モノづくりに貢献するドライコーティング技術

Dry Coating Technology to Support Manufacturing

鬼頭佑典　Y. KITO　松尾和昭　K. MATSUO　橋富弘幸　H. HASHITOMI

Coating technologies that use plasma can impart functionality to material surfaces. These technologies are broadly divided into PVD and plasma-enhanced CVD methods, and the JTEKT Group is capable of both processes. Nitride-based coatings are imparted with PVD processes primarily for wear resistance and improved heat resistance. DLC is processed with the plasma CVD method, which can impart excellent lubricity. This report introduces these processing technologies and examples of their applications.

Key Words: PVD, PECVD, DLC, hard coating, tribology

1．はじめに

材料の表面に機能を付与するコーティング技術は，ウェットコーティングとドライコーティングに大別される．ドライコーティングでは，プラズマを用いたコーティング技術の研究開発が進められている．プラズマを用いるコーティング技術には，Physical Vapor Deposition（PVD）とPlasma-enhanced Chemical Vapor Deposition（PECVD）があり，耐摩耗性，低摩擦性，耐焼付き性など，多様な表面機能の付与を可能とする．これらの処理では，真空下におけるバッチ処理が基本となるため，ウェットコーティングのめっき処理やスプレー処理と比較して生産性に劣るものの有害な排気ガスの発生が少なく，地球環境に優しい処理として知られている．さらに，プラズマの高エネルギーを活用することにより，従来処理では困難な化学組成や材料表面への新機能付与が可能であり，表面創成技術として継続的な研究開発が進められている．

プラズマは特殊な現象ではなく，自然界において雷，オーロラ，太陽フレアなどとして観測される．また，人工的なプラズマは蛍光灯，ネオン灯，プラズマテレビなど，生活環境でも利用されている身近な現象である．実際には，高温または強い電磁場の影響により，気体中の原子が電子と正の電荷をもつ原子（イオン）に分離した状態である．このような状態のため，プラズマは電気伝導性を有しており，外部の電磁場に強く反応する特性を示し，固体・液体・気体に次ぐ，物質の第 4 の形態と呼ばれている．

PVD および PECVD のコーティングに用いるプラズマは，プラズマ中の粒子が異なるエネルギー分布を有する非平衡プラズマである．プラズマ中の高エネルギー粒子と被処理物間のポテンシャル差によって生じる運動エネルギーを活用し，材料表面にコーティングを行う．この非平衡プラズマを人工的に得るには，外部からのエネルギー供給によって原料や雰囲気ガスを電離・放電をさせる必要がある．また，二次電子放出や電界放出により，非平衡プラズマを維持し，コーティング技術に活用している．

プラズマを用いたドライコーティング技術は自動車部品，工具，金型などの機械部品に広く採用されている．主に金属材料を対象とした表面多機能化技術として，耐摩耗や耐腐食性の向上に寄与している．グループ会社である株式会社ジェイテクトコーティング（以下，JCT）においても PVD 法および PECVD 法によるコーティング技術の開発に取り組んでおり，工具向けの窒化物系コーティングおよび Diamond Like Carbon（DLC）コーティングの処理が可能である．

本報では，JCT が有するドライコーティング技術である PVD 法および PECVD 法に着目し，これらの基礎技術の解説およびその適用事例を紹介する．

2. PVD 法

2.1 PVD 法の分類

ドライコーティング技術の一つである PVD 法は，原料に金属固体が用いられる．真空中の原料をプラズマで蒸発させ，窒素（N_2）などのプロセスガスとの反応により，被処理物の表面に付着・堆積させるコーティング技術である．

PVD 法には真空蒸着，スパッタリング，イオンプレーティング法などの手法があり（**図 1**），JCT ではアークイオンプレーティング法による処理技術を有している．

