

軸受の残存疲労寿命予測

第3報：漏洩表面波の適用

Prediction of Residual Fatigue Life of Bearings Part3: Application of Leaky Rayleigh Wave

貴治雅博 M. KIJI 小熊規泰 N. OGUMA

The purpose of this study is to analyze the fatigue rate of bearings by a non-destructive procedure. In previous study, authors proposed a X-ray diffraction method and surface horizontally polarized shear wave method. However hardened ball bearings were not dealt. In this paper, a leaky Rayleigh wave (LR wave) method has been discussed. An ultrasonic transducer has been developed, which can generate LR wave propagating in the subsurface of an inner race. LR wave velocity measurement system has been constructed with this transducer. High accuracy data within $\pm 0.37\text{m/s}$ standard deviation has been obtained. The relationship between the fatigue rate and the LR wave velocity has been established. From the experimental results, it is possible to say that the fatigue rate of ball bearings can be predicted by LR wave velocity.

Key Words: rolling bearing, fatigue rate, nondestructive evaluation, ultrasonic transducer, leaky Rayleigh wave

1. はじめに

本研究は、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。第1報¹⁾では、X線回折法を提案した。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、疲労度が推定可能であることを明らかにした。ただし、この手法の対象軸受は、普通焼入れ焼戻しされた軸受であり、半価幅の変化量が小さい表面硬化熱処理された軸受には適用困難であった。そこで、第2報²⁾では、転走面直下の内部疲労情報を得るために、表面SH波法を提案した。具体的には、表面SH波と呼ばれる種類の超音波を転走面直下に伝播させ、その伝播速度を測定することによって、疲労度が推定可能であることを明らかにした。この手法は平面トランスデューサを使用するため、対象軸受は線接触タイプの軸受である。

したがって、上記2つの手法では、表面硬化熱処理された点接触タイプの軸受が対象外となっていた。このため、浸炭窒化処理を行った深溝玉軸受を対象として、そ

の内輪軌道底を伝播させることのできる超音波を検討した。すなわち、超音波トランスデューサが軸受に接触することなく、転走面表層を伝播する超音波として漏洩表面波 (leaky Rayleigh wave : 以下、LR波と略す) に着目した。しかしながら、鞍型の深溝玉軸受内輪の軌道底に、LR波を伝播させることのできるトランスデューサは市販されておらず、新規開発の必要があった。

そこで、本研究では、上記トランスデューサの開発³⁾に取り組みとともに、軸受の転動疲労試験を行って、軸受疲労度とLR波音速の関係を構築⁴⁾した。本報では、その結果について報告する。

2. 深溝玉軸受内輪用トランスデューサの開発

深溝玉軸受内輪用トランスデューサには、以下の性能が必要である。

- ・超音波の内輪軌道底への集束
- ・LR波の軌道底周方向の伝播
- ・LR波と鏡面反射波の個別受信
- ・LR波の転動疲労層への進入

2.1 圧電高分子膜の採用による超音波の集束

圧電素子には、可撓性の大きい圧電高分子膜を採用した。可撓性の小さい素子では凹面に成形できないため、音波を集束させるには音響レンズが必要となり、レンズ内での多重反射などの問題が生じる。これに対して高分子膜は、可撓性が大きいので、容易に凹面に成形でき、レンズなしでの音波集束が可能である。また、高分子は他の圧電素子に比べて音響インピーダンスが小さいため、液体に音波を入射する場合、エネルギーの伝達効率が高い利点がある。また、軸受内輪軌道底の周方向にLR波を発生させる必要があるため、電極は球形形状の内の一軸方向のみの配置とした。

2.2 電極の分割によるLR波の分離

焦点が試料内部に位置するよう集束トランスデューサを設置すること(以下、この操作をデフォーカスと呼ぶ)により、LR波が励振・受信される。図1(a)に示すような従来の集束トランスデューサでは、①のLR波と②の鏡面反射波の両方を同時に励振・受信するため、それらが干渉し、LR波単独の受信ができない。

