

## 高性能太陽光集光用レンズを低コストで製作するための金型の高精度研磨技術の開発

研究代表者 秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科 呉勇波

### 1. はじめに

近年、CO<sub>2</sub>の大量排出に伴う地球温暖化が進むにつれて地球規模の異常気象が頻発し、われわれの生活環境が壊されていくだけでなく、社会の持続的発展も脅かされている。このような状況下で、CO<sub>2</sub>の主な発生源である化石燃料の使用を抑え、太陽光など自然エネルギーの利用や自然光・LED 照明によるエネルギーの節約がますます重要となっている。

太陽光発電は平板・シート型と集光型に大別される。その中、普段よく見かける建物の屋根や壁に設置する平板・シート型と違って、図1に示すようにレンズで太陽光を集光し発電セルに照射して発電する集光型は、小面積にもかかわらず発電効率が高いことからメガソーラー用などで注目を浴びている。集光レンズとして、プラスチック製フレネルレンズが多用されている。この種のレンズが図2に示すように無色透明なプラスチック（アクリルなど）の基板上に同心円状（同図(a)の円環型）か平行分布（同図(b)のリニア型）のV溝を設ける構造となっており、薄型で集光倍率が高いという点で特徴的である。円環型は平行光が一点に集光されるのに対し、リニア型は直線状に集光されることから、直線配列の発電モジュール部品、パイプなどへの集熱を行うための光学モジュールとしての利用に適している。

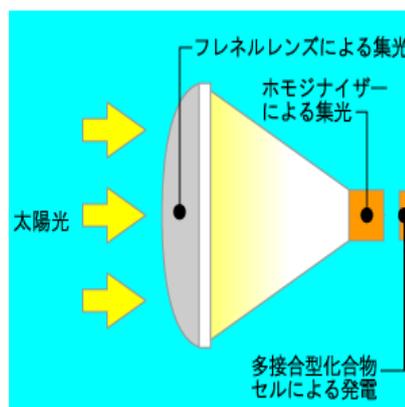


図1. 集光型太陽光発電の概念図

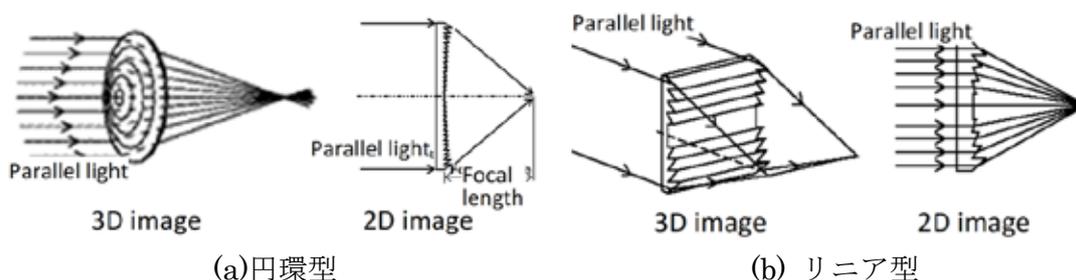


図2. フレネルレンズの構造と集光方式

フレネルレンズは、集光型太陽光発電システムの普及を図るために、金型を製作して成形（プレスや射出）によって低コストで大量生産することが強く求められている。そのため、転写精度が高く、しかも使用寿命が長い金型の加工製作は重要な課題となって

いる。この種の金型の製作プロセスでは、通常無酸素銅などの素材に超精密ダイヤモンド切削でV溝を設けることによって所定の形状・寸法に加工したのち、転写精度と離型性をよくするために、ダイヤモンド切削面に発生した微小バリやカッターマークを研磨によって除去し面粗さを数 nm rms まで極力小さくする必要がある。

従来の研磨法は、①ラッピングやポリシング、またバフ研磨と電解砥粒研磨および超音波振動研磨などのように研磨パッドを加工面に押し当てて両者間に遊離砥粒を供給しながら相対運動を与えて研磨を行うものと、②磁気研磨や ER・MR 流体研磨およびバレル研磨などのように電・磁力や遠心力によって砥粒を加工面に接触させ、両者間に相対運動を与えて研磨を行うもの、といった手法がある<sup>1)</sup>。①は平面や小曲率曲面の研磨に有効であるが、微細溝の研磨に適用する際に圧力加工のため溝側面やコーナー等の細部まで砥粒が到達しにくく研磨が困難である。一方②は砥粒が電・磁力や遠心力などの遠隔作用によって研磨領域の細部まで届くが、加工面との相対速度が十分に得られず研磨能率が低いという問題がある。この点では、筆者らの 10 年ほど前から研究を進めてきた MCF (Magnetic Compound Fluid) スラリーと呼ばれる磁場制御型研磨剤による研磨法が有効であると考えられる。

