

## 光学面の超精密加工

小川秀樹

1990年代に入り、静圧空気軸受式スピンドル、2軸静圧油軸受け式スライドおよび高分解能フィードバックシステムを兼ね備えた加工機で、シャープな刃先を有する単結晶ダイヤモンドツールを使用して光学面の創成を行うための超精密加工機は、さらにフィードバック分解能の向上、加工最大径の増大、Y軸を追加した3軸加工機等(図1)，市場の要求により機能面において一段と進歩を遂げ、徐々に多様化してきた。また、加工対象物としての光学部品における形状精度、表面粗さの要求も年々向上し、その加工形状も年々複雑となって、回転軸対称非球面から非回転軸対称曲面(図2)も出現してきた<sup>1,2)</sup>。光学面を創成する代表的な超精密切削加工と超精密研削加工について事例を上げて以下に紹介する。

### 1. 超精密切削加工

刃先の鋭利な単結晶ダイヤモンドツールを使用して光学面を創成する超精密切削加工は、1960年代後半に米国で始まり<sup>3)</sup>、近年は優れた研磨技術による単結晶ダイヤモンド工具の刃先精度の向上<sup>4)</sup>、使用する加工機の静的および動的精度の向上により、光学部品の形状精度と表面粗さにおいて高精度加工が達成されている。加工径としてはφ2~600 mm程度まで広範囲にわたり、加工対象材料もアルミニウム合金、無酸素銅、黄銅、無電解ニッケル、樹脂、ゲルマニウム、シリコン等多種類にわたっている。以下に2軸超精密加工機による代表的な加工例と加工結果を加工材料に分けて紹介する。

Optical surfaces generated by ultra-precision machining  
(1995年12月8日受理)

Hideki OGAWA ランクテーラーホブソン(株)(〒104 東京都中央区銀座4-9-13)

#### 1.1 軟質金属の超精密切削加工

日本における代表的な加工対象材料は、アルミニウム合金、無酸素銅および無電解ニッケルであり、アルミニウム合金は主にポリゴンミラーおよび赤外線光学用の反射鏡等の光学面に使用されている。無酸素銅は赤外レーザー用反射鏡として使用され、平面鏡、球面鏡、放物面鏡等がその代表的な形状である。無電解ニッケルは、主としてプラスチックの成形用金型の光学面に使用され、その代表的な例として、CD用非球面ピックアップレンズ、カメラ用非球面レンズ、大型プロジェクター用非球面レンズ等がある。図3は、米国ランクニューモ社製Nanoform-300で直径30 mm、凹面曲率半径30 mmの球面無電解ニッケルを超精密切削加工したときのレーザー干渉計による測定結果であり、形状精度は0.035 μm(P-V)，また図4はその表面粗さを触針式粗さ計(talystep)を使用して測定した結果で、凹面(上図)は4 nm R<sub>max</sub>、凸面(下図)は6 nm R<sub>max</sub>で成型用金型の光学面としては研磨なしで十分使用可能な面が達成されている。

#### 1.2 樹脂の超精密切削加工

樹脂を直接切削する例としてはコンタクトレンズ、光学部品の試作等が上げられる。コンタクトレンズの加工では、単結晶ダイヤモンドツールによる直接切削の後、研磨加工により表面粗さの向上が図られている。加工面形状として、球面、非球面、バイフォーカル面およびフレネル面等の回転軸対称曲面の組合せ等があり、これらの形状加工は加工機の主軸回転軸上で行われている。図5はアクリルコンタクトレンズを球面に切削加工したときの形状を触針式粗さ計(form talysurf)で測定評価した結果で、評価範囲8.5 mmに対して形状精度は

