

刃先にレーザ加工を施した cBN 工具を用いた鉄系金属のマイクロ溝加工の試み

北川大地*1, メシュラム トウシヤール*1, 閻 紀旺*2

Microgrooving of ferrous metals by using cBN tools with laser-modified edges

Daichi KITAGAWA, Tushar MESHRAM and Jiwang YAN

鉄系金属は産業的に広く用いられている材料であり、その表面にマイクロ溝などを加工することでさまざまな表面機能が付与できる。しかし、従来のダイヤモンド V パイトによる溝切削では工具摩耗が激しく、加工能率が低い問題もあった。そこで本研究では、フェムト秒パルスレーザを用いて刃先に溝加工を施した cBN 工具を用いる、鉄系金属へのマイクロ溝の一括転写切削法を提案した。本手法を用いることで、大量なマイクロ溝を短時間で切削することに成功した。また、加工を急停止させることで切りくず生成現象を直接観察し、切削メカニズムの解明を試みた。

Key words: Laser-Modified cBN tool, micro cutting, ferrous metal, micro grooving, structured surface

1. 緒言

純鉄をはじめとする鉄系金属は、安価であること、高い強度をもつことなどから、さまざまな産業に広く用いられている。近年、材料表面にマイクロ溝をはじめとする微細構造を加工することで、濡れ性¹⁾や細胞の成長方向²⁾を制御できることなどが報告されている。これらの微細構造の多くはリソグラフィ³⁾やレーザ照射⁴⁾によって加工されている。マスクを用いたリソグラフィの場合、成膜やエッチングを繰り返すことでさまざまな微細構造の成形が可能であるが、加工時間がかかることや、耐薬品性によって加工できない材料があることに課題がある。また、レーザ加工は材料強度や耐薬品性に依存せず材料除去を行うことができるが、加工できる形状や精度に制限がある。

それらに対し、切削加工は工具軌跡を直接被削材に転写する加工方法であり、複雑な表面形状を高精度かつ短時間で加工することが可能である⁵⁾。超精密切削分野では、高硬度で非常に鋭い刃先を作ることができる単結晶ダイヤモンドが工具材料として広く使われている⁶⁾。高山ら⁸⁾は、単結晶ダイヤモンド工具刃先に対し、ピコ秒パルスレーザを工具すくい面側から刃先へ照射することでマイクロ溝を加工し、この工具を用いることで無酸素銅表面にマイクロ溝を大量に転写することに成功した。しかし、被削材が鉄系金属の場合、ダイヤモンドの炭素拡散反応によって激しい工具摩耗が生じる⁹⁾ことが問題となっている。そのため、鉄系金属材料の切削加工には、硬度と耐熱性に優れ、被削材との親和性をもたない立方晶窒化ホウ素(cBN)が工具材料として広く使用されている¹⁰⁾¹¹⁾。一方、刃先に溝加工を施した cBN 工具を用いた鉄系金属へ

のマイクロ溝の転写切削については報告がない。鉄系金属表面へのマイクロ溝加工は、表面の撥水性向上などが見込まれ、汚れが付着しにくいことによる製品のメンテナンスコスト削減や長寿命化を実現することが可能である。さらに、これを切削加工で実現することで、他の鉄系金属の加工が可能となり、将来的に多くの産業応用が期待される。

そこで本研究では、フェムト秒パルスレーザを工具逃げ面から照射し、工具刃先にマイクロ溝を加工した Laser-Modified cBN (LMcBN) 工具を用い、鉄系金属表面にマイクロ溝を一括して高精度に加工する新しい方法を提案する。本論文では、本提案技術の有効性を示すため、鉄系金属の中でも Fe 含有量が最も多く、ダイヤモンド工具を用いた切削での工具摩耗が特に激しい純鉄を被削材とし、その表面に様々な切削条件で周期的なマイクロ溝の切削加工を行った。また、切削を急停止し、切削点における切りくず生成現象を直接観察することで、LMcBN 工具を用いた切削加工における切削メカニズムの解明を試みた。

2. 実験装置および方法

2.1 LMcBN 工具の作製

市販の cBN 工具((株)タンガロイ製)の刃先に対し、フェムト秒パルスレーザ(Light Conversion 製 PHAPOS-08-600-PP)を照射することで刃先の修正加工を行い、LMcBN 工具を製作した。すくい面からのレーザ照射⁸⁾では、加工の進行に伴ってレーザの焦点がずれていく問題があった。本研究では、焦点深さを一定にするため、レーザを工具逃げ面に対して垂直に照射し、断面が V 字形のマイクロ溝が刃先に周期的かつ平行に並ぶよう加工を行った。表 1 にレーザ加工条件および設計した溝形状を示す。図 1 に刃先へ修正加工を施した LMcBN 工具の走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察画像を示す。

