回折光を利用した鏡面加工表面粗さの インプロセス計測*

森田 健二** 川久保洋一**

In-process Roughness Measurement of Mirror Turned Surfaces by Diffracted Light /
Kenji MORITA and Yooichi KAWAKUBO

Key words: precision machining, diamond tool, mirror surface, surface roughness, optical method, diffraction, in-process measurement

1. はじめに

光学的方法で表面粗さを測定することが最近特に注目を集めている。その理由は、非接触であるのでワークを損傷しない、高速処理ができるので大きな領域を比較的短時間に測定できる、等の魅力があるからである。さらに、装置やマシンに組み込んでインプロセス計測ができるので、生産工程の自動化や無人化を可能にする期待もある。

表面粗さを測定する光学的方法の中で、散乱法は、比較的大きな範囲に光ビームを当て、その反射光を光電変換して種々の処理をし、その部分の粗さを知ろうとする方法である。光学系が簡単であり、半導体レーザーの使用によってコンパクトに構成できるので、インプロセス計測には特に適した方法である。その他、焦点検出法等いくつかの粗さ測定法があり、それらの全般の解説は、テキスト、解説書等に詳しく紹介されている^{1)~3)}。また、測定 of 具体的研究事例については、本学会の講演会等で数多く発表されているので、それらを参照願いたい^{4)~9)}。

ダイヤモンドバイトを用いた超精密切削加工面には、規則正しい切削痕が残る場合が多々あり、この面からの散乱光は、いわゆる回折光となって観測できる。本稿では、Al 合金の超精密切削加工面を例にとり、筆者らの行った回折光を利用した表面粗さのインプロセス計測例を紹介する¹⁰⁾。

2. ダイヤモンドバイトを用いた 超精密切削加工

Al 合金の平板（例：磁気ディスク基板）加工には、切れ刃が直線状であるダイヤモンドバイト（以下平バイトまたはバイトという）が多く用いられている。このバイトを用いた切削加工における切削点近傍の概略を図1に示す。図から明らかなように、切削面の幾何学的表面粗さ R_{theo} を小さくするには、送り S およびバイトの設定角 θ を共に小さくすれば良いことになる。こうして鏡面加工が可能になるが、一例として $R_{\text{theo}}=0.02\ \mu\text{m}$ のようなほぼ光学的鏡面を加工するには、 $S=50\ \mu\text{m}$ として、 θ を 0.02° 以下としなければならないことが分かる。このように、鏡面加工を行うには、バイトの設定が極めて重要な問題となる。

3. 回折光を利用した表面粗さの測定

既に述べたように、平バイトを用いた切削面の表面

$$R_{\text{theo}} = S \frac{\tan \theta \cdot \tan(\eta - \theta)}{\tan \theta + \tan(\eta - \theta)}$$

$$\eta \gg \theta$$

$$\approx S \tan \theta$$

R_{theo} : 幾何学的表面粗さ, S : 送り, θ : 平バイトの設定角

図1 平バイトによる切削加工

* 原稿受付 昭和63年1月23日

** 正会員 (株)日立製作所(国分寺市東恋ヶ窪1-280)

$$m\lambda = S(\sin i \pm \sin \phi)$$

m : 回折次数, λ : 波長, S : 格子定数(送り), i : 入射角,
 ϕ : 回折角

図2 回折格子による光の回折

粗さは、バイトの設定角 θ に特に依存する。 θ が大きい場合に加工された表面には規則的な切削痕が見られ、この切削痕の深さが表面粗さを決定することになる。規則正しい切削痕のある面は、いわゆる回折格子であり、光を当てると回折光が発生し虹面となって見える。

図2は回折格子による光の回折を模式的に示したものである。入射角 i で入射した二つの光 AB, DE は、回折角 ϕ 方向に BC, EF となって回折し、ABC, DEF の光の間には光路差が生じる。光路差が波長 λ の整数倍 m となると、二つの光は強め合って回折光となる。つまり、次の式が成り立つ。 m を回折次数という ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)。

$$m\lambda = S(\sin i \pm \sin \phi)$$

この式にて $m=0$ とは $i=\phi$ となる場合であり、これが鏡面反射光すなわち 0 次光である。回折角 ϕ の正負は、垂線 N を境とし入射光側を正、反対側を負と定める。

