構造工学論文集　Vol.38A（1992年3月）　土木学会

マルティプルＴＭＤ・ＴＬＤの特性の把握

A SIMULATION STUDY ON EFFECTIVENESS OF MULTIPLE TMD AND MULTIPLE TLD

藤野陽三*，孫 利民**，山口宏樹***
BY Yozo FUJINO, Limin SUN and Hiroki YAMAGUCHI

Multiple TMD (MTMD) or Multiple TLD (MTLD) consists of a number of TMD's (TLD's) whose natural frequencies are distributed over a certain range around the natural frequency of the structure. Properties of MTMD and MTLD are studied numerically. It is shown that, even though each TMD (TLD) has low damping, MTMD (MTLD) is very effective and robust against mis-tuning. The optimal range of the frequency distribution and the optimal damping in each TMD exist for a given mass ratio.

１．　まえがき

振動制御という考え方が定着化し、同調系のダンパーであるＴＭＤあるいはＴＬＤなどを建設系構造物に用いることは珍しいことではなくなってきている[1]。

ダンパーを実構造物にとりつける際には、ダンパーの収納スペースに限界があったり、作業性のために、単一のダンパーでなく、数個以上のダンパーにすることがしばしば行なわれている。ＴＬＤなど質量として液体を用いる場合は、鋼などに比べ軽いので、必要な水の体積が大きくなる。したがって、スペースの制約から小型容器のＴＬＤを数多く使用せざるを得なくなる。自由表面を有するＴＬＤの場合は、スペースの制約がなく大きな容器が使用可能であっても、大容器にすると構造物との振動数同調のために相対的に水深が深くなる。水深が深くなると液体動揺の際、底面付近は水粒子の運動が小さく、ダンパーとしての効率が低下する。小型容器を数多く使うもう一つの理由である。

従来、ＴＭＤ，ＴＬＤをいくつかに分割して分散型とする場合でも、固有振動数、減衰定数（ＴＬＤでいえば容器サイズ、水深）など、その１つ１つのダンパーの特性は同一にするという考え方で設計を行なってきたものと思われる。

２個のＴＭＤをとりつける際の個々のＴＭＤの最適パラメータなどについては既に研究[2]がなされ、その優位性について論じられたことはあったが、さらに多数にするような方向での検討は行なわれてこなかった。ごく最近、Igusaら[3,4,5]は多数のＴＭＤを用意し、その固有振動数を構造物の固有振動数のまわりに分布

*)　Ph.D. 東京大学教授　工学部土木工学科　（〒113　文京区本郷7-3-1）
**)　工博　東京大学外国人研究員　〃　（　〃　）
***)　工博　埼玉大学助教授　（現在 アジア工科大学派遣中）

させることにより、「パラメータの最適化が実質的に不要になる」という結果を理論的に導き、マルティプルダンパーの積極的利用を提唱している。そこでは、外力として定常ランダム加振を想定している。

Igusaらの結果[3,4,5]によれば、マルティプル化することにより、ＴＭＤ（ＴＬＤ）の減衰定数がかなり低くとも、安定した制振効果が得られることになる。これはＴＬＤにとっては極めて重要なことである。ＴＬＤは特に水深が深いとき、微小振幅範囲での減衰が一般に小さい上に、そのコントロール（予測）が難しい。ネット、棒などを入れる、あるいは水表面に浮体粒子を浮かせるなどの工夫が試みられているが、これはすべて減衰を高めるための工夫である。ＴＬＤの場合はこれまでの実施例からみても10～100個、あるいは1000個のオーダーの容器による分散型となっており、もし減衰が小さくともよいということになれば減衰コントロールにあまり神経質にならなくてもよいということになる。また、浅水を用いたＴＬＤには加振振幅に対する非線形性が存在する。マルティプル化したときＴＬＤにはＴＭＤと異なる特性が生じることも予想される。

そこで、本研究ではマルティプルＴＭＤ，そしてマルティプルＴＬＤを対象とし、調和外力に対する制振特性をシミュレーションの上から明らかにし、実際の利用にあたっての情報を提供しようとするものである。

ＴＭＤについては線形モデルとし、ＴＬＤについては著者らが開発してきた波動シミュレーションモデルを用いる。

２．ＭＴＭＤの振動制御特性

構造物の特定モードでの振動をｎ個のＴＭＤにより制御することを考え，図－１に示すような解析モデルを想定する。ここでｎ個のＴＭＤはそれぞれに異なる特性を有するものとする。特に各ＴＭＤの固有振動数f_i(i=1～n)については，構造物の固有振動数のまわりのある範囲に等間隔に分布させるものとし，図－２のような振動数分布を考える。図中，$\delta\gamma$はＴＭＤの振動数間隔，$\Delta\gamma$はＴＭＤの分布する固有振動数の領域幅，γ_0はＭＴＭＤの中央振動数からの構造物の固有振動数のずれであり、無次元量として以下に定義する。

$$\delta\gamma = (f_i - f_{i-1})/f_0 \quad (i=2\sim n)$$

$$\triangle\gamma = (f_n - f_1)/f_0$$

$$\gamma_0 = (f_s - f_0)/f_0$$

ここでf_0はＴＭＤの中心振動数$(=(f_1+f_n)/2)$である。

問題の設定にあたり以下の仮定を導入し，この多数個のＴＭＤ（Multiple Tuned Mass Dampers:ＭＴＭＤ）の制振原理，制振効果について数値解析から考察を加える。

