

深溝玉軸受におけるリッジマーク検出手法の検討および  
電氣的条件がリッジマーク形成に与える影響の評価

Study on Ridge Mark Detection Method in Deep Groove Ball Bearings and  
Evaluation of the Effects of Electrical Conditions on Ridge Mark Formation

日本精工株式会社（正）\*ギジェルモ アンドレス グアハルド ドウエニヤス  
（正）河野 知樹 （正）山田 紘樹 （正）戸田 雄次郎  
Guillermo Andres Guajardo Duenas, Tomoki Kawano, Hiroki Yamada, Yujiro Toda  
NSK Ltd.

1. はじめに

近年、インバータ駆動モータの高性能化に伴い、転がり軸受における電氣的損傷の抑制が課題となっている。転がり軸受のリングと転動体の接触部には油膜が形成されるが、この油膜に耐電圧を超える電圧が印加されると、絶縁破壊（放電）が生じ、局所的に高温となってリングや転動体が溶融する。このような現象は電食と呼ばれ、なかでもリッジマーク（フルーティング）と呼ばれる周期的な洗濯板状の損傷形態が広く知られている。リッジマークの進行によりリング軌道面の真円度に変化し、軸受の振動や音響が著しく増加する<sup>1)</sup>。この電食は、インバータ駆動モータに使用される転がり軸受において顕在化しており、モータ内部の磁束変化によって発生する循環電流や、コイルの中性点に生じる共通モード電圧に起因する共通モード電流が軸受に流れることで生じるとされている<sup>2)</sup>。しかし、これらの電流が軸受に与える具体的な影響や損傷の進行メカニズムについては、依然として不明な点が多く、特に軸受内部で発生する放電現象によって引き起こされる損傷の発生過程や、各種電氣的条件が軸受寿命に及ぼす影響を明らかにすることが求められている。そこで本研究では、軸受に流れる通電モードの違いがリッジマークの形成に与える影響を明らかにすることを目的とし、単発的な放電として流れる共通モード電流と、アンペアオーダーの大電流が連続的に流れる循環電流の違いに着目した。

2. 試験方法

試験装置の概略図を Fig. 1 に示す。本試験では、6206 の試験軸受に対して、共通モード電流（COM）の模擬には直列にコンデンサを、循環電流（CIR）の模擬には直列に抵抗を接続した回路を構成し、それぞれにバイポーラ電源で正弦波の交流電圧を印加した。試験条件を Table 1 に示す。リッジマークの進展に伴い試験機の振動が増加することから、試験軸受近傍に加速度計を取り付けて振動を測定し、リッジマークの進展状況を詳細に把握するために、高周波サンプリングで振動を取得し、FFT 解析およびエンベロップ FFT 解析を実施した。また、通電試験中はオシロスコープを用いて、軸受に印加される電圧および流れる電流の波形を定期的に記録し、通電開始から終了までの総エネルギー（電力を時間積分した値）および放電数を測定した。

3. 結果と考察

3.1 リッジマーク検出手法の検討

リッジマークが発生する前後の試験機振動およびその振動の FFT、エンベロップ FFT 解析結果を Fig. 2 に示す。なお、各グラフの赤色の線は振動および特定の周波数の強度が大きくなり始めたタイミングを示している。試験機振動に関しては、リッジマークが発生し始めても損傷がある程度進行しない限り、顕著な変化が生じないが、FFT 解析を行うと、振動が上昇するよりも早い段階で特定の周波数成分が出現し、リッジマーク発生の前兆を示していることが考えられる。さらに、損傷の進行とともに高周波数領域の成分が顕著に増加し、これは軸受や周辺構造の固有共振周波数が電食損傷の影響を受けて現れたものと考えられる。また、エンベロップ FFT 解

