

回折 X 線を用いた表面層の分析によるレール削正量の検討

兼松 義一* 松井 元英** 上東 直孝*

Study of Rail Grinding Amount by Surface Layer Analysis Using X-ray Diffraction

Yoshikazu KANEMATSU Motohide MATSUI Naotaka UEHIGASHI

Rail grinding is so far carried out by many railway companies because of its effectiveness in suppressing squat. However, few studies have examined the amount of grinding required for rails which have never been grinded before. Hence, using a quantitative evaluation method of material state by diffraction X-ray analysis, the depth of surface layer affected by rolling contact was evaluated for rails with cumulative passing tonnage ranging from 100 to 700 million tons. As a result, it was found that the depth affected by rolling contact tends to increase to 0.5 to 1.5 mm with increase in cumulative passing tonnage.

キーワード：レール，転がり接触，X線フーリエ解析，硬さ試験，結晶方位解析

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、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に起因した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加工硬化層（以降、転がり接触疲労層という）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⁾。国内においては、転がり接触疲労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⁾。

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⁾。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、レール表面の転がり接触疲労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にあたっては、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。

これまでレール表面の転がり接触疲労層の評価の手段として、金属組織の顕微鏡観察や硬さ分布測定⁶⁾、X線回折を用いた集合組織の測定⁷⁾や結晶方位解析⁸⁾等が提案されてきた。しかし、上述の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状況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線のラインプロファイル解析（以降、X線フー

リエ解析と呼ぶ）を適用した転がり接触による塑性変形程度の定量化について検討⁹⁾しており、X線フーリエ解析から算出される二つの指標（転位密度と結晶子サイズ）を用いたレールの転がり接触疲労層の評価への適応の可能性について報告した⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。

X線フーリエ解析をレール削正量の検討に資するために、従来の評価手法との相関性を確認する必要がある。そこで、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明らかにした。また、これまでに削正を実施していない累積通過トン数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、転がり接触疲労層深さを評価¹²⁾し、各レールのレール削正量を検討した結果を報告する。

2. レールの転がり接触とX線フーリエ解析

2.1 転がり接触と金属組織の変化

図1には敷設された列車進行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内に転位が発生し塑性ひずみが蓄積される。転位は再配列すると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。

2.2 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

* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

** 材料技術研究部

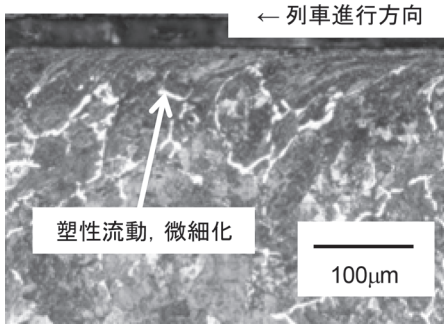


図1 転がり接触を受けたレールの金属組織の例

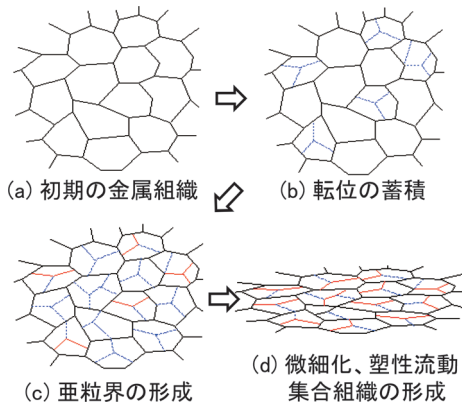


図2 転がり接触による金属組織の模式的变化

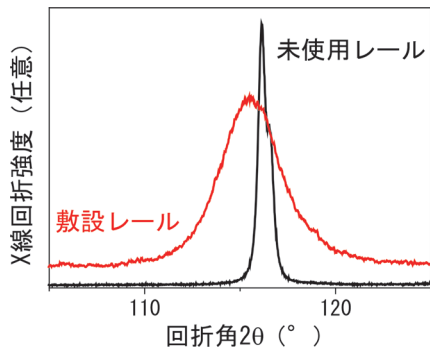


図3 未使用レールと敷設レールの回折X線の形状変化の例

な要因によってその高さ、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。転がり接触を受け、塑性変形することで、図3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線ライン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線の広がりに対する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¹³⁾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¹⁴⁾。

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¹⁵⁾¹⁶⁾。これらは回折X線に現れる拡がりの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。

2.3 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 a_0 を得る。

$$\Delta K = a_0 + \varepsilon K \quad (1)$$

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、最小二乗法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. Ungár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。

