

マルチアーク PVD 法による コーティング技術

The Coating Technology of Multi-Arc PVD System

岡崎 尚 登*	緒 方 潔*
N. Okazaki	K. Ogata
平塚 治 男*	入 澤 一 彦*
H. Hiratsuka	K. Irisawa
宮崎 修*	大 谷 聡**
O. Miyazaki	S. Ohtani

Synopsis

The society of new century faces a lot of environmental problems and a coating technology is expected to become one solution in some of such case. Nissin Electric has been engaged in the development of coating system and process since 1984, and the new coating system that is applicable to the engineering applications such as tool, die, decoration and some environmental purpose is developed. In this report, the advantages of new Multi-Arc PVD system and industrial experiences are described.

1. ま え が き

金属の酸化物や窒化物（以下セラミックス）は極めて硬く、薄膜として工具や部品などの基材の表面に形成すると摩耗が抑えられる優れた材料である。代表的なセラミックス膜として窒化チタン（TiN）があげられ、金属であるチタン（Ti）の原子と窒素ガス（N₂）との反応により、真空チャンバ内で合成される。こうしたドライコーティング技術は、従来のウェットコーティング（メッキ）では形成できないセラミックス膜の形成技術として、早くから検討されている⁽¹⁾。

セラミックス膜の形成技術は、主に金属原子を発生さ

せる方法の違いにより、CVD（Chemical Vapor Deposition；化学的気相成膜法）と、PVD（Physical Vapor Deposition；物理的気相成膜法）に区別され、さらにPVDの中でスパッタリング法とイオンプレーティング法に分けられる（表1）。

CVDは、約800℃と極めて高い温度によりセラミックス膜と基材との間に強固な密着層を形成するので、剥離しにくく密着性に優れた良質なセラミックス膜を得ることが可能である。しかし、基材として超合金などの一部の耐熱性が高いものに限定されてしまい、工具や部品などに多く用いられる熱処理された合金鋼（SKH、SKD、SUJなど）には用いることができない。

表1 主なセラミックス膜形成技術

セラミックス膜の形成技術		金属原子の発生方法	成膜中の 基材温度
CVD		金属を含むガス（TiCl ₄ 等）をプラズマで分解して、金属原子を発生させる	約 800
PVD	スパッタリング	アルゴン等のイオンを固体金属に衝突させ、金属原子をはじき出す	200 以下
	イオンプレーティング	固体の金属を熱により蒸発させて、金属原子を発生させる	200～500

* システム事業部 ファインコーティング事業推進部

** 日本アイ・ティ・エフ㈱

スパッタリングは、逆に 200 以下で膜を形成でき、プラスチックまで含め多くの種類の基材に成膜できるが、密着性に乏しいために工具や部品などでは剥離をする場合が多く、用途が装飾や電子部品など一部に限定されてしまう。

イオンプレーティングは、基材の材質に応じた温度コントロールを行うことで基材を熱劣化させず、またボンバードメント処理（金属イオンをバイアス電源によって

引き寄せ、基材表面の洗浄や活性化を図る）を行うことでセラミックス膜と基材との間に強固な密着層を形成し密着性に優れた膜を形成でき、用途、基材とも適用範囲が広い優れた方法である。

このイオンプレーティングは、電子流を発生しその熱で固体金属を蒸発させて金属原子を得る方法であるが、電子流の発生方法によりさらに表 2 のように分類される。

表 2 電子流の発生によるイオンプレーティングの分類

方 式		電子流の発生，金属の蒸発方法	イオン化率
イオンプレーティング	アーク	アーク放電により，固体金属に電子流をあたえ，部分的に溶解・蒸発させる	高
	ホローカソード	ホローカソード放電を起こし電子を発生させ，ルツボ内の金属にあて，溶解・蒸発させる	中
	電子銃	フィラメントから電子を発生させ，ルツボ内の金属にあて，溶解・蒸発させる	低

これらの中で、アーク（陰極アーク放電）方式は金属蒸気のイオン化率が 80% 以上と高く⁽²⁾⁽³⁾、ボンバードメント処理が有効に働き、比較的低温（200～500）でも緻密性・密着性に優れた膜を高速で形成できることが最大の特長である。

