高分子液晶系 ER 流体を用いたダンピングが制御可能な リニアガイドシステム開発のための基礎研究*

—微小せん断速度域における特性評価—

張 剣** 古荘純次*** 宇田昌樹† 山口利明††

Basic Study on Development of A New Linear Guide System
with Electrically Controllable Damping Using Liquid Crystalline Polymer
—The Characteristics in Low Shearing Velocity Region—

Jian ZHANG, Junji FURUSHO, Masaki UDA and Toshiaki YAMAGUCHI

Rolling element linear guide systems are widely used in the industrial machines such as machine tools for the advantages of high-precision, high-rigidity and low-friction. However, the principal disadvantage of such systems is their inferior damping characteristics, which cause the chatter vibrations not only in the servo direction, but also in the lateral direction during machining or motion. In this study, using the ER Fluid(Liquid Crystalline Polymer), a linear guide system with electrically controllable damping is developed. The experiments are carried out and the effectiveness is confirmed.

Key words: linear guide system, electrorheological fluid, liquid crystalline polymer, servo mechanism, controllable damping, high-precision position control

1. はじめに

リニアガイドシステムは工作機械、ステッパーやロボットなどの直動位置決め機構として多く用いられている¹⁾。その主流であるボールベアリングやローラーベアリングを用いた転がり案内は、低摩擦、高速対応力、メンテナンス・フリー、エレクトロニクスとの親和性など高速かつ高精度な位置決め制御に適した特性を持ち、リニアガイドシステムに多くに用いられているが、それにより機械的ダンピングが低下し、システムの減衰比 ζ は一般に 0.01 以下になる。この低ダンピング特性およびボールねじ駆動系の弾性が原因で、多くのリニアガイドシステムのサーボ軸方向の運動について、運動時の振動および停止時の残留振動という問題が発生している。

また、サーボ軸と直交する方向についても、リニアガイドのボールベアリングあるいはローラーベアリングなどの弾性が原因で振動問題が発生している。なお、この方向についてはアクチュエータがないため制御できず、構造的に振動を低減させる必要がある。

このような課題に対して、微小ギャップ間に油を封入したダンパ機構を付加することによる減衰特性の向上などの研究が試みられた^{2)~4)}。このように油を用いたサーボ軸方向に十分なダンピング効果があるダンパを構成した場合、粘性がほぼ一定であるため、高速移動時における発熱および大きな抵抗力という問題が発生し得る。

また近年、印加電圧を制御することで、そのレオロジー特性を変化させることができる ER 流体（電気粘性流体）に関する応用研究が盛んに行われ^{5)~13)}、この ER 流体の粘性可変特性を利用し、工作機械などのテーブルシステムへの応用研究が報告されている^{10)~13)}。しかし、その多くは粒子分散系 ER 流体を用いた研究である。また、シアノフェニルシクロヘキサン系の混合液晶について検討が行われたが、発生力が小さすぎるため、十分なダンピングが得られていない¹³⁾。

本研究では、粒子分散系 ER 流体と比べて、発生力が 1 桁程度大きい高分子液晶系 ER 流体をリニアガイドシステムに適用することにより、全方向に対して各運動状態に応じた適切なダンピングを与えることのできるリニアガイドシステム開発のための基礎的検討を行う。高分子液晶系 ER 流体¹⁴⁾は、ニュートン流体に似た特性を示すため精密な制御に適し、ロボットの高精度制御などに関する研究が行われている⁷⁾⁸⁾。

本論文の構成は以下のとおりである。2 章では、ER 流体について概説し、高分子液晶系 ER 流体の特性を示す。3 章では、ER ダンパを取りつけたリニアガイドシステムを紹介し、そのモデル化を行う。4 章では、ダンパ強度設計を考え、ダンパの寸法設計を行う。5 章では、ダンパにおける消費ワット数について検討を行う。6 章では、実験システムを紹介する。7 章では、試作したテーブルシステムのサーボ軸方向の微小変化に対する性能を実験により評価する。8 章では、サーボ軸と直交する水平方向（以下横方向と呼ぶ）に関する ER ダンパの効果を実験的に検討する。

