

TMD アナロジーをベースにした TLD の特性の理解

Understanding of TLD properties based on TMD analogy

藤野陽三¹⁾、パチェコ ベニート²⁾、チャイセリ ピヤワット³⁾、孫利民³⁾、古賀健一³⁾

By Yozo FUJINO, Benito M. PACHECO, Piyawat CHAISERI, Li Min SUN and Kenichi KOGA

Wave height and base shear force of TLD with rectangular, circular, and double circular containers are measured in a shaking table under the sinusoidal base motion of various amplitudes and frequencies. Virtual mass and virtual dashpot of TLD attached to an undamped linear SDOF structure are calculated from the experimental data, and amplitude-dependent equivalent mass, dashpot and stiffness of TLD are also obtained using the linear TMD analogy. On this basis, some important properties of TLD are discussed. Finally a method to increase liquid damping in TLD is proposed and its effectiveness is experimentally demonstrated.

1. まえがき

液体の動きを利用したダンパー（著者らは総称して Tuned Liquid Damper, TLDと呼んでいる）は、固体質量を用いたTMDのような従来から用いられているパッシブタイプにはない利点があり、また目新しさも加わってこの2、3年建設工学の分野で活発な研究が行なわれてきている（たとえば文献1～9）。

本研究で対象とするのは、我々グループがこの4年ほど取り組んできている容器内の浅い液体の動揺を利用したダンパー（TLD）である（文献10～14）。桁の横振動、斜張橋タワーの風力振動（文献15）の制振策としてもすでに使われ、実橋への適用もはじまりつつある。

文献12～14では矩形容器を用いて（1）振動台上にTLDをのせた強制変位加振実験（2）TLDの制振効果を知るためのTLD-構造物系の強制外力加振実験を行ない、非線形波動シミュレーション法による予測が碎波が生じない範囲では実験結果とよく一致することを示した。そこではTLDの特性を把握するというよりもシミュレーション法の検証的な面が強かった。

本研究では、新たに円筒容器、二重円筒容器、あるいは内容液として水の代わりに高粘性液体を用いた強制変位加振実験を振動台を使って行ない、その結果をTMDアナロジーを用いて整理し、TLDの特性の理解を試みる。さらに、液体動揺の減衰コントロール法としての浮体粒子法の効果を実験的に確かめる。

2. 振動台を用いたTLDの強制変位加振実験

2. 1 装置と実験条件

図1に示すように振動台上にTLDをのせ、強制正弦波変位を与えた。液体の波面の高さを容量式波高計で、ベースシアをロードセルで、振動台変位は光学式変位計で測定した。文献12,13で用いたのと同じ装置である。

用いた容器は、矩形容器（巾 $2a=60\text{cm}$ 、奥行 $b=33\text{cm}$ ）、円筒容器（径 $2a=60\text{cm}$ ）、二重円筒容器（外径

1) Ph.D 2) 工博 東京大学工学部助教授（〒113 文京区本郷 7-3-1）

3) 東京大学大学院土木工学専攻（同上）

60cm、内径50cm)の三種である(図2)。

矩形容器は水深3cm(液面動揺一次固有周期2.2秒)とした。円筒容器は水深を2.7cm、二重円筒容器では水深を7.8cmとし、ともに固有周期2秒の条件で実験を行った。波高計は3ヶ所に設置し、円筒容器、二重円筒容器において巡回振動(スワーリング)がでたときにもその動きをつかめるようにしてある。

矩形容器については粘性増加液を水に加え、液体を高粘性(動粘性係数 $\nu = 11.2\nu_w, 30\nu_w$ の2種。なお、 ν_w は水の動粘性係数である)としたケースも行った。

実験はすべて正弦波加振のもとで加振振動数を徐々にかえるスイープ実験であり、波高、ベースシアの測定は水の動きが定常に達したと思われる時点で行っている。

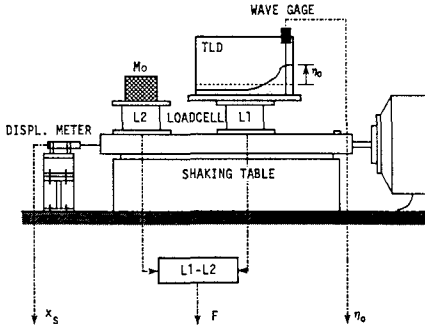


図1 振動台による加振実験
(力、波高の測定)

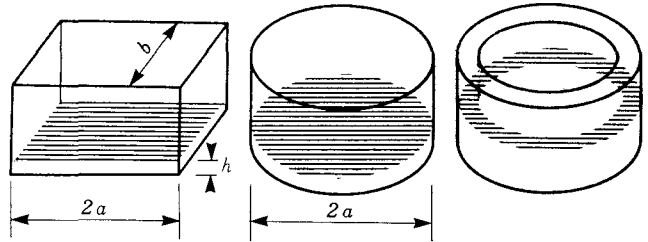


図2 実験に用いたTLD

2.2 実験結果

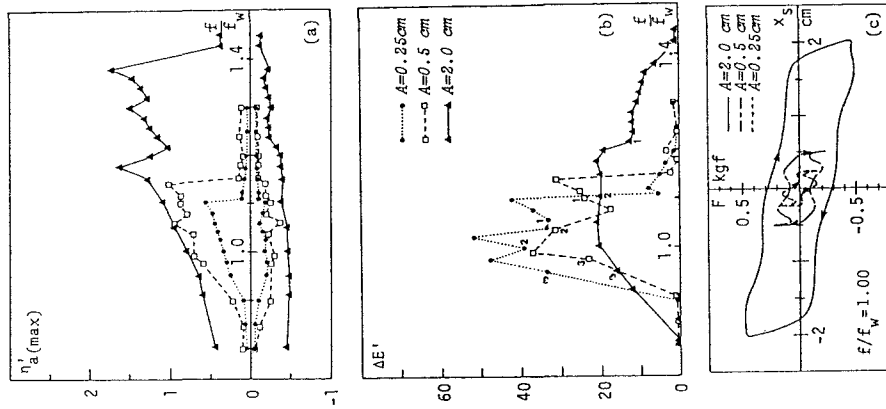
矩形容器の場合も含めて、各容器内における液面の振幅 η 、1周期あたりのエネルギーロス ΔE を加振振動数ごとに求めたのが図3である。図中のたて軸の η'_{max} 、 η'_{min} は、加振方向の壁面のごく近くで測定した波の峰、谷の静水時からの差を水深 h で無次元したものである。エネルギーロス $\Delta E'$ は一周期あたりのエネルギーロス(台変位とベースシアで形成されるループの面積) ΔE を、水全体を剛体としたときにもつ最大運動エネルギー $m_A^2 \omega^2 / 2$ で除した無次元量である。ここで m_w :水の質量、 A :振動台変位振幅、 ω :加振円振動数である。図3の横軸は、加振振動数 $f (= \omega / 2\pi)$ を液体動揺の(線形)一次固有振動数 f_w (理論値)で除した値である。

(a) 矩形容器(図3a) すでに文献12、13で述べたように、加振振幅が大きくなるにつれ、共振振動数が上昇する(ハードニング現象)。小振幅のときには η' 、 $\Delta E'$ にローカルピークがあるが、これは非線形性のために高調波(1周期内に波の峰が2つ、3つ)が励起されるためである。

