

ER 流体を用いた減衰機の性能評価

後藤 邦彰・若月 勇佐・西村 龍夫

機械工学科

二重円筒型電極を設置した減衰機を試作し、連続往復動を加えた時に減衰機により伝わる力の変化を測定することにより、正弦波状に往復振動する流れ場における電気粘性効果を実験的に検討した。減衰機内で電気粘性流体（ER 流体）を介して伝わる力、すなわち ER 流体により発生する応力は電極板間での電界強度の増加に伴い増加し、低電界強度では増加傾向は減衰機の往復動の速度により異なる。また、往復動の速度が早い場合には、応力の時間変化に遅れが生じる。この遅れは、ER 効果の主要因である粒子架橋構造の崩壊、再構成の時間によると考えられる。

Key Words : *Electrorheological fluid, Oscillatory flow, Damper, Multiphase flow*

1. 緒言

液体の粘性係数は物性定数であり、温度や圧力が一定の場合には不変である。ところが、電界中に置かれると、同一温度、圧力の下でも粘性係数が変化する液体が存在する。このように、加えられた電界によって液体の粘性係数が変化する現象は電気粘性効果（以下、ER 効果と称す）と呼ばれ、電気粘性効果を持つ流体を電気粘性流体（Electro Rheological Fluid : 以下、ER 流体と称す）という。

ER 流体は外部電界によって粘度を数桁に及ぶ広範囲で可逆的に制御できることから、多くの機械要素への応用が期待されている。これまでのところ、主として自動車部品として使用されることを前提に、バルブ、クラッチ、減衰機（ダンパー）などへの応用例が報告されている¹⁾。一方、ER 効果の解明とモデル化を目的とした基礎的研究も多く報告されている²⁾。基礎的研究では、主に一定流速の定常流における ER 流体の挙動と、発生応力に着目した検討がなされてきた。しかし、実際の機械要素中での流れは複雑であり、特に、減衰機では時間的に流れ方向の変わる往復動流が起き、定常流中で測定された ER 流体の特性がそのまま機械要素中での ER 流体の特性として適用できるかは疑問である。しかし、ER 流体を機械要素へ応用した研究では、機械性能の評価が主体となっており、機械要素中での流体挙動や ER 効果のメカニズムに着目した研究例はほとんどない。

そこで本研究では、時間的に流速が変化する流れ場での ER 効果を実験的に検討することを目的とした。このため、時間的に流速の変化する流れの起きる機械要素の一つとして減衰機を取り上げた。また、これまでの減衰機の性能試験ではインパルス入力に対する応答性が検討されていたのに対し、ここでは連続往復動を加えた時に減衰機により伝わる力を測定した。これにより、連続往復振動する流れ場における ER 流体の特性を検討した。

2. ER 流体の基本的特性

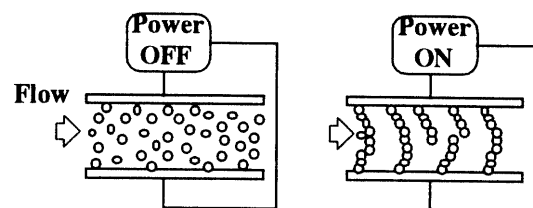
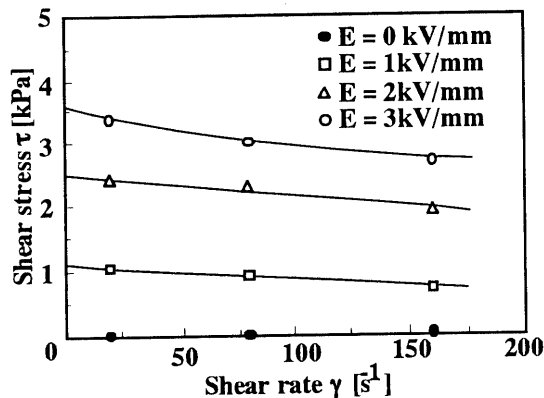


