

ドライプロセスによる 表面処理・薄膜形成の基礎

表面技術協会 編

コロナ社

編集委員会

| | | |
|-------|--------------------|------------|
| 編集委員長 | あかし かず お 明石 和夫 | (東京大学名誉教授) |
| 編集幹事 | すぎむら ひろゆき 杉村 博之 | (京都大学) |
| | さかもと ゆきひろ 坂本 幸弘 | (千葉工業大学) |

執筆者一覧 (執筆順)

| | | | | |
|---------------------|---------------|-------------------|--------------|--------|
| あかし かず お 明石 和夫 | (東京大学名誉教授) | | (1章) | |
| いのうえ やすし 井上 泰志 | (千葉工業大学) | なかの たけお 中野 武雄 | (成蹊大学) | (2章) |
| だいく はらしげ き 大工原茂樹 | (日本真空学会) | | (3.1節) | |
| かしわぎ くひろ 柏木 邦宏 | (東洋大学名誉教授) | | (3.2節) | |
| くさの えいじ 草野 英二 | (金沢工業大学) | | (3.3節) | |
| ほり まさる 堀 勝 | (名古屋大学) | いしかわ けんじ 石川 健治 | (名古屋大学) | (3.4節) |
| たかの いちろう 鷹野 一朗 | (工学院大学) | | (3.5節) | |
| いとう しげる 伊藤 滋 | (東京理科大学) | | (3.6節) | |
| ばば こうめい 馬場 恒明 | (長崎県工業技術センター) | | (3.7節) | |
| うらお りょういち 浦尾 亮一 | (茨城大学名誉教授) | | (3.8節) | |
| すぎむら ひろゆき 杉村 博之 | (京都大学) | | (4.1節, 4.2節) | |
| ばば しげる 馬場 茂 | (成蹊大学) | | (4.3節, 4.4節) | |
| わたなべ しゅういち 渡部 修一 | (日本工業大学) | | (4.5節) | |
| ほづみ あつし 穂積 篤 | (産業技術総合研究所) | | (4.6節) | |

(2013年3月現在)

ま え が き

ドライプロセスによる表面技術の発展は著しく、機械部品、電子部品、光学部品などへの産業応用が進んでいます。最近では、バイオや医療技術への展開も検討されるようになりました。ドライプロセスによる薄膜形成および表面機能化に関する書籍は、すでに数多く出版されていますが、ドライプロセスが、光学薄膜や半導体集積回路製造技術への実用化を契機として発展してきたこともあり、より一般的な表面処理技術への応用展開に基盤を置いた成書、特に、この視点から執筆された初学者向けの教科書・参考書が、不足しているように見受けられます。表面処理技術に特化したドライプロセスの教科書としては、1994年に「PVD・CVD 皮膜の基礎と応用」が、同じく表面技術協会編として出版され好評を博しました。しかし、発刊から20年近い歳月が流れ、同書もすでに絶版となっています。ドライプロセスの教育研究に携わっている先生方からも、新しい教科書の発刊を望む声が上がっていました。このような状況に鑑み、本協会の「材料機能ドライプロセス部会」のメンバーが中心となって、本書は企画されました。編集委員長には、同部会のルーツとなる研究会の一つを発足させ、表面技術協会におけるドライプロセスの基礎研究を、その黎明期からリードしてこられた、明石和夫 東京大学名誉教授にお引き受けいただきました。今回、明石委員長のリーダーシップのもと、ここに発刊にこぎつけました。

上記書籍では、基礎と応用を一つにまとめて出版しましたが、この分野をこれから学ぼうとする初学者にとっての入門書として、特に、理工系学部の大学生がドライプロセスの基礎を学ぶに適した教科書になることを目標に、まず基礎編を分離して世に出すことを編集委員会では目指しました。初学者にとって「入りやすく」「わかりやすい」ことを考えて執筆しましたが、ドライプロセス

における重要分野をカバーし、本書によって得た基礎知識をさらに発展させる手掛かりも得られるように構成したつもりです。本書は、はじめてこの分野に触れる人たちにとってばかりでなく、ドライプロセスの基礎的な面を再確認しておきたいとお考えの技術者・研究者の方々にも、十分役に立つ書籍であると自負しております。

