

冬季に増加するレール折損を未然に防ぐ



細田 充
Mitsuru Hosoda
軌道技術研究部
レールメンテナンス研究室
主任研究員



小納谷 優希
Yuki Konaya
軌道技術研究部
レールメンテナンス研究室
研究員



水谷 淳
Jun Mizutani
軌道技術研究部
レールメンテナンス研究室
副主任研究員



寺下 善弘
Yoshihiro Terashita
軌道技術研究部
レールメンテナンス研究室長

はじめに

レールは鉄道の軌道を構成する基本的な部材で、走行する列車の荷重を直接支持し、かつ安全・安定に列車を案内するなどの重要な役割を有しています。一方、つながっているレールが不連続となる**レール折損**が発生すると、列車の走行に支障をきたすことから、鉄道事業者は多大な労力をかけ、レール折損の防止に努めています。

ここでは、レール折損が冬季に増加する理由を概説するとともに、レール折損を防止するための新たな検査手法に関する研究について説明します。

レール折損が冬季に増加する理由

図1に2016～2020年の5年間に於いて、国

内で発生した月別のレール折損の頻度を示します。明らかにレール折損が冬季に集中していることがわかります。レール折損を発生させる代表的なき裂である**頭部横裂**（以下、「横裂」といいます）の進展メカニズムを例に、冬季にレール折損が増加する理由を説明します。図2に示すように、横裂は繰り返しの列車走行で**レール頭頂面**が疲労し、**水平裂**とよばれる水平方向に伝播するき裂が発生した後に分岐し、底部方向に進展するき裂のことで

図3にレール軸力および列車荷重が作用した際の横裂の挙動のイメージを示します（厳密にはレール製造時に発生する金属内部の残留応力が影響しますが、ここでは割愛します）。冬季の温度低下でレールが収縮し、引張側のレール軸

図1 2016～2020年の5年間に於ける国内で発生した月別のレール折損の頻度（月別の折損数／折損総数）

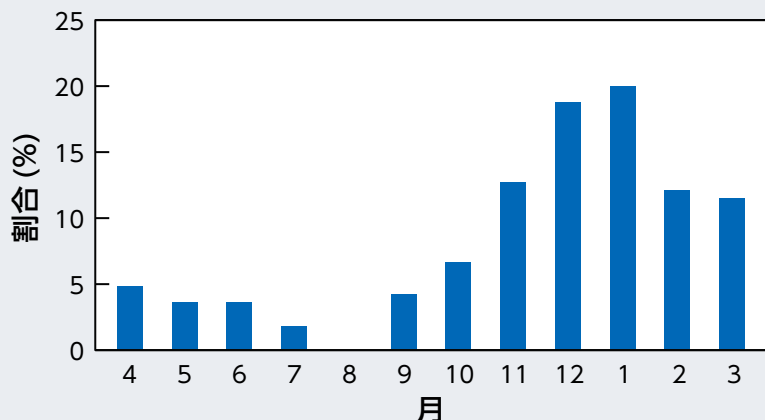


図2 営業線で頭部横裂から折損に至ったレール



力が発生すると、横裂は開口する状態となります。そこに列車荷重が作用し、レール頭部が曲げられ、圧縮応力が発生すると横裂が閉口し、列車が通過すると再び横裂が開口します。これを繰り返すことで横裂は進展し、最終的に折損に至ります。一方で、夏季（特に日中）ではレール軸力は圧縮側になり、横裂は閉口する状態となります。この状態で列車荷重が作用しても、常に閉口した横裂は進展しないため、レール折損が発生しにくいこととなります。

そのため、多くの鉄道事業者はレール折損が増加する冬季前に、横裂を有するレールを検査で発見し、レール交換などの処置を行い、レール折損を未然に防いでいます。

ガイド波による 頭部横裂の検査手法の提案

現在、多くの鉄道事業者では、図4に示すような検査車両から超音波をレールに送受信する方法により、レールに発生したき裂の有無を定期的に検査しており¹⁾、本検査で把握したき裂サイズなどに応じてレール交換などの処置を定めています。一方で、図5に示すように、検査車両では超音波を

