

# PVD コーティング工具による 難削材の高効率・高精度切削(第1報)\*

—UBMS 法による TiCN コーティングエンドミルを用いた SUS304 の高速乾式切削—

嶋村公二\*\* 細川 晃\*\* 上田隆司\*\* 政 誠一\*\*\*

High-efficiency and High-precision Machining of Difficult-to-machine Materials by PVD Coated Tools (1st Report)  
- Dry High-speed Milling of SUS304 with TiCN Coated End Mills Deposited by UBMS Method -

Koji SHIMAMURA, Akira HOSOKAWA, Takashi UEDA and Seiichi MASA

The UBMS (UnBalanced Magnetron Sputtering) method is applied to the coated end mills and some kinds of such tools are used in high-speed milling of SUS304. This coating film is designed to improve lubricating ability rather than heat resistance. TiCN film deposited by UBMS method (U-TiCN) has smooth surface and low coefficient of friction. XPS analysis reveals that the U-TiCN film includes many free carbons rather than carbide phases, and this structure acts as lubricant as well as thermoprotective film. Long tool life and good finished surface quality are obtained with U-TiCN coated end mills than standard commercially available coated end mills in high-speed side milling without coolant. An U-TiCN end mills having a low coefficient of friction suppress adhesion of workpiece material and overlap of chips to the cutting edge.

**Key words:** UBMS, TiCN coated end mill, free carbons, high-speed milling, difficult-to-machine materials, SUS304

## 1. 緒 言

機械部品の高性能化にとまない、難削材と称されるステンレス鋼、チタン合金およびニッケル基合金などの切削加工が急増している。これらの材料は低い熱伝導性、高い加工硬化性および工具との高い親和性などから切削工具の消耗が速く、所定の寸法精度や加工面粗さが得られない場合が多い。一方、近年、地球環境の負担を軽減するため、クーラントを使用しない乾式化が進められているが<sup>1)</sup>、切削油剤を使用した場合に比べて加工中の工具温度が上昇するため、工具が急激に消耗してしまう。そのため、種々のコーティング膜を工具表面に施すことが一般的になっているが、難削材を乾式で高効率・高精度切削することは困難な状況である。

現在、難削材切削用のエンドミルやフライスチップには、PVD(Physical Vapor Deposition)の一種であるアークイオンプレーティング法(以下、AIP 法)の TiAlN(窒化チタンアルミ)や AlCrN(窒化アルミクロム)を生成することが主流になっている。これらは、主として切削熱から工具母材を保護することを目的とした“耐熱性”重視のコーティングで、焼入れ鋼のハードミリング等に有効であることが報告されている<sup>2)</sup>。しかしながら、上述した難削材への適用については、十分満足できる結果は得られていない。

そこで本研究では、優れた平滑性と膜種によっては低い摩擦係数が期待できるアンバランスドマグネトロンスパッタ法(以下、UBMS 法)<sup>3)</sup>によるコーティング膜を切削工具に適用することを提案する。コーティング表面の平滑化によ

って低い摩擦係数を得ることができれば、切削工具に“潤滑性”が付与されることになり、難削材切削における工具摩耗の進行を抑制できる可能性がある。本報では、UBMS 法および AIP 法によって 5 種類のコーティング膜を作製し、膜の機械的性質を評価するとともに、これら 5 種類のコーティングエンドミルによる SUS304 の高速乾式切削を行った結果について報告する。

## 2. AIP 法および UBMS 法の原理

AIP 法および UBMS 法による金属窒化物膜の生成原理を図 1 に示す。AIP 法はアーク放電を利用して金属を蒸発させ、N<sub>2</sub> ガスと結合することによって金属窒化物を基板に生成する。ターゲット金属の 30~80%がイオン化され<sup>4)</sup>、容易に窒化物を生成できることから、切削工具や金型のコーティングに用いられることが多い。一方、UBMS 法は陰極である

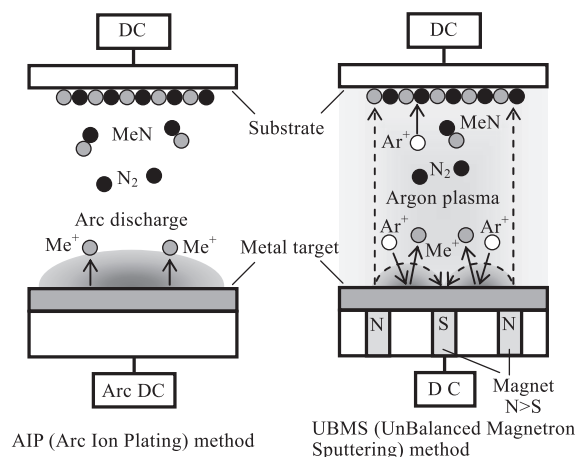


Fig.1 Two types of coating methods by PVD

\* 原稿受付 平成 22 年 3 月 12 日  
\*\* 正 会 員 金沢大学大学院 (金沢市角間町)  
\*\*\* 楠北熱 (富山市高木西 115)

