

(解説)

AIP[®]法における装置技術の展開

高原一樹・藤井博文

機械カンパニー・高機能商品部

The Industrial Development of AIP System Technologies

Kazuki Takahara・Hirofumi Fujii

In order to satisfy environmental and economic considerations, production-scale arc ion plating systems have been developed and applied to many industries. Some systems are introduced in this paper. In addition, a new arc cathode (evaporation source) has been developed. This cathode can double the arc spot velocity of conventional cathodes, and consequently the amount and size of macro-particles are dramatically decreased. Typical performance data is presented in this paper.

まえがき = アークイオンプレーティング (Arc Ion Plating, 以下 AIP) 法は、真空アーク放電を利用して固体材料を蒸発させるイオンプレーティング法の一つであり、蒸発した材料のイオン化率が高く、密着性に優れた皮膜が形成できるため、過去約 10 年の間に切削工具分野を中心に硬質耐摩耗皮膜コーティングの量産手段として急速に活用され始めてきた¹⁾。さらに最近では、製品の高機能化や高付加価値化のニーズの高まりに対応して、切削工具はもちろん、各種金型から自動車・機械部品の摺動耐摩耗処理に至るまで用途が拡大してきており、多様化かつ高度化するニーズに対応するため新しい蒸発源や装置構成が開発され普及に一層の拍車がかかっている²⁾。

当社では 1986 年にバッチ式 AIP 装置を実用化して以来、これまでに多様なニーズに対応できる装置技術と成膜技術の開発を継続しておこない、TiN, TiAlN, TiCN, CrN などの各種硬質皮膜の工業化技術の開発をおこなってきた。さらに最近では新たなニーズへの対応として DLC (ダイヤモンドライクカーボン) に代表される耐摺動摩耗皮膜についても取り組んでいる³⁾。

本稿では、とくに当社 AIP 装置の技術展開と、新たに開発した新型蒸発源 (以下ファインカソード) およびそれによる皮膜特性について紹介する。

1. AIP 法の原理と特長

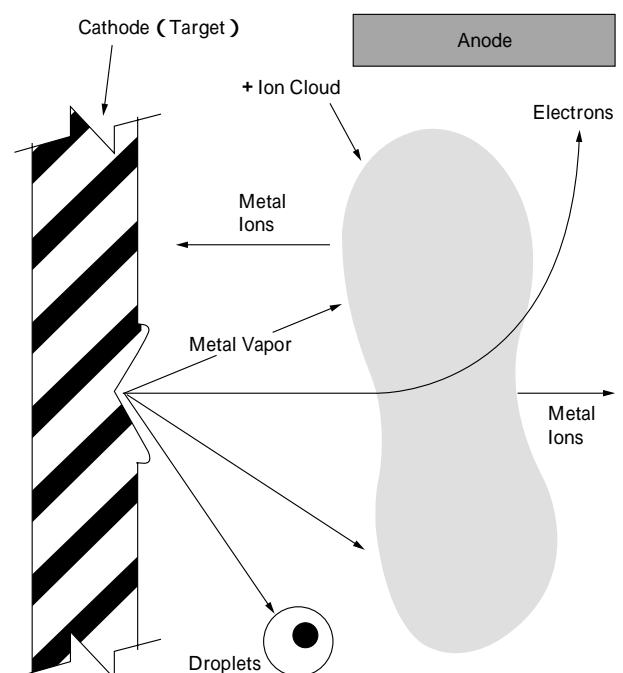
AIP 法は真空雰囲気において、ターゲット (皮膜形成材料) をカソード (陰極) としアノード (陽極) との間で真空アーク放電を発生させ、ターゲット表面から材料を蒸発、イオン化し、負のバイアス電圧を印加したワーク (被コーティング物) 表面にイオンを堆積させることにより、皮膜を形成する薄膜コーティング方法である。

