

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560138

研究課題名（和文） 鉄道事業の安全に貢献するオンサイト X 線応力測定装置の開発と応用

研究課題名（英文） Development and Application of On-site X-ray Stress Measurement Device Contributing to Safety in Railway Technology

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）：本研究は、結晶格子の情報と同時に、残留応力も評価できる X 線回折に着目し、オンサイト使用可能な小型装置を新開発し、敷設レールの実態解明を通して安全安心な鉄道の実現を目的とした。その結果、レールからのデバイリングを背面反射にて約 2 分で計測でき、塑性フローによる集合組織状態の一部を視覚的に観察することが可能となり、同時に、デバイリングから残留応力の評価が可能となった。

研究成果の概要（英文）： This research aimed at realization of a safe railroad. Since simultaneously with the information on a crystalline lattice, X-ray diffraction method can also enables us to evaluate residual stress, this research paid its attention to the X-ray diffraction method. The purpose of this research is to develop newly the compact apparatus for determining residual stress which can be used on-site. The other purpose of this research is to investe the actual condition of the damage in rails in service. As a result, it was found that the Debye ring from a rail was measurable in about 2 minutes by back reflection. It was also found that it became possible to observe visually a part of texture structure state developed in a rail by a plastic flow. Simultaneously, evaluation of residual stress was obtained from the Debye ring too.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 2010 年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 2011 年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 2012 年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：工学

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、残留応力、集合組織、疲労、X 線、回折、転動、接触応力

1. 研究開始当初の背景

社会基盤として重要な交通手段の鉄道は、新幹線などの列車側の技術は進んでいる一方で、レール技術の進歩は比較的遅く、現在においても列車通過毎に車輪による接触と

荷重を通して転動疲労(RCF)を受け、数年で劣化や折損に至る場合がある。レールは一度敷設すると交換が難しく、また劣化の検知が困難である。この状況は世界的規模においても同様であり、英国では 2000 年に RCF が原

因でレールが折損した結果、脱線に伴う死亡事故が発生している。RCF 問題は日本を含む世界的課題になっている。現在の対策方法である超音波探傷やレール削正は、そのコストとして巨費を要しつつも、効果には限界があるとされている。このような従来技術を補う目的で、結晶格子レベルの微視的な材料評価法である X 線回折法に着目し、レールの場合に重要になる現地計測に適するように、イメージングプレートによる X 線の二次元計測技術と新解析理論 (cos α 法) を採用して小型軽量化と高性能化を両立させることが可能であると着想するに至った。

2. 研究の目的

公共交通機関として社会的に重要な鉄道技術における課題の一つとして、レールの安全確保とそのための対策コストの低減の問題がある。本研究は、従来の超音波技術によるき裂の探傷やレール削正による損傷箇所の除去処理を補う方法として、結晶レベルのナノ情報(集合組織)を基礎とし、同時に工学的マクロ情報(残留応力)も評価できる X 線回折に着目した。実験室での精密測定技術として確立している X 線回折法を、レール保守への応用に資するようにするため、オンサイト使用可能な小型 X 線回折装置 (X 線応力測定装置) を新開発し、敷設レールの実態解明、レールの疲労損傷評価技術に貢献し、安全安心な鉄道交通技術の実現を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 現場レール用の X 線解析装置の開発

二次元検出器と研究代表者の開発した新解析理論 (cos α 法) の組み合わせによって、敷設状態のレールの X 線回折パターンから残留応力・材質判定可能な測定システムを新開発した (図 1 参照)。まず、検出器の周辺部分を整備し、回折環が有効に二次元計測できるようにした。次に、測定されたデバイリング画像データを精密に解析して回折角と格子ひずみを求め、cos α 法を適用して応力を決定するデータ処理機構を開発した。平面応力状態 ($\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$) の場合について説明する。

