

台車の非破壊検査を可視化する

牧野 一成

車両構造技術研究部(車両強度 副主任研究員)



まきの かずなり

はじめに

鉄道車両は図1に示すように、皆さんが乗車したり貨物が積載されたりする「車体」と、車体を支持する「台車」に大きく分けられます。車両の定期検査では車体も検査されますが、台車に関しては、台車枠と輪軸(車軸と車輪の対)にさらに分解して精密に検査され、その際に非破壊検査が活用されています。

ここでは、非破壊検査によってきずを可視化し、検査結果を検査員に分かりやすく表示する手法について、台車で適用例を中心に説明します。

主な非破壊検査法

非破壊検査には多くの方法がありますが、台車の定期検査で用いられる主な検査法として、図2に示すように、①超音波探傷法、②磁粉探傷法、③浸透探傷法の3つが挙げられます。

①の超音波探傷法は、検査する部品の内部に、人間の耳

には聞こえない超音波(音の一種)を入射し、その反射波の波形からきずの位置や大きさを確認する方法で、部品の内部あるいは裏側のきずを検出できます。②の磁粉探傷法は、検査する部品を電磁石などで磁化しながら磁粉(細かい鉄粉)を吹きかけると、表面にきずがあればその箇所磁粉が集まるので、それを観察する方法です。③の浸透探傷法は、表面に特殊な液体を吹き付けてきずの内部に浸透させた後、現像処理によってきずに浸透した液体を吸い上げて観察する方法です。

超音波探傷を可視化する方法

超音波探傷法での検査装置の構成例を図3に示します。装置は通常、超音波探傷器、探触子(プローブ)、ケーブルから構成されます。超音波探傷器は、ケーブルを通じて探触子に電圧を与えて超音波を送信する役割と、きずなどで反射後に探触子が受信した超音波を増幅して画面上に表示する役割を持っています。超音波は文字通り「波」なので、

