

総 論

MQL セミドライ加工の大きな可能性

MQL 研究会 井 上 正 之

MQL 研究会・・・MQL セミドライ加工の普及拡大を目的に設立し、主に技術的な情報をユーザーに提供する活動を行っている。
詳しくは・・・<http://www.MQL.jp>

「セミドライ加工とは なにか」より転載

◆切削油の歴史

金属加工が始まった当初から、加工点に少量の油や水をかけて削ると、加工がスムーズに行われることが知られていた。HSS 工具と NC 化以前の多くの機械では、スプラッシュガード（囲い）もなく、加工点だけに少量の油を流したり、筆で刃先に油を塗ったりしていた。

1960-80 年代にかけて、超硬工具、ついで NC 機が普及すると、加工が高速化し、単位時間当たりの切りくず排出量が飛躍的に向上した。耐熱性の高い超硬工具の出現によって、切削油の目的は加工点の潤滑よりも大量の熱を冷却する目的に変わってきた。それと同時に、大量の切りくずを安定的に押し流すこと（フラッシング）が重要となった。そのため、切削油タンクと循環モーターは大型化し、現在では、加工点が見えないほどの切削油を高圧で大量にかけられるようになった。一方、切削油そのものも、油性に代わり水溶性油が主流をしめるようになった。NC 化に伴い、自動運転中に火災の恐れがないことが条件となったからである。

1990 年代の後半から、環境に対する関心の高まりを受け、製品そのものの環境負荷低減と同時に、製造工程における環境負荷低減の関心が高まった。環境マネジメントシステム (ISO 14000) を導入する企業が増え、工場の省エネや有害物質の管理強化の取り組みが盛んになった。そうした中で、金属加工工場においては、切削油による環境負荷が大きいことが次第にわかってきた。

◆切削油の問題点

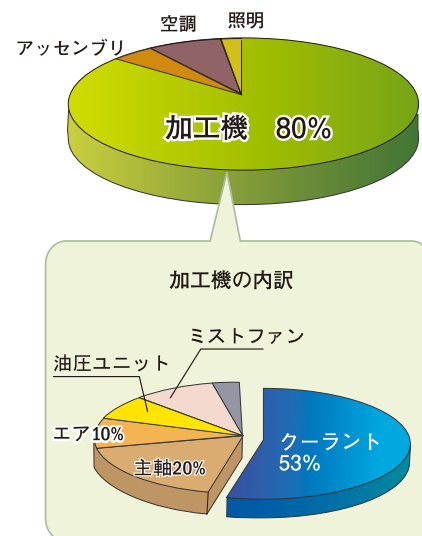
先進各国の温暖化効果ガスの削減目標が割り当てられた京都議定書が 2005 年に発効した。日本政府も「チームマイナス 6」というプロジェクトにより、省エネを呼びかけている。日本においては、エネルギー消費量の約 50% を産業分野がしめており、エネルギー使用の合理化や環境負荷の低減が求められている。特に、工作機械は全国で約 70 万台が稼動しており、その消費エネルギーの低減が課題といえる。（注 1）右のグラフにあるように、自動車メーカーのデータでは工作機械の消費エネルギーの 53% が切

削油（クーラント）に関するものであると報告されており（注 2）、とりわけ金属加工工場の切削油を低減することが重要な課題となっている。

また、切削油は最終的に金属粉を含んだ汚泥となって産業廃棄物として処理されるため、廃棄物レスの点からも、その使用量の低減が求められている。切削油の消費量は年間 13 万トンといわれ、廃油にいたっては年間 42 万トン（希釈後含む）発生するといわれている。（注 1）

また、近年、化学物質に対する管理が厳しくなっている。PRTR 法をはじめ、ダイオキシン規制法、土壤汚染対策法。最近では、EU が発動した RoHS 有毒物質の使用制限がある。

1997 年大阪の工場の焼却炉から高濃度ダイオキシンが



トヨタ自動車 機械工場の
エネルギー使用割合
出典：トヨタ自動車 井川他

検出され社会問題化した。その原因が塩素系切削油のしみこんだウエスを焼却したためとわかり、切削油の非塩素化が進んだ。JIS 規格から塩素添加油がはずされる規格変更も行われた。現在、切削油そのものは、一部の添加剤に有害性があるのみで、油剤メーカーも、環境負荷の少ない切削液の開発を行っている。しかし、化学物質に対しては、将来の法規制を視野に入れた先取りの対策と一滴ももらさない密閉型の管理が必要である。現実的には、多くの工場では切削油が部品カゴから滴ったり、工場の床がぬるぬるしている。可能であれば有害物質を使用しないことが、リスク管理面からも重要となる。

