

# ガイド波によるレール頭部横裂検知システム構築のための FEM 解析

小納谷 優希\* 細田 充\* 山本 隆一\*\*

FEM Analysis for Construction of Rail Head Transverse Defect Detection System Using Guided Wave

Yuki KONAYA Mitsuru HOSODA Ryuichi YAMAMOTO

Simulations of ultrasonic wave propagation in cracked rails have been carried out to investigate a method of detecting transverse rail head cracks using guided waves. The results show that 100~150 kHz input frequencies are suitable for detecting rail head cracks, and that the intensity of the first few waves in the received signal waves decreases with the degree of cracking. Further investigation shows that transverse cracks greater than 20 mm that have grown below horizontal cracks can be detected by checking the intensity of the first 3 waves in the received signal waves at the 100 kHz.

キーワード：ガイド波，超音波伝播シミュレーション，レール損傷検知，頭部横裂，頭部水平裂

## 1. はじめに

多くの鉄道事業者ではレール探傷車による定期的な検査によってレールに発生するき裂を検査している<sup>1)</sup>。しかし、図1に示すように、レール折損要因の約4割を占めるレール頭部横裂（以下、横裂とする）<sup>1)</sup>は、レール頭頂面下に発生する水平裂から下に向かって進展するため、レール頭頂面から超音波を入射し、き裂からの反射波を検知するレール探傷車による検査は困難である。そのため、横裂の検知手法として、レール頭側部から超音波を透過させ検査を行う手法が一般的である<sup>2) 3)</sup>が、人手による作業であると共に、頭側部の摩耗したレールや踏切部などでは検査が難しく、新たな検査手法の確立が課題となっている。一方、過去に国内外でガイド波を用いたレール損傷検知手法の検討が行われている

他<sup>4) 5) 6)</sup>、ガイド波を用いて非接触でレールの破断を検知する手法をこれまでに提案している<sup>7)</sup>。そこで、本研究では、レール内部の欠陥に感度良く反応する超音波の条件を検証するため、レールに対し非接触で超音波の送受信を行う FEM 解析モデルを作成し、横断面方向にスリットを入れたレールを用いた基礎的な超音波伝播シミュレーションを行った。また、実際に営業線で発生する水平裂や横裂を模擬したき裂をレールモデルに挿入してシミュレーションを行うことで、受信応答よりガイド波による水平裂下の横裂の検知可能性を検証した。

## 2. レール横断面方向にスリットを入れたレールモデルを対象とした超音波伝播特性の評価

### 2.1 解析モデルと解析条件

レールへ伝播させるガイド波の周波数により、レール内での伝播深さが異なることが過去の研究にて報告されていることから<sup>8)</sup>、横裂のような頭部の欠陥に感度良く反応する入力周波数を把握する必要がある。そこで、レール頭頂面から横断面方向に深さの異なるスリットを挿入したモデルを作成した。解析には超音波解析ソフトウェア ComWAVE<sup>9)</sup> を用いた。図2に FEM 解析モデルの概

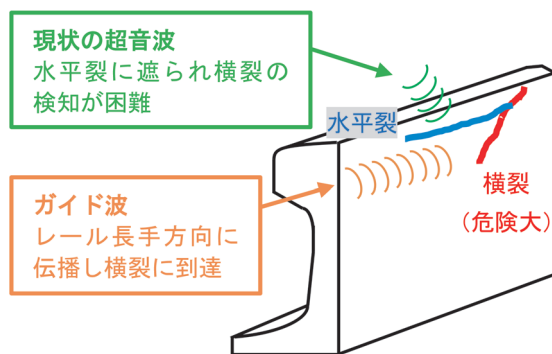


図1 レール頭部の水平裂・横裂と超音波伝播イメージ

\* 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室  
\*\* 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室(現 鉄道国際規格センター)

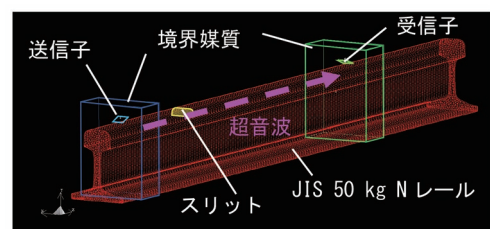


図2 解析モデル概要

要を示す。レールは有限の全長 1500mm の JIS 50kg N 普通レールとし、レール頭頂面から離れた位置に超音波の送受信子を配置した。送受信子モデルの周囲には境界媒質となる空間を設けた。

