ダイヤモンド原石の色のバイト摩耗への影響*

前 田 幸 男** 沢 真 司** 梶 田 正 美**

Influence of the Colour of Natural Diamond on Tool Wear in Precision Turning

Yukio MAEDA, Masasi SAWA and Masami MASUDA

Even for diamond tool, the tool wear increases with cutting distance after on diamond turning of an Al-Mg alloy. According to diamond tool manufacturers, it is said that brown diamonds are stronger and tougher than yellow ones. It has not been made clear, however, what coloured diamond is preferable for cutting tools. On the other hand, Ikawa has reported that microfracture strength can be estimated by IR absorption coefficient on diamond crystals. In this paper, the correlation between the colour of diamond and the tool wear was examined on turning experiments of an Al-Mg alloy. Yellow, light yellow, white, light brown and brown crystals of natural diamond were tested as cutting tools. These tools have same crystallographic orientation and same ratio, RA, of IR absorption coefficient a_1 at wave length $\lambda=7.3 \mu\text{m}$ relative to the value a_2 at $\lambda=7.8 \mu\text{m}$. The following results were obtained. (1) Microfracture strength on the brown tools is approximately 1.2 times larger than that on the yellow tools, according to the estimation with a_1 and a_2 measured. The wear rates of both cutting tools are, however, almost same in the stationary state after some primary tool wear. (2) The surface roughness using the brown tools can not be distinguished from that using the yellow tools at any cutting distance.

Key words: diamond turning, colour of diamond, absorption coefficient, tool wear

1. 緒 言

ダイヤモンドバイトを用いて軟質金属を鏡面切削するとき、切削距離の増加に伴い、ダイヤモンドと言ってもサブミクロンオーダーで切れ刃稜が摩耗する。これまでに、筆者らはバイト摩耗に伴い、切削面粗さが向上する切削面形成メカニズムを明らかにした¹⁾。しかし、切削距離の増加に伴うバイト摩耗は、個々のダイヤモンドバイトにより著しく異なることが経験的に知られており、このことが量産加工上の障害となっている。このバイト摩耗が、結晶方位により異なること²⁾、原石中の窒素不純物と相関があること^{3,4)}、またダイヤモンドの微小破壊強度と赤外吸収係数との間に相関があること⁵⁾などが報告されている。また、ダイヤモンドは本来、無色透明であるが、不純物の混入により黄色や茶色の原石が多い。工具メーカーにおける研磨作業の経験から、原石の色によって硬さやじん性に差があり、黄色に比べ茶色の原石は硬く、バイト寿命が長いと言われている⁶⁾。

しかし、ダイヤモンド原石の色の耐摩耗性への影響については報告されておらず、上記の事実を裏づける切削事例も見当たらない。

そこで本研究では、ダイヤモンド平バイトを用いて、Al-4.5 wt%Mg 合金 (O 材) を切削し、ダイヤモンド原石の色のバイト摩耗への影響について実験解析し、バイト寿命のばらつき原因を明らかにすることを目的としている。

2. 実験装置および方法

切削実験に使用した精密正面旋盤の主要部は、空気軸受支持の主軸 (回転精度 $0.05 \mu\text{mTIR}$ 以下) と対向形油静圧案内テーブル (直線運動精度 $0.02 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$) から成り、このベッドはグラナイト製で4個のエアマウントにより支持されている⁷⁾。

特に断らない限り、表1に示す切削条件で端面切削を行っている。使用した工具は、単結晶ダイヤモンドに直線状の切れ刃を形成した平バイトである。すくい面より見た平バイトの切れ刃形状を図1に示す。バイトの送り方向と前切れ刃稜のなす角度を、ここではバイト設定角と呼ぶ。バイト設定角の最小読取精度は 0.001° である。

* 原稿受付 平成元年3月6日、昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会 (昭和63年3月17日) にて発表

** 正 会 員 (株) 日立製作所 (横浜市戸塚区吉田町 292)

Table 1 Cutting conditions

Tool	Straight tool (Single crystal diamond)
Workpiece	Al-Mg alloy (annealed)
Cutting speed	7.5-16.5 m/s
Feed rate	50 $\mu\text{m}/\text{rev}$
Depth of cut	10 μm
Cutting fluid	White kerosene
Tool setting angle	+0.016°

