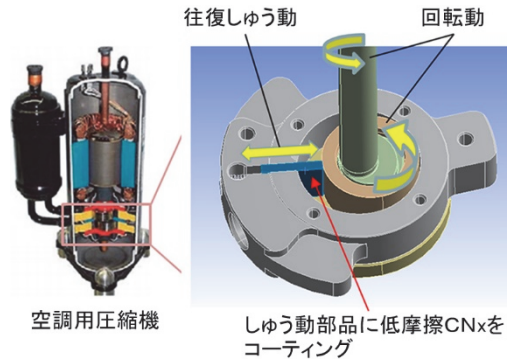


# 製品の摩擦損失低減・効率向上を実現する 低摩擦表面処理を用いたしゅう動面改良技術

Sliding Surface Improvement Technology Using Low Friction Surface Treatment to Reduce Friction Loss and Improve Efficiency of Products



洞口 典久\*<sup>1</sup>  
Nori-hisa Horaguchi

石本 孝生\*<sup>1</sup>  
Takao Ishimoto

倉地 浩平\*<sup>1</sup>  
Kohei Kurachi

梅原 徳次\*<sup>2</sup>  
Noritsugu Umehara

李 義永\*<sup>3</sup>  
Lee Woo Young

IBA-FAD法(Ion Beam Assisted Filtered Arc Deposition)により成膜したta-CN<sub>x</sub>膜を用いて摩擦試験を行った結果、冷媒雰囲気での乾燥摩擦における摩擦係数は約0.02、冷媒と冷凍機油の混合雰囲気では0.03以下を確認し、現行DLCコーティング(Diamond Like Carbon Coating)の摩擦係数約0.1に比べて約1/3以下の低摩擦を発現させて、先行他社(自動車エンジンで使用されている)DLC対比や、コーティングなしの摩擦係数0.1-0.15と比較して、従来よりも大幅な低減を実現する技術を開発した。また、エンジンオイル雰囲気では、オイルに新たな添加剤を追加配合した条件において、摩擦係数0.04の低摩擦を確認した。摩擦試験後の摺動面の観察と反射分光分析により、摩擦面に生成したトライボフィルムを確認し、ta-CN<sub>x</sub>膜の低摩擦機構を明らかにした。更に今回、一例として、開発したta-CN<sub>x</sub>膜を空調用圧縮機のしゅう動部に適用した結果、約1%の効率向上を達成した。

## 1. はじめに

各社、機械製品の省エネルギー化に取り組んでおり、省エネルギー化の打ち手の一つにしゅう動部の摩擦損失の低減がある。近年、炭素系硬質コーティングを用いた低摩擦が報告されており、中でもta-CN<sub>x</sub>(tetrahedral amorphous Carbon Nitride)は、乾燥窒素雰囲気下で摩擦係数0.01以下が発現したと報告<sup>(1)(2)</sup>があるが、冷媒環境下での摩擦特性は報告されていない。そこで、機械製品の摩擦損失低減による高効率化を実現する低摩擦表面処理を用いたしゅう動面改良技術を開発した。本報では、ta-CN<sub>x</sub>を用いて冷媒環境下での摩擦特性を評価し、低摩擦発現メカニズムを提案するとともに、その開発したしゅう動面改良技術を空調用圧縮機に適用し、更なる高効率化に向けた取組みを行った例について報告する。

## 2. 要素しゅう動試験方法及び、結果と考察

### 2.1 要素しゅう動試験方法

共同研究先である名古屋大学保有のIBA-FAD装置の概要と、グリッドレスイオンビーム発生装置を用いて成膜したta-CN<sub>x</sub>コーティングの成膜条件、試験片を図1に示す。摩擦試験に用いたリングオンディスク摩擦試験機を図2に示す。摩擦試験は、冷媒ガスの乾燥摩擦と冷媒及び冷凍機油混合下、更にエンジンオイル雰囲気で行い、荷重は一定の間隔で増加させた。摩擦試験後のしゅう動面の分析に反射分光分析装置を用いた。