2. 高分子液晶系 ER 流体

ER 流体 (Electro-Rheological Fluid) は、電気粘性流体とも呼ばれており、その名の通り、電場の強さに応じて見かけ上の粘性（レオロジー特性）が変化する流体の総称である。大

* 原稿受付 平成 16 年 6 月 1 日

** 学生会員 大阪大学大学院工学研究科 (大阪府吹田市山田丘 2-1)

*** 正会員 大阪大学大学院工学研究科

† 大阪大学大学院工学研究科

†† 正会員 日本精工(株) 総合研究開発センター 精機開発センター (神奈川県藤沢市鵠沼神明 1-5-50)

Fig. 1 Characteristics of ER fluid

Fig. 2 Overview of ball-screw driving system

大きく分けて、粒子分散系と均一系の二種類がある⁵⁾⁶⁾。それぞれの特性を図 1 に示す。ただし、均一系 ER 流体の特性図には、本研究で使用した均一系に属する高分子液晶系 ER 流体の特性を示す。

図からわかるように、粒子系 ER 流体は電場を印加すると、せん断速度がせん断応力にほとんど影響を与えないビンガム流体としての特性を示す。すなわち、固体摩擦と同様な振動抑制効果をもつ。また、微小な振動域では粒子鎖が変形するだけで効果が現れないことが報告されている¹¹⁾。そこで、粒子系 ER 流体はブレーキやクラッチには適しているが、精密な位置決め制御などにはそれほど適さないと考えられる。そのほか、粒子系 ER 流体は粒子の沈降、凝集などの問題が残されている。

一方、均一系 ER 流体の一つである高分子液晶系 ER 流体は粒子分散系 ER 流体と比べて、以下の特徴を持つ。

- (1) 出力が一桁ほど大きい。
- (2) 高電圧をかけたとき、ニュートン流体のような特性を持ち、滑らかな抵抗増大を示すため、線形的なダンピングを与えることが可能であり、精密位置決めに適している。
- (3) 粒子を含有しないため、粒子沈降、摩耗、破碎や凝集の心配がない。また、極めて狭い電極隙間での使用が可能である。その結果印加電圧を低減することができる。

そこで、本研究では均一系 ER 流体に属する高分子液晶系 ER 流体を用いることにする。

3. リニアガイドシステム

3.1 ボールねじ駆動系の基本構成

図 2 にボールねじ駆動系の概略図を示す。

本研究では一軸送りテーブルシステム (日本精工 XY-HS0070-342-003) を用いる。アクチュエータは、200[W] の DC サーボモータによりボールねじを介し負荷側 (テーブル) を駆動し、エンコーダによって回転角度を測定する。エンコーダからのパルス数を 4 通倍して分解能 36,000[pulse/rotation] として使用した。また、テーブルの位置はレーザ測長計 (小

Fig. 3 Overview of ball-screw driving system with ER damper

Fig. 4 Model of servo direction

野測器 LV-9110) により直接に測定できる。レーザ測長計の分解能は 0.01[μm] である。

3.2 駆動系に付加するリニア型 ER ダンパの仕様

図 3 に本研究で開発した ER 流体を充填したダンパ (ER ダンパ) を付加するボールねじ駆動系の概略図を示す。

開発した ER ダンパは図 3 に示すように固定電極を兼ねた流体槽および移動電極から構成される。ダンパはテーブルシステムの片側に設置される。図には示していないが、質量のバランスを取るために、テーブルシステムの反対側に移動電極と同じ質量の鉄板をもう一枚設置している。移動電極と流体槽の内壁との横方向の電極間隔は 0.5[mm]、移動電極の長さは 300[mm] であり、有効電極面積は合計 0.024[m²] である。なお、移動電極をアースにとり、流体槽に電圧を印加することによって、流体に電場を印加する。また、流体槽とベースの間には、セラミック部材が挟まれており、流体槽は絶縁されている。テーブルと移動電極 2 枚の質量は合計でおよそ 65[kg] である。

高分子液晶を用いたリニアガイドシステムに関する基礎的検討を行うための第 1 段階として、図 3 のようなダンパ構造とした。この構造では移動電極が高速に移動すると、流体がオーバーフローする。そこで、本報告における実験では、微小せん断速度域における実験のみを行う。現在流体を封入することによって、オーバーフロー問題を解決できるダンパを開発中であり、このシステムを用いてテーブルが高速に移動した際の特性実験を行う予定である。

