

鉄道車軸の車輪はめ合いの有無によるきず検出確率への影響

牧野 一成*

Influence of Wheel Mating Parts on Probability of Detection of Flaws in Railway Axles

Kazunari MAKINO

In the ultrasonic inspection of railway axles, the echo heights essentially have some dispersion, which becomes wider for the flaws in the mating components such as a wheel seat. In this study, the relation between the flaw echo height and the reflection area of flaws was obtained for the hollow axles. The relation in the axle body was compared with the one in the wheel seat with the help of the probability of detection (POD) curve. The detectable area of a flaw with the probability of 90% at a lower confidence limit of 95% in the wheel seat was more than twice larger than that in the axle body.

キーワード：鉄道車軸，エコー高さ，平行部，車輪座，欠陥検出確率

1. はじめに

車軸の超音波探傷における感度調整では、数種類の深さや面積を有する人工きずを表面に加工したモデル車軸を用い、そのきずのエコー高さを基準として、きず検出のしきい値を設定する機会が多い。しかしながら、手探傷はもとより自動探傷の場合でも、探触子の配置のずれや温度変化による屈折角の変化などに起因して、エコー高さは本質的にばらつきを有している。さらに、車輪や歯車などの部品がはめ合わされる車軸のはめ合い座のきずでは、表面粗さによる接触状態、あるいは車軸表面と相手材の内径面との接触面圧が、きずによる超音波の反射に影響を及ぼすことにより、エコー高さのばらつきが大きくなることが想定される。このような状況下で、きずの検出性能を定量評価するためには、エコー高さを確率的に取り扱うことが必要となる。原子力や航空機の分野では、欠陥検出確率 (POD: Probability of Detection)^{1) 2)} に注目した確率論的破壊力学 (PFM: Probabilistic Fracture Mechanics) の考え方が成熟しているが³⁾、鉄道分野ではその適用範囲が限られているのが現状である⁴⁾。

本研究では、図1に概念的に示すように、車軸の超音波探傷に対してPODの考え方を適用し、表面きずを有する試験車軸の平行部 (非はめ合い部) および車輪座 (はめ合い部) における超音波探傷結果を分析した。測定されたきずのエコー高さとの関係を求め、それを線形回帰することにより、所定の信頼度におけるきずの面積と欠陥検出確率の関係 (POD 曲線) を導出し、車輪はめ合いの有無によるPODを比較した。また、試験車

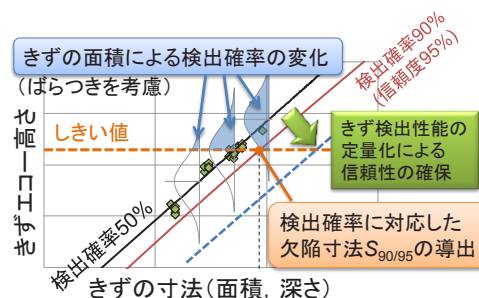


図1 超音波探傷における欠陥検出確率 (POD) の概念

軸を用いて感度調整を行った場合に、検出可能なきずの大きさや、きず検出に必要なしきい値の設定について、POD 曲線を用いて考察した。

2. 試験方法

2.1 試験車軸

車軸の超音波探傷における欠陥検出確率の検討で用いた試験車軸を図2に示す。本車軸には探傷用の中ぐり孔が加工されており、平行部の外径は150mm、車輪座の外径は192mmで、中ぐり径は30mmまたは40mm (2種類) である。車軸の平行部 (非はめ合い部) には、以下の5種類のきずが加工されている (きず形状は表1を参照)。

- ・ 矩形きず：長さ10mmで深さ0.15, 0.3, 0.6, 1mmの4種類 (0.15S, 0.3S, 0.6S, 1S)
 - ・ 鋸きず：深さ0.5mmの1種類 (0.5N)
- 車軸の反歯車側車輪座の内ボス側端部 (はめ合い部) には、以下の9種類のきずが加工されている。
- ・ 矩形きず：長さ10mmで深さ0.3, 0.6, 1mmの3種類 (0.3S, 0.6S, 1S)