*1 慶應義塾大学大学院 理工学研究科: 〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1

Keio University

*2 慶應義塾大学理工学部 機械工学科: 〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1

Keio University

〈学会受付日:2022年 7月 3日〉

〈採録決定日:2022年 9月 15日〉

表 1 刃先修正に使用したレーザ加工条件

加工前 cBN 工具パラメータ	
材質	cBN
ノーズ半径 R [mm]	0.8
すくい角 $[\circ]$	0
レーザ加工パラメータ	
フルーエンス $[J/cm^2]$	1.27
スポット径 $[\mu m]$	$\phi 20$
レーザ周波数 [kHz]	100
パルス幅 [fs]	256
レーザ波長 [nm]	1028
繰り返し数 [times]	5
走査速度 [mm/s]	100
工具刃先の溝形状	
高さ h $[\mu m]$	11
ピッチ p $[\mu m]$	40
幅 w $[\mu m]$	22

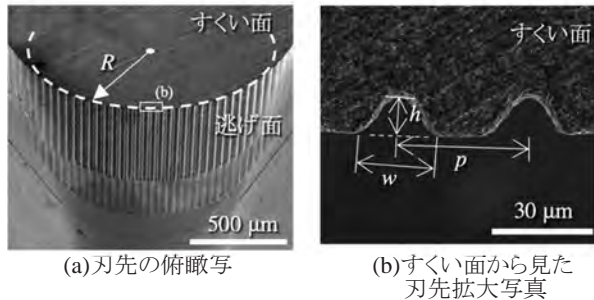


図 1 LMcBN 工具

刃先形状はほぼ設計通りに加工が行われたことがわかる。

2. 2 加工機および被削材

本研究では、4 軸同時制御超精密旋盤 (AMETEK Precitech Inc. 製 Nanoform X) を使用した。X, Z 軸はリニアモーターを採用することによる完全非接触型の直線軸駆動, C 軸には超精密空気軸受けを採用し、直線軸は 8 μm 、回転軸は 0.010 arc-sec の位置フィードバック分解能を有する。被削材には純鉄 ($\phi 30$ mm) を用い、これをアルミ製の治具に固定したうえで旋盤の真空チャック (C 軸) に取り付け、切削実験を行った。

2. 3 LMcBN 工具を用いたマイクロ溝加工実験

図 2 に実験装置の外観および切削模式図を示す。また、表 2 に切削実験条件を示す。まず、治具を介してスピンドルに固定された被削材を、刃先加工をしていない別の同型 cBN 工具を用いて平面加工を行った。その後 LMcBN 工具を用い、加工機の X 軸と C 軸を同時に制御して切削を行うことで、被削材表面上の同じ工具軌跡をたどりながら徐々にマイクロ溝の加工を行った。この際、一度の切削の切り込み量は 1 μm とした。また、図 2(b) に示したように、加工領域によって切削を行う回数を変化させ、異なる総切り込み量 d_T による切削現象の変化の調査を行った。さらに、工具送り量 f を変化さ

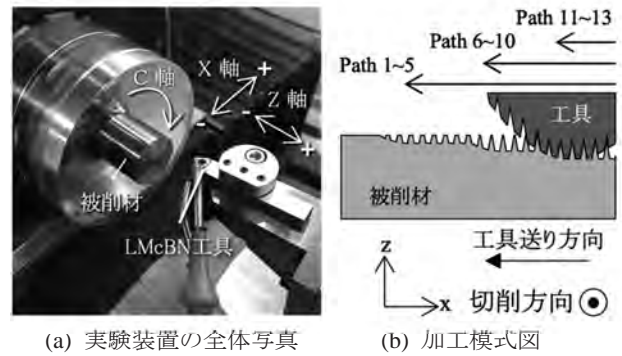


図 2 切削実験

表 2 切削加工条件

工具	Laser-Modified cBN Tool
被削材	純鉄 (Fe) $\phi 30$ mm
スピンドル回転速度 [rpm]	25
切り込み量 d $[\mu m/path]$	1
総切り込み量 d_T $[\mu m]$	0, 5, 10, 13, 17*
	* $f = 280 \mu m/rev$ のみ
工具送り量 f $[\mu m/rev]$	40, 120, 280
切削雰囲気	水溶性切削液噴霧

せて同様の切削実験を行うことで、工具送り量が加工面形態や切削現象へ及ぼす影響を調査した。なお、 $f = 280 \mu m/rev$ の条件においては、工具送り量が大きいことによって被削材表面の一部が加工されないことが考えられたため、 d_T が 17 μm になるような領域を追加で切削した。また、LMcBN 工具を用いた切削における切削メカニズムを解明するため、 $f = 280 \mu m/rev$ の条件において、加工の途中で被削材を取り付けたスピンドル (C 軸) を急停止するプログラムを用いて切削を中断し、切削点における切りくず生成現象の直接観察を行った。切削加工後、加工面および切削点の観察には SEM (FEI Company Inc. 製 Inspec F50) を、加工面の断面測定にはレーザプローブユニット (三鷹光器 (株) 製 MP-3) を用いた。

