

金型材料の被切削性に関する研究

機械金属室 國吉 和男
比嘉 達二*
上田邦太郎*
糸村 昌祐**
新城 祐功***

1. 緒 言

県内の工芸産業の生産高は年間80億円で、そのうち陶器とガラスが24億円の生産額を示し観光産業の重要な位置を占めているが¹⁾、その生産はほとんどが伝統的技術による成形で職人に頼った手作りが主体である。従って生産コストが一般的に高く、中量（百～数百個程度）を生産する技術が欠落しているために中量の受注に対して納期的対応が困難であることや、量が増えることで求められる品質の安定化や高品質化への展開が十分ではない。

一方金型はデザイン、設計情報を元に機械加工を中心とした多様な加工技術で加工される、少種多量製品の生産に欠くことのできない重要な道具であるが、地域工芸品のように3次元自由曲面が多用され、複雑な形状で多種少量生産される製品の場合は金型の納期やコストに問題があり積極的に金型を使用するという手法は採用されていない。

すなわち設計図面ではなく、美術工芸家のイメージで創作された完成品をモデルとして、それから直ちに金型を作製し、製品を生産するいわゆるリバースエンジニアリングシステムの技術が確立され、しかも金型発注から製作、納品までの時間が短く、安価に金型が得られれば、中小企業が多い工芸品製造業にとっては朗報である。

本研究は地域工芸品の琉球ガラスのプレス成形用金型の加工を目標に、切削加工が容易で短時間加工が可能でかつ、安価な材料を選択するために、鋳鉄、軟鋼、合金鋼の3種類を用い、3次元自由曲面形状の切削加工を想定して、ボールエンドミル工具を使った加工実験を行った。得られた知見を以下に報告する。

2. 切削分力の検討

2-1 実験方法

金型を切削加工によって製作する場合の加工時間、工具寿命等を検討するため、ボールエンドミルを切削工具とし、フライス盤（池田工機株式会社V-400）とマシニングセンタ（ヤマザキマザック株式会社MAZATECH V-550）を用いて実

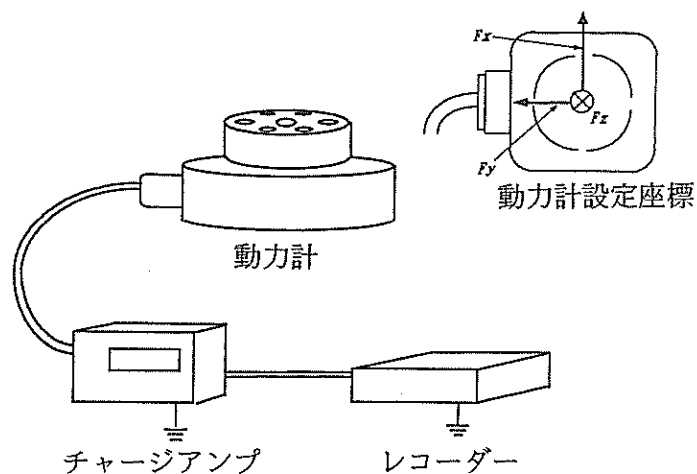


図1 切削分力測定装置の構成と動力計設定座標

*：琉球大学工学部機械システム工学科学生

**：琉球大学工学部機械システム工学科

***：沖縄鋳鉄工業株式会社

験を行った。

切削分力 (F_x , F_y , F_z) の測定は図1に示す切削分力測定装置 (日本キスラー社製) を用いた。同装置は4成分動力計 (Type 9272)、4チャンネルチャージアンプ (Type 5019A) 及びレコーダで構成されている。図2に示すように、フライス盤又はマシニングセンタのテーブルに、工具動力計を固定し、治具を介して動力計に試験片を取り付ける。それぞれの切削条件において、ボールエンドミルによる一列溝加工あるいはピッチを変化させて平面を切削したときの切削分力を測定する。

