

複数個の TLD を設置した海洋構造物の波浪共振特性に関する実験的研究

小村 辰彦*・石田 啓**・桐畑 修***

1. 結 論

海洋空間の有効利用や海底資源の採取を実行するためには、信頼性の高い海洋構造物の設計が不可欠となるが、海洋開発の進展に伴う海洋構造物の大型化のため、構造物の固有振動周期が海洋波の周期に近づき、波浪による構造物の共振破壊の危険性が増加している。小村ら(1992)は、すでに脚柱式構造物に同調液体ダンパー(以下、TLDと記す)を設置することにより、共振の抑制が可能となることを実証しているが、海洋構造物の場合は、作用外力である波力が風や地震荷重と異なった周期性の強いものであるため、その振動特性は陸上構造物の場合とは異なったものとなる。したがって、TLDによる海洋構造物の振動制御は、各状況に即した十分な検討が必要であり、本論では、共振制御に対し、最も効果的と考えられるマルチプルタイプのTLDを設置した場合について研究する。すなわち、複数個のTLDを設置したプラットフォーム模型に対し、作用波の周期を順次変化させて、その共振特性を把握し、次に波と振動変位とTLD内のスロッシング(液体動揺)の位相特性について検討し、最後にTLDの複数化によるTLD内の液体質量の増加が共振特性に及ぼす影響を解明する。

2. 実 験

(1) 実験装置

実験は、福井工業高等専門学校土木工学科に設置された長さ26m、幅60cm、深さ80cmの2次元造波水槽を用い、その中央に図-1に示すプラットフォームを設置した。このプラットフォームは、重量が17.5kgf(171.5N)の鋼製デッキを、比重が1.37で、ヤング係数が $E=28700\text{ kgf/cm}^2$ (281 kN/cm²)の塩化ビニル製円柱4本で支持する形式であり、脚柱の基礎固定端の高さは6cmで、水底からデッキ結合部までの高さは86.6cmである。脚柱の外径は2cmで、その肉厚は3.6mmである。プラットフォームの脚柱間隔は、波の波長が脚柱間隔の

2倍となる時に生じる変位の相殺点の変位の基本共振点に近づき過ぎないように、 $l_h=54.4\text{ cm}$ とした。このプラットフォームのデッキ上には、図-2に示すTLDを設置するが、TLDはアクリル樹脂製の矩形水槽が5槽連結したマルチプルTLDである。TLDの1槽あたりの内空寸法は、長さ30cm、幅18cm、高さ10cmであり、5槽すべてが同一構造で、TLDの重心位置はデッキの重心位置に一致している。また、矩形水槽の重量は7.09kgf

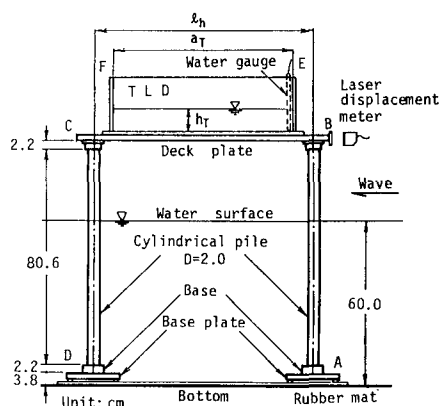


図-1 プラットフォーム模型の寸法

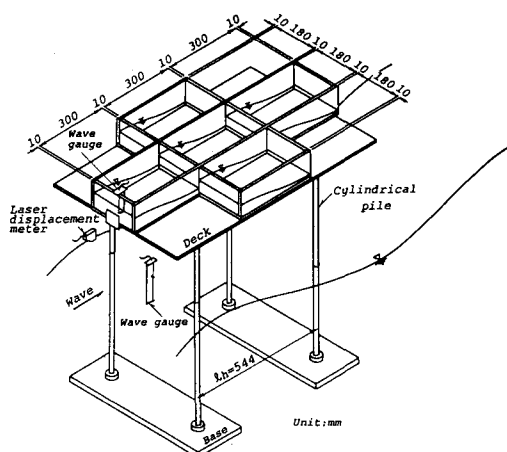


図-2 マルチプル TLD の設置状況

* 正会員 工博 東京コンサルタンツ株式会社

** 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科

*** 正会員 金沢大学大学院 工学研究科

(694.8 N) である。

(2) 固有振動数比 γ と質量比 μ

TLD により振動を制御するには、プラットフォームの固有振動数 f_p と TLD 内のスロッシングの固有振動数 f_s との比 $\gamma = f_p/f_s$ が重要なパラメータとなるが、小村ら (1992) は、すでに $\gamma=1$ とすることにより、効果的に共振を制御できることを実証している。

