

中性子回折法による転がり軸受け内部の残留応力測定

Measurement of Inner Residual Stress of Bearing by Neutron Diffraction Technique

東京大学大学院工学系研究科	平井 俊輔	Shunsuke HIRAI	Student Member
	上坂 充	Mitsuru UESAKA	Professor
	藤原 健	Takeshi FUJIWARA	Member

Neutron diffraction technique is one of prevailing method to measure inner structure of material, such as molecular arrangement and lattice spacing by means of penetration of neutron. In particular the residual stress measurement by neutron diffraction has been developed and is greatly performed in many research facilities, because the examination of residual stress existing materials is critically important to estimate fatigue of the materials and to maintain structural objects for efficient utilization. We performed a measurement of residual stress of bearings used for rotating equipment at power plant in the JRR-3 (JAEA) after performing loading rotation test on the bearings. The measuring machine is called RESA (Neutron Diffractometer for Residual Stress Analysis). We used two samples, one was new and the other was fatigued by the test above. The result indicates us that the inner residual stress distribution clearly changed. We summarize this difference and consider several possible causes below.

Keywords: Neutron Diffraction, Residual Stress, Bearing, Condition-Based Maintenance

1. 緒言

エネルギー資源の乏しい我が国において、限られた資源を有効利用することは不可欠であり、3割以上の電力を供給する原子力発電プラントの安全を確保し、稼働率を向上させることは非常に重要である。そのために発電所における状態監視保全が必要になってくるが、その中でも発電において負荷が大きい回転機器とりわけベアリングの適切な点検・管理が重要である。ベアリングの余寿命評価については、振動計による加速度信号の発生頻度の上昇カーブのフィッティングにより、破壊までの回転数を算出する手法が行われてきたが、機器や運転条件の違いでバラつきが大きく、十分な予測とは言えない。そこで、ベアリングの劣化損傷を繰り返し負荷による金属疲労として捉え、表面及び内部の残留応力の変化を追い、それと Acoustic Emission 法及び摩耗粒子法との相関を考察すれば、AE 信号や発生粒子からベアリングの残留応力を推定でき、より正確な余寿命評価を可能にしたいと考えている。

本稿では、加速劣化試験(通常より強い荷重をかけた回転試験)で段階的に疲労させたベアリング試料に対し、日本原子力研究開発機構(JAEA)の JRR-3 にある中性子回折 RESA-1 による測定を行い、その結果について述べる。

連絡先：平井俊輔

東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻
〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22
E-mail:hirai@nuclear.jp

2. ベアリング内部の応力分布測定

2.1 測定試料

本研究で使用したベアリングの試料を Fig.1 に示す。内輪と外輪の間に 11 個の球があり、直径は 7mm である。材質は炭素クロム鋼で重量は約 10g となっている。試料は加速劣化試験を行っていないもの(new)と、荷重回転試験を施し、AE のピーク信号が発生直後のもの(used)を使用した。輪からベアリング球を取り出し、Fig.1 右のようにアルミの土台に設置し JRR-3 における RESA-1 を用いて中性子回折による内部の残留応力測定を行った。ちなみに、new の試料は銀色に光っているが、used 試料は劣化が進んだため焦げ茶色にくすんでいる。

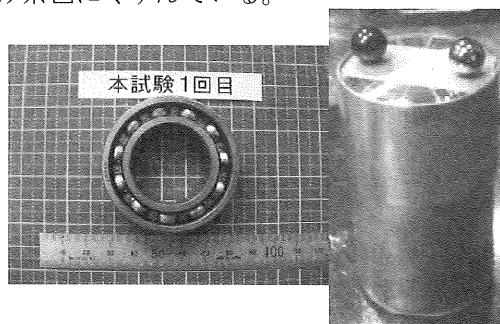


Fig.1 ベアリング試料

Fig.2 は加速劣化試験における回転数と AE 信号の発生頻度、摩耗粒子についての関係を示している。実験前が new の試料にあたり、AE Peak が used の試料に

あたる。これを見て分かるように、AE信号が発生してから短い時間の間に大規模な破損が起きている。ベ어링は、表面の数 μm の深さに強い圧縮応力が加わっており、内部ではわずかな引張応力が加わり釣り合っている。この表面の圧縮応力が材料の劣化で弱くなってくると、表面の亀裂などの破壊が発生すると考えられている。そのような疲労破壊と応力分布の変化の関係を評価し、余寿命評価の検討をするのが本測定の主な目的である。

