

平成 22 年 5 月 21 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19560138

研究課題名（和文） レールの転動疲労損傷の解明及び対策

研究課題名（英文） Research of Rolling Contact Fatigue of Rails

研究代表者

佐々木 敏彦（SASAKI TOSHIHIKO）

金沢大学・人間科学系・教授

研究者番号：40251912

研究成果の概要（和文）：鉄道レールでは、レールの寿命、交換時期、保守点検間隔の決定等の安全面や経済面に課題があった。最新の回折法を用いると、実測評価が可能である。まず、二次元検出器の利用法、Dölle-Hauk理論により初期レール損傷の評価法、および、残留応力解放を最表面で検知して微細なき裂検知を可能とする評価法を考案し、より損傷初期の実態解明に貢献することを見出した。中性子エリアディテクタ方式での残留応力評価法の実用化の見通しも得ることができた。

研究成果の概要（英文）：Rolling contact fatigue damage is accumulated in rails during the repeated passage of trains over the rails, and an incipient crack may initiate due to the rolling contact fatigue. Rail failures can occur due to crack growth in the rails. In order to prevent such rail failures, the estimation of the behavior of internal rail cracks is required on the basis of an engineering analysis model as well as a method to detect rail defects before the crack grows to critical size. It is expected that the residual stress distribution in a rail has a significant influence on the growth rate of the crack. In this research, X-ray and neutron diffraction techniques were used for these rail problems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2007 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総 計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：X線材料強度学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：レール、鉄道、転動疲労、量子ビーム、トライボロジー

1. 研究開始当初の背景

- ・レールの転動疲労損傷のメカニズムが解明されていないため、レールの寿命、交換時期、点検間隔の決定が経験に頼らなければ

ならず、安全面や経済面に課題が残る。

- ・従来より、二円盤の回転接触試験によるラボ試験による基礎的検討が行われている

が、実使用車輪や敷設レールの実態は不明な点が多い。

- ・ X 線回折法と最新の計測および解析手法を用いると、実レールの測定が可能で、この分野の発展に貢献できる。
- ・ 研究代表者は、これまで X 線応力測定法に携わってきたが、鉄道レールの応力測定では三軸応力、集合組織、応力解放などの検討課題があることを知り、また、この問題に本提案法の特長が有効に活かせると着想するに至った。

2. 研究の目的

- (1) 敷設レールの応力状態を評価するため、試料に加工時の応力解放をひずみゲージ法と FEM 法を併用して解明し、敷設状態の実応力を推定する手法を解明する。
- (2) 同時に、実レールの応力を実測するため、代表者がこれまで手掛けてきた IP と $\cos \alpha$ 法による測定システムを適用する。
- (3) 転動疲労損傷メカニズムを解明するため、円板を回転接触して転動疲労を再現してメカニズムを解明するための基礎実験を行う。
- (4) 中性子応力測定法を用い、内部の残留応力および結晶の微視的ひずみを解明する。
- (5) 実際に使用されたレール試験片を用い、損傷状態を解明する。

3. 研究の方法

X 線測定 (SR 光測定) 用いた試験片は、在来線で使用された JIS E 1101 60kg 普通レールであり、レール頭頂面からレールの幅方向を試験片の長手方向としてワイヤー放電加工、ファインカッターによって図 2 に示す形状 (L65mm×W12mm×D10mm) に加工した。深さごとの変化を求めるため、測定面を 10 μ m ずつ電解研磨して、逐次、X 線応力測定を行った。用いた X 線測定条件を表 1 に示す。イメージングプレート (IP) によって回折環を測定し、画像処理を経て回折環全周より 360 個のひずみ ϵ_α を求めた。このひずみに対して $\cos \alpha$ 法を三軸応力測定用に拡張した以下の関係式を用いて応力を決定した。

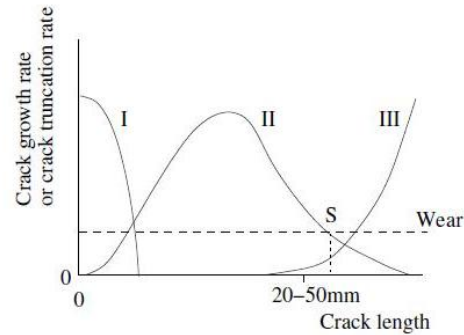


Fig.1 Whole life rail model proposed by Kapoor et al.

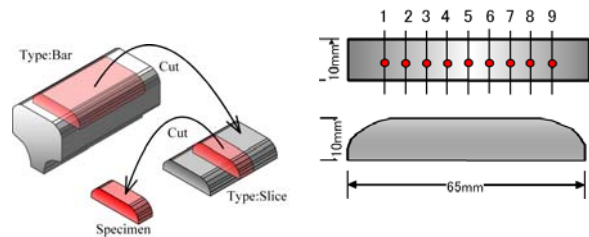


Fig.2 Rail sample used and locations of X-ray stress measurement.