当社はアークイオンプレーティング法のもつ密着性と適用性の広さに着目し、1984 年からコーティング技術の開発に取り組んできた。特に切削工具の寿命向上用途に適用し、マルチアーク PVD 装置として実用化し、成果を上げてきた。

近年、社会は環境問題に直面しており、エネルギー枯渇、水質汚濁、大気汚染など解決しなければならない課題は多い。今、環境への負荷を減らすための技術として

従来切削工具を中心として利用されてきたドライコーティングが注目されている。たとえば、工具の用途では、油煙や油流出の問題などから切削油を用いないで加工する、いわゆる無潤滑油切削のニーズが高まっている。同様に、金型においても離型材を不要にしたいとのニーズがある。自動車部品や機械部品では、摩擦抵抗を低減して低燃費化・省エネ化を図りたいという要求がある。また装飾分野においては、メッキ等の表面加工にとってかわるドライコーティング技術があれば有害な廃液を減らすことができる。

このように、ドライコーティング技術は環境に対する取り組みにも検討されるようになってきた。表 3 にこの技術が適用可能な用途の一例と、求められる性能を示す。

表 3 分野別のニーズおよび適用例

用 途	現状のニーズ	皮膜に求められる性能	使われる皮膜(例)	マルチアーク PVD 装置の適用例(*)
工 具	<ul style="list-style-type: none"> ●より寿命を長くしたい ●切削油を使用しないで使いたい 	<ul style="list-style-type: none"> ●摩耗しにくいこと ●高温に耐えること 	TiN TiCN TiAlN	ドリル、エンドミル、メタルソー、電線カッタ等
金 型	<ul style="list-style-type: none"> ●より寿命を長くしたい ●離型材を少なくまたは不要にしたい 	<ul style="list-style-type: none"> ●摩耗しにくいこと ●高温で安定であること 	TiCN CrN	鍛造金型、ゴム成形金型、鋳抜きピン等
自動車部品	<ul style="list-style-type: none"> ●摩擦抵抗を下げ、低燃費化したい ●排気ガスを減らしたい 	<ul style="list-style-type: none"> ●摩擦が小さいこと ●摩耗しにくいこと 	TiN CrN DLC	エンジン部品、カーエアコン部品、ポンプ部品等
機械部品	<ul style="list-style-type: none"> ●摩擦抵抗を下げ、省エネ化したい 	<ul style="list-style-type: none"> ●摩擦が小さいこと ●摩耗しにくいこと 	CrN DLC	コンプレッサ部品等
装 飾	<ul style="list-style-type: none"> ●有害な廃液の出るメッキをなくしたい ●塗装ではでない風合いを出したい 	<ul style="list-style-type: none"> ●見栄えが良いこと 	TiN CrN	時計、アクセサリ等

(* 現在、適用検討中のものも含む)

これらの要求を満足させるには、従来のアーク法によるコーティング技術では平滑性が悪く表面の凹凸が摩擦抵抗になるので、各用途の性能が十分に発揮できない。また、用途が工具中心から、自動車部品や機械部品などにも拡大するにつれて、材料や膜が用いられる環境が多様化し、それらに応じた高度な皮膜特性制御技術が必要となってきた。さらに自動車部品やメッキからの代替技術として低コスト化が要求され、コーティング技術としての高い生産性や、無人で運転できる装置が求められている。

そこで当社では、早くから研究に着手したコーティング技術についてそれらをさらに改良し、表3のニーズに応えることができるコーティング技術を開発した。本報告では、この技術を適用した装置（マルチアーク PVD 装置）を製作しこれらの要求性能について検証した結果を述べる。

