

研削加工による超精密・鏡面研削加工の高効率加工プロセスの開発

－自由曲面光学レンズ金型の加工技術開発と実用化－

森由喜男*・久田哲弥*・和嶋直*・林正博**・渡邊洋一*・家口心*・齋藤佳史*

*材料開発・分析技術部 ・ **企画・事業推進部

次世代の自由曲面ガラスレンズの量産に用いる金型や、半導体製造装置に用いられる自由曲面ミラーなどは、その使用環境から耐熱性を有し、高硬度で寸法の経年変化が少ない超硬合金やセラミックスなどの硬脆材料が使用される。しかし、これらの材料における光学面の仕上げ工程では、非能率的で高い形状精度を満足することが困難な研磨加工に頼らざるをえず、加工技術が十分に確立しているとはいえない。そこで、研削加工により高い形状精度と良好な表面粗さを同時に実現し、研磨工程を大幅に削減できる自由曲面レンズ金型／ミラーの高効率加工技術の開発を行った。

キーワード：鏡面研削加工、超精密加工、脆性材料、自由曲面レンズ金型／ミラー、円弧法絡研削法、ツルーイング・ドレッシング、有気孔レジノイドダイヤモンド砥石

1. 緒言

映像・撮像装置をはじめとする各種光学機器の分野では、光学系の高性能化、高機能化、軽薄短小化を可能にする自由曲面レンズに対する要求が高い。また、線幅 45nm 以下の半導体デバイスを実現する極端紫外線半導体露光装置(EUV ステッパー)の反射光学系に自由曲面ミラーが必要とされている。自由曲面ガラスレンズの量産に用いるプレス成形金型や EUV ステッパーの自由曲面ミラーには、その使用環境から耐熱性を有し高硬度で寸法の経年変化が少ない超硬合金やセラミックスなどの硬脆材料が使用される。しかし、現状では光学面の仕上げ工程のほとんどを研磨加工に頼らざるをえず、非能率的であるばかりでなく高い形状精度を満足することが困難であり、加工技術が十分に確立しているとはいえない。

本研究では、平成 10 年度までに開発した平面の鏡面研削加工技術を自由曲面形状へ応用し、高い形状精度と良好な表面粗さを同時に実現し、研磨工程を大幅に削減できる自由曲面レンズ金型／ミラーの超精密・高効率研削加工技術の開発を行った。

2. 自由曲面研削加工方法の開発

2.1 自由曲面創成方法

本研究では、研削加工による自由曲面形状創成法の一つである、庄司らが提案した円弧包絡研削法を採用した^{1), 2), 3)}。図 1 に本手法の概念図を示す。円弧包絡研

削法とは被加工面上において、円弧断面を有する幅広の平型砥石を 3 次元的に走査することにより、目標とする自由曲面の形状創成を行う方法である。そろばん玉型の砥石を用いるコンタリング研削法に代表されるような、砥石断面の一点のみで加工を行う手法と比較し、円弧包絡研削法では砥石の外周面のより広い範囲で加工するため、砥石の目つぶれや目づまり、磨耗といったダメージを分散でき、一度のツルーイング・ドレッシングで加工できる量が飛躍的に増大する。これは加工能率の観点から非常に有利である。

この方法では、図 1 から分かるように各加工位置によって砥石表面上を研削点(被加工面と砥石の接点)が移動するため、被加工面の形状と砥石の軌跡は異なる。従って、目標とする被加工面の設計式と砥石の寸法に基づいて工具軌跡を計算し、NCプログラムを作成す

