Al合金の鏡面加工について*

菅野 健**, 竹内 喜代松***
後藤 崇之†, 吉田 嘉太郎††

Research on Diamond Turning of an Al Alloy Mirror

Takeshi SUGANO, Kiyomatsu TAKEUCHI,
Takayuki GOTO, and Yoshitaro YOSHIDA

Various methods exist for determining the qualitative and quantitative integrity of a diamond-turned surface. Particularly, the micro-roughness and residual stress of surfaces are used for preliminary evaluation of surface integrity. That is to say, the availability of reflectors, capacity of disc-memory and other capabilities of diamond-turned surfaces are dependent on the surface integrity. The amount of micro-roughness and residual stress depend on the conditions of the machining process, in this case, on the single crystal diamond turning conditions. Especially, the residual stress are affected by the manufacturing (heat treatment and each machining) of Al alloys. From these points, the paper describes the phenomena of micro-roughness and residual stress of the surface region caused by various machining conditions.

Key Words: Diamond Turning, Single Crystal Diamond Tool, Surface Roughness, Residual Stress, Metal Mirror

1. はじめに

現在 Al 合金を素材として、コンピュータ用磁気ディスク基板、あるいは反射鏡などが、超精密切削加工で作られている。とくに磁気ディスクは急増する情報量に対応できるように、高密度化、大容量化、高速化が計られ、仕上面精度の向上、表面性状の安定性が求められている。また金属鏡もコスト、製作時間などの点からガラス鏡に代わるものとして、とくに CO₂ レーザ加工装置の反射鏡に期待されており、ガラス鏡(研磨による)と同等の仕上面精度が要求されている。

本研究は上記の要求を考慮し、曲面加工に必要な刃先半径の比較的大きな(R刃という)ダイヤモンド工具による鏡面加工において、鏡面精度としての表面あらさ、および鏡面表層状態としての残留応力、加工変質層について、それぞれ加工条件との関係を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 実験方法 工具は天然の単結晶ダイヤモンドバイトを、加工機械は CNC ダイヤモンド旋盤を用いた。被削材はコンピュータ用磁気ディスクに用いられている Mg 系 Al 合金 (JIS AA 5086 系の改良品)、実験諸条件は次のとおりである。

(1) 単結晶ダイヤモンド工具

刃先半径(R): 2 mm, 6 mm, 10 mm

すくい角: 0°

前逃げ角: 5°

(2) 被削材

材質: Mg 系 Al 合金 (前加工後熱処理)

直径: 200 mm

厚み: 20~30 mm

(3) 加工条件等

回転数: 1160 rpm (一定)

送り速度: 5 mm/min (4.3 μm/rev) ~ 50 mm/min (43.5 μm/rev)

切込み深さ: 5 μm ~ 25 μm

切削剤: 揮発性油噴霧

その他: 作動油、潤滑油の油温調整

被削材取付具は真空チャックを使用し、工具刃先の

* 昭和 61 年 10 月 7 日 第 64 期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和 61 年 4 月 23 日。

** 正員、工業技術院機械技術研究所 (〒305 茨城県新治郡桜村並木 1-2)。

*** 工業技術院機械技術研究所。

† 正員、三菱重工業(株)広島研究所 (〒783 広島市西区観音町 4-6-22)。

†† 正員、千葉大学工学部 (〒260 千葉市弥生町 1-33)。

工作物に対する取付けは、常に刃先円弧の中央部一点で切削するように、顕微鏡によりプリセッティングを行い、加工装置に取付けた。また、切削は工作物中心から、外周に向けて切削し、切りくずは強制吸引し、仕上面の損傷を防いだ。