Table 1 Five types of coating samples

Sample	Process	Structure (target thickness)
U-TiN	UBMS	TiN(3.0 $\mu$ m)
U-TiCN	UBMS	TiN(1.5 $\mu$ m)+TiCN(1.5 $\mu$ m)
A-TiN	AIP	TiN(3.0 $\mu$ m)
A-TiCN	AIP	TiN(1.5 $\mu$ m)+TiCN(1.5 $\mu$ m)
A-TiAlN	AIP	TiAlN(3.0 $\mu$ m)

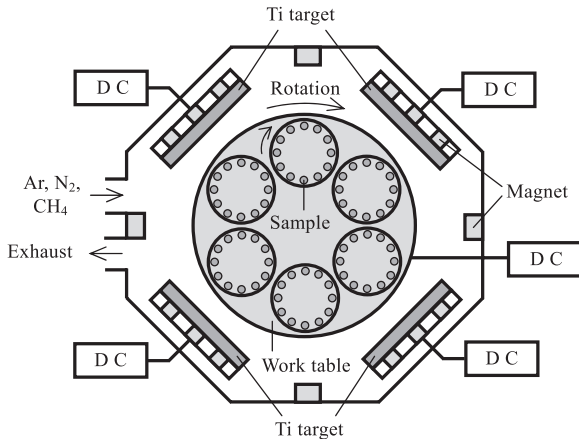


Fig.2 Mass-production type UBMS system for TiCN coating

金属ターゲットに Ar イオンを衝突させ、はじき出された金属が N<sub>2</sub> ガスと結合することによって金属窒化物を基板に生成する。AIP 法と比較すると生成速度が劣るものの、様々な組成のコーティング膜を平滑に生成できることから、高い精度が必要とされる冷間鍛造金型のコーティングに適している<sup>5)</sup>。

### 3. 実験方法

#### 3.1 コーティング膜の生成

本研究で使用したコーティング膜の製法および構造を表 1 に示す。UBMS 法による TiN (以下, U-TiN) および TiCN (以下, U-TiCN) の生成には、図 2 に示す量産型 UBMS 装置を用いた。生成手順は、まずチャンパー内を 4×10<sup>-3</sup>Pa まで真空引きし、加熱によるチャンパー内の不純物除去および Ar エッチングによる基材表面の酸化物除去を行った後、U-TiN の場合は Ar と N<sub>2</sub> の混合ガス、U-TiCN の場合は Ar, N<sub>2</sub> および CH<sub>4</sub> の混合ガス雰囲気中で Ti ターゲット (99.9%) をスパッタさせ、基材に 3 $\mu$ m のコーティング膜を生成させる。一方、AIP 法による TiN (以下, A-TiN), TiCN (以下, A-TiCN) および TiAlN (以下, A-TiAlN) の生成については、実績のある市販の量産型 AIP 装置を用いた。A-TiN の場合は N<sub>2</sub> ガス、A-TiCN の場合は N<sub>2</sub> と CH<sub>4</sub> の混合ガス雰囲気中で Ti ターゲット (99.9%) をアーク放電させ、基材に 3 $\mu$ m のコーティング膜を生成させる。A-TiAlN の場合は、N<sub>2</sub> ガス雰囲気中で TiAl ターゲット (99.9%) をアーク放電させ、基材に 3 $\mu$ m のコーティング膜を生成させる。なお、U-TiCN および A-TiCN の構造は、基材との密着性を確保するため TiN 層と TiCN 層の 2 層構造とするとともに、TiCN 層の C 含有率が一定 (20at%) になるよう、マスフローコントローラにて成膜中の CH<sub>4</sub> ガス流量を調整している。

コーティングに施すエンドミルは、実績のある PVD コーティング工具に使用されている微粒子超硬エンドミル ( $\phi$ 2mm, 2 枚刃, ねじれ角:30°) とし、同材種の基材で物性評価用試験片 (12.7mm×12.7mm×5mm, 鏡面仕上げ) を作製した。なお、コーティング後にエンドミル逃げ面のコーティング膜厚を測定した結果、すべて 3±0.5 $\mu$ m であった。

Table 2 Experimental conditions

Machine	Machining center (MORI-SEIKI NVD1500DCG)
Cutting tool	$\phi$ 2mm, 2-flute square end mill (helix angle:30°)
Workpiece	SUS304 (Hv200)
Cutting speed	$V = 50, 220$ (m/min)
Spindle rotation	$N = 8000, 35000$ (min <sup>-1</sup> )
Feed speed	$F = 80, 350$ (mm/min)
Feed per tooth	$f = 0.005$ mm/tooth
Axial depth of cut	$A_q = 1$ mm
Radial depth of cut	$R_q = 0.05$ mm
Cutting length	$L = 2600$ mm (26mm×100pass)
Cutting style	Up-cut without coolant

