

(解説)

当社におけるPVD受託加工事業の概要と適用例

Outline of PVD Job Coating Business and Applications in Kobe Steel



赤理孝一郎*
Koichiro AKARI

Kobe Steel began the manufacturing and sales of PVD systems in 1986, and entered the PVD job coating business in 2007, opening two coating centers in Japan and United States. The results of our development of films through the sales system are concentrated into our lineup of films called the “BELCOAT®” series which include DLC films by UBMS processing and nitride films by AIP processing. DLC film has been specially applied for automotive engine parts, and the AIP nitride films are applicable for cutting tools and molds.

まえがき = PVD(Physical Vapor Deposition, 物理的蒸着)法は、真空技術を用いた薄膜形成法であり、皮膜材料の一部またはすべてを固体材料から蒸発・昇華させて供給し、被処理物(基材)上に堆積させるものである。基材が本来持つ材料特性とは別の新たな機能・特性を表面に付与する技術としてさまざまな分野で実用化されている。当社は、1986年にPVD法の一種であるアークイオンプレーティング(Arc Ion Plating, 以下AIPという)法の基本技術を米国から導入し、装置販売を開始した。AIP装置は生産性に優れ、切削工具分野を中心に窒化物皮膜などの硬質耐摩耗性皮膜の量産装置として急速に採用が進んだ¹⁾。また、1998年には、同じくPVD法の一種であるアンバランスマグネトロンスパッタリング(Unbalanced Magnetron Sputtering, 以下UBMSという)装置を上市した。UBMS装置は、次世代トライボロジー皮膜として期待されるDLC(Diamond like Carbon)膜の形成手段の1つとして自動車部品分野を中心に採用が拡大している。コーティング装置販売にあたって、装置開発と並行して硬質膜分野における皮膜開発や用途開発も行ってきていたが、特にDLC膜の用途開発を強化する目的から、2000年よりコーティング処理自体を請負う受託加工事業も開始した。さらに近年の受託加工市場の拡大を考慮し、2007年には国内の高砂コーティングセンター、米国の「KOBELCO Advanced Coating(America) Inc.」(イリノイ州パファローグロブ市)と、2つの受託加工拠点を開設し、本格的な受託加工事業を開始した。

本稿では、当社PVD事業における新しい領域である受託加工事業について、処理に用いているコーティング方法、商品となる皮膜ラインナップおよび適用事例を紹介する。

1. コーティングプロセスとその特長

受託加工事業でコーティング処理に採用しているプロセスは、当社装置販売メニューと同じUBMS法およびAIP法である。装置販売の中心はAIP装置であるが、受託加工ではUBMS法が先行し、AIP法による処理は2007年から本格的に開始した。以下、両プロセスの概要を紹介する。

1.1 UBMS法

UBMS法はPVD法の代表的なプロセスであるスパッタ法の一つである。スパッタ法は、真空中で高エネルギーのイオンを固体材料(ターゲット)に衝突させた際にターゲットの構成原子/分子が弾き飛ばされる“スパッタ”現象を利用したコーティング法である。スパッタに用いるイオンは、アルゴンガスなどの不活性ガスを導入した真空雰囲気下で、陰極となるターゲットに高電圧を印加してグロー放電を発生させ、不活性ガスをイオン化し生成する。工業的に使用されているスパッタ装置では、ターゲット裏面に配置した磁石による磁場を利用して高密度プラズマが生成可能なマグネトロンスパッタ法が採用されている。後述のAIP法とスパッタ法の大きく異なる点は、スパッタ粒子はほぼ電気的に中性で、イオンによって皮膜形成を行うイオンプレーティング法の一つであるAIP法に比べると皮膜形成粒子のエネルギーが低い点である。このため、従来強固な密着性や耐摩耗性が要求されるハードコーティング分野ではスパッタ法の適用は限られていた。

UBMS法とは、スパッタ粒子のエネルギーを増すために基板へのイオン照射を強化したスパッタ技術である。UBMS法で用いるスパッタ蒸発源の概念図を図1に示すが、従来のマグネトロンスパッタ源と異なり、外側磁極と内側磁極のバランスを意図的に崩した非平衡磁場が特

