



# 切削工具用コーティング技術の進化 ～CVD法とPVD法～

Evolutional History of Coating Technologies for Cemented Carbide Inserts  
—Chemical Vapor Deposition and Physical Vapor Deposition

福井 治世  
Haruyo Fukui

コーティング超硬工具は他の工具材種と比較して耐摩耗性と耐欠損性のバランスに優れており、年々その出荷量は増加している。現在ではコーティング超硬工具の使用比率は70%を超えており、この傾向は今後も継続するものと考えている。当社は切削工具用コーティングの研究を始めて50年が経過し、その間、CVD、PVDコーティングそれぞれの技術革新を進めてきた。本報では、この50年の研究開発の歴史を振り返るとともに、最新の新材料に関して記述する。

Coated cemented carbide inserts have well-balanced wear resistance and chipping resistance compared with uncoated inserts made of other materials. Consequently, the shipment of coated cemented carbide inserts is increasing with each passing year. Coated cemented carbide inserts account for over 70% of all the inserts currently in use, and this trend seems to continue for many years to come. Sumitomo Electric Industries, Ltd. started research and development on coated materials 50 years ago, and has since been working hard to advance the innovation of chemical vapor deposition and physical vapor deposition coating technologies. This paper looks back at 50 years of history of coated materials development and introduces new materials.

キーワード：切削工具、コーティング超硬、CVD、PVD

## 1. 緒 言

超硬合金\*<sup>1</sup>(<sup>1</sup>)は主たる成分がWC(炭化タングステン) - Co(コバルト)などからなる、セラミックスと金属の複合材料である。この超硬合金の主成分であるタングステンは極めて重要な軍事戦略物質であることに加え、その生産地が中国に集中し価格が極めて不安定で世界の政治情勢次第で乱高下するため、タングステンを超硬合金に用いない脱タングステン、あるいは省タングステンが各超硬工具メーカーで盛んに研究されてきた。

その一つの成果として、超硬合金の表面にセラミックス薄膜を気相コーティングしたコーティング工具が開発された。コーティング工具は適切な使用条件下では母材となる超硬合金の強靭さとコーティング膜となるセラミックスの高耐熱性と高耐摩耗性を合わせ持った汎用性の高い工具となる。それゆえ、近年の高速・高送りの高能率切削加工において特に威力を発揮し、ユーザでの加工コスト低減に加え、機械部品の加工精度向上にも大きく貢献している。

本報では当社の50年にも及ぶコーティング技術に関する研究開発の歴史<sup>(2),(3)</sup>を振り返るとともに最新の技術革新、新材質、今後の展望に関して述べる。

## 2. 切削工具用気相コーティング技術

### 2-1 コーティング工具の製造方法と特徴

図1に刃先交換型チップの工具材種別生産割合(国内)と

出荷個数を示す(日本機械工具工業会統計)。このデータから、コーティング超硬工具は超硬、サーメットやセラミックスに比べると幅広い加工用途に適用され、この約25年間でその比率が40%から70%まで急増し、最も重要な工具材質となったことが理解できる。これは近年の切削工具の過酷な使用環境から考えると至極当然の結果とも言える。切削工具用コーティング薄膜としては、CVD(Chemical Vapor Deposition)法とPVD(Physical Vapor Deposition)法で成膜されるものがある。

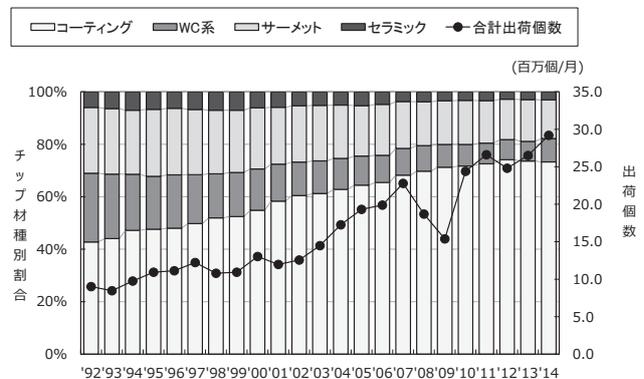


図1 刃先交換型チップの材種別出荷割合と出荷個数(日本)