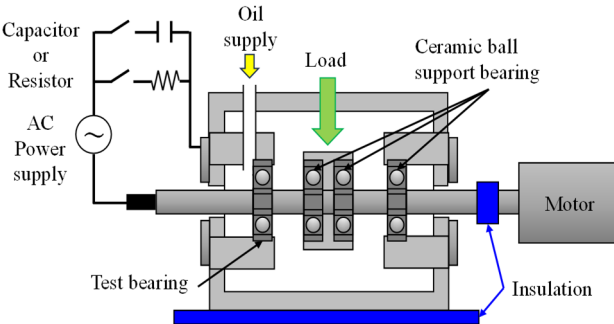


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Test conditions

	Common Mode Current (COM)	Circulating Current (CIR)
Bearing	6206	
Radial load, N	500	
Rotational speed, rpm	5000	
Lubricant	Mineral oil	
Viscosity at 40°C, mm <sup>2</sup> /s	32	
Lubricant temperature, °C	40, 80	
AC waveform	Sinusoidal	
AC frequency, kHz	20	20,100,1000
Voltage, V <sub>p-p</sub>	50	28~38
Current, A <sub>p-p</sub>	1 (Max)	1, 4
Capacitor, pF	1000	-
Resistor, Ω	-	4.7, 24

析では、明確な等間隔の周波数が検知され、これらは外輪のうねり周波数に相当する。初期には玉ビッチに対応する低次（1Zfc, Z: 玉数 [-], fc: 保持器の回転周波数 [Hz]）のうねりが現れ、損傷の進行に伴い高次のうねりが順次出現しており、リッジマークが粗い周期から細かい周期へと段階的に形成される様子を示している。以上のことから、FFT およびエンベロープ FFT 解析を振動計測と併用する本手法は、リッジマーク形成の初期兆候をリアルタイムで検出し、その進展状況を正確に評価できる有効な解析手法であると考えられる。

## 3.2 電気的条件がリッジマーク形成に与える影響

### 3.2.1 コモンモード電流（COM）と循環電流（CIR）の違い

COM と CIR の通電モードがリッジマーク形成に及ぼす影響を評価するため、20 kHz の交流周波数下における試験軸受への総エネルギーと、通電終了時の振動加速度の関係を Fig. 3 に示す。初期振動は温度で異なるため、全ての振動値を正規化した。振動の増加は外輪でのリッジマーク形成を示し、値が大きいほど損傷の進行度が高いことを意味する。COM では式 (1) により総エネルギーを算出したが、CIR では放電数を計測できないため、試験時間全体にわたって電力を積分して、総エネルギーを算出した。

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N \int_{t_i^{\text{start}}}^{t_i^{\text{end}}} |V(t) \cdot I(t)| dt \quad (1)$$

$E_{\text{total}}$ : 総エネルギー [J],  $V(t)$ : 軸受電圧 [V],  $I(t)$ : 軸受電流 [A],  $t_i$ : 放電時間 [s],  $N$ : 放電数 [-]

COM では、総エネルギーが約 800 J を超えると振動が急上昇し始め、最終的に約 1600 J で振動はおおよそ 30 倍まで増加した。この傾向は 40℃ および 80℃ の両条件で共通しており、温度によらず、同じ総エネルギーでリッジマークが形成され、ほぼ同等の速度で損傷が進行することが示された。一方、CIR では 40℃ において通電電流値によらず、約 12 kJ 付近から振動の増加が始まり、50 kJ では最大で 30 倍の上昇が確認された。これに対し、80℃ ではリッジマークが形成され始めるエネルギーは 50 kJ となり、エネルギーが 200 kJ になっても振動の増加は約 15 倍にとどまった。この結果は、高温条件下では放電損傷の進展が抑制され、リッジマークの形成には多くのエネルギーを要することを示唆している。