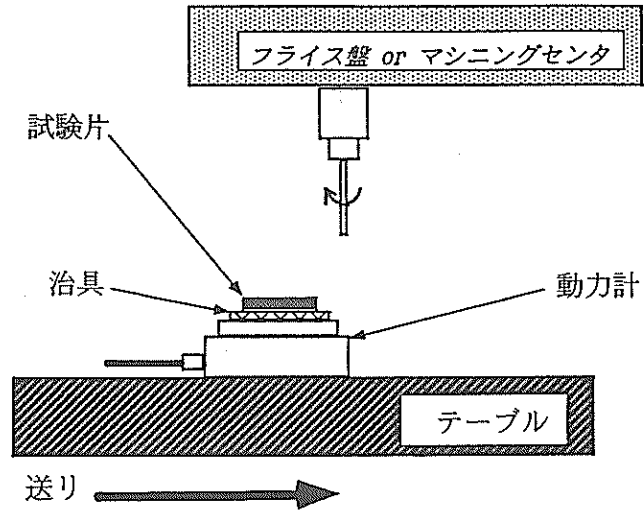


図2 工具動力計及び試験片の取り付け

表1 素材の組成 (mass%)

名称	JIS 記号	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
ねずみ 鋳鉄	FC250	3.57	3.10	0.48			
軟鋼	SS400	0.17	0.30	0.88			
合金鋼	SKD61	0.36	0.98	0.48	5.03	1.15	0.97

今回使用したフライス盤は回転数 (最大回転数 1,350rpm) を切り替えるタイプであり、マシニングセンタは切削速度 (材料に対して切削速度を設定すると適切な回転数が決まる: 最大回転数 3,500rpm) を設定するタイプである。

実験に使用する素材としてねずみ鋳鉄、軟鋼、合金鋼の三つを選択した。これらの素材の組成を表1に示す。素材から加工した切削分力測定用試験片の形状・寸法を図3に示す。

三次元自由曲面形状の切削を想定しているため、切削工具は図4に示すように切削面が球面となっている超硬コーティング2刃ボールエンドミル (OSG社製: FX-MG-EBD) を使用した。

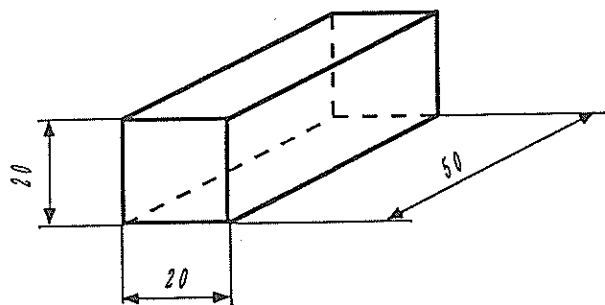


図3 切削分力測定用試験片の形状と寸法

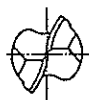


図4 ボールエンドミルの形状

(a) 切削条件

加工時間を短くするためできるだけ切り込みを大きくした高速切削で、なおかつ工具寿命が長くなるような条件を検討することとした。フライス盤での切削条件を表2、マシニングセンターでの切削条件を表3に示す。いずれもFC250は切削油を使用せず、SS400及びSKD61は切削油として機械油SAE10を使用した。

表中の周速度は工具直径に対応したもので、切削面が球面になっているボールエンドミルにおいては、切り込み深さによって実際に切削している刃先部分の切削直径が異なるため、最大切削速度は表中の周速度よりも小さな値の中で変化する。すなわち、工具半径を r 、切り込み深さを d としたときの最大切削円半径 r' は次式で示される。

$$r' = \sqrt{d(2r-d)}$$

表2 切削条件 (フライス盤による切削)

工具直径 D (mm)	回転数 N (rpm)	テーブル送り F (mm/min)	周速度 V(m/min)	一刃当たりの送り Ft (mm)	切込み深さ z (mm)
10	1,350	250	42.39	0.093	0.3
5	1,350	140	21.20	0.052	0.2

