

# 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 ～ のこぎり歯のピッチが輸送に及ぼす影響 ～

立命館大学 三谷 篤史, 菅野 直人, 平井 慎一

## Micro-parts Feeding by a Saw-tooth Surface

### Influence of pitch of saw-tooth surface on feeding

Ritsumeikan Univ. Atsushi Mitani, Naoto Sugano, and Shin-ichi Hirai.

This paper describes an analysis of dynamical behavior of the micro-parts feeding using a saw-tooth surface. Saw-tooth surfaces bring difference of contact condition at positive and negative direction, which realize unidirectional feeding of micro-parts with simple planar and symmetric vibration. In order to design an appropriate saw-tooth surface for various micro-parts, we need to understand influence of contact condition of saw-tooth surface with a micro-part. Spherical models are defined as an approximation of roughness of a micro-part surface. We derive statics of contact of these spherical models with a saw-tooth, and we derive dynamics of a micro-part. Then we conduct numerical simulation for feeding and assess the influence of pitch of saw-tooth surface on micro-parts feeding.

## 1 はじめに

筆者らは、図 1 に示す、のこぎり歯形状表面を有するマイクロパーツフィーダを提案している [1]。この機構は、振動式フィーダの表面にのこぎり歯形状の溝加工を施し、マイクロパーツとフィーダの接触条件を正負方向で変化させることで、対称な平面振動による一方輸送を実現する。このような機構においては、マイクロパーツ表面とのこぎり歯表面の接触状態によって、マイクロパーツの輸送条件が変化する。適切な接触条件が得られる表面形状を設計するためには、マイクロパーツの表面あさを把握し、それに応じたのこぎり歯表面を選択する必要がある。本報では、マイクロパーツの表面あさを球面でモデル化し、それらとのこぎり歯の接触状態を解析する。また、マイクロパーツの動特性モデルを導出し、のこぎり歯表面の振動による輸送におけるダイナミクスを導出する。さらに、それらのモデルを用いてシミュレーションを行い、のこぎり歯のピッチと輸送の関係を確認する。

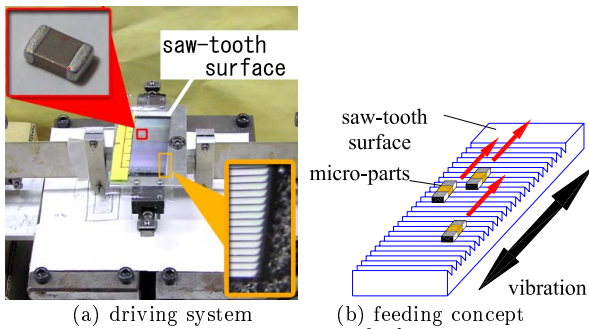


Fig. 1 Micro-parts feeder

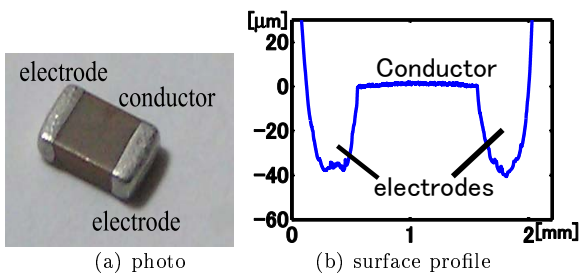


Fig. 2 Ceramic capacitor

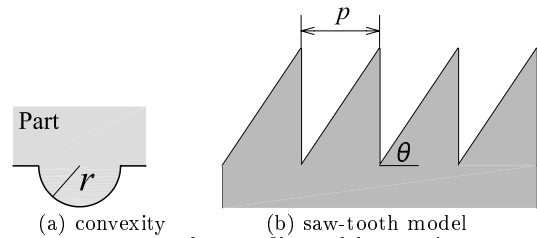


Fig. 3 Surface profile model: convexity

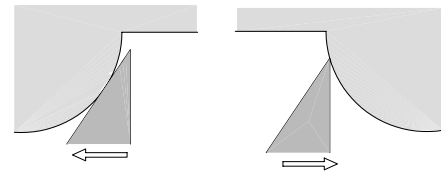


Fig. 4 Contact condition of a convexity and two saw-tooth

## 2 マイクロパーツのダイナミクス

マイクロパーツとして、基板実装用セラミックコンデンサを用いる。図 2(a)(b) に、セラミックコンデンサの外観および表面形状を示す。マイクロパーツの電極表面には、多くの凸部が存在する。本研究では、これらの凸部を半径  $r$  の半球面であると仮定し、それらとのこぎり歯が接触する場合について検討する。図 3(a)(b) に凸部モデルおよびのこぎり歯モデルを示す。凸部とのこぎり歯の接触においては、斜面と接触する場合 (図 4(a))、および先端と接触する場合 (図 4(b)) とに分けられる。ここでは、それぞれの接触状態において、のこぎり歯の駆動によって伝わる駆動力の静力学的関係を考える。