入射角 i を一定とすると、回折光は 0 次光を中心としてその両脇に等間隔位置に発生する。この回折光を切削面より距離 y だけ離れて写真撮影した回折パターンの様子を図3に示す。この例は、 $\lambda=633\text{ nm}$, $S=45\text{ }\mu\text{m}$, $i=3^\circ$, $y=800\text{ mm}$ の場合であり、各回折光スポットの間隔 l は 11.3 mm となる。 l が一定であること、スポット間に散乱光が存在しないこと等から、この切削面は送り S が一定でかつ切削痕の深さも一様にそろっている（加工中の振動等による切削痕の乱れない）ことが推定できる。図4はその回折パターンの強度測定例である。0 次光強度が最も大きく、回折光は回折次数が高くなるにつれて強度が低下してい

図3 ダイヤモンド切削面の回折パターン

図4 回折パターンの強度測定例

ることが分かる。回折光強度 = 各回折光の光量の和 / 0 次光の光量として、この例では約 1% の回折光強度である。

図5に $S=45\text{ }\mu\text{m}$ で切削加工した種々の試料の顕微鏡写真、その表面粗さの断面曲線およびその面から得られた回折パターンの関係を示す。試料 (a) は規則正しい切削痕が明りょうな面であり、表面粗さは $R_z \approx 0.2\text{ }\mu\text{m}$ 、回折光は ± 3 次回折光以上まで発生している。(b) は切削痕の消失した $R_z \approx 0.02\text{ }\mu\text{m}$ の鏡面であり、回折光はほとんど発生していない。(c) はむしれ面であり、回折パターンには、バックグラウンドに一樣に薄明るく散乱光が重畳している（但し、本図には見えない）。

図6は $S=26\text{ }\mu\text{m}$ で切削加工した試料を用いて回折光強度を測定した結果である。 R_z が小さい程回折光強度が小さく、また、同じ R_z の試料でも波長 λ によって回折光強度が変わってくるのが分かる。その結果

試料	(a)	(b)	(c)
顕微鏡写真			
表面の断面曲線 (タリスステップ)			
回折パターン			
R_z (μm)	0.2	≈ 0.02	0.08
θ ($^\circ$)	0.25	≈ 0	-0.1

図5 種々の切削面と回折パターンの関係

図6 表面粗さ R_z と回折強度の関係

から、 $R_z = 0.1 \mu\text{m}$ 以下のような鏡面切削加工面においては、回折光強度を知ることで、その面の表面粗さ R_z を推定できることになる。

4. インプロセス計測

Al 合金の超精密切削加工におけるインプロセス計測の事例として、バイト寿命の判定について概説する。

所定の基準値、例えば表面粗さ $0.1 \mu\text{m}$ 以下の品質のワークを量産加工する場合には、バイトの摩耗という問題を考慮しておかねばならない。高硬度であるダイヤモンドバイトといえども、刃先は徐々に摩耗し、ついには所定の表面粗さを満たす加工が不可能となる。図7はバイトの摩耗を示す例であるが、このように摩耗の進行したバイトでは、表面粗さの良い鏡面加工ができなくなる。つまり寿命である¹¹⁾。このバイト

図7 バイトの摩耗例 (前逃げ面)

(a) 顕微鏡写真

(b) 表面粗さの断面曲線
(タリスステップ)

図8 摩耗したバイトによる切削面

で加工した面の顕微鏡写真およびその面の粗さの断面曲線 (タリスステップ、触針の先端曲率半径 $12.5 \mu\text{m}$) を図8に示す。この図から、 $S = 50 \mu\text{m}$ ごとの規則正

