

フェーズドアレイ超音波探傷法の台車部品への適用

牧野 一成*

Application of Phased Array Ultrasonic Testing Method to Flaw Detection in Vehicle Bogie Parts

Kazunari MAKINO

An imaging technology by the phased array ultrasonic testing (PAUT) was applied to bogie part inspection, targeting welded parts in bogie frames and wheel seats in axles. Regarding bogie frames, the superiority of PAUT was confirmed in detecting inclined surface flaws, and the effect of paint thickness on the echo height was clarified. When PAUT was applied to an actual bogie frame, the results of flaw detection were visualized clearly, demonstrating the effectiveness of PAUT in bogie frames. Regarding axles, when PAUT was applied to a wheel seat using shear-wave and longitudinal-wave angle beam inspection techniques, flaws on the wheel seat were detected and visualized in a wheel-fitted state.

キーワード：フェーズドアレイ，超音波探傷，台車枠，車軸

1. はじめに

鉄道車両の台車枠や車軸などの台車部品に対して，製造時あるいは定期検査時に超音波探傷試験や磁粉探傷試験などの非破壊検査が適用されている¹⁾²⁾。

溶接構造を有する台車枠に関しては，主要な溶接部に対して超音波探傷試験による溶接内部の検査が製造時に行われ，一定の溶接品質が確保されている。その前提で，鉄道車両の定期検査では，供用中の負荷に起因する溶接部表面のきずを対象とする検査体系が構築されており，主に目視試験や磁粉探傷試験が適用されてきた。ところが近年，図1に示す台車枠の側ばりと部材との溶接内部，あるいは側ばりの内部補強との溶接部が起点と考えられる台車枠の損傷³⁾⁴⁾が発生し，鉄道事業者に対しても定期検査において，台車形式に応じて台車枠の溶接内部の探傷技術が求められるようになった。

一方，車軸に関しては，車両の定期検査において，表面きずに対しては磁粉探傷試験が，車輪や歯車等とのはめ合い面などに発生する直接目視できないきずに対しては超音波探傷試験が適用されている。車軸では，安全上の問題となる損傷は近年発生していないが，特に超音波探傷においては，超音波波形からきずの有無を判断するには相応の経験が必要で，車両検修現場における技術継承の上で課題がある。

以上のように，台車枠や車軸などの台車部品において超音波探傷試験は重要な役割を果たしているが，現状では，振動子を1個のみ有する斜角探触子を用いた従来の超音波斜角探傷法（以下，従来 UT）の適用が主流である。一方，超音波探傷試験における一つの技法として，

多数の振動子を並列配置したアレイ探触子を用いて，超音波の伝搬方向や焦点を電子的に制御して探傷するフェーズドアレイ超音波探傷法（以下，PAUT）⁵⁾⁶⁾が近年注目されている。鉄道車両以外の各種構造物に対しても，きずの検出性能の高さや，探傷結果の映像化によるきずの判断の容易さなどから，PAUTが適用される事例が増えている⁷⁾。

本報告では，台車枠の溶接部や，車軸の車輪座などのはめ合い部を対象として，PAUTによる超音波映像化技術を適用し，きずを映像化して検出した結果を示す。従来 UT と PAUT の概要を述べたのちに，台車枠の側ばりのきずを対象として，まず，きずの面が表面に対して傾斜したきずに PAUT を適用したときの検出性能を評価した。さらに，台車枠表面の塗装の有無（塗膜厚さ）の影響を評価したうえで，実台車枠に対して PAUT を適用し，きずの検出性能を確認した。最後に，車軸に対して，斜角探傷法および局部探傷法による PAUT を適用したときの結果を示した。

