光放射圧を利用した微粒子操作による マイクロ加工に関する基礎的研究*

清水浩貴** 三好隆志*** 高谷裕浩*** 高橋 哲***

Study on Micro-Machining Using a Small Particle Controlled by Optical Radiation Pressure

Hiroki SHIMIZU, Takashi MIYOSHI, Yasuhiro TAKAYA and Satoru TAKAHASHI

This paper presents a new micro-machining using a small particle controlled by optical radiation pressure induced by focused laser light, which is based on laser trapping technology. It is known that the particle of several micrometer can be trapped and moved in liquid by optical radiation pressure force, which is as small as pN to nN. It is so called laser trapping technology. In this paper, the new micro-machining are proposed, that is using small dielectric particle like a diamond grain or a silica sphere, controlled by optical radiation pressure as a machining tool. In order to verify the feasibility of new micro-machining, at first, computer simulation of trapping force are performed. The simulation results suggest that the objective with larger numerical aperture and the particles with larger refractive index are suitable for this micro-machining. Second, fundamental experiments are carried out based on the simulation results. The laser trapped diamond grain is moved at the constant path in hundreds of times on the silicon wafer surface in the machining fluid. After that, the surface to be machined is observed by using AFM. From the AFM image, it is found that the diamond grain removes the silicon wafer surface with the depth of several nanometer, even if the pressure force is as small as 0.1nN. Furthermore, it is suggested that rotating diamond grain is more efficient for micro-machining than the non-rotating diamond grain, and that even a silica sphere with smaller refractive index will be able to perform micro-machining for the surface with low mechanical strength.

Key words: micro-machining, laser trapping, optical radiation pressure, mechanochemical polishing, diamond grain

1. 緒 論

現在、マイクロマシンの実現に向けて、マイクロ部品の製作、組立て、制御、エネルギー供給等、さまざまな方向から研究が進められている。

マイクロマシンの微小機構を構成する機械要素の製作技術としてこれまでに、半導体製造プロセス（フォトリソグラフィやエッチング技術）を応用する方法¹⁾、従来の機械加工²⁾や放電加工³⁾等を微細化・高精度化して微小な対象に適用する方法、STMの探針を使って原子レベルでの加工を行う方法⁴⁾など、多方面からのアプローチが試みられている。

最も代表的な、半導体プロセスを応用した微細加工法はマイクロメートルオーダの部品を一度に大量に生産することが可能であるが、一度製作した部品に追加加工や修正加工を施すのは困難である。従来の機械加工や放電加工を微細化する方法は加工能率が高く、さまざまな材質に対して適用できるという特長を有するが、マイクロメートルからナノメートルオーダの部品に適用するのは難しい。STMを用いた加工法は原子レベルの極微の加工が可能であるが加工能率が低いという問題点を持つ。このように、加工の柔軟性、加工寸法、加工精度、加工能率等の面でそれぞれ課題を残しており、新しいマイクロ加工法の開発が求められている。

そこで筆者らは、レーザー光の光放射圧を利用して微粒子操作を行うレーザトラッピング技術^{5,6)}を加工に応用し、微細除去

加工を行う新たな加工法を提案する。すなわち、集束レーザー光により発生する光放射圧を利用して、大きさが数 μm のダイヤモンド砥粒やシリカ球のような誘電体微粒子を捕捉、制御し、加工対象に押し付けながら繰り返し表面を走査する相対運動を与えることでナノメートルからマイクロメートルオーダの表面除去加工を可能にしようとするものである。

本加工法は光を用いて微粒子の操作を行うことから自由度の高い加工力制御や位置制御が可能であり、局所的な仕上げ加工、複雑な任意形状の微細加工や半導体部品や機械部品の修正加工、追加加工が可能と考えられる。

そこで、本手法の実現の可能性を検証するために、まずシミュレーションによる微粒子挙動の解析を行い、その解析結果に基づいて光学実験装置を製作し、基礎的なマイクロ加工実験を行った。その結果、本手法によるナノメートルオーダの除去加工の可能性を示唆する結果が得られたので報告する。

