

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7557166号
(P7557166)

(45)発行日 令和6年9月27日(2024.9.27)

(24)登録日 令和6年9月18日(2024.9.18)

(51)国際特許分類

B 2 4 B 37/10 (2012.01)
B 2 4 B 1/04 (2006.01)

F I

B 2 4 B 37/10
B 2 4 B 1/04

E

請求項の数 6 (全12頁)

(21)出願番号	特願2020-34252(P2020-34252)	(73)特許権者	504137912
(22)出願日	令和2年2月28日(2020.2.28)		国立大学法人 東京大学
(65)公開番号	特開2021-133490(P2021-133490)		東京都文京区本郷七丁目3番1号
	A)	(73)特許権者	594066637
(43)公開日	令和3年9月13日(2021.9.13)		夏目光学株式会社
審査請求日	令和4年12月7日(2022.12.7)		長野県飯田市鼎上茶屋3461番地
		(74)代理人	100074561
			弁理士 柳野 隆生
		(74)代理人	100177264
			弁理士 柳野 嘉秀
		(74)代理人	100124925
			弁理士 森岡 則夫
		(74)代理人	100141874
			弁理士 関口 久由
		(74)代理人	100163577

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 修正研磨加工方法および修正研磨加工装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

局所的に研磨加工可能な回転ツールを、スラリー状の研磨加工液をワークとの間に供給しつつ、数値制御で走査加工する修正研磨加工方法において、

前記ワークを圧電アクチュエータにより振幅 $1 \mu m$ 以上 $30 \mu m$ 以下で揺動させながら加工を行うことを特徴とする、修正研磨加工方法。

【請求項2】

前記揺動の振動数を、 $0.1 Hz$ 以上とした、請求項1記載の修正研磨加工方法。

【請求項3】

前記研磨加工液が、平均粒径 $5 \mu m$ 以上の有機粒子からなる砥粒を液体中に分散させた研磨加工液である、請求項1又は2記載の修正研磨加工方法。

10

【請求項4】

前記液体が、純水または水を主成分とする液体である、請求項3記載の修正研磨加工方法。

【請求項5】

走査されない静止状態で局所的にワークを研磨できるワーク研磨用の回転ツールと、該回転ツールとワークとの間に、スラリー状の研磨加工液を供給する加工液供給手段と、前記ワークをXYZ方向に移動可能に保持するワーク保持機構と、

該ワーク保持機構に保持されたワークを圧電アクチュエータにより振幅 $1 \mu m$ 以上 $30 \mu m$ 以下で揺動させる揺動手段とを備え、

20

前記揺動手段によって揺動するワークに対し、前記ワーク保持機構を数値制御して走査加工する、修正研磨加工装置。

【請求項 6】

前記揺動手段が、
前記ワークを保持する保持体を、前記揺動方向に沿って案内するガイド機構と、
前記保持体を前記揺動方向に沿って振動させる振動アクチュエータと、
よりなる請求項5記載の修正研磨加工装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

10

本発明は、局所的に研磨加工可能な回転ツールにより数値制御で走査加工する修正研磨加工方法に関する。

【背景技術】

【0002】

レンズやミラーなどの光学素子の表面形状は、光の集光性能や強度変化に大きく影響を及ぼす。一方で、要求される表面形状は様々である。特に非球面や自由曲面形状は、従来のすり合わせ研磨による作製は難しい。そこで、局所的に研磨加工可能な回転ツールを、スラリー状の研磨加工液を間に供給しつつ、ワーク（被加工物）に押し付けながら全面にわたって数値制御で走査加工する修正研磨加工が行われている。

【0003】

20

修正研磨加工では、予めワークと同質の材料に回転ツールを走査せずに研磨加工することで静止加工痕を得、この静止加工痕を単位時間当たりに置き換えた単位加工形状を得る。そして、この単位加工形状とワーク上の形状誤差（修正目標形状）とをデコンボリューション（逆畳み込み積分）計算することで回転ツールの滞留時間（走査速度）を算出し、この滞留時間分布に沿って回転ツールを走査する、というプロセスにより目的の形状へと修正加工を行う（例えば、特許文献1参照。）。

