

第72回

鉄道車両の車軸の超音波探傷

はじめに

鉄道車両は図1に示すように、私たち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台車も検査されますが、台車の検査では、台車枠と輪軸（車軸と車輪の対）に、場合によっては輪軸を車軸単体にまで分解し、非破壊検査を活用した精密な検査がなされています。

車軸に適用される非破壊検査としては、超音波探傷と磁粉探傷があげられますが、ここでは超音波探傷について、

基本的な原理と歴史的な背景、および今後の展望を紹介します。

車軸の超音波探傷とは

車軸のように車体からの荷重を支持しながら高速で繰り返し回転する部材では、そのままでは人間の目（目視検査）や耳（打音検査）で確認できない微細なきずが発生するような方が一の事態を想定しておく必要があります。そこで、定期検査で非破壊検査の手法を用いてきずを微細なうちに検出できるようにすることで、車軸ひいては鉄道

車両の安全性が担保されています。

非破壊検査の代表的な手法の一つとして、図2に示す「磁粉探傷（磁気探傷）」があります。この方法では、部材の表面を磁化器で磁化しながら蛍光磁粉液を散布し、きずから漏洩した磁束に凝集した磁粉をブラックライトを用いて観察することで微細な表面なきずが検出できます。しかし、検査の際に表面が露出した部位でない適用できず、車輪や歯車がはめ合わされたままの車軸の部位の検査や、後述する在交状態での検査には適用が困難です。

