研 究

回転-往復動型のすり合わせラッピング における形状生成過程*

田 中 国 弘** 田 中 芳 雄*** 井 戸 守***

Characteristics of the Surface Generation
Process in the Rotation/Reciprocation
Lapping

Kunihiro TANAKA, Yoshio TANAKA
and Mamoru IDO

Characteristics are investigated about the generation of surface shapes of upper and lower workpieces in the rotation/reciprocation lapping which has been used to produce camera lens and so on. Simulations are made in two different cases of upper workpiece rotation during reciprocation, one by driving force, the other by frictional force between upper and lower workpieces. The latter is

carried out in experiments. Simulated and experimental results show that the changing process of the surface shapes of the upper and lower workpieces preserves two fundamental properties which have been cleared to govern the process in the reciprocation lapping. Moreover, based on these properties, the process is shown to be able to be described by the same kind of linear differential equation that has been applied to represent the process in the reciprocation lapping.

Key words: lapping characteristics, lapping process simulation, surface generation equation, surface generation process, rotation/reciprocation lapping, reciprocation lapping.

1. 緒 言

本研究は、レンズ加工等に用いられているラッピング方式である往復動運動に回転運動を組合せた回転-往復動型のすり合わせラッピングで生成される上、下試料の表面形状の生成過程を、シミュレーションと実験との両面から明らかにしようとするものである。

既報^{1)~4)}においては、すり合わせラッピングにおける表面形状の変化過程を支配する主因子を抽出するため、往復動型のラッピング装置を用いて追究してきた。その結果、形状生成過程には二つの基本特性が存在することがわかり、これらの基本特性を基にして線形ベクトル微分方程式でその過程の記述を行った。

そこで本報は、上試料を強制回転させる場合と下試料から受ける摩擦により上試料を自由回転させる場合とにおけるすり合わせ過程のシミュレーションおよび後者の場合の実験を行い、回転-往復動型のラッピング方式で生成される表面形状の変化を調べた。このラッピング方式における形状変化過程を往復動型の場合の形状変化特性¹⁾を基にして考察し、その変化過程の線形ベクトル微分方程式による表現を検討した。

* 原稿受付 昭和54年6月8日。精機学会昭和54年度関西地方定期学術講演会(昭和54年7月12日)にて発表。

** 学生会員 大阪府立大学大学院(堺市百舌鳥梅町4丁804)

*** 正 会 員 大阪府立大学工学部

2. シミュレーションの概要

すり合わせ過程のシミュレーションで設けた仮定は以下に列挙する通りである。

- (1) 上、下試料の初期の表面形状は基本形状として回転放物面を想定し、それに正規乱数を加えたもので与える。
- (2) 砥粒位置および砥粒径はそれぞれ一様乱数および正規乱数で与える。また各砥粒の負担荷重は各々の砥粒のくい込み量に比例する。さらに砥粒は剛体とし、破碎も摩耗もしない。
- (3) 各砥粒の切削量は上試料の中心に加える集中荷重に対して力学的平衡が成立するときの砥粒のくい込み量と、それぞれの作用砥粒位置におけるラッピング速度の大きさとに比例する。

また上試料を自由回転させる場合、さらに次の仮定を設けている。

- (4) ある時刻から次の時刻に至るまでの上試料の回転角速度の増分は、その時刻において下試料から受ける摩擦力による回転モーメントに比例する。ここに下試料から受ける摩擦力は各砥粒のくい込み量に比例した大きさであり、それらの作用砥粒位置でのラッピング速度の方向に作用する。

以上のシミュレーション仮定を基に次のようにしてすり合わせ過程をシミュレートしている。まず図1はすり

図1 座標系の設定

合わせ時の上, 下2面に対して設定した座標系を示したものである。図中の (X, Y) 系は空間固定座標系であり, 原点 O は下試料中心である。 (x', y') および (x'', y'') 系はそれぞれ下試料および上試料に固定した座標系であり, 各々の原点は各試料中心 O' および O'' である。また N_1 および N_2 は下試料および上試料のそれぞれの回転数を表し, 図中に示す矢印の向きに各試料が回転とする。このときの (X, Y) 系からの (x', y') および (x'', y'') 系のラップ時間 t におけるそれぞれの回転角を θ_1, θ_2 で示し, 上試料の往復動による下試料中心 O' から上試料中心 O'' までの移動距離を x_g で表す(ただし上, 下試料はぴったり重なり合った状態からすり合わせを行う)。さらに (r, θ) は上試料の点 A を極座標表示したものである。さて上試料が図中に示す方向に移動する場合, 上試料の点 A におけるラッピング速度 V は上, 下試料の回転および往復動によるそれぞれの速度 V'', V' および V_g の和であり, 幾何学的な関係から (X, Y) 系で表せば次式となる。