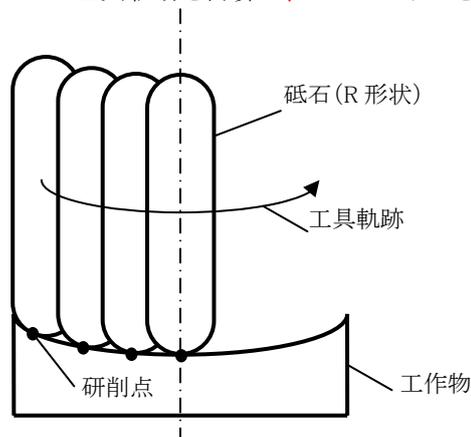


図 1 円弧包絡研削法

るプロセスが必要となる。図2に円弧包絡研削法における研削点G(X_g, Y_g, Z_g)と砥石の工具基点O(X_o, Y_o, Z_o)の関係を示す。なお、 R_1 は砥石外周半径、 R_2 は砥石先端円弧半径、点Pは砥石先端円弧半径の中心点である。目標とする曲面の設計式を $Y=f(X, Z)$ とおくと、研削点で砥石表面と被加工面が共通法線をもつことを考慮し、研削点と工具基点との関係は式(1-1)、式(1-2)で表わすことができる³⁾。

$$\begin{cases} X_o = X_g + \frac{\alpha}{m} \cdot R_2 + \frac{\alpha}{n} \cdot R \\ Y_o = Y_g + \frac{\beta}{m} \cdot R_2 + \frac{\beta}{n} \cdot R \\ Z_o = Z_g + \frac{\gamma}{m} \cdot R_2 \end{cases} \quad (1-1)$$

ここで、

$$\begin{cases} (\alpha, \beta, \gamma) = \left(-\frac{\partial Y}{\partial X}, 1, \frac{\partial Y}{\partial Z} \right) \\ m = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2} \\ n = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \\ R = R_1 - R_2 \end{cases} \quad (1-2)$$

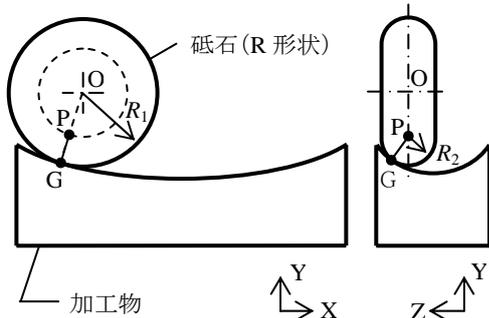


図2 円弧包絡研削法における研削点Gと砥石の工具基点Oとの関係

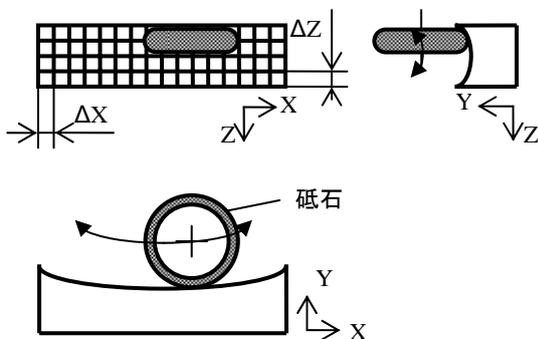


図3 円弧包絡研削法による工具軌跡計算の概要

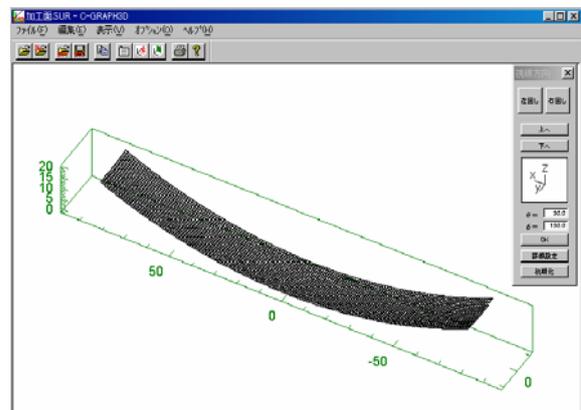
この式より、目標とする被加工面の設計式、およびその一次偏導関数が得られれば、各研削点に接触する砥石の工具基点が求められる。

