

アルミニウム合金の摩耗に及ぼす酸化鉄被膜の影響（第2報）

Influence of Iron Oxide layer on Wear of Aluminum Alloys (Second report)

NSK（正）\*若杉 宙泳    NSK（正）佐藤 努    NSK（正）元田 智弘

Chuei Wakasugi, Tsutomu Sato, Tomohiro Motoda

NSK Ltd.

1. はじめに

古くから使用されている表面処理の一つとして黒染め処理があり、一般的にトライボロジー特性を向上させる目的ではなく、外観上の目的や耐食性向上を期待されることが多い。ところが、転がり軸受においては白色組織はく離やピーリングなどの損傷を抑制する効果が報告されており、そのメカニズムについての研究報告<sup>1,2)</sup>がいくつかなされている。前報<sup>3)</sup>では、軸受の外輪外径面に施した黒染め被膜が、外輪クリープ<sup>4)</sup>中に発生するアルミハウジングの摩耗に与える影響を調査し、黒染め被膜を施すことでアルミハウジングの摩耗量が約1/3に低減することを報告した。また、黒染め被膜はアルミの移着を抑制すると考えられることや、試験後の外輪外径面には膜厚は薄くなっているものの黒染め被膜が広範囲（64%）にわたって残存していると推定されることも報告した。すなわち、黒染め被膜がアルミの移着を抑制した結果、アルミハウジングの摩耗が抑制されたと考えた。一方で、膜厚が1μm程度と薄くHV200~300程度の黒染め被膜が、摩滅することなく広範囲に残存する理由はわかっていない。そこで本報では、試験中に黒染め被膜が摩耗する過程を調査し、黒染め被膜が残存する要因を検討したので報告する。

2. 実験方法

本研究では、前報と同じ条件で軸受試験を行い、外輪クリープを発生させハウジングのクリープ摩耗を再現した。具体的には、アルミ合金製のハウジングへ組み込んだ6206深溝玉軸受（d=30, D=62, B=16）に純ラジアル荷重（7760N）を負荷し、ATFオイルの強制給油環境下で内輪を3900min<sup>-1</sup>で回転させた。試験時間は0.5h, 2h, 12h, 96hとした。試験に用いた軸受は、軌道輪と転動体ともにSUJ2製で、外輪のみに黒染め処理を施した。黒染め処理条件は、DIN50938に準拠し、十分に脱脂した軸受の外輪を135~145℃のアルカリ溶液に浸漬し、約1μmの膜厚になるように時間を調整した。試験中に黒染め被膜が摩耗する過程を調査するため、SEMによる軸受外輪外径面の表面観察、断面観察による残存膜厚の測定、EPMAによる残存膜厚とその割合の推定を行った。なお、SEM観察は加速電圧10kVで行った。断面の観察による残存膜厚測定は、試験後の外輪外径面の反対側にある2断面から無作為に選んだ視野のSEM像を膜厚方向に5等分し、各位置の膜厚を測定して平均値を算出した。EPMAによる残存膜厚の算出は、外輪外径面を加速電圧15kV、100μm×100μmの範囲で元素マッピングを10視野行い、OのX線強度は黒染め被膜由来で、かつ膜厚に比例すると仮定して行った。なお、カウントされるOは酸化Al由来も存在すると考えられる。そこで、予め黒染め処理を行っていない軸受の試験後の外輪外径面を分析し、AlとOの強度の関係を把握し、残存膜厚を求める時には、O強度から酸化Alに起因するO強度を引き算した後のO強度を黒染め被膜由来として扱った。

3. 実験結果と考察

Figure 1に軸受外輪外径面をSEMで観察した結果を示す。試験時間0.5hでは全面が黒染め被膜に覆われており、部分的にAlの移着部が確認された。試験時間2hでは、被膜は摩耗し始めていたが母材の露出には至っていなかった。一方、試験時間12hから96hでは、黒染め被膜が摩滅し母材が露出しているように見える領域（被膜摩滅部）が存在し、被膜摩滅部や残存した黒染め被膜の多くは研削目に沿って筋状に存在することがわかった。次に、外輪外径面の断面をSEMで観察し、残存膜厚を測定した結果をFig.2に示す。黒染め被膜は、試験時間2h（外輪が回転した回数10回）で平均0.45μmとなり初期の膜厚の半分程度となった。さらに、試験時間12h（118回）で膜厚は平均0.23μmと減少するが、96h（1139回）は平均0.21μmであり、12hの膜厚とほとんど変わらなかった。次に、EPMAより推定した被膜の残存膜厚とその割合をFig.3に示す。試験時間に伴い、厚い膜厚の割合が急速に低下し、試験時間12hで最も割合が高い膜厚は0%超~10%以下、被膜が残存していない領域は19%と算出された。試験時間96hでは、被膜が残存していない領域の割合が最も高くなり、36%と算出された。黒染め被膜が残存する面積に着

