

ヘリコプタ用流体式防振装置の開発

～縦振動防振メカニズムに関する研究～

Development of the “ Helicopter Liquid Vibration Absorption System ” (HeLiVAS)

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

鈴木 利明
Toshiaki SUZUKI

川田工業(株)航空・機械事業部
製品開発部技術開発課

赤坂 剛史
Takeshi AKASAKA

川田工業(株)航空・機械事業部
製品開発部技術開発課

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

本論文では、航空・機械事業部で開発中のヘリコプタ用流体式防振装置 (HeLiVAS) の縦振動に対する防振効果を理論と実験の両面から議論する。このうち理論面については、遠心力場にある液体の挙動を摂動法による近似解を用いて解析し、液体が外乱と同調するための最適条件を導く。架台実験では理論解析で得られた結果を参考にして防振装置模型を設計製作し、装置の有効性を実証する。またヘリコプタへ適用化のための実験として、ロータ模型を用いた風洞実験を行い、空力的加振力に対する防振効果を検討する。

なお本論文は、川田技報Vol.19における報告の第2報である。

キーワード：ヘリコプタ用防振装置，同調液体ダンパ，液体バランサ，縦振動，横振動

1. はじめに

川田工業(株)航空・機械事業部では、液体を利用したヘリコプタ用防振装置 Helicopter Liquid Vibration Absorption System (HeLiVAS) を開発中^{1),2)}である。この装置は液体とそれを内蔵する容器から構成されており、ロータ・ヘッドに装着して、メイン・ロータが誘起する縦と横の2方向の振動を同時に低減する(図1)。

防振の対象となる振動成分は、横振動がブレードのマス・アンバランスによる1/revの振動成分、縦振動がヘリコプタの前進飛行時に発生するN/revの振動成分(N:ブレード枚数)である。このうち横振動防振に関しては液体の自動バランサ効果を利用する。この自動バランサ効果については、前年度の川田技報³⁾ですでに検討を行って

おり、その有効性を理論と実験の両面から検証している。

縦振動防振に関しては同調液体ダンパの原理を利用する。同調液体ダンパとは液体の波動を利用した振動低減装置であり、建築物や街灯の横揺れ防止用にすでに実用化されている。

同調液体ダンパの原理を用いて縦振動を低減しようとする試みは文献4)で研究されている。文献4)では回転容器に内蔵した液体を、回転軸方向の振動に同調させて縦振動を吸振することを検討しており、その有効性が、主に1/revの振動に対して証明されている。

本論文では、縦振動低減に対するHeLiVASの設計指針を得ることを目的として、回転する円筒容器内に内蔵された液体が発揮する3/revの振動低減効果を調べる。ここで3/revの振動とは、3枚ブレードのヘリコプタが前進飛行時に発生する縦振動である。具体的にはまず文献4)で得られた解析解を用いて、3/revの縦振動に有効な同調パラメータ(容器の形状と液体の量、種類)を算出する。次にそれらの値を用いて容器を設計製作し、防振効果を実験的に確認する。さらにロータ模型による風洞実験を行い、空気力を加振源とする振動についての防振効果を検証する。

