

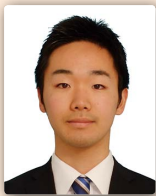
鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# レールの損傷の発生・進展速度を予測する

レールはさまざまな環境下で使用され、かつ繰り返しの列車走行でレール損傷が発生します。レール損傷の発生時期やき裂の進展速度を予測することができれば、適切なタイミングで処置（検査、レール交換など）が可能となり、長寿命化につながります。ここでは、レール損傷の発生・進展を予測するための取り組みについて紹介します。



**細田 充**  
Mitsuru Hosoda  
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  
【専門分野】 土木工学



**水谷 淳**  
Jun Mizutani  
軌道技術研究部  
レールメンテナンス研究室  
研究員  
【専門分野】 機械工学

## レールの管理について

列車の荷重を直接支持するレールは、深刻な損傷を起こさないために、適切に保守管理する必要があります。レール交換の要因としてレール頭部の「傷」およびレール底部の「疲労寿命」があげられます。ここではこれらの観点に着目したレールの管理について説明します。

レールの傷の中で、「頭頂面シェリング」「ゲージコーナーき裂」(☞参照)といった頭部から発生するき裂が問題となっています。それらの傷の概要を図1、図2に示します。繰り返しの列車走行によりレール頭部には水平裂が発生することがあります。水平裂が成長する過程で、き裂がレール底部方向

へ分岐し、(以下、「横裂」といいます。)レール折損に至る可能性があります。さらに、近年は曲線で設置されている硬度の高い熱処理レールに対し、ゲージコーナーき裂といった傷<sup>1)</sup>を起点とした横裂によるレール折損が発生しています。鉄道事業者は目視検査やレール超音波探傷などによる定期的な検査を実施し、その検査結果から必要に応じてレール交換などを実施しています。一方で、疲労寿命の観点でもレールの寿命に達する前に定期的にレール交換が行われています。レールの定期交換については列車がレールを走行する際にレールの底部に発生する曲げ応力および車軸通過回数の関係に基づいた、累積通過トン数(☞参照)によりレール

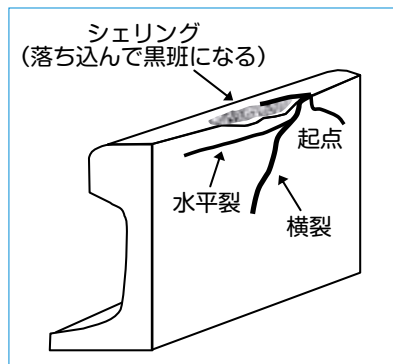


図1 頭頂面シェリングの概要

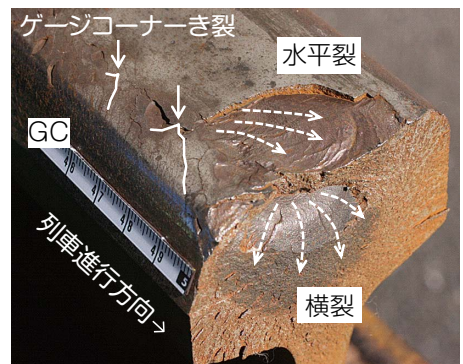


図2 ゲージコーナーき裂での折損例

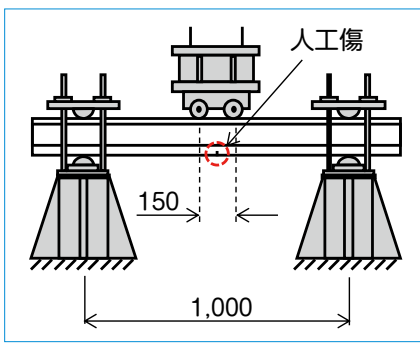


図3 横裂進展試験概要(単位mm)

ル交換周期を定めています。しかしながら、以上の措置には多大なるコストを要しており、レール交換周期や措置の適正化を図るため、頭部横裂の進展特性およびレールの疲労寿命の解明が求められています。ここではこれらの課題への取り組みについて紹介します。

