

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 18 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420047

研究課題名(和文) 強還元作用を用いたチタンおよびチタン合金の環境対応高能率切削加工に関する研究

研究課題名(英文) Environmental Conscious Machining Technology of Titanium alloy assisted by reducing atmosphere

研究代表者

酒井 克彦 (Sakai, Katsuhiko)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：80262856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：チタンの切削加工には切削点の冷却および潤滑のために大量のクーラントを使用する必要があり、環境負荷や生産コストの増大が問題となっている。本研究では切削加工を窒素ガスなどの還元雰囲気中で行うことによる摩耗低減効果の原因を明らかにするために実験的な検討を行った。工具被削材熱電対に寄る解析結果から、炭素鋼のドライおよび窒素雰囲気切削における切削工具と被削材料との界面温度に差異はなく、その一方で切りくず新生面側の酸化膜厚が30nm以下に抑制されることが明らかとなった。以上より、切削雰囲気制御による摩耗抑制効果は、熱的な要因ではなく、切削加工中の化学反応抑制が要因であることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In cutting of titanium, it is necessary to use a large amount of coolant for cooling and lubrication of the cutting point, increasing the environmental burden and the production cost. In this research, an experimental study was conducted to clarify the cause of the wear reduction effect by performing the cutting process in a reducing atmosphere such as nitrogen gas. From the analytical results towards the tool-workpiece thermocouple method, there is no difference in the interface temperature between the cutting tool and the workpiece in dry and nitrogen atmosphere cutting of carbon steel, while the oxide film thickness on the chip generated surface side is 30 nm or less. It was revealed that it was suppressed by nitrogen gas. From the above, it was revealed that the effect of suppressing tool wear by cutting atmosphere control is not a thermal factor but suppression of chemical reaction during cutting process.

研究分野：生産工学

キーワード：切削加工 窒素雰囲気 切削温度 表面分析

1. 研究開始当初の背景

研究代表者はこれまで、生産現場への適用が容易かつ切削工具の寿命改善効果が高い各種手法について、混合ガスミスト切削加工法、アルカリ電解水ミスト切削法、窒素ガスブロー高速高送りミーリング加工法などの方法を提案し、それぞれの切削加工特性について実験的に検討を行ってきた。その過程において、鉄鋼材料への深穴加工のドリルセンター穴に炭酸ガスでミストを供給することによってスラスト抵抗を低減し、ドリルの摩耗を低減可能であることや、チタンの旋削加工に窒素ガスブローを供給することによって完全ドライ環境下であるにもかかわらず低摩耗で高速切削を実現出来る可能性を見いだしている。このような効果が発現するメカニズムとして、切削によって生じる金属新生面の酸化防止による切削点温度の低減効果や、加工中に工具や被削材界面に大気中とは異なる低摩擦化合物が生成する等の仮説に基づいて検討を行ってきたものの、その要因についてデータに基づいた明確な根拠がある結論を得るには至っていなかった。

2. 研究の目的

各種ガス雰囲気における外周切削試験を実施し、その際の切削抵抗や切削点近傍温度の精密測定および、切りくずや工具表面の元素分析等を通じて、切削加工に対するガス雰囲気の作用メカニズムを明らかにし、チタン材料を始めとする各種材料の切削加工に関して、油剤を使用しないことによる環境負荷低減効果と高生産性、低コスト化につながる知見を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

各種ガスを切削工具近傍のノズルから切削点に供給するガスブロー法は、工作機械への設置が容易である反面、ノズルから噴射された供給ガス流が大気を巻き込むことによる影響を避けられない。そこで本研究では、外周切削加工中の切削点近傍を完全に雰囲気置換するための実験装置の開発を行った。このような実験を行うためには、従来は走査型電子顕微鏡内部や、真空チャンバー内に小型の実験装置を組み込んだ装置を用いる方法が各種提案されている。しかし、これらの手法では切削速度等の切削加工条件が実際の生産現場で採用されている条件よりもかなり低くなる問題があった。そこで本研究では通常の切削加工で用いられる普通旋盤の加工点のみをガス雰囲気とするための小型の密閉容器を製作し、回転部分や移動する切削工具を適切にシールする構造としたことで、加工実験中の酸素濃度を測定器の限界値以下に低減する事に成功した(図1)。これまでの実験結果からガス供給の効果は通常の切削条件よりも高い条件で顕著になることが判明しているため、これに基づいて切削速度を中心とした加工パラメータの設定

