

# 研磨加工における化学的作用

Role of Chemical Actions in Abrasive Machining

谷 泰 弘\*

Yasuhiro TANI

研磨加工と研削加工の大きな違いは、研磨加工では化学的作用が除去作用に大きな影響を及ぼしていることである。こうした研磨加工の中で、機械的作用と化学的作用の相互作用であるメカノケミカル作用を主体としたメカノケミカルポリッシングは、ダメージレスを目指す最近のポリッシング技術の中心となっている。このメカノケミカルポリッシングにおいて、砥粒の電気化学的作用は仕上げ面粗さや除去能率を決める要因となっている。最近の話題として、この電気化学作用を積極的に利用した研磨技術が開発されている。本解説では研磨加工における化学的作用と電気化学作用を利用した研磨技術について紹介する。

## 1. 研 磨 加 工 と は

研削加工と研磨加工は、硬質の砂粒である「砥粒」を用いて表面の仕上げを行う、同じ砥粒加工の仲間である。この二つの加工方法は、それぞれ異なったメカニズムにより加工が行われていると考えられている。すなわち、研削の加工メカニズムは「削る」(材料の微小量を削り取る)ことであるのに対して、研磨の場合は「表面を摩擦する」動作であると考えられている。このように、加工メカニズムが違うにも関わらず、加工現場では研削加工のことを「研磨する」と表現している場合が多い。これは、仕上げ研削では切り込み量が微小でその加工メカニズムが摩擦に近いと想像されることから、そういった表現がとられているに違いない。

しかし、これは研磨屋に言わせれば、大変迷惑な話である。もともと研削と研磨とは大きく違っているのである。機械加工の代表的な三つの加工方法である切削・研削・研磨の基本的な性格を比較して示せば、図1のようになる。確かに切れ刃として用いられているのが砥粒で、加工に同時に作用している切れ刃が多いという点では、研削と研磨は似ている。しかし、形状創成方法の点では、研削は切削と同じ運動転写が採用されており、圧力転写の研磨とは全然異なっている。また、研削では切削同様切れ刃が工具に固定されており、制御性に優れるという特徴を持っている。こうした点で研削は、どちらかという、切削の方に近いと言えるのである。

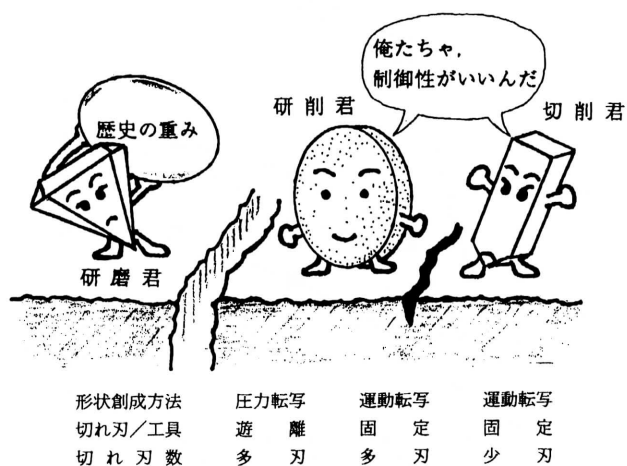


図1 切削・研削・研磨の基本的性格

仕上げ研削の加工メカニズムは摩擦に近いと考えられていると上述したが、これも誤解に近い。というのは、仕上げ研削でも研削マークと呼ばれる筋は観察されるが、研磨ではこうした工具の送りマークが観察されることはめったにない。送りマークはまさに切れ刃の運動軌跡であることから、これが観察されるかされないかで、その加工形態は異なるものと考えられる。

出だしにおいて研削と研磨では同じ砥粒を用いていると説明したが、実はこの理解も正しくない。研磨の大きな特徴の一つは、切れ刃が工具から遊離していることである。そのために、研削のように切り屑が砥粒間につまり加工状態が悪化するという目づまりの心配がなく、研削では全く使用できないような非常に微細な砥粒が使えることになる。

