微粒ダイヤモンド多結晶体による超精密加工

Precision Machining of Al Alloy with a Fine-grained Polycrystalline Diamond Tool

大橋 忠一

Tadakazu OHASHI

A fine-grained diamond compact synthesized using a mixed sintering agent of magnesium carbonate and oxalic acid dihydrate was evaluated through precision machining of aluminum alloys in comparison with natural single crystals of diamond. The flank wear of the tool made of polycrystalline compact was half that of single crystal. And the tool made of polycrystalline compact achieved as excellent a surface finish as that of single crystal.

[precision machining, diamond, Al alloy]

1. はじめに

近年の情報機器関連の発展はめざましく、高速化・高機能化はもちろんのこと小型化・高密度化はとどまることを知らず、機器に組み込まれている電子および光学精密部品の精度に対する要求はますます厳しくなっている。これら精密部品は製品の性能を大きく左右するため、ほとんどが超精密加工により高精度に製造されている。例えば、ビデオレコーダ用のドラムおよびガイド等電子精密部品、レーザプリンタに使用されるポリゴンミラーや非球面レンズ、フレネルレンズ等光学精密部品がある。また、これらの光学部品を成形するための精密金型の製造にも超精密加工が使用されている。携帯電話等に搭載されている小型カメラのレンズは精密金型による成形で製造している。

超精密加工には切削加工、研削加工等があるが、ここでは、切削加工について述べる。超精密切削加工への取り組みは古く 1940 年頃にはオランダ Philips 社がダイヤモンド工具を使用してテレビの光学系精密部品を作製している[1]。1960 年には LLL(米国 Lawrence Livermore National Laboratory)の J.B. Bryan は micro inch machining というタイトルで銅やアルミニウムの鏡面切削が可能であることを発表している[2][3]。超精密切削加工が可能となったことで、磨きによる仕上げが不可欠であった上記のような超精密加工品が容易にかつ

安価に得られるようになった。超精密切削加工はメーカーにとって重要な技術としてとらえられており、加工ノウハウ流出防止のためにコスト高の国内工場で行っている場合もある。超精密切削加工は情報機器産業の発展を支えるキーテクノロジーの 1 つと考えられる。

超精密加工には、非常に優れた耐摩耗性と鋭利な刃先エッジが要求されるため単結晶ダイヤモンド工具が主に用いられている[2]。また、ダイヤモンド単結晶には合成品と天然品が用いられているが、仕上げ面粗度が要求される分野には経験から天然ダイヤモンドが主に用いられている。単結晶ダイヤモンドは超精密加工に適した性能を有しているが、単結晶であるため劈開性を示し、欠け易いという問題をもっている。また、天然ダイヤモンドの場合は不純物および欠陥が一定ではなく、特性が安定しない。その結果、工具寿命がばらつくという問題もある。J.M. Oomen らはダイヤモンドの種類により耐摩耗性が異なるという知見を得ている[4]。

ダイヤモンド工具には単結晶の他にダイヤモンド粒子を超高压・高温下で焼結した多結晶体がある。ダイヤモンド多結晶体は様々な結晶面を有するダイヤモンド粒子間に部分的に直接結合をもっている焼結体であるため、特定の劈開面をもたず耐チッピング性に優れ、安定した特性を有している。現在、ダイヤモンド多結晶体工具は自動車部品、航空機部品の加工等に幅広く

〒311-0102 茨城県那珂郡那珂町向山 1002-14 三菱マテリアル(株)総合研究所那珂研究センター先進プロジェクト推進部, 科学技術振興事業団 Central Research Institute Naka Research Center, R&D Projects Department, 1002-14 Mukohyama, Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken, 311-0102. ohashi@mmc.co.jp, Core Research for Evolutional Science and Technology, Japan Science and Technology Corporation, c/o NIRIM

使用されている。しかし、超精密加工には多結晶工具はほとんど使用されない。多結晶はダイヤモンド粒子間に部分的に直接結合をもっている焼結体であり、刃先エッジの形状はダイヤモンド粒子の大きさに依存する。サブミクロンより高い形状精度が要求される超精密加工では多結晶中の粒子の大きさが問題となってくる。従来の多結晶は数ミクロン以上の粒子径であるので超精密加工に必要な鋭利な刃先が得られず、希望の形状精度が得られないことがその理由と考えられる。

もし、非常に微細な組織を有する微粒ダイヤモンド多結晶が作製できれば鋭利な刃先エッジを有し、特性の安定した超精密加工用工具の作製が可能となる。多結晶はその製法から量産効果によるコストダウンも見込める。微粒ダイヤモンド多結晶は理想的な超精密加工用工具素材になると考えられる。