2. アークイオンプレーティング法によるコーティング技術の原理

基本的な装置構成を図1に示す。蒸発させたい金属を陰極とし、真空チャンバを陽極として、この間に直流電

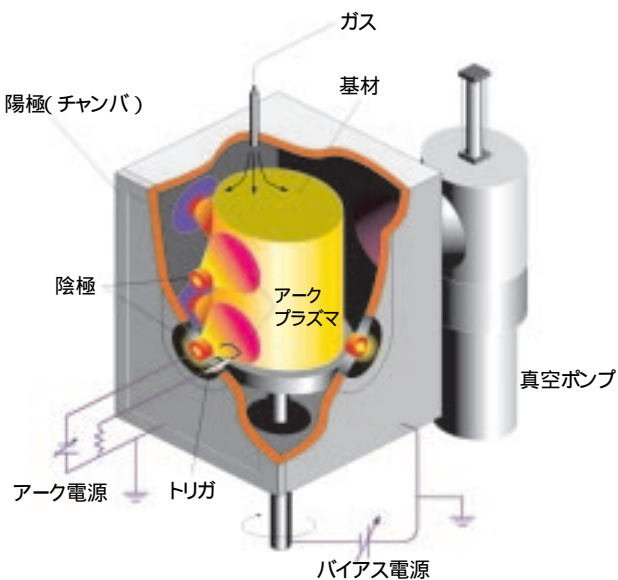


図1 装置構成図

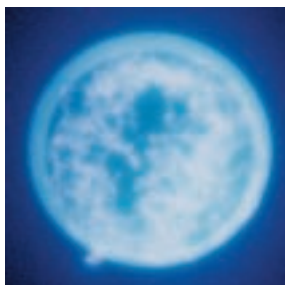


図2 陰極でのアークスポット

圧をアーク電源から印加して真空中でアーク放電を発生させ、金属を蒸発させプラズマを発生させる。基材には負のバイアス電圧を印加して、プラズマ中の金属イオンを基材に向けて引き寄せコーティングを行う。TiN等の窒化物や炭化物をコーティングする場合には窒素ガスや炭化水素ガスを導入し、また金属膜（純チタン膜など）の場合にはArなどの不活性ガスを導入する。基材と膜との密着性を向上させるため、基材を加熱するヒータを設置している。通常、多数の基材を一度に処理するため、陰極は複数個配して生産性を高めている。図2にアーク放電中の陰極表面の様子を示す。陰極上の輝点（アークスポット）が、陰極表面を高速で移動し、アークスポットから金属が蒸発する。

真空アーク放電は、金属のイオン化率が高いため比較的低温（200～500℃）でも緻密性・密着性に優れた膜を高速で形成できることが最大の特長と言える。図3にこの方法でコーティングした炭窒化チタン（TiCN）膜のX線回折分析結果を示す。結果から、111面に強く配向した結晶性の良い皮膜が形成できていることがわかる。

主として金属イオンによる成膜であるので、負にバイアスされた3次元的形状の基材に対しても、付きまわりが良い利点がある。また蒸発させたい陰極金属の表面から液体のプールを作らずに直接蒸発させるので、蒸発物の純度が高く、るつぼなどの容器を必要としない。蒸発源を上下、左右に自在に多数配置することができ、大形・大量の基材にも容易に対応可能で、複雑な形をした基材にも均一にコーティングできるなどの長所を持っている。さらにアーク放電は他のグロー放電等と比較して、原理的に放電電圧が低く（Tiを陰極とした場合約-20V）、この特性から蒸発源の絶縁など装置構成上の問題が起こりにくい利点も有している。

陰極材料を変え、また導入するガスを変えることで、さまざまな種類の皮膜をコーティングすることができる。表4に本装置でコーティングされた代表的な皮膜の特性と特長について一例を示した。陰極アーク放電中のアークスポットは、部分的に約5,000 [K]⁴⁾の温度となり、Mo、Cなどの高融点金属も含めほぼすべての金属を蒸発させることができる。また表4の窒化チタンアルミ（TiAlN）のように、2種類以上の合金膜の場合には、予めTiAl合金の陰極を使用することで容易にコーティングできる。

