

マイクロフレネルレンズ成形型の超精密研削（第2報）*

—モリブデン製ツルアによる鋭利なエッジを有する研削ホイールの精密ツルーイングと
フレネル形状の研削加工の高精度化—

山本雄士** 鈴木浩文*** 森脇俊道*** 沖野 正*** 樋口俊郎†

Precision Grinding of Micro Fresnel Lens Molding Die (2nd Report)
- Precision Truing of Micro Grinding Wheel with Sharp Edge by Molybdenum Truer and
Accuracy Improvement in Fresnel Surface Grinding -

Yuji YAMAMOTO, Hirofumi SUZUKI, Toshimichi MORIWAKI, Tadashi OKINO and Toshiro HIGUCHI

Needs of digital devices are increasing rapidly in recent years, and the demands of a micro Fresnel glass lenses are increasing especially in a DVD pick-up and dark field systems for automobiles. The glass lenses are molded with a glass press molding process with micro ceramics molds and dies, and then ultra-precision grinding technology of ceramic molds and dies becomes to be a core technology. Authors have successfully developed the simultaneous 2-axes (Y, Z) controlled grinding method, and it was clarified that ultra-precision micro Fresnel shape could be ground using a diamond wheel with sharp edge. In this paper, in order to improve the form accuracy, a new truing method with rare metal truer is proposed and the effects of the molybdenum truer are tested. Finally, with the developed truing system the micro diamond wheel was trued, and an aspherical mold of Fresnel glass lens for infrared DOE is ground to evaluate grinding performances.

Key words: ultra precision grinding, molds and dies, molybdenum truer, diamond wheel, truing ratio, cutting edge density, glassy carbon

1. 緒 言

近年、一般の非球面形状のレンズに回折光学素子を複合することにより従来のレンズ以上の特性を持たせることが可能となっている。回折光学素子とは基板上に形成した微細溝構造によって光を回折する素子であり、(1)画像の高精細化、(2)光学系のコンパクト化、(3)レンズ全体の軽量化などが達成できることが知られており¹⁾²⁾、今後様々な分野での応用が期待されている。

回折光学素子を作製する場合、フォトリソグラフィやエッチングなどの半導体加工プロセスを利用したものと機械加工による方法が考えられる。しかし、現在では加工時間や加工精度などを考慮して、後者のほうが多く用いられる傾向にある³⁾。これら金型を作製する場合、刃先の曲率半径が非常に小さな単結晶ダイヤモンドバイトによる切削加工が中心であり、型材として無酸素銅、黄銅、無電解Niなどの軟質金属に限られていた。そのため、レンズ材料は低温で射出成形できるプラスチック材が中心となっている。しかし光学特性および耐熱強度を向上させるためには、ガラスレンズ化が不可欠である。そのためにガラス成形が可能なセラミック型などに対する超精密・微細加工技術の開発が必要である。また、実際にゲルマニウム(Ge)系合金製のフレネルレンズなどによる車載用赤外監視システムのニーズなども生じている。車載用ではプレス成形によるGe系合金レンズの量産プロセスが必要であり、グラッシーカーボン製などのフレネル形状型の精密研削加工が不可欠である⁴⁾。

これまで筆者らは、微小段差を有するフレネル形状の加工を行うために、先端がナイフエッジ形状に尖った円板状のダイヤモンドホイールを用いて、**図1**に示すようなY-Z軸の同時2軸制御によるフレネル形状の研削加工法を提案し、その可能性を示した⁵⁾。しかし、研削加工に用いたダイヤモンドホイールの先端の鋭利さが不十分であるために、段差部に若干の形状誤差領域が残っていた。この形状誤差領域を減少させるためにはダイヤモンドホイールのツルーイング法を改善して、ホイールの先端をより鋭利にする必要がある。現状ではGCツルアやWAツルアなどを用いて、数時間かけてナイフエッジ形状にツルーイングを行っているが、ツルーイング工程は非加工時間であり、その短縮が望まれている。

そこで本研究ではモリブデン製ツルアを適用し、ナイフエッジ形状のダイヤモンドホイール先端部における曲率半径の微小化およびツルーイング時間の短縮を試み、車載用Geレンズのグラッシーカーボン製成型を試作し、その加工特性を検証した。