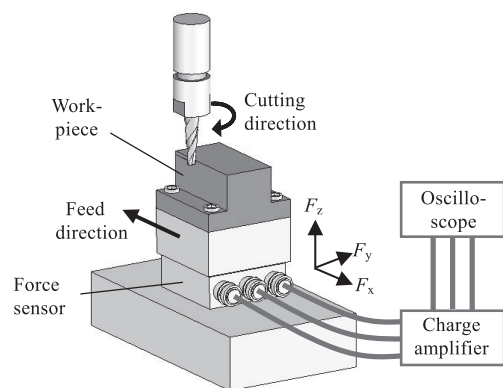


Fig.3 Experimental setup

#### 3.2 コーティング膜の機械的性質および構造解析

5 種類のコーティング膜を施した微粒子超硬試験片を用いて、コーティング膜の機械的性質を評価した。塑性変形硬さはナノインデントーター (榊フィッシャー・インストルメンツ製, H-100) で測定した。このときの押し込み深さがコーティング膜厚の 1/10 以下になるよう、押し込み荷重は 40mN とした。密着力の測定はスクラッチ試験機 (CSEM 製, レベテスト) を使用し、ダイヤモンド圧子でコーティング膜を 1~200 N の荷重範囲で押付け、剥離またはクラックが発生する荷重 (剥離臨界荷重) にて評価した。表面粗さは表面形状測定機を用いて測定した。摩擦摩耗特性の評価にはボールオンディスク型摩擦摩耗試験機 (CSEM 製, トライボメータ) を使用し、荷重 5N, ボール材種 SUJ2, 乾式で摩擦係数を測定した。また、2 種類の TiCN については両者の構造を比較するため、X 線光電子分光 (XPS: X-ray Photoelectron Spectroscopy) による表面分析を実施した。

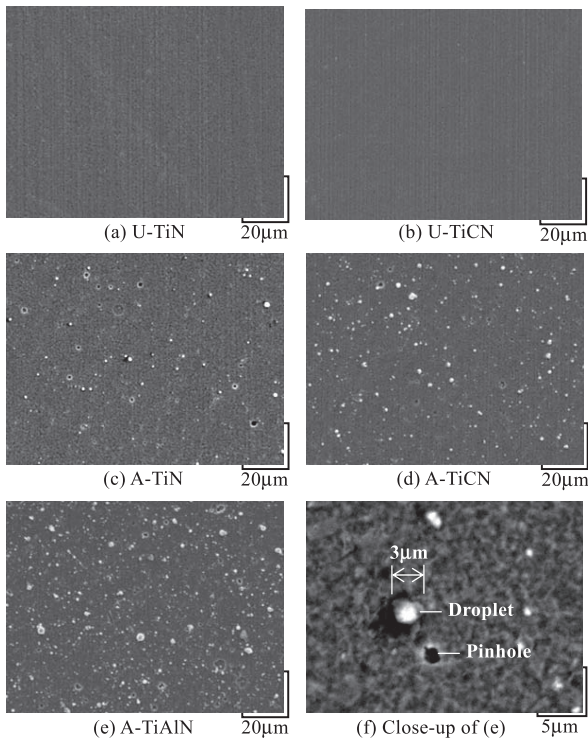
#### 3.3 切削試験

表 1 に示す 5 種類のコーティング膜を施した微粒子超硬エンドミルを用いて定切込み側面加工を実施した。切削試験には立型 3 軸マシニングセンタ (榊森精機製作所製, NVD1500DCG; 最高主軸回転数は 40000min<sup>-1</sup>) を用い、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 (Hv250) の乾式切削を行った。実験装置の概略を図 3 に、切削条件を表 2 に示す。1 刃あたりの送り速度は  $f=0.005$ mm に固定し、工具の熱負荷に最も影響する切削速度を標準速度  $V=50$ m/min と高速度  $V=220$ m/min の 2 条件で行っている。コーティング膜の特性は工具摩耗、切りくず生成形態、切削抵抗および仕上げ面性状にて評価した。工具摩耗は、走査電子顕微鏡によってエンドミル逃げ面の反射電子像を観察し、組成のコントラストからコーティング膜の摩耗幅を測定した。切りくず生成は顕微鏡による形態観察に加え、高速度カメラ (榊フォトロン製, SA5) によ

**Table 3** Mechanical properties of coating films

Sample	Hardness (GPa)	Scratch test Load (N)	Surface roughness $R_z$ ( $\mu\text{m}$ )*	Friction coefficient (vs. SUJ2)
U-TiN	35	142	0.08	0.62
U-TiCN	31	148	0.09	0.26
A-TiN	28	151	0.53	0.60
A-TiCN	35	116	0.63	0.61
A-TiAlN	37	140	0.69	0.62

\*Substrate:  $R_z=0.06\mu\text{m}$



**Fig.4** SEM images of coating surface

る排出状況の観測を行い評価した。切削抵抗の測定には、図3に示す圧電動力計(KISTLER 9251A)を組み込んだ3成分切削動力計を用い、 $F_x$ (主分力)および $F_y$ (背分力)を算出した。