表 1 に解析条件を示す。本解析ではレール外部での超音波の送受信メカニズムに大きな影響は無いと考え、計算負荷低減のため境界媒質を水として計算した。これは水の場合、空気と比較して超音波の伝播波長が数倍異なり、要素サイズおよび解析時間を大きく減少させることができるためである。FEM 解析モデルの要素サイズについては、解析精度を担保するために、境界媒質を超音波が透過する際の波長の約 1/20 のサイズ (0.35~0.75mm, 入力周波数に応じて変化) とした。超音波の入力周波数については、レール破断検知での検討<sup>7)</sup> を参考の上 100, 150, 200kHz の 3 種類とし、レール長手方向に瞬間的に高出力な波数 12 の連続波 (バースト波) を伝播させた。水平面に対する送受信子の角度は、得られる受信強度をなるべく大きくするため、水中からレールへの横波臨海角度である 20 度に設定した。これは過去の検討<sup>10)</sup> により、横波に近いモード (約 3mm/μs) であると、高速かつ高強度のモードとしてガイド波がレール頭部を伝播することが示されていることや、一般的に横波は臨界角近くに設定すると高強度で送信できるためである。送受信子とレールとの離隔については、鉄道車両に送受信子を搭載し、レールとの離隔を 70mm 以上確保した状態で超音波の送受信が可能であることを確認しているが<sup>7) 11)</sup>、本解析ではレール内での超音波伝播特性の把握が目的であることから、解析モデルの全要素数と計算負荷を考慮し 10mm とした。き裂として挿入したスリットは幅 1mm とし、頭頂面から 10~60mm の深さで挿入した。なお、本解析モデルと同様のレールへのガイド波透過試験を実施したが、試験とほぼ同等の応答が得られることを確認している。

表 1 解析条件 (スリット入りモデルでの解析)

(a) 固定条件			
送受信子サイズ	25 mm × 25 mm	送受信子角度	20 °
送信子からき裂までの水平距離	200 mm	送受信子とレールとの離隔	10 mm
き裂形状	頭部スリット	送受信子間水平距離	950 mm
入力波の種類	バースト波	入力波数	12
(b) 設定した入力周波数とモデル要素数の関係			
入力周波数	100 kHz	150 kHz	200 kHz
全要素数	約 0.5 億	約 1.7 億	約 5 億

## 2.2 解析結果

図 3 に超音波伝播によるレール表面変位を示す。頭頂面から挿入したスリットにより超音波の伝播に変化が生じていることが分かる。本研究では以降特記した場合を除き、超音波の受信信号として、3次元各方向の変位より算出される体積変化量から得られる体積ひずみを強度として、き裂 (スリット) 無しのレールでの解析結果から得られるピーク値の強度を 1 として正規化することにより評価した。

図 4 に入力周波数 100, 200kHz におけるスリット無し、スリット深さ 10, 40mm の場合の受信波形を示す。スリット深さに応じて強度が小さくなることが分かる。図 5 に各入力周波数におけるスリット深さの違いによるピーク強度の変化を示す。入力周波数が 150, 200kHz の場合は頭頂面から 10mm の深さのスリットを入れた時点で 0.6 程度まで急激にピーク強度が低下する一方で、入力周波数 100kHz の場合は頭頂面からのスリット深さが 20~40mm で大きく低下していることが分かる。また入力周波数 150kHz の場合は、スリット深さ 10~30mm でのピーク強度の低下も大きいことが分かる。

