

超音波探傷による車軸軸受軌道面下の 非金属介在物検出手法

牧野 一成* 坂本 博* 養祖 次郎**
永友 貴史*** 岡村 吉晃***

A Method for Detecting Non-metallic Inclusions under the Raceway of Axle Bearing by Ultrasonic Testing

Kazunari MAKINO Hiroshi SAKAMOTO Jiro YOHSO
Takafumi NAGATOMO Yoshiaki OKAMURA

A non-metallic inclusion which exists under the raceway of an axle bearing might lead to the occurrence of a flaking on the raceway by the rolling contact fatigue. Therefore, intended for the non-metallic inclusions existing under the outer ring raceway, a method for detecting them by ultrasonic testing was studied. We attempted two types of techniques: one to use the surface wave, and the other called a precise inspection making use of an immersion testing. It was found out that the inclusions having a diameter larger than approximately 110 μm and located at the position deeper than 250 μm under the raceway could be detected by the immersion ultrasound with a nominal frequency of 25 MHz.

キーワード：超音波探傷，車軸軸受，軌道面，非金属介在物，はく離

1. はじめに

鉄道車両では、車軸軸受をはじめとして多くの転がり軸受が用いられているが、使用中に損傷が発生する場合がある。軸受の損傷形態として、はく離、焼付き、圧痕、かじり、摩耗、さび、電食等が挙げられる。これらのうち、はく離は図1に示すように、さらに内部起点型と表面起点型に分類される。内部起点型は、軸受の軌道面下に存在する非金属介在物（以下、介在物）等の欠陥を起点として発生したき裂が軌道面に達してはがれる損傷である。表面起点型は、転動体と軌道面の間に硬質の異物を噛み込んで生じた圧痕を起点として発生したき裂が進展してはがれる損傷である。前者は、軌道面上を転動体が転がることで材料に繰返し荷重が作用する「転がり疲れ」が原因で発生するため、これを軸受の寿命と称しており、介在物の種類、大きさ、位置によっては、はく離が早期に発生する原因となる。ここでは、軸受の寿命に影響を及ぼす介在物に着目する。

介在物の種類に関しては、特にアルミナ等の酸化物がはく離に影響すると言われており^{1), 2)}、製鋼時において鋼中の酸素濃度を低減させる等の改善が行われてきた。一方、軸受製造時には、鋼材ロットごとの成分調査

あるいはJIS G 0555³⁾等に基づく介在物の顕微鏡試験が行われている。しかし、これは少数のサンプルによる破壊試験であり、極値統計法によって軸受鋼材中に存在する介在物の大きさを推定する⁴⁾ことはできても、軌道面下の有害な介在物の有無を直接評価することはできない。

車軸軸受のように長寿命域まで使用する軸受では、介在物のサンプル調査ではなくより厳しい全数検査が求められている。有害な介在物を非破壊で検出することが可能となれば、それを起点とするはく離が防止され、軸受の寿命を延伸することができる。軸受の内輪および外輪の非破壊検査に関しては、欧州規格 (EN 12080⁵⁾) に超音波探傷の方法が規定されているが、軌道面上の直径0.5mm、深さ0.5mmの人工欠陥を感度調整の基準としている。この手法で検出できるのは、人工欠陥と同程度の大きさの欠陥であり、さらに小さい介在物を起点として発生するはく離を完全に防止できるとは考えにくい。

そこで、車軸軸受のうち、背面組合せ型複列円すいこ

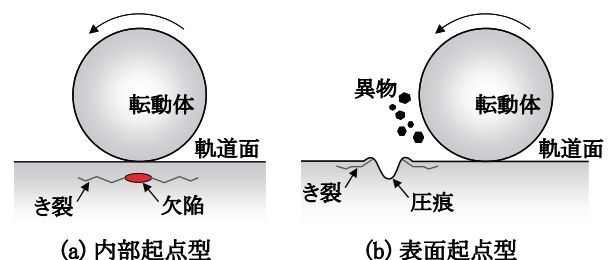


図1 はく離の発生形態

* 車両構造技術研究部（車両強度）
** 元 車両構造技術研究部
*** 材料技術研究部（潤滑材料）

特集：材料技術

ろ軸受（以下、円すいころ軸受）の外輪軌道面を対象として、超音波探傷による介在物の検出手法について研究した。本報告では、表面波探傷と、より高精度な精密探傷の2種類の方法について検討した結果を示す。