* 車両構造技術研究部 車両強度研究室

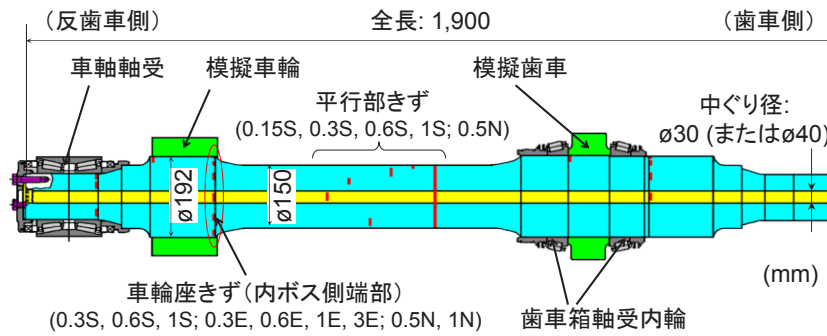


図2 試験用中ぐり車軸の形状ときず位置

- ・ 半楕円きず: 深さ 0.3, 0.6, 1, 3mm の 4 種類 (0.3E, 0.6E, 1E, 3E)
 - ・ 鋸きず: 深さ 0.5, 1mm の 2 種類 (0.5N, 1N)
- 半楕円きずのアスペクト比 (深さの長さに対する比: $a/2c$, 表 1 を参照) は 0.35 とした。

2.2 超音波探傷方法

中ぐり車軸用の超音波自動探傷装置を図 3 に示す。2 個の横波斜角探触子を内蔵した探傷ヘッドを軸端面から中ぐり孔に挿入する。気温が異なる時期に複数回の測定を行い、きずによる反射波形の表示を超音波探傷器の画面上で 80% に合わせたときの増幅ゲインをエコー高さとして記録した。探触子の公称屈折角は 50°, 公称周波数は 5MHz で、探触子に内蔵された振動子の寸法は以下のとおりである。

- ・ 中ぐり径 30mm 用: 高さ (H) 15mm × 幅 (W) 12mm
- ・ 中ぐり径 40mm 用: 高さ (H) 13mm × 幅 (W) 10mm

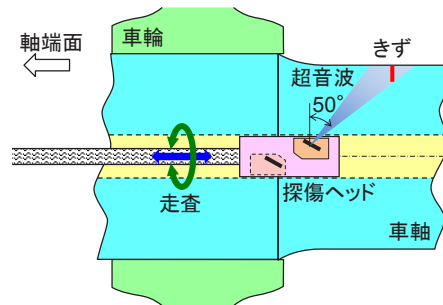


図3 中ぐり車軸用超音波自動探傷装置

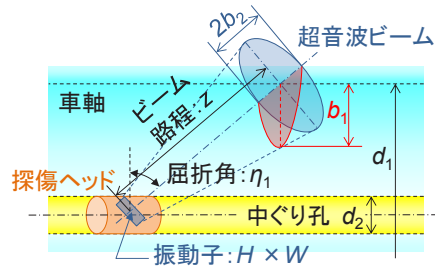


図4 超音波ビーム径の計算

3. 欠陥検出確率の計算

3.1 超音波ビーム径と欠陥面積の関係

超音波が照射される領域 (ビーム径) を考慮せず、単純に欠陥の面積から POD 曲線を導出すると、得られた POD 曲線を欠陥面積に対して外挿的に用いる場合に、大きな欠陥に対する POD が限りなく 1 (100%) に近づき、POD が過度に高く評価される可能性がある。そこで以下では、超音波ビーム径を考慮して補正した欠陥面積 (反射面積⁵⁾) を用いて POD を評価した。

