
マイクロカプセルを利用したラッピング砥石の開発

Development of a Lapping Stone Including Microcapsules

榎本 俊之* 島崎 裕*

Toshiyuki ENOMOTO Yutaka SHIMAZAKI

要 旨

研削加工用工具である砥石を構成する基本三要素として砥粒、結合剤、気孔があるが、第四の要素として添加剤を新たに加えることで、その工具特性を飛躍的に向上させることができる。そこで代表的な難研削材であるアルミニウムを高効率に鏡面仕上げすることを目的に、添加剤を利用したメカノケミカル加工を行うこととした。そして、アルミニウムとトライボケミカル反応を生じるパーフルオロポリエーテルオイルを内包したマイクロカプセルを作成し、それを添加した砥石を開発した。この砥石による加工特性を評価した結果、加工の高精度化と高効率化を両立して実現できるとともに、シリコンに対しても同様の効果があることがわかった。なお、本技術に関する学術論文に対し、その高い独創性、発展性および機械工学への大きな貢献が認められ、2000年度日本機械学会賞(論文)ならびに2000年度工作機械技術振興賞を受賞した。

ABSTRACT

A grinding stone is composed of the basic three elements, namely abrasive grain, bonding material and pore. The stone performance is expected to be improved significantly with an addition of the fourth element. Then, for the purpose of finishing aluminum, which is a typical difficult-to-grind material, precisely and efficiently, we examined the application of tribochemical reaction utilizing an additive. And perfluoropolyether oil, which reacts tribochemically with aluminum, was introduced into the stone in a encapsulated form. Lapping experiments demonstrated that the tribochemical reaction between the oil and the surface significantly improved the finishing efficiency and the surface quality of the aluminum disk, as well as silicon wafer. JSME (The Japan Society of Mechanical Engineers) medal for outstanding paper is awarded to the paper concerning this technology.

* 研究開発本部 生産技術研究所
Manufacturing Technology Research and Development Center
Research and Development Group

1. はじめに

機械加工の中でも高精度な仕上げ加工を可能とする研削加工においては、工具として砥石が用いられる。この砥石を構成する基本三要素として砥粒、結合剤、気孔があるが、第四の要素として添加剤を新たに加えることで、その工具特性を飛躍的に向上させることができる。添加剤には一般に、増量剤や骨材、潤滑性や耐摩耗性向上を目的とした固体潤滑剤、熱伝導性や砥粒保持性の向上を目的とした金属粉末などが知られている。また、工作物に対して化学的作用を及ぼすものとして、食塩などが添加されることもある¹⁾。この食塩の例のように、添加剤を利用して、砥石に対し機械的除去作用のみならず化学的作用を新たに付加することで、従来にはない、高品位な加工の実現が期待できる。また、固体ではなく液体を添加剤に用いることができれば、より化学的作用を活性化できると考えられる。しかし、当然ではあるが、液体をそのまま砥石中に添加することはできない。

そこで筆者らは、マイクロカプセル化技術を利用し、工作物に対し化学的作用を生じる液体を見かけ上固化し、砥石に添加することを試みた²⁾ので報告する。

2. マイクロカプセル化技術³⁾

マイクロカプセルは、その名の通り、 μm オーダーの微小な容器である。しかし、製法原理が同じであれば、 nm から mm オーダーのカプセルも、便宜上、マイクロカプセルと呼ばれる。この製法原理とは、Fig.1に示すように、カプセルに内包する芯物質を分散媒中で微粒化し、この微粒子に膜をかけて被覆するというものである。通常のカプセルが、まず容器をつくり、次いで芯物質を容器中に充填するという方法で行われているのとは大きく異なる。

Table 1⁴⁾に、カプセル化技術の特徴とその応用例を示す。動植物の細胞や種子などは天然のマイクロカプセルといえるが、人工的に作製されたものも様々な用途で用いられている。その商品化の第一号は、1950年代のNCR社による感圧複写紙（ノーカーボン紙）とされている。また、砥石に用いられた例としては、気孔形成剤がある。

Table 2には、マイクロカプセルのおもな製法を示す。これらの方法によれば、基本的には、固体、液体、気体のい

れもカプセル化することができる。作製されたカプセルは、使用時に、外部からの圧力や熱、光、 pH などに反応して、カプセル壁が破壊され、芯物質を放出し、所定の機能を発揮する。

本稿で紹介する砥石添加剤としてのマイクロカプセルは、おもにTable 1の「形態の変換：液体の固化」という特徴を用いている。マイクロカプセルは、加工時に加工点における圧力や熱により破壊され、芯物質を放出し、工作物表面を化学的作用に基づき良被削性に改質することを狙いとしている。

