MRF（磁性流体研磨）による 高精度ミラー加工*

High-Precision MRF Mirror Polishing

関口修利**

Chris MALONEY***

Paul DUMAS***

Nobutoshi SEKIGUCHI, Chris MALONEY and Paul DUMAS

Key words

MRF (Magneto Rheological Finishing), polishing, sub-aperture, conformal, figure correction, surface roughness, MSF, asphere, freeform

1. はじめに

磁性流体研磨（MRF）は、加工精度および加工時間を高い確度で予測できる仕上げ研磨技術である。平面、球面、非球面、シリンドリカル面やプリズムなどの加工において、形状精度と表面粗さの厳しい要求に応えてきた実績がある。加工対象は、ガラス・ガラスセラミックス（合成石英や低熱膨張ガラスなど）から単結晶（Si や CaF_2 など）や多結晶（WC や SiC など）まで広範にわたる。完成度の高い光学表面の加工に欠かせない最先端の技術である。

2. MRF の原理

MRF は、磁性流体（MR）研磨剤とワークとの間に形成される数 mm 程度の“スポット”を研磨ツールとして、ワーク全面を走査することにより高精度な光学表面を実現するサブアパーチャー研磨技術である¹⁾。

MR 研磨剤は、酸化セリウムあるいはダイヤモンドをベースとする研磨剤とカルボニル鉄粉と水とが混合されたもので、磁場が加わると磁性流体の性質を表し、粘度などの特性が変化する。図 1 に示すように、MR 研磨剤はノズルから吐出されたのち、回転するホイール上で磁場の作用に

図 1 MRF 装置。ホイール上に MR 研磨剤リボンを形成

より数 mm の幅のリボン状となって運ばれる。図 2 (a) に示すように、鉄粉粒子はホイールに引き付けられ、リボン表面には磁性をもたない研磨剤成分が層をつくる。MR 研磨剤リボンにワークを浸けると、図 2 (b) に示すように、MR 研磨剤の流れによるせん断力でワークの一部が削り取られ、これが“スポット”となる。スポットは、ワーク上で図 3 に示すような弾丸形状を呈し、MR 研磨剤が流れる方向に数百 nm 程度の深さ分布を有する。スポットにおいて削り取られる量は、ワークを浸けた時間に比例するため、スポットの滞留時間を精密に制御しながらワーク全面を走査することにより、所望の研磨加工を実現することができるのである。スポットは、MR 研磨剤の流れの方向と直交する方向に走査する。スポットの走査方法により、図 4 に示すように、輪帯状に走査するスパイラル研磨と、X-Y 方向に走査するラスタ研磨の 2 種の研磨方法がある。走査経路上の各点でのスポットの滞留時間は、ワークの形

