

昭和41年5月23日 第3種郵便物認可  
2021年8月15日発行・毎月1回15日発行

〔第66巻〕  
第8号


ISSN 0915-1168  
CODEN : TORAEO

# トライボロジスト

JOURNAL OF JAPANESE SOCIETY OF TRIBOLOGISTS

Vol.66 / No.8 / 2021

一般社団法人 日本トライボロジー学会



特集・加工のための潤滑技術  
SPECIAL ISSUE ON LUBRICATION  
TECHNOLOGY IN METAL PROCESSING



Japanese Society of Tribologists

## 解説 特集・加工のための潤滑技術

“トライボロジスト” 第66巻 第8号(2021) 608~613  
原稿受付 2021年3月8日

## 切削加工に関する潤滑技術

—油剤供給方法の観点—

帯川 利之<sup>1\*</sup>、森合 主税<sup>2</sup>

## Tribology in Cutting Processes

—From a Viewpoint of Lubricant Feeding—

Toshiyuki OBIKAWA<sup>1\*</sup> and Chikara MORIGO<sup>2</sup>

## Abstract

Tribology in cutting processes are explained for different cooling methods with flood coolant, MQL, high speed coolant, and high pressure coolant. First, the fundamental modeling of lubrication in cutting processes through gas phase lubrication, which can be applied to all the cooling methods, is depicted. This model explains the efficient lubrication of MQL, which could compensate the poor cooling ability of MQL in comparison with flood cooling. Computational fluid dynamic analysis of coolant flow in turning shows visibly that high speed coolant is much more effective than flood coolant for cooling high temperature area of a tool near the tool tip. Finally, the effects of high and ultrahigh pressure coolant on cutting processes are highlighted. Both kinds of coolant have two main roles in cutting: cooling and chip breaking. Chip breaking is a not-negligible action of these types of coolant, which contributes to the efficient cutting processes by solving one of ill-defined problems of chip control. The influence of coolant pressure on cooling and chip breaking is described comprehensively.

Key Words : tribology, cutting process, flood coolant, MQL, high speed coolant, high pressure coolant

## 1. はじめに

切削加工では、解決策が容易に見つからないトラブルによく見舞われる。特に近年、航空宇宙部品や生体医療部品等の需要が高まり、超耐熱合金やチタン合金などの難削材とよばれる材料の切削が増加しており、それに伴うトラブルが切削工程の自動化や無人化の妨げになっている。困難なトラブルを解決しようとする際には、基本に立ち返って切削加工状態を見直そうとすることが多く、工具摩耗の低減に対しては、工具の冷却効果や工具面の潤滑効果が検討課題となる。ところが、切削のトライボロジーに関連する技術情報は、通常、個別の加工事例の集まりであるため、これらを概

概念的、包括的に理解することが求められる。

そこで、本稿では切削のトライボロジーに関する基本的な現象を、より科学的に解説することとした。まずは、切削における最も合理的な潤滑モデルを示し、このモデルに基づいてMQL切削とフラッドクーラント（大量の低圧クーラント）における潤滑効果と冷却効果の違いを説明する。なお、MQLにはminimum quantity lubricationとminimum quantity of lubricantの二つの意味があるが、本稿ではこれらを適宜使い分けている。

次にクーラントの流れの数値流体解析の結果を示し、工具すくい面と切りくずの間の狭いすきまや工具逃げ面と仕上げ面の間の狭いすきまにクーラントが侵入するためには、高速のクーラントが

極めて効果的であることを視覚的にわかりやすく説明する。最後に、近年注目されている高圧クーラントの効果について解説する。高圧クーラントには、冷却促進だけでなく、切りくず処理の観点から切りくずの破断促進が期待されている。クーラントの圧力が冷却促進と切りくずの破断促進にどのように影響するかを、クーラントの運動量と熱伝達率の観点から包括的に説明する。

## 2. 切削の潤滑モデル

切削では、工具すくい面と切りくずの接触部、工具逃げ面の摩耗部と仕上げ面の接触部において、それぞれすくい面摩耗と逃げ面摩耗が発達する。工具摩耗の抑制には、クーラントによる潤滑と冷却が有効であるが、クーラントの供給法によって結果は大きく変わることが知られている。