$$V = \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x_{g0} \cdot \omega_g \cdot \cos \omega_g t - (\omega_1 - \omega_2) \cdot r \cdot \sin(\theta + \omega_2 t) \\ x_{g0} \cdot \omega_1 \cdot \sin \omega_g t + (\omega_1 - \omega_2) \cdot r \cdot \cos(\theta + \omega_2 t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここに, $x_g = x_{g0} \sin \omega_g t$, $2x_{g0}$: 往復動ストローク, $\omega_g = 2\pi N_g$, N_g : 往復動回数, $\omega_1 = 2\pi N_1$, $\omega_2 = 2\pi N_2$ 。

また上試料面上の点 $A(x'', y'')$ は, 幾何学的な関係から次式で表される下試料面上の点 (x', y') に対応する。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{g0} \cdot \sin \omega_g t \cdot \cos \omega_1 t + r \cdot \cos(\theta - (\omega_1 - \omega_2) \cdot t) \\ -x_{g0} \cdot \sin \omega_g t \cdot \sin \omega_1 t + r \cdot \sin(\theta - (\omega_1 - \omega_2) \cdot t) \end{pmatrix} \quad (2)$$

上式を用いて上, 下試料面上の対応点を以下のようにして決めている。すなわち図中に示すように上, 下試料のラップ面をともに正方形格子(直径 $50 \cdot \Delta R$)で分割し, その

図2 実験装置

中心を代表点に取る。ここに $\circ, \bullet$ 印はそれぞれ上, 下試料の代表点を示す。そして上試料の代表点に対して式(2)の関係を満たす点が属する下試料の正方形格子を判定し, その正方形格子の代表点と上試料の代表点とが対応すると考えた(当然のことながら同一正方形格子内に二つの代表点を含めないようにし, また格子線上に上試料の代表点が存在する場合, いずれかの正方形格子内に含まれるようにしている)。こうして求めた上, 下試料の対応点に対して, シミュレーション仮定に基づく力学的平衡を満足する作用砥粒位置および砥粒のくい込み量を往復動型の場合のアルゴリズム¹⁾を用いて決定し, 式(1)で作用砥粒位置におけるラッピング速度を求め表面の除去を行った(上試料を自由回転させる場合の上試料の回転角速度 ω_2 の算出については後節で述べる)。一方, 表面形状は一定ラップ時間ごとに回転放物面 $z = a(x^2 + y^2) + c$ で近似し, 最小二乗法を適用して求まる2次項の係数 a を表面形状の代表値としてすり合わせ過程の形状変化過程を調べた。

3. 実験方法

上試料が下試料から受ける摩擦により自由回転できる構造の回転-往復動型の装置を製作した。その装置の主要部の構造を図2に示す。図中の①, ②はそれぞれ上試料および下試料であり, 上試料はボール③の回りに自由に回転でき, しかも自由な姿勢を取ることができるようにしている。またローラベアリング上のブロック⑦の往復運動を⑥, ④および⑤を介して上試料に伝達した。ラップ圧力は鉛直面内で回転可能な腕④, 負荷軸⑤の自重およびおもりによって与えた。さらにラッピングは下試料保持具に取付けたラップ液容器⑤の中で行い, 一定ラップ時間ごとに⑧とともに上試料を持ち上げ, 上, 下試料間に新しいラップ液を入れて再びラッピングを行うという方法を繰返した。この一定ラップ時間間隔を以

図3 上試料の中心が下試料面上に描く軌跡

下では‘ラップ継続時間 L_T ’と呼ぶことにする。一方、表面形状は一定ラップ時間ごとに小坂式 SE-3 型万能形状測定機で試料を 22.5° ずつ回転して 8 か所を 30 mm にわたり測定した。そして各プロファイルから 5 mm 間隔に 56 個の形状高さを読取り、シミュレーションの場合と同じく回転放物面で近似して表面形状を表現した。