2. 光放射圧マイクロ加工の原理

2.1 光放射圧による微粒子の捕捉

光線は運動量を持った光子の流れであるとみなすことができ、反射や屈折に伴いその向きが変わるとき、光線の持つ運動量が変化する。例えば、図1に示すように屈折率 n_1 の媒質から屈折率 n_2 のような媒質に速度 c で光線が入射し、屈折する場合を考えると、光線が屈折により下方に向きを変えられ、光線の運動量の鉛直下向き方向の成分が増加する。ここで運動量保存則を適用すると、運動量変化の反力として境界面に式(1)で示されるような上向きの力が発生する。

$$F_i = \frac{n_1 I_i}{c} \cos \phi - \frac{n_2 I_t}{c} \cos \phi \quad (1)$$

* 原稿受付 平成11年8月16日

** 学生会員 大阪大学大学院 (現、東北大学工学研究科：仙台市青葉区荒巻字青葉01)

*** 正会員 大阪大学大学院工学研究科 (吹田市山田丘2-1)

Fig. 1 Principle of optical radiation pressure force

Fig. 2 Trapping a small sphere by optical radiation pressure force

F_t が屈折光の光放射圧により発生する力、 I_t が屈折光線のパワーを表す。また、このとき、運動量の水平方向成分は変化せず横方向には力は発生しないので、光放射圧による力 F_t は光が入射する面に対して常に垂直方向に発生することが知られている。

次に対物レンズにより集光されたレーザ光の焦点近傍に置かれた球体の微粒子上に発生する力について考える。図2に示すように粒子に対して垂直上方からレーザ光が入射するものとする。集束レーザ光を光線の集まりと考え、そのうちの1本(A-A')に注目する。対物レンズにより向きを変えられた光線は誘電体の球に入射し、その表面で屈折が起こる。また、球の中を通過した光は再び空気中に出るがこの時にも屈折が起こる。

光の屈折時には前述の通り表面に垂直な力が発生する。これらの力を光束中のすべての光線について合算するとこの球に働く力 F が求められる。この力 F は光軸上でビームウエスト面よりわずかに下方にある力の均衡点に向かって粒子を移動させようとする求心力として作用し、その結果、粒子は均衡点で三次元的に捕捉される。この現象はレーザトラッピングとして知られており、力 F をレーザトラッピング力（以下、簡単のためにトラップ力）と呼ぶ。

2.2. 光放射圧マイクロ加工の考え方

筆者らが提案する光放射圧マイクロ加工の概念図を図3に示す。例えばダイヤモンド砥粒のような微粒子をマイクロ加工ツールに見立て、上述のレーザトラッピング技術を用いて微粒子を加工試料に押し付けた状態でトラップすることができる。この状態で微粒子と試料間に外部から横方向の相対運動を与え、試料表面を微粒子で走査する。さらにトラップ粒子の回転運動や振動等を利用することで能率的に試料表面にナノメートルオーダーのマイクロ加工を実現しようとするものである。

Fig. 3 Concept of optical radiation pressure force micro-machining

Fig. 4 Simulation model

3. 光放射圧シミュレーション

3.1 解析モデル

光放射圧を利用したマイクロ加工に適した実験条件を求めるために粒子に発生する光軸方向（Z軸方向）のトラップカシミュレーションを行った。不定形粒子についてトラップ力を求めるのは一般に困難であるので、代表的な球形粒子に発生するトラップ力を求め、他の形状の粒子のトラップ力を推定した。粒子の大きさは数μmサイズと光線の波長よりも十分に大きいことから光線追跡法を用いて、屈折のみならず反射も考慮して粒子に発生する力を計算した。

シミュレーションによる光放射圧の計算に用いた解析モデルを図4に示す。入射する光線を一様な強度を持つ球面波と仮定し、入射光全体のパワーを P 、s 偏光および p 偏光に対する微粒子と媒質の境界における振幅反射率を R_s 、 R_p 、振幅透過率を T_s 、 T_p (R_s 、 R_p 、 T_s 、 T_p は n_1 、 n_2 、 θ の関数) と定義するとトラップ力 F は式 (2) で与えられる。

$$F = \frac{P}{2c\alpha} \int_0^\alpha (G_p + G_s) d\alpha$$

$$G_{p(s)} = \left\{ n_2 T_{p(s)} \cos \phi' - n_1 (R_{p(s)} + 1) \cos \phi \right\} \cos \psi_0$$

$$+ \sum_{i=1}^{\infty} T_{p(s)} R_{p(s)}^{i-1} \left\{ n_2 (R_{p(s)} + 1) \cos \phi' - n_1 T_{p(s)} \cos \phi \right\} \cos \psi_i$$

$$\psi_0 = \theta - \phi, \quad \psi_i = \begin{cases} \psi_0 - (\pi - 2\phi) i & Z_s \geq 0 \\ \psi_0 + (\pi + 2\phi) i & Z_s \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式 (2) よりトラップ力は入射光のパワーに比例し、粒径には

