ダイヤモンド工具の研磨に関する研究 (第5報)*

—1 原石を4分割して製作した工具の摩耗形態—

上 神 謙 次 郎** 番 義 之*** 前 野 康 夫†
中 谷 征 司†† 岡 幸 嗣†† 小 島 一 志††

Study on Lapping of Diamond Tool (5th Report)

— Wear Shape of Tools Oriented Four Crystallographical Types from One Rough Diamond —

Kenjiro UEGAMI, Yoshiyuki BAN, Yasuo MAENO,
Seiji NAKATANI, Kouji OKA and Hitoshi OBATA

A single-crystal diamond has a large anisotropy in lapping stock removal depending on its crystallographic orientation. Moreover, the rough diamonds have the individual difference of lapping difficulty each other, even on the same plane and direction. Therefore, the wear performance of diamond tools are effected by its crystallographic orientation and its wear characteristic of the rough diamond used as tool material. Eliminating the difference of individual substance of rough diamond, only one rough diamond was sawed into four, and the four kinds of diamond tools in crystallographic orientation were lapped up. The effects of diamond anisotropy on tool wear were examined. By electron probe surface roughness analyzer (SEM with 2 or 4 detectors), the topographs and contours of worn tool edges were obtained. The contour lines of worn tool edges were discussed by the crystallographic orientation route of tool edge from face to flank. The crystallographic orientation route of tool edges were capable of representation as diagram of developing chart of diamond reference sphere on the restricted Mercator's projection. From the diagram of the tools, the evidences had been given that the wear shape of tools corresponded with the lapping difficulty on crystallographic orientation of the routes respectively.

Key words: single-crystal diamond tool, tool wear, wear shape, diamond reference sphere, restricted Mercator's projection, crystallographic orientation route of tool edge

1. は じ め に

前報¹⁾では各種結晶方位に作られた単結晶ダイヤモンド切削工具を用いて、工具摩耗に及ぼす結晶方位の影響を調べた。その結果、結晶方位の影響は顕著である上に、すくい面と逃げ面の両面の間の結晶方位群が大きく関係していること、さらに、原石の研磨難易度にかかなりの差異が認められることから²⁻⁴⁾、工具原石の耐摩耗個体間差の影響も加わっていることがわかった。すなわち、単結晶ダイヤモンド工具の摩耗は、刃先の結晶方位群と原石の個体の差異に影響されることが明らかになった。そこで、本報では一つの原石から結晶方位の異なる4種類の工具を製作し、原石による工具間の差の影響を最小にして、工具摩耗に及ぼす結晶方位の影響を調べた。また、電子線三次元表面形態解析装置を用いて摩耗形態を調べ、摩耗量ばかりでなく摩耗形態にも顕著な差異が生じていることを明らかにし、それらは刃先の結晶方位群の相違によることを再確認した。

2. 原石の四分割法および実験方法

まず、工具の製作手順を述べる。図1は用いた天然12面体単結晶ダイヤモンド原石の四分割法を示す。まず、(001)面に沿ってソーイングして2分割し、その各々を(100)および(110)面に沿って再分割する。図1の四分割原石の太線で囲んだ面をすくい面とし、矢印方向に刃先を向けた工具を製作した。すなわち、工具の目標結晶方位は、すくい面が{100}および{110}面で

Fig. 1 Sawing method of rough diamond into four

Fig. 2 Appearance of four tools

あり、刃先の向きはその各々の面上で摩擦係数が極大・極小の2方向、<100>および<110>方向である。工具形状は第2報⁵⁾、4報¹⁾と同じで、すくい角0°、逃げ角5°、コーナ半径1 mmの円弧(R刃)工具である。図2は製作後の工具の写真であり、これらをバイトシヤンクにボルトで固定して用いた。

