



研究技術ノート

PIG プラズマ CVD 法による DLC コーティング技術

寺山 暢之

神港精機株式会社 装置事業部 真空装置技術部 開発課

(原稿受付：2011年4月6日 / 原稿受理：2011年6月22日)

ダイヤモンド結合とグラファイト結合を併せ持つ DLC (Diamond Like Carbon) 膜は、高硬度・高耐摩耗・低摩擦・低い相手攻撃性・耐焼きつき性・高絶縁性・赤外透過性・高ガスバリア性・生体適合性などの優れた特長を兼ね備えている。DLC コーティングはプラズマ・イオンを利用した PVD 法と CVD 法が用いられている。我々は低エネルギーで大電流イオンが容易に得られる PIG (Penning Ionization Gauge) タイプのプラズマガンを独自開発し、これを CVD 装置に採用し、PIG プラズマ CVD 装置として商品化してきた。本稿では装置の特長と得られた DLC 膜のトライボロジー特性について報告する。

Keywords:

diamond like carbon, penning ionization gauge discharge type plasma CVD, tribology

1. DLC 膜の構造および物性

DLC (Diamond Like Carbon) はグラファイトとダイヤモンドの中間的な物性をもつ非晶質のカーボン膜であり、硬度を比較するとダイヤモンドの性質に近い硬い膜である。1970年代にイオンビーム蒸着法を用い、初めて作製されて以来、各種のコーティング法が開発されてきた。図1、図2はそれぞれ DLC の構造と物性を示す。DLC はダイヤモンド構造とグラファイト構造の両者が混在した非晶質の皮膜である。ここでは構成元素として炭素と水素を示したが、製法によっては水素フリーの DLC や金属元素をドーピングしたメタルドーピングの DLC など、用途に応じて様々な DLC が実用化されている。最近では硬度 1000 HV 以上であれば DLC と呼んでおり、これよりも軟らかい皮膜はアモルファスカーボンと呼び、それぞれ区別している。

DLC 皮膜の特長と工業的用途を図3に示す[1]。低摩擦、低相手攻撃性を活かして自動車分野をはじめとする摺動部品への適用が圧倒的に多い。昨今の地球環境や CO₂

削減をめざして燃費改善、異音防止、オイル低減化、耐久性向上を図っている。ここでは示していないが、ガスバリア性を活かして、ペットボトルの内面に DLC コーティングを行い、酸素や水分の透過を抑えて長期間の品質を維持し

図2 物性比較。

| | グラファイト | DLC | ダイヤモンド |
|-------------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 結晶系 | 六方晶 | 非晶質 | 立方晶 |
| 密度 (g/cm ³) | 2.26 | 1.5~2.5 | 3.52 |
| 硬度 (HV) | 100 | 1000~5000 | 8000~10000 |
| 比抵抗 (Ω・cm) | 4 × 10 ⁻³ | 10 ⁷ ~10 ¹⁴ | 10 ¹³ ~10 ¹⁶ |
| 屈折率 | 2.15 | 2~2.4 | 2.42 |
| 光学ギャップ (eV) | | 1~2 | 5.5 |
| ヤング率 (GPa) | | 100~500 | 1150 |
| 熱伝導率 (W/cm・K) | 0.4~2.1 | 0.2 | 6~20 |
| 酸化開始温度 (°C) | 600 | 300~400 | 600 |

図1 DLC の構造比較。

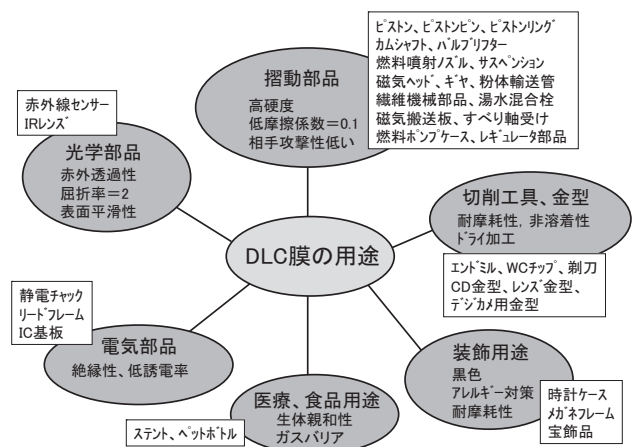
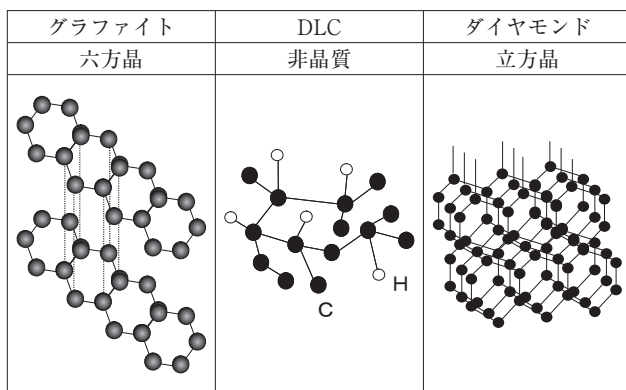


