

切削加工におけるオイルレス極少量潤滑技術に関する研究

-界面活性剤水溶液による潤滑性改善-

相本英嗣*

A Study on the Oilless-Minimum Quantity Lubrication in Cutting -The Improvement of Lubricity with Aqueous Surfactant Solution-

Eiji Sugimoto

本研究ではオイルレスの切削加工実現のため、濡れ性および粘性に着目し、界面活性剤水溶液(以下、水溶液)のミストを用いて加工特性を調査した。その結果、アルミ合金の切削加工において、水溶液を加工点へミスト供給したところ、切削抵抗は低減し、オイルミストとほぼ同等の切削抵抗を実現することができた。また、界面活性剤を用いた水溶液の潤滑において、濡れ性が切削抵抗と工具摩耗に影響すること、粘性は既知の知見と同じく支配的で無いことを把握した。

1. 緒 言

機械加工での環境技術への取組みはコスト高になると敬遠されてきた。しかし近年、環境技術への関心は高まっており、またコスト低減手法としての環境技術の提案も求められている。現在切削加工において環境技術の1つとしてセミドライ加工が行われている。代表的なセミドライ加工であるMQL(Minimum Quantity Lubrication)は大量の加工液の代わりに、オイルミストを圧縮空気と共に加工点に供給することで、冷却・潤滑を行うものである。加工液の濾過循環用のポンプを必要としないことや廃液が出ないことが利点である。しかしMQLで使用されている加工液は環境負荷の少ない植物油や合成エステルが主体であるが、高価で、冷却効果が低いという課題がある。さらなるコストダウン、潤滑・冷却性能の向上の為にオイルに依存しない水ベースでの潤滑技術の確立が必要である。その実現には潤滑現象を理解し、また加工液に求められる物性を把握することが重要となる。

一般に加工現象は工具と被削材の接触・摩擦を伴う現象である。このような摩擦し合う物質の潤滑状態を表すものとしてストライベック曲線がある¹⁾。図1にストライベック曲線の概念図を示す。ストライベック曲線では潤滑状態を流体潤滑、混合潤滑、境界潤滑の3種類に大別している。

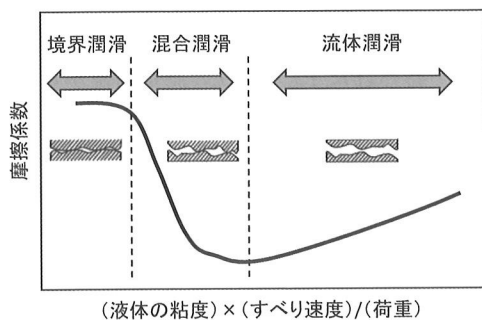


図1 ストライベック曲線の概念図

これらのうち、加工現象で起こりうる境界潤滑においては、他の2つの状態に比べて粘性の寄与は低く、化学的、界面化学的、表面物理的特性が支配的であると言われている²⁾。また、金属の切削現象において、潤滑は工具と被削材の摩擦面に加工液が侵入し、せん断強度の低い潤滑油膜あるいは何らかの反応生成膜が形成されることで成り立つと考えられている³⁾。これらから、加工現象での加工液に求められる機能は、まず被削材表面に加工液が広がること、つまり濡れ性をもち⁴⁾、そして潤滑膜あるいは反応生成膜を形成することが必要となると考えられる。従来から使用されているオイルベースの加工液は金属に対する濡れ性に優れるが、これに対して水は金属に対する濡れ性が悪く摩擦面に浸透し難い。水ベースのオイルレス潤滑を想定した場合、まずは水の濡れ性の悪さが問題となる。

