

論文 レールの回折 X 線による転がり疲れの影響深さと累積通トンの関係

兼松 義一¹・松井 元英²

¹非会員 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:kanematsu.yoshikazu.23@rtri.or.jp

²非会員 鉄道総合技術研究所 総務部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

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

繰り返し転がり接触を受け、レールの転がり疲れが生じた部分を除去するレール削正は、多くの鉄道事業者で実施されている。レール削正の適用範囲拡大等に伴い、これまで削正履歴がない高通過トン数のレールに対して、適切な削正量を知る必要が生じているが検討された事例は少ない。

回折 X 線を用いた転がり疲れの程度を定量的に評価する手法を実レールへ適用するにあたり、従来からの評価手法である硬さ測定および結晶方位解析と比較した。従来手法は、観察断面によって得られる評価結果が異なるため、転走面を平均的に評価できる回折 X 線を用いた手法がレールの転がり疲れの評価に適していると考えられる。回折 X 線での評価手法により評価した 1~7 億トンまでのレールの転がり疲れの影響深さは、0.5~1.5mm と通過トン数の増加に伴い深くなる傾向であることがわかった。

Key Words: railway rail, rolling contact fatigue, x-ray diffraction analysis, hardness distribution, crystal orientation analysis

1. はじめに

レールは、車輪との繰り返し転がり接触により金属組織に影響を受け（以降、転がり疲れと呼ぶ）、その状況によっては微小なき裂が形成され、シェリング等の転がり接触疲労損傷へと進展する場合がある。レールの車輪転走面に形成された転がり疲れの影響層を除去するレール削正は、シェリング抑制効果があり、国内外で検討・実施されている^{1,2)}など。国内においては、転がり疲れの影響層除去を目的としたレール削正では、通過トン数 0.5 億トンにつき削正量 0.1mm が、指標として用いられることが一般的である^{3,4)}など。

レールのメンテナンスコスト低減に向けた取り組みの一環として、鉄道事業者ではレール削正の適用範囲の拡大やレール削正車の新規導入が進められてきた⁵⁾など。その際、これまで削正を実施していないレールを削正する場合に、どの程度の削正量が適切であるかを知る必要があるが、これまで検討された事例は少ない。また、レールの転がり疲れの影響層の除去を目的としたレール削正における削正量を検討するためには、車輪との繰り返し接触によって生じたひずみ等の材料変化を定量的に把握したうえで削正量を検討することが望ましい。

これまでレールの転がり疲れの評価には、金属組織の顕微鏡観察や硬さ測定⁶⁾、X 線回折を用いた集合組織の測定^{7,8)}等が行われてきた。しかし、上述の一部手法は定性的な評価に留まることや、車輪と転がり接触するレール最表面での転がり疲れの程度を十分に評価できないことが課題であった。著者らは、回折 X 線のプロファイル解析（以降、X 線フーリエ解析と呼ぶ）を適用した転がり疲れによる塑性変形程度の定量化について検討⁹⁾しており、これまでに二円筒転がり試験片に形成された転がり疲れの影響層と微小なき裂の発生との関係性について評価を実施し、ひずみの程度を定量的に評価できることを示した。

本研究では、X 線フーリエ解析と従来の評価手法との相関性を確認するために、累積通過トン数 7 億トンのレールについて、硬さ分布測定、結晶方位解析および X 線フーリエ解析を実施し、X 線フーリエ解析での評価手法の特徴を整理した。また、累積通過トン数 1~7 億トンのレールについて、X 線フーリエ解析によって、転がり疲れの影響深さを評価した。なお、解析対象のレールは、軌道条件や走行する列車の本数や種類などを統一することにより、できるだけ条件をそろえるため、同一線区から選定した。

2. レールの転がり疲れと X 線フーリエ解析

(1) 転がり疲れと金属組織の変化

図-1には敷設されたレールの長手方向断面の金属組織写真の例を示す。また、図-2にレールの転がり接触による金属組織の変化の模式図を示す。レール鋼の金属組織は主にパーライト組織を有する結晶粒の集合体である。レールが繰り返し転がり接触を受けると結晶粒中や結晶粒界に塑性ひずみ（転位）が蓄積される。転位は新たな結晶粒界を形成し、金属組織が微細化しながら変化していく。これらより、繰り返し転がり接触を受けたレールには、転がり接触の履歴に対応した金属組織の微細化や車輪とのすべり接触による塑性流動が形成される。

(2) X 線フーリエ解析

レールなど結晶性の物質に X 線を照射した際に、Bragg の回折現象によって得られる回折 X 線は、様々な要因によってその回折 X 線の高さ、形状が変化する。例えば、結晶が一様にひずめばその回折 X 線の回折角度が移動し、回折に寄与する結晶数が増減すればその積分強度が増減し、不均一なひずみが増えれば回折 X 線形状が広がる。図-3に回折 X 線に及ぼすひずみの影響を模式的に示す。材料が変形するとその状態に対応して回折 X 線

