**鉄道車軸の超音波探傷検査に関する実験的評価
(き裂に作用する変動応力および検査時の車軸曲げ応力の影響)**山本 勝太^{*1}, 牧野 一成^{*1}, 石塚 弘道^{*1}**Experimental evaluation on railway axle ultrasonic testing
(Effect of variable stress acting on the crack and axle bending stress during ultrasonic test)**Masataka YAMAMOTO^{*1}, Kazunari MAKINO^{*1} and Hiromichi ISHIDUKA^{*1}^{*1} Railway Technical Research Institute
2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8540, Japan

Received: 31 July 2017; Revised: 16 October 2017; Accepted: 12 November 2017

Abstract

The integrity of railway axles is a critical aspect for ensuring the safety of a railway system. Therefore, non-destructive inspections such as ultrasonic testing and magnetic particle testing are conducted periodically. Some railway operators conduct ultrasonic tests directly on axles mounted on the train. However, the axles have to be disassembled for conducting magnetic particle testing. In the present study, the effects of variable amplitude stress acting on cracks and axle bending stress during ultrasonic test on ultrasonic response are discussed. An ultrasonic test was conducted using a full-scale axle specimen that had fatigue cracks and no artificial notches. The ultrasonic response was evaluated for the cracks whose lengths were 10 mm, 16 mm, and 19 mm. Under an unloaded condition, the ultrasonic response for the 16-mm-long and 19-mm-long cracks was approximately 4 or 7 times higher than that for the 10-mm-long crack, although the cross-sectional area of each of these cracks was approximately 2.5 or 3.5 times larger than that of the 10-mm-long crack. The obtained results indicate that the contribution of the reflection area to the ultrasonic response under a variable amplitude stress differs from that under a constant stress condition. Moreover, the influence of axle bending stress ranging between -50 MPa to $+47$ MPa on the ultrasonic response was investigated. A higher bending stress led to a higher ultrasonic response. However, the decreasing rate of ultrasonic response caused under compressive stress was lower than the increasing rate under tensile stress. For example, the ultrasonic response was approximately 2 dB lower than that under the unloaded condition at a compressive stress of -30 MPa; however, the ultrasonic response showed an increment of approximately 4 dB at a tensile stress of 30 MPa. A similar trend was observed in the crack of each length. The results denote that the crack position influences the precision of crack detection in ultrasonic inspection. However, considering that the maximum static bending stress of axles used in Japan is 30 MPa, its effect on in-service axle inspection is negligible.

Keywords : Railway axle, Ultrasonic testing, Variable amplitude stress, Bending stress, Ultrasonic response

1. 緒 言

鉄道車軸は、軸箱や台車枠を介して車体重量を支持するとともに、電動機の駆動力やブレーキの制動力を車輪・レールへ伝える役割を担う鉄道車両の走行や安全性にとってきわめて重要な部品である(図1)。そのため、車軸に対しては、一定期間ごとに超音波探傷検査や磁粉探傷検査などの非破壊検査が行われている。磁粉探傷検査では、車両に組み込まれた状態で使用される車軸を単体の状態に分解する必要があるのに対して、超音波探傷検査では、車軸が車両に組み込まれた「在姿状態」で検査できるため、効率的にメンテナンスを行うことができる。近年では、在姿状態での車軸の超音波探傷検査を行う検査装置の開発(養祖, 坂本, 1991)や、より短時間で検査を行うためにアレイ探傷の導入(石原, 2007)などが進んでいる。

車軸の超音波探傷検査は、基準となる人工きずを加工した車軸（以降、モデル軸と表記）を用いて検査装置を較正したうえで、実施される。モデル軸の人工きずは放電加工や機械加工によって作製されるため、放電加工電極あるいは鋸歯の厚さ以上のある開口幅を有する。一方で、疲労き裂の開口幅はこれと比較して小さく、き裂面同士が接触することのできる状態にある。米山らは、板状試験片を用い、放電加工ノッチと疲労き裂の深さや開口幅、面粗さが超音波エコー高さに及ぼす影響を評価し、疲労き裂の開口幅によってエコー高さが大きく変化すること、開口幅がある大きさを超えると放電加工ノッチと同等のエコー高さが得られること、疲労き裂の面粗さはエコー高さにほとんど影響しないことなどを報告している（米山，三原田，2003）。また，Saka らは，応力比や負荷した最大応力拡大係数が異なる種々の疲労き裂に対して，疲労き裂の深さとき裂開口応力拡大係数を評価し，これらを推定する手法を提案している（Saka and Salam Akanda, 2004）。このように，人工きずと疲労き裂では開口幅に大きな違いがあり，その影響はき裂進展時の応力状態によっても変化する。しかしながら，応力比 -1 の回転曲げ状態で使用される鉄道車軸に対して，疲労試験で発生させた疲労き裂を対象に，超音波探傷精度を評価した研究は少ない（Carboni and Cantini, 2016）（Makino et al., 2012）。

