

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19560144

研究課題名（和文） ニアドライ加工の高性能化とトライボロジー挙動

研究課題名（英文） HIGH-PERFORMANCE NEAR-DRY MACHINING AND ITS TRIBOLOGICAL BEHAVIOR

研究代表者

若林 利明 (WAKABAYASHI TOSHIAKI)

香川大学・工学部・教授・

研究者番号：00294736

研究成果の概要（和文）：切削油剤の使用量を大幅に削減できる環境に優しいニアドライ加工の高性能化について、トライボロジー挙動解明の立場から検討した。その結果、油剤の高い潤滑効果が不可欠なアルミニウム合金の加工においては、エステル、アルコール、酸など、いわゆる含酸素化合物に優れた切削性能をもつものがあること、また、水の併用が切削性能を向上させることを究明した。さらに、難削材の一種であるステンレス鋼のニアドライ加工では、油剤と水溶性切削油の複合ミスト供給が有効なことを検証した。

研究成果の概要（英文）：Regarding high-performance near-dry machining which can considerably decrease the amount of cutting fluids and is therefore environmentally friendly, its tribological behavior was investigated in detail. As a result, in machining of aluminum alloys necessitating the high lubricating effects of fluids, it was found that some of such chemical compounds including oxygen as esters, alcohols and acids had the excellent cutting performance and that coexisting water could improve the performance. Further, in near-dry machining of a stainless steel which is one of difficult-to-cut materials, hybrid mist supply of an ester and a water-based coolant demonstrated to be effective in providing the higher cutting performance.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：トライボロジー

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：ニアドライ加工，MQL加工，トライボロジー，エコマシニング，環境対応，切削加工，潤滑剤，合成エステル

1. 研究開始当初の背景

世界的な環境問題に関する取り組みの中

で、極めて少ない油剤を供給して切削を行うニアドライ加工は、環境に優しい製造技術の

柱の一つとなっている。とくに極微量切削液供給 (Minimal Quantity Lubrication) システムを用いた MQL 加工は、製造現場において最も普及しているニアドライ加工の代表的成功例である。

MQL 加工法は、従来の湿式切削と比べて、1 時間あたりの油剤供給量が数十 ml 程度と数万分の 1 であるにもかかわらず、工具摩耗の低減や製品精度の向上の点で遜色がないばかりか、むしろ切削性能が高まる場合も多い。そのため、環境対応型切削 (エコシニング) 技術として、主に鋼材を対象に実際の生産現場への適用が着実に進み、そこに、本研究者が開発した合成エステル系切削油剤も大きく貢献している。

MQL 加工の場合、供給油剤量が極微量であるため、油剤の潤滑効果が格段に重要性を増すことになる。このようなトライボロジー的視点に立った本研究者らの検討によって、鋼の MQL 加工におけるエステル油剤の潤滑効果発現に関わる作用メカニズムが明らかになり、その成果は鋼の MQL 加工の普及に大いに活用されてきている。

本研究の開始当時、MQL 加工の最大の技術的課題は、自動車部品加工等で使用が拡大しているアルミニウム合金と、今後さらに需要が増すと予想される難削材への適用であり、油剤の性能ばかりでなく、MQL 加工システムとしても、まだ不十分な状況にあった。

2. 研究の目的

ニアドライ加工の技術的課題であるアルミニウム合金と難削材への適用性拡大について、前者では潤滑性不足による切くずの凝着が、後者では冷却性不足による工具寿命の短縮が大きな問題となっている。いずれも、そこに使用する油剤のトライボロジー特性が大きく影響するため、本研究では、鋼の MQL 加工には最適と判明した合成系エステル油剤の他、各種潤滑剤や潤滑剤そのものの処理方法も対象にしてトライボロジー挙動を詳細に調べる。さらに、それらの結果をアルミニウム合金や難削材の切削性能と関連づけて検討し、MQL 加工の最適化と応用範囲の拡大につなげ、ニアドライ加工技術の高性能化に貢献することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 各種油剤のトライボロジー特性評価