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

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 a_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(2)を満たすような、 \bar{C} 因子、 a 、 β および O を決定する。次に、実験的に転位密度を見積ることが可能な式(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。

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

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 はパ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。 Re 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法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)および式(3)の結晶子サイズ a と転位密度 ρ を転がり接触疲労層の評価指標として求めた。

3. 解析用レールの諸元

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。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数で表記する。

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。レール長手方向の試料採取位置の選定は、解析レールの長さ約1.2mのうち、車輪との接触条件が厳しいと考えられる箇所を選定することとした。そこで、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い、その結果から凹凸の凸部分から試料を採取した。また、車輪の転走面である照面が転がり接触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。

4. X線フーリエ解析結果と従来評価方法(硬さ分布・結晶方位解析)の比較

これまで、転がり接触疲労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⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾、X線による集合組織および結晶方位解析による結晶情報の変

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	採取レールの累積通過トン数
1	1億トン	1.3億トン
2	2億トン	2.1億トン
3	3億トン	2.9億トン
4	4億トン	3.9億トン
5	5億トン	4.9億トン
6	6億トン	5.7億トン
7	7億トン	7.1億トン

化⁽¹⁹⁾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、7億トンレールについて、硬さ測定や結晶方位解析を実施した。

4.1 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ト相の層状組織)であり、フェライト相はセメント相と比べると硬さが低い。これまでの報告⁽²⁰⁾では、フェライト層に転がり疲れによるき裂が形成される傾向がある。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線の幅の広がりを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を除去した。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平均値の結果を図4に示す。ここで、結晶子サイズと転位密度は

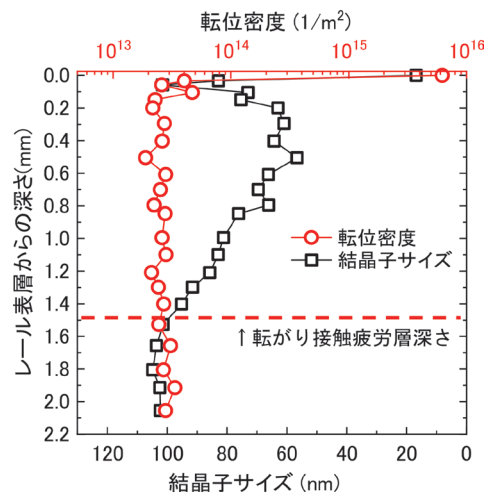


図4 7億トンレールのX線フーリエ解析結果

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。

レール表層の転位密度は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ると考えられる転位密度の閾値¹¹⁾である 1×10^{15} を超えていた。また、結晶子サイズはレール表層が最も小さい値であった。算出された両方の指標の変化が漸減し、母材レベルまで低下した深さを転がり接触疲労層深さとする、約1.5mmまで影響があることが明らかとなった。この結果はX線を照射した面積中（レール幅方向約10mm×レール長手方向約3mm）の平均的な値である。

4.2 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30.0mm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5に、硬さ測定結果の平均値の分布を示す。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、GC30.0mm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0.2～0.3mm深さ、GC30.0mm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、転がり接触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5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

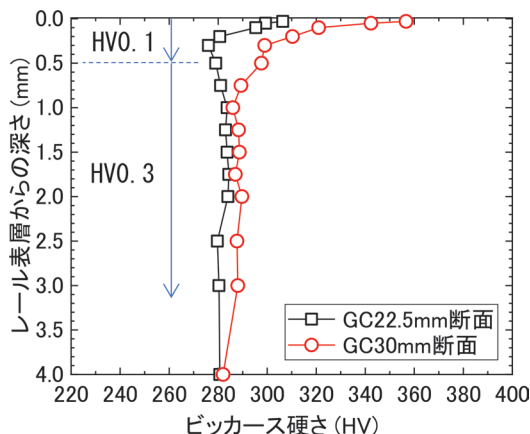


図5 7億トンレールの断面硬さ分布測定結果

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。

4.3 結晶方位解析

結晶方位解析は、走査型電子顕微鏡の後方散乱電子回折パターンを解析することで、微視的な結晶方位や結晶系を測定することができる手法である。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、結晶方位解析を行った。なお、試験片は鏡面研磨後に電解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、4.2節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：1 μ m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）を図6に示す。逆局点図とは各測定点のND方向（本測定ではレールの高さ方向）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。

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と判断した。これは既往研究¹⁹⁾と一致する結果である。各断面とも最表層は転がり接触によって結晶粒が微細化しており、結晶粒が母材レベルに戻る傾向がある。結晶方位解析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

