

## 研究論文

# ロータリ切削工具に付与した表面テクスチャ形状が 摩擦に及ぼす影響

河田圭一\*<sup>1</sup>、石川和昌\*<sup>2</sup>

## Effect of Surface Texture on Friction in Rotary Cutting Tool

Keiichi KAWATA\*<sup>1</sup> and Kazumasa ISHIKAWA\*<sup>2</sup>Industrial Research Center\*<sup>1\*2</sup>

本研究開発では、レーザによる微細加工技術を取り入れた工具設計と加工技術を開発し、難加工性材料の高効率切削や切り屑の高効率排出を目指している。本年度は、マシニングセンタを使用したロータリ切削工具による立ち壁加工を行った。その結果、①速度比が大きくなるに従い、切削抵抗  $F_x$  および  $F_y$  は零に近づく、②速度比が大きくなるに従い摩擦係数は小さくなる、③摩擦係数は、すくい面上に形成したテクスチャの角度や深さに影響し、潤滑状態で効果が異なる、④薄い立壁の加工が可能であることを明らかにした。

### 1. はじめに

ロータリ切削工具による加工は、円形状の刃を回転させることにより、工具全周の切れ刃を利用した切削が行えるため、摩耗や加工熱が切れ刃全体に分散し、難削材加工に優れた性能を有することが示されている<sup>1)</sup>。ロータリ切削は、切り屑排出時における切り屑とすくい面の摩擦を利用して工具を回転させる従動式と、工具をモータなどにより強制的に回転させる駆動式に分けられる。最近では、工具の回転数や傾斜角度などが任意に変更できる複合加工機を利用した駆動式ロータリ切削の研究<sup>2)</sup>が行われており、インコネルやステンレスなどの難削材の高速・高効率加工や工具の長寿命化が期待されている。

一方、複合加工機による旋削加工において、ロータリ切削工具の特徴である切れ刃が連続的に移動することを利用した切削点近傍への効果的な油剤供給と、すくい面に設けたテクスチャによる高い潤滑効果により、切り屑と工具間の摩擦係数が 0.1 を下回る低摩擦を実現できることが分かってきた<sup>3)</sup>。しかし、テクスチャ形状が摩擦に与える影響についてはまだ明らかになっていない。

そこで、本年度は切れ刃に対するテクスチャの角度やテクスチャの深さなどが摩擦に与える影響について調べた。また、ロータリ切削による加工適用範囲を広げるための試みとして、マシニングセンタを利用した薄壁加工への可能性について検討した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 切削実験方法

図 1 に示すような 5 軸加工機を使用したロータリ切削工具による突き加工を行い、加工特性について調べた。

(a) に示した加工面に一定の切り込みを行い、工具を Z 軸方向の + 方向から - 方向に送ることにより、被削材を削り取る。このため、本実験では、Z 軸の送り速度が切削速度となる。被削材を動力計に固定し、(b) に示す方向に働く切削抵抗を測定した。加工条件を表 1 に示す。被削材にはアルミニウム合金 A5052 を用いた。本報では、工具回転速度  $V_t$  と切削速度  $V$  との比である  $V_t/V$  を速度比として定義し、速度比を 1~100 まで変化させたときの切削抵抗および摩擦係数について調べた。また、切削液供給方法は MQL、ドライ、水溶性クーラントの 3 種類について比較した。

