

X線フーリエ解析法を用いたレール転がり疲労層評価

松井 元英* 兼松 義一*
 神谷 祐次** 松本 直紀***

X-ray Fourier Analysis on Rolling Contact Fatigue Layer Formed in Rail

Motohide MATSUI Yoshikazu KANEMATSU
 Yuji KAMIYA Naoki MATSUMOTO

Crystallite size and dislocation density in RCF (rolling contact fatigue) affected layers have been identified using x-ray Fourier analyses for the serviced rails. The evaluation of crystallite size and dislocation density is based on the modified Williamson-Hall and Warren-Averbach models. This evaluation enables to provide a quantification of the microstructural evolution in the RCF layer with the increase of accumulated loading as well as an identification of the most deteriorated locations in the RCF layer. In summary, the surface layer experiences the highest deterioration in all evaluated cases. Furthermore, the accumulation of loading (in terms of MGT – Million Gross Tonnes) increases the depth of the surface RCF layer.

キーワード：レール，転がり疲労，X線回折，X線結晶粒径，転位密度

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ばさせ、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と考えられる。

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)~4)}。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。これまでの実験的な取り組みとして、金属組織観察をはじめ、硬さ、X線集合組織や電子線回折測定等から、転がり疲労層の評価が行われてきた。しかし、それぞれの測定結果を有機的に関連付ける適切な統一の定量尺度がなかった。そのため、転がり疲労を受けた表層部全体を同一の測定手法および評価基準で定量的に評価し、比較できることが望ましいと考え、より適切な評価・解析手法を検討してきた。

本研究では、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、この塑性変形状態の変化を評価・解析することを目的とした。そこで、これまでのX線回折手法を見直し、新たにX線フーリエ解析を検討した。X線フーリエ解析では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）の定量評価が可能である。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に形成された転がり疲労層に適用し、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を言い、X線回折測定から見積もられる結

* 材料技術研究部 摩擦材料研究室
 ** 材料技術研究部 摩擦材料研究室（現 鉄道機器株式会社）
 *** 材料技術研究部 摩擦材料研究室（現 関東分岐器株式会社）

特集：軌道技術

晶粒サイズに相当する。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 (a) - (c) に X 線回折ピークに及ぼすひずみの影響を模式的に示す。無ひずみ状態では鋭い X 線回折ピークが得られるが、材料が変形するとその状態に対応して X 線回折ピークに変化が現れる。また、図3 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、図2 (c) で示すように 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、回折ピークの幅や位置を測定することで、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. 転がり疲労による金属組織変化

図4 (a) - (c) に転がり疲労を受けた時の金属組織の変化を模式的に示す。初期の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として構成

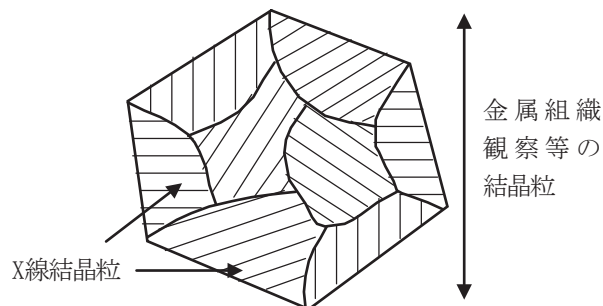


図1 X線結晶粒と金属組織観察での結晶粒の違い

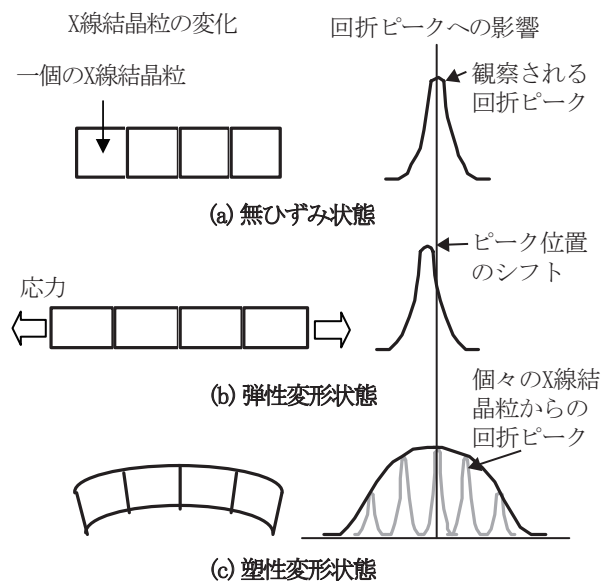


図2 X線回折ピークに及ぼすひずみの影響

されている。これが転がり疲労を受けると初期の結晶粒中や結晶粒界 (図4 (a) 実線部) に塑性ひずみ (転位) が蓄積される (図4 (b) 破線部)。これが継続されると蓄積した転位は新たな結晶粒界 (図4 (b) 太線部) を形成し、金属組織が微細化しながら変化していく。最終的に転がり疲労を受けた金属組織には、転がり疲労の履歴に対応した微細化、金属組織フローや集合組織等が形成される (図4 (c))。この一連の変化を定量的に評価できるようにすることが転がり疲労メカニズム解明に繋がると期待される。

