

水平バッフルによるスロッシング抑制法の検討 (過渡応答のシミュレーションと実験の比較)

A Study on Sloshing Suppression Method by Horizontal Baffles (Comparison of Transient Sloshing Responses Obtained by Simulations and Experiments)

浦田 喜彦 *
Yoshihiko URATA,

Abstract: The cure against sloshing is a very important subject on disaster prevention. Many studies have been made on this subject so far. However, more low-cost methods of sloshing suppression are desired. The authors predicted that horizontal plates installed near surface in the liquid beside the tank wall are effective to suppress sloshing. Analytical simulation and experiments were performed about parallelepiped tanks. The collocation method is used for analytical simulations. The horizontal baffle plates obstruct up and down motion of liquid near the tank walls. As a result, sloshing becomes small. However, vortices caused by baffle plates have substantial effects on sloshing suppression, too. It is guessed that horizontal baffle plates are effective to suppress sloshing also in other shaped tank than the parallelepiped ones.

Key Words : Sloshing, Suppression, Rectangular Tank, Baffle Plates , Collocation Method, Experiment

1. 緒 言

スロッシングとは容器内の液体表面が揺動する現象を一般に指す。卑近なところでは洗面器に水を入れて揺すったときの現象がその典型である。

さて、工学的な意味でスロッシングが問題となるのはおもに2種類である。ひとつはさまざまな乗り物の燃料タンクやタンカーのような輸送用タンクなどの可動容器内での現象で、たとえば液体燃料ロケットの飛行安定性などにも関係するので NASA にも研究蓄積がかなりある⁽¹⁾。スロッシングは一般には重力の影響下で起きるものと考えられているが、微小重力下で表面張力の影響の方が大きくなった場合についての報告もある。そうしたこともきちんと把握しておかないとロケットに燃料を確実に供給することはできないであろう。

もう一つは地上における各種定置型タンク内のスロッシングで、おもに地震災害との関係で重視されている。日本では 1964 年の新潟地震や 2003 年の十勝沖地震の際に石油タンクの大規模火災がスロッシングを原因として起きている。また、2006 年の中越地震の際には原子力発電所の使用済み核燃料棒の貯蔵タンクでスロッシングが発生して放射能を帯びた水がわずかであるが漏れ出したことがあった。そのほかに小規模の給水施設や薬液貯蔵用のタンクが地震時のスロッシングで損傷した例は多数ある。

以上のような状況を考えればスロッシングの防止が防災上の重要課題であることは了解されよう。実際に国内

外で古くから多くの研究がなされてきた。前述のように NASA でも研究が行われているし、比較的最近には Ibrahim によって分厚いレビュー書が出されている⁽²⁾。国立情報学研究所の CiNii というサイトで単純に「スロッシング」と入力して検索すると 2010 年末時点では 497 件が検出される状況である。大手ゼネコンや重工業系企業にとって大型タンクのスロッシング防止は事業上の重要課題なので CiNii には登録されない多くの情報が各社の企業誌に述べられているし、特許出願件数も相当な数に上る。

著者は最近までスロッシングについては関心を持ちながらも直接研究の対象とはしてこなかった。しかし、スロッシングについてのいろいろな研究結果に接しているうちに通底する基本的考え方がよく見えず、方向が定まりかねているのではないかという印象を持ち始めた⁽³⁾。

通常の機械振動に対しては減衰付与という方法が効果を発揮することが多い。スロッシングも振動ではあるので減衰を与えるという方法が多く検討されてきている。減衰が重要であることはその通りであるが、スロッシング対策としては地震動を受けても液体にエネルギーが蓄積されないような方法を考える方が近道ではないか。これには通常の構造でいえば免震という考えに他ならない。そのように考えれば意外に簡単な方法で対応できそうであるというのが最近の著者の見解である。ここでは検討の概要を報告しておく。