円弧包絡研削法のNC加工プログラムを作成する手順は次の通りである。まず、図3に示すように被加工面の投影面に格子間隔が $\Delta X, \Delta Z$ である格子を設定し、曲面の設計式より各節点における曲面上の研削点の座標値を計算する。次に各研削点に接触する砥石の工具基点を計算して通過順に配列し、隣接する工具基点を直線補間し工具軌跡を生成する。

本研究では、曲面の設計式およびその一次偏導関数を入力することにより、煩雑な工具軌跡の計算とNC加工プログラムの生成を自動的に行うソフトウェアを開発した。本ソフトウェアは、送り速度、切込み深さ、格子間隔の設定、および平行研削/クロス研削の選択が可能である。また、加工プログラムの生成と同時に、計



(a)加工条件入力画面



(b)被加工面形状確認画面

図4 加工条件入力画面と被加工面形状確認画面

算した被加工面形状と工具軌跡を視覚的に確認できる機能を有する。図4に加工条件入力画面と被加工面形状確認画面を示す。

ところで、直線補間駆動により自由曲面の加工を行う場合、被加工面を多面体に近似することになり、それにより図5に示すような削り残し(凸面の場合は削り過ぎ)が発生し、形状誤差の要因となる。こうした形状誤差は設定する格子間隔が小さいほど減少するが、その一方でNCデータ量および加工時間は増大する。従って、NCプログラムを作成する際には、仕上げの段階に応じて設定する格子間隔を徐々に細かくし、最終的に目標加工精度に対して必要十分な分割幅を設定した。

2.2 自由曲面加工システムの構築

次に、開発した自由曲面研削加工システムを紹介する。本システムの構成を図6に、各構成装置の仕様を表1に示す。本システムは超精密CNC成形平面研削盤、NC制御装置、およびNCプログラムジェネレータから構成される。

(1) 超精密CNC成形平面研削盤

本研削盤は、砥石軸には油静圧軸受けを、各軸の摺動部には油静圧案内を採用している。各軸はボールねじにより駆動し、ガラススケールフィードバック制御による各軸の最小位置決め分解能は $0.01\mu\text{m}$ である。本研削盤は $23\pm 1^\circ\text{C}$ に制御された恒温室内の、周囲と縁切りした床面上に設置した。また、作動油や研削液の温度も

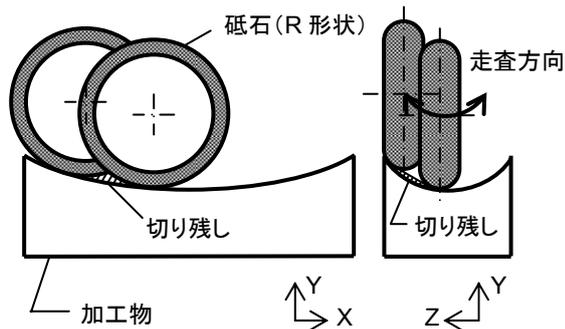


図5 直線補間により生じる形状誤差例

管理しており、外乱や周囲の温度変化による影響を極力排除するよう配慮した。

(2) NC制御装置

研削盤各軸のサーボモータの制御を行う部分であり、自由曲面の加工に不可欠である高精度な同時3軸制御が可能な仕様とした。

(3) NCプログラムジェネレータ

前述したNCプログラム生成ソフトがインストールされた外付けのコンピュータである。自由曲面加工用NCデータは大容量となるため、NC制御装置単体の能力では対応が困難である。従って外部コンピュータでNCプログラムを計算・作成し、光ファイバケーブルを用いた高速シリアルバスにより、データをNC制御装置に逐次転送しながら加工を行う構成とした。

