

液体の回転を利用した制振装置

吉武裕*・稲垣和成**・安部晃***・梶原修平****

Vibration control device using rotation of liquid

by

Yutaka YOSHITAKE*, Kazunari INAGAKI**, Akira ABE**, and Shuhei KAJIHARA****

The authors have been researching vibration control devices using Hula-Hoops. In this study, from the viewpoints of energy saving and cost of the device, the vibration control devices using the rotation phenomenon of liquid instead of Hula-Hoops is investigated. The results obtained from the experiments and the numerical calculations are summarized as follows. (1) Depending on the diameter of the cylindrical container, there are differences in the frequency and its range of the water rotation phenomenon. (2) The smaller the diameter, the wider the rotation region of the liquid. (3) The angle when the fluid climbs up the wall of container is also affected by the container shape. (4) When the fluid is 100% alcohol, the rotational resistance is small and the vibration control effect is large.

Key words : *Nonlinear vibration, Vibration control device, Forced vibration, Hula-Hoop, Rotation of water.*

1. 緒言

パッシブな制振装置の一つにバランシングの原理に基づく自動平衡装置^{1),2)}があるが、自動平衡装置は有害な自励振動が発生する可能性があるため、著者らは自励振動が発生する可能性のないフラフープの運動の原理を利用した制振装置を提案し、渦励振などの自励振動の制振^{3),4)}、強制振動の制振^{5)~8)}に適用した。一方、フラフープを用いた制振装置は、フラフープの減衰が大きいとフラフープとアンバランスを逆位相に配置することが困難となることや、アシストモータを用いた場合には制振のためのエネルギーが必要となる。そこで、省エネとコストの観点から、フラフープを回転させる代わりに液体の回転現象を用いた制振装置について検討する。従来から液体の様々な現象を用いた制振装置があるが、その代表的なものがス

ロッシング現象を利用した制振装置である⁹⁾。スロッシング現象を利用した制振装置は、容器の中に液体を入れるだけなので構造的にも非常に単純な制振装置であり、機械部品を用いた制振装置に比べて、装置本体のコスト、メンテナンスコストともに低く抑えることができる。また、容器の大きさや水深で液体の固有振動数が決まってくることもあり、設置した構造物へのチューニングもしやすいが、それがずれると制振効果がなくなるという欠点もある。そこで、新しい制振装置として、スロッシング現象の固有振動数を超えたある振動数領域で発生する液体の回転現象^{10),11)}を用いた制振装置の可能性を検討する。基礎実験として、円筒容器を用いて、直径の大きさや水深を変えることで、液体の回転現象が生じる振動数領域を明らかにするとともに、生じた回転現象を用いて制振が可能か検

令和元年12月20日受理

* システム工学部門 (Division of System Science)

** 総合工学専攻 (Department of Advanced Engineering)

*** トヨタ自動車 (株) (Toyota Motor Corporation)

**** 三井造船 (株) (Mitsui Engineering and Shipbuilding Corporation)

討する。液体の回転現象による制振効果は、液体が回転することで容器の側面にせり上がる水量に大きく依存すると考えられるので、液体の種類や容器の形状といった基礎的な部分についても実験より検討を行う。

2. 水の回転現象に関する基礎実験

水が回転現象を生じる振動数領域は、水深や容器の直径によって異なる。水の回転現象を利用した制振実験を行うためには、フラフープを用いた制振と同様に主系の固有振動数より高い振動数で適用することになるので、その領域で回転現象を生じなければならない。また、その制振効果にはアンバランスとの釣り合いの観点から、回転時の水のせり上がりの程度が重要になってくる。よって、外部から加える振動の大きさに対して、水深や容器の直径の相違により容器中の水の運動にどのような違いがあるのかを調べる実験を行い、その傾向をまとめる。

2.1 容器中の液体の運動

液体のスロッシング現象の固有振動数は Housner による理論式から式(1)で表されるが、このスロッシング現象が発生する振動数を超えたある振動数範囲におい

て液体は回転現象を生じる。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3.68 \cdot g \cdot \tanh(3.68 \cdot h/D)}{D}} \quad (1)$$

ここに、

f_n : スロッシングの固有振動数

D : 円筒容器の直径

H : 水深

g : 重力加速度

2.2 実験方法

水の回転現象について実験を行った。容器を加振する振幅の大きさに対して、容器形状や容器の直径、水深の違いで、回転現象にどのような違いが生じるか調べた。加振振幅を 2mm とし、断面の直径が異なる円筒容器と楕円容器に水を入れて加振し、振動数 f を上げていき、水の運動を観測した。円筒容器は直径が、60mm, 44mm, 34mm, 24mm の 4 種類、楕円容器は短軸長さが、60mm, 44mm, 34mm の 3 種類である。また、水深 h (m) を円筒容器の直径 D (m) で除した値は、0.65 とした。楕円容器に関しては、円筒容器と比較を行うために、水深 h は同じ値とした。