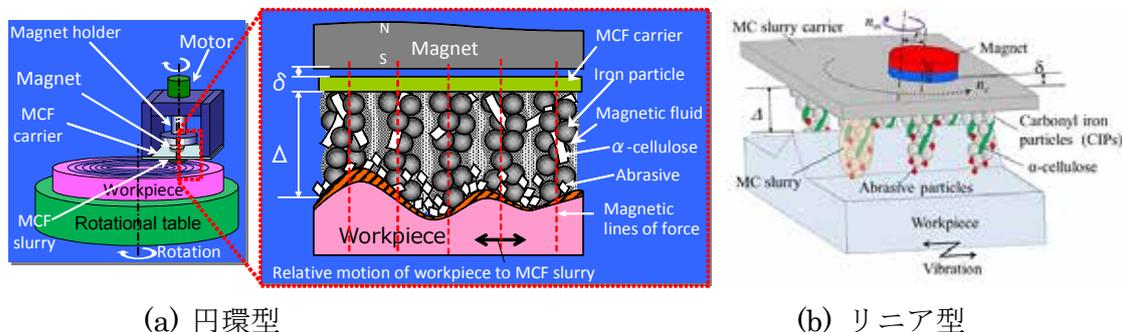
MCF スラリーは、磁場に瞬時に反応して素早く磁力線に沿って細長いチェーン状クラスタが生成され、しかもクラスタの分布とサイズを磁場の強さと印加方法によって自由自在に制御できる。そのため、砥粒に対するクラスタのキャリア作用によって、細部を含め加工面全体を満遍なく効率よく研磨可能という特長を持ち、形状・寸法の異なる各種微細 3D 構造の研磨に柔軟に対応できる。とくに、ロータリ磁場を印加するとクラスタの自己形状復元力と砥粒の活発な動きが得られ研磨能率がさらに高くなる。過去の研究でロータリ磁場作用下の MCF スラリーをアクリル樹脂、シリコン単結晶、光学ガラス (水晶・BK7・石英)、SiC セラミックス、非磁性金型鋼、無電界 Ni-P めっきなど金属・非金属試料の平面や微細 3D 構造の研磨に適用したところ、欠陥の非常に少ない鏡面仕上げ (面粗さ Ra はサブ nm~数 nm) に有効であることが明らかになった<sup>2-6)</sup>。本研究では、ロータリ磁場作用下の MCF スラリーを同心円状と直線分布状の V 溝の仕上げに適用し、円環型とリニア型のフレネルレンズ金型のナノ精度研磨技術を新たに開発するために、実験装置を製作したうえ、研磨加工特性を実験的に調べた。本報は加工原理、実験装置と方法および得られた結果を報告する。

## 2. 加工原理と実験装置

図 3 に MCF スラリーによるフレネルレンズ金型の研磨原理を示す。MCF スラリーは、同図(a)右に示したように、粒径 10nm のマグネタイト微粒子を含有した磁性流体の中にミクロンサイズの鉄粉と砥粒ならびに  $\alpha$  セルロースを混入して作成されたものである。磁石の下に間隔  $\delta$  で設置した非磁性 MCF キャリアの下面に MCF スラリーを供給すると、このスラリー全体は磁場に瞬時に反応してキャリア下面に磁力保持される

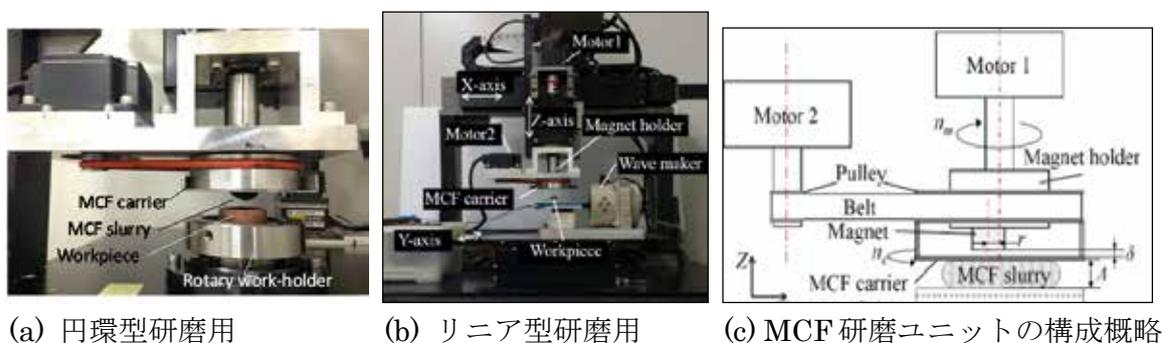
とともに、内部にマグネタイト微粒子と鉄粉からなるクラスタ（鎖状配列）が磁力線に沿って多く形成される。このとき、磁気浮力や重力により非磁性砥粒はスラリー内部から追い出されクラスタ先端部に高密度で分布するが、 $\alpha$ セルロースはクラスタ間を行き渡りスラリーのせん断力を高める。これらクラスタは、軟らかくてその組成や印加磁場によって太さと長さも変化するため、砥粒のキャリアとなって一種のフレキシブル研磨工具となる。さらに図 3(a)左に示したように、磁石ホルダーの下端面上に磁石を偏心固定してホルダー回転軸の回りに公転させると空間的に回転するいわゆるロータリ磁場が発生する。この種の磁場下では、長くて柔らかいクラスタは、その根本部が摩擦力によってキャリア下表面上に拘束されるが、先端部に行くほど磁力線の位置変化に追従して動的挙動を示し高い粒子配列作用と集積作用が得られる。これら特性により、MCF スラリーは素早い自己形状形成現象と高い形状復元力を示すだけでなく、攪拌作用が生じ砥粒の分散性を高める役割も果たす。