\*東京大学生産技術研究所 第2部

また、新しい切れ刃がどんどん供給されるため、切れ刃の摩耗の心配もなく、やはり研削では使用できないような比較的軟らかい砥粒も使用できる。実際に研磨では  $0.1\ \mu\text{m}$  以下の超微細砥粒も使われているし、酸化セリウム、酸化クロム、酸化珪素、ベンガラなどの軟らかい砥粒も使われている。これらのことが研磨において鏡面が作りやすい一番の理由となっている。

## 2. 研磨加工と化学的作用

この微細なあるいは軟らかい砥粒が使えるということが、鏡面を作れるということ以外にも研磨加工の特徴を引き出している。友田ら<sup>1)</sup>によれば、図2のように砥粒を精製水に混合させるだけで、液の pH が増加するという現象を観察することができる。この現象は非酸化物系砥粒よりも酸

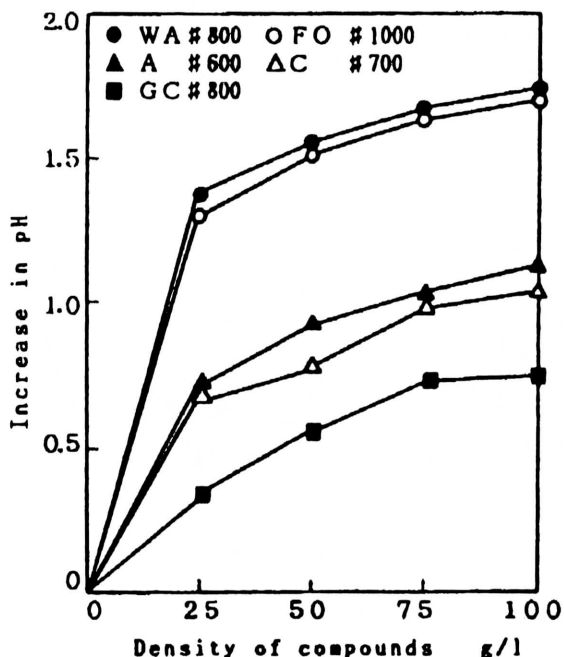


図2 砥粒・精製水混合時のpH変化<sup>1)</sup>

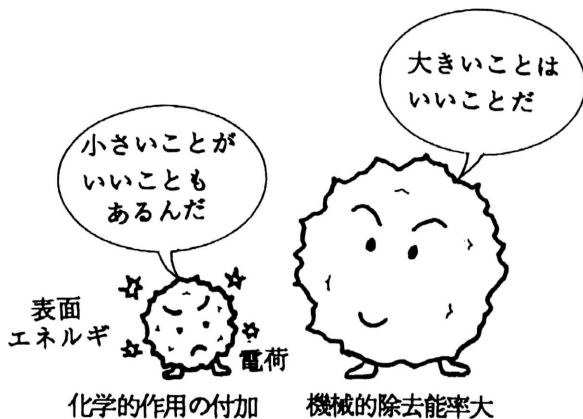


図3 微細砥粒の特徴

化物系砥粒の方が、また砥粒径が小さくて表面積が大きい方が顕著であると報告している。この結果は、安永らが、『砥粒径は小さいほど化学的作用が活発である』(図3)と指摘していること<sup>2)</sup>を裏付けている。そして、この化学的作用のおかげで研磨加工では全く機械的歪みの残らない加工面を作り上げることができるのである。

確かに研削においてもアルミナのように研磨と同じ材質の砥粒も使われている。そのため、実際には砥粒の化学的作用がゼロであるとは言い切れない。しかし、多分機械的な除去作用のスピードがあまりにも早いために、化学的作用の効果がほとんど目立たなくなっているものと思われる。そこで、研削加工でもたとえばアルカリ液を研削液として使用して化学的雰囲気高め、切れ刃の切り込み速度をできる限り遅くして機械的な除去能率を小さくすれば、化学的作用の効果が確認されるかもしれない。

純粋な化学的作用ではないが、電解複合研削や放電複合研削は機械的除去作用以外の効果が確認されている例であろう。一方、研磨では上述のような機械的作用と化学的作用の複合状態を容易に観察することができる。酸化セリウムでガラスの研磨を行う際に、加工圧力を上げすぎると、傷だらけの面になる。これはまさに化学的作用によりガラス表面に水和層が作られる速度よりも、機械的除去能率の方が上回った結果生じた現象であると考えられる。