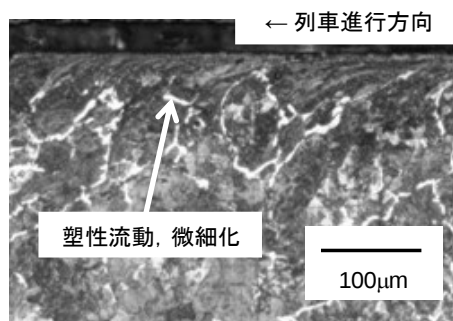


図-1 転がり接触を受けたレールの金属組織の例

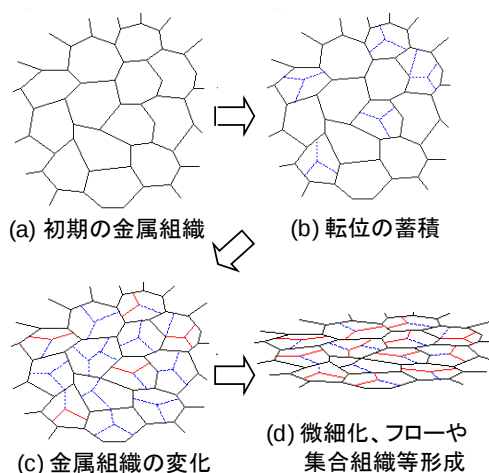


図-2 転がり接触が蓄積した際の金属組織の模式的变化

に影響が現れ、無ひずみ状態で得られる回折 X 線と比較して、一般的に弾性変形状態では回折 X 線の回折角度がシフトし、塑性変形状態に陥ると回折 X 線形状が幅広（ブロード）になる。図-4に敷設レールから得られたフェライト相の回折 X 線ピークの一部の変化を示す⁹⁾。転がり疲れを受け、塑性変形することで、図-4で示すように回折 X 線の回折角度がシフトし、ブロードになっていることが分かる。

回折 X 線の変化は理論的に計算できることから、回折 X 線プロファイルを逆解析することで、結晶材料中の格子欠陥に関する情報を得ることができる。回折 X 線の広がり、結晶子サイズと格子ひずみによる影響を分離する方法の 1 つが Williamson-Hall プロット¹⁰⁾である。なお、ここでの結晶子とは、回折に寄与する最小単位で結晶粒の中で単結晶としてみなせる部分のことであり、金属組織観察で確認される結晶粒とは異なる。よって、結晶子サイズは結晶粒径より小さいか、もしくは等しくなる¹¹⁾。

Williamson-Hall プロットは、結晶方位によるひずみの異方性を考慮していない。このため、鉄鋼材料についてこれらの方法を用いた解析は定性的な評価にとどまっていた。Ungár らは結晶の弾性異方性や、転位によるひずみの結晶方位異方性を考慮した新たな解析手法を modified Williamson-Hall 法および modified Warren-Averbach 法として提案した^{12,13)}。これらは回折 X 線に現れる広がり、異方性を考慮しており、この方法により信頼性の高い転位密度等の解析が実現した。

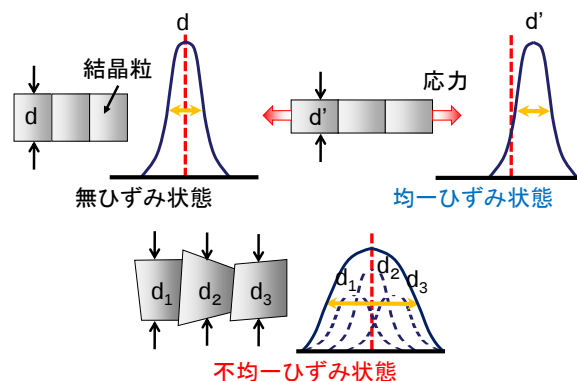


図-3 回折 X 線の変化の模式図

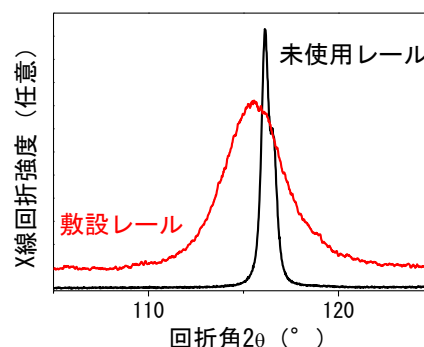


図-4 転がり疲れが回折 X 線に及ぼす影響

(3) X線フーリエ解析手順⁹⁾

X線フーリエ解析による定量評価は、X線回折測定から得られた波形情報をもとに以下のように行った。まず、式(1)に示す理論式から結晶子サイズの初期値 $\alpha 0$ を得る。

$$\Delta K = \alpha 0 + \varepsilon K \quad (1)$$

ここで、 K は $K=2\sin\theta/\lambda$ であり、X線測定において回折ベクトルと呼ばれている。 θ と λ は回折角および入射X線の波長である。これは、Williamson-Hallの式と呼ばれ、最小二乗による直線近似により、結晶子サイズと不均一ひずみ ε を得る。しかし、前述したように弾性異方性が、式(1)では考慮されておらず、鉄鋼材料への適用が難しかった。そこで、T.Ungarらは弾性異方性を考慮して次式を含めたX線フーリエ解析を考案した。

$$\Delta K = \alpha + \beta K \bar{C}^{1/2} + O(K \bar{C}^2) \quad (2)$$

ここで、 β と O は転位密度に関係する定数である。 $\bar{C}$ は転位コントラスト因子と呼ばれるもので、弾性異方性を考慮するために導入された。この $\bar{C}$ 因子はX線回折の波形情報から実験的に求める場合と理論値から見積もる場合とがあり、塑性変形状態に依存する。

