

FEM 解析を用いた非接触空中超音波による レール損傷検知システムの基礎検討

小納谷 優希* 細田 充 山本 隆一 (公益財団法人鉄道総合技術研究所)

Basic study on the rail defect detection system using non-contact air coupled ultrasonic wave by FEM analysis

Yuki Konaya*, Mitsuru Hosoda, Ryuichi Yamamoto, (Railway Technical Research Institute)

As the method of rail head transverse crack detection, we investigated non-contact air coupled ultrasonic wave system. We conducted FEM analysis to simulate propagation of ultrasonic wave which is sending and receiving in air through rail with defects such as horizontal and transverse crack. We analyzed the output data and concluded that the characteristics of ultrasonic propagation are different depending on crack deformation and size.

キーワード：非接触空中超音波，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
(Keywords: Non-contact Air Coupled Ultrasonic Wave, Ultrasonic Wave Propagation Simulating, Rail Defects Detection, Transverse Fissure, Horizontal Split Head)

1. はじめに

現状多くの鉄道事業者では、シェリングなどによりレール頭部に発生する横裂の管理は手作業の超音波探傷に頼っており、横裂検知手法の効率化が求められている。図 1 に示すように、車上より非接触で超音波をガイド波としてレールに伝播させ、同じく車上にて受信した超音波の受信信号よりレールの破断を検知する手法が提案されており⁽¹⁾、この非接触空中超音波技術のレール損傷検知への適用が期待できる。そこで本研究ではこの車上からのレール損傷検知手法を開発するため、超音波伝播シミュレーションによってその適用性を基礎的に検討した。具体的には、頭部横裂や水平裂を模擬したレールモデルに対して、送信プローブおよび受信プローブを、レール長手方向に一定間隔空けて設置した条件で、超音波を伝播するシミュレーションを行った。

2. 解析モデル

解析には超音波伝播シミュレーションソフトウェア ComWAVE (伊藤忠テクノソリューションズ開発) を用い、ボクセル型有限要素による解析モデルを構築した。超音波伝播のシミュレーション精度の観点から最短伝播波長の 1/20 以下のメッシュサイズにすることが推奨されている⁽²⁾。伝播する超音波の波長は媒質のインピーダンスで決まるが、空気のインピーダンスを想定したメッシュサイズで数メートル規模のレールをモデル化すると、要素数が極めて

多くなってしまう。本研究では、超音波送信から受信の過程まで、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 段階に分割したモデルを構築し、モデル①～③の順に計算を引き継いでいく手法を取ることとした。このモデルの概要を図 2 に示す。これよりメッシュを細かく設定する必要のある空気での解析領域を含むのはボリュームの小さいモデル①、③の



図 1 台車に設置した超音波送受信プローブ

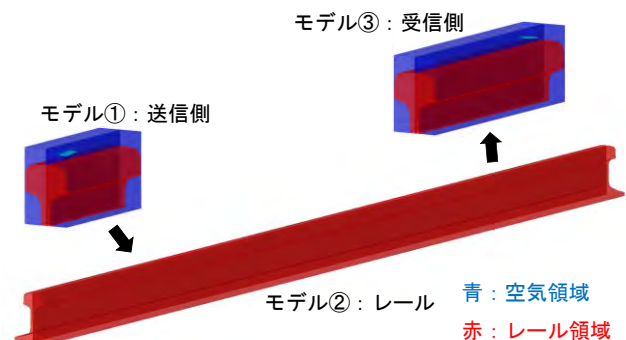


図 2 分割計算モデル概要

みとなり、計算精度を保持しつつ計算負荷を大幅に低減させた。

3. 解析条件

解析条件を表 1 に示す。本研究ではレールを JIS50kgN レールとし、入力する超音波周波数を 100、120kHz の 2 種類とした。これは同様の伝播シミュレーションで、150kHz や 200kHz の高周波数側の超音波を用いた場合は 100kHz に比べ表面近傍を伝播しやすい傾向があり⁽³⁾、内部欠陥の検知感度が不十分であると判断したためである。また送受信子間の距離については、先行研究⁽³⁾において、横裂を想定し頭頂面から挿入した表面開口スリットを対象とした解析結果と、実際の横裂を想定し、本研究で対象とした内在スリットの解析結果を比較するため、まず先行研究同様の 950mm として解析を行った。さらに図 1 のように実際の鉄道車両に送受信プローブ (送受信子) を設置する場合を想定し、3200mm として解析を行った。なおレールモデルの全長は反射波などの影響を考慮し、それぞれ余分に長さを取り 1500mm、3500mm とした。欠陥の無いレール内の超音波伝播の様子を、表面変位を指標として図 3 に示す。