表1は研磨後の4工具の結晶方位をX線背面ラウエ回折像から測定した結果である。工具の記号は製作目標とした方位について第2報⁵⁾の表示法によって決めた。そして、1原石から4分割して製作した工具である意をNDに続く百の位に4を付加して示した(簡単化のため以下、表1のT411などと略称する)。工具の目標すくい面と刃先反対方向⁵⁾はミラー指数で示し、X

*原稿受付 平成6年2月3日

**正会員 大阪市立大学工学部(大阪市住吉区杉本3-3-138)

***大阪市立大学大学院(現、日本アイ・ビー・エム(株))

†大阪市立大学大学院(現、住友信託銀行)

††正会員 大阪ダイヤモンド工業(株)(堺市鳳北町3-80)

Table 1 Crystallographic orientation of single crystal diamond tools

Tool No. and Symbol	Crystallographic orientation of rake face and inverse edge direction	
	desired value	actual value(Mercator)
(A) T411 [ND411-01]	{100}/<100>	(1.0N 4.0E, 271.5°)
(B) T412 [ND412-01]	{100}/<110>	(1.0N 2.0E 310.5°)
(C) T421 [ND421-01]	{110}/<100>	(0.0N 43.5E, 183.0°)
(D) T422 [ND422-01]	{110}/<110>	(2.0N 44.5E, 89.5°)

Fig. 3 Microphotographs of worn tool edges

線による測定結果はメルカトル法⁵⁾で表した。メルカトル法表示の()内の緯度N、経度Eの値はすくい面の結晶面を示し、三つ目に示した角度は工具の刃先反対方向を表す。

表2は被削材の化学成分を示す。固い粒子が多数散在している過共晶Si-Al材である。外径φ70、長さ120mmの丸棒、中心にφ20の穴を加工して端面を外から内に向かって正面切削を繰り返した。したがって、工具は左勝手として用いている。

表3は切削条件を示す。表2の被削材の切削では、工具摩耗が急速に進行するので、切削速度を低くした。また、円弧工具では、後述の図7に示す刃先結晶方位経路群の扇形の広がり、摩耗量や摩耗形態に影響する。そこで、ある程度の幅でこの扇形が広がるように、切込み、送りを比較的大きくとした。

用いた工作機械は池貝鉄工所製 ANC25型NC旋盤、切削力の測定は半導体ひずみゲージによる動力計を用い、切削中全域で測定した。逃げ面最大摩耗幅は光学顕微鏡写真を撮って拡大して測定した。すくい面摩耗は微小で照明光が透過し、わずかに視認できる程度であったので光学顕微鏡による測定はしなかった。刃先の摩耗形態の測定は、電子線三次元表面形態解析装置（エリオニクス社製、ERA-2000およびERA-8000）を用いて、SEM像およびトポグラフを記録した。

3. 4 工具の摩耗とその形態

図3は5km切削後の4工具の逃げ面の光学顕微鏡写真である。T411とT421工具の中央付近の欠けは切削後不注意に欠けさせてしまったもので、切削中に生じたものではない。工具原石は同じであるから、摩耗の差は結晶方位のみに起因すると考えてよい。いずれの工具も左側に境界摩耗があり、右側の仕上げ面側にもわずかな境界摩耗がある。T411工具の逃げ面摩耗は小さく、T412工具は大きく摩耗し、中央から右寄りにくびれた部分がある。T421工具は右寄りの仕上げ面形成部分の摩耗は少し大きい

Table 2 Chemical compositions of work material

Si hyper-eutectic aluminum alloy (wt%)								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
16.0	0.21	4.24	0.01	0.54	0.01	0.01	0.01	Re

Table 3 Cutting conditions

Cutting speed	4.58→1.31 m/s	Dry cutting
Depth of cut	40 μm	
Feed	40 μm / rev

Fig. 4 Progress of maximum width of flank wear

Fig. 5 Comparison of cutting forces

が、全体として比較的小きな摩耗で、T422工具はすくい面にも逃げ面にも大きく摩耗し、刃先の鈍化が最も著しい。T422工具は右寄りのすくい面が凹んだように撮れているが、すくい面側に大きな摩耗があり、照明光の加減でこのように見える。