実験条件は以下に示す通りである。

工作物（上，下試料）： 鋳鉄（FC 20）

試料寸法： $\phi 40$ mm

往復動ストローク： 20 mm（試料直径の 1/2）

往復動回数： 45 回/min

下試料回転数： 67 rpm

ラップ圧力： 2.5×10^{-3} kg/mm²

ラップ剤： GC # 400

工作液： 菜種白絞油

ラップ液濃度： 30% 体積比

4. 結果および考察

シミュレーションにおいては、上試料を強制回転させる場合と自由回転させる場合のいずれに対しても、往復動回数 N_g と下試料回転数 N_l との比 N_g/N_l を 1/2 とした。このときの上試料の中心が下試料面上に描く軌跡の 1 周期を図 3 に示す。この軌跡を一定ラップ時間で 20 等分し、各分点間を直線で近似した軌跡として扱った。ここに図中の ● 印はすり合わせを行った点を表す。

図 4 は上試料を強制回転させた場合のシミュレーション結果であり、上，下試料の表面形状を往復動型の場合³⁾と同じくベクトル $\mathbf{a} = (a_1, a_2)^T$ （肩の T は転置を示す）と定め、その変化を (a_1, a_2) 面上に表したものである（ここに添字 1, 2 はそれぞれ下，上試料に対するもの）。ここで $\mathbf{a}$ の変化を表す軌跡上の相隣り合う 2 点間のラップ時間は一定で、その変化の進行方向は折線上の矢印で示されている。ただし上，下試料の回転数の比 N_2/N_1 を 1/3 とした $\mathbf{a}$ の変化である。さてこの図から、 $\mathbf{a}$ の変

 図4 シミュレーション結果（強制回転における $\mathbf{a}$ の変化）

化はいずれの初期形状に対しても図中に示す 2 点鎖線に向かって指数関数的に漸近し、それ以後はこの直線に沿って進行しているのがわかる。また 2 点鎖線に初期形状があるときはこの直線に沿って $\mathbf{a}$ の変化が進むことが認められる。これらの変化の傾向は往復動型の場合の形状変化過程を支配していた二つの基本特性、すなわち (a_1, a_2) 面で -45° の傾きを持つ直線に平行もしくはこれに沿って $\mathbf{a}$ の変化がほぼ一定速度で進行するという特性 I とこの直線に向かって漸近するという特性 II とであることがわかる。しかも $\mathbf{a}$ の軌跡は往復動型における往復動方向の形状変化によく似ている。そこでこの (a_1, a_2) 面に示す 2 点鎖線を以後往復動型の場合と同じく準安定線⁴⁾と呼ぶことにする。

一方、上試料を自由回転させる場合のシミュレーションでは、強制回転させる場合とは異なり上，下試料の形状の組合わせにより上試料の回転数が変化するので、まず初期形状の組合わせでの上試料の回転数を知る必要がある。そのため初期形状の種々の組合わせに対して表面の除去を行わずにすり合わせ、そのときの定常回転数 N_2 を求めたシミュレーション結果を図 5 に示す。ここで横軸に取っている $\bar{a}_1$ は、図中に示すように $\mathbf{a}$ を (a_1, a_2) 系に対して 45° 回転した座標系、 $(\bar{a}_1, \bar{a}_2)$ 系でみたときの座標成分である。この図は上，下試料の表面形状が $\bar{a}_1$ 軸上の点として表せる組（ $\bar{a}_1$ が正の場合図中に示すように断面形状が凹同志の上，下 2 面の組で、負の場合凸同志の形状の組）について比 N_2/N_1 の変化を調べた結果である（なお $\bar{a}_2$ 軸上では比 N_2/N_1 の変化は無視できる程度の大きさであった）。ただしこの図に示す比 N_2/N_1 の変化は、上試料の支持点（図 2 におけるボール ③）に存在する摩擦の影響を考察するため、これによるモーメントの大きさ M_0 が下試料から受ける摩擦力に

図5 シミュレーション結果(上, 下試料の回転数の比 N_2/N_1 の変化)

