

論文 Article

6軸駆動機構による鏡面加工の研究（第1報）

—加工装置の設計・試作と特性評価—

原稿受付 2011年3月30日

ものづくり大学紀要 第2号 (2010) 5~10

神谷聖志^{*1}, 三浦圭祐^{*2}, 沼尾絃臣^{*3}^{*1}ものづくり大学 技能工芸学部 製造学科^{*2}ものづくり大学 技能工芸学部 製造学科 学生^{*3}日本電産コパル電子(株)

Study for Machining Mirror Like Surface by 6 Axes Driving Mechanism (Part 1)

Masashi KAMIYA^{*1}, Keisuke MIURA^{*2}, Hiroomi NUMAO^{*3}^{*1} Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists^{*2} Student, Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists^{*3} COPAL ELECTRONICS. Co. Ltd.

Abstract

Machining a mirror-like surface, the newly simple diamond turning machine has been designed. It has 5 axes driving stages, X, Y, Z, θ , Tilt, and spindle attaching a diamond tool. The plane, convex and concave mirrors has been machined by fly cutting and spherical generation. The machine can provide surface roughness Rz 0.02 μ m and figure error 0.04%.

Key Words : 6 axes mechanism, diamond cutting, surface

1. はじめに

多面体鏡¹⁾, 感光ドラム, 平・球面鏡²⁾, レンズ用金型など軟質金属を用いた光学部品の需要が高まっている³⁾. その加工には適切な切削速度, 送り量を維持するために, NC 装置などによる工具, ワークの運動と位置制御が求められ, 一般的には大掛かりで高コストな装置となる⁴⁾.

そこで, 本研究では汎用の単軸機構を組合せた5軸機構と高精度回転する主軸とで構成した簡易な6軸駆動の加工装置を設計, 試作した. さらに, それらの機構間で幾何学的な位置関係を持たせて, 高精度な平, 球面形状の反射鏡加工が可能かを実験的に検討した.

2. 加工用装置の構成

装置は図1に示すように, 汎用の定盤上に Y, X, Z, 傾斜 (Ti 軸), ワーク回転 (θ 軸, ワーク取付用チャック搭載) の駆動軸を順次積重ねたものである. また, 光学部品の加工を行うために工具取付け用主軸を定盤上のコラムに搭載し, 比較的大きい工具回転半径 600mm を持ったフライカティングを行う縦型旋削形式とした.

それらの駆動機構のうち, Z 軸では切込み量を決め, θ 軸でワークと主軸に相対的回転を与える. また, Ti 軸は θ 軸とワークを搭載し, ワークの中心を基準として主軸と θ 軸との間に傾斜角度を設定する.

これらの機構によって, 図2に示すように⁵⁾主軸回転と Y 軸の直線移動, または θ 軸の回転運動

との組み合わせで平面加工する。さらに、Ti 軸を傾斜させ、 θ 軸と主軸とを相対的に回転させることによって凹凸球面創生を行う⁶⁾。この方法は Ti 軸回転と主軸回転とを同期させることによって、球面の曲率半径を連続的に変えることが可能であり、非球面加工への発展も望める。