2. 理論解析

解析に用いたモデルを図2に示す。アンバランス・ホ



図1 HeLiVASの概念図

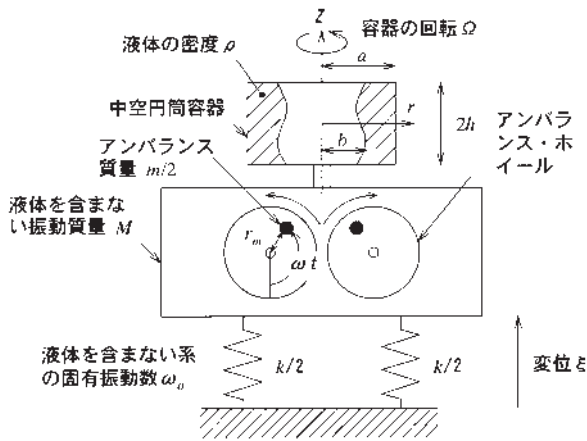


図2 解析モデル

イールによって振動質量 M には $mr_m \omega^2 \sin \omega t$ なる加振力が作用しているとする。 r_m はアンバランス・マスの取り付け半径、 m はアンバランス・マスの全質量である。密度 ρ の液体を内蔵した円筒容器はその軸を鉛直に向けて角速度 Ω で回転している。容器の内径は $2a$ 、高さは $2h$ である。液体は平衡状態において、容器の軸から半径 b の位置まで封入されているとする。振動質量はバネのみで支持されており、鉛直方向のサスペンション系の固有円振動数は液体がないときに ω_0 とする。

振動質量 M の鉛直方向変位を ξ とすると、鉛直方向の M についての運動方程式は以下ようになる。

$$M \ddot{\xi} + k \xi = mr_m \omega^2 \sin \omega t + f_L \quad (1)$$

ここで f_L は、液体が容器に及ぼす鉛直方向の力である。

f_L については、容器内に固定した円筒座標系上で非粘性非圧縮性流体の運動方程式を立て、周方向モードがないことおよび振動による変位が微小であることを仮定して、方程式を線形化し、近似的に解析解を求める。振動質量 M の縦方向の振動応答解は、この f_L の近似解を式(1)に代入し、 ξ について解いて得ることができる。結果のみを記すと次のようになる。

$$\xi = \frac{1}{2} \omega_0^2 \sin^2 \omega t$$

$$\text{ここで } \omega_0^2 = \frac{mr_m \omega^2}{1 - \dots} \quad (2)$$

$$\left(\frac{b}{a}, \frac{h}{a}, \omega_0, n \right) = 1 + \omega_0^2 \left\{ \left(1 - b^2 \right) + \left(\frac{4}{a} \right)^2 h b \dots S_n \right\} \quad (3)$$

ただし各変数は次式により無次元化してある。

$$b^* = b/a, h^* = h/a, r_m^* = r_m/a, \omega^* = \omega/a, \omega_0^* = \omega_0/a, \dots = \dots, \omega_0 = \left(\frac{a^2 2h}{M} \right) / M: \text{仮想質量}$$

式(2), (3)については、 $\Omega/\omega > 1/2$ に対する解も同様に得られるが、本研究では3枚ブレードのヘリコプタで現れる3/revの振動を対象としているため、ここでは省略している。

式(3)において、 S_n はベッセル関数を含んだ関数である。また次数 n は容器の上下面間に存在する波の節の数を表しており、 $n = 2, 4, 6 \dots$ については上下面対称となって流体力がキャンセルさせるため、考慮に入れていない。さらに次数が3以上の波については動吸振器としての使用可能な範囲が狭く実用的でないため、以下では $n = 1$ 、すなわち半波長分の波が及ぼす影響についてのみ考察する。

図3は $\Omega/\omega = 1/3$ 、つまり3/revの強制振動数に対する振動周波数応答を計算したものである。 $b = 1$ すなわち液体が内蔵されていないときは共振周波数 ω_0 において共振現象を示す。ところが、 b が0.71のときは共振を示さず、すべての周波数領域で振動が低いレベルに抑えられている。このように各パラメータを適切に調整することにより、すべての加振周波数領域において振動を低減することが可能になる。

