

ガラスの研磨加工

大阪大学

榎本 俊之

Basic Glass Polishing

Toshiyuki Enomoto

Osaka University

1. はじめに

研磨加工とは研磨パッド、ラップ定盤といった工具の上に切れ刃となる砥粒を含んだ研磨剤を供給し、それに工作物を押し当て摺動させるといった単純な加工プロセスである。それゆえに、その構成要素の種類、組み合わせ、使い方には極めて多くの選択肢があり、適切に選択することで他の加工法では得られない高品位かつ高精度な仕上げ加工をリーズナブルなコストで実現できるものの、そのためには多くの知識やノウハウが必要とされる。

そこで本稿では研磨加工における数多くの選択肢やその組み合わせ方の中で、ガラスを対象とした研磨加工を中心に基礎的な知識にしばって解説する。なお基礎知識とはいっても加工、特に研磨加工に関する知識にはケースバイケースで変わるものが多く、ここでは最も一般的な内容を説明するにとどめる。

2. 研磨加工の概要

まず研磨加工そのものについて簡単に述べる。砥粒を使った加工、つまり砥粒加工には大

きく研磨加工と研削加工がある。研磨加工とは圧力により切込みを行う（圧力転写原理にもとづく）加工であり、研削加工とは砥石を用いて寸法により厳密に切込みを行う（運動転写原理にもとづく）加工である。したがって研磨加工では研削加工と異なり、加工機精度をこえる微小な切込みを実現でき、良好な仕上げ面を容易に得ることができる。研磨加工はさらに研磨剤（スラリー）を用いる遊離砥粒加工と砥石を用いる固定砥粒加工に分けられるが、一般には前者のみを研磨加工としてイメージされることが多いようである。

研磨加工を行うにあたり、この遊離砥粒加工法と固定砥粒加工法のいずれを採用すべきかは重要な課題となる。前者は加工能率の向上に限界がある、工作物の洗浄が大変である、スラリーに起因する劣悪な作業環境、廃液処理等々の問題を有することから、固定砥粒加工への置き換えが強く望まれている。しかし砥石を用いた加工では砥粒や砥石の摩滅・摩耗などによりその切れ味を一定に保つのが難しいという致命的な問題がある。また後工程を考えた場合、切れ刃軌跡が多方向となりやすい遊離砥粒加工のほうが望ましいこともある。このようにいずれも一長一短があり、実際に一度固定砥粒加工法に置き換わったものの、数年後にはまた遊離砥粒加工法に戻るといったことも加工現場では起

きており、加工仕様や加工工程の変化、工具の進歩などにより日々変わっているのが現状である。なお、以下では研磨加工とは特に断りのない限り、遊離砥粒加工のことを指す。

3. 研磨加工の基礎知識

3.1 ラッピングとポリシング

研磨加工はラッピングとポリシングに大別される。ラッピングは粗い研磨加工、ポリシングは精密な研磨加工といった具合に、その結果により区別されているだけであり、曖昧さを有した用語であるが、おもな特徴を以下に挙げる。

ラッピング：・工作物を所定の形状、寸法、厚みに能率よく仕上げる ・おもに粗い砥粒と硬質な工具を使用する ・おもに機械的除去作用で加工する

ポリシング：・工作物の加工面を高品位、精密に仕上げる ・おもに微細な砥粒と軟質な工具を使用する ・機械的除去作用に化学的作用を併用することが多い

このようにラッピングでは硬質な工具（ラップ定盤）の上を粗い砥粒が転動しながら加工が進行し、ポリシングでは軟質な工具（研磨パッド／研磨布）に微細な砥粒が緩く保持されながら加工が進行する。その他、硬質工具と微細砥粒、軟質工具と粗砥粒という組み合わせも実際の加工に用いられている。

3.2 ラッピング用砥粒と工具

ガラスのラッピングでは、#1000程度（平均粒径12 μm 程度）のアルミナ系砥粒を防錆剤などととも水に分散させて用いることが多い。実際には加工現場ごとにそれぞれの考え方により砥粒の選択を行っているが、ラッピングはポリシングの前工程と位置づけられるため、そのポリシングの負荷を考慮して工程設定される。後述するガラスのポリシングにおける加工能率はおよそ1~5 $\mu\text{m}/\text{min}$ である。これに対し、ポリシングに要する加工時間を短縮したい、また取り代が多くなると形状精度が劣化しやすいといったことを考慮して、ポリシングに

おける取り代としては数~10 μm 程度に設定されることが多い。ポリシングでは仕上げ面粗さを良好にするのみならず、表面の加工変質層も除去しきることが求められるため、前工程後の変質層厚みを取り代である10 μm 以下にしておかなくてはならず、おおざっぱには加工面粗さとしてP-V1~2 μm におさえる必要がある。こうしたことから上記のように#1000程度アルミナ系砥粒が多用されるのである。

