アルミナ短繊維強化アルミニウム合金 の高精度切削加工 (第1報)*

——刃先形状, 切削条件が被削性へ及ぼす影響——

古沢利明** 日野 裕** 野呂瀬 進** 磯貝 毅***
中村 示** 山田国男** 貴志浩三†

High Precision Cutting of Aluminum Alloy Reinforced by
Short Fibers of Alumina (1st Report)
-The Effects of Tool Geometry and Cutting Conditions on Machinability-

Toshiaki FURUSAWA, Hiroshi HINO, Susumu NOROSE, Takeshi ISOGAI,
Simesu NAKAMURA, Kunio YAMADA and Kozo KISHI

Up to the present, aluminum alloy reinforced by short fibers of alumina is used as the parts of automobile because this material has wear-resistant. In the future, it is necessary to generate higher precision surface in order to apply to other uses. The purpose of this study is to experimentally generate higher precision surface of this material by means of diamond cutting with an ultra precision lathe. In order to attain the purpose, the first step was to quantitatively estimate surface roughness and defect from three dimensional measurement of the finished surface. After that, the optimum working conditions were selected. The results obtained from this study are as follows: The pore was generated by falling off of fiber, and the swell of matrix around fiber was observed in the finished surface. If tool geometry and another conditions were selected properly, better results were found to be obtained in surface defects, tool wear, and straightness of finished surface.

Key words: high precision cutting, SFRM, diamond cutting

1. 緒 言

繊維強化複合材は金属単体・合金では実現できない高い比強度・比弾性率, 耐摩耗性等の特性を示すので, 大きな期待が寄せられ研究開発に多大な努力がなされてきた。中でも, 軽量のアルミニウム合金を母材にしてアルミナ短繊維で強化した複合材は耐摩耗性が優れていることから, 自動車のピストンリングの一部に使用され実用化の段階に入りつつある。摩擦材としてさらに今後他の用途への適用を図ろうとする場合, 経済的な加工が可能であることは当然のことであるが, 機器の精度レベルが向上している現状では仕上げ面を高精度に加工する必要が生じてくることになる。

アルミニウム基複合材の仕上げ面生成機構について

是新井ら¹⁾により, 繊維, 母材, および界面の機械的性質等の相違, 並びに切削状態によって仕上げ面形態に3種類のパターンがあることが報告され, 生成機構が明確になりつつある。また, 仕上げ面精度に大きな影響を及ぼす工具摩耗の検討²⁾も進められ, 摩耗機構の解明が進められている。

本研究は, 被削材中に硬質, 軟質の組織を持つために良い仕上げ面を生成することが困難な現状の複合材に対し, 工具寿命を考慮しながら, 表面欠陥が少なく平滑な精度の高い切削面を得ることを目的とした。そこで, 超精密旋盤によるダイヤモンド切削を行って仕上げ面を生成し, 表面微細形状の三次元評価により, 表面欠陥の定量化を行った。更に, このような仕上げ面を得るための適切な刃先形状, 並びに切削条件の選定を行った。

その結果, 仕上げ面では刃先の押付け力による繊維の脱落により穴が生成し, 繊維周囲の母材の盛り上がりが生じていることが分かった。また, 適切な刃先形

* 原稿受付 平成3年4月9日, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会(平成2年9月28日)にて発表

** 正 会 員 帝京大学理工学部(宇都宮市豊郷台1-1)

*** 帝京大学理工学部

† 正 会 員 宇都宮大学工学部(宇都宮市石井町2753)

状、並びに切削条件を選定することにより、穴の深さ及び盛り上がり量を小さくし、工具摩耗の減少、形状精度の維持を図ることができた。

2. 実験装置及び方法

実験方法および条件は表1に示す使用機械、工具、被削材、切削条件、並びに環境条件で行った。被削材は、繊維がほぼ一方向に配向しており、 $\phi 40\text{mm}$ の試料を切断面が配向方向の軸と直交する面となるように、約2mm厚に円板状に切断し、磁気ディスク基板($\phi 130 \times \phi 40 \times 1.9$)へ接着剤でバランスを保てるように2枚張り付け、基板を主軸のウレタン製の真空チャックで保持した。そのため、繊維配向方向に直角に切削することになる。また、本研究では、仕上げ面粗さ $0.2\mu\text{mRmax}$ 、真直度 $1\mu\text{m}$ 程度を検討しており、切込み $3\mu\text{m}$ の微小切削を行っているため、環境には特に配慮し実験した。

