液晶を用いた可変減衰ダンパ*

森 下 信^{*1}

Controllable Damper Using Liquid Crystal

Shin MORISHITA

This paper describes a newly developed controllable damper using liquid crystal (LC) as a working fluid. LCs are homogeneous organic liquids characterized by the long-range order of their molecular orientation. The sample LC used in the present experiment is a thermotropic LC whose phase appears in nematic phase, originally developed for displays. The nematic phase is characterized by the molecular orientation of rod like molecules whose direction can be controlled by the applied electric or magnetic field. When an electric field is applied to a LC, it is known that the orientation of the molecule becomes parallel to the applied electric field, which causes the viscosity increase in the flow perpendicular to the applied electric field. This phenomenon is defined as the electroviscous effect. As an application study of the electroviscous effect of LCs to controllable mechanical devices, a prototype controllable damper was constructed and its performance was examined. The performance was studied under various applied DC electric field strengths, piston amplitudes and frequencies. The results show that the controllable damping force was three times larger with electric field than that without electric field, and that the damping controllability was kept at the same level regardless of the frequency and amplitude of the piston reciprocation.

Key Words: Damper, Vibration Control Device, Electrostatic Actuator, Liquid Crystal, Electroviscous Effect

1. はじめに

液晶は、一様な流体でありながら光学的異方性という結晶のもつ特性を有し、液体相と固体相の中間に位置づけられる。この異方性は、物資の結晶が融解した後も分子の配向に関する“長距離的”な秩序が保たれることにより生ずる⁽¹⁾。分子の配向は外部より加える磁場・電場などで制御することが可能であり、応用例としてディスプレイがよく知られている。しかし、他の応用例はほとんど見当たらないのが現状である。

この液晶を潤滑剤に用いる試みがトライボロジーの分野ですでに始まっている^{(2)~(5)}。Cognard⁽²⁾、森ら⁽³⁾は、液晶の分子がもつ配向性を利用することで、液晶が通常の潤滑油より潤滑性能が高く低摩擦を期待できる素材であることを示し、また Tichy⁽⁴⁾、Fischer⁽⁵⁾らは液晶の潤滑特性に関する理論的計算を行っている。さらに、Honda ら⁽⁶⁾、著者ら⁽⁷⁾並びに吉田ら⁽⁸⁾の研究により外部より高電圧を加えることで物性値としての粘度を大きく変化させることが可能であることも示されており、機械工学における応用分野を広げることの

できる素材であると考えられる。

著者は現在まで分散系の電気粘性流体(ER 流体)の応用研究を進めてきたが、液晶の上述の特性を利用すれば基本的には分散系の ER 流体の応用分野には液晶が適用できるものである。さらに分散系の ER 流体と比較して、液晶は一様流体であるので成分が分離することはなく分散系のように沈殿の生成がないため流体の特性を長期間維持できること、および分散系 ER 流体では外部電場により流体の降伏応力が変化するのに対し、液晶ではニュートン粘度そのものが変化するために制御系が線形系に近く設計が容易であることなど優れた特性を有しているので、液晶のほうが有利な応用分野も開拓できると考えられる。そこで、有望な応用分野として考えられる振動制御機器への適用性を検討するために、本論文では、ダンパ内部の作動流体として液晶を用い、オリフィスを電極に置き換えた機械的作動部のない可変減衰ダンパを試作し、その特性を実験的に評価したので、その結果について述べる。

2. 液 晶

2・1 液晶の概要 一般の流体は三次元的に無秩序であるとみなせるが、中には一次元的、二次元的にある秩序を有する流体が存在し、その流体の特性を示

* 原稿受付 平成6年3月7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)。

図 1 液晶の分子モデル

す状態を、流体と固体の中間に属する状態という意味で中間相もしくは液晶相と呼ぶ。液晶はまず、液晶相がある温度範囲で現れるサーモトロピック液晶と、ある濃度範囲で現れるライオトロピック液晶とに大別される。それぞれの液晶は分子構造に基づいて図1に示すような四つの相に分類され、さらにそれぞれの相を呈する低分子液晶と高分子液晶がある。図1は理想化された分子モデルであり、現在これらの4種類が知られている⁽¹⁾。ネマティック相は棒状の分子がある一方向に任意の位置で並んでいる状態であり、スメクティック相はその位置がある程度の層状のまとまりをもっている状態を表している。コレステリック相は分子が層状態に配列しそれぞれの平面的な層の中で分子はある一定方向を向き、互いの層は分子の方向性に関してある角度を有してらせん状態をなす分子構造と解釈されている。さらにディスコティック相は円盤状分子が層をなすように重なりあっている状態である。工業的に現在最も一般的に用いられているのがネマティック相を呈する液晶である。

