

中ぐり車軸のきずを 在姿状態で探る

新幹線電車では、車軸の中心に孔を空けた中ぐり車軸が用いられています。交番検査では、営業運転中の列車のままの「在姿状態」で車軸の超音波探傷検査が行われますが、車両の重量によって車軸を曲げる負荷が作用するため、きずのエコー高さが変化する可能性があります。本稿では、中ぐり車軸の在姿状態での超音波探傷の特徴を述べ、エコー高さの変化を確認する手法として、実体輪軸を用いた超音波探傷試験とその結果について紹介します。



牧野 一成
Kazunari Makino
車両構造技術研究部
車両強度研究室
主任研究員
[専門分野] 非破壊検査、
車軸の超音波探傷と強度

中ぐり車軸の超音波探傷とは

新幹線電車では図1のように、中心に直径60mmの中ぐり孔を空けた中ぐり車軸が主に用いられています。すべての鉄道車両は定期的に検査を受けることが義務づけられていますが、新幹線電車の検査種別の一つに「交番検査」があります。交番検査は30日または走行距離が3万kmを超えない期間のいずれか短い期間ごとに行われますが、その検査項目の一つとして超音波を用いた車軸の探傷検査（きずを探す検査）が行われます。

交番検査での車軸の超音波探傷の特徴として、「在姿状態」で行う点が挙げられます。在姿状態とは、車両の部品を分解したりせず、営業運転中の列車のままの状態のことを言います。新

幹線電車は編成を組んだまま、交番検査用のピット線（車両の床下に検査用の空間を設けた線路）に入線します。そして、車軸端面のフタのみを取り外した後、図2のように斜め前後方向に横波超音波を発振する2個の斜角探触子を備えた探傷ヘッドを中ぐり孔に挿入し、前後および円周方向に走査しながら車軸の全周、全長にわたってきずの有無を確認します。

超音波探傷装置には探傷器とコンピューターが内蔵されており、探傷ヘッドの位置に応じて、図3のような波形が探傷器の画面に表示されます。波形の横軸はビーム路程（探触子からの斜め距離）、縦軸はエコー高さ（受信した反射波の強さ）です。車軸にきずが存在すると、超音波がきずで反射