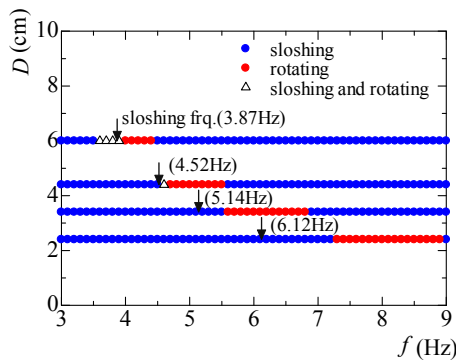


Fig.1 Water behavior(Experiment, Cylindrical container)

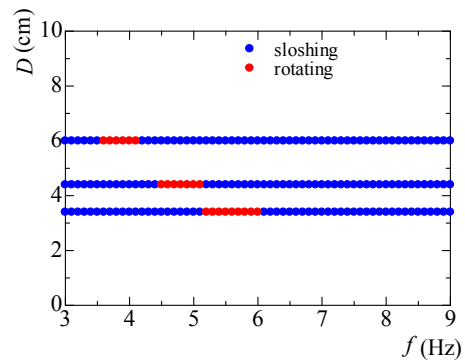
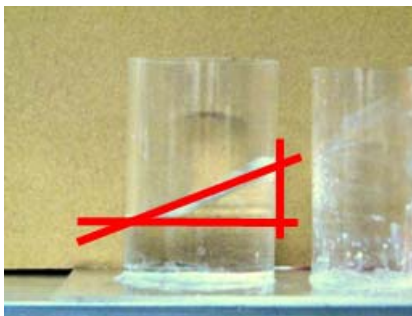
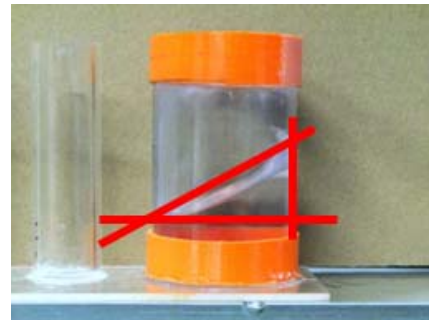


Fig.2 Water behavior(Experiment, Oval container)



(a) Cylindrical container, $D = 6\text{cm}$, $f = 4.2\text{Hz}$



(b) Oval container, $D = 6\text{cm}$, $f = 3.9\text{Hz}$

Fig.3 Rise angle in water rotating

2.3 実験結果

図1, 図2に実験結果を示す. 図1が円筒容器の場合, 図2が楕円形容器の場合である. とともに青丸印がスロッシング現象, 赤丸が回転現象, 三角印が2つの現象が混在していることを示す. 黒の下向きの矢印は(1)式を用いて求めたスロッシング現象の固有振動数である. ここで, 青丸印で示したスロッシング現象時の振幅は非常に小さいものであり, 従来のスロッシングを利用した制振装置は(1)式で求めた固有振動数前後の狭い振動数領域でのみ制振できると思われる.

図1, 2より, 回転現象が生じる振動数が, 円筒容器の直径, および楕円形容器の短軸長さによって変化し, それらが小さくなるほど高い振動数で発生することがわかった. 回転領域の広さは, 円筒容器の直径や楕円形容器の短軸長さが短い方が広くなることがわかった. (1)式で求めたスロッシングの固有振動数には, 円筒容器の直径や楕円形容器の短軸長さが大きい場合においては, ある程度一致している. そのため, それらの値が大きい場合において, 回転現象が生じる振動数は(1)式からある程度推測できると考えられる.

水の回転領域の広さと水のせり上がり角度の2つの観点から円筒容器と楕円形容器を比較する. 回転領域の広さは円筒容器の方が広い. 水のせり上がり角度を示す写真を図3に示しているが, 楕円形容器の方がせり上がり角度が大きいことがわかる. しかし, 楕円形容器は円筒容器と比較するため, 水深 $h(m)$ を円筒容器に合わせていることもあり, わずかに水量が多いので, 一概に楕円形容器の方が水のせり上がり角度が大きいとは言えない可能性がある. そのため, 今後詳細に実験を行う必要があると思われる.

