

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 3 日現在

機関番号：20105

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560166

研究課題名(和文) 異方性エッチング加工による非対称微細構造表面におけるトライボロジ特性の解明

研究課題名(英文) Analysis of tribology characteristics of asymmetric periodic fabricated surfaces with anisotropic etching process of silicon wafer

研究代表者

三谷 篤史 (Mitani, Atsushi)

札幌市立大学・デザイン学部・講師

研究者番号：70388148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：10～100 $\mu\text{m}$ サイズの微小物体の振動輸送において、トライボロジ特性を考慮した微小物体の動特性を解明することを目的とする。これまでに、微小物体を輸送するために、非対称形状に加工したフィーダ表面を有するマイクロパーツフィーダを提案している。本研究では、面方位<221>結晶面を表面とするシリコンウェハの異方性エッチング加工により得られる非対称形状表面を開発した。微小物体の輸送実験を通してその適用可能性を検討すると共に、動き解析マイクロスコープを用いた微小物体の運動解析を通して輸送の安定性を検証した。

研究成果の概要(英文)：We previously showed that microparts can be fed along an asymmetric microfabricated surface using simple planar symmetric vibrations. Microparts move in one direction because they adhere to the microfabricated surface asymmetrically. In the present work, we applied the etching process of single crystal silicon to develop higher accurate and uniform asymmetric fabricated surfaces. Using a silicon wafer with a plain orientation of (221), an asymmetric periodic structure is generated on its surface because the etching speed is different between forward and backward of the crystal face. We examined the applicability for microparts feeding by experiments. We also analyzed the micropart movement using a movement analysis microscopic system then assessed the stability of microparts feeding.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学(設計工学・機械機能要素・トライボロジー)

キーワード：振動輸送 摩擦特性 トライボロジー 異方性エッチング 非対称性 機能性表面

1. 研究開始当初の背景

振動式パーツフィーダは、生産の自動化において重要な役割を果たしている。従来のシステムでは、斜め振動や機械的な傾き、正負方向の加速度変化により、非対称な慣性力を得ることで物体の輸送を実現している。一方、サブミクロンオーダーの物体においては、テーブルと微小物体間にはたらく摩擦力や凝着力の静的変化を利用して操作を実現している。これらの中間の大きさにあたる $1\sim 100\mu\text{m}$ オーダーの微小物体においては、フィーダテーブルの振動による慣性力だけでなく、表面との間に生じる摩擦力や凝着力の影響をも考慮する必要がある。

2. 研究の目的

これまでに、微小物体を輸送する機構として、非対称形状のフィーダ表面を有するマイクロパーツフィーダを提案している。これは、フィーダ表面にのこぎり歯などの非対称形状加工を施し、接触の非対称性を得ることで、対称な平面振動による一方向輸送を実現する。本研究では、 $10\sim 100\mu\text{m}$ サイズの微小物体の振動輸送において、トライボロジ特性を考慮した微小物体の動特性を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

微小物体の振動輸送を目的としたパーツフィーダにおいて、フィーダ表面に MEMS 技術の一つである異方性エッチングにより得られた非対称表面を適用した場合の輸送特性を検証する。面方位 $\langle 221 \rangle$ 面を切り出したシリコンウェハをエッチングすると、非対称三角形状が得られる。ここでは、これらの特性を利用して得られた様々な非対称周期構造を用いて微小物体の輸送実験を実施し、微小物体のトライボロジ特性を検証する。

4. 研究成果

(1) 異方性エッチングによる非対称表面の生成

面方位 $\langle 221 \rangle$ の面で切り出したシリコン基板を酸化膜で被覆し、その上からフォトレジストをスピニングで塗布し、フォトマスクとマスクアライナを用いて $5\sim 10$ マイクロピッチのライン&スペースパターンを生成する。パターンを現像した後、不要な酸化膜を除去し、シリコン基板をエッチング液に浸漬させる。これらの手順により、周期的な非対称三角形状を有する表面を生成する。

図 1 に、異方性エッチングにより得られた非対称形状表面を示す。各凸部は、Si 結晶面に応じた傾斜面を有している。また、各形状は均一性が高く、加工の安定性が高いことがわかる。しかしその一方で、凸部先端にマスクが残留しているのに加えてオーバーエッチングも生じており、表面の非対称性を低下させる要因となっている。そこで加工精度のより高いエッチングパラメータを検討した。