クーラントによる潤滑に対しては1977年にWILLIAMS<sup>1)</sup>が提案した気相による潤滑モデルが最も妥当なモデルとみなされている。本モデルは切削のトライボロジーを理解する上で極めて重要であるので、多少詳しく説明する。

図1はWILLIAMSのモデルを著者なりに解釈し、フラッドクーラントとMQLの違いを示したもの

である。WILLIAMSのモデルの特徴の一つは、工具すくい面と切りくずの接触面に気相のクーラントが侵入できる毛細管を想定したことである。毛細管の高さは表面粗さ程度で、その断面は適度な幅を持つ矩形と仮定する。同様の毛細管は工具逃げ面摩耗部と仕上げ面の接触面にも想定できるので、図1では、毛細管を含む断面において、逃げ面を中心に潤滑状態を描いている。

図1には潤滑状態を具体的に想定できるように参考となる数値を記入した。それによれば、逃げ面摩耗部と仕上げ面の間の毛細管は高さが1μmと非常に狭く、また、下面を構成する仕上げ面は毛細管内に侵入する液体を排出するように1500mm/sの速さで右に高速で移動する。そのため、クーラントは液相でほとんど侵入できず、代わりに高温の工具に接触して蒸発・気化した気相のクーラントが蒸気分圧で毛細管のネットワーク内へ侵入し、壁面の工具や工作物に吸着する。毛細管の発生する位置は絶えず変わるので、吸着したクーラントにより新たな接触部が潤滑される。

同図(a)のフラッドクーラントと(b)のMQLとの大きな違いはクーラントの沸騰にある。フラッドクーラントの場合には工具の表面温度の低下が

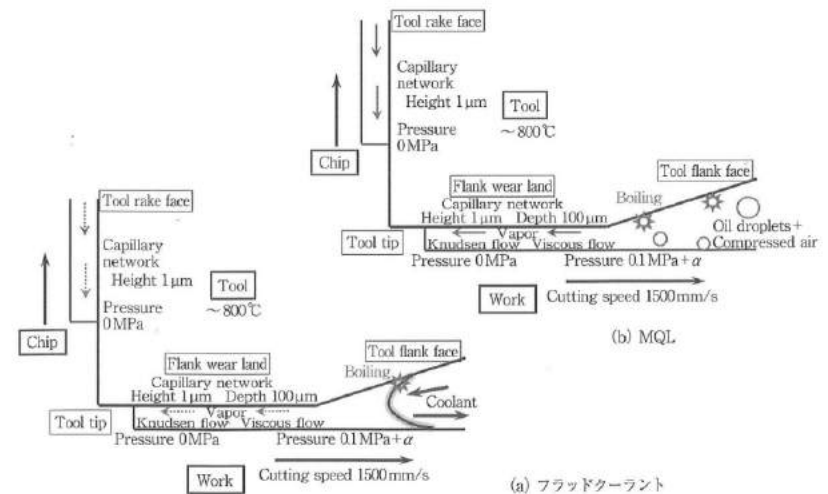


図1 気相による潤滑モデル

<sup>1</sup> 東京電機大学 ものづくりセンター (〒120-8551 東京都足立区千住旭町5) Monozukuri Center, Tokyo Denki University (5, Senju-Asahi-cho, Adachi-ku, Tokyo 120-8551)

<sup>2</sup> (株)トクピ製作所 (〒581-0854 大阪府八尾市大竹3丁目167) TOKUPI Co., Ltd. (167, Otake 3-chome, Yao-shi, Osaka 581-0854)

\* Corresponding author : E-mail: obikawa@mail.dendai.ac.jp



大きいので効率よく沸騰できない。一方、油性のMQLでは、冷却効率が悪い分だけ工具面温度が高く、ドロップレットの直径が10~100 $\mu\text{m}$ と小さいことから、沸点が高くて熱容量が非常に小さいので効率よく沸騰する。この結果は、MQL切削の共通認識である「潤滑性能はMQL>フラッドクーラント、冷却性能はMQL<フラッドクーラント」に対応している。また、負荷の小さい切削では、総合的にMQLがフラッドクーラントより優れることを合理的に説明できる。さらに、図1のモデルを念頭に潤滑性能や浸透性能を調整し、切削油剤の性能向上を図ることが期待される。