真空アーク放電が開始されると、カソード表面上に数 μm 径のアークスポットと呼ばれる溶融領域が発生する。アークスポットの物理現象に関しては、第 1 図に示す Daalder や Plyutto らが提案したモデルが妥当と考えられている⁴⁾⁻⁶⁾。

AIP 法によるコーティングは、通常、数十～数百 A 程

度のアーク放電であるため、直径 $10\mu\text{m}$ 程度のアークスポットには $10^6 \sim 10^8 \text{A}/\text{cm}^2$ に及ぶ高密度の電流が集中するため、ジュール加熱などにより $4000 \sim 10000\text{K}$ という高温を発生し、カソード材料を瞬時に溶融蒸発させると同時にその多くの部分をイオン化する⁷⁾。したがって HCD (ホローカソード) 方式などの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やモリブデンなどの高融点金属も比較的容易に蒸発させることが可能である¹⁾⁵⁾。

さらにアークスポットでの蒸発は、瞬時におこなわれるため融点と蒸気圧の異なる材料を組合せた合金をターゲット材料に使用しても合金成分比をほぼそのまま転写した皮膜をえることが可能である。また、アーク溶接のような大気中でのアーク放電と異なり、真空アーク放電では、このアークスポットが陰極であるターゲット表面上を 10m/s 程度の速さでランダムに動き回る⁶⁾⁷⁾ため、ターゲット表面はつねに固体の状態を保つことができ



第 1 図 アークスポットのモデル
Fig. 1 Model of an arc spot region

る。そのため AIP 法ではワークに対しターゲットを最適な位置に配置することが可能である。また、アークスポットの近傍においては蒸発したカソード物質の 30～80% がイオン化されるため⁷⁾、活性度が高く緻密な膜が容易に形成でき、炭窒化膜などの成膜時の反応性が良好である。

いっぽう、アークスポットでは同時に電氣的に中性な溶滴であるドロプレット（以下マクロパーティクル）が発生し放出される。この AIP 法における副産物はしばしば皮膜の表面粗度の観点からはデメリットとなるため、このマクロパーティクルの発生を抑える蒸発源の研究開発も盛んにおこなわれている²⁾。

2. AIP 技術の展開

ここでは、AIP 法を工業生産技術として実現する装置技術について当社の取組みを紹介する。

まず、AIP 法を実現する装置を第 2 図に示すが、基本的な構成は次のとおりである。

- a) 真空状態を維持するための真空チャンバ
- b) 真空チャンバを真空にするための真空排気ユニット
- c) ターゲット（皮膜形成材料）を蒸発させる蒸発源（カソード）
- d) 蒸発源に放電電流を供給するアーク電源
- e) ワーク（被コーティング物）を搭載する回転テーブル
- f) テーブルを介してワークに負の電位を与えるバイアス電源
- g) 反応性皮膜を形成するためのガス導入系
- h) それらを制御するための制御系

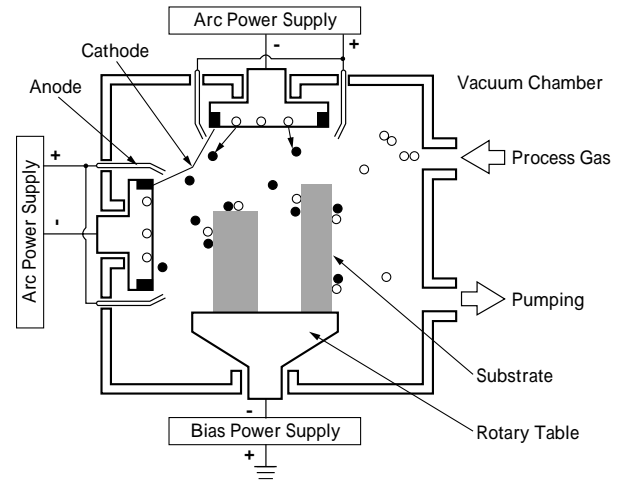
当社では 1986 年にこの基本構成を持つパッチ式 AIP 装置を実用化して以来、切削工具、機械部品、金型、装飾品などの多様な工業用、研究開発用ニーズに対応した AIP 技術および装置を開発実用化してきた。その代表的なものを紹介する。

