

状態監視保全定量化の戦略

Strategy on Quantitative Condition Based Maintenance

東京大学大学院原子力専攻

上坂 充

橋本 英子

Mitsuru UESAKA

Eiko HASHIMOTO

山本 智彦

加畑 晶規

Tomohiko YAMAMOTO

Akinori KAHATA

Condition Based Maintenance (CBM) is very important for safety of nuclear plants. We analyze basic experimental data for quantitative lifetime evaluation of bearings. So far the lifetime is guessed by fitting curves for signal outputs from vibration gauges. However data spread of results is rather large depending on the conditions of equipment, operation and environment. We are performing AE-, vibration- and oil-debris- analyses and trying to understand the fracture status more directly. Further, we newly try to measure residual strain and stress of bearing parts (ball, inner/outer races) by the neutron diffraction method using the accelerator-based neutron source, J-PARC. We aim at getting the S-N curve of the bearing material and evaluating the lifetime. We think this methodology can be applicable to other equipments, propeller and engine etc., which must be very important for overall industry maintenance.

Keywords: Condition based Maintenance, S-N Curve, Neutron, J-PARC, Residual Stress

1. 緒言

原子力発電所の安全確保・稼働率向上に、状態監視保全、つまりプラントを稼働させながら検査評価する保全手法が重要となっている。発電所の内部で最も故障事象の多い機器はポンプなど回転機器、部品としてはベアリングが挙げられる。ベアリングの余寿命評価はこれまで、振動計によって加速度信号発生頻度の上昇カーブをフィッティングして、破壊までの余寿命を推測する手法で行われてきた。しかし機器や運転条件によって結果のバラツキがあり、重大な被害を起こしうる。ベアリングの劣化損傷は転動体と内輪・外輪との衝突による金属疲労破壊であると考えられる。末期のマクロ的損傷は振動法や摩耗粒子分析で評価できる。軽度劣化の段階的過程での残留応力が把握できれば、劣化の度合いが疲労破壊曲線 (S-N カーブ) と照らし合わせて評価することが可能になる。この手法が確立すれば、回転機というシステムの軽度・重度劣化が、ベアリング材料の疲労破壊として捉えられ、ここまで蓄積されかつ信頼性のある材料データを活用して、余寿命を評価することができる。我々は中性子回折法による残留応力測定を J-PARC において行い、S-N カーブを利用して AE や振動信号から残留応力を推定し、ベアリング余寿命評価を行いたいと考えている。

本稿では本保全学会 CMT 分科会技術 WG の概要[1]、

J-PARC のビームラインを用いた測定法と新しい評価法構築に向けた戦略を述べる。

2. 日本保全学会 CMT 分科会技術 WG

2.1 活動方針

平成 20 年度に引き続き、実機ベアリングの劣化加速試験を継続し、データ蓄積と分析を推進する。実用計測手法 (振動、AE、油・微粒子分析、サーモグラフィ) のデータを同時取得し、破損過程の材料力学的明確化をはかり、余寿命評価の精度を向上させる。また、電磁信号、電磁超音波、光計測、小型 X 線源など新手法の、状態監視保全への導入の方策についても考察していく。

2.2 活動要領

(1) 実機ベアリングの劣化加速試験

昨年度同様に、主に (株) トライボテックスの協力を得て、振動、AE、油・微粒子分析の手法でデータを同時取得し、破損とそこにいたる材料力学的プロセスを分析する。今回はサーモグラフィ測定の行い、ベアリングの発熱状態もオンライン観察し、情報を増やす。さらに、日本原子力研究開発機構(JAEA) J-PARC (加速器ベース中性子源) の中性子回折ビームラインに共同利用申請し (成果公開で使用料無)、ベアリングの玉、内・外輪の劣化部の残留ひずみ・応力を評価することにチャレンジする。

(2) 劣化モードの識別分析

主に産業技術総合研究所の協力を得て、電磁信号手法等

連絡先: 上坂充、〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22 東京大学大学院工学系研究科原子力専攻、電話: 029-287-8421、e-mail: uesaka@nuclear.jp