2. 超音波探傷法の検討

2.1 表面波探傷

外輪の表面波探傷の模式図を図2に示す。この方法は、軌道面の表面または表面下の比較的大きな介在物を簡便に検出することを目的としている。油等の接触媒質を介して軌道面に直接接触させた探触子（振動子とくさびで構成）から表面波を送信し、介在物等の欠陥からの反射波を受信して検出する。図3に示すように、式(1)のスネルの法則から計算した臨界角 θ_{Tc} 以上の角度を有する縦波超音波を入射した時、軌道面に表面波が発生する⁶⁾。

$$\theta_{Tc} = \sin^{-1} \frac{V_{Lw}}{V_{Rb}} \quad (1)$$

ここで、 V_{Lw} は探触子のくさび内の縦波音速、 V_{Rb} は軸受鋼の表面波音速である。例えば、くさびがアクリル製の場合、アクリルの縦波音速 $V_{Lw} = 2730\text{m/s}$ 、軸受鋼の表面波音速 $V_{Rb} = 2980\text{m/s}$ から、 $\theta_{Tc} = 66.4^\circ$ を得る。

しかし、円すいころ軸受の場合、図4に示すように、入射点から円周上のある地点までの経路を考えると、大径側と小径側とでは曲率の違いにより経路長が異なるため、表面波は大径側に逸れて伝搬し、欠陥からの反射波が得られにくくなる。そこで図5に示すように、振動子を小径側に傾斜させることとした。式(2)に示す3次元のスネルの法則によると、入射点における軌道面の法線単位ベクトル n とくさび内の入射波単位ベクトル a_i から、軌道面を伝搬する表面波（屈折波）単位ベクトル a_R

が求められる。そこで、 a_R が入射点から100mm前方の軌道面幅中心に向かうように、 a_i の方向、すなわち軌道面への入射角と振動子の小径側への傾斜角を逆算した。

$$\frac{a_i \times n}{V_{Lw}} = \frac{a_R \times n}{V_{Rb}} \quad (2)$$

ここで、 \times はベクトル積（外積）を表す。外輪のテーパ角によって計算結果は異なるが、例えばテーパ角が 10° の場合、入射角を 66° で固定すれば、式(2)によって計算される最適な傾斜角は約 4° であった。表面波探傷用に製作した探触子を図6に、主な仕様を表1に示す。

探傷感度の調整には、軌道面の表面に放電加工した軸方向の長さが5mm、平均深さが14, 42, 57, 83 μm の4種類の人工きずを用いた。表面波は伝搬距離に応じて減衰するため、探触子の前縁から人工きずまでの軌道面に沿った距離を50mmで一定として各きずを探傷した。この時、欠陥エコーの高さが超音波探傷器の画面上80%となる時のゲインを測定し、きず深さと探傷器ゲインの較正曲線を作成した。この較正曲線から求めた、長さ5mm、

