

X線フーリエ解析によるレール転がり疲労層評価

材料技術研究部 摩擦材料研究室

主任研究員 松井 元英

1. はじめに

レールと車輪が繰り返し転がり接触することで形成発達する転がり疲労層は、シェリング、ゲージコーナキ裂、きしみ割れやはく離損傷をレールに顕在化させ、場合によってはレール折損を誘発する。そのため、これらを抑制することは、列車運行の安定性や安全性を向上させるだけでなく、レールの使用寿命を延伸させ、メンテナンスコストの低減に寄与すると考えられる。

レール削正車によるレール削正はレール損傷を抑制する一つ的手段として利用され、転がり疲労層の除去に大きな役割を果たしてきた。しかし、削正量や頻度について一定の基準はあるものの、その効率的な運用に貢献するには保有する削正車数や削正量、頻度、延長や方式等を加味した削正手法を考慮する必要があると考えられる。また、将来的に増加が見込まれる経年レールのメンテナンスにおいて新たにレール削正を実施する場合、すでに形成された転がり疲労層をどのように除去していくかを検討する必要がある。

レール表層に形成される転がり疲労層を数値解析的、もしくは、実験的に評価する取り組みは国内外で実施されてきた^{1),2)}。レール損傷を効果的に抑制していくには、転がり疲労層の形成過程を定量的に把握することが重要である。そこで、レール表層部の転がり疲労層に対して、金属組織の塑性変形状態の変化に着目し、この塑性変形状態を評価・解析することを目的とした。手法として、X線フーリエ解析を検討し、塑性変形の程度を表すX線結晶粒径と転位密度（塑性ひずみ量の尺度）を評価した。また、X線フーリエ解析を転がり疲労に適用するために検討したX線回折測定・解析方法を敷設レール等に適用し、その比較を通して適用可能性を調べた。

2. X線結晶粒径および転位密度

図1に示すように、X線結晶粒径とはX線回折測定から見積もられる結晶粒サイズを言い、金属組織観察等から見積もられる結晶粒中で単結晶と見なせるような大きさの集まりに相当する。また、転位密度とは結晶配列の乱れの程度を意味し、結晶粒が塑性変形した時に蓄積される塑性ひずみ量と深い相関性がある。図2に実際に転がり疲労を受けたレール鋼から得られたX線回折ピークの変化を示す。転がり疲労を受け、塑性変形することで、X線回折ピークの位置がシフトし、幅広になっていることが分かる。X線結晶粒径の減少および転位密度の増加は、X線回折ピークの幅を広げ、ピーク位置に影響を及ぼす。逆に、回折ピークの幅、形状や位置等を測定することで、X線結晶粒径や転位密度の大きさを知ることができる。

3. X線フーリエ解析

X線フーリエ解析とは、X線回折測定で得られる各結晶格子面での波形情報を利用することで、金属組織が転がり疲労による塑性変形を起こした時の金属組織変化を定量評価するものである。この波形情報を定量評価する解析手法はこれまでいろいろと提案されてきたが、レール鋼に含ま

れる鉄(Fe)等には結晶軸方向に依存した変形異方性が存在する。この変形異方性がX線回折による詳細な解析を困難にしてきた。しかし、この変形異方性を考慮したX線フーリエ解析をT.Ungar らが1990年代に提唱し、Fe等の変形異方性を有する構造材料に適用され始めた³⁾。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X線結晶粒径の初期値の逆数 α_0 を得る。

$$\Delta K = \alpha_0 + \varepsilon K \quad (1)$$

ここで、 $K=2\sin\theta/\lambda$ であり、X線回折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線の波長となる。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、X線結晶粒径と塑性ひずみ ε を得る。しかし、前述したようにFeに存在する変形異方性が、式(1)のみによる詳細な解析を困難にしてきた。そこで、T.Ungarらは変形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³⁾。

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

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、変形異方性を考慮するために導入された。この因子はX線回折の波形情報から実験的に得る場合と理論値から求める場合とがあり、塑性変形状態に依存する。そのため、転がり疲労層の各測定深さ位置での塑性変形状態を考慮して、式(1)で得られた α_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、適切な $\bar{C}$ 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 はバーガースベクトルと呼ばれる材料固有値で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、