1)構造物に関する仮定

a)固有振動数は互いに十分離れている。

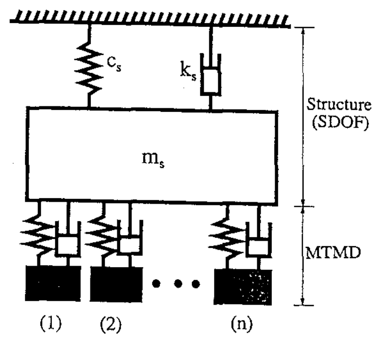
b)制振対象とする振動は特定の固有振動モードであり，１自由度系でモデル化する。

c)構造物の減衰は極めて小さく無視する。

2)ＭＴＭＤに関する仮定

d)各ＴＭＤの質量および減衰定数は同一とする。

e)振動数の分布は等間隔とする（$\delta\gamma$＝一定）。



図－１　ＭＴＭＤの解析モデル

f)原則としてＭＴＭＤの中央振動数は構造物の固有振動数と同じにとる（γ_0＝０）。

3)対象とする振動

g)振動数ｐの調和外力による強制振動の制御を考える。

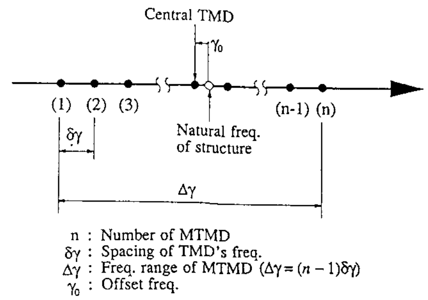
ここで，構造物と振動に関する仮定は単一ＴＭＤの古典理論での仮定と全く同じである。ＭＴＭＤに関する仮定については，その基本的特性が変わらない範囲で問題を簡略化するために設けたものである。振動数間隔を等間隔としたことから振動数比間隔は振動数比幅とＭＴＭＤ個数とから算出される。したがってＭＴＭＤの決定すべき独立なパラメータは以下のとおりとなる。

1)ＴＭＤの個数ｎ

2)各ＴＭＤの質量比μ/n（ＴＭＤ１個の構造物に対する質量比）

3)減衰定数ξ_T（各ＴＭＤの減衰定数）

4)振動数比幅Δγ（ＭＴＭＤが分布する振動数比の領域幅）

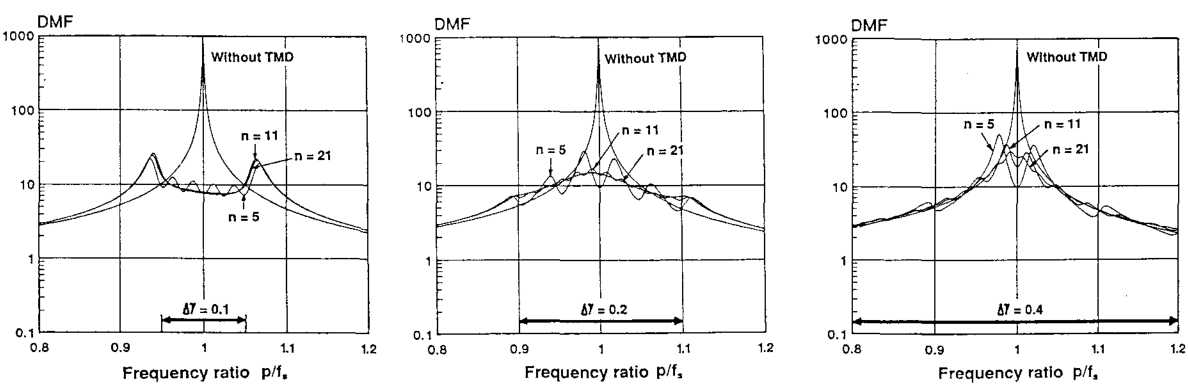


図－２　ＭＴＭＤの振動数分布

上記の仮定を基に，図－１に示す解析モデルに対して運動方程式を求め，調和外力と同じ振動数を有する調和振動解を仮定すれば，構造物の動的応答倍率（ＤＭＦ）が陽な形で簡単に求められる[6,7]。これを用い，動的応答倍率がＭＴＭＤの各パラメータによって如何に低減されるかを数値的に検討した。その手順は単一のＴＭＤの設計手順とほぼ同じになるように考えた。つまり，単一のＴＭＤではまず質量比が適当に設定され，その質量比に対して最適な振動数比（同調比），および減衰比を決めるものであり，ＭＴＭＤの場合も質量比μを固定，振動数比幅Δγおよび減衰定数ξ_Tをパラメータに動的応答倍率の変化を調べることにした。ＭＴＭＤの質量比はｎ個のＴＭＤの全質量比（μ）としては、単一ＴＭＤで目安とされる１％を選んだ。また，最も重要なパラメータの一つであるＴＭＤの個数ｎについては５，１１，２１を考え比較している。

