

# レール等に潜む損傷の検査法

寺下 善弘

軌道技術研究部  
(レール溶接 副主任研究員)

設楽 英樹

同  
(同 研究室長)



てらした よしひろ



したら ひでき

## はじめに

レールは車輪を直接支持・案内して、列車を安全に運行させる非常に重要な鉄道システムの構成要素です。このため、鉄道事業者では主として超音波探傷法を用いたレール検査を定期的に行っています。これは、レールに生じる損傷には内部のき裂や欠陥等があるためです。しかし、これまで使われてきた超音波探傷法では損傷の検出や判定が十分にできない場合があります。このような問題を改善するために、新しい超音波探傷法が検討されてきました。

本報告では、レールおよびレールに付帯する部材の超音波探傷法として比較的新しいものについてその概要を紹介します。

## レール頭部のきずを検査する

レールには車輪との転がり接触によって頭部表層にシェリングと呼ばれるき裂を生じることが知られています。このシェリングは図1に示すように主に直線区間で連続あるいは単発的にレール頭頂面に発生するもので、検査車両に搭載された超音波探傷システムおよび手押し式の超音波探傷装置等によって検査が実施されてきました。これらの探傷方法はいずれも頭頂面から超音波を送受信する方法で、探傷結果は主として図2に示すように画像で確認されます。超音波をレール鉛直方向に送受信する垂直探傷子によって水平裂の長さを、レール長手方向斜め70°に送受信する斜角探傷子によって鉛直方向に進展したき裂（以下、「横裂」と記す）深さがわかります。ところが、シェリングから発生するき裂の形態は様々であり、図3に示すように水平に進展するき裂（以下、「水平裂」と記す）の進展範囲が広いと水平裂から分岐した横裂が70°斜角探傷では検知できないことがあるとともに、水平裂内から反射したエコーが得られることもあり、検査判定が難しい場合があります。このような理由から開発されたのが、図4に示す頭部横裂測定器（以下、「横裂測定器」と記す）です。横裂測



