ER 流体ダンパによる工作機械工具系の振動抑制*

富澤 元一^{*1}, 青山 藤詞郎^{*2}
田中 克敏^{*3}, 桜井 宏治^{*4}Suppression of Tool Shank Vibration
by Electrorheological Fluid DampersMotokazu TOMIZAWA, Tojiro AOYAMA,
Katsutoshi TANAKA and Koji SAKURAI

Those who are concerned with the machining of metals through the cutting process are often confronted with a self-excited vibration, commonly termed chatter instability. In order to suppress the chatter vibration, viscously coupled dampers for boring bars have been proposed by several researchers. In this study, new cutting tool shanks with variable damping elements are proposed. The variable damping element is developed by applying the electrorheological fluid. The electrorheological fluid is a kind of colloidal suspension whose apparent viscosity is variable depending on the applied electric field. The performances of the proposed tool shanks are evaluated through the impulse force response test and cutting test and the effect of the variable damper was investigated.

Key Words: Cutting Tool, Vibration Control, Damper, Electrorheological Fluids, Chatter Vibration, Surface Roughness

1. 緒 言

機械加工の高精度化, 高能率化を目指す上で, 加工中に生じる振動の抑制は重要な課題の一つである。加工時の振動は, 機械全体の振動特性に起因するが, 中でも工具系の剛性は機械の振動特性に大きな影響を与える。特に, 中ぐり加工に代表される工具突出し量の長い加工では, 工具自身の剛性が低いためにびびり振動が発生しやすく, その対索として, 突出しの長い工具にダンパなどにより付加的な減衰力を作用させて振動減衰性を向上させる方法が従来から提案されている⁽¹⁾。しかし, 理論どおりに設計することが困難なことや, 減衰力が工具の内部で受動的にしか発生しないために振動特性の変化に対して十分な効果が期待できないといった問題が指摘されている。最近では, 圧電・電媒材料, 形状記憶合金などの機能材料を中ぐり工具に応用し, 減衰力を能動的に発生させて切削性能を向上させる試みがなされている^{(2)~(4)}。

本研究では, 電界を加えると見かけの粘弾性が変化する ER 流体を用いて, ダンパに作用する減衰力を電氣的に調整し, 切削工具の動特性を向上させることを提案した。ER 流体は電界を加えるとその強度に応じて瞬時に流動性を失い, 電界を切ると元に戻るといった特性を示す流体である。この ER 流体を応用したダンパ(ER 流体ダンパ)を切削工具のシャンクに封入することにより, 工作機械工具系の振動特性を ER 流体の粘弾性を変化させることで電氣的に調整し, 切削性能を向上させることを試みた。ER 流体ダンパを付加した切削工具を試作し, その性能をインパルス応答法および切削試験により評価した。

2. ER 流体の特性

ER 流体は電界を加えることによって流体の見かけの粘弾性が変化するコロイド溶液の総称であり, 一般に電気絶縁性流体中に ER 粒子と呼ばれる微粒子を分散させたものである。電界の存在により流体の見かけの粘弾性が変化する現象を ER 効果という。そのメカニズムは, ER 流体中に電界を加えると流体中に分散された ER 粒子が誘電分極を起こし, 粒子同士が引き合って図 1 に示すような ER 粒子の鎖状構造を形成することにより説明される。実際にはこの粒子鎖は 1 本

* 原稿受付 1997 年 8 月 15 日。

^{*1} 慶應義塾大学大学院 (☎ 223-8522 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} 正員, 東芝機械(株) (☎ 401-0022 沼津市大岡 2068-3)。^{*4} 藤倉化成(株) (☎ 340-0203 埼玉県北葛飾郡葛飾市桜田 5-13-1)。

ではなく、複数の鎖が絡み合って構造体を形成していることが知られている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。電界中にある ER 流体をせん断流動するにはこの ER 粒子鎖を切断する力が必要とし、これが ER 流体の見かけの粘弾性の上昇として観測される⁽⁷⁾。また電極間に形成される粒子鎖には弾性の性質もあり、粒子鎖が完全に破壊されないような微少なせん断に対しては復元力が働いて ER 効果が現れることや、流体のせん断方向だけでなく、図 1(c)に示すような流体を圧縮する電界方向の振動に対しても ER 効果が働くことが確認されている⁽⁸⁾。

