極微量切削液供給法による切削加工* (フライス加工に関する基礎研究)

峯川 洋己^{*1}, 稲崎 一郎^{*2}, 中村 誠^{*3}
鈴木 繁^{*4}, 上間 丈司^{*5}, 横田 秀雄^{*6}

Cutting with Minimal Quantity Lubrication (Fundamental Research on the Milling Process)

Hiroki MINEKAWA, Ichiro INASAKI^{*7}, Makoto NAKAMURA,
Shigeru SUZUKI, Takeshi KAMIMA and Hideo YOKOTA

^{*7} Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Kōhoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-0061 Japan

The cooling lubricants are still widely used for machining operation today to extend the tool life and to improve the quality of the machined surface. However, due to increasingly strict regulation aiming at controlling environmental pollution, the costs of using cooling lubricants are rising. It is, therefore, necessary to reduce the amount of cooling lubricant used in production lines. The logical step which can be taken to avoid the environmental problem is dry machining. But sometimes dry machining is not possible due to manufacturing process aspects, such as extensive tool wear and insufficient surface quality. To solve those problems, this study proposes cutting with minimal quantity lubrication (MQL), which is able to achieve the function of the cooling and lubrication with an extremely low consumption of lubricants and great amount of air flow. In this paper, the mechanism of the MQL system is introduced and by using this system, milling process on carbon steel and aluminum alloys is tested to see the effectiveness of the MQL method.

Key Words: Cutting Fluid, Lubrication, Milling, Cutting Force, Cutting Temperature, Tool Wear

1. 緒言

切削液は、工具寿命の延長や加工面品質を向上させるため、加工において不可欠なものとなっている。しかしながら、切削液の産業廃棄物としての側面が、近年の環境問題意識の高まりと共に大きく注目され、法的規制も強化される傾向にある。そのため、処理費用など、切削液に関わる費用は増加し、経済的観点からも切削液の使用を押さえることが望まれている。

切削液に関わる問題を防ぐための理想的な方法は、ドライマシニングつまり、切削液を全く使用しない加工である。しかし、完全なドライマシニングは工具寿命や加工精度の低下、更に切り屑処理の困難さなどにより、不可能である場合がしばしばある。そこで、極微量の切削液と、圧縮空気を供給する極微量切削液供給法 (Minimal Quantity Lubrication: MQL) が近年注目を集めている⁽¹⁾。

本研究では、極微量切削液供給システムによるフライス加工の有効性について検討した。

2. 切削液の役割

切削液には様々な種類があるが、その基本的な役割と目的は同じであり、冷却、潤滑、切り屑除去である。

* 原稿受付 1999年8月2日。

^{*1} 学生員, 慶應義塾大学大学院 (☎ 223-0061 横浜市港北区日吉3-14-1)。

^{*2} 正員, 慶應義塾大学理工学部。

^{*3} マキノJ(株) (☎ 243-0303 神奈川県愛甲群愛川町中津4007)。

^{*4} 黒田精工(株) (☎ 293-0036 富津市千種新田132)。

^{*5} クロダ・ワッツ(株) (☎ 213-0032 川崎市高津区久地1121)。

^{*6} 日石三菱(株) (☎ 231-0815 横浜市中区千鳥町8)。

E-mail: inasaki@sd.keio.ac.jp

切削加工では、およそ 97%の仕事が熱に変換されるといわれている⁽²⁾。そのほとんどが、切り屑によって運ばれるが、切り屑と接触する切削点や工具には熱が累積する。その熱により、工具の摩耗は促進され、また熱膨張により加工精度は低下する。従って、熱の発生を抑制し、また、熱を効率よく運ぶことは、切削液にとって重要な役割である。

また、切削液は、切削点に直接作用して皮膜を生成し、金属接触を押さえる。従って、摩耗や切削抵抗が抑えられる⁽³⁾。

切り屑除去も切削液の重要な役割の一つであり、普通給油法の場合、切削液消費量の 7 割が切り屑除去に用いられているとまでいわれている⁽⁴⁾。切り屑が切削点近傍にたまっていると切削点温度は上昇し、加工精度に影響を及ぼす。さらに、切り屑の二度切りにより、切削抵抗は上昇し、工具または加工物に悪影響を及ぼす。