2. 近似解析とその周辺事情

2.1 これまでの経過 著者はこれまで数値計算を骨格としてさまざまな研究に取り組んできた。た

2011年3月4日受理
*理工学部機械工学科

だし、研究を始めたころの劣悪な計算環境の影響でいまでもなるべく簡単な方法を用いて近似でも現象の本質を見ることのほうが大切であるという考えに徹している。比較的最近では音響や振動のシミュレーションに解析解を用いる方法を検討している。計算力学では FEM (有限要素法) が主力ではあるが、FEM は強力ではあっても万能ではないし、問題点もあるので何らかの代替法があったほうがよいと考えて始めた研究である。定常音響問題の基礎方程式はヘルムホルツの方程式

$$\nabla^2 \varphi + k^2 \varphi = 0 \tag{1}$$

である。ここで $k = 0$ とすればスロッシングの基礎方程式であるラプラス方程式

$$\nabla^2 \varphi = 0 \tag{2}$$

に一致する。これらの式の形を見れば音響とスロッシングは近いと考えるのは自然なことであろう。実際にある企業の技術者から社内でスロッシング対策が問題になったときに音響屋に相談しろという話になったと聞かされたことがあった。あり得ることである。しかし、実はスロッシングと音響とでは数理問題としては質的にかなり差があることが最近になってわかってきた。式 (1) は本来が波動に由来し、いろいろな座標系で書いた解は常に広い範囲に影響をするという意味の大域性を持っていると考えてよい。しかし、式 (2) では座標系を無造作に選ぶと解が局所的な性質を強く帯びようになって、通常の数値計算ではスロッシングに対して意味のある結果を得るためには有効数字の桁数が足りない場合が出現するのである。物理的にはスロッシングは波動であり、振動なのであり、解は大域性を持つ方がよい。ラプラス方程式系もヘルムホルツの方程式系と並行的な方法で解析できるはずだという思い込みがあったのでそのことに気づくのに少し手間取ってしまった。

このような事情で著者のスロッシング研究は近似計算が入り口になったが、最近はその実験を加えて検討している。

2.2 近似解析の要点 解析法の要点をまとめておく。

流体運動を変位ポテンシャル φ で表すとラプラス方程式(2)になる。境界条件は

$$\left. \begin{aligned} \nabla \varphi \cdot \mathbf{n} &= 0 && \text{on } \Gamma_1 \\ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi}{\partial z} &= x\alpha(t) && \text{on } \Gamma_2 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

である。ここに Γ_1 は容器の壁や底、バッフルに接している部分を表し、いずれの場合も壁は剛体であるとして扱う。また、 Γ_2 は自由表面を表している。さらに \mathbf{n} は境界における外向き法線方向の単位ベクトルである。自由表面の条件式の右辺の x は水平方向の座標、 α は水平加振の加速度である。流体変位は $\nabla \varphi$

で計算されるが、この変位は容器に対して相対的なものである。

図 1 のように側壁に沿って液面下に幅 b の水平な剛体板を設置することを考える。この場合のシミュレーションを選点法で行う。板と同じ高さの水平な線で部分領域 I, II に分割し、それぞれの領域の解を次のようにおく。

$$\left. \begin{aligned} \varphi_I &= \sum_{n=1}^N A_n \sin \beta_n x \cdot \cosh \beta_n y_1 \\ \varphi_{II} &= \sum_{n=1}^N \sin \beta_n x \cdot (B_n \cosh \beta_n y_2 + C_n \sinh \beta_n y_2) \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

$\beta_n = (2n - 1)\pi / 2a$ とすれば式(4)は底面と側面の条件を満たしているので、残る自由表面と接合面の条件を満たすようにする。接合面の条件は液体どうしが接している場合には

$$\frac{\partial \varphi_I}{\partial x} = \frac{\partial \varphi_{II}}{\partial x}, \quad \frac{\partial \varphi_I}{\partial z_1} = \frac{\partial \varphi_{II}}{\partial z_2} \tag{5}$$

剛体板 (バッフル) がある場合には

$$\frac{\partial \varphi_I}{\partial z_1} = 0, \quad \frac{\partial \varphi_{II}}{\partial z_2} = 0 \tag{6}$$

である。これらを図 1 に示した点でのみ条件を満たすようにすると形式的に次の形の式が得られる。

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_n \\ B_n \\ C_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{7}$$

また、式 (4) の解を式 (3) の第 2 式に代入すると

$$\begin{bmatrix} \ddot{A}_n \\ \ddot{B}_n \\ \ddot{C}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & H_{23} & H_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_n \\ B_n \\ C_n \end{Bmatrix} = \{F_n\} \tag{8}$$