2.3 ツルーイング・ドレッシング方法の開発

我々は、これまでに粒度#1000より細粒の有気孔レジノイドボンダイヤモンド砥石による平面の鏡面研削加工技術、および本砥石の高能率ツルーイング・ドレッシング技術を確立している^{4), 5), 6), 7)}。これは $150\text{mm}\times 50\text{mm}$ の高硬度鋼の平面を、ツルーイング・ドレッシングも含め30分以内で鏡面(表面粗さ 50nm 以下)に仕上げることが可能な技術であり、この技術を自由曲面加工にも応用している。ここではステンレスロール法と単石ダイヤモンドドレッサ法による、円弧断面形状を有する有気孔レジノイドボンダイヤモンド砥石のツルーイング・ドレッシ

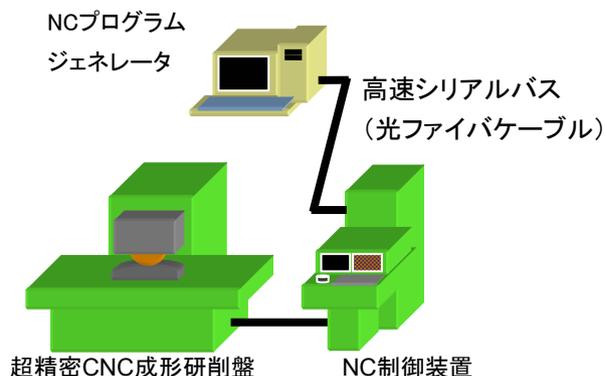


図6 自由曲面研削加工システムの構成

表1 自由曲面研削加工システム構成装置の仕様

| | |
|---------------|--|
| 超精密CNC成形平面研削盤 | ナガセインテグレックス(株)製 SGU52SXS4 3軸油静圧案内、ボールねじ駆動、油静圧スピンドル軸受 スケールフィードバック・フルクロズド制御 位置決め分解能: X(左右): $0.1\mu\text{m}$ 、Y(上下): $0.01\mu\text{m}$ 、Z(前後): $0.01\mu\text{m}$ |
| NC制御装置 | ファナック(株)製 15i 同時3軸制御 |

ング技術を紹介する。両技術の概念図を図7に示す。

(1) ステンレスロール法

平成10年度までの研究により、平面研削加工における粒度#1000より細粒の有気孔レジノイドボンダイアモンド砥石のツルーイング・ドレッシングには、ステンレス鋼(SUS304)のブロック材を平面研削する方法が、最も有効であることを見出している⁸⁾。ステンレスロール法は、この技術を円弧断面砥石のツルーイング・ドレッシング技術に応用したものである。本手法では、回転する円盤状のステンレスロールに対し、砥石およびドレッサの円弧断面が接するように砥石に往復円弧運動を与えながら徐々に切込み、ステンレスロールと砥石の共削りを行う。これにより砥石の円弧断面が所望の半径にツルーイングされ、砥石表面のドレッシングも同時に行われる。砥石の円弧断面が凸形状の場合、目的とする砥石外縁の円弧断面の半径を R_w 、ドレッサの円弧断面の半径を R_D とすると、制御する砥石の円弧運動半径 R_{NC} は式(2)で表すことができる。

$$R_{NC} = R_w + R_D \quad (2)$$

(2) 単石ダイヤモンドドレッサ法

一方、単石ダイヤモンドドレッサ法は、ダイヤモンドパイトで砥石を切削するように砥石の断面を円弧に成形し、同時に砥石の目立ても行う方法である。通常、鋭利な単石ダイヤモンドドレッサの先端も、微視的に見れば円弧断面を有している。また、先端が任意の半径に加工されたドレッサも市販されている。従って、単石ダイヤモンドドレッサ法の場合も、砥石の円弧断面半径 R_w 、ドレッサ先端の半径 R_D から、式(2)より砥石の円弧運動半径 R_{NC} が求められる。

