軟質金属切削における塗布効果（第5報）*

—オイルミスト実験による最小油膜厚さの決定—

金 枝 敏 明** 松 下 智*** 岡 田 賢 和†

Lubricant Applying Effect in Ductile Metal Cutting (5th Report)

- Determination of Minimum Thickness of Oil Film by Oil-mist Cutting Experiments -

Toshiaki KANEEDA, Satoshi MATSUSHITA and Yoshikazu OKADA

Cutting experiments were conducted on an NC precision cutting apparatus to determine relationship between amount of oil particle on the precut surface and lubricant applying effect. Minute diameter-oil particles could be obtained by accumulation of oil mist which was generated by a spray gun. The amount of the oil particle could be controlled by the accumulation time. Reduction percentage in the cutting forces surely increased with increase of the accumulation time. AFM and ellipsometer analyses indicated that the minimum thickness of the oil film on the precut surfaces which could produce the maximum reduction percentage was approximately 2nm.

Key words: oil mist, lubricant applying effect, oil film, MQL, semidry cutting, cutting fluids, AFM, ellipsometer, oleic acid, machinability, pure aluminum,

1. 緒 言

著者らは、前報までに切削におけるレピンダー効果と一般に理解されがちな塗布効果について、その発生条件を求め¹⁾、幅広い切削条件下で成立する詳細な機構について明かにしてきた²⁾。さらに軟質金属切削での潤滑効果を不偏的な方法で求めるため、浸漬法切削実験を考案し、切削油剤の潤滑効果を定量的に求めた。そして潤滑効果に占める塗布効果の割合を算出し、多くの切削条件下では潤滑効果の大部分が塗布効果であることを明かにした。切削油剤に潤滑効果のみを求めるなら、多くの場合極少量の油剤の供給で済むことになり、MQL（セミドライ切削）が理論的に可能なことを示した³⁾。

しかし、塗布効果を利用すればMQLは理論的には可能であるが、その塗布量や塗布剤の付着状況については未だ明らかにされていない。また、MQLは現在、一部の切削加工で実施され、かつその装置も市販されているが、切削油剤の供給量に至っては単位時間当たりの消費量が示されているに過ぎない。

そこで、今回塗布効果が発生する場合の塗布剤（切削油剤）の最小油膜厚さを求めるため、工業用スプレーガンを用いたオイルミスト実験装置を作成し、供給したオイルミストが粒径によって沈着する時間が異なることを利用することで前加工面に付着する油膜の厚さを変化させ、塗布効果との関係を求めた。さらにAFMならびにエリプソメータで前加工面に付着した油膜の厚さを計測することにより最小値を求めたので、ここに報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 切削実験装置および条件

切削実験装置には既報²⁾と同様にNC二次元精密切削実験装

置を用いた。被削材もこれまでと同一の純AlのA1050（1/2硬化材）厚さ3mmの板材である。工具材料やすくい角、工具幅、刃先の仕上げ方法や他の実験条件等も既報^{1)~3)}と同一である。なお、本実験で重要と思われる工具刃先丸みも既報と同一の刃先丸み半径 $\rho = 2\mu\text{m}$ である。

切込み t_1 は $5\sim 70\mu\text{m}$ である。軟質金属切削で重要なもう一つのパラメータである最終前加工切込み t_L は、10, $50\mu\text{m}$ とした。

切削速度 V は塗布効果が大きく現れ、かつ潤滑効果が大きい $V=5.3\text{ m/min}$ と $25.7, 50.0\text{ m/min}$ である。

塗布剤および切削油剤は、塗布効果が顕著に現れる油性向上剤のオレイン酸である。切削抵抗も既報と同様に水晶製の圧電型切削動力計を用いて測定した。

表1に切削条件をまとめて示す。

2.2 オイルミスト供給装置

塗布効果での前加工面に塗布する切削油剤の最小量を求めるには、できるだけ微小なサイズの油剤を均一に塗布することが必須である。通常の塗布効果切削実験では油剤を産業用紙製のワイパーに染込ませ、実験者が塗布していた。そこで、今回工業用スプレーガンを使用し、発生した粒子のうちできるだけ細かい粒子を選択的に前加工面に付着させる以下の方法を考案した。以下、プロセスを箇条書きにする。

(1) 図1a)に示す箱状のカプセル（ $570\times 385\times 200$ ）内に工

Table 1 Cutting conditions

Work material	Pure Al (1050 H24)
Tool material	Cemented carbide K10
Tool geometry	Rake angle α°
	Relief angle ε°
Cutting form	Orthogonal cutting
Cutting speeds V m/min	5.3, 25.7, 50.0
Depth of cut t_1 μm	5 ~ 70
Depth of cut at last pre-cutting t_L μm	10, 50
Applied material (Cutting fluid)	Oleic acid