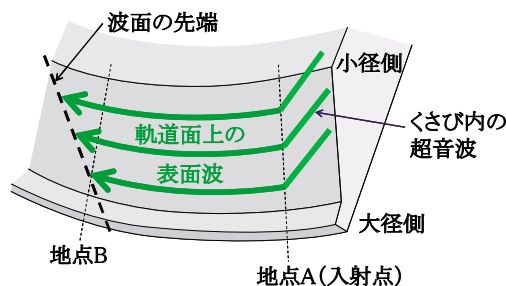


図4 円すいころ軸受における表面波の伝搬

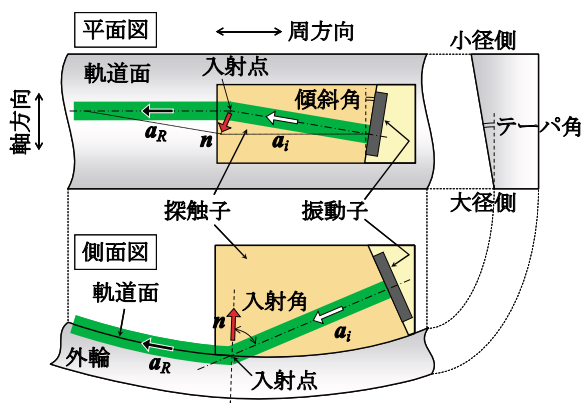


図5 表面波探触子の傾斜角

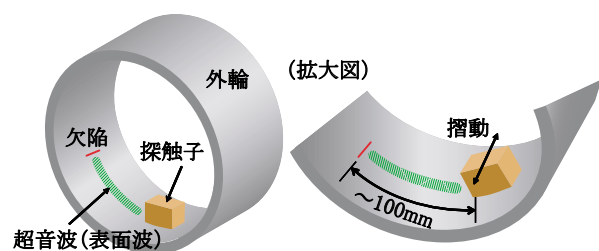


図2 外輪の表面波探傷の模式図

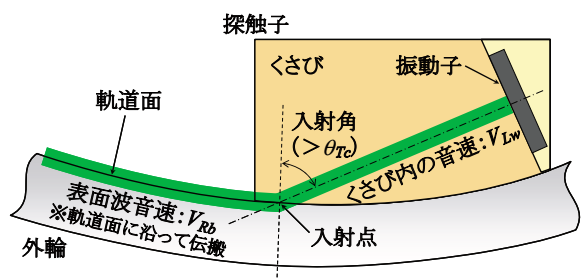


図3 軌道面に発生する表面波

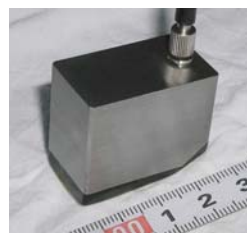


図6 表面波探触子

表1 表面波探触子の仕様

大きさ	34 × 29 × 20mm
探傷面半径	91mm
周波数	3.5MHz
振動子径	0.5 インチ
振動子材料	コンポジット材
入射角	約 66°
傾斜角	約 4°

深さ50 μm の欠陥エコーが画面上80%に相当するゲインを基準感度とした。

2.2 精密探傷

外輪の精密探傷⁷⁾の模式図を図7に示す。これは、軌道面の深さ方向に伝搬する高周波の縦波超音波を用いた、水浸法による垂直探傷である。外輪を水没させて探傷面(軌道面)と探触子の間を水で満たし、両者の間隔をほぼ一定に保ちつつ外輪をターンテーブルで回転させながら探触子を上下方向(軸方向)に動かすことにより、軌道面全体を一定のピッチで探傷する。円すいころ軸受の場合は、軌道面に対して超音波を常に垂直に入射させるために、外輪のテーパ角の分だけ探触子を傾斜させて探傷する。

精密探傷では、軌道面での表面反射波を探傷開始位置の基準とする。すなわち、表面反射波を検出するための表面ゲートと、欠陥エコーを検出するための探傷ゲートの2種類を用いる。各ゲートの設定の考え方を図8に示す。表面反射波は一定の幅を有するため、表面反射波の直後に探傷ゲートを設けると、表面反射波自身を欠陥エコーとして誤検出する。したがって、一定の遅延時間を設けて探傷ゲートを設定する必要がある。表面反射波の直後の探傷できない深さ範囲を表面不感帯と称し、遅延時間 τ と表面不感帯 L は式(3)の関係にある。