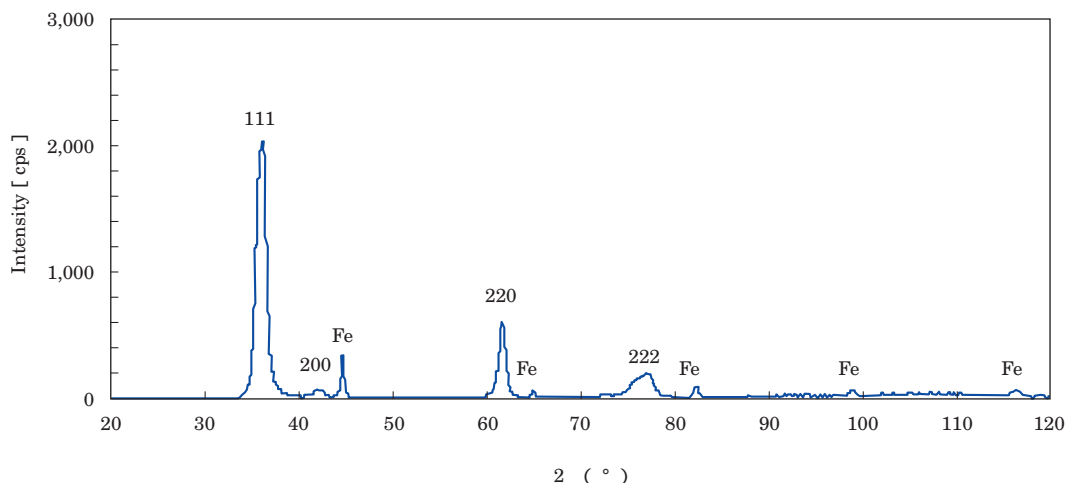


図3 マルチアーク PVD 装置でコーティングした TiCN 膜の X 線回折分析結果

表4 マルチアーク PVD 装置による皮膜特性一例

膜種	色調	膜の硬度 (ヌーブ硬度)	皮膜の特長	代表的な用途
TiN	金色	2,400	硬度が高く、化学的に安定 美しい金色	工具・金型, 装飾品
TiCN	銀紫	3,000	TiN よりもさらに硬度が高い	工具・金型
TiAlN	黒紫	2,800	高温での耐酸化性に優れる	工具
CrN	銀白色	1,800	擦れ合う相手材を摩擦させない	機械部品, 自動車部品
DLC	黒色	4,000	摩擦が小さい	機械部品・工具

3. 開発課題と当社の取り組み

(1) 皮膜の平滑性を大幅に改善

陰極アーク放電によるコーティングは、前述したように数々の利点を持っているが、従来は、陰極で金属が蒸発・イオン化されるものとともに、比較的大きな数～数十 μm の溶融粒子（ドロップレット）が放出され、その一部が基材表面の薄膜に取り込まれる問題があった。このドロップレットは外観を損ねるのみでなく、膜の平滑性を損なうため摩擦が大きくなったり、膜の剥離の起点となったりする。ドロップレットの付着を防止するために、遮蔽板などを陰極と基材との間に設置するなどの防止策が検討されている⁽⁵⁾が、コーティング速度が低下するなどの問題が生じている。

当社では、コーティング速度を落とすことなく、効率的にドロップレットを低減させる方法について研究開発を行った。ドロップレットの発生量は、陰極の温度やアークスポットの移動速度、真空チャンバ内の雰

囲気、磁場の作用に大きく依存する事実を発見し、それらを正確にコントロールすることで、生産性を低下させないでドロップレット付着を低減させることを見出し、新型マルチアーク PVD 装置として製品化をすることができた。

従来の装置と新型マルチアーク PVD 装置を使用し、TiN, TiCN, TiAlN, 窒化クロム (CrN) の4種の皮膜をコーティングした場合の皮膜表面の電子顕微鏡による観察結果を図4に示す。いずれの皮膜においても、ドロップレット（表面に観察される粒状のもの）が、新型マルチアーク PVD 装置では、効率的に低減できていることがわかる。図5は、超合金基材にTiN膜をコーティングした場合の皮膜断面写真である。

ドロップレットの低減により、ドリルなどの工具は寿命が向上することが知られている⁽⁶⁾。また自動車部品の場合には、表面粗さが小さい方が摩擦が少ない⁽⁷⁾と言われており、低燃費化、省エネ化に有利である。

