

のこぎり歯形状を有する表面によるマイクロパーツの輸送

○菅野 直人 (立命館大, 院), 三谷 篤史 (立命館大), 平井 慎一 (立命館大)

Micro-parts Feeding by a Saw-tooth Surface

Naoto Sugano, Ritsumeikan Univ., rr005002@se.ritsumei.ac.jp
Atsushi Mitani, Shin-ichi Hirai, Ritsumeikan Univ.

Abstract — This paper describes micro-parts feeding using a saw-tooth surface. First, we describe the principle of the proposed technique. Second, We show experimental results to examine whether the proposed method performs micro-parts feeding. Finally, we investigate the relationship between feeding velocity and driving force of feeder surface.

Key Words: A saw-tooth surface, micro-parts, feeding, directionality

1 はじめに

近年、電子機器の小型化に対する要求や、携帯電話などのモバイル機器の普及とともに、基盤実装用小型抵抗・コンデンサなどのマイクロパーツが大量に生産・消費されている。マイクロパーツのように微小かつ軽量の輸送対象物(ワーク)の輸送においては、重力など体積に比例する力に比して、接触面積に比例する凝着力の効果が支配的である [1]。これらの点に着目すれば、振動式フィーダの入力信号波形や駆動周波数を変更するよりむしろ、ワークとフィーダ表面の接触条件を変更する方が、ワークの運動により大きな影響を与えられる。

本研究では、フィーダ表面にのこぎり歯形状の溝加工を施し、正負方向の接触条件を変えることによって、対称な平面振動による輸送を実現する方法を提案する。本報告では、フィーダ表面にのこぎり歯形状を適用した場合の一方向輸送原理を示し、その実現性を実験により確かめる。また、パーツフィーダの駆動力と輸送速度の関係を示す式を導出し、その妥当性を実験により検証する。

2 輸送原理

本研究では、ワークとして積層型セラミックコンデンサを用いる。Fig.1(a)にワークの外観を、Table1にTDK製Cシリーズの仕様を示す。これらのワークは、セラミック誘導体部と両端の外部電極により構成される。Fig.1(b)は、2012型の表面を接触式あらさ測定器で計測した結果である。外部電極がセラミック誘導体部より約 $40\mu\text{m}$ 突出していることがわかる。したがって、

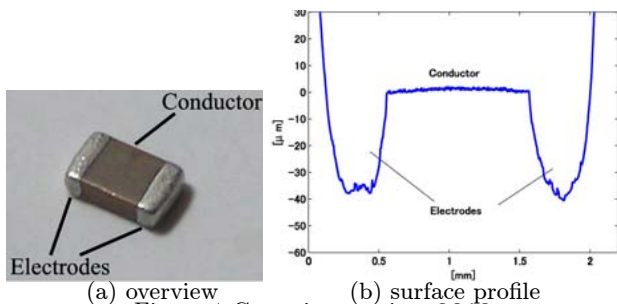


Figure 1 Ceramic capacitor 2012

Table 1 TDK C series specification

Type	Size(t × w × h[mm ³])	Weight[mg]
1005	1.0 × 0.5 × 0.5	1.2
2012	2.0 × 1.2 × 0.6	7.5

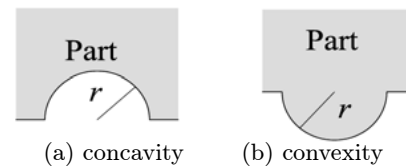


Figure 2 Surface model

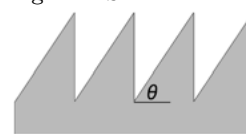


Figure 3 Saw-tooth surface model

パーツフィーダ表面との接触は外部電極において発生する。また、外部電極の表面は平らでなく、多くの凹凸が存在することがわかる。

ワークの外部電極表面に存在する凸部や凹部が、Fig.2に示すように半径 r の円弧であると仮定し、パーツフィーダの表面がFig.3で示すのこぎり歯形状であると仮定する。のこぎり歯の仰角を、Fig.3に示すように θ で表す。パーツの凹凸部とフィーダ表面ののこぎり歯一枚との接触は、Fig.4に示す先端接触と、Fig.5に示す斜面側接触に分けられる。一方向輸送を実現するには、先端接触状態ではすべりを生じさせず、斜面接触状態においてのみすべりを生じさせることが必要である。