ところで、その化学的作用の正体は一体何であろうか？このことについては研磨加工の専門家の間でもかなり意見の分かれるところで、はっきりしていない。多様な化学的現象が重なり合っているものと思われる。こうした中で、安永は『“メカノケミカルポリシング”は、メカノケミカル現象(与えられた機械的エネルギーにより誘起される化学反応や相変化)を積極的に利用したポリシング法であり、その加工メカニズムは、

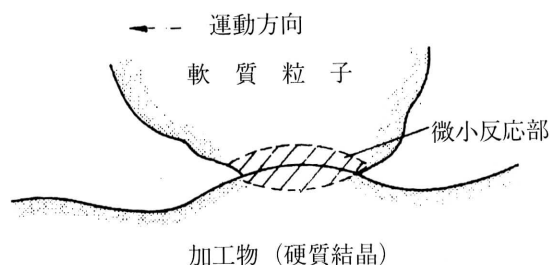
- ①砥粒と工作物表面との真実接触点で両者の直接的な固相反応が生じ、この反応層が摩擦応力により脱落する、
- ②加工除去により露出した活性な新生面で、雰囲気との急速な反応により酸化層や水和層が形成され、この生成層が砥粒との固相反応や砥粒の擦過作用により除去される、
- ③砥粒が触媒的作用を営んで工作物表面の真実接触点の酸化を促進し、さらにこの生成酸化物を砥粒が機械的に除去する、

の三つである』と定義している<sup>2)</sup>。しかし、ここに示された加工メカニズムでは全ての場合で機械的作用が後にある。もし機械的作用が最終的な除去作用を分担しているとすれば、先ほどのガラスの場合同様少しでも機械的作用と化学的作用のバランスが崩れると傷や歪みのある面になるものと推察される。

そこで、上述のような加工メカニズムも確かに存在するかもしれないが、もし研磨により全く歪みの残らない面が



図4 機械的作用と化学的作用

図5 乾式メカノケミカル研磨<sup>2)</sup>

加工されるとしたら、化学的作用が最終的な除去作用を担当している形態も存在するものと考えられる(図4)。つまり、通常の意味でのメカノケミカル作用—機械的ダメージによりエッチングレートが増加するという形態の加工も存在するものと思われる。もっと具体的に言えば、まず工作物表面に砥粒がぶつかったり、機械的摩擦作用あるいは除去作用を行って、工作物表面にダメージが残る。そのために、化学的な腐食作用が促進され、工作物表面の歪みが多い領域が選択的に取り除かれる。そこで、最終的には化学的作用による除去面が残る、ダメージが残らないという加工メカニズムになる。

化学的作用と一言に言っても、触媒、酸化、還元、拡散、化合、腐食、吸着、置換など種々の作用が存在する。どの作用が働いても、広義的にはメカノケミカルポリッシングになるものと考えられる。微細砥粒を用いている研磨では、こうした化学的作用を援用しやすい環境を作り上げているということができよう。これらの化学的作用を利用した研磨を少し以下に紹介しよう。

化学的研磨としてよく知られているのが、ガラスの研磨である。酸化セリウムや酸化クロム、ベンガラなどの比較的軟らかい砥粒を使用した研磨の除去能率が、条件によって同一の粒径の炭化珪素や酸化アルミニウムを使用した研磨よりも高くなり、しかもかなりダメージのない面ができあがるのが判っている。これは、たとえば酸化セリウム

