

I-8

液体を満たした薄肉弾性円筒殻のカオスの応答

(財)電力中央研究所 正会員 豊田幸宏
(財)電力中央研究所 増子芳夫

1. はじめに 近年、各種プラントの容器、石油タンク等の円筒構造物は、大型化、薄肉化の趨勢にあり、それら構造物の動的安定問題を解明することは、工学上重要である。従って、薄肉円筒殻の動的挙動に関し、従来より数多くの研究がなされている。それらの中で、液体を満たした薄肉円筒殻に関し、振動外力が比較的大きい場合に、応答がカオス状態となることが報告されている^{1, 2)}。しかしながら、これらの実験的研究は、限られた条件での結果を示しており、未だ不明点が多い。

本研究は、振動外力が比較的大きい条件下における薄肉円筒容器と内部液体との非線形連成動的挙動を実験的に明らかにすることを目的とする。本報では、液体を満たした円筒容器を水平方向に正弦波加振した場合の容器の応答が、加振加速度の増加に伴い、周期的な応答からカオスの挙動へと遷移する過程を示す。

2. 実験方法 実験に用いた円筒模型を図1に示す。模型は、板厚 0.188mm のポリエステルフィルムを半径 $R=170\text{mm}$ になるように軸線に沿って重ね合わせて接着し、下端を低融点合金により固定したものである。使用したフィルムの材料定数を表1に示す。なお、内部液体には、水道水を用い、本実験では、水位は一定とし、円筒容器底面上より 220mm とした。

実験装置の概略を図2に示す。計測項目は、振動台入力加速度と円筒胴部面外変位とし、変位計測には、渦電流式非接触変位計を使用した。計測されたアナログ信号は、AD変換ボードを介してパソコンに収録されるとともに、FFTアナライザにも入力され周波数分析をオンラインで実施した。

加振には、(財)電力中央研究所が所有する水平・上下2軸小型電磁式振動台(振動台テーブル寸法 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 、最大積載重量 300kgf)を用い、加速度制御による水平方向正弦波加振を行った。

実験においては、まず、模型の周波数応答特性を調べるために、正弦波掃引加振を実施した。次に共振振動数を加振振動数とした条件で、入力加速度振幅を段階的に増加させ、模型の応答が、周期的な運動からカオスの挙動へと遷移する様子を調べた。なお、正弦波掃引加振時における加振振動数の掃引速度は、 0.05Hz/sec とした。

3. 実験結果 図3に円筒胴部の時刻歴波形ならびにパワースペクトルを示す。これらによれば、入力加速度振幅が小さい場合には、調和振動であり、周波数成分も共振振動数($f_0=48\text{Hz}$)が卓越しているが、入力が増大すると周期性が乱れ、周波数成分も $f_0/2$ 、 f_0 、 $3f_0/2$ 、 $2f_0$ …の成分が見られ複雑な応答となっている。図4に、円筒胴部の振動挙動の分岐図を示す。この図は加振加速度場の位相が 2π のときの円筒胴部の変位振幅量を縦軸にプロットしたものである。これによれば、入力が小さい領域では、円筒胴部は、1つの周期で振動するため一定の位置にあり、入力が増加するとサブハーモニック分岐が発生し、2つの値をとっている。さらに入力が増加すると応答の周期性が崩れ、種々の変位振幅値をとることがわかる。このような振動挙動は、遷移がサブハーモニック分岐を示すことからストレンジアトラクタの存在を示唆している。一般にアトラクタを調べる場合には、適当な n 次元位相空間での軌道を見る必要がある。ここでは、 $\{X(t), X(t+\tau)\}$ の位相平面における軌道¹⁾を組み立てた。図5~7に相平面図を示す。加振加速度振幅が 20gal の場合には、安定な周期アトラクタである。加振加速度振幅が 40gal になると軌道が変形し、分岐の発生したことを示している。さらに入力が増大すると軌道は同じ道を通らず、軌道が平面上に広がる強い軌道不安定性を示している。図7に対応するポアンカレ断面図(図8)からも軌道の不安定性が確認でき、応答がカオス的であることがわかる。

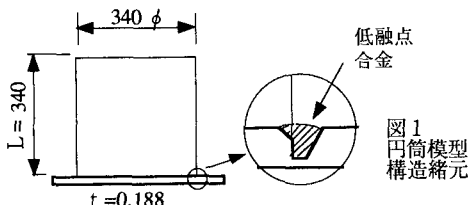


表1 ポリエステルフィルム材料定数

ヤング率 $E(\text{kgf/mm}^2)$	重量密度 $\rho(\text{kgf/mm}^3)$	ポアソン比 ν
4.84×10^2	1.41×10^{-6}	0.30