TLD 内のスロッシングの 1 次固有振動数 f_s は、TLD 内の液体の動揺を矩形閉塞浅水域における 2 次元運動と見なし、微小振幅波理論を用いることにより、次式から算定できる。

$$f_s = \sqrt{(\pi g/a_T) \tanh(\pi h_T/a_T)/2\pi} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 a_T は TLD の 1 槽の振動方向の長さであり、 h_T は TLD 内の水深である。また、TLD を設置したプラットフォームの固有振動数 f_p は、4 脚柱式プラットフォームを、1 本脚に置き換えた 1 自由度の構造物として振動解析を行うことにより、次式から近似的に算出できる (石田ら, 1992)。

$$f_p = \frac{\lambda_1 \sqrt{EI}}{2\pi m} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 λ_1 は 1 次の固有値であり、 EI および m は置き換えた柱の曲げ剛性および付加質量を含めた単位長さ当りの質量である。なお、式 (2) を用いて求めた図-1 のプラットフォームの水中における固有振動周期は、2% 以内の誤差で実測値と一致した。

また、TLD の大きさを表すパラメータには、TLD 内の水の総質量 m_w と TLD 付きプラットフォームの換算質量 m' との比 $\mu = m_w/m'$ を用いることとするが、TLD 付きプラットフォームの換算質量 m' は、4 脚柱式プラットフォームを 1 本脚に置き換えた 1 自由度のモデルに対して、次式から算出される。

$$m' = k_B/\omega^2 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

$$k_B = 48EI/l^3 \dots\dots\dots (4)$$

$$\omega = 2\pi f_p \dots\dots\dots (5)$$

であり、 k は柱のバネ係数で、 ω はプラットフォームの固有角振動数である。

(3) 実験方法

実験では、レーザー変位計を用いることにより、図-1 の B 点におけるデッキの振動変位を測定し、同時に、TLD 内の水面変動を TLD 内の側壁 E 点に設置した容量式波高計により測定し、さらに、進行波の水面変動を、脚柱 AB の位置に設置した容量式波高計により測定した。実験時の水深は $h=60$ cm であり、構造物に作用する波は、波高を $H=6$ cm とし、その周期を $T=0.6\sim 1.6$ sec の範囲内で断続的に変化させた。共振抑制効果の検討は、図-2 のデッキ上の矩形水槽において、注水した水

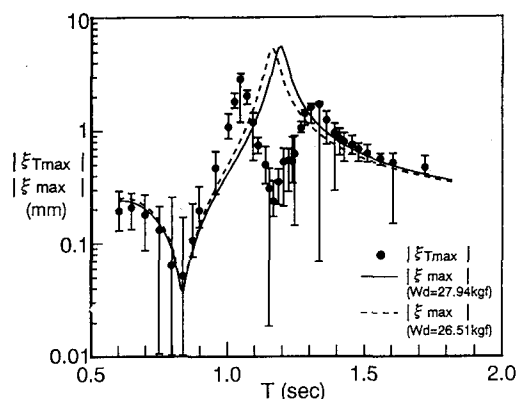
槽の数を順次増加することにより TLD の数を増加させ、それぞれの状態に対し共振特性を調べた。この時、固有振動数比 γ が 1 となるように水深 h_T を設定した。また、TLD の複数化に際し、それぞれの脚柱に作用する応力が同一となるように、注水する水槽を選定した。

TLD を設置しないプラットフォームの波浪振動変位は、石田ら (1986, 1987) が提示した理論解を用いて算出するが、理論計算では、抗力係数は $C_D=1.0$ 、慣性係数 $C_M=2.0$ 、付加質量係数は $C_a=1.0$ を使い、減衰係数 c_D は、プラットフォームを空中で自由振動させた時の減衰曲線から求めた値を用いた。