式(1)で得られた $\alpha 0$ を変化させて、最小二乗法によるフィッティングを繰り返しながら、式(1)を満たすような、 $\bar{C}$ 因子、 α 、 β および O を決定する。次に、実験的に転位密度を見積もることが可能な式(3)を利用し、決定した $\bar{C}$ 因子を代入することで転位密度を算出する。

$$\ln A(L) = \gamma - \rho L^2 \frac{\pi b^2}{2} \ln\left(\frac{R_e}{L}\right) K^2 \bar{C} + P(K^2 \bar{C})^2 \quad (3)$$

ここで、 $A(L)$ はレール鋼のFe結晶から得られた各結晶面でのX線波形情報を擬フーリエ関数（ガウス関数とローレンツ関数の組合せ関数）で近似した時の実部フーリエ係数である。 L はフーリエ長さである。 b はバーガスベクトルと呼ばれる材料固有値で、レール等の鋼(bcc-Fe)の場合、0.248nmとなる。 R_e と P は転位密度に関係する定数であり、 γ は定数である。

式(3)において、フーリエ長さを変化させて最小二乗によるフィッティングを行い、右辺第二項を求め、第二項中の $\ln(L)$ に対する傾きを求めることで、実験的に転位密度 ρ を見積もることが可能となる。本研究では式(2)および(3)の結晶子サイズ α と転位密度 ρ を転がり疲れの評価指標として求めた。

3. 解析用レールの諸元および解析位置の検討

(1) 解析レールの諸元

本研究で解析対象としたレールは同一線区内（複線区間）の駅間・直線区間とし、レール削正は未実施のものである。また、レール種別は60kgレール、当該区間の通過列車の車輪形状は修正円弧踏面である。なお、上り線・下り線および左・右レールについては統一されていない。表-1に解析レールの諸元を示す。以降、各レールは目標通トンで表記する。

(2) 解析レールの試験片採取位置の検討

X線フーリエ解析を含めた材料評価は、評価できる試料の大きさに限りがあるため、レール長手方向および幅方向（まくらぎ方向）から試料を採取する位置を考慮する必要がある。これまで、レール長手方向の試料採取位置の選定は、車輪との接触が厳しいと考えられる1m凹凸の凸部分としている。また、車輪の転走面である照面が転がり疲れを受けていることから、レール幅方向（まくらぎ方向）は照面から採取した（図-5）。

レール頭頂面凹凸測定器（HTR-8：原田製作所製）を用いて、レール幅中心にてレール長手方向1m区間の凹凸測定を行った。なお、列車進行方向と凹凸測定方向は一致させた。図-6に代表として7億トンレールの凹凸測定結果を示す。また、図中の四角は各種材料解析を実施する試料の採取位置を示す。

表-1 解析レールの通過トン数

No.	解析用レールの 目標通トン数 (億トン)	採取レールの 累積通過トン数 (億トン)
1	1	1.3
2	2	2.1
3	3	2.9
4	4	3.9
5	5	4.9
6	6	5.7
7	7	7.1

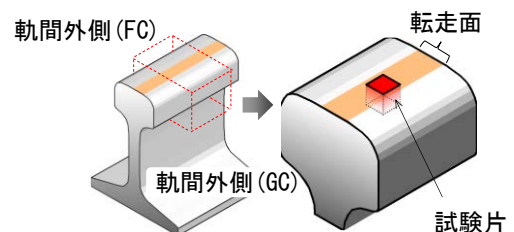


図-5 レール試験片採取位置（まくらぎ方向）

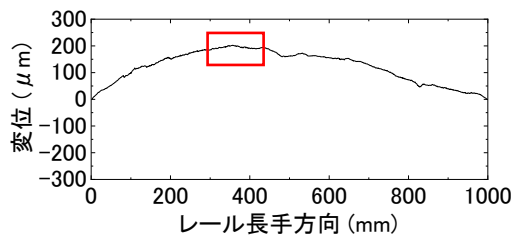


図-6 レール試験片採取位置（レール長手方向）

4. X線フーリエ解析結果と従来評価方法（硬さ・結晶方位解析）の比較

これまで、レールに形成された転がり疲れの影響層を評価する手法として、加工硬化（塑性ひずみ量）に対する硬さ変化^{14,15}、X線による集合組織および結晶方位解析(EBSD)法による結晶情報の変化¹⁶が検討されてきた。今回のX線フーリエ解析と従来評価手法との対応を確認するために、7億トンのレールについて、硬さ分布測定や、EBSD解析を実施した。

(1) X線フーリエ解析

測定X線にはCu-K α を線源とするX線発生装置（リガク社製、Smart Lab）を用いた。レールは一般的にパーライト組織（フェライト相とセメンタイト相の層状組織）であり、フェライト相はセメンタイト相と比べると硬さが低い。これまでの報告¹⁷では、フェライト層に転がり疲れによるき裂が形成する傾向がある。そこで、回折X線から得られたフェライト相の回折X線ピークを解析対象とした。得られた回折X線について、専用解析ソフトウェアによってバックグラウンド除去の後、K α 1とK α 2を分離した。K α 1とK α 2は二重ピークであるため、強度の高いK α 1を解析対象とした。そして、分離したK α 1の回折X線に対して、各回折角 θ [rad]における積分強度を測定し、2章で記載した式よりフェライト中の格子ひずみ ε を求めた。また、測定した回折面は、(110), (200), (211), (220), (310)および(222)である。なお、測定装置に起因する回折X線の幅の広がり除去するための標準サンプルとして、LaB6パウダー(SRM 660b, NIST)を用い、測定装置に起因する幅広がり除去した。試料の深さ方向の評価のために、X線測定後、エメリー紙による研磨および電解研磨を用いて所定の深さまで除去する逐次電解研磨によって測定を繰り返した。