で、玉、内・外輪の損傷の識別など、内部有効情報のオンライン取得を目指す。検討会は、必要に応じて2,3ヶ月に1度のペースで開催する。運営はWG主査が行う。

(3) 新技術の公募研究

2. 既往のベアリング寿命予測法

2.1 慣例的なS-Nカーブ

我々はベアリングの劣化を、Fig.1に模式的に示したように、玉、内輪、外輪の衝突による繰返し疲労破壊と捉える。

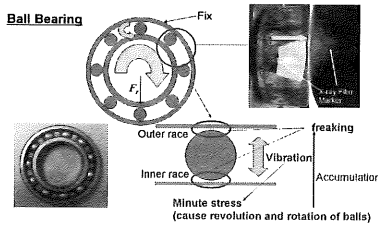


Fig.1 Degradation of bearing as collisional cyclic fatigue

金属疲労破壊曲線は S-N カーブと呼ばれ、それぞれ Stress、Number of Cycles を示す。繰返し応力を特定数加えた際に疲労しない最大応力のことをその繰返し数における疲労強度と言う。S-N カーブはその疲労強度と繰返し数の関係を示したものである。関係線図は縦軸に応力振幅(S)、横軸に繰返し数(N)の対数を取るのが一般的で、疲労試験装置に試験体を取り付け、破断するまで繰返し応力を加えて求めることができる。Fig.2 に S-N カーブの概略図を示す。[2]

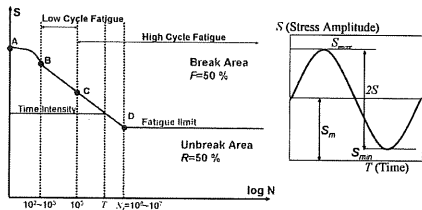


Fig.2 S-N Curve

しかし、ここから求められる耐久性は単純な繰返し応力をかけたものに過ぎず、材料形状や温度変化といった時間的に不連続な応力がかかることを考慮していないため、実際に評価する際にはこれらを考慮する必要がある。

2.2 破損確率を含めた S-N カーブ

慣例的な S-N カーブを玉軸受けなどに適用するためには破損確率を加味しなくてはならない。そこで、確率の概念を S-N カーブに含めたものが P-S-N カーブ (Probabilistic Stress Life Curve)である。特に玉軸受けの寿命

式で表現されている軸受作用荷重と定格荷重の関係を示す P-F-L カーブ (Probabilistic Force Life Curve) がもっとも進んでいるものと考えられている。寿命計算式は

$$L_n = a_1 \left(\frac{C}{F} \right)^p + \gamma, a_1 = \left(\frac{\ln R}{\ln 0.9} \right)^{1/m} \quad (1)$$

で表される。ここに L_{10} は基本定格寿命と呼ばれ、信頼度 90 % で 10^6 回転単位の寿命、 γ は 100% の信頼度である。また C と F はそれぞれ基本動定格荷重、動定格荷重を示し単位は [N] である。玉軸受けにおいては $p=3$ を与える。 a_1 さは信頼性係数、 R は信頼度、 $m=10/9$ (点接触) である。さらに、信頼度係数などを乗じて補正を行う必要がある。

玉軸受けの寿命評価はこの S-N カーブと呼ばれる金属疲労曲線を基に行うべきだと考えられる。しかし、S-N カーブは前述したとおり、単純な繰返し応力により描かれているため、材料形状の変化などの要素が含まれていないため、寿命回転数に誤差が生じる。その誤差を少なくするための機軸を作成する必要があると我々は考えており、以下で記述する方法・戦略を構築したい。

2.3 振動加速度測定分析

最近の実機ベアリングでの状態監視保全は振動計による加速度測定法が主である。ここでは設定した閾値を超える加速度信号の頻度を時間に対してプロットして余寿命を検討する。Fig.3 のように、信号強度の急速な上昇を解析関数でフィッティングし、異常信号/正常信号比を設定し、それを超える時点をもって、経験的に余寿命を評価している

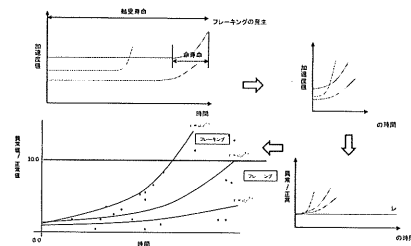


Fig.3 Empirical lifetime evaluation by the acceleration measurement

しかしこの手法も運転条件に多く依存し、余寿命に大きな幅は生じることが問題となっている。

3. 日本保全学会・トライボテックス合同試験

平成 20 年度 CMT 分科会技術WGではここまで原子力・火力・水力プラントの回転機・軸受の劣化分析に実績の豊富な (株) トライボテックス[3]と協力して、公開で軸受劣化加速試験を実施した。専用の軸受劣化加速試