振動子の高さが H , 幅が W のとき、遠距離音場でのビーム形状は図 4 のような楕円とみなされ、車軸の半径方向の楕円半径 b_1 および円周方向の楕円半径 b_2 は式 (1), 式 (2) で表される⁶⁾。

$$b_1 = z \cdot k_\alpha \cdot \frac{\lambda}{H} / \sin \eta_1 \quad (1)$$

$$b_2 = z \cdot k_\alpha \cdot \frac{\lambda}{W} \quad (2)$$

k_α はビーム中心に対するビーム端の音圧比 (10%) によって定義され、ここでは $k_\alpha = 0.91$ とした。 λ は横波波長 (周波数 5MHz, 横波音速 3,230m/s のとき $\lambda = 0.646\text{mm}$), η_1 は超音波の屈折角 (50°) で、楕円半径 b_1 ではビームの傾斜が考慮されている。ビーム路程 z は車軸の外径 d_1 および中ぐり径 d_2 を用いて、 $z = (d_1 - d_2) / (2 \cos \eta_1)$ で計算される。

ビーム半径 b_1, b_2 を用いて、超音波ビームときずが重複する範囲から、反射面積 S_{ref} をきずの形状 (S, E, N) に応じて表 1 のように定義した。中ぐり径 30mm 用と 40mm 用の 2 種類の探触子を用いたときの、平行部 ($d_1 = 150\text{mm}$) と車輪座 ($d_1 = 192\text{mm}$) における b_1, b_2 の値を表 2 に示す。

3.2 計算方法

以下に示す手順^{5) 7)} により POD を計算した。エコー高さは超音波の欠陥での反射に比例すると仮定し、反射面積 S_{ref} を線形回帰分析におけるエコー高さに対する説

表1 きずの形状による反射面積 S_{ref} の定義

きず形状	矩形きず S (深さ a , 長さ 10mm)	半楕円きず E (深さ a , 長さ $2c$)	鋸きず N (深さ a)
きずと反射面の関係			

※ は超音波ビーム, はきず形状, (重複箇所) は反射面積 S_{ref} を定義する反射面を表す。

表2 各探触子における超音波ビームの楕円半径 b_1 , b_2

探触子	振動子高さ H (mm)	振動子幅 W (mm)	外径 d_1 (mm)	中ぐり径 d_2 (mm)	ビーム路程 z (mm)	半径方向の楕円半径 b_1 (mm)	円周方向の楕円半径 b_2 (mm)
φ30mm 用	15	12	150	30	93.3	4.78	4.57
			192		126.0	6.45	6.17
φ40mm 用	13	10	150	40	85.6	5.05	5.03
			192		118.2	6.98	6.95

※ 屈折角 $\eta_1 = 50^\circ$, 波長 $\lambda = 0.646\text{mm}$, ビーム係数 $k_a = 0.91$ は全ての探触子で共通

明変数とした。

- (1) 超音波測定ごとに、各きずのエコー高さを平行部の 1S きずのエコー高さで規格化する。
- (2) 規格化した全ての測定データを両対数グラフにプロットし、回帰直線を導出する。
- (3) 得られた回帰直線を 50% の信頼度を有する 50% POD の回帰直線とし、エコー高次の分散から、同曲線の上側および下側 95% 信頼度曲線を導出する。
- (4) 回帰直線に対するエコー高次の残差が 10 または 90 パーセントの各データ点を通るように、50% POD の回帰直線とそれに伴う 2 本の信頼度曲線を平行移動し、各々の 3 本の曲線を 10% または 90% POD の回帰直線 (50%, 上側 95%, 下側 95% の各信頼度曲線) とする。

4. 欠陥検出確率の計算結果

4.1 平行部 (非はめ合い部) での結果

4.1.1 POD 導出のための回帰曲線

平行部におけるきずのエコー高さと反射面積との線形回帰分析により得られた、POD 導出のための回帰曲線を図 5 に示す。同図のグラフの上側には、外径 150mm の平行部における各形状のきずの寸法を、反射面積に対応づけて示した。きずのエコー高さと反射面積 S_{ref} には正の強い相関があり、決定係数は $R^2 = 0.942$ であった。また、データの分散は小さく、エコー高次の推定範囲および母回帰の信頼区間は比較的狭かった。

