

太陽光集光用プラスチックレンズをプレス成形で量産するための金型の高精度研磨技術の開発

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

教授 呉 勇波

(平成 27 年度一般研究開発助成 AF-2015003)

キーワード:

1. はじめに

再生可能エネルギーを活用するための技術として、集光型太陽光発電への期待が高まっている。この技術には、主に太陽光集光用フレネルレンズを用いて光学的に高いモジュール変換効率を実現する方法が利用されている。近年、この技術の需要増大に伴い、フレネルレンズは金型を用いたプラスチック製のものが製造されることが増えてきている。この金型は、無電解 Ni-P めっきを施したスタバックスなどの高性能ステンレス鋼上に、V溝が中心まわりに同心円状分布する円環状と平行に分布する直線状のように超精密ダイヤモンド工具を用いた切削加工で形状創製した後、生成されたツールマークを精密研磨で除去することにより製造される。このとき、転写精度と離型性を向上するためには、切削面に発生した微小バリやツールマークを研磨によって除去し、面粗さ数ナノオーダーまで小さくする必要がある。

先行研究で、磁性流体(Magnetic Fluid: MF)にミクロンオーダーのカルボニル鉄粉を混合した磁気混合流体(Magnetic Compound Fluid: MCF)をベースとしたスラリー(以下、MCFスラリーと呼ぶ)を開発し、Ni-P めっきの平面研磨に適用した際の基礎的な研磨特性を検討するとともに、その有効性を明らかにしてきた。本研究では、ピッチが 1.2mm、深さが 0.6mm で直線的に形成された微細 V 溝を有する Ni-P めっきを施したスタバックスとピッチが 0.4mm、深さが 0.2mm で同心円状に形成された微細 V 溝を有する Ni-P めっきを施したスタバックスについて、MCF 研磨を行ったときの溝形状や表面粗さ、および材料除去量を実験的に評価した。本報は、加工原理と実験装置および実験検討結果を報告するものである。

2. 加工原理と実験装置

図 1 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。磁石ホルダーに偏心距離 γ で固定した永久

磁石を速度 n_m で公転させることによって発生する回転磁場を非磁性の MCF キャリア下部に供給した MCF スラリーに印加する。磁場の作用により上下方向に分布する磁力線に沿ってクラスタが形成され、また磁場の回転に追従して MCF スラリーのクラスタ形状は復元力を示し、その全体形状が維持される。ここで、MCF キャリアの下方に間隙 Δ を設けて工作物を置くと、工作物の表面に MCF スラリーを

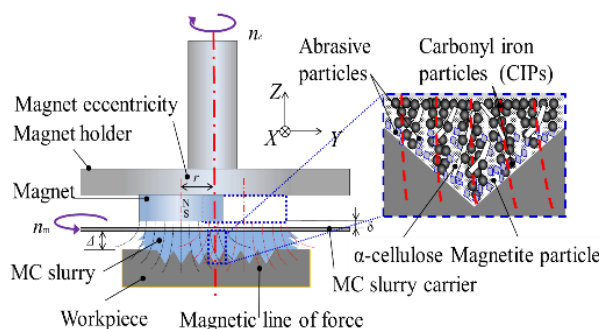
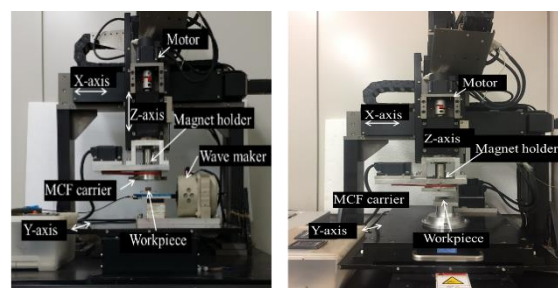


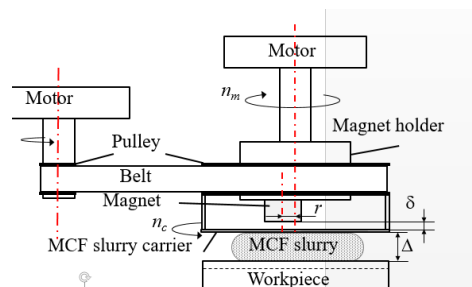
図 1. MCF スラリーによるフレネルレンズ金型の研磨原理

押し付け、また磁気浮揚現象と重力の作用により砥粒が工作物表面に多く集まる。



(a) 直線状

(b) 円環状



(c) 研磨ユニットの構成概略図

図 2. 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図

このとき、直線状 V 溝では工作物を低周波振動(周波数 f 、振幅 A_{p-v})させ、円環状 V 溝では工作物を回転運動させると、MCF スラリーと工作物の間に相対運動が発生し、砥粒の微小切削作用によって研磨が施される。なお、低周波振動は表面形状を崩さずに微細溝の研磨を行うことを目的とし、V 溝の長手方向に沿って与える。このような加工原理を実現するために構築した実験装置をそれぞれ図 2(a)と(b)に示す。3 軸制御可能な NC ポリッシャー上に、加工原理に基づいて設計・製作した MCF 研磨ユニットと直線状 V 溝研磨のための低周波振動装置(旭製作所製 SL-0505)および円環状 V 溝研磨のためのワーク回転機構を取付けることにより MCF 研磨システムを構築した。また、同図(c)に研磨ユニットの構成概略図を示す。このユニットが磁石ホルダー、MCF キャリア、モータ 2 個およびベルトから構成されている。

3. 実験方法と結果

3.1 直線状 V 溝

まず、図 3 に示す直線状 V 溝の研磨実験を行った。厚さ 1.0mm の Ni-P めっきを施したスタバックス表面上に超精密ダイヤモンド切削により微細 V 溝を形成した工作物を低周波振動装置上にねじ止めで固定した。MCF スラリーの構成比は表 1 に、研磨実験条件は表 2 にそれぞれ示す。MCF キャリア回転速度を 10rpm、50rpm、研磨時間を 30~150 分に変化しながら研磨実験を行い、研磨前後の工作物表面形状や V 溝側面の粗さについて評価・検討した。