単石ダイヤモンドドレッサによるツルーイング・ドレッシング技術は、一般砥石の場合の簡便な方法として広く普及しているが、ダイヤモンド砥石に適用することは推奨されていなかった。これは、砥石に含まれる砥粒とドレッサの硬度が同じであるため、お互いに摩擦磨耗すると共に、発生した摩擦熱により軟化したボンダ材内部へ弾塑性的に砥粒が埋没し、劣悪な砥石作業面となるためである。この状態を回避するためには、図8に示すように1パス毎の切込み量および送り量を、ダイヤモンド砥石の砥粒径に対して十分に大きく設定する。これにより、砥粒は切れ刃ではなく単なるレジノイド樹脂の介在粒子とみなすことが可能となり、単石ダイヤモンドドレッサによるレジノイドボンダイアモンド砥石の切削が可能となる⁹⁾。

3. 高精度・高能率加工技術の開発概要と成果

3.1 研究開発の推移

図9は表面粗さと形状精度の年度別達成状況を示す。平成11年度にCNC成形平面研削盤を導入以降、加工精度を向上させるべく、各種加工技術の改善を進めた。具体的な実施事項は粒度やボンダ材などの砥石仕様、

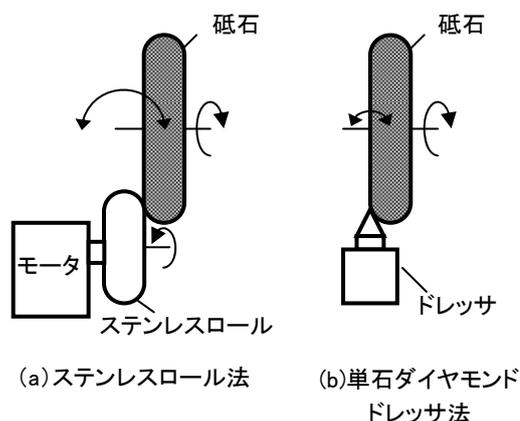


図7 各ツルーイング・ドレッシング技術

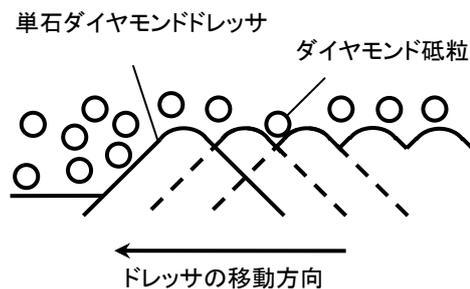


図8 単石ダイヤモンドドレッサによるツルーイングモデル

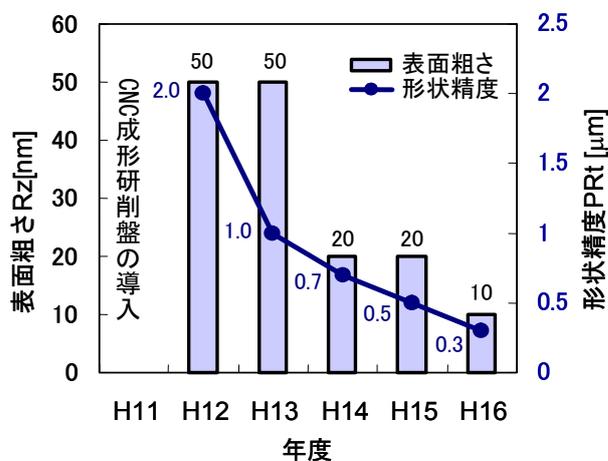


図9 表面粗さと形状精度の年度別達成状況

研削方向(平行研削法やクロス研削法)や砥石周速

度などの加工条件の最適化、ツルーイング・ドレッシング方法の開発と条件の最適化などである。平成 15 年度には、それまでの加工精度の向上に伴い、機械の動作精度に起因する象限突起の影響が顕著となった。そこで、加工プログラムの修正(送り速度の可変)、および砥石の仕様や加工条件の最適化を行い、形状精度 $0.5 \mu\text{mPt}$ 以下、表面粗さ 20nmRz 以下を達成した。平成 16 年度には、さらに微粒であり、これまで取扱いが困難とされた粒度 #12000 の有気孔レジンノイドボンドダイヤモンド砥石による加工技術を開発し、加工能率を低下させることなく形状精度 $0.3 \mu\text{mPt}$ 以下、表面粗さ 10nmRz 以下を達成した。