CVD法はPVD法とならび、両者ともドライ成膜プロセスの一種であり、メッキなどウエットプロセスに対して環境負荷が低いことが大きな特徴である。化学的蒸着法と称されるCVD法にはプラズマCVD法、光CVD法など色々な方式があるが、超硬工具用に用いられる製法は1000℃近い温度で成膜される熱CVD法である。CVD法の特徴は、①均一な被覆と密着性が優れていること、②高純度で結晶性が高く多種多様な薄膜が成膜できること、③多層膜、厚膜が容易に得られることなどである。

一方、PVD法は物理的蒸着法と呼ばれ、金属材料のプラズマを用いるイオンプレーティング法とスパッタリング法が主要な成膜プロセスである。PVD法の大きな特徴として、①600℃以下の低温で密着性の良い薄膜が得られること、②非常に多種の基板材質や薄膜材料が選択できること、③合金や非平衡系の化合物薄膜の成膜が可能などなどが挙げられる。

表1に製造方法の違いによる特徴と主な用途をまとめる。いずれの方法においても薄膜には応力が残留するが、高温で成膜されるCVD法では、母材である超硬合金とセラミックス薄膜との熱膨張係数の差により引っ張り応力が残留し母材強度の低下が生じる。一方、PVD法では圧縮の応力が残留することからコーティング後の母材強度低下はほとんどない。その他、密着性や膜厚などにも違いがあり、各々の特徴を生かした用途に対して使い分けがなされている。

表1 CVD法とPVD法の特徴と主な用途

	CVD法 (化学蒸着法) Chemical Vapor Deposition	PVD法 (物理蒸着法) Physical Vapor Deposition
原理	化合物・単体のガスを原料とし、基板上で化学反応させてコーティングする	加熱・スパッタなどの物理的な作用により原料金属を蒸発・イオン化させて基板にコーティングする
膜質	TiC, TiN, TiCN, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiC, TiN, TiCN, TiAlN, CrN他
コーティング温度	800~1000℃	400~600℃
密着力	密着力は非常に高い	良いがCVDより劣る
応力	引っ張り応力 (1GPa程度)	圧縮応力 (-2GPa程度)
強度	基材より強度劣化あり、抗折力 <sup>※2</sup> で50~80%	基材の強度と同じ
最適使用膜厚	5~20μm	0.5~5μm
主な用途	厚膜を必要とする用途 (断熱)、耐摩耗性が必要とされる用途、粗加工を必要とする用途	シャープエッジを必要とする用途、機械・熱的衝撃が加わる用途、耐抗折強度を必要とする用途
	旋削加工・(一部フライス加工)	フライス切削・高精度加工・ドリル・エンドミル

## 2-2 コーティング工具の摩耗機構

コーティング膜厚は通常2~20μm前後であるが、工具摩耗はにげ面摩耗 ( $V_B$ )、すくい面摩耗 ( $K_T$ ) とともに50~1000μm以上と大きく、それらには大きな差異がある。この薄いコーティング膜が、このような大きな摩耗に対して効果を示す理由は図2のA、B、C、Dの点で摩耗幅の拡大を抑えているためである。特に、コーティング膜が有する①高硬度、②耐酸化抵抗、③鉄 (Fe) との凝着・反応の抑止、などの効力のためと考えられるが、中でもB、D点での超硬合金粒子の脱落抑制の効果が一番大きいと考えられている。