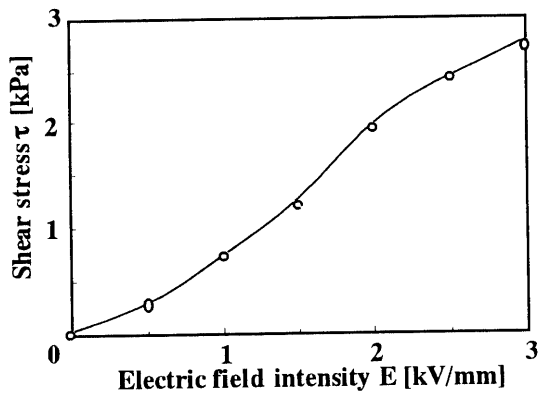
Fig.1 Concept of ER effect

ER 効果は、Winslow が鉱油を精製する目的で石灰岩粒子の鉱油分散液に電界を印加したところ、分散液の見かけの粘度が著しく増大する現象を見出したことから発見された³⁾。電界により見かけの粘度が増加するメカニズムについては Fig. 1 に示すようなモデルが考えられている。すなわち、電気粘性流体中の粉体粒子が電界によって誘電分極を生じ、電界の方向に鎖上に並ぶことによって電極板を力学的

に結び付けるために生じる現象であると考えられている³⁾。



a) Shear stress as a function of shear rate



b) Shear stress as a function of electric field intensity under constant shear rate ($\gamma = 160 \text{ s}^{-1}$)

Fig.2 Characteristics of tested ER fluid

ER 効果を示す流体には、誘電体粒子を絶縁性流体中に分散した分散系 ER 流体の他に、液晶に代表される均一系 ER 流体とがある。しかし、分散系 ER 流体の方が現状では特性が優れており、機械要素として実用の可能性が高い。そこで、本研究においても、電気絶縁性油中に粒径約 $10\mu\text{m}$ の高分子固体粒子 (Poly styrene-co-divinylbenzen) を 40wt% で分散した分散系 ER 流体⁴⁾ (日本触媒株式会社製) を使用した。

本研究に用いた ER 流体の特性を Fig.2 に示す。Fig.2-a を見ると、電圧印加時の ER 流体は流動曲線が原点を通らない非ニュートン流体の挙動を示すことがわかる。また、降伏応力も現れており塑性流体に分類されるが、せん断速度 γ の増加に伴いせん断応力 τ が若干低下しており、ビンガム流体のような単純な塑性流体挙動とは異なる。一方、印加電圧 V を高くし、電極間の電界強度 E を高くすると、同一せん断速度 γ において発生するせん断応力 τ は増加する (Fig.2-b)。なお、これらは、回転粘度

計を改良した装置によって測定された結果であり、時間的に流体の移動速度が時間的に変動しないという点で、定常流での特性と考えられる。

3. 実験装置および方法

試作した減衰機 (ダンパー) の構造図を Fig.3 に示す。ダンパー内に充填された ER 流体は、ピストンが往復動することで樹脂 (ポリカーボネート) 製内側電極支えに開けられた流路を通り、二重円筒電極 (SUS304 製) 間を流れる。二重円筒電極の外側電極はアースに、内側電極は直流高圧電源装置にそれぞれ接続しており、内側電極に電圧を印加することにより電極間には直流電界が発生する。電極間を通る ER 流体に電界により ER 効果が発現し、見かけの粘度が変化する。これによりピストン支持軸から ER 流体を介してダンパー内を伝わる力が変化する。

なお、本ダンパーでの外側電極内径は 53mm 、内側電極外径は 48mm とし、電極間隔は 2.5mm とした。

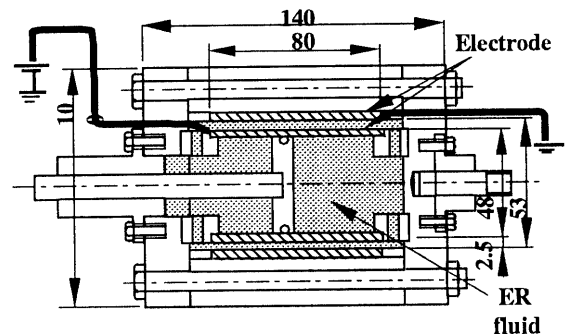


Fig.3 Tested damper

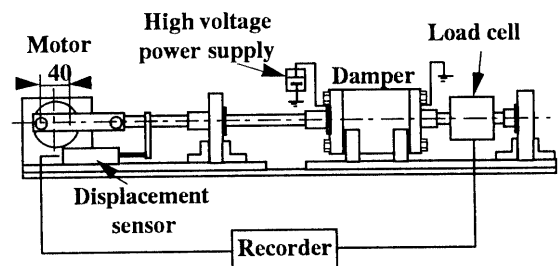


Fig.4 Experimental apparatus

Fig.4 に試験装置の概念図を示す。定トルクモーター (オリエンタルモーター社, MSD-560) の回転運動はクランク機構を介して ER ダンパーのピストンへ、振幅 $A = 40\text{mm}$ の直線往復強制変位として入力される。ER ダンパーの反対側の軸はロード・セル (昭和測器社, DBS-20K) に接続し、ピストン支

