

論文 渦流探傷によるレール表層部の微小き裂検知に関する検証

井上 拓也¹・高尾 賢一¹・松井 元英²

¹正会員 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部 施設部 施設技術室

(〒530-8341 大阪市北区芝田二丁目4番24号)

E-mail: takuya-inoue@westjr.co.jp, kenichi-takao@westjr.co.jp

²非会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 材料技術研究部摩擦材料

(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: matsui.motohide.69@rtri.or.jp

シェリング傷の発生抑制を図るために定期的なレール削正を実施している。一方で、削正要否によらず定期的に削正するより、レール表層に実在する初期段階のき裂を定量的に把握したうえで除去する手法の方が極めて有効であることから、渦流探傷によるレール表層部の微小き裂検知性能について検証した。長さや深さの異なる人工き裂を対象とした試験の結果、深さ0.2mm程度の微小き裂を検知可能であることを確認した。レールに実在する微小き裂検知に関する検証として、レール交換後の経年レールを対象とした試験により、深さ0.05mm以下の極めて浅いき裂でも検知可能であることを確認した。また、営業線における試験においてもレール表面に微小き裂を確認し、レール表層部に実在する微小き裂の検知可能性を確認した。

Key Words : rail grinding , squat , rolling contact fatigue, eddy current testing

1. はじめに

シェリング傷の進展によるレール折損を防止するためには、継続的な超音波探傷検査や交換基準に基づいたレール交換を実施する必要があることから、多大な労働力と経費を費やしている。シェリング傷の発生抑制にはレール表層の疲労層を削正により除去することが有効であるとされ、レール削正による抑制効果が実験的に求められている¹⁾。JR西日本（以下、当社という）の在来線においては、シェリング傷の発生傾向分析に基づいて線区毎に削正周期を定め、定期的なレール削正を実施してシェリング傷の発生抑制を図っている²⁾。

一方で、この手法においてはシェリング傷の起点となる転がり疲労層や初期段階の微小なき裂の実際の形成状況は考慮できていないため、レール削正をさらに効果的かつ効率的に実施するためには、何らかの検査方法によりこれらを定量的に把握したうえで、レール削正を実施して除去する方が極めて有効である。しかしながら、これらは、現在実施している超音波探傷検査で検知可能な

領域（深さ約4mm以深）よりも極めて浅い領域に存在するため、超音波探傷検査では把握することはできない。

そこで当社では、レール削正で対処可能な極めて浅い領域を対象とした検査技術の検討を行うこととした。これまでの検証では、X線残留応力測定による評価として営業線において現地測定を行ったものの、転がり接触疲労の定量的な評価はできていない³⁾。

本稿では、レール表層部検査技術のより有効な手法として、渦流探傷によるレール表層部の微小き裂検知性能について検証したので、以下に報告する。

2. 渦流探傷によるき裂検知

(1) 測定原理

導体に渦電流を誘導してきずの検出や材質評価などに適用する方法として渦電流試験方法（以下、渦流探傷）がある⁴⁾。

渦流探傷は、交流電流を流したコイルの磁束の作用によって導体中に誘起された渦電流（図-1）が、導体の材

質変化や導体表面のきずなどにより変化し、その変化をコイルで検知することで、きずの存在や材質の違いなどを調べる手法である。渦流探傷は、渦電流が導体の表面に集中することから、探傷領域が導体表面および表面直下の領域に限られ、深さ0.1～3mmといった浅い領域の検査に適している。レールを対象とした使用事例としては、営業線から採取したレールや営業線の敷設レールを対象として、きしみ割れ深さの測定が行われている⁹⁾。

今回は、シェリング傷の進展過程⁹⁾の中でも、特に初期段階にレール表層部に生じている微小なき裂で、レール削正により除去可能な程度（目安としてレール表層から深さ0.3mmまで）のき裂検知を目的として使用することとした。

(2) 測定装置

測定に使用した渦流探傷装置およびプローブを図-2に示す。金属材料の疲労損傷検査用の幅5mmのプローブ（ASW473-033）および装置（EC-001）を使用した。