（１）振動数幅の影響とＭＴＭＤの作用原理

図－３は振動数比幅Δγを０．１，０．２，０．４と変化させた場合の振動数応答曲線で，横軸は構造物



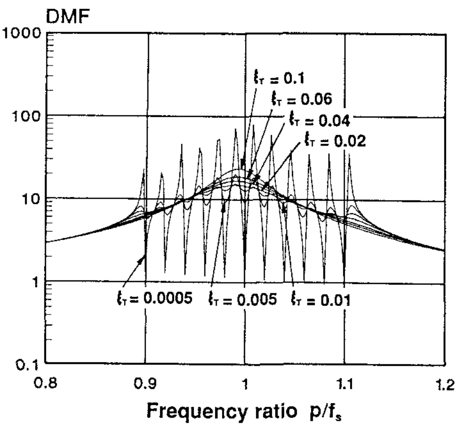
図－３　振動数比幅Δγに対する応答曲線の変化（ＴＭＤ減衰比ξ_T=0.01）

の固有振動数ｆ$_s$で無次元化した外力振動数ｐ，縦軸は動的応答倍率ＤＭＦである。各図にはＴＭＤの個数が５個，１１個，２１個の場合の応答曲線を構造物だけの場合の応答曲線と比較して示した。なお，ＴＭＤの減衰比ξ_Tは単一ＴＭＤの最適減衰定数（質量比μ=0.01のとき０．０６程度）に比べてかなり小さい値；０．０１としている。図－３で特徴的なのは，ＭＴＭＤの振動数比幅の小さい０．１の場合に応答曲線は，

単一ＴＭＤを取り付けた場合と同じく，２つの大きなピークを持つのに対し，振動数比幅を大きくすると全体として構造物の共振振動数付近に１つの大きなピークを持つ応答曲線となることである。もっともＭＴＭＤの個数が少ないと個々のＴＭＤの共振の影響が応答曲線に現れ，細かなピークをもたらしている。これらの細かなピークはＴＭＤの個数、あるいはの減衰を若干大きくすることで消すことができる（後述）。ＭＴＭＤの制振原理は単一のＴＭＤとは異なり，ＴＭＤの影響を振動数領域に分散させ，構造物の共振点はそのままにそのピーク値を減衰付加によって下げるものといえる。その制振効果とＭＴＭＤの振動数比幅△γとは密接な関係があり，幅が狭いと単一のＴＭＤに似て２つピークの応答曲線となり，幅を広くとり過ぎても図－３のΔγ＝０．４の場合のように効果は落ちる。したがってＭＴＭＤの場合にも振動数比（幅）の最適値が存在することがわかる。

（２）ＴＭＤの減衰定数ξ_Tの影響

図－４はＭＴＭＤの減衰定数により振動数応答曲線がどのように変化するかを，１１個のＭＴＭＤの場合に示したものである。振動数比幅△γは０．２である。前述のように，減衰が小さい場合に，ＴＭＤの共振が構造物の応答曲線に影響して細かなピークをもたらすが，ＴＭＤの減衰を大きくすることによってそのピークを抑えることができる。しかし，減衰定数を大きくし過ぎると構造物の共振ピークの値が大きくなって制振効果は落ちる。これは個々のＴＭＤの動きが減衰定数を大きくし過ぎたことで抑えられてしまうことによると理解される。したがって，ＭＴＭＤの場合も減衰定数に最適値が存在するが、その値は単一ＴＭＤに比べ小さくてよい。



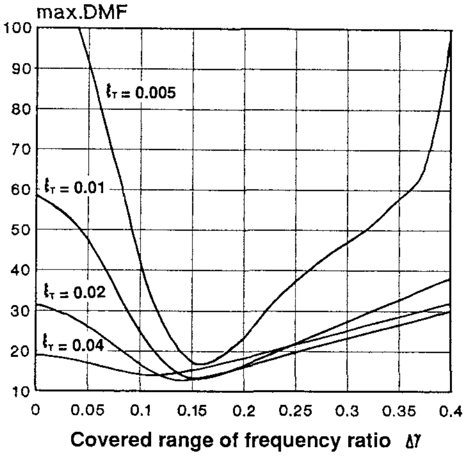
図－４　ＴＭＤ減衰比の影響（n=11, Δγ=0.2）

（３）制振効果とロバスト性

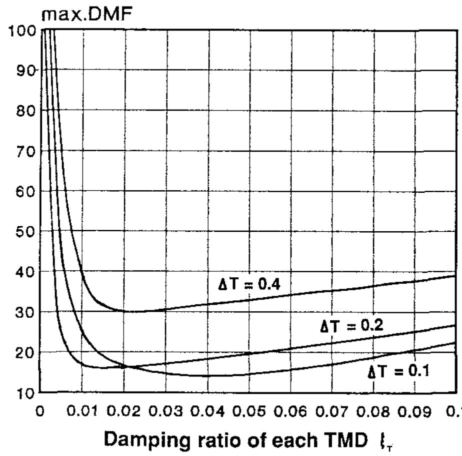
ＭＴＭＤの場合にも振動数比幅△γと減衰定数ξ_Tには最適値が存在することがわかったが，これらの最適値は単一ＴＭＤと異なり互いに独立でなく，またＭＴＭＤの個数にも影響される。図－５，６は１１個のＭＴＭＤの場合について振動数比幅と減衰定数の最適値およびロバスト性（最適値からずれた場合の制振効果への影響度で、その制振安定性あるいは頑健性）を見たものである。共に縦軸は動的応答倍率の最大値（振動数応答曲線でのピーク値）で制振効果を示す指標である。振動数比幅と減衰定数とが相互に関連して制振効果，およびロバスト性が変わることがわかろう。制振効果に関しては振動数比幅△γの影響が大きく，０．１５付近の値が全般的に良さそうである。振動数比幅に対するロバスト性は一般に悪いが、減衰定数を大きくすることでパラメータ変化に対する敏感度が低くなり，ロバスト性が確保される。一方，減衰定数に対するロバスト性は極めて良く，減衰比を０．０１から０．１の範囲で変えても制振効果の変化は，単一ＴＭＤに比べ，かなり小さいといえる。制振効果そのものは１％質量比の単一ＴＭＤの最大効果（ＤＭＦ最大値で約１４）よりも大きな効果を期待できるものの，その差は有意とは言い難く（図－５，６），ＭＴＭＤの優位性はロバスト性にあるといえる。