4.1.2 設定しきい値に対する POD 曲線

次に、きず検出のための具体的なしきい値を設定した場合の POD 曲線を導出する。例えば、1S きずのエ

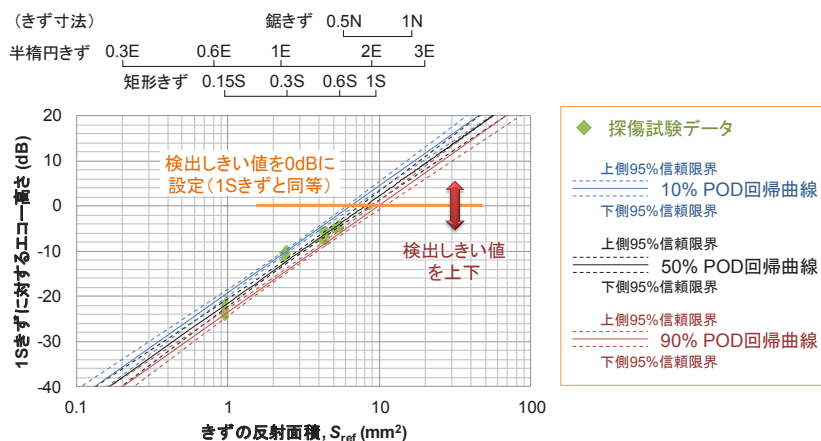


図5 平行部きず (非はめ合い部) に対する POD 導出のための回帰曲線

特集：車両技術

コー高さをそのまましきい値とした場合（しきい値が 0dB）、図 5 において 0dB のしきい値と確率 $p = 10, 50, 90\%$ の各回帰曲線との交点を求め、確率 p のロジット（ $= \log [p / (1 - p)]$ ）と各確率に対応するきずの反射面積 S_{ref} の対数を信頼度ごとに線形回帰することで、当該しきい値に対する POD 曲線が得られる。

例として図 6 に、(a) しきい値が 0dB の場合と、(b) しきい値を 2dB 下げた場合の各 POD 曲線を示す。両者を比較すると、しきい値を下げることに伴って POD 曲線が左側へシフトした。これは、しきい値を低く設定するほど、同じ検出確率でより小さい欠陥が検出できることを意味する。

実用的には、POD が 90% (0.9) で下側 95% 信頼限界に相当する反射面積 $S_{90/95}$ を有する欠陥は、十分な信頼性をもって検出できるとされている⁷⁾。そこで、しきい値を 0, -2dB に設定したときに検出可能なきずの反射面積 $S_{90/95}$ を図 6 に併せて示した。さらに、-6, -10dB にしきい値を設定した場合についても同様に評価し、0, -2, -6, -10dB の各しきい値で検出可能なきずの反射面積 $S_{90/95}$ と、その面積に相当する各形状きずの深さを表 3 に示す。

4.2 車輪座（はめ合い部）での結果

4.2.1 POD 導出のための回帰曲線

車輪座における POD 導出のための回帰曲線を図 7 に示す。平行部と比較するため、縦軸のエコー高さは、車輪座の 1S きずではなく平行部の 1S きずのエコー高さで規格化した。図 5 の平行部の場合と比較して、エコー高さが全体的に低下するとともに、反射面積 S_{ref} に対する正の相関の決定係数は $R^2 = 0.764$ に低下した。さらに、データの分散が比較的大きく、平行部と比較してエコー高さの信頼区間が拡大した。

4.2.2 設定しきい値に対する POD 曲線

車輪座の例として、しきい値が 0dB（平行部 1S きずのエコー高さと同値）の場合と、しきい値を 12dB 下げた場合の各 POD 曲線を図 8 に示す。図 6 の平行部での結果と比較すると、曲線が右側（反射面積が大きい側）にシフトするとともに、異なる信頼度を有する 3 曲線間の間隔が拡大した。

0, -12dB の各しきい値で検出可能なきずの反射面積 $S_{90/95}$ を図 8 に併せて示すとともに、0, -6, -12, -18, -24dB の各しきい値における反射面積 $S_{90/95}$ と、その面積に相当する各形状きずの深さを表 4 に示す。