7億トンのレールの車輪転走面である照面（GC 約3mm～35mmで車輪との接触による金属光沢）の中央付近から10×10×10mmの試験片を採取し、表層から深さ方向に電解研磨をしながら、各深さ位置において3回測定を行い、X線フーリエ解析で評価した。X線フーリエ解析から得られる結晶子サイズおよび転位密度の結果を図-7に示す。なお、エラーバーは3回測定の標準偏差を

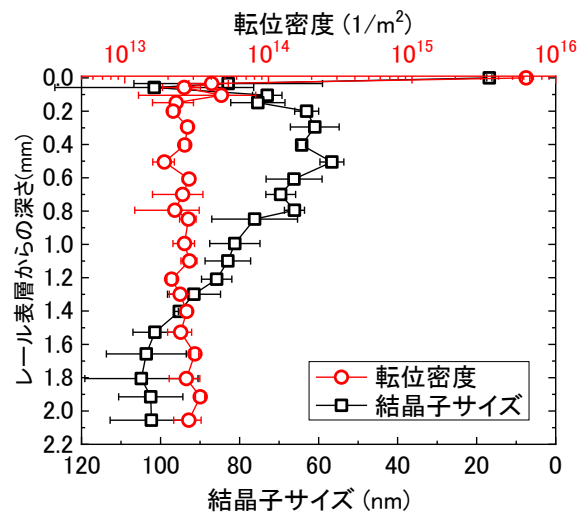


図-7 7億トンレールのX線フーリエ解析結果

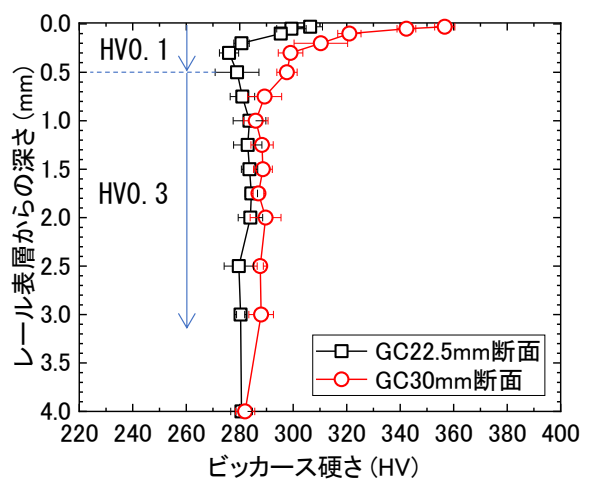


図-8 7億トンレールの断面硬さ分布測定結果

示す。ここで、結晶子サイズと転位密度はともにX線フーリエ解析で見積ることができる指標で塑性ひずみ量に関係があり、塑性ひずみが蓄積されると結晶子サイズは小さく、転位密度は大きくなると考えられる。

レール表層は結晶子サイズと転位密度はともに測定深さ中最も高い値であり、転位密度はレール鋼の二円筒試験において微小き裂が形成され则认为される転位密度の閾値¹⁸である 1×10^{15} を超えていた。結晶子サイズと転位密度の両方の値の変化が漸減し、母材レベルにまで低下したとされる深さを転がり疲れの影響深さとする、約1.5mmまで転がり疲れの影響があることが明らかとなった。

(2) 硬さ分布測定

7億トンレールの車輪転走面である照面（GC 約3mm～35mmで車輪との接触による金属光沢）のうち照面中央付近のGCから22.5mm位置および照面中央からFC寄りの30mm位置のレール幅方向断面について、マイクロビッカース硬さ試験機を用いて、レール表層から深さ方

向に分布測定を行った。試験荷重は表層からの深さ 0.5mm までは 1N、それ以降は 3N とした。保持時間は 15 秒である。各測定深さにおいて 3 回測定を実施した。

図-8 に、硬さ分布測定結果を示す。レール表層では転がり接触の影響による加工硬化のため、硬さ値が上昇しており、GC22.5mm 断面では約 310HV、GC30mm 断面では約 360HV であった。また、表層から内部にかけて GC22.5mm 断面では約 0.3mm 深さ、GC30mm 断面では 0.5～0.75mm 深さまで硬化していることがわかる。

硬さ分布測定は、転がり疲れによるひずみが蓄積した結果として表れる加工硬化を評価するのに適し、一般的かつ簡便な手法であるが、図-8 のように測定する断面・位置によって、その最大値や深さが異なることが明らかとなった。また、硬さ分布測定は、任意の位置について硬さを連続的に評価する 1 次元的な評価にとどまるため、評価可能な領域は限定的であり、適切な評価位置を選択することが困難である。レール削正深さを検討するにあたり、レールの転走面のようにレール長手方向およびまくらぎ方向に広がりを持つ場合には、評価数は多大になると考えられる。また、X 線フーリエ解析による転がり疲れの影響深さは 3 回測定のみらつきがあるものの概ね 1.5mm 深さであるに対して、硬さ分布測定で得られた加工硬化深さは最大で 0.75mm 程度であった。これは X 線フーリエ解析が結晶情報に基づいた微視的な評価が可能であるためと考えられる。