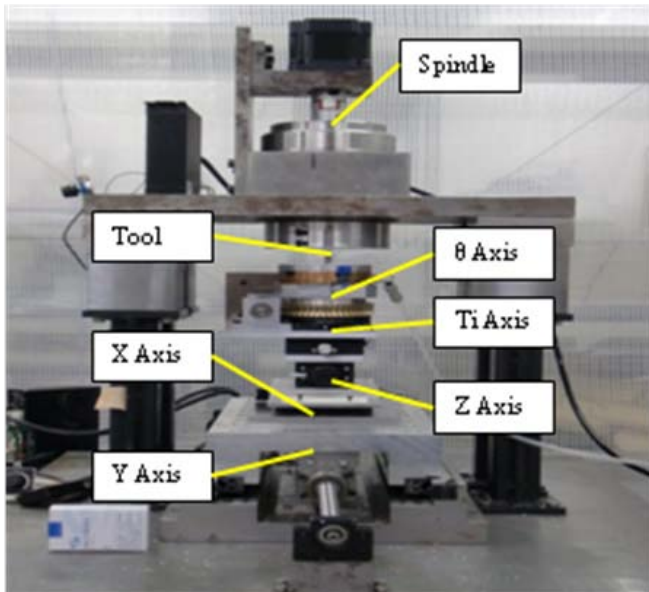


Fig.1 Apparatus of 6 Axes Control Mechanism

3. 各軸駆動機構と運動特性

3.1 X,Y 軸機構

表 1 に各駆動軸の特性、諸元を示す。ここで Y 軸機構はアルミニウム合金(A2017)製のステージを左右 2 本のリニアクロスローラガイド (Schneeberger RNG12) で案内する。これを中央に設置したボールネジ(NSK 社 W1606FA リード 5mm) を介して、DC サーボモータ (オリエタルモータ社 BMX シリーズ) と 1/4 減速プーリによって駆動する。

図 3 はその運動特性である。うねりを持った上下動は $2\mu\text{m}/50\text{mm}$ であり、数 μm 程度の平面度加工が可能と思われる。また、左右動もほぼ同様な精度を示しているが、切削方向と直交するので、加工精度への影響は上下動に比べて小さいと思われる。

X 軸機構はリニアクロスローラで案内されるステージ (シグマ工機社 TDS 1001) とこの側面

に取付けられた送りねじによって位置決めする。X 軸は主軸回転時の工具軌跡が θ 軸の回転中心と一致するように位置決め後、固定するので、その運動特性は問題にしない。

なお、この加工法による表面粗さ R_{max} はステージの送り速度と主軸の切削速度から次式で近似されるものとする⁵⁾。

$$R_{\text{max}} = f^2/8r \quad (1)$$

ここで、 f はピックフィード(mm/rev)、 r は工具のノーズ半径(5mm)である。

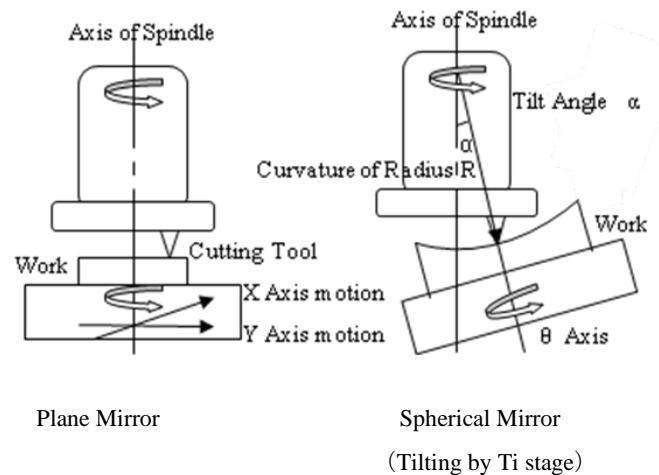


Fig.2 Principle of Plane and Sphere Machining

Table1 Characteristics of Stages

Stage	X	Y	Z	Ti	θ
Stroke	± 12.5	± 100	± 2.5	$\pm 15\text{deg.}$	360deg.
Driving System	Manual	DC Servo motor Ball Screw Pulley transmission	Manual or DC Servo motor	Manual or DC Servo motor	DC Servo motor Worm Gear Reduction ratio 1/50
Mechanism of Guide	Linear roll bearing	Linear roll bearing	Wedge guide Linear roll	Plane bearing	Ball bearing
Accuracy(μm) or (Arc sec.)	Straightness 2	Straightness 2/50mm	Positioning 1	Positioning 1deg./rev	Pitching 4
Mass(kg)	1.50	7.8	0.7	0.64	0.45
Stiffness(N/ μm)	—	400	8	—	—
Angular (Arcsec./Nm)	Pitch 31.9 Yaw 42..	—	Pitch 0.2 Yaw 0.04	—	—

