



M. Okada

医療用材料の極表層の微細塑性変形を 活用したマイクロ剪刀刃先に適した 機能性表面の創成

岡田 将人*

1. まえがき

鋭利な刃先形状が要求される刃物製品としてマイクロ剪刀がある。マイクロ剪刀とは、脳外科手術で使用される長さ数 mm から十数 mm 程度の刃先を持つはさみであり、柔軟な生体組織を術者の意図に倣いの確に切断できる切れ刃性能が求められる。現在のマイクロ剪刀の製造工程として、まず各部品が NC 工作機械によって板状素材から設計された形状に切削加工される。その後、切削加工により生じたバリの除去、刃先の研ぎ、調子合せといった仕上げ工程が手作業によって行われて完成となる。この仕上げ工程である手作業が、品質の不安定化、製造時間の伸長、技能者の確保および育成といった懸念点を招いているのが現状である。そのため、NC 工作機械上で、前述の手作業で行われている仕上げ工程も実施できれば、有用な加工法となる。

チップバニシング加工は先端が球頭形状を呈する工具をボールエンドミル加工と同様の加工形態で対象面に押付け、定力下でしゅう動させることで表面の微小凹凸ならびに表層材料を塑性変形させ、金属表面の平滑化を図る加工法である。本加工法は表面の平滑化とともに、工作物表層の塑性変形に由来する圧縮残留応力と加工硬化をもたらすため、疲労強度、耐磨耗性が向上する表面改質効果も得られる¹⁾。また、切削加工を行った工作機械上で工具を付け替えることで、そのまま実施できるため、自動工具交換機能を有する工作機械を用いることで、工程の集約化、製造時間の短縮、製造スペースの狭小化が図れる。本研究室では、このチップバニシング加工に対し、工具を高速回転させながら、なおかつ、その回転軸を対象面法線方向から傾斜させることで、工具と工作物間に高速のしゅう動作用を発現させ、表面の平滑化および表面改質を効率的に実施できる工具回転型チップバニシング(以後、回転バニシ)加工に係る研究に取り組んできた。回転バニシ加工では、しゅう動作用を発現させる方向を制御することで、表層材料の流動方向を制御できることを明らかにしている²⁾。そこで本研究では、マイクロ剪刀をはじめとした刃物製品のような外縁部に向かって板厚が薄くなる製品の縁部仕上げ工程に回転バニシ加工を適用することで、縁部のバリ除去ならびに鋭利な刃先形状の創成を同時に自動化できるとの着想に至り、これを本研究の一つ目の目的とした。

マイクロ剪刀が使用される脳外科手術の作業空間は大変狭く、脆弱な組織や微細な血管が張り巡らされているため、無駄な力を要せずに目標の部位の切断ができる切れ味が要求されている³⁾。現在、このような生体組織を対象とした刃物の切れ味の評価方法としてマテリアルシートと呼ばれる生体組織の機械的特性を模擬したシートが用いられており、このマテリアルシートをマイクロ剪刀などの切れ刃で切り込み、切れ味の確認が行なわれている。しかしながら、その性能評価は試験者の経験に基づく感性が含まれており、定量的な評価がなされていないのが現状である。そこで本研究では、マイクロ剪刀をはじめとした刃物製品の切断性能について定量的な評価をするための切断性能評価試験機を開発する。加えて、開発した試験機を用いて、切れ刃形状が切断性能に及ぼす影響について基礎的な検討をすることを二つ目の目的とした。本報では、これら 2 種類の研究目的に沿った実験を、それぞれ実験 1, 2 と定義する。

2. 回転バニシ加工による鋭利刃の創成実験 (実験 1)

