

車軸の超音波探傷における反射点のずれによる影響の評価

牧野 一成*

Evaluation of Influence Due to Reflection Point Shift on Axle Surface in Ultrasonic Flaw Detection

Kazunari MAKINO

For ultrasonic flaw detection of axles, an inspection technique in which a shear wave is emitted into an axle at certain angles is widely applied. However, when a shear wave is obliquely incident on a boundary surface, sound beam displacement may shift a geometric reflection point parallel to the boundary surface. In this study, two types of boundary surfaces, that is, an axle body and a wheel seat, are targeted. The relationship between a shear-wave incident angle and sound beam displacement is derived theoretically and then reproduced using finite element calculations. The propagation behavior of ultrasonic waves while inspecting surface flaws on an axle is discussed from the viewpoint of sound beam displacement.

キーワード：車軸，超音波探傷，音束変位，横波入射角，境界面

1. はじめに

鉄道車軸の超音波探傷では、図1に示すように、中実車軸の場合は車軸の側面から屈折角の異なる複数の探触子を用いて、中ぐり車軸の場合は斜め前後方向に超音波を送信する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中ぐり内面から、横波超音波による斜角探傷が行われている。

車軸には、平行部のような自由境界面のみならず、車輪等の嵌合物とはめ合い面が存在する。また、車軸の表面や内部にきずが存在すると、きずの向かい合う面に新たな境界面が生じる。ここで、境界面に横波超音波が

斜角入射して全反射するとき、超音波の幾何学的な反射点が境界面と平行な方向にずれる「音束変位」が生じることが知られている¹⁾²⁾³⁾。車軸のこれらの境界面に超音波が入射したときの反射挙動を把握することは、超音波探傷による車軸のきず検出の観点からも重要である。

本研究では、平行部（自由境界面）および車輪座（はめ合い面）の2種類の境界面を対象として、音束変位が車軸の超音波探傷に及ぼす影響を評価した。まず、横波の入射角と反射波の位相との関係を平面波の反射理論に基づいて解析的あるいは数値的に計算し、横波入射角と音束変位との関係を導出した。そのうえで、各境界面に横波超音波が斜角入射したときの伝搬挙動を有限要素（FE）モデルを用いて計算し、境界面での反射時に音束変位が生じることを計算でも確認した。

さらに、車軸の平行部および車輪座の表面きずを超音波探傷したときに、音束変位が探傷結果に及ぼす影響について、(1) きずと幾何学的に相対する位置に探触子を配置したときの反射波のずれ、および(2) エコー高さが最大となる探触子位置からきず位置を推定したときの誤差、の観点から理論的に評価した。

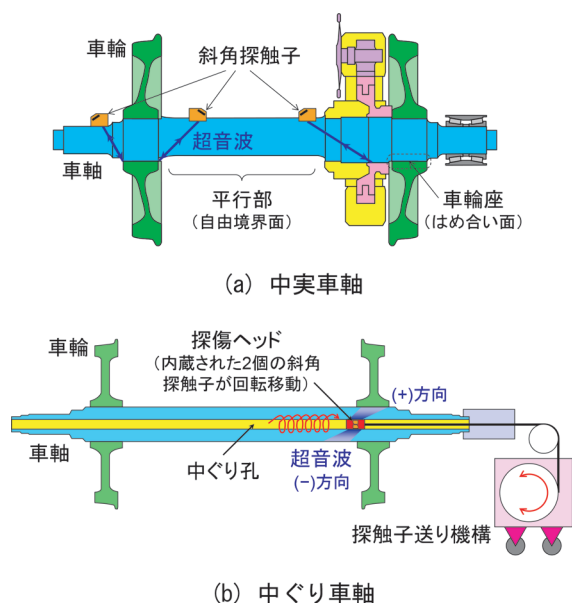


図1 鉄道車軸の超音波探傷

2. 音束変位の理論的検討

2.1 音束変位の概要

図2に示すように、境界面に横波超音波が斜角入射して全反射するとき、本来の幾何学的な反射経路に対して、超音波が距離 D だけずれて反射する¹⁾。この距離 D を x 方向の反射点のずれ、すなわち音束変位 Δ として表すと、式(1)のようになる²⁾³⁾。

$$\Delta = -\frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial \phi}{\partial h} \quad (1)$$