*機械エンジニアリングカンパニー 産業機械事業部 高機能商品部

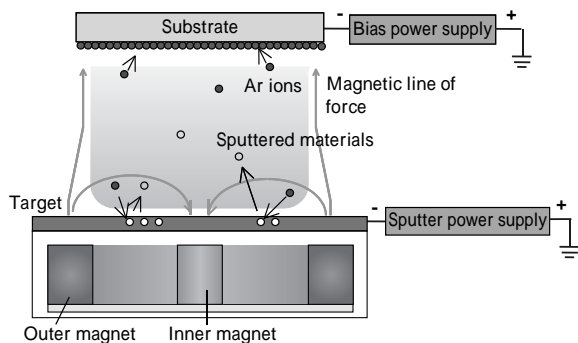


図1 UBMスパッタ源の概念図
Fig. 1 Model of UBM sputtering source

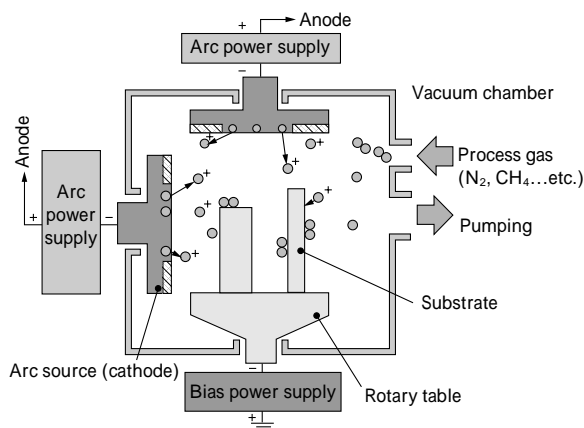


図2 AIP装置の基本構成
Fig. 2 Schematics of arc ion plating apparatus

徴である。従来の平衡磁場下ではターゲット近傍に集中していたArイオンが、非平衡磁場下では、一部が基材側に拡散し²⁾、皮膜形成中に基材に印加するバイアス電圧によってエネルギーを制御したArイオンを基板に照射することができ、結果的にスパッタ粒子のエネルギーを増大させることが可能となる。UBMS法におけるArイオンのアシスト効果は、スパッタリングのイオンプレートイング化と考えることができ、バイアス電圧によって皮膜特性を制御することが可能となる。

1.2 AIP法

AIP法は、PVD法のもう一つの代表的手法であるイオンプレートイング法の一つで、真空アーク放電を利用したイオンプレートイング法である。AIP装置の基本構成を図2に示す。UBMS法と同様にターゲットを陰極とするが、陽極との間で発生させた真空アーク放電によりターゲット材料を蒸発、イオン化し、バイアス電圧が印加された基板の上にイオンを堆積させることにより皮膜を形成する。真空アーク放電は、数十～数百Aの放電電流がターゲット表面上の微小領域に集中し、4,000～10,000Kという高温になったアークスポットが生じるのが特徴である³⁾。AIP法は、この真空アーク放電の特性により、ターゲット材料のイオン化率が高く³⁾、緻密で密着力に優れた皮膜を容易に高速で形成できる。また、他方式のイオンプレートイング法では困難とされている高融点金属の蒸発¹⁾や、融点や蒸気圧の異なる材料からなる合金ターゲット材料をほぼ合金成分比のまま蒸発させることも可能である。

切削工具分野の耐摩耗皮膜として合金ターゲットを用いたTiAlN膜が主流となるにつれ、AIP法の適用も急速に拡大した。当社のAIP装置では最新のアーク蒸発源であるファインカソード⁴⁾を搭載し、高品質被膜形成が可能である。

2. コーティング皮膜のラインナップ

当社ではUBMS法およびAIP法を用いたコーティング装置販売の中で培ってきた皮膜技術をBELCOAT[®]シリーズとして結集し、受託加工にて処理を行っている。以下、代表的な皮膜の特性について紹介する。