その結果、先端形状が改善されたエッチング加工表面を得た。加工表面の一例を図 2 に示す。凸部先端には平坦な部分が残っているものの、左右の傾斜面は異なった角度を有している。

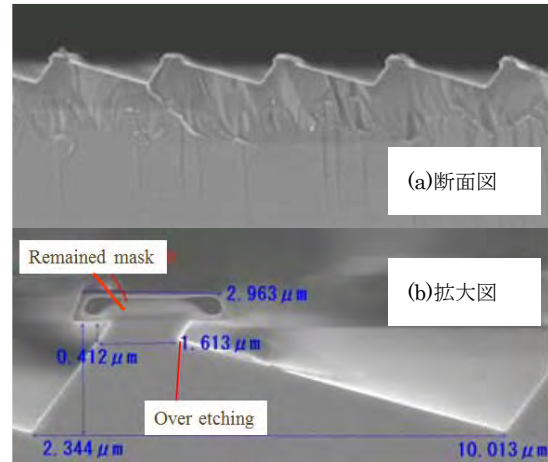


図 1 異方性エッチング加工表面

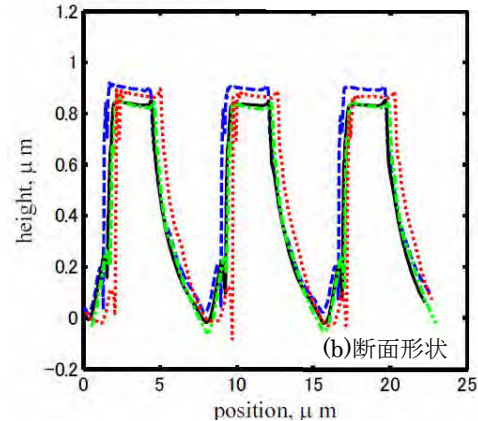
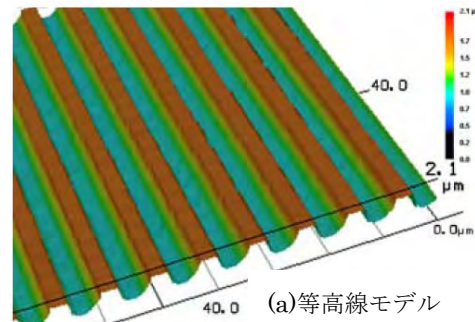


図 2 改善型異方性エッチング加工表面

これらの解析結果を基に、エッチング加工表面の幾何学的パラメータを定めた。ここでは、図 3 に示すモデルを仮定し、各部位のパラメータを計測により求めた。表 1 に、本

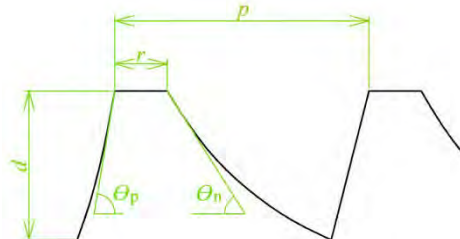


図 3 エッチング加工表面モデル

研究にて開発した異方性エッチング加工表面の実例を示す。

表 1 表面のパラメータ

表面	ピッチ $p, \mu\text{m}$	平坦長さ $r, \mu\text{m}$	溝深さ $d, \mu\text{m}$	左傾斜 $\theta_p^\circ$	右傾斜 $\theta_n^\circ$
A	6.94	2.60	0.90	53.84	13.13
B	7.00	2.53	0.78	58.30	13.74
C	6.99	2.86	0.65	82.20	14.92
D	6.97	2.81	0.65	74.24	15.10

### (2) 摩擦の非対称性検証

異方性エッチング加工表面における摩擦の非対称性を検証するために、微小物体の摩擦角計測実験を行った。微小物体として、0402型セラミックチップコンデンサ(0.4×0.2×0.2 mm, 0.1 mg)を適用した。摩擦の非対称性を検証するために、加工表面を時計回り(正方向)および反時計回り(負方向)に回転させる場合についてそれぞれ計測した。実験結果を表2および図4に示す。これは、10個の微小物体を用いて10回計測した結果である。回転角を90°まで上昇させ、各微小物体の落下角度を計測し、その平均値を計算するとともに、落下した微小物体の個数を数えた。また、非対称性については、角度の比、すなわち、負方向角度を正方向角度で割ることによって得た。この場合、比が1の時に非対称性を持たないことを示す。これらの結果より、全ての加工表面が摩擦の非対称性を有していることがわかった。特に、表面Bが最も非対称性が見られており、また、表面Cが最も微小物体が落下しにくい特性を有していることがわかった。これらの特性と表面科学的特性との関連性については、今後検討していく。