Carboni らは，試験車軸に一定応力振幅下で導入した疲労き裂に対して超音波探傷試験を実施し，超音波エコー高さが超音波ビームの反射に寄与する疲労き裂の有効面積（以降，有効面積と表記，詳細は図 12 参照）に依存することを報告している（Carboni and Cantini, 2016）。ところで，実際の車軸に発生するき裂は変動応力振幅下で進展するため，破面にはビーチマークが形成される。また，一定応力振幅のき裂進展試験は下限応力拡大係数範囲（以降， ΔK_{th} と表記）を超える応力レベルで実施されるのに対して，実際の車軸の使用条件では ΔK_{th} 以下の応力レベルも含まれる変動応力が作用するため，き裂進展に時間を要し，かつき裂面の繰り返し接触回数も多くなる。そのため，変動応力振幅下のき裂では，超音波の反射に寄与するき裂の有効面積が，一定応力振幅下の場合と異なると考えられる。

在姿状態の車軸は，図 2 に示すように車両重量によって 4 点曲げ状態となり，図中上側は引張応力，下側は圧縮応力となる。そのため，在姿状態の超音波探傷検査時において，き裂が図 2 の上側に存在すればき裂面が開口する状態に，下側に存在すればき裂面が閉口する状態となる。一方で，検査時におけるき裂の円周方向位置は，車両の停止位置によって変化する。このように車軸に曲げ応力が作用する状態においては，検査時のき裂位置によってき裂面の接触状態が変化し，超音波探傷精度に影響を与える可能性が考えられる。著者らは，車軸と車輪の圧入部に発生したフレット疲労き裂を対象に超音波探傷試験を実施し，フレット摩耗の進行や車軸の曲げ変形に伴う車輪との接触状態の変化によって，接触面圧が変化し，超音波探傷精度に影響を与えることを実験的・解析的に示した（Makino and Biwa, 2013）。しかしながら，車軸に作用する曲げ応力の変化によるき裂面の接触状態の変化が，超音波探傷精度に与える影響に関しては，これまで定量的には評価されていない。

以上のような背景から，本研究では，車輪圧入の影響を受けない車軸中央平行部を対象として，実物大の試験車軸に導入した疲労き裂の超音波探傷試験を実施し，超音波探傷精度に対するき裂進展時の変動応力の影響および検査時に車軸に作用する曲げ応力の影響を評価した。

Fig. 1 Illustration of railway vehicle.

Fig. 2 Bending stress of railway axle caused by vehicle load.

2. 疲労き裂を有する実物大試験車軸の製作

2・1 試験装置および供試体

本研究に用いた疲労試験装置を図3に示す。本装置は、実物の車軸と同等の直径を有する供試体（以降、実物大車軸と表記）に対して、実物と同様の4点曲げ状態で回転曲げ疲労試験を実施できる。実物大車軸に負荷される回転曲げ応力は電気油圧式アクチュエータの荷重によって制御される。疲労試験に供した実物大車軸の形状を図4に示す。材質は、鉄道車両用車軸鋼 SFA640 (C:0.45, Si:0.20, Mn:0.80, P:0.02, S:0.01 wt(%)) である。実物大車軸の中央には、深さ1 mm × 長さ1 mm の人工きずを、放電加工によって設けた。前述の通り、実物大車軸は支持軸受を介して4点曲げ状態となるため、人工きずを導入した直径153 mmの供試体中央部の曲げモーメント（公称曲げ応力）は一様となる。

Fig. 3 Test rig employed for crack propagation testing of full-scale axles: (a) Schematic and (b) photograph.