Table.1 X-Ray diffraction conditions.

Characteristic X-ray	Cr-K α
Diffraction line, hkl	Fe α 211
Tube voltage, kV	40
Tube current, mA	200
Collimator ϕ , mm	1
Incident angle ϕ_0 , deg	Specimen 30 Standard material 0
Camera length, mm	Specimen 100 Standard material 43

$$a_1 = \frac{1}{2} [(\epsilon_\alpha - \epsilon_{\pi+\alpha}) + (\epsilon_{-\alpha} - \epsilon_{\pi-\alpha})] \quad (1)$$

$$\frac{\partial a_1}{\partial \cos \alpha} = -\frac{1+\nu}{E} [(\sigma_x - \sigma_z) \sin 2\psi_0 + 2\tau_{xz} \cos 2\psi_0] \sin 2\eta \quad (2)$$

ここで、 σ_x 、 σ_z は垂直応力、 τ_{xz} はせん断応力、 E は縦弾性定数、 ν はポアソン比、 η は θ の捕角、 ϕ_0 は試料面法線と入射ビームとのなす角である。SR 光による測定では、 ϕ_0 を変化させることで侵入深さを種々変えて残留応力分布を求めた。

中性子測定 Webster ら⁷⁾は、鉄道レールの中性子応力測定では試料の切断が不可避であり、また、切り出し方法を工夫することで有効なデータが得られることを示した。現在、この手法が世界標準となって来ている。そこ

で本研究でも同様な考えに基づき、中性子回折強度を確保するためレールから頭頂面部分を切り出し、図3に示すような形状とした。寸法は L200mm×W65mm×D20mm である。測定点は、レール幅方向に 7.5mm 間隔に、合計 6 点とした。ゲージボリューム(GV)が完浴状態となる深さを 1.5mm とした。(GV の中心深さを使用)。このような測定深さを 1.5mm から 4mm まで 0.5mm 間隔に設定した(図4参照)。中性子測定条件を表2に示す。

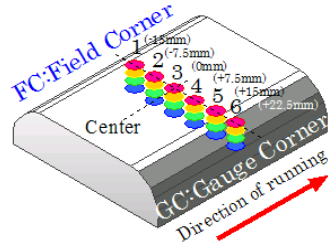


Fig.3 Specimen and locations of neutron stress measurement.

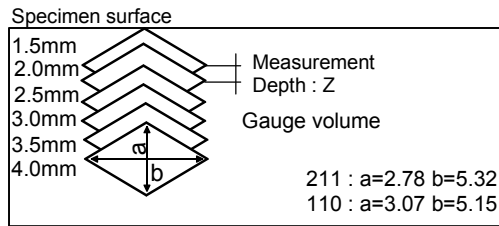


Fig.4 Gauge volume and measurement depth.

Table.2 Neutron diffraction conditions.

Diffraction Index	αFe110	αFe211
Wavelength of neutron, nm	0.2072	
Slit size, mm	3 × 3	
Scanning range, deg	60 - 63 (0.1)	122.8 - 126.4 (0.1)
Distance from Specimen to Detector, mm	50	
d_0 of Railway rail, nm	0.2027	0.117

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\epsilon_x + \nu(\epsilon_y + \epsilon_z)]$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\epsilon_y + \nu(\epsilon_z + \epsilon_x)]$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\epsilon_z + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y)]$$

(3)

中性子回折プロファイルを測定後、ガウス関数近似によってピーク位置 2θ を求め、Bragg の条件式よりひずみを求めた。次いで、このようなひずみを直交する 3 方向に関して測定し次式を用いて応力を決定した。

中性子応力測定では原理上、無ひずみのときの格子面間隔 d_0 の精度が必要であり、本研究では焼鈍した同一レール試料より実測した値を使用した。

4. 研究成果

図5に X 線および中性子測定で得られた残留応力分布を示す。図より、X 線により得られた表面から 40μm までは、内部に行くごとに圧縮応力側にやや急激な勾配をもっていることが判明する。60μm～1500μm までの領域は測定を行っていないため破線で表示した。次に、中性子による結果では内部に行くごとに圧縮側に変化している。また、X 線、中性子において各垂直応力成分は互いに近い応力値を示している傾向が見られる。(SR 光を用いた表面域の測定については現在検討中であるのでここでは説明を省略する。)

図5より、表面から 10μm までの極表面域において、引張残留応力が存在している。平川らの解析³⁾によれば、レールに 50MPa の引張残留応力が存在する場合、繰返し数 1×10^7 でき裂が約 50mm 進展する可能性があるとの報告がある(最大曲げ応力 30MPa, 応力範囲 120MPa の場合)。このように、レールでは比較的小さな引張残留応力であってもき裂進展(および発生)に対して大きな影響を及ぼす可能性があることが報告されており、その実態を広く説明することが必要であると思われる。本研究で用いた方法は、レールの全ての部分を評価することは困難であるが、本検討により、頭頂面から数 mm 程度の範囲については三軸および応力勾配に関する実態の評価に有効である見通しが得られたものと考えられる。

