

# 車輪との接触面圧を考慮した車軸きずエコーの 定量評価

牧野 一成\* 坂本 博\*\*

Quantitative Evaluation on Flaw Echo of Railway Axle in Consideration of  
Contact Pressure with a Wheel

Kazunari MAKINO Hiroshi SAKAMOTO

For railway axles, the wheel seat is periodically inspected by the ultrasonic testing. When the ultrasonic axle inspection is performed with wheels being mounted, the flaw echo height may vary according to the fitting condition. For the inspection performed in the in-service condition, the echo height may also vary according to the bending load acting on the axle due to the car weight. In this study, the variation of echo height due to the contact pressure with the wheel was quantitatively evaluated by the simulation of ultrasound propagation. And the echo-height variation during cyclic rotating bending in a full-sized wheelset was investigated experimentally from the viewpoint of the variation of normal stiffness at the axle-wheel interface.

キーワード：車軸，超音波探傷，はめ合い部，きずエコー，接触面圧，界面剛性

## 1. はじめに

鉄道車両の車軸の定期検査では、表面が露出した箇所には磁粉探傷が適用されるが、大歯車のように定期検査では通常取り外さない部品の座や車輪交換を行わない場合の車輪座（車輪とのはめ合い面）の検査では、はめ合い面のきずの有無を超音波探傷（主に斜角探傷）により確認し、車軸の健全性を確保している<sup>1)</sup>。車輪座の内ボス側端部はフレットングき裂の発生が懸念されるため入念に検査するが、車輪がはめ合わされた状態で超音波探傷を行う場合、はめ合い状態に応じて車軸-車輪間の接触面圧が変化し、きずエコーの高さが変化する。また、新幹線電車の交番検査では、列車の編成のままの状態（在姿状態）で車軸の超音波探傷を行うが、車両重量により車軸に作用する曲げ負荷によって車輪との接触状態が変化し、エコー高さが変化する可能性がある。このように、車輪との接触状態が車軸の超音波探傷に及ぼす影響は定性的には理解されている。これを定量的に評価した研究としては、中ぐり車軸の車輪座の接触面圧分布を垂直超音波で測定した Marshall らの報告<sup>2)</sup>があるが、車軸の斜角探傷に関する報告は見当たらない。

本報告では車輪座のきずを対象として、車軸-車輪のはめ合い面を表現するモデルを用いた超音波探傷シミュレーションにより、きず深さおよび車輪との接触面圧がエコー高さに及ぼす影響を定量評価した結果を示す。ま

た、はめ合い部にきずを有する実体輪軸に繰返し回転曲げを与える負荷試験を行い、繰返し負荷に伴う車輪との接触状態の変化や車軸への曲げの作用によるきずエコーの変動を、界面剛性により評価した結果を報告する。

## 2. 車軸-車輪はめ合い面のモデル化

### 2.1 スプリング界面モデル

車軸に車輪をはめ合わせる際、車輪座は研磨やペーパー掛けで滑らかに仕上げる。一方、車輪内径面は、車軸に対して所定の締め代を有するように車輪座径よりも小さい内径で機械加工した後、ある程度の粗さに仕上げて車軸に圧入する。したがって、車軸-車輪のはめ合い面は微視的には図1(a)に示すように、ある粗さを有する面同士が、締め代によって生じる面圧で接触した状態にある。この状態は近似的に、2種類の界面剛性（垂直剛性  $K_N$ 、せん断剛性  $K_T$ ）を有する同図(b)のスプリング界面<sup>3)</sup>によってモデル化される。ここで界面剛性とは、車軸-車輪間の相対距離が単位長さだけ変化したときの

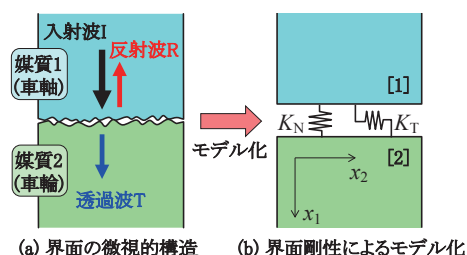


図1 スプリング界面モデル

\* 車両構造技術研究部 車両強度研究室

\*\* 前 車両構造技術研究部 車両強度研究室

特集：車両技術

垂直またはせん断応力の増分である。車軸と車輪はいずれも炭素鋼であることから、以下では両者とも Lamé の定数  $\lambda, \mu$  で定義される等方弾性体とし、密度  $\rho$ 、縦波音速  $c_L$ 、横波音速  $c_T$  は両者で等しいとみなす。