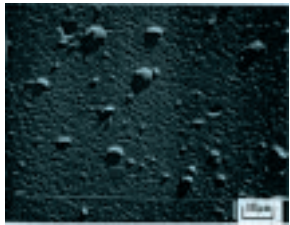
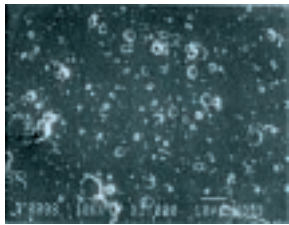
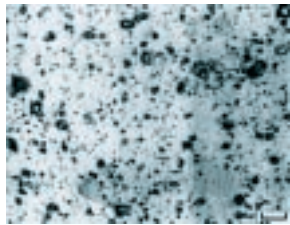
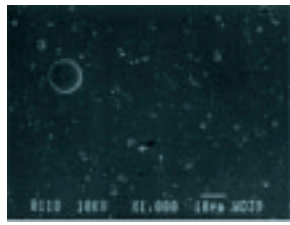
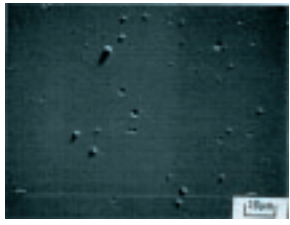
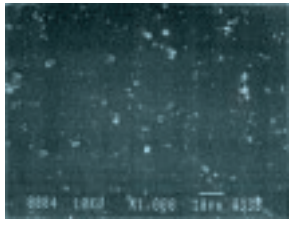
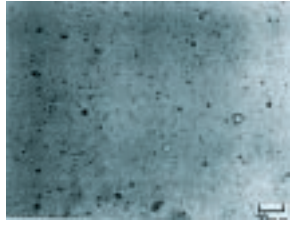
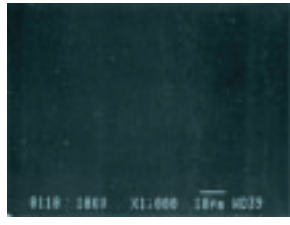
使用装置	TiN	TiCN	TiAlN	CrN
当社従来装置				
新型マルチアーク PVD 装置				

図4 各種皮膜の表面状態の比較

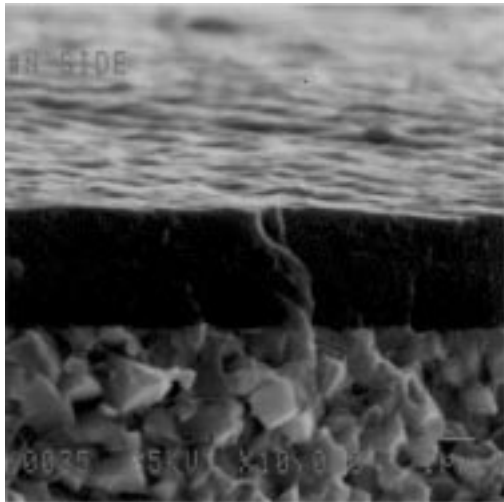


図5 TiN 膜コーティング断面写真

(2) 皮膜特性の制御性

同じ種類の皮膜であっても適用する用途が異なる場合には、皮膜の硬さや色調などについて調整を行い、コーティングの効果が最大限に発揮されるようにコーティングパラメータの調整を行う。

各用途への適用検討において、各皮膜の硬度調整範囲を調査した結果を図6に示す。

TiN, TiCN, TiAlN は主に工具に使われるので硬度は高い必要があり、ヌーブ硬度で2,000~3,000の範囲で使われる。一方、CrN, DLCは機械部品・自動車部品に用いられ、摺動部材の表面コーティングに使われる場合が多い。この皮膜は、あまり硬度が高すぎると摺動する相手材を摩耗してしまふことがあり皮膜の硬度を調整する必要が生じる。図6に示すように、