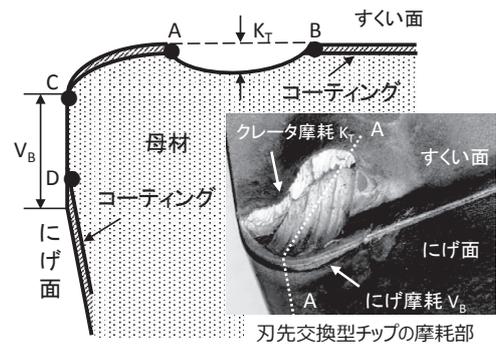
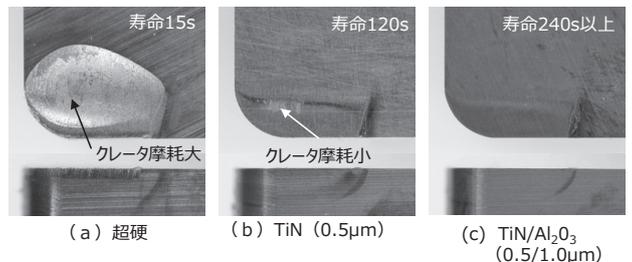


図2 刃先交換型チップ摩耗部のA-A断面図

写真1に合金鋼 (SCM435) の外径を切削速度  $V_c=250\text{m}/\text{min}$  で15秒切削した後の工具損傷を示す。この結果からわかるようにわずか数μmのコーティングで工具摩耗は抑制され、寿命は10倍以上となることがわかる。



【切削条件】被削材：SCM435、インサート：SNGA120408 (超硬K10)  $v_c=250\text{m}/\text{min}$ 、 $f=0.3\text{mm}/\text{rev}$ 、 $a_p=1.5\text{mm}$ 、wet、切削時間15s

写真1 合金鋼旋削加工時の工具摩耗の比較

## 3. CVDコーティング技術の変遷

### 3-1 CVDコーティング専用の超硬母材開発

セラミックス薄膜による切削工具用のコーティングは、1969年に当時の西ドイツKrupp社により熱CVD法によるTiC (炭化チタン) 膜を被覆した超硬合金製切削工具で開始され、その後、国内外の超硬工具メーカーの力を削ることとなった。先発するメーカーを凌駕する当社技術として母材に独自の表面強靱層を持った超硬合金を1976年に開発し、CVDコーティング工具の使用量が大きく伸びた。

これは写真2に示すように一般的にはCo (コバルト) 富化層 (脱β層) と言われ、当社ではエース層と呼ぶコーティング膜の直下、すなわち母材の表面10~30μmに形成させたWC-Co組成が特徴のものである。このエース層により亀裂の伝搬が阻止され、母材の耐衝撃強度が大きく向上し、軽切削から汎用切削、重切削領域まで使用可能となった。その後、更に高温特性に優れたジルコニウム入り超硬合金母材が開発され、1994年に鋼旋削用の汎用材種AC2000を発売した。

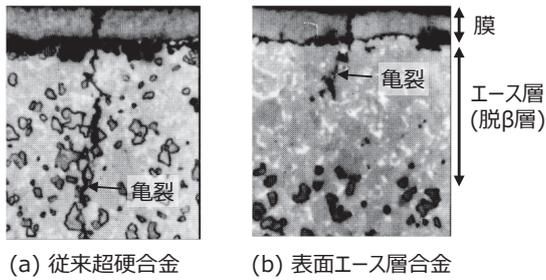


写真2 表面エース層合金による亀裂伝搬抑制

### 3-2 CVDコーティング技術開発

1970年代にまずTiN(窒化チタン)、TiCN(炭窒化チタン)膜などTi系化合物膜が実用化された後、1980年頃には $\kappa$ 型の $Al_2O_3$ (アルミナ)膜が登場し、当社ではTi系化合物膜と $Al_2O_3$ 膜の積層構造が特徴のエースコート®シリーズAC10やAC25が市場に浸透して今日の基本となっている<sup>(4)</sup>(第一世代)。しかしながら、写真3に示すようにTi系化合物膜は1000℃程度の温度(HT(High Temperature)-CVD法)で超硬合金母材上に被覆されるため、母材成分であるW、C、Coなどがコーティング薄膜中に拡散する結果、基材/コーティング膜界面に脆化層( $\eta$ 層:  $Co_3W_3C$ )が生成され、工具の耐欠損性に問題を起こす場合があった。

