電気粘性流体を利用したスクイズフィルムダンパ*

森下 信^{*1}, 三井純一^{*2}Squeeze Film Damper
as an Application of Electro-Rheological Fluid

Shin MORISHITA and Jun'ichi MITSUI

Electro-Rheological fluid (ERF) has notable characteristics of viscosity which could be applicable for various industrial machines. Viscosity of ERF increases in accordance with the applied electric field. Without an electric field, ERF has the viscosity characteristics of a Newtonian liquid. Variation of viscosity is reversible, and the required time for variation is said to be as short as 0.001 sec. Numerous applications of ERF in the engineering field have been attempted since the characteristics of ERF were discovered by W.M. Winslow. However, no successful application has ever been reported. This paper deals with the successful application of ERF to a squeeze film damper. It is elucidated that the squeeze film damper with ERF is quite effective for the reduction of vibration for any rotor system. First and second critical speeds can be easily passed without large vibration amplitude. It is also shown experimentally that there may be the most effective damping ratios for every mode of the rotor. Transition phenomena of the modes in accordance with supported damping are clarified in the present experiment.

Key Words : Squeeze Film Damper, Flexible Rotor, Vibration of Rotating Body,
Vibration Control, Electro-Rheological Fluid

1. はじめに

電場を加えることにより流体の粘性が変化するという電気粘性効果の存在は1800年代の終わりにA.W. Duff⁽¹⁾、G. Quinke⁽²⁾らにより認められた。しかし当時は理論的裏付けが少なく、実用的応用分野も開拓されなかった様子であり注目されなかったようである。ところが1949年にW.M. Winslowがコロイド溶液に関する電気粘性効果の研究を行って電場を加えることにより数十倍の粘度上昇が認められて以来実用性の検討がたびたび行われてきた⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。電気粘性効果は一般の流体に於いても少なからず認められ、水も例外ではないが、特に粘性の変化に主眼点を於いて開発された流体を総称して電気粘性流体という。この流体の特徴は粘性が変化する応答性がきわめて良く、また粘度範囲もかなり自由に選択できることにある。

近年の制御工学の発展に照らし合わせて考えると、

電圧により粘性が制御できることは周辺機器の簡素化に非常に有利である。この電気粘性流体には様々な用途が考えられるが、その中でも有効の利用法として挙げられるのが振動制御である。著者らは別報において減衰器への応用を提案し、理論的及び実験的な検討を加えて電気粘性流体の有用性について明らかにした。

本論文では回転機械の振動抑制に用いられているスクイズフィルムダンパへの適用を試みた結果について報告する。スクイズフィルムダンパに関しては既に数多くの研究があり⁽⁶⁾⁻⁽¹¹⁾、振動モードに応じた最適な減衰が存在することが指摘されている。電気粘性流体の応用により、潤滑油の粘度を制御することで複数の振動モードに対応する最適な減衰値が与えられることが容易に推測される。ここでは電気粘性流体を用いたスクイズフィルムダンパを試作して実験を行い、ダンパの最適減衰の存在について論じ、さらに単一のスクイズフィルムダンパにより複数のモードに対する振動抑制が可能であることを示す。

* 原稿受付 平成元年9月1日。

^{*1} 正員、横浜国立大学工学部 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)。^{*2} 正員、東燃(株)総合研究所 (〒354 埼玉県入間郡大井町西鶴ヶ岡1-3-1)。

図1 電気粘性効果

2. 電気粘性流体の特性

電気粘性流体は電場を流体に加えることにより、電場中に存在する流体の粘性を電場の強さに応じて制御できるという特徴を持つ。粘性が変化する応答速度は1 msec以下とされており極めて速い。また粘度変化の範囲も数センチポアズからは固体まで及ぶ。なぜ粘性が変化するのかという理論的根拠についてはいくつか提案されているがまだ定まったものはない⁽⁵⁾。代表的な特性として印加電圧と粘度の関係を図1に示す。せん断速度が大きくなると電気粘性効果は小さくなり、一種のチキソトロピーを示す。

3. 実験

図2に実験装置の概要を示す。三カ所に集中質量を持つ剛性の低い弾性ロータの両端をスクイズフィルムダンパで支持し、ロータの一端はフレキシブルな弾性継手を介してモータに接続されている。主

図2 実験装置概要

な諸元を表1に示す。

ロータは少なくとも二次までの弾性モードが現われるように二次の弾性モードの腹の位置に対応した場所に集中質量を配置している。

本実験の目的は電気粘性流体を利用したスクイズフィルムダンパでロータの振動が抑制できるか否かを示すことにあるので、電気粘性流体を利用したスクイズフィルムダンパは反モータ側のものだけである。なおモータ側のダンパは通常のスクイズフィルムダンパを用いている。概略の構造を図3に示す。

