研究論文

高分子液晶系ER流体を用いたダンピング制御可能な
リニアガイドシステムの高せん断速度域における性能評価*菊池 武士**, 古荘 純次**, 山口 利明***
張 剣****, 宇田 昌樹*****Evaluation of a Linear Guide System with Electrically Controlled Damper using
Liquid Crystalline PolymerTakehito KIKUCHI, Junji FURUSHO, Toshiaki YAMAGUCHI,
Jian ZHANG, Masaki UDA

To meet the demands for high speed and high precision, rolling element linear guide systems are widely used in industrial machinery such as machine tools for the advantages of high precision, high rigidity and low friction. However, the principal disadvantage of such a system is its inferior damping characteristics, which may cause serious oscillation problems during operation. In this study, a linear guide system with electrically controlled damping and the capacity to move long strokes and at high speed using a minimal amount of fluid is developed. Liquid crystalline polymer (a homogeneous ER fluid) is used in place of particle-type ER fluid because of its characteristics of high output, near-linearity, and absence of sedimentation and particle crushing. Some basic experiments are carried out and its advantageous characteristics ascertained.

Key words : Electro-Rheological Fluid, Liquid Crystalline Polymer, Linear Guide System, Servomechanism, Controllable Damping, Mechatronics

1. 緒 言

ボールねじを用いたリニアガイドシステムは、工作機械や半導体製造装置などの直動位置決め機構として多く用いられている¹⁾。高速かつ高精度な位置決めが要求されているため、多くの場合案内には転がり案内が用いられるが、その低摩擦特性により機械的ダンピングが低下する。

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およびサーボ軸と直交する水平方向（横方向）において、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、運転効率や製品の品質の低下などの問題を引き起こしている。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て、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が生じるという問題が発生し得る。

また、リニアガイドシステムは転がり案内の高速対応力を生かすために、非加工時などの高速移動が求められる時には移動を妨げないように低抵抗であり、位置決め時や、加工時などの高精度な制御が求められる時には高粘性であることが望ましい。そのため、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 (Electro-Rheological) 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⁾。

本研究は、粒子分散系ER流体と比べて、せん断応力の変化が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、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の開発を目的としている。

*平成20年5月19日 原稿受付

**大阪大学大学院工学研究科

(所在地 大阪府吹田市山田丘2-1)

(E-mail: kikuchi@mech.eng.osaka-u.ac.jp)

***NSKプレジジョン株式会社技術本部

(所在地 群馬県前橋市鳥羽町78)

****株式会社日立ハイテクノロジーズ那珂事業所

(所在地 茨城県ひたちなか市市毛882番地)

*****バイオニア株式会社川崎事業所

(所在地 神奈川県川崎市幸区新小倉1-1)

筆者らは、高分子液晶系ER流体を用いたダンパを開発し、サーボ軸方向について 20s^{-1} 以下の微小せん断速度領域に着目し、その性能評価を行った¹⁴⁾。この報告でのせん断速度域が微小領域に限られたのは、ダンパの構造上、高速域では流体のオーバーフローが起こるためであった。また、この報告では、サーボ軸と直交する水平方向（横方向）でのスクイズフィルムダンパ効果についても検討を行い、大きな振動抑制効果が確認できた¹⁴⁾。

本論文では新たに次のことを行った。

ERダンパを改良し、高速かつ長距離の移動を可能とし、高せん断速度域での特性を調べた。

前報¹⁴⁾のERダンパでは電極間ギャップは 0.5mm であったが、本報で用いたERダンパでは電極間ギャップを 0.2mm とした。これにより、同一のテーブル速度に対して、流体のせん断速度は25倍になり、ダンパでの発生力を増大させた。また、ギャップを狭めたことにより、同一電場を得るために必要な印加電圧を下げる事ができた。

リニアガイドシステムにおいては、目標値応答特性やモータ側からの外乱のみならず、負荷側からの外乱に対する応答性も重要である。そこで本報では目標値およびモータ側からの外乱に対するシステムの応答特性を検討するとともに、負荷側である移動テーブルにリニアDDモータを搭載することにより、リニアガイドシステムの負荷側へ加わる外乱に対する抑制効果を調べた。

本論文は以下のように構成される。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する。4章では、本研究の制御システムについて説明する。5章では、ERダンパを用いたリニアガイドシステムについて、高せん断速度領域における目標値応答特性の実験を行う。6章では、モータ側に外乱を加えたときの応答を実験により評価する。7章では、負荷側のテーブルに外乱を加えたときの応答を実験により評価する。