スプリング界面モデルにおいて、角周波数  $\omega (= 2\pi f, f$ : 周波数) の縦波または横波が、車軸から車輪へ界面に垂直に入射するとき、界面剛性と超音波の反射率の関係は式 (1), (2) で表される。

$$K_N = \frac{\omega \rho c_L}{2} \sqrt{\frac{1}{R_L^2} - 1} \quad (1), \quad K_T = \frac{\omega \rho c_T}{2} \sqrt{\frac{1}{R_T^2} - 1} \quad (2)$$

ここで  $R_L, R_T$  はそれぞれ、縦波および横波の垂直入射時の反射率である。

2.2 周期的非接合界面による等価モデル

上述のスプリング界面モデルは理論的な取扱いは容易であるが、超音波の伝搬を有限要素法で計算するためには、界面剛性に相当するばね要素を用いたモデルが必要で、計算上やや煩雑となる。そこで本研究では、図 2 に示すような周期的な非接合部を有する界面モデルを用いることとする。このモデルの界面での挙動は、式 (3) で求められる垂直剛性  $K_N$  を有するスプリング界面と等価であることが知られている<sup>4)</sup>。

$$K_N = \frac{E'}{s} \left\{ \frac{4}{\pi} \ln \left[ \sec \frac{\pi(1-w/s)}{2} \right] \right\}^{-1} \quad (3)$$

ここで  $E'$  は平面ひずみ縦弾性係数 ( $= E / (1-\nu^2)$ ,  $E$ : 縦弾性係数,  $\nu$ : ポアソン比),  $s$  は周期境界の幅,  $w$  は完全接合部の幅である。 $s$  および  $w/s$  の値を調整することによって、任意の垂直剛性  $K_N$  を有する界面が表現される。

車軸および車輪の密度を  $\rho = 7.8\text{g/cm}^3$ , 縦波音速を  $c_L = 5,900\text{m/s}$ , 横波音速を  $c_T = 3,230\text{m/s}$  とし、周波数  $f =$

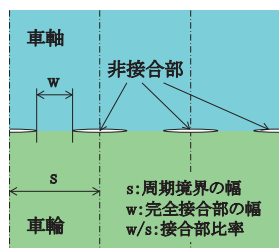


図 2 周期的な非接合部を有する界面モデル

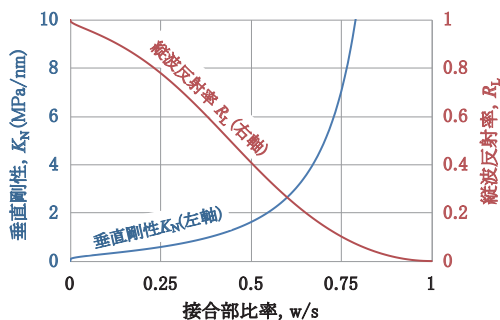


図 3 接合部比率と垂直剛性, 縦波反射率との関係

5MHz の縦波超音波が、周期境界の幅  $s = 0.32\text{mm}$  (横波波長  $\lambda_T = 0.646\text{mm}$  の約 1/2) の界面に垂直入射する場合に、式 (1), (3) より導かれる接合部比率  $w/s$  と垂直剛性  $K_N$  および縦波反射率  $R_L$  との関係を図 3 に示す。接合部比率  $w/s$  が高いほど垂直剛性  $K_N$  が高くなり、高い剛性がより多くの超音波を透過させるために縦波反射率  $R_L$  が低下する。

3. 超音波シミュレーションによる車輪座きずの評価

3.1 シミュレーションの目的

車輪座のきずを斜角探傷するとき、探触子から発振された超音波は、きずを検知して探触子で受信されるまでの経路上で、図 4 に示すように車軸-車輪界面ときずの面の 2箇所 で反射し、一部が車輪側あるいはきずの向こう側に透過すると考えられる。したがって、車軸-車輪界面およびきずの面での超音波の反射率が、受信されるきずエコーの高さに大きく影響する。ここでは、車軸-車輪界面の接触面圧がきずエコーに及ぼす影響を評価するため、きず深さと接触面圧によるエコー高さの変化を超音波シミュレーションによって計算する。

