

転がり滑り環境下における水素フリーDLCの摺動特性

Sliding properties of hydrogen-free DLC under sliding-rolling contact condition

大城 竹彦*
Takehiko Oshiro

三宅 浩二
Koji Miyake

大原 久典
Hisanori Ohara

藤井 正浩
Masahiro Fujii

自動車の電動化の進展に伴い、モーターや減速機などに用いられる歯車や軸受といった転がり滑り環境下で使用される部品の耐久性向上や摩擦損失低減が重要になってくると考えられる。日本アイ・ティ・エフ(株)では用途に応じて様々なタイプのDLC^{*1}をコーティングおり、その中でも水素フリーDLCは潤滑油中での摩擦低減効果が高いことが確認されている。この研究では、水素フリーDLCを歯車に適用した際の耐久性の変化や転がり滑り環境下における水素フリーDLCの摩擦低減効果の調査を行った。その結果、水素フリーDLCを歯車にコーティングすることで歯車の耐久性が向上することが確認された。また、『低粘度』、『高回転』、『高い滑り率』の環境下ほど、水素フリーDLCの摩擦低減効果が高いことが確認された。

As the electrification of automobiles progresses, the number of parts used in rolling and sliding environments, such as gears and bearings, which are often used in motors and reducers, is increasing. Therefore, improving their durability and reducing their friction loss are considered to be important. We coat various DLC depending on the application. Among them, it has been confirmed that hydrogen-free DLC has a high friction reduction effect in lubricating oil. In this study, we investigated changes in durability when applying hydrogen-free DLC to gears and the friction reduction effect of hydrogen-free DLC in rolling and sliding environments. As a result, it was confirmed that coated gears with hydrogen-free DLC improves their durability. It was also confirmed that the friction reduction effect of hydrogen-free DLC is higher in environments with “lower viscosity of oil,” “higher rotation speed,” and “higher slip ratio.”

キーワード：水素フリーDLC、歯車、転がり滑り、低粘度

1. 緒言

これまで、低燃費化を目的とした自動車へのDLCの適用は、エンジン部品が主であり、滑り環境下での摩擦低減効果が重要であった。今後、自動車の電動化が進むと、モーターや減速機などに多く用いられている歯車や軸受といった転がり滑り環境で使用される部品での摩擦低減も重要になってくると考えられる。

日本アイ・ティ・エフ(株)では用途に応じて様々なDLCのコーティングを行っているが、水素フリーDLCは潤滑油中における摩擦低減効果が特に高いDLCとなっている⁽¹⁾。そこで、今後重要になってくると考えられる歯車へ水素フリーDLCをコーティングした際の耐久性の変化や転がり滑り環境下での摺動特性について調査を行った。

2. 水素フリーDLC

2-1 水素フリーDLCの概要

DLC膜は、炭素を主成分としたアモルファス構造の薄膜であり、ダイヤモンド構造(sp³構造)とグラファイト構造(sp²構造)からできている。このsp³構造とsp²構造の比率や、構造中に取込まれた水素の比率により様々な特徴を持たせることができる。それらの比率を基にしたDLC膜の概念図としてA. C. FerrariとJ. Robertsonによって提唱された3元相図がある(図1)⁽²⁾。

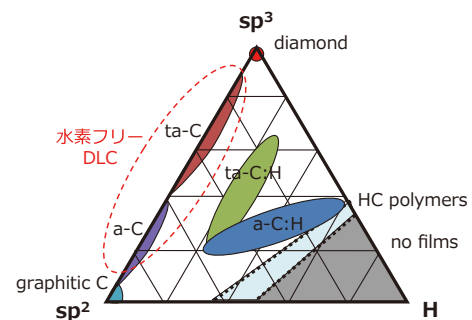


図1 DLCの3元相図

3元相図内に示される水素含有量の少ないta-C^{*2}膜やa-C^{*3}膜が一般に水素フリーDLCと呼ばれている。

DLC膜の作製方法には、炭化水素ガスを用いる方法と固体のグラファイトを用いる方法があり、水素フリーDLCを作製するにはグラファイトを用いた方法が一般的で、工業的には真空アーク蒸着法がスパッタ法が用いられる。