図3 DLC 膜の特長と用途。

ている例もある。

2. DLCのコーティング方法

DLCコーティング手法は固体の炭素からスパッタリングや陰極アーク放電を利用して成膜する方法(PVD法)とCH₄やC₂H₂等の炭化水素系ガスをプラズマ化して成膜する方法(CVD法)の2種に大別される。図4は各種コーティング方法と成膜特性の一例を示す。スパッタリング法では水素を含有しない皮膜ができるが、CVD法では材料ガスに炭化水素系ガスを使用しているため、必然と水素を含むDLCができる。最近では、スパッタ法においても成膜中にCH₄ガスを流して反応性スパッタにより水素含有DLCのコーティングを行い、皮膜特性に幅をもたせてきている。

機械部品のトライボコーティング膜としてDLCに要求される性能は、厚膜、高密着、表面平滑性、低温処理、低コストである。DLCが良好なトライボロジー特性を発揮するには、表面粗度が小さいことが肝要である。膜表面が粗いと、自分自身の摩耗粉でアブレッシブ摩耗が起り、耐摩耗性が低下する。また摺動相手に対する攻撃性も高くなる。PVD法では固体カーボンからのクラスター飛散、ドロップレットがあり表面粗度が大きい。一方、CVD法はガスを原料として用いているので、ドロップレットの心配がなく、比較的平滑な表面が得られる。

3. プラズマCVD法の原理と高速成膜の手法

プラズマCVD法における皮膜堆積の過程を図5に示す[2]。材料ガスに電離電圧以上のエネルギーを持つ電子を衝撃させることで、化学的に活性なラジカル・イオンが生成される。これらの粒子は基板表面に拡散していき、シーブと呼ばれる空間電荷層に到達したとき、イオンは基板表面に向かって加速される。一方、ラジカルは中性であるので速度の変化はない。基板表面に到達したラジカル・イオンは表面拡散、吸着、表面反応を経て薄膜が成長すると考えられている。

厚膜・低コストの観点から、成膜速度を上げることが肝

要である。成膜速度を向上するには、基板に入射するラジカル・イオンの量を上げることが必須であり、具体的には以下の2点に絞られる。

- ① 反応室に材料ガスを多量に供給する
- ② 高密度のプラズマをつくる

従来、DLCコーティングには高周波プラズマCVD装置が使用されてきたが、得られるプラズマ密度が10¹⁰/cm³台と低いため成膜レートは0.5μm/hであった。摺動部品に要求される3μmの膜厚を得ようとするためコーティング工程だけで6時間もかかってしまう。そこで我々は低電圧・大電流放電を特長とするPIGプラズマに着目し、10¹¹/cm³台のプラズマ密度を得ることで3μm/h以上の高速成膜ができるPIGプラズマCVD装置を開発した。

図6はPIGプラズマとRFプラズマの電子密度を比較したものである。放電ガスはArで圧力は4Paである。電子密度の測定はLangmuirプローブ法を用いた。両者とも放電出力が大きくなると、電子密度は上がる傾向にあるが、同じ放電出力で比較すると、PIGプラズマはRFプラズマよりも密度が1桁高く、効率が良い。

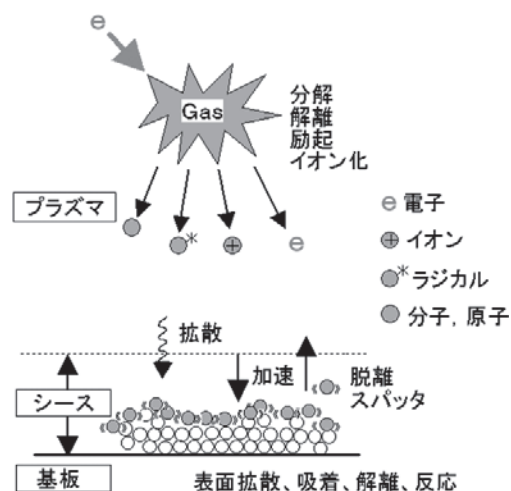


図5 皮膜堆積の過程。

図4 各種コーティング方法と成膜特性。

| 成膜法 | スパッタ法 | RFプラズマCVD法 | イオン化蒸着法 | PIGプラズマCVD法 |
|-------|--------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 原理 | | | | |
| 成膜原料 | 固体カーボン | CH ₄ | C ₆ H ₆ | C ₂ H ₂ |
| 処理温度 | ~250℃ | ~200℃ | ~300℃ | ~250℃ |
| 成膜速度 | 0.5 μm/h | 0.5 μm/h | 0.7 μm/h | 3 μm/h |
| 最大膜厚 | 5 μm | 1 μm | 1 μm | 20 μm |
| 水素含有量 | 水素フリー | 30~40 at% | ~15 at% | 20~30 at% |
| 硬度 | 1000~3500 HK | 1500~2000 HK | 2000~2500 HK | 1000~2500 HK |
| 表面粗さ | △ | ○ | ○ | ○ |

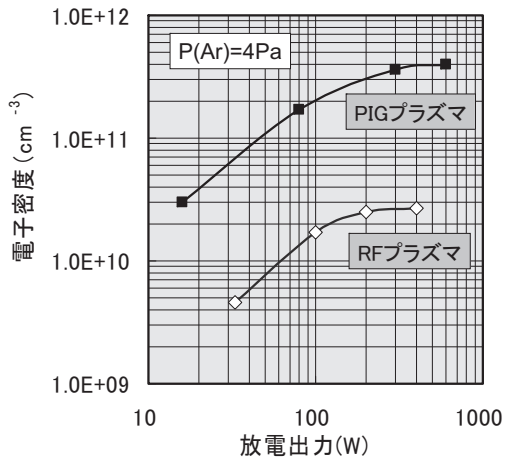


図6 電子密度の比較.