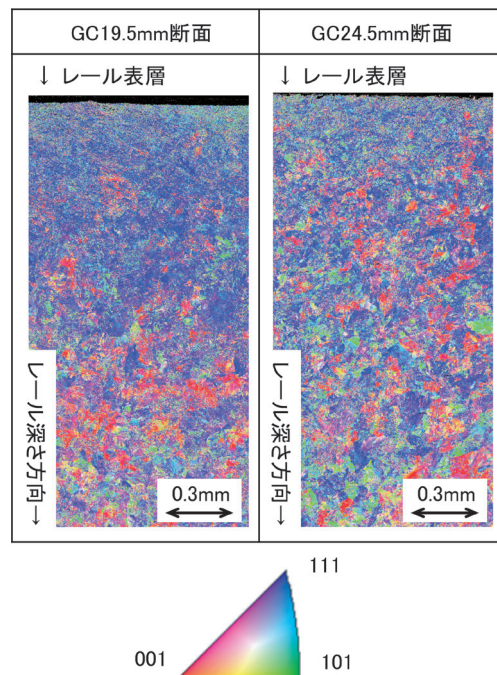


図6 7億トンレールの結晶方位解析結果

結果は異なることがわかる。

4.4 従来評価方法との比較に関する考察

4.2節の硬さ分布測定および4.3節の結晶方位解析による転がり接触疲労層の評価は、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。

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接触疲労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

5.1 X線フーリエ解析結果

表1の各種レールについてそれぞれ3回ずつ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解析結果の平均値を図7に示す。いずれのレールも表層において結晶子サイズは最も小さく、転位密度の値は測定した深さ領域のうち最も大きい値となった。表層における結晶子サイズや転位密度の値は、レールの使用履歴に依存すると思われるが、今回対象とした解析レールの使用履歴の条件において、転位密度は微小き裂が形成されると考えられる閾値¹¹⁾である 1×10^{15} を超えていた。

算出された両方の指標の変化が漸減し、母材レベルまで低下した深さ（転がり接触疲労層深さ）を図7中の破線で示す。また、図7中に、各レールの転がり接触疲労層深さの一覧を記す。累積通過トン数の増加に伴い、転がり接触疲労層深さも増加する傾向にあることが分かった。

5.2 レール削正量の検討

今回のX線フーリエ解析結果では、転がり接触疲労層の深さは、1億トンレールで0.5mm、7億トンレールでは1.5mmであった。レール削正の目的である転がり接触疲労層を除去することを考慮し、母材レベルまで復

