論文　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

小納谷　優希[1]・細田　充[2]・山本　隆一[3]

[1]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所　軌道技術研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8-38）
E-mail: konaya.yuki.13@rtri.or.jp (Corresponding Author)

[2]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所　軌道技術研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8-38）
E-mail: hosoda.mitsuru.75@rtri.or.jp

[3]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所　軌道技術研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8-38）
E-mail: yamamoto.ryuichi.22@rtri.or.jp

レール折損につながる頭部横裂は水平裂から下に向かって進展するため，探傷車による検知は難しく人手による検査を必要としている．この検査作業の省力化のため，車上からガイド波として超音波をレールへ入力し，受信信号より頭部横裂を検知するシステムを検討している．そこで非接触でレールへ超音波を伝播させ受信することを模擬した FEM 解析モデルを作成し，頭頂面から横裂を模擬したスリットを挿入したレールへのガイド波伝播シミュレーションを行った．その結果頭部に発生する横裂に感度良く反応する超音波周波数帯域が示唆され，同形態のき裂を含む実物レールを用いた室内試験でも同様の結果を確認した．また，水平裂や横裂をレールモデルに再現し解析を行ったところ，き裂の程度に応じて受信信号の強度が低下し，横裂検知が可能である見通しを得た．

Key Words: *guided wave, ultrasonic propagation simulating, rail defects detection, rail head crack*

1.　はじめに

レール折損要因の約 4 割を占めるシェリング等に起因するレール頭部横裂（以下，横裂という）[1]は，レール頭頂面直下に発生する水平裂から下に向かって進展するため，レール探傷車による検知が困難である．現状多くの鉄道事業者では，この横裂の検査として人手による超音波探傷を行っており，検査に手間を要するため横裂検知手法の効率化が求められている．一方，過去にガイド波として超音波を伝播させ，レール底端部の検査を行う技術の検討が行われている他 [2]，レールの破断を検知する手法として，図-1 に示すように，車上より非接触でガイド波をレールに伝播させ，同じく車上で受信するシステムが提案されており [3]，この非接触空中超音波技術のレール横裂検知への適用が期待できる．そこで本研究では，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，き裂を含むレールに対する超音波伝播シミュレーションを行った．レールへ伝播させるガイド波の周波数により，伝播深さが変化することが報告されており [4]，本研究ではシミュレーションにて得られた受信波よりガイド波のレール内での基礎的な伝播特性を評価した．また水平裂や横裂を模擬したき裂を設けたモデルを用いてシミュレーションを行い，受信波応答より横裂検知手法への適用可能性を検討した．



図-1　台車に設置した超音波送受信プローブ

2.　スリット入り試験体を対象とした超音波伝播特性の評価

入力周波数によってレール内伝播深さが異なることから，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ため，レール頭頂面および底面より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用い

て解析を行い，入力周波数とレール内伝播特性の関係を整理した．

(1) 解析モデルおよび解析条件

解析には超音波解析ソフトウェア ComWAVE[5]を用い，ボクセル型有限要素によるレール解析モデルを作製した．基礎的検討として本解析では**図-2** に示すような，有限の全長 1500mm の 50kgN 普通レールを用いた室内でのガイド波透過試験をイメージしたモデルとした．また送信プローブから超音波を非接触でレールに入力することを想定し，レール外部に設置した送受信プローブのモデル周辺に境界媒質となる空間を設けた．解析モデルの概要を**図-3** に示す．

続いて解析条件を**表-1**に示す．本解析では境界媒質は水として計算した．これは水の場合，超音波の伝播波長が数倍異なり，空気と比較して要素サイズおよび解析時間を大きく減少させることが可能なためである．FEM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，媒質を超音波が透過する際の波長の1/20のサイズを目安として設定した．超音波の入力周波数は破断検知での検討[3]を参考の上100，150，200kHzの3種類とし，レール長手方向に連続的で高出力かつ特定の周波数の応答が顕著となるような12波のバースト波を伝播させた．水平面に対するプローブの角度についてはより大きな受信強度が得られる角度として，水中からレールへの横波臨界角度である20°に設定した．これは過去の検討[6]により，横波に近いモード（約3mm/μs）が速度が速く，強度が強い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おり，かつ一般的な横波は臨界角近くに設定すると強い強度で送信できるためである．プローブとレールとの離隔について，既往の研究にてプローブを鉄道車両に搭載し，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[3]が，本研究ではレール内での基礎的な伝播特性の把握が目的であることを踏まえ，解析モデルの全要素数と計算負荷を考慮し10mmに設定した．なお，スリットについては任意の深さのものをレール頭頂面および底面から幅1mmで挿入した．

