

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560117  
 研究課題名 (和文) 酸化物の潤滑性を利用した溶着低減による環境対応型加工法の研究  
 研究課題名 (英文) Study on Environmental Friendly Machining by Reducing the Adhesion with a Lubrication of Oxide  
 研究代表者  
 臼杵 年 (USUKI HIROSHI)  
 島根大学・総合理工学部・教授  
 研究者番号：10176670

研究成果の概要：本研究の目標は、酸化に着目して酸化物あるいは酸化膜の持つ潤滑性により工具への被削材の溶着現象の低減、あるいは複合酸化物系保護膜を生成させ、工具と被削材の直接接触を防いで拡散摩耗を防止して工具寿命を延長する環境対応型加工法を提供することである。

本年度の研究では、医療用βチタン合金 (Ti-15Mo-5Zr-3Al) の高酸素雰囲気加工および酸化物系保護膜生成と摩耗機構、潤滑性コーティング工具の耐溶着性能について検討した。医療用βチタン合金は、これまで行ってきた Ti-6Al-4V やβCチタン合金 (Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr) と同様に高酸素雰囲気での加工が摩耗抑制に有効で、酸素濃度 28% 辺りが適正濃度であった。また昨年度行った潤滑性コーティング (TiBON) について、今年度は膜厚の影響について調査した。全体膜厚を 3 μm とし、TiBON と TiAlN 膜の厚さ比率を変更した工具を用意した。その結果、チタン合金およびインコネルどちらに対しても TiBON 膜厚の厚い工具が最も長い寿命を示し、特にインコネルに対しては、膜厚 2.5 μm で TiAlN の約 2 倍の寿命が得られた。一方、酸化物系保護膜の生成について、数種のコーティング工具と超硬 P 種で Ca 脱炭鋼を切削し、生成したベラーク膜と工具界面を所定の切削時間ごとに TEM 観察した。切削開始 10 秒段階でベラーク膜はすでに安定な状態に生成しており、ある時間までアモルファス上のベラークが工具との接触界面で反応層を生じることなく付着しており (これまで推測されていた状態とは異なる)、ある時間経過後、工具材料と間で拡散反応を生じて工具を摩耗させることがわかった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：機械工作・生産工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：切削加工, 環境対応, 酸化物, 溶着低減, チタン合金, インコネル, ベラーク,

## コーティング工具

### 1. 研究開始当初の背景

最近の加工分野では、高効率加工と自然環境の保全や作業環境の改善といった環境問題などに対応した加工技術が求められている。現在、小径ボールエンドミルによる実用的な高速ドライ形状加工が金型材料を中心に可能になっている。また時間当たりの油剤使用量が数ccから数十ccのMQL加工（ミスト加工）も数多く研究され、深穴ドリル加工やエンドミル加工、ホブ加工などで有益な成果が得られている。申請者もこれまで高速断続切削や雰囲気制御加工、酸化物系保護膜生成による工具摩耗抑制などドライ加工を中心に研究を行っている。その流れの中で酸化物を利用した加工法の提案を行っている。通常、酸化は工具摩耗を増大させる要因であり、最近の工具開発の中心であるコーティング工具でもコーティング材料の硬さとともに耐酸化温度の高さに注意が払われている。しかし酸化物にも潤滑性があるものや酸化膜の生成により溶着現象を軽減する場合もある。その一例がチタン合金である。チタン合金は活性の強い材料であるため、切削した場合工具への溶着が激しく工具寿命を低下させる。これを酸化の起こらない不活性ガス雰囲気中で切削すると切削により生成した新生面に酸化膜ができないうえにさらに溶着が激しく発生し、通常の鋼などとは逆に工具寿命を著しく短くしてしまう。チタン合金は、以前から軽量、高比強度、高耐食性という特性から航空・宇宙分野を中心に使用されてきたが、一般の生活用品からスポーツ、自動車、医療分野までその用途は拡大しつつある。工具メーカーもチタン合金の需要拡大を睨んでチタン合金加工用の新工具の開発を課題として取り組んでいる。

