極小径超硬コーティング エンドミル

Coated End Mill for Micromachining

赤松猛史* Takeshi Akamatsu

ナノテクノロジー関連産業は2010年には30兆円近い規模に増えることが複数の調査機関から報告されている。その中でもバイオエンジニアリングの分野で実用化が進められているMicro-TAS (Micro Total Analysis System)は,次世代の新技術製品として注目されている。従来これらの作製には,LIGAプロセス(X線リソグラフィー,電鋳,モールドによる微細部品製作プロセス)が用いられているが,これらの手法は高分解能であり,かつ高アスペクト比を持つ構造体が得られる手法として有力である反面,設備が大型で高価なうえに,作製できる構造体が2次元形状に限定される。そこで,3次元的で自由な構造体を精密に形成するための新手法として切削加工法の高度化に取り組んだ。

すなわち,著者らは,工具メーカーとして広範な角度から工具の改良と最適化を図り,従来は困難だった刃径サイズが 0.03 mmの極小径超硬コーティングエンドミルを開発し商品化に成功した。本報は,この極小径エンドミルを用いた微細切削加工法の検討経緯と結果について報告するものである。

Nano-technology related industry is predicted to grow into a huge industry valued at approximately 30 trillion yen by 2010. The area of biotechnology called micro total analysis system (Micro-TAS) is gradually attracting wide attentions and is considered to be the next-generation technology. However Micro-TAS requires extremely large equipments and high costs, but can only produce a 2D structure. Therefore, the cutting process is considered to be one of the most important technologies to overcome the current problems and create a flexible 3D structure. Authors have made every effort to optimize cutting tools and have succeeded in developing a coated end mill with a diameter of 0.03 mm. The characteristics of micromachining produced by using this end mill are presented in this paper.

● 緒言

今日の微細加工技術には目を見張る進歩があり,関連市場はナノテク市場の拡大とともに大きく成長する可能性を秘めている。特に,リソグラフィ技術を応用した微細加工技術は急速に進歩しており,ナノインプリントや導光板金型,医療分野におけるバイオチップやMicro-TAS(Micro Total Analysis System)などのMEMS(Micro Electro Mechanical System)技術がそれにあたる。これら露光技術を用いた方法には,加工工程数が多いため製作期間が長く,設備そのものも高価だという難点があるい。そこで,短期間,低コストでの製作を可能とするため,露光技術を用いた加工を切削技術に代替し,上記問題点を解決することができる微細加工用エンドミルの開発が有力であると考えられる。

この分野では,複数の大学や研究機関で,微細加工用 エンドミルの研究開発が進められているものの,いまだ 多くの克服すべき課題を抱えている。すなわち,微細切 削加工を行う上で以下の課題が挙げられる。

- (1) 微細切削加工を行うためのエンドミルの工具径が極めて小さく,複雑な刃型の作製が困難である。
- (2)研削面が粗いと、研削による凹凸(スクラッチ痕)を起点とする亀裂によって破断しやすい。
- (3)被削物が単純な形状の場合,切削性能が急激に劣化して切削後にバリが発生するなど,要求品質や精度に耐えうる加工が困難になる。
- (4) そのほかにも微細切削加工方法の細部が確立されていないため、高精度な加工が困難である。

大学などで研究されている微細工具の刃型形状は,一 般的にエンドミルとして定義される刃型形状と異なる単

^{*}日立ツール株式会社 野洲工場 博士(工学)

^{*}Yasu Works, Hitachi Tool Engineering, Ltd.

純な形状が採用されているので,加工後のバリの問題を はじめ,多くの課題が積み残される。すなわち,微細切 削加工を実用化するためには,極小径のエンドミルの開 発が必要であり,その切削現象の把握を行い,加工方法 を確立することが重要である。

そこで本報は,微細切削加工の実用化に向けて,極小 径エンドミルの工具形状の最適化をめざし,その加工現 象を実験的に解析することで,微細切削加工法の確立を 試みたので,その結果を報告するものである。