ここに、 λ は波長、 ϕ は入射波に対する反射波の位相差、

* 車両構造技術研究部 車両強度研究室

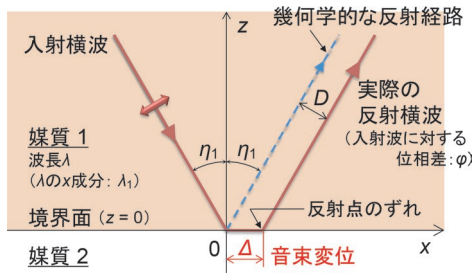


図2 音束変位の概要

$h = \sin \eta_1$ で、 η_1 は横波入射角である。なお、音束変位 Δ を波長 λ で除して無次元化した値 Δ/λ を規準化音束変位と称する。

2.2 車軸の自由境界面における音束変位

車軸（鉄鋼）の自由境界面に縦波臨界角を超える横波が斜角入射するとき、位相差 ϕ は解析的に解くことができ、式(2)で表される²⁾。

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{8h^2\sqrt{h^2 - q^2}\sqrt{1 - h^2}(1 - 2h^2)^2}{16h^4(h^2 - q^2)(1 - h^2) - (1 - 2h^2)^4} \right] \quad (2)$$

ここに、 $q = c_T/c_L$ で、 c_L は縦波音速、 c_T は横波音速である。式(2)を式(1)に代入すれば、入射角 η_1 と規準化音束変位 Δ/λ の関係が得られる。

鉄鋼の音速を $c_L = 5900\text{m/s}$ 、 $c_T = 3230\text{m/s}$ としたときの η_1 と Δ/λ の関係を図3に示す。入射角 η_1 が 45° のときには音束変位を生じないが、 $\eta_1 < 45^\circ$ では x の正の向き（入射波の伝搬方向の x 成分と同じ向き）に、 $\eta_1 > 45^\circ$ では x の負の向きに、それぞれ音束変位が生じる。

2.3 車軸のはめ合い面における音束変位

車軸の車輪とののはめ合い面のように、両者とも炭素鋼製で性質が類似しており、音響インピーダンス（密度と音速の積）がほぼ等しい場合、境界面（車軸-車輪界面）を完全接合面として扱うと境界面での反射がなくなり、超音波の反射挙動を表現できない。そこで、車軸-車輪界面に対してスプリング界面⁴⁾⁵⁾⁶⁾を適用したうえで、音束変位の検討を行った。ただし以下では、後述する超音波シミュレーションでの計算の容易さを考慮し、車軸-車輪界面をスプリング界面と等価な図4に示す周期的非接合界面⁷⁾として扱った。同界面は、周期境界の幅 s と完全接合部の幅 w で定義され、スプリング界面における界面に垂直な方向のばね定数に相当する垂直剛性 K_N は式(3)で与えられる。