* 原稿受付 平成17年 9月 30日

** 正 会 員 岡山理科大学工学部（岡山市理大町1-1）

*** ダイハツディーゼル株（大阪市中央区徳井町2-4-14）

† トーヨーエイトック株（広島市中区宇品5-3-38）

Fig.1 Oil particle accumulation on precut surface by spray gun

Fig.2 Oil particles reflected by shield plate

業用スプレーガンで油剤を30秒間噴射し、遮蔽板に衝突させ、遮蔽板に反射した油剤のみをカプセル内に満たす。一般に遮蔽板に衝突した粒子の内、大きな径の粒子は遮蔽板に付着し、それより以下の粒子は反射する⁴⁾。測定結果から今回の実験法では遮蔽板には粒径約50 μ m以上の粒子が付着し、一方約50 μ m以下は反射することがわかっている。図2に遮蔽板で反射した粒子が鏡面仕上げした板材表面に付着した様子を示す。

(2) カプセル内の粒子は、大きい粒子から底面に沈着するので、細かい粒子のみを確保するためにそのまま60秒間放置する。これで、重力の影響を受けやすい粒径10 μ m以上の粒子が沈着し、一方10 μ m以下の粒子が徐々に沈降する。

(3) 次に、図1b)のように沈降しかけている微小粒子を内包するカプセルに被削材を入れ、粒子が前加工面に沈着するのを待つ。この時間を沈着時間 T_a とし、この時間により前加工面に付着する粒子の量を調節することができる。ここではじめて塗布されたことになる。なおこの時、被削材前半部をアルミフイルでカバーして乾式部とし、後半部を覆わずにおき塗布部とする。

2.3 切削実験法

塗布効果ならびに浸漬法実験の実験方法は既報³⁾と同じである。切削抵抗は、同じ切込みにもかかわらず前加工面の加工変質層の状態によって大幅に変化し、それに対応して塗布効果も変化する¹⁾。したがって、以下の方法により、前加工面の加工変質層を制御した。微小な切込みで十数回以上の前加工で一旦加工変質層を薄くした後、最終前加工切込み t_L 、今回は10, 50 μ mで最終前加工を実施する。こうすることにより、被切削領域(前加工面)の加工硬化度を制御する。その後、

Fig.3 AFM and Ellipsometer analysis

被削材に付着している油剤をアセトンで十分除去し、ドライヤによって一旦乾燥させる。これ以後、塗布効果実験では、被削材の塗布部に油剤を汚れ膜程度塗布し、実験に移る。一方、オイルミスト供給実験では、切削実験に移る前に2.2で記したように微量の油剤の粒子を沈着させた後、切削する。

2.4 油剤粒子の付着状況測定

図3に行ったAFMとエリプソメータの測定の概略を示す。前加工面の粒子の付着状況は図3a)で示すAFMで測定した。AFMでは“接触領域”で感じる力の分布“空間分布”を画像化していることになる⁵⁾。他方、油膜の厚さの測定には、物理吸着膜や薄膜の厚さの測定等に用いられているエリプソメータで実施した。図3b)に示すように、He-Neレーザを直線偏光とし、加工面に斜めに入射する。試料からの反射光はそのまま回転検光子に入り、その後光検出器に入力され、入射光と反射光の反射率や位相差を測定し厚さを求める⁶⁾。これによる測定では、0.1nm~1 μ mの透明薄膜の厚さが可能とされている。ミスト給油実験では油膜ではなく、油剤粒子が分散して付着しているため、レーザの照射範囲を約 ϕ 1mmとし、数多くの点で測定し、その平均値を油膜厚さとした。

3. 実験結果ならびに考察

3.1 切削抵抗減少率に及ぼす沈着時間の影響

図4に、最終前加工切込み $t_L=10\mu$ m、切込み $t_l=10\mu$ m、切削速度 $V=5.3$ m/min(以後それぞれを t_L , t_l , V と略す)でオイルミスト給油切削実験をした場合の油剤粒子の沈着時間と切削主成分の減少率との関係を示す。なお、塗布効果ならびに潤滑効果の定量的表現には切削力の減少率で表す。す

Fig. 4 Relationship between accumulation time and reduction percentage in tangential cutting force