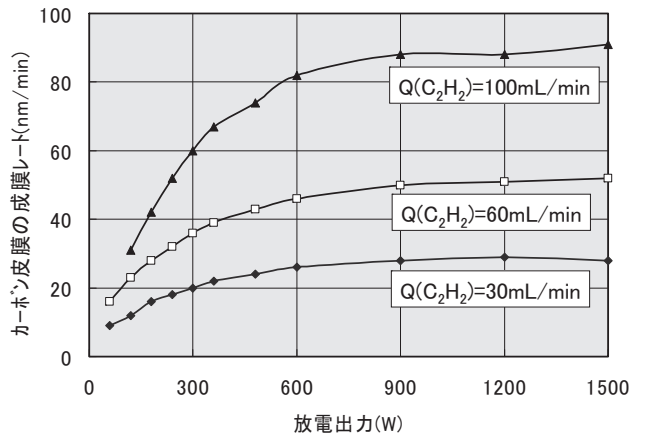


図7 放電出力と成膜速度の関係.

PIG プラズマによる放電出力と成膜レートの関係を図7に示す。材料ガスはアセチレンを用いた。成膜レートは放電出力が大きくなるにしたがい増加するが、900 W 以上で飽和する。またC₂H₂ガス流量が多いほど成膜レートは大きい。したがって成膜レートを向上するには、材料ガスの多量供給と、これに見合った放電出力を投入すればよい。導入したガス流量の積算質量と基板に堆積した皮膜の質量を比較したところ、ガスの使用効率は80%以上であった。

C₂H₂ ガスを多量に導入できるように、H₂ に対して排気速度の大きい高背圧型の油拡散ポンプからなる排気系を用いた。炭化水素系のガスをプラズマで分解させるとチャンバー内で水素が発生する。発生した水素を効率良く排気しないと、チャンバー内の圧力が上昇してしまい、安定な成膜ができない。ガス種に対する油拡散ポンプの排気速度は(分子量)^{1/2} に逆比例するので、H₂ に対する排気速度はN₂ やC₂H₂ の3 倍程度大きい。ターボ分子ポンプに代表されるような機械的なポンプでは、水素に対する圧縮比が小さいため多量に発生した水素を排気できない。このような理由から高真空領域でH₂ に対する排気速度の大きい油拡散ポンプを使用した。

4. PIG プラズマ CVD 装置の原理

PIG プラズマ CVD 装置の構成および生産装置の外観をそれぞれ図8、図9に示す[3]。本装置はマグネトロンスパッタ法により金属中間層を形成後、プラズマ CVD 法で DLC 膜を積層する複合システムとなっている。

成膜室の上部にプラズマガンと反射電極との間に基板が配置される。膜厚分布の確保および立体物への均一成膜を目的として、基板はプラズマを中心として自公転する。カソードフィラメントの保護と材料ガスの有効な消費を目的として、プラズマガンには Ar, H₂ ガスを導入し、成膜室に C₂H₂, TMS (テトラメチルシラン: Si(CH₃)₄) ガスを導入している。

電離に寄与する電子を有効利用する目的で、カソードフィラメントに対向して成膜室にフローティング電位の反射電極を設けている。これによりカソードフィラメントか

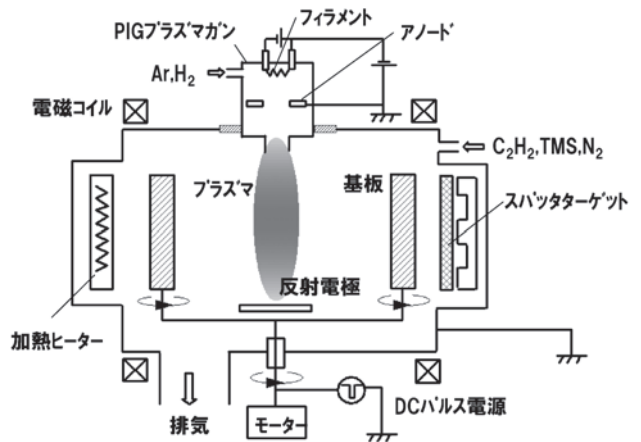


図8 PIG プラズマ CVD 装置の構成.

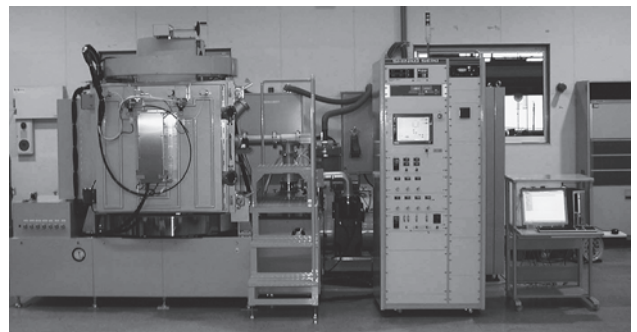


図9 生産装置の外観.