3.2 接触面圧と界面剛性の関係

車軸-車輪界面の接触状態を表現するためには、接触面圧と界面剛性の関係を求める必要がある。車軸-車輪界面における剛性を導出するため、図 5 に示す小型輪軸試験片を用いた実験を行った。車輪座の直径は  $\phi 57\text{mm}$ , 車輪の外径は  $\phi 87\text{mm}$  で、車軸と車輪の締め代は実体輪軸と同等の接触面圧 (約 85MPa) が得られるように調整した。まず、周波数 5MHz の縦波垂直探触子を車輪の外表面に配置し、車輪はめあい状態 (図 5 (a)) で測定した車軸-車輪界面での反射波をフーリエ変換し、周波数 5MHz における振幅スペクトル  $h_{RL1}$  を求めた。次に、車輪を切断して車軸を抜いた図 5 (b) の車

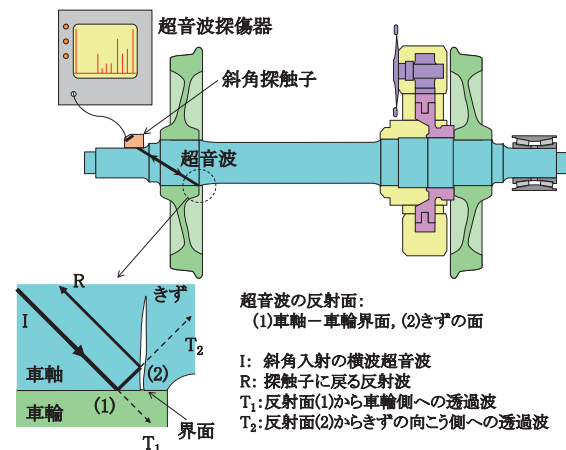


図 4 車輪座の斜角探傷における超音波の反射と透過

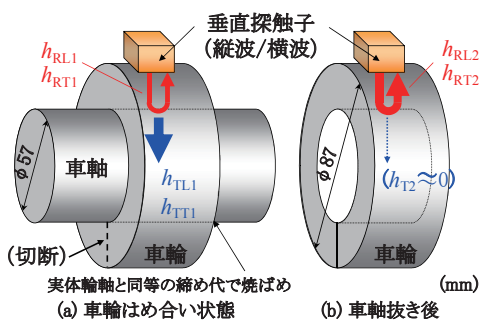


図5 小型輪軸試験片を用いた車軸-車輪界面でのエコー高さの測定

輪単体の状態で同様に測定し、自由表面での反射波の振幅スペクトル  $h_{RL2}$  を求め、両者の比から周波数 5MHz における縦波反射率  $R_L$  を式 (4) により計算した。同様に、周波数 5MHz の横波垂直探触子を振動方向が車軸の中心軸に平行となるように車輪に配置し、図 5 (a), (b) の状態で測定した振幅スペクトル  $h_{RT1}$ ,  $h_{RT2}$  から横波反射率  $R_T$  を式 (5) により計算した。

$$R_L = \frac{h_{RL1}}{h_{RL2}} \quad (4), \quad R_T = \frac{h_{RT1}}{h_{RT2}} \quad (5)$$

小型輪軸試験片を用いた測定で得られた  $R_L$  を式 (1) に、 $R_T$  を式 (2) に代入すれば、垂直剛性  $K_N$  およびせん断剛性  $K_T$  が導出される。本実験では  $K_N = 2.11\text{MPa/nm}$ ,  $K_T = 0.570\text{MPa/nm}$  の各値が得られた。ここで、車軸-車輪界面の接触面圧  $p$  と垂直剛性  $K_N$  が比例する<sup>2)</sup> と仮定すれば、 $p = 85\text{MPa}$  において  $K_N = 2.11\text{MPa/nm}$  であったことから、接触面圧  $p$  (MPa) と垂直剛性  $K_N$  (MPa/nm) との間には  $p = 40.3K_N$  の関係が成立する。

### 3.3 計算モデル

車輪座のきずエコーを評価するための計算モデルを図 6 に示す。4 章で述べる実体輪軸の中ぐり内面 ( $\phi 40\text{mm}$ ) から  $\phi 193\text{mm}$  の車輪座を斜角探触子で探傷する状態を表している。探触子の材質はアクリル、車軸と車輪の材質は鉄鋼である。計算モデルは 2 次元で紙面に直交する方向の変位を拘束し、要素の形状ははめ合い面を含め全て正方形とし、要素分割の寸法  $d$  は  $0.04\text{mm}$  (横波波長  $\lambda_T$  の約 1/16)、要素数は約 770 万である。車軸-車輪のはめ合い面を 2.2 節で述べた周期的非接合界面でモデル化し、周期境界の幅  $s$  を  $0.32\text{mm}$ 、接合部比率  $w/s$  を 0, 0.25, 0.5, 0.75 の 4 段階として界面剛性を変化させた。また、各接合部比率のモデルに対して車輪座のきず深さ  $a$  を 1, 2, 3, 5mm の 4 段階で変化させた。

