

# 超精密機械加工とその評価技術

## —フロートポリシングにおける加工量シミュレーション—

菊池 誠\* 小石川勝男\*

### 1. 緒言

本研究は、フロートポリシング加工における加工量を予測することと、その加工メカニズムを同定することを目的としている。

通常、研磨加工の加工量はその押しつけ圧力と接触長さ、接触速度に影響されると考えられている<sup>1)</sup>。これは通常の研磨加工がマクロ的には接触式に位置づけらねる為で、この場合、基本的に“砥粒は固定されている”という仮定に基づいている。これに対し、フロートポリシング加工は基本的に“砥粒は遊離している”という仮定に基づいている。この為、フロートポリシング加工の場合、その加工メカニズムの解明が遅れている。即ちフロートポリシング加工の加工量は“いったい何によって影響されるのか”ということが明らかにされていない<sup>3)</sup>。

しかしながら、原子レベルの超精密加工を考えた場合、固定砥粒も遊離砥粒もその加工モデルに大差はなく、加工精度を突き詰めていった場合、“共に加工メカニズムは同じである”と仮定してもよい。そこで、本報告では、まず“原子レベルのフロートポリシングの加工メカニズムは固定砥粒の加工メカニズムと同じである”と仮定し、その場合の加工シミュレーションを行った。

### 2. モデリング

一般的に研磨加工は、ワークの表面に存在する凸凹を砥粒の衝突で削除する加工であり、加工量は砥粒の運動量と衝突頻度、加工時間によって決定できると言われている。そして、衝突時の運動量はワークと砥粒の相対速度、砥粒質量で決定され、頻度は砥粒の量や研磨液の圧力によって影響を受ける。従って、加工量を計算する為には、相対速度、砥粒質量、砥粒密度、研磨圧力、研磨時間が必要であると想定できる。

次に“これらの変数がどのように関係をもっているのか”を想定しなくてはならない。一般には、1衝突当たりの削除量は一定であり、その削除量は砥粒の持っている運動量に比例すると仮定するのが自然である。すると加工量は、 $加工量 = 比例定数 \times 運動量 \times 衝突頻度 \times 時間$ で計算できる。この式を相対速度と研磨圧力を使って書き換えれば、 $加工量 = 比例定数 \times 相対速度 \times 砥粒質量 \times 砥粒密度 \times 研磨圧力 \times 研磨時間$ となり、砥粒質量と砥粒密度を比例定数に含め、定数以外を時間の関数とみなせば、加工量は次式で計算できる。

$加工量 = 比例定数 \times 時間積分 \{ 研磨圧力 \times 相対速度 \}$

---

\*機械金属部

### 3. 相対速度の計算

今、図1のように角速度  $\omega_1$  で回転する定盤上に角速度  $\omega_2$  で回転するワークを浮かせ、任意時間  $t$ 、任意位置(距離  $X$ 、角度  $\phi$ )におけるワークから見た定盤の相対速度  $v$  を求める。但し、以下、特に断らない限り時間以外は全てベクトル表示とし、 $\times$  記号は外積とする。

まず、相対速度  $v$  はワークの絶対速度  $v_1$ 、定盤の絶対速度  $v_2$  から

$$V = V_2 - V_1 \quad (1)$$

と表現できる。そして、

$$V_1 = \omega_1 \times r, \quad V_2 = \omega_2 \times (R+r) \quad (2)$$

であるから、

$$v = \omega_2 \times R + (\omega_2 - \omega_1) \times r$$

$$= \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & \omega_2 \\ R \cos(\omega_2 t) & R \sin(\omega_2 t) & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & \omega_2 - \omega_1 \\ r \cos(\omega_1 t) & r \sin(\omega_1 t) & 0 \end{vmatrix}$$

$$= - \{ \omega_2 R \sin(\omega_2 t) + (\omega_2 - \omega_1) r \sin(\omega_1 t) \} i$$

$$+ \{ \omega_2 R \cos(\omega_2 t) + (\omega_2 - \omega_1) r \cos(\omega_1 t) \} j \quad (3)$$