これまで、いくつかの微粒ダイヤモンド多結晶が提案されているが、助剤量が多いため十分な耐摩耗性が得られておらず[5][6]、耐摩耗性と鋭利な刃先エッジ両方を有する微粒ダイヤモンド多結晶は合成されていない。最近、赤石によって新しい助剤を用いた微粒ダイヤモンド多結晶が開発された[7]。この多結晶の切削性能を評価したところ従来ダイヤモンド多結晶より優れた耐摩耗性を示し[8]、超精密加工においても単結晶ダイヤモンドと同等の性能を示すことがわかった[9][10][11]。以下、超精密加工における微粒ダイヤモンド多結晶の特性について報告する。

2. 微粒ダイヤ多結晶による超精密加工

2.1 実験方法

超精密加工の評価に用いた微粒ダイヤモンド多結晶は赤石により開発された非金属助剤ダイヤモンド多結晶である。原料粉末には0~1 μm 天然ダイヤモンド粉末を用いており、助剤には炭酸マグネシウム+0.1 mol シュウ酸二水和物を用いている。処理条件は、圧力 7.7 GPa、温度 2300℃、保持時間 20 分である。

微粒ダイヤモンド多結晶の評価は2種類のアルミ合金を超精密加工することで行った。ひとつは電子精密部品であるビデオレコーダのドラム等に使用されている日本軽金属製 ADC12 に対する切削性能を評価した。ADC12 はダイカスト用アルミ合金で Table 1 に示すようにアルミの他にシリコンおよび銅が添加されている。ドラムはテープが走行するため耐摩耗性も要求される。ADC12 は、多量の Si で铸造性を改善し、Cu を固溶させて強さを高めている(Table 2)[12]。工具への

耐摩耗性が求められる材料であるので、評価においては仕上げ面粗度と工具刃先の摩耗量を評価した。

もう一つは、光学精密部品であるレーザープリンタのポリゴンミラー等に使用される日本軽金属製 S3M に対する切削性能を調べた。S3M は超高純度アルミニウム地金に Mg を主とした 2~3 の元素を添加した合金である。光学用であるので光の反射率が重要で ADC12 と異なり金属間化合物の析出がほとんどないとされている[12]。S3M は表面性状を利用する用途が多いので、評価は仕上げ面粗度を中心に行った。

切削条件を Table 3 に示す。切削油には灯油を使用した。ADC12 送り、切り込みともに 35 μm 、S3M ではさらに小さく送り、切り込みともに 5 μm でおこなった。本研究で被削材回転数を一定にして加工しているのは、回転数が変化する場合に生じる回転軸のわずかな振れによる加工精度の低下を防ぐためである。比較材には、天然ダイヤモンド単結晶を使用した。比較に使用した天然ダイヤモンド単結晶は、2 種類である。外観色から「無色」、「茶色」としている。経験的ではあるが、刃付け性等から「無色」の方が「茶色」のものよりグレードが高いとされている。使用工具は、Fig. 1 に示すような特殊口ウ付けバイトで刃先 R0.8 mm、すくい角 0°、逃げ角 5°、超硬合金製シャンクである。単結晶工具は、すくい面が(110)面、逃げ面が(100)面になるように作製した。加工機は、理研製鋼製超精密 CNC 旋盤 UPL-1 K である。刃先および被削材観察には光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡(SEM)を使用した。仕上げ面粗度の測定にはテラー・ホブソン製フォームタリサーフを使用した。

Table 1. Composition of aluminum alloy (wt%).

Name	Si	Cu	Mg	Fe	Al
ADC12	10.8	2.5	-	-	Bal.
S3M	0.005	0.001	3.7- 4.7	0.004	Bal.

Table 2. Mechanical properties of aluminum alloy.

Name	Tensile strength (N/mm ²)	0.2% yield strength (N/mm ²)	Brinell hardness HB
ADC12	228	154	74.1
S3M	216	88	58

Table 3. Cutting conditions.

Name	Cutting velocity (m/min)	Depth of cut (mm)	Feed rate (mm/rev)
ADC12	113-280	0.035	0.035
S3M	47-153	0.005	0.005

Fig. 1. Enlarged view of tool edge.

Fig. 2. Overview of cutting test.