Fig. 5 Accumulation time effects on machined surface properties

なわち、乾式部と塗布部の切削力の差を乾式部の切削力で除したものとなる。点線は、通常塗布効果実験で得られた主分力の減少率 $R\tau = 86.0\%$ (以後 $R\tau$ と略す) を示す。図より油剤の沈着時間 T_a (以後 T_a と略す) の増加とともに $R\tau$ が急激に増加し、約 60 sec 以上で増加割合を減少させ、 $T_a = 120 \text{ sec}$ で通常塗布とほぼ同じ値になり、 $T_a = 600 \text{ sec}$ で飽和している。また図中には後述する AFM による油剤粒子の付着状態の観察結果とエリプソメータによる油膜厚さ測定結果を

Fig. 6 Accumulation time effects

Fig. 7 Accumulation time effects

考慮した油剤の付着状況を表示している。

図 5 は、 $T_a = 15 \text{ sec}$ 、 60 sec 、通常塗布の三つの乾式部 (各々の写真の上部) と塗布部 (写真の下部) の加工面の様子を示す。 $T_a = 15 \text{ sec}$ では表面粗さへの塗布効果の出現が顕著でなく、表面平均粗さ (切削幅方向) は $Ra = 1.12 \mu\text{m}$ であるが、 $T_a = 60 \text{ sec}$ ならびに通常塗布の場合、いずれも $Ra = 0.92 \mu\text{m}$ となって塗布効果が大きく現れており、図 4 の $R\tau$ の傾向とよく対応している。

図 6 は、通常塗布と $T_a = 60 \text{ sec}$ での以下の条件での比較である。すなわち、 $t_L = 10 \mu\text{m}$ 、 $t_1 = 5 \sim 40 \mu\text{m}$ 、 $V = 5.3 \text{ m/min}$ での $R\tau$ と t_1 の関係を示す。いずれの場合も t_1 の増加とともに $R\tau$

Fig.8 Accumulation time effects

Fig.9 Cutting speed effects

が減少するが、 $Ta = 60 \text{ sec}$ の場合、通常塗布の場合以上の割合で t_l の増加とともに R_T が減少している。

図7は図6と異なる切削速度 $V = 25.7 \text{ m/min}$ の場合で、切込みも $t_l = 20 \sim 40 \mu\text{m}$ と図6で通常塗布と $Ta = 60 \text{ sec}$ で R_T に大きな差が見られる条件である。 $Ta = 600 \text{ sec}$ のデータも追加している。図6の場合と異なり、 $Ta = 60 \text{ sec}$ では通常塗布と比較的差があったが、 $Ta = 600 \text{ sec}$ となると通常塗布とほぼ同じ R_T が得られるようになっていく。

図8は、図7の $t_L = 50 \mu\text{m}$ の場合に対応するもので、 $t_l = 30 \sim 70 \mu\text{m}$ である。 $Ta = 600 \text{ sec}$ では図7と同様に R_T が通常塗布より若干低い値を示し、一方 $Ta = 60 \text{ sec}$ では半減に近い値を示す。

以上のように切込みが大きくなるとともに $Ta = 60 \text{ sec}$ での R_T が小さくなっていったのは、切込みの増加とともに切削過程中的変形領域での前加工面側(ラメラ部)の変形が大きくなり、ラメラ間の摩擦低減を行うのに十分な油剤粒子が付着していないことが考えられる。

また、 $t_L = 50 \mu\text{m}$ が $t_L = 10 \mu\text{m}$ よりも低い R_T を示したのは、既報²⁾で述べたごとく塗布効果の発生機構であるラメラ間の摩擦の大小に起因している。すなわち、前者の場合、被切削領域の加工硬化度が高く、刃先での滞留層の規模が比較的小さく、それに対応してラメラ間の摩擦が小さくなり、塗布効果が大きく発生する余地がなくなるためである。

図9は、 $t_L = 10 \mu\text{m}$ 、 $t_l = 10 \mu\text{m}$ での R_T に及ぼす V の影響を示す。いずれの場合とも V が高くなるとともに R_T が減少している。これは V の上昇とともに生ずる変形領域の狭小化が、刃先滞留層の規模縮小、ラメラ間の摩擦低減を生み出し、塗布効果を大きく発生する余地がなくなったことに起因する²⁾。 V が高くなると通常塗布とオイルミスト供給の両者間で R_T の差が大きくなる。これは、変形速度の上昇により極薄く前加工面に塗布されている塗布剤では、十分に潤滑効果を発生できないことが原因と思われる。またこの t_L ならびに t_l の条件では沈着時間の影響が小さい。