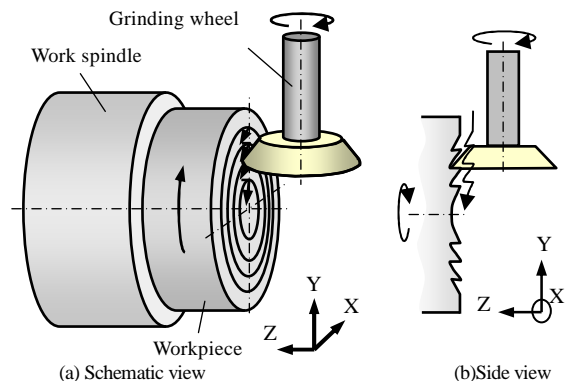


Fig.1 Fresnel shape grinding of 2-axes (Y,Z) control

* 原稿受付 平成 18 年 10 月 23 日

** 学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科 (神戸市灘区六甲台町 1-1)

*** 正 会 員 神戸大学 (神戸市灘区六甲台町 1-1)

† 正 会 員 東京大学大学院工学研究科 (東京都文京区本郷 7-3-1)

2. ナイフエッジ形状のツルーイングの実験方法

ツルーイングによりホイール先端部を鋭利にするには、ホイールの弾性変形や欠けを考慮してツルーイング抵抗が小さいことが望ましい。現状では、ツルーイング抵抗が小さい GC ツルアや WA ツルアを用いているが、ツルーイング比が小さいためにツルアの摩耗が大きく、膨大な時間を要していた。そのためツルーイング抵抗が小さいことに加え、ツルーイング比が大きいことがナイフエッジ形状のツルーイングに求められている。

その一方で、著者らはこれまでにモリブデンなどのレアメタル製ツルアによる高能率ツルーイングを提案し、その可能性を示している⁶⁾。モリブデン製のツルアを用いてレジンボンドダイヤモンドホイールを成形した場合、GC ツルアと比較して約 200 倍と大きいツルーイング比を示している。その際のツルーイング抵抗は GC ツルアを用いた場合よりも小さい、ナイフエッジ形状のツルーイングに適していると考えられる。

そこでモリブデン製ツルアを用いたナイフエッジ形状のダイヤモンドホイールのツルーイングを試みた。実験方法は以下のようにして行った。図 2 に示すようにツルアを機上に取り付けて揺動させながら、レジンボンドダイヤモンドホイールの側面(45°傾斜)と底面に接触させてツルーイングを行い、その後にホイール先端部の曲率半径などを測定した。ツルーイング条件を表 1 に示す。ダイヤモンドホイールの粒度は#800、#1200、#2000 の 3 種類を用いた。ツルアには 3mm×3mm の断面を持つモリブデン(Mo)、GC ツルア (GC#800)、ステンレス鋼 (SUS304) の 3 種類を用いて比較した。評価項目は、ツルーイング比、ツルーイング抵抗、ホイール先端部の曲率半径および砥粒切れ刃密度とした。ツルーイング比は研削ホイールとツルアの重さの変化量から算出し、ホイール先端部の曲率半径はツルーイング後に平面形状のカーボン板を回転したホイールに押し付けて、湿式研削を行いホイールの先端形状のレプリカを採取し、それを非接触式形状測定器 NH-3 (三鷹光器製) により測定した。

3. ナイフエッジ形状のツルーイングの実験結果

3 種類のツルア材質を用いてナイフエッジ形状のダイヤモンドホイールのツルーイングを行った後におけるホイールの底面の外観写真を図 3 に示す。ステンレス製ツルアを用いてツルーイングを施した場合にはホイールの表面が目詰まりにより黒色に変色していたのに対し、モリブデン製ツルアや GC ツルアを用いた場合にはホイールの表面は非常に滑らかで、変色は確認されなかった。

次に、図 2 に示す方法で測定したツルーイング比の変化を図 4 に示す。モリブデン製ツルアを用いた場合が最も大きいツルーイング比を示し、現状の GC ツルアを用いた場合と比較して、約 50 倍も高い値を示していることがわかった。ナイフエッジ形状を有するダイヤモンドホイールのツルーイングにおいても、モリブデン製ツルアによる高能率ツルーイングが有効であり、ツルーイング時間の短縮が実現できた。

