

特集 セミドライ切削用高潤滑切削油剤の開発*

Development of a Highly Lubricative Cutting Fluid for MQL Cutting

永田 雅亨

Masayuki NAGATA

山田 理生

Toshio YAMADA

森田 浩充

Hiromichi MORITA

岩佐 昌光

Masamitsu IWASA

池島 昌三

Syozou IKEZIMA

佐々木 啓次

Keiji SASAKI

These days, environmental problems have been the focus of more attention than ever, and we have been working to develop dry machining technology which requires Minimum Quantity Lubrication (MQL) or the removal of cutting fluids, which include toxic pollutants such as chlorine. In this paper, we will introduce a newly developed MQL cutting process. After evaluating the cutting performance of absolute dry cutting, dry cutting with air-cooling, and MQL cutting, we chose MQL cutting as it was found to be superior in terms of the primary concerns, lubrication and cooling. We then developed a new MQL cutting technique by adopting a newly developed highly lubricative cutting fluid and incidental facilities to secure the same cutting tool life and cutting accuracy as those of conventional wet cutting.

Key words : MQL cutting, High lubrication cutting fluid, Sulfur, Surfactant

1. 序論

従来、切削、研削加工では製品競争力強化のために低コスト化、難削材加工などの高付加価値化が要求されてきた。しかし、近年、上記要求に加えダイオキシン問題、CO₂排出量削減等に代表される環境問題が大きくクローズアップされており、ゼロエミッション、省エネルギー対応が要求されている。このことは、自動車メーカーが環境に優しい車をつくるのみでなく、製造工程から有害物質排除に取り組み、消費者にクリーンな会社をアピールしている例からも分かる。当社では「環境と調和した経済社会の実現」をデンソーエコビジョンの行動指針に掲げ、環境問題に積極的に取り組んでいる。

当社における切削、研削加工は、ダイオキシンの要因となる塩素や赤潮の要因となるリン、窒素等の有害物質を含む切削油を使用し、さらに全社の電力消費量の約15%に該当する最も消費量が多い加工法である。特に当社ではインジェクタ、ノズルに代表される高硬度な難削材をミクロンオーダーの精度で、かつ加工設備限界付近の高速な条件で大量に加工しているため、年間約1000kLという非常に多量の切削油を使用する。さらに、約60%が有害物質を含む塩素系鉱物油を使用しており対策が急務となっている。

これまで当社では、後処理による切削油排出を中心に、塩素など有害物質を排除した切削油および長寿命切削油の活用、少量供給化を推進してきた。最近では生産設備のCS³ (Compact, Simple, Slim, Speed) を

コンセプトに新たな活動の一環として、極限の目標となるドライ加工による切削油レス化に取り組んでいる。ドライ加工はゼロエミッションだけでなく加工設備の消費エネルギーの約20~60%を占める切削油供給ポンプを停止できるため省エネルギー面でも非常に重要な手段となる。

2. ドライ加工実現のための課題と方針

ドライ化技術の研究は、10年程前から国内外の設備メーカー、研究機関等が力を注いで取り組んでいるテーマである。特に、環境に厳しく切削油の処理に関して数々の法令を持つヨーロッパでは研究が盛んで、ドイツにおいては国家プロジェクトで研究を進めている。しかし、現在広範囲な展開につながっていないのが現状であり、主要要因としては下記三つの問題が挙げられる。

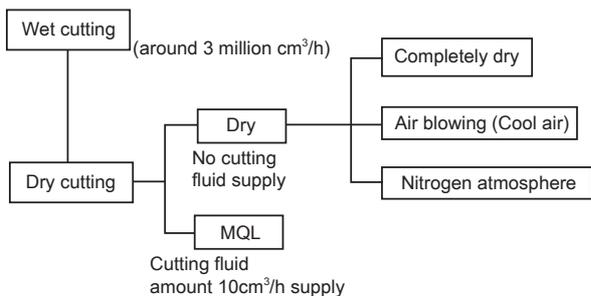
- (1) 刀具寿命低下による加工品質への影響
- (2) 切りくず排出に起因する加工品質および稼働率への影響
- (3) コスト的な優位性が少ない

切削油には主に潤滑、冷却および切りくず排出の働きがある。潤滑、冷却作用が失われると工具刃先の温度が上昇し、アプレッシブ摩耗および凝着摩耗の発生が顕著となる。切削加工は刃先プロファイルを被加工物に転写させることで寸法および形状精度を実現するため、これらの摩耗により精度確保が困難となる。また、切削油の流体としての異物洗浄作用が失われる