表 1 解析条件

波の種類	バースト波	送受信子とレールとの離隔	10mm
波数	N=3 波	送受信子間距離	950mm 3200mm
送受信子サイズ	25mm×25mm	送受信子角度	6°
欠陥形状	水平裂、水平裂&横裂深さ 20mm、 水平裂&横裂深さ 30mm		
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(950mm) 約 0.6 億(3200mm)	約 0.3 億(950mm) 約 0.6 億(3200mm)	
モデル③要素数*	約 2.0 億(950mm) 約 2.5 億(3200mm)	約 3.5 億(950mm) 約 4.4 億(3200mm)	

※モデル②、③では送受信子間距離毎に要素数が異なる

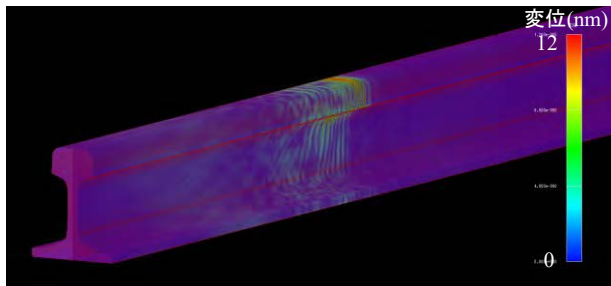
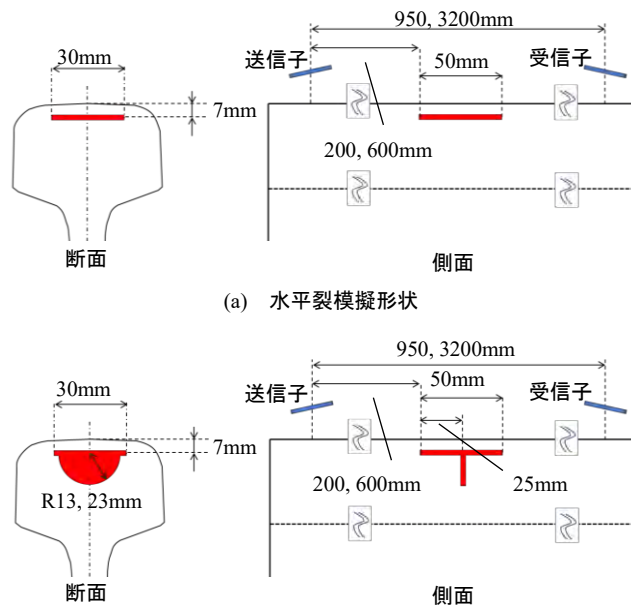


図 3 超音波伝播の様子 (周波数 100kHz)

またレール部分に挿入した 3 ケースの欠陥の概略図を図 4 に示す。本研究では実際にレール頭部に発生する横裂および水平裂を再現した欠陥をレールモデル内に再現した。水平裂を模擬して頭頂面からの深さ 7mm 位置に長さ 50mm



(b) 水平裂および横裂模擬形状 (最大深さ 20mm および 30mm)

図 4 レールモデル頭部に再現した欠陥の形態

×幅 30mm で厚さ 1mm の直方体 (以降「人工水平裂」とする) および、横裂を模擬して水平裂下に半径 13、23mm で厚さ 1mm の半円柱スリット (以降「人工横裂」とする) を設置した。人工水平裂を深さ 7mm の位置に設定したため、人工横裂の頭頂面からの最大深さは 20mm および 30mm となる。欠陥挿入位置については、送信子中心から欠陥までの距離を送受信子間距離が 950mm の場合は 200mm、3200mm の場合は 600mm とした。

4. 解析結果

〈4・1〉 送受信子間距離 950mm の場合

本研究では各解析条件下における受信子での体積ひずみの変化に注目した。図 5 に送受信子間距離 950mm の場合の体積ひずみの波形を示す。100、120kHz のいずれの入力周波数についても欠陥を有するケースでは波形の振幅が減少していることが読み取れる。そこで振幅の最大値をピーク強度として欠陥のケース毎にその変化をまとめたグラフを図 6 に示す。ここでは欠陥の無い場合の最大値を元に正規化しており、先行研究における表面開口スリットを設置した場合の入力周波数 100kHz の解析結果⁽³⁾を併せて示した。