(3) 結晶方位解析

結晶方位解析は、後方散乱電子回折と走査型電子顕微鏡を組み合わせて電子線を操作しながら、菊池パターンを解析することで、ミクロな結晶方位や結晶系を測定することができる評価手法である。7 億トンレールの照面のうち GC から 19.5mm 位置および 24.5mm 位置のレール幅方向断面について、結晶方位分布測定を行った。なお、試験片は鏡面研磨後に電解研磨やコロイダルシリカ研磨によって表層の加工歪みを除去する必要があるため、上述の硬さ分布測定を実施した断面から数 mm 程度移動した断面とした。測定条件は、倍率：90 倍、測定領域：レール長手方向 1mm×レール深さ方向 2mm、測定間隔：1μm とした。

7 億トンレールの GC19.5mm 断面および GC24.5mm 断面の逆局点図(IPF), GOS マップを図-9 に示す。逆局点図とは各測定点の ND 方向（レールの高さ方向）と垂直になっている結晶面の面指数を求め、カラーキーにしたがって表示したものであり、レール高さ方向から見たときに、どの結晶面が見えているかを示すものである。また、GOS マップとは各結晶粒内のすべてのピクセル間の結晶方位差を算出し、その平均値をその結晶粒の値として示したものであり、塑性ひずみと相関がある。

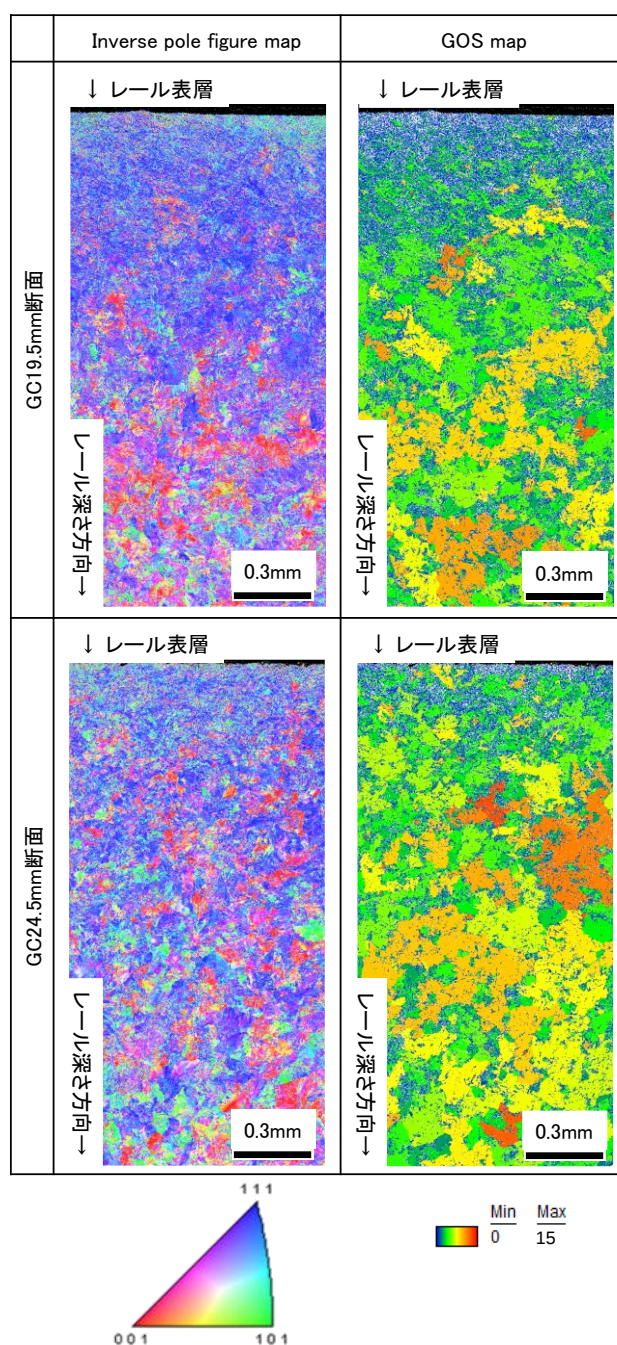


図-9 7 億トンレールの結晶方位解析結果

IPF マップでは両観察面とも、レール表層から約 1mm 深さまでは青色の部分が多く、(111)の集合組織が形成されている。これは既往の研究結果である転がり疲れの蓄積による集合組織の形成⁹⁾とも一致する内容である。また、GOS マップでは、レール表層は転がり疲れに伴って組織が微細化され、今回の測定条件では結晶粒として認識されていない部分が多い。この GOS マップをレール深さ方向に 0.1mm ごとに分割し、表層から深さ 2.0mm までの 20 観察面の GOS 値の平均を算出した結果を図-10 に示す。各断面とも最表層の GOS 平均値は上述した理由により相対的に低く、内部に進むほど増加する傾向がある。また、レール母材の平均 GOS 値は 20.57 であり、