本研究で使用した ER 流体は、ポリマ粒子の表面を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 13.6 cSt のシリコン系オイルに 30 wt.% 分散させたコロイド溶液である。この ER 粒子は平均粒径約 15 μm で、ポリマ芯体のため低比重で分散安定性に優れている。また軟質であるため電極を磨耗する心配がなく、さらに高い電気抵抗を示し省電力形であるなどの特徴を持つものである⁽⁹⁾。ER 流体には数 kV/mm と高い電界強度を印加するが、本研究で用いた ER 流体の電流密度(単位面積当たりの電流)は数 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ であり消費電力としては非常に少ないものとなる。図 2 に使用した ER 流体の特性を示す。特に低せん断速度領域において顕著な粘性せん断抵抗の上昇が認められる。この場合の ER 効果は電界の大きさに対して線形性を示し、ER 流体の粘度上昇の割合は加える電界の大きさに比例している⁽¹⁰⁾。

また、従来の ER 流体は ER 粒子と呼ばれる微粒子を電気絶縁油に分散させたコロイド溶液として用いら

(a) The formation of the ER cluster

(b) The ER effect in shear direction

(c) The ER effect in compressive direction

Fig. 1 Mechanism of the ER effect

れているが、本研究では、分散媒として空気を用いる、すなわち ER 粒子を粉体としてそのまま用いることを提案し、これをダンパに応用した。本論文では以後、分散媒として電気絶縁油を用いたものを ER 流体、空気を用いたものを ECF 粉体(Electro-Cohesive Fluid Powder)と呼ぶことにする。ER 流体の見かけの粘弾性変化のメカニズムによれば、ER 効果による降伏応力の上昇を得るには分散媒が液体である必要はないと考えられる。この ECF 粉体は、空気中において高い流動性を示し、また、電界を加えると電極間に粉体が凝集することが実験により観察された。ECF 粉体でも、ER 流体と同様、粒子が誘電分極を起こし、粒子鎖が形成されると考えられる。しかし、分散媒である空気の比重が粒子の比重に比べ小さいため、粒子の自重の影響が大きい。そのため粒子間に働く斥力以上に粒子の自重が影響し、粒子鎖が形成されるというよりは、粒子の凝集という現象が生じていると思われる。電界により凝集した粒子が電極の相体運動の抵抗となり、減衰力を発生させるものと考えられる。分散媒を空気にするにより、絶縁性油を分散媒とする従来の ER 流体に比べ、無電界時の基底粘度が小さくなり、また、粉体をそのまま使えば、粒子の体積分率が高くなり、電界を加えることによる粘弾性の変化幅が大きくなると考えられる。

3. 試作した切削工具の構造

本研究で試作した ER 流体ダンパを付加した切削工具の構造を図 3(a)に示す。工具の前円筒部に内部質量を差し込み、工具と内部質量のすきまに ER 流体を封入する。工具を負電極、内部質量を正電極としてすきま内の ER 流体に電界を加えると、ダンパ内で図 3(b)に示すような ER 粒子鎖の形成により、工具に対して付加的な減衰力が発生する。このダンパの構造では、せん断方向、および圧縮方向の両方向に対して

Fig. 2 Increase in apparent viscosity of the ER fluid

Fig. 3 The tool shank with ER fluid damper

Fig. 4 Experimental setup for measuring dynamic characteristics

Fig. 5 Dynamic characteristics of the tool shank with ER fluid damper

付加的な減衰力が働くと考えられ、切削加工中にびり振動などの不安定な振動が生じた際に、電氣的に工具の振動特性を変化して、工具の切削性能を向上させることができると考えられる。工具および内部質量の材質は炭素鋼(S 48 C)であり、内部質量を電気絶縁性のゴムリングにより支持することにより、工具と内部質量を絶縁した。このゴムリングにはER 流体をシールする役割を併せて持たせている。また、先端部にSANDVIK 社製の交換式カッティングヘッドをボルトを介して取付け、実際に切削を行えるようにした。工具の円筒部の内径は18 mm、内部質量外径は16 mm、電極間すきまは1.0 mmとし、電極面積は約11 304 mm²(円周 $2\pi \times 18 \text{ mm} \times \text{長さ } 100 \text{ mm}$)とした。