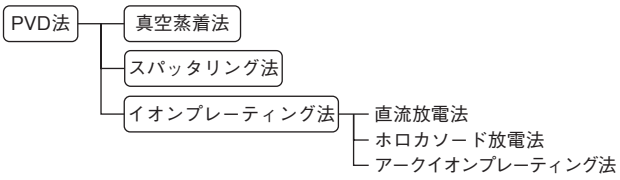

図 1 PVD 法の分類
PVD method classification

2.2 イオンプレーティング法

イオンプレーティング法は 1964 年に D. M. Mattox によって考案され，現在では窒化物系コーティングに広く用いられている．本手法では，減圧下でアルゴン（Ar）ガスをプラズマ化した後，コーティング原料をイオン化する．さらに，電界をくわえることで処理材にコーティングする[1)]．合金コーティングの場合は，イオン化率が低いため処理速度に課題があったが，イオン化率の向上を目的として各種イオン化技術が開発された．当初は電子銃を用いた Hollow-Cathode Discharge（ホロカソード放電）法が開発され，1990 年代には Arc Ion Plating（アークイオンプレーティング）法が開発されている．

アークイオンプレーティング法は，微小な面積にアーク放電で大電流を集中して原料を蒸発させ，その大部分をイオン化するため処理速度に優れ，現在ではイオンプレーティング法の主流となっている．本手法では，真空チャンバー内でアーク放電により原料をイオン化し，被処理物に負のバイアス電圧を印可するとイオン化された金属粒子が被処理物表面に引き寄せられ，被処理物表面にコーティングされる．金属粒子が被処理物表面に到達する際のエネルギーをバイアス電圧で制御し，プロセスガスとして窒素（N_2）などを同時に導入することによって窒化膜などコーティングの組成および膜質の制御

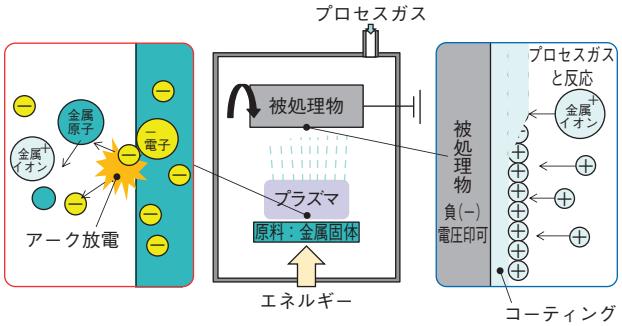

図 2 アークイオンプレーティング法
Arc ion plating process

が可能である（**図 2**）．さらに，アークイオンプレーティング法は金属原料を固体状態で保持するため，原料の装置内での配置自由度が高い．その結果，一度にバッチ処理可能な製品数が増加し，他の PVD 法と比較し生産性に優れている．ただし，PVD 法全体の課題ではあるが，蒸発源から陰になる部分はコーティングできないため，被処理物の全面をコーティングするには製造装置に自公転機構などの生産技術的な工夫が必要となる．

アークイオンプレーティング法の特徴は以下である．

①緻密なコーティングが可能
②真空蒸着法と比較して密着性が高い
③低温処理（500℃ 以下）でも密着性が高い

アークイオンプレーティング法で得られる主なコーティングの種類は TiN 系や CrN 系などの窒化物系コーティングである．これらのコーティングは用途に応じた特性を得るため，原料である金属組成が調整される．例えば，高融点材料である Si や Y，Zr などの添加は，コーティングの耐熱性を向上させる．また，コーティングの組成比の最適化によって，より高硬度のコーティングの形成が可能となる[2)]．

JCT においてアークイオンプレーティングの標準的な処理条件で得られるコーティングの特性を**表 1** に示す．例えば，AlCrN 系コーティングは，スクラッチ試験での剥離荷重が 43N と高く，密着性に優れている．TiAlCrN 系に添加元素をくわえることにより，コーティングの耐熱性の指標である酸化開始温度を向上させることが出来る．PVD 法によるドライコーティング技術は，処理方法の特徴を活用し，硬度，耐熱性，密着性など要求に応じたコーティングにより，モノづくりに必要な工具および金型などの寿命向上に貢献できる．

表1　PVD コーティングの特性
PVD coating characteristics

評価項目	AlCrN 系	TiAlCrN 系＋添加材
膜厚，μm	3.0	3.9
酸化開始温度，℃	1 000	1 200
硬度，GPa	30	33
密着力，N	43	37

3. PECVD 法

3.1　PECVD によるコーティング

PECVD 法はガス原料を供給し，プラズマ化で生成されるラジカルやイオンなどの活性粒子による化学反応を利用しコーティングする技術である．PECVD 法は放電に用いる電源やイオン源などにより，直流プラズマ，PIG（Penning Ionization Gauge）プラズマ，高周波プラズマなどに分類される．高周波プラズマはプラズマ密度が低く，成膜レートが遅い．このため量産性に不向きであるため，JCT では直流プラズマ，PIG プラズマによる量産を行っている．本章では JCT で量産中の直流プラズマ CVD 法および PIG プラズマ CVD 法の原理と本処理技術で得られる DLC コーティングについて解説する．

