単結晶ダイヤモンドバイトの刃先*

見義 一兄**

Cutting Edge of Diamond Turning Tools / Ikkei MIYOSHI

Key words : single point diamond turning, cutting edge, diamond crystal, diamond turning tool, anisotropy, ultraprecision machining

1. 緒 言

ダイヤモンドは硬さ、熱伝導率、光学的性質にすぐれており、工業材料として重要な位置を占めている。中でも、ずば抜けた硬さを有しているので、工具材料として研削砥石、切削工具、耐摩工具などのダイヤモンド工具が産業界の幅広い分野で用いられ、その用途は拡大傾向にある。

これらのダイヤモンド工具の中でedgeと深いかかわりを持つ工具には、アルミニウム合金や銅合金を鏡面切削するための単結晶ダイヤモンドバイト、透過電子顕微鏡用薄片サンプルを作成するためのダイヤモンドナイフ、外科手術用のダイヤモンドメスなどがある。これらの工具の特徴は、その刃先の鋭さとなめらかさが他の工具では得られない程すぐれていることである。

ここではナノメータの加工精度を実現する超精密切削加工に用いられる単結晶ダイヤモンドバイトの刃先(edge)について、その現状や問題点を述べる。

2. 超精密切削加工

超精密切削加工はSPDT (Single Point Diamond Turning) と呼ばれ、高精度で高剛性を持った超精密旋盤と単結晶ダイヤモンドバイトを用いて、 $R_{\max}$ 0.01 μm 以下、形状精度 1 μm 以下の鏡面加工を行う技術を言う。これに単結晶ダイヤモンドバイトが用いられるのは、ダイヤモンドの持つすぐれた硬さや耐摩耗性に加えて、アルミニウム合金や銅合金の軟質金属が鏡面切

削出来、仕上面形成能力にすぐれているからである。砥粒を用いた研削、ラッピング、ポリッシングでは精度的に限界があり、製造コストも高くなる。又、超精密切削加工では、非常に高い形状精度を得るために、切込み量が 10 μm 以下と通常の切削に比べて小さいのが特徴で、このような小さい切込み量で切削が可能な工具は単結晶ダイヤモンドバイト以外にない。

超精密切削加工は開発当初、宇宙で用いられる高精度ジャイロ部品や核融合に用いられるガスレーザ用大口径曲面鏡の製作に用いられた。その後、電算機用メモリーディスクやレーザスキャナ用ポリゴンミラー、炭酸ガスレーザ加工機用反射鏡、カメラや半導体レーザ用球面、非球面レンズ等の生産に適用され、専用の超精密旋盤の開発により実用化されるに至った。これらの部品の要求精度を表1に示す。

現在は更に高い形状精度と面粗さが要求される紫外線やX線等波長の短い光線用の反射鏡の製作が検討されており、X線望遠鏡やX線顕微鏡の開発を目指して、超精密切削加工はサブミクロンからナノメータオーダの高精度化に向けての研究が展開されている。

3. ダイヤモンドの結晶

ダイヤモンドは立方晶の結晶構造を持ち、自形[※]のはっきりした結晶が多い。図1にダイヤモンド結晶の代表的な形を示す。12面体、8面体は天然ダイヤモンドに良く見られる形状である。合成ダイヤモンドは6面体あるいは8面体に近い6-8面体が多い。これらの面は(100)、(110)、(111)の3つのいずれかの結晶面で構成されている。各結晶面に表れる炭素原子の配列や

* 原稿受付 昭和63年8月29日

** 旭ダイヤモンド工業(株) (川崎市高津区久地 185)

表1 超精密切削の用途と要求精度

名 称	加工方法	被 削 材	精 度	用 途
磁気ディスク	旋 削	アルミニウム合金	面粗さ $0.006 \sim 0.01 \mu\text{mR}_a$ 振れ $0.007 \sim 0.01 \mu\text{m}$	ハードディスク
ポリゴンミラー	フライカッタ	アルミニウム合金	面粗さ $0.01 \sim 0.02 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ 平面度 $\lambda/6$ 以上 隣接面倒れ $3''$	レーザプリンタ バーコードリーダー
平面・球面鏡	フライカッタ	無酸素銅	面粗さ $0.02 \sim 0.05 \mu\text{mR}_{\text{max}}$	レーザ加工機
感光ドラム	旋 削	アルミニウム合金	面粗さ $0.05 \mu\text{mR}_{\text{max}}$	複写機
非球面鏡	旋 削	無酸素銅	面粗さ $0.02 \sim 0.05 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ 形状精度 $0.3 \sim 1.0 \mu\text{m}$	レーザ加工機 宇宙観測系
球面レンズ 非球面レンズ	旋 削	プラスチック	面粗さ $0.02 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ 形状精度 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$	カメラ, VTRカメラ, コンタクトレンズ