3. 実験結果および考察

3. 1 総切り込み量が加工面に与える影響

図 3 に各切削条件における加工面 SEM 観察画像を、図 4 に加工面の断面プロファイルを示す。 f の値によらず、 d_T の増加とともに鮮明なマイクロ溝が加工された。この際、図 4(a) に示した $f = 40 \mu m/rev$ の断面プロファイルにおいて、 $d_T = 5, 10 \mu m$ で加工面高さが元の平面よりも高くなっている領域が確認された。これは、工具刃先に加工された溝高さ h よりも d_T が小さかったことで、切削点で変形した被削材の一部が被削材表面と刃先の溝の隙間に押し出された結果、バリとして加工面に残存したためと考えられる。また、図 4(c) に示した $f = 280 \mu m/rev$ では、円弧形状と周期的なマイクロ溝を有する複合溝表面が加工された。この円弧形状は、元々工具のもつノーズ半径の形状が転写されたものと考えられる。この際、工具の刃先中央部分で加工された領域では、 $f = 40 \mu m/rev$ の場合と

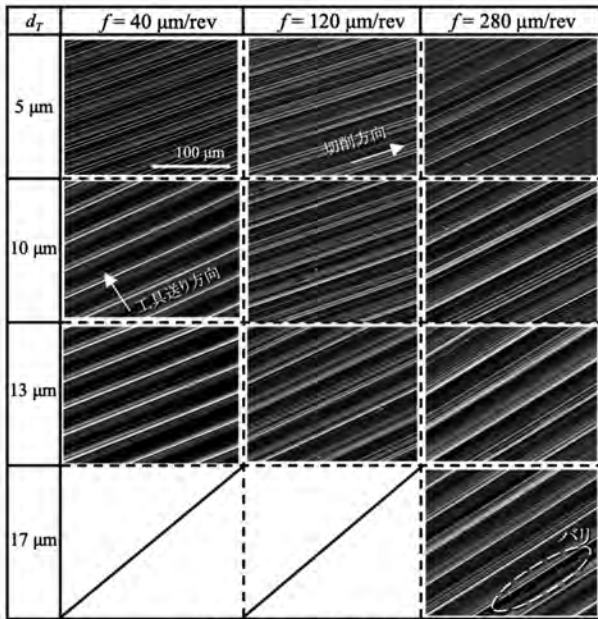


図3 加工面 SEM 観察画像

同様に d_T が大きくなるにつれてバリのない溝が加工されたが、工具の端部分で加工された領域では浅く、バリが残っていた。これは、図3の $f=280 \mu\text{m/rev}$, $d_T = 17 \mu\text{m}$ の加工面観察画像内、点線で囲われた領域からも確認できる。この現象は f の増加による影響と見られ、次節で詳しく考察を行う。

3.2 工具送り量が加工面に与える影響

図4に示した加工面の断面プロファイルより、 $f=40 \mu\text{m/rev}$ では均一なマイクロ溝表面が加工され、 $f=280 \mu\text{m/rev}$ では工具が元々持つ円弧形状を有する複合溝表面が加工されたことが確認された。 $f=40 \mu\text{m/rev}$ の条件では、工具刃先に加工された溝ピッチと工具送り量が一致する。この場合、被削材表面には溝が一本ずつ加工されるため、 d_T の値によらず均一なマイクロ溝が加工される。それに対し、 $f=280 \mu\text{m/rev}$ の場合、7本の溝が同時に加工されることとなる。加えて、本実験で使用した工具は半径0.8mmのRバイトであり、刃先のレーザ加工はこの輪郭に沿って行われた。そのため、刃先に平行に加工された溝は位置によって高さが異なる。 f が大きい場合、高さの異なる溝が加工面に転写されることで、マイクロ溝と元の工具輪郭が合成された複合溝表面が加工されたと考えられる。

3.3 LMcBN 工具を用いた切削の幾何学的考察

LMcBN 工具を用いた切削について、幾何学モデルを用いて各種パラメータが加工面に及ぼす影響を考察する。図5に LMcBN 工具刃先のモデル図を示す。簡易化のため、ここでは工具刃先には高さ h 、幅 w のV溝が、工具先端を基準として水平方向にピッチ p の間隔で刃先に平行に加工されたと仮定する。また、切削による工具摩耗は考慮しないとす。図中の R, h, w, p はそれぞれ工具ノーズ半径、溝高さ、溝幅、溝ピッチを示す。刃先先端の溝底辺と刃先の円周の交点を基準点 G_1 、そこを基点に n 番目の溝の基準点を G_n とし、 G_1 と G_n が工具ノーズ半径の中心に対してなす角を θ_{1n} 、基準点同士の高さの差を h_{1n} とすると、以下の式(1), (2)が成り立つ。