が得られる。この式の右辺は式 (3) の第 2 式の右辺の強制加振に由来する項である。 γ を任意定数として式 (7), (8) を合成すると

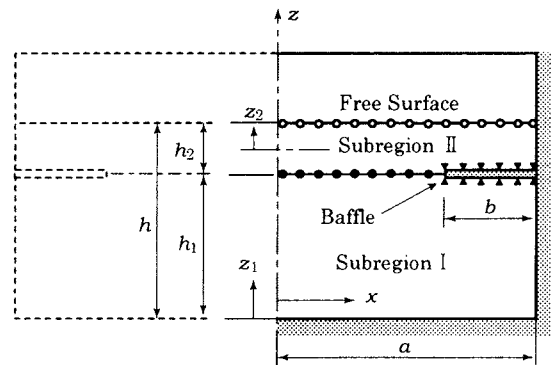


Fig.1 Configuration of Collocation Points

$$\begin{bmatrix} \gamma H_{11} & \gamma H_{12} & \gamma H_{13} \\ \gamma H_{21} & \gamma H_{22} & \gamma H_{23} \\ 0 & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{A}_n \\ \ddot{B}_n \\ \ddot{C}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ 0 & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_n \\ B_n \\ C_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_n \end{Bmatrix} \quad (9)$$

この式は係数間の連立微分方程式でさまざまな解法が適用できるが、ここではテイラー級数に展開する方法（6階の微分項まで採用）で数値的に解いた。その際に γ の値は1000以上と大きめにとるほうが計算が安定する。時間関数としての係数 A_n, B_n, C_n が求まれば式(4)から任意の時刻、任意の点での液体の変位や速度を求めることができる。

2.3 近似解析の問題点 以上の計算はあくまでも近似でしかない。粘性などの散逸要因が含まれていないし、何よりも渦を考慮していないからである。それでは必要な情報が十分に得られないというネガティブな立場があることも承知しているが、簡単なモデルでも骨格情報は得られるという見方もあり得る。著者はもちろん後者の立場で検討している。

3. 実験の方法と装置

図2に実験装置の概略を示す。水槽は透明アクリル樹脂製で内法が幅 $2a = 500\text{mm}$ 、高さ 450mm 、奥行き 380mm の直方体である。抑制板は2個を左右対称にそれぞれを水槽のふたから直径 6mm のステンレス管4本で吊るし、設置深さを可変とした。水槽はアルミ板製の加振台に固定し、それを偏心カムと戻りばねで水平方向に変位加振した。駆動はインバーターで可変速とした三相モータで行った。軸の回転変位をロータリーエンコーダーでパルスに変換してプリセットカウンタで計数し、設定値に達した時点でクラッチ・ブレーキを操作して回転の断続を行うようにした。これによって図3に示すような有限整数周期だけ切り取った正弦波が得られるが、連続加振も可能である。以下では10周期だけ加振した結果について述べる。

液体には基本的に水を用いたが、液面変位は側壁から 10mm の位置で静電容量型の波高計で検出し、その出力をデジタル記録装置に収めてからデータ解析を行った。

抑制板を設置しないで水深を 200mm 、加振振幅を 2mm として実測した水位変化の例を図4に示す。共振は 1.154Hz で起き、ここでは加振開始からほぼ直線的に振幅が増加して加振停止後は緩やかに減衰していく様子が見て取れる。ただし、非線形効果で平均水面からの上昇と下降が非対称になっている。加振振動

数が共振点より低くても高くても加振による強制振動と自由振動の重ね合わせでうなりが生じ、最大振幅は加振の途中で起きるようになる。共振点以外では振幅が小さいので加振停止後は減衰が目立たず、ほぼ一定振幅の自由振動が長く続いている。

抑制板を設置すると振幅は小さくなるが、現象としては類似の結果が得られる。また、シミュレーションの結果も定性的にはこれに対応している。

4. 計算および実験の結果と検討

4.1 過渡加振応答の結果 図5に幅 120mm 、厚さ 1mm のステンレス製の抑制板の設置深さを5通りに変えて10周期加振を行った際の最大水位と最低水位の差の加振振動数に対する変化のシミュレーションと実験の結果を比較して示す。抑制板がないときの