2.2 ADC12 の超精密加工

加工の様子を Fig. 2 に示す。図右側の円筒形状のものが被削材であり、左側が固定された工具である。刃先は切り屑に隠れてよく見えない。排出される切り屑はカールしており、適当な長さで自然に分断されるため、通常のアルミ合金切削加工と違いブレーカー等を用いて切り屑を分断する必要はない。

ADC12 を 80 km 加工した後の逃げ面摩耗幅を測定し

た。微粒ダイヤモンド多結晶は天然ダイヤモンド単結晶の約半分しか摩耗せず、優れた耐摩耗性を示すことが確認された。加工後の工具刃先を光学顕微鏡により観察した。単結晶の場合、種類によらず摩耗部と未摩耗部の境界部分がはっきりとしているのに対して微粒ダイヤモンド多結晶は摩耗部と未摩耗部の境界が比較的曖昧であった。境界部分の違いは、単結晶の摩耗がダイヤモンド自身の摩滅により進行しているのに対して多結晶の摩耗がダイヤモンド粒子の摩滅と粒子の脱落両方で進行していることによると考えられる。

また、単結晶の摩耗部はすくい面から観察すると横に長い三角形に近い形状をしており、多結晶と明らかに異なっていた。単結晶で三角形に摩耗が進行するのは摩耗し易い結晶面から摩耗が進行している可能性を示唆している。方位依存性がない多結晶で、そのような形状が観察されないことからこの可能性が高い。更に刃先摩耗部をよく観察するために、SEM で 80 km 加工後の刃先エッジの観察をおこなった。単結晶の場合、加工後の刃先は面取りされたように斜めに摩耗していた。これに対して多結晶は加工前の刃先エッジ形状を保っていた。しかし、ダイヤモンド粒子の摩滅および脱落により刃先には細かな凹凸ができていた。多結晶のダイヤモンドの摩耗体積は単結晶よりかなり小さかった。SEM 観察からも多結晶は単結晶に比べ耐摩耗性が優れていることがわかった。

次に仕上げ面粗度を加工長 40 km と 80 km で測定した。80 km 加工後の多結晶の平均面粗度 R_a は $0.06 \mu\text{m}$ 程度で、単結晶と同等であった。40 km と 80 km での面粗度の変化は単結晶より多結晶が小さく安定していた。

加工面を光学顕微鏡により観察した結果、単結晶の場合は、刃先摩耗形状の転写により、送り量に対応する大きなうねりが観察された。多結晶の場合は、刃先の後退量が小さいことを反映して大きなうねりは観察されず、ダイヤモンド粒子径に対応すると考えられる細かなすじ状の模様が観察された。また、単結晶の場合には析出 Si と考えられる凹凸も観察されたが、多結晶の場合には析出 Si と考えられる部分がはっきりと観察されず、ぼんやりとしたくぼみとして観察された。

刃先を観察した結果、単結晶は多結晶に比べて刃先の摩耗は早いが常に鋭利なエッジを形成するように摩耗が進行していた。多結晶は摩耗進行が遅く加工前の刃先エッジを保っているが刃先自体の鋭利さは失われていた。単結晶では析出 Si を切断しているのに対して、多結晶では切断できず、押しつけ、もしくは脱

落させている可能性があり、これが表面状態の差になって現れたと考えられる。

以上より、ADC12 の超精密加工において微粒ダイヤモンド多結晶は天然ダイヤモンド単結晶より優れた耐摩耗性と同等の仕上げ面粗度を得られることがわかった。

2.3 S3M の超精密加工

5 μm と非常に小さい切り込み量であるが、糸状の連続した切り屑が排出された(Fig. 3)。500 km 加工後に刃先の観察をおこなった(Fig. 4)。単結晶のすくい面には、多結晶には無いクレータ状の摩耗が観察された。これは、切り屑がすくい面を擦ることにより形成されたと考えられる。刃先の鋭利さに関しては、単結晶が摩耗により刃先が後退しているものの鋭利さは失っていないのに対して、多結晶はやや丸みを帯びたエッジになっていた。

次に仕上げ平均面粗度 R_a を評価した。加工初期では、単結晶は多結晶に比較して優れた面粗度を示した。しかし、加工が進むにつれて単結晶の R_a は低下し加工長 300 km 以降は、単結晶と多結晶の平均面粗度の差は 0.005 μm 以下と非常に小さくなった。 R_a は約 0.03 μm であった。加工長 500 km での仕上げ面粗度の測定結果を Fig.5 に示す。多結晶は単結晶と同等の仕上げ面粗度が得られることがわかった。

微粒ダイヤモンド多結晶は、初期から平均面粗度 $R_a = 0.025 \mu\text{m}$ 以上であったが、加工長 500 km までの範囲では加工長に依存せず平均面粗度 $R_a = 0.03 \mu\text{m}$ 前後で推移しており安定していた。この傾向は、ADC12 の場合と同様であった。加工面粗度の安定性という観点では、多結晶は単結晶より優れていることがわかった。

Fig. 3. Optical micrograph of chips of aluminum alloy, S3M.