また図 5 にツルーイング抵抗を示す。ここでのツルーイング抵抗は切込み方向に作用する力であり、上滑り量に相当する。モリブデン製ツルアが最もツルーイング抵抗が低く、GC ツルア、ステンレス製ツルアという順でツルーイング抵抗が大きくなった。

ホイール先端部の曲率半径の変化を図 6、またホイール先端部の SEM 写真を図 7 に示す。提案法であるモリブデン製ツルアを

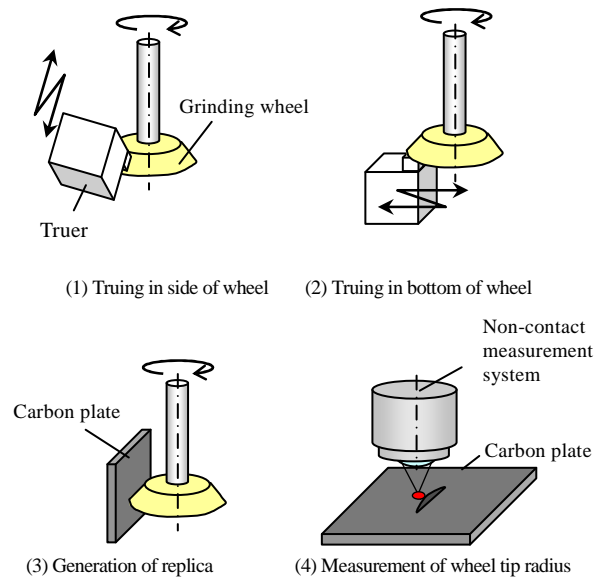


Fig.2 Procedure of truing experiment

Table 1 Truing conditions

Grinding wheel	Resinoid bonded diamond wheel
Grain size	SD800, SD1200, SD2000
Rotational rate	1000 min ⁻¹
Truer	Molybdenum, GC truer(#800), Stainless steel
Depth of cut	1 μm/pass
Feed	30 mm/min
Coolant	Solution type