よる回転モーメントの計算された内の最大値 $M_{\max}$ に対して約 0, 0.075 および 0.15 倍の場合についての結果である。ここに $0 \leq N_2/N_1 \leq 1$ とした。この図から上試料の支持点に摩擦がないときは形状の組に無関係に比 $N_2/N_1 \equiv 1$ となり, $N_2 \equiv N_1$ となることがわかる。これに対して支持点に摩擦が存在する場合, 形状の組によって比 N_2/N_1 が異なり, $\vec{a}_1 \equiv 0$ を境にして変化の割合が大きく変わるのが観察できる。この変化の傾向は上, 下2面の形状の組に対する作用砥粒位置および力学的平衡を考えることにより推測できる。こうして $\vec{a}_1$ と比 N_2/N_1 との関係を用いて初期形状の組に対する上試料のすり合わせ開始の回転数を決めた。一方, すり合わせ時の上試料の回転数は, 第2節に挙げたシミュレーション仮定(4)に基づいて次のようにして求めている。すなわちラップ時間 t における上試料の代表点 (x_i'', y_j'') での摩擦力 F_{ij} による回転モーメント M_{ij} のうでの長さ u_{ij} は幾何学的な関係より次式で与えられる。

$$u_{ij} = \frac{r_{ij} |V_{xij} \sin(\theta_{ij} + \omega_2 t) - V_{yij} \cos(\theta_{ij} + \omega_2 t)|}{(V_{xij}^2 + V_{yij}^2)^{1/2}} \quad (3)$$

ここに添字 i, j は代表点 (x_i'', y_j'') に対するものである。式(3)により下試料から受ける摩擦力による回転モーメント M は次式となる。

$$M = \sum_{i,j}^N M_{ij} = \sum_{i,j}^N F_{ij} u_{ij} \text{sign}[\mathbf{n}_{ij} \cdot \mathbf{V}_{ij}] \quad (4)$$

ここに, $F_{ij} = \mu_f \delta_{ij}$, μ_f : 摩擦係数等の定数, δ_{ij} : 点 (x_i'', y_j'') における砥粒のくい込み量, N : 作用砥粒数, $\mathbf{n}_{ij}$: (x'', y'') 系に対する点 (x_i'', y_j'') の位置ベクトル $\mathbf{r}_{ij}$ (この絶対値は r_{ij}) に直交する単位ベクトル, $\text{sign}[x] = 1 (x > 0)$, $0 (x = 0)$, $-1 (x < 0)$ である。

したがって上試料の回転角速度 ω_2 は次の微分方程式を解くことにより得られる (ただし初期の角速度は前の

図6 シミュレーション結果(自由回転における $\mathbf{a}$ の変化)

図7 実験結果(自由回転における $\mathbf{a}$ の変化)

時刻における角速度を用いている)。

$$I \frac{d\omega_2}{dt} = M, \quad I: \text{慣性モーメント} \quad (5)$$

以上のようにして上試料の回転数を各すり合わせごとに計算し, 自由回転の場合をシミュレートした結果を図6に示す。ただし $\mathbf{a}$ の変化は先の強制回転の場合と同様に表し, また上試料の支持点の摩擦が $M_0/M_{\max} \equiv 0.15$ の場合である。さてこの図からわかるように, 自由回転における $\mathbf{a}$ の変化もまた強制回転の場合と同じく準安定線に向かって指数関数的に漸近し, その後は直線に沿って変化が進行していく傾向がある。このように上試料を強制回転および自由回転させる場合のそれぞれの形状変化過程にはあまり差異は認められなかった。

図7は上試料を自由回転させた時の実験結果であり, シミュレーション結果と同じ座標系を取り $\mathbf{a}$ の変化を示している。図中の○印はラップ継続時間 L_r を 1 min に, ●印は 5 min にしたときの $\mathbf{a}$ の変化を表す。これらの条件に対する準安定線は図中に2点鎖線で示す直線 l_1 および l_2 となる。また各データ点に付記している数字

 図8 実験結果(上, 下試料の回転数の比 N_2/N_1 の変化)