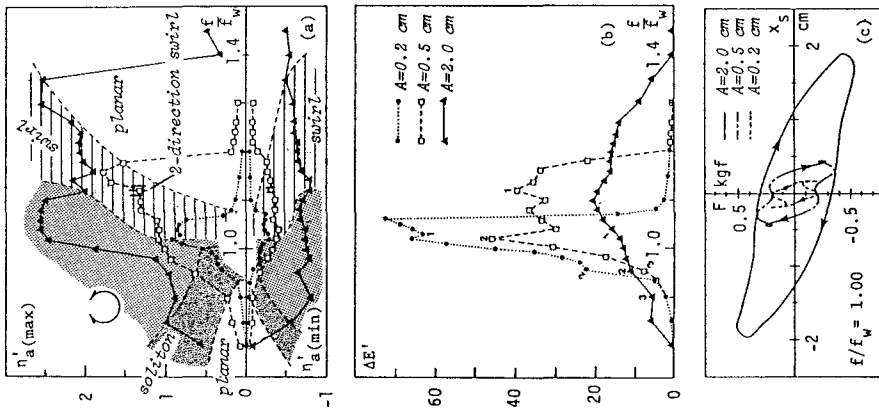
加振振幅が大きいと η' はフラットになる。これはいわゆる共振現象が起こらなくなることを示唆している

(b) 円筒容器(図3b) 矩形容器に比べ、水の動きはより複雑である。共振振動数からはずれたところでは、水面が平面状態(planar motion)で振動し、加振振動数をあげて $f/f_w = 1$ に近づけると孤立波(soliton)的な波がみられる。このときには高調波も見られた(図4a)。共振振動数にさらに近いところでは円周方向に沿って逆位相の波が伝播し、互いが半周期ごとにおつかる状態となる。加振振幅があるレベル以上では共振振動数を少し過ぎたあたりに巡回運動(swirling、スワーリング)が生じる。加振振幅 A が0.5cmのときには $f/f_w = 1.1$ 付近で右まわり、左まわりのスワーリングが間欠的に生じ、非定常な様相を呈した。非定常な液面動揺応答の例を図4b、cに示す。ここで示す非定常な応答はその包絡線からみて依然周期性があるように見受けられる。比較的水深比の大きい($h/a \approx 1$)円筒容器の液面動揺においては、周期性が欠落したカオスがみられるという報告が船越ら^{16,17)}によってなされ、最近注目をあびているが、今回の実験では‘カオス’といえるような応答は見られなかった。

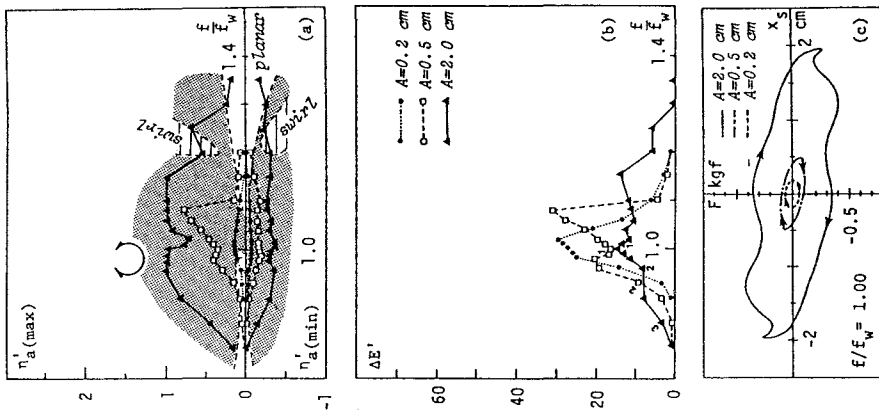
円筒容器のスワーリング現象については、すでにいくつかの報告(文献18,19,20)があるが、いずれも深い水(水深/直径 > 1)を対象としている。ここで行ったような浅い水(水深/直径 ≈ 0.05)についての既



□ a) 矩形容器



○ b) 円筒容器



◎ c) 二重円筒容器

図 3 波高 η 、エネルギーロス ΔE と力と変位のリサージュ図 (実験値)

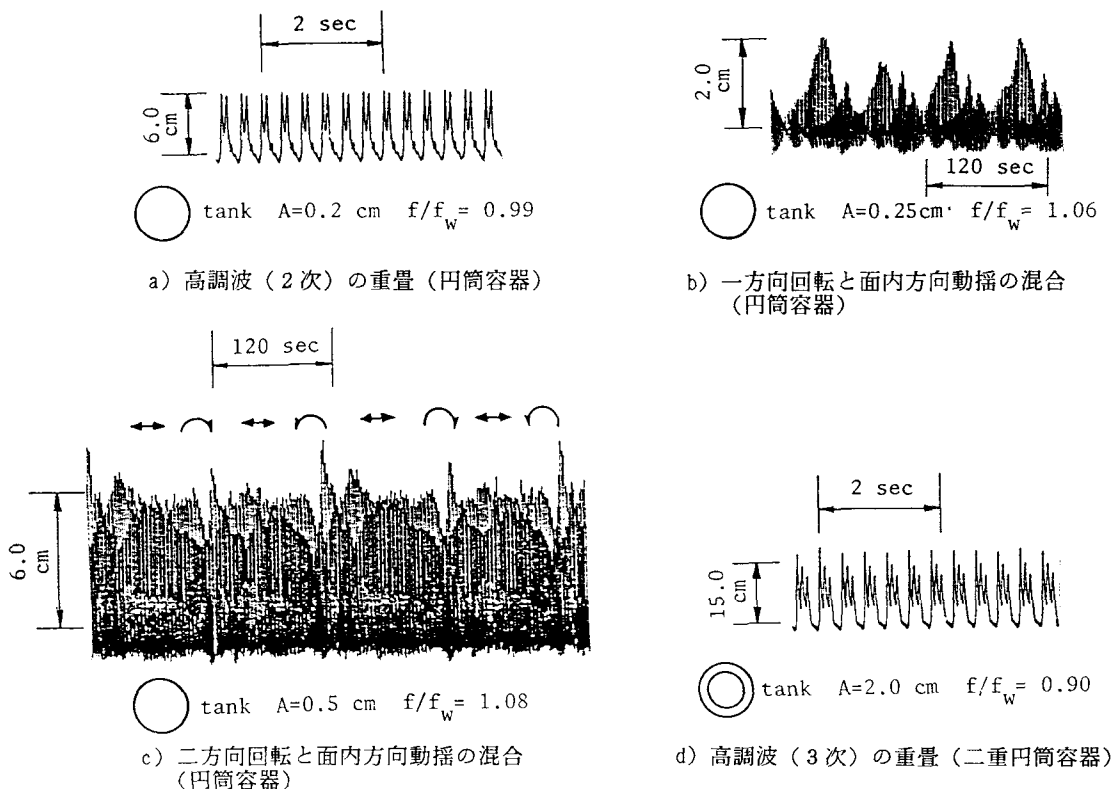


図4 実験でみられた液面波高時刻歴の例（加振方向の壁面近くで測定）

往の実験結果はないが、スワーリングが共振点を少しすぎた振動数付近で生じるなど既往の結果と整合的といえる。

共振振動数は加振振幅が大きくなるにつれて上昇し、共振振動数を過ぎると液面動揺は急激に減少し、再びplanar motionに移る。これは矩形容器の場合と同じであり、この水深の円筒容器の液面動揺もハードニング性を有することがわかる。

（c）二重円筒容器 加振振幅による共振振動数の変化は矩形容器に比べて顕著ではない。これは、矩形容器の水深3 cmに比して水深が7.8 cmと深く、非線形性が弱いためと考えられる。図4 dに示すような高調波は観察されている。図3の η' 、 $\Delta E'$ は比較的なめらかであり、矩形容器の場合に比べそのレベルは低い。スワーリングも生じたが、その範囲は円筒容器に比べ狭かった（図3）。

