

# 高耐熱 B-C-X 系硬質膜を用いた難削材の高効率精密加工

神崎 昌郎\*

## Precision Machining of Difficult-to-Cut Material by Coating B-C-X Hard Film with High Thermal Stability on Tool

by

Masao KOHZAKI

### Abstract

We improved the performance of cutting tools against titanium alloys by coating titanium-boron-carbon (Ti-B-C) thin films. We prepared the Ti-B-C thin films by DC magnetron sputtering using boron carbide ( $B_4C$ ) target and Ti target. First, deposition experiments were performed with silicon and tungsten carbide substrates for optimizing the coating conditions. The target power for Ti was varied from 0 to 200 W and  $CH_4$  gas flow rate from 0 to 80 sccm in the deposition process to understand the influences of titanium and carbon contents on nano-indentation hardness, frictional properties and adhesive strength of coatings. Then, at the optimized coating conditions, the Ti-B-C films were produced on tungsten carbide inserts and turning tests were carried out against titanium alloy with the coated tools. Chip produced became smooth by Ti-B-C coating, although obvious tool wear was not observed on the rake face of coated and uncoated tools. The cutting force of the coated tool was lower than that of the uncoated tool. Moreover, the surface roughness of the titanium alloy was improved by the Ti-B-C coating on the tool. As a result, the coating was found to improve cutting performance against titanium alloys.

**Keywords:** Cutting force, Ti-B-C thin film, DC magnetron sputtering, Titanium alloy

## 1. 緒 言

Ti 合金は比強度が高く、耐食性に優れることから、航空機エンジンや人工関節等に使用されている<sup>1-4)</sup>。しかし、Ti 合金は熱伝導率が低く、化学反応性が高い等の特性を有しているため、工具摩耗が生じやすく切削が困難な材料である<sup>5,6)</sup>。

そこで本研究では、切削工具に硬質薄膜を形成することで Ti 合金の切削性向上を検討した。Ti 合金の化学反応性および切削時の温度上昇を考慮し、形成する薄膜としてホウ素含有材料である Ti-B-C 薄膜に着目した。ホウ素含有材料は硬度が高く、 $1000^{\circ}C$ を超える高温においても化学的に安定であるなどの優れた特性を有しており<sup>7-9)</sup>、切削工具への応用に有効である。しかし、基板に対する密着力が低いことや摩擦係数が高いこと等の問題点がある。本実験では  $B_4C$  および Ti ターゲットを用いた二元スパッタリング法により Ti-B-C 薄膜を形成した。Ti ターゲットへの電力を増加させることで密着力向上を、また、薄膜形成過程で  $CH_4$  を導入することにより摩擦係数低減を目指した。優れた機械的特性を示す Ti-B-C 薄膜形成条件

を決定し、その条件下で工具にコーティングを施し、Ti 合金切削時の切削抵抗低減を検討した。

## 2. 実 験

### 2.1 Ti-B-C 薄膜の形成および評価方法

Ti-B-C 薄膜を  $B_4C$  および Ti ターゲットを使用した DC 二元マグネトロンスパッタリング法により形成した。基板には Si ウェハおよび WC を用いた。成膜時の基板温度を  $350^{\circ}C$ 、 $B_4C$  ターゲットへの電力を 250W とし、Ti ターゲットへの電力を 0W、100W、200W の 3 水準に設定した。また、 $CH_4$  ガスを導入する場合、その導入量を 0sccm から 80sccm の範囲で変化させ、Ti-B-C 薄膜の形成を行った。

得られた薄膜中の B、C および Ti の相対的比率 (Ti 含有量等) を XPS 分析により求めた。

Ti-B-C 薄膜の摩擦係数測定は、ボールオンディスク式摩擦摩耗試験機 (レスカ社製 FRP-2000) を用いて、室温・大気中・無潤滑下において行った。相手材として直径 5mm の SUS304 ボールを用い、試験荷重 0.5N、摩擦速度 10mm/sec、摩擦時間を 900 秒とした。