Fig.4に示す先端接触において、パーツフィーダの振動による駆動力を F_p とする。パーツの凹凸とのこぎり歯の接触点と、凹凸を示す円の中心を結ぶ直線が水平線と成す角を ϕ とする。このとき、ワークに伝わる力は、次式で示すように法線方向の分力 $F_{np} = F_p \cos \phi$ と接線方向の分力 $F_{rp} = F_p \sin \phi$ で表される。ワークが十分軽量であるとし、接触点での摩擦係数を μ_e とすると、ワークとのこぎり歯の間にすべりが生じない条件は、式(1)

で与えられる.

$$F_{rp} - \mu_e F_{np} = F_p \sin \phi - \mu_e F_p \cos \phi < 0 \quad (1)$$

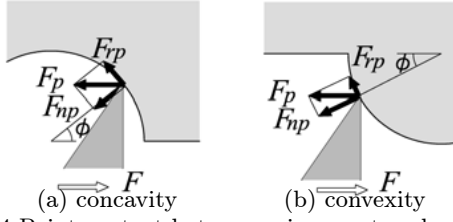


Figure 4 Point contact between micro-part and saw-tooth

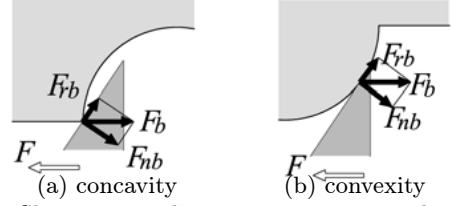


Figure 5 Slope contact between micro-part and saw-tooth

同様に, Fig.5の斜面接触において駆動力を F_b とすると, ワークに伝わる力は, 斜面の法線方向の分力 $F_{nb} = F_b \sin \theta$ と水平方向の分力 $F_{rb} = F_b \cos \theta$ で表される. 接触点での摩擦係数を μ_s とすると, すべりの生じる条件は以下の式で表される.

$$F_{rb} - \mu_s F_{nb} = F_b \cos \theta - \mu_s F_b \sin \theta > 0 \quad (2)$$

したがって, パーツフィーダ表面ののこぎり歯形状とワークの表面との接触状態が, 式(1)と式(2)の条件を同時に満たしたときに一方輸送が実現する.

次に, 輸送の方向性が得られない場合について考える. 式(1)が満たされない場合, 先端接触においてすべりが生じる. しかし, Fig. 4(a)に示す凹部での接触では接触位置の角度 ϕ が減少していき, 最終的に $\mu_e > \tan \phi$ が満たされるので, すべりの生じない条件での駆動となる. また, Fig. 4(b)に示す凸部の接触においては, ϕ が増加する方向へすべり, $\phi = 90^\circ$ を超えた時点で非接触運動へと移行する. しかし, 隣ののこぎり歯の先端が突起に接触し, すべりの生じない条件へ移行する. ただし, パーツフィーダの振幅が十分でない場合には, すべり状態からすべりの生じない運動状態への移行が行われにくく, 輸送効率が低下する.

3 実験装置

3.1 パーツフィーダ駆動装置

Fig.6に駆動システムの概略図を示す. アクチュエータとして, バイモルフ型圧電素子を2枚用いる. 一端を固定端支持としたバイモルフ型圧電素子の屈曲運動を, ベアリングを用いた回転端を介してフィーダテーブルに伝達し, フィーダテーブルの往復運動として得る機構である. 圧電素子の駆動信号源として関数発生器およびメスチック製の圧電アクチュエータ駆動用増幅器を用いる. フィーダ表面には, 表面加工を施したシリコンウエハを用いる.

3.2 フィーダ表面

パーツフィーダ表面として, のこぎり歯形状に加工したシリコンウエハを用いる. Fig.7(a)にシリコンウエハの断面図, Fig.7(b)に表面の顕微鏡写真を示す. シリコンウエハの加工には, のこぎり歯形状を形成するため, 三角形のブレードを用い表面に溝堀を行った. ここで, p はピッチ, l は切り込み長さ, d は溝深さ, θ は溝の仰角を示している.