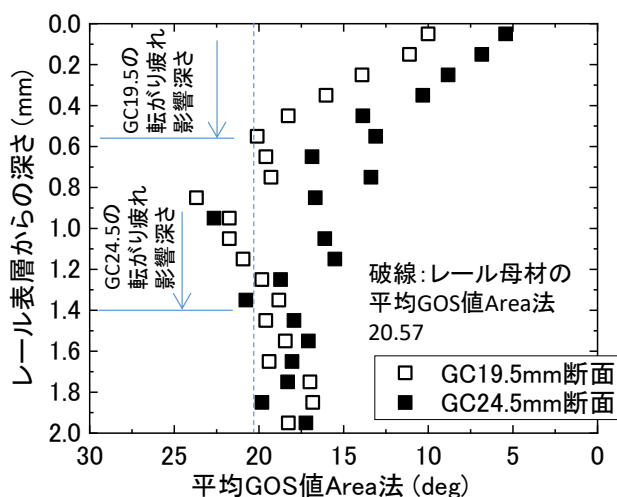


図-10 7億トンレールのGOS平均値の深さ方向分布

転がり疲れによる影響深さはGC19.5mm断面においては0.5mm～0.6mm程度であると推測される。一方GC24.5mm断面では、1.4mm程度であると推測され、概ねX線フーリエ解析との整合が確認できる。EBSDは任意の断面を評価するため、2次元的な評価と言える。そのため、レールの照面のようなレール幅方向およびレール長手方向に広がりがあり、かつ深さ方向の影響深さを評価する場合には、観察断面によってその結果は異なるという知見が得られた。

(4) 従来評価方法との比較に関する考察

硬さ分布測定および結晶方位解析による転がり疲れの評価は、定量的な値が得られるが、評価断面によってその傾向が変わることが明らかとなった。

レール削正の目的のひとつは、レールに形成された転がり疲れの影響層を除去することである。その削正量を検討するためにはレール幅方向に広がりを持つ車輪転走面についてできる限り広範に評価することが適切であると考えられる。X線フーリエ解析では、解析試料のサイズに制限を受けるが、その解析結果はX線を照射した面積中の結晶の平均的な値をとり、車輪との転走面を平均的に評価できる。そのため、X線フーリエ解析がレール削正の深さの検討に妥当な手法であると考えられる。

5. 通トン別レールのX線フーリエ解析結果

前章で述べた測定方法および測定条件で表-1の各種レールについてX線フーリエ解析を実施した。X線フーリエ解析から得られる結晶子サイズおよび転位密度の結果を図-11に示す。いずれのレールも表層において結晶子サイズと転位密度の値は測定した深さ領域のうち最も大きい値（第1ピークと呼ぶ）であり、転位密度は微小き裂が形成されると考えられる閾値¹⁹⁾である 1×10^5 を超

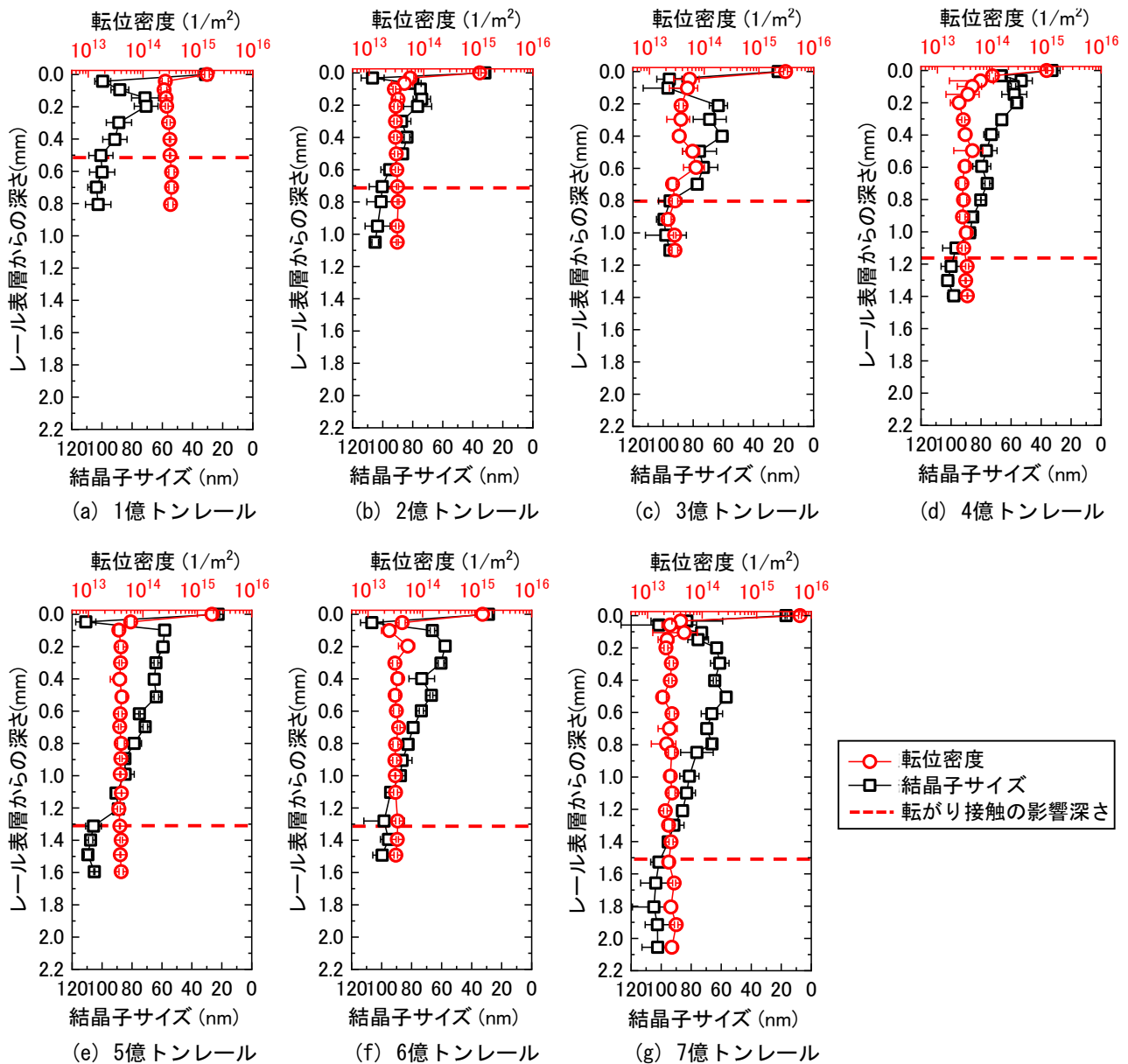
えていた。また、4億トンを除くレールの結晶子サイズは、最表層が高い値を示すが、電解研磨によって約0.05mm研磨した後の解析結果では、レール母材レベルまで値が落ち着き、その後再度値が上昇（第2ピークと呼ぶ）する傾向がみられる。これは、表面近傍と内部で作用していた主な応力が異なる可能性があり、例えば車輪とレールの粗さ接触を考慮した二次元弾性接触応力解析の結果では、表層から0.002mm程度の深さで接触応力が高くなること¹⁹⁾や、車輪／レールの接触面内において接線方向や接触力分布が形成されること²⁰⁾からレール表層ではすべりが形成されているとの報告がある。