レール折損

使用中のレールにきずが発生し、欠線部が発生することです。また、レール破断ともよびます。

レール頭頂面

レール頭部の側面および下面を除く表面で、車輪を直接支持する面。

水平裂

水平方向に伝播するき裂の総称を水平裂といいます。特に、レール頭部では繰り返しの列車通過により、レールが疲労することで、しばしば水平裂が発生し、その後横裂に進展します。

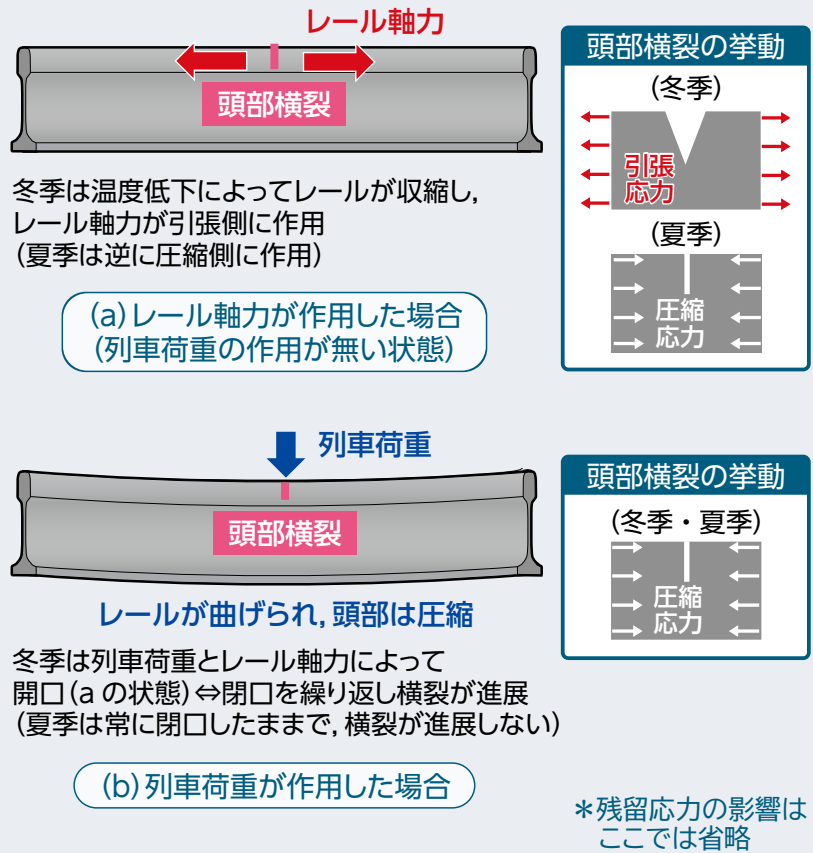


図3 冬季・夏季における頭部横裂の挙動のイメージ

図4 検査車両の例



図5 現状の頭部横裂の検査の課題と提案したガイド波による検知のイメージ

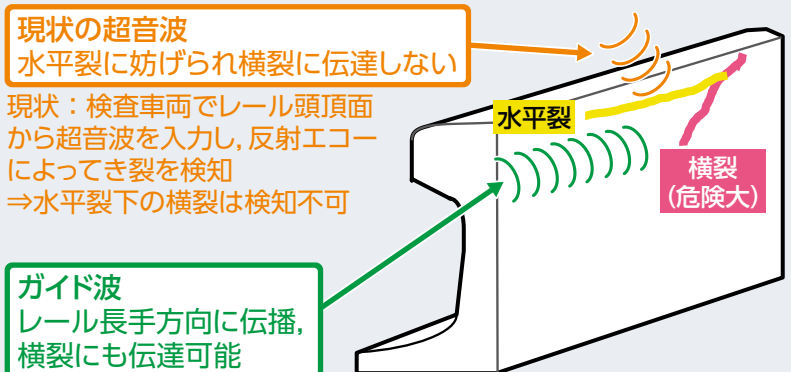
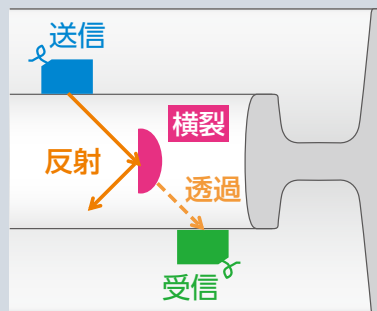




