

超精密研磨用砥石の動向

池野 順一*

1. はじめに

昔からさまざまな産業分野で表面仕上げが求められており、分野毎に専用の研磨用砥石が開発されてきた。1934年には自動車産業で軸受のレース面や円筒などの鉄鋼部品用に多孔質のビトリファイドボンド超仕上げ砥石が開発され騒音低減に貢献した¹⁾。この砥石は面粗さを向上させるためにバニッシング効果を最後に利用している。またシリンダー内の仕上げでは油だまりを残しつつ摩擦面の形状精度と平滑性を備えた機能表面が求められており、ホーニング加工法の開発とともに専用砥石の開発が進められた。鉄鋼以外に用いられる研磨用砥石を見てみると、ステンレス板材やディスクに用いるアルミニウムなど、目詰まりしやすい金属素材には多孔質レジンボンド弾性砥石が開発されている。

1990年ころになると半導体結晶材料の加工が課題となり、ポリシングメカニズムを転用したメカノケミカル砥石が研究され、加工変質層のないナノレベルの鏡面を目指すようになった²⁾。この鏡面創成に対しては研削加工側からのアプローチも盛んになり延性モード研削の概念が出され、1990年代には超精密研削装置の開発とともに超砥粒砥石の開発が進められた³⁾。いまではSiCなどの高硬度材料に対して、高速でしかも研削マークが視認できない数nmの面粗さを実現しており著しい進歩を遂げている。以上、一口に研磨用砥石といってもルーツの違いで、加工対象や求められる精度、品質、機能、砥石に対する考え方も異なっている。

一方、製品の高機能化に伴って加工精度に対する要求が年々厳しくなっている。とくにパワー半導体基板材料や電子材料などでは高速でしかも高精度・高品位な研磨加工が求められている。さらに研磨工程における環境保全、コスト、技能などの課題も相まって産業界が研磨用砥石に寄せる期待は大きなものになっている。前述したようにルーツを異にする研磨用砥石であるが、いま分野の垣根を越えて各研磨用砥石メーカーが産業界の求めに応じて同様の技術課題に取り組む傾向が見られる。まさに研磨用砥石にとって歴史的な合流点に差し掛かっており、それぞれが培ってきた知見や新たな知見が融合し、今後ますます発展していくものと期待される。

本稿では、主に半導体結晶材料や電子材料に用いる研磨用砥石を要素毎に眺め、その課題と対策となる新技術について紹介し、最後にいくつかのメカノケミカル砥石についても紹介したい。なお、紙面の都合上、筆者が気になる技術を優先的に取り上げたので、偏りのあることは否めない。著者の浅学ゆえご容赦いただきたい。

2. 各要素における課題と新技術

2.1 砥粒

半導体結晶材料や電子材料の高品位加工にはメカノケミカル反応を利用するのが有効である⁴⁾。加工メカニズムは主に3つあり、固相反応(狭義のメカノケミカル反応)、吸着イオンによるケモメカニカル反応、触媒作用などである。加工対象物ごとに反応が異なるため、砥粒の選定や探査が課題である。これにはトランスファ・エンジニアリング(技術移転)の考え方が役立つ。