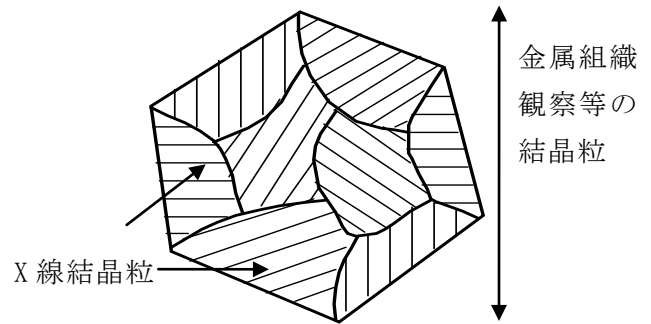


図1 X線結晶粒と金属組織観察での結晶粒の違い

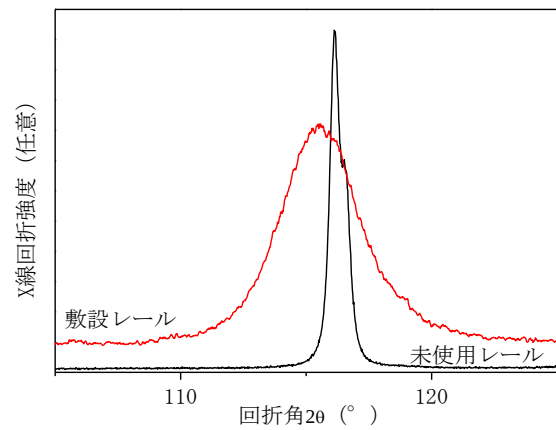


図2 転がり疲労がX線回折ピークに及ぼす影響

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 (3) の X 線結晶粒径 α と転位密度 ρ の転がり疲労層中での変化を調べた。

4. 実験方法

直線に敷設されていた普通レール頭部 (A: 累積 5000 万通トン, B: 累積 5 億通トン) から X 線回折測定用の供試体を切り出した。敷設レールから切り出した供試体については表面が照面を含むように 10mm 角程度の大きさとした。切り出した供試体に対して、X 線回折測定を以下のように行った。照面を含む表面から X 線回折測定を開始し、深さ方向に電解研磨後 X 線回折測定を行うことを繰り返した。得られたそれぞれの X 線回折の波形情報を X 線フーリエ解析することで、各深さ位置での X 線結晶粒径と転位密度を見積もった。X 線回折測定の入射 X 線源には銅 (Cu) を用いた。この場合、レール鋼のフェライト相で X 線回折測定が可能な結晶面は (110), (100), (211), (220), (310) と (111) の 6 個であり、これら 6 結晶面に対して X 線回折測定を行い、波形情報を得た。測定条件は励起電圧を 50 kV, 200mA とし、回折ステップを 0.02° で取得時間を各 10 秒とした。

5. 結果および考察

敷設レール A と B の照面中央位置でのレール幅方向断面の光学顕微鏡による金属組織を図 3(a) と (b) に示す。敷設レール A では車輪との転がり接触部表面近傍に深さ $40\mu\text{m}$ 程度の金属組織フローが確認された。金属組織フロー下部の金属組織は通常のレール鋼の金属組織の様相を呈しており、下部金属組織と比較すると、金属組織フロー中では転がり疲労による加工変質が進み、通常のレール鋼の結晶粒が細かく分断されて微細になっていた。金属組織フローは車輪との接触面に作用する接線力の影響によると考えられる。一方、敷設レール B では車輪との転がり接触部表面近傍に接線力の影響によると考えられる白色層が形成され、その下部に $400\mu\text{m}$ 程度にわたって金属組織フローが確認された。さらに、その下部の金属組織を敷設レール A の金属組織フロー下部の金属組織と比較すると、金属組織がより不明瞭となり、累積通トン増加やレール／車輪接触状態の変化等に伴う転がり疲労の影響が定性的に推測される。このような金属組織変化を評価する場合、硬さ測定が実施されることがある。しかし、敷設レール A のように表面極近傍 (深さ $50\mu\text{m}$ 以内) での急激な金属組織変化を硬さで十分に評価することは困難である。なお、敷設レール A と B にはシェリングやはく離損傷等は視認されなかった。これまでに報告⁴⁾によれば、転がり疲労き裂はレール鋼金属組織に含まれるフェライト相に発生する傾向があるため、選択的にフェライト相の転がり疲労状態を定

