

# 3軸同時制御による大曲率光学表面の超精密切削加工

閻 紀旺<sup>\*1</sup>, 佐佐木智之<sup>\*2</sup>, 田牧純一<sup>\*2</sup>, 久保明彦<sup>\*2</sup>

Fabrication of large-curvature optical elements by ultraprecision cutting under 3-axis numerical control

Jiawang YAN, Tomoyuki SASAKI, Jun'ichi TAMAKI and Akihiko KUBO

最近の光学デバイスには大きな曲率をもつ光学部品に対する要求が高くなっている。しかし、従来の2軸制御円弧包絡切削法では大曲率表面の加工が困難である。本研究では、単結晶ダイヤモンド平バイトを用いたXZB 3軸同時制御直線包絡創成法による大曲率光学表面の超精密切削加工を目的としている。直線包絡創成法では、工具先端を加工機のB軸の中心に正確に合わせることが重要となる。そこで、はじめに高精度な工具位置制御機能をもつ圧電駆動式3方向微調整刃物台を製作し、それを使用することにより高精度の工具設定を行った。そして、大きな曲率をもつ楕円面ミラーの試作加工を行い、形状誤差や表面粗さなどを検証した。

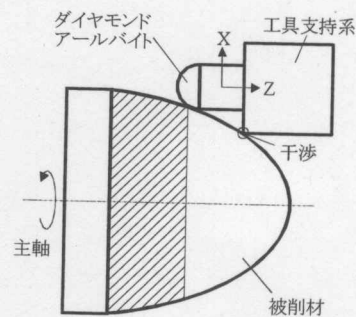
Key words: ultraprecision cutting, diamond turning, optical elements, large curvature, aspherical surface

## 1. 緒言

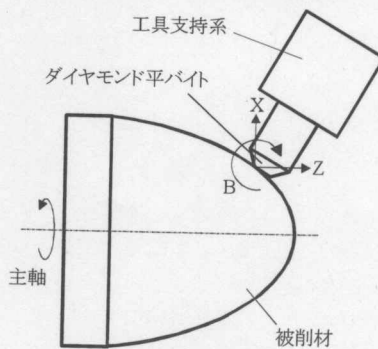
近年、光学デバイスには大きな曲率をもつ光学表面が多用されている。たとえば照明系の楕円面ミラーや放物面ミラー、高密度記録用次世代光ヘッド、そして特殊な半球状集光レンズなどがある。曲面光学部品の製造方法としては、超精密切削技術が挙げられる。しかし従来のXZ2軸制御による円弧包絡切削法では、工具支持系と工作物との間に干渉が起こりやすいため、大曲率表面の加工が困難である。そこで本研究では、このような問題を解決するために、XZB3軸同時制御による直線包絡創成法を採用し、大曲率光学表面の高精度切削加工を試みた。

## 2. 3軸制御直線包絡創成法

従来の2軸制御円弧包絡法の概要を図1(a)に示す。すなわち、アールバイトをXZ2軸制御することにより、円弧包絡による形状創成が行われている<sup>1)</sup>。この方法では、曲面光学部品の根元部(図の斜線部分)を加工しようとした場合、被削材と工具支持系が干渉するため、大曲率表面の加工が困難である。そこで、本研究では、図1(b)に示す3軸制御直線包絡創成法(以下、直線包絡法と略称する)を採用する。直線包絡法では、ダイヤモンド平バイトをXZの2方向に直線運動させながらB軸を回転させ、XZBの3軸同時制御を行うことにより、切れ刃が常に加工面の接線方向と微小な角度を保持しながら加工を行うため、被削材・工具支持系間の干渉問題を解決することができる。また、硬脆材料の加工では、大きな送り量でも延性モード切削が可能<sup>2)</sup>であるため、切削距離や切削時間を大幅に低減でき、工具寿命と加工能率の向上が期待できる。さらに、アールバイトに比べて平バイトは比較的安



(a) 2軸制御円弧包絡創成法



(b) 3軸制御直線包絡創成法

図1 曲面創成法の概略図

価であり、形状精度を保証しやすい利点もある。

## 3. 加工形状誤差の形成要因

曲面の切削では、工具形状誤差や工具設定誤差が加工精度に影響を及ぼす。円弧包絡法では、切削点が切れ刃に沿って移動するため、工具の形状誤差が加工面に直接転写され加工誤差となって表れる。しかし直線包絡法では、工具先端をB軸中心に設定すれば工具の形状誤差の影響を無視できるので、加工誤差の要因は工具設定誤差だけとなる。