$$h_{1n} = R(1 - \cos \theta_{1n}) \quad (1)$$

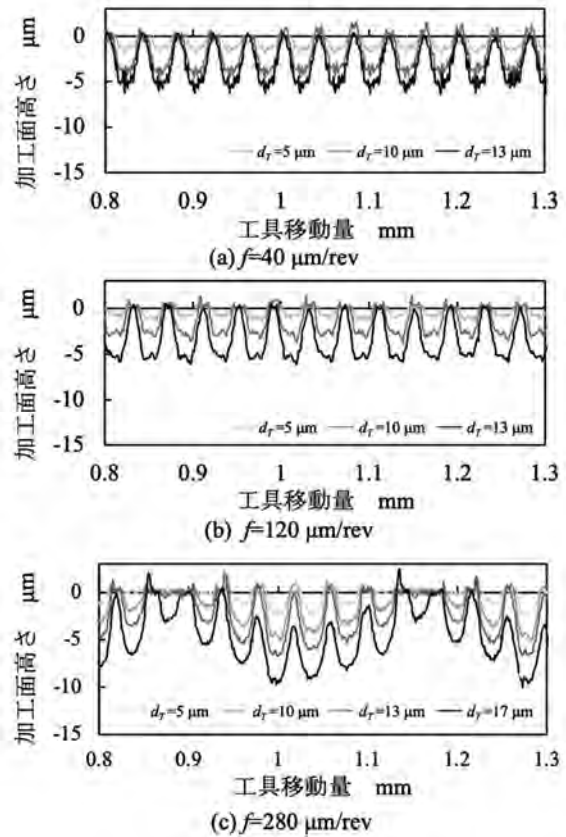


図4 加工面断面プロファイル

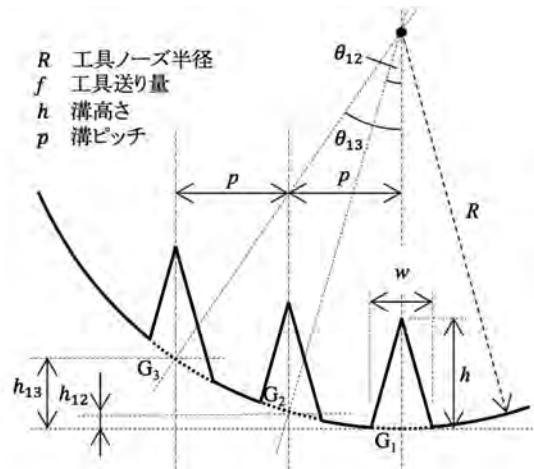


図5 LMcBN 工具を用いた切削の幾何学モデル

表3 計算値 d_{min} と実験値 d_T の比較

工具送り量 f [$\mu\text{m/rev}$]	40	120	280
d_{min} 計算値 [μm]	11.0	12.0	20.1
最大 d_T 実験値 [μm]	13.0	13.0	17.0

$$\theta_{1n} = \sin^{-1}\left(\frac{np}{R}\right) \quad (2)$$

なお、この工具を用いて連続したマイクロ溝を加工するためには、工具送り量 f は p の倍数である必要がある。さらに、

刃先の溝は G_1 を基準に左右対称に存在することから, f, p, n , は次の関係式で表される.

$$f = (2n + 1)p \quad (3)$$

どの加工条件においても被削材にバリのないマイクロ溝を切削するためには, 被削材と接触する工具刃先領域の最大溝高さ以上切り込む必要がある. そこで必要となる最小総切り取り量を d_{min} とすると, d_{min} は式(4)で表され, 式(1)~(4)を用いて式(5)のようにまとめられる.

$$d_{min} = h_{1n} + h \quad (4)$$

$$d_{min} = R \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{f-p}{2R} \right)^2} \right) + h \quad (5)$$

これより, 特定の条件でマイクロ溝加工を行うとき, バリのない加工面を得るために最低限必要な d_{min} を算出することが可能となった. この式は, R を小さく, h または f を大きくした条件で d_{min} が増加し, 加工面全体にバリのないマイクロ溝を加工するためには d_r をより大きくする必要があることを示す.

本実験条件を式(5)へ代入し, 算出された d_{min} の値および加工実験における最大 d_r を比較したものを表 3 に示す. 本実験では, $f=40 \mu\text{m}/\text{rev}$ の条件で, 算出された d_{min} よりも深く加工を行っていたことがわかる. これは, 図 4(a)に示した $d_r=10 \mu\text{m}$ ではマイクロ溝の稜線にバリが発生し, $d_r=13 \mu\text{m}$ でバリのない加工面が得られた結果とも合致する. さらに, $f=280 \mu\text{m}/\text{rev}$ の場合に $d_r=13, 17 \mu\text{m}$ の一部の加工面でバリが残存した原因も, f が増加し d_{min} が大きくなったためであることがわかる. これらの結果より, LMcBN 工具による切削において, 式(5)を用いることでバリのないマイクロ溝切削を行うために最低限必要な総切り込み量を幾何学的に予測することが可能になったと言える. なお, 工具円弧形状に対して法線方向にマイクロ溝の加工を行った場合は, 切削現象などがさらに変化することが考えられる.