DLC コーティングは非晶質炭素膜の総称である．ダイヤモンド構造とグラファイト構造の両方を併せ持つアモルファス構造であり，低摩擦係数，耐摩耗性，高硬度，表面平滑性，化学的安定性などの優れた特性を有する硬質膜である．DLC コーティングは PECVD 法，PVD 法などで処理され，膜質はコーティング法によって異なるため処理方法の確立も重要である．

直流プラズマ CVD 法は**図3**に示すようにガス原料を供給し，被処理物を陰極として用い，被処理物表面に沿ってイオンが加速されるプラズマシースが形成され，被処理物がコーティングされる．このため，つきまわり性に優れたコーティングが可能である[3]．また，装置構造が比較的単純であり，回転機構などの補助装置を用いずに形状全面にコーティングが可能なため，大量処理に適しており生産性に優れている．JCT の処理では，プラズマ窒化処理後に連続して DLC コーティングを実施しており，密着性に優れたコーティングが得られる．ただし，この処理は温度が 500 ～ 600℃ の高温となるため，被処理物の材質に制約がある．

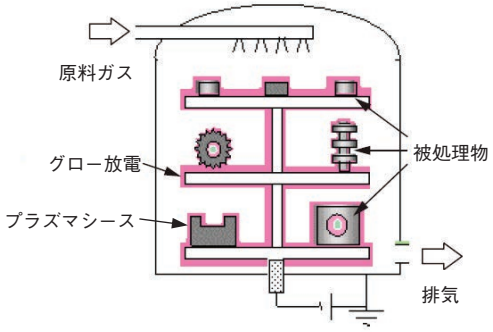

図3　直流プラズマ CVD 装置[3]
Direct current plasma CVD apparatus

PIG プラズマ CVD 法は直流プラズマ CVD 法と同様にガスを原料としている．PIG プラズマ CVD 法のプラズマは，チャンバー中央上部の PIG ガンにより高密度プラズマを生成する．そのため，直流プラズマ CVD 法と比較してコーティング速度が向上している．また，基板と DLC の密着性を確保するため，PVD 法の一種であるマグネトロンスパッタ法を併用し，窒化物系中間層を採用している[4]．本手法は処理温度が 200℃ 以下と低温での処理が可能であるが，PIG プラズマは指向性を有するため，**図4**に示すように被処理物を自転・公転させるテーブル機構が必要となる．

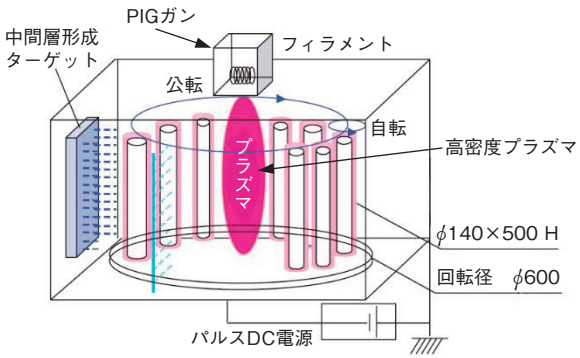

図4　PIG プラズマ CVD 装置[4]
PIG plasma CVD apparatus

3.2　PECVD 法で得られる DLC の種類と特性

PECVD 法で得られる DLC コーティングは，水素を含有している．また，原料に炭化水素ガスと TMS（テトラメチルシラン：$Si(CH_3)_4$）ガスを用いることにより，Si を添加した水素含有 DLC（a-C：H：Si）のコーティングも可能となる．これらの DLC は比較的多くの水素を含有し，無潤滑環境下において低い摩擦係数を示す．特に Si を添加した DLC は湿潤大気雰囲気下においても低い摩擦係数を示すことが知られている．

JCT の標準的な条件でコーティングした DLC の特性を**表2**に示す．直流プラズマ CVD 法では前述のとおり，密着性向上を目的として窒化処理を行うため，未処理の SKH4 基板（表面粗さ Ra0.004 μm）に対してコーティング後の表面粗さ Ra が 0.013 μm とやや粗くなるが，スクラッチ試験における剥離荷重は 64 N と高く，密着力に優れている．一方，PIG プラズマ CVD 法によるコーティングでは処理前後で表面粗さはほとんど変化がなく，平滑性に優れた DLC が得られる．