各接合部比率および各きず深さのモデルにおいて、周波数 5MHz の縦波変位を振動子に付与し、車軸への入射面でモード変換した屈折角 (界面への入射角)  $45^\circ$  の横波で斜角探傷したときのエコー高さ (受信波の変位振幅) を計算した。計算には、伊藤忠テクノソリューションズ

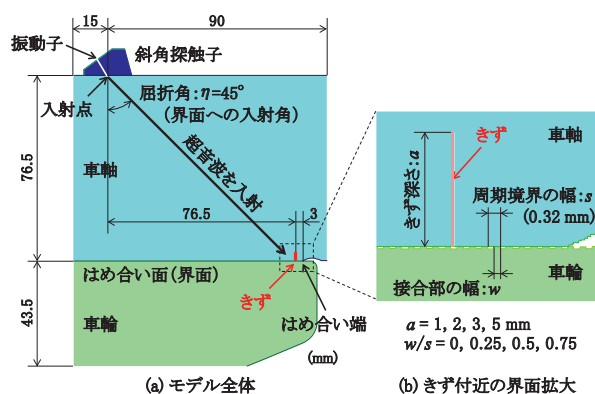


図6 車輪座きず評価の計算モデル

表1 車輪座計算モデルにおける界面の状態

項目	記号	単位	接合部比率 $w/s$			
			0.25	0.5	0.75	
垂直入射時の反射率	縦波	$R_L$	—	0.844	0.511	0.147
	横波	$R_T$	—	0.860	0.518	0.142
垂直剛性	$K_N$	MPa/nm	0.459	1.217	4.860	
せん断剛性	$K_T$	MPa/nm	0.235	0.604	2.763	
接触面圧	$p$	MPa	18.5	49.0	195.9	

ズ(株)製の商用超音波シミュレーションソフトウェア ComWAVE Ver.5.0.1 を用いた。

計算に先立ち、周期境界条件を設定し 1 周期分の界面のみをモデル化した 2 次元モデルを用いて、界面に垂直入射した縦波および横波の、 $w/s = 0$  (自由表面) での反射波に対する  $w/s = 0.25, 0.5, 0.75$  のときの反射波の比 (縦波反射率  $R_L$ , 横波反射率  $R_T$ ) を求め、計算モデル上で表現された界面剛性を式 (1), (2) から同定した。計算モデルでの界面剛性  $K_N$ ,  $K_T$  および 3.2 節の  $p-K_N$  の式で換算した接触面圧を表 1 に示す。

### 3.4 きず深さと接触面圧がエコー高さに及ぼす影響

接合部比率  $w/s = 0, 0.25, 0.5, 0.75$  の各モデルにおいて、きず深さ  $a$  を変化させたときに受信したエコー高さの分布を図 7 (a) に示す。縦軸は入射波振幅に依存する任意のスケールである。 $w/s = 0$  は車輪がはめ合わされていない面圧 0 の状態に相当する。 $w/s$  の値、すなわち接触面圧の大きさに関わらず、きず深さが 2mm より浅い範囲ではきず深さとエコー高さはほぼ比例するが、それよりもきずが深くなるとエコー高さの増加率が低下した。また、 $w/s$  の増加 (接触面圧の増加) に伴って、エコー高さが全体的に低下した。

接触面圧による影響を評価するため、きず深さ  $a = 1, 2, 3, 5\text{mm}$  の各モデルにおいて、 $w/s = 0$  (面圧 0 に相当) のときに対する各  $w/s$  でのエコー高さの比を計算し、表 1 に示した各  $w/s$  のモデルでの接触面圧  $p$  の関数として示した分布が図 7 (b) である。車輪座のきず深さに関わらず、車輪とのはめ合い等による接触面圧の作用に

