

水の入った円筒タンクの水平振動実験

鹿児島大学工学部

中村 達哉

はじめに

水の入った円筒タンクに周期的な水平方向の外力を加えると、円筒の断面が正円でなくなる周方向の高次振動モード(周方向フーリエ展開次数 $N=2,3,\dots$)が生起する現象が観測される。また、ある特定の振動数領域において、外力振動数の1/2倍などの分数調波振動が大振幅の振動として分岐する現象など、線形の振動応答では説明できない振動現象が観測される。これらの原因を明らかにするために、広範囲の外力振動数領域のもとで、この円筒タンクに水平方向周期外力を加える振動実験が行なわれている。皆川は、幾何学的非線形を考慮した理論解析により、これらの現象が生起することを報告していると同時に、水平振動実験および理論解析から得られた結果の比較も行なっている。ここでは、詳細な振動実験から得られた結果を示し、分数調波振動が生起する要因について述べる。

キーワード: タンクの振動 水平振動実験 振動モード 分数調波振動

1. 実験概要

電磁式の加振器、振動台(寸法200mm×200mm)および測定装置から構成される実験装置に、円筒タンク供試体を設置して、実験を行なった。

1-1. 供試体

供試体は厚さ0.51mmの塩化ビニール・フィルムを用いて作製された直径84.4mm、高さ200mmの円筒シェルである。供試体上部には厚さ8mmの亚克力製のふた、下部にはアルミニウム製の基盤が取り付けられた。塩化ビニール・フィルム製の円筒シェルと亚克力製のふた、およびアルミニウム製の基盤とは、亚克力樹皮系の接着剤を用いて接合した。また、塩化ビニールフィルムの接着には、シアノアクリレート系接着剤が用いられた。亚克力製のふた、およびアルミニウム製の基盤が取り付けられた供試体は、ボルトを用いて振動台に接合された。本実験で用いた供試体(Mv24)の寸法および重量をTable 1に示す。

1-2. 測定位置

変位、およびひずみの測定位置をFig.1に示す。タンク、および振動台の変位応答は非接触型の微小変位計を用いて、4箇所測定された。振動台の加振方向のタンク底部から高さ190mm(0°-Top) および100mm(0°-Middle)の位置、加振方向と直角の位置にあるタンク底部から高さ100mm(90°-Middle)の位置、および振動台である

Table 1 Size and Mass of Specimen(Mv24)

Size(mm)					Mass(g)			
Diameter	Height	Overlap Width	Thickness	Overlap Thickness	Shell	Acrylic Lid	Aluminium Base	Total
84.4	200.0	5.0	0.5	5.0	38.7	51.3	543.4	655.2

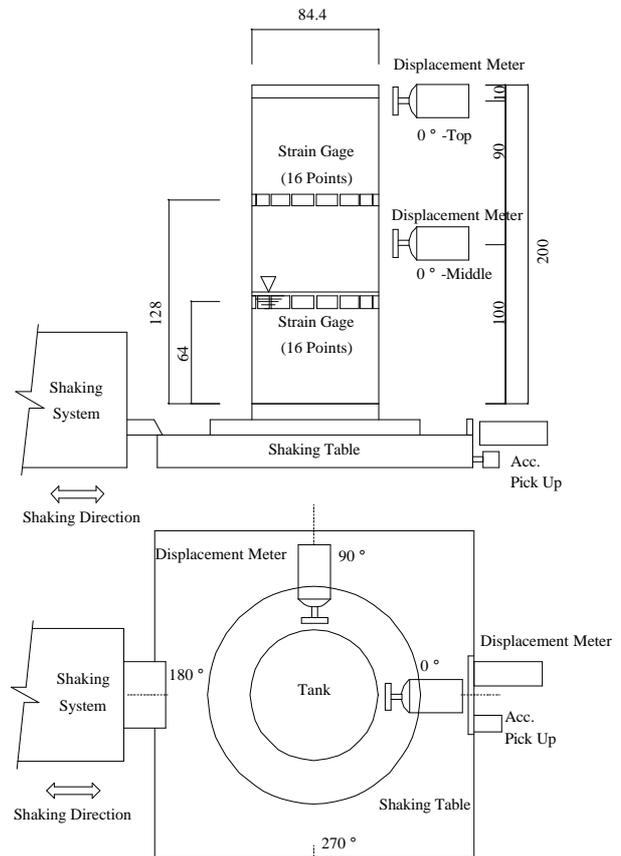


Fig.1 Points of measurement of Displacement and Strain

る。タンクのひずみ応答は、タンク底部から高さ64mm、および128mmの位置にそれぞれ等間隔に16枚ずつ貼付されたひずみゲージを用いて測定された。また、振動台の加速度は圧電式の加速度計を用いて測定された。