2 極小径エンドミルの切削特性

2.1 切削環境が性能に及ぼす影響

工作機械の主軸は高速回転化が進み、さらに超硬エン ドミルの耐酸化性が向上したことで,切削速度が200~ 400 m/min, あるいはそれ以上の切削速度で加工するこ とも可能となってきた2)3)。ところが主軸の回転速度は 高々毎分50,000回転というのが実用レベルである。そう なると刃径サイズが 0.1 mm以下のエンドミルを使用 するとその切削速度は一般的な切削の1/20,もしくはそ れ以下となる。そこでまず高速域と低速域での切削環境 の違いについて実験的な確認を行った。

2.1.1 実験方法

本実験に使用した供試エンドミルの仕様を表1に示す。 さらに実験条件を表2に示す。一刃送りを一定にし,切 削速度を変化させたときの切削状態の変化について比較 することで極小径エンドミルを用いた切削環境の状態を 把握することができる。

表 1 供試エンドミルの仕様

Table 1 Specifications of cutting tool



工 具 刃 径 (mm)	1
刃 長 (mm)	2
シャンク径 (mm)	4
全 長 (mm)	50
超硬母材	微粒子超硬合金
コーティング	TH(TiSiN系)

表 2 実験条件

Table 2 Cutting conditions

回 転 数 (min · 1)	1,600 and 20,000
切削速度(m/min)	5 and 70
送り速度(mm/min)	45 and 560
一刃送り(mm/tooth)	0.014
切込み量(mm/回)	0.05
加工深さ(mm)	1
被 削 材	HPM-1 (HRC40)
切削方式	Wet

2.1.2 実験結果および考察

図1に切削初期および切削距離が20 mに至った点で の各切削条件別の工具摩耗状態を示す。切削初期におい ては摩耗形態の差がほとんど認められない。一方,切削 距離が増大すると,切削速度が小のエンドミルは刃先が 大きく欠損していることがわかる。それに対して切削速 度が大の条件では欠損を起こすことなく安定した摩耗形 態と言える。一般的に切削速度が大きくなると切削抵抗 は増大するが4),切削性能に関しては,ある領域までは切 削速度大の方が向上すると言われているり。これは切削速 度を大きくすることで,同じ切削除去量を加工する際の 切れ刃接触時間が短くなるためである。逆に今回のよう に切削速度が極めて低い条件下で加工すると切れ刃の接 触時間が長くなるため切削速度が5 mm/minのエンドミ ルは欠損を引き起こしたと考えられる。

極小径エンドミルの切削においても同様の現象が起き ることが予想され、かなり過酷な環境で加工をする必要 がある。

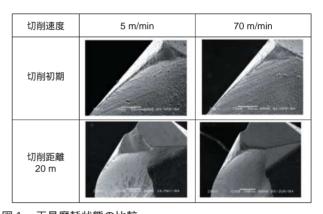


図1 工具摩耗状態の比較

Fig. 1 Comparison of tool wear.

2.2 微細切削加工におけるねじれ形状の影響

上述のとおり微細切削加工の環境は,一般的なエンド ミルを用いた切削加工の場合と大きく異なる。また多く の大学で研究されているような単純形状では実用化は困 難である。そこで微細切削加工に対応できる工具刃径が

0.1 mm以下のねじれを有したエンドミルの研削技術 を確立する必要がある。そこで以下の諸点について研削 方法の改良や検討を行い,図2に示すような工具刃径が わずか 0.03 mmの極小径超硬エンドミルの研削に成功 した。

- (1) スピンドル構造の検討
- (2)機械の熱変位
- (3)機械振動の影響
- (4) 砥石のドレッシング方法
- (5) 砥石の摩耗,研削条件

通常,刃径が 1 mm以下の小径エンドミルの場合, 刃先先端エッジがチッピングを起こしやすいため, あらか じめ刃先にフラットな面を設ける処理を行うケースが多 い。しかし,そうすることで刃先強度は上がるものの,

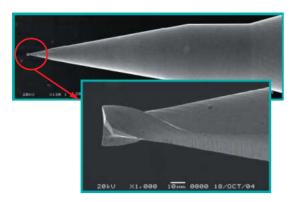


図2 極小径エンドミルの拡大写真

Fig. 2 Microscopic view of end mill.