特集：車両技術

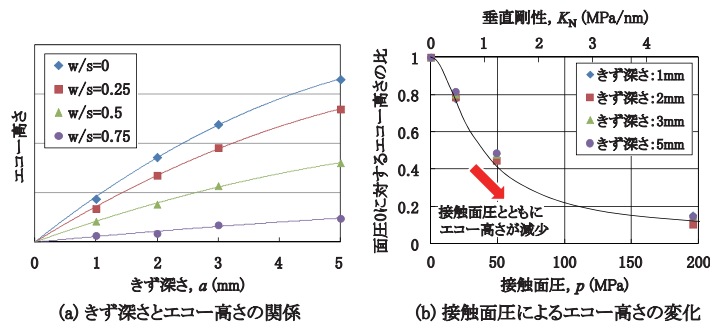


図7 きず深さと接触面圧がエコー高さに及ぼす影響

よってエコー高さが低下した。接触面圧 50MPa で面圧 0 のときのおよそ半分のエコー高さとなり、それより高い面圧では面圧とエコー高さはほぼ反比例の関係であった。以上のように、車軸-車輪のはめ合い面の接触面圧はエコー高さに大きな影響を及ぼすと考えられる。

#### 4. 繰返し回転曲げ荷荷がはめ合い面に及ぼす影響

##### 4.1 実体輪軸を用いた繰返し回転曲げ試験

###### 4.1.1 試験の目的

ここでは、これまでに得られた車軸-車輪界面のモデル化および接触面圧と界面剛性に関する知見を実体輪軸での試験結果<sup>5)</sup>に適用し、走行中の車軸に作用する繰返し回転曲げ荷荷がはめ合い面に及ぼす影響について評価および考察を行う。

###### 4.1.2 試験方法

試験に用いた実体輪軸(軌間 1,067mm)を図 8 に示す。車輪座直径は 193mm, 平行部直径は 167mm, 中ぐり径は 40mm である。試験車軸の片側には図 9 に示すように、深さ 3mm, 円周方向長さ 10mm の 4 個の矩形きず A ~ D が車輪座に放電加工されている。車軸超音波探傷装置の模式図を図 10 に示す。軸端面より挿入する探傷ヘッドには 2 個の横波斜角探触子(公称周波数 5MHz, 公称屈折角 45°)が組み込まれており、それぞれ斜め方向に前向きまたは後向きに超音波を入射してきずを検出する。

車軸に繰返し回転曲げを荷荷するため、実体輪軸疲労試験装置を用いて試験を行った。図 8 に示した位置に荷重を荷荷した状態で、車輪座の公称曲げ応力(試験応力)

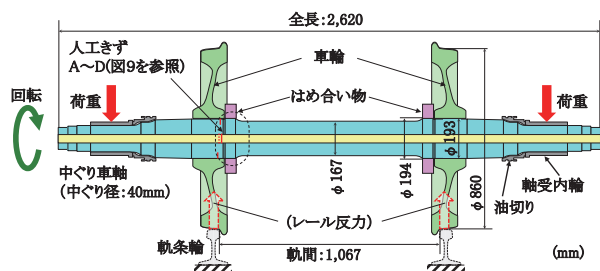


図8 繰返し回転曲げ試験に用いた実体輪軸

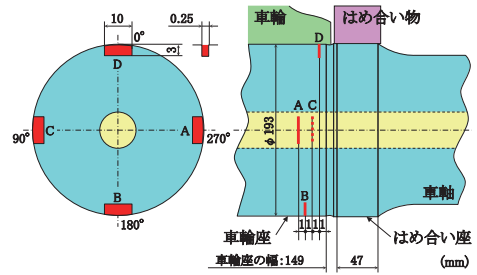


図9 車輪座の人工きず

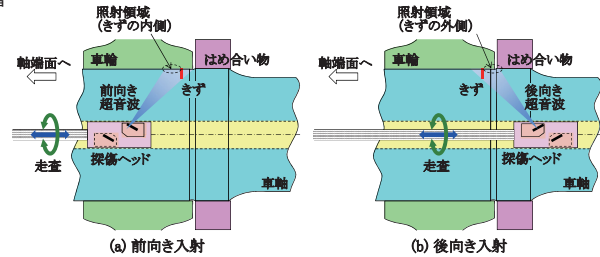


図10 前向き, 後向き入射の超音波でのきずの検出

を約 40MPa として  $5 \times 10^7$  回(約 13.5 万 km 走行相当)回転させた後、試験応力を約 60MPa に増加してさらに  $3 \times 10^7$  回(約 8.1 万 km 走行相当)回転させた。超音波探傷装置を用いて、以下の I ~ V の荷荷過程の各段階で探傷試験を行った。段階 II ~ IV では、車軸に曲げモーメントが作用した状態できずエコーを測定した。