図 2 MRF の原理。せん断力でワークの一部が削り取られる

図 3 典型的なスポット（干渉計による測定）

*原稿受付 平成 30 年 3 月 28 日

**正 会 員 QED Technologies International, Inc.（東京都中央区日本橋蛸殻町 1-13-1 日本橋北島ビル 2F）

***QED Technologies International, Inc.（1040 University Ave., Rochester, NY 1467, USA）

図4 スポット走査経路 (左) スパイラル研磨 (右) ラスタ研磨

図5 (a) SPDT 加工による自由曲面ミラー金型 (b) MRF 均等研磨の結果。旋削痕と虹目が大幅に低減

形状誤差関数（ワークの形状測定値と目標値（設計値）との差）とスポットの形状に基づく研磨レート関数とのデコンボリューションをとることにより求めることができる。

3. MRF の利点

ユニークな加工原理に基づく MRF には多くの利点がある。第一に、MRF ではワーク表面とほぼ平行なせん断力によって研磨作用を起こしているため、ワーク表面への垂直加圧は、従来の研磨技術の 10^{-5} 以下である²⁾。そのため、MRF 加工時にワークに圧力、ひずみや損傷を与える可能性は極めて低い。第二に、ワークを MR 研磨剤リボンに浸ける深さは、MRF の加工精度にはそれほど厳格ではない。通常、MR 研磨剤リボンの高さは 1~2 mm 程度で、0.5 mm 程度の深さでワークを当てているが、その深さに $10\mu\text{m}$ 程度の誤差があったとしても、研磨レートは 2% 程度の誤差内に収まり、サブ nm オーダーの加工においてその影響は小さい³⁾。この性質は、特にワークの自重によるたわみやワークの取り付けによる形状ひずみが発生し得る場合に有効である。第三に、MRF は加工結果が高い確度で予測できる。通常、MR 研磨剤の粘度などのパラメータは十分に管理されているため、スポットの形状や研磨量は極めて安定しており、走査経路上でのスポットの滞留時間が算出された時点で加工精度および加工時間が予測できるのである。第四に、MRF は基本的にコンフォーマル加工である。MRF は液体を研磨ツールとしており、平面、凹面、凸面のいずれの形状にも倣うため、従来技術のように、加工形状に合わせて専用の研磨ツールや研磨盤を用意する必要がない。この性質は、非球面や自由曲面のような複雑な形状にも適用できる。

図6 合成石英に対する表面粗さの比較 (上段) 白色干渉顕微鏡による測定 (20×対物, 1×ズーム, 視野 359×270 μm) (下段) AFM による測定 (視野 10×10 μm)

4. コンフォーマル加工と平滑化加工の二面性

MRF では、スポットでワーク全面を均等に走査・研磨した場合には、全面をワークの形状に倣って研磨するだけで形状を補正するわけではない。このコンフォーマル加工性は、ピッチがおおよそ 0.5 mm を超えるうねりに対して見られる。一方、ピッチがおおよそ $50\mu\text{m}$ より小さなうねりに対しては、MRF は研磨剤粒子によりワーク表面を平滑化する性質を示す。図5は、300 mm×90 mm の自由曲面ミラー金型の加工例である。図5 (a) は、NiP コート面をシングルポイントダイヤモンド旋削 (SPDT) によって加工したもので、加工面からは、数 μm ピッチの旋削痕が確認でき、また、虹目が観察された。図5 (b) は、MRF でこのミラー金型の設計形状に倣ってワーク全面を 200 nm だけ均等に研磨した結果で、SPDT による旋削痕は大幅に低減され、虹目を抑えることができた。

5. MR 研磨剤と表面粗さの改善

MR 研磨剤は、研磨レート、表面粗さ、ワークの材質の三つの条件から最も適合するものを選ぶことができる。研磨レートと表面粗さとは、一般にトレードオフの関係にあり、加工時間か表面品質のどちらかを優先する必要がある。MRF による形状精度は、MR 研磨剤によらず、おおよそ 1~3 nm rms ということができる。一方、表面粗さは、MR 研磨剤に依存するところが大きい。図6は、合成石英を加工した際の表面粗さを比較した例で、従来の研磨技術によるもの、D11 という最も研磨レートの高い MR 研磨剤によるもの、C30 という最も表面粗さに優れた MR 研磨剤によるものを例として掲げた。従来の研磨技術で得られる表面粗さは 0.5~0.8 nm rms、MRF では、いずれの MR 研磨剤でもおおよそ 0.4 nm rms 以下と評価できる。MR 研磨剤 C30 は、広範な材質に対して約 0.15 nm の表面粗さが実現できるものと評価されているが⁴⁾⁵⁾、図6の

図7 MRFによる球面加工の典型例

図8 (a) ゼルニケ自由曲面の球面からの乖離（約8μm）(b) MRF加工後の形状精度

AFMによる評価では、表面粗さは0.08 nm rmsまで達しており、さらに研磨痕の方向性も消えていることが分かる。

6. MRFによる形状補正

図7(a)にMRFによる球面加工の典型例を示す。ワークは、直径150 mmの合成石英である。MRF研磨前の形状精度は9.6 nm rms, 66.9 nm pvだったが、1回の加工で2.0 nm rms, 37.9 nm pvまで改善された。MR研磨剤D11による加工時間は19分だった。図7(b)は、このワークをさらに研磨レートの低いMR研磨剤で加工した結果で、12分間の加工で1.5 nm rmsまで改善された。