鋼の MQL 加工用潤滑剤として優れた性能を示す合成ポリオールエステル油剤について、それらのアルミニウム合金等の摩擦に対する基礎的トライボロジー特性を評価した。さらに、合成系エステル以外の酸、アルコールといった含酸素化合物にも対象を広げ、基礎的トライボロジー特性を調べた。

(2) 実用ニアドライ加工試験による切削性

能評価

①アルミニウム合金の切削

主としてアルミニウム合金の MQL エンドミル加工において、工具への凝着状態等の判定から、各種油剤の切削性能を評価した。一方、各種含酸素化合物アルミニウム合金の MQL によるタッピング加工、ドリル穴加工も行い、トライボロジー特性と関連づけて切削性能を検討した。

②難削材の切削

難削材の MQL 加工については、その第一段階としてステンレス鋼の切削を対象に、油剤ミストと水溶性切削油のミストを同時に噴霧できる複合ミスト供給装置によるニアドライ方式のエンドミル加工を行い、各種油剤の切削性能を評価した。

(3) 油剤の潤滑挙動におよぼす吸着特性の影響の考察

雰囲気制御切削試験機で得られた油剤モデル化合物の金属新生面に対する吸着特性を調べ、それが油剤の潤滑挙動および切削性能におよぼす影響を検討した。

(4) MQL 油剤に対する水マイクロバブル処理と油剤性能の検討

液体への新たな機能付与技術として着目されているマイクロバブル処理を用いて、MQL 加工に用いる合成ポリオールエステル油剤中に水を安定的に微分散させる方法を検討した。さらに、その処理油剤の MQL 加工用油剤としての性能も調べた。

4. 研究成果

(1) 各種油剤のトライボロジー特性評価

鋼の MQL 加工用油剤を参考に、ネオペンチルグリコール、トリメチロールプロパン、ペンタエリスリトールという、それぞれ 2、3、4 価のアルコールとオレイン酸との脱水縮合反応由来の合成ポリオールエステル (各々 UE-1、UE-2、UE-3 と略す) を選定した。これらの基礎的トライボロジー特性評価例として、鋼とアルミニウム合金の組み合わせに対する摩擦係数の測定結果を図 1 に示す。これら合成ポリオールエステル油剤の摩擦特性は、その 1 分子中のエステル結合数が増えるほど良好となることがわかった。

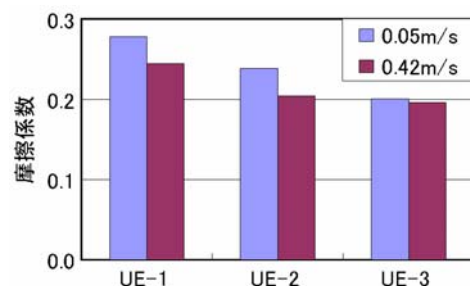


図 1 各エステル油剤の摩擦係数

一方、エステルや酸、アルコールといった含酸素化合物に注目して、鋼とアルミニウム合金の摩擦に対する基礎的トライボロジー特性を評価したところ、エステルが最も低い摩擦係数を示すことが明らかとなった。

(2) 実用ニアドライ加工試験による切削性能評価

①アルミニウム合金の切削

合成ポリオールエステル油剤 UE-1、UE-2、UE-3 および市販 MQL 加工用エステル油剤 CO-1 を用いて、主に JIS AC8A アルミニウム合金の MQL エンドミル加工を行った結果を、従来の大量給油による湿式加工の場合 (WET) と比較して図 2 に示す。UE-2 は MQL 加工であるにもかかわらず、大量給油の WET と同等の優れた凝着抑制効果を有することがわかった。

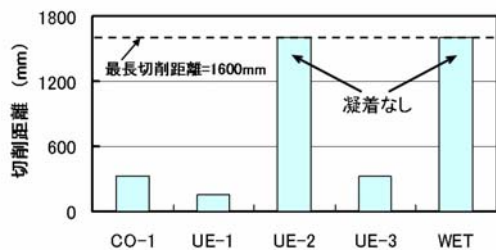


図 2 工具への凝着発生時の切削距離

この UE-2 の優れた凝着抑制効果について、気相潤滑の立場から考察し、アルミニウム合金の MQL 加工油剤としては、図 1 に示した潤滑性と分子構造に関する蒸発性の両者に優れる必要があることを見出した。これは、アルミニウム合金の MQL 加工油剤開発において極めて有用な知見である。

