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)

石 山 誠^{*1}, 青山 藤詞郎^{*2}, 枝 村 一 弥^{*3}

Application of Electrorheological Fluid for the Dynamic Performance Enhancement of Machine Tool Table Systems (Analysis of the Dynamic Characteristics of a Simple Table System)

Makoto ISHIYAMA, Tojiro AOYAMA and Kazuya EDAMURA

Rolling guideways have been widely applied to the machine tool tables because of their low friction and high maintainability. Table systems with rolling guideways have, however, some demerits such as low damping ability, which causes the chatter vibrations during machining. In this study, a table system with variable damping mechanism is proposed in order to improve the dynamic characteristics of the table system. The ER (electrorheological) fluid is applied to control the viscous damping force generated by the proposed mechanism. ER fluid is a kind of colloidal suspension, and its apparent viscosity is increased in accordance with applied electric field intensity. The dynamic characteristics of the proposed table system are analyzed by means of the impulse force method, and the effect of ER fluid is investigated.

Key Words: Machine Tool, Guide Way, Rolling Bearing, Table System, Chatter Vibration, ER Fluid, Damping Ability, Dynamic Characteristics

1. 緒 言

一般の工作機械テーブルの直動案内には、高い負荷容量と優れた減衰性能をもつ滑り案内が、多く用いられてきた。しかし、工作機械の高精度化、高速度化が進むのに伴い、滑り案内ではその位置決め精度や運動速度に限界があるため、近年ではこれに代わって、転がり案内の需要が増加してきている。転がり案内は、摩擦抵抗が小さいことが最大の特徴であり、このため高速、高加速度運転および高精度の位置決め制御が可能である⁽¹⁾。しかしながら、転がり案内は低摩擦であるがゆえに、滑り案内と比較して振動減衰性能が低く、加工中にびびり振動が発生しやすいことが指摘されている⁽²⁾⁽³⁾。工作機械では、その母性原理によってテーブルの運動性能が直接的に加工精度に影響を与えるため、減衰性能は重要な問題の一つであり、その向上が強く望まれる。この問題に対する従来の研究報告は数少なく、転がり案内テーブルに滑り案内の機能を複合化し、びびり振動を抑制する研究がなされているに過

ぎない⁽⁴⁾。また最近、電気粘性流体(ER 流体)を利用してテーブルシステムの送り方向についての特性制御が可能であることが報告されてはいるが⁽⁵⁾、実用化するにはまだ多くの問題が残されている。

本研究では、転がり案内されたテーブルに対し、ER 流体(Electro-rheological Fluid)の粘性抵抗を利用した摩擦発生機構を付加し、これによってテーブルの動特性を向上させることを試みた。ER 流体は、電界の存在により見掛けの粘度が変化する流体で、応答性が極めて良いこと、粘度の変化する割合が大きいこと、電気的信号で制御するため機械システムの中に導入することが比較的容易なことなどから、近年さまざまな分野への応用が試みられており^{(6)~(9)}、工作機械への応用も始められようとしている。ER 流体の粘度変化は可逆的で、付加する摩擦減衰力を電界の強さによって調節することができるため、低摩擦である転がり案内の長所を活かしながら、加工時にのみ摩擦減衰力を発生させてテーブルの動特性を向上させることが可能であると考えられる。本報告では、ER 流体をテーブルシステムに応用するにあたり、転がり案内テーブルの基本構造をもったモデルを試作し、その基礎的な特性を実験的に解析した。