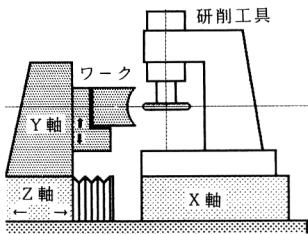


図1 3軸研削加工機。

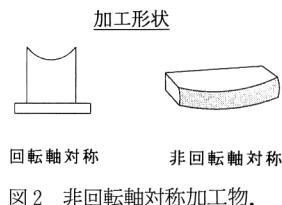


図2 非回転軸対称加工物。



図3 無電解ニッケル凹面切削加工結果 ( $\phi 30\text{ mm}$ ,  $R 30\text{ mm}$ )。

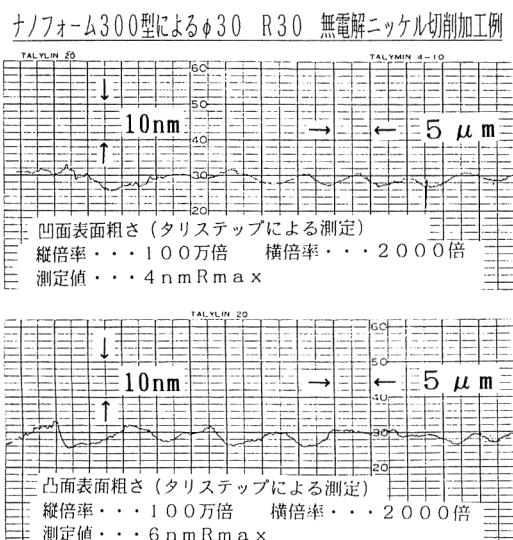


図4 無電解ニッケル切削加工表面粗さ。

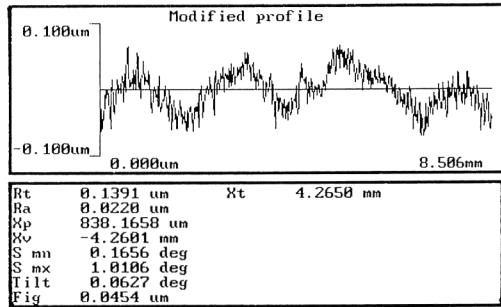


図5 アクリル切削加工の形状結果 (球凹面,  $\phi 10\text{ mm}$ )。

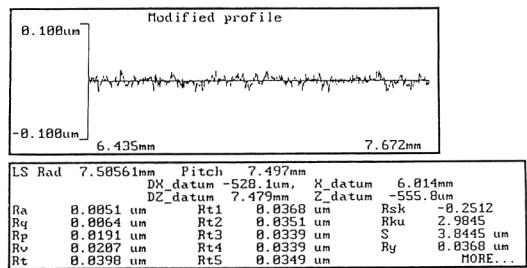


図6 PMMA 切削表面粗さ。

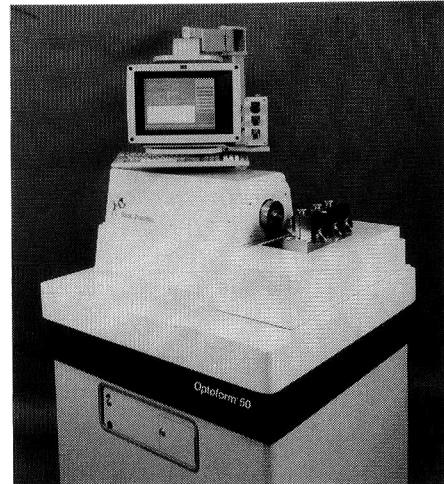


図7 コンタクトレンズ加工機 (Optoform-50)。

$0.139\text{ }\mu\text{m}$  (P-V) である。図6はその表面粗さを示し、 $0.0051\text{ }\mu\text{m}$   $R_a$ 、 $0.039\text{ }\mu\text{m}$   $R_t$  である。また図7に使用された小型超精密加工機 (Optoform-50) を示す。

最近米国ランクニューモ社において、高度な fast tool servo 技術の開発により、主軸回転軸上では元来加工が困難とされていた非回転軸対称のトーリック面、軸はずし円錐光学面の加工が可能となっている<sup>5)</sup>。これは

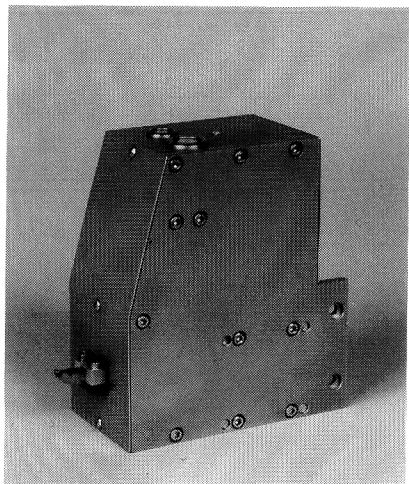


図 8 Fast tool servo システム (Variform).

