

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06122

研究課題名(和文) トライボロジー的課題解決手法を駆使した難削材の高性能複合ニアドライ加工

研究課題名(英文) HIGH PERFORMANCE AND HYBRID NEAR-DRY MACHINING BY UTILIZING PROBLEM-SOLVING METHOD BASED ON TRIBOLOGY

研究代表者

若林 利明 (WAKABAYASHI, Toshiaki)

香川大学・創造工学部・教授

研究者番号：00294736

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：チタン合金を対象にしたニアドライ加工において、オイルミストのみ供給するMQL加工、水溶性切削油剤のミストのみ供給するクーラントミスト(CM)加工、MQLとCMを組み合わせた複合ミスト(HM)加工、乾式(DRY)加工、油剤を大量に使用する湿式(WET)加工について実用切削性能を評価した結果、連続切削についてはCM加工が従来の湿式加工と同等の切削性能を示すことを見出した。一方、断続切削においては、むしろ冷却効果に劣るMQL加工の方が工具寿命をより延長できることを究明した。さらに、新たな加工油剤用添加剤として取り上げた環境にやさしい液状ラノリンによって、工具寿命が大幅に延長できることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

難削材の代表であるチタン合金を対象にしたニアドライ加工において、切削性能に優れる油剤とその組み合わせを確定するとともに、これらの加工に最適な複合ニアドライシステムが提案できた。本研究を通して、油剤として有効な合成系酸素化合物の構造、高性能な化合物の組み合わせ、水溶性クーラントを併用した最適な供給法などが明らかとなり、MQL方式と複合化させた難削材の高性能ニアドライ加工が提案された。これらの成果は、低炭素社会の実現に合致した、エコマシニングによる環境に優しいシステムの構築に有益で、その成果を広く国内外に公表し、日本ばかりか世界レベルで見た社会的貢献も極めて大きいと判断される。

研究成果の概要(英文)：Regarding machining of titanium alloys, this study evaluated the practical cutting performance in the cases of MQL machining, coolant mist (CM) machining which could supply water soluble coolant, hybrid mist (HM) machining which could supply combined mists of MQL oil and coolant, dry machining and conventional wet machining. The evaluation results demonstrated that, in the case of the continuous cutting operation, CM machining demonstrated the possibility of making the tool life equivalent to that of ordinary wet machining with flood cutting fluid supply. On the other hand, in the case of the intermittent cutting operation, the regular MQL operation, which is inferior in cooling effect to CM machining, provided longer tool life than that of CM machining. In addition, liquid lanolin, which is a new lubricant additive and derived from natural wool grease, showed the evidence of considerably elongated tool life.

研究分野：トライボロジー

キーワード：環境対応 トライボロジー ニアドライ加工 難削材

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 環境に優しい低炭素社会の実現には、あらゆる分野で炭酸ガス排出量を抑制することが不可欠である。「ものづくり」の基盤技術である切削加工では、この取り組みの柱として、切削油剤の使用にともなう供給動力の削減、工作物洗浄工程の簡略化、廃液処理の軽減を図るため、ドライ化への移行が進められている。しかし、切削油剤を一切用いないドライ加工は、生産効率の低下や製品精度への悪影響といったデメリットを有し、適用範囲も限定されてしまう。そこで本研究では、「ニアドライ (Near-dry) 加工」を取り上げた。

(2) ニアドライ加工は極めて少ない切削油を供給して行う加工技術の総称であり、これらの中で、研究開始当初から現在に至るまで、最も普及している成功例が MQL 加工である。これは、1 時間あたりの油剤供給量が数十 ml 程度と従来の湿式切削と比べて極微量にもかかわらず、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、とくに鋼材を対象にした環境対応型切削 (エコマシニング) 技術として、生産現場への適用が着実に進み、製造ライン全体において、油剤や消費電力量の大幅な削減を実現してきた。

