

レール頭部横裂連続探傷方法の開発



安藤 洋介*



青木 宣頼**



瀧川 光伸*



小関 昌信*

レール頭部内に発生する横裂は通常、レール頭頂面からの斜角探触子による方法や、レール頭側部をはさむように探触子を配置する透過法による超音波探傷によって管理している。しかし、大きな水平裂やきしみ割れなど、レール表層部に傷がある場合や、レール頭部に摩耗などによる形状変化が生じている場合は、超音波の伝播が阻害されるため十分な探傷をすることができない。また、一定の延長を通して発生するレール頭部の内部傷に対しては、レール長手方向へ移動しながら連続的に探傷させることが探傷効率を向上させる上からも望ましい。そこでフェイズドアレイ技術を利用し、レール上首部あご下位置から送受信する二探触子法を用いることで、レール頭部の状況に関わらず、かつ連続的に横裂を探傷することができる新たな探傷器を開発した。

●キーワード：レール、シェリング、横裂、超音波探傷、フェイズドアレイ

1. はじめに

現在のレール損傷管理は主に超音波によるレール探傷により行っている。レールに発生する傷の中でも、レール頭部に発生する横裂は、輸送に影響を与える可能性が高いことから、横裂の検出および管理が重要となっている。横裂は一般的に図1に示すシェリングと呼ばれる傷の水平裂から分岐し、レール底部に向かって進展する。

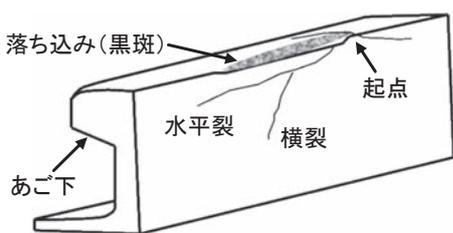


図1 シェリングの状態

現場における超音波探傷では、レール表面や表層部の傷(きしみ割れや水平裂)の存在、レール頭部の摩耗などによる形状変化で、横裂探傷が難しい場合がある。また、レール長手方向に対して連続的に探傷したいというニーズに対応するため、フェイズドアレイ技術を用いたレール上首部のあご下位置(以下、「レールあご下部」とよぶ)から探傷する探傷器を開発した。

2. 現在の探傷方法の課題

横裂はレール頭頂面からの斜角探触子(入射角70度)を用いて探傷する場合、図2に示すように横裂上に水平裂が存在するときに、超音波伝播が遮断され、正確な横裂深さ

を測定することができず、超音波の多重反射により深い傷として判定することもある。近年では、図3に示すような超音波の透過法が用いられている。これは水平裂の影響は受けにくい方法ではあるが、レール頭部に摩耗などの形状変化があり探触子が密着しない場合は、超音波をレール頭部に入射することが難しい。

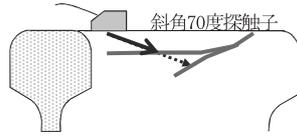


図2 レール頭頂面からの斜角探傷法

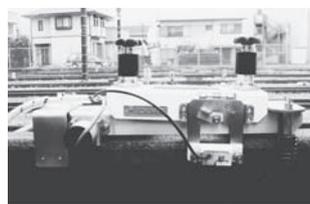


図3 レール頭側部からの透過法

テクニカルセンターではレール頭部表面の状況や形状変化に影響を受けず、横裂を探傷できる方法として、図4に示すレールあご下部からの二探触子による反射法を考案し、探傷器を開発した¹⁾。本方法では、探触子のレール長手方向における設置位置やレール頭部に対する探触子の角度を手動で走査し、横裂面からの反射エコーを検出することで、超音波のピーム路程と両探触子の角度から傷の深さを算出する。

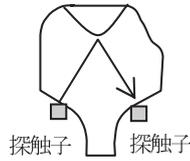


図4 レールあご下部からの反射法による探傷

上述した3つの方法は、これらの課題の他に、ひとつの傷に対し、き裂の最深部を見つけるために複数回の走査が必要であり、実施者の技量に影響を受けるという課題がある。

3. フェイズドアレイ技術の特徴

3.1 フェイズドアレイ技術の適用分野

レール頭部を一度に広範囲に、かつレール長手方向に移動しながら連続的に探傷できる方法として、フェイズドアレイのレールへの適用を検討した。

一般に良く知られているフェイズドアレイによる超音波探傷器は医療用の超音波診断装置（例えば胎児のエコー画像）などがあげられる。工業用としてのフェイズドアレイは1980年代より開発・製作されている。複雑な形状にも対応でき、エネルギープラントシステムの保守点検、鉄鋼製造ラインの品質確認用などとして利用されている。