注) 回転数を初めに設定。工具直径×回転数× π で周速度を計算した。

表3 切削条件 (マシニングセンタによる切削)

工具直径 D (mm)	回転数 N (rpm)	テーブル送り F (mm/min)	周速度 V(m/min)	一刃当たりの送り Ft (mm)	切込み深さ z (mm)
10	3,500	909	110	0.26	0.5

注) 周速度を初めに設定。周速度/工具直径/ π で回転数を計算した。

(b) 切削ピッチ

表2のフライス盤の切削条件に切削ピッチを加えたのが表4の条件である。初めに1列の溝切削を行い、次に2列目の加工を行う。このとき、表4に示すように、工具径 $D=10\text{mm}$ に関しては、1, 2, 3および4mmと1mmずつ、工具径 $D=5\text{mm}$ に関しては0.5, 1.0, 1.5および2.0mmと0.5mmずつピッチを増やして加工し、そのときの切削分力を求めた。

表4 切削ピッチを変えた切削条件

工具直径 D (mm)	回転数 N (rpm)	テーブル送り F (mm/min)	周速度 V(m/min)	一刃当たりの送り Ft (mm)	切込み深さ z (mm)	ピッチ P (mm)
10	1,350	250	42.39	0.093	0.3	1
5	1,350	140	21.20	0.052	0.2	0.5

2-2 実験結果

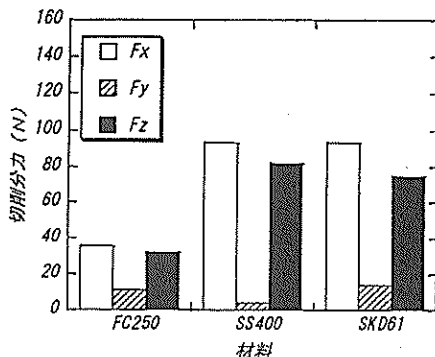
(b) 切削分力

フライス盤を使用し、切り込みを0.3mm及び0.2mmとしたときの切削分力の測定結果を、図5及び図6に、またマシニングセンタを用いた場合の切削分力を図7にそれぞれ示す。

これらの図からわかることは、FC250、SS400及びSKD61のうち切削分力が最も低い値を示しているのはFC250である。よって、一般的に言われているよう鑄鉄の被削性が優れていることが明瞭である。また、フライス盤においてはSS400の方が高い値を示しているのに対して、マシニングセンタにおいてはSKD61の方が高い値を示している。これは、切削速度と材料の性質に関係があるものと考えられる。

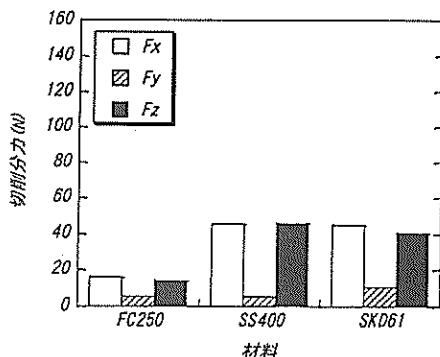
今回使用したボールエンドミルは180度離れた2枚刃であり、1枚の刃が材料を削っているとき、もう一方の刃は削っていないことになる。すなわち切削分力に現れるデータは、切削中の時間を拡大して考えれば単刃切削のデータとみなされる。図8は切削分力の座表系を示したもので、図に示したように切削分力の正方向を考えると、刃が試験片に切り込み始めるときは、上向き削りで F_y は正の値をとるが、中央部を過ぎると下向き削りとなって F_y は負の向きになる。すなわち F_y は正・負の向きを考慮すると、 $0 \rightarrow$ 正の最大 $\rightarrow 0 \rightarrow$ 負の最大 $\rightarrow 0$ と変化する。²⁾

