

## チタン合金切削用コーティング膜の開発

佐伯 和彦\* 飯塚 一智\* 松本 泰治\* 五月女 英平\* 近藤 弘康\*  
井上 至\*\* 坂本 直紀\*\* 杉山 裕一\*\* 荒井 恵里\*\* 高久 魁\*\* 櫻井 英樹\*\*\* 藤原 眞二\*\*\*

Development of Hard Coating Films on Cutting Tool for Titanium Alloy  
Kazuhiko SAEKI, Kazutomo IIZUKA, Taiji MATSUMOTO, Hidehira SOUTOME, Hiroyasu KONDO,  
Itaru INOUE, Naoki SAKAMOTO, Yuichi SUGIYAMA, Eri ARAI, Kai TAKAKU,  
Hideki SAKURAI and Shinji FUJIWARA

チタン合金切削において、工具の長寿命化のために工具表面へ硬質セラミック膜のコーティングが行われている。本研究では、膜特性を向上したコーティング膜を開発し、開発膜のコーティングによる工具の切削性能の向上を図った。

開発した4種の膜ともに膜の高硬度化を実現するとともに、低摩擦係数、高靱性、基材に対する高い密着性を有していた。これらの開発膜をコーティングした工具を用いてチタン合金の切削試験を行った結果、4種の開発膜のうち、1種では、硬質セラミック膜がコーティングされた市販工具と比較して切削性能が10%向上した。他の2種の膜では市販工具と同等の切削性能を得ることができた。また、膜の硬さが大きいほど切削性能が高かったことから、膜の硬さが切削性能の向上に及ぼす重要な要因の一つであることが示唆された。

Key Words: チタン合金, 膜, 切削, 硬さ

### 1 はじめに

高強度と軽さを兼ね揃えたチタン合金品は、航空機向け部材として使用されている<sup>1)</sup>。また、生体に無害であることから人工関節など広い用途に使用されている<sup>2)</sup>。しかし、チタン合金は熱伝導率が小さいため切削時に高温になることや、化学反応性が高いなどの特性を有しているため、工具摩耗が生じやすい難切削材である。

金属材料の加工に使用される工具は、被削材との激しい接触しゅう動環境下で使用されるため、優れた耐摩耗性が要求されている。そのため、耐摩耗性の高い硬質セラミックス膜を工具表面にコーティングすることが行われている<sup>3),4)</sup>。チタン合金は難切削材であることから、一層優れた特性を有するコーティング膜が必要である。

本研究では、鉄系の被削材に主に使用されている従来膜の特性を向上した膜を開発し、この開発膜をコーティングしたエンドミル工具を用いてチタン合金切削性能の向上を図った。また、工具の再利用を検討するために、基材にコーティングされた開発膜の除膜方法についても検討した。

### 2 研究の方法

#### 2.1 コーティング膜

従来、鉄系切削用工具のコーティングに使用している硬質窒化物膜（従来膜）をベースとした4種のコーティング膜（ $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ）を開発した。膜の特性評価用のテストピースは、工具の材質と同じ超硬を用いた。

切削性能評価には、開発した膜をコーティングした工具を用いた。工具は $\phi 10\text{mm}$ で2枚刃の超硬エンドミルを用いた。

#### 2.2 コーティング膜の特性評価

膜の表面観察は走査型電子顕微鏡（日本電子(株) JSM-6010PLUS/LA）を用いた。表面粗さは、光干渉顕微鏡（テラーホブソン CCIMP）により測定した。摩擦特性は、ピンオンディスク型摩擦摩耗試験機（新東科学(株) HEIDON TYPE20）により評価した。測定にはアルミナボール $\phi 10\text{mm}$ を用い、荷重100g、回転半径2mm、周速度100mm/sで測定した。硬さは、マイクロビッカース硬さ試験機（株アカシ HV-114）とナノインデント（株エリオニクス ENT-1100a）により評価した。膜の密着性は、スクラッチ試験機（株レスカ CSR-1000）を用いて評価した。また、膜の密着性及び靱性をロックウェル固さ試験機（株アカシ HR522）を用いてスケールAで試験を行い、圧痕周辺の膜の剥離の様子を観察することで評価した。膜の耐熱性については、600℃及び800℃で電気炉中でテストピースを加熱処理後、膜の硬さをナノインデントを用いて測定