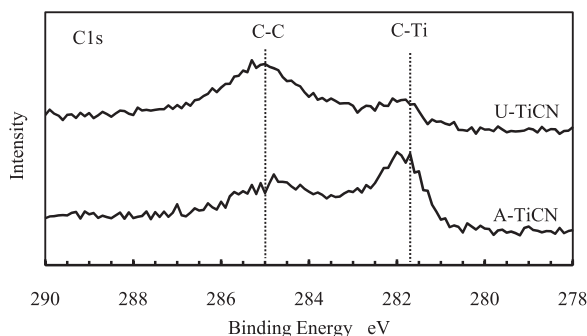
#### 4. 実験結果

##### 4.1 コーティング膜の機械的性質

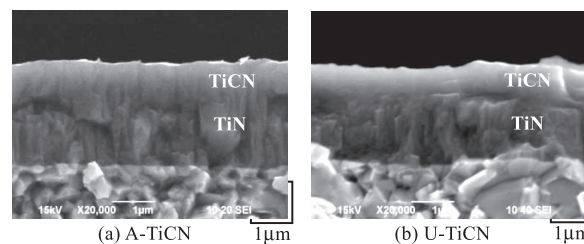
コーティング膜の機械的性質を表3に示す。UBMS法により作製したU-TiNおよびU-TiCNは、AIP法により作製したA-TiN、A-TiCNおよびA-TiAlNと同等の高い塑性変形硬さ31~35 GPaを有している。また、スクラッチ試験によって得られた剥離臨界荷重についても、142~148 NとAIP法のコーティング膜と同等の値を示している。一方、表面粗さ $R_z$ は、UBMS法のコーティング膜が0.08~0.09  $\mu\text{m}$ となっており、AIP法のコーティング膜(0.53~0.69  $\mu\text{m}$ )に比べ大幅に低い値を示した。微粒超硬試験片の表面粗さ $R_z$ は0.06  $\mu\text{m}$ であることから、UBMS法によるコーティング膜は基材の平滑性が保たれていることがわかる。図4にコーティング膜表面のSEM観察像を示すが、図4(c)~(e)にみるように、AIP法ではすべての膜でコーティング表面に突起物やピンホールなどの欠陥が多数観察されている。これらの突起物はアーク放電時にターゲット金属から放出された電気的に中性な溶滴が基板に付着したドロプレット<sup>9)</sup>と考えられる。図4(f)は図4(e)を拡大したものであるが、ドロプレットの直径は大きいもので3  $\mu\text{m}$ 程度であった。これに対して図4(a)および図4(b)のUBMS法では、

**Table 4** Carbon content and Ti/N ratio in TiCN coating films

Sample	C content (at%)	Ti/N atom ratio
U-TiCN	22.9	1.1
A-TiCN	21.8	1.4



**Fig.5** C1s XPS spectra of TiCN coating films



**Fig.6** Cross section SEM images of TiCN coating films

U-TiN および U-TiCN の両コーティング表面とも欠陥がほとんど観察されなかった。UBMS法はArイオンで金属ターゲットをたたき出すため金属が溶滴化せず、平滑な表面が得られるものと考えられる。

次に、摩擦摩耗試験の結果をみると、U-TiN とすべてのAIP法のコーティング膜の摩擦係数が0.60~0.62であったのに対し、U-TiCNのみは0.25と非常に小さい値を示していることがわかる。これは、コーティング膜へのCの添加が摩擦係数の低下に大きな影響を与えたためである。A-TiCNもCを含有するが、表面粗さ $R_z$ が0.63  $\mu\text{m}$ と大きいため、高い摩擦係数を示すものと考えられる。

##### 4.2 コーティング膜の構造

XPSで測定したTiCNのC含有量およびTi/N比率を表4に示す。表より、U-TiCNのC含有量(22.9at%)とA-TiCNのC含有量(21.8at%)は同程度であったにもかかわらず、U-TiCNのTi/N比率(1.1)はA-TiCNのTi/N比率(1.4)より低い値を示した。図5はTiCNのC1sスペクトルを示したものであり、スペクトルの281.7eVはC-Ti結合、285.0eVはC-C結合を表している。それぞれの膜種のピークエネルギーをみてもわかるように、U-TiCNはC-C結合が高く、A-TiCNはC-Ti結合が高くなっている。このことから、A-TiCNに含まれるCの多くはTiと結合しているが、U-TiCNに含まれるCはTiと結合せず、フリーのカーボンとして存在していることがわかる。UBMS法の場合、ターゲットから弾き出された金属は中性に近いため、イオンによってコーティング膜が形成されるAIP法に比べると金属粒子のエネルギーは小さい<sup>9)</sup>。そのため、TiとCの結合が抑制され、C-C結合のCが多く生成されたものと推測できる。TiCNの膜断面のSEM観察像を図6に示す。どちらのTiCNについても、TiN層とTiCN層の2層から構成されていることが確認できる。A-TiCNのTiCN層はTiN層と同様の柱状晶であるが、U-TiCNのTiCN層は結晶粒界が不明瞭で、柱状晶