2.2 測定方法 鏡面加工の評価として、仕上面あらさ、工具刃先摩耗、切削抵抗、および仕上面の性状を取り上げ、各加工条件ごとにそれぞれ測定を行った。

a. 仕上面あらさ あらさの測定は、触針式あらさ計（触圧：30 mg、ダイヤモンド触針：2 μm R）を用い、表面あらさは10点平均あらさ R_z により、鏡面の中心から10, 50, 90 mmの3点の平均とした。端面削りの場合中心部と外周部とで切削速度が異なるが、仕上面あらさの内外周での差はほとんどなく、切削速度の影響はあまりないことを確認している⁽¹⁾。

b. 工具刃先の摩耗および鏡面状態 刃先のすくい面、逃げ面の摩耗および鏡面状態の観察にはノマルスキー微分干渉顕微鏡を用いた。また一部は走査形電子顕微鏡を用いた。

c. 切削抵抗 工具刃先摩耗および仕上面あらさに関係する切削力の測定には、圧電形の切削動力計を用いた。切削力そのものが極めて小さく、SN比が良くないため、切削の開始、終了時のそれぞれ安定した時の変化分だけをデータとして使用した。

d. 表面性状 素材から鏡面に至るまでには、熱処理を含むいくつかの加工が行われる。したがって、各加工工程、および工作物の取付け、取り外しにより生ずる局所的な残留ひずみを把握するために、X線回折により、各加工条件下の残留応力を測定した。また加工により塑性変形を受けた表面の加工変質層の測定には、透過形電子顕微鏡を使用し、電子回折パターンにより変質層の深さを推定した。

3. 表面あらさと加工条件

3.1 切削条件との関係 R刃バイトの場合、仕上面あらさは理論的に $f^2/8R$ (f : 送り量, R : 刃先半径) で表され、刃先半径が大きいほど仕上面あらさは小さくなる。実際の切削でもその傾向はみられるものの、理論あらさととの差は、刃先半径が大きいほど、大きくなる。これは機械の振動、刃先の凝着物などの影響が介入してくることが大きな要因であると考えられる。使用した各R刃バイトによる切削条件と仕上面あらさの関係を図1に示す。

この結果からみると、刃先半径2 mmと6 mmとではほとんど差がなく、10 mmのように直線刃に近

くなるほど仕上面あらさは良くなる。刃先半径が小さく、また送り量が大きくなるほど、図2のように明確な送りマークが現れる。一般に、構成刃先、機械振動などの影響により、理論あらさと必ずしも一致しないが、送り量が小さいほど、刃先半径が大きいほど仕上面あらさはよくなる。しかし、この送りマークは、R刃ダイヤモンド工具では仕上面あらさ向上に大きな障害になるので、これを除く研究が必要である。

3.2 切削抵抗との関係 前報⁽¹⁾で報告したように、切削距離が長くなるに従い、主分力はゆるやかに増加するが、背分力は図3のように、増加の割合は大きく、一様でない。また、そのうち特徴的な増加を示す刃先半径6 mmについて、背分力の増加量と仕上面あらさとの関係を示したのが図4である。図4のように

図1 切削条件と仕上面あらさの関係

背分力の変動率は、切削開始後 200 km までの領域から、切削距離 300~400 km の一般に工具寿命といわれる領域まで大きく、仕上面あらさも一定しない。一方、切削距離 400 km 以上では、背分力の変動は比較的小さく、仕上面あらさも安定する。このことは他の刃先半径の場合についても同様である。

すでに報告したように、切削距離 200~300 km でクレータ摩耗の進行が止まっていることも考え合えると、200 km 付近までの初期摩耗と、300~400 km での不安定領域が存在すると推定される。

そこで、工具摩耗について調べてみた。仕上面あらさは工具摩耗、特に切れ刃の安定化と密接に関係する。各刃先半径について、切削距離約 900 km におけるすくい面、逃げ面の摩耗状態を図 5 に示す。

顕微鏡写真では、すくい面のクレータ摩耗はめいりように観察できるが、逃げ面の摩耗ははっきりしない。しかも、境界摩耗も観察されなかった。これは刃先が曲率をもち、切削幅が必ずしも一定でないためと考えられる。刃先りょうの摩耗状態は、背分力の増加から推定できるが、顕微鏡でみられる三日月状の逃げ面