Fig. 4 (a) Illustration of full-scale axle and (b) shape of electrical-discharge-machined starter artificial notch.

2・2 疲労予き裂の導入

実物大車軸への疲労予き裂の導入は、前報 (Yamamoto et al., 2016) と同様の手順とした。まず、中央部 (φ153 mm 部) の公称曲げ応力を σ_0 とした一定応力振幅下で回転曲げ疲労試験を実施し、人工きずより疲労き裂を発生させた。次に応力を σ_1 に減じ、疲労き裂をさらに進展させた。このときの応力減少率 $(\sigma_0 - \sigma_1) / \sigma_0$ は、ASTME 647 の疲労予き裂導入条件を参考に、15%以下とした (American Society for Testing and Materials, 2013)。また、応力 σ_1 におけるき裂長さの進展量 Δl_1 についても ASTM E 647 に基づいて決定した。以降、応力減少率 $(\sigma_{i-1} - \sigma_i) / \sigma_{i-1}$ およびき裂長さ進展量 Δl_i ($i = 2, 3, \dots$) の条件を満足するように応力 σ_i を漸減させながら、同様の手順を繰り返す。最終的に、試験軸中央部の公称曲げ応力を 125 MPa まで減じて、き裂長さ約 10 mm の疲労予き裂を導入した。なお、本報告における疲労試験の回転周波数は、いずれも 10 Hz とした。

2・3 人工きず除去と疲労予き裂の再導入

車軸曲げ応力の変化に伴うき裂面同士の接触状態の変化が超音波探傷精度に与える影響を評価するためには、人工きずがない、疲労き裂のみの状態とする必要がある。そこで、実物大車軸中央部の直径を 150 mm に再加工することによって、人工きずを除去した。その後、き裂発生部の公称曲げ応力を 130 MPa として、疲労き裂が長

さ約 10 mm となるまで再度進展させた．これらの関係を図 5 に模式的に示すとともに，各状態における磁粉探傷試験結果を図 6 に示す．まず，人工きずから疲労き裂を発生・進展させた図 5 (a) 段階においては，人工きずを起点として，円周方向に对称に疲労き裂が進展したことが図 6 (a) からわかる．また，図 6 (b) からは人工きずが除去されたこと，図 6 (c) からはき裂が引き続き円周方向に对称に進展したことがわかる．このようにして，表面に人工きずがなく，疲労き裂のみが生じた状態の実物大車軸を製作した．なお，実物大車軸の疲労き裂が，人工きず寸法によらず，アスペクト比（き裂長さに対するき裂深さの比率）で 0.4 程度となることは，前報（Yamamoto et al., 2016）および後述する試験後の破面観察より確認している．

Fig. 5 Illustration of fatigue crack geometries. (a) Fatigue pre-crack shape generated from the artificial notch. (b) Crack shape after removing the notch. The axle body diameter was machined to 150 mm. (c) Fatigue crack shape after the crack re-propagation.

Fig. 6 Magnetic particle testing results. (a) Fatigue pre-crack shape generated from the artificial notch, (b) crack shape after removing the notch and (c) fatigue crack shape after the crack re-propagation.

2・4 疲労き裂の再進展

図 6 (c) の状態までは，一定応力振幅下の回転曲げ疲労試験により，疲労き裂を進展させた．一方で，実際の疲労き裂におけるき裂面の接触状態や，き裂先端の応力場を模擬するためには，変動応力振幅下で疲労試験を行う必要がある．そこで，図 7 に示す車軸曲げ応力の実測データに基づく応力頻度分布をもとに，疲労試験に用いる変動応力波形を作成し，疲労試験を実施した．縦軸は，走行中の実測応力を，上下振動やレールからの左右力を受けない直線区間を車両が低速で準静的に走行した際に発生する応力（以降，静的曲げ応力と表記）で除して無次元化した応力振幅（以降，正規化応力振幅と表記）を示す．図 7 の点線は車軸曲げ応力の実測データに基づく応力頻度分布を示すが，本研究では試験時間を短縮するために，応力が比較的小さい正規化応力振幅 1.6 以下の分布を一部間引いた実線の応力頻度分布を用いた．本波形における正規化応力振幅の最大値は 3 であり，同様の評価がされている過去の報告とも概ね一致している（酒井他，2011）．静的曲げ応力は，国内で使用される車軸の設計上の上限値を想定し，50 MPa とした（実測データの静的曲げ応力とは異なる）．これらの関係から，疲労試験に用いた変動応力波形の最大応力振幅は 150 MPa となる．この応力は，人工きずを除去後，き裂を図 6 (b)