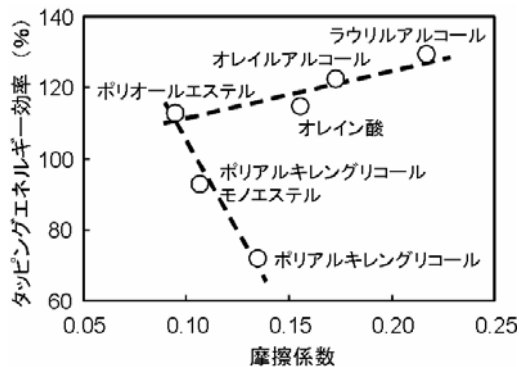


図 3 タッピングエネルギー効率と摩擦係数との関係

さらに、含酸素化合物を油剤に用いた MQL による JIS AC8A アルミニウム合金のタッピング加工、ドリル穴加工を行った。その結果の代表例として、タッピングエネルギー効率の値と基礎的トライボロジー特性で求めた摩擦係数との関係を図 3 に示す。エステルお

よびグリコールについては、低摩擦なものほど切削効率がよく、潤滑性の良否と切削性能の良否の序列が一致した。しかし、オレイン酸およびオレイルとラウリルアルコールは高摩擦なものほど切削効率が上がるという特異な挙動をもつことが明らかとなった。とくにオレイルとラウリルアルコールの切削性能は極めて高く、非常に興味深い現象である。

②難削材の切削

難削材のニアドライ加工については、主に JIS SUS304 ステンレス鋼を対象にエンドミル加工を行った。このとき、エステル油剤としては、過去の検討で合金鋼に最も効果的な UE-3 を選び、油剤ミストのみを供給する通常の MQL 加工だけではなく、さらに水溶性切削油のミスト (クーラントミスト、CM と略す) を同一ノズルから噴霧できる複合ミスト供給方式を適用し、何も供給しない乾式切削 (DRY) と比較して切削性能を評価した。

工具寿命に達したときの切削距離で判定した切削性能の評価結果例を、各潤滑条件について図 4 に示す。MQL 単独や複合ミストのニアドライ加工は、DRY に比べて 3 倍以上の工具寿命延長効果を有し、とくに CM 量が 100ml/h の場合、工具寿命でみた切削性能は DRY の 5 倍にも達することがわかった。これは、このステンレス鋼について複合ミスト方式による冷却効果に最適点があることを物語っており、ニアドライ加工の高効率化に役立つ重要な知見である。

一方、材種の異なるいくつかのステンレス鋼を用いたニアドライ加工を行い、切削性能におよぼす油剤および潤滑条件の影響は、ステンレス鋼の材種によって異なるという結果も得られ、この挙動は今後さらなる検討を要する課題である。

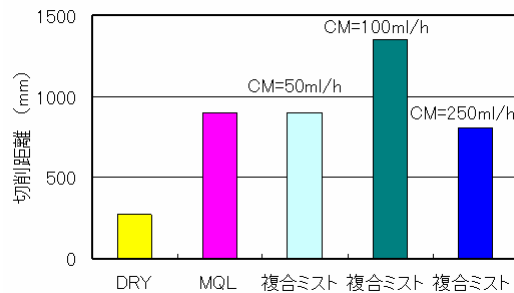


図 4 工具寿命時の切削距離

(3) 油剤の潤滑挙動におよぼす吸着特性の影響の考察

雰囲気制御切削試験機を用いて、アルコール、酸、エステルのモデル含酸素化合物の金属新生面への吸着特性を調べ、単位時間あたりの吸着量に相当する吸着速度と新生面との親和性を表す吸着活性を求めた。それらの結果とタッピングエネルギー効率で判定し