\*栃木県産業技術センター, \*\*株式会社アイ・シイ・エス,

\*\*\*株式会社オンワード技研

することにより評価した。

### 2. 3 切削性の評価

切削試験に用いる工具は、φ10mmの2枚刃超硬エンドミルに開発した4種の膜をコーティングした工具を用いた。比較として、上記で用いたコーティング無しの工具（ノンコート工具）とこれと同一の工具に硬質膜がコーティングされた市販工具（市販工具）についても切削試験を行った。切削試験の切削条件は表1のとおりとした。

表1 切削試験 加工条件

使用装置	縦型三軸マシニングセンタ YBM640 Ver. 3 (安田工業株)
被削材	チタン合金 Ti-6Al-4V (AMS 4911)
切削速度[m/min]	200
1 刃当たりの送り [mm/tooth]	0.1
半径方向切込み[mm]	0.1
軸方向切込み[mm]	3.0
切削液	なし

### 2. 4 コーティング膜の除膜

テストピースにコーティングされた膜の除膜は、ドライエッチングと湿式エッチングについて検討した。

ドライエッチングには高周波プラズマ CVD 装置（サムコ PD-10ST）を用いた。高周波出力 400W、アルゴンガス 20sccm、プロセス圧力 20Pa で1時間のエッチングを行った。試料にはβ膜がコーティングされたテストピースを用いた。除膜の評価はエッチング前後の膜の表面を電子顕微鏡により観察することにより行った。

湿式エッチングの除膜は、コーティングされたテストピースを 10M の水酸化ナトリウム水溶液中で 170℃、30 時間水熱処理することにより行った。

## 3 結果及び考察

### 3. 1 コーティング膜の特性評価

走査型電子顕微鏡(SEM)による膜の表面観察結果を図1に示した。αとβはほとんどドロップレットがなく、αは特に平滑

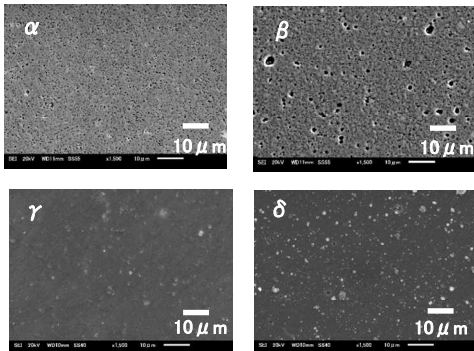


図1 膜表面のSEM観察結果

な表面を有している。また、γも平滑な膜を有しているが、δは平滑な面にドロップレットが多少みられる。

光干渉顕微鏡により膜の表面粗さを測定した結果を表2に示した。全ての膜において、RaとSaは小さく平滑な表面であることが確認できた。このうちαとγの表面粗さは特に小さく、SEM観察の結果（図1）とも一致している。

表2 膜の表面粗さ

膜種	Ra/nm	Sa/nm
α	14.9	15.8
β	34.5	32.6
γ	8.0	10.3
δ	22.2	32.0

表3に摩擦測定を行った結果を示した。全ての開発膜で摩擦係数が0.5未満と小さい値であった。特にγは摩擦係数が小さく、表面粗さが最も小さい（表2）ことが要因の一つとして考えられる。

表3 膜の摩擦係数

膜種	α	β	γ	δ
摩擦係数	0.3	0.3	0.1	0.4

表4にビッカース硬さ試験の結果を示した。表には従来膜の硬さも示した。なお、γは非常に硬い膜で、圧痕の確認が困難であるため測定は不可能であった。以上の結果、α、β及びγは従来膜と比較して硬さが向上した。

表4 ビッカース硬さ

膜種	硬さ(HV)
従来膜	2000*1
α	2920
β	2510
γ	3000以上*2
δ	2020

\*1：カタログ値

\*2：膜が硬く圧痕が確認できないため測定不可。

次に、ナノインデントを用いて硬さ試験を行った結果を表5に示した。4種の開発膜の硬さの傾向は、ビッカース硬さとおおよそ同じであった。ビッカース硬さ試験において、硬すぎるため測定不可能であるγは、64GPaと4種の膜の中で最も高い値であった。