Fig. 5 The relationship between the trapping force and focusing position in z optical axis direction

依存せず、粒子の屈折率と開口数により決定されることが分かる。式 (2) を用いて粒子位置と粒子に働く Z 軸方向の力の関係を対物レンズの開口数 ($NA = n_1 \sin \alpha$) とトラップされる粒子の屈折率 n_2 をパラメータとして計算した。

3.2 解析結果

図 5 は粒子位置と、粒子に発生する Z 方向のトラップ力の関係を表したものである。

グラフの横軸は対物レンズにより集光されたレーザー光のビームウエストと粒子の中心の相対的位置関係を粒子半径 r で正規化したものである。例えば粒子中心とビームウエストが一致していれば 0、粒子がビームウエストより半径 r だけ下方にあるとき 1 となる。また、(a) (b) グラフ間の図が粒子とビームウエストの位置関係を模式的に表している。

グラフの縦軸は粒子に働く光軸方向の力を表し、正の値は粒子に引上げ力が発生すること、負の値は粒子に押付け力が発生することを表している。

図 5 (a) は対物レンズの開口数をパラメータにとって水中 ($n_1 = 1.33$) における、シリカ球 ($n_2 = 1.44$) の位置とトラップ力の関係を示したものである。どの開口数を取った場合でも粒子がビームウエストのわずかに下側に来るときに粒子に働く力が 0 となる。この位置が図 2 で述べた力の均衡点である。その位置より上側に粒子があるときには押付け力、下側に粒子があるときには引上げ力が発生し、その大きさはおよそ数 pN/mW 程度である。開口数と押付け力の関係をみると、開口数が大き

Fig. 6 Schematic diagram of optical radiation pressure force micro-machining

ければ大きいほど粒子に働く押付け力および引上げ力のピークが大きくなることが分かる。

粒子の屈折率をパラメータとしたときの水中 ($n_1 = 1.33$) における粒子位置とトラップ力の関係を図 5 (b) に示す。粒子の屈折率が 1.44, 1.6 の場合は押付け力、引上げ力ともに発生するが屈折率が大きくなるにつれて引上げ力のピークは低下し、押付け力のピークが増大している。さらに屈折率が 2.0 となると引上げ力は発生せず、粒子がどのような位置に来た場合にも押付け力が発生することになる。

以上のシミュレーション結果から、光放射圧を利用した加工を行うには、(1) より大きな開口数を持つ対物レンズを用いること、(2) 粒子中心より下側にレーザーのビームウエストを結ぶようにすること、(3) 屈折率の大きな粒子を用いること、が望ましいと考えられる。

例えば、ダイヤモンドの屈折率は 2.417 と非常に大きいため、常に押付け力が発生し、かつその押付け力の最大値も他の物質に比べて明らかに大きいことが分かり、ダイヤモンド砥粒はマイクロ加工ツールとして有効であると考えられる。

4. 実験方法

4.1 実験装置および実験手順

実験装置の概略図を図 6 に示す。この実験装置は加工微粒子をレーザートラップして加工試料に対する相対運動を与える部分と、実験中の様子を観察、記録する部分から構成されている。微粒子をトラップするためのレーザーは波長 488nm、最大出力 2.3W のアルゴンイオンレーザーを使用する。レーザーから出た光は倍率 40 倍、開口数 0.55 の対物レンズにより集光される。対物レンズの開口数 (NA) は可能な限り大きいほうが望まし

Fig. 7 Experimental view of rotating diamond grain

いが、操作上長い作動距離を確保する必要があり $NA=0.55$ のレンズを使用した。パーソナルコンピュータにより制御された数 nm オーダの精度を持つピエゾ三次元ステージ上に試料ホルダは置かれており、任意の軌跡で試料ホルダを動かすことができる。対物レンズより垂直上側の光学系は無限遠補正顕微鏡光学系となっている。その倍率は CCD の受光面において 600 倍であり、実験の様子はモニタ上で直接観察でき、同時に VTR に記録される。