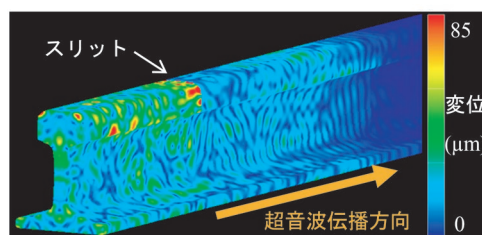
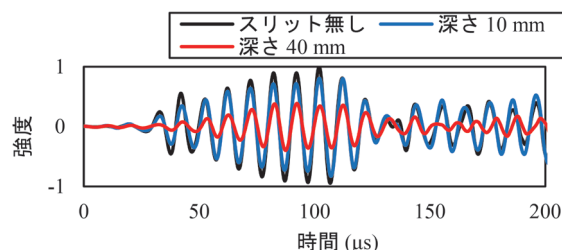
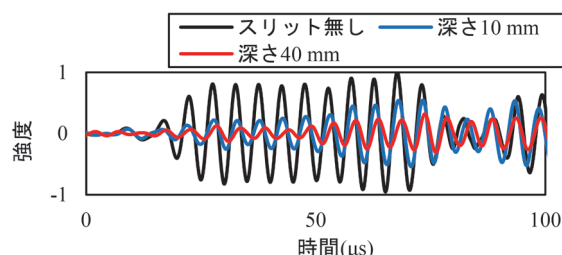


図 3 超音波伝播の様子 (入力周波数 100kHz・スリット深さ 40mm)<sup>12)</sup>



(a) 入力周波数 100 kHz



(b) 入力周波数 200 kHz

図 4 スリット深さ毎の受信波形例

以上の結果より、レール破断に至る前に管理上検知すべき横裂深さが20~30mmであることを考慮すると、100~150kHzの周波数のガイド波がレール頭部に発生する横裂の検知に適している可能性が高い。

周波数の違いによるレール内伝播深さの変化についてさらに考察するため、図6に示すように、レール頭頂面および頭頂面から深さ40mmのレール長手方向における体積ひずみの分散曲線(カラーマップ)を作成した。このグラフは横軸が周波数、縦軸が波長を示しており、強度(体積ひずみ振幅)が強い白色~赤色の線がそれぞれのレール内深さにて卓越して伝播する波の振動モードを表している。この図6の分散曲線より、頭頂面に比べて深さ40mmでは、200kHz以下の低周波寄りの振動モードが高強度を示していることが分かる。つまり、レール頭頂面から深さ40mmでは、100~150kHzの周波数帯の超音波が卓越して伝播し、この深さの部分で遮断するスリットによりこれらの周波数帯の超音波が多く遮られたと推測される。

### 3. 水平裂・横裂が混在したレールモデルを対象とした超音波伝播特性の評価

#### 3.1 解析モデルと解析条件

実際に営業線に発生する水平裂や横裂を模擬したき裂を挿入したレールモデルを作成し、FEM解析を実施することで、水平裂より下に進展した横裂の検知可能性を検証した。図7に本解析での解析モデルの概要を示す。

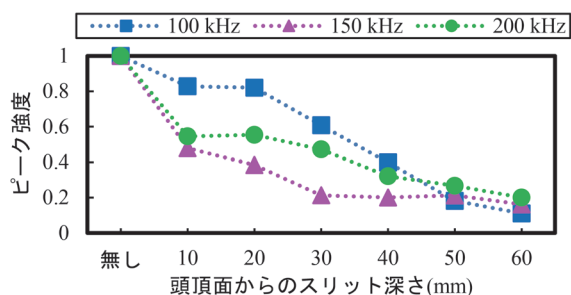
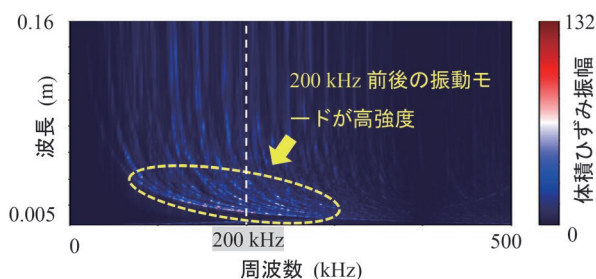