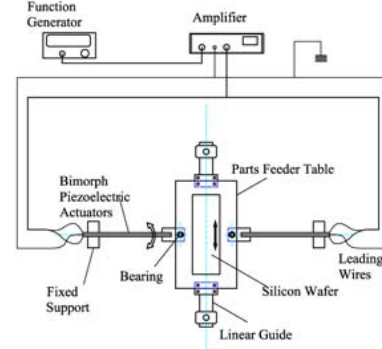


Figure 6 Driving system of the proposed mechanism

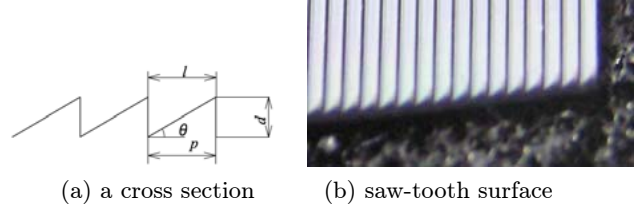


Figure 7 A saw-tooth surface of silicon wafer

4 溝加工による摩擦低減効果

接触面積を一定とし, 溝深さを変えた時の 2012 型の摩擦角を計測することにより凝着力の変化を確かめる. 溝のピッチを $p = 0.1\text{mm}$, 溝幅を $l = 0.05\text{mm}$, $\theta = 90^\circ$ とし, 溝深さを $d = 0\text{mm}$ から 0.09mm まで変化させた. Fig.8に, 横軸に溝深さ, 縦軸に各溝深さでの摩擦角 μ と未加工時の摩擦角 μ_0 との比 μ/μ_0 をとった場合の計測結果を示す. 溝深さ 0.001mm で摩擦角は未加工時の約 90%, 0.01mm で約 70% となり, その後はほぼ一定である. したがって, 接触面積を 50% にした場合には, 0.01mm 以上の溝深さで最大 30% の摩擦低減効果が得られる.

5 輸送実験

本研究では, セラミックコンデンサ 2012 型および 1005 型のワーク輸送の方向性を確認し, その後, 2012 型について輸送実験を行う. また, 本報告では, Table2 に示すフィーダ表面を用いて輸送実験を行う.

5.1 輸送の方向性

ワークの凹凸によりワークが一方へ輸送されることを確認するために, 凹凸のない試験用ワークとして $2.0\text{mm} \times 1.0\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ のシリコンウエハ片を用い, セラミックコンデンサとの運動を比較した. フィーダ表面には, $\theta = 30^\circ$ のシリコンウエハを用いた. のこぎり歯形状の傾斜面が奥行き側 (正方向配置) と手前側 (負方向配置) の場合の実験結果をそれぞれ Fig.9(a)(b) に示す. なお, A は 1005 型, B はシリコンウエハ片, C は 2012 型である. どちらの配置においても, 1005 型, 2012 型はそれぞれ前

Table 2 Surface shape parameter

Type	30°	60°
θ [deg]	30	60
p [mm]	0.1835	0.0557
l [mm]	0.1835	0.0557
d [mm]	0.1250	0.1250

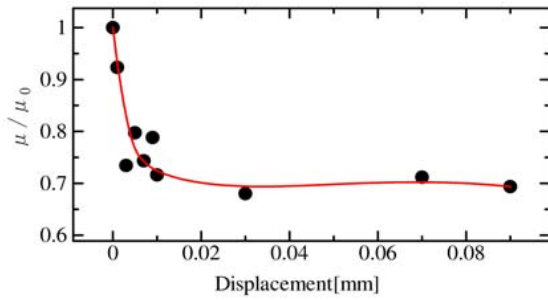
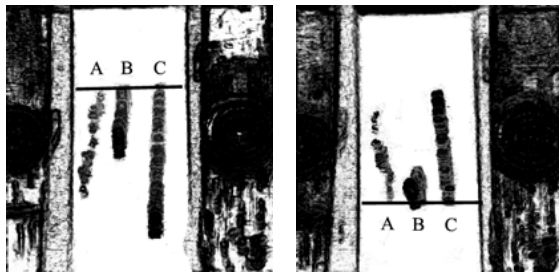