### 2. 研究の目的

本研究ではこの酸化に着目して酸化物あるいは酸化膜の持つ潤滑性により工具への被削材の溶着現象の低減、あるいは複合酸化物系保護膜を生成させ、工具と被削材の直接接触を防いで拡散摩耗を防止して工具寿命を延長する環境対応型加工法を提供することを目的としている。そのために2つの方法を考えている。1つは、これまで行ってきた高酸素雰囲気を利用した酸化物生成による溶着の低減である。酸化物生成による自己潤滑性を持つコーティング工具において確認を行うとともに、各種コーティング材料と被削材の組み合わせで摩擦摩耗試験も行い、切削実験と合わせて検討した。もう1つの方法は、後者である。通常、複合酸化物系保護膜（融点を下げ

るために、低融点の酸化物を複合させる必要がある）を工具摩耗面に選択的に付着させるためには、保護膜のもととなる元素を適量材料に含ませ、かつ酸素含有量が適当である（成分調整された）被削材を、TiCを含む工具を用いて、工具刃先温度が付着させる複合酸化物が適度の流動性を有する温度（融点より低い温度）となる切削条件で加工する必要がある。さらに切削時の加工雰囲気も影響する。この複合酸化物系保護膜をコーティング工具（PVD法ではターゲット材を用意できればどのような成分系のコーティング膜でも生成できる）に生成させ、被削材との直接接触を妨げて拡散摩耗を防止し、コーティングの耐摩耗性を長期間維持する加工を雰囲気を含めて検討した。そして界面での元素分布状態を調査し、どのような機構で保護膜が生成付着したのかの解明を試みた。

以上のことから、鉄系材料および非鉄系材料（チタン合金や超耐熱合金）の環境対応型加工化（ドライ加工化）を進める上での知見を得る。

### 3. 研究の方法

これまで行ってきた高酸素雰囲気を利用した酸化物生成による溶着の低減について前述の未確認現象を確認するとともに、各種コーティング材料と被削材の組み合わせで摩擦摩耗試験も行い、切削実験と合わせて検討した。また鉄系材料を対象とした複合酸化物系保護膜を生成させる方法では、この複合酸化物系保護膜をコーティング工具に生成させ、被削材との直接接触を妨げて拡散摩耗を防止し、コーティングの耐摩耗性を長期間維持する加工を雰囲気を含めて検討した。そして界面での元素分布状態を調査し、どのような機構で保護膜が生成付着したのかの解明を試みた。

### 4. 研究成果

本研究での検討項目に対して、得られた成果は以下の通りである。

(1) 高酸素雰囲気での酸化物生成による溶着低減の検討

① 医療用 V フリー β 型チタン合金 (Ti-15Mo-5Zr-3Al) の酸素富化加工

Ti-15Mo-5Zr-3Al は、これまで行ってきた Ti-6Al-4V や β C チタン合金 (Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr) と同様に高酸素雰囲気での加工が摩耗抑制に有効で、図 1 に示すように酸素濃度 28% 辺りが適正濃度である。過度の酸素濃度は、摩耗を増大させる。TiBON は、酸化も潤滑

性付与に関係するため工具そのものを酸化消費するので過度の高酸素濃度は好ましくない。これは、これまでの実験で未確認であった予測と合致する結果である。

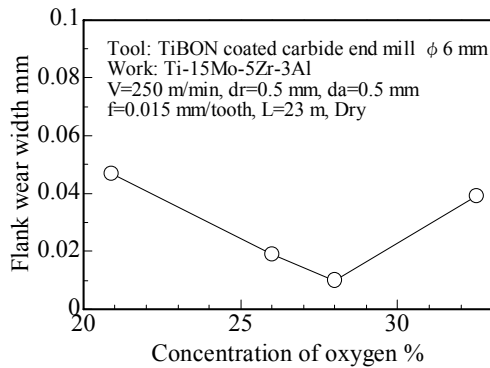
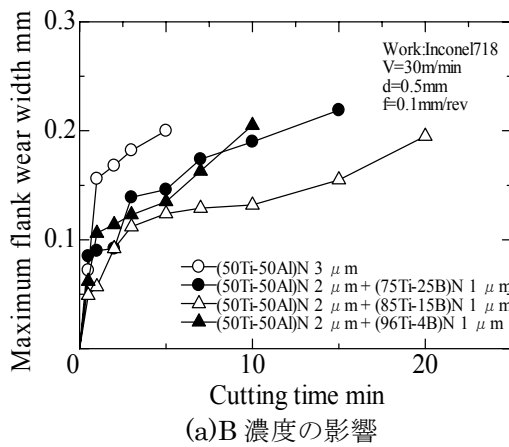