1-3. 測定手法

測定装置の関係をFig.2に示す。供試体への加振

1:Prob(IWATSU ST-0505)
 2,3,4:Prob(IWATSU MDC-641)
 5:Pick up(RION PV-90A)

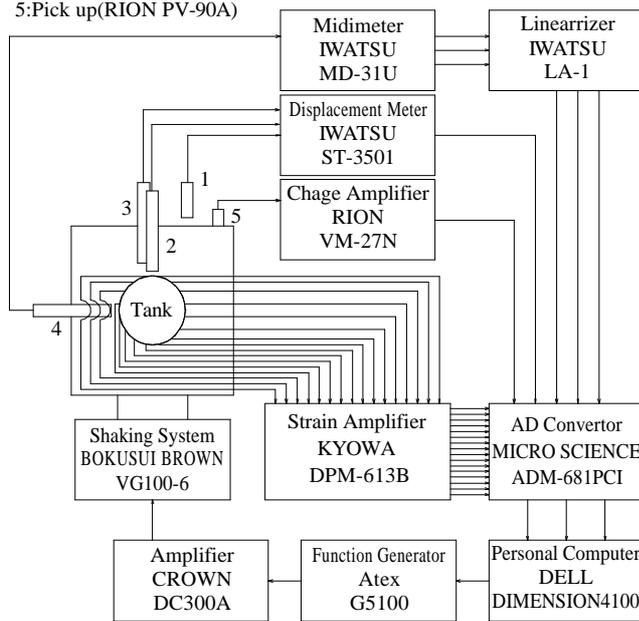


Fig.2 Connection of Experiment Devices

は、ファンクション・ジェネレーターから正弦波を発振させ、それをアンプで増幅させた後、電磁式加振装置へ入力し、振動台を振動させて行なった。水平振動台、および円筒タンク供試体の応答は、パソコンで制御された3枚のAD変換ボードでデジタル量に変換された後、キャリブレーションデータを用いて即座に応答量に変換された。円筒タンクのひずみゲージのデータは、FFTを利用して有限フーリエスペクトルに分解された。

2. 実験結果

円筒タンク内の水高を0mmから190mm、振動数領域[720-30](Hz)を2Hz刻みで変化させて振動実験を行なった。振動台の外力加速度は0.5g、1.0g、および2.0gとした。ここでは、円筒タンクの周方向のフーリエ展開次数N=0から7までの振動モードと、基本振動成分、および1/2倍の分数調波振動成分を組み合わせた応答曲線を示す。

2-1. 基本振動成分

円筒タンク内の水高を70mmとし、外力加速度の実効値を0.5gとしたときの、基本振動成分(外力と同一の振動数を有する振動成分)のひずみ応答曲線、および変位応答曲線をFig.3、Fig.4に示す。応答曲線の縦軸は、ひずみ応答曲線では振幅(m)、変位応答曲線では変位(mm)であり、横軸は振動数(Hz)である。ひずみ応答曲線の記号 \circ 、および \square は、それぞれタンク底部から高さ64mm、および128mmの位置に貼付されたひずみ応答に対応している。以後に示されるひずみ応答曲線において、すべて同様の記号を用いる。図中の w_{12} は、解析か