切削抵抗が上がりやすいという難点もある。また極小径 エンドミルで微細切削加工を行う場合には,一回の切込 み量が極めて小さくなるためフラットな面を設けると, ねじれを有さない直刃の部分で加工をすることになり, 不具合である。

2.2.1 実験方法

表3に示す工具刃径が 0.04 mmの2種類の極小径エンドミルを用いて,微小リブ溝切削を行った。その実験条件を表4に示す。2種類の供試エンドミルは,一つは刃先エッジをシャープに形成し,もう一つは刃先エッジにフラット面を設けた。

満切削時の一回の切込みを0.004 mmとしたのでフラット面を設けたものは直刃で切削することになる。つまり本実験では,ねじれの有無による微細切削加工時の切削現象の差異が比較できる。

表3 供試エンドミルの仕様 (タイプ1,2)

Table 3 Specifications of cutting tool (Type1 and 2)

			()	,
刃	径(mm)	0.04		
刃	長(mm)	0.06		
先端之	フラット有無	なし(タイプ1), あり(タ	イプ2)
シャン	ノク径 (mm)	4		
ねじ	れ角	30 °		
母	材	微粒子超	硬合金	

表 4 実験条件(タイプ1,2)

Table 4 Cutting conditions (Type1 and 2)

40,000
5
100
0.00125
0.004
0.04
Cu (無酸素銅)
Wet

2 . 2 . 2 実験結果および考察

図3に切削後の加工ワーク上面バリ状態の比較を示す。 この結果から,フラットなしタイプであるタイプ1はタイ プ2に比べてバリの発生が抑えられていることを確認できた。**図4**に超深度形状測定顕微鏡(KEYENCE社製:VK-8500)を用いて測定した3次元の形状データを示す。同図からもバリの状態には明らかな差が確認できる。また,タイプ2は直刃で切削しているのに対し,タイプ1はねじれ刃で切削しており,このことによって食い付き性の面での差が生じていることから,ねじれの効果がバリの抑制効果に起因していることは明らかである。

バリが発生するメカニズムに関しては多くの報告がある^{28) 29) 30)}。連続切削の場合,切り屑が生成し被削材が変形し始めると塑性変形領域がエッジに発生し,ある領域で大変形域とともにバリが生成されると言われている。3次元的にバリが生成されるメカニズムも,基本的には断続的に発生するバリが連続的に残る現象であり,上面に発生しているバリは切削初期の切込み量が浅い状態で生成されると考えられる。すなわち,タイプ1のエンドミルに比べてタイプ2のエンドミルはフラットな面で加工する分,大変形域が発生しやすく,大きなバリが発生したと考えられる。

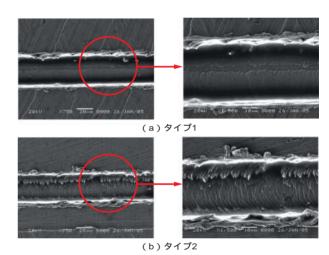


図3 加工ワーク上面バリの比較

Fig. 3 Comparison of microscopic cutting face and burr.

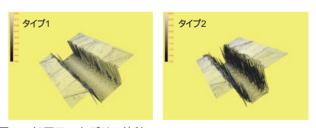


図4 加工ワークバリの比較

Fig. 4 Comparison of visualized cutting face and burr.

2.3 微細切削加工におけるエンドすくい角の影響

微細加工技術の分野は微細流路や電極をマイクロ加工 したチップの上で,化学反応や化学分析を行うMicro-TAS,バイオ技術や医療から,環境の監視や薬品の合成 に至るまで広範な適用が期待されており,その加工物に は厳しい精度が求められている。またバリが加工ワーク に生成すると,たとえばマイクロリアクターなどのワークを張り合わせる作業が困難となる。 微細切削加工を行う上ではバリ生成の抑制は極めて重要である。