ら放出された熱電子はプラズマガンと反射電極との空間で往復振動を行い、ガスを効率的にイオン化させる。0.05~1 Pa の低圧においても低電圧大電流 (50 V, 60 A) の放電を維持し、かつプラズマを閉じ込め高密度化させる目的で、成膜室の外周に一对の電磁コイルを設けている。プラズマガンと反射電極の軸方向に1~10 mT 程度のミラー磁場を形成して、いわゆる PIG (Penning Ionization Gauge) 構造とした[4, 5]。緻密な皮膜を得る目的で、基板には周波数50~250 kHz の非対称パルス電圧を印加している。

DLC のような絶縁皮膜を再現性良くコーティングを行うには、チャンバーのアース面積がバッチ間で変わらないことが大事である。プラズマはアースであるチャンバーの

中に生成されているので、チャンバーも電極の一部となる。コーティング時間の経過とともにチャンバー内壁が絶縁膜に覆われてくると、アース電位であるチャンバーに流入する電子電流が減少し、放電出力を同一にしても基板に入射するイオン量が低下し、再現性が得られない。本装置では PIG プラズマガン本体を絶縁電位に維持し、ミラー磁場によってプラズマをプラズマガンと反射電極の軸上に閉じ込め、プラズマ電子が径方向に散逸することを防いでいる。また、図 8 に示していないが、PIG プラズマガンの下部にはフローティング電位の防着板を配置して、チャンバーに流入する電子を防いでいる。このような工夫を行うことで、プラズマのアースは PIG プラズマガンのアノード（アースに結合）に限定され、コーティングの再現性が得られている。

成膜室には基板に対向してスパッターターゲットが設けられており、Ti, Cr, CrN 等の金属中間層を形成して基板と DLC の密着力を確保する。

成膜速度は C_2H_2 ガス流量と PIG プラズマガンの出力で調整し、皮膜硬度および処理温度は基板に印加するパルス電圧でコントロールする。DLC の成膜速度と膜質、処理温度は独立して制御できることが特長であり、金属基板から樹脂基板まで幅広く対応可能である。なお DLC の成膜速度はガス流量に比例し、最大 $5.5 \mu\text{m/h}$ のレートが得られる。

図 10 は PIG プラズマガンの内部構造を示す。カソードフィラメントはワンタッチで取り外し可能なフィラメントブロックに 2 本取り付けられている。カソードフィラメントが成膜途中で断線しても、自動的に予備フィラメントに切り替わることで、一連の工程を大気開放せずに終了でき、生産に支障をきたさない。フィラメント寿命は DLC 膜厚 $3 \mu\text{m}$ プロセスで 20 バッチ程度である。アノードの上部に酸素ガスノズルが設けられているが、これは成膜室から逆流した C_2H_2 ガスがプラズマで分解、解離することによって堆積するカーボン膜を除去するものである。わずかな酸素供給によりプラズマガン内部に堆積するカーボン膜を抑えて、メンテナンス周期の長期化を図っている。

DLC コーティング時の放電写真を図 11 に示す。 C_2H_2 プラズマは白い放電色を有している。ミラー磁界によりプラズマはチャンバー中央に閉じ込められ、プラズマの径としては $\phi 100 \text{ mm}$ 程度である。基板はプラズマに暴露されないため、処理温度の低温化が図れる。

成膜は全自動でコンピュータによるレシピ設定とログインデータ管理を行い、皮膜品質の安定化を図っている。

5. PIG プラズマのイオン量と質

DLC 皮膜で最も大事な膜質は膜密度である。膜密度は硬度、ヤング率、水素含有量、内部応力、屈折率、光透過性などに影響を及ぼす。緻密な膜ほど硬度は高く、水素含有量は少なく、屈折率は高く、光透過性は下がる傾向にある。膜密度を制御する方法は、基板に負のバイアスを印加して、皮膜成長面にイオン衝撃を行うことが通常よく用いられる。また負バイアスが同じであっても、基板に入射するイオン量が多いほど、イオン衝撃効果が大きくあらわれる。PIG プラズマ CVD 装置による DLC 成膜では、基板に入射するイオン量は PIG ガン出力で制御し、基板に入射するイオンエネルギーは負バイアスで調整する。

図 12 はファラデーカップをプラズマの中心から径方向に距離 $d = 100 \sim 300 \text{ mm}$ に配置し、イオン電流密度のプラズマガン出力依存性を示したものである。イオン電流密度は

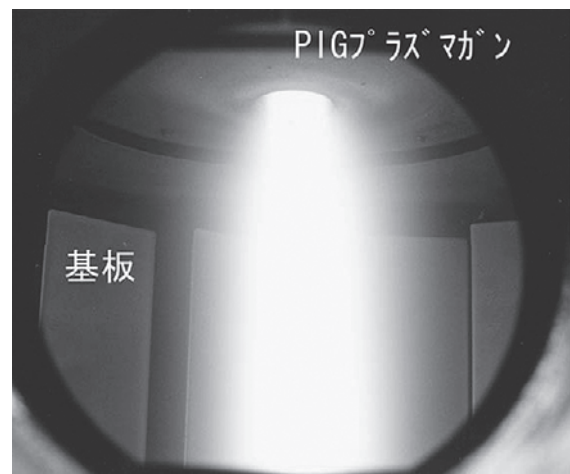


図 11 DLC 成膜状況.