2. ER 流 体

ER流体は、電気粘性流体とも呼ばれており、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)}。それぞれの流動特性をFig. 1に示す。ただし、均一系ER流体の特性図（Fig. 1(b)）には、本研究で使用した、均一系の一種である高分子液晶系ER流体の特性を示す。

粒子分散系ER流体は、絶縁油の中に微粒子を分散させたもので、電場を印加すると、粒子が誘電分極しクラスターを形成することによりレオロジー特性が変化する。一般にER流体というこの種類の流体のことを指す。Fig. 1(a)からわかるように、粒子分散系ER流体は電場を印加すると、せん断応力がせん断速度にほとんど依存しないビンガム流

(a) Dispersed-particle-type

(b) Homogeneous-type

Fig. 1 Characteristics of ER fluids

体としての特性を示す。すなわち、電場印加時にはクーロン摩擦に近い振る舞いをするようになる。

粒子分散系ER流体を用いた従来の研究^{10)~13)}では、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た¹¹⁾。そのほか、粒子分散系ER流体は、速度符号が変化する際に力の方向が突変することや、そのクーロン摩擦的な振る舞いから振動制御時に平衡状態以外の位置で静定するといった問題がある。また、粒子の沈降、凝集などの問題も残されているため、粒子分散系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あまり適さないと考えられる。

一方、均一系ER流体は低分子液晶系と高分子液晶系からなる。従来、この種類の流体のER効果はそれほど大きなものではなかった。しかし、高分子液晶である側鎖型ポリシロキサン液晶（LCP: Liquid Crystalline Polymer）をポリジメチルシロキサン（DMS: Polydimethylsiloxane、一般にいうシリコンオイル）で希釈した流体において、井上¹⁵⁾によって大きなER効果が発見された。

本研究に用いた高分子液晶系液晶の特性はFig. 1(b)に示す。粒子分散系ER流体と比べて、以下のような特徴を持つ。

粒子分散系ER流体と比べて、せん断応力の変化が一桁ほど大きい。

電場印加時において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。

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。従って、微小ギャップによるせん断の影響で

流体の特性が低下することがなく、流体寿命の改善が期待される。また、極めて狭い電極隙間でも使用が可能であるため、印加電圧を低減することも可能である。

そこで、本研究では均一系ER流体の一種である高分子液晶系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

Fig. 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、200W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を4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（小野測器LV-9110）により測定した。レーザ測長計の分解能は0.01 μ mである。

3.2 リニア型ERダンパの仕様および流体のシール

ダンパを取り付けたシステムの概略図をFig. 3(a)に示す。開発したERダンパはFig. 3(a)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。ダンパの基本構成は前報¹⁴⁾と同一でテーブルの片側に設置し、質量のバランスを取るためにテーブル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電極間隔は0.2mm、有効電極面積は合計0.024m²である。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およびカウンターバランスの質量は合計で65kgである。

前報¹⁴⁾のダンパでは、長距離、高速移動時には流体のオーバーフロー現象が起り、高速移動実験や長距離の移動実験は不可能であった。さらに、液体槽全体に流体を充填する従来の方法では、高分子液晶系ER流体の使用量が多すぎるなどの実用化上の問題もあった。

そこで、本研究ではFig. 3(b)に示すように、移動電極が周囲の流体を保持したまま走行できるように移動電極の両側に流体保持シールを設けた。これにより、少量の流体でより長距離、高速度の実験が可能となるようにした。印加電場2 kV/mm、170mm/sの移動速度までは放電せずに走行可能であることを確認した。流体保持用のシール材料としては、非粘性性、低摩擦係数および電気的には高い絶縁抵抗を持つふっ素樹脂（PTFE）を使用した。本シールシステムにおいて、短期的（日単位）には流体の漏れは微小であった。ただし、長期の放置（1週間以上）においては若干の漏れが確認されたため、実用化に向けてはさらなる改良が必要である。

4. 制御システムおよび基礎特性実験

4.1 制御システム

実験制御システムはFig. 4に示す。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。電気的な安全性を考慮して、電源の入力端子とD/Aコンバータとの接続にはアイソレーションアンプを介した。

Fig. 2 Overview of ball-screw driving system

(a) Overview

(b) Fluid seal

Fig. 3 Ball-screw driving system with ER damper

Fig. 4 Experimental setup

テーブルのサーボ軸方向の移動距離測定には、レーザ測長計（小野測器LV-9110）を使用した。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のサーボ加速度計が

