

NACHI
**TECHNICAL
REPORT**
Machining

Vol. **19A1**
Sep/2009

マシニング事業

■ 寄稿・論文・報文・解説

「塗布効果を使えば切削油剤の
使用量は最小量 (MQL) に」

To Minimize Consumption of Cutting Fluids (MQL)
Using Lubricant Applying Effect in Ductile Metal Cutting

〈キーワード〉 塗布効果・MQL・セミドライ切削・エコマシニング・
レビンダー効果・極微量潤滑

岡山理科大学 工学部

教授 金枝 敏明

Toshiaki KANEEDA

Professor, School of Engineering, Okayama University of Science

要 旨

MQLの潤滑メカニズムとなる塗布効果について、よく混同されがちなレビンダー効果と併せて解説した。切削で潤滑効果が見出される条件なら、大部分が塗布効果であることを示した。冷却効果を期待せず潤滑効果を目的とするならば、軟質金属切削では塗布効果に頼るだけでほぼ充分で、油剤の供給量(塗布量)は、驚く程少なくて済む。

塗布効果は、上記のように軟質金属、軟鋼やステンレス鋼でも見出されているが、Ti合金やCo-Cr-Mo合金などの被削材では認識できない。

Abstract

Lubricant applying effect (LAE), which is lubrication mechanism in MQL cutting, is demonstrated in this report. In addition, Rebinder effect, which was often misinterpreted as LAE, was strictly compared with LAE. The experimental results indicated that LAE has a major role in lubrication in ductile metal cutting. If LAE could be utilized in such metal cutting as Al, Cu, mild steel and SUS cutting, cutting fluid consumption would be reduced dramatically, which leads to MQL.

1. 切削油剤のレビンダー効果と塗布効果のとり組み

金属切削における切削油剤の潤滑機構に関しては、切削油剤の成分の影響や役割などすでに多くの研究があり、ほぼ研究の余地はないように一部では考えられている。しかし、本質的な点では未だ不明な点が多いのも事実である。例えば、切削油剤をまめに供給していても、実際に切削工具すくい面や逃げ面に潤滑油剤がいき渡っているかどうか?また切削油剤の役割のうち、潤滑作用と冷却作用の割合はどうであろうか?など、未だ解決しなければならない問題は結構ある。そのような未解決の問題の一つに、切削油剤のレビンダー効果と塗布効果がある。

「レビンダー効果とは、有機極性物質を含む溶液中で材料試験を行なうと、材料表面が雰囲気の影響を受け、降伏応力、加工硬化速度、クリープ速度などの機械的性質が低下する現象である¹⁾。」要するに油剤を何らかの金属表面に塗る(塗布する)と、その金属の強度が低下する効果である。まるで手品師が鼻の油を硬い鋼の棒の表面にちょっと塗ると、簡単に曲げてしまうような話である。したがって多くの研究者や技術者は、この効果を切削やその他の機械加工作業で利用できれば、切削抵抗の減少、加工面性状の向上など被削性の改善が得られると考えた。ところが、このような被削性が向上する現象は、一部の研究者によって認められたものの、その反面存在そのものを否定する研究者も多く、謎に包まれた現象となっていた。

そこで、著者らは雰囲気の種類である塗布剤によって被削性が向上する現象、すなわち塗布効果に着目し、研究した結果、これが本稿の目的でもあるMQLの原理であることが分かった。



2. レビンダー効果の再検討

塗布効果とMQLの関係のみに興味のある方はこの項目を飛ばし、3に目を移して頂ければ、結構です。ロシアの研究者レビンダーが、彼自身の名前を付けた効果を最初に論文に発表したのは、著者の調査では、1947年である。彼は、材料試験でこの効果を見出した。その後、レビンダーは機械加工でもこのような現象が生じているのではないかと予想して、ドリルによる穴あけ実験を実施し²⁾、その効果の存在を確かめた。これが、機械加工の分野の研究者に広まり、著名な研究者もこの効果について研究するに至った³⁾。

一方、国内でも榊田らがこの現象に着目し、本格的な究明に乗り出し、切削過程での被削性改善現象は、レビンダー効果とは全く異なるもの、すなわち、材料自身の強度低下ではないとし、この被削性改善現象を塗布効果⁴⁾と名付けた。彼らは詳細で多岐にわたる実験を実施したが、塗布効果の機構について明らかにしたわけではない。

その後も塗布効果とレビンダー効果とは終始混同され続けており、現に切削や研削の分野でレビンダー効果が存在すると理解している研究者が多いのも事実である。この原因は、まず塗布効果の発生条件ならびにその機構が十分に明らかにされていないことにある。

レビンダーがその効果を最初に見出したのは、単結晶金属に界面極性物質を吸着させ、降伏応力、加工硬化速度、クリープ速度などが低下したことにある。Sn、Pb、Zn、Alなどの単結晶の線に引張速度が一定になるように引張応力を加え、応力一ひずみ関係を求めた。一種のクリープ試験と考えてよい。

そこで、著者は後述する塗布効果が大きく現われた被削材と同一の純度を有する $\phi 15\text{mm}$ の純Alの丸棒のクリープ試験を行ない、ごく一般的な材料でレビンダー効果が存在するのか調査した。その結果、レビンダー効果が認められないものとなった⁵⁾。クリープ試験などの材料試験で提唱されているレビンダー効果を高ひずみ速度の大変形過程である切削での被削性向上現象に、直接適用することには問題がある。

