

機械技術

Mechanical Engineering

2018

7

Vol.66
No.8

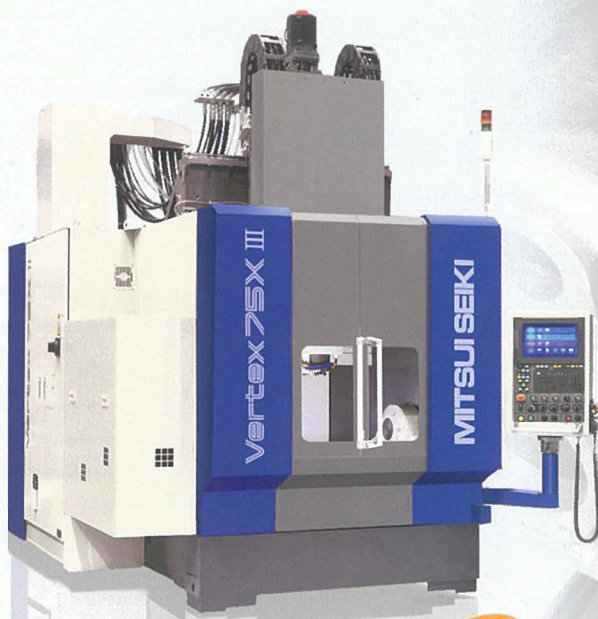
特集

進展する工具研削盤・再研磨・工具コーティング技術

レポート—CCMT2018見聞録

MITSUI SEIKI

精度・剛性にさらに磨きをかけた
省スペース5軸マシニングセンタ



5軸制御立形マシニングセンタ

NEW

Vertex 75X III



特集

進展する工具研削盤・再研磨・ 工具コーティング技術

〔解説〕

- DLC 膜の工具への応用～ツールコーティングラボラトリの試み～
.....豊橋技術科学大学 滝川 浩史、針谷 達、谷本 壮・18

〔解説〕

- 炭化バナジウムコーティング切削工具の開発
.....(地独)鳥取県産業技術センター 加藤 明、今岡 睦明・23

〔解説〕

- 再研削工具の優位性ピーティーティー(株) 青木 渉・28

〔工具研削盤編〕

- TGR-250 によるテーパボールエンドミル再研削(株)宇都宮製作所 田中 敦則・34
- シュッテ社製 CNC 万能工具研削盤による特殊フルート部位加工およびギア加工
.....(株)ゴーショー 中村 文治・38
- 切削工具の高精度化と耐摩耗性の追求YKT(株) 海瀬 聖次郎・42

〔工具コーティング技術編〕

- EgiAs コーティングを施した切削工具の特徴
.....オーエスジーコーティングサービス(株) 杉田 博昭、王 熾・46
- 高硬度鋼加工用コーティング TH3 を適用した小径ボールエンドミル
.....三菱日立ツール(株) 田牧 賢史朗・50
- 新開発 NX コーティングと「マルチドリルネクシオ MDE 型」の特長と加工事例
.....住友電工ハードメタル(株) 瀬戸山 誠・54
- 高硬度材加工工具用被膜「DH 1」の特徴と加工事例
.....ダイジェット工業(株) 行成 伸二、春日 良一・59

〔コーティング技術応用編〕

- DLC コーティングの最新技術動向日本アイ・ティ・エフ(株) 辻岡 正憲・62
- 切削工具におけるハードコーティングの製法と特徴
.....日本コーティングセンター(株) 斉藤 邦夫・66

〔解説〕

DLC 膜の工具への応用～ツールコーティングラボラトリの試み～

豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系 教授 滝川 浩史 (Hirofumi Takikawa)

電気・電子情報工学系 助教 針谷 達 (Toru Harigai)

電気・電子情報工学系 助教 谷本 壮 (Tsuyoshi Tanimoto)

〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1 TEL 0532-44-6727

1. はじめに

ダイヤモンドライクカーボン (Diamond-Like Carbon, DLC) 膜を大別すると、水素 (H) を含まず sp^3 構造リッチな ta-C (tetrahedral amorphous carbon)、H を含まず sp^2 構造リッチな a-C (amorphous carbon)、H を含み sp^3 構造リッチな ta-C:H (hydrogenated tetrahedral amorphous carbon)、H を含み sp^2 構造リッチな a-C:H (hydrogenated amorphous carbon) の 4 種である。なお H 以外の元素、例えばシリコン (Si)、フッ素 (F)、窒素 (N)、タングステン (W) やチタン (Ti) などを含んだ DLC 膜もある。すなわち、DLC といっても、実は多様な DLC が存在する。本稿で取り上げる DLC は、ta-C に分類されるもので、H や他元素などの不純物を含まず、高 sp^3 比 (sp^3 構造リッチ) で、高密度 (おおよそ 2.8 g/cm^3 超) であり、DLC の中でも最も硬いものである。

なお、DLC の分類としては、密度とナノインデンテーション硬さとの関係で把握するのが分かりやすいため、その関係を図 1 に示す。ダイヤ

モンド、水素フリー DLC (ta-C, a-C)、水素入り DLC (ta-C:H, a-C:H) の位置関係が明確に分かる。この関係において、60 GPa 以上の硬さの ta-C をスーパー DLC と呼んでいる。

本稿では、スーパー DLC 膜の形成方法・装置をはじめ、工具への応用例として彫刻カッターの例を紹介する。また、DLC 膜の優位な特徴の 1 つは、金属間化合物とは異なり、除膜 (脱膜) が比較的容易であることである。これについても触れる。

2. 形成方法^{1)~5)}

DLC 膜形成の工業的主流は、プラズマ CVD 法と、イオン化蒸着法、スパッタリング法、プラズマイオン注入成膜法 (PBIID; Plasma Based Ion Implantation and Deposition) 法、および真空アーク蒸着法などの PVD 法 (Physical Vapor Deposition) である。膜質を考えた場合、CVD 法 (Chemical Vapor Deposition) と PVD 法とで分類するよりは、炭素源に何を用いるかで分類した方がよい。プラズマ CVD 法、イオン化蒸着法、および PBIID では、炭化水素ガスが原料であるため、水素フリーの DLC を形成できない。これに対し、真空アーク蒸着法とスパッタリング法では、基本的に黒鉛固体を原料として用いるため、水素フリーの DLC (ta-C, a-C) を形成できる。

さらに、イオンエネルギーの観点から見ると、真空アークの場合 2 桁 eV 以上であるが、スパッタリング法の場合、せいぜい 1~数 eV 程度であるため、スパッタリング法では高イオンエネルギーが必要なスーパー DLC の形成は望めない。

以上の状況から、スーパー DLC 膜 (ta-C 膜) の工業的形成法は真空アーク蒸着法^{6),7)}、ということになる。真空アーク蒸着法は、業界では、ア

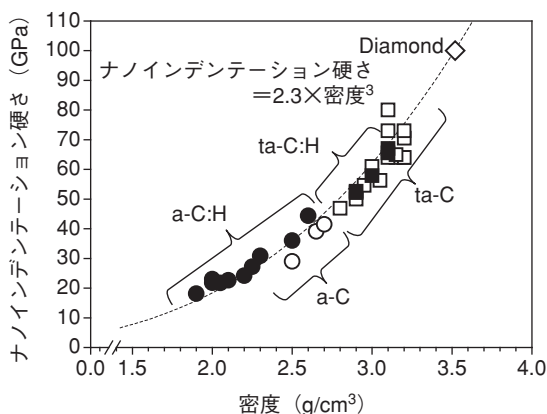


図 1 DLC 膜の密度と硬さとの関係

ークイオンプレーティング法 (AIP; Arc Ion Plating) とか、アーク PVD 法とか呼ばれている。学術的には、陰極アーク (カソードイックアーク) 蒸着法 (CAD; Cathodic Arc Deposition) とか、陰極真空アーク法 (CVA; Cathodic Vacuum Arc) とかと呼ばれることもある。同法は従来、窒化チタン (TiN)、窒化クロム (CrN)、窒化チタンアルミ (TiAlN) 膜など、窒化物系の硬質保護膜の形成が主体であった。最近では、ta-C 膜を工業的に形成できる唯一の手法としても知られ、利用されるようになってきている。

