自動車産業のトライボロジーに関する 技術課題と DLC コーティング

太刀川 英 男*

*^(株)豊田中央研究所(〒480-1192 愛知県愛知郡長久手町大字長湫手字横道 41-1)

Tribological Issue in Automobile Industry and DLC Coating

Hideo TACHIKAWA*

*Toyota Central Research & Development Laboratories Inc.(41-1, Aza Yokomichi, Oaza Nagakute, Nagakute-cho, Aichi-gun, Aichi 480-1192)

Keywords : Automobile, Tribology, Surface Modification, Diamond-like Carbon, DLC, DLC-Si, Plasma CVD, Practical Application

1. はじめに

近年、自動車産業では、「走る」、「曲がる」、「止まる」といった従来の車の基本性能の向上に加え、CO₂ 低減など地球規模の環境保全への対応が重要となってきた。こうした地球環境保全に対する取り組みとして、1)自動車の低燃費化、2)自動車の生産工程での省エネルギー化があげられ、それぞれに対する技術開発が進められている。こうした低燃費化、省エネルギー化を進めていく上で、トライボロジーに関する問題の解決が求められる場合が多い。トライボロジー問題に対する材料的な観点からの対策としては、潤滑油、トライボ材料および表面改質などさまざまな方策が考えられるが、なかでも部品や生産用の金型、工具の表面改質技術は、広い用途に適用できることから有用性が高い。そうした表面改質技術のなかで、とりわけダイヤモンドライクカーボン(DLC)コーティング技術が注目されている。それは、無潤滑(ドライ)下でも潤滑下でも、摺動部品や生産用具に低摩擦特性や耐摩耗性を付与できることから、自動車の低燃費化および生産工程のドライ化による省エネルギー化を実現する上で有力な技術と考えられているからである。本報告では、自動車産業におけるトライボロジーに関する技術課題を概観し、そうした課題の解決のための DLC の応用研究の取り組みと報告者らが開発してきたプラズマ CVD を用いたシリコン含有の DLC(DLC-Si と呼称)コーティング技術について述べる。

2. 自動車産業のトライボロジーに関する技術課題

表 1 に、1950 年から 2001 年までの半世紀余りの自動車の保有台数の推移を示す¹⁾。1970~2000 年で見ると 10 年平均 1.7 億台の増加となっており、Euro Motor Reports “DATABOOK”の 2010 年の予測では世界の自動車保有台数は 9 億 1900 万台になると予想されている。今後の人口増、

表 1 世界の自動車の保有台数の推移

年	保有台数(万台)	年	保有台数(万台)
1950	6897	1980	41317
1955	9596	1985	48379
1960	12716	1990	57910
1965	17446	1995	66584
1970	24476	2000	74871
1975	32383	2001	75539

(出典：自動車ハンドブック (2003~004 年版) 日刊自動車新聞社、^(株)日本自動車会議所 共編)

BRICs(ブラジル、ロシア、インド、中国)の主要マーケットの需要拡大などを考慮すると 2030 年には現在の倍の約 16 億台へと拡大することが予想されている。こうした自動車の世界的な普及、拡大は、当然のことながら CO₂ の排出増加をもたらす。IEA(国際エネルギー機関)などの報告によると石油の消費量は、2030 年には現在の 1.5 倍になると見積もられており、石油、天然ガス、石炭などの化石燃料の消費による温暖化ガス(CO₂)の排出量は、世界経済の成長がこのまま続くとすると、2030 年には、現在の 1.55 倍になると見積もられている²⁾。こうした状況をそのままにすれば、地球環境の観点から深刻な状況を迎えることになる予想される。

図 1 は、日本国内の CO₂ 排出量に占める各部門の割合を示す³⁾。運輸・自動車の部門の割合は、約 2 割を占め、このうちの 9 割が自動車からの排出である。したがって、自動車産業が抱える技術課題のうち CO₂ 低減に対する取り組みが最も重要な課題となっている。こうした課題の解決に対しては、(1)自動車走行時の CO₂ 低減策と(2)自動車の製造工程での CO₂ 低減策が有効である。中でも、自動車の製造から廃棄・リサイクルまでの全工程での CO₂ の排出割合の 8 割強と最も大きいのが(1)の自動車の走行中に排出される CO₂ である。そのため、図 2 に示すような様々な自動車の CO₂

低減策が検討されている。中でも、摺動部品の摩擦損失の低減や伝達効率の向上といったトライボロジーに関する技術は、自動車の燃費効率改善(CO₂低減)に大きく結びつくことからさまざまな角度から検討されている。

