

# 液体を利用した防振装置のヘリコプタへの適用化研究

～ 横振動制振効果に関する基礎的研究 ～

Application of Liquid Vibration Absorber to Helicopter

譚 安忠

Anzhong TAN

川田工業(株)航空・機械事業部  
製品開発部技術開発課課長

中村 優

Masaru NAKAMURA

川田工業(株)航空・機械事業部  
製品開発部生産技術課課長

赤地 一彦

Kazuhiko AKACHI

川田工業(株)航空・機械事業部  
製品開発部設計課

金平 徳之

Noriyuki KANEHIRA

川田工業(株)航空・機械事業部  
製品開発部技術開発課

藤田 乃里

Nori Fujita

川田工業(株)航空・機械事業部  
製品開発部生産技術課

The Aircraft and Mechanical System Division has been developing a new vibration absorber for helicopters. The vibration absorber consists of a vessel containing liquid, and is installed on the rotor head. Both lateral vibration, due to the rotor blade mass and unbalance and vertical vibration due to the unequal aerodynamic load on the rotor disc are absorbed by the absorber. In experiments to date, the mechanism and effect of lateral vibration absorption were investigated with a bench model experiment resulting in a 60% vibration reduction. In this paper, the analytical and experimental results for the lateral vibration absorption will be discussed.

Key words: helicopter vibration absorber, lateral vibration, vertical vibration, liquid balancer, tuned liquid damper, critical frequency

## 1. 緒言

ヘリコプタの振動は、搭乗者に不快感や疲労感を与えるだけでなく、機体に搭載してある構造物や計器類に大きな影響を及ぼすため、その対策が非常に重要である。ところが小型ヘリコプタについては、重量増加を避けるという理由から、加振源をエラストマ・ダンパなどで絶縁するといった簡易的な防振策しか施されていない。

現在川田工業(株)では、シンプルで整備性のよい小型ヘリコプタ用防振装置として、液体を用いた動吸振器を開発中である。この装置は液体とそれを封入する容器から構成されており、メインロータのロータヘッドに取り付けてロータとともに回転させて振動を吸収する(図1)。

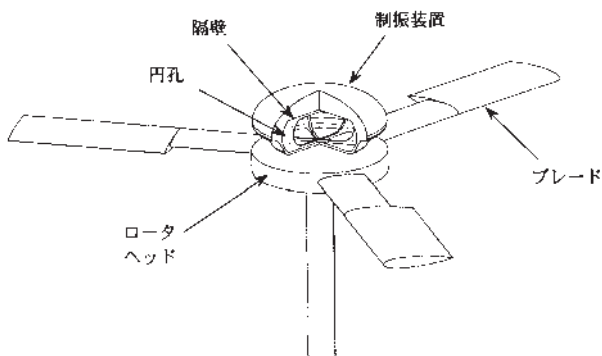


図1 防振装置の概念図

液体を利用した制振装置については、液体の動揺を利用するTLD(Tuned Liquid Damper)<sup>1,2)</sup>と呼ばれるものや、回転する液体がアンバランス質量と反対方向に集まる性質を利用する液体パラリサ<sup>3)</sup>と呼ばれるものがある。本