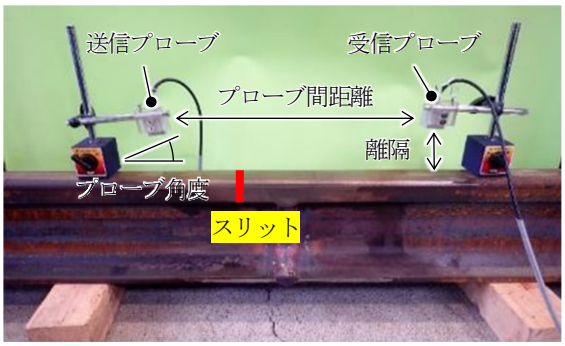


図-2 室内でのガイド波透過試験

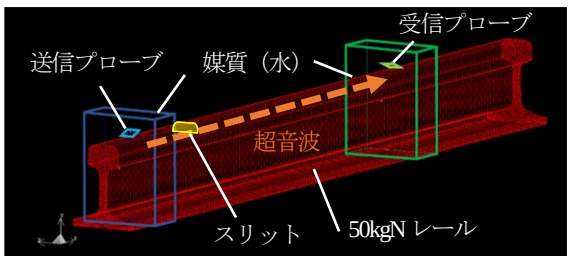


図-3 解析モデル概要

(2) 解析結果

図-4 に超音波伝播によるレール表面変位の変化の状況を示す．頭頂面から挿入したスリットの前後で超音波の伝播に起因する表面変位量が大きく変化していることが分かる．本研究では超音波の受信信号として，表面変位より算出される体積ひずみに注目することとする．**図-5** に入力周波数が 100kHz，200kHz の場合の受信プローブでの体積ひずみ変化の波形例を示す．いずれも頭頂面からスリットを挿入した場合の波形であり，スリット無しのデータを元に正規化している．入力周波数に応じて波長が変化しており，レール内伝播中のレール形状に起因した反射等の影響により若干の増減はあるが，双方の波形にて 1 つ目の波束に 12 周期程度の波が確認できる．またスリットの深さが深くなるにつれて振幅が減少しており，入力周波数の違いによってスリット深さ毎の波形の振幅の減少幅が異なっていることが読み取れる．

各入力周波数でのスリット深さによるピーク強度（波

表-1 解析条件（その 1）

送受信プローブサイズ	25mm×25mm	送受信プローブ角度 θ	20°
送信プローブからき裂までの距離	200mm	送受信プローブとレールとの離隔	10mm
き裂形状	頭部，底部スリット	送受信プローブ間距離	950mm
入力波の種類	バースト波	入力波数	12
入力周波数	100kHz	150kHz	200kHz
全要素数	約 0.5 億	約 1.7 億	約 5 億

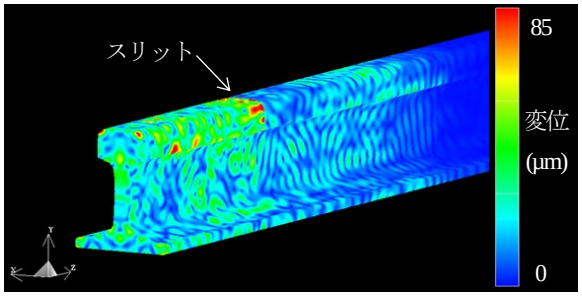
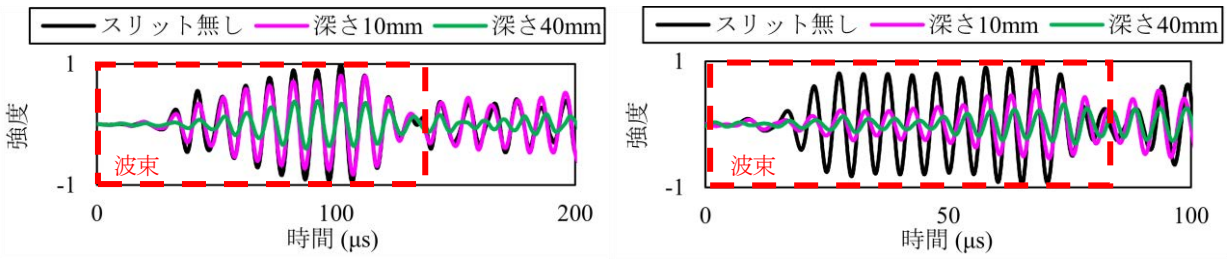
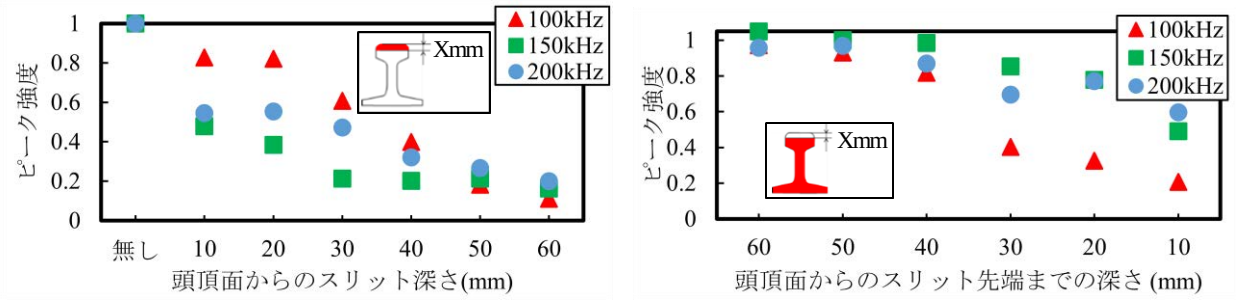