3. 液体の回転を利用した制振

実験と数値計算を行い, 液体の回転を利用した制振

装置の制振効果を調べた. 実験から水の回転はその回転抵抗が大きく, アンバランスと完全な逆位相に配置されず, また, 回転時の水のせり上がり具合も小さく, アンバランスと釣り合わない事が判明した. そこで, 水に加えアルコール 50%, アルコール 100%の液体を用いて実験を行った. 同様の液体を想定した数値計算も行った.

実験装置を図4に, 数値解析モデルを図5に示す. DC モータ(澤村電気社製; SS32G)を用いて質量 m_0 のアンバランスを回転させることで遠心力型の外力を主系に作用させた. 主系は水平方向に振動する. 水の回転運動は質量 m_2 のフラフープの運動で表すこととした. ラグランジュの運動方程式を用いて求めた運動方程式と DC モータの回路の状態方程式, パラメータは以下のとおりである.

$$(m_0 + m_1 + m_2)\ddot{x} + c_1\dot{x} + k_1x - m_0l_{G0}(\ddot{\theta}_0 \sin \theta_0 + \dot{\theta}_0^2 \cos \theta_0) - m_2l_{G2}(\ddot{\theta}_2 \sin \theta_2 + \dot{\theta}_2^2 \cos \theta_2) = 0 \tag{2}$$

$$(I_{GM0} + I_{G0} + m_0l_{G0}^2)\ddot{\theta}_0 - m_0l_{G0}\ddot{x} \sin \theta_0 = K_{T0}I_0 - N_0\dot{\theta}_0 \tag{3}$$

$$(I_{G2} + m_2l_{G2}^2)\ddot{\theta}_2 - m_2l_{G2}\ddot{x} \sin \theta_2 = 0 \tag{4}$$

$$L_0\dot{I}_0 = -K_{E0}\dot{\theta}_0 - R_0I_0 + E_0 \tag{5}$$

ここに, 用いている記号の定義は以下のとおりである.

- x : 主系の変位
- θ_0 : アンバランスの回転角
- θ_2 : フラフープの回転角
- m_0 : アンバランスの質量
- m_1 : 主系の質量
- m_2 : フラフープの質量

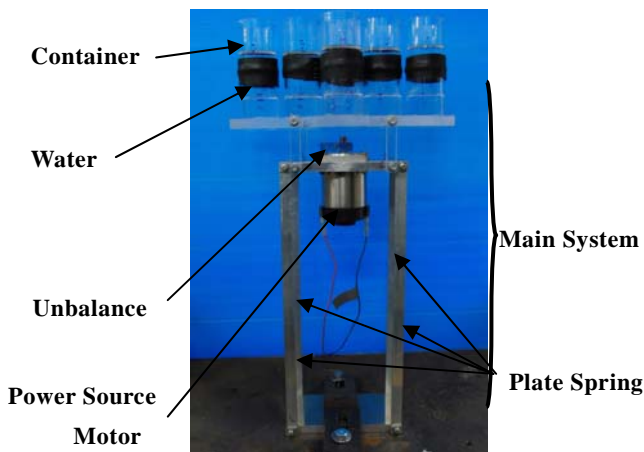


Fig.4 Experimental apparatus

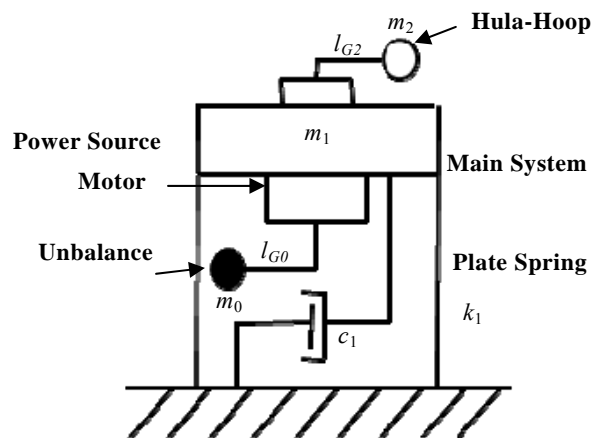


Fig.5 Analytical model

- c_1 : 主系の粘性減衰係数
- k_1 : 主系の剛性
- l_{G0} : アンバランスの回転軸から重心までの長さ
- l_{G2} : フラフープの回転軸からの重心までの長さ
- I_{G0} : アンバランスの重心回りの慣性モーメント
- I_{GM0} : 動力源モータのロータの慣性モーメント
- I_{G2} : フラフープの重心回りの慣性モーメント
- K_{T0} : 動力源モータのトルク定数
- N_0 : 動力源モータのトルク特性の傾き
- I_0 : 動力源モータの電流
- L_0 : 動力源モータのインダクタンス
- K_{E0} : 動力源モータの逆起電力定数
- R_0 : 動力源モータの内部抵抗
- E_0 : 動力源モータに与える電圧