真空アーク蒸着法は、真空中でのアーク放電によって、陰極固体表面に高温の陰極点を形成し、そこから発生する陰極固体原料を起源としたプラズマを用いた蒸着法である。そのプラズマ中のイオンのエネルギーは 150 eV にもなる。このような高いイオンエネルギーは他の手法では得られない。スーパー DLC 膜形成には高いエネルギーのイオンが必要であり、同法はまさにうってつけの手法であるということになる。

ところが、真空アーク蒸着法では、陰極点からドロップレットと呼ばれる陰極材料のマクロ微粒子が副次的に放出され、このドロップレットが生成膜に付着すると、膜の平坦性、均一性、均質性を損なうほか、膜剥離や性能劣化を誘引する起点となる可能性があるという欠点がある。そこで、ドロップレットを生成膜に付着させないようにする手法として、フィルタードアーク法 (FAD; Filtered Arc Deposition) が考案された。Aksenov⁶⁾により、Ti 陰極のドロップレットが基板に付着することを防止したトラスフィルタが提案されて以来、多くのフィルタ形状が提案されている。金属陰極の場合、ドロップレットは熔融状態にあるため、フィルタダクト壁に固着する。しかし、DLC 形成に用いる黒鉛陰極のドロップレットは固体状であるため、ダクト壁で反射され、ダクト自体がガイドになってしまう。そこで考案したのが T 字形状のフィルタを持つ T 字状フィルタードアーク蒸着装置 (T-FAD) である。そのメーシ図と実機の一例を図 2 に示す。

T-FAD では、電磁石を用いて形成した磁界とフィルタダクトに印加した電界とによって、陰極から発生した真空アークプラズマを成膜室へ導く。ダクト形状が T 型であり、プラズマは T 字部で 90° 屈曲される。ドロップレットは陰極から

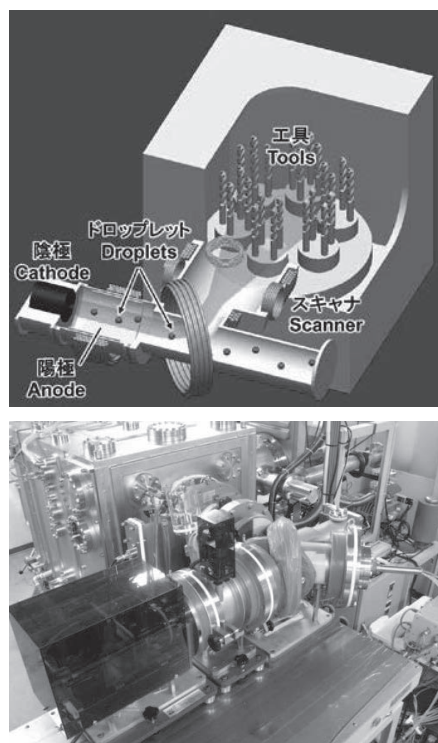


図 2 T 字状フィルタードアーク蒸着装置 (T-FAD)
(上) イラスト、(下) 実機例

直進方向に設けた捕集部で回収される。これによって、成膜室方向にはクリーンプラズマビームが得られる。ビーム状プラズマを用いて広い範囲を成膜するため、電磁コイルを用いたビームスキャナやビームアライナが併設される。チャンバ内には自公転機構が内設され、一度に多数の工具へのコーティングが可能である。