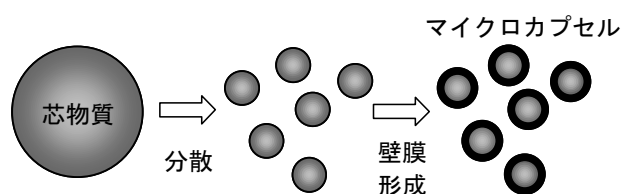


Fig.1 General process of microencapsulation

Table 1 Characteristics and applications of capsules⁴⁾

	特徴	応用例
物質の保護	揮発性物質の保護 反応性物質の保護 毒性物質の隔離 不快味臭の隠蔽 空気・水の遮蔽	香料、農薬 接着剤、酸化剤 殺虫剤、除草剤 医薬品 医薬品、漂白剤
形態の変換	気体・液体の固化 色の隠蔽 熱・光の感応性改変 溶解度の改変 比重の改変 機械的性質の改変	農薬 染料 防火剤、感光剤 医薬品、酵素 農薬 人工血液

Table 2 Typical methods of microencapsulation

カプセル化方式	カプセル化法
化学的技法	界面重合法 in situ 重合法 液中硬化被覆法
物理化学的技法	コアセルベーション法 液中乾燥法 粉末法
物理的技法	Wurster 法 スプレードライ法 高速気流中衝撃法

3. パーフフルオロポリエーテル(PFPE)オイルによるトライボケミカル作用

アルミニウム等の軟質金属は、研削加工において目づまりが極めて生じやすいことから、難研削材とされている。このため、例えばアルミニウムの研削加工には、多孔質構造からなるPVA砥石のみが使用されてきた。しかし、高気孔率のために砥粒間隔が大きくなり、得られる加工面粗さは0.1 μ m R_y程度が限界となっている。そこで、ここではアルミニウムの研削加工をとりあげ、加工精度および加工能率の向上を目的にマイクロカプセル芯物質によるアルミニウムの表面改質について検討した。

アルミニウムは両性金属であるため、化学反応液としては酸性液やアルカリ性液を使用できるが、加工機械や工具の腐食の恐れがある。そこで、パーフルオロポリエーテル(略称PFPE)オイルを使用することとした。

Fig.2左上の基本構造式に示すように、PFPEオイルは主として極めて結合力の強い炭素-フッ素結合により構成されている。そのため、他分子との相互作用力は小さく、化学反応性は極めて低い。また、構造中に極性を高めるためにエーテル基が導入されており、金属等への吸着性が高くなっている。こうしたことから、金属の潤滑塗布膜として極めて優れた性能を示す。この他にも、優れた耐熱性、耐薬品性、低蒸気圧等々の特性を有することから、磁気記録媒体や真空環境下での潤滑が求められる宇宙機器等の潤滑剤として、広く用いられている。

このように、PFPEは通常、化学的に極めて不活性であるが、Fig.2に示すように境界潤滑下では金属材料と反応し、エーテル基の部分で主鎖が切断され、アシル基を有するフッ素化合物(R_f-COF)を生成することが知られている。このフッ素化合物は腐食性が極めて強く、金属表面を容易にフッ化し、金属フッ化物(Metal-F)を生成する。また、金属フッ化物は、ルイス酸の一種であり、PFPEオイルの分解触媒となるため、上記の反応は加速的に進行していく⁵⁾。

PFPEオイルは、こうしたトライボケミカル反応を生じるため、近年、PFPEによる磁気記録媒体の腐食が問題視されるようになってきた。しかし、ここでは、この腐食性を加工面改質に積極的に利用することを考案したのである。すなわち、上記反応によってアルミニウムの表面に生成された金属

フッ化物(フッ化アルミニウム)は、アルミニウムに比べると硬脆であり、一方、自然酸化膜に比べると軟質である。このため、研削時には目づまりを生じることなく、容易に削り取られていくことが期待される。