### 実レールによる横裂進展試験

レールの頭部に横裂が発生した場合、その横裂が繰り返しの列車荷重によりレール底部へ進展する速度、またレール折損を引き起こす時期を高精度で把握することができれば、適切なタイミングでレール交換などの処置を行うことができ、ライフサイクルコストの削減につながります。ここでは横裂の進展速度を把握するために実施した実レールの横裂進展試験について紹介します。

頭頂面に横裂を模擬した人工傷(半径5mmの半円状断面のスリット)を設置した実レールに対し、レール頭部を下にした状態で、き裂を進展させる横裂進展試験を実施しました。この試験によって、鋼種、傷の発生位置およびレールの横裂進展に影響するとされ

☞ **ゲージコーナー**  
車軸が接触する軌間の内側。

☞ **累積通過トン数**  
車軸軸重×車軸通過回数。

☞ **残留応力**  
レールの製造時や列車荷重を受けることによって、内部に残留する応力のこと。

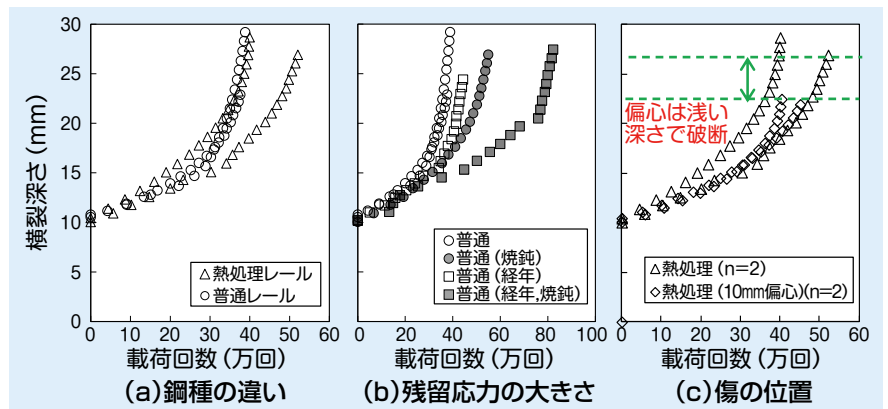


図4 载荷回数と横裂深さの関係に及ぼす各種因子の影響

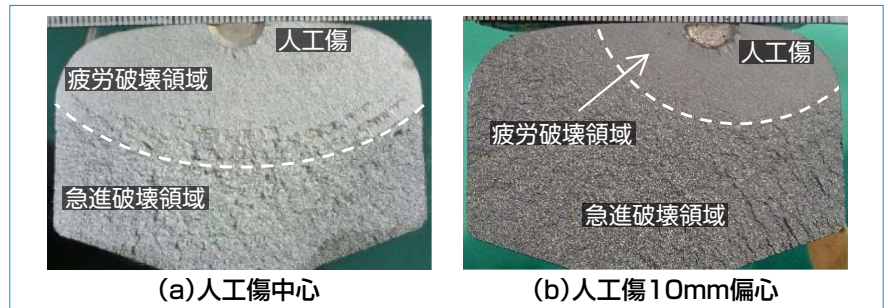


図5 試験後の破面の例

る残留応力(☞参照)が横裂進展に及ぼす影響を検討しました。

各レール供試体は使用履歴の有無や残留応力を低減させる目的で焼鈍したレール、ゲージコーナーき裂を想定して人工傷を10mm偏心させた熱処理レールなどを用い、それぞれの横裂進展速度を把握しました。横裂進展試験は、図3に示すように、片振4点曲げで実施しました。応力条件は、初期のき裂を速やかに発生させるため、人工傷から進展深さ5mm程度(頭頂面から10mm程度)の予き裂が発生するまで高い頭部曲げ応力振幅を負荷した後、 $100\text{N}/\text{mm}^2$ に応力振幅を下げ、繰り返し载荷しました。

