

車軸軸受のフレッチング摩耗防止に対する セグメント構造炭素膜の効果

岡村 吉晃* 鈴木 大輔* 生駒 一樹* 永友 貴史*

Effects of Segment-structured Carbon Film on Fretting Wear Prevention of Axle Journal Bearings

Yoshiaki OKAMURA Daisuke SUZUKI Kazuki IKOMA Takafumi NAGATOMO

In an axle journal bearing of railway vehicles, it is necessary to mitigate the fretting wear that occurs between the contact surfaces of the inner ring and the backing ring. In this work, we investigated the preventive effect of segment-structured carbon film on the fretting wear through rotation tests of full-scale railway axle bearings with the backing ring side face coated with the film. As a result, we have found that the film is effective in suppressing the fretting wear generated on the contact surfaces between the inner ring and the backing ring of the axle bearings.

キーワード：車軸軸受，フレッチング，摩耗，ダイヤモンド状炭素膜，セグメント構造

1. はじめに

鉄道車両用車軸軸受は、車体重量によって作用するラジアル荷重と走行中の車両の揺れなどによって発生するアキシャル荷重を支える。車軸軸受がラジアル荷重を負荷されながら回転すると、車軸軸受が取り付けられた車軸に回転曲げによるたわみが発生するため、車軸軸受の車輪側の内輪と車軸軸受の軸方向の取付け位置を決定する後ぶたの接触部において微小な相対すべり運動による損傷、すなわちフレッチングが生じる¹⁾。フレッチングによって発生した金属摩耗粉が車軸軸受の内部に侵入すると、軸受の摩耗や潤滑剤の劣化が懸念される。さらに、車軸軸受の軸方向の取付け位置の不整を引き起こす可能性も考えられる。車軸軸受のフレッチング対策として車輪側の内輪と後ぶたの間にOリング²⁾や軸受材料よりも軟質な黄銅板の外周部にゴムが成形されたゴム付き当板³⁾を挿入する方法が実用されているが、どちらもフレッチング摩耗粉の軸受内部への侵入を防止することは可能であるものの、フレッチングそのものの発生を防止するには至っていない。また、内輪と後ぶた間に部品を挿入することは、部品点数が増えるうえ、組立て作業時に取付けミスを引き起こす可能性がある。そのため、部品点数を増やすことなく、車軸軸受のフレッチング摩耗の対策を講じる手法を開発することは有意義であるが、これについて取り組まれた事例はほとんど見当たらない。

フレッチング摩耗を防止するためには、「設計改善」や「材料選択」のアプローチについて検討する必要がある⁴⁾。「設計改善」の観点から、筆者らは、現用の後ぶ

たのオイルシールしゅう動面に円周方向の溝を加工して後ぶたの剛性を低下させることによって内輪と後ぶたの接触面間における半径方向の圧力分布をできるだけ均一に近づけると、フレッチング摩耗が現用後ぶたを用いた車軸軸受より低減できることを報告した⁵⁾。

一方、「材料選択」の観点からは、後ぶたの内輪との接触面（以下、「後ぶた接触面」という）を摩擦係数が低く、密着性が高い上、後ぶたの変形にも追従できる硬質膜で被覆することが有効であることを明らかにした⁶⁾。硬質膜の一種であるダイヤモンド状炭素（DLC, diamond-like carbon）膜では、被覆した面の変形に追従できる成膜法としてセグメント構造化が考案されている⁷⁾⁸⁾。そこで本稿では、車軸軸受のフレッチング摩耗を防止することを目的に、内輪との接触面をセグメント構造DLC膜（以下、「S-DLC膜」という）で被覆した後ぶたを用いて車軸軸受の台上回転試験を実施し、S-DLC膜によるフレッチング摩耗の防止効果について検討した結果を報告する⁹⁾。

2. 試験条件

2.1 試験軸受

台上回転試験に使用する軸受は、既報¹⁾⁵⁾と同様、鉄道車両用車軸軸受として広く使用されているグリース密封形複列円すいころ軸受とした。図1にその概略図を示す。車軸軸受は、2列の軌道面を有する外輪と、内輪、ころおよび保持器が一体となった組立品、ならびにオイルシール、油切りおよび後ぶたによって構成されている。内輪の材質は機械構造用合金鋼（SNCM420相当）の浸炭材で、その表面硬さは58-62HRC（653-746HV相当）

