

鉄道レール底端部向けガイド波検査技術の基礎検討

北岡 雅則* 溝田 裕久 (日立製作所)

Fundamental Study of Guided Wave Inspection for Bottom Edge of Rail

Masanori Kitaoka*, Hirohisa Mizota (Hitachi, Ltd.)

Long range screening inspection techniques using ultrasonic guided wave have been developed to inspect the rails. These techniques eliminate the need for dismantling and restoration work that is required to inspect difficult-to-see areas, thereby contributing to reducing maintenance costs. In order to excite guided waves, it is necessary to set inspection conditions that take dispersion (sound velocity and frequency) into consideration. We developed two excitation techniques and detected defects 2.5m away from the sensor with signal-to-noise ratio of >4, which is enough for screening inspection of the rails.

キーワード：非破壊検査, 超音波探傷, ガイド波, レール
(Nondestructive inspection, Ultrasonic testing, Guided wave, Rail)

1. はじめに

列車の安全な運航のためには、レール破断の要因となる底端部の電食や腐食に起因する欠陥を定期的に検査する必要がある。現状、踏切などでは底端部が道路や踏板で埋没していることが多く、目視検査のための解体作業が行われており、メンテナンスコストの増加の一因になっている。この解体作業を削減する方法として、ガイド波と呼ばれる超音波の長手方向への伝搬を利用した方法を検討した。

図 1 に示すようなレールに生じる主な欠陥は、頭頂部に発生するシェリングと、底面部および底端部に発生する電食や腐食に起因する欠陥がある⁽¹⁾⁽²⁾。頭頂部や底面部は、レール上面部から十分な強度の超音波を入射して検査できる。一方で底端部は上面部からは超音波が届かない箇所である。踏切外に超音波センサを設置し、ガイド波を用いて底端部を検査することができれば、解体・復旧工事に関わるコストを削減できる。

今回、ガイド波を送受信するための 2 方式のセンサを開発し、底端部を模擬した厚さ 15 mm の平板に適用してそれらの検出性を評価した結果を報告する。

2. センサ角度可変方式

(2.1) 理論

ラム波に分類されるガイド波は、図 2 に示すように、センサより中間媒質を介して超音波を一定の角度で入射し、中間媒質と平板の境界で屈折して励振することができる。平板においては、対称波 (Symmetric Wave) と反対称波

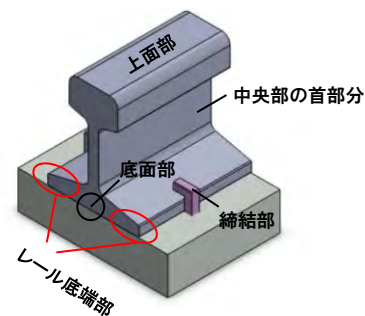


図 1 レールの構造

Fig. 1. Structure of the rail

(Asymmetric Wave) の 2 種類が存在し、それぞれ頭文字をとって S 波、A 波と呼ばれる。さらに、S 波と A 波には各種モード(0 次, 1 次, 2 次…)が存在し, $S_0, S_1, S_2, \dots, A_0, A_1, A_2, \dots$ として一般に表記される。各種モードは、板厚・周波数によって音速が異なる分散性を持つ。検査に用いるモードの決定には、位相速度と周波数の関係である分散曲線が必要である。図 3 に厚さ 15 mm の平板に対する分散曲線を示す。それぞれの曲線が各モードの周波数と位相速度の関係を示している。

センサ角度可変方式は、片方の外表面から 1 素子で斜め方向に超音波を入射してガイド波を励振するので、励振しやすいモード・励振し得るモードとその分離性・センサの製造上の問題を総合的に考慮し、100 kHz 近傍の A_0 モードを励振することを狙った。中間媒質の縦波音速を V_i 、ガイド波の位相速度を V_p とすると、被検体への入射角 θ_i は次式で表すことができる。