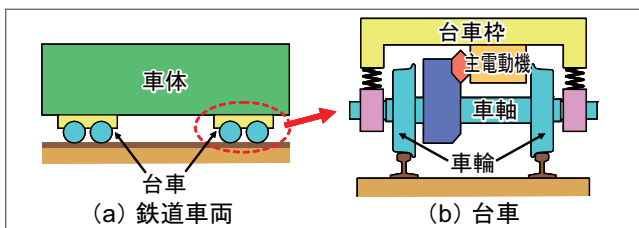


図1 鉄道車両と台車の構成

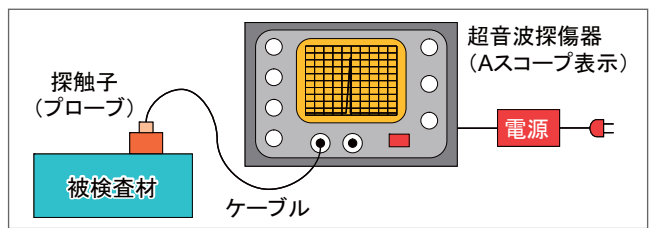


図3 超音波探傷装置の構成例

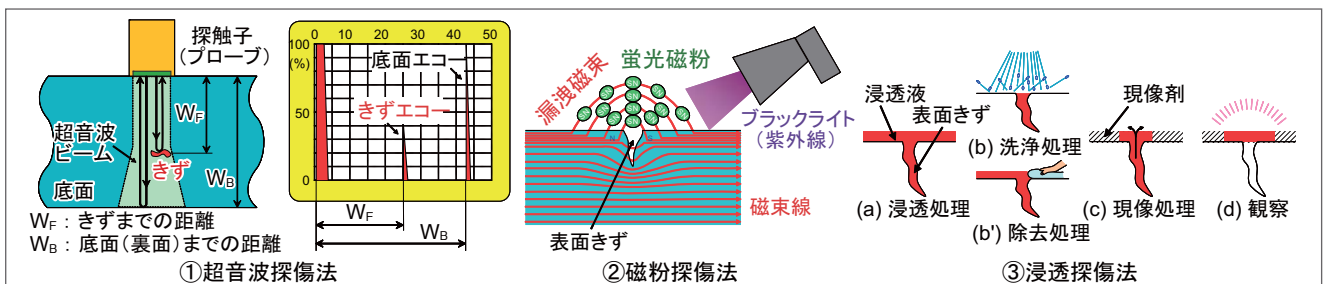


図2 台車の主な非破壊検査法

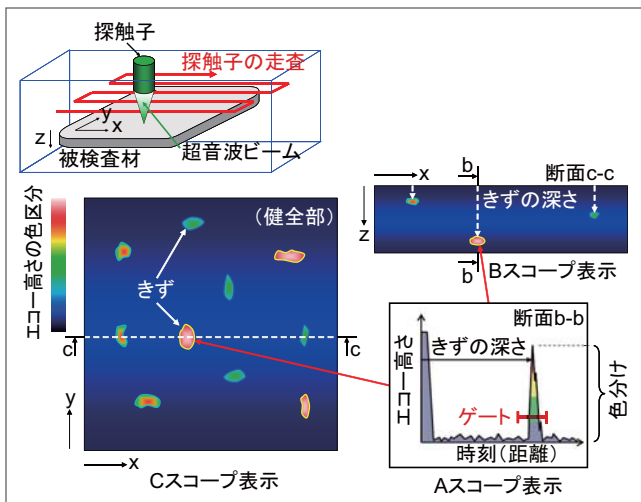


図4 超音波探傷結果の表示方法

特に工夫をしなければ、受信した電圧に相当する波形が探傷器の画面に表示されます。これをAスコープと呼んでいます。検査員は、探触子を動かして超音波を部品にまんべんなく入射させ、きずで反射した波形(きずエコー)とそれ以外のノイズの波形(妨害エコー)とを区別しながら、きずの有無を判断します。超音波探傷法では、探触子を動かすことを「走査(スキャン)」と言います。

Aスコープによる方法は超音波探傷法の基本ですが、探傷中に検査員に課せられる集中力や判断力などの精神的負担が大きくなります。また、検査速度にも限界があるため、超音波探傷の自動化の観点からも不向きです。そこで、図4に示すようなBスコープ、あるいはCスコープと呼ばれる表示法が、最近の超音波探傷法では多く用いられています。

Bスコープとは、超音波で検査した部品の断面を表示した画面のことを言います。まず、探触子を走査しながら一定の距離ごとの各位置で、波形(Aスコープ)を取り込んで装置に記憶させます。その後、各位置での波形をエコー高さに応じて色分けし、それらを位置の順番に並べるとBスコープ表示が完成します。探触子を手で動かす代わりに自動で走査させると、検査員は、表示されたBスコープを見るだけできずの位置と深さが正確に分かり、表示された色からきずの大きさが推定できます。

一方、Cスコープとは、超音波を入射した面から部品の内部を透視した画面のことを言います。探触子を走査して取り込んだデータを記憶しておき、各位置での波形の最大値に応じて色分けして表示します。Cスコープでは、きずの位置とエコー高さが表示されますが、注目したい深さ付近の波形のみを取り込むための「ゲート」を設定し、このゲートを切り替えることによって、深さに応じたCスコープが得られます。図5は、電車の主電動機と小歯車との間の継手に用いられている、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)製のたわみ板を探傷し、ゲートを切り替えてCス