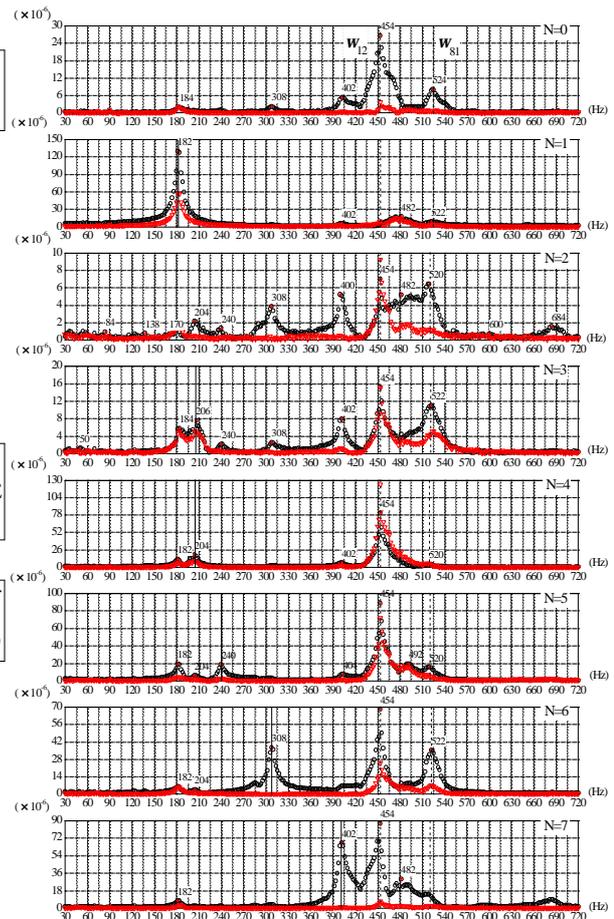


Fig.3 Strain-Frequency Curves for each N of the Fundamental Oscillation Component (Mv24,Shell Diameter 84mm,Water Height 70mm,Shaking Table Acceleration 0.5g)

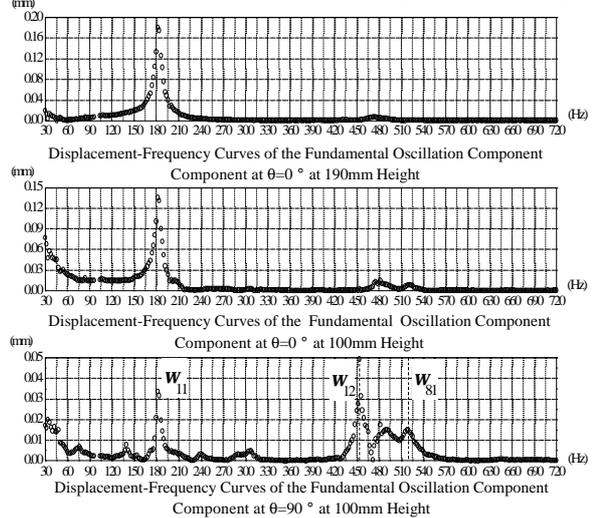


Fig.4 Displacement Responses of the Fundamental Oscillation Component (Mv24,Shell Diameter 84mm,Water Height 70mm,Shaking Table Acceleration 0.5g)

ら得られた周方向展開次数N=1の2番目の固有振動数、 w_{81} は実験結果をもとに推定した、周方向展開次数N=8の最小固有振動数に対応している。応答曲線から、周方向展開次数N=1,3,4,5,6,7の振動モードに対応する最小固有振動数は、それぞれ182Hz、206Hz、204Hz、240Hz、308Hz、402Hzと算定された。その他の水高においても同様に、実験から得られたデータから作成された応答曲線を

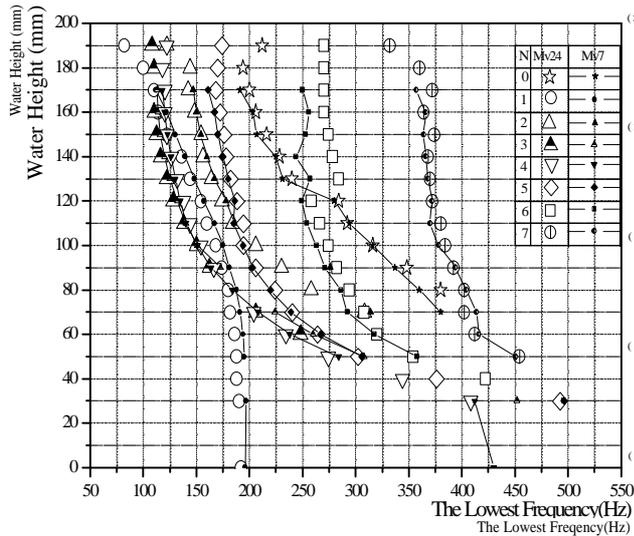


Fig.5 Water Heights vs the Lowest Frequencies Each Circumferential Fourier Number N (Mv24)