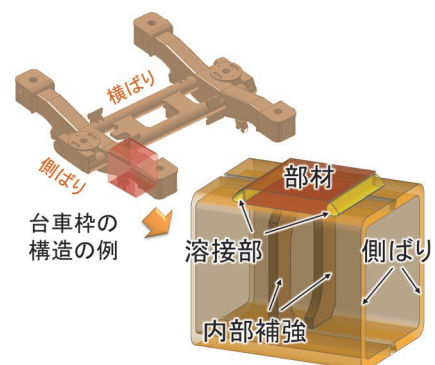


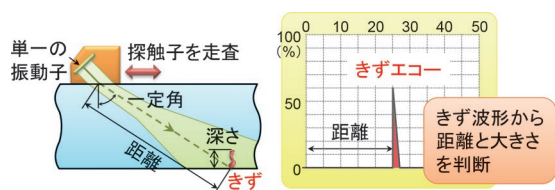
図1 溶接構造を有する台車枠の模式図

* 車両技術研究部 車両強度研究室

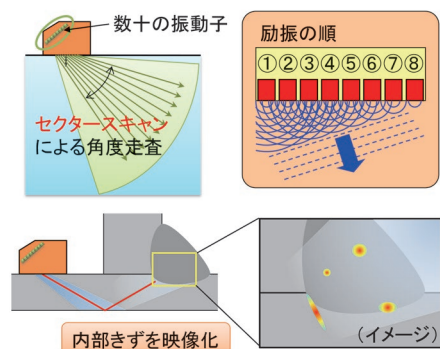
2. フェーズドアレイ超音波探傷法 (PAUT) の概要

超音波斜角探傷において、従来 UT と PAUT を比較した概念図を図 2 に示す。同図 (a) に示すように、従来 UT に用いる探触子には通常 1 個の振動子が内蔵されており、例えば 45° 、 70° といった単一の屈折角の超音波が送信される。実際の探傷では、探触子の走査によりリアルタイムに変化する波形の中から、きずで反射して受信された超音波 (きずエコー) の距離 (ビーム路程) を読み取り、きずのエコー高さ、ビーム路程と屈折角をもとに、きずの有無やその位置を評価する必要があり、探傷技術者には一定のスキルや経験が要求される。また、きずの傾きや、探触子ときずの位置関係などに応じて、屈折角の異なる複数の探触子を使い分ける必要がある。

一方 PAUT では、代表的な方式である、数十の振動子 (素子) を一列に並べて探触子に内蔵させたりニアレイ探触子の場合、図 2 (b) のように、振動子を励振する順序 (図の例では①～⑧の順) と時間差を制御することにより、様々な屈折角の超音波が逐次的に送信 (セクターキャン) される。例えば、 40° から 75° の屈折角の超音波を 0.5° 間隔で送信することができる。さらに、セクターキャンの各受信波をビーム路程に沿ってエコー高さに応じて色分けし、それらをスキャンした屈折角に応じて扇形に並べることで、探傷結果を面的に映像化することができ、きずの位置を実形状に関連付けて把握することが容易となる。



(a) 従来 UT



(b) PAUT

図 2 従来 UT と PAUT を比較した概念図

3. きずの傾斜による影響の評価

3.1 概要

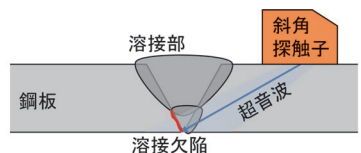
台車枠を構成する鋼板の表面きずの超音波探傷において、きずの面が表面に対して垂直な場合 (傾斜角が 0° の場合) には、超音波のきずでの反射挙動が単純で検出が容易であるが、きずの面が表面に対して傾斜していると検出が難しい場合がある。図 3 に示すように、鋼板の突合せ溶接や鋼板の表面に取付座を溶接した構造では、開先面の角度やすみ肉溶接の熱影響部の形状に応じて、表面に対して傾斜した溶接欠陥や疲労き裂の発生が想定されるため、表面傾斜きずの検出性能を定量的に把握することが重要である。

本章では、鋼板の特に溶接部に対して従来用いられている屈折角 70° の従来 UT と PAUT の両者を対象として、台車枠の側ばりを模した厚さ 8mm の鋼板に設けた -60° から $+60^\circ$ の様々な角度で傾斜した表面きずを、一回反射法で斜角探傷したときの超音波伝搬挙動を超音波シミュレーションにより解析した。このとき、表面きずの傾斜角の変化に対する受信波のエコー高さの変動に注目し、従来 UT と PAUT とで表面傾斜きずに対する検出の優位性を比較した⁸⁾。

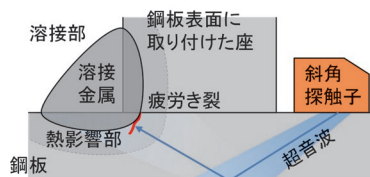
3.2 解析方法

3.2.1 解析モデル

きずの傾斜による影響の評価に用いた 2 次元の有限要素モデルを図 4 に示す。鋼板の厚さ t は 8mm とし、鋼板の表面には高さ $d = 1.76\text{mm}$ のきずを設けた。これは、従来 UT による屈折角 $\theta = 70^\circ$ の斜角探傷において、感度調整に用いられる直径 $4\text{mm} \times$ 高さ 4mm の縦穴 (以下、 $\phi 4 \times 4\text{mm}$ 縦穴) のエコー高さを基準としたときに、その 4 倍の高さのエコーが得られるきずに相当する。きずの傾斜角 η は、きずが鋼板表面に垂直なときを 0° として、 -60° から $+60^\circ$ の範囲で 5° 間隔で変化させた。

