

超精密機械加工とその評価技術

- フロートポリシング液の流動解析モデルの定式化 -

菊池 誠* 小石川 勝男*

1. 緒言

半導体や光学部品の最終研磨として常用されているフロートポリシングは、平面を高精度且つ無歪に加工する手法¹⁾²⁾であり、ラップと工作物を回転させることにより両者の間に介在するポリシング液の流動圧で工作物を浮上させ、ラップ各部の平面度を集積した形状に工作物を転写する加工技術とされている。

フロートポリシングの良否は、形状の転写状況に左右されるが、特に工作物表面の研磨圧(流動圧)の分布とポリシング液对工作物の相対速度分布が工作物表面の形状に影響すると予想され、研磨圧及び速度が大きい場所は、一般に除去量が多く、このためフロートポリシングによって仕様とする表面形状を得るには、研磨圧分布と速度分布を制御する必要がある。

本研究では、フロートポリシングにおけるポリシング液の流動現象を流体力学に基づいて定式化した有限差分法を用いて数値計算し、ポリシング液に対する工作物の相対速度分布と工作物がポリシング液から受ける圧力分布を解析することを目的としている。

2. 解析モデル

解析モデルの概略を図1 (上面図, 正面図, 拡大図A) に示す。本研究では、ラップ表面はラップ回転軸くから外周に向かって渦状に彫られた矩形溝であると仮定した。さらに渦を同心円で近似し、ラップ表面形状のラップ回転軸くに対する対象性を利用した。このため解析モデルが想定する系は、ラップ回転軸ベクトルと半径方向ベクトルによって張られる2次元空間で取り扱うことができる。さらに、ラップ表面の半径方向に沿った断面形状は周期的に変化するため、解析モデルは、その1周期分に相当する1セルを計算対象とした。工作物全体の速度分布及び圧力分布はその組み合わせから求めることができる。拡大図Aは、任意セルの断面形状を示す。

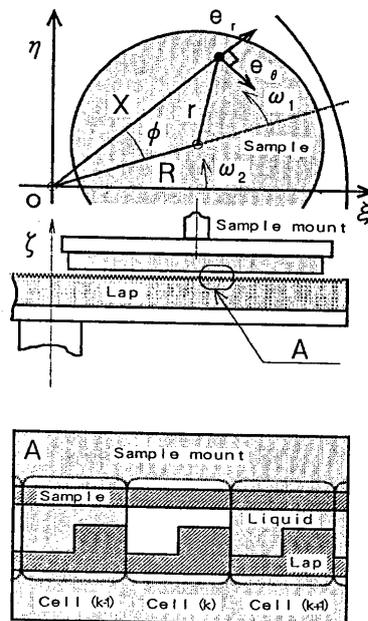


図1 ポリシングマシンのシミュレーションモデル

*機械金属部

この図において、セル(k)左端の境界条件は、そのセルに隣合うセル(k-1)の右端の境界条件を利用し、セルk右端の境界条件はセル(k+1)左端の境界条件を利用する。さらに、境界条件に利用するラップに対する工作物の相対速度分布は式(1)とする。

$$V_r = r_2 \sin(\omega_2 t - \phi) + r_1 \sin\{\omega_1 t + (\omega_2 - \omega_1)t\}$$

ただし、

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{r \sin \omega_1 t}{r \cos \omega_1 t + R} \right\} \quad (1)$$

ここで、R:工作物回転中心からラップ回転中心までの距離、r:工作物回転中心からの距離、 ω_1 :工作物の角速度、 ω_2 :ラップの角速度、t:時間とする。

さらに、ラップ回転軸中心からの距離Xは、

$$X = R \cos \phi + r \cos(\omega_1 t - \phi) \quad (2)$$

で与えられる。

3. 基礎方程式

ポリシング液は非圧縮粘性流れとし、各セル内の相対速度 $V=(U, V)$ 、圧力 $P=(P_x, P_y)$ を求める正規化された2次元基礎方程式は次式のようなになる³⁾⁴⁾。

$$\Delta \cdot \psi = \omega \quad (3)$$

$$(\mathbf{V} \cdot \nabla) \omega = \frac{\Delta \omega}{Re} \quad (4)$$

$$\mathbf{u} = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad \mathbf{v} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (5)$$

$$(\mathbf{V} \cdot \nabla) u = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\Delta u}{Re} + \omega^2 X_k \quad (6)$$

$$(\mathbf{V} \cdot \nabla) v = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\Delta v}{Re} \quad (7)$$

ここで、 ψ :流れ関数、 ω :渦度を表しており、式(3)は連続の式、式(4)は渦度で表現したN - S方程式、式(5)は流れ関数と速度成分との関係、式(6)、(7)は圧力分布を求めるためのN - S方程式である。さらにRe:レイノルズ数、 ∇ :ナブラ、 Δ :ラプラシアンである。式(6)の右辺第3項目は、ラップ回転軸から X_k だけ離れたセル(k)が受ける遠心加速度成分を表している。