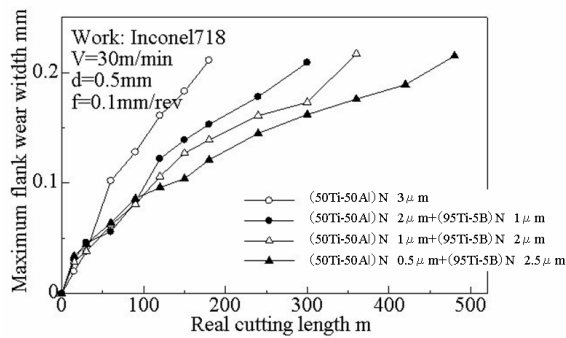
図1 酸素富化加工に酸素濃度と工具摩耗の関係

### ② 潤滑性コーティング工具の耐溶着性能

潤滑性コーティング (TiBON) について、B濃度と膜厚の影響について調査した。B濃度については、チタン合金に対して25%、インコネルに対して15%が最も切削性能が良く、インコネル718ではTiAlN膜に対して約3倍の寿命を示した。(図



(a) B濃度の影響



(b) TiBON膜の膜厚の影響

図2 インコネル718切削時の潤滑性コーティングの切削性能

2(a)) また膜厚については、全体膜厚を3  $\mu$ mとし、TiBONとTiAlN膜の厚さ比率を変更した工具を用意した。その結果、チタン合金およびインコネルどちらに対してもTiBON膜厚の厚い工具が最も長い寿命を示し、特にインコネルに対しては、膜厚2.5  $\mu$ mでTiAlNの約2倍の寿命が得られた。(図2(b)) 高酸素雰囲気ではさらに寿命延長効果が見られたこと(図3)から、このコーティング膜の潤滑機構としては、BNの固体潤滑と酸化物生成による潤滑作用の両方が働いていることがわかった。

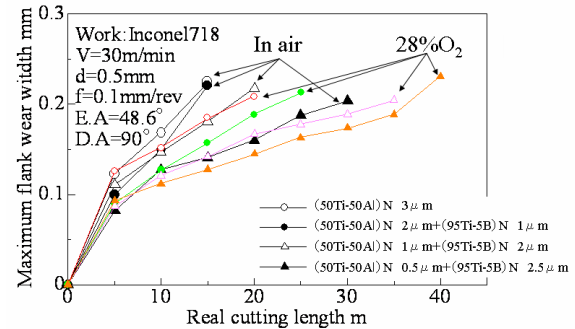


図3 インコネル718切削時におけるTiBONコーテッド工具の工具摩耗に及ぼす雰囲気酸素濃度の影響

### ③ 摩擦摩耗試験

Ti-6Al-4V,  $\beta$ Cチタン合金, インコネル718およびCa脱酸鋼とTiAlN, TiSiN, TiBONおよびAlCrNコーティング膜とに摩擦摩耗試験を大気中, 室温で行った。インコネル718を除く材料に対しては、コーティングの種類に関わらずほぼ同じ摩擦係数となったが、Ca脱酸鋼<Ti-6Al-4V<インコネル718< $\beta$ Cチタン合金の順で摩擦係数が高くなり、インコネル718ではコーティング間の差が顕著に現れ、TiBONが最も低い摩擦係数となった。これは、TiBONコーティングのB濃度等の効果が顕著に