\*1 総合研究所機械研究部

\*2 名古屋大学 大学院工学研究科 教授 博士

\*3 名古屋大学 大学院工学研究科 特任助教

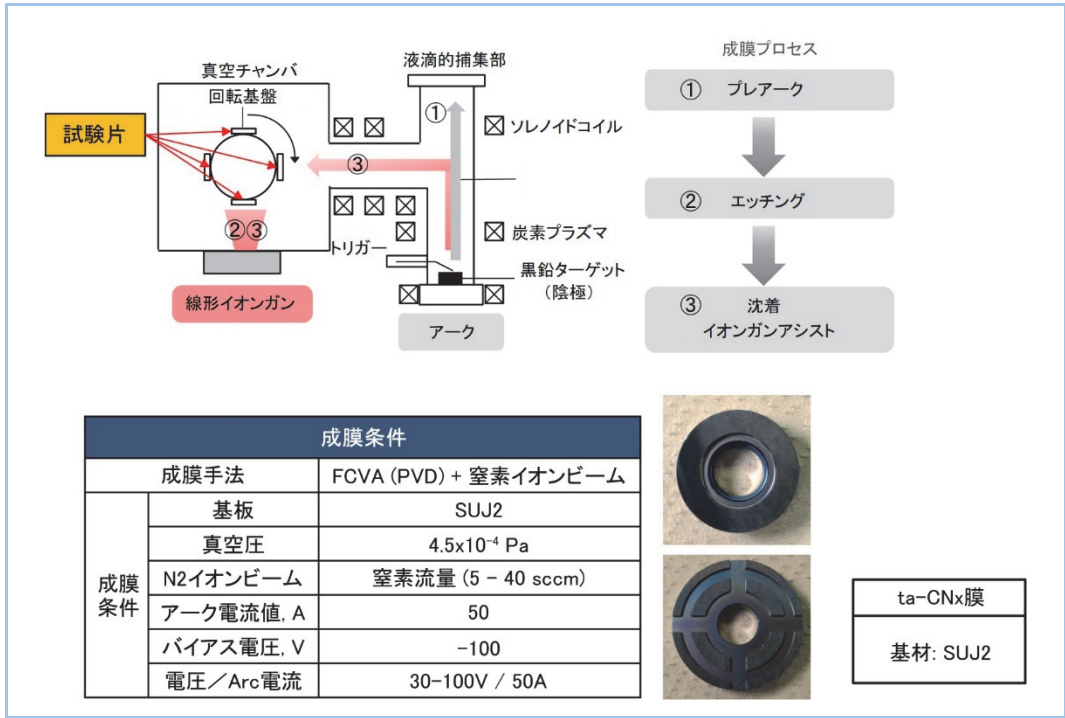


図1 IBA-FAD 装置の概要と成膜条件, ta-CN<sub>x</sub> コーティング試験片

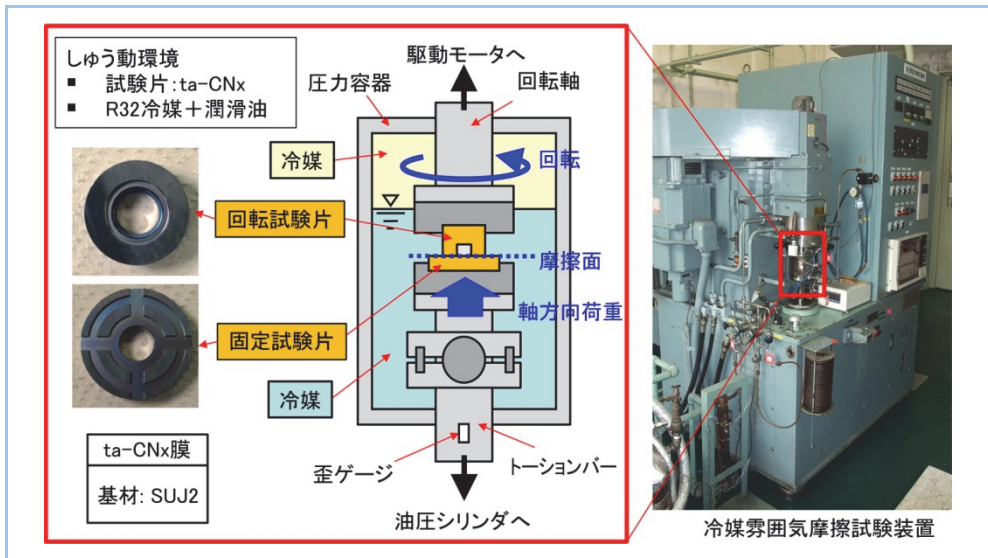


図2 リングオンディスク摩擦試験機

2.2 要素しゅう動試験結果

(1) 空調用圧縮機への適用評価検討

R32 冷媒雰囲気での乾燥摩擦試験結果を図3に示す。試験開始直後の摩擦係数は高いが、約8分後の摩擦係数は0.03を下回った。また、荷重を増加させても低い摩擦係数を維持した。