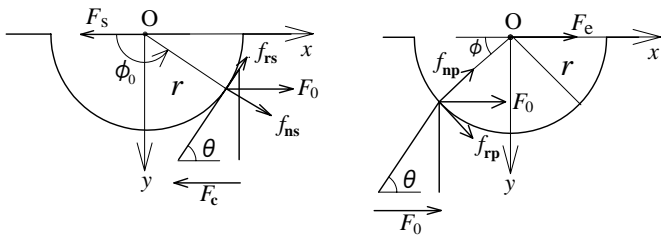
### 2.1 斜面接触

図 5(a) に示すように、凸部の中心に座標系  $O-xy$  をとる。また、斜面接触の接触角を  $\phi_0$  とする。いま、のこぎり歯の斜面が凸部に対して  $F_c$  の力で接触する場合を考える。このとき、凸部の駆動力は、凸部を左方向へ押す力と、のこぎり歯から受ける反力  $F_0 = -F_c$  により斜面を登る力の和で表される。斜面を上る力  $f_{rs}$  は、斜面と凸部の摩擦係数を  $\mu_s$  とすると以下のように表される。

$$f_{rs} = F_0 \sin \theta - \mu_s F_0 \cos \theta \quad (1)$$

したがって、凸部の駆動力  $F_s$  は以下の式となる。

$$F_s = F_c + f_{rs} \cos \theta = -F_0(1 - \cos \theta(\cos \theta - \mu_s \sin \theta)) \quad (2)$$



(a) slope contact (b) point contact  
Fig. 5 Statics of each contact condition

ただし、 $\cos \theta - \mu_s \sin \theta < 0$  となる場合には斜面でのすべりが生じないため、駆動力は  $F_s = F_c = -F_0$  となる。

## 2.2 先端接触

図 5(b) において、 $\phi$  を先端接触の接触角とする。のこぎり歯の先端が凸部に  $F_0$  の力で接触する場合、のこぎり歯から凸部に加わる力は、法線方向分力  $f_{ns} = F_0 \cos \phi$  と、のこぎり歯の先端が凸部をすべる場合に生じる摩擦抗力  $f_{rp} = \mu_e f_{ns}$  の合力である。なお、 $\mu_e$  は先端接触の摩擦係数である。凸部の駆動力  $F_e$  は、合力の  $x$  成分すなわち

$$F_e = f_{np} \cos \phi + f_{rp} \sin \phi = F_0 \cos \phi (\cos \phi + \mu_e \sin \phi) \quad (3)$$

となる。ただし、先端接触にすべりが生じない場合、すなわち  $\sin \phi - \mu_e \cos \phi < 0$  となるときには  $F_e = F_0$  となる。

## 2.3 運動方程式および駆動力

図 6 に示すように、のこぎり歯表面に基準座標系  $O - x_0 y_0$  をとり、基準座標系におけるマイクロパーツの位置および姿勢を  $P = (x_c, y_c, \phi_c)$  で表す。また、図 7 のようにマイクロパーツの重心を原点としたパーツ座標系  $G - x_g y_g$  を定義し、パーツ表面の凸部の位置および半径をそれぞれ  $c_i = (cx_i, cy_i)$ 、 $r_i (i = 1, 2, \dots)$  で表す。マイクロパーツの運動方程式は以下の式で表される。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_c \\ \ddot{y}_c \\ \ddot{\phi}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & 0 & 0 \\ 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\phi}_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $m$  および  $I$  はマイクロパーツの質量および慣性モーメント、 $c$  および  $d$  は並進および回転運動における粘性減衰係数である。マイクロパーツの駆動力およびトルク  $f = (F_x, F_y, \tau)^T$  は、それぞれの凸部が受ける駆動力の和から計算される。マイクロパーツの表面に  $n$  個の凸部があると、凸部  $c_i$  が受ける接触力を  $F_i$  とする。のこぎり歯表面は  $x_0$  軸方向に振動するため、 $F_i$  は図 7(b) に示すように  $x_0$  軸に平行に生じる。このとき、 $F_i$  によって生じる駆動力および駆動トルク  ${}^g f_i = ({}^g f_{xi}, {}^g f_{yi}, {}^g \tau_i)^T$  は

$${}^g f_i = (F_i \cos \phi_g, -F_i \sin \phi_g, -F_i (cx_i \sin \phi_g + cy_i \cos \phi_g)) \quad (5)$$