### 記号の定義

$O_1$  : ベッセルの回転中心

$O_2$  : ベッセルの幾何学的中心位置

$\omega$  : ベッセルの回転角速度

$2a$  : ベッセルの内径

$2b$  : 平衡状態での液体自由表面の直径

$h$  : ベッセルの高さ

$p$  : 液体の圧力

$\rho$  : 液体の密度または比重

$m_{cb}$  : 液体を除く振動系全体の質量

$m_b$  : アンバランス質量

$m_{tot}$  : ベッセル内に液体が一杯に詰まると仮定したときの液体の仮想質量

$r_b$  : アンバランス質量までの半径

$k$  : 振動系のバネ定数

$c$  : 振動系の粘性減衰係数

$n = \sqrt{\frac{k}{m_{cb}}}$  ; 振動系の不減衰固有円振動数

$\gamma = \frac{c}{2\sqrt{m_{cb}k}}$  ; 振動系の粘性減衰率

$f_{ix}, f_{iy}$  : 液体がベッセルに及ぼす流体力の $x, y$ 方向成分

$F_{ix}, F_{iy}$  : 液体がベッセルに及ぼす流体力の $X, Y$ 方向成分

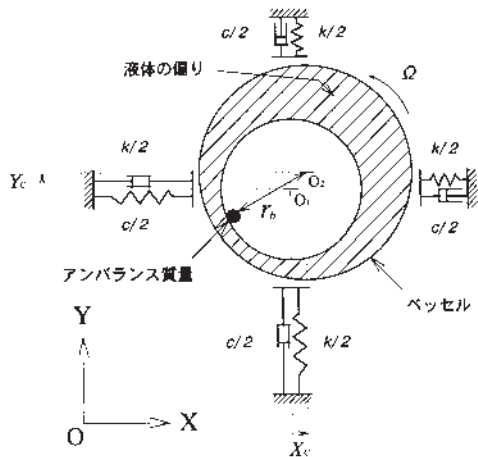


図 2 (a) 横振動防振の原理

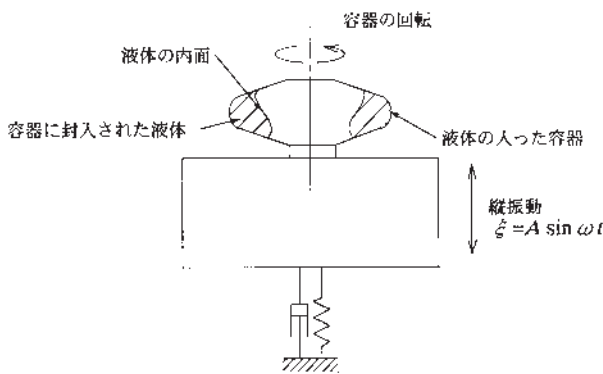


図 2 (b) 縦振動防振の原理

防振装置はこのTLDと液体バランサの両方の原理を用いることにより、ロータブレードの質量不均衡による横振動と、ロータディスクにかかる不均一な空気力に起因する縦振動を同時に制振することを可能にしている。

現在までに、ロータブレードのアンバランスによる横振動の制振についての研究を、解析と模型を用いた実験の両面から行ってきた。本論文では、液体を用いた防振装置開発の第一報として、横振動制振に対する本防振装置の防振メカニズムと制振効果についての研究結果を報告する。

## 2. 作動原理

### (1) 原理の説明

図 2 (a)は本防振装置の横振動に対する制振原理を説明したものである。回転するベッセル内に液体が内蔵されていると、遠心力により液体は容器壁面に張り付く。そのとき回転体に質量の不均衡があると液体はベッセルとともに偏心回転を行う。いま、ベッセルを支えている支持系の固有振動数が回転体の回転数より低いと液体の偏りがアンバランス質量と反対側へ位置し、アンバランスをうち消すように働く。これが液体バランサ効果である。

図 2 (b)は縦振動制振の説明である。回転する容器が軸

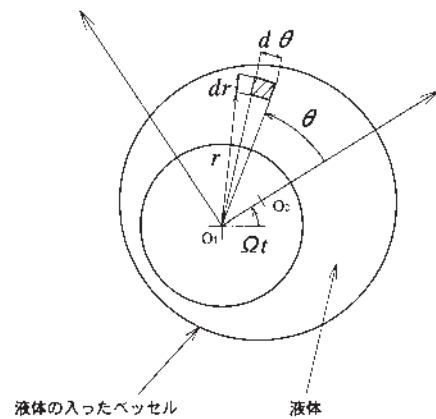


図 3 容器に固定された動座標系

方向の縦振動を受けると、液体内面に軸方向の定常波が発生する。内蔵する液体の種類や量を適切に調整すると、この定常波が制振効果を発揮して全体の振動が減衰する<sup>4)</sup>。ヘリコプタの場合、2/rev., 3/rev.の成分が縦振動として現れるので、この周波数成分に対して防振効果を発揮するようなパラメータを決める必要がある。

### (2) 横振動制振効果に対する理論解析

図 2 (a)に横振動の解析に用いた解析モデルを示す。回転するベッセルはバネ特性が等しい支持系で4方向に支えられているとする。また液体に働く重力は遠心力に比べ十分に小さいと考えられるのでその影響は無視し、運動をXY面内の2次元問題に限定する。さらに液体の量はベッセル壁面をすべて浸すだけ十分に封入されているとする。