回転バニシ加工のための実験装置を図 1 に示す。加工機には精密卓上型 3 軸ロボット (RAP3L-171707-1552-SP, コムス(株)) に高速モータスピンドル (BMS-4040, ナカニシ(株)) を Z 軸方向から傾斜させて固定し、先端が球頭形状の工具を設置した。工具には球頭形状 ($R = 1.5 \text{ mm}$) の DLC コーテッド超硬工具を用いた。著者らはこれまでに、DLC コーテッド超硬工具により、良好な仕上げ面が得られることを明らかにしている⁴⁾。工作物はばねを介して 3 軸ロボットのテーブル上に固定し、ばねの縮み量に応じて工具の工作物への押付力 F_t [N] を制御した。バニシ工具の回転によるしゅう動速度 v_s [m/min] は工具と対象面間の接点における理論的な周速度と定義し、工具傾斜角、工具回転数、工具先端半径により決定した。なお、バニシ加工における仕上げ面は、前加工面粗さの影響を受ける⁵⁾。そのため、いずれの前加工面においても、その表面形状を揃えた。前加工面を得るための切削条件は、 $R = 0.5 \text{ mm}$ のボールエンドミルにより、工具送り方向を -X 方向、クロスフィード方向を +Y 方向、クロスフィード量 0.03 mm 、切り込み量 0.03 mm とした。本研究では、回転バニシ加工を仕上げ工程に

* 福井大学 教授

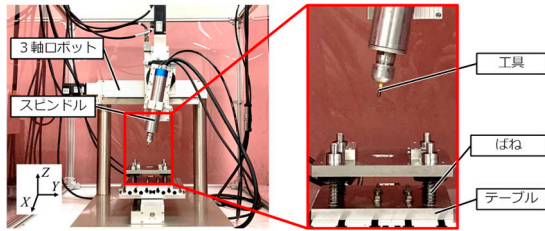
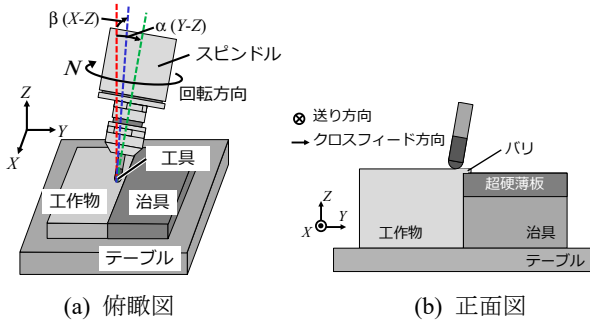


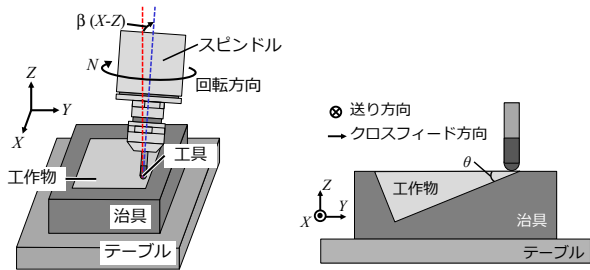
図1 パニシング加工実験の装置外観



(a) 俯瞰図

(b) 正面図

図2 実験方法 (実験 A)



(a) 俯瞰図

(b) 断面図(正面)

図3 実験方法 (実験 B)

適用することで鋭利刃の創成を目的にしている。鋭利刃創成のためには、切削加工により生成された縁部バリの除去と刃先近傍材料の流動による鋭利形状の創成が求められる。そこで、これらを別々の実験として実施した。縁部バリ除去実験を実験 A、鋭利刃形状創成実験を実験 B とし、それぞれの実験の概略を図 2 (a), (b), 図 3 (a), (b) に、実験条件を表 1 に示す。なお、パニシ工具の Y-Z 平面での傾斜角を α° 、X-Z 平面での傾斜角を β° とした。