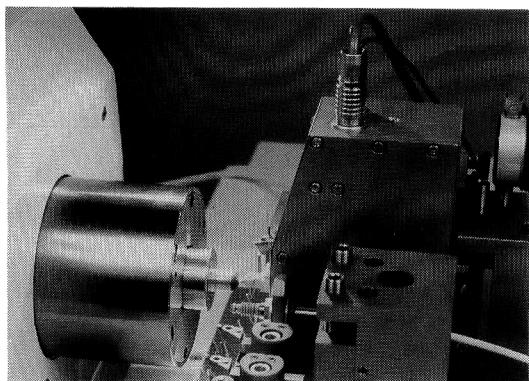


図 9 Variform を加工機に取りつけた外観。

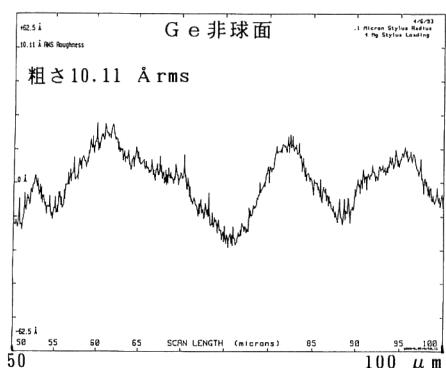


図 10 Ge の切削表面粗さ (非球面, 凹面)。

ピエゾアクチュエーターを使用して主軸の回転に同期させて、使用するダイヤモンドツールの切入込み深さを制御し切削するもので、従来のアクチュエーターに比べて駆

動レンジが大きく、また応答性が高いことが特徴である。その主な仕様を以下に示す<sup>6)</sup>。

- ・駆動レンジ: 400  $\mu\text{m}$ @100 Hz  
200  $\mu\text{m}$ @200 Hz
- ・方式: モーション拡大レバー付きピエゾアクチュエーター
- ・フィードバック: linear variable differential transformer 検出によるクローズドループ
- ・スピンドル回転: 2,000~6,000 rpm に対応

上記装置の外観を図 8 (幅 50×奥行 100×高さ 150 mm) に、この装置を図 7 の加工機 (Optoform-50) の刃物台に取り付けた構成を図 9 に示す。この構成により、コンタクトレンズが切削加工され、実際に生産されている。

また、Cunningham らにより光学部品の非回転軸対称曲面の樹脂の直接切削加工を 2 軸加工機で行った例が発表されている<sup>7)</sup>。この加工方法は、X および Z 軸を有する 2 軸加工機の主軸スピンドルにツールを固定して回転させ、その回転軌跡を維持しながら主軸スピンドルをプログラム駆動することにより、トーリック形状を創成する。この加工により、樹脂製のトーリックレンズの試作製造が報告されている。

### 1.3 結晶体の超精密切削加工

結晶体の切削として、代表的な材料はゲルマニウム (Ge), シリコン (Si), ジンクセレナイト (ZnSe), ジンクサルファイド (ZnS) および KDP (potassium dihydrogen phosphate) 等があり、Ge および Si は主に赤外線光学系部品として、また ZnSe, ZnS および KDP は CO<sub>2</sub> レーザー光学部品として使用されている。

Ge は 8~13  $\mu\text{m}$  帯の赤外線光学系の球面、非球面レンズとして使用されており、結晶体の中では加工特性も良く、加工形状精度および表面粗さも軟質金属と同等、またはそれを上回る結果が得られている<sup>8)</sup>。図 10 は Ge を非球面形状に小型超精密加工機 (図 7) で切削加工したときの結果で、1.011 nm rms の光学面に適する表面粗さが得られている。その加工には、軟質金属と異なり一般的に -15~-30 度の範囲の負の斜い角をもったツールを使用する。

また、Si は 3~5  $\mu\text{m}$  帯の赤外線光学系の球面、非球面レンズとして主に使用されるが、Ge と比べて使用的ダイヤモンドツールの摩耗が激しく、加工全面にわたって光学面の表面粗さを維持することが困難である。KDP はレーザー光学部品の波長変換器等に使用されているが、フライカットによる平面切削が一般的である。