$$L = \frac{\tau \cdot V_{Lb}}{2} \quad (3)$$

ここで、 V_{Lb} は軸受鋼の縦波音速である。以下では断りのない限り、遅延時間 τ を150nsに設定した。この時、

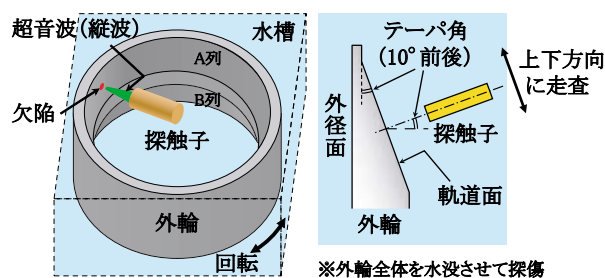


図7 外輪の精密探傷の模式図

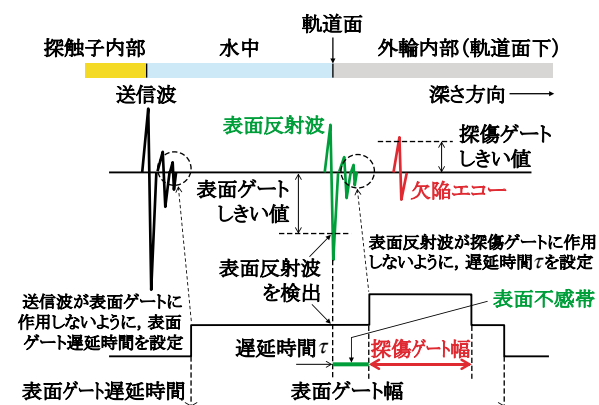


図8 ゲート設定の考え方

$V_{Lb} = 5900\text{m/s}$ として式(3)から計算すると、表面不感帯 L は約450 μm となる。ただし、表面不感帯より浅い位置に存在する欠陥であっても、欠陥と表面の間での多重反射によるエコーを探傷ゲートで検出できる場合がある。

精密探傷の基礎検討に用いた装置は、図9に示す超音波顕微鏡 HSAM 210 (日立建機製)である。表2に示す3種類の公称周波数(以下、周波数)の集束探触子を用い、探傷面からの深さが異なる直径0.5mmの9個の平底穴を有する試験片を探傷した。一般的に、周波数が高いほど欠陥の検出精度は高いが、超音波の減衰や集束範囲の影響を受けやすいため、例えば、探触子の位置決めに精度を要する等、装置の取扱い上の制約が多くなる。そこで、探触子を上下させて探傷面との間隔を変化させた時の、軸受鋼中での計算上の焦点深さと検出可能な平底穴の深さとの関係を求めた。図10の各グラフ(周波数50MHzは省略)で赤○と青○に挟まれた黄色の部分が、欠陥が検出できる領域である。

転動体と軌道面とのヘルツ接触による最大せん断応力が軌道面のはく離に影響を及ぼすが、その発生位置は深さ数百 μm までの範囲である。図10によると、周波数25MHzの探触子は浅い欠陥に対する検出領域が広く、検出精度と検出領域を両立できると考えられる。そこで、以下では断りのない限り、周波数25MHzの探触子を用いた。精密探傷での探傷条件を表3に示す。

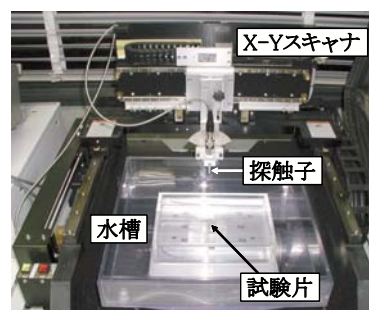


図9 精密探傷装置(超音波顕微鏡)

表2 精密探傷用探触子

No.	周波数 (MHz)	振動子径 (mm)	水中焦点距離 (mm)	ビーム径 (μm)
1	15	6.4	15	約240
2	25	6.4	15	約160
3	50	6.4	12	約100

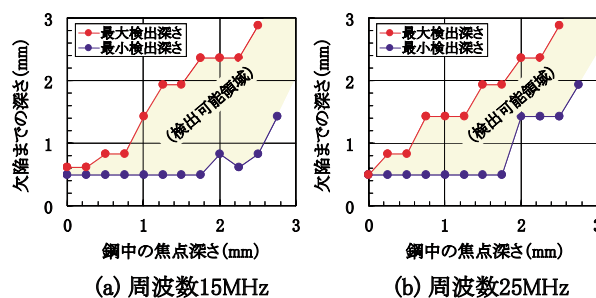


図10 焦点深さと検出可能な欠陥深さとの関係

表3 精密探傷での探傷条件

周波数	25MHz
フィルタ	HPF：5MHz, LPF：70MHz
ダンピング	50 Ω
パルス繰返し数	10kHz
鋼中の焦点深さ	約0.5mm
基準感度	深さ2mm, 直径1mmの平底穴のエコー高さが100%の感度
探傷感度	基準感度+12dB
探傷ゲート幅	軌道面から深さ約0.45～3mm
探傷ピッチ	XY方向とも80μm, 拡大探傷時は4μm