(3) 科学研究費補助金による先行研究「基盤研究(C): 複合ニアドライ加工システム構築のトライボロジー的アプローチ (平成 25-27 年度)」では、アルミニウム合金に最適な複合ニアドライ加工システムとして、ポリオールエステルにアルコールを併用した油剤による加湿式 MQL 加工法の開発を果たすとともに、難削材として取り上げたチタン合金に適する複合ニアドライ加工システム構築のための基礎検討を完了し、その評価指針を提示するに至っている。前者の成果は、いまだ普及が一部にとどまっているアルミニウム合金の MQL 加工の飛躍的展開に寄与するものであり、現時点でのニアドライ加工の最大の技術的課題は、後者の成果を足がかりにした、難削材の場合の冷却性不足による工具寿命の短縮という壁の克服に絞られていた。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、油剤に合成系含酸素化合物を適用したときの作用機構をトライボロジー的立場から詳細に検討し、チタン合金といった難削材の切削性能と関連づけて解明することを目的としている。

(2) さらに、これら化合物の組み合わせや水溶性クーラントを併用した供給方式の複合化によって、MQL 加工に不足する能力を付与する方法論を構築し、環境に優しいニアドライ加工の難削材への適用拡大につながる高性能化のための研究開発を行う。

3. 研究の方法

(1) チタン合金に対しては極性物質が大きな効果をもつ可能性を秘めていると推測されることから、代表的な極性物質であり、比較的安全性が高く、環境との適合性にも優れるものが多いエステル、アルコール、脂肪酸などの合成系含酸素化合物を対象として取り上げる。そして、これら化合物の中から、構造が比較的明らかである、入手性が高い、MQL 加工油剤に求められる主要物性としての動粘度や融点、沸点などが許容範囲内であること、等を条件に探索を行う。そして、入手できた油剤の基礎的トライボロジー特性を評価し、油剤構造と潤滑性能との関係を検討する。また、含酸素化合物以外の極性物質の探索も適宜実施する。

(2) 作用メカニズム解明の面から、雰囲気制御型切削試験機を用いて、モデル化合物の金属新生面への吸着特性を調べ、その結果を官能基の構造としては等価な含酸素化合物の基礎的トライボロジー特性の評価結果と関連づけて検討し、これら化合物の潤滑挙動におよぼす吸着特性の影響を推察する。

(3) 先行研究で導入した複合ミスト供給装置は、ミストの自動供給を基本とした市販品であり、ミスト供給については流量設定の容易さや流量範囲の自由度に制限があることから、複合ミストの供給条件等の詳細な検討の妨げとならないよう、本研究開発のシステム構築の第一段階として、これらミスト供給に関わる設定を手動でできる形式へと供給系を大幅に改良する。この改良した複合ミスト供給装置をチタン合金の加工に適用し、鋼で実績のある合成エステル油剤ミストと水溶液クーラントミストを用いて、これらの最適な組み合わせ条件や適切な供給法を検証する。

4. 研究成果

(1) 代表的ニアドライ方式の MQL 加工においては、エステル、アルコール、脂肪酸といった含酸素化合物の中で、アルコールがチタン合金に対して最も効果的であり、その作用メカニズム解明の観点から、雰囲気制御型切削試験機を用いて、モデル化合物の金属新生面への吸着特性を調べた結果、表 1 に示したとおり金属新生面との化学的親和性の尺度として測定された吸着活性は、チタン合金の場合、アルコールの方がエステルや脂肪酸より数倍程度大きい値をもつことを究明した。すなわち、トライボロジー的立場から、切削によって生じる金属新生面との化学

的亲和性が高い油剤分子が、その新生面に強く吸着することで潤滑効果を発揮することが検証できた。

表1 吸着活性と吸着速度

含酸素化合物	吸着活性, s ⁻¹
プロピオン酸メチル	0.0372
プロピオン酸	0.0602
1-プロパノール	0.1105

一方、流量設定の容易さや流量範囲の自由度に制限がある市販の複合ミスト供給装置について、ミスト供給に関わる設定を手動でできる形式へと供給系を大幅に改良した。この改良した装置を用いて、チタン合金 Ti-6Al-4V を対象に、オイルミストのみを供給する MQL 加工、水溶性切削油剤のミストのみを供給するクーラントミスト (CM) 加工、MQL と CM を組み合わせた複合ミスト (HM) 加工の三種のニアドライ加工を行い、乾式 (DRY) 加工と油剤を大量に使用する湿式 (WET) 加工と比較した。その結果、図1のとおり、連続切削については、水溶液クーラントミストを供給する CM 加工の場合が従来の湿式加工と同等の切削性能を示すことを見出した。