また磯部らは粘性水溶液を加工点にミスト供給した研削加工において良好な結果を得ている⁵⁻⁸⁾。これは加工点において水溶液の粘性が、何らかの効果を発現した可能性を示唆するものである。加工点において粘性は効果的ではないと言われているが、従来の知見のほとんどはオイルベースの加工液についての研究により得られたものであるため、水ベースの加工液に関しては検証を要するものである。現在水ベースの加工液を用いた切削加工の研究として、電解還元水を用いたエンドミル加工⁹⁻¹⁰⁾や、MQLに水を併用した研究結果¹¹⁾などが報告されている。しかし水の濡れ性や粘性に着目した研究は見受けられない。

本研究では、オイルレスの切削加工実現のため、濡れ性および粘性に着目し、水溶液のミストを用いて加工特性を調査した。

2. 実験方法

2・1 水溶液の濡れ性、粘性の評価

前述したように、水は濡れ性の悪い液体と言われているが、界面活性剤を添加することで濡れ性を制御することができる。そこで、イオン交換水に添加する界面活性剤濃度

(以下、濃度)を変化させた水溶液を作成し、接触角測定による濡れ性評価、および粘度測定による粘性評価を行った。各測定の概要を以下に示す。なお、界面活性剤にはラウリルグルコシド(花王製マイドール 12)を使用した。

2・1・1 接触角測定

接触角は、接触角計(協和界面科学製 CA-S ミクロ 2 型)で測定した。濡れ性は接触角で評価でき、接触角が小さいほど濡れ性が良いことを意味する。図 2 に固液界面の接触角を示す。固体表面上に少量の液体がある場合、液滴ができる。このときの液滴表面と固体表面がなす角を接触角 θ という。また、固液界面と液滴頂点を結んだ直線と固体表面が成す角を θ_1 とすると、固体上の液滴は円の一部と見なすことが出来ることから、幾何学的に $\theta = 2\theta_1$ の関係が成り立つ。よって、 θ_1 を測定することで接触角 θ を求めることが出来る。

アセトンにて十分に洗浄した平滑な板材のアルミ合金 A5052(以下 A5052)と炭素鋼 S50C(以下 S50C)に水溶液を静かに滴下し、接触角を測定した。測定は 5 回行い、その平均値を測定値とした。

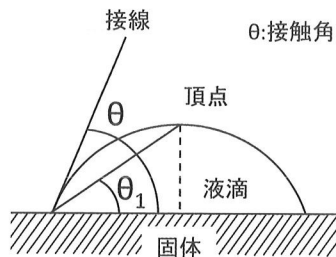


図 2 固液界面の接触角

2・1・2 粘度測定

粘度測定には、オストワルド粘度計(柴田科学製 No. 1, No. 3)を使用した。オストワルド粘度計および水溶液は、測定前に恒温恒湿室内(室温 23[°C], 湿度 50[%])において 1 日以上放置し、十分室温になじませた後に測定を行った。6[cc]の水溶液をオストワルド粘度計内に入れ、毛細管を落下する時間を測定し、水の落下時間と比較することで、水に対する相対粘度を算出した。測定は 5 回行い、その平均値を測定値とした。

2・2 加工実験

水溶液の加工特性を評価するため、加工実験を行い、切削抵抗、工具温度、工具摩耗を測定した。加工実験は立形マシニングセンタで行い、試験液体を加工点にミスト供給しながら、エンドミルによる側面切削を行った。表 1 に加工条件を示す。被削材は、切削抵抗測定と工具温度測定では A5052 を使用し、工具摩耗測定では S50C を使用した。なお、加工点への試験液体のミスト供給には、外部給油式ミスト供給装置を使用した。