$$\theta_i = \sin^{-1} \left(\frac{V_i}{V_p} \right) \dots \dots \dots (1)$$

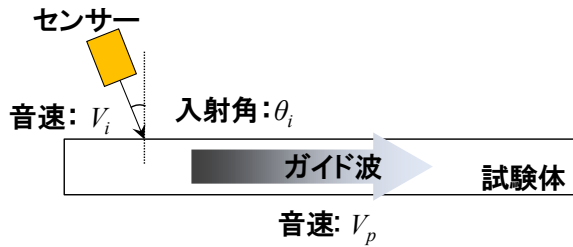


図 2 センサ角度可変方式によるガイド波の励振

Fig. 2. Guided wave excitation by variable sensor angle

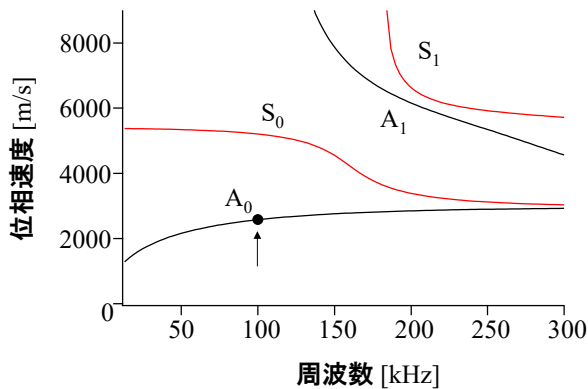


図 3 15mm 平板におけるラム波モード

Fig. 3. Lamb wave mode in 15mm flat plate

100 kHz での A_0 モードの位相速度は 2577m/s であり、超音波検査の中間媒質として一般に用いられるアクリルの場合、縦波音速が 2740 m/s と位相音速よりも速いため、式 (1) を満たす θ_i が存在せず A_0 モードを励起できない。ポリスチレンの場合は、2330 m/s であり、 A_0 モードを励起可能であるが、入射角は約 65 度となり、角度が浅いため調整幅が狭い。中間媒質を水とすると縦波音速は 1500 m/s であるため、入射角は約 36 度となる。一方で、液体媒質は回収・処理が必要になるため、利便性が悪い。そこで、液体に近い性質を有し、かつ扱いやすい媒質として、ゲルを用いたセンサを開発した。

〈2・2〉 ゲル充填角度可変センサ

開発したセンサを図 4 に示す。寒天やゼラチンの粉末を加熱して水に溶かして作成したゲルを、空洞部分に充填して冷却・固化した。ゲルは検査時にレールに直接接触するため、崩れたり、こぼれ落ちたりしないように、ある程度の強固さが必要になる。強固なゲルを作成するには、水に対する粉末の割合を大きくすると良い。しかし、単に強固なゲルを製作すると気泡が抜けにくく、気泡が残存すると超音波の伝搬が阻害される。したがって、気泡を含まない範囲で強固なゲルにする必要がある。試行錯誤で粉末と水の配分を変えながら最適な配合になるように調整した。

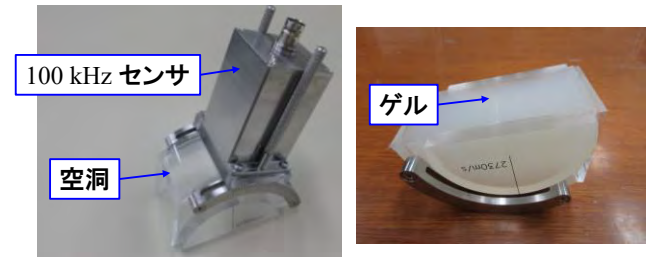


図 4 ゲル充填角度可変センサ

Fig. 4. Gel-filled variable angle sensor

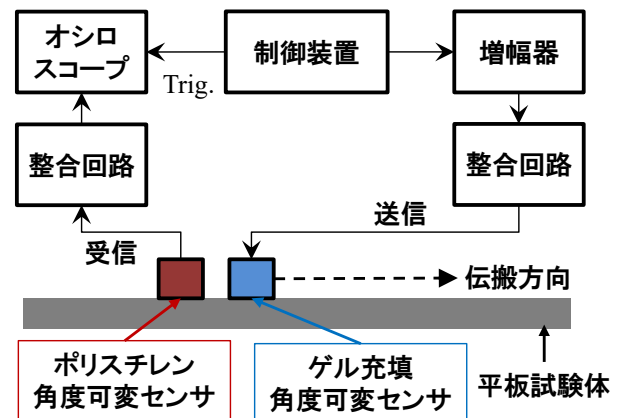


図 5 センサ角度可変方式の装置構成

Fig. 5 Setup for variable sensor angle method

〈2・3〉 試験装置

図 5 にセンサ角度可変方式を用いた試験装置を示す。送信側にゲル充填角度可変センサを用い、受信側はポリスチレンの角度可変センサを用いた。センサ周波数はともに 100 kHz である。制御装置とパワーアンプ、さらに、本センサ専用設計した電氣的整合回路を接続した構成とした。送信信号は、100 kHz のパルス波を用いた。送受信の入射角については、理論計算で求めた条件で、送受信信号が最大となることを確認して設定した。