4. 試作した切削工具の動特性評価

4・1 動剛性評価 試作した工具の動特性を、インパルス応答性により測定した。図4に示すように、突出し長さを工具径の8倍にあたる200 mmとして定盤に強固に固定した工具の先端をハンマで加振し、生じる振動を工具先端に取付けた加速度ピックアップにより測定し、2chFFTアナライザによって、工具系の周波数応答関数を求めた。

図5、6に、ダンパ部にER 流体およびECF 粉体を満たない場合と満たした場合の動コンプライアンスの変化を示す。実線がダンパ部になにも満たしていない

Fig. 6 Dynamic characteristics of the tool shank with ECF powder damper

場合で、200 Hz と 350 Hz 付近に共振点が認められる。両者ともER 流体、ECF 粉体を満たすこと、そして、電界を加えることにより共振周波数が低下しかつ共振点付近での動コンプライアンスが上昇して工具系の動剛性が低下しているのがわかる。この原因としては、ダンパ部のすきまにER 流体やECF 粉体を完全に満たした場合、工具に加えられた振動に対して、流体や粉体が移動する空間やないため、ダンパ質量となる内部質量の運動が抑制され、ダンパとしての機能が発揮させず工具と内部質量が一体となった特性に近いものになっていると考えられる。すなわち、ER 流体ダンパ内に封入するER 流体の量がその特性に大きく

影響を与えると考えた。

4.2 ECF 粉体封入量の影響 そこで、ER 流体および ECF 粉体の封入量を変えて、その影響を調べたところ、ECF 粉体については、封入量の影響が電界印加時の動コンプライアンスに強く現れることがわかった。ECF 粉体の封入量を 1.0~6.0 ml の範囲で変えて動コンプライアンスを測定した結果を図 7 に示す。ダンパ部のすきまに ECF 粉体を完全に満たすと約 6.0 ml の粉体が封入できる。ECF 粉体の封入量が少ない場合に電界の印加による動コンプライアンスの変化が顕著に現れている。まず、電界を加えない状態では共振点が約 200 Hz および約 350 Hz の 2 点で認められ、特に 350 Hz の共振が顕著である。封入量 1.0 ml のとき 0.5~1.0 kV/mm 電界を加えると [図 7(a)]、電界に応じて二つの共振点の動コンプライアンス値の差が減少する。すなわち、200 Hz 付近の共振点における動コンプライアンス値が増大し、350 Hz 付近のそれは小さくなって、結果として、工具の最大コンプライアンス値は低下し、動剛性が向上していると考えられる。また、ECF 粉体の封入量が 3.0

ml の場合 [図 7(b)]、では、二つの共振点における動コンプライアンス値が逆転し、工具の支配的な共振点が約 350 Hz から約 200 Hz に変化していると判断できる。しかし、これらの効果は、さらに封入量を多くした 5.0 ml および 6.0 ml [図 7(c), (d)] では認められず、電界の印加により動コンプライアンスが増加するという傾向が見られる。つまり、ER 流体ダンパを付加した切削工具に ECF 粉体を封入する場合、ER 効果によってその動特性を電氣的に調整するためにはダンパ部への ECF 粉体の封入量を適切に設計する必要がある。

ダンパ部に封入する ECF 粉体の量を少なくすると、振動外力による工具と内部質量の相対変位によって、粉体が移動する。電界を加えない場合、ECF 粉体はその比重が 1.132 g/cm^3 と小さく、流動性があるため粉体は移動しやすく、内部質量の移動に対してほとんど抵抗にならない。電界を加えると分散していた粉体が凝集し、工具と内部質量の相対運動に対して、抵抗になり、ダンパとしての機能が有効になるものと考えられる。約 3.0 ml の封入量で、加える電界を

Fig. 7 Influence of the filled volume of ECP powder on dynamic characteristics

0.0~2.0 kV/mm まで 0.5 kV/mm 刻みで変化させた場合の工具の動コンプライアンスの変化を測定した。その結果を図 8 に示す。この場合、0.5 kV/mm の電界を加えると二つの共振点における動コンプライアンス値がほぼ等しくなり、動コンプライアンスが最も低く抑えられている。これに対し、さらに電界を強くした場合、350 Hz 付近の共振点における動コンプライアンス値が低下し、かわって、200 Hz 付近の動コンプライアンス値が上昇している。ここで特徴的なのは、系で支配的な共振周波数が電界により大きく調整できる点である。