2・2・1 切削抵抗測定

図 3 に実験装置の概略図を示す。切削動力計は立形マシニングセンタのテーブル上に固定し、被削材は切削動力計上に固定した。加工中の工具に生じる抵抗力は、被削材へ

表 1 加工条件

加工機	立形マシニングセンタ (日立精機製 VKC-45)		
被削材	アルミ合金 (A5052)	炭素鋼 (S50C)	
工具	ハイス4枚刃フラットエンドミル 刃径:Φ8mm 刃長:20mm ねじれ角:30deg. コーティング:無し (日立ツール製 4ESMR8)		
切削条件	ダウンカット側面切削		
	切削方式		
	主軸回転数 [rpm]	2800	3200
	テーブル送り速度 [mm/min]	630	340
	切削速度 [m/min]	70	80
	1刃辺りの送り量 [mm/tooth]	0.056	0.027
	軸方向切り込み量 [mm]	12	
径方向切り込み量 [mm]	0.4	0.8	
試験液体	・界面活性剤水溶液 (イオン交換水+ラウリルグルコシド) 濃度:0.01[wt%]~10[wt%] 供給量:1[cc/h]~128[cc/h]	・界面活性剤水溶液 (イオン交換水+ラウリルグルコシド) 濃度:0.5[wt%], 1[wt%], 2[wt%] 供給量:24[cc/h]	
	・イオン交換水 供給量:4[cc/h]~96[cc/h]	・イオン交換水 供給量:24[cc/h]	
	・MQL用オイル フジBC技研製LB-10 供給量:0.5[cc/h]~32[cc/h]		
試験液体供給装置	外部給油式ミスト供給装置 (フジBC技研製 FK-1)		

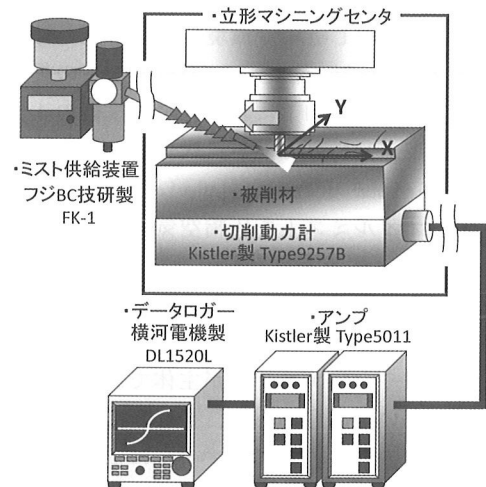


図 3 実験装置の概略図

の反力を生じさせる。この反力を切削動力計で検出し、反力のY方向(切り込み方向)の電圧信号を、アンプを介しデータロガーに保存し、実験後にY方向の切削抵抗(以下、切削抵抗)として算出した。

2・2・2 工具温度測定

加工中の工具温度は、赤外線サーモグラフィ(チノー製 CPA-SC7000)で測定した。フレームレート 1,000fps で 12 秒間撮影し、得られた 12,000 枚の測定画像から、工具の最高温度を抽出し、時系列データとして保存した。

2・2・3 工具摩耗測定

工具摩耗は、工具の逃げ面摩耗幅によって評価した。A5052 では工具がほとんど摩耗しないため、S50C を被削材とし、切削条件を工具メーカー推奨条件の 2 倍の切削速度となるように設定することで、工具摩耗加速試験を行った。加工実験後の工具の逃げ面摩耗幅を、測定顕微鏡(オリンパス光学工業 STM5)で測定した。その際、顕微鏡の落射光が工具の摩耗面に鉛直に当たるように、工具を測定顕微鏡の

ステージ上にセットした。刃先先端から 3[mm]の位置で 4 刃すべての逃げ面摩耗幅を測定し、その平均値を工具摩耗幅とした。

3. 実験結果および考察

3・1 濃度と接触角, 粘度の関係

図 4 に濃度と接触角, 粘度の関係を示す。濃度の上昇とともに接触角が低下する領域 I (~0.1[wt%]), 接触角と粘度がほとんど変化しない領域 II (0.1[wt%]~1.0[wt%]), 粘度が上昇する領域 III (1.0[wt%]~)が存在することがわかった。また, 接触角の値は A5052, S50C 共にほぼ同じ結果であった。

