

〈12 回連載 ショートレクチャー〉

# 若手技術者のための研削工学

## (第 3 回) 研削液の特性とその供給法

奥山繁樹 (防衛大名誉教授)

### 1. はじめに

初回のレクチャーでは、研削加工の特徴について述べた。その中で、砥粒切れ刃は大きな負のすくい角を有し、しかも砥粒は工作物の表面を弾性的・塑性的に上滑りするため、摩擦熱が発生しやすいことを指摘した。今回の主題である研削液には、このような摩擦熱の発生を潤滑作用によって抑制するとともに、発生した熱を排除する重要な役割がある。

研削液の一般的な使用目的は次のとおりである。

- (1) 砥粒と工作物の接触部を潤滑して摩擦を低減させるとともに、切り屑の砥石への溶着を防ぐ。
- (2) 工作物の平均的な温度上昇や砥石と工作物の接触域(干渉領域)の温度上昇を防ぐ。
- (3) 切り屑や破碎・脱落した砥粒を洗浄・排除するとともに、これらが仕上げ面性状を悪化させるのを防ぐ。
- (4) 研削盤や工作物を防錆する。

さらに研削液には、化学的に安定でかつ腐敗しにくいこと、努めて作業性を低下させないこと、人体や環境に無害であること、などが求められる。

研削液の使用者には、加工の目的や被削材に適合した油剤の選定と、その機能を生かす効果的な供給法を選択、あるいは案出することが求められる。

今回のレクチャーでは、潤滑や冷却作用についての理解を深めていただきたいが、これらについて原理から解説した加工学の教科書は少ない。そこで、これらの原理に触れながら、研削液の機能とその働きについて解説することから始めることにしたい。

### 2. 潤滑剤の基本的機能

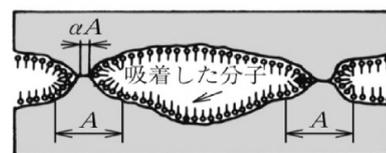
機械類の摩擦や摩耗を軽減させるために油剤を供給して潤滑するが、その理想的な状態が「流体潤滑」である。流体潤滑では、くさび状の油膜内に発生する動

力学的な圧力(流体の粘度が重要な支配因子になる)で荷重が支えられる。このとき、二固体は油膜によって完全に分離されるので、摩擦抵抗は極端に低くなり、摩耗も発生しない。しかし、油剤の粘度や摩擦速度の低下、あるいは負荷の増大によって、流体潤滑状態が維持できなくなると、固体どうしの接触が発生して境界潤滑状態に移行する。

ところで、平面に仕上げられた固体表面には少なからず凹凸があるから、二つの平面を重ねて押しつけたとき、真に接触するのは数個の凸部だけである。このとき「真実接触面積」は、付加した荷重と柔らかい側の材料の降伏圧力(降伏応力の 1.8 倍程度)で決まる。つまり、真実接触点の寸法は極めて小さく、接触点の圧力は非常に高い。

図 1 は Bowden-Hardy の境界潤滑モデルである。面積  $\alpha A$  は固体間の真実接触面積であり、潤滑剤がないときはこの領域で荷重を支える。しかし油剤を塗布すると、オタマジャクシのように描いた油剤分子が金属表面に密に吸着して被膜を構成し、これが荷重の一部を支えて真実接触面積を減じ、摩擦と摩耗を減少させる。つまり、境界潤滑の支配因子は油剤の粘度ではなく、油剤の固体表面への吸着力である。

この状態は、油剤を塗油した固体間の接触で普通に見られるもので、「境界潤滑」状態と言う。精製した鉱油類には、境界潤滑膜を作る力はほとんどないので、市



$A$  : 荷重支持面積,  $\alpha A$  : 金属接触面積

図 1 Bowden-Hardy の境界潤滑モデル

販の潤滑油には、鉱油に少量の油性剤（油性向上剤とも言う）が添加されている。

表1に極性基を有する有機物の金属表面への吸着特性を示す。脂肪酸  $[\text{CH}_2(\text{CH}_2)_n\text{COOH}]$  は炭素鎖の一端にカルボキシル基を有し、貴金属以外の金属表面に化学吸着する。長鎖状の脂肪酸分子は金属表面に強固に吸着して垂直に密に並び、隣接する分子間にも横方向に大きな吸引力が生ずるので、境界膜は破断し