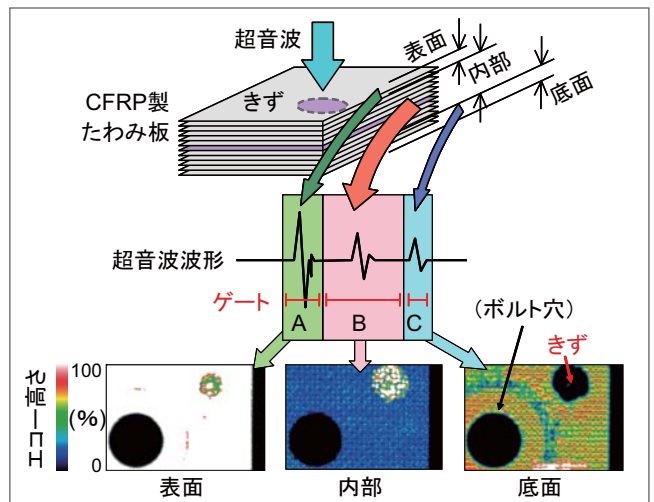


図5 ゲート設定とCスコープ表示との関係

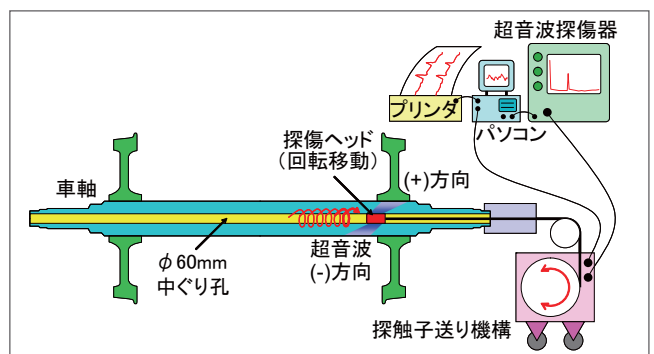


図6 中ぐり車軸の超音波探傷法

コープで画像化した結果です。たわみ板の表面だけでなく、内部にもきずが広がっていることがわかります。最近では、記憶装置の大容量化や演算速度の高速化により、Cスコープ上の全ての位置での波形(Aスコープ)を、探傷器と接続したパソコンに一旦記憶させておき、検査終了後に、任意の位置での波形や断面像(Bスコープ)を再計算して表示する技術が発達しています。これにより、超音波探傷の結果から、部品内部の状態を多角的に捉えられます。

車軸の超音波探傷結果の可視化

新幹線電車では、輪軸の軽量化のために直径60mmの中ぐりをした中ぐり車軸が用いられています。車軸の検査では中ぐり孔を利用した超音波探傷が行われており、その模式図を図6に示します。斜め前後方向(+), (-)方向に超音波を発振する2個の探触子が組み込まれた探傷ヘッドを軸の片側から中ぐり孔に挿入し、反対側まで空送りした後に一定の速度で回転させながら引き抜くことによって、車軸全体が検査されます。以下では、中ぐり車軸の探傷波形の特徴と、探傷結果を可視化する方法について説明します。

車軸の使用中に発生する可能性があるきずは、バラスト(レールの碎石)や雪塊などの飛来物による打痕や、車輪、歯車などのはめ合い部に発生するきずなど、車軸の

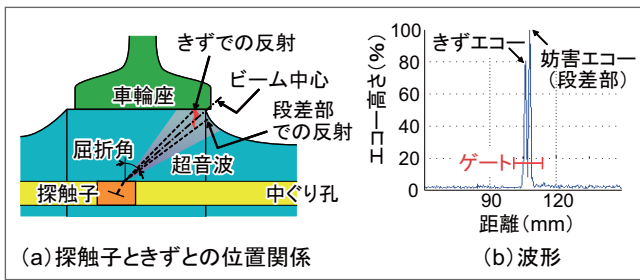


図7 車輪座におけるきずエコーと妨害エコー

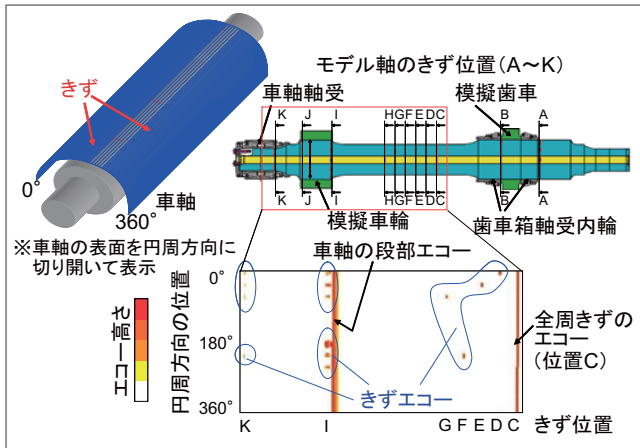


図8 車軸の超音波探傷結果のCスコープ表示

表面に発生する物が大半です。そこで、定期検査でも車軸の表面を重点的に探傷しています。車輪座(車輪とのはめ合い面)に発生したきずに超音波がちょうど到達した瞬間の、探触子ときずとの位置関係と、その時の波形(Aスコープ)を図7に示します。車軸には段差があるため、段差部でも超音波が反射します。きずの位置と段差部との距離が近い場合は、きずエコーと段差による妨害エコーとが同時に近接して表示されます。自動化された車軸探傷では、探傷ヘッドの移動に伴って変化する波形の中から、一瞬しか表示されないきずエコーを可視化の助けを借りずに弁別するのはほぼ不可能です。

車軸探傷では表面きずに注目するため、断面表示(Bスコープ)はあまり活用されていません。そこで、Cスコープについて考えます。中ぐり孔の内面から覗き込んで車軸表面を観察する状況を想定すると、表面全体を1本の筒とみなすことができます。この筒を円周上の1箇所切り開いた平面にエコー高さを描けば、車軸表面のCスコープが得られます。エコー高さを測定では、図5で説明したゲートを車軸の表面近くの距離に設定して、表面のデータのみを取り込みます。