となる。最終的に、マイクロパーツの駆動力およびトルクは、マイクロパーツ座標系から基準座標系への変換行列  $R(\phi_g)$  を用いて以下のように表される。

$$f = R(\phi_g) {}^g f_{\text{total}} \quad (6)$$

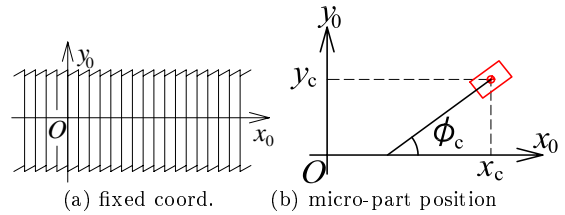
ただし、

$${}^g f_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n {}^g f_i, \quad R(\phi_g) = \begin{bmatrix} \cos \phi_g & -\sin \phi_g & 0 \\ \sin \phi_g & \cos \phi_g & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

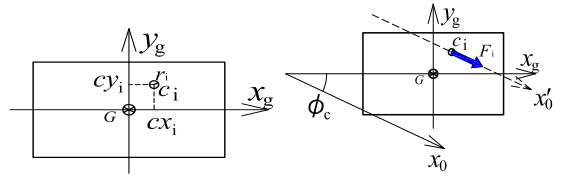
である。

次に、各凸部における接触力  $F_i$  について検討する。接触力  $F_i$  は、のこぎり歯と凸部の接触状態だけでなく相対的な運動によっても変動する。のこぎり歯と凸部が互いに離れる方向に運動する場合には、接触力は  $F_i = 0$  となる。また、凸部が小さいと、のこぎり歯との接触が生じない場合も起こりうる。したがって、接触力は以下ようになる。

$$F_i = \begin{cases} F_s, & \text{slope contact with pushing.} \\ F_e, & \text{point contact with pushing.} \\ 0, & \text{no contact or separated motion.} \end{cases} \quad (7)$$



(a) fixed coord. (b) micro-part position  
Fig. 6 Fixed coordinate system



(a) micro-part coord. (b) force vector  
Fig. 7 Micro-part coordinate system

## 4 シミュレーション

のこぎり歯の仰角を  $\theta = 30 \text{ deg}$ 、マイクロパーツの初期位置・姿勢を  $P_0 = (0, 0, \pi/2)$  とし、凸部が  $x_g$  軸上に一つ存在する場合のシミュレーションを行った。ここでは、輸送対象のマイクロパーツを 2012 型のチップコンデンサ (サイズ:  $2.0 \times 1.2 \times 0.6 \text{ mm}$ 、質量:  $7.5 \text{ mg}$ ) とし、凸部の位置を  $c_1 = (0.65 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ 、半径を  $r_1 = 0.05 \text{ mm}$  とし、のこぎり歯のピッチを  $p = 0.25, 0.167, 0.125, 0.1, 0.083, 0.071, 0.0625 \text{ mm}$  とした場合について行った。この場合、マイクロパーツは  $x_0$  軸の正方向に動きながら、凸部  $c_1$  による回転モーメントが  $\tau = 0$  になる姿勢すなわち  $\phi_g = 0 \text{ deg}$  に近づいていくことが予想される。シミュレーション結果を図 8 に示す。これらの図において、(a) は  $x_0$  軸方向の輸送距離、(b) は姿勢を示す。 $p = 0.167, 0.0625 \text{ mm}$  においては、位置・姿勢とも初期状態から動いていない。輸送速度のピークは  $0.083 \text{ mm}$  であり、 $p = 0.1 \text{ mm}$  においてもほぼ同等の輸送結果が得られている。また、 $p = 0.125$  および  $0.071 \text{ mm}$  においては、 $p = 0.083 \text{ mm}$  よりも低速であるものの、位置・姿勢とも予測された運動が行われている。これらのことから、ある大きさの凸部に対して、最も良好な輸送条件が得られるのこぎり歯のピッチが存在することがわかる。したがって、よりよい輸送条件を得るためには、マイクロパーツの表面あらさに応じてのこぎり歯表面を設計する必要がある。すなわち、マイクロパーツ表面の精密な計測およびモデリング手法の確立が必要である。

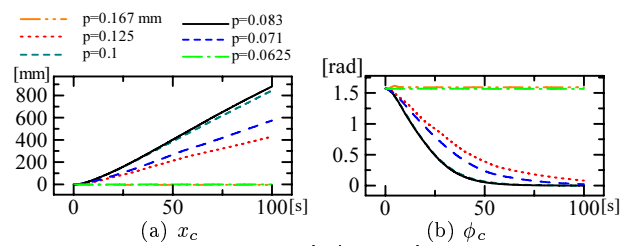


Fig. 8 Simulation results

## おわりに

本稿では、マイクロパーツの表面あらさモデルとのこぎり歯表面モデルの接触状態を解析し、さらにマイクロパーツのダイナミクスを導出した。それらの式を用いてシミュレーションを行い、のこぎり歯のピッチが輸送に及ぼす影響について考察した。

## 参考文献

- [1] 三谷 篤史, 菅野 直人, 平井 慎一: 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, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.71, No.704, pp.1169-1176(2005-4)。