\*1 東北大学大学院工学研究科: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻 字青葉6-6-01(元, 北見工業大学)

\*2 北見工業大学: 〒090-8507 北海道北見市公園町165番地  
(学会受付日: 2004年7月20日)

工具設定は、①工具先端のB軸中心への設定(B軸設定)、②主軸回転中心に対する工具先端の左右調整(X軸設定)、③主軸回転中心に対する工具先端の上下調整(Y軸設定)の3段階に分けられる。図2に、直線包絡法における各種の工具設定誤差の概要を示している。

### 3.1 B軸設定誤差

工具先端がB軸中心に対して-X方向に $\delta_x$ の誤差で設定されていると仮定し、曲率半径 $R$ の球面を切削した場合、形状誤差 $\varepsilon_x(x)$ は次式で表せる。

$$\varepsilon_x(x) = \sqrt{R^2 - x^2 + 2\delta_x \cdot x} - \sqrt{R^2 - x^2} \quad (1)$$

次に、B軸中心に対して-Z方向に設定誤差 $\delta_z$ が存在した場合の形状誤差 $\varepsilon_z(x)$ は次式で表せる。

$$\varepsilon_z(x) = \sqrt{(R - \delta_z)^2 - x^2} - \sqrt{R^2 - x^2} + \delta_z \quad (2)$$

一例として、式(1)、(2)を用い、曲率半径 $R=12.5, 30, 50\text{mm}$ とし、設定誤差 $\delta_x=1\mu\text{m}$ の場合の計算結果と $\delta_z=1\mu\text{m}$ の場合の計算結果を図3に示す。図3から、 $\varepsilon_x(x)$ は正值、 $\varepsilon_z(x)$ は負値となり、Z方向よりもX方向の設定誤差のほうが形状誤差に大きな影響を与えることがわかる。また、 $\varepsilon_x(x)$ 、 $\varepsilon_z(x)$ 共に外周に行くにつれて形状誤差は増加し、被削材の曲率半径が小さいほどその傾向は顕著になることがわかる。

### 3.2 X軸設定誤差

工具先端が被削材の回転中心から-X方向に設定誤差 $\delta_x$ が存在すると仮定すると、加工形状誤差 $\varepsilon_x(\theta)$ は次式で表せる<sup>3)</sup>。

$$\varepsilon_x(\theta) = -\delta_x \cdot \tan \theta \quad (3)$$

なお、 $\theta$ は被削材上の切削点の傾き角である。

### 3.3 Y軸設定誤差

工具先端が被削材の回転中心からY方向に工具設定誤差が存在すると、被削材中心部に未加工部、いわゆる“へそ”が生じる<sup>3)</sup>。へその形状と大きさから誤差の生じている方向とその大きさを判断することができる。

## 4. 圧電駆動式刃物台の開発

以上のことから、2軸制御の円弧包絡法に比べ、3軸制御の直線包絡法では工具先端をB軸中心に正確に合わせることが重要であることがわかる。一方、通常の非球面加工機では、工具設定は手動によるねじあるいは弾性機構の調整により行われているため、短時間でしかも精密な中心合わせは非常に難しい。そこで、本研究では、短時間で高精度の工具調整を実現するために、3方向圧電駆動式刃物台を開発した。

図4に開発した刃物台の概観写真を示す。刃物台は、微調整用の圧電駆動式刃物台(上部)と粗調整用の土台(下部)の2つの部分から構成されている。微調整部は工具に微小な変位を発生させるために平行バネ構造を用い、積層圧電アクチュエータを用いて変位を発生させることにより、XYZ

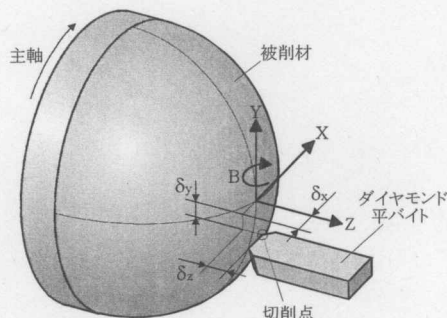
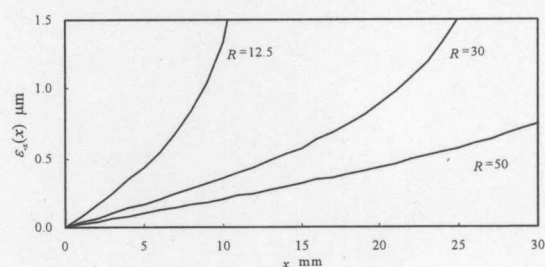
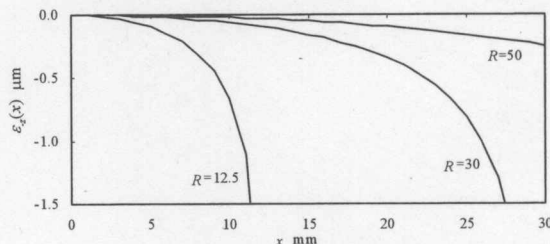