特に減衰定数に対するロバスト性は重要である。図－７（ｎ＝５，Δγ＝０．２，ξ_T＝０．０３）に示すように，ＴＭＤ減衰定数を小さく抑えた場合に各ＴＭＤの応答は構造物の応答に比べて非常に大きくなる（単一の最適ＴＭＤであればＴＭＤの応答比は１０以下）。このようなとき、通常はスペースの制約からの許容振幅がオーバーするため減衰定数を大きくせざるを得ないわけであるが，このような場合にも制振効果をあまり落とさずに済むことになる。

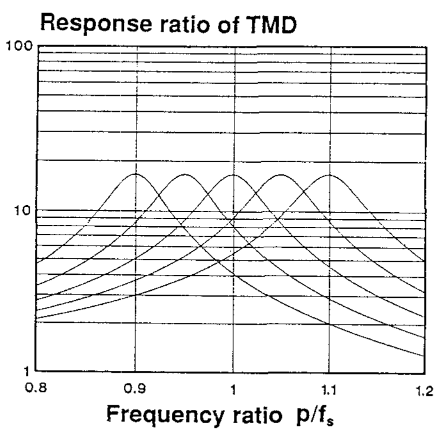
なお，ＭＴＭＤの制振特性はその個数に大きく依存する。図－８は振動数比幅$\Delta\gamma$（＝０．２），減衰定数ξ_T（＝０．０１）を固定し，ＭＴＭＤ個数をパラメータに応答曲線の変化を示したものである。数を増やすことによって制振効果を高め得るが，ある程度の数以上になると制振効果は変わらないことがわかる。



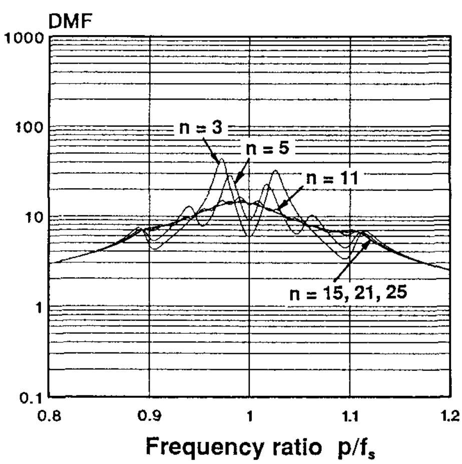
図－５　振動数比幅に対する制振効果



図－６　減衰比に対する制振効果



図－７　各ＴＭＤの応答



図－８　ＭＴＭＤ個数の影響

３．　ＭＴＬＤの特性

前章において１つ１つのＴＭＤの減衰が低くともマルティプルにすることにより制振性が高まり、かつロバストになるということが示された。このようなマルティプルの恩恵を最も受けるのは前述したように、小振幅で減衰が低くなりがちで、かつ多数個から構成され分散型といえるＴＬＤであろう。

ただし、ＴＬＤは浅水とする限り非線形性があり、前章での結果がそのまま通用するとは限らない。ここではＴＬＤ内の波の非線形性、砕波を考慮したモデルを用いてＭＴＬＤの特性の把握に努める。

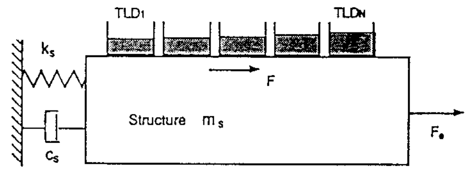
3．1　ＭＴＬＤとそのシミュレーション

図９に示すマルティプルＴＬＤを考える。ＴＬＤの固有振動数は図10に示すようにf_1〜f_Nに分布することになるが、ここでもf_1〜f_Nは等間隔とする。

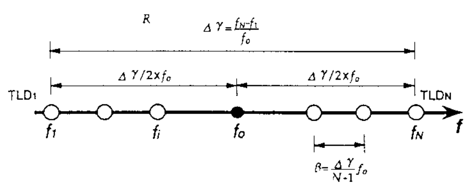
個々のＴＬＤ内の液面動揺は著者らが開発してきた波の理論にもとづくＴＬＤシミュレーションモデル[8,9,10]を用いる。すなわち、波高η、液面流速 u_s（図11）は

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + h\sigma \frac{\partial (\phi u_s)}{\partial x} = 0$$