4. 結 言

本研究は、フロートポリシングにおけるラップと工作物の相対速度を工作物位置及び、各角速度の

関数として求めるとともに、ポリシング液の流動現象を流体力学に基づいて定式化した。

この結果、ポリシング液に対する工作物の相対速度分布と工作物がポリシング液から受ける研磨圧力分布を、有限差分法とセル法を用いた数値計算によって求めることができる。

5. 付 録

付録Aにラプラシアン演算子を展開した場合の基礎方程式の表現形式を示し、付録Bに本研究で定式化した境界条件を示す。ここで、 D は動圧生成用の溝の底から工作物表面までの距離、 H は同じくラップ最上面までの距離、 L は1セルの幅、 W は底の幅、 μ は粘度、 ρ は密度、 U_0 はラップに対する工作物の相対速度の半径ベクトル成分、 ω_0 はラップの角速度である。尚、付録では正規化した変数には全て右肩に*印を付けている。

(付録A) 正規化した基礎方程式

$$\left(u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^{*2}} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^{*2}} \right) = - \frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right) + \omega_0^{*2} X^*$$

$$\left(u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^{*2}} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^{*2}} \right) = - \frac{\partial p^*}{\partial y^*} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right)$$

$$\frac{\partial^2 \psi^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial y^{*2}} = \omega^*$$

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = - \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

$$u^* \frac{\partial \omega^*}{\partial x^{*2}} + v^* \frac{\partial \omega^*}{\partial y^{*2}} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 \omega^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 \omega^*}{\partial y^{*2}} \right)$$

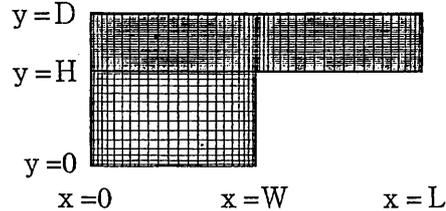
但し

$$x^* = \frac{x}{D}, \quad y^* = \frac{y}{D}, \quad X^* = \frac{X}{D}, \quad h = \frac{H}{D},$$

$$l = \frac{L}{D}, \quad w = \frac{W}{D}, \quad u = \frac{u}{U_0}, \quad v = \frac{v}{U_0},$$

$$\omega_0^* = \frac{\omega_0 D}{U_0}, \quad p^* = \frac{\rho D U_0}{\mu},$$

$$\psi^* = \frac{\psi}{D U_0}, \quad \omega^* = \frac{\omega D}{U_0}$$



(付録B) 正規化した境界条件

B.1 境界Aの条件

$$\psi^*(0, y^*) = y^* + \frac{(1-y^*)^3}{3(1-h)^2} - \frac{1}{3}(1+2h)$$

$$\omega^*(0, y^*) = \frac{2(1-y^*)}{(1-h)^2}$$

$$\frac{\partial p^*}{\partial y^*}(0, y^*) = 0$$

$$\frac{\partial p^*}{\partial x^*}(0, y^*) = \omega_0^2 X - \frac{2}{(1-h)^2 Re}$$

$$(h \leq y^* \leq 1)$$

B.2 境界Bの条件

$$\psi^*(0, y^*) = 0$$

$$\omega^*(0, y^*) = \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial x^{*2}}(0, y^*)$$

$$(0 \leq y^* \leq h)$$

B.3 境界Cの条件

$$\psi^*(x^*, 0) = 0$$

$$\omega^*(x^*, 0) = \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial y^{*2}}(x^*, 0)$$

$$(0 \leq x^* \leq w)$$

B.4 境界Dの条件

$$\psi^*(w, y^*) = 0$$

$$\omega^*(w, y^*) = \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial x^{*2}}(w, y^*)$$

$$(0 \leq y^* \leq h)$$

B.5 境界Eの条件

$$\psi^*(x^*, h) = 0$$

$$\omega^*(x^*, h) = \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial y^{*2}}(x^*, h)$$

$$(w \leq x^* \leq l)$$

B.6 境界Fの条件

$$\psi^*(l, y^*) = y^* + \frac{(1-y^*)^3}{3(1-h)^2} - \frac{1}{3}(1+2h)$$

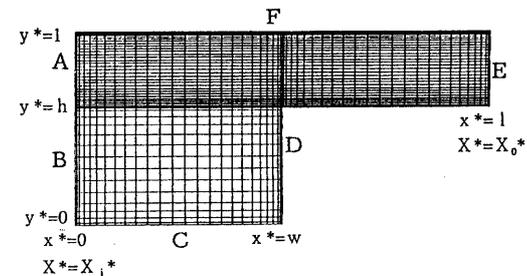
$$\omega^*(l, y^*) = \frac{2(1-y^*)}{(1-h)^2}$$

$$\frac{\partial p^*}{\partial y^*}(l, y^*) = 0$$

$$\frac{\partial p^*}{\partial x^*}(l, y^*) = \omega_0^2 X_0 - \frac{2}{(1-h)^2 Re}$$

$$(h \leq y^* \leq 1)$$

B.7 境界Gの条件



$$\frac{\partial^2 \psi^*}{\partial x^{*2}}(x^*, 1) = 1$$

$$\omega^*(x^*, 1) = \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial y^{*2}}(x^*, 1)$$

$$(0 \leq x^* \leq l)$$

参考文献

- 1) Y.Namba and H.Tsuwa: Ultra-Fine Finishing of Sapphire Single Crystal, Ann. CIRP, 26/1(1977), 325.
- 2) 江田他4名: 磁気ディスク基板の研磨加工に関する研究, 精密工学会誌, 54, 8(1988)(57-62)
- 3) 日本機械学会編: 流れの数値シミュレーション, コロナ社, (1988)
- 4) 小竹, 土方著: パソコンで解く熱と流れ, 九善(1988)