

# NEW ニュー ダイヤモンド DIAMOND

Japan  
New  
Diamond  
Forum

ダイヤモンド、カーボンナノチューブ等の基礎研究・応用技術の明日を拓く!

# 96

2010. 1

DLC 特集





# 合成

# T字状フィルタードアーク蒸着 による DLC 合成とその最新 動向

豊橋技術科学大学  
滝川 浩史



滝川 浩史

## アブストラクト：

機能性薄膜形成法の一つである真空アーク蒸着法について概説し、同法が抱えるドロップレット問題を解決したフィルタードアーク蒸着法（FAD）について紹介する。中でも、筆者らが開発したT字状フィルタードアーク蒸着装置（T-FAD）は、真空アークプラズマの輸送方向とドロップレットの飛行方向とを分離するため、固体ドロップレットを放出する黒鉛陰極を用いたDLC成膜に有効である。真空アーク放電は、高エネルギーイオンを発生させるため、最も高密度のDLCであるta-C（テトラヘドラルアモルファスカーボン）を形成できる。一般的なDLCと比べ、ta-Cは高硬度、アルコール系潤滑剤下で超低摩擦、非凝着性が高い、などの特徴がある。T-FADを用いると、ドロップフリーの高品質ta-Cが形成できる。現在、アルミ合金のドライ切削用工具やガラスレンズ金型の表面保護膜への実用化が進みつつある。

## 1. 真空アーク蒸着

物理的成膜法であるPVD法の一つに真空アーク蒸着法がある。この方法は、アークイオンプレーティング法あるいはマルチアークPVD法と呼ばれ、機能性薄

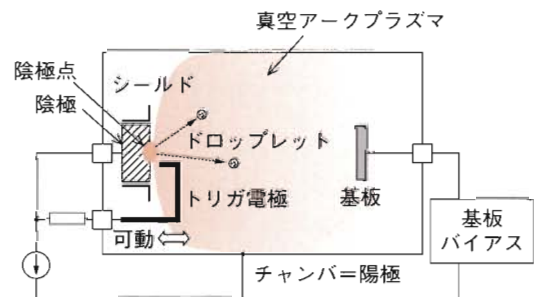


図1 真空アーク蒸着装置の基本型

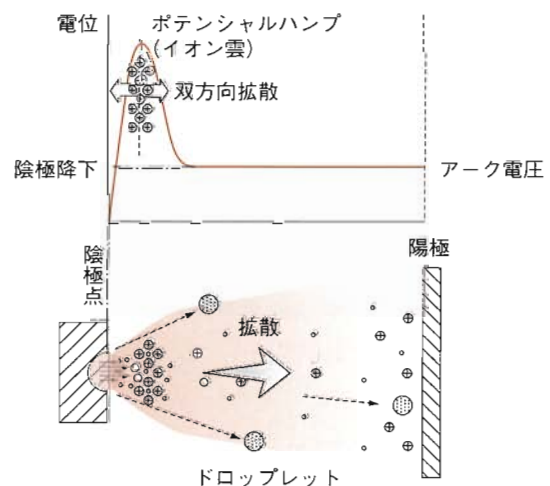


図2 真空アークの電位分布と粒子の挙動

膜形成法として工業的に広く利用されている。同法で形成される主な膜種は、TiN、TiAlN、CrN、TiCN、TiCなどである。これらは、機械部品への耐摩耗性、耐熱性、しゅう動性付与といったいわゆる保護膜、あるいは装飾性コーティングなどとして利用されている。

真空アーク蒸着装置の基本型を図1に示す。導電性固体（通常、金属または合金）を陰極とし、真空アーク放電で生じる高温の陰極点によってその陰極材料を直接蒸発させ、陰極材料蒸発物質を構成粒子としたプラズマを発生させる。窒化物や酸化物を形成する場合

滝川 浩史 (Hirofumi Takikawa)