2-2 真空アーク蒸着法

日本アイ・ティ・エフ(株)では、真空アーク蒸着法により水素フリーDLCを作製している。真空アーク蒸着法は、陰極表面に形成される陰極点から放出される高エネルギーのイオンを堆積させて薄膜を形成する成膜方法である。固体

陰極からの蒸発物によってプラズマが形成されており、薄膜の原料として炭化水素系のガスを導入する必要がない。そのため、水素フリーDLCを作製できる。しかし、真空アーク蒸着法では陰極点よりグラファイトの粒が放出されるという問題がある。放出されたグラファイト粒子が成膜中のDLC表面に付着すると、ドロップレットと呼ばれているコーン状のDLC粒子が形成される原因となる。ドロップレットはDLC膜と同等の硬さの粒子であるため、摺動時に摺動相手を傷つけるだけでなく、脱落するとDLC膜自体も傷つけてしまう。そのため、真空アーク蒸着法で作製されたDLC膜は、膜表面を研磨し、ドロップレットによる突起を除去して使用されることが多い。

2-3 フィルタード真空アーク蒸着法

真空アーク蒸着法において陰極で発生するグラファイト粒子をDLC膜の原料である炭素イオンと分離し、ドロップレットの発生を抑制する手法が古くから存在しており、フィルタード真空アーク蒸着 (Filtered Vacuum Arc: FVA) 法と呼ばれている。図2に示す様に、陰極から発生するプラズマを磁場により湾曲し、グラファイト粒子と分離することで、ドロップレットの少ないDLC膜が作製できる。

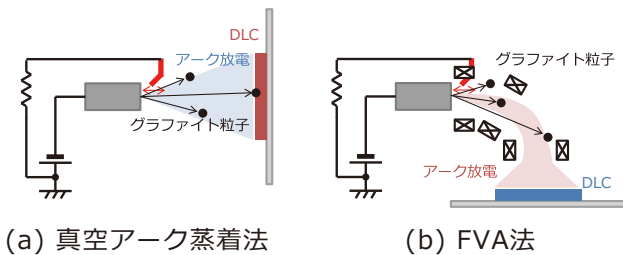


図2 成膜方法のイメージ

2-4 水素フリーDLCの諸特性

表1に試験に用いた水素フリーDLCの諸特性を示す。真空アーク蒸着法により作製したDLC1は、ドロップレットを除去するために、成膜後、膜表面の研磨を行っているが、FVA法により作成したDLC2とDLC3は成膜後の研磨処理を行わずに試験に用いた。

表1 水素フリーDLCの製法と諸特性

	DLC1	DLC2	DLC3
成膜手法	真空アーク蒸着法	FVA法	
膜厚	0.5 μm	1.0 μm	1.0 μm
粗さ Ra	0.018 μm (研磨あり)	0.028 μm (研磨なし)	0.031 μm (研磨なし)
硬度	61 GPa	28 GPa	16 GPa
ヤング率	555 GPa	317 GPa	149 GPa

3. 歯車耐久試験

3-1 試験方法

歯車耐久試験は、IAE型動力循環式歯車試験機 (図3、表2、表3) により行った。試験により歯車の歯面に発生するピッチング^{*4}の面積が、接触面全体の1%になる繰返し数をピッチング疲労寿命として、歯車の耐久性を評価した。

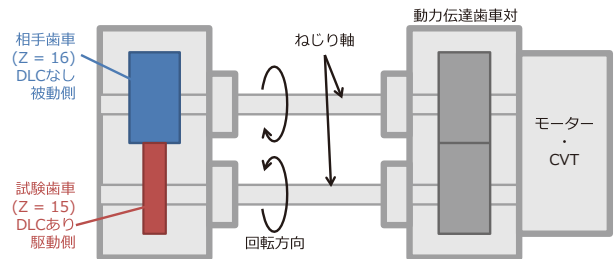


図3 IAE型動力循環歯車試験機模式図

表2 使用歯車

	試験歯車	相手歯車
DLC	あり	なし
材質	SCM420 ヤング率：206 GPa ポアソン比：0.3	
歯数	15	16
歯幅	5 mm	18 mm

表3 試験条件

回転数		1800 rpm
最大ヘルツ面圧 ^{*5}		1.8 GPa
ATF オイル ^{*6}	温度	80°C ± 5°C
	供給速度	750 mL/min
	密度	0.863 g/cm ³
	引火点	194°C
	動粘度	33.03 mm ² /s @40°C 7.013 mm ² /s @100°C
粘度指数		181