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

ここに、 E' は平面ひずみ縦弾性係数（ $=E/(1-\nu^2)$ ）； E ：縦弾性係数、 ν ：ポアソン比）である。

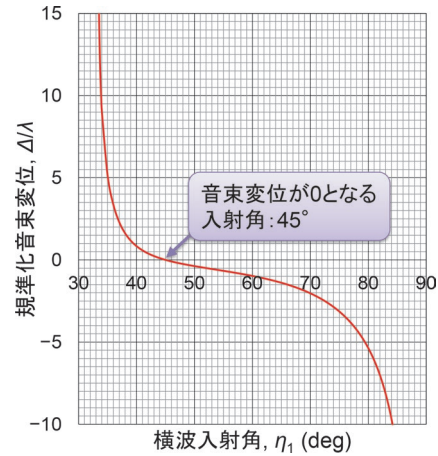


図3 車軸の自由境界面での横波入射角と規準化音束変位の関係

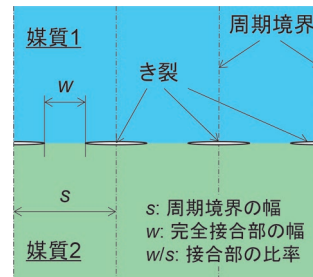


図4 周期的非接合界面（スプリング界面と等価）によるモデル化

横波がスプリング界面に角度 η_1 で入射したときの反射波の位相差 ϕ は、界面における応力とひずみ（変位）の関係式⁶⁾を数値的に解くことにより求められる。そのうえで、式(1)で $\partial\phi/\partial h$ を $\Delta\phi/\Delta h$ （注：ここでの Δ は増分を意味する）とみなし、各入射角 η_1 において η_1 から $\Delta\eta_1$ だけ増加したときの、 $h = \sin \eta_1$ により求められる h の増分 Δh と、位相差 ϕ の増分 $\Delta\phi$ から、入射角 η_1 と規準化音束変位 Δ/λ の関係を数値的に計算することができる。

例として、界面の両側の媒質1、2がともに鉄鋼で、材料定数が $E = 209\text{GPa}$ 、 $\nu = 0.29$ 、界面パラメータが $s = 0.4\text{mm}$ 、 $w = 0.2\text{mm}$ の界面に、周波数 2MHz の横波が入射したときの η_1 と Δ/λ の関係を図5に示す。図3に示した自由境界面の場合と比較して音束変位の絶対値は小さいが（縦軸の違いに注意）、同種の材料が接触している境界面でも音束変位が生じることが理論的に示された。

3. 超音波シミュレーションによる音束変位の評価

3.1 計算モデルと計算条件

車軸の自由境界面および車軸-車輪界面に横波が斜角入射するときの反射挙動を、有限要素法（FEM）により計算した。入射角が 60° の場合の x - z 面上の2次元モデルを図6に示す。このモデルは、媒質1（鉄鋼）、媒質2

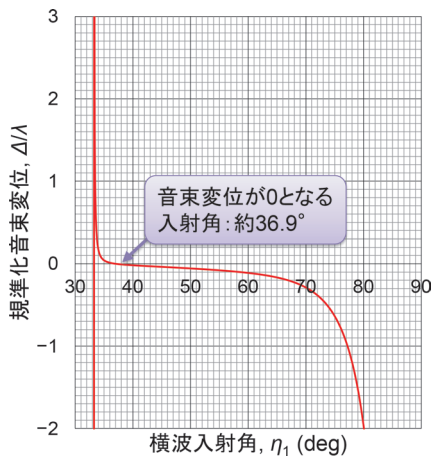


図5 車軸-車輪界面での横波入射角と標準化音束変位の関係

(真空または鉄鋼)と2個の振動子(送信子および受信子)から構成され、両媒質の境界面上に設けた入射点を中心とする半径50mmの半円上に、送信子と受信子が入射点を挟んで線対称の位置に配置されている。振動子の長さは10mmである。要素を構成する各媒質および振動子の材質はすべて等方材で、材料定数を表1に示す。

車軸の自由境界面を模擬したモデル(媒質2が真空)では、要素をすべて一辺の長さが0.1mmの正方形要素とした。一方、車軸-車輪界面を模擬したモデル(媒質2が鉄鋼)では、2.3節での計算例と同様に $s=0.4\text{mm}$ 、 $w=0.2\text{mm}$ のパラメータを有する2次元の周期的非接界面を導入し、一辺の長さが0.05mmの正方形要素によりモデル化した。

入射波は x - z 面と平行に振動する周波数2MHzの横波

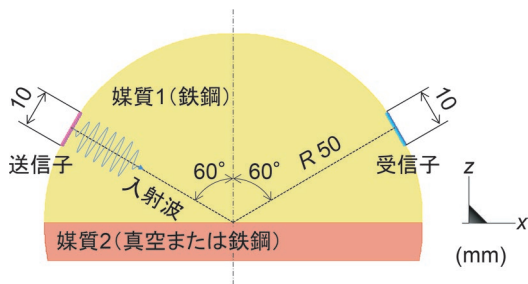


図6 横波斜角入射の2次元モデル(入射角60°)