持軸（図中，ダンパー左側の軸）から入力し，ER 流体を介してダンパー内を伝わる荷重 F を測定した。この荷重 F を ER 流体により発生した力とみなし，内側電極面積 A で割ってせん断応力 τ ($=F/A$) を算出した。また，ピストン基部に設置した接触式変位計（キーエンス社, AF-060）でピストン変位を検出し，変位とロード・セルで測定した荷重を同時にペンレコーダに記録した。

実験条件として，印加電圧 V を $0\sim 4\text{kV}$ とし，電界強度 $E = 0\sim 1.6\text{kV/mm}$ の範囲で変化させて測定を行った。また，モーター回転数 ω はモーターが安定した回転を発生する下限から最大回転数までとし， $\omega=0.8\sim 23.4\text{rpm}$ の範囲とした。ここで，ER 流体の特性評価のためにはせん断速度 γ で表わすことが望ましいが，本装置ではピストン位置の時間変化が正弦波状であり，せん断速度は，時間平均値 0 で周期的に変動する。このため，せん断速度に変わる流体速度の代表値としてモーター回転数 ω を用いた。

4. 実験結果および考察

Fig.5 に，電界強度を一定とし，回転数 $\omega = 0.8, 10, 23.4\text{rpm}$ と変えたときのピストン1周期でのせん断応力 τ の変化を示す。どの電界強度でも，ピストンの運動方向が反転する無次元時間 $t/T=0, 1/2, 1$ の前後でせん断応力は急激に変化し，負から正，または，正から負へと移行している。また，ピストンの移動速度が最も早い無次元時間 t/T が $1/4$ および $3/4$ 付近で，発生するせん断応力は最大および最小値となる。各電界強度において，ピストン回転数による最大発生せん断応力の違いを見ると，電界強度が低い Fig.5-a では回転数の増加にともない，最大発生せん断応力が増加していることがわかる。これに対し，電界強度が高い Fig.5-c では回転数による最大発生せん断応力の違いは見られない。

ここで，電界強度 E による ER 流体により発生したせん断応力の変化を検討するために，無次元時間 t/T が $1/4$ において得られた最大発生せん断応力 τ_{max} を周期的に変動するせん断応力の代表値とする。Fig.5 の結果から求めた最大発生せん断応力 τ_{max} の電界強度 E による変化を Fig.6 に示す。図中には参考のため，改良粘度計により測定された定常流でのせん断応力も合わせて示した。この図から，ダンパーにより伝達された最大せん断応力 τ_{max} は電界強度の増加に伴い増加し，電界強度によりダンパーを介して伝達される荷重が制御できることがわかる。