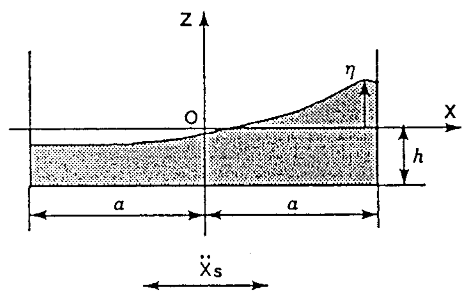
$$\frac{\partial u_s}{\partial t} + \frac{\partial u_s^2}{\partial x} + C_{fr}^2\, g \frac{\partial \eta}{\partial x} + gh\sigma \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \frac{\partial \eta}{\partial x} = - C_{da}\, \lambda u_s - \ddot{X}_s$$



図－９　ＭＴＬＤのモデル



図－１０　ＭＴＬＤの振動数分布



図－１１　ＴＬＤ内の液体動揺

で表わされる。ここで g：重力加速度、kは波数を表し、$\sigma=\tanh(kh)/(kh)$、$\phi=\tanh(k(h+\eta))/\tanh(kh)$、$X_s$はベース加速度、$\ddot{X}_s$は構造物の応答加速度。$\lambda$は容器底面、側面および水面の減衰への影響を表す，微小振幅時の速度比例減衰係数であり、

$$\lambda = \frac{1}{h+\eta} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega \nu} \left\{ 2 + \frac{2h}{b} \right\}$$

である。ここで、ω：加振角振動数、ν：動粘性係数、b：容器の奥行きである。C_{da}，C_{fr}は砕波を取り込むための無次元係数であり、C_{da}は

$$C_{da} = 0.57 \sqrt{\frac{\varepsilon h \omega_w}{\nu} A}$$

を用いる[9,10]。ここで水深比$\varepsilon=h/a$、A=容器の振動振幅、ω_wは液体動揺の固有円振動数である。また、C_{fr}は1.05を用いる[9,10]。差分による数値計算において砕波が生じていないときは$C_{fr}=1.0$，$C_{da}=1.0$、砕波が生じているときには上述のC_{da}，$C_{fr}=1.05$を用いる。砕波の条件は、容器の壁面近くでの波高η>水深hとする。

構造物の応答はＭＴＬＤとの連成系として解かれることになる[9]。

3．2　シミュレーションの条件

一自由度系構造物の固有振動数はf_s=0.458Hz、減衰定数はξ_s=0.0032（対数減衰率δ_s=0.02）とする。

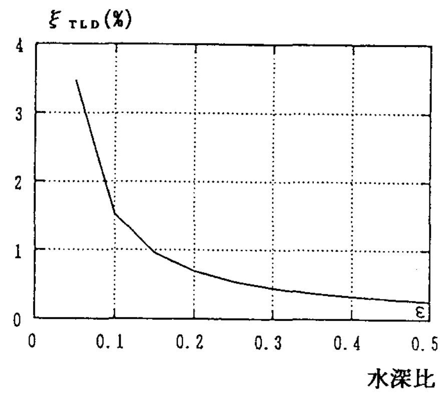
一方、ＴＬＤとしては矩形容器を用い、その巾を2a=59cmとする。このとき、水深h=3cmとすれば液体動揺の固有振動数は0.458Hzとなり、f_sに一致する。

ＴＬＤの中心振動数f_0が0.458Hz（水深3cm）となるように、マルティプルＴＬＤは水深を調整する。すなわち、まず液体動揺の固有振動数がf_1～f_nになるように個々のＴＬＤの水深を決定する。次に、個々のＴＬＤ容器の奥行は同じとし、ＴＬＤ容器の奥行bは質量比μ=1%となるように決める。これは、ＴＬＤを実際に用いる場合、容器を同じにする方が圧倒的に簡便だからである。この様に設計されるマルティプルＴＬＤは質量が１つ１つ異なり、２．のＭＴＭＤの条件とは若干異なるものとなる。

なお、ＴＬＤでは容器と水深が決まればその減衰特性は一意的に決まってしまう。ＴＭＤの場合とはここが大きく異なる。ＴＬＤの微小振幅時の減衰定数ξ_{TLD}は

$$\xi_{TLD} = 2\sqrt{2\omega_w \nu}\ (1+h/b)\ (2\pi\ \varepsilon\sqrt{gh})$$

で与えられる[11]。ここで2a=容器巾、h=水深、b=容器の奥行、ν：液体の動粘性係数、ω_w：液体動揺の固有円振動数、ε=水深比(=h/a)である。2a=59cm、h=3cm、b=33.5cmとしたときのξ_{TLD}を図12に示す。以下のシミュレーションで対象とするε=0.1(h=3cm)では、図12からわかるように減衰定数がおよそ1.5%、ε=0.2(h=6cm)とすると1%を切る。この値は通常いわれている質量比μ=1%のときのＴＭＤの最適減衰値（6%程度）の数分の１で、かなり低いものである。



図－１２　微小振幅時のＴＬＤの減衰定数ξ_{TLD}

外力としてはＭＴＭＤのと同じく調和外力を想定する。外力としてはＴＬＤとしての非線形性が大きくは現われないレベルを基本とする。すなわち、ＴＬＤがないときの構造物の共振振幅Aが0.1cmとなる外力をベースとする。