以下に、本書の内容を簡単にまとめます。1章では、ドライプロセスとプラズマに関する概要と歴史的発展過程を記述しました。これからドライプロセスを学ぼうと考えている方たちだけでなく、ドライプロセスの教育に関与されている方にも、この章の内容は有意義と考えております。2章では、ドライプロセスを支える重要な基盤技術・基礎学問である真空とプラズマの基礎について、特に章を割いて解説しました。3章では、代表的なドライプロセスについて実際に取り上げ、それぞれのプロセスがどのような原理・原則に基づいているのかを解説しました。ドライプロセスが産業分野でどのような役割を果たしているかについても、ある程度わかるようになっています。4章には、薄膜および表面の評価分析技術について説明を加えました。これらの分析評価技術は、ドライプロセスだけに限定して使われるわけではありませんが、ドライプロセスの研究開発にとって必要不可欠な分析評価手法です。

最後に、本書の刊行にあたってコロナ社の方々にはたいへんお世話いただきましたことを、編集委員会ならびに執筆者一同に代わってお礼申し上げます。

2013年2月

材料機能ドライプロセス部会
代表幹事
杉村博之

目 次

1. ドライブプロセスとプラズマ

| | |
|--------------------------------------------|----|
| 1.1 表 面 処 理 | 1 |
| 1.2 ドライブプロセスと真空 | 3 |
| 1.2.1 真空, 真空を作る装置, 種別と発展史概要 | 3 |
| 1.2.2 真空蒸着の発展史概要 | 6 |
| 1.3 PVD, CVD とプラズマとのかかわり | 7 |
| 1.3.1 気体放電によるプラズマ発生法発展の概要史とプラズマの分類 | 7 |
| 1.3.2 近年における各種プラズマ発生法の開発と得られるプラズマの違い | 10 |
| 1.3.3 PVD と非平衡プラズマ | 13 |
| 1.3.4 CVD とプラズマ CVD | 18 |
| 1.3.5 プラズマからの活性種と表面の反応, 改質層の形成 | 19 |
| 1.3.6 熱プラズマによる成膜法 | 21 |
| 1.4 ま と め | 23 |

2. 真空およびプラズマ

| | |
|---------------------------|----|
| 2.1 真 空 | 24 |
| 2.1.1 気体圧力と真空 | 24 |
| 2.1.2 真 空 装 置 | 27 |
| 2.1.3 平均自由行程と表面入射流束 | 30 |
| 2.2 プ ラ ズ マ | 32 |
| 2.2.1 プラズマとは | 32 |

| | | |
|-------|-----------|----|
| 2.2.2 | プラズマ生成法 | 33 |
| 2.2.3 | プラズマ物理の基礎 | 36 |
| 2.2.4 | プラズマ反応素過程 | 40 |
| 2.3 | プラズマ診断 | 45 |
| 2.3.1 | プローブ法 | 45 |
| 2.3.2 | 発光分光法 | 47 |
| 2.3.3 | 質量分析法 | 49 |

3. ドライブプロセスによる表面処理と薄膜形成

| | | |
|-------|--------------------------------|----|
| 3.1 | 真空蒸着 | 52 |
| 3.1.1 | 真空蒸着が利用する物理現象 | 52 |
| 3.1.2 | 真空蒸着の原理 | 53 |
| 3.1.3 | 真空蒸着装置の蒸発源 | 55 |
| 3.1.4 | 蒸着による薄膜の特徴 | 58 |
| 3.2 | イオンプレーティング | 59 |
| 3.2.1 | イオンプレーティングの原理 | 59 |
| 3.2.2 | イオンプレーティングの特徴 | 61 |
| 3.2.3 | イオンプレーティングの種類 | 62 |
| 3.2.4 | 反応性イオンプレーティング | 63 |
| 3.2.5 | イオンプレーティングによるハイブリッド膜形成 | 66 |
| 3.2.6 | イオンプレーティングで得られる膜構造 | 67 |
| 3.3 | スパッタリング法 | 68 |
| 3.3.1 | スパッタリング現象とスパッタリングによる薄膜堆積 | 68 |
| 3.3.2 | スパッタリング率とスパッタリングにより発生した粒子エネルギー | 70 |
| 3.3.3 | スパッタリング法により堆積された薄膜の持つ構造的な特徴 | 71 |
| 3.3.4 | スパッタリング装置の概要 | 74 |
| 3.3.5 | 種々のスパッタリング法 | 76 |
| 3.3.6 | 反応性スパッタリング法 | 83 |
| 3.4 | ドライエッチング | 84 |
| 3.4.1 | イオンエッチング | 84 |

