

研究論文

シリコンオイルを用いたステンレスのロータリ切削

河田圭一*¹、石川和昌*¹

Rotary Cutting of Stainless Steel with Silicone Oil

Keiichi KAWATA*¹ and Kazumasa ISHIKAWA*¹Industrial Research Center*¹

本研究では、ロータリ切削の特徴である切れ刃が連続的に移動することを利用し、切り屑／工具間の大幅な低摩擦化により、工具の長寿命化や高能率加工を試みている。本報では、ステンレス(SUS304)を対象としたロータリ切削における摩擦を下げるため、粘度指数の大きいジメチルシリコンオイルを切削油剤として用いることを検討した。その結果、シリコンオイルは工具とステンレスの凝着を抑えるとともに、粘度増加に伴い摩擦係数は低下することが分かった。また、ジメチルシリコンオイルの一部をフロロアルキル基により変性することで、さらに摩擦は小さくなることが明らかとなった。

1. はじめに

本研究では、ロータリ切削の特徴である切れ刃が連続的に移動することを利用し、①切削点近傍へ効果的に油剤を供給すること、②工具表面に設けたテクスチャにより潤滑効果をより高めることで、切り屑／工具間の大幅な低摩擦化を試みている。

アルミニウム合金(A6061)を対象としたロータリ切削では、高粘度な機械油(VG460)を切削油剤として用いることにより、切り屑／工具間の摩擦係数が0.1を下回る低摩擦状態を発現できる¹⁾。しかし、ステンレス(SUS304)の加工では、同様な低摩擦状態が得られていない。その原因のひとつとして、ステンレスの加工では、アルミニウム合金に比べて加工点の温度上昇が大きく、切削油剤の動粘度が低下し、切り屑／工具間で油切れが生じているためと考えられる。そこで、温度上昇による粘度低下を抑えるため、温度による動粘度変化の小さい(粘度指数の大きい)油剤について検証した。

本報では、粘度指数の大きい切削油剤としてジメチルシリコンオイルを用いたときの効果について検証した結果を報告する。

2. 実験方法

切削実験として、複合加工機を使用した駆動型ロータリ切削を行った。図1に、駆動型ロータリ切削の概略図を示す。これまでの実験から、工具回転方向は、切り屑／すくい面間への油剤の導入効果を大きくすることのできる図1に示す方向とした。また、工具の傾斜角は30度と大きくした。

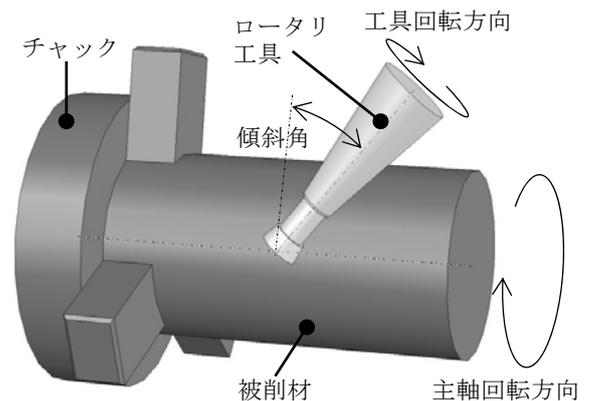


図1 駆動型ロータリ切削の概略図

被削材には、SUS304を用いた。主な切削条件を表1に示す。ロータリ工具のすくい面は、ダイヤモンド砥石(#800)による研削加工で仕上げたのち、ナノ秒レーザを用いて図2に示すテクスチャを付与した。図2(a)のようにテクスチャは、切れ刃の接線方向に対し40度傾いた溝を72本配置した。テクスチャの断面形状は、深さと幅がおよそ1:10となるように加工した(図2(b))。また、切り屑の流れに対し、急激な変化がないように緩やかに戻る楔形状にした。

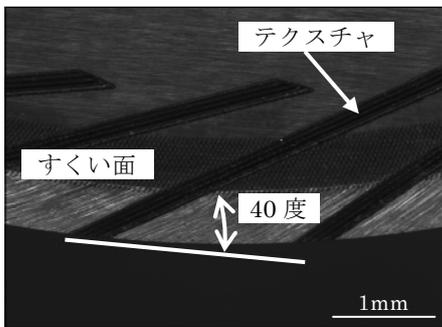
切削油剤には粘度の異なる5種類のジメチルシリコンオイルを使用した。構造式を図3(a)に示す。シロキサン結合からなる直鎖状ポリマーであり、末端がメチル基となっている。また、潤滑性向上のためジメチルシリコンオイルの一部のメチル基をフロロアルキル基で変性したシリコン(図3(b))を用いた切削実験も行った。油