1) パッチ式 AIP 装置

通常、工業的に使用されるパッチ式 AIP 装置は基本的には上述と同じ構成であり、真空チャンバの側面に平板ターゲットを有する蒸発源を配置するとともに、同チャンバ内にワーク積載用テーブルが搭載されている。ここで、蒸発源は縦方向に複数配列することによりコーティング空間内の縦方向の膜厚分布を確保し、テーブルには遊星回転機構を有することで多量のワークを均一にコーティングできるように考慮されている。

当社ではこの基本的な機能に経験に基づく改良を加え、さらにより高品質で均質なコーティングを実現するために後述する新開発ファインカソードを搭載した新型パッチ式 AIP 装置を開発し 1999 年に上市した（第 3 図）。この装置の主な特長を以下に示す。

- ・新開発ファインカソードによる高品質皮膜形成が可能
- ・蒸発源段数の最適化により処理空間での膜厚分布を改善
- ・熱フィラメント型プラズマ源による強化型ガスイオンボンバード機能により皮膜の高品質・高密着性を実現



第 2 図 AIP 装置の基本構成
Fig. 2 Schematic drawing of AIP system

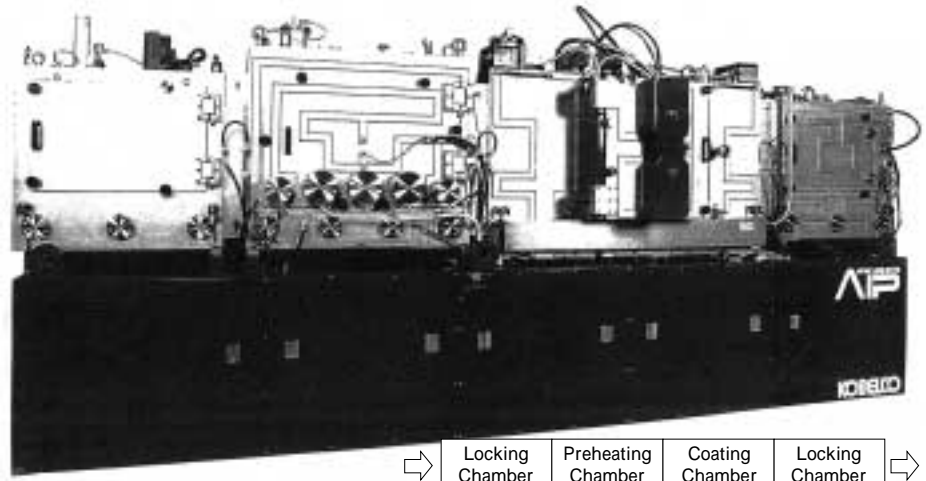


第 3 図 新型パッチ式 AIP 装置/AIP-S40
Fig. 3 New AIP system / AIP-S40

- ・高温ヒータの採用およびゾーン分割により均一でこれまで以上の高温域までのワーク昇温を実現
- ・熱電対による直接ワーク測温機能およびワーク温度制御機能により、低温度から高温域までの正確なワーク温度管理が可能
- ・新設計のマンマシンインターフェースによる簡単で快適な操作性と全自動コンピュータシステムによる高いプロセス再現性を実現

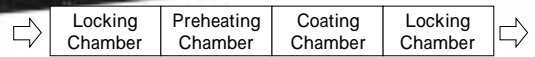
2) インライン式 AIP 装置⁸⁾

標準的な AIP 装置では初期真空排気、予熱、ボンバード（イオンエッチング）、コーティング、冷却の一連の工程を一つの真空チャンバでおこなうのに対し、これらの各工程をそれぞれ専用のチャンバでおこない、さらに前後の搬送ラインと連動させることにより自動車部品や工具などの大量連続生産用として実用化したものがインライン式 AIP 装置（AIP-IV65）である（第 4 図）。この装置構成では、コーティングをおこなう処理室は常時真空に保持されるため高い生産性に加え高い安定性を実