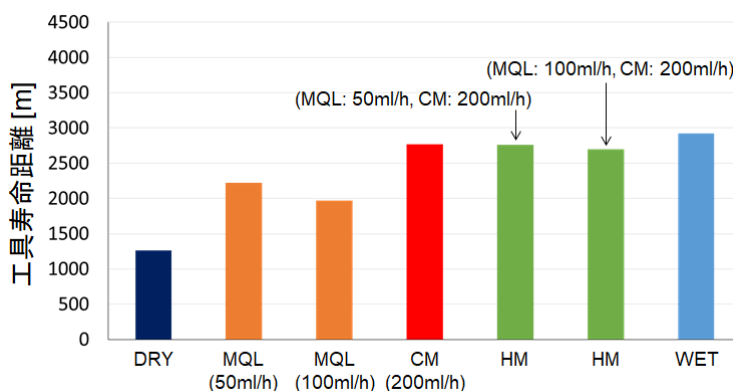


図1 各切削条件における工具寿命測定結果

(2) エステル、アルコール、脂肪酸といった含酸素化合物の中で、アルコールは、チタン合金の金属新生面に対して最も高い吸着活性をもち、そこに強く吸着することで潤滑効果を発揮するという検証結果を踏まえ、その潤滑効果について、油性領域および極圧領域における基礎的トライボロジー挙動を再検討した。この検討で求めた摩擦係数から、チタン合金に対する含酸素化合物の摩擦特性は、油性と極圧いずれの領域でもアルコールが最も良好と判断され、アルコールの高い吸着活性にもとづく摩擦低減効果がニアドライ方式の MQL 加工における良好な切削性能をもたらした、との推測を裏付けることができた。

一方、改良が完了した複合ミスト供給装置を用い、これまで実施してきた連続切削ではなく、断続切削に適用範囲を広げ、チタン合金のニアドライ加工における切削性能を調べた結果、図2に示したとおり、冷却効果に優れる CM 加工に比べ、その効果に劣る MQL 加工の方が、断続切削時の工具刃先への熱衝撃を抑制し、工具寿命をより延長できることを究明した。

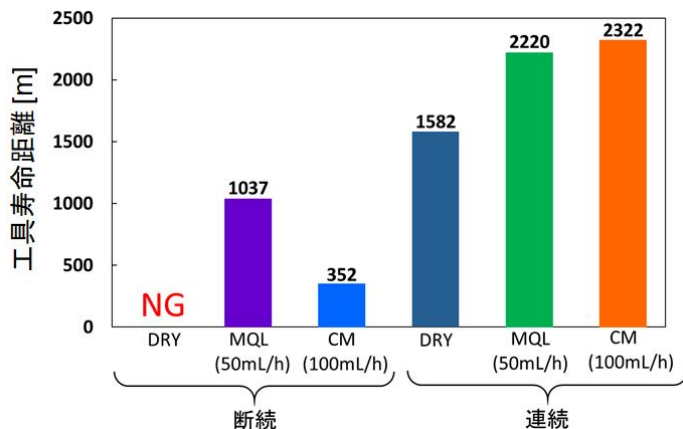


図2 断続切削と連続切削を比較した工具寿命測定結果

(3) 新たな加工油剤用添加剤として、羊毛に付着する脂質を精製した環境にやさしい天然素材である液状ラノリンを取り上げ、切削性能のさらなる向上を試みた。断続切削で評価し、潤滑方法としてオイルミストのみを供給する MQL 加工を行い、ポリオールエステル油剤としてトリメチロールプロパントリオレート (TMPO)、市販 MQL 用切削油剤で高い生分解性と酸化安定性を有する合成エステルの CO-1 を使用した。さらに、TMPO に液状ラノリンを 10 質量% 添加したもの (TMPO+L10%)、CO-1 に液状ラノリンを 10 質量% および 20 質量% 添加したもの (それぞれ CO-1+L10% および CO-1+L20%) を用いた。その結果、液状ラノリンは、チタン合金の MQL 加工において、工具寿命を大幅に延長することがわかり、その主成分であるステロール、脂肪族アルコール、脂肪酸、ヒドロキシ酸などの極性基を有する化合物が、金属表面に化学吸着して潤滑膜を形成する油性剤としての効果を発揮することが実証できた。