3. カッターへの応用例^{7)~9)}

切削工具の 1 つに、銘板刻字用彫刻カッターがある。ここでは、彫刻カッターへのスーパー DLC コーティング効果について紹介する。スーパー DLC コーティングを施した彫刻カッターを図 3 に示す。彫刻カッターは超硬 (WC) 製であり、



図 3 スーパー DLC コーティングカッター

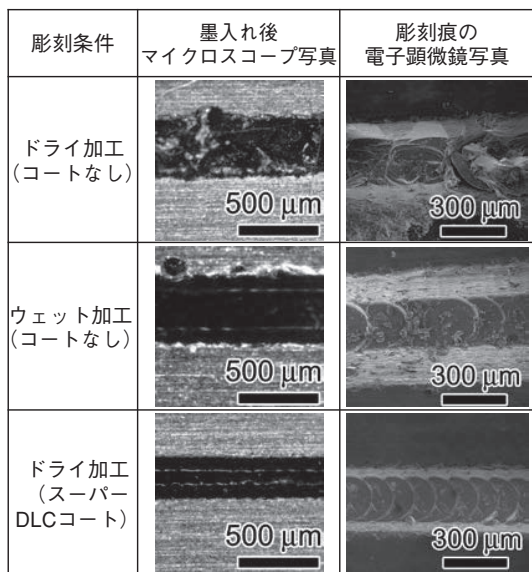


図4 彫刻痕の観察(被削材:アルミ)

通常では表面コーティングは施されていない。従来の銘板刻字工程では、金属板に切削油を滴下し、切削加工を行う。切削後の油除去作業の手間や、その環境性を考慮すると、切削油を使用しない切削加工が望まれる。そこで、スーパー DLC コーティングカッターを用いて、切削油を用いないドライ切削加工を試みた。

切削試験機(卓上 CNC フライス盤 PSF-240-CNC, Prospec)を用いて、銘板(アルミ、銅、真ちゅう)に対し、カッター回転速度 2,000 rpm、彫刻設定深さ 0.1 mm、送り速度 100 mm/min、二度彫り(真ちゅうは一度彫り)、彫刻長 200 mm の条件で切削試験を行った。図4に、切削後の銘板上彫刻痕を観察した様子を示す。通常のコートなしカッターを用いた場合のドライ加工では、切削エッジの乱れやバリの発生、被削材の溶着が見られる。これに対し、スーパー DLC コーティングカッターを用いたドライ加工では、そのような切削精度を低下させる要因が一切見られず、線幅が一定に保たれており、底面にはきれいなツールマークが観察できる。さらに興味深いのは、スーパー DLC コーティングカッターはドライ加工にもかかわらず、切削油を用いたウェット加工の場合よりも切削痕が高品質であることである。

試験後のカッター先端(刃先)を、走査型電子顕微鏡で観察した様子を図5に示す。コートなしの場合、アルミの加工では、刃先に切削したア

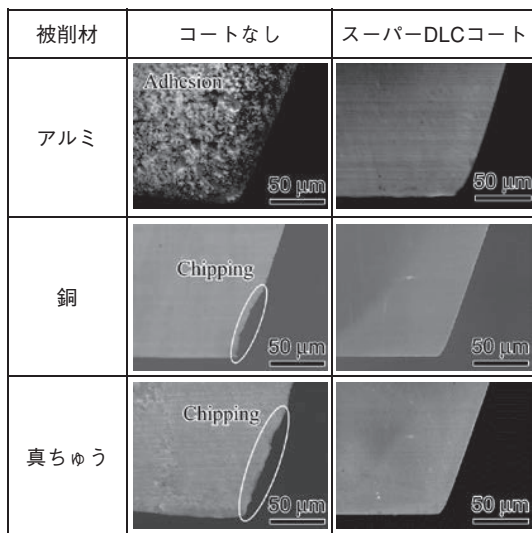


図5 切削後カッター先端の電子顕微鏡写真

ルミの溶着が観察できる。これに対し、スーパー DLC コーティングカッターの刃先には、アルミの溶着が全く見られない。これは、スーパー DLC の低摩擦特性がアルミ材とカッターとの接触面における抵抗を低減し、熱の発生を抑制して、切削熱によるアルミの溶融を防ぐためであると考えられる。また、DLC 自体にもアルミが溶着しにくい傾向がある。