* (社)日本機械学会の了解を得て、「第3回JSME先端生産技術に関する国際会議前刷集」Vol.1, pp.127-132を和訳、一部加筆して転載

と、刃具やワークなど着脱時の切りくず噛み込みで加工精度、設備稼働率が低下する。上記課題は量産加工において品質を維持する上で致命的な課題となる。

一方、コスト面ではドライ化により切削油剤、切削油供給エネルギー等間材費の低減、さらには加工機の切削油供給装置や洗浄工程を廃止できるため設備投資面でもコストダウン効果が期待される。しかし、上記効果をすべて実現するには全切削工程をドライ化する必要があるため、現状では(1)に示す技術課題から実現できていない。現在、刃具寿命に対処する方法としてFig. 1に示すような冷風、窒素雰囲気、セミドライ加工等の研究が報告されている¹⁾。中でもセミドライ加工は切削油を極微量供給することで潤滑性、冷却性の両面に効果があることが注目されている。難削材を多く加工する当社では、まずはセミドライ化の効果を最大限引き出すことで(1)の課題を解決する取り組み方針とした。セミドライ加工は切削油供給量が極微量であるため切削油の性能、切削点への供給方法が特に重要となる。本報では加工温度領域が異なる鋼とアルミの加工に関し、各材料に適した高潤滑かつ塩素系有害物質を含まないセミドライ用切削油の開発を行ったので報告する。



Technology		Characteristics
Lubrication	Cutting tool coating	Improving lubrication Reducing heat generation
	MQL	<ul style="list-style-type: none"> Lubrication : Forming lubrication film Between work and tool Cooling : Heat of vaporization due to reduced particle size+mist generation air vaporization ※ If normal temperature (around 25°C), cool to Round 10°C
Cooling	Air blowing	Cooling by air
	Cool air	Cooling by cool air
Others	Nitrogen atmosphere	Prevention of oxidation of cutting tool

Fig. 1 Overview of dry technologies

3. 高潤滑切削油の開発

3.1 鋼用切削油の開発

従来使用している塩素系鉱物油は、潤滑性を確保するため塩素、リン等の環境負荷物質を含んでいる。Fig. 2に添加剤を含んだ油を塗布した状態での鉄表面の温度と摩擦係数の関係を示す²⁾。塩素、リンは、約200°C以上の高温領域で潤滑性を向上させる役割がある。これは塩素、リンが鉄表面でFeCl₂、FeP等の化学反応膜を生成するためと考えられている。これまで塩素はこの物性および安価に製造できるメリットから、特に高温領域になる鉄系の高速切削加工用の切削油剤として広く使用されてきた。近年、塩素、リンに代わる環境に優しい添加剤として、Ca系スルホネートと硫黄が注目されている。Ca系スルホネートは約200°C前後で金属面に吸着し、基油と添加剤による潤滑膜をつくり、一方硫黄は約300°C以上で金属表面にFeS₂等の化学反応膜をつくる性質を持っているといわれる³⁾。そこで、当社ではセミドライ加工用切削油の開発ポイントとして、切削温度に合わせた添加剤の最適化とし、鉄系の高速切削時の温度約500~900°Cで反応しやすい硫黄をベースとした鉱物油の開発に取り組んだ。

はじめに最適な硫黄添加量を実験により求めた。評価はチムケン試験機を使い、荷重：98Nを与えたときの試験片の摩耗量を測定した。Fig. 3に評価結果を示す。試験片の摩耗量は硫黄量2.0wt%までは硫黄量の増加に従い減少し2.0wt%以上でサチレートする。さらに、硫黄量2.0wt%では塩素系鉱物油よりも摩耗量が小さくなる。添加量によるコスト増加を考慮し硫黄添加量は最低限の2.0wt%とし、次にその油の加工性を実際の製品を加工することで評価した。

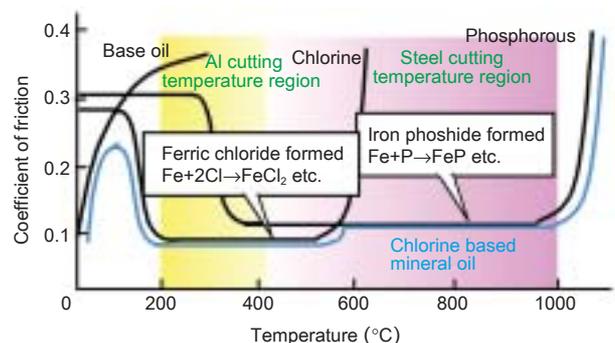


Fig. 2 Relationship of temperature of chloride cutting oil and coefficient of friction