まず、回折環を二次元測定し、式(1)、式(2)の $a_1(0)$ および $a_2(0)$ の関係を求める。このとき、各直線の傾きにはそれぞれ 1 個ずつの応力成分が含まれていることが分かる。したがって、そ

れぞれの直線の傾きを決定できれば、次式のように垂直応力 σ_x およびせん断応力 τ_{xy} を得ることができる。(ただし、 $\phi_0 \neq 0$)

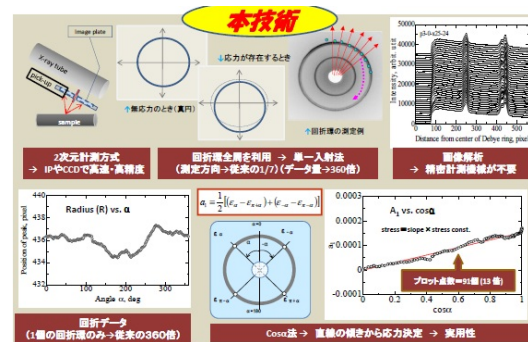
$$\sigma_x = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0} \left(\frac{\partial a_1(0)}{\partial \cos \alpha} \right) \quad (1)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin \psi_0} \left(\frac{\partial a_2(0)}{\partial \sin \alpha} \right) \quad (2)$$

一方、入射 X 線を試料法線方向から y 軸方向に傾斜角 ϕ_0 だけ倒して回折環を測定すると、式(3)より $a_1(90)$ の直線式の傾きには σ_y のみが含まれるようになり、次式から σ_y を得ることができる。(ただし、 $\phi_0 \neq 0$)

$$\sigma_y = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0} \left(\frac{\partial a_1(90)}{\partial \cos \alpha} \right) \quad (3)$$

以上のようなデータ解析により、レール上から測定したデバイリングデータから残留応力を測定することが可能になる。



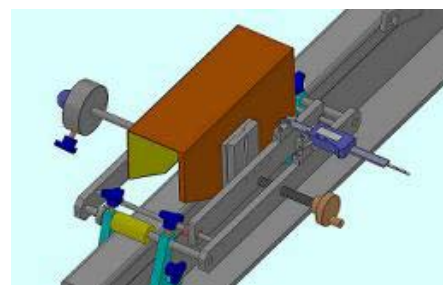
(図1)

(2) 実使用レールの損傷状態の解明

実路線のレールに対して X 線回折法により本開発装置を用いて詳細に調査した。評価項目は、三軸残留応力、および、背面反射デバイリングである。X 線回折条件として、標準的な CrK α X 線によるフェライトの 211 回折を採用した。

(3) 新 X 線解析装置の改良 (装置架台部)

次に、完成した新型 X 線環検出装置用の取付架台を製作した。(図3)。



(図2)

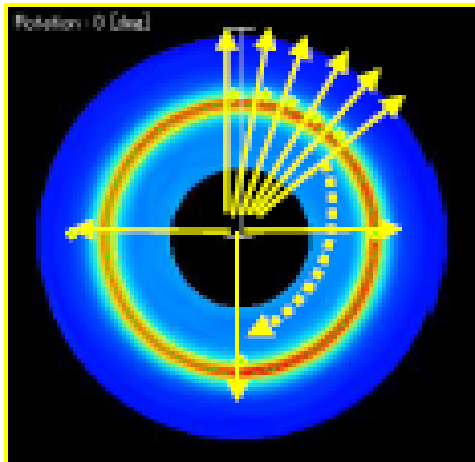
4. 研究成果

(1) 試作した装置

図3、図4に試作した二次元X線検出器方式のX線応力測定装置および測定したデバイリングの一例を示す。回折X線ビーをイメージングプレートにより二次元計測して応力解析する新方式のX線応力測定装置である。測定された応力測定精度を検証した結果、従来技術 ($\sin^2\psi$ 法) 並み又はそれ以上の(繰り返し)精度であることが判明した。さらに、転動接触疲労によって発生する三軸残留応力状態を従来技術に比べて高効率で測定可能になった。