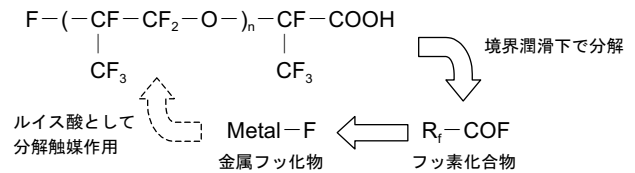


Fig.2 Tribochemical reaction of PFPE with metal

4. マイクロカプセル添加砥石の特徴

4-1 マイクロカプセル添加砥石の開発

PFPEオイルを内包したマイクロカプセルの作製には、in situ重合法を用いた(Fig.3)。次に、ホットプレス法により、カプセルが破壊されないように条件を設定し、Table 3の仕様のレジソンド砥石を作製した。また、カプセル無添加砥石、一般的な合成オイル内包のカプセル添加砥石およびパーフルオロカーボン(略称PFC)オイル内包のカプセル添加砥石を用意し、その性能を比較した。なお、これら2種類のオイルは境界潤滑下においても反応性に極めて乏しい。

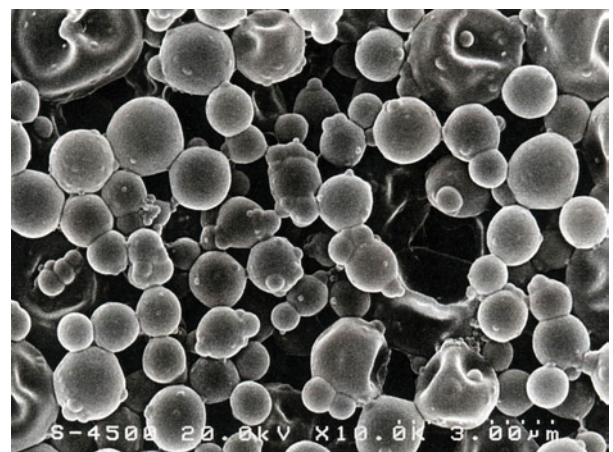


Fig.3 Microcapsules containing PFPE oil

4-2 マイクロカプセル添加砥石の加工性能

まずは、カプセル無添加の砥石を用い、PFPEオイルを加

工液として供給，あるいは予め砥石面に塗布して加工を行った．Table 4に加工条件を示す．その結果，オイルの供給量，塗布量を広範囲で変化させても，オイルの潤滑性が高すぎるため，砥石が上滑りするか，あるいは砥石面上にオイルが全く存在しない状態と同様になってしまい，加工が進行しなかった．このことから，PFPEのような高潤滑性オイルを外部からの供給によって，砥石-工作物間に適切に滞留させることは，極めて困難であることがわかった．

次に，加工液を純水(供給量0.3mL/min)にかえて，各砥石の加工特性を評価した．Fig.4に平均除去能率を示す．砥石Cは他の砥石に比べ，2.7～6.5倍高い除去能率が得られており，カプセル芯物質のPFPEオイルが有効に作用したことがわかる．また，Fig.5によると，砥石Cでは40nm Ry程度に加工面粗さが向上しており(初期表面粗さ0.11 μ m Ry)，正常な切削作用により加工面が創成されたことが推察される．一方，砥石Rでは，砥石目づまりが原因と思われるスクラッチが発生し，加工面粗さは0.38 μ m Ryと大きく劣化してしまった．

4-3 表面分析による加工メカニズムの検討

砥石Cにおける優れた加工特性が，PFPEによるトライボケミカル作用に基づくものかを検討するために，加工面をX線光電子分光分析(X-Ray Photoelectron Spectroscopy；略称XPS)により分子構造解析を行った．

その結果，砥石Cによる加工表面にのみフッ素原子が検出された．さらに，その結合状態を調べたところ，685eVにピークが存在し，金属フッ化物の生成が確認され(Fig.6)，この金属がアルミニウムであることもわかった．以上より，加工点におけるフッ化アルミニウムの生成，すなわち，Fig.2のトライボケミカル反応の発現が明らかになった．

さらに，PFPEはシリコンに対してもアルミニウムに対してと同様の反応を生じる．そこで，3インチのシリコンウェーハの加工を行った結果，砥石Cは他の砥石に比べ，5～30倍高い加工能率を示すことが見出されている．

Table 3 Specifications of lapping stone to be developed

砥石寸法	D202, H40, T3
砥粒 集中度(砥粒添加率) カプセル添加率	平均粒径2 μ m ダイヤモンド 40 (10 vol%) 30 vol%

Table 4 Lapping conditions

加工機械 工作物	ラップマスタ型ラッピング装置 2.5 インチ アルミニウム合金ディスク (初期表面粗さ 0.11 μ m Ry, 15 nm Ra)
加工圧力 砥石回転数 工作物回転数 加工時間	11.1 kPa 60 rpm 40 rpm 10 min