リスク管理面から考えると、万一漏洩したり、土壌や河川、海洋に流出した場合でも、環境負荷の少ない生分解性油を使用することが望まれる。生分解性油の代表は植物油または植物油由来の生分解エステルである。しかし、これらの油剤は価格が高いため、従来のような大量の切削油としてはコスト面で採用しにくく、性能向上のため、鉱油に混ぜて使用されてきた。

◆大量の切削油のメリットとデメリット

大量の切削油には多くの利点がある。切削油の効果には、①潤滑、②冷却、③穴加工時の切りくず排除、④被削材周辺やテーブル面からの切り屑の除去運搬（フラッシング）といった効果がある。さらに、精密加工分野では被削材の冷却と熱変異防止、機械全体の熱変異防止といった役割も担っている。

多くの方が経験しているように、切削油をかけなければ、工具寿命が悪くなるだけでなく、アルミなどでは工具が折損したり、精度や面粗度が悪くなる。完全なドライ加工がいかにもむずかしいかは、切削油を停止してみればすぐにわかる。

一方、切削油には環境問題だけでなく、多くのデメリットがある。先に書いた、循環モーターの消費電力、廃油処理を始め、床汚れ・臭気などの工場環境悪化を引き起こし、切削油使用の後工程では洗浄脱脂工程が必要となる。また、素材価格の高価な非鉄金属の加工では、切り屑を回収して再溶解するが、切削液に濡れた切り屑は乾燥工程を必要とする。

しかし、本当に、それほど大量の切削油が必要なのだろうか？ 切削加工の中には切削油をさほど必要としない加工もある。下記は切削油技術研究会が調査した被削材別の使用油種の抜粋である。（注 3）

旋盤の場合

鋼	ドライ 24%、	不水 18%、	水溶性 58%
鋳物	ドライ 42%、	不水 4%、	水溶性 54%
アルミ合金	ドライ 10%、	不水 20%、	水溶性 70%

マシニングセンタの場合

鋼	ドライ 5%、	不水 36%、	水溶性 59%
鋳物	ドライ 23%、	不水 14%、	水溶性 63%
アルミ合金	ドライ 3%、	不水 17%、	水溶性 80%

これを見ると、鋳物はドライで削りやすく、アルミには切削油の効果が大きいようである。このように被削材によっても切削油の効果が違ってくる。また、加工内容別では、断続切削となるフライス、エンドミル系の工具はドライ化しやすく、穴加工であるドリル、タップ、リーマは切削油の効果が大きいといえる。旋盤加工はその中間といえるが、

工具刃先が常にワークの中にあるという点で、連続加工時間が長い場合には冷却の必要性が大きいといえる。要は、大量の切削油を惰性で使い続けるのではなく、本当に必要な加工に、必要最少限を供給するという考え方である。

◆切削油の低減・代替方法

こうしたメリットとデメリットを持った切削油を減らしていく、またはなくしていくためにはどのような代替方法があるのだろうか。切削油のデメリットのうち、電力の問題だけを解決したいならば、切削油の適量・適圧化を行うとよい。一般の切削油ポンプは、大は小を兼ねるの発想で備えられており、加工内容に合った量と圧力にすることが重要である。しかし、この場合、省エネ効果はあるが、廃油処理など、他のデメリットは残る。

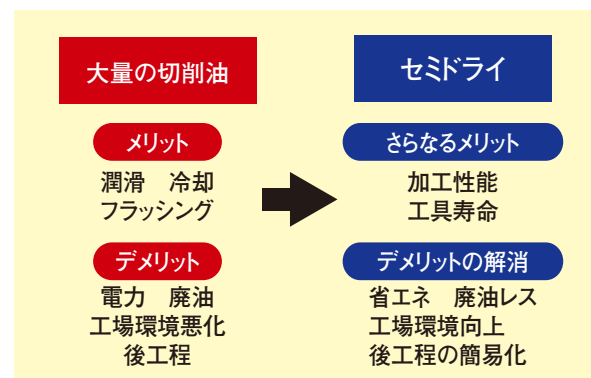
そこで、切削油の問題点を一掃する方法として、切削油を使用しないドライ化、または極微量しか使用しないセミドライ化が検討されている。なかでも、セミドライ加工は、Minimum Quantity Lubrication (MQL) と呼ばれ、すでに多くの工場で実用化されている。MQL セミドライ加工は、高性能の植物油ベース切削油または生分解性のある植物油由来合成エステルを、1 時間当たり 2 ～ 30ml という極微量、ミストにして加工点だけに塗布する方法である。