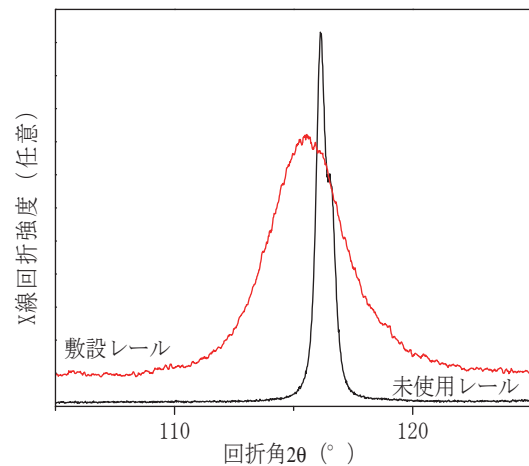


図3 転がり疲労が X 線回折ピークに及ぼす影響

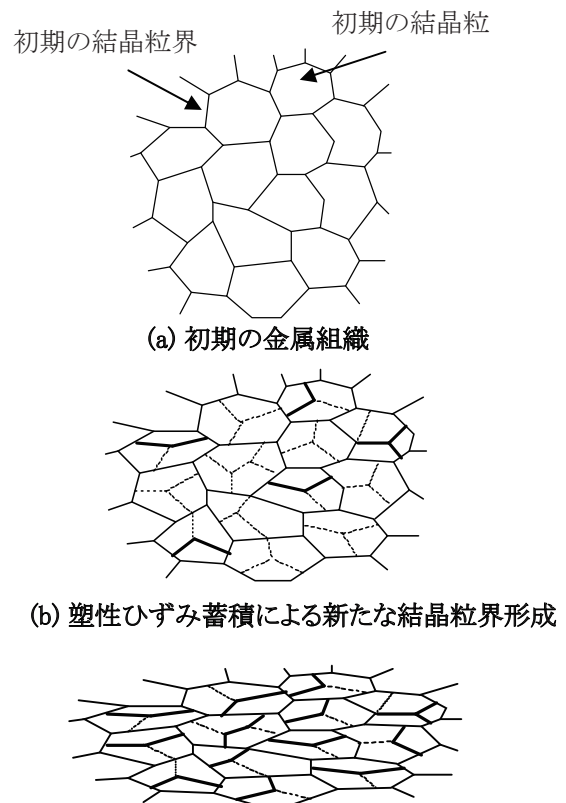


図4 転がり疲労を受けた時の金属組織変化イメージ

4. 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^{5)~8)}。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⁹⁾。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^{5) 6)}。

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

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。

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

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 はフーリエ長さで整数をとる。 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_g 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。

5. 実験方法

直線に敷設されていた普通レール頭部からX線回折測定用の供試体を切り出した。図5に供試体採取位置を示す。敷設レールから切り出した供試体については表面が照り面を含むように10mm角程度の大きさとした。表1に今回X線フーリエ解析に用いた敷設レールの諸元を示す。

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。図5に示すように照り面を含む表面から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。入射X線源にはCuの他、クロム(Cr)やモリブデン(Mo)等が室内試験で用いられる場合が多いが、図6に示すようにレール鋼に対してX線回折測定する場合CuのX線侵入深さは一番浅くなる。X線侵入深さとは入射X線が材料内に入り込む程度を表し、侵入したX線の領域全体の平均情報が測定結果として得られる。転がり疲労層は表面近傍で大きな変化を有することが金属組織観察等から定性的に判断できるため、X線侵入深さが小さい方がこの変化をより定量的に捉えられると考えられる。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