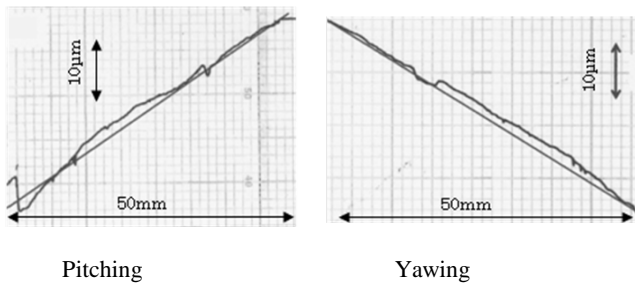


Fig.3 Pitching and Yawing accuracy of Y stage

3.2 θ 軸機構

θ 軸は手動の回転ステージ (ミズ社 RPGT100) の下部に回転中心を一致させたウォーム伝達機構を取付け、DC サーボモータで駆動する。ウォームホイールは歯数 50, モジュール 2, ウォームは研削仕上げしたものである。

式(1)のピックフィードの関係から主軸回転数を 1500rpm 程度とすれば、θ 軸の回転速度は 1rpm 以下の低速回転で十分である。このステージ上に真空チャックを乗せ、オンマシンでチャック面を切削して基準面とした。この時、θ 軸は半径 50mm の位置で振幅 1µm の面振れがあり、計算上では定盤面とは 4" の傾きがあると考えられる。また、1 回転中の 2 山は、θ 軸は 0.5µm 程度の振幅で振れまわっていることを示している。

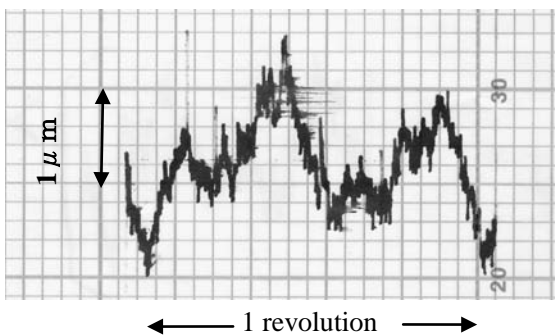


Fig.4 Pitching Accuracy of θ Stage

3.3 Z 軸機構

Z 軸は押しねじを送ることによって、くさび形案内されたステージ (駿河精機社 B36) を上下移動できる機構である。上下移動部には、ばねで予圧が加えられていてガタを軽減している。切削では、粗加工で十数µm, 仕上げ加工は数µm の切込み精度が必要なので、1µm 程度の位置決めと再

現性が満たされれば良い。

図 5 はその送り精度である。ステージストロークの上部で 2µm 程度のバックラッシュがあるが、位置によらず位置決め精度 1µm 以内の要求精度を満足している。

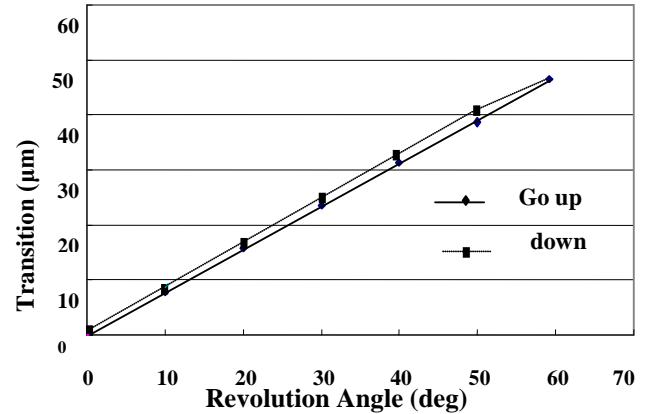


Fig.5 Feeding Accuracy of Z Stage

3.4 Ti 軸機構

Ti 軸に用いたステージ (駿河精機社 B36) は、中央に配置された押しねじによって傾斜調整を行う機構である。実験では、手動で押しねじを回転し、ステージの傾斜変位を 2 点で計測して角度を調整した。