表面きずが予め加工された車軸(モデル軸)を探傷し、Cスコープで表示した結果が図8です。グラフの横軸は軸方向の位置、縦軸は円周方向の位置(0~360°)を表します。車軸の段差のように全周に渡って形状が一様な場所では、

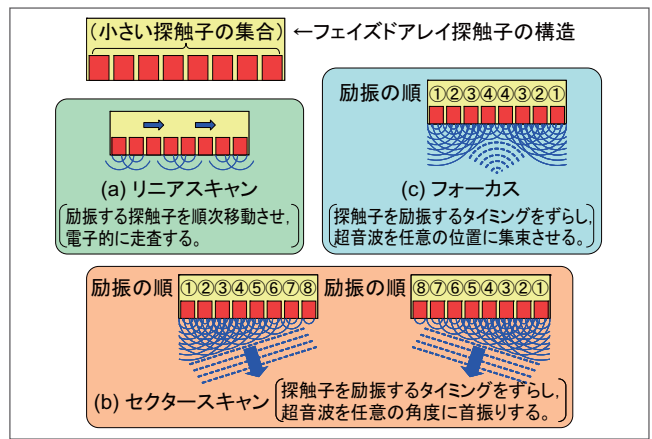


図9 フェイズドアレイ探触子の構造と電子走査モード

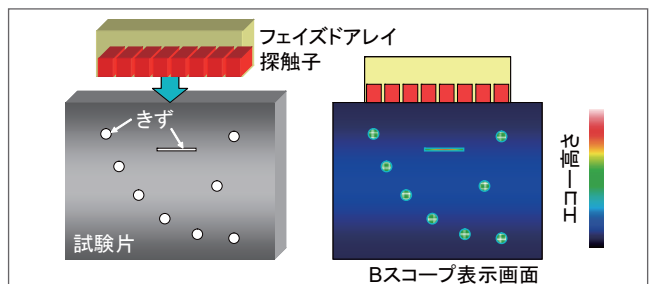


図10 フェイズドアレイ探触子によるBスコープ表示

エコー高さが一定のため縦方向の直線が表示されます。一方、きずエコーは、Cスコープ上で色の付いた点の集合として表示されます。図7で示したきずと同様に段差の近くにあるきずIは、図8では直線の左脇に「こぶ」のように表示されます。探傷装置から出力されたCスコープを参照すると、検査員はきずの有無を容易に判定でき、必要に応じて、きずの位置に探傷ヘッドを移動させて、きずを詳細に評価できます。ここでは実験結果を示しましたが、車軸探傷の実際の現場でも、Cスコープなどの表示方法を応用して、探傷結果を分かりやすく可視化しています。

フェイズドアレイによる可視化

これまででは、1個の探触子を走査することによって得られるデータを用いた可視化について説明しましたが、探触子側の工夫によって、より直感的に分かりやすい画像を得るための研究も進められています。その一つが「フェイズドアレイ」と呼ばれる技術です。小さい探触子を多数並べて、各々が超音波を送受信するタイミングを電子的に制御することによって、図9に示すように、探触子を走査せずに超音波の位置を動かしたり(リニアスキャン)、首振りさせたり(セクタースキャン)、任意の位置に集束させたり(フォーカス)することができます。

フェイズドアレイ探触子を用いて探傷し、BスコープあるいはCスコープ表示と組み合わせることによって、

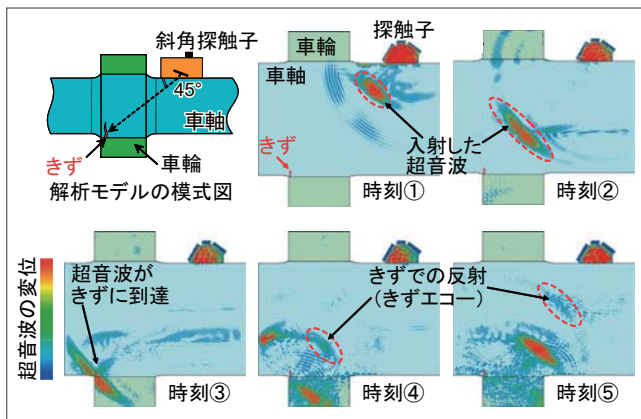


図 11 車軸-車輪はめ合い部の超音波シミュレーション

図10に示すように、探触子を走査しなくても表面に当てるだけで、断面のきずの像が瞬時に表示されます。電子機器の発達に伴って、探触子の複雑な制御やデータ処理が可能になったことから、近年、非常に進化している技術です。台車の検査でも、フェイズドアレイ方式を用いた車軸探傷装置が海外および国内の一部で採用され始めています。