| | | |
|--------|---------------------|-----|
| 3.4.2 | イオンビームエッチング | 88 |
| 3.4.3 | 反応性イオンエッチング | 89 |
| 3.5 | イオン注入法 | 95 |
| 3.5.1 | 概 要 | 95 |
| 3.5.2 | イオン注入理論 | 98 |
| 3.5.3 | スパッタリング理論 | 102 |
| 3.5.4 | イオン注入装置 | 103 |
| 3.5.5 | イオン注入関連技術 | 104 |
| 3.5.6 | イオン注入の応用 | 106 |
| 3.6 | CVD | 107 |
| 3.6.1 | CVD の具体例 | 108 |
| 3.6.2 | CVD 反応と得られる皮膜の種類 | 109 |
| 3.6.3 | CVD の 種 類 | 110 |
| 3.6.4 | CVD 装 置 | 111 |
| 3.6.5 | CVD 試 薬 | 113 |
| 3.6.6 | 基 板 | 114 |
| 3.6.7 | CVD 反応のパラメータ | 115 |
| 3.6.8 | CVD 反応と核形成 | 117 |
| 3.6.9 | CVD 反応の解析と析出の監視システム | 118 |
| 3.6.10 | ま と め | 118 |
| 3.7 | プラズマ浸漬イオン注入 | 119 |
| 3.8 | プラズマ窒化・浸炭 | 124 |
| 3.8.1 | プラズマ窒化 | 124 |
| 3.8.2 | プラズマ浸炭 | 128 |

4. 分析と評価

| | | |
|-------|-----------|-----|
| 4.1 | 膜 厚 測 定 | 131 |
| 4.1.1 | 膜 厚 の 定 義 | 131 |
| 4.1.2 | 機械的な膜厚測定 | 133 |
| 4.1.3 | 光学的な膜厚測定 | 135 |

| | |
|-------------------------|------------|
| 4.2 表面分析 | 142 |
| 4.2.1 電子顕微鏡 | 142 |
| 4.2.2 走査型プローブ顕微鏡 | 145 |
| 4.2.3 2次イオン質量分析法 | 155 |
| 4.3 密着性評価 | 156 |
| 4.3.1 界面の力学 | 157 |
| 4.3.2 界面の微視的構造 | 159 |
| 4.3.3 付着損傷の形態 | 159 |
| 4.3.4 密着性の力学的測定方法 | 160 |
| 4.3.5 押し込みおよびスクラッチ試験の力学 | 162 |
| 4.4 薄膜の内部応力 | 163 |
| 4.4.1 薄膜の力学 | 163 |
| 4.4.2 基板の変形から求める内部応力 | 164 |
| 4.4.3 格子ひずみから求める内部応力 | 166 |
| 4.4.4 真性内部応力と熱応力 | 169 |
| 4.5 薄膜の摩擦・摩耗評価と硬度測定 | 169 |
| 4.5.1 摩擦 | 169 |
| 4.5.2 摩耗 | 171 |
| 4.5.3 硬質膜の摩擦・摩耗特性 | 174 |
| 4.5.4 ナノインデンテーション | 176 |
| 4.6 ぬれ性・はっ水性評価 | 180 |
| 4.6.1 接触角 | 180 |
| 4.6.2 表面自由エネルギー | 181 |
| 4.6.3 動的接触角 | 183 |
| 4.6.4 接触角ヒステリシスと滑落角 | 185 |
| 引用・参考文献 | 186 |
| 索 引 | 196 |

***** 1.

ドライプロセスとプラズマ

1.1 表面処理

すべての物体には、大小や形状にかかわらず表面が必ず存在する。この表面に人工的に手を加えて表面性状を変化させるか、膜を形成させる（成膜という）処理が、表面処理（surface treatment または surface finishing）と呼ばれる技術である。本書の表題であるドライプロセス（dry process）とは、乾式めっき法（dry plating process）のことで、ウエットプロセス（wet process）すなわち湿式めっき法（wet plating process）とともに、表面処理に属する重要な技術である。英語の plating（めっき）の類似語として coating があり、拡散めっき（diffusion coating）、セラミックコーティング（ceramic coating）などの用語が見られる。ペイントによる塗膜形成（塗装）に対しても coating が用いられるが、painting という場合が多い。このように専門用語の使い方には注意が必要で、また日本語と英語の対比を正確に記憶しておくべきである。学術用語より業界用語のほうが汎用される場合もある。