Ti 軸によって主軸とワーク回転軸との傾斜角度 α を与えた時の球面の曲率半径 R は、工具回転直径を D として次式で決まる。

$$R = D / (2 \sin \alpha) \quad (2)$$

式(2)から、平面鏡を加工する場合の R は無限大であるので、Ti 角 $\alpha = 0$ すなわち、主軸とワーク回転軸を平行にする必要がある。一般的には Ti 角は Z 軸周りに Y, X の 2 軸方向で制御する必要があるが、本装置では Z 軸周りの回転対象の加工であり、Z-Y 軸方向のみのチルト機構として特性を評価する。傾斜角度の範囲はワーク加工面上を回転中心として $\pm 10^\circ$ である。

なお、本装置の初期的な取付け時の傾斜角 α は、θ ステージの面振れの計測から 4" と予測できる。従って、工具回転直径 $D = 120\text{mm}$ の時の曲率半径は式(2)から約 3.1km と長曲率半径の球面となる。本実験ではその影響を含めて、形状精度を確認する。

さらに平面度の向上ためには、手動の押しねじ

をサーボモータなどによって1"レベルの高精度な角度制御機構への改良が必要になると思われる。

3.5 主軸

主軸には静圧空気軸受（NSK社 エアスピントルユニット）を用いた。その特性は給気圧力0.5MPaでラジアル剛性60N/ μm 、アキシャル剛性580N/ μm 、取り付け面振れ1 μm 、再現性0.02 μm である。軟質金属鏡の微小な切削力を考慮するとラジアル、アキシャルとも0.1 μm 以下の変位量と考えられる。主軸はDCサーボモータ（リエンタル社FBL5120）によって直接駆動される。

主軸の工具取付け台にそれぞれ焼結、単結晶ダイヤモンド工具（表2）を取り付けた時の回転精度を図6に示す。振れまわりは焼結（質量：24g）と単結晶（質量：46g）工具の質量によって多少の違いはあるが、主軸外周面の形状誤差を考慮すると、0.1~0.3 μm 程度の振れまわりである。

また、900, 1800rpm付近の回転数で共振現象が発生しているため、単結晶では1600rpm、焼結では1700rpm程度の回転数で切削すれば振れまわりは0.1 μm 以内である。

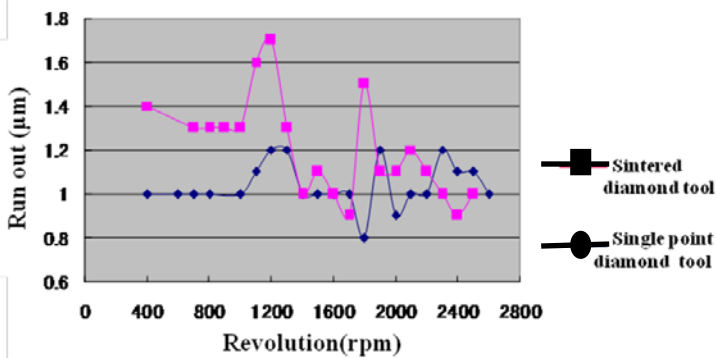


Fig.6 Run out of Spindle

4. 基礎的切削加工実験

試作した加工装置を用いて直径90mmのワークの切削加工を行い、機構と加工精度の関係を実験的に検討した。切削工具は前述のとおり、ノーズ半径が同一の焼結ダイヤモンド工具、単結晶ダイヤモンド工具である。

切削条件では切込み量は粗加工で10 μm 、仕上げ加工で5 μm とし、切削油として白灯油を滴下した。ワークの材質は軟質金属の中で光学部品への

応用例が多い無酸素銅(C1020)とアルミニウム(A1070)の2種類とした。

Table2 Condition of Diamond Tool

	Cutting Tool			Cutting Condition			
	Tool	Nose Radius (mm)	Rake angle (deg)	Mass (g)	Spindle Revolution (rpm)	Material Revolution (rpm)	Feed (μm)
Rough	Sintered diamond	5	8	24	1700	0.123	10
Fine	Single Point dia.	5	5	46	1600	0.088	5