一方切削分力 F_x はテーブル送り方向に対して垂直方向にかかる分力であり、図8の切削分力の方向から常に正であって、切り込み始めの0から正の最大値を示した後、減少し0となる。 F_z は材料を押し付ける力の反力であり常に正である。各材料の切削分力はいずれも $F_x > F_z > F_y$ となっており F_x が最大、 F_y が最小であった。



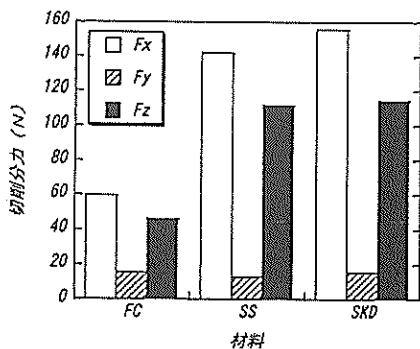
工具直径 D=10mm
回転数 = 1,350rpm
テーブル送り = 250mm/min
切り込み深さ = 0.3mm

図5 切削分力 (フライス盤)



工具直径 D=5mm
回転数 = 1,350rpm
テーブル送り = 140mm/min
切り込み深さ = 0.2mm

図6 切削分力 (フライス盤)



工具直径 D=10mm
回転数 = 3,498rpm
テーブル送り 909mm/min
切り込み深さ 0.5mm

図7 切削分力 (マシニングセンタ)

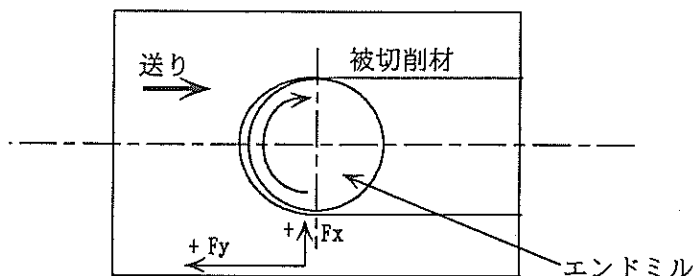


図8 切削方法及び切削分力座標系

(b) 切削ピッチと切削分力

図9は切削分力測定装置で測定した記録の例である。各分力ともピーク値は激しく変動し中にはマイナスまで変化する場合もあったので、変動幅を明確に表示するために黒塗りで示し、安定した分力値を白抜きの棒グラフで示した。

各素材毎に工具径の違いによる切削ピッチと切削分力の関係について整理し、図10と図11に示す。工具径5mmと10mmでは径が大きいほど切削分力は大きく、素材ではFC250<SKD61<SS400の順に切削分力が大きかった。

また切削分力 F_x と F_z は切削ピッチが大きくなるにつれて、切削面積が増えるために切削分力も大きくなっている。しかし切削ピッチが加工の最大切削円半径(r')を超えれば溝状切削と変わらないので、切削分力は一定の値になる傾向が見られる。

F_y については図12から分かるように、ピッチが小さいときは、プラス方向分力(黒塗り)よりマイナス方向分力(斜線部)が大きいため、データとして現れる切削分力はマイナス方向分力である。しかし、ピッチが大きくなるにしたがってプラス方向分力が増え、溝直径を超えるときには双方の方向分力は打ち消し合い、テーブル送りによる力だけがデータに現れるのであろうと考えられる。