そこで、図1(b)のように電極を3つの領域に分割し、役割を分けた。このトランスデューサによりLR波、または鏡面反射波のみの受信が可能となる。また鏡面反射波は、トランスデューサと試料との距離の測定に使用する。分割した電極の配置を図2に示す。上記の構造により改善された受信波形を、従来と比較して図3に示す。

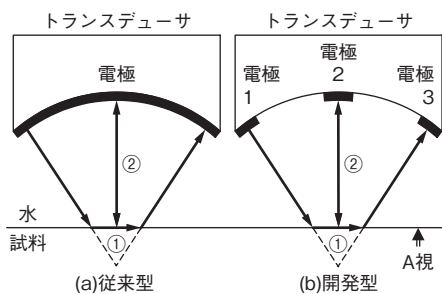


図1 従来型と開発型の電極の比較⁽³⁾
Conventional vs. developed electrodes

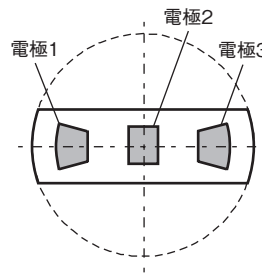


図2 電極の配置 (図1のA視)⁽³⁾
Layout of electrodes (view A in Fig.1)

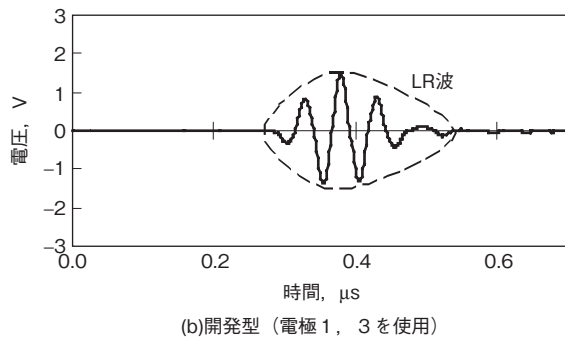
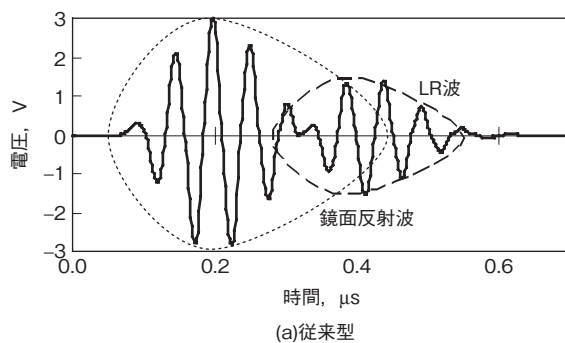


図3 LR波の分離⁽³⁾
Separated LR wave from reflected wave

2.3 バッキング材による周波数の変更

LR波は、疲労した軸受の最大せん断応力の発生深さまで進入する必要がある。また、低周波であるほど深く進入するという性質がある。低周波化の方法の一つとして、高分子膜を厚くすることが考えられるが、厚い成膜やその分極処理が困難である。また、バッキング材の密度と音速を増加させる方法がある。金属などを使用する場合は凹面加工が困難であるため、本研究では、樹脂と金属粉を混合し、凹面形状に成型して硬化させる方法を試みた。エポキシ樹脂、エポキシ樹脂に銅粉を混合したもの(質量比1:3)、タングステン粉を混合したもの(同1:7.5)の3種類を製作した。その結果中心周波数は13, 11, 7MHzとなった。なお、7MHzで進入深さ0.2mmである。