をおこなった(表1)。また、切削点の温度計測方法として従来は非接触式赤外線温度計を使用してきたが、この方法では測定対象が必ずしも切削点ではなく切りくずや切削工具、被削材の温度の平均値となることが懸念されるため、本実験では切削点の温度をより正確に測定するため、工具すくい面と被削材との接触部で生じる熱起電力を直接測定する工具被削材熱電対法を構築して測定をおこなった。また、切削試験後の切りくず表面の化学状態を評価するために XPS (X線光電子分光装置) を用い、Fe, O, N の化学結合状態の評価を行った。

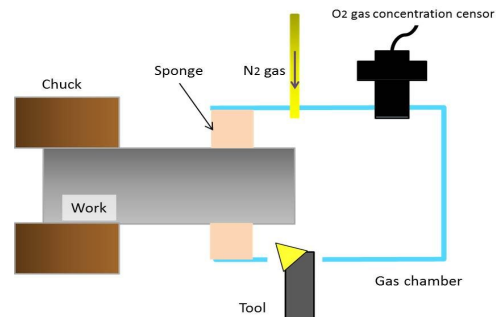


図1 切削実験の構成

表1 切削加工条件

Atmosphere	Dry, N ₂ atm. (O ₂ <0.1%)
Cutting speed [m/min]	100, 150, 200
Feed [mm/rev]	0.2
Depth of cut [mm]	1.0
Work material	S45C
Tool material	Carbide UTi20T

4. 研究成果

(1) 切削点温度

切削速度と切削温度の関係を図2に示す。図より、切削速度にかかわらず大気中とN₂雰囲気中とで切削温度にほとんど差がないことが明らかになった。その一方でそれぞれの切りくずの外観(図3)については、ドライ切削では新生面が酸化膜の生成によるテンパーカラーに起因するとみられる青い変色が観察されるが、窒素雰囲気切削における切りくずは金属光沢が保たれており、酸化が

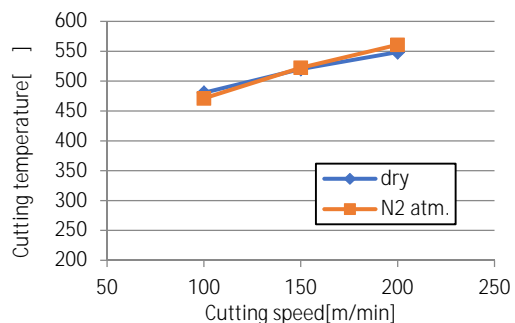


図2 切削点近傍温度

抑制されているものと考えられる。これらの結果から、ドライ環境および N₂ 雰囲気切削による切りくず新生面には酸化の有無に明確な差異があるにもかかわらず、切削点の温度がほぼ等しいという結果が得られた。このことから、切削加工中の工具と被削材の接触部接触部では酸化反応に伴う発熱が生じないことから計測された温度がどちらの条件でも等しかったと考えられる。ドライ切削での切りくずのテンパーカラーについては、切りくずが工具との接触点から離脱した直後に酸化が起こったため考えられる一方、窒素雰囲気では切りくずが接触点から離脱後も酸化が生じず、この差が雰囲気制御による境界摩耗低減の要因ではあることが示された。

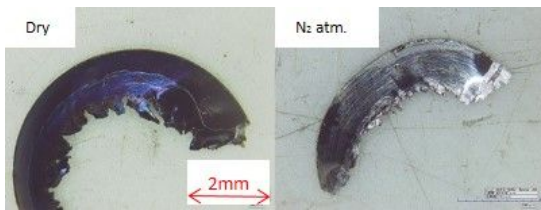


図3 切りくずの外観（切削速度 100m/min）

(2) 切りくず表面の化学状態

ドライ切削および N₂ 雰囲気切削では切りくずの発色が明らかに異なることから、雰囲気による酸化膜厚の差について詳細に検討するため XPS を用いた定量分析を実施した。測定では切削速度 100[m/min]の条件で排出された切りくずの新生面側（すくい面側）に