冷媒及び冷凍機油の混合下での摩擦試験結果を図4に示す。コーティングなしの摩擦係数は0.1以上を示し、また、図中に示していないが、現行のDLCコーティングの摩擦係数は約0.1に対して約1/3以下となる摩擦係数を示した。これに対して、ta-CN<sub>x</sub>コーティングを適用することで境界潤滑下における摩擦低減効果は約70%減を実現した。

(2) エンジンへの適用評価検討

エンジンオイル雰囲気での摩擦試験結果を図5に示す。現行油の摩擦係数は0.06程度であり、現行油に新しく添加剤を追加配合した組合せ条件において、摩擦係数は0.04まで低減することを確認した。

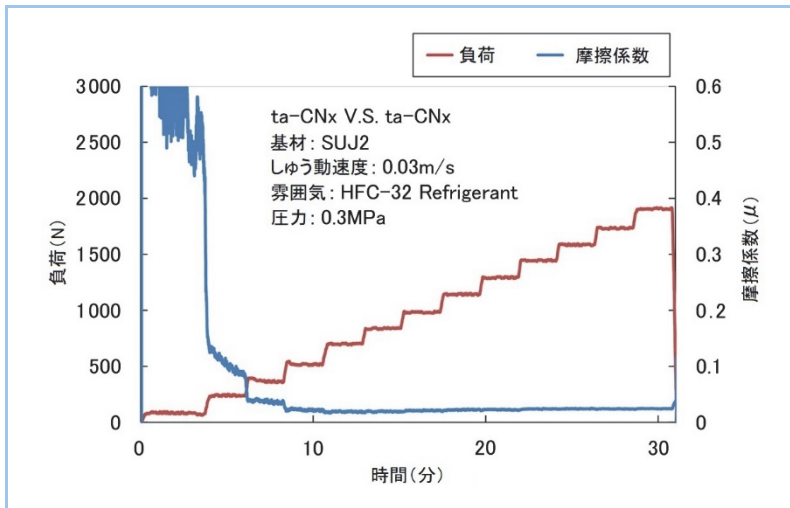


図3 R32 冷媒雰囲気での乾燥摩擦試験結果 (摩擦トレンドグラフ)