3-2 ピッチング疲労寿命

図4に歯車耐久試験で評価したピッチング疲労寿命を示す。未コートの歯車と比べ、水素フリーDLCをコートした全ての歯車においてピッチング疲労寿命が向上していた。特にDLC3をコートした歯車では、ピッチング疲労が未コートの歯車の6.9倍と大きく向上していた。

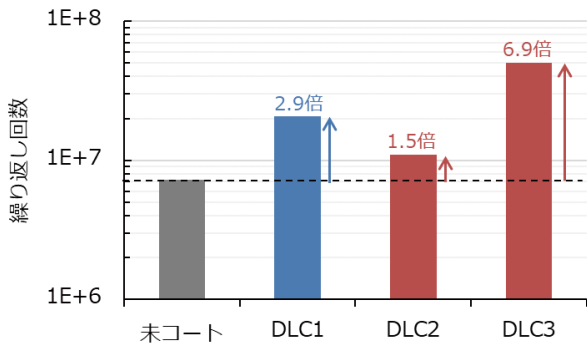


図4 ピッチング疲労寿命

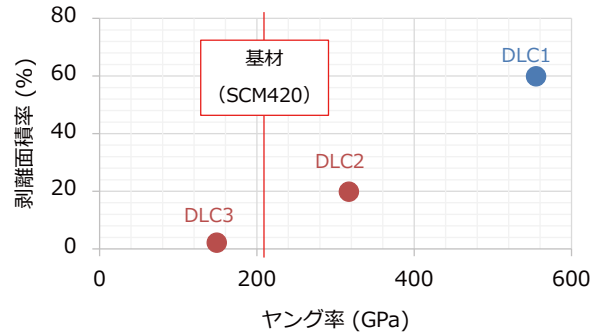


図6 DLCのヤング率と剥離面積率の比較 (7×10⁶回時)

3-3 耐剥離性

それぞれの歯車における損傷状態を比較するために、7×10⁶回繰返し時点で歯面の状態を確認した結果を図5に示す。DLC1の歯面には摺動方向に進展した擦り傷が多数見られるのに対し、DLC2及びDLC3の歯面には摺動方向に進展した擦り傷が見られない。DLC1では成膜後に研磨処理を行っているが、膜中にはドロップレットが多数残されている。そのため、それらが脱落した際に引っ掻き傷を作ったものと思われる。一方、FVA法で作製されたDLC2及びDLC3は、ドロップレット含有量が少ないため、ドロップレットによる擦り傷が抑制されたと思われる。

さらに、図5からは、DLCごとに剥離状態が異なっていることも確認できる。歯面の接触域全体に占める剥離部の割合を剥離面積率として算出した値を、各DLCのヤング率と比較すると、図6に示す様に相関が見られた。最も剥離の少ないDLC3のヤング率は、基材のヤング率よりも低くなっている。このため、基材が変形した際に、DLC3は基材変形に追従して変形することで剥離が抑制されたと思われる。そして、歯面にDLCが存在し続けることで、良好な摺動性が維持され、ピッチング疲労寿命が延びたものと思われる。

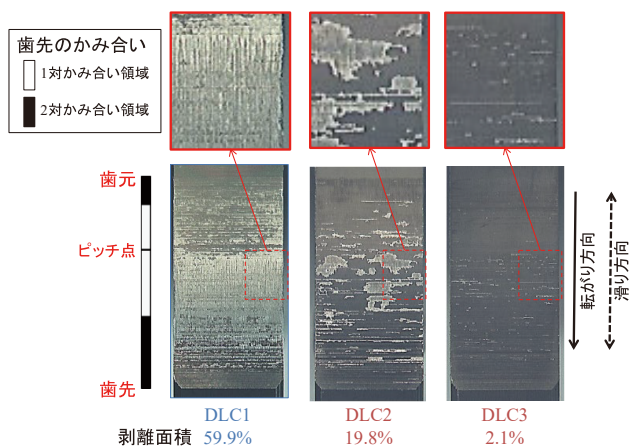


図5 歯先の損傷状態 (7×10⁶回時)