(図3)



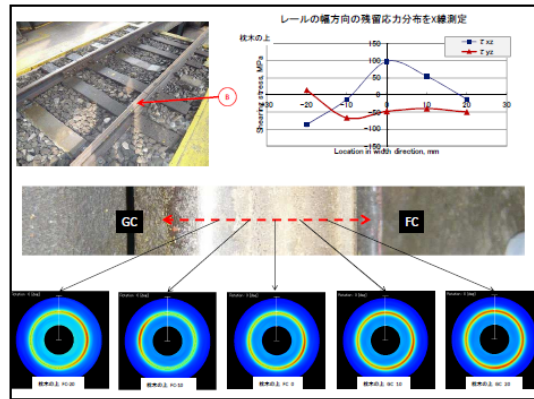
(図4)

(2) 実使用レールの損傷状態の解明

在来線におけるレールについて本開発装置を適用してX線測定を行った結果の一例を図5に示す。レールの幅方向についてX線回折測定を実施し、デバイリングの状態を明らかにし、配向性や格子欠陥に伴う半価幅の広がりを可視化することができた。また、 $\cos\alpha$ 法を適用した精密な残留応力解析を行っ

た。とくに、転動接触において特異な挙動を示すことが理論的に知られている深さ方向のせん断応力に関して実測データを得ることができた。得られたせん断残留応力は、敷設レールを切断して実験室においてX線測定して得ることができた従来技術による測定結果とほぼ一致した。

これとは別に、測定サンプルの中央部に転動接触疲労によって発生した黒斑が存在していたレールに関しても本技術を用いてX線応力解析を行った。その結果、X線測定結果にも黒斑に対応する模様が見られた。また、三軸せん断残留応力は、レールの中央を境目として符号が反対になる分布を示すことが判明した。



(図5)

(3) レール用装置架台の開発

試作したX線応力装置用の取付架台を図6に示す。本課題を用いて営業線レールのX線応力測定を行い有効なデータを得ることができた。



(図6)

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6件)

- ① 森俊哉、広瀬幸雄、嘉村直哉、佐々木敏彦、ショットピーニング処理したマトリクス系ハイスの残留応力分布、日本材料強度学会、査読有、49巻、3号、2013、41-48
- ② 佐々木敏彦、二次元検出器による次世代X線応力測定($\cos\alpha$ 法)、トライボロジスト、査読有、57巻、7号、2012、467-473
- ③ T. Sasaki, J. Akita, Y. Sone and Y. Kobayashi, Determination of Shearing Stresses (τ_{xz} and τ_{yz}) Using X-Ray Diffraction Method with Two-Dimensional Detector, Materials Science Forum, 査読有、706-709, 2012, 1719-1724
DOI:[10.4028](https://doi.org/10.4028)
- ④ S. Ejiri, T. Sasaki and Y. Hirose, Residual Stress Analysis of Textured Materials by X-Ray Diffraction Method、Materials Science Forum, 査読有、706-709, 2012, 1673-1678
DOI:[10.4028](https://doi.org/10.4028)
- ⑤ Y. Sone, J. Suzumura, N. Kamura and T. Sasaki, Identification of iron rust on rail by X-ray diffraction and vibrational analysis, Advanced Materials research, 査読有、706-709, 2012, 581-585
DOI:[10.4028](https://doi.org/10.4028)
- ⑥ O. Yaguchi, Y. Okada and T. Sasaki, Nondestructive Structure Test of Cam-shaft Using Both Eddy Current and X-rays, Materials Science Forum, 査読有、706-709, 2012, 590-594
DOI:[10.4028](https://doi.org/10.4028)

[学会発表] (計13件)