【0004】

修正研磨加工では、ツール摩耗や加工液（スラリー）の供給方法によって発生する、加工レートの不安定性を抑えることが重要となる。特に、酸化セリウムやシリカなどの一般的な研磨砥粒を用いた場合、砥粒の分散性の悪さが加工レートの不安定性の要因となる。この課題に対し、本発明者は既に、アクリルなどの有機粒子を砥粒として用いるOrganic Abrasive Machining（OAM法）を開発した（特許文献2を参照。）。有機粒子を用いるメリットは、水と比重が近いため粒子の分散性が非常に高い、工作物と比べて柔らかく加工傷が付きにくい、有機溶剤に溶解するため加工後の除去が容易、安価で入手し易いといった点が挙げられる。

30

【0005】

上記OAM法では、アクリル粒子を用いて $100\text{ }\mu\text{m}$ 空間分解能の修正研磨加工が達成されている。しかしながら、このOAM法においても、図6に示す通り、静止加工痕にツールの回転方向に依存する縞が発生する。この結果、修正研磨加工の走査ピッチを上げると、研磨加工後の表面粗さはツール回転方向に異方性が見られ、わずかに悪化してしまう。このため、走査ピッチを上げることができず、加工の効率化が図れないといった課題があった。

40

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【文献】特開2005-22005号公報

【文献】特許第6446590号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

50

そこで、本発明が前述の状況に鑑み、解決しようとするところは、静止加工痕での縞の発生を抑え、修正研磨加工の走査ピッチを上げても表面粗さに異方性が出ず、加工の効率化を図ることができる修正研磨加工方法および修正研磨加工装置を提供する点にある。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明者は、上述の課題を解決するべく鋭意検討した結果、ワークを揺動させることにより加工を平均化して縞の発生、ひいては異方性を抑制し、表面粗さを改善できる可能性があることを着想し、揺動による静止加工痕の変化を調査した結果、本発明を完成するに至ったものである。

【0009】

すなわち本発明は、以下の発明を包含する。

【0010】

(1) 局所的に研磨加工可能な回転ツールを、スラリー状の研磨加工液を間に供給しつつ、数値制御で走査加工する修正研磨加工方法において、前記ワークを揺動させながら加工を行うことを特徴とする、修正研磨加工方法。

【0011】

(2) 前記揺動の振動数を、0.1 Hz以上とした、(1)記載の修正研磨加工方法。

【0012】

(3) 前記揺動の振幅を、1 μm以上とした、(1)又は(2)記載の修正研磨加工方法。

【0013】

(4) 前記研磨加工液が、平均粒径5 μm以上の有機粒子からなる砥粒を液体中に分散させた研磨加工液である、(1)～(3)の何れかに記載の修正研磨加工方法。

【0014】

(5) 前記液体が、純水または水を主成分とする液体である、(1)～(4)の何れかに記載の修正研磨加工方法。

【0015】

(6) 走査されない静止状態で局所的にワークを研磨できるワーク研磨用の回転ツールと、

該回転ツールとワークとの間に、スラリー状の研磨加工液を供給する加工液供給手段と、前記ワークをXYZ方向に移動可能に保持するワーク保持機構と、該ワーク保持機構に保持されたワークを揺動させる揺動手段とを備え、前記揺動手段によって揺動するワークに対し、前記ワーク保持機構を数値制御して走査加工する、修正研磨加工装置。

【0016】

(7) 前記揺動手段が、前記ワークを保持する保持体を、前記揺動方向に沿って案内するガイド機構と、前記保持体を前記揺動方向に沿って振動させる振動アクチュエータと、よりなる(6)記載の修正研磨加工装置。

【発明の効果】

【0017】

以上にしてなる本願発明によれば、ワークを、回転ツールの回転方向に交差する方向にワークを揺動させながら加工を行うことで、該回転ツールによる静止加工痕での縞の発生が抑えられるため、数値制御で走査加工する際の走査ピッチを上げても、表面粗さに異方性が出ず、修正研磨加工の効率化を図ることができる。