3. エンドファイア型アレイ方式

〈3・1〉 理論

エンドファイア型アレイは、アンテナ分野でよく知られる手法であり、目的の方向に向かって素子を配置し、遅延時間を考慮して合算することで指向性を高め、ノイズとなる目的外の方向からの信号を抑制する方法である³⁾。

エンドファイア型アレイの素子配列を図 6 に示す。今、 N 個の幅 a の素子が長さ L の範囲に間隔 d で並んでいるとする。また、これらの素子から発する超音波の波長を λ 、波数を $k = 2\pi/\lambda$ とする。素子間には距離に応じた位相差が生じる。簡単のため、各音源の振幅 A が等しいと仮定し

て定式化すれば、伝搬方向を基準とした角度 θ に依存する指向性 (アレイファクター) は次式で表わすことができる。

$$f_a(\theta) = Ae^{ikL(1-\cos\theta)/2} \frac{\text{sinc}[k(L+d)(1-\cos\theta)/2]}{\text{sinc}[kd(1-\cos\theta)/2]} \dots\dots\dots (2)$$

また、素子ごとの指向性 (エレメントファクター) は次式で表される。

$$f_e(\theta) = \frac{\sin \frac{a\pi \sin \theta}{\lambda}}{a\pi \sin \frac{\theta}{\lambda}} \dots\dots\dots (3)$$