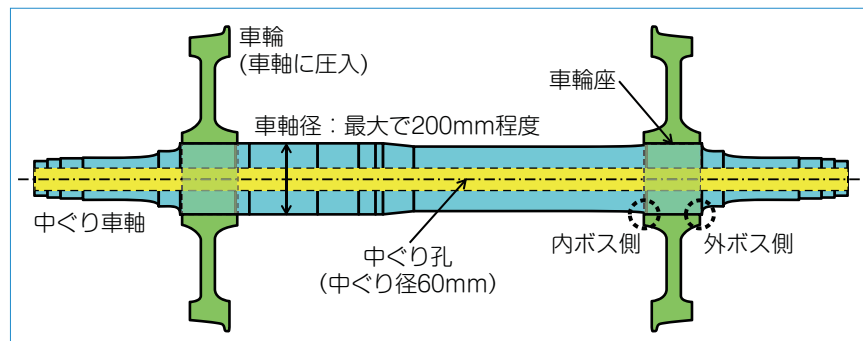


図1 中ぐり車軸が組み込まれた新幹線電車の輪軸

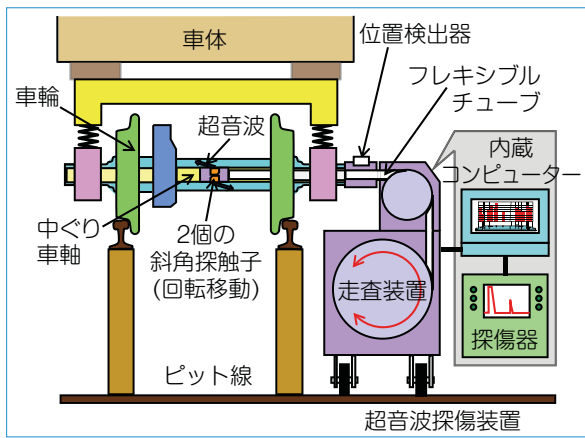


図2 中ぐり車軸の在姿状態での超音波探傷

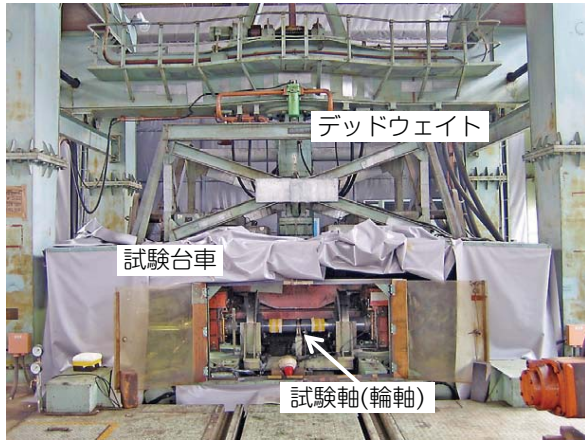


図4 実体輪軸疲労試験装置

し「きずエコー」として表示されます。きずが大きいほどエコーは高くなるので、エコー高さに対するしきい値を設けて、それを超えるエコーが表示されたときに、コンピューターが自動的にきずありと判定するようにしています。

在姿状態での車軸探傷の特徴

輪軸(2枚の車輪と1本の車軸の組み合わせ)は、車輪の中心孔の内径を車軸の車輪座(車輪がはめ合わされる箇所、はめ合い部)の外径よりも少し小さく加工しておき、油圧プレス装置で車輪を車軸に押し込む「圧力ばめ」で組み立てられます。したがって走行中、車輪が車軸に対してずれ動くことはありません。しかし、走行中の輪軸が何度も高速で回転するのに伴って、車輪座の端部のみがごくわずかに車輪と擦られて摩耗し、それを起点として車軸にきずが発生する場合があります。車軸の超音波探傷で注目すべき検査部位は

車輪座の端部で、特に車軸の長手方向の中心側(内ボス側)の端部を重点的に検査しています。

在姿状態で検査中の車軸には、車両の重量とレールからの反力により、図2のように車軸を見たときに車軸を上にも凸の方向に曲げる負荷(曲げモーメント)が作用します。この曲げモーメントによって車軸と車輪のはめ合い部での接触状態が変化し、接触面での超音波の反射や透過の割合が変化して、きずのエコー高さが変化する可能性があります。きずが発生した車軸が交番検査を受ける場合、車両がたまたま停止した位置に応じて、検査する車軸中のきずの円周方向の位置が偶然に決まります。そして、きずの位置と曲げモーメントの方向の相対関係によってエコー高さが変化します。その結果、エ