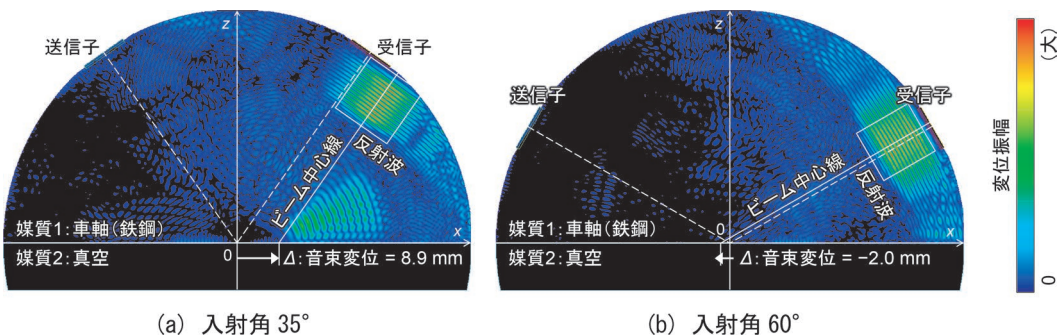


図7 反射波の受信直前の変位振幅分布(自由境界面モデル)

表1 各要素の材料定数

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)
媒質1	鉄鋼	5900	3230	7800
媒質2	真空	0	0	0
	鉄鋼	5900	3230	7800
探触子	アクリル	2730	1430	1180

(SV波)とし、2次元モデルの奥行き(y 方向)の変位を拘束した。波形(変位波形)は、図6の送信子付近に模式的に示すような8波(正弦波5波+前後に遷移波を各1.5波)とした。一連の計算には非線形性がないので振幅は任意に設定できるが、ここでは振幅を2mmとした。入射角は35°、45°、60°、75°の4通りとした。

計算の時間ステップは約13.6nsで、超音波が境界面で反射して受信が完了する時刻40μsまでの超音波の伝搬を計算した。FEM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. 9.5.2を用いた。

3.2 計算結果

車軸の自由境界面モデルで、横波入射角が35°および60°における、反射波の受信直前の変位振幅分布を図7に示す。入射角が45°では音束変位が生じなかったが、35°のときの(a)では x の正の向きに、60°のときの(b)では x の負の向きに、それぞれ音束変位が確認された。これらの傾向は、図3に示した理論検討の結果と一致した。車軸-車輪界面モデルでも、界面での反射波振幅が小さく表面波成分との弁別が困難であった入射角75°の場合を除き、変位振幅分布の図上で音束変位が確認された。

各境界面のモデルで、FEM計算により得られた変位振幅分布をもとに、反射波の変位振幅が最大の地点を通るように目測で描いたビーム中心線から音束変位を0.1mm単位で求め、2.2節および2.3節で述べた理論検討による値と比較して表2に示す。計算結果と理論値とを比較すると、車軸の自由境界面では両者は概ね一致した。一方、車軸-車輪界面では、理論値は1mm以下の値であったが、計算結果は数mmの値であった。ただし、入射角が45°付近から離れるほど音束変位の絶対値が大

表2 FEM 計算での変位振幅分布の目測による音束変位と理論値との比較

入射角	車軸の自由境界面		車軸-車輪界面	
	FEM 計算	理論値	FEM 計算	理論値
35°	8.9	8.3	4.2	0.07
45°	0	0	≈ 0	-0.06
60°	-2.0	-1.6	-4.2	-0.18
75°	-5.3	-5.1	(観測不可)	-1.0

(mm)

きくなる定性的な傾向は一致した。

4. 音束変位が車軸の超音波探傷に及ぼす影響

4.1 きずでの反射で想定される事象

図8に示すように、探触子から送信された横波超音波が、表面きずを有する境界面に角度 η_1 で入射するとき、超音波は境界面に角度 η_1 で反射したのち、きずの面に角度 $90^\circ - \eta_1$ (η_1 の余角)で入射する。その後、きずの面で角度 $90^\circ - \eta_1$ で反射し、探触子の方へ戻って受信される。

車軸の自由境界面における超音波の反射を想定すると、入射角が $\eta_1 < 45^\circ$ の場合、自由境界面で正の向きの音束変位 Δ_1 が生じ、きずの面で負の向きの音束変位 Δ_2 が生じる。結果として、探触子位置では x の負の向きの総音束変位 Δ_{tot} が生じる。入射角が $\eta_1 > 45^\circ$ では Δ_1 、 Δ_2 がいずれも逆向きになり、総音束変位 Δ_{tot} は x の正の向きとなる。

