

- 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

経年したレールの内部を診る

経年したレールでは、それまでの車輪との繰り返し接触による転がり疲労で、照面下の表層付近のレール材質が変化し、ひどくなると、微小き裂が発生し、場合によってはレール損傷につながります。レール削正でこの材質変化した表層部を取り除いていますが、敷設後削正が実施されていない経年レールで、この作業を効率的に進めるためには、転がり疲労による材質変化を定量的に見積もる必要があります。そこで、この材質変化度合いを評価するためにX線解析手法を適用し、経年レールの削正作業の指針が得られないか検討しました。



松井 元英
Motohide Matsui
材料技術研究部
摩擦材料研究室
室長
【専門分野】 軌道材料、
金属材料全般



兼松 義一
Yoshikazu Kanematsu
材料技術研究部
摩擦材料研究室
副主任研究員
【専門分野】 軌道材料



辻江 正裕
Masahiro Tsujie
鉄道力学研究部
軌道力学研究室
副主任研究員
【専門分野】 破壊力学、
マルチボディダイナミクス

はじめに

レールが疲労したり、摩耗したりする要因に車輪との接触があげられます。車両がレール上を走行することで、レールは車輪と繰り返し接触し、転がり疲労とよばれる疲労による材質変化、おもに摩擦熱に起因すると考えられる材質変化や摩耗が発生します。このような材質変化が進むと微小き裂が発生、進展して、シェリング、ゲージコーナークリACK、きしみ割れやはく離などの損傷を引き起こす場合があります。

材料が繰り返し荷重で疲労する場合、疲労が蓄積した部位では局所的に塑性

変形が進みます。塑性変形が生じた部位はもとの材料状態に戻ることは通常ありません。微視的な金属組織の観点から、この材質変化を模式的に表すと図1のようになります。レール鋼を微視的にみると個々の結晶粒が強固に結合した金属組織が観察されます。転がり疲労を受け、局所的な塑性変形が進むと、金属組織に変化がみられます。それは、塑性変形にともない増加する塑性ひずみで、結晶粒の大きさが元の状態より微細になることです。転がり疲労による材質変化が進むと、金属組織の微細化が進み、結果として、元の

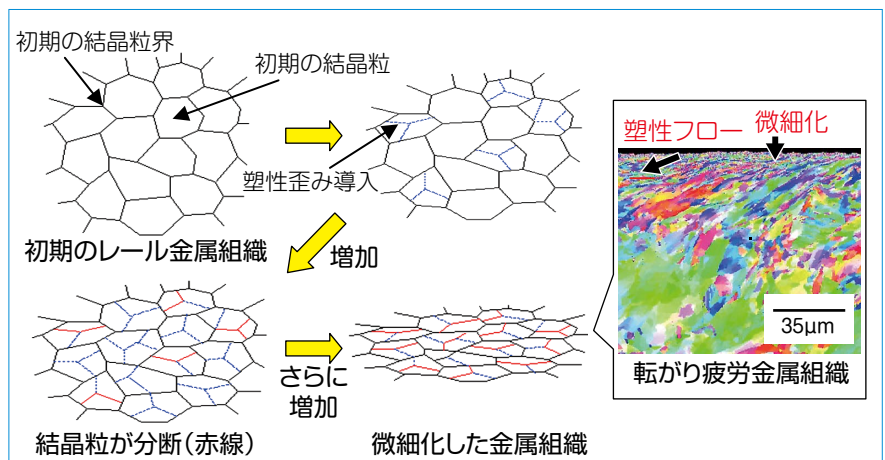


図1 転がり疲労によるレール鋼の金属組織の変化

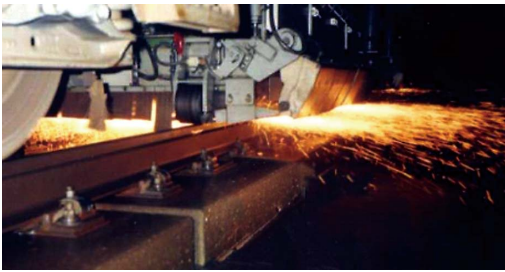


図2 レール削正

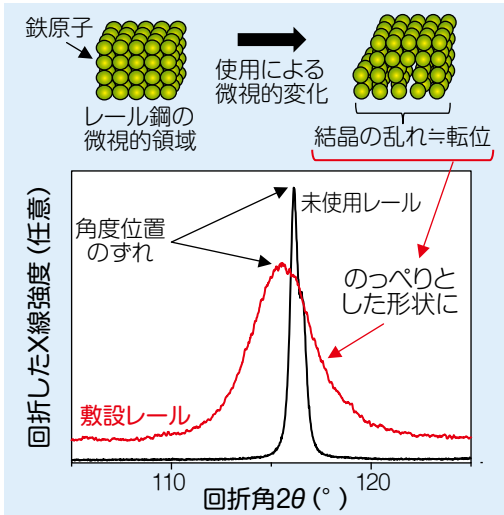


図4 回折されたX線の波形に現れる変化

状態から変化した金属組織や、場合によっては金属組織が一方向に流れているようにみえる塑性フローなどが観察されることがあります(図1)。

このような材質変化を起因としたレール損傷を抑制することは、レールの使用寿命を伸ばし、安定的な列車運行に貢献すると考えられます。レール損傷を抑制する手段の一つとして、レール削正車¹⁾が導入され、転がり疲労で塑性変形したレール表層を除去することなどに大きな役割を果たしています(図2)。レール削正に関しては、過去に室内試験の結果をもとに、一定の削正基準が提案されていますが、おもに新品レールを敷設した後の場合を想定したものです²⁾。すでに供用され削正されずに経年した敷設レールに対しては、蓄積した転がり疲労の影響を今後の削正でどのように低減していくかを検討する必要があります。そのため、転がり疲労で変質する経年レール内部の金

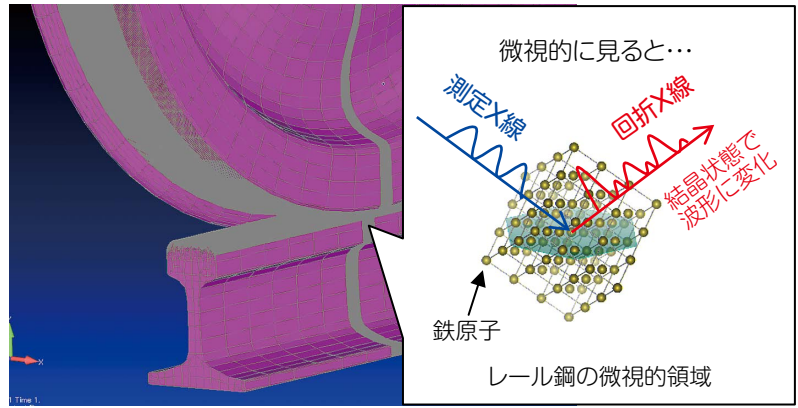


図3 X線によるレール鋼の測定と評価

属組織の状態を、X線解析で定量的に分析し、経年レールに対する削正手法について検討した例を紹介します。

X線解析

材料の内部や表面状態を分析するのにX線(☞参照)はよく用いられます。材料に含まれる含有成分の定性、定量分析から、応力ひずみ測定、

CTスキャンなどの撮像まで多岐にわたります。身近なものでは、健康診断などで使用する医療用のレントゲン写真や空港での所持品検査のためのセキュリティチェックなどに活用されています。

レールなどの鉄鋼材料をX線で測定する場合について説明します。微視的にみると、鉄を主成分とするたくさんの小さな結晶がレール鋼には含まれます。レールに対してX線が入射されると、表層内部まで侵入し、反射(回折)されます(図3)。反射されたX線は、波形データとなって取得され、この波形のピーク形状や位置などにはレール表層内部の結晶の変形状態を反映した情報が含まれます。

図4に敷設レールの照面から供試材を切り出して、X線測定したときに回折されたX線の測定結果の一部を示します。通常、X線測定を実施すると、図4に示すような波形のデータが得ら

れます。横軸の回折角は波形データが得られた角度位置を示します。縦軸はX線の強度を示します。ここで、重要なのは、未使用レールと敷設後のレールでは波形データの形状が異なることです。未使用レールでは鋭いピークを有する波形が得られていることがわかります(黒線)。一方、敷設後のレールではピークの角度位置のずれだけでなく、波形が鋭くなくなり、全体的にのっぺりした波形になっています(赤線)。この変化にレール表層内部に含まれる結晶の変形状態の情報が含まれています。つまり、この形状などを解析することで変形状態を知ることができるようになります。図1で示したように転がり疲労を受けるとレール表層内部の結晶は塑性変形することで微細化し、X線測定で得られる波形がのっぺりしてきます。X線解析では、この時の波形データを解析して負荷された塑性ひずみ量に深い指標である転位密度(=単位体積中の転位の長さ、 $1/m^2$)と結晶の大きさの情報(X線結晶粒径とする)を見積ることができ(3)(4)。

ここで、転位密度について簡単に説明します。模式的に表すと、転位とは結晶の乱れを指します(図4)。微視的

☞ X線

電磁波の中で、波長が0.1～数百Å(Åは百億分の1メートル)程度の範囲のもの。

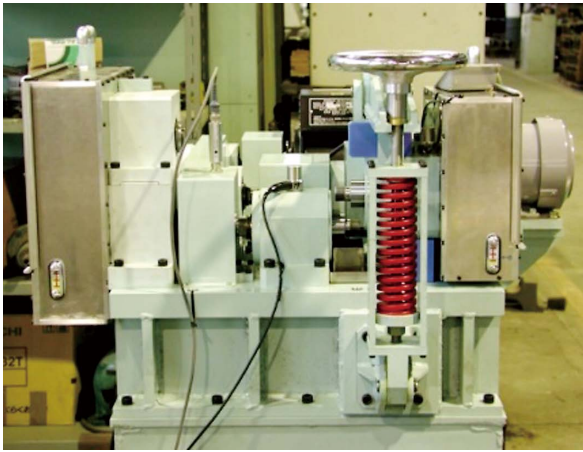


図5 室内二円筒転がり試験機

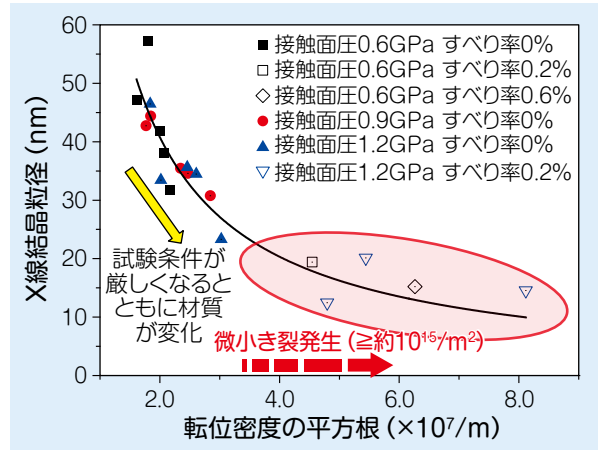


図6 室内二円筒転がり試験結果

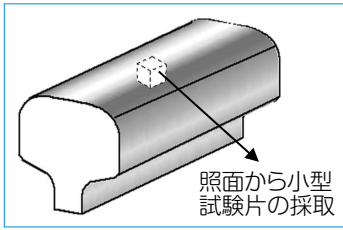


図7 敷設レールからの小型試験片の採取

に見ると、塑性変形による結晶の配列の乱れが増加すると金属組織が微細化し、塑性ひずみ量に対応する転位が発生し、X線測定で得られる波形がのっぺりしてきます。X線解析はこの材質変化を評価する手法となります。

室内試験での微小き裂発生評価

実際のレールでは転がり疲労の影響で材質が変化し、場合によっては微小き裂が発生、進展し、損傷に至ると考えられます。そこで、経年レールを評価する前に、小型試験片を使用して、X線解析で得られる指標と微小き裂発生との関係を室内二円筒転がり試験機(図5)を用いて調べました。ここでは、実際の車輪/レール接触を模擬して、接触面圧、試験回転数やすべり率を変化させた条件下で試験された円筒試験材から切り出した小型試験片を供試材としました。図6に各試験条件で

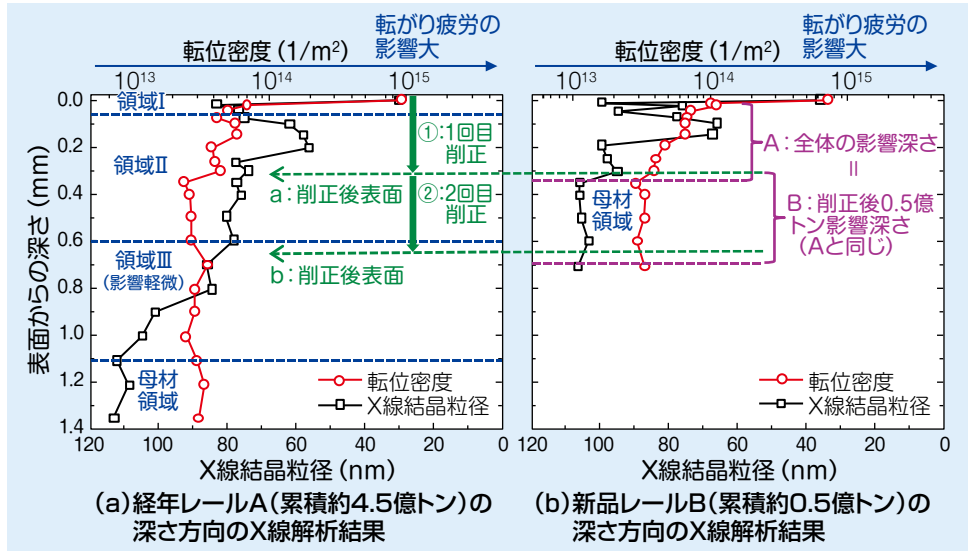


図8 経年レールの削正手法の検討

取得された解析結果を示します。試験条件が厳しくなり転がり疲労の影響が大きくなるにつれて、X線結晶粒径は小さく、転位密度は大きくなる傾向が得られ、転位密度が約 10^{15} ($1/m^2$)以上から微小き裂が発生することがわかりました(図6の赤枠内)⁵⁾⁶⁾⁷⁾。このように転がり疲労による影響で材質変化した金属組織を定量評価できる手法を用いれば、微小き裂が発生する瞬間をとらえることは困難なものと期待されます。

経年レールの評価と削正手法の検討

直線区間で削正履歴のない経年レール

の転がり疲労の影響による材質変化を評価し、削正手法を検討しました³⁾⁴⁾⁶⁾⁸⁾。これを経年レールA(累積約4.5億トン)とします。これから小型試験材を採取し(図7)、深さ方向にX線解析を繰り返した結果を図8に示します。あわせて、同区間で新品レールBを試験敷設し、累積約0.5億トン経過した後に同様の解析をした結果を示します。転がり疲労の影響が大きくなると、X線結晶粒径は小さく、転位密度は大きくなることを踏まえ、経年レールAの解析結果をみます(図8(a))。この影響は表面から急激に減少した後(領域I)、比較的緩やかに変化、減少し(領域II)、軽微な状態になる(領域III)ことがわかり

ました。新品レールBでも影響が表面から減少する類似の傾向がみられますが、累積通トンが小さい分、影響深さが浅くなっていました。新品レールBの結果から0.5億トンが経過する間に、転がり疲労の影響はおもに深さ0.3～0.4mmまで及ぶと考えられます。もちろん、0.5億トン経過後レール削正をしなければ、この影響はより深部へ及ぶこととなります。ここで、新品レールを敷設したときのレール削正手法として提案されている0.1mm/0.5億トン¹⁾をもとに、経年レールの削正深さを検討します。経年レールAでは転がり疲労の影響度合いで深さ方向に3つの領域(I～III)に分けられます(図8(a))。解析結果から、領域IIまでは材質変化が進んでいる領域で、領域IIIについては、X線結晶粒径だけがすでにかなり大きい状態から徐々に母材に近づく領域なので転がり疲労の影響は軽微と思われます。そのため、経年レールAで0.3mm以上の深さを狙うような削正を一度実施します(①、本試験では0.34mm)。新品レールBの解析結果(A：全体の影響深さ約0.35mm)を考慮すると、その後の0.5億トンが経過する間、削正後の新たな表面(a：削正後表面)から同じ深さ範囲0.3～0.4mmでおもに転がり疲労の影響が大きくなると考えられます(B：削正後0.5億トン影響深さ)。1回目の削正(①)後0.5億トン経過するまでに、2回目の削正(②)を深さが同じく0.3mm以上を狙うように行います(b：削正後表面)。こうすることで、経年レールAの領域IIIから深部で転がり疲労の新たな影響を極力避けて、すでに転がり疲労の影響が大きかった領域IとIIを削り取ることができると考えられます。この後はほぼ影響の軽微な領域IIIしか残らないため、0.1mm/0.5億トンに戻しても、提案

されている敷設新品レールの削正¹⁾を行うときと同様の削正効果が得られると期待されます⁶⁾⁸⁾。

レール削正を検討する場合は、削正深さだけでなく、微小き裂発生観点から表面の転がり疲労の影響がひどくならないように削正間隔を検討する必要があります。図9に経年レールAに対して削正深さ(0.11と0.34mm)を変えた削正試験を実施し、一定通トンごと経過後に試験レールを採取し小型試験材を切り出して、表面をX線解析した結果を示します。室内試験の結果(転位密度 10^{15} ($1/m^2$)以上で微小き裂発生)から、この値と同等程度、もしくは、経年レールAで得られた値を大きく超えないように削正間隔を決めれば、微小き裂が発生、進展する前にその領域を削正できると考えられます。図9に示すように、どのレールにおいても通トン(軸重×通過軸数)が増えることで、転位密度が大きくなり、転がり疲労の影響が大きくなっていました。しかし、深さ0.11mmを削正した経年レールCについては、削正後0.3億トン経過後に室内試験で得られたしきい値と

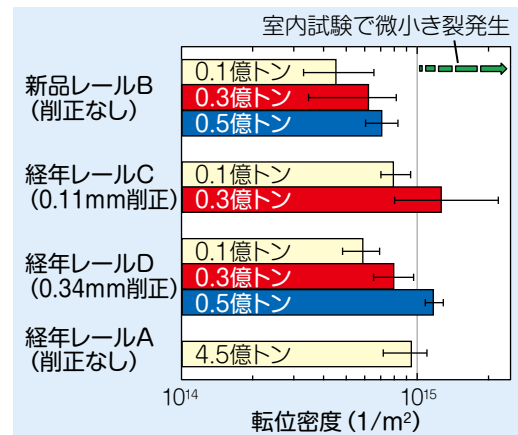


図9 各レール表面のX線解析結果

同等程度で経年レールAの値を平均的に超えていることがわかります。一方、深さ0.34mmを削正した経年レールDについては削正後0.5億トン経過時点で同様の状態になっていると考えられます。このことから、経年レールでは初期に削正深さを大きくすることで削正間隔(0.5億トンごと)を変える必要がなくなり、削正手法が複雑にならずに済むと思われます⁶⁾⁸⁾。

おわりに

経年レールの削正手法に対する取り組みを紹介しました。車輪との繰り返し接触による転がり疲労を起因としたレールの材質変化をX線解析で定量化することで、効率的なレール削正作業に資すれば幸いです。RRR

文献

- 1) 日本スベノ：レール削正車, http://speno-jp.fkc-ffm.de/jp/3_machines.asp
- 2) 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, 鉄道総研報告, Vol.9, No.12, pp.19-24, 1995
- 3) M.Matsui and Y.Kamiya : Evaluation of material deterioration of rails subjected to rolling contact fatigue using x-ray diffraction, Wear, Vol.304, pp.29-35, 2013
- 4) 松井元英, 兼松義一, 神谷祐次, 松本直紀：X線フーリエ解析法を用いたレール転がり疲労層評価, 鉄道総研報告, Vol.28, No.6, pp.53-58, 2014
- 5) M.Matsui, Y.Kanematsu and H.Tanimoto : Application of X-ray Fourier Analysis to Quantification of Cumulative RCF in Rail, Proceedings of 10th Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, 2015
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道レールの削正管理方法及び削正管理装置, 特開2017-020911, 2017.1.26
- 7) 松井元英, 兼松義一：X線解析によりレールの転がり疲労をとらえる, RRR, Vol.75, No.6, pp.8-11, 2018
- 8) 兼松義一, 辻江正裕, 松井元英：X線回折を用いたレールの転がり接触疲労の定量評価, 鉄道工学シンポジウム論文集, 2017