はすり合わせを始めてから最初の 1 min 間の上試料の回転数 N_2 である(例えば, 図中の第3象限の●印で示す α の変化において N_2 は 4 rpm, 23 rpm, …と回転数が増していく)。この図からシミュレーション結果は実験結果における α の変化の傾向を良く表していると言える。また回転-往復動型のすり合わせラッピングにおいても, 往復動型の場合の形状変化過程を支配していた二つの基本特性¹⁾⁴⁾(前述した特性 I および特性 II) が保存されていることがわかる。さらに上, 下試料間への砥粒の供給状態を変える(ラップ継続時間を 1 min から 5 min にする)ことによって, 往復動型の場合と同様な影響²⁾を受けて準安定線の位置(a_2 軸切片の値)が異なっているのが観察される。一方, 上試料の回転数は上, 下試料が互いにならない合うにつれて変わり, (a_1, a_2) 面の第1象限(凹同志の形状の組)から各準安定線に漸近するとき減少し, 第3象限(凸同志)からの場合は反対に増加しているのがわかる。実験で得られた上試料の回転数の最大値および最小値は図からわかるように 53 rpm ($N_2/N_1 \approx 0.79$) および 4 rpm ($N_2/N_1 \approx 0.06$) であった。また α の変化が準安定線に漸近し, その直線に沿って進行する場合の上試料の回転数はそれぞれの準安定線 l_1, l_2 に対して約 40 rpm ($N_2/N_1 \approx 0.60$) および約 33 rpm ($N_2/N_1 \approx 0.49$) に落ち着きついていることが観察できる。この上試料の回転数の変化をシミュレーションの場合と同様に示したのが図8である。この図からシミュレーション結果の比 N_2/N_1 の変化と実験結果のそれとは傾向がよく一致しており, シミュレーション仮定が妥当であると考えられる。また実験装置における上試料の支持点の摩擦は下試料から受ける摩擦力による回転モーメントに対して無視できない割合であることがわかる。

以上のように, 回転-往復動型のすり合わせラッピングにおける形状生成過程は往復動型の場合の変化過程, 特に往復動方向の形状変化¹⁾によく似ており, 往復動型における形状変化特性 I, II が同じく存在することが認められた。そこで回転-往復動型および往復動型における

上試料面の各点が下試料面上に描く軌跡の観点から, 今回のラッピング方式に対する形状変化過程をとらえてみる。シミュレーションにおける強制回転と自由回転では下試料面に対して上試料の中心が描く軌跡は同じであるが, それ以外の点の両者の軌跡は全く異なる。しかしながら α の変化は両者ともに同じ傾向を持っていることから, 上試料が適当にながしかの回転をしておきさえすれば, 上試料面の中心以外の点が描く軌跡の多少の相違は形状変化過程に大きく差異を生じさせる要因でないと考えられる。また自由回転の場合のシミュレーションと実験の両結果における α の変化は両者の上試料の中心の描く軌跡が異なるにもかかわらず, 共に同じ傾向を示していることから, 上試料の中心が描く軌跡もまた適当に下試料面上に広がっていれば, その相違は形状変化過程に重大な影響を及ぼさないものと考えられる。一方, 回転-往復動型の形状変化には往復動型に存在した往復動方向と幅方向との方向による形状変化の違いはない。すなわち, 上, 下試料の回転運動があるため回転-往復動型ではいずれの方向も往復動型ラッピングの往復動方向および幅方向の形状変化の繰返しとなり, 両方の形状変化に共通して存在した特性 II と往復動方向の形状変化のみに存在した特性 I とが回転-往復動型ラッピングの形状変化過程を支配するのがわかる。したがって, α の変化は実際には往復動型の往復動方向と幅方向との合成された形状変化であるが, 両特性を持つ往復動方向の形状変化によく似ていると言うことができる。

さて回転-往復動型のラッピング方式に対する上, 下試料の表面形状の生成過程は, 二つの基本特性を基にして往復動型の場合と同じく考えることにより次の線形ベクトル微分方程式で表現することができる。

$$\frac{d}{dt}\mathbf{a} = T\mathbf{a} + \mathbf{V}_1 \quad (6)$$

ここに,

$$\mathbf{a} = (a_1, a_2)^T, \quad \mathbf{V}_1 = \mathbf{V} + k\mathbf{d}$$

$\mathbf{V}$: 特性 I による速度成分, $(-v, v)^T$, $v = \text{一定} > 0$

T : 特性 II による速度成分 $K(\mathbf{a})$ を $-k(\mathbf{F}\mathbf{a} - \mathbf{d})$ と線形近似したときの $T = -k\mathbf{F}$, k : 正の定数,
 $\mathbf{F} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$: 射影作用素である。