3. 超音波探傷試験

3.1 供試体および試験手順

供試体は、鉄道車両で一般的に用いられている車軸軸受10個の外輪(No.1～10)である。軸受の種類によって多少異なるが、テーパ角は10°前後、軌道面幅中心付近での内径は190mm前後である。超音波探傷試験の手順を以下に示す。

- (1) 表面波探傷によって、10個の外輪の軌道面全周を探傷する。
- (2) 介在物と推定されるエコーの検出箇所が多い外輪を数個選定し、外輪全体の精密探傷を行う。
- (3) 表面波探傷および精密探傷の結果、顕著なエコーが検出された位置を特定し、両者を比較する。

3.2 試験結果

3.2.1 表面波探傷

2.1節で述べたゲインを基準として、12dBを加えた値を探傷感度とした。12dBは約4倍の感度に相当するため、単純に考えれば、長さ5mm、深さ50μmのきずの4分の1の投影面積を有する欠陥を検出できる。例として、外輪No.6の表面波探傷でのエコー検出位置を図11に示す。同図は、外輪を周方向に切り開いて、内径側(軌道面側)から見た平面図であるが、縦横比は実際と異なる。青□内に表示した「・」が検出位置であり、各位置を6-A-01(外輪No.-列-通し番号)等と記することにする。

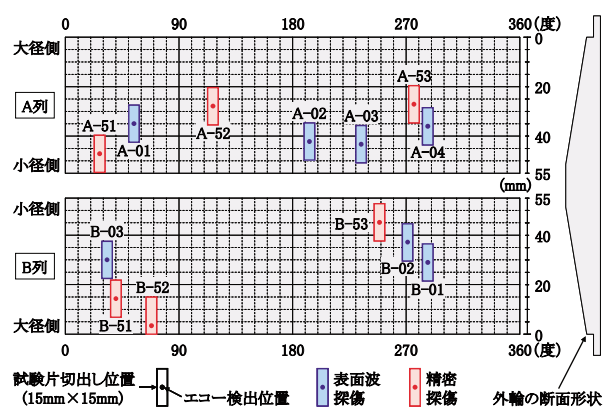


図11 外輪No.6の各探傷でのエコー検出位置

□の大きさは、4章で述べる切断後の試験片の大きさを表す。外輪No.6では、A列で4箇所、B列で3箇所の計7箇所で、高さ15%以上のエコーを検出した。

3.2.2 精密探傷

4章で述べる介在物の評価に先立って、外輪全体の精密探傷を行い、介在物のおおよその位置を調査した。探傷には、図7の模式図に示したものと同様の探傷装置を用い、探触子の周波数は50MHzとした。

10個の外輪のうち、No.4, 6, 8, 10の4個を精密探傷に供した。例として、外輪No.6の精密探傷でエコーが高かった位置を、図11に赤□内の「・」で示した。精密探傷で検出した位置には、50番台の通し番号を付与した。精密探傷は表面波探傷と比較して周波数が高いため、表面波探傷で検出した欠陥は精密探傷でも検出できると考えられたが、表面波探傷および精密探傷での検出位置が一致する事例は少なかった。表面波探傷では、軌道面下に存在する介在物ではなく、軌道面の圧痕、さび等の別の要因によるエコーが検出された可能性がある。

4. 非金属介在物の評価

4.1 研磨調査

4.1.1 調査方法

表面波探傷または精密探傷で、介在物によると推定される顕著なエコーが検出された複数の位置において、その位置を中心として大きさ約15mm角、厚さ約8mmの試験片を切り出し、研磨調査に供した。例えば図11に示した青□および赤□が、外輪No.6から切り出した試験片の位置である。