4.1 平面鏡の加工

主軸とY軸駆動および、 θ 軸駆動によって平面鏡の加工を行い、それぞれの表面粗さ、平面度に関する評価を行った（Taylor Hobson タリサーフ、Zygo レーザ干渉計）。切削方法は、焼結ダイヤモンド工具で粗加工を行った後、単結晶ダイヤモンド工具を取付け、最適回転1600rpm（切削速度：10m/sec）で仕上げ加工した。この時の機構の駆動条件は、表面粗さ $R_{\text{max}}0.01\mu\text{m}$ 以内を目標値として、式(1)からステージの送り速度はY軸送りでは25mm/sec、 θ 軸では回転数0.88rpmとして、ピックフィードを0.0155mm/rev.に選定した

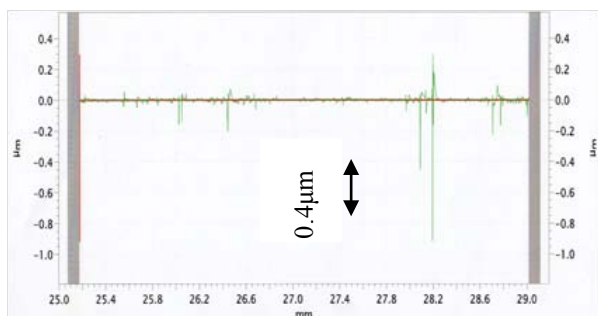
(1) 表面粗さ

上記加工条件で、Y、 θ 軸駆動の違いによる表面状態を比較した。図7は平面鏡加工した時の表面粗さである。

Y軸駆動では図7に示すようにA1070では $R_z0.092\mu\text{m}$ と目標値を達してない。ワークの表面は全般的には鏡面加工されたが、1部分にスクラッチを生じたために表面粗さを低下させた。その要因は、切りくずの切削面に巻き込み、ボールネジの回転体と同期した送りむらなどYステージの移動精度が影響したと考えられる。特に、前者においては用いた空気ブローでは切りくずを十分に排除できず、工具に付着して切削面を傷つける現象が見受けられた。

一方、 θ 軸駆動ではA1070で $R_z0.028\mu\text{m}$ 、C1020では $R_z0.016\mu\text{m}$ を得た。材質による僅かな違いや、表面粗さパラメータの R_{max} と R_z とで値

は異なるが、ほぼ目標の鏡面加工を達成した。また、ワーク中心部分と最外周部分との精度の差はA1070加工で $0.01\mu\text{m}$ 以下と工具回転半径による送り速度の影響は僅かであった。



Machining by Y-Axis driving

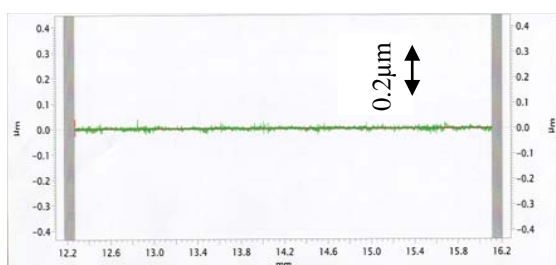
Machining by θ -Axis driving

Fig.7 Surface Roughness of Plane Mirror(A1070)

(2) 平面精度

Y軸駆動でA1070を加工した時の表面形状の測定結果を図8に示す。ワーク中央部に $0.3\mu\text{m}$ の凹面を持ち、干渉計では 1.8λ ($\lambda:632\text{nm}$)のうねりがある。ステージの上下動約 $2\mu\text{m}$ の1部が転写されたものと考えられる。