なお、図3の $\Delta E'$ 図に記した数字2、3は2次、3次の高調波の意味であり、そこではこれらの高調波が観察されたことを示している。

エネルギー $\Delta E'$ に着目すると、容器の形状による大きな差はみられないが、いずれの場合も加振振幅が小さい場合には振動数選択性があるが、大きい振幅となるとシャープなピークが消える。これは液体動揺の減衰性が砕波などにより増加し、共振現象が生じなくなるためである。

図3には $f/f_w = 1.00$ のときの振動台変位 X_g とベースシアFの描くループも例として示している。小振幅のときには容器形状による非線形性の微妙なちがいがループ形状が異なるが、振幅の大きいときには砕波あるいは砕波に近い状態（ $\eta'_{g(max)} > 1$ ）であるため、いずれの容器でも偏平だ円に近い。ただし、矩形断面では、波が同時刻に壁にぶつかるので X_g のピーク（最大、最小）付近で力Fがやや急激に増加し、そのためループが平行四辺形的になっている。一方、円筒容器では砕波した波が進行中、容器壁に徐々にぶつかるために、動水圧Fに大きなピークが出ず、だ円に近くなったと考えられる。

3. TLDの線形1自由度系としてのモデル化

3.1 主旨 すでに述べてきたように、TLDは容器内の浅い液体動揺を利用しているために、非線形性が強い。その代表的な現象が砕波である。砕波が生じない範囲では非線形波動シミュレーション法がTLDのモデル化として適用可能であることはすでに文献12、13で示したが、砕波がからんでくると物理現象に即したモデル化は困難であり、海岸工学の分野においても確立されたものはないのが現状である。したがって、何らかの簡易モデルを想定し、そのパラメータを実験のデータからキャリブレーションするような手続きが工学的には必要となる。

ここでは2.で行った異なる振幅下でのスweep強制正弦波加振実験の結果を用いて、TLDが無減衰線形1自由度系に設置されたときの仮想質量、仮想ダッシュポットを求める。次にそれを利用してベース振幅ごとにTLDを等価な1自由度線形系に置き換えたときのパラメータ（質量 m_a 、粘性減衰係数 c_a 、ばね定数 k_a ）を同定する。これらの結果から、TLDの線形モデルからのかい離の程度を含め、TLDの特性を理解することを考える（文献21）。

非線形な現象を線形モデルで代表させるわけで、当然モデル誤差が介入することになるが、この線形モデルによってTLDの特性がベース振幅に対してどのように変わるかを傾向としてつかむことが容易になる。

また、TLDの等価パラメータ m_a 、 c_a 、 k_a を振幅依存の形にせよ、経験的あるいは半経験的な形で求めることができれば、TLDの制振効果の予備検討をする際に、あるいはTLDの概略設計をする際に有用と思われる。

バッシブダンパーとして代表的なものにTMDがある。TMDは通常 m 、 c 、 k をパラメータとする線形1自由度系としてモデル化され、その意味においてここで行うTLDのモデル化はTMDアナロジーとなっている。

3.2 TLDの等価 m_a 、 c_a 、 k_a の評価法

(1) 仮想質量と仮想ダッシュポットの定義 簡単のために構造物は無減衰1自由度系とし、そこへ付加系（ダンパー）がついているとする（図5 aの点線の枠が付加系を示しており、この場合にはTLDがそれに相当する。この構造物－付加系が外力 $p(t) = P \exp(i\omega t)$ を受けたときの構造物の変位を $x(t) = A \exp(i\omega t)$ とする。一方、 $p(t)$ に対する変位 $x(t)$ が図5 aに示す構造物－TLDと全く同じになるような仮想質量 m_v と仮想ダッシュポット c_v を付加系の代わりに考えることができる（図5 c）。付加系が構造物に及ぼす力 $f(t)$ が結局

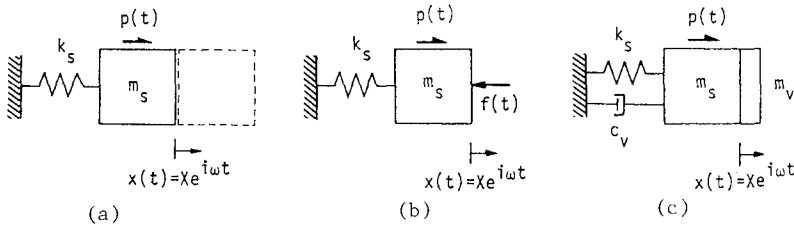


図5 正弦波変位応答に対する仮想質量 m_v と仮想ダッシュポット c_v

のところ構造物の応答に及ぼす付加系の存在の影響のすべてを代表しており（図5 b）、 m_v 、 c_v は $f(t)$ と関連した量となる。ここで

$$f(t) = m_v \ddot{x} + c_v \dot{x} \quad (1)$$

とすると、

$$m_v = \int_0^T f(t) \ddot{x}(t) dt / \pi \omega^3 A^2 = m_v(\omega, A) \quad (2)$$

$$c_v = \int_0^T f(t) \dot{x}(t) dt / \pi \omega A^2 = c_v(\omega, A) \quad (3)$$

と求められる。積分区間は1周期 T であり、 $T = 2\pi/\omega$ である。

もし付加系（ダンパー）が線形1自由度系であれば式（2）、（3）は厳密解である。もし非線形であれば式（1）の右辺は $f(t)$ の中の ω という単一振動数成分のみを考えていることになるので式（2）、（3）

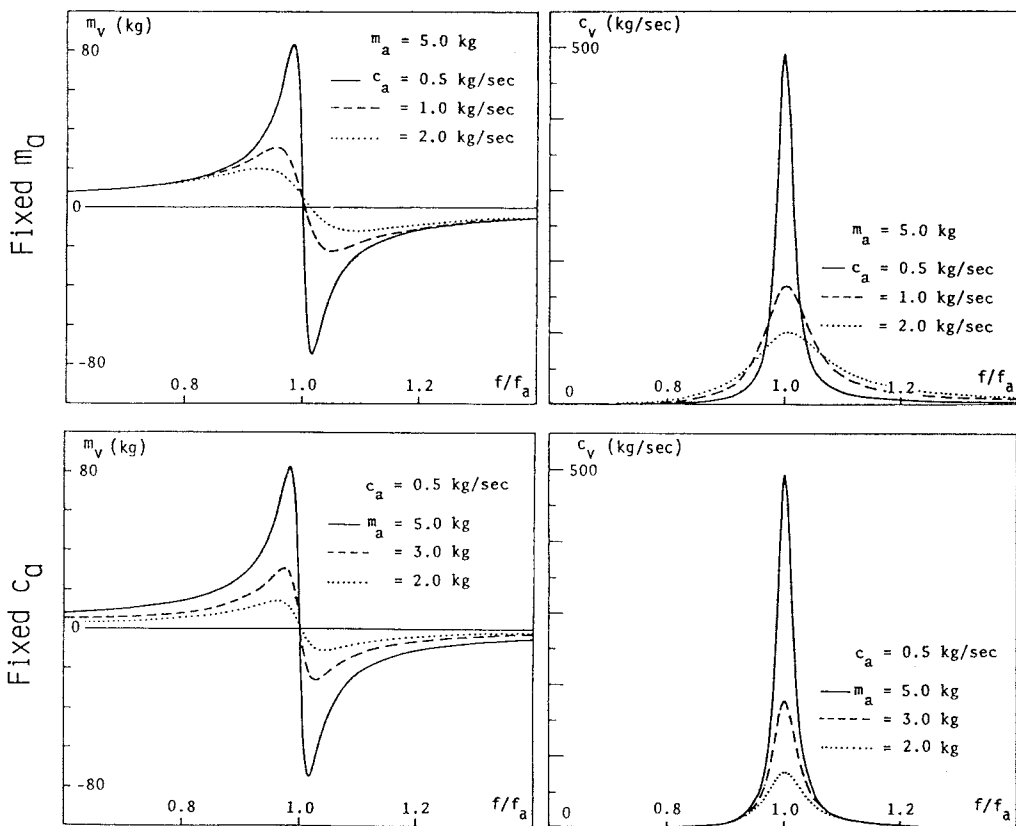


図6 線形1自由度付加系(TMD)の仮想質量 m_v と仮想ダッシュポット c_v

は近似となる。逆にいえば、式(2)(3)は非線形のために生じる ω 以外の成分、たとえば倍調波(2ω)、3倍調波(3ω)などの影響は大きくはないという前提にたっていることになる。