2.1 UBMS法によるDLC膜(BELCOAT[®]-DLCシリーズ)

DLC膜とは多種多様な特性を持つアモルファスカーボン(-C)膜の総称で、ダイヤモンドのような高硬度とグラファイト的な低摩擦係数を持つ皮膜である。DLC膜は、その特徴から自動車エンジン部品などに適用されてきており、エンジンの効率化、環境負荷低減に寄与している。UBMS法の特長を生かした代表的なDLC膜ラインナップを表1に示す。標準的なUBMS-DLC膜はその皮膜色調が黒色(Black)であることにちなんでBELCOAT[®]Bと称している。UBMS法ではイオンアシスト効果を利用して、バイアス電圧によるDLC膜の硬度制御が可能であり²⁾、より高硬度の特性を持つ、“HB”および“UB”もラインナップしている。また、硬度制御機能をより高度に利用すると、低硬度と高硬度のDLC膜をナノオーダーの厚さで積層にしたナノ積層型DLC膜の形成も容易である(BELCOAT[®]NB)。高い次元で低摩擦特性と耐摩耗性が要求される場合、1種類のDLC膜では対応が難しいが、NB膜では低摩擦係数と耐摩耗性の両立が可能である⁵⁾。さらに、固体ターゲットを材料とするUBMS法では、金属ターゲットをカーボンターゲットと同時にスパッタすることで各種金属元素を添加した金属ドーピング型DLC膜の形成も可能で、BELCOAT[®]MBとしてラインナップしている。添加金属元素は要求される特性に応じて適宜選定しているが、これまでの形成例としては、Ti, Cr, W, Alなどの実績がある。

また、すべてのBELCOAT[®]-DLCシリーズに共通する

表1 UBMS法によるDLC膜ラインナップ
Table 1 Lineup of DLC Films by UBMS

| Film name | Spec. | Hardness (HV) | Friction coefficient | Film thickness (μm) | Property |
|-------------------------|--------------|---------------|----------------------|---------------------|--|
| BELCOAT [®] B | standard | 1,500 ~ 2,500 | 0.1 ~ 0.15 | 0.5 ~ 5 | Balanced DLC with wear resistant, low friction and adhesion |
| BELCOAT [®] HB | hard | 2,500 ~ 3,500 | 0.1 ~ 0.2 | 1 ~ 5 | Higher wear resistant |
| BELCOAT [®] UB | Ultra-hard | 3,500 ~ 4,000 | 0.1 ~ 0.2 | 1 ~ 4 | Highest wear resistant in higher surface pressure |
| BELCOAT [®] NB | Nano-layered | 1,500 ~ 2,500 | 0.1 ~ 0.15 | 1 ~ 10 | Higher wear resistant and lower friction For impact load application |
| BELCOAT [®] MB | Metal dope | 1,000 ~ 2,000 | 0.15 ~ 0.25 | 1 ~ 10 | Lower inner stress Additional properties depending on doped material |

表2 AIP 法による窒化物皮膜ラインナップ
Table 2 Film Lineup of Nitride Films by AIP

| Film name | Film composition | Color | Hardness (HV) | Oxidation temperature () | Friction coefficient |
|---------------------------|------------------------|------------------|---------------|---------------------------|----------------------|
| BELCOAT [®] G | TiN | Gold | 2,200 | 600 | 0.5 |
| BELCOAT [®] R | TiCN | Rose | 2,800 | 400 | 0.4 |
| BELCOAT [®] V | TiAlN | Violet | 2,800 | 800 | 0.5 |
| BELCOAT [®] SG | CrN | Silver gray | 1,800 | 700 | 0.4 |
| BELCOAT [®] S/M | CrN based nano-layered | Silver metallic | 2,600 | 1,000 | 0.4 |
| BELCOAT [®] S/DG | TiCrAlN based | Silver dark gray | 3,600 | 1,000 | 0.5 |

特長として、基材との高い密着性が挙げられる。DLC 膜の実用化における最大の問題の1つが基材との密着性であり、特に信頼性が重視される自動車・機械部品分野などでは大きな壁となってきた。UBMS 法による DLC 膜形成では、多様な皮膜形成が可能で混合組成層の形成が容易、かつ、イオンアシスト効果で基材との界面も強固になるというプロセスの特性を生かして、基材上に金属材料による第1層形成後、金属/炭素の傾斜組成層を形成して DLC 層につなげる中間層構成を採用し、自動車・機械部品分野などでの実用に耐えうる高い密着性が得られている²⁾。

