超精密金属鏡加工技術の研究*

(超精密加工用工作物取付法)

新野 秀憲**, 三井 公之**

Studies on Fabrication System of Ultra-Precision Metal Mirrors (Workpiece Fixturing Methods for Ultra-Precision Machining)

by Hidenori SHINNO and Kimiyuki MITSUI

Ultra-precision machining technology for metal optics has recently become important, in response to demands for high energy laser equipment and magnetic memory disks. In order to realise such precision machining, it is necessary to pay special attention to the workpiece fixture. Conventional fixture techniques, such as vacuum or multi jaw chucks, tend to provide adequate support, but they can also introduce unacceptable levels of partial distortion. In this paper, therefore, distortion-free workpiece techniques for metal mirrors are proposed, simultaneously clarifying both the characteristics and beneficial features.

Key Words: Ultra-Precision Machining, Workpiece Fixture, Strain-Free Mounting, Metal Mirror, Diamond Turning, Deformation

1. 緒 論

社会における各種製品機能の多様化と高度化に伴って、その構成要素である部品の精度に対する要求は今後さらに厳しくなっていくことが予測される。このような超精密化への傾向が進展し、その応用分野が拡大していく中で、最近特に単結晶ダイヤモンド工具による軟質金属およびプラスチック類の超精密加工技術が、磁気ディスクやレーザ光・赤外光用の光学系部品の仕上げ加工として注目を集めている。それを実現するためのDTM (Diamond Turning Machine) と呼ぶ高精度・高剛性の加工機械の開発も欧米を中心に進められ大きな話題となっている⁽¹⁾。

極限技術ともいうべき、こうした超精密加工技術および、それを実現するための加工装置の設計技術を確立するためには、単に工作機械の運動精度や剛性を高めるだけではなく、工具・工作物・工作物取付具などを含めた系全般の加工精度に与える要因を総合的に検討しなければならない。特に、銅・アルミニウム合金に代表される軟質金属の超精密加工に際しては、最適な工

作物の取付方法について検討することが、所期の目的を達成する上で重要な課題の一つであると考えられる。

しかし、超精密加工における工作物の取付方法については、材質・形状・加工方法など種々の加工精度に与える因子が複雑に絡み合い、統一的な取扱いが困難であることなどから、従来ほとんど検討されておらずわずかに和田⁽²⁾や Barkman⁽³⁾らがその重要性を指摘しているにすぎない。

そこで、本研究では超精密ダイヤモンド旋盤による金属鏡の加工を対象として、その取付方法について検討を行った結果、具体的に工作物取付具を試作し、その有用性を明らかにしようとするものである。

2. 金属鏡加工用工作物取付法概念

サブミクロン、あるいはそれ以上の高い加工精度が要求される超精密加工においては、特にその支持・クランプ方法が重要となり、加工後クランプをはずした時のスプリングバックや残留ひずみの解放による形状精度の低下は無視できない。そのため本研究で対象としている金属鏡のような円板状工作物の取付具としては、従来真空チャックや三点取付法などが採用されている⁽²⁾。

* 昭和60年10月2日 第63期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和60年3月11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)。

真空チャックは工作物の取付けや取りはずしの容易性や広い面積による一様なクランプが可能であるなどの理由から磁気ディスクの加工などに広く用いられている。一般に用いられている真空チャックは、チャック面全面に同心円のみぞが削られ、そのみぞに吸気口が配置された構造であり、加工物はチャック面に強制的に吸着される。そのために、たとえチャック面の面精度が高くても、吸着される加工物側の面精度が低ければクランプをはずした時のスプリングバックによる形状精度の低下は無視できない。特に本研究で対象としている金属鏡のような軟質金属の円板状工作物の場合には、それが大きな問題となる。

したがって、本研究では以下の条件を満足する金属鏡加工用工作物取付法について検討する。

- (1) 工作物自体が切削抵抗に対して十分な剛性を有すること。
- (2) チャック面が十分な形状精度を有していること。ここではダイヤモンド工具によるセルフ・カッティングによった。
- (3) 取付けによるひずみが加工面、すなわち鏡面に影響しないこと。