上述の方法により優れた機械的特性を示した薄膜の形成条件を選定し、その条件下で工具へ

\* 工学部機械工学科教授

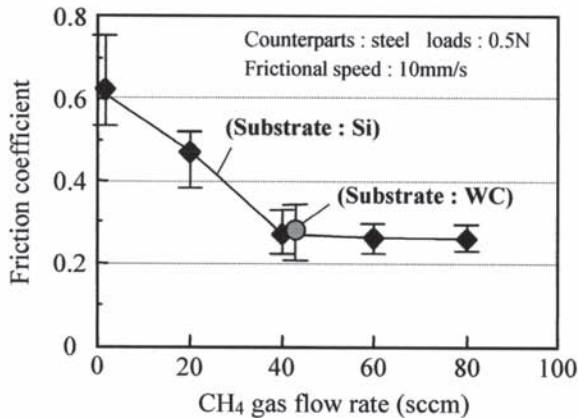


Fig.1 Friction coefficients of Ti-B-C films prepared with CH<sub>4</sub> introduction

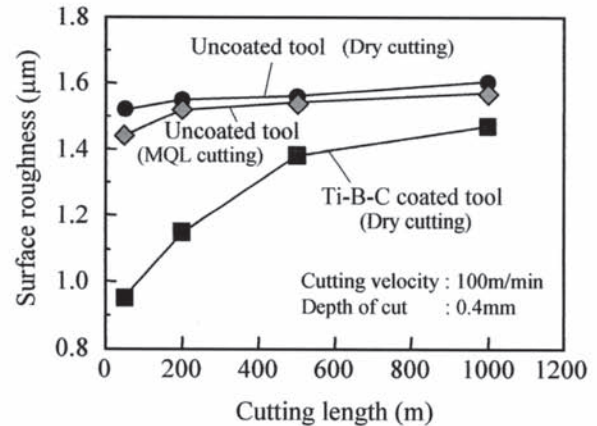


Fig.2 Surface roughness recorded when machining titanium alloy with uncoated tool and Ti-B-C coated tool

Ti-B-C 薄膜をコーティングした。

## 2.2 Ti 合金の切削加工実験

切削加工には精密高速旋盤（光畑製 L-5000D）を使用し、切削工具として超合金製スローアウェイチップ（三菱マテリアル製 CCET060204R-SN）を用いて旋削を行った。被削材には Ti 合金（Ti-6Al-4V）を用い、切削条件として切込量を 0.4mm、送り速度を 0.1mm/rev、切削速度を 100m/min、切削距離を 50~1000m に設定した。また、潤滑油を使用しない場合と、ミスト供給装置（フジ BC 技研製 ブルーベ FK-2-M-LLMB）により植物性潤滑油（同製 LB-1）を、毎時 12ml で供給した場合でそれぞれ切削を行った。

それぞれの工具および切削距離における被削材の表面粗さを触針式表面粗さ試験機（ミットヨ製 SJ301）により測定した。Ti 合金を 1000m 切削した後、工具の工具摩耗状態および切屑形態をビデオマイクロスコープ（キーエンス製 VH-5000）により観察した。また、切削中の切削抵抗を AST 式切削動力計（三保電機製 AST-TTM）により測定を行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 Ti-B-C 薄膜の機械的特性

ナノインデンテーション法により得られた B-C 薄膜の微小硬度は 30GPa と高硬度であった。Ti ターゲットへの電力を増加させることにより、微小硬度は低下したが、Ti ターゲットへの電力を 200W として形成した薄膜においても、微小硬度は 22GPa であり DLC 膜と同等以上の高硬度を示した。また、Ti ターゲットへの電力を増加させることで密着力は上昇した。ただし、Ti ターゲットへの電力を増加した場合においても摩擦係数に変化はなかった。そこで、摩擦係数低減を図るため、CH<sub>4</sub> ガスを導入し、Ti-B-C 薄膜の形成を行った。