図1 単結晶ダイヤモンドの代表的形状

密度の違いから、ダイヤモンドの結晶には異方性が存在する。図1で実線矢印は摩耗しやすい方向、点線矢印は摩耗し難い方向を示す。3つの結晶面の比較では(111)が摩耗し難く、ダイヤモンド工具の製造で(111)を研磨することはない。摩耗しやすい方向を研磨するのが得策で、さもないと加工に時間がかかるばかりでなく、刃先にチッピングが生じやすくなり、満足な刃先を作ることが困難となる。又、ダイヤモンドの結晶は欠けやすい性質があり、ダイヤモンドが破壊する時は(111)に平行に存在するへき開面に沿って起こる。図2にへき開により破壊したダイヤモンドの破面を示す。表2に3つの結晶面のなす角度を示す。例えば(111)同士の交わる稜線の角度が $70^\circ 32'$ であることを示す。単結晶ダイヤモンドバイトの精度や寿命に対して、これらの異方性、へき開面、結晶面の角度は重要な意味を持っている。

図2 ダイヤモンド結晶の破面

表2 立方晶の結晶面間の角度

	{100}	{110}	{111}
{111}	$54^\circ 44'$	$35^\circ 16'$ 90°	0° $70^\circ 32'$
{110}	45° 90°	0° 60° 90°	
{100}	0° 90°		

4. 単結晶ダイヤモンドバイトの刃先

超精密切削に用いられる単結晶ダイヤモンドバイトの基本形状を図3に示す。刃先が直線を持つ平バイトと円弧を持つRバイトとに分けられる。超精密切削では加工物の鏡面性(面粗さ)と形状精度(平面度, 真球度など)の2つの要求精度を満足しなければならない。バイトにとってみれば前者は切れ刃稜(edge)の鋭さとなめらかさに関係しており、後者は切れ刃稜の形状精度と摩耗に関係している。

4.1 切れ刃稜の鋭さ

単結晶ダイヤモンドバイトでは、すくい角 $-5 \sim$

図3 超精密切削用ダイヤモンドバイトの基本形状

+5°, 逃げ角1~10°が普通で, 切れ刃角は80~85°が多い。その意味では刃物として刃先が特に鋭いという感じはない。これはダイヤモンドが非常に硬い半面, 欠けやすいという性質のためで, 高速度鋼や超硬合金の切れ刃角に比べると大きい傾向がある。しかし, 図4に示したように単結晶ダイヤモンドバイトの切れ刃は超硬バイトに比べて非常にとがっている。図5にバイトによる切削を模式図で示すが, 切れ刃の鋭さは切れ刃丸み半径 R として表すことが出来る。 R が大きいと設定切込み量 T も大きくしないと切りくずが排出されずラッピングが起こる。又, R が大きいと加工変質層が増大すると共に, 弾性回復量 t が大きくなって過度なバニシングが起こり, いわゆる結晶粒界段差などを生じ, 面粗さの低下を招く。超精密切削では T が10 μm 以下の微小切込みが要求され, この条件で切りくずを生成させるためには R も小さいことが要求される。高速度鋼で作られたバイトの R は20 μm 前後であるという測定結果¹⁾があるが, 単結晶ダイヤモンドバイトの R は極端に小さく, 現在まだその測定方法が確立していない。単結晶ダイヤモンドバイトでは数 nm の切込み量でも切りくずが安定して生成するところから²⁾, R は10 nm 以下であると推定される。 R の測定法の確立が叫ばれ1986年に精密工学会産学協同研究プロジェクト「ダイヤモンド刃先評価研

図5 単結晶ダイヤモンドバイトによる切削

究協力分科会」が設置された。ここではSEMと画像解析の手法により R が数十 nm であると報告されている³⁾。この値は高速度鋼で作られたバイトの R に比べて3けた小さい。一方, 井川らは刃先の表面エネルギーと弾性ひずみエネルギーとから R の到達限界が単結晶ダイヤモンドでは2 nm であると報告している⁴⁾。