以上のような観点から、本研究ではMg系アルミニウム合金製の直径198mmの金属鏡の加工を対象として、その無ひずみ取付法について検討した。そして具体的にリング支持による周辺吸着方式の真空チャックと接着方式の真空チャック・アダプタを試作し、超

精密ダイヤモンド旋盤で切削実験を行い、それらが超精密金属鏡の取付具として有効なことを確認した。

3. リング支持による周辺吸着方式の真空チャック

3.1 真空チャックの試作 軟質金属製の金属鏡の加工には、前述したようにチャック面全面により吸着する真空チャックは不適当である。そこで、第2章の条件を満足する図1のような、取付面の形状精度の影響を受けないリング支持による周辺吸着方式の真空チャックを以下の設計指針によりアルミニウム合金で試作した。すなわち、

- (1) 取付けひずみと鏡面の変形を分離するため、図2のような鏡側面にみぞを入れた被削材を取付けるものとする。
- (2) 加工物は図1におけるリング状吸着面Sで支持するものとする。したがって、この部分は、チャックを超精密旋盤に取付けた後、ダイヤモンド工具を用いてセルフ・カッティングを行い、他の吸着面よりも数 μm 高くなるように加工する。
- (3) 支持リングの外側周辺の吸着面により、金属鏡を吸着する。

なお、リング支持部の位置の設定および取付け変形の予測などの検討は、次節の解析により行った。

3.2 有限要素法による解析 最適な支持リングの位置、および加工物である金属鏡側面に入れるみぞの寸法諸元による形状精度への影響は、金属鏡の取付け状態を図2のような解析モデルに置き換え、有限要素法を用いて検討した。なお、解析は8節点の二次要素を用い、軸対称問題として取扱った。また、図2の圧力 p は実験条件に等しく90 kPa (0.9 kgf/cm²)に設定し、FACOM M 380により計算を行った。

解析結果の一例を図3に示す。解析結果を詳細に検討したところ、次のような点が明らかとなった。

- (1) リング支持点Sが外縁部、すなわち図2において $F=D$ の場合は変形量が大きく、また支持方

図1 リング支持による周辺吸着方式の真空チャック

図2 解析モデル

法およびみぞ部下面だけを吸着する取付具設計上の問題から不適当である。

(2) みぞを切らない場合は、図3(a)のように変形量がみぞを切った場合に比較して大きくなる。

(3) みぞ部が支持点よりも外側、すなわち図2において $E > F$ の場合は、図3(b)のように鏡面の外縁部が下がり、鏡面が上に凸の変形挙動を示す。

(4) みぞ部が支持点よりも内側、すなわち図2において $E < F$ の場合は、図3(c)のように鏡面の外縁部が上がり、鏡面が下に凸の変形挙動を示す。

(5) みぞ部が支持点の近傍、すなわち図2において $E \approx F$ の場合は、図3(d)のように鏡面の変形が小さい。

(6) 支持条件・みぞの寸法・深さが同一の場合は、加工物の厚さ H 、特に C が大であるほど、図3(e)のように変形が小さい。ただし、図2における A があまりに小であると、下面の変形が上面に影響を及ぼす。

以上の結果を総合して、図1のリング支持による周辺吸着方式の真空チャックを試作した。なお、支持点 S の位置は、吸気孔の配置と所要吸着力の制約条件から、直径110 mmの部分に設定した。

3・3 実験結果 試作した真空チャックの有用性を確認するため、実際に切削実験を行った。実験にはBoley社の超精密旋盤 DW 4-HD-P を用いて以下の実験条件で行った。

切削条件

回転数 : 1 160 rpm

切込み深さ : 10~20 μm

送り速度 : 10~20 mm/min

加工物材質

Mg系アルミニウム合金

工具

R刃ダイヤモンドバイト

実験に用いたアルミニウム合金の金属鏡素材は普通旋盤で前加工を行った後、その残留ひずみを除去するため焼鈍を施した。

切削した金属鏡の形状精度は、断面曲線と鏡面凹凸により評価することにした。

図4には切削した金属鏡の半径方向の断面曲線を触針式あらさ計で測定した結果の一例を示す。図4(a)には従来の全面吸着方式の真空チャックを用いて加工した場合の結果を示す。図4(b), (c), (d)はそれぞれ図3(b), (c), (e)の加工物形状、支持条件による実験結果に対応している。すなわち、図4(b)はみぞをリング支持点よりも外側に入れた場合であり、