もとに固有振動数を算定した。

2-2 . 水高の変化に伴う固有振動数の推移

外力加速度を0.5gとし、円筒タンク内の水高を0mmから190mmまで10mm刻みで変化させ振動実験を行い、得られたデータをもとに作成された応答曲線から算定された周方向展開次数N=0から7までの最小固有振動数をFig.5に示す。また、過去に行なわれた実験結果²⁾(Mv7)から算定された最小固有振動数もあわせて示す。グラフの縦軸はタンク内の水高(mm)、横軸は振動数(Hz)である。図中の大きな記号による散布図は、今回の実験結果(Mv24)より算定された最小固有振動数である。周方向展開次数N=6以外の最小固有振動数は、過去の実験結果と比較的近い値を示していることがグラフから読み取れる。

2-3 . 1/2倍の分数調波振動成分

円筒タンク内の水高を70mmとし、外力加速度を1.0g、2.0gとしたときの、1/2倍の分数調波振動成分(外力振動数の1/2倍の振動数を有する振動成分)のひずみ応答曲線をFig.6、Fig.7に示す。これら2つの応答曲線より、外力振動数494Hz近傍において、周方向展開次数N=5を主要のモードとする1/2倍の分数調波振動の生起がみられた。そのときの最大のひずみ応答は、外力加速度1.0gのもとで633(m)、外力加速度2.0gのもとで826(m)まで達している。加速度の増加に伴い、最大のひずみ応答も増加していることがわかる。

2-4 . 1/2倍の分数調波振動の分布

外力加速度2.0gのもとで観測された1/2倍の分数調波振動が生起した領域(不安定領域)をFig.8に示す。グラフの縦軸はタンク内の水高(mm)、横軸は振動数(Hz)である。図中の右下斜線、左下

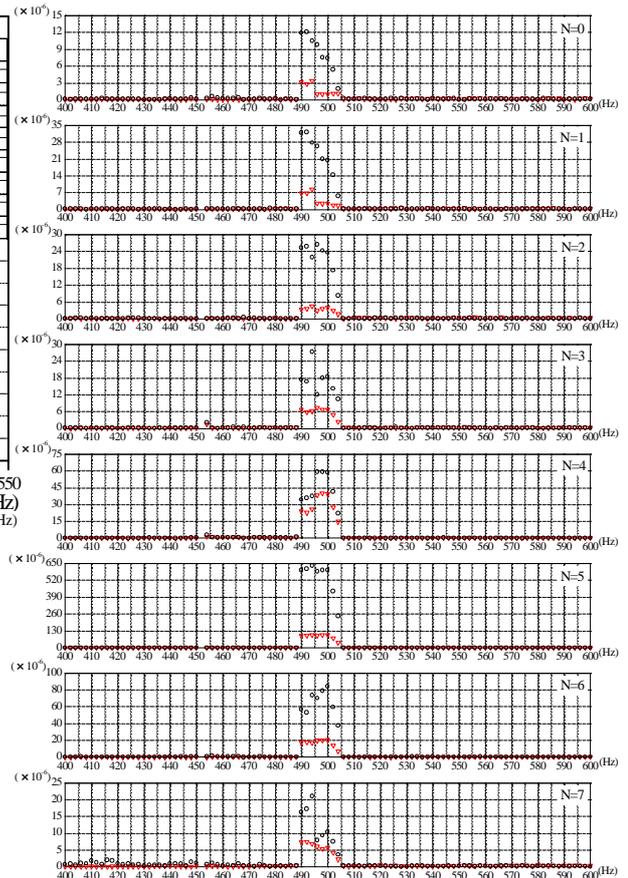


Fig.6 Strain-Frequency Curves for each N of the 1/2-subharmonic Oscillation Component (Mv24, Shell Diameter 84mm, Water Height 70mm, Shaking Table Acceleration 1.0g)