いま MCF キャリアの下に間隙  $\Delta$  で円環型フレネル形状試料（図 3(a)）かりニア型フレネルレンズ形状試料（図 3(b)）を置き、円環型では試料を回転させ、リニア型では試料を直線往復運動させることによって MCF スラリーとの相対運動を与えると、砥粒が V 溝表面を擦過して微小切削作用が起こり研磨が行われる。この際、試料に対して磁石とそのホルダーおよび MCF キャリアなどからなるユニットを適宜に前後左右運動させると全面研磨が行われる。



(a) 円環型 (b) リニア型

図 3. MCF スラリーによるフレネルレンズ金型の研磨原理



(a) 円環型研磨用 (b) リニア型研磨用 (c) MCF 研磨ユニットの構成概略

図 4. 研磨実験装置中心部の外観写真と研磨ユニットの構成概略

上述の加工原理を実現するために、ロータリ磁場発生機能と MCF スラリー保持機能を備える研磨ユニットを設計・製作して既設の NC ポリシャー上の Z 軸に取り付けることによって実験装置を構築した。このように、MCF キャリアと試料間の間隙  $\Delta$  は、Z 軸の上下位置調整によって設定できる。円環型研磨では既設ポリシャー上のワーク回転機構を回転式ワークホルダーに使用したが、リニア型研磨では市販の低周波振動装置（旭製作所製 SL-0505）を既設ポリシャー上に取り付けて往復直線運動式ワークホルダーにした。図 4(a)と(b)にそれぞれ円環型とリニア型研磨用実験装置中心部の外観写真を示す。また、同図(c)に研磨ユニットの構成概略を示す。図示のように、このユニットが磁石ホルダー、MCF キャリア、モータ 2 個およびベルト/プリーから構成されている。1 個のディスク状ネオジム永久磁石( $\phi 18 \text{ mm} \times t 10 \text{ mm}$ ,  $0.45\text{T}$ )は、偏心量  $r = 4.5 \text{ mm}$  でそのホルダー上に固定されている。2 個のモータのうち、Motor1 はカップリンを介して磁石ホルダーと接続され磁石に速度  $n_m$  の公転運動を与えるが、Motor2 はベルト/プリーを介して MCF キャリアに速度  $n_c$  の回転運動を与える。MCF キャリアは非磁性のアルミニウム板 ( $82 \text{ mm} \times 82 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ )である。

### 3. 実験方法と結果

#### 3.1 リニア型

まず上述のリニア型研磨用実験装置を用いて、図 5 に示すリニア型試料の研磨実験を行うことにした。この試料は、切削加工で無酸素銅基板上に並行分布の V 溝（ピッチ  $1.2\text{mm}$ 、深さ  $0.6\text{mm}$ 、頂角  $90^\circ$ ）を設けたものであり、低周波振動（周波数  $f$ 、振幅  $A$ ）テーブル上に溝が振動方向に平行になるように固定した。研磨前の V 溝側面の粗さは  $320\text{--}340\text{nm Ra}$  であった。

本研究の目的は、研磨に伴い V 溝形状精度や面粗さがどのように変化するかを調べ提案手法の妥当性を確かめることにあるため、MCF スラリーの成分構成と研磨時間以外の研磨条件をそれぞれ表 1 と表 2 のように固定した。作業手順としては、①MCF キャリアと試料間の間隙を十分にしておよそ所定量の MCF スラリーを MCF スラリー表面に供給する；②磁石公転をさせながら間隙が所定値になるまで Z 軸上下位置を調整する；③MCF キャリアを所定の速度で回転させ、低周波振動テーブルを所定の周波数と振幅で振動させて所定の時間になるまで研磨を行う；④すべての運動をストップし Z 軸位置調整で間隙を十分にしておよそ試料をそのホルダー上から取り外し、洗浄した後に粗さと形状精度の測定を行う。