仕上げ面の微細形状の測定には、触針式表面形状測定器(小坂研究所 ET-30HK)、並びに座標測定機能付走査型電子顕微鏡(エリオニクス EMM-3000)を用いた。以下各機器を用いた測定方法を触針法、SEM法と略記する。測定値は触針法の場合、基準長さ 0.8mm 、12か所測定した平均値であり、SEM法は基準長さ $40\mu\text{m}$ であり、105か所測定した平均値である。図1にはSEM法による測定方法を示す。繊維による穴の最も深い部分に位置決めし、断面曲線を求め、盛り上がり量および穴の深さを基準位置から測定する。

工具摩耗量の測定は工具顕微鏡(ニコン MM-11U)を用いて、平バイトでは横逃げ面と前逃げ面のコーナ部分の摩耗量、先丸バイトでは摩耗部分の最大幅を取った。真直度の測定は、切削終了後試料をチャックに取り付けた状態で、旋盤の刃物台に固定した電気マイクロメータで試料の全長 40mm にわたって変位を測定し読みの最大差を測定値としたものである。また、切削抵抗は動力計(キスラー 9251A)を工具ホルダと刃物台間に固定し、記録には断続切削で高速現象となるためFFTアナライザ(小野測器 CF-940)を用いた。

3. 実験結果及び考察

3.1 刃先形状が仕上げ面粗さおよび表面欠陥に与える影響

Table 1 Test apparatus and conditions

Machine tool	Ultra precision disk lathe(DPL-100:Hitachi Seiko) Axial spindle motion accuracy within $0.03\mu\text{m}$ Static rigidity of spindle in axial direction 147 N/ μm Yawing error of tool feed travel within $0.1\mu\text{m/mm}$
Tool	Throw away type single crystal diamond tool Rake angle 0° Clearance angle 5° Approach angle 30° Length of cutting edge 0.8mm (Straight tool) Rounded radius $0.4, 1.6\text{mm}$ (Rounded corner tool)
Work material	$\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ short fiber reinforced aluminium alloy Composition of fiber Al_2O_3 85%, SiO_2 15% Contents of fiber 10 % Average diameter of fiber $3.6\mu\text{m}$ Aspect ratio ≤ 3.0 Matrix material A4032 Processing Extrusion Heat treatment T6
Cutting condition	Spindle speeds 1000 - 3000 rpm(145 - 1179 m/min) Feed rate 0.01 - 0.03 mm/rev Depth of cut 3 - 20 μm Cutting fluid Insoluble(Synthetic oil)
Room condition	Temperature $20^\circ \pm 1^\circ$ Humidity $55 \pm 2\%$

Fig. 1 Method of measuring surface defect by SEM

生成された仕上げ面は、母材部分、繊維自体の部分、並びに繊維と母材の境界部分に分類され、更に、母材部分は硬質な析出Si部分と軟質なAl-Si系合金部分とに分けられ、それぞれ表面形状が異なる。そのため生成される仕上げ面も上述の各因子を分離し評価する必要がある。図2は触針法により、平バイトのセッティング角を $-0.51^\circ \sim +0.49^\circ$ 、先丸バイトのコーナ半径を $0.4, 1.6$ とした場合の、母材の平均粗さ、および繊維の脱落によってできる穴の深さ、繊維周りの母材の盛り上がり量、並びに工具の幾何形状と1回転当たり

Fig. 2 Relationship between surface roughness, surface defects and tool geometry measured by stylus type profile meter
N=1000rpm, $f=0.01mm/rev$, $d=10\mu m$

の送り量によって計算される幾何学的理論粗さを示したものである。また、図2には平バイトでの切りくず生成状態およびセッティング角の符号の方向を示す。なお、図3は測定した各パラメータの代表的形状を示す。幾何学的理論粗さは本条件の場合 $0.09\mu m$ 以下となっているが、母材自体は軟質部分と硬質部分で真の切り取り厚さが異なることや、母材の材質であるアルミニウム合金の大きい延性により仕上げ面形成部分でかえりが生じている、等考えられるため、実際はかなり大きな値となっている。母材部分の粗さは、平バイト -0.11° で極小値を示し、先丸バイト $re=0.4$ が最も悪い。繊維の穴の深さは平バイト 0° 付近で最大値を示し、セッティング角 -0.11° 以下にすると値が小さくなる。一方、先丸バイトは盛り上がり量が平バイトに比べて大きくなる。界面部分の盛り上がりはSEM法による3次元測定を行うことにより、繊維脱落穴の比較的近傍が盛り上がっていることが、図4に示す盛り上がり量の大きい先丸バイト $re=0.4$ と少ない平バイト -0.11° を観察することにより分かる。盛り上がり量が少ない理由は、図2に示す切りくず生成状態から、負のセッティング角の場合前切れ刃により薄い切りくずが生成され、繊維周りの盛り上がり部分をさうることができるためと考えられる。これは、図5に示す切りくずを見ると、平バイト -0.11° の場合切りくず厚さの非常に薄い部分ができるのに対して、先丸バイト $re=0.4$ ではあまり薄い部分はない。