入力周波数 100kHz に着目すると、強度の減少率について、人工水平裂によりピーク強度は欠陥の無い場合に対し約 80%まで減少する。しかし、人工水平裂に追加し人工横裂を設置した場合のピーク強度の減少程度は非常に小さい。一方、先行研究において、表面開口スリットを設置した

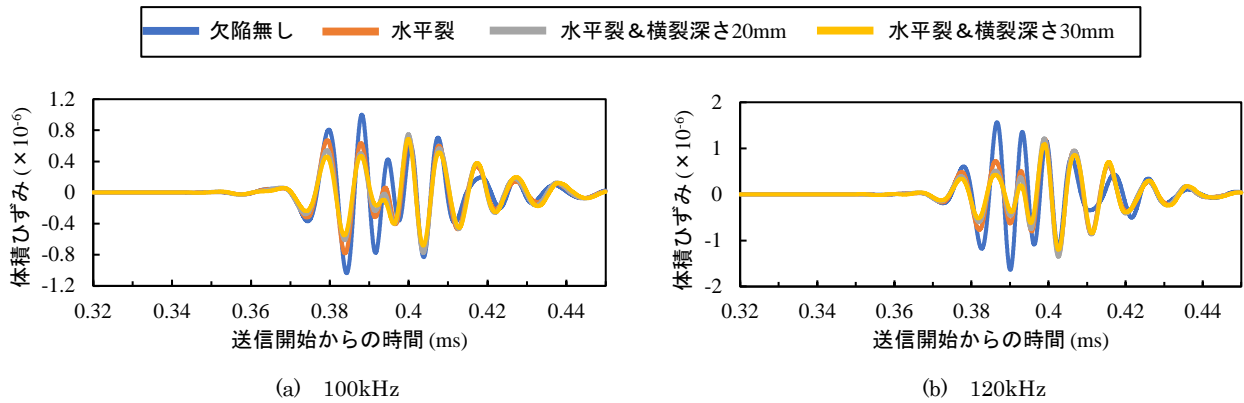
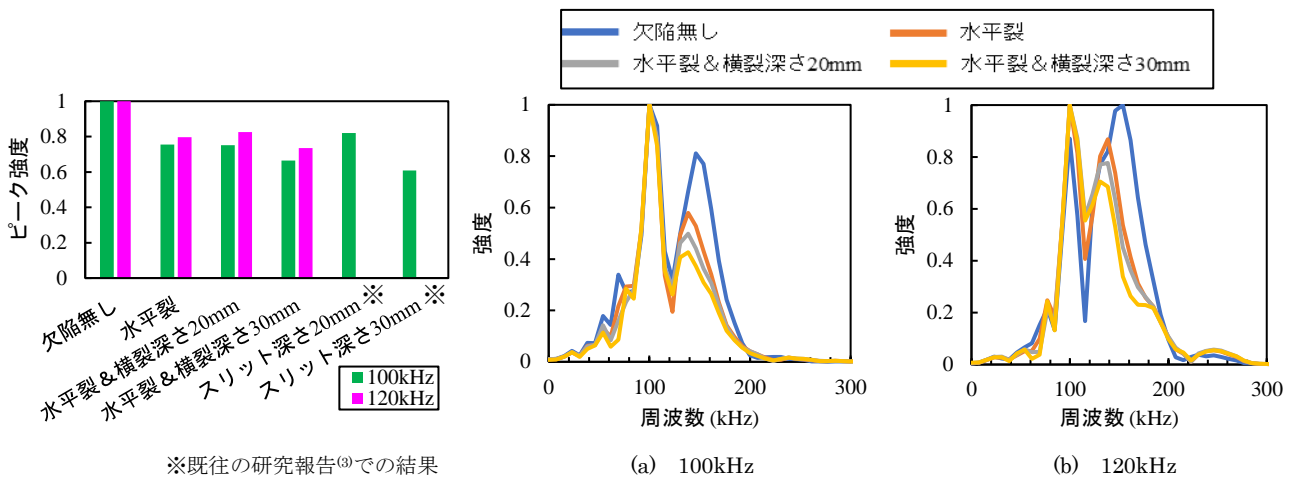