以上のことから、車軸の超音波探傷における音束変位の影響として、次の二つのことが想定される。一つは、きずの位置と探触子の屈折角 (=境界面への入射角) から幾何学的に決まる位置に探触子を配置したときに、きずでの反射波が探触子の位置からずれること、もう一つは、エコー高さが最大となる探触子位置からきずの位置を推定すると誤差を生じうることである。以下ではこれらの観点から、音束変位が車軸の超音波探傷に及ぼす影響を評価する。

4.2 計算モデルと計算条件

斜角探触子を用いて、車軸の自由境界面および車軸-車輪界面の表面きずを探傷するときの超音波の送受信の挙動を、FEMにより計算した。探触子の屈折角が 55° のときの $x-z$ 面上の2次元モデルの例を図9に示す。種々の解析ケースに対する計算の時間的制約を考慮し、車軸の厚さ(直径または肉厚に相当)を40mmとした。

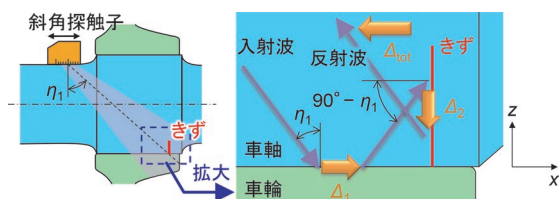


図8 音束変位が車軸の表面きずの探傷に及ぼす影響

探触子は一振動子型(送受信で1個の振動子を共用)で、振動子長さは10mmである。深さ3mmのきずを車軸表面に配置し、きずの向かい合う面間には1要素分のすきまを設けた。探触子の屈折角は 35° 、 40° 、 45° 、 50° 、 55° の5通りとし、屈折角に応じて探触子の位置およびモデルの x 方向の長さを変化させた。要素を構成するすべての媒質および探触子は等方材料とし、3章での計算と同じ材料定数(表1)を用いた。

解析モデルの要素は、すべて一辺の長さが0.1mmの正方形要素とした。車軸-車輪界面モデルでは、両者のしめしろ比による接触面圧を反映した垂直剛性 K_N の値や表面状態(機械加工時のバイト送り量による周期性)を考慮し、 $s=1\text{mm}$ 、 $w=0.7\text{mm}$ の周期的非接合界面を適用した。

入射波は $x-z$ 面と平行に振動する周波数2MHzの横波(SV波)とし、 y 方向の変位を拘束した。波形は、図9の探触子付近に模式的に示すような3波のウェーブレット波形で、変位振幅を2mmとした。境界面あるいは屈折角の異なる各モデルにおいて、きずの位置と屈折角から幾何学的に決まる探触子の位置(以下、幾何学中心位置)を原点とし、車軸表面に沿って x 方向に1mmピッチで探触子を移動させた。このとき、探触子の各位置で受信したきずエコーの高さ(振動子を構成するすべての要素の体積ひずみの平均値)を計算し、探触子位置(x 座標)を横軸、エコー高さを縦軸とするグラフ(後掲の図11を参照)での多項式近似により、エコー高さの最大値と、エコー高さが最大となる探触子位置を求めた。

計算の時間ステップは約13.6nsで、超音波が境界面で反射して受信が完了する時刻(屈折角ごとの経路の長短に応じて $45\sim 65\mu\text{s}$ の範囲)までの超音波の伝搬を、ソフトウェアComWAVEを用いて計算した。計算条件の詳細は割愛するが、周波数5MHzの入射波に対しても同様の計算を行った。