7. MRFによる自由曲面加工

直径150 mm, 曲率半径210 mm（凹面）の球面上に、複数のゼルニケ項からなる約8 μm pvの曲面を重ね合わせ、MRFにより加工した。図8(a)に、この自由曲面形状の球面からの乖離量を示す。作製はラスタ研磨で、三つのステップに分けて行った。第1ステップでは、MR研磨剤D11を用い、かつ直径150 mmのホイールで大きなスポット（15×6 mm）を生成し、アグレッシブな加工条件で概略形状を作製した。研磨レートは25 μm/minで、約2時間の研磨により形状精度は12λからλ/2 pvまで改善した。第2ステップでは、同じくMR研磨剤D11を用い、直径50 mmのホイールで5×3 mm程度のスポットを生成

図9 自由曲面加工におけるMRF加工前後の中間周波数成分(MSF)の分析結果

し、形状精度を向上させた。研磨レートは19 μm/minで、約1時間の研磨により形状精度はλ/10 pvまで改善した。最終ステップでは、MR研磨剤C30を用い、直径20 mmのホイールで小さなスポット（4×2 mm）を生成し、形状精度と表面品質を向上させた。研磨レートは約2 μm/minで、約3時間の研磨により、図8(b)に示すように、形状精度はλ/30 pv, 約3 nm rmsまで改善することができた。使用した材質は、BK7と同様の硬度の光学ガラスで、計約6時間のMRF加工により、8 μm pv程度の乖離量を有する高精度な自由曲面を作製することができたことになる⁶⁾。この技術は、透過波面の精密補正などにも活用されている。図9に中間周波数成分(MSF)の分析結果を示す。低い空間周波数のうねり成分だけでなく、ピッチが1~2 mm程度のMSF成分に対してもMRF加工前の球面よりも改善されていることが分かる⁶⁾。MSFは、フレアやボケ画質低下の原因として知られており、この領域でもMRFのポテンシャルが示されたことになる。

8. MRFによる高精度平面加工

従来、30 nm pv（約λ/20 pv）が高精度平面の一つの要求精度とされており、MRFはその要求に答えてきた。しかし、それまでのMRFによる加工精度が、測定精度の制約を受けていた可能性は否定できず、より高精度な平面度の測定データに基づいたMRFの加工精度についての検討が求められていた。以下は、外径108 mmの合成石英の平面板の加工例である。高精度な平面度測定を実現するために、垂直設置のステッチング干渉計でワーク全面を測定し、平面原器の波面誤差などのシステムエラー成分を除去した横分解能の高い測定結果を得た。さらに、水平設置の干渉計を用いて3平面法によりパワー成分を較正して、垂直設置での測定による自重の影響について考慮してワーク本来の形状誤差を算定した。得られた測定結果に基づき、直径20 mmのホイールを用いて三つのステップに分けてMRF加工を行った。図10にその結果を示す。第1ステップでは、MR研磨剤D11を用いてλ/4からλ/12 pvまで改善した。第2ステップでは、同じくMR研磨剤D11

* 本論文では、面精度の表記を明確にするために、測定値にrms（最小二乗平均）あるいはpv（最大値と最小値の差）を付した。

図 10 高精度な平面度測定に基づく MRF 加工結果

図 11 高 NA 光学素子に対する MRF 研磨

を用い、形状精度は $\lambda/75$ pv にまで向上した。さらに、MR 研磨剤 C30 を用いて MSF を低減し、最終的な形状精度として、8.4 nm pv, 0.6 nm rms ($\lambda/75$ pv, $\lambda/1000$ rms) を達成した。