図1 連続して発生したシェリング

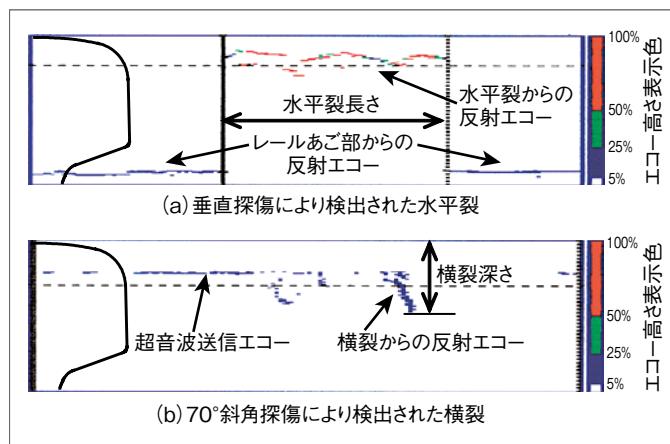


図2 レール頭頂面から探傷したシェリング探傷画像

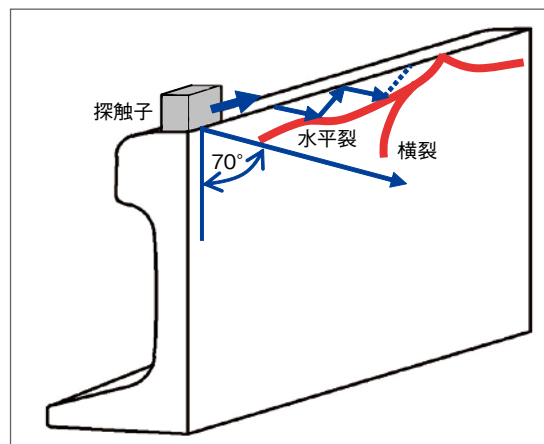


図3 水平裂の進展範囲が広い場合の探傷イメージ



図4 頭部横裂測定器

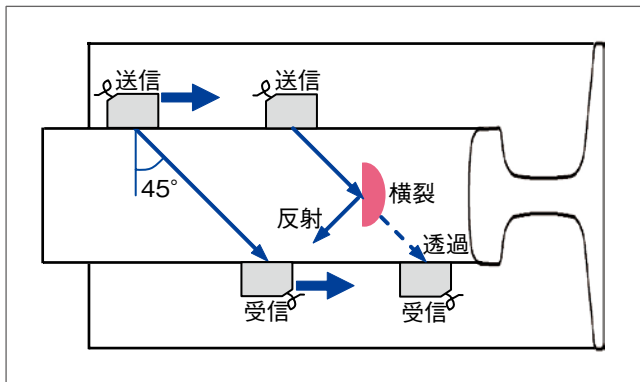
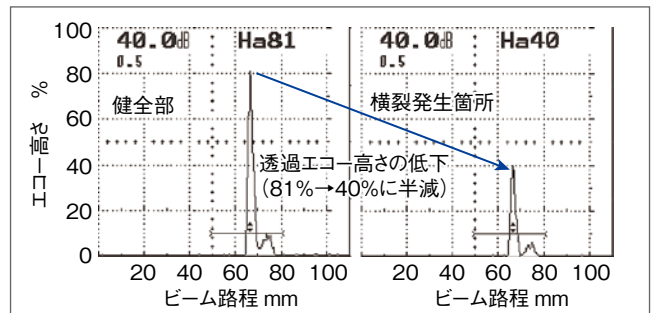


図5 頭部横裂測定器の探傷イメージ

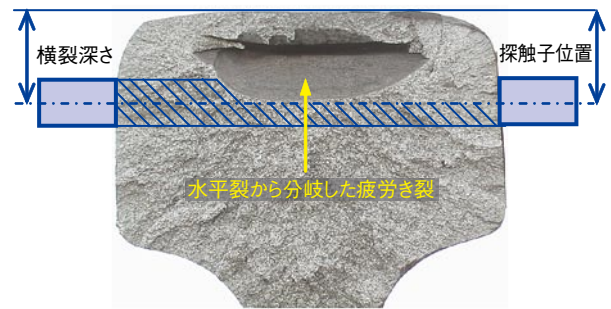
定器は、頭部側面から超音波を送受信するため、頭頂面下5～10mm深さで進展する水平裂の影響を受けずに横裂の有無およびその深さを判定することができます。さらに、頭部側面が摩耗により変形した場合でも超音波が適切に送受信できる仕組みになっています。

横裂測定器は図5に示すようにレール頭部側面から反対側の頭部側面まで斜め45°に超音波を送信し、透過する超音波の音圧（音の強さ）変化で横裂の確認を行う機器です。超音波がき裂等により途中で阻害されると、受信される超音波の音圧が低下するため、横裂の有無やその深さを検知できる仕組みになっています。検査表示画面では、受信される超音波の音圧がエコー高さと呼ばれる山状の図形高さで示されるため、シェリングの発生していない健全なレール頭部でこのエコー高さを一定（80%前後）になるよう感度調整した上で検査が実施されます。

図6は、実際に横裂が発生したシェリング箇所を検査した際の透過エコー高さの変化と強制破断により現出させた横裂破面を示します。このように、横裂が発生していると(a)に示すように健全部で感度調整した透過エコー高さが低下し、横裂の発生を検知することができます。また、同図(b)に示すように透過エコー高さがちょうど半減した際



(a) 健全部および横裂発生箇所の透過エコー高さ



(b) 強制破断で現出した横裂と超音波経路のイメージ

図6 透過エコー高さの変化と実際に検出した横裂



図7 曲線部外側レールに発生したき裂

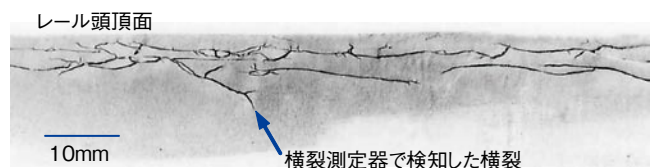


図8 曲線レールのき裂進展状況(レール縦断面)