3．3　シミュレーションの結果

（１）ダンパーの個数nの影響

周波数応答の計算結果を図13に示す。γ_0=0.0とし、ＴＬＤの振動数比幅$\triangle\gamma$としては0.2、すなわちf_i/f_0(i=1～n)を0.9～1.1としている。質量比μはＭＴＭＤと同じくいずれも１%である。　ＴＬＤにおいてもマルティプルにすることにより構造物のピーク応答が低下し、すなわち周波数応答曲線が平坦化しており、マルティプルの効果が現われていることが図13よりわかる。n=11以上であればほとんど差がない。n=5とn=11、21、31との結果には若干の差があるが、大きなものではない。すなわち、この場合にはn=5程度ですでにマルティプルとすることによる優位性が出てくる。

（２）振動数比幅$\triangle\gamma$の影響

ＴＬＤの数n=21としたとき、$\triangle\gamma$の大きさの影響をみたのが図14である。$\triangle\gamma$の大きさにより応答曲線はかなり大きく変わる。この場合$\triangle\gamma$=0.1～0.2程度をとればよいことがわかる。この結果はＭＴＭＤの結果

（図５）と整合的といえる。

（３）同調比の影響

よく知られているように同調系のパッシブダンパーでは構造物の固有振動数とダンパーの固有振動数を近接させ、ほぼ1.0にすることが必要である。とりわけ、ダンパーの減衰定数が低いときにはこのことが要求される。

よく知られているように、実際の構造物の固有振動数の正確な予測は容易ではない面がある。設計段階では２次部材などの寄与を無視したモデルを用いるために固有振動数が大巾に異なりうる。完成系の構造物の固有振動数については振動実験により同定しうるが、若干の誤差は避けられない。また、構造物は長い使用期間中、積載荷重の変化等により、固有振動数が経年変化することも大いに考えられる。ある時点で、構造物の固有振動数にダンパーの固有振動数を同調させたとしても何らかの要因で両者の間にずれが生じることがありうる。

そこで、同調振動数比（ここでは1.0とする）からずれたときの応答特性を調べてみた。n=5としたときの結果を図15a～dに示す。

図15より、単一のＴＬＤでは同調比に極めて敏感でγ_0=５％程度のずれでピーク応答が倍程度に変化することがわかる。図15bはn=5、$\triangle\gamma$=0.1としたときの結果である。この場合、nが少ない上、５％の同調比のずれに対して$\triangle\gamma$が0.1と小さいためマルティプルとしての優位性はあまり明確ではない。図15cでは$\triangle\gamma$を0.2と増やしており、５％の振動数比のずれが生じても応答には変化は生じていない。すなわち、単一ＴＬＤの場合と異なり、$\triangle\gamma$を適当に選べば、ＭＴＬＤはmis-tuningに対しロバストといえる。ただし、$\triangle\gamma$をあまり大きくすると同調比のずれに再び敏感になる（図15d）。

振動数比のずれが想定される場合には、当然のことであるが$\triangle\gamma$の選び方は、予想されるずれの値に応じて選択するべきということである。

（４）水深比εの影響

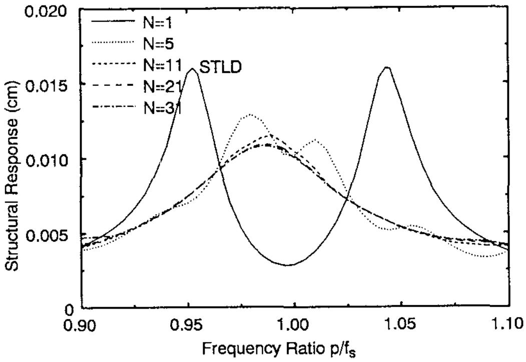
ＴＬＤ容器の巾b=60cmのままで水深比ε_0=0.1(h=3cm)と0.2(h=6cm)としたときの制振効果を比較したのが図16a、bである。ε_0=0.2の液体動揺（１次モード、固有振動数=0.639Hz）の減衰は図12で示したように１％を切る。なお、ε_0=0.2のときは液体動揺の１次固有振動も0.458Hzから0.639Hzに変化するので、１自由度構造物の固有振動数もそれに同調するように変えている。

水深比ε_0=0.2と大きくなると、ＴＬＤの減衰が低下するが、単一のＴＬＤに比べその制振効果の安定性が高いことがわかる。

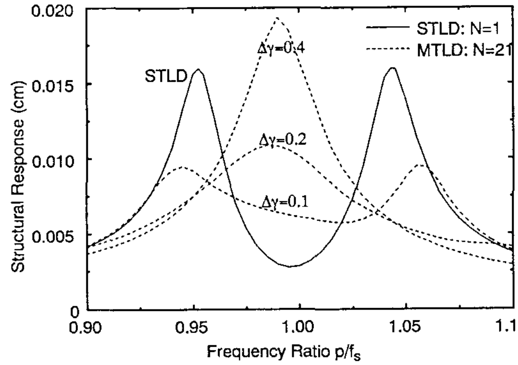
（５）加振振幅の影響

これまでのシミュレーションは、ＴＬＤがないときの構造物の共振振幅Aが0.1cmとかなり小さい調和外力を想定してきた。ここでは外力レベルを（ＴＬＤがないときの）共振振幅Aにして0.5、1.0、2.0、5.0cmとなるように変化させ、その影響をみることとする。