なおラッピング用砥粒、つまりラップ材としては上記のアルミナ系の他には炭化珪素系の砥粒が広く使われている。炭化珪素系砥粒は高硬度で鋭利なコーナを有するため、加工面粗さは大きいものの加工能率に優れるといった特徴を有する。一方、アルミナ系砥粒は炭化珪素系砥粒より硬度は低く、形状もブロックである。したがって加工能率は劣るが、良好な加工面粗さを得やすい。また砥粒の選定においては種類と粒度に着目することが多いが、砥粒による突き出し高さの差が実質的な切込み深さとなるため、加工能率の高低は砥粒の平均的な大きさではなくその粒度分布のばらつき程度の影響を受けることになる。大きな砥粒を用いると加工能率が高まるのは、大きな砥粒になるほど粒度分布のばらつき程度が大きくなるためである。

次にラッピング用工具（ラップ定盤）としては、・砥粒をある程度工具内に沈み込ませる・工具形状を維持するための適度な耐摩耗性を有する・形状修正が容易であるといった目的から鑄鉄定盤が多用されている。そして加工能率の向上やスクラッチ発生の抑制などのために定盤には基盤目、放射状、スパイラル状等の溝が加工されることが多い。

粗加工ではこうしたラッピングにかわり、固定砥粒加工が用いられることもある。ガラスレンズの研磨ではラッピングを砥石研磨（ダイヤモンド砥粒をブロンズや樹脂で結合させたペレット状砥石を定盤上に多数配置）に置き換えることで加工能率が100倍、加工面粗さが1/10といった大きな効果が得られているが、ここで

も砥粒の突き出しを確保し、切れ味を安定に保つことが重要であることは言うまでもない。

3.3 ポリシング用砥粒と工具

仕上げ加工であるポリシング用の砥粒としては、シリカ系、アルミナ系、セリア系やダイヤモンドなどが挙げられるが、ガラスのポリシングではセリア、シリカ、ベンガラ、ジルコニアが用いられる。その中でもセリアつまり酸化セリウム (CeO_2 、通常は粒径 $0.2\sim 3\ \mu\text{m}$) が圧倒的に多用されるが、それは高い加工能率で良好な仕上げ面粗さ (P-V $10\sim 20\ \text{nm}$) を容易に得られるからである。セリアはバストネサイトを原料とし、酸処理、焼成、粉碎などの工程を経て製造されている。特に焼成工程では微妙な設定温度や時間の違いによりセリアの凝集程度、硬度が大きく変化し、そのため化学的作用の程度も変わるため、重要な工程となっている。

ガラス研磨に限らずポリシングにおいては砥粒による機械的除去作用の他に、あるいはそれ以上に、砥粒やスラリー溶媒による化学的な作用が支配的となり、これにより高品位な加工面を得ることができる。ガラスのポリシングでは様々な加工メカニズムが提案されているが、基本的にはガラス表面に軟質な水和層が形成され、その水和層をセリアや研磨パッドが除去することで加工が進行すると考えられている。ここでセリアの役割については多くの説があり、その一例を紹介する。ガラスの表面に形成された水和物と砥粒中の金属との間に Si-O-Me 結合がつくられる。ここで Ce は Si をはじめ他の Me に比べ粒子表面の OH 結合が多く、その結果 Si-O 結合より O-Me 結合が強くなり、Si-O がより多く切れ、加工能率が高くなる。なお Ce の次に結合力が強い Me は Zr である。

このセリア砥粒は比重が大きく、また凝集し $1\ \mu\text{m}$ 以上の粒子となりやすいため、スラリー中で分散しにくく、すぐに沈殿してしまう。またコロイダルシリカのように電気的反発力による分散効果を得ることが難しく、そこで高分子をベースにした分散剤が添加されることが多

い。しかし分散剤は起泡性が強く、また砥粒を高分子で包埋した状態にしやすいため、加工作用が抑制され、加工能率が大きく低下しやすいといった問題を生じやすいので注意を要する。

次にポリシングで用いられる工具、すなわち研磨パッドとして工業的に多く使用されるものとしては、スエード、不織布、発泡ポリウレタンからなる各種研磨パッドが挙げられる。ガラスのポリシングにおいては、セリアを含有した発泡ポリウレタン研磨パッドとセリアを用いたポリシングを 1~2 工程行い、必要に応じて最後にスエード研磨パッドとコロイダルシリカを用いたポリシングを 1~2 工程行うことが多い。発泡ポリウレタンパッドにセリアを含有させるのは、研磨パッドを適度な硬度にして耐摩耗性を高め、良好な形状精度を得やすくするとともに、ある程度脆くして研磨パッド表面が同じ状態を維持しやすくするためとされている。なお硬さを目安として研磨パッドの選択がなされることが多いが、それと加工能率、形状精度 (平面度) との関係は加工条件によっても大きく変わるため、あまり先入観をもたずに、まずは全く異なる種類の研磨パッドをいくつか評価することが望ましい。

その他の要素技術として、リテーナ・キャリア技術を含めて片面/両面加工における工作物の取り付け、保持技術も高精度加工を実現する上で極めて重要である。また工作物である硝材の諸特性 (特に水和層生成速度とその硬さ) を考慮することも当然必要となる。

4. おわりに

ガラス研磨加工に対する要求の高度化はとどまるところを知らない。業界スタンダードとされている加工装置や消耗材、加工条件を単に選択しただけではそうした要求に応えることは不可能となってきており、これからは基礎的な知識に立脚し、可能な限り工学的な検討を行い続けることが必須である。本稿がそのきっかけになれば幸甚である。