さて、繊維の脱落によってできる微細な穴は図2の触針法であると概略的な測定は

(a) Region of matrix in profile curve

(b) Region around fiber in profile curve

Fig. 3 Surface parameter in profile curve

Fig. 4 Swell around fiber measured by SEM

可能であっても、穴の最も深い部分をねらって測定することは困難である。そこで、SEM法による穴部分の測定を行った。図6は図2と同一試料の穴の深さ、

(a) Rounded corner tool $re=0.4$

(b) Straight tool -0.11°

Fig. 5 Typical SEM photographs of chips

および盛り上がり量の平均値を測定したものである。穴の深さおよび盛り上がり量に関し、図2、図6ともほぼ同様の傾向を示している。ただし、穴への正確な位置決めができた結果、図2に比較して穴の深さの測定値は2倍程度大きくなっている。ところが、盛り上がり量の測定値は小さくなっている。これは、SEM法であると基準長さが短いため母材部分の基準位置が取りにくく、正確に測定できなかったためである。

3.2 刃先形状が工具摩耗、形状精度、切削抵抗に及ぼす影響

硬質な繊維が存在する複合材は著しく工具摩耗を進行させ、根本的に工具寿命を改善させるには至っていない現状である³⁾。ここで工具摩耗の状態を調べた。図7は切削距離245mmでの、フランク摩耗量を測定した結果である。母材中に分散されたヌーブ硬さ2000程度の硬質な Al_2O_3 を切削しているため、工具摩耗は著しくなる。平バイトは切削に関与するセッティング角を正から負に小さくしていくほど、摩耗量が減少する傾向にある。この理由は、測定部分であるコーナ部分が正のセッティング角の場合、仕上げ面の生成に直接関わるのに対し、負のセッティング角であるともう一方

Fig. 6 Relationship between surface defects and tool geometry measured by SEM
N=1000rpm, f=0.01mm/rev, d=10μm

Fig. 7 Relationship between flank wear and tool geometry

のコーナ部分が関係することから、母材の加工硬化等の影響が工具の摩耗を助長させているものと考えられる。また、図から先丸バイトは平バイトに比べて摩耗が小さくなっている理由は、先丸バイトの摩耗部分はR部であるのに対して、平バイトの場合は主切れ刃と前切れ刃のコーナ部分であるので同一摩耗体積に対しては最大摩耗幅は大きくなるためである。更に、図8は平バイトおよび先丸バイトの摩耗状態の概略を示すSEM写真およびSEM法による断面曲線を示す。これから摩耗は硬質な Al_2O_3 によるアブレシブ形の摩耗であると推測される。

高精度仕上げ面としての仕様を満たすためには、粗さと同時に重要視されるのは面の形状精度、すなわち真直度、平面度等である。そこで、仕上げ面の真直度を測定した。結果を図9に示す。平バイトでは0.7~1.4μm、先丸バイトでは0.6~0.9μmであり、平バイト-0.2°~-0.1°、および先丸バイトが0.9μm以下の良

(a) Straight tool -0.02°

(b) Rounded corner tool rε=0.4

Fig. 8 SEM photographs and profile curve of worn tool after 245mm machined
N=1000rpm, f=0.01mm/rev, d=10μm

い結果を示している。

工具摩耗の進行状態は切削抵抗の変化である程度予測することができる。図10は平バイト $+0.19^\circ$, -0.02° , -0.23° 、および先丸バイト $r_t = 0.4$ 、並びに繊維強化していない母材のみの試料を平バイト -0.11° の条件で、切削距離245mmまで切削したときの主分力、背分力の変化を示す。繊維強化することによって主分力、背分力とも大きくなり、力の増加の割合は主分力に比べて背分力のほうが大きくなる。さらに、図11は切削距離113mmのときの平バイト、先丸バイトの切削抵抗を示す。平バイトではセッティング角を負にすると背分力が急激に増加することが分かる。これは、セッティング角を負にすると前切れ刃で切削する長さが増え、発生する力の方向がほとんど背分力成分となるためである。そのため、図10で負のセッティング角では摩耗の進行と共に背分力の増加が著しくなる。一方、先丸バイトではノーズ半径が大きい方が背分力は大きくなる。