取り付けられている。

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¹⁷⁾。このモデルに基づき、次章以降の閉ループ制御実験における制御系設計を行った。

4.2 基礎特性実験

テーブルを異なる速度で等速運動させ、それぞれの速度におけるせん断速度およびモータ推力の平均値を計算し、推力とせん断速度の関係からダンパのサーボ軸方向粘性特性を調べた。モータ推力は、モータへの電流指令値から電流サーボアンプのアンプ定数および回転系から直動系への変換係数によって算出した。その結果をFig. 5に示す。また、比較するために、低せん断速度域において高分子液晶系ER流体と同等の粘度 (3×10^4 cSt) を有するシリコンオイルの結果も載せておく。

まず、印加電場 2 kV/mm の高分子液晶系ER流体の結果 (「○」) を印加電場 0 kV/mm の高分子液晶系ER流体の結果 (「△」) と比較すると、電場を印加することで、高分子液晶系ER流体の見かけの粘性が制御できていることがわかる。

次に、ニュートン流体と見なすことのできるシリコンオイルの結果 (「●」) を印加電場 0 kV/mm の高分子液晶系ER流体の結果 (「△」) と比較する。シリコンオイルはせん断速度が増大するにつれ、生じる力はどこまでも大きくなる。一方、印加電場 0 kV/mm の高分子液晶系ER流体は低せん断速度領域 (およそ 30 s^{-1} 以下) ではシリコンオイルとほぼ同等の粘性力を示すが、高せん断速度領域ではシリコンオイルほど力が大きくなり、せん断力が降伏する。この特性により、高分子液晶系ER流体を用いたほうが高速域で低粘性となり、高速移動を妨げないことがわかった。

また同図に示すように、ダンパに流体もシールも入れていない場合のシステム粘性特性は「◇」で表され、システムの固有摩擦力はおよそ 40 N とわかる。

そのほかの三種類の場合 (「●」, 「○」および「△」) は、流体保持部を取り付けることにより、システムの固有摩擦力はおよそ 20 N 高くなった。

Fig. 5 Driving force of motor vs. shear rate of fluids

5. 目標値応答実験

与えられた目標値に対する応答性を調べるために、目標値応答特性実験を行った。制御方式はモータの情報のみを用いるセミクロズドループ位置IPD制御であり、制御ゲインは前報¹⁴⁾と同様に「拡張パラメータ平面法」¹⁷⁾を用いて決定した。本章では、ダンパの振動抑制効果を見るために、制御帯域を広くとり、 $0.9\omega_0$ (ω_0 は二慣性系の反共振周波数を表し、本システムにおいては 490 rad/s) とした。

5.1 速度のステップ応答実験

ステップ状の速度目標値変化に対する応答特性を調べた。具体的には、移動速度が 10 mm/s から 50 mm/s へステップ状に変化するような位置目標軌道を与えた。

速度が 50 mm/s に達した直後の速度変化の様子をFig. 6に示す。Fig. 6を見ると、ダンパなし (「(a) Without fluid」) と比べて、高分子液晶系ER流体を充填することで (「(b) ER fluid ($E = 0 \text{ V/mm}$)」) 振動が大きく抑えられ、収束が速くなっていることがわかる。また、高分子液晶系ER流体に電場を印加する場合 (「(c) ER fluid ($E = 2 \text{ kV/mm}$)」) は、高分子液晶系ER流体に電場を印加しない場合 (「(b) ER fluid ($E = 0 \text{ V/mm}$)」) と比べると、さらに収束時間が少し短くなり、振動の振幅も小さくなり、速度の変動が抑えられていることがわかる。つまり、ERダンパを用いることで、速度指令値の激しい変化に対して良好な追従性が示された。

(a) Without fluid

(b) ER fluid ($E = 0 \text{ V/mm}$)

(c) ER fluid ($E = 2 \text{ kV/mm}$)

Fig. 6 Step response of velocity

5.2 位置のステップ応答実験

目標位置 20 mm に対するステップ応答実験も行い、位置決

め性能の評価も行った。ただし、加減速域では加速、減速を 625mm/s^2 とし、定速域では速度を 50mm/s とする速度台形則を用いた。

目標位置 20mm に達した際の停止時の負荷側残留振動の様子をFig. 7に示す。Fig. 7から、ダンパなし ((a) Without fluid) と比べて、高分子液晶系ER流体を充填すること ((b) ER fluid ($E = 0\text{ V/mm}$)) で振動が抑えられている様子がわかる。さらに、高分子液晶系ER流体に電場を印加すること ((c) ER fluid ($E = 2\text{ kV/mm}$)) によって立ち上がりが少し遅くなっているが、残留振動が抑えられ、また、オーバーシュートも改善され、収束が速くなっていることがわかる。