ここで図 3 に示した工具系は一般に図 9(a) のようにモデル化できる⁽¹²⁾。ただし m_1 は工具シャンクの質量、 m_2 は内部質量であり、 C および k_2 はそれぞれ内部質量を支持している ECF 粉体とゴムリングに関する減衰定数とばね定数である。いま、強制振動数比 $\lambda(=\omega/\omega_0)$ と m_1 の振幅比 A の関係を固有振動数比 $\nu(=\omega_{02}/\omega_0)$ ここで $\omega_0=\sqrt{k_1/m_1}$ 、 $\omega_{02}=\sqrt{k_2/m_2}$ と減衰係数比 $\zeta(=C/C_c)$ ここで $C_c=2m_2\omega_0$ をパラメータ

Fig. 8 The influence of the applied electric field intensity

Fig. 9 Theoretical model of the tool shank with ECF damper element

として表すと、図 9(b) の関係が得られる。これより固有振動数比と減衰係数比の両者を適当に増大させることにより振幅比のピーク値が低振動数側へ移動することがわかり、この傾向は図 7(b) および図 8 に示した実験結果と一致する。すなわち、ダンパに封入された ECF 粉体に電界を加えることにより内部質量に関する減衰定数とばね定数が同時に増加し、このことによって工具シャンク系全体の支配的な共振周波数が低下するものと考えられる。

この変化には再現性があることを実験中に確認しており、これにより、電界の ON-OFF による動コンプライアンスの能動的な調整が可能であると考えられる。切削中にびびり振動が発生した場合、電界を加えることにより工具系の動特性を変化させ、振動を抑制できるものと判断される。

4.3 自励びびり振動に対する安定性評価 一般に自励びびり振動に対する安定性は、動コンプライアンスの最大負実部の大きさを判断される⁽¹¹⁾。インパルス応答性により測定した動コンプライアンスのベクトル線図を図 10 に示す。ECF 粉体を封入することによる影響はほとんど見られないが、これに電界を加えると位相角 90 度~180 度の範囲でゲインが減少し最大負実部の値が小さくなっていることがわかる。このことから、本研究で提案した ER 流体ダンパ付切削工具は、電界の印加により自励びびり振動の発生に対する振動抑制の効果が期待できることが確認された。

5. 切削試験による性能評価

5.1 切削中の工具の振動 ER 流体ダンパを付加した切削工具を実際に旋盤に取付け、ER 流体ダンパが加工中に発生する振動に対してどの程度抑制効果

Fig. 10 The vector diagram of the tool shank

を発揮するかについて評価した。切削形態としては加工後の加工面を評価しやすい外周切削を選択した。切削中の工具の振動を工具先端に取付けた加速度ピックアップにより検出し、得られた信号をFFTアナライザで周波数解析して、振動加速度のスペクトラムを求めた。実験装置の構成および切削条件を図11に示す。

切削速度 113.0 m/min(回転速度 600 rpm), 送り速度 0.15 mm/rev, 切込み量 0.025 mm の切削条件で、外径 60 mm の工作物を外周切削したときの、切削工具の振動波形を図12に示す。電界を加えることにより振動が抑制されていることがわかる。また、測定した振動数形をFFTアナライザにより周波数解析した結果を図13に示す。工具の共振周波数 400 Hz 付近のスペクトラムが強くなっているが、1.5 kV/mm の

Cutting conditions	Depth of cut (mm)	0.025
	Feed rate (mm/rev)	0.15
	Cutting speed (m/min)	113.0
Workpiece	Material	S45C
	Diameter (mm)	φ 60
Tool shank	Tool length (mm)	200
	Diameter (mm)	φ 25
Tip	Material : Cemented carbide

Fig. 11 Evaluation of tool shank through cutting test

Fig. 12 Vibration of tool shank during machining

電界を加えると共振点付近のスペクトラム分布が極端に減少し、切削加工中に生じる振動がER流体ダンパにより効果的に抑制されていることがわかる。

5.2 加工面評価 工作機械では工具と工作物の相対的な振動が加工面に転写され、びびり振動が生じれば、びびり痕と呼ばれる振動マークが加工面に残る。実際に電界を加えないで加工を開始し、途中で1.5 kV/mmの電界を加えた場合の加工面形状の様子を図14に示す。切削開始直後からびびり振動が生じ、典型的な再生びびりの模様が加工面に現れている。しかし、1.5 kV/mmの電界を加えるとびびり痕は消え、びびり振動が抑制されているのがわかる。この加工面の表面形状を軸方向(送り方向)、円周方向(切削方向)について測定した結果を図15および図16に示す。旋削などの送りを与える単刃切削では、送り方向に周期的な波形状が形成される。図15を見ると電界を加えることにより軸方向の粗さ曲線は、周期的な曲線に近