図6 レール頭部の側面からの手探傷



レール頭頂面から入射し、き裂から反射される超音波の強度によって、き裂の有無を判断しますが、水平裂が超音波を遮るため、その下に生じた横裂を検知することは困難です。そのため、検査車両で水平裂が検出された箇所すべてに対してレール頭部の側面からの手探傷(図6)が行われていますが、図7に示す摩耗したレールや踏切内のレールでは頭部側面にセンサーが適切に当てられないなどの理由で、検査が十分に行き届かないことがあります。そこで、効率的に車上から横裂を検知することでレール折損を減らすため、新たに図5中に示したようなレール長手方向に超音波を送受信するガイド波を用いた横裂の検査手法を提案しました。



(a) 摩耗レール



(b) 踏切内レール

図7 手探傷で検査できないレール

図8 レール超音波解析モデル

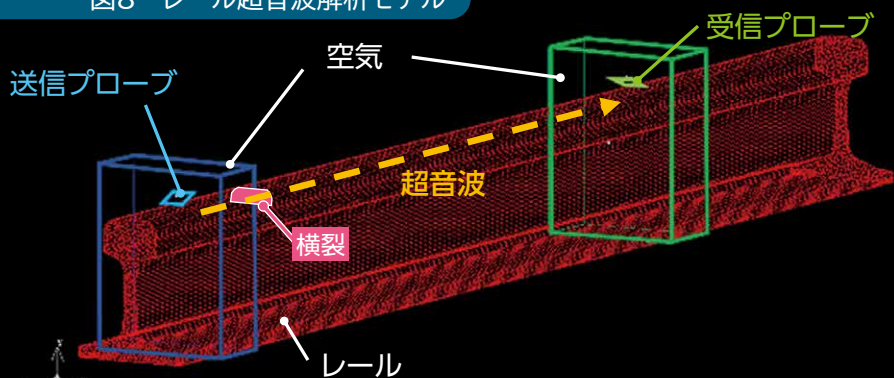
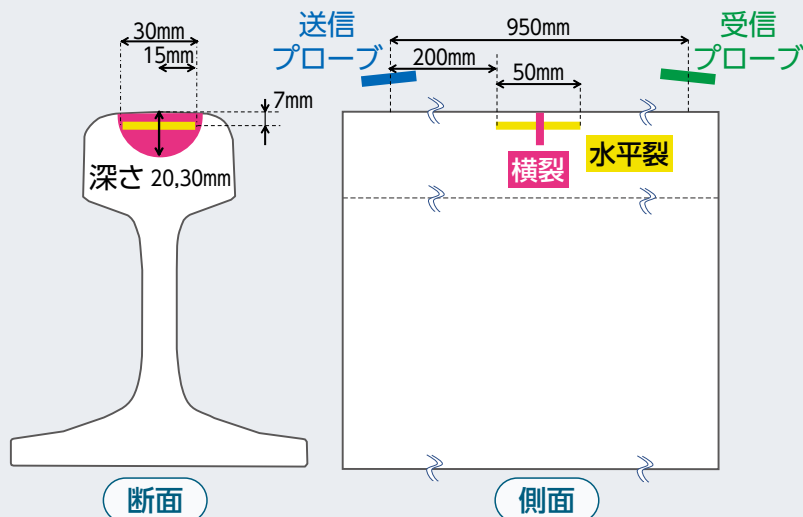