*IKENO, Jun-ichi / 埼玉大学 理工学研究科 教授

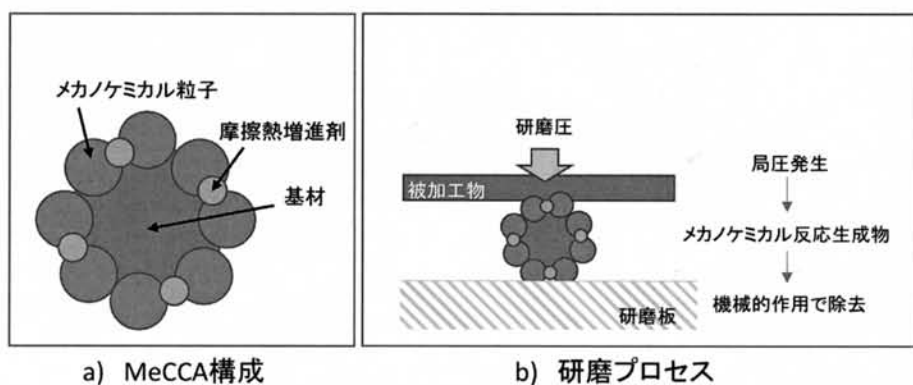


図1 機能性複合砥粒 (MeCCA) 概念図

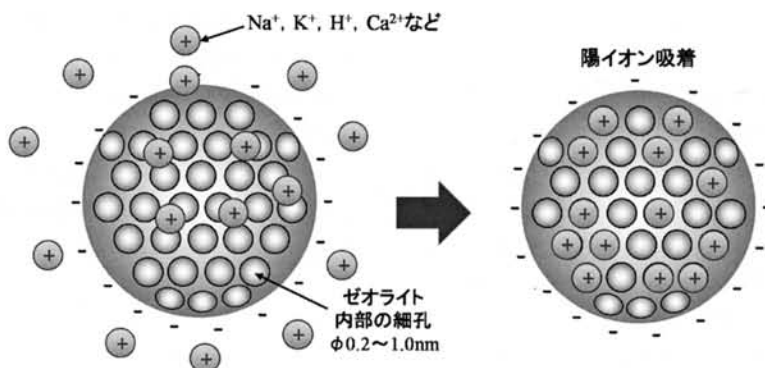


図2 ゼオライトの構造

(1) 機能性複合砥粒 (MeCCA) の開発

乾式メカノケミカル研磨ではサファイアが熱変形し、砥粒がサファイア表面に固着するため湿式が望ましい。ところが湿式では効率が極端に落ちてしまう。そこで湿式でも効率よく研磨できる砥粒の開発が、粉体製造メーカーのノウハウを使って進められている。図1にその砥粒の概念図を示す。それぞれ機能をもつ粉体同士が固着して一つの単位をなしており、機能性砥粒(アサヒ化成工業社製MeCCA)を形成している⁵⁾。具体的にはサファイアが傷つかない程度に硬い物質(アルミナなど)を基材とし、そのまわりにメカノケミカル砥粒(ベンガラ)や摩擦時に発熱する物質を配している。基材はメカノケミカル砥粒をサファイアとの間に挟み、局圧を発生させて反応させる役割と、サファイア表面に生成された反応物質を機械的作用で効率よく除去する役割を担っている。これにより、ダイヤモンドラッピングと同等の研磨効率でサファイア基板を0.5nmRaの鏡面に仕上げることが可能になっている⁵⁾。今後は研磨用砥石としても展開が期待される。

(2) 天然物における砥粒の探査

自然科学を基礎とした技術ならば自然界から砥石として適正な物質を抽出することも忘れてはならない。山形県産のイタヤ・ゼオライトはシリカを約70%含んだ白色で不純物の少ないゼオライトである。図2のようにナノ細孔を持ち電荷を帯びており、触媒やガス吸着材などに使用されている。このゼオライトを砥粒として使い、SiCの研削加工を行ったところ、メカノケミカル反応が確認され、SiCウエハは3nmRa以下の表面粗さとなることがわかった⁶⁾。コストで比較すると、CMPで使用されるシリカ微粒子の1/10以下、ダイヤモンドの1/200となる。研究が進めば研磨用砥石のための人造ゼオライト開発も夢ではなく、将来が楽しみである。

2.2 結合剤

研磨用砥石には主にビトリファイドボンドとレジンボンドが使用されている。それぞれの成分には添加剤が含まれ、製造上のノウハウもあるため詳細を知ることはできない。研究発表もほとん

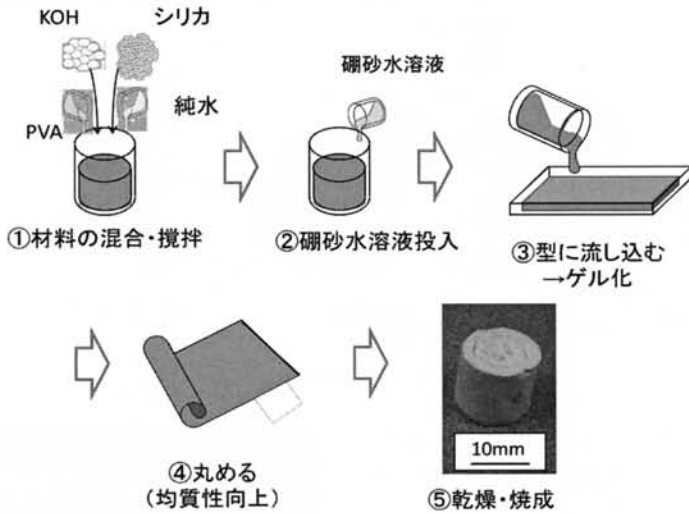


図3 スライムを応用したビトリファイドボンド砥石の作製

どされず、たまに精密工学会や砥粒加工学会で散見される程度である。まさしく結合剤は砥石の最も重要な要素である。難しいことは承知だが、この結合剤に関してもオープンイノベーションが必要ではないかと思われる。