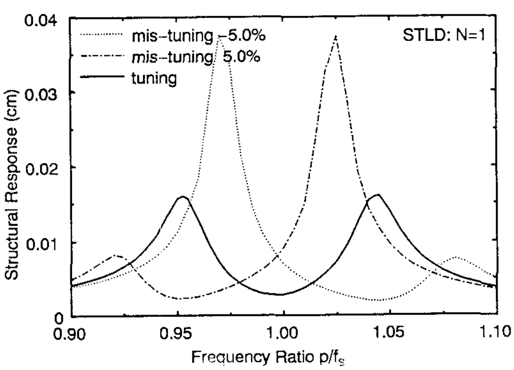
結果を図17に示す。加振振幅が小さい範囲ではマルティプルの優位性が顕著であるが、大きくなるにつれその差異はほとんど消失する。これは大振幅になると、ＴＬＤそのものの減衰が増える（たとえばA=5cmのケースにおいては、シミュレーションの上では広範囲の加振振動数に対して砕波が生じている）ためである。



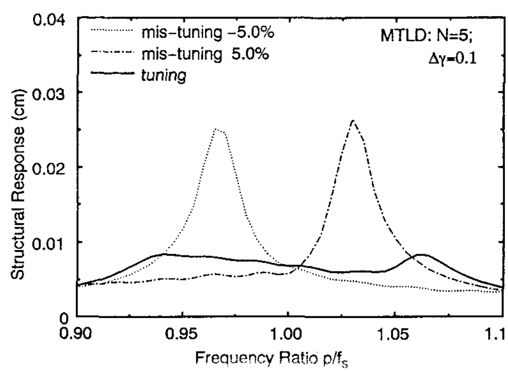
図－１３　構造物の周波数応答－ダンパーの個数の影響
（γ_0=0.0，$\triangle\gamma$=0.2）



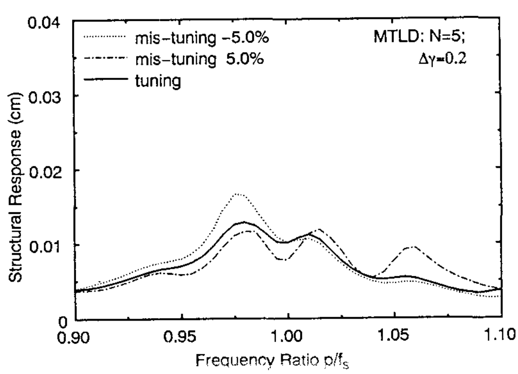
図－１４　$\triangle\gamma$の影響（γ_0=0.0，n=1,21）



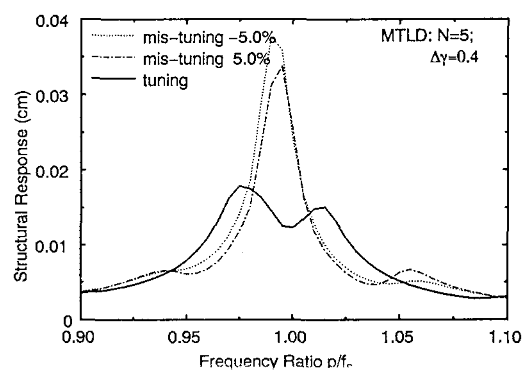
a）単一のＴＬＤ



b）n=5，$\triangle\gamma$=0.1



c）n=5，$\triangle\gamma$=0.2

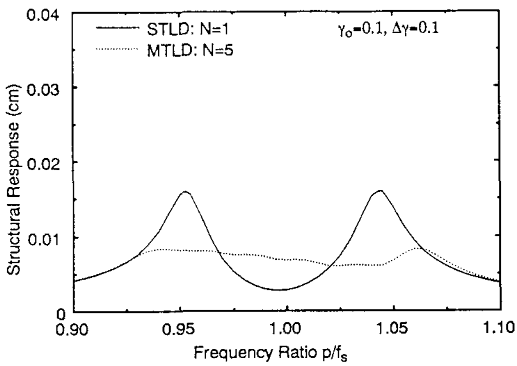


d）n=5，$\triangle\gamma$=0.4

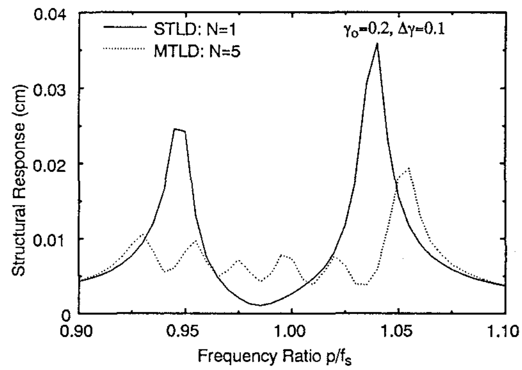
図－１５　Mis-tuningの影響

4.　あとがき

構造系の固有振動数のまわりに分布させたＭＴＭＤ，ＭＴＬＤの特性を把握する目的でシミュレーションを行なった。

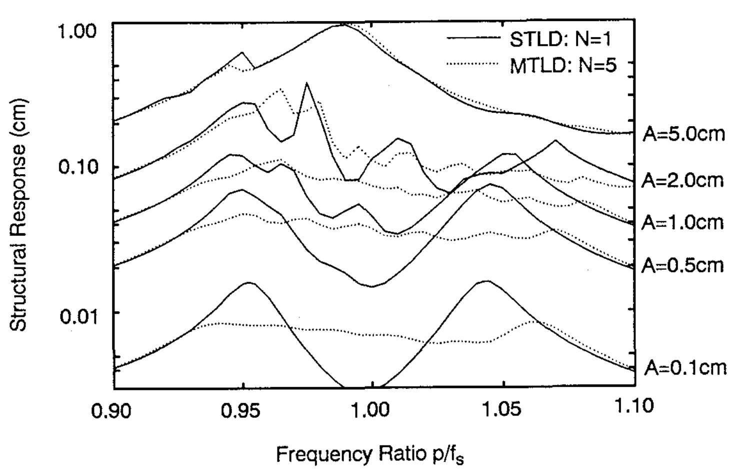


a)　ε_0=0.1，△γ=0.1



b)　ε_0=0.2，△γ=0.1

図－１６　水深比εの影響



図－１７　加振振幅の影響
(△γ=0.1，n=1,5)