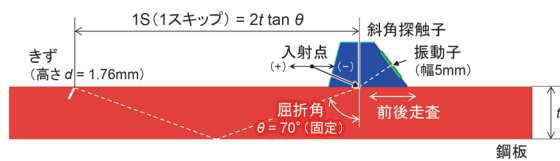


(a) 開先面に沿った溶接欠陥

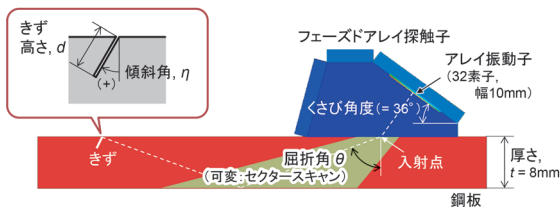


(b) 熱影響部に沿った疲労き裂

図 3 鋼板の溶接部に発生する表面傾斜きず



(a) 従来 UT



(b) PAUT

図4 きずの傾斜による影響の評価用モデル

傾斜角 η の符号は、きずの面が探触子から遠ざかるほうへ傾斜するときを正とした。

探触子の位置は、一回反射法できずを検出することを想定して、探触子の入射点からきずまでの距離が1スキップ ($= 2t \tan \theta =$ 約 44.0mm) となる基準位置に配置したときを「探触子位置 0mm」と定義した。探触子位置の符号は、基準位置からきずに接近する側に探触子を動かしたときを正とした。従来 UT の探触子は、振動子寸法が幅 5mm で屈折角を 70° とした。PAUT 探触子の振動子は、幅 0.31mm の素子を 32 個並べた構成で、振動子全体の幅は約 10mm (0.31mm \times 32 素子) である。PAUT 探触子のくさびの角度は 36° で、アレイの位相制御をしない状態では屈折角約 53.9° の超音波が送信される。解析モデルに用いた材料定数を表 1 に示す。

3.2.2 解析手順

解析における探触子の走査方向を、前掲の図 4 に併せて示す。探触子の走査は、従来 UT では前後走査とし、探触子位置を -10mm から $+10\text{mm}$ の範囲を 1mm 間隔で変化させた。PAUT では、セクタースキャンの屈折角を 40° から 75° の範囲で 1° 間隔で変化させて解析した。PAUT における焦点距離は 50mm とした。

送信波の周波数は、従来 UT、PAUT ともに 5MHz とした。きずの傾斜角 η の各モデルにおいて、上述のように探触子を走査したときに、一連の走査におけるきずからの受信波 (振動子要素の体積ひずみの総和) の絶対値の最大値を、傾斜角 η のきずに対するエコー高さ h とした。得られたエコー高さは、感度調整用の $\phi 4 \times 4\text{mm}$ 縦穴のエコー高さを 80% (JIS Z 3060:2015 におけるエコー高さ区分線の H 線⁹⁾) に合わせたときのエコー高さの % 値として評価した。計算には、伊藤忠テクノソリューションズ (株) 製の超音波シミュレーションソフトウェア ComWAVE Ver.11.0.0 を用いた。

表 1 解析モデルに用いた材料定数

要素	材質	縦波音速 c_L (m/s)	横波音速 c_T (m/s)	密度 ρ (kg/m^3)
鋼板	鉄鋼	5900	3230	7800
探触子くさび (従来 UT 用)	PMMA (アクリル樹脂)	2730	1430	1180
探触子くさび (PAUT 用)	Rexolite® (架橋ポリスチレン樹脂)	2350	1250	1050

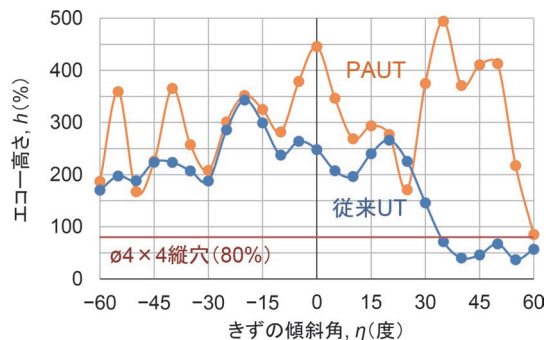


図5 従来 UT と PAUT におけるきずの傾斜角とエコー高さとの関係

3.3 解析結果

屈折角 70° の従来 UT において、きずの傾斜角 η とエコー高さ h との関係を示す。図 5 のグラフに「従来 UT」(青色) で示す。屈折角 $\theta = 70^\circ$ の従来 UT では、 $\eta = 0^\circ$ あるいは屈折角 $\theta = 70^\circ$ の余角である $\eta = \pm 20^\circ$ といった特定の角度で傾斜したきずのエコー高さは高かったが、傾斜角 η が大きくなるにつれてエコー高さ h が急激に低下した。

PAUT における解析結果を、図 5 のグラフに「PAUT」(橙色) として、従来 UT と比較して示す。きずの傾斜角 η 全体にわたり、PAUT によるエコー高さ h は従来 UT よりも高く、表面傾斜きずの検出に対する PAUT の優位性が示された。特に、探触子から見て鈍角に傾斜した $\eta > 0$ のきずに対する検出の優位性が大きい。

4. 塗膜厚さによる影響の評価

4.1 概要

表面が塗装された構造物の超音波探傷では一般的に、探触子を摺動させる箇所の塗膜をはく離してから探傷が行われる。これは、探触子から塗膜を介して試験体の内部に超音波が伝搬する往復の過程において、塗膜中の超音波の減衰と、探触子と塗膜の間および塗膜と試験体表面の間における超音波の伝達損失を避けるためである。ところが、塗膜をはく離するためには、ワイヤブラシや剥離剤などを用いる必要があり、一連の検査過程において相応の時間や手間を要する。