にくい。このため、長鎖状脂肪酸（植物油などに多く含まれるステアリン酸、オレイン酸など）の潤滑効果と減摩作用には著しいものがある。このほか、水酸基やアミンのような極性基を有する長鎖状有機化合物も油性剤として用いられる。油性剤は鉱油に比べて高価であるが、わずかに混入するだけで高い境界潤滑性能を示すため、非常に有用である。

一般に、潤滑油には油性剤の他に極圧添加剤（EP剤）が混入される。これは、摩擦面の温度が約  $200^\circ\text{C}$  を上回ると油性剤の吸着力が急減して潤滑効果を失うからである。このため添加剤には、 $200^\circ\text{C}$  以上で速やかに金属と反応し、剪断強さが母材金属よりも小さい化合物皮膜を生成させ、焼き付きや摩擦抵抗を低下させるものが選ばれる。添加剤としては、塩化物や硫化物などが使われて来たが、前者は地球環境や人体に有害であるため、今は主に硫化物が用いられる。

### 3. 流体による冷却作用

固体内部、あるいは流れのない（対流もない）流体内部の熱の移動を「熱伝導」と言い、流体と固体界面の熱の移動を「熱伝達」と言う。前者は、材料固有の物性値である「熱伝導率」に支配されるが、後者の支配因子である「熱伝達率」は、流体の熱伝導率の他に、伝熱面の形状・寸法、流れの状態などの影響を強く受けるやっかいな値である。

例えば、流れの中に置いた電熱線（例えば通電したニクロム線）の太さが限りなく細くなると、電熱線表面からの熱伝達率は無限大に近づく。これは、電熱線近傍の流体の温度こう配が限りなく大きくなるからである。

とはいえ、平面の平均的な熱伝達率を大まかに把握しておくことは無駄ではない。平均熱伝達率  $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$  の概数は、流れている（強制対流下の）空気では  $12$

表1 極性有機物の金属表面への吸着の種類

極性有機物	金属	吸着の種類
脂肪酸アルコール	すべての金属	物理吸着
エステル	亜鉛, カドミウム	物理吸着(本来)
		化学吸着(加水分解して)
脂肪酸	金, 銀, 白金	物理吸着
	その他の金属	化学吸着

～ $290$ 、油で  $60\sim 1700$ 、水で  $300\sim 6000$  程度とされている。つまり、油は空気の  $5$  倍、水はさらにその  $5$  倍の冷却効果がある。しかも、水の気化熱は大きいから、冷却に水を使うのは合理的といえる。

つぎに、研削液（ここでは純水）による砥石と工作物の干渉領域の冷却作用に注目すると、供給された水は回転する砥石によって加速される。細部の議論は省くが、水の流速が砥石周速度  $V=30\text{m/s}$  に等しく、かつ流れが層流である（上下の流体が入れ替わらない）と仮定すると、砥石と工作物の干渉領域（加熱域）の長さ  $L$  が  $1.5\text{mm}$ （通常の平面研削ではこの程度である）のとき、温度境界層（工作物表面からの加熱の影響を受ける流体膜）の厚さ  $\delta$  は  $6\mu\text{m}$  程度に過ぎない（ヌッセルト数  $N_u$  を用いて  $\delta=L/N_u$  と書けるので、興味のある方は計算していただきたい）。したがって層流熱伝達の場合、この厚さの外にある水は冷却に寄与できない。つまり、大量の研削液の供給は、冷却効果の向上に、あまり役立たないことになる。

一方、ノズル出口流速  $2.7\text{m/s}$  で研削液を供給したときの、砥石と工作物の干渉領域内の熱伝達率を筆者らが測定した結果によれば、 $A60M8V$ 、 $V=30\text{m/s}$  の条件で  $110\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  前後に達した。この値は、層流熱伝達を仮定した場合の約  $1.5$  倍である。工作物表面から  $6\mu\text{m}$  程度の厚さの水の層が乱流になることはまずないが、この結果は、高速で通過する砥粒による研削液のかくはん作用が無視できないことを物語っている。つまり、冷却作用を高めるために表面に溝を刻んだ砥石や多孔砥石を使うのは意味があるといえる。