TLDについては振動台を用いた正弦波強制変位実験を行っているのでそこで測定されたベースシア力が式(2)(3)の $f(t)$ であり、 m_v 、 c_v を振動数 ω 、加振変位振幅 A ごとに実験値から容易に求めることができる。

(2) TMDアナロジーによる、 m_v 、 c_v からの m_a 、 c_a 、 k_a の推定 図5aの付加系が線形TMD(1自由度ばね k_a —マス m_a —ダッシュポット c_a 系)とすると m_v 、 c_v は

$$m_v = m_a [(1 - \Omega_a^2) + (2\beta_a \Omega_a)^2] / [(1 - \Omega_a^2)^2 + (2\beta_a \Omega_a)^2] \quad (4)$$

$$c_v = c_a \Omega_a^4 / [(1 - \Omega_a^2)^2 + (2\beta_a \Omega_a)^2] \quad (5)$$

と表わされる(文献22)。ここで $\Omega_a = \omega / \omega_a$ 、 $\beta_a = c_a / 2m_a \omega_a$ 、 $\omega_a = \sqrt{k_a / m_a} = 2\pi f_a$ である。

図6にTMD(線形1自由度系)の場合の m_v 、 c_v を示す。上の図は m_a を固定し c_a を変えたときのものであり、下は逆のケースである。 m_v がゼロとなるのは $\Omega_a \approx 1.0$ のときである。減衰定数 β_a が小さい、あるいは質量 m_a が大きいと c_v のピーク値が高くなり、 m_v については、 m_a が大きくなる、あるいは c_a (あるいは β_a)が小さくなると m_v のピーク(トラフ)の値が大きくなる。

2. で行った実験結果を用い、式(2)(3)に従って m_v 、 c_v を求めたのが図7である。図7にはTMDアナロジーとして式(4)(5)の曲線が実験値の m_v 、 c_v にできる限り適合するように m_a 、 β_a 、 ω_a を試行錯誤により変えて得られた結果を実線で示している。

矩形容器の場合、小振幅 ($A=0.25\text{cm}$)、もう少し大きい振幅 ($A=0.5\text{cm}$) のとき、線形モデルとの適合はよいとはいえないがこれは高調波の影響である。ただし傾向としては線形モデルで近似しうるといってもよいであろう。しかし、さらに大きい振幅 ($A=2\text{cm}$)、つまり T L D 内の液体に砕波が発生した状態での適合は、非線形性が強いと思われるにもかかわらず適合は逆に悪くない。

円筒容器、二重円筒容器の場合は、小振幅 ($A=0.2\text{cm}$)、大振幅 ($A=2.0\text{cm}$) での適合はよい、つまり線形 T M D に近いが、中振幅 ($A=0.5\text{cm}$) のときは液体動揺の非線形性のため適合度が少し落ちる。

なお、図 7 には水の約 30 倍の粘性をもつ液体を用い矩形容器を使って行った実験より求めた m_v 、 c_v と適合曲線を示してある。粘性を増加させると液面動揺そのものが小さくなり、相対的に非線形性が弱くなる。ベース振幅 2cm でも砕波は生じていない。線形モデルによる曲線との適合がいずれの振幅においてもよいのはこのためといえる。

3. 3 等価 T M D パラメータ m_a 、 β_a 、 f_a からみた T L D の特性

図 8 は図 7 の適合曲線に用いた m_a 、 β_a 、 f_a ($=\omega_a/2\pi$) を加振振幅 A をパラメータにとり示したものである。なお、 m_a は水の質量 m_w で、 f_a は微小振幅時の一次液面動揺固有振動数 f_w (計算値) で無次元してある。

まず、いずれの容器形状の場合も f_a/f_w はベース加振振幅 A が大きくなるに従い、上昇する。これは容器内の浅い水深の液体動揺がハードニング特性を持つためである。固有振動数が振幅によって 1 割近く変化することはダンパーの振動数チューニングの点から注意を要する点といえよう。なお、二重円筒容器の場合、水深が深いので、 f_a の変化は比較的小さい。

なお、高粘性液体 (矩形容器) の場合、 f_a/f_w が 1.0 を下回っているが、これは粘性効果により液体動揺の固有振動数が通常用いられる理論値 (粘性の効果を含んでいない) よりも下回るためである。このことは自由振動実験からも確かめてある。なお、高粘性液体の場合、 f_a/f_w があまり変化しないのは液体動揺が小さくなり線形の範囲が広がるからであろう。

等価 (有効) 質量 m_a に関してはいずれの場合も振幅とともに増大し、水の質量 m_w に近づく。振幅が大きいとき $m_a/m_w=1.0$ に近づくのは水全体が動かされる (死水がない) ためであり、直観的な現象の理解と整合的である。ただし、容器の形状による差異はかなり認められる。しかし、有効質量の多少の違いは、後述の減衰性などに比べダンパー特性の中でそれほど重要ではなく、実用面ではあまり問題にならないと考えられる。

矩形容器の場合、小振幅では m_a/m_w がおよそ 0.8 であるが、巾 $2a=60\text{cm}$ 、水深 3cm のときの Housner (文献 23) による一次モードの有効質量 (理論値)、 $m_a/m_w=0.82$ にほぼ一致する。

最後に、ダンパーとして重要なパラメータである (等価) 減衰 β_a の特性について考える。微小振幅のときの液体動揺の減衰定数 β の理論値は、矩形容器のとき

$$\beta = \sqrt{2} \omega \nu (1+2h/b+S)/(2\pi \varepsilon \sqrt{gh}) \quad (6)$$

で与えられる。ここで $\omega=\omega_w$ = 液面 (水) の固有円振動数、 ν = 液体の動粘性係数、 h = 水深、 b = 容器の奥行、 S = surface contamination factor = 1、 ε = 水深比 ($=h/a$ 、 $2a$: 容器巾)、 g = 重力加速度である。 $2a=60\text{cm}$ 、 $b=33\text{cm}$ 、 $h=3\text{cm}$ 、 $\nu=\nu_w$ のときの β は約 1.8% であり、図 7 における小振幅時の β_a とほぼ同じ値となっている。

図 8 に示すように等価減衰 β_a はいずれの容器でも振幅 A の増大とともに上昇する。砕波が生じているとは考えられない振幅 (たとえば矩形容器で $A=0.2\text{cm}$ 、 0.5cm のとき) でも β_a が大きくなるのは、流体の減衰が本質的には粒子速度を u としたとき $u|u|$ に比例すること、非線形性のために液体動揺の共振時のピークが線形的に増大しないことが理由と考えている。