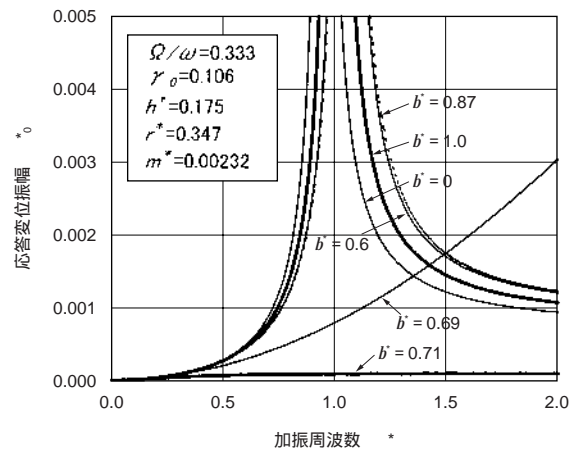


図3 振動応答の計算結果

図3中の共振を起こさないような b と h の範囲は、式(3)で定義される $\omega_0^2 < 0$ となるという条件下で求めることができる。 ω_0^2 は液体の影響を表すパラメータであり、式(2)において $\omega_0^2 < 0$ であれば、 ω_0^2 が ω^2 に対して単調減少関数になる。したがって $\omega_0^2 < 0$ を最適同調条件とし、この条件を満たすように b と h を決定すれば装置は最適化されることになる。図4 a) は $\Omega/\omega = 1/3$ のもとで上述の最適条件を満たす b と h の組を数値計算で求めたものである。図中の黒い部分が $\omega_0^2 < 0$ を満たす (b, h) の領域である。このように最適な (b, h) は限られた範囲にあり、これ以外の領域では、効果は十分に発揮されない可能性がある。

図4 b) は図4 a) の計算を $\Omega/\omega = 0.318$ について実行したものである。 ω_0^2 すなわち仮想質量比が大きいと、最適同調を与える (b, h) の領域は広くなるのが分かる。つまり密度の大きい液体を使うと、装置の最適調整範囲のロバスト性が大きくなり、最適に調整しやすくな

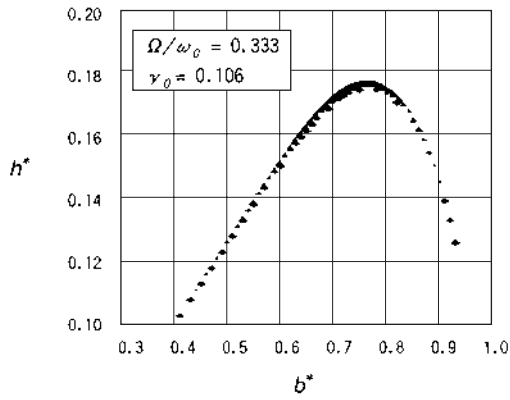


図4 a) 最適同調領域 ($\gamma_0 = 0.106$)

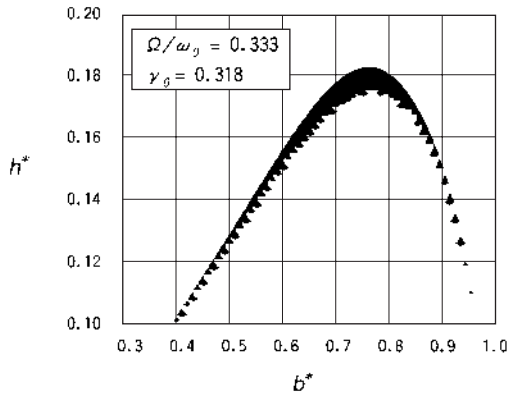


図4 b) 最適同調領域 ($\gamma_0 = 0.318$)

るという利点がある。

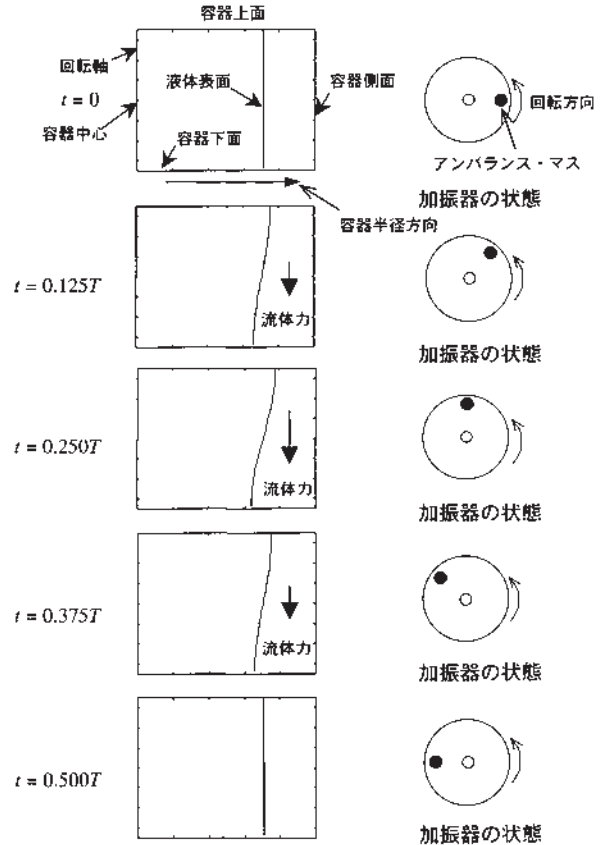
図5は半波長モード ($n=1$) の波形が半周期の間でどのように変化するかを計算したものである。液面の変位は誇張して描いてある。図中において T は加振器の周期である。液面は加振器と 180° 位相がずれた状態で運動しており、加振器による加振力が最も大きいところで液体はそれと反対の方向へ最も大きく偏っている。