4.2 切れ刃のなめらかさ

切れ刃のなめらかさは, 切れ刃の粗さとチップングから評価される。切れ刃の粗さはすくい面と逃げ面の交差で決まるから, それぞれの面粗さに左右される。単結晶ダイヤモンドバイトのこれらの面粗さは10 nm 以下である。これらの面は研磨加工により作られるので, 研磨方向が切れ刃に直角か平行かによっても左右される。加工物の面粗さに影響を及ぼす度合は, 逃げ面の面粗さの方が大きいので, 逃げ面の面粗さは特に小さくなるように考慮される。

一方, 切れ刃のチップングは電子顕微鏡での観察が有望であるが, ダイヤモンドは絶縁体なので厄介な点も多く, 微分干渉顕微鏡で400~1000倍で観察して検査する。電子顕微鏡との比較において数十 nm 程度のチップングは検査されている。ただし, それ以下にミクロな考えをすれば切れ刃はザラザラしているであろうか。

実際に, 単結晶ダイヤモンドバイトによる切削で, 切削初期にはやや面粗さが悪く, ある時点までは面粗さが向上することがある。刃先の初期摩耗により, 切れ刃のなめらかさが向上するのが, その一因として考えられる。

4.3 切れ刃の形状精度

切れ刃の形状精度は加工物の形状精度に影響を及ぼす。例えば R バイトでは図6の方法で切削さ

単結晶ダイヤモンドバイト

超硬バイト

図4 切れ刃の比較

図6 Rバイトによる曲面加工

れることが多く、この場合、バイトと加工物の接触点が加工部位により変化するので、Rバイトの切れ刃稜の形状誤差は加工物の形状誤差を大きくする原因となる。Rバイトの刃先半径に対し、その真円度は $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ が多い。要求としては $0.1 \mu\text{m}$ 以下という場合もある。この要求は加工機における刃物台と加工物の相対変位が運動精度の向上や振動の低減により小さくなればなる程高くなる傾向にある。一方、平バイトでは平面度の要求に合わせて切れ刃稜の直線度が問題になる。現状では 50 nm/mm 以下の直線度が得られている。加工物の形状精度は、その面粗さも含めて、バイトのすくい面よりも逃げ面の形状精度の影響を大きく受けるので、単結晶ダイヤモンドバイトの形状精度の測定は、切れ刃稜近傍の逃げ面を触針式形状測定機で測定することが多い。切れ刃稜を直接測定することは、切れ刃稜にチップングを起こす恐れがあり完成品での測定は困難である。非接触での測定が考えられているが、いまだ一般的とは言えない。

4.4 切れ刃稜の摩耗

単結晶ダイヤモンドバイトでアルミニウム合金を切削した時の切れ刃稜の摩耗状態を図7に示す。これはほぼ工具寿命となった摩耗状態を示した。単結晶ダイヤモンドバイトは同一条件で切削したのに工具寿命がばらつくといわれることがある、この原因としてはダイヤモンド原石の質や結晶方位の影響、チップングや

図7 ダイヤモンドバイトの摩耗

欠けの発生、切りくずの溶着（構成刃先）などが挙げられる。

5. 結 論

超精密切削用の単結晶ダイヤモンドバイトを取り上げて、その刃先（edge）の現状について述べた。ほかに類を見ない鋭さとなめらかさを持った切れ刃稜はこの用途では不可欠の工具であるが、色々問題点もある。中でも切れ刃稜丸み半径などは工具の性能に大きく影響する要因だが、その測定方法が確立していない。面の評価については測定分解能数Å（サブナノメートル）に達している。edgeの測定についてもナノメートルオーダーの分解能を持った測定方法の確立が望まれるところである。

文 献

- 1) 小野浩二ほか：理論切削工学，防衛大学校（1974）82。
- 2) 岩田一明ほか：無酸素銅の超微小2次元ダイヤモンド切削に関する研究，昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集（1987）463。
- 3) 浅井昭一ほか：走査電子顕微鏡によるダイヤモンド工具の刃先測定，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）365。
- 4) N. Ikawa et al. : Cutting Tool for Ultraprecision Machining, 3rd Int. Conf. Prod. Engg., Kyoto, (1977) 357。