実験 A では、図 2 にみるように直方体形状の工作物上面に切削加工を施すことにより、その縁部に意図的にバリを生成させた。このバリに対し、下面に超硬合金製の薄板をサポート材として設置し、工作物上面の縁部からバリ発生方向に向けて回転パニシ加工により表層材料を流動させることでバリの除去を試みた。本実験では、工具傾斜状態として $\alpha = 10^\circ$ 、 $\beta = 0^\circ$ を条件 I、 $\alpha = 0^\circ$ 、 $\beta = 10^\circ$ を条件 II とした。対象面との理論接触点における工具回転によるしゅう動は、条件 I では +X 方向、条件 II では +Y 方向にそれぞれ作用することとなる。条件 I、II において工具送り方向は -X 方向、クロスフィード方向は +Y 方向に統一した。

表 1 実験条件

条件定義	A		B
	I	II	-
押付力 [N]	$F_t = 80$		
しゅう動速度 [m/min]	$v_s = 12.3$		$v_s = 9.82$
送り速度 [mm/s]	$f = 5$		
クロスフィード量 [mm]	$C_f = 0.01, 0.05$		$C_f = 0.05$
傾斜角 [deg]	$\alpha = 10,$ $\beta = 0$	$\alpha = 0,$ $\beta = 10$	$\alpha = 0, \beta = 10$

実験 B では、刃物製品の製造工程における切削加工により創成された鋭利形状を模擬するために、切削加工により削り出した鋭角 ($\theta = 25^\circ$) を有するくさび形状の工作物を対象とし、その鋭角と接する面を工作機械の X-Y 平面と平行になるように治具で固定した。

いずれの実験においても工作物には JIS SUS420J2 の生材を用い、加工部には塑性加工油 (BP-3000, スターカット工業㈱) を滴下した。仕上げ面の表面形態の測定には触針式粗さ計 (SURFCOM NEX001 SD-12, ㈱東京精密) を用いた。縁部外観形状はマイクロスコープ (VHX-970F, ㈱キーエンス)、縁部鋭利形状は卓上走査型電子顕微鏡 (JCM-6000Plus, 日本電子㈱)、縁部断面形状は正立金属顕微鏡 (BX51M, オリンパス㈱) を用いて撮影した。

3. 鋭利刃の切断性能評価試験機の開発 (実験 2)

回転パニシ加工により創成した鋭利刃の切れ味評価のための切断性能評価試験機を開発した。試験機全体ならびに試験部の外観と概略図を図 4 (a)-(d) に示す。本試験機は電動シリンダ (EACM4E30AZMC, オリエンタルモーター㈱) と 1 軸ステージを組み合わせた機構であり、上下方向に 1 自由度の電動シリンダにより、試験シートに対して +Z 方向より試験刃を定速で押付けることが可能である。切断荷重 F_z [N] の測定は、小型圧縮型ロードセル (LMA-A-50N, ㈱共和電業) を用いており、ロードセルからの出力の増幅にチャージアンプ (DPM-911B, ㈱共和電業) を、チャージアンプからの出力の表示、記録のためにデータロガー (GL240, グラフテック㈱) を使用した。試験シートには、生体組織を模したマテリアルシート (TEST MATERIAL, ㈱エムエス) を使用した。試験刃には実験 B にて得られた刃先形状の工作物を用いた。図 5 に試験シートの概略図を示す。試験シート幅は 3 mm とし、刃先押付部に応力を集中させるために、試験刃接触部に対して片端に 1 mm 程度の切り込みを入れた。また、試験時に試験刃と試験シートの接触部およびその近傍以外の領域での試験シートの伸びを制限するために、試験シートの試験刃接触部およびその