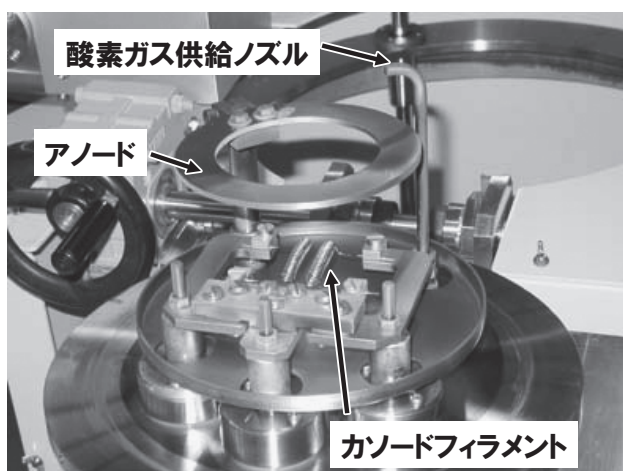


図 10 PIG ガンの構造.

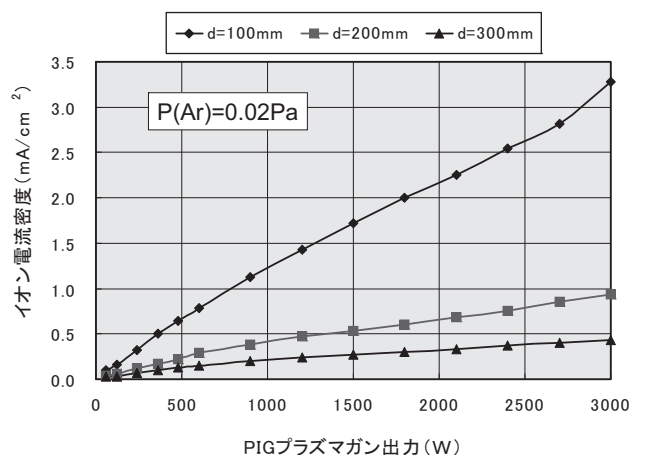


図 12 イオン電流密度の PIG ガン出力依存性.

プラズマガンの出力に比例し、径方向に離れるほど小さくなる。イオン電流密度 (J_s) の径方向距離依存性を詳細に調べた結果、磁場強度に影響を受けるが、 J_s は距離の2乗～3乗に反比例する。バッチあたりの生産量および膜質の関係から、基板は径方向に距離200～350 mmの位置に配置される。

基板に入射するイオンエネルギーはPIGプラズマの空間電位と基板に印加する負電圧の絶対値を加えた値となる。したがって、必要とするイオンエネルギーを細かくコントロールするには、イオンのエネルギー幅が小さいことが望まれる。図13に示す4枚グリッドの静電アナライザーを用いて、イオンのエネルギー幅を調べた結果を図14に示す。なお、グリッドはステンレス製で300 mesh/inchを用いた。アナライザーグリッドに正の電圧 (V_a) を印加し、イオンを減速させてコレクターに流れるイオン電流 (I_c) をプロットした。これを微分することでイオンのエネルギー分布を得た。PIGプラズマ中のイオンエネルギーのピーク値は14 eVであり、Langmuirプローブ法で求めた空間電位とほぼ一致した。また、エネルギー分散 (半値幅) は10 eVであり、比較的単色性のあるイオンが生成されている。