Figure 8 Relationship between friction and groove depth



(a) positive direction (b) negative direction

Figure 9 Directionality of feeding

進運動のみ見られたのに対し、シリコンウェハ片は前進・後退運動の両方が見られた。したがって、凹凸のないシリコンウェハ片では運動の方向性が得られず、凹凸のあるワークにおいては一方方向輸送が実現されることが確認された。

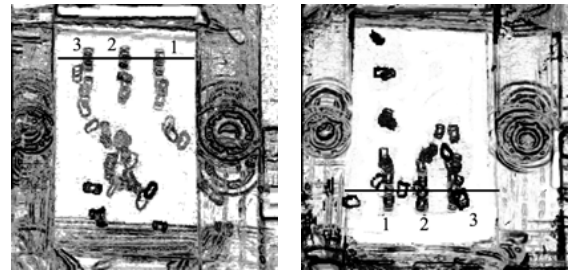
5.2 2012 型の輸送実験

5.2.1 $\theta=30^\circ$ 表面を用いる場合

フィーダ表面として、Table 2 に示す $\theta=30^\circ$ のシリコンウェハを用いて、のこぎり歯形状の傾斜面が奥行き側の場合（正方向配置）と手前側の場合（負方向配置）についてそれぞれ、2012 型のワークの輸送実験を行った。10Hz 駆動時で約 1 秒間撮影した実験結果を Fig.10(a)(b) に示す。この場合、駆動中にワークの回転や跳躍、横転が頻繁に生じており、輸送は不安定である。これは、フィーダの振動振幅が大きいために、フィーダ表面とワークの接触時における衝撃力が大きく、接触点を支点とした回転モーメントが発生し、ワークの先端が浮き上がる現象が起きたと考えられる。15Hz 駆動時の実験結果を Fig.11(a)(b) に示す。ここでは約 4 秒間撮影した。正負方向どちらも良好な実験結果が得られた。また、シリコンウェハの配置によってワークの輸送方向が反転することが確認された。Fig.12(a)(b) に、30Hz 駆動時において約 8 秒間撮影した結果を示す。この場合、運動の方向性はみられるものの輸送がほとんど行われておらず、輸送開始位置からほとんど動いていないワークが存在する。原因としては、フィーダの振動振幅が小さすぎたため、すべりを生じない接触状態への移行が行われず、良好な輸送条件が得られていないためであると考えられる。

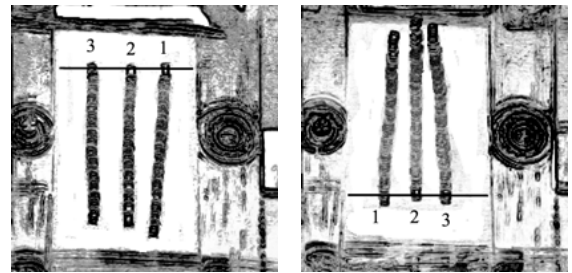
5.2.2 $\theta=60^\circ$ 表面を用いる場合

フィーダ表面を Table 2 に示す $\theta=60^\circ$ のシリコンウェハに変更し、前項の輸送実験で最も良好な結果が得られた 15Hz 駆動と同一の駆動条件で実験を行った。約 2 秒間の撮影結果を Fig.13(a)(b) に示す。正方向においては、ワーク 2 のみが約 2 秒で一番下まで到達している。また、ワーク 3 は輸送中に回転している。ワーク 1 においては半分程度の輸送しか行えていない。負方向においては、シリコンウェハの反転にもかかわらず、ワーク 1 は下方に



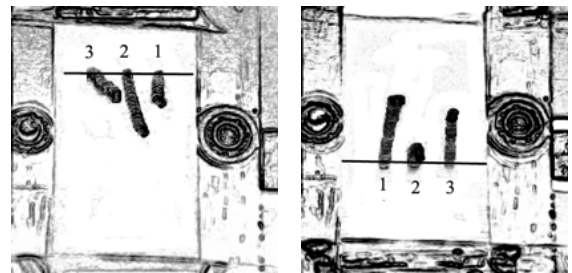
(a) positive direction (b) negative direction