図9 設定したき裂の条件



超音波伝搬シミュレーションによる検査手法の検証

まず、提案した検査手法の適用性について解析的に検討を行うこととしました。具体的には、レール頭部に存在する水平裂や横裂に対し、ガイド波を伝播させた場合の応答を評価し、水平裂の下に生じた横裂を検知可能かを検討することとしました。シミュレーションには、さまざまなき裂の状況を再現可能な超音波解析ソフトウェア

送信プローブ・受信プローブ

超音波を対象物に送信および受信するためのセンサーを、それぞれ送信プローブおよび受信プローブといいます。

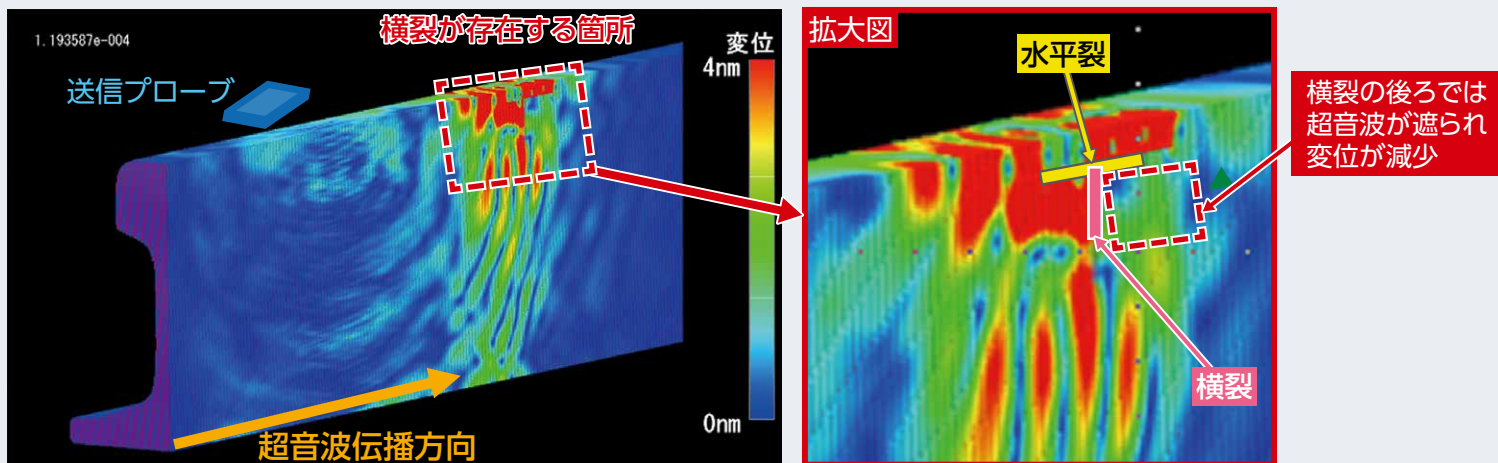


図10 超音波のき裂到達直後の伝播の様子 (水平裂と深さ30mmの横裂 (混在条件))