図2 直線包絡法における工具設定誤差



(a) -X方向



(b) -Z方向

図3 工具設定誤差による加工形状誤差

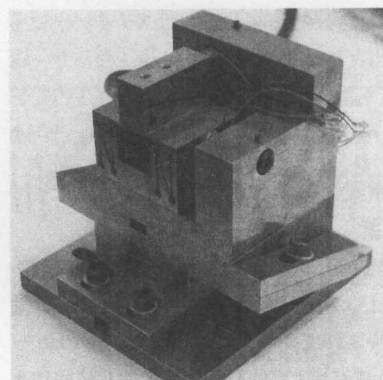


図4 製作した刃物台の概観写真

の3方向に10nmレベルの精密制御が行えるようにした。また、粗調整部は、ねじによる手動方式となっており、XYZの3軸それぞれに対して±5mmの調整が可能である。さらに、案内面に治具を設置することにより、Y方向を調整する際にX座標が変化しないような構造となっている。Y方向は、手動調整機構にマイクロメータを取り付け、μmレベルの調整を可能とした。このように、まず手動機構を用いてμmレベル以上の粗調整を行い、そして圧電駆動式刃物台を使用しμmレベル以下の精密調整を行うという高精度の工具調整が可能となった。

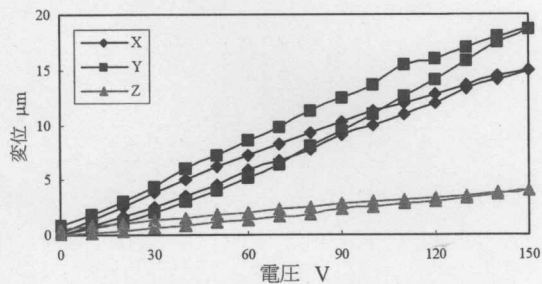


図5 圧電式刃物台の変位-電圧特性

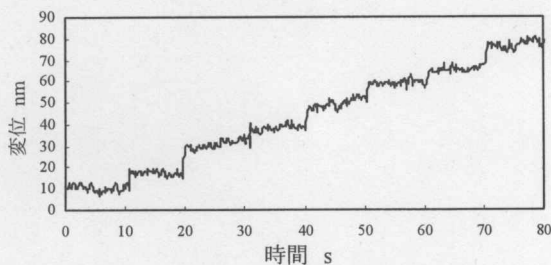


図6 圧電式刃物台のステップ変位特性

次に、開発した圧電駆動式刃物台の各方向の変位量及び分解能を測定した。図5に変位-電圧の特性を示す。変位量については、0-150Vまで10V単位で電圧を付加し、150Vに達した時点から10Vずつ電圧を減少させ、変位を測定した。図から明らかなように、150V時の最大変位量はX軸15.0μm、Y軸18.6μm、Z軸4μmとなった。10μm以上の変位では、変位-電圧特性にヒステリシス特性が見られたが、数μm以下の範囲での精密工具調整においてはヒステリシスがほとんど無視できる。図6は、一例としてX方向において安定して使用できる最小電圧とそと時の変位量を調べた結果である。0.1V単位で電圧を増加させた結果、変位はステップ状に変化しており、1ステップ当たりの変位量は約10nmとなった。同様に他の方向についても測定した結果、各方向とも1V以下の電圧で10nmレベルの位置制御が可能であることがわかった。

## 5. 大曲率光学表面の試作例

### 5.1 加工装置

実験には(株)不二越製XZB3軸同時制御超精密非球面加工機(ASP-15)を使用した。この加工機は、主軸はエアベアリングで支持されており、直交するXZ2軸のテーブルには高剛性でかつ減衰性の高い油静圧案内と油静圧ねじを採用しているため、機械的な接触部を持たない位置決め機構になっている。テーブルの位置設定にはレーザスケールによるフルクロズド制御を用いており、最小設定単位は10nm/stepである。B軸にはロータリテーブルに油静圧軸受、駆動にバックラッシュのない摩擦駆動方式を採用し、0.001°の分解能が得られている。また、防振のため、グラナイト製旋盤ベースをエアマウント上に設置し、コンプレッサ、油温度調整機などの周辺装置は加工機本体と隔離して設置してある。