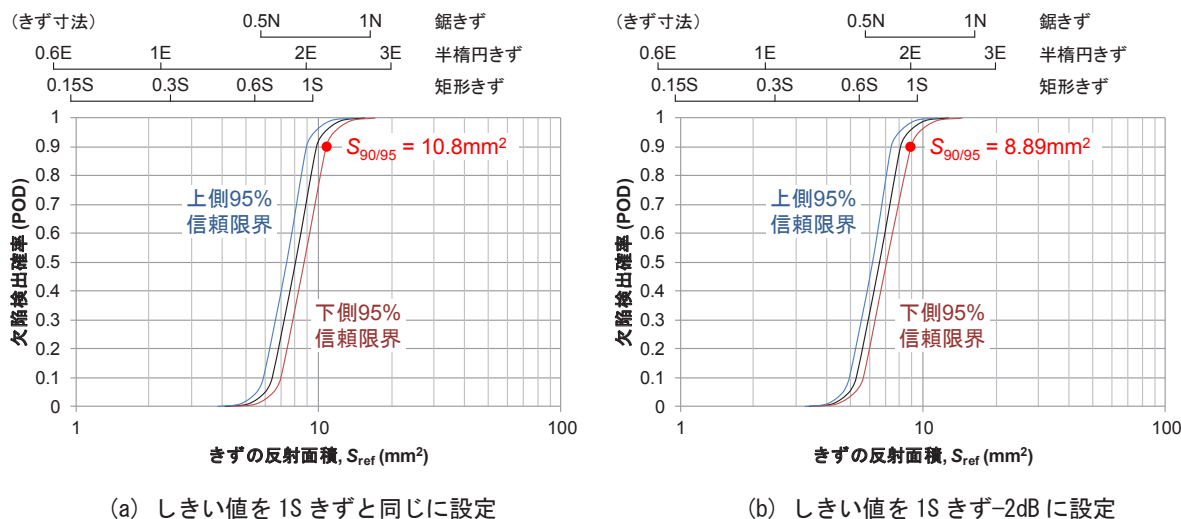


図 6 各検出しきい値における平行部きずの POD 曲線

表 3 各検出しきい値で検出可能なきずの反射面積と相当するきず深さ（平行部）

きず検出しきい値の 1S きずに対する比*	検出可能なきずの 反射面積 $S_{90/95}$ (mm ²)	相当する各きずの深さ (mm)		
		矩形きず	半楕円きず	鋸きず
0dB (100%)	10.8	1.2S	2.3E	1.2N
-2dB (79%)	8.89	1.0S	2.1E	1.0N
-6dB (50%)	5.82	0.68S	1.8E	0.67N
-10dB (32%)	3.85	0.49S	1.5E	0.49N