図-4 超音波伝播の様子（入力周波数 100kHz・頭頂面よりスリット挿入深さ 40mm）



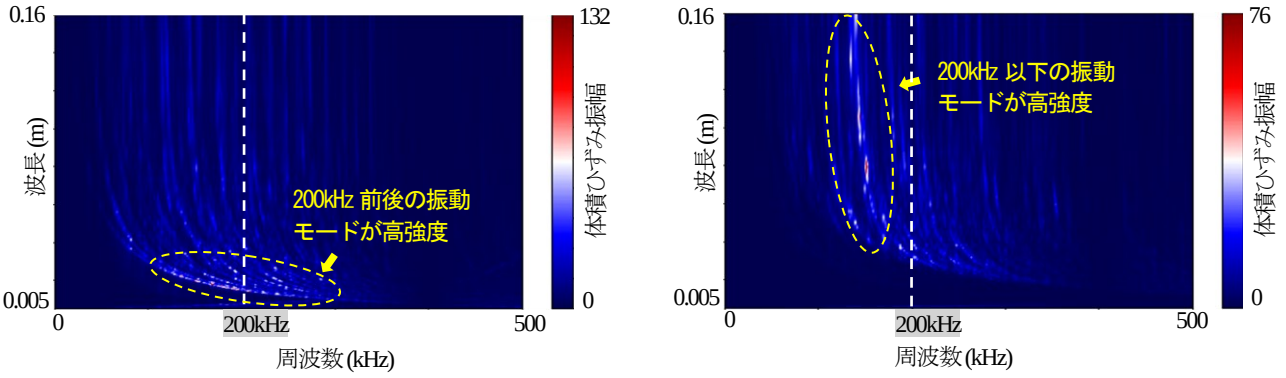
(a) 入力周波数 100kHz　　(b) 入力周波数 200kHz

図-5 バースト波（12 波）発信時のレール頭部スリット深さ毎の受信波形例（スリット無しのデータを元に正規化）



(a) 頭頂面からスリット挿入　　(b) 底面からスリット挿入

図-6 スリット深さとピーク強度の関係（スリット無しのデータを元に正規化）



(a) レール頭頂面　　(b) 頭頂面より深さ 40mm

図-7 体積ひずみの分散曲線

形の振幅の最大値）の変化を**図-6** に示す．レール底部の超音波が遮られた場合の受信応答を検証するために底面からスリットを挿入したが，いずれの周波数でも，レール底面から挿入したスリットが上首部付近まで到達するまでのピーク強度の変化は極めて小さい．強度の減衰率に着目すると，頭頂面および底面からスリットを挿入したいずれの場合でも，入力周波数 100kHz では，レール頭頂面からの深さが 20~40mm 付近のスリット深さの変化で急激にピーク強度が変化する．一方入力周波数 150, 200kHz では，レール頭頂面から挿入した 10mm の深さのスリットによりピーク強度がスリット無しの 50%程度まで低下し，底面から挿入したスリットが頭頂面から 10mm の深さに到達するまでのピーク強度の変化は緩やかである．また，**図-7** 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，受信強度が強いそれぞれの白色～赤色の箇所が波の振動モードを表している．この分散曲線を参照すると，レール頭頂面に比べて深さ 40mm の地点では，200kHz 以下の低周波寄りの振動モードで高強度を示していることが読み取れる．つまり，深さ 40mm の地点では，100~150kHz の周波数帯の超音波が卓越して伝播し，この部分を遮断するスリットでこれらの周波数帯の超音波が多く遮られた可能性が高いと推測される．これはレール内を主に伝播する横波の基本モードの場合，レール頭頂面からの深さが深いほど波長が長い低周波数の帯域が卓越しているからと考えられる．

以上より，スリット深さに応じて感度良く反応する周波数が異なることが示唆された．頭頂面からスリットを

入れた場合，スリット無しと比較して，入力周波数 150, 200kHz では，スリット深さ 10mm でピーク強度が大きく減少し，周波数 150kHz ではスリット深さ 10~30mm の範囲でのピーク強度の変化が大きかった．一方，入力周波数 100kHz の場合には，スリット深さ 10~20mm でのピーク強度の変化は小さく，スリット深さ 20~40mm の範囲でのピーク強度の変化が顕著であった．管理上検知すべき深さの横裂が深さ 20mm 以上であることを考慮すると，ガイド波による頭部横裂検知システムには，100~150kHz の周波数の超音波が適している可能性が高いと言える．