- I 新製した輪軸の無荷荷状態
- II 試験応力 40MPa を作用させ、回転曲げ開始前
- III 40MPa での試験後、応力を 60MPa に上げた状態
- IV 試験応力 60MPa での回転曲げ終了後
- V 車輪等を取り外し、車軸のみの無荷荷状態

探傷試験では、きず D の位置がほぼ真上(0°)および真下(180°)となるように輪軸を停止させた後、前向きと後向きの各々の超音波で各きずのエコー高さを測定した。探触子の接触状態や気温の影響を排除するため、試験車軸の平行部に設けた深さ 1mm, 長さ 10mm のきずのエコー高さで測定結果を規格化した。以下では主に、前向き入射の超音波での試験結果を述べる。

###### 4.1.3 きずエコーの測定結果

きず D を真上および真下に位置させたときに、前向き入射の超音波で測定した各きずのエコー高さをデシベル値で図 11 に示す。段階 I から II への移行は、試験輪軸に 40MPa の試験応力を作用させたときの変化であるが、各きずのエコー高さの変化量は  $\pm 1$ dB 以内であった。段階 II から III でエコー高さが低下した後、段階 IV でやや上昇する傾向が見られた。エコー高さの変化は、はめ合い端に最も近いきず D で顕著であった。試験の進行に伴ってエコー高さが変動したことは、繰返し回転曲げによって車軸-車輪のはめ合い面が摩耗し、接触状態が変化したことを示唆している。

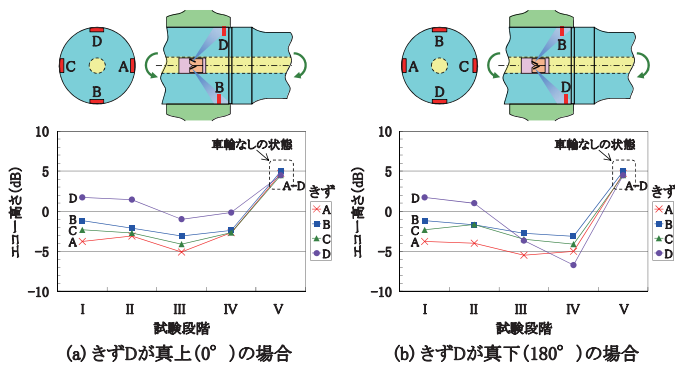


図 11 試験段階の進行に伴うきずエコーの変化

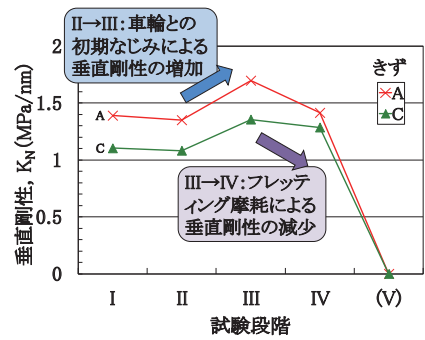


図 12 試験段階の進行に伴う垂直剛性の変化

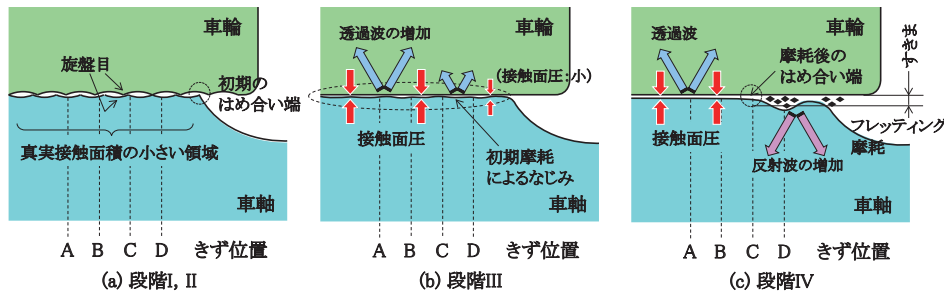


図 13 はめ合い面の接触状態が超音波の反射，透過に及ぼす影響

4.2 繰返し回転曲げに伴う界面剛性の変化

ここでは、繰返し回転曲げに伴うはめ合い面での接触状態の変化を、きず付近の局所的な界面剛性を用いて評価する。車輪がはめ合わされていない段階 V でのエコーは車軸表面での自由反射（横波反射率  $R_T = 1$ ）により得られたと仮定し、段階 I ~ IV のエコー高さの段階 V に対する比を横波反射率  $R_T$  として、横波の  $45^\circ$  の斜角入射時の関係式 (6) <sup>6)</sup> から垂直剛性  $K_N$  を計算した。

$$R_T = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{2}K_N}{\omega\rho c_T}\right)^2}} \quad (6)$$