6. 基板のバイアス方法

高硬度のDLCを得るためには、成長面でのイオン衝撃が

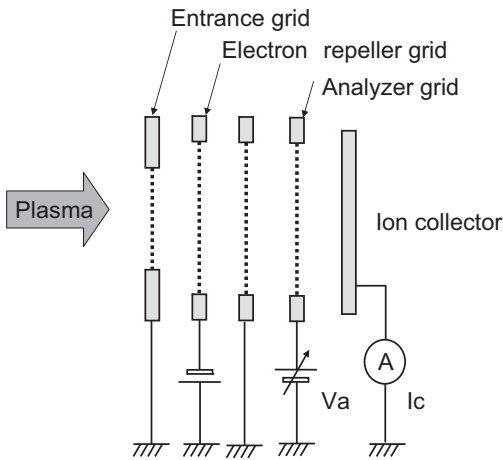


図13 4枚グリッドの静電アナライザー。

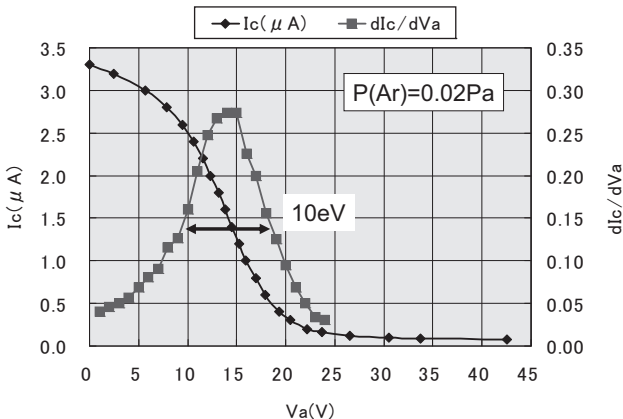


図14 イオンのエネルギー幅。

必須である。DLCは比抵抗 $10^8 \sim 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ を有する絶縁膜であるので、基板に直流の負電圧を印加すると、正電荷蓄積によるチャージアップが起こり、安定にイオンを基板方向に加速することができない。通常、絶縁膜のコーティング装置では基板に13.56 MHzの高周波を使用するが、負荷によりマッチング調整が必要であること、電源価格が高い等の課題がある。そこで本装置ではマッチングボックスが不要で、低価格の周波数可変型 ($f=50 \text{ kHz} \sim 250 \text{ kHz}$) バイポーラパルス電源を採用している。図15は成膜時における基板パルス電圧波形を示す。基板は接地電位に対して正電圧が $2 \mu\text{s}$ の期間印加され、負電圧が $8 \mu\text{s}$ の期間印加される。基板電位が負のとき、Arおよび C_2H_2 等のイオンが膜成長面に加速される。基板電位が正のとき、熱化されたプラズマ電子が膜成長面に加速され、成膜面に滞在しているイオンと衝突することで電荷中和が起きる。このような電荷中和プロセスにより、正電荷蓄積によるチャージアップを防止して、イオンを安定に膜成長表面に加速、輸送することができ、皮膜の硬度を調整することが可能となる[6]。

図16は基板バイアスと硬度の関係を示す。基板バイアスが大きくなるにしたがい皮膜硬度は高くなる。図示していないが、膜密度についても基板バイアスが大きくなると $1.5 \text{ g/cm}^3 \rightarrow 2.5 \text{ g/cm}^3$ に向上する。硬度と膜密度は比例関係にあり、膜密度が高いほど皮膜は硬い。皮膜成長面へのイオン衝撃エネルギーが高いほど、緻密で硬いDLCが得ら

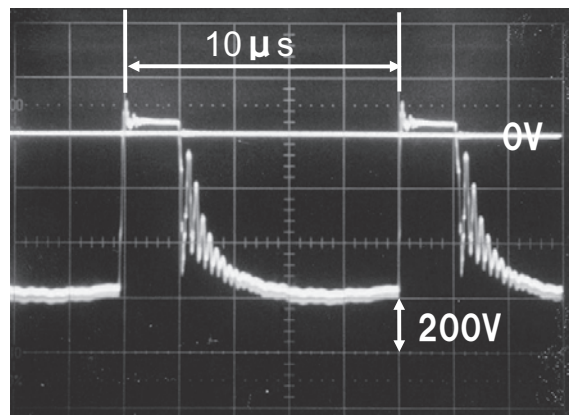


図15 パルス電圧波形。

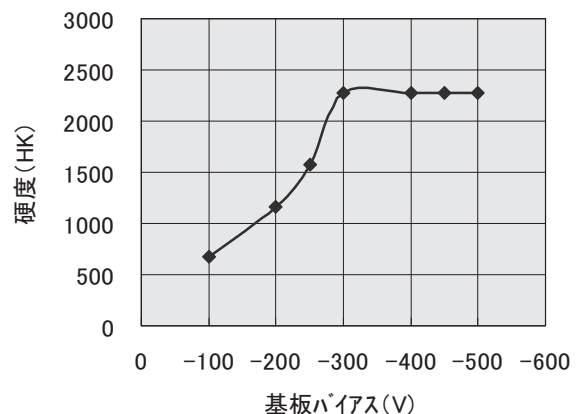


図16 基板バイアスと硬度の関係。

れる。

図17は水素含有量と硬度および内部応力の関係を示す。図の◆DLCは炭素と水素のみで構成されるDLC、□Si(3at%)-DLCは炭素と水素に加えて3%のシリコンを含有したDLC、▲Si(6at%)-DLCは炭素と水素に加えて6%のシリコンを含有したDLCを表している。いずれにおいても硬い皮膜ほど水素含有量は少なくなり、内部応力(圧縮)は大きくなる。イオン衝撃により、皮膜成長面からの水素脱離が起こっていると考えられる。

7. DLC コーティング技術

図18は皮膜構成の一例を示す。基板とDLCの間に高硬度のCrN皮膜を1~2μm形成している。その上にTMSガスを使用して非晶質のSiCx層を傾斜させ、最後にDLC層を積層させる。硬い中間層の上にDLCを積層することで、負荷によるDLCの変形が抑えられて高面圧まで耐えられる。通常DLCは一般的な鉄系材料に直接コーティングすることはできない。鉄との濡れ性が低く、界面に炭化物層ができにくいいため、容易に剥がれてしまう。DLCがダイレクトにコーティングできる基板はシリコン、ゲルマニウム、炭化シリコン等に限定されている。

トップコート層は摺動部品用途によってDLCあるいはシリコン含有DLC(Si-DLCと略す)のどちらかを適宜選択する。耐摩耗重視の用途ではDLCを、低摩擦重視の用途ではSi-DLCを選択している。シリコン含有量はTMSとC₂H₂