但し、 $i, j, k$  は  $\eta, \xi, \zeta$  軸の基底。

ここで新たに基底を式(4)の条件を満足する基底  $e_r, e_\theta$  に変換する。

$$i = \sin \theta e_r + \cos \theta e_\theta$$

$$j = -\cos \theta e_r + \sin \theta e_\theta \quad (4)$$

ここで、

$$\theta = \tan^{-1} [r \sin(\omega_1 t) / \{r \cos(\omega_1 t) + R\}] + \omega_2 t \quad (5)$$

である。

いま、式(3)に式(4)を代入すると  $v$  は次式で表現できる。

$$v = - [ \omega_2 R \cos \theta + (\omega_2 - \omega_1) r \cos \{ \theta + (\omega_2 - \omega_1) t \} ] e_\theta$$

$$+ [ \omega_2 R \sin \theta + (\omega_2 - \omega_1) r \sin \{ \theta + (\omega_2 - \omega_1) t \} ] e_r \quad (6)$$

但し、 $\theta = \omega_2 t - \tan^{-1} [r \sin(\omega_1 t) / \{r \cos(\omega_1 t) + R\}]$  (7)

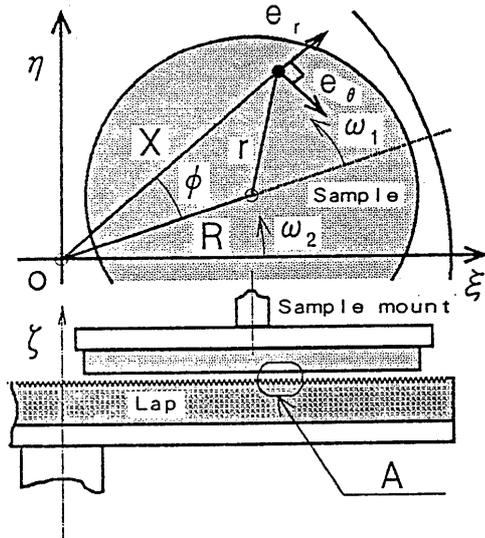


図1 ポリシングマシンのシュミレーションモデル

#### 4. 圧力の計算

圧力は定盤の断面形状から距離 $X$ の関数になると仮定する。定盤の断面形状は図2に示すとおり、重力波型をしているが、この形状によって発生する圧力分布は図3のようになると仮定できる。この圧力分布を数式で表現すると、

$$P(X) = \begin{cases} 0 & 2m\Delta R < \|X\| < (2m+1)\Delta R \\ 0.5 & \|X\| = 2m\Delta R, \|X\| = (2m+1)\Delta R \\ 1.0 & (2m+1)\Delta R < \|X\| < \{2(m+1)\}\Delta R \\ & (m=1, 2, 3, 4, \dots) \end{cases} \quad (8)$$

但し、

$$X = R \cos \theta + r \cos(\omega t - \theta) \quad (9)$$

である。

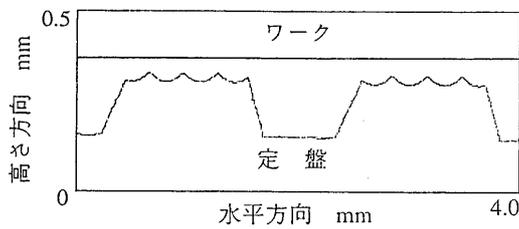


図2 定盤の断面形状(図1,A拡大図)

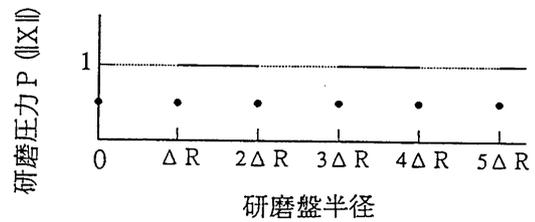


図3仮定した半径方向における研磨圧力

#### 5. 加工量の計算

加工量は研磨圧力と相対速度の積を時間で積分したものに比例すると仮定しているから式10)で表現できる。

$$h(r) = C \int_0^t P(X) v dt \quad (10)$$

今回はこの式で、

定盤上の研磨圧力を一定にした場合

定盤上の研磨圧力を位置によって変化させた場合(図3に示す圧力分布)