大振幅のときには β_a は 10% を越える。質量比 μ が 1% 前後で T M D の振動数を同調させたときの T M D の最適減衰定数は 6% 程度といわれている (文献 24)。それからみると大振幅では T L D の減衰が大きめでダンパーとしての効率は下がることになる。しかし、高減衰であるために逆に振動数チューニングなどに対して敏感でなくなるといったメリットもある。

T L D は T M D と異なり、水は容器内でのみしか動けず、いわばそのストロークが限定されている。そのため、ベースの振幅が大きくなっても T L D の水はあるレベル以上大きな振幅で運動することができず、その分が結局砕波によるエネルギーロスとなって生じ、 β_a が大きくなると考えている。

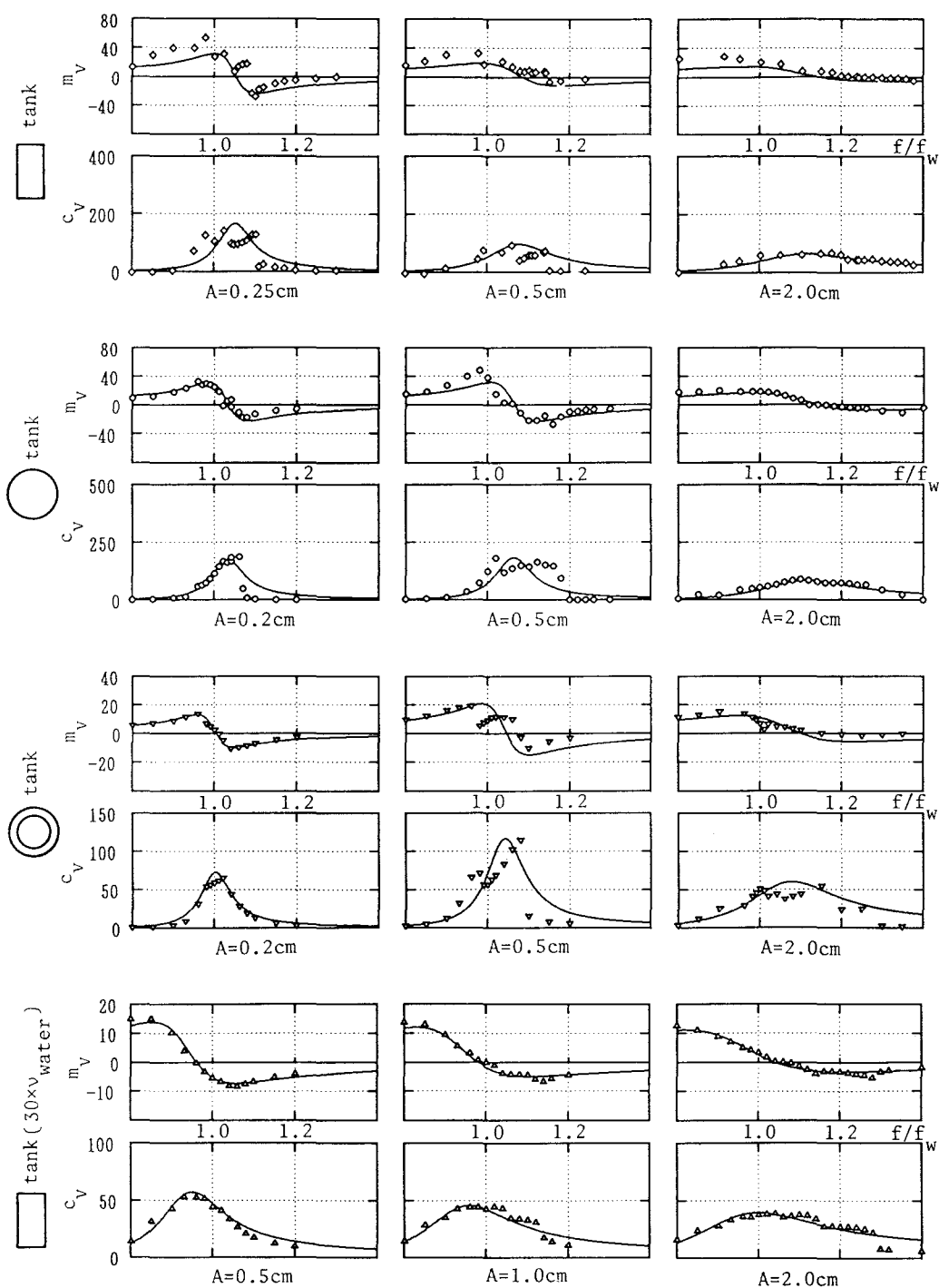


図 7 T L D の仮想質量 $m_v(f, A)$ と仮想ダッシュポット $c_v(f, A)$ と線形 TMD アナロジーによる適合曲線

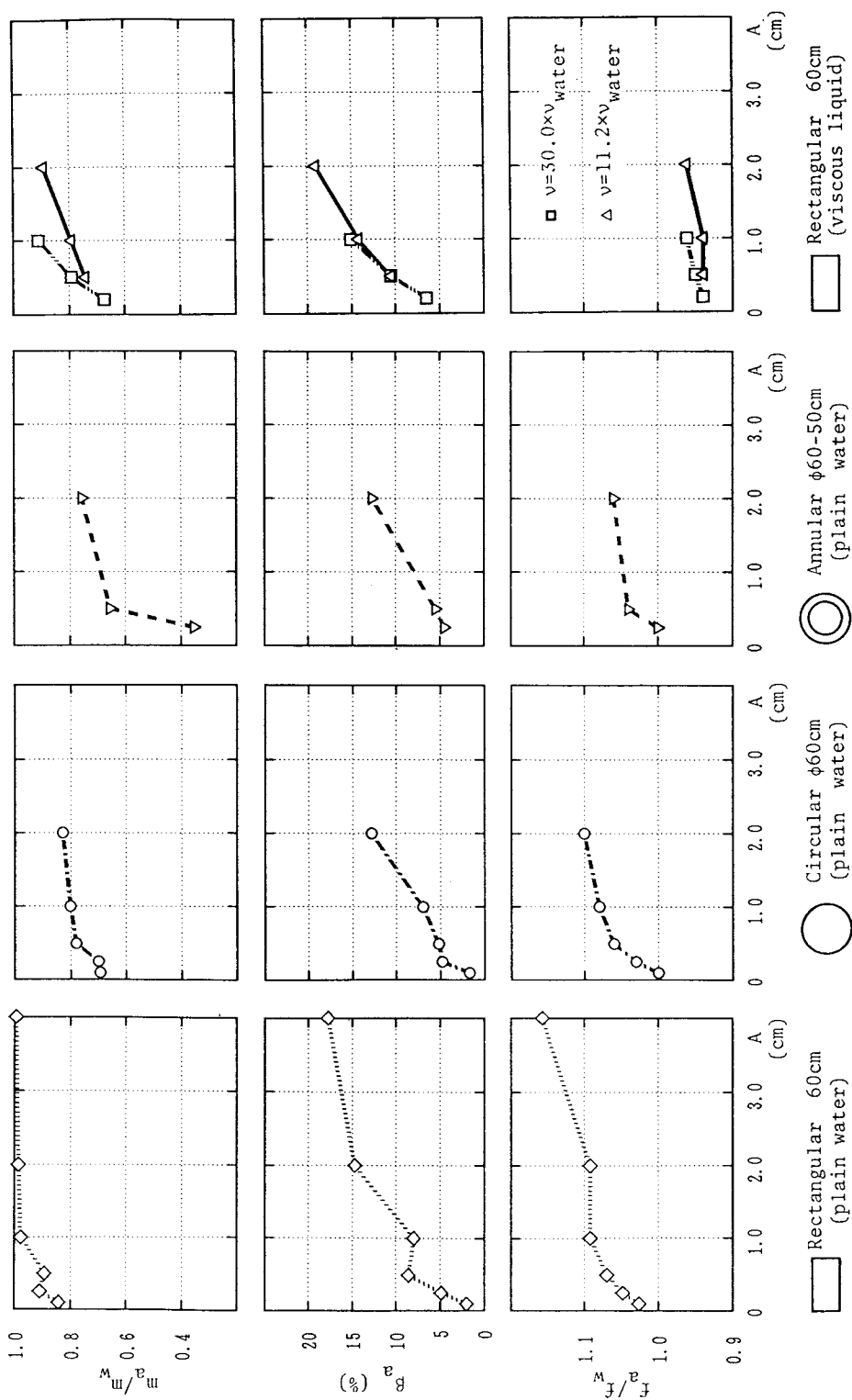


図 8 等価質量 m_a 、等価減衰定数 β_a 、等価固有振動数 f_a の振幅依存性 (A はベース振幅)

矩形、円筒、二重円筒容器の β_g を比較すると二重円筒容器の β_g が小振幅のときから比較的 β_g が大きい容器形状による大きな差はないといっていよう。

高粘性液体の場合は $A=2.0\text{cm}$ でも砕波状態になってないが、 β_g は大きく20%近くになっている。これも流体減衰が $u|u|$ (u :液体粒子速度)の特性をもつことによるためかもしれないが、現時点では明確な理解はできていない。

4. 構造物-TLD系からみたときのTLDの特性

3. においてTLDには振幅がかわると m_g 、 β_g 、 f_g に変化する、つまり非線形性があることを示した。TLDを構造物にとりつけたときこの非線形性がどのような形で現われるかを、構造物-TLD (もしくはTMD)系に関する2、3の数値シミュレーションを通じて示すことにする。

図9に示すのは構造物-TLD系に正弦波外力が作用したときの構造物の周波数応答曲線である。TLDがないときの共振ピーク応答 x_{max} が 0.1cm となるように外力を選んである。ここでTLDの容器としては矩形 ($2a=32.2\text{cm}$ 、 $b=25.2\text{cm}$ 、水深 $h=3.6\text{cm}$)を考えている。質量比 $\mu = m_w/m_s$ (m_s は構造物の質量) = 1%である。