試験片の研磨調査の手順を、図12および以下に示す。介在物の位置の特定のために、図9に示した精密探傷装置を用い、表3に示した条件で再度探傷した。

- (1) 試験片表面の2箇所に、位置基準用のビッカース圧痕(荷重：196N)を加工する。
- (2) 試験片を精密探傷し、基準用圧痕の位置を基に、介在物の存在が推定される位置を特定する。
- (3) 特定された位置の上下(軸方向)各2mmの2箇所に、研磨調査用のビッカース圧痕(荷重：490N, 対角長

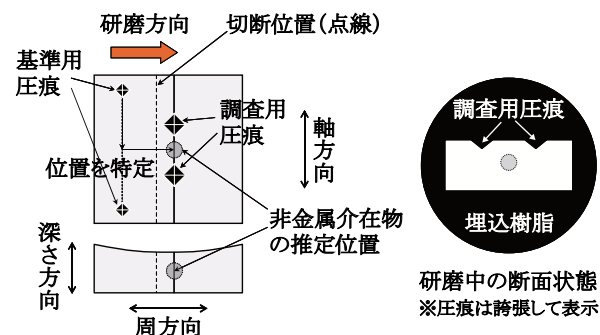


図12 研磨調査の方法

さ：約350 μm)を加工する。

- (4) 調査用圧痕の少し手前で、周方向に直交する面で試験片を切断し、切断面が研磨面となるように試験片を樹脂に埋め込む。
- (5) 研磨面に徐々に現れる調査用圧痕の大きさを確認しながら、周方向への研磨と金属顕微鏡による断面観察を繰り返す。

断面観察の周方向ピッチは10 μm を目標とし、検鏡面は1断面ごとに1000番までのSiC研磨紙で研磨した後、6 μm のダイヤモンドペーストで仕上げ研磨した。

4.1.2 調査結果

介在物が現れた時の、低倍率での典型的な断面を図13に示す。2個の調査用圧痕の中心線上で、かつ欠陥エコーの立ち上がり位置から推定される欠陥の上端までの深さ付近に介在物が観察された場合、超音波探傷の結果と介在物の位置との対応が取れたことになる。

対応が取れた介在物について、研磨断面を重ねて合成した写真の例を、精密探傷でのエコーが最大の位置でのAスコープ(生波形)および拡大探傷時のCスコープ(平面図)と併せて図14に示す。介在物の形状は、6-B-53、8-A-53のような厚さ10 μm 程度の介在物が数百 μm の長