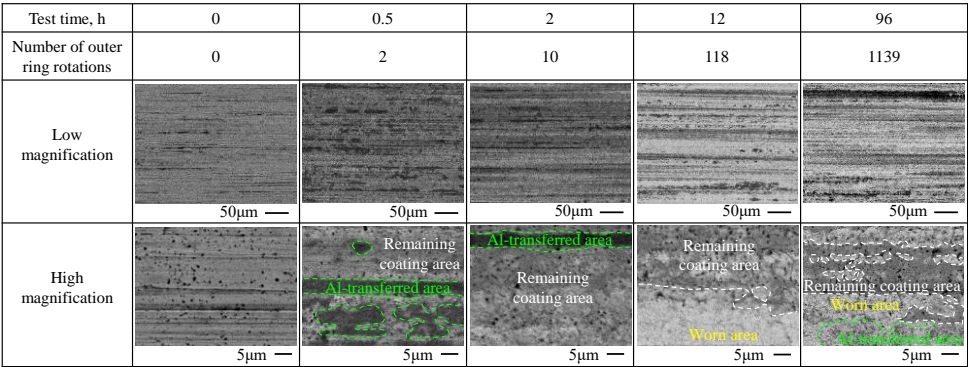


Fig. 1 SEM images of outer diameter surface

目すると、試験時間 12h で 81%, 96h で 64%の範囲で、膜厚は薄くなっているものの被膜が存在することを示している。すなわち、黒染め被膜は初期に急速に摩耗が進行するが、ある程度摩耗するとその後は摩耗の進行が非常に緩やかになることがわかった。

外輪外径面の SEM 観察の結果より、黒染め被膜の摩耗が落ち着く試験時間 12h 以降では、残存した黒染め被膜の多くが研削目に沿って存在することから、母材の粗さが被膜の残存に影響を及ぼしていると推定した。そこで、黒染め被膜の残存状態に対する母材の粗さの影響を検討した。具体的には、算術平均粗さ (Ra) が異なる SUJ2 製の平板を黒染め処理し、アルミ合金製の球 (D=10mm) としゅう動した後、しゅう動部を SEM で観察することによって検討した。平板の表面の粗さは、平滑な Ra0.01 $\mu$ m と、軸受外輪外径面と同等の粗さである Ra0.25 $\mu$ m の 2 種類である。なお、Ra0.25 $\mu$ m は外輪外径面の研削目を再現するため、研削目を 1 方向に揃え、その方向にアルミ球をしゅう動させた。しゅう動条件は、荷重 9.8N、ストローク長 10mm、しゅう動回数 50 往復、室温、無潤滑環境下とした。Figure 4 に SEM 観察結果を示す。平板の表面の粗さが Ra0.01 $\mu$ m のとき、しゅう動部は黒染め被膜がほとんど無くなっていた。一方で、平板の表面の粗さが Ra0.25 $\mu$ m のとき、しゅう動部には被膜摩滅部と黒染め被膜が残存している領域が、それぞれ研削目に沿って筋状に観察された。これは、しゅう動により表面粗さの突起部の黒染め被膜は摩耗し無くなってしまいが、突起 - 谷間の斜面や谷底に形成された黒染め被膜が残存した結果と推察される。粗さが小さい場合は、黒染め被膜は一気に摩耗し無くなってしまふ。一方、粗さがある場合、摩耗によって被膜よりも硬い母材が部分的に露出するため、全面が被膜に覆われているときよりも摩耗が緩やかになる。従って、軸受試験において黒染め被膜は、ある程度摩耗するとその後は摩耗の進行が非常に緩やかになったと考えられる。また、しゅう動試験後に残存した黒染め被膜に着目し SEM で高倍で観察したところ、試験前に観察された黒染め被膜上の筋模様が消失していた。この結果から、しゅう動後に残存する被膜もアルミ球としゅう動されており、アルミの移着を抑制したと考えられる。以上から、表面粗さの谷部に存在する黒染め被膜が残存し続け、アルミハウジングの摩耗低減に寄与したと推定した。