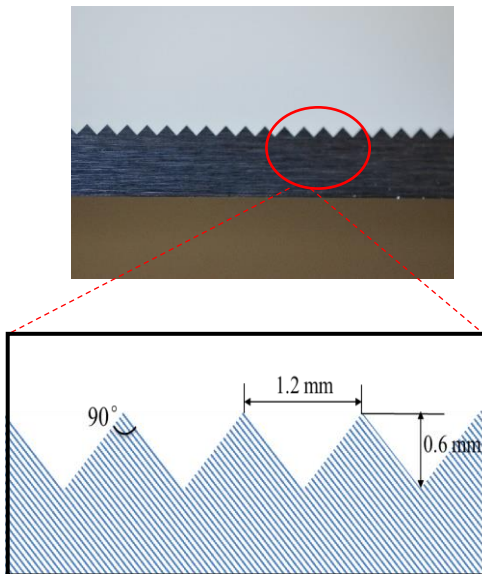


図 3. 直線状試料の外観写真(左)と V 溝形状寸法(右)

表 1 MCF の MCF スラリーの構成比

Carbonyl iron powder (CIP)	Mean diameter	7.5 μm
	Concentration	45 wt. %
Abrasive particle (Al_2O_3)	Mean diameter	1 μm
	Concentration	12 wt. %
Water-based magnetic fluid (MF)	Mean diameter	10 nm
	Concentration	40 wt. %
α -cellulose	Concentration	3 wt. %

表 2 研磨実験条件

Oscillation parameter	$f/A_{p-v}=30\text{Hz}/4\text{mm}$
Magnet type	Nd-Fe-B, B=0.45 T
Magnet revolution speed	$n_m=1,000$ [rpm]
MCF carrier rotation speed	$n_c=10,50$ [rpm]
Amount of MCF slurry supplied	$V=1.00$ [mL]
Clearance	$\Delta=1.0$ [mm]
Polishing time	$T=30\sim 150$ [min]

測定評価方法を図 4 に示す、上述の研磨用実験装置を用いた、直線状 V 溝試料の研磨実験を行うことにした。この試料は、Ni-P めっき上に並行分布の V 溝(ピッチ 1.2mm、深さ 0.6mm、頂角 90)を設けたものであり、低周波振動(周波数 f 、振幅 A)加工テーブル上に V 溝が振動方向に平行になる固定している。形状精度を定量的に評価するために形状維持率 η 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 $\Delta S = S_0 - S$ は材料の除去量となる。

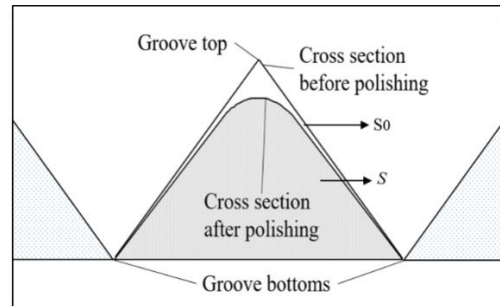


図 4. 測定評価方法

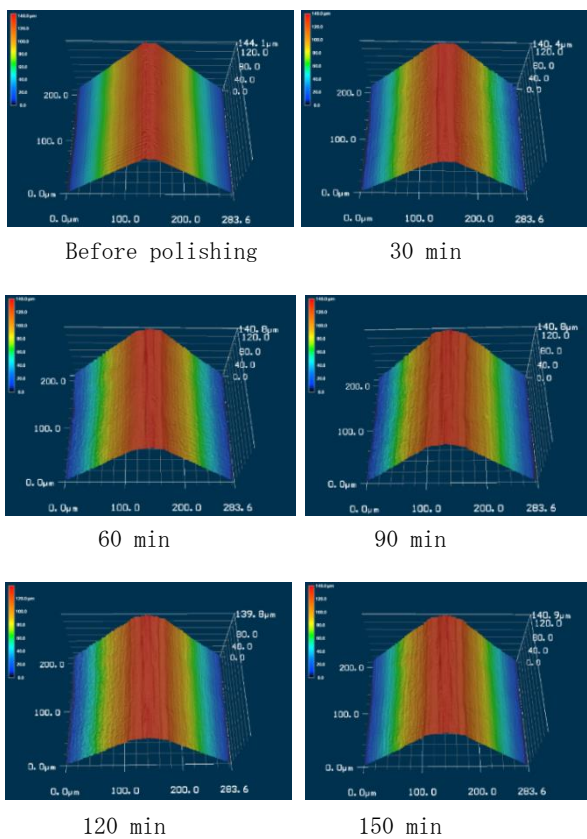
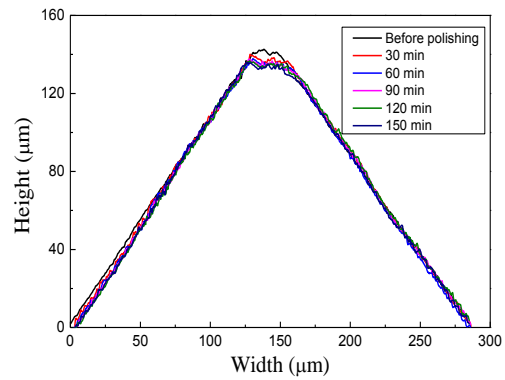
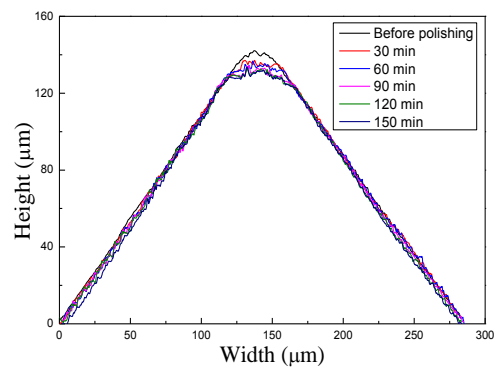


図 5. $n_c=50$ rpm 研磨前後の 3D レーザ顕微鏡写真

図 5 は研磨前と 150 分まで研磨後の 3D レーザ顕微鏡写真を示す。明らかに V 溝側面はその上の並行分布の切削痕が研磨後に消えて、滑らかになった。研磨前後の断面プロファイル(図 6 上)を比較すると、側面上の微小凹凸が研磨後にほとんどなくなったが、その平均線が若干下がったことがわかる。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 より、V 溝形状維持率が MCF キャリア回転速度に関わらずに研磨の進行によって低下し、また MCF キャリア回転速度が高いほど形状維持率が悪くなるが、150 分研磨後の形状維持率 η は 99.60% 以上の高いレベルで維持されていることがわかる。



