

(解説)

AIP/UBMS法によるトライボロジ皮膜の自動車部品への適用

Application of Tribological Films Automobile Parts based on the AIP/UBMS Process



赤理孝一郎*
Koichiro Akari

Reduced friction loss and car weight have become extremely important issues in the automobile industry. Tribological films are required to improve the sliding coefficient and wear-resistance of parts used in cars. Nitride films deposited by AIP are already used in industrial situations. DLC films based on the UBMS process are currently being developed. In this paper, the principles behind the AIP/UBMS process and its properties and potential application areas are introduced.

まえがき = PVD (Physical Vapor Deposition, 物理的蒸着)法やCVD(Chemical Vapor Deposition, 化学的蒸着)法といったドライコーティング技術を利用して, 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がさまざまな分野で実用化されている。近年, 多くの産業で環境対応が優先度の高い課題となっている中, 従来の長寿命化とは別に, 表面処理に対しても環境面からの期待が高まっている。特に自動車分野では, 地球温暖化防止と大気環境保護の観点から燃費向上と排ガス規制が至上命題となり, エンジンの摩擦損失低減や車両の軽量化が重要な技術課題となっている。そこで, 材料のトライボロジ特性を高機能化できるトライボロジ皮膜開発のニーズは一層の高まりを示している。

当社は, PVD法に属するアークイオンプレーティング(Arc Ion Plating, 以下AIP)法によるパッチ式コーティング装置を1986年に実用化した。この装置は工業生産に適するため, 切削工具分野を中心に硬質耐摩耗皮膜の量産手段として急速にその採用が進み¹⁾, 自動車部品分野でも多くの量産用設備が導入されている。また, 1998年には, アンバランスドマグネトロンスパッタリング(Unbalanced Magnetron Sputtering, 以下UBMS)装置を上市した。現在, 次世代トライボロジ皮膜として期待されるDLC(Diamond like Carbon)膜の開発にも取り組んでいる²⁾。

本稿では, AIP法およびUBMS法の原理と形成される皮膜の特性, および自動車部品分野での適用事例について紹介する。

1. コーティング法の原理と特長

1.1 AIP法

AIP法は, PVD法の代表的手法であるイオンプレーティング法の一つで, 真空アーク放電を利用したイオンブ

レーティング法である。AIP装置の基本構成図を図1に示す。真空チャンバ内で, ターゲット(皮膜形成材料)をカソード(陰極)としてアノード(陽極)との間で真空アーク放電を発生させると, ターゲット材料はアーク放電により蒸発し, イオン化される。基板(被コーティング物)には負のバイアス電圧が印加され, イオン化したターゲット材料が適切なエネルギーを持って, 基板上に堆積して皮膜を形成する。真空チャンバにはガスの導入ラインが設けてあり, たとえばTiを蒸発させながらN₂ガスを導入することでTiN皮膜を形成する。ほとんどの実用的皮膜は, この反応性コーティングにより形成される。真空アーク放電は, ターゲット表面上に放電電流が微小領域に集中したアークスポット(熔融領域)が生じるのが特徴である。アークスポットは4000~10000Kという高温になり, ターゲット材料を瞬時に溶解蒸発させる³⁾。アークスポットからは蒸発過程の副産物として,