そこで、車軸のもう一つの非破壊検査

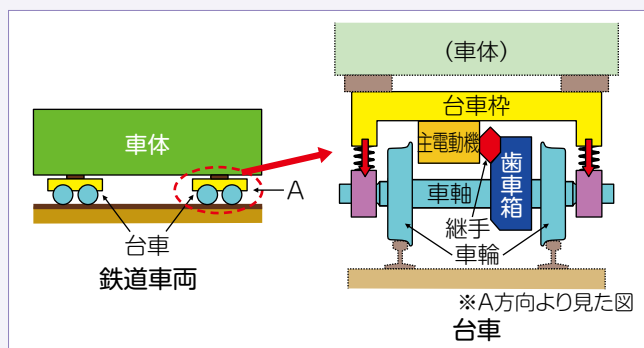


図1 鉄道車両と台車の構成

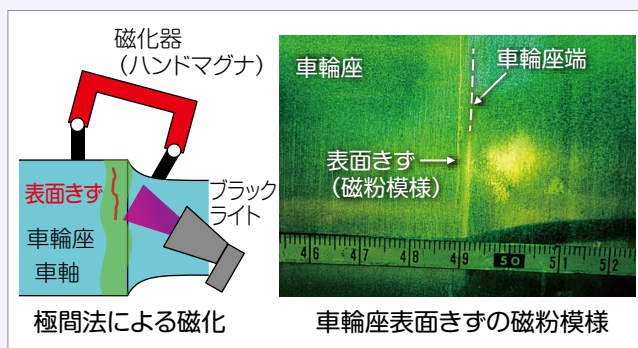


図2 車軸の磁粉探傷（磁気探傷）

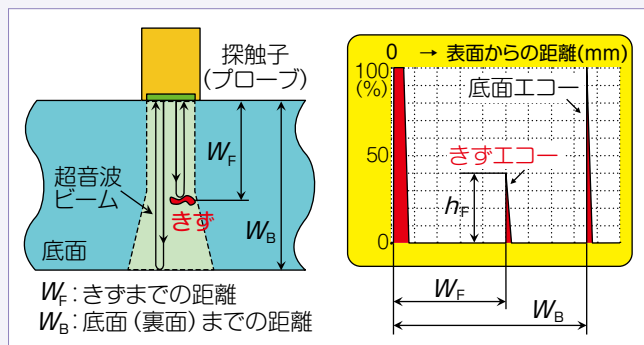


図3 超音波探傷の原理

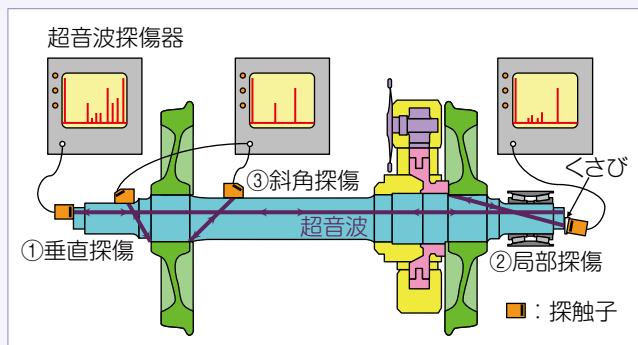


図4 車軸の超音波探傷の3つの方法



図5 斜角探傷法による車軸の超音波探傷

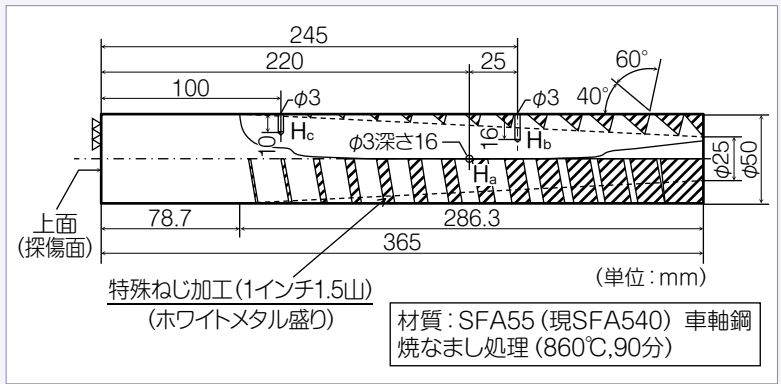


図6 国鉄(鉄研)Ⅱ型標準試験片

手法として、超音波探傷が適用されています。超音波探傷は図3に示すように、検査する部材の内部に、人間の耳には聞こえない高い周波数の音波(超音波)を探触子(プローブ)から入射したときに、その反射波(エコー)の表面からの距離 W_F や波形の高さ h_F からきずの位置や大きさを確認する方法で、部材の内部あるいは直接観察できない裏面やはめ合い面のきずが検出できます。

超音波探傷には音波の種類や入射角などに応じて多数の手法がありますが、車軸の超音波探傷では図4に示すように、①垂直探傷法、②局部探傷法、③斜角探傷法の3つの方法が用いられています。①の垂直探傷法は、車軸端面に垂直探触子を接触させて車軸に平行に縦波超音波を入射し、車軸全長のきずの有無を一度に検査する方法です。②の局部探傷法は、垂直探触子に「くさび」を取り付けた複数の角度の局部探触子を用いて、車軸全長をいくつかのブロックに分割して重点的に探傷する方法です。③の斜角探傷法は、車軸側面に斜角探触子を接触させて横波超音波を入射し、車輪のはめ合い部(車輪座)などを近距離からピンポイントで探傷する方法です。例として、車輪座の斜角探傷の様子を図5に示します。これらの方法を組み合わせると、車軸全体に超音波をくまなく行き渡らせ、きずが発生する可能性がある重要部位での見落としがないようにしています。

車軸の超音波探傷の始まり

走行中の列車で車軸が折損することは、少なくとも日本では、現在は皆無に近い事象ですが、戦後の昭和20年代には相応の本数が折損していました。たとえば、1950(昭和25)年度には、東京近郊の電車に限っても10本の車軸折損が報告されています¹⁾。車軸折損を防止するための非破壊検査法の開発は喫緊の課題でした。

旧国鉄では、大井工場(現在のJR東日本 東京総合車両センター)で1950(昭和25)年に磁粉探傷が、翌年の1951(昭和26)年には超音波探傷が試行されました。超音波探傷の設備はその後、鷹取、吹田、大宮、松任、五稜郭、高砂、長野の各工場、および新鶴見貨車区(いずれも当時の名称)をはじめ全国に導入されました。当時の超音波探傷は垂直探傷のみで、周波数2MHzの水晶振動子を内蔵した探触子が用いられ、探傷器も現在のフルデジタル式とは異なり、ブラウン管の画面を含めてアナログ式のものを用いられていました。それでも、吹田工場での実績として、1954(昭和29)年には車軸の検査本数1,431本のうち4.5%(約65本)の取り替えに至っており²⁾、超音波探傷の適用が車軸折損の防止に効果を上げていたことが推測されます。