図9は θ 軸回転による平面加工の結果の1例である。中心点を対象に4方向で測定すると、形状が僅かに異なった $2.6\sim 3.0\mu\text{m}$ の凹面状態を示し、中央と周辺とで最大 $1\mu\text{m}$ の凸部が共通に形成されている。

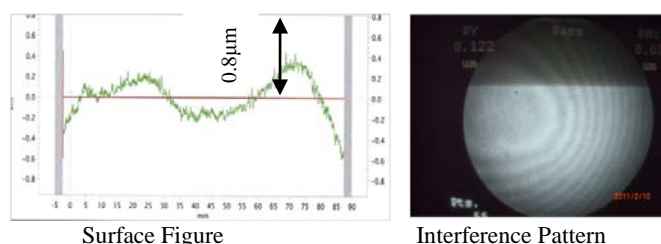
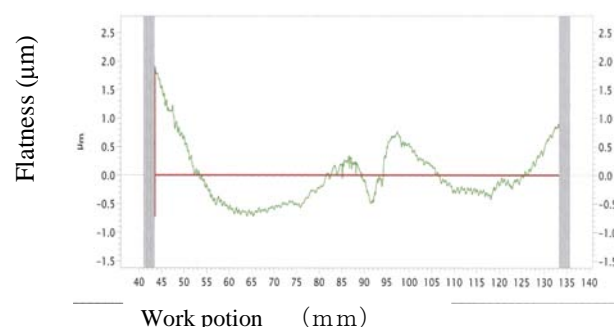


Fig.8 Flatness of Plane Mirror by Y axis driving

これらは、Ti軸の主軸に対する初期的な傾斜誤差 $\alpha=4''$ の時、表面は約 $1\mu\text{m}$ の凹面形状となり、測定結果と傾向が一致する。また、中央部の凸部は θ 軸駆動に用いた真空チャックの吸引力が、ワーク中央と周辺部に約 $1.5\mu\text{m}$ の弾性変形量の差を与えたため、その弾性回復によって生じたと考えられる。

Fig.9 Flatness of Plane Mirror by θ axis driving

4.2 球面鏡の加工

図2.2に示すようにTi軸を用いて主軸とワーク面との傾斜角度を設定して、球面鏡の加工を行った。切削条件は平面加工と同様である。目標曲率半径を 1.5m に設定し、式(2)を用いてTi軸を 1.15deg . (工具回転半径 60mm)に設定した。

表3にその結果を、図10, 11にA1070を加工した時の凹凸面の形状を示す。

凹凸両面ともA1070では曲率半径 1.51m , $Rz0.05\mu\text{m}$ と曲率半径誤差 0.7% 以内で鏡面の球面創生できた。一方、C1020の場合は曲率半径 1.56m と曲率半径誤差 4% とやや大きい、 $Rz0.04\mu\text{m}$ と鏡面が得られた。

なお、それぞれの鏡面の中央局部に $6\sim 8\mu\text{m}$ の凸部の存在が認められた。これは、曲率半径 1.5m の時の中央と周辺の凹凸の高さ $700\mu\text{m}/90\text{mm}$ に対する加工誤差と考えれば、 1% 程度の誤差であり、曲面各部分の曲率半径の均一性は 99% の精度と言える。

これらの加工誤差に関して、曲率半径に及ぼす誤差要因は、材質の依存性が大きいとは言い難く、工具やワークの取付け寸法に関する装置の再現性の問題と思われる。また、中央部付近の局部的凸部に関しては、ワーク回転軸(θ 軸)と工具回転

軸（主軸）とに僅かな回転中心の位置ずれによる切り残し，平面加工と同様に真空吸着による弾性変形により生じたと考えられる。

Table.3 Accuracy of Spherical Mirror

	Material	Theoretical Radius of Curvature (m)	Machining Radius (m)
Concave	A1070	1.5	1.51
Concave	C1020	1.5	1.56
Convex	A1070	1.5	1.51