Fig. 1 Shape of a straight diamond tool

ダイヤモンドの窒素不純物と相関がある波長 $7.3 \mu\text{m}$ 及び $7.8 \mu\text{m}$ の赤外吸収係数の測定には、フーリエ変換赤外分光装置 (NICOLET 製 170 SX 型) を使用した。この装置の波数精度は $\pm 0.01 \text{ cm}^{-1}$ 、測定時の分解能は $\pm 0.5 \text{ cm}^{-1}$ である。ダイヤモンド原石を厚さ約 1.0 mm 、平行度 ± 1 以内の平行平板状の試料に研磨した後、赤外吸収係数の測定を行った。赤外吸収係数の測定後、直線切れ刃長さ 1.2 mm の平バイトとし、このバイトの結晶方位を測定した。平バイトの

結晶方位測定は、X線回折装置 (理学電機製) を使用した。バイトのすくい面に垂直に X 線を入射し、背面反射ラウエ法により結晶方位を測定した。結晶方位の測定精度は ± 1 以内である。

3. 実験結果と考察

3.1 ダイヤモンド原石の色と赤外吸収係数の比較

天然ダイヤモンドは、紫外から赤外の帯域での電磁波の吸収特性から、Ia, Ib, IIa, IIb 型に分類される。天然ダイヤモンドの 98% は Ia 型に属し⁸⁾、この原石は黄、薄黄、白、薄茶、茶などの色をしている。

工具メーカーがバイトとして使用するダイヤモンド原石 (0.75 ct) を、外観の色で選別した例を図 2 に示す。この図に示す黄、薄黄、白、薄茶、茶の色と原石中の不純物との対応は不明である。しかし、ダイヤモンドの窒素不純物を赤外吸収スペクトルで評価する報告が多い。

そこで、図 2 に示す 20 個の原石を平行平板状の試料に研磨し、この赤外吸収スペクトルを測定した。測定例を図 3 に示す。図 3 における波長 $3 \sim 6 \mu\text{m}$ の間の吸収スペクトルは、純粋なダイヤモンドの結晶構造に対応し、波長 $6 \sim 13 \mu\text{m}$ の吸収は窒素不純物による欠陥に起因する。この窒素不純物による欠陥のうち、井川ら⁹⁾によれば、ダイヤモンドの微小破壊強度は、波長 $7.3 \mu\text{m}$ における赤外吸収係数 a_1 と相関がある

Fig. 2 Natural diamonds with various colours

Fig. 3 Typical FT-IR spectra of natural diamond

Fig. 4 Absorption coefficients at 7.3 μm and 7.8 μm in natural diamonds with various colours

ことが報告されている。また Wong³⁾, Syn⁴⁾によれば、バイト摩耗は波長 7.3 μm の赤外吸収係数 a_1 と波長 7.8 μm の赤外吸収係数 a_2 の比 RA ($= a_1/a_2$) により異なることが報告されている。ここでは、窒素不純物による吸収スペクトルのうち、波長 7.3 μm と波長 7.8 μm における赤外吸収係数 a_1, a_2 に着目し、整理した結果を図 4 に示す。この図から、原石の色が黄と薄黄のグループに比べ、茶と薄茶のグループの赤外吸収係数 a_1, a_2 はいずれも 1/10~1/2 程度と小さく、白色は両者の中間値を示すと言える。井川⁵⁾の報告を

Fig. 5 Absorption coefficient ratio of natural diamonds with various colours

もとに算出すると、図 4 の黄色のダイヤモンド (a_1 の平均値 17.4 cm^{-1}) に比べ、茶色のダイヤモンド (a_1 の平均値 1.3 cm^{-1}) は微小破壊強度で約 1.2 倍高いと考えられる。

3.2 ダイヤモンド原石の選定

上記の微小破壊強度以外に、バイト摩耗に影響すると考えられる要因として、赤外吸収係数の比 RA ($= a_1/a_2$)³⁾⁴⁾、及びダイヤモンドの結晶方位²⁾に関する報告がある。ここでは、切削実験に使用するダイヤモンドバイトの赤外吸収係数の比および結晶方位をできる限り等しくなるようにした。

はじめに、図 4 の原石の赤外吸収係数の比 RA を求めた。その結果を図 5 に示す。図 5 から、以下のことが言える。

- (1) 赤外吸収係数の比 RA は、0.14~0.95 の範囲である。
- (2) 色により、RA=0.3~0.6 のばらつきがある。
- (3) 黄色と茶色の原石には、顕著な有意差が認められない。