COM と CIR の間でリッジマーク形成に要する総エネルギーが異なる要因として、電流の立ち上がり速度が一因として考えられる。以前報告した通り、連続通電において 20 Hz から 20 kHz までの周波数帯では、通電時の周波数が高いほど振動の立ち上がりが早くなり、より短時間でリッジマークが形成される傾向がある<sup>3)</sup>。そこで、COM (40℃) で観測された 1 万回放電に対して FFT 解析を行い、各放電の卓越周波数の分布を Fig. 4 に示す。図からは 2.3, 2.8, 2.9 MHz にピークが確認され、COM 放電が MHz 帯の高周波成分を有することが分かる。これは、COM 放電が急激な電流の立ち上がりを伴う短時間放電であり、同じエネルギーでも CIR より早期に損傷を進展しやすい要因の一つと考えられる。

この仮説の検証として、CIR において 100 kHz および 1 MHz で 1 A<sub>p-p</sub> の通電試験（3 分、6 時間、12 時間）を実施した。結果を Fig. 5 に示す。図より、通電の周波数を上げて軸受振動やリッジマーク形成の進行に顕著な差は見られず、総エネルギーも 20 kHz と同程度であった。この結果は、CIR では 20 kHz 以上で電流の立ち上がりを与える影響が小さく、損傷進行のメカニズムが COM とは異なることを示唆している。更に、本研究で開発し

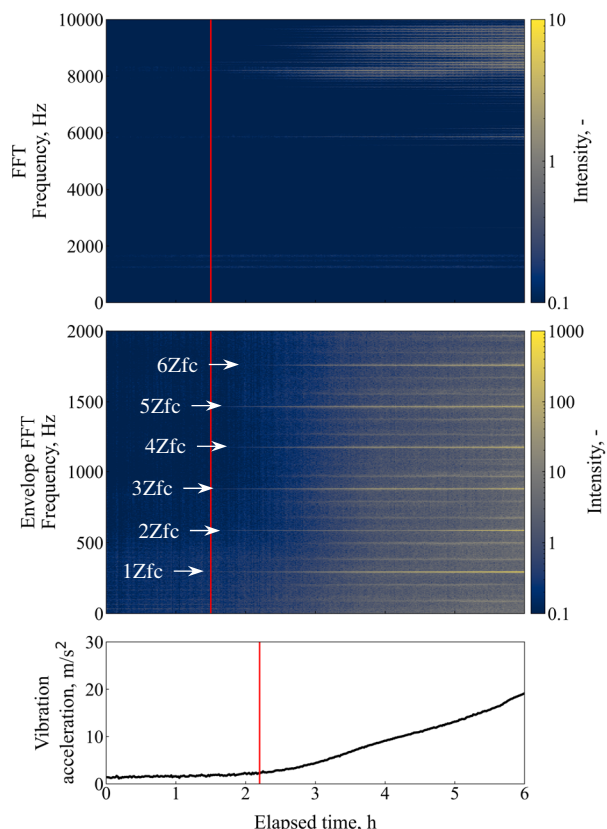


Fig. 2 Vibration progression with FFT and envelope FFT spectra of a fluting fault in a test bearing

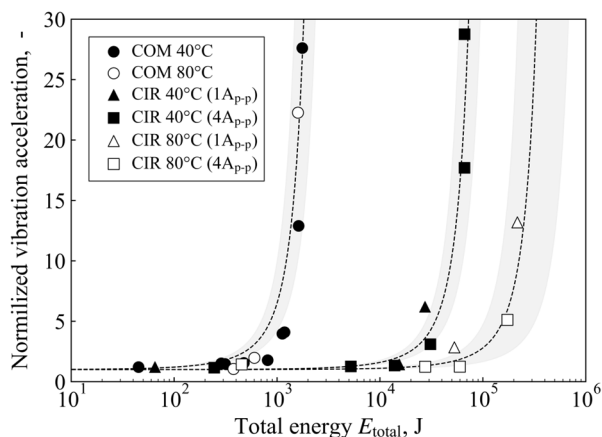


Fig. 3 Effect of total energy on normalized vibration acceleration under COM and CIR conditions

