

超音波探傷を用いた軸受鋼のミクロ介在物評価

Evaluation of Micro Inclusions in Bearing Steel Using Ultrasonic Testing

日本精工(株) (正)*日高 僚太 (正)小俣 弘樹 (正)橋本 翔

(非)土信田 知樹 (非)内田 啓之 (正)植田 光司

Ryota Hidaka, Hiroki Komata, Sho Hashimoto, Tomoki Doshida, Hiroyuki Uchida, Koji Ueda

NSK Ltd.

1. はじめに

転がり軸受のスポーリングは、最も典型的な故障モードであり、繰り返し応力による疲労破壊である。スポーリングは表面起点型と内部起点型の2つに大きく分類される。表面起点型スポーリングは、主としてシビアな潤滑環境で起こるスポーリングであり、その対策として例えば熱処理による組織制御が行われる¹⁾。一方、内部起点型スポーリングは、比較的クリーンな潤滑環境で生じ、高温等の特殊な使用環境下でない限り鋼材中に含まれる非金属介在物が起点となる。そのため、内部起点型スポーリングの対策としては鋼材中に非金属介在物がどの程度存在しているかを正確に把握し、その量を抑えた鋼材を選定することが考えられる。一般的に鋼材中に非金属介在物が存在する程度の指標は清浄度と呼ばれており、軸受メーカーにとって重要な材料品質の管理項目となっている。清浄度の評価手法としては、例えば、顕微鏡を用いたASTME45法がある。顕微鏡法は介在物を直接観察することから、介在物の種類（酸化物、硫化物、窒化物）の情報が得られる。一方で、評価面積が限られる結果、鋼材中に数多く分布している数 μm 程度の極小さな非金属介在物を観察する手法となっており、実際に市場でスポーリングを引き起こすような数十 μm 以上の比較的大きくて存在確率の低い非金属介在物を直接検出するものではなかった。そこで、著者らは、よりスポーリング寿命との相関の強い大きさの非金属介在物を直接評価することのできる手法として超音波探傷を利用した評価法を開発した（以後、Micro-UT法）。本報では、Micro-UT法の概要と、その要点となる非金属介在物の大きさを算出する推定式や材料清浄度を把握した鋼材で製造した軸受の寿命との相関について報告する。

2. Micro-UT法の概要

Micro-UT法は、非破壊で鋼材内部の非金属介在物を評価できるため、大体積の測定が可能である。Fig. 1にMicro-UT法の概略図を示す。鋼材を水中に浸漬させて回転させ、プローブを軸方向に走査させることで鋼材全周全長を検査する。プローブから発信された超音波が鋼材の内部を伝播し、鋼材中に非金属介在物がある場合は反射波（エコー）が検出されることを利用して、非金属介在物を検出している。また、発信する超音波の周波数やプローブの走査ピッチ等を調整して所定の大きさの介在物が検出できるよう測定条件を設定している。Fig. 2にMicro-UT法により検出された介在物のエコー画像を示す。超音波からのエコーの強度の大きさをピクセルごとに色で示しており、赤色、黄色、青色の順でエコーの強度が大きいことを示している。これらの検出結果から実際に存在する介在物の大きさを推定し、鋼材の清浄度として指標化することでその鋼材の材料清浄度の良し悪しを判断する。

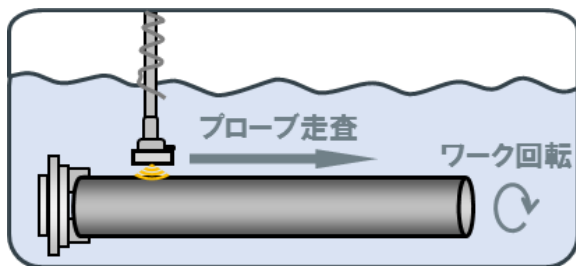


Fig. 1 The image diagram of Micro-UT

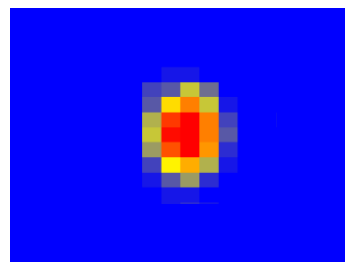


Fig. 2 The echo image by Micro-UT

3. Micro-UT法による非金属介在物の大きさの推定式について

超音波探傷で検出したエコーの面積とそのエコーの反射源となった介在物の大きさは必ずしも一致しない。例えば、介在物の存在深さの違いにより超音波の焦点位置とのずれや減衰量の違いが生じ、エコー強度が変化してしまい超音波探傷データ上の見かけの介在物寸法も変わるためである。そこで、超音波探傷で得られるデータから1つ1つの非金属介在物の大きさを正確に推定する推定式を作成することとした。推定式を作成するためには、①鋼材中の非金属介在物の実際の大きさ（以後、実介在物寸法）の測定と②見かけの介在物寸法に影響する因子の特定を行い、影響因子を補正する必要がある。