めっきのおもな目的として、表面外観の美化、特性（例えば、硬さ、耐摩耗性、耐食性、接着性、耐熱性、はっ水性、親水性、絶縁性、導電性、磁気遮蔽性などに加えて、宇宙工学やエレクトロニクス、バイオテクノロジーなど新分野の進歩に関連した新しい表面物性）の付与が挙げられる。

めっきとは、本来各種金属や非金属の製品の表面に薄い金属膜をかぶせる方法を指すが、現在は膜を構成する材料として、金属のほかにガラス、セラミッ

2 1. ドライプロセスとプラズマ

クス、プラスチックほか各種有機物など、驚くほど多種類の物質が利用されている。めっき法として非常に古い時代から利用されているのは湿式めっきで、その起源は紀元前 1500 年ごろまでさかのぼり、メソポタミア（現在のイラク）北部のアッシリアで、鉄器へのスズめっきが行われたとの記録がある。現在、工業用の機器や部品はもちろんのこと、あらゆる分野で使用されている工業製品のすべてに対して、めっきを含む何らかの表面処理が施されているとって過言ではない。我々が日常家庭で利用するほとんどの製品にも、材料の種類に関係なく、めっきが施されている。つまり、めっき技術がなければ、我々の生活は成り立たないのである。読者はこのことを念頭に置いて、以下で述べるプロセスの重要性を認識されたい。

ウエットプロセスすなわち湿式めっき法とは、めっきしようとする物質（原料）を溶かした溶液（おもに水溶液）から、対象物表面にめっき膜を形成させる方法で、溶液の電気分解を利用して金属膜を形成させる電気めっき、電気を用いず化学的な還元法を利用して金属膜を形成させる無電解めっき、化学的処理により化合物膜を形成させる化成処理などに分類されるが、詳しいことは省略する。

これに対して、ドライプロセスすなわち乾式めっき法は、原料を気体の状態（気相）にして供給し、対象物上に目的のめっき膜を形成させる方法で、物理的過程から成る物理気相成長法（physical vapor deposition, PVD, 物理蒸着ともいう）と化学反応、化学的過程が関与する化学気相成長法（chemical vapor deposition, CVD, 化学蒸着, 化学気相析出ともいう）に分類される。本文中では略語の PVD, CVD が多用されているので注意されたい。ドライプロセスは湿式に比べて歴史は新しく、19 世紀の半ば以降に出現し、20 世紀半ばから急成長し始めた。溶液が不要なため廃液処理の必要がない、nm から μm オーダーの厚さを厳密に制御した薄膜形成ができる、従来見られない物性を示す新材料の膜を創製できる、などのメリットが生かされて、近年目覚ましい発展を遂げた。膜の成長速度（成膜速度）が遅く、装置が高価、装置のメンテナンスに手がかかる、などのデメリットもあるが、今後さらに進歩する可能性が高

い。

以上述べたドライブプロセスで、気相を構成する各種気体を電離させてプラズマ (plasma) の状態にして利用する PVD, CVD が、20 世紀後半から急速に進歩した。電離気体 (ionized gas) はイオンと電子を含む気体で、プラズマと言い換えてもよいが、より正確なプラズマの定義は「正負の電荷が等量存在する全体的には中性とみなせる電離気体」である。大部分の気体分子や原子 (中性粒子) が電離していなくても、ごく一部が電離していればプラズマである。正の電荷を帯びているのは正イオン (positively charged ion : cation) で、負の電荷を帯びた粒子は電子であるが、特殊な条件下では中性粒子に電子が付着して負の電荷を帯びた負イオン (negatively charged ion : anion) が存在する場合もある。電離気体にプラズマという専門用語が普遍的に用いられるようになったのは、1928 年のアメリカのラングミュア (I. Langmuir) による命名以降である。plasma には鑄型という意味があり、ラングミュアが、放電管 (いわば鑄型) の形状に従って低圧下の放電が隔々まで及ぶ様子を観察して名付けたとされるが、プラズマに固有な振動現象に由来するという別の説もある。