3. 人工き裂試験片を用いた検知性能確認試験

(1) 試験目的

渦流探傷は表面きずの非破壊検査を高速に行うことができる一方で、き裂の形状および寸法を正確に把握することが困難であること、多くの雑音因子の影響を受けや

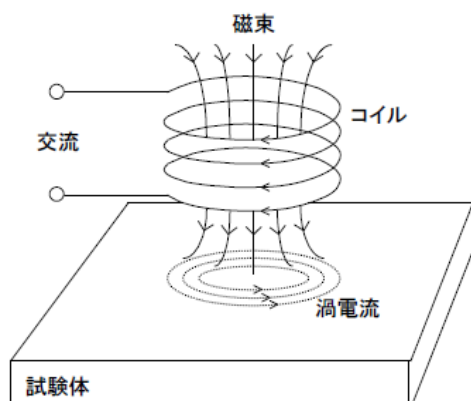


図-1 渦流探傷の測定原理イメージ図



図-2 渦流探傷装置およびプローブ

すいこと、が欠点とされている。そこで、人工き裂を設けた試験片を用いて、あらかじめ基本的な検知性能を確認することとした。

まず、様々なき裂形状に対する測定を行い、き裂の形状と信号電圧の関係や微小なき裂に対する検知性能を確認することとした。

また、プローブとレールとの距離（リフトオフ量）等

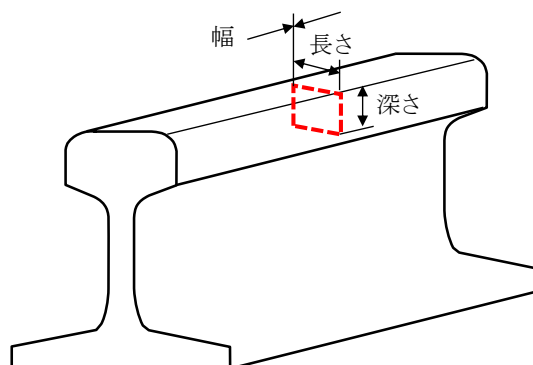


図-3 人工き裂の加工イメージ

表-1 試験片の人工き裂一覧

No.	加工寸法(mm)			備考
	長さ	幅	深さ	
1	0.5	0.25	0.2	長さ変更
2	1.0	0.25	0.2	長さ変更
3	2.0	0.25	0.2	長さ変更
4	5.0	0.25	0.2	基準き裂
5	10.0	0.25	0.2	長さ変更
6	5.0	0.25	0.1	深さ変更
7	5.0	0.25	0.3	深さ変更
8	5.0	0.25	0.6	深さ変更
9	5.0	0.25	1.0	深さ変更
10	5.0	0.45	0.2	幅変更
11	2.0	0.25	0.2	中央から20mmGC側

表-2 人工き裂試験片を用いた検証の内容

検証No.	分類	検証項目	比較対象
1	き裂形状による違い	き裂長さ	長さ(mm) 0.5, 1, 2, 5, 10
2		き裂幅	幅(mm) 0.25, 0.45
3		き裂深さ	深さ(mm) 0.1, 0.2, 0.3, 0.6, 1.0
4	測定条件による違い	き裂位置	レール中央部 レール曲面部
5		リフトオフ	リフトオフ(mm) 0.15, 0.25, 0.5, 1, 2
6		検査位置	き裂位置に対して 0.5mmずつ移動

の測定条件の違いが与える影響についても確認することとした。

(2) 人工き裂試験片を用いた検証内容

JIS60kg普通レールの頭部に放電加工により溝状の人工き裂を施したものを試験片とした(図-3)。人工き裂は表-1に示すように、比較するうえで基準とするき裂から長さや深さを変えた矩形とし、さらにはき裂幅や加工位置も考慮することで、表-2に示す内容の検証を行うこととした。検証における測定条件は、絶対値の比較を行うために、リフトオフ0mmで最大き裂信号(No.9)が9V程度になるように設定した。

(3) 検証結果

人工き裂試験片を用いた検知性能確認試験の結果を表-3に示す。各き裂形状と信号電圧との関係として、検証No.1き裂長さの違いについて、人工き裂とノイズの信号電圧値を比較したときの絶対値の違いから、長さ1mm以上から検知可能であることを確認した。また、検証No.3き裂深さの違いによる検知性能の確認において、深さ0.2mm以上でノイズの信号電圧値と比較して絶対値に違いがあることから、レール削正で除去可能な程度の深さ(目安として0.3mm)の微小なき裂が検知可能であることを確認した(図-5)。き裂深さに応じて信号電圧は増加するが、コイルからの距離が離れることにより信号電圧が減衰する表皮効果のため、信号電圧の増加量は徐々に小さくなった。

測定条件の違いによる信号電圧への影響を確認した結果、検証No.5リフトオフ量の違いによる検知性の確認において、ミリ単位のわずかなリフトオフ量の違いによって信号電圧が大きく変動することから、現地測定においてもリフトオフ量をできるだけ一定にすることや、リフトオフ量による信号電圧の変化を補正するような測定をする必要性を確認した(図-6)。

なお、今回の検証においては、き裂に対して直角にプローブ走査した場合の結果であり、き裂に対して角度を持ってプローブ走査した場合の信号電圧の変化については別途検証する必要がある。

4. 室内における経年レールを用いた検証

(1) 試験目的

転がり接触疲労の影響を受けた経年レールに実在している微小き裂の検知性能の確認を目的に、レール交換後の経年レールを対象として渦流探傷を実施し、反応を示した箇所のレール断面を確認することにより、渦流探傷によるレールの微小き裂検知の可能性を検証することとした。

表-3 人工き裂試験片を用いた検知性能確認試験結果

検証No.	検証項目	検証結果
1	き裂長さ	1mmから検知可能 長さに応じて電圧値増加 5mm(プローブ幅)以上は電圧値一定
2	き裂幅	0.25と0.45mmの電圧値は同程度 より小さなき裂幅でも検知可能と想定される
3	き裂深さ	0.2mmから検知可能 深さに応じて電圧値増加 表皮効果で徐々に増加量が小さくなる
4	き裂位置	レールの曲面部にき裂がある場合も リフトオフを同じにすれば同等の電圧値
5	リフトオフ量	距離減衰により電圧値低下
6	検査位置	き裂に対するプローブの 重なり量により変動

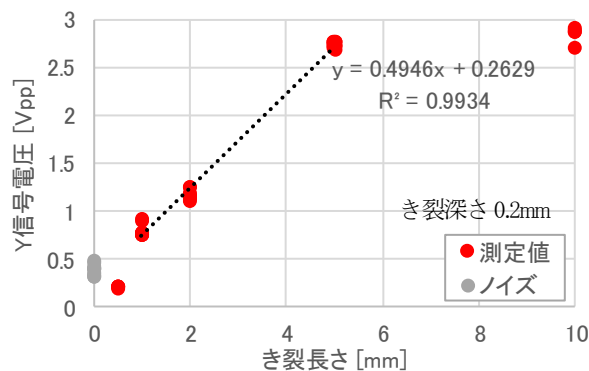


図-4 き裂長さと信号電圧との関係

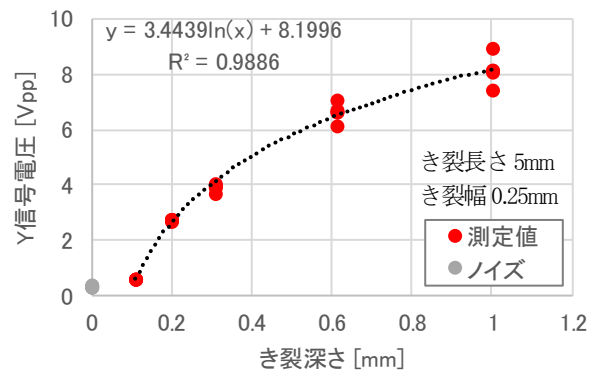


図-5 き裂深さと信号電圧との関係

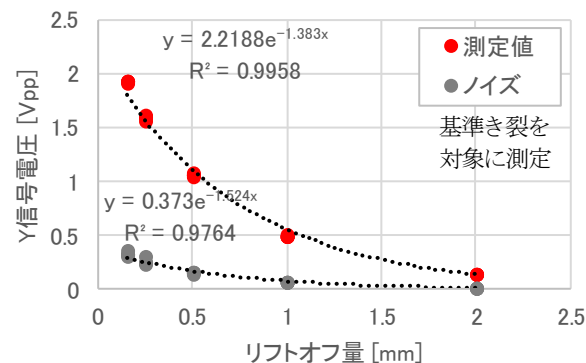


図-6 リフトオフ量と信号電圧との関係

(2) 測定条件

試験対象とした経年レールの概要を表-4に示す。試験は、1本あたり400mmとしたレール23本（合計9.2m分）を対象に実施した。渦流探傷の実施にあたっては、人工スリットを用いた基準感度設定を行い、深さ0.1mm程度の微小なき裂でも検知可能とするために、深さ0.1mm（長さ10mm）のき裂に対してリフトオフ0mmで信号電圧1.7Vの反応がある条件で本測定を行った。渦流探傷で反応を示した箇所について、蛍光磁粉探傷によりレール表面の目視可能なき裂の有無を確認した後、レール断面の確認によりレール内部のき裂有無を確認した。

(3) 測定結果

合計9.2m分の経年レールに対する各種測定結果を表-5に示す。渦流探傷では7箇所で反応（ノイズに対する絶対値の違い）が確認された。これらの断面を確認した結果、7箇所中3箇所ではレール表層に微小なき裂が確認され、最大深さ0.05mm（レール表面上のき裂長さ2mm程度）の極めて浅いき裂であった（図-7、図-8）。検知数が全7箇所と限られた結果であるものの、経年レール表層に実在する深さ0.05mm以下の極めて浅いき裂を検知した結果から、レール削正で除去可能な程度（深さ0.3mm以下）の微小なき裂の検知可能性を確認した。

また、蛍光磁粉探傷で表面にき裂や剥離が確認できたものは、7箇所中3箇所であった。き裂等を確認できなかった4箇所については、渦流探傷の原理から、人工き裂のように単一のき裂ではなく目視での判別が困難なほどに非常に微小なき裂が複数存在し、探傷範囲でのき裂体積の総和が一定レベルに相当したため渦流探傷にのみ反応があったと推測されるが、原因を特定するためには別途詳細な確認が必要である。

5. 営業線における渦流探傷試験

(1) 試験目的

渦流探傷を線路内で長手方向連続的に実施する場合の作業性や敷設レールのき裂検知性能の確認を目的として、営業線での渦流探傷試験を実施した。

(2) 測定条件

現地測定実施箇所の概要を表-6に示す。当該試験区間はいずれも直線の明かり区間でシェリング傷が存在しており、微小なき裂の存在が有力と想定される区間で測定を実施した。

現地測定の状況を図-9に示す。線路長手方向を連続的に測定可能とするため、専用に製作した手押し式の架台に渦流探傷装置を搭載し、プローブを架台に対して一定の高さに固定した状態で測定を実施した。なお、プロー

表-4 試験対象とした経年レールの概要

条件	内容
線名	北陸本線
線形	直線
軌道構造	有道床
明かり・トンネル	明かり
年間通トン	1270万トン
累積通トン	4.2億トン
レール削正有無	削正履歴なし

表-5 経年レールの各種測定結果

No.	渦流探傷 (信号電圧V)	蛍光磁粉	断面観察 き裂深さ
1	1.6	判別不可	0.01mm以下
2	1.0	き裂確認	0.05mm程度
3	1.0	判別不可	判別不可
4	0.9	判別不可	判別不可
5	1.4	判別不可	判別不可
6	1.5	き裂確認	0.01mm以下
7	-1.0	剥離確認	表面剥離



図-7 き裂確認結果の一例（No.2）

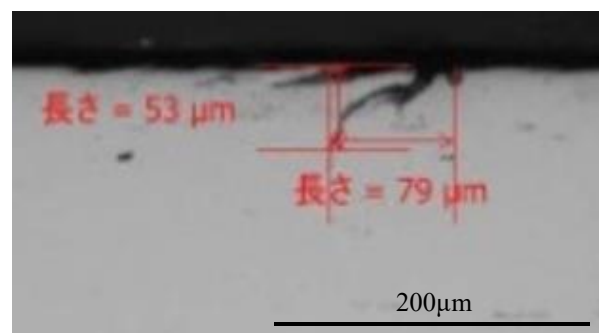


図-8 レール断面確認結果の一例（No.2）

表-6 現地測定実施箇所の概要

線名	山陰本線	山陽本線	湖西線
軌道構造	有道床	有道床	有道床・スラブ
年間通トン	500万トン	2,000万トン	1,400万トン
累積通トン	0.6億トン 2.1億トン	8.1億トン	5.9億トン
延長	870m	370m	620m

ブは、レールの照り面中央を測定するように配置して測定を行った。

渦流探傷の基準感度調整は、レール削正で対処可能な深さ0.3mmと検知箇所の表面確認作業を考慮して、表-1の試験片におけるNo.7の人工き裂（深さ0.3mm）で信号電圧2.0Vとなるように調整したうえで現地測定を実施した。

(3) 測定結果

渦流探傷で信号電圧2.0V以上の反応を示した箇所について目視や蛍光磁粉探傷等によりレール表面状態を確認した結果、レール表面に微小なき裂や剥離等の変状が確認された。測定結果の一例として、図-10に渦流探傷において2.0V以上の反応を示した例を、図-11に対応する箇所のレール表面を蛍光磁粉探傷により確認した結果、微小なき裂を確認した例を示す。

また、今回測定した箇所における、渦流探傷後のレール表面確認で微小き裂の存在可能性を確認した回数（検知割合；100mあたりの検知数）と累積通過トン数との関係を図-12に示す。今回測定した箇所においては、概ね累積通過トン数が大きい箇所で検知割合が大きくなる傾向にあった。これは転がり接触疲労の蓄積により微小き裂が生じていることを示しているものと考えられ、今後さらなるデータの蓄積と材料分析結果との照合を行うことにより、シェリング傷の初期段階であるレール表面の微小き裂の分布状況に基づいた最適なレール削正計画の策定に寄与する可能性があると考えている。

渦流探傷によるレール評価の課題として、レール溶接部や踏みきず等のき裂以外でも反応を示すため、微小き裂のみを対象とする効率的なレール評価を行うためには、き裂以外の反応を波形の特徴等から区別することが課題である。

6. まとめ

本稿では、シェリング傷の初期段階として微小き裂の検知を目的として渦流探傷試験を実施した。人工き裂試験片や経年レールを対象とした試験により、渦流探傷の適用に関する留意点や課題を把握するとともに、レール表層に実在する微小き裂の検知可能性を確認した。

今後は、実用化に向けて定量的評価手法の確立やき裂進展メカニズムの検証等を行う予定である。

参考文献

- 1) 石田誠，阿部則次；レールシェリング予防削正効果に関する実験的研究，RTRI REPORT Vol9, No12, 1995.12
- 2) 今井啓貴，高尾賢一；J R 西日本（在来線）におけ



図-9 現地測定状況

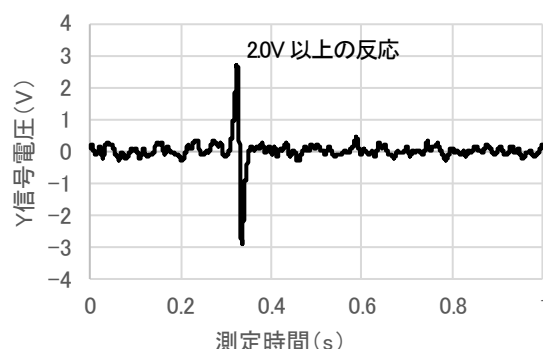


図-10 渦流探傷測定結果の一例



図-11 レール表面確認結果の一例

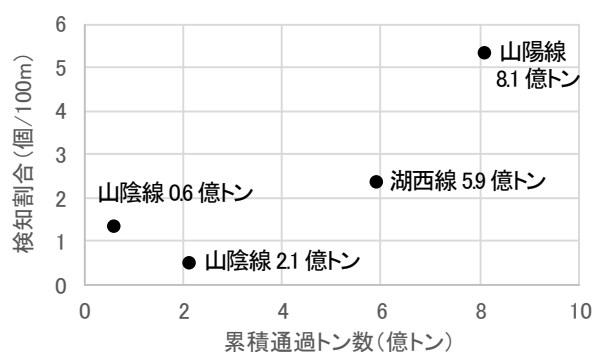


図-12 累積通過トン数と検知割合の関係

- る最適なレール削正手法の検討，日本鉄道施設協会誌，2017.12
- 3) 井上拓也，高尾賢一，佐々木敏彦；X線による敷設レールの転がり接触疲労の評価に関する基礎的検証，第73回土木学会年次学術講演会，2018.9
- 4) （一社）日本非破壊検査協会編；渦電流探傷試験Ⅱ，2016.4
- 5) 元好茂；渦電流によるレールのきしみ割れ深さ測定，日本鉄道施設協会誌，2013.7
- 6) 松山晋作；レールの癌シェリングを斬る，RRR，Vol.44, No.5, 1987.5
- 7) 石田誠，阿部則次；レールシェリング対策，RRR，Vol.70, No.11, 2013.11
- (2020.4.3 受付)

VERIFICATION OF DETECTING MICRO CRACKS ON RAIL SURFACE BY EDDY CURRENT TESTING

Takuya INOUE, Kenichi TAKAO and Motohide MATSUI

In order to prevent squats, rail grinding is performed at a constant cycle. On the other hand, since the method of quantitatively detecting the initial cracks existing on the rail surface and then removing them is extremely effective, the possibility of detecting micro cracks on the rail surface by eddy current testing was verified. As a result of tests on artificial cracks with different lengths and depths, it was confirmed that small cracks with a depth of about 0.2 mm could be detected. As a verification on the detection of micro cracks existing on rails, it was confirmed that extremely shallow cracks with a depth of 0.05 mm or less can be detected by tests on rails after replacement. In addition, in tests on commercial lines, micro cracks were detected on the rail surface, and the possibility of detecting micro cracks existing on the rail surface was confirmed.