の探触子位置が横裂の深さを示しており、探触子の位置を調整しながら横裂深さを測定します。

図7には、曲線区間外側のレールに発生したきしみ割れ状のき裂を示します。このようなきずからも頭部に横裂が進展する場合があります、横裂測定器が使用されています。これらの連続したき裂は、図8に示すようにレール内部で複雑な形態を呈するため、頭頂面からの探傷検査では横裂を検出することが困難なためです。

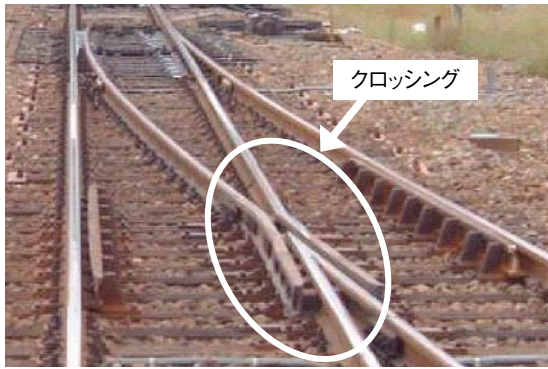
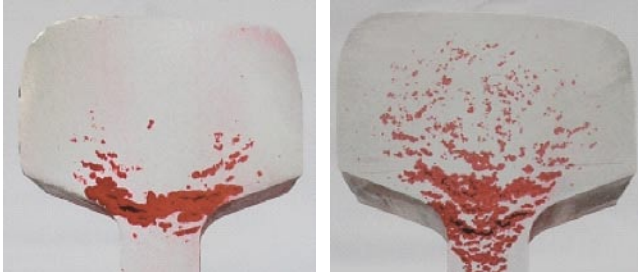


図9 分岐器内のクロッシング



(a) 大きい引け巣 (b) 大きい引け巣と微細引け巣

図10 上首部の浸透探傷検査による引け巣の発生状況

### マンガンクロッシングを検査する

図9に示すクロッシングは、分岐器を構成する部材の一つです。通常のレールに比較して複雑な形状をしているとともに、構造上車輪からの衝撃荷重を受けるため、一体製造で製作される高マンガン鋼製のクロッシングが多く使用されています。高マンガン鋼はき裂が発生しても進展が遅く、耐摩耗性や耐衝撃性を有する等の特長があります。ただし、 casting productのため現在の技術をもってしてもごく稀ですが casting defect を発生する場合があります。

図10は、マンガンクロッシングの端部上首部に発生した引け巣（溶鋼の凝固収縮によって生じる空洞）の状況を、レール断面の浸透探傷検査（カラーチェック）により示したものです。これまでマンガン鋼は結晶粒が粗く超音波の減衰が大きいなどの理由で、超音波探傷は困難とされてきましたが、強度上問題となるような大きい引け巣であれば図11(a)に示すように頭頂面からの垂直探傷により検出可能なことがわかりました。しかし、図10(b)のように大きい引け巣の上側に微細な引け巣が多数存在する場合には、超音波の散乱・減衰が生じて大きい引け巣を検出することができません（図11(b)）。

このような状況から、現場用の検査方法として提案された探傷法を図12に示します。この方法も送受信2つの探触子を用いた超音波探傷法です。この方法では、レール頭頂面から垂直探触子により送信した超音波を底部端部の垂直探触子で受信します。欠陥がない場合にも受信される