* 材料技術研究部 潤滑材料研究室

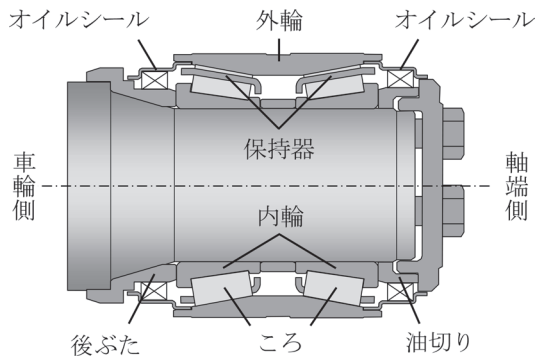


図1 車軸軸受の概略図

である。一方、後ぶたの材質は機械構造用炭素鋼 S45C の焼ならし材で、硬さは 167-229HBW (173-243HV 相当) である。軸受の外径、内径および幅の各寸法は、それぞれ $\phi 220\text{mm}$ 、 $\phi 120\text{mm}$ および 155mm である。なお、内輪と後ぶたは車軸に締めりばめで取り付けられている。

2.2 ダイヤモンド状炭素 (DLC) 膜

金属材料の表面をセラミックスなどの硬質膜で被覆すると、しゅう動性、耐摩耗性、耐焼付き性および耐腐食性等が向上することが知られている。そこで、内輪と後ぶたに発生するフレッチング摩耗を防止するため、表面処理の加工性や車軸軸受の生産性を考慮した上で、後ぶたの内輪との接触面を DLC 膜で被覆することにした。DLC の成膜は化学蒸着 (CVD, Chemical Vapor Deposition) 処理の一種であるプラズマ CVD 法によって行い、その成膜処理温度は 523K 以下である。DLC 膜の種類は水素化非晶質炭素 (a-C:H, Hydrogenated Amorphous Carbon) 膜であり、密着性を向上させるために基材 (後ぶた) との間にけい素 (Si) の中間層を設けた。後ぶた接触面にはりん酸塩被膜処理が施されているが、硬質膜の密着性を向上させるため、成膜前にりん酸塩被膜を研削加工によって除去して平滑にした。その結果、研削加工前の後ぶた接触面の算術平均粗さ Ra は $0.78\mu\text{m}$ であったが、研削加工によって Ra は $0.13\mu\text{m}$ になった。

図 2 に DLC 膜で被覆した後ぶた接触面の半径方向の断面組織を示す。断面組織は走査電子顕微鏡 (SEM, 加速電圧 15kV) を用いて観察した。なお、腐食液には 5% 硝酸アルコール溶液 (ナイタール) を用いた。DLC は基材の形状に沿って成膜されており、その平均膜厚は $1.7\mu\text{m}$ であった。また、後ぶたの材質は S45C の焼ならし材のため、フェライトとパーライトの二相組織が認められる。

DLC 膜の特性を表 1 に示す。なお、DLC 膜の押し込み硬さ (H_{IT}) は、計装化押し込み硬さ試験の試験方法について定めた ISO 14577-1¹⁰⁾ に準拠したナノ押し込み硬さ試験機を用いて、圧子の押し込み深さが DLC 膜の厚さの