なお、表1に示したラインアップ以外の DLC 膜も可能であり、用途に応じたカスタム対応の DLC 膜形成も行っている。

2.2 AIP 法による窒化物皮膜(BELCOAT[®]-AIP シリーズ)

AIP 法による窒化物系皮膜のラインナップを表2に示す。AIP 法による各皮膜の名称も基本的にはその色調に由来している。TiN, TiCN, TiAlN, CrN の4種は AIP 法による基本的な皮膜であり、切削工具や金型分野で幅広く実用化されている。ただし近年、硬質皮膜に対して加工速度向上、コスト・環境負荷低減のための切削油削減など、より高負荷・高温の苛酷な環境下でも高い耐摩耗性が求められており、元素添加による多成分系化や複層化など皮膜組成・構造が多様化する傾向にある。当社でも高機能皮膜の研究を積極的に展開してきたが、独自に開発・商品化した皮膜が BELCOAT[®] S/DG と BELCOAT[®] S/M である。TiAlN は、TiN に Al を添加することにより、TiN の硬度と酸化開始温度を大幅に向上したものであるが、金属成分(Ti と Al)に対する Al の組成が60原子%を超えると結晶構造が硬質の立方晶構造から軟質の六方晶構造に変わるために、硬度の向上には限界があった。これに対し、BELCOAT[®] S/DG は TiAlN へ Cr を添加することにより、硬質の立方晶構造を維持したまま金属成分(Ti と Cr と Al)に対する Al 組成を70原子%程度まで高めた皮膜である⁶⁾。ピッカース硬度が3,600まで向上し、酸化開始温度も1,000以上に向上した。

また、当社が開発した複合型 PVD 装置を用いて、AIP 蒸発源により高速で皮膜を形成しながら、同一成膜チャンバ内に装備された UBMS 蒸発源により AIP 法では蒸発が困難な元素を添加することで、ナノ積層構造を有す

る硬質皮膜を形成する技術も開発している⁷⁾。その一例が CrN をベースにしたナノ積層膜、BELCOAT[®] S/M である。BELCOAT[®] S/M では CrN に比べ高硬度化、高酸化温度化を実現している。

3. 受託加工の適用例

3.1 UBMS 法による DLC 膜の適用

UBMS 法による DLC 膜の受託加工は2000年から開始しており、既に多くの用途に適用されている。代表的な適用例を以下に紹介する。

1) 部品分野

DLC 膜の適用が最も期待される分野が自動車・二輪車部品分野であるが、UBMS-DLC 膜は、特に過酷な摺動条件下での耐焼付性や耐摩耗性が要求されるレース用エンジン部品で先行して展開されている。試作検討中のものを含め、代表的な適用例を図3に示す。レース用エンジン部品では、軽量化、高出力化の進行で摺動部には非常に高い耐久性が要求され、DLC 膜コーティングが必須となりつつあるが、一方で、DLC 膜には高い信頼性が要求される。UBMS-DLC 膜は、最適化した中間層による高密着性の確保により、高硬度な DLC 膜を厚く形成することが可能となり、レース用エンジン部品で要求される高度な耐久性と信頼性を達成している。さらに現在は、量産車部品への適用に向けた皮膜開発・用途開発を行っており、今後、自動車・二輪車部品分野における DLC 膜の適用がより拡大していくものと思われる。

また、そのほかの一般機械装置や電子・精密機械内の各種摺動部品への UBMS-DLC 膜の適用も拡大している。

2) 金型・工具分野

金型分野では、アルミや銅などの軟質材料の加工工程において、従来から、耐凝着性に優れた DLC 膜が広く適用されているが、UBMS-DLC 膜は、特に耐衝撃性が要求される穴あけ用パンチに適用されている。図4にステ