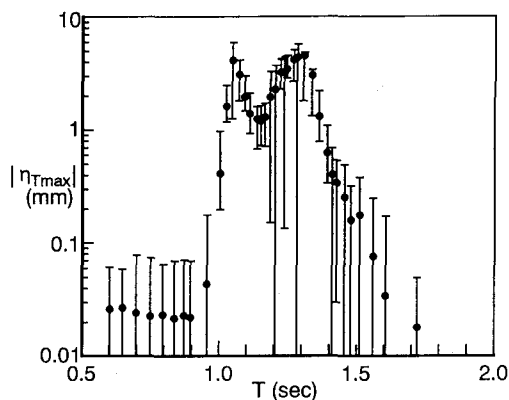
3. 結果および考察

(1) TLD 付きプラットフォームの共振特性

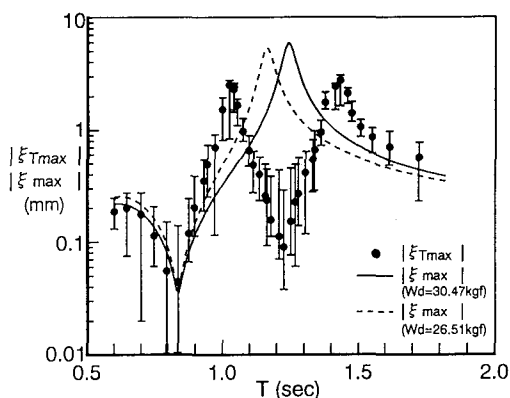
図-3 は、横軸に作用する波の周期 T をとり、縦軸にデッキ変位の一周期間の変位の最大値をとって、TLD を設置した時のプラットフォームの共振特性を示したものである。図中の●は TLD 設置時のデッキ変位の最大値 $|\xi_{Tmax}|$ の平均値で、細い縦線により $|\xi_{Tmax}|$ の変動範囲を示す。また、実線および破線は、TLD を設置しない場合のデッキ変位の最大値 $|\xi_{max}|$ の理論曲線であり、実線がデッキ鋼版重量に水槽重量と水槽内の水の重量 (TLD の重量) を加えた場合で、破線がデッキ鋼版重量に水槽重量のみを加えた場合である。(a) は、TLD 1 槽のみに水を入れた場合の共振特性を示すが、この時の TLD 内の水深は $h_T=2.6$ cm であり、質量比は $\mu=0.047$ である。(b) は、TLD 3 槽に水を入れ、マルチプル TLD とした場合であり、この時の TLD 内の水深は $h_T=2.4$ cm で、質量比は $\mu=0.123$ である。また、(c) は、さらに TLD 5 槽すべてに注水した場合であり、この時の TLD 内の水深は $h_T=2.2$ cm で、質量比は $\mu=0.180$ である。図より分かるように、いずれの場合も、実線で示した TLD を設置しない時 (ただし、TLD の重量は考慮されている) の共振変位がほぼ消滅し、この元の共振周期の前後に新たな 2 つの共振が生じる。以下、これらの新たな 2 つの共振点のうち、短周期側の共振点を第 1 共振点、長周期側の共振点を第 2 共振点と呼ぶこととするが、第 1 共振点は、TLD 内の水を除いた時の破線で示した共振点よりも、常に短周期側に発生している。また、共振変位については、TLD を設置しない場合に $|\xi_{max}|=6$ mm 程度であったものが、TLD の設置により $|\xi_{Tmax}|=3$ mm 程度に半減する。しかし、第 1 共振点と第 2 共振点での変位は、TLD を設置しない元の変位より大きくなり、いわゆるスビルオーバー現象を呈する。また、(a)、(b) および (c) を比較した場合、質量比 μ が最も小さい (a) の場合には、第 2 共振点での共振の発生は顕著ではなく、(b) および (c) と質量比 μ が増大するに伴い、新たな 2 つの共振の発生



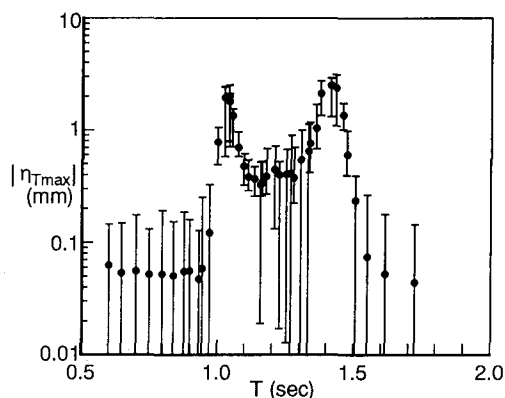
(a) TLD 1槽 ($\mu=0.047$)