- $m_0=2.30 \times 10^{-2} \text{kg}$
- $N_0=4.30 \times 10^{-5} \text{Nms/rad}$
- $l_{G0}=2.0 \times 10^{-2} \text{m}$
- $I_{G0}=5.38 \times 10^{-6} \text{kgm}^2$

円筒容器 6 個の場合

- $m_1=9.67 \times 10^{-1} \text{kg}$
- $c_1=0.20 \text{Ns/m}$
- $k_1=6.11 \times 10^2 \text{N/m}$

円筒容器 12 個の場合

- $m_1=1.104 \text{kg}$
- $c_1=0.20 \text{Ns/m}$
- $k_1=6.11 \times 10^2 \text{N/m}$

次に、主系、アンバランス、フラフープ、動力源モータの各パラメータの値を以下に示す。

- $I_{GM0}=4.40 \times 10^{-5} \text{kgm}^2$
- $L_0=5.30 \times 10^{-3} \text{H}$
- $R_0=5.70 \Omega$
- $K_{E0}=7.20 \times 10^{-2} \text{Vs/rad}$
- $K_{T0}=7.20 \times 10^{-2} \text{Nm/A}$

4. 数値解析

実験では円筒容器を主系に取り付け、液体の回転現象による制振効果の計測を行った。しかし、数値解析では液体の回転現象を運動方程式で理論的には表現することは容易ではないので、今回は液体の回転現象をフラフープの回転現象で表すことにより、実験結果をどこまで説明できるか検討する。ルンゲクッタ・ギル法を用いて数値積分を行った。また、簡単のために、液体の回転による遠心力の合計を、フラフープ 1 個の

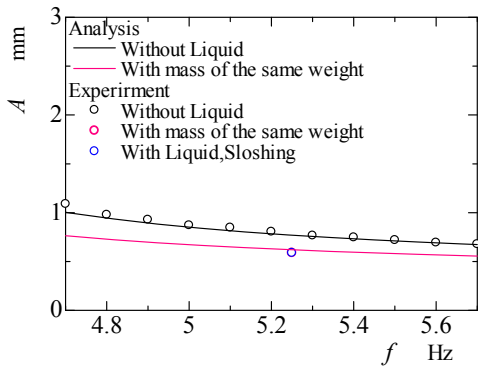


Fig.6 Resonance curve (water, $h/D=0.4$)

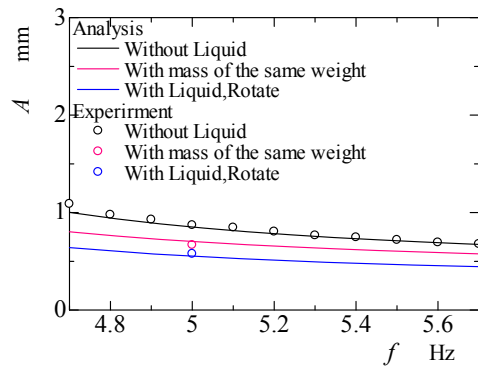


Fig.8 Resonance curve (alcohol, $h/D=0.4$)

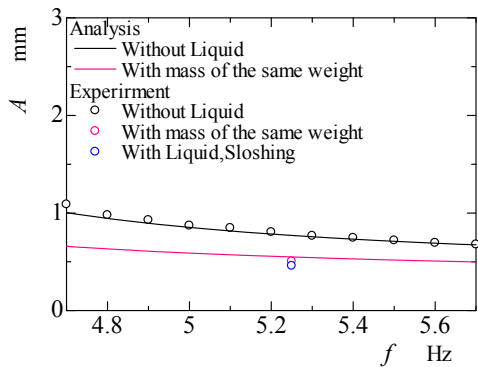


Fig.7 Resonance curve (water, $h/D=0.65$)

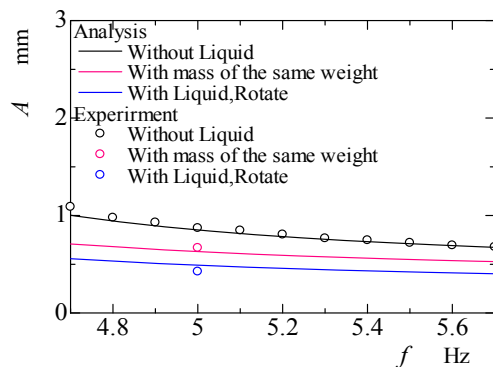


Fig.9 Resonance curve (alcohol, $h/D=0.65$)