液晶は、その分子の配向性に起因してさまざまな物性値の異方性を示し、この配向性は磁場、電場等で制御できる。配向性の指標として、棒状分子の長軸方向をもった単位ベクトルとして定義される配向ベクトル(director)を用いる。液晶相を呈している状態では、液晶分子はドメインと呼ばれるある領域ごとにとまとまりのある方向性をもっており、ドメインの大局的方向が配向ベクトルの方向の一致する。

液晶分子の配向性により、誘電率も液晶状態では異方性を有する。電場を加えた方向の誘電率は $\epsilon_{||}$ 、それ

図 2 Miesowicz の粘度

と直交する方向の誘電率を $\epsilon_{\perp}$ で表現し、その差 $\Delta\epsilon = \epsilon_{||} - \epsilon_{\perp}$ を誘電率異方性と呼ぶ。誘電率異方性は液晶の電気粘性効果と密接な関係をもつと考えられている。

2・2 液晶の粘度⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ 棒状分子からなる液晶においては、液晶の粘度は配向ベクトルの向きに依存し、配向ベクトルと流れの関係から図2に示す3種類の粘度が定義されている。これらをMiesowiczの粘度と称しており、ここではde Gennesの標記に従い η_a , η_b , η_c で表す。これらは一般に $\eta_c > \eta_a > \eta_b$ の関係がある。通常の液晶粘度の測定で用いられる回転粘度計による粘度は η_b と一致することが示されている。電場により配向ベクトルの方向を制御することを考えると、電場を加えることで η_b から η_c の範囲で粘度を変化させることができると推察される。

3. 実験

3・1 供試液晶 供試液晶はディスプレイ用に開発されたサーモトロピック液晶の中でネマティック相を呈する低分子液晶である。ライオトロピック液晶は使用温度に影響されず液晶相を呈するという特性を有し、温度が変化する機械要素に適用することは大きな意味があると考えられるが、まだ実験室で合成されている段階なので大量に用いることは不可能であり、容易に入手可能なサーモトロピック液晶を用いた。その物性値の概略を表1に示す。主成分はビフェニル系からなる混合液晶である。単一の液晶成分では得られない物性値を得るために、複数の液晶成分を混合するのが液晶を開発する際の通例であるとされる。

3・2 粘度特性 図3に粘度特性を測定する実験で用いた粘度計の概略を示す。同心状2円筒のすきまに供試液晶を入れ、内円筒を回転させて外円筒に伝達されるトルクを測定し、粘度に換算する。両円筒を電極として直流電場を加え、電場の強さ、せん断速度および温度をパラメータとして粘度を測定する。おもな諸元は内円筒の直径が50 mm、長さが50 mm、内外円筒間のすきまは0.5 mmである。内円筒の回転数は

表 1 供試液晶の物性値

Clearing point [°C]	100.3
Resistivity [$\Omega \cdot \text{cm}$]	1.2×10^{11}
Viscosity (20 °C) [Pa·s]	0.0415
Ordinary axis	1.499
Refractive anisotropy	0.146
Dielectric constant	16.3
Dielectric anisotropy	11.3

図 3 粘度計の概略

最大 120 rpm で、外円筒は摩擦に伴う誤差を最小限にするために空気軸受で支持されている。温度制御は外円筒の外周にラバーヒータを巻き、内円筒の底部に近い部分に熱電対を差込み、市販の温度制御器を用いて PID 制御により行う。温度は室温から約 90°C の範囲で設定可能である。

3・3 実験装置 可変減衰ダンパの構造を図 4 に示す。電極は多重の同心円筒からなっており、電極は正極と負極を交互に配置しピストンに固定してある。ダンパ内部は液晶で満たされており、ピストンの往復動に従い電極が液晶中で往復運動する。