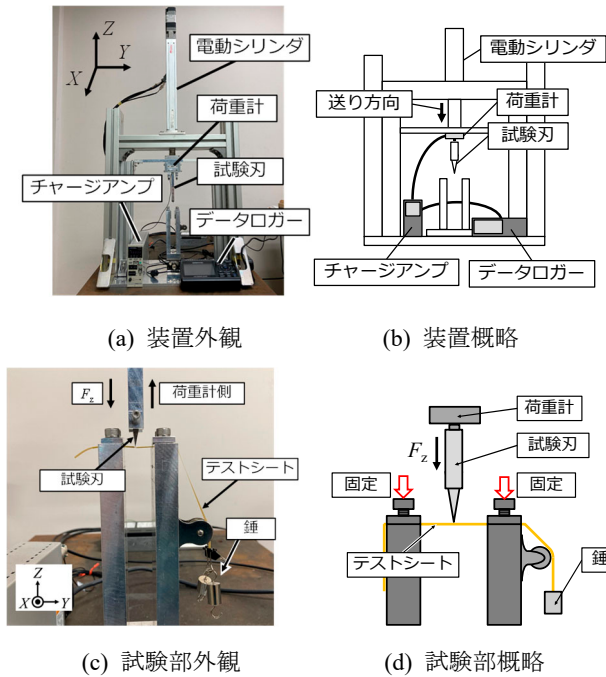


図4 切断性能評価試験機

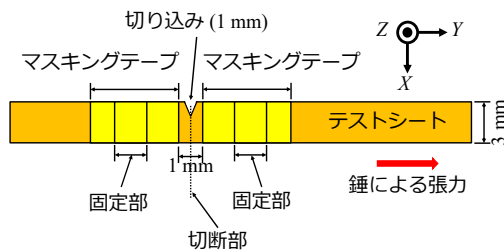


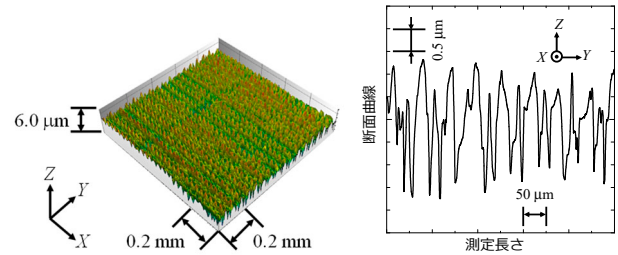
図5 試験時のテストシート概略

近傍以外の領域にマスキングテープを貼付した。試験シートの試験機への設置について、試験シート設置時点に作用させる張力を一定にするため、試験シートの片端に20gのおもりを取り付け、一定荷重で張力を作用させた状態で試験機に固定した。試験は試験刃を2mm/sの一定速度で+Z軸方向から試験シートに押し当てて実施した。予め試験刃および固定治具をロードセルに押し当てており、その状態を切断荷重ゼロとし、試験刃が試験シートに接触してから切断されるまでの切断荷重の傾向を記録した。

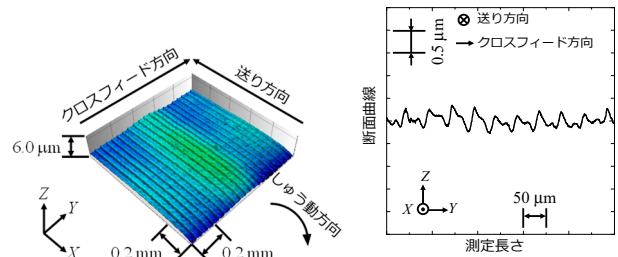
4. 実験結果と考察

4.1 しゅう動作用方向が対象面表層の材料流動に及ぼす影響(実験1-A)

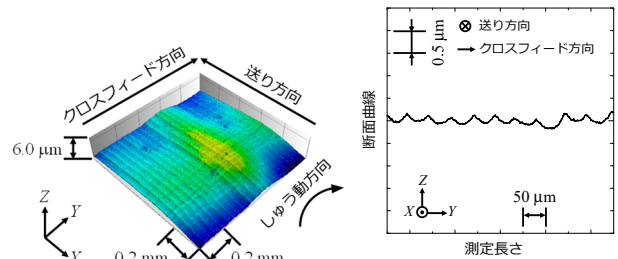
本研究において、工作物縁部バリの除去機構として、バリ部材料をバリ発生方向に流動させることにより、薄肉化させ破断させることを期待している。回転バニシ加工は、工具を傾斜、回転させることにより、工作物表面に対してしゅう動作用を発生させることで、表層の材料流動を制御する。そのため、本節では工具接触点におけるしゅう動方