から図 6 (c) の状態となるまで再度負荷した試験応力 130 MPa より高い。また、車両走行中に車軸に発生する曲げ応力は、直線、曲線、分岐器、レール継目などの軌道条件や速度、加減速度などの走行条件に依存するため、単純な多段応力波形やランダム波形と異なる。そこで、実測データの応力発生順序をもとに、変動応力波形を作成した。

変動応力振幅下での回転曲げ疲労試験は、き裂長さ 10 mm より開始したが、走行距離で 1 万 km 相当の繰り返し負荷（実際の輪軸の場合、車輪径を 860 mm とすると繰り返し数約 400 万回）によってもき裂の進展が認められなかった。そのため、再び公称曲げ応力 130 MPa の一定応力振幅下において、き裂長さ 15 mm まで成長させた。き裂長さ 15 mm 以上では、静的曲げ応力を 50 MPa とした図 7 実線の変動応力波形を用い、再びき裂を進展させた。なお、3 章で詳述する通り、超音波探傷試験ではき裂長さ 19 mm までを対象とした。き裂長さ 19 mm 以下の場合、静的曲げ応力を 50 MPa とした際に間引いた応力分布の上限 80 MPa における応力拡大係数は、SFA640 の下限界応力拡大係数範囲 $8.7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (Yamamoto et al., 2016) を下回ることを確認している。

最終的な疲労試験終了後の破面を図 8 に示す。破面に形成されたビーチマークから、疲労き裂のアスペクト比は前報 (Yamamoto et al., 2016) と同様に 0.4 程度で進展している様子が確認できる。

Fig. 7 Stress frequency distribution employed in variable amplitude test. Vertical axis indicates stress amplitude normalized by static stress. The dashed line indicates measured stress distribution. Relatively low-stress is omitted.

Fig. 8 Fracture surface after fatigue test. Beach marks can be clearly observed. The fatigue crack propagates as the crack aspect ratio remains approximately 0.4.

3. 超音波探傷試験

3・1 試験方法

斜角超音波を用いた疲労き裂の超音波探傷試験の模式図を図 9 に示す。図 2 に示した通り、在姿状態での車軸検査時には、き裂の位置が変化することで、き裂に作用する応力が変化するが、本研究ではき裂位置を図

3 の下方に固定し、荷重を変化させることで、作用する応力を変化させた。超音波探傷試験では、き裂と相対する車軸表面に斜角探触子を配置し、き裂に対して斜め方向から横波超音波 (SV 波) を入射して、き裂面で反射した波 (受信波、以降、きずエコーと表記) を同じ探触子で測定した。探傷には、周波数 5 MHz、屈折角 40 度、振動子寸法 10 mm × 10 mm の斜角探触子 (検査技術研究所製) および超音波探傷器 USD15S (日本クラウトクレーマー製) を用いた。超音波探傷試験は、き裂長さが 10 mm、16 mm、19 mm に達した各段階で実施した。試験手順を以下に示す。まず、疲労き裂が図 3 の下側位置となるように試験軸を回転させて位置決めしたうえで、試験装置のアクチュエータ荷重を無負荷とし、疲労き裂発生部の公称曲げ応力 (σ_n) が 0 MPa の状態で、きずエコーの探傷器画面上の表示が 80% となる探傷器ゲイン ($H_{0,1}$) を測定した。このとき、実際には試験軸の自重により 1.5 MPa 程度の引張応力がき裂に作用するが、ここでは考慮していない。超音波探傷を継続したまま、所定の σ_n となる荷重を負荷し、きずエコーの画面表示が 80% となる探傷器ゲイン ($H_{\sigma_n,1}$) を測定した。引き続き、超音波探傷を継続したまま、無負荷時の探傷器ゲイン ($H_{0,2}$) および負荷時の探傷器ゲイン ($H_{\sigma_n,2}$) を再度測定した。このとき、無負荷時および負荷時の各々における各回の測定値の差から、測定の再現性を確認した。 σ_n は、圧縮側では、-10 MPa、-20 MPa、-30 MPa、-40 MPa および -50 MPa の 5 段階とし、引張側では、10 MPa、20 MPa、30 MPa、40 MPa および 47 MPa の 5 段階とした。引張側の σ_n の最大値は、試験装置の安全装置の動作によって制限された。

Fig. 9 Test setup for the ultrasonic testing of the fatigue crack in a test axle.