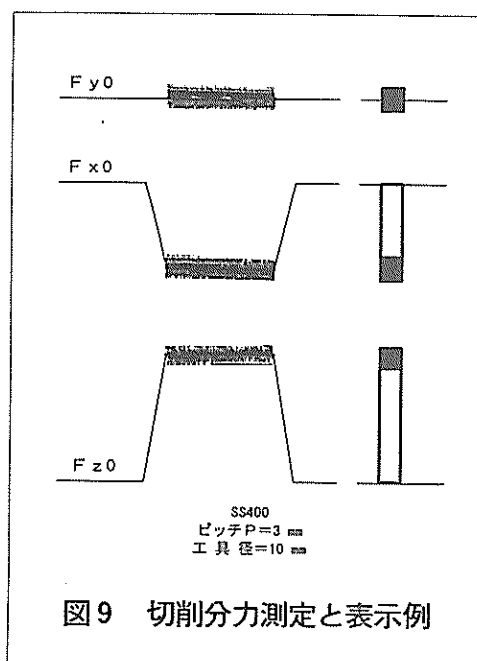


図9 切削分力測定と表示例

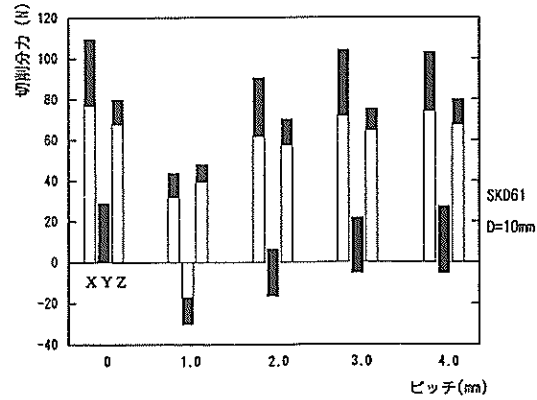
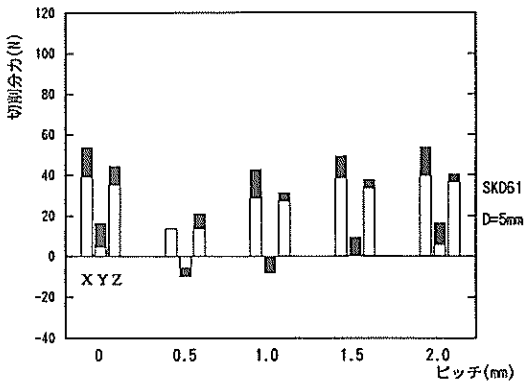
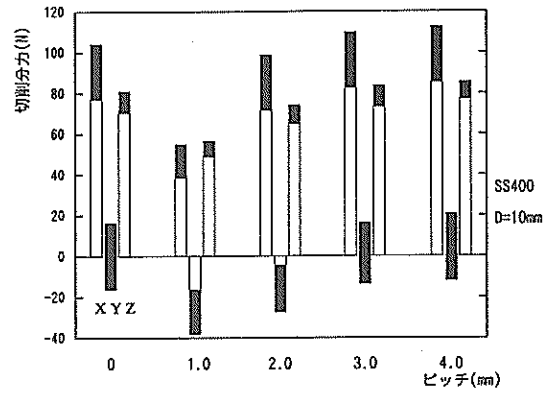
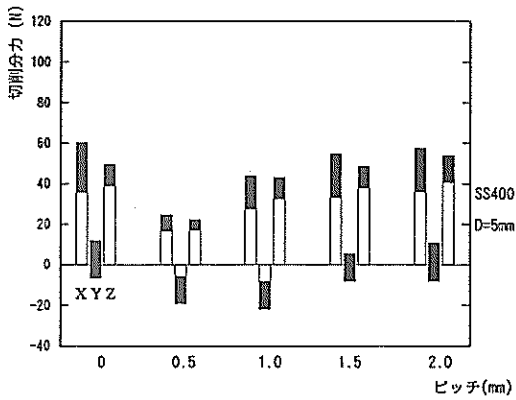
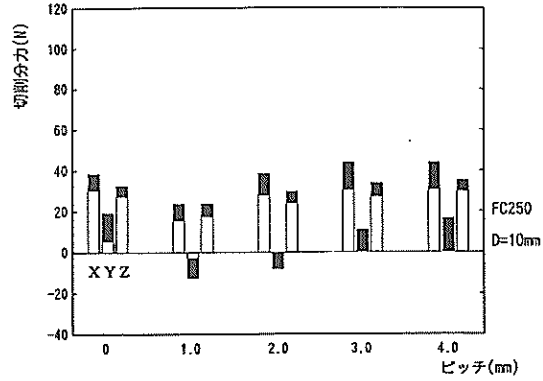
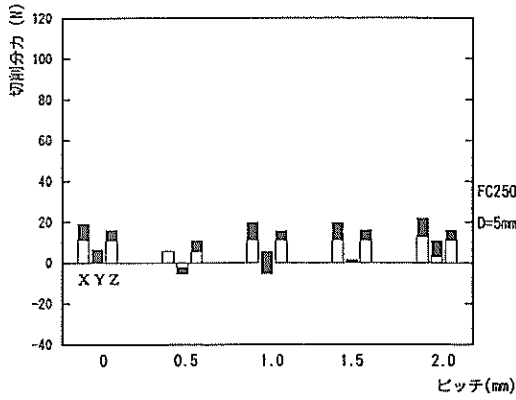