また、油剤をまったく使用しない完全ドライ加工の研究も行われている。1990 年代の後半に一世を風靡した冷風加工は、－30 度の冷却エアーを加工点に吹き付けて加工する方法である。研削加工を中心に効果が報告されたが、エネルギー効率の問題と霜付着などの作業性の問題があった。また、加工点に窒素を吹き付けて工具の酸化を防止する窒素加工があった。明確な効果が期待できないことと、脱酸した窒素を使用するため、酸欠の問題が指摘され、現在は火災の危険性の大きいマグネシウム加工での効果が期待されている。その他に大学レベルでは、粉末ドライアイス加工など様々なドライ化技術が研究されている。

◆MQL により生産性を向上させたケース

MQL セミドライ加工の採用事例を類別すると大きく二つのパターンに分けられる。ひとつは、①水溶性切削油よりも、工具寿命や加工性において良好なケースである。もうひとつは、②切削油のデメリットである循環モーター電力、廃油、作業環境の悪化、後工程（脱脂・洗浄・乾燥）を解決することにより、生産性の向上やコスト削減をはかったケースである。

最初に、①水溶性切削油よりも加工性が良好なケースの例を上げる。1990 年代当初、セミドライ加工を最初に大

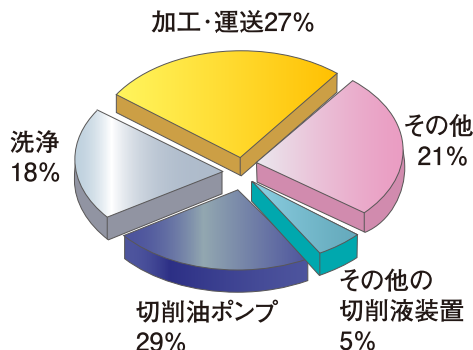


セミドライ加工採用の理由

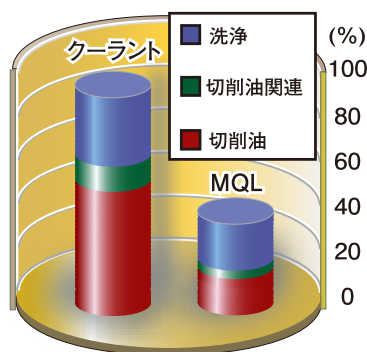
規模に採用したのがアルミ建材業界であった。水溶性切削油ミストの大量使用から油性ミストのセミドライ化に切り替え、同時に油剤性能の高い植物油を使用することにより、切断用のノコ刃の寿命を飛躍的に向上させた。また、アルミ建材は切削油がなければ加工できないが、美観を重視するため、油を使用したくない加工である。それまで建材 1 本 1 本を手で脱脂のため拭き取りしていた工程では、人工数が 4 分の 1 に減った。

1990 年代の後半には、マシニングセンタの高速化に伴い、金型の切削法が変わった。高速・低切込みの切削法により熱発生を抑え、高精度金型を作るようになった。この切削法に対し、ミスト切削の有効性が認められ、多くの金型製造工場で採用された。特に、小型のプラ型については、ミストのかけ方も簡単であり採用が増えた。

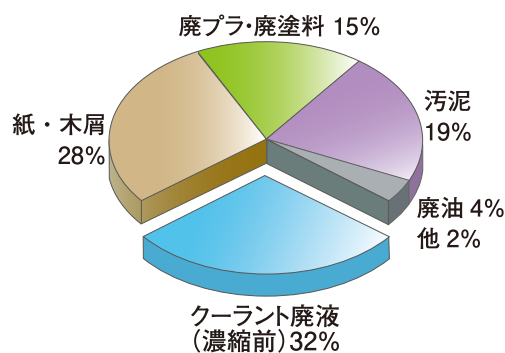
2000 年代に入り、小径深穴用の超硬ドリルが開発された。直径 4-8mm、深さが径の 20 倍以上のドリルでは、ガンドリルやハイスドリルでしか切削できなかったが、超硬ドリルを使用することにより、従来の 5 倍の能率で加工が可能になった。同時に、この加工では他の油剤よりもセミドライとの相性がよく、セミドライで加工することにより、切り屑が細かく破碎され、深穴から効率よく排出されることがわかった。このように、スポット的ではあるが、セミドライ加工は、加工法や工具との組み合わせで生産性の向上に大きく寄与した実績がある。