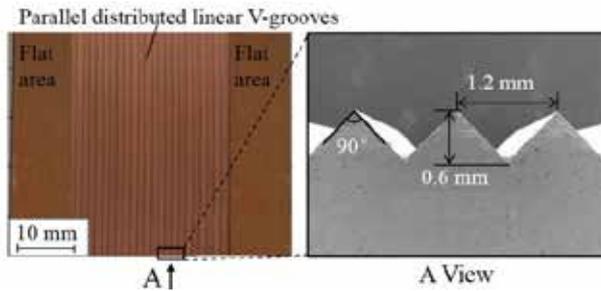


図 5. リニア型試料の外観写真(左)と V 溝形状寸法(右)

表 1. MCF スラリーの成分構成

Carbonyl iron powder (CIP)	Mean diameter	7.5 $\mu\text{m}$
	Concentration	40 wt. %
Abrasive particle ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	Mean diameter	1 $\mu\text{m}$
	Concentration	12 wt. %
Water-based magnetic fluid	Mean diameter	10 nm
	Concentration	45 wt. %
$\alpha$ -cellulose	Concentration	3 wt. %

表 2. 研磨加工条件

Frequency/Amplitude $f/A$	30 Hz/4 mm <sub>p-p</sub>
Magnet	Rotational speed $n_m=1000$ rpm
MCF carrier	Rotational speed $n_c=10$ rpm
Supplying of MCF slurry	0.75 mL
Polishing time $t$	30, 60, 90, 120, 150 min
Clearance $\Delta$	1.0 mm

図 6 に研磨領域と測定評価点の分布を示す。研磨中試料は X 方向に振幅  $A=2$  で振動するため、研磨領域が長径  $D+2A$ 、短径  $D$  の楕円になる。本研究における実験条件では、 $D=32$  mm となった。研磨位置によって形状精度や面粗さが違うと予想されるので、研磨領域内における直径  $D_L=9.6$  mm の円上に等間隔で分布する 8 点 P1 – P8 (図 6 左) について 3D レーザ顕微鏡(キーエンス製 VK-9700)を用いて形状精度の測定評価を行った。また同図右に示したように、同一点における 4 つの部位 A1-A4 について V 溝の側面観察と面粗さ測定を行った。さらに形状精度を定量的に評価するために形状維持率  $\eta$  は次式で定義した:

$$\eta = (S/S_0) \times 100\% \quad (1)$$

ここで  $S_0$  と  $S$  はそれぞれ V 溝の研磨前後の断面積であり、両者の差  $\Delta S = S_0 - S$  は材料除去量とすることができる。