3・2 試験結果と考察

30 MPa の公称曲げ応力 σ_n を負荷したときの、各き裂長さにおける探傷器ゲインの測定結果を、一例として図 10 に示す。ここで、探傷器ゲインが小さいことは、きずエコーを所定の高さ (80%) に表示させるのに必要な増幅が小さいこと、すなわち受信波の音圧の絶対値 (以降、エコー高さと表記) が大きいことを意味する。図 10 では、エコー高さの大小を明示的に表現するために、縦軸 (探傷器ゲイン) を反転させている。各き裂長さにおいて、 σ_n を 30 MPa とした場合の探傷器ゲイン $H_{30,1} \sim H_{30,3}$ は、荷重無負荷 (0 MPa) の探傷器ゲイン $H_{0,1} \sim H_{0,4}$ より約 4 dB 低くなる (エコー高さが高くなる) こと、 $H_{30,1} \sim H_{30,3}$ および $H_{0,1} \sim H_{0,4}$ のそれぞれの差は小さいことが確認できる。また、無負荷時の探傷器ゲイン (エコー高さ) がき裂長さのみに依存し、試験荷重負荷の繰り返しや負荷の順序等によって変化しないことも確認している。

無負荷時におけるエコー高さとき裂長さの関係を図 11 に示す。縦軸は、き裂長さ 10 mm 時のエコー高さを基準とした dB 値で示している。き裂長さ 10 mm 時のエコー高さと比較して、き裂長さ 16 mm では +12 dB (約 4 倍)、き裂長さ 19 mm では +17 dB (約 7 倍) となった。一方で、き裂面積は、き裂長さ 10 mm に対して、それぞれ約 2.5 倍、約 3.5 倍であり、(超音波ビームの反射に寄与する疲労き裂の) 有効面積 (図 12) の増加率はこれよりもさらに小さくなる。Carboni らが実施した一定応力振幅下で進展させた疲労き裂に対する超音波探傷試験では、エコー高さは有効面積に依存する結果が示されている。変動応力振幅下で疲労試験を実施した本研究においては、疲労き裂の有効面積の増加率以上に、エコー高さが増加する結果となった。このように、変動応力振幅下では、き裂先端の応力場やき裂面同士の繰り返し接触の相違等に起因し、超音波の反射に寄与するき裂面積が一定応力振幅の場合と異なる可能性が示された。

Fig. 10 An example of ultrasonic testing results at $\sigma_n = 0$ and 30 MPa in each crack length. Echo height at $\sigma_n = 30$ MPa ($H_{30,1}$ to $H_{30,3}$) is approximately 4 dB higher than that at $\sigma_n = 0$ MPa ($H_{0,1}$ to $H_{0,4}$) in each crack length. The difference among $H_{0,n}$ or among $H_{30,n}$ in each crack length was small, respectively.

Fig. 11 Comparison of echo height at $\sigma_n = 0$ MPa. Vertical axis indicates the echo height normalized by that at the 10-mm-length crack. The echo height at the crack length of 16 mm or 19 mm was 12 dB or 17 dB higher than crack length of 10 mm.

Fig. 12 Definition of the effective reflection area for a semi-elliptic flaw.