ダンパのシリンダ内径は 50 mm、シリンダの長さは 100 mm、さらに電極は 11 重として電極間隔はすべて 0.5 mm としている。

この可変減衰ダンパを図 5 に示す実験装置に組込んでその特性を求める。ダンパを固定し、強制的にピストンを往復動させる。ピストンの往復動はクランクシャフトを介して可変回転数モータにより生成される。

測定対象となるものは減衰力とピストン変位であ

図 4 液晶ダンパの構造概略

図 5 減衰力測定装置

る。減衰力はピストンロッドの接続部にロードセルを設置し測定を行う。変位はレーザ式非接触変位計によりピストン変位を直接測定する。変位を微分して速度に換算し、減衰係数を求める。温度制御は回転粘度計による場合とほぼ同様にダンパ全体にヒータを巻き、ダンパ内部に熱電対を挿入して温度制御装置により行う。

実験条件はピストンの変位振幅で 5 mm と 10 mm に設定し、クランクシャフトの回転数をそれぞれの振幅において 20~180 rpm の範囲で 20 rpm ごとに、さらに各条件下で加える電圧を零から 800 V まで変化させ、減衰力とピストン変位の測定を行う。液晶の特性は温度により変化するので、本実験では温度は 40°C で一定とした。

4. 結果および考察

4・1 粘度特性結果 回転粘度計により測定した粘度特性の一例を図 6 に示す。電場を強くするに従い

数百 V/mm で粘度が上昇を始め、その後急激に粘度が高くなり、さらに電場を強くすると粘度上昇が緩やかになり、ある一定値に漸近する。せん断速度を大きくしてもその傾向は変わらず、ただ一定値に近付くために必要な電場の強さが高くなる傾向にある。この傾向は図2に示した Miesowicz の粘度と関連して次のように解釈できる。まず、電場なしの状態では棒状の分子は流れに対する低抗の一番小さい方向、すなわち配向ベクトルが流れと平行になるように配列し、粘度としては η_0 が測定される。外部電場を強くするに従い分子の大局的方向は流れと直角方向に電場に平行に並ぼうとするが、実際は流れの速度との関連で配向ベクトルの方向が決定する。さらに電場を強くすることにより分子はほぼ流れと直角に並び、これ以上の粘度増加は認められなくなる。高いせん断場でも増粘効果が得られるのが ER 流体より優れている点である。

図6 液晶の電気粘性効果(その1)

図7 液晶の電気粘性効果(その2)

図6を書き直したのが図7である。この各線のこう配がいわゆるニュートン粘度を表すが、電場なしの状態および高電圧を加えてほぼ増粘効果が飽和した状態でニュートン粘性の特性をもち、その中間状態では擬塑性流体の特性をもっていることがわかる。ER 流体が塑性流体に近い特性を有していることを考えると、この特性の違いは際立っている。

4.2 減衰力特性 図8および9は測定された減衰力の時間変化である。実験条件はピストンの変位振幅は 10 mm で、図8はピストン振動数 0.67 Hz、図9は 3.0 Hz の結果である。それぞれ電場を加えない場合、電場の強さが 800 V/mm および 1600 V/mm の場合の計三とおりについて示している。

ロードセルにより測定された力は液晶の粘度による粘性力とピストンロッドのシール部の摩擦力、さらには各駆動部の慣性力を含んでいる。実験の振動数が低いので慣性力は無視できるものとすれば、図8においてはピストン速度が小さいために、特に電場を加えていない状態では測定された力のかなりの部分が摩擦力に支配されていると考えられる。この摩擦力は主としてピストンシール部で発生している。電場を強くするに従い粘度の増加に伴う減衰力の増大により、相対的に摩擦力の割合は小さくなり、正弦波に近い形状を示す。図9においてはピストン速度が図8に比較して大きいために、ほぼ粘性抵抗により減衰力が生じているとみなすことができ、電場がない状態でも正弦波状の減衰力が得られる。いずれにしても、ピストン速度にかかわらず電場を加えることで大きな減衰力の変化を生み出すことができる。