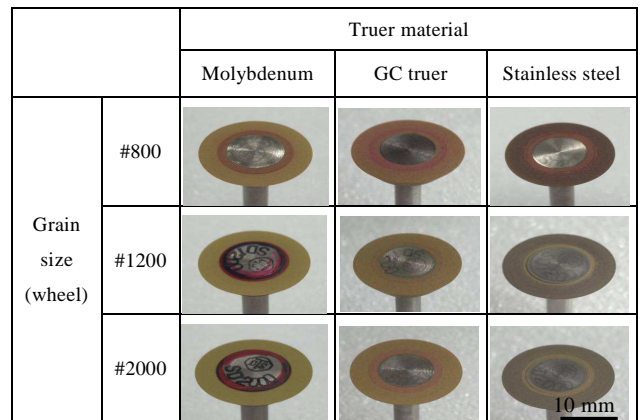


Fig.3 Appearances of wheel after truing

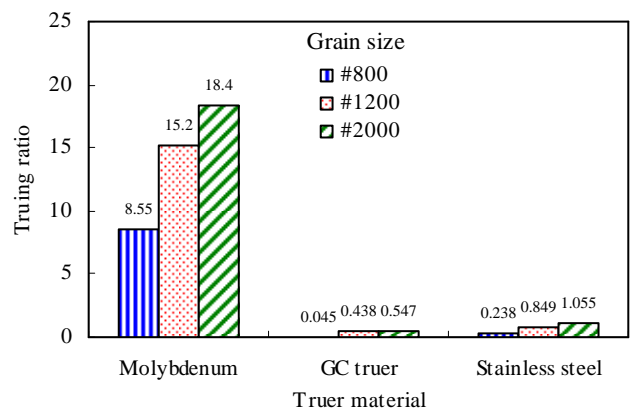


Fig.4 Change of truing ratio in each truer

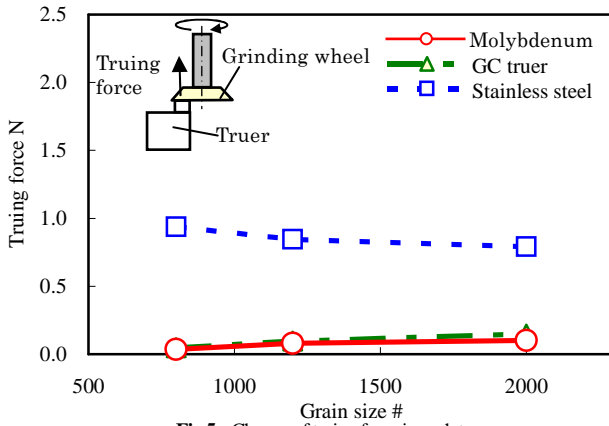


Fig.5 Change of truing force in each truer

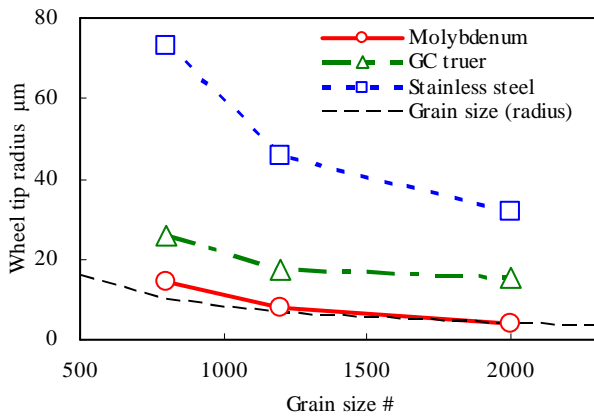


Fig.6 Change of wheel tip radius in each truer

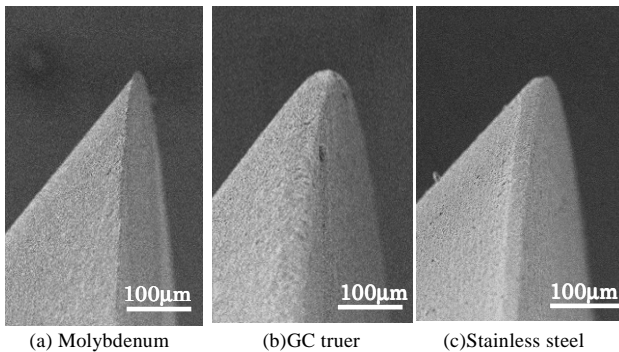


Fig.7 SEM micrographs of wheel tip after truing

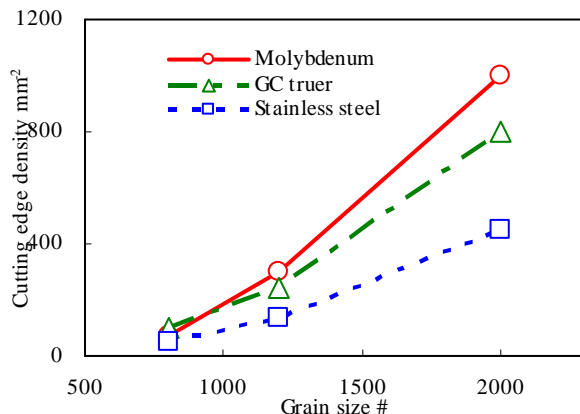


Fig.8 Change of cutting edge density in each truer

用いた場合が最も曲率半径が小さく、現状の GC ツルアを用いた場合と比較して、半分程度にすることができた。またホイールの粒度が小さくなるにしたがってホイール先端部の曲率半径が砥粒の半径に近くなっている。これはモリブデン製ツルアを用いてツルーイングを施した場合は、ツルーイング抵抗が低く、上滑り量が非常に少ないため微粒のホイールのツルーイングにおいても砥粒の脱落が少なくなり、ホイール先端部の微小化が可能になったと推察される。その一方で GC ツルアを用いた場合は、ツルーイング抵抗は低かったが、ツルーイング比が低いため、ツルアの摩耗量が大きくなり、結果としてホイール先端部の鋭利さが不十分になったと考えられる。またステンレス製ツルアを用いた場合では先端部が平坦になっていた。これはツルーイング抵抗が大きく、耐え切れずホイール先端部が脱落したと考えられる。