各き裂長さにおける無負荷時のエコー高さを基準として、き裂発生部に圧縮および引張曲げ応力を負荷した際のエコー高さの変化を図 13 にまとめる。エコー高さは、負荷応力の増加に伴って大きくなるが、圧縮応力によるエコー高さの減少割合は、引張応力によるエコー高さの増加割合より小さい。これは、圧縮応力が作用しても、き裂面の粗さ等に起因して面同士が完全な接触状態とはならないのに対して、引張応力が作用した場合はき裂面

の隙間が負荷応力に伴って拡大し、超音波の反射に寄与するき裂面積がそれに伴って増加するためと考えられる。なお、き裂長さ 19 mm、負荷応力 47 MPa の測定結果では、エコー高さの飽和が認められたが、これはき裂面を介する超音波の透過がなくなるまで隙間が拡大したためと考えられる。同測定点を除くと、エコー高さと負荷応力の関係（図 13 (a) ~ (c) のグラフ形状）は、本研究で実施したき裂長さの範囲においては、よく一致した。

前述の通り、在姿状態の超音波探傷検査においては、き裂位置によってき裂面に作用する開閉口応力が変化する。車軸の検査は、車両検査等に合わせて実施されるため、旅客重量等を考慮する必要はなく、車両や台車の重量のみが車軸に作用する。このとき曲げ応力は、車軸直径の遷移箇所における応力集中等を考慮しても、最大で 30 MPa 程度である。つまり、圧縮応力が最大となる車軸下側にき裂が存在しても、超音波エコー高さは、荷重無負荷の状態と比較して -2 dB 以内の変化にとどまることが、図 13 の結果からわかる。

Fig. 13 Relationships between echo height and applied nominal bending stress. Echo height increases with increasing of applied stress. Tensile stress has a more profound effect on echo height than compressive stress. Relationships between echo height and applied nominal stress in respective crack lengths are consistent with each other.

4. 結 言

鉄道車軸は変動応力下で使用されるため、き裂が発生した場合、破面にビーチマークを形成しながら進展する。変動応力振幅下におけるき裂面の繰り返し接触回数は、一定応力振幅下のき裂進展試験時と比較して多い。そのため、変動応力振幅下のき裂では、超音波の反射に寄与するき裂面積が、一定応力振幅下の場合と異なると考えられる。また、在姿状態における車軸の超音波探傷検査では、車軸に車両重量による曲げ応力が作用するため、検査時のき裂位置によって、き裂面の接触状態が変化し、超音波探傷精度に影響を与える可能性が考えられる。

本研究では、車軸中央平行部を対象として、実物大の試験車軸に導入した疲労き裂の超音波探傷試験を実施し、超音波探傷精度に対するき裂進展時の変動応力の影響および検査時に車軸に作用する曲げ応力の影響を評価した。

無負荷時におけるエコー高さとき裂長さの関係を整理した。き裂面積は、き裂長さ 10 mm に対して、き裂長さ 16 mm では約 2.5 倍、き裂長さ 19 mm では約 3.5 倍となり、超音波ビームの反射に寄与するに対する疲労き裂の有効面積の増加率はこれよりも小さくなるが、エコー高さは、き裂長さ 10 mm 時と比較して、それぞれ +12 dB (約 4 倍)、+17 dB (約 7 倍) となった。過去の一定応力振幅下での試験結果では、エコー高さは疲労き裂の有効面積に依存することが示されているが、変動応力振幅下で疲労試験を実施した本研究においては、疲労き裂の(有効)面積の増加率以上にエコー高さが増加する結果となった。この結果は、超音波の反射に寄与するき裂面積が、一定応力振幅と変動応力振幅では異なる可能性を示している。

また、各き裂長さにおける無負荷時のエコー高さを基準として、き裂発生部に圧縮および引張曲げ応力を負荷した際のエコー高さの変化を求めた。その結果、エコー高さは、負荷応力の増加に伴って大きくなるが、圧縮応力によるエコー高さの減少割合は、引張応力によるエコー高さの増加割合より小さいことが確認された。これは、圧縮応力が作用しても、き裂面の粗さ等に起因して面同士が完全な接触状態とはならないのに対して、引張応力が作用した場合はき裂面の隙間が負荷応力に伴って拡大し、超音波の反射に寄与するき裂面積がそれに伴って増加するためと考えられる。また、エコー高さと負荷応力の関係は、本研究で実施したき裂寸法の範囲においては、よく一致した。一方で、車両重量に起因する圧縮曲げ応力が 30 MPa 程度であることを考慮すると、エコー高さの変化は、無負荷の状態と比較して -2 dB 以内にとどまり、検査精度に与える影響は大きくないことが確認された。