の2種類について、 $R=50\text{mm}$ 、 $r_{\text{max}}=40\text{mm}$ 、 $\omega_1=1$   
 $3.09\text{rad/s}$ 、 $\omega_2=2.094\text{rad/s}$ の場合のワークの  
 加工量を計算した。積分はオイラー法を用い積分  
 間隔はワークの公転周期の1000分1とした。  
 積分範囲は0s~10Tsまで(Tはワークの公転周  
 期)とした。半径rの分割数は400とし、計算範囲  
 は0~ $r_{\text{max}}$ までとした。従って、ワークの位  
 置、相対速度、研磨圧力を倍精度浮動小数点型  
 で計算するものを1ユニットとして、総計算  
 量は400万ユニットとした。尚、今回のシュミ  
 レーションには、計算機としてMac fx、プロ  
 グラム言語はTHINK-Cを使用した。

## 6. 計算結果

### 6.1 圧力分布一定の場合

図4は、ワーク半径に対する加工量の変化  
 を相対速度の接線成分と半径成分に分けて示し  
 たものである。図4からワーク中心部では接線成  
 分による加工量が大きく、周辺部に近づくにつれ  
 て半径成分による加工量も増加することがわか  
 る。図5は2成分を加えた場合の加工量を示す。更  
 に図5から断面形状を予想すると図6のようにな  
 る。図6の傾向は図7に示す実際のポリシングの加  
 工形状と類似している。このことは本シュミレー  
 ションのアルゴリズムが精度良く加工現象を表



図6 予想断面形状

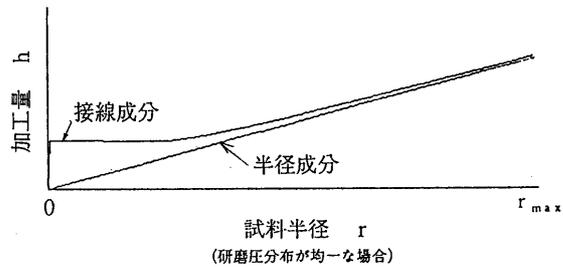


図4 試料半径に対する成分ごとの加工量(計算値)の変化

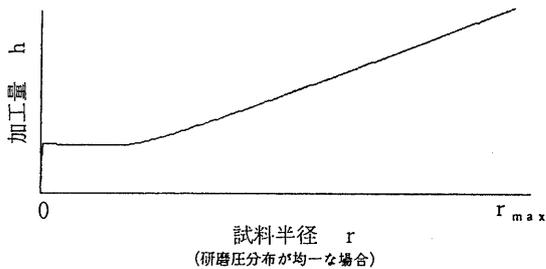
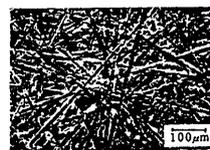
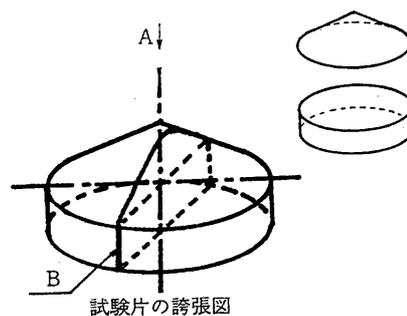
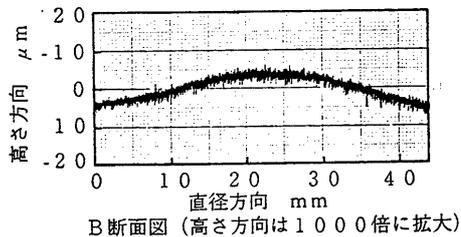


図5 試料半径に対する加工量(計算値)の変化  
 試験片の誇張図



倍率: 150倍  
 $\omega_1: 15.7 \text{ rpm}$   
 $\omega_2: 15.7 \text{ rpm}$

A方向から見た写真



B断面図 (高さ方向は1000倍に拡大)