試験結果を図4、試験後の破面の例を図5に示します。なお、ここでは図4の横軸は予き裂発生後の载荷回数を、縦軸は頭頂面からの横裂深さを示します。この結果の傾きが横裂進展速度を指し、傾きが急峻になるほど速度が速くなります。試験結果は以下のとおりです。

(a) 全体の特徴として横裂深さの増加

にともなって、横裂進展速度が速くなる傾向を示しました。

(b) 図4(a)に、新品の普通レールと新品の熱処理レールのそれぞれ2本ずつのデータを示します。鋼種の違いは後述するその他の因子と比較すると小さい結果でした。

(c) 図4(b)に示すように残留応力を低減させる目的で焼鈍した2種類のレールが非処理品に比べて比較的遅い結果となりました。残留応力が小さいほど、横裂進展速度が小さくなることが示されました。

(d) 図4(c)より、人工傷の位置が中心の場合と偏心させた場合の比較から、横裂進展速度の傾向に明確な差異はありませんが、図4(c)、図5より、偏心させた場合には中心の場合と比較して浅い位置で破断に至りました。

### 横裂進展予測手法の構築

以上のような試験で横裂進展特性を把握した後に、営業線の各種条件下における横裂進展を予測するための解析

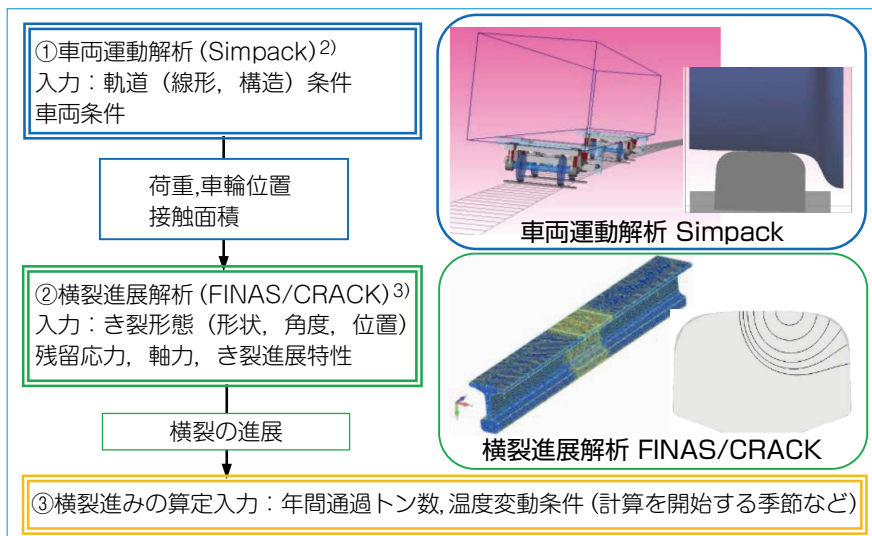


図6 横裂進展予測解析のフローチャート

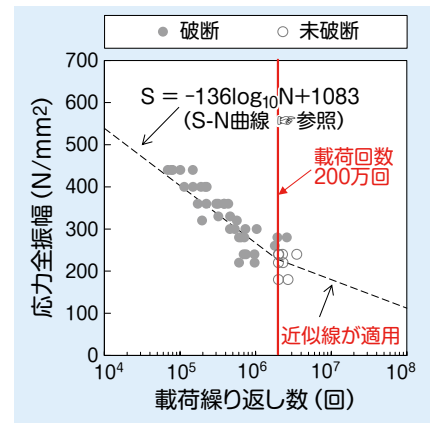


図7 レール発生応力と破断に至るまでの载荷回数の詳細

モデルを構築しました。なお、解析は横裂進展試験を模擬することでその妥当性を検証しています。

解析モデルのフローチャートを図6に示します。営業線における横裂進展の推定にあ

たっては、列車荷重の特性や軌道条件、また、温度の変動による熱応力を考慮する必要があります。手順は以下のとおりです。

- (1) 軌道条件(軌道線形、構造条件)および車両条件を車両運動解析に入力し車両の輪軸が通過した際のレールへの荷重、車輪位置および接触面積を算定します。
- (2) き裂(形状、角度、位置など)、軸力および残留応力、き裂進展特性と(1)で得られた結果を横裂進展解析に入力し、車両の走行による横裂進展を求めます。
- (3) 年間における列車の走行回数、列車重量、温度変動条件などを設定し、(2)で得られた結果を用いて横裂進展を計算します。

この解析モデルにより横裂が発生した場合のレールの余寿命を推定し、鉄道事業者のレール管理業務の支援を行います。



図8 要素試験片の平面曲げ疲労試験

### レールの疲労強度の把握

レールの交換周期を定める疲労寿命は曲げ疲労試験によりレール発生応力と破断に至るまでの载荷回数の関係から推定されてきました。その関係を図7に示します。ただし、実レールの試験では、試験レールのサイズが大きいため、高い周波数での疲労試験が実施困難でした。これまでの疲労試験は、200万回程度の载荷回数の疲労強度しか把握できず、実際の現場で使用されているレールが受けるような载荷回数の領域の強度は近似的に求めていました。しかしながら、より高精度な寿命推定を行うためには実軌道により近い载荷回数領域の試験を行う必要があります。そこで、これまで実施されていない高い载荷領域の曲げ疲労試験を実施し、レール交換周期延伸の可能性について検討しました。

図8のようにレール底部から切り出した要素試験片をレール底面が引っ張

り側となるように試験機に据え付け、片振りの試験を実施しました。载荷周波数は20～25Hz、乾燥状態および湿潤状態における試験を行いました。湿潤状態における試験では、図8(c)に示す斜線部に、水0.5mm³を12秒に1回ずつ滴下しました。

各種条件の試験結果を比較すると、以下の特徴がみられました。

- ① 平面曲げ疲労試験結果は200万回以下の载荷回数では乾燥状態と湿潤状態でおおむね同等でした。
- ② 乾燥状態での平面曲げ疲労試験では低い応力全振幅にて200万回を超える载荷回数で破断に至らず、湿潤状態では200万回を超える载荷回数で破断に至るケースがありました。

#### S-N 曲線

一定の振幅で繰り返し負荷される応力と破断までの負荷の回数の関係を示した曲線。

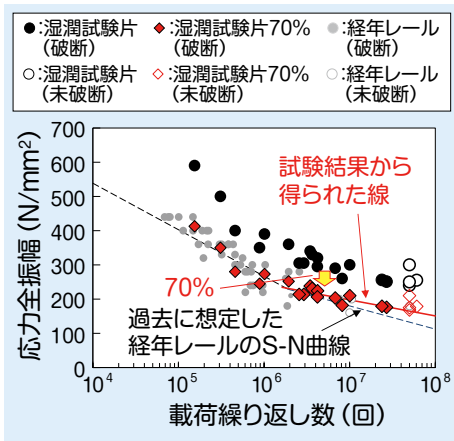


図9 要素試験片の平面曲げ疲労試験結果の詳細

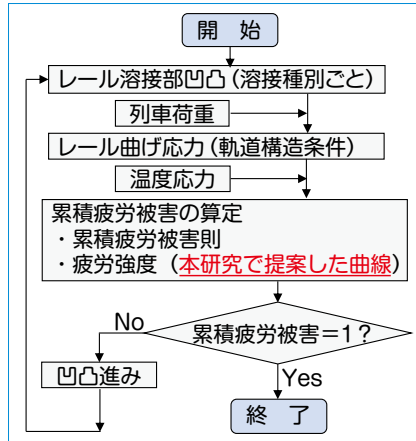


図10 寿命算定フローチャート

表1 レール疲労寿命の算定条件

項目	条件
対象車両	電気機関車 (輪重79kN, 100km/h) 交直流特急電車 (輪重59kN, 130km/h)
軌道構造	バラスト軌道, 浮きまくらぎ1mm
レール凹凸進み	0.1mm/億トンまたは0.05mm/億トン
初期レール凹凸量	V=0.0mm, W=0.3mm 

③ 実レールの時間強度は、要素試験片の結果に比べて70%程度小さくなりました。

図9に試験結果をまとめたものを示します。ここで、湿潤状態の試験で得られた結果の方が乾燥状態での試験に比べて実態を安全側に反映していると判断し、当データを採用し、疲労強度の評価を行いました。また、要素試験片と実レールで試験結果に差異がみられるのは、寸法効果により、材料の内部欠陥存在確率などが異なることが一般的にいわれています。以上のことから、試験片による試験結果に対し、その70%の応力全振幅を実レールの時間強度とみなしました。さらに、本研究では高繰り返し領域のレール疲労寿命に着目しているため、200万回時間強度以下の範囲における曲線を対象とし、最小二乗法により推定しました(図9中の赤線)。過去に想定した在来線経年レールの曲線と比較すると、200万回時間強度以下の範囲において、今回の試験結果から得た曲線が過去のものを上回る傾向が認められました。このことからレールの疲労強度に基づく現行の交換周期の延伸の可能性が示唆されました。

### レールの寿命計算

前章の結果より、交換周期延伸の可能性が認められたため、レールの余寿

命の試算を行いました。

図10に寿命推定のフローチャートを、表1に推定条件を示します。ここではレール溶接部を弱点部と仮定しました。一般的に溶接部では頭頂面にいくらかの凹凸が存在し、その凹凸が大きいはど、列車が走行時にレールに作用する荷重も大きくなりますが、列車荷重によるレールの疲労の累積とともに凹凸も列車荷重の累積に比例して大きくなるようにしています。

疲労寿命の推定結果を比較した結果を図11に示します。今回の計算条件下においては、列車種別による疲労寿命推定結果の違いはほとんどありませんでした。凹凸進み量0.1mm/億トンにおける推定寿命は50kgNレールで7億トン程度、60kgレールで10億トン程度でした。これは、従来の在来線におけるレール交換周期である、50kgNレール:6億トン、60kgレール:8億トンを上回る数値です。本研究で得られたS-N曲線から求めた推定寿命は、既往の研究で得られたS-N曲線から求めたそれを50kgNレールでは約1割、60kgレールでは約3割上回ることがわかります。このことから、今回の計算条件下においては、レールの累積通過トン数による交換周期の延伸の

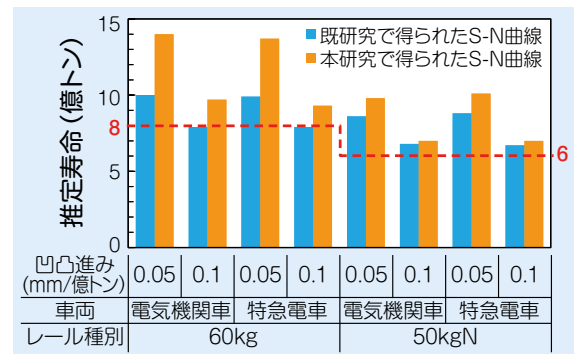


図11 レール疲労寿命の推定結果

可能性が示されたと考えています。

### おわりに

レールに対する各種試験を実施することで、その疲労特性を把握し、シミュレーションなどにより、レールの交換周期延伸について検討しました。今後も高精度化を図りさらなるコスト削減を目指します。[RRR]

### 文献

- 1) 兼松義一：近年の曲線外軌の損傷事例と新型熱処理レール，新線路，Vol.70, No.7, pp.23-25, 2016
- 2) ダッソー・システムズ：Simpack マルチボディシミュレーションソフトウェア，<https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/simpack/> (入手日：2019/8/8)
- 3) 伊藤忠テクノソリューションズ：FINAS/CRACK：FEMによる3次元き裂進展解析ソフトウェア，[http://www.engineering-eye.com/FINAS\\_CRACK/](http://www.engineering-eye.com/FINAS_CRACK/) (入手日：2019/8/8)