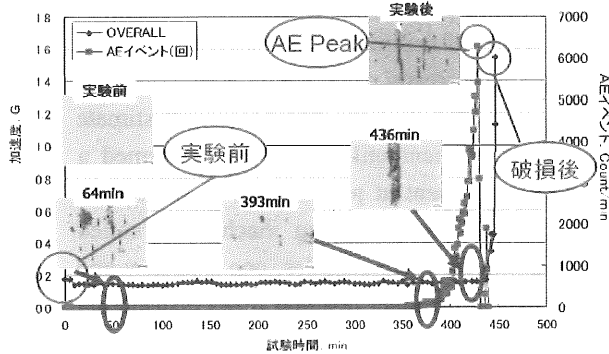


Fig.2 加速劣化試験と AE 信号

2.2 中性子回折法^{[1][2][3]}

結晶内は一般的に規則正しく原子が並び、格子を形成している。それらの格子間隔は存在している応力により変化する。つまり、その格子間隔を計測することで、弾性係数やポアソン比から具体的な応力の値を評価することができる。中性子が結晶内部に入射したとき、あらゆる方向に散乱するが、式(1)に示す Bragg の回折条件を満たす方向に強く回折が起きる。

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

d は格子面間隔、 θ は回折角、 λ は中性子の波長である n は回折次数という整数である。結晶内の応力が変化による格子間隔変化により、回折角の変化が起きる。式(1)を波長一定として微分して書き換えると下のような式(2)が得られ、格子ひずみ ϵ を求めることができる。ここで d_0 、 θ_0 はそれぞれ無ひずみ状態の格子間隔及び回折角である。

$$\epsilon = (d - d_0) / d_0 = -\cot \theta_0 \cdot \delta \theta \quad (2)$$

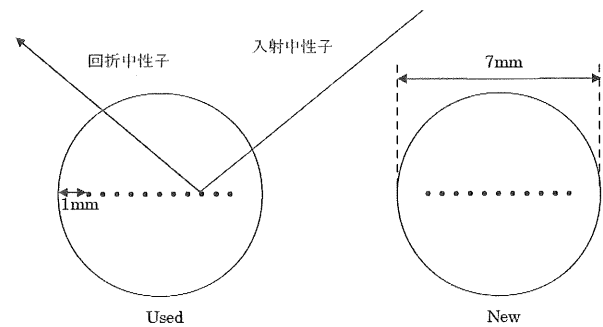
つまり、回折角の変化から測定点のひずみを求めることが可能である。中性子は X 線と違って金属に対し透過性が高く、金属内部での応力測定に適している。

2.3 測定条件

今回は RESA-1 のマシンタイムを丸 4 日間利用し

測定を行った。使用した中性子ビームの波長は 0.165 \AA 、ビーム径は $1\text{mm} \times 3\text{mm}$ 、回折面は(110)を利用した。また、測定点はマシンタイムを考慮し、Fig.3 のように中心を通る軸に対し、周方向のひずみを 1mm 深さから 0.5mm 間隔で 1 試料あたり 11 点、計 22 点の測定を行った。1 つの点を測定する時間は 140 分に設定した。これは、信頼性を確保するために必要なピーク強度を得るための積算時間である。

また、Fig.4 は全体の実験体系である。右奥からビームを出し、中央のステージにおかれたサンプルに入射・回折を起こす。そして回折中性子を 1 次元検出器で測定する。



※ 測定点の間隔は 0.5mm

Fig.3 測定点



Fig.4 測定体系

3. 測定結果

Fig.6-7 に測定結果を示す。Fig.6 は実際に測定された Hoop 方向の回折ピーク角であり、Fig.7 は式(2)を用いて計算した格子ひずみである。また横軸は共にベ어링球の中心からの距離を表しており、赤い

点が新しい試料(new)、青い点がAEピーク信号発生直後の試料(used)である。また、格子ひずみを求めるときに必要になる無ひずみ状態の回折角であるが、今回用いた試料は、新しいものは内部の応力がほとんど存在しないと考えられるため、newの値を無ひずみ状態と扱い計算を行った。

Fig.7から明らかのように、used試料のデータは、右側では圧縮されているのに対し左側では引張応力が加わっている。中心に対する対称性が無いのがわかる。なお、この格子ひずみに回折弾性係数を乗じると実際の応力が求まるが、ここで扱われている係数やひずみは引張試験などの機械的試験で求まる値とは異なるので、注意が必要である。^[1]