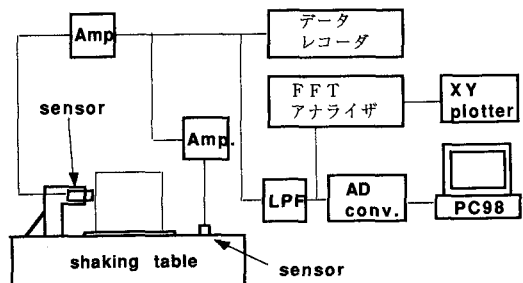
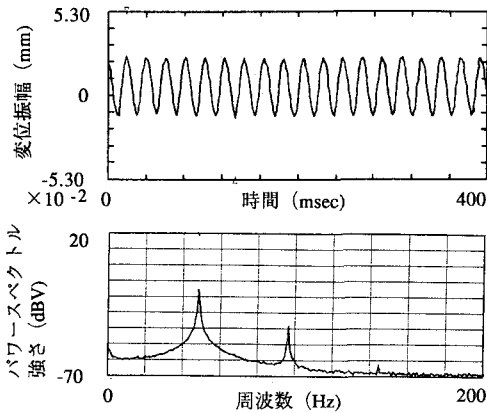
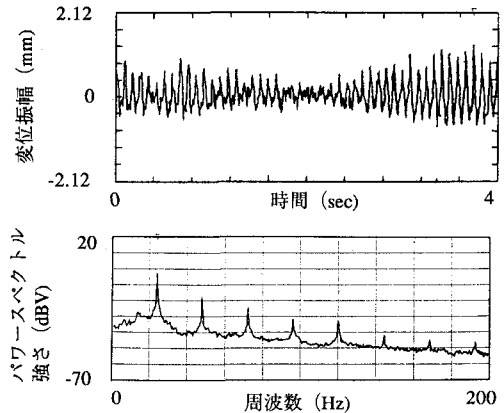


図2 実験装置の概略



(1) 入力加速度振幅 $a=20\text{gal}$



(2) 入力加速度振幅 $a=450\text{gal}$

図3 変位応答の様相 (加振振動数 $f=48\text{Hz}$)

4. まとめ 液体を満した薄肉円筒殻の非線形動的挙動に関し、比較的大きな加振入力の場合に、カオスの振動挙動が存在することが実験的に確認できた。

<参考文献>

- 1) S. Ciliberto and J.P. Gollub: Chaotic mode competition in parametrically forced surface waves, J. Fluid Mech., Vol.158(1985)
- 2) M. Chiba, J. Tani et al.: Dynamic stability of liquid-filled cylindrical shells under horizontal excitation, Part I: Experiment, J. Sound and Vib., Vol.104(1986)

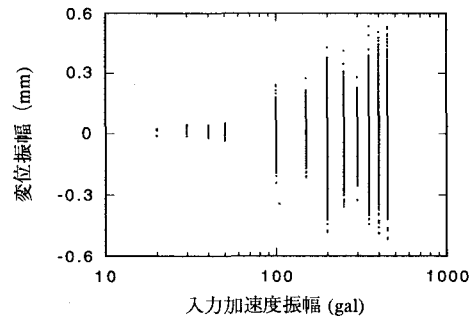


図4 変位応答の分岐図 $f=48\text{Hz}$

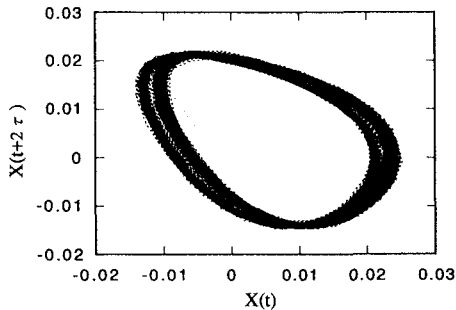


図5 相平面図 $f=48\text{Hz}$ $a=20\text{gal}$

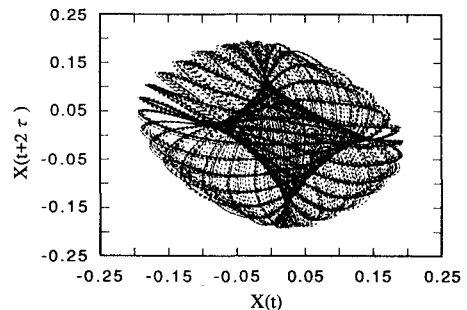


図6 相平面図 $f=48\text{Hz}$ $a=40\text{gal}$

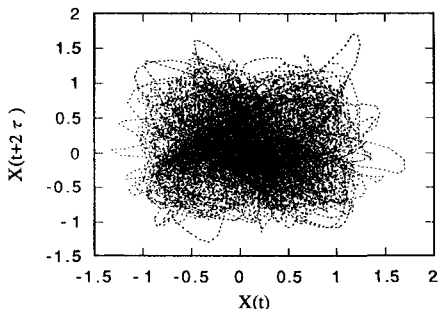


図7 相平面図 $f=48\text{Hz}$ $a=450\text{gal}$

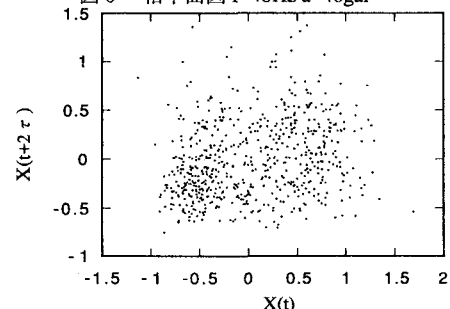


図8 ポアンカレ断面図 $f=48\text{Hz}$ $a=450\text{gal}$