3. 4 切りくず生成現象の直接観察

3. 4. 1 総切り込み量による切りくず生成現象の変化

LMcBN 工具を用いたマイクロ溝切削における切削メカニズムを解明するため, $f=280 \mu\text{m}/\text{rev}$ の条件において, 切削を急停止させ, 工具を被削材に対して垂直に引き抜くことで切削点における切りくず生成現象の直接観察を試みた.

図 6-9 に $d_r=5, 10, 13, 17 \mu\text{m}$ の切削点の SEM 観察画像をそれぞれ示す. 各図(a)に示した切削点全体の画像より, d_r が大きくなるほど工具が被削材と接触する領域が大きくなり, 切りくずが生成されている領域の幅が広がったことがわかる. また, $d_r=5, 10 \mu\text{m}$ の場合, 図 7(a)内①で示したように, 切りくずは全て溝ごとにそれぞれ独立したものが生成されたのに対し, $d_r=13, 17 \mu\text{m}$ の場合, 幅の広い一体型の切りくずが切削点中央から形成されたことが見て取れる. これは, d_r が工具側の溝高さ h よりも大きくなると同時に, 溝部分を含めた刃先全体が刃先先端部の溝から徐々に被削材と接触し, 加工が

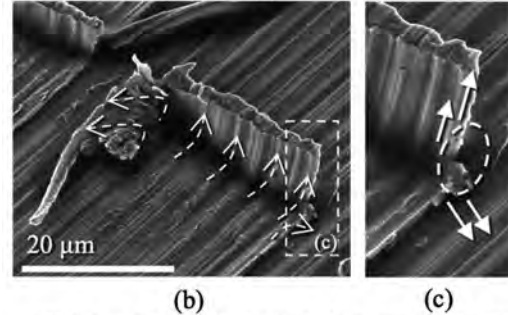
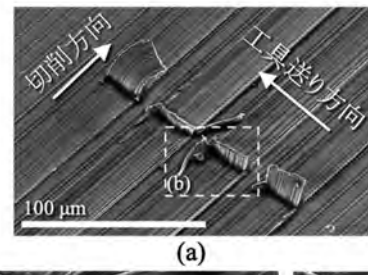


図 6 $d_r = 5 \mu\text{m}$ における切削点の SEM 観察画像

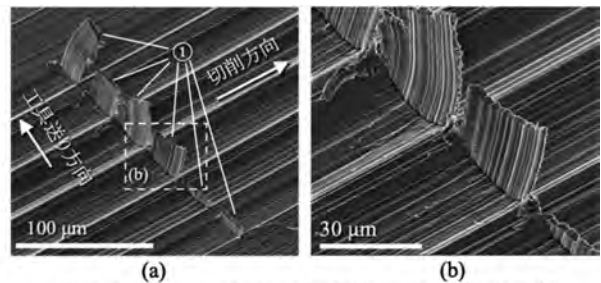


図 7 $d_r = 10 \mu\text{m}$ における切削点の SEM 観察画像

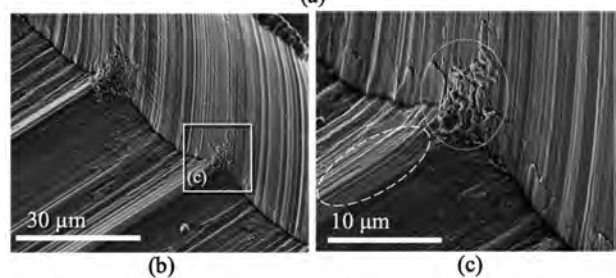
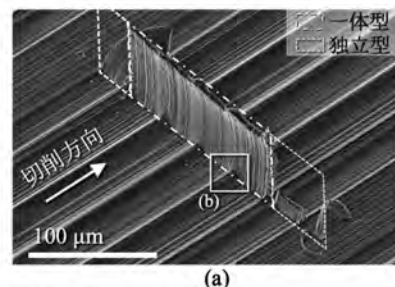


図 8 $d_r = 13 \mu\text{m}$ における切削点の SEM 観察画像

行われたためである. このことから, 式(5)で算出した d_{min} より深く加工を行った場合, 同じ切削条件でも生成される切りくずは全体で一つのものになると考えられる.