* 原稿受付 平成6年3月18日。

^{*1} 学生員、慶應義塾大学大学院 (〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。

^{*2} 正員、慶應義塾大学理工学部。

^{*3} 藤倉化成(株) (〒105 東京都港区芝公園2-6-15)。

2. ER 流体の特性

電界を加えることによって流体の見掛けの粘弾性の性質が変化する現象をER効果と呼んでいる。ER流体とは、この効果を示す流体の総称であり、一般的に絶縁性油にER粒子と呼ばれる微粒子を分散させたコロイドである。ER流体の粘弾性変化のメカニズムは、図1に示すような電界の存在によって形成されるER粒子の鎖状構造によって説明される。ER流体に電場を加えると、各ER粒子に誘電分極による双極子が生じる。分極した二つの粒子が接近すると、双極子-双極子相互作用により、電場方向に並んだ粒子には引力が、電場垂直方向に並んだ粒子には斥力が発生する。これにより、電極間で粒子が電場方向に結合して鎖状構造を形成する。電界中にあるER流体をせん断するためには、この粒子鎖を切断する力を必要とし、ER流体の見掛けの粘性抵抗が高くなる⁽¹⁰⁾。また、粒子鎖は完全に切断されなくても、せん断により傾くと元の状態に戻る方向に復元力が働き、これが弾性の性質を示すことになる。

本研究で用いたER流体は、ポリマ粒子の表面をER活性な特殊酸化チタンの微粒子で被覆した無機・有機複合形粒子を、シリコンオイルに分散させた系である。このER粒子は平均粒径が約15 μm で、ポリマを芯体としているため、低比重で分散安定性に優れ、軟質で電極が摩耗する心配がないなどの特長を有して

図1 ER効果のメカニズム

図2 使用したER流体の特性⁽¹¹⁾

いる。また、印加電圧は高いが、電気抵抗値が非常に高いため省電力形であり、使用中に発熱することがない。図2に使用したER流体の、電界の強さを変化させたときの、せん断速度とせん断応力の関係を示す⁽¹¹⁾。

3. 試作した実験装置

ER流体を転がり案内テーブルシステムに応用するための基礎的な実験解析を行うことを目的とし、1組の直動転がり軸受ユニットで構成される。簡単なテーブルシステムのモデルを製作した。これに対して、ER流体による可変摩擦力発生機構を試作して取付けた。図3に試作した実験装置の構造を示す。摩擦力発生機構はオイルフィルムダンパ⁽¹²⁾の構造を適用したもので、案内の片側に送り方向に平行となるように設けられた溝と、この溝に挟まれる平板によって構成される。平板は直動転がり軸受ユニットの上に固定され、これらがテーブルを構成している。テーブルが送り方向に移動することにより、平板も溝の両壁面と一定の距離を保って移動する。この溝内にER流体を満たすことにより、テーブルの振動に対して摩擦減衰力を作用させる構造となっている。溝の両壁面を正極に、溝に挟まれた平板を負極に帯電することができるように、両極間を非導電性のセラミックスを用いて絶縁し、電場を加えることでER流体のせん断応力を上昇させ、テーブルに作用する摩擦減衰力を増大させようとするものである。このときのER流体に電界を加えることのできる電極の面積は、平板の両面合わせて6400 mm^2 (40 $\text{mm} \times 80\text{mm} \times 2$)であり、両電極間のすきまは0.2~0.6 mm の範囲で調節が可能である。

図3に示したように、座標系はテーブル送り方向を

図3 実験装置

X 方向, 送り方向に直交する水平方向を Y 方向, 鉛直方向を Z 方向と定めた。

4. 結果および考察

4・1 試作したテーブルモデルの動特性評価 試作した転がり直動案内テーブルの周波数応答特性をインパルス応答法によって, X, Y, Z の 3 方向について測定した。図 4 に示すように, インパルスハンマによって加えられる加振力信号と, テーブルに取付けた加速度計からの応答信号を 2 チャンネル FFT アナライザに入力し, テーブルの動コンプライアンスを測定した。また, 通常のテーブルシステムは, X 方向についてボールねじ等の駆動系によってその運動が拘束されているが, 本実験装置においてはその代わりに, 図 4 に示すように板ばねを取付けることによって同方向の剛性を与えた。

図 5 は, ER 流体を溝内に満たしていない場合, すなわち転がり案内テーブル単独の場合の動コンプライアンスを測定した結果である。X 方向では約 280 Hz, Y 方向では約 455 Hz, Z 方向では約 505 Hz 付近に, それぞれ顕著な共振点が認められる。また, テーブル