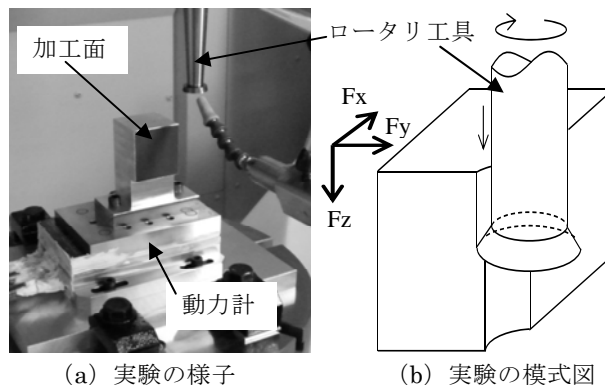


図 1 5 軸加工機を使用したロータリ切削実験方法

表1 加工条件

被削材	A5052
工具	超硬合金 K種 $\phi 25\text{mm}$ すくい角: $0^\circ$ 逃げ角: $7^\circ$
切削速度	5m/min
切込み	0.5mm
ピックフィード	0.4mm
回転速度	5~500m/min
切削油剤	MQL、水溶性、ドライ

## 2.2 テクスチャの形成

本実験では表面テクスチャとして微細な溝をすくい面に形成した。テクスチャを付与する目的は、①油溜まりの効果や②動圧効果による油剤の引き込み量の向上である。そこで、すくい面に形成する溝の角度が摩擦に与える影響について調べるため、切れ刃近傍に図2に示すようなテクスチャをパルスレーザにより加工した。図は切れ刃近傍のすくい面を上方から見た図であり、工具とすくい面の関係を簡略化して示している。 $V_c$ は流出切り屑速度、 $V_t$ は工具の回転速度である。本実験では切削速度が5m/minと遅いため、 $V_t$ に比べ $V_c$ は小さい値となる。図では、切れ刃に対し垂直方向がロータリ工具の半径方向であり、切れ刃の上側が工具の中心方向である。本実験では、(a)のように半径方向と同じ方向の0度と、

(b)のような工具の回転側に45度傾斜させた方向の2種類について検討した。工具は図に示す右方向に回転させているため、摩擦の大きさによって異なるが、おおよそ切り屑は工具の半径方向よりも右側に流出する。そのため、溝に保持されている油は、(a)の場合では刃先から工具の中心に向かって押し出されるように流れると推測される。一方、(b)ではヘリングボーン溝のような動圧効果が期待でき、溝に保持されている油は切れ刃に向かって流れる効果が期待できるので、(b)の方が摩擦は小さくなると予想される。

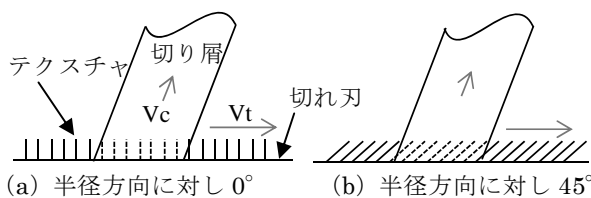
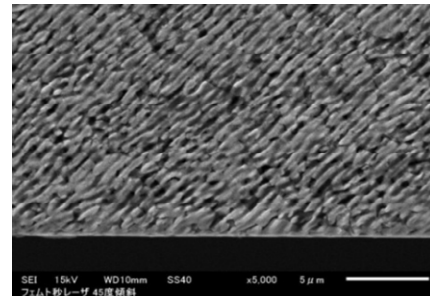


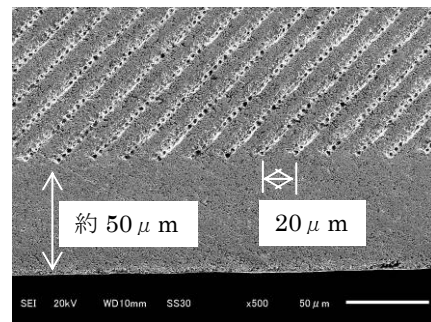
図2 テクスチャ角度の略図

また、溝深さについて検討するため、図3に示すような、サイズの異なる2種類の溝をパルスレーザにより、すくい面上に加工した。(a)はフェムト秒レーザを使用して、約150nmの深さの溝を約800nm周期に加工したナノ周期構造のテクスチャである。ナノテクスチャは切