次にホイール先端部における砥粒数を顕微鏡観察により測定し、砥粒切れ刃密度（単位面積当たりの砥粒数）を算出した。その結果を図 8 に示す。モリブデン製ツルアによりツルーイングを施したものが最も砥粒密度が高く、GC ツルア、ステンレス製ツルアという順であった。これはツルーイング抵抗の結果と同じ傾向であり、ツルーイング抵抗を抑えることにより、ホイール表面の砥粒の脱落が抑制されたと考えられる。

4. 研削加工条件の選定

ダイヤモンドホイール先端部の微小化が実現できたが、実際に研削加工を行うにあたり表面粗さが問題となる。そこでダイヤモンドホイール先端部を微小化した場合の表面粗さについて考える。一般に平行方式の研削加工面の送り方向の表面粗さは、ホイール形状が転写されるとすると、次式で表される。

$$R_y = \frac{f^2}{8r} \quad (1)$$

ここで、 r はホイール先端部の曲率半径、 f は送りである。ホイール先端部の曲率半径と送りが表面粗さに及ぼす影響を図 9 示す。曲率半径が小さくなるにしたがい、表面粗さが悪化することがわかる。しかし、送りを小さくすれば表面粗さは良好になるので鏡面加工は可能であると考えられる。例えばホイール先端部の曲率半径が 0.015mm の場合、送りを 0.002mm/rev に設定すると理論表面粗さは約 30nmRy となり鏡面が得られる。

その一方でセラミック材料の加工では、延性モードの加工面を得るためには、最大切り厚さを数十ナノオーダーにする必要がある⁷⁾。それ以上の切り厚さで加工をすると多数のクラックが存在する脆性モードの加工面になり、表面粗さが悪化する。そこで図 10 に示すようなフレネル形状の研削加工を行った場合の最大切り厚さについて考えると、ワーク回転方向(X 方向)の最大切り厚さは以下の近似式で表される。

$$g_x = 2 \frac{v}{V} a \cdot \sqrt{\frac{A_x}{D}} \quad (2)$$

ここで、 V はホイールの速度、 v は工作物の速度、 a は砥粒切れ刃間隔、 A_x は切込み、 D はホイールの直径である。

また、工具送り方向(Y 方向)の最大切取厚さは次の近似式で表される。

$$g_y = f \cdot \sqrt{2 \frac{A_y}{r}} = f \cdot \sqrt{2 \frac{g_x}{r}} \quad (3)$$

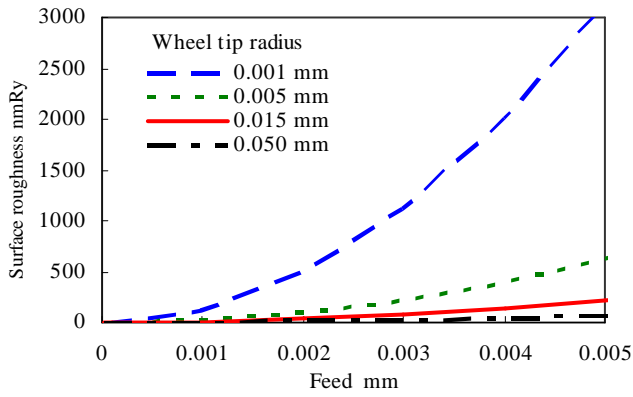


Fig.9 Change of surface roughness with feed and wheel tip radius

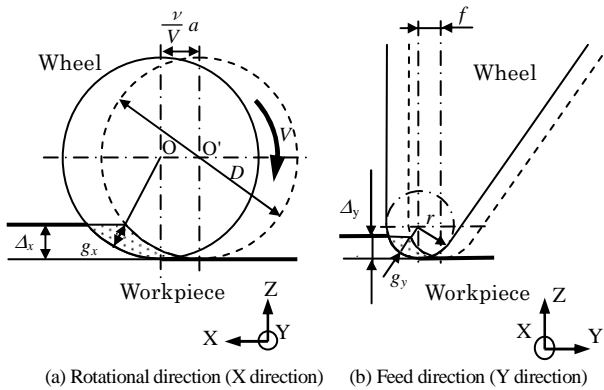


Fig.10 Schematic illustration of Fresnel shape grinding

Table 2 Simulation conditions

Grinding wheel	D=20 mm
Rotational rate	25000 min ⁻¹
Tip radius	(0.001), (0.005), 0.015, (0.050) mm
Cutting edge density	(10), 200, (500), (2000) mm ⁻²
Workpiece	r=5 mm
Rotational rate	150 min ⁻¹
Depth of cut	0.5 μm
Feed	0.3 mm/min (0.002 mm/rev.)