さて、毛細管内の気相クーラントの流れには、KNUDSEN流と粘性流が想定できるが、図1の状況ではKNUDSEN流の方が深くまで侵入する。侵入深さは切削条件、毛細管内の温度や分圧などの影響を強く受けるが、WILLIAMSの計算式<sup>1)</sup>に従って概算値を求めると、KNUDSEN流で100 $\mu\text{m}$ 程度、粘性流で20 $\mu\text{m}$ 程度となる<sup>2)</sup>。KNUDSEN流であれば、逃げ面摩擦幅の半分程まで侵入し、工具摩擦速度の抑制に貢献することになる。

### 3. MQL切削のドロップレット寸法

MQL切削では、オイルミスト中のドロップレットの寸法が潤滑効率に大きく影響する。ドロップレットのパフォーマンスを決定づける因子の一つに停止距離があり、ドロップレット寸法はこの値を左右する。停止距離は、図2に示すように、初速 $u_0$ で運動する微粒子が空気粘性抵抗によって減速し停止するまでの距離 $s$ である。停止距離 $s$ が工具面までの距離より長ければドロップレットは工具面に到達し、到達点が刃先に近ければ

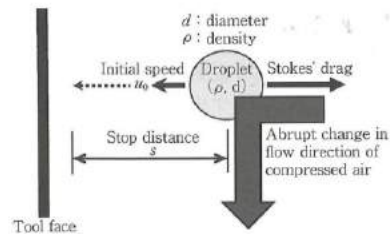


図2 ドロップレットの停止距離

近いほど高温によって速やかに気体となる。しかし、停止距離が100 $\mu\text{m}$ 程度のオーダーであれば、圧縮空気によって搬送されてきたドロップレットの多くは、圧縮空気の流れが図2のように急に方向を変えても流れから飛び出し工具面に到達することができない。結局は再び流れに取り込まれて無駄に排出される。なお、図2以外の一般的な圧縮空気の流れでは、停止距離を、空気との相対速度 $u_0$ で運動するドロップレットが流れの中で自由に動ける距離とみなすことができる。

図3は図2のような状態において求めた直径1 $\mu\text{m}$ と10 $\mu\text{m}$ のドロップレットの初速 $u_0$ とそれぞれの停止距離 $s_1$ 、 $s_{10}$ との関係であり、文献3)の近似式を使用した。同図より、ドライミストに分類される直径1 $\mu\text{m}$ のドロップレットでは停止距離が短すぎ、潤滑油剤としての役割をほとんど果たすことができないことがわかる。

一方、停止距離は概ね直径の二乗に比例するので、直径が10 $\mu\text{m}$ まで増加するとドロップレットの停止距離はかなり大きくなり、圧縮空気の流れから離脱して工具面に到達し、工具と工作物との接触面の潤滑に寄与するようになる。しかし、直径が100 $\mu\text{m}$ 近くになると、図1の逃げ面と仕上げ面の楔状間隙やすくい面と切りくずのすまの奥深くに侵入し刃先に近づくことが難しくなる。

以上のことから最適な粒径は10~100 $\mu\text{m}$ になる。数値流体解析の結果によれば、旋削において刃先付近を流れ潤滑に貢献する可能性のある油剤は、ノズルから噴出する量の0.1%以下である<sup>3)</sup>。例えば、油剤の消費量が10mL/hとすると、有効

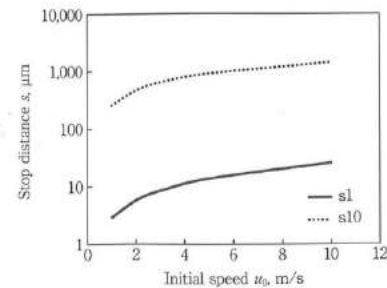


図3 直径1 $\mu\text{m}$ と10 $\mu\text{m}$ のドロップレットの停止距離

に使える量は10 $\mu\text{L/h}$ 以下となるので、ドロップレットの粒径分布の最適化が利用効率を高めるうえで、非常に重要である。

### 4. 高速クーラントの効果

図1(a)ではフラッドクーラントが工具逃げ面と仕上げ面の楔状間隙の奥まで届いていないが、このことは、最初に数値流体解析によって確認され<sup>4,5)</sup>。その後、刃先から離れた位置でクーラントが沸騰することも確認された<sup>6)</sup>。