そこで本章では、従来 UT と PAUT の両者を対象と

して、台車枠と同等の鋼材の試験体表面に設けた塗膜の厚さを0mmから約1mmまでの範囲で変化させたときに、探触子から一定距離にある反射源からのエコー高さを超音波シミュレーションにより解析し、台車枠表面の塗膜厚さが超音波のエコー高さに及ぼす影響を評価した結果を示す¹⁰⁾¹¹⁾。

4.2 解析方法

4.2.1 解析モデル

塗膜厚さによる影響の評価に用いた2次元の解析モデルを図6に示す。半径50mmの円周の面（以下、R面）を反射源として用いた。探触子モデルの寸法や振動子の構成は、3.2.1項と同じである。

解析モデルに用いた材料定数は、塗膜以外は表1と同じである。一方、塗膜はアクリル相当の材料として、表1の「探触子くさび（従来UT用）」と同じ材料定数としたが、塗膜厚さによる影響を評価するため、塗膜に対して減衰係数 α を設定する必要がある。減衰係数 α は一般にdB/m（超音波が距離1mを伝搬したときのdB値での減衰）で定義されるが、本解析モデルでは、周波数5MHzにおける一般的な測定値に基づく $\alpha=500\text{dB/m}$ の値¹²⁾を用いた。

4.2.2 解析手順

解析では、塗膜の面上で探触子を走査させた。探触子の走査は、従来UTでは前後走査とし、探触子位置を-3mmから+3mmの範囲を0.5mm間隔で変化させた。PAUTでは、セクタースキャンの屈折角を40°から75°の範囲で1°間隔で変化させて解析した。PAUTにおける焦点距離は、3.2.2項と同じ50mmとした。送信波の周波数は、従来UT、PAUTともに5MHzとした。

塗膜厚さ t_p は、従来UTでは0、0.16、0.32、0.48、0.64、0.8、0.96mmの7段階（0.16mm間隔）で、PAUTでは上記に加えて0.08、0.24mmを補間した9段階で変化させた。従来UTでは、各塗膜厚さのモデルにおいて、探触子を前後走査させたときのR面からの受信波を多項式近似して得られた最大値を、その塗膜厚さに対するエ

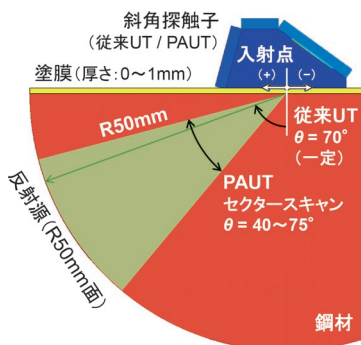


図6 塗膜厚さによる影響の評価用モデル

コー高さ h とした。得られたエコー高さ h は、塗膜厚さ t_p が0mmのときのエコー高さを100%として規格化し、塗膜厚さ t_p が超音波のエコー高さ h に及ぼす影響を評価した。PAUTでは、40°から75°の各屈折角のビームに対して塗膜厚さごとにエコー高さ h を計算し、塗膜厚さ t_p による影響を屈折角ごとに評価した。

4.3 解析結果

従来UTにおいて、塗膜厚さを0mmから約1mmの範囲で変化させたときの、塗膜厚さ t_p とエコー高さ h との関係を図7に示す。塗膜厚さの増加に伴って、エコー高さは単調に減少した。図7のグラフを直線近似することにより、塗膜厚さ t_p (mm)とエコー高さ h (%)の関係は、 $h=100(1-0.196t_p)$ の式で表される。すなわち、塗膜厚さ1mmにつきエコー高さは約20%低下する。従来UTにおいて塗膜上からの探傷を行う場合は、上式より求められる塗膜中の超音波の減衰によるエコー高さの低下を考慮して、きず検出のしきい値を設定する必要がある。

PAUTにおいて、塗膜厚さを0mmから約1mmの範囲で変化させたときの、 $\theta=40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ の各屈折角における塗膜厚さ t_p とエコー高さ h との関係を図8に示す。いずれの屈折角 θ においても、従来UTのときのような塗膜厚さ t_p の増加に伴うエコー高さ h の単調減少の傾向はみられず、屈折角 θ に応じて塗膜厚さとエコー高さとの関係が変化した。ただし、検討した塗膜厚さの最大値 $t_p=0.96\text{mm}$ までの範囲内では、塗膜なしの