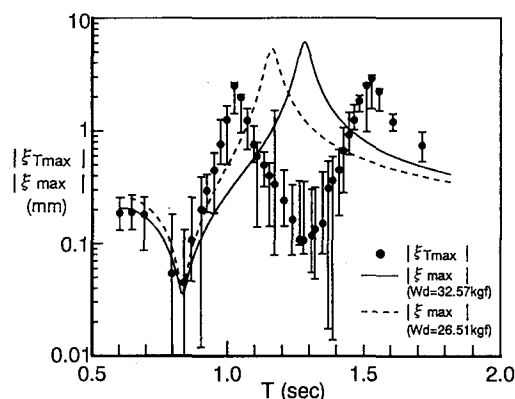
(a) TLD 1槽 ($\mu=0.047$)



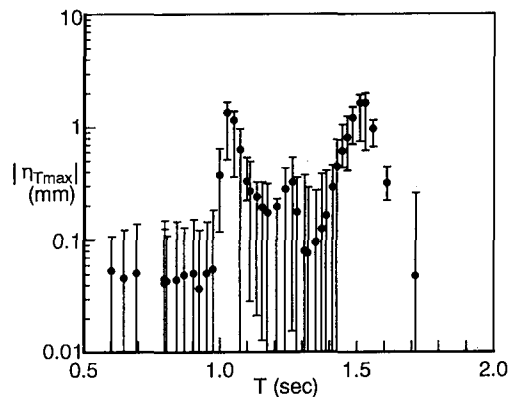
(b) TLD 3槽 ($\mu=0.123$)



(b) TLD 3槽 ($\mu=0.123$)



(c) TLD 5槽 ($\mu=0.180$)



(c) TLD 5槽 ($\mu=0.180$)

図-3 TLD の設置によるデッキ変位の共振特性

図-4 スロッシングの周期特性

が著しくなることが分かる。

図-4(a), (b)および(c)は、横軸に作用波の周期 T をとり、縦軸にTLDの1つの水槽内の水の1周期間のスロッシングの最大値 $|\eta_{Tmax}|$ をとって、図-3(a), (b)および(c)の場合のスロッシングの周期特性を示したもので

ある。図中の●は $|\eta_{Tmax}|$ の平均値で、 $|\eta_{Tmax}|$ の変動範囲を細い縦線により示す。いずれの場合も、図-3の新たな共振点と同じ周期において、 $|\eta_{Tmax}|$ のピーク値が生じるが、元の共振点付近での $|\eta_{Tmax}|$ はかなり小さくなる。また、第1共振点より短周期側および第2共振点より長周

期側の波に対して、TLD内のE点の水は、ほぼ上下動しない状態にある。さらに、(a)、(b)および(c)を比較すると、質量比 μ が最も小さい(a)の場合には、新たな2つの共振点での $|\eta_{Tmax}|$ は5mm程度であるが、元の共振点付近での $|\eta_{Tmax}|$ は1.5mm程度であり、(b)から(c)へと質量比 μ が増大するに伴い、元の共振点付近での $|\eta_{Tmax}|$ は0.5mm以下と小さくなり、また、新たな2つの共振点での $|\eta_{Tmax}|$ も、1.5~2mm程度に減少する。ただし、(b)および(c)は、TLDを3槽および5槽に増加した場合であることから、(a)の単槽のTLDの場合より、(b)および(c)のマルチプルTLDの方がプラットフォームに及ぼすスロッシングの影響が小さいとは限らない。