プラズマプロセスでは、高いエネルギー状態 (励起状態という) の粒子 (分子, 原子, イオン, 電子など) が、成膜の物理的・化学的過程に関与するので、プラズマの存在しない場合に比較して、プラズマ独特の有利な効果が現れる。

なお、以下ではドライブプロセスを真空、プラズマと関連付けて説明するが、プロセスの歴史的発展の経緯についても簡潔に触れることにする。現在のドライブプロセスの隆盛がもたらされたのは、先人の発明・発見と創意工夫があったればこそといえるからである。

1.2 ドライブプロセスと真空

1.2.1 真空、真空を作る装置、種別と発展史概要

PVD による成膜は、通常密閉容器内で気体の圧力を標準大気圧以下にして

4 1. ドライブプロセスとプラズマ

行われる。このような気圧の低い状態は真空 (vacuum) と呼ばれる。成膜装置内に真空状態を作り維持するためには、排気つまり内部の空気を排除するポンプ (真空ポンプ: vacuum pump) が必須であるが、そのほか多くの重要な付属部品が挙げられる。例えば装置の密閉性を確保する耐真空シールが、その一つである。初めて人工的に真空を作り出したのはイタリアのトリチェリ (E. Torricelli) で、水銀を満たした長さ約 180 cm のガラス管の口をふさぎ、管を逆さにして水銀を満たした皿の中に垂直に立て、管の口を空けて水銀を流し出すと、管中に 76 cm の高さの水銀が残り、管の上部に真空部が残った。この有名な実験は 1643 年に行われた。時期を同じくして 1645 年には、最初のピストン型真空ポンプがドイツのゲーリケ (O. von Guericke) により作られ、かなりの真空度が達成された。それ以降 1860 年ごろまでこのタイプのポンプが広く用いられたが、適当なシール材がないため、高真空の達成は不可能であった。成膜容器への気体の導入部や排出部、内部を観察する覗き窓、口径の大きな蓋の部分、電流端子や回転部品の導入部などのシーリングが不十分だと、真空度は上がらない。管と管をつなぐ接合部分、例えばフランジ部分のシールの重要性は、誰でも気が付くことである。シール部に O リングが用いられているのを目にすることが多い。こうして 1850 年代半ばごろから優れたシール材の探求が盛んになり、いくつかの発明を経て、ようやく 1931 年にアメリカのニューランド (J. A. A. Nieuwland) により合成ゴムのネオプレン (Neoprene) が発明され、それまで利用されていた「ろう (wax)」によるシールの必要がなくなった。また、装置内の水蒸気を除くために種々の工夫がなされ、例えば五酸化リンのような強力な脱水剤が利用された。

1855 年、ドイツのガイスラー (J. H. W. Geissler) は、前記トリチェリの発見を利用して、管中の水銀柱を上下させて容器内の空気を吸引するタイプの水銀ピストンポンプを作製したが、考案したのは同じ研究室のプリュッカー (J. Plucker) とされている。このポンプにはコックが使用されていたが、1862 年にはコックのない改良型がトプラー (A. J. Topley) により、1865 年さらにその構造を改善したポンプがスプレングル (H. J. P. Sprengel) により開発され

た。また、真空中への水銀蒸気の残留を減少させるため、デュワー (J. Dewar) により考案された極低温の液化ガスを利用するデュワーびん (Dewar flask) が真空トラップとして利用された。

1907年、ゲーデ (W. Gaede) が回転翼型油回転真空ポンプ (oil-sealed rotary vane mechanical pump) を発明し、通称ゲーデ型油回転ポンプとして現在も活用されている。1910年ごろからは電動機駆動が一般的となった。1913年にはゲーデにより水銀拡散ポンプ (mercury diffusion pump) が発明され、ラングミュア (I. Langmuir) により排気速度が大きくなるように改良された。ポンプの材料は、水銀の使用に耐えるようガラスまたは鉄が用いられた。空気分子は空間に噴き出して広がっていく水銀蒸気中に拡散し、水銀蒸気とともに排気口に運ばれ除かれる。水銀蒸気が真空容器内に逆流しないように、液体空気など寒剤で冷却したトラップが常用された。水銀はポンプ容器の壁で凝縮する。1928年には英国のバーチ (C. R. Burch) が、拡散ポンプの作動液として、低蒸気圧の油が水銀に代わって有用であることを発見し、油拡散ポンプ (oil diffusion pump) が出現した。こうしてポンプの材料にも鉄以外の金属 (例えば黄銅など) が使えるようになり、冷却トラップなしでも 10^{-2} Pa の真空が達成された。ヒックマン (K. C. D. Hickman) は、米国で低蒸気圧の合成油を用いた改良型の拡散ポンプ (分留型と呼ばれる) を用い、冷却トラップなしで $10^{-3} \sim 10^{-5}$ Pa の真空を達成した。かくして油回転ポンプと油拡散ポンプは、その後の真空とその応用技術の発展に大きな貢献をした。