図4〔出典：文献5)より一部改変〕は、旋削において図1(a)のようにクーラントを逃げ面側から供給する時、クーラントが工具逃げ面と仕上げ面の間隙に侵入する状態を数値流体解析した結果である。図4(a)がフラッドクーラントに、(b)がノズルを細くし流速を高めた高速クーラントに対応する。ただし、逃げ面摩擦のない状態を仮定し、刃先から0.2mmの断面での侵入状態をVFOL

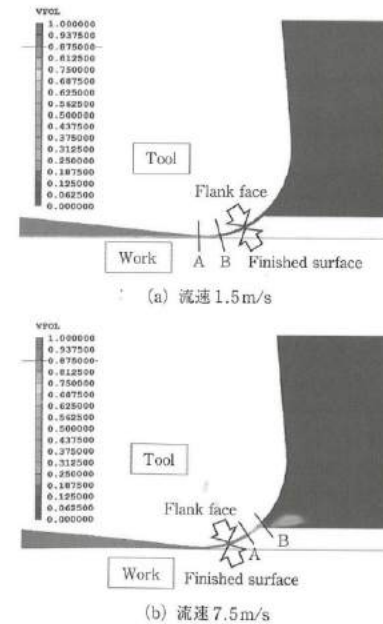


図4 工具逃げ面と仕上げ面の間隙へのクーラント侵入深さに及ぼす流速の影響〔出典：文献5)より一部改変〕

(volume fraction of liquid) で示している。線分Aの左側(赤)のVFOL=1がクーラント、線分Bの右側(青)のVFOL=0が空気、その中間の色と値が二相混合状態である。なお、解析での切削条件は切削速度90m/min、切込み0.2mm、送り0.2mm/revであり、クーラントは斜め左後方から供給しているため、間隔の大きい左下側の工具と工作物の間は、クーラントで満たされている。

同図の結果より、高速クーラントはフラッドクーラントでは侵入できなかった刃先から0.2mm位置の間隙(逃げ面と仕上げ面の間隔21 $\mu\text{m}$ )まで侵入できるので、大きな冷却効果が期待される。確認の切削実験は切削速度240m/min、切込み1.0mm、送り0.2mm/revのより厳しい条件で行ったが、高速クーラントは、フラッドクーラントより工具寿命を93%伸ばすことが可能であった<sup>5)</sup>。

数値解析の結果を基に、二次元切削モデルにクーラントの供給状態を書き加えたものを図5に示す。フラッドクーラントでは侵入深さから刃先の効率的な冷却は難しいが、高速クーラントを使用すれば冷却状態は大きく変わる。

### 5. 高圧クーラントの効果

高速クーラントより流速の速い高圧クーラントでは、冷却だけでなく他の効果も期待されている。特に重要な効果は切りくずの破断であり、旋削時に切りくずが工具や工作物に絡みつきの防止し、ドリル切削では切りくずを細分化することにより排出性を高め、ステップ加工に頼らない一気通貫

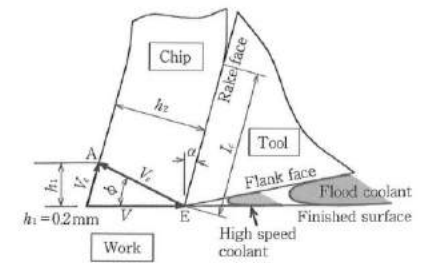


図5 フラッドクーラントの刃先への接近状態と高速クーラントによる改善〔出典：文献7)より一部改変〕

の深穴加工を実現する。

図6に一例としてノズルの面積が $A=2\text{mm}^2$ のときのクーラントの圧力 $P$ と流速 $v$ の関係を示す。高圧における流速は $P=20\text{MPa}$ で $81\text{m/s}$ と非常に速く、 $20\text{MPa}$ でも飽和傾向を示さない。流量は速度に比例するので、切りくずの破断に密接に関連する運動量は速度の2乗に比例して増加する。一方、冷却と密接に関連する熱伝達率は、レイノルズ数の0.5乗から0.7乗、言い換えれば流速の0.5乗から0.7乗に比例して増大すると考えられる。