表 2 摩擦角計測実験結果

表面	正方向	負方向	比
A	51.23°	52.43°	1.024
B	56.69°	59.66°	1.052
C	55.06°	57.29°	1.040
D	56.23°	56.71°	1.008

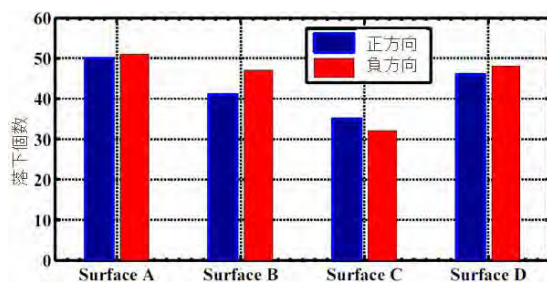


図 4 摩擦角実験における微小物体の落下個数

### (3) 微小物体の輸送実験とその運動解析

前項で示した加工表面を用いて、微小物体の輸送実験を実施した。実験装置を図5に示す。震動源として、バイモルフ圧電素子を用いている。フィーダテーブルはリニアガイドに取り付けられており、バイモルフの曲げ振動を矢印方向の直線振動に変換している。エッチング加工表面はフィーダテーブルの上に設置される。これらの装置を用いて、0402型セラミックチップコンデンサの輸送実験を実施した。結果を図6に示す。これらの結果より、全ての表面において一方向輸送が実現できた。最も高速な輸送を実現したのは表面Dであり、駆動周波数115.5 Hzにおいて39.7 mm/sを実現した。また、表面AおよびBは、駆動周波数110 Hzから120 Hzの間に微小物体が動かない周波数が存在するのに対し、表面CおよびDは広範な周波数で一方向輸送を実現している。これは、表面CおよびDの左傾斜が、表面AおよびBよりも大きいことが要因としてあげられる。理想的なのこぎり歯の場合、左傾斜角値は90°になるため、90°により近い表面CおよびDの方が安定した輸送を実現できたと考えられる。



図 5 マイクロパーツフィーダ装置

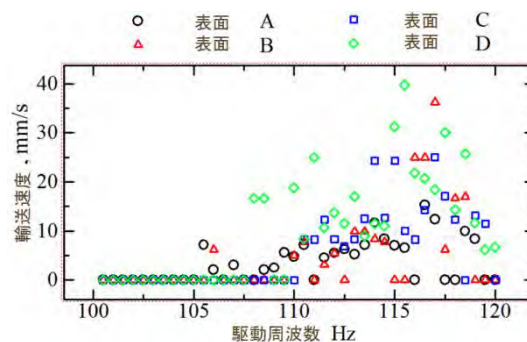


図 6 輸送実験結果

次に、微小物体の輸送時における運動解析を通して、輸送の安定性を検証した。検証には、Keyence製の動き解析マイクロスコープVW-6000を用い、500 fpsのフレーム速度で輸送の状態を撮影した。また解析方法としては、粒子追跡法(PTV: particle tracking velocimetry)を用いて行った。この解析方法では、撮影された動画をフレームごとに分解し、各フレームにおける微小物体の輪郭を抽出し、そこから微小物体の重心位置を検出する。その後各フレーム画像を合成することで、微小物体の動きを解析する方法である。



(図 7). この場合, 1 フレーム進むごとに時間は 2 ミリ秒ずつ進むため, フレーム間に進む距離を測定すれば, 移動速度も計算することができる.