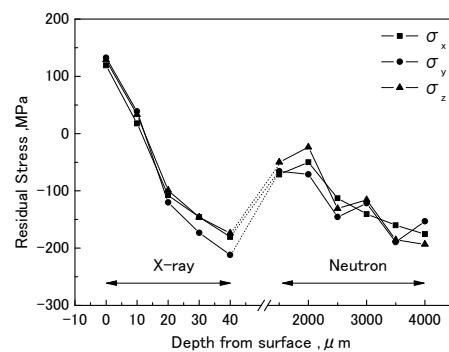


Fig.5 Residual stress distribution as a function of depth obtained with X-ray and neutron.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 8 件)

1. 高橋俊一、加藤孝憲、鈴木裕士、佐々木敏彦、鉄道用車輪の残留応力評価、日本機械学会論文集 A、第 76 巻、第 763 号 (283~289 頁) (2010) . 査読有

2. 佐々木敏彦、高橋俊一、佐々木勝成、小林裕一、エリアディテクタ方式の X 線三軸応力測定法の改良に関する研究、日本機械学会論文集 A 75 巻 750 号、219-227. 2009、査読有

3. T.Sasaki, S.Takahashi, Y. Kanematsu, Yukio Satoh, K. Iwafuchi, M.Ishida and Y.Morii, WEAR, Measurement of Residual Stresses in Rails by Neutron Direction, vol.265, (2008),1402-1407. 査読有

4. T.Sasaki, Y.Miyazawa, S.Takahashi, R.Matsuyama K.Sasaki and K.Hiraatsuka, Application of Synchrotron Radiation to Residual Stress Analysis by IP/cos α Method, Materials Science Forum Vols. 571-572(2008) pp.249-254. 査読有

〔学会発表〕 (計 37 件)

1. 佐々木敏彦、矢口修、鈴木裕士、Neutron Residual Stress Measurement of Railway Rails Using Image Plate, The 5th International Conference on Mechanical Stress Evaluation by Neutrons and Synchrotron Radiation, November 10-12, 2009, Hotel Lake Mito, Mito, Japan

2. 佐々木敏彦、高橋俊一、鈴木裕士、盛合敦、エリアディテクタ方式の中性子応力測定、日本機械学会 M&P 材料カンファレンス、2009 年 11 月 6 日、富山国際会議場、富山

3. 佐々木敏彦、矢口修、石田誠、Application of Area Detector Type X-Ray Stress Measurement To Shelling Problem In Railway Rails, The 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2009), Sept., 18, 2009, Palazzo Degli Affari, Firenze, Italy

4. 佐々木敏彦、矢口修、小林裕一、A Study on Area Detector Type Diffraction Stress Measurement and Its Application to Shelling Problem in Railway Tracks, International Conference on PROCESSING & MANUFACTURING OF ADVANCED MATERIALS Processing, Fabrication, Properties, Applications, August 26, 2009, MARITIM Hotel Berlin, Germany

5. 佐々木敏彦、高橋俊一、鈴木裕士、盛合敦、鉄道レール・車輪の中性子残留応力測定、日本機械学会 M&M 材料カンファレンス、2009 年 7 月 26 日、札幌コンベンションセンター、札幌

6. 佐々木敏彦 他、Influence of Peak Determination Method on Area Detector Type Neutron Stress Measurement, Conference on stress evaluation on materials by neutron or synchrotron radiation(MECA SENS IV), 2007 年 9 月 25 日、ウイーン工科大学 (オーストリア)

7. 佐々木敏彦 他、cos α 法による三軸残留応力測定の精度向上および適用例、日本材料学会 X 線材料強度に関するシンポジウム (第 4 2 回)、2007 年 7 月 1 2 日、日本材料学会 (京都)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称 : X 線応力測定方法

発明者 : 佐々木敏彦

権利者 : 国立大学法人金沢大学

種類 : 特許

番号 : 特願 2009-173619

出願年月日 : 平成 21 年 7 月 24 日

国内外の別 : 国内

○取得状況 (計 1 件)

名称 : X 線回折装置及び X 線回折システム

発明者 : 佐々木敏彦、佐藤幸雄、岩淵研吾、平塚剛一

権利者 : 佐々木敏彦、(財)鉄道総合研究所、平塚剛一

種類 : 特許

番号 : 特許第 4276106 号

取得年月日 : 平成 21 年 3 月 13 日

国内外の別 : 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 敏彦 (SASAKI TOSHIHIKO)

金沢大学・人間科学系・教授

研究者番号 : 40251912