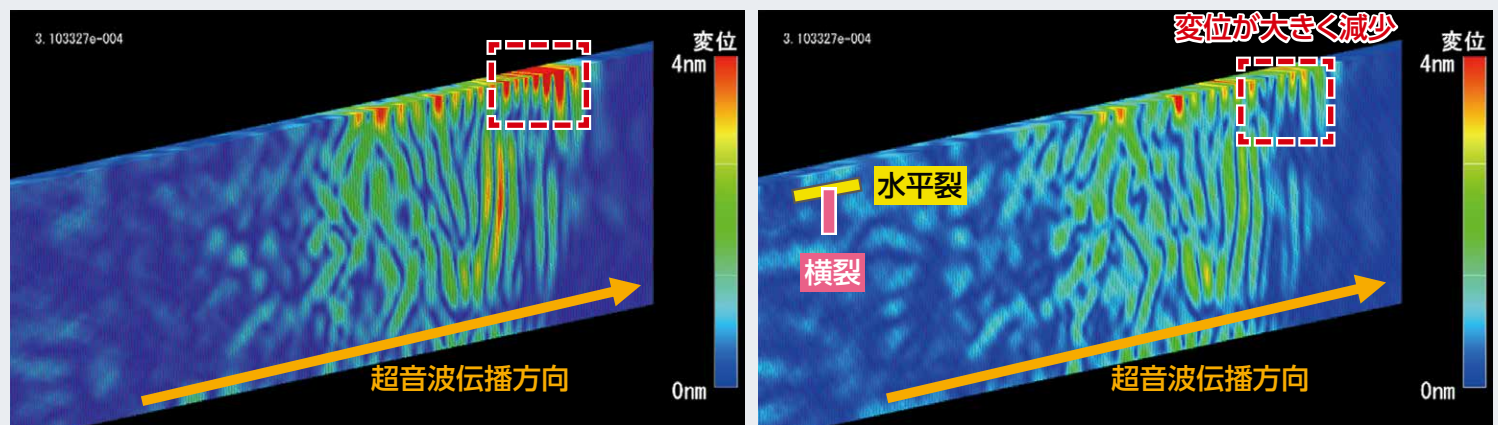
アComWAVE²)を用い、図8に示すようなレール超音波解析モデルを構築しました。また、今回提案する検査手法は、レール頭頂面の凹凸などで検査精度を低下させないため、送信プローブ・受信プローブTMがレールに非接触で超音波を送受信する機構を想定しています。解析モデルでも各プローブとレールとの間(周辺)に空気の領域を設けて、非接触の条件を再現しています。

ここでは図9に示すように「き裂なし」、「水平裂のみ」および「水平裂と深さ20mmまたは30mmの横裂 (混在条件)」の解析結果を例に説明します。シミュレーションでは、レール内に

超音波(周波数:約100kHz)を複数波(3波)伝播させた際に発生するレール内部の変位(鉛直方向)を出力し評価しています。

図10に「水平裂と深さ30mmの横裂」の条件におけるき裂に超音波が到達した直後の伝播の様子を示します。横裂によって、超音波が遮られている様子が確認できます。図11に超音波がき裂を完全に通過した後の状況を示します。図11(b)の「水平裂と深さ30mmの横裂」の条件では、図11(a)の「き裂なし」の条件に比べ、赤点線で囲んだ先行する波によるレールの変位が大きく低下していることがわかります。続いて受信プローブで受信した超音波の波形を

図11 超音波のき裂通過後の伝播の様子



(a) き裂なし

(b) 水平裂と深さ 30mm の横裂 (混在条件)