図9 磁気ディスク基板表面粗さインプロセス計測法

しい切削痕が顕著であること、その切削痕の深さ、つまり表面粗さは、 $R_z \approx 0.1 \mu\text{m}$ まで悪化していることが分かる。

バイト寿命の判定基準は、バイトの中間検査がしにくく摩耗量の測定が困難であることおよびそれぞれのバイトの摩耗の進行する度合がまちまちであること等の理由によって簡単に定められない。そこで現状では、加工されたワークの表面粗さの悪化した程度から判定する場合が多い。ワークがAl合金の場合には、従来の触針式の粗さ計を用いた測定は触針の傷がつくので好ましくなく、光によって表面粗さを計測することが特に有効となる。

既に述べたように、表面粗さが悪化することとバイト摩耗が進行したことはほぼ対応するので、この関係を用いてバイト寿命の判定ができる。図8のような面に光ビームを当てると、回折光は全反射光の数%以上の割合となる。その分0次光の強度は低下することになる。このように、回折光または0次光を連続的に監視しておけば、加工面の表面粗さの悪化した程度が推定できるので、それからバイト寿命も判定できることになる。

以上のような原理を、磁気ディスク基板の鏡面切削加工に応用した例を以下に述べる。

超精密旋盤に光学系を図9(a)に示すように設置した。光学系は工具台上に載っており、特別の機構を用い

図10 切削距離と光出力の変化

ることなく、ディスクの半径方向へ移動できる。光学系の中には、図9(b)の回路ブロック図に示すように、光源として半導体レーザーがあり、レンズによって平行ビームとなってディスク面に当たる。反射光はこれまで述べたように、ディスク面の粗さに応じた強さの回折光となってフォトディテクタに入る。フォトディテクタは3個設けて、0次光および±1次回折光を検出するようにした。回折角 ϕ は送り S によって変化するので、フォトディテクタの間隔は変えられるようにした。光学系内に外部からの光が侵入するとノイズとなるので、レーザービームの出射窓および入射窓にフィルタを置いて、この影響を防止した。増幅した±1次回折光は加算回路によって合成した。この回路の0次光出力および±1次回折光出力からディスク面の粗さを判断し、バイトの寿命を知ろうとする。

所要の表面粗さのディスク面が加工できるようにバイトを設定し、以後切削距離を増やした場合、ディスク面からの光出力の変化を調べた結果が図10である。図には、触針式粗さ計（タリスステップ）で測定した表面粗さ R_z も併記した。切削距離が15 km程で表面粗さが最も良くなり、以後悪くなっていくことが分かる。0次光出力および±1次回折光出力は表面粗さの変化と良く対応している。つまり、表面粗さが悪化することにつれて0次光出力は低下し、±1次回折光出力が増加していることが分かる。ディスク面の表面粗さを、例えば $R_z \leq 0.1 \mu\text{m}$ に保つことが必要とすれば、この例では135 kmの切削距離でバイト寿命となる。この時の0次光出力または±1次回折光出力をバイト寿命の判定基準として使うことができる。

以上に述べた例のように、インプロセス計測によってバイト寿命が判定できれば、鏡面加工の自動化も可能となる。光を用いた表面粗さのインプロセス計測は、このような期待にこたえてくれるものと思われる。

5. おわりに

平バイトを用いて Al 合金を超精密切削加工する場合を例にとり、回折光を利用した表面粗さのインプロセス計測例を紹介した。ここでは、光ビーム径を約 $\phi 0.5 \text{ mm}$ とした。これは切削の送り $S=50 \mu\text{m}$ の 10 倍であり、この部分の規則正しい切削痕(周期的情報)の深さを平均値として計測している。つまり、この方法は触針式の粗さ測定値 R_z (10 点平均粗さ) または R_a (中心線平均粗さ) と良く対応する。一方、突発的に入ったスクラッチ (非周期的情報) に対する感度はないので、 R_{max} (最大高さ) には対応しないという欠点がある。むしろ面のように一様に肌荒れた面では散乱光が観測できるので、この評価はある程度できる。