図7に、加工システムの概略を示す。工具調整は、PCにより電圧を制御し、圧電駆動式刃物台を駆動することによって行われる。したがって、従来の手動方式における試行錯誤やバ

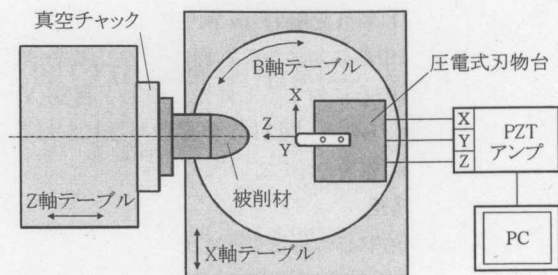


図7 システムの概略図

表1 試作加工表面の形状

幾何形状	回転軸対称楕円面
口径	50 mm
曲率 $C$	$0.08 \text{ mm}^{-1}$
円錐定数 $K$	-0.8
非球面係数 $A$	0

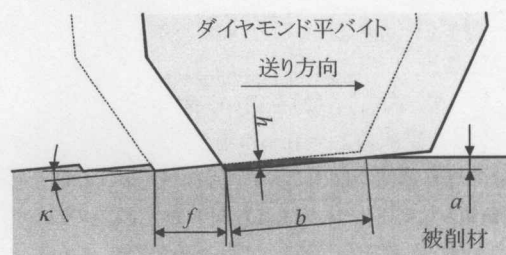


図8 切削点近傍の切削モデル

ラツキの問題を解決でき、より迅速でしかも精密な調整が可能となった。工具の運動軌跡の制御は、加工機本体のPCによりXZBテーブルを同時制御することによって行われる。

### 5.2 加工形状

一般に、軸対称非球面形状は次式で表される。

$$z(x) = \frac{C \cdot x^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1) \cdot C^2 \cdot x^2}} + \sum A_i \cdot x^i \quad (4)$$

ここで、 $x$ は被削材の半径方向の座標、 $z$ は光軸方向の座標、 $C$ は曲率、 $K$ 、 $A_i$  ( $i=1 \sim n$ )は非球面定数である。 $K>1$ は楕円、 $K=0$ は球面、 $K=-1$ は放物面を表す。本研究で製作する曲面形状は楕円面であるため、 $A=0$ とした。表1に加工した表面形状のパラメータを示す。

### 5.3 加工条件

図8に切削点近傍の切削モデルを示す。送り量を $f$ 、切込み角を $\kappa$ とすると、切取り厚 $h$ は次式で表される。

$$h = f \cdot \sin \kappa \quad (5)$$

また、切込み量を $a$ とすると、切削幅 $b$ は次式で表される。

$$b = \frac{a}{\sin \kappa} \quad (6)$$

加工条件を表2に示す。実験では直径50mmの無酸素銅を両面平行なアルミニウム製試料台に接着し、真空チャックにより主軸に固定し、単結晶ダイヤモンド平バイトによる楕円面切削を行った。主軸回転数を1500rpmとし、切削液は白灯油を噴霧状にして使用した。図9に加工機主要部の写真を示す。



表2 切削加工条件

被削材	無酸素銅
切削工具	単結晶ダイヤモンド平バイト
すくい角	0°
逃げ角	6°
主軸回転数	1500 rpm
切り厚さ $h$	35 nm
切込み角 $\kappa$	0.2°
送り量 $f$	10 $\mu\text{m}/\text{rev}$
切込み量 $a$	2 $\mu\text{m}$
切削液	白灯油噴霧

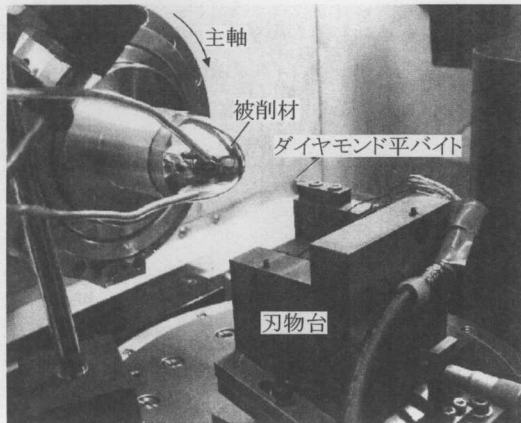


図9 加工機主要部の写真

#### 5.4 実験結果

図10は加工後の工作物の写真である。表面は鏡面仕上げされている。工作物中心の顕微鏡写真を図11に示す。中心部には明確なへそが見られず、工具設定はほぼ正確に行われていることがわかる。