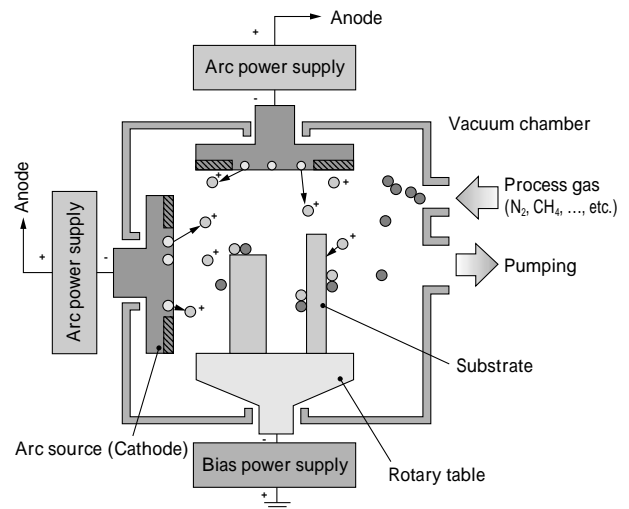


図1 AIP装置の基本構成
Fig. 1 Schematics of Arc Ion Plating apparatus

*機械エンジニアリングカンパニー 高機能商品部

ターゲット材料の微小溶滴であるマクロパーティクルが放出され、皮膜の表面粗度の観点からデメリットとなることがあるが、高蒸発レートが簡単に得られ、他方式のイオンプレーティング法では困難とされているタングステンなどの高融点金属の蒸発¹⁾⁴⁾や、融点や蒸気圧の異なる材料を組合わせた合金ターゲット材料でもほぼ合金成分比のまま蒸発させることが可能である。

AIP法は、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ため、特に量産性、プロセス安定性が要求される自動車部品のトライボロジ皮膜形成に適した方法である。

1.2 UBMS法

スパッタリング法はイオンプレーティングと並ぶPVD法の代表的なプロセスであり、半導体・電子機能部品分野から裝飾用コーティングまで、広範囲の産業分野で応用されているコーティング法である。真空雰囲気において固体ターゲットをカソードとするが、AIP法と異なり、Arなど不活性ガスを導入しながら、ターゲットに高電圧を印加して発生するグロー放電を利用する。グロー放電プラズマ中のArイオンが高エネルギーでターゲットに衝突して、ターゲット原子/分子を弾き飛ばし、ターゲットと対向して配置されたワーク上に堆積して皮膜が形成される。

AIP法と異なり、原理的にマクロパーティクルの放出がなく、平滑な皮膜形成が容易である。また、真空アーク放電に比べ、グロー放電の方が安定なため、ターゲット材料も導電性から絶縁性材料まで適用範囲が広い。一方、ターゲットから弾き出されたスパッタ粒子は通常ほぼ電的に中性のため、イオンによって皮膜形成を行うAIP法に比べると、皮膜形成粒子のエネルギーは低くなる。

ほとんどのスパッタ法では、ターゲット裏面に配置した磁石による磁場を利用して、ターゲット前面に高密度プラズマが生成可能なマグネトロンスパッタ源が採用されている。UBMS法で用いるスパッタ蒸発源は、通常のマグネトロンスパッタ源と異なり、図2に示すように、外側磁極の磁場を内側磁極より強くして、バランスを意図的に崩した非平衡磁場が特徴である。非平衡磁場では、外側磁極からの磁力線の一部が基材側まで及び、タ

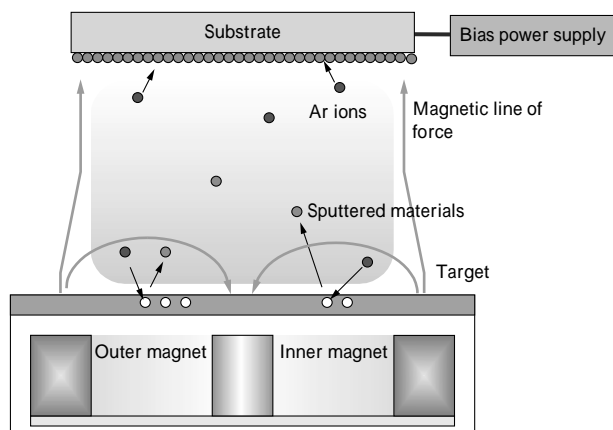


図2 UBMスパッタ源の概念図
Fig. 2 Model of UBM sputtering source

ーゲット近傍に収束していたプラズマの一部が磁力線に沿って基材近傍まで拡散しやすくなる。その結果、皮膜形成中に基材に照射されるArイオン量を増大させることが可能となる²⁾。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ティング化と考えることができ、基板に印加する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。特に、従来成膜粒子のエネルギーが低いために不向きと考えられていた、耐摩耗用途向け硬質皮膜形成に適用可能な新しいスパッタ法である。