MQL では、以上 3 つの切削液の機能を、極微量の切削液と圧縮空気で担っている (図 1)。極微量の切削液は主として潤滑とこれによる熱発生抑制を、また圧縮空気は冷却と切り屑除去を担っている。

Fig.1 Functions of cooling lubricant

3. 切削液供給装置

本研究では、環境への配慮を考え、切削液としてエステル油剤を用いている。この切削液は、微生物により酸化されて、炭酸ガス、水、及び生成菌体に変わる。また、硫黄や塩素などの人体に害を及ぼす添加物は含まれていない。このエステル油剤の性状を表 1 に示す。生分解性潤滑油の基準として、CEC 法が世界的に広く用いられ一般的になっている。ドイツやスイスの基準では、CEC 法で 80%以上の分解率を有するものを生分解性潤滑油としている⁽⁵⁾。

Table 1 Qualities of the ester oil

Density ρ (15°C) g/cm ³		0.9460
Kinematic viscosity ν (40°C) mm ² /s		19.73
Surface tension γ (25°C) mN/m		30.3
Biodegradability	CEC method (CEC-L-33-T82)	100%
	OECD method (OECD 301D 28days)	65%

通常のマシニングセンタによる加工の場合、数百 l/h 程度もの切削液が使用されている。当然、これらの切削液をフィルターなどを通して、循環させて使用するわけであるが、潤滑装置は大型化してしまい、エネルギー消費の観点からも問題である。また、100%切削液を循環させて使用することは不可能であり、場合によっては 50%近くも蒸発したり工作物や工具、切り屑などに運ばれてしまう⁽⁵⁾。

一方、MQL では、切削液の量が通常 50 ml/h 以下であり⁽⁶⁾、そのため、切削液を循環させる装置が必

Fig.2 MQL system

要なくなり、環境への配慮のみならず、費用の面でも効果的で、省スペース化にも役立つ。また、MQLを用いれば、切削後の工作物、工具、及び切り屑はドライのままであるという特徴がある。

図2に本研究で用いた MQL 装置を示す。コンプレッサから送られてきた空気はフィルタ、ミストクリーナ、ドライヤを経た後、レギュレータで圧力と流量を調節されてエアリューブリケータに運ばれる。また、エアリューブリケータには、プランジャから間欠的に切削液が供給される。この装置にはタイマが備えられていて、吐出間隔を変えることにより、油量が調節できるようになっている。エアリューブリケータの中で、ドロッピングノズルから滴下した切削液は空気の流れにより霧状になってボールの中を漂う。そこで、粒径の大きいものは落下し、粒径が $2\mu\text{m}$ 以下のものだけが出口へ運ばれる。ドロッピングノズルから滴下した切削液のうち、5~15%がノズルから供給されることになる。

4. 実験

4. 1 フライス加工で必要とされる切削液量

MQL では、主に極微量の切削液が潤滑機能を担っている。そこで、どれくらいの油量があれば十分な潤滑機能を得られるか確認のための実験をした。潤滑機能は、切削抵抗に大きな影響を及ぼすので、圧電式三分力測定器で切削抵抗を測定した。実験装置を図3に示す。エンドミル加工は、断続切削であり、切削力の方向も時々刻々と変化する。そこで、工具曲げ方向に作用する力 F_x , F_y の合力 F_{xy} で評価した。

$$F_{xy} = (F_x^2 + F_y^2)^{0.5} \quad (1)$$

MQL 法では、ノズルは図4に示すような位置に配置した。この配置にノズルを置くことにより、エンドミル逃げ面方向に切削液が供給され、また切り屑も効率よく除去できる。

図5に各油量での切削抵抗を示す。これを見ると、切削液が供給されると、切削液がない場合に比べて切削抵抗がおおよそ10%減少する。また、切削液の量が増すに従い、切削抵抗は減少する傾向にある。しかしながら、切削抵抗は、切削液の量に比例して減少するわけではなく、ある値（この実験の場合、約530N）に収束する。つまり、約0.2 ml/min の切削油量を、切削点に的確に供給してやれば、潤滑機能は