3.3 切削条件が被削性に及ぼす影響

仕上げ面粗さおよび欠陥、真直度、工具摩耗に比較的良好な結果を得た平バイトのセッティング角 -0.1° の刃先形状で、切削条件を変化させた場合の被削性について検討した。ただし、仕上げ面粗さは触針法により測定したものであり、セッティング角は許容差が $\pm 0.01^\circ$ になるように工具を取り付けた。

図12(a)は回転数を変化させた場合のフランク摩耗量、仕上げ面欠陥、真直度、切削抵抗の影響を示す。切削速度は1000rpmの場合145~393m/minであり、3000rpmの場合435~1179m/minとなる。図から回転数を増加することにより、工具摩耗は新増傾向にあり、繊維の工具に与える微小な衝撃力、切削熱による影響が存在すると考えられる。仕上げ面欠陥及び真直度はやや良くなる。

図12(b)は送り速度を変化させた場合の結果である。送り速度を増加することにより、工具摩耗量は小さくなる。これは、複合材切削の工具摩耗は切削する繊維の個数に依存すると言われているが³⁾、送り速度が大きければ同一仕上げ面積に対しては切削距離が減り繊維を切削する個数が減ることになり、工具摩耗が減少したものと思われる。一方、送り分力の増加による合成された切削抵抗の増加で、仕上げ面の繊維脱落による穴の深さが大きくなる。同様の理由で、真直度はやや増加傾向にある。

図12(c)は切込みを変化させた場合の結果で

Fig. 9 Relationship between straightness and tool geometry

Fig. 10 Variation of cutting forces for several conditions

Fig. 11 Relationship between cutting forces and tool geometry at cutting distance 113mm

Fig. 12 Variation of flank wear, surface defects, straightness, cutting forces for cutting conditions (Straight tool -0.1°)

ある。切込みを増加することにより、工具摩耗量は増加する。これは、断続切削により刃先に加わる衝撃力が切込みと共に増加し工具摩耗を促進していると考えられるが、 $3\mu\text{m}$ 程度の切込みでは、切れ刃長さが 0.8mm であるため、本条件におけるセッティング角 $-0.11^\circ \sim -0.09^\circ$ の範囲では両コーナ部分の位置が $1.3 \sim 1.5\mu\text{m}$ 異なり、先に切削に関与するコーナ部分が切込みが小さい、切込みが小さければ主切れ刃と前切れ刃のコーナ部分の負担は少なくなる。更に、繊維脱落して穴ができるため、コーナ部分で繊維を切削する確率が切込みの十分な場合に比べて少なくなり、工具摩耗にはますます有利である。しかし、真直度は切込みを増加することにより悪くなる。これは切削抵抗の増加が影響しているものと考えられる。しかし、仕上げ面欠陥にはあまり差を生じていない。

以上より、仕上げ面欠陥を小さくおさえながら工具寿命の延長、形状精度の維持を図るためには、切込みを小さくすれば良いことが分かる。

4. 結 言

アルミナ短繊維強化アルミニウム合金を超精密旋盤を用いてスローアウェイ式単結晶ダイヤモンド工具により切削仕上げを行い、以下のことが分かった。

- (1) 仕上げ面は繊維の脱落によって生ずる微細な穴、繊維・母材境界での盛り上がり、並びに母材の粗さにより構成され、刃先形状、切削条件の変化によって穴および盛り上がりは変化する。
- (2) 刃先形状を平バイトセッティング角 $-0.2^\circ \sim -0.1^\circ$ にすると仕上げ面の欠陥が少なくなり、工具摩耗、真直度により結果が得られた。また、切込みを小さくするほど工具摩耗、真直度が良くなる。

最後に、本研究に御協力をいただいた古河電気工業(株) 日光研究所、(株) 大阪ダイヤモンド工業、並びに(株) 日立精工に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 新井 実, 中山一雄, 王 曉渡: 短繊維強化アルミニウムの切削仕上面品位, 精密工学会誌, 57, 1(1991)172.
- 2) 花崎伸作, 藤原順介, 峠 睦, 深江 守: F R M切削時の工具摩耗の機構, 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(1989)463.
- 3) 大石健司: F R M振動切削時の工具摩耗, 精密工学会誌, 56, 7(1990)1253.