① 鋼材中の実介在物寸法の測定

超音波探傷データから検出した非金属介在物の存在位置を把握した上で、その位置の断面を金属顕微鏡で観察し、実介在物寸法を特定した。正確な位置を観察できるよう検出位置周辺を切断して取り出したあと、研磨量を測定しながら数 μm 程度の研磨と観察を繰り返して実介在物寸法の最大値を測定した。これを $N=50$ の異なる非金属介在物を対象に行った。例として、Fig. 2 のエコー画像に相当する非金属介在物観察結果を Fig. 3 に示す。

② 見かけの介在物寸法に影響する因子の特定

影響因子として、介在物面積(エコーのマス数)、エコー強度、非金属介在物の存在位置(鋼材表面からの深さ)、材料の組織に起因したエコーノイズ、鋼材直径を抽出した。この5つの因子を考慮した重回帰分析と①で得られる実介在物寸法により推定式を作成した。Fig. 4 に、推定式から算出した非金属介在物の大きさ(以後、推定介在物寸法)と実介在物寸法の比較を示す。推定式を用いることで実介在物寸法を精度よく推定できていることが分かる。また、相関係数も 0.90 と正の相関があることも分かる。この推定式の作成により、鋼材中の介在物の存在分布を正確に把握でき、それらを指標化することで、材料清浄度を定量的に判断できるようになった。

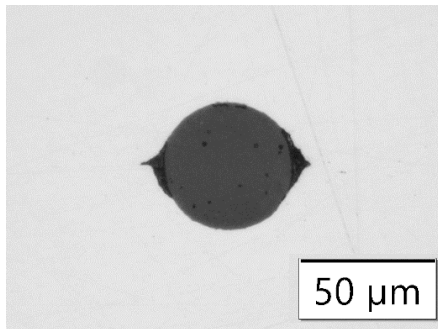


Fig.3 The inclusion image corresponding to the echo image in Fig.2

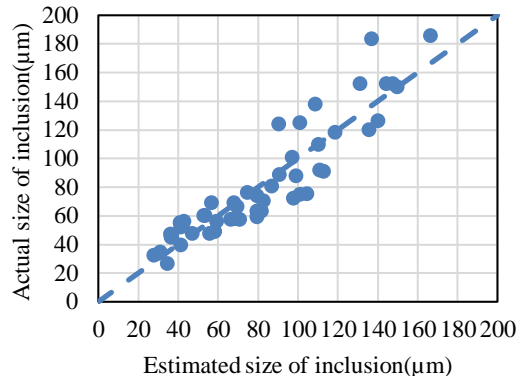


Fig.4 The comparison between estimated inclusion size and actual inclusion size

4. Micro-UT 法により評価した材料清浄度とスポーリング寿命の関係

Micro-UT 法により、鋼材中の材料清浄度を定量化したのち、材料清浄度と寿命の相関性について検証をおこなった。Fig. 5 に、Micro-UT 法にて測定した材料清浄度の異なる鋼材から製造した深溝玉軸受 6206 を用いて寿命試験した結果を示す。寿命試験条件は、ラジアル荷重 13.8 kN、回転数 3900 min^{-1} とした。潤滑方法は強制循環給油、潤滑油は ISO-VG68 である。清浄度が劣る鋼材 A から製造した軸受(赤のプロット)は清浄度が良好な鋼材 B から製造した軸受(青のプロット)よりも左側に位置することから、短寿命であることが分かる。このことから、Micro-UT 法で求まる材料清浄度と軸受寿命試験結果には相関があることが分かる。

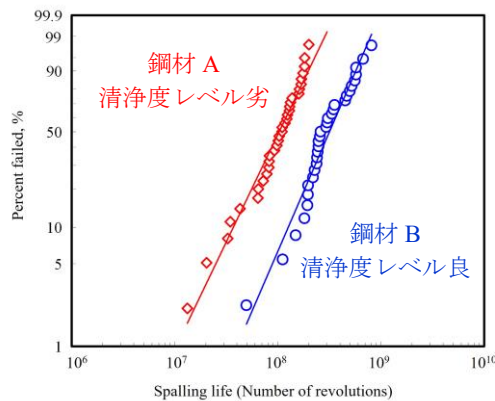


Fig.5 Weibull plots for different cleanliness index

5. おわりに

Micro-UT 法により、スポーリングの起点となりえる大きさの介在物を直接評価可能となり、軸受寿命の優劣を把握できるようになった。この技術を用いて清浄度の評価を行うことによりスポーリングに対するリスク評価を鋼材選定段階で行うことが可能となった。

6. 参考文献

- (1) Y.Murakami, et al. : Proceeding of the International Tribology Conference, (1995), 1393-1398