レールに関しては、レール製造時の品質保証体制強化のため、製造ライン中においてフェイズドアレイを用いた探傷を行っている事例がある²⁾。これはレール側が移動し、探触子が固定されている方法であり、製造時の小さい孔状の欠陥を見つけることを目的としている。今回開発したフェイズドアレイ探傷器は、現場でのレール探傷用として探傷器本体を移動させ、傷の大きさを計測する初めての試みのものである。

3.2 フェイズドアレイ技術の基礎と用語

通常の超音波探傷では、ひとつの探触子がひとつの振動子を持ち超音波の送信・受信を行っている。フェイズドアレイではひとつの探触子に複数の振動子を持

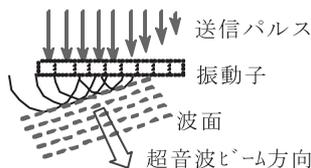


図5 超音波ビームのイメージ

ち、各々の振動子に時間差を持って励振させることにより、超音波主ビームの方向を制御している。そのイメージを図5に示す。超音波の伝播方向を扇状に走査させることをセクタ走査またはセクタスキャンと呼ぶ。瞬時に広範囲を探傷できることから、2章で示した課題のように横裂の最深部を探すために手動走査を複数回実施する必要がない。

最初にセクタ走査角60度とすることでレール頭部をほぼカバーできることを確認した。その後、各種探傷走査法を実施した結果、レール横裂の検出にレールあご下部からの二探触子法の有効性を確認し、新しい探傷器の開発を行った³⁾。

フェイズドアレイ主体の規格化や用語の統一、表示方法が確立されていないため、用語に関しては文献⁴⁾に基づき記載する。表1に主な用語の解説を示す。

表1 フェイズドアレイに関する用語と解説

用語	解説
フェイズドアレイ	複数の振動子から放射する音波の位相（時間）を電子回路で制御することにより超音波ビームを形成する。受信信号においては受信した信号の位相を電子回路で制御して受信波形を形成する
アレイ探触子	複数（通常8振動子以上）の振動子で構成された探触子。通常フェイズドアレイ探傷器に接続して使用する
素子、振動子	アレイ探触子を構成する振動子
電子走査、電子スキャン	アレイ探触子の複数の素子を電子的に切り替えて超音波ビームを走査する方式の総称
セクタ走査、セクタスキャン	アレイ探触子を構成する複数の素子の個々の駆動タイミング（位相）を制御し、超音波ビームの方向を変える走査方式

4. レール頭部横裂連続探傷器の概要

4.1 探傷器の構造

探傷器の全体図を図6に示す。上部のパソコンにて探傷器の操作などを行う。駆動輪はモーターにて定速走行を行うが、人力で支えながらの走行となる。探触子は図7のように送信側・受信側がレール頭部を抱え込むように配置される。

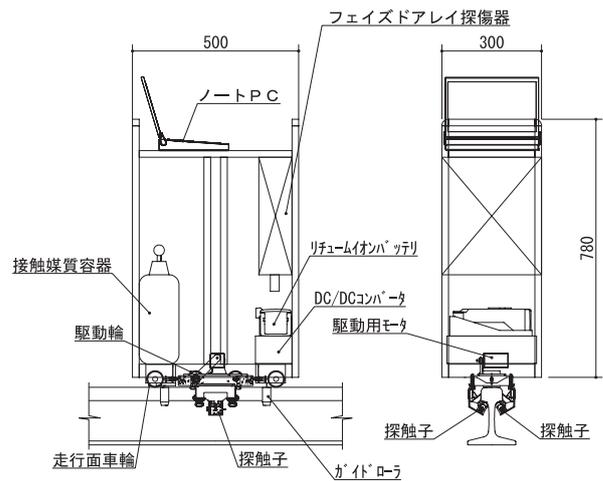


図6 探傷器構造全体図

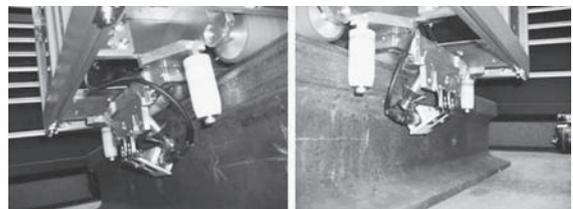


図7 探触子写真

探触子の位置の影響で、ゴールドサミット溶接部、レールボンド類、レール継目板、伸縮継目、踏切ではそのままでは探傷することができない。探傷器の移動(探傷)は、横裂進展の向きと同じである列車進行方向と同方向となる。探傷状況を図8に示す。