遠心力と同じ値になるように仮定して解析を行った。

図6~9に円筒容器を12個設置した場合の結果を示す。いずれも円筒容器の直径は34mmである。解析結果を実線で表し、実験結果を丸印で表している。黒線と黒丸が容器に液体を入れていない場合 (Without Liquid), 赤線と赤丸が回転していない液体に見立てるため液体と同等の質量のものを載せた場合 (With mass of the same weight), 青線と青丸が液体を入れその液体が回転している場合 (With Liquid, Rotate) を表している。

図6と図7は液体に水を用いた場合である。図6は $h/D=0.4$, 図7は $h/D=0.65$ の場合である。いずれも水は回転しなかった。そのため、数値解析では液体を入れていないときに対応する振幅と質量効果のみのおよび対応する振幅を示している。ともに円筒容器12個に水を入れたことにより、質量効果で主系の振幅が小さくなったと考えられる。また、 h/D が大きくなったことで質量効果が大きくなっている。実験結果と解析結果はよく一致している。

図8, 9は液体にアルコール100%を用いた場合である。図8は $h/D=0.4$, 図9は $h/D=0.65$ の場合である。アルコールは前章の水が回転する振動数領域より少し低い振動数領域で回転した。高速ビデオ撮影の結果、アンバランスとアルコールは完全に逆位相で回転し制振していることが判明した。アルコール100%の場合、アルコールと容器との摩擦抵抗が小さく、アンバランスと逆位相でよく回転したと考えられる。実験結果と解析結果は良く一致している。

水の回転を利用して制振することが研究目的であるので、今後は添加剤などを用いて水と容器表面との抵抗を小さくすることが考えられる。

5. 結言

液体の回転を利用した新しい制振装置について実験と数値計算から調べた結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 円筒容器の直径によって、水の回転現象が発生する振動数や領域の広さに違いがある。
- (2) 直径が小さい方が液体の回転領域が広い。
- (3) 流体のせり上がり角度も容器形状の影響を受ける。
- (4) 制振流体をアルコール100%にすると、回転抵抗が小さくなり、制振効果が大きい。

参考文献

- 1) 井上順吉, 陣内靖介, 荒木嘉昭, 中原章, “自動平衡装置 (その基礎的な特性)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.45, No.394 (1979), pp.646-652.
- 2) 井上順吉, 陣内靖介, 久保省蔵, “自動平衡装置 (動不つりあいへの適用)”, 日本機械学会論文集 C 編,

Vol.49, No.448 (1983), pp.2142-2148.

- 3) 吉武裕, 末岡淳男, 森山智樹, 山崎正則, “フラフープを用いた自励振動の制振と発電”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.646 (2000), pp.1785-1792.
- 4) Yoshitake, Y., Sueoka, A., Yamasaki, M., Sugimura, Y. and Ohishi, T., “Quenching of vortex-induced vibrations of towering structure and generation of electricity using Hula-Hoops”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.272, No.1-2 (2004), pp.21-38.
- 5) 吉武裕, 末岡淳男, 福島明寿, 山脇勝也, 赤峰秀樹, “機械・構造物の制振と発電を同時に行う装置の研究 (強制-自由度系の制振)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.650 (2000), pp.3233-3241.
- 6) Yoshitake, Y., Ishibashi, T. and Fukushima, A., “Vibration control and electricity generating device using a number of hula-hoops and generators”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.275, No.1-2 (2004), pp.77-88.
- 7) 吉武裕, 原田晃, 柴田佳紀, 永代行日出, 梶原修平, “フラフープを用いた制振装置”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.766 (2010), pp.1483-1488.
- 8) 吉武裕, 清水亮佑, 柴原文高, 梶原修平, 濱田知宏, 原田晃, “フラフープを用いた機械構造物の制振 (鉛直方向振動と水平方向振動の比較, および制振効果)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78, No.792 (2012), pp.2760-2770.
- 9) 池田隆, 堀正洋, 中川紀寿, “長方形水槽内のスロッシングによる構造物の非線形振動”, 日本機械学会論文集, 60-573, C(1994-5), 1517-1525.
- 10) 西村督・他4名, “加振実験による円筒形木製水槽の地震時挙動”, 日本建築学会北陸支部研究報告集, 55(2012-7), 43-46.
- 11) G. W. Housner, “The Dynamic Behavior of Water Tanks”, *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol.53, No2, pp. 381-387. February, 1963.