図10 ピッチと切削分力の関係 (D=5mm)

図11 ピッチと切削分力の関係 (D=10mm)

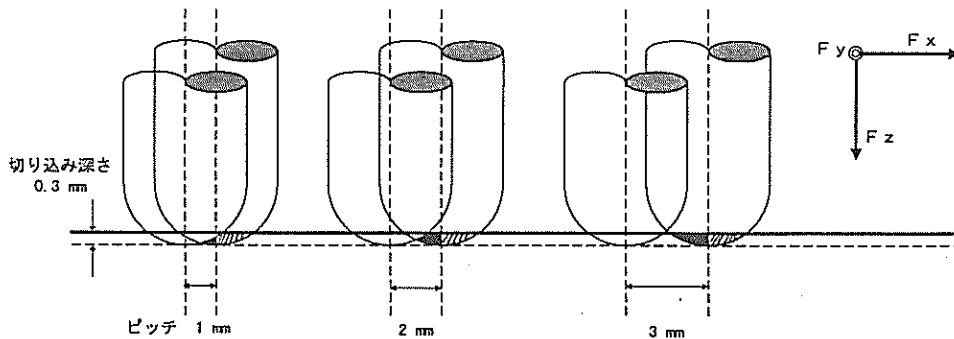


図12 ピッチと切削断面積の変化

3. 工具摩耗の検討

3-1 実験方法

マシニングセンタを用いて長時間連続切削した場合の工具摩耗の検討を行うため、図13に示す形状・寸法の3種類の金型素材を試験片とし、図14に示すような切削経路のプログラムを作り、ピッチ、切り込み深さなどの切削条件を変えて、所定深さまで連続切削を行う。

切削後の工具及び被削材の表面状態の観察には下記の2装置を使用した。

- ①株式会社 東京精密機械の輪郭形状測定機（コンタレコーダ40型）：加工面の表面形状を切削面に平行方面（X軸方向）を20倍、切削面に垂直方向（Y軸方向）を100倍に拡大して測定する。
- ②高精細デジタルマイクロスコープ（KEYENCE・VH6300）：切削工具の刃先および被削材の表面を観察する。表5に平面を連続切削するときの切削条件を示す。ピッチと切り込みの深さを変えて切削し、所要の深さまで切削するのに要した時間を表の末尾に示してある。

3-2 実験結果

表5で示した実験分類(b)の切削条件で、深さ36mmまで切り込んだ時の工具刃先の写真と被削材の表面の形状を図15に示す。

鋳鉄（FC250）を切削した場合、刃先に構成刃先らしきものが付着しており、その影響が被削材の表面形状をわずかに荒れたものになっている。しかし3種類の被削材の中では、最も表面形状は規則正しかった。