(3) 解析結果の妥当性の検証

本解析結果の妥当性について検証するため，**図-2** で示した室内試験を解析と同条件で行った結果および境界媒質を実際の空気とした場合の解析結果と比較した．室内試験ではガイド波としてレールに超音波を伝播させるため，バースト波を送受信可能な高感度，高出力の超音波送受信機および外付けプリアンプを使用して試験を行った．**図-8** にスリット無しレールに対して周波数 100kHz，波数 12 とした超音波を伝播させた室内試験で得られた受信波形を示すが，**図-5(b)** と比較すると波数が大きく増加した波形となっている．これは実際に超音波プローブの振動子から送信される波は設定波数（入力信号波数）よりも大きくなってしまうこと [7] 等が原因と考えられるが，ピーク強度について，同様に振幅の最大値を抽出することで比較することとした．また境界媒質を空気とした場合の解析では，要素サイズが非常に小さくなることから，計算負荷を抑える必要がある．そのため，解析モデルは**図-3** で示したモデルよりレール底面から高さ 35mm の部分を削除したモデル（全要素数約 10 億）とした．これは，**図-6(b)** に示した通り，レール底面から上首部付近までスリットを挿入しても強度変化が極めて少なかったことから，底部領域を計算上除外しても最終的なピーク強度変化には大きな影響はないと判断したためである．

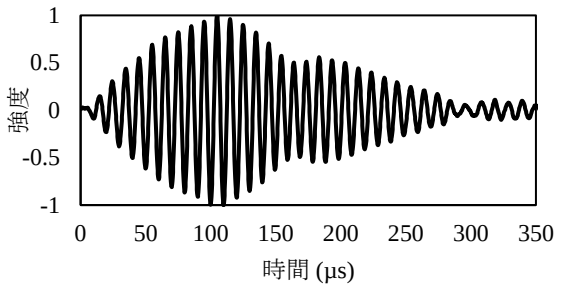
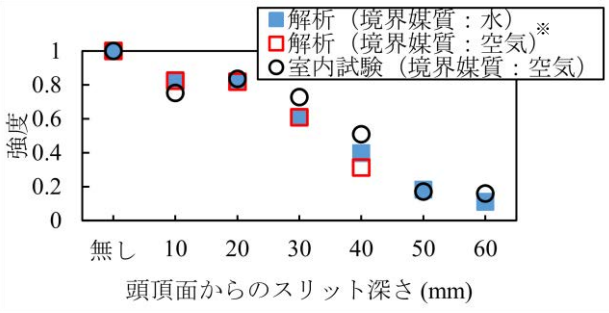


図-8 スリット無しレールに対し室内試験で得られた受信波形（入力周波数 100kHz・入力波数 12）



※スリット深さ 40mm までのデータのみ

図-9 解析と試験でのピーク強度変化の比較（入力周波数 100kHz）

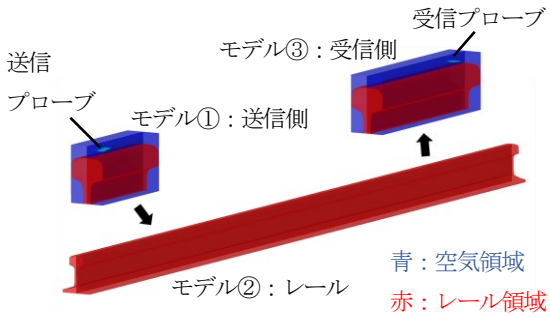
入力周波数を 100kHz として頭頂面からスリットを挿入した場合の受信ピーク強度変化の比較グラフを**図-9** に示す．最大誤差で 20%程度と良く整合し，特に境界媒質の違いによる変化は極めて小さいことを確認した．以上より，波形としての違いは見られたものの，ピーク強度変化によるレール内の超音波伝播特性評価を行うにあたり，解析モデルの妥当性が示唆された．

3. 水平裂・横裂混在状況下での受信波応答の評価

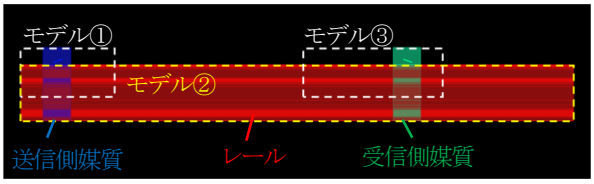
実際に営業線に発生する水平裂や横裂を想定し，それらが混在する場合の横裂検知の可能性を検討するため，水平裂および横裂を模擬したき裂をレールモデルに再現し，解析により受信波応答を分析した．

(1) 解析モデルおよび解析条件

図-10 に本章での解析モデルの概要を示す．2章での解析モデルとは異なり，超音波送信から受信の各過程を，モデル①：空中での超音波送信からレールまでの伝播，モデル②：レール内長手方向への伝播，モデル③：レー



(a) 引継ぎ計算イメージ



(b) 分割モデル解析領域（側面図）

図-10 分割解析モデル概要

ルから空中での超音波受信までの伝播，の 3 段階に分割し，モデル①～③の順に引継ぎ計算を行うこととした．これにより媒質を空気とした場合でもメッシュサイズを小さくする必要のあるのはボリュームの小さいモデル①，③のみとなり，計算精度を維持しつつ空気中における超音波伝播計算を実現できるほか，モデル②のレール長さを延長した場合でも，計算負荷を抑えた解析が可能になる．