(a) 前加工面



(b) 条件 I



(c) 条件 II

図6 前加工面とバニシング加工面の3Dプロファイルと断面曲線

向をX軸に沿って形成されている縁部バリに対して平行(条件I)とした場合と垂直(条件II)とした場合について、それぞれの仕上げ面の加工痕形状から評価した。図6(a)-(c)に、前加工面ならびに両条件による回転バニシ加工後の仕上げ面の3D形状とY方向に測定した断面曲線を示す。クロスフィード量は $C_f=0.05$ mmで一定とした。図6(a)-(c)より、バニシ仕上げ面には、切削加工により生じた周期的なカスプに対し、バニシ工具形状の転写による加工痕が明確に認められる。断面曲線を比較すると、条件Iでは凸形状が-X方向側に高くなっているのに対して、条件IIでは指向性のない低い凸形状であった。両条件において工具傾斜条件以外は同一であることから、この違いは工具のしゅう動作用に起因すると考える。これらより、工具と対象面の理論接触点におけるしゅう動作用が+X方向に作用する条件Iは、バリ発生方向と対向する-Y方向に材料流動が顕著に作用したことがわかる。これに対して、しゅう動作用が+Y方向に作用する条件IIはバリ発生方向に対して材料流動が作用したと考える。本研究では、工具傾斜角を 10° としており、工具と対象面間の接触領域における

しゅう動作用は X - Y 平面上に対して円弧状となっていると考えられる。そのため、工作物縁部およびバリ部に回転バニシ加工を適用した場合、条件 I は表層材料を工作物の内側 ($-Y$ 方向) に巻き込む流動が発生したと考える。これに対して、条件 II は材料をバリ発生方向 ($+Y$ 方向) に引き延ばす流動が発生したと考える。

4.2 しゅう動作用方向が縁部バリ状態に及ぼす影響 (実験 1-A)

本節では、4.1 節の条件から $C_r = 0.01$ mm に変更し、それ以外は同一の加工条件にて、回転バニシ加工を適用した場合のバリ部近傍の状態を評価した。図 7 (a)-(c) に、加工前後におけるバリの外観を、図 8 (a)-(c) にバリ部近傍の断面形状を示す。これらは、回転バニシ加工による面加工を対象面に 1 回行った場合である。また、外観形状は図 7 中の模式図に示すとおり、バニシ面に対し裏側から撮影したものであり、断面形状は、図 8 中の模式図に示すとおり、工作物の側面から撮影したものである。図 7 (a)-(c) より、加工前は $200 \mu\text{m}$ 程度のバリが生成されていたのに対して、回転バニシ加工を施すことで両条件ともに、バリが $+Y$ 方向に引き延ばされた形状を呈した。また、条件 II では条件 I に比べてバリの引き延ばしがより顕著に生じており、一部バリが縁部より離脱した部分 (図中①) が生じた。これは、条件 I に比べて条件 II では表層材料の流動がより顕著に作用したことを示唆しており、4.1 節の材料流動機構と整合する結果と考える。また、図 8 (a)-(c) より、加工前は厚さ $50 \mu\text{m}$ 程度であったバリは、加工により展伸して薄肉化している。

4.3 面加工回数が縁部バリ状態に及ぼす影響 (実験 1-A)