4. 転がり滑り摺動試験

4-1 試験方法

最も耐久性が高かったDLC3の摩擦係数を転がり滑り摺動試験機 (図7、表4、表5) により評価した。この試験機ではボールとディスクを別々の速度で回転させることにより任意の転がり速度と滑り率で摺動試験を行うことができる。

摺動試験では、最初に温度を安定させるために20分間の慣らし摺動を行った後、転がり速度を変えて摩擦係数の変化をみるストライベック測定を行い、さらに続けて滑り率を変えて摩擦係数の変化をみるトラクション測定を行った。その際、潤滑油にはマシンオイルとエンジンオイルを使用し、マシンオイル使用時は油温を40℃に、エンジンオイル使用時は油温を100℃に設定した。

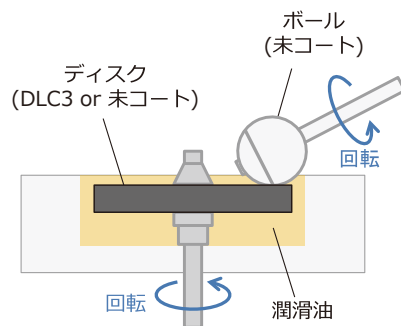


図7 転がり滑り摺動試験機

表4 試験サンプル

ディスク	SUJ-2 (DLC3 or 未コート)
ボール	SUJ-2 (未コート)
潤滑油	エンジンオイル (SN/GF-5, 5W-30) @100℃ ⇒ 動粘度: 10.42 mm ² /s マシンオイル (ISO GV46) @ 40℃ ⇒ 動粘度: 46 mm ² /s

表5 摺動試験条件

	Step1	Step2	Step3
		慣らし摺動	ストライベック測定
転がり速度	100 mm/s	1 mm/s~1000 mm/s	
滑り率	0%	0%~100%	
荷重	0.5 N	37 N (最大ヘルツ面圧: 1.0 GPa)	
備考	20分間	転がり速度増加	滑り率増加

4-2 ストライベック測定

図8、図9にストライベック測定結果を示す。転がり速度が10 mm/s未満では滑り率の制御が難しく、測定結果が安定しないため、10 mm/s以上の測定結果を示している。

動粘度が高い潤滑油（マシンオイル/40℃）中では、未コートとDLC3で摩擦係数に大きな差は見られない。一方、動粘度が低い潤滑油（エンジンオイル/100℃）中では、転がり速度や滑り率が高くなるほど、DLC3の摩擦係数が未コートの摩擦係数よりも低くなった。

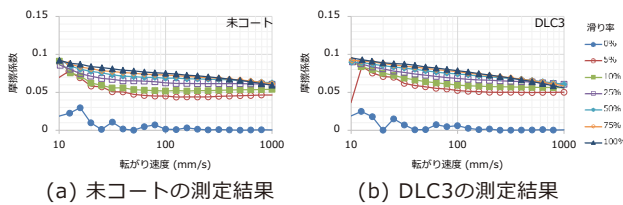


図8 ストライベック測定結果（マシンオイル/40℃）

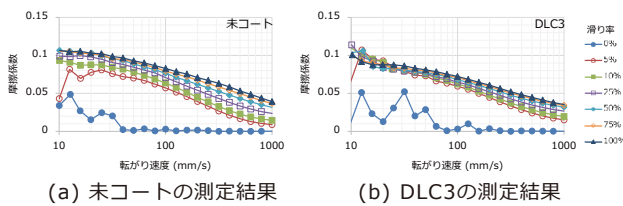


図9 ストライベック測定結果（エンジンオイル/100℃）

4-3 トラクション測定

図10、図11にトラクション測定結果を示す。トラクション測定結果においても、動粘度が高い潤滑油中では、未コートと比べてDLC3が低摩擦になってはいないが、動粘度の低い潤滑油中ではDLC3の摩擦係数の方が低くなった。

トラクション測定で得られたグラフの横軸を滑り速度（転がり速度×滑り率）に変換し、それぞれの摺動条件におけるDLC3と未コートの摩擦係数比（DLC3の摩擦係数÷未コートの摩擦係数）を取ったグラフ（図12）でみると、傾向をよりはっきりと確認することができた。どちらの潤滑油中でも滑り速度が高くなるほど摩擦係数比が小さくなっ