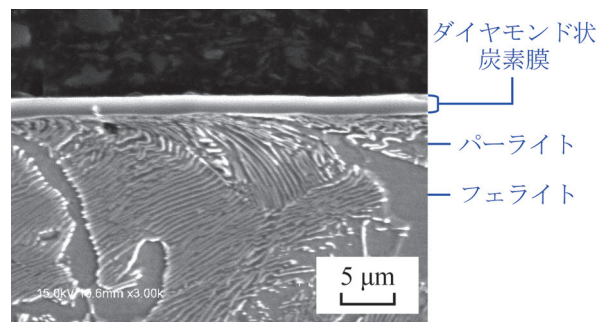


図2 ダイヤモンド状炭素膜で被覆した後ぶた接触面の断面組織

表 1 使用したダイヤモンド状炭素膜の特性

押し込み硬さ	16.5 GPa
膜厚	$1.7\mu\text{m}$
摩擦係数*	0.17-0.21

* 乾燥摩擦条件下での軸受鋼 (SUJ2) に対する摩擦係数

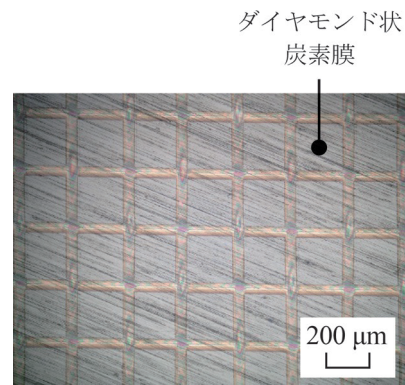


図3 セグメント構造ダイヤモンド状炭素膜の拡大写真

約 1/10 になる試験力で測定した。

S-DLC 膜は後ぶた接触面にタングステン製メッシュワイヤを配置した状態で DLC 膜を被覆することで形成される。メッシュワイヤは平織であり、メッシュワイヤの太さおよび目開きをそれぞれ $50\mu\text{m}$ および $204\mu\text{m}$ とした。図 3 に後ぶた接触面を被覆した S-DLC 膜の拡大写真を示す。メッシュワイヤを配置したことにより、一辺が約 $200\mu\text{m}$ のセグメント構造が形成されている。

図 4 に S-DLC 膜で被覆した後ぶた接触面の外観および断面曲線を示す。なお、断面曲線は表面粗さ測定機を用いて半径方向の内径側から外径側に向けて測定した。S-DLC 膜で被覆した後ぶた接触面の算術平均粗さ Ra は $0.33\mu\text{m}$ であり、被覆前の算術平均粗さより大きい。これは、接触面を S-DLC 膜で被覆したことによって表面に凹凸が生じたためである。

2.3 台上回転試験

台上回転試験には鉄道総研が所有する車軸軸受耐久試験装置を用いた。試験方法および試験条件は既報¹⁾⁵⁾と同じで、車軸軸受の分解検査が行われる一般的な走行距離である60万km相当に達するまで回転試験を行った。なお、運転中の軸受外輪の表面の最高上昇温度は周囲温度に対して約55Kで、車軸軸受の性能試験方法について定めたJRIS J 0455¹⁾の規格値内(周囲温度+70K以