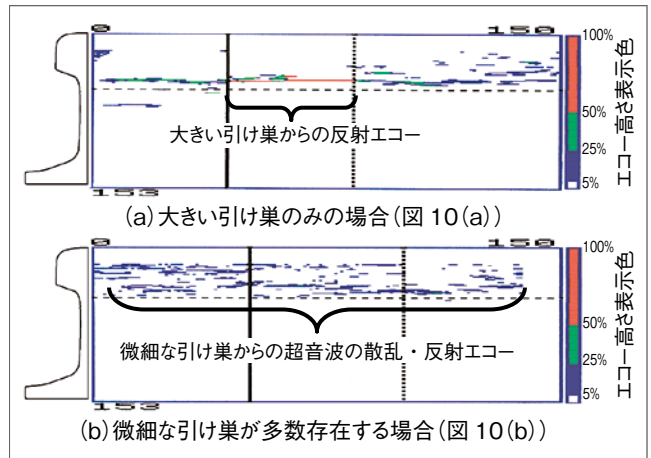


図11 垂直探傷によるレール長手方向の超音波探傷結果

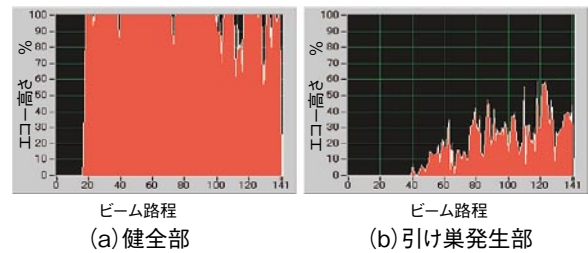


図13 透過法により得られた探傷画像の一例

音圧レベルは低いため、一般的な探傷方法に比べて探傷感度を非常に高く設定します。

この探傷法による引け巣等の検出例を図13に示します。引け巣の存在しない健全部では超音波の透過率が高いため、100%を超える透過エコーが得られます。一方、有害な引け巣が存在する部位では、超音波が減衰するために透過エコー高さが低下し、さらには超音波の散乱等により超音波のビーム路程が長くなります。この探傷法により、上首部に発生するき裂や強度低下につながるような引け巣の検出・評価がある程度可能となりました。

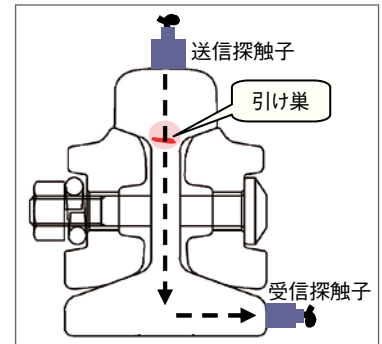


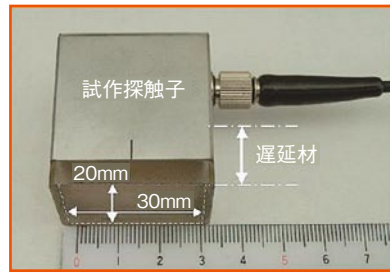
図12 端部上首部の透過法

### レールボンド接合部を検査する

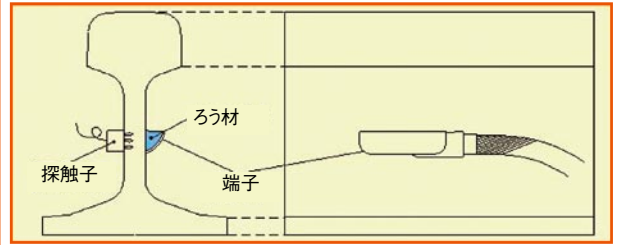
レールには架線から電車を介して変電所に戻る帰線電流や列車位置等を検知するための信号電流が流れています。このため、継目部等のレール間では電気的導通を確実にするため図14に示すような銅線をより合わせた部材（レールボンド）が取り付けられます。レールボンドは主としてスズ (Sn) - 亜鉛 (Zn) 系の低温ろう付でレールに接合されますが、低温ろう付部からレールボンドが脱落し、列車運行



図14 継目部のレールボンド



(a) 試作した垂直探触子



(b) 探傷方法

図16 ボンド接合部の超音波探傷法

が阻害される場合があります。レールボンドの脱落原因として施工不良によるものがあることから、接合品質を確認するための検査方法が検討されました。

検討されたレールボンド接合部（以下、「ボンド接合部」と記す）の検査法はパルス反射式の超音波探傷法です。ただし、超音波は異材接合界面では音響特性の変化のために反射波を生じます。すなわち、ボンド接合部の一方の材料側から超音波を入射させた場合、低温ろう材とレールの音響インピーダンス（音の伝わりやすさを表す指標で密度と音速の積）が異なるため、接合界面に欠陥が存在しない場合においても一定の反射波が発生します。そこで、超音波探傷法でボンド接合面の健全性を評価するためには、健全な接合面における音圧反射率（入射超音波の音圧に対する反射超音波の音圧の比率）を予め明らかにする必要があります。

物質間の音圧反射率は次式で表されます。

$$RAB = (ZB - ZA) / (ZB + ZA) \dots\dots\dots (1)$$

$$ZA = \rho A \times v A \dots\dots\dots (2)$$

$$ZB = \rho B \times v B \dots\dots\dots (3)$$

ここでRABは物質Aから物質Bに超音波が入射するときの音圧反射率、ZA、ZBは各物質の音響インピーダンス、 $\rho A$ 、 $\rho B$ は各物質の密度、 $v A$ 、 $v B$ は各物質内の音速を示します。レールおよび低温ろう材の音速および密度の測定結果から、上式により健全な低温ろう材-レール鋼接合面からの音圧反射率を求めた結果、27%になることがわかりました。

一方、固体（レール鋼）と気体（空気）の界面からの音圧反射率は100%となることから、全面未接合の場合の音圧反射率はほぼ100%になります。すなわち、接合品質が未知のろう材-レール鋼接合面に対して垂直に超音波を入射

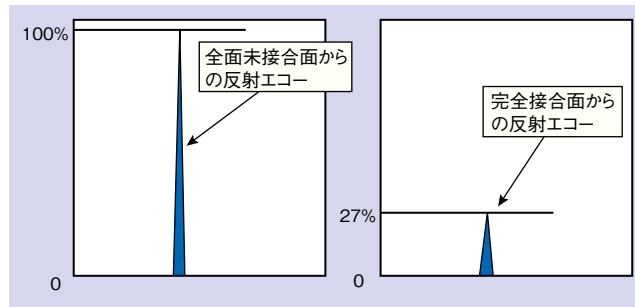


図15 ボンド接合面からの反射エコー

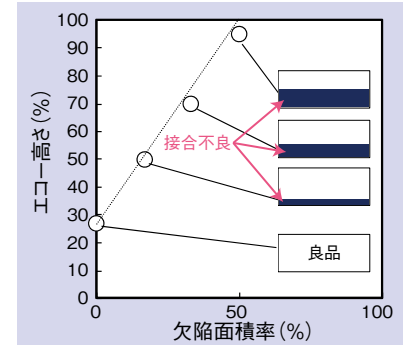


図17 探傷結果と接合不良（欠陥面積）の関係

させた場合、その面からの音圧反射率は接合面の品質に依存して27～100%の間で変化すると推定されます。そして、超音波探傷器で測定される反射エコー高さは超音波反射源からの音圧に比例して変化するため、図15に示すように接合面からの反射エコー高さで接合面の品質を確認できる見通しが得られました。

図16に試作したボンド接合部用の超音波探触子およびこの探触子を使用した探傷方法を示します。このように、ボンド接合面と反対側のレール表面に探触子を当てて探傷を行います。振動子はセラミック製で周波数は2MHzです。また、この探触子には音圧分布を均質にするために厚さ15mmの遅延材を装着しています。

試作した探触子と汎用の超音波探傷器を用いて、接合不良を模擬したボンド接合部の品質検査結果を図17に示します。接合不良の大きさと相関のある探傷結果（接合面からの反射エコー高さ）が得られ、検討した探傷方法でボンド接合面の品質評価が可能になりました。

### おわりに

レールおよびその付帯部材の検査方法としてレール頭部、マンガクロッシングおよびレールボンド接合部に対する比較的新しい超音波探傷法を紹介しました。これからもレール部材等の信頼性向上を図るために、検査方法の改善および精度向上に努めていきたいと思ひます。[RRR]