XY面内でベッセルが不釣り合い回転をしているときのベッセルの中心O<sub>2</sub>についての運動方程式は次のように書ける。

$$\begin{aligned} m_{cb}\ddot{X}_C + c\dot{X}_C + kX_C &= m_b r_b \Omega^2 \cos \Omega t + F_{kx} \\ m_{cb}\ddot{Y}_C + c\dot{Y}_C + kY_C &= m_b r_b \Omega^2 \sin \Omega t + F_{ky} \end{aligned} \quad (1)$$

(X<sub>C</sub>, Y<sub>C</sub>)は釣り合い位置O<sub>1</sub>に対するベッセル中心O<sub>2</sub>の位置である。

まずベッセルに液体が含まれていないときの特解は、(1)式の右辺第2項を0とおいて解くことにより

$$\begin{aligned} X_C &= A_1 \cos \left( \Omega t - A_1 \right) \\ Y_C &= B_1 \sin \left( \Omega t - B_1 \right) \end{aligned} \quad \text{となる。}$$

ここで

$$A_1 = B_1 = \frac{\frac{m_b}{m_{cb}} r_b \left( \frac{\Omega}{n} \right)^2}{\sqrt{\left[ 1 - \left( \frac{\Omega}{n} \right)^2 \right]^2 + \left( 2 \frac{\Omega}{n} \right)^2}}$$

$$\tan A_1 = \tan B_1 = \frac{2 \frac{\Omega}{n}}{1 - \left( \frac{\Omega}{n} \right)^2}$$

とおいた。これから分かるようにベッセルは原点 $O_1$ を中心とした偏心剛体回転を行う。

次にベッセルが偏心回転しているときの流体力を評価する。この問題について金子ら<sup>5)</sup>は、解析と実験から詳細な検討を行っており、液体の表面に誘起される遠心波と呼ばれる波のため、条件によっては振動系が自励振動を起こすことを示している。しかしながら今回の質量アンバランスによる振動のように、ベッセルの回転数と加振周波数が同期しているときは遠心波は起こらず、液体はベッセルとともに剛体回転をすると思わせる。後述する可視化実験からも、ベッセルにフェンスを設けて液体の円周方向の揺動をある程度拘束すれば、液体は剛体回転をすることを確認している。そこで本解析ではベッセル内の液体はベッセルの運動とともに剛体偏心運動をすると仮定して解析を進める。

図3から液体の微小要素についての運動方程式をたてると次のようになる。

$$dp(r) = \frac{r^2}{r} \frac{dr}{dr} = r^2 dr$$

この式を境界条件、 $r = a$ で $p = 0$ を用いて積分すると

$$p = \frac{1}{2} \rho (r^2 - b^2) \quad \text{となる。}$$

ベッセルに働く流体力は圧力 $p$ をベッセルの壁面で積分すれば求めることができる。すなわち

$$f_{cx} = \rho a^2 h r_c^2 = m_{tot} r_c^2$$

$$f_{cy} = 0$$

ここで $m_{tot} = \rho a^2 h$ とおいた。この式から分かるように、流体力はベッセル中心の変位の方向を向いており、その大きさはベッセルに液体が一杯に詰まっていると仮定したときの液体の仮想質量 $m_{tot}$ に比例する。つまりベッセルの内面をすべて覆うように液体が内蔵されているときには、流体力は液体の量によらず一定になる。

ここで求めた流体力を静止座標系上の成分に分解し、回転体の運動方程式(1)へ代入すると次のようになる。

$$(m_{cb} + m_{tot}) \ddot{X}_C + c \dot{X}_C + k X_C = m_b r_b^2 \cos \omega t$$

$$(m_{cb} + m_{tot}) \ddot{Y}_C + c \dot{Y}_C + k Y_C = m_b r_b^2 \sin \omega t$$

この式の定常解から、ベッセルの中心は半径

$$r_c = \frac{m_b r_b^2}{\sqrt{[1 - (1 + m_{tot})^2]^2 + (2 \zeta)^2}}$$

アンバランス質量からの位相遅れ

$$\tan \phi = \frac{2 \zeta}{1 - (1 + m_{tot})^2}$$

で円運動をすることが分かる。ただし $\phi$ は次式で定義される無次元量を表す。

$$r_c^* = \frac{r_c}{a}, \quad r_b^* = \frac{r_b}{a}, \quad m_b^* = \frac{m_b}{m_{cb}}, \quad m_{tot}^* = \frac{m_{tot}}{m_{cb}}$$

$$= \frac{c}{2\sqrt{m_{cb}k}}, \quad \zeta = \frac{c}{2n}, \quad n = \sqrt{\frac{k}{m_{cb}}}$$