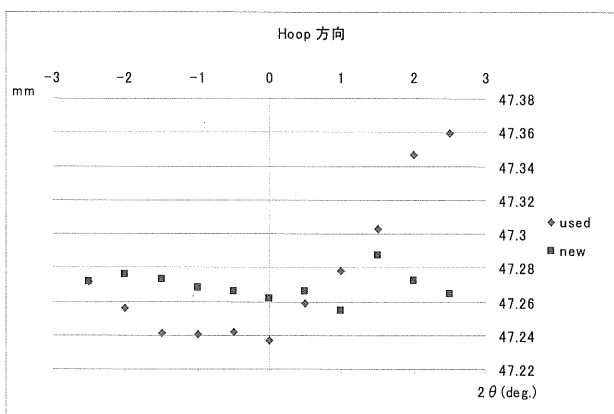


Fig.6 回折ピーク角(周方向)

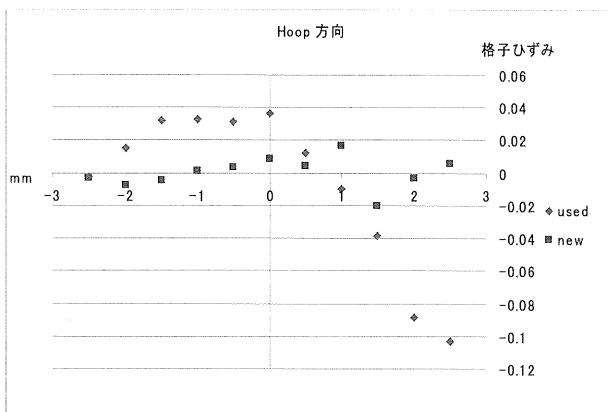


Fig.7 格子ひずみ(周方向)

今回は当初の予定よりもビーム径が1mm×3mmと大きくなったため、測定精度を左右する Gauge Volume は直径7mmの試料に対し大きくなってしまった。しかしながら、回折角の変化は追うことができた、newとusedで有意な差を計測することができた。また、試料の位置合わせにおけるずれは0.1mm以下であるため、今回の実験結果にはほとんど影響は無かったと思われる。

測定当初は、ベアリングの回転はランダムであり、

応力分布の変化も中心に対称的に起こりうると仮定していたため、このような非対称的な応力分布は予想外であった。原因を考察してみると、回転試験におけるベアリングの回転がランダムでない可能性がある。ベアリングの球は外輪と内輪にはさまれ回転を続けるが、輪の回転の向きによって球の回転に偏りが生じる可能性はある。また、輪の回転が重力に対して垂直か平行かでも内部の応力変化は異なるだろう。このようなことから、used試料の応力変化が中心に対し非対称になる可能性はある。もう1つの可能性として、ベアリングで剥離が発生し、その結果応力分布が非対称になった可能性がある。usedサンプルはAEの信号が発生後のものなので、すでに大規模な破壊が起き、純粋な球でないことが予想される。そのような場合、内部の応力は複雑な状態になっているだろう。

いずれにせよ、今回の測定では試料数が各状態で1つしかなかったため、次回は試料数を増やし信頼性向上を図る必要があるだろう。とりわけ、無ひずみ状態の回折角を左右するnew試料は、試料数を増やし、より精度良く測定するべきである。

4. 結言

- 1)炭素クロム鋼ベアリングに対し、中性子回折法により内部の応力測定を用い、疲労による応力の変化を確認することが可能であることを確かめた。
- 2)疲労が進んだベアリングは、内部での応力変化が不均一になる可能性があり、AEピーク信号発生後に起きる大規模な破壊との関連性を示唆した。

謝辞

本研究では、試料のセッティングや測定手法、及び測定後の考察に関してまでJAEAの残留応力チームの方々に非常にお世話になりました。

参考文献

- [1] 兼松学、野口貴文、安田正雪、鈴木裕士、” 残中応力回折用中性子回折装置(RESA)による鉄筋応力の非破壊測定”、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.2、2008
- [2] 前川晃、野田満靖、大厩徹、高橋茂、” 中性子回折法によるオーステナイト系ステンレス鋼配管突合せ溶接継手の残留応力分布測定”
- [3] 秋庭義明、” 新しい光源による応力評価 中性子回折法による応力測定”、(J.Soc. Mat. Sci. Japan)、Vol.54、No.7、pp 785-790 July 2005