- ① 佐々木敏彦、嘉村直哉、古川敬、三原毅、Ni基合金の二次元方式X線応力測定、日本金属学会北陸信越支部・日本鉄鋼協会北陸信越支部平成24年度連合講演会、2012年12月8日、福井工業大学(福井市)
- ② 佐々木敏彦、佐藤光、古川敬、三原毅、SUS316Lの二次元方式のX線応力

測定、日本金属学会北陸信越支部・日本鉄鋼協会北陸信越支部平成24年度連合講演会、2012年12月8日、福井工業大学(福井市)

- ③ 嘉村直哉、橘真由、佐々木敏彦、SUJ2材の二次元方式X線応力測定、日本金属学会北陸信越支部・日本鉄鋼協会北陸信越支部平成24年度連合講演会、2012年12月8日、福井工業大学(福井市)
- ④ 佐々木敏彦、江尻正一、嘉村直哉、佐藤光、佐藤嘉洋、広瀬幸雄、測定スペースが狭い部分のエリアディテクタ方式によるX線三軸応力測定、日本材料学会第46回X線材料強度に関するシンポジウム、2012年7月5日、日本材料学会(京都市)
- ⑤ 佐藤光、谷和彦、佐々木敏彦、SUS304溶接部に対するIP方式の $\cos\alpha$ 法X線応力測定、日本材料学会第46回X線材料強度に関するシンポジウム、2012年7月5日、日本材料学会(京都市)
- ⑥ 神長史人、趙桂薇、大場宏明、江尻正一、佐々木敏彦、X線とAEによる転がり疲れ過程の評価、日本材料学会第46回X線材料強度に関するシンポジウム、2012年7月5日、日本材料学会(京都市)
- ⑦ 嘉村直哉、藤田工、田中広政、佐々木敏彦、X線回折環全体を利用した転がり軸受の疲労度評価、日本材料学会第46回X線材料強度に関するシンポジウム、2012年7月5日、日本材料学会(京都市)
- ⑧ 川澄健太郎、中根清和、小林裕一、佐々木敏彦、IP式 $\cos\alpha$ 法による高周波熱処理したロッド鋼材のX線応力測定、日本材料学会第46回X線材料強度に関するシンポジウム、2012年7月5日、日本材料学会(京都市)
- ⑨ 佐藤光、嘉村直哉、神長史人、趙佳薇、大場宏明、江尻正一、茂木良平、佐々木敏彦、転がり疲れ試験片のX線応力測定、日本金属学会北陸信越支部・日本鉄鋼協会北陸信越支部平成23年度連合講演会、2011年12月3日、金沢工業大学(金沢市)
- ⑩ 嘉村直哉、神長史人、趙佳薇、大場宏明、江尻正一、末次正寛、佐々木敏彦、二次元検出器方式による転がり疲れ試験片のX線応力測定、日本金属学会北

陸信越支部・日本鉄鋼協会北陸信越支部
平成 23 年度連合講演会、2011 年 12 月 3
日、金沢工業大学（金沢市）

- ⑪ 佐々木 敏彦、佐藤 嘉洋、石田 誠、
鈴木 裕士、江尻 正一、廣瀬 幸雄、
中性子 Debye 環によるせん断応力の測定、
日本材料学会第 45 回 X 線材料強度に關する
シンポジウム、2011 年 7 月 7 日、ルー
テル市ヶ谷センター（東京都）
- ⑫ 佐々木 敏彦、嘉村 直哉、末次 正寛、
福田和人、Debye 環によるショットピー
ニング処理材の応力勾配測定、日本材料
学会第 45 回 X 線材料強度に關するシンポ
ジウム、2011 年 7 月 7 日、ルーテル市ヶ
谷センター（東京都）
- ⑬ 矢口 修、岡田 欣之、門前 亮一、細川
晃、佐々木 敏彦、X 線と渦電流による
機械部品の材質検査、日本材料学会第 45
回 X 線材料強度に關するシンポジウム、
2011 年 7 月 7 日、ルーテル市ヶ谷センタ
ー（東京都）

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