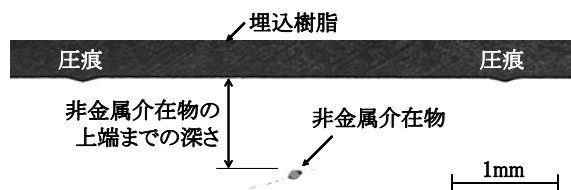


図13 非金属介在物が現れた断面の例

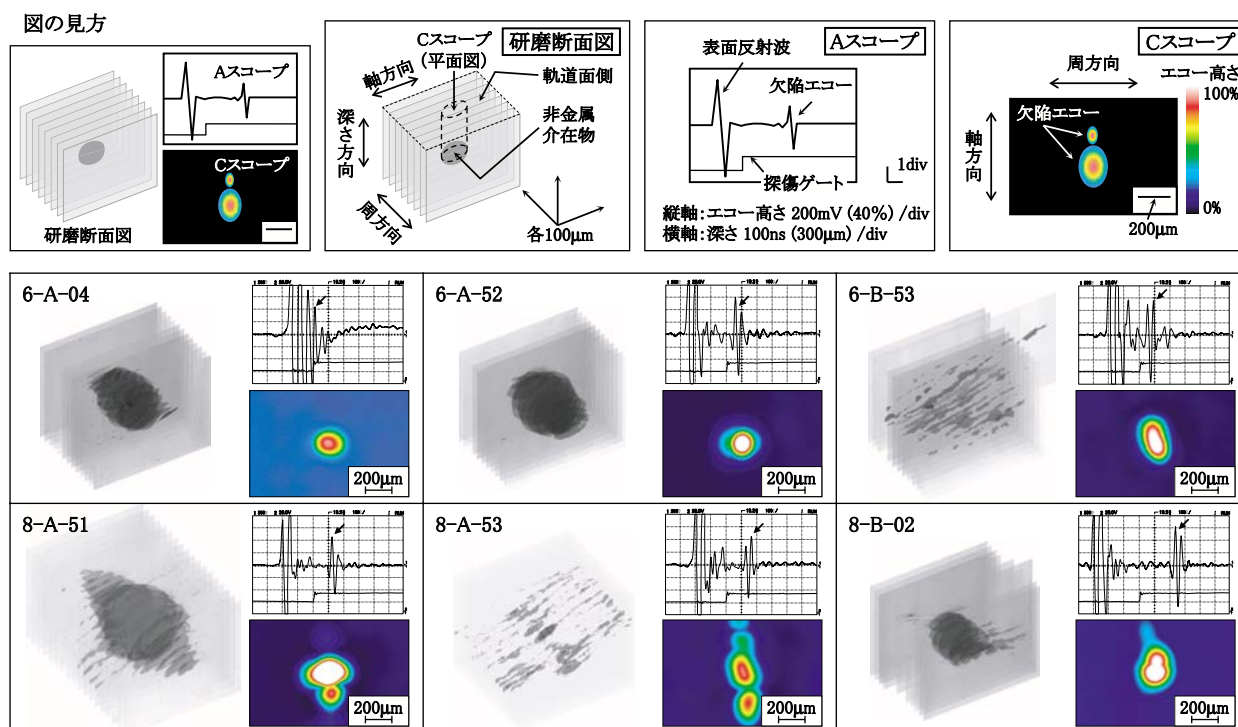


図14 非金属介在物の研磨断面および超音波探傷波形

さで群をなしているものと、6-A-52、8-A-51のような直径数十 μm の単独のものに大別される。

4.2 欠陥エコーと介在物との関係

介在物の存在が確認された試験片について、精密探傷時のエコー高さと、研磨写真から測定した介在物の上端までの深さ、および大きさとの関係を図15に示す。介在物の大きさについては、介在物の軌道面への投影面を楕円形で近似した面積で評価した。同図のプロットのうち、投影面積が極端に小さい4点を除外して考えると、軌道面から250 μm 以上の深さにその上端が存在し、軌道面への投影面積が10000 μm^2 以上(直径約110 μm 以上)の介在物が、エコー高さ80%以上で検出できることが分かった。

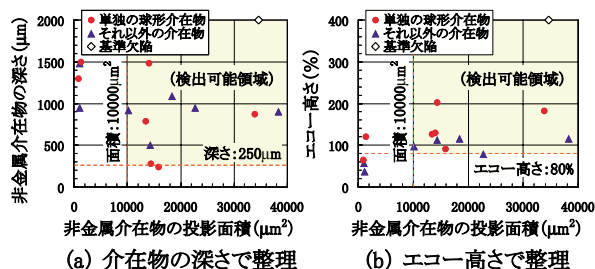


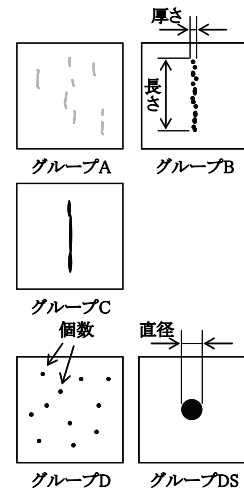
図15 介在物の深さ、投影面積とエコー高さの関係

5. 考察

JIS G 0555³⁾における介在物の分類を表4に示す。同規格では、介在物の評価指標として0.5から3までの指数番号が定義されており、番号が大きいほど介在物が多い

表4 非金属介在物の分類 (JIS G 0555³⁾ より要約)