以上のことから、図 2 に示したダイヤモンド原石 20 個のうち、図 4 の赤外吸収係数 a_1 と図 5 の赤外吸収係数の比 RA が各色の平均値に近い、表 2 に示すような原石を 1 個ずつ選択した。これら各色の典型的

Table 2 IR absorption coefficient of natural diamonds used in experiment

Tool sample	Colour	Absorption coefficient (cm^{-1})		RA = $\frac{a_1}{a_2}$
		$a_1(\lambda=7.3 \mu\text{m})$	$a_2(\lambda=7.8 \mu\text{m})$	
A	Brown	1.3	2.0	0.65
B	Light brown	0.8	1.7	0.47
C	White	4.9	12.0	0.41
D	Light yellow	11.3	26.6	0.42
E	Yellow	19.8	34.4	0.58

Fig. 6 Crystallographic orientation of single crystal diamond tools shown in Table 2

な5個の原石では、以下のことが言える。

- (1) 黄色の原石の赤外吸収係数 α_1 は、茶色に比べ約15倍大きい。
- (2) 赤外吸収係数の比 RA は、0.41~0.65 の範囲であり、黄色と茶色の原石の RA はほぼ同じである。

次に、表2の5個の原石を、直線切れ刃長さ1.2 mmを有する平バイト(図1)に成形した。この際、川久保ら²⁾の報告をもとに、前逃げ面の結晶方位を{310}面に設定した。これらのバイトの結晶方位の測定結果を図6に示す。5本のバイトにおける結晶方位の設定値からの角度誤差は 2° 以内である。

3.3 原石の色とバイト摩耗の相関

ダイヤモンドバイトの摩耗は、バイト送りピッチとはほぼ等しい幅にわたって{110}面からなる面取り形状を示す²⁾⁹⁾。筆者らは、このバイト摩耗部の形状のうち、図7に示す切れ刃後退量 δ_1 と切削面粗さの間には、強い相関があることを明らかにしている¹⁾。そこでここでは、切削面粗さに対し支配的な切れ刃後退量 δ_1 によりバイト摩耗を評価している。なお、切れ刃後退量 δ_1 は鏡面切削された面にバイトを数 μm プランジカットし、その刃形の転写形状を触針式面粗さ計(Talysurf)を用いてバイト送り方向に走査し求めた。この方法における δ_1 の測定精度は $0.05 \mu\text{m}$ である。図6に示した5本のバイトの切れ刃後退量の推移を図8に示す。図8より、以下のことが言える。

- (1) 各バイトとも、切削距離 50 km 以上における

(a) Wear model of straight diamond tool

(b) Cutting edge profiles of plunge-cut replica

Fig. 7 Cutting edge profiles of plunge-cut replica with sharpened and worn tools

切削距離に対する切れ刃後退量の増加率(ここではこれをバイトの摩耗率と呼ぶ)は、 $0.002 \mu\text{m}/\text{km}$ とほぼ一定である。

- (2) 原石の色が茶、薄茶のバイト A, B は、切削距離 160 km における切れ刃後退量 δ_1 が $0.5 \mu\text{m}$ であるのに対し、黄、薄黄、白のバイト C, D, E

Fig. 8 Effect of cutting distance on cutting edge recession

の δ_1 は $0.4 \mu\text{m}$ と小さい。

図8の切削距離 160 km における、バイト A (茶色の原石) とバイト E (黄色の原石) の切れ刃摩耗の顕微鏡写真及び刃形の転写形状を図9に示す。図9においては、バイト A, E とともに前逃げ面から観察した切れ刃摩耗部に、境界摩耗やチッピングなどの異常摩耗が認められない。このことから、正常な切削状態で次第にバイトが摩耗したと言える。

以上のことから、切削距離 50 km 以上の定常摩耗領域では、バイトの摩耗率がほぼ一定である。しかし、切削初期のバイトの摩耗率が異なるため、100 km 以上の切削距離において切れ刃後退量に最大 $0.1 \mu\text{m}$ の差を生じている。この初期摩耗の差は、黄色に比べ茶色のダイヤモンドが相対的に研磨しにくいいため、切れ刃稜に顕微鏡では確認しえない微細なマイクロクラックが刃付け研磨時に発生し、これが初期摩耗を促進することに起因していると考えている。