図4は切削距離5kmまでの逃げ面最大摩耗幅の進行を示した。同様に図5は切削力の変化である。T421工具の切削力はいずれの分力も最小で摩耗の進行にもかかわらず、ほとんど増大しない。これは後述するように、逃げ面がほとんど摩耗せず工具刃先が鋭利なまま保たれることと、すくい面と切りくずの摩擦係数が4工具中最低の結晶方位の工具であるためである⁵⁾。

図6はこれらの摩耗形態を明らかにするため、電子線三次元表面形態解析装置を用いて5km切削後の工具を調べた結果である。工具すくい面を45°傾け、切削に携わった刃先摩耗部の中央を最も高い位置にし、これを中心にしてSEM像、トポグラフを測定描画した。左図に示すように3軸はすくい面から逃げ面に向かう方向をX軸、工具の幅方向をY軸、工具内部から刃先に向かう方向をZ軸としている。すなわち、工具のp, f, vの3軸(JIS, B0107-1991)において、f軸を中心にしてp, vの2軸を逃げ面側に45°回転させ、それぞれをX, Y, Z軸としている。

工具刃先の摩耗部全体のトポグラフ線図はT422工具の場合のみを示した。このトポグラフはXZ平面をY軸方向に30°傾けている。このトポグラフ線図は非常に繁雑になって摩耗形態の正確な把握はかえって分りにくい。そこで、各工具のSEM像中に白い矢印で示した各々の3か所について、刃先摩耗部を拡大測定した。これらはY軸を紙面に垂直にし、XZ平面への投影として示したので、刃先摩耗部の輪郭として描画されている。

Fig. 6 SEM photographs, contours and topograph of worn tool edges

おのおの(a), (b)および(c)の線図は、後述の図7および図8のそれぞれと対応させている。図から明らかに個々の工具の摩耗形態には大きな特徴があり、次項で詳述する。

4. 刃先結晶方位経路図と摩耗形態との関係

工具のすくい面から逃げ面に至る刃先の結晶方位の経路（以下、刃先結晶方位経路または単に経路という）の結晶面群において、切りくずや仕上面などが摩擦してゆく作用方向の摩耗異方性が工具摩耗形態に関係しているはずである。まず、この刃先結晶方位経路を図示する方法として、ダイヤモンド結晶の投影球面を展開した図上に表す方法について以下に述べる。

図7はダイヤモンド結晶投影球面を制限付きメルカトル法で表示した展開図である。ダイヤモンド結晶とその投影球を図7左図に示す。この投影球は(100), (110)および(111)で囲まれる単位三角球面と等価なものが48個連なっている。この単位三角球面が4つ組み合わさった(100), (111), (010)および(11 $\bar{1}$)で囲まれたブロックを一単位として、これが12個連なっていると見なすこともできる。この12個のブロックを制限付きメルカトル法で表示し、展開すると図7になる。すなわち、紙面の中央の横方向4つのブロックの領域は(001)を北極とし(00 $\bar{1}$)を南極としたメルカトル法に基づく緯線、経線によって所定の結晶面の位置を表示できる。そして、その結晶面上での摩擦、研磨などの作用方向を矢印で示すことができる。作用方向の矢印は北極方向を0°として時計回りに角度をとる。この角度はメルカトル表示図上であるので、偏角なく、いわゆる、地球上の磁方位のごとく指示できる。上下段の4つずつのブロックも同様であるが、北極、南極の位置がそれぞれ異なるだけである。たとえば、図の中央左上の(100), (11 $\bar{1}$), (001)および(111)で囲まれるブロックと、中央左下の(100), (11 $\bar{1}$), (00 $\bar{1}$)および(11 $\bar{1}$)で囲まれるブロックは北・南極がおのおの90°回転し、(010)・(010)を北・南極としたメルカトル法で表されている。投影球上と展開図中に(100)(単位三角球面をメルカトル法の緯度、経度で表すと、0°N 0°Eの位置、以下同じ)、(110)(0°N 45°E)および(111)(35.3°N 45°E)に相当する位置に■、◆および▲の