3. LR波音速の測定原理

LR波音速は図4に示すように、2つのデフォーカス量 d_a , d_b において超音波伝播時間を測定することにより求められる。 d_a , d_b , 屈折角 θ と水中縦波音速から水中伝播時間が求まり、その値と測定した伝播時間から AB と A'B' の伝播時間差が算出される。また d_a , d_b から AB と A'B' の距離差が算出されるため、LR波音速 C_s が求まる。ただし、距離 AB, A'B' は θ に依存し、 θ は式(1)にスネルの式⁵⁾を示すように、水中縦波音速 C_w と LR波音速 C_s によって決定される。

$$\sin\theta = \frac{C_w}{C_s} \quad (1)$$

C_s が未知であるから、AB と A'B' の距離差と伝播時間差は求まらず、単純には解が得られないことになる。そこで、以下に示す方法で LR波音速 C_s を算出する。

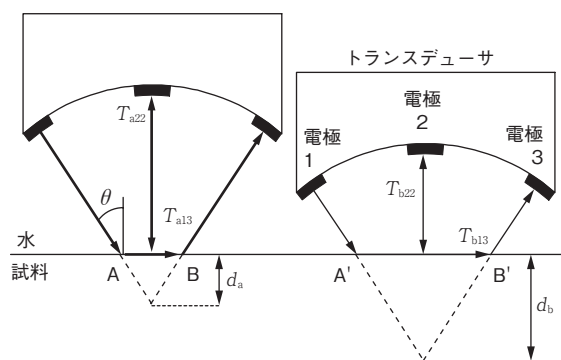


図4 LR波音速測定原理³⁾
Principle for measuring LR wave velocity

図4に示すように、2つのデフォーカス量 d_a , d_b において、電極 1, 3 で得られる伝播時間と、電極 2 で得られる伝播時間をそれぞれ T_{a13} , T_{a22} , T_{b13} , T_{b22} とする。トランスデューサの焦点距離を r とし、伝播時間はそれぞれ次式で表される。

$$T_{a13} = 2 \left[\frac{r - \frac{d_a}{\cos\theta}}{C_w} + \frac{d_a \tan\theta}{C_s} \right] \quad (2)$$

$$T_{a22} = 2 \times \frac{r - d_a}{C_w} \quad (3)$$

(デフォーカス量 d_b の場合についても同様)

式(1)~(3)より、伝播時間差 ($T_{a13} - T_{b13}$, $T_{a22} - T_{b22}$) に着目して C_s について連立方程式を解くと、LR波音速 C_s は次式で求められる。

$$C_s = \frac{C_w}{\sqrt{1 - \left(\frac{T_{a13} - T_{b13}}{T_{a22} - T_{b22}} \right)^2}} \quad (4)$$

ただし、水中音速 C_w は水温により決まる。本研究では水温 K が 18 ~ 28℃ において、1℃ 毎の水温と水中音速の値⁶⁾ から、2次関数で近似して得られた次式により求めた。

$$C_w = -0.0394K^2 + 4.6444K + 1405.212 \quad (5)$$

4. LR波音速の測定再現性

4.1 測定システム

測定の流れは以下のような順序である。

- ①パルサーレーザでトランスデューサに電圧を印加
 - ②超音波が発振→水中を伝播→軸受に到達→軸受表面を伝播→水中を伝播→トランスデューサに到達
 - ③波をパルサーレーザで受信
 - ④波形をオシロスコープでモニタリング
 - ⑤波の受信時間(ゼロクロス点：図5参照)をパソコンで読み取り、LR波音速を式(4)により算出
- また、トランスデューサと軸受のセッティング外観を図6に示す。