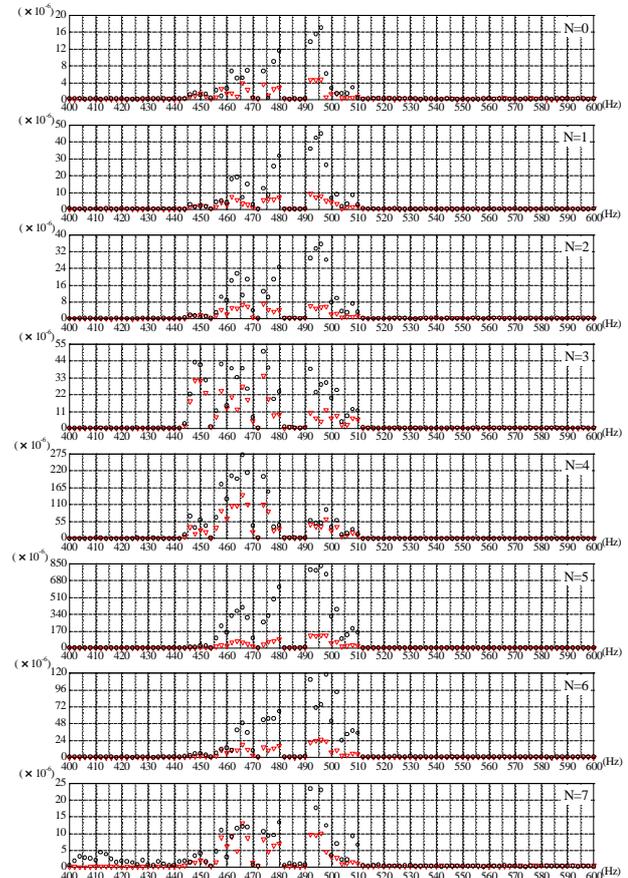


Fig.7 Strain-Frequency Curves for each N of the 1/2-subharmonic Oscillation Component (Mv24, Shell Diameter 84mm, Water Height 70mm, Shaking Table Acceleration 2.0g)

斜線、および水平線は、それぞれ周方向展開次数 $N=4, 5$ 、および6に対応する不安定領域をあらわしている。また、周方向展開次数 $N=4, 5, 6$ の最小固有振動数を2倍した振動数の曲線 ($w_{N1} * 2$)と、 $N=1$ の小さいほうから2番目の固有振動数 (w_{12}) および $N=8$ の最小固有振動数 (w_{81}) をあわせて示す。 w_{12} 、および w_{81} に対応する曲線が、各モードの2倍の固有振動数 ($w_{N1} * 2$) の曲線に接近している場合、その近傍において不安定領域が現れる傾向がみられた。 w_{12} と $w_{N1} * 2$ ($N=4, 5$) の曲線が接近する水高60mmから80mmの500Hz近傍では、 $N=4$ および5を主要なモードとする1/2倍の分数調波振動が生起するのが観測された。また、 w_{81} と $w_{61} * 2$ の曲線が接近する、水高が120mmを超える実験においては、外力振動数500Hz近傍において、周方向展開次数 $N=6$ を主要なモードとする1/2倍の分数調波振動が生起するのが観測された。

2-5. 1/2倍の分数調波振動と外力加速度の関係

1/2倍の分数調波振動が観測された水高60mmから80mmの500Hz近傍において、不安定領域の分布と外力加速度の関係を Fig.9から Fig.11 に示す。縦軸は外力加速度の実効値 (g)、横軸は振動数 (Hz) である。図中の斜線部分は、Fig.8と同様である。それぞれの不安定領域内での塗りつぶされている振動数は、ひずみ応答が領域内で最大であることを表す。今回の実験では、外力加速度の実効値を0.5g、1.0g、および2.0gとした。水高60mm、および水高70mmのグラフから、加速度の増加に伴い、不安定領域の生起の分布が拡大していることがわかる。また、 $w_{51} * 2$ と w_{12} の振動数がほぼ一致している水高80mm (Fig.11) では、前者の2つよりも低い外力加速度 (0.5g) においても、1/2倍の分数調波振動の生起がみられた。

3. まとめ

w_{12} と $N=4$ および5の最小固有振動数の2倍の振動数 ($w_{N1} * 2$) が接近する振動数領域近傍に、不安定領域がみられた。また、 w_{81} と w_{61} の2倍の振動数が近接する振動数領域において、 $N=6$ のモードを有する1/2倍の分数調波振動の出現がみられた。これらのことから w_{12} と w_{81} が不安定領域の生起に関係していると推測される。今回の実験結果をもとに推測した w_{81} が、周方向展開次数 $N=8$ に対応するモードであることが、ポテンシャル流体と容器との動的相互作用場の解析⁹⁾から判明している。今後は、円筒タンクのひずみゲージの枚数を増やし、このモードを水平振動実験のデータから確認する必要がある。