(1) ビトリファイドボンド

研磨用砥石ではないがCBN砥石に用いるビトリファイドボンドの濡れ性改善に関する研究発表が2016年に砥石メーカーから報告された⁷⁾。CBNとガラス結合剤の濡れ性をアルカリ金属成分の含有量で調整し、軟化点を下げることでCBNとの保持面積を大きくできたというものであり、この成果は研磨用砥石にも通用する知見である。

一方、大学からは図3に示すようなスライムにシリカ微粒子を混合させて焼成する試みが報告された。これにより、硼砂が結合剤となってメカノケミカルシリカ砥石が製造でき、SiCを2nmRa以下で高能率鏡面研磨できたことが示された⁸⁾。

(2) レジンボンド

昔からレンズ研磨で使用されてきたピッチには相対速度の小さい相手に対しては変形量が大きく、相対速度が大きいたまには変形量が小さくなる特性(ダイラタンシー)がある。これによって砥粒がピッチ皿と連れ廻っていれば砥粒はピッチに押し込まれて一時固定砥粒となる。レンズの方は相対速度が大きいためピッチは固く作用し形状精度を保つことができる。このダイラタンシーはレジンボンド弾性砥石の摩耗を抑制し、形状精

度と研磨効率を高めるためにも重要な特性であり、加工条件の選定時には考慮する必要がある。2017年の精密工学会では東京都産技研から軸付き砥石において回転速度を変化させれば砥石の硬軟が制御でき、1つの砥石で粗加工から仕上げ加工まで可能であることが報告された⁹⁾。

2.3 気孔・組織

研磨用砥石の目詰まりを解消する場合、一つの有効な対策として多気孔構造が挙げられ、発泡剤を使って80%以上の気孔率が得られている。ただ、気孔も砥粒同様に分散状態はランダムで均一なことが望ましいが確率論で扱われ、なかなか設計どおりに幾何学的構造を作り出すことは難しい。

(1) 3Dプリンタを用いた砥石作製

現在、広い分野で3Dプリンタの活用が検討されている。この最大の特徴は閉空間に微細構造を作り出せることである。茨城大学の伊藤教授らのグループでは、図4に示すように3Dプリンタで設計どおりの幾何学的構造をもつ砥石の開発に取り組んでいる¹⁰⁾。砥粒分散についても、静電気力で形成する噴霧を用いて各層ごとに砥粒を配置し、より均一な砥粒率となるよう工夫している。この製造方法ならば、所定の場所の砥粒率や気孔の大きさ、分布を意図的に変えることができるため、砥石の局所での研磨性能や剛性など制御可能になるとと思われる。今後の研究展開が楽しみである。

(2) アクリル微粒子を用いた気孔形成

発泡剤を用いた場合、結合剤中で泡が凝集し不均一な空間ができやすい。そこで、ビトリファ

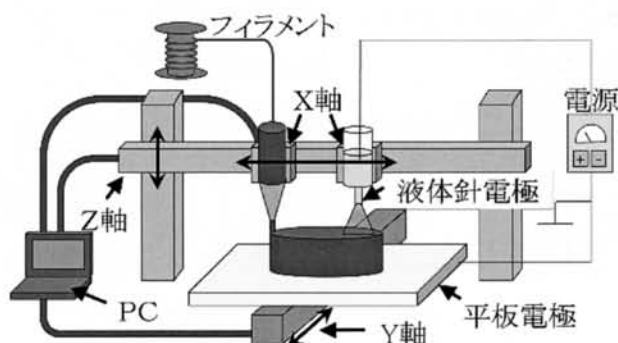


図4 3Dプリンタを用いた砥石作製

イド砥石内の気孔を一定の大きさに制御する研究が行われている¹¹⁾。これには微細で均一径をもつアクリル微粒子が使用される。アクリル微粒子は砥石の仮焼き時に昇華し、気体となってすり抜けていくため、構造を崩さずに微粒子の形状をそのまま気孔として転写することができる。