また、車軸内部の超音波の減衰度測定も、当時は規定として実施されてい

ました。これは、当時の車軸鋼は粗大な結晶粒や不純物の存在により必ずしも良質とはいえず、車軸を超音波探傷する以前に、そもそも探傷のための超音波を車軸内部に伝搬させられるかという観点で実施されていたものです。

国鉄Ⅱ型標準試験片による標準化

前述のように、垂直探傷法による車軸の超音波探傷は車軸折損対策として効果を上げていましたが、その一方で、車両工場などの検査の施行箇所によって探傷感度が必ずしも統一されていないという課題がありました。

そこで、1957(昭和32)年8月3日に車軸超音波探傷検査基準が旧国鉄工作局にて制定されました。それとともに、超音波探傷器の精度確認や各工場間での探傷感度の差を少なくすることを目的として、同年に図6に示す「国鉄Ⅱ型標準試験片」が大井工場で作られました。直径50mm、長さ365mmの試験片で、感度調整時の遅れエコー(側面での反射)を防ぐために、ホワイトメタルが盛られた特殊な構造をしています。このときには、約200本の試験片から選ばれた、エコー高さの平均値に最も近い1本を標準試験片No.0として保管し、残りのうち54本が旧国鉄の工場各所に配布され、さらに40本が鉄道車両メーカーや鋼材メーカー、

あるいは探傷器メーカーなどに配布された記録が残っています。

その後、新幹線の開業時に試験片が増備されるとともに、一部の試験片は昭和50年代に再検定が実施され、標準試験片No.0との感度差が所定の範囲内(試験片の5回目の底面反射波が+1.5dB, -0.5dB以内)の試験片には㊦マークが打刻されました。

この試験片はJRの発足時に「鉄研II型標準試験片」と名前を変えて、JR各社をはじめとする各所で現在も使用されています。なお、標準試験片㊦No.0は、感度差の検定にいつでも供することができるよう、周波数2MHzの水晶振動子を内蔵する測定用の探触子とともに鉄道総研にて保管されています(図7)。

新幹線車軸の中ぐり化と超音波探傷

1964(昭和39)年に新幹線が開業すると、当時の新幹線電車検査施行基準規程に基づき、交番検査でも車軸の超音波探傷が実施されるようになりました。交番検査は在姿状態(車両を分解せずに運転に供されるままの状態)で行う検査で、新幹線の開業当時は「30日または走行距離が2万kmを超えな

い期間のいずれか短い期間ごと」に実施されていました。交番検査では垂直探傷を主体に局部探傷を併用して、図8のような手押し車にアナログ探傷器を載せた装置で探傷を行っていました³⁾。その後、1969(昭和44)年に交番検査周期の距離規程が3万kmに改められましたが、基本的な探傷方法は踏襲されました。

新幹線の車軸検査に転機が訪れたのは、1992(平成4)年の300系新幹線の登場です。300系では、270km/hでの高速運転を実現するために、とくに台車周りの「ばね下質量」の軽減が図られました。その際、車軸の軽量化を目的として、軸中心に直径60mmの貫通孔を加工した「中ぐり車軸」が採用されました。そのため、従来の中実車軸(中ぐり孔が加工されていない車軸)に適用されていた超音波探傷法を用いることができず、探傷方法を抜本的に変更する必要が生じました。

このとき採用されたのが図9に示すように、斜め前後の方向に超音波を入射する2個の探触子を内蔵した探傷ヘッドを中ぐり孔に挿入して探傷する方法です。探傷ヘッドを回転させながら軸方向に所定の速度で掃引し、らせん状に走査することにより、車軸の全周、全長を探傷することができます。

