

ラッピング・ポリシングの基礎・理論

吉富 健一郎（防衛大学校）

1. はじめに

遊離砥粒を用いた研磨加工であるラッピングとポリシングの呼び方に明確な区別はなく、目的の表面性状や加工形状によって選定される砥粒と工具の組み合わせで使い分けられている。ここでは、鋳鉄などの硬質工具（ラップ定盤）を使用する場合をラッピング、樹脂などの軟質工具（ポリシングパッド）を使用する場合をポリシングとして説明する。

2. 1 ラッピング

ラッピングでは、工作物とラップ定盤よりも硬い砥粒を使用し、砥粒径を段階的に小さくすることで仕上げ面の粗さを向上させる。ラップ定盤上の砥粒は、工作物との間で転動したりラップ定盤表面に埋め込まれたりするとされ、工作物に微細な切れ刃として作用する。砥粒を水や油で分散した研磨剤に工作物が浸かる湿式ラッピングでは、研磨圧力をあまり高くしないことで転動する砥粒が切りくず生成の主となる。この場合、梨地面が創成され、加工能率を重視する粗・中間加工に用いられる。ペースト状の研磨剤をラップ定盤に薄く塗る乾式ラッピングでは、ラップ定盤に埋め込まれた砥粒上を高い研磨圧力をかけて工作物が相対運動することで加工が進み、鏡面を創成できるので仕上げ加工に用いられる。

工作物が硬脆材料の場合、表面に生じる微小クラックの集積が切りくずを発生させるため、基本的には梨地面が創成される。金属材料の場合は切削作用で切りくずが生じ、微小な砥粒を用いることで鏡面の創成が可能である。ラッピングで得られる最大高さ粗さ R_z は砥粒径の $1/10$ 程度、加工変質層は砥粒径の 3 倍程度とされ、同じ砥粒径の砥石による研削よりも加工変質層は深い。

ラッピングは工作物とラップ定盤が共に硬質であるため、接触面には両方の表面粗さに応じた隙間が生じることになり、砥粒径の選定が加工能率に影響する。隙間が砥粒径より大きい場合や隙間が小さすぎて砥粒が入り込めない場合は研磨が進まない。ラッピングの砥粒径は、表面粗さや工作物とラップ定盤の表面形状差を考慮して決定する必要がある。

GC やアルミナ砥粒を使用する一般的なラッピングでは安価で剛性が高い鋳鉄製ラップ定盤がよく使用される。強度の優れるダクタイル鋳鉄（FCD）製が工作物を選ばず汎用的で

あり、ねずみ鋳鉄（FC）製は摩耗が早いが安価であるので軟質工作物に適する。ダイヤモンド砥粒を使用する場合には、砥粒が埋め込まれやすいように錫や銅など軟質ラップ定盤が用いられる。ガラス系のラップ定盤は、砥粒が埋め込まれず転動するのでスクラッチを抑制するとされ、化合物半導体などの加工に使用される。

遊離砥粒を用いるラッピングであるが、固定砥粒化したダイヤモンド砥石のペレットを敷き詰めたラップ定盤を用いる方法も実用化されており、加工能率が高く、ラップ定盤の摩耗が小さいので形状精度の劣化を抑制でき、廃液処理が容易である利点をもつ。

2. 2 ポリシング

ポリシングの加工原理として、金属や光学ガラスなどに対して鏡面創成を目的とした機械的作用のポリシングと、半導体デバイス基板などに対して表面の原子配列を乱さない無擾乱面を創成する化学的作用を利用するポリシング（CMP：Chemical Mechanical Polishing, メカノケミカルポリシング）が挙げられる。

ポリシングの機械的作用では、軟質素材のポリシングパッド表面に粒径 $1\mu\text{m}$ 以下といった微細砥粒をゆめく保持して微小切削作用で加工が進行し、硬脆材料に対しても微小クラックを発生させることなく鏡面を創成する。金属の鏡面ポリシングでは、微細なダイヤモンド砥粒やコロイダルシリカと不織布パッドの組み合わせが使用されている。光学ガラスのポリシングでは、砥粒には酸化セリウム、ポリシングパッドには硬質発泡ポリウレタンが広く用いられている。また、高級なレンズ製作には、樹脂パッドが一般的な現在においても昔ながらのピッチ皿が使用されている。ピッチは目的の曲面に成形することが容易であり、ポリシングとニュートン原器による干渉縞の検査を繰り返すことで、高精度な球面や非球面形状を創成する技術として確立されている。