3.3 モデリング

図 4 に示すように、サーボ軸方向のモデルはモータ側の慣性と負荷側の慣性が駆動系の軸方向剛性によって結合された 2 慣性系と見なすことができる¹⁵⁾。本実験装置のリニアガイドでは、リニアガイドの粘性が極めて小さいので、図中のダンパ (C_1) は ER ダンパを示す。記号は表 1 のように定義する。ただし、括弧内の変数 F_m, M_m, X_m は回転系の変数 T_m, J_m, θ_m を直線系に等価的に変換した場合の記号である。

モータの駆動トルク T_m からモータ角度 θ_m までと負荷の変位 X_l までの開ループ伝達関数はそれぞれ次のように表さ

Table 1 Definition of symbols in the servo direction

Symbol	Definition
T_m	Input torque of motor (F_m)
J_m	Moment of inertia(motor side) (M_m)
θ_m	Angle of motor (X_m)
N	Conversion rate (from rotary system to linear system)
K_t	Stiffness of driving system
M_l	Mass of table
X_l	Displacement of table
C_t	Coefficient of viscosity
F_c	Frictional force

Fig. 5 Model of lateral direction

れる。

$$\frac{\theta_m(s)}{T_m(s)} = \frac{s^2 + 2\zeta_a\omega_a s + \omega_a^2}{J_m s^2(s^2 + \omega_0^2) + 2J_m\zeta_a\omega_a s(s^2 + R\omega_a^2)} \quad (1)$$

$$\frac{X_l(s)}{T_m(s)} = \frac{N\omega_a^2}{J_m s^2(s^2 + \omega_0^2) + 2J_m\zeta_a\omega_a s(s^2 + R\omega_a^2)} \quad (2)$$

ただし、

$$\omega_a = \sqrt{\frac{K_t}{M_l}}, \quad \omega_0 = \omega_a \sqrt{1 + R}, \quad R = \frac{N^2 M_l}{J_m}, \quad \zeta_a = \frac{C_t}{2\omega_a M_l} \quad (3)$$

ここで、 ω_a は 2 慣性系の反共振周波数を、 ω_0 は共振周波数をそれぞれ表している。 R は慣性比であり、 $N^2 M_l$ は負荷側の質量をモータ側の慣性に等価換算したものである。 ζ_a は、負荷側の減衰比であり、印加電圧により変化する。このモデルに基づき、7 章の閉ループ制御実験における制御系設計を行う。

次にサーボ軸と直交する水平面内の方向（横方向）について考える。図 3 に示す ER ダンパの構造からわかるように、ER ダンパは横方向にはスクイズフィルムダンパとしての効果を持つ。図 5 にリニアガイドと ER ダンパからなるシステムの横方向の運動に関するモデルを示す。表 2 に各記号の定義を示す。

負荷質量に加える外力 F_s からテーブル横方向変位 X_s までの伝達関数は次式のように表される。

$$\frac{X_s(s)}{F_s(s)} = \frac{K_d + C_s s}{M_l C_s s^3 + M_l K_d s^2 + (K_s C_s + K_d C_s) s + K_d K_s} \quad (4)$$

4. ER ダンパの寸法（剛性）設計

本研究では、サーボ軸方向のみならず、横方向（水平方向）における ER ダンパの効果についても検討を行う。従来の研究においては、文献 10)、11) において粒子系 ER 流体の横方向の ER ダンパ効果（スクイズフィルムダンパ効果）について検討も行われている。本研究では、高分子液晶系 ER 流体のスクイズフィルムダンパ効果について検討を行う。横方向

Table 2 Definition of symbols in the lateral direction

Symbol	Definition
F_s	Lateral deformation force
K_s	Lateral stiffness of linear guide system
K_d	Lateral stiffness of ER damper
X_s	Lateral displacement of table
C_s	Coefficient of viscosity(ER damper) in lateral direction
X_1	Lateral displacement of spring K_d
X_2	Lateral displacement of damper C_s