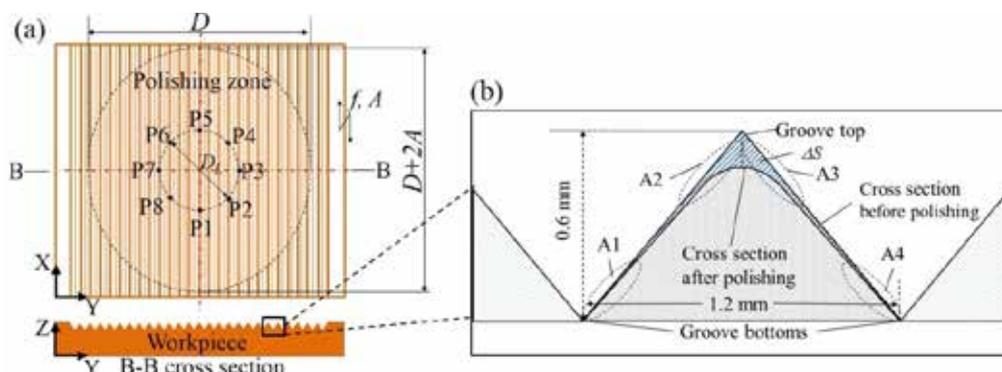


図 6. 研磨領域と測定評価点

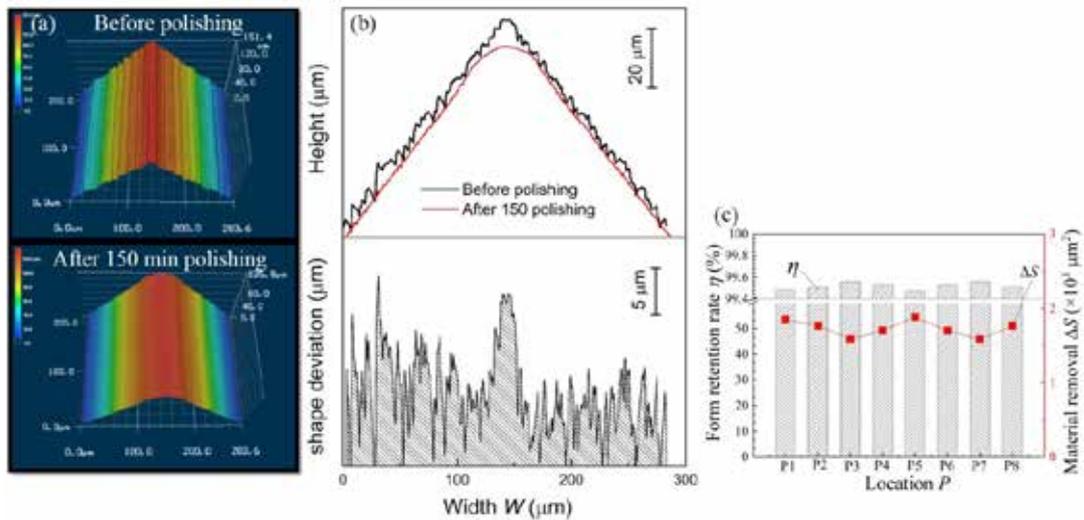


図 7. 研磨点 P3 における (a) 3D レーザ顕微鏡写真と (b) 断面プロファイルと形状変動、および (c) 各研磨点の形状維持率  $\eta$  と材料除去量  $\Delta S$

図 7 (a) に、研磨点 P3 における研磨前と 150 分研磨後の 3D レーザ顕微鏡写真を示す。明らかに研磨前の V 溝側面上の並行分布の切削痕が研磨後に消えており、溝側面が滑らかになった。研磨前後の断面プロファイル (図 7(b) 上) を比較すると、側面上の微小凹凸が研磨後に殆ど無くなったが、その平均線が若干下がったことがわかる。その下がりが図 7(b) 下に示したように部位によって違い、すなわち凸部が選択的に除去され、その結果溝側面が平滑化された。一方、溝トップ部に近いほど MCF キャリアの間隙が小さいため、研磨圧力が大きく材料除去量が多い。これによって溝トップが円弧状になりやすい。図 7(c) に、各研磨点 P1-P8 における図 7(b) のような結果から求めた材料除去量  $\Delta S$  と形状維持率  $\eta$  を示す。図よりわかるように、研磨点によって材料除去量が変わるが、150 分研磨後はすべての研磨点で形状維持率  $\eta$  が 99.4% 以上の高いレベルにある。これは、提案した手法で V 溝をその形状を維持したまま側面を要求のレベルまで十分に平滑化できることを示す。

V 溝側面粗さが研磨中にどのように変化するかを調べた結果の一例として研磨点 P3 における各部位の Ra 値の平均値の時間的変化を図 8 に示す。図よりわかるように、最初の 30 分で Ra 値が急激に減少したが、その後減少率が段々低下し、やがて飽和値に近づく。同図に示した 150 分研磨前後の SEM 写真からわかるように、研磨前の 300nmRa を超えた粗さが研磨後に 15nmRa 以下に大幅に小さくなった。これは、鏡面レベルの V 溝面が得られたことを示している。

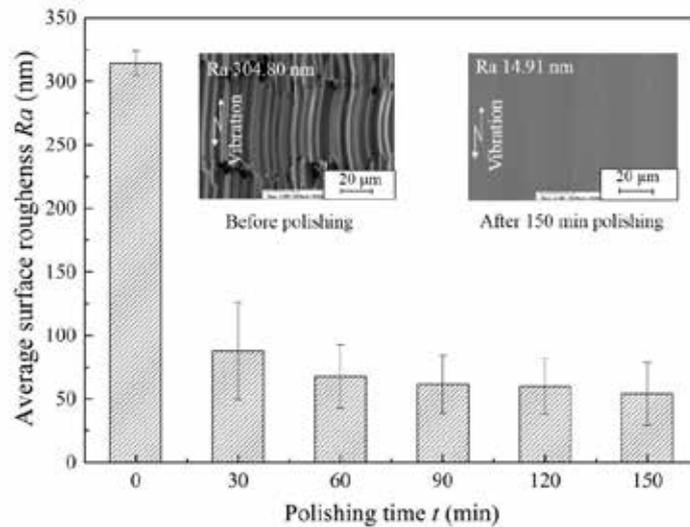


図 8. 研磨時間に伴う面粗さの変化

### 3.2 円環型

次に図 4(a)に示した円環型研磨用実験装置を用いて、図 9 に示す円環型試料の研磨実験を行った。この試料は、切削加工で無酸素銅円盤上に同心円状分布の V 溝（ピッチ 1.2mm, 深さ 0.6mm, 頂角 90°）を設けたものであり、回転式ワークホルダー上に円環中心がワークホルダー回転中心に位置するように固定した。研磨前の V 溝側面の粗さは 350nm Ra 前後であった。研磨実験の作業手順は、リニア型研磨時と同じにしたが、低周波振動テーブルを回転式ワークホルダーに置き換えた。MCF スラリーとしては、リニア型研磨時と同じ成分構成（表 1）のものを使用した。研磨実験条件を表 3 に示すようにした。