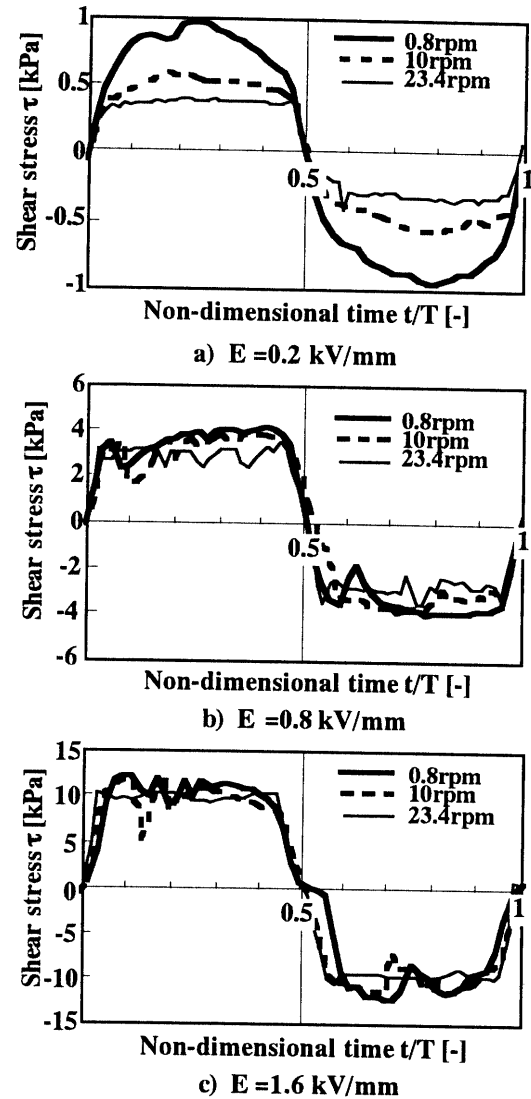


Fig.5 Comparison of shear stress curves under constant electric field intensity

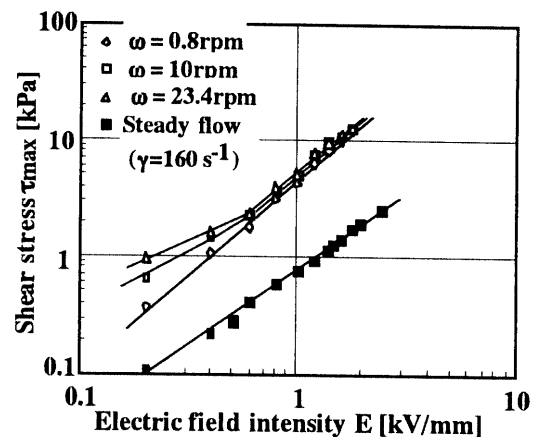


Fig.6 Shear stress at 1/4-cycle ($=0.25 t/T$)

最大発生せん断応力 τ_{max} は，電界強度が 0.7kV/mm 付近より大きい時には，回転数 ω ，すなわち，せん断速度にほとんど依存しないのに対し， 0.7kV/mm 以下では平均せん断速度が高い方が高いせ

せん断応力を発生する。また、定常流での結果と比較すると、同一電界強度でダンパーにより発生した応力は約 10 倍となっている。Fig.2 からわかるように ER 流体でのせん断応力はせん断速度により変化するが、電界強度が一定の場合、せん断速度が変化しても降伏応力に比べて 10 倍までは変化しない。よって、ダンパーでの測定結果と定常流の結果の差はせん断速度によるものではないと考えられる。

そこで、ダンパーで測定されたせん断応力と定常流の結果との相違について考える。ダンパーによる実験で求めた応力はダンパーを介して伝わった荷重から計算しているため、せん断応力 τ_{max} には電極間での ER 効果による応力、ピストンから電極までの流路中での圧力損失による力、ピストンの機械的摩擦による力が含まれると考えられる。機械的摩擦の大きさを評価するために、ダンパーから ER 流体を除去し、ピストンの機械的摩擦のみによりダンパーを伝わる荷重を測定したところ、最大でも 0.15kPa であり、Fig.6 に示した最大発生せん断応力の 10% 程度であった。よって、定常流とのせん断応力の違いは、機械的摩擦では説明できない。また、流路の圧力損失を無電界での ER 流体の粘性係数に基づき計算したところ、これも最大発生せん断応力の 10% 程度であり、ER 流体が流動する流路形状の違いでも説明はできない。これらのことから、Fig.6 での定常流とダンパーでの発生せん断応力の違いの原因として、

- ① ER 流体を往復動流させる形式では定常流よりも大きなせん断応力が発生する
- ② 電極通過後も ER 効果が持続することで、圧力損失も電界強度により変化し、無電界時の性質から予測されるよりも大きな圧力損失が発生することが考えられる。

可視化実験を行い、電極間に形成される粒子数珠状構造を観察した結果、電極間をつなぐ大規模な凝集構造は電界がなくなるとすぐに崩壊するが、局所的な粒子凝集体は数秒保持されることが確認された。このことから、主に②粒子凝集体による流路中での圧力損失の増大が Fig.6 での定常流とダンパーでの発生せん断応力の違いの原因と考えられる。