Fig. 6 Movable electrode and stator electrode of ER damper

の振動については特に、ダンパ自身の剛性を検討しておく必要がある。

横方向については、リニアガイドシステムには転がり案内が用いられているため、剛性が非常に高い。それで、図 5 からわかるように、ダンパ（移動電極と流体槽）部分の剛性 K_d が充分でなければ、たとえダンパにより減衰力が生じたとしてもテーブルの振動を十分に抑えることが出来ないと考えられる。そこで、システムの横方向剛性 K_s を同定した上でダンパの強度設計を行った。

ダンパ（移動電極と流体槽）部分の剛性 K_d がリニアガイドシステムの横方向剛性 K_s に対してどの程度の大きさであれば良いかを調べるために、横方向の運動について、図 5 のモデルに基づいて動的応答に関するシミュレーションを行った。その結果、 K_d が K_s の 4 倍程度あれば、 $K_d = \infty$ の場合と振動の様子が同じようになることがわかった。そこで、これを満たすように電極の設計を行い、図 6 に示す各寸法は $h_1 = 70[\text{mm}]$, $h_2 = 30[\text{mm}]$, $h' = 40[\text{mm}]$, $b = 300[\text{mm}]$, $b' = 600[\text{mm}]$, $l_1 = 70[\text{mm}]$, $l_2 = 40[\text{mm}]$ とした。

5. ER ダンパにおける消費ワット数

流体ダンパを用いるリニアガイドシステムにおいては、ダンパからの付加的な減衰力が作用するため、テーブルの高速運動時に転がり案内の長所である低抵抗特性を損い、システムの発熱問題などが生じる恐れがある。そこで、高分子液晶系 ER 流体を用いるダンパの抵抗特性評価を行い、テーブルの高速運動時のダンパにおける抵抗力および消費ワット数について検討を行う。ただし、テーブルの速度が $0.2[\text{m/s}]$ の場合について検討する。

電極間のギャップは $0.5[\text{mm}]$ なので、せん断速度は $400[\text{s}^{-1}]$ となる。そこで、せん断応力は、電場を印加しない場合には約 $200[\text{Pa}]$ であり、電場印加時 ($3[\text{kV/mm}]$) には $8000[\text{Pa}]$ となる (図 1 (b) 参照)。ゆえに、電場を印加する場合および電場を印加しない場合のダンパにおける抵抗力 F および消

Table 3 Fluid resistance force and power dissipation

Status of ER fluid	F[N]	W[J/s]
ER fluid (3[kV/mm])	192.0	38.4
ER fluid (without electric field)	4.8	0.96

 $(U = 0.2[\text{m/s}])$

Fig. 7 Photo of ball-screw driving system with ER damper

Fig. 8 Experimental system

費電力 W は表 3 のようになる.

表3からわかるように、電場印加時には、大きな抵抗力および発熱が生じている。このような発熱および抵抗力は、精度の悪化などをもたらすので好ましくない。一方、電場を印加しないときには、発熱も抵抗力も極めて小さい。そこで、精度が要求されない高速移動時には、電場を零にすることによって、発熱や抵抗力による変形を防ぐことができる。

次に、ER 流体に電場を印加することによる消費電力 W について考える。高分子液晶系 ER 流体における電流の消費は粒子系 ER 流体と比べて、極めて小さく、 $2[\text{kV}/\text{mm}]$ の場合に流れる電流密度は $1.07 \sim 0.6[\mu\text{A}/\text{cm}^2]$ である。その上限値の $1.07[\mu\text{A}/\text{cm}^2]$ を取っても、有効電極面積 $0.024[\text{m}^2]$ および印加電圧 $2[\text{kV}]$ から、高分子液晶系 ER 流体の場合に印加電圧により消費されるワット数はわずかに $0.5[\text{W}]$ である。

6. 実験システム

試作したリニア ER ダンパを組み込んだボールねじ駆動系の写真を図 7 に示す。図 8 に制御システムを示す。サーボドライバおよび高電圧アンプ (H.V.AMP) への指令電圧を D/A コンバータから与える。コンピュータへの影響を考えて、電源の入力端子と D/A コンバータとの接続には、アイ