電子工業界を始めとする広範な分野において、高精度な加工技術の必要性がますます高まっており、その精度もサブミクロンから nm の領域に入りつつある。計測技術は加工技術と相互に進歩、発展してきた。光は nm レベルの物差しであり、干渉や回折を利用して測定感度をさらに高められるという特長がある。光学的計測法は今後さらに重要な役割を果たしていくであろう。また、生産工程の自動化や無人化が随所で進められている今日、非接触、インプロセス計測が可能等の利点を生かして、それぞれの分野に適合した光計測技術が開発されて行くものと思われる。

参考文献

- 1) 第 119 回講習会テキスト「非接触方式による高精度加工表面の性状評価技法」——光学方式の測定原理と応用、精機学会 (1984. 9)。
- 2) 特集「光学的非接触方式による高精度測定技術」、精密工学会誌、51, 4 (1985)。
- 3) 超精密加工および計測に関する研究(II)——超精密加工計測研究交流会報告書、日本機械工業連合会 (1986. 9)。
- 4) 齊藤弘義、鴨川昭夫、佐田登志夫：切削加工面による光の回折——虹面切削の研究(第 1 報)、精密機械、35, 7 (1969) 452。
- 5) 津和秀夫、難波義治、打越純一：レーザによるインプロセス表面粗さ検出器の開発、昭和 55 年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1980) 305。
- 6) 三井公之、小沢則光、河野嗣男：高感度インプロセス粗さ計の開発、昭和 59 年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1984) 393。
- 7) 三好隆志、齊藤勝政、宮腰貴宏：超精密ダイヤモンド切削面の性状評価法に関する研究——表面粗さとフランホッファー回折像の関係、昭和 60 年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1985) 889。
- 8) 野口昭治、塚田忠夫：反射光強度分布を利用した表面粗さの一評価法、昭和 60 年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1985) 57。
- 9) 本西 英、吉田浩二：レーザ反射散乱光による超精密切削面の評価、昭和 61 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1986) 773。
- 10) 森田健二、川久保洋一、加藤重雄：ダイヤモンド切削面と回折光の関係、昭和 61 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1986) 779。
- 11) 川久保洋一、森田健二、加藤重雄、屋鋪 博：磁気ディスク Al 基板加工用ダイヤモンドバイトの寿命について、昭和 57 年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1982) 407。

シンセシスの成果を「開発論文」に

——開発論文投稿のお勧め——

「精密工学会誌」では、1986 年 9 月から投稿論文の新しい種別として「開発論文」を設けました。

従来からのアナリシス中心の「研究論文」とともに、シンセシスを主内容とした「開発論文」を設けたことにより、精密工学会はより幅広い研究成果発表の場を有することになりました。

既に、54 巻 3 号までに 9 編の開発論文が会誌に掲載されています。

「開発論文」新設の主旨は、すでに会誌(52 巻 9 号、53 巻 1 号)で述べられていますが、その要点は次のとおりです。

- (1) 会員の約 70% を占める企業に属する会員は、シンセシスに関する情報を求めている。
- (2) 企業の技術者が主に従事している新技術、新製品開発に関する論文掲載の道を開く。
- (3) アナリシス中心の研究論文と同一の取扱いを避け、シンセシスのための新しい種別を設ける。

さらに、開発論文は研究論文と異なる内容を持つため、いくつかの特徴を持っています。

- (1) 投稿は学術講演会での講演のほかに、春秋大会における「先端技術紹介セッション」で発表したものも受け付けます。
- (2) 論文の取扱いはいは、研究論文と対等です。
- (3) 論文の内容が異なるため、執筆要綱に従って論文の校閲基準が異なります。

開発論文は、企業等に所属する研究者、技術者に論文投稿の道を広く開放するとともに、高いレベルにある開発力を論文として公表することにより、論文をより活力あるものへと転換する力を有しています。

この力を生かし、精密工学をダイナミックに発展させるために、会員の方々、特に企業に所属する会員の積極的な投稿をお勧め致します。

詳細をお知りになりたい方は、本会事務局に執筆要綱をご請求下さい。