スクラッチ試験機を用いて膜の密着性試験を行った結果を図2に示した。4種の開発膜のうちβは密着性が42Nと最も高かつ

た。一方 $\gamma$ は13Nと最も密着性が低いが、これはナノインデンテーション硬さが64GPaと非常に硬いことから、逆に膜が剥離し易くなったと推察される。

表5 ナノインデンテーション硬さ

膜種	硬さ (GPa)
$\alpha$	42
$\beta$	28
$\gamma$	64
$\delta$	35

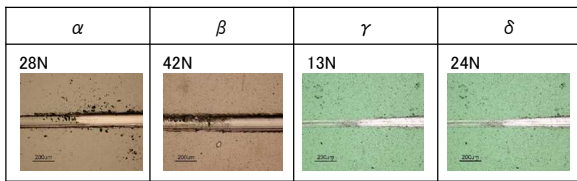


図2 スクラッチ試験機による密着性試験結果

耐熱性試験の結果を図3に示した。 $\alpha$ は、800℃でも切削用工具として実用上十分な硬さ20GPa以上の硬さを維持していた。ただし、 $\alpha$ 以外は20GPa以下となった。

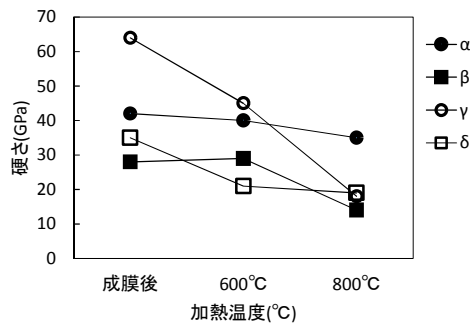


図3 膜の耐熱性試験結果

膜の密着性及び靱性について、ロックウェル試験後の圧痕の外観観察の結果をコーティング無しの超硬基材の結果と併せて図4示した。その結果、全ての膜において圧痕の周辺に、膜が剥離する様子は観察されなかった。なお、膜にひびがみられるが、これは基材自体のひびから生じている。これらのことから膜の超硬基材への密着性は高く靱性も高いことが確認できた。

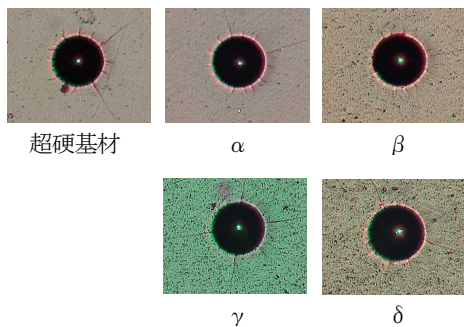


図4 ロックウェル試験後の圧痕の外観

### 3. 2 切削性の評価

切削性試験を行った結果を図5に示した。その結果、ノンコート工具、各コーティング工具ともに切削長300mまでゆっくりと摩耗が進行し、300m以降は急速に摩耗が進行した。切削性能において、摩耗幅50 $\mu$ mを寿命とした場合の各工具の工具寿命を表6に示した。開発膜 $\alpha$ 、 $\beta$ をコートした工具は市販工具と同等の切削性能を得ることができた。開発膜 $\gamma$ をコートした工具は、市販工具と比較して10%の向上が可能となった。開発膜 $\delta$ をコートした工具は市販工具より劣っていた。膜の硬さ試験(表4、5)において、膜の硬さが大きいほど切削性能が高いことから、膜の硬さが切削性能の向上に及ぼす重要な要因の一つであることが示唆された。