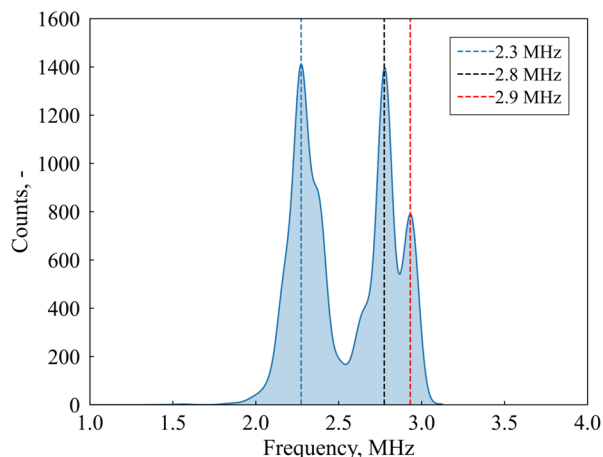


Fig. 4 Smoothed distribution of dominant frequencies of discharge events under COM condition

たリッジマーク検出手法を用いて、COM および CIR におけるリッジマーク形成に至るまでの総エネルギーを Fig. 6 に示す。参考として、各バーの上には、そのエネルギーに対応する通電時間を付記した。COM では 40℃ および 80℃ でエネルギーに大きな差は見られず、温度（油膜厚さ）に依存しないことが確認された。一方、CIR では 80℃ において、40℃ よりも多くのエネルギーが必要であった。なお、試験中の油膜厚さを電気インピーダンス法<sup>4)</sup>により算出すると、40℃ では 203 nm、80℃ では 136 nm であった。この結果は、油膜厚さの違いが電食損傷の進行に影響を与えることを示唆している。

### 3.2.2 各通電モードにおける電食損傷の SEM 観察

通電モードによる損傷形態の違いを詳しく確認するため、40℃ において COM および CIR (20 kHz, 1 A<sub>p-p</sub>) 条件で試験した軸受の外輪軌道面の SEM 観察を行い、その結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7(a) は、いずれもリッジマーク形成前の比較的少ないエネルギー (COM : 45 J, CIR : 65 J) での電食損傷の SEM 像である。COM では、典型的なスパーク放電 (瞬間的な放電) により形成された多数のクレータが重なり合った損傷が特徴的である。一方、CIR では、黄色の枠で囲んだような線状の損傷痕が確認され、持続的に電流が流れるアーク放電に起因することが示唆される。Fig. 7(b) は、リッジマーク形成が確認された時点の外輪軌道面 (COM : 0.8 kJ, CIR : 15.4 kJ) を示している。COM では、Fig. 7(a) と同様にクレータ状の損傷が見られ、スパーク放電による損傷の進行が確認できる。一方、CIR では、黄色で囲った線状のアーク痕に加え、ピット状の深い損傷も一部に確認されており、スパークとアークの複合的な放電モードによって損傷が進行している可能性が高い。これらの結果より、COM では主にスパーク放電が支配的であり、CIR ではスパーク放電に加えてアーク放電も関与する複雑な損傷メカニズムにより損傷が進行することが示唆された。

## 4. まとめ

深溝玉軸受にコモンモード電流または循環電流を模擬した電流を流し、リッジマーク検出手法の検討およびリッジマーク形成への影響の調査を行った。得られた知見は以下の通りである。  
①コモンモード電流では、循環電流よりも少ない総エネルギーでリッジマークが形成される。  
②コモンモード電流は温度（油膜厚さ）が異なっても同程度のエネルギーでリッジマークが形成されるが、循環電流では温度によって必要なエネルギーが異なる。  
③SEM 観察により、コモンモード電流ではスパーク放電、循環電流ではスパーク放電に加えてアーク放電による損傷進行が示唆された。

## 文献

- 1) 野口・福田・金田：玉軸受の電食損傷における振動周波数に関する研究，日本機械学会論文集 C, 79, 799 (2013) 790.
- 2) 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.
- 3) 河野・グアハルド・山田・戸田：転がり軸受の電食損傷に関する研究 - 電気的條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 -，トライボロジー会議 2024 秋 名護 (2024) A49.
- 4) 丸山他：電気インピーダンス法を用いた転がり軸受の動的潤滑状態計測，トライボロジー会議 2025 秋 函館 (2025).

