

# 軸受の残存疲労寿命予測

## 第1報：X線回折法の適用

### Prediction of Residual Fatigue Life of Bearings

#### Part 1 : Application of X-ray Diffraction Method

小熊規泰 N. OGUMA

*The objective of this study is to predict the residual fatigue life of bearings in use by a non-destructive procedure. To predict the residual life is almost the same meaning to analyze the fatigue rate of bearing steel. Parameters on the rolling contact surface have been estimated by X-ray diffraction method. As the results, it was found that half value breadth (HVB) is the most relational parameter changing with the progress of rolling fatigue, and the fatigue rate analysis technique by normalizing the changing quantity of HVB was established. But it will be necessary to take the internal fatigue information in order to precisely estimate the fatigue rate of bearings.*

**Key Words:** rolling bearing, non-destruction, fatigue rate, X-ray diffraction, half value breadth

### 1. はじめに

機械要素部品の一つとして重要な役割を担う転がり軸受の寿命に対する研究は、長寿命化と寿命予知に関するものが精力的に行われている。前者は、はく離発生起点となる非金属介在物を低減させた高纯净度鋼の開発<sup>1)</sup>や表面硬化熱処理手法の適用<sup>2)</sup>、またはショットピーニングにより圧縮残留応力を表層に与え疲労強度を高める手法<sup>3)</sup>などが行われている。一方、後者は損傷発生以前にAEの発生を監視するなど、その前兆の現象を捉えようとする試み<sup>4)</sup>が行われている。特に、高価な設備または安全性を重視する設備に使用される軸受の場合は、寿命予知技術に対する関心が高い。

上記寿命予知手法は疲労き裂の発生を受動的にモニタリングするものであるが、近年、能動的な寿命予知手法の必要性が高まってきた。すなわちある程度の稼働時間で軸受の疲労の程度を解析し、残存寿命を予知したいという要求である。この背景には、新規アプリケーション開発を短期間で行うために評価試験の打切りによって軸受の疲労度を把握することや、既存製品の設計余裕度を把握することが挙げられる。また、メンテナンスの効率化を目的として適切な交換時期を把握する

といった観点からも、軸受の疲労の程度を解析する技術が求められている。

金属材料の疲労を評価する手段として、X線回折法が広く適用されており、一般に測定されるX線パラメータは残留応力、マルテンサイト半価幅(以下半価幅と称す)、残留オーステナイト量である。これまで、これらのX線パラメータと転がり疲労との対応を研究した結果<sup>5)-8)</sup>が報告されており、軸受の疲労度(寿命時間に対する稼働時間の割合)を解析する取組みが行われている。古村らは半価幅と残留オーステナイト量の組合せが良い<sup>7)</sup>としており、広田らは残留応力と半価幅が対応する<sup>8)</sup>としている。しかしながら、いずれの研究も内部起点型はく離の場合には、最大せん断応力が作用する深さにおけるX線パラメータが疲労度と最も良い対応を示すことを報告しており、電解研磨で転走面を破壊する手法をとっている。そのためこれらの手法では、軸受を継続使用したい場合、その要求を満たすことができないことになる。

そこで、本研究では軸受の継続使用を前提とし、内部起点型はく離を対象とした非破壊での疲労度解析技術の開発を試みた。本報ではX線回折法を用いた取組みについて述べる。

## 2. 予備試験

### 2.1 試験方法および試験条件

まず予備試験を行い、転がり疲労の進行と対応する転走面でのX線パラメータの特定を行った。図1に本研究に用いた試験機を示す。試験軸受はX線回折測定の便宜上、外輪アッシータイプの普通焼入れ焼きもどし(以下普通熱処理と称す)された円筒ころ軸受(呼び番号：NU206)とし、両側に配置するようにシャフトに組み込んだ。すなわち、シャフトにはサポート軸受と円筒ころ軸受の内輪が組み込まれる。