3. 塗布効果

1) 塗布効果の定義

ここで、あらためて塗布効果について説明する。「塗布効果とは、前加工面に何らかの塗布剤を汚れ膜程度に塗布し切削すると、切削抵抗の低下、加工面性状の向上などの被削性が改善される現象である。」すなわち、図1に示す被削材である長さ300mmの板材を二次元切削する。被削材の前半の270mmを前加工面に塗布しない乾式部とし、後半の30mmを塗布部とする。乾式部が塗布部に比べ極端に長いのは、軟質金属切削においては切削抵抗、ひいては切削状態が切削開始から定常状態に至るまで、その他の金属よりも切削距離を要するためである。塗布剤を前加工面に汚れ膜程度に塗布する。そうすれば塗布部の表面は、目視で光沢がわずかに鈍くなる程度となる。この厚さは、エリプソメー

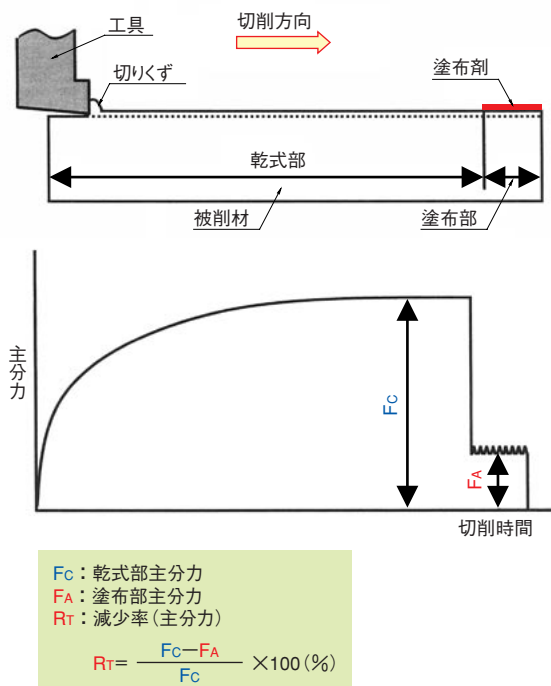


図1 塗布効果実験と切削抵抗減少率

ターやAFM(原子間力顕微鏡)で、ナノレベルで正確に測定したところ、2~200nm⁶⁾となった。図中に被削材を切削し、塗布効果が得られた際の切削抵抗の変化曲線を示す。すなわち、塗布部に至ると、このように切削抵抗の急激な低減が得られる。同時に加工面性状も乾式部よりスムーズな面となる。

2) 潤滑効果と塗布効果

潤滑効果と塗布効果の関係を図2に示す。潤滑効果は工具すくい面もしくは逃げ面に切削油剤が到達し、界面に浸入すれば潤滑作用を呈する。油剤が工具面に達するためには、工具面に負荷される1GPa(102kgf/mm²)といった垂直応力に打ち勝ち、切りくず流出方向や加工面の移動方向に逆行せねばならない。したがって通常の切削状況では、油剤の工具面の浸入は考えにくく、事実著者らの実験結果では、すくい面に到達しないことを立証している⁷⁾。もし油剤が浸入するとすれば、被削材もしくは工具の剛性が低い場合が、可能性があるケースと考えられる。これに対し、塗布効果では前加工面に塗布しておけば被削性の改善が得られる。したがって、図からも分かるように潤滑効果には塗布効果が含まれることにもなる。

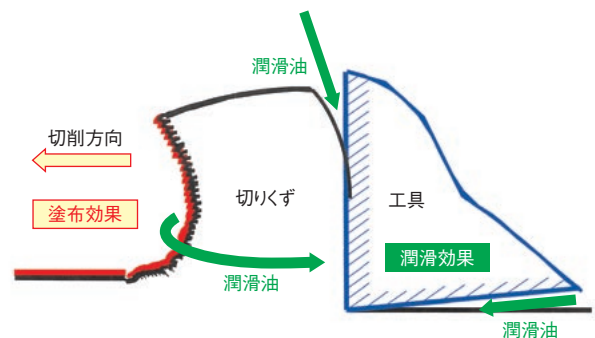


図2 潤滑効果と塗布効果の関係

3) 塗布効果の発生条件と前加工の方法

塗布効果が榊田らによって命名されたが、一部の研究者は追実験によって塗布効果が現れなく、その存在すら疑問視する傾向が一部にあるのも事実である。例えその効果を認めたとしても、その機構が前加工面に塗布された塗布剤が、単に工具面に達した潤滑効果だと片付ける研究者も存在する。著者はなぜこのような状況になったのかを考えた結果、その発生条件が完全に把握されていないこと、さらにその決定的な機構が解明されていないことに起因していることに気がついた。塗布効果は、すでに榊田らやその他の研究者⁸⁾によって被削材の機械的性質(延性、破断ひずみ、加工硬化率など)、工具形状(すくい角)、切削条件(切削速度、切込み)⁴⁾などの発生条件については、明らかにされていたが、唯一その決定的な条件が明らかにされていなかった。それは前加工面の加工変質層の厚さ、厳密には後述する図3の切削予定領域での硬度分布である。すなわち、前加工面の加工変質層の厚さを減少させればさせるほど、塗布効果が大きくなる。

しかし、実際に塗布効果を得るためには以下のような準備、すなわち、前加工を実施する必要がある。被削材表面には、切り出し時に加工変質層が生成される。そこでその影響を除去もしくは制御するため、極圧油による湿式切削を切込み t_1 (以下 t_1 と略す) $=30\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ まで暫時 $10\mu\text{m}$ ずつ減少させながら、各切込みで十数回切削する。その後 $t_1=10\mu\text{m}$ で軟質金属切削特有の交番現象⁹⁾の存在を十分確認した後、切削抵抗が小となったときに前加工面の最終前加工を、例えば $10\mu\text{m}$ で実施する。この最終前加工時の切込み t_L (以下 t_L と略す)を変化させることにより、切削予定領域の硬度分布は図3のごとく制御できる。