下)であった。

3. 試験結果

3.1 外観観察および摩耗深さ分布測定

図5および図6にS-DLC膜で被覆した後ぶたを用いた車軸軸受の回転試験後の後ぶた接触面および車輪側の内輪大端面の外観と摩耗深さ分布を示す。摩耗深さ分布

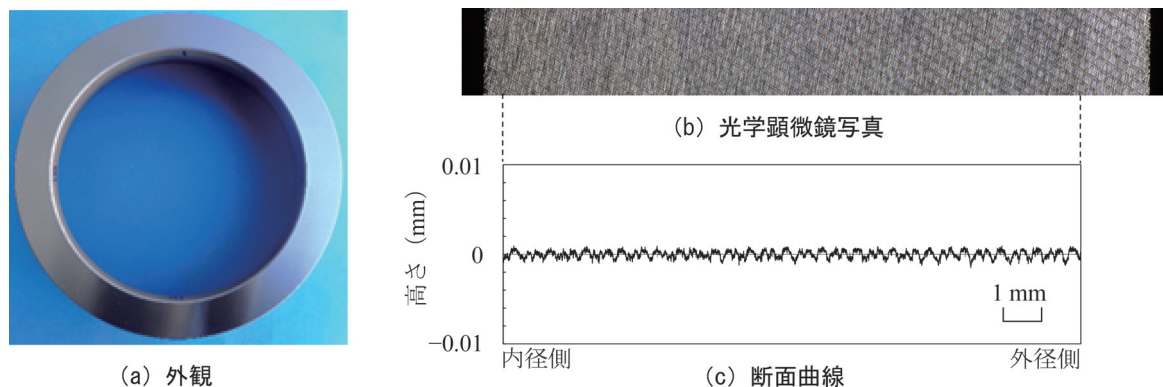


図4 セグメント構造ダイヤモンド状炭素膜で被覆した後ぶた接触面の外観および断面曲線

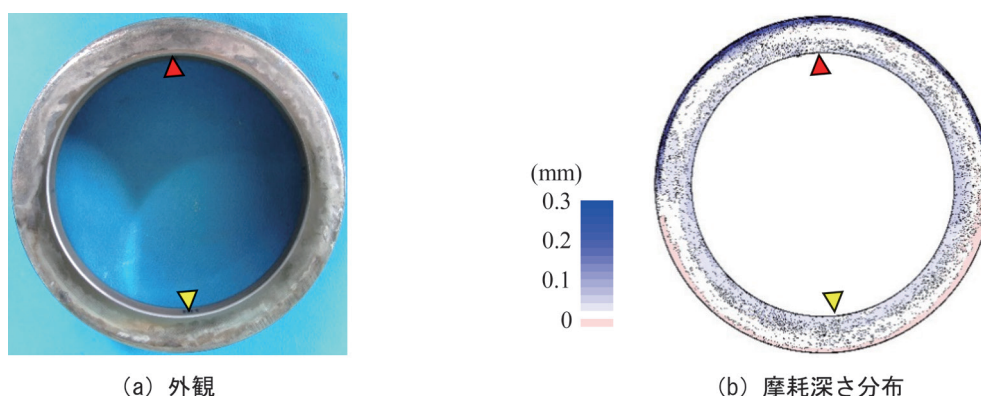


図5 回転試験後の後ぶた接触面の外観および摩耗深さ分布

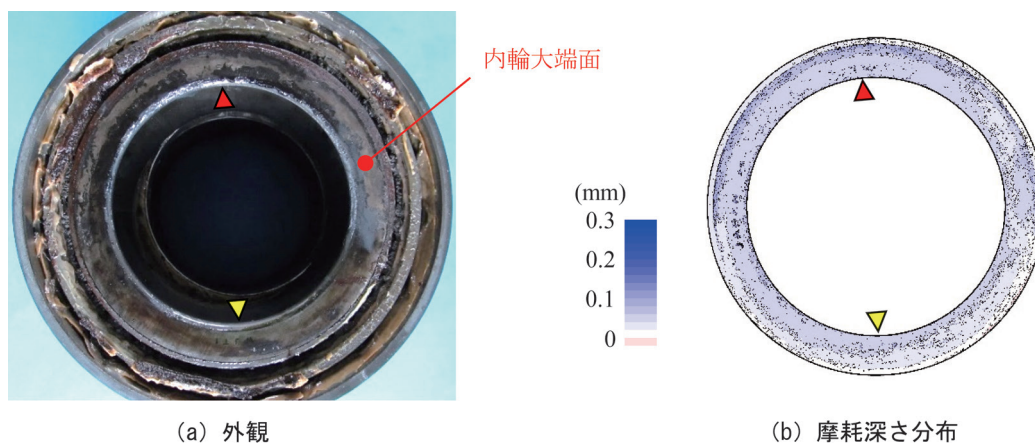


図6 回転試験後の車輪側の内輪大端面の外観および摩耗深さ分布

は2次元レーザ変位計を用いて円周方向に測定した。どちらの面にも摩耗が認められ、内輪には赤褐色に変色したグリースが付着している。一般にフレッチング摩耗粉は赤褐色の酸化鉄(III) ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) といわれている¹²⁾ ため、フレッチング摩耗粉が混入したグリースは赤褐色を呈する。当該軸受の使用状況からフレッチング摩耗以外の理由でグリースが赤褐色に変化したとは考えにくいことから、S-DLC膜で被覆した後ぶた接触面と内輪大端面の摩耗はフレッチング摩耗であったといえる。後ぶた接触面の摩耗は全域で発生しているが、特に最外径で著しい。一方、内輪大端面の摩耗は後ぶたと接触していた領域ではほぼ一様に発生している。

3.2 表面観察および断面曲線測定

図5(b) および図6(b) に示した摩耗深さ分布において、フレッチング摩耗が著しかった領域(図中の赤印部)と比較的軽微であった領域(図中の黄印部)のそれぞれについて、表面観察と断面曲線測定を実施した。回転試験中、後ぶたと内輪は円周上の同位相で互いに接触していた。