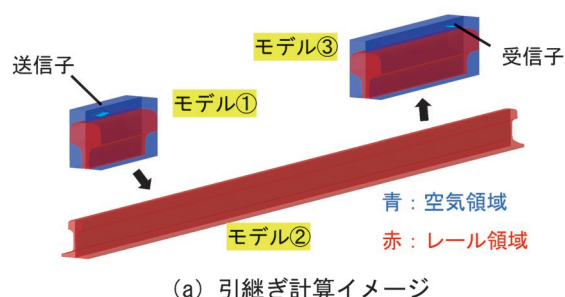
図5 スリット深さとピーク強度の関係



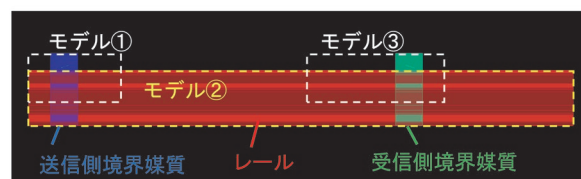
(a) レール頭頂面

送信から受信までの一連の超音波伝播の過程のうち、①: 空气中からの超音波送信からレール内までの伝播、②: レール内長手方向への伝播、③: レールから空气中での超音波受信までの伝播、と解析の計算過程を3分割し、それぞれの過程で独立したモデルを作成し(それぞれモデル①~③とする)、順に引き継いで計算を行った。これにより、各モデルにてメッシュサイズを調整することで、計算精度を維持しつつも計算負荷を大幅に抑えることが可能となり、境界媒質を空気とした計算を可能にした。

表2に本解析での解析条件を示す。送受信子角度については、境界媒質を空気としたため、空气中からレールへの横波臨海角度である6度に設定した。入力周波数については、2章での図5の結果を考慮してより高い感度を期待できる100、120kHzの2種類を設定し、波数は3波とした。これは一般的に波数が減少するほど伝播する波の周波数分布は広帯域となることから<sup>13)</sup>、き裂による周波数分布の特徴量の変化を捉えられる可能性を考慮したためである。実際に入力波数を3および12波としてき裂を含まないレールモデルを用いて解析を行い、受信波周波数分布を比較したところ(図8)、3波の方が広帯域であることを確認した。またレールモデルに挿入

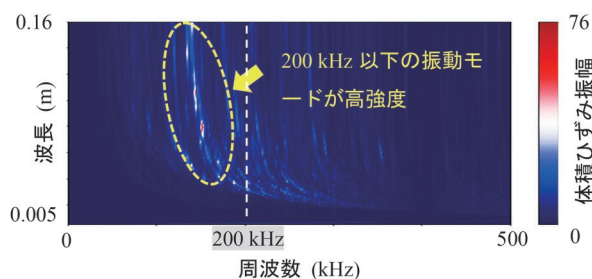


(a) 引継ぎ計算イメージ



(b) 分割モデル解析領域(側面図)

図7 分割解析モデル概要<sup>12)</sup>



(b) 頭頂面より深さ40mm

図6 体積ひずみの分散曲線<sup>12)</sup>

表2 解析条件（水平裂・横裂混在モデルでの解析）

(a) 固定条件

送受信子サイズ	25 mm×25 mm	送受信子角度	6°
送信子からき裂までの水平距離	200 mm	送受信子とレールとの離隔	10 mm
き裂形状	水平裂, 水平裂+横裂深さ 20 mm, 同 30 mm	送受信子間水平距離	950 mm
入力波の種類	バースト波	入力波数	3

(b) 設定した入力周波数と各モデル要素数の関係

入力周波数	100kHz	120kHz
モデル①要素数	約 1.4 億	約 2.5 億
モデル②要素数	約 0.3 億	約 0.3 億
モデル③要素数	約 2.0 億	約 3.5 億