第4図 インライン式 AIP 装置/AIP-IV65

Fig. 4 AIP-IV65 Inline series (Mass production use)



現できる。

3) 厚膜コーティング用 AIP 装置^{9, 10)}

通常の AIP 法で形成される皮膜厚さは数 μm 程度であるが、ピストンリングのように用途によっては数十 μm の厚膜コーティングが要求される^{11, 12)}。この場合には長時間の安定運転が可能で、処理コストに対しターゲット費用が大きな比率を占めるためターゲットコストの安い装置が必要となる。

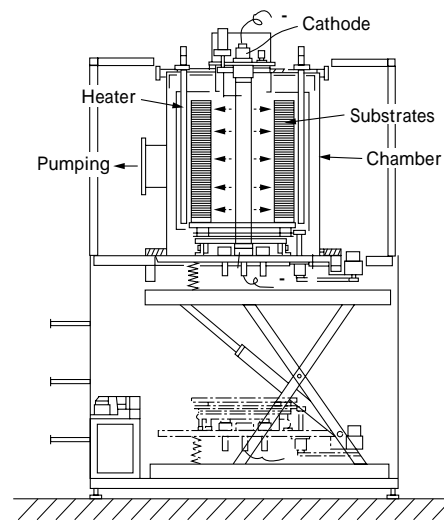
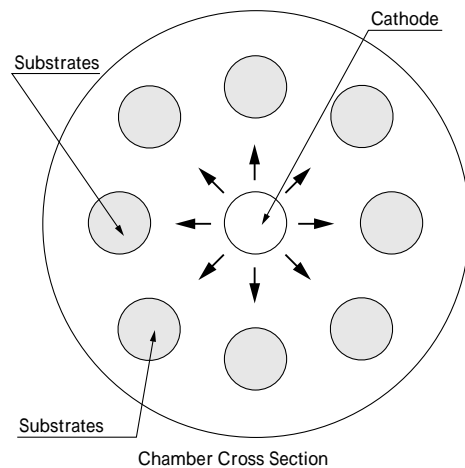
当社では通常は平板ターゲットを真空チャンバの側壁に配置するのに対し、円筒状ターゲットを採用した蒸発源を開発し真空チャンバの中心に配置することで内側から外側に向かってコーティングをおこなう厚膜コーティング用 AIP 装置 (AIP-R500) を実用化している (第5図)。このような構造を採用することにより、平板ターゲットと比較して、ターゲットの歩留りを大幅に向上させることができると同時に、蒸発材料が中心から周囲のワークに向かって全方位に放出されるので、蒸気の捕捉率を向上させることができ、処理コストの低減に大きく寄与する。また、ターゲット寿命の大幅な向上とともに長時間の安定したアーク放電を維持することができるため、ターゲット交換頻度も大幅に減少し容易なメンテナンス性も実現している。

4) 箔コーティング用 AIP 装置

その他特殊用途として実用化したロールコータ方式 AIP 装置 (AIP-W500) を紹介する。AIP-W500 は、箔へのコーティングをおこなうため、ロール状に巻いた厚さ数十 μm の箔を真空チャンバ内で巻き出し、加熱脱ガス室、ダンサーロールを経てコーティングロール上で AIP コーティングした後にはふたたびダンサーロールを経て巻き取る機能を保有した AIP 装置であり、幅 500mm の金属箔の両面に 1~5m/分の搬送速度でコーティングをおこなうことが可能である。具体的な実施例としては電解コンデンサの機能向上対策として電極材料であるアルミ箔への TiN 皮膜形成に活用されている。

3. 新開発ファインカソード

AIP 法による蒸発過程の副産物として発生するマクロパーティクルとはターゲット材が蒸発する際にターゲットの固体状態部と蒸発部の間にわずかに存在する液相部



第5図 厚膜コーティング用 AIP 装置/AIP-R500
Fig. 5 AIP-R500 (Mass production use for thick film)