無潤滑および鉱油潤滑下において往復動型摩擦試験機を用いた摩擦試験結果を**図5**に示す．DLC に対して SUJ2 球（直径 3/16 インチ）を往復しゅう動させた結果，直流プラズマ CVD 法および PIG プラズマ CVD 法で得られるいずれの DLC も無潤滑および鉱油潤滑環境下における平均摩擦係数は 0.1 以下と低い摩擦係数を示す．さらに，DLC の比摩耗量は 10^{-7} $mm^3/N \cdot m$ と小さく，これらの特性により ITCC（Intelligent Torque Controlled Coupling）クラッチやウォーターポンプなど，自動車の駆動系部品のしゅう動部に潤滑性硬質コーティングとして適用されている．

表2　DLC コーティングの特性
DLC coating characteristics

評価項目	直流プラズマ CVD 法	PIG プラズマ CVD 法
表面粗さ Ra，μm	0.013	0.005
硬度，GPa	20	17
密着力，N	64	38

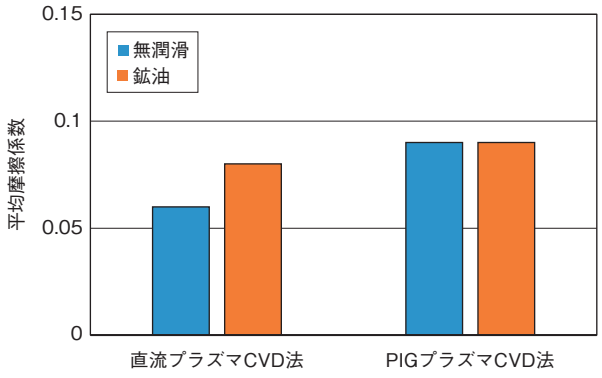

図5　DLC コーティングの摩擦特性
DLC coating friction properties

4. 適用事例

JCT では主に自動車部品に DLC コーティングを処理している．最近では，アークイオンプレーティング法による処理技術を確立し，製造ラインの設備治工具への適用も進めている．本章では製造ラインにおけるコーティング技術に対するニーズである「固着防止」や「寿命向上」にコーティングを適用した事例を紹介する．

4.1　リフロー工程ジグ

ハイブリッド車，電気自動車，鉄道，高速エレベーターのモーター駆動制御用のパワーデバイスに使用されるパワー半導体素子などのリフロー工程（**図6**）で用いるジグへの DLC 適用例を以下に示す．

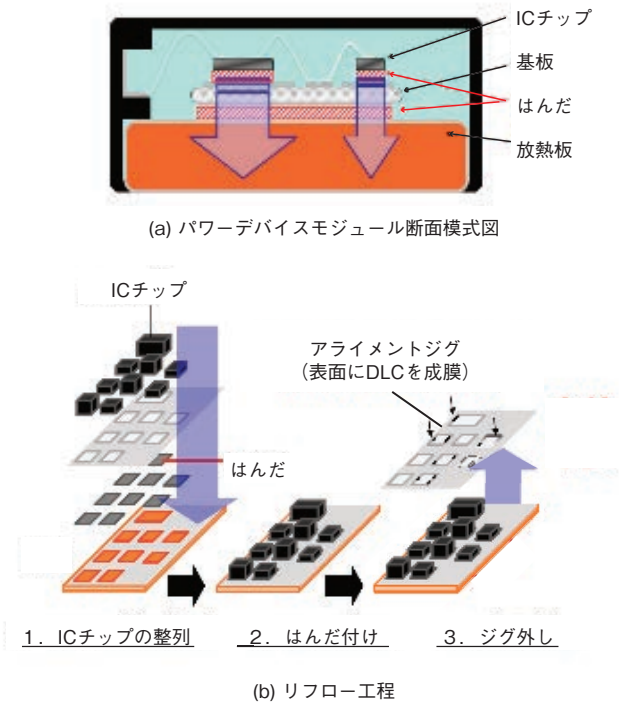

図6　パワーデバイスラインにおける DLC 適用事例
DLC applications in power device line

パワーデバイスは使用時に高温になるため，IC チップと基板，基板と放熱板の間にはんだを介して接地し，放熱性を高めている．このリフロー工程の際，IC チップの位置決めにアライメントジグを用いている．リフロー工程は「IC チップの整列」「はんだ付け」「ジグ外し」の順に実施される．そのため，連続処理時に，はんだの漏れや飛散が生じ，はんだがアライメントジグに固着し，IC チップの固定不良や位置ずれ（定着不良）が生じることがある．