* () 内の % 値は、探傷器画面での 1S きずのエコー高さに対するしきい値の相対的な高さを示す。

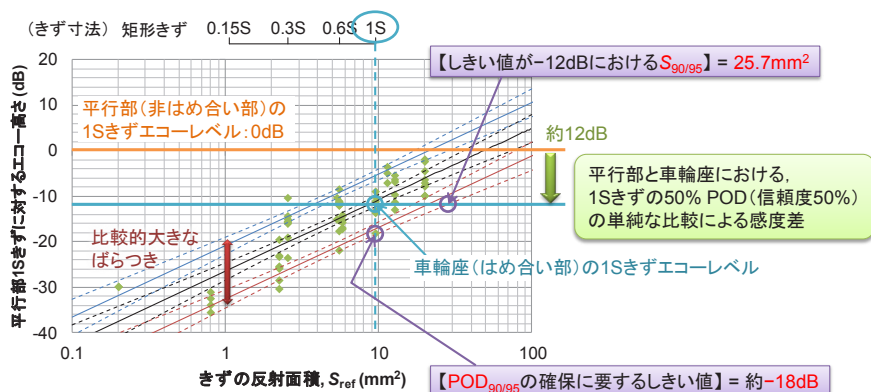


図7 車輪座きず（はめ合い部）に対する POD 導出のための回帰曲線

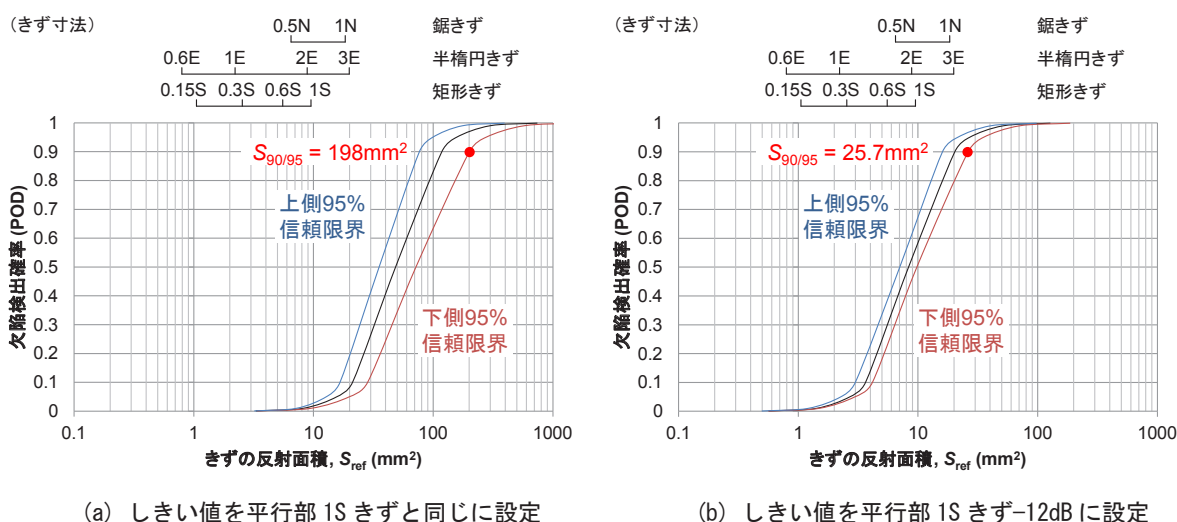


図8 各検出しきい値における車輪座きずの POD 曲線

5. 考察

表3より、平行部（非はめ合い部）の探傷において、きず検出しきい値を1Sきずのエコー高さと同じに設定したとき、十分な信頼度で検出可能な反射面積 $S_{90/95}$ ($= 10.8\text{mm}^2$) に相当する矩形きずの深さは1.2mm (1.2S) であった。このことは、モデル車軸で1Sきずが検出できるように超音波探傷器の感度またはしきい値を設定しても、実車軸では1Sきず相当の形状を有するきずを見逃す可能性があることを示唆している。実車軸で1Sきずを確実に検出するためには、モデル車軸の1Sきずのエコー高さに対してしきい値を少なくとも2dB低く設定する必要がある。

次に、車輪座（はめ合い部）の超音波探傷について、平行部での結果と比較しながら考察する。図7に示した車輪座でのPOD導出のための回帰曲線によると、反射面積が約 10mm^2 の1Sきずが50%の確率で検出される時のエコー高さは、中央の黒の実線の $S_{\text{ref}} = \text{約 } 10\text{mm}^2$ における縦軸の値から約-12dBで与えられる。すなわち、

平行部と車輪座の感度差のみを単純に考えた場合、平行部のきずに対して設定した検出しきい値を約12dB下げることにより、平行部きずと同じ大きさの車輪座のきずが検出できる。ところが図8(b)より、きず検出しきい値を平行部の1Sきずに対して-12dBに設定したとき、 $S_{90/95}$ の面積は 25.7mm^2 もの大きさであった。これは、車輪座におけるエコー高さの分散が比較的大きかったためである。車輪座において1Sきず相当の実車軸のきずを十分な信頼度で検出するためには、しきい値をさらに6dB低く（平行部の1Sきずに対して-18dB）設定する必要がある。この6dBの下げ幅は、上述した平行部における超音波探傷の信頼性確保に必要な下げ幅（2dB）と比較して大きい。