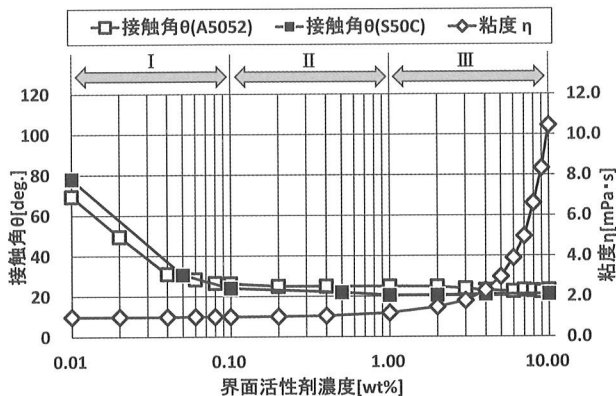


図 4 濃度と接触角, 粘度の関係

3・2 加工実験結果

3・2・1 濃度およびミスト供給量と切削抵抗の関係

図 5 に試験液体ごとのミスト供給量と切削抵抗の関係を示す。イオン交換水とオイルは供給量が増えるにつれて切削抵抗が低下し、オイルでは 4[cc/h]以上、イオン交換水では 50[cc/h]以上ではほぼ一定となった。これらに対して、水溶液は濃度 0.01[wt%]ではイオン交換水とほぼ同じ結果を示したが、濃度が高まるにつれて、切削抵抗が低下するとともに供給量約 10[cc/h]において極小値を取る傾向を示した。このことから、適量の水溶液をミスト供給することで、潤滑性をオイルとほぼ同等に改善することが可能であり、その最適なミスト供給量は約 10[cc/h]であることがわかった。

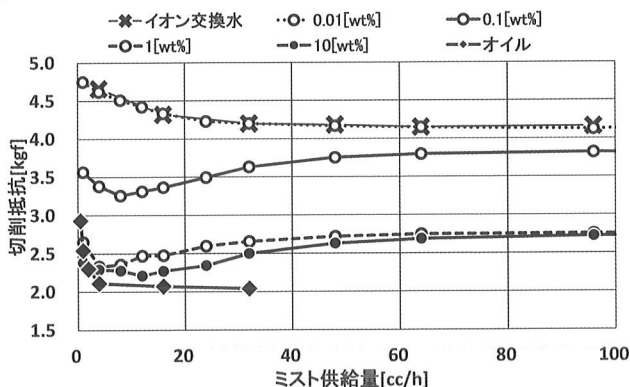


図 5 試験液体ごとのミスト供給量と切削抵抗

この水溶液のミスト供給量に最適値が存在する理由として、以下のことが考えられる。水はあまり良くない境界潤滑剤であるといわれており¹²⁾、図 5 のイオン交換水の結果からも分かるように、水事態の潤滑性は界面活性剤よりも悪いと思われる。よって水は少ない方が潤滑性の改善には良いと考えられる。ミスト供給量を少なくするとミストの水分の気化が促進されると予想されるため、水溶液が濃縮されることから潤滑性が向上すると思われる。さらに供給量を少なくすると、加工点を潤滑できるだけの供給量を下回るため潤滑性が悪化すると思われる。以上より必要最低限の水分を含んだ水溶液が極少量供給されることで、界面活性剤の潤滑効果が効率良く引き出されたと推察する。

図 6 にミスト供給量 8[cc/h]における濃度と切削抵抗の関係を示す。図 4 で示した濃度の上昇とともに接触角の低下が見られた領域 I では、同様に切削抵抗の低下が見られた。これは、液体の濡れ性が向上することで、工具と被削材の摩擦面に水溶液が侵入しやすくなり、切削抵抗の低減につながったと思われる。

図 4 で示した濃度の上昇とともに粘度の上昇が見られた領域 III では、切削抵抗の変化はほとんど見られなかった。このことから、粘性が切削抵抗に影響しないことがわかった。これは、粘性が加工点において効果的ではないという既知の知見と一致するものである。また、最も低い切削抵抗を示したことから、最適な濃度は 1[wt%]以上であることがわかった。