4) 塗布効果を左右する前加工面の硬度分布

図3は、最終前加工を実施した前加工面の深さ方向のマイクロビッカース硬度分布¹⁰⁾である。すなわち、これから切削しようとする切削予定領域とその下方の硬度分布である。上述したようにこの変質層の状態は、最終前加工切込み t_L によって制御される。

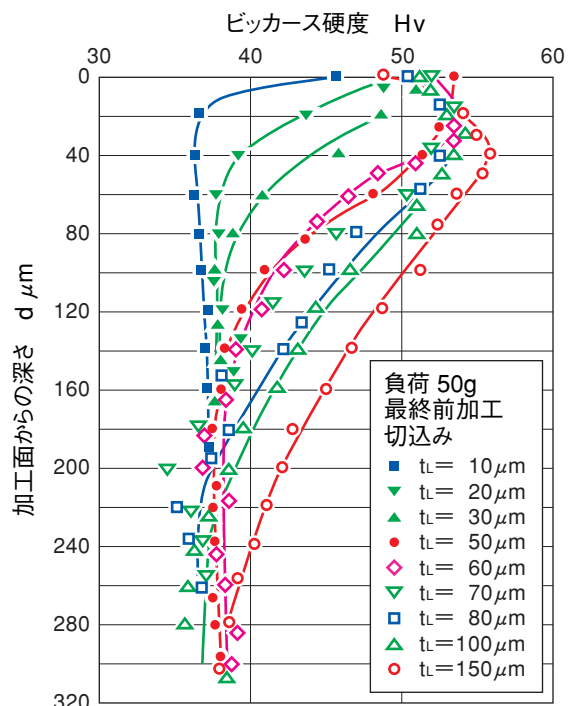


図3 純Al前加工面のマイクロビッカース硬度分布¹⁰⁾

5) 切削実験方法

図4に実験に使用した切削実験装置を示す。これは、低速から通常速度まで幅広く切削速度が設定可能で、工具や被削材が剛性高く保持でき、二次元切削が容易な、平削盤(刃物台の最大ストローク650mm)の機構を採用した特注のNACHI製二次元切削実験装置である。被削材は、軟質金属材料である純アルミニウムA1050(1/2硬化材)、純銅等の厚さ3mmの板材や難削材のステンレス鋼SUS304、チタン合金Ti-6Al-4V、Co-Cr-Mo合金の2mm厚のものである。工具には主として超硬合金K10を用いた。工具幅は5mmである。すくい角は、予備実験や他の研究者の結果⁴⁾などから0°とする。

工具の刃先丸みは、塗布効果に大きく影響を及ぼす¹¹⁾ので、ダイヤモンド砥石#800で仕上研削をする。こうすれば刃先丸み $\rho=2\mu\text{m}$ の工具が得られる¹²⁾。切削速度は低速から通常速度までの $V=5.3\sim 50.0\text{m}/\text{min}$ である。本実験での切込みは $t_1=5\sim 150\mu\text{m}$ である。最終前加工切込みは $t_L=10\sim 150\mu\text{m}$ である。

塗布剤には、この種の実験で効果が顕著に現れるとされている油性向上剤のオレイン酸をはじめ、ステアリン酸、一般的な油の主成分である鉱物油、固体潤滑剤である黒鉛、二硫化モリブデン、粘度を多様に変化させることができるシリコン油などである。以後、後の二者をそれぞれ MoS_2 、Si油と略す。実験時には前加工時の切削油剤などをアセトンで十分拭き取り、ドライヤによって乾燥させた後、塗布部の前加工面の上に塗布剤を汚れ膜程度に塗布する。その後切削に移る。

表1に切削条件をまとめて示す。

表1 切削条件

被削材	純アルミ、純銅、黄銅、軟鋼、ステンレス鋼 チタン合金、Co-Cr-Mo合金
工具材料	超硬合金 K10、M20
すくい角	0°
逃げ角	7°
切削方式	二次元切削
切削速度 m/min	5.3、8.8、25.7、50.0
最終前加工切込み $t_L\mu\text{m}$	10~150
切込み $t_1\mu\text{m}$	5~150
塗布剤(切削油剤)	オレイン酸、鉱物油、シリコンオイル、 MoS_2 、グラファイト、ステアリン酸

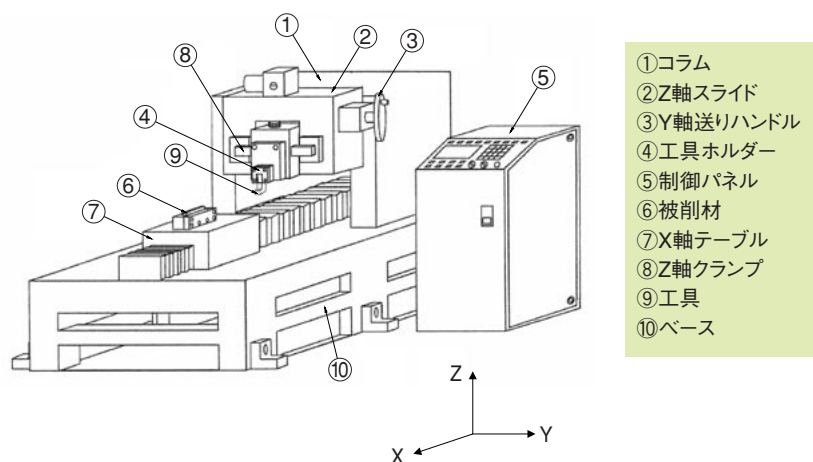


図4 NACHI製二次元精密切削実験装置

6) 塗布効果の実験結果 (最終前加工切込み t_L の影響)