前述した切りくず形態の変化は, 加工面のバリ生成現象と強い関係性があることが考えられる. 図 6(b)の切削点拡大画像より, 工具刃先との接触によって変形された被削材は, 矢印が示すように, その多くは工具すくい面に沿って流れながら切りくずを生成し, 一部は左右に押し出されるように流れていた. 脇に押し出されるように被削材の一部が流れたのは, 刃

先に加工された溝と被削材の間に隙間が存在していたためと考えられる。これは、 d_r が d_{min} より小さく、刃先の溝を含めた工具刃先全体が被削材と完全に接触していない場合に生じる。この際、図 6(c)に示したように、材料には切りくず生成方向と、脇に押し出され被削材表面に残留する方向の 2 つの力が作用する。これにより、図 6 (c)の点線で囲われた領域でせん断力生じ、被削材側に残留した材料が加工面のバリとなる。その一方、図 8 に示したように、 d_r が大きくなり、刃先の一部の領域が完全に工具と接触し加工が行われている場合、その領域で除去された材料は全て工具すくい面に沿って流れ、切りくずを生成していることが確認された。この際、被削材側の溝頂点部分では、工具刃先の溝輪郭全体がそのまま転写され、バリのない切削が行われた。このように、 d_r を変化させることで切削点では切りくず生成現象が変化し、その形態によって加工面の状態も変化することが明らかとなった。

3. 4. 2 総切り込み量によるせん断角の変化

図 10 に、 $f=280 \mu\text{m}/\text{rev}$, $d_r=17 \mu\text{m}$ 時の切削点の SEM 上方視点観察画像を示す。画像内点線領域①で示した独立型の切りくずの厚さは一定なのに対し、一体型の切りくずでは②溝頂点部で③溝底部よりも厚い切りくずが生成されていた。これは、溝頂点部の切削でより多くの材料が変形し、切りくずを生成したことを示している。図 11 に切削における切り込み量、切りくず厚さおよびせん断角の関係を示す。せん断角 ϕ は切り取り厚さおよび切りくず厚さから算出され、その関係は式(6)で表される。

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \quad (6)$$

図 12 に、式(6)から算出した、 $f=280 \mu\text{m}/\text{rev}$ における d_r とせん断角の関係を示す。グラフより、 d_r の増加とともにせん断角が減少したことが見て取れる。これは、切り取り厚さに対して切りくずの厚さが厚くなったことを示している。さらに、 $d_r \geq 13 \mu\text{m}$ で形成した一体型の切りくずでは、溝底部よりも頂点部においてせん断角が小さくなった。これは、溝底部よりも溝頂点付近でより多くの材料が変形されたことに加え、刃先をレーザ加工した際に生じた刃先の丸みや加工中の摩耗が要因と考えられる。せん断角が小さくなると、切削中に工具へ作用する切削力が大きくなる¹²⁾ことが報告されており、LMcBN 工具を用いた切削でも、溝頂点部において局所的に大きな切削力が作用していたと考えられる。その結果、刃先の加工時に生じた丸みと合わさり、図 9(c)に示した溝頂点部の切削点において被削材が顕著に堆積したと考えられる。今後、一度の切削における切り込み量を大きくし、切削抵抗や工具磨耗の分布を明らかにしていく。

3. 4. 3 切削形態の分類

これまでの実験結果を総括し、LMcBN 工具を用いたマイクロ溝切削における切削形態を分類する。図 13 に示すように、切削パラメータによって切削現象と切削メカニズムが大きく変化する。