図3 DLC 膜の自動車部品適用例
Fig. 3 DLC coated automotive parts

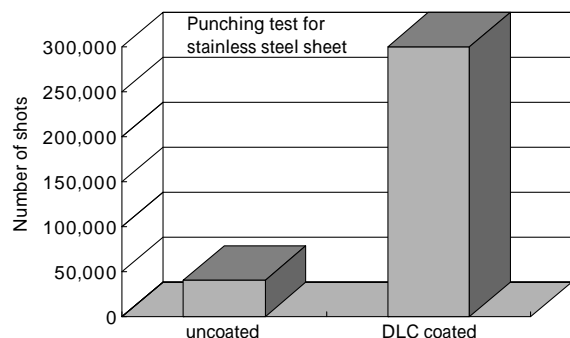


図4 DLC 膜のパンチでの適用効果例
Fig. 4 Example of the effect of DLC coating for punch

ンレス板への穴あけ加工時の効果を示すが、高速度工具鋼(SKH材)製の未処理パンチに比べ、ナノ積層型DLC膜(BELCOAT®NB)をコーティングしたパンチでは、約9倍の寿命改善効果が得られている。これは、ナノ積層型DLC膜では欠損による大きな損傷が起りにくいと考えられる。また、相手材がアルミの適用例として、エアコンの熱交換器用アルミフィン材への穴あけパンチなどがある。その他、工具分野ではアルミ加工用の切削工具や銅管加工用工具でDLC膜が適用されている。

3.2 AIP法による窒化物皮膜

AIP法による受託加工事業は2007年から本格的に開始したところであり、まだ適用例は少ないが、AIP法の特長や装置販売を通じて蓄積してきた皮膜技術を最も生かせるのが工具・金型分野である。前項で紹介した開発膜であるBELCOAT®S/DG膜の切削工具への適用における効果の一例を図5に示す。ボールエンドミルによる高硬度合金工具鋼(HRC50)の高速ドライ切削試験におい

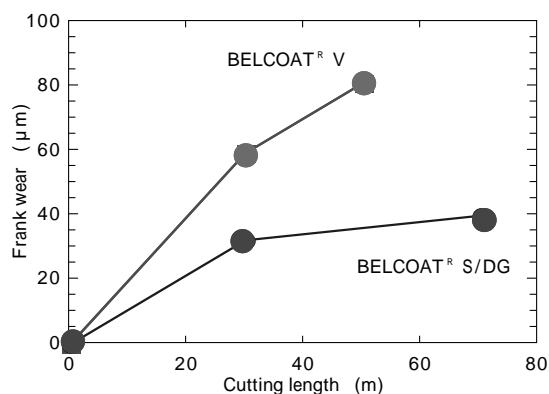


図5 AIPによる切削工具での効果例

Fig. 5 Example of the effect of AIP coating for cutting tool

て、TiAlN膜(BELCOAT®V)膜の約2倍以上の耐摩耗性を有することが確認されている。

むすび = 本稿では当社におけるPVD受託加工事業の概要として、コーティングプロセスと皮膜の種類、その適用例について紹介した。受託加工事業はユーザから預かった基材に皮膜を形成し、その付加価値に対して収益を得るビジネスモデルである。これまでのPVD装置販売とは大きく異なるものであるが、装置販売以上に直接的にPVD技術を活用して世の中のニーズにこたえることができる事業である。素材メーカーでもある当社の強みを生かし、皮膜開発から皮膜の分析・評価、コーティングに適した素材の提案まで含めて総合的なソリューションを提案できると考える。受託事業は国内外2ヶ所にて本格的に開始したところでもまだ緒についた段階であるが、今後、拠点も拡充し、装置改良・開発とともにユーザニーズに合せた皮膜技術開発を継続し、環境負荷軽減や生産性向上などに貢献していきたい。

参考文献

- 1) 玉垣 浩ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.41, No.4 (1991) p.103.
- 2) 赤理孝一郎ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50, No.2 (2000) p.58.
- 3) J. E. Daalder：J. Phys. D., Vol.11 (1987) p.1667.
- 4) 高原一樹ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50, No.2(2000) p.53.
- 5) E. Iwamura：Processing. Mater. for Properties, (Sanfrancisco, 2000) p.263.
- 6) K. Yamamoto, et al.：Surf. Coat. Technol., 174/175 (2003) p.620.
- 7) 久次米進ほか：粉末冶金協会講演概要集平成16年度秋季大会 (2004) p.65.