*¹産業技術センター 自動車・機械技術室

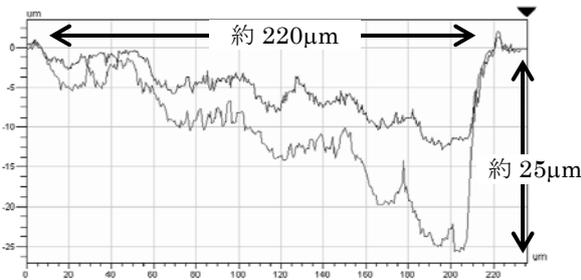
剤は、あらかじめ被削材と工具に塗布してから実験を行い、加工中に油剤の供給は行わなかった。

表1 主な切削条件

ロータリ工具	材種：超硬合金 K10 直径：25mm すくい角：-10度 逃げ角：8度
工具回転速度	5,10,15,20m/min
切削速度	5m/min
送り	1mm/rev
径方向切り込み	0.2mm
傾斜角	30度
切削油剤	ジメチルシリコンオイル (100,500,1000,5000,10000mm ² /s@25°C) フロアルキル基変性シリコンオイル(1000mm ² /s) 機械油 VG460

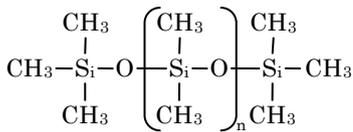


(a)テクスチャの配置

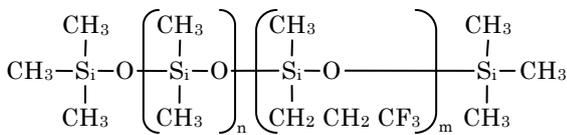


(b)テクスチャの断面形状

図2 すくい面上に形成したテクスチャ構造



(a)ジメチルシリコンオイル



(b)フロアルキル基変性シリコンオイル

図3 シリコンオイルの構造式

3. 実験結果及び考察

3.1 シリコンオイルの凝着抑制効果

ジメチルシリコンオイルの効果について確認するため機械油を用いた加工との比較を行った。機械油と同程度の動粘度とするため、500mm²/sのジメチルシリコンオイルを使用した。

主軸に働く抵抗 F_w 、工具軸に働く抵抗 F_t を比較した結果を図4示す。本報では、工具回転速度 V_t を切削速度 V で除した値を速度比と定義した。どちらの油剤も速度比を大きくすると F_w は小さくなる傾向を示したが、 F_t では大きな変化は見られなかった。機械油ではジメチルシリコンに比べ F_t が若干大きくなり、 F_w が小さくなった。ロータリ切削では、工具と切り屑の摩擦により工具回転方向に切り屑が排出される。このため、摩擦が大きいほど F_t は大きくなり、 F_w は小さくなる傾向を示す。このことから、ジメチルシリコンより機械油の方が摩擦は大きいと考えられる。

次に、切り屑流出角及び切り屑流出速度を比較した結果を図5に示す。速度比が大きくなるに従い、切り屑流出角は小さくなり、切り屑流出速度は速くなっていることが分かる。工具の回転速度が速くなると、工具と切り屑の摩擦のため切り屑が引っ張られる力が大きくなり、切り屑は工具の接線方向に排出されるようになるため、切り屑の流出角度は小さくなる。さらに、切削速度よりも速い速度で切り屑が流出するようになる。