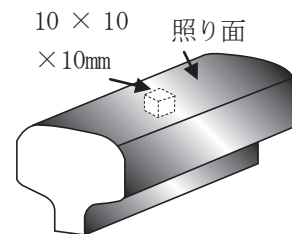


図5 X線回折測定用の供試体採取位置

表1 X線フーリエ解析に用いた供試体の諸元

供試体	諸元
敷設レール A	直線, 累積通トン 50MGT
敷設レール B	直線, 累積通トン 500MGT

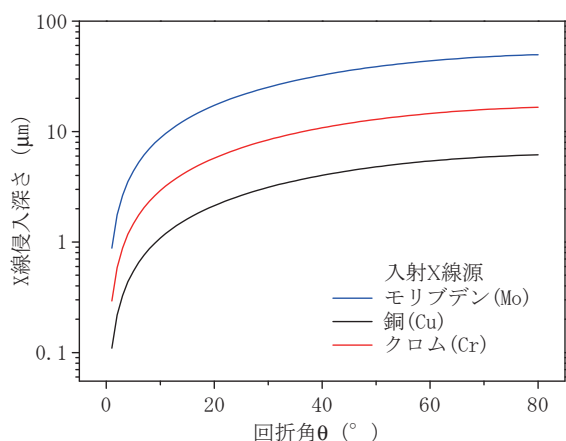


図6 X線理論式から見積もられるレール鋼に対するX線侵入深さ

を50kV, 200mAとし、回折ステップを0.02°で取得時間を各10秒とした。

6. 結果と考察

表1の敷設レールAとBの照り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7(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40μm弱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。前述したように金属組織の微細化は車輪との繰り返し転がり接触で、塑性ひずみ(転位)が導入され、蓄積されていくことで初期の結晶粒内部に新たに結晶粒界が形成されることで生じると考えられる。また、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思われる。一方、敷設レールBでは

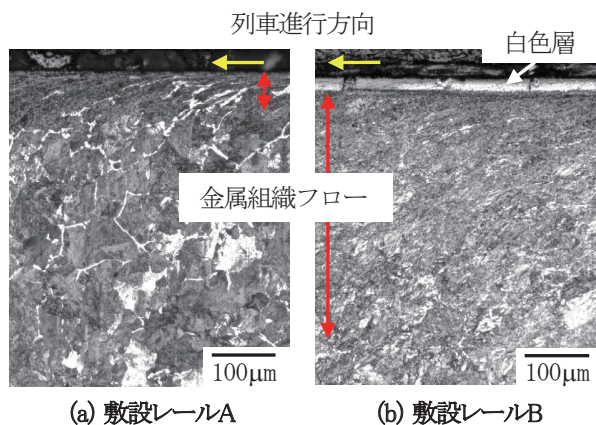


図7 敷設レールAとBの照り面中央位置でのレール幅方向断面の金属組織

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思われる白色層が形成され、その下部に400μm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50μm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。

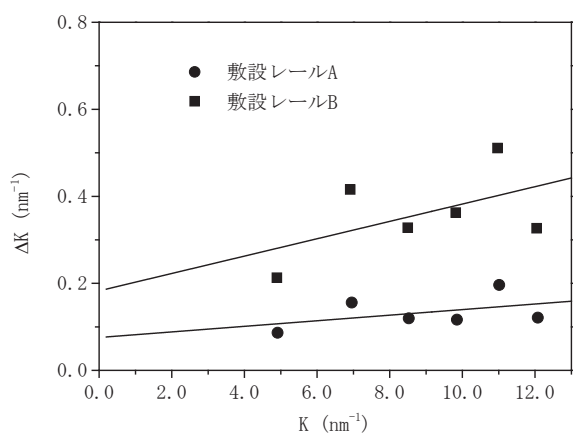
これまでに報告された国外の論文¹⁰⁾によれば、転がり疲労き裂はレール鋼金属組織に含まれるフェライト相に発生する傾向があるため、選択的にフェライト相の転がり疲労状態を定量評価可能なX線回折は有効な手段と考えられる。そこで、これまで転がり疲労状態評価に頻繁に行われてきたX線回折手法を改良し、金属組織の転がり疲労による塑性変形状態を定量評価できるようにX線フーリエ解析を検討した。

図8(a)と(b)に敷設レールAとBの表面で得られた各6結晶面のX線回折測定結果を式(1)および(2)で解析した結果を示す。式(2)の転位コントラスト因子 \bar{C} を導入した二次関数による解析の方が各結晶面における変形異方性によるばらつきを低減した解析が可能になると考えられる。各図中のプロットはX線回折測定したフェライト相の結晶面である(110), (100), (211), (220), (310)と(111)に対応する。また、図8(b)におけるフィッティング曲線のX軸における切片の逆数がX線結晶粒径を与える。X線結晶粒径はX線回折ピークに影響を与え、2章でも述べたように、X線結晶粒径が小さくなると得られる回折ピークの幅は大きくなる。X線回折による各結晶面での波形情報をもとに、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)による解析で転位密度を算出した。図9(a)と(b)に式(3)による解析で得られた右辺第二項を $Y(L)$ とし、式(4)のように整理した時の $Y(L)/L^2$ と $\ln L$ の関係を示す。