図5に塗布効果が得られた例¹⁰⁾を示す。以下の切削条件で実験した。切削速度 $V=8.8\text{m}/\text{min}$ 、工具すくい角 $\alpha=0^\circ$ で、 t_L は $t_L=10\sim 150\mu\text{m}$ と変化させ、本実験での切込みは一定の $t_1=30\mu\text{m}$ である。以後切削速度、すくい角をそれぞれ V, α と略す。塗布剤はオレイン酸である。塗布効果の大小を定量的に表わすためには、図1内に示したように切削抵抗減少率(以下 R と略す)を用いた。 R は乾式部の切削抵抗 F_C と塗布部の切削抵抗 F_A との差、すなわち切削抵抗の減少量を乾式部切削抵抗 F_C で除したものである。以下それぞれを F_C, F_A と略す。添字の T, N はそれぞれ主分力、背分力成分を示す。 V ならびに α の選定は、上述したように今回の実験ならびに過去の研究者⁴⁾の結果を参考にして決定した。すなわち α は小さいほどより大きな塗布効果が得られたが、負の値では被削材の機械的性質ならびに前加工面の加工変質層厚さの関係から、むしろ形切りくず生成になりやすく、それを回避させながら、なおかつ大きな切削抵抗減少率が得られる値に設定している。

図中○で表わされる乾式部の主分力、背分力は t_L の増大とともに減少し、 $t_L=150\mu\text{m}$ 内外で値が低下し終わる。これに対し●で示す塗布部の切削抵抗は、 t_L の増加に対して微小に減少するに留まる。したがって R (△印)は、図からもわかるように乾式部の切削抵抗と同じ傾向で、 t_L の増加とともに減少していく。例えば、 $t_L=10\mu\text{m}$ であれば主分力で $R_T=73.0\%$ 、背分力で $R_N=66.5\%$ であり、これが $t_L=150\mu\text{m}$ であれば $R_T=R_N=0\%$ となり、 t_L が大きいと塗布効果が全く現われないことになる。ここで注目されるのは、乾式部の切削抵抗が、本実験切込みが $30\mu\text{m}$ と一定にも拘らず t_L の値に大きく左右され、例えば、 $t_L=150\mu\text{m}$ では、 $t_L=10\mu\text{m}$ の $1/4$ の切削抵抗になる。それが減少率を直接大きく支配することである。すなわち塗布効果が大きく現われる被削材である軟質金属では、加工変質層の状況が切削条件、とくに最終前加工時の切込みによって同図のように大きく変化する。またこれらの事実より、通常遭遇する多くの切削条件では、塗布効果は少々見出しにくいことにもなる。

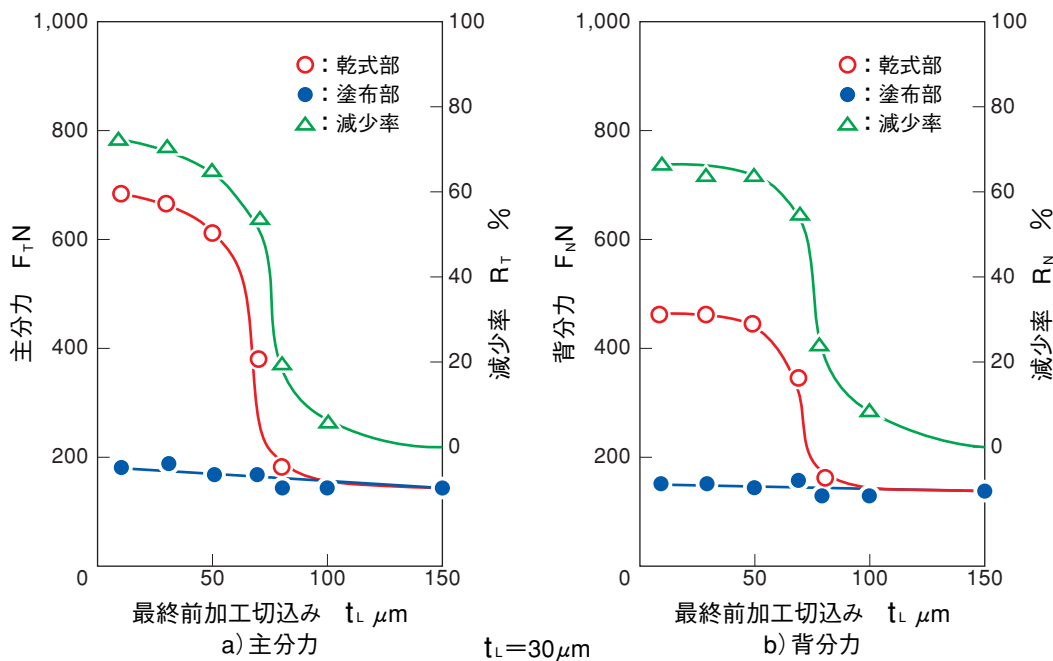


図5 塗布効果の典型例¹⁰⁾

(塗布剤の種類と粘度影響)