【図面の簡単な説明】

【0018】

【図1】本発明の代表的実施形態に係る修正研磨加工装置を示す正面図。

【図2a】左側は揺動なしの静止加工痕の表面観察画像、右側は深さプロファイルを示すグラフ。

【図2b】左側は揺動の振幅1 μmの静止加工痕の表面観察画像、右側は深さプロファイルを示すグラフ。

10

20

30

40

50

【図2c】左側は揺動の振幅5μmの静止加工痕の表面観察画像、右側は深さプロファイルを示すグラフ。

【図2d】左側は揺動の振幅10μmの静止加工痕の表面観察画像、右側は深さプロファイルを示すグラフ。

【図2e】左側は揺動の振幅20μmの静止加工痕の表面観察画像、右側は深さプロファイルを示すグラフ。

【図2f】左側は揺動の振幅30μmの静止加工痕の表面観察画像、右側は深さプロファイルを示すグラフ。

【図3a】左側は揺動なしの静止加工痕の表面観察画像、右側は深さプロファイルを示すグラフ。

【図3b】左側は揺動の振動数0.1Hzの静止加工痕の表面観察画像、右側は深さプロファイルを示すグラフ。

【図3c】左側は揺動の振動数1Hzの静止加工痕の表面観察画像、右側は深さプロファイルを示すグラフ。

【図3d】左側は揺動の振動数10Hzの静止加工痕の表面観察画像、右側は深さプロファイルを示すグラフ。

【図4a】左側は揺動なし、走査ピッチ10μmの走査加工痕の表面観察画像、右側は拡大像。

【図4b】左側は揺動あり、走査ピッチ10μmの走査加工痕の表面観察画像、右側は拡大像。

【図4c】左側は揺動なし、走査ピッチ50μmの走査加工痕の表面観察画像、右側は拡大像。

【図4d】左側は揺動あり、走査ピッチ50μmの走査加工痕の表面観察画像、右側は拡大像。

【図5】(a)は10μmピッチの走査加工におけるPSD、(b)は50μmピッチの走査加工におけるPSD。

【図6】(a)は従来のOAM法における静止加工痕の表面観察画像、(b)は走査加工前後の表面粗さを示す画像。

【図7】走査加工の方法を示す説明図。

【発明を実施するための形態】

【0019】

次に、本発明の実施形態を添付図面に基づき詳細に説明する。

【0020】

本発明の代表的実施形態に係る修正研磨加工装置1は、図1に示すように、ワーク9に対して局所的に押し付けられるワーク研磨用の回転ツール2と、回転ツール2とワーク9との間に、スラリー状の研磨加工液を供給する加工液供給手段3と、ワーク9をXYZ方向に移動可能に保持するワーク保持機構4と、ワーク保持機構4に保持されたワーク9を揺動させる揺動手段5とを備えている。

【0021】

本実施形態では、OAM法（特許第6446590号公報記載の局所研磨加工方法）に、揺動手段5を組み合わせて構成したものについて説明するが、本発明は、このようなOAM法を用いたものに限定されるものではなく、EEM加工（Elastic Emission Machining）法や磁性流体研磨加工方法（特公平2-25745号公報）、その他の種々の局所研磨加工法に揺動手段を組み合わせて構成することが可能である。特に、工具ツールとワーク表面が直接接触せず、もしくは強い接触力を生じず、高速で揺動することが可能な修正研磨加工法に組み合わせて構成することが有効である。なお、本実施形態のOAM法に関する構成に関しては、上記特許第6446590号公報の記載が参照により援用される。

【0022】

回転ツール2は、ゴム等の弾性素材よりなる回転体20と、先端に該回転体20が設けられ、該回転体20を回転させる軸方向に長い軸体21と、基端側で該軸体21を支持し

10

20

30

40

50

つつ軸中心に回転させる回転支持部 22 とより構成されており、回転体 20 の外周面をワーク 9 側に押し当てることで、軸体 21 が湾曲し、該湾曲した軸体 21 の弾性復元力により回転体 20 がワーク 9 側に押し付け付勢される。図中符号 70 は錘、71 の電子天秤であり、回転体 20 のワーク 9 への押し付け荷重（及び荷重変化）を電子天秤 71 で詳細に測定し、パソコン 10 に記録できるように構成されている。

【 0 0 2 3 】

回転体 20 は、ワーク 9 に対面する外周面における研磨作用領域の外径（領域内の最大直径）が 5.0 mm 以下になるように構成され、回転体の直径（外周面の最大直径）は従来の回転ツールの直径と比較して小径に設定されている。具体的な弾性素材としては、フッ素ゴムを用いることが好ましい。回転体 20 の形状は、球状、部分球状、断面円のリング形状（トロイダル形状）その他、種々の形状が採用できる。