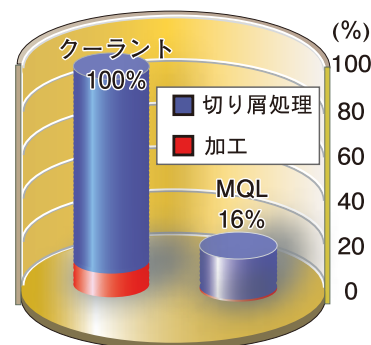
マツダ エンジン加工ラインの消費電力の内訳



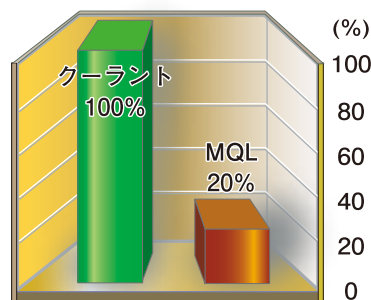
マツダ 消費電力削減



マツダ エンジン加工ラインの焼却廃棄物の内訳



マツダ クーラント使用量削減



マツダ 廃棄物 (廃油) 削減

◆製造工程の環境問題に貢献

次に②切削油のデメリットである電力消費、廃油処理、作業環境の悪化、脱脂・洗淨・乾燥の後工程を解決することにより、生産性の向上やコスト削減をはかったケースについてみてみよう。

製造工程の環境負荷低減のため、セミドライ加工を導入した代表事例として、マツダ㈱のアルミ製エンジンシリンダブロックの加工ラインが上げられる。この取り組みは、機械加工ラインにおける最大の動力消費源がクーラントポンプ（切削油循環ポンプ）であると分析、同時に切削油廃液の焼却処理、腐敗臭・ミスト等、地球環境、作業環境の点で、切削油の及ぼしている影響が大きいと判断、切削油をいかに減らすかをテーマに実施された。緻密な現状分析、問題点の洗い出しと対策を重ね、セミドライ加工を全面的

に導入し、省エネルギー、省資源、廃棄物削減を実現した。この一連の取り組みは（財）省エネルギーセンター 平成14年度省エネルギー優秀事例全国大会で経済産業大臣賞を受賞した。（注4）

◆後工程を考える

次に、セミドライ化によって、後工程に与えた影響を見てみよう。代表的な例として、切り屑のドライ化があげられる。銅やアルミなどの高価な金属は切り屑を回収して再溶解するが、油や水にぬれた切り屑は再溶解しにくく、できるだけ乾いた状態で切り屑を回収したいというニーズがある。特に溶解炉を持つ金属素材工場や鋳物工場では、自社内で再溶解ができるため、切り屑が乾いているメリットが大きい。また、部品加工では脱脂洗浄工程が付きものだが、セミドライ化することで、洗浄工程を簡略化できる場合がある。こうしたメリットを引き出すことで、生産性に寄与し、切削油の環境問題を解決しているところも少なくない。

◆作業環境への貢献

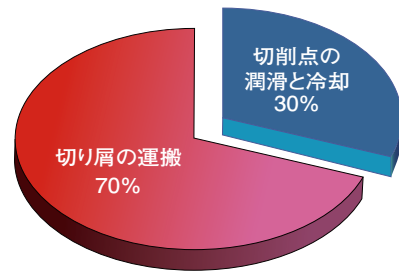
切削油問題に関して、重要なニーズとしてあげられるのが、作業環境の問題である。中小の工場に行くと、工場に入ったとたん、工場が乾いた雰囲気か、ぬれた雰囲気かがわかる。切削油がたれたり、また浮遊ミストとなったものが沈下して床がぬるぬるしていたり、ベトベトしている場合がある。夏場に水溶性切削油が腐敗して、すっぱいにおいがしたり、異臭がする工場もある。また、船舶、航空機、電力、建機などの重工業では門型マシニングセンタや床上型横中ぐり盤といった大型機械が使用され、スプラッシュガードがついていない機械も多く、切削油の管理・段取り・清掃が大変わずらわしくなっている。こうしたケースでは、セミドライ化ができれば、大きなメリットがある。中小企業では、若者やパートの雇用を有利にするためにも工場環境の改善は重要である。また、MQLの採用により、工場全体が乾いた雰囲気となり、床のスリップがなくなり、作業性がよくなったという声も聞かれる。作業環境の改善は、5S運動（整理・整頓・清掃・清潔・躰）と同様、主観的・体感的な効果があるものの、数値化されにくいいため、作業者に対するアンケートなどを通じて数値化していく必要がある。また、ISO14000取得を通じて、工場外の人に審査してもらうことで、自社の作業環境を改善していくのも手である。