4.3 きずでの反射における音束変位の理論値

図8に示した、屈折角 η_1 によって生じる音束変位 Δ_1 と、その余角 $90^\circ - \eta_1$ によって生じる音束変位 Δ_2 から、探触子位置で生じる総音束変位 Δ_{tot} は式(4)で求められる。

$$\Delta_{tot} = -\Delta_1 + \Delta_2 \tan \eta_1 \quad (4)$$

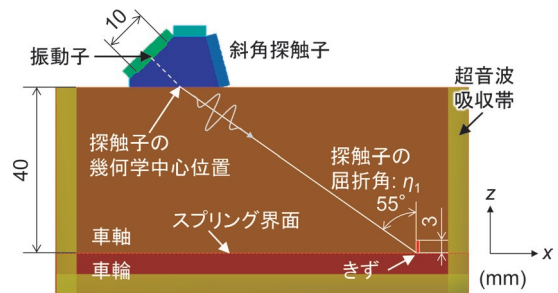


図9 音束変位のきず検出への影響評価のための2次元モデル(車輪座きず、屈折角 55°)

実際の車軸では、きずの向かい合う面同士が接触している可能性があるが、本検討では、音束変位 Δ_2 を生じさせるきずの面を鉄鋼の自由境界面として扱った。

車軸の平行部および車輪座において、入射波の周波数が 2MHz のとき、35° から 55° の屈折角に対して、図 3 または図 5 の規準化音束変位 Δ/λ と式 (4) から計算される総音束変位 Δ_{tot} の理論値を表 3 に示す。平行部と車輪座を比較すると、平行部の方が総音束変位 Δ_{tot} が大きい。一方で、きずの面での音束変位 Δ_2 の理論値のいくつかは、FEM 計算でモデルに設けたきずの深さ 3mm を超過している。きずの深さを超える音束変位がきずの面で生じるとは考えにくく、実際の総音束変位 Δ_{tot} はここで示した理論値よりも小さいと予想される。

周波数が 5MHz の場合は波長 λ が短いため、それに伴って、規準化音束変位 Δ/λ から計算される総音束変位 Δ_{tot} は、表 3 に示した 2MHz のときの値よりも小さくなる。

4.4 エコー高さが最大となる探触子位置

車軸の平行部と車輪座の各モデルにおいて、入射波の周波数を 2MHz とし、35° から 55° の 5 通りの屈折角に対して、探触子の幾何学中心位置からの移動量とエコー高さとの関係を計算した。例として、平行部のきずを屈折角 55° で探傷したときの超音波の伝搬挙動を図 10 に示す。探触子を幾何学中心位置に配置したとき、きずでの反射波は前方、すなわち x の正の向きに約 8mm ずれた。このとき、探触子位置を前方へ 4mm 移動すると、受信されるきずエコーの高さが最大となった。

このようにして、屈折角ごとに FEM 計算により求めた、探触子の幾何学中心位置からの移動量とエコー高さとの関係を図 11 に示す。屈折角が 40° または 45° のときにエコー高さが全体的に高く、エコー高さが最大となる探触子位置は屈折角の変化に伴って変化した。

図 11 の (a) 平行部、(b) 車輪座の各データをもとに、探触子の屈折角の変化に伴うエコー高さの最大値と、そのときの探触子位置を整理して図 12 に示す。図 12 の探触子位置のグラフには、表 3 に示した総音束変位 Δ_{tot}

表 3 平行部と車輪座における各屈折角での総音束変位の理論値 (周波数 2MHz)

部位	屈折角 η_1	境界面での音束変位 Δ_1 (mm)	きずの面での音束変位 Δ_2 (mm)	探触子位置での総音束変位 Δ_{tot} (mm)
平行部	35°	8.3	-1.1	-9.0
	40°	1.4	-0.6	-1.9
	45°	0	0	0
	50°	-0.6	1.4	2.2
	55°	-1.1	8.3	12.9
車輪座	35°	0.04	-1.1	-0.8
	40°	-0.03	-0.6	-0.5
	45°	-0.05	0	0.05
	50°	-0.08	1.4	1.7
	55°	-0.11	8.3	11.9

の理論値を併せて示した。エコー高さの最大値は、屈折角の変化に伴って、車輪座の 45° 前後を除いて比較的緩やかに変化した。エコー高さが最大となる探触子位置は、屈折角の増加に伴って、幾何学中心位置よりも前方に移動した。探触子位置の移動量は、車輪座よりも平行部の方が大きく、平行部を屈折角 35° で探傷したときに最大で約 8mm であった。