### 4. 切削油剤の種類と用途

切削油剤（含む、研削油剤）は、不水溶性と水溶性に大別される。JIS K2241 ではこれらを表2、表3のよう

に分けており、それぞれ次のような性質を有している。

4.1 不水溶性切削油剤

N1種は、極圧添加剤を含まないので環境に優しく、鋼の軽切削や非鉄金属の加工に広く用いられる。N2～4種はN1種を主成分に硫黄系の極圧剤を添加したもので、油剤の活性度によって区分されており、活性度の高いものは重切削や難削材の加工に用いられる。

4.2 水溶性切削油剤

A1種は、鉱油や脂肪油に界面活性剤が添加されており、10～20倍の水に希釈して用いる。白濁することからエマルジョン・タイプ(乳化形)と呼ばれる。安価で性能が良いことから、切削や研削に広く用いられる。ただし、他の水溶性油剤に比べると油の割合が高い分、冷却性能が低い。

A2種は、鉱油を少なく、界面活性剤を多くしたもので、洗浄性に優れている。40～80倍の水に希釈して用いるが、半透明または透明であるのでソリューション・タイプと呼ばれる。

A3種は、水に溶解するためソリューション・タイプと呼ばれており、100～200倍の水に希釈して用いる。冷却性能が高く、主に研削加工に用いられる。A3種では、防錆性を付与するためにホウ酸塩などの無機塩類が添加されており、近年では有機カルボン酸塩が使用される傾向があるが、潤滑性能に課題がある。

そこで、水溶性合成潤滑剤を基剤としたシンセティックタイプのものが開発され、潤滑性能の向上が図られている。

5. 研削液の選定と供給法

研削加工では、砥石と工作物そして加工条件に適した研

表2 不水溶性切削油剤の種類

N1種	鉱油および/または脂肪油からなり、極圧添加剤を含まないもの
N2種	N1種の組成を主成分とし、極圧添加剤を含むもの [銅板腐食が150℃で2未満(JIS-K2241, 以下同じ)のもの]
N3種	N1種の組成を主成分とし、極圧添加剤を含むもの (硫黄系極圧添加剤を必須とし、銅板腐食が100℃で2以下、150℃で2以上のもの)
N4種	N1種の組成を主成分とし、極圧添加剤を含むもの (硫黄系極圧添加剤を必須とし、銅板腐食が100℃で3以上のもの)

表3 水溶性切削油剤の種類

A1種	鉱油や脂肪油など、水に溶けない成分と界面活性剤からなり、水に希釈すると乳白色になるもの
A2種	界面活性剤など水に溶ける成分単独、または水に溶ける成分と鉱油や脂肪油など水に溶けない成分からなり、水に希釈すると半透明ないし透明になるもの
A3種	水に溶ける成分からなり、水に希釈すると透明になるもの

備考： A1種～A3種のいずれも塩素系極圧添加剤および亜硝酸塩を含有しない。

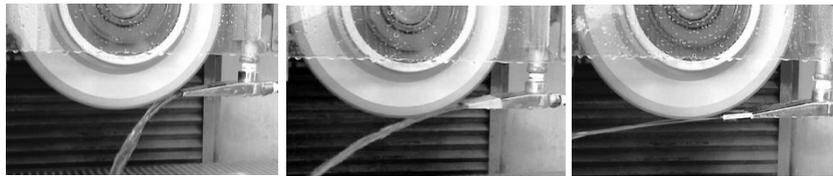
削液を選定することが重要である。表4に研削液の種類と特性および適応研削作業を示す。研削液の具体的な選択例は、油剤メーカーのホームページに掲載されているので、ここでは省略する。

研削液は図2(a)に示すように、ノズルによって加工点に供給するのが一般的であるが、砥石は高速で回転しているため、外周部に連れ回り空気層が生じ、研削点(図では、砥石最下点)への研削液の到達を阻んでいる。手軽な対策としては、ノズル出口高さを小さく

表4 研削液の種類と特性および適応研削作業

種類	名称	希釈倍率	研削液の特性					適応研削作業
			潤滑性	耐溶着性	冷却性	洗浄性	浸透性	
水溶性	A1種	5～30	○	△	○	×	△	金属類の研削, cBNホイールによる高能率研削
	A2種	20～150	△	△	◎	○	○	精度が要求される研削
	A3種	80～150	×	×	◎	○	×	能率が要求される研削, ダイヤモンドホイールによる研削
不水溶性(N2～N4種)	動粘度10mm <sup>2</sup> /s未満	—	○	◎	×	◎	◎	ねじ研削, 歯車研削, 工具研削など, 目づまりや, 研削焼け・割れを嫌い, 精密さを要求される研削, cBNホイールによる軽研削
	動粘度10mm <sup>2</sup> /s以上	—	◎	◎	×	○	○	