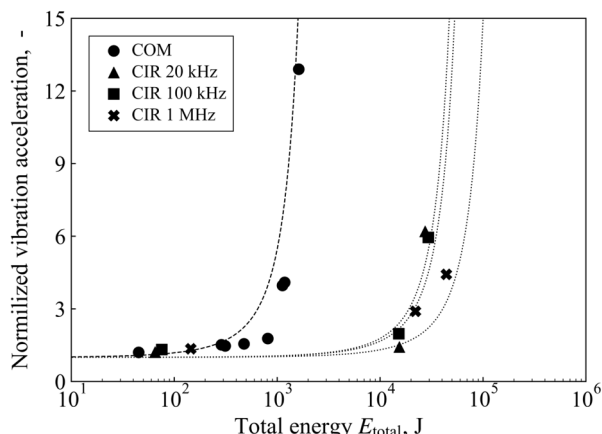


Fig. 5 Effect of total energy on normalized vibration at different AC frequencies (40℃)

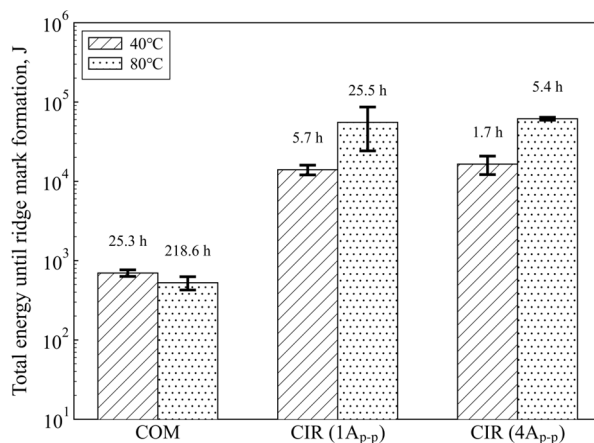


Fig. 6 Total energy required for ridge mark formation under COM and CIR conditions

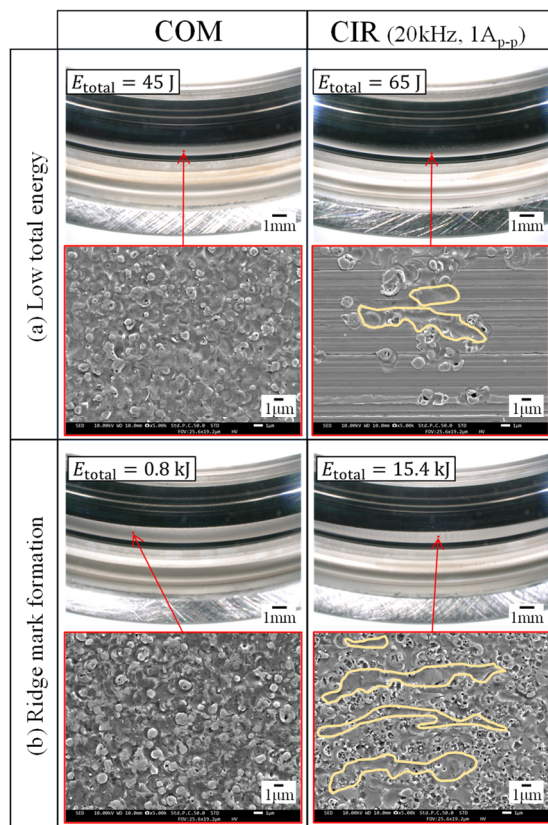


Fig. 7 SEM image comparison of outer ring raceways under COM and CIR conditions