解析条件を**表-2** に示す．送受信プローブ角度について，本解析では媒質を空気としたことから，空気中からレールへの横波臨界角度である 6° に設定した．入力する超音波について，2 章で得られた結果より周波数は 100，120kHz の 2 種類を設定し，また波数については 3 波とした．これは入力波数 3 および 12 でき裂を含まないレールの場合の解析結果より受信波の周波数分布を比較したところ（**図-11**），波数 3 の方が広帯域であり，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．一方再現したき裂について，具体的な形態を**図-12** に示す．水平裂を模擬したき裂として，頭頂面からの深さ 7mm 位置に長さ 50mm×幅 30mm で厚さ 1mm の直方体のき裂を設定した．また，横裂を模擬したき裂として，水平裂下に内在する半円状スリットおよび，頭頂部に開口した半円状のスリットを深さ 20mm，30mm でそれぞれ設定した．なお以降では，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水平裂，横裂を模擬したき裂を指すものとし，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」と呼ぶこととする．

表-2　解析条件（その 2）

送受信プローブサイズ	25mm×25mm	送受信プローブ角度 θ	6°
送信プローブからき裂先端までの距離	200mm	送受信プローブとレールとの離隔	10mm
再現したき裂形態※	水平裂，水平裂＋横裂深さ 20mm，同 30mm	送受信プローブ間距離	950mm
入力波の種類	バースト波	入力波数	3
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	

※横裂は開口横裂および内在横裂を含む

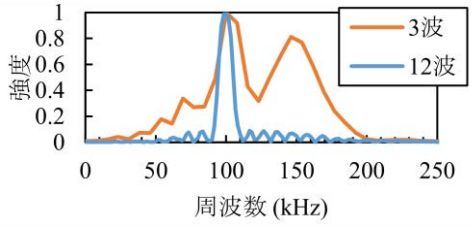


図-11　入力波数差による受信波周波数分布比較
（入力周波数 100kHz，き裂無しレール）
※最大値により正規化

(2)　解析結果

入力周波数 100kHz として，き裂無しのモデルおよび水平裂と深さ 30mm の内在横裂を設定したモデルそれぞれの解析結果から，モデル②のレール表面の変位のコンター図を出力しレール内での超音波伝播の様子を可視化した．**図-13** にき裂に超音波が到達した直後の伝播の様子を，き裂無しのモデルと合わせて比較して示す．**図-13(a)**のき裂無しのモデルではレール内に伝播した数波の超音波が確認できるが，**図-13(b)**の水平裂と深さ 30mm の内在横裂を含むモデルではき裂によって波が遮られている様子が確認できる．

図-14 に，伝播する波の多くがき裂をほぼ完全に透過した時点での状況を同様に比較して示す．このケースでは波の伝播によるレール表面の変位が広範囲で確認でき，レール内での伝播距離が長くなったことにより波数が増加していると考えられる．**図-14(b)**の水平裂と深さ 30mm の内在横裂を含むモデルでは，**図-14(a)**のき裂を含まないモデルに比べ，波の先頭部分（図中では最初の 5~6 波程度）の強度（表面変位）が低下している．これよりレール内を伝播し，受信プローブ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，強度が低下していることがわかる．

続いて入力周波数 100kHz，120kHz のそれぞれの条件での受信波形例を**図-15** に示す．いずれの入力周波数でも，き裂の存在によって波の立ち上がりから最初の 3 波程度まで（図中にて赤矢印で示した範囲）の波形の振幅が減少していることが読み取れる．これは前述の先頭数波の強度が大きく変化しているレール内の超音波伝播の可視化結果と一致している．一方で，それ以降の波の振幅は，いずれのき裂を有する場合でもき裂無しの場合に比べ大差がない．