10

【 0 0 2 4 】

軸体 21 は、ステンレス等の金属シャフトを用いることができる。本実施形態では、軸体 21 の先端部をトロイダル形状の回転体 20 に嵌め込んで固定し、かつ該軸体 21 の基端部を回転支持部 22 に固定することにより回転ツール 11 が構成されている。回転支持部 22 は電動モータなどを用いることができる。そして、回転体 20 とワーク被加工面 90 との間に介在する砥粒が、回転体 20 に押さえつけられながら被加工面 90 上を転動して被加工面 90 を研磨する。

【 0 0 2 5 】

加工液供給手段 3 は、噴出ノズル 30 と、該ノズルから噴射してワーク被加工面 90 に当って落下する研磨加工液 8 を受け入れる、噴出ノズル 30 の周りの回収槽 31 と、回収槽 31 に受け入れて回収された研磨加工液 8 を再度、噴出ノズル 30 に供給して上方に噴出させるスラリー循環ポンプ 35 とよりなる加工液噴射ユニットが構成されている。研磨加工液 8 はこれら噴出ノズル 30 、ワーク被加工面 90 、回収槽 31 およびポンプ 35 の間を循環する。

20

【 0 0 2 6 】

研磨加工液 8 の液体は、有機粒子の分散性の点で純水または水を主成分とする液体であることが好ましい。有機粒子は、種々のものを採用でき、とくに高分子材料からなるアクリル粒子、ウレタン粒子、スチレン粒子など、密度 1 g / cm³ に近いものが好ましい。なかでもウレタンやアクリル（密度は共に 1.2 g / cm³ ）がより好ましい。異なる素材の有機粒子を混合してもよい。また、有機粒子の平均粒径は、5 μm 以上 30 μm 以下が好ましい。

30

【 0 0 2 7 】

ワーク保持機構 4 は、被加工面 90 を下方に向けたワーク 9 を上方位置において X Y Z 方向に移動可能に保持する X 軸ステージ 41 、 Y 軸ステージ 43 及び Z 軸ステージ 42 の 3 軸自動ステージより構成されている。ワーク保持機構 4 にワーク 9 を保持したまま回動させる回動機構（回転ステージ；ステージ）を付与すれば、ワークの位置に加えて姿勢を変えることができ、より加工の自由度を高めることができる。ワーク保持機構 4 や回転ツール 2 の支持台 60 の動作などを図示しないコンピュータにより数値制御することにより、回転ツール 2 と接触した状態のワーク 9 を動かし、被加工面 90 を自動で走査加工するように構成されている。

40

【 0 0 2 8 】

揺動手段 5 は、ワーク 9 を保持する保持体 40 を揺動方向に沿って案内するガイド機構 51 と、保持体 40 を揺動方向に沿って振動させる振動アクチュエータ 52 とを備えている。ガイド機構 51 はリニアガイドが好適であり、振動アクチュエータ 52 には圧電アクチュエータが好適である。圧電アクチュエータに正弦波の交流電流を流すことで、圧電アクチュエータの変位がガイド機構 51 を通じてワークに伝達され、ワークをガイド機構 51 の案内方向に沿って揺動させる。圧電アクチュエータとしては、たとえばメカノトランスマフォーマ社製の変位拡大機構型圧電アクチュエータなどを好適に用いることができる。

【 0 0 2 9 】

50

振動の振動数は0.1Hz以上、振幅は1μm以上とすることが好ましい。本実施形態では、ガイド機構51による振動の案内方向は、回転ツール2の被加工面90に沿った回転接線方向に直交する方向にまっすぐな方向とされ、この方向に振動されることになるが、本発明はこのような振動方向に限定されない。振動の様子も直線往復以外に曲線往復、無端状（ループ状）に回転振動など、種々の様子が可能である。

【実施例】

【0030】

<静止加工痕試験1>

図1に示した加工装置を用い、振動の振幅のみ変えて、静止加工痕（ツールの走査を停止した加工）の違いを確認する実験を行った結果について説明する。

10

【0031】

（加工条件）

- ・ワークの素材：石英ガラス
- ・研磨加工液：平均粒径10μmのアクリル粒子を10wt%で純水と混合したスラリー
- ・回転ツールの回転体の素材：フッ素ゴム
- ・回転ツールの回転体の外径：3mm
- ・回転ツールの押し込み深さ：400μm
- ・回転ツールの回転速度：2000rpm
- ・ワーク振動の振動数（圧電アクチュエータに入力する正弦波交流電流の周波数）：1Hz
- ・ワーク振動の振幅：0μm（振動なし）/1μm/5μm/10μm/20μm/30μm
- ・加工時間：5分