式(3)において $m_{tot}^* = 0$ とするとベッセルに液体を含まないときの振動変位の振幅となる。そこで液体バランサの効果を明確にするために、液体が入っていないときの振幅との比をとる。すなわち、

$$\frac{r_c^*}{r_{c0}^*} = \frac{\sqrt{[1 - (m_{tot}^*)^2]^2 + (2 \zeta)^2}}{\sqrt{[1 - (1 + m_{tot}^*)^2]^2 + (2 \zeta)^2}} \quad (4)$$

図4は $m_{tot}^* = 0.2$ の場合について、 $\zeta$ をパラメータとして振動数比 - 振幅比曲線を描いたものである。 $\zeta = 0.05$ の曲線を見れば分かるように液体の付加により共振点は $\omega^* = 1$ の小さい方向へ移動する。また振幅比は加振円振動数が共振点より低いところでは1より大きく(増幅)、共振点より高いところでは1より小さく(減衰)になっている。これはベッセルの回転数が支持系の固有振動数よりも高いときに本装置が防振装置として働くことを示している。

$\zeta$ を大きくしていくと液体バランサ効果は次第に小さくなる。これは式(3)の分母において $\zeta$ の項が $m_{tot}^*$ よりも支配的になるためである。振幅の減衰は加振振動数が高いほど大きいわけではなく、例えば $\zeta = 0.05$ の場合、固有振動数付近が一番効果的である。加振振動数を上げていくと、振幅比は減衰率や振動周波数に依存しない一定値に近づいているが、この一定値は式(3)で $\zeta \rightarrow \infty$ の極限をとって $1 / (1 + m_{tot}^*)$ となる。図4の場合、 $m_{tot}^* = 0.2$ としたので、この極限值は0.83である。

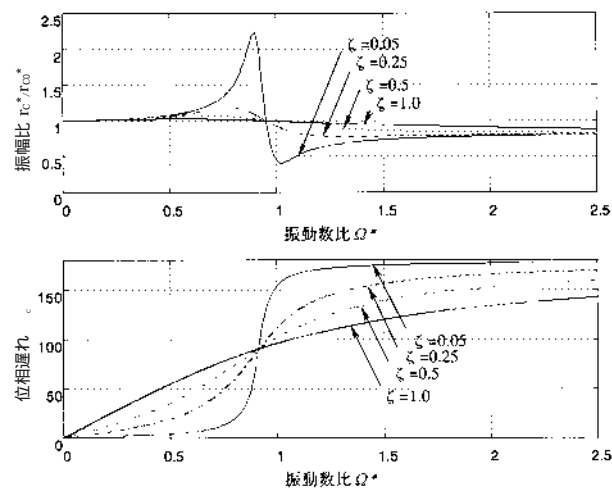


図4 振動数比に対する振幅と位相の関係 ( $m_{tot}^* = 0.2$ )

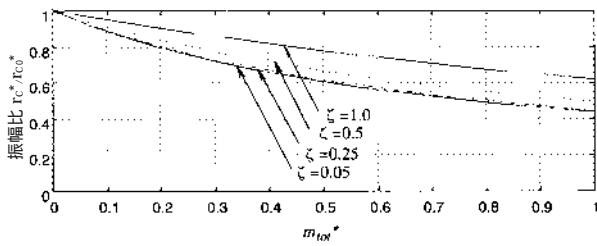


図5  $m_{tot}$ に対する振幅と位相の関係 ( $\omega = 2.0$ )

また図4の位相遅れのグラフを見ると、加振振動数比が1より大きいところでは  $\phi$  が大きいほど位相遅れは小さくなっている。つまり  $\phi$  が大きいほど液体の偏りとアンバランス質量の位置が近いところにあるということになり、そのため液体バランサとしての振幅減衰効果も小さくなっている。