図6に各種塗布剤の切削抵抗の減少率¹⁰⁾を示す。最終前加工切込み $t_L=10\mu\text{m}$ 一定以外、実験条件は図5と同様である。図より各種塗布剤の減少率は主分力、背分力とも同様な順序になって現われており、鉱物油、ステアリン酸、オレイン酸、グラファイト、 MoS_2 の順に減少率が増加している。この大小は純粹の油剤、油性向上剤、固体潤滑剤の順であり、おおむね境界潤滑特性に富む材料の順番ともなっている。また、これは前述の榊田らの結果⁴⁾とほぼ同様の結果となっている。

そこで境界潤滑特性の差を顕著に現われるようにするため、同一成分でありながら、粘度を幅広く変化させることのできるSi油を選び、粘度を0.01、0.1、5,000ポアズと変化させ実験した結果が図7¹⁰⁾である。図より粘度の影響が明瞭に現われている。したがって粘度が高く、微小な隙間に侵入しにくいSi油のほうが、減少率の高い結果が得られ、塗布剤の浸透特性はさほど重要でないことになった。

塗布剤の境界潤滑特性が、重要な影響要因であることが明らかとなった。

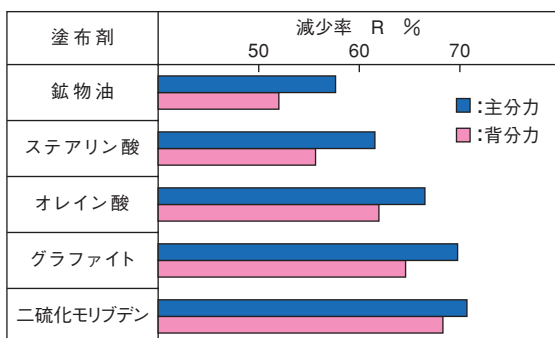


図6 各種塗布剤の切削抵抗減少率におよぼす影響¹⁰⁾

(塗布効果の機構)

図8に、塗布効果のメカニズムを図示する¹³⁾。加工変質層が薄い、例えば $t_L=10\sim 30\mu\text{m}$ の被削材を切削する場合、被切削領域の加工硬化がすすんでいないゆえ、刃先前方で充分加工硬化がすすみ、破断に至るまで刃先滞留層が発生し、それとともに変形領域が過大になる。同時に掘起こし作用が生じ、切削の進行とともに切りくず厚さを増し、同時にラメラ構造が重ね合うようになり、同図(1)のような羽根ぼうき状切りくずになる。乾式部の羽根ぼうき状切りくずでは、ラメラ間での摩擦作用が過酷なものになっており、切削抵抗は過大になる。

そこで前加工面に塗布剤が存在すれば、ラメラ間の摩擦低減をもたらす、これが掘起こし作用の縮小、せん断面の垂直荷重の低下を招き、せん断変形を容易化させる。そして、切りくず流出を阻んでいた刃先滞留層もその規模を縮小し、スムーズな流出となる。すなわち同図(2)のようになり、塗布効果が現われる。

しかし切削予定領域の加工硬化が充分にすすんでいる、例えば $t_L=150\mu\text{m}$ の場合、加工硬化が充分すすんでおり、変形領域も大きくなり、またラメラ間での摩擦作用も過酷でなく、刃先前方で刃先滞留層や掘起こし作用がほとんど発生せず、切りくず流出もスムーズであるため、切りくず形式も羽根ぼうき状切りくず生成に至らず、通常の流れ形切りくず生成になる¹³⁾。