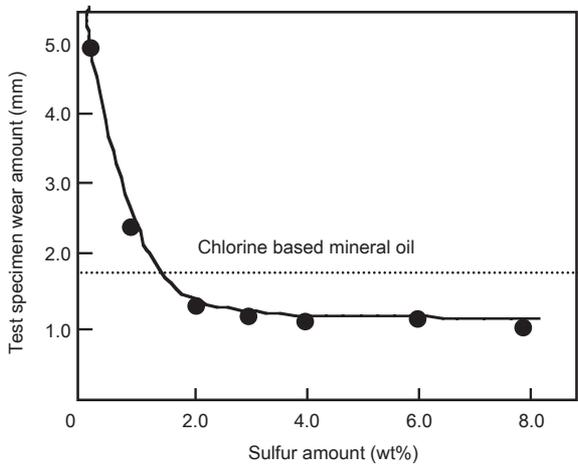


Fig. 3 Relationship of sulfur amount and wear amount

Fig. 4に評価条件，評価の概略図を示す。材料は加工硬化しやすくかつ靱性が高い難削材であるSUS304である。油の供給方法としては，確実に切削点へ油を供給するため，ホルダに穴を設け刀具のすくい面と逃げ面に供給できるように改良した。比較対象として生分解性に優れセミドライ加工で最も一般的な植物油，冷却性に優れる水溶性切削油を合わせて評価した。

Fig. 5に比較結果を示す。潤滑性を重視した硫黄系鉱物油が最も刀具摩耗量が小さく，かつセミドライ加工でも塩素系鉱物油湿式と同等の刀具摩耗を確保することが分かった。さらに，刃先の拡大写真より，セミドライ加工では逃げ面に湿式で見られるような微小傷が見られず，刀具表面が滑らかなことが分かった。セミドライ加工では加工部近傍の切削温度が湿式ほど下がらないため，刀具の急冷，急加熱が発生しにくく熱衝撃による割れが減少したためと推定される。また，硫黄の効果を確認するためワーク表面のEDX分析を行った。Fig. 6に評価結果を示す。評価結果より硫黄が検出されたことから，硫黄によってワーク表面に硫黄生成物ができたことが分かる。

3.2 アルミ用切削油の開発

一般的に鋼材では高温による刀具摩耗が問題となるのに対して，アルミ材は約300℃付近の温度領域での刀具への溶着を抑えることが品質上の課題となる。今回，水溶性切削油剤で使われる界面活性剤のOH基，O基による低温領域での高い金属吸着特性に着目し，その潤滑膜をさらにレベルアップすることで切削抵抗を減らし耐溶着性を向上させることを考えた。水溶性

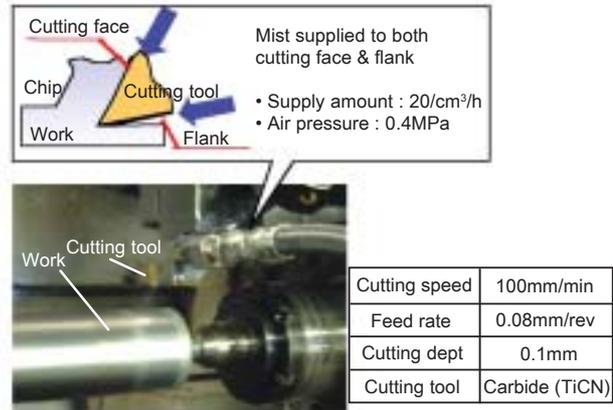


Fig. 4 Overview of evaluation method (SUS410 turning lathe)