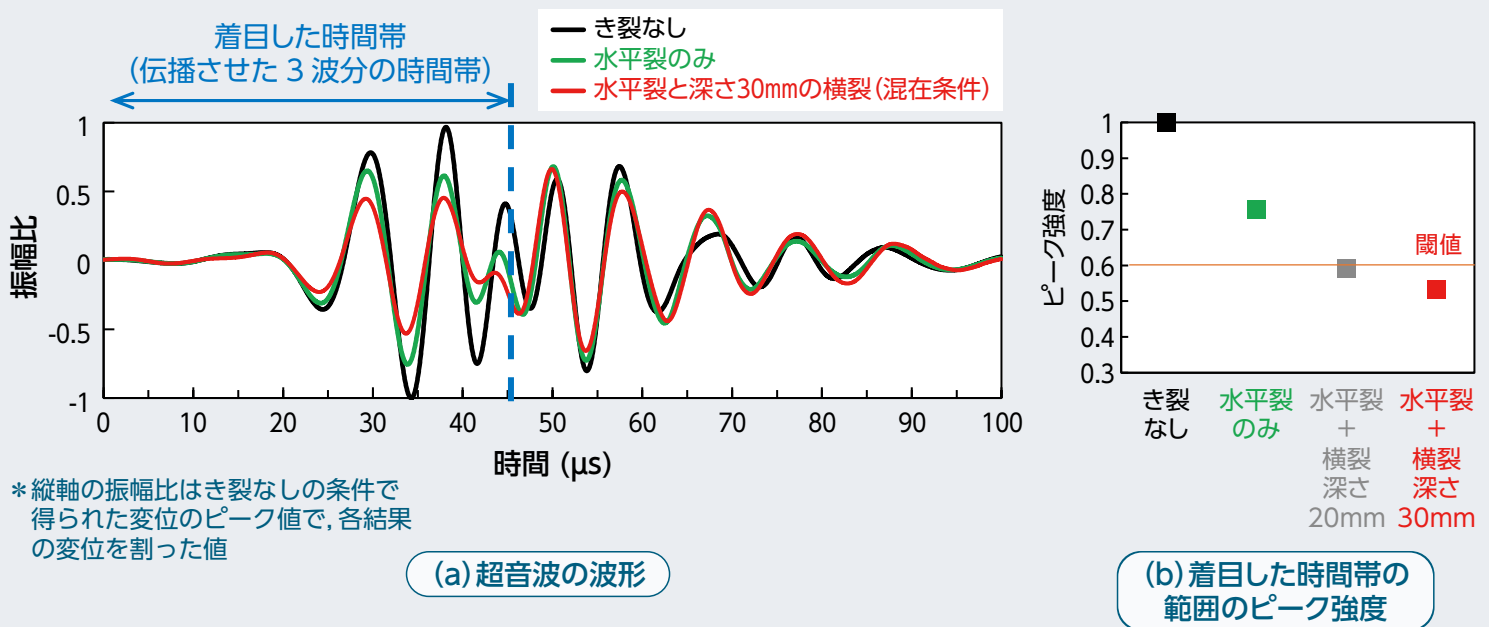


図12 受信プローブで受信したき裂条件毎の超音波の評価

図12(a) (縦軸の振幅比はき裂なしの条件で得られた変位のピーク値で、各結果の変位を割った値) に示します。送信プローブから送信した3波、約45 μ s (図中の青矢印で示した範囲) の波形の振幅がき裂の存在によって減少していることがわかります。これは図11の先行する波の変位が大きく変化している超音波の伝播の様子とも一致しています。そこで、この時間帯に絞って受信した超音波の変位をピーク強度として抽出し、整理したものを図12(b)に示します。き裂なしではピーク強度が1となりますが、き裂の程度に応じてピーク強度が低下しており、例えば0.6の閾値を設定することで、水平裂と区別して横裂を検知できることがわかります。これらの検討によりガイド波による横裂検知の基本的なメカニズムを解析的に明らかにすることができました。

所内試験線による 車上からの検査手法の検証

次に、提案した頭部横裂検査手法の車上からの検知性能を検証するため、試験車両に送受信プローブを設置し、所内試験線で走行試験を行いました。走行試験の概況を図13に示します。

送受信プローブはレール頭頂面から約70mm離れた状態で、試験車両の台車の前後に設置しています。また、所内試験線のレールの一部に、水平裂または混在条件のき裂を模擬したレールを設置しました。

図14にき裂入りレールを走行した際の超音波の時刻歴波形を示します。健全部ではピーク強度が1-0.8程度となり、レール継目^④ではレール端部間に隙間があって超音波がほとんど伝播しないため、ピーク強度が0.2以下に低下しています。それに対し、水平裂が存在する箇所では、ピーク強度が0.8-0.6、混在条件(水平裂と深さ30mmの横裂)のき裂が存在する箇所では、ピーク強度が0.4程度に低下しました。よって、走行試験においても、シミュレーションによる検討結果と同様に、き裂の程度に応じてピーク強度に変化がみられ、水平裂のみの場合と横裂が存在する場合では明らかにピーク強度が異なることを確認できました。このように本手法は走行しながらの連続的なレール頭部横裂の検査手法として適用できることがわかりました。

