

## 国際標準化に準じた DLC の産業応用動向

### The trend of DLC's industrial applications in accordance with international standardization

日本アイ・ティ・エフ株式会社, 辻岡 正憲

Nippon ITF Inc., Masanori Tsujioka

#### 1. はじめに

ダイヤモンドとグラファイトの両方の特性を有する DLC は、そのユニークなトライボロジー特性から多くの摺動部品の表面処理として利用されている。一方、DLC をダイヤモンド結合(sp<sup>3</sup>)とグラファイト結合(sp<sup>2</sup>)の比と水素量で 4 つのタイプに分類・標準化し、産業界への DLC の普及をさらに促進しようという動きが日独で進んでいる。ここでは DLC の産業応用事例、および最近の我々の DLC 開発とその適用事例について紹介する。

#### 2. DLC のタイプ別応用事例

DLC は高硬度で耐摩耗性を有し、摩擦係数が低く、相手攻撃性の低い表面処理であり、また化学的に安定で凝着、溶着を起しにくいという特徴があり、各種機械部品の表面処理として広く活用されている。しかしながら、DLC の構造、組成は様々であり、それにより特性も微妙に異なるため、目的に応じた DLC の選択が重要である。

##### ①工具・金型

近年省エネ目的で、アルミ合金をはじめとする軽量金属を用いた部品が広く使われているが、これらの金属は軟質であるため、切削・成形加工においてワークの溶着が問題となる。この解決のために硬質で溶着防止効果のある DLC が注目された。工具・金型の表面処理被膜として重要な特性は、耐摩耗、長寿命に大きくかわる膜硬度と膜剥がれ等の原因となる膜の密着性である。そういった意味で、DLC の中でも特に sp<sup>3</sup> 比率が高く、ダイヤモンドに近い硬度を持ち、成膜時のイオン化率が高く密着性に優れたアークイオンプレーティング法で作製した水素フリーDLC(ta-C)が最も適していると言える。実際にアルミ合金(ADC12)の切削試験において、切削抵抗でノンコート工具の 1/2 となり、仕上げ面粗さも 1/2 となった。これは、摩擦抵抗が低く、溶着が生じず、結果として加工時の温度上昇を抑え、雫れ等の現象が生じなかった結果と考えられる。同様にアルミ合金の打ち抜き金型においても、窒化系の表面処理では 1000 ショット、他の DLC では 50000 ショットが限界であったのに対し、ta-C では 100000 ショットまで加工でき、打ち抜き後の穴径もほとんど変化しないという結果を得た。

##### ②自動車・機械部品

自動車・機械部品の摺動部には ta-C、a-C:H、ta-C:H の DLC が利用されているが、主にエンジンオイル等の油潤滑下で用いられている部品には ta-C が主に用いられ、無潤滑あるいはグリース下で用いられる部品には a-C:H が用いられている。一般に DLC は無潤滑下では金属との摺動において、摩擦係数は 0.1~0.2 と MoS<sub>2</sub> 等の固体潤滑材と同等の低摩擦を有するが、潤滑油では他の材料も摩擦係数が下がり、DLC の優位性は発揮されない。ところが、ta-C のみは潤滑下でもさらに摩擦係数が下がり、0.06~0.08 となる。これは

ta-C 以外の DLC は炭素原子が水素で終端しているのに対し、ta-C は表面に不対電子があり、これが油中の添加剤元素と結合しやすく、界面での油の保持力が高まった結果と推測される。現在、ta-C は動弁系部品、ピストンリング等の自動車エンジン部品に広く適用されている。動弁系部品では、摩擦抵抗を 25% 低減し、結果、燃費 3~4% の向上を実現した。

#### 3. DLC の構造制御による新たなアプローチ

a-C:H 型の DLC は、プラズマ CVD を主プロセスとして作製され、その膜は表面が滑らかで無潤滑下で低摩擦を有していることが一般的に知られている。ところが、同じプラズマ CVD で作製した DLC で水素含有量、膜表面粗さ、膜密度がほぼ同じでも、その成膜手法(プラズマ励起手法)の違いにより摩擦係数、摩耗量に違いがあることが分かった。Spring-8 を用いた微小角入射 X 線散乱法による分析を試みたところ、低摩擦係数で低摩耗の DLC にのみ、グラファイト結晶のピークがあることを確認した。さらに動径分布関数(RDF)を計算し、これによって炭素原子の骨格の解析を行ったところ、その結晶サイズは、数 10nm から 100nm の非常に微小な粒径であることがわかった。この微細なグラファイト結晶の存在が低摩擦、低摩耗にどのように寄与しているのかを解明するために量子化学計算を用いて、オイル分子と DLC、グラファイト、ダイヤモンドそれぞれの表面の相互作用エネルギーの計算、それに基づくオイル分子を動かす時の摩擦力を見積もったところ、グラファイト >ダイヤモンド > DLC となった。このことから、微細なグラファイト結晶はオイル分子が表面に付着、保持することに寄与し、これによりトライボフィルムを形成しやすくなり、結果として低摩擦、低摩耗になったものと推定している。現在、この DLC は油中およびグリース中で用いられる駆動系部品、クラッチ部品等でその効果が確認され、量産対応に至っている。

また DLC のラマン分光により得られる情報(ID/IG、G ピーク)と摩擦特性の関係を調査することにより、摩擦トルクを制御できることも分かった。成膜プロセスのパラメータに置き換えることで、きめ細やかな摩擦トルクの制御が可能であり、単純な低摩擦というだけでなく、用途に応じた摩擦係数を実現することにより、より広範囲な適用が期待できる。

#### 4. まとめ

既に DLC は広く実用化されているが、地球環境、省エネの流れの中、期待とニーズはさらに広がっている。成膜技術や解析技術の進展により、さらに厳密な特性制御も可能になりつつあり、より広範囲で産業界への貢献が期待できる。