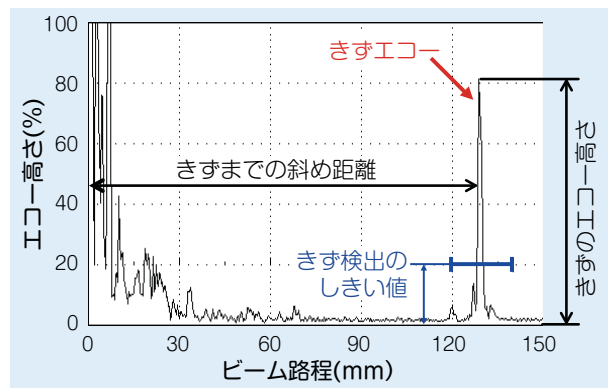


図3 超音波探傷の波形例

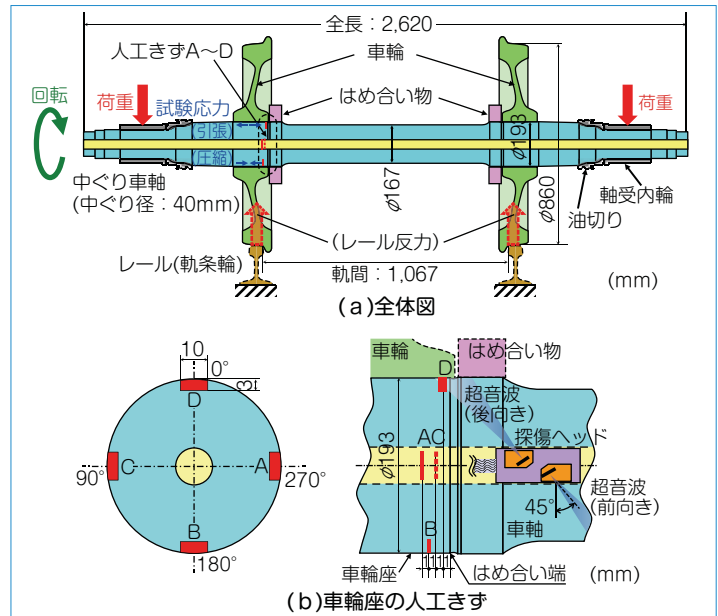


図5 試験に用いた実体輪軸の模式図

コー高さとしきい値の関係によっては、きずの大きさを過小評価したり、きず以外のエコーをきずとして誤検出することが考えられます。このように、車軸のきずエコーを正確に評価することは意外に難しく、在姿状態で車軸を超音波探傷するには注意しなければなりません。

実体輪軸でのきずエコーの測定

列車の走行に伴ってきずエコーが実際に変化するかを確認するために、図4に示す実体輪軸疲労試験装置を用いて、実物大の輪軸に荷重を作用させたまま繰り返し回転させる「繰返し回転曲げ」の負荷中に超音波探傷試験を行いました。試験に用いた実体輪軸を図5に示します。車輪座の内ボス側端部に4個の人工きず(以下、きず)A

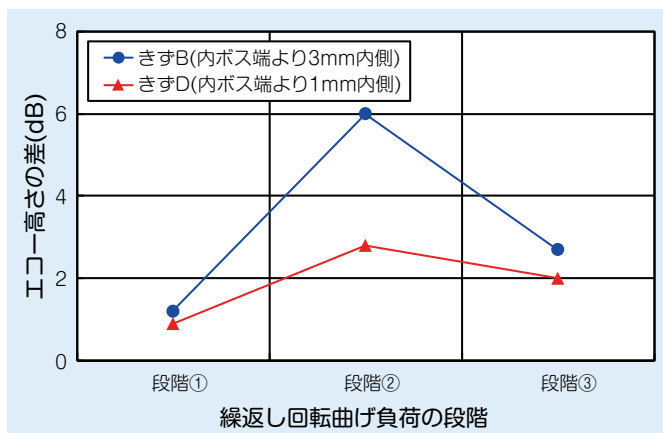


図6 車両の停止位置によるきずのエコー高さの差

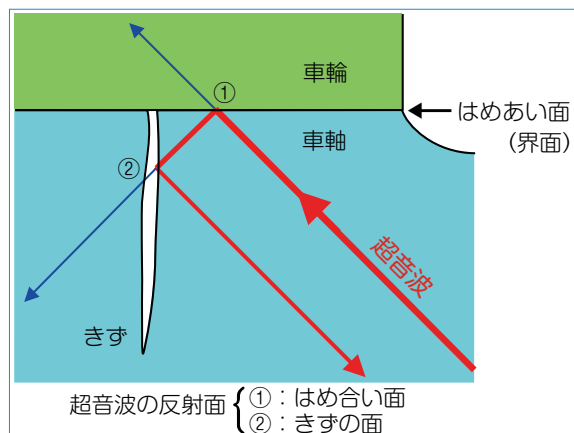


図7 きずでの超音波の反射

～Dが加工されており、きずを加工後に車輪が圧力ばめ（圧入）されています。これらのきずは、大きさはすべて同じですが、きずの位置によるエコー高さの違いを調べるために、はめ合い端からの距離を1～4mmの範囲で変化させました。きずの円周方向の位置を90度ピッチで変えたのは、一つのきずを探傷中に他のきずのエコーが重ならないようにするためです。車軸は在来線車両での使用を想定して製作したもので、中ぐり径は40mmで、新幹線電車の車軸で行われている表面処理（高周波焼入焼戻し）は施工されていません。この車軸を、図2に示したものと同様な中ぐり車軸用超音波自動探傷装置で探傷します。実験では、斜め45度の前後方向に周波数5MHzの超音波を発振する探触子を用いました。