化学的作用を利用する CMP とメカノケミカルポリシングは、前者がスラリーと工作物の反応、後者が砥粒と工作物の反応を利用するポリシングとされている。CMP が適用される Si ウェーハでは、コロイダルシリカをアルカリ性溶液に懸濁させたスラリーが使用され、水酸化物イオンによる溶解反応と粒径 100nm 以下のシリカ粒子の微小切削作用で材料除去が進む。Si ウェーハの CMP は、加工温度で材料除去速度が大きく変

* 防衛大学校：〒239-0803 神奈川県横須賀市走水1-10-20

化するため、化学的作用の効果が大きいといえる。メカノケミカルポリシングの加工原理は、砥粒と工作物の接触点で固相反応が誘起・促進され、その反応生成物が砥粒により除去されるプロセスとされている。工作物より硬度の劣る砥粒を用いるので、無擾乱面の創成が可能である。代表的な加工事例として、砥粒にコロイダルシリカを用いたサファイアウェーハや SiC ウェーハのポリシングが挙げられる。

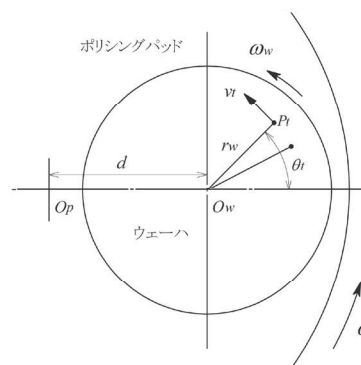


図1 片面ポリシングの計算モデル

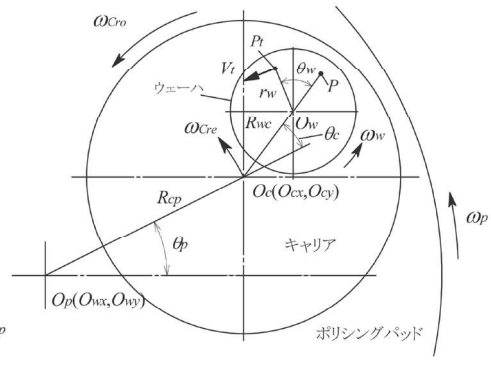


図2 両面ポリシングの計算モデル

3. 研磨理論

ラッピングやポリシングによる工作物の形状変化を理論的に計算するための基本的な考え方を解説する。多くの研磨シミュレーションは、加工量が相対速度 \$v\$、圧力 \$p\$、時間 \$t\$ と比例関係にあるとする Preston の式を基礎としている。Preston の式は、反射鏡をフェルトによりポリシングすることにおいて提案されたもので、安定した加工条件の範囲内で成立する経験式としてこの分野で定着している。この式は原則としてポリシングに適用するものであり、すなわち工作物とポリシングパッドが接触領域全面で隙間なく密着した状態が想定されている。

工作物上の任意の位置における加工量を求めて工作物の形状変化を計算するには、相対速度と圧力を解析する必要がある。相対速度は運動解析で一義的に求まるが、圧力解析についてはポリシングパッドと工作物の接触状態を理論化する必要がある。しかし、詳細に圧力解析をするには、ポリシングパッドの変形特性や摩耗特性の数学モデルや工作物の姿勢の計算手法を考案する必要がある。例えば、ポリシングパッドを完全弾性体と仮定して変形量から圧力を算出したり、工作物にかかる力とモーメントの釣り合いから姿勢を決定したりする方法がある。

形状変化をさしあたりシミュレーションするには、相対速度を運動解析で求め、研磨圧力は接触領域全面で一定とする方法がよく用いられる。この場合、加工量に比例関係となる工作物上の任意の位置における走行距離(相対速度×時間)を求めることで工作物上の加工量分布が計算できる。以下に、ウェーハに対する片面と両面ポリシングの計算方法を紹介する。