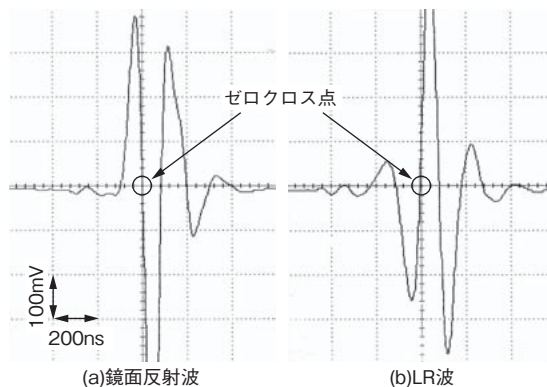


図5 受信波形例とゼロクロス点
Example of received waves and zero cross points

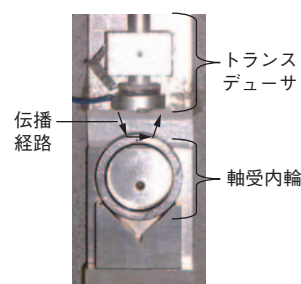


図6 セッティング外観³⁾
Appearance of setting

4.2 音速測定値のばらつき要因検討

式(4)に示したLR波音速の計算式から、誤差を生じさせると考えられる以下の3つの要因について、机上検討を行った。

- ・ 試料測定面の傾斜
- ・ 水温測定誤差
- ・ 受信波形のゼロクロス時間読取り誤差

また、音速測定再現性の目標を、ばらつき±0.7m/s以内と設定した。これは、応力推定を目的とした音速測定例⁷⁾を参考とした値である。

4.2.1 試料測定面の傾斜

トランスデューサの音軸に対する試料測定面の傾斜による音速測定値への影響を検討した結果、図7に示す関係が得られた。ばらつき±0.7m/s以内で測定するためには、傾斜角度±0.59°以内とする必要がある。水平方向の位置ずれに換算すると、深溝玉軸受6206内輪の場合、水平方向位置の誤差±0.19mm以内となる。これについては、図6に示したような専用に設計したセッティング治具を使用することで誤差を小さくすることができる。

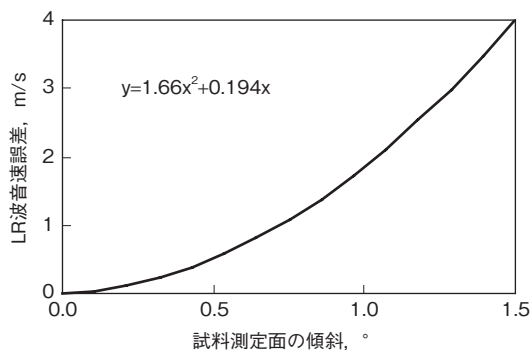


図7 試料測定面の傾斜とLR波音速測定誤差の関係
Relationship between inclination of measured surface and measurement errors of LR wave velocity

4.2.2 水温測定誤差

水温測定誤差による音速算出値への影響を検討した結果、図8に示す関係が得られた。±0.7m/s以内での音速測定のためには、±0.12℃以内での水温測定が必要である。このため、分解能0.1℃の水温計により測定することとした。

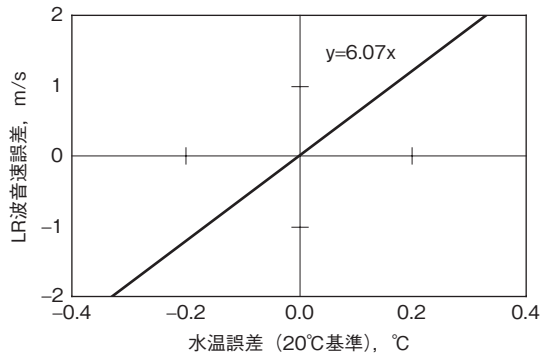


図8 水温測定誤差とLR波音速測定誤差の関係
Relationship between measurement errors of water temperature and those of LR wave velocity

4.2.3 時間読取り誤差

受信波形のゼロクロス点の読取り誤差による音速算出値への影響を検討した結果、図9に示す関係が得られた。±0.7m/sでの音速測定のためには、±0.14ns以内での時間読取りが必要である。しかし、使用したオシロスコープの時間分解能は5nsであり、不十分であった。そこで、ゼロクロス点近傍の振幅と時間データをパソコンにより直線補間し、ゼロクロス点を高分解能に算出することとした。