図-15 で示した受信波形より，波形全体の振幅の最大値をピーク強度として抽出しグラフ化したものを**図-**

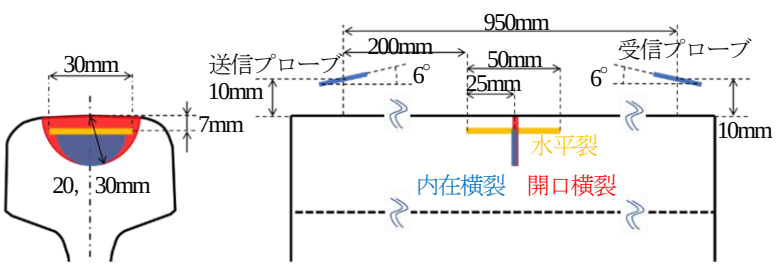
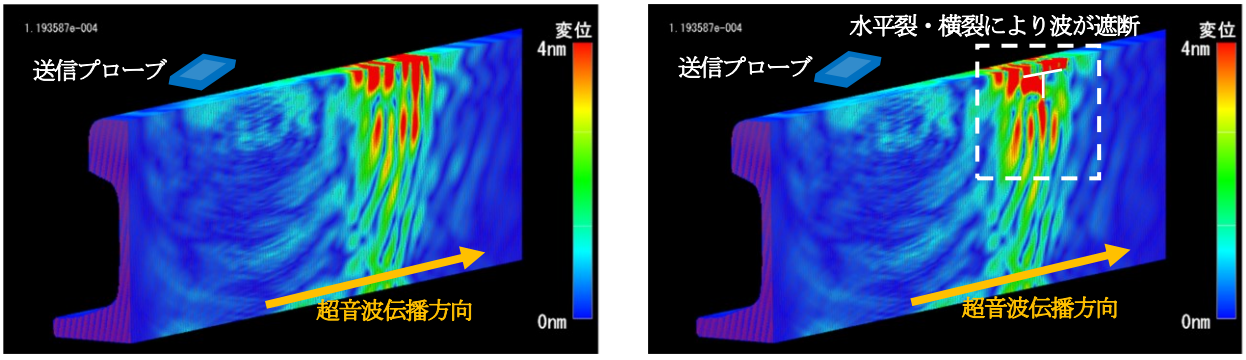
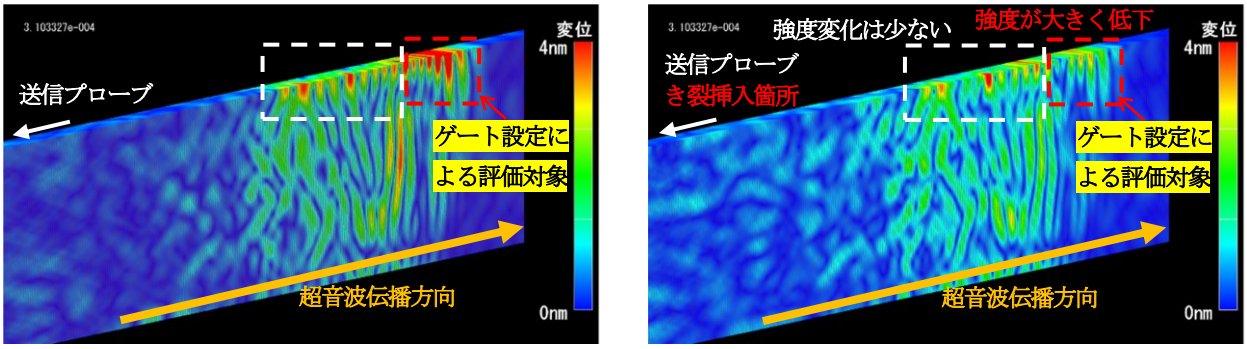