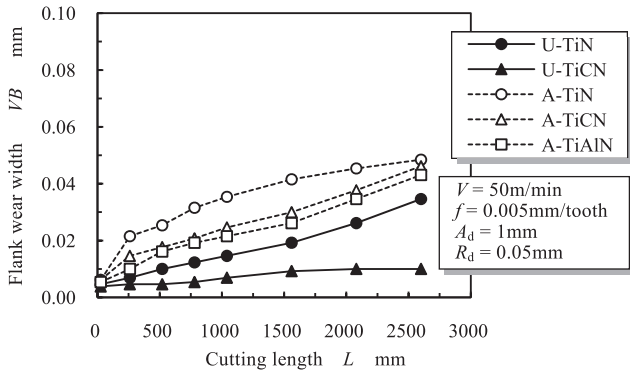


Fig.7 Relation between cutting length and flank wear width ( $V=50\text{m/min}$ )

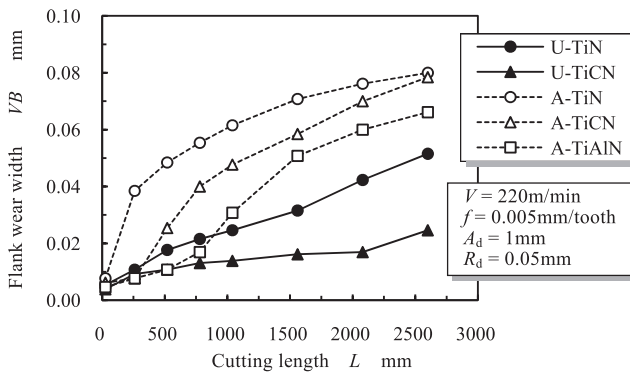


Fig.8 Relation between cutting length and flank wear width ( $V=220\text{m/min}$ )

が観察されない。石川らは AIP 法による TiSiN の生成において、非晶質 Si が TiSiN 柱状晶の成長を抑制し、結晶粒が微細化することを報告している<sup>7)</sup>。今回作製した U-TiCN においても、非晶質物質が含有することによって TiCN 柱状晶の成長が抑制されている可能性が高い。すなわち、U-TiCN の TiCN 層は、微細な TiCN 結晶粒と非晶質カーボンから構成されていることが推測できる。非晶質カーボンの含有が低い摩擦係数に少なからず影響しているものと考えられる。

### 4.3 工具摩耗

低切削速度  $V=50\text{m/min}$  および高切削速度  $V=220\text{m/min}$  における切削距離  $L$  とエンドミル逃げ面摩耗幅  $VB$  の関係をそれぞれ図 7 および図 8 に示す。 $L$  はテーブルの移動距離である。 $VB$  はコーティング膜の摩耗により工具母材が露出した部分の平均摩耗幅と定義した。いずれのコーティングエンドミルにおいても、 $L$  の増加とともに  $VB$  が増加しており、逃げ面の摩耗が進行していることがわかる。熱的負荷の大きい  $V=220\text{m/min}$  では  $V=50\text{m/min}$  より摩耗が大きく、約 2 倍の摩耗幅を示したものの、どちらの切削速度においても UBMS 法によるコーティング膜は AIP 法によるコーティング膜より小さい摩耗幅を示した。特に切削初期においては、AIP 法によるコーティング膜の摩耗進行が顕著であったのに対し、UBMS 法によるコーティング膜は摩耗進行が緩やかになっている。 $L=2600\text{mm}$  における  $VB$  をコーティング膜種ごとに比較すると、U-TiN (●) は A-TiN (○) より約 30% 小さい値を示し、U-TiCN (▲) は A-TiCN (△) より 70% 以上小さい値を示したことから、U-TiCN の  $VB$  が際立って小さいことがわかる。また、 $V=220\text{m/min}$  における U-TiCN の  $VB$  は、 $V=50\text{m/min}$  における他のコーティング膜の  $VB$  より小さい値であったことから、U-TiCN を施したエンドミルは寿命を短縮させることなく、高速乾式切削することが可能といえる。

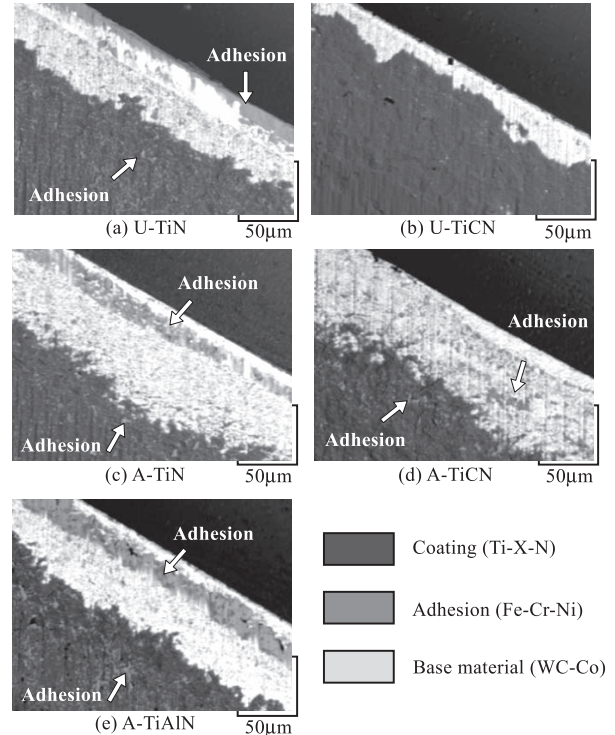


Fig.9 SEM-BEI image of flank face ( $V=220\text{m/min}$ ,  $L=2600\text{mm}$ )