Fig. 4. Optical micrographs of the tool edge from rake direction after cutting S3M. Cutting length is 500 km. (a) Fine-grained polycrystalline diamond, (b) Colorless single crystal.

(a) $R_a = 0.032 \mu\text{m}$

(b) $R_a = 0.033 \mu\text{m}$

Fig. 5. Profiles of the finished surface of S3M after 500 km cutting. (a) Fine-grained polycrystalline diamond, (b) Colorless single crystal.

Fig. 6. Optical micrographs of the finished surface of S3M cut by fine-grained polycrystalline diamond tool. Cutting lengths (a) 10 km, (b) 100 km, (c) 300 km.

被削材表面の光学顕微鏡観察を行った。多結晶体の場合は加工長によらず、同じ様な模様が観察された (Fig. 6)。一方、単結晶は加工長により被削材の模様に変化が見られた (Fig. 7)。この結果は、仕上げ面粗度の測定結果とも対応している。

以上より S3M の超精密加工において微粒ダイヤモンド多結晶は単結晶と同等の仕上げ面粗度が得られることがわかった。

3. まとめ

精密部品に使用されている代表的な 2 種類のアルミ合金 ADC12 と S3M の超精密加工において、微粒ダイ

Fig. 7. Optical micrographs of the finished surface of S3M cut by single crystal tool. Cutting lengths (a) 10 km, (b) 100 km, (c) 300 km.

ヤモンド多結晶は単結晶ダイヤモンドと同等の仕上げ面粗度と優れた面粗度の安定性を示すことが確認された。面粗度のばらつきが小さいことは実際の大量加工においては品質の安定性という観点から達成面粗度と共に重要である。また、ADC12 の加工において多結晶は単結晶より優れた耐摩耗性を示すことが確認された。

微粒ダイヤモンド多結晶製超精密加工用工具には、特性の安定化および多結晶サイズの大面積化によるコストダウンが期待される。また、多結晶は単結晶と異なり方位依存性がないので、工具加工において研磨方向の制約を受けず、複雑形状刃先への対応も容易である。切れ刃長に関しても単結晶より長いものに対

応可能で、工具刃先の自由度は大きい。例えば、多焦点フレネルレンズの溝加工のような場合にV型の単結晶ダイヤモンド工具が使用されているが[13]、多結晶体であればVをたくさん集めた鋸刃状の工具を作製することも可能であると考えられる。樹脂製レンズ等の精密金型の仕上げ加工は、単結晶ダイヤモンド製エンドミル等により行われている。精密金型加工で精度を阻害する最も大きな要因は工具摩耗であるといわれている[14]。工具のわずかな摩耗で設計寸法からのズレが生じるため、ほんのわずかな摩耗で工具は使用不可となってしまう。微粒ダイヤモンド多結晶体は、ADC12の端面切削において非常に優れた耐摩耗性を示しており、旋削用としてだけでなく超精密加工用エンドミルとしても高い可能性をもっていると考えられる。以上のように微粒ダイヤモンド多結晶体工具は超精密加工の可能性をさらに広げるものと期待される。

参考文献

- [1] 工作機械技術研究会編：工作機械 84 超精密加工，p.14 (大河出版, 1984).
- [2] N. Ikawa, R.R. Donaldson, R. Komanduri, W. König, P.A. McKeown, T. Moriwaki, I.F. Stowers: *Annals of the CIRP*, **40**, 587 (1991).
- [3] 谷口紀男：ナノテクノロジーの基礎と応用，p.72 (工業調査会, 1988).
- [4] J.M. Oomen, J. Eisses: *Precision Engineering*, **14**, 206 (1992).
- [5] M. Akaishi, T. Ohsawa, S. Yamaoka: *J.Am. Ceram. Soc.*, **74**, 5 (1991).
- [6] M.W. Cook: *Industrial Diamond Review*, **58**, 15 (1998).
- [7] 赤石實：第 41 回高圧討論会講演要旨集，p.108 (2000).
- [8] 大橋忠一，山本和男，赤石實：第 42 回高圧討論会講演要旨集，p.164 (2001).
- [9] 大橋忠一，山本和男，赤石實：第 42 回高圧討論会講演要旨集，p.90 (2001).
- [10] 大橋忠一，山本和男，赤石實：2002 年度精密工学会春季大会講演論文集，p.547 (2002).
- [11] T. Ohashi, K. Yamamoto, M. Akaishi: submitted.
- [12] 日本軽金属技術資料.
- [13] 竹内芳美：精密工学会誌，**68**, 167 (2002).
- [14] 安斎正博，2002 年度精密工学会春季大会講演論文集，p.540 (2002).

[2002 年 11 月 20 日受理]