この計算モデルでは系に粘性を含んでいないため位相のずれは 0° か 180° である。しかしながら実際の液体には粘性があり、位相のずれは加振周波数によって変化するものと考えられる。したがって振動低減効果を最大限に発揮する最適設計を行うためには、ここで述べた種々のパラメータに加えて、液体の粘性係数をも同時に含んだモデルでの解析が必要となる。ただし本研究では、粘性モデルの解析を行う代わりに、上式で得られた非粘性解をもとにして実験を行い、架台装置上にて実験的に粘性の効果を調べた。

3. 架台実験

(1) 実験装置

写真1に架台実験装置の外観を示す。サーキュラ・プレートと防振装置模型は内蔵モータによって鉛直軸周りに回転する。装置全体はコイル・スプリング上に支持されており、装置の下部に取り付けた鉛直方向の加振器に



計算条件	
$\Omega/\omega = 0.333$	$b^* = 0.71, h^* = 0.175, \gamma_0 = 0.106, n = 1$

図5 液面変位の変化の様子

よって縦振動を誘起する。振動は3軸加速度計によって計測し、動ひずみ計を介してパーソナル・コンピュータに記録した。得られた振動データには周波数解析を施し、加振周波数成分のみを取り出した。なお防振装置模型を含まない実験装置の全重量は7.4kgであった。

防振装置模型は内径や高さの異なるものを4種類製作した。図6に示すのはその一例である。この防振装置模

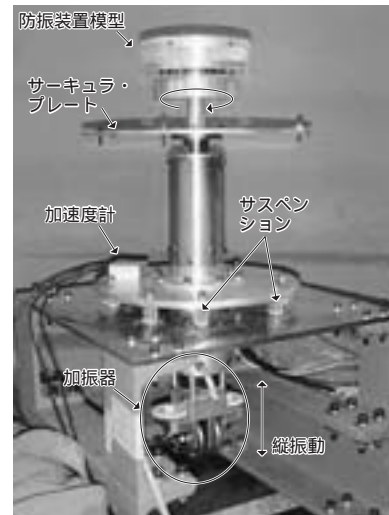


写真1 架台実験装置の外観

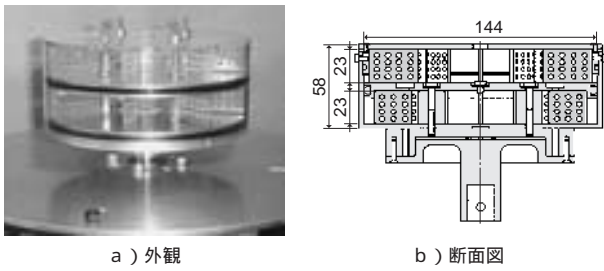


図6 2層防振装置模型

表1 実験に使用した液体の種類

液体	比重	動粘度 (cSt)
水	1.02	1.00
シリコン・オイル 100 cSt	0.99	100
重液(ポリタングステン酸ナトリウム)	2.55	4.00