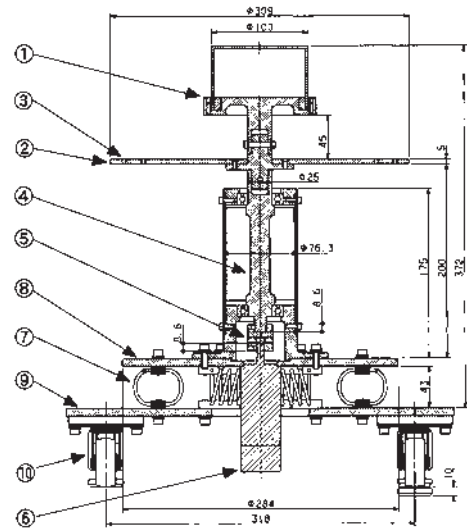
図5は振動数比を2.0に固定し、 $m_{tot}$ に対して振幅比をプロットしたものである。このグラフから分かるように振幅比は $m_{tot}$ に関して単調に減少していく。また前述したように  $\phi$  が小さいほど防振効果は大きくなっている。

### 3. 実験

#### (1) 実験装置

図6に架台実験装置の断面図を、写真1にその外観を示す。装置全体はバネ特性（バネ定数，減衰係数）の分かっているサスペンションの上に配置してあり，ロータ・プレート上に取り付けられたアンバランス質量によって横振動を発生させる。サスペンションにはワイヤロープとコイルバネの2種類を用いた。それぞれの支持系についてのバネ特性を表1に示す。また本論文では特にことわらない限り，半径140mmの位置に質量4.5gのボルトをアンバランス質量として取り付けた場合の結果を報告する。

液体を封入するベッセルの基本形状は直径100mm，高さ53mmの円筒形である。このベッセルはアクリルできており，架台実験装置の最上部に取り付けてある。



- ①防振装置模型
- ②ロータ・プレート
- ③アンバランス質量取り付けねじ穴
- ④シャフト
- ⑤カップリング
- ⑥DCサーボモータ
- ⑦サスペンション
- ⑧サーキュラ・プレート
- ⑨ベース・プレート
- ⑩キャスタ