④ レール継目

レールとレールの接続箇所。

(a) 試験車両



(b) 試験軌道

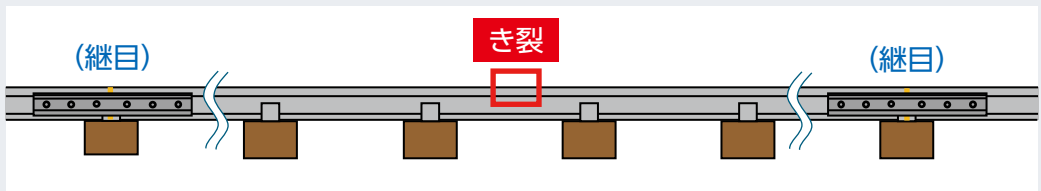
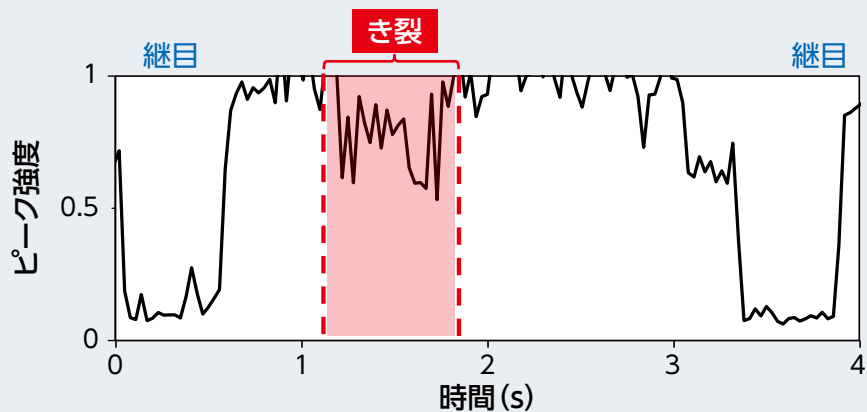


図13 走行試験の概況

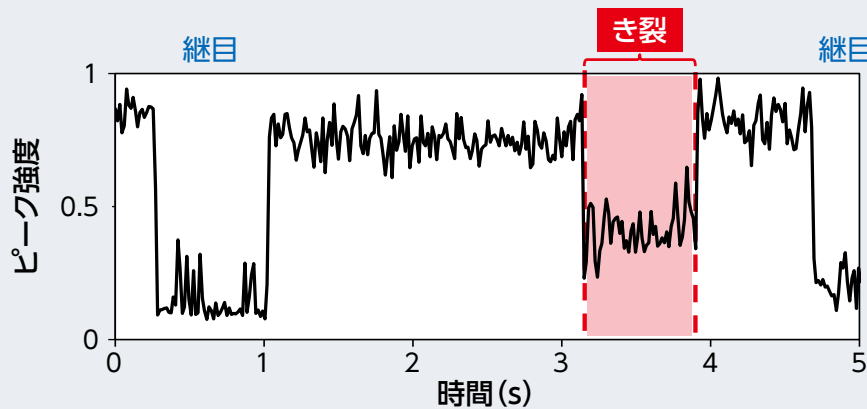
まとめ

ここでは、レール折損が冬季に増加する理由を概説するとともに、現在、取り組んでいるガイド波による車上式レール頭部横裂検査手法の研究について説明しました。本手法により水平裂下の横裂を検知できる見通しを得ましたので、今後は、営業線の検査車両への設置および複雑なき裂への適用可能性の検証などを通じて、レール折損を防止するための検査手法として実用化していくことをめざします。 **RRR**

図14 き裂を有するレール上を走行した際の超音波の時刻歴波形



(a) 水平裂のみ



(b) 水平裂と深さ 30mm の横裂 (混在条件)

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) 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/> (入手日：2023年2月20日)