3.2 超合金製自由曲面金型の加工事例

本研究で開発した超精密・高能率研削技術を利用した、トーリック凹面形状を有するガラス製 $f\theta$ レンズ用超合金製金型の加工事例について紹介する。図 10 にサンプルの概略を、表 2 に主要寸法を示す。ここで、 R_m は YX 断面における円弧半径を、 R_y は YZ 断面における円弧半径である。

図 11 に加工後のサンプルの外観を、図 12 に非接触三次元表面粗さ計 (Taylor Hobson 製 Talysurf CCI3000) により

3.3 技術の権利化と技術移転

本研究で開発した超精密・鏡面研削加工技術において、ダイヤモンド砥石のツルーイング・ドレッシングに関するもの 3 件、非軸対称非球面の研削加工に関するもの 1 件、軸対称非球面の研削加工に関するもの 1 件、研削砥石に関するもの 1 件の計 6 件の特許出願を行っており、これまでに 3 件が特許登録された^{4), 5), 6), 7), 10), 11)}。また、4 企業と特許実施許諾契約を締結し、本技術の実用化が進められている。

また、本開発技術は県内企業に限らず全国的に注目を集め、平成 11 年度から 16 年度までにおいて県内外 21 企業に計 32 件の技術移転を実施した。特に、測定した表面粗さと、接触式の表面粗さ形状測定機 (Taylor Hobson 製 Form Talysurf S5) により測定した短軸方向および長軸方向の形状精度の測定結果を示す。表面粗さは 8nmRz 、短軸方向および長軸方向とも形状精度が約 $0.2 \mu\text{mPt}$ 程度と非常に良好な結果が得られた。更に、加工時間は段取りを含めて 2 日間程度であり、非常に高能率な超精密加工が可能であった。最終仕上げ時の主な加工条件を表 3 に示す。

高精度加工技術に対するニーズは、近年高まりつつあり、今後も更なる加工技術の高度化が必要である。

4. 結言

高い形状精度と良好な表面粗さを同時に実現し、研磨工程を大幅に削減できる自由曲面レンズ金型/ミラーの超精密・高能率研削加工技術の開発を行い、次のような結果を得た。

- (1) 自由曲面形状の加工を可能とするシステムの構築、加工プログラムの開発を行った。
- (2) 砥石を高精度に成形し、かつ目立てを行う高能率ツルーイング・ドレッシング方法を開発した。
- (3) トーリック凹面形状を有するガラス製 $f\theta$ レンズ用超合金製金型の加工において、形状精度 $0.3 \mu\text{mPt}$ 以下、表面粗さ 10nmRz 以下で加工する技術を開発した。
- (4) 本研究により開発した超精密・鏡面研削加工技術に関する特許 6 件を出願した (現在までの特許登録は 3 件)。また、21 企業延べ 32 件の技術移転を実施した。

参考文献

- 1) 厨川常元, 立花亨, 庄司克雄, 森由喜男: 日本機械学会論文集 (C 編), **63**, 611 (1997-7), P2532.
- 2) T.KURIYAGAWA, M.S.SEPASY, H.SUZUKI, K.SHOJI: Advanced in Abrasive Technology, vol. **1** (1997), P217.
- 3) 庄司克雄ほか: H12 年度地域コンソーシアム事業「パラレル研削方式による高精度非球面光学素子創成技術の研究開発」成果報告書 (2001), P66.
- 4) 森由喜男, 和嶋直, 久田哲弥: 特開 2003-260646
- 5) 森由喜男: 特許第 2977508 号
- 6) 和嶋直, 森由喜男: 特許第 3678986
- 7) 森由喜男, 和嶋直, 久田哲弥, 渡辺洋一: 特許第 3014963 号
- 8) 森由喜男, 和嶋直, 鈴木福雄, 佐々木泰孝, 高橋正直, 児玉省明: 宮城県工業技術センター研究報告, **27** (1996), P13.
- 9) 厨川常元, セパシ・サマティ・モハマト・サイド, 鈴木浩文, 庄司克雄, 和嶋直, 千葉浩之: 砥粒加工学会講演論文集 (1997), P149.
- 10) 久田哲弥, 森由喜男, 渡辺洋一: 特開 2002-66931
- 11) 森由喜男, 久田哲弥, 林正博: 特願 2004-241826