モデルの減衰比は, 動コンプライアンスからのバンド幅法による測定によると, X, Y, Z 方向について, それぞれ 0.029, 0.039, 0.018 となった。

次に摩擦力発生機構の溝内に ER 流体を満たして, テーブルに摩擦減衰力を作用させた場合について, 同様の方法で測定を行った。電極間すきまは 0.5 mm とし, ER 流体は 10 cSt のシリコンオイルに 20 wt%ER 粒子を分散させたものを使用した。図 6 に, ER 流体に

図 4 テーブルの動特性の測定方法

図 5 転がり直動案内単独の場合のテーブルの動コンプライアンスの測定結果

図 6 電界の強さを変化させたときのテーブルの動コンプライアンスの測定結果

加える電界の強さを $0 \sim 3.0 \text{ kV/mm}$ までの範囲で変化させたときの X , Y , Z の 3 方向の動コンプライアンスの測定結果を示す。ここで実線は電界を加えない場合、すなわち ER 効果がない場合のテーブルの動コンプライアンスである。テーブルは、ER 流体に電界を加えなくても、ER 流体の基底油の粘性抵抗によって摩擦減衰力を受けるので、共振点の動コンプライアンス値は、図 5 に示した転がり案内単独の場合よりも低下する。さらに電界を加えることによって、ER 効果が発生し、これら共振点のコンプライアンス値は電界の強さに応じて低下することが分かる。電界を加えることでテーブルの動特性が向上したのは、ER 効果によって電極間に形成される粒子鎖により、ER 流体の見掛けの粘弾性の性質が変化したためである。また、ER 粒子間の結合力は電界の強さに関係するので、電界の強さに応じてテーブルの動コンプライアンスが低下したと考えられる。

図 7 は、このときの ER 流体に加えた電界の強さとテーブルの減衰比の関係を示したものである。この結果からも、テーブルの減衰比が加える電界の強さに応じて高くなっていることがわかる。しかしながら図 7 の測定結果において、 X 方向および Z 方向については良好なテーブルの減衰性能の向上が認められるが、 Y 方向についてはテーブルの減衰比の増大の割合が少ないことが指摘される。これは Y 方向の ER 効果が、負電極である平板が電界方向に振動することで生じていることから、 X および Z 方向のせん断場においてのいわゆる ER 効果と異なるメカニズムによるた

めと思われる。

Y 方向にも ER 効果が生ずる理由として、ER 流体によるスクイズ膜作用と、電極間に並んだ粒子鎖の弾性の性質が考えられる。テーブルに固定された平板(負電極)が Y 方向に振動すると、電界を加えない場合においても、電極間に満たされた ER 流体の粘性によりスクイズ膜作用が生じ、テーブルの振動に対して減衰力が働く。電界を加えた場合は、電極間に形成される粒子鎖が ER 流体の流動を防げるため、スクイズ膜作用による減衰力が電界を加えない場合よりも強く働くものと推定される。またこれに加え、粒子鎖自体が弾性の性質をもっているため、図 8 に示すように Y 方向の振動に対してばね的な役割を果たしていることも考えられる。つまり、粒子鎖は引張られる場合には、向かい合う粒子同士が引き合って引力を⁽¹³⁾、圧縮される場合には、弓形にたわんで反発力をそれぞれ生じ、テーブルの動剛性が向上したものと考えられる。このように、すきま方向の振動に対して認められる ER 効果を、ER スクイズ効果と呼ぶことにする。

4・2 自励びり振動に対する安定性の評価 機械加工中に発生するびり振動には、強制びり振動と自励びり振動がある。何らかの外乱によって生じる強制びり振動は、比較的容易に抑制することができるが、自励びり振動は、外乱の有無にかかわらず発生するため、その抑制が困難とされる⁽¹⁴⁾。本研究では、試作したテーブルの自励びり振動に対する安定性を、動コンプライアンスの最大負実部の大きさによって評価した⁽¹⁵⁾。