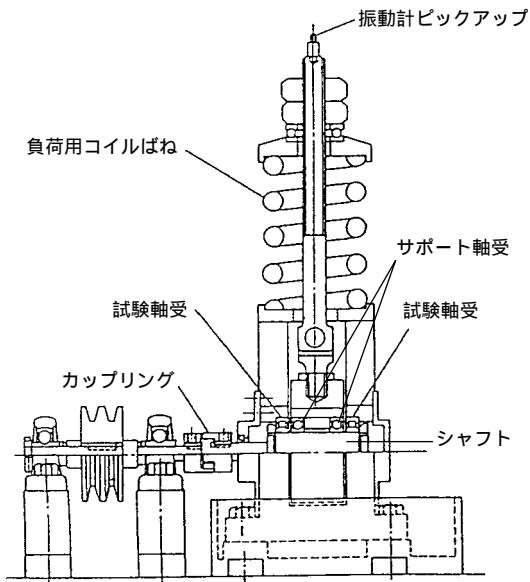


図1 試験機の概略

Schematic drawing of test equipment

表1に試験条件を示す。軸受荷重は7.06kN(0.3Cr)とし、回転速度は2500min<sup>-1</sup>で行った。潤滑はタービン油VG68を循環させ、油温は自然昇温のみとしたが、70±5℃である。このときの油膜パラメータは3以上であり、流体潤滑状態である。

表1 予備試験条件

Test conditions

試験軸受	NU206
軸受荷重	7.06kN(0.3Cr)
回転速度	2500min <sup>-1</sup>
潤滑	タービン油VG68循環 (油温：自然昇温)

### 2.2 X線回折の測定条件

X線回折測定は位置検出型比例計数管(PSPC)を備えた装置で行い、各パラメータの測定条件を表2に示す。軸受の測定対象は軸受要素の中で最も負荷応力の高い内輪とし、内輪転走痕における測定位置は円周方向に3等配個所の軸方向に3個所の合計9点とした。また、はく離発生に至るまでの試験途中における測定は、断続的に所定の試験時間が経過した時点で試験を中断し、試験軸受内輪およびサポート軸受をシャフトに組み込んだ状態で行った。

表2 X線回折条件

X-ray diffraction conditions

特性X線	Cr - K
管電圧	10kV
管電流	30mA
照射時間	100s
コリメータ	1 × 1 mm
走査方法	並傾法
入射方法	0一定法
角	0, 10, 20, 30, 40deg.
測角範囲	143 ~ 170deg.
ピーク算出法	半価幅中点法
偏光補正	フィルタ法
回折面	: [211], : [200]

### 2.3 測定結果および評価パラメータの決定

図2は疲労度に対する転走表面のX線パラメータ(残留応力、半価幅、残留オーステナイト量)の変化を示したものである。なお、図中に回帰分析による相関係数を示した。疲労の進行にともなって、残留応力は圧縮応力が増加していく傾向にあり、半価幅と残留オーステナイト量は減少傾向が認められる。また、上記3つのX線パラメータを比較すると、半価幅が相関係数0.943で転がり疲労の進行と最も良い対応を示している。したがって、疲労度解析の評価パラメータとして半価幅の減少量を対象とするのが良いと考えられる。

しかしながら、転走面の半価幅は、試験前の新品状態においても、仕上げ研磨加工の具合によってばらつくため個体差を持つ。また、同じ減少量であっても疲労の程度が異なり表面半価幅からの疲労度推定は困難であることが報告されている<sup>8)</sup>。さらにばらつきの要因を挙げると、測定装置や測定条件が異なると半価幅の値は変化する。したがって、半価幅の減少量を正規化して評価する必要がある。