20

（結果）

結果を図2(a)～図2(f)に示す。各図の左側は、各振幅におけるスポット加工痕全体の走査型白色干渉計による計測結果、右側は深さプロファイルを示している。深さプロファイルのうちツール（回転ツール）の回転と垂直方向（被加工面に沿った回転接線方向に直交する方向）のプロファイルを比較すると、振動無しでは非常に表面粗さが粗いのに対し、振動の振幅を増やすほど表面が滑らかになっていく様子が確認された。また、振幅が大きくなるにつれて静止加工痕のサイズが肥大化する様子も確認された。

<静止加工痕試験2>

30

次に、図1に示した加工装置を用い、振動の周波数のみ変えて、静止加工痕の違いを確認する実験を行った結果について説明する。

【0032】

（加工条件）

- ・ワークの素材：石英ガラス
- ・研磨加工液：平均粒径10μmのアクリル粒子を10wt%で純水と混合したスラリー
- ・回転ツールの回転体の素材：フッ素ゴム
- ・回転ツールの回転体の外径：3mm
- ・回転ツールの押し込み深さ：400μm
- ・回転ツールの回転速度：2000rpm
- ・ワーク振動の振幅：10μm
- ・ワーク振動の振動数：0Hz（振動なし）/0.1Hz/1Hz/10Hz
- ・加工時間：5分

40

（結果）

結果を、図3(a)～図3(d)に示す。各図の左側は、各振幅におけるスポット加工痕全体の走査型白色干渉計による計測結果、右側は深さプロファイルを示している。深さプロファイルのうちツール（回転ツール）の回転と垂直方向（被加工面に沿った回転接線方向に直交する方向）のプロファイルを比較すると、振動数は0.1Hzでも十分に表面粗さの改善が確認された。ただし、これ以上振動数を上げても、さらなる改善は見られなかった。これは、0.1Hzの振動であっても加工時間5分の間にワークは30往復し

50

ており、十分に加工の平均化作用が行われたことによると考えられる。

＜走査加工痕の比較＞

回転ツールを送り（ワークを移動させる）ながら、一定範囲の走査（スキャン）加工を行い、走査ピッチの違い、及び搖動の有無による表面粗さの違いを確認する実験を行った結果について説明する。

【0033】

（加工条件）

- ・ワークの素材：石英ガラス
- ・研磨加工液：平均粒径 $10 \mu\text{m}$ のアクリル粒子を 10 wt\% で純水と混合したスラリー
- ・回転ツールの回転体の素材：フッ素ゴム
- ・回転ツールの回転体の外径： 3 mm
- ・回転ツールの押し込み深さ： $400 \mu\text{m}$
- ・回転速度： 2000 rpm
- ・ワーク搖動：搖動無し / 搖動あり（振幅 $30 \mu\text{m}$ 、振動数 90 Hz ）
- ・走査ピッチ： $10 \mu\text{m} / 50 \mu\text{m}$ （走査ピッチは図7参照）
- ・走査範囲：走査ピッチ $10 \mu\text{m}$ では $690 \mu\text{m}$ 四方、走査ピッチ $50 \mu\text{m}$ では $650 \mu\text{m}$ 四方
- ・加工時間：30分

（結果）

結果を、図4(a)～図4(d)及び図5に示す。図4の各図の左側が加工痕全体の走査型白色干渉計による計測結果であり、右側が加工部分の拡大像である。 $50 \mu\text{m}$ ピッチの搖動無しでは、走査ピッチに依存する表面粗さの悪化がみられたのに対し、 $50 \mu\text{m}$ ピッチの搖動ありでは、走査ピッチに依存する表面粗さの悪化は見られず、表面粗さが改善した。 $10 \mu\text{m}$ ピッチでは、搖動の有無で表面粗さは変わりなかった。すなわち走査ピッチに依存する表面粗さの悪化はみられず、これ以上の表面粗さの改善もなかった。

【0034】

図5は搖動方向の表面粗さのPSD（パワースペクトル密度）の比較を示す。 $50 \mu\text{m}$ ピッチの低い空間周波数では表面粗さの改善がみられるが、 $10 \mu\text{m}$ ピッチの高い周波数領域では搖動による表面粗さの改善がみられない結果が得られた。