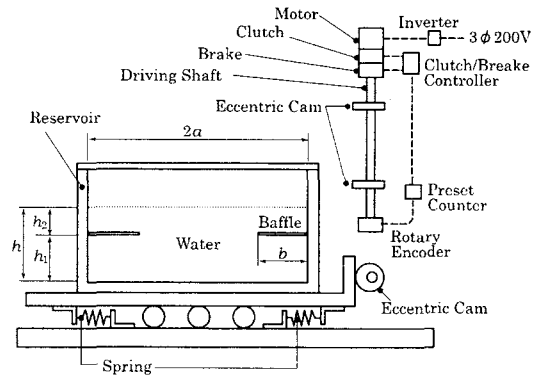


Fig.2 Experimental Setup



Fig.3 Exciting Time History

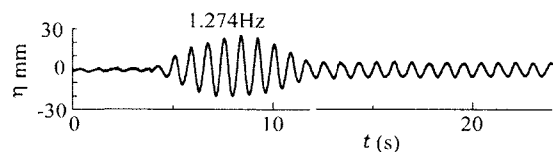
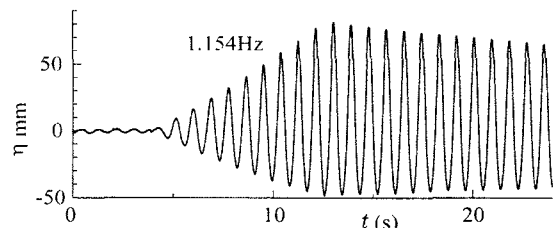
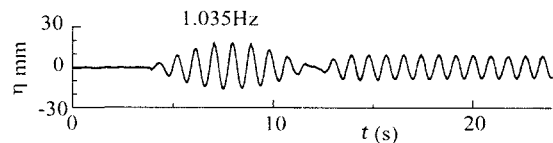


Fig.4 Examples of Observed Transient Sloshing

結果は計算と実験で非常によく一致する。しかし、抑制板を設置すると $\Delta\eta$ の最大値を与える振動数に計算と実験で大きな差はないが $\Delta\eta$ の最大値は実験の方がかなり小さくなる。ただし、抑制板が表面近くになるほど抑制効果が大きく現れることは定性的には計算でも実験でも同じである。

計算と実験の違いは計算では考慮していない効果の影響が実験で大きく現れていることを示す。考えられる要因の第一は渦であろう。抑制板先端では流れが剥離し、渦が生じることは容易に想像できるし、実際にタフトを用いた実験でその確認をしている。ただし、ここで強調しておきたいのは定量的には一致が十分ではなくても抑制板の存在によってスロッシングにポテンシャルエネルギーが蓄積していくことを妨げる効果が現れるということの予測はほぼ妥当であったということである。計算と実験の一致が十分であるということはある得ないという前提で抑制板の効果を予測して始めた研究であり、方向付けとしての意味はあったとはいえるであろう。

4.2 問題点の検討

つぎに計算と実験の一致の程度が高くない原因を検討する。前述したように渦が関与していることは間違いないと考えられるが、渦がどのようなプロセスで現象に関与しているのかを考える必要がある。仮説としてつぎの二つを考えた。

まずは渦の運動学的影響である。流体がタンク壁面に駆け上がる位相になるはずのときに渦運動の結果として駆け上がりとは逆に下向きの運動成分が生じる。このことはタフトを使った実験でも容易に確認される。この効果が液面変化の観測結果に直接反映されたのであろうというのが第一の仮説である。実際に流体の運動を観測しているところの仮説にはかなり妥当性があるという“感想”を強く抱かせるものがある。

つぎに、渦は結局のところエネルギーの散逸過程で現れるものであるから、渦が観測されるのは減衰がある証拠であると捉えて、図5では通常の振動で減衰が関与すると振幅が小さくなるという当然のことを観測しただけであるというのが第二の仮説である。振動学の立場からはこちらの方が単純で取り付きやすい。

第一の仮説を簡単に放棄しなかったのには理由がある。抑制板で水面を全部覆い尽くし、板と水との間に隙間がなければスロッシングは起きようもない。タンクと水はあたかも剛体のように一体になってふるまうであろう。この場合には減衰は一切関係がない。この研究で想定している抑制板にはここまでは極端ではないにしろ、方向としては同じような効果があると考えられるのである。

試みに図6に示す変位励振の1自由度系を用いて簡単な検討を行った。この系は強制変位が

$$u = U_0 \sin \omega t \tag{10}$$

という形で与えられれば

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = U_0(2\zeta\omega_n\omega\cos\omega t + \omega_n^2\sin\omega t) \tag{11}$$