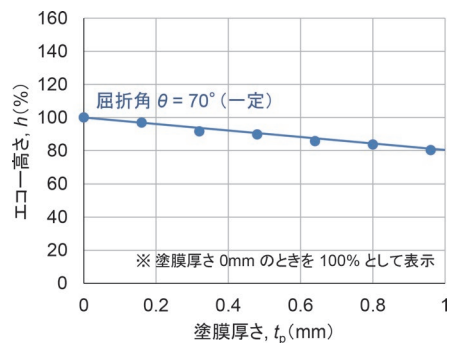


図7 従来UTにおける塗膜厚さとエコー高さとの関係

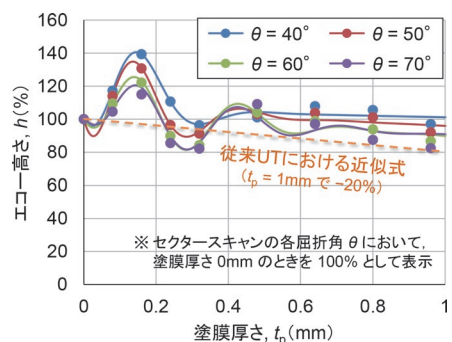


図8 PAUTにおける塗膜厚さとエコー高さとの関係

ときに対するエコー高さの減少は、屈折角 θ がいずれの場合も 20% 以内であった。

5. 実台車枠での探傷試験

5.1 概要

ここまで、きずの傾斜や塗膜厚さによるエコー高さへの影響の評価を通じて、台車枠に対して PAUT を適用するうえでの特性や課題を従来 UT と比較しながら明らかにした。本章では、PAUT を実台車枠の溶接部に対して適用するうえで、探傷装置の設定および感度調整の方法を説明し、映像化された探傷結果をもとに PAUT の台車枠探傷への有効性を示す¹¹⁾。

5.2 探傷方法

5.2.1 探傷装置および設定

PAUT 探傷装置の構成を図 9 に示す。探傷装置はいずれも ZETEC 製で、本体は TOPAZ 64（最大同時励振数：64ch）、探触子は AM-10MHZ（周波数 10MHz、素子寸法 10mm×0.31mm の 32 素子リニアアレイ）、くさびは AM-55SW（屈折角 55°）を用い、1 軸のロータリーエンコーダを併用した。探傷装置の代表的な設定を表 2 に示す。フォーカス設定は、探触子からの水平距離が一定となる位置にすべての屈折角の超音波を集束させる「プロジェクトン（投影）」モードとした。

5.2.2 感度調整

PAUT による探傷では、以下の①～③の手順で感度を

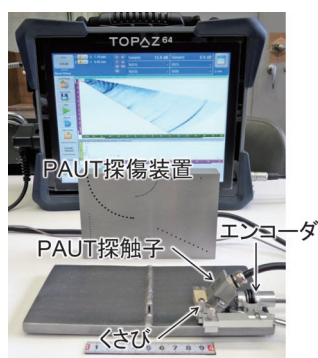


図 9 PAUT 探傷装置の構成

表 2 PAUT 探傷装置の設定

音速設定	縦波 5920m/s, 横波 3230m/s
スキャンモード	セクタースキャン (屈折角 40~75°, 0.5°間隔)
感度補正	STB-A1 標準試験片の R100mm 面での反射が、すべての屈折角に対して一定となるよう補正
フォーカス設定	プロジェクトン 屈折角 70°の超音波が試験体の底面で 1 回反射して表面に達するまでの水平距離 (1 スキップ) の位置に、すべての屈折角の超音波を集束させる設定

調整した。

- ① STB-A1 標準試験片の R100mm 面において、セクタースキャン範囲の屈折角 40°~75°のすべての超音波の反射波のエコー高さが一定となるよう、屈折角ごとの感度を調整する。
- ② 探触子の入射点から、板厚 8mm の試験体における屈折角 70°の超音波の水平距離 1 スキップの位置に、すべての屈折角の超音波が集束するようにフォーカス設定を行う。
- ③ 従来 UT との互換性を確保するため、屈折角 70°の超音波で $\phi 4 \times 4$ mm 縦穴を探傷したときのエコー高さが 80% (H 線相当) となるよう、探傷装置全体のゲインを調整する。

5.2.3 走査方法

実台車枠の疲労試験により、側ばり下面のまくらぎ方向の溶接線に沿って発生させたルート部のき裂に対して、溶接線からレール方向へ、屈折角 70°の超音波の 1 スキップ距離だけ離れた側ばり下面に探触子を配置した。このとき、探触子の前後方向（レール方向）は固定したまま、まくらぎ方向の溶接線に沿ってエンコーダを用いて探触子を左右走査しながら、溶接部を一回反射法で長さ約 40mm にわたって探傷した。エンコーダから出力された探触子の左右走査における座標を記録し、断面映像を連続的に取得して溶接線に沿った断面の立体像を記録した。

5.3 探傷結果

実台車枠での探傷結果を図 10 に示す。セクタースキャンによる側面像から分かるように、屈折角が約 70°の方向で 1 回反射した超音波によるきず映像が表示された。台車枠下面からの平面像および板厚方向の断面像で、エコー高さが 80% を超える領域の大きさから判断すると、当該のきずはまくらぎ方向の溶接線に沿って約 8mm の長さを有していた。また、平面像から分かるように、得られたきず映像の位置は、対象とする溶接線の位置（超音波のフォーカス位置）にほぼ一致しており、きずであるか否かを容易に判断することができた。なお、同じ箇所を従来 UT で探傷したときに、同様のきずエコーが発生することを確認している。