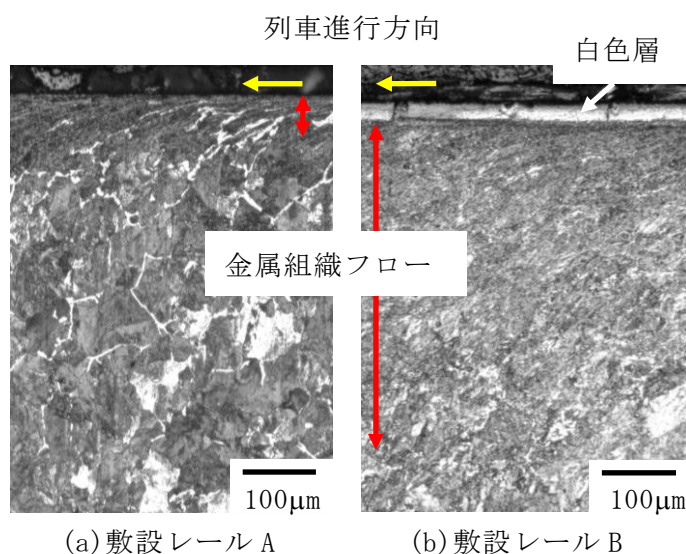


図 3 敷設レール A と B の照面中央位置でのレール幅方向断面の金属組織

量評価可能な X 線回折は有効な手段と考えられる。そこで、金属組織の転がり疲労による塑性変形状態を定量評価できるように X 線フーリエ解析を検討した。式(1)および(2)による解析を行い、X 線結晶粒径と転位コントラスト因子 $\bar{C}$ を見積もった後、式(3)の右辺第二項から転位密度を算出した。図 4 に電解研磨を用いて各深さ位置での各結晶面における X 線回折の波形情報をもとに X 線フーリエ解析を実施して、得られた X 線結晶粒径と転位密度分布を示す。転がり疲労による加工変質層が形成されると X 線結晶粒径が減少し、転位密度が増加する。そのため、

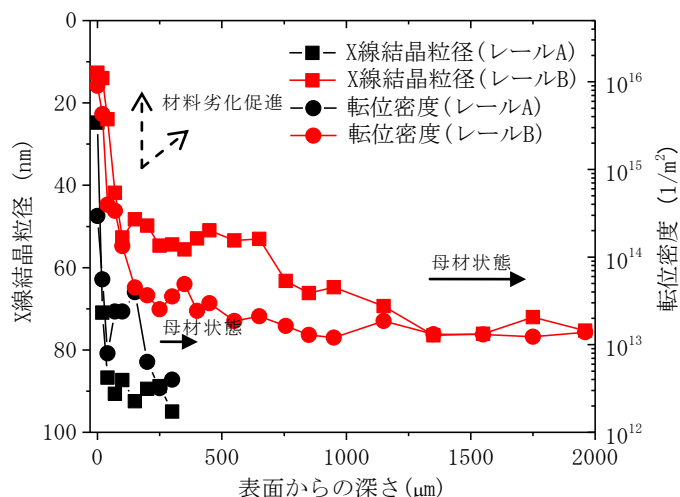


図 4 X 線フーリエ解析による敷設レール A と B の X 線結晶粒径と転位密度の分布

理解が容易となるように、左縦軸を反転させ図中の上部に結果が位置するほど転がり疲労の影響が大きくなるように図示している。敷設レール A と B を比較すると、図 3 (b) に示す金属組織観察で白色層や大きな金属組織フローが観察された敷設レール B の方は、X 線結晶粒径が小さく、転位密度が大きくなる傾向が確認され、表面近傍でレール／車輪の転がり接触の影響を大きく受けていた。また、累積通トンの増加に伴い、転がり疲労の影響がより深部へ及んでいた。

6. まとめ

累積通トンが異なる敷設レールに形成された転がり疲労層を X 線フーリエ解析で評価した結果、転がり疲労を受けた金属組織の変化に対応して、得られた X 線結晶粒径と転位密度の分布は変化した。特に評価困難であった転がり疲労層表面近傍の急激な転がり疲労状態の変化を評価可能であり、累積通トンの増大に伴い、転がり疲労層の塑性変形程度が上昇していた。このことから転がり疲労層の塑性変形状態を定量的な指標で持って比較可能になると期待される。

参考文献

- 1) 井上靖雄, 佐藤幸雄, 柏谷賢治: 集合組織の発達によるレール鋼の転がり接触疲労損傷の評価, 鉄道総研報告, Vol. 4, No. 4, pp. 52-57, 1990
- 2) Ekberg, A., Akesson, B., and Kabo, E. : Wheel/rail rolling contact fatigue-probe, predict, prevent, Proceedings of 9th International Conference - Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Chengdu, China, pp. 29-41, 2012.
- 3) Ungar, T., and Borbely, A. : The effect of dislocation contrast on x-ray line broadening: a new approach to line profile analysis, Applied Physics Letters, 69, pp. 3173-3175, 1996.
- 4) Garnham, J. E., and Davis, C. L. : The role of deformed rail microstructure on rolling contact fatigue initiation, Wear, 265, pp. 1363-1372, 2008.