Fig. 7 Step response of position

6. モータ側外乱応答特性

40mm/s (せん断速度 200s^{-1}) の定速移動時のテーブルに正弦波外乱入力を加えたときの負荷側の応答を調べた。外乱入力Fig. 4におけるDCサーボモータへの推力指令値に正弦波信号を加算し、テーブルを駆動しているDCサーボモータの推力に片振幅 100N 、周波数帯域 $200 \sim 800\text{rad/s}$ の正弦波を重畳させることにより作用させた。この周波数範囲の決定に際しては、流体なしにおける振動ピーク ($300\text{rad/s} \sim 400\text{rad/s}$) を含み、サンプリング限界 (サンプリングタイム 1ms) である 800rad/s 以下となるように決定した。制御方式はセミクロズドループ位置IPD制御方式を用いた。また、加える外乱の影響を観測しやすくするために、文献¹⁷⁾により設計した最適ゲインを用い、制御帯

域を $0.7\omega_n$ とした。

Fig. 8 Frequency disturbance response (motor side)

入力を外乱 (力) $[\text{N}]$ 、出力を負荷の変位 $[\text{mm}]$ として、周波数応答実験を行った結果をFig. 8に示す。約 400rad/s 以上の周波数範囲では、制御系の応答性が低下しているためにダンパなし (Without fluid)、印加電場 0 kV/mm 、 2 kV/mm での差異が見られないが、それ以下の周波数範囲においてはダンパなし、印加電場 0 kV/mm 、 2 kV/mm の順番でゲインのレベルが下がっており、外乱応答特性の向上が確認された。

従来の研究では橋詰ら¹²⁾は、空気静圧案内とリニアモータを採用したナノメートル位置決めテーブルシステムに粒子分散系ER流体を応用したERダンパを組み込み、その特性を評価したが、テーブル運動時において粒子分散系ER流体は、せん断速度の増大に伴って、電場印加による微小振動に対する減衰作用は減少傾向を示すことが確認された。具体的には 100s^{-1} 以上のせん断速度では電場を印加しても外乱応答特性の向上はほとんど確認できなかった。

それに対して、本実験では、 200s^{-1} の高せん断速度でも電場印加によって外乱抑制効果の向上が確認できた。それは、本研究では高分子液晶系ER流体が用いられ、その性質は、Fig. 1(b)に示すように、全体的に発生せん断応力が粒子分散系ER流体よりはるかに大きく、また、電場印加によるせん断応力のせん断速度の増大に伴う変化量も粒子分散系ER流体より大きいと考えられる。

7. 負荷側外乱応答特性

現場ではテーブルの上に搭載する工作物などの稼働によって負荷側に外乱が発生するケースがよくある。その場合には、外乱により負荷側のテーブル位置に偏差が生じてしまう。そこで、テーブル運動時における外乱応答特性の影響に着目し、負荷側外乱応答特性実験を行った。

外乱は、Fig. 9に示すように、移動テーブルの上にサーボ軸方向にリニアDDモータを固定し、リニアDDモータを一定周波数で左右に動かすことで印加した。

7.1 セミクロズドループ制御の場合

40mm/s (せん断速度 200s^{-1}) の定速移動時のテーブルに正弦波外乱入力を加えたときの負荷側の応答を調べた。制御方式はセミクロズドループ位置IPD制御方式を用い、

Fig. 9 Disturbance system with a linear motor on the table

また、加える外乱の影響を観測しやすくするために、文献¹⁷⁾により設計した最適ゲインを用い、制御帯域を $0.7\omega_a$ とした。

リニアモータより片振幅20N、周波数帯域200～800rad/sの正弦波外乱を与えた時の負荷側応答を調べた結果をFig. 10に示す。Fig. 8と同様に、入力外乱(力) [N]、出力は負荷の変位 [mm] である。Fig. 10からわかるように、ダンパなし (Without fluid)、印加電場 0 kV/mm、2 kV/mmの順番で、ゲインのレベル (ピーク) が下がっており、外乱応答特性の向上が確認された。特に、ER流体を充填した場合はダンパなし (Without fluid) と比べて、外乱抑制効果が顕著に現れたことがわかる。