まず、疲労試験装置に載せるおもり（デッドウェイト）で荷重を調整し、試験応力を約40MPaとした段階①できずエコーを測定しました。試験応力とは、車軸の曲げによって車輪座の表面に発生する単位断面積あたりの軸方向の引張または圧縮の力のことで、値が大きいほど車軸に対する負荷が大きいことを示します。なお、試験応力40MPaは、走行中の列車の車軸に平均的に発生する応力の数割増しから2倍程度に相当します。この状態で輪軸を

500万回転（約13.5万km走行に相当）させて車軸に繰返し回転曲げを荷した後、デッドウェイトを増やして試験応力を60MPaとした段階②できずエコーを測定しました。その後、試験応力60MPaで輪軸をさらに300万回転（約8.1万km走行に相当）させた後の段階③できずエコーを測定しました。

①～③のいずれの段階でも、超音波で測定中の車軸には常に曲げモーメントが作用していますが、このとき、きずBとDそれぞれについて、きずがほぼ真上（0度）および真下（180度）に位置するように輪軸を回転、停止させて探傷し、きずエコーを測定しました。輪軸の方向を180度回転させて探傷したのは、交番検査で車両が停止する位置に応じてエコー高さがどれだけ変化するかを評価するためです。

きずエコーの測定結果

超音波のきずへの入射方向によって測定結果は変化しますが、ここでは、超音波をきずに対して斜め後向き（超音波が軸端に向かう方向）に入射した場合の結果を示します。曲げモーメントの方向（車両の停止位置）の影響を評価するため、①～③の各段階で、きずBとDそれぞれに対して、きずがほぼ真上および真下に位置したときのエコー高さを測定し、両者の差を求めた

結果を図6に示します。図のグラフでは縦軸をdB（デシベル）としましたが、エコー高さの差がない場合が0dB、きずが真上のときに対して真下にするとエコー高さが約半分になる場合が6dBに相当します。

きずBでは、段階①で小さかったエコー高さの差が段階②で約6dBに達した後、段階③で再び小さくなりました。一方、きずDはきずBよりも変化が小さく、各試験段階でのエコー高さの差は最大で約3dBでした。なお、探傷試験終了後にきずを開口して調査した結果、きずの大きさにはほとんど変化がなかったため、きずの大きさの影響を受けてエコー高さが変化したのではないことが分かっています。

きずエコーの変化の原因

車軸と車輪のはめ合い部の斜角探傷では図7のように、①はめ合い面、②きずの面で超音波が2回反射して探触子の方向に戻り、きずエコーとして測定されます。実験に用いた人工きずの場合、②のきずの面には超音波が反射するのに十分なすきまが存在するので、きずエコーに最も影響を及ぼすのは、①のはめ合い面での超音波の反射と考えられます。

