

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04271

研究課題名(和文) 連結された直方体容器の多液面間で生じる局所液面揺動メカニズムの解明

研究課題名(英文) Localization characteristics of liquid oscillation in a rectangular container with a multi-liquid surface

研究代表者

高原 弘樹 (Takahara, Hiroki)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：90226910

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：容器内の液体が大きく揺動することを抑制する方法として、容器に隔壁を挿入する方法がある。直方体容器では、底まで届かない隔壁を用いて液面を分ける方法が使われるばあいがあり、この手法によって、隔壁に垂直な方向の加振による液面揺動が抑制できることが知られている。その一方で、隔壁に平行な方向の加振によって特定の液面に揺動が集中してしまう現象が確認されており、この現象は揺動の局所化と呼ばれている。揺動の局所化によって液面の振幅が局所化しないときより大きくなる場合もあることが報告されているが、この現象について、ほとんど分かっていない。そこで本研究では揺動の局所化現象の基本的な特性に着目して研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

液体を収めた容器は多方面に利用され、地震の多い我が国では、地震動を受けた場合でも容器の安全性の確保は、重要な課題である。液面振動を抑えるために、容器内に隔壁を設置する方法がよく用いられおり、その効果も実証されている。しかし、隔壁を設置することにより液面で分離された容器では、特定の励振条件で、隔壁を挿入したことにより、特定の液面に揺動が集中する揺動の局所化現象が生じ、局所化しない場合より液面揺動が大きくなる場合があることが確認されており、隔壁挿入によって危険性が増す可能性もあるが、その現象についてはまったく分かっておらず、その特性を把握することは液体貯槽の安全性の向上に寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：The characteristics of two surface liquid motions in a rectangular tank are investigated. The characteristics of multi-surface liquid oscillation are important, In the sloshing with multiple surfaces, it has been reported that each liquid surface vibrates with different amplitudes. These phenomena are called the localization of sloshing. However, to date, this phenomenon has not been elucidated at all. In this research, we focused on the fundamental characteristics of this phenomenon. The effects on localization by changing the size of the opening connecting the two liquid surfaces while keeping the size of the liquid surfaces constant are investigated. Through experiments, it was confirmed that localization of sloshing occurs even if the size of the opening is changed. Furthermore, when the size of the opening was changed, the frequency range where the localization occurs changed.

研究分野：振動工学

キーワード：液面揺動 液面揺動の局所化 非線形液面揺動

### 1. 研究開始当初の背景

隔壁等で液面を分離した容器(貯槽)では液面が複数となる。このような容器では特定の励振条件で、一つの液面のみが他の液面より大きく揺動する現象が報告されている。この現象の解明は、貯槽や容器の安全性向上への寄与が大きいと考える。しかしながら、このような多液面を有する容器内液面の揺動に関する研究は、隔壁に垂直な方向の励振を対象にして、隔壁による液面揺動の抑制に関する研究がほとんどである。非線形性に着目した揺動特性に関する研究も隔壁に垂直な方向の励振を対象としている。本研究で対象としている一方の液面のみが揺動するような液面揺動の局所化に関する研究はなく、液面揺動の局所化メカニズムは未解明である。

### 2. 研究の目的

多液面を有する容器内で生じる液面揺動局所化の基本的なメカニズムの解明を目指して、直方体容器に、底面まで達しない隔壁を挿入した容器内で生じる局所化現象に着目し、隔壁の位置、開口部の大きさ、液深等の条件が液面揺動の局所化の発生条件や、局所化時の液面揺動の大きさに与える影響を明らかにすることである。

### 3. 研究の方法

まず、二つの液面をつなぐ開口部の大きさを変更可能な多液面を有する直方体容器を作成した。液面揺動の固有振動数と固有モードを求めた。先行研究を参考に液面揺動が局所化すると予想される励振条件を設定して実験を行い、開口部や液深が局所化へ与える影響を調べた。以下にその手順を示す。