試料ホルダ付近の拡大図を図 6(A) 部に示す。試料はスライドガラス上に配置され、試料の上部とカバーガラスの間は加工微粒子を含んだ加工液で満たされている。カバーガラス厚さ、試料表面とカバーガラス間の加工液層の厚さは共に約 0.15mm 程度に保たれる構造になっている。

4.2 トラップ粒子の動的運動特性

加工実験前の予備実験として、不定形のダイヤモンド砥粒（平均粒径 $5\mu\text{m}$ ）およびシリカ球（直径 $5\mu\text{m}$ ）のトラップ特性、すなわちトラップの難易やトラップされた不定形ダイヤモンド砥粒の動的な安定性や制御性を考察するために粒子と試料間に相対運動を与え追従性の検証実験を行った。

その結果、不定形ダイヤモンド砥粒は球形微粒子に比べるとトラップが難しく、安定してトラップされる砥粒の比率は必ずしも高くはなかった。しかし、安定したトラップに成功した砥粒については砥粒を試料に押し付けた状態で、速度数十 $\mu\text{m/s}$ 程度の相対運動を与えても砥粒は十分に追従することが確認できた。

図 7 に示すように、一部のダイヤモンド砥粒は回転した状態でトラップされるという現象が確認された⁸⁾。図中の下方に黒い長方形の 3 点が見えるが、これは加工実験を行った位置を特定するためにシリコン基板上に実験前に作成したマーキングである。その上側に見える細長い粒子がダイヤモンド砥粒であり、2 枚の連続写真を比較して見るとその向きが変わっていることから回転運動をしていることが分かり、またマーキングと砥粒の相対位置が変化していることから砥粒がトラップされ、基板に対する相対運動が行われていることが確認できる。

Table 1 Experimental conditions (Diamond grain)

	Non rotation	Rotation
Grain size	$6.5 \times 3.0\mu\text{m}$	$6.0 \times 2.5\mu\text{m}$
Number of trace	200 times	50 times
Traverse speed	$14.5\mu\text{m/s}$	$4.4\mu\text{m/s}$
Machining fluid	Solution of potassium hydroxide (KOH, pH11)	
Trapping laser	Ar ⁺ laser, $\lambda=488\text{nm}$, 0.1W	

Table 2 Experimental conditions (Silica sphere)

Workpiece	Silicon wafer coated with hydrocarbon
Particle size	$5\mu\text{m}$ (diameter)
Number of trace	300times
Traverse speed	$38.1\mu\text{m/s}$
Machining fluid	Water with surface active agent
Trapping laser	Ar ⁺ laser, $\lambda=488\text{nm}$, 0.1W

また、粒子によっては回転速度が 300rpm 以上と比較的高速回転するものも確認された。

直径 $5\mu\text{m}$ 程度のシリカ球をトラップした場合は形状が球形であることから安定してトラップすることが可能であった。さらに、より高速な動きに対しても追従可能であるなど、追従性についても不定形の粒子に比べ良好な結果が得られた。しかし、シリカは屈折率が 1.44 と低く、加工実験時に押付け力のピークが弱くなることがシミュレーションの結果から予想できる。また、球形シリカ粒子の光軸を中心とした回転運動はモニタ上で観察した限りでは確認されなかった。

4.3 実験条件と加工実験手順

加工微粒子として不定形ダイヤモンド砥粒を用いた場合の実験条件を表 1 に示す。4.2 節で述べたようにトラップ時に回転する砥粒が観察されたことから回転する砥粒と回転しない砥粒それぞれの中から長径が $6\mu\text{m}$ 程度、短径が $3\mu\text{m}$ 程度の粒子を選び出し、両者の加工特性を比較する実験を行った。表面加工痕の識別が容易に行えるように、加工試料として R_a が 1nm 以下であるような平坦性に優れたシリコンウエハを使用し、加工液としてシリコンウエハの研磨時に使用される KOH 水溶液 (pH11) を用いた。なお、砥粒をトラップするためのレーザーパワーは対物レンズの出射側で約 100mW である。