表1 乾式メカノケミカル研磨の例<sup>2)</sup>

加工対象	ポリシヤ・工具	研磨剤・雰囲気	研究者
サファイヤ基板	石英ガラス定盤	シリカ粉など、乾式	安永ほか(電総研)
	クロスポリシヤ	コロイダルシリカ	H. W. Gutsche ほか (Monsanto) E. Mendel ほか (IBM)
	杉定盤など	加熱水蒸気中 (250~300°C)	奥富ほか(電総研)
サファイヤ凹球面	抛入れ工具鋼	シリカ粉、乾式	船戸ほか(日立製作所)
焼結アルミナ丸棒	シリカ粉テープ、ローラ押付け、高速揺動		鈴木(日工大)ほか
ダイヤモンド薄膜	鉄定盤など	水素ガス雰囲気 (730°C以上)	吉川ほか(東工大)
ダイヤモンド先端 (段付き・エッジ)	SiO <sub>2</sub> 薄膜工具	砥粒なし、乾式	西口ほか(日立製作所) Edge Technologies 社
水晶基板	銅定盤など	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粉など、乾式	安永ほか(電総研)
Si 基板	ベークライト	BaCO <sub>3</sub> 粉など、乾式	安永ほか(電総研)
	多孔質テフロン	BaCO <sub>3</sub> 粉, KOH 水溶液	八田ほか(新日鐵)
		CaCO <sub>3</sub> 粉含有低結合度ラッピング砥石、乾式	河田(タイホー工業)ほか
単結晶フェライト	鉛・すず定盤	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粉, 希塩酸液	落合ほか(日立製作所)
多結晶窒化けい素	ベークライト	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粉, 乾式・湿式	H. Vora ほか (Honeywell)
		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粉含有樹脂定盤, 乾式	須賀ほか(東大)
		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粉含有樹脂スティック, 低周波振動	鈴木(日工大)ほか
		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粉テープ, ローラ押付け, 高速揺動	鈴木(日工大)ほか
	非接触	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粉スラリー (電気泳動衝突)	黒部ほか(金沢大)
単結晶炭化けい素 多結晶炭化けい素		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粉含有樹脂定盤, 乾式	須賀ほか(東大)

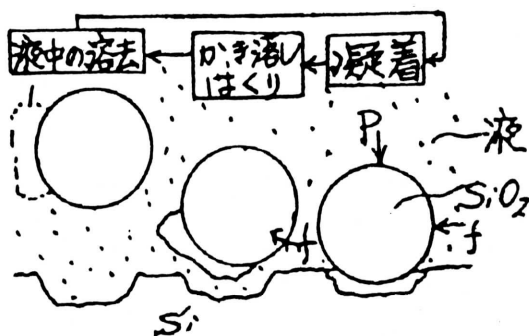
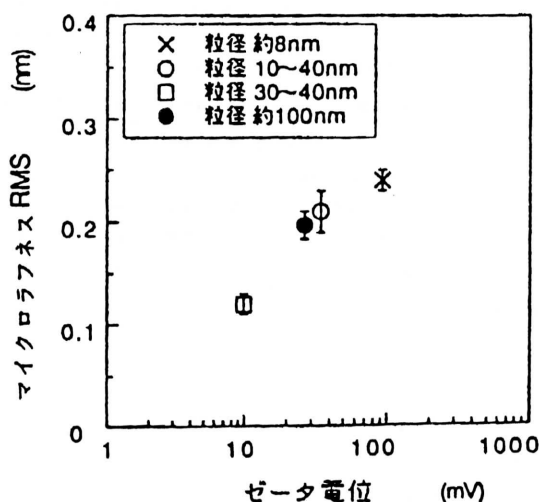
砥粒がガラスの表面に水和層ができる現象を加速する触媒的な働きをしているのではないかと考えられている。

安永らは、図5に示されるように工作物よりも軟らかい砥粒が工作物表面との間で固相反応を生じ、この固相反応で生成された化合層を砥粒の擦過作用でぬぐい取る「乾式メカノケミカル研磨<sup>2)</sup>」を提案している。この研磨法では表1のように種々の工作物と酸化物系砥粒の組み合わせが確認されている。機械的な除去作用のみを考えていたのでは、工作物よりも軟らかい砥粒で工作物表面を研磨するという発想は出てこないだろう。

