十二回連載　ワンポイントレッスン　第十回

# 現場で使える 研磨加工の理論と計算手法

宇根篤暢（元 防衛大学校），河西敏雄（(株)河西研磨技術特別研究室）

## 1．キャリア式研磨機

キャリア式研磨機を**図 10.1** に示す．工作物はキャリア内に収納され、反転する太陽ギアとインターナルギアにより定盤と同方向に強制回転させられ、重錘により圧力がかけられる．キャリアは定盤上に等分に複数個配置され、工作物はキャリア内に等分に複数個配置される．一般的に、キャリアは太陽ギアとインターナルギアにより強制的に自公転するが、キャリア中の工作物は工具の回転により連れ回りする。

## 2．キャリア式研磨機の運動解析と相対速度

**図 10.2** は円環状工具と、その上に等分に配置された複数個のキャリア、キャリア中に等分に配置された3個の円板状工作物の位置関係を示すものである。ここでは、簡単化のために工作物も一定速度で回転するものとして、平均相対速度を算出する理論式を導出する。半径 $R_C$ のキャリアは、角速度 $\omega_a$ で回転している半径 $R_a$ の内輪と、角速度 $\omega_b$ で回転している半径 $R_b$ の外輪により自公転し、半径 $R_{W0}$ の工作物と円環工具はそれぞれ $\omega_W$ と $\omega_T$ の角速度で回転しているものとする。この時、キャリアの自公転の角速度 $\omega_K$、$\omega_M$ は、

$$\omega_K = \frac{(R_a+R_c)(\omega_b R_b - \omega_a R_a)}{(R_a+R_b)R_c} \qquad (10.1)$$

$$\omega_M = \frac{\omega_a R_a + \omega_b R_b}{R_a+R_b} \qquad (10.2)$$

で表すことができる。このキャリアの自公転、および工作物、工具の回転によって、$t$ 時間後にキャリアの中心は $O_{K0}$ から $O_K$ に、工作物の中心は $O_{W0}$ から $O_W$ に移動する。この時、工作物上の任意の点 $A_0(x_0, y_0)$ は点 $A(x, y)$ に移動したとすると、その座標 $(x, y)$ は、

$$x = d\cdot\cos(\omega_M\cdot t) + L\cdot\cos(\omega_K\cdot t) + R_W\cdot\cos(\theta_0+\omega_W\cdot t) \qquad (10.3)$$

$$y = d\cdot\sin(\omega_M\cdot t) + L\cdot\sin(\omega_K\cdot t) + R_W\cdot\sin(\theta_0+\omega_W\cdot t) \qquad (10.4)$$

で表すことができる。ここで、第 1 項はキャリア中心 $O_K$ の座標を、第 1 項と第 2 項の加算は工作物中心 $O_W$ の座標を表す。$d$ は工具中心とキャリア中心の距離、$L$ はキャリア中心とウエハ中心の距離、$R_W$ はウエハ中心から $A_0$ 点までの距離、$\theta_0$ は工作物の初期位相である。

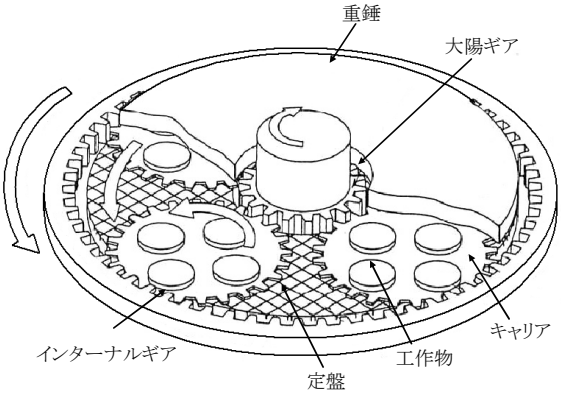


図 10.1 キャリア式研磨機

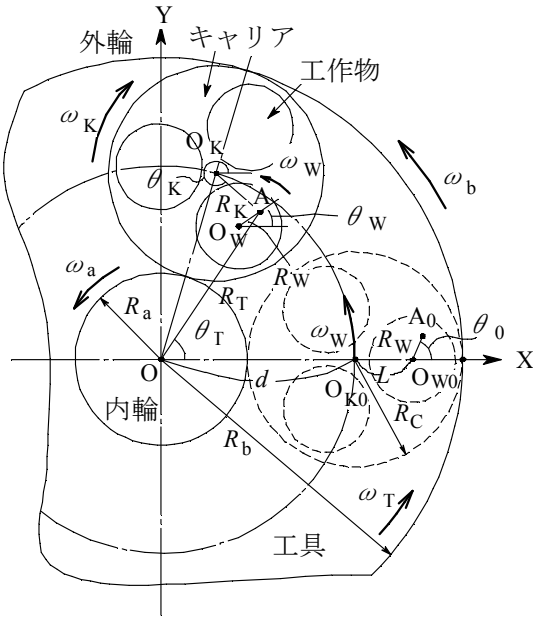


図 10.2 キャリア式研磨機における工作物と工具の位置関係

次に、工作物上の任意の点 A(x, y)において、キャリアの公転と工具の回転によって発生する速度差、および工作物、キャリアの自転によって発生する速

度を、それぞれ $v_d$、$v_w$、$v_K$ とし、それぞれの X 方向、Y 方向のベクトル速度を x、y のサフィックスをつけて表すと、以下の式が成立する。

$$v_{dx}=R_T\cdot(\omega_T-\omega_M)\cdot\cos\theta_T$$
$$v_{dy}=R_T\cdot(\omega_T-\omega_M)\cdot\sin\theta_T \quad (10.5)$$

$$v_{Wx}=R_W\cdot\omega_W\cdot\cos\theta_W \quad v_{Wy}=R_W\cdot\omega_W\cdot\sin\theta_W \quad (10.6)$$

$$v_{Kx}=R_K\cdot\omega_K\cdot\cos\theta_K \quad v_{Ky}=R_K\cdot\omega_K\cdot\sin\theta_K \quad (10.7)$$