【0035】

この結果から推測するに、搖動の平均速度が回転ツールの回転速度と比較して 1.7% 程度しかなく、粒子一つ一つの流れは搖動の影響をほとんど受けないことから、走査ピッチを細かくしてスポット加工時の縞の影響がそもそも出ない状況下では、搖動を加えても更なる表面粗さの向上は困難な状況下では、搖動を加えても表面粗さの悪化が改善される。これに対し、走査ピッチを上げた場合の表面粗さの悪化については、搖動により効果的に防止できることがわかる。

【符号の説明】

【0036】

- 1 修正研磨加工装置
- 2 回転ツール
- 3 加工液供給手段
- 4 ワーク保持機構
- 5 搞動手段
- 8 研磨加工液
- 9 ワーク
- 20 回転体
- 21 軸体
- 22 回転支持部
- 30 噴出ノズル
- 31 回収槽
- 35 スラリー循環ポンプ

10

20

30

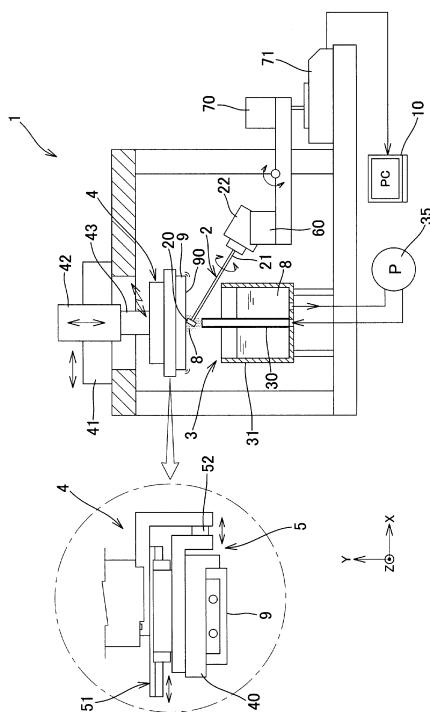
40

50

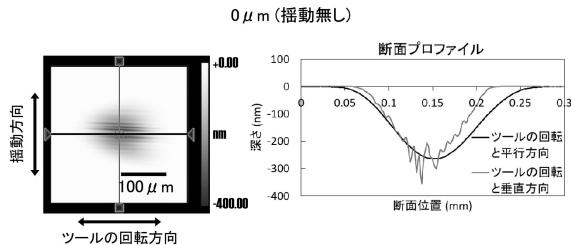
- 3 5 ポンプ
 4 0 保持体
 4 2 Z 軸ステージ
 4 1 X 軸ステージ
 4 3 Y 軸ステージ
 5 1 ガイド機構
 5 2 振動アクチュエータ
 7 0 錘
 7 1 荷重測定装置
 6 0 支持台
 9 0 被加工面