ここで、 f はホイールの送り、 Δ_y は切込み、 r はホイール先端部の曲率半径である。ホイール先端部の曲率半径および先端部の砥粒切れ刃密度を変化させた場合を考える。シミュレーション条件を表2に示す。最初に砥粒切れ刃密度を 200mm^{-2} として、ホイール先端部の曲率半径を変化させた場合の最大切取り厚さを図11に示す。ホイール先端部の曲率半径が小さくなるほど、最大切取り厚さは大きくなることわかる。

また、次にホイール先端部の曲率半径を 0.015mm として先端部における砥粒切れ刃密度を変化させた場合の最大切取り厚さを図12に示す。先端部が鋭利になった場合でも砥粒切れ刃密度を増やすことにより、最大切取り厚さを小さくすることができる。

モリブデン製ツルアを用いて成形したダイヤモンドホイール(#1200)は、先端部の曲率半径が 0.015mm 、砥粒切れ刃密度が 200mm^{-2} であった。ここで表2の条件で加工した場合、工作物の最外周($r=5\text{mm}$)での最大切取り厚さを算出すると 25nm となり、ダイヤモンドホイール先端部を微小化した場合においても鏡面が得ることができることわかる。

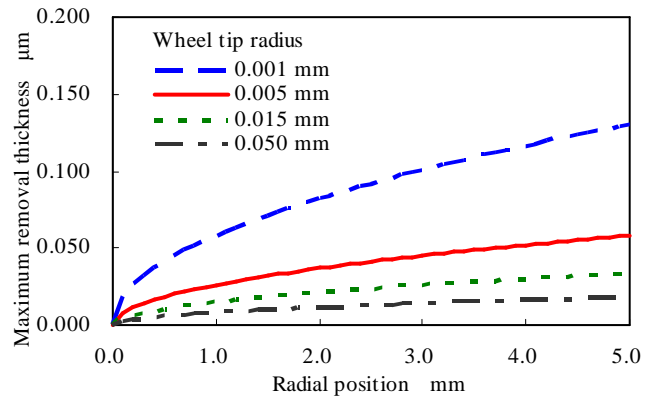


Fig.11 Change of maximum removal thickness with wheel tip radius

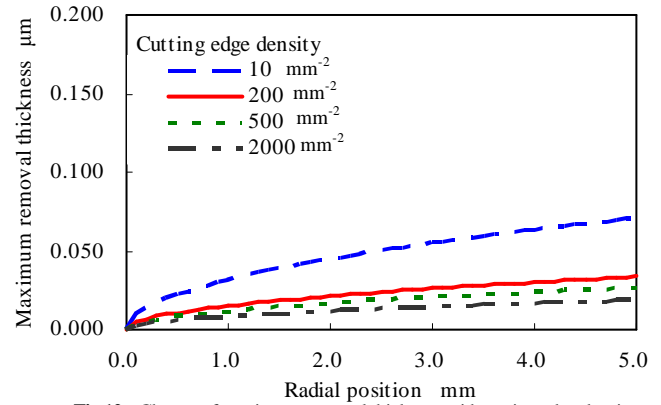


Fig.12 Change of maximum removal thickness with cutting edge density

Aspherical function:

$$Z(X) = \frac{C_{\text{ASP}} \cdot X^2}{1 - \sqrt{(K_{\text{ASP}} + 1) \cdot C_{\text{VASP}}^2 \cdot X^2}} + \sum_{i=1}^n C_{\text{ASH}} \cdot X^i + \text{mod} \left(\frac{C_{\text{DOEV}} \cdot X^2}{1 - \sqrt{(K_{\text{DOE}} + 1) \cdot C_{\text{DOEV}}^2 \cdot X^2}}, nd \right)$$