断面曲線は中低の傾向を示している。また、図4(c)はみぞをリング支持点よりも深く入れた場合であり、断面曲線は中高の傾向を示している。それらに対して、

(a) $D=198.\text{mm}, H=25.\text{mm}$

(b) $A=11.\text{mm}, B=4.\text{mm}, C=11.\text{mm}, D=198.\text{mm}, E=150.\text{mm}$

(c) $A=11.\text{mm}, B=4.\text{mm}, C=11.\text{mm}, D=198.\text{mm}, E=100.\text{mm}$

(d) $A=11.\text{mm}, B=4.\text{mm}, C=11.\text{mm}, D=198.\text{mm}, E=115.\text{mm}$

(e) $A=19.\text{mm}, B=4.\text{mm}, C=18.\text{mm}, D=198.\text{mm}, E=100.\text{mm}$

(注) 図中、 A, B, C, D, E, H は図2参照のこと

図3 解析結果の一例

図4(d)はみぞの深さをリング支持点近傍にし、鏡の厚さも大きくした場合であり、図3(e)の解析結果に対応して、ほぼ平坦な鏡面が得られている。図4(b)～(d)のいずれの断面曲線も、従来の真空チャックによる図4(a)に比べて平坦な鏡面が得られていることを示している。

図4(b)および(c)の断面曲線は、図3(b)および(c)の解析結果のように取付けによって変形を生じた状態で切削された後、取りはずされてスプリングバックしたと考えると、前述の傾向からも明らかなように解析結果と非常によく一致する。

一方、鏡面の凹凸はテーブル回転形真円度測定機に金属鏡を取付け、回転中の金属鏡とプローブの間の変位を非接触変位計を用いて検出した。その結果は測定データをミニ・コンピュータで処理することにより、図5にその一例を示すような極座標で表示した。図5(a)は従来の全面吸着方式の真空チャックにより加工した鏡面の中心から30 mmと60 mmの鏡面凹凸を極座標表示したものである。図5(b)および(c)は、それぞれ図3(c)および(e)の加工物形状、支持条件による結果であるが、図5(a)に比較してかなり高い

形状精度が得られている。なお、図中のRMZCは最小領域円の半径差法による評価値を表している。

多数の解析および実験結果を詳細に比較検討したところ、被削材の形状および取付け条件と加工後に取りはずした金属鏡の形状精度との相関関係および、その再現性は非常に高く、このことから有限要素法を用いた取付変形のシミュレーション結果をもとに、より超精密の加工機械で変形量を予測して加工を行うことも十分可能であると考えられる。

4. 接着方式の真空チャック・アダプタ

前章で検討したリング支持による周辺吸着方式の真空チャックは、取付け・取りはずしが容易であり、しかも解析によって取付変形が予測可能なクランプ方法であるが、加工物側面にみぞを入れなければならないという加工物形状に制約条件がある。取付方法としては、加工物をできるだけそのままの形で自由に取付けられることが望ましい。

そこで、図6に示すような接着方式の真空チャックアダプタをアルミニウム合金で試作した。これはチャック面に明けられた3箇所のボルト穴部分に、ボルト

(a) 従来の全面吸着方式の真空チャックによる鏡面〔みぞなし、 $D=198$ mm, $H=26$ mm〕

(b) $A=11$ mm, $B=4$ mm, $C=11$ mm, $D=198$ mm, $E=150$ mm [図3(b)]

(c) $A=11$ mm, $B=4$ mm, $C=11$ mm, $D=198$ mm, $E=100$ mm [図3(c)]

(d) $A=19$ mm, $B=4$ mm, $C=18$ mm, $D=198$ mm, $E=100$ mm [図3(e)]