表1 摩擦摩耗試験における摩擦係数

サンプル	条件	超硬ボールへのコート			
		TiAlN	TiSiN	TiBON	AlCrN
Ti-6Al-4V	RT	0.49	0.43	0.50	0.50
$\beta$ C-Ti	RT	0.69	0.71	0.72	0.70
S45C-Ca	RT	0.43	0.41	0.42	0.44
Inconel 718	RT	0.50	0.49	0.39	0.69

ボールオンディスク：摺動速度50mm/sec, 荷重2N, 摺動距離25m, 大気中無潤滑

現れた結果を裏付けている。

(2) 複合酸化物系保護膜生成による工具摩耗の抑制

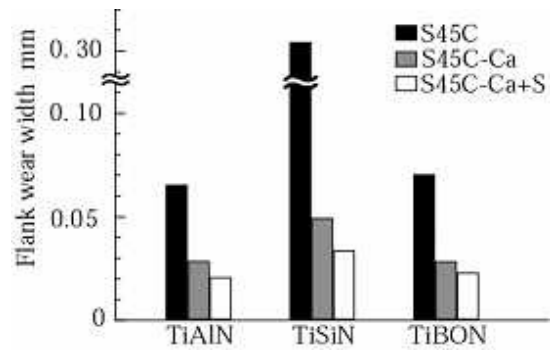
図4に、ベラーグ生成が確認されている成分調整した炭素鋼 (S45C-CaおよびS45C-Ca+S) と標準鋼の3種類の炭素鋼を各種コーテッド工具で5分間(切削距離1.5km)切削した後の工具逃げ面摩耗幅を示す。すべての工具においてS45Cを切削した工具の摩耗量が最も大きく、S45C-Ca、S45C-Ca+Sの順で小さくなっておりS45Cと成分調整材料との差は2倍以上である。図5に切削後のTiSiNの摩耗形態を示す。S45Cを切削した逃げ面に大きなダメージを受けているのがわかる。またすくい面にもクレータ摩耗が生じている。一方、成分調整材料を切削した工具にはクレータ摩耗は発生しなかった。

図6にTiSiNの面分析結果の一部を示す。S45Cを切削した工具のクレータ摩耗部では、コーティング成分であるSiがまったく検出されず、FeおよびOが検出され、コーティング膜が失われてFeの溶着が確認された。一方、S45C-Caを切削した工具には、すくい面の中盤から終端部に掛けてSi、Al、Ca、Oが同一箇所検出された。このことによりCa、Al、Si酸化物の混合物が付着していることが推測できる。S45C-Ca+Sを切削した工具には、すくい面全般にCaおよびSが同一箇所検出された。また、Alがすくい面先端と切削部終端部で検出された。

またこれらのコーティング成分に炭化物を導入した成分のコーティングを試作したが、同様にベラーグの生成を確認している。

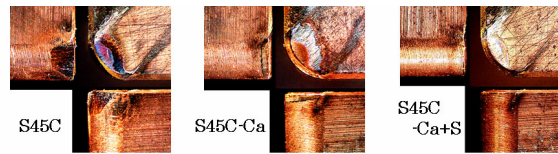
このようにTi系炭化物の有無に関わらずTi系窒化物のコーティング工具においてもベラーグの生成が可能であることがわかる。これは、Ti炭化物およびTi窒化物とTi酸化物の自由生成エネルギーを比べると、Ti酸化物が最も安定であるため、Ti炭化物およびTi窒化物が鉄鋼系材料中に生じる強酸化剤であるFeOやMnOによる酸化や大気中での直接酸化によって酸化物となり、このTi酸化物とベラーグと両方に対して親和性の高いFeOやMnOを接着剤として付着していると、これまでの実験結果およびこれまでに言われていることから想定される。なお、それぞれのコーティングについては、高温下でTi酸化物を生成することは報告されている。

そこで、酸化物系保護膜の生成について、数種のコーティング工具でCa脱酸鋼を切削し、生成したベラーグ膜と工具界面を所定の切削時間ごとにTEM観察した。図7に切削時間7分時点のコーティング膜と生成したベラーグとの界面をTEMおよびX線回折、EDSによる面分析結果を示す。切削開始10秒段階で