### 3. 研磨加工と電気化学作用

0.1 μm 以下のシリカ砥粒をアルカリ液中に分散させたコロイダルシリカによるシリコンウェーハの研磨は、やはり化学的作用を付加された研磨の代表的なものである。やはりその加工メカニズムははっきりしていないが、上述のような機械的ダメージがエッチングレートを高めるメカノケミカル反応であるかもしれないし、シリカ粒子の表面にシリコン原子を吸着させる現象や水和層を生成する現象<sup>3)</sup>であるかもしれない。

吸着現象については、NTT 在籍時に上野らが図6のような加工メカニズムを想定し、解明しようと努力をしている<sup>4)</sup>が、どうもはっきりした証拠を見つけるまでには至っていない。少し話が異なるが、銅をコロイダルシリカを用いて研磨すると、白色の研磨液が青色に変わり、そのpH

図6 吸着現象<sup>4)</sup>図7 ゼータ電位と仕上げ面粗さ<sup>6)</sup>

も低下する現象<sup>5)</sup>が観察される。また、この時研磨液は分散状態が悪化し、沈殿を生じるようになる。これらはアルカリ液中でマイナスに帯電しているシリカ粒子の表面に銅イオンが吸着した結果であると考えられる。

池野らはその現象を利用して、コロイダルシリカを用いた銅とアルミニウムの同時研磨で、銅とアルミニウムの表面を平滑化しながら、アルミニウム表面に銅をメッキさせる“プレーティング研磨”を提案している<sup>5)</sup>。このように、研磨における化学的作用は除去作用にも付着作用にも適用でき、除去プロセス中に付着現象を発現させることが可能となる。

こうした吸着現象は、微細砥粒が研磨液中で帯電しているために生じる現象である。その電位は $\zeta$ （ゼータ）電位と呼ばれており、砥粒の種類や粒径、研磨液の種類により異なっている。この $\zeta$ 電位は種々の研磨特性に影響を与え、図7に示されるようにこの $\zeta$ 電位により仕上げ面粗さが変わってくることも知られている<sup>6)</sup>。もしこうした研磨液に外から電場が作用すれば、メカノケミカル作用が活性化することも可能になる。たとえば、黒部<sup>7)</sup>や池野<sup>8)</sup>は微細砥粒が電荷を持つことを利用して、砥粒を工具に集める電気泳動現象を研磨に利用することを試みている。

このように、種々の場を援用することにより、研磨特性を変化させることができる（図8）。こうした例として、

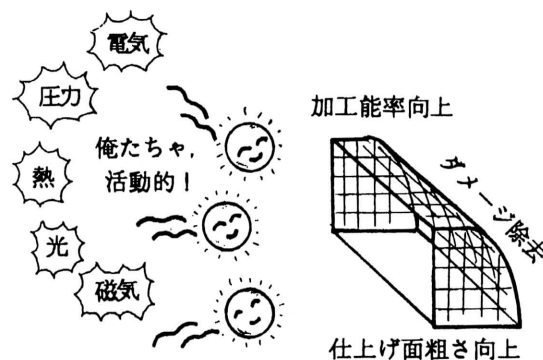
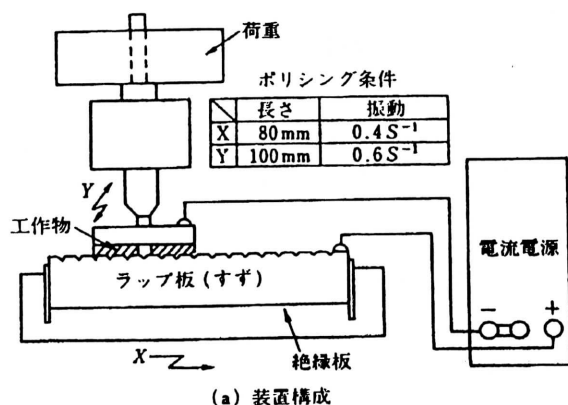
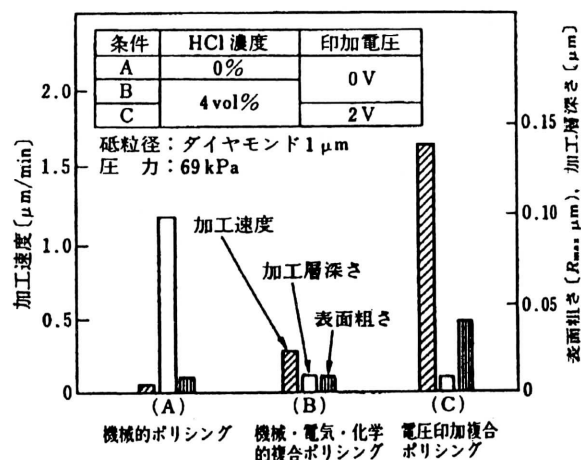