マルティプル化させることにより、Igusaらの指摘する‘ロバスト性の向上’を支持する結果が得られた。すなわち、ダンパーに必要な減衰が小さくても済むこと、同調比のずれに対しても制振性能があまり低下しないことなどが確かめられた。

しかし、‘マルティプルダンパーにおいては最適化が不要’ということではなく、ダンパーの固有振動数巾には最適値が存在し、その巾は広すぎても狭すぎてもいけないこと、同調すべき固有振動数の10～20％の

巾に分布させることが望ましいことが示された。ただし、構造物系の固有振動数の推定精度が悪い場合にはこの巾を大きくする必要がある。Igusaらは定常ランダム加振での応答を考えているのに対し、本研究では調和外力に対するＭＴＭＤ、ＭＴＬＤの特性を対象にしており、このことが最適化の必要性につながったと考えられる。

ＭＴＬＤの数値シミュレーションの結果とＭＴＭＤの結果とは特に大きな差異はなかったが、ＴＬＤの場合、振幅が大きくなるに従い減衰が大きくなるので、ＭＴＬＤとしての優位性は小振幅に限定されることなどが新たなる知見として得られた。

吊橋主塔などの長周期大型構造物にとりつけられるＴＭＤは主としてスペースの制約（ＴＭＤの振幅を小さくする）から減衰の高いもの（たとえば減衰定数にして20％以上）とする傾向にある。減衰をあるレベル以上にすると制振効率が低下するので、質量比が増大し、ＴＭＤの個数の増大という悪循環となる。ＴＭＤの設計は最大想定外力によりなされるので、その時のＴＭＤの振幅でその減衰定数が決定される。高い減衰にした時、外力が小さいときはＴＭＤの振幅も小さいわけでＴＭＤを最大限に使っていないことになる。外力の小さいときはＴＭＤの減衰を小さくして、ＭＴＭＤの特性をフルに生かし、外力の大きいときは減衰を大きくし、スペースの制約を満たすという設計の方が、高い減衰で同じ固有振動数のＴＭＤをいくつも並べるという現行の設計法よりもよいように思えてくる。この意味でＴＭＤの振幅を制約としたときのＭＴＭＤの優位性の有無についてはさらに検討を加える必要があると考えている。併せて、特に非線形の強いＴＬＤにおいて実験的な検証も欠かせないであろう。また、振動論的にみたときにＭＴＭＤの優位性・メカニズムの説明はまだ十分とは思えず、このあたりも考えておきたい問題である。

謝辞

Northwesten大学(USA)のIgusa Takeru準教授、Warnitchai Pennung博士からは初期の段階で有益なコメントをいただいた。ここに記して感謝したい。なお、本研究は科学研究費の補助を受けて行なわれたものである。

参考文献

1) 土木学会振動制御小委員会「構造物の振動制御，第６章 制振事例（津村直宜 編）」振動制御コロキウム Part A., pp.102-172, 1991.7
2) たとえば，日本機械学会編：耐震設計と構造動力学，日本工業出版，pp.42-51, 1985
3) Igusa, T. and Xu, K. : Wide band-response characteriatics of multiple subsystems with high modal density, Proc. of 2nd Int, Conf. on Stochastic Structural Dynamics, Florida, USA, 1990.
4) Igusa, T. and Xu, K. : Application of distributed tuned mass dampers in vibration reduction problems, Abstract for AIAA Structural Dynamics and Materials Conference, p.2, 1991.
5) Igusa, T. and Xu, K. : Vibration reduction characteristics of distributed tuned mass dampers, STRUCTURAL DYNAMICS: RECENT ADBANCES, Proc. of 1th Int. Conf., pp.596-605, Elsevier Science Publishers, 1991.
6) Harnpornchai, N. : Study on effectiveness and sensitivity of TMD, Master thesis submitted to Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1991.
7) Yamaguchi, H. and Harnpornchai, N. : Performance of multiple tuned mass dampers, in preparation.
8) 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，土木学会，1989年，pp. 561-574.
9) 金子，孫，藤野：砕波を考慮したシミュレーション，土木学会第46回年次講演会概要集，I-472，982-983，1991. 9.
10) 孫利民：Semi-analytical modelling of TLD with emphasis on damping of liquid sloshing，東京大学博士論文，pp. 1-156，1991. 9.
11) 藤野，パチェコ，チャイセリ，孫、古賀：ＴＭＤアナロジーをベースにしたＴＬＤの特性の理解，構造工学論文集，Vol. 36A，土木学会，pp. 577-590，1990. 3.

（1991年9月30日受付）