TMDの減衰定数 β_T に相当する粘性係数 ν は $0.01\text{ (cm}^2/\text{s)}$ ($=\nu_w$:水の動粘性係数) $\sim 0.50\text{ (cm}^2/\text{s)}$ に変化させている。計算には文献12, 13, 14に示した非線形波動シミュレーションを用いており、TLD内の波高が水深以下のレベル (砕波があまりおきていない) のときには妥当なことが確かめられている。なお、液面の微小時一次固有振動数 $f_w=0.90\text{Hz}$ 、構造物の固有振動数 $f_s=0.91\text{Hz}$ としており、その比は $f_w/f_s=0.99$ で、TMDの最適同調比に近い (文献24)。

図10には図9に対する構造物-TMDの応答を示す。質量 μ 、同調振動数比 f_T/f_s 加振外力レベルは先の例と全く同じである。TMDの減衰定数 β_T は式(6)にTLDの諸元および図9の計算に用いた ν を代入して求まる β と同じにしている。すなわち、 ν の変化に応じて β_T は1.12% ($\nu=0.01\text{cm}^2/\text{s}$ に相当) $\sim 7.93\%$ ($\nu=0.50\text{cm}^2/\text{s}$ に対応)の間を変化させている。

図10のTMDの場合には $f/f_s=0.95, 1.05$ 付近にはほぼ対称のピークがみられるが、TLDの場合には2つのピークの高さはこのような小振幅においても異なっている。ただし、液体の粘性係数を適当な値 (水の粘性係数 ν_w の30 $\sim$ 50倍) にすると応答曲線はフラットに近くなり、TMDにはほぼ匹敵する制振効果が得られるといえる。

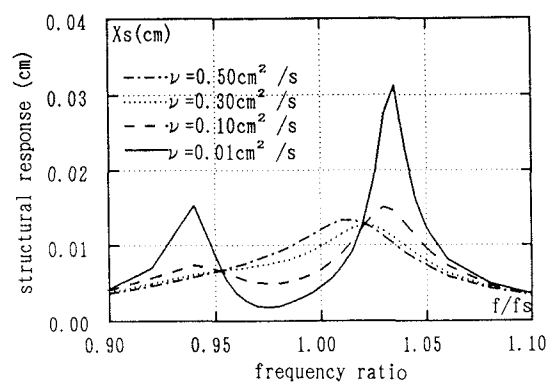


図9 構造物-TLD系における構造物の応答 (正弦波外力、TLDなしのときの共振振幅 0.1cm)

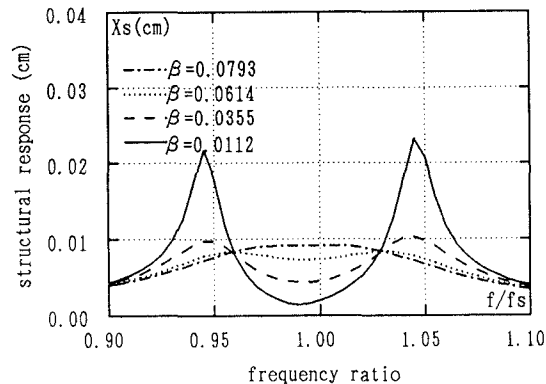
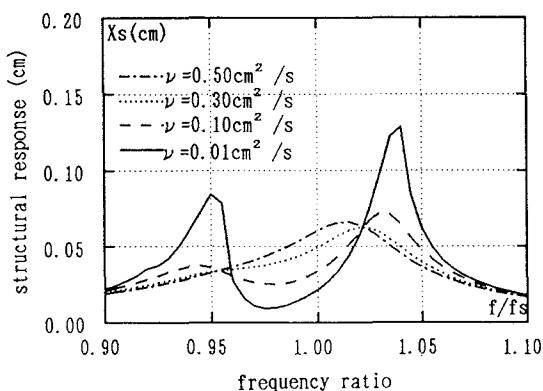
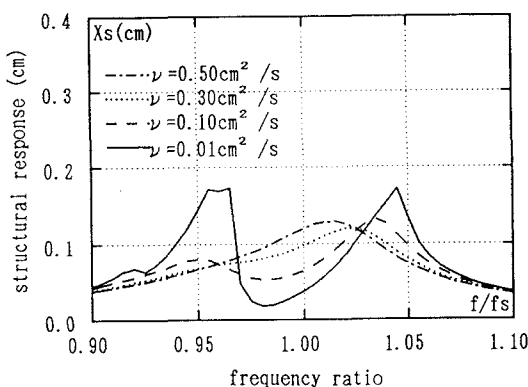