験機を使用し、振動・AE・油中磨耗粒子分析を行い、結果を公開して分析・議論するのがベストと判断した。専用試験機は、駆動モーター、トルクメーター、片支持型荷重印加装置、各種センサ・計測システムが装填・稼動している。軸受は深溝玉軸受で外径 55mm、動・静定格荷重 13.2,8.3kN である。回転数 1,500、横荷重は 16.4kN まで印加可能で、破壊まで 40-72 時間程度で到達可能である。ベアリングは、10cm (高さ) x10cm(幅)x8cm (奥行き) 程度の鋼製ケースに装填されてそれにテコ構造によって横荷重を印加する。潤滑油浸漬用アクリル透明容器内に設置されている。グリス装着も可能である。ケースには、振動計、AE センサがとりつけられている。モーターと反対側軸方向からベアリングのかんりの部分が直視できる。グリス使用の場合は油液面がないので、観察はさらに容易になる。さらに油中の微粒子の定期的分析も行う。今年度横荷重負荷による劣化加速試験を 4 回行った。測定系は、振動計、AE センサ、油分析を行った。結果はスライドで紹介するが、振動計、AE による測定は開始から破壊まで連続して行い、定期的に油分析も行い、破壊直前では異常音の取得も行った。結果の 1 例を Fig.4 に示す。以前からの知見の確認ではあるが、振動・異常音の前に、AE に有意な信号が出て、その低下後に振動が有意となり、破壊に至った。油中の磨耗粒子のサイズの変化がかなり感度高い劣化の指標になりえるかもしれないことが示唆された。

2 章で紹介した既往の寿命評価法の問題点は、軸受けをブラックボックスとして捉え、限られた物理パラメータを簡略な関数で結びつけようとしているため、内包された実験条件の影響を大きく受け、数値誤差が甚大となることである。本試験では、磨耗粒子という疲労破壊の物的証拠を運転中に取得できるという大きな利点を確認した。磨耗粒子の分析で疲労剥離破壊の様子を分析できる。

もう 1 つの材料力学情報として、残留応力の評価がある。次章で説明するように、わが国の最新先進ビーム技術がそれを可能にしてくれるかもしれない。

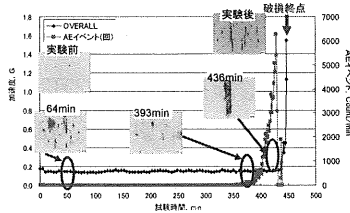


Fig.4 Bearing degradation test at TRIBOTEX Co.

4. 残留応力試験

4.1 J-PARC BL-19 “TAKUMI”

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex,大強度陽子加速器施設)は茨城県東海村の日本原子力研究開発機構(JAEA)内にあり、JAEA と高エネルギー加速器研究開発機構(KEK)の共同運営されている施設である。J-PARC は入射器・3 GeV シンクロトロン・50 GeV シンクロトロンからなり、我々が使用しようとしているビームラインは 3 GeV シンクロトロンにある物質・生命科学実験施設(MLF)の BL-19 “TAKUMI”である。BL-19 は工学材料回折装置であり、パルス中性子を用いた中性子回折による応力・ひずみなどを測定できる。“TAKUMI”は最高分解能 0.2 %以下の設計性能を誇っており、ひずみ・応力測定精度が非常に高い。また、広い格子間距離測定能力と世界トップクラスの中性子フラックスを有し、実験ステーションに十分なスペースがあるので、短い測定時間で多くの部品の自動移動連続測定が可能となり限定されたマシンタイムで多くのデータ取得が可能であると考えている。Fig.5 に TAKUMI 内にある試験環境を示す。中性子ビームに対して 90°方向に 2 つの検出器を配置してある。

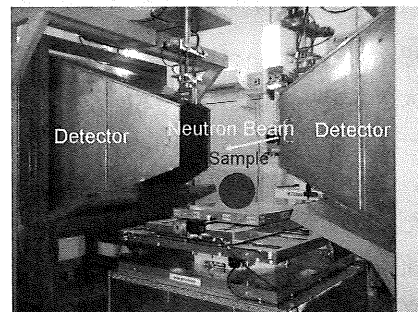


Fig.5 Test Stand at J-PARC BL-19

4.2 中性子による残留応力測定

金属中の残留応力測定法として、中性子を使った回折による測定法は、X 線法に比べ、任意の深さのデータが取得できる大きな利点がある。特に J-PARC MLF BL-19 におけるパルス中性子は幅広いエネルギー分布を持つ中性子が生成されるため、飛行時間法(Time of Flight 法, ToF 法)により一度に多くの情報を得ることができる。ToF 法は中性子の飛行距離を固定し、飛行時間の違いを測定する。これによって中性子速度を割り出し、波長を決めることができる。今飛行距離を L とし、中性子の運動量 p とすれば