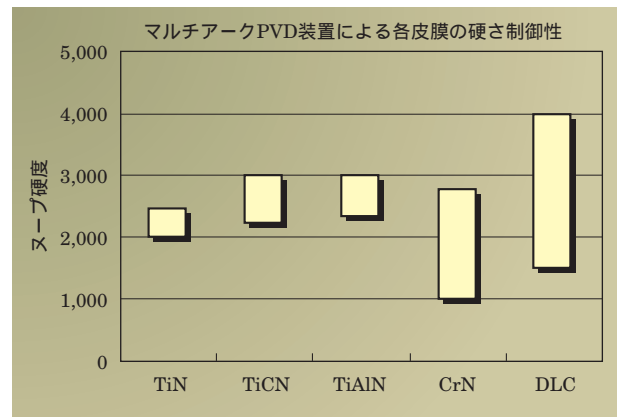


図6 各皮膜の硬度範囲

マルチアーク PVD 装置によるコーティング法は幅広い範囲で硬度を制御できることがわかる。各用途における最適な膜質を選び、最大限のコーティング効果を発揮できるように、皮膜硬度の制御性を向上させている。

皮膜は単層膜で用いられる場合もあり、また幾つかの種類を積層し使われる場合もある。図7は2種類の皮膜を交互に積層コーティングした一例である。このような場合、用途や選定する膜種などにより、単層膜よりも高性能な結果が得られる場合がある。密着性が良い下地層を形成し、その上に硬質層を形成するなどがその代表的な例である。また TiCN 膜のような場合、皮膜の下から上に向かって次第にC含有量を増やすなど傾斜組成の皮膜が用いられる場合もある。このような積層膜・傾斜組成膜に関しても、後述の制御システムにより簡単に形成できる。

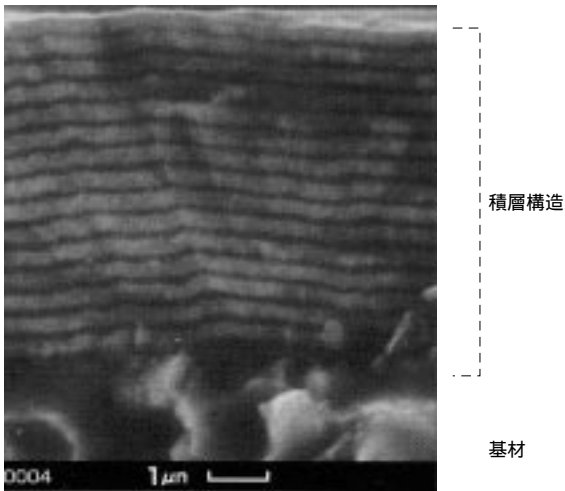


図7 TiN/HfN 膜の積層構造例

(3) コーティングシステムの全自動化

コーティング中に装置が一定に制御している成膜パラメータとして、アーク電流やバイアス電圧、基材の温度、ガス圧力、ガス流量などがあるが、これらのパラメータは正確に、再現性よく制御する必要がある。よってこれらを表形式で入力してデータを作成し、ボタン一つで全自動コーティング処理を行うことができる装置制御システムを開発した。コーティング中の成膜パラメータは、ハードディスクに記録されるようにし、後からでも実際のパラメータ値を確認したりグラフ化も可能なためデータ分析が容易となる。

また、条件選択ミスをなくし、処理ロット管理についても容易に行えるようにバーコードリーダを採用し、処理伝票に記載されたバーコードからコーティング条件を自動識別できるようにした。



図8 制御システム画面一例

(4) 生産性を向上

アーク電流の大電流化による成膜速度の向上や、真空ポンプ強化による真空排気時間の短縮、また一度に大量に基材を搭載して処理する治具の開発を行い、コーティングサイクルタイムを短縮して生産性の向上を実現した。

図9に、600 mmの有効コーティング高さを持つ装置を用いてTiN膜を成膜した場合の膜厚均一性について調査した結果を示す。範囲内において±4.6%と良好な膜厚均一性が得られており、歩留りの向上や膜の信頼性などに寄与することができる。

