

## 十二回連載 ウンポイントレッスン 第二回

# 現場で使える 研磨加工の理論と計算手法

河西敏雄(株)河西研磨技術特別研究室), 宇根篤暢(防衛大学校)



## 1. 加工量・工具摩耗量の要因

先月号の図 1.1 に示した加工量および工具摩耗量のデータは、筆者等の古い実験結果である。当時（1960 年代前半）を思い返すと、多くの光学メーカーのレンズやプリズムの製作では、多連のオスカーワン式レンズ研磨機によるピッチポリシングが盛んに行われていた。一方、研磨時間の短縮も迫られており、新規の研磨機の開発、高速・高圧の研磨条件に見合った新しいポリシャあるいはポリシングパッドの探索などに向け、当時の光学工業技術研究組合（現日本オプトメカトロニクス協会）を中心に調査研究が進められていた。レンズ研磨機の下皿の等速回転、上皿の円弧往復と不等速回転の組合せでは、特に上皿の円弧往復の死点における運動の変化において異常回転、異常圧力が発生し、これらは研磨量測定において誤差発生の原因になった。それを改善すべく上記研究組合の補助を得て取り入れたのがリング工具研磨機であり、摩耗測定を可能にするため工具に PMMA 材を用いた。研磨機は、その後の小型修正輪形研磨機の製作に結び付くことになる。

このリング工具研磨機によって、工作物が鏡面になると、研磨量と工具摩耗量が安定し、研磨時間と直線的な関係となり、相対速度や圧力に対しても比例することが明確になった。なお、研磨量や工具摩耗量は、工作物であるガラスにビニールテープをマスクにしてフッ酸エッティングで溝を作り、また工具の PMMA には切削で溝を作り、触針式表面粗さ測定機を用いて研磨前後の溝深さの変化から求めた。

## 2. 研磨量・工具摩耗量の比例定数

研磨量  $hw$  と工具摩耗量  $ht$  は、速度  $v$ 、圧力  $p$ 、時間  $t$  との間で式(2.1) のように表される。

$$hw, ht = (\eta w, \eta t) v \cdot p \cdot t \quad (2.1)$$

この式は平面度など形状変化を算出していくうえで基本式になる。比例定数  $\eta w$ 、 $\eta t$  については、光学工業研究組合ガラス加工研究委員会で提案し、検討の結果、走行距離と圧力の単位を残し、「比研磨量・圧力比  $\eta w$  ( $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} / \text{Pa}$ )」、比工具摩耗量・圧力比  $\eta t$  ( $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} / \text{Pa}$ )」と定義した。

ポリシングにおける研磨量とこれらの比例関係については、1927 年の Preston のフェルトのポリシングパッドによる天体望遠鏡反射鏡の研磨機設計に関する論文のなかでも扱われており、多くの論文で引用されている。

筆者らは、砥粒が遊離状態にあるので工作物だけでなく工具にも、また、ポリシングだけでなくラッピングにも同様に適用し、この比例関係が全く同じように扱えることを明らかにした。その後、トライボロジー分野でもアブレイシブ摩耗が提案され、「比摩耗量(1/Pa)」が用いられるようになった。上記の比工具摩耗・圧力比と次元は同一である。

## 3. 平行度修正研磨の理論的扱いと検証

これらの比例関係が成立する条件のラッピングやポリシングでは、その条件を活かして加工を合理的に進めることができる。式(2.1)のように、加工量に対して速度、圧力、時間をそれぞれ等価として扱えるので、例えば、所定の厚さ寸法に仕上げる場合に速度あるいは圧力を 2 倍に選べば研磨時間は 1/2 に短縮できる。

ところで我々は、研磨で工作物に片寄った圧力や速度が作用すると工作物が偏減りすることを経験している。平行度修正研磨はこの偏減りを上手くコントロールすることで行われている。ここでは2種類の偏心荷重付加による平行度修正法を説明する。

**図2.1**は剛体と見なせる自重 $P_W$ の円板状工作物に偏心荷重を付加したときの圧力分布モデルである。(a)は、半径 $R_W$ 工作物の中心Oと偏心位置Eを結ぶ線をx軸とし、偏心距離 $x_E$ に集中荷重 $P_E$ を付加した場合である。工作物と工具の間に生じる圧力分布 $p(x)$ は式(2.2)のように表せる。

$$p(x) = \{(P_W + P_E)/\pi R_W^2 + (4P_E \cdot x_E \cdot x)/\pi R_W^4\} \quad (2.2)$$