銅板と真ちゅう板に対する切削試験では、コートなしの場合、刃先が細かく欠けるチッピングが見られたが、スーパー DLC コーティングカッターでは刃先の欠けが一切なく、また銅や真ちゅうの溶着も見られなかった。銅や真ちゅうは、アルミに比べ硬い。被削材が硬いほど、切削時に刃先へかかる負荷が大きく、コーティングを施していないカッターでは刃先が欠けたと考える。

図6は、切削時に発生した切子の様子である。一般的に、切削工具の切れ味が良いほど、切子表面には擦れ傷や摩擦熱による溶融がなく、切子は金属光沢を有する。どの金属被削材においても、コートなしカッターを用いた場合、金属光沢を有する切子はほとんどなく、スーパー DLC コーティングカッターを用いた場合の切子には、金属光沢が確認でき、コーティングの有無によるカッターの切れ味の違いが分かる。

製品の生産性には、切削工具の送り速度が影響し、送り速度が速いほど加工が短時間で完了するため望ましい。DLC コーティングを施すことで、



図6 切子の状態

切削抵抗が低減すれば、送り速度の向上も期待できる。実際、スーパー DLC コーティングを施すことで、従来の2倍の送り速度でもドライ切削加工が可能であった。

4. DLC 膜の除膜

DLC 膜の除膜は、成膜のやり直しや母材再利用、つまり歩留り改善や省資源の観点において、成膜失敗工具や使用済み工具などから DLC 膜を除去するために必要である。除膜方法には、機械的な研磨などによる方法や薬品などを用いた化学的な方法がある。これらの方法では、母材への負荷が大きく処理時間も長い。特に薬品を利用した場合に廃液処理も問題となる。そのため、母材への負担が少なく高速処理が可能な方法が求められている。また、製造現場などの利用現場では大量の工具を一度に処理するため大面積処理も求められている。ここでは、本研究室で取り組んでいるスーパー DLC 膜の除膜について報告する。

DLC 膜の除膜方法として酸素プラズマを用いている。酸素プラズマ中のイオンやラジカルを DLC 膜中の炭素と反応させ、炭酸ガスとして除膜する方法である。酸素プラズマの生成方法には、低電力でプラズマの生成が可能、かつ安定に大面積処理可能なグロー放電を用いている。