1984年 豊橋技術科学大学電気・電子工学課程卒業

1986年 豊橋技術科学大学大学院電気・電子工学専攻修士課程修了  
豊橋技術科学大学電気・電子工学系助手、釧路工業高等専門学校  
電気工学科助教授などを経て

現在 豊橋技術科学大学電気・電子工学系教授  
博士（工学）

### ■主として行っている業務・研究

真空アークプラズマおよび大気圧メゾプラズマの発生と応用（薄膜合成、表面処理）、ナノカーボンの合成と応用（電子エミッタ、電池電極）、エコエネルギー有効利用技術。

### ■勤務先

豊橋技術科学大学 電気・電子工学系  
〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1

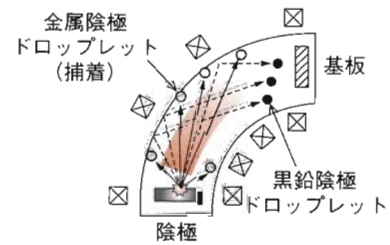


には、雰囲気中に窒素や酸素を導入し、反応性蒸着を行う。図2に、真空アーク放電プラズマの空間電位分布と粒子の挙動を示す。陰極点近傍にはイオン集積によるポテンシャルハンプ\*1が形成され、その領域から陽極方向に向かってドリフトするイオンは、ハンプの電界によって加速され、電子エネルギーやアーク電圧よりも高いエネルギーを得る。薄膜形成用真空アークにおける電子エネルギーは約2eVであるが、イオンエネルギーは数十eVである。ほかの放電プラズマでは、このような高いエネルギーをもつ固体源イオンを直接生成するのは困難である。

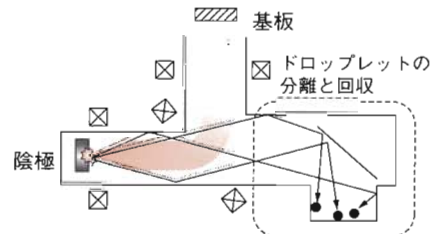
## 2. フィルタードアーク蒸着

真空アーク放電は、陰極点から陰極材料の微粒子（ドロップレット）\*2を放出するという現象を有する。そのサイズは、通常、サブミクロン～十数ミクロンであり、これが生成膜に付着すると、膜の平坦性や均質性を失うことになる。冒頭で述べた機能性膜の場合、この問題を抱えつつも工業的に利用されている。

ドロップレット問題を解決する方法として、フィルタードアーク蒸着法（Filtered Arc Deposition: FAD）がある<sup>1)</sup>。これは、基板から見えない位置に陰極（およびチャンバから独立した陽極）を配置し、陰極点から発生したプラズマのみを磁界（と電界）によって屈曲させて基板まで輸送するものである。ドロップレットは電磁気的な作用を受けなため直進し、その結果、屈曲して輸送されるプラズマから分離される。図3(a)に従来から利用されているトーラス型FADを示す。この方法は、溶融ドロップレットを放出する金属系陰極の場合にはおおむね有効である。しかしながら、DLC成膜時に用いる黒鉛陰極の場合は有効ではない。なぜなら、黒鉛ドロップレットは固体であり、トーラス状のプラズマ輸送ダクトそれ自体がドロップレットの進行ガイドになってしまうからである。

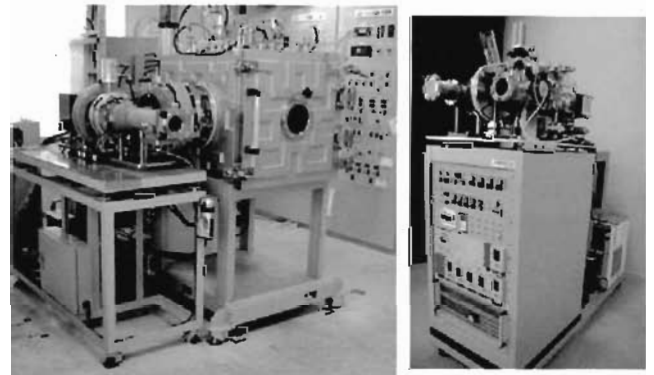


(a) トーラス FAD



(b) T字状 FAD (T-FAD)

図3 トーラス FAD と T-FAD におけるドロップレット フィルタリングの概略



(a) 生産用 T-FAD

(b) 小型 T-FAD

図4 生産用 T-FAD とラボ向け小型 T-FAD

以上のような背景から、プラズマの輸送方向とドロップレットの飛行方向とを分離する T 字状 FAD (T-FAD) を開発した。この模式図を図3(b)に示す。また、図4に、生産用 T-FAD と研究機関などでの膜開発用途向け小型 T-FAD を示す。