印をつけ、これらと結晶上等価の位置にも同様の印を付けた。

このように表された展開図中に、表1の各々の工具のすくい面に当たる位置を●で表し、この点から刃先反対方向を矢印で示すと、ほぼ、切りくずがすくい面上を摩擦してゆく方向を図示できる。つぎに、このすくい面の点から逃げ面に至る刃先結晶方位経路を書き入れる。この書き入れ方は前報で述べた¹⁾。刃先結晶方位経路の扇形を(a), (b)および(c)と3等分するように4種類の線で示した。これらの経路は図6および図8中のそれぞれに対応する。工具は左勝手として用いており、各々の経路の幅は、切削に携わった結晶面群の領域を表し、(a)側が仕上面形成にかかわった側である。この経路の逃げ面に当たる結晶面群にも刃先反対方向の矢印（ほぼ、仕上面が逃げ面を摩擦して行く方向）を付けた。各々の経路線は投影球の大円に沿ったものであり、線の長さは大円の中心角($\lambda = 90^\circ + \text{すくい角} + \text{逃げ角}$)の円弧になり、本工具の場合は $\lambda = 95^\circ$ に相当する。

メルカトル法の利点の一つは、その地図上で方向を偏差なく示すことができることにある。個々のブロック球面の北極の方向はそれぞれ異なることがあるが、これらの経路の両端の矢印および経路そのものの方向も偏角なく示されている。切りくずと仕上面の分離線はこの刃先結晶方位経路図からは分からないが、ほぼ中央あたりにあるであろう。その分離線を境に切りくず流出方向および仕上面摩擦方向が互いに反対方向に向き、それらの方向はほぼこの経路に沿っていると見なしてよいであろう。したがって、この経路上での切りくず流出方向、仕上面摩擦方向および工具刃先での応力分布などがダイヤモンドの摩耗異方性と関係し合って工具摩耗の大小と形態の相違をもたらしていると考えられる。

図8は図6の工具摩耗輪郭が図7の刃先結晶方位経路図とどのような関係にあるかを検討するとともに、その摩耗輪郭が両工具面に接する円弧形状からどの程度偏っているかを調べる目的で求めた。図8の左図は工具摩耗輪郭をグラフに表す方法を示す。左図上の工具摩耗輪郭線と元の工具のすくい面および逃げ面で囲まれる斜線部の摩耗断面Awを測定する。そして、左図

Fig. 7 Diagram of crystallographic orientation routes of tool edges from face to flank on developing chart of diamond reference sphere represented in the restricted Mercator's projection

Fig. 8 Relationships among wear height δ , δ' for contour of worn tool edge and route angle of tool edge from face to flank (Left-hand figures show the measuring method of tool wear height δ and hypothetical arc wear height δ' .)

下のように A_w と等しい断面積をもつように円弧（半径 R_w ）を元の工具面に接するように描く。つぎに、すくい面から一定の角度（図8では 5° ）ごとに、摩耗輪郭上および仮想円弧摩耗上に接線を引き、その接点から法線を立ててゆき、この法線が摩耗前の工具面と交わる点を求め、この交点と法線の足までの長さ