$$p = \frac{h}{\lambda} = mv = m\left(\frac{L}{t}\right) \quad (2)$$

で表すことができる。金属結晶格子間距離を d とすれば、Bragg 回折の法則から

$$d = \frac{ht}{mL(2 \sin \theta)} \quad (3)$$

で表せる。さらに、無応力状態の格子間距離と測定された格子間距離から格子ひずみを求め、回折面ごとの格子ひずみから残留応力を求めることが可能である。Fig.6 に J-PARC を利用した中性子回折法の原理を示す。測定できる d の違いからひずみを測定でき、応力を求めることができる。[4]

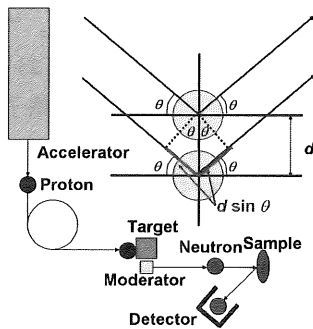


Fig.6 Principle of Neutron Diffraction Method

5. ベアリング余寿命評価新手法の構築

我々が提案する新しいベアリングの余寿命評価法は残留応力の大きさを基準軸として、AE 信号・振動信号などの観測データを評価することにより余寿命を推測する手法である。この手法を実現し、評価法として有意義なものにするために以下のような実験を行う。

- (1) 加速劣化試験により疲労状態の違うベアリングを作成する
- (2) J-PARC BL-19 においてベアリングの残留応力を測定する
- (3) 残留応力の測定結果と加速劣化試験での疲労状態の対比を行う (AE や振動信号と残留応力を結びつける)
- (4) S-N カーブを活用し、状態監視できる手法である AE や振動信号の状態から余寿命を推定する
- (5) 油分析や X 線[5] などといった手法で損傷の度合いなどを評価する

以上のプロセスを踏んで余寿命評価手法を構築したいと考えている。このような手法を確立できれば、AE や振動といった状態監視できる手法のデータが S-N カーブを用いて残留応力状態と余寿命を評価できることになる。

Fig.7 に我々の提案する評価手法の流れを示す。

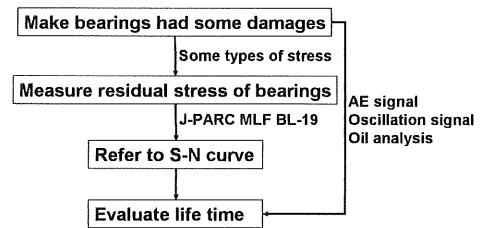


Fig.7 Strategy of quantitative lifetime evaluation

サンプルは損傷試験を行う予定でいるトライボテックス株式会社において加速劣化試験を行ったベアリングを使用し、J-PARC での残留応力試験を本年 10 月と来年 1 月に予定している。この方法は回転機を用いている他の産業にも応用できると考えられ、構造物の保全活動に非常に役に立つと考えている。

5. 結言

- 1) ベアリングの既往の余寿命評価について解説した。
- 2) J-PARC の BL-19 “TAKUMI” を利用した中性子回折法による残留応力測定法を検討し、本年 10 月に劣化ベアリングを用いた測定試験を行う予定でいる。
- 3) 劣化加速試験での AE・振動分析情報、磨耗粒子分析、残留応力測定によって、ベアリング材の疲労破壊 S-N カーブ取得とそれによる材料科学的寿命表を試みる
- 4) AE・振動・油分析・中性子・X 線の融合により、より高度な状態監視保全の実現を目指した新しい余寿命評価法の構築を実現したいと考えている。

謝辞

本研究はトライボテックス株式会社と J-PARC の BL-19 のグループとの共同で行われる研究である。

参考文献

- [1] M. Uesaka et al., *Proc. of 7th International Conference on NDE on Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components*, (2009) (to be published)
- [2] 清水茂夫 “機械系のための信頼性設計入門” 数理工学社, 2006
- [3] 川畑雅彦 “潤滑油診断技術の発電設備への適用” 日本非破壊検査協会, 非破壊検査, Vol.58, 1 (2009)
- [4] 鈴木徹也 “中性子回折の材料工学への活用”, 電気製鋼, Vol.77, 1, pp.39 – 44 (2006)
- [5] 山本智彦他、本講演会予稿