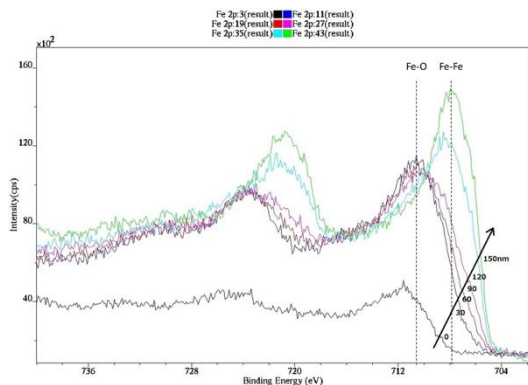


図4 ドライ切削切りくずの Fe2p スペクトル

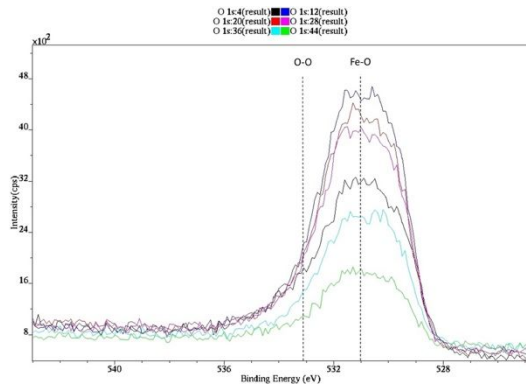


図5 ドライ切削切りくずの O1s スペクトル

ついて分析を行った。その他の切削条件は Table1 と同様である。ドライ切削における切りくずの Fe2p 電子の結合エネルギーのスペクトル(以下、単にスペクトルと表記する。)を図4に、O1s スペクトルを図5に、窒素雰囲気切削における切りくずの Fe2p のスペクトルを図6に、O1s のスペクトルを図7に示す。

これらの図より Fe2p, O1s のスペクトルとその変化に着目し、酸化物の生成起因するピークシフトと、表面から深さ方向へのピークシフトの変化傾向より、酸化膜の厚さや内部組成の変化について考察をおこなった。分析では、アルゴンイオンエッチング条件を1回当たり SiO₂ 換算で 30nm 除去としてエッチングと測定を繰り返して分析を行った。図4から図7において黒線が切りくず最表面のスペクトルを示し、初期エッチングを経た青、赤、淡紅、水色、緑線の順にエッチングが進行して表面から深い位置で検出されたスペクトルを表している。図4では最表面から深さ 90nm までの Fe2p のスペクトルが酸化の影響によって Fe-Fe の結合エネルギーより低エネルギー側にシフトしたピークが現れている。一方深さ 120nm では Fe-Fe の位置のピークが強く現れて、酸化に起因するピークが重なった形状であることが確認できる。深さ 150nm になると Fe-Fe の位置にのみピークが現れている。一方図5より、O1s のピークが酸化に伴う Fe との結合生成の影響で全てのスペクトルが O-O 結合のエネルギーよりもより高いエネルギー側にシフトしているこ

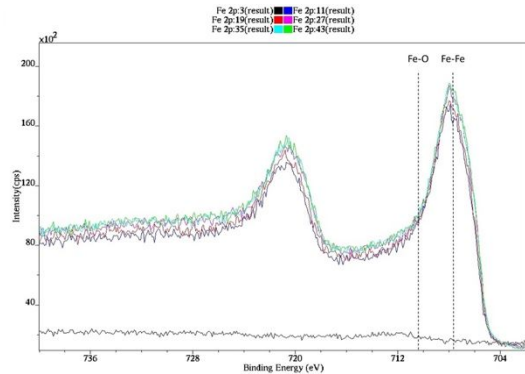


図6 N₂ 雰囲気切りくずの Fe2p スペクトル

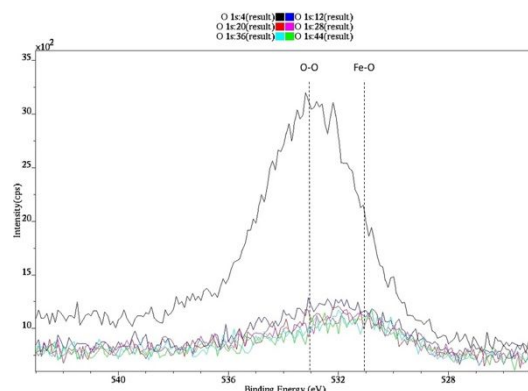


図7 N₂ 雰囲気切りくずの O1s スペクトル

とがわかる．また表面から 30nm までピーク強度が増加し，その後は一律に減少している．これらの結果から総合的に判断して，ドライ切削では切りくず新生面側の表面に 120～150nm の厚さの酸化膜が生じていることが明らかになった．