初めに、フレッチング摩耗が著しかった領域の後ぶた接触面および内輪大端面の拡大写真と断面曲線を図7および図8に示す。図7に示した後ぶた接触面のフレッチング摩耗は半径方向の外径側で著しく、摩耗深さは最

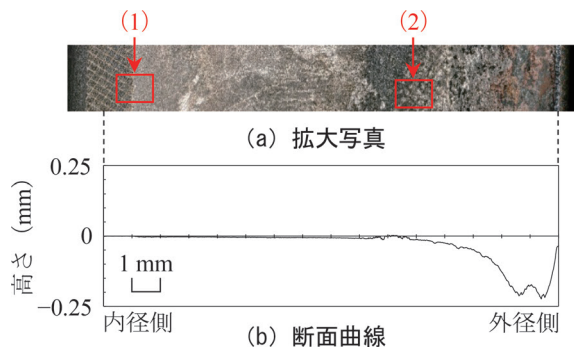


図7 回転試験後に摩耗が著しかった領域の後ぶた接触面の拡大写真と断面曲線

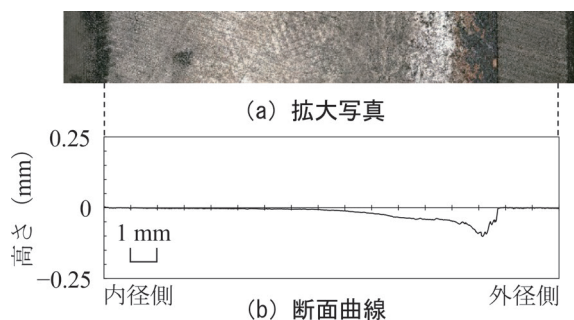


図8 回転試験後に摩耗が著しかった領域の内輪大端面の拡大写真と断面曲線

大よ0.22mmである。また、内径側の表面にはセグメント構造が認められないものの、摩耗は軽微である。一方、図8に示した内輪大端面のフレッチング摩耗は半径方向の中央から外径側にかけて発生しており、摩耗深さは最大約0.10mmである。

次に、フレッチング摩耗が比較的軽微であった領域の後ぶた接触面と内輪大端面の拡大写真と断面曲線を図9および図10に示す。図9に示した後ぶた接触面にはセグメント構造が認められ、摩耗はほとんど生じていないことがわかる。図10に示した内輪大端面においてもフレッチング摩耗はほとんど認められない。また、後ぶたとの接触によって内輪大端面にはセグメントが転写されている。図10(c)に示すように、転写された箇所の断面