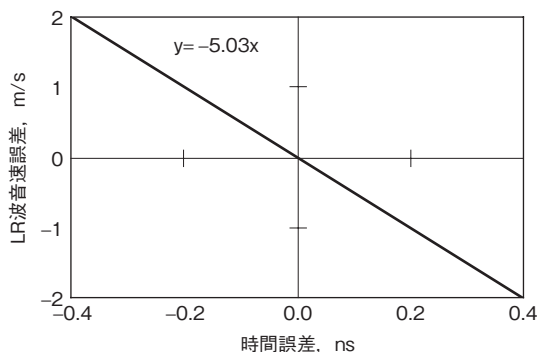


図9 ゼロクロス点読取り誤差とLR波音速測定誤差の関係
Relationship between reading errors of zero cross points and measurement errors of LR wave velocity

4.3 音速測定再現性

音速測定の再現性を確認するため、新品の内輪2個を測定した。種類は深溝玉軸受(基本呼び番号:6206)で、浸炭窒化処理されたものである。また、使用したトランスデューサの中心周波数は7MHzである。

内輪2個についてそれぞれの円周3等配位置の軌道底を、円周方向に5回測定した。それぞれの位置毎の平

均値を表1に示す。3箇所の位置の平均は軸受 No.1 で 3 026.1m/s, No.2 で 3 026.2m/s であり、それぞれの標準偏差は 0.37m/s, 0.36m/s であった。したがって、ばらつきの小さい測定が可能であるといえる。

表1 音速測定結果³⁾ (単位：m/s)
Results of LR wave velocity measurement

| 軸受 位置 | No.1 | No.2 |
|----------|---------|---------|
| ① | 3 026.7 | 3 026.7 |
| ② | 3 025.8 | 3 025.7 |
| ③ | 3 025.8 | 3 026.3 |
| 平均 | 3 026.1 | 3 026.2 |
| 標準偏差 | 0.37 | 0.36 |

5. 軸受疲労度とLR波音速

5.1 転動疲労試験の条件

転動疲労試験は図10に示すように、4つの軸受を使用するラジアル型転動疲労試験機を用いた。試験条件は表2に示すように、軸受荷重 11.7kN, 回転速度 4 000min⁻¹, タービン油 VG68 の循環潤滑, 油温は自然昇温とした。なお、この軸受荷重の場合に発生する最大せん断応力の転走表面からの深さは 0.1mm である。

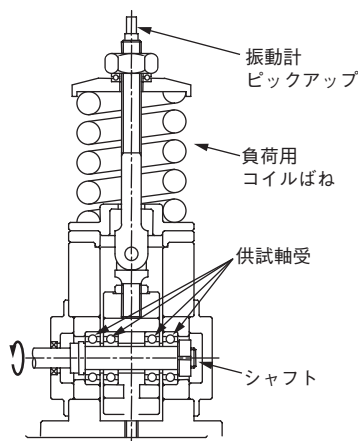


図10 ラジアル型転動疲労試験機の概略⁴⁾
Schematic diagram of test equipment

表2 試験条件⁴⁾
Test conditions

| | |
|------|---------------------------|
| 試験機 | ラジアル型転動疲労試験機 |
| 供試軸受 | 深溝玉軸受 6206 (内輪：浸炭窒化処理) |
| 軸受荷重 | 11.7kN (最大面圧 3.1GPa) |
| 回転速度 | 4 000min ⁻¹ |
| 潤滑 | タービン油 VG68 循環 (自然昇温) |

所定の回転時間が経過した後、試験機を停止して4つの軸受を分解し、それぞれ内輪軌道底のLR波音速を測定した。4.2項と同様に測定し、3箇所の位置の平均値を所定の回転時間における各軸受の代表値とした。音速測定後、軸受を再度組み立てて試験を継続した。このように、試験と音速測定を繰り返し、軸受にはく離が発生するまで行った。