図 9 に、転がり案内単独の場合、ER 流体を使用し電界を加えていない場合、電界を加えた場合の 3 種類について、 X 方向の動コンプライアンスの実部を示す。最大負実部の大きさは転がり案内単独の場合に

図 7 電界の強さとテーブルの減衰比との関係

図 8 ER 粒子鎖の弾性

図 9 動コンプライアンスの実部

比べ、摩擦力発生機構に ER 流体を満たすことで、電界を加えない場合でも約 2/3 に減少する。これは、ER 流体の溶媒であるシリコンオイルの粘性により摩擦減衰力がテーブルに付加され、テーブルの動剛性が向上したためである。さらに 3 kV/mm の電界を加えると、ER 効果によって強い摩擦減衰力が発生するため、最大負実部の大きさは電界を加えない場合の約 1/2、転がり案内単独の場合の約 1/3 と小さくなる。以上の結果より、本研究で開発した、ER 流体を用いた摩擦力発生機構は、転がり案内テーブルの自励びり振動発生に対する安定性の向上策として有効なものと判断される。

4.3 使用する ER 流体の基底粘度の影響 摩擦力発生機構は電界を加えない場合においても、流体の粘性抵抗によりテーブルに摩擦減衰力を発生することから、使用する ER 流体の基底粘度を高くすることで、テーブルの動特性を向上できるものと考えられる。そこで、ER 流体の基底粘度がテーブルの動特性に与える影響を、テーブルの送り方向である X 方向に対して調べた。測定結果を図 10 に示す。ER 流体の基底粘度は溶媒であるシリコンオイルの粘度で調節し、混入する ER 粒子濃度はすべて 20 wt% とした。基底粘度の高い ER 流体を使用すると、それ自体で高い摩擦減衰力が得られ、テーブルの動剛性が高くなっていることがわかる。しかしこの場合、ER 効果による共振点でのコンプライアンスの値の低下量は少なく、テーブルの減衰性能を調節できる範囲が狭くなる。また、ER 流体の基底粘度が高いと、テーブルの高速送り時にいて駆動負荷が大きくなり、転がり案内の長所を損なう恐れがある。以上のことから、転がり案内の長所である低摩擦特性を活かしながら、テーブルに作用する摩

図 10 ER 流体の基底粘度の影響

擦減衰力を広い範囲で制御可能とするためには、高い ER 効果が有効に認められる、基底粘度の低い ER 流体を使用することが望ましいといえる。

4.4 電極間すきまによる影響 摩擦力発生機構の構造上、電極間すきまを広くすることで、テーブルの高速送り時の駆動負荷を軽減することができる。しかしその反面、電極間すきまを広くすると、ER 効果によって発生する摩擦減衰力が十分に得られなくなることが予想される。そこで電極間すきまを変化させたときの、電界の強さとテーブルの減衰比の関係を X 方向について測定した。測定結果を図 11 に示す。電極間すきまが 0.2~0.6 mm の範囲では、電界は強いほど、電極間すきまは狭いほど、高い減衰性能が得られることがわかる。電界を加えていない状態においてもテーブルの減衰比が、電極間すきまが狭いほど高いのは、ER 流体の基底油のせん断粘性抵抗が高くなるためである。電界を加えた状態においては、上記の基底油のせん断粘性抵抗の作用に加えて、電極間に形成される粒子鎖の長さによる影響も、テーブルの減衰性能に関係していると思われる。図 12 に示すように電極間すきまを狭くすると、1 本の粒子鎖を形成する ER 粒子数は当然のことながら減少する。テーブルが同じ振幅 L で振動したとすると、図に示したように電極間が狭い方が粒子鎖の傾きは大きくなり、粒子鎖が元の状態に戻る方向の復元力は強くなることが考えられる。

4.5 ER 効果の応答性 ER 流体を用いた減衰力

図 11 電極間すきまの影響

図 12 電極間すきまと ER 粒子鎖の関係

図 13 ER 効果の応答性(電界を加える場合)