2.4 装置システム

鏡面研削ではカップ形ビトリファイドボンド微粒ダイヤモンド砥石を用いて、延性モード領域でより微小な切り込みを実現している¹²⁾。これには高剛性な空気静圧スピンドルや高精度な転がり軸受の開発、それに目詰まりを回避するために結合度を調整するなどの工夫がなされている。現在、SiCやサファイアウエハで研削マークが視認できない数nmRzで鏡面仕上げが実現できているのも研削装置と砥石が旨く開発の両輪となっているためである。

一方、研磨加工側からの鏡面創成アプローチであるメカノケミカル砥石はポリシング仕上げに匹敵する清浄面を目指している。ポリシングの仕上げ面はナノレベルでも一定方向に流れる加工痕がないのが特徴である。それは加工面の一点に対して遊離砥粒がランダムな方向から均等に作用するためである。このような面を創成できるメカノケミカル砥石専用加工装置の開発ができれば、砥石の可能性は大きく広がるものと思われる。しかし、研削と研磨の狭間で装置開発が進まず、未だ砥石の特性を最大限活かせる加工装置はない。

3. 最近のメカノケミカル砥石の紹介

3.1 ケミカル作用と機械作用を併せもつメカノケミカル砥石

研磨中のメカノケミカル反応を活発にするた

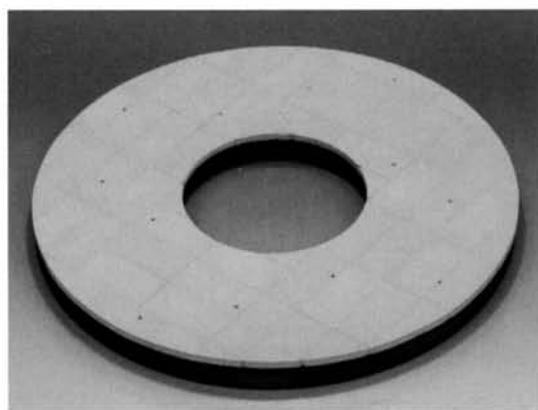


図5 メカノケミカル砥石 (ミズホ社製、SH)

めには、反応生成物に注意しなければならない。もし、反応生成物が加工物表面を被覆するように形成されるのであれば反応場がなくなり研磨は止まってしまう。したがって、そのような場合は反応生成物を機械的に効率よく除去することが望ましい。この機能を持ち合わせたメカノケミカル砥石の一例 (ミズホ社製SH砥石) を図5に示す。この砥石は微細な超砥粒がビトリファイドボンドでしっかり保持されており、効率よく反応生成物を除去できる。さらに、軟質なメカノケミカル砥粒が固体潤滑剤の役割も兼ね、加工変質層の低減や仕上げ面粗さの改善に寄与し、目詰まりや目つぶれを防止している。用途は超仕上げ、ラップ、ホーニングであり、砥粒にはセリア、硫酸バリウム、シリカなどが選択できる。

3.2 メカノケミカル弾性砥石

これまで、多気孔のレジンボンド弾性砥石はC砥粒を用い、目詰まりしにくい特性を活かして、アルミディスクやステンレス板のラップに用いられてきた。その一例を図6に示す。一方で多気孔

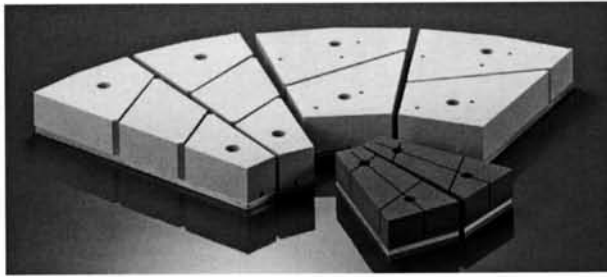


図6 多気孔の弾性砥石（アイオン社製クリスタル砥石）

レジンボンドは酸化物粒子の保持が製造上容易ではなく、他分野への展開がいまひとつ鈍かった。ところが近年、製造技術開発の進歩によって酸化物の保持が可能となり、光学分野や半導体分野用メカノケミカル砥石の開発が進められている¹³⁾。