切削試験後のエンドミル逃げ面の SEM 反射電子像を図 9 に示す。観察位置はエンドミル先端から 0.5mm の逃げ面部分である。観察像の白色部は微粒子超硬、薄いグレー部は被削材の凝着、濃いグレー部はコーティング膜を表す。観察像より、いずれのコーティングエンドミルについても刃先のコーティング膜が摩耗し、母材が露出していることがわかる。U-TiN、A-TiN、A-TiCN、A-TiCN および A-TiAlN は母材露出部分とコーティング膜に被削材の凝着が観察された。母材露出部分への凝着は、刃先の先端に多くみられたことから、摩耗の進行によってシャープエッジ形状が失われ凝着が発生したものと考えられる。また、コーティング膜への凝着は工具形状の影響とは考えにくいため、被削材に対するコーティング膜の摩擦特性が影響したものと考えられる。比較的小さい  $VB$  を示した U-TiN にも、AIP 法のコーティング膜と同様に被削材の凝着が発生しているため、コーティング膜の表面平滑性のみでは凝着抑制に大きな効果はないといえる。一方、圧倒的に小さい  $VB$  を示した U-TiCN は、被削材の凝着がほとんど発生していなかった。U-TiCN は安定して低い摩擦係数を示すことから、逃げ面へ被削材が凝着せず、摩耗進行が抑制されたものと考えられる。

### 4.4 仕上げ面

高切削速度  $V=220\text{m/min}$  で切削した被削材の仕上げ面形状および表面粗さ  $R_z$  を図 10 に示す。U-TiCN 以外の U-TiN、A-TiN、A-TiCN、A-TiCN および A-TiAlN の場合、被削材の仕上げ面は大きくむしれた様相を呈しており、良好な仕上げ面とは言い難い。表面粗さ  $R_z$  も  $36.56\sim 39.24\mu\text{m}$  を示している。西村らは  $V=188\text{m/min}$  で SUS304 を高速切削すると被削材表面にむしれのような傷が発生することを報告しており<sup>8)</sup>、この場合も同様の現象が発生しているものと考えられる。工具摩耗の評価において、逃げ面に被削材の凝着が観察されたことから考察すると、凝着物によって工具と被削材の親和性が高くなり、加工中に仕上げ面がむしられるものと考えられる。これに対して U-TiCN の場合は、

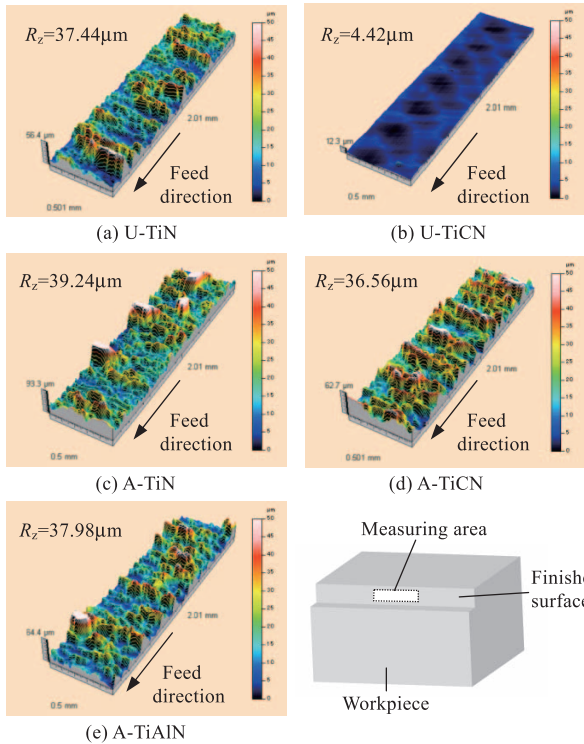


Fig.10 3D profiles of workpiece surface ( $V=220\text{m/min}$ ,  $L=2600\text{mm}$ )

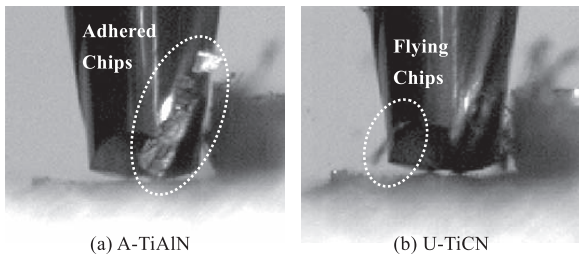


Fig.11 Chip formation scenes by high-speed camera ( $V=220\text{m/min}$ )