(a) $n_c=10$ rpm



(b) $n_c=50$ rpm

図 6. 研磨前後の断面プロファイル

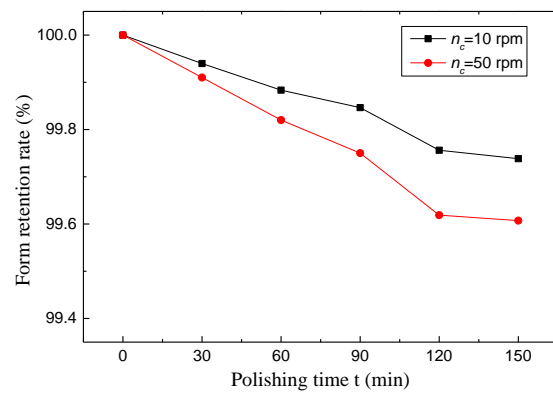


図 7. MCF キャリア回転速度による V 溝の形状維持率

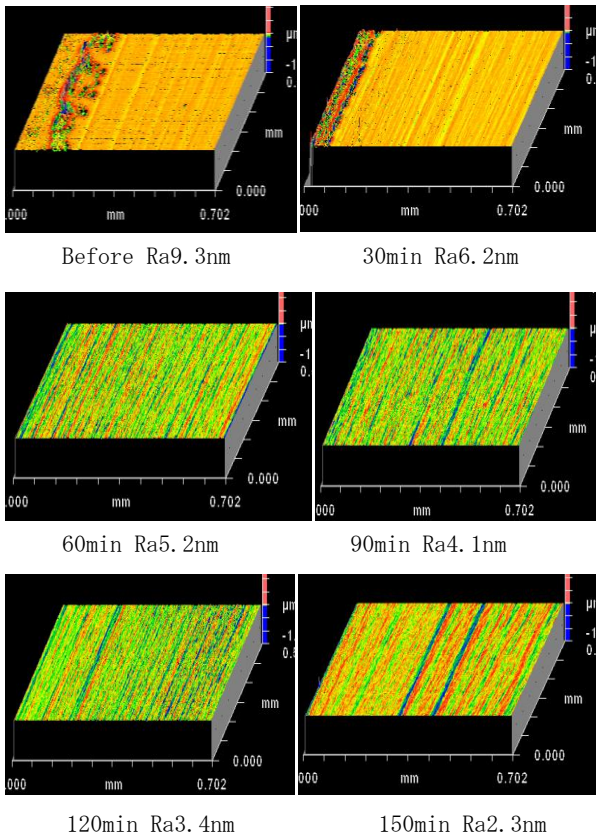


図 8. $n_c=50\text{rpm}$ 研磨中溝側面粗さの変化

V 溝側面粗さが研磨条件によってどう変化することを調べた結果を図 8 に示す. V 溝側面の平均表面粗さ Ra のキャリア回転速度に伴う変化を図 9 に示す. なお, 表面粗さの測定には非接触表面形状測定器 (Zygo 社製 NewView600) を用いた. 図 6~9 に示した結果は, 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.

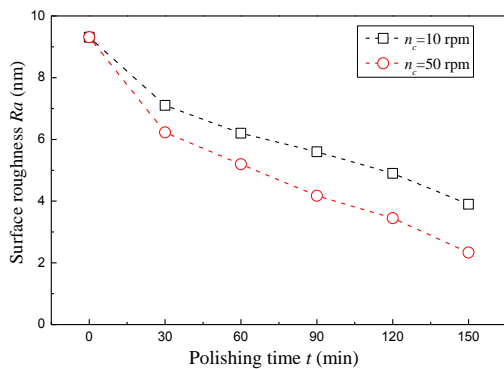


図 9. V 溝側面の平均表面粗さ Ra のキャリア回転速度による変化

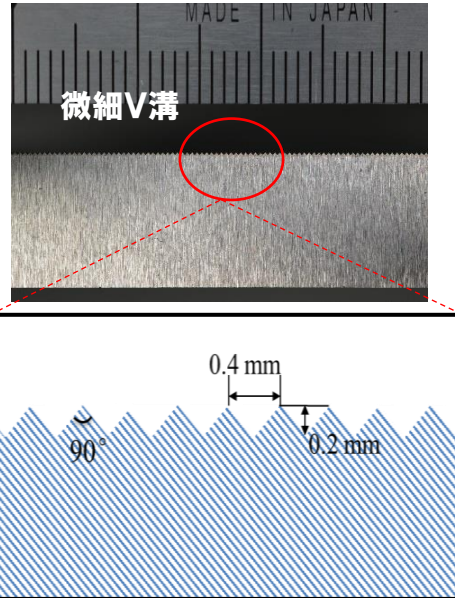


図 10. 直線状試料の外観写真(左)と V 溝形状寸法(右)

3.2 直線状微細 V 溝

上述したように, ピッチが 1.2mm, 深さが 0.6mm のミニアチュア V 溝に精密仕上げに MCF 研磨が有効であることが明らかになった. そして, 次にピッチが 0.4mm, 深さ 0.2mm の直線状微細 V 溝 (図 10) の MCF 研磨を試みた. MCF スラリーの構成比は表 3 に, 研磨実験条件は表 4 にそれぞれ示す. MCF 研磨の加工間隙 Δ を 0.8, 1.0, 1.2mm, MCF キャリア回転速度 n_c を 10, 50, 100rpm, 研磨時間を 30~90 分で変化しながら研磨実験を行い, 研磨前後の工作物表面形状や V 溝側面の粗さについて評価・検討した.