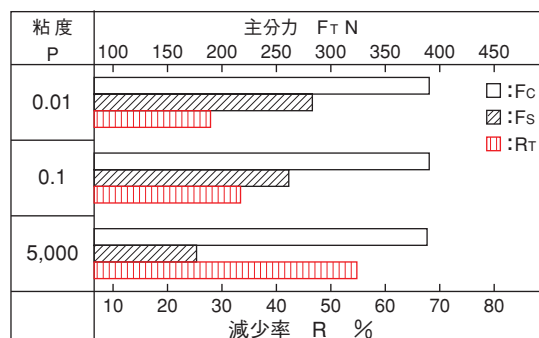


図7 塗布剤の粘度が切削抵抗減少率におよぼす影響¹⁰⁾

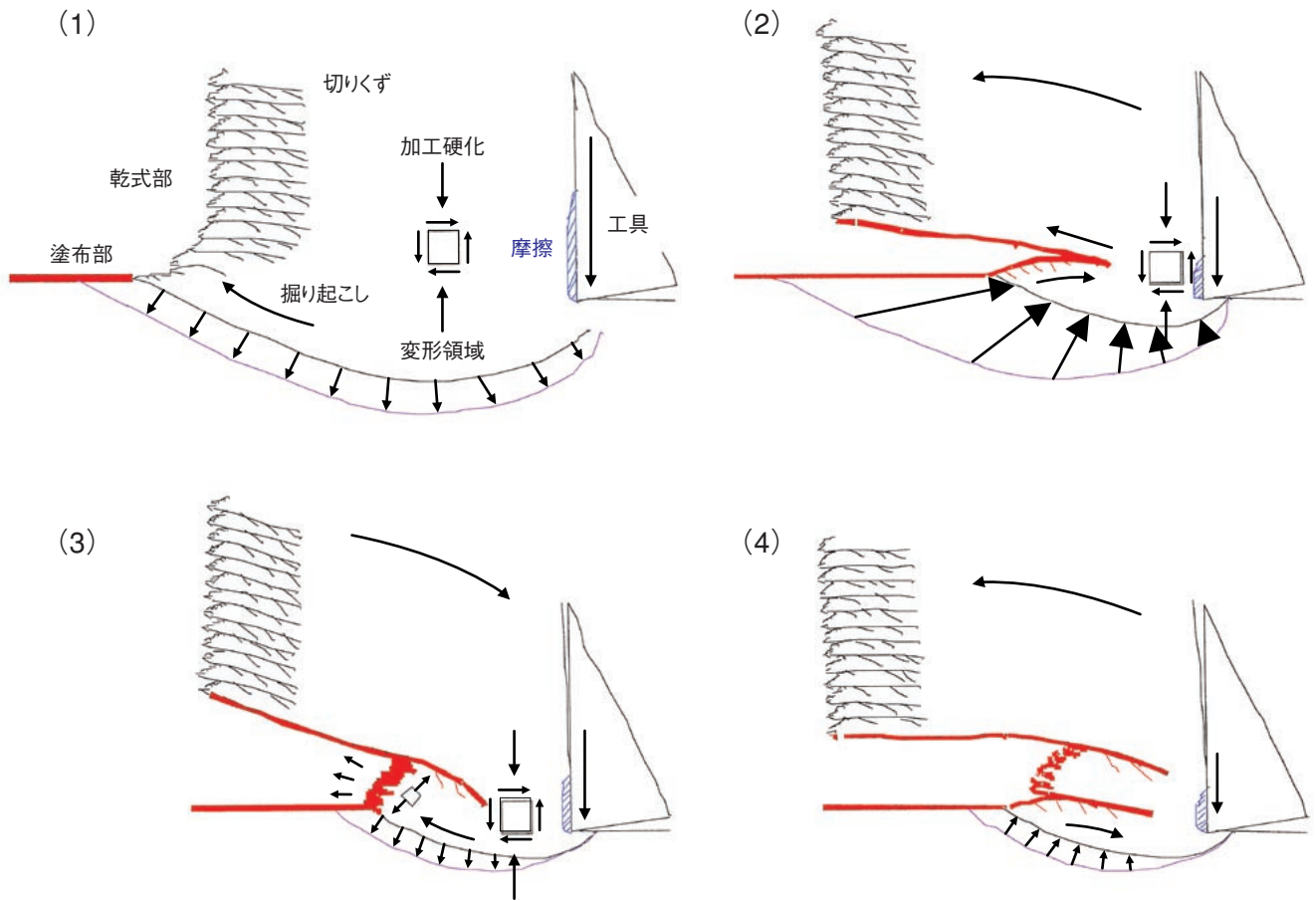


図8 塗布効果のメカニズム¹³⁾

(浸漬法により求めた塗布効果の潤滑作用における割合)

塗布効果は、前加工面の加工変質層の厚さが薄ければ、前加工面に厚さ2~200nmの塗布剤を塗布すると現われる。したがってMQLは、塗布効果を利用すれば可能となる。一般に行なわれている切削の現場では、通常切削油剤を潤沢に供給するので、そのような場合も塗布効果が含まれている可能性が大である。そこで、潤滑作用に占める塗布効果の割合は、どれくらいであろうか?ということ、浸漬法を用いて調査した¹⁴⁾。

浸漬法とは、図9に示すように工具と工作物で形成される切削部分が完全に切削油剤に浸った状態で切削するものである。切削油剤の供給方法に関しては、論議がいろいろされ、未だ決定的な方法はないように思われる。また、切削油剤が実際に工具すくい面なり逃げ面に達しているかについても議論の余地があり、剛性の小さい工作機械ほど潤滑効果が大きいとさえ言われている。浸漬法であれば、潤滑油の供給方向や切りくずの流出などに影響されない普遍性のある切削油剤供給下の切削実験が可能である。

図10は、潤滑効果中の塗布効果の割合¹⁴⁾を示す。主分力の場合である。同図a)の $V=5.3\text{m}/\text{min}$ では $t_L=100\mu\text{m}$ の $t_1=30\mu\text{m}$ 以下で、また同図b)の $V=50.0\text{m}/\text{min}$ では $t_L=100\mu\text{m}$ のすべての t_1 ならびに $t_L=50\mu\text{m}$ の $t_1=10, 30\mu\text{m}$ ではいずれも塗布効果はまったくない、もしくは低い占有率であるが、その他は潤滑効果の大部分を占める。なお、切削抵抗は多くの金属が $50\text{m}/\text{min}$ 以下の切削速度で最大値を示し、その後は切削速度の上昇とともに低下していく。それとともに潤滑効果が減少していく¹³⁾。

そこで、図10の占有率を求める際に算出した塗布効果ならびに浸漬法実験での切削抵抗減少量を、図11¹⁴⁾に示す。それぞれの減少量を図内の記号 ΔF_{AT} 、 ΔF_{ST} で示す。図から分かるように両者間でほとんど差がなく、とくに図10で低い占有率もしくは全くない上記の条件では、減少量が絶対的にかなり小さいことが分かる。したがって、大きな潤滑効果が得られる、言い換えれば潤滑効果で切削抵抗の減少がある程度大きく得られる条件ならば、塗布効果が大部分を占めることになる。