図1の片面ポリシングの場合、回転要素はウェーハとポリシングパッドの2つ(\$\omega_w\$と\$\omega_p\$)であり、通常は同方向・同回転数として接触領域全面の相対速度が同じになるので、ウェーハ上のどの位置でも加工量は同じになる。回転に差を付けた場合にも対応する加工量は次のように導出できる。ウェーハ上の任意の点の加工開始時(\$t=0\$)の極座標を \$P(r_w, \theta_0)\$ とする。\$t\$ 秒後の \$P_t(r_w, \theta_t)\$ における相対速度 \$v_w\$、加工量 \$u_w\$ は式(1)～(3)で表される。ここで、\$\eta\$ は比加工量・圧力比(Preston 定数)である。

$$\theta_t = \omega_w t + \theta_0 \quad (1)$$

$$v_w = \left\{ \omega_p^2 d^2 + 2(\omega_p - \omega_w) \omega_p d r_w \cos \theta_t + (\omega_p - \omega_w)^2 \omega_p^2 \right\}^{1/2} \quad (2)$$

$$u_w = \int_0^t \eta \cdot v_w \cdot p \, dt \quad (3)$$

図2の両面ポリシングの場合、ウェーハ自転 \$\omega_w\$、キャリアの自転 \$\omega_{Cro}\$ と公転 \$\omega_{Cre}\$、上下定盤 \$\omega_p\$ が回転要素になる。ウェーハ上の任意の点の加工開始時(\$t=0\$)の座標を \$P(r_w \cos \theta_0, r_w \sin \theta_0)\$ とする。\$t\$ 秒後の \$P_t(x_t, y_t)\$、そのときの相対速度 \$V_w\$、加工量 \$U_w\$ は式(4)～(10)で表される。

$$\theta_w = \omega_w t + \theta_0, \theta_c = \omega_{Cro} t, \theta_p = \omega_{Cre} t \quad (4)$$

$$x_t = (\alpha + R_{cp}) \cos \theta_p - \beta \sin \theta_p \quad (5)$$

$$y_t = (\alpha + R_{cp}) \sin \theta_p - \beta \cos \theta_p \quad (6)$$

$$\alpha = \{r_w \cos \theta_w + R_{wc}\} \cos \theta_c - r_w \sin \theta_w \sin \theta_c \quad (7)$$

$$\beta = \{r_w \cos \theta_w + R_{wc}\} \sin \theta_c + r_w \sin \theta_w \cos \theta_c \quad (8)$$

$$V_w = \left\{ \left[\omega_w (O_{cy} - y_t) + \omega_{Cro} (O_{wy} - y_t) - (\omega_{Cre} - \omega_p) y_t \right]^2 + \left[\omega_w (x_t - O_{cx}) + \omega_{Cro} (x_t - O_{wx}) + (\omega_{Cre} - \omega_p) x_t \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (9)$$

$$U_w = \int_0^t \eta \cdot V_w \cdot p \, dt \quad (10)$$

圧力分布を考慮する場合は、式(3)と(10)で時間毎に圧力 \$p\$ を変化させる。シミュレーションの精度向上については、実験結果との比較による補正式の導入などにより実用性が高められている。

4. おわりに

ラッピングやポリシングの加工条件の調整や最適化は、依然として熟練技能者の経験によるところが大きい。理論化を妨げる原因は、加工状態(工作物の姿勢、加工面の接触状態、工具の表面性状、スラリーの流れなど)の観察が難しいためであるが、最近の見える化技術により研磨現象が解明され理論化が進むことが期待されている。より詳しい研磨の情報については参考文献 1)～4)を参照されたい。

5. 参考文献

- 1) 河西敏雄, 安永暢男: 高付加価値のための精密研磨, 日刊工業新聞社, (2010).
- 2) 宇根篤暢, 河西敏雄: 研磨加工の理論と計算手法, 日刊工業新聞社, (2010).
- 3) 奥山繁樹ほか: 機械加工学の基礎, コロナ社, (2013)181.
- 4) 鬼倉宏猷: 機械製作要論, 養賢堂, (2016)171.