そこで,エンドすくい角がバリの抑制および切削現象にどのような影響を及ぼすか確認検討した結果について述べる。

2.3.1 実験方法

微細切削加工においては,一回の切込み量が小さいため,エンド部の形状によって切削性能が大きく変わることが予想される。特にエンドすくい角は切削時の食い付き性という観点から重要な要素である。そこで表5に示す工具刃径が 0.2 mm,ねじれ角 30° ,エンドすくい角がそれぞれ -5° , 10° である2種類のエンドミルを用いて,前節と同様に微小リブ溝切削を行った。実験条件を表6に示す。本検討においては,切削状態をより細かく観察するために図5のように機械主軸に専用治具でCCDカメラ(キーエンス製 245倍)を取り付けた。さらにエンドすくい角の影響が切削時にどのような現象を引き起こしているかを検証するために,表7に示す工具刃径が4 mm,ねじれ角 30° ,エンドすくい角がそれぞれ -5° , 10° である2種類のエンドミルを用いて,アクリル板を切削した。エンドミル切削時の底面視での現象を観察

表 5 供試エンドミルの仕様(タイプ3,4)

Table 5 Specifications of cutting tool (Type3 and 4)

		0 ()1
刃	径(mm)	0.2
刃	長(mm)	0.3
エンド	すくい角	- 5 (タイプ3) , 10 (タイプ4)
シャン	ク径 (mm)	4
ねじね	n 角	30 °
母	材	微粒子超硬合金

表 6 実験条件 (タイプ3,4)

Table 6 Cutting conditions (Type3 and 4)

rable o Galling containents (Types and Ty		
回 転 数 (min · 1)	40,000	
切削速度(m/min)	25	
送り速度 (mm/min)	100	
一刃送り (mm/tooth)	0.00125	
切込み量(mm/回)	0.02	
加工深さ(mm)	0.2	
被 削 材	Cu (無酸素銅)	
切削方式	Dry	



図5 CCDカメラを用いた実験治具

Fig. 5 Experimental equipment with CCD camera.

するため、**図6**に示すように治具と旋盤を配し、被削材であるアクリル板を挟んでCCDカメラを設置した。

表 7 動態観察用供試エンドミルの仕様

Table 7 Specifications of cutting tool for movement scope

刃径 (mm)	4
刃長 (mm)	12
エンドすくい角	- 5 (タイプ5) , 10 (タイプ6)
	1
 ねじれ角	30 °
母材	ハイス

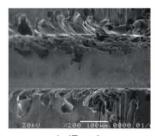


図6 旋盤を用いた実験治具

Fig. 6 Experimental equipment with lathe.

2.3.2 実験結果および考察

図7に切削後の加工ワーク上面バリ状態の比較を示す。 エンドすくい角が - 5 のタイプ3のエンドミルでの加工面 には多くのバリが発生している。一方,エンドすくい角 が10 であるタイプ4のものは上面のバリがかなり抑制さ れている。



zoku kapa lapun sheo ai

(a)Type 3

(b)Type 4

図7 加工ワーク上面バリの比較

Fig. 7 Comparison of microscopic cutting face and burr at upper side of work.

両条件の切り屑を詳細に比較観察したところ生成形態の差異が確認できた。そこでCCDカメラを用いて切削中の動態について視覚的な比較検討を試みた。切り屑生成の様子を図8に、1パス切込み時の底面性状の状態を図9に示す。タイプ3のエンドミルを用いた場合、切り屑が連続的に生成されて排出されている様子が確認できる。このことから、映像でははっきりと確認できないが、外周

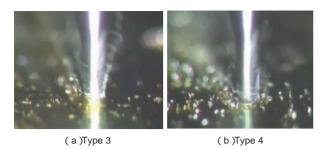


図8 切削中の切り屑生成状態

Fig. 8 Movement appearance of chip discharge.

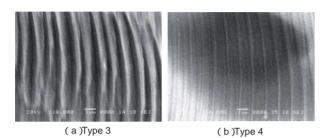


図9 銅板の加工面性状の比較

Fig. 9 Comparison of copper board cutting face.