図 5 体積ひずみ受信波形 (送受信子間距離 950mm)



※既往の研究報告⁹⁾での結果

図 6 設置した人工欠陥とピーク強度の関係

モデルでは、頭頂面からのスリット深さが 20、30mm の場合、それぞれ欠陥無しの場合に比べ 20、40%のピーク強度の低下が見られた。これよりスリットが表面開口している場合と人工横裂のような内在している場合で、ピーク強度の変化に大きな違いがある可能性が高い。入力周波数 120kHz の場合も 100kHz と同様に、人工水平裂単独による減少量は大きいですが、人工水平裂に人工横裂を追加して設置した場合のピーク強度の減少量は非常に少ない。このように実在する横裂の場合には、本研究で実施した解析での人工横裂と同様に表面開口していないことから、ピーク強度の変化のみでスリットの存在を検知することは困難であると推測される。一方で人工水平裂の場合には、内部欠陥でありながらも入力周波数 100、120kHz のいずれでも大きくピーク強度が減少する傾向がある。

一方、図 7 に受信波をフーリエ変換により作成した受信波の周波数分布のグラフを示す。100kHz および 120kHz の周波数を入力しても、いずれの場合も 100kHz 周辺および 130~150kHz 周辺の 2 つのピークが存在しており、欠陥を含むモデルは 130~150kHz のピークが減少している。例えば 100kHz の波形では、その帯域が欠陥の存在および人工

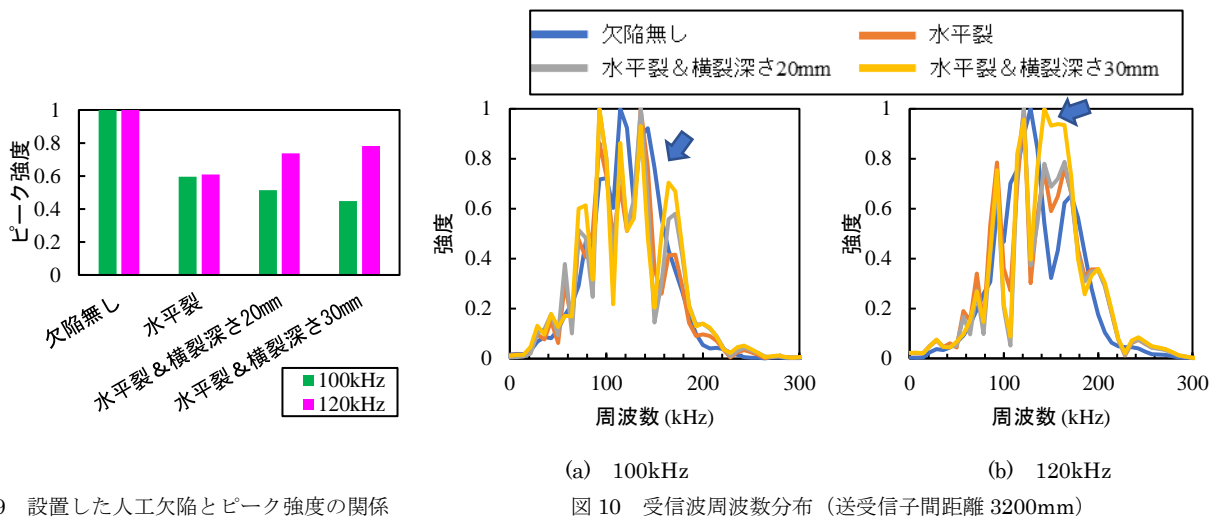
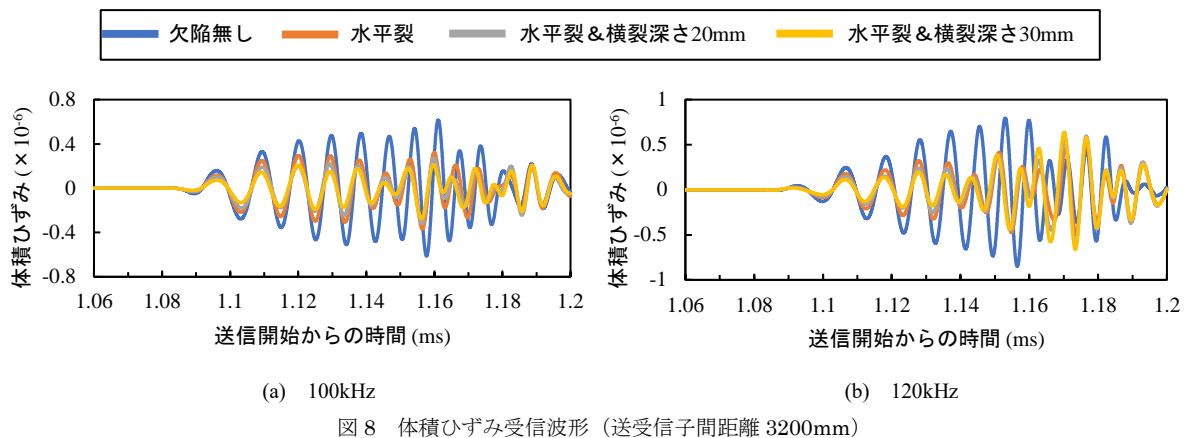
図 7 受信波周波数分布 (送受信子間距離 950mm)