型はアクリル製の円筒容器とベース部から構成されている。層を増やした場合の効果を検討するため、容器には中ブタを設け、上下に2つの層を有している。各層の高さは理論解析で得られた最適値に設定し、スペーサの変更による若干の調整代を設けた。容器の各層には8枚ずつフェンスを取り付けているが、文献1)で報告したようにこれらのフェンスには液体の動きを安定化させる役割がある。なおこの図に示す防振装置模型の重量は0.9kgである。

表1に実験で使用した液体の種類を示す。比重と粘性の影響を調べるため3種類の液体を用いて実験を行っている。

(2) 架台実験結果

h と b を固定し、振動数比 ω/Ω を変えながら振動を計測した結果を図7に示す。縦軸にプロットしたのは液体を内蔵していないときに対する振動加速度の比である。図から分かるように各 h と b の組には防振効果が最大となる振動数比があり、 $h = 0.194$, $b = 0.778$ のケースでは $\omega/\Omega = 2.75$ のときに80%の振動の低減効果を得ている。

図8は図7と同じ条件下で理論計算を行った結果である。液体の粘性や波動の非線形現象のために振動の低減量や最大防振効果を与える振動数比に若干の違いは見られるが、定性的にはよい一致を示している。

次に内蔵する液体の種類を変えて実験を行った結果を図9に示す。この図は容器の高さを一定にし、表1で表された3種類の液体について、内蔵する液体の量を変えながら振動を計測した結果である。まず水と重液の場合を比べてみると、重液を内蔵した場合の方が振動低減効果は高い。また水の場合、防振効果は液量に対して敏感に変化する。液体の粘性を比較すると、水とシリコン・オイルではシリコン・オイルの方が、 b の有効範囲が若干広がっている。ただしどちらの場合でも振動の低減量はほぼ同じであり、振動低減効果に対しては液

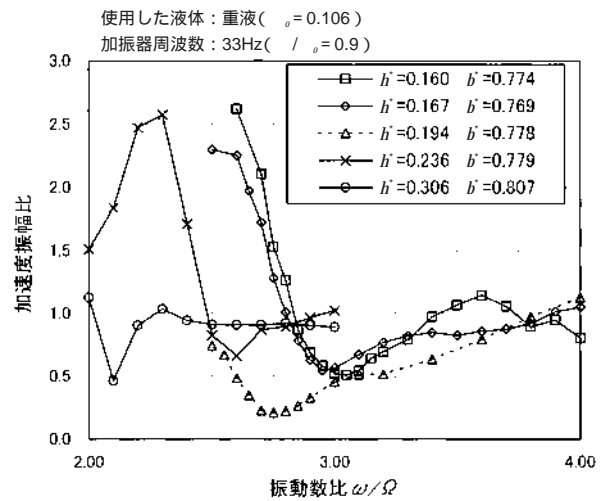


図7 振動数比による振動加速度の変化(実験)

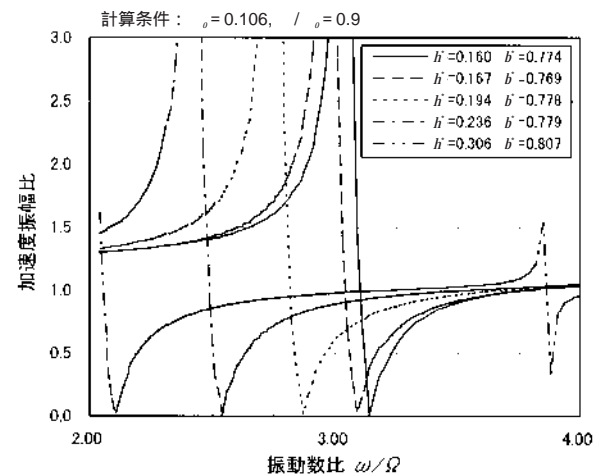


図8 振動数比による振動加速度の変化(計算)

