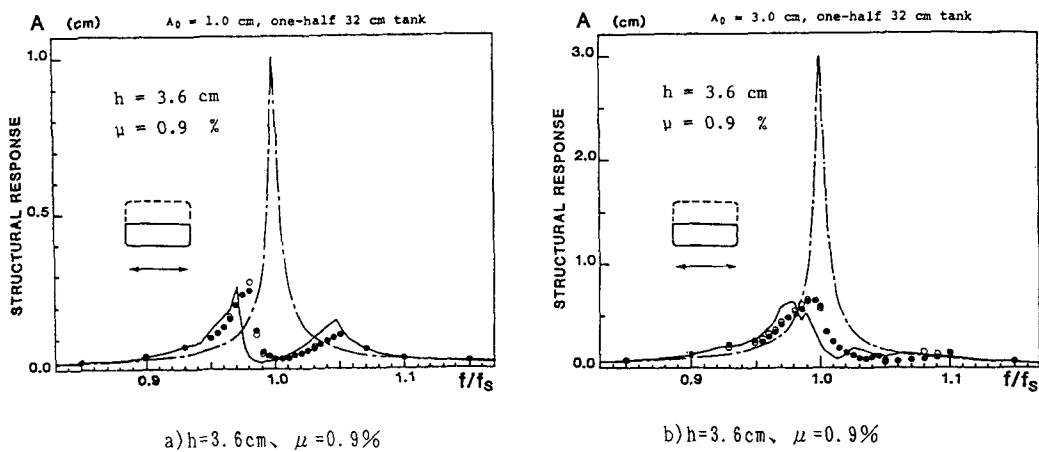


図13 正弦波加振による応答曲線 (TLD容器は長手方向に加振、図中の記号は図12と同じ)

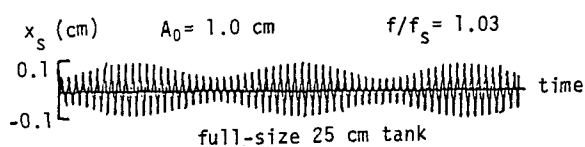


図14 構造物+TLD系実験で見られた構造応答のうなり ($f/f_s=1.03$)

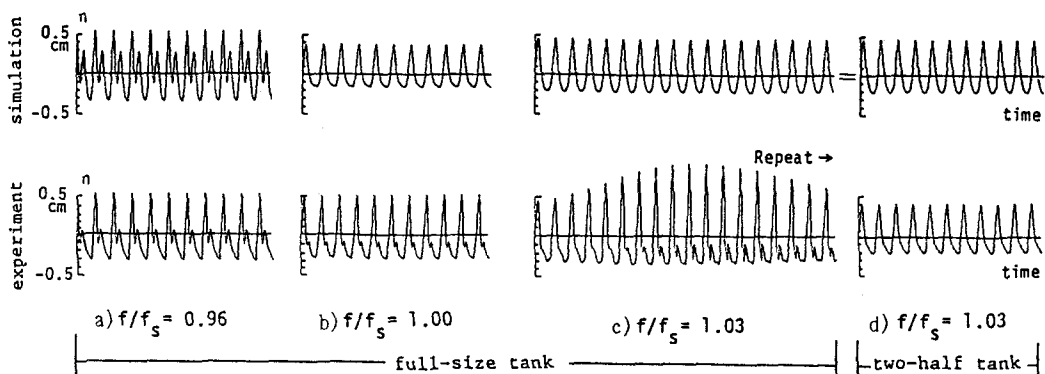


図15 構造物+TLD系における壁面近くの液面動揺 (図a)～c)は図12a)、図d)は仕切入板を入れたケースに対応)

用いることができるなどの有利性をもっているものと考えられる。あらゆる場合に、TLDが他のダンパーに比べ優位であるとは思っているわけではなく、適材適所ということであろう。

波の減衰の評価についてはつめるべき点が残っている。他にも、二軸振動下での非線形波動解析、ロッキング（ねじり）振動に対する解析、円筒容器あるいはリング容器（2重円筒容器）の場合の非線形波動解析、砕波のモデル化など研究すべき点は数多く残っており、今後さらに発展させ、TLDの設計ができるだけ解析的に行なえるようにしていきたい。

謝辞 東京大学伊藤学教授には有益な助言をいただきました。また、葉山真治教授（東大工）、金子成彦助教授（東大工）にもいろいろコメントをいただきました。振動台実験は清水建設技術研究所において行なったものであり、その際、藤井邦雄部長、佐藤孝典研究員他多くの方々に助力をいただいた。ここに感謝いたします。また、本研究は科学研究費試験研究（1）、ならびに東大と民間（清水建設）との共同研究の補助を一部受けて行なわれたものであることを付記します。