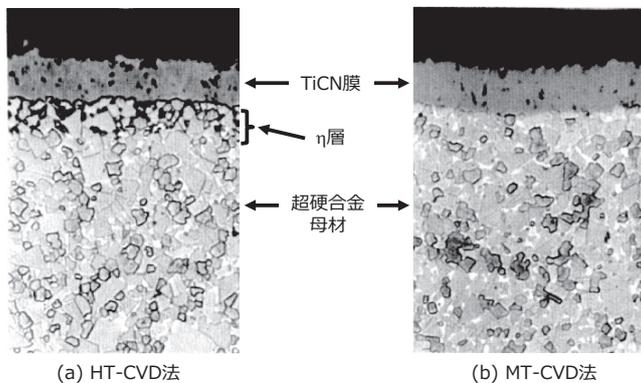


写真3 CVDコーティング法違いによる母材/膜界面での $\eta$ 層の比較

そこで、コーティング温度を100℃以上低下させたMT(Moderate Temperature)-CVD法を用いたTiCN膜や更に熱的に安定な $\alpha$ 型の $Al_2O_3$ 膜などが1990年代に開発され、脆化層の生成を大幅に低減することができ、上述のAC2000で高速・高能率加工にも対応できるようになった(第二世代)。近年では環境対策としてのドライ加工化、切削加工の高速化による生産性向上のニーズの高まりにより更なる高温使用領域での刃先の安定性が切削工具に求められることとなった。

すなわち、高い硬度、優れた耐チップング性、耐溶着性、高密着強度などの向上が必要となった。2006年にはCVDガス導入系部位・薄膜合成部位・排気系部位の各部位で従来に比べはるかに高い次元で機器を精密に制御し、加えて成膜条件の最適化を図ることでセラミックス薄膜の結晶組織の超微細化に成功し、高い硬度、優れた耐チップング性と15 $\mu$ mを超える厚膜化を実現した。加えて、均一な結晶組織にすることで、耐チップング性、耐溶着性、高密着強度を実現したスーパーFFコート®採用の鋼旋削用材種AC800Pシリーズを開発した<sup>(5)</sup>(第三世代)。

ここでTiCN系セラミックス薄膜の表面組織と断面組織観察した結果を表2に示す。このようにスーパーFFコート®は従来薄膜と比べ、均一で超平滑、超微細な結晶組織をもつセラミックス薄膜であることが判る。