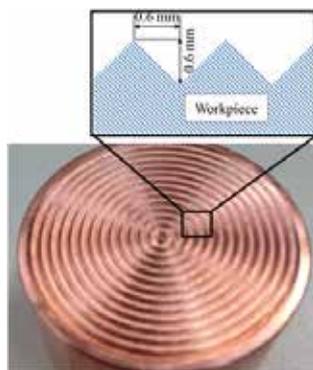


図 9. 円環型試料の外観写真と V 溝の形状寸法

表 3. 円環型研磨実験条件

Workpiece rotation speed	$n_w=200$ rpm, 600 rpm
Magnet revolution speed	$n_m=1,000$ rpm
MCF carrier rotation speed	$n_c=10$ rpm
Supply of MCF slurry	1 mL
Polishing time	90min( $n_w=200$ rpm) +60min ( $n_w=600$ rpm)
Clearance	$\Delta=1$ mm

図 10 に研磨前後の試料外観写真を示す。研磨後は光沢がより顕著になっていることがわかる。研磨に伴う溝側面のトポグラフィを示す 3D 顕微鏡写真と面粗さの変化を示

すと図 11 のようになる。図よりわかるように、最初面粗さ  $Ra345.6nm$  の非常に粗い面が研磨の進行に伴って次第に平滑化されていき、試料回転数  $n_w=200rpm$  で 90 分研磨後は  $Ra$  値が初期の 5 分の 1 以下の  $Ra70.5nm$  に小さくなった。試料回転数を  $n_w=600rpm$  へ高めてさらに 60 分研磨すると面粗さもさらに  $Ra24.4nm$  までに減少した。また研磨前後の溝頂点付近について異なる倍率で SEM 観察したところ、図 12 に示すように、研磨前の並行分布の切削痕が研磨後ほぼ消えて平滑な面となったことがわかる。