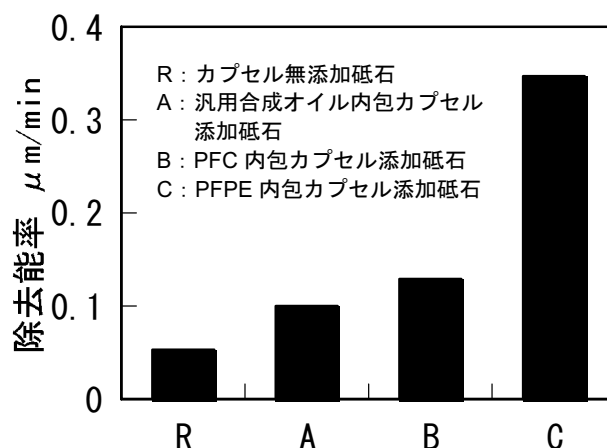
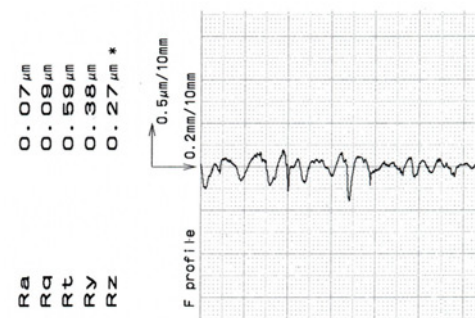
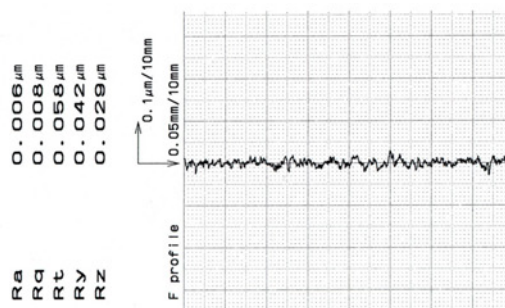


Fig.4 Material removal rate in using lapping stones with / without microcapsules



(a) Lapped by stone R



(b) Lapped by stone C

Fig.5 Effect of additional microcapsules on surface roughness

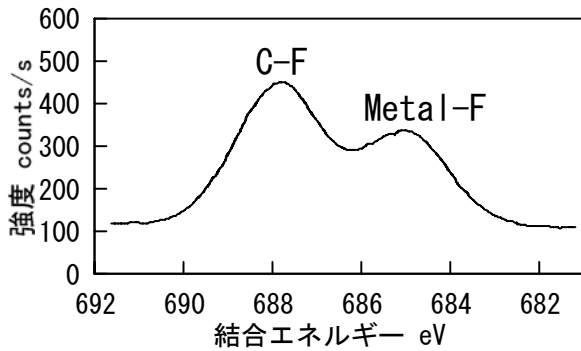


Fig.6 XPS high-resolution F1s spectrum of the surface lapped by stone C

カノケミカル研磨, 日本機械学会論文集(C編), 65, 632 (1999) pp.1698-1703.

- 3) 例えば, 近藤: 最新マイクロカプセル化技術, 総合技術センター(1990).
- 4) 日本化学会: 化学便覧応用編, 丸善(1990) p.929.
- 5) Mori, S. and Morales, W.: Tribological reactions of perfluoroalkyl polyeter oils with stainless steel under ultrahigh vacuum conditions at room temperature, *Wear*, 132 (1989) pp.111-121.

5. おわりに

本稿では, アルミニウムやシリコンの加工に効果のある, フッ素系オイル内包のマイクロカプセルを添加剤としたラッピング砥石について紹介した.

詳細には述べなかったが, 開発した砥石は, 加工液を全く供給することなくアルミニウムを研削加工することも可能である. このように, マイクロカプセルを利用した砥石への液体添加技術は, 加工液供給を極微量化できる環境低負荷工具技術としても有効なものとなりえる. 最後に, マイクロカプセルは, 多様な物質を内包できる魅力的な道具である. ここでは, その一つの使用例を示したにすぎず, 今後, 砥石をはじめ, 固定砥粒加工工具への様々な適用が期待される.

なお, 本技術に関する学術論文²⁾に対し, その高い独創性, 発展性および機械工学への大きな貢献が認められ, 2000年度日本機械学会賞(論文)ならびに2000年度工作機械技術振興賞を受賞した.

謝辞

本工具技術の開発においては, 東京大学谷教授, トッパン・フォームズ株式会社, 株式会社ノリタケカンパニーリミテドにご指導, ご協力いただいた. 記して深謝申し上げます.

参考文献

- 1) 谷, 柳原: 1999年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1999) p.360.
- 2) 榎本他: マイクロカプセルを利用したラッピング砥石によるメ