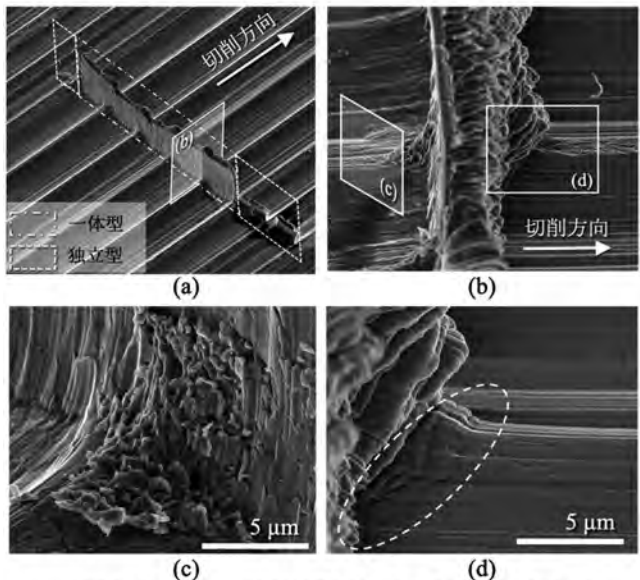


図 9 $d_r = 17 \mu\text{m}$ における切削点の SEM 観察画像

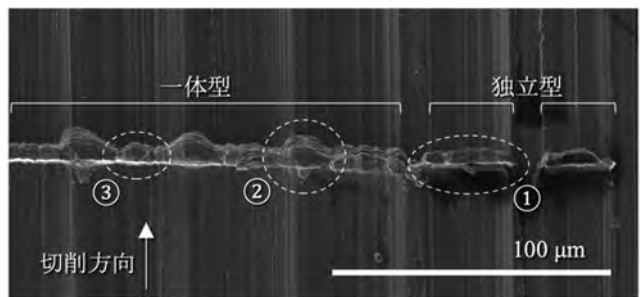


図 10 $f=280 \mu\text{m}/\text{rev}$, $d_r = 17 \mu\text{m}$ 時の切削点の SEM 観察画像

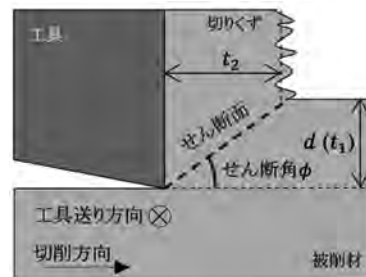


図 11 切り取り厚さ、切りくず厚さとせん断角の関係

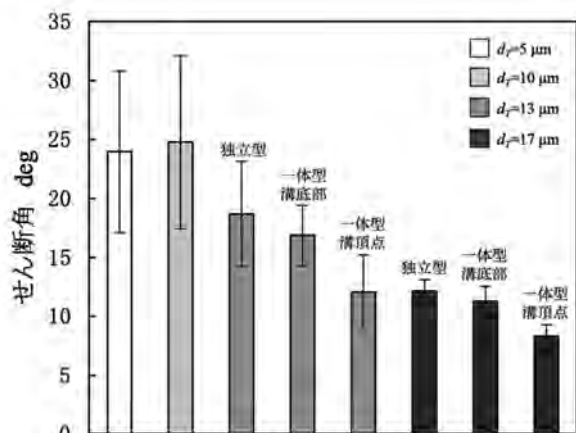


図 12 d_r によるせん断角の変化

まず、工具送り量 f が工具の溝ピッチ p と一致する場合(図 13(a), (c)), 高さが均一なマイクロ溝表面の加工が可能である。この条件の場合、ホブ加工やブローチ加工などに代表さ

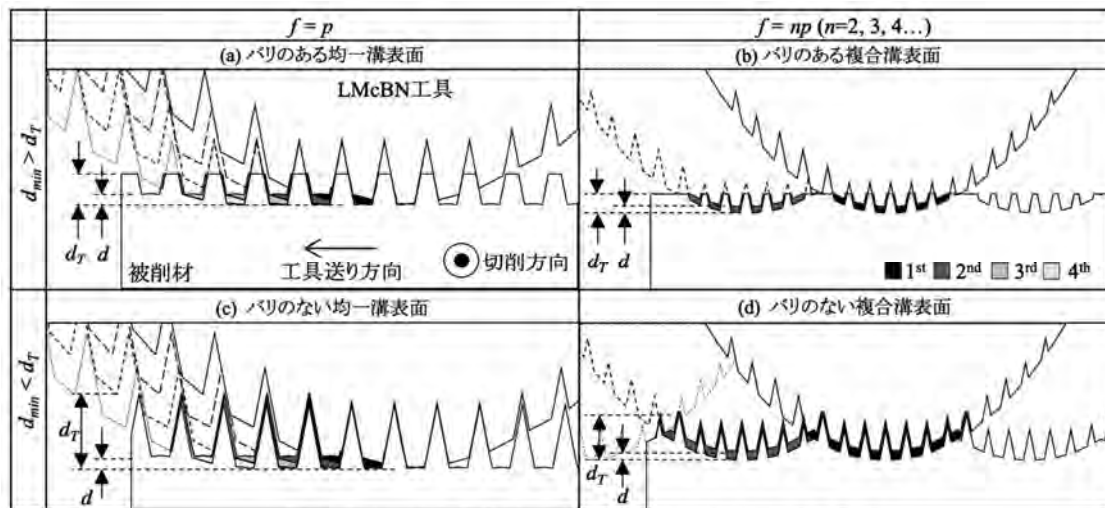


図 13 LMcbN 工具を用いた切削における切削形態の分類

れる、複数の刃で徐々に 1 つの溝を加工する切削形態となり、工具の切込み量よりも小さな切り取り厚さで徐々に溝加工が行われる。これは、 d_T を大きくした場合 (図 13(c)) でも同様の切削形態になることが考えられる。

一方、 f が p より大きい場合 (図 13(b), (d)) は、元の工具の先形状も加工面に転写され、複合溝表面が加工される。 $f=p$ の時とは異なり、この場合は、複数の溝を単一の刃で加工する加工形態となる。このとき、 f の増加とともに、式(5)より算出される d_{min} の値も増加するため、バリのない溝表面を加工するにはより多くの材料除去が必要となる。また、 d_T が工具刃先の溝高さ h を上回った時点より、刃先先端部分から加工面にはバリのないマイクロ溝が加工されるようになる。この際、切削点で生成される独立した複数の切りくずは徐々に一体型の切りくずへと遷移する。一体型の切りくずでは、溝の稜線部で谷部分より厚い切りくずが生成されるため、せん断角が局所的に小さくなる。せん断角が小さいほど、工具刃先にはより大きな切削力が作用するため、工具側の溝頂点部分では他の領域と比べて工具が摩耗しやすく、レーザ加工による刃先丸みと合わせり、より大きな構成刃先を構成する。