5.2 回転時間に対するLR波音速の変化

4つの軸受の回転時間に対するLR波音速の変化を図11に示す。同図から、回転時間の経過に伴って、LR波音速は速くなる傾向がわかる。ここで、軸受の転動疲労に伴って、転走面直下に圧縮残留応力が蓄積することが知られている。また、圧縮応力の増加により、LR波音速が増加することも知られている⁸⁾。したがって、上記測定結果は妥当であると考えられる。

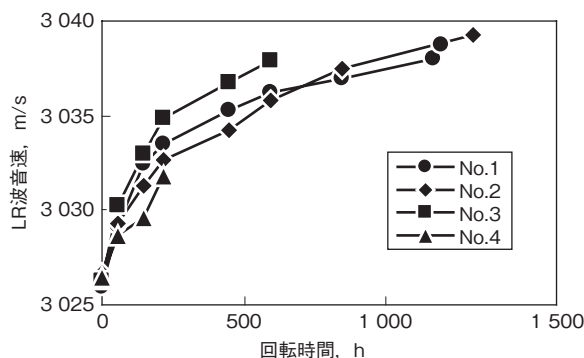


図11 回転時間とLR波音速の関係⁴⁾

Relationship between running time and LR wave velocity

5.3 疲労度解析データベースの構築

図11の関係を、横軸を疲労度として表すと図12のようになる。ここで、疲労度とは、はく離発生時間に対する回転時間の割合である。したがって、新品時の疲労度は0%であるが、他の疲労度と総合して傾向を検討するため、1%として扱った。

図12から、LR波音速の変化は、No.1～3の軸受において同様の傾向であることがわかる。No.4は寿命が短く、残留応力の蓄積が、他の軸受より少ないものと推測される。そのはく離部を観察した結果、図13に示すように、圧こんを起点とした表面起点はく離であった。

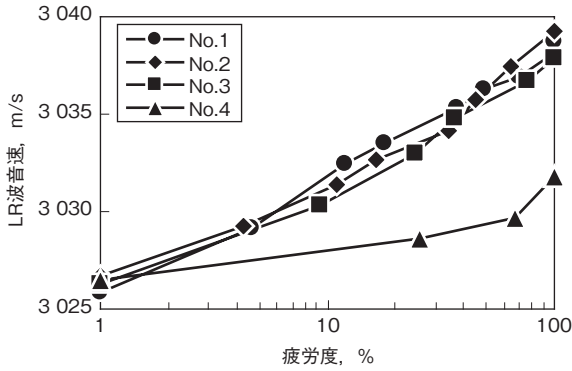


図12 疲労度とLR波音速の関係⁴⁾

Relationship between fatigue rate and LR wave velocity

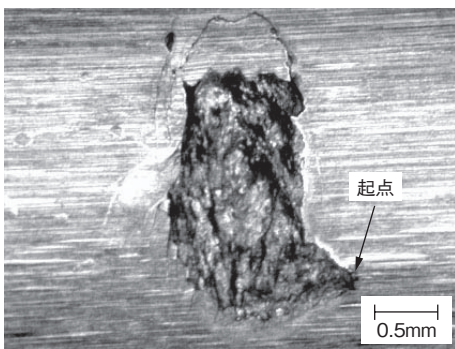


図13 表面起点はく離れた転走面⁴⁾

Surface initiated spalling on raceway

そこで、No.4の軸受は、内部組織疲労を伴ったはく離寿命とは判断せず、No.1～3のデータにより、疲労度—LR波音速の関係の信頼区間を求めることとした。

信頼区間の算出方法は、従属変数であるLR波音速から、独立変数である疲労度を推定するので、100(1-α) %の信頼区間は次式で与えられる⁹⁾。

$$Y_x - B_{\alpha, x} \leq y \leq Y_x + B_{\alpha, x} \quad (6)$$

ここで、 Y_x は回帰直線から求められる疲労度 x のときのLR波音速である。式(6)における $B_{\alpha, x}$ は次式で与えられる。

$$B_{\alpha, x} = t_{(n-2); \alpha} S_{Y|X} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{X})^2}{(n-1)S_x^2}} \quad (7)$$