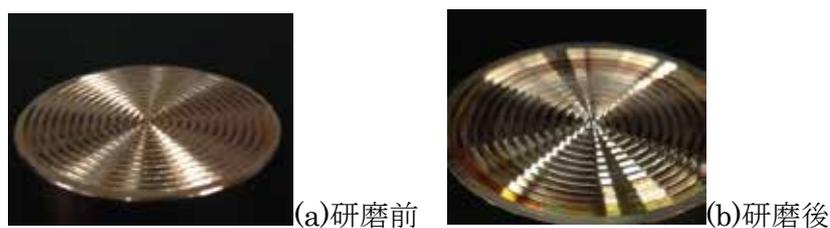


図 10. 研磨前後の試料外観写真

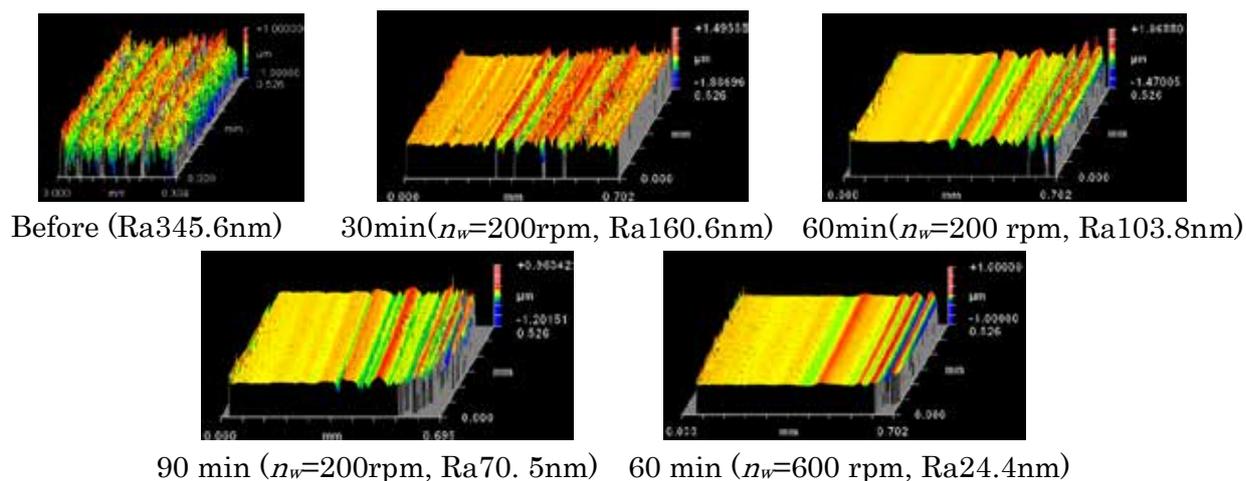


図 11. 研磨中溝側面トポグラフィと粗さの変化

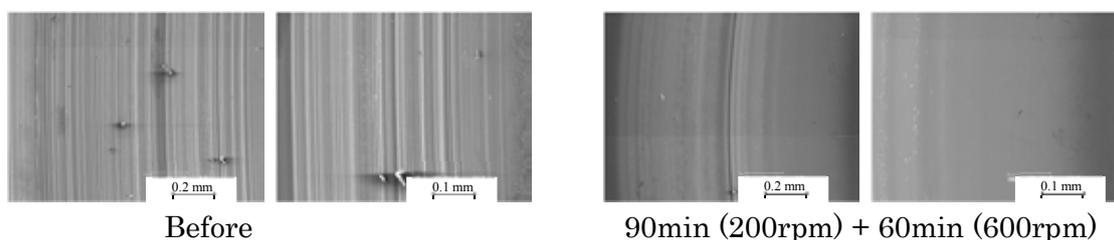


図 12. 研磨前後の溝頂点付近の SEM 写真

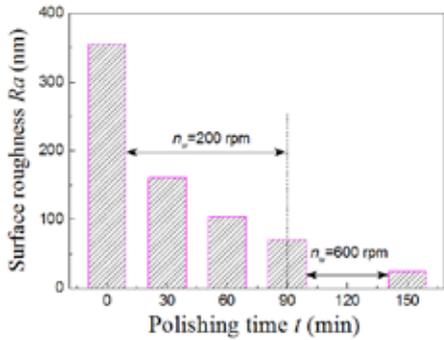


図 13. 溝側面粗さ平均値の時間的変化

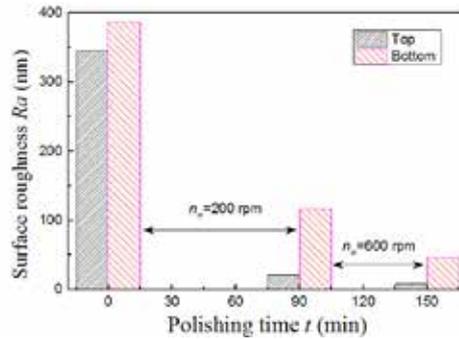
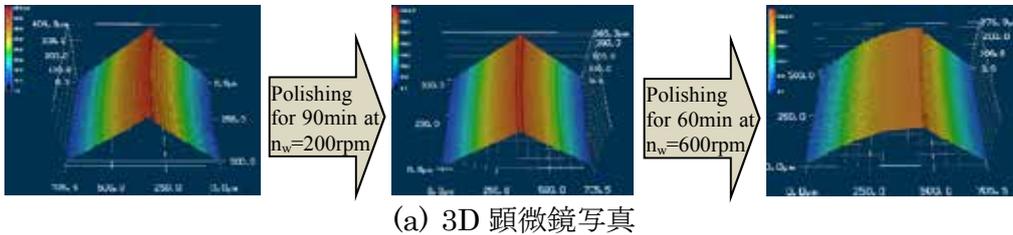
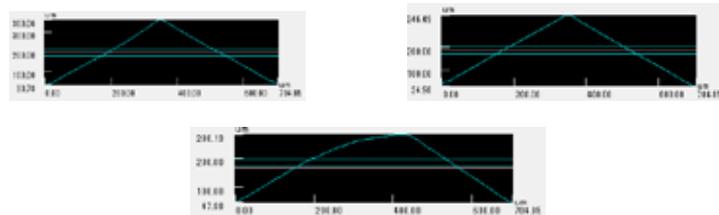


図 14. 溝頂面と底面付近の側面粗さの時間的変化



(a) 3D 顕微鏡写真



(b) 断面プロファイル

図 15. 研磨前後 V 溝の 3D 顕微鏡写真と断面プロファイル

面粗さの研磨時間に伴う変化を調べた結果を図 13 と図 14 に示す. 図 13 に示したのは溝側面全体の粗さの平均値であるが, 図 14 に示したのは溝頂点付近と低部付近それぞれの粗さである. 図 13 よりわかるように, 面粗さの平均値が研磨中に単調に減少し, 試料回転数を  $n_w=200\text{rpm}$  から  $n_w=600\text{rpm}$  に高くすると, 粗さの減少率が大きくなる. 一方図 14 を見ると, 溝頂点付近でも底面付近でも面粗さが研磨の進行に伴い単調に減少するが, 頂点付近の減少率が底面付近のそれよりずいぶん大きいことがわかる.  $n_w=200\text{rpm}$  で 90 分研磨したのちに  $n_w=600\text{rpm}$  に試料回転数を高めて研磨を続けると, 面粗さがより大きな減少率で減少し, 最終的に  $Ra8.3\text{nm}$  の鏡面が得られた.