以上のことから、車輪座などはめ合い部の超音波探傷で信頼性を確保するためには、はめ合い物との接触に起因して平均的に低下する感度に加えて（または、はめ合い状態のモデル車軸で設定した感度に対して）、接触状態の不均一などに起因する感度のばらつきに対する補正を行ったうえで探傷を行う必要があることが示唆される。

表4 各検出しきい値で検出可能なきずの反射面積と相当するきず深さ（車輪座）

きず検出しきい値の 1S きずに対する比 [※]	検出可能なきずの 反射面積 $S_{90/95}$ (mm ²)	相当する各きずの深さ (mm)		
		矩形きず	半楕円きず	鋸きず
0dB(100%)	198	> 7.0S	> 7.0E	> 7.0N
-6dB(50%)	71.5	> 7.0S	6.4E	6.2N
-12dB(25%)	25.7	2.7S	3.5E	2.0N
-18dB(13%)	9.57	1.1S	2.1E	0.78N
-24dB(6%)	3.97	0.45S	1.4E	0.37N

※（）内の % 値は、探傷器画面での 1S きずのエコー高さに対するしきい値の相対的な高さを示す。

6. まとめ

本研究では、中ぐり車軸の平行部（非はめ合い部）と車輪座（はめ合い部）に加工されたきずの測定データを用いて、超音波自動探傷における欠陥検出確率（POD）を計算し、車輪はめ合いの有無による POD を比較した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) きずのエコー高さと反射面積との関係を線形回帰分析により評価した。平行部での結果と比較すると、車輪座ではエコー高さが全体的に低下するとともに、データのばらつきが比較的大きかったため、きずの反射面積に対する相関の度合いが低下し、エコー高さの信頼区間が拡大した。
- (2) 平行部において、数種類のきず検出しきい値に対する POD 曲線を作成し、各しきい値で検出可能なきずの形状ごとの寸法を導出した。実車軸で 1S 形状のきずを検出するためには、モデル車軸の 1S きずのエコー高さに対してしきい値を少なくとも 2dB 低く設定する必要がある。
- (3) 車輪座において、実際のきずを十分な信頼度で検出するためには、平行部の同じ形状のきずのエコー高さに対してしきい値を 18dB 低く設定する必要がある。この結果は、はめ合い物との接触による平均的な感度低下に加えて、エコー高さのばらつきに対する補正を行ったうえで探傷を行う必要性を示唆している。

これらの結果を車軸の超音波探傷方法に反映することで、車軸のさらなる信頼性向上に寄与することが可能となる。

文献

- 1) MIL-HDBK-1823A: Department of Defense Handbook – Nondestructive evaluation system reliability assessment –, U.S. Department of Defense, 2009.
- 2) Berens, A.P., “NDE reliability data analysis,” Metals Handbook 9th Edition, Vol.17: Nondestructive Evaluation and Quality Control, ASM International, pp.689-701, 1989.
- 3) 小坂部和也, 鬼沢邦雄, 柴田勝之, 鈴木雅秀: 原子炉圧力容器用確率論的破壊力学解析コード PASCAL ver. 2 の開発, 日本原子力学会和文論文誌 6 (2), pp.161-171, 2007
- 4) 日本材料学会編: 産業界における信頼性工学の応用, 養賢堂, pp.41-55, 2008
- 5) Carboni, M., “A critical analysis of ultrasonic echoes coming from natural and artificial flaws and its implications in the derivation of probability of detection curves,” Insight 54(4), pp.208-216, 2012.
- 6) Krautkramer, J., and Krautkramer, H., “Ultrasonic Testing of Materials,” 4th ed., Springer, pp.76-79, 1990.
- 7) Schneider, C.R.A., and Rudlin, J.R., “Review of statistical methods used in quantifying NDT reliability,” Insight 46(2), pp.77-79, 2004.