一般的に、真空容器内壁表面との相互作用の大きい気体分子を含まない真空を、質の良い真空と呼んでいる。そのような真空を作るためには、水銀や油のような作動液のない真空ポンプが必要となる。代表的なものがクライオポンプ (cryopump)、ターボ分子ポンプ (turbomolecular pump) などである。クライオポンプは、1960年代に液体ヘリウムのトラップが導入されて発展したが、広く使用されるようになったのは1980年以降である。ターボ分子ポンプはゲーデによって1912年に発明されていたが、現在実用されているのは、1958年のスタインハーツ (H. A. Steinhertz) とベッカー (W. Becker) の開発によ

る。ポンプの内側に、タービン翼のような構造を持つ円盤（動翼）と固定翼が組み合わさっており、円盤が高速回転すると、吸気口から入った気体分子に排気口への運動量が与えられる。油拡散ポンプに代わって多用されるようになり、いまや真空が関与する実験には欠かせないものになっている。

そのほか名前のみ挙げると、スパッタイオンポンプ、ゲッターポンプ、ソーブションポンプなどがあるが、ターボ分子ポンプを除いて、原理的にはすべて気体の固体表面への吸着を排気に利用している。真空装置には、真空ポンプのほかに真空計やガス漏れ（リーク）の検出器、質量分析計など重要な付帯機器があるが、それらの詳細については、気体分子の運動、気体の排気速度、真空計の原理など、重要な基礎的事項とともに、2章以下で説明されるが、巻末の真空関係の引用・参考文献にも記載されている。

1980年ごろから極超高真空と呼ばれる領域が注目され始め、金属（おもにステンレス鋼かアルミニウム、チタンもある）製の真空容器の内壁表面の処理や真空加熱脱ガスが行われるようになり、現在 10^{-10} Pa の真空を達成する方法が確立されているといつてよい。

1.2.2 真空蒸着の発展史概要

PVD の基本的・代表的プロセスとして、真空蒸着（vacuum deposition）がある。真空蒸着とは真空中で原料物質（蒸発源）を加熱蒸発させ、目的物の表面に付着固化させて薄膜を形成させるプロセスである。

歴史的には1800年代の後半にハーツ（H. Hertz）やシュテファン（S. Stefan）による平衡蒸気圧の研究が端緒となり、1909年、クヌーセン（M. Knudsen）が、点状の加熱源からの蒸発に関して有名な余弦則（Knudsen's cosine law of distribution：固体表面の一点からの法線と α だけ傾いた角度に、気体分子が立体角 $d\omega$ 内で飛び出す確率が $\cos \alpha d\omega$ になる）を、1915年には、蒸発源の平衡蒸気圧と気圧の関数として自由表面からの蒸発速度式を提示した。皮膜の堆積については、1884年にエディソン（T. A. Edison）による特許の申請があるが、プロセスについての明瞭な記載がなく、1887年のナールウォ