れ刃まで加工した。(b)は、(a)に比べサイズが大きくなるように、ナノ秒レーザを使用して加工した。溝幅は約10 $\mu\text{m}$ 、溝の最外周のピッチは20 $\mu\text{m}$ とした。溝深さは、約5 $\mu\text{m}$ と約2 $\mu\text{m}$ の2種類を用意した。切れ刃から50 $\mu\text{m}$ までの間は、マイクロテクスチャを加工しなかった。



(a) フェムト秒レーザで加工したナノテクスチャ



(b) ナノ秒レーザで加工したマイクロテクスチャ

図3 パルスレーザ加工されたテクスチャ像 (SEM)

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 切削液の影響

切れ刃に対する角度が0度のナノテクスチャを付与した工具を用いて、切削液供給方法を変えた時の切削抵抗の測定結果を図4に示す。いずれの供給方法においても $F_x$ および $F_y$ は速度比が大きくなると小さくなる傾向を示した。速度比100における $F_x$ 、 $F_y$ の値は、MQLの場合に最も小さく、ドライや水溶性では同程度となった。一方、 $F_z$ は、ドライおよび水溶性では $F_x$ 、 $F_y$ と同様に速度比の増加とともに小さくなった。減少量はクーラントに比べドライの方が大きくなった。しかし、MQLでは速度比5までは $F_z$ は減少したが、それ以上では若干増加しており、他の供給法とは異なる傾向を示した。

そこで、測定した切削抵抗から次式によりすくい面と切り屑の摩擦係数 $\mu$ を算出し比較した。

$$\mu = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{F_z} \quad (1)$$

摩擦係数を算出した結果を図5に示す。MQLの場合、速度比の増加とともに摩擦係数は大きく減少し、0.1よりも小さくなった。一方、ドライ加工では増加傾向を示

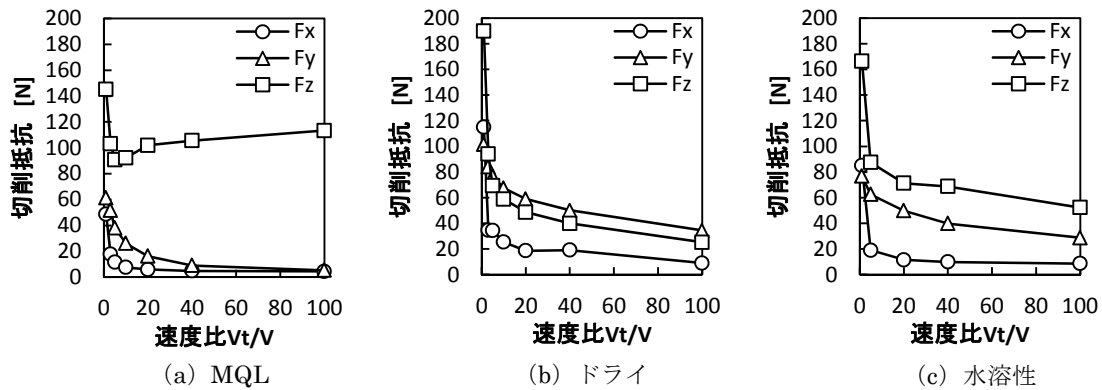


図4 各切削液供給方法による切削抵抗の測定結果

し、摩擦係数は1以上の大きな値を示した。また、極圧添加剤を含む水溶性を使用してもMQLほど摩擦係数は小さくならないことが分かった。このことから、MQLの加工では、極性基を持つ植物油により境界潤滑領域の潤滑性が向上しただけでなく、すくい面と切り屑の間に引き込まれた油により、部分的ではあるが流体潤滑に移行したと推測される。