た切削性能との関係を図5に示す。この結果から、油剤の吸着特性としては、吸着速度ではなく吸着活性の方が切削性能の優劣とよく相関することが明らかとなった。

この理由について、金属新生面の生成速度にもとづくアルミニウム原子の活性点生成速度の推算結果と比較して検証した。その結果、各モデル化合物の吸着速度は切削によって生ずるアルミニウムの新生面を十分に被覆できる値であり、検討した含酸素化合物がほぼ同等な厚さの潤滑膜を作ると推測されることを究明した。これは、油剤の吸着特性は吸着速度ではなく吸着活性とよく相関することを意味しており、含酸素化合物の潤滑メカニズム解明に大きく貢献する成果である。



図5 吸着特性と切削性能の関係

(4) MQL 油剤に対するマイクロバブル処理と油剤性能の検討

含酸素化合物と同様、水の極性物質としての特性に期待し、蒸気凝縮法を応用することによって、MQL 加工に用いるポリオールエステル系油剤への水マイクロバブルの微分散処理が可能かを調べ、一定処理条件の下で、安定な油水混合分散液を得ることができた。この成果にもとづき、これを実用化につなげるための水マイクロバブル微分散装置を試作した。

このマイクロバブル微分散装置を適用して水を併用すると、アルミニウム合金の MQL エンドミル加工において、仕上げ面粗さが改善され、切削性能を向上させることがわかった。これは、油剤ミストに水を組み合わせることの有効性を示唆しており、今後さらに検討する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

①Wakabayashi, T., Suda, S., Shibata, J., Importance of MQL Media Composition in Near-Dry Machining of Aluminum, Key Engineering Materials, v. 407-408, 329-332, 2009、査読有

②Wakabayashi, T., Suda, S., Shibata, J., Influence of Oxygen Concentration on Cutting Performance in MQL Machining of Aluminum Alloy, Proceedings of 3rd CIRP International Conference on High Performance Cutting (Dublin, Ireland), 347-354, 2008、査読有

③Wakabayashi, T., Suda, S., Environmentally Friendly Machining of Aluminum Using Minimal Quantity Lubrication System, Proceedings of 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems (Tokyo, Japan), 377-380, 2008、査読有

④Wakabayashi, T., Kishida, Y., Suda, S., Tsukuda, A., Atsuta, T., Lubricating Action and Cutting Performance of MQL Media in Near-dry Machining, Proceedings of International Conference on Tribology in Manufacturing Processes (Yokohama, Japan), 277-280, 2007、査読有

〔学会発表〕(計11件)

①高原研二、若林利明(2番目)ほか4名、Environmentally Friendly Machining of Stainless Steel with Various Near-dry Methods, World Tribology Congress 2009, 2009年9月8日、国立京都国際会館(京都)

②千本木紀夫、若林利明(6番目)ほか4名、Effects of Oxygen-including Compounds on Cutting Performance in MQL Machining of Aluminum, World Tribology Congress 2009, 2009年9月8日、国立京都国際会館(京都)

③大林亘、若林利明(2番目)ほか4名、Near-dry Machining of Aluminum Alloys with MQL System, World Tribology Congress 2009, 2009年9月8日、国立京都国際会館(京都)

④若林利明、MQLを用いたアルミニウム合金のエンドミル加工、日本機械学会：第7回生産加工・工学機械部門講演会、2008年11月22日、長良川国際会議場(岐阜)

⑤若林利明、ニアドライ方式によるステンレス鋼のエンドミル加工、日本機械学会：第7回生産加工・工学機械部門講演会、2008年11月22日、長良川国際会議場(岐阜)

⑥Wakabayashi, T., Kishida, Y., Tsukuda, A., Atsuta, T., Suda, S., Tribology and Cutting Performance of Esters as a MQL

Machining Lubricant 、 STLE/ASME
International Joint Tribology Conference
(IJTC2007)、2007 年 10 月 23 日、Mission
Valley Marriott Hotel (San Diego、米国)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

若林 利明 (WAKABAYASHI TOSHIAKI)

香川大学・工学部・教授

研究者番号 : 00294736