2. AIP/UBMS法によるコーティング皮膜

AIP法では、主にTiN、Cr-N、TiAlNといった窒化物皮膜やTiCNのような炭窒化物皮膜が形成され、これらは既に広く工業的に利用されている。UBMS法は主にDLC膜の形成に適用されているが、TiNなど窒化物膜の形成も可能であり、非常に表面平滑性が要求される精密金型などの用途にはUBMS法によるTiN膜が適用されている。

以下では、自動車部品分野への適用例の多いCr-N膜および今後適用が期待されるDLC膜についてその特性を紹介する。

2.1 AIP法によるCr-N膜

AIP法によるクロム窒化物(Cr-N)膜は、金属Crターゲットを窒素雰囲気中でアーク放電により蒸発・イオン化させることによって形成される。図3に示すように、窒素圧力を低圧から高圧まで変化させることにより、Cr₂N、Cr₂N、CrN混合、CrNと結晶構造を変化させることが可能である⁵⁾。なお、「Cr-N」はこれら多種のクロム系窒化物の総称を示す。Cr-N膜の硬度は窒素圧

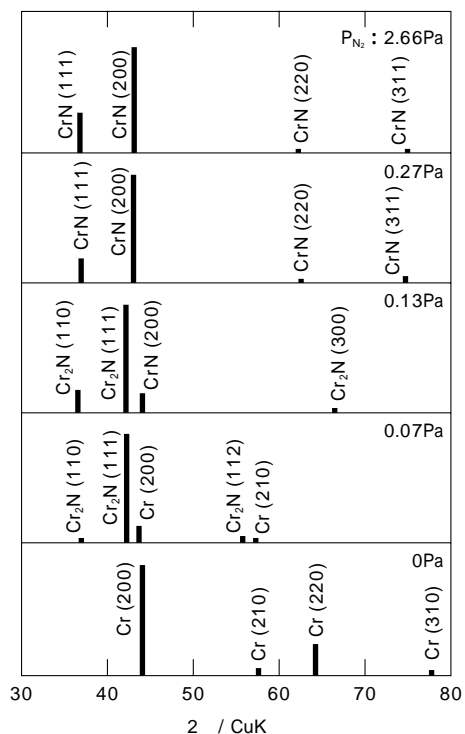


図3 異なる窒素分圧で形成したCr-N膜のX線回折結果
Fig. 3 Results of X-ray diffraction of Cr-N films deposited under different nitrogen pressure

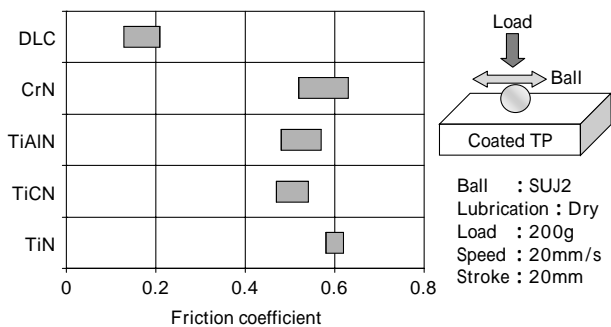


図4 DLC膜と窒化物皮膜の摩擦係数の比較

Fig. 4 Comparison of friction coefficient between DLC and nitride films

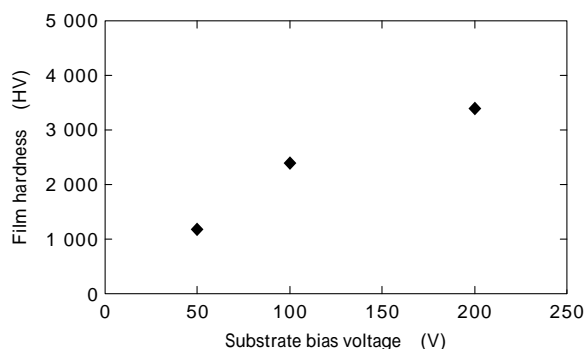


図5 バイアス電圧とDLC膜硬度の関係

Fig. 5 Film hardness of DLC as function of bias voltage

力やバイアス電圧の条件によって、おおよそ HV 1 000 ~ 2 300 の範囲で変化させることが可能である。この硬度は TiN (HV2 200 ~ 2 500) に比べると低い、摺動部に適用した場合に相手部材への攻撃性が小さく、また内部応力が小さいために厚膜化が容易という特徴がある。