が微少な溶滴 (ドロップレット) となって飛散し皮膜に混入するものである。バルブアジャスティングシムの事例^{13, 14)}のようにこのマクロパーティクルをフリクション低減の手段として積極的に利用する場合も例外的にはあるが、通常は皮膜粗度の観点より有害物として扱われ、平滑な表面が必要な用途に対して AIP 法の適用を制限する要因となっていた。

当社ではこれまでにこの解決策としてターゲット前方に同軸に配置した励磁コイルによる磁場をもちいたフィルタ型蒸発源 (以下スーパーカソード) を商品化してき

た(第6図)。

この製品の特徴は、マクロパーティクルのターゲット表面に平行な方向に飛散しやすく電的に中性で磁場の影響を受けない性質を利用し、ターゲット前方のコイルにより発生させた磁力線により蒸発材料のイオンと電子によるプラズマのみをコイル内部の空間をとおしてワークに導くことで、マクロパーティクルの多くを蒸発源内部に捕獲するものである。これにより通常の蒸発源(以下ノーマルカソード)にくらべマクロパーティクルの混入を約1/10以下に低減できるため、アルミの混入でターゲットが低融点化しマクロパーティクルが発生しやすいTiAlN成膜などで活用されてきた。ただ、直線式フィルタ方式のため完全なマクロパーティクルの遮断を狙った屈曲式フィルタ方式にくらべると蒸気ロスが少ないが、それでもノーマルカソードにくらべると蒸着速度が約50%に低下するという問題があった。

そこで、当社では蒸着速度の維持とマクロパーティクルの低減の両立を目指した蒸発源の開発に着手し、新開発ファインカソードを実用化した。この特徴は、磁場とアークスポットの移動挙動の関係に着目し、ターゲット表面の水平磁場成分分布を最適化することでアークスポットの移動速度を加速し、マクロパーティクルの発生源であるアークスポット液相部領域の発生を極力低減させることでマクロパーティクルの発生そのものを抑制するものである。実測した結果ではアークスポット移動速度はノーマルカソードのほぼ2倍に加速されており、マクロパーティクルの大きさおよび数量は1/10以下に抑制できている。さらに、この方式はフィルタ型蒸発源のような蒸発源内に捕獲される蒸気ロスがないため蒸着速度の低下も防止できる。以下にファインカソードにて成膜した皮膜の特性例を示す。

1) 表面性状

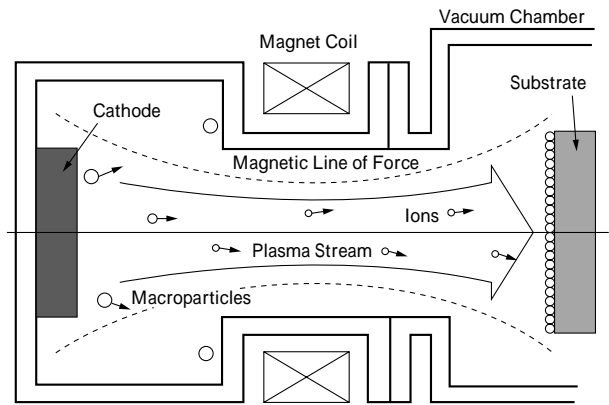
第7図a)にノーマルカソード、同b)にファインカソードによるTiAlN皮膜のSEM観察結果を示す。マクロパーティクルの発生しやすいTiAlN皮膜にもかかわらずファインカソードではその大きさ、数量を大幅に低減できている。