ここで、 n は標本数、 \bar{X} は疲労度の標本平均、 S_x は疲労度の標本標準偏差、 $S_{Y|X}$ は回帰直線の標準偏差である。なお、 $t_{(n-2); \alpha}$ は t 分布表から数値を得る。95%信頼区間 ($\alpha = 0.05$) を求める場合の統計量を表3に示す。

図14は、LR波音速による疲労度解析データベースの回帰直線と、95%信頼区間を示したものである。ただし、疲労度の表示は10～100%の範囲とした。この図を基にして表面硬化処理された深溝玉軸受の疲労度解

析が可能となる。

表3 95%信頼区間算出時の統計量⁴⁾

Statistical value to calculate 95% confidence interval

| n | \bar{X} | S_x | $S_{Y X}$ | $t_{(n-2); 0.05}$ |
|-----|-----------|--------|-----------|-------------------|
| 20 | 1.4897 | 0.4414 | 0.5599 | 2.086 |

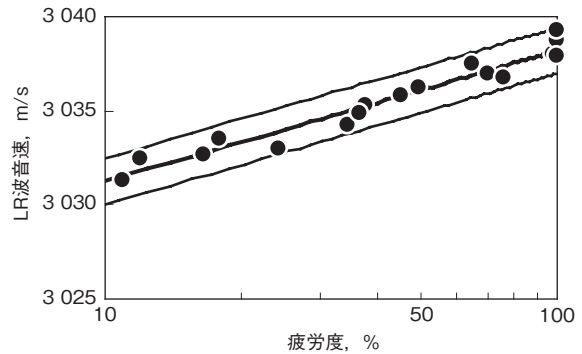


図14 疲労度解析データベースの95%信頼区間⁴⁾

95% confidence interval of data base for fatigue rate analysis

6. おわりに

深溝玉軸受内輪に適用可能な超音波トランスデューサとして、以下の特徴を持つものを開発した。

- ・超音波の内輪軌道底への集束
- ・LR波の軌道底周方向の伝播
- ・LR波と鏡面反射波の個別受信
- ・LR波の転動疲労層への進入

開発したトランスデューサを用いてLR波音速測定システムを構築し、深溝玉軸受内輪の軌道底を伝播するLR波の音速を、高精度に測定することが可能となった。そして、転動疲労によるLR波音速の変化を測定し、それらの関係を求めた。この関係を基にして、LR波音速の測定による軸受疲労度推定の可能性が示唆された。

本手法は原理的に、特殊な熱処理や軌道形状に制約されないため、今後あらゆる品種への適用が見込まれる。

参考文献

- 1) 小熊規泰：Koyo Engineering Journal, no. 161 (2002) 26.
- 2) 小熊規泰, 三上 剛：Koyo Engineering Journal, no. 162(2002)38.
- 3) 貴治雅博, 小熊規泰, 戸田裕己, 村田頼信：トライボロジー会議予稿集 東京(2005)87.
- 4) 小熊規泰, 貴治雅博：トライボロジー会議予稿集 東京(2005)89.
- 5) 実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦：超音波技術便覧, 日刊工業新聞社(1991)16.
- 6) 高木堅志郎：超音波便覧, 超音波便覧編集委員会(1999) 718.
- 7) 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)82.
- 8) 福岡秀和：音弾性, 日本非破壊検査協会(1994)104.
- 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



貴治雅博*
M. KIJI



小熊規泰**
N. OGUMA

* 研究開発センター 電子システム研究部

** 研究開発センター 電子システム研究部
工学博士