R=2mm, f=26μm/rev, d=10μm

図 2 仕上面の状態

図 3 切削距離と背分力の関係

摩耗のミクロな摩耗状態は、定量的測定ができていない。

3.3 工具刃先条件との関係 平刃バイトの場合、工作物に対する刃先のセッティング角度が、仕上面あらさに微妙に影響することは知られている⁽²⁾。R 刃バイトにおいては、刃先円弧のうちある範囲内であればどこでも切れ刃となりうる。そこで、切削面に対するすくい面のなす角度（垂直および水平断面）を微小に変化させた場合の仕上面あらさを求めた結果が図 6 である。両者ともに約 $\pm 1^\circ$ 程度の範囲では、仕上面あらさに影響しないことがわかった。

図 4 背分力の変動率と仕上面あらさ

(a) R=2 mm

(b) R=6 mm

(c) R=10 mm

図 5 工具刃先摩耗

4. 表面性状と加工条件

前報で刃先半径の大きな場合、残留応力が大きくなることを示した。そこで、ここでは各種の加工条件のもとでの表面性状、すなわち鏡面の残留応力と加工変質層の状態について調べた。

4.1 加工履歴と残留応力 鏡面を作り上げるための Al 合金の処理工程は、圧延素材、荒加工、熱処理、前仕上加工および鏡面加工の工程を経る。これらの各工程ごとに、残留応力の変化を示すと、図 7 になる。なお測定は、いずれも工具の切削軌道（接線方向）に沿って測定している。

素材の残留応力は、圧延方向により差があると考えていたが、適度な熱処理（仕上焼なまし）が施されているため、その差はあまりみられない。荒加工後においては、表面に大きな引張応力が生ずる。しかも中央部より外周部が大きい。

荒加工後、ひずみとり焼なましを行ったことにより、残留応力は除去されている。このことは熱処理が応力除去で有効であることを示している。この熱処理を全工程に入れるかは、大きな問題で、加工工程の最適化が今後の検討課題である。

前仕上げ後、圧縮応力が中央部に生ずる。この場合比較的軽切削であるため、圧縮応力が生じ、特に中心部は切削速度が遅いため残留応力が大きくなると考えられる。応力の傾向は荒加工と同様であるため、前加工後に熱処理工程を入れるとよいかもしれない。

仕上加工では、 -60 MPa の圧縮応力が生ずる。しかも外周部と中央部とでは、ほとんど差がない。前加工の表層を除去することと、工具摩耗による鏡面でのバニシング作用が主要因と推定される。例えばこのときの加工変質層の深さを調べると、図 8 にみられるように、 $0.5\sim 1.0\text{ }\mu\text{m}$ のエッチング深さの試料に回折ス

ポットが表れており、これから加工変質層の深さは、 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 程度にすぎないことがわかる。本実験での切込み深さは $5\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ であり、このことは、1 回の切削で、すべての変質層が除去されることを示している。なお変質層の測定は反射電子線回折法で行った。

以上の結果から、残留応力を少なくするためには、前加工後に熱処理を施し、ただちに仕上加工することが望ましいと言える。

4.2 切削条件と残留応力 切込み深さ、および送り量と残留応力の関係は図 9 のようになる。図 9 より、切込み深さ $5\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ 程度では残留応力にほとんど差はみられない。また送り量については、送り量が小さくなるほど、また刃先半径が大きいほど、わずかながら応力の増加がみられる。

なお、切削速度の影響については、図 7 で示したように、鏡面仕上げではほとんど影響しない。

図 7 加工工程ごとの各留応力状態

図 6 工具セッティング角度と仕上面あらし

図 8 Al 鏡面の反射電子回折パターン

4・3 切削距離と残留応力 切削距離が長くなると、工具摩耗が進行し、図 10 のように、パニング作用の増加により、圧縮応力は大きくなる。圧縮応力の増加率は、500～600 km あたりから小さくなる。これは、工具刃先の摩耗状態が安定するためと考えられる。