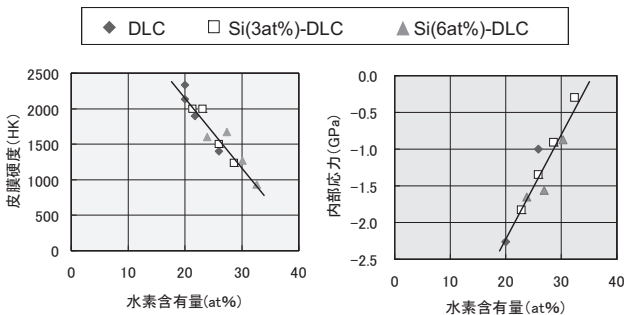


図17 水素含有量と硬度および内部応力の関係。

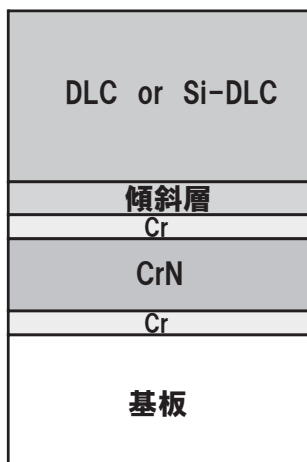


図18 積層皮膜の構成。

のガス流量比を調整することで制御し、含有量は数at%程度である。DLCにシリコンを含有させることで、ドライ環境で摩擦係数μを0.15→0.05に下げることができる。図19にCrN/DLC複合皮膜の断面SEM像を示す。

図20はDLC膜厚3μmコーティングにおける成膜工程を示す。タクトタイムは3.5~4hである。以下、各工程に関して詳細を述べる。

排気+加熱工程

ワーク(処理物)を自公転する基板台に装着後、1×10⁻³Paまで真空排気を行う。そして、脱ガス目的で加熱を行う。通常、鉄系基材では内部に水分を含んでおり、真空中で100~150℃のベーキングを行うことで、これを放出させる。

ボンバード工程

ArとH₂を導入し、圧力0.2PaにてPIGプラズマを形成してボンバード(放電洗浄)を行う。機械加工後の金属表面には酸化層や吸着ガス層、汚染層がトータルで20nm

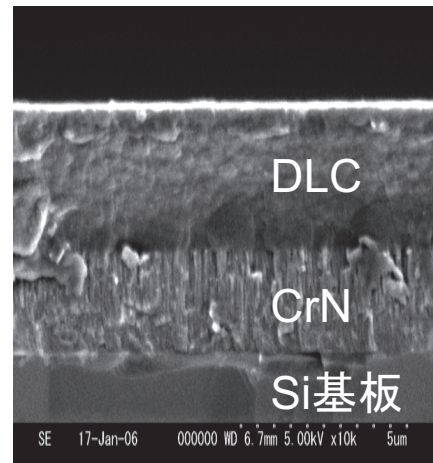


図19 断面SEM像。

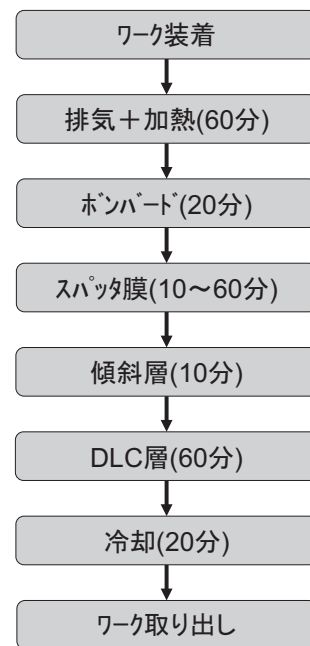


図20 成膜工程。

程度あり、これをアルゴンイオンと水素イオンの衝撃で除去する。アルゴンイオン衝撃は物理的なエッチング効果があり、水素イオン衝撃は酸化物の還元作用による化学的なエッチング効果がある。加熱工程とボンバード工程はコーティング前の脱ガスと表面清浄化を行い、皮膜の密着力を確保するうえで最も大事な工程である。

スパッタ膜形成工程 (PVD 法)

次にH₂ガスの導入を止めてArのみでPIGプラズマを形成し、スパッタターゲット(Cr)に負の直流電圧を印加してCrをスパッタさせる。ターゲットの裏面には環状の永久磁石が付いており、アルゴンイオン衝撃によって発生した二次電子を環状の磁界で閉じ込め、ターゲット表面にリング状の高密度プラズマを形成し、いわゆるマグネトロンスパッタ法にてCrをスパッタさせている。スパッタ時の圧力は0.1~0.5 Paの範囲で調整する。図21はスパッタ時の放電写真を示す。矩形のCrターゲット表面に環状のマグネトロン放電が形成されている様子がうかがえる。

Cr膜を成膜後、N₂ガスを導入して反応性スパッタによりCrN層を形成させる。CrN層形成後、N₂ガスを止めてCr層を形成する。メタル中間層の構成はCr/CrN/Crの3層構造になっており、第1層目のCrは鉄系基材との密着力を得るための層、第2層目のCrNは負荷によるDLCの変形を抑え、耐摩耗性を向上するための補強層である。第3層のCrは後述する傾斜層との密着力を確保するための層である。

傾斜層コーティング工程 (CVD 法)