式(2)と式(3)を合わせるとエンドファイア型アレイ全体の指向性は、次式となる。

$$p(\theta) = |f_a(\theta)f_e(\theta)| \dots\dots\dots (4)$$

図 7 に指向性を計算した結果を示す。 $d = \lambda/4$ の時に指向性が良く、サイドローブと呼ばれる不要な方向成分を抑制できることが分かる。

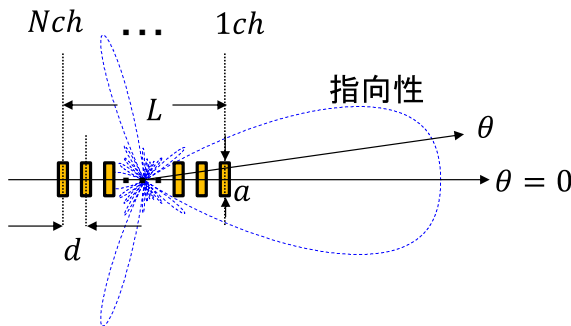


図 6 エンドファイア型アレイの素子配列

Fig. 6. Element arrangement of endfire type array

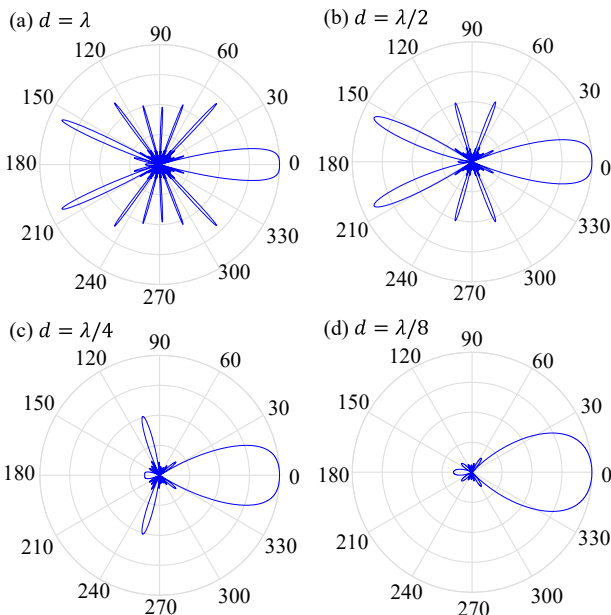


図 7 エンドファイア型アレイの指向性

Fig. 7. Directivity of endfire type array

〈3・2〉 エンドファイア型アレイセンサ

開発したセンサを図 8 に示す。配管検査用に開発された共振周波数約 2 MHz のせん断振動子⁽⁴⁾⁽⁵⁾を備えたキューブ型素子を 8 個用いて試作した。共振周波数よりも十分低い 25 kHz~120 kHz のパースト波電圧を印加することで、任意の周波数で励振することができる。これら 8 個のキューブ型センサは、個別に配置間隔を変えることができる。せん断振動子により発生するガイド波は SH (Shear Horizontal) 板波と呼ばれるモードであり、本研究では最低次の SH₀ モードを励振する。SH₀ モードの位相速度は横波音速と一致する。センサは、全体を平板試験体にクランプで固定し、電動ポンプでキューブ型素子の背後にある加圧チューブに空気を注入することで、空気圧によって押し付ける。キューブ型素子がない空間には、ダミープレートを挿入することで、均等に加圧できるようにしている。

〈3・3〉 試験装置

図 9 にエンドファイア型アレイ方式に用いた装置構成を示す。アレイ前方の CH1~CH7 の 7 素子を送信専用とし、CH8 を受信専用とした。素子間隔とガイド波の位相速度から、各素子に印加する電圧の遅延時間を設定した。送信周波数は、40 kHz を基準に周波数を振って、検出波形の振幅値と S/N を観測して 47 kHz と定めた。CH8 の受信信号は、プリアンプで増幅し、オシロスコープで観測する。受信信号は、平均化回数 128 回で平均化処理を実施した。

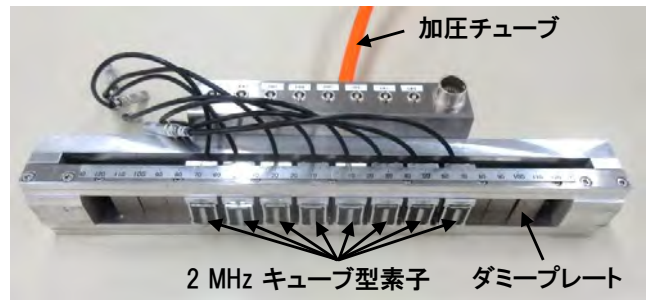


図 8 エンドファイア型アレイセンサ

Fig. 8. Endfire type array sensor

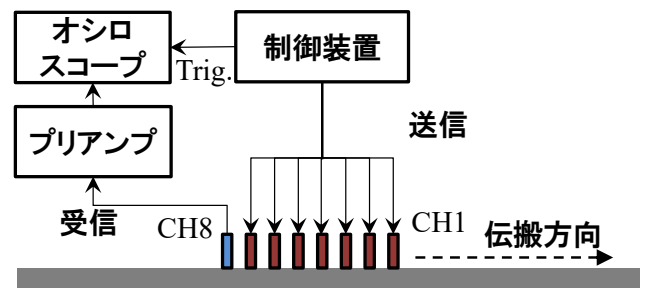


図 9 エンドファイア型アレイ方式の装置構成

Fig. 9. Setup for endfire array method

4. 検証試験

〈4・1〉 試験方法

図 11 に検証に用いる鋼板の平板試験体を示す。50N レールの底端部の厚さと概ね一致する厚さ 15 mm、長さ 3 m、幅 125 mm の平板に、電食や腐食を模擬した直径 20 mm、深さ 10 mm の貫通していない人工欠陥と、直径 20 mm の貫通した人工欠陥を付与して製作した。

検証試験では、貫通欠陥よりも検出が難しい前者の非貫通欠陥を対象とし、信号ノイズ比 (SN 比) を算出して評価した。SN 比は 2 以上の時、検出可能と判定した。

〈4・2〉 試験結果

図 11 と図 12 にセンサ角度可変方式およびエンドファイア型アレイ方式の試験結果をそれぞれ示す。横軸はセンサからの距離を表している。センサから約 1 m までは、送受信センサ間の直達波やセンサ内での多重反射による不感帯となっている。SN 比は、不感帯と既知の欠陥からの信号は取り除いて評価した。その結果、センサ角度可変方式は SN 比 4.1、エンドファイア型アレイ方式は SN 比 4.2 であった。両者とも SN 比 2 以上で非貫通欠陥を検出可能であり、開発したセンサの有効性が確認できた。