以上のように、従来 UT との互換性が確保された $\phi 4 \times 4$ mm 縦穴のエコー高さを基準とする感度校正を行ったうえで、PAUT を実台車枠の溶接部に適用することにより、探傷結果を明瞭に映像化できることが確認され、PAUT を台車枠へ適用することの有効性が示された。

6. PAUT による車軸の超音波探傷

6.1 概要

車両の定期検査における車軸の検査では、車輪や歯車等とのはめ合い面のきずに対して超音波探傷試験が適用され

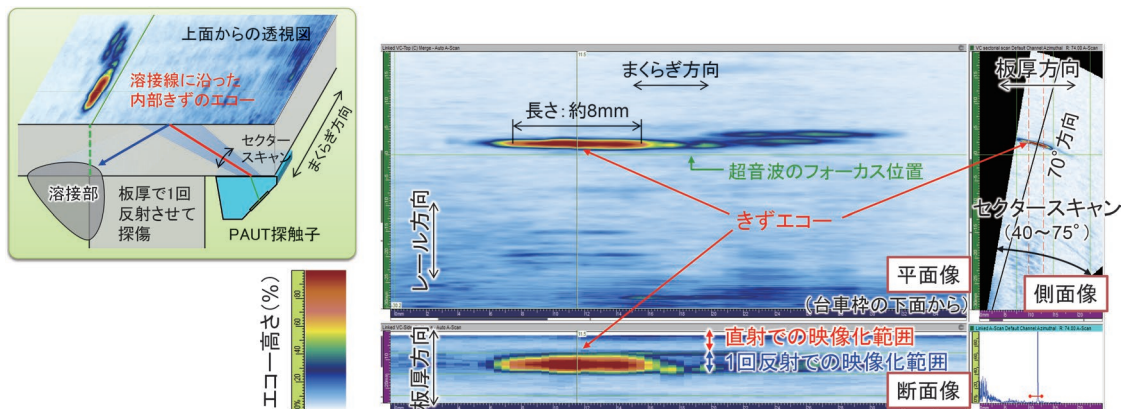


図10 PAUTの一回反射法で台車枠の溶接線に沿って検出されたきずの映像化

ている。現状では、車軸の超音波探傷は従来 UT による方法が主流であるが、PAUT の適用により探傷結果が映像化されれば、きずの判断が容易になることが期待できる。本章では、車軸の車輪座などに対して、斜角探傷法および局部探傷法による PAUT を適用したときの探傷結果を示す¹³⁾。

6.2 試験体

車軸のきず入り試験体（モデル車軸）の模式図を図11に示す。在来線車両に使用される全長1900mmの動軸および従軸で、各軸のA～Gの位置に応じて0.5mm、1mm、3mm、5mm、10mm深さの鋸形状きず（Nきず）が放電加工されたのち、車輪、歯車、ディスク座、軸受などの部品がはめ合わされている。両側の軸端面には、前ぶたを取り付けるためのボルト穴が120°間隔で3箇所

所ずつ加工されている。

6.3 探傷方法

6.3.1 斜角探傷

従軸のモデル車軸の平行部の側表面に、斜角探傷用のくさびを介して PAUT 探触子を接触させ、屈折角が35°から75°までのセクタースキャンにより探傷した。使用機材と主な探傷条件を表3の左列に示す。台車枠のときと比較して対象部までの距離が長いことから、周波数5MHzで64chの大型の探触子を用いた。車軸の平行部の外径に合わせて、くさびの接触面は曲面に加工されている。探触子の前後方向（軸方向）を位置決めしたのち、左右方向（円周方向）に走査してデータを取得した。探傷の様子を図12（a）に示す。