刃だけでなくエンド刃でも切り屑が生成されていること が想定される。

ここで2次元せん断面モデルを**図10**に示す。エンドすくい角が負のネガティブ刃型の場合,2次元切削として考えるとポジ刃型に比べてせん断角は小さくなる((式1))。その分切り屑は押しつぶされるように生成され,工作物表面へ流れやすくなる。そのため,送り方向前後に振動を繰り返すような工具軌跡をともなうと,切り屑は連続的に(連なって)形成される結果となることが考えられる。

$$tan = \frac{r_c \cos}{1 - r_c \sin}$$
 (1)

ここに, $r_c = t_1/t_2$: せん断角 : すくい角

tı:切込み量 t₂:切り屑厚み

である。

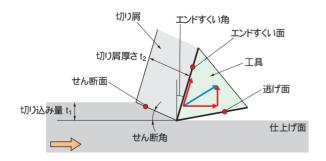
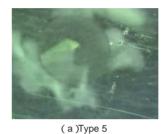


図10 2次元せん断モデル Fig. 10 2D shearing model.

上記現象をさらに細かく検証するために,不安定な状態を再現する。すなわちアクリル板を片持ちで保持してエンドミルで切削し,CCDカメラを用いて底面視で切削現象を観察した。切り屑の生成される状態をより詳細に確認するために,切れ刃は1枚とし切り屑がエンド刃で生成されるかどうかを観察した。**図11**に切削中の切り屑生成の様子を示す。

エンドすくい角が - 5 であるエンドミル (タイプ5)では,エンド刃中心方向まで切り屑が生成され,その切り屑が連なって上面へ流れていく様子が確認できる。エンドすくい角が10 であるエンドミル(タイプ6)では,エンド刃では切り屑は生成されず,外周刃で生成された切り屑が分断されて上面へ排出されていることが確認できる。





(a) Type 3

(b)Type 6

図11 切削中の切り屑生成状態

Fig. 11 Appearance of type5 and type 6 chip discharge.

以上,述べてきたように刃径が 1 mm前後の小径エンドミルと刃径が 0.1 mm以下である極小径エンドミルとの基本的な切削特性の差異を確認し,極小径エンドミルの切削現象について実験的に検証した。これらの知見に基づき以下に示すような,刃型の設計指針が得られた

- (1)銅のような非鉄関係の微細切削加工においては,エンドミルのねじれの効果が大きく,加工物のバリ抑制に大きな影響を及ぼす。
- (2)極小径エンドミルのエンドすくい角がネガティブ刃型の場合,切削中に発生する切り屑は連なって形成され加工物のバリの状態を悪化させる。これは切削中,エンドミルが「食い付き」時に振動を繰り返し,送り方向前後に振られながら加工しているためと考えられる。これに対して,エンドすくい角が正のポジティブ刃型の場合は,切り屑が分断されて生成され,バリの抑制が確認できた。

このようにして極小径エンドミルの最適形状を得ることにより,微細切削加工の安定化が可能である。

2.4 コーティング技術と脆性材料の微細切削加工

リソグラフィ技術を応用した微細加工技術は急速に進歩しており、それに平行してナノインプリントや導光板金型、また医療分野であるバイオチップやMicro-TASなどのMEMS技術による関連製品も充実してきているので、微細切削加工の対象製品を考える上でも上記関連製品は参照すべきであろう。特に医療分野であるバイオチップ、Micro-TASの材料はガラスが一般的に使用される77899ので、以下、ガラス加工についても検討を加える。

ガラスの微細切削加工を行う上で問題となるのが工具 の耐摩耗性と被削材側の精度である。ガラスの微細切削 加工においては工具の摩耗が極めて早い。また脆性材料 であるガラス側が切削中に欠けやすい。

超硬エンドミルの耐摩耗性を上げる目的で工具刃先に コーティングを施す技術は一般化しているが,極小径工 ンドミルにコーティング成膜を施すと、刃先のシャープ さを損ない,またマクロパーティクルが刃先に多く生成 されることとなりかえって問題である。そこでコーティ ングの最適化を行い,極小径エンドミルであっても刃先 のシャープさが維持でき、本来の皮膜の特性を維持でき るように工夫された新コーティング皮膜(マイクロTHコ ーティング)を開発した。図12に工具刃径が 0.04 mm の極小径エンドミルにコーティングを施した試料の表面 状態について示す。新コーティング皮膜は極小径エンド ミルにおいても刃先がシャープに維持されていることが わかる。

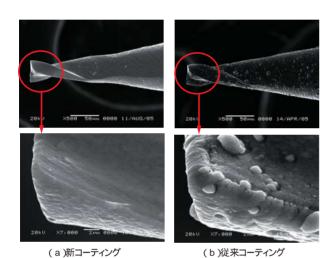


図12 コーティング表面状態の比較

Fig. 12 Comparison of coating surface conditions.