今回の実験では、一般に寿命とみられる 400 km の 2 倍程度まで切削距離を設定したが、寿命評価のためには、いっそう長い距離の切削実験が必要である。

(a) 送り量との関係

(b) 切込み深さとの関係

図 9 切削条件と残留応力

図 10 切削距離と残留応力

4・4 すべりマークについて Al 合金の結晶は面心立方構造をもち、{111} 面がすべり面であり、〈110〉にすべりの方向がある。一般に結晶方位はランダムであるので、すべりの方向もランダムであるが、とくに切削の進行方向に強い力が加わり、切削の方向にすべりが生ずると考えられる。

すべりは、図 11 に示すように切削方向に生じ、そのピッチ間隔は結晶方位により異なる。さらに、結晶内のひずみが残っている場合、これらのすべりにより、ひずみを吸収するために、すべりはある程度、どの方向にも、またどの切削条件でも生ずることになる。例えば切削条件により目視ですべりの発生状況を調べた結果、表 1 に示すように、切削条件によりすべりの発生が少ない場合もある。

このように切削条件により、すべりの発生する範囲がだいたい明らかであり、切込み深さが小さい場合、または送り量が小さい場合にすべりが生じやすいといえる。よりきびしい切削条件の場合、結晶中のひずみがすべりにより開放されるために、より広い面ですべりが生ずるものと考えられるが、仕上面あらさの中に吸収され、目視できないと思われる。しかし鏡面になればなるほど、このすべり、および、結晶の粒界段差

表 1 切削条件とすべりマークの観察

FEED RATE μm/rev	DEPTH OF CUT μm				
	5	10	15	20	25
9	◎	△	◎	◎	○
17	◎	○	△	×	△
26	○	×	×	△	○
35	△	×	×	×	×
43	×	×	×	×	×

DISTRIBUTION OF SLIP MARK

◎ : REMARKABLE ○ : MANY
△ : FEW × : NONE

図 11 すべりマークの観察

が問題になる。

このすべりを生じせしめないために、熱処理工程をどこに入れるかが重要な課題であるとともに、最適な切削条件を見い出すことも必要である。

5. おわりに

Al 合金を対象としたダイヤモンド工具による鏡面加工について、その加工条件と仕上面あらさ、および鏡面性状との関係を実験的に調べた結果をまとめる。

(1) 刃先半径が大きいほど、また送り量が小さいほど、面あらさは良くなるが、加工装置などの問題により理論的あらさに対してかなり差がある。

(2) 切削抵抗のうち背分力の増加は刃先摩耗（とくに刃先りょう摩耗）、および仕上面あらさに関係する。

(3) 工具セッティング角度を、正常位置から微小（約 $\pm 1^\circ$ ）に変化させたときの仕上面あらさへの影響はなかった。

(4) 残留応力は、荒加工では引張応力が、鏡面切削では圧縮応力が生ずる。ひずみのない面を得るためには、熱処理を含めた加工工程の最適化が必要であ

る。

(5) 残留応力の大きさは、刃先半径および送り量に関係し、切込み深さの影響は少ない。また加工変質層の深さは反射電子回折パターンから、 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 以内と推定される。

(6) 刃先摩耗が進むとバニッシング作用により圧縮の残留応力は増大しやがて安定する。

(7) 鏡面の性状には、粒界段差とともに結晶内すべりによる面あらさへの影響について考えねばならない。切削条件および熱処理により、すべりの発生が抑えられる。

おわりに、本研究の中で表面性状に関して有益なご教示をいただいた機械技術研究所材料工学部 トライボロジ課長、榎本祐嗣氏、また本研究の実験に多大の協力をいただいた千葉大学工学部 山口 武、渡部 潔 両君に心から感謝の意を表する。

文 献

- (1) 吉田・ほか 2 名, 機論, 51-471(昭 60), 3121.
- (2) 田宮・ほか 1 名, 精密機械学会春季講演論文集, (昭 57), 287.