トライボロジーに関する技術課題は、従来から自動車の基本性能に関わる問題として扱われてきた。表2に自動車におけるトライボロジー関連部品の例を示す。表からも分かるように自動車では実に多くの部品群がその対象となっている。これらの部品に必要な特性は、耐摩耗性、耐凝着性、低摩擦性あるいは高摩擦性などで、多くの場合、複数の表面特性が同時に必要とされる。したがって、摺動部品の表面に複数のトライボロジー機能をもたせる表面改質技術が求められている。

一方、自動車製造工程では、CO₂低減のための省エネルギー対策や廃油・廃棄物低減に向けた取り組みが進められて

いる。ドライ切削など加工のドライ化(無潤滑化)や潤滑剤をより少なくする加工がその例である。それは、切削油などを工場中に搬送、供給するエネルギーの方が実際の加工に使われるエネルギーより大きいという事情や油剤の洗浄工程などでの消費エネルギーが馬鹿にならないことによる。また、最近では自動車の軽量化のためにアルミニウム合金や高張力鋼、さらに品質保証の観点から耐食性の高いステンレス鋼が多用されるようになり、成形、加工時に凝着を惹き起こすトラブルが急増している。

こうした自動車の製造工程全般の問題解決を推し進める技術が求められている。

以上、自動車産業全般に関わる技術課題解決に対しては、トライボロジーに関する技術の果たす役割は大きく、とりわけトライボロジー特性を飛躍的に向上させる表面改質技術への期待は大きい。

3. DLC コーティング

自動車部品や金型、工具、治具の寿命向上のためのトライボロジー対策として、めっき、浸炭、窒化、PVD-TiN、CVD-TiCあるいはTRD-VCなどさまざまな表面改質が行われてきた。しかし、これらの方法は、先に触れた“摩擦力の制御”という機能や潤滑剤をなくす加工を実現するには満足いくものではなかった。ダイヤモンドライクカーボン(DLC)コーティングは、まさにそうした要求に応える技術として近年とくに注目されている。

DLCは、1970年代の初頭に合成⁴⁾され、これまでさまざまな合成・成膜法が検討されてきた。1980年代になると市販の実用装置が開発され、ビデオデッキのヘッドやカミソリ刃など家電製品や精密金型などを中心に应用されるようになった。

自動車産業においても、DLCは早くから注目され、その応用研究がなされてきた。しかし、コストが高い、膜の密着性が低く信頼性に欠けるなどの理由から、実用化は遅れていた。

1990年代の中ごろ、ボッシュが燃料噴射ポンプに初めてDLCを実用化したのを契機に、自動車産業でも再びさまざまな部品や金型、工具、治具への実用化検討が始まった。最近になって、表3に示すように^{5)~7)}、自動車部品に対しても

図1 日本国内のCO₂排出量比較

図2 自動車のCO₂低減策

表2 自動車におけるトライボロジー関連部品

システム	部品	システム	部品
エンジン系	ピストン/シリンダ	ディファレンシャル系	ビスカスカップリングプレート
	ピストンリング/シリンダ		ITCC, LSD, 各種歯車
トランスミッション系	ピストンピン	ブレーキ系	軸受け
	カム/カムフォロア		パッド/ロータ
	各種軸受け		ピストン/シリンダ
	湿式クラッチ	補機・燃料系	シール/シリンダ
ステアリング系	乾式クラッチ		エアコンコンプレッサ
	シンクロナイズリング		ウォータポンプ
	各種歯車		ベルト/プーリ
	各種軸受け		オルタネータ
	パワステポンプ		燃料ポンプ, インジェクタ
	各種歯車, 軸受け, ジョイント, シール		整流子, 各種軸受け

実用化が進んできた。2000 年以降の自動車部品への DLC の本格的な実用展開には、日本が主導的な役割を果たしている。表 3 にも示した DLC の実用例の中で、筆者らが関わって実用化してきた DLC-Si コーティングについて次に紹介する。

4. DLC-Si コーティング技術

4. 1 成膜方法および装置

DLC-Si コーティング⁸⁾には、直流プラズマ CVD 法が用いられている。図 3 および図 4 にそれぞれ、コーティング装置の概略図と実用装置の外観を示す。直流プラズマ CVD 法は DLC 膜の原料として、すべてガスを用いるため、膜のつきまわり性に優れること、また直流電源設備はコストが安く、DLC の装置として他の方法に比べ安価な装置が使えるといった特長がある。成膜用のガスとして、メタンガス(CH₄)など炭化水素系のガス、テトラメチルシラン(TMS: Si(CH₃)₄)などのシリコン系のガスが用いられる。その他希釈