横裂深さに応じて大きな変化がみられるため、この帯域に着目すると、欠陥の判別が容易にできる可能性がある。

〈4・2〉 送受信子間距離 3200mm での結果

送受信子間距離を実車両への搭載を想定し 3200mm とした場合の各入力周波数での体積ひずみの波形を図 8、ピーク強度の変化を図 9 に、周波数分布のグラフを図 10 に示す。図 8 の受信波形のグラフより、いずれの周波数についても送受信子間距離が 950mm の場合同様に欠陥を有するモデルの波形は振幅が減少しているが、波数が増加し、受信波の応答時間が長くなっていることが分かる。これは欠陥部分から受信子までの距離が長いことにより、長手方向への伝播中に反射などによる様々なモード変換を引き起こしたためと考えられる。また伝播距離が長い場合、全体的に体積ひずみが減少していることが分かる。

図 9 のピーク強度の変化について、人工水平裂が存在する場合は、いずれの周波数でも 60%程度まで減少する。そして人工水平裂に加え人工横裂が追加されたことにより、120kHz ではむしろ増加してしまっている。一方で、100kHz ではさらに 40~50%台までピーク強度は減少し、送受信子間



距離 950mm の場合に比べ人工横裂による減少幅が大きい。このようにいずれの入力周波数でも人工水平裂によるピーク強度の低下が見られ、入力周波数が 100kHz の場合、人工水平裂下に進展した人工横裂の存在をピーク強度差で検知できる可能性がある。

また図 10 の受信波周波数分布について、送受信子間距離 950mm の場合 (図 7) 以上にピークを取る周波数が複数存在していることが分かる。具体的には、図 10 中に矢印で示した通り、入力周波数 100kHz については 160~170kHz、同じく 120kHz については 140~160kHz 周辺で欠陥を含むモデルではピークが強く出ている。このような特徴を受信データから抽出し判定に活用できれば、今後欠陥の検知手段の一つとして利用できる可能性がある。

5. まとめ

非接触空中超音波によるレール損傷検知システムの適用可能性を検討するため、水平裂や横裂を再現した損傷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て受信強度の比較を行った。結果は以下の通りである。

- (1) 頭頂面が開いているスリット形状の欠陥に比べ、人工横裂のような内部欠陥の場合では受信強度の変化が非常に少ないと想定される。一方で人工水平裂の場合、受信強度は大きく減少する傾向にある。
- (2) 実車両への搭載を想定した送受信子間距離 3200mm の場合、入力周波数 100kHz とすることで人工水平裂に追加して設置した人工横裂により受信強度は減少し、横裂の検知可能性が示唆された。
- (3) 受信波の周波数分析を実施したところ、人工横裂の有無により、周波数分布の波形パターンに差が生じることが明らかとなり、横裂検知手段として利用できる可能性が示唆された。

文 献

- (1) 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)
- (2) 伊藤忠テクノソリューションズ㈱, ComWAVE 操作マニュアル
- (3) 小納谷優希, 細田充, 山本隆一:「横裂を模擬したスリットを有するレールに対する超音波伝播シミュレーション」, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会講演概要集, VI-939 (2022)