(注) 図中、 A , B , C , D , E , H は図2参照のこと

図4 断面曲線の一例

穴径の2倍強の大きさの両面テープ状になったアクリル樹脂系の粘弾性体を貼り付け、その上に金属鏡を接着するものである。金属鏡を接着した真空チャック・アダプタは超精密旋盤の真空チャック面に吸着して加工を行う。なお、ここでは厚さ 50 μm の粘弾性体を採用した。

(a) 従来の全面吸着方式による鏡面
〔みぞなし, $D=198\text{ mm}$, $H=26\text{ mm}$ 〕

(b) $A=11\text{ mm}$, $B=4\text{ mm}$, $C=11\text{ mm}$, $D=198\text{ mm}$,
 $E=100\text{ mm}$ [図 3 (c)・図 4 (c)]

(c) $A=19\text{ mm}$, $B=4\text{ mm}$, $C=18\text{ mm}$, $D=198\text{ mm}$,
 $E=100\text{ mm}$ [図 3 (e)・図 4 (d)]

(注) 図中, RMZC の単位は μm

図 5 鏡面凹凸の極座標表示

用した。加工後は、機上からアダプタごと金属鏡を取りはずし、アダプタ背面の3箇所のボルト穴から軟質金属製の3本のボルトを低速度で回転させ、金属鏡を持ち上げて取りはずす。ここで用いた粘弾性体の接着強度は、10 MPa (100 kgf/cm²) と非常に高いが、ボルトの回転によりボルト先端部で接着面が破断を生じ、チャック面から金属鏡を容易に取りはずすことができ、しかも後処理は不要である。また、接着面における減衰能も高いことから、びびり振動防止の観点からも有効な工作物取付法であると考えられる。

前章と同様な方法により、直径 198 mm, 厚さ 26 mm の金属鏡を加工し、図 7, 8 に示すような断面曲線と鏡面凹凸の極座標表示を求めた。両者から明らかに、形状精度は従来の真空チャックに比較して格段と高くなっていることがわかる。また、鏡の中心から 30, 60 mm における鏡面凹凸は、最小領域円の半径差法による評価値 RMZC で表示すると、図 8 のようにそれぞれ 0.08, 0.11 μm であり、一連の実験結果の中で最も高い形状精度を得ることができた。

図 6 接着方式の真空チャック・アダプタ

図 7 接着方式による鏡面の断面曲線

(a) $r = 30. \text{ mm}$ (b) $r = 60. \text{ mm}$

図 8 接着方式による鏡面凹凸の極座標表示

5. 結 論

本研究では超精密金属鏡加工技術を確立する上で、基本的に重要でありながら、従来国内外でほとんど研究されていなかった超精密加工用工作物取付法について、解析および実験の両面から詳細な検討を行った。その結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 超精密金属鏡の加工用取付具として、みぞ付

の金属鏡をリング形状の面で支持し、その周辺部を真空中で吸着する形式の真空チャックを試作し、切削実験を行った結果、その有用性を明らかにした。

(2) 上記の真空チャックに取付けるみぞ付の金属鏡の寸法・形状および支持条件には、取付変形を最小にするための最適解が存在し、それを数値解析により容易に算定することができた。

(3) 金属鏡の取付変形と加工後クランプをはずした後の形状精度の低下との相関関係を解析および実験により明らかにした。そして、このことから取付変形のシミュレーション結果をもとに、変形量を予測して加工を行うことも可能であることを示唆した。

(4) 接着方式の金属鏡加工用真空チャック・アダプタを試作し、切削実験を行った結果、従来の真空チャックに比較して格段に高い形状精度を実現することができた。

以上のように本研究では従来にはないユニークな真空チャック、および真空チャック・アダプタを開発しそれらの有用性を明らかにした。

終わりに、解析を行うにあたり有益なご教示をいただいた機械技術研究所、機械部 機械要素課の近藤孝之技官、前加工および熱処理にご協力いただいた同部工作機械課の竹内喜代松技官に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 例えば、吉田・三井・岡崎、機誌、87-791 (昭59)、1116。
- (2) 和田、精密機械、48-11 (昭57)、1421。
- (3) Barkman, W.E., *Precision Engineering*, 4-2 (1982), 101.