$\mathbf{d}$: (a_1, a_2) 面の原点から準安定線までの位置ベクトル, $(d, d)^T$, d : 定数である。

t : ラップ時間。

式(6)の解を求め, 図7に表した実験結果に対する解例を示したのが図9である。ただ $\bar{a}_1 > \bar{d}$ (正の漸近と呼ぶ)と $\bar{a}_1 < \bar{d}$ (負の漸近)で特性 II の速度成分を表す特性値 k の値 (α の軌跡の形)を変えている。ここに $\bar{d} =$

($\bar{a}_1, \bar{a}_2$) 面上における α の軌跡は式 (6) から $\bar{a}_1 = \alpha e^{\beta \bar{a}_2} + \bar{d}$ となる。ここに, α : 初期形状より決まる定数, $\beta = -(k/\sqrt{2}v) = -0.08 \text{ mm}$ (正の漸近), -0.02 mm (負の漸近), $\bar{d} = 74.3 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$ ($Lr=1 \text{ min}$), 0.0 mm^{-1} ($Lr=5 \text{ min}$) である

図9 図7の実験結果に対する式(6)の解例

$|\bar{d}|$ であり, $\bar{a}_1$ は ($\bar{a}_1, \bar{a}_2$) 系における α の座標成分である (図5 参照)。この図に示すように正と負の漸近で特性値 k を変えている (往復動型では同じ値で近似した) のは, 両者の漸近で形状が互いにならない合う状況が異なるためである。すなわち正の漸近の場合試料端部の方が中央部より除去量が多く, 試料端部からならない合い, 負の漸近ではこれとは反対に試料中央部からならない合っていく。このことは往復動型の場合においても同じく考えられるが, 回転-往復動型では試料各点でラッピング速度が一樣でなく, 当然のことながら試料端部におけるその速度が大きいため, 正と負の漸近において形状が互いにならない合う速度 (特性 II による速度成分) の大きさの違いが往復動型の場合よりも顕著になってくる。その結果 α の軌跡の形を表すパラメータ β の絶対値は正の漸近の方が負の漸近より大きい。さて図9から, 表面形状

を回転放物面近似したときの回転-往復動型の形状生成過程は式 (6) で十分近似できることがわかる。

5. 結 言

レンズ加工等に用いられている回転-往復動型のすり合わせラッピングにおける形状生成過程を, 上下同一試料についてシミュレーションと実験との両面から追究した。その結果, 上試料が下試料から受ける摩擦により自由回転する場合の形状変化およびラッピング中の上試料の回転数に対するシミュレーション結果は, 実験結果を良く表していることがわかった。また両結果および上試料を強制回転させる場合のシミュレーション結果はいずれもよく似た形状変化の傾向を示すことがわかり, 形状生成過程は回転-往復動型のすり合わせラッピングにおいても往復動型の場合に存在していた二つの基本特性に支配されているのが明らかになった。さらにこれらの特性を基にして往復動型の場合と同じ形の線形ベクトル微分方程式で表現することができ, 実験結果に対してよい近似を与えることを示した。

終わりにあたり, 本研究は一部昭和54年度文部省科学研究費補助金の援助を受けて行った。また実験遂行に本学学生・田中清貴, 上西敏彦両氏のご協力を得たことに対して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 井戸 守, 田中芳雄, 酒井義郎: 三面ラッピングにおける形状生成過程, 精密機械, **41**, 10 (1975) 978.
- 2) 酒井義郎, 田中芳雄, 井戸 守: 三面ラッピングの能率化, 精密機械, **42**, 12 (1976) 1145.
- 3) Y. Sakai, Y. Tanaka and M. Ido: Construction of Three-workpiece Lapping Process, Trans. ASME, Ser. B, **101**, 3, (1979) 255.
- 4) 井戸 守, 田中芳雄, 田中国弘: 平面ラッピングにおける形状生成過程, 精密機械, **44**, 12 (1978) 1438.