エコー高さの測定時に車軸の中立面付近に位置し、曲げモーメントの影響をほとんど受けなかったきず A, C を対象として、きず D を真上および真下に位置させて測定した図 11 (a), (b) の各きずのエコー高さの比を  $K_N$  に換算のうえ平均した結果を図 12 に示す。垂直剛性は段階 I から II ではほとんど変化せず、段階 II から III で増加した後、段階 IV でやや減少した。段階 V では  $R_T = 1$  とみなしたことから  $K_N = 0$  である。また、きず A 付近の方がきず C 付近よりも界面剛性が全体的に高かった。

新製の輪軸では、旋盤等を用いて機械加工された車軸表面と車輪内径面がはめ合わされる。繰返し回転曲げを負荷する前の段階 I および II は、ある規則的な粗さを有する二つの面同士が締め代によって無数の突起で接触した状態で、やや低めの垂直剛性を有している。その後、回転曲げの繰返しとともにフレットングによる初期摩耗で真実接触面積が増加する（接触面がなじむ）ことにより段階 II から III で界面剛性が増加し、接触面での

摩耗がさらに進行するとすきまが発生して密着度が低下した結果、段階 III から IV で界面剛性が減少したと考えられる。なお、きず A 付近の方がきず C 付近よりも界面剛性が高かったのは、きず A はきず C よりもはめ合い内側に位置しており、はめ合い端に近いほど顕著なフレットングの影響を受けにくかったためと考えられる。これらの状態を模式的に図 13 に示す。

4.3 曲げモーメントのきずエコーへの影響

車軸に作用する曲げモーメントがきずエコーに及ぼす影響を評価する。車軸に曲げが作用している段階 II ~ IV において、輪軸の停止位置が  $180^\circ$  異なる状態で測定した図 11 (a), (b) の各きずのエコー高さから、両者の差を計算した結果を図 14 に示す。同図で正の値は、きず D が真上のときの方がエコー高さが高いことを表している。初期の段階 II では、いずれのきずでもエコー高さの差は小さかった。また、曲げの中立面付近で測定したデータ同士の差であるきず A, C では、段階 II ~ IV を通してエコー高さの差は比較的小さかった。一方、きず B, D では両者

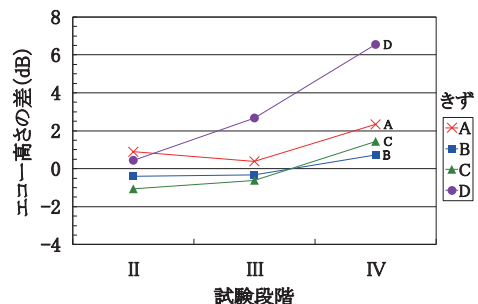
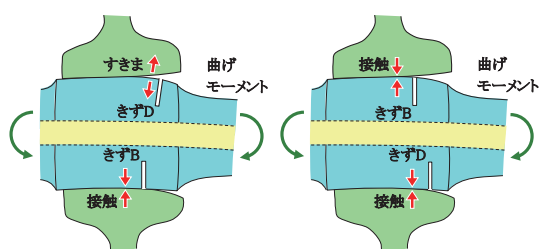


図 14 輪軸の停止位置によるエコー高さの差



(a)きずDが真上(0°)の場合 (b)きずDが真下(180°)の場合  
図 15 曲げモーメントのはめ合い面への影響

とも中立面から最も離れた状態でエコー高さを測定したが、試験の進行に伴って顕著な変化を示したのはきずDのみで、エコー高さの差は段階IVで+6.6dBに達した。

この原因を考察すると、まず、段階IIでは図13(a)で示したように、車軸と車輪は無数の突起で接触した状態にあり、曲げモーメントの負荷による真実接触面積の増減はわずかであったため、エコー高さの差が小さかったと考えられる。その後、段階IIからIII、IVへ進むにつれてはめ合い面でのなじみや摩耗が進行し、輪軸を回転させたときにきずD付近の接触面圧が変動し始める。最終的には図15に示すように、輪軸の回転に応じてきず付近のはめ合い面が接触した状態とすきまを有する状態とを繰り返し、きずDのエコー高さに差が生じたと考えられる。一方、きずB付近ではすきまが生じる程度にまでは摩耗が進行しなかったため、エコー高さに顕著な差が生じなかったと考えられる。