#### 3・1 多液面を有する直方体容器

本研究で着目した多液面を有する容器を図1に示す。図1(a)は全体図を示す。直方体容器に隔壁を挿入し、液面を二つに隔てている。容器の底面中央に原点をとり、各辺に平行となるように容器に固定された直交座標系  $o-xyz$  を設定する。容器は隔壁に平行な  $y$  方向に強制変位  $f_y(t)$  の励振を受けるとする。直方体容器は  $x$  軸方向の辺の長さを  $2a$ 、 $y$  軸方向の辺の長さを  $2b$ 、隔壁下端から容器底面までの距離を開口部の高さ  $c$ 、液面間の距離(隔壁の厚さ)を  $2d$ 、液深を  $h$ 、静止液面からの変位量を液位  $\eta(x, y, t)$  とする。隔壁の中央の  $x$  座標は  $0$  とする。解析モデルの断面図を図1(b)に示す。赤の領域は開口部を示す。液面間の距離  $2d$  と開口部の高さ  $c$  を変化させることにより開口部の大きさを変える。液面揺動の固有振動数を求める際には、液体は非圧縮渦なし完全流体と仮定する(参考文献)。

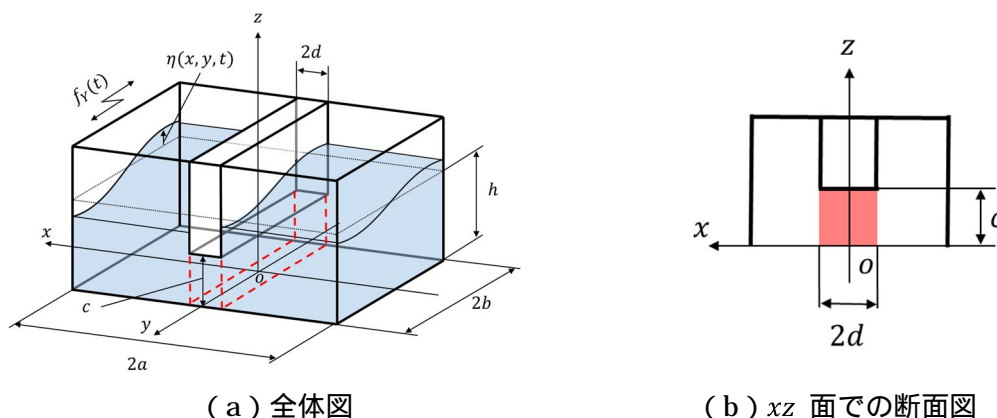


図1 多液面を有する直方体容器

#### 3・2 実験で用いる直方体容器の大きさ、および、固有振動数と固有モード形状

強制加振実験で用いる容器に対応した解析パラメータを表1に示す。両家鬼面の面積を一手に保ちながら、容器は開口部の高さ  $c$  を3通り、液面間の距離  $2d$  を3通りと変化させた。本研究

では「 $y$ 方向に $m$ 次のモードの中で振動数の昇順に $n$ 番目のモード」を「 $(m,n)$ モード」と呼ぶことにする。

解析パラメータに対し境界要素法を用いた解析結果としてモード形状と対応する固有振動数を図2と表2に示す。

図2は開口部の高さ  $c=75$  mm、液面間の距離  $2d=100$  mm におけるモード形状である。図2(a), (b)は揺動の局所化に関する(1,0)モード, (1,1)モードのモード形状を表す。 $x$ が正の領域にある液面を液面1,  $x$ が負の領域にある液面を液面2と定義すると, 図2(a), (b)の右側の液面は液面1であり, 左側の液面は液面2となる。液面1と液面2の間の空間は隔壁を示している。(1,0)モードは二液面がともに $y$ 方向逆対称1次形状で互いに同位相で振動しており, (1,1)モードは二液面がともに $y$ 方向逆対称1次形状で互いに逆位相で振動している。解析パラメータの残り8パターンにおいても解析を行ったが, モード形状に大きな変化が見られないため他のモード形状は割愛する。揺動の局所化は励振により直接励起される(1,0)モードと非線形性による連成により同時に成長する(1,1)モードの重ね合わせで発生すると考えられている(参考文献)。

表1 使用したパラメータ

	Analytical parameters
$2a$	250,330,430 mm
$2b$	160 mm
$c$	45,75,105 mm
$2d$	20,100,200 mm
$h$	150 mm