玉軸受はリング状ハウジングに固定され、そのリング状ハウジングは複数の弾性サポートピンで支持されている。このピンの数を変化させることにより軸受部支持剛性を選択できる。リング状ハウジングの外周に絶縁性セラミックを介して内側電極を取り付け、外側電極はやはり絶縁性セラミックを介してハウジングに固定されている。外側電極と内側電極の間に電気粘性流体を流し、電圧を変化させることで減衰力を制御することが可能である。ロータの自重による軸中心とダンパ中心の偏心を補正するためにピアノ線により釣り上げ、軸受支持剛性に比較して十分小さい剛性のコイルバネにより弾性支持して

表1 主な諸元

Rotor Length	700 mm
Shaft Diameter	20 mm
Rotating Speed	500-4500 rpm
Damper Diameter	72 mm
Radial Clearance	0.16 mm
Damper Width	10 mm

図3 スクイズフィルムダンパ

いる。電気粘性流体は約 1 m の水頭により強制給油し、排出された電気粘性流体はポンプにより循環している。油温はダンパのハウジングをドライヤで加熱することにより一定に保ち、油温測定はハウジングの給油口の部分で行っている。

回転数の測定はロータの反モータ側に 60 個の穴のあいた円盤を取り付け光学的パルスを発生させてカウントし回転数に換算している。

ロータの振動振幅および振動モードは 6 個の渦電流式非接触変位計により測定した。

実験はまず打撃試験により固有振動数を測定し、ロータの支持剛性を算定する。また電場の強さを変化させて打撃試験を行うことで振動波形から各モードに対応した減衰率を算定する。次にロータを回転させて回転数の変化に対応して振動モードを測定し、各回転数で電場の強さを変化させて振動モードの変化の様子を明らかにする。

図 4 危険速度線図

図 5 振動モード

4. 結果及び考察

4・1 数値解析結果 前章で示した実験装置をモデル化し有限要素法により複素固有値解析を行った。固有値計算はQR法に逆べき乗法を組み合わせることで複素固有値及び複素固有ベクトルを算出した。

図4に非減衰時の危険速度線図を示す。また支持剛性を20、50 kgf/mmとした時の1次と2次の振動モードを図5に示す。支持剛性を高くするに従い単純支持のモードに近づくのでダンパの効果は当然小さくなり、また逆に支持剛性を低くすれば軸心とダンパ中心の位置のずれが大きくなり非線形性が強くなると考えられるので、支持剛性の設計値は50 kgf/mmとした。1次と2次の危険速度はそれぞれ1452、3254rpmである。

支持剛性を50 kgf/mmで一定とし、支持部の減衰係数を変化させたときのロータの危険速度は図6(上図)のようになる。減衰係数がある値を越えると危険速度は同一の振動モードに対して上昇し、単純支持の状態に漸近する。しかも振動モードにより危険速度の遷移する減衰係数の値が異なることがわかる。

同様に減衰係数を変化させたときの減衰比を図6(下図)に示す。この減衰比は、ロータをバネとダッシュポットを有する集中質量の1自由度系に置き換えて、複素危険速度を表す偏角の余弦をもって定めている。具体的には

図 6 危険速度と減衰比

$$\lambda_r = -\frac{c}{2m}$$

$$\lambda_i = \frac{\sqrt{4mk-c^2}}{2m}$$

として

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_r}\right)^2}}$$

で定義する。ここで m 、 c 、 k はそれぞれ質量、減衰、剛性を表し、 λ_r 、 λ_i は複素固有値の実数部と虚数部である。 ζ は減衰比を表す。スクイズフィルムダンパには、齊藤らにより指摘されているように、ロータの各振動モードに対応した最適な減衰値が存在する^{(6)・(8)}。図より明かなように各振動モードに対して減衰比が極値を持つ減衰係数の値が異なっている。本計算例の場合には1次のモードよ

り2次のモードの方が低い減衰係数において効果的であるといえる。

4・2 実験結果および考察 スクイズフィルムダンパの減衰特性を決めるのはダンパの形状によるか、もしくは潤滑油の粘性によるかのいずれかである。実機では作成後の形状変更は不可能である。そこである1つの振動モードに対する最適減衰は形状(すきま)により与え、他の振動モードに対しては粘性を制御することで最適減衰を与えるという考え方をする。

実験はまずダンパ内に潤滑油を入れない状態で打撃試験を行った。その時の1次および2次の振動モードに対する危険速度は各々1259、3457cpmであった。また減衰曲線から求めた減衰比は約3.5%であった。