図-12　再現したき裂の形状



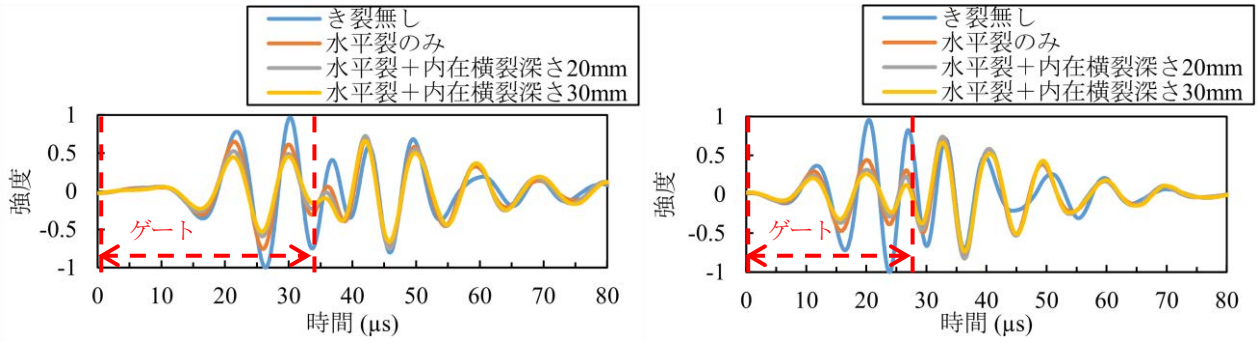
(a) き裂無し　　(b) 水平裂＋内在横裂深さ 30mm

図-13 超音波のき裂到達直後のレール縦断面での伝播の様子



(a) き裂無し　　(b) 水平裂＋内在横裂深さ 30mm

図-14 超音波のき裂透過後のレール縦断面での伝播の様子

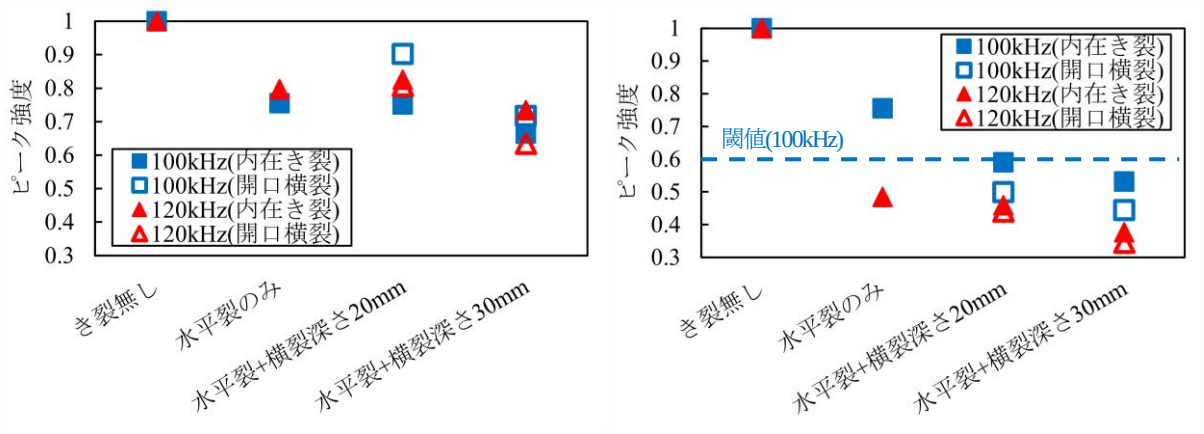


(a) 入力周波数 100kHz　　(b) 入力周波数 120kHz

図-15 き裂条件ごとの受信波形例

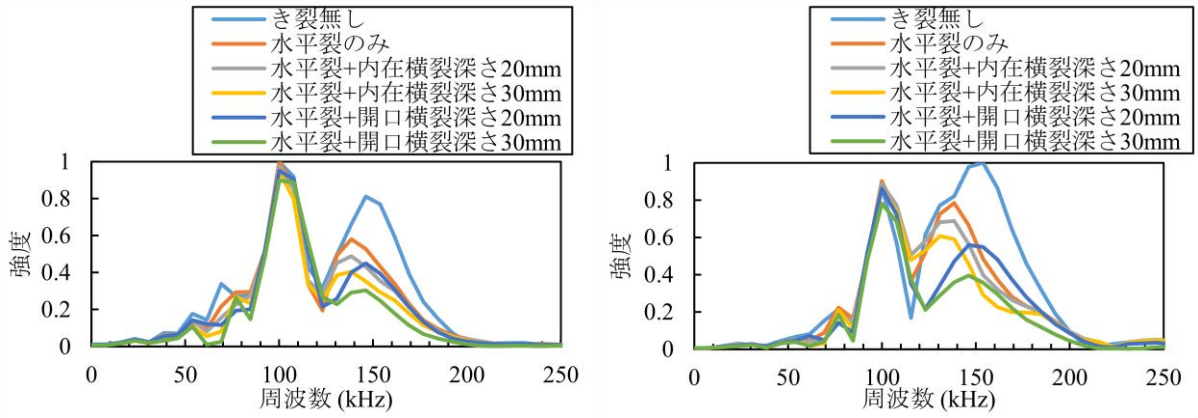
16(a)に示す．いずれの入力周波数でも水平裂が存在することでピーク強度の減少が見られるが，横裂の深さの違いによる強度変化は見られない．そこで波形の振幅に大きな変化が見られた区間として，ここではき裂無しの受信強度の波形データのうち，初めて絶対値 0.01 以上の極値を取った点から 3 周期分の時間をゲートとして設定し，各波形のゲート時間内最大値をピーク強度として整理したものを図-16(b)に示す．いずれの入力周波数でもき裂の程度に応じてピーク強度の変化が確認でき，特に入力周波数 100kHz の場合，き裂が水平裂単独の場合に比べ，内在横裂の深さに応じて約 0.15～0.2 程度のピーク強度の減少がみられる．また開口横裂の場合はさらに約 0.1 程度ピーク強度が減少する．これより閾値を 0.6~0.7 程度に設定することにより，実務上管理すべき水平裂下に存在する深さ 20mm 以上の横裂の存在が判定できる可能性が高い．一方，入力周波数 120kHz では，水平裂が単独で存在するだけでピーク強度が 0.5 程度まで大きく減少してしまうため，水平裂下に存在する横裂によるピーク強度の減少量が非常に小さく，横裂の存在を検知することは難しいと考えられる．

さらに，き裂の形態による受信波周波数特性の変化による横裂検知可能性について検討するため，受信波の周波数分布の比較を行った．フーリエ変換により作成した受信波の周波数分布を図-17 に示す．入力周波数 100kHz および 120kHz の結果とも，図-17 中 100kHz 周辺および 130~150kHz 周辺に 2 つのピークが存在しており，き裂の



(a) 波形全体で強度を抽出した場合　　(b) ゲートを設定し抽出した場合

図-16 き裂条件とピーク強度の関係



(a) 入力周波数 100kHz　　(b) 入力周波数 120kHz

図-17 受信波周波数分布

程度に応じて 130~150kHz のピークが大きく変化している．このことからこの帯域に着目することでも，き裂の判別ができる可能性がある．

以上より水平裂から下に向かって進展した横裂の検知可能性が示唆されたが，き裂の角度や幅等検証すべきパラメータはまだ多く存在し，さらなる検討を今後進めていく必要がある．