軟鋼（SS400）を切削した場合は、刃先形状に目立った変化は見られないが、被削材自体が軟らかいため、表面状態は鋳鉄よりも凸凹が見られる。

合金工具鋼（SKD61）を切削した場合は、刃先に欠損が見られ、そのために表面形状の荒れが3種類の被削材の中では最も悪かった。

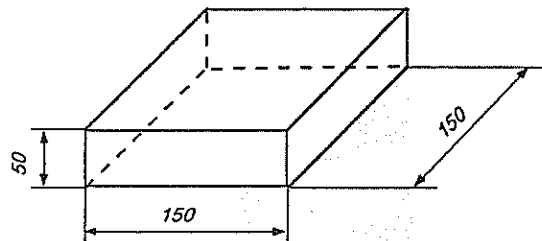


図13 長時間切削実験のための試験片形状と寸法

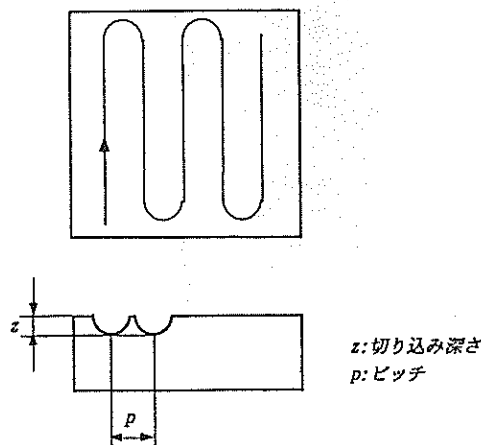


図14 マシニングセンタによる連続切削経路

表5 マシニングセンタによる平面連続切削の条件

実験分類	被削材	ピッチ (mm)	切込み 深さ z (mm)	切削面 の数	切削の 全深さ (mm)	工具直径 (mm)	周速度 (m/min)	テーブル送り 速度 (mm/min)	全深さ 切削時間 (hour)
(a)	FC250	1	0.3	3	0.9	10	110	909	1
(b)	FC250 SS400 SKD61	2	1.2	30	36.0				6
(c)	FC250	3	2.4	15	36.0				2