シリカ球を加工粒子に用いた場合の実験条件を表 2 に示す。シリカ球を用いた実験時には加工試料としてシリコンウエハ上に炭化水素（ハイドロカーボン）薄膜を 10nm 程度の厚さにコーティングしたものを用いた。なお、炭化水素薄膜は SEM の電子線照射によって形成することができ、STM の探針として用いられている例⁹⁾がある。

実験手順としては、まず加工液中の試料表面に存在する適当な微粒子をカバーガラスを透過した集束レーザー光によってトラップし、マーキングの近傍に移動させる。次に、試料を保持するステージの高さを変えることでレーザー光のビームウエストの位置を微粒子の中心からみると粒子半径分だけ下側の位置、すなわち加工基板上面の位置にビームウエスト位置を調整し、押付け力を発生した状態でトラップにする。この状態で x, y 面内で一辺 $10\mu\text{m}$ の "F" 型の繰返し運動軌跡を描くようにステージを動かし微粒子と試料間に相対運動を与えて加工を行う。

(a) Surface image

(b) Cross section of A-B

Fig. 8 Experimental results (Diamond grain, non-rotation case)

(a) Surface image

(b) Cross section of A-B

Fig. 9 Experimental results (Diamond grain, rotation case)

5. 実験結果

5.1 ダイヤモンド砥粒を用いた場合

図8に非回転砥粒による加工実験を行った領域(20μm四方)を原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて測定した結果を示す。

図中に「┐」型の凹部が観察できる。この凹部の形状および位置は実験時に粒子が移動した軌跡と一致していることから加工実験により発生した加工痕であることが分かる。加工痕の縦方向の溝幅は約5μm、横方向の溝幅は約3μmで縦の溝に比べ横の溝が細くなっているのが観察される。このような加工痕形状が得られたのは、実験時に細長い粒子の長手方向が横向きの状態であったためと考えられる。また、加工痕の断面プロファイルから溝の深さはおよそ1~2nm程度と極めて小さいことが分かる。

図9は約300rpmで回転した砥粒による加工実験結果 (AFM観察像) である。図中に「┐」型の加工痕が見られる。非回転粒子の場合と異なり、縦と横の溝幅はほぼ同じであり約3μmである。これは砥粒の回転によって不定形砥粒の平均形状が加工痕に関与しているため一様な溝幅の形状加工が行われたと考えられる。溝の深さは約3~4nmで、回転しない場合に比べて走査回数が少ないにもかかわらず、溝深さはほぼ倍になっている。以上の事実より、砥粒の回転が加工を促進しているものと推測できる。

5.2 シリカ球を用いた場合

シリカ球を加工に用いた場合の試料表面の観察像を図10に示す。ダイヤモンドの場合と同様に「┐」型の痕が観察できる。シリカ球の場合はハイドロカーボン層に対しての加工実験であり、シリコンウエハに対して加工を行ったダイヤモンド砥

(a) Surface image

(b) Cross section of A-B

Fig. 10 Experimental results (Silica sphere)

粒の場合の実験との直接比較はできないが、シリカ球を用いて加工実験を行った場合にも加工痕が観察された。加工痕の幅は約3μmではほぼ一定であり、また、深さは約4nmである。

この結果より、押付け力が弱く、また、ダイヤモンド砥粒ほ

Fig. 11 Mechanism of optical radiation pressure force micro-machining

どの硬度を持たないシリカ粒子であっても繰り返し走査することで比較的機械強度の弱い表面層であれば加工が可能になると考えられる。

5.3 加工メカニズムの検討

数十回から数百回の繰返し回数をもって深さ数 nm の加工が可能になるという実験結果から考えると 1 回の走査による除去量は原子スケールのオーダーである。また、トラップ力による物理的な除去加工のほかに光化学反応の作用も考えられる。そこで、推測の域は出ないが図 11 に光放射圧マイクロ加工のメカニズムの想像図を示す。

通常、シリコンウエハは原子がお互いに強い結合力により結びつけられていると考えられるが (a)、KOH 加工液の化学反応により活性化されたり、レーザ光によりエネルギー状態が変化して励起されたりすることで表面付近の原子間の結合力が弱まることが予想される (b)。このような状態では接触圧の低い粒子の弱い衝撃によっても比較的容易に表面原子が除去されるものと考えられる。ここでレーザトラップされた粒子がシリコンウエハ基板上を接触しながら移動すると、その表面原子は確率的に結合を断ち切り粒子側に再結合したりあるいは液中に分散し (c)、その結果基板表面の原子が減少するため、ナノメートルオーダーの除去加工が行われるものと推測される。