超音波シミュレーションによる可視化

近年、鉄道車両の運動や振動の解析、輪軸の強度評価、空気抵抗が少ない車体形状の開発などのあらゆる場面で、シミュレーション技術が用いられています。非破壊検査の分野でも例外ではありません。ここでは、超音波シミュレーションによって、車軸探傷を可視化した結果を示します。

超音波は非常に高い周波数で振動しているため、人間の耳で聞くことができません。まして、目で直接見ることは不可能です。しかし、送信した超音波が反射して、Aスコープなどの波形として受信されるのは事実です。そこで、コンピューターを用いたシミュレーションで、超音波の伝搬挙動を再現する技術が開発されています。

シミュレーションを行うためには、起こっている現象を数式で表す必要があります。詳細は省略しますが、超音波の伝搬挙動は「波動方程式」という数式で表されることが知られています。車軸や車輪などの部品を多数の細かい粒子(要素)の集合体と考え、これらの要素が波動方程式に基づいて振動すると仮定して「有限要素法(FEM)」と呼ばれる解析手法を用いて計算すれば、超音波で探傷した時の挙動が再現されます。

表面きずを有する車軸に円筒状の車輪をはめ合わせた部品を探傷した時の、超音波シミュレーションの結果を図11に示します。ここでは、車軸と車輪とを合わせて、約10億個の要素の集合体だと仮定して解析しました。探触子から送信された超音波が拡がりながらきずに近づき、その一部が反射してきずエコーとして探触子に戻る様子が

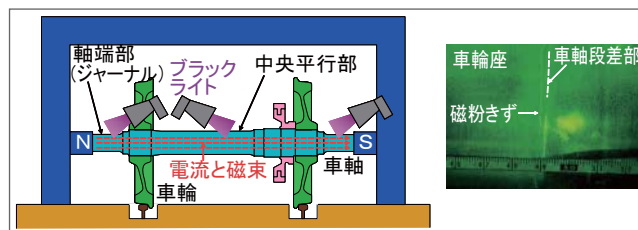


図 12 車軸の磁粉探傷装置ときず指示

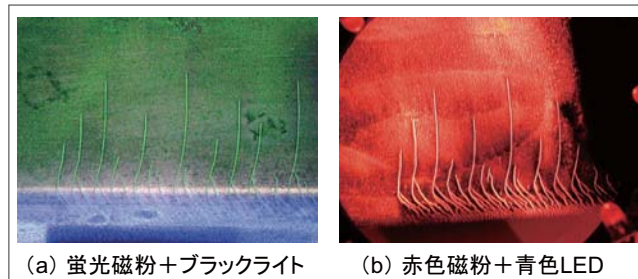


図 13 赤色蛍光磁粉による磁粉探傷(レールきず)

分かります。このようなシミュレーション技術を活用すれば、複雑な形状の部品を検査する場合に、どの位置あるいは方向から探傷すると最も精度よくきずを検出できるかが事前に確認でき、検査方法の検証が効率的に進められます。

磁粉探傷法での新たな可視化技術

車軸や台車枠の表面きずの検査では、磁粉探傷法が広く用いられています。車軸の磁粉探傷装置の構成例と、磁粉探傷で得られたきず指示を図12に示します。台車の磁粉探傷法では、磁粉の散布や磁化を自動的に行うことはありますが、きずの有無は検査員が確認します。磁粉模様を撮影してきずの有無を自動的に判定する研究も進んでいますが、当面は検査員の技量に頼ることになりそうです。なお、可視化とは直接は関係しませんが、紫外線の光源にLEDを用いたブラックライトや、図13に示すように、紫外線で黄緑色に蛍光する磁粉の代わりに、LEDなどによる青色光で赤色に蛍光する磁粉などの開発が行われており、今後も、磁粉探傷法の結果をより見やすくする技術の開発が期待されます。

おわりに

検査する部品の形状や検査の場面に応じて、検査員が最も直感的に分かりやすいように検査結果を可視化することは、今後も重要な技術であることは間違いありません。その一方で、可視化されたために、実現象や非破壊検査の原理をよく理解しなくても検査業務ができるのも事実です。物事に潜む事象を可視化する技術も重要ですが、少なくとも非破壊検査においては、可視化された物に潜む真実を見極める能力や経験も重要だと筆者は考えています。RRR