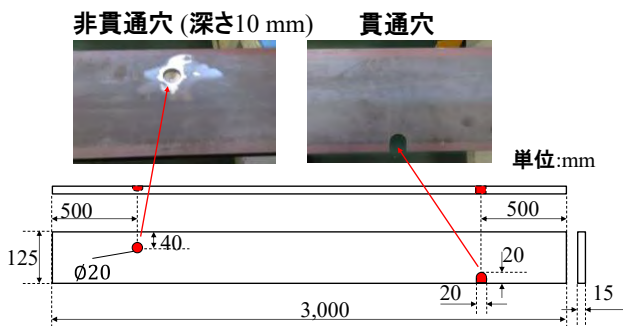


図 10 人工欠陥を付与した平板試験体

Fig. 10. A flat plate specimen with artificial defects

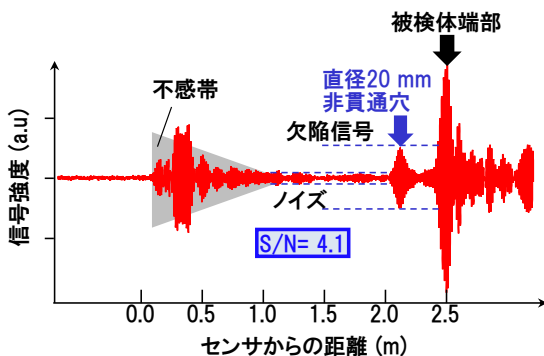


図 11 センサ角度可変方式の試験結果

Fig. 11. Experimental result of variable sensor angle method

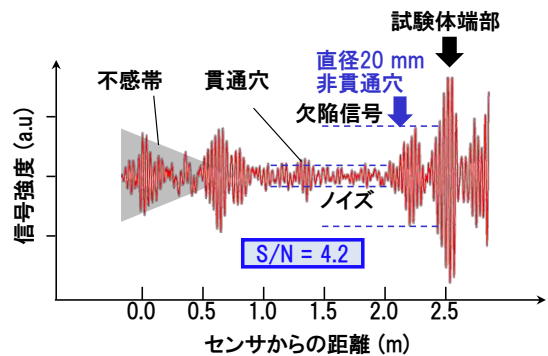


図 12 エンドファイア型アレイ方式の試験結果

Fig. 12. Experimental result of endfire array method

5. まとめ

レール破断の一要因である底端部の電食や腐食に起因する欠陥を検知するには、踏切など目視検査が困難な個所では解体復旧工事が必要であり、工事することなく検知できればコスト削減に貢献できる。そこで、長手方向の一括検査を可能とするガイド波をスクリーニング検査に活用することを検討し、センサ角度可変方式とエンドファイア型アレイ方式の 2 方式のセンサを開発した。センサ角度可変方式では、ガイド波励起条件である超音波入射角度の調整幅の広い中間媒質としてゲルを用いた。エンドファイア型アレイ方式では、素子間隔を適切に設定することでガイド波の指向性を高めることができることを示した。

厚さ 15 mm、長さ 3 m、幅 125 mm の平板に、電食や腐食を模擬した直径 20 mm、深さ 10 mm の人工欠陥を付与し、2 m 以上離れた位置にセンサを設置して検出性を評価した結果、両手法とも SN 比 4 以上で検出可能であることを確認した。今後は、実レール形状や実レールを拘束した実機環境での試験を通じ、検出性を検証していく。

文 献

- (1) 高井秀之: 「鉄道軌道の保守管理のためのセンサ技術」, 電気学会 E 部門論文誌, Vol.56, No.2 pp.107-110 (2017)
- (2) 小関昌信・片岡慶太: 「レールの信頼性向上を目的とした 研究開発について」, JR EAST Technical Review, No.17 pp.13-18 (2006)
- (3) H. Ehrenspeck, and W. Kearns: "Two-dimensional endfire array with increased gain and side lobe reduction", Wescon Convention Record, Pt.1 pp.217-221 (1957)
- (4) Y. Nagashima, et al.: "Defect Sizing Method Using Ultrasonic Guided Waves in Pipes", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.28 pp.1583-1590 (2008)
- (5) Y. Nagashima, et al.: "Modeling of Ultrasonic Guided-Wave Reflection from a Discontinuity in a Plate Structure", Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.7, No.6 pp.601-611 (2013)