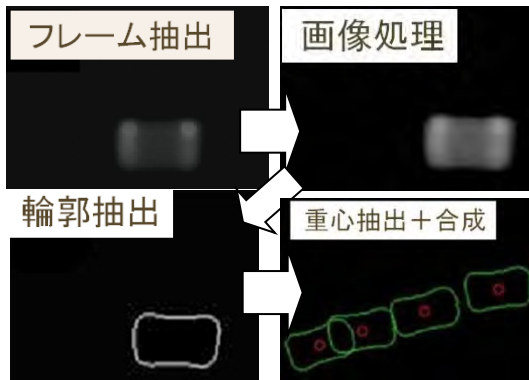


図 7 粒子追跡法 (PTV)

これらの手法を用いて, 微小物体の運動解析を実施した結果を図 8 に示す. 同図より, 表面 C および D 上の微小物体は, 時間に比例して輸送されているのに対し, 表面 A および D では断続的に停止しながら進んでいるのが分かる. したがって, 表面 C および D の方が, 表面 A および B よりも安定した輸送を実現できているのが分かる.

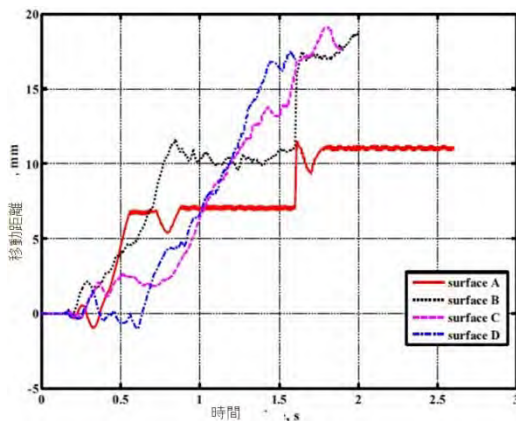


図 8 PTV による解析結果

また, 微小物体と加工表面の幾何学的な関係性が輸送におよぼす影響を検証した. 本研究では, 微小物体としてセラミックチップコンデンサを採用している. このセラミックコンデンサは, 用途に合わせて様々な大きさのものが用意されている(表 3).

表 3 セラミックコンデンサの種類(単位は mm)

種類	長辺, $l$	短辺, $w$	高さ, $h$
0402	0.4	0.2	0.2
0603	0.6	0.3	0.3
1005	1.0	0.5	0.5
1608	1.6	0.8	0.8
2012	2.0	1.2	0.6

そこで, セラミックコンデンサの長辺  $l$  を代表長さとし, 非対称加工表面のピッチ  $p$  との比 ( $l/p$ ) と輸送速度の関係性を検証した. 検証結果の一例として,  $l/p=20$  の時のフィード振動速度と微小物体の輸送速度との関係を図 9 に示す. これらの結果は, 微小物体のサイズと加工表面のピッチとの幾何学的な関係性が同一であっても, ピッチが大きいすなわち微小物体のサイズが大きい方が輸送速度は高速になることを示している. すなわち, 輸送対象物が小さくなるにつれて, フィード表面から受ける凝着力や摩擦力の影響が大きくなっていくことを示している. 今後は, 微小物体と加工表面との接触状態をより詳細に観察し, それが輸送におよぼす影響を検討していく.

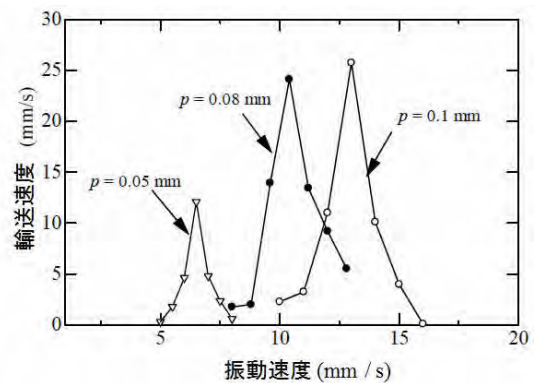


図 9  $l/p=20$  における輸送速度

また, 微小物体のダイナミクスをより詳細に解析するために, 空力抵抗を考慮したシミュレーションモデルを検討した. ニュートンの第 2 法則より, 駆動力と速度の関係は以下で表される.

$$m\vec{a} = \vec{F}_t \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで,  $m$  は微小物体の重量,  $\vec{a}$  は運動の加速度ベクトル,  $\vec{F}_t$  は駆動力ベクトルである. また, 駆動力ベクトルに摩擦力および空力抵抗を考慮すると, 駆動力ベクトルは以下のように書き換えられる

$$\vec{F}_t = \vec{F} + \vec{F}_d + \vec{F}_a \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで,  $\vec{F}$  はフィードの振動により伝えられる駆動力,  $\vec{F}_d$  は摩擦力,  $\vec{F}_a$  は空力抵抗を示す. 空力抵抗は, 微小物体とその周りの空気との摩擦により生じる力であり, 以下のように表すことができる.

$$\vec{F}_a = -\frac{1}{2}C_d A \rho ||v||\vec{v} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで,  $C_d$  は空力係数,  $A$  は微小物体の断面積,  $\rho$  は空気の密度である.