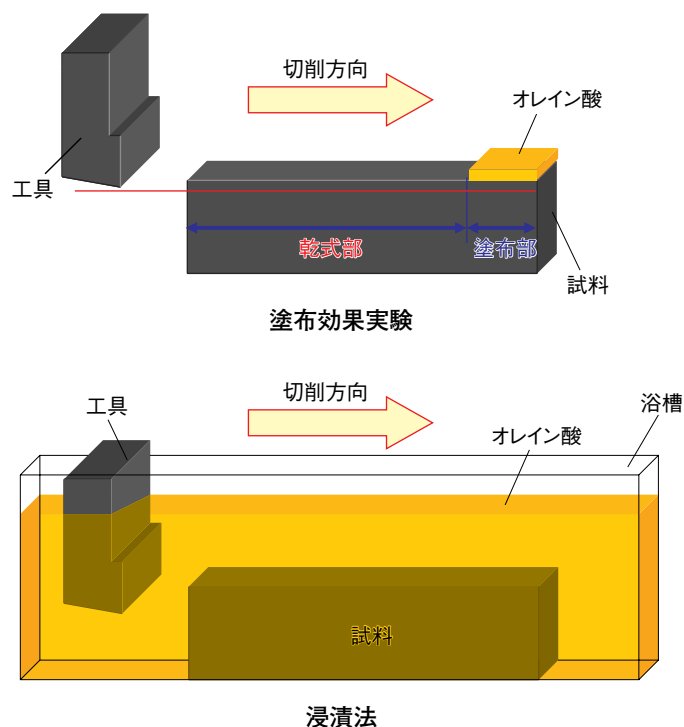


図9 潤滑効果に占める塗布効果の割合を求める浸漬法実験

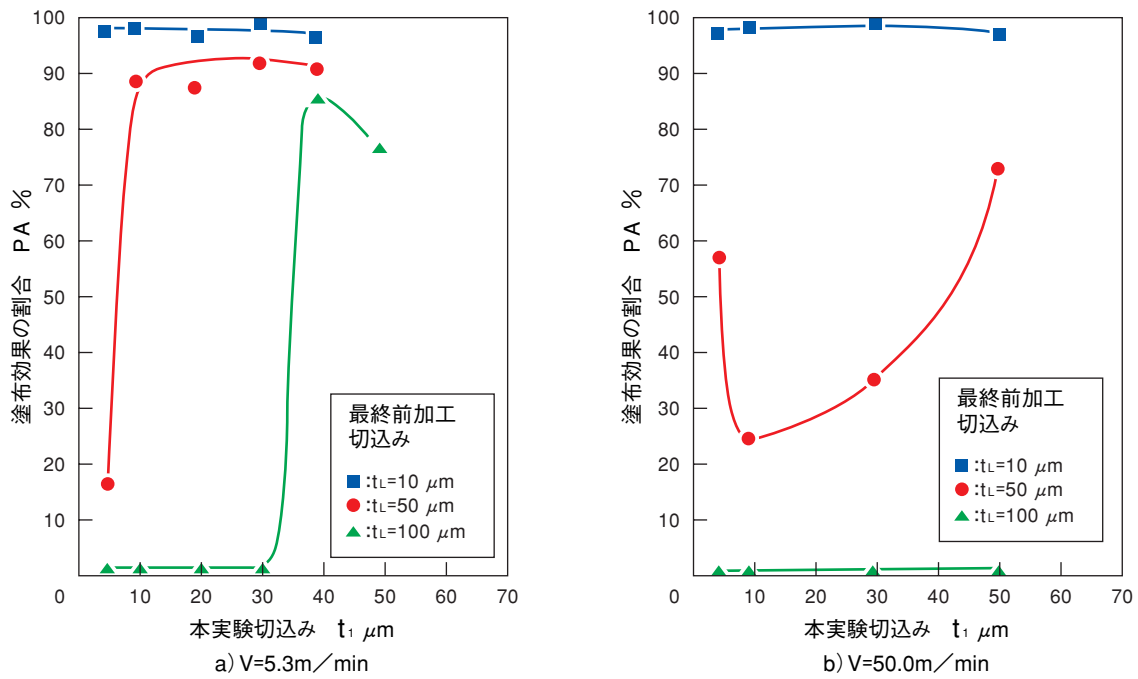


図10 潤滑効果に占める塗布効果の割合¹⁴⁾

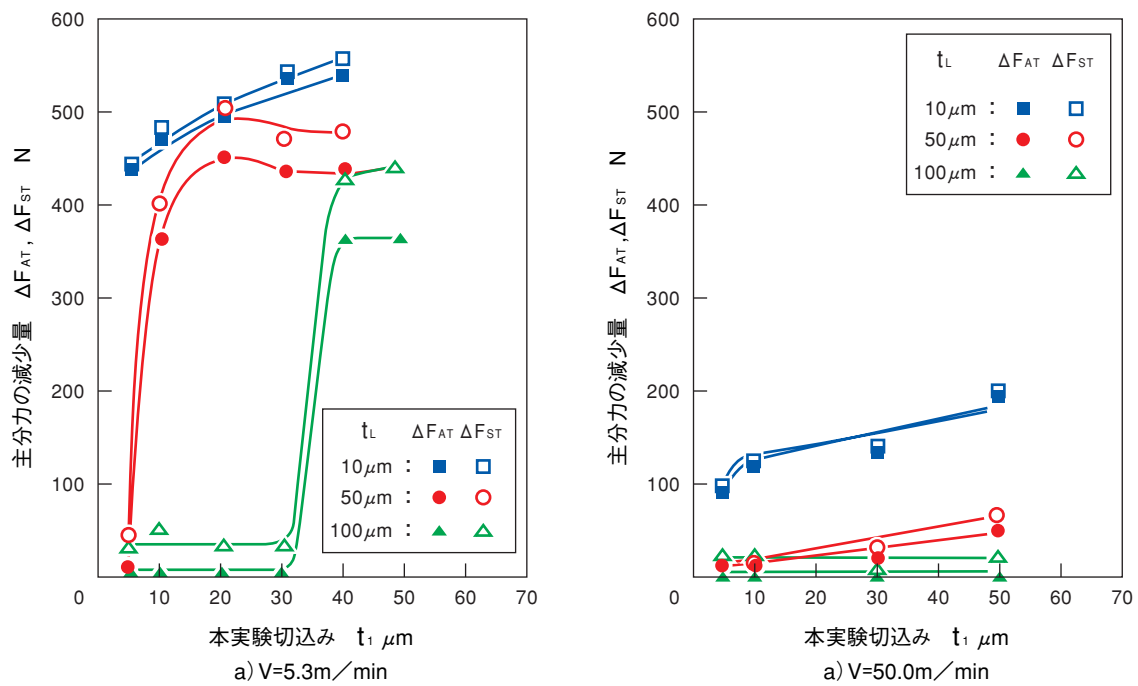


図11 塗布効果ならびに潤滑効果による切削抵抗減少量¹⁴⁾

4. 塗布効果のまとめ

MQLでの潤滑メカニズムとなる塗布効果について、よく混同されがちなレピンダー効果と併せて解説した。塗布効果の発生条件は限られているが、一般の軟質金属の機械加工の現場で行なわれている切削油剤が、単に切削部分に注入しているだけで、工具すくい面や逃げ面に達しなくても潤滑効果があるのは、この塗布効果が寄与していることに間違いない。潤滑効果が見出される条件なら大部分が塗布効果であることを示した。

さらに潤滑効果が、多くの専門家が思っている以上の切削条件の範囲で、効果がないことも分かった。したがって、冷却効果を期待せず潤滑効果を目的とするならば、軟質金属切削では塗布効果に頼るだけでほぼ充分で、油剤の供給量(塗布量)は、上述のごとく驚く程少なくて済む。

塗布効果は、上記のように軟質金属、軟鋼やステンレス鋼¹⁵⁾でも見出されているが、Ti合金やCo-Cr-Mo合金などの難削材では認識できない。¹⁶⁾これは切りくず形状からも推測できる。ただし、単なる流れ形、せん断形のような判定ではなく、一見流れ形でも、羽根ぼうき状切りくずになっているかどうか、が問題である。

本拙稿が、潤滑効果を目的とし切削油剤を供給する場合、切削油剤の無駄な消費の警鐘となり、切削コストの低減や環境保全などに役に立つようになれば、幸甚である。

参考文献

- 1) P.A.Rebinder : New Physico-Chemical Phenomena in the Deformation and Mechanical Treatment of Solids, Nature, 159, 4052 (1947) 866
- 2) E.D.Shchukin, Z.M.Polukarova, V.S.Yushchenko, L.S. Brykhanova & P.A.Rebinder : Facilitation of Drilling in the Presence of Liquid Metals, Soviet Physics-Doklady, 17, 7 (1973) 699
- 3) E.Usui, A.Gujral & M.C.Shaw : An Experimental Study of the Action of CCl_4 in Cutting and Other Processes Involving Plastic Flow, International Journal of Machine Tool Design and Research, 1 (1961) 187