除膜試験用として、超硬 (WC) 基板上に成膜した厚さ約 400 nm のスーパー DLC 膜を用いた。スーパー DLC を成膜し、基板表面に Si 基板

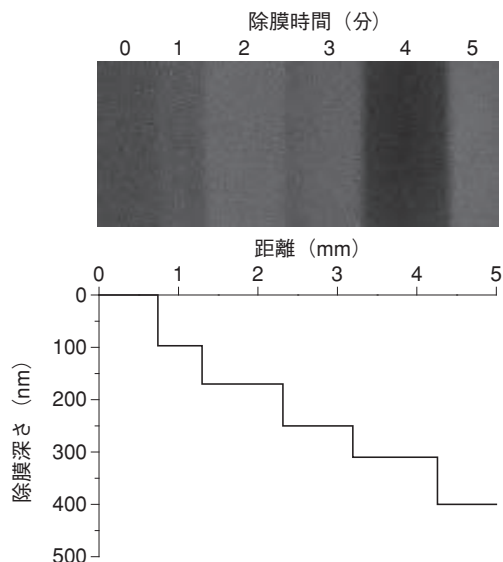


図7 処理時間に対する膜表面の変化

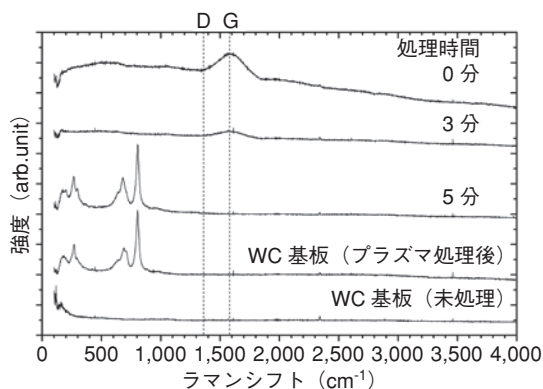


図8 除膜に対するラマンスペクトルの変化

をマスクとして設置し、1分毎にマスクをずらしながら5分間除膜を行った。その結果の基板表面の様子を図7に示す。処理時間の経過に伴い、基板表面の干渉色に変化が見られた。この干渉色の変化は膜厚の変化を示している。膜厚と色の関係、および触針式段差計で膜厚の変化を求めたところ、処理時間の経過とともに除膜深さが増加した。

処理表面の膜質変化を、ラマン分光分析を用いて調べた。その結果を図8に示す。処理時間0分の未処理の場合では、1,580 cm⁻¹付近にスーパー DLC 特有のスペクトルが観測された。3分後ではスペクトル強度は減少したものの、未処理の表面と同様な形状のスペクトルが観察された。このことから、スーパー DLC 膜は組成を変化す

ることなく、徐々に除去されることが分かった。しかし、5分間除膜した場合の表面においては、基板が酸化してしまったことが分かる。

酸素プラズマを用いた DLC 膜の除膜は有効な方法であるものの、母材が酸化しないようにしなければならない。そのためには DLC 膜の膜質や膜厚などの条件に対し、処理時間などを適切に制御する必要がある。

5. おわりに

豊橋技術科学大学の当研究グループの柱の研究テーマの1つは、表面処理・加工に適したプラズマ装置の開発と機能的応用であり、真空アーク放電に関する特性の理解、発生や制御、成膜技術などに関して多くの知見を蓄積し、いくつかのフィルタードアーク蒸着装置を開発してきている。その1つの T 字状フィルタードアーク蒸着装置は、高品質のスーパー DLC 膜を形成する装置として高く評価され、工具メーカーなどでも導入が進んできており、一定の社会貢献ができているのではないかと自負している。

本稿では、ツールコーティングラボラトリとしての研究成果の一部を紹介したが、今後、次のような課題に取り組んでいきたい。まず、スーパー DLC 膜に関しては、高温の耐久性を上げること、

これにより、加工速度の改善が見込める。

また、水素入りであってもいいので安価で高速な DLC 成膜技術を開発すること、これにより新たな応用がもたらされると考えている。そして、これらの DLC 膜を素早く、母材へのダメージなしに除膜する技術・装置の開発も進めていく。

さらに、DLC では対応できない温度での切削工具に向けては、金属間化合物形成用のフィルタードアーク蒸着装置や新型保護膜の開発を手がける予定である。

謝 辞

本原稿の執筆にあたり、修士学生近藤勇樹氏、爲國公貴氏に協力いただいた。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 滝川浩史：表面技術，58，572-577（2007）
- 2) 滝川浩史：真空，51，20-25（2008）
- 3) 滝川浩史：金属，79，106-111（2009）
- 4) 滝川浩史：機能材料，34，24-30（2014）
- 5) 滝川浩史：「最新高機能コーティングの技術・材料・評価 第5章スーパー DLC 膜」，シーエムシー出版（2015）
- 6) I. I. Aksenov, V. A. Belous, V. G. Padalka, and V. M. Khoroshikh：Sov. J. Plasma Phys., 4，425-428(1978)
- 7) 田上英人，滝川浩史，須田善行：化学工業，63，12，34-40（2012）
- 8) 滝川浩史：月刊トライボロジー，305，1，38-40（2013）
- 9) Y. Fujii, et al.：Surf. Coat. Technol., 307，1029-1033（2016）