4. まとめ

ガイド波による非接触のレール頭部横裂検知に向けて，横裂および水平裂を模擬したき裂を有する FEM レールモデルを用いた超音波伝播シミュレーションを実施し，レール内の超音波伝播特性の評価および横裂形状のき裂の検知可能性について検討した．本研究では以下のような結果を得た．

(1) レールモデル頭頂面および底面より横断面方向にスリットを挿入して超音波伝播解析を行った結果，入力周波数 150~200kHz の超音波はレール頭頂面付近を伝播し，100~150kHz の超音波は上首部付近を主に伝播することが明らかになったことから，深さ 20mm 以上の頭部横裂検知には 150kHz 以下の入力周波数のガイド波が適していると考えられる．

(2) 入力周波数 100kHz として，水平裂や横裂を模擬したき裂を挿入したレールモデルにて同様の解析を行ったところ，受信波の最初の数波部分がき裂の影響を大きく受け強度が低下していることが分かった．これより受信波の最初の3周期部分でピーク強度を比較することにより，入力周波数 100kHz の場合，水平裂下に存在する横裂の深さに応じてピーク強度が低下することを確認した．したがってき裂無しの場合に対し 60~70%程度の閾値の設定により，深さ20mm以上の横裂の検知が可能だと考えられる．

(3) 入力周波数 100, 120kHz とした場合の受信波の周波数分布を比較すると，周波数分布図中 130~150kHz 周辺のピークが水平裂や横裂を模擬したき裂の程度に応じて減少し，このピーク変化に着目するこ

とによりき裂を判別できる可能性が示唆された.

REFERENCES

1) 新版軌道材料編集委員会編：新版軌道材料，pp. 76-83，鉄道現業社，2011. [Committee of New Editon for Track Material: *Shinhan Kidouzairyou*, pp. 76-83, Tetsudou Gengyousha, 2011.]
2) 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. [Hayashi, T. , Miyazaki, Y. , Kataoka, K. and Takikawa, M.: Application of ultrasonic guided waves to rail inspection, *M&M Material Mechanics Conference*, Vol. 2007, pp. 72-73, 2007.]
3) 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，36 巻 3 号，pp. 17-22, 2022. [Hosoda, M. , Aizawa, H. and Yamamoto, R.: Rail Broken Detection System from Vehicle as an Alternative to Track Circuits, *Report of Railway Technical Research Institute*, Vol. 36, Issue 3, pp. 17-22, 2022.]
4) 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.
5) ComWAVE 超音波解析ソフトウェア，engineering-eye，伊藤忠テクノソリューションズ, https://www.engineering-eye.com/ComWAVE/index.html，2023 年 6 月 2 日閲覧 [“ComWAVE ultrasonic analysis software”, engineering-eye, ITOCHU Techno-Solutions Corporation, https://www.engineerig-eye.com/ComWAVE/index.html, accessed on June 2, 2023.]
6) 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.
7) 浅田隆昭：空中超音波トランスデューサの概要，日本音響学会誌，76 巻 5 号，pp. 271-278，2020. [Asada, T.: Brief Outline of Airborne Ultrasonic Transducers: Present and future, *The Journal of The Acoustical Society of Japan*, Vol. 76, Issue 5, pp. 271-278, 2020.]

(Received March 31, 2023)
(Accepted June 9, 2023)

SIMULATION OF GUIDED WAVE PROPAGATION TO CRACKED RAIL USING FEM MODELS

Yuki KONAYA, Mitsuru HOSODA and Ryuichi YAMAMOTO

It is difficult to detect rail head transverse cracks which will lead to rail breakage because the ultrasonic input from top of rail heads would be blocked by horizontal cracks that exist near the surface. Therefore, we have been investigating a system using guided waves as a new method for detecting transverse cracks. We conducted FEM analysis to simulate ultrasonic wave propagation in which ultrasonic waves were input to a cracked rail from the air and received in the air. Ultrasonic wave propagation simulations were carried out for a rail model with a slit inserted in the transverse direction. The results showed that the depth from the rail head at which guided waves propagate varies with input wave frequency, and that input frequencies less than 150kHz are appropriate to detect cracks in the rail head by guided waves. Then, we carried out simulations using rail models with horizontal and transverse cracks and 100, 120kHz input waves. The results showed that the strength of the first few waves in the received signal waves decreased with the degree of cracking, and decreased to 60~70% of that without cracking in the case of horizontal and transverse cracks deeper than 20mm. At the 120kHz input wave, there was no difference in wave strength between the case of only a horizontal crack and the case of horizontal and transverse cracks. Therefore, the result shows that transverse cracks more than 20mm that exist below horizontal cracks can be detected using the input frequency of 100kHz. On the other hand, a comparison of the frequency distributions of received signal waves showed that the peak of 130~150kHz decreased with the degree of cracks. This indicates that those cracks may be detected by evaluating the frequency distributions.