Fig. 13 Power spectrum of vibration

Fig. 14 The machined surface

Fig. 15 Surface roughness in axial direction

づいていることがわかる。また、図 16 を見ると、電界を加えないときには顕著なびり痕が生じているが、電界を加えるとびり痕が消え、びり振動が抑制されているのがわかる。このびり痕のピッチから振動の周波数を推定すると、約 410~420 Hz と概算されるのに対して、工具系の最大負実部にあたる周波数は約 400 Hz と測定される。切削過程によって生じる振動と機械構造における工具系の固有振動数付近における共振のふるまいが相互に関連して、自励的な不安定振動を起こしていると考えられる。旋削加工における再生びり振動についてその安定限界線図は主軸回転数に対して周期的に安定なスポットを持つことが知られている。ここで ER 流体ダンパに電界を加えると、工具系の支配的な共振周波数が変化して、系の安定なスポットが移動し、これによってびり振動が抑制されたものと考えられる。このことは、すなわち別の切削条件においては、電界の印加によって状態が不安定になることを意味している。電界の印加後に切削条件が変更されて再生びり振動が発生する場合には、電界を OFF にすることにより振動を抑制できると考えられる。またこのことが本研究で提案する ER 流体ダンパの機能的な特徴である。

6. 結 言

切削工具に付加的な減衰力を作用させることにより、工具系の動特性が改善されるという考えに基づき、ER 流体を応用した可変減衰ダンパ (ER ダンパ) を突出しの長い切削工具に付加することで、工具の動特性を電氣的に調整し、これを向上させることを試みた。

Fig. 16 Surface roughness in circumferential direction

ER 流体ダンパを付加した切削工具の性能をインパルス応答法および切削試験により評価した。得られた結果を以下にまとめる。

(1) ER 流体ダンパに加える電界の強さにより、切削工具の動特性を変化させることができる。ER 流体には、空気分散系 ER 流体 (ECF 粉体) を使用した場合に特に顕著な効果が得られた。

(2) ER 流体ダンパによる切削工具の動特性の変化は、ダンパ内に封入する ER 流体の割合に強く依存し、最適な封入量が存在する。

(3) ER 流体ダンパを切削工具に付加して、これに加える電界を切削条件の変化に応じて ON-OFF することにより、切削加工中に生じるびり振動の発生が抑制可能で、これによる加工面の表面粗さの改善が期待できる。

文 献

- (1) 防振・緩衝装置 (下巻), (1997), 99, 日本機械学会。
- (2) 田中久隆・小幡文雄・松原十三生・水本洋・紀之内隆生, 機論, 59-560, C(1993), 1243-1248。
- (3) 樫村幸辰・鈴木良昭, 精密工学会誌, 62-1(1996), 105-109。
- (4) Eugene, I. R. and Like, Xu., ASME NCA, 18(1994),

- 35-41.
- (5) 大坪泰父・枝村一弥, 第 42 回レオロジー討論会講演要旨集, 日本レオロジー学会他共催, (1994-10), 203-205.
 - (6) Otsubo, Y. and Edamura, K., *J. Rheol.*, **38**(1994), 1721-1733.
 - (7) 例えば, 笹田直・本多力, 機械の研究, **32**-1(1980), 63.
 - (8) 石山誠・青山藤詞郎・枝村一弥・都築良彦, 機論, **60**-577, C(1994), 2964-2969.
 - (9) 大坪泰父・枝村一弥, 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), 21-24.
 - (10) 横田真一・吉田和弘・近藤豊・枝村一弥, 第 9 回流体制御シンポジウム講演論文集, 計測自動制御, 計測自動制御学会共催, (1994-11), 19-20.
 - (11) 星鐵太郎, 機械加工びり現象, (1977), 5, 工業調査会.
 - (12) 例えば, 亘理厚, 機械振動, (1966), 117, 丸善.
-