3.4 バイト摩耗が切削面粗さに及ぼす影響

図8と同一の実験において得られた切削距離の増加

Fig. 10 Dependence of cutting distance on surface roughness

に伴う切削面粗さの推移を図10に示す。図10から、以下のことが言える。

- (1) 各バイトとも切削距離の増加とともに、切削面粗さは良くなり、 $0.02 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ で一定となる。
- (2) 切削初期のバイトの摩耗率の大きいバイト A (茶色の原石) とバイト B (薄茶色の原石) では、他のバイトと比べ、切削面粗さが $0.02 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ に達するまでの切削距離が短い。
- (3) バイト A (茶色の原石) とバイト E (黄色の原石) の切削距離に対する切削面粗さの変化は、ほぼ同じ傾向をたどる。

筆者らは、正のバイト設定角で切削すると、切れ刃後退量 δ_1 の増加に伴って切削面粗さが向上する切削メカニズムは、バイト摩耗部にサブミクロンの切残し量が生じ、これを後続の前切れ刃で微小切削し、むしろ痕を除去するためであることを先に明らかにした¹⁾。図8と対比すれば明らかなように、切れ刃後退量 δ_1

Fig. 9 Microphotographs and cutting edge profiles of worn tools

が $0.25 \sim 0.3 \mu\text{m}$ に達した時点で、切削面粗さは $0.02 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ となる。このことから、切れ刃後退に伴う微小切削作用による切削面粗さの改善機構が実証される。

4. 結 言

色が5種類に大別されるダイヤモンド原石より、赤外吸収係数の比と結晶方位がほぼ等しくなるように製作した平バイトを用いて、正のバイト設定角でAl-Mg合金を切削し、ダイヤモンド原石の色がバイト摩耗に及ぼす影響を実験検討した。その結果、本実験条件範囲内では、

- (1) ダイヤモンド原石の色と、波長 $7.3 \mu\text{m}$, $7.8 \mu\text{m}$ の赤外吸収係数 a_1 , a_2 には相関が認められ、黄色のダイヤモンドは、茶色に比べ a_1 , a_2 とも約10倍大きい。
- (2) 初期摩耗領域（切削距離50 km以下）において、原石の色が黄、薄黄、白、薄茶、茶のバイトの切れ刃後退量に最大 $0.1 \mu\text{m}$ の差が生じる。
- (3) 定常摩耗領域（切削距離50 km以上）において、切削距離に対する切れ刃後退量の増加割合は、黄色と茶色のダイヤモンドで差が認められない。
- (4) 黄色のダイヤモンドと茶色のダイヤモンドでは、切削距離に対する切削面粗さの推移に大差がない。

ことなどを明らかにした。

茶色系のダイヤモンドが硬くて、研磨しにくいとの工具メーカーでの経験をも考慮すると、この種のダイヤモンドでは、刃付け研磨しても切れ刃稜にマイクロラックが残存し、これが切削初期のバイト摩耗を促進していると推定される。

参 考 文 献

- 1) 前田幸男, 樹田正美, 西口 隆, 沢 真司, 伊藤 立: ダイヤモンド工具によるAl合金の鏡面切削に関する研究(第2報), 精密工学会誌, **55**, 5 (1989) 847.
- 2) 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.
- 3) C. J. Wong: Fracture and Wear of Diamond Cutting Tools, Trans. ASME, **103**, (1981) 341.
- 4) C. K. Syn, J. S. Taylor and R. R. Donaldson: Diamond Tool Wear vs. Cutting Distance on Electroless Nickel Mirrors, Proc. SPIE, **676**, 8, (1986) 26.
- 5) N. Ikawa, S. Shimada and H. Tsuwa: Non-Destructive Strength Evaluation of Diamond for Ultra-Precision Cutting Tool, Ann. CIRP, **34**, 1, (1985) 117.
- 6) 浜田 洋: 超精密加工用ダイヤモンドバイト, 精密機械, **51**, 9 (1985) 1669.
- 7) 前田幸男, 樹田正美, 西口 隆, 沢 真司, 伊藤 立: ダイヤモンド工具によるAl合金の鏡面切削に関する研究(第1報), 精密工学会誌, **54**, 10 (1988) 165.
- 8) 井川直哉: ダイヤモンドの工学(1), 機械の研究, **36**, 6 (1984) 673.
- 9) R. Wada, H. Kodama and K. Nakamura: Wear Characteristics of Single Crystal Diamond Tool, Ann. CIRP, **29**, 1, (1980) 47.