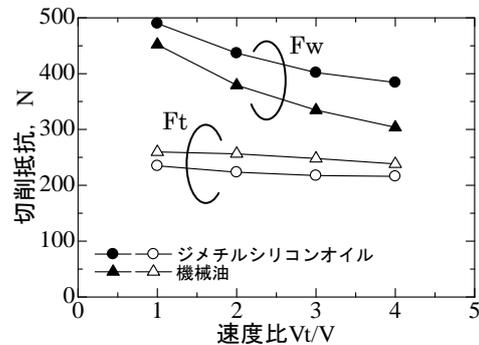


図4 切削抵抗の比較

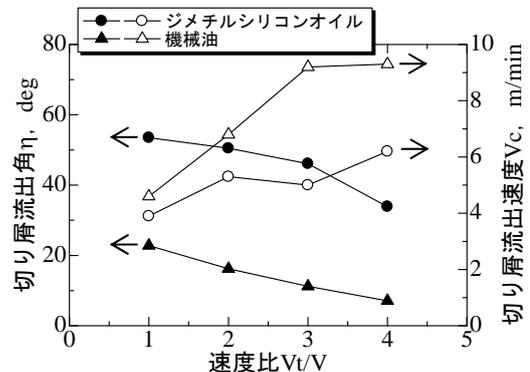


図5 切り屑流出角と流出速度の比較

各軸に働く切削抵抗、切り屑流出角度及び切り屑流出速度から切り屑と工具に働く摩擦係数を計算して求めた。その結果を図6に示す。シリコンオイルの摩擦係数は0.6~0.7であるのに対し、機械油では1前後の高い値となった。通常の切削における摩擦係数は0.8前後であるため、機械油では全く油剤の効果がないことが分かった。

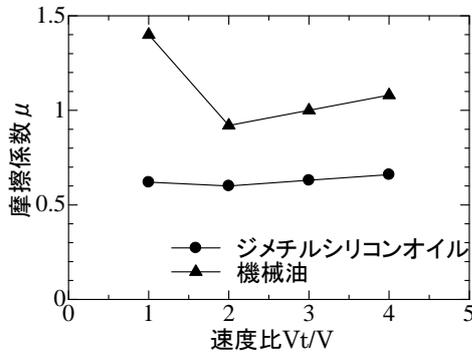
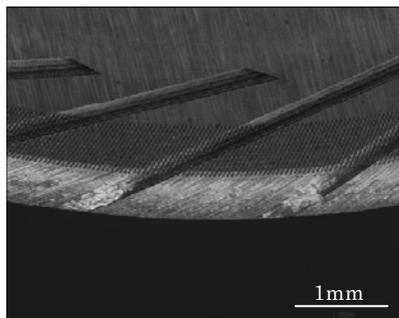
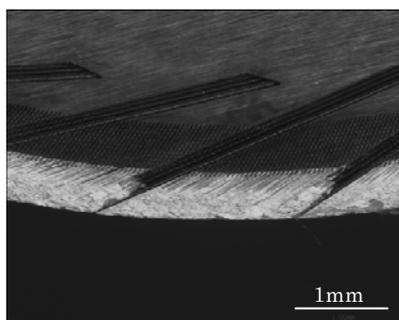


図6 摩擦係数の比較



(a)ジメチルシリコンオイル



(b)機械油

図7 切削加工後のすくい面観察結果

原因について調べるため、加工後のすくい面をマイクロスコブにより観察した。その結果を図7に示す。ジメチルシリコンオイルを用いた場合、図7(a)に示すように、研削部分には被削材の凝着は見られなかった。一部テクスチャ内に被削材が付着しているが、図2(b)から分かる通り、テクスチャ内部の粗さが大きいためと考えられる。一方、図7(b)に示す機械油を用いた場合では、すくい面の研削痕が見えなくなるほど被削材が凝着して

いた。

このことから、機械油では切削温度の上昇とともに粘度が低下し、油膜を維持することができなくなり、工具に被削材が凝着したと考えられる。一方、粘度指数が大きいジメチルシリコンオイルでは、機械油に比べ粘度低下は小さく、比較的油膜を維持できた結果、凝着が抑制されたと考えられる。

3.2 動粘度の影響

切削点温度が高くなり粘度が低下したとしても、初期の動粘度が大きければ、油膜は維持されると考えられる。そこで、ジメチルシリコンオイルの動粘度が摩擦係数に与える影響について調べた。その結果を図8に示す。速度比に関係なく動粘度が高くなるに従い、摩擦係数は減少する傾向が見られた。このことから、粘度の高い油剤ほど油膜が維持できていると推察できる。しかし、5000mm²/s以上の油剤では摩擦係数には大きな差が見られなかった。粘度が高すぎても油剤が引き込まれにくくなり、油剤量が減るため摩擦はあまり下がらなくなると思われる。

また、速度比が大きいと摩擦係数は高くなる傾向が見られた。工具の回転速度が速くなると、切り屑と工具の摩擦により温度上昇が大きくなり、油剤粘度が低下するためと考えられる。