### 5. 車軸の超音波探傷との関連性

本研究では、車軸-車輪の界面モデルを用いた超音波シミュレーション結果、および中ぐり径40mmの実体輪軸を用いた実験結果をもとに、はめ合い面の状態がきずエコーに及ぼす影響を評価したが、中ぐり径60mmの新幹線電車用車軸や中実車軸でも同様の影響が現れると考えられる。供用中の車軸の超音波探傷では、新製あるいは車輪交換後に一定の距離を走行すると車軸-車輪のはめ合い面がなじむため、新製の車軸に同じきずがある場合と比べてエコー高さが低下する可能性があり、きずの見落としや過小評価につながり得る。逆に、長期間使用された輪軸では、はめ合い面での摩耗に伴って生じるすきまの作用で、新製やはめ合い面がなじんだ輪軸と比較してきずエコーが高めに検出される可能性がある。

新幹線電車用車軸の在姿状態での超音波探傷では、本研究での60MPaの試験応力に匹敵するような曲げモーメントが負荷される状態にはないが、輪軸の停止位置ときずの位置との関係によっては、車両重量による曲げモーメントの作用でも数dBのエコー高さの変動が起こる可能性がある。

車軸の超音波探傷では、新製の車軸に人工きずを加工して車輪をはめ合わせた輪軸(モデル軸)で感度調整をする場合が多い。車輪との締め代(接触面圧)や車両の

走行距離に応じてきず検出のしきい値を変更したり、在姿状態での超音波探傷できずを検出した場合には輪軸をレールから部分的に浮かせて再検査する、あるいはきずの検出位置が中立面より下側であればしきい値を下げて評価することによって、きずの見落としや過小評価が避けられ、車軸の健全性がさらに向上すると考えられる。

### 6. まとめ

本研究では車輪座のきずを対象として、きず深さおよび車輪との接触面圧がエコー高さに及ぼす影響を定量評価し、実体輪軸に繰返し回転曲げを荷重したときのきずエコーの変動を評価した。得られた成果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 車輪座のきず深さと車輪との接触面圧がエコー高さに及ぼす影響を超音波シミュレーションにより評価した結果、きずが2mmより浅いときはエコー高さがきず深さにほぼ比例することと、接触面圧50MPaで面圧0のときのおよそ半分のエコー高さとなることが分かった。
- (2) はめ合い部にきずを有する実体輪軸の繰返し回転曲げ試験で、繰返し荷重に伴う車軸-車輪の接触状態の変化によって、あるいは車軸に曲げが作用したときのきずの円周方向位置に応じてエコー高さが数dB変動したが、それらは界面での垂直剛性の変化によって説明された。

### 文献

- 1) 牧野一成：車両に潜むきずの検査法, RRR, Vol.65, No.5, pp.2-5, 2008
- 2) Marshall, M.B., Lewis, R., Dwyer-Joyce, R.S., Demilly, F. and Flament, Y., "Ultrasonic measurement of railway wheel hub-axle press-fit contact pressures," *Proc. IMechE Part F: J. Rail and Rapid Transit*, Vol. 225, pp. 287-298, 2011.
- 3) Drinkwater, B.W., Dwyer-Joyce, R.S. and Cawley, P., "A study of the interaction between ultrasound and a partially contacting solid-solid interface," *Proc. R. Soc. Lond. A*, Vol. 452, pp. 2613-2628, 1996.
- 4) Baik, J.-M. and Thompson, R.B., "Ultrasonic scattering from imperfect interfaces: A quasi-static model," *J. Nondestruct. Eval.*, Vol. 4, pp. 177-196, 1984.
- 5) 佐藤康夫, 山本勝太, 牧野一成, 坂本博, 石塚弘道：近接はめ合い部を有する中ぐり車軸のきず進展性評価, 鉄道総研報告, Vol.24, No.6, pp.29-34, 2010
- 6) Makino, K. and Biwa, S., "Influence of axle-wheel interface on ultrasonic testing of fatigue cracks in wheelset," *Ultrasonics*, Vol. 53, pp. 239-248, 2013.