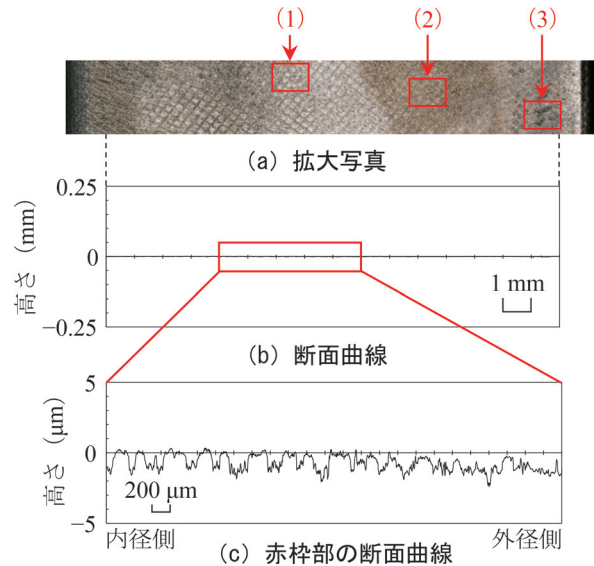


図9 回転試験後に摩耗が比較的軽微であった領域の後ぶた接触面の拡大写真と断面曲線

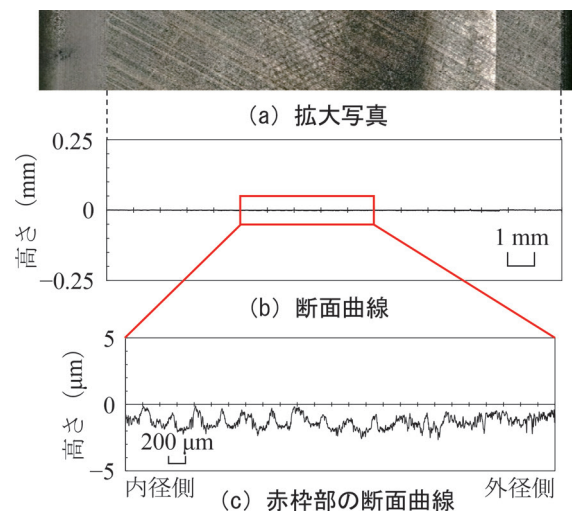


図10 回転試験後に摩耗が比較的軽微であった領域の内輪大端面の拡大写真と断面曲線

曲線を拡大すると、後ぶた接触面を被覆した S-DLC 膜の凹凸が押し付けられたことによって、内輪大端面の表面が塑性変形して凹凸の形状を示していることがわかる。

3.3 エネルギー分散 X 線 (EDX) による表面分析

後ぶた接触面を被覆した S-DLC 膜が回転試験後に残存しているかを確認するため、後ぶたの接触表面を走査電子顕微鏡 (SEM, 加速電圧 15kV) で観察し、SEM に取り付けられているエネルギー分散 X 線分析装置 (EDX) を用いて元素分析を実施した。分析対象の元素は鉄 (Fe)、および基材と DLC 膜の中間層に含まれる Si とした。

図 11 に、フレッチング摩耗が著しかった領域である図 7(a) の赤枠部 (1) および (2) における SEM/EDX 像を示す。S-DLC 膜で被覆した回転試験後の後ぶた接触面には Si が検出されていないことから、DLC 膜がすべてはく離したことを確認できる。なお、内径側に S-DLC 膜が残存しているが、ここは内輪と接触していなかった部分である。

次に、図 12 にフレッチング摩耗が比較的軽微であった領域の図 9(a) の赤枠部 (1)~(3) における SEM/EDX 像を示す。表面観察においてセグメント構造が認められた図 9(a) の赤枠部 (1) では、S-DLC 膜が完全に残存している。また、表面観察において茶色く変色していた図 9(a) の赤枠部 (2) では、S-DLC 膜がわずかに残存していることが確認できる。さらに、表面観察においてやや黒く変色していた図 9(a) の赤枠部 (3) では、S-DLC 膜は残存していない。以上のことから、S-DLC 膜の摩耗は半径方向の外径側に向かうにしたがい、著しくなっていることがわかる。

3.4 グリース中の鉄分の定量

S-DLC 膜によるフレッチング摩耗の防止効果を確認するため、回転試験後に車軸軸受の車輪側の内輪組立品から、保持器柱部の内側およびころ大端部に付着していたグリースを採取し、走査型蛍光 X 線分析装置を用いて鉄分を定量した。その結果を表 2 に示す。なお、表中には内輪との接触面を DLC 膜で被覆していない現用後