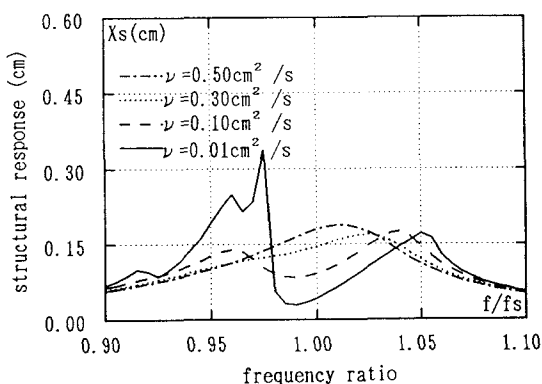
図10 構造物-TLD系における構造物の応答 (正弦波外力、TLDなしのときの共振振幅 0.1cm)



a) TLDなしのピーク振幅が0.5cmの場合



b) TLDなしのピーク振幅が1.0cmの場合



c) TLDなしのピーク振幅が1.5cmの場合

図11 構造物-TLD系における構造物の応答(正弦波外力)

図11は、構造物-TLD系において加振外力を5倍、10倍、15倍としたときの構造物の応答である。この図はTLDの非線形性のため、構造物の応答に変化が生じることを示している。

すなわち、 $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ ($\approx \nu_w$) のとき、図9の $f/f_s = 1.04$ 付近のピークは外力が大きくなるにつれ減少している(図11)。これは、ハードニングのためにTLDの固有振動数が振幅とともに増大し、比較的大きな振幅では $f/f_s = 1.04$ 付近でちょうど同調制振効果が高まったためと思われる。このことを理解するために、図12にはTMDの固有振動数 f_T を高め $f_T/f_s = 1.04$ としたときの応答曲線を示した。図10に比べ $f/f_s = 1.05$ 付近のピークが目立たなくなっている。このことは、上述の $f/f_s = 1.04$ 付近のピークの値の変化がTLDの剛性の非線形性によるものとの考えを支持するものである。

図11a, b, cにおいて振動数比 $f/f_s = 0.95$ 付近のピーク値は少しではあるが外力の増加とともに増大している。これはTLDの固有振動数が振幅とともに増えるため同調比が1.0を上回り、この帯域の制振効果が下回るためであろう。

TLD内液体の粘性係数 ν が大きいとき(水の50倍)、外力の大きさが変化しても応答曲線の形状もその制振効果には大きな変化はない(図9、11)(いずれの場合もTLDがないときのピーク振幅の15%程度までに低下している)。これは粘性が適当に大きいと液面動揺そのものが小さく線形系に近くなるからである。

5. TLDの減衰コントロール

容器内の液体動揺を利用するTLDは、容器の形状が決まれば水深でその固有振動数をコントロールすることができる。しかし、その減衰は式(6)に示すように水の粘性を変えない限り大幅に変えることは難しい。

図13には水($\nu_w = 0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$)を内容液とする矩形容器($2a = 60 \text{ cm}$, $b = 33.5 \text{ cm}$)の減衰定数 β を水深比 ε ($h = a$) をパラメータに示した。水深が深くなると減衰定数 β が低下し、ダンパーとしての安定した効果が期待できなくなる。

液体動揺の減衰をあるレベル以上に保つためには、水を使う限りTLD内の液体は必然的に浅くせざるを得ない(式(6))。このことはある固有周期に同調させるときにTLD容器の大きさを小さくすること、すなわち同じ質量比に対して容器の数が増えることにつながり実用的な面から好ましいことではない。

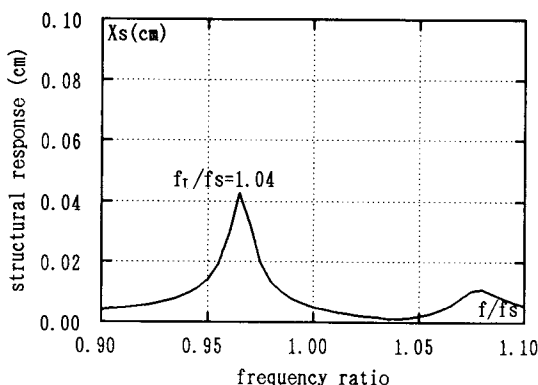


図12 構造物-TLD系における構造物の応答（正弦波外力、同調比 $f_r/f_s=1.04$ 、ピーク振幅0.1cm、 $\beta_r=1.12\%$ ）

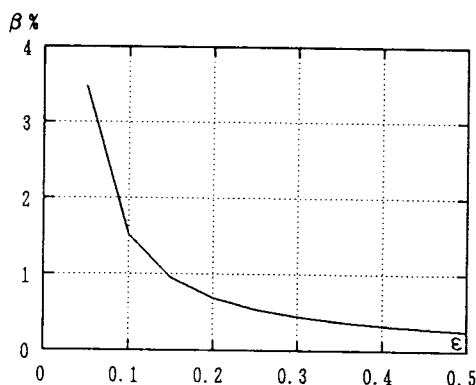
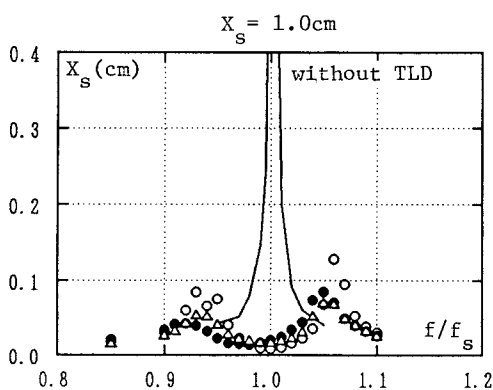


図13 減衰定数 β と水平比 ϵ の関係

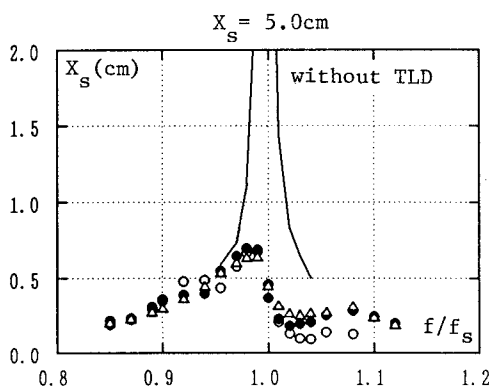
逆に液体動揺の減衰を何らかの方法で高めることができれば大型の容器で深い水深のTLDを使うことができる。さらに、液面動揺も相対的に小さくなり非線形性も弱くなり、砕波も起きにくくなる。このことは数値シミュレーション法の適用範囲（適用可能振幅）を大きくすることにもなり種々の利点がある。高粘性液体（たとえばエチレングリコール）を使うことも考えられるが経年変化の問題、漏液のことを考えると実際にはあまり好まれないであろう。そこでここでは液面上に軽い粒子を敷つめ粒子同志の接触、衝突あるいは粒子の壁面との接触により液体動揺の減衰を高めることを考えた。

その効果を確かめるために構造物-TLD系の強制外力スイープ実験を行った。実験装置は文献12、14で用いたのと同じである。TLDの容器としては図9の計算に用いたのと同じ市販のポリ容器を用いた。水深を $h=3.4\text{cm}$ とし、5個を1自由度系構造物（ $m_s=665\text{kg}$ 、対数減衰率 $\delta_s=0.007$ ）にのせている。水の場合は質量比 $\mu=2.1\%$ である。直径約2mmの発泡スチロール粒子（TLD1個あたり見かけ上の体積約600cc）を一面に浮かせた場合、水深3.4cmのエチレングリコールを用いた場合（エチレングリコールの比重が1.15のため $\mu \approx 2.4\%$ ）、そして水のみの場合の3ケースについて実験を行った。結果を図14に示す。 X_s は構造物の定常振幅である。