回転バニシ加工において面加工を同一範囲で複数回実施することで、表層の材料流動がより促進されると考える。そのため、本節では同一面に対して加工回数を増加させた場合のバリの除去状態について評価した。図 9 (a), (b) に条件 I, II でそれぞれ同一の領域を 5 回 ($N=5$) 加工した場合のバリの外観形状を示す。撮影方法については、図 7 と同様にバニシ面に対し裏側から撮影した。図 9 に示すように $N=5$ の加工において条件 I では、加工全域でバリが概ね除去された。また、条件 II では、加工領域の一部で微小なバリ (図中②) が残存した。次に図 10 に条件 I, II でそれぞれ $N=1-5$ まで加工を施した場合の残存したバリ長さを示す。ここでバリ長さとは、図 9 に示すように、工作物縁部からバリ先端までの長さである。図中にはバニシ領域内で残存したバリの最大・最小長さをエラーバーで示した。図 10 より、両条件において $N=1$ では未加工時よりもバリ長さは長くなり、 $N=2$ 以降で徐々に短くなっている。これより、両条件ともに $N=1$ において材料流動により、加工前のバリが引き延ばされた後、 $N=2$ 以降で薄肉になったバリが徐々に離脱したと考える。また、条件 II ではいずれの場合においてもバリ長さは条件 I に比べて長くなっている。これは、前述のとおり、条件 II がバリ発生

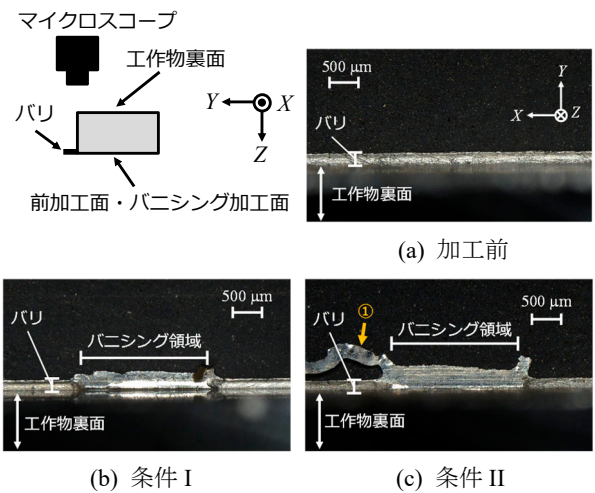


図 7 バリの外観形状

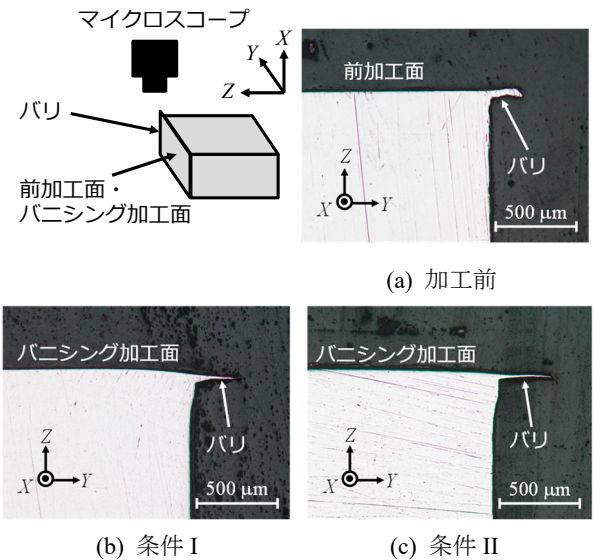


図 8 バリの断面形状

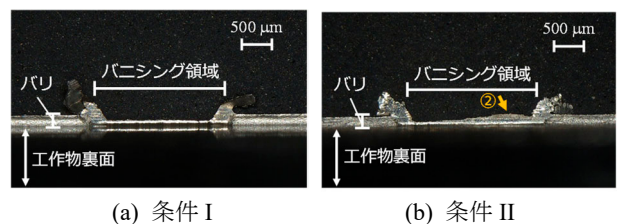


図 9 加工回数 5 回後のバリ外観形状

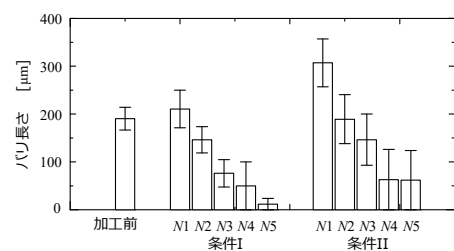


図 10 加工回数によるバリ長さの変化

方向 (+Y 方向) にしゅう動作用が作用しているためと考える。これに対し、条件 I はバリ発生方向と対向する方向に流動を発生させながら、バリ根元部を破断させることで、バリの残存が少ない良好な縁部が得られたと考える。