Fig. 9 Open-loop frequency responses of motor side

Fig. 10 Open-loop frequency responses of load side

ソリューションアップを介して行うようにした。サーボ方向には、レーザ測長計（小野測器 LV-9110）によって、直接テーブル変位を測定することが可能である。モータの回転角度はエンコーダによって測定する。また、テーブルには、サーボ軸方向の加速度を計測するため、サーボ加速度計が取り付けられている。横方向のインパルスハンマ応答実験を行う場合は、テーブルの横をインパルスハンマで叩いて振動を励起し、その振動情報を反対側に取り付けられたピエゾ素子加速度ピックアップおよびレーザ変位計により取得する。

特性実験の結果については，サーボ軸方向と横方向に分けて述べる。

本報告の実験では、3.2 節で述べたようにオーバーフローを減軽するため移動電極の移動速度および移動距離を十分に抑えて、微小せん断速度域におけるダンパの効果を検討する。

7. サーボ軸方向に関する実験的検討

7.1 開ループ周波数応答実験

モータトルク (T_m) を入力とする周波数応答実験を行った。出力はモータ角度 (θ_m) およびテーブル変位 (X_I) であり、入力の振幅は $0.5[\text{N} \cdot \text{m}]$ とした。周波数応答実験の結果を **図 9**、**図 10** に示す。

2 慣性系の特徴である反共振（ノッチ）および共振（ピーク）が現れている。また、モータ側、負荷側とも ER 流体を充填した場合（ER[0V/mm], ER[2kV/mm]）は流体なし（Without fluid）の場合より明らかに粘性が上がり、ピークが目立たなくなっており、振動的な挙動が抑えられていることがわかる。

Fig. 11 Macrograph of figure 1(b)

Fig. 12 Closed-loop frequency responses of load side

また、電場が零の場合と 2[kV/mm] の場合を比べると、その差はわずかである。その理由については次のように考えられる。

図 10 からわかるように、 640[rad/s] の共振周波数において、負荷側の振幅が最も大きくなっている。このときの負荷側の最大速度は 8[mm/s] であり、ダンパで生じるせん断速度は $16\text{[s}^{-1}\text{]}$ である。図 11 は図 1(b) の低せん断速度域における拡大図を示す。図からわかるように、せん断速度 $16\text{[s}^{-1}\text{]}$ では、無電場時と電場印加時の差はそれほどない。すなわち、この程度の低せん断速度域では、高分子液晶系 ER 流体は電場の影響をほとんど受けないため、周波数応答にはあまり差が見られなかったと考えられる。実際、入力振動を $0.2\text{[N}\cdot\text{m]}$ と小さくすると、周波数応答における差異はさらに小さくなる。

7.2 閉ループ制御実験

制御方式としてはモータの情報のみを用いるセミクローズドループ位置 I-PD 制御を用いた。3.3 節で導いたモデルおよび文献 (15) の制御系設計法を用いてフィードバック係数を決定した。

7.2.1 閉ループ周波数応答実験

周波数範囲 $20 \sim 800\text{[rad/s]}$ で、目標値を振幅 0.1[mm] で正弦波状に変化させたときの閉ループ周波数応答実験結果を図 12 に示す。ただし、制御帯域としては $0.9\omega_a$ とした。閉ループ周波数応答実験と同じように、流体なしの場合に比べて、ER 流体を充填した場合はピークが目立たなくなっており、振動的な挙動が抑えられている。同様に、ER 流体にかかる電場が 0[V/mm] 、 2[kV/mm] の場合の差異はほとんど見られなかった。その理由は、この実験における最大せん断速度はおよそ $8\text{[s}^{-1}\text{]}$ であり、低せん断速度域では電場なしの高

Fig. 13 Responses of load position to stepwise reference input change

分子液晶系 ER 流体は降伏が生じずに、電場ありの場合と同じ粘性特性を示すためと考えられる (図 11 参照)。

7.2.2 ステップ応答実験

0.5[mm] のステップ状の目標位置変化を与えて、テーブル位置の過渡応答実験を行った。ただし、制御帯域は $0.9\omega_a$ とする。流体なしの場合と ER 流体にかかる電場が 0 と 2[kV/mm] の場合における、実験開始約 0.05[s] 後の残留振動の様子の比較を図 13 に示す。