Figure 10 2012 Motion at 10Hz square wave on $\theta=30^\circ$ surface



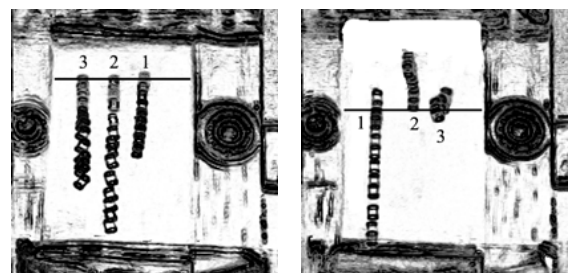
(a) positive direction (b) negative direction

Figure 11 2012 Motion at 15Hz square wave on $\theta=30^\circ$ surface



(a) positive direction (b) negative direction

Figure 12 2012 Motion at 30Hz square wave on $\theta=30^\circ$ surface



(a) positive direction (b) negative direction

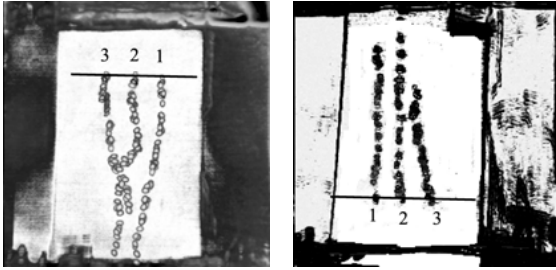
Figure 13 2012 Motion at 30Hz square wave on $\theta=60^\circ$ surface

進んでいる。ワーク 2、3 は上方方向に進んでいるもののほとんど輸送されていない。従って、 $\theta=60^\circ$ のシリコンウェハでは輸送の方向性は得られなかった。

5.2 項の実験よりも高速な輸送が実現できている理由は、 $\theta=60^\circ$ の表面が $\theta=30^\circ$ に比して凝着力の影響が小さいためである。また、運動の方向性が得られなかった理由としては、 $\theta=60^\circ$ では斜面接触点でのすべりが生じなかったためであると考えられる。

5.3 1005 型の輸送実験

実験条件は 5.2 項の 15Hz 駆動時と同一である。また、フィーダ表面として Table 2 の $\theta=30^\circ$ のシリコンウェハを用いた。約 5 秒間撮影した結果を Fig.14(a)(b) に示す。この場合において



(a) positive direction (b) negative direction

Figure 14 1005 Motion at 15Hz square wave on $\theta=60^\circ$ surface

もシリコンウエハの向きによって運動の方向が変わっていることがわかる。正方向においては、すべてのワークにおいて左右への運動が生じており、ワーク **3** は他のワークに比べて輸送距離が小さい。逆方向においては、ワーク **1**, **2** が直線的に動いているが、輸送距離にばらつきが生じている。

5.2 項と比較すると低速な駆動になっているのは、**1005** 型が **2012** 型より小型かつ軽量なために、フィーダの駆動により生じるワークの慣性力が小さくなり、相対的に凝着力の影響が大きくなったためであると考えられる。また、左右へのふらつきは、パーツの個体差やのこぎり歯形状の加工精度によって接触条件の変動が生じたためであると推察される。

6 フィーダの駆動力と輸送速度の関係

本研究にて提案したパーツフィーダは、フィーダテーブルの振動エネルギーを、フィーダ表面とマイクロパーツ間に働く表面力を介してマイクロパーツに伝達し、輸送を実現するシステムである。したがって、フィーダテーブルの振動エネルギーとマイクロパーツの輸送速度の間には、何らかの力学的な関係が存在すると推測される。そこで、フィーダテーブルの駆動力と輸送速度との関係を示す式を導出し、それを実験的に検証する。

6.1 関係式の導出

マイクロパーツの動力学方程式は、以下の式で表される。

$$F = m\ddot{x} + C\dot{x} \quad (3)$$

なお、 m はマイクロパーツの質量、 C は粘性摩擦係数である。ここで、 F はフィーダの振動により伝わるマイクロパーツの駆動力であり、フィーダの振動力に比例すると仮定する。すなわち、フィーダの質量を M_f 、振動振幅を A_f 、振動周波数を ω とすると、