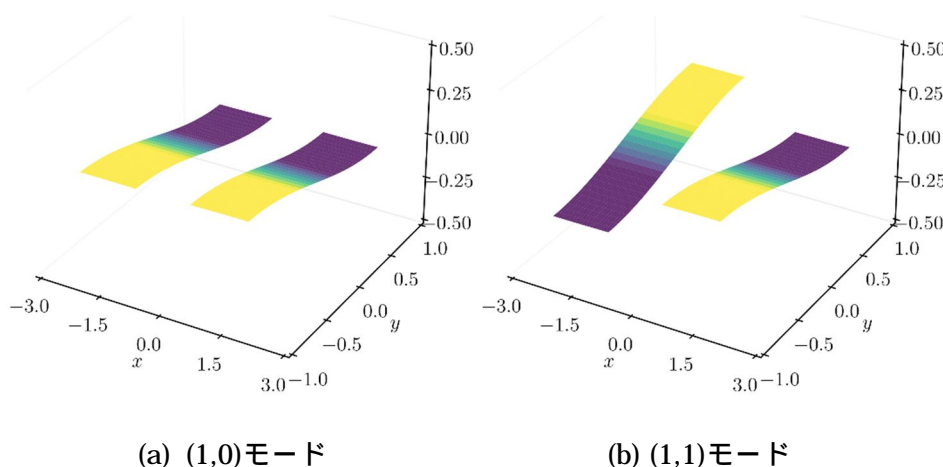


図2 液面揺動の固有モード形状

表2 固有振動数

	$c=45$ mm (1,0), (1,1)	$c=75$ mm (1,0), (1,1)	$c=105$ mm (1,0), (1,1)
$2d=20$ mm	2.205, 2.212 Hz	2.208, 2.224 Hz	2.216, 2.263 Hz
$2d=100$ mm	2.208, 2.209 Hz	2.214, 2.217 Hz	2.233, 2.241 Hz
$2d=200$ mm	2.208, 2.209 Hz	2.215, 2.215 Hz	2.237, 2.238 Hz

### 3・3 揺動実験の方法

容器に挿入された隔壁に平行な $y$ 方向に水平調和励振を行う。励振開始直後は, 水平励振により, (1,0)モードだけが成長し, 両方の液面は同振幅・同位相で振動する。局所化が生じる場合には, 励振時間の経過とともに, (1,1)モードが非線形連成によって成長をはじめ, 定常状態では, どちらか一方の液面だけが大きく揺動する液面揺動の局所化が生じる。

#### 4. 研究成果

開口部の高さ  $c$  と液面間の距離  $2d$  を変化させたときの、線形自由振動解析により求めた固有振動数近傍で励振した周波数応答曲線の代表例を示す。

##### 4.1 両液面の液位と振幅比の周波数応答

両液面の液位の片振幅と振幅比の周波数応答を示す。定常状態である加振開始から 296-300 秒における液位の最大値と最小値の差を 2 で割った値を液位の片振幅とする。定常状態の液位  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  のうち片振幅が大きい液位  $\eta_{max}$ , 小さい液位を  $\eta_{min}$  とする。 $\eta_{max}$ ,  $\eta_{min}$  をフーリエ変換しパワースペクトルを求め、励振振動数に一番近い振動数のスペクトル値をそれぞれ  $\hat{\eta}_{max}$ ,  $\hat{\eta}_{min}$  とし  $\hat{\eta}_{max}/\hat{\eta}_{min}$  を振幅比とした。

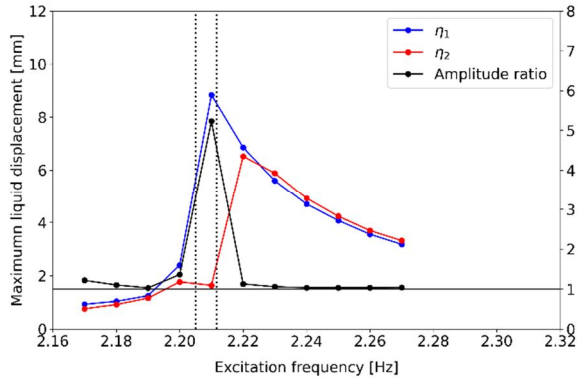


図 3 液面揺動の周波数応答曲線  
( $2d=20$  mm,  $c=45$  mm)