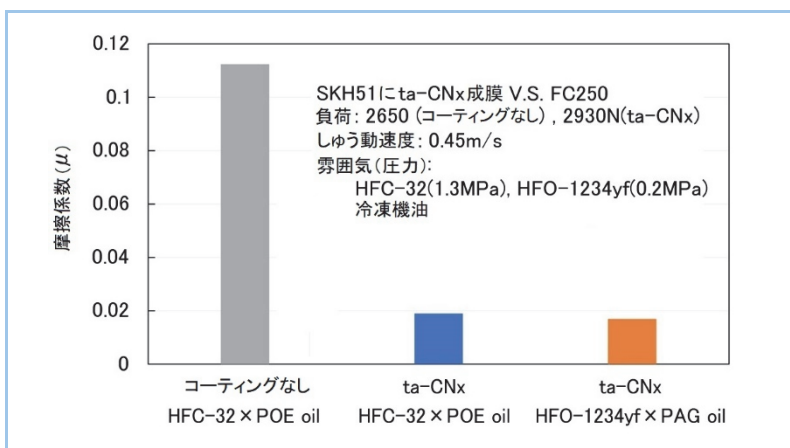


図4 冷媒及び冷凍機油の混合下での摩擦試験結果

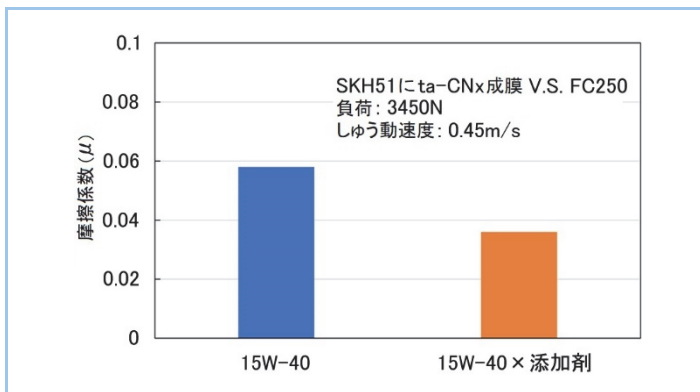


図5 エンジンオイル雰囲気での摩擦試験結果

### 2.3 冷媒雰囲気下における ta-CNx の低摩擦発現メカニズム解明

R32 冷媒雰囲気での乾燥摩擦試験後のしゅう動面観察結果を図6に示す。しゅう動面にトライボフィルムの生成を確認し、その中で最もトライボフィルムが厚い箇所は約 270~370nm レベルである。また、しゅう動面の反射分光分析を行った結果を図7に示す。トライボフィルムの屈折率 $n$ は2以下、消衰係数 $k$ は0.15であり、平塚ら<sup>(3)(4)</sup>の報告による分類では、polymer-like carbon の値を示した。このことから、しゅう動面表面に軟質なトライボフィルム<sup>(5)(6)</sup>が生成され、低せん断な薄膜固体潤滑により低摩擦が発現したと考察した。

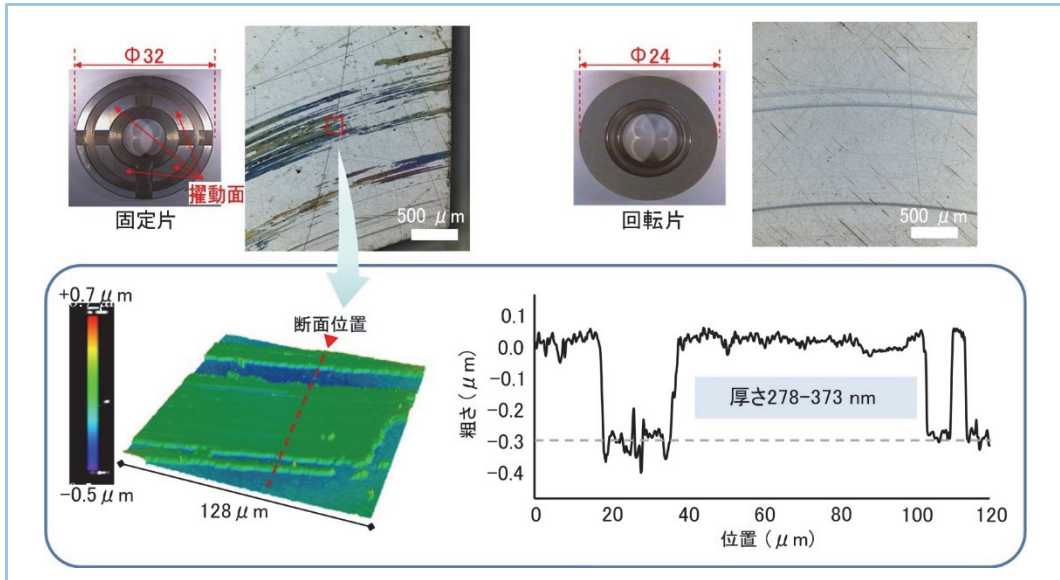


図6 R32 冷媒雰囲気／乾燥摩擦試験後のしゅう動面観察結果(トライボフィルムの生成状況)

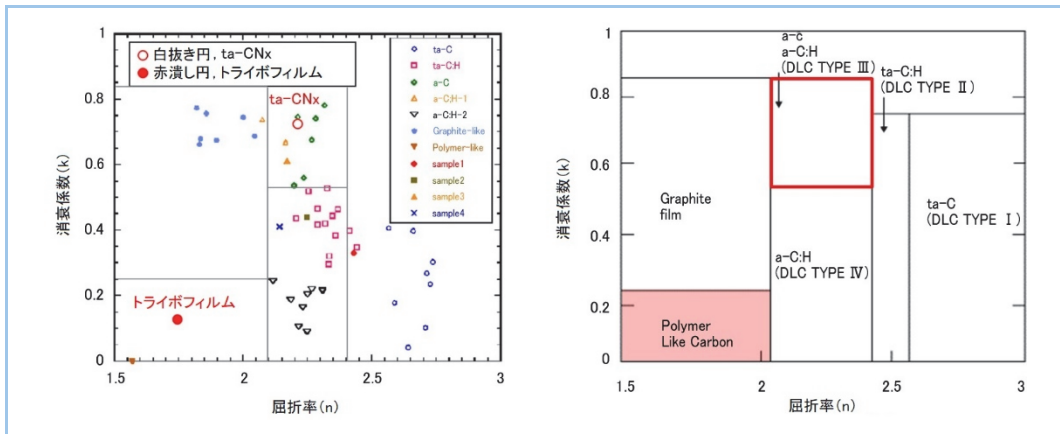


図7 しゅう動面の反射分光分析結果(低摩擦メカニズム提案の考察図)