従来は離型性を有するカーボン製ジグを採用していたが，高価で割れやすく取り扱いが困難であった．この課題を解決するため，ジグの材質をアルミニウム合金に変更し，その表面に DLC 処理をした．アルミニウム合金

のような軟化温度の低い材料に処理するため，低温処理が可能な PIG プラズマ CVD 法の処理条件を最適化し，DLC の有する離型性，低摩擦性，化学的安定性および耐摩耗性によって，はんだ飛散による汚れを効果的に抑制できた．これらの結果，従来のカーボンジグから安価で取り扱いが容易な DLC 処理アルミニウム合金製ジグへの変更を実現した．

4.2　アルミニウム合金溶解工程用シュート

アルミニウム合金鋳造において，インゴット材料を溶解する鋳造準備の工程で用いる投入シュートに直流プラズマ CVD 法による DLC を適用した事例を紹介する．

アルミニウム合金鋳造ではシュートを介してインゴットをアルミニウム合金溶湯の中に投入する．その際，アルミニウム合金溶湯が飛散し，投入シュートの表面に固着・堆積するとインゴットの滑りが悪くなり，「つまり」と呼ばれる投入不良が発生する．投入不良でラインが停止すると投入シュートの交換が必要となる．従来は予防保全の観点から投入シュートを 2 週間に 1 回の頻度で定期交換していた．投入シュートに DLC を成膜することによってアルミニウム合金溶湯の固着が抑制され，交換頻度が 2 倍の 4 週間に 1 回へと改善された．

4.3　ホブカッター

JCT における自動車部品加工ラインの粗加工工程では，ホブ加工（周速度 150 m/min）で使用するホブカッター（**図7**）にアークイオンプレーティング法で得られる窒化物系コーティングを採用している．用途に応じて膜質を調整することにより，他社品と比較して工具寿命が約 1.5 倍となった．現在，さらに他の加工ラインへの展開を進めている．

図7　ホブカッターにおける窒化物系コーティング適用事例
Nitrade coating applications in hob cutting tools

5. おわりに

本報では，ドライコーティングに関して JCT で処理可能な技術を中心に，処理技術の原理と適用事例を紹介した．ドライコーティングは用途に応じて表面機能を付与する技術として，機械部品に限らず広い分野で採用され，日々進化している．窒化物系コーティングは高硬度かつ耐摩耗性に優れ，過酷な環境下においても安定して性能を発揮する．また，DLC は優れた摩擦特性，耐摩耗性および耐焼付き性を付与し，トライボコーティングとして効果を発揮する．用途に応じて最適なコーティングを選定することにより，モノづくりに貢献している．さらに，ドライコーティングは有害物質の排出が少なく，環境にも優しい処理技術であり，今後も重要な基盤技術であると考えられる．さらなる高機能化・多様化するニーズに応えるため，コーティングによる材料表面の新たな機能化に向けて研究開発に取り組んでいく．

参考文献

1）D. M. MATTOX：Film Deposition Using Accelerated Ions, Electrochemical Technology, Vol. 2, No. 910 (1964) 295.
2）淺沼英利：ニッケル基超耐熱合金旋削加工用 MP9025 の特徴と加工事例，粉末および粉末冶金，第 67 巻，1 号 (2022) 18.
3）鈴木雅裕，山川和芳，齊藤利幸：DLC 膜の成膜技術とその応用，JTEKT ENGINEERING JOURNAL，No. 1008 (2010) 40.
4）株式会社 CNK：DLC 成膜による表面改質，JTEKT ENGINEERING JOURNAL，No. 1006 (2009) 93.

筆　者



鬼頭佑典*　Y. KITO
松尾和昭*　K. MATSUO
橋富弘幸**　H. HASHITOMI

*　イノベーション本部　材料研究部
**　株式会社ジェイテクトコーティング　生産技術部