局所的な粒子凝集体が電極間以外でも保持されると考えると、低電界での最大せん断速度に回転数依存性が現れた理由も説明できる。すなわち、ピストン回転数が早く流体の移動速度が早い時には、凝集体が保持されたまま移動する距離が長くなり、凝集体による圧力損失増加の影響が回転数と共に大きくなることが予想される。この場合、電界強度が高くなると凝集体の保持時間が長くなり、高電界強度で

は低速度でも全流動領域で凝集体の影響が現れたものと考えられる。

Fig.7 は回転数を一定とし、電界強度 E を 0.2, 0.8, 1.6kV/mm と変えたときのピストン 1 周期でのせん断応力の変化を示す。回転数が 0.8rpm のときには、発生せん断応力は、ピストン運動方向が反転する無次元時間 $t/T=0, 1/2, 1$ の前後で急激に増加または減少し、その後、不連続的にほぼ一定値となっている。これに対し回転数の高い 23.4rpm では、ピストン運動方向が反転する前後でのせん断応力の時間変化は緩やかである。

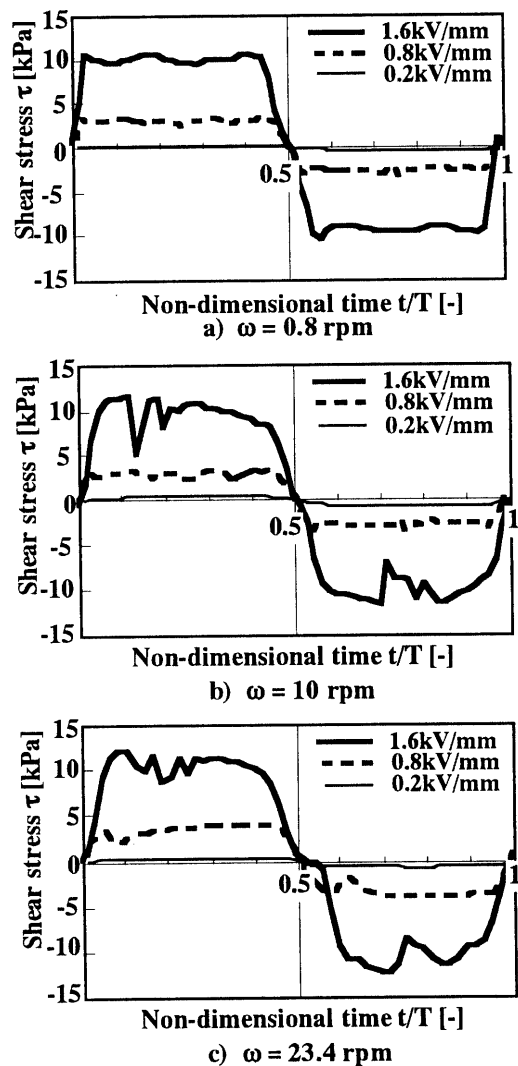


Fig.7 Comparison of shear stress curves under constant frequency

回転数を変えると、発生せん断応力の時間変化だけではなく、Fig.8 に示した ER 流体中をながれる電流にも違いが現れる。回転数が 0.8rpm では電流

の変化は小さく、ほぼ一定とみなせる程度でしか変化しない。これに対し、回転数 23.4rpm では電流値は周期的に変動しており、ピストンの運動方向が反転する無次元時間 0, 1/2, 1 において電流値が高く、運動速度の早い 1/4 および 3/4 付近で低くなる。この電流の時間変化に着目し、ER 効果に対する回転数の影響を考える。

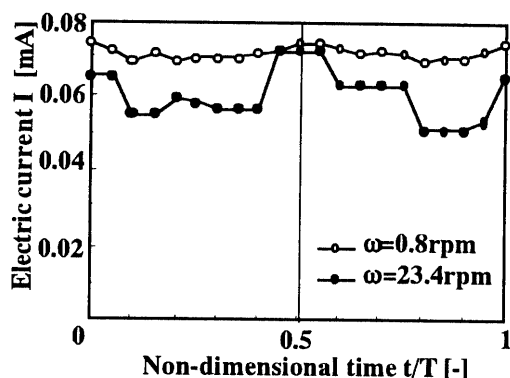


Fig.8 Electric current change with time

可視化実験により、電極間での電界強度が同じでも、電極間に安定した数珠状構造が形成されている時には電流値は高く、急激な流速変動により数珠状構造に乱れがあるときには電流値は低いことが確認された。このことから、回転数が高くなると往復動により電極間に形成される数珠状構造に乱れが生じることが考えられる。また、可視化実験から静止流体中で ER 効果の主要因と考えられる数珠状構造が形成されるには約 2 秒を要することがわかった。以上のことから、回転数が高い場合には、