図10が図8, 9に例示した減衰力の最大振幅を種々のピストン速度振幅に対して整理したものである。全体的傾向としてグラフは右上がりであり、ピストン速度が大きくなるに従い減衰力も増加する。電場強度が小さい範囲では電場による減衰力の増大効果はあまりみられない。電場強度 800 および 1200 V/mm の結果は、電場を加えない状態での減衰力曲線をそのまま平行移動したような特性を示している。これは、この程度の電場の強さでは液晶の特性自体が擬塑性流体に近い挙動を示すためと考えられる。電場強度を 1600 V/mm にするとこう配はやや大きくなる。図7より推察すれば、2000 V/mm 程度まではニュートン粘度が上昇するので、さらにこう配は大きくなると推察される。いずれにせよ、ピストン速度を大きくしても外部電場を加えることで3倍程度の減衰力の変化を期待することができる。

図11に試作した可変減衰ダンパの荷重変位曲線を

図 8 減衰力の時間履歴 (Amp. = 5 mm, 0.67 Hz)

図 9 減衰力の時間履歴 (Amp. = 10 mm, 3.0 Hz)

示す。この曲線で囲まれた面積がダンパの消散エネルギーを表すことになるが、電場を加えない状態での結果と 1600 V/mm の結果を比較するとループの面積はほぼ 3 倍程度増加しているようすがわかる。

図 10 減衰力特性

図 11 減衰力-変位履歴曲線

剛性に関しては、電場を加えない状態で約 1 kN/m と推定されるが、電場の強さ 1600 V/mm のもとでは約 5 倍に増大している。剛性が変化するメカニズムに関しては本実験の範囲では明らかではない。

図 12 はピストンの振幅の減衰力に及ぼす影響を調べた結果である。振幅が 5 mm と 10 mm について比較し、比較を容易にするために振動数を約 2 倍にしてある。振幅による差はほとんどみられない。この特徴

図 12 減衰力時間履歴(変位振幅依存性)

も、分散系の ER 流体の増粘効果が振幅依存性が大きいという事実と比較すると優れているとみなすことができる。

なお、今回用いた液晶は先に述べたようにディスプレイ用に開発されたものであり、その要求から粘度は極力低下させている。本研究のような応用分野に対応するには幅広い粘度をもった液晶が必要であるが、その件に関しては要求スペックが明らかになれば容易に対応可能であるとされている。

5. 結 論

本研究では、液晶という機能性流体の機械要素としての可能性の一つとして、加える電圧で減衰力を制御できる可変減衰ダンパに適用した結果を報告した。得られた結論は以下のとおりである。

(1) 液晶をダンパの作動流体として用いることで、加える電圧により減衰力を大きく変化させることのできる可変減衰ダンパを開発した。

(2) 液晶を用いた可変減衰ダンパの減衰特性は振幅依存性も周波数依存性も本実験の範囲ではほとんどみられない。

本研究を行うにあたり、(株)ロディック 藤田豊部長に液晶に関してご教示いただいた。ここに記して謝意を表する次第である。

文 献

- (1) 岡野・小林, 液晶(基礎編), (1985), 3, 培風館.
- (2) Cognard, J., *American Chemical Society Symposium on Tribology and the Liquid-Crystalline State*, **441**(1990), 1.
- (3) 森・岩田, トライボロジー会議予稿集, (1992), 365, 盛岡.
- (4) Tichy, J. A. and Rhim, Y., *Trans. ASME, J. Tribology*, **111**-1(1989), 169.
- (5) Fischer, T. E., ほか 4 名, *Tribology Trans.*, **31**-4(1988), 442.
- (6) Honda, T., ほか 2 名, *Jpn. J. Appl. Physics*, **17**-9(1978), 1525.
- (7) 森下・ほか 2 名, トライボロジー会議予稿集, (1992), 41, 東京.
- (8) 吉田・ほか 3 名, トライボロジー会議予稿集, (1992), 361, 盛岡.
- (9) Benicewicz, B. C., ほか 2 名, *Molecular Cristal and Liquid Crystal*, **65**(1981), 111.
- (10) deGennes, P. G., *The Physics of Liquid Crystal*, (1975), 23, Oxford Univ. Press.