

非破壊余寿命診断法による転がり軸受の疲労進行評価

Remaining useful life evaluation of rolling bearings by Non-destructive diagnostics

日本精工（株）（正）*小林 大輔 （正）小野 晃一郎 （正）名取 理嗣 （正）小俣 弘樹

Daisuke Kobayashi *, Koichiro Ono*, Masahide Natori*, Hiroki Komata*

*NSK Ltd.

1. はじめに

転がり軸受（以下、軸受）は、様々な産業機器の回転部に使われる機械要素の一つである。転がり疲労によるはく離などの軸受故障は、設備のダウンタイムを発生させるなど、多大な影響を及ぼす可能性がある。そのため、軸受は用途に応じて使用期間を定め、損傷していなくとも定期的に交換されることが一般的である。しかしながら、この交換期間は、安全を担保するため、実際の軸受寿命に対し余裕を持った期間とされる。破損する直前まで軸受を使用することができれば、省資源化に貢献することができる。そのためには、軸受の損傷状態を診断する手法が必要である。診断手法の一つとして、金属組織を評価する X 線回折法（X-ray diffraction, XRD）が知られている。転がり疲労の進行に伴う軸受軌道面の金属組織の変化量を XRD 測定により求め、余寿命を診断する^{1),2)}。しかしながら、XRD は測定可能な試料サイズや形状に制限があり、場合によっては切断を要する破壊検査となる。そこで、転がり疲労に伴う金属組織変化が材料の磁性を変化させることに着目し、渦電流探傷試験（Eddy Current Testing, ECT）を用いた手法を開発した^{3),4)}。転がり疲労試験を実施した軸受に対する ECT の測定結果と XRD による疲労進行度の相関関係を整理することで、疲労進行に伴い ECT の出力値が大きく変化することを明らかとした。本研究では、ECT を用いた疲労診断手法が、複雑に使用条件が変動しうる、フィールドで実際に使われた軸受に対しても有効であるかを検証した。

2. ECT の測定原理および測定条件

ECT 測定用プローブ内にはコイルが内蔵されている。このコイルに交流電流を流すとコイル内に磁束が発生する。ここで、導電性材料にコイルを接近させると、電磁誘導現象によって導電性材料表面に渦電流が発生する。この渦電流は、コイル内の磁束を打ち消す方向に磁束を発生させ、コイルのインピーダンスを変化させる。ECT 測定ではこのインピーダンスの変化を X-Y 座標上に電圧変化として検出する。なお、4 章に示す結果は、市販の ECT 装置及び測定用プローブ（コア径 3 mm）を用い、励磁周波数を 128 kHz とした測定結果である。また、リフトオフによる測定電圧値の変化が X 軸に平行になるように位相角を調整している。

3. XRD による疲労進行評価

転がり疲労に伴う金属組織変化を ECT にて評価できるか検証するためには、疲労進行の定量化が必要である。そこで、転がり疲労試験を実施した軸受に対し、試験時間と、マルテンサイトの半価幅の新品からの変化量（ $\Delta FWHM$ ）の相関を調査した。試験軸受には円すいころ軸受 HR32017XJ（内径 85 mm、外径 130 mm）を用いた。転動体、軌道輪の材料は SUJ2 である。熱処理条件を調整することで、オーステナイト量がほぼ 0% である Bearing A と、数%残留している Bearing B を用意した。転がり疲労試験機は、軸受の内輪が軸、外輪がハウジングに固定され、内輪回転、外輪静止の構造となっている。試験条件として、ラジアル荷重は 61.5 kN、アキシアル荷重は 18.5 kN、回転数は 1500 min^{-1} とした。また、異物混入潤滑下（異物硬さ: 870 HV、大きさ: $74\sim 147 \mu\text{m}$ ）で試験を実施することで疲労を加速させた。試験を中断しながら外輪軌道面の最大負荷位置に対し XRD 測定を実施し、試験時間ごとの $\Delta FWHM$ を求めた。 L_{10} 寿命（185 h）に対する試験時間比と $\Delta FWHM$ との関係を図 1 に示す。熱処理条件によらず、試験時間の経過とともに $\Delta FWHM$ は増加する傾向が認められる。すなわち、 $\Delta FWHM$ は疲労進行度の指標になるといえる。