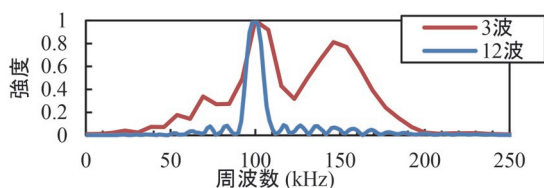


図8 入力波数差による受信周波数分布比較（入力周波数 100kHz, き裂無しレール）<sup>12)</sup>  
※最大値により正規化

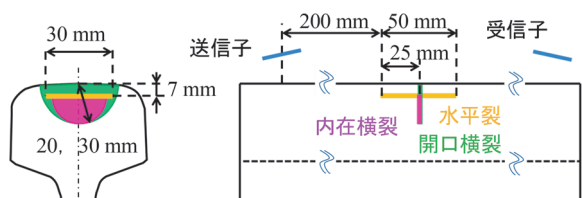


図9 挿入したき裂の形状

したき裂の形状を図9に示す。水平裂を模擬したき裂として、頭頂面から深さ7mmの位置に幅30mm、長さ50mmの内在スリットを設定した。横裂を模擬したき裂は、水平裂中心下に垂直に広がる内在した半円状のスリットとして、深さ20、30mmで設定した。さらに横裂の模擬き裂に関しては頭頂面に開口した場合も同じ深さで設定した。いずれのき裂を模擬したスリットも厚さは1mmである。なお以降特記した場合を除き、単に「水平裂」や「横裂」と表記した場合は、このそれぞれのき裂を模擬したスリットを指すものとし、水平裂より下に内在した半円状スリットを「内在横裂」、頭頂部が開口した半円状スリットを「開口横裂」とする。

### 3.2 解析結果

超音波伝播の様子の可視化例として、図10、11に、き裂無しのモデルおよび水平裂と深さ30mmの内在横裂が混在したモデルでのレール表面変位の変化状況（いずれも入力周波数100kHz）を示す。図10はき裂に超音波が到達した直後の様子、図11は伝播するほぼすべての波が透過した後の様子であり、き裂無しのモデルはそれぞれの比較対象のき裂有りのモデルと送信から同じタイミングの様子である。図10(a)のき裂無しのモデルでは安定して伝播している数波の超音波が、図10(b)のき裂有りモデルではき裂により遮られている様子が確認できる。また、図10と図11を比較すると、図11では伝播している波の波数が増加していることが分かる。これはレール内伝播中のモード変換や反射等により増加したためと考えられる。図11(a)と図11(b)を比較すると、き裂有りの場合は、この波数が増加した一連の波のうち先頭の5~6波程度のみが変位が小さくなっていることが分かる。これは、やがて受信子に到達する一連の波のうち、先行する波がき裂の影響を大きく受けたためと想定される。

図12に入力周波数100kHz、120kHzの受信波形例を示す。き裂の種類によらず、いずれの受信波形も入力した3波よりも波数が増加しており、波の後半部分に比べ、先頭の3波程度（図中の赤矢印で示した範囲）の振幅がき裂を含むモデルでは減少していることが確認できる。これは超音波伝播の様子を可視化した図10、11の状況と概ね一致していると言える。そこでき裂無しの受信波形にて、初めて絶対値0.01以上の極値を取った点から3周期分の時間幅をゲートとして設定し、このゲート内での波形の振幅の最大値をピーク強度として整理することとした。き裂の条件とピーク強度の関係として、受信波形全体でピーク強度を抽出したグラフおよびゲート内でのピーク強度を抽出したグラフを図13に示す。受信波形全体でピーク強度を抽出した図13(a)のグラフでは、いずれの入力周波数でも、き裂の条件が水平裂のみの条件と水平裂と横裂が混在した条件で大きな強度変化は見られない。一方、ゲート内でのピーク強度を抽出した図13(b)のグラフでは、入力周波数が100kHzであれば、き裂が水平裂のみの条件に比べて水平裂と内在横裂深さ20mm、30mmの条件で、それぞれピーク強度が0.15、0.2程度減少することが分かる。また開口横裂の場合はそれぞれさらに0.1程度減少していることが確認できる。これより、横裂の大きさに応じてピーク強度は減少し、閾値を0.6~0.7程度に設定することで、閾値を下回る箇所が深さ20mm以上の横裂の発生箇所と判定できる可能性が高いと考えられる。入力周波数120kHzの場合は、き裂が水平裂のみの条件に比べて、水平裂と開口横裂の条件でも横裂深さ20mmで0.045

