



# 軟質金属との摺動に最適な自動車エンジン部品用DLC膜「HC-DLC」

Novel Diamond-Like Carbon Film “HC-DLC” for Engine Parts That Slide on Soft Metals

大城 竹彦\*  
Takehiko Oshiro

三宅 浩二  
Koji Miyake

当社では、アークイオンプレーティング法により作製されるDLC<sup>\*1</sup>膜に、水素を含有させた新膜「HC-DLC」を開発した。適切な量の水素を含有させたことで、MoDTC<sup>\*2</sup>を含有したエンジンオイル中においても耐摩耗性と耐焼き付き性が非常に高く、さらに軟質金属に対する相手攻撃性が極めて低いという、これまでにない特徴を持たせることに成功した。軟質金属と摺動する部品であるピストンピンにHC-DLCを適用することで高い性能が得られることから、2019年秋に量産が開始され、さらに次世代高効率エンジンへの適用検討が進んでいる。

We have developed a new diamond-like carbon film “HC-DLC,” which is produced by vacuum arc deposition and contains hydrogen. With its appropriate hydrogen content, this film obtained extremely low attackability to soft metals without compensating its high wear resistance and seizure resistance in engine oil containing MoDTC. The film demonstrates excellent performance in protecting piston pins that repeatedly slide on soft metals. To meet market needs, the mass-production of the film started in the fall of 2019, and now further application to the next-generation high-efficiency engines is under consideration.

キーワード：DLC、MoDTC、ピストンピン、自動車エンジン部品、摺動

## 1. 緒言

自動車の電動化は今後急速に進む見通しであるが、2050年段階でもエンジンとモータを組み合わせた車両が大多数を占め、エンジンを搭載する車両は現在よりも増える予想されている。そのエンジンにおいては、小型化・高効率化により、ピストンピンにかかる負荷が増大しており、より高い耐焼付き性・耐摩耗性を持ったピストンピンが求められるようになってきている。

近年、ピストンピンにDLC膜をコーティングすることで、耐焼付き性・耐摩耗性の向上が行われている。ピストンピンに用いられている水素を含有するDLC膜は、エンジンオイルの添加剤の一種であるMoDTCと反応して異常摩耗することが知られている<sup>(1)</sup>。

一方で、真空アーク蒸着法などにより作製される水素を含有しない高硬度のDLC膜であれば、MoDTCが添加されたエンジンオイル中でも異常摩耗することはない。しかし、相手攻撃性が高く、ピストンピンのような軟質金属との摺動には使用しにくいといった欠点があった。

そこで当社は、MoDTCが添加されたエンジンオイル中において異常摩耗が発生せず、軟質金属に対して相手攻撃性の低いDLC膜「HC-DLC」の開発を行った。

## 2. HC-DLC膜の概要

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 ( $sp^3$ 構造) とグラファイト構造 ( $sp^2$ 構造) からできている。この $sp^3$ 構造と $sp^2$ 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)<sup>(2)</sup>。

水素を含有するDLC膜では、主にプラズマCVD<sup>\*3</sup>法やスパッタリング法により作製されるa-C:H<sup>\*4</sup>膜が、ピスト

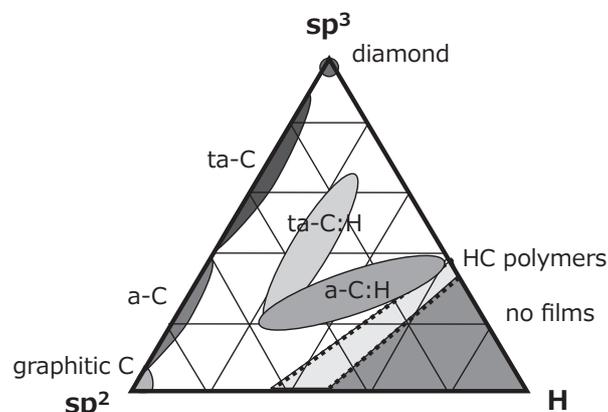


図1 DLCの3元相図

ンピンをはじめ多くの部品に使用されている。水素を含まないDLC膜では、真空アーク蒸着法により作製されるta-C<sup>\*5</sup>膜が主に使用されている。a-C:H膜とta-C膜を比較すると、どちらも優れた摺動性を有しているが、sp<sup>3</sup>構造を多く含むta-C膜の方が高硬度で、耐熱性にも優れている。また、a-C:H膜はエンジンオイルの摩擦調整剤としてよく用いられるMoDTCと反応して異常摩耗することが知られており、ピストンピンには使用しにくい場合がある。一方で、ta-C膜は製法上、ドロップレットと呼ばれる硬質な粒子を多く内包しており、成膜後のラッピング工程で除去が行われるものの、完全には除去できず、使用環境によっては使用中に脱落したドロップレットによるta-C膜自身や摺動相手の損傷が問題となる。