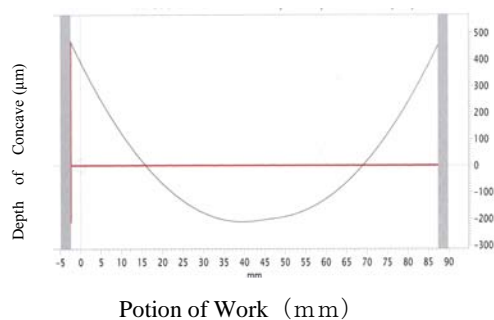


Fig.10 Configuration of Concave (A1070)

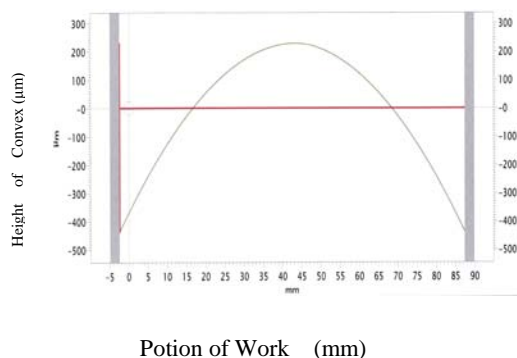


Fig.11 Configuration of Convex (A1070)

5. まとめ

汎用の単軸機構を組合わせて，X, Y, Z, θ , Ti と主軸から構成した6軸の簡易な加工装置を設計，試作し，軟質金属の鏡面切削を行って，特性を評価した．その結果次のことが分かった．

- (1) 試作した加工装置では主軸とY軸移動，または主軸と対向した θ 軸回転のいずれの組み合わせでも，幾何学的関係どおり平面，球面の鏡面加

工ができる．

- (2) 平面鏡の加工精度はワーク径90mmに対して，Y軸駆動では，A1070の時の表面粗さはRz $0.09 \mu\text{m}$ であって，目標精度 $0.01 \mu\text{m}$ を達成できなかった．その要因はYステージの送り精度が影響を与えているが，切りくずの巻込みによるスクラッチの発生を無視できない．
- (3) θ 軸駆動では表面粗さはC1020でRz $0.016 \mu\text{m}$ ，A1070ではRz $0.026 \mu\text{m}$ とほぼ理論値と近似できる鏡面加工ができた．また，半径差によるワーク回転速度の違いは表面粗さに大きな影響を与えない．
- (4) 平面度ではY軸駆動では $1.7 \mu\text{m}/90\text{mm}$ ， θ 軸駆動では $3 \mu\text{m}/90\text{mm}$ の平面度が得られた． θ 軸駆動では，主軸との傾斜角誤差と面振れが形状の低下を招く．
- (5) θ 軸とTi軸を用いた凹凸球面加工では，目標曲率半径1.5mに対して1.51~1.56mと最大誤差4%，曲率半径の均一性は99%程度の鏡面加工が可能である．その誤差要因は装置の工具，ワークの取付け寸法の再現性，ワークと主軸の回転中心の位置ずれなどが考えられる．
- (6) 平面，球面鏡のいずれもワーク保持に用いた真空チャックが中央部に弾性変形を与え，精度劣化の要因となった．吸着力と弾性変形を考慮した最適設計が求められる．

文献

- 1) 例えば M.Kamiya, M.Yamashita et al. : Laser-Beam Printer Scanner, Proceedings of the SID 27,1(1986)3.
- 2) 例えば 吉田正太郎：反射望遠鏡光学入門，誠文堂出版(2005).
- 3) (財)光産業技術振興協会：光産業動向調査（技術情報レポート）(2010).
- 4) 鈴木浩文，山形豊，樋口敏郎：超精密加工システムの最近の動向，精密工学会誌，72,4(2006)417.
- 5) 小林 昭等：超精密加工技術マニュアル，新技术開発センター出版(1985)144.
- 6) K. Ueda et al. : Machining of Mirror-like Surface, Toshiba Review(1981)132.