また、論文査読者から有益なコメントをいただきました。査読者の方にも感謝いたします。

参考文献

- 1) 藤野陽三：液体の動揺を利用したダンパー、日本機械学会第674回講習会「流体関連振動の基礎と最近の話題」、113-127, 1988年7月
- 2) Modi, V.J. and P. Welt :Vibration Control using Nutation Damper, Proc. Int. Conf. on Flow Induced Vibration, Bowness-on-Windemere, England, 1987, pp369-376.
- 3) 佐藤孝典：Tuned Sloshing Damper, 日本風工学会誌、32号、昭和62年5月、pp67-68
- 4) 宮田、山田、斉藤：耐風制振振用水槽ダンパーの検討、日本風工学会誌、32号、昭和62年5月、pp65-66
- 5) 野路 他：スロッシングを利用した制振装置の研究（その1、その2、その3）、日本建築学会学術講演梗概集、昭和62年10月、pp867-872 （その4～その7） 昭和63年10月、pp. 565-570
- 6) Chaiseri, P. (1987) :Damper for Tower-like Structure Utilizing Liquid Motion as Energy Dissipator, Master Thesis, Dept. of Civil Engg. Univ. of Tokyo. Japan.
- 7) Tamura, Y. and Fujii, K. et. al. (1988) :Wind-Induced Vibration of Tall Towers and Practical Applications of Tuned Sloshing Damper, Proc Symposium, Workshop on Serviceability of Buildings, Canada, pp228-241
- 8) 佐岡・玉木・坂井：Tuned Liquid Damper（液柱管ダンパー）の制振効果について、第43回土木学会概要集、I-PS515, 30-31, 1988
- 9) 渡辺四郎：動揺軽減法（2）、耐航性に関するシンポジウム論文集、日本造船学会、1969年7月、pp.156-179.
- 10) Sayar, B. and Baumgarten J. R.: Linear and Nolinear Analysis of Fluid Slosh Damper, AIAA J., 20, 11, 1982, pp.1534-1538.
- 11) Bauer, H. F.: Oscillations of Immiscible Liquids in a Retangular Container : A New Damper for Excited Structures, J of Sound and Vibration, 93(1), pp.117-133, 1984.
- 12) 松浦義一ほか：倉内流体運動を利用した防振法に関する基礎的研究、日本造船学会論文集、No.160、1986、pp.424-432.
- 13) たとえばFujino, Y. 他 :Parametric studies on tuned liquid damper(TLD) using circular containers by free-oscillation experiments, 土木学会論文集、No.398、1988-10.

- 14) Chester, W. 他: Rosant Oscillations of Water Waves, Part I and Part II, Proc. Roy. Soc. of London, 308, 5-22, 23-30, 1968.
- 15) 石川忠晴、椎貝博美: 円形水槽内2層流体における内部波について、土木学会論文報告集、No. 219, pp. 45-53, 1973年11月
- 16) 沢本正樹、加藤一正: 有限振幅内部重複波に関する研究、土木学会論文報告集、No. 232, pp. 37-47 1974年12月
- 17) 清水隆、葉山真治: 浅水波理論を応用したスロッシングの非線形応答(第1報)、日本機械学会論文集(c) 53, 486, 昭和62-2, 357-363 (あるいは、JSME International Jour, 30, 263, 1987, 806-813)
- 18) 孫利民: Simulation of nonlinear waves in rectangular tuned liquid damper(TLD), 東大土木工学専攻修士論文, 1-86, 1988年9月
- 19) Sun, L.M., Fujino, Y., Pacheco, M.B. and Isobe, M.: Nonlinear waves and dynamic pressures in rectangular tuned liquid damper(TLD) - simulation and experimental verification -, 土木学会論文集(投稿中)
- 20) Jonsson : Wave boundary layer and friction factors, Proc 10th CCE, ASCE, 127-148, 1966.
- 21) Vandorn, W. G. (1966) : Boundary dissipation of oscillatory waves, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 24, part 4, pp769-779
- 22) Miles, J.W. : Surface wave damping in closed basins, Proc. Roy. Soc. London, A297, 459-475, 1967
- 23) Miles, J.W. : Resonantly forced nonlinear gravity waves in a shallow rectangular tank, Wave Motion, No. 7, 291-297, 1985.
- 24) Lamb, H. : Hydrodynamics, Cambridge Univ. Press (邦訳(今井、橋本)、その3、pp. 182-183, 東京図書)
- 25) Lepelletier, T.G. and Raichlen, F. : Nonlinear oscillations in rectangular tanks, Journal of Engineering Mechanics, vol. 114, No. 1, ASCE, 1-23, 1988.
- 26) Chaiser, P., Fujino, Y., Pacheco, B.M. and Sun L-M. : Interaction of Tuned Liquid Damper(TLD) and structure - theory and experimental verification、土木学会論文集(投稿中)

(1988年10月12日受付)