この方法の原理は斜角探傷と同じですが、周波数が5MHzで、はめ合い部でのSN比を勘案した屈折角50°の斜角探触子が標準的に用いられています。

車軸の中ぐり化の本来の目的は軽量化にありましたが、超音波探傷の面からも、従来の中実車軸の斜角探傷と比較して、車軸の肉厚の斜め距離に相当する短いビーム路程で高精度に探傷できるようにになりました。

車軸の超音波探傷の自動化

上述の新幹線車軸の交番検査では、探傷前の車軸端面の処理(軸端キャップの取り外しなど)や中ぐり孔の清掃、探傷装置を移動させて探傷ヘッドを固定する作業に人手を要しますが、いったん探傷が始まると、探傷ヘッドの走査やきずの有無の判定はすべて自動で行われ、検査の効率化が図られています。

同様に、超音波探傷の自動化の流れは、在来線を含む全般検査などの解体検査における輪軸検修ラインでも進みました。現在、JR各社で全般検査を担う総合車両センター(総合車両所、工場)や公民鉄の車両検修場でも、多くの超音波自動探傷装置が導入されています。

その一つが、図10に示す中実車軸用の自動探傷装置です。この装置では、垂直探触子と4個程度の局部探触子を円周方向に配置した探傷ヘッドが車軸の両軸端にセットされ、軸端面に探傷油を供給しながら輪軸を回転させることにより、車軸全長を複数のブロックに分割して一度にきずの有無を監視します。そして、多数の健全な車軸のノイズレベルやきず入り車軸の波形から作成されたしきい値曲線をもとに、きずの有無を自動で判定します。