図 12 によれば、探触子の屈折角とエコーが最大となる探触子位置との関係は、総音束変位 Δ_{tot} の理論値における屈折角との関係と定性的には一致したが、平行部では屈折角 55° のときに、車輪座ではすべての屈折角にわたり FEM 計算値と Δ_{tot} の理論値に乖離が生じた。この原因として、①総音束変位 Δ_{tot} の計算では探触子の移動を考慮していないこと、②きずの面での音束変位 Δ_2 のきず深さ 3mm による制約、③探触子から車軸へ入射するときの音束変位の影響 (本研究では未検討)、④車軸-車輪界面モデルの精度の問題、が考えられる。

周波数 5MHz に対しても同様に FEM 計算を行った結果、エコー高さが最大となる探触子位置は、屈折角の変化に伴って、平行部で -3 ~ +1mm 程度、車輪座で -2 ~ +0mm 程度であった。図 12 に示した周波数 2MHz

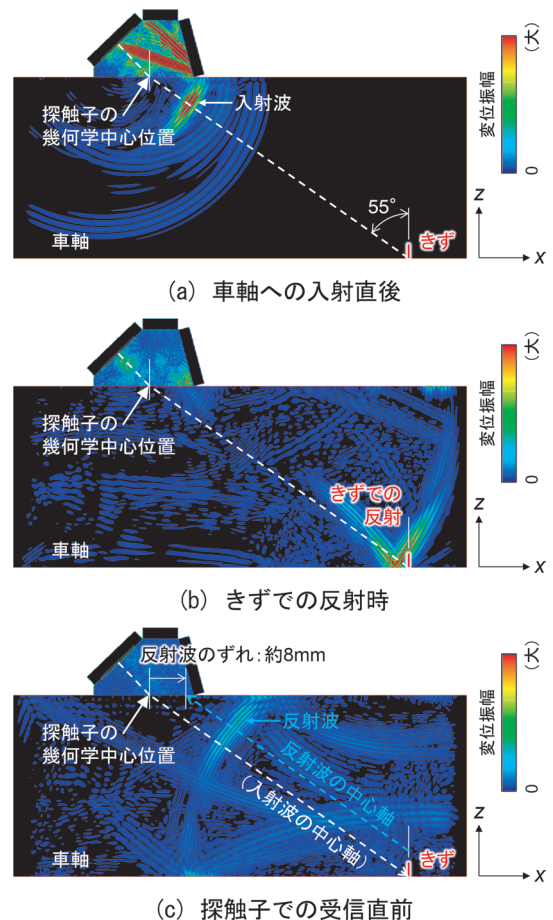


図 10 探触子を幾何学中心位置に配置したときの超音波の伝搬挙動 (平行部きず, 屈折角 55°)

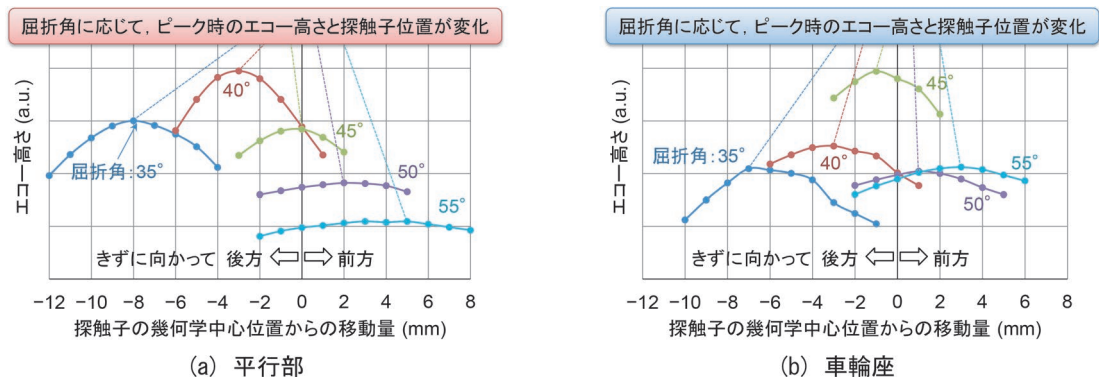


図 11 FEM 計算による探触子の幾何学中心位置からの移動量とエコー高さとの関係 (周波数 2MHz)