3.3 SiC研磨における新たな試み

SiC単結晶の鏡面創成ではさまざまなメカノケミカル研磨が試みられてきた。たとえば、UVやプラズマ照射下での研磨¹⁴⁾、¹⁵⁾、強力な酸化剤を利用した研磨¹⁶⁾、触媒作用を利用した研磨加工¹⁷⁾などである。2018年の精密工学会春季大会では、砥粒を含まない多気孔弾性パッド（アイオン社製）をSiCに擦りつけるだけの高効率鏡面創成加工法が報告された¹⁸⁾。これは、まずパッドの摩擦によってSiC表面に酸化層が形成される。次にそれが摩擦で剥がれて多気孔弾性パッドに捕捉されるとその酸化物が砥粒の役割を担ってSiC表面の研磨を加速させるというものである。多気孔弾性パッド面には酸化物が次々と捕捉されず排出されるため、自生発刃作用が生じており40 μ m/h程度の効率で2nmRa程度の鏡面が創成できる。

4. おわりに

さまざまな分野の基礎的知見を融合させて新たなメカニズムに基づく加工を実現し、研磨用砥石は進化を続けている。公益社団法人砥粒加工学会ではこれを重要分野の一つと認定し2005年には「次世代固定砥粒加工プロセス専門委員会」が設置された。今年の8月で研究会は80回目を迎える。企業会員60社、学界会員65名が所属し、毎回活発な議論がなされ盛況な会になっている。活動の詳細を知りたい方は、下記の当専門委員会HPを参照されたい。

<http://spe.mech.saitama-u.ac.jp/mysite5/index.html>

最後に本稿の執筆に当たり、ご協力賜った関係者の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 松森 昇、仕上げ砥石のいろは、精密工学会誌82-7、2016、p.643.
- 2) 池野順一、他、電気泳動現象を利用した超微粒砥石の開発とその応用、日本機械学会論文集（C編）、57-535、p.1013.
- 3) 宮下政和、ぜい性材料の延性モード研削加工技術、精密工学会誌、56-5、1990、p.782.
- 4) 安永暢男、他、軟質粒子によるSi単結晶のメカノケミカルポリッシング、精密機械学会誌、44-9、1978、p.63.
- 5) 藤本俊一、高能率鏡面研磨用砥粒（MeCCA）の開発、2017年度砥粒加工学会学術講演会論文集、p.78.
- 6) 小金裕貴、他、天然物を使用した硬脆材料の鏡面研削砥石に関する研究、2014年度精密工学会春季大会学術講演会論文集、p.643.
- 7) 中井太一、他、高性能ビトリファイドCBNホイール向け新ガラス結合材の開発、2016年度砥粒加工学会学術講演会論文集、p.163.
- 8) 興石卓哉、他、メカノケミカル反応を利用したSiC用鏡面研削砥石の研究、2013年度砥粒加工学会学術講演会論文集、p.313.
- 9) 鈴木悠矢、弾性率変化を用いた高効率研削砥石の検討、2017年度精密工学会春季大会学術講演会論文集、p.307.
- 10) 益子雄行、他、3Dプリントを用いたELID研削砥石の開発、2017年度砥粒加工学会学術講演会論文集、p.293.
- 11) 永嶋雅俊、他、鏡面創成のための多孔質砥石の作製と特性評価、2015年度砥粒加工学会学術講演会論文集、p.112.
- 12) 例えば、和井田製作所社製 SIG-V4 <http://www.waida.co.jp/products/super.html>
- 13) 加藤大輝、他、メカノケミカル弾性砥石の作製と性能評価に関する研究、2017年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集、p.25.
- 14) 田中武司、他、紫外線励起加工の研究（第20報）、2016年度精密工学会春季大会学術講演会論文集、p.901.
- 15) 田尻光毅、他、サブ大気圧プラズマを用いたプラズマエッチングによる2インチSiC基板の高効率加工、2016年度精密工学会春季大会学術講演会論文集、p.929.
- 16) 大森 恒、他、SiC単結晶の酸化剤援用研磨の研究（3）、2013年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集、p.33.
- 17) 稲田辰昭、他、光電気化学酸化を援用した触媒表面基準エッチング法による炭化ケイ素の高効率平坦化、2016年度精密工学会春季大会学術講演会論文集、p.363.
- 18) 高橋尚也、他、弾性パッドによるSiCの砥粒レス研磨加工に関する研究、2018年度精密工学会春季大会学術講演会論文集、p.505.