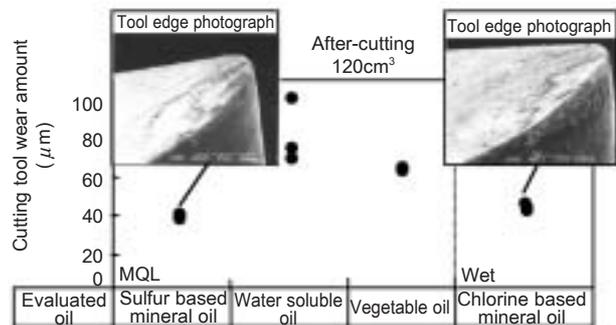


Fig. 5 Cutting tool wear results

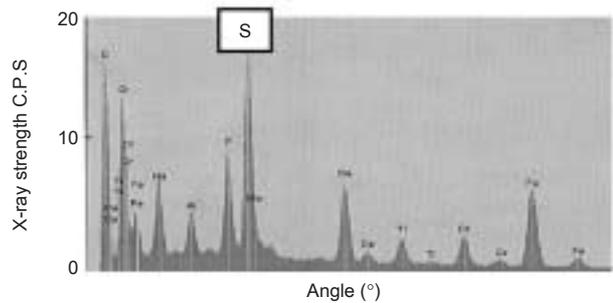


Fig. 6 Results of EDX analysis of work surface

切削油剤には従来の植物油に対して洗浄性が良いため洗浄コストが低減できる効果もある。

まず，分子構造の検討として非極性基（アルキル基）鎖長の選定を行った。一般的に，鎖長が長くなると界面活性剤の分子間凝集力が大きくなることから潤滑膜が強固になり潤滑性が向上し，短くなると低粘度になり浸透性が向上する特徴がある。評価は溶着が発生しやすい転造タップ加工を選定した。評価条件をFig. 7に示す。溶着性レベルの判断は溶着が始まる最低油供

給量とした。Fig. 8にアルキル鎖長と溶着開始油供給量の関係を示す。Fig. 8に示す結果よりC12が最も溶着開始油供給量が小さくなり、従来使用されている植物油よりも約80%向上することが分かった。次のステップとして潤滑膜の潤滑性向上検討を行った。

潤滑膜の潤滑性を向上する方法としては、界面活性剤の分子間凝集力を大きくし潤滑膜を強固にするという考え方が一般的である。凝集力を大きくするには界面活性剤の濃度を向上させる方法、または添加成分により潤滑膜を密にする方法がある。前者では別実験により、上記で選定した界面活性剤での濃度の効果は70%でサチレートし溶着開始油供給量 $35\text{cm}^3/\text{h}$ が限界であることが分かっている。よって、今回はアルキル鎖を持った成分を添加し、添加成分を界面活性剤と凝集させ凝集間力を大きくすることで、潤滑膜を強固にしようと試みた。

今回検討した添加成分をTable 1に示す。アルキル鎖を持ち、潤滑性を有する添加成分としては、鉱物油、

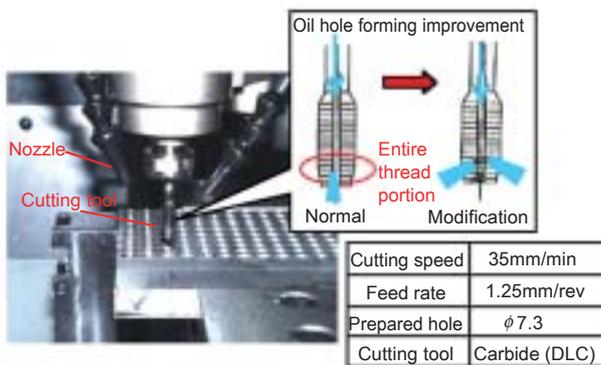


Fig. 7 Overview of evaluation method (ADC12 rolled tap)

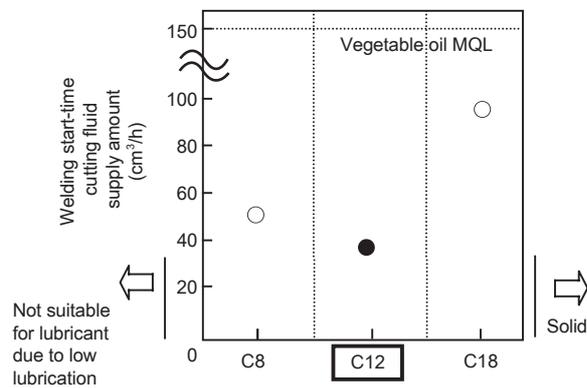


Fig. 8 Alkali group chain length selection results

エステル、(酸化)ワックスが考えられる。しかし、(酸化)ワックスは粘度が約 $10000\text{mPa}\cdot\text{s}$ と高粘度でありミストを形成することができないことから鉱物油、エステルの2材料に絞った。評価は、液体として存在する成分の中から分子量、鎖長が最短、中間、最長の成分を選定し、前記評価と同様に溶着開始油供給量を調査した。Figs. 9-10に添加成分と溶着開始油供給量の関係を示す。Figs. 9-10より以下のことが分かる。

- (1) 鉱物油を添加した場合、分子量最短300で最も溶着開始油供給量が小さくなり、分子量が長くなるに従い溶着開始油供給量が多くなる。
- (2) エステルを添加した場合、鎖長による優位差は見られない。