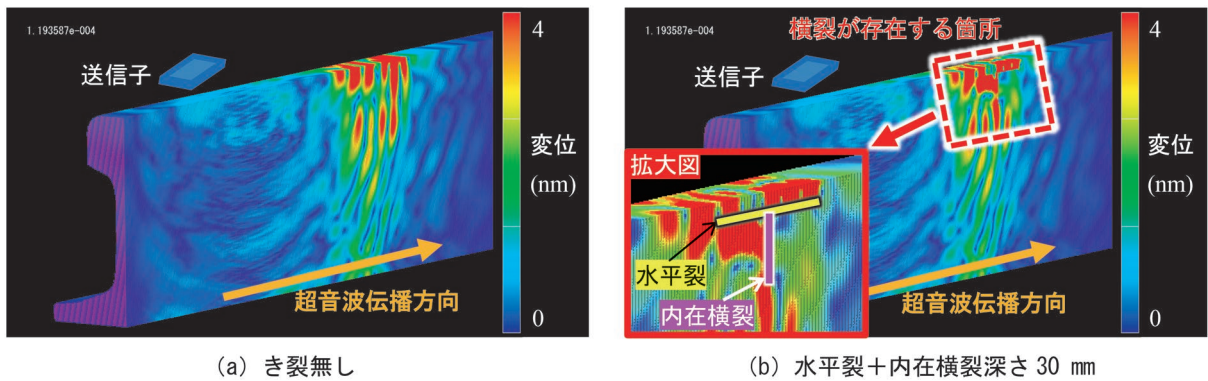


図 10 超音波のレール内き裂到達直後の伝播の様子

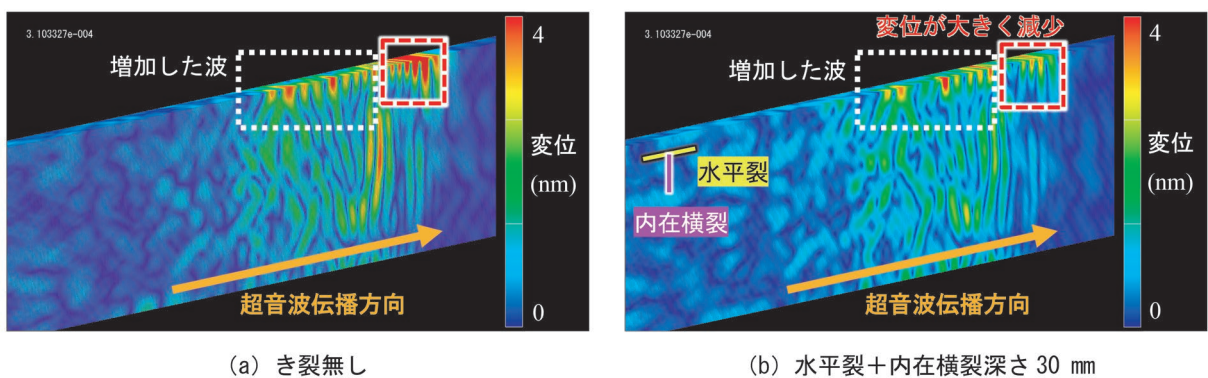


図 11 超音波のレール内き裂透過後の伝播の様子

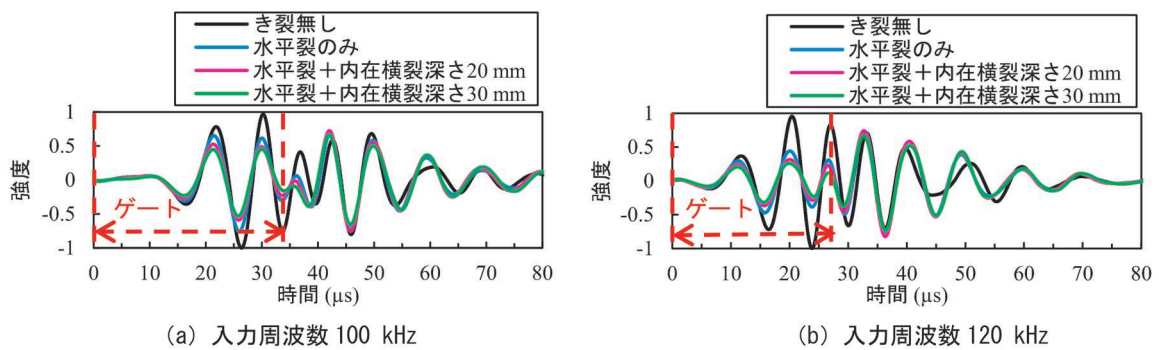


図 12 き裂ごとの受信波形例

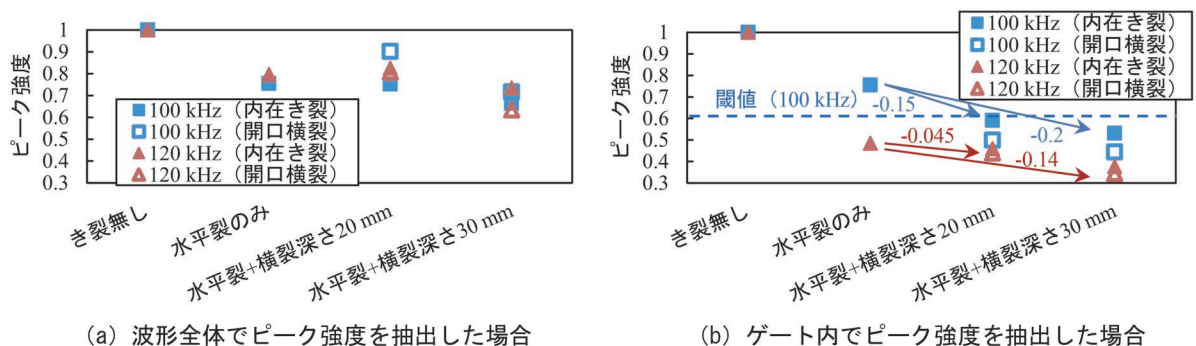


図 13 き裂の条件とピーク強度の関係<sup>12)</sup>

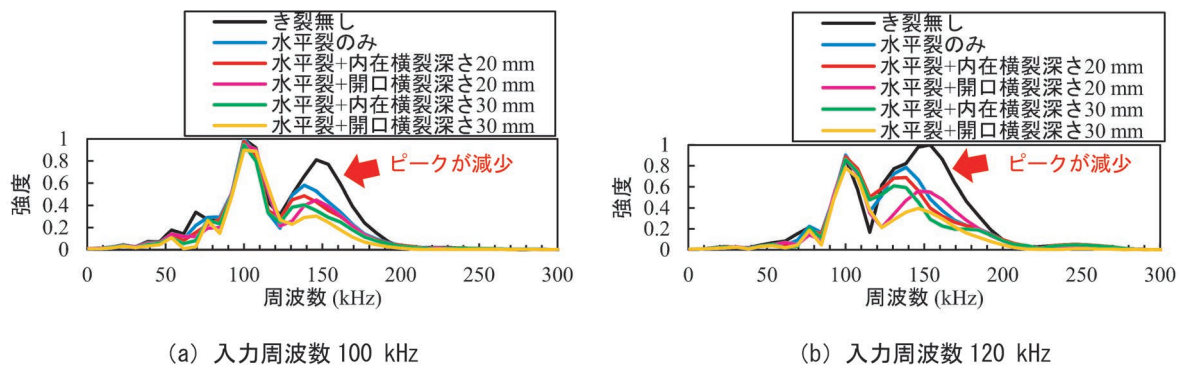


図 14 受信波周波数分布

程度、同じく 30mm で 0.14 程度の減少量であり、横裂の有無によるピーク強度の変化が小さい。そのため、入力周波数 100kHz の場合に比べて横裂の有無を区別する正確な閾値設定が難しく、受信強度の変化に着目して深さ 20mm 以上の横裂の検知を行うことは難しいと考えられる。

さらに、受信波の周波数分布を比較することにより、周波数特性の変化による横裂検知可能性を検討した。図 14 に各き裂の条件での受信波の周波数分布を示す。入力周波数 100, 120kHz のどちらの場合においても、100kHz 周辺および 130~150kHz 周辺に 2 つのピークが存在しており、水平裂や横裂の大きさに応じて 130~150kHz のピークが減少していることが確認できる。このピークの減少に着目することにより、き裂の形状の判定ができる可能性がある。