表 2 サンプルの主要寸法

| | |
|------------|-----|
| L [mm] | 100 |
| W [mm] | 18 |
| R_m [mm] | 250 |
| R_s [mm] | 65 |

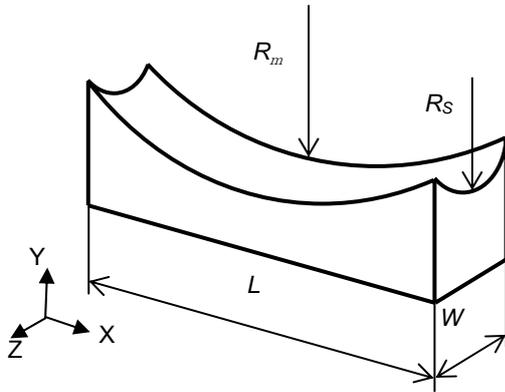
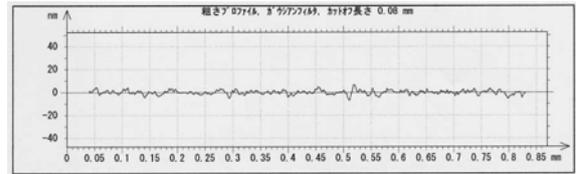


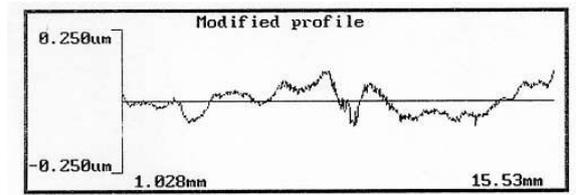
図 10 トーリック凹面金型



図 11 トーリック凹面形状のサンプル

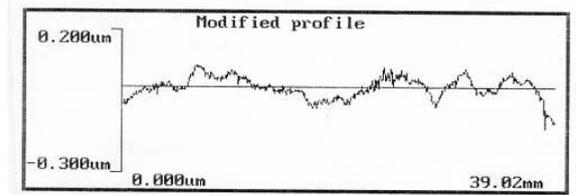


(a) 表面粗さ結果



LS Rad 65.0745mm
 PRa 0.0362 um
 PRt 0.1995 um
 PRzISO 0.1235 um

(b) 短軸方向の形状精度



LS Rad 250.103mm
 PRa 0.0280 um
 PRt 0.2207 um
 PRzISO 0.1169 um

(c) 長軸方向の形状精度

図 12 加工サンプルにおける表面粗さと短軸および長軸方向の形状精度

表 3 最終仕上げ時の研削加工条件

| | |
|------------------|---|
| 使用砥石 | 有気孔レジノイドボンドダイヤモンド砥石 (SD12000L50、255D-20T-5X-33R、東京ダイヤモンド工具製作所製) |
| 研削液 | ケミカルソリューションタイプ、2.5% |
| ツルーイング・ドレッシング方法 | ステンレスロール法 |
| 被加工面上設定格子間隔[mm] | $\Delta X=0.1$ 、 $\Delta Z=0.05$ |
| 砥石送り速度[mm/min] | 100 |
| 砥石切込み量[μ m] | 1、0.5 |
| 砥石周速度[m/min] | 800 |