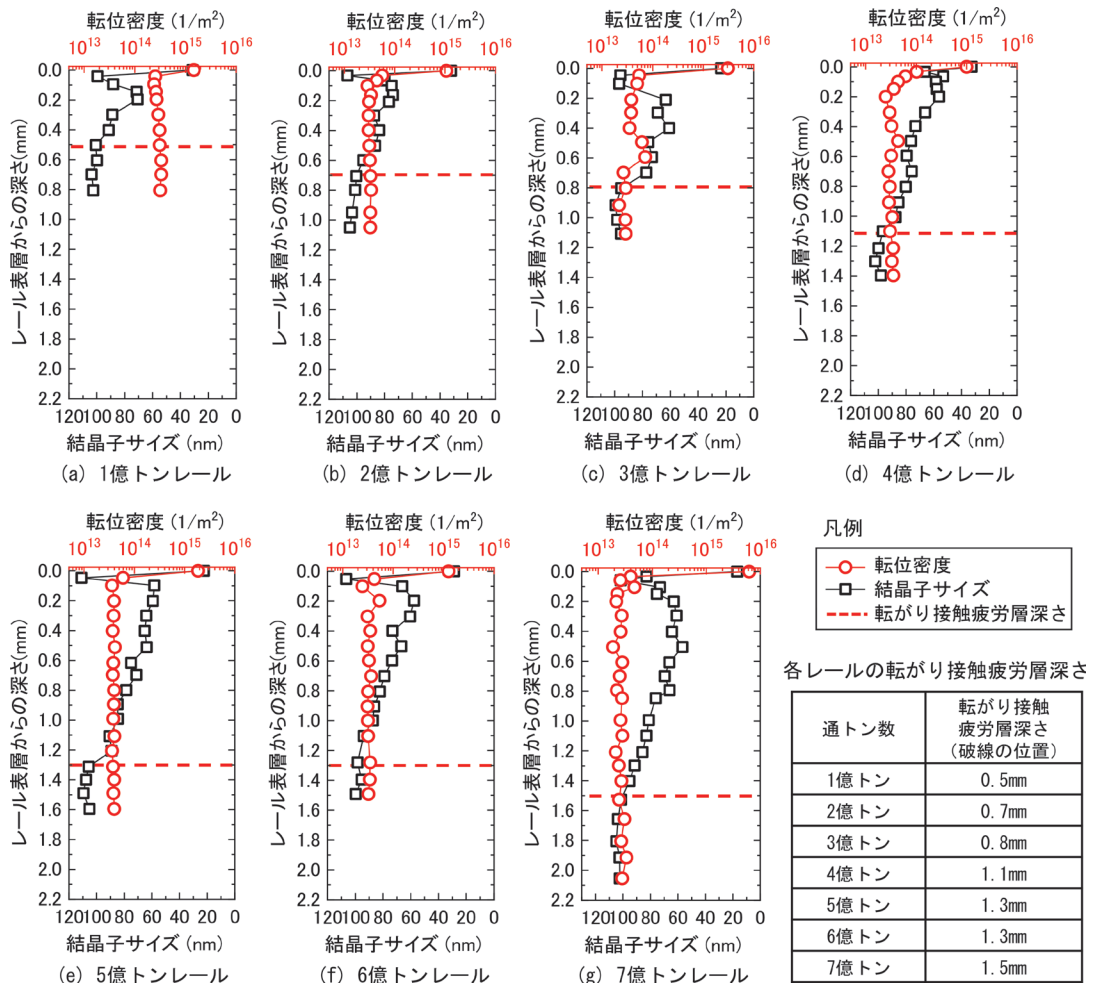


図7 各種レールのX線フーリエ解析結果

元する場合には、たとえばミリング式のレール削正車を活用することや、削正量を増やした削正パターンでのレール削正を実施することが必要になると考えられる。一方で、図7で示したように微小なき裂が形成される程度の材料変化（転位密度が 1×10^{15} 以上）が生じている深さは、どの通過トン数のレールにおいても0.1mm以内であり、一般的に使用されている削正量でも、最も除去すべき領域が除去できると考えられ、削正の効果があると考えられる。そのため、削正する線区の通過トン数や削正車の運用・削正コスト等に応じて削正量を検討することが必要となる。なお、文献21では削正後0.5億トン経過時のレールのX線フーリエ解析結果に基づき、効率的な削正間隔や削正量を報告している。これらの解析結果を蓄積し、より効率的なレール削正を検討する必要がある。

6. まとめ

回折X線を用いたレールの転がり接触疲労層の程度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、レール削正に必要な削正量の検討に資するため、レールの転がり接触疲労層深さを推定した。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接触疲労層の評価は、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接触疲労層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導入されたひずみの程度が大きいことを示していた。今回解析対象としたレールの使用履歴に依存すると思われるが、レール鋼の二円筒試験において微小な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 各レールの転がり接触疲労層深さは、通過トン数の増加に伴い、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。

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 shellings," Quarterly Report of RTRI, 39-3, pp.136-141, 1998.
 - 4) 大石隆明, 石川智志: 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, 今西進也, 辰己新太郎: ミリング式レール削正車の効率的な稼働に向けた取組み, 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) Motohide Matsui, Yuji Kamiya, "Evaluation of material deterioration of rails subjected to rolling contact fatigue using x-ray diffraction," Wear, vol.304, Issues 1-2, 2013.
 - 11) Motohide Matsui, Yoshikazu Kanematsu, Hiraku Tanimoto, "Application of X-ray Fourier Analysis to quantification of cumulative RCF in rail," 10 th International Conference on Contact Mechanics proceedings, 2015.
 - 12) 兼松義一, 松井元英: 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, 鉄道工学シンポジウム論文集, 25, 2021
 - 13) G.K. Williamson, W.H. Hall, Acta Metal., 1, 22, 1953
 - 14) 熊谷正芳, 横山亮一: 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
 - 15) B.E. Warren, B.L. Averbach, J. Appl. Phys., 21, 595, 1950.
 - 16) T. Ungár, A. Borbély, Appl. Phys. Lett., 69, 3173, 1996.
 - 17) 高田憲一, 仲尾浩: 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
 - 18) 柏谷賢治, 井上靖雄, 佐藤幸雄: 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
 - 19) 佐藤幸雄, 岩淵研吾: 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
 - 20) Garnham, J.E, "The role of deformed rail microstructure on rolling contact fatigue initiation," Wear, 265, pp.1363-1372, 2008.
 - 21) 松井元英, 兼松義一, 辻江正裕: 経年したレールの内部を診る, RRR, Vol.76, No.2, 2019