図7 ポリシング加工物の断面形状(実例)

現できることを意味している。尚、図7のB断面図は図7の試験片の誇張図に示した断面形状の円錐面側を粗さ計で測定したものである。図7の写真は中し、付近の様子を示している。

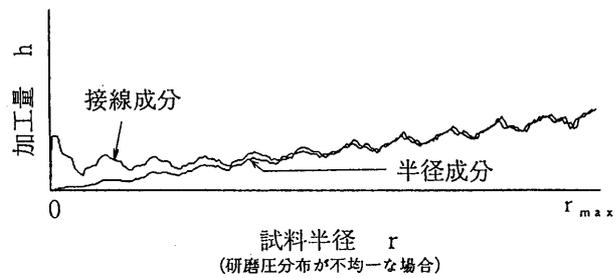


図8 試料半径に対する成分ごとの加工量(計算値)の変化

## 6.2 圧力分布を変化させた場合

圧力分布を図3のような方形的に仮定した場合の加工量を図8, 図9に示す。図9では全体的傾向は図5の場合と類似しているが、加工量に波型が現れている。この波型は圧力分布の状態がワークの表面に転写された為であると考えられ

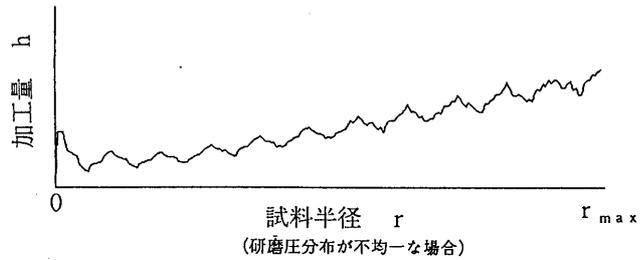


図9 試料半径に対する加工量(計算値)の変化

る。このことは、フロートポリシングにおいて定盤表面の圧力分布は出来るだけ小さい方が好ましい事を示している。

その為、定盤表面の凹凸は出来る限り小さくする必要がある、しかし、その場合には研磨屑の詰まりや研磨液の供給不足から生じる研磨圧力のバラッキが問題となる。更に圧力分布を時間的に安定化する為にポリシング液の流れが相転移によって乱れないような制御技術も伴わなければならない。

## 7. 結 言

### 7.1 結 果

本報告は、図2のような断面形状をした定盤でフロートポリシングを行った場合の研磨圧力を図3のように仮定し、その時の加工量を従来のポリシングの考え方に基づいて予測するシュミレーションモデルを作成し、実行した。その結果、定盤の断面形状がフロートポリシング後のワークの表面形状に影響を与えることを示した。このことからフロートポリシング加工では、動圧を生み出す定盤の断面形状を細かく最適な形状に成形する必要があることがわかった。

### 7.2 課 題

本研究のシュミレーションには技術上改善すべき問題点がある。それは次のとおりである。

複数の円運動を要素とするシュミレーションでは接線部分での分解能が低下する為、精度を向上させる為には全体の分解能を上げるか、もしくは分解能を部分的に変化させ必要な部分では分解能を高めるような工夫が必要である。しかも、これには計算時間、配列容量、収束時間などの最適化も行

わなくてはならない。

本研究では研磨圧力分布を仮定してシュミレーションを行ったが、厳密には研磨圧力を研磨液の流動から求める必要がある。更に、原子オーダーの加工シュミレーションでは分子動力学(MD法)<sup>4)</sup>を利用したアルゴリズムの採用が必要である。

#### 参考文献

- 1) 谷口:ナノテクノロジーの基礎と応用,工業調査会,77,78 (1988)
- 2) Y.Namba:Ultra-Fine Finishing of Sapphire Single Crystal,Ann.CIRP,26/1(1977), 325.
- 3) B.Bhushan:Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices, Springer-Verlag,806, 809, 836 (1990)
- 4) 稲村,鈴木,武犀:銅とダイヤモンドの原子配列モデルによる計算機内での切削実験,精密工学会,120,126 (1990) 56