ピストンピン向けDLC膜として考えた場合、摺動相手がアルミや銅と言った軟質金属であるため、相手攻撃性が高いta-C膜は使用しにくい。また、さらなる低燃費化のためにエンジンオイルにMoDTCが添加されることが多くされており、a-C:H膜も使用しにくくなってきている。

当社で開発したHC-DLCは、真空アーク蒸着法にてDLC膜を作製する際に、成膜雰囲気中に炭化水素ガスを導入することで膜中に水素を取り込ませたta-C:H<sup>\*6</sup>膜となっている。DLC膜の構造としては、ta-C膜とa-C:H膜の中間的なものと言える。構造の最適化を進めた結果、MoDTCが添加されたエンジンオイル中でも異常摩耗せず、アルミや銅と言った軟質金属への相手攻撃性が低い、ピストンピン向けDLC膜として優れた特徴を持たせることに成功した。

### 3. HC-DLC膜の性能評価

#### 3-1 DLCの諸特性

表1にHC-DLCと、従来のDLCとの諸特性の比較を示す。

表1 HC-DLCと従来のDLCの諸特性比較

	HC-DLC (ta-C:H)	ta-C	a-C:H
作製方法	真空アーク蒸着法		プラズマCVD法
原料	グラファイト 炭化水素ガス	グラファイト	炭化水素ガス
膜厚	1μm	1μm	3μm
水素含有量	13 at%	-	26 at%
硬度	39GPa	56GPa	23GPa

HC-DLCは、ta-C膜と同じ成膜装置で作製されており、炭化水素ガスを導入することで膜中に水素が取り込まれている。今回の試験において、HC-DLCとta-C膜は、DLC膜のみの違いを比較するために、基材との密着層は同じ条件で作製している。また、真空アーク蒸着法で作製したDLC膜はドロップレットにより表面が粗くなるため、HC-DLCとta-C

膜は成膜後に同じ条件でラッピング処理を行っている。

#### 3-2 HC-DLC膜の耐摩耗性

MoDTCの添加によりHC-DLCに異常摩耗が発生するかを確認するために、MoDTCが添加されたエンジンオイル (MoDTC有) とMoDTCが添加されていないエンジンオイル (MoDTC無) を用いてボールオンディスク試験 (図2、表2) を行った。その結果を図3に示す。

HC-DLCとta-C膜ではMoDTCの有無で摩耗に大きな変化はみられないが、a-C:H膜ではMoDTCを添加することで摩耗の著しい増加がみられる。これより、a-C:H膜で異常摩耗が発生する摺動環境下においても、HC-DLCは異常摩耗が発生しないことがわかる。

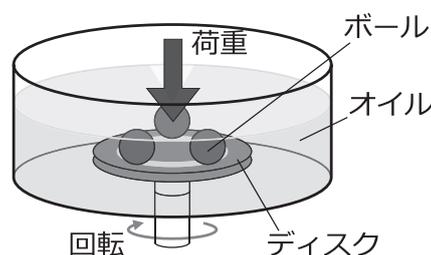


図2 ボールオンディスク試験概要

表2 ボールオンディスク試験条件

ディスク	SCM415 (DLCコート)
ボール	SUJ-2、φ3/8インチ、固定
荷重	250 N
回転	1500 rpm、φ15 mm
オイル	エンジンオイル (5W-30)、80°C、MoDTC 無or有
時間	40分

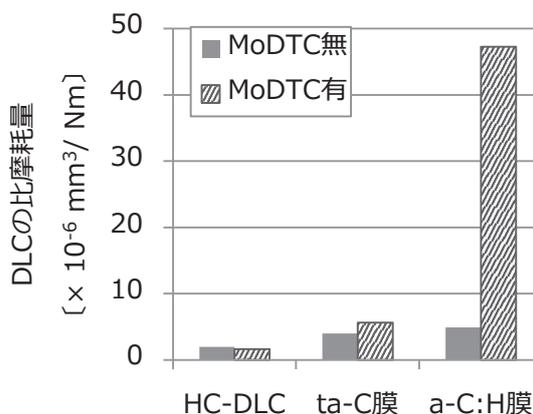


図3 ボールオンディスク試験結果

### 3-3 HC-DLC膜の相手攻撃性

HC-DLCの軟質金属に対する相手攻撃性を確認するために、シリンダーオンディスク試験（図4、表3）を行った。その結果を図5に示す。

HC-DLCは、相手材がAl合金、Cu合金いずれの場合においても、ta-C膜よりも相手材の摩耗量が小さくなっており、軟質金属との摺動する環境ではta-C膜よりも相手攻撃性が低い。

