

転がり軸受の電食損傷に関する研究

- 電気的条件および軸受使用条件がリッジマーク形成に及ぼす影響 -

Study on Electrical Erosion Damage of Rolling Bearings

- Influence of Electrical and Operating Conditions on the Ridge Mark Formation -

日本精工株式会社（正）*河野 知樹 （非）グアハルド ドウエニャス ギジェルモ アンドレス

（正）山田 紘樹 （正）戸田 雄次郎

Tomoki Kawano, Guajardo Duenas Guillermo Andres, Hiroki Yamada, Yujiro Toda

NSK Ltd.

1. はじめに

転がり軸受のリングと転動体間に形成される油膜に耐電圧を超える電圧が印加されると、油膜で絶縁破壊（放電）が発生し、リングや転動体が局所的に高温になり溶融する。この軸受損傷は電食と呼ばれ、電食損傷にはリッジマーク（フルーティング）と呼ばれる洗濯板状の損傷形態がある（Fig. 1）。リッジマークが形成され始めると、リング軌道面の真円度が悪くなり、軸受振動や音響が大幅に上昇する。電食はインバータ駆動モータ用の転がり軸受で問題となっており、モータ内部の磁束変化起因の誘起電圧により発生する“循環電流”や、モータコイルの中性点に生じるコモンモード電圧により発生する“コモンモード電流”が軸受に流れることで電食が発生すると言われている¹⁾。しかしながら、これらの電流が引き起こす電食損傷の程度や電食損傷に影響する要因については詳細には明らかになっていない。

そこで、本研究では、アンペアオーダーの大きな電流が連続的に軸受に流れる“循環電流”に着目し、循環電流を模擬した交流電流を軸受に通電することで、電気的條件や軸受の使用条件がリッジマークの形成に及ぼす影響について調査した。

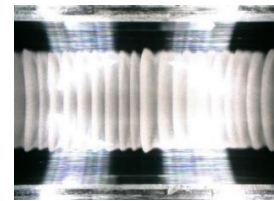


Fig. 1 Ridge mark (Fluting)

2. 試験方法

試験軸受（深溝玉軸受）と抵抗を直列に接続した回路に正弦波の交流電圧を印加することで、試験軸受に循環電流を模擬した交流電流を連続的に通電する試験を行った。電流値は試験ごとに抵抗の大きさを変えることで調整している。ただし、周波数を振った試験のみ電流制御で実施した。

通電試験は二種類の試験機で行っており、電気的条件の影響に関しては、6303（外径 47 mm，グリース潤滑）に通電できる試験機（Fig. 2）を用いて試験を実施した。また、軸受使用条件の影響に関しては、6206（外径 62 mm，油潤滑）に通電できる試験機を用いて試験を実施した。本試験において、リッジマークが進展するにつれて試験機振動が上昇するため、試験軸受の近傍に加速度計を取付け、振動を測定した。

また、通電試験中にオシロスコープを用いて軸受にかかる電圧と軸受に流れる電流の波形を定期的に取り込み、通電試験開始から終了時までの総エネルギー（電力を時間で積分した値）[J]と総電気量（電流を時間で積分した値）[C]を算出した。なお、今回算出したエネルギーや電気量は、放電加工や、鉄道のパンタグラフとトロリ線間で発生するアーク放電の分野にて、工作物の除去量や摩耗量と関連があると考えられているパラメータであり²⁾³⁾、リッジマークの形成と関連があると考え、リッジマークの進展度合いとの関係を調べた。

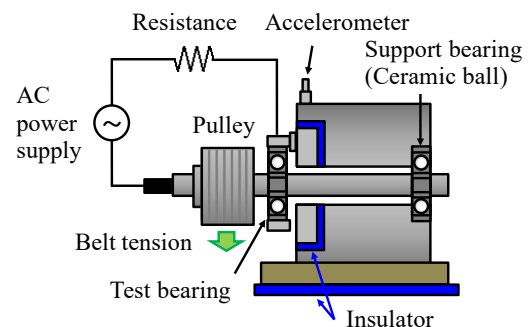


Fig. 2 Schematic diagram of test rig

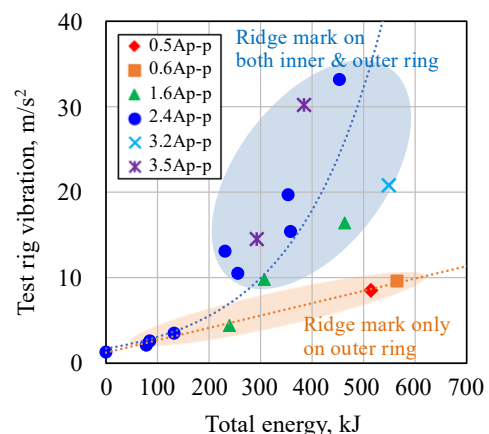


Fig. 3 Relationship between total energy and test rig vibration

3. 結果と考察

3.1 電気的条件がリッジマークの形成に及ぼす影響

3.1.1 電流値の影響

電流値の影響を調査するため、電流値及び通電時間を振って試験を行った。試験はウレアグリース A ($\nu=46 \text{ mm}^2/\text{s}$ at 40°C) を封入した 6303 を用いて、回転数 5000 min^{-1} 、ラジアル荷重 500 N、電流 $0.5\sim 3.5 \text{ A}_{p-p}$ 、周波数 20 kHz の条件で実施した。総エネルギーと通電終了時の試験機振動の関係を Fig. 3 に示す。試験機振動の上昇は、リングにリッジマークが形