図7 標準試験片㊦No.0と水晶探触子

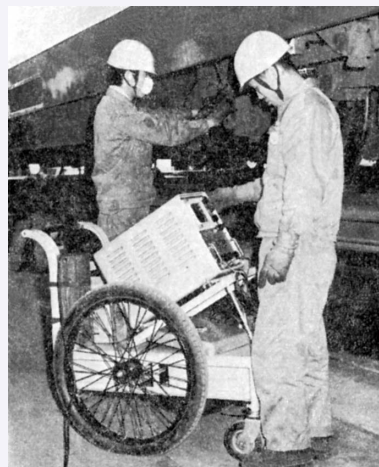


図8 初期の新幹線車軸の超音波探傷風景
出典：詳解 新幹線, 日本鉄道運輸協会³⁾

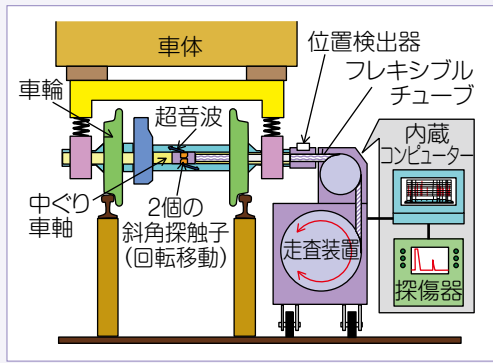


図9 交番検査用中ぐり車軸超音波自動探傷装置

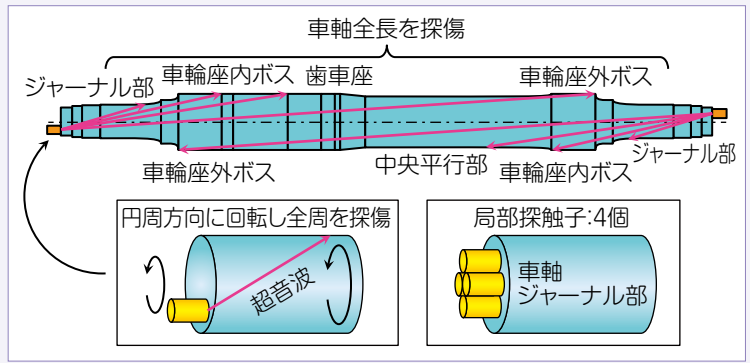


図10 局部探傷法による中実車軸超音波自動探傷装置

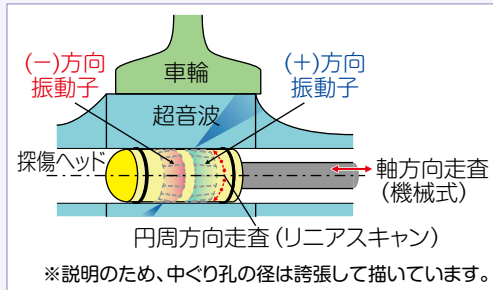


図11 マルチプローブ方式による中ぐり車軸の超音波探傷

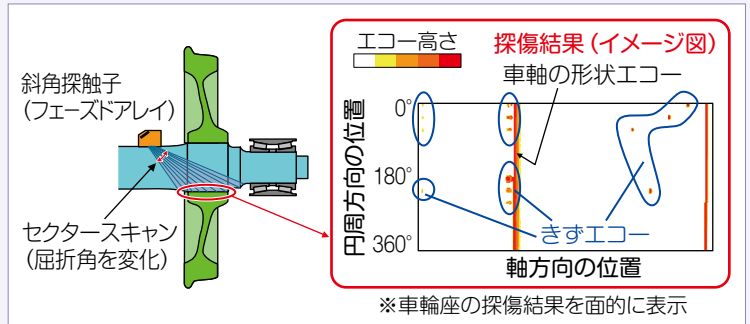


図12 フェーズドアレイ探触子による中実車軸の斜角探傷

車軸の超音波探傷の今後

超音波探傷の近年の話題として、従来の機械的な探触子の走査に代わり、多数の振動子を1列、格子状、あるいは同心円状に配置して電子的に走査することにより、超音波ビームの伝搬方向や焦点距離を制御する「フェーズドアレイ」の技術が注目されています。

中ぐり車軸の超音波探傷では図11に示すように、多数の振動子を探傷ヘッドの円周方向に並べ、電子回路を切り替えて超音波を全周に発振する「マルチプローブ」を採用した装置が一部で導入されています⁴⁾。探傷ヘッドの回転動作を省略することで、装置の機構が簡素化されています。

一方、中実車軸の斜角探傷でも図12のように、フェーズドアレイ探触子を用いて屈折角を振りながら探傷する装置が導入されつつあります。これにより、車軸はめ合い部の内面のきずの有無を面的に表示することができます。日本国内に限らず、ヨーロッパや高速鉄道の発展が著しい中国でも、

新たな超音波探傷技術の研究開発が報告されています。

フェーズドアレイやそれに類する探傷方法では、アレイの個々の振動子の不均一性や、アレイ間隔による探傷ピッチの制約を受けるので、単一の振動子を駆使して探傷する従来方式の方が優れている点もあります。車軸の超音波探傷でも、新規技術の動向や特性を十分に見極めたうえで導入が図られてゆくものと考えます。

一方で、近年では山手線E235系における車両搭載機器の状態基準保全(CBM)の考え方や、新幹線N700Aにおける台車振動検知システムの導入により、保守の高度化が図られつつあります。車軸に関しても、定期的な非破壊検査のみならず(あるいはそれにとって代わり)、たとえば、回転体である車軸に貼付したセンサーで得られた応力や振動などの情報をテレメーターでリアルタイムに送信し、車軸の異常を即座に判定するような抜本的なシステムが、近い将来に導入されるかもしれません。

おわりに

ここでは、鉄道車軸の超音波探傷について、基本的な原理と歴史的な背景、および今後の展望を紹介しました。車軸の超音波探傷に限られたことではありませんが、技術継承の困難さや労働力人口の減少を受けて、車軸探傷の自動化や高度化の流れは今後も続くと考えられます。しかしながら、探傷装置を操作し、きずの有無を最終的に判断するのはやはり人間です。車軸の超音波探傷が探傷技術者による「検査」として、今後も継続されることが望めます。

(牧野一成/車両構造技術研究部
車両強度研究室)

文献

- 1) 武内久：大井工場における超音波及び磁気探傷の概況、非破壊検査、Vol.2, No.3, pp.83-91, 1953
- 2) 廣重巖：輪軸、交友社、1971
- 3) 新幹線運転研究会：詳解 新幹線、日本鉄道運転協会、p.597, 1975
- 4) 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, pp.114-117, 2007