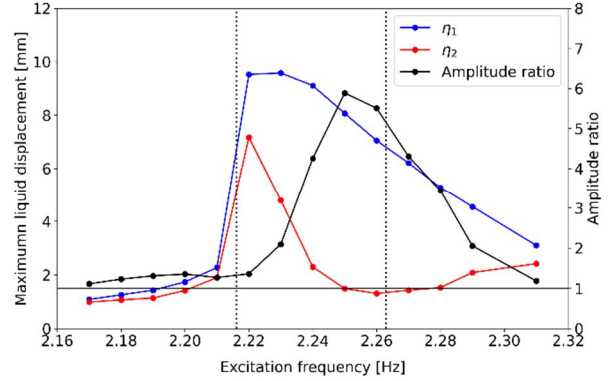


図 4 液面揺動の周波数応答曲線  
( $2d=20$  mm,  $c=105$  mm)

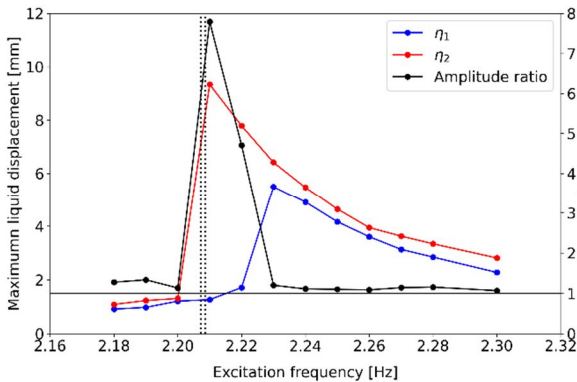


図 5 液面揺動の周波数応答曲線  
( $2d=100$  mm,  $c=45$  mm)

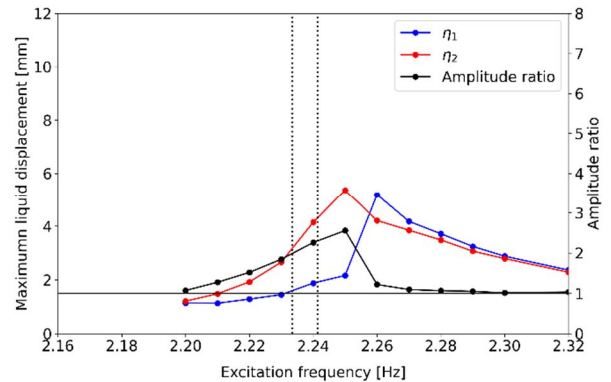


図 6 液面揺動の周波数応答曲線  
( $2d=100$  mm,  $c=105$  mm)

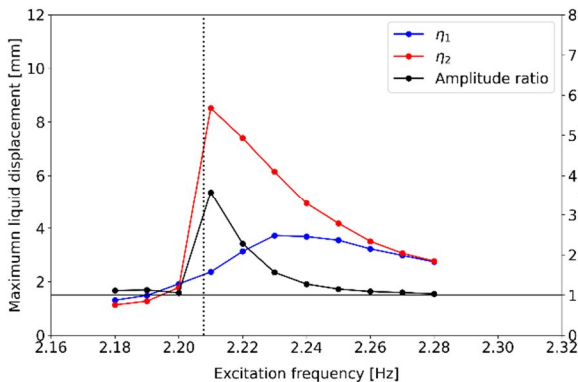


図 7 液面揺動の周波数応答曲線  
( $2d=200$  mm,  $c=45$  mm)

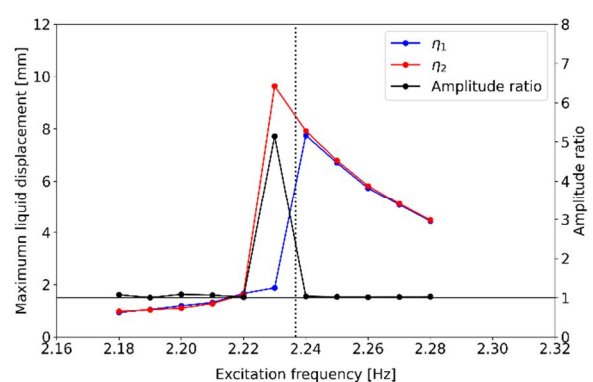


図 8 液面揺動の周波数応答曲線  
( $2d=200$  mm,  $c=105$  mm)