と表すことができる。この式の減衰比 ζ は無減衰であれば0であるが、あるいはスロッシングの時刻歴の記録、たとえば図4の中央の図の加振停止後の減衰の様子から求めることができる。数値計算はテイラー級数法を用いて10周期加振の最大振幅を求めた。この手順はスロッシングの過渡応答を求める際のものと同じである。

このようにして求めた結果をスロッシングの各場合と比較したのが図7である。左側の列がスロッシングで破線がシミュレーション、実線が実験で得た結果で、この

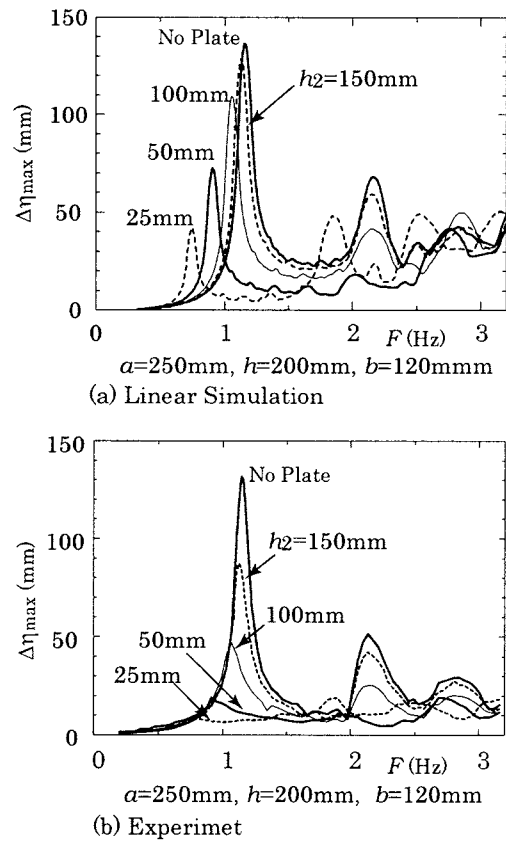


Fig.5 Results of Simulation and Experiment

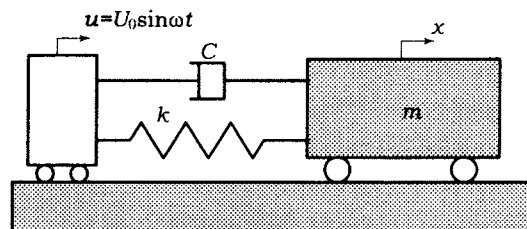


Fig.6 S-dof Model of Base Excitation

データそのものは図5を抑制板の深さ別に並べ直したものである。図7の右側の列は式(11)の1自由度系のシミュレーション結果で、左側のスロッシングの各場合に対応させてある。無減衰の場合と減衰がある場合を対比したのはスロッシングの結果と同様である。減衰比 ζ は対応するスロッシングの各場合の共振時のデータから得た値を用いた。1自由度系の無減衰の場合のピーク高さが対応するスロッシングのシミュレーションのピークに一致するように図の縮尺を調整してある。横軸は共振点を基準にした無次元振動数であるが、スロッシングの実際の現象も1Hz前後が共振なので比較はしやすい。

これらの図の1次の共振ピークを見る限りはスロッシングのシミュレーションと実験の差は減衰の有無で説明が付きそうである。

通常、渦がエネルギー散逸過程に関与することはよく知られているが、大きな規模の渦から規模の小さな渦にエネルギーが移り、そのプロセスの連鎖で分子規

模の運動までつながり、結局は熱運動に転化するというのが一般的な理解であろう。これに従う限りはスロッシングで生じた巨視的な渦の運動エネルギーが熱に変わるまでにはいくつかの過程を経る必要がある。それゆえ、渦が生じれば時間をおかずに直ちに減衰として現れるかどうかということに疑問を持ったのであるが、巨視的な渦が熱に変わる際にはいくつもの現象が並行的に進むので時間差ということを考える必要はほとんどないというのが図7の結果であろう。

以上の結果をみる限り、水平板の抑制作用はスロッシングモードにポテンシャルエネルギーが蓄積するのを妨げる効果と励起される渦の散逸効果の相乗作用とみるのが最も妥当と解釈されるのであるが、これで解決したというのは早計である。