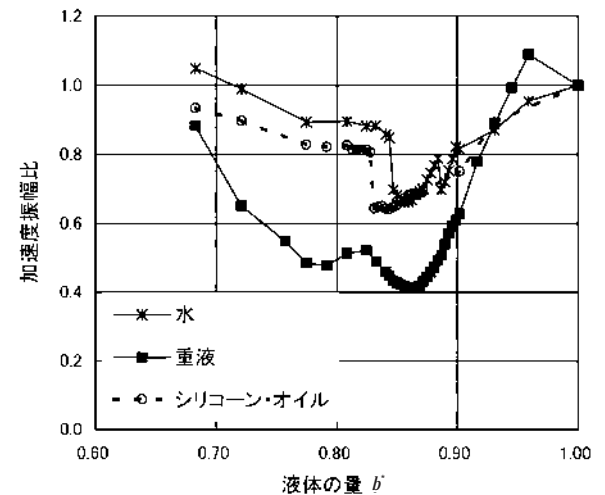


図9 液体の種類による振動低減効果の違い

体の比重が重要なパラメータであることが分かる。

次に h を0.153, ω/Ω を3.0に固定し、加振周波数を変化させて振動を計測した結果を図10a)に示す。用いた容器は図6で示した2層防振装置模型である。液体が内蔵されていないとき($b = 1$)には40Hzの共振点にて共振現象を示している。これに対し液体を下層にのみ内蔵

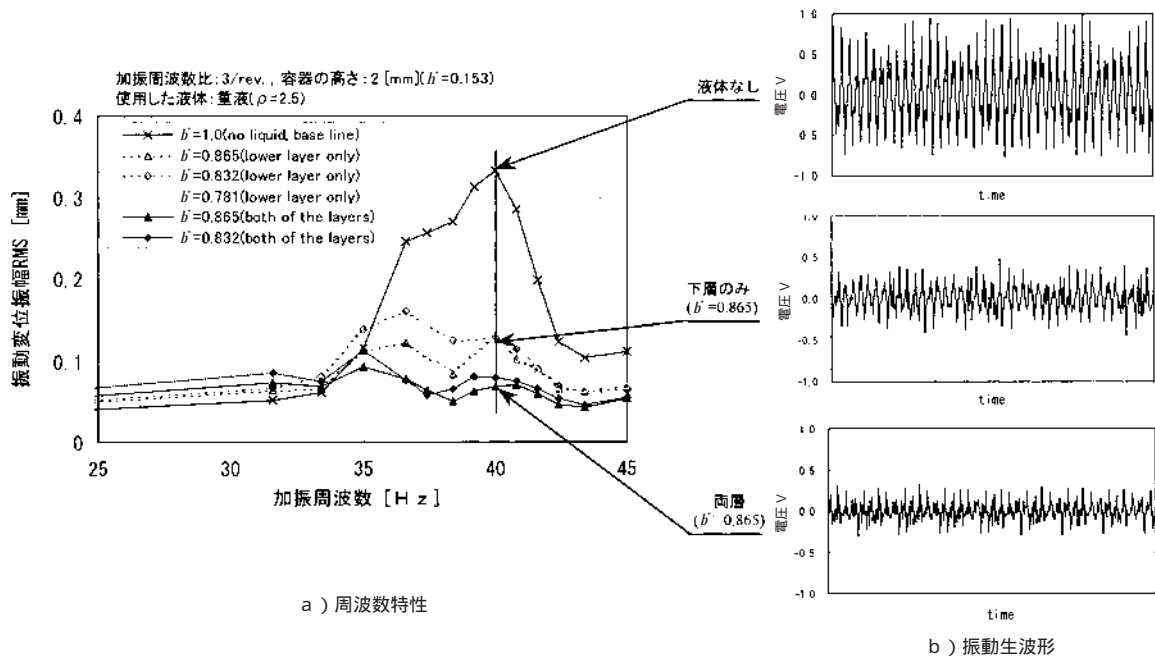


図10 2層防振容器の効果

すると ($b=0.865$) 共振現象が大きく抑えられ、共振点では初期値の40%にまで振動が減衰している。さらに両層に液体を内蔵した結果では共振現象が完全に抑えられており、最大で80%の防振効果を発揮している。図10b)は加振周波数が40Hzのときの振動波形を電圧値のままプロットしたものである。2層容器の有効性が明らかに現れている。