以上のコーティング技術の進化をまとめると図3のようになり、工具の耐酸化性では約2倍、組織微細化では1/30に、結果、切削加工速度では約3倍の向上が図られた。

表2 従来セラミックス膜とスーパーFFコート®の走査型電子顕微鏡(SEM)組織観察の比較

	従来セラミック薄膜	スーパーFFコート®
表面組織		
断面組織		

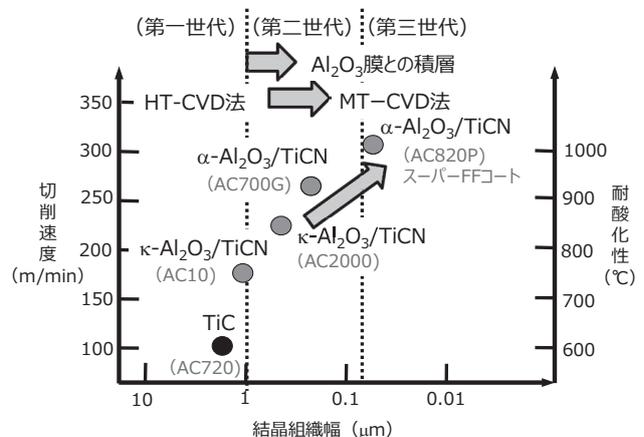


図3 CVDコーティングの進化の歴史

### 3-3 膜表面処理技術開発

過酷な切削環境下で使用されるセラミックス薄膜は、高硬度と耐チップング性に加えて、耐溶着性も必要である。昨今、セラミックス薄膜を施した後に薄膜の表面平滑化処理を行うことが多く、2006年にはステンレス旋削用材種AC600Mシリーズに、2014年にはAbsotech® Platinum技術<sup>(6)</sup>としてAC6030Mに適用されている。これは膜表面を平滑化することで被削材との摩擦を減少させることと、化学的に安定なアルミナ膜を最表面に露出させるのが目的である。

またCVD法では1000°C程度の高温で成膜が行われ、成膜終了から被覆超硬合金を取り出す際の冷却工程で超硬合金とセラミックス薄膜との熱膨張係数の違いにより引っ張り応力が残留、薄膜に微小なクラックが発生し、これが工具刃先のチップング・欠損を引き起こす原因の一つとなっている。このような場合、ショットピーニング<sup>\*3</sup>などによる表面処理はこの引張残留応力を緩和する効果があり、耐チップング性の向上に繋がる。これらの理由からCVDコーティングの付加工程技術として表面応力制御処理が採用されており、2011年に銑鉄旋削用材種AC400Kシリーズに、2012年にフライス用材種新ACP100/新ACK200や2014年のACM200にそれぞれ製品展開された。

## 4. PVDコーティング技術の変遷

### 4-1 世界初PVDコーティング工具

当社PVDコーティングの応用に関しては、1978年に高速度工具鋼（ハイス）の表面にTi化合物を電子ビーム式イオンプレーティング法でコーティングしたゴールドエース™GA8として世界に先駆け実用化したことに始まる。翌年には超硬母材に適用<sup>(7)</sup>し、エースコート®AC330を開発した（第一世代）。これは従来CVD法によるコーティング工具では困難とされていた鋼フライス切削を可能にしたことが画期的であった。これによりコーティング工具の適用領域が旋削からフライス加工まで広がった。

その後、更に製法の改良と膜や母材の開発を重ね、エンドミルやドリルへの展開が図られた。なかでも1982年に開発されたマルチドリルP型は独創的な刃型設計とPVD材種の適用で長年の夢であった鋼の高速・高能率穴あけ加工を可能にした画期的なオリジナル製品であり、業界における当社の超硬ドリルの基盤を確立した。

また、1990年にはサーメットへのPVD法の適用も図り、コートッドサーメットZシリーズを開発した。これはTi化合物（TiCN）を主体としたセラミックス薄膜をPVD法によりコーティングしたものでノンコートサーメットの2~6倍の耐摩耗性と強い膜密着力を持ち、仕上げ加工の高速化を実現した製品である。

### 4-2 ナノ超多層コーティング技術

PVDコーティング薄膜は成膜プロセスの進歩とともに発展を遂げており、TiN膜、TiCN膜の時代には電子ビーム式ある

いはホロカソード式など、るつぼ内で原料を融解、蒸発させるタイプのイオンプレーティング法が中心であった。1990年頃以降、アーキオンプレーティング法が登場して以来、このプロセスで形成されるTiAlN（窒化チタンアルミ）膜が主流となっている。

アーキオンプレーティング法では金属イオンまたはAr（アルゴン）イオンで基材表面をクリーニングした後にコーティングできることから、従来法に比べ密着力が格段に向上した点でも切削工具用コーティングプロセスとして優位性があった。また、このアーキオンプレーティング法では、導電性さえあればどのような組成の合金でも原料として用いることができ、加えてターゲット組成に近い値で薄膜組成が得られるという特徴を有することから材料選択の広いプロセスであるという点も大きな強みである。