図6 架台実験装置の断面図



写真1 実験装置の外観

表1 振動系のバネ特性

	固有振動数[ Hz ]	減衰率
ワイヤロープ式サスペンション	9.54	注)
コイルバネ式サスペンション	4.54	0.0354

注) ワイヤロープについては非線形性を有する

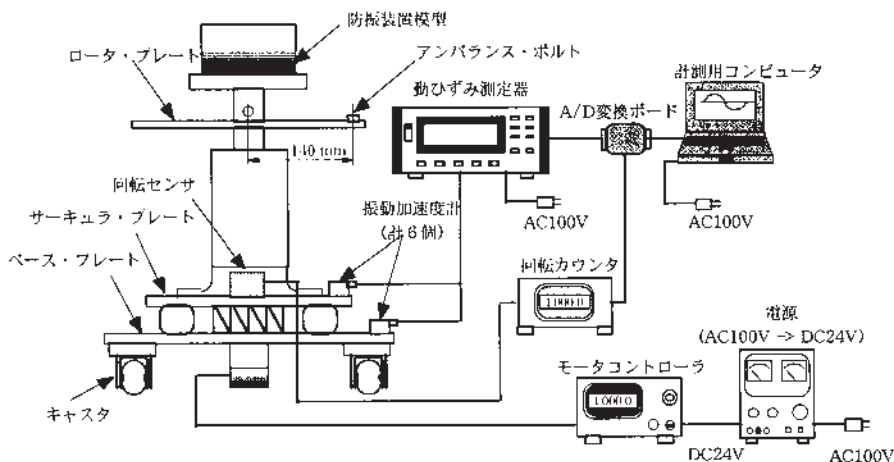


図7 計測システムの概念図

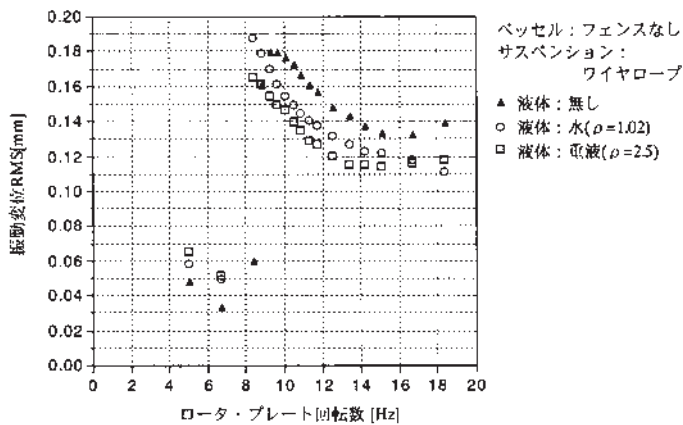


図8 回転数を変えたときの振動振幅の変化の様子，  
液体の量：25ml

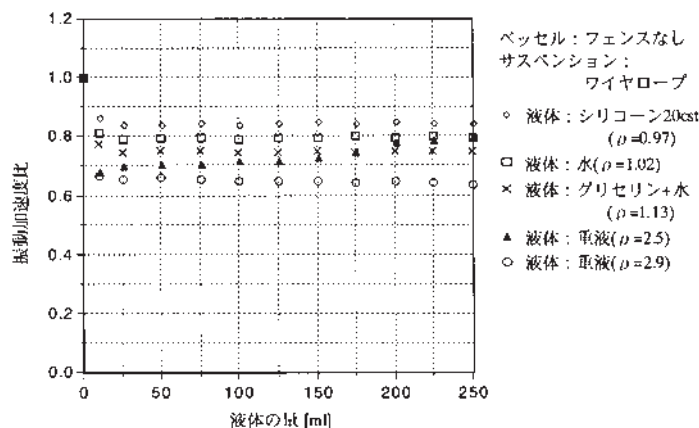


図9 比重をパラメータとして液体の量を変えていったときの  
振動加速度の変化の様子，回転数：800rpm

サーキュラ・プレート 上には振動加速度計を取り付け、液体の種類やベッセルの形状による振動低減効果を調べた。また高速ビデオカメラを用いて鉛直上方より液体の挙動を撮影し制振メカニズムを観察した。図7に計測システムの概要を示す。

## (2) 実験結果

図8は回転数を変えながらロータ・プレートの半径方向の振動変位を測定した結果である。振動変位は振動加速度を回転数の2乗で割って算出した。このグラフから分かるように液体がないときの共振点は9.5Hzであり、液体を入れると回転数が共振点より低い領域では振動が増し、共振点より大きい領域では振動が減衰する。また液体を入れることにより共振点が回転数の低い方へ移動している。

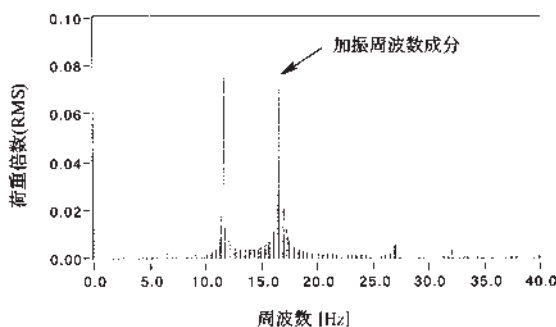
図9は回転数を一定にして、封入する液体の量が振動に及ぼす影響を調べたものである。縦軸には液体がないときに対する、液体を注入したときの振動加速度の比がプロットされている。この結果をみると、制振効果は液体の量に無関係にほぼ一定となることが分かる。

また液体の種類については、比重の大きいものほど

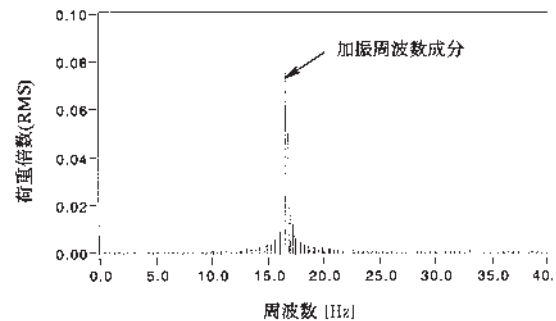


ベッセル：フェンスなし  
サスペンション：ワイヤロープ  
液体：グリセリン+水 ( $\rho = 1.13$ ), 50ml  
回転数：800rpm

写真2 高速ビデオカメラによる可視化結果



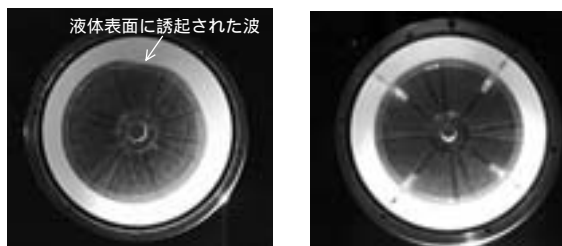
(a) フェンスなし



(b) 4枚フェンス

液体：重液 ( $\rho = 2.9$ ), 100ml 回転数：1000rpm

図10 フェンスの効果  
(振動波形のスペクトル解析結果)