δ および δ' をその角度の結晶方位に生じた摩耗高さとする。その結果、図8右側の12個のグラフを得た。各グラフの右肩に A_w および R_w を示す。

横軸の λ は上述のようにすくい面からの角度を採るから、図7のそれぞれの(a)~(c)の領域の中央線に沿っている。したがっ

て、 δ の値は図7のダイヤモンド投影球の該当する結晶面上において、切りくずあるいは仕上げ面が経路に沿った方向への摩擦によって生じさせられた摩耗の高さである。破線の曲線 δ' は工具材料が等方性であって円弧摩耗が生じたとした場合（等方性であっても、刃先摩耗は円弧形状になるとは限らないが）を仮想している。本工具形状では47.5°が横軸入の中央になり、この角度で δ' が最大となり左右対称になる。 δ 曲線が破線の δ' 曲線に沿うほど、摩耗形態は円弧形状に近いことになる。このようにして図7と図8を対照させると、工具の刃先結晶方位経路と工具摩耗形態との対応付けができることになる。

さて、図6、8の工具摩耗形態のすべてをダイヤモンドの摩耗異方性によって解析するには全結晶面の全方向についての摩耗特性データが必要である。しかし、現時点ではその完全なデータはない。計算上求めるにはへき開面と関連づけて可能かとも考えられるが、いまだなされてない。実験的に調べるには原石の個体間差が関係するので単一の実験データについて調べる必要もあり、多数の結晶面を対象にした膨大な実験が必要かと思われる。しかし、一部分の実験データは既にあるといえる。すなわち、研磨を一種の摩耗と考えると代表的な3面についてはこれまでに詳細に研磨特性が調べられてきた⁷⁾。また、Wilksら⁸⁾によって代表3面を結ぶ線上の結晶面群、すなわち、(100)と(110)の間、(111)から(100)と(110)へ向かう方向の一部の面群の研磨データが示されている。これらを合わせると単位三角球面の角の点と外周線上に沿う面群については60%程度のデータがあるといえる。したがって、刃先結晶方位経路がこの線上に沿う場合は一定限度の定量的な解析が可能であり、本報の4工具についても部分的に適用できるが、これには長文と説明図を要するので、次報にゆずり本報では定性的な説明にとどめる。

図7の刃先結晶方位経路図のうち、上述の単位三角球面の角の点および外周線上に沿うか、それに近い経路図は、4工具のそれぞれの経路(a)が該当する。また、それらの経路(a)はそれぞれ異なる領域を占めているが、結晶の対称性から等価な方位を通過している。そこで、以下の記述では簡単化のため、個々の結晶面および摩擦方向を図7と照らし合わせて「▲→■へ」や「◆→■の方向」などと記し、図8と対照させて述べる。

まず、図7のT411工具の経路(a)から、切りくずは経路の中央付近の◆からすくい面の■方向へ摩擦して行く。同様に仕上面も◆付近から■を通過して逃げ面へと摩擦して行くことと見ることができ、結晶方位に対する摩擦としてはほぼ等価である。これらの摩擦方向は、前述した単位三角球面を地図と見なすと、赤道にある■と◆の間を西に向かって摩擦して行くことに相当する。Wilksらによれば⁸⁾、この方向への研磨は極めて困難とされている。その結果、図8の(A)T411(a)の摩耗が比較的小さな摩耗にとどまっているといえる。ところが、図7のT422工具の経路(a)は同じ赤道に沿っているにもかかわらず、切りくずの摩擦方向は■→◆であり、仕上面のそれも■→◆であるから、T411工具の場合と反対で、赤道を東に向かって摩擦して行くことになる。この方向での研磨はかなり容易であり⁸⁾、その結果、図8(D)T422(a)の摩耗が大きく生じているといえる。

つぎにT412工具の場合切りくずは▲→■の方向に摩擦するが、▲は研磨がほとんど不可能な結晶面であり、また■での摩擦方向も難研磨の<110>方向⁷⁾であるので、その結果、図8(B)T412(a)の左半分のすくい面側の摩耗は少ない。しかし、仕上面は▲から◆への摩擦となり、▲付近では難研磨ではあるが、◆に近づくと急激に研磨容易になり、特に、◆の<100>方向⁷⁾は全結晶面中で最も研磨が容易であるので、図8(B)T412(a)の右半分の逃げ面側には大きな摩耗が生じる。T421工具の経路(a)はT412工具のそれと等価な線上に沿っているが、すくい面と逃げ

