小径工具切れ刃プロファイルの光回折オンマシン計測に関する研究* (第 2 報, 極小径工具 ($\phi 300 \mu\text{m}$) 摩耗の測定評価)

カチョーンルンルアン パナート^{*1}, 三好 隆志^{*2}, 高谷 裕浩^{*2}
原 田 孝^{*3}, 砂金 総一郎^{*4}

On-Machine Cutting Edge Profile Measurement for Micro Milling Tool (2nd Report, Micro Endmill ($\phi 300 \mu\text{m}$) Wear Measurement and Evaluation)

Panart KHAJORNRUNGRUANG, Takashi MIYOSHI^{*5},
Yasuhiro TAKAYA, Takashi HARADA and Soichiro ISAGO

^{*5} Department of Mechanical Engineering and Systems, Osaka University,
2-1 Yamada-oka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

The extremely precise level of cutting work's demand has been increasing, recently. Therefore, the establishment of a supreme measurement technology for micro endmills during operating on ultra-precision machining center plays an important role in many micro fabrication industries. The "Diffraction Gauge Method", a novel measuring technique based on far-field laser diffraction, has been proposed to measure cutting-edge profiles of micro tools ($\phi < 500 \mu\text{m}$) with repeatability of better than 100 nm even though on-machine surroundings. In this paper, cutting-edge profile measurement of worn micro endmills ($\phi 300 \mu\text{m}$), which operated side-milling on graphite work material, is carried out. Agreement of the measured profiles with SEM image confirms the high accuracy of the measurement technique. Subsequently, the tool wear evaluations in various cutting lengths of micro endmills before and after cutting notify the relationship between increase in tool wears and cutting length. These experimental results verify the validity of our novel micro endmill measurement technique, which can be applied into ultra-precision machining center in the near future.

Key Words: Micro Endmill, On-Machine Tool Measurement, Wear, Cutting Tool, Cutting, Measurement, Optical Measurement, Cutting-Edge Profile, Laser Diffraction

1. 結 言

現在, マイクロ切削加工は, 高精度なマシニングセンターなどを用いて直径数 $100 \mu\text{m}$ の極小径工具により行われている。加工精度と生産性効率の向上のために, 工具管理(摩耗・欠損)や工具経路の補正が可能な工具切れ刃形状を機上で計測する技術が望まれている。しかし, マイクロ工具を対象とした工具切れ刃形状のオンマシン計測手法がまだ確立されておらず⁽¹⁾⁻⁽³⁾, 現状では切削中の工具切れ刃形状を測定評価することは困難であり, 加工精度の向上が期待できない。そこ

で, 本研究はオンマシン計測に適用可能なマイクロ工具の切れ刃プロファイルを対象とした計測手法「光回折ゲージ法」を提案している。第一報では, 新品の小径工具($\phi 1.8, 2.0 \text{ mm}$)を試料とした測定実験を行ない, 切れ刃の微小凹凸形状が高精度に測定されていること, また切れ刃の三次元プロファイルを $0.1 \mu\text{m}$ の精度で測定可能であることなどから, 本手法の有効性が示された⁽⁴⁾。

本報では, 精密微細加工に一般に使われているマイクロツールである極小径工具($\phi 300 \mu\text{m}$)を試料とした摩耗切れ刃計測実験を試みた。すなわち, 新品の切れ刃プロファイルのみならず, 切削実験によって摩耗した切れ刃プロファイルの計測および連続自動回転中における工具摩耗の定量的な測定評価から, 本手法の極小径工具摩耗に関するオンマシン計測の可能性を検証したので報告する。

* 原稿受付 2005 年 4 月 1 日。

^{*1} 大阪大学大学院工学研究科(☎ 565-0871 吹田市山田丘 2-1)
[現: 九州工業大学大学戦略室(☎ 820-8502 飯塚市川津 680-4)]。