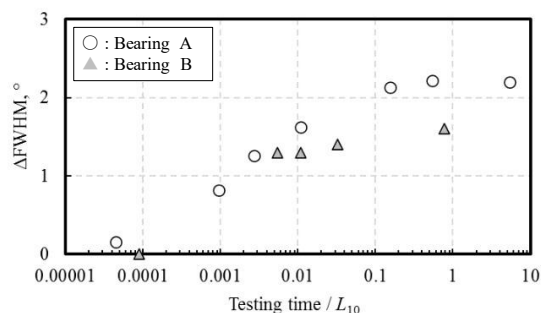


Fig. 1 Change in $\Delta FWHM$ according to testing time

4. 産業機械で使用された軸受に対する疲労進行評価

4.1 ECT による疲労診断事例 1

フィールドで使われた自動調心ころ軸受（材料: SUJ2、内径寸法: 約 100 mm）の内輪に対して ECT 測定および XRD 測定を実施した。稼働中の回転数は $800\sim 900 \text{ min}^{-1}$ 、稼働時間は 2 年間で約 3600 時間であった。対象軸受は内輪に負荷圏が存在し、円周方向に荷重分布を持っている。円周方向の一部に認められる走行跡の中央を最大負荷位置とし、 180° 反対位置を各測定の開始位置（ 0° ）とし、円周方向に内輪軌道面を 1 周測定した。走行跡が認められない範囲では 30° 間隔、走行跡が認められる範囲では 10° 間隔で測定した。使用前の測定は実施していないため、測定開始位置の

測定値を ECT および XRD 測定の基準値とした。すなわち、各測定点の疲労進行度は、 0° 位置との差に基づき評価したものである。 $\Delta FWHM$ の値を 3 つのグループ（グループ I : 0.5° 未満，グループ II : 0.5° 以上， 1.0° 未満，グループ III : 1.0° 以上）に分類した。Figure 2 に ECT 測定結果を示す。ECT 測定結果は、 $\Delta FWHM$ の値が大きくなるほど、X-Y 座標上の第 3 象限方向を負の方向に変化することがわかる。また、ECT 測定結果の Y 電圧の値を円周方向位置（角度）に対してプロットした結果を Fig.3 に示す。走行跡が現れる 90° 位置から、最大負荷位置まで徐々にマイナス方向に変化し、走行跡がなくなる 270° 位置に向かい、徐々に 0 V となることが分かる。以上の結果から、ECT による測定はフィールドにおいても有効であり、負荷分布を有する軌道輪については、円周方向に測定することで定量的に疲労進行を把握することができると考えられる。