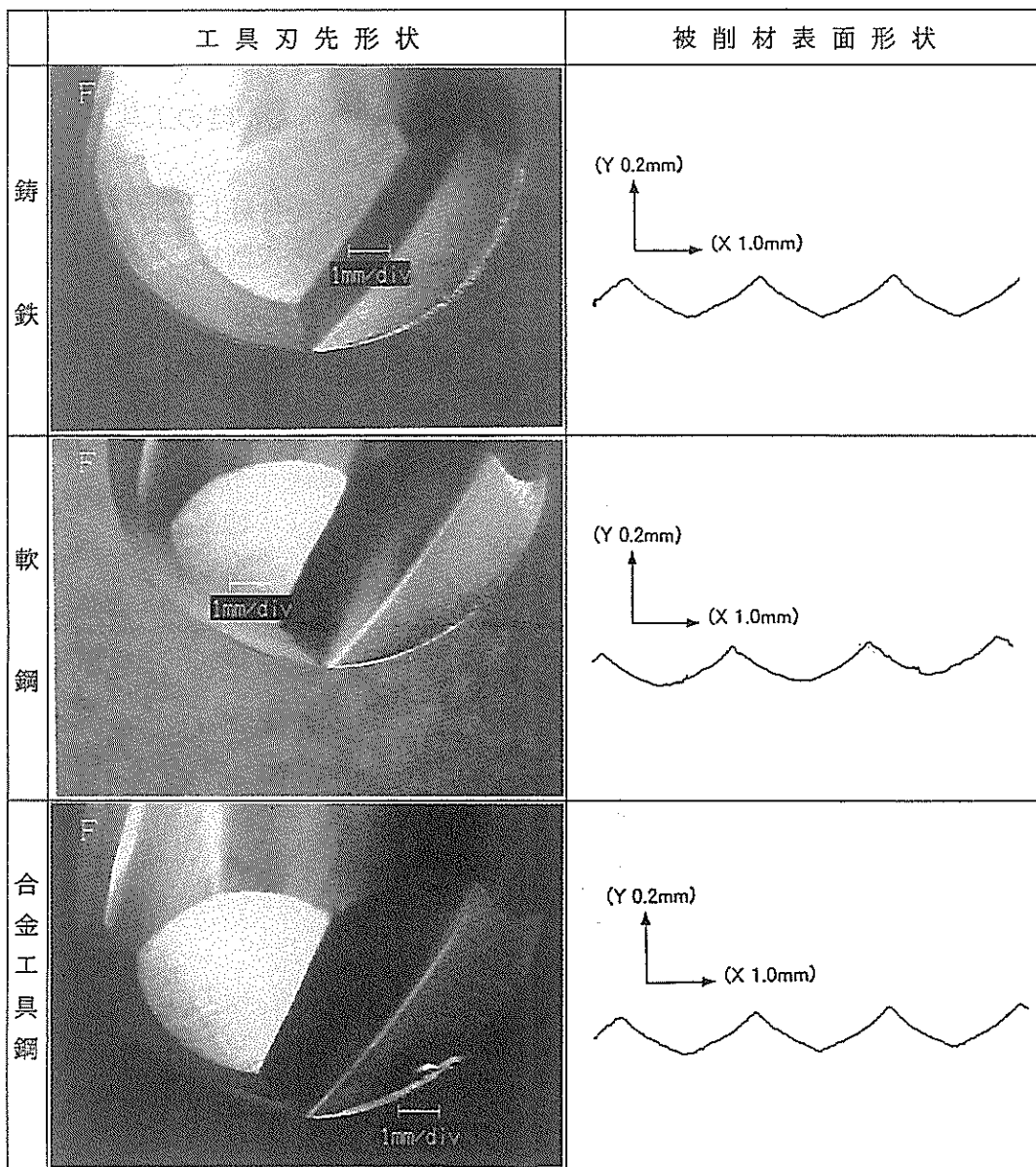


図15 連続6時間切削後の刃先と最終被削面の形状

4. 結言

短納期で低コストのガラス成形用金型製作という観点から、鑄鉄（FC250）、軟鋼（SS400）、合金工具鋼（SKD61）の3種類の材料に対して、超硬ボールエンドミル工具を使用し、フライス盤及びマシニングセンターで切削実験を行った。切削分力、工具摩耗、被削材表面状況等を検討した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 切削分力はテーブル送り方向に垂直な分力： $F_x >$ テーブル面からの反力： $F_z >$ テーブル送り方向分力： F_y となる。
- 2) 切削抵抗は3種類の材料中で鑄鉄が最も小さい。
- 3) 回転数、テーブル送り速度、切り込み深さのいずれも大きくなってくると、軟鋼の切削抵抗が合金工具鋼のそれよりも大きくなる。
- 4) 切削ピッチが小さいときは、 F_y は負の方向を示す。
- 5) 同一条件で切削すると、硬い合金工具鋼を切削する場合は工具寿命は最も短く、工具の欠損とともに、被切削面の状況も悪くなる。
- 6) 工具寿命や、加工時間の短縮、被切削面の状況等から判断して、ガラス金型用材料には鑄鉄が適している。

この結果は、現用されているプレス成形ガラス用金型材料として鑄鉄が用いられている状況の再確認となった。今後は選定された鑄鉄素材を10,000～30,000rpmの高速マシニングセンターや新規工具等を用いて切削加工し、さらに効率よい金型加工条件の検討を目指した研究を展開する。

参考文献

- 1) 沖縄県観光文化局工芸産業課：平成7年度工芸産業実態調査の概要；平成8年12月
- 2) 洞口巖、橋本正俊：エンドミル加工の切削機構について（3次元切削機構の解析—Ⅳ）；豊田工業高等専門学校研究紀要、第21号（1988）、pp.21—26

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。