一方、図 4 で示した接触角と粘度がほとんど変化しなかった領域 II でも、領域 I と同様に切削抵抗の低下が見られた。これは、濡れ性や粘性以外の別の要因が切削抵抗の低減に影響している可能性を示唆している。加工現象での加工液に求められる機能は、濡れ性を有し、せん断強度の低い潤滑膜あるいは反応生成膜を形成することである。界面活性剤は界面に物理吸着するため、潤滑膜を形成することが可能であると思われる。つまり、領域 II の切削抵抗の低下は、界面活性剤が形成した潤滑膜による効果によるものと推察する。しかし、これについてはさらなる検証が必要である。

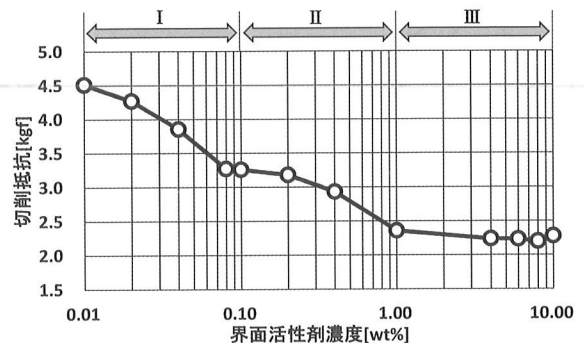


図 6 供給量 8[cc/h]における濃度と切削抵抗の関係

3・2・2 アルミ合金切削時の工具温度

図 7 に A5052 切削時の工具温度を示す。グラフ中の瞬間的な鋭い温度上昇は、工具と赤外線サーモビューアの間を、

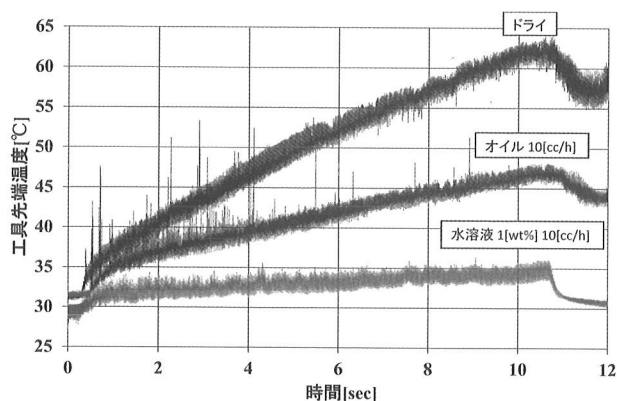


図7 A5052 切削時の工具温度

高温の切り屑が横切ることによるものであるため、実際の工具温度ではない。ドライ、オイル、水溶液のいずれも、加工開始から加工終了まで工具温度の上昇が見られたが、水溶液の温度上昇は最も少なく、5[°C]程度であった。

ここで、切削加工中の工具の温度上昇が、オイルよりも水溶液の方が少なかった原因について考察する。図5の結果が示すように、オイルは水溶液よりも切削抵抗が低く潤滑性が優れていることから、切削加工時の発熱量も少ないことが予想される。しかし、水溶液をミスト供給することで水分が気化し、その潜熱によって加工点近傍が冷却された結果、工具の温度上昇がオイルよりも少なかったと考えられる。

3・2・3 濃度と工具摩耗の関係

図8に濃度と工具摩耗幅、接触角の関係を示す。濃度0.5[wt%]工具摩耗は大きく改善されたが、それ以上ではほとんど変化しなかった。この傾向は接触角の変化と良く似た傾向であり、工具摩耗と接触角には相関があると思われる。水の濡れ性が改善されたことにより、水溶液が工具と被削材間に介在しやすくなることで、工具摩耗を減少させたのではないかと考える。