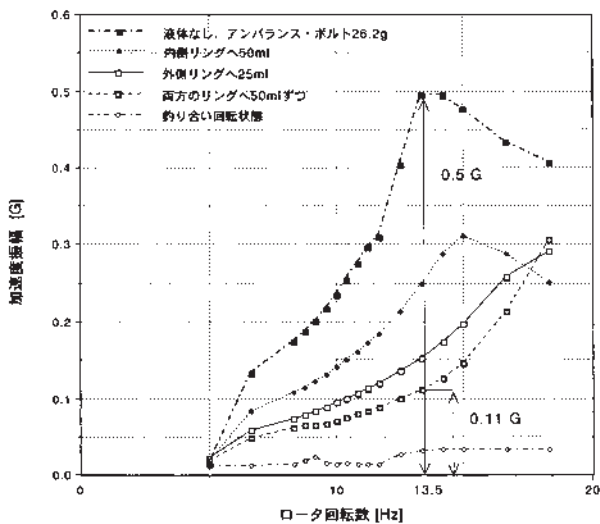


(a) フェンスなし

(b) 4枚フェンス

サスペンション：ワイヤロープ  
液体：グリセリン+水 ( $\rho = 1.13$ ), 150ml 回転数：800rpm

写真3 フェンスによる効果の可視化



サスペンション：ワイヤロープ  
 ベッセル形状：内側リング直径100mm，外側リング直径150mm  
 アンバランス・ボルト：半径140mmの位置，26.2g  
 液体：重液（ $\rho = 2.6$ ）

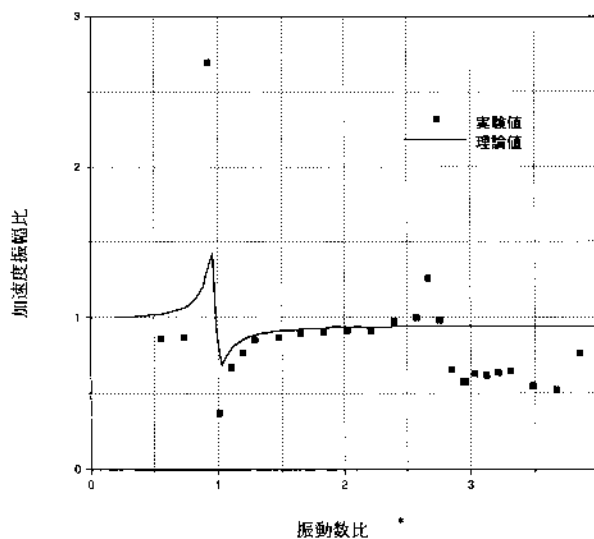
図11 2重ベッセルによる効果

振動の減衰比が大きくなることを読みとることが出来る。ただし重液（ $\rho = 2.5$ ）については量が増えるにつれ振動加速度比が大きくなっているが、これは後述するように液体表面に誘起された表面波によって全体の振動が増幅されたためである。

写真2は高速ビデオカメラによる可視化実験の結果である。この写真はベッセルの回転数が系の固有振動数より大きい状態での可視化結果であるが、アンバランス質量と反対の方向へ液体が集まっており、液体の偏りが制振効果を発揮している様子をとらえている。

次にベッセルの内部形状を変えてフェンスによる効果を調べた。フェンスには液体が自由に移動できるように3mmの穴を多数あけ、それをベッセルの半径方向に等間隔で配置した。図10はフェンスなし、ありのそれぞれのベッセルについて振動計測を行い、波形を周波数解析したものである。フェンスなしの場合はベッセルの回転周波数成分16.7Hzの他に3つの振動成分が現れているが、4枚フェンスを設けたベッセルでは加振周波数のみの成分となっており、その他の周波数成分は現れていない。写真3はこの様子を高速カメラによる可視化写真でとらえたものである。写真3(a)では液体表面に波が生じているの確認できるが、フェンスを取り付けたベッセルに対しては真円形の内面形状となっている。この結果から、フェンスには液体表面が波立つ現象を抑え、確実に液体バランサ効果を発揮させる働きがあることが分かる。