6.3.2 局部探傷

動軸のモデル車軸の両側軸端面に、センターピン付きの一定厚さ（5mm）のくさびを介して PAUT 探触子を

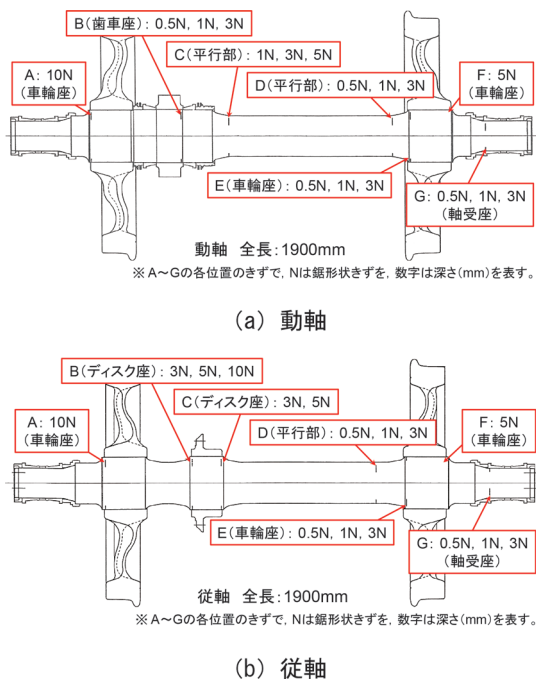


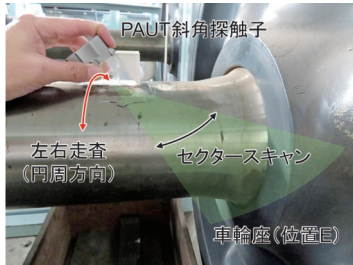
図11 車軸のPAUTに用いたきず入り試験体（モデル車軸）

表3 車軸のPAUT試験における使用機材と主な探傷条件

	斜角探傷	局部探傷
超音波探傷装置	TOPAZ-64/128PR-TFM HR (ZETEC)	
探触子	LM-5MHZ (ZETEC) (周波数: 5MHz, 振動子数: 64, 振動子寸法: 幅 38.4mm (0.6mm × 64 素子) × 長さ 10mm)	
くさび	LM-55SW (ZETEC) (55°横波送信用, 探傷面 R76 加工)	0°くさび (厚さ 5mm, センターピン付き)
音速設定	縦波 5920m/s, 横波 3230m/s	
スキャンモード	セクタースキャン (屈折角 35~75°, 1°間隔)	セクタースキャン (縦波屈折角 0~30°, 0.5°間隔)
感度補正	STB-A1 標準試験片の R100mm 面での反射が一定となるよう補正	局部探傷子入射点測定用試験片の R210mm 面での反射が一定となるよう補正
探傷面	車軸平行部の側表面	車軸の両側軸端面
フォーカス設定	なし	なし

接触させ、縦波屈折角が0~30°のセクターキャンにより探傷した。使用機材と主な探傷条件を表3の右列に示す。局部探傷でも周波数5MHzで64chの探触子を用

いた。探傷の際は、くさびのセンターピンを車軸端面のセンター穴に挿入した状態で、探触子から車軸中心までの距離を一定に保ったまま、探触子を時計回りに回転走査してデータを取得した。探傷の様子を図12(b)に示す。



(a) 従軸の斜角探傷



(b) 動軸の局部探傷

図12 PAUTによる車軸の超音波探傷の様子

6.4 探傷結果

6.4.1 斜角探傷

従軸のモデル車軸の平行部の側表面にPAUT探触子を接触させ、従来、車軸の超音波探傷で検出目標とされている位置Eの車輪座1Nきずを車輪はめ合い状態で斜角探傷した結果を図13に示す。車軸全周に出現する車輪座外ボス側角部の形状エコーとともに、きずエコーが当該位置で十分なSN比で検出された。また、探傷結果が映像として表示されているため、車軸形状と対比させることで、きずエコーかどうかの判断も容易であった。なお、図示は省略するが、車輪座の0.5Nきずも検出可能であった。

6.4.2 局部探傷

動軸のモデル車軸の反歯車側軸端面にPAUT探触子を接触させ、位置Eの車輪座1Nきずを含む領域の全周を車輪はめ合い状態で局部探傷した結果を図14に示す。同図では、図11(a)の車軸図面を左右反転させた状態で探傷結果が示されている。局部探触子が軸端面のボル