表 3 MCF の MCF スラリーの構成比

Carbonyl iron powder (CIP)	Mean diameter	7.5 μm
	Concentration	45 wt. %
Abrasive particle (Al_2O_3)	Mean diameter	1 μm
	Concentration	12 wt. %
Water-based Magnetic fluid (MF)	Mean diameter	10 nm
	Concentration	40 wt. %
α -cellulose	Concentration	3 wt. %

表 4 研磨実験条件

Oscillation parameter	$f / A_{p-T}=30\text{Hz}/4\text{mm}$
Magnet type	Nd-Fe-B, $B=0.45\text{T}$
Magnet revolution speed	$n_m=1,000\text{ rpm}$
MCF carrier rotational speed	$n_c=10, 50, 100\text{rpm}$
Amount of MCF slurry	$V=1.00\text{mL}$
Clearance Δ	$=0.8, 1.0, 1.2\text{mm}$
Polishing time	$T=30, 60, 90\text{min}$

実験では、ミニチュア V 溝研磨時に使用した研磨用実験装置を用いた。試料は、Ni-P めっき上に並行分布の V 溝(ピッチ 0.4mm, 深さ 0.2mm, 頂角 90)を設けたものであり、低周波振動(周波数 f , 振幅 A)加工テーブル上に V 溝が振動方向に平行になるように固定して研磨を行った。形状精度を同じ評価方法で検討した。

今回は図 11 に示すように、研磨領域における四点(P1~P4)についてそれぞれの断面形状を 3D レーザ顕微鏡で測定し、得られた研磨前後の断面形状を比較することによって除去量と形状維持率を求めた。また、非接触測定器を用いて各点における V 溝側面の表面粗さを測定した。図 12 に各加工位置 P 1 ~ P 4 における研磨前と 90 分研磨後の V 溝断面形状の測定結果を示す。これら断面形状から求めた材料除去量と形状維持率を図 13 に示す。また図 14 に各研磨点における V 溝側面の表面粗さを示す。

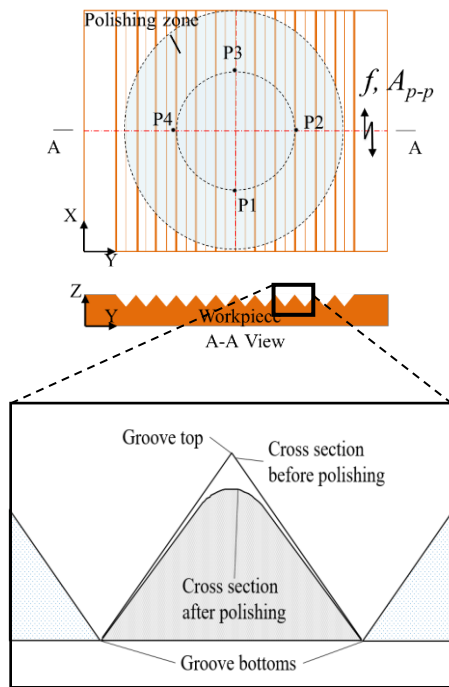


図 11. 測定位置と評価方法

図 13 よりわかるように、P1, P3 と比べると P2, P4 では材料除去量が大きく形状維持率が低かったが、99.7%以上の高い形状維持率が得られている。V 溝側面粗さ R_a に着目すると、 R_a 値が研磨時間に伴い減少する傾向で、最終的に研磨点によって差が多少あるものの、研磨前の $R_a 5.3nm$ から 90 分研磨後の $R_a 3.5nm$ 以下に減少したことがわかる。

次はキャリア回転速度によって、材料除去量と形状維持率及び表面粗さ R_a に及ぼすキャリア回転速度の影響について調べた。

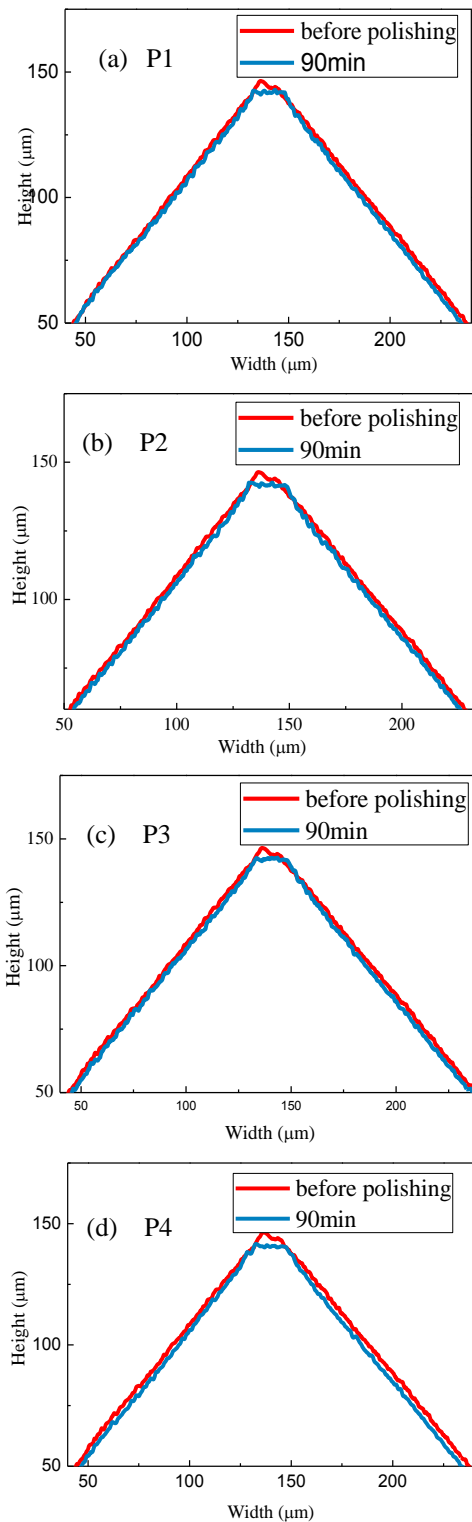


図 12. 異なる加工位置における V 溝断面形状の比較 (加工条件：キャリア回転速度 50rpm, 間隙 1mm)