- ER 流体を往復動されると ER 効果の主要因である電極間の数珠状構造に乱れが生じる。
- 乱された粒子数珠状構造が再構成には時間的な遅れが伴う。
- 再構成の遅れにより発生せん断応力の立ち上がりが遅れる。

という原因で、Fig.7 の発生せん断応力の時間変化に回転数による違いが見られたと考えられる。

5. 結言

時間的に流速が変化する流れ場での ER 効果を実験的に検討することを目的とし、ER 流体を用いた減衰機を試作し、その性能評価を行った。実験では、

本装置に正弦波状に連続往復振動する入力を加え、その結果 ER 流体を介してダンパー内を伝達された荷重を測定し、ER 流体で発生したせん断応力を求めた。

せん断応力は、ピストン運動の 1 周期のうち、運動方向が反転する無次元時間 0, 1/2, 1 の前後で急激に増加または減少する。また、ピストン移動速度の最も早い無次元時間 1/4, 3/4 前後でせん断応力は最大となる。

最大せん断応力は電極間に発生させた電界の強度の増加と共に増加する。減衰機により得られる最大せん断応力は、定常流中でのせん断応力の約 10 倍の値となる。これは、電極間で形成された粒子凝集体が電極間以外の流路中でも保持され、流体の見かけの粘度を増加させるため、流路中での圧力損失が増加したためと考えられる。さらに、この電極間以外での凝集体の影響により、低い電界強度において、せん断応力の回転数依存性が現れたと考えられる。

往復動の回転数、すなわち、せん断速度が高い場合には、運動方向の反転により電極間に形成される粒子凝集体構造に乱れが生じると考えられる。このため、運動方向反転前後でのせん断応力の時間変化は、回転数が早くなると緩やかになる。

謝辞：本研究は商工会等地域技術創造事業の一環として行った。研究を遂行するに当たり、ご協力いただいた宇部市商工会議所 大町道人 参与、小田文雄 部長および、貴重なご意見をいただいた宇部市商工会議所工業部 坂本幸一会長、商工会等地域技術創造事業検討専門委員の皆様へ感謝いたします。

また、本研究に使用した ER 流体およびその基礎的特性データをご提供いただいた日本触媒株式会社ならびに 同社 浅子佳延 氏、河上敏浩 氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Duclos, T.G. : Design of devices using Electrorheological fluids, SAE Technical Paper Series 881134, p.p.1-5, 1988
- 2) 例えば, Parthasarathy, M. and Klingenberg, D.J. : Electrorheology:mechanisms and models, *Materials Sci. and Engineering*, R17, p.p. 57-103, 1996
- 3) Winslow, W.M. : Induced fibrillation of suspensions, *J. Appl. Physics*, Vol.20, p.p.1137-1140, 1949
- 4) 浅子佳延, 相澤龍司, 河上敏浩, 小西正芳 : 分散系電気粘性流体, *トライボロジスト*, Vol.41, p.p. 48-53, 1996

(1998.5.15 受理)

PERFORMANCE EVALUATION OF
AN ELECTORRHEOLOGICAL DAMPER

Kuniaki GOTOH, Yusuke WAKATSUKI and Tatsuo NISHIMURA

The characteristics of electrorheological fluid in oscillatory flows have been studied through the performance evaluation of an electrorheological damper. The shear stress of ER fluid is calculated from the force transferred by the ER fluid through the damper. The shear stress periodically vary with time. The maximum shear stress in an oscillatory cycle increases with the electric field intensity which is similar to the feature of steady flows. The value of the stress is, however, about 10 times higher than that of the steady flow. The maximum shear stress depends on the shear rate when the electric field intensity is low.

When the speed of the oscillatory movement is high, the change of the shear stress shows a delay of response. This delay was due to the disruption of particle agglomeration structure and to the delay of reconstruction of agglomeration structure.