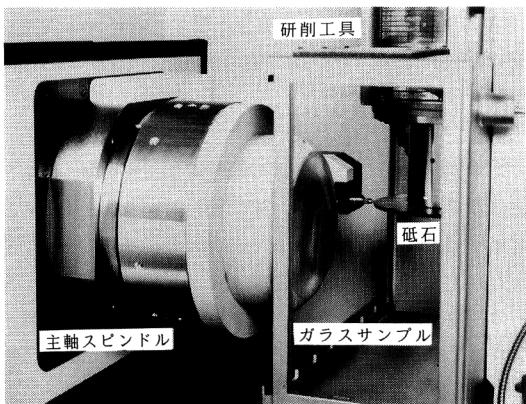


図 11 超精密研削加工例。

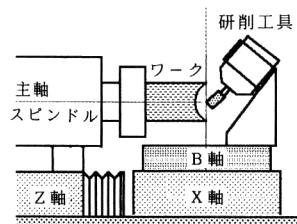


図 12 B 軸付研削加工機構造。

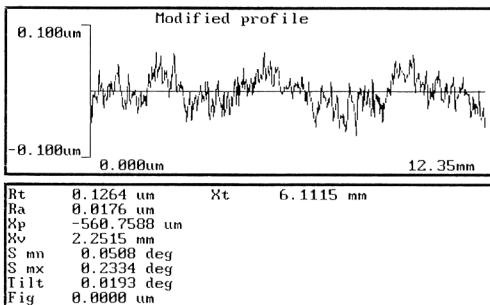


図 13 超硬サンプル研削加工形状 ( $\phi 12$  mm, 非球面, 凹面)。

## 2. 超精密研削加工

比較的剛性の高い 2 軸の超精密加工機に切削工具の代りに研削工具を取り付け、超精密研削加工を行うことが一般的に行われている。図 11 は米国ランクニューモ社製 Nanoform-300 型に直径 150 mm のガラス部品を取りつけて研削加工をしている一例である。超精密研削加工は、研削用砥石軸を主軸に対して垂直に取り付け、円盤形状またはそろばん玉形状の砥石を用いて形状創成加工を行うのが一般的である。また、図 12 に示すように、B 軸回転軸を追加し、その上に 45 度に傾けた研削工具を取り付け、円筒状の砥石のエッジを使用して小径ワークを加工する方式も実用化されている。