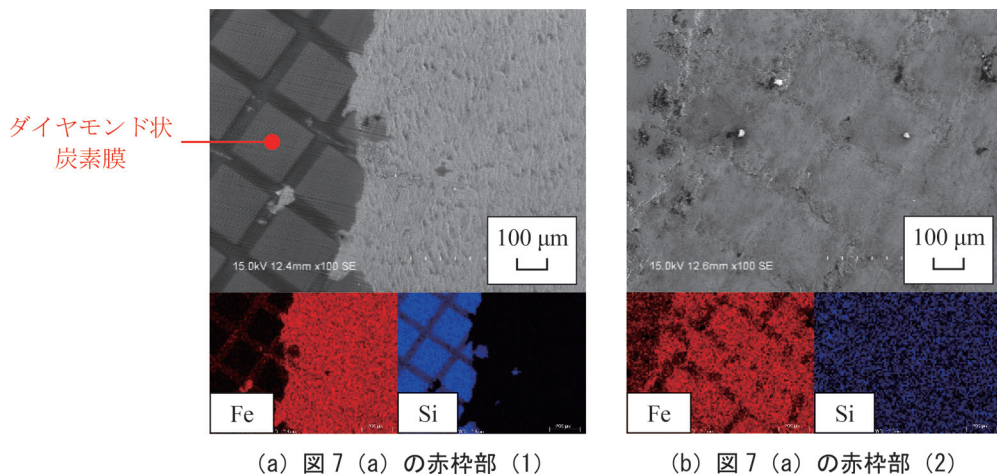


図 11 回転試験後に摩耗が著しかった領域の後ぶた接触面の SEM/EDX 像

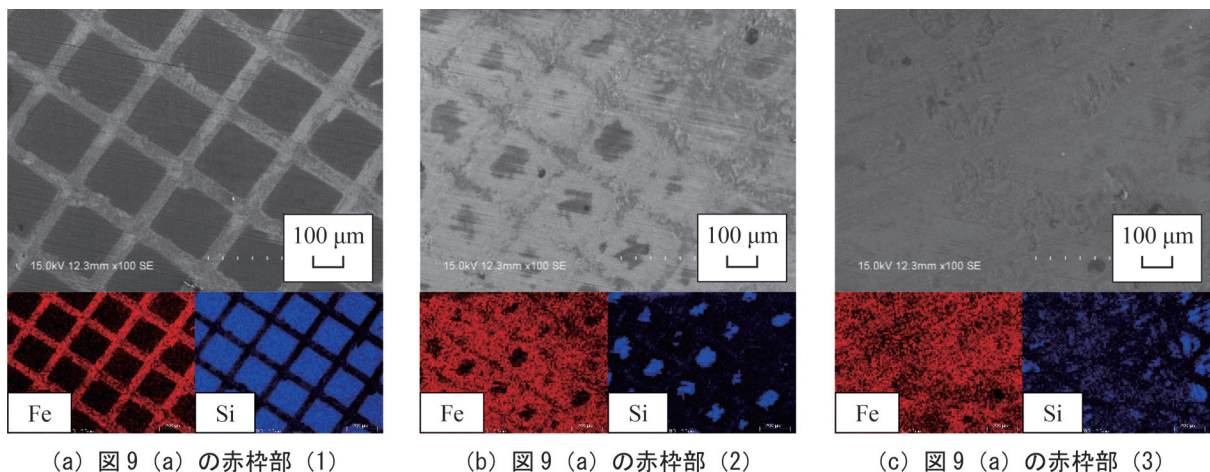


図 12 回転試験後に摩耗が比較的軽微であった領域の後ぶた接触面の SEM/EDX 像

表2 回転試験後のグリース中の鉄分

後ぶた	保持器柱部	ころ大端面
S-DLC 被覆品	0.13 mass%	0.34 mass%
現用品	0.21 mass%	2.88 mass%

ぶたの車軸軸受の結果も示している。

どちらの採取位置においても、S-DLC 被覆品のグリース中の鉄分は現用品より低い。特に、後ぶたとの接触部に近い、ころ大端面から採取したグリースの鉄分の低下が顕著である。

4. 考察

台上回転試験の結果、外観観察によって S-DLC 膜で被覆した後ぶたにフレッチング摩耗が認められたが、S-DLC 膜が後ぶた接触面に残存していたため、後ぶたの摩耗は軽微であった。また、3.4 節で述べたように、S-DLC 膜で被覆した後ぶたを用いた車軸軸受の内輪から採取したグリースに含まれる鉄分は現用品よりも低かった。これらの結果は後ぶたのフレッチング摩耗が S-DLC 膜によって低減できることを示している。以下では、S-DLC 膜によって車軸軸受のフレッチング摩耗が低減した理由について考察する。

車軸軸受を車軸に圧入すると、現用後ぶたは車軸のテーパ部をせり上げるようにして半径方向に拡大し、後ぶたの内輪との接触面が変形する¹⁾。そのため、現用後ぶたの接触面を硬質膜で被覆しただけでは車軸の回転曲げにともなう繰返しの変形に追従できず、硬質膜にき裂やはく離が発生した⁶⁾。一方、硬質膜をセグメント構造化すると後ぶた接触面が変形しても被膜に生じる応力が緩和される⁷⁾ため、S-DLC 膜は後ぶた接触面の変形に追従できたと考えられる。その結果、台上回転試験後にも S-DLC 膜が残存していたと考えられる。また、3.2 節に示したように、S-DLC 膜で被覆した後ぶたと接触していた内輪大端面にはセグメント構造が転写されていた。内輪大端面にセグメント構造が転写された領域では、後ぶた接触面と内輪大端面のフレッチング摩耗はどちらも軽微であった。この理由は、後ぶた接触面に被覆された S-DLC 膜が内輪大端面に食い込んで内輪と後ぶた間の半径方向の相対すべり運動が拘束されることによって、フレッチング摩耗が抑制されたためと考えられる。以上のことから、S-DLC 膜は車軸軸受のフレッチング摩耗を抑制する効果があると考えられる。