図7は上記の議論を基に、 $P=7\text{MPa}$ の流速 $v_f$ を基準として、クーラント圧力の増加に伴うクーラントの運動量と熱伝達率の変化の概略を表したものである。具体的には $(v/v_f)^2$ 、 $(v/v_f)^{0.7}$ 、 $(v/v_f)^{0.5}$ のクーラント圧力による変化である。図7よりクーラントの運動量はクーラント圧力の増加に伴って直線的に近い状態で増加しており、切り

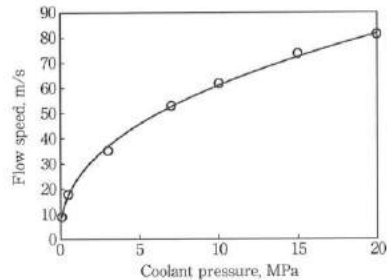


図6 クーラントの噴射速度と圧力との関係

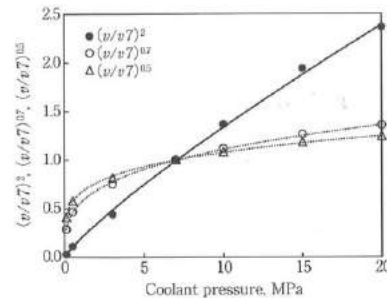


図7 クーラント圧力と運動量、熱伝達率との関係

くず処理にはクーラント圧力の増加が非常に有効であることがわかる。一方、熱伝達率は $P=3\text{MPa}$ 程度までは冷却効果の大きな改善が期待できる。しかし、クーラント圧力が $7\text{MPa}$ を超えると飽和傾向を示すので、冷却だけを目的として $10\text{MPa}$ 以上の超高压クーラント装置を導入するほどのメリットは感じられない。以上の結果を視覚的にわかりやすくまとめたのが図8である。

図9は、切りくず処理に及ぼすクーラント圧力の影響を概観するため、文献調査<sup>8)</sup>と試験結果からクーラント圧力と切りくず形状分類番号との関係をまとめたものである。切りくず形状は添え図のように11種類に分類し、番号が大きくなるにつれて切りくずが短くなるように並べている。この中で切りくず処理に適した形状は分類番号で6番から9番である。すべての結果を一瞥すると、同じ圧力でも切りくずの形状には大きな違いが見られる。材料や切削条件が異なるので当然であるが、工作機械における高圧クーラントの標準値 $7\text{MPa}$ では切りくず処理のトラブルを解消できない

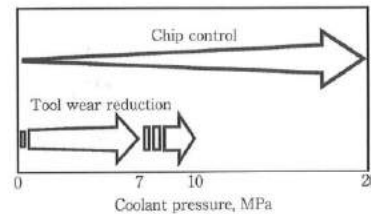


図8 クーラントの圧力が切りくず処理と工具摩耗低減に及ぼす効果

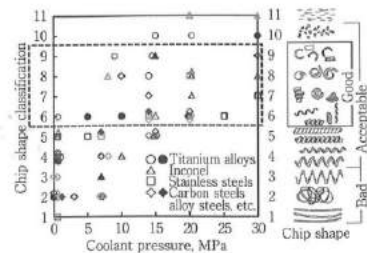


図9 各種被削材の切りくず形状に及ぼすクーラント圧力の影響 (出典:文献7)より一部改変)

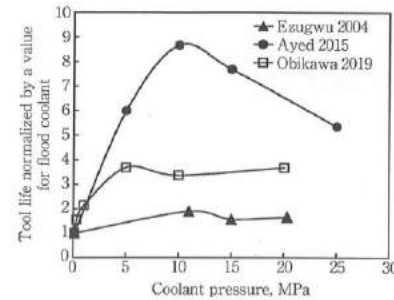


図10 超高压領域における工具寿命の飽和 (出典:文献7)より一部改変)