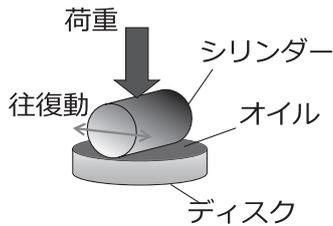


図4 シリンダーオンディスク試験概要

表3 シリンダーオンディスク試験条件

シリンダー	SCr415 (DLCコート)、φ33mm×22mm
ディスク	Al合金 又は Cu合金
荷重	100 N
往復動	振動数：28 Hz、振幅：3 mm
オイル	エンジンオイル (0W-16)、80℃、MoDTC有
時間	30分

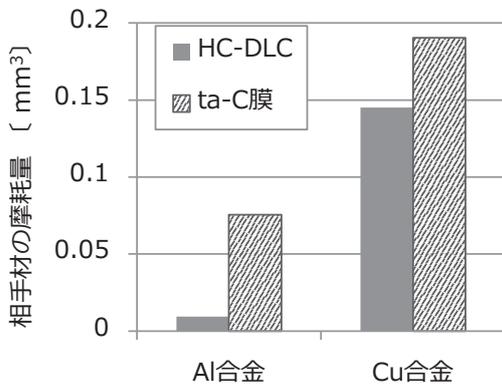


図5 シリンダーオンディスク試験結果

試験前のHC-DLCとta-C膜の表面形状をSPM（走査型プローブ顕微鏡）で確認すると、HC-DLCとta-C膜は同じ条件でラッピング処理を行っているにもかかわらず、微細な突起の量に大きな差が見られる（図6、図7）。HC-DLCは、適度に水素を含有させたことにより、ドロップレットの除去が容易になり、相手攻撃性が低減されたと思われる。

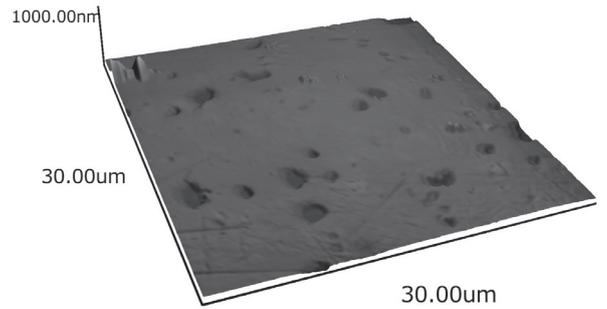


図6 HC-DLCのSPM像（粗さRz=0.32μm）

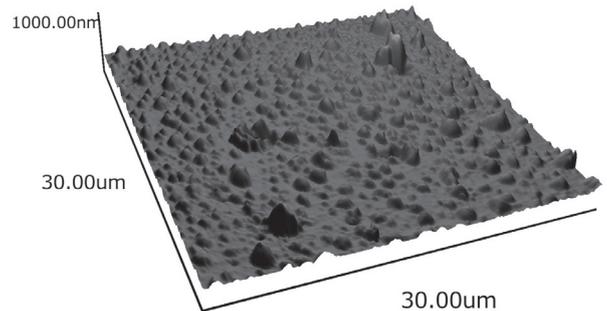


図7 ta-C膜のSPM像（粗さRz=0.70μm）

### 3-4 HC-DLC膜の耐焼付き性

HC-DLCの耐焼付き性を確認するために、MoDTCが添加されたエンジンオイルを用いて焼付き試験を行った（図8、表4）。この試験では、荷重を増加させていき、真鍮ピンが折れた瞬間の荷重を焼付き荷重としている（図9）。

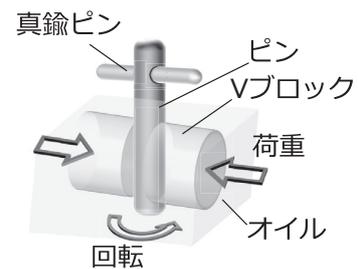


図8 焼付き試験概要

表4 焼付き試験条件

ピン	SAE 3135 (DLCコート or 未コート)
Vブロック	AISI 1137
荷重	3kN/minで増加
回転	500rpm
オイル	エンジンオイル (0W-20)、80℃、MoDTC有