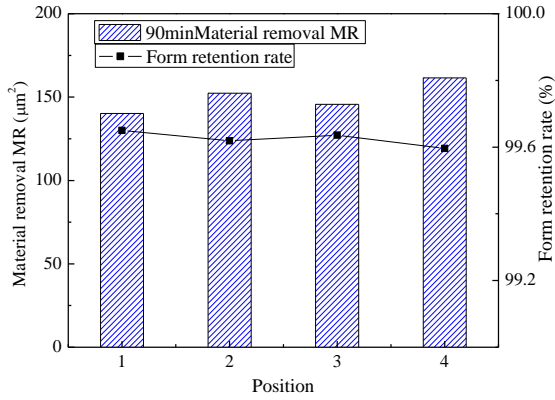


図 13. 形状維持率の加工位置的变化

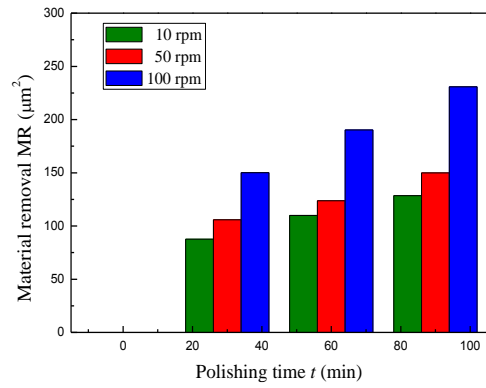


図 16. 各キャリア回転数における材料除去量の時間的变化

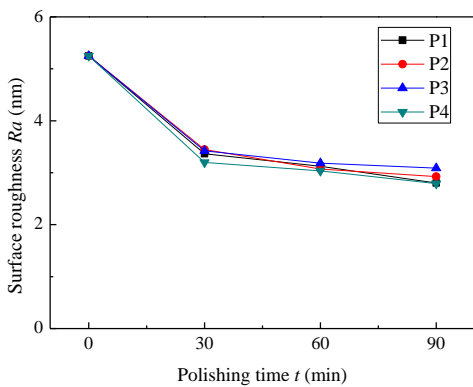


図 14. 加工位置による Ra の時間的变化

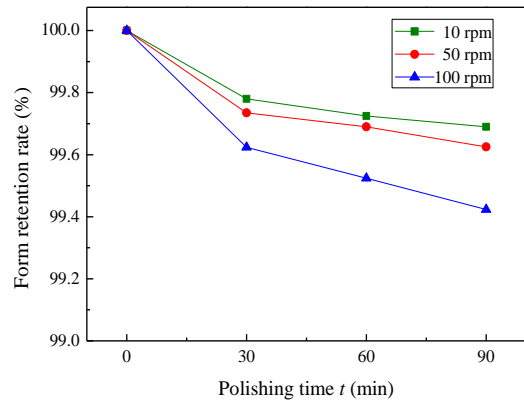


図 17. 各キャリア回転数における形状維持率の時間的变化

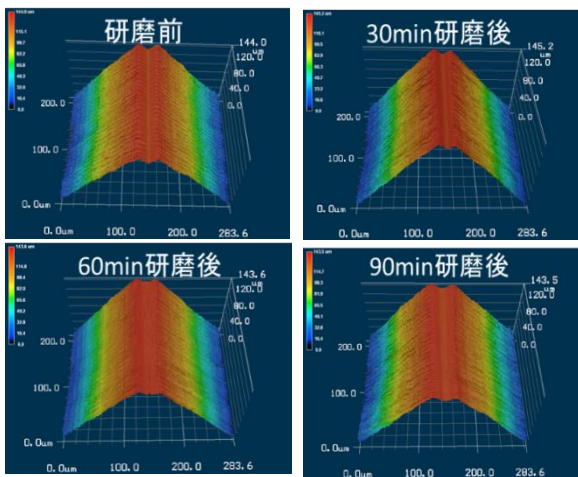
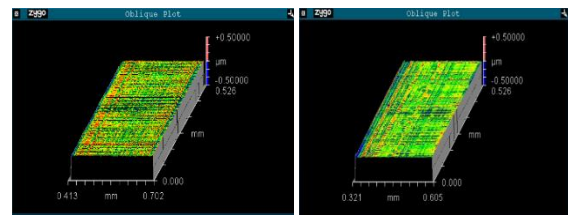


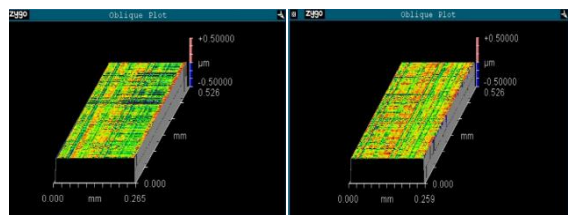
図 15. 3D レーザ顕微鏡写真 (キャリア回転数 50rpm)

図 15 に一例としてキャリア回転数 50rpm 時の異なる研磨時間における V 溝のレーザ顕微鏡写真を示す。図 16 と 17 にそれぞれ材料除去量と形状維持率を示す。

図よりわかるように、キャリア回転が 100rpm の際に、材料除去量が最も大きく、V 溝の形状維持率も 90 分研磨で 99.4% まで低下した。すなわち、MCF キャリア回転速度が速いと形状維持率が低下する。



Before Ra5.3nm 30min Ra3.7nm



60min Ra3.2nm 90min Ra2.9nm

図 18. キャリア回転が 50rpm とき溝側面表面粗さの時間的变化

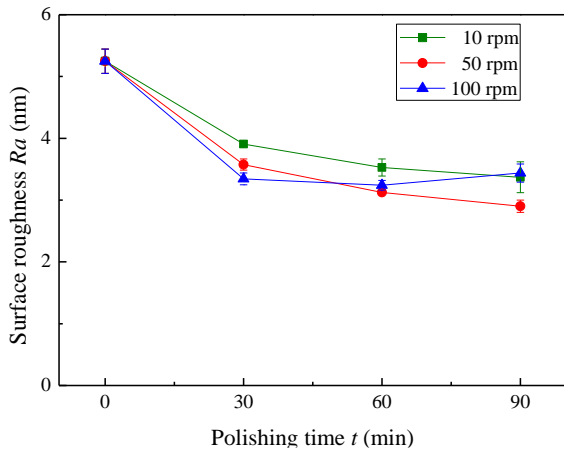


図 19. 各キャリア回転速度における溝側面粗さの時間的変化

V 溝側面粗さが研磨条件によってどう変化することを調べるために行った顕微鏡観察結果の一例を図 18 に示す。V 溝側面粗さ Ra がキャリア回転速度に伴う変化を図 19 に示す。なお、V 溝側面の観察と面粗さの測定には非接触表面形状測定器 (Zygo 社製 NewView600) を用いた。

同図よりわかるように、研磨直後の 30 分間で Ra 値急激に減少し、その後減少率が徐々に低下する。また、キャリア回転速度が速いほど表面粗さ Ra の減少率が高くなるが、100rpm の時に 60min から表面粗さ Ra がほとんど変わっていない。回転速度 50rpm の時、形状が高いレベルで維持されるとともに面粗さ Ra も小さい。この値が最適なキャリア回転速度と考えることができる。