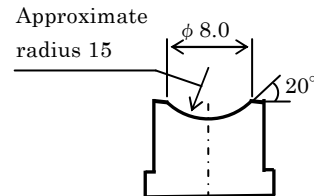


Fig.13 Shape of target DOE molding die made of glassy carbon

5. 回折型光学素子の試作

実際に車載用赤外系 Ge レンズの成形型の試作を行った。工作物には図13に示す形状のグラシーカーボン製のガラス成形型を用いた。一般の非球面形状にフレネル形状が複合された DOE 形状である。非球面形状の近似曲率半径は 15mm 、有効径は $\phi 8\text{mm}$ とし、フレネル形状の段差は $8.3\mu\text{m}$ である。研削装置としては、リニアスケールフィードバック計測制御方式の同時4軸(X, Y, Z, C)制御加工機 ULG-100D (SH3) (東芝機械製)を用いた。工作物はジグを介して真空チャックにより主軸に取り付け、電気マイクロメータを用いて計測しながら $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以下の同軸度が得られるように調整した。研削条件はシミュレーション結果から表3に示す条件に設定した。研削ホイールには粒径#1200のレジソボンドダイヤモンドホイールを用いた。ホイールはツルーイング実験と同様にナイフエッジ形状に尖った円板状とし、モリブデン製ツルアによりツルーイングを施した。形状誤差曲線は先端半径 $2\mu\text{m}$ のダイヤモンドスタイラスを備えた Form Talysurf により測定した。

Table 3 Grinding conditions

Grinding wheel	Resinoid bonded diamond wheel
Grain size	SD1200
Rotational rate	25000 min ⁻¹
Truer	Molybdenum
Workpiece	Glassy carbon
Rotational rate	150 min ⁻¹
Depth of cut	0.5 μm
Feed	0.3 mm/min
Coolant	Solution type

研削加工後の金型の外観および段差部の SEM 観察像を 図 14 に示す。目視でフレネル形状の段差が確認できる。また、図 15 に非接触式表面粗さ計 Newview6200 (Zygo 社製) により測定した結果を示す。表面粗さは約 20nmRy の鏡面が得られている。前述の理論表面粗さの結果より表面粗さが若干良くなっているが、これはホイール先端部が摩耗したためと考えられる。図 16(a) にフレネル形状の分布 (非球面形状を除去した形状分布)、図 16(b) に形状誤差曲線を示す。フレネル形状の段差は設計値が 8.3μm であったのに対し、測定結果は約 8.2μm とほぼ一致している。段差部の測定で測定器のスタイラスがうまく走査できていない可能性があるものの、ほぼ設計通りの段差が得られている。本提案のツーリング法を適用して研削加工した結果、DOE 金型の形状精度は有効径は φ8mm の範囲内で 0.12μmP-V と十分な精度が得られた。

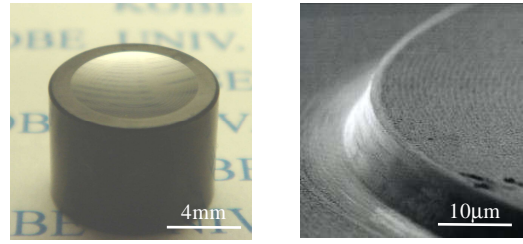
6. 結 言

本研究ではモリブデン製ツルアを適用しナイフエッジ形状のダイヤモンドホイール先端部における曲率半径の微小化およびツーリング時間の短縮を試み、そのツーリング性能を検証した。また、最後に本提案法により車載用 Ge レンズのグラッシーカーボン製成形型を試作し、研削加工特性を検証した。その結果、以下の点が明らかになった。

- (1) ツーリング比は現状の GC ツルアを用いた場合と比較して、顕著に大きい値を示し、ツーリング時間の短縮が実現できた。
- (2) ツーリングを施した後のホイール先端部の曲率半径は、モリブデン製ツルアによるものが最も小さく、現状の半分程度にすることができ、ホイール先端部の微小化が可能になった。
- (3) ホイール先端部を微小化した場合においても、理論表面粗さおよび最大切り取り厚さのシミュレーションと実験結果から鏡面加工の可能性を確認した。
- (4) 実際にモリブデン製ツルアで成形したダイヤモンドホイールを用いて、車載用レンズの成形型を試作した結果、0.12μmP-V の形状精度および 20nmRy の表面粗さが得られ、その有効性が示された。