^{*2} 正員, 大阪大学大学院工学研究科。

^{*3} 正員, 三菱マテリアル神戸ツールズ(株)(☎ 674-0071 明石市魚住町金ヶ崎西大池 179-1)。

^{*4} (株)牧野フライス製作所(☎ 243-0308 神奈川県愛甲郡愛川町増鏡 359-3)。

E-mail: miyoshi@mech.eng.osaka-u.ac.jp

2. 光回折ゲージ法

2.1 測定原理 高い測定分解能を持ちながら、オンマシン計測に適用可能なエッジ間隙の光回折を応用した光回折ゲージ法の測定原理を図1に示す。二枚の基準ナيفエッジによってあらかじめ校正された間隙ゲージ G に、被測定極小径工具が挿入される。ここで、極薄なシート状レーザビームを両間隙 x_l , x_r をわたるように照射すると、各間隙によって回折した光がフーリエ変換レンズによって、焦点面に回折パターンを結像する。ここでは、エッジ間隙の一次元的な情報のみを高速に計測するため、一次元配列のラインCCDを用いて回折パターンを取得する。その回折パターンの1次光間距離 W を検出し、工具切れ刃-基準ナيفエッジ間の距離 x を次式から推定する。

$$x(W) = 1.4303\lambda \sqrt{1 + \left(\frac{2f}{W}\right)^2} \quad (1)$$

ただし、 λ と f はそれぞれ既知のレーザ波長とレンズの焦点距離である。それぞれの x_l と x_r の間隙を測定するために、シャッターで他方のエッジ間隙による回折光をさえぎる。このように、測定したエッジ間隙値の x_l と x_r 、および既知の間隙ゲージ G の値から、シートビームで照射された位置の工具径 d は

$$d = G - (x_l + x_r) \quad (2)$$

により求められる。そして、シートビームのスキャンを行ない、同様の測定をすることにより、工具全体の切れ刃プロファイルおよび直径の計測ができる。ここで、シートビームのスキャンは工作機械によって被測定工具自体を垂直方向に移動させるものとする。

2.2 実験装置 光回折ゲージ法に基づき、極小径工具の切れ刃プロファイルの測定実験装置を試作した。測定実験装置は図2に示すように、工具取付け部、間隙ゲージ調整部、半導体レーザ光源、フーリエ変換レンズ、ラインCCD、から構成されている。波長650 nm、厚み20 μm のシートビームが被測定工具と両基準ナيفエッジ間をわたるように照射される(図2の写真)。このとき、生じる回折光は、焦点距離100 mmのレンズを通り、焦点面でラインCCD(8ビット; 1ピクセル7 μm)により検出され、コンピュータでリアルタイムに処理される。間隙ゲージの設定については1ステップ0.1 μm の電動ステッピングステージで、基準ナيفエッジを x 軸方向に移動させて調整する。また、相対的なシートレーザビームの走査および被測定工具の回転は、 y 軸とローラステージにより

Fig. 1 Schematic of diffraction gauge method. The spacing x_l and x_r can be obtained by measuring the width between 1st order maxima W .

Fig. 2 Experimental setup of tool edge profile measurement using diffraction gauge method.

行なう。ローラステージが図中のベルト伝動装置と、2つの直径22.2 mmのローラから構成され、ローラの回転によって被測定工具を回転させる。

2.3 測定手順 図3に極小径工具の切れ刃プロファイルの測定手順を述べる。まず本光回折エッジ間隙測定法により、間隙ゲージ G を設定する。次に挿入された被測定極小径工具を左右それぞれのエッジ間隙

Fig. 3 Measurement procedure for micro endmill cutting-edge profiles.