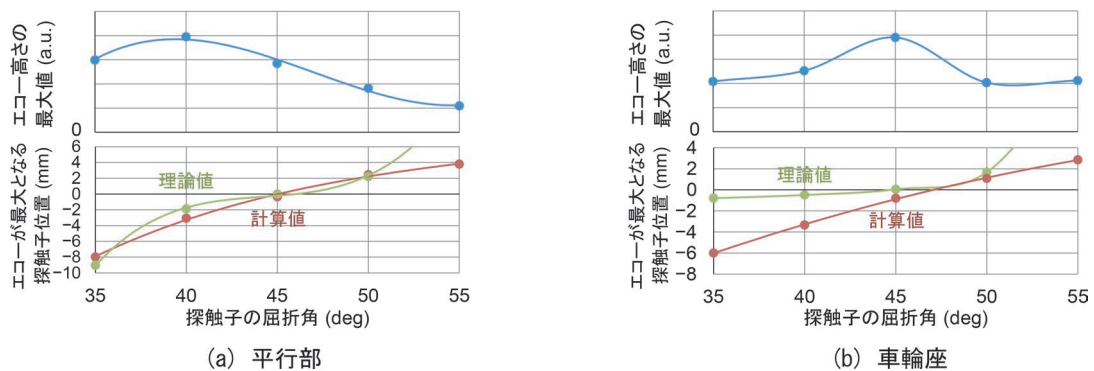


図 12 探触子の屈折角の変化に伴うエコー高さの最大値とそのときの探触子位置の変化 (周波数 2MHz)

のときほど顕著ではないが、周波数が 5MHz でも音束変位の影響を受けることが分かった。

際の超音波探傷できずが検出された際の正確な位置評価に活用できるよう検討を進める。

5. まとめ

本研究では、車軸の自由境界面（平行部）と車軸-車輪界面（車輪座）の 2 種類の境界面を対象として、超音波の反射時における反射点のずれ、すなわち音束変位が車軸の表面きずの超音波探傷に及ぼす影響を、理論計算と FEM 計算により評価した。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 車軸平行部の自由境界面、および車輪座における車輪とのはめ合いを模擬した車軸-車輪のスプリング界面に対して、横波入射角と音束変位との関係を導出した。FEM 計算の結果、はめ合い面においても音束変位が生じることを確認した。
- (2) 音束変位が車軸の表面きずの探傷に及ぼす影響を評価した結果、エコー高さが最大となる探触子の位置は、きずの位置と屈折角から幾何学的に決まる位置に対して移動した。周波数 2MHz で平行部を探傷したとき、移動量は最大で約 8mm であった。

車軸の境界面およびきずの面における音束変位に起因して、超音波の反射点や受信位置がずれることは重要な知見である。今後、車軸の超音波探傷における実験データへの音束変位の適用性や整合性を確認したうえで、実

文献

- 1) Artmann, K., "Berechnung der Seitenversetzung des totalreflektierten Strahles," Ann. Physik. 437, pp.87-102, 1948.
- 2) Niklas, L., "Gruppenlaufzeit und Bündelversetzung bei der Schrägreflexion Auswirkungen auf die praktische Werkstoffprüfung mit Ultraschall," Materialprüf. 7(8), pp.281-288, 1965.
- 3) 福原照明, 木村勝美: 斜角探傷における横波の全反射の際の音束変位に関する実験的検討, 非破壊検査 33(12), pp.907-914, 1984
- 4) Drinkwater, B.W., Dwyer-Joyce, R.S., Cawley, P., "A study of the interaction between ultrasound and a partially contacting solid-solid interface," Proc. R. Soc. Lond. A 452, pp.2613-2628, 1996.
- 5) 牧野一成, 坂本博: 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, 鉄道総研報告, Vol.27, No.12, pp.5-10, 2013
- 6) Makino, K., Biwa, S., "Influence of axle-wheel interface on ultrasonic testing of fatigue cracks in wheelset," Ultrasonics 53, pp.239-248, 2013.
- 7) Baik, J.-M., Thompson, R.B., "Ultrasonic scattering from imperfect interfaces: A quasi-static model," J. Nondestr. Eval. 4, pp.177-196, 1984.