◆セミドライ加工の課題

従来は切削油の潤滑効果や冷却効果が重要視されていたが、工具母材の改良やコーティング技術の進歩により、工具の耐熱性が高まった結果、切削油の必要性は相対的に低くなっている。その結果、切削油の主な効果は、潤滑や冷却よりもむしろ、切りくずの搬出となった。切りくずの搬出に対しては、工作機械の設計段階からの配慮が必要であり、大量の切削油使用を前提にした機械設備を、あとでドライ化することは簡単なことではない。

2002年にエンジン加工ラインのMQL化を達成したマツダでは、加工そのものはMQLで行っているが、切りくずの排出は独自のフラッシング方式採用している。これは防錆効果を持った洗浄液を加工終了から加工物搬送の間に間欠吐出させ、切り屑を洗い流すもので、「省エネルギー切り屑回収技術」と呼んでいる。（注3）

また、（株）デンソーでは、既存機の切りくず排出を安価に行う方法として、ステンレス板で新たに傾斜角度の大きい



切削油の使用目的割合

出典：トヨタ自動車（株） 近藤

スラント部を作り、エネルギー消費を抑えた自重落下方式を行っている。この場合、実際に切りくずが落下するための角度の評価試験を行い、35度以上（安全を見込み45度）という結論を得ている。（注5）

こうしてみると、セミドライ化のためには、工作機械メーカーの開発段階での配慮が不可欠であり、また、既存機をセミドライ化する場合は、切りくずの排出をどのように行うかを検討しなければならないことがわかる。

◆エンジニアリング

第一線の現場では、サイクルタイム、切削条件、工具寿命、精度、面粗さ、コストダウンを常に向上させるべく、限界に近い条件を探している。自動車部品加工のような大量生産現場では、常に最高速の境界条件を模索している。

その境界条件下で、大量に使用していたものを、少ないエネルギーと少ない資源に置き換えようとするれば、加工そのものは繊細・不安定にならざるを得ない。その中で、必要最少限の切削油という境界領域をさがす作業は、労力と時間がかかり、根気がいる。

さらに、ある加工をセミドライ化する場合、そこには非常に多様な条件がある。加工内容、被削材質、工具材質、工具形状、切削速度・切り込み・送り、機械剛性。そして、従来から使用している切削油の種類、添加剤、水溶性切削油の濃度、吐出圧力、吐出量など、条件が余りにも多い。

そのため、切削油の低減やセミドライ化を推進していくには、データ収集が重要になってくる。加工ソリューションを提供できるエンジニアリングが必要不可欠となる。同時に、既設設備をセミドライ化する場合は、現場での工夫も必要になる。切り屑の除去のための工夫やノズルの設置など、機械を見て診断すべきことも多くある。

MQLを導入しようとお考えの工場は、セミドライエンジニアリングの経験豊かな工作機械メーカーやミスト装置メーカーに相談することをお勧めする。中でも、ミスト装置メーカーのフジBC技研（株）〈ブルーベ〉は、マシニングセンタやNC旋盤を設置したMQLトライアルセンターを開設し、ユーザーに開放している。こうした施設を利用することで、納得してセミドライ加工を導入することができると思う。

【出典】

（注1）NEDO エネルギー使用合理化工作機械等技術開発 基本計画 1999

（注2）トヨタ自動車（株） 井川、岩坪、宮崎 機械技術 1999.5

（注3）機械と工具 1998.1 桜井浩樹

（注4）平成14年度省エネルギー優秀事例全国大会、ECCJ ホームページ

（注5）月刊トライボロジー 2004.2.（株）デンソー 永田雅亨、森田浩充