- 4) 榊田勝実・渡辺善次郎・益子正己：被削材表面環境の切削現象に及ぼす影響(第1報)銅の切削における切削力、切削比、仕上げ面あらさについて日本機械学論文集(第3部)、38、316 (1972) 3246
- 5) 金枝敏明・野口浩二：純アルミニウム材の引張試験ならびにクリープ試験によるレピンダー効果の有無 岡山理科大学紀要、38、A (2002) 165
- 6) 金枝敏明・松下 智・岡田賢和：軟質金属切削における塗布効果(第5報)一オイルミスト実験による最小油膜厚さの決定一精密工学会誌、72、5 (2006) 631
- 7) 金枝敏明・高槻昇平・松下 智・田中雅次：軟質金属切削における塗布効果(第4報)一油剤圧力注入実験による工具すくい面潤滑効果との比較一精密工学会誌、70、3 (2004) 417
- 8) 大島郁也・石渡秋二・鈴木正光：切削油剤のレピンダー効果について茨城大学工学部研究集報、23 (1975) 17
- 9) 財満鎮雄・岡崎忠雄：アルミニウム合金の切削過渡特性について日本機械学会論文集(第3部)、33、248 (1967) 641
- 10) 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)一発生条件ならびに塗布剤の境界潤滑特性の影響一精密工学会誌、61、5 (1995) 702
- 11) 榊田勝実・渡辺善次郎・益子正己：被削材表面環境の切削現象に及ぼす影響(第2報)一せん断角、すくい面摩擦角、切削仕事について一機械学論文集(第3部)、42、353 (1976) 307
- 12) 金枝敏明：切削における分離作用に関する研究 大阪大学学位論文(1981) 10
- 13) 金枝敏明・野口浩二：軟質金属切削における塗布効果(第2報)一切込みならびに切削速度の影響と塗布効果機構一精密工学会誌、66、1 (2000) 74
- 14) 金枝敏明・大江保充・岡田賢和：軟質金属における塗布効果(第3報)一浸漬法による潤滑機構中の塗布効果の役割究明一精密工学会誌、68、4 (2002) 566
- 15) 金枝敏明・衣川耕平・西田達哉：ステンレス鋼切削における塗布効果 先端加工学、27、1 (2009) 63
- 16) T.Kaneeda & K.Kinugawa : Lubricant Applying Effect in Ti Alloy Ti-6Al-4V Cutting Proc. of 23rd ASME Annual Meeting & 12th ICPE Meeting (2008) CD-ROM