5. まとめ

鉄道車両用車軸軸受の内輪と後ぶたの接触面で発生す

るフレッチング摩耗を防止するため、車軸の回転曲げにともなう後ぶた接触面の変形に追従して硬質膜のき裂やはく離の発生を抑制できるセグメント構造ダイヤモンド状炭素膜（以下、「S-DLC 膜」という）の効果について検討した。後ぶた接触面を S-DLC 膜で被覆した車軸軸受を用いて台上回転試験を実施した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 後ぶた接触面に S-DLC 膜が残存した領域では、フレッチング摩耗はほとんど生じていなかった。また、炭素膜が残存した領域と接触していた内輪大端面には、S-DLC 膜の凹凸が押し付けられたことによって、セグメント構造が転写されていた。これは、後ぶた接触面の S-DLC 膜が内輪大端面に食い込んで内輪と後ぶた間の半径方向の相対すべり運動が拘束されることによって、フレッチング摩耗が抑制されたためと考えられる。
- (2) 台上回転試験後の内輪から採取したグリースに含まれる鉄分は、後ぶた接触面を S-DLC 膜で被覆したことによって低下する。

以上のことから、後ぶた接触面を S-DLC 膜で被覆すると、車軸軸受のフレッチング摩耗を抑制できることがわかった。

文 献

- 1) 岡村吉見, 深貝晋也, 鈴木大輔, 高橋研, 梅原大樹, 永友貴史: 車軸軸受のフレッチング摩耗の発生機構, 鉄道総研報告, Vol.31, No.8, pp.11-16, 2017
- 2) 高野浩二, 浅井寿: 車軸軸受装置, 日本国特許第 3529691 号, 2004
- 3) 岡竜太郎: 鉄道車両車軸軸受の高速化と長寿命化への対応, トライボロジスト, Vol.58, No.7, pp.479-484, 2013
- 4) 志摩政幸, 地引達弘: フレッチング摩耗, トライボロジスト, Vol.53, No.7, pp.462-468, 2008
- 5) 岡村吉見, 鈴木大輔, 深貝晋也, 高橋研, 永友貴史: 車軸軸受のフレッチング摩耗を低減する後ぶたの提案, 鉄道総研報告, Vol.33, No.11, pp.23-30, 2019
- 6) 岡村吉見, 鈴木大輔, 高橋研, 永友貴史, 宇都宮裕: 鉄道車両用車軸軸受のフレッチング摩耗の硬質被膜による抑制効果, 鉄と鋼, Vol.104, No.6, pp.303-311, 2018
- 7) Aoki, Y., Ohtake, N., "Tribological properties of segment-structured diamond-like carbon films," Tribology International, Vol.37, pp.941-947, 2004.
- 8) Takashima, M., Kuroda, T., Saito, M., Ohtake, N., Matsuo, M., Iwamoto, Y., "Development of antiwear shim inserts utilizing segment-structured DLC coatings," Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.3, No.6, pp.841-852, 2009.

- 9) Okamura, Y., Suzuki, D., Ikoma, K., Nagatomo, T., Utsunomiya, H., "Effects of segment-structured DLC film on the fretting wear of railway axle journal bearings," Mechanical Engineering Journal, Vol.6, No.1, DOI: 10.1299/mej.18-00446, 2019.
- 10) 国際標準化機構 (ISO) 規格：金属材料－計装化押込み硬さ試験及び材料パラメータ第1部：試験方法, ISO 14577-1, 2015
- 11) 日本鉄道車輛工業会規格 (JRIS)：鉄道車両－車軸軸受の性能試験方法－, JRIS J 0455, 2009
- 12) R.B. Waterhouse (佐藤準一訳)：フレッチング損傷とその防止法, 養賢堂, pp.80-87, 1984