x_l , x_r を測定し、測定値を確定する。そして、工具を垂直に移動することで、シートレーザビームの走査を行なう。試料工具の極小径工具切れ刃はねじれ角をもつので、切れ刃先端を基準ナイフエッジに合わせるため、切れ刃が基準ナイフエッジとの間隙が最小となるように、工具を微小回転させてから、次の工具軸方向の位置において測定を行なう。このように、各位置の工具切れ刃の測定を繰り返し、極小径工具の切れ刃プロファイルおよび直径の測定実験を行なう。

3. 工具摩耗実験

極小径工具の摩耗切れ刃プロファイル計測の可能性を検証するために、図4および表1に示すねじれ刃極小径エンドミル ($\phi 300 \mu\text{m}$) の切削実験を行ない、切削長さの異なる摩耗極小径工具を準備する。工具はねじれ角 30° の2枚刃で、刃長が最大で 0.6 mm の超硬合金エンドミルである。

3.1 実験方法 図5は極小径エンドミルを用いた摩耗実験の概略図であり、表2には切削条件を示す。極小径工具による側面フライスの切削条件として、切削速度 38 m/min (回転速度 $40,000 \text{ rpm}$)、送り速度 0.0025 mm/刃 、半径方向の切り込み量 0.01 mm のエアードライによるダウンカットで、工具先端から 0.3

Fig. 4 Dimensions of a micro endmill.

Table 1 Micro endmill specifications.

Diameter	mm	0.3
Overall length	mm	40
Flute length	mm	0.6 (Max)
Number of flutes		2
Helix angle	deg	30
Shank diameter	mm	4
Tool material		WC Tungsten Carbide

Fig. 5 Illustration of sidemilling experiment for providing worn tools.

mm の切れ刃領域で加工を行ない、1本の工具で摩耗の有・無領域があるものにした。この実験では、摩耗の進行を早めるために被削材として、放電加工における型電極によく使われるグラファイトを採用した。また、工具摩耗の進行過程を計測するため、上記の極小径工具5本を用いて切削長さをそれぞれ 0.55 , 1.1 , 2.2 , 3.3 , 4.4 m に変えて摩耗状態の異なる試料工具を準備した。図6に切削加工中の様子を示す。

3.2 摩耗工具試料 一例として、最も切削長さの大きい 4.4 m の工具において、切削する前と切削した後の顕微鏡写真をそれぞれ図7(a)と(b)に示す。切削する前(新品)の切れ刃には摩耗は見られないが、加工後の工具では逃げ面摩耗がはっきりと観察される。

4. 摩耗切れ刃プロファイルの計測

4.1 検出分解能 対象とする極小径工具は直径が $\phi 300 \mu\text{m}$ と非常に小さいため、ねじれ刃の曲率は大きくなり、本手法における切れ刃位置の測定精度に

Fig. 6 Cutting appearance.

Table 2 Cutting conditions.

Cutting method		Side milling
Rotational speed	rpm	40,000
Cutting speed	mm/min	38
Feed	mm/min	200
Feed rate	mm/tooth	0.0025
Axial depth of cut	mm	0.3
Radial depth of cut	mm	0.01
Coolant		Dry
Work material		Graphite
Cutting length	m	0.55, 1.1, 2.2, 3.3, 4.4 (5 pieces)
Milling Machine		Makino AG-III & Nihon Seimitsu HS2500
Rotation runout	mm	0.005 (Max)

(a) New tool before cutting.

(b) Worn tool after cutting.

Fig. 7 Micro endmill photographs.

(a) 500 nm step displacement

(b) Zoomed result shows the measurement repeatability and resolution

Fig. 8 Measurement result of 500 nm step displacement.