図からわかるように、流体なしの場合と比べて、ER 流体にかかる電場が 0[V/mm] および 2[kV/mm] の場合のほうが明らかに振動的な挙動が抑えられている。電場変化による差異はほとんど見られない。その理由は、7.1 節および 7.2.1 項の実験の場合と同じように、せん断速度が低く、残留振動域においてせん断速度が $10\text{[s}^{-1}\text{}]$ 以内になるためと考えられる。

8. 横方向に関する実験的検討

横方向 (水平方向) のダンピング特性を検討するために、インパルスハンマ応答実験を行った。リニアガイドシステムの横方向剛性が高いため、共振周波数が 40[kHz] 以上、測定可能な周波数範囲が $5\text{[Hz]} \sim 16\text{[kHz]}$ である piezo 加速度ピックアップ (小野測器 NP-3414) をテーブルの横に取り付け、その反対側をインパルスハンマで叩いて加振したときの応答を調べた。ハンマの毎回の力が同じになるように計測して、コントロールした。また、振動の位置信号はレーザ変位計 (キーエンス LC-2400) で計測する。

まず、ER 流体を充填しないで実験を行った。次に、ER 流体を充填し、印加電場が 0[V/mm] と 2[kV/mm] の場合について実験を行った。その結果を図 14 に示す。

図 14 からわかるように流体なしの場合は、リニアガイドシステム全体の横方向の固有振動数と考えられる約 250[Hz] の周波数成分が現れている。高分子液晶系 ER 流体を充填す

Fig.14 Impulse hammer response

ると、その振動が抑えられ、収束も速くなっており、スクイズフィルムダンパとしての顕著なダンピング効果が現れている。しかし、印加電圧の大きさとは関係せず、ダンピング効果の違いはほとんど見られなかった。その理由は次のように考えられる。

振動の振幅および速度データにより、計算では、スクイズ流れ断面には数千 $[s^{-1}]$ 以上の最大せん断速度が発生する。また、図 1(b) からわかるように、せん断速度が大きくなると、電場ありの高分子液晶系 ER 流体でも見かけ上の粘度が低下する傾向がある。つまり、数千 $[s^{-1}]$ 程度の高せん断速度域では、高分子液晶 ER 流体のせん断応力は降伏してしまい、電場の影響をほとんど受けないためと思われる。

また、減衰された後に口立つようになった約 650[Hz] の高い周波数成分はリニアガイドシステム自体の高次振動に起因するものと考えられ、その原因については、今後の検討課題である。

9. ま と め

本研究では、高分子液晶系 ER 流体を用いて、ダンピングが制御可能なリニアガイドシステムの開発について検討を行い、ER ダンパ付きのリニアガイドシステムを試作し、微小せん断速度域における基礎実験を行った。得られた結果を以下にまとめる。

(1) サーボ軸方向については、微小振動でせん断速度が十分に小さければ、高分子液晶系 ER 流体は電場の影響をほとんど受けず高い粘性を持つため、電圧を印加することなしでも、良好な振動減衰性が得られる。これは、開ループ実験および閉ループ制御実験の両者について確認された。すなわち、精密な位置決めなどにおける機械的なダンピングが得られる。

(2) 電場を印加しないときの高分子液晶系 ER 流体は、高せん断速度域においては、低粘性であるためダンピング効果はほとんどないが、発熱や抵抗力を発生せず、高速な移動を可能とする。

(3) 高速移動時にはそれほど精度が要求されず、その結果、低ダンピングで良く、精密な位置決め時にのみ適切なダンピングが要求されるサーボシステムがある。このような場合には、電場は常に零とした高分子液晶 ER 流体を封入したダンパによっても十分な効果が得られる。

(4) サーボ軸と直交する水平方向 (横方向) については、大きなスクイズフィルムダンパとしての効果が得られる。ただし、電場を変えてもダンピング効果には大きな差異が見ら