解析対象のレールの中で最も累積通過トン数が小さいレール（1億トンレール）においては、表層から0.2mm程度の深さまでは結晶子サイズと転位密度の値は大きく変化し、転がり接触の影響が大きいことが確認された。また、転がり疲れの影響深さは0.5mm程度であった。ここでは、結晶子サイズと転位密度の両方の値の変化が漸減し、母材レベルにまで低下したと考えられる深さを転がり接触の影響深さとした（図-11中破線）。解析レールの中で最も累積通過トン数が多い7億トンレールにおいては、転がり接触の影響深さは1.5mm程度であった。

表-2に、各レールの転がり影響層深さの一覧を記す。

累積通過トン数の増加に伴い、転がり疲れの影響深さも増加する傾向にあることがわかった。なお、一般的に金属組織観察で確認することができる結晶粒径は小さいほど強さや靱性などの性質が向上する。一方、結晶子サイズは、回折に寄与する最小単位で結晶粒の中で単結晶としてみなせる部分であり、結晶粒径と同じものではないと考えられている¹⁹⁾。結晶子サイズの低減が、結晶粒微細化と同じ影響を及ぼすか、また転がり疲労損傷にどのような影響を与えるかは明らかではない。しかし、結晶子サイズの減少は車輪との繰り返し接触による転がり疲れで形成された影響層であることは確かであり、レール削正深さを検討するうえで、レール母材レベルにまで復元すること、すなわち車輪との繰り返し接触による影響層を除去することがより安全側となると考えられる。

レール削正の実務において、従来の砥石式の削正車に加えて、刃物で削り取るミリング式の削正車が普及しつつある。その特徴として、1パス当たりの削正量が1mm程度まで可能であることが挙げられる。表-2に示したように、3億トンを超えたレールの転がり疲れの影響深さは1mmよりも深い解析結果であり、そのすべて削り取することはミリング式削正においても複数パス必要となることから、ミリング式削正の利点を低減させる。一方、X線フーリエ解析で評価した二つの指標（結晶子サイズと転位密度）のうち、転位密度は最大でも0.2mm深さまでであり、結晶子サイズは0.2～0.6mm程度の深さで第2ピークをとり、その後漸減する傾向がある。ここで、結



晶子サイズの第2ピークが半減する深さ、すなわち結晶子サイズが第2ピークの値と母材レベルの中間程度の深さまでを削正で除去することで、転がり疲れの影響層の大部分が除去され则认为、ミリング式のレール削正の実務を考慮した削正量として提案する「ミリングでの推奨削正深さ」を表-2に併せて記す。

表-2 各レールの転がり影響層深さ

通トン数	表面影響層全深さ	ミリングでの推奨削正深さ
1.3億トン	0.5mm	0.3mm
2.1億トン	0.7mm	0.4mm
2.9億トン	0.8mm	0.5mm
3.9億トン	1.1mm	0.6mm
4.9億トン	1.3mm	0.8mm
5.7億トン	1.3mm	0.8mm
7.1億トン	1.5mm	1.0mm

6. まとめ

回折X線を用いたレールの転がり疲れの影響深さを評価する手法を実レールへ適用するにあたり、従来の評価手法である硬さ分布測定および結晶方位解析と比較した。また、レール削正作業の省コスト化、高効率化に寄与する取り組みの一環として、レール削正に必要な削正量の検討に資するため、レールの転がり疲れの影響層を推定した。同一線区の1～7億トンのレールについて、X線フーリエ解析を行った結果、以下のことが分かった。