最後に, V 溝の形状精度を調べるために, 研磨前後の V 溝について 3D 顕微鏡観察と断面プロファイル測定を行った. 図 15(a)と(b)に, それぞれ研磨前後 V 溝の 3D 顕微鏡写真と断面プロファイルを示す. 同図(a)からわかるように, 研磨後溝側面の平滑化が進んだが, 形状, とくに溝頂点付近のそれが崩れている. 同図(b)に示した研磨前後の

断面プロファイルからの材料除去量を求めると、 $\Delta S=17830\mu\text{m}^2$ と得られた。研磨前の V 溝断面積が  $S_0=105000\mu\text{m}^2$  であることから形状維持率が式(1)で  $\eta=83\%$ と得られた。この値は前述のリニア型のそれと比べずいぶん小さいもので、MCF スラリーの成分構成や間隙などの加工条件を最適化することによって形状維持率が要求値を満たすことが十分可能と考えられる。

#### 4. まとめ

MCF（磁気混合流体）スラリーをロータリ磁場下に置いて平行分布直線状と同心円状分布の V 溝の研磨に適用することによって、リニア型や円環型のフレネルレンズ金型を高能率で鏡面に仕上げる技術を新たに開発することを目的に、実験装置を構築したうえで、到達形状精度や面粗さを調べた。得られた結果を要約すると次の通りである。

##### I) リニア型研磨においては

- ・研磨の進行に伴い面粗さが改善する傾向であり、最終的に **Ra15nm** 程度の鏡面が得られた。
- ・形状精度が研磨中次第に悪くなるが、最終的には形状維持率が **99.4%**という高いレベルにある。

よって、提案した手法で平行分布の直線状 V 溝をその形状を高いレベルに維持したまま側面を要求のレベルまで十分に平滑化できることを示す。

##### II) 円環型研磨においては

- ・面粗さも形状精度もリニア型の場合と同じく研磨中 **Ra** 値が小さくなり形状維持率が低下する。
- ・**Ra** 値が最小で **9nm** 以下と得られたが、 $\eta$  値が **83%**と低かった。

よって、提案手法で同心円状の V 溝を鏡面レベルまでに仕上げる可能性が示されたが、形状精度の更なる向上が必要となり、そのため加工条件の最適化が求められている。これは今後の課題とする。

#### 謝 辞

本研究は、公益財団法人 **JFE21** 世紀財団より受けた **2014** 年度技術研究助成を実験装置の構築と試料の製作、また研究補助者謝金に当てることによって行われたものである。試料の製作では榎木村製作所より協力をいただいていた。実験実施においては、博士課程学生の王有良君に尽力していただいた。

## 参考文献

- 1) 図解 砥粒加工技術のすべて, 砥粒加工学会 編, 工業調査会, 2006.
- 2) Huiru Guo, Yongbo Wu, Dong Lu, Masakazu Fujimoto, Mitsuyoshi Nomura, Ultrafine Polishing of Electroless Nickel-Phosphorus Plating Mold with Magnetic Compound Fluid Slurry), *Materials and Manufacturing Processes*, Vol.29, p.1502, 2014.
- 3) Huiru Guo, Yongbo Wu, Dong Lu, Masakazu Fujimoto, Mitsuyoshi Nomura. Effects of pressure and shear stress on material removal rate in ultra-fine polishing of optical glass with magnetic compound fluid slurry, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.214, p.2759, 2014.
- 4) Youliang Wang, Yongbo Wu, Huiru Guo, Masakazu Fujimoto, Mitsuyoshi Nomura and Kunio Shimada, A new magnetic compound fluid slurry and its performance in magnetic field-assisted polishing of oxygen-free copper, *Journal of Applied Physics*, Vol.117, p. 17D712-1-12-4, 2015.
- 5) Yongbo Wu, Youliang Wang, Masakazu Fujimoto, Mitsuyoshi Nomura. Nano-precision polishing of CVD SiC using magnetic compound fluid slurry, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol.23, p.547, 2014.
- 6) Y. Wu, T. Sato, W. Lin, K. Yamamoto, K. Shimada, Mirror surface finishing of acrylic resin using MCF-based polishing liquid, *International Journal Abrasive Technology*, Vol3, p.11, 2010.