※ 不水溶性のN1種は、耐溶着性が○である他は、他のN種にほぼ同じ。  
※ 凡例：◎ 優, ○ 良, △ やや劣る, × 劣る



(a) 市販ノズル (b) 出口高さ 3mm (c) 出口高さ 1mm

図 2 各ノズルにおける削液供給状態の違い(流量  $Q=5\text{L/min}$ )

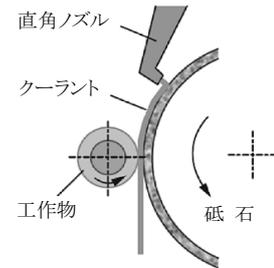


図 3 直角ノズルによる方法

して流速を上げることである[図 2(c)]. この方法によって、研削液を効果的に供給できるが、研削液の使用量を削減できることから有用といえる。また、図 3 に示すように直角ノズルによって空気層を遮断しつつ研削液を砥石表面に巻き付かせる方法も効果がある。

一方、砥石周速度を非常に高くして加工の高能率化をはかる高速研削においては、高圧で研削液を供給する、ジェット注液が有効とされている。また通常の研削加工でも、切込みを大きくすると、砥石と工作物の干涉領域の工作物表面温度は容易に水の膜沸騰温度(120°C程度)を上回り、冷却能力は急速に失われる。つまり、工作物表面が水蒸気で覆われ、熱伝達率は急減すると言われているが、ジェット注液には膜沸騰を抑制する効果が期待される。

近年、マシニングセンタに砥石を取り付けて研削することが行われている。この場合、砥石と工作物の相対位置の変化によって研削点が移動するから、ノズルの位置や噴射方向を制御して、常に研削液が研削点に届くようにする必要がある。

## 6. 加工液使用量削減への努力

大手自動車メーカーの機械工場における消費エネルギーの目的別使用割合を調べた結果によると、加工液関係(含む、廃液処理)が 5 割強に及ぶとされている。つまり、地球環境保全の観点のみならず、加工コスト削減のためにも、加工液の使用量削減が重要といえる。近年では、加工液の使用量を最小限にしようとする MQL(minimum quantity lubrication)へのチャレンジが続いている。

切削加工の分野では MQL が実用化されており、これをさらに推し進めたセミドライ加工の適用例がある。セミドライ加工では、極めて少量の油剤しか使わないから、加工熱で油剤が蒸散し、工作物の洗浄の必要もないとされているものの、重切削における冷却や、切りく

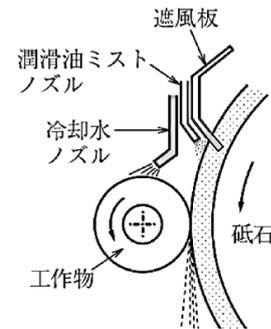


図 4 円筒研削における環境に優しい研削液供給方法の一例<sup>1)</sup>

ずの排出に課題がある。一方、研削加工の場合には熱の影響が大きいことから、MQL への道のりは遠い。

図 4 は、ある工作機械メーカーで開発された研削液供給法の例<sup>1)</sup>である。この方法では、地球環境に優しい植物性油剤のミストを研削点に供給して潤滑を行い、工作物の冷却には冷却効果の大きい水を使用する。潤滑作用と冷却作用を分離することによって、研削液の供給量を大幅に削減できるとともに、クーラントタンクの小形化や消費電力の削減効果もあるとされている。

## 7. おわりに

研削加工では、熱による加工精度の低下、研削焼けや加工変質層の発生などの問題が生じやすい。上述のように、研削液には摩擦熱の発生を抑制するとともに、発生した熱を排除する重要な役割がある。読者諸兄には、斬新な発想によって、より効果的な研削液の供給法を編み出して頂きたい。研削液に関する詳細な情報が、<http://www.juntsu.co.jp> に公開されているのでごらん頂きたい。

## <参考文献>

- 1) 向井良平, 吉見隆行: 環境対応研削加工技術, 砥粒加工学会誌, 48, 9(2004) 483.