2.4.1 実験方法

新コーティング皮膜を施した極小径エンドミルを用い ガラスの微細切削加工を試みた。ガラスの微細切削加工 においてまず問題となるのは溝上面に発生するガラスの カケである。そこで切削条件の差異によってカケの状態 がどのように変わるか比較検討した。表8にエンドミル の工具仕様を示す。実験条件は表9に示す。ここでカケ

表8 ガラス加工用供試エンドミルの仕様 Table 8 Specifications of glass cutting tool

刃	径(mm)	0.1
刃	長 (mm)	0.15
シャンク径(mm)		4
ねじ	れ角	30 °
全	長(mm)	40
母	材	微粒子超硬合金
コー	ティング	マイクロTHコーティング

の状態を定量的に評価するため,画像処理により溝の面 積に対するカケの面積比率を求め、これを指標とした。ま たここでは,**図13**に示すような,水中でのガラス微細切 削とした10)11)。

2 . 4 . 2 実験結果および考察

図14に各条件で切削した加工ワーク上面の比較を示す。

表 9 実験条件(ガラス加工)

Table 9 Glass cutting conditions

回 転 数 (min · 1)	20,000
切削速度(m/min)	6.3
送り速度 (mm/min)	2 , 4 , 20 , 40 , 80
一刃送り (mm/tooth)	0.05 , 0.1 , 0.5 , 1 , 2
切込み量 (mm/回)	0.005
加工深さ(mm)	0.005
被削材	硼硅酸ガラス
切削方式	Wet

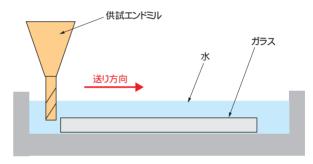


図13 ガラスの微細切削環境

Fig. 13 Conditions of glass cutting.

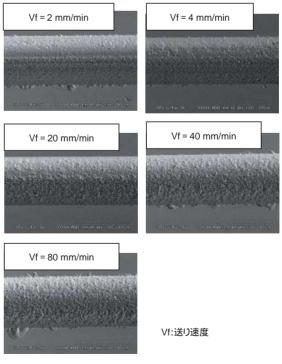


図14 ガラス加工面性状の比較 Fig. 14 Comparison of glass cutting faces.

同図からわかるように送り速度が遅くても上面のカケは発生しており、逆に速くてもカケが増加する傾向にある。ここで**図15**に示すように画像処理により、カケの面積を算出し、溝の面積に対するカケの面積比率として比較を行った。その結果を**図16**に示す。同図から、送り速度が20 mm/minの時に最もカケの状態が少なくほとんど発生していないことがわかる。また、水中でのガラス微細加工の加工後ワーク上面の状態を**図17**に示す。ガラスの切り屑は硬いため、切削中に切り屑でワーク表面を傷つけてしまう可能性がある。同図からわかるように、ワーク

図15 画像処理によるカケの定量的評価

Fig. 15 Chip value by image processing analysis.

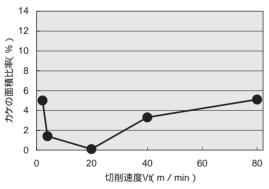


図16 カケの面積比率の比較

Fig. 16 Cutting speed dependence of chipping area.

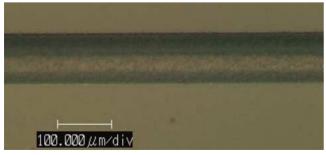


図17 加工面の状態

Fig. 17 Appearance of cutting face.