理論解析や図9で示したように、制振効果は少量の液体で十分に発揮されるが、制振効果をより改善するためこれまでの容器の外側に直径150mmのリングを設け、液体の入る層を2重にして実験を行った。その結果が図11



実験条件  
 サスペンション：コイルバネ  
 液体：水（ $\rho = 1.02$ ），100ml  
 ベッセル形状：4枚フェンス付き基本ベッセル

図12 回転数に対する加速度応答の理論値と実験値との比較

である。これから分かるように液体を内側、外側、両側と内蔵するに従い振動加速度が減衰していく。特に両方の層に重液を含ませたときには振動加速度比が13.5 Hzのときに最大で初期値の22%になっている。このように制振効果を向上させるためには比重の大きい液体を使うほかに、多層のリングを有する容器が有効であることが分かる。

### (3) 理論値と実験値との比較

図12に、回転数を変えていったときの加速度振幅比の変化を、理論値と実験値を比較して示す。実験装置の支持系としては、振動系の固有振動数と粘性減衰率の判明しているコイルスプリングを用いた。また内蔵する液体として水100mlを用いた。さらに液体表面に有害な波が生じることを防ぎ、計算での仮定である液体の剛体回転を保証するため、4枚フェンス入りのベッセルで実験を行った。

グラフの縦軸には、液体を入れないときに対する加速度振幅の比をプロットした。加速度比の理論値としては式(4)を用いて

$$\frac{A_c}{A_{c0}} = \frac{\sqrt{[1 - \omega^2]^2 + (2\zeta\omega)^2}}{\sqrt{[1 - (1 + m_{tot})\omega^2]^2 + (2\zeta\omega)^2}}$$

を計算した。

液体がバランサ効果を発揮するのは振動数が共振振動数を超えた領域であるが、グラフから分かるように  $\omega = 1.5 \sim 2.4$  の範囲では実験値と理論値はよく一致する。なお  $\omega > 2.5$  の領域では実験値が理論値を大きく下回っているが、これはこの領域で発生する別のモードの振動を

液体バランサが吸振しているためである。換言すると液体バランサを利用した制振装置は、作動回転数が十分に高ければ、アンバランスに起因するすべての振動モードを減衰させる働きのあることを示している。

#### 4. 結言

本論文では液体を用いた制振装置をヘリコプタに応用するための基礎実験として、アンバランス回転に起因する横振動の制振効果を理論解析と実験の両面から検討した。その結果以下のことが明らかになった。

本防振装置は振動系の固有振動数より高い回転数でロータが回転するとき効果を発揮する。

制振効果は内蔵する液体の量には無関係であり、液体の仮想質量に関係する。

ベッセル内のフェンスは液体の表面に有害な波が生じるのを防ぐ効果がある。またベッセルを多層にすることで制振効果をより一層効果的にすることができる。

については実機サイズの無人機（ロボコプタ）を用いた実験から、機体が地上にあるときの機体系の共振振動数はロータの運航回転数よりも低いことを確認している。したがって本装置が実機の横振動に対して効果的に作動することを予想できる。

また の結果より、横振動防振のための液体の量はあ

る程度任意に設定できるということが判明した。したがって今後は縦振動に対する解析と実験を行い、縦振動吸振に対して最適な液体の量や性質を調べていく予定である。そして最終的にはそれらの結論をふまえて実機サイズの制振装置を設計製作し、ロボコプタに取り付けて実際の制振効果を確認することを目標としている。

なお本研究は東京大学名誉教授東昭先生の指導の下、(社)日本航空宇宙工業会技術開発センターの委託研究として行われたものである。

#### 参考文献

- 1) 山口宏樹：構造振動・制御，1996年，pp.133～149，共立出版株式会社。
- 2) 日経メカニカル，No.516，1997年9月29日号，日経BP社。
- 3) 田中基八郎・大久保信行：振動をみる，平成6年，オーム社。
- 4) 佐藤勇一：液体を内蔵した中空回転体を用いた動吸振器，日本機械学会論文集，C編，54巻，504号，昭和63年8月，pp.1629～1636。
- 5) 金子成彦・葉山眞治：回転円筒容器内に部分的に含まれた液体の自由表面波に関する研究（第1報，共振モードの可視化と非粘性理論による解析），日本機械学会論文集，C編，49巻，439号，昭和58年3月，pp.370～380。