### 3. 空調用圧縮機の高効率化実証検証結果

開発した ta-CN<sub>x</sub> コーティングを空調機用圧縮機のしゅう動部品に適用して性能を評価した結果を図8に示す。現行の DLC コーティングと比較した場合、電気代平均効率比、約1%の効率向上を確認した。低摩擦コーティングにより摩擦損失が低減し、効率向上が可能となる。これにより、しゅう動部を有する機械製品の消費動力低減によるランニングコストや、効率向上分をモータのダウンサイジングによる部品費等の削減が見込めるとともに、省エネルギー化・低炭素化等の環境保護への貢献につながる可能性を得た。なお、ta-CN<sub>x</sub> コーティングの耐久性や長期信頼性については、今後、明らかにしていく。

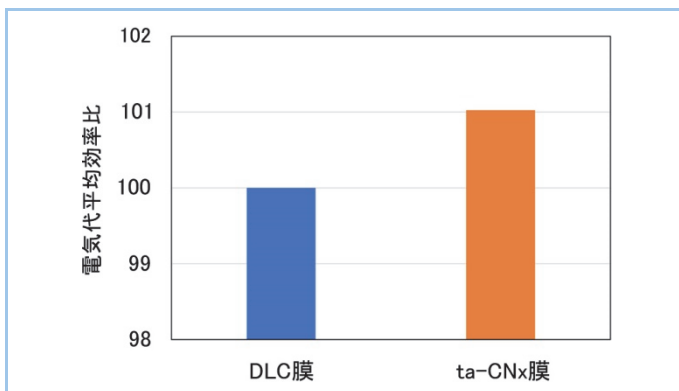


図8 空調機用圧縮機の性能結果

## 4. まとめ

開発した ta-CN<sub>x</sub> コーティングは、窒化炭素を主成分とする表面処理であり、従来の DLC コーティングに窒素を含有させることで軟質化できる。膜硬度を制御する窒素含有量と膜厚を適正化することで、低摩擦と耐摩耗性を両立できるコーティングの仕様を導出した。

ta-CN<sub>x</sub>コーティングは、機械製品の摩擦損失を低減し、効率向上を実現することで、空調用圧縮機への採用の可能を見いだした。

今後、ta-CN<sub>x</sub> コーティングの耐久性、低コスト・安定供給や、製品適用拡大評価に関する研究を進める。適用候補先のエンジンに向け、オイル雰囲気での低摩擦発現を制御する摩擦・摩耗しゅう動面制御技術を開発し、エンジンのピストンピン、ピストンリング等への適用を目指して、機械製品の省エネルギー化、低炭素化の環境保全に貢献していく。

また、機械要素の電動化に伴いより静粛性が求められるため、摩擦低減の新たな価値創出として、音・振動低減に繋げていく。

## 参考文献

- (1) Kato, K., Umehara, N., and Adachi, K., “Friction, wear and N<sub>2</sub>-lubrication of carbon nitride coatings: a review”, *Wear*, Vol. 254, No. 11 (2003), pp. 1062-1069.
- (2) Tokoroyama, T., Goto, M., Umehara, N., Nakamura, T., and Honda, F., “Effect of nitrogen atoms desorption on the friction of the CN<sub>x</sub> coating against Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ball in nitrogen gas”, *Tribology letters*, Vol. 22, No. 3 (2006), pp. 215-220.
- (3) 平塚, DLC 膜の光学的分類図案, *メカニカルサーフェステック* 4(2017)
- (4) Hiratsuka, M., Nakamori, H., Kogo, Y., Sakurai, M., Ohtake, N., and Saitoh, H., “Correlation between optical properties and hardness of diamond-like carbon films”, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol. 7 (2013), pp. 187-198.
- (5) 野老山貴行, 梅原徳次, 富田博嗣, 竹之下雪徳, “窒化炭素膜の極低摩擦現象に及ぼす相手面表面粗さと移着膜の影響”, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 69, No. 686 (2003), pp. 2824-2829.
- (6) 李義永, 洞口典久, 石本孝生, 梅原徳次, ta-CN<sub>x</sub> 膜を用いた冷媒環境における低摩擦の実現, *日本トライボロジー学会年次大会 (2020 秋)*