- 1) 硬さ分布測定および結晶方位解析による転がり疲れの評価は、定量的な値が得られるが、評価断面によってその傾向が変わること、すなわち観察する断面で転がり疲れの影響評価深さが変わることが明らかとなった。

- 2) X線フーリエ解析では、X線を照射した面積中の結晶の平均的な値をとり、車輪との転走面を平均的に評価できる。そのため、X線フーリエ解析がレール削正の深さの検討に妥当な手法であると考えられる。
 - 3) 1～7億トンのX線フーリエ解析の結果、いずれのレールも最表層において結晶子サイズと転位密度の値はひずみの程度が大きい結果であり、レール鋼の二円筒試験において微小き裂が形成される転位密度の閾値である 1×10^{15} を超えていた。
 - 4) 各レールの転がり影響層深さは、累積通過トン数の増加に伴い、転がり接触の影響深さも増加する傾向があり、1～7億トンに対して、0.5～1.5mmであった。なお、転がり疲れの蓄積は、レールの摩耗程度によっても異なることが知られており、今後は摩耗を考慮した転がり疲れの評価が今後の課題である。
- 参考文献**
- 1) 高山宜久, 山崎久彰: 在来線レール削正車の導入と効果について, 日本鉄道施設協会誌, 第39巻, 第7号, 2001.
 - 2) Grassie, S.L.: Appropriate specification of grinding requirements for heavy haul railways, *IHHA '99 STS-conference*, 1999.
 - 3) Ishida, M., Abe, N. and Moto, T.: The effect of preventive grinding on rail surface shelling, *Quarterly Report of RTRI*, 39-3, pp.136-141, 1998.
 - 4) 大石隆明他: レール削正車によるレール削正, 新線路, 69, 4, 2015
 - 5) 今井啓貴他: ミリング式レール削正車の効率的な稼働に向けた取り組み, 新線路, 67, 3, 2013
 - 6) 佐藤幸雄: 新幹線レールのころがり接触面における塑性変形挙動, トライボロジスト, 36, 8, p.693, 1991.
 - 7) 柏谷賢治: レール頭頂面変形層における集合組織の発達について, 材料, 36, 407, p.786, 1987
 - 8) Y. Satoh and K. Iwafuchi: Effect of rail grinding on rolling contact fatigue in railway rail used in conventional line in Japan, *Wear*, 265, p.1342, 2008.
 - 9) 松井元英: 鉄道レールの転がり疲労状態把握に向けたX線フーリエ解析の適用, 日本信頼性学会誌, 38, 3, 2016
 - 10) G. K. Williamson, W. H. Hall: *Acta Metal.*, 1, 22, 1953
 - 11) 熊谷正芳他: X線回折ラインプロファイル解析による微視組織評価法, 材料, Vol.69, No.3, 2020
 - 12) B. E. Warren, B. L. Averbach: *J. Appl. Phys.*, 21, 595, 1950.
 - 13) T. Ungár, A. Borbély: *Appl. Phys. Lett.*, 69, 3173, 1996.
 - 14) 高田憲一他: 近鉄におけるレール削正作業への取り組み, 新線路, vol.57, no.8, 2003
 - 15) 柏谷賢治他: 転がり接触疲労によるレール材試験片表面下の集合組織の発達, 材料, vol.37, 1988
 - 16) 佐藤幸雄他: 結晶方位解析によるレール頭頂面の転がり接触損傷度の評価, 鉄道総研報告, Vol.18, No.10, 2004
 - 17) Gamham, J. E.: The role of deformed rail microstructure on rolling contact fatigue initiation, *Wear*, 265, pp. 1363-1372, 2008
 - 18) 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, 21, 2017
 - 19) 石田誠, 陳樺, Franklin, F.: 粗さ接触から見たシェリング予防削正効果, 日本鉄道施設協会誌, 38-2, 2000
 - 20) 林雅江他: 車輪・レール間の動的接触挙動評価, 鉄道総研報告, 第28巻, 第12号, 2014

(Received April 2, 2021)
(Accepted June 4, 2021)

RELATIONSHIP BETWEEN SURFACE AFFECTED LAYER EVALUATION DEPTH AND CUMULATIVE TONNAGE BY DIFFRACTION X-RAY ANALYSIS IN RAILWAY RAILS

Yoshikazu KANEMATSU and Motohide MATSUI

Rail grinding is carried out by many railway companies because it is effective in suppressing Squat. There are few cases in which the amount of grinding required for rails that never done of rail grinding has been examined.

The depth of the surface affected layer of rails from 100 to 700 million tonnages was evaluated using a method for evaluating the state of deformation by diffraction X-ray analysis. As a result, it was found that the depth of influence of rolling contact tends to increase to 0.5 to 1.5 mm as the cumulative passing tonnage increases. In addition, it was compared with the hardness distribution measurement results and crystal orientation analysis results, which are conventional methods for evaluating the state of rail fatigue. The conventional method is a one- or two-dimensional evaluation of the observed cross section. Therefore, it was confirmed that the result differs depending on the observed cross section when the rail has a spread in the rail width direction and the rail longitudinal direction such as the running band of the rail.