本実験では3/revの振動数比に対する防振効果のみを検討した。しかしながら図8からも予想できるように、容器の形状と液体の量を調整することで、4枚ブレード、5枚ブレードのロータが発生する4/rev、5/revの振動についても防振効果を得ることが可能である。また3/revの振動低減に最適な容器の高さは $h=0.153$ であることが分かったが、これは内径の15%に過ぎず、容器としては薄い形状となる。したがって容器を縦に重ねても装置全体のボリュームとしては比較的小さく保たれる。本装置がヘリコプタ用防振装置として有利であると考えるのは以上で述べたような理由からである。そしてこれらの点は既存の動吸振器では見ることができない大きな特徴である。

4. 風洞実験

(1) 実験装置

架台実験では加振器を用いて振動を発生し防振効果を計測した。しかしながら実機における振動は空気力によるメイン・ロータからの振動であり、縦振動以外にもロール振動や横振動が同時に発生する。本装置は縦振動と横振動を1台で防振することを目標としており、その効果確認のためにもヘリコプタを模擬したロータ模型での振動低減計測実験が必要である。そこで写真2に示すよ

うな風洞模型を設計製作し、川田工業(株)所有の多目的風洞開放型計測部にて実験を行った。

製作した模型は全重量40kg、ロータ直径1.5m、最大設計ロータ回転数1500rpmの3枚ブレード・ロータ模型であり、ロータ・ヘッドには架台実験で使用した防振装置模型を直接装着できるようになっている。模型全体はコイルサスペンションを介してベース・プレートに取り付けられ、さらにそのベース・プレートは風洞内の六分力天秤に搭載される。防振装置による振動低減効果はロータ模型に取り付けた3軸振動加速度計により計測した。

(2) 実験結果

ロータを回転した状態で風速を増加し、コレクティブ・ピッチ角を入力することで、ヘリコプタの前進飛行を模擬することができる。この際、ブレードに不均衡な空気力が働き、模型にはブレード枚数に応じた振動が誘起される。図11に示すのは風速21.2m/s、コレクティブ・ピッチ角 8° 、液体なしの状態では振動加速度を計測し、

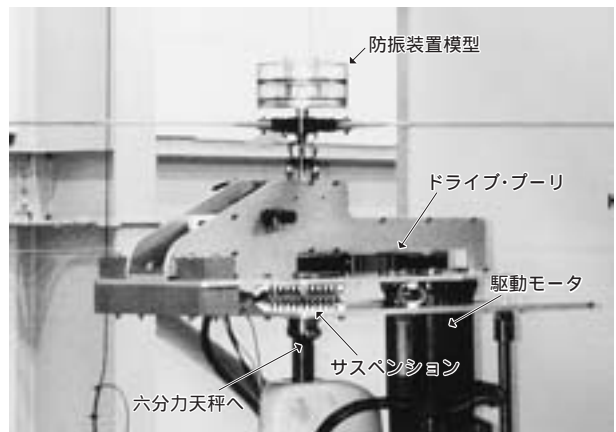


写真2 ロータ模型を風洞内に設置した様子

そのデータを周波数解析した結果である。45Hzにピークが見られるが、これはロータ回転数900 rpm (15Hz)の3倍である。つまり本ロータ模型が、3枚ブレードを有するヘリコプタに特有の振動を忠実に模擬できることを示している。

次に重液を容器に内蔵して縦方向振動加速度を計測し、コレクティブ・ピッチ角に対してプロットしたものを図12に示す。各層の高さは架台実験で得られた最適値の $h = 0.153$ に固定した。図から分かるように両層に液体を内蔵することで最大50%の振動低減が確認できる。また振動低減率はすべてのコレクティブ・ピッチ角にわたってほぼ一定となっている。なお両層に重液を内蔵した場合のロータ模型に対する液体の重量比は1.2%であった。