れなかった。その理由としては、せん断速度が非常に大きいため流体が降伏してしまい、電場の影響が現れなかったと考えられる。ただし、実際の使用に際しては、横方向ダンピング効果は大きいほど良いため、制御する必要はない。そこで、電場によって、ダンピングが制御できないことで、使用上の支障をきたすことはないと考えられる。

(5) 横方向の振動について、シリコンオイルなど通常の流体を用いても十分にダンピング効果は得られる。しかし、サーボ軸方向に十分なダンピング効果を持つ流体を用いるとき、通常の流体では高速移動時における発熱および大きな抵抗力という問題が発生するので、高分子液晶系 ER 流体は有用である。

本報告では、高分子液晶系 ER 流体を用いたリニアガイド用ダンパの微小せん断速度領域における特性について検討した。検討したせん断速度域内では電場を印加することなく、良好なダンピング特性が得られ、しかも高速移動時には発熱などの問題が起こらないことがわかった。しかし、実際の使用においては、より大きなせん断速度域において適切なダンピングが必要な場合もある。これについて検討するため、現在、流体を封入した ER ダンパを開発し、予備実験を行っていますが、電場を印加しないとき、十分なダンピング特性が得られないに対して、電場を印加することによって、適切なダンピングが得られている。

最後に、流体の提供およびご助言を頂きました (株)ER テック代表取締役の井上昭夫氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 大岩孝彰, 勝木雅英: 超精密位置決めにおけるアンケート調査, 精密工学会誌, **69**, 8(2003)1077.
- 2) M.Kral, J.Housa: Optimization of damping constants of the rolling guideway dampers, Proc Int Matador Conf (GBR), **32**, (1997)469.
- 3) A.Grunau: Neuste Erkenntnis-sezum RUDS, Prospectus of INA(1991).
- 4) J.Housa: Linear guideways of machine tools, Dissertation thesis CTU Prague(1997).
- 5) 古庄 純次: ER 流体を用いたメカトロニクスシステム (解説), フリッドパワーシステム (日本油空圧学会誌), **32**, 6, 9(2001)390.
- 6) 古庄 純次: ER 流体を用いたメカトロニクス機器の制御 (展望), 計測と制御, **34**, 9,(1995)687.
- 7) 古庄, 佐野, 古賀: 液晶系 ER 流体を用いたロボットアームの H_{∞} 制御に基づく高精度位置決め制御, 日本機械学会論文集 (C 編), **61**, 586(1995)2501.
- 8) G.Zhang, J.Furusho, M.Sakaguchi: Vibration suppression control of robot arms using a homogeneous-type electrorheological fluid, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, **5**, 3(2000)302.
- 9) N.Takesue, J.Furusho, A.Inoue: Electro-rheological effects of liquid crystalline polymer on one-sided pattern electrodes, J. of Applied Physics, **91**, 3(2002)1618.
- 10) 石山 誠, 青山 藤詞郎, 枝村 一弥: ER 流体を応用した工作機械テーブルシステムの動特性向上 (基本構造モデルによる動特性の解析), 日本機械学会論文集 (C 編), **60**, 577, 9(1994)72.
- 11) 石山 誠, 青山 藤詞郎, 枝村 一弥, 都築 良彦: ER 流体を応用した工作機械テーブルシステムの動特性向上 (テーブルシステムの試作と切削試験による性能評価), 日本機械学会論文集 (C 編), **62**, 593, 1(1996)326.
- 12) 橋詰 等, 新野 秀憲: ER 流体応用ナノメートル位置決めテーブルシステムに関する研究, 日本機械学会論文集 (C 編), **65**, 630, 2(1999)354.
- 13) 橋詰 等, 新野 秀憲, 伊東 諒, 佐藤 忠一: 電気粘性流体によるテーブルシステムの特性制御 (分散系電気粘性流体と液晶による特性比較), 日本機械学会論文集 (C 編), **61**, 590, 10(1999)301.
- 14) A. Inoue, S. Maniwa: Electro-rheological effect of liquid crystalline polymers, International Journal of Modern Physics B, **10**, 23 & 24(1996)3191.
- 15) 張 劍, 章 国光, 古庄 純次: 2 慣性特性を考慮したボールねじ駆動系の制御に関する研究, 精密工学会誌, **70**, 5(2004)689.