ており、エンジンオイル中ではほとんどの領域において摩擦係数比が1よりも小さくなっていった。このことは、滑り速度が高いほど、DLCをコートした場合の摩擦低減効果が高く、潤滑油の粘度が低いとより効果的であることを示している。

以上の結果から、DLCの摩擦低減効果は『低粘度』、『高速回転』、『高い滑り率』の際により大きくなると考えられる。

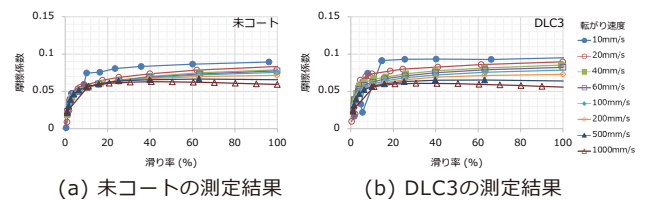


図10 トラクション測定結果（マシンオイル）

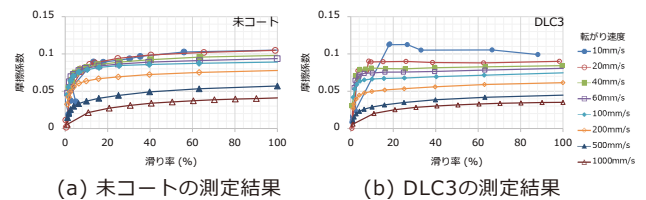


図11 トラクション測定結果（エンジンオイル）

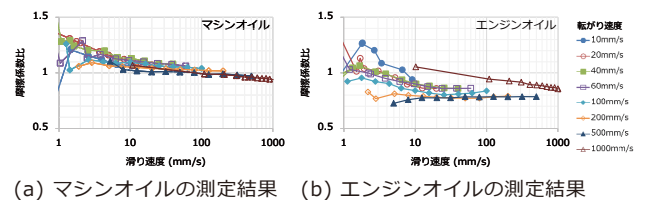


図12 滑り速度に対する摩擦係数比の変化

5. 結 言

水素フリーDLCを歯車にコーティングすることで、歯車の耐久性（チッピング疲労寿命）の向上が確認された。その中でも、基材よりも低いヤング率の水素フリーDLCが特に有効であった。

また、転がり滑り環境下における摺動試験により、水素フリーDLCをコーティングすることで得られる摩擦低減効果は、『低粘度』、『高回転』、『高い滑り率』の環境下ほど高いことが確認された。

用語集

※1 DLC

Diamond Like Carbonの略称。炭素を主成分としたアモルファス薄膜の総称。

※2 ta-C

Tetrahedral Amorphous Carbonの略称。テトラヘドラルアモルファス炭素膜と呼ばれる水素含まず、ダイヤモンド構造の割合が高いDLC膜。

※3 a-C

Amorphous Carbonの略称。アモルファス炭素膜と呼ばれる水素含まず、グラファイト構造の割合が高いDLC膜。

※4 ピッチング

歯面の微細な凹凸に繰り返し高い応力がかかることでその部分が疲労しピット（孔）が発生する損傷状態。

※5 最大ヘルツ面圧

二つの物体の接触面に対して垂直方向に荷重が加わり弾性変形した際に、その接触面に掛かる面圧はヘルツ面圧と呼ばれており、最大ヘルツ面圧はヘルツ面圧が最も高くなる点における面圧。

※6 ATFオイル

Automatic Transmission Fluidの略称。AT（オートマチックトランスミッション）車のトランスミッションに使用されるオイル。

参考文献

- (1) Y. Yasuda, M. Kano, Y. Mabuchi, and S. Abou, "Research on Diamond-like Carbon Coatings for Low-Friction Valve Lifters," SAE Paper 2003-01-1101 (March 2003)
- (2) A. C. Ferrari and J. Robertson, "Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon," PHYSICAL REVIEW B Vol.61 No. 20, pp.14095-14107 (May 2000)

執筆者

大城 竹彦* : 日本アイ・ティ・エフ(株) グループ長
博士 (工学)



三宅 浩二 : 日本アイ・ティ・エフ(株) 執行役員



大原 久典 : 日本アイ・ティ・エフ(株) 非常勤顧問



藤井 正浩 : 岡山大学 教授
博士 (工学)



*主執筆者