2.2 UBMS法によるDLC膜

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。図4に、UBMS法によるDLC膜と各種窒化物皮膜の無潤滑下での摩擦係数の比較を示す。DLC膜は無潤滑下でも0.1~0.2の低摩擦係数を示す。また、UBMS法ではArのイオンアシスト効果を利用して、図5に示すように、バイアス電圧による硬度の制御が可能である。さらに、固体ターゲットを材料とするUBMS法では、水素フリーまで含めて水素量を制御したDLC膜や金属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DLC膜(Me-DLC)の形成も可能で、より幅広い特性を持ったDLC膜の形成が可能であることが特徴である。

従来、DLC膜形成において実用上最も問題となるのは膜と基板との密着性であり、実用化を阻む大きな要因となっていた。しかし、UBMS法によるDLC膜形成では、金属層と金属/炭素の混合傾斜組成層を中間層とした皮膜構成とイオンアシスト効果による界面強化により、鉄系基板に対しても実用に耐えうる密着性が得られている²⁾。

3. 自動車部品分野での適用例

3.1 AIP法による窒化物皮膜の適用

AIP法により形成されたTiNなどの硬質皮膜の実用化

は、まず切削工具の分野で1980年代初頭から始まった。自動車部品分野への適用は、環境保全問題への対応から、燃費向上や排ガス規制対策の技術的課題を解決するための手段の一つとして、1980年代後半に始まった。以下に代表的な適用例を紹介する。

1) カーエアコン用コンプレッサ部品

1980年代後半に当社のインライン型AIP装置により、自動車部品への量産コーティングとして初めて実用化された⁶⁾。斜板式コンプレッサのシューはピストンの先端に取付けられ、回転する斜板に押付けられる部品である。シュー、斜板ともに極めて高い摺動耐摩耗性が要求される。そこで、図6に示すように焼付特性、摩耗特性ともに優れるCr-N膜が採用された⁶⁾。

2) ピストンリング

1990年代初頭から、Cr-N系皮膜が乗用車用ピストンリングの量産処理に適用され始めた⁷⁾⁸⁾。ディーゼルエンジンの高出力化にともない、従来採用されていた硬質Crめっきなどより、耐スカuffing性や耐摩耗性を長期にわたり維持できる新しい表面処理が要求されたためである。Cr-N膜は厚い皮膜を形成することができるため、AIP法による30~50μmという厚いCr-N膜が採用された。当社はこのような厚膜処理に対応するために、大型のロッド形ターゲット式蒸発源を搭載したピストンリング用専用装置(AIP-R500)を商品化している。

3) バルブアジャスティングシム

1990年代半ばには、エンジンの動弁系部品であるバルブアジャスティングシムへのTiN膜の応用が開始された⁹⁾¹⁰⁾。これはAIP法の副産物であるマクロパーティクルを積極的に利用し、フリクション低減を図った例である。シムは直動式動弁系においてカムと摺動接触する部品であるが、シムの表面にAIP法によるTiN膜をマクロパーティクルを適切に制御してコーティングする。エンジンの回転にともない、カムの表面がマクロパーティクルにより研磨され、短時間で表面粗度が向上する(Ra 0.02程度)作用により、フリクションを約40%低減でき、約1~2%の燃費向上効果が得られると報告されている。

4) 燃料噴射系部品

1990年代後半には、ディーゼル燃料噴射ポンプ部品へAIP法によるCr-N膜の適用が開始され、量産化された¹¹⁾。燃料噴射ポンプの高噴射圧化により、摺動部材の

Disc	Pin	Hardness (HK: 100g)	Seizure Pressure (MPa)			
			10	20	30	40
A390 (t6)	SUJ2 (uncoated)	720		■		
	Cr plate	860		■		
	Cr-N	1 740			■	
	TiN	2 080			■	