について検討する必要がある。そこで、切削摩耗実験を行なった極小径エンドミル (ϕ 300 μ m) の切れ刃に対し、基準ナイフエッジを 500 nm ずつステップ移動させ、光回折パターンからの 1 次光間距離から切れ刃-基準ナイフエッジ間距離を測定した。図 8 に測定結果を示す。横軸は測定した回数で、縦軸はエッジ間距離の測定値である。図 8(a) では、500 nm のステップ移動を表わし、図 8(b) は測定結果を拡大したものであり、繰り返し精度 (測定値の標準偏差の 2 倍: 2σ) は 86 nm である。この結果より、500 ナノステップの間隔をほぼ 5 段階に区分できることから、切れ刃摩耗の検出分解能はおおよそ 100 nm であることがわかった。

4.2 回折パターンへの影響 以上の摩耗工具 (切削長さ 4.4 m) を用いて切れ刃-基準ナイフエッジの間隔を 30 μ m に設定して回折パターンを調べた。切削前の切れ刃 (図 9(a)) と切削後の切れ刃 (図 9(b)) における回折パターンを比較すると、左右の 1 次回折光強度に変化が見られる。すなわち、新品時の工具では切れ刃のねじれ角の影響で工具側の 1 次回折光の強

(a) On new tool.

(b) On worn tool.

Fig. 9 Detected diffraction pattern.

度がさらに低下しているが、切削後の工具における回折パターンでは工具側の1次回折光強度が大きく低下することがわった。その原因は工具刃先側で生じる1次回折光は刃先の逃げ面によって反射散乱するためと考えられる⁽⁵⁾。さらに、切れ刃が大きく摩耗した場合は、刃先が後退して、より大きな逃げ面を形成し、その刃先の逃げ角は0度近くとなるため、1次回折光がより大きく反射散乱して、刃先側で強度の低い回折パターンになるものと考えられる。

4.3 測定結果 一例として切削長さ4.40 mの工具について、図3に示したように工具の先端から100–550 μmの領域にわたって測定を行なった2次元的な結果を図10に表示する。この図から、切れ刃が摩耗している領域としていない領域がはっきりと区別でき、切れ刃プロファイルには長いうねりのような変動が見られる。そして、切削に関与しない切れ刃上部の平均工具径は289.8 μmであり、切削により摩耗して後退した下部の平均工具径は279.9 μmであることから、工具径後退摩耗量は約10 μmであることがわかる。また、回転角度102度にわたって測定した切れ刃プロファイルを図11に三次元的に示した。

4.4 SEM観察像との比較 次に、測定した切れ刃プロファイルの精度について考慮するために、走査型電子顕微鏡 (SEM) により得られた切れ刃プロファイルの観察像と、測定した切れ刃プロファイルの

Fig. 10 Measured cutting-edge profiles in 2 dimensions.

Fig. 11 3D measured cutting-edge profiles of a micro endmill.

比較を行なった結果を図12に示す。さらに、摩耗の進行が著しい右側の切れ刃プロファイルを拡大し、SEM観察像と比較した結果を図13に示す。これらの結果から分かるように、SEM観察像と測定した切れ刃プロファイルは良好に一致しており、測定したプロファイル切れ刃摩耗の特徴を正確に捉えていることから、本手法が極小径工具において、摩耗切れ刃プロファイルの高精度測定に有効であることが実証された。

また、右側の切れ刃摩耗の進行が著しいのは、工具の偏心の影響のためと考えられる。すなわち、工具を加工機に取り付ける時には工具の回転振れが±5 μm以内に設定するようにしたが、極小径工具の切削条件では、半径方向の切り込み量もまた10 μm程度に設

Fig. 12 Measured profiles of micro-endmill (ϕ 300 μ m) comparing with SEM image.

Fig. 13 Zoom for certification of the measured results.

定しなければならず、 $\pm 5 \mu\text{m}$ の回転振れであっても偏心の影響は避けられず、主に片側だけの切れ刃で切削することによって生じたものと考えられる。

5. 工具摩耗の自動計測

5.1 回転系の電動化 本手法のオンマシン計測に対応できることを検証するために、オンマシンでチャックに付けたままの状態を再現できるように、電動ステッピングモータを付け加えて改良した計測システムの概観を図14に示す。モータシャフト軸からの駆動力が伝動ベルト系を介して、ローラステージのローラ軸を回し、工具を連続的に回転させることが可能となり、オンマシン計測の再現ができるようになった。

Fig. 14 Views of the improved apparatus with motorized roller stage; the automated measuring apparatus duplicating on-machine measurement.