ここで、$\theta_T$、$\theta_W$、$\theta_K$ は次式で表される。

$$\omega_M\cdot t-\theta_T = \cos^{-1}\left(\frac{d^2+R_T^2-R_K^2}{2d\cdot R_T}\right) \quad (10.8)$$

$$\theta_W = \theta_0+\omega_W\cdot t \quad (10.9)$$

$$\theta_K-\omega_K\cdot t = \cos^{-1}\left(\frac{L^2+R_K^2-R_W^2}{2L\cdot R_K}\right) \quad (10.10)$$

以上の式を用いて工作物と工具間の相対速度 $V$ は式(10.11)で表すことができる。

$$V^2=(v_{dx}+v_{Wx}+v_{Kx})^2+(v_{dy}+v_{Wy}+v_{Ky})^2 \quad (10.11)$$

したがって、工作物半径 $R_W$ の半円上における工作物と工具の平均相対速度 $\bar{V}$ は式(10.12)で表すことができる。

$$\bar{V}(R_W)=\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} V(R_W,\theta_W)d\theta_W \quad (10.12)$$

## 3. コンボルーション研磨

研磨工具が回転し、ある位置$(x, y)$に $t$ 時間だけ止まって加工する場合、その位置における単位除去形状 $f(x, y)$は、Preston の式を用いると、式(10.13)で表される.

$$f(x,y)=\int K\cdot P(x,y,t)\cdot V(x,y,t)dt \quad (10.13)$$

ここで、$P(x, y, t)$は工具と工作物間の接触圧力分布、$V(x, y, t)$は研磨速度分布であり、$K$ は比例定数である. このような単位除去形状 $f(x, y)$をもつ工具を平面内で移動すると、加工面の加工量分布 $h(x, y)$は、前加工面を平面とし、工具の滞留時間を $g(x, y)$とすれば、式(10.14)で示す以下のコンボリューションモデルで予想することが可能になる。

$$h(x,y)=\iint_{-\infty}^{\infty} g(u,v)\cdot f(u-v,y-v)dudv \quad (10.14)$$

この計算結果を模式的に表したものが、**図 10.3** である. 接触圧力分布が重要になるが、通常、工作物に対して工具が小さいので、工具全面が一様な圧力分布が保たれるとして扱われている. 矩形交差パターンで研磨される場合がもっとも平坦度が良好である。平坦な仕上げをするためには滞留時間の最適化が必要となる。それがデコンボルーション研磨である。

## 4. デコンボルーション研磨

任意の表面形状 $h(x, y)$をもつ前加工面を平面に研磨する場合には、式(10.14)のコンボルーション計算によって求められる滞留時間 $g(x, y)$のフーリエ変換 G を逆変換し、求めた $g(x, y)$に応じて工具送り運動をコントロールすればよい.

$$g(x,y)=\iint_{-\infty}^{\infty}\frac{H(\omega_\alpha,\omega_\beta)}{F(\omega_\partial,\omega_\beta)}\cdot e^{j\omega_\alpha x}\cdot e^{j\omega_\beta y}d\alpha d\beta \quad (10.15)$$

ここで、$H$、$F$ はそれぞれ $h$、$f$ のフーリエ変換である. **図 10.4** はデコンボリューションモデルの計算を行った例である. 単位除去形状は、工具全面の圧力を一様として扱っているので、工具と工作物間の相対速度で決まり、逆円錐形状をもつ。理想モデルでは平面に仕上げられるが、実研磨量は目標研磨量と一致しないので、シミュレーション仕上面は平面に仕上げられていない。

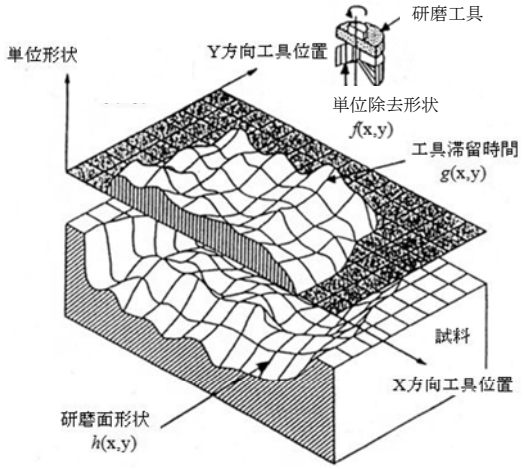


図 10.3　コンボルーションモデルの模式図

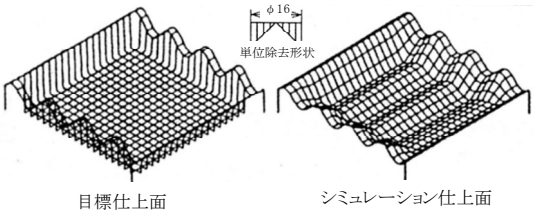


図 10.4　デコンボルーションモデルによる創成面のシミュレーション

◆研磨シミュレーション講座を 9、10 月に開催します。
http://park.saitama-u.ac.jp/~kasai-alpt-lab/