式(2)および(3)で示した駆動力をダイナミクスに反映させ, 微小物体の輸送シミュレーションを行い, 実験結果と比較した. シミュレーションには MATLAB を用いた. ここでは, PTV により得られた輸送速度の時間履歴を, 高速フーリエ変換(FFT)により周波数ス

ベクトルに変換し、その近似曲線を描き、加えてシミュレーション結果をプロットすることによって比較した。結果の一例を図 10 に示す。これらの結果から、空力抵抗を考慮したダイナミクスの方が、実験結果に近いシミュレーション結果が得られることが分かった。

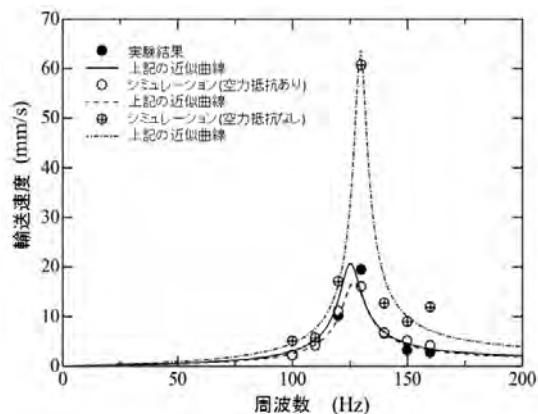


図 10 空力抵抗を考慮したダイナミクスによるシミュレーション結果

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

[1] Phuong Hoai Le, Thien Xuan Dinh, Atsushi Mitani, and Shinichi Hirai, Effect of Geometry Parameters of Saw-tooth Surface on the Feeding Velocity of Micro-parts, IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering, Vol.8, Issue S1, pp. S102-S105, 10.1002/tee.21925, 2013.

[2] Phuong Hoai Le, Thien Xuan Dinh, Atsushi Mitani, and Shinichi Hirai, A Study on the Motion of Micro-Parts on a Saw-Tooth Surface by the PTV Method, Journal of System Design and Dynamics, Vol.6, No.1, pp.73-80, 10.1299/jsdd.6.73, Feb., 2012.

[3] 松尾保孝, 三谷篤史: “微細加工技術による生物規範を取り込んだ機能性表面創製”, 新学術領域 生物規範工学ニュースレター No. 2, No. 2, pp.29-30, Oct. 25, 2013

[学会発表] (計 1 3 件)

[1]

Phuong Hoai Le, Thien Xuan Dinh, Atsushi Mitani, and Shinichi Hirai, “Feed and Align Microparts on Symmetrically

Vibrating Saw-tooth Surface”, The 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, Shenyang, China, (Accepted), June 29-July 4, 2014

[2] Atsushi Mitani and Yasutaka Matsuo: “Submillimeter Microparts Feeding Along With Asymmetric Surfaces Fabricated By Anisotropic Etching Process of Single-Crystal Silicon”, Procs. World Tribology Congress 2013, Torino, Italy, September 8-13, 2013

[3] Atsushi Mitani, Le Hoai Phuong, Yasutaka Matsuo, and Shinichi Hirai: “Improvement of Sawtooth Shape Generated By Anisotropic Etching Process of Single-Crystal Silicon For Microparts Feeding Using Horizontal and Symmetric Vibrations”, Procs. 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2013), Paper ThAT6.5, Wollongong, Australia, July 2013

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

該当無し

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

三谷 篤史 (MITANI ATSUSHI)

札幌市立大学・デザイン学部・講師

研究者番号：70388148

(2) 研究分担者

松尾保孝 (MATSUO YASUTAKA)

北海道大学・電子科学研究所・准教授

研究者番号：90374652