Fig. 10 Frequency disturbance response (load side, semi-closed loop)

7.2 クローズドループ制御の場合

レーザ測長計により計測したテーブル位置情報をフィードバック信号とし、制御方式をクローズドループ位置I-PD制御として、負荷側の外乱に対する周波数応答を調べた。前節と同様に、加える外乱の影響を観測しやすくするために、文献¹⁷⁾により設計した最適ゲインを用い、制御帯域は $0.6\omega_a$ とした。片振幅20N、周波数帯域200～800rad/sの正弦波外乱を負荷側に加えたときの結果をFig. 11に示す。Fig. 8と同様に、入力外乱(力) [N]、出力は負荷の変位 [mm] である。Fig. 11からわかるように、流体なし (Without fluid) に比べて、ダンパにER流体を充填し、印加電場 0 kV/mm、2 kV/mmの順番で、ゲインのレベルが下がり、特にピークが出ている帯域では効果が大きく、外乱を抑制で

きていることがわかる。このことから、ERダンパを用いることで、クローズドループ位置I-PD制御の外乱抑制効果をさらに高めることができる。

Fig. 11 Frequency disturbance response (load side, closed loop)

8. 結 言

本稿では、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を試作し、高せん断速度領域における基礎実験を行い、その特性を評価した。

本論文で明らかになった事項を下記にまとめる。

ERダンパの基礎特性実験として粘性特性実験を行い、システム高速運動時には抵抗を抑えるために無電場で低粘性を、高精度な位置決めが要求される時には高い振動減衰性を得るために電場印加で高粘性を実現することが可能となることがわかった。

ERダンパを付加したリニアガイドシステムにおいてセミクローズドループ制御系を構成し、目標値応答実験を行った。その結果、速度ステップ応答においては、ER流体を充填、電場を印加することで、急激な目標速度変化に対しても少ない変動で追従できることを確認した。また、位置決め実験においては、電場を印加することで振動の収束が速く、オーバーシュートも軽減され、残留振動が抑えられることを確認した。

ERダンパを付加し、セミクローズドループ制御したリニアガイドシステムに対して、モータ入力に付加的な外乱を加えたときの特性を調べた。その結果、高せん断速度域まで電場印加によって外乱の影響を抑制することができ、粒子分散系ERでは得られないダンピング特性の向上が見られた。

負荷側のテーブルの上に、リニアモータを載せて強制的に外乱を加えたときの応答を調べた。その結果、セミクローズドループ制御のみならず、クローズドループ制御でも高せん断速度域まで電場印加によって外乱の影響を抑制することが確認できた。

本稿では、印加する電場に関しては動的に変化させることはしていない。印加電場に時間変化を与えた場合のダンピング制御に関しては次報以降で報告する予定である。

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, 1077/1082 (2003)
- 2) M. Kral, J. Housa: Optimization of damping constants of the rolling guideway dampers, Proc. Int. Matador Conf. (GBR), **32**, 469/474 (1997)
- 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) 古荘純次: ER流体を用いたメカトロニクスシステム (解説), フレイドパワーシステム (日本油空圧学会誌), **32**-6, 390/395 (2001)
- 6) 古荘純次: 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, **32**-6, 390/395 (2001)
- 7) 古荘純次, 佐野明人, 古賀滋雄: 液晶系ER流体を用いたロボットアームの $H\infty$ 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, 2501/2507 (1995)
- 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, 302/309 (2000)
- 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, 1618/1623 (2002)
- 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, 2964/2970 (1994)
- 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, 326/332 (1996)
- 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, 786/792 (1999)
- 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, 4105/4110 (1999)
- 14) 張剣, 古荘純次, 宇田昌樹, 山口利明: 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), 精密工学会誌, **71**-4, 471/476 (2005)
- 15) A. Inoue, S. Maniwa: Electro-rheological effect of liquid crystalline polymers, International Journal of Modern Physics B, **10**, 3191/3200 (1996)
- 16) H. Kito, K. Tajiri, H. Orihara, Y. Ishibashi, M. Doi and A. Inoue: A Novel mechanism of Electrorheological effect in polymer blends, International Journal of Modern Physics B, **13**-14, 15&16, 1983/1989 (1999)
- 17) 張剣, 章国光, 古荘純次: 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, 689/694 (2004)