2) 膜質

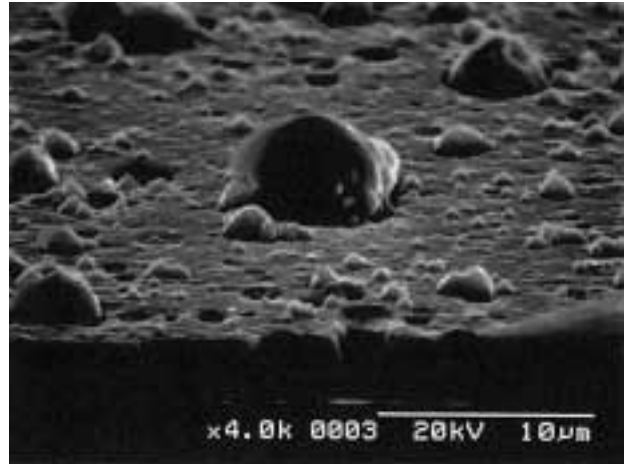
第8図にファインカソードによるTiN皮膜のX線回折の結果を示す。第8図a)は(111)優先配向を、同b)は(200)優先配向を狙ったものであるが、ファインカソードでは優先配向のピークが明確に立ち上がり、他配向のピークはほとんどなく結晶配向の制御性に優れていることがわかる。また、成膜時のバイアス電圧や反応ガス圧力に対する硬度など膜質の変化も顕著であり、膜質の制御が容易である。

(3) 断面組織

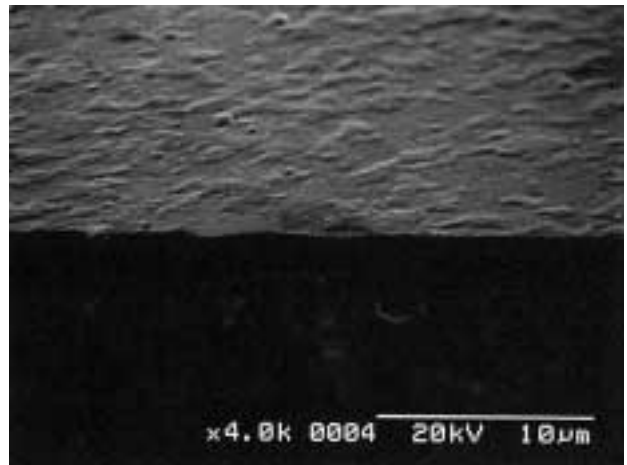
第9図にファインカソードによるCrN厚膜の断面SEM観察結果を示す。100 μ m以上の厚膜成膜であり長時間の安定運転が必要であるが途中でも異常なく処理をおこなえた。断面組織はマクロパーティクルの混入もなく全域で緻密な柱状晶組織となっている。



第6図 フィルタ型AIP蒸発源/スーパーカソード
Fig. 6 Filtered type AIP cathode / Super Cathode



a) Deposited by previous cathodes



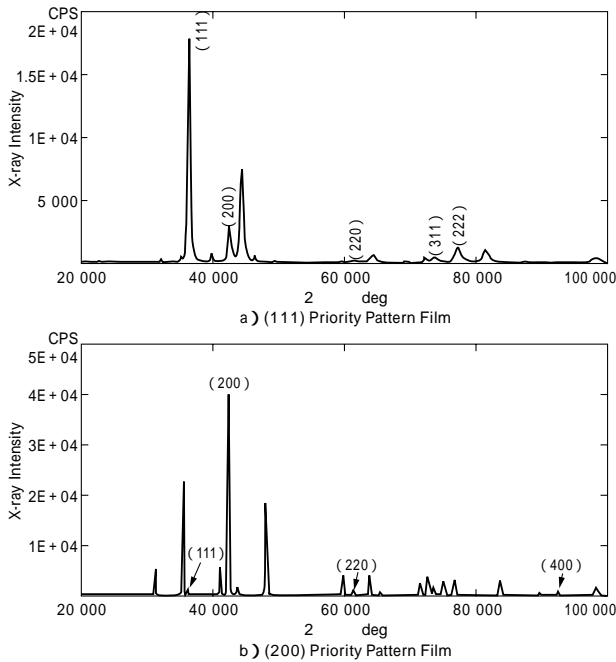
b) Deposited by modified cathodes

第7図 TiAlN被膜のSEM観察結果

Fig. 7 SEM photo of deposited TiAlN films prepared by AIP-S40

むすび = 本稿ではコーティングへの多様なニーズに対応した当社AIP技術の取組みと新開発ファインカソードについて紹介してきた。しかし、コーティング皮膜への要求は日々高性能・高機能化しておりそれを満足させるためにはさらなるプロセス、膜種、装置技術の開発が必要である。