摩擦係数の CH<sub>4</sub> ガス導入量依存性を Fig.1 に示

す。Ti-B-C 薄膜の摩擦係数は CH<sub>4</sub> ガス導入量増加に伴い低下する傾向にあり、CH<sub>4</sub> ガス導入量を 40sccm 以上として形成した Ti-B-C 薄膜の摩擦係数は 0.2~0.3 程度の低い値を示した (Fig.1 参照)。ただし、CH<sub>4</sub> ガス導入量を 40sccm 以上としても摩擦係数がさらに低下することはなかった。また、摩擦試験後に観察した薄膜の摩耗痕においても CH<sub>4</sub> ガスを導入していない薄膜の摩耗痕と比べ摩耗は減少し、耐摩耗性が向上していることが確認された。この摩擦係数低下および耐摩耗性向上は CH<sub>4</sub> ガス導入に伴う炭素含有量の増加が要因と考えられる。また、CH<sub>4</sub> ガス導入量を 40sccm として工具と同じ材種である WC 基板上に形成した薄膜においても摩擦係数は 0.2~0.3 程度の値を示した。上記の結果から、CH<sub>4</sub> ガスを導入しながら Ti-B-C 薄膜を工具へコーティングすることにより、工具表面の摩擦係数低減および耐摩耗性向上が可能と考えられる。

### 3.2 Ti-B-C コーテッド工具による Ti 合金切削

Fig.2 にノンコーテッド工具およびコーテッド工具を用いて切削した Ti 合金の表面粗さの変化を示す。ノンコーテッド工具を用いた場合、潤滑油を供給しても表面粗さに大きな違いは見られなかったのに対し、コーテッド工具を用いることにより、切削後の表面平滑性は向上した。しかし、切削距離を伸ばすに伴い表面粗さは増大する傾向にあった。これは、切削距離を伸ばすに伴い Ti-B-C 薄膜の剥離が進行したためと考えられる。

Fig.3 にノンコーテッド工具および Ti-B-C コーテッド工具を用いた Ti 合金切削時における工具刃先および切屑形態を示す。ノンコーテッド工具を用いて切削を行った場合、切削時に切屑は絡まりながら不規則に排出されたのに対し、コーテッド工具を用いた場合、切屑はカール状に排出され切屑排出性は良好であった。

ノンコーテッド工具および Ti-B-C コーテッド工具を用いた Ti 合金の切削において、切削距離

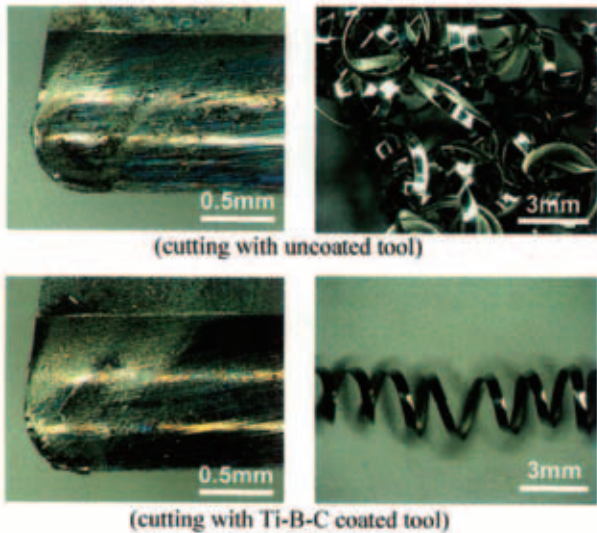


Fig.3 Tool wear on rake face and chip with uncoated tool and Ti-B-C coated tool (cutting velocity : 100 m/min, depth of cut : 0.4 mm, cutting length : 1000m)

50m 時の切削抵抗を Fig.4 に示す。ノンコーテッド工具を用いて切削した場合、潤滑油を供給することで切削抵抗は低くなった。また、Ti-B-C コーテッド工具を用いた場合、ドライ切削においてもノンコーテッド工具を用いた MQL 切削時の切削抵抗と同等であった。これより、工具へ Ti-B-C コーティングをすることにより、潤滑油を供給した場合と同等の効果が得られると考えられる。しかし、コーテッド工具を用いた場合、切削距離を伸ばすに伴い切削抵抗は大きくなり、ノンコーテッド工具を用いたドライ切削時の切削抵抗と同等となった。ノンコーテッド工具を用いた場合においては切削距離に関わらず切削抵抗に大きな変化はなかったことから、コーテッド工具を用いて切削を行った場合、切削距離 1000m において工具刃先に剥離が生じたため、切削抵抗が大きくなったと考えられる。