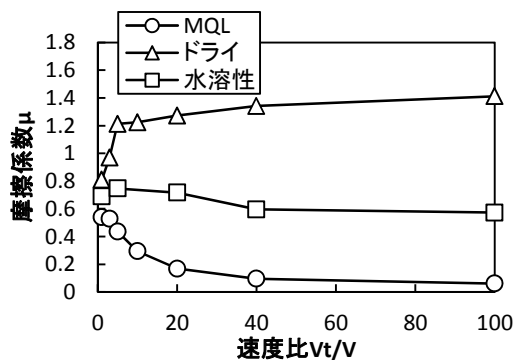
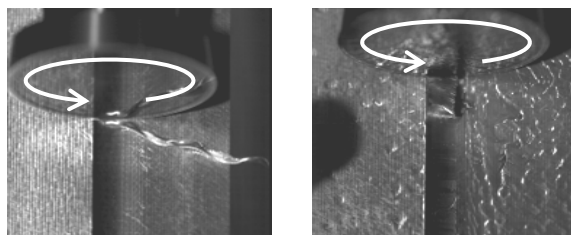


図5 摩擦係数の比較

速度比100における加工中の切り屑の排出方向を高速カメラにより観察した結果を図6に示す。ドライ加工では摩擦が大きいため工具の回転に引っ張られ、切れ刃の接線方向に切りくずが排出された。一方、MQLでは摩擦が小さいため、工具が回転しているにもかかわらず、工具の回転を止めて加工しているときとほぼ同じ方向に切りくずが排出された。



(a) ドライ (b) MQL

図6 高速カメラによる切り屑流出方向の観察

### 3.2 溝の角度の影響

MQLでは他の方法に比べ摩擦が小さくなることが分かったので、以下の実験ではすべてMQLを使用して実験を行った。

ナノテクスチャを用いて溝の角度の影響について調べた結果を図7に示す。摩擦係数は45度、0度、テクスチャなしの順に小さかった。速度比の小さい領域では、テクスチャの影響は小さく、摩擦係数に大きな差は見られなかった。一方、速度比の大きい領域では、テクスチャの角度の影響は大きく、45度のナノテクスチャが最も小さくなった。

次に、マイクロテクスチャの結果を図8に示す。ナノテクスチャとは異なり、速度比の小さい領域ではテクス

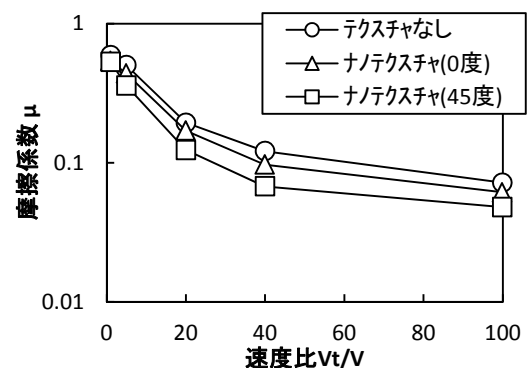


図7 ナノテクスチャの摩擦係数

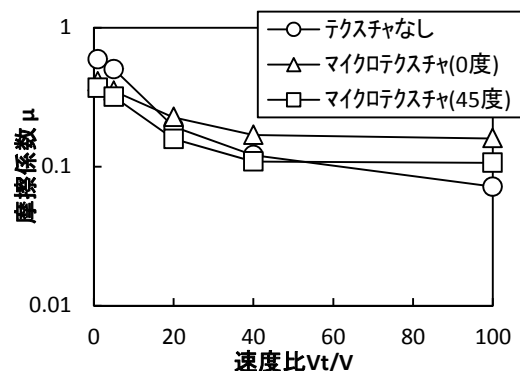


図8 マイクロテクスチャの摩擦係数

チャの効果は大きく、テクスチャを有する方が摩擦係数は小さくなった。しかし、速度比の大きい領域では効果は逆転し、テクスチャを有する方が摩擦係数は大きくなった。摩擦係数はテクスチャの角度にも影響し、0度よりも45度の方が小さくなった。

どのサイズのテクスチャにおいても、0度よりも45度の角度をつけたテクスチャの方が摩擦係数は小さくなっており、溝内部に保持されている油を刃先側へ流す効果が得られていると考えられる。