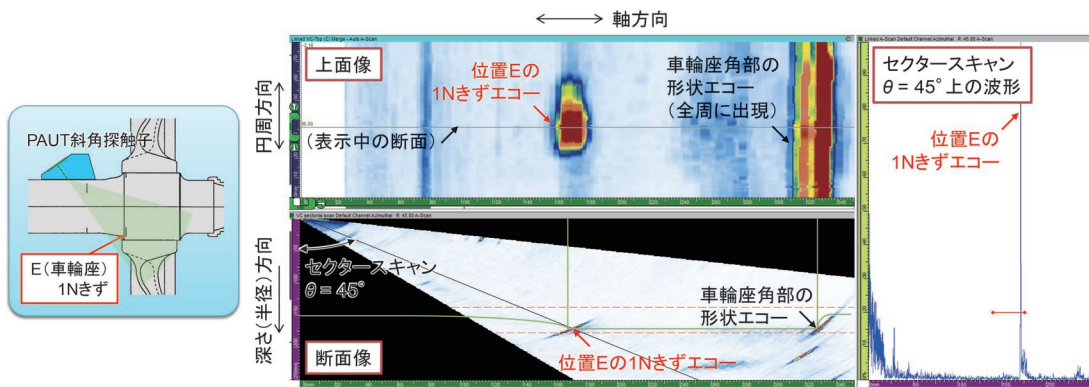


図13 従軸の車輪座内ボス側(位置E)1NきずのPAUT斜角探傷結果

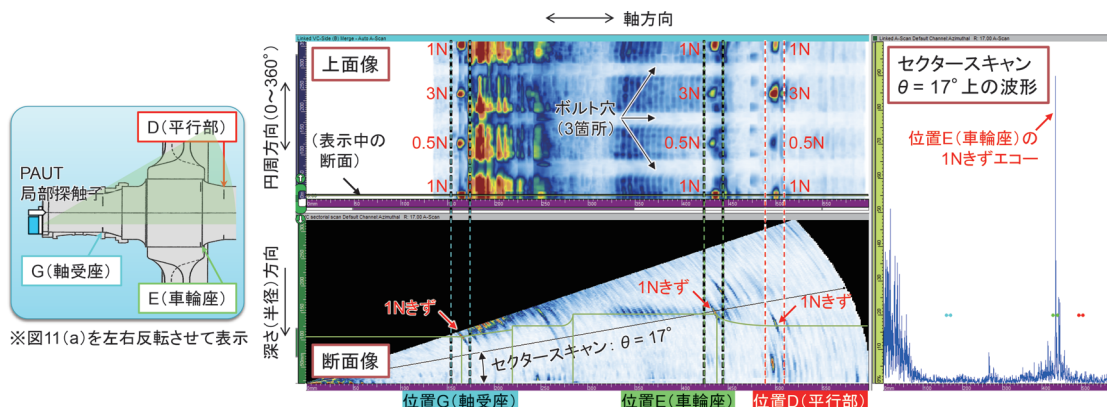


図14 動軸の反歯車側軸端面からのPAUT局部探傷結果

ト穴上を通過している間は超音波が十分に送受信できないため、探傷結果の上面像で白抜きの画像として表示されている。車軸軸受の後ぶた周辺や車輪とのはめ合い面でやや大きなノイズがみられたが、D（平行部）、E（車輪座）およびG（軸受座）の各位置における0.5N、1N、3Nのすべてのきずが映像化された状態で検出できた。

7. まとめ

本報告では、台車枠の溶接部や、車軸の車輪座などのはめ合い部を対象として、アレイ探触子を用いたPAUTによる超音波映像化技術を台車部品に適用し、きずを映像化して検出することを試みた。得られた結果を以下に示す。

- (1) 台車枠の表面に対して傾斜したきずにPAUTを適用したときのエコー高さは従来UTを上回り、表面傾斜きずの検出におけるPAUTの優位性が示された。
- (2) PAUTにおける表面の塗膜厚さの影響を評価した結果、屈折角に応じて塗膜厚さのエコー高さへの影響が変化したが、塗膜厚さが約1mmまでの範囲ではエコー高さの減少は20%以内であった。
- (3) 実台車枠に対してPAUTを適用し、きずの検出性能を確認した。従来UTとの互換性を有する $\phi 4 \times 4$ mm縦穴を基準とする感度校正を行ったうえでPAUTを適用することにより、探傷結果が明瞭に映像化され、PAUTの台車枠探傷への有効性が示された。
- (4) 車軸の超音波探傷では、車輪座に対して斜角探傷法と局部探傷法によるPAUTを適用したとき、いずれの方法でも、従来、検出目標とされている車輪座の深さ1mmの鋸形状きず（1Nきず）をはめ合い状態で映像化して検出できることを確認した。

PAUTを台車部品の探傷に適用することにより、台車枠の溶接部のきず、およびはめ合い状態の車軸の車輪座きずを、従来UTでは実現が難しい「映像化された状態」で検出することができる。これにより、台車部品におけ

るきずの見落としが防がれ、台車のさらなる安全性向上に寄与することが可能となる。

文 献

- 1) 牧野一成：鉄道車両のメンテナンスと非破壊検査，日本機械学会誌，Vol.123，No.1215，pp.14-17，2020
- 2) 牧野一成：車両を取り巻く技術の動向② 非破壊検査，R&M，Vol.16，No.6，pp.48-51，2008
- 3) 運輸安全委員会：鉄道重大インシデント調査報告書，RI2019-1-1，2019
- 4) 運輸安全委員会：鉄道事故調査報告書，RA2018-1-1，2018
- 5) Olympus NDT：Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications 日本語版，Olympus NDT，2006
- 6) 超音波による欠陥寸法測定 編集委員会：超音波による欠陥寸法測定，共立出版，pp.151-200，2009
- 7) 「検査技術」編集部：超音波フェーズドアレイ技術（基礎編，実技・応用編），日本工業出版，2022
- 8) 牧野一成：鋼板表面に対して傾斜したきずに適用する超音波探傷について—従来UTとPAUTとの比較—，溶接技術，Vol.69，No.10，pp.63-67，2021
- 9) JIS Z 3060:2015「鋼溶接部の超音波探傷試験方法」，附属書B（規定）平板継手溶接部の探傷方法
- 10) 牧野一成：鋼材の従来UTとPAUTにおける塗膜厚さによる影響の比較解析，日本非破壊検査協会2021年度第1回超音波部門講演会資料UT-00182，pp.17-22，2021
- 11) 牧野一成：鉄道車両用台車枠のフェーズドアレイ超音波探傷における影響要因の評価，日本非破壊検査協会第30回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集，pp.87-92，2023
- 12) K. Ono, "A comprehensive report on ultrasonic attenuation of engineering materials, including metals, ceramics, polymers, fiber-reinforced composites, wood, and rocks," Appl. Sci. 10(7), 2230, 2020.
- 13) 牧野一成：鉄道車軸のフェーズドアレイ超音波探傷法の検討，日本非破壊検査協会2022年度第1回超音波部門講演会資料UT-00192，pp.9-14，2022