当社では、3元系のTiAlN膜とほぼ同じ時期の1994年に写真4に示す通りアーキオンプレーティング法で成膜された1層当たりの膜厚がナノメートル（千分の1マイクロメートル）という極めて薄いTiN膜とAlN膜を交互に約2000層積層することで、cBN焼結体に匹敵する硬度と高い耐熱性を有するナノ超多層コーティング技術（ZXコート™）を開発<sup>(8)</sup>し、ドリル、エンドミル、フライス用刃先交換型工具（ACZ350）などにおいて製品化した（第二世代）。

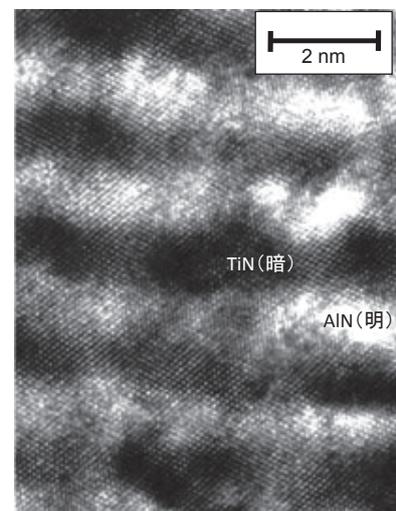
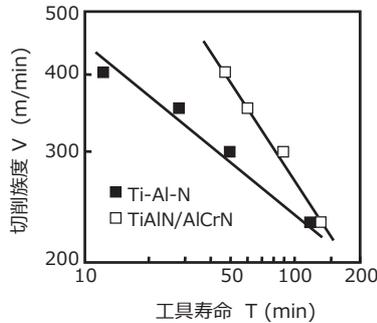


写真4 TiN/AlNナノ多層膜の透過電子顕微鏡（TEM）観察結果  
暗層：TiN膜、明層：AlN膜

このナノ超多層コーティング技術は当社オリジナル技術としてその後も進化を続け、最近では更にCr（クロム）やSi（シリコン）を添加し硬度、耐熱性を高めた、TiAlN/AlCrN ナノ超多層膜（スーパーZXコート™）<sup>(9)</sup>がフライス用材種ACP/ACKシリーズに適用され図4の通り高速切削で優位性を示し（第三世代）、AlTiSiN系ナノ超多層膜（ニューサー

パーZXコート™とAbsotech® Bronze) がステンレス加工用フライス用材種ACMシリーズとステンレス用旋削用材種AC6040M<sup>(6)</sup>にそれぞれ製品展開されている(第四世代)。

以上のコーティング技術の進化をまとめると図5のようになり、工具の硬度では約3倍、耐酸化性では約2倍に、結果、切削加工速度では約3倍の向上が図られた。



【切削条件】被削材：SCM435、カッタ：WGC4160R(φ160 mm)  
 インサート：SEET13T3AGSN-G  
 fz=0.3mm/t, ap=2mm, ae=150mm, DRY

図4 TiAlN/AlCrNナノ積層膜のV-T線図

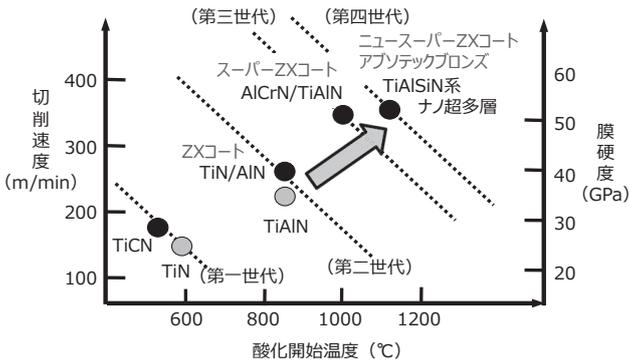
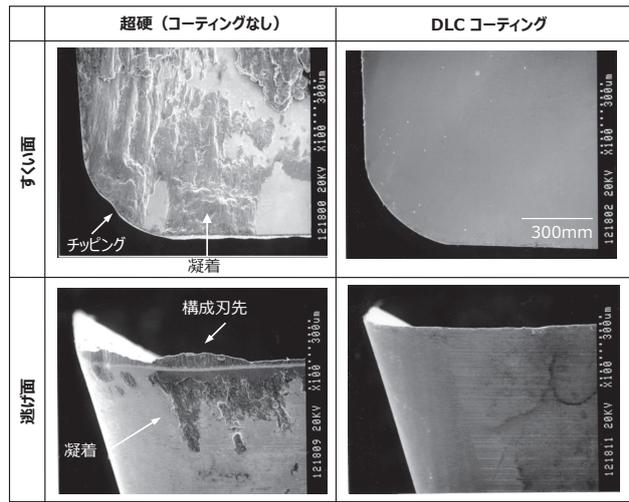