## 3. テトラヘドラルアモルファスカーボン膜

一口に DLC といってもさまざまな DLC がある<sup>2)</sup>。最近では、炭素のみからなり、比較的  $sp^3$  リッチなものを ta-C (tetrahedral amorphous carbon),  $sp^2$  リッチなものを a-C と呼ぶ。これらに水素を含むものは、ta-C:H, a-C:H と記述される。これらのなかで最も高い密度を有するのは ta-C であり、これはほかの DLC と比べて以下の特徴をもつ。

- ・高密度（ゆえに、高硬度、高温耐熱、耐酸化性）
- ・光学的に透明（装飾に有利）

\*1 ポテンシャルハンプ：陰極点においては、大電流を維持するだけの量の熱電子が放出されるとともに、陰極材料が蒸発する。蒸発した陰極材料は熱電子との衝突によってイオン化する。蒸発物質の拡散よりもイオン化のほうが速いため、陰極点近傍にイオンが集積し、正の空間電荷をもつ領域がハンプ形状をもって形成される。ハンプの傾きは高電界を形成し、ハンプ内からドリフトしてくるイオンはこの電界によって高エネルギーに加速される。

\*2 ドロップレット：大電流放電であるアーク放電の場合、放電プラズマと電極（特に陰極）固体との接点境界に形成される陰極点における電流密度は極めて高い。その結果、陰極点は極めて高温となり、激しい蒸発を伴う。陰極点の周囲においては陰極材料が突進し、数ミクロン～サブミクロンの微粒子となって放出される。この微粒子がマクロパーティクル、ドロップレットなどと呼ばれるものである。金属系陰極の場合に放出されるドロップレットはたいてい溶融しているが、黒鉛陰極の場合には固体状である。



図5 ta-Cコーティングの実用例（上：アルミ合金切削工具，  
下：ガラスレンズ成形用金型）

- ・低摩擦係数（特に、アルコール系潤滑環境下）
- ・非凝着性（特に、ガラスやアルミに対し）
- ・電氣的に高絶縁性

これらの特徴を生かしたさまざまな応用が検討されているが、ta-Cを工業的に生産できる方法は高エネルギーのイオンが得られる真空アーク法のみである。しかしながら、前述のようにドロップレット問題がある。一方、T-FADでは、ドロップレットフリーのta-C膜を形成できるため、表面の平坦性が高く（ドロップレットの付着や脱離による凹凸がない）、均質（組成がサブミクロンオーダーで均一）である。

最も古くから実用されているta-Cの応用は、ハードディスクの磁気ヘッド(スライダ)の表面保護膜である。この成膜にはFCVAというFADの一種が使われている。また、FADではなく、通常の真空アーク蒸着装置を用い、自動車エンジンのバルブリフタという機械部品へのta-C成膜が最近行われている。この場合、後処理でドロップレットを除去している。したがって、膜の平坦性は低い。

このような状況のなか、T-FADは、現在、アルミ合金の切削用工具（ドリル、エンドミル、インサートチップ）へのta-Cコーティングに利用されだした。ドロップレット付着がないため、従来よりも比較的厚膜が形成でき、その結果、切削性と寿命が向上した。また、ガラスとの凝着性がないことから、ガラスレンズモールドプレス用金型の保護膜としての利用も進んできている。これらの実用例を図5に示す。

本稿では、ta-C膜を形成できる真空アーク蒸着法とフィルタドアーク蒸着法について概説するとともに、ta-Cの応用の一部を紹介した。Ta-Cは形成法が限られており、ほかのDLCのようには簡単につくれない。そのため、応用開発が遅れている。今後、フィルタドアーク蒸着装置の普及とともに、ta-Cの新たな応用展開に期待したい。

## 参 考 文 献

- 1) H. Takikawa and H. Tanoue: IEEE Trans. Plasma Sci., 35, pp. 992-999 (2007)
- 2) J. Robertson: Mater. Sci. Eng. R, 37, p. 129 (2002)