実機で考慮する場合、実質的な振動質量はトランスミッションを含むロータ系の部分であり、この部分の重量は全備重量の約5%に相当する。防振器の重量を全備重量の1%程度と仮定するならば、実質的な振動質量に対する装置の重量は20%程度となる。したがって、実機を模擬した実験を行う場合、液体の重量が振動質量の20%程度になるように模型を設計する必要がある。今回の実験ではロータ模型に設計上の制約があり、全重量を軽くすることができず、小さい質量比での実験にとどまった。

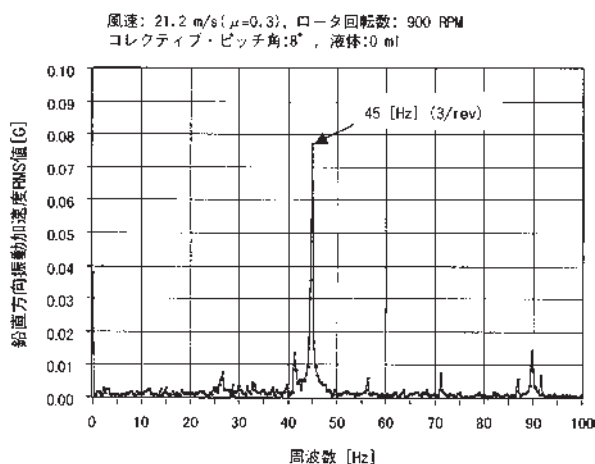


図11 縦振動の周波数解析結果 (液体なし)

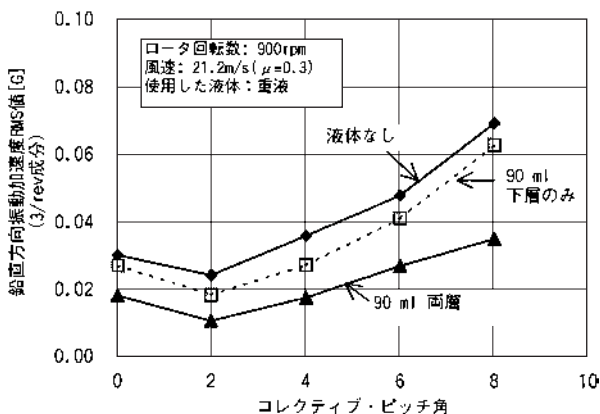


図12 縦振動 3/rev 成分低減効果

振動低減効果が架台実験の結果と異なり、50%にとどまった理由はその点にある。そこで今後は横振動低減効果も含めた総合的な評価を行うため、模型のロータ系とモータ駆動部の分離を図り、より実機に近い状態を模擬して実験を行う予定である。

5. まとめ

本論文ではヘリコプタ用流体式防振装置HeLiVASの縦振動防振に対する最適設計パラメータを検討した。その結果、 h と b を最適に同調すると、すべての加振周波数領域にわたって振動を低減できることが分かった。また最適な h と b にはある一定の領域が存在し、この領域は容器の仮想質量が大きいほど広くなるのが解析的に示された。架台上の実験では、上下2層を有する容器について防振効果を測定し、理論結果を実証した。さらに風洞実験を行って防振効果を測定し、3枚ブレード・ロータが発生する縦振動についての防振効果を検証した。

今後はロータ模型の改造を通してより実機に近い状態で風洞実験を行い、その結果を装置の設計に反映させて、最終的には実機搭載用の防振装置を設計製作する予定である。

なお、この研究は平成11年度(社)日本航空宇宙工業会の委託研究として実施されたものである。

参考文献

- 1) 高粘性の液体を利用した防振装置のヘリコプタへの適用化研究, 革新航空機技術開発に関する調査研究成果報告書, No.1009, (社)日本航空宇宙工業会革新航空機技術開発センター, 1999.3.
- 2) 高粘性の液体を利用した防振装置のヘリコプタへの適用化研究, 革新航空機技術開発に関する調査研究成果報告書, No.1106, (社)日本航空宇宙工業会革新航空機技術開発センター, 2000.3.
- 3) 譚安忠・中村優ほか: 液体を利用した防振装置のヘリコプタへの適用化研究, 川田技報, Vol. 19, 2000.1, pp.10~16.
- 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, 1988.8, pp.1629~1636.