N_2 雰囲気切削で排出された切りくずについては，図 6 から切りくず最表面以外のスペクトルが全て Fe-Fe の位置に現れており，酸化物に起因するピークシフトは観測されなかった．また，エッチングを進めた深部の測定についてもスペクトル形状はほぼ一定であった．また図 7 からは最表面に 0-0 のピークが強く現れるものの，初期エッチング以降の内部については Fe-O のピークがわずかに現れていることが見て取れる．この結果から総合的に判断して， N_2 雰囲気切削では切りくず新生面側の酸化膜厚が 30nm 以下であることが明らかになった．またドライの場合とは異なり，切りくずの最表面には Fe2p のピークが観測されなかった．これは切削実験後に切りくず新生面が大気と接触してから XPS 分析を行ったことによって，切りくず表面に酸素が物理吸着したためだと考えられる．以上より切削中雨の雰囲気を大気から N_2 雰囲気とすることによって，切りくずの金属新生面の酸化膜厚が 120～150nm から 30nm 以下に抑制されていることが明らかになった．

(3) 還元雰囲気の切削プロセスへの影響

研究結果から予想されるドライ切削の酸化モデルを図 8 に， N_2 雰囲気切削の酸化モデル図を図 9 に示す．いずれの場合でも切削点では工具と被削材が密着するため雰囲気ガスの流入は無く酸化や窒化などの化学反応

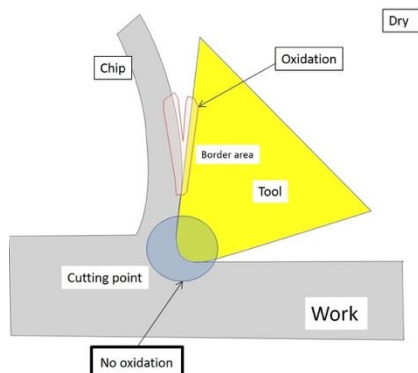


図 8 ドライ切削の表面生成モデル

が起きないと考えられる．ドライ切削では切

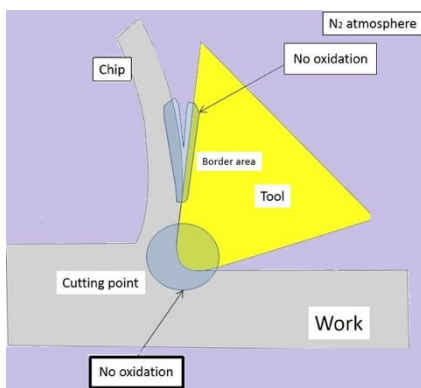


図 9 N_2 雰囲気切削の表面生成モデル

りくずが工具すくい面を離脱後に酸化が起こり，切りくずの新生面側の酸化膜厚は 120～150nm であることが明らかになった．一方で N_2 雰囲気切削では酸化を 30nm 以下に抑制する効果があることが明らかとなり，この酸化反応の差異によって N_2 雰囲気切削における工具摩耗の進行抑制効果が得られたと考えられる．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

是永宗佑，植松俊明，大澤洋文，伊藤芳典，静弘生，酒井克彦，チタン合金のエンドミル加工における工具逃げ面摩耗の予測に関する研究 -各種条件における切削抵抗と工具摩耗の関係-，精密工学会誌，査読有，83 巻，5 号，2017，439-444

〔学会発表〕(計 3 件)

是永宗佑，大澤洋文，植松俊明，伊藤芳典，静弘生，酒井克彦，切削抵抗解析によるチタン合金のエンドミル加工における条件選定手法の提案，精密工学会 2015 年度春季大会学術講演会，2015 年 3 月 17 日，東洋大学白山キャンパス，東京都文京区

石橋賢治，静弘生，酒井克彦，窒素雰囲気切削における工具摩耗低減効果の検証，精密工学会 2016 年度春季大会学術講演会，2016 年 3 月 15 日，東京理科大学野田キャンパス，千葉県野田市

Kenji Ishibashi, Hiroo Shizuka and Katsuhiko Sakai, Investigation of Tool Wear Reduction Mechanism on Nitrogen Atmosphere Cutting, International Conference on Machining, Materials and Mechanical Technologies 2016, 2016 年 10 月 9 日，松江テルサ，島根県松江市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 克彦 (SAKAI, Katsuhiko)
静岡大学工学部・准教授
研究者番号：8 0 2 6 2 8 5 6

(2) 研究分担者

静 弘生 (SHIZUKA, Hiroo)
静岡大学工学部・助教
研究者番号：8 0 5 5 2 5 7 0