成されたことを示し、1.6~3.5 A_{p-p}の電流を通電した試験では、総エネルギーと振動に相関がみられ、総エネルギーが 300 kJ を超えると内輪と外輪の両方にリッジマークが形成され、振動が大きく上昇した。その一方で、0.5 A_{p-p}や 0.6 A_{p-p}の小さい電流を通電した試験では、総エネルギーが 500 kJ を超えるまで通電しても、リッジマークは回転輪である内輪には形成されず、外輪のみに形成された。そのため、振動は 10 m/s² 以下となり、大きい電流での試験結果から乖離した。横軸に総電気量をとっても同様の結果が得られた。これらの結果から、リッジマークの形成には、総エネルギーや総電気量だけでなく、電流値も影響することが明らかになった。

3.1.2 周波数の影響

周波数の影響を調査するため、電流を 3 A_{p-p} に固定し、周波数を 20~20 kHz に振って 72 時間の通電試験を行った。試験はウレアグリース B ($\nu=100 \text{ mm}^2/\text{s}$ at 40°C) を封入した 6303 を用いて、回転数 5000 min⁻¹、ラジアル荷重 2000 N の条件で実施した。各周波数の通電試験中における試験機振動の推移を Fig. 4 に示す。周波数が高いほど振動が早く立ち上がり、これはリッジマークが早く形成されたことを示している。試験後の外輪軌道面の光頭像と形状を Table 1 に示す。光頭像から 20 Hz と 20 kHz の条件で試験した軸受の外輪はどちらもリッジマークが形成されていることが分かるが、形状測定から負荷圏の軌道面形状は大きく異なることが明らかになった。この試験は、同じ電流値と通電時間で実施しており、各試験の総エネルギーや総電気量はほぼ同等となる。試験条件で異なる点は周波数のみであるため、電流の立ち上がり速度がリング軌道面の形状に大きく影響することが示唆される。

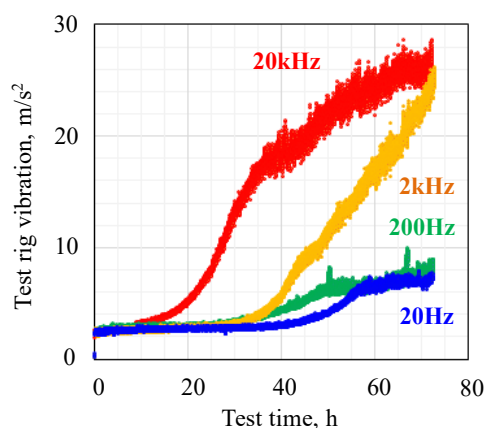


Fig. 4 Test rig vibration trends over time at different AC frequencies

Table1 Photographs and roundness of outer ring raceway

Before test	20Hz	20kHz
No damage	Ball pitch erosion	No ball pitch erosion

3.2 軸受使用条件 (油膜厚さ) がリッジマークの形成に及ぼす影響

油膜厚さの影響を評価するため、潤滑油の温度を変えて通電試験を実施した。軸受は 6206 で、動粘度が異なる二種類の油 ($\nu=12, 32 \text{ mm}^2/\text{s}$ at 40°C) を用いて、回転数 5000 min⁻¹、ラジアル荷重 500 N、電流 4 A_{p-p}、周波数 20 kHz の条件で試験を実施した。油膜厚さは、アキシアル荷重がかかる軸受の静電容量から油膜厚さを算出する電気インピーダンス法⁴⁾を参考にし、油膜厚さと相関のある軸受の静電容量の逆数を求め、リッジマークが形成される時間との関係を調べた (Fig. 5)。この結果から、油膜厚さ (静電容量の逆数) がリッジマークの形成に大きく影響しており、油膜が厚くなるほどリッジマークは短い時間で形成されることが明らかになった。油膜厚さがリッジマークの形成に影響する原因としては、油膜が厚いほど油膜での絶縁破壊発生時のエネルギーが大きくなり、リング軌道面の損傷が進むことが推定される。

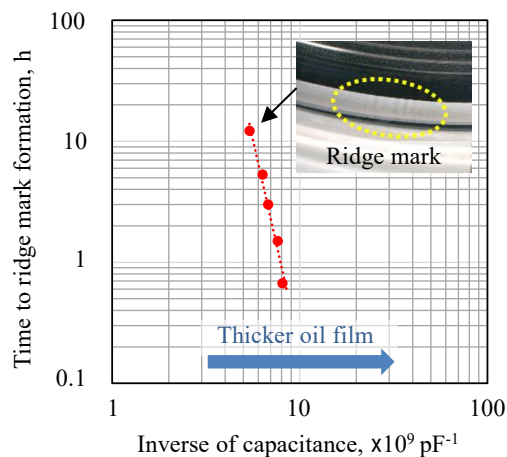


Fig. 5 Relationship between inverse of capacitance of bearing and time to ridge mark formation

4. まとめ

転がり軸受に交流電流を連続的に通電する試験を行い、電気的条件と軸受使用条件がリッジマークの形成に及ぼす影響を調査した。その結果、①総エネルギー、総電気量、電流値が大きい、②周波数が高い、③油膜が厚いほど、リッジマークが形成されやすくなることが明らかになった。

文献

- 1) 北村・木村・五十嵐：永久磁石同期モータにおける軸受電食の原因となる循環電流の発生メカニズムの一考察，電気学会静止器/回転機 合同研究会資料，SA-24-026，RM-24-026 (2024) 63.
- 2) 夏・橋本・国枝・西脇：放電加工における実加工中のエネルギー配分の測定，精密工学会誌，62, 8 (1996) 1141.
- 3) 河野・大藪・曾田：集電用材料の摩耗に及ぼす離線アークの影響 (第1報)，潤滑，27, 4 (1982) 283.
- 4) T. Maruyama, M. Maeda and K. Nakano: Lubrication Condition Monitoring of Practical Ball Bearings by Electrical Impedance Method, Tribology Online, 14, 5 (2019) 327.