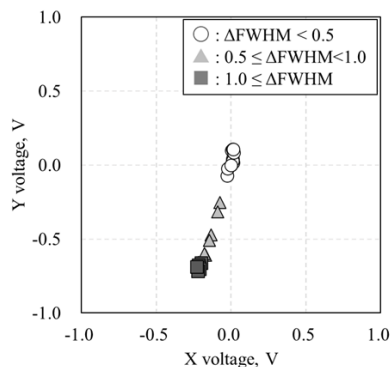


Fig. 2 Change in ECT results

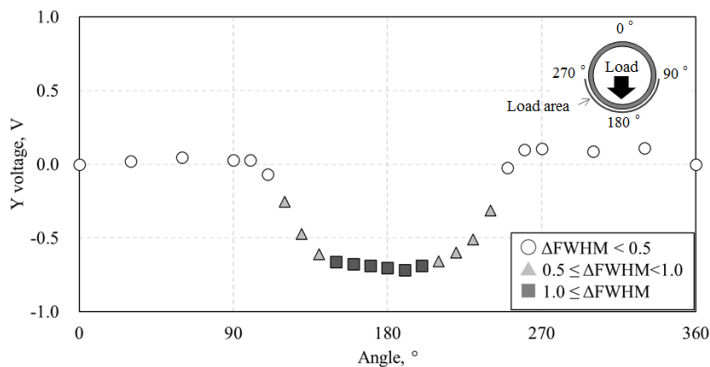


Fig. 3 Change in Y voltage of ECT result in circumferential direction

4.2 ECT による疲労診断事例 2

大形の産業機械において点検のために取り外された自動調心ころ軸受（材料: SUJ3, 内径寸法: 約 750 mm）の外輪に対して ECT 測定を実施した。稼働中のラジアル荷重は約 140 kN であり、回転数は約 270 min^{-1} 、稼働時間は 23 年間で約 200000 時間であった。軸受は分解せず、外輪を固定し、転動体と一体となっている内輪を 90° 反した状態で測定した。円周方向全周の測定は困難であったため、測定箇所は負荷位置と、 180° 反対側の非負荷位置とした。また、XRD 測定は実施していない。外輪端面から 20mm の位置を測定開始点とし、軸方向に 5 mm 間隔で ECT 測定を実施した。設備に組み込まれた軸受の概略図と ECT 測定結果の Y 電圧値を Fig.4 に示す。ECT 測定結果は、外輪内径面の転動体が通過しない非走行部を基準値（ 0 V ）とした相対値である。

Figure 4 から、特に負荷位置の B 列と非負荷位置の A 列の電圧変化が大きくなっていることが分かる。これは設備稼働時にかかる負荷によるモーメント荷重を受けた結果であると推察される。以上の結果から、ECT 測定は疲労進行だけでなく、軸受への荷重の加わり方をその場で簡易的に把握することができる手法であるといえる。

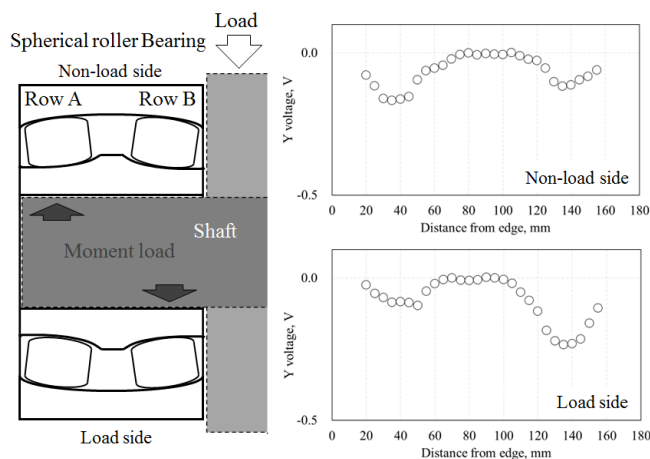


Fig. 4 Change in Y voltage of ECT results in axial direction

5. おわりに

本研究では、ECT を用いた非破壊かつ簡便な軸受の疲労診断方法を用いて、実際にフィールドの産業機械で使用された軸受を評価した。前報で示した試験軸受での検証結果と同様に、フィールドで使用された軸受においても、疲労進行に伴う ECT 測定値の変化が認められた。以上の結果から、例えば ECT 測定値と疲労進行度の相関図を作成することにより、簡易的な余寿命診断方法として活用できると考える。

文献

- 1) 古村・城田・藤井：転がり軸受の疲労解析（第 1 報），NSK Bearing Journal, 643 (1982) 1.
- 2) 小熊：軸受の残存疲労寿命予測 第 1 報 X 線回折法の適用, Koyo Engineering Journal, No. 161 (2002) 26.
- 3) 小林・小野・名取・小俣：転がり軸受の非破壊余寿命診断法の開発，トライボロジー会議 2022 春 予稿集, (2022) 171.
- 4) D. Kobayashi, K. Ono, M. Natori & H. Komata: Proceedings of the Asia Pacific Conference of the PHM Society 2023, Vol.4, No.1 (2023)