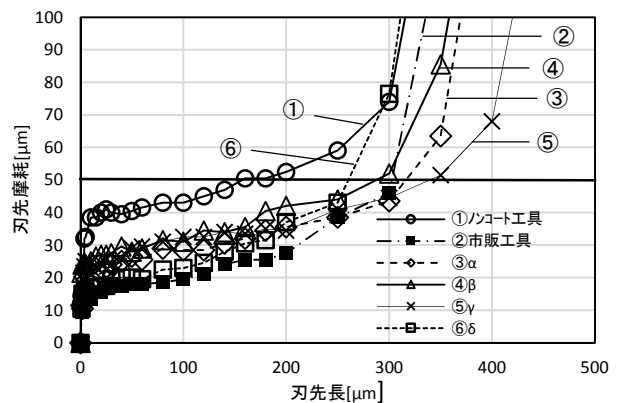


図5 切削試験結果

表6 各種工具の切削性能

工具種	ノンコート工具	市販工具	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
工具寿命 (m)	157	303	316	288	339	260

### 3. 3 コーティング膜の除膜

ドライエッチングについて、 $\beta$ 膜の除膜試験前後のSEM像を図6に示した。除膜は不均一におこることが分かった。これはエッチング前の膜の凹部がドライエッチングによるエッチングは不均一におこらず、クレーター状に先にエッチングされ、窪みが大きくなっていくためと考えられる。

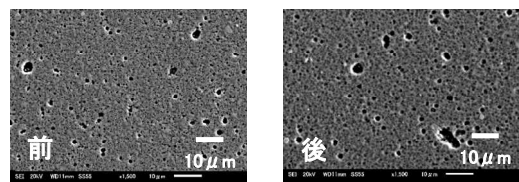


図6 ドライエッチング前後のSEM観察結果

次に湿式エッチング試験を行った前後のテストピース表面のSEM観察結果を図7に示した。除膜の確認は、エッチング後の膜の成分検出により判断した。

その結果、 $\beta$ と $\delta$ の除膜が可能となった。ただし、膜表面は、エッチングによる荒れが生じているため、再コーティング前には、研磨により表面を平滑化する必要がある。一方、 $\alpha$ と $\gamma$ は外観にほとんど変化が認められず、除膜はされなかった。このことから $\alpha$ と $\gamma$ は、耐食性が高い膜であることがわかった。

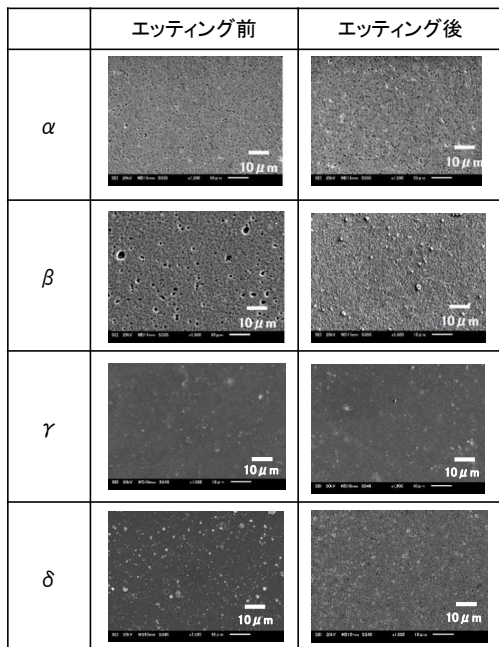


図7 膜のエッチング前後のSEM写真

#### 4 おわりに

チタン合金切削用工具のコーティング膜を開発するために、従来膜の特性の向上を図った。また、開発した膜をコーティングした工具を用いて切削試験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 4種の開発膜ともにその硬さが向上し、特に $\gamma$ 膜はナノインデンテーション硬さ64GPaと硬い膜が得られた。
- (2) 4種の開発膜ともに基材に対して高い密着性と靱性を有していた。
- (3)  $\alpha$ 膜は800℃の耐熱性を有していた。
- (4)  $\alpha$ 膜及び $\beta$ 膜をコーティングした工具は市販工具と同等の切削性能を有していた。
- (5)  $\gamma$ 膜をコーティングした工具は市販工具より10%向上した切削性能を有していた。
- (6)  $\beta$ 膜と $\delta$ 膜は湿式エッチングにより工具からの除膜が可能となった。

#### 参考文献

- 1) 山本兼司, 久次米進: "KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS", 59, No. 1, (2009)
- 2) 成島尚之, 軽金属, 51, 561(2005)
- 3) 村上良彦, 表面技術, 51, 243(2000)
- 4) 長谷川 裕之, 高温学会誌, 33, 78(2007)