表 3 自動車部品への DLC 実用例

応用部品	コーティング方法	DLC の構成元素
ITCC クラッチ	プラズマ CVD	C-H-Si *
ウォーターポンプシャフト	プラズマ CVD	C-H-Si *
カードキーフック	プラズマ CVD	C-H-Si *
ディーゼル燃料 インジェクタ	プラズマ CVD	C-H
バルブリフタ	PVD	C
ディファレンシャルギア	PVD	C-H-W

* DLC-Si コーティング

図 3 DLC-Si 成膜装置の概略図

図 4 DLC-Si 成膜装置の外観
(日本電子工業(株)製の JPE-610-3 S)

ガスとしてアルゴンガス(Ar)および水素ガスが添加される。合成される膜は炭素、水素およびシリコンからなっている。用いるガスの種類や組成あるいは放電条件などにより、膜組成は変化し、膜特性も大きく変わる。

図 5 に 500℃で 1 時間成膜した DLC-Si 膜の断面写真を示す。成膜速度は、成膜ガスや放電条件によって変えることが可能で、1~10 μm/h の範囲で成膜される。減圧下で成膜する方法の中では、成膜速度は大きい。また、トライボコーティングとして常用される膜厚は、数 μm であるが、目的によっては膜厚を 0.5 μm 以下に薄くして使うこともある。放電方式を工夫することで数十 μm の厚さにしてもはく離なく成膜することができる。

当初、基材との密着性が十分ではなく自動車用部品や生産用金型などに適用することは困難であったが、現在では、図 6 に示すように前処理としてプラズマエッチングを利用し基材表面に微細凹凸をつける高密着化技術が開発され^{9),10)}、量産性に優れ、信頼性の高い成膜技術として自動車部品や生産用の金型、工具に実用されている¹¹⁾。膜の密着力のレベルとしては、たとえば窒化鋼, SUS 440 C, SKH 51 などを基材とした場合は、スクラッチ強度で 50~70 N の密着力を示す。

現在、図 2 に示した装置以外にさらに大型化した装置(φ 1300×1750 mm および φ 900×3200)が稼動している。

4. 2 膜の特性

膜の組成を制御することで硬さ、ヤング率など膜の諸物性や摩擦特性などが変わる。表 4 に代表的な DLC-Si 膜の特性

図 5 DLC-Si 膜の断面

図 6 プラズマエッチングより基材表面に形成された微細凹凸

の一例を示す。無潤滑の条件で、摩擦係数 0.05 を示し、高い耐摩耗性を示す。しかし、油中では、油種によって、摩擦係数が 0.04~0.12 と変化する。このことは、DLC-Si 膜は低摩擦部品だけでなく高摩擦を必要とする動力伝達部品にも適用できることを示している。強アルカリの水溶液や王水、塩酸など強酸にも侵されない化学的安定性を保持している。

通常、低摩擦、耐摩耗コーティングとして使われている DLC-Si 膜を固体 NMR 法で膜中の炭素の結合状態を調べた。その結果を図 7 に示す。sp² 結合と sp³ 結合の割合は、ほぼ 7:3 で、sp² 結合が多い膜であることが分かった。DLC-Si 中のシリコンや水素の量によってこの割合が変わり、それによって硬さやヤング率も変わることが確認されている。

4. 3 実用化状況

現在、適用検討されている DLC-Si 膜の用途例は多い。自動車部品はもとより工作機械や繊維機械部品から金型、治具、工具類までその用途は幅広い。中でも DLC-Si の特徴である低摩擦特性や耐焼き付き性あるいは低相手攻撃性に着目した応用例が多くある。現在、本技術は自動車部品だけでも、数多くの実用化検討が進められ、表 3 にも示したように 2004 年に、世界に先駆けて実用化した 4 WD 用の電子制御カップリング (ITCC) のクラッチを皮切りに、2006 年には、ハイブリッド車用のウォータポンプ部品、意匠性と耐摩耗性が必要な高級車用のカードキー部品などに実用化された。以下に ITCC クラッチの実用化例について詳述する。