これは、鉱物油はOH基、O基を持たないため界面活性剤の吸着を阻害せずに狙いどおり潤滑膜を密にするのに対し、エステルはCOOR基により金属に吸着し、エステルが吸着した分の界面活性剤が吸着しなくなり潤滑膜が密にならなかったからだと考えられる。さらに、鎖長が最短(低粘度)である鉱物油が良好な結果を得たことから、検討した鉱物油は、界面活性剤に比べいずれも鎖長が長いいため潤滑性よりも浸透性を重視した方が、良好な結果を得たと考えられる。

Table 1 Investigated additives

	Additive	Lubrication	Permeability
No adsorption to work	Mineral oil : $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ (Molecular weight : 300-420) 	Improvement	Low
Adsorption to work	Ester : $\text{R}_2\text{-COO-R}_2$ 	Improvement	Low
	(Oxidized) wax : $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{-COOH}$ 	Improvement	Deterioration

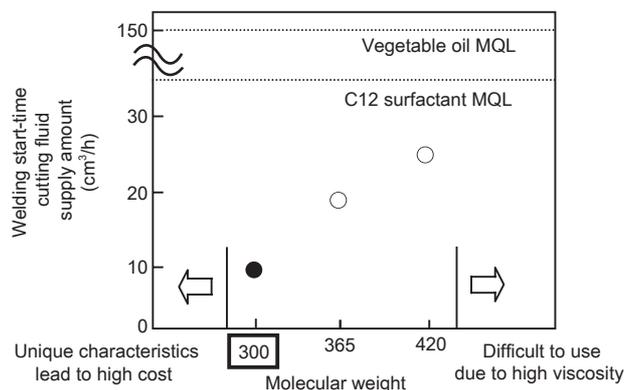


Fig. 9 Mineral oil selection results

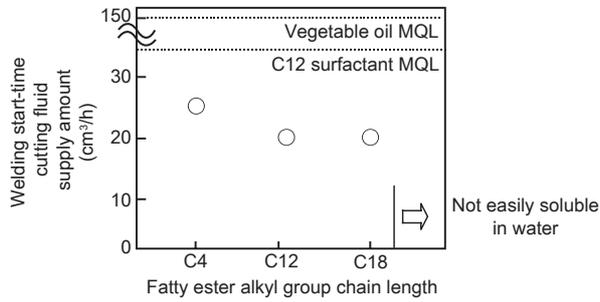


Fig. 10 Ester selection results

4. 生産ラインへの展開事例

Figs. 11-12に開発した2種類の切削油を銅系、アルミ系ワークを加工する生産ラインに展開した事例を紹介する。Fig. 11は旋盤工程、Fig. 12はマシニング・センタ工程である。セミドライ加工により塩素系湿式と同等の品質、刃具寿命確保を確認しており、その結果切削油消費量を約85%削減、間材費低減で加工コストを約15%削減した。



Fig. 11 Real application example of steel use cutting fluid (Fuel injection nozzle)



Fig. 12 Real application example of aluminum use cutting fluid (Sensor board plate)

5. 結論

加工の温度領域にあわせた油剤を開発することで従来使用している植物油の約1.5~2倍の性能を持つミスト用油剤を開発した。

謝辞

最後に、本切削油の開発に際し多大なるご尽力をいただいた方々ならびに実ラインへの展開にあたり多大なるご尽力をいただいた製造部の方々に心から感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 切削油技術研究会：ドライ、ミスト、ウエット加工の実態を探る，切削油技術研究会事務局（2001），pp.1-297.
- 2) 竹山秀彦：切削・研削油剤，初版，工業調査会（1972），pp.39-42.
- 3) 若林利明・横田秀雄・岡崎稔・小倉茂稔：切削加工に対する油剤の効果と工具材質の影響（第1報），トライボロジスト，39，9（1994），pp.784-791.



<著 者>



永田 雅亨
(ながた まさゆき)
生産技術開発部
切削加工の要素技術開発に従事



森田 浩充
(もりた ひろみち)
生産技術開発部
マイクロ加工，工作機械の要素
技術開発に従事



池島 昌三
(いけじま しょうぞう)
材料技術部
トライボロジー，燃料関連の研究
開発に従事



佐々木 啓次
(ささき けいじ)
材料技術部
トライボロジー技術に関する研究
に従事



山田 理生
(やまだ としお)
日華化学(株)
名古屋支店
スペシャリティケミカルグループ
金属加工用薬剤の販売に従事



岩佐 昌光
(いわさ まさみつ)
日華化学(株)
スペシャリティケミカル開発部
金属・機能化学品グループ
水溶性切削油及び金属加工用薬剤
の開発に従事