加工面の形状及び表面粗さの測定には(株)三鷹光器製非接触3次元形状測定器(NH-3SP)を使用した。なお、工作物外周部は急な傾斜面になっており、上記の測定器では全面を測定できないため、工作物中央部のみを測定した。形状誤差の測定結果を図12に示す。形状誤差は約1.7 $\mu\text{mP-V}$ となった。この形状誤差は、補正加工を行うことによってさらに小さくすることができる。表面粗さの測定結果を図13に示す。表面粗さは6nmRa, 33nmRyとなった。

#### 6. 結 言

直線包絡法を用いて大曲率光学表面の試作を行った。結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 直線包絡法では、形状誤差の要因の1つはB軸中心に対する工具設定誤差である。また、被削材の曲率半径が小さいほど、形状誤差は大きくなる。
- (2) 高精度工具設定を行うために、粗動と微動の2層構造をもつ超精密刃物台を開発した。刃物台の変位は10nmレベルのステップで制御可能である。
- (3) 大曲率楕円面の試作加工を行った結果、加工時間は数分程度であり、形状誤差1.7 $\mu\text{mP-V}$ 、表面粗さ6nmRa, 33nmRyとなった。

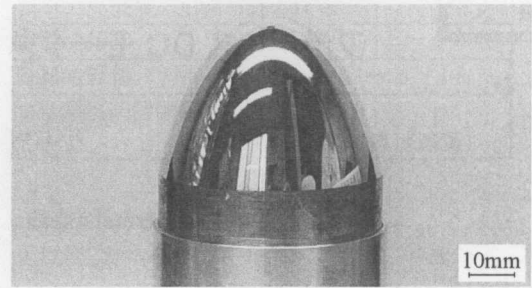


図10 加工後の工作物の写真

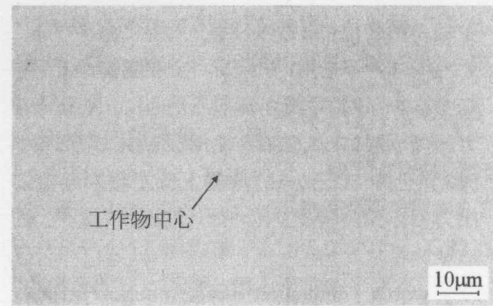


図11 加工後の工作物中心の顕微鏡写真

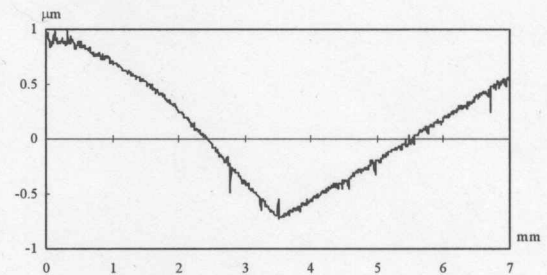


図12 加工面の形状誤差

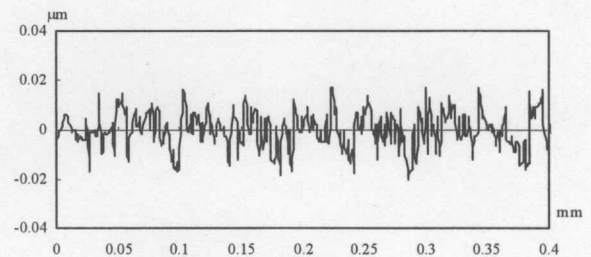


図13 加工面の表面粗さ

#### 謝 辞

本研究の製作実験にご協力頂いた北見工業大学技術員杉野豪氏、学部卒業生の中川雄平君、三浦義宣君に感謝する。

#### 7. 参考文献

- 1) 田中克敏: 非球面レンズの製作方法と超精密非球面加工機, 光技術コンタクト, 38, 10 (2000) 592.
- 2) 閻紀旺, 庄司克雄, 厨川常元: 直線包絡法による単結晶シリコン製大口径非球面レンズの超精密切削, 精密工学会誌, 68, 4, (2002) 561.
- 3) 鈴木浩文, 北嶋孝之, 奥山繁樹: 軸対称非球面の高精度切削に関する研究—工具の各種誤差要因が形状誤差に与える影響及びその最適補正法の検討, 精密工学会誌, 65, 3, (1999) 401.