図 8 に DLC-Si をコーティングした ITCC(Intelligent Torque Controlled Coupling)電磁クラッチの適用箇所を示す。ITCC は車両の走行状況や路面状況に応じ、最適な前後輪トルク配分を電子制御で瞬時に行う駆動力伝達装置である。その動力伝達部には、鉄系電磁クラッチが使われており、油潤滑下にて摺動しトルクを伝達する機能を果たしている。したがって、DLC-Si をこの電磁クラッチの表面にコーティン

グすることにより低摩擦化してしまうことはあつてはならず、より高い摩擦係数を発現する必要がある。そのため DLC-Si の組成の最適化やクラッチ表面に微細な溝構造を設ける、あるいは DLC-Si に最適な潤滑油を開発するなどが行われた。その結果、電磁クラッチ板に DLC-Si コーティングをすることで安定した摩擦特性を長期間に亘って確保でき、その耐久性を飛躍的に向上させることができた。これによりクラッチ枚数を削減でき小型・高容量化と低コスト化を同時に実現することができた。図 9 に、図 8 に示した大型装置による DLC-Si コーティングクラッチ板の量産風景(一回に 500 枚処理)を示す。現在、ITCC クラッチを搭載した 4 輪駆動車は年間 200 万台以上生産されている。

表 5 に金型、工具、治具に実用されている例を示す。これらの中には、自動車製造に関わるものだけではなく、他の産業分野にも実用されている例も加えてある。表中の狙い、効果の欄には、適用した結果、単に金型や工具の寿命向上とだけでなく、さまざまな波及効果ももたらされたことを示した。以下にそうした効果が顕著だった粉末成型の例について詳述する。

図 10 に、粉末のかじり対策として適用した粉末成型型(超

表 4 DLC-Si 膜の代表的な特性

硬さ	Hv 500~3000
ヤング率	70~160 GPa
電気抵抗	10 ⁸ ~10 ¹¹ Ω・cm
摩擦係数	0.05(無潤滑) 0.04~0.12(油, 水潤滑)
耐食性	強アルカル水溶液や王水、塩酸に侵されず

図 7 DLC-Si 膜中の炭素の結合状態 (固体 NMR (HD-MAS) 法により測定)

図 8 DLC-Si を適用した ITCC の電磁クラッチ箇所

硬)の写真を示す。通常、ポンチ側には DLC をはじめさまざまなコーティングが適用されているが、ダイス内面へのコーティングは、難しいとされてきた。それは、従来のアーキオンプレーティングやスパッタリングなど PVD 法では、ターゲットからの飛翔してくるイオンやスパッタされた元素の指向性が高いためダイス内面奥まで膜が形成されにくく、形成されても膜が薄く、密着力は低かった。本技術では、こうしたダイス内面にも均一で高密着なコーティングが可能となるため、現在、粉末成形用のポンチやダイスに広く適用されている。DLC-Si コーティングにより、耐かじり性が大幅に改善されたことにより成形型の寿命向上が達成されただけでなく、従来は型かじり防止のため粉末内に添加されていたステアリン酸亜鉛などの内部潤滑剤の使用を低減して成形ができるようになり、粉末成形体や焼結体の高密度化が可能になった。その結果、焼結品の高強度化や寸法変化の低減と

いった副次的な効果が得られている。

その他の応用としては、せん断型やプレス型へのコーティングが特に注目される。自動車の燃費改善策の一つとして自動車の軽量化対策が進められ、車体への高張力鋼板やアルミニウム合金板が多用されるようになったため、せん断型やプレス型の焼き付き、かじりが問題となっている。従来の TiN などのハードコーティングでは十分な耐焼付き性が得られないため、DLC-Si コーティングの適用検討が進められている。また、耐焼付き性の改善が顕著なためドライ切削実現の工具類にも適用検討が進みつつある。たとえばドリル¹²⁾やタップに適用することで無給油でのアルミニウム鋳物のドライ切削が可能となる。DLC-Si のダイカスト型への応用も増えつつある。単純に DLC-Si を適用して効果を示すものもあるが、やはり型の冷却や離型剤の最適化を行うことでより型の長寿命化やメンテナンスフリー化が実現している。DLC-Si に限らず DLC 全般にいえることではあるが、こうした周辺技術の取り込みや最適化はコーティングの効果を高める上で重要である。