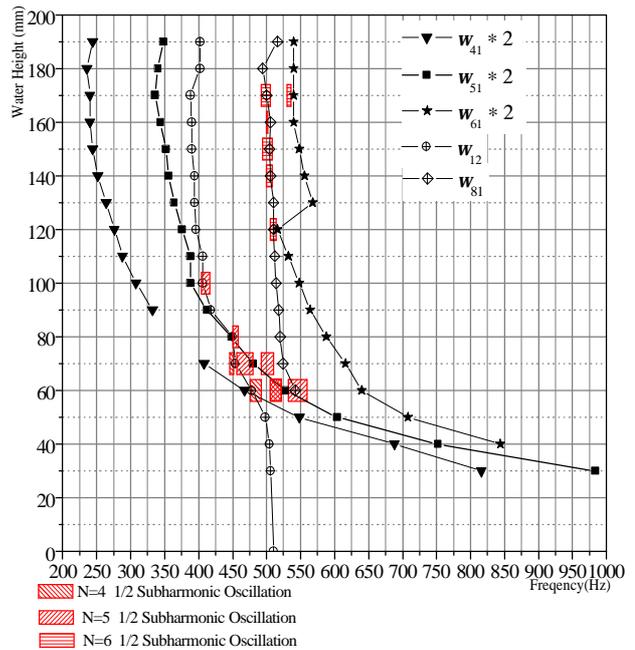


Fig.8 Water Heights vs Instability Regions for Subharmonic Oscillation Components (Mv24,2.0g)

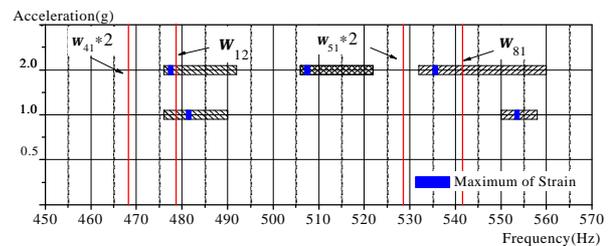


Fig.9 Acceleration Magnitude vs Instability Regions for Subharmonic Oscillation Components (Mv24, Water Height 60mm)

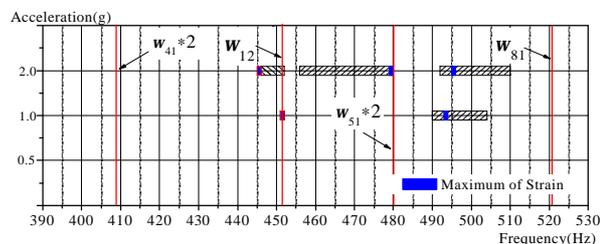


Fig.10 Acceleration Magnitude vs Instability Regions for Subharmonic Oscillation Components (Mv24, Water Height 70mm)

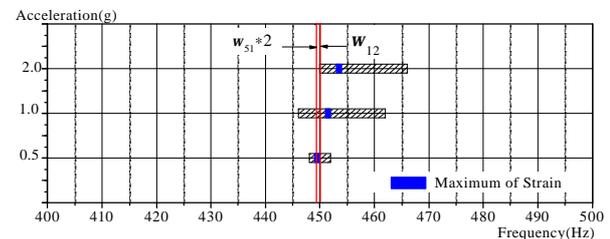


Fig.11 Acceleration Magnitude vs Instability Regions for Subharmonic Oscillation Components (Mv24, Water Height 80mm)

参考文献

- 1) 皆川洋一：日本建築学会構造系論文報告集第435号、pp.91-107、1992年5月
- 2) 末広康之、皆川洋一：日本建築学会大会学術講演梗概B-1構造、pp.553-554、1995年10月
- 3) 嶋本耕三、皆川洋一：日本建築学会九州支部研究報告第44号、pp.561-564、2005年3月
- 4) 中村達哉、皆川洋一：日本建築学会大会学術講演梗概B-1構造、pp.829-830、2005年9月