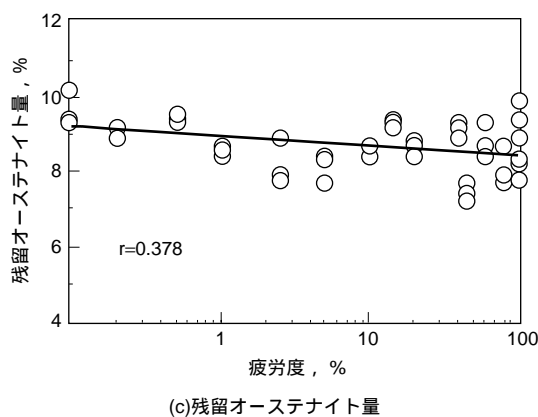
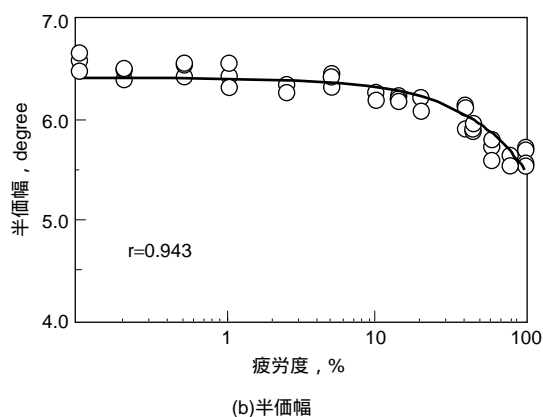
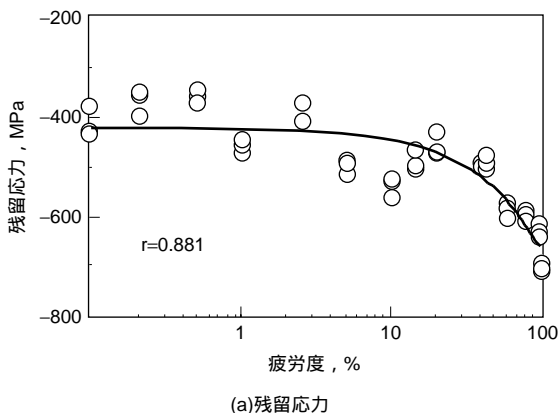


図2 疲労度に対するX線パラメータの変化  
Change of X-ray parameters against fatigue rate

そこで、本研究では半価幅の変化量を次のように無次元化し、半価幅減少度と定義する。

$$\text{半価幅減少度} = \frac{\text{内部半価幅} - \text{表面半価幅}}{\text{内部半価幅}}$$

この式において内部半価幅とは、転がり疲労の影響を受けず、研磨仕上げの影響も受けていない熱処理後の材料本来の半価幅を意味する。本研究では非破壊測定を前提とすることから、内部半価幅の測定は、軸受の転がり機能に影響のない側面を電解研磨し、約50 μm掘下げた深さで行った。

### 3. 軸受荷重の影響試験

#### 3.1 試験条件

疲労度解析技術を実用する際には、運転条件が不明な軸受を測定対象とする場合があるので、多種多様な運転条件で試験を行い、データベースを構築することが望まれる。そこで、軸受荷重を変化させた試験を行って半価幅減少度の挙動を考察した。表3に試験条件を示す。なお、回転速度に関しては、流体潤滑されている限り寿命に対する疲労の進行度合いは変動しないと考えられるため、回転速度との関係の試験は省略した。

表3 試験条件

Test conditions

試験軸受	NU206		
軸受荷重, kN	4.71	7.06	9.84
回転速度, min <sup>-1</sup>	4 000		
潤滑	タービン油 V G 68 循環 (油温: 自然昇温)		

#### 3.2 半価幅減少度の挙動

図3は3水準の軸受荷重条件下で行った試験における疲労度に対する半価幅減少度の変化を示したものである。ただし、半価幅減少度を算出するために対象とした半価幅測定値は、一つの軸受あたり測定9個所の中ではなく離が発生した幅方向の位置に限定し、円周方向測定値の平均で整理した。すなわち、はく離が発生した円周方向はどの個所においても同じ疲労度であると仮定した。図3を見ると、およそ疲労度20%まで半価幅減少度は徐々に大きくなり、それ以降は傾きがさらに大きくなる傾向を示していることが分かる。疲労度20%以下の低疲労度領域の対数回帰分析による相関係数は0.732であり、疲労度20%以上の高疲労度領域の相関係数は0.865であった。このように疲労度との相関が変化する原因は、転がり接触領域の内部から蓄積してくる結晶ひずみが、疲労度20%以降に転走面に現れるためと考えられる。転走面内部の測定では疲労が10%以上進行すると評価パラメータの変化が現れる報告<sup>7)</sup>があることから、内部の疲労情報と表面の疲労情報とは変化の度合いに違いがあるものの、同様の疲労進行過程を示すものと考えられる。

以上の結果から軸受荷重が異なっても、また寿命時間が異なっても疲労度と半価幅減少度という尺度を用いれば、両者の関係に良い相関が得られることが明らかとなった。

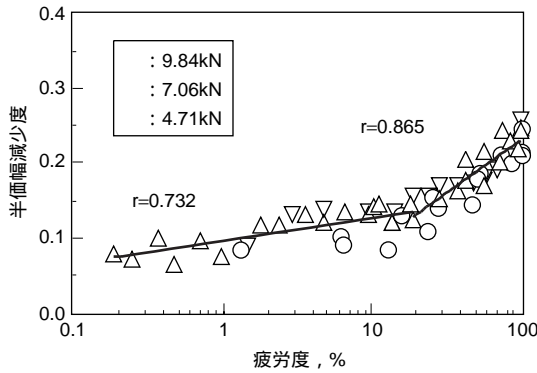


図3 疲労度と半価幅減少度の関係

Relationship between fatigue rate and decrease rate of HVB

### 3.3 信頼区間

次に疲労度解析のばらつき範囲を算出するために信頼区間を求める。図3を疲労度解析データベースとして用いるとき、従属変数である半価幅減少度から独立変数である疲労度を推定することになる。この場合の100(1 - )%の信頼区間は次式で与えられる<sup>9)</sup>。

$$Y_x - B_{a,x} \leq y \leq Y_x + B_{a,x} \quad (1)$$

ここで、 $Y_x$ は疲労度 $x$ のときの回帰曲線から求められる半価幅減少度である。式(1)における $B_{a,x}$ は次式で与えられる。

$$B_{a,x} = t_{(n-2),\alpha} S_{Y|X} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{X})^2}{(n-1)S_X^2}} \quad (2)$$

ここで、 $S_{Y|X}$ は回帰曲線の標準偏差、 $S_X$ は標本標準偏差、 $n$ は標本数、 $\bar{X}$ は標本平均である。なお、 $t_{(n-2),\alpha}$ は $t$ 分布表から数値を得る。

図4は図3における高疲労度領域のデータを標本とし、例として95%信頼区間(=0.05)を示したものである。

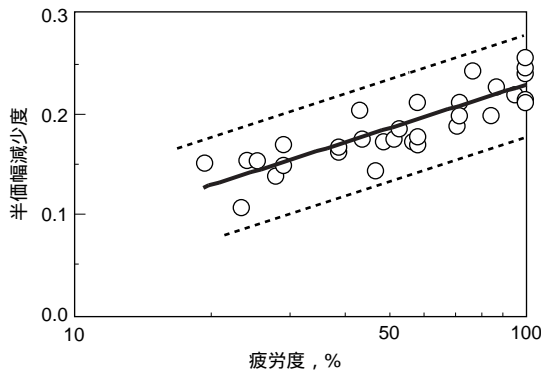


図4 疲労度解析線図の95%信頼区間

95% reliability zone of database for fatigue rate analysis

## 4. データベースの適用拡大検討

### 4.1 点接触軸受の場合

前述のように普通熱処理された円筒ころ軸受を用いて疲労度解析データベースを構築したが、点接触する軸受の場合への適用を検討する必要がある。そこで、深溝玉軸受(呼び番号:6206)を用いて疲労度試験を行い、疲労度に対する半価幅減少度の挙動を確認した。軸受荷重は8.93kN(0.46Cr)、回転速度は4000min<sup>-1</sup>とし、潤滑条件は予備試験と同じである。

図5は図4に示した円筒ころ軸受での95%信頼区間に深溝玉軸受のデータをプロットしたものである。点接触する深溝玉軸受においても、線接触する円筒ころ軸受の95%信頼区間に包括されていることが分かる。したがって、図4のデータベースは軸受の接触形式に関わらず適用可能であることが確認された。

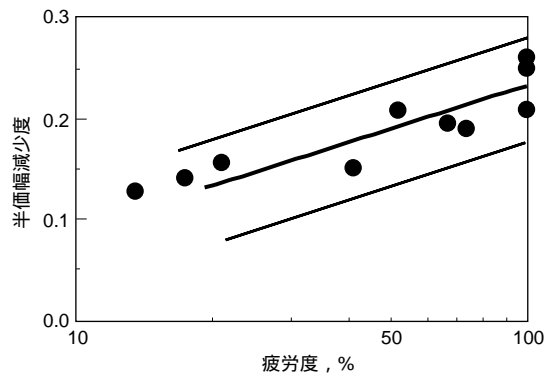


図5 円筒ころ軸受の信頼区間に対する深溝玉軸受の半価幅減少度の挙動

Behavior of decrease rate of HVB on ball bearings compared with reliability zone on cylindrical roller bearings

### 4.2 表面硬化処理軸受の場合

次に、異なる熱処理が施された軸受について図4のデータベースの適用を検討する。図6は、表面硬化熱処理(内部より表面の方が高硬度となる熱処理)を行った軸受の場合における、疲労度と半価幅減少度の関係を示したものである。なお、比較のため図4に示した普通熱処理された円筒ころ軸受の95%信頼区間を併記した。表面硬化熱処理の種類は、SUJ2材に浸炭窒化熱処理を行ったもの、SAE5120材に浸炭熱処理を行ったもの、同じくSAE5120材に特殊浸炭熱処理を行ったものである。各熱処理における回帰曲線は普通熱処理した場合と比較して傾きが小さく、半価幅減少度から疲労度を推定するにはばらつきが大きくなるのが分かる。したがって、図4に示したデータベー

スは普通熱処理された軸受の場合に限定され、表面硬化処理された軸受には適用が困難であると言える。

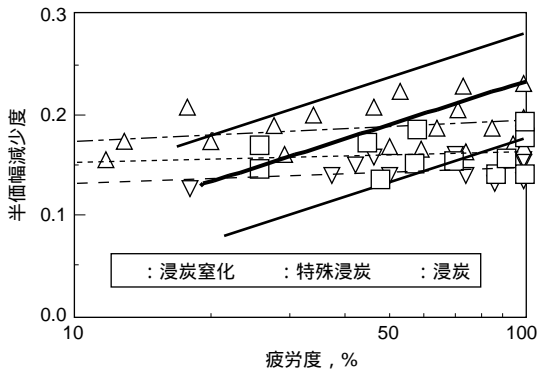


図6 表面硬化熱処理品における疲労度と半価幅減少度の関係

Relationship between fatigue rate and decrease rate of HVB on several heat treatment bearings

ここで、表面硬化処理された軸受の半価幅減少度が小さい原因について考察を加える。図7は各種熱処理品の内部硬さ分布を示したものである。各種表面硬化処理品は普通熱処理品と比較して表層の硬さが高いことが確認できる。図8は深さ方向の残留応力と半価幅の分布を示したものである。各種表面硬化処理品の表層の圧縮残留応力および半価幅は普通熱処理品よりも高い値を示しており、熱処理によって結晶ひずみが生成していることが分かる。以上のデータから、転がり疲労による半価幅の減少が小さい原因は、結晶の均一ひずみを表す圧縮残留応力または不均一ひずみを表す半価幅の値が大きいため、転がり疲労による表層の結晶ひずみの解放が小さいことによるものと推定される。

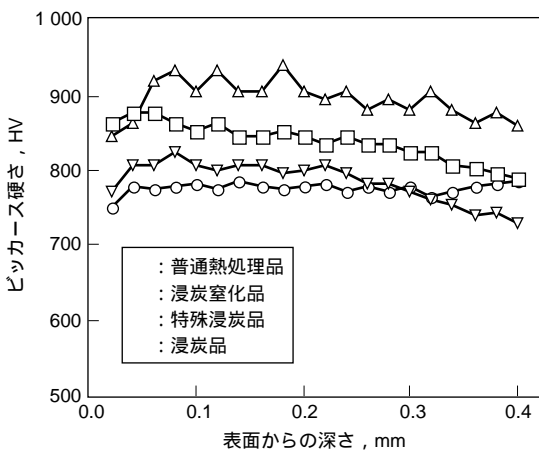
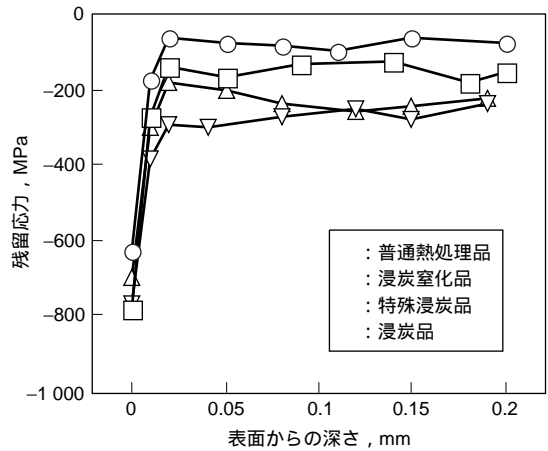
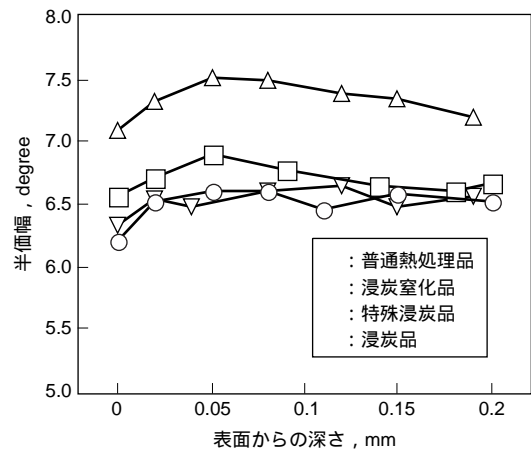


図7 各種熱処理品の内部硬さ分布

Hardness distributions of various heat treatments



(a)残留応力分布



(b)半価幅分布

図8 各種熱処理品の残留応力と半価幅の分布

Residual stress and HVB distributions of various heat treatment

## 5. おわりに

内部起点はく離を発生する運転条件で使用される軸受を対象とし、非破壊でその疲労度解析技術確立することを目的として、X線回折法の適用を試みた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 転がり疲労による転走面のX線パラメータの挙動は、圧縮残留応力が増加し半価幅と残留オーステナイト量は減少する傾向が確認された。疲労度との相関は半価幅の変化が最も良い対応を示した。
- (2) 転走表面の半価幅減少量を内部半価幅の値で除すことによって無次元化し、普通熱処理された軸受鋼の疲労度解析線図を構築した。異なる荷重条件下および接触形式の異なる軸受でも半価幅減少度は疲労度と良い対応を示した。

(3)表面硬化熱処理を施した軸受では転走面の半価幅の減少が小さいため、疲労度解析のばらつきが大きくなり推定が困難である。

通常の清浄油中環境下で運転された軸受の転がり疲労は、最大せん断応力が発生する深さから疲労が蓄積し、はく離が発生し寿命に至る。この基本現象を熟慮すれば、X線回折法による半価幅測定は転走面の疲労情報しか取得できないため、疲労度を推定するには精度が十分でないともいえる。また、表面硬化処理軸受ではX線回折法の適用が困難であることが確認された。したがって、精度向上および適用範囲の拡大を推進するには、非破壊で内部の疲労情報を取得できる手法が必要である。このような課題を解決するために、次報では、超音波法を用いた疲労度解析技術の取組みについて報告する予定である。

## 参考文献

- 1) 森原源治, 藤田良樹, 藤本芳樹: KOYO Engineering Journal, no. 128 (1985) 20.
- 2) 藤田良樹, 星野照男: KOYO Engineering Journal, no. 126 (1984) 28.
- 3) 後藤将夫: 特許第3170615号
- 4) 西本重人, 小熊規泰: KOYO Engineering Journal, no. 137 (1990) 34.
- 5) 日紫喜基久, 堀 捷樹, 高野博史, 川辺秀昭, 上村正雄: 材料, vol. 27, no. 303 (1978) 74.
- 6) X線材料強度部門委員会: 材料, vol. 28, no. 312 (1979) 847.
- 7) 古村恭三郎, 城田伸一, 藤井章雄: NSK Technical Journal, no. 646 (1986) 18.
- 8) 広田忠雄, 清水健一: 不二越技報, vol. 43, 22 (1987) 43.
- 9) 室津義定, 大場史憲, 米沢政昭, 藤井進: システム工学, 森北出版(1980) 82.

## 筆者



小熊規泰\*

N. OGUMA

\* 総合技術研究所 基礎技術研究所  
トライボロジー研究部 工学博士