図9 ITCC クラッチの量産風景

図10 スプロケット製造用粉末成型型への DLC-Si 適用例

表5 金型・工具への適用例

適用例	被加工材, 他	金型・工具材質	狙い, 効果
絞り, 曲げ型	ステンレス鋼板, 高張力鋼板	SKH 51, SKD 11 超硬	耐凝着性, 表面キズ防止 非塩素系潤滑油使用可 →環境負荷低減, 応力腐食防止
せん断型	アルミニウム板, ステンレス鋼板 Zn めっき鋼板	SKD 11	耐凝着性, バリ抑制, 潤滑油レス化 →洗浄工程簡略化
スタンピング型	マグネシウム板, 鋼板	SKD 11	耐摩耗性, 耐凝着性
粉末成型型 (パンチ)	鉄系粉末	SKH 51, 超硬	耐凝着性, 耐摩耗性, 潤滑剤低減
粉末成型型 (ダイス)	鉄系粉末	超硬, SKH 51	→高密度成形, 高強度化, 低歪化
樹脂成型型	塩ビ, タルク入り樹脂	SUS 420 J 2	離型性, 顔料による耐摩耗性
ガラス成型型	ガラス	超硬	耐摩耗性, 表面キズ防止
ダイカストピン	アルミ溶湯, 亜鉛溶湯	SKD 61	耐凝着性, 耐アルミ溶損性
穴あけ用せん断工具 (標準パンチ)	アルミ板, ステンレス鋼板, 銅板, 銅版	SKD 11, SKH 51	耐凝着性, 耐摩耗性, 長寿命化
カシメ工具	アルミ板	SKD 11	耐凝着性, カシメ部破断防止
パニシング工具	鋼材	SKD 11	耐凝着性, 耐摩耗性, 長寿命化
せん断刃	紙	SUS 420 J 2	耐摩耗性
塗装用バー	塗料, 接着用樹脂	SUS 304	顔料に対する耐摩耗性, 耐食性
溶射用治具	各種溶射粒子	A 1050, SPCC	溶射付着防止

5. 結 言

DLC は 21 世紀になって急速にさまざまな分野に実用されるようになってきた。先に見てきたように自動車産業の分野でも例外ではない。これまでは、トライボロジー分野への応用がその主戦場であったが、今後は、新しい動力源に関連する電池、モーター、パワーデバイスといったまだ注目されていない分野への応用が期待される。

20 世紀の「シリコンの時代」に対し、21 世紀は「炭素と水素」の時代と言われている。資源ならびに環境面で問題のないこれらの元素を用いた材料開発は益々重要となる。シリコンを添加した DLC-Si コーティング技術をはじめ、これまで先人の努力により開発されてきた DLC コーティング技術は、こうした要件を満たす技術であり、自動車産業に限らず、広く“モノ造り”の世界に貢献できるものと思われる。

(2008-5-27 受理)

文 献

- 1) 日刊自動車新聞社, (株)日本自動車会議所共編集; 自動車年鑑ハンドブック<2003~04 年版>, p. 64 (日刊自動車新聞社,

2003).

- 2) IEA ; World Energy Outlook (2006).

- 3) N. Hasegawa ; *J. Soc. Auto. Eng. Japan*, **58**, 8 (2004).

- 4) S. Aisenberg and R. Chabot ; *J. Appl. Phys.*, **42**, 2953 (1971).

- 5) 安藤淳二, 齊藤利幸, 酒井直行, 酒井俊文, 深見 肇, 中西和之, 森 広行, 太刀川英男, 大森俊英; 日本トライボロジー学会 秋季トライボロジー会議 (2004).

- 6) 越智文夫, 奥村 望, 菅原博好; 自動車技術会秋季大会学術講演前刷集, No. 97-06, p. 23 (2006).

- 7) 馬淵 豊, 浜田孝浩, 和泉博之, 保田芳輝, 加納 眞; 自動車技術会秋季大会学術講演前刷集, No. 97-06, p. 15 (2006).

- 8) K. Ogri and T Arai ; *J. Mater. Res. Soc.*, **5**, 2567 (1990).

- 9) H. Mori and H. Tachikawa ; *Surf. Coat. Technol.*, **149**, 225 (2002).

- 10) 森 広行, 中西和之, 太刀川英男; 表面技術協会第 108 回講演大会要旨集, p. 213 (2003).

- 11) K. Nakanishi, H. Mori and H. Tachikawa ; *Proc. The International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films*, San diego, p. 62 (2004).

- 12) 五十嵐新太郎, 長谷川英雄, 大庫和孝, 太刀川英男; 精密工学会秋季大会講演論文集, p. 333 (2003).