面が逆の位置にある。図8(C)T421(a)の右半分の仕上面が摩擦して行く部分の小さな摩耗は、上述のT412工具と同様に難研磨方位のためと言える。しかし、すくい面側の左半分はT412工具の逃げ面側とほぼ等しい経路でありながら低い摩耗にとどまっている。これは難研磨の▲がT412の場合よりもすくい面側に近いこと、図5からも分かるように背分力が最も低い結晶方位の工具であり、それにより切削力分布がすくい面上で低く抑制されるためと考えられる。

以上総合して、工具摩耗形態はその刃先結晶方位経路図に対応して説明できることが分かった。すべての結晶面の全方向について、また、原石個体についての耐摩耗性の定量的な特性を明らかにできれば、工具の摩耗特性が分かり、次いで切削条件に合った工具の最適結晶方位が予測できると考えられる。

5. 結 論

単結晶ダイヤモンド工具の結晶方位が工具摩耗に及ぼす影響を調べるに際して、工具原石の個体間の差を最小にするため、単一の実験を4分割して4種類の結晶方位の工具を製作し、その工具摩耗形態を調べ、各々のすくい面から逃げ面に至る刃先結晶方位経路と対照させて比較し、つぎのような結論を得た。

- (1)ダイヤモンドの結晶投影球を制限付きのメルカトル法による展開図として表し、すくい面から逃げ面に至る刃先結晶方位群を経路図として記入する方法を示した。
- (2)単結晶ダイヤモンド切削工具の摩耗量およびその形態はその刃先結晶方位経路図と対照させて説明できることを再確認した。
- (3)4種の工具中では、すくい面が{110}面、刃先反対方向が<100>方向の工具の摩耗が比較的少なく、切削力の増大はほとんど無く、最良の結晶方位工具であった。

本研究は電子線三次元表面形態解析装置に負うところ大で、同装置の使用に際し、(株)エリオニクスの岡崎伊喜夫社長、稲継芳弘氏、田口佳男氏には多大の援助を、さらに、大阪府立産業技術総合研究所の森河務氏にも同装置の使用と有益な助言をいただいた。ここに記し謝意を表します。

参 考 文 献

- 1)上神謙次郎、張 光均、玉村謙太郎、若林三記夫、森元時夫：ダイヤモンド工具の研磨に関する研究(第4報)－各種結晶方位の工具の摩耗－，精密工学会誌，60，5 (1995) 693.
- 2)上神謙次郎：単結晶ダイヤモンドの個体間の差(主として研磨特性から)，精密工学会1992年度関西地方定期学術講演会講演論文集，(1992) 128，p. 71.
- 3)張 光均，上神謙次郎，玉村謙太郎，若林三記夫，森元時夫：ダイヤモンド工具の研磨に関する研究(第3報)－単結晶ダイヤモンドの被研磨特性－，精密工学会誌，59，2 (1993) 281.
- 4)上神謙次郎，張 光均，玉村謙太郎，富森 紘：ダイヤモンド工具の研磨に関する研究(第1報)－鉄鋳円板による基礎的研磨実験－，精密工学会誌，54，11 (1988) 2138.
- 5)上神謙次郎，張 光均，玉村謙太郎，若林三記夫，森元時夫：ダイヤモンド工具の研磨に関する研究(第2報)－各種結晶方位のダイヤモンド工具による切削－，精密工学会誌，56，6 (1990) 1039.
- 6)E. M. Wilks and J. Wilks: The Resistance of Diamond Abrasion, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 5, (1972) 1902.
- 7)たとえば，3)の p. 282 の Fig. 2 と p. 283 の Fig. 3 など.
- 8)たとえば，6)の p. 1908 の Fig. 5 と p. 1910 の Fig. 7 など.