$R_z=4.42\mu\text{m}$  の平滑な仕上げ面が得られている (図 10(b)). これらの結果より、高速乾式切削においても U-TiCN を施したエンドミルは高い精度を実現することが可能であると言える。

#### 4.5 切りくず生成状態

切りくずの生成挙動を観測するため、高速度カメラによって切削状態を撮影した。高切削速度  $V=220\text{m/min}$  における切りくず排出の様子を図 11 に示す。図 11(a)にみられるように、A-TiAlN はすくい面に切りくずが付着し、回転毎に堆積していった。これに対して U-TiCN では切りくずがすくい面に付着せず、回転毎に飛散することから、切りくず離れに優れることがわかる。

$V=220\text{m/min}$  における切りくず形態を図 12 に示す。いずれの切りくずについても変色していないため、切削温度は比較的低いことが推測できる。U-TiN、A-TiN、A-TiCN、A-TiCN および A-TiAlN の場合、連なった形状の切りくずが観察された。これは、切りくずがすくい面に堆積した際に形成されたものと考えられる。また、U-TiN の場合にも AIP 法のコーティング膜と同形状の切りくずが観察されたことから、コーティング膜の表面平滑性は切りくず形状に大きく影響しないことがわかる。一方、U-TiCN の切りくずは非常に細く一つ一つが分散していることから、すくい面への切りくずの堆積はほとんど発生していないことがわかる。前項において明らかになった逃げ面での凝着抑制効果と同様に、すくい面においても低い摩擦係数によって被削材の凝着が抑制され、切り

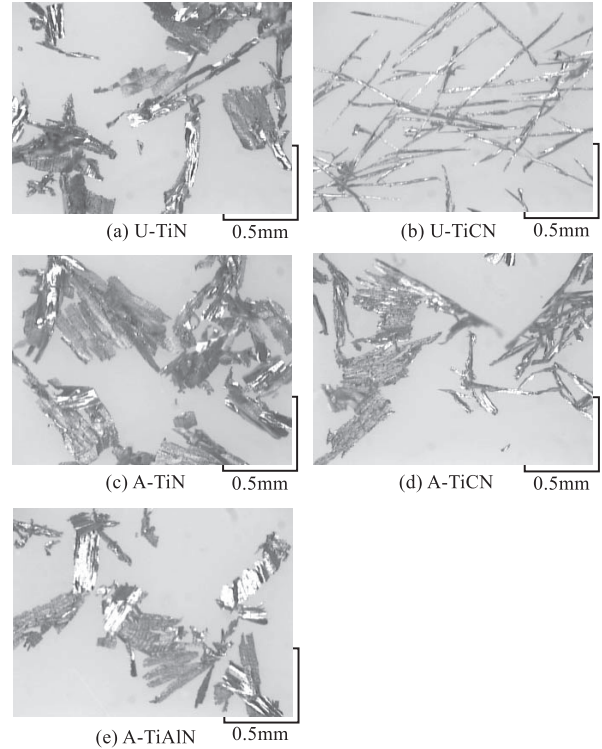


Fig.12 Cutting chip morphologies ( $V=220\text{m/min}$ ,  $L=2600\text{mm}$ )

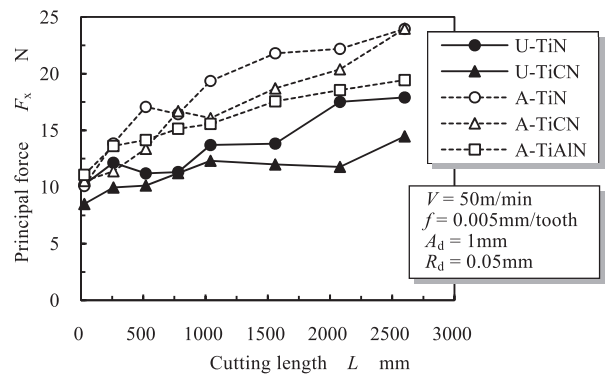


Fig.13 Relation between cutting length and principal force

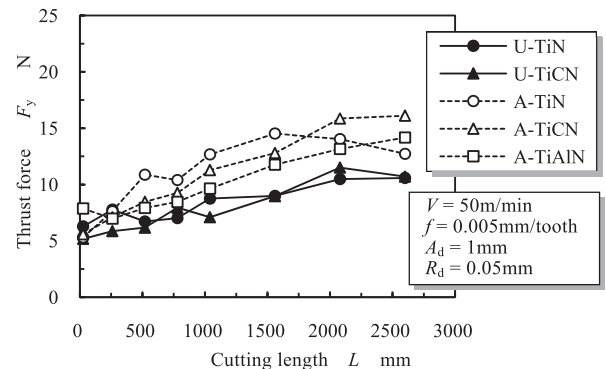


Fig.14 Relation between cutting length and thrust force

くずの堆積が防止できることが確認できた。

#### 4.6 切削抵抗

切削距離  $L$  と主分力  $F_x$  および背分力  $F_y$  の関係をそれぞれ図 13 および図 14 に示す。なお、高切削速度  $V=220\text{m/min}$  では圧電動力計の応答速度が追従できないため、標準的な切削速度  $V=50\text{m/min}$  のみで評価を行った。いずれのコーテ