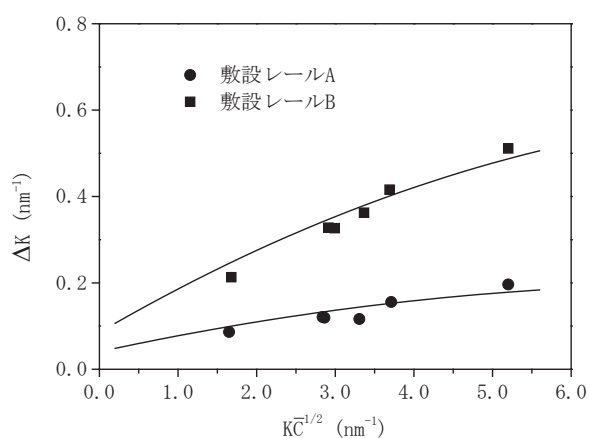
$$\frac{Y(L)}{L^2} = \frac{\rho\pi b^2}{2}(\ln R_e - \ln L) \quad (4)$$

L の範囲を適切に選択することで直線関係が得られ、その傾きから転位密度を算出できる。図9(b)に示すように表層に白色層を形成していた敷設レールBでは、その傾きの絶対値が敷設レールAと比較して大きくなっていた。

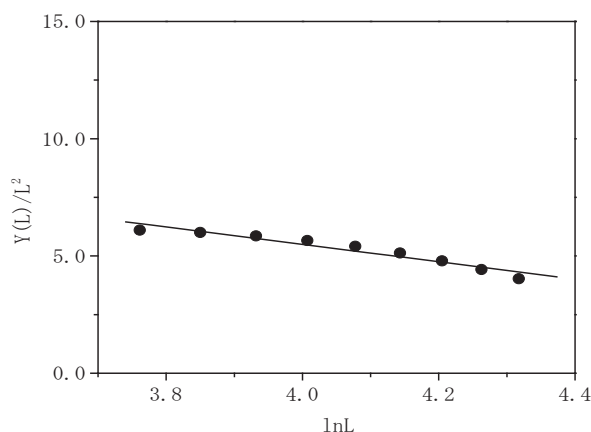
これは白色層が塑性ひずみ(転位)を多く含むマルテンサイト相から構成されていることによる。



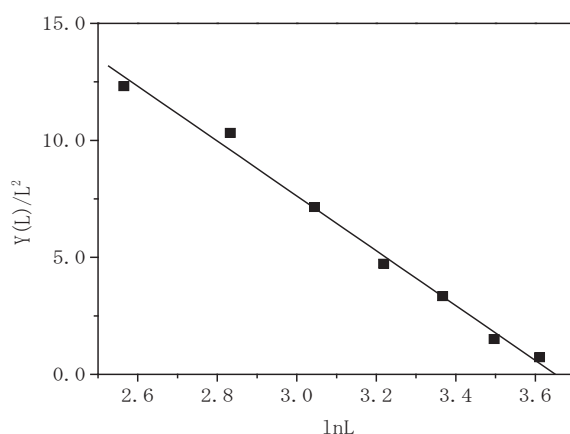
(a) 式(1)による解析



(b) 式(2)による解析



(a) 敷設レールA



(b) 敷設レールB

図8 敷設レールAとBの表面での式(1)と(2)による解析

図9 敷設レールAとBの表面の式(3)と(4)による解析

図10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、得られたX線結晶粒径と転位密度分布を示す。前述したように、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、理解が容易となるように、左Y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7(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。全体的な傾向として、敷設レールAとBともに表面から内部に向かって転がり疲労の影響が小さくなっていったものの、転がり疲労による影響で敷設レールAの表面から深さ50~250 μm 程度の範囲で転位密度の増加が認められた。一方、敷設レールBの内部では、X線結晶粒径と転位