水平裂の幅や長さ、横裂の位置や進展角度など、き裂の形状をはじめとしてまだ多くのパラメータが存在し、FEM 解析によるさらなる検討を進めていく予定である。

#### 4. まとめ

水平裂および横裂を模擬したき裂を挿入した FEM レールモデルを作成し、非接触でガイド波をレールへ伝播させる超音波伝播シミュレーションを実施することで、ガイド波によるレール頭部横裂の検知可能性を検討した。本研究で得られた結果を以下の通りまとめる。

- (1) レール頭頂面よりスリットを挿入したモデルにて超音波伝播シミュレーションを行い、入力周波数と主に伝播するレール内深さの関係を整理した結果、入力周波数 100~150kHz の超音波が深さ 20~30mm の横裂の検知に適していることが分かった。
- (2) (1) の結果より、入力周波数 100, 120kHz として水平裂や横裂を模擬したレールモデルにて超音波伝播シミュレーションを実施したところ、伝播す

る波のうち、最初の数波部分がき裂の影響を大きく受けることが分かった。これより受信波形のうち最初の 3 周期部分のみでの強度の比較により、水平裂下の横裂の深さに応じて強度が低下することを確認した。入力周波数を 100kHz とした場合、120kHz とした場合に比べ、き裂が水平裂のみの条件に対する横裂を含む条件での受信強度は大きく減少することが分かった。き裂無しの条件での受信強度に対し、60~70% 程度の閾値を設定することにより、深さ 20mm 以上の横裂の検知が可能であると考えられる。また受信波の周波数分布を比較することで、水平裂や横裂を判別できる可能性が示唆された。

- (3) 本研究での解析結果を踏まえ、さらに解析での検討を行い、ガイド波によるレール頭部横裂検知システムの構築を進めていく予定である。

#### 文献

- 1) 新版軌道材料編集委員会編：新版軌道材料，鉄道現業社，pp.76-83，2011
- 2) 東京計器レールテクノ，鉄道保線機器総合カタログ，頭部横裂測定器： [https://www.tokyokeiki.jp/Portals/0/images/products/pdf/rail/202111\\_trt.pdf](https://www.tokyokeiki.jp/Portals/0/images/products/pdf/rail/202111_trt.pdf) (参照日：2024 年 1 月 10 日)
- 3) 寺下善弘，設楽英樹：レール等に潜む損傷の検査法，RRR，Vol.65，No.5，pp.22-25，2008
- 4) 例えば Bayissa, W.L. and Dhanasekar, M., "High speed detection of broken rails, rail cracks and surface faults," CRC for Rail Innovation (An Australian Government Initiative), 2011.
- 5) 林高弘，宮崎雄介，片岡慶太，瀧川光伸：超音波ガイド波の鉄道レール検査への適用，M & M 材料力学カンファレンス，2007 巻，pp.72-73，2007
- 6) 元好茂，本間健一：レール損傷検知システム（超音波方式，帰線電流方式）の開発，新線路，Vol.66，No.11，pp.33-35，2012
- 7) 細田充，相澤宏行，山本隆一：軌道回路に代わる車上式レー

- ル破断検知システム, 鉄道総研報告, Vol.36, No.3, pp.17-22, 2022
- 8) Chong, M. L., Joseph, L. R. and Younho, C., "A Guided Wave Approach to Defect Detection under Shelling in Rail," NDT&E International, Vol.42, pp.174-180, 2009.
- 9) 伊藤忠テクノソリューションズ, ComWAVE 超音波解析ソフトウェア, engineering-eye : <https://www.engineering-eye.com/ComWAVE/index.html> (参照日: 2023年6月23日)
- 10) Hayashi, T., Won-Joon, S. and Joseph, L. R., "Guided Wave Dispersion Curves for a Bar with an Arbitrary Cross-section, a Rod and Rail Example," Ultrasonics, Vol.41, Issue 3, pp.175-183, 2003.
- 11) 小納谷優希, 細田充, 山本隆一: ガイド波によるレール損傷検知システムを搭載した車両による走行試験, 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会講演概要集, No.VI-1204, 2023
- 12) 小納谷優希, 細田充, 山本隆一: FEMによるき裂を有するレールへのガイド波伝播シミュレーション, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.27, pp.71-78, 2023
- 13) 川崎絢一郎: 超音波を用いた非破壊材料特性評価, 日本機械学会論文集 (A編), Vol.67, No.655, pp.16-23, 2001