## まとめ

黒染め被膜が広範囲に残存する原因を明らかにするため、試験中に黒染め被膜が摩耗する過程を調査したところ、以下の知見を得た。

- ・黒染め被膜は、クリープによるアルミハウジングとのしゅう動によって、試験開始直後から急速に摩耗が進行するが、ある程度摩耗するとその後は摩耗の進行が非常に緩やかになる。
- ・研削目が一方向に揃っている表面粗さを持つ母材を下地とする黒染め被膜は、しゅう動した後、研削目に沿って被膜が残存する。
- ・母材の研削目に沿った谷部に存在する黒染め被膜がクリープ試験中も残存し続け、クリープ摩耗を低減していると推定した。

## 文献

- 1) Y. Kou, H. Yao, H. Yamada, H. Uyama: Influencing Factors on Rolling Contact Fatigue Life in Hydrogen Gas, World Tribology Congress 2017 Beijing, Abstract.
- 2) 長谷川・藤田・内館・阿保：転がり接触によるピーリングの発生メカニズムとピーリング抑制に及ぼす黒染処理の影響 (第 1 報), トライボロジスト, 63, 8 (2018) 35.
- 3) 若杉・佐藤・元田：アルミニウム合金に及ぼす酸化鉄被膜の影響, トライボロジー学会 2025 春予稿集 (2025) E1
- 4) 展・坂尻・武村・湯川：軸受外輪クリープの発生メカニズム, NSK Technical Journal, 680 (2006) 13.

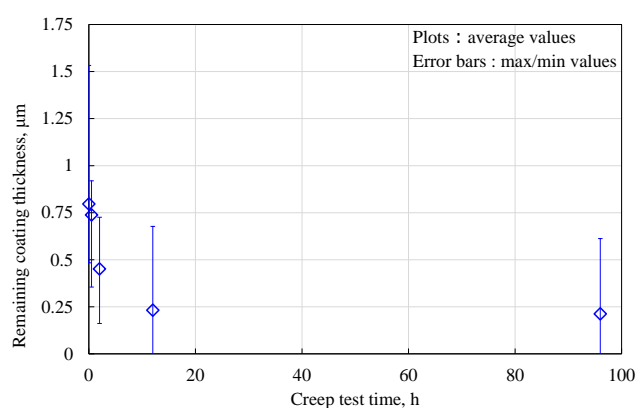


Fig. 2 Remaining coating thickness measured by cross-section observation

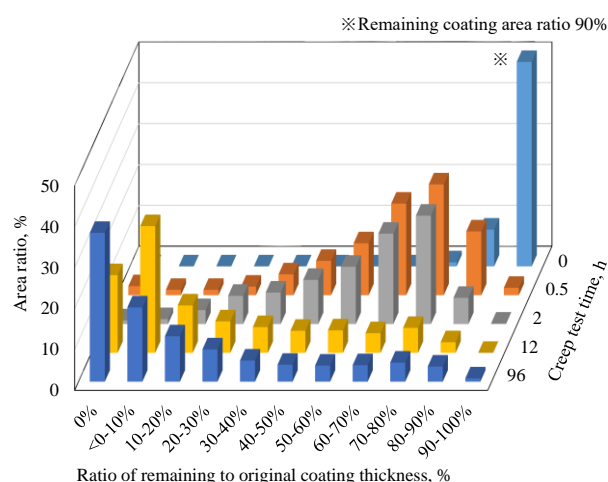


Fig. 3 Remaining coating thickness and its ratio to original thickness as determined by EPMA

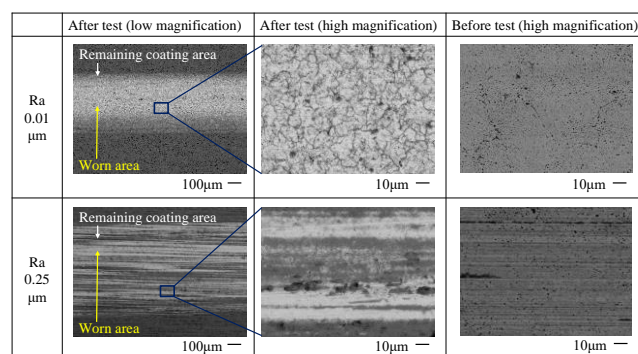


Fig. 4 SEM images of plate surface after and before sliding test