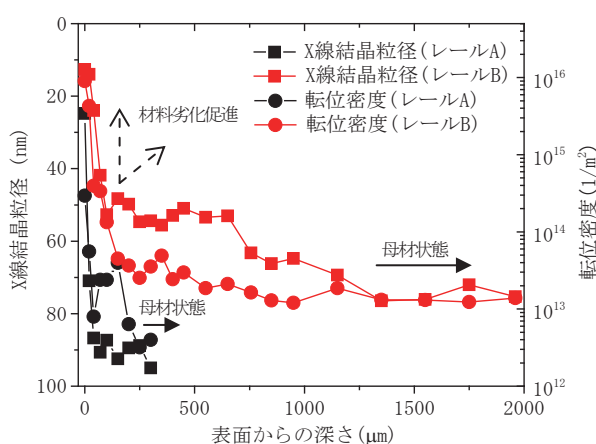


図10 X線フーリエ解析による敷設レールAとBのX線結晶粒径と転位密度の分布

密度分布に肩を有する傾向が認められた。これらを考慮すると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る。言い換えれば、車輪との接触面に作用する接線力や車輪やレールの微小表面粗さが表面近傍での

特集：軌道技術

加工変質層形成に主に寄与しており、内部では車輪との接触で生じるヘルツ応力等が主に寄与していた可能性がある。このように X 線フーリエ解析では、表面近傍の急激な金属組織変化を定量的に捉えられるだけでなく、表面から内部まで同一の手法で評価・解析が可能であり、得られた定量的な指標を通して転がり疲労状態の比較が可能になると期待される。なお、これまで報告されていた内部での集合組織形成は敷設ルール B には確認されたが、敷設ルール A には確認されなかった。これは累積通トンの差異が影響していると思われる。

7. まとめ

レール転がり疲労層の塑性変形状態を実験的に評価する試みはこれまで種々行われてきた。しかし、転がり疲労層表面から全体に及ぶ範囲を統一的に定量評価できる手法がなく、異なる実験手法で得られた結果を有機的に繋げることも困難であった。そこで、これらの問題点を解消するために、新たに X 線フーリエ解析を検討した。X 線フーリエ解析を転がり疲労に適用するために、X 線回折測定方法とレール鋼の変形異方性を考慮した解析方法を検討した。X 線フーリエ解析は、X 線回折測定で取得された各結晶面からの X 線回折による波形情報のすべてを利用することで定量的な指標である X 線結晶粒径と転位密度（塑性ひずみ量の尺度）を見積もり、転がり疲労による塑性変形状態を評価する手法である。これを敷設ルールに形成された転がり疲労層に適用し、その比較を通して、X 線フーリエ解析の転がり疲労への適用可能性を調べた。以下に得られた結果を記す。

- (1) X 線フーリエ解析をレール転がり疲労層の定量評価に適用するために、X 線回折測定条件を検討した。定性的に観察されていた転がり疲労層表面の急激な金属組織変化を定量評価するためには、X 線侵入深さの小さい Cu 線を測定用の入射 X 線に選定することが妥当と考えられる。また、X 線フーリエ解析を転がり疲労層へ適用することで、レール鋼の変形異方性によるばらつきを低減した塑性変形状態の評価が可能になることがわかった。
- (2) 敷設ルールに形成された転がり疲労層に対して、X 線フーリエ解析を適用した結果、転がり疲労を受けて変化した金属組織を表面から内部まで同一の測定・解析手法で定量的に評価できることがわかった。特に、これまで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った。

- (3) 累積通トンが異なる敷設ル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は変化した。また、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。

文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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.
- 4) Bower, A. F., and Johnson, K. L.: Plastic flow and shake-down of the rail surface in repeated wheel-rail contact, Wear, 144, pp.1-18, 1991.
- 5) 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.
- 6) Ungar, T., Dragomir, I., Revesz, A., and Borbely A.: The contrast factors of dislocations in cubic crystals: the dislocation model of strain anisotropy in practice, Journal of Applied Crystallography, 32, pp.992-1002, 1999.
- 7) Yin, F., Hanamura, T., Umezawa, O., and Nagai, K.: Phosphorus-induced dislocation structure variation in the warm-rolled ultrafine-grained low-carbon steels, Material Science and Engineering, A354, pp.31-39, 2003.
- 8) Pesicka, J., Kuzel, R., Dronhofer, A., and Eggeler, G.: The evolution of dislocation density during heat treatment and creep of tempered martensite ferritic steels, Acta Materialia, 51, pp.4847-4862, 2003.
- 9) Williamson, G. K., and Hall, W. H.: X-ray line broadening from filed aluminum and wolfram, Acta Metallurgica, 1, pp.22-31, 1953.
- 10) Garnham, J. E., and Davis, C. L.: The role of deformed rail microstructure on rolling contact fatigue initiation, Wear, 265, pp. 1363-1372, 2008.