(2) デッキ変位とスロッシングの位相変化

図-5、図-6および図-7には、波の一周期間の振動変位およびスロッシングの位相変化を示す。図中、実線はTLD設置時のデッキ変位 ξ_T であり、破線はスロッシング η_T である。ここに、 $+\xi_T$ は波の進行方向側への変位を、 $+\eta_T$ は波の進行方向と逆方向側の壁面での水面の上昇を示す。図-5(a)および(b)は、TLDが1槽の場合($\mu=0.047$)の第1共振点および第2共振点での位相変化であり、図-6(a)および(b)は、TLDが3槽の場合($\mu=0.123$)の第1共振点および第2共振点での位相変化である。また、図-7(a)および(b)は、TLDが5槽の場合($\mu=0.180$)の第1共振点および第2共振点での位相変化である。いずれの場合も、第1共振点では、 ξ_T と η_T が同位相であり、スロッシングがデッキの振動を阻止する状態になるにもかかわらず共振が生じ、第2共振点では、 ξ_T と η_T が逆位相で、スロッシングがデッキの振動を増大させる状態で共振が生じることが分かる。また、図-5から図-7の(a)の第1共振点では、質量比 μ にかかわらず、波に対する振動変位 ξ_T およびスロッシング η_T の位相はほぼ一定となる。(b)の第2共振点では、図-5の μ が小さい場合には、波に対する ξ_T および η_T の位相差が約 $\pm 90^\circ$ であるが、図-6および図-7と μ が増大するとともに、 ξ_T および η_T の位相が遅れる傾向にある。

図-8は、変位 ξ_T およびスロッシング η_T が最大値をとる位相 t/T の周期特性を示したものであり、(a)、(b)および(c)は、図-3のデータを用いて、TLDを1槽、3槽および5槽とした場合である。各図の横軸は波の周期 T であり、縦軸は位相 t/T である。図中の●は波の進行方向の変位が最大($+\xi_{Tmax}$)となる位相であり、○は波の進行方向と逆方向のTLD壁面でのスロッシングが最大($+\eta_{Tmax}$)となる位相である。いずれの場合も、波と振動変位との位相差は第1共振点、第2共振点および元の共振点付近で急激に変化するが、波とスロッシングとの位相差は第1共振点付近でのみ急変する。また、元の共振点より長周期では、振動変位とスロッシングとの位相差

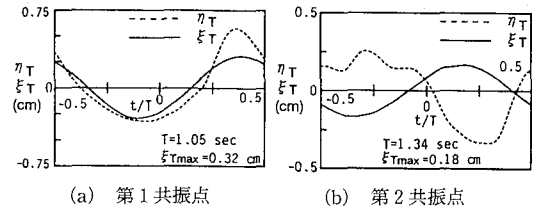


図-5 スロッシングと振動変位の位相変化 (TLD 1槽)

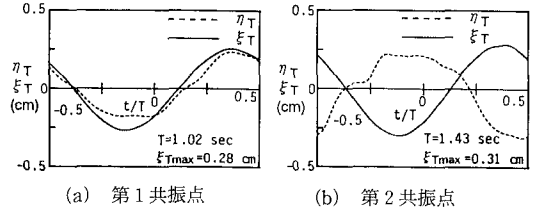


図-6 スロッシングと振動変位の位相変化 (TLD 3槽)

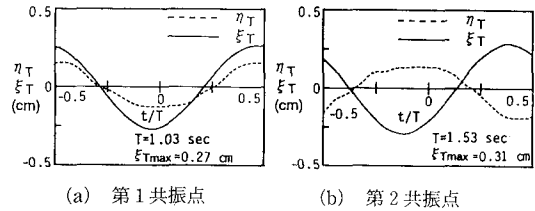
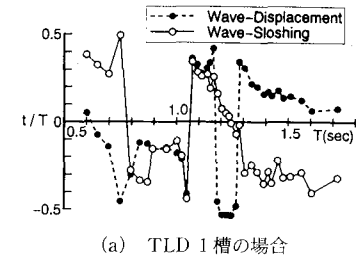
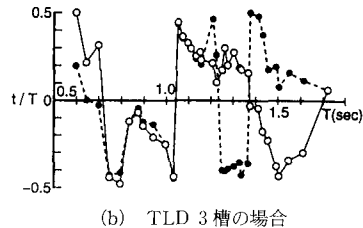


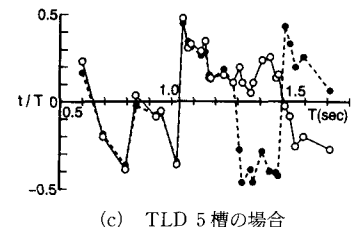
図-7 スロッシングと振動変位の位相変化 (TLD 5槽)