謝 辞

本研究の一部は(独)科学技術振興機構(JST)・研究成果活用プラザ東海における事業化のための育成研究「マイクロ・微細光学部品用セラミックス製成形型の超精密研削加工技術の開発」(H15.3~H17.9)の助成により実施されたものである。JST プラザ東海ならびに三栄精工株式会社の関係者各位に感謝の意を表す。



(a) Appearance (b) SEM image

Fig.14 DOE molding die

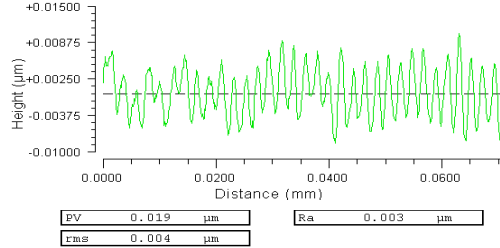
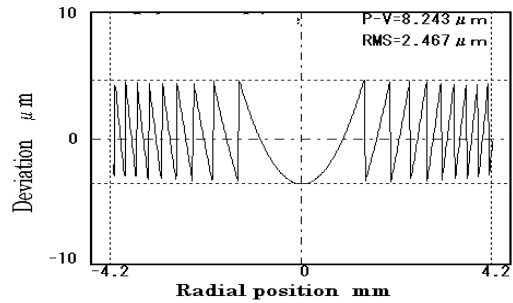
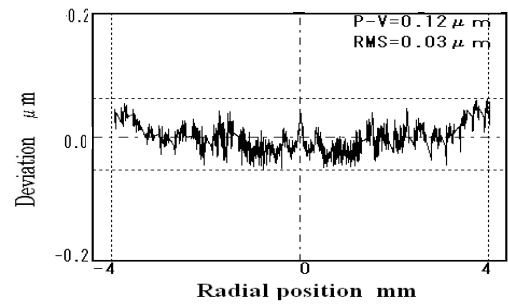


Fig.15 Surface roughness



(a) DOE profile (Reference: base aspherical shape)



(b) Form deviation profile (Reference: Fresnel shape)

Fig.16 Grinding results

参 考 文 献

- 1) 中井武彦: 積層型回折光学素子の研究とカメラレンズへの応用, 光技術コンタクト誌 39, 9 (2001) 545.
- 2) Sornsuwit N, Takeuchi Y, Kawai T, Sawada K: Manufacture of High Precision Diffraction Fresnel Lens by Means of Ultraprecision Turning, Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century (LEM21), (2003) 69.
- 3) 鈴木浩文, 鎌野利尚, 樋口俊郎, 谷岡鉄也, 島村和弘, 横山三自, 北嶋孝之, 奥山繁樹: マイクロフレネルレンズの精密ガラス成形-成形条件による成形転写性の実験的検討および成形試作-, 精密工学会誌 67, 3 (2001) 443.
- 4) 大槻智洋: 迷わない部品選び-車載カメラモジュール-, 日経エレクトロニクス誌 933 (2006) 65.
- 5) 鈴木浩文, 樋口俊郎, 和嶋直, 北嶋孝之, 奥山繁樹, 山崎洋: マイクロフレネルレンズ成形型の超精密研削-超硬合金型の研削加工の可能性検証-, 精密工学会誌 65, 8 (1999) 1163.
- 6) 山本雄士, 鈴木浩文, 馬越聖剛, 沖野正, 土方祥雄, 森脇俊道, 東保男, 澁谷秀雄: モリブデン製ツルアによるマイクロダイヤモンドホイールの高精度・高効率成形に関する研究, 砥粒加工学会誌 50, 6 (2006) 312.
- 7) 吉田武司, 庄司克雄, 厨川常元: 単粒研削におけるセラミックスの延性・脆性遷移挙動の評価, 砥粒加工学会誌 42, 10 (1998) 430.