【図面】

【図 1】



【図 2 a】



10

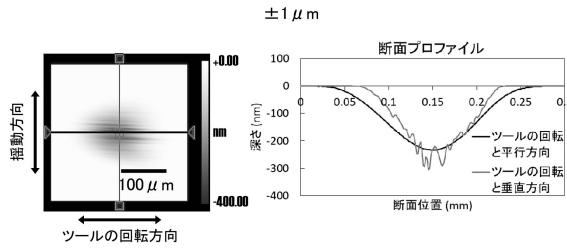
20

30

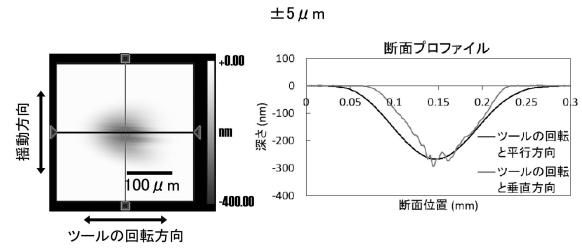
40

50

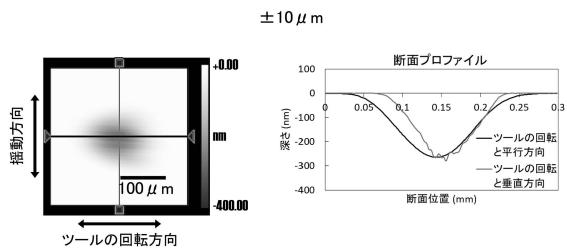
【図 2 b】



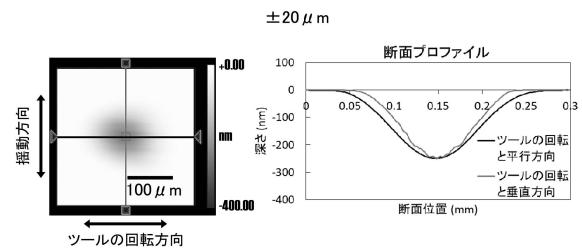
【図 2 c】



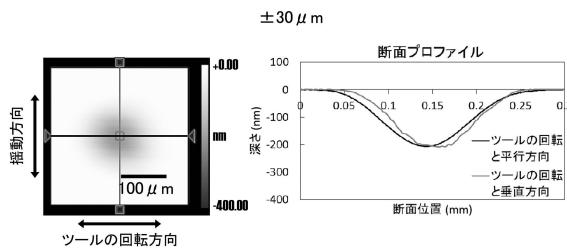
【図 2 d】



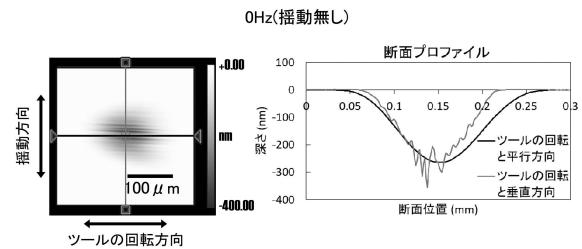
【図 2 e】



【図 2 f】



【図 3 a】



10

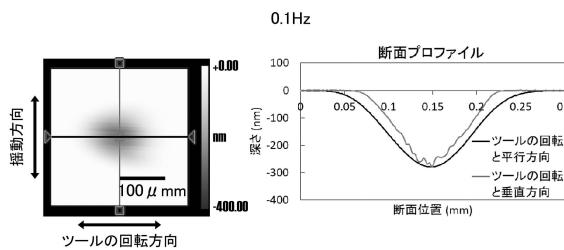
20

30

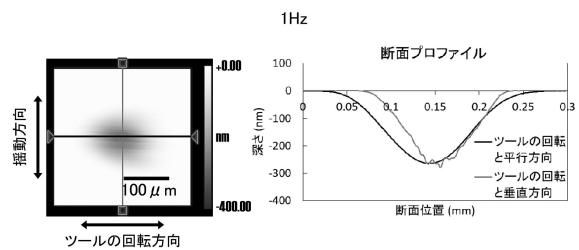
40

50

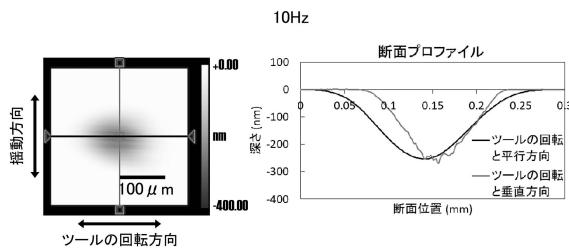
【図 3 b】



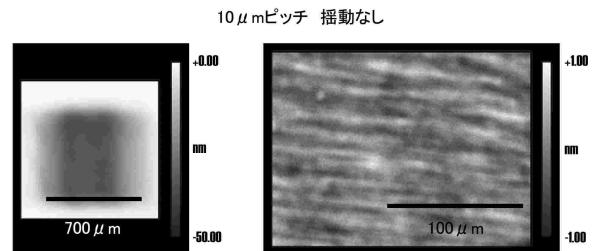
【図 3 c】



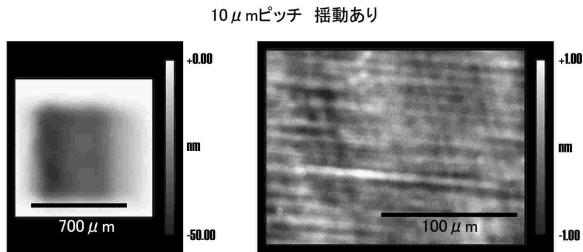
【図 3 d】



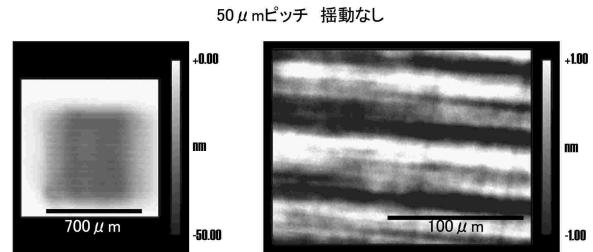
【図 4 a】



【図 4 b】



【図 4 c】



10

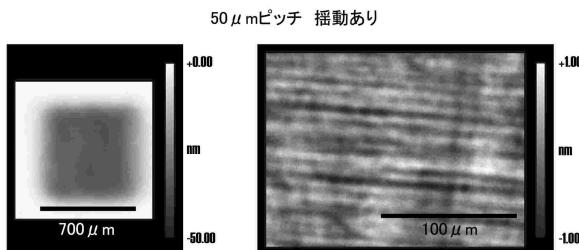
20

30