い場合が多い。実際に使用する高圧クーラントの圧力は被削材や切削条件に合わせて調整することになるが、 $20\text{MPa}$ の超高压クーラントが必要となる場合もある。

図10は文献9~11)で報告された工具寿命とクーラント圧力の関係の一例であり、フラッドクーラントを使用した際の工具寿命で正規化している。適切なクーラント圧力を選択すると工具寿命が大きく伸びるが、クーラント圧力が $10\text{MPa}$ を超えると工具寿命が飽和傾向を示すことが多く、寿命がかえって短くなる結果も報告されている。

## 6. おわりに

本稿では、切削における潤滑の基本を説明し、潤滑・冷却状態がクーラントの供給法に大きく影響されることを説明した。クーラントの特性や供給法の変更により現状の切削性能を変える余地が十分にあることを理解いただけたと思う。特集号の趣旨のように基本から現象を理解し、それを新しい潤滑冷却技術の開発に結びつけることは非常に重要である。さらに、切削効率の向上、機械工場環境改善、省エネルギー、環境負荷低減へとつながっていくことを期待したい。

## 文献

- 1) J. A. WILLIAMS & D. TABOR : The Role of Lubricants in Machining, *Wear*, **43** (1977) 275.
- 2) T. OBIKAWA : Machining with Least Quantity Lubrication, *Comprehensive Materials Processing*, 11, ed. S. HASHIMI, Elsevier (2014) 255.
- 3) T. OBIKAWA, Y. ASANO & Y. KAMATA : Computer Fluid Dynamics Analysis for Efficient Spraying of Oil Mist in Finish-Turning of Inconel 718, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **49**, 12 (2009) 971.
- 4) T. OBIKAWA & M. YAMAGUCHI : Computational Fluid Dynamic Analysis of Coolant Flow in Turning, *Procedia CIRP*, **8** (2013) 271.
- 5) R. NAKATSUKASA, M. HAYASHI, T. OHNO, T. OBIKAWA, T. KUMAKIRI & H. TAKAHASHI : High Speed Machining of Stainless Steel Using Low-Pressure Jet Coolant, *Proc. 7th Int. Conf. Lead. Edge Manuf. 21st Cent.*, Matsushima (2013) 255.
- 6) 松本・帯川：切削性能に及ぼすジェットクーラントの効果、2016年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(2016) 705.
- 7) 帯川・森合・長谷川：高圧クーラントの実力-切削の悪問題を解消し難削材の高速切削加工を実現、*自動車技術*, **74**, 5 (2020) 64.
- 8) 帯川・森合・松本・林：高圧クーラントを用いた高速切削の動向と最新のトピックス, *生産研究*, **67** (2015) 607.
- 9) E. O. EZUGWU & J. BONNEY : Effect of High-Pressure Coolant Supply when Machining Nickel-Base, Inconel 718, Alloy with Coated Carbide Tools, *J. Mater. Process. Tech.*, **153-154** (2004) 1045.
- 10) Y. AYED, G. GERMAIN, A. AMMAR & B. FURET : Tool Wear Analysis and Improvement of Cutting Conditions Using the High-Pressure Water-Jet Assistance when Machining the Ti17 Titanium Alloy, *Proc. Eng.*, **42** (2015) 294.
- 11) T. OBIKAWA, Z. FANG, W. MATSUMOTO, M. HAYASHI, H. HATTORI & C. MORIGO : Deposition of Trace Coolant Elements on Flank Face in Turning Inconel 718 under High Pressure Conditions, *Int. J. Auto. Tech.*, **13** (2019) 41.

### 著者プロフィール

**帯川 利之** 東京工業大学工学部機械物理工学科卒業、同大学にて工学博士取得。現在、東京電機大学特別専任教授。主として切削加工技術の研究開発に従事。

**森合 主税** 追手門学院大学卒業。現在、(株)トクビ製作所代表取締役社長。主として高圧ポンプと高圧クーラントの利用技術の研究開発に従事。精密工学会、砥粒加工学会に所属。