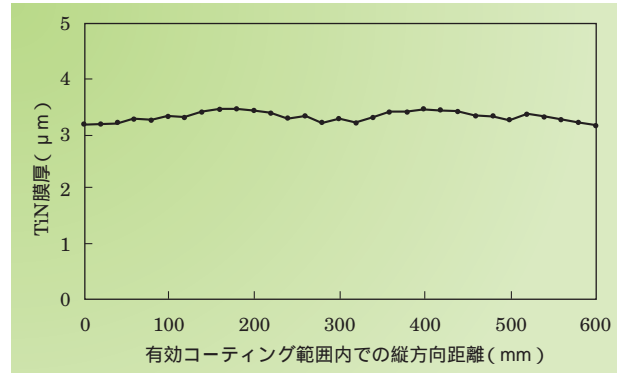
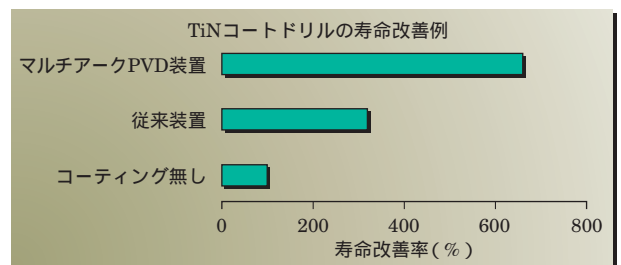


図9 有効コーティング範囲内縦方向での膜厚分布

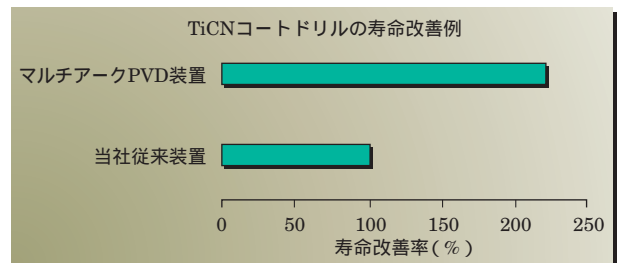
4. コーティングの効果について

前述の各応用分野（エンジニアリング分野）でマルチアークPVD装置を適用した結果、工具寿命の改善や、金型メンテナンス周期の改善、摩擦抵抗低減など、数多くの効果が得られている。図10～14では、実際に得られたコーティングの効果の一例を示す。



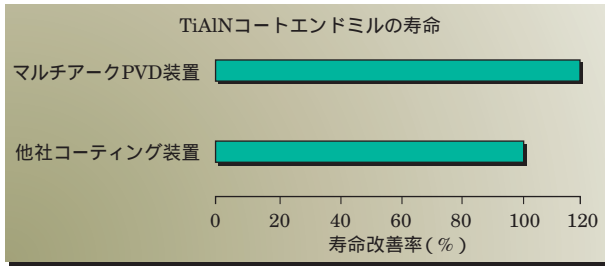
ドロップレットが少ないため膜がはがれにくく、従来のコーティング装置と比較し、約2倍の寿命が達成できた。

図10 高速度工具鋼のドリルにTiN膜をコーティングした場合のドリル寿命評価結果



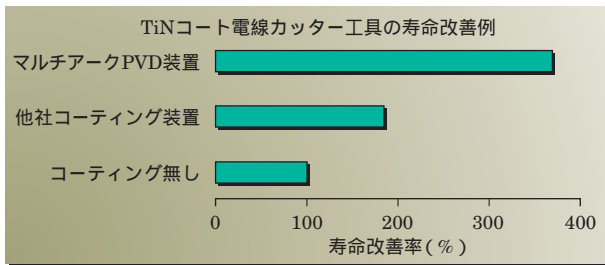
上記TiN膜結果と同様に、ドロップレットが少ないため膜がはがれにくく、従来のコーティング装置と比較し、約2倍の寿命が達成できた。

図11 高速度工具鋼のドリルにTiCN膜をコーティングした場合のドリル寿命評価結果



市販されている高性能工具を上回る寿命評価結果が得られた。

図 12 超硬合金製エンドミルに TiAlN 膜をコーティングした場合の寿命評価結果



平滑性を向上させた結果、他社コーティング装置と比較し、約2倍の工具寿命が得られた。

図 13 ワイヤーハーネス用電線カッターに TiN 膜をコーティングした場合の寿命評価結果

6. あとがき

工具・金型・自動車部品・機械部品など、エンジニアリング分野でのコーティング用途において、より高性能な皮膜を形成するコーティング技術の開発に取り組み、次に示す成果を上げることができた。