Fig.3 Experimental setup for investigating cutting forces

Fig.4 Arrangement of nozzle

Fig.5 Cutting force influenced by oil quantity

十分に得られることが確認できる。

4. 2 炭素鋼の切削

MQL 法の性能を従来の普通給油法と比較するため、図 6 に示すような実験装置を組み、実験を行った。実験は空気だけを供給するものと、普通給油法、それと MQL で行った。この実験では炭素鋼 S55C をエンドミル側面加工し、その時の切削抵抗、工具摩耗、加工面品質、そして切削点温度を測定した。切削抵抗は前述の圧電式 3 分力測定器で測定し、工具摩耗に関しては、逃げ面摩耗幅を顕微鏡を用いて測定した。また、加工面品質については、表面粗さ計を用い、加工面の側面の最大高さ粗さ R_y を測定した。切削点温度は、工作物から 200mm 離れた場所に設置された、赤外線輻射温度計を用いて測定した。赤外線輻射温度計を用いる利点は、非接触で切削点の周辺の温度分布を測定できることである。しかし、普通給油法の場合には適用不可である。それぞれの測定は、切削距離 2 m 毎に行われた。

Fig.6 Experimental setup for milling of steel

MQL 法が、従来の普通給油法に取って代わるためには、少なくとも加工能率、工具寿命、加工面品質で従来とほぼ同じ加工性能が得られなければならない。

図 7 に工具逃げ面摩耗の結果を示す。空気だけを供給している場合、潤滑機能は得られない。これをふまえて結果を比較すると、工具寿命にとって潤滑機能がとても重要な役割を果たしていることが分かる。MQL と普通給油法を比較すると、工具寿命では

Fig.7 Tool life investigation

ほぼ同じであると言える。

図 8 に加工面品質を示す。加工面品質は、工具摩耗と密接な関係がある。工具切れ刃の形状は加工面に転写される。そのため摩耗した工具で切削を行うと加工面が荒れる。空気だけを供給する場合、工具摩耗が急速に進展し、そのため加工面も荒れる。また、潤滑効果が無いことにより、切削初期から粗さは大きい。一方、普通給油法と MQL では、摩耗の進展が抑えられているため、加工面品質でもほぼ同じ結果が得られた。

Fig.8 Surface quality

図 9 に切削点温度を示す。MQL では、切削点温度は 300℃以下に抑えられているが、圧縮空気供給だけでは、切削距離 12m の地点で 350℃を越えている。つまり、切削液の潤滑機能による熱発生抑制が確認される。

図 10 に切削抵抗を示す。MQL での切削抵抗 F は、普通給油法と比較して、約 50N 小さくなっている。普通給油法はフライス加工のような断続切削の場合、被削材によってはあまり好ましくないといわれている。なぜなら、断続切削の場合、工具の加熱—冷却を繰り返す熱疲労の影響が出るからである⁽⁷⁾。MQL では、加熱冷却の温度差が小さく、熱疲労の影響は

Fig.9 Cutting Temperature

Fig.10 Cutting force

少ないと考えられる。

4. 3 アルミニウム合金の切削

アルミニウム合金は軟らかく、加工面品質も維持しやすいので、普通給油法では重切削にも耐え、比較的加工しやすい材質である。しかしながら、ドライ切削を行う場合、事態は一変する。アルミニウム合金は融点が低く、軟化し易いため工具への凝着が問題となる⁽⁸⁾。

アルミ合金切削の場合、逃げ面摩耗よりも、工具すくい面へのアルミニウム合金の凝着が問題となる。そこで、半径方向切り込み深さを、4.0mm から 5.0mm まで 0.2mm 刻みで切削距離 0.1m 毎に増加させ、その時のすくい面へのアルミニウム合金凝着の様子を観察した。また、それぞれの半径方向切り込み時の切削抵抗を、圧電式 3 分力測定器で測定した。切削点温度に関しては、切削距離 0.1m (半径方向切り込み 4.2mm) 時点での温度を赤外線輻射温度計を用いて測定した。

図 11 にエンドミルすくい面の写真を示す。ドライ条件では、切削距離 0.3m の時点で、アルミニウム合金が工具の溝に詰まってしまい使用不能となってしまった。圧縮空気供給の場合、アルミニウム合金