その結果、HC-DLCは、ta-C膜よりも耐焼き付き性が高いことが確認された。

その原因調査のために、荷重5kNで試験を停止し、DLC膜の表面状態をマイクロスコープにて観察したところ、HC-DLCでは、脱落したドロップレットによるスクラッチ痕がta-C膜と比べて、非常に少ないことが確認された(写真1、写真2)。HC-DLCでは、ドロップレットの除去が容易になったことにより、相手攻撃性が低下しただけでなく、DLC膜自体の損傷も抑制されており、結果として耐焼き付き性が高くなったと思われる。

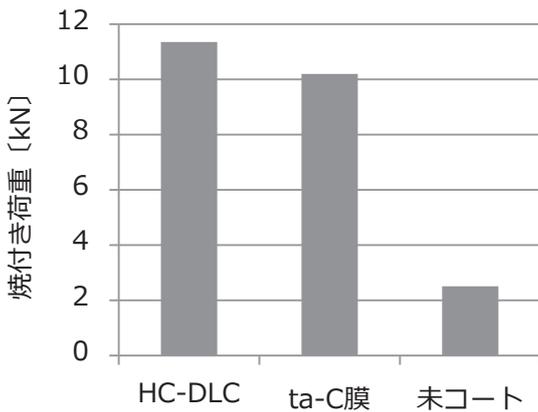


図9 焼き付き試験結果

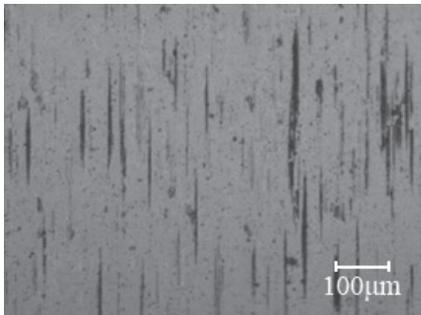


写真1 荷重5 kN停止時のHC-DLC表面

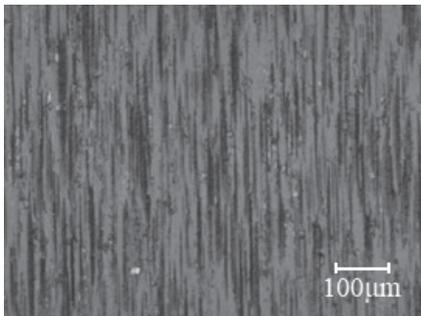


写真2 荷重5 kN停止時のta-C膜表面

## 4. 結 言

当社の開発したHC-DLCは、MoDTCの添加によりa-C:H膜で異常摩耗が発生する摺動条件下においても異常摩耗が発生しないため、MoDTCが添加されたオイルが使用される摺動部にも使用可能である。また、ta-C膜よりも軟質金属に対する相手攻撃性が低く、さらに耐焼き付き性も高くなっている。そのため、HC-DLCは、軟質金属と摺動するピストンピンのようなエンジン部品の保護膜に適している。

### 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 MoDTC

Molybdenum Dithio-Carbamateの略称。摩擦調整剤の一種であり、エンジンオイルに広く利用されている。

#### ※3 CVD

Chemical Vapor Depositionの略称。化学蒸着または化学気相成長と呼ばれ、原料ガスを流し込み化学反応により膜を堆積させる手法。

#### ※4 a-C:H

Hydrogenated Amorphous Carbonの略称。水素化アモルファス炭素膜と呼ばれる水素を含有したDLC膜。

#### ※5 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、水素を含まず、ダイヤモンド構造の割合が高いDLC膜。

#### ※6 ta-C:H

Hydrogenated Tetrahedral Amorphous Carbonの略称。水素化テトラヘドラルアモルファス炭素膜と呼ばれるta-Cに水素を含有させたDLC膜。

### 参 考 文 献

- (1) T. Shinyoshi, Y. Fuwa, & Y. Ozaki, "Wear Analysis of DLC Coating in Oil Containing Mo-DTC," SAE Technical Paper, 2007-01-1969 (July 2007)
- (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) 主査  
博士 (工学)



三宅 浩二 : 日本アイ・ティ・エフ(株) 部長



---

\*主執筆者