たとえば、切削工具においては今やコーティング工具は常識であるが、これまで以上の高速切削や重切削、あるいは人や地球にやさしいドライ切削のニーズが高まっており、CBN、ダイヤモンド、Al₂O₃などが従来のTiAlN

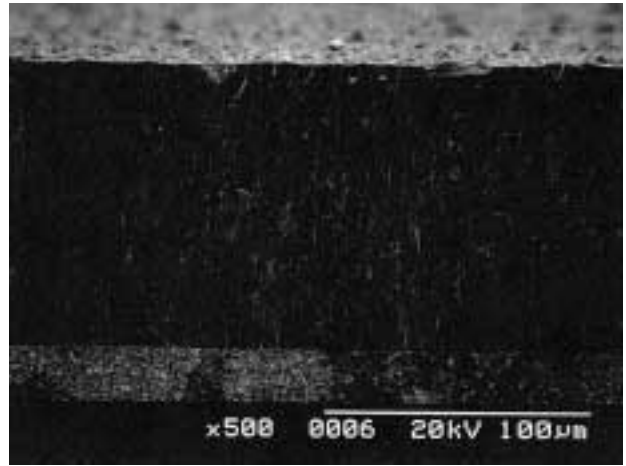


第8図 TiN 皮膜の X 線回折結果
Fig. 8 X-ray diffraction patterns of deposited TiAlN films prepared by AIP-S40

を超える薄膜として期待されている¹⁵⁾。

また、自動車部品関連では燃費改善、排ガス規制などの環境問題への対応のため、高性能の摺動耐摩耗皮膜のニーズが一段と高まってきており、最近ではとくに DLC 膜や MoS₂ 膜などが従来の CrN を超える薄膜として注目されている³⁾。

このように新しいコーティング皮膜が開発されつつあるが、これまでのような単一組成、単一プロセスによる皮膜特性の改善では実用化において限界が予想される。具体的には優れた膜特性を発揮させるための耐高温酸化性や高密着性の両立などが当面の問題となっている。したがって、今後はそれぞれの長所を活かした、あるいは短所を補完した複合化膜として積層、微粒子、超格子構造などの手法が試行されてゆくものと予測される。その成膜方法についても各皮膜に適したプロセスがあるため、すべてが AIP 法によるとはいえないが、たとえば AIP 法 + スパッタ法やイオン注入法などのような複合化プロセスが主流となっていくものと思われる。そのなかで、高密着性や高生産性など優れた特徴をもつ AIP 法は今



第9図 CrN 厚膜皮膜断面の SEM 観察結果
Fig. 9 SEM fracture cross section of deposited CrN films prepared by AIP-S40

後ともその中核に位置する技術であると確信している。

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) K. Akari et al. : Surf. Coat. Technol., Vol.43/44 (1990) p.312.
- 3) 赤理孝一郎：日刊工業ゼミナル，UBMS スパッタ法による DLC 膜形成技術とその応用，(2000)。
- 4) J. E. Daalder : J. Phys. D., Vol.16 (1983) p.17.
- 5) P. C. Johnson : Physics of thin films, Vol.14 (1989) p.129.
- 6) H. Randhawa et al. : Surf. Coat. Technol., Vol.31 (1987) p.303
- 7) J. E. Daalder : J. Phys.D., Vol.11 (1987) p.1667.
- 8) H. Tamagaki et al. : Surf. Coat. Technol., Vol.54/55 (1992) p.594.
- 9) 公開特許，平 5-081406.
- 10) US PAT, No.5730847.
- 11) 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)
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 池田 孜：日本機械学会誌，Vol.102, No.962 (1999) p.11.