5.2 切れ刃位置の自動検出 本実験では、オンマシン計測を再現する目的として、被測定極小径工具を連続的に回転させながら、工具の切れ刃位置の自動検出実験を試みた。図15は工具が半回転したときの代表的なナイフエッジと切れ刃の位置関係(1から6)を模式的に図示したもので、最小間隙1と6が二枚の切れ刃先端位置を示している。工具の高さを固定して一回転させ、その間取得した回折パターン(1次回折光間隔 W)から得られた微小間隙 x_r の結果を図16に示す。横軸はエンドミルの回転角度であり、縦軸はエンドミル基準ナイフエッジ間の測定値である。谷部は工具切れ刃が回ってきたことを意味しており、基準ナイフエッジとの間隙が最も小さくなっている。図16(a)は、前節の摩耗実験において切削に関与しない工具の切れ刃領域(切削する前の工具とみなす)を測定した結果である。測定結果から工具の360度回転に対して、2枚の切れ刃先端位置が2つの局所最小値(谷部)として検出された。その谷部の間隔は工具の180度回転に対応している。

また、図16(b)では、切削実験が行なわれた切削長さ4.4 mの工具の切れ刃領域における測定結果を示す。谷部が鈍化して、微小間隙 x_r も大きくなることから、切削実験によって工具が摩耗したことが推定できる。

Fig. 15 Top view of diffraction gauge among automated measurement.

Fig. 16 Two valleys show the position of both cutting edges (a), (b); comparison of measured edge spacing between new tool and worn tool (b).

切削前と切削後の谷部の差は工具刃先が後退した量を示し、刃先の後退摩耗量を計測できることがわかった。片側 (R) の刃先後退摩耗が大きく $8.8 \mu\text{m}$ であり、もう片側 (L) の刃先後退摩耗が小さく $1.5 \mu\text{m}$ であることが本自動切れ刃位置検出実験で計測された。その違いは、切削時の工具回転振れによるものであると考えられる。

以上のようにオンマシン計測の再現において、被測定極小径工具が回転している状態で切れ刃の位置を自動検出でき、回転中の工具切れ刃プロファイル位置を計測することができた。

Fig. 17 Measured tool diameters before and after milling on micro endmill (4.4 m cutting length.)

6. 切れ刃後退摩耗量

6.1 摩耗工具の直径変化 切削して摩耗させた5本の工具試料を用い、その工具の軸方向における各位置の工具径の測定を試みた。本測定ではあらかじめ新品時に各工具の工具径を測定しておき、摩耗実験後の各工具を再測定し、切削前と切削後の工具径を比較した。図17に切削長さ4.4 mの極小径エンドミル直径の測定結果を示す。本実験では、図16に示したように工具を一周回転させながら間隔を測定した後、工具を上方にシフトして、また一周回転における間隔測定を繰り返し、工具切れ刃位置を自動検出したものである。試作した本回転系は振れ量の小さいローラステージを採用し、工具回転に対して芯が無いため、工具の回転に対する振れが小さく、わずか $\pm 2 \sim 3 \mu\text{m}$ である。しかし、工具回転振れの状態は一般の工作機械における回転系の振れ状態と違い、ローラの1周回転では振れを繰り返すが、工具の1周回転に対しては同じ振れとはならない。すなわち、ローラ (直径: $7/8 \text{ inch} \approx 22.22 \text{ mm}$) が1周すると、工具 (シャンク径: 4 mm) は $22.22/4 = 5.55$ 周回転するので、結局工具は5.5周ごとに同じような振れを繰り返すことになる。その回転現象は測定値にも反映しており、 $\pm 3 \mu\text{m}$ 程度変動が見られる。そこで、工具回転の振れ周期より長い、8点の移動平均による平滑化を2回行ない、回転振れの影響を除去した。マークの付いていない曲線は軸方向における各位置の平均した工具径の測定結果であり、切削が行なわれなかった領域では切削前と切削後の工具径が良く一致している。軸方向に対する工具径変化の測定結果から以下のことがわかった。