外力が弱くピーク振幅 $x_{\max}$ で1cmとしたとき（図14a）、水の場合には $f/f_s \approx 0.95, 1.05$ 付近にはっきりとしたピークが見えるのに対し、発砲スチロールを入れた場合にはピークもゆるやかで、粘性が水の16倍ある



a) 共振ピーク振幅 $X_s=1\text{cm}$ （TLDなし）



b) 共振ピーク振幅 $X_s=5\text{cm}$ （TLDなし）

図14 構造物-TLD系における構造物の応答（正弦波外力、○：水、●：エチレングリコール、△：発泡スチロール粒子+水）

エチレングリコールの制振効果とほぼ同じであることがわかる。

外力の大きい場合(図14b)には三者にあまり差がでていない。これは共振点付近で砕波が生じ(水の場合には容器の天井にまで水があたっていた)、このことによりいずれのケースにおいても液体動揺の減衰性が高くなったために差がでなかったと思われる。

6. まとめ

矩形、円筒、二重円筒容器のTLDの強制加振実験結果からTLDを線形1自由度系モデルにあてはめたときの適合性を示し、さらに等価質量 m_a 、等価減衰定数 β_a 、等価固有円振動数 ω_a を振幅別に求めた。その結果、内容液として水を用いた場合

- 1) 等価質量 m_a は小振幅のときは液体の質量 m_w より小さいが、振幅とともに増大し、その比は1.0に近づく
- 2) 等価減衰 β_a も振幅とともに増大し、砕波が生じている振幅域では10%を超える。
- 3) いずれの容器の場合も浅水であり、液体動揺の固有振動数は振幅とともに増大する。
- 4) m_a 、 β_a 、 ω_a に関して容器形状による差異は工学的に大きな問題となるほどではない。

ことがわかった。

また、粘性の高いエチレングリコールを用いた場合には、液面固有振動数の振幅依存性は水に比べ低い。しかし、予想に反し等価減衰 β_a は水の場合と同様に揺振幅とともに増大する傾向が認められた。

なお、上述の知見は、今回対象とした実験の範囲から得られたものであり定量的な意味まで含めると一般性のあるものではない。ただし、浅い液体の液面動揺の特性、すなわち等価質量、減衰、固有振動数に関してはここでの知見は定性的には有効と考えられる。ちなみに、深い水の場合(たとえば矩形容器では $h/a > 0.6$)にはソフトニングになることが知られている。

次に、TLDとTMDの制振効果の比較、とくにTLDの非線形性の影響を非線形波動シミュレーションを用いて行い、液体動揺の減衰を適当な値にすればTLDは最適TMDにほぼ匹敵する性能を有することを示した。最後に、TLDの減衰コントロール法の1つとして浮体粒子が有効であることを示した。

浮体粒子が液体動揺そのものに与える影響については今後強制加振実験により明らかにしていく予定である。また、浮体粒子による減衰効果の見積り、シミュレーションへの取り込みが今後の課題と考えている。

謝辞 東京大学伊藤學教授には本研究に対し助言と励ましをいただいている。また、振動台実験は清水建設技術研究所において行ったものであり、その際には藤井部長、大築研究員、大山研究員には大変お世話になり、またいろいろコメントもいただいた。これらの方々に心よりお礼を申し上げたい。

なお、本研究は科学研究費(代表藤野陽三)、ならびに民間(清水建設)と東京大学の共同研究の補助を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) Modi, V.J. and F. Welt :Vibration Control using Nutation Damper, Proc. Int. Conf. on Flow Induced Vibration Bowness-on-Windemere, England, 1987, pp.396-376.
- 2) 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 Building, Canada, pp.228-241.
- 3) 宮田、山田、斉藤：長方形水槽ダンパー適用に関する諸問題の検討、構造工学論文集、No.35A、1989年、pp.553-560.
- 4) 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11)、日本建築学会学術講演梗概集、昭和62年10月、昭和63年10月、平成元年10月。
- 5) 荻生田 弘：水のスロッシングを利用した制振装置、三井造船技報、No.137、1989年6月、pp.13-20

- 6) 坂井、高枝、玉木：液柱管ダンパー (Tuned Liquid Column Damper) の提案 - 液柱管の振動特性 -、構造工学論文集、No. 35A、1989年、pp. 543-552.
- 7) 久保他：液体振動を利用した回転方向振動の制振に関する基礎的研究、44回土木学会年次講演会概要集、I-339、1989. 10、pp. 730-731.
- 8) 香川、藤田、日比、藤井：船舶用流体式制振装置の開発と建築物への応用、建築大会大会学術講演梗概集、2307、1989年10月、pp. 613-614.
- 9) 中垣、植田、有馬、加道：Tuned Sloshing Damperの振動特性と制振効果、44回土木学会年次講演会概要集、I-393、1989年10月、pp. 838-839.
- 10) 藤野、パチェコ、チャイセリ、藤井：同調液体ダンパー (T L D) の基本特性に関する実験的検討、構造工学論文集、34A、1988年、pp. 603-616.
- 11) Fujino, Y., Pacheco, B., Chaiseri, p., and Sun, L.M. : Parametric studies on tuned liquid damper(TLD) using circular container by free-oscillation experiments, 土木学会論文集、No. 398、1988-10.
- 12) 藤野、パチェコ、孫、チャイセリ、磯部：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、構造工学論文集、No. 35A、1989年、pp. 561-574.
- 13) Sun, L.M., Fujino, Y., Pacheco, B., and Isobe, M. : Nonlinear waves and dynamic pressures in rectangular tuned liquid damper(TLD), Proc. JSCE, No. 410, 1989.
- 14) Chaiseri, P., Fujino, Y., Pacheco, B., and Sun, L.M. : Interaction of tuned liquid damper(TLD) and structure, Proc. JSCE, No. 410, 1989.
- 15) 米田、藤野 他：幸魂橋主塔に対する T L D の減衰付加効果について、日本風工学会誌 No. 41、1989年12月
- 16) Funakoshi, M. and Inoue, S. Surface waves in a circular cylinder, J. Fluid Mech., Vol. 192, 1988, pp. 219-247.
- 17) 船越満明、井上進：水面波のカオス、日本物理学会誌、Vol. 44, No. 5, 1989, pp. 323-329.
- 18) Abramson, H.N. (ed) : The dynamic behavior of liquids in moving containers, NASA SP-106, 1966, pp. 1-467.
- 19) 木村、大橋：軸対称容器におけるスロッシングの非線形応答 (その1、その2、その3)、日本機械学会論文集、pp. 3024-3033 (昭53.9)、pp. 3446-3454 (昭53-10)、pp. 42-50 (昭55-1)。
- 20) 大森 博司他：液体貯槽における有限振幅液面動揺に関する研究 (その1～その4)、日本建築学会論文集 375号 (昭62.5)、380号 (昭62.10)、385号 (昭63.3)、403号 (1989.9)。
- 21) Pacheco, B. and Fujino, Y. : 非線形機械式ダンパーの仮想質量、仮想粘性減衰による特性表示と T L D のモデル化への応用、44回土木学会年次講演会概要集、I-342、1989. 10、pp. 736-737.
- 22) Reed, F.E. : Dynamic vibration absorbers and auxiliary mass dampers, Shock and Vibration Handbook, Chap. 6, McGraw Hill, 1961.
- 23) Housner, G.W. : Dynamic pressures on accelerated fluid containers, Bull. Seismo. Soc. Amer., Vol. 47, 1957, pp. 15-35.
- 24) Warburton, G.B. and Ayorinde, E.O. : Optimum absorber parameters for simple systems, J. of Earthg. Eng. & Struct. Dyn., Vol. 8, 1980, pp. 197-217.

(1989年10月2日受付)