### 3.3 溝深さの影響

溝の深さの異なる3種類のテクスチャについて摩擦係数を調べた結果を図9に示す。テクスチャの角度はすべて45度である。速度比の小さい領域では、溝深さの深い順に摩擦係数は小さくなった。逆に、速度比の大きい領域では、溝深さの浅い順に摩擦係数は小さくなった。

速度比の小さい領域は、切り屑と工具が接触している境界潤滑になっていると考えられる。そのため、溝深さの深い方が油溜まりとしての効果は大きくなり、摩擦は小さくなったと考えられる。一方、速度比の大きい領域における摩擦係数は0.1程度まで小さくなっており、部分的に流体潤滑に移行していると考えられる。そのため、膜厚よりも深い溝では動圧効果が得られにくくなり、深い溝ほど摩擦は大きくなったと考えられる。このことから、テクスチャの効果を効率よく得るためには、潤滑状態を考慮した溝形状や構造を決定する必要がある。

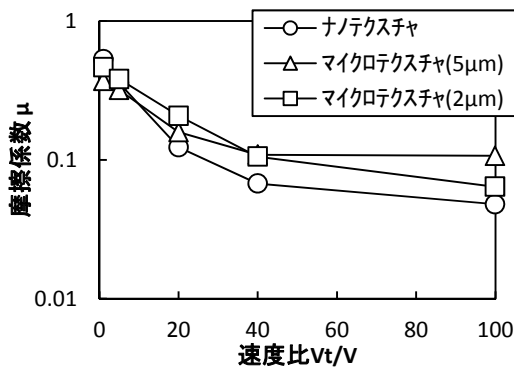


図9 溝深さの影響

### 3.4 ロータリ切削工具による薄壁加工

ロータリ切削による加工適用範囲を広げるための試みとして、マシニングセンタによる薄壁加工を実施した。仕上げ時の加工条件は、切削速度 5m/min、工具回転速

度 500m/min、切り込み 0.1mm、ピックフィード 0.4mm、切削油供給法は MQL とした。その結果、図10に示すような幅 30mm、高さ 30mm、厚さ 0.5mm の薄壁の加工が可能であった。三次元測定機により薄壁の平行度を測定したところ  $35\mu\text{m}$  であった。また、仕上げ面粗さは  $8\mu\text{mRt}$  であった。

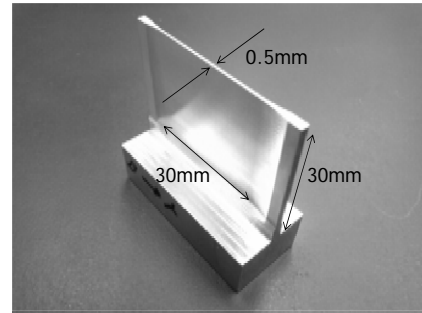


図10 薄壁の加工結果

## 4. まとめ

ロータリ切削工具を用いたマシニングセンタによる加工実験を実施した結果、以下のことが分かった。

- (1) 切削抵抗  $F_x$  および  $F_y$  は速度比が大きくなるに従い減少し、MQLを用いた場合に最も小さい値となった。
- (2) MQLの場合、速度比が大きくなるに従い摩擦係数は小さくなった。
- (3) 摩擦係数は、すくい面上に形成したテクスチャの角度や深さに影響し、潤滑状態で効果が異なった。
- (4) 厚さ 0.5mm の薄い立壁の加工が可能であった。

## 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) 陳, 星: 精密工学会誌, 57(10), 1792 (1991)
- 2) H. NAKAJIMA, A. KATO, H. SASAHARA, H. YAMAMOTO, T. MURAKI, M. TSUTSUMI: *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2(4), 532 (2008)
- 3) 河田, 糸魚川, 則久, 石川: 日本機械学会2011年度年次大会DVD-ROM論文集, 11(1)