9. MRF による高 NA 素子の加工

MRF プロセスでは、通常はホイールの頂点で研磨が行われるが、凹面のワークを加工する際には、図 11 (a) に示すように、MRF 装置とワークとの干渉により、加工できるワークの NA に制約があった。近年開発された MRF 用ホイールでは、磁場のかけ方に工夫を凝らし、ホイールの頂点から $\pm 30^\circ$ ないし 45° の範囲であれば、どこでも同一のスポットがとれるように設計されている。この機能とラスタ研磨とを組み合わせることにより、MRF 装置の 5 軸の CNC プラットホームでは不可能だった奥行き方向のスロープも加工できるようになり、ラスタ研磨でも回転対称のワークや自由曲面を加工することが可能となった。さらに、この機能とスパイラル研磨とを組み合わせることによって、図 11 (b) に示すように、NA の大きな凹面のワークでも、装置と干渉することなく加工することが可能になった⁷⁾⁸⁾。これにより、例えば、50 mm ホイールを使用した場合、口径が 130 mm から 220 mm 程度であれば、半球凹面でも MRF 加工ができるようになったのである。

10. おわりに

MRF は、一つのプラットホームで、さまざまな形状や材質に対して、高精度な形状補正および表面品質の改善ができるユニークな研磨技術である。加工精度や加工時間の高い予測性は、今後も生産性の向上に大きく貢献していくことと思われる。将来の精密光学業界の要求仕様にも応えていけるよう、一層の開発が続けられている。

参考文献

- 1) M. Tricard et al.: Sub-aperture approaches for asphere polishing and metrology, Photonics Asia, (2004).
- 2) V.I. Kordonskii and S.R. Gorodkin: Magnetorheological polishing of optical surfaces, J. Opt. Technol., **79**, 9 (2012) 588.
- 3) M. Tricard and D. Golini: High precision photomask polishing with Magneto-Rheological Finishing (MRF), 17th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering, (2002).
- 4) P. Dumas and C. McFee: Novel MRF fluid for ultra-low roughness optical surfaces, Proc. SPIE 9281, 7th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies, 928109 (2014).
- 5) C. Maloney et al.: Improving low, mid and high-spatial frequency errors on advanced aspherical and freeform optics with MRF, Proc. SPIE 10009, Third European Seminar on Precision Optics Manufacturing, 100090R (2016).
- 6) C. Maloney et al.: Fine figure correction and other applications using novel MRF fluid designed for ultra-low roughness, Proc. SPIE 9633, Optifab 2015, 96330G (2017).
- 7) C. Maloney et al.: Novel high-NA MRF toolpath supports production of concave hemispheres, Proc. SPIE 10448, Optifab 2017, 104480G (2017).
- 8) F. Piche et al.: New high-precision deep concave optical surface manufacturing capability, Proc. SPIE 10448, Optifab 2017, 104480H (2017).

関口修利

ロチェスター大学 (視覚研究センター) を 1992 年に修了 (Ph. D.). 光学・エレクトロニクス分野の技術開発および事業開発に従事したのち、2013 年に QED Technologies に入社。ビジネスマネージャーとして日本における事業開発に従事。

Chris MALONEY

ロバート・ウェスレヤン大学 (物理) を 2011 年に卒業 (B.S.), ロチェスター工科大学 (マイクロエレクトロニクス) を 2011 年に卒業 (B.S.), 2014 年に修士課程修了 (M.S.). QED Technologies に入社し、シニアアプリケーションエンジニアとして現在に至る。

Paul DUMAS

ロチェスター大学 (光学研究所) を 1990 年に卒業 (B.S.), 1992 年に修士課程修了 (M.S.). 1996 年に 5 人の創業者の 1 人として、QED Technologies 創設に携わる。創業初期には、ソフトウェアマネージャーおよびシステムエンジニアリングマネージャーを歴任。現在は、グローバルカスタマーサポートおよびアプリケーションエンジニアリングを統括。