4. 結言

V 溝を刃先にレーザ加工した cBN 工具を用い、純鉄表面へのマイクロ溝加工を試みた。総切込み量 d_T および工具送り量 f が加工面に与える影響を調査し、切削点における切りくず生成現象の直接観察を行い、切削メカニズムや切削形態の解明を試みた。以下に結論を示す。

- 1) d_T は主に加工面のバリ生成に影響し、バリのない加工面を加工するためには、幾何学的モデルから算出される最小切り込み厚さ d_{min} よりも深く切込む必要がある。
- 2) f は加工面形状に影響を及ぼす。 f を工具側の溝ピッチと同値にすることで均一なマイクロ溝表面の加工が可能。一方、 f を大きくすることで、工具がもつ刃先形状とマイクロ溝を有する複合表面を加工することができる。
- 3) 工具に加工する溝形状および切削条件から、LMcbN 工具を用いた切削の幾何学的モデルを提案した。これにより、バリのないマイクロ溝表面の加工に必要な最小

総切込み厚さ d_{min} の予測が可能となった。

- 4) 切削点の直接観察より、 d_T が d_{min} よりも小さい場合、加工面にはバリが残存し、独立した切りくずが生成され、 d_T が d_{min} よりも大きく、バリのないマイクロ溝が加工される場合には一体型の切りくずが生成されることがわかった。
- 5) バリのないマイクロ溝が加工される際、溝頂点部分では溝底部よりも材料の変形量が大きく、これにより切りくずの厚さが厚くなり、せん断角も小さくなる。

本研究より、LMcbN 工具を用いて鉄系材料表面へ効率よくマイクロ溝を大量に加工する提案技術の有効性が示された。

5. 参考文献

- 1) Kazuma Asakura and Jiwang Yan: Water Repellency Control of Oxygen-Free Copper Surface by Diamond-Cut Micro Grooves, Int. J. Autom. Tech., 9, 4, (2015) 396.
- 2) Mingjie Liu, Shutao Wang, Zhixiang Wei, Yanlin Song and Lei Jiang: Bioinspired Design of a Superoleophobic and Low Adhesive Water/Solid Interface, Adv. Mater. 21 (2009) 665.
- 3) C.D.W. Wilkinson, M. Riehle, M. Wood, J. Gallagher and A.S.G. Curtis: The use of materials patterned on a nano- and micro-metric scale in cellular engineering, Mater. Sci. Eng. C, 19 (2002) 263.
- 4) Yuka Yamamuro, Tomotaka Shimoyama and Jiwang Yan: Microscale Surface Patterning of Zirconia by Femtosecond Pulsed Laser Irradiation, Int. J. Precis. Eng. Manuf. -Green Technol., 9, 2 (2022) 619.
- 5) Ayumi Nakajima, Masaki Omiya and Jiwang Yan: Generation of micro/nano hybrid surface structures on copper by femtosecond pulsed laser irradiation, Nanomanuf. Metrol. (2022).
- 6) Shigeru Tanikawa and Jiwang Yan: Fabrication of micro-structured surface with controllable randomness by using FTS-based diamond turning, Precis. Eng., 73 (2022) 363.
- 7) Zhiyu Zhang, Jiwang Yan and Tsunemoto Kuriyagawa: Manufacturing technologies toward extreme precision, Int. J. Extrem. Manuf. 1 (2019) 022001.
- 8) Nozomi Takayama, Jun Ishizuka and Jiwang Yan: Microgrooving of a single-crystal diamond tool using a picosecond pulsed laser and some cutting tests, Precis. Eng., 53 (2018) 252.
- 9) Shoichi Shimada, Hiroaki Tanaka, Masahiro Higuchi, Tomomi Yamaguchi, Sakuro Honda and Kazushi Obata: Thermo-Chemical Wear Mechanism of Diamond Tool in Machining of ferrous Metals, CIRP Annals, 53, 1 (2004) 57.
- 10) Zone-Ching Lin and Din-Yan Chen: A study of cutting with a CBN tool, J. Mater. Process. Technol., 49 (1995) 149.
- 11) Ken Soon Neo, Mustafizur Sazedur Rahman, Xiaoping Li, Hock Hee Khoo, Masasi Sawa and Yukio Maeda: Performance evaluation of pure CBN tools for machining of steel, J. Mater. Process. Technol., 140 (2003) 326.
- 12) Peng Li and Zhiyong Chang: Numerical Modeling of the Effect of Cutting-Edge Radius on Cutting Force and Stress Concentration during Machining, Micromachines, 13 (2022) 211.