図8 微細砥粒の活躍



(a) 装置構成



(b) フェライト材料の加工特性

図9 電圧印加複合研磨法<sup>9)</sup>

放電現象や電解現象を利用したものも報告されているが、こうしたものは研削加工においても同様のものが存在しているので、ここでは研磨特有の話として、電気化学現象を利用した面白い例を紹介しよう。

ダイヤモンドスラリを含んだ塩酸液中ですす定盤を用いてフェライトを研磨する際、工作物が陰極になるように電場を作用させると、局部電池ができてフェライトが還元され溶解する現象<sup>9)</sup>が確認されている。このことにより、図 9 に示されるように砥粒の機械的除去作用と複合して、高い加工能率とダメージの少ない加工面が得られている。

このように、化学的作用を促進させるもの、あるいは複合的現象を生じさせるものとして、電気の外に、圧力、熱、光、磁気などがある。ここで、圧力は砥粒の機械的作用と考えるのがふつうであるが、工具の機械的作用まで考えれば、電解研磨や熱拡散反応を利用したもの<sup>10)</sup>、置換反応を利用したもの<sup>11)</sup>なども存在する。

#### 4. 研磨加工の今後

3 K の最も代表的存在であるはずの研磨加工に最近注目が集まっている。研磨加工を他の加工方法により代替することが今後の課題であると大部分の技術者が理解しているにも関わらず、磁気ディスク基板の最終仕上げやデバイスウェーハのプラナリゼーションなど研磨加工の適用分野が増加している。研磨加工の持つ魅力を少しでも本報で紹介したつもりであるが、こうした研磨加工の特徴を持った固定砥粒加工法の完成にはまだまだ研究開発が必要だと思われる。

(1996年1月9日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) 友田 進, 菅原 章: ラップ液の pH に関する研究, 精密工学会誌, 54, 2 (1988) 372.
- 2) 安永暢男, 須賀唯知: 機能材料のメカノケミカルポリシング, 1993年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, (1993) 29.
- 3) 精密工学会編: 精密工作便覧, コロナ社, 東京, (1992) 615.
- 4) 梶田三夫, 上野嘉之: メカノケミカル・ポリシングにおける圧力効果, 昭和59年度精機学会秋季大会学術講演会論文集, (1984) 53.
- 5) 池野順一, 谷 泰弘: 超微細砥粒の表面活性を利用した物質移送に関する一考察, 砥粒加工学会誌, 36, 3 (1992) 155.
- 6) 左光大和, 安永暢男, 荒木隆一, 高橋 彰, 土井健司, 鈴木謙一: Si ウエハポリシング面の AFM による粗さの評価 (第3報), 1993年度精密工学会春期大会学術講演会講演論文集, (1993) 847.
- 7) 黒部利次, 今中 治, 坂谷勝明: 電気泳動現象利用による表面研磨, 精密工学会誌, 52, 3 (1986) 151.
- 8) 池野順一, 谷 泰弘, 福谷亮人: 超微細砥粒の電気泳動現象を利用した研削切断法の開発, 日本機械学会論文集 (C編), 57, 542 (1991-10) 3320.
- 9) 田村利夫, 荒川紀義, 落合雄二: フェライト材の電圧印加複合研磨法, 精密工学会誌, 54, 12 (1988) 2307.
- 10) 楊 政峰, 戸倉 和, 吉川昌範: 熱化学反応を利用した膜状ダイヤモンド研磨機の試作および性能, 精密工学会誌, 55, 1 (1989) 77.
- 11) E. Mendel: Polishing of Silicon, SCP & Solid State Tech., 10, 27 (1967).