ィング膜においても、 $L$  の増加とともに  $F_x$ 、 $F_y$  が増加している。特に AIP 法による A-TiN(○)、A-TiCN(△)、A-TiAlN(□) の場合に  $F_x$  の増加が顕著で、 $L=2600\text{mm}$  においては 19~24N まで上昇した。これに対して U-TiN(●) の  $F_x$  は切削初期に AIP 法のコーティング膜と同等の値を示すものの、 $L$  が増加すると AIP 法のコーティング膜より低くなった。U-TiN は比較的小さい  $VB$  を示すことから、刃先形状の鈍化が小さく、切削に要するエネルギーが抑制されたものと考えられる。また、U-TiCN(▲) の  $F_x$  は切削初期から最も低い値で推移し、 $L$  が増加した場合でも他のコーティングより大幅に低い値を示した。U-TiCN は低い摩擦係数によって被削材の凝着や切りくずの堆積が抑制されるため、切削初期から低い値を示したものと考えられる。さらに、 $L$  が増加しても  $VB$  の増加が著しく小さいことから、鋭利な刃先が維持され、他のコーティング膜より圧倒的に低い切削エネルギーで推移したものと考えられる。一方、 $F_y$  は  $F_x$  ほど顕著な違いはみられないが、やはり UBMS 法の 2 種類のコーティング工具(U-TiN、U-TiCN)が他のコーティング工具より低い値を示している。 $F_y$  は刃先が被削材に食い付く時のエネルギーが主体であるため、工具形状が大きく影響する。そのため、工具摩耗が進行していない切削初期では同等の値を示すが、切削距離が増加すると工具摩耗の大きい AIP 法のコーティング工具(A-TiN、A-TiCN、A-TiAlN)は刃先の鋭利さが失われ、高い値を示すものと考えられる。

## 5. 結 言

UBMS 法および AIP 法によって 5 種類のコーティング膜を作製し、膜特性の評価とコーティングエンドミルによる SUS304 の高速ドライ切削を行った。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) UBMS法によるコーティング膜は、AIP法のコーティング膜と同等の高い硬さと優れた密着性を示しながら、表面の突起物やピンホールが極めて少なく、表面平滑性に優れる。また、UBMS法によるTiCNは摩擦係数が低い。
- (2) XPS構造解析において、UBMS法によるTiCNはC-C結合のピークが高くなることから、フリーカーボンが多く生成されている。
- (3) 一般的な切削速度 $V=50\text{m/min}$ だけでなく熱的負荷の大きい高切削速度 $V=220\text{m/min}$ においても、UBMS法によるTiCNを施したエンドミルは、他のコーティングエンドミルより圧倒的に小さい逃げ面摩耗幅を示す。
- (4) 被削材のむしれが発生しやすい高切削速度 $V=220\text{m/min}$ においても、UBMS法によるTiCNの場合は平滑な仕上げ面が得られる。
- (5) UBMS法によるTiCNの場合、工具逃げ面への被削材の凝着や工具すくい面への切りくずの堆積が大幅に抑制される。
- (6) UBMS法によるTiCNを施したエンドミルは、切削初期から著しく低い切削抵抗を示す。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり、多大なご支援・ご協力をいただいたMTRF (Machine Tool Technologies Research Foundation: 財団法人工作機械技術研究財団)ならびに株式会社森精機製作所に深謝する。また、財団法人北陸産業活性化センター平成21年度R&D推進・研究助成事業からの援助に対し謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 安岡 学: 切削工具用コーティング膜の進歩, 精密工学会誌, **66**, 4 (2000) 527.
- 2) 岡田将人, 細川 晃, 田中隆太郎, 上田隆司: コーテッド工具のハードミリングにおける切削特性-コーテッド工具のコーティング膜材質と母材の影響-, 精密工学会誌, **75**, 8 (2009) 979.
- 3) 嶋村 他: UBM スパッタ法による(Ti,Mo)N 膜の特性, 表面技術協会第118回講演大会要旨集, (2008) 17.
- 4) 高原一樹, 藤井博文: AIP 法における装置技術の展開, 神戸製鋼技報, **50**, 2 (2000) 53
- 5) 嶋村 他: UBM スパッタ法による(Ti,Mo)N 膜の冷間鍛造金型への適用, 表面技術協会第118回講演大会要旨集, (2008) 18.
- 6) 赤理孝一郎: AIP/UBMS 法によるトライボロジ皮膜の自動車部品への適用, 神戸製鋼技報, **54**, 3 (2004) 77.
- 7) 石川剛史, 井上謙一: 切削工具用超高硬度 TiSiN 系コーティング材料の開発, 日立金属技報, **21**, (2005) 59.
- 8) 西村通喜, 佐野正明, 藤原和徳: 高精度加工に関する研究-難削材の切削条件に関する研究-, 山梨県工業技術センター研究報告, **17**, (2003) 102.