図5 PVDコーティング技術の進化の歴史

#### 4-2 トライボロジー※4性能を向上させる潤滑性コーティング技術

DLC (Diamond like Carbon) はダイヤモンドに似た三次元的な結合を持っており、極めて低い摩擦係数と、優れた耐摩耗性、摺動特性が得られることが特徴である。DLCがこのような特異的とも言える摺動特性を示す理由は、摺動時にDLCが黒鉛状物質や有機(炭化水素)物質に変化し、潤滑剤として作用するためであると考えられている。

このような摺動特性は、相手材が軟質金属の場合にも有効に作用し、極めて焼付きを起こしやすいアルミニウム合金や銅合金でさえ焼付かない(図6参照)。この効果を利用し、2002年にオーロラコート®としてアルミ加工用工具(刃先交



【切削条件】カッタ：WEM3032(φ32mm)、インサート：APET160504PDFR-S  
 被削材：ADC12、Vc=300m/min、fz=0.15mm/t、ap=ae=5mm、  
 切削長L=9m、DRY

図6 切削試験後の刃先の凝着状況

換型チップ、ドリル、エンドミルなど)として実用化した<sup>(10)</sup>。

2012年にはコーテッドサーメット工具において、鋼との反応性が低いコーティング材質(Brilliant Coat®)を開発しT1500Zとして製品化した<sup>(11)</sup>。Brilliant Coat®は、当社独自のPVDコーティング膜で、図7に示す通り摺動性が高く鋼との反応性が極めて低い薄膜を最表面に積層することで、仕上げ面品位を大幅に向上させることに成功した。

このように、従来コーティング薄膜に求められてきた高硬度、高耐酸化性に加えて、低摩擦、潤滑性と言ったトライボロジー特性向上も切削工具寿命安定化に対して重要な要素となってきている。

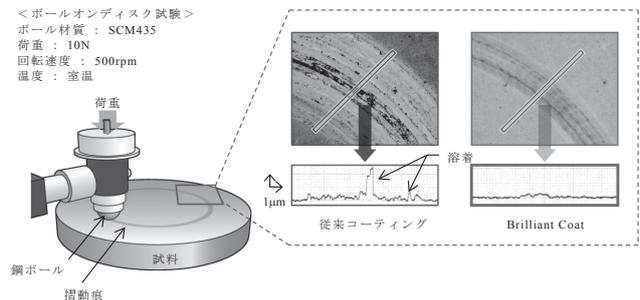


図7 コーティング耐溶着性比較

### 5. 今後の開発展望

CVDコーティング膜は現在でもなお、薄膜の結晶配向性、微細構造、およびTiCN膜とAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜の各膜厚の最適化

や厚膜化などにより切削性能の向上が図られてはいるが、熱CVD法による新規な薄膜材料は長らく登場していない。しかしながら、近年PVDコーティングでは汎用的となっているAlTiN膜の研究開発が始められており、その他の材質も含めて今後の新規コーティング膜開発の展開が期待されている。