3.2 油剤付着状況ならびに油膜厚さ

図10は、前加工面の油剤の付着状況を観察したものである。同図b) $Ta = 30 \text{ sec}$ では、乾式に比しほとんど差違が認められない。観察に利用したハイブリッド型マイクロ스코プの分解能が $0.8 \mu\text{m}$ であるので、それ以下のサイズの油剤粒子が存在しているものと考えられる。一方、他よりも低い倍率の写真(同図c))にもかかわらず通常塗布では小さな粒子の存在が認められる。

図11は、前加工面の油剤の付着状況を AFM で観察したものである。各図の右上方もしくは下方には測定位置の同定のための目印として付けたピッカース圧子による圧痕がある。同図a)乾式と同図b) $Ta = 15 \text{ sec}$ の測定結果では、縦軸のスケールは同一である。乾式の場合、小さなゴミが所々付着し、一方、 $Ta = 15 \text{ sec}$ の場合、乾式よりさらに多くの油剤粒子らしきものが付着しているのがわかる。

さらに同図c) $Ta = 60 \text{ sec}$ ならびに同図d)通常塗布の場合、縦軸が同図a)ならびに同図b)の nm に対し μm オーダーになっている。前者の場合、 $Ta = 15 \text{ sec}$ の場合より油剤粒子一個一個のサイズが大きく、ある程度塊になって付

a) Dry

b) Lubricant applying effect by spray gun (30sec)

c) Normal lubricant applying effect

Fig.10 Oil particles on precut surface

Fig.11 AFM images of oil particles on precut surfaces

着したと判断される形状となっている。エリプソメータによる油膜厚さの測定では、厚さ $d=1.87$ nm となった。

後者の通常塗布の場合、表面の凹凸が消え、一面にわたって油膜が形成されている。また所々凝集して塊になっている部分が存在しており、図10c)の観察結果と対応している。なお、この通常塗布の試料は、実際の前加工面そのものではなく、アルミ板(圧延材)を鏡面に研磨した面であり、それに通常塗布のような方法で油剤を塗布したもので、表面粗さは実際のものより小さな値となっている。油膜厚さの測定結果では、厚さ $d=2.2$ nm となった。なお、凝集部では $d=200$ nm である。

4. 結 言

塗布効果発生時の、前加工面に塗布する切削油剤の最小油膜厚さを求めるため、工業用スプレーガンを用いたオイルミスト実験装置を作成し、可能な限り小さい油滴を前加工面に沈着させ、油剤粒子の付着状態と塗布効果との関係を求めた。さらにAFMならびにエリプソメータで油膜の分布状態や厚さを計測した。その結果以下のことが明かとなった。

- (1) 今回開発したスプレーガンによる間接的なオイルミスト供給装置では $\phi 50 \mu\text{m}$ 以下の油剤粒子が供給でき、沈着時間を制御することにより、最小ではナノレベルの油剤粒子が得られる。
- (2) 沈着時間と切削抵抗減少率はほぼ比例し、600secになれば通常塗布とほぼ同じ減少率が得られる。
- (3) 塗布効果がほぼ最大に得られる最終前加工切込み $t_L =$

$10 \mu\text{m}$ 、切込み $t_1 = 10 \mu\text{m}$ の条件では、最小塗布量は油膜厚さで約2nmとなる。

- (4) 最小塗布量は、最終前加工切込みならびに切込みによって変化し、これは前加工面の粗さや油剤粒子の付着状況、さらには切削時の前加工面の変形状態に起因すると思われる。
- (5) 油剤粒子の分布状態や油膜の厚さは、それぞれAFMとエリプソメータで測定可能である。

謝 辞

実験実施時に岡山理科大学工学部機械工学科金枝研究室に在籍し、協力された当時の学部学生宇都宮正人氏に、ここで深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 金枝敏明, 河坂博文: 軟質金属切削における塗布効果(第1報) - 発生条件と塗布剤の境界潤滑特性の影響, 精密工学会誌, **61**, 5 (1995) 702.
- 2) 金枝敏明, 中村達哉: 軟質金属切削における塗布効果(第2報) - 切込みならびに切削速度の影響と塗布効果機構, 精密工学会誌, **66**, 1 (2000) 74.
- 3) 金枝敏明, 大江保充: 軟質金属切削における塗布効果(第3報) - 浸漬法による潤滑機構中の塗布効果の役割説明, 精密工学会誌, **68**, 4 (2002) 566.
- 4) 中島弘行: ユーザーのための空気圧技術読本, オーム社(1974) 140.
- 5) 八木克道編: 表面の構造解析, 丸善(1998) 195.
- 6) 5) p243.