次はキャリア回転速度を 50rpm に設定して、加工間隙 Δ によって V 溝の材料除去量と形状維持率及び表面粗さ Ra がどう変わるかを調べた。図 20 と 21 にそれぞれ材料除去量と形状維持率を示す。明らかに Δ 値が小さいと除去量が大きくなり、形状維持率が低下する。にもかかわらず、90 分研磨後は形状維持率が $\eta=99.5\%$ 以上と高いレベルで維持された。

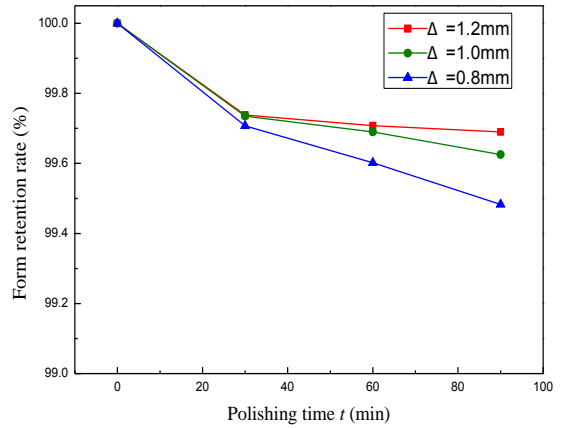


図 20. 各間隙における除去量の時間的変化

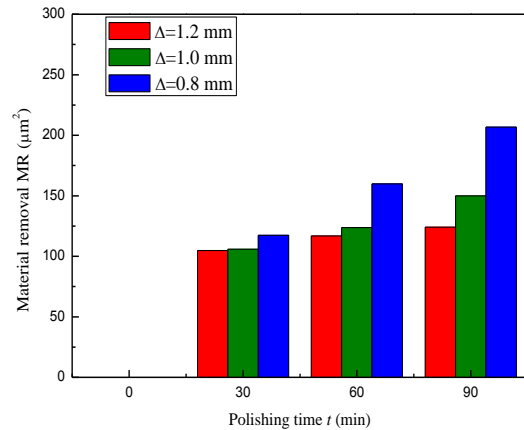


図 21. 各間隙における形状維持率の時間的変化

図 22 に各間隙における V 溝側面粗さ Ra の時間的変化を示す。時間の増加に伴い、表面粗さ Ra が小さくなったが、同じ研磨時間では加工間隙 Δ が小さいほど表面粗さ Ra が大きくなる傾向である。そこで図 20 と図 22 を合わせてみると、MCF キャリア回転速度が 50rpm、間隙が 1.2mm のとき、表面粗さはよくなり、形状維持率が一番高いことがわかる。

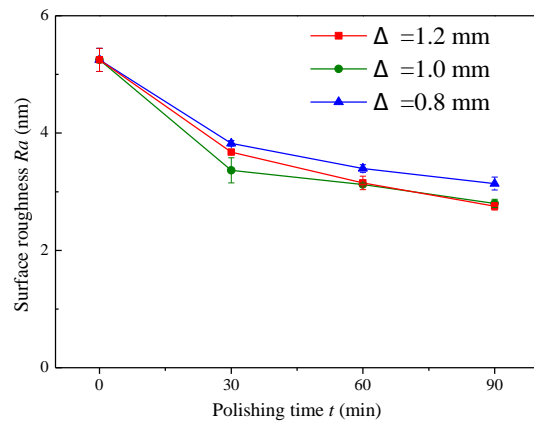


図 22. 各間隙における表面粗さ Ra の時間的変化

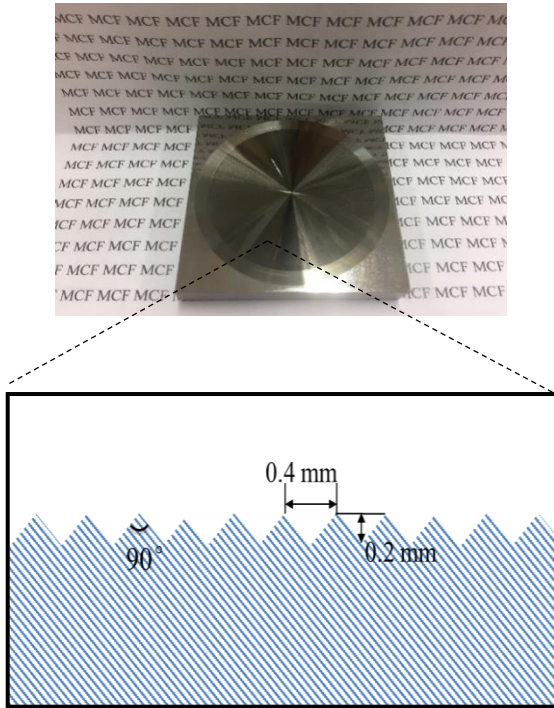


図 23. 円環状試料の外観写真(左)と V 溝形状寸法(右)

表 5 研磨実験条件

Workpiece	Miniature circular V-grooves
Workpiece rotation speed	$n_w=40$ rpm
Magnet	Nd-Fe-B: B=0.45T Revolution radius $r=4.5$ mm Rotation speed $n_m=1,000$ rpm
MCF carrier	Rotational speed: $n_c=-50$ rpm
Supply of MCF slurry	1 mL
Polishing time	30, 60, 90, 120, 150min
Clearance	$\Delta=0.8, 1.0, 1.2$ mm

3.3 円環状 V 溝

次に円環状 V 溝研磨用実験装置 (図 2(b)) を用いて、図 23 に示す円環状 V 溝試料の研磨実験を行った。この試料は、切削加工で Ni-P めっき上に同心円状分布の V 溝(ピッチ 0.4mm, 深さ 0.2mm, 頂角 90)を設けたものであり、ワーク回転機構上に円環中心がワーク回転中心に一致するように固定した。研磨実験の作業手順は、直線状研磨時と同じにしたが、低周波振動装置をワーク回転機構に置き換えた。MCF スラリーとしては、直線状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 5 に示す。