(1) 工具・金型などの長寿命化

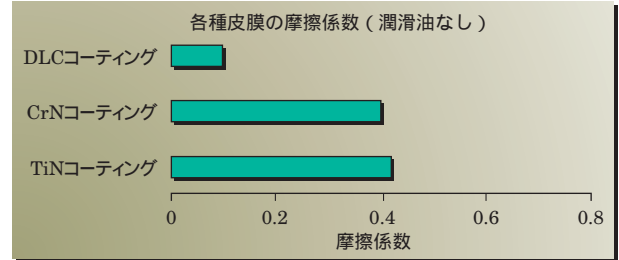
真空アーク法のもつ数々の利点を損なうことなくドロップレットの付着を低減させ、平滑な皮膜を形成できるようになった。これにより、工具・金型などの用途で従来よりもさらに寿命を向上させることができた。また自動車部品などでは低燃費化、省エネ化が期待できる。

(2) 高度な皮膜特性制御

各用途に向けたプロセス開発の結果、膜硬度などの制御性を向上させることができた。これにより用途に応じた膜質を選ぶことができ、最大限のコーティング効果を発揮できるようになった。

(3) コーティング制御システムの全自動化

自動制御システムを開発し全自動コーティングを行えるようにするとともに、安全機能の強化を行った。これによりコーティング条件の制御・管理が容易とな



3種類の中ではDLC膜が最も低い摩擦係数を示し、摺動材料として期待できる材料である。

図 14 SUS 304 基材に各種皮膜をコーティングした場合の摩擦係数測定結果 (潤滑油なし, ピンオンディスク試験)

り、人為的ミスもなくすることができるようになった。また、無人運転も可能となり、生産コストの低減を図った。

(4) 高い生産性

サイクルタイムの短縮化、治具の開発、均一性の向上などの実現により、より高い生産性を達成させることができた。

また、これらの技術を適用した新型マルチアーク PVD 装置を製品化することができた (図 16)。本装置は各種のインターロックを充実させるとともに、真空チャンバ内部の構造について新たに設計、改良を行い、コーティング皮膜の付着によるクリーニング作業を簡便にすることができた。

コーティングは、工具を中心とした用途から、環境をキーワードとした自動車部品や機械部品などへの用途にも応用されるようになった。そしてコーティングに対する期待感は今後ますます高まり、皮膜に要求される性能も、より高いものになると考えられる。当社はそのニーズに応えるためユーザに視点をのこした技術開発や新たな用途に向けてのプロセス開発、新しい付加価値の創造などについて努力していきたいと考える。



図 16 マルチアーク PVD 装置

参 考 文 献

- (1) D.M.Mattox : Electro Chem. Technol.,Sept.-Oct. (1964)
295
- (2) C.Bergman : Surface and Coating technology,50 (1992)
p.103
- (3) 鈴木泰雄, 丹上正安 : 「アーク式真空蒸着による新素材
開発技術」放電研究, No.115 (1987) p.86-101

- (4) J.E.Daalder : Cathode Erosion of Metal Vapor Arcs in
Vacuum 学位論文 p.76
- (5) H.Brandolf, US Patent 4,511,593 (1985)
- (6) H.Randhawa : J. Vac.Sci.Technol, A, 4,6,2755 (1986)
- (7) 保田芳輝 他 : 日本トライボロジー学会トライボロジー
会議予稿集 (東京 1999-5)

◆ 執筆者紹介

岡 崎 尚 登	システム事業部 ファインコーティング事業推進部 課長
緒 方 潔	システム事業部 ファインコーティング事業推進部 部長
入 澤 一 彦	システム事業部 ファインコーティング事業推進部 主任
平 塚 治 男	システム事業部 ファインコーティング事業推進部 技師長
宮 崎 修	システム事業部 ファインコーティング事業推進部
大 谷 聡	日本アイ・ティ・エフ(株) 技術部