図6 焼付特性テスト結果

Fig. 6 Seizure pressure test results

負荷増大，潤滑環境悪化など使用環境が厳しくなり，優れた耐摩耗性，耐焼付性などが要求されたためである。

3.2 DLC 膜の適用

前節で AIP 法による窒化物皮膜の自動車分野における適用例を挙げたが，近年，自動車の燃費向上に対する要求はますます高まっており，表面処理技術においても更なる低フリクション化技術の開発が行われている。このなかで，DLC 膜は特に摩擦損失への影響度が高く，摺動条件が厳しいエンジン動弁系やピストン系への適用が以前から研究されている。当初は，エンジンオイル中では無潤滑下のような DLC 膜の摩擦係数の優位性が得られなかった。特に極圧添加剤を含有したオイルに対しては，添加剤由来のトライボフィルムが DLC 膜表面には形成されにくいという問題点も指摘され¹²⁾，オイル中での低摩擦化が課題となっていた。その後，金属を添加した Me-DLC 膜^{13),14)} や PVD 法による水素フリー DLC 膜による摩擦係数低減¹⁵⁾ が確認され，エンジン試験でのフリクション低減も報告されている。当社でも，UBMS 法の特長を活かせる Me-DLC 膜や水素フリー DLC 膜によるオイル中の低摩擦化に現在取り組んでいる。自動車部品のトライボロジ特性の更なる高機能化の一つの方向として，DLC 膜の実用化に向けた動きは加速しつつあり，今後 CrN などの窒化物系皮膜から DLC 膜への移行が進むものと考えられる。

むすび = 本稿では，AIP 法および UBMS 法の原理・特長と自動車分野での適用例について紹介してきた。生産性，安定性に優れた AIP 法は既に自動車部品への窒化物皮膜形成の量産技術として普及しているが，今後も表面処理の中核技術としてその適用が拡大すると期待される。

DLC 膜はこれまでも着実に用途を拡大してきたが，自動車部品分野での実用化は DLC 膜発展のキーポイントと考えられる。実用化には膜特性以外にも処理コストの低減や品質管理法の確立など課題もまだ多く残されてい

る。今後も DLC 膜のアプリケーション拡大に向けて，装置 / 皮膜設計 / 評価の総合的立場から解決策を提案していきたい。

また，今後表面処理に対する要求がより高度化するなか，単一プロセスによる皮膜特性の改善では限界も予想される。当社は，AIP 法および UBMS 法の蒸発源を同一チャンバに搭載した複合プロセス装置も商品化しており，今後，複合成膜技術による高機能皮膜形成も期待される分野である。

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) P. C. Johnson : Physics of thin films, Vol.14 (1989) p.129.
- 5) 山本兼司ほか：表面技術，Vol.48, No.4 (1997) p.74 .
- 6) H. Tamagaki et al. : Surf. Coat. Technol., Vol.54/55 (1992) p.594.
- 7) 自動車用ピストンリング編集委員会：「自動車用ピストンリング」，山海堂 (1997) .
- 8) 山本英継ほか：自動車技術会，学術講演会前刷集 934 (1993-10) p.89.
- 9) 増田道彦ほか：自動車技術会，学術講演会前刷集 964 (1996-10) p.165.
- 10) 鳥居正則ほか：自動車技術会，学術講演会前刷集 966 (1996-10) p.217.
- 11) 竹内桂三：月間トライボロジー (2000.4) p.28 .
- 12) 加納眞ほか：トライボロジー会議予稿集東京 1999-5 (1999) p.11 .
- 13) 斉藤喬士ほか：トライボロジー会議予稿集東京 2000-5 (2000) p.63 .
- 14) 宮永美紀ほか：トライボロジー会議予稿集仙台 2002-9 (2002) p.179 .
- 15) Y. Yasuda et al. : SAE Paper 2003-01-1101 (2003) .