PVDコーティング膜ではナノ結晶と非晶質コンポジット膜構造(ナノコンポジット構造)をもつnc-MeN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Me: Ti, W, V (バナジウム)) 膜などがダイヤモンドと同程度の硬度105 GPaに達するという報告<sup>(12)</sup>があり高硬度材料開発分野において大きな期待が持たれている。また、従来のPVD法では難しかった酸化物など非導電性薄膜(アルミナなど)の形成も高周波電源あるいはパルス電源を用いればマグネトロンスパッタリング法との組み合わせで成膜できるようになってきており、今後、工具への適用も可能になると考える。加えて、新規成膜プロセスであるHIPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering) 法が現在注目されている。本技術を用いれば、マグネトロンスパッタリング法の長所である平滑性に加え、アークイオンプレーティング法の特徴である高いイオン化率による良好な密着性と緻密な膜が得られることから次世代PVD法としての期待が大きい。

## 6. 結 言

1970年代のコーティング工具の実用化においてCVD法が専用超硬母材との組み合わせで先行したが、その後PVD法も1990年代のアークイオンプレーティング法の普及によって適用領域を拡大し、いずれも大きな進歩を遂げた。現在では使用用途にあった工具材料選択が益々重要となってきており、工具メーカーとしては新規のセラミックス薄膜材料やコーティングプロセス開発を進めて行くことで機械加工分野での市場ニーズ、すなわち環境対応、精度向上、高能率化、工具費低減(長寿命化)、難削化対応といった課題解決に貢献していきたい。

## 用語集

### ※1 超硬合金

主たる成分がWC (炭化タングステン) - Co (コバルト) などからなる、セラミックスと金属の複合材料。

### ※2 抗折力 (TRS)

Transverse Rupture Strength : 3点曲げ試験により求められる曲げ強度の指標。試験方法 : CIS 026 (JIS R 1601、ISO 3327)。

### ※3 ショットピーニング

小さな多数の球体物質を高速で被加工物表面に衝突させることで、塑性変形による加工硬化、圧縮残留応力の付与を図る処理。

### ※4 トライボロジー

潤滑、摩擦、摩耗、焼付きなど相対運動しながら互いに影響を及ぼしあう二つの表面の間におこる全ての現象を対象とする科学と技術。

## 参 考 文 献

- (1) 後藤、「イゲタロイ®の歴史」、SEIテクニカルレビュー第174号、1 (2009) pp.1
- (2) 「住友電工百年史」(1999) pp.298
- (3) 「研究部門史」(1996) pp.49
- (4) 中堂 ほか、「高靱性アルミナコートチップAC25の開発」、住友電気第128号、3 (1986) pp.100
- (5) 岡田 ほか、「新CVDコーティング「スーパーFFコート™」の開発と切削工具への適用」、SEIテクニカルレビュー第170号、1 (2007) pp.81
- (6) 竹下 ほか、「ステンレス鋼旋削加工用AC6030M/AC6040M」、SEIテクニカルレビュー第186号、1 (2015) pp.85
- (7) M. Kobayashi, et al., "TiN AND TiC COATING ON CEMENTED CARBIDES BY ION PLATING," Thin Solid Films, 54 (1978) pp.67
- (8) 瀬戸山 ほか、「TiN/AlN超格子膜の開発と切削工具への応用」、SEIテクニカルレビュー第146号、3 (1995) pp.92
- (9) 福井 ほか、「TiAlN/AlCrN超多層膜「スーパーZXコート™」の開発と切削工具への応用」、SEIテクニカルレビュー第169号、7 (2006) pp.60
- (10) 鍵谷 ほか、「DLCコーティング膜(オーロラコート®)の開発と工具への適用」、SEIテクニカルレビュー第161号、9 (2002) pp.107
- (11) 小池 ほか、「鋼加工用Brilliant Coat®サーメットT1500Z」、SEIテクニカルレビュー第184号、1 (2014) pp.88
- (12) S. Veprek, "The search for novel, superhard materials," J. Vac. Sci. Technol., A 17(5), Sep/Oct (1999) pp.2401

## 執 筆 者

福井 治世 : 住友電工ハードメタル(株)  
合金開発部 グループ長  
工学博士