#### 4. 結 言

今回、Ti 添加および CH<sub>4</sub> ガス導入によるホウ素含有薄膜の密着力向上および摩擦係数低減を図り、最適な Ti-B-C 薄膜形成条件を検討した。また、最適化した Ti-B-C 薄膜形成条件により工具へコーティングを行い、コーテッド工具による Ti 合金の切削性向上について検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. Ti ターゲットへの電力増加により Ti-B-C 薄膜の密着力は上昇した。また、Ti ターゲットへの電力を増加した場合においても、微小硬度は DLC 膜と同等以上の高硬度を保った。
2. CH<sub>4</sub> ガスを導入することにより Ti-B-C 薄膜は低摩擦特性を示し、耐摩耗性向上も確認された。

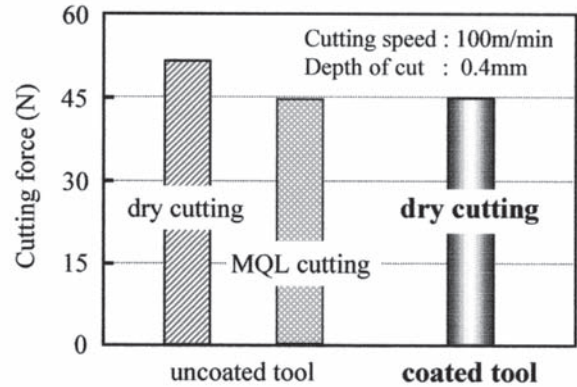


Fig.4 Cutting forces recorded when machining titanium alloy with uncoated tool and Ti-B-C coated tool

3. Ti-B-C コーテッド工具を用いることにより、ノンコーテッド工具を用いた場合と比べ、Ti 合金の表面平滑性は向上し、切削時の切屑排出性は良好となった。
4. 切削時の切削抵抗は Ti-B-C コーティングにより減少し、ドライ切削においてもノンコーテッド工具を用いた MQL 切削と同等であった。

#### 謝 辞

本研究は、2007 年度工学部研究教育補助金を受けて行われたものであります。御援助に対してここに深謝致します。

#### 参考文献

- 1) Y. Su, N. He, L. Li, X. L. Li, An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high-speed end milling of Ti-6Al-4V, *Wear*, 261, (2006), 760.
- 2) 狩野勝吉, 難削材・新素材の切削加工ハンドブック, 工業調査会, (2002), 287.
- 3) D. Nolan, S. W. Huang, V. Leskovsek, S. Braun, Sliding wear of titanium nitride thin films deposited on Ti-6Al-4V alloy by PVD and plasma nitriding processes, *Surface and Coatings Technology*, 200, (2006), 5698.
- 4) M. V. Ribeiro, M. R. V. Moreira, J. R. Ferreira, Optimization of titanium alloy (6Al-4V) machining, *International Journal of Materials Processing Technology*, 144, (2003), 458.
- 5) E. O. Ezugwu, R. B. Da Silva, J. Bonney, Á.R. Machado, Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti-6Al-4V alloy with high pressure coolant supplies, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, (2005), 1009.
- 6) K. A. Venugopal, S. Paul, A. B. Chattopadhyay, Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V

- alloy under cryogenic cooling, *Wear*, 262, (2006), 1071.
- 7) 神崎昌郎, マグネトロンスパッタリング法によるホウ素含有薄膜の創成とその機械的特性の評価, *精密工学会誌*, 72, (2006), 756.
- 8) F. Zhou, K. Adachi, K. Kato, *Friction and Wear Behavior of BCN Coatings Sliding against Ceramic and Steel Balls in Various Environments*, 261, *Wear*, (2006), 301.
- 9) 神崎昌郎, メタンガス導入による炭化ホウ素系スパッタ薄膜の摩擦特性向上トライボロジスト, 52, (2007), 303.