グループ名	系 列	特 徴
A	硫化物系	・端が丸く、延伸性が高い ・アスペクト比(長さ/厚さ)の分布が広範囲 ・灰色の個別の粒子
B	アルミナ系	・変形せずに角がある ・アスペクト比が低い ・黒または青みがかった、整列した粒子群
C	シリケート系	・端が鋭く、延伸性が高い ・アスペクト比の分布が広範囲 ・黒または濃い灰色の、個別の粒子
D	粒状酸化物系	・角張っている、または円形 ・アスペクト比が低い ・黒または青みがかった、ランダムに分布する粒子
DS	個別粒状介在物系	・円形または円形に近い ・直径13 μm 以上の、単独の粒子



ことを示す。指数番号は、断面0.50mm²の視野における、グループA～Cでは全ての介在物長さの合計、グループDでは介在物の個数、グループDSでは介在物の直径から求められる。

超音波探傷および研磨調査の結果、厚さ10 μm 程度で長さ数百 μm の介在物の群、あるいは直径数十 μm の単独の球形介在物が検出された。前者はグループBまたはグループCの指数番号1.5、後者はグループDSの指数番号3の介在物に相当する。エコー高さのノイズに対する比(SN比)には余裕があるため、実際には指数番号が若干小さい介在物でも検出可能と推定される。図15では除外して考えた4個の欠陥を含めると、最小で直径32 μm (投影面積882 μm^2)の球形介在物が検出されたが、これはグループDSの指数番号1.5に相当する。

本研究の超音波探傷法では、グループAおよびグループDの介在物は検出が困難であると推定される。グループAの硫化物系介在物は、高延伸性で厚さが薄く、母材と密着していることが多いため、母材と介在物との境界面において超音波が透過すると考えられる。グループDは、一定範囲内に粒状酸化物が分散していたとしても、各々の直径が13 μm 未満のために超音波の反射が弱く、検出が困難であると考えられる。

6. まとめ

本研究では、鉄道車両用車軸軸受の外輪軌道面を対象として、超音波探傷による介在物の検出手法について検討した。得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 軌道面下の比較的大きな介在物を簡便に検出することを目的とした表面波探傷について検討し、円すいころ軸受用に傾斜角を最適化した探触子を製作した。
- (2) 軸受製造時の全数検査等を目的とした精密探傷について検討した結果、周波数25MHzの水浸法を適用すれば、欠陥の検出精度と検出領域を両立できると考えられる。

(3) 精密探傷および研磨調査の結果、軌道面から250 μm 以上の深さにその上端が存在し、軌道面への投影面積が10000 μm^2 以上(直径約110 μm 以上)の介在物が検出できることが分かった。

(4) 精密探傷を適用すれば、JIS G 0555で分類されるグループBまたはグループCの指数番号1.5以上、およびグループDSの指数番号3以上の介在物が検出可能である。

本研究で検討した超音波探傷法を適用することにより、軌道面下に存在する介在物を検出することができ、軌道面のはく離防止の有効な手段になると考えられる。現状では軌道面下の深さ250 μm 未満の領域における探傷精度には改善の余地があるが、例えば軸受製造時に、軌道面に250 μm 程度の研削代を残した状態で超音波探傷を行った後に最終仕上げ加工をすれば、軌道面下の有害な介在物を確実に除去することができる。

文 献

- 1) 是永敦：軸受鋼の転がり疲れ寿命に及ぼす非金属介在物の影響の現象的記述，トライボロジスト，Vol.46, No.9, pp.680-685, 2001
- 2) 似内昭夫：転がり軸受の寿命に及ぼす非金属介在物の種類の影響，トライボロジスト，Vol.46, No.9, pp.686-691, 2001
- 3) JIS G 0555:2003，鋼の非金属介在物の顕微鏡試験方法
- 4) 村上敬宜：金属疲労 微小欠陥と介在物の影響，養賢堂，pp.131-155, 1993
- 5) BS EN 12080:2007, Railway applications - Axleboxes - Rolling bearings
- 6) 日本学術振興会：超音波探傷法(改訂新版)，日刊工業新聞社，pp.199-202, 1974
- 7) 村井純一，井田隆志，白岩俊男：超音波による鋼中のアルミナ非金属介在物と空孔の弁別検出，非破壊検査，Vol.47, No.7, pp.498-503, 1998