の上面のカケは全くなく加工面も比較的良好な結果が得られている。しかしながら切削底面部はこすれた加工面となっており,流体チップの実用で求められる精度までには至っておらず課題が残る。

❸ 極小径エンドミルの切削性能

3.1 光ファイバーの微細切削加工

図18に光ケーブル内部にある光ファイバーの表面に文字彫り加工を行った切削事例を示す。供試工具はノンコート品の極小径超硬エンドミルを使用した。光ファイバーの素材は樹脂系であるが、きれいに加工ができている。また加工後にこの光デジタルケーブルに光を照射すると文字を加工した部分だけに光が透過され、ネオンサインのように浮かび上がった。この文字高さはわずか0.25 mmである。これがネオンサインであれば世界最小だったであろう。

3.2 鋼の微細切削加工

図19にプリハードン鋼の微細溝切削事例を示す。供試工具はマイクロTHコーティングを施した極小径超硬コーティングエンドミルである。鋼についてもマイクロTHコーティングを施すことで安定した加工ができた。

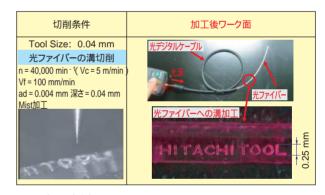


図18 加工事例1 Fig. 18 Cutting field 1.

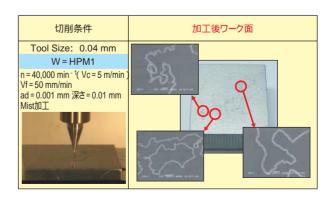


図19 加工事例2 Fig. 19 Cutting field 2.

4 結 言

微細加工技術は広範な分野で応用が期待されているが、 その中でも微細切削加工はコスト面,能率面でも大きな 可能性を秘めている。本研究では微細切削加工の実用化 に向けて,極小径エンドミルの工具形状を最適化し,そ の加工プロセスで起こる現象を実験的に解析することで, 微細切削加工法の確立を試みた結果、以下の結論を得た。 (1)極小径エンドミルのエンドすくい角がネガティブ刃 型の場合、切削中に発生する切り屑は連なって形成され 加工物のバリの状態を悪化させる。これはエンドミルが 「食い付き」時に振動を繰り返し送り方向前後に振られな がら切削加工していることによる。エンドすくい角がポ ジティブ刃型の場合は,分断された切り屑が生成され, バリの抑制効果が確認できた。

(2) ガラスの微細切削加工において,最適化した新コー ティング膜を被覆し,最適条件で切削加工を行うことに より加工上面部に発生するガラスのカケを抑制すること ができる。これを水中切削とした場合,切り屑の排出性 が向上し,冷却効果との相乗効果でさらに安定した加工 ができる。

⑤ 今後の展開

本研究の成果により、極小径超硬エンドミルの商品化 に成功し,微細切削加工の可能性が大きく広がった。 しかしながら、工具だけでは加工できないので、とりわ け本分野のように新しい加工分野を拓く場合に求められ る工具メーカーの役割は,単に工具を提供するだけにと どまらず,微細切削加工方法そのものを提案できる,す なわち切削技術として総合的に展開できることが望まし い。このような観点から,今後は受託微細加工も視野に 入れた技術展開を図りたい。

参考文献

- 1) 高野登: 砥粒加工学会誌, 第49巻第10号, (2005)
- 2) 高橋一郎,安斎正博:精密工学会誌,第65巻第6号, (1999)867.
- 3) 石川剛史:機械と工具, Vol.45 No.12, (2001)67.
- 4) 北嶋弘一, 赤松猛史:精密工学会春季大会講演論文 集,(2001)84.
- 5) 高橋一郎,安斎正博:砥粒加工学会学術講演論文集, (2006)227.
- 6)ツールエンジニア編集部編著:エンドミルのすべて 大河出版 (1988) 64.
- 7) 川堰宣隆,森田昇:精密工学会秋季大会学術講演論 文集 (2005)125.
- 8) 藤田博之:精密工学会誌,第70巻第9号,(2004) 1133.
- 9)秦誠一,下河辺明:精密工学会誌,第68巻第5号, (2002)657
- 10)松村隆,植木義人:精密工学会秋季大会学術講演論 文集 (2005)449.
- 11)松村隆,赤松猛史:精密工学会春季大会学術講演論 文集,(2006)365.



赤松猛中 Takeshi Akamatsu 博士(工学) 日立ツール株式会社 野洲工場