本手法による加工メカニズムは、液中に分散された微小粒子が試料表面を極めて低い接触圧で擦過することにより加工が行われている点で EEM⁽⁹⁾ と類似点がみられるが、レーザ光による加工の促進が行われている点、1 粒子のみを制御して限定された領域のみに加工が可能である点が異なっている。

6. 結 論

レーザトラップ技術を応用して数 μm の微粒子を集束レーザ光を用いて操作し、加工対象に対して相対運動させることによるマイクロ加工法を提案し次のような結論を得た。

- (1) シミュレーション解析から、集束レーザ光のビームウエスト位置が微粒子中心の下側に来るとき押付け力が発生し、その押付け力はトラップされる微粒子の屈折率が高いほど、また対物レンズの開口数が多いほど大きくなることを明らかにした。
- (2) レーザトラップしたダイヤモンド砥粒をシリコンウエハ表面に対して押し付けながら動かすことで深さ数 nm の痕が発生することを確認し、本手法によるナノメートルオーダーの除去加工の可能性を示唆する結果を得た。
- (3) 不定形のダイヤモンド砥粒をトラップしたところ、一部の砥粒は光放射圧で発生するトルクにより回転するのが観察された。また、この回転する砥粒は、回転しない砥粒に比べ能率的な加工が行える可能性を示唆する結果を得た。
- (4) ダイヤモンド砥粒に比べ、押付け力、硬度ともに低いシリカ球を加工砥粒として用いた場合にもハイドロカーボン薄膜のような比較的機械強度の弱い表面層に対しては加工が可能であることが分かった。

以上のように、本手法がナノメートルオーダーの加工の可能性を有することを確認できた。今後、加工メカニズムの検証や、より定量的な加工の評価を行うことを考えている。

謝 辞

本研究は平成 9、10 年度文部省科学研究費補助金（基盤研究 (B) (2)）の助成を受けて行われたことを付記し、感謝の意を表すものである。

参 考 文 献

- 1) M.Mehregany, S.F.Bart, L.S.Tavrow, J.H.Lang, S.D.Senturia and M.F.Schlecht : A Study of Three Micro-fabricated Variable-capacitance Motors, Sensors and Actuators, A21-23, (1990) 173.
- 2) K.Okano, T.Waida, T.Suto, J.Mizuno and T.Kobayashi : Micro-grinding of Micromachine Parts, Proc. Int. ABTEC (Abrasive Technology) Conf., Seoul, (Nov.1993) 100.
- 3) T.Masuzawa et al. : Wire Electro-discharge Grinding for Micro Machining, Ann. CIRP, 34, 1 (1985) 431.
- 4) 青野正和, 小林 中, F.Grey, 内田裕久, D.H.Huang, 吉信 淳 : 走査トンネル顕微鏡における探針と Si 表面との相互作用およびその原子操作への応用, 応用物理, 61, 12 (1992) 1264.
- 5) A.Ashkin : Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure, Phys.Rev.Lett., 24 (1970) 156.
- 6) A.Ashkin, J.M.Dziedzic, J.E.Bjorkholm and S.Chu : Observation of a Single-beam Gradient Force Optical Trap for Dielectric Particles, Opt. Lett., 11, (1986) 288.
- 7) Y.Takaya, H.Shimizu, S.Takahashi and T.Miyoshi : Fundamental Study on the New Probe Technique for the Nano-CMM Based on the Laser Trapping and Mirau Interferometer, Measurement, 25 (1999) 9.
- 8) 白井靖幸, 吉岡俊朗, 宮崎俊行, 井上 薫 : 光圧による微小物体の回転, 精密工学会誌, 60, 8 (1994) 1137.
- 9) Y.Akama, E.Nishimura and A.Sakai : New Scanning Tunneling Microscopy Tip for Measuring Surface Topography, J.Vac.Sci.Technol., A8, 1 (1990) 429.
- 10) 森 勇蔵, 山内和人, 遠藤勝義 : 極限精密加工技術, 精密工学会誌, 57, 1 (1991) 36.