式(2.2)は材料力学の短柱の偏心荷重付加と全く同一の式であり、1995年のRumseyが平行度修正研磨の説明で引用した。ここで修正時間を短縮するため、 $x_E$ や $P_E$ を大きくとると理論上負の圧力となり加工されない部分が生じる。現実には、傾斜角度が異なる2面が形成され、それらが交差する境界に折れ線が発生するので、最小分布圧力位置 $x = -R_W$ において、 $p(x) \geq 0$ を満足させることが必要条件になり、 $x_E$ と $P_E$ の関係式(2.3)が無視できなくなる。

$$x_E \leq R_W/4 + (P_W \cdot R_W)/4 P_E \quad (2.3)$$

一方、(b)はこれらを踏まえ、負の圧力発生の心配がない偏心荷重付加法として筆者らが提案したものである。円柱を斜めに切断した荷重 $P_E$ の偏心分銅の重心位置(偏心位置)は、 $x_E = R_W/4$ である。式(2.3)を満足しており、圧力分布 $p(x)$ は式(2.4)のように表せる。

$$p(x) = \{(P_W + P_E)/\pi R_W^2 + (P_E \cdot x)/\pi R_W^3\} = H_W \cdot \rho_W + H_E \cdot \rho_E (1+x/R_W)/2 \quad (2.4)$$

ここで $H_W$ 、 $\rho_W$ はそれぞれ工作物の厚さと比重、 $H_E$ 、 $\rho_E$ は偏心分銅の最大高さと比重である。

工作物の厚さ偏差を $HE_1$ から $HE_2$ に修正するのに時間 $t_E$ を要したとするならば、式(2.5)のような関係になる。この関係はラッピングでもポリシングでも確認できた。

$$HE_1 - HE_2 = 2 \eta W \cdot v (P_E/\pi R_W^2) t_E \quad (2.5)$$

図2.2は、工作物の $\phi 60 \times 1.5$ の薄板ガラス

に偏心分銅を付加してピッチポリシングを行つたときの平行度修正を示す等厚干涉縞である。これは光源のHe-Neレーザ光( $\lambda:6328\text{\AA}$ )が工作物(屈折率1.5のガラス)の表面から入射し、裏面から反射してくる光との干渉である。研磨の初期条件は、あらかじめガラスの両面とも、平面度 $0.15\mu\text{m}/\phi 60\text{mm}$ ( $\lambda/4$ )に仕上げた。そのとき平面ピッチポリシャと全面が一定速度となる修正輪形研磨機を用い、偏心分銅を付加して研磨を行つた。当初は数えることが難しいほど多数の縞があった。それを10数時間の修正研磨で6本まで平行に近づけ、54分間の研磨で1本以内にした。工作物に偏心分銅を付加し、直線的に変化する圧力分布条件のもとで行った研磨である。変形しやすい薄板ガラスとピッチポリシャを用いたにもかかわらず長時間研磨で直径上に異常な変形を生じることなく修正研磨できた。

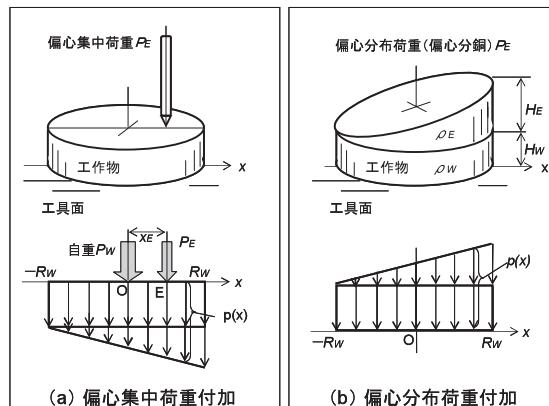


図2.1 2種類の偏心荷重付加法

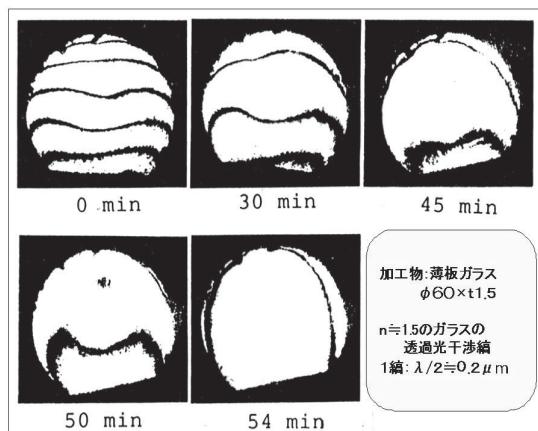


図2.2 ポリシングにおける平行度修正