ここで、図6に示したエコー高さの差の変化について考えます。段階①で

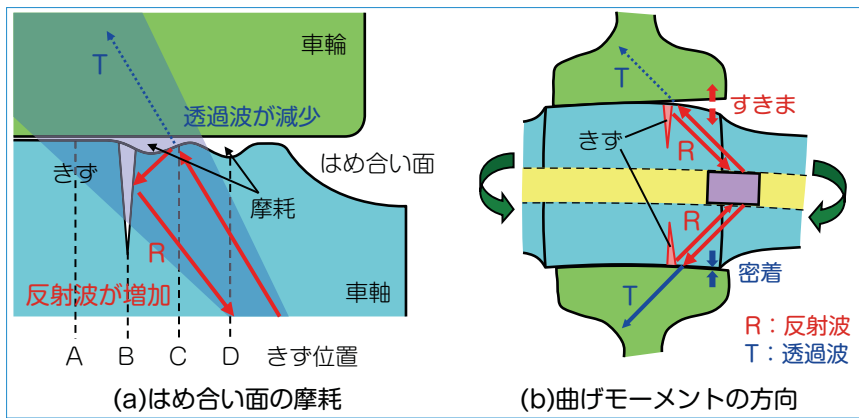


図8 きずエコーの変化の原因

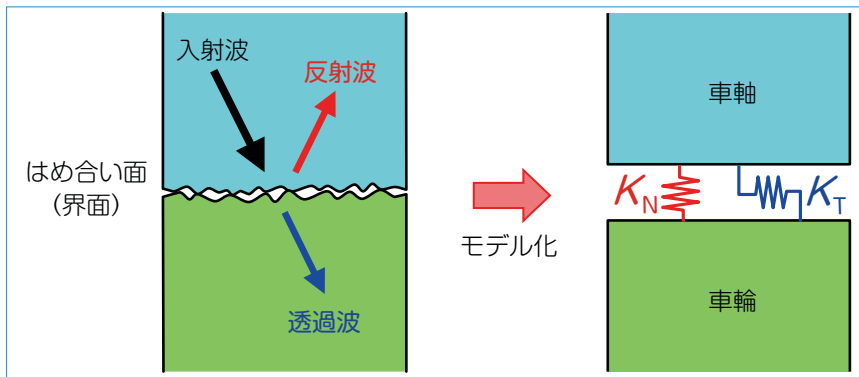


図9 スプリング界面モデル

は車軸と車輪がまだ十分に密着しており、曲げモーメントの方向を変えても両者は密着したままだったため、エコー高さの差がほとんど生じませんでした。ところが、繰返しの負荷が進んだ段階②では、図8 (a) のようにはめ合い面の端部が徐々に摩耗し、同図 (b) のように曲げモーメントの方向に応じて面が密着した状態とすきまがある状態とを繰り返したため、エコー高さの差が大きくなったと考えられます。さらに摩耗が進んで段階③になると、どちらの方向に曲げられてもはめ合い面の端部には常にすきまが生じ、超音波が車輪側へほとんど透過せずに反射したため、エコー高さの差が再び小さくなったと考えられます。このように、きずの大きさがほぼ一定であったにも関わらずエコー高さが変化したのは、試験段階の進行に伴って車軸と車輪のはめ合い部での接触状態が変化し

たことが一因と考えられます。きずの位置や測定の時期にもよりますが、実験では、はめ合い端から3mmに位置するきずBでこれらの影響を最も受ける結果となりました。

これらの実験結果を評価するために、車軸と車輪のはめ合い面 (界面) を K_N , K_T の2個のばねで表現した、図9に示す「スプリング界面モデル」¹⁾を用いて、①のはめ合い面での超音波の反射を理論的に計算しました。その結果、車軸が車輪と接触することによってエコー高さが最大で約8.0dB低下することが分かりました。これは、車軸と車輪が完全に密着した状態と完全にすきまがある状態の差に相当します。実体輪軸を用いた実験ではエコー高さの差が最大できずBの約6dBでしたので、車軸の曲げによってはめ合い面の密着あるいはすきまが部分的に生じていたと推定されます。

おわりに

本稿では、新幹線電車の中ぐり車軸での超音波探傷の方法、在姿状態で探傷する場合の特徴とともに、車両の停止位置によってきずエコーが変化する可能性を述べました。また、エコー高さの変化を確認する手法として、実体輪軸を用いた繰返し回転曲げ負荷中の超音波探傷試験とその結果について紹介しました。

新幹線電車車軸の在姿状態での実際の超音波探傷では、60MPaの試験応力に相当する大きな負荷は作用せず、車軸表面に高周波焼入焼戻しが施工されていて耐摩耗性が高いので、エコー高さの変化は本稿で述べたほど大きくはないと思われます。しかし、車軸と車輪のはめ合いや摩耗の状態、あるいは車両の停止位置に応じて、はめ合い部ではきずの大きさが同じでもエコー高さが変化する可能性があることは重要な知見です。その対策として、きずエコーを検出した際に、きずの円周方向の位置に応じてエコー高さに補正をかけたり、当該の輪軸をジャッキ等を用いて部分的に浮かせて曲げモーメントをなくした状態で探傷したりすることが考えられます。

なお、全般検査のように輪軸単体はまだ解体してから超音波探傷を実施する場合には、車両の重量による曲げモーメントは作用しませんが、はめ合い面での摩耗状態によってエコー高さが変化する可能性は残っているので注意が必要です。[RRR]

文献

- 1) K.Makino,S.Biwa : Influence of Axle-Wheel Interface on Ultrasonic Testing of Fatigue Cracks in Wheelset,Ultrasonics, in press,2012 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2012.06.007>).