索 引

| | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>【あ】</p> <p>アーク放電 8, 11, 21, 120</p> <p>油回転ポンプ 28</p> <p>アブレッシブ摩耗 172</p> <p>アンカリング 159</p> <p>アンバランスト</p> <p> マグネトロン 15</p> <p>アンバランスト</p> <p> マグネトロンスパッタリング 79</p> <p>【い】</p> <p>イオンアシスト堆積法 16</p> <p>イオンエッチング 85</p> <p>イオン化 41</p> <p>イオン化断面積 40</p> <p>イオンシース 39, 69, 85, 120</p> <p>イオン衝撃 16</p> <p>イオン蒸着法 16</p> <p>イオン注入 95</p> <p>イオンビームアシスト 105</p> <p>イオンビームアシスト蒸着 17, 122</p> <p>イオンビームエッチング 88</p> <p>イオンビーム</p> <p> スパッタリング 82</p> <p>イオンビームミキシング 105</p> <p>イオンプレーティング 15, 59</p> <p>異方性エッチング 92</p> <p>インピーダンス整合 36</p> <p>【え】</p> <p>エッチング 68</p> <p>エリプソメーター 135</p> <p>エリプソメトリー 135</p> <p>エロージョン 78</p> | <p>【お】</p> <p>オージェ電子分光 149</p> <p>押込み試験 161</p> <p>【か】</p> <p>界面エネルギー 159</p> <p>解離過程 43</p> <p>化学気相成長法 (化学気相析出) 2, 107</p> <p>化学シフト 151</p> <p>化学蒸着 2, 107</p> <p>核形成 117</p> <p>カスケード衝突 97</p> <p>乾式めっき法 2</p> <p>【き】</p> <p>境界潤滑 169</p> <p>凝集損傷 160</p> <p>凝着摩耗 172</p> <p>【く】</p> <p>空間電荷層 39</p> <p>クロスカット試験 161</p> <p>グロー放電 8, 125, 129</p> <p>【け】</p> <p>形状膜厚 131</p> <p>原子間力顕微鏡 147, 179</p> <p>【こ】</p> <p>硬質膜 174</p> <p>格子ひずみ 166</p> <p>高周波グロー 34</p> <p>高周波スパッタリング 76</p> <p>高周波放電プラズマ 12</p> <p>高周波誘導加熱 57</p> <p>高周波励起イオンプレーティング 17</p> | <p>碁盤目試験 161</p> <p>コリジョンカスケード 86, 91</p> <p>コールドウォール 113</p> <p>コロナ放電 8</p> <p>【さ】</p> <p>再結合 44</p> <p>【し】</p> <p>自己バイアス 12, 35, 76, 77</p> <p>質量分析 49</p> <p>質量膜厚 131</p> <p>シャドウイング効果 71</p> <p>蒸気圧 53</p> <p>触針式形状測定 134</p> <p>真空 4, 24</p> <p>真空計 29</p> <p>真空蒸着 6, 52</p> <p>真空ポンプ 28</p> <p>真空容器 27</p> <p>シングルプローブ 45</p> <p>真性内部応力 169</p> <p>【す】</p> <p>スクラッチ試験 161</p> <p>ステップ成長 115</p> <p>スパッタリング 13, 68, 102</p> <p>スパッタリング (収) 率 46, 70, 86, 98, 102</p> <p>【せ】</p> <p>正イオン密度 38</p> <p>静的接触角 180</p> <p>接触角 180</p> <p>接触角ヒステリシス 185</p> <p>セルフバイアス 35</p> <p>選択エッチング 93</p> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