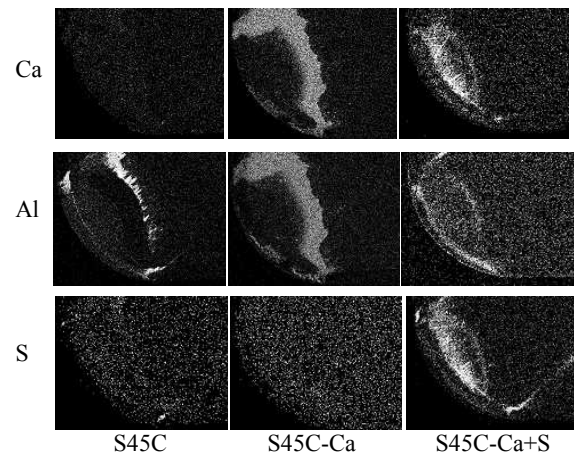
V=300m/min, d=0.5mm, f=0.2mm/rev, L=1.5km

図4 各種コーティング工具の逃げ面摩耗量比較



V=300m/min, d=0.5mm, f=0.2mm/rev, L=1.5km

図5 TiSiNコーティング工具の摩耗形態比較



Tool: TiSiN coated carbide

V=300m/min, d=0.5mm, f=0.2mm/rev, L=1.5km

図6 TiSiNコーティング工具の摩耗面の元素分布状況

ベラーグ膜はすでに安定な状態に生成しており、この時間までアモルファス状のベラーグが工具との接触界面で反応層を生じることなく付着している。(これまで推測されていた状態とは異なる)そして、図8は同じ条件で9分間切削したものであるが、界面付近のベラーグが結晶化して、工具材料と間で拡散反応を生じて工具を摩耗させることがわかった。これは界面で部分的に起こっていたが、この結晶化は、界面付近に融点の低いFeの酸化物が集中することが起点と考えられる。

また図9にTiBONコーティングで9

分間切削した時点のもので、TiSiN で起こっていた結晶化はまだ起こっていない。これは、このコーティングが低摩擦係数であるための切削温度が低いことが一因であると考えられる。

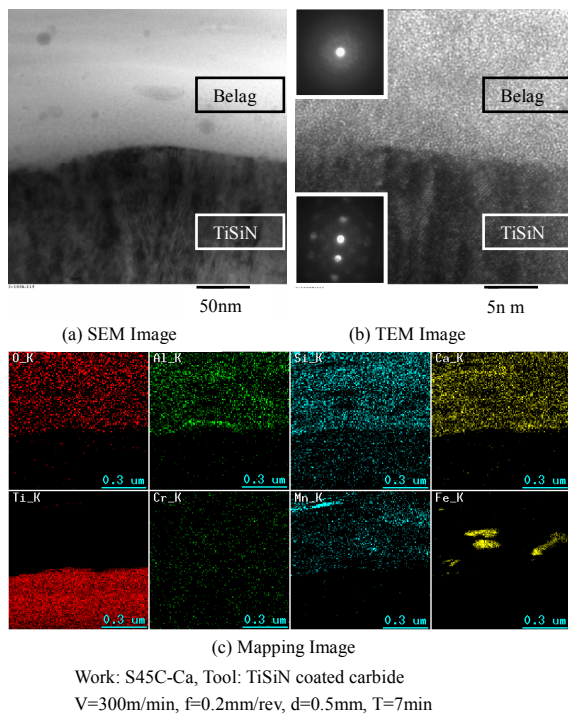


図 7 Belag とコーティング界面の分析結果

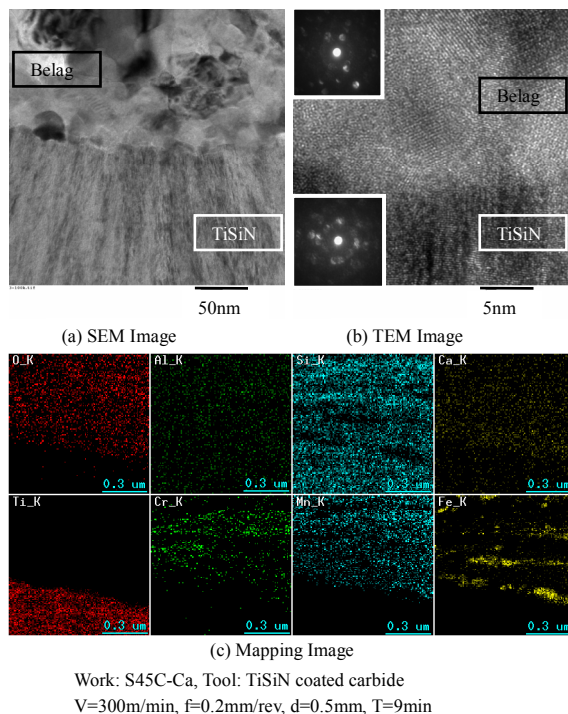
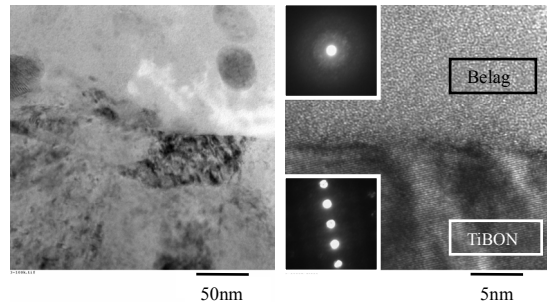


図 8 Belag とコーティング界面の分析結果



(a) SEM Image (b) TEM Image  
Work: S45C-Ca, Tool: TiSiN coated carbide  
V=300m/min, f=0.2mm/rev, d=0.5mm, T=9min

図 9 Belag とコーティング界面の分析結果

これらの知見は、これまで得られているあるいは予測されているものとは異なり、新たな展開が期待できる。

今回の研究成果から、以下の内容について継続的に検討を進めていく。

- (1) 潤滑性コーティング膜の耐溶着性向上の最適化
- (2) 酸化物系保護被膜の生成および摩耗機構
- (3) 医療用  $\beta$  チタン合金の加工特性
- (4) 高温摩擦摩耗試験

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① Masakazu Isaka, Hiroshi Usuki, Satoshi Sakamoto and Kazuyuki Kubota: Machining of Difficult-to-cut Material with a Lubricant Coated Tool, Progress of Machining Technology, Key Engineering Materials, Vol.407-408, p53-56, 2009, 査読有

[学会発表] (計 4 件)

① 長井則孝, 臼杵年, 多尾田有字, 坂本智, 中島省吾, 久保田和幸, 伊坂正和, 狩野隆, 山根八洲男: コーテッド工具における Belag の生成と工具摩耗, 精密工学会 2009 年度春季大会, 2009 年 3 月 11 日, 中央大学

② 長井 則孝, 臼杵年, 多尾田有字, 坂本智, 久保田 和幸, 伊坂 正和, 狩野 隆, 山根八洲男: 酸化物系保護膜 (Belag) の生成と工具摩耗に関する研究 (第 1 報) - 生成界面の TEM 観察 -, 精密工学会中国四国支部愛媛地方学術講演会, 2008 年 11 月 15 日, 愛媛大学

③ 臼杵年, 島本陽介, 坂本 智, 長見佳成, 久保田和幸: 潤滑性コーティング工具による難削材料の加工, ABTEC2008 (砥粒加工学会), 2008 年 9 月 3 日, 滋賀県立大学

- ④長見佳成, 臼杵 年, 坂本 智, 久保田和幸:  
潤滑性コーティング工具の切削性能(第1報)  
-B濃度が工具摩耗に及ぼす影響-, 精密工  
学会中国四国支部呉地方学術講演会,  
2007年11月16日, ポートピア呉

[その他]

ホームページ等

<http://zairyo3.riko.shimane-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

臼杵 年 (USUKI HIROSHI)

島根大学・総合理工学部・教授

研究者番号: 10176670

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: