

| |
|-------|
| 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 |

X線解析によりレールの 転がり疲労をとらえる

レールは車輪と繰り返し転がり接触すると疲労により、材料劣化を起こします。これを転がり疲労といい、転がり疲労が蓄積すると微小き裂が発生し、それが進展することでレール損傷に発展します。この転がり疲労の状態を定量的に評価できるようになれば、レールの材料劣化状態を知ることができます。そこで、転がり疲労で変化するレールの金属組織を定量的に評価するX線解析手法を検討しました。ここでは、その手法や評価例について紹介します。

はじめに

車両がレールの上を走行することで、レールは車輪と繰り返し転がり接触します。この繰り返し接触が原因となって、レールが疲労したり、摩耗したりします。この疲労現象を転がり疲労とよんでいます。レールが転がり疲労を受け続けると、鋼を主成分とするレール材料が塑性変形し、金属組織が元の状態から微細になります(図1)。さらに、転がり疲労を受け続けると微小き裂の発生やそのき裂が進展することで、

場合によってはシェリング、ゲージコーナーき裂、きしみ割れやはく離損傷といったレール損傷を引き起こします。そのため、このようなレール損傷を抑制していくことはレールの使用寿命を伸ばし、メンテナンスコストの低減につながるだけでなく、安定的な列車運行にも貢献できると考えられます。

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⁾が導入されています。レール削正車とは回転する砥石などで人工的にレールを削ることがで



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

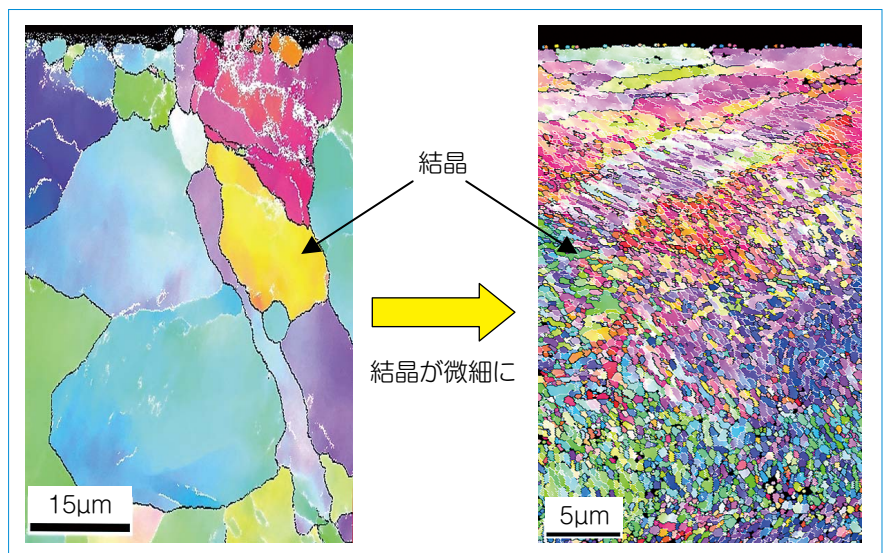


図1 初期(左)と転がり疲労を受けた(右)金属組織(電子線測定結果)

きる保守用車のことをいい、転がり疲労で塑性変形したレール表層を除去することに大きな効果を果たしています。ただしレール削正を行うには、一回の作業でどれくらいの深さまで削るか(削正量)と、どれくらいの期間で同様の作業を繰り返すか(削正頻度)という基準が必要になります。

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レール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。そのためには、転がり疲労の影響を定量的に評価する必要がありますと考えられます。

そこで、X線解析を用いて、転がり疲労による塑性変形でレールの金属組織が微細化していく状態を定量的に分析できないか検討しました。

ここでは、評価に用いたX線解析、室内試験片や実物レールへの検討例を紹介します。

X線測定と転がり疲労

電磁波(☞参照)の中で、波長が0.1～数百Å(Åは百億分の1メートル)程度の範囲のものがX線とよばれます。X線はさまざまな産業機器に应用されています。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ーチェックなどに活用されています。一方、材料工学では、X線は材料分析、応力測定などの定性・定量分析に広範に利用されています。

では、どのような原理でレールのような鉄鋼材料をX線で測定できるのでしょうか。X線は医療用レントゲン写真に特徴されるように物体を透過する性質があります。一方で、その一部は

物体表層に入り込んだ後反射し、表面を抜けて返ってきます。この現象を回折とよんでいます(図2)。この透過・回折の程度は対象とする物体が変わると変化します。また、物体を透過、もしくは、回折したX線には、その物体の材料状態が反映されます。レールのような鉄鋼材料ではX線はほとんど透過しないため、通常回折を用いて評価します。

そこで、室内試験の試験片や車輪との繰り返し接触で転がり疲労が蓄積したレール表層に対して、X線測定を行い、回折したX線を計数し解析することで、材料劣化状態を評価しました。

図3に模式的に転がり疲労による

レールの金属組織の微細化の過程を示します。レールを図1のように微視的に見ると小さな結晶の集まりになります。転がり疲労を受けるとこの結晶が塑性変形を起こし、ひずみます。さらに塑性変形が進むと個々の結晶中の塑性ひずみ量が増加することで、元の結晶粒が細かく分断され、微細化されます。

では、もう少し細かくレール表層が塑性変形したときの結晶に含まれる原

☞ 電磁波

波長の違いでさまざまな性質を持ちます。赤外線、可視光線、紫外線、X線などの異なる波長のものが電磁波に含まれます。

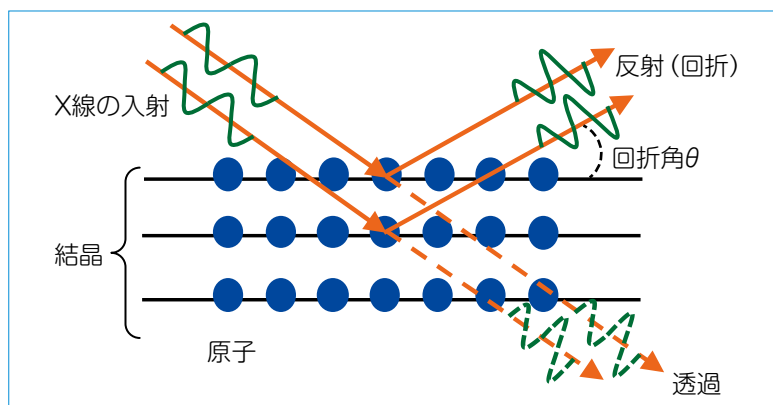


図2 X線の反射(回折)と透過

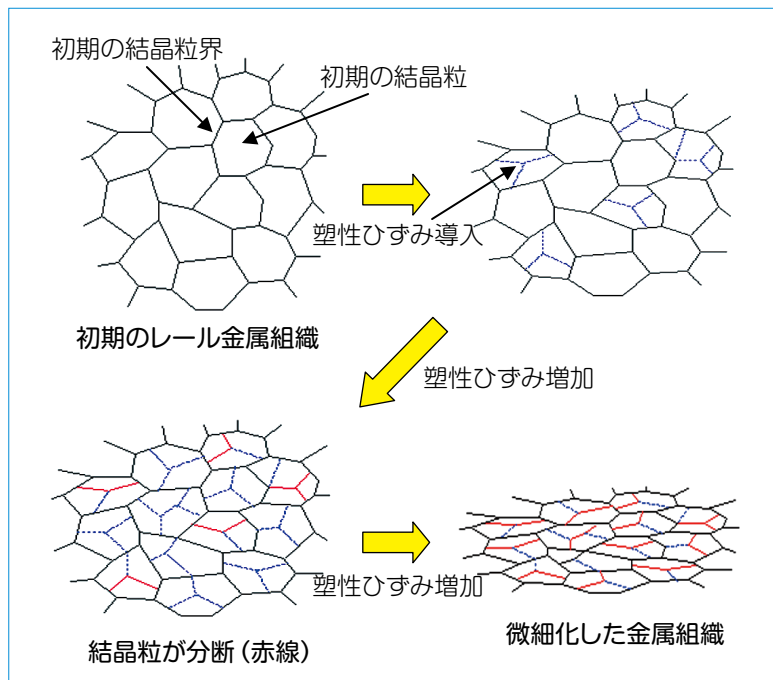


図3 転がり疲労による金属組織の微細化過程

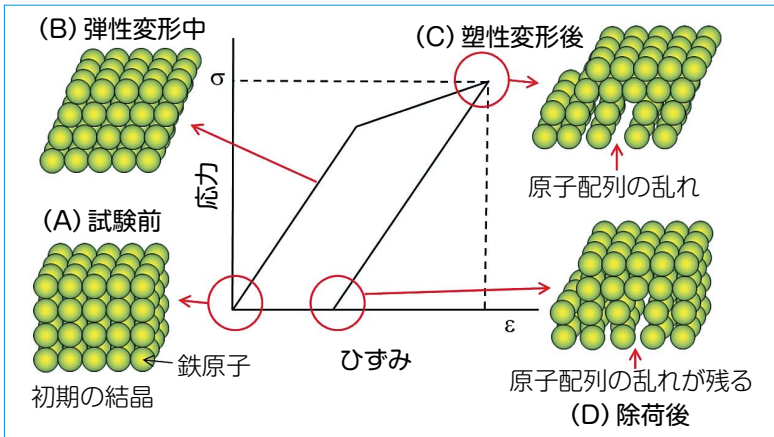


図4 塑性変形した時の原子配列の変化(転位の導入)

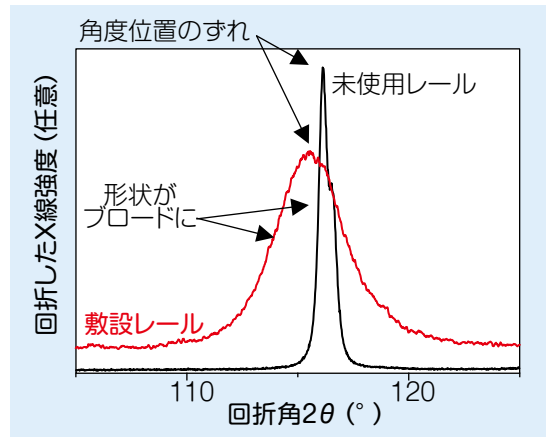


図5 回折されたX線の波形に現れる変化

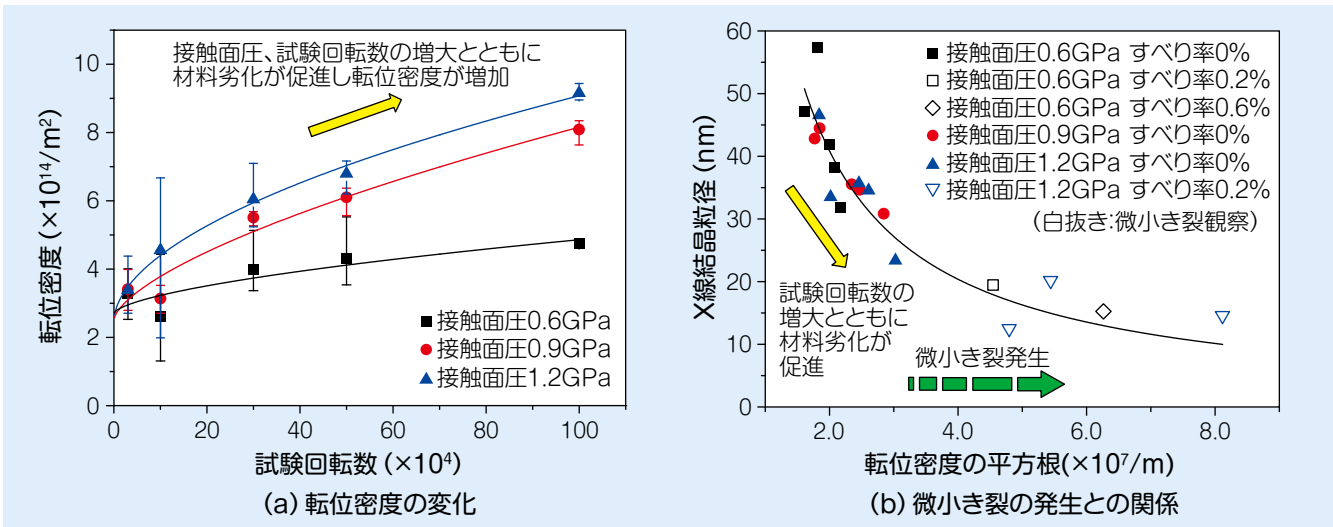


図6 室内二円筒転がり接触試験

子配列の変化を見てみます。図4にある模式的な応力・ひずみ線図を使って、塑性変形した時の原子配列の変化について説明します。試験前(A)では、レール中の鉄原子は整然と並んでいるとします。応力を負荷した弾性変形(☞参照)中(B)では、整然と並んだ鉄原子の配列が単純に変形するだけとなります。さらに、ひずみが増加し、塑性変

☞ 弾性変形

無負荷の状態から荷重をかけ変形させた後、荷重を取り除くともとの状態に戻る変形をいいます。

☞ 塑性変形

無負荷の状態から荷重をかけ変形させた後、荷重を取り除いてもとの状態に戻らない変形をいいます。

形(☞参照)が始まると(C)、鉄原子の配列に乱れが生じ、除荷したとしても、その乱れは残り(D)、通常では元の状態(A)には戻りません。この原子配列の乱れは、材料工学では転位とよばれています。この転位は、塑性変形で増加したひずみと相関が深いもので、微視的な観点から評価するときの一つの指標となります。また、どの程度の転位が結晶中に含まれるかを示すために、転位密度(=単位体積中の転位の長さ、 $1/m^2$)が用いられます。

車輪との繰り返し転がり接触を受けたレール鋼の変化は、X線測定の結果にどのように現れるのか説明します。図5に敷設レールの照面から供試材を切り出して、X線測定したときの回折したX線の測定結果の一部を示しま

す。X線測定では、図5にあるような波形のデータが得られます。この波形データの得られる角度位置や形状には対象物であるレール鋼の材料状態の情報が含まれています。これはX線測定ができる手法に由来します。同図の未使用レールと比較すると、使用された敷設レールでは、波形の角度位置がずれ、形状がブロードになり、変化が現れていることがわかります。

図1と図3にあるように、レール鋼は転がり疲労により塑性変形し、塑性ひずみが増加することで、転位密度が増加し、金属組織が微細になります。X線測定において、レール頭頂部照面で回折したX線には、このような微視的な材料状態が反映され、波形に変化

が出ます。

そこで、本研究では転がり疲労で塑性変形したレール鋼の微視的な状態から回折されたX線の波形を分析することで、結晶の大きさの情報(X線結晶粒径とする)と転位密度を見積もり、蓄積した転がり疲労状態の定量評価への適用可能性を検討した結果を紹介します。

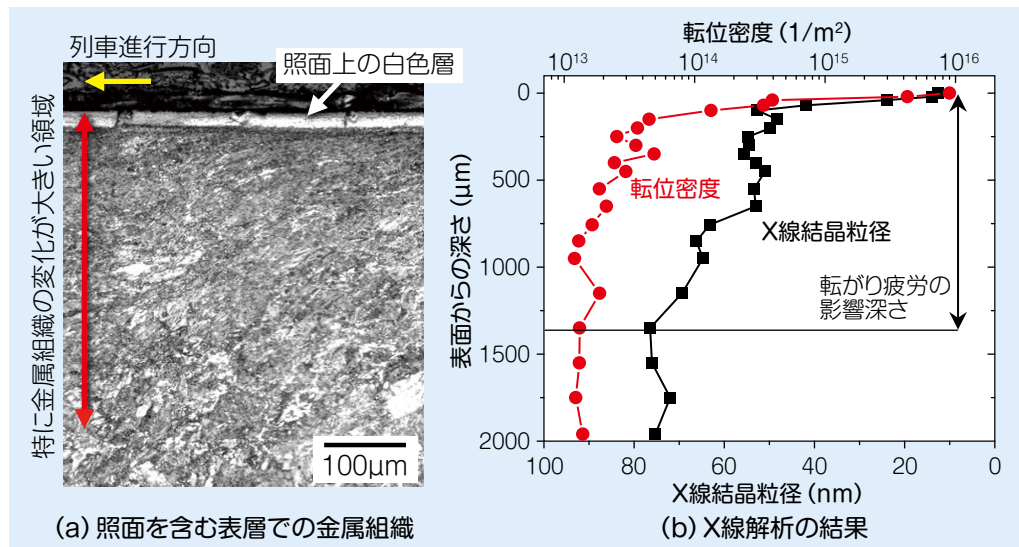


図7 X線解析による実物レールの評価結果

レール転がり疲労へのX線解析の適用

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試験条件下で室内二円筒転がり接触試験を行いました。その後、レールを模擬した円筒試験片から供試材を切り出し、その接触面に対してX線測定を行いました。図6に回折されたX線波形の分析からX線結晶粒径と転位密度を見積もった結果を示します³⁾。実際のレールでは転がり疲労の蓄積で塑性変形し、材料劣化が進むと微小き裂が発生、それが進展することで、損傷に至ると考えられます。そこで、室内試験で転がり疲労の蓄積していく過程を評価できないか検討しました。すべり率を0%に設定し、接触面圧や試験回転数を増加させ転がり疲労を蓄積させると、転位密度は平均的に大きくなりました。(図6(a))。次に、すべり率を増加させ、光学顕微鏡観察で微小き裂の発生を確認した結果と比較します(図6(b))。先ほどと同様に、試験条件が厳しくなり、転がり疲労の蓄積を起因として材料劣化が進むにつれて、X線結晶粒径は小さく、転位密度は大きくなることがわかりました。室内試験でも微小き裂が発生する瞬間をとらえることは困難ですが、図6(b)にあるように転位密度が10¹⁵ (1/m²)

以上くらいから転がり疲労の蓄積による材料劣化が起因となった微小き裂が発生すると推測されます。このように転がり疲労による塑性変形で変化した金属組織を微視的に定量評価できる手法を用いれば、微小き裂発生までの転がり疲労の蓄積状態を知ることができると期待されます。

図7に実物レールの頭頂部照面から供試材を切り出してX線解析で評価した結果を示します⁴⁾⁵⁾。実際に使用されたレールには、繰り返し車輪と接触したことで照面下にレールの金属組織が初期の状態から変化した転がり疲労層が形成されます(図3, 図7(a))。図7(a)の金属組織には、白色層とよばれる高い転位密度を有する変質層が見られました。しかし、内部に向かって転がり疲労の蓄積で変化した金属組織が元の状態に近づくにつれて、X線解析で見積もられるX線結晶粒径や転位密度が初期の金属組織で見積もられる程度の値へと変化していきました。この変化していく様子から、当該レールの転がり疲労の影響深さ、最表面が車輪との接触面で最も影響を受けていることや表層部がとくに影響が大きいことなどを知ることができると考えられます(図7(b))。

おわりに

X線測定で得られた波形情報から、転がり疲労で微細になるレールの金属組織の結晶粒径と転位密度を解析し、転がり疲労状態を定量的に評価する取り組みを紹介しました。

現在、この解析手法を適用して、レール削正作業の効率化に向けた検討を行っています。[RRR]

文献

- 1) 日本スベノ社HP: 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, Y.Kanematsu and H.Tanimoto: Application of X-ray Fourier Analysis to Quantification of Cumulative RCF in Rail, Proceedings of 10th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, 2015
- 4) M.Matsui and Y.Kamiya: Evaluation of material deterioration of rails subjected to rolling contact fatigue using x-ray diffraction, Wear, Vol.304, Issues 1-2, pp.29-35, 2013
- 5) 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