発生機構を実際のテーブルシステムに適用する際には、得られる減衰力の大きさが十分であることはもちろんであるが、電場を印加してから、減衰効果が得られるまでの応答速度も問題となるものと思われる。そこで、テーブルの X 方向にその固有振動数に等しい振動外力を加えておき、瞬時に 4.0 kV/mm の電界を加えたときの X 方向振幅の変化の様子を測定した。テーブルは動電形加振器によって一定の力で加振し、このときの X 方向変位を渦電流形非接触変位計によって測定した。その結果を図 13 に示す。電場を印加した瞬間から、電界の強さが設定値の 90% に至るまでに、約 2 ms を要した。使用した ER 流体の応答特性は、時定数が約 13 ms 、最終値に達するまでの 10% から 90% までの立ち上がり時間が約 30 ms 以下であることが測定結果よりわかる。また電界を加えることにより、テーブルの振幅が小さくなりテーブルの動剛性が高くなることが確認された。

次に、ER 流体に 4.0 kV/mm の電界を加えている状態から、電界を取り除いた場合についても同様の測定を行った。図 14 にこのときのテーブルの X 方向の動変位の様子と、電界の関係を示す。電極に帯電した電荷が移動してなくなるまでに、約 25 ms を要した。また、 X 方向の変位にむだ時間が存在することから、電極間に形成された粒子鎖が壊れるまでに多少の時間がかかることがわかる。

5. 結 言

ER 流体による可変摩擦力発生機構を試作して、こ

図 14 ER 効果の応答性(電界を取り除く場合)

れを転がり直動案内テーブルに取付け、テーブルの動特性を調べた。得られた結果を以下にまとめる。

(1) ER 流体を応用した摩擦力発生機構を転がり直動案内テーブルに取付けることにより、テーブルの動特性を X , Y , Z の 3 方向について向上させることが可能である。

(2) ER 流体を転がり直動案内に应用することで、自励びり振動発生に対する安定性の向上が期待できる。

(3) 転がり案内の長所である低摩擦特性を活かしながら、テーブルに作用する摩擦減衰力を広い範囲で制御可能とするためには、有効な ER 効果が得られるように基底粘度の比較的低い ER 流体を使用することが望ましい。

(4) 電極間すきまは、これが狭いほどテーブルの減衰性能は向上する。

(5) 使用した ER 流体は、時定数が約 13 ms 、最終値に達するまでの 10% から 90% までの立ち上がり時間が約 30 ms 以下と、良好な応答性を示した。

文 献

- (1) 森田, 潤滑, 32-5(1987), 371.
- (2) 伊藤・青山・稲崎, 機論, 54-506, C(1988), 2375.
- (3) 高本・鶴, 機械の研究, 38-8(1986), 903.
- (4) 船越・青山・稲崎・三輪, 機論, 55-515, C(1989), 1747.
- (5) 橋詰・菊地・新野・伊東・島, 機講論, No. 930-13(1993-10), 401.
- (6) 大坪, 粉体と工業, 25-3(1993), 50.
- (7) 森下・三井・黒田, 機論, 56-524, C(1990), 928.
- (8) 森下・三井, 機論, 56-529, C(1990), 2367.

- (9) 森下・三井・榎場・桜田, 機論, 58-551, C(1992), 2045.
 - (10) 大坪・枝村, 第30回粉体に関する討論会講演要旨集, 粉体工学会他共催, (1992-10), 52.
 - (11) 大坪・枝村, 第31回粉体に関する討論会講演要旨集, 粉体工学会他共催, (1993-10), 21.
 - (12) 浅見・関口, 機論, 57-534, C(1991), 437.
 - (13) Halsey, T. C., Electrorheological Fluids, *Science*, 258 (1992), 761.
 - (14) 星, 機械加工びり現象, (1977), 5, 工業調査会.
 - (15) Weck, M. and Teipel, K., 工作機械動特性の測定と評価, (1979), 104, マシニスト出版.
-