スパッタターゲット出力をオフ後、アルゴンのPIGプラズマを形成し、かつ基板にパルスバイアスを印加した状態で、TMSとC₂H₂を同時に供給する。TMS流量は初期に多く導入し、時間とともに減少させる。一方、C₂H₂流量は初期に少量で、時間とともに増加させる。ガス流量の傾斜導入により、Cr界面ではシリコン濃度の高いSiC_xを形成し、DLC層側ではシリコン濃度の低いSiC_xを積層させている。

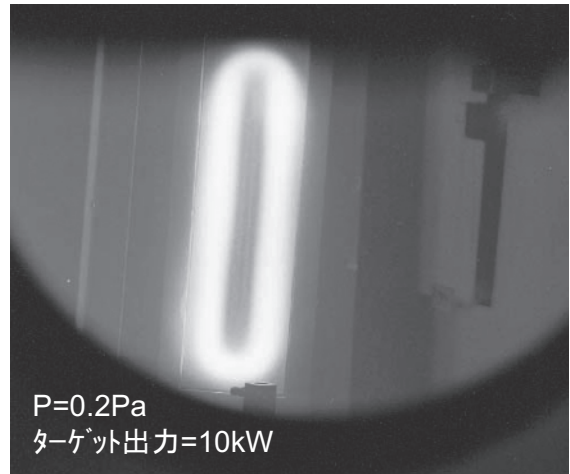


図21 マグネトロンスパッタ放電。

本傾斜層はスパッタCr膜とトップコートのDLC層の密着力を確保するための層である。傾斜層の膜厚は500nm程度である。

DLC層コーティング工程 (CVD 法)

最後にトップコートのDLC層はArとC₂H₂ガスで形成する。またシリコン含有DLC層の場合はこれにTMSを添加する。シリコン含有量4at%のDLCを得るには、TMSの流量はC₂H₂ガス流量のおよそ10%程度に調整すれば良い。シリコン含有量はTMS流量とC₂H₂ガス流量の比で制御でき、0~16at%の範囲で調整できる。

8. PVD-DLC と CVD-DLC のトライボロジー比較

プラズマCVD法で形成したDLCはPVD法と比較して表面が平滑である。図22はPVD法と当社PIG-PECVD法で作製したDLC膜の表面状態、粗さ、トライボロジー特性の比較を示している。当社皮膜の硬度はPVD法(A)の半分しかないにもかかわらず、比摩耗量は1/7と小さく耐摩耗性が高い。また相手攻撃性についても4/1000と小さい。PVD

図22 PVD-DLC と CVD-DLC の比較。

| | PVD 法(A) | PVD 法(B) | PIG-PECVD 法 |
|----------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| SEM 写真 (× 1 万倍) | | | |
| AFM 像エリア 20 μm 角 | | | |
| 粗さ: Ra (nm) | 56.7 | 13.5 | 6.6 |
| 硬度 (HK) | 4400 | 3500 | 2200 |
| 摩擦係数: μ | 0.32 | 0.17 | 0.15 |
| 比摩耗量 (mm ³ /Nm) | 3.5 × 10 ⁻⁷ | 1.5 × 10 ⁻⁷ | 0.5 × 10 ⁻⁷ |
| 相手攻撃性 (mm ³) | 37 × 10 ⁻⁴ | 1.6 × 10 ⁻⁴ | 0.16 × 10 ⁻⁴ |

法(A)の表面粗さ Ra は 56.7 nm に対して PIG-PECVD 法では 6.6 nm である。表面粗さの差がこれらのトライボロジー特性に影響を及ぼしている。固体潤滑皮膜に求められる性能は、低摩擦であること、自分自身が摩耗しないこと、そして相手も摩耗させないことであり、これらの観点からコーティング膜の表面粗さは小さいほうが良い[7]。

PIG プラズマ CVD 法は高密度のプラズマ生成および材料ガスの多量供給を可能にした排気システムを採用したことで、高成膜速度で表面が平滑な DLC ができる。また、基板に入射するイオン量とエネルギーをそれぞれ独立してコントロールできるため、膜質の異なる DLC が容易に得られ、摺動条件に最適な皮膜を選択するためにも有効な手法と考えられる。

9. おわりに

DLC は摺動部品の耐久性、信頼性向上に寄与し、昨今の環境問題から省エネ、低燃費に欠かせない皮膜となりつつある。DLC は各種手法で成膜されているが、用途および要

求される皮膜仕様によって最適な手法と装置が選択されているのが実情である。今後、コーティング装置は大型化、インライン化の方向に進み、皮膜の性能向上と低コスト化が実現して、DLC が広く産業界に利用されていくと思われる。

参考文献

- [1] 寺山暢之：コンバーテック 439, 81 (2009).
- [2] 齊藤秀俊, 大竹尚登, 中東孝浩：DLC 膜ハンドブック (エヌ・ティー・エス, 2006) 80.
- [3] 池永 勝：高機能化のための DLC 成膜技術 (日刊工業新聞社, 2007) 126.
- [4] 寺山暢之, 巽由佳, 中曾根正美：真空 38, 653 (1995).
- [5] 寺山暢之, 中曾根正美：第 4 回粒子線の先端的应用技術に関するシンポジウム, 27 (1993).
- [6] 鈴木秀人, 池永 勝：事例で学ぶ DLC 成膜技術 (日刊工業新聞社, 2003) 125.
- [7] 寺山暢之：月刊トライボロジー 265, 20 (2009).