電気粘性流体をダンパ内に流入させ、加える電場の強さを変化させて打撃試験を行ったときの減衰波形を図7に示す。電場がないとき、すなわち流体の粘度の低いときはロータ全体の振動が剛体運動も含めて一様に収まっているが、電場を強くするに従い弾性振動が残る様子がわかる。また固有振動数に関しても減衰を大きくするに従い高くなる様子が観察される。これらは軸受部が単純支持状態に近付くために起きる現象である。

これをフーリエ解析し1次と2次の固有振動数を

図7 自由振動波形

図8 危険速度と減衰比

図9 パワースペクトル

求めたものが図8の上図である。電場を強くするに従いまず2次の共振振動数が約3800rpmから5000rpmに上昇し、その後1次の共振振動数が約1400rpmから1900rpmまで上昇する。特に1次の共振振動数に関しては遷移時に二つの共振振動数が同じモードに対して現われ移行するのが観察された。2次に関しては明確ではないが同様の現象が起きているものと推定できる。これらの移行形態は数値計算上はあたかも滑らかに遷移するように見えるが、実際の現象は本実験結果のように同時に2つの共振点が現われ優位さが次第に顕著になることが明らかになった。

図8下図は減衰波形から1次の振動モードの波形を分離して対数減衰率を求め、1自由度系に換算した減衰比を表したものである。共振振動数の遷移点の付近で減衰比が極大値をとっていることが分かる。

図9はパワースペクトルを、加える電場の強さを変化させて示したものである。図8と照らし合わせると、1次の共振振動数が移り変わる様子がよく現われている。さらに振動振幅が極小値を持つこと、すなわち減衰の最適値が存在することがこの図からも明かである。

回転実験時の共振曲線を示したのが図10である。電場をかけないときとかけたときでは、1次の共振点のピーク値が大幅に減少し、さらに共振点も高くなっている。この図は高速回転時の信号から低速回転時の信号をベクトル的に差し引いて初期たわみその他の誤差成分を取り除いてある。

図11に1次の共振点付近(1400rpm)での振動モードを、さらに図12に2次の共振点付近(3800rpm)

図10 共振曲線

図11 1次の振動モード

図12 2次の振動モード

での振動モードを示す。センサーを5箇所配置して測定した結果であり、1次に関しては振幅が鉛直面で最大値をとるある瞬間に鉛直面に投影したモードを示し、2次に関しては中央円盤での振幅がゼロとなる瞬間の位相方向からみた投影図を示している。図11に関しては1次の振動は電場を加えることによりその振幅が著しく減少していることがわかる。また図12の2次の振動に関しては、実験装置の都合上4200rpmまでしか回転が上げられなかったので電場を加えたときの2次の振動のピーク値が明かではないが、電場が強すぎるとかえって振動振幅が大きくなっている様子が観察される。

5. 結 論

以上、電気粘性流体を応用したスクイーズフィルムダンパの有効性について検討した。その結果以下の点を明らかにした。

(1) 電気粘性流体を利用することで減衰力を可変制御できることを実験的に明らかにした。従来指摘されているようにスクイーズフィルムダンパには最適減衰が存在し、しかも振動モードによりその値は異なる。電気粘性流体により粘性を制御することで複数の振動モードに対する効果的な減衰を与えることが可能であることが示された。

(2) ロータの支持部の減衰力を変化させたときの固有振動数が変化する遷移過程を実験的に明らかにした。

本論文では一つの応用例を示したが、現在制御系の発達は著しく、電気粘性流体と制御系を組み合わせることで様々な分野への応用が可能であると考えられる。

本研究を行うにあたりご指導いただいた東京大学教授 木村好次先生にお礼申し上げます。

参考文献

- (1) Duff, A.W., *Physical Review*, 4-1 (1896) 23
- (2) G. Quinke, *Ann. Physik*, 62 (1897) 1
- (3) Bjornstahl, Y. and Snellmann, K.O., *Kolloid Zeitschrift*, 78 (1937) 258
- (4) Winslow, W.M., *J. Applied Physics*, 20 (1949) 1137
- (5) Klass, D.L. and Martinek, T.W., *J. Applied Physics*, 38-1 (1967) 67
- (6) 斉藤、他2名、*機論*、42-360 (1976) 2384
- (7) 斉藤、染谷、*機論*、43-376 (1977) 4474
- (8) 斉藤、小林、*機論*、48-436 (1982) 1883
- (9) 宮地、他2名、*航空宇宙誌*、24-274、(1976) 552
- (10) Tomsen, K.K. and Andersen, H., *Trans. ASME, Ser. B*, 96-2 (1974) 427
- (11) Cunningham, R.E., 他2名、*Trans. ASME, Ser. B*, 97-4 (1975) 1383