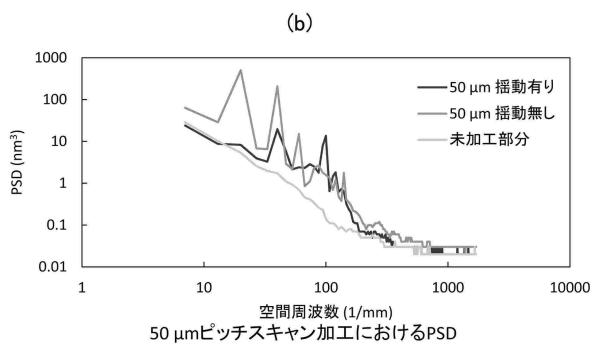
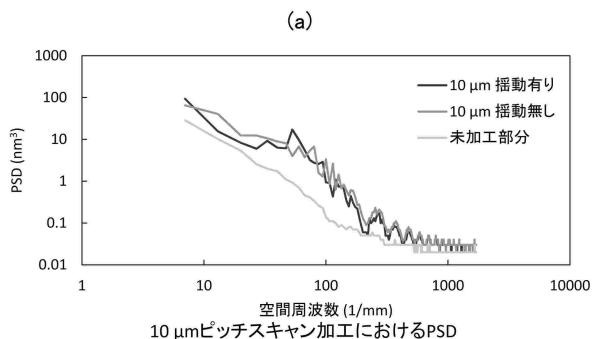
40

50

【図 4 d】



【図 5】

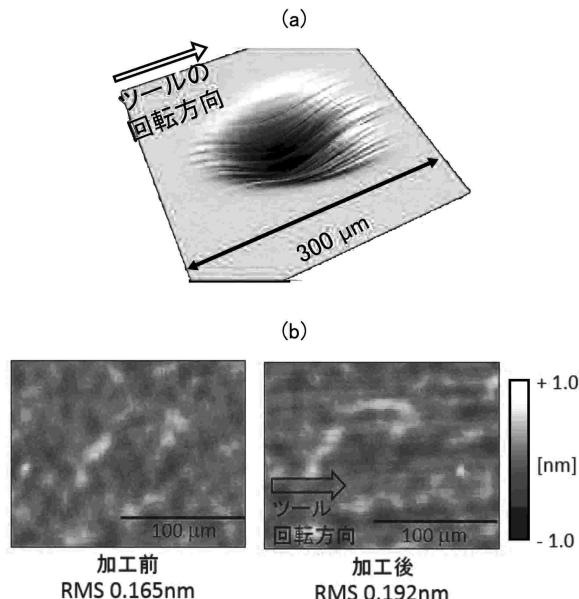


10

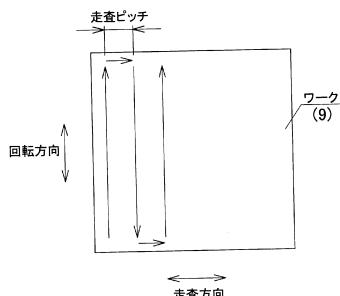
20

30

【図 6】



【図 7】



40

50

フロントページの続き

弁理士 中川 正人

(72)発明者 大出 龍一郎

東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大学法人東京大学内

(72)発明者 松澤 雄介

長野県飯田市鼎上茶屋3461番地 夏目光学株式会社内

(72)発明者 橋爪 寛和

長野県飯田市鼎上茶屋3461番地 夏目光学株式会社内

(72)発明者 三村 秀和

東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大学法人東京大学内

審査官 山村 和人

(56)参考文献 特開2020-025998 (JP, A)

国際公開第2016/199612 (WO, A1)

特開平09-225800 (JP, A)

特開2013-006267 (JP, A)

特開平02-198758 (JP, A)

特開昭62-193761 (JP, A)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

B24B 37/00 - 37/34

B24B 1/04