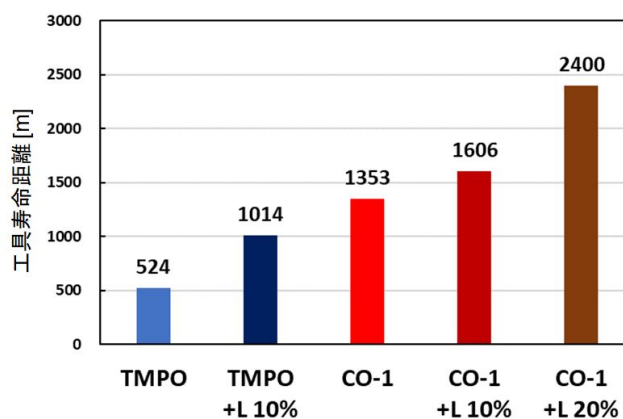


図3 断続切削での工具寿命に対する液状ラノリンの効果

以上のことから、難削材の代表であるチタン合金を対象にしたニアドライ加工において、切削性能に優れる油剤とその組み合わせを確定するとともに、これらの加工に最適な複合ニアドライシステムが提案できた。本研究を通して、油剤として有効な合成系含酸素化合物の構造、高性能な化合物の組み合わせ、水溶性クーラントを併用した最適な供給法などが明らかとなり、MQL 方式と複合化させた難削材の高性能ニアドライ加工が提案された。これらの成果は、低炭素社会の実現に合致した、エコマシニングによる環境に優しいシステムの構築に有益で、その成果を広く国内外に公表し、日本ばかりか世界レベルで見た社会的貢献も極めて大きいと判断される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 WAKABAYASHI Toshiaki, YAMADA Keisuk, KOIKE Shota, ATSUTA Toshifumi	4. 巻 749
2. 論文標題 Turning of Titanium Alloy Using Near-Dry Methods with MQL, Coolant Mist and Hybrid Mist Supplies	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 101-106
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4028/www.scientific.net/KEM.749.101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Toshiaki Wakabayashi, Hiroya Isozaki, Yusuke Mimura, Toshifumi Atsuta, Yasuharu Matsushima	4. 巻 November
2. 論文標題 Investigation on Action Mechanism of Lubricants Based on Their Adsorption Behavior in Near-dry Machining of Titanium Alloy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2019)	6. 最初と最後の頁 4pages
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 若林利明
2. 発表標題 Tribological Action and Cutting Performance of Lubricants in MQL Machining
3. 学会等名 Taiwan-Japan Tribology Symposium 2018（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 若林利明・熱田俊文・松島康晴
2. 発表標題 チタン合金のニアドライ加工に対するクーラントミストの効果
3. 学会等名 日本機械学会 第12回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 磯崎紘哉・小池将太・若林利明・熱田俊文
2. 発表標題 チタン合金のMQL加工における油剤の作用メカニズム -金属新生面への吸着挙動による検討-
3. 学会等名 2018年度精密工学会中国四支部香川地方学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 磯崎紘哉・小池将太・若林利明・熱田俊文
2. 発表標題 金属新生面への吸着挙動に基づいたチタン合金のMQL加工における油剤作用メカニズムの検討
3. 学会等名 日本トライボロジー学会 トライボロジー会議2018 秋 伊勢
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 若林利明
2. 発表標題 The Importance of Tribology in Environmentally Friendly Machining
3. 学会等名 The 10th Advanced Forum on Tribology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三村悠祐・磯崎紘哉・若林利明・熱田俊文・松島康晴
2. 発表標題 ニアドライ方式を用いたチタン合金の旋削加工 -液状ラノリンの効果-
3. 学会等名 2019年度精密工学会九州支部・中国四国支部佐世保地方講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----