4.4 回転バニシ加工が鋭利刃形状に及ぼす影響(実験 1-B)

本節では、鋭利刃形状を模した傾斜面を有する工作物の刃先近傍に対して回転バニシ加工を適用した場合の表層の材料流動が刃先形状に及ぼす影響について評価した。図 11 (a), (b) に刃先の断面形状および拡大 SEM 画像を示す。図 11 (a), (b) より、未加工状態の刃先形状は 25° 程度であったのに対して、回転バニシ加工を施した刃先形状は 21° 程度であり、 4° 程度鋭利な刃先形状となった。一方で、刃先先端部には、 $-Z$ 方向へのダレ(図中③)が生じている。また、先端部付近の材料流動により過剰に薄肉化された領域(図中④)が創成されていると考えられ、本領域をバリとして適切に除去することが求められる。

4.5 鋭利刃の切断性能評価試験(実験 2)

試験刃として、未処理刃および前節の実験 B により得られた回転バニシ加工による処理刃で切断性能の評価試験を実施した。評価試験により得られた切断荷重曲線を図 12 (a), (b) に示す。本試験は試験回数 $N = 3$ で実施した。図 12 (a), (b) より、未処理刃を用いた場合の切断荷重は 0.9 N 程度であったのに対して、処理刃の切断荷重は 1.7 N 程度であった。また、その切断に至るまでのストロークは、処理刃のほうが長くなった。これらの結果から、切断に至る時点の荷重ならびにストロークより、処理刃の切断性能は未処理刃より劣ると考えられる。これは、試験に用いた処理刃は、図 11 (a), (b) に示すように、刃先先端においてダレやバリが生じており、これが切断性能に影響したものと考える。回転バニシ加工による処理刃の切断性能の向上には至らなかった。しかしながら、回転バニシ加工により、刃先表面の平滑化、バリ除去、刃先角の鋭利化の効果はそれぞれに確認できたことから、今後、両面加工やバリ除去プロセスを一連のプロセスとして構成させることで、良好な切断性能の発現が期待できると考えている。また、本研究で提案した切断性能評価試験は、極先端付近の刃先形状の違いを切断荷重とストロークの違いとして定量的に評価することができており、切断性能評価試験として適切な評価が可能であると考えられる。

5. まとめ

工具回転型バニシング加工をステンレス鋼の薄板材縁部に適用した場合の縁部形状を評価した。次に、切断性能の評価を目的とした試験機を開発し、工具回転型バニシング加工で処理した試験刃を用いて、切断性能を定量的に評価した。得られた結果を以下にまとめる。