図 24 に加工概念図 (左) と測定評価位置分布 (右) を示す。測定評価位置として、OP1, OP2, OP3, OP4 の 4 方向に試料中心から $L=0.3, 0.6, 0.9, 1.2$ mm の 4 か所、計 16 か所について V 溝側面粗さと断面形状を測定した。図 25 に一例として OP2- $L=0.9$ mm V における溝側面の研磨前と異なる時間研磨後の顕微鏡写真 ($\Delta=0.8$ mm) を示す。研磨前の深い切削痕が研磨の進行に伴い徐々に浅くなり、面粗さが初期の Ra24.8nm から 150 分研磨後の Ra16.8nm に小さくなったことがわかる。そして、試料中心からの距離 (つまり L 値) が異なる位置の面粗さに対して研磨時間と間隙がどう影響するかを調べると、図 26 に示すような結果が得られた。なお、各 L 値における Ra 値は、OP1~OP4 の 4 方向に測定した 4 つのデータを平均したものである。図よりわかるように、すべての間隙 Δ において $L=0.3$ mm と $L=1.2$ mm の時に研磨の進行に伴う面粗さ Ra の減少が非常に小さかったが、 $L=0.6$ mm と $L=0.9$ mm の時に Ra 値が減少する傾向にあった。これは、試料中心から距離が違うと V 溝の研磨特性が異なることを示し、その詳細は今後の課題とする。

上述で明らかになった面粗さ Ra が最も小さい位置 $L=0.9$ mm における V 溝の断面形状を 3D レーザ顕微鏡で測定して、材料除去量と形状維持率を求めた。図 26 にこの位

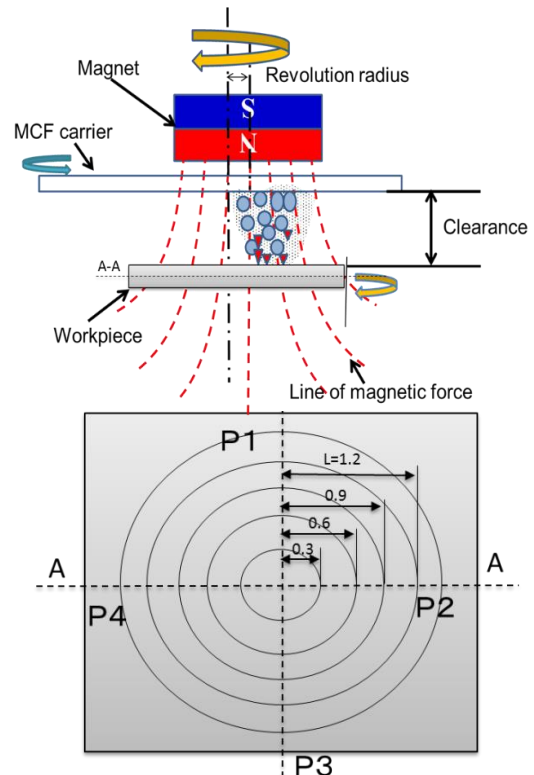


図 24. 円環状試料の加工概念図(上)と測定位置(下)

置における研磨前後のV溝の3Dレーザ顕微鏡写真を示す。研磨前によく見えるV溝エッジが150分研磨後に丸みがつけられているように見えるが、溝側面はずいぶん滑らかになったことがわかる。

図28と図29にそれぞれ各間隙における材料除去量と形状維持率の時間的変化を示す。図よりわかるように、加工間隙に関わらずに研磨時間の増加に伴い、材料除去量が増加して、形状維持率が低下する。また、加工間隙 $\Delta=1.0\text{mm}$ と 1.2mm においては、 Δ 値による変化が非常に小さいが、加工間隙が $\Delta=0.8\text{mm}$ に小さくなると、研磨中材料が比較的に大きな率で除去され、それによってV溝の形状維持率が比較的に速いペースで低下する。

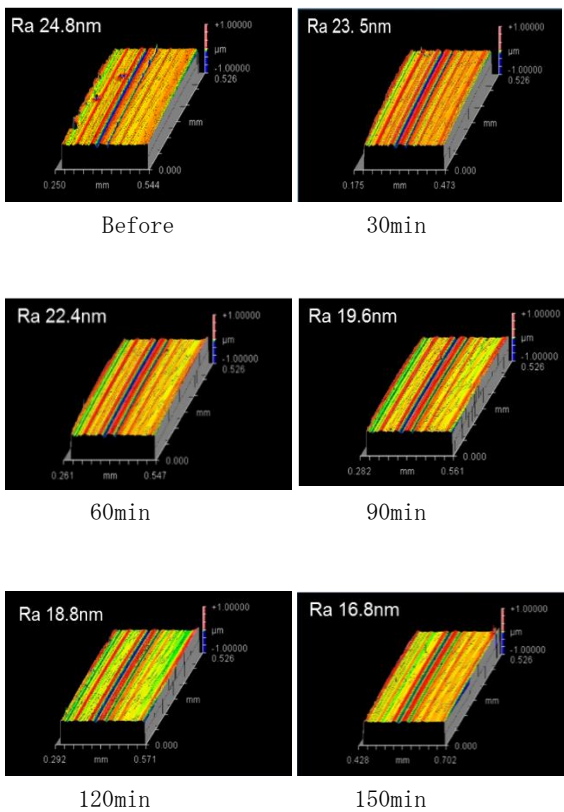
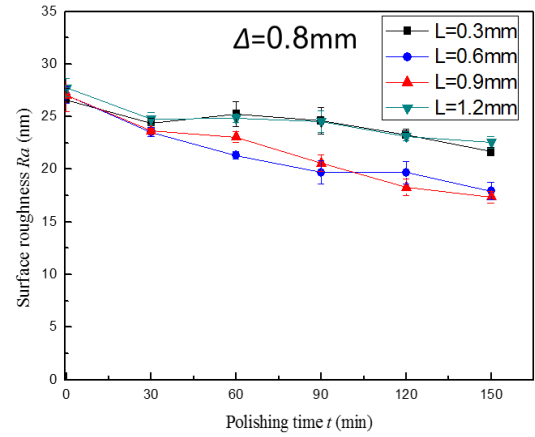
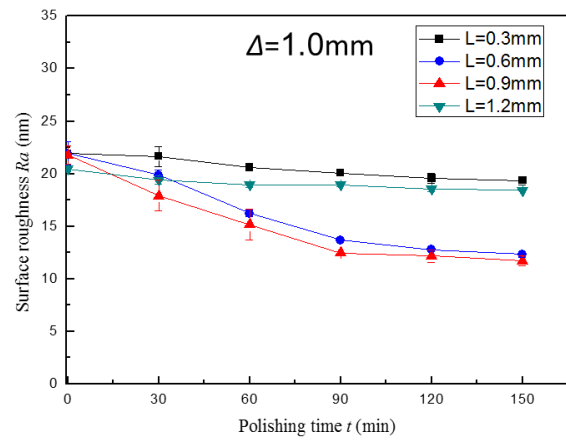