- 切削実験が行なわれた切れ刃領域では、工具径の減量 (後退摩耗量) が計測された。

Fig. 18 Propagation of tool diameter reduction corresponding to cutting length.

- 切削長さの増加にともなう、工具摩耗が進行している。
- その摩耗形状は、正常摩耗パターンであり、特に超硬合金に多い摩耗パターンと類似している⁽⁶⁾。

6.2 後退摩耗量と切削長さの関係 図18には工具の切れ刃後退摩耗量に相当する5本の工具径の減少と切削長さの関係を示す。JIS B 4011では“比較的摩耗が一樣なとき（正常摩耗）はその平均値をとるのを原則とするが、不均一なときは最大摩耗幅をとることができる”と定めているので、工具径の最大摩耗後退量を代表値としてプロットした。切削長さが、1.1 mまでは摩耗量3 μm程度で「初期摩耗領域」、1.1～3.3 mの間は「比例（定常）摩耗領域」、摩耗量が8 μmとなる3.3 mからは「急速摩耗領域」に入るとみられる⁽⁶⁾。このように後退摩耗量の大きさと摩耗成長の過程が本計測実験で確認された。

7. 結 論

本論文では、オンマシン計測への適用を考慮した極小径工具切れ刃プロファイル計測法の確立を目指し、光回折現象に基づく新しい切れ刃測定法である光回折ゲージ法を提案し、極小径工具の摩耗切れ刃測定評価の実験を行ない、以下の結果が得られた。

1. ねじれ刃の曲率が大きい極小径工具 (ϕ 300 μm) の場合でも、繰返し精度（標準偏差の2倍）86 nm、分解能0.1 μm以下で高精度な切れ刃摩耗の検出が可能である。
2. 摩耗切れ刃プロファイルの測定結果から、切削に関与する摩耗領域と関与しない領域を明確に識別することができる。その三次元切れ刃プロファイルは、SEMの観察像と良く一致していることが

ら、極小径工具における本手法の有効性が実証された。

3. 工具の連続回転中に切れ刃位置の自動検出が可能であり、また、切削長さとの関係から極小径工具の摩耗成長過程を判定できることから、本手法のオンマシン計測の実用可能性が示唆された。

以上、提案した光回折ゲージ法は、オンマシン計測に適用可能であり、極小径工具の高精度な摩耗切れ刃プロファイル計測法であることが示された。

参 考 文 献

- (1) Ryabov, O. et al., Laser displacement meter application for milling diagnostics, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol.30, No.[3-4] (1999), pp.251-263.
- (2) Matsumura, T. et al., Tool Wear Monitoring System in Milling Operation, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.65, No.11 (1999), pp.1617-1622.
- (3) Lee, H. S. et al., Development of an optical Measuring Equipment of Flank Wear in Peripheral Cutting Edges of End Mills, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C*, Vol. 66, No. 645 (2000), pp.1681-1686.
- (4) Khajornrungruang, P. et al., On-Machine Cutting Edge Profile Measurement for Micro Milling Tool (1st Report), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C*, Vol. 70, No. 700 (2004), pp.3556-3563.
- (5) Fukaya, J. et al., Fraunhofer Diffraction Pattern by a Slit Aperture between a Knife Edge and a Metal Cylinder, *OPTICAL REVIEW*, Vol. 2, No. 2 (1995), pp.139-143.
- (6) Fujimura, Y., *Practical cutting*, (1981), pp.70-71, Kyoritsu publishing.