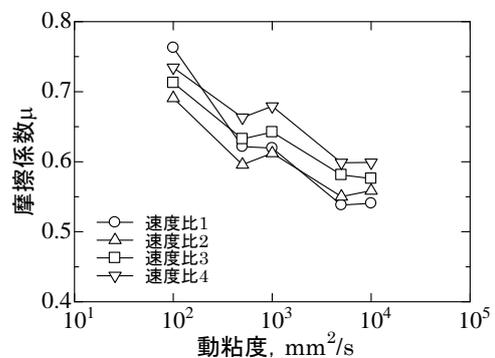


図8 動粘度の影響

3.3 切削速度の影響

切削速度は工具の温度上昇に大きく影響するため、切削速度と摩擦係数の関係について調べた。速度比は2に固定し、切削油剤には動粘度 5000mm²/s のジメチルシリコンオイルを用いた。測定結果を図9に示す。切削速度が速くなると加工温度が高くなり、摩擦係数は大きくなると予想したが、実験結果では小さくなった。本実験条件では、切削距離を約1mに固定したため、切削速度が速くなるに従い加工時間は短くなる。特に、切削速度200m/minでは約0.3秒で加工が終了する。このことから、切削速度の速い条件では、工具の温度が上昇するこ

となく切削が完了し、油膜が維持されて摩擦係数は小さくなったのではないかと推測される。

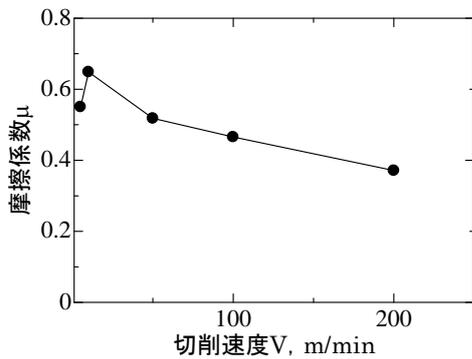


図9 切削速度の影響

3.4 変性シリコンの効果

ジメチルシリコンオイルを用いた場合、最も摩擦が低下しても 0.5 程度であったため、切り屑と工具が接触している境界潤滑領域にあると思われる。そのため、極圧添加剤のような効果が得られればより摩擦は小さくできると考えられる。そこで、ジメチルシリコンオイルのメチル基の一部をフロロアルキル基により変性したシリコンオイルの効果について調べた。その結果を図10に示す。同粘度のジメチルシリコンオイルに比べ摩擦係数は大きく低下した。変性シリコンに含まれるフッ素の効果によるものと考えられる。

4. 結び

切り屑／工具間の摩擦低減のため、シリコンオイルを用いたステンレスのロータリ切削を行い、以下のことが分かった。

(1) 粘度指数の大きいジメチルシリコンオイルを用いる

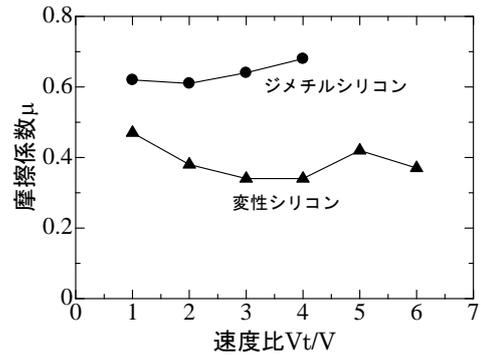


図10 変性シリコンの効果

ことにより、凝着が抑えられ、機械油を用いた時よりも摩擦係数は小さくなった。

- (2) 動粘度が高くなるに従い摩擦は減少した。しかし、 $5000\text{mm}^2/\text{s}$ 以上ではその効果は小さくなった。また、速度比が大きくなるほど摩擦は増加した。
- (3) 切削距離 1m の本実験条件では、切削速度が速くなると摩擦係数は小さくなる傾向を示した。
- (4) フロロアルキル基で変性したシリコンオイルを用いることにより、さらに摩擦は小さくなった。

今後は、摩擦と工具摩耗の関係について調べる予定である。

付記

本研究は、平成 23 年度「知の拠点」重点研究プロジェクト事業「低環境負荷型次世代ナノ・マイクロ加工技術の開発」において実施した。

文献

- 1) 河田，糸魚川，則久，石川：2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，P890