文 献

- American Society for Testing and Materials, Standard test method for measurement of fatigue crack growth rate, E647-13a (2013).
- Carboni, M. and Cantini, S., Advanced ultrasonic “Probability of Detection” curves for designing in-service inspection intervals, *International Journal of Fatigue*, Vol. 86 (2016), pp. 77–87.
- 石原道章, 鉄道車軸の超音波探傷技術について, 非破壊検査, Vol. 56, No. 3 (2007), pp. 114–117.
- Makino, K., Biwa, S., Sakamoto, H. and Yohso, J., Ultrasonic evaluation of fatigue cracks at the wheel seat of a miniature wheelset, *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 27, Issue 1 (2012), pp. 29–46.
- Makino, K. and Biwa, S., Influence of axle-wheel interface on ultrasonic testing of fatigue cracks in wheelset, *Ultrasonics*, Vol. 53, Issue 1 (2013), pp. 239–248.
- Saka, M. and Salam Akanda, M. A., Ultrasonic measurement of the crack depth and the crack opening stress intensity factor under a no load condition, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 23, No. 2 (2004), pp. 49–63.
- 酒井宏樹, 山村佳成, 荻野智久, 岩本厚, 砥上靖弘, 橋本通孝, 営業走行車両における車軸の応力測定と強度評価 (その 2 : 実働応力の解明と分析), 第 18 回鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集, S1-1-5 (2011), pp. 143–146.
- Yamamoto, M., Makino, K. and Ishiduka, H., Comparison of crack growth behaviour between full-scale railway axle and scaled specimen, *International Journal of Fatigue*, Vol. 92 (2016), pp. 159–165.
- 養祖次郎, 坂本博, 交番検査用新幹線中ぐり車軸超音波自動探傷装置の開発, 鉄道総研報告, Vol. 5, No. 6 (1991), pp. 15–22.
- 米山弘志, 三原田八水, 疲労き裂と放電加工ノッチにおける超音波エコー特性の比較, 圧力技術, Vol. 41, No. 3 (2003), pp. 115–122.

References

- American Society for Testing and Materials, Standard test method for measurement of fatigue crack growth rate, E647-13a (2013).
- Carboni, M. and Cantini, S., Advanced ultrasonic “Probability of Detection” curves for designing in-service inspection intervals, *International Journal of Fatigue*, Vol. 86 (2016), pp. 77–87.
- Ishihara, M., Ultrasonic inspection technology for wheel-axle, *Journal of the Japanese Society for Non-destructive Inspection*,

Vol. 56, No. 3 (2007), pp. 114–117 (in Japanese).

Makino, K., Biwa, S., Sakamoto, H. and Yohso, J., Ultrasonic evaluation of fatigue cracks at the wheel seat of a miniature wheelset, *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 27, Issue 1 (2012), pp. 29–46.

Makino, K. and Biwa, S., Influence of axle–wheel interface on ultrasonic testing of fatigue cracks in wheelset, *Ultrasonics*, Vol. 53, Issue 1 (2013), pp. 239–248.

Saka, M. and Salam Akanda, M. A., Ultrasonic measurement of the crack depth and the crack opening stress intensity factor under a no load condition, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 23, No. 2 (2004), pp. 49–63.

Sakai, H., Yamamura, Y., Ogino, T., Iwamoto, A., Togami, Y. and Hashimoto, M., Measurement of stress and strength assessment on axle in-service (Part 2: Clarification and analyses of actual stress), *Proceedings of the 18th Jointed Railway Technology Symposium (J-RAIL 2011)*, No. S1-1-5 (2011), pp.143–146 (in Japanese).

Yamamoto, M., Makino, K. and Ishiduka, H., Comparison of crack growth behaviour between full-scale railway axle and scaled specimen, *International Journal of Fatigue*, Vol. 92 (2016), pp. 159–165.

Yohso, J. and Sakamoto, H., Development of automatic ultrasonic testing equipment for Shinkansen vehicle hollow axle, *RTRI Report*, Vol. 5, No. 6 (1991), pp. 15–22 (in Japanese).

Yoneyama, H. and Miharada, H., Comparison of echo heights between fatigue crack and EDM notch, *Journal of high pressure institute of Japan*, Vol. 41, No. 3 (2003), pp. 115–122 (in Japanese).