| | | | | | |
|--------------|----------------|---------------|------------|---------------|---------------------|
| 【そ】 | 透過型電子顕微鏡 | 142 | 【ふ】 | | |
| | 動的接触角 | 183 | | 深さ分析 | 154, 156 |
| 走査型電子顕微鏡 | 142 | ドライエッチング | 84 | 腐食摩耗 | 173 |
| 走査型トンネル顕微鏡 | 145 | 【な】 | | 付着損傷 | 160 |
| 走査型プローブ顕微鏡 | 145, 179 | 内部応力 | 164 | 物性膜厚 | 132 |
| 側壁保護膜 | 92 | ナノインデンテーション | 176 | 物理気相成長法 | 2 |
| 【た】 | | 【に】 | | 物理蒸着 | 2 |
| ダイナミックイオン | | 2極スパッタリング | 76 | 浮遊電位 | 38, 45 |
| ミキシング | 105 | 2次イオン質量分析 | 155 | プラズマ | 3, 7, 32 |
| ダイヤモンド | 175 | 入射頻度 | 53 | プラズマ CVD | 18, 110 |
| ダイヤモンド (薄) 膜 | 18, 147 | 【ね】 | | プラズマ (イオン) 窒化 | 19, 125 |
| ダイヤモンドドライク | | 熱 CVD | 18 | プラズマ (イオン) 浸炭 | 19, 129 |
| カーボン | 122 | 熱応力 | 169 | プラズマシース | 69 |
| ターゲット | 75, 78, 80, 81 | 熱プラズマ | 11, 21, 33 | プラズマ重合 | 66 |
| 脱励起過程 | 43 | 【は】 | | プラズマ浸漬イオン注入 | 120 |
| ダブルプローブ | 45 | 発光分光法 | 47 | プラズマ診断 | 45 |
| ターボ分子ポンプ | 29 | パルス電圧 | 119 | プラズマ素過程 | 40 |
| 段差測定器 | 134 | パルス放電 | 80, 125 | プラズマソースイオン注入 | 120 |
| 弾性散乱 | 98 | パルスマグネトロン | | プラズマ電位 | 38, 45 |
| 【ち】 | | スパッタリング | 79 | プラズマ溶射 | 21 |
| 超親水性 | 180 | 反跳イオン | 98 | プロジェクトレンジ | 96 |
| 超はっ水性 | 180 | 反応性イオンエッチング | 89 | 分光干渉法 | 140 |
| 直流グロー | 34 | 反応性 | | 【へ】 | |
| 直流放電 | 10 | イオンプレーティング | 63 | 平均自由行程 | 30, 52, 71, 86, 116 |
| 直流マグネトロン | | 反応性スパッタ | | 平衡プラズマ | 33 |
| プラズマ | 13 | (リング) | 14, 83 | ヘリコン波プラズマ | 13 |
| 【て】 | | 反応性 | | 偏光解析 | 135 |
| 低温プラズマ | 33, 36 | プラズマエッチング | 89 | 偏光解析関数 | 138 |
| 抵抗加熱 | 56 | 【ひ】 | | 【ほ】 | |
| デバイ長さ | 40 | 光 CVD | 111 | 放電 | 32 |
| 電子温度 | 37, 45, 49 | 非弾性散乱 | 98 | ホットウォール | 113 |
| 電子サイクロトロン共鳴 | | 引張試験 | 161 | ホロー陰極放電 | 11 |
| プラズマ | 13 | 非平衡プラズマ | 33 | 【ま】 | |
| 電子銃 | 56 | 表面 (自由) エネルギー | 157, 181 | 膜厚 | 131 |
| 電子分光法 | 149 | 表面入射流束 | 30 | マグネトロン | |
| 電子密度 | 37, 38, 45 | ビラニ真空計 | 29 | スパッタリング | 14, 78 |
| 電離気体 | 3, 7, 32 | 疲労摩耗 | 173 | 摩擦 | 169 |
| 電離真空計 | 30 | ピンオンディスク | 170 | 摩擦 | 171 |
| 【と】 | | | | | |
| 投影飛程 | 96 | | | | |

| 【み】 | 【よ】 | 【れ】 |
|-------------------------|----------------------|----------------|
| 密着性 156 | 容量結合 (型) プラズマ 12, 35 | 励起過程 42 |
| 【や】 | 【ら】 | レーザー CVD 111 |
| ヤング (Young) の式 158, 181 | ラジカル 43, 89 | レーザーアブレーション 58 |
| 【ゆ】 | ラジカル窒化 20 | レーザー加熱 58 |
| 誘導結合 (型) プラズマ 12, 36 | 【り】 | 【ろ】 |
| | 立方晶窒化ホウ素 175 | ロータリーカソードマグネット |
| | 臨界核半径 115 | ロンスパッタリング 81 |
| | | ロッキングカーブ 168 |

| 【A】 | 【I】 | 【R】 |
|---------------------------|---------------------|-----------------|
| AES 149 | ICP 12, 36 | RF plasma 12 |
| AFM 147, 179 | 【M】 | RIE 89 |
| 【C】 | MOCVD 111 | 【S】 |
| CCP 12, 35 | 【O】 | SEM 142 |
| CVD 2, 107 | OES 48 | SPM 145, 179 |
| 【D】 | 【P】 | STM 145 |
| DLC 17, 122, 175 | PI ³ 120 | 【T】 |
| 【E】 | PIII 120 | TEM 142 |
| ECR plasma (プラズマ) 13, 124 | PSII 120 | Thornton モデル 72 |
| | PVD 2 | 【X】 |
| | | XPS 149 |
| | | X線光電子分光 149 |

ドライプロセスによる表面処理・薄膜形成の基礎

Introduction to Dry Processing for Surface Finishing and Thin Film Coating

© 一般社団法人 表面技術協会 2013

2013年5月20日 初版第1刷発行

★

編者 一般社団法人
表面技術協会
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 新日本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04631-1

(横尾)

(製本：愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします