

# 軸受の残存疲労寿命予測 第2報：表面SH波の適用

## Prediction of Residual Fatigue Life of Bearings

### Part 2 : Application of Surface Horizontally Polarized Shear Wave

小熊規泰 N. OGUMA 三上剛 T. MIKAMI

*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. It was difficult to analyze the fatigue rate for the case hardened bearings using an X-ray diffraction method. In order to get the internal fatigue information caused by cyclic rolling contact, the surface horizontally polarized shear (SH) wave method is evaluated. The condition of the sensor setting in order to measure the stable waveform is determined, and the surface SH wave is measured with the different length conditions in order to cancel the scatter factors. As the results of the experiments and the measuring of surface SH wave, it is found that the velocity of SH wave is later with the increase of the fatigue rate of the bearing. The fatigue rate analysis technique for the case hardened bearings was established by measuring the velocity of surface SH wave.*

**Key Words:** rolling bearing, life prediction, non-destruction, fatigue rate, analysis, ultrasonic, SH wave

## 1. はじめに

本研究では、内部起点型はく離で寿命に至る軸受を対象とし、その疲労過程における非破壊での疲労度解析技術の開発を目的としている。前報<sup>1)</sup>では、X線回折法を適用した疲労度解析技術について報告した。具体的には、軸受の転走面の半価幅を測定し、その変化量を無次元化することによって、軸受の疲労度が推定可能な線図を提案した。普通焼入れ焼もどしされた軸受鋼の場合では、非破壊で疲労度解析が可能であることを明らかにした。しかしながら、表面硬化熱処理を施した軸受では、転がり疲労による転走表面の半価幅の変化量が小さいため疲労度解析が困難であることも示した。そのため、内部の疲労情報を得る手法が必要であることを指摘した。

そこで本研究では、内部疲労情報を得るために、超音波の適用を検討した。超音波による鋼の疲労寿命評価に関する研究はいくつか行われている<sup>2)・5)</sup>が、転がり疲労に限定すれば、超音波顕微鏡を用いた井上らの研究<sup>6)</sup>しか見られない。本研究では、比較的容易にフィールド測定が可能なポータブル型の超音波測定システムを採用し、試料の表層を伝播する超音波として表面SH波(Surface horizontally polarized shear wave)に着目した。

本報では、軸受の疲労度解析技術に表面SH波法を適用する場合の基本的測定手順を検討するとともに、表面硬化処理軸受の一種である円筒ころ軸受浸炭品を対象としたデータベースを構築したので、以下に報告する。

## 2. 表面SH波の基本的測定条件

表面SH波法は主に探傷に適用されており、安定した波形を測定するための種々の影響要因が検討されている<sup>7)</sup>。これを参考に、本研究で実施する表面SH波測定に関するばらつき要因を調査した。

### 2.1 押付け力と保持時間

表面SH波の測定は、横波専用の接触媒体を用いて、SHセンサを試料に押しつける接触式測定法である。そのため、SHセンサの押付け力と保持時間によって接触媒体の膜厚が変動し、それに伴って伝播時間も変動する。そこで、最適なSHセンサの押付け力と保持時間の検討を行った。

用いたSHセンサは東芝タンガロイ社製の10×10mmの平面プローブであり、素子の共振周波数は1.6MHzである。また、表面SH波の伝播時間の測定システムは東芝タンガロイ社製のポータブル型表面音診機を用いた。なお、測定試料は

60HRCの硬さ基準片である。

観測された表面SH波の例を図1に示す。同図の波形において、SH伝播時間を決める評価点は、図中に示すように第2ゼロクロス点(以下Z2と称す)の時間を採用した<sup>8)</sup>。

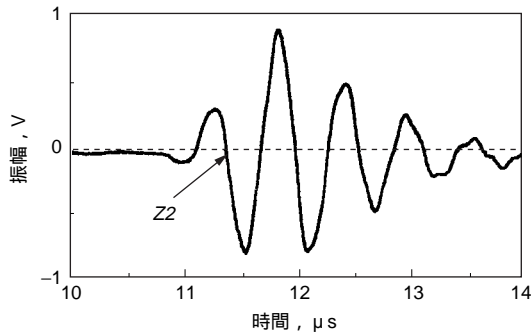


図1 表面SH波の観測例  
Example of observed surface SH wave

図2は、センサの押付け力が10, 20, 30Nの場合における、保持時間に対するZ2時間の変化を示したものである。図2から、Z2時間は押付け力が大きいほど速く安定することが分かる。最も速く安定する押付け力は30Nの場合であり、その時間は5分であった。

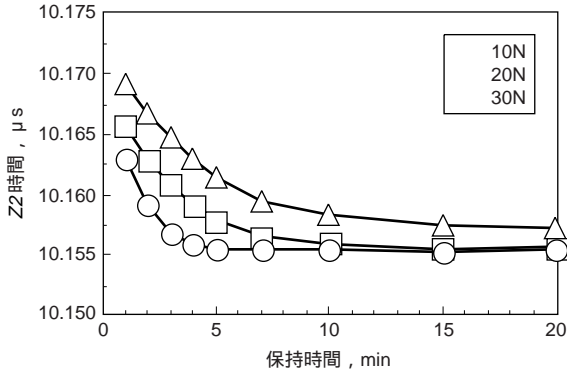


図2 保持時間の影響  
Influence of retention time

## 2.2 基礎的伝播挙動の確認

### (a) 雰囲気温度および表面粗さの影響

SH波専用の媒体は、その粘性で横波を伝播させる性質をもっている。媒体粘度は温度によって変化するため、測定環境における雰囲気温度が伝播時間の変動に影響を与えと考えられる。また、試料の温度も音速に影響を与えることが知られている<sup>9)</sup>。そこで、雰囲気温度によって表面SH波の伝播時間がどのように変動するかを検討した。

図3は異なる雰囲気温度でのZ2時間の変動を示したものである。なお、雰囲気温度は、空調によって温度制御した室内における、測定場所近傍の

室温である。図3を見ると、雰囲気温度が高いほどZ2時間が遅くなる傾向が認められる。すなわち、雰囲気温度の上昇によって媒体粘度が小さくなり、表面SHが伝播しにくくなったものと推定される。

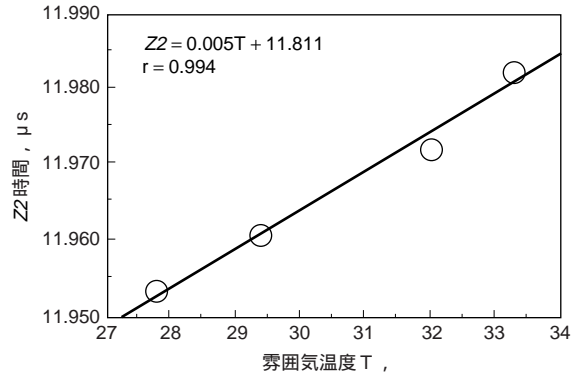


図3 雰囲気温度の影響  
Influence of temperature

次に、Z2時間に及ぼす試料の表面粗さの影響について検討した。図4は4種類の表面粗さの測定面におけるZ2時間の変化を示したものである。図4を見ると、表面粗さRaが大きいほどZ2時間が遅くなる傾向が認められる。この結果は、表面粗さが大きいほど入射音圧が低下する<sup>10)</sup>ためと考えられる。

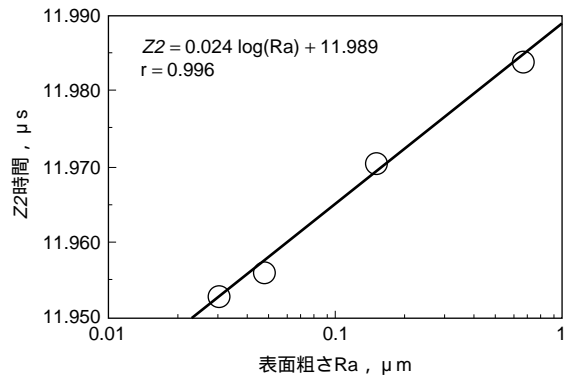


図4 表面粗さの影響  
Influence of surface roughness

### (b) 残留応力の影響

表面SH波の音速測定は、一般に、音弾性による試料の主応力測定に用いられる。弾性ひずみ状態で音速が変化するという事は、残留応力場のような塑性ひずみ状態でも音速が変化すると考えられる。そこで、残留応力が異なる試料で表面SH波の音速を測定し、転がり疲労による圧縮残留応力場の生成に対応して音速が変化する可能性を検討した。

図5は硬さ基準片を用いて表面SH波の音速を測定した結果である。音速の算出は表面SH波の

伝播距離を変化させて距離差を出し、Z2時間の差で除すことによって行った。なお、残留応力の測定はX線回折法で行った。図5を見ると、圧縮残留応力が大きいと表面SH波の音速は遅くなる事が分かる。

転がり疲労の進行にともなって、最大せん断応力発生深さの圧縮残留応力が増加することが知られている。したがって、表面SH波の伝播速度は、転がり接触による疲労の蓄積にともなって、遅くなる事が期待される。

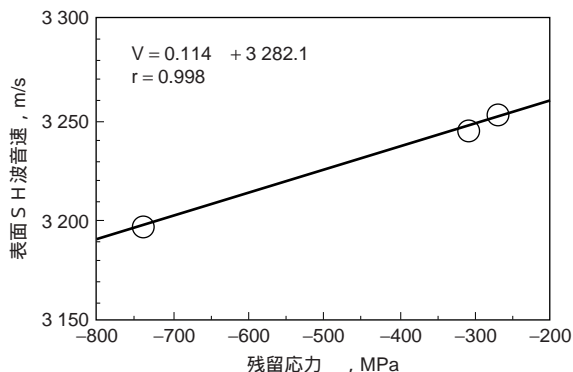


図5 残留応力と音速の関係

Relationship between residual stress and sound velocity

### 2.3 センサレイアウト

円筒ころ軸受内輪転走面における表面SH波の伝播速度を測定する場合、種々の内輪直径に対応したSHセンサのプロープを準備することは、汎用性に欠けコストが増大する。そこで、平面プローブを用いて、任意の直径が測定可能なSHセンサのレイアウトを検討した。

任意の直径の軸受内輪を測定するためには、SHセンサを円周方向に配置して測定すると都合が良い。図6は転走面に送信センサおよび受信センサを接触させたレイアウトである。両センサに角度を持たすと同時にセンサ間隔を調整し、プローブの適切な位置で接触するようにしなければならない。そこで、軸受の内輪直径とセンサの接触位置の関係を幾何学的に検討した。

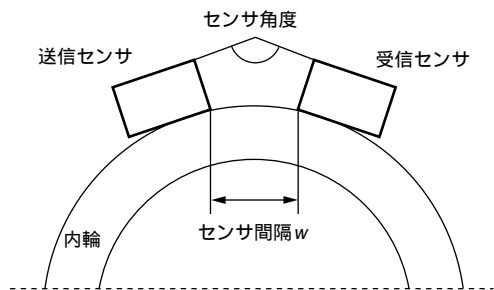


図6 SHセンサのレイアウト

Layout of SH sensor setting

図7はセンサ内端からの接触位置を算出するモデル図である。センサの接触位置 $p$ はセンサ角度 $\theta$ 、センサ間隔 $w$ 、および内輪直径 $d$ を用いて次式で算出される。

$$p = \frac{d \sin \theta - w}{2 \cos \theta} \tag{1}$$

ただし、 $\theta = (\text{センサ角度}) / 2$ である。

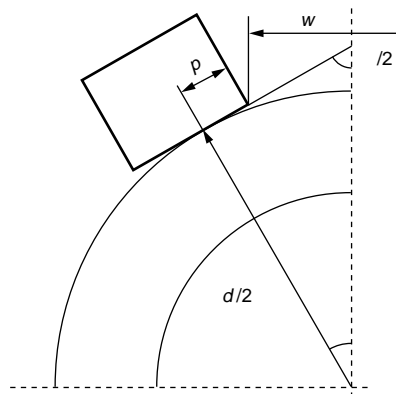


図7 センサ接触位置の算出図

Contact position on sensor probe

接触位置 $p$ がセンサ面の有効波動伝播領域に入るようにセンサ角度 $\theta$ とセンサ間隔 $w$ を決定すればよい。なお、本報で用いたSHセンサの有効波動伝播領域は、2～5.5mmの範囲である。

ところで、前項の検討結果によれば、Z2時間は雰囲気温度および試料の表面粗さによって変動するため、測定環境および試料状態によって統一的评价が困難となる。表面SH波の正確な伝播速度を求めるためには、これらの変動要因に対して補正值を用いるか、または、削除する測定方法が必要である。変動要因を削除する方法として距離変化法<sup>11)</sup>があるが、一般に知られている方法はプローブを移動させて測定を行うため、軸受のような曲面を測定する場合には適用が困難である。伝播速度を求めるためには、距離差と時間差が既知となればよいので、前述したSHセンサのレイアウトを2条件以上として測定すればよいことになる。

## 3. 転動実験および表面SH波測定

### 3.1 実験条件および測定条件

軸受の疲労度に対する表面SH波の挙動を把握するための実験は、前報と同じくラジアル型の転動疲労試験機(試験機の概要は前報参照)を用いて行った。供試軸受は内輪がSAE5120材の浸炭熱処理品であり、外輪がSUJ2材の普通熱処理品である。

表1に実験条件を示す。軸受荷重は14.1kN (0.6Cr)としたが、ころにクラウニング加工が施してあるため、最大接触圧力は2.9GPaである。また、回転速度は4 000min<sup>-1</sup>で行った。潤滑はタービン油VG68を循環させ、油温は制御せず自然昇温とした。

表1 実験条件  
Test conditions

試験軸受	NU206-GC
軸受荷重	14.1kN(0.6Cr)
回転速度	4 000min <sup>-1</sup>
潤滑	タービン油VG68循環 (油温：自然昇温)

表面SH波の測定は、任意の時間で実験を中断し、内輪転走面の円周方向に3箇所を測定した。図8にSHセンサを軸受内輪にセッティングしたときの状況を示す。セッティング条件は、前節での検討結果を考慮し、センサ角度170°、センサ間隔1mmの場合とセンサ角度165°、センサ間隔3mmの場合の2条件とした。この条件における測定距離差は約1.7mmである。

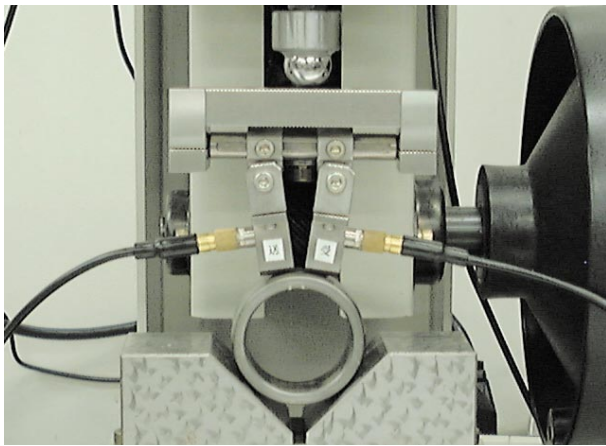


図8 セッティングの状況  
Sensor setting

表2 測定条件

Conditions of surface SH wave measurement

センサ形式	分離型平面センサ	
押付け荷重, N	30	
保持時間, min	5	
センサ角度, deg.	170	165
センサ間隔, mm	1	3
接触位置, mm	1.182	1.021
伝播距離, mm	3.355	5.025

### 3.2 測定結果

図9に疲労度に対する2条件で測定した表面SH波の伝播時間差の変化を示す。ただし、周方向に測定した3箇所データの平均して代表値とした。図9から、疲労度が増加するほど伝播時間差が大きくなる傾向が分かる。

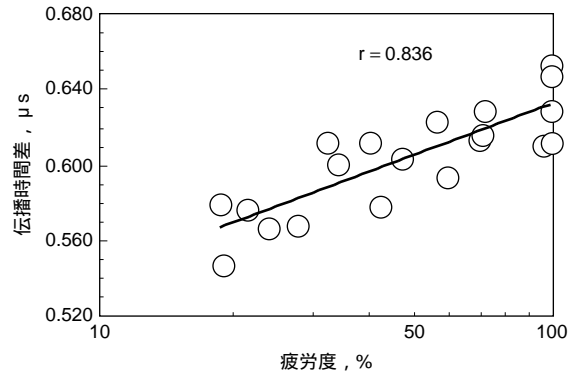


図9 疲労度に対する伝播時間差の変化  
Change of propagation time against fatigue rate

しかしながら、センサ特性や伝播距離が異なれば伝播時間差も変化するため、測定条件が異なっても同じ指標で評価できるパラメータが必要である。図10は伝播時間差を伝播速度に置き換えたものである。また、同時に95%信頼区間も示した。疲労度の増加にともなって伝播速度は遅延することが分かる。転がり疲労の進行によって圧縮残留応力が増加していくことは知られているが、図10に示した結果は、硬さ基準片を用いて検討した残留応力と表面SH波の関係と同様であり、また、井上らが報告<sup>6)</sup>している、軸受の転走面直下における転がり疲労による圧縮残留応力の生成に対する弾性表面波の音速の遅延現象とも一致する。

以上から、表面SH波の伝播速度を測定することで、軸受の疲労度を推定することが可能であることが分かった。

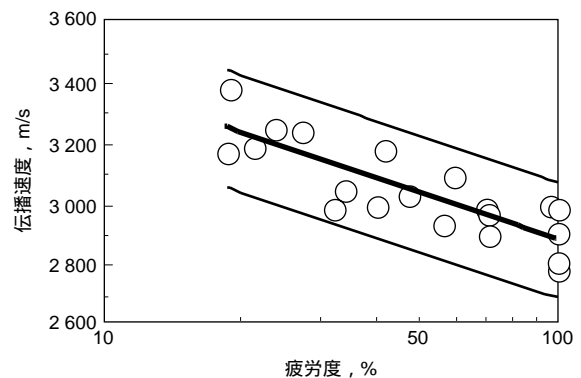


図10 疲労度に対する伝播速度の変化  
Change of propagation velocity against fatigue rate

## 4. おわりに

X線回折法では疲労度解析が困難であった表面硬化処理の一種である浸炭熱処理された軸受を対象とし、表面S H波法の適用を試みた。安定した波形の測定条件を特定するとともに、転がり疲労に対する表面S H波の挙動を考察した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1)表面S H波の伝播時間に及ぼす、測定環境温度および軸受転走面粗さの影響を削除するために、距離差測定法を提案した。
- (2)円筒ころ軸受内輪を測定対象とした場合、汎用性を考慮して平面センサで測定できる。また、この場合の距離差測定法は、2条件のセンサレイアウトで測定すれば良い。
- (3)転がり疲労の進行に伴って、表面S H波の伝播速度は遅くなる。この関係を用いて、円筒ころ軸受浸炭品の疲労度解析線図を構築した。

## 参考文献

- 1) 小熊規泰：KOYO Engineering Journal, no. 161(2002)26.
- 2) 福原幹夫, 桑野芳行, 斉藤 潔, 古村一朗：日本非破壊検査協会平成8年度秋季大会講演概要集,(1996)175.
- 3) 平尾雅彦, 荻 博次：非破壊検査, vol. 46, no. 9(1997)649.
- 4) 和田宇生, 松坂 矯, 杉林卓也：日本非破壊検査協会平成9年度秋季大会講演概要集,(1997)105.
- 5) 加藤誠一, 福原熙明, 本郷道宏, 山口弘二：第5回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集,(1998)109.
- 6) 井上靖雄, 坂本 博, 柿島秀史：第31回X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集,(1995)169.
- 7) 溶接部の超音波探傷委員会：非破壊検査, vol. 47, no. 6(1998)403.
- 8) 福岡秀和, 戸田裕己, 平尾雅彦：音弾性の基礎と応用, オーム社,(1993)32.
- 9) 中島規雄, 丹羽 登：非破壊検査, vol. 41, no. 3(1992)128.
- 10) 森山茂樹, 木村勝美：非破壊検査, vol. 47, no. 5(1998)315.
- 11) 福岡秀和, 戸田裕己, 平尾雅彦：音弾性の基礎と応用, オーム社,(1993)51.

## 筆 者



小熊規泰\*  
N. OGUMA



三上 剛\*\*  
T. MIKAMI

\* 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

\*\* 総合技術研究所 基礎技術研究所  
トライボロジー研究部