Lubricating parameters

Cutting parameters		MQL	
Process	Side milling	Oil ; Ester (n-C ₈ +n-C ₈ +n-C ₁₀)	
Workpiece	Aluminum alloy (A7075)	Flow rate ; 62 l/min	
Tool	Carbide endmill φ10	Air pressure ; 0.2 MPa	
Cutting speed v _c	314m/min	Quantity of oil ; 0.135 ml/min	
Feed rate f _z	0.2mm/rev	Flood lubrication	
Axial cutting depth a _p	7.5mm	Oil ; non water miscible lubricant	
Radial cutting depth a _e	4.0-5.0mm	Quantities of oil ; 4270 ml/min	
Down cutting			

Fig.11 Adhesion of material on the rake face of tools

はエンドミルの溝に詰まりはしないが、顕微鏡ですくい面を観察すると、実験開始直後から凝着が起きているのが分かる。一方、MQL と普通給油法では、ほとんど凝着が観測されなかった。このことは、切削抵抗にも影響している (図 12)。アルミニウム合金が凝着している場合、凝着していない場合に比べておよそ 350N 大きい値をとる。凝着していない MQL と普通給油法では、ほぼ同じ切削抵抗値となっている。以上により、圧縮空気による切り屑除去機能により、工具溝にアルミニウム合金が詰まるのを

Fig.12 Cutting force on tools

防止し、潤滑機能によりアルミニウム合金の凝着を防いでいると考えられる。

図 13 に切削点温度を示す。工具にアルミニウム合金が凝着すると、切削抵抗が増大し、切削点温度が上昇する。また、切削点温度が上昇すれば、アルミニウム合金は凝着しやすくなる。アルミニウム合金の切削では、このような悪循環があるが、MQL では冷却機能、潤滑機能、切り屑除去機能が普通給油法と同じ程度に発揮されているため、ドライでは難しいとされていたアルミニウム合金の加工にも極微量の切削液で対応できる。

Fig.13 Temperature at the cutting point

5. 結論

極微量切削液供給法を炭素鋼、アルミニウム合金のエンドミル切削に用い、その時の工具摩耗、切削抵抗、加工面品質、切削温度を調べた。その結果、次のような結論が得られた。

- (1) 極微量の切削液を供給することで、従来の普通給油法とほぼ同じ潤滑性能を得ることができた。
- (2) 炭素鋼のフライス切削では、MQL を適用することにより、工具摩耗、加工面品質、切削抵抗で普通給油法とほぼ同じ結果が得られた。また、MQL では、切削点温度も抑えられた。

- (4) アルミニウム合金のフライス切削では、MQL を用いてアルミニウムの工具すくい面への凝着が防げた。

以上により、フライス加工において、MQL は従来の普通給油法に代わりうる技術であることが結論された。残されている技術課題は効果的な切り屑除去対策である。

参考文献

- (1) 佐藤，稲崎，若林：極微量切削液供給による旋削加工，日本機械学会論文集 C 編，Vol.62, No.604, (1996) p4696
- (2) E.G. Thomen, J.T. Laspley, R.C. Grassi: Deformation Work Absorbed by the Workpiece during Metal Cutting, Trans ASME, Vol.75, No.5, (1953), p591
- (3) F. Klocke, G. Eisenblatter: Machinability Investigation of Drilling Process Using Minimal Cooling Lubrication Techniques, Production Engineering, Vol.IV/1, (1997) p19
- (4) I. Inasaki: Toward Eco-Friendly Machining Technology, Proceedings of the International Seminar on Improving the Machine Tool Performance, Vol. I (1998) p43
- (5) 北村：生分解性潤滑油，トライボロジスト，No.38, Vol.5 (1993) p37
- (6) F. Klocke, G. Eisenblatter: Dry Cutting, Annals of the CIRP, Vol. No.2 (1997) p519
- (7) 鶴，川島，安斎ら：フライス加工におけるクーラント供給の影響，精密工学会春季大会学術講演論文集 (1995), p859
- (8) 岸本：アルミニウム加工のための油剤の選び方・使い方，機械技術 (1995) p32