図 3, 4 は液面間の距離  $2d=20$  mm, 開口部の高さ  $c=45, 105$  mm における結果, 図 5, 6 は液面間の距離  $2d=100$  mm, 開口部の高さ  $c=45, 105$  mm における結果, 図 7, 8 は液面間の距離  $2d=200$  mm, 開口部の高さ  $c=45, 105$  mm における結果にそれぞれ対応する。左縦軸は液位の片振幅, 右縦軸は振幅比, 横軸は励振振動数である。実験値を点でプロットし, それぞれを直線でつないだ。青線は液位 $\eta_1$ の片振幅, 赤線は液位 $\eta_2$ の片振幅, 黒線は振幅比である。垂直な黒色の 2 本の点線は, 左側は(1,0)モード, 右側は(1,1)モードの固有振動数を示す。液面間の距離  $2d=200$  mm では, それぞれの固有振動数の差が 0.001 Hz 程度ととても小さいため(1,0)モードの固有振動数のみを点線で示す。水平な黒線は振幅比が 1 であることを表す。

振幅比が大きいときその液面揺動は局所化が大きいと定義する。容器形状や液位測定の影響があるため便宜上振幅比が 2 倍以上になる振動数の範囲が広いとき局所化したと定義する。

図 3 から図 8 より励振振動数が 2 つの隣接する固有振動数近傍で片方の振幅が小さくなり, 他方の振幅が大きくなった。振幅比は 2 つの隣接する固有振動数近傍で大きくなった。

液面間の距離  $2d=20$  mm のときの実験結果から, 開口部の高さ  $c=105$  mm では(1,0)モードと(1,1)モードの固有振動数の間の 2.25, 2.26 Hz のときに液面 1 と液面 2 の液位の振幅比が 5 倍以上になり局所化が大きい。開口部の高さ  $c$  を大きくすると振幅比が 2 倍以上になる振動数の範囲が広くなり, 局所化しやすくなる傾向が得られた。

次に, 液面間の距離  $2d=100$  mm のときの実験結果(図 6, 7, 8)から, 開口部の高さ  $c=45$  mm では(1,1)モードの固有振動数より少し高い 2.21 Hz のときに,  $c=75$  mm では 2.22 Hz のときに振幅比が 5 倍以上になり局所化が激しい。開口部の高さ  $c=105$  mm の場合, 2.25 Hz のときに振幅比はそれほど大きくなり 2.56 倍になり局所化は生じていると考えられる。

液面間の距離  $2d=200$  mm のときの実験結果から, 開口部の高さ  $c=45$  mm では(1,1)モードの固有振動数より少し高い 2.21 Hz のときに 3.58 倍になり,  $c=105$  mm では(1,0)モードの固有振動数より少し低い 2.23 Hz のときに 5.14 倍になり局所化が大きい。

開口部の高さが小さい  $c=45$  mm (図 3, 5, 7) のとき, 液面間の距離を大きくすると局所化しやすくなる傾向が得られた。逆に, 開口部の高さが大きい  $c=105$  mm (図 4, 6, 8) のとき, 液面間の距離を大きくするにつれて局所化しにくくなる傾向がある。

#### 4・3 局所化に対する開口部の大きさの影響について

励振振動数を変化させたとき, 固有振動数近傍のときに振幅比が大きくなり局所化が発生し, 固有振動数から離れた場合はそれらが小さくなり局所化が生じない。

液面間の距離が短いとき, 開口部の高さが大きくなるほど局所化しやすくなる傾向や, 液面間の距離が長いとき, 開口部の高さが大きくなるほど局所化しにくくなる傾向がある。

開口部の高さが小さいとき, 液面間の距離が大きくなるほど局所化しやすくなる傾向や, 開口部の高さが大きいとき, 液面間の距離が大きくなるほど局所化しにくくなる傾向がある。

開口部の大きさの変化による局所化が生じた場合の局所化の大きさは同程度であった。

#### < 引用文献 >

木村康治, 高原弘樹, 田村晋司, 廣瀬雄一, 多液面を有する直方体容器内液面の三次元自由振動特性, 日本機械学会論文集, Vol.75, No.754, pp.1568-1574, 2009

高原弘樹, 青柳仁, 中野寛, 多液面を有する直方体容器内液面の三次元非線形揺動(液面を分ける隔壁に平行な励振に対する液面揺動), 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2015 USB 論文集, No.602

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------