$$F = S_f M_f E_0 \sin \omega t \quad (4)$$

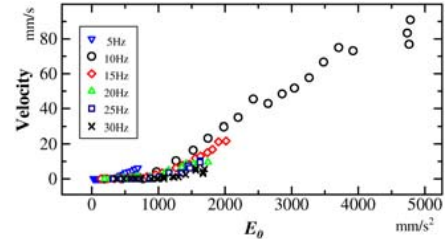
となる。ここで、 $E_0 \equiv A_f \omega^2$ である。また、 S_f はフィーダ表面からマイクロパーツに伝わる力の伝達係数であり、フィーダ振動の正負方向によって異なった値を持つ。また、マイクロパーツの質量は微小であり、慣性力の影響が無視できると仮定すると、(3) 式は以下のように書き換えられる。

$$\dot{x} = \frac{S_f M_f E_0}{C} \sin \omega t \quad (5)$$

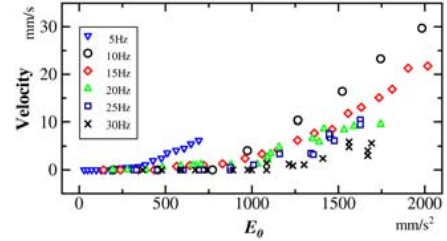
すなわち、マイクロパーツの輸送速度 $\dot{x} \equiv v_m$ は、フィーダテーブルの振動振幅と振動周波数の自乗に比例する。

6.2 駆動実験

ここでは、パーツフィーダの振動周波数を $f = 5, 10, \dots, 30$ [Hz]、駆動電圧を $V = 7.5, 15, 22.5, \dots, 150$ [V] とし、それぞれの駆動条件におけるマイクロパーツの輸送速度を計測した。横軸に



(a) overall



(b) An extended part of above figure ($E_0 < 2000$)
Figure 15 Relationship between feeding velocity and E_0

$E_0 = A_f \omega^2$ をとり、縦軸に輸送速度をとった場合の実験結果を図 15(a)(b) に示す。なお、図 15(a) は全実験結果であり、(b) は $E_0 < 2000$ となる部分を拡大した図である。

6.3 考察

図 15 より、 $E_0 < 300$ の領域では、各周波数での輸送速度がほぼ 0 となっている。これは、フィーダ表面とマイクロパーツとの間にはたらく静止摩擦力や凝着力に打ち勝つだけの駆動力が得られておらず、輸送が不可能であることを示している。5Hz 駆動では $E_0 > 300$ の領域、10Hz、15Hz 駆動では $E_0 > 750$ の領域において、マイクロパーツの輸送速度は駆動力に比例して増加している。5Hz 駆動の方が低駆動力での輸送が可能なのは、2 項で述べたように、フィーダの振動振幅が小さいと輸送効率が低下することが挙げられる。すなわち、同一の駆動力で比較した場合、低周波駆動の方がフィーダの振動振幅が大きいため、高効率な輸送条件となる。20Hz、25Hz、30Hz 駆動では、15Hz 駆動よりもさらにフィーダの振動振幅が小さいために輸送効率が低く、 $E_0 < 1000$ における輸送速度がほぼ 0 となっている。また、輸送が可能となる $E_0 > 1000$ の領域においてはばらつきが大きく、駆動力に比例して輸送速度が増加しているとは言い難い。これは、 $E_0 > 1000$ においてもフィーダの振動振幅が十分ではないことを示している。

これらの結果から、輸送速度はフィーダの駆動力に比例するものの、輸送が可能となる E_0 の条件は駆動周波数によって異なることが明らかになった。すなわち、式 (5) の S_f は、振動の正負方向だけでなく、駆動周波数にも依存することを示している。したがって、マイクロパーツの詳細な動力学方程式を導出するためには、これらの検討が必要であり、今後の研究課題としたい。

7 おわりに

本研究では、フィーダ表面にのこぎり歯形状を適用し、正負方向の接触条件を変えることにより一方向輸送を実現する方法を提案した。また、フィーダ表面にのこぎり歯形状を適用した場合の一方向輸送原理を示し、実験により確かめた。さらに、パーツフィーダの駆動力と輸送速度の関係を実験により検証した。

参考文献

- [1] 藤澤 悟, 安藤泰久, 榎本祐嗣: マイクロスケール摩擦と表面間力, トライボロジスト, Vol.44, No.6, (1999), pp.409-413.