4.3 粘性の影響

図8に水とグリセリン水溶液で行った定常加振の際の振幅変化を示す。実験装置は基本的には同じであるが、液深を $h=250\text{mm}$ 、抑

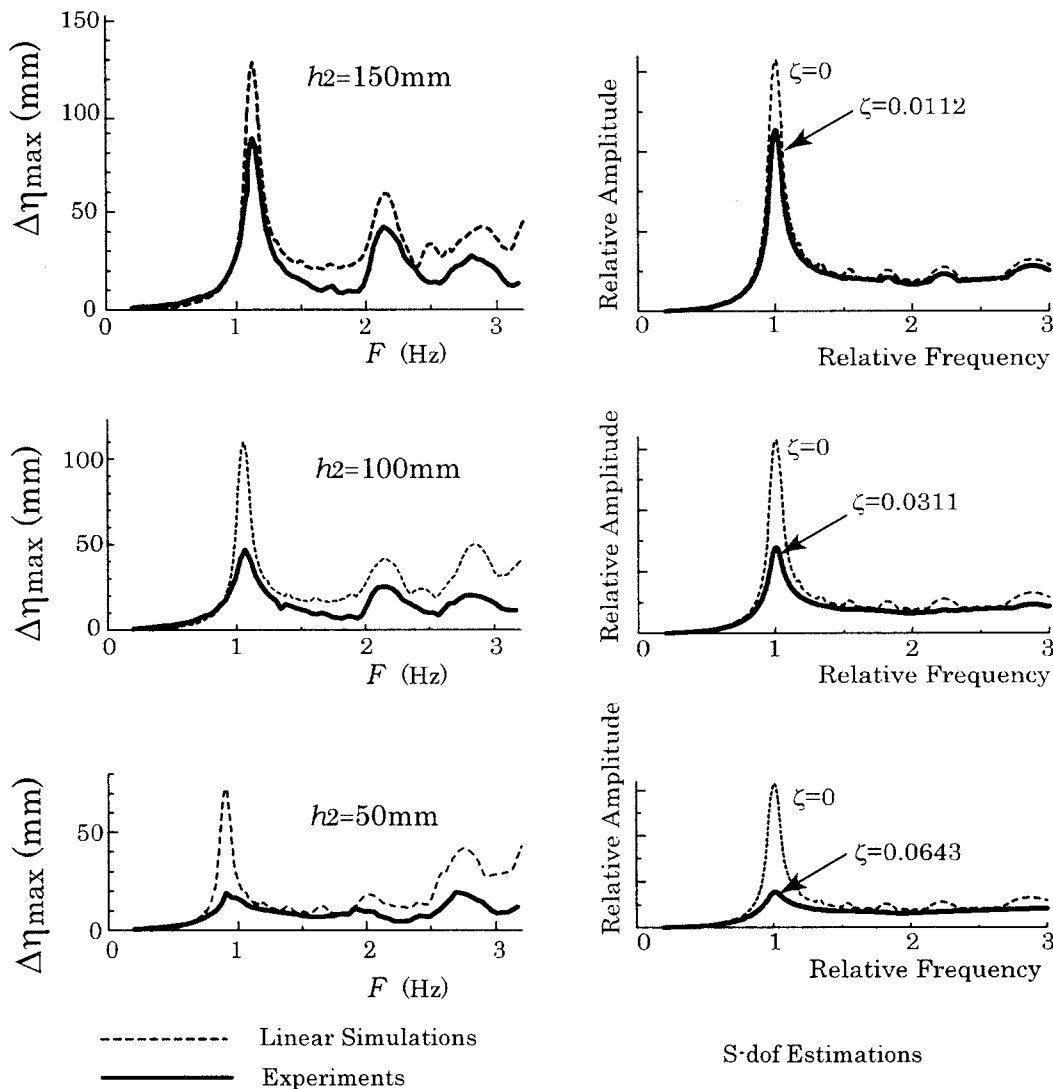


Fig.7 Comparison of Responses of Transient Sloshing and S-dof System with a Damper

制板幅を $b=50\text{mm}$, 抑制板には厚さ 3mm のステンレス板を用いている。

抑制板を設置しない時には明確に粘性の影響が現れている。しかし、抑制板があると水とグリセリン水溶液で少なくとも1次の共振振幅には明確な差は認められない。グリセリン水溶液の粘性は水のほぼ17倍である。