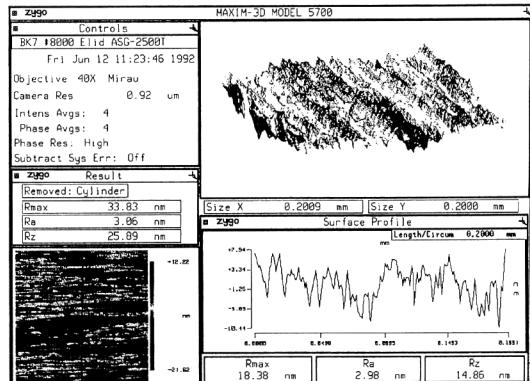


図 14 BK-7 ELID 研削加工表面粗さ。

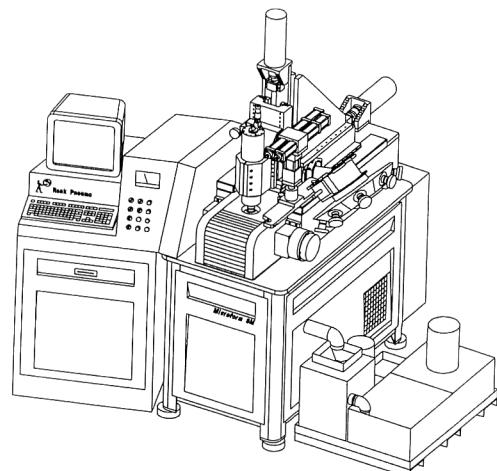


図 15 ガラス直接研削加工機 (Microform-SM)。

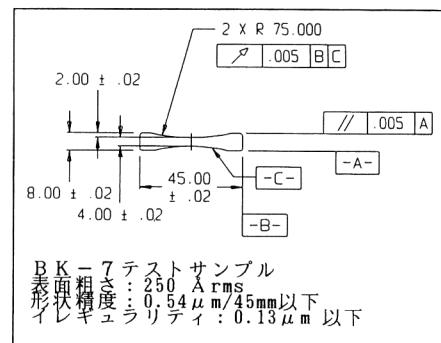


図 16 Microform-SM の加工保証精度。

また、研削加工は被加工物の直径およびサグ深さ (sag depth) によって使用する研削ヘッドおよび砥石の寸法を選択する必要があり、その選択により小径研削、

中径研削および大径研削に大別される。小径研削は主に  $\phi 4\sim38$  mm 程度までの加工径、サグ深さは凸面で 25 mm、凹面は 4.8 mm まで、使用砥石は  $\phi 3\sim13$  mm 程度である。中径研削は主に  $\phi 10\sim50$  mm 程度までの加工径、サグ深さは凸面で 30 mm、凹面は 8 mm まで、使用砥石は  $\phi 6\sim25$  mm 程度である。また、大径研削は  $\phi 30\sim300$  mm 程度までの加工径、サグ深さは凸面で 75 mm、凹面は 38 mm まで、使用砥石は  $\phi 25\sim140$  mm 程度まで可能である<sup>9)</sup>。超精密研削加工は、表面粗さ向上の目的から、従来の脆性加工に対して切込み深さをサブミクロンから 1 ミクロン程度に小さくした延性加工を主流とし、加工表面の変質層を極力小さくすることで表面粗さを小さく維持している。図 13 に小径研削による直径 12 mm の超硬金型の非球面加工の形状測定例を示す。非球面形状精度は 0.126  $\mu\text{m}$  (P-V)，表面粗さは 9.5 nm  $R_a$  である。また図 14 は延性加工の一方式である ELID (electrolytic in-process dressing) 研削加工により仕上げられた BK-7 の R 100 mm 球面形状の表面粗さの測定結果で、2.98 nm  $R_a$ 、および 18.38 nm  $R_{\max}$  が得られている。

超精密研削加工用の被加工物としてはレンズ用金型材料としての超硬 (WC)，シリコンカーバイト (SiC) またはガラスレンズの直接研削が主である。レンズ金型加工では、大きさとして  $\phi 4\sim25$  mm 程度で、CD 用非球面ピックアップレンズ、DVD (digital video disc) 用非球面レンズ、カメラおよびビデオカメラ用非球面レンズなどの成形金型に上記 WC および SiC が応用されている。また、ガラスの直接研削加工では、直径 20~300 mm 程度までの球面、非球面形状の加工が行われている。ランクニューモ社ではガラス研削加工機を用いて、約 5 分程度で直径 50 mm 程度のガラスブランクより球面レンズ形状の創成ができ、形状精度として 0.3  $\mu\text{m}$

(P-V)/50 mm 以下、表面粗さとして 25 nm rms 以下を達成している<sup>10)</sup>。その加工機を図 15 に、またその保証精度を図 16 に示す<sup>10)</sup>。

光学面創成のための最近の超精密加工を切削と研削とに分けて説明してきたが、光学面に対する加工要求精度が年々向上し、それに伴って加工機の精度および加工技術も向上してきた。超精密加工により制作される光学素子の利用分野においては、使用される波長も徐々に短くなり、X 線用光学素子に必要な形状精度 10 nm、表面粗さ 1 nm の部品も超精密加工機の対象となりつつある。今後の超精密加工機の開発に携わる研究者の挑戦と、加工機のさらなる発展に期待したい。

## 文 献

- 1) 谷口孝夫、坪井 崑、大阪哲嗣：“三次元自由曲面光学部品の超精密加工”，1995 年度砥粒加工学会学術講演会講演文集 (1995) pp. 99-104.
- 2) 田中克敏：“超精密非球面研削盤と応用例”，1995 年度砥粒加工学会学術講演会講演文集 (1995) pp. 99-104.
- 3) 小林 昭：“超精密ダイヤモンド切削に関する特別講演会テキスト”(精機学会、1984) p. 14.
- 4) K. Obata, K. Oka and T. Chujo : *Development of Ultra Precision Cutting Tool* (SME, 1991) pp. 191-194.
- 5) L. Chaloux : “Topics on demand,” Contact Lens Labtalk, Fall (1995) 6-7.
- 6) ランクニューモ社：“Variform Toric Generator” カタログ (1995) p. 1.
- 7) J.P. Cunningham, T. A. Marlar, A. C. Miller and R. L. Paterson : “Fabrication of large radii toroidal surfaces by dingle diamond turning,” *ASPE 1995 Proceeding*, Vol. 12 (1995) pp. 17-20.
- 8) 伊藤清一：“結晶材料の精密加工”，光技術コンタクト，29, 12 (1991) 34-41.
- 9) ランクニューモ社：“Nanoform-300”，“Nanoform-600” カタログ (1991) p. 4.
- 10) ランクニューモ社：“Microform-SM” カタログ (1994) p. 10.