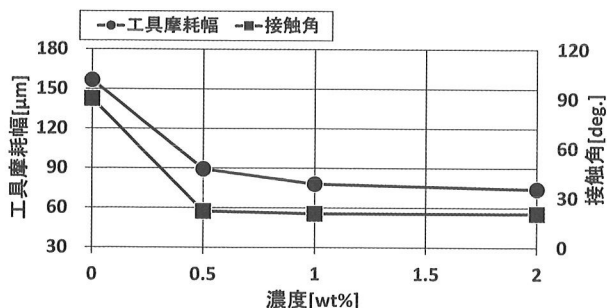


図8 濃度と工具摩耗幅、接触角の関係

4. 結言

オイルレスの切削加工実現のため、濡れ性および粘性に着目し、界面活性剤水溶液のミストを用いて加工特性を評価した結果、以下の知見を得た。

1) 界面活性剤水溶液のミストを用いた切削加工において、濡れ性の向上により切削抵抗は低減するが、粘性は既知の知見と同じく支配的ではない。

- 2) 適量の界面活性剤水溶液をミスト供給することにより、切削抵抗を低減することができる。アルミ合金 A5052 を切削加工する場合の最適供給量は約 10[cc/h]であり、さらに濃度を 1[wt%]以上にするにより、オイルミストとほぼ同等の切削抵抗を実現できる。
- 3) 濡れ性と粘性がほとんど変化しない界面活性剤濃度範囲においても、切削抵抗の低減が確認されたことから、濡れ性や粘性以外の別の要因による切削抵抗の低減効果が示唆される。
- 4) 界面活性剤水溶液のミストは、オイルミストよりも優れた冷却効果を持つ。
- 5) 界面活性剤濃度を上げることで工具摩耗は低減する。濡れ性と工具摩耗には相関があると思われる。

参考文献

- 1) (社)日本機械学会：機械工学便覧デザイン編β4 機械要素・トライボロジー，丸善，p.162(2005)。
- 2) 桜井俊男：新版潤滑の物理化学第二版，幸書房，p.29(1983)。
- 3) 山本明，鈴木音作：潤滑油剤とその効果，朝倉書店，p.83(1966)。
- 4) 山本雄二，兼田楨宏：トライボロジー，理工学社，p.16(1998)。
- 5) 磯部佳成，加藤泰生：研削加工時における水ミスト冷却が被加工物へ及ぼす効果に関する研究 第2報：水ミスト成分と測定温度の関係について，ABTEC2007 砥粒加工学会学術講演会講演論文集，pp.197-200(2007)。
- 6) 磯部佳成，加藤泰生：研削加工時における水ミスト冷却が被加工物へ及ぼす効果に関する研究(水溶性潤滑における多糖類の効果)，ABTEC2008 砥粒加工学会学術講演会講演論文集，pp.349-350(2008)。
- 7) 磯部佳成，加藤泰生：研削加工時における水ミスト冷却が被加工物へ及ぼす効果に関する研究(水ミスト特性の影響について)，ABTEC2009 砥粒加工学会学術講演会講演論文集，pp.81-84(2009)。
- 8) 磯部佳成，加藤泰生：研削加工時における水ミスト冷却が被加工物へ及ぼす効果に関する研究(水溶性潤滑の冷却効果について)，ABTEC2010 砥粒加工学会学術講演会講演論文集，pp.29-30(2010)。
- 9) 佐藤運海，竹ノ内敏一，原宏，山崎隆夫，若林信一：電解還元水を用いた炭素鋼のエンドミル加工，日本機械学会論文集(C編)，71(710)，pp.228-234(2005)。
- 10) 佐藤運海，竹ノ内敏一，原宏，若林信一：電解還元水を用いたアルミ合金のエンドミル加工，日本機械学会論文集(C編)，72(722)，pp.328-335(2006)。
- 11) 若林利明，柿原徹，久原淳司，熱田俊文，佃昭，柴田潤一，千本木紀夫，須田聡：アルミニウムのMQL加工におよぼす水の効果，2011年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，pp.321-322(2011)。
- 12) 山本明，鈴木音作：潤滑油剤とその効果，朝倉書店，p.43(1966)。