図8 実際の探傷状況

4.2 探傷器の特徴

4.2.1 探触子

探触子はレールあご下部左右に送信用と受信用を配置し、二探触子法により傷からの反射エコーを捉える。

アレイ探触子の仕様を表2に示す。セクタスキャンは±30度(扇状の探傷範囲角度60度)の角度で行われる。図9に探傷範囲を示す。

表2 アレイ探触子仕様

項目	内容
周波数	3MHz
素子数	10
素子長さ・幅	10 × 0.6mm
ギャップ(素子間の隙間寸法)	0.1mm
屈折角	50度
探触子外形寸法	20mm × 40mm

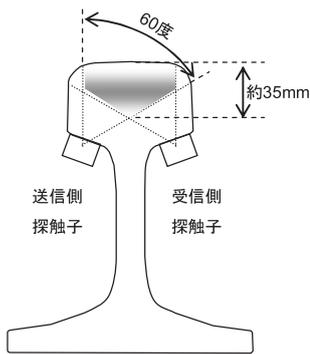


図9 レール頭部内探傷範囲

4.2.2 探傷機能と操作

レール頭部横裂連続探傷器の操作は、備え付けのパソコンを通して行われる。パソコンでは、本体の走行および停止のほか、探傷モードの切換、横裂寸法の確認を行うことができる。パソコン上の条件設定画面にて、探傷モードの選択、線名、線別およびレール左右別などを入力する。探傷モードは3種類あり、一次連続探傷、二次連続探傷および試験連続探傷である。一次連続探傷は速い速度で走行し、横裂の有無を確認することを目的とし、二次連続探傷は一次連

続探傷で横裂が確認された箇所で、精密な横裂深さを確認するために使用する。試験連続探傷は波形を確認しながら探傷する場合に用いる。

(1) 一次連続探傷

一次連続探傷の走行速度は0.5km/h、1.0km/h、2.0km/hの3種類から選択できる。速度によらずセクタスキャンはレール長手方向に対して5mmピッチで実施する。探傷時のパソコン画面を図10に示す。設定した閾値を超えたエコーが検出されたとき、その範囲をレール側面図にプロットする。横裂が確認された場合、その範囲をクロスカーソルでプロットの最深部を特定し、人により深さを読み取る。

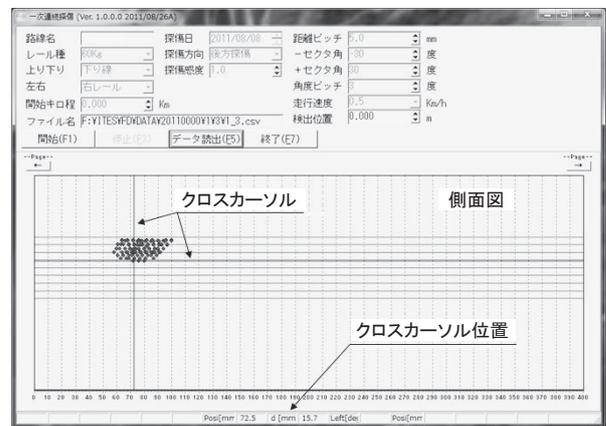


図10 一次連続探傷画面例

(2) 二次連続探傷

横裂深さを詳細に調べる場合に使用するモードで、走行速度は1mm/sec、2mm/sec、5mm/secの3種類から選択でき、セクタ走査ピッチはそれぞれ1秒、2秒、5秒である。横裂深さを読み取る機能のほか、一次連続探傷画面とは異なり、図11のようにレール断面における横裂の幅を読み取ることができる。

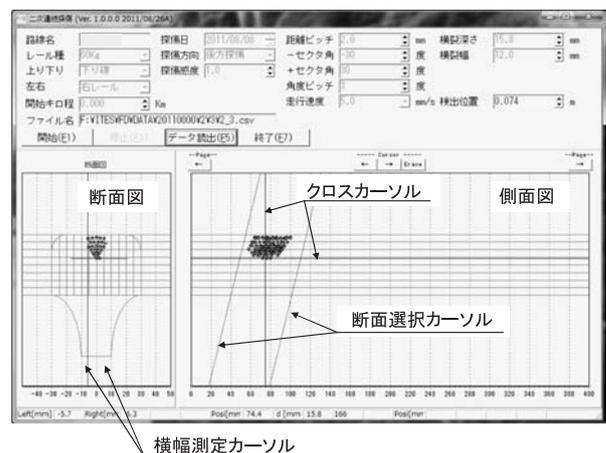


図11 二次連続探傷画面例

5. 横裂探傷結果

5.1 人工傷の探傷結果

シェリングを模擬した傷をレール頭部に加工したレール片（横裂深さ10mm,15mm,20mm,25mm）を製造し、本探傷器にて探傷を実施した。二次連続探傷（5mm/sec）での探傷結果を図12に示す。

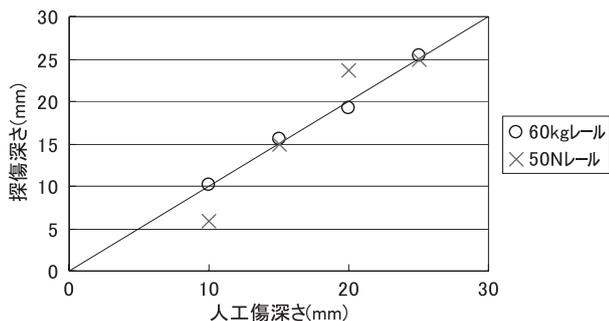


図12 探傷結果例

5.2 営業線で発生した傷での探傷結果

本探傷器の結果で、深さ10.3mmの横裂を検出したレールがあった。その探傷画像を図13に示す。実際の傷の状況を確認するために、レールを長手方向に切断した（図14参照）。検出した傷は図中に示す丸で囲まれた箇所である。レールあご下部からの探傷方法のため、新品レール寸法からの差で横裂深さが計算され、レール頭部摩耗量を含んだ値で示される。摩耗分を含んだ傷の最深部は10.2mm（摩耗を含まないと約8mm）と探傷器による結果と一致した。また、横裂はレール頭頂面からの角度が約30度と、一般的に進行した横裂の角度の半分程度のものであったが、反射エコーを受信することができた。



図13 探傷結果

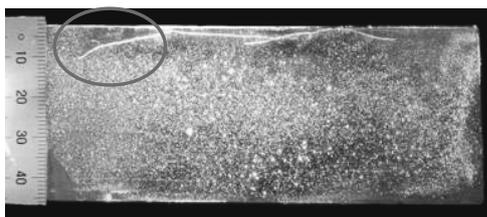


図14 探傷したレールの断面

5.3 探傷器の性能限度

本探傷器の使用では、事前準備および結果を確認する際に、以下の点に留意する必要がある。

- (a) レールあご下部を探触子が走行し、超音波を送受信するため、レールの汚れや浮き錆を事前に除去する必要がある
- (b) セクタスキャンにおけるセクタ角が大きいほど（扇状に振る超音波の両端ほど）、超音波の反射効率が低下するため精度が落ちる
- (c) 探触子がレールに対して左右同位置に固定されているため、横裂面がレール断面中央から外側にずれるほど、超音波の反射効率が低下し精度が落ちる
- (d) 水平裂は本方式の特性上検出できない
- (e) 接触媒質にはグリセリンペーストを用いる

6. おわりに

フェイズドアレイ技術によるレールあご下部からの二探触子法によって、現在使用されている斜角探触子や透過法による探傷での課題を解決し、かつレール長手方向へ連続的に探傷できる探傷器を開発した。本探傷器により、従来探傷が困難であった場所での探傷や、連続して効率的に探傷することが可能となった。

現在使用されている探傷方法や本探傷器それぞれの性能や利便性を理解したうえで、効率的な現場探傷およびレール損傷管理が可能になると考えられる。今後はフェイズドアレイの特徴を活かして、横裂の形状に関するさまざまな情報を取得できる探傷システムの研究に反映させる予定である。

参考文献

- 1) 青木他、レール頭部の精密な探傷方法の開発、第63回土木学会年次学術講演会、2008.9.
- 2) 櫛田他、フェイズドアレイ超音波法によるレール広断面探傷装置、JFE技報No.15、p.28-31、2007.2.
- 3) 安藤他、フェイズドアレイ技術を用いたレール横裂探傷の基礎試験、第66回土木学会年次学術講演会、2011.9.
- 4) 日本工業出版、超音波フェイズドアレイ技術-フェイズドアレイの基礎から応用-2010年改訂版、2010.