前節では渦の影響があることを示すような結果が得られることを述べたが、渦は液体のせん断変形を介して散逸に関わるはずである。そうであれば粘性が奇与しないはずはない。

この意味で前節の結果とここで述べた結果は同一線上で理解することが困難である。つまりは散逸のメカニズムについては解決を見ていないということになる。

5. 結 言

長方形タンクにおいて水平抑制板によるスロッシング抑制の検討をしてきた。抑制のメカニズムはポテンシャルエネルギーの蓄積を妨げるといういわば免震効果とエネルギー散逸、つまり減衰効果の相乗によると

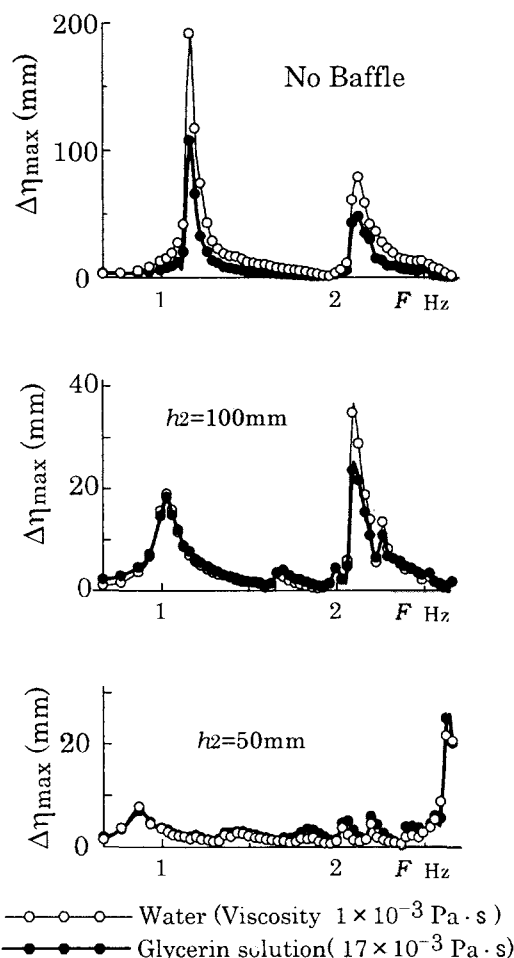


Fig.8 Effect of Liquid Viscosity on Steady Sloshing
($h=250\text{mm}$, $b=50\text{mm}$)

考えることは妥当である。しかしながら、散逸の機構については渦が関与していることは確かであるが、細部についてはまだ十分に理解し得たとは言いがたい状況にある。そのような状況であるにしても水平抑制板に強力なスロッシング抑制効果があることは明確なので、比較的規模の小さいタンクに対しては状況に合わせて水平抑制板を利用することを勧めたい。

一方、直径数十メートル以上の大規模石油タンクについてはここで述べた方法よりは確かな効果を持つ方法が存在すると考えている。低コストで、かつ施工がしやすいことが両立することを目標にその検討を現在進めている。

本報告の前半の実験には装置の作製を含めて2009年度卒研 西村 淳君の多大な貢献があった。また、それに先立って行われた2007年度の高氏正貴、平松直之君、2008年度の鈴木達也、室伏秀亮君らが先鞭をつけた実験結果が後半の検討に奇与している。他にも円形タンクで少し意味を変えた実験を行っているグループがいる。実験装置のほとんどを自作しながら研究に励んでくれたこれらの諸君に感謝の念を伝えたい。

スロッシングは振動現象としては特定の範囲に限られるが、装置作製を含めた研究の底に横たわる基礎知識は機械工学全般にわたる。これらの諸君が卒研を通して体験したことを技術者として成長していく際の糧にしてくれることを切に願うものである。

また、装置作製については行平憲一技術課長をはじめとする工作センターの方々に多大なご支援をいただいたことを記して感謝の意を表します。

文 献

- (1) Silverman, S. and Abramson H. N., Damping of Liquid Motions and Lateral Sloshing, NASA SP-106, (1966), pp.105-143, NASA.
- (2) Ibrahim, R.A., Liquid Sloshing Dynamics - Theory and Applications, (2005), Cambridge University Press, 90.
- (3) URATA, Y., A Method of Sloshing Suppression Using Horizontal Baffle Plate (A Fundamental Study on Sloshing in Rectangular Tanks), Transactions of the Japan Society Mechanical Engineers, Series C, Vol.75, No.749(2009), pp50-57.