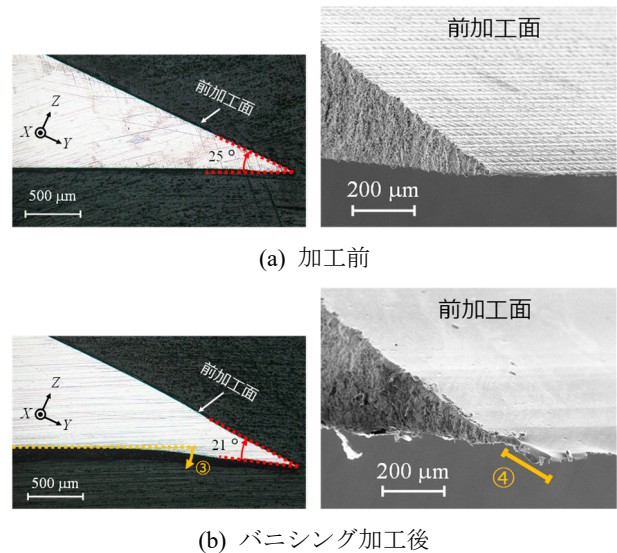


図 11 刃先の断面形状と SEM 画像

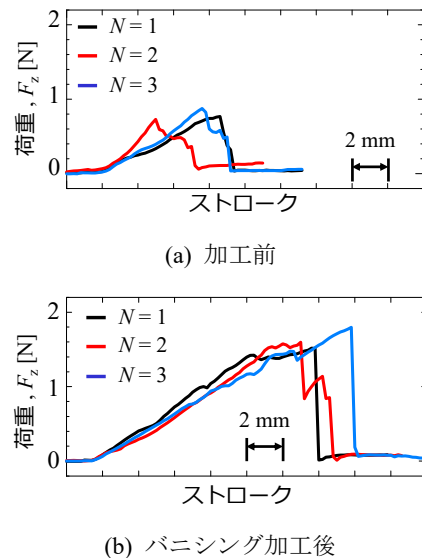


図 12 切断評価試験における荷重-ストローク線図

- (1) しゅう動作用が $+X$ 方向の場合、加工痕の凸形状が $-Y$ 方向側が高くなり、バリ発生方向に対向する $-Y$ 方向の材料流動が促進されたのに対して、しゅう動作用が $+Y$ 方向の場合、指向性のない低い凸形状が連続し、バリ発生方向に対して材料流動が作用した。
- (2) 回転バニシ加工により縁部バリは引き延ばされて薄肉化し、しゅう動方向が $+X$ 方向よりも $+Y$ 方向の場合に、バリの引き延ばしがより顕著に生じた。
- (3) 同一面に対して回転バニシ加工の面加工回数を 1 回から 5 回に増やすことで縁部バリの除去に成功し、良好な縁部形状の創成に成功した。
- (4) 回転バニシ加工により、未加工の刃先形状に比べて、 4° 程度鋭利な刃先形状の創成に成功したが、極先端付近にダレとバリ状の薄肉部が生じた。

- (5) 開発した切断試験機により，試験シートの切断に至るまでの性能を荷重とストロークで定量的に評価できた。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成 (AF-2018029) によって行われたことを付記するとともに，記して深甚なる謝意を表す。加えて，本研究に係る実験を進めるにあたり技術的な協力をいただいた福井大学技術部 青山直樹 氏ならびに，加工実験の実施やデータ分析に協力をいただいた福井大学大学院 精密加工研究室 修了生の 吉田清斗 氏に深謝する。

参考文献

- 1) Masato Okada, Masayoshi Shinya, Hiromu Matsubara, Hiroaki Kozuka, Hiroshi Tachiya, Naoki Asakawa, Masaaki Otsu, Development and characterization of diamond tip burnishing with a rotary tool, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 244, pp. 106-115, 2017. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.01.020
- 2) Masato Okada, Shin Terada, Yuki Kataoka, Takeshi Kihara, Takuya Miura, Masaaki Otsu, Burnishing characteristics of sliding burnishing process with active rotary tool targeting stainless steel, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 15, No. 4. pp. 1-11, 20210630. DOI: 10.1299/jamdsm.2021jamdsm0044
- 3) 学生編集委員会 WG0, 技能を守れ 町工場の底力～脳外科手術機器 編～, *精密工学会誌*, Vol. 74, No. 1, (2008), pp. 37-43. DOI: 10.2493/jjspe.74.37
- 4) 岡田将人, 新谷正義, 高杉敬吾, 立矢宏, 佐々木敏彦, 大津雅亮, コーテッド超硬工具による工具回転型パニング加工—工具表面特性が仕上げ面性状に及ぼす影響と工具摩耗形態の解明—, *精密工学会誌*, Vol. 83, No. 7, pp. 694-700, 201707. DOI: 10.2493/jjspe.83.694
- 5) Lars Hiegemann, Christian Weddeling, Noomane Ben Khalifa, A. Erman Tekkaya, Prediction of roughness after ball burnishing of thermally coated surfaces, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 217 (2015), pp. 193-201. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.11.008