(a) TLD 1槽の場合

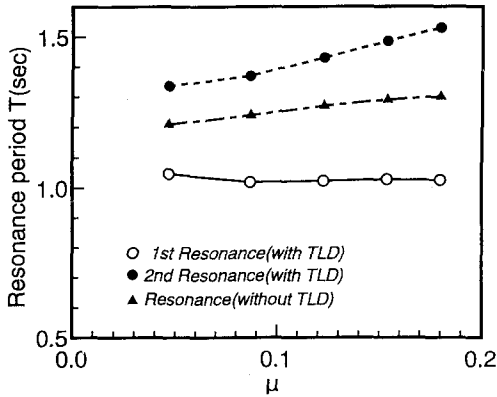
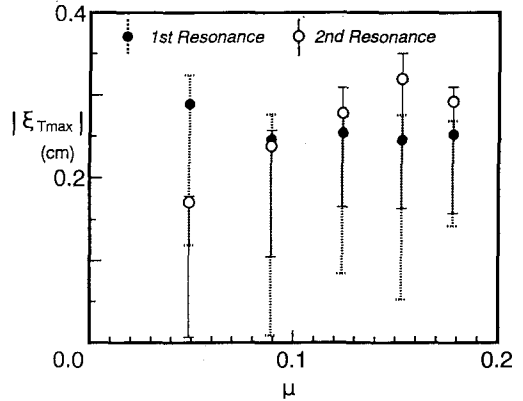


(b) TLD 3槽の場合



(c) TLD 5槽の場合

図-8 スロッシングと振動変位の位相の周期特性


 図-9 質量比 μ の増加に対する共振周期の変化

 図-10 質量比 μ の増加に対する共振変位の変化

が大きくなり、第2共振点でその差が半周期となる。すなわち、第1共振は構造系と波力とが協調することにより発生し、第2共振はTLD内のスロッシングによる力と波力とが同調することにより発生すると推察される。

(3) 質量比と共振点の関係

図-9は、TLDの数を順次増加し、質量比 μ を増大した時の共振周期の変化を示すもので、縦軸は共振周期であり、横軸は質量比 μ である。図中の○および●は、それぞれTLDを設置した場合の第1共振点および第2共振点であり、▲はTLDを設置しない場合(TLDの重量を考慮する)の共振点である。第1共振点は、質量比 μ にかかわらずほぼ一定値となるが、第2共振点は μ の増加により長周期側へ移行する。また、TLDを設置しない場合の共振点は、第1および第2共振点のほぼ中間となる。

図-10は、TLDの数を順次増加し、質量比 μ を増大した時の共振変位の変化を示すもので、縦軸は共振変位の一周期間の最大値 $|\xi_{Tmax}|$ であり、横軸は質量比 μ である。図中の○および●は、それぞれTLDを設置した場合の第1共振点および第2共振点の $|\xi_{Tmax}|$ の平均値であり、破線および実線の縦線は、それぞれ第1共振点および第2共振点の $|\xi_{Tmax}|$ の変動範囲を示す。第1共振変位は μ が小さい時に若干大きい、全体的にほぼ一定であり、第2共振変位は μ の増加に伴い増大している。しかし、いずれの共振変位も、図-3に示したTLDを設置しない時の共振変位の半分程度に低減されている。

4. 結 論

本研究により得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- 1) 振動数比 $\gamma=1$ としたTLDにより、元の共振はほぼ消去されるが、元の共振周期の前後に新たな2つの共振が発生する。この2つの共振変位は、元の共振変位の約半分程度と小さくなるが、それらの周期における元の変位よりも大きくなり、いわゆるスピルオーバー現象を呈するため、使用に際し注意する必要がある。
- 2) TLDのマルチ化による質量比 μ の増大に伴い、第2共振点の長周期側への移行によるスピルオーバー現象が顕著となるため、 μ はある程度小さくする必要がある。

参 考 文 献

- 石田 啓 (1986): 微小振幅波による小口径柱体の振動に関する理論解, 土木学会論文集, 第369号/II-5, pp. 161-170.
 石田 啓・加島 卓・上野 彰 (1987): ストークス波による海洋プラットフォームの振動に関する理論解とその応用, 土木学会論文集, 第381号/II-7, pp. 121-130.
 石田 啓・黒崎和保・小村辰彦 (1992): 海洋プラットフォームの共振特性および波力の相殺点による共振制御に関する研究, 土木学会論文集, 第456号/II-21, pp. 65-74.
 小村辰彦・石田 啓・秦 弘和 (1992): 同調液体ダンパー(TLD)による海洋プラットフォームの共振制御に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 761-765.