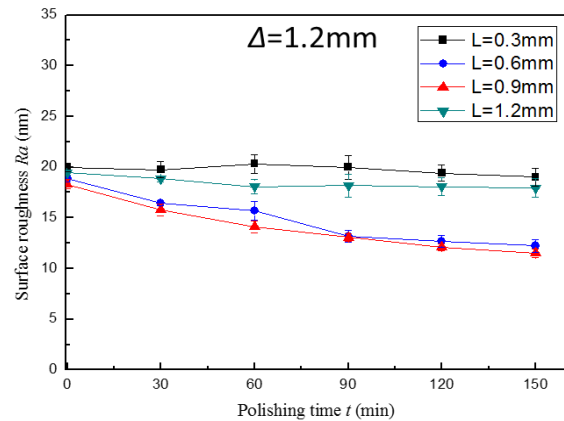
図25. V溝側面顕微鏡観察例 ($\Delta=0.8\text{mm}$, 150min, OP2_L=0.9mm)



(a)



(b)



(c)

図26. 各加工条件におけるV溝表面粗さRaの時間的変化

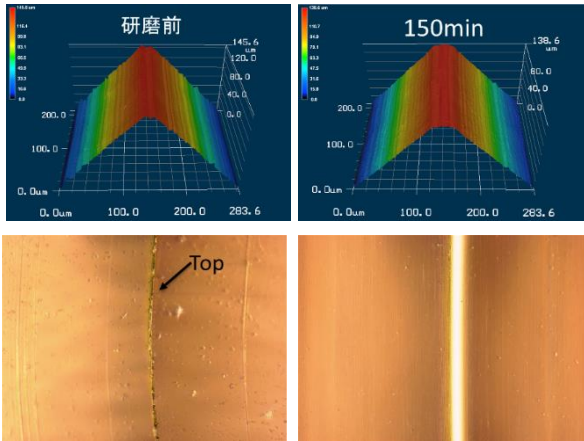


図 27. OP1-L=0.9mm における研磨前後 V 溝の 3D レーザ顕微鏡写真

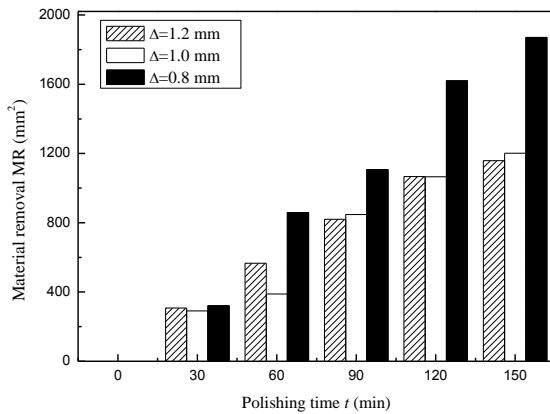


図 28. 各間隙における材料除去量の時間的変化

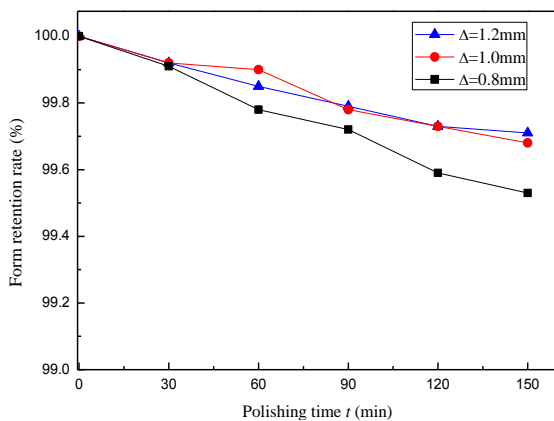


図 29. 各間隙における形状維持率の時間的変化

4. まとめ

Ni-P めっきスタバックス基板に設けた直線状 V 溝 (ピッチ 1.2mm, 深さ 0.6mm とピッチ 0.4, 深さ 0.2mm の 2 種類) と円環状 V 溝 (ピッチ 0.4mm, 深さ 0.2mm) の試料について MCF 研磨を行い, 研磨前後の溝断面形状維持率や側面粗さ, また材料除去量について比較した結果, 次の知見が得られた.

1) 直線状においては, ①研磨時間の増加とともに面粗さが改善し, 最終的に Ra2.7nm 程度の鏡面が得られた; ②加工間隙によるが, 90 分研磨後は維持率 $\eta=99.5\%$ 以上と形状が高く維持される; ③MCF キャリア回転速度が 50rpm, 間隙が 1.2mm のとき, 面粗さが最も小さく, 形状維持率が最高である.

2) 円環状においては, ①中心から距離 $L=0.9\text{mm}$ で面粗さ Ra が最小となり, 150 分研磨後 Ra12.5nm となった; ②150 分研磨後形状維持率 η が依然 99.73% という高いレベルにある.

以上の結果より, 提案手法で直線状も円環状も V 溝の形状が高く維持されながら溝側面粗さが産業界の要求を満たすことができることが明らかになった.

本研究に関連した論文発表

- 1) 王有良, 吳勇波, 野村光由, MCF スラリーを用いたミニチュア V 溝の鏡面仕上げの基礎研究, (2015 年 9 月 4-6 日, 東北大学, 仙台)
- 2) Youliang Wang, Yongbo Wu, and Mitsuyoshi Nomura, Feasibility study on surface finishing of miniature V-grooves with magnetic compound fluid slurry, Precision Engineering, 45(2016) 67-78
- 3) 姚宗良, 吳勇波, 藤井達也, 野村光由, MCF (磁気混合流体) スラリーを用いた Ni-P めっき微細 V 溝の鏡面仕上げ, (2017 年 3 月 13-15 日, 慶応義塾大学, 横浜)