

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：14201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03830

研究課題名（和文）統計的解析手法による転がり疲労の定量的評価技術の開発

研究課題名（英文）Development of quantitative evaluation technology for rolling fatigue by statistical analysis method

研究代表者

三井 真吾（Mitsui, Shingo）

滋賀大学・データサイエンス学系・助教

研究者番号：10714438

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：転がり疲労の評価は重要なテーマであるが、十分に解明されていない。それは様々な要因により転がり疲労が発生するためであり、定量的な評価手法の開発が求められている。本研究では、開発した高速X線残留応力測定装置による大量の測定データを機械学習により学習することで、転がり疲労を定量的に評価する研究を行った。本研究により、使用済みレールの亀裂箇所の異常検知が可能となり、スラスト荷重試験を行った軸受鋼の転がり疲労の時間的変化の評価手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

転がり疲労は、レールや軸受、ローラー、歯車など様々な機械部品の強度や寿命を予測するために重要な指標となる。本研究により転がり疲労の定量的評価が可能となると、社会インフラである鉄道レールの効率的な交換が可能となり、人手やコストの大幅な削減に貢献できる。機械部品や金属構造物の余寿命評価が可能となると安全性の向上だけでなく製品開発にも活かせるなど産業的にも利点がある。産業競争力強化にもつながるため社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：The evaluation of rolling contact fatigue is an important issue, but has not been sufficiently elucidated. This is because rolling contact fatigue occurs due to various factors, and the development of quantitative evaluation methods is required. In this study, a quantitative evaluation of rolling contact fatigue was conducted using machine learning of a large amount of measurement data from a developed high-speed X-ray residual stress measurement system. This research enabled the anomaly detection of crack locations on used rails and developed a method for the evaluation of temporal changes in rolling contact fatigue of bearing steel subjected to thrust load tests.

研究分野：放射線検出器

キーワード：転がり疲労 機械学習 X線残留応力測定

### 1. 研究開始当初の背景

レールは車輪との転がり接触により疲労を受け、シェリングやきしみ割れといった損傷が発生する。これらの損傷は、車両の振動やレールの破断などの問題を引き起こすため、削正車を用いて年に数回、一律に削正することで安全性を確保している。レールの検査は、超音波探傷車によるスクリーニング検査の後、検査員により目視検査が行われるため膨大な費用と人員が費やされているため、科学的データに基づく効率的で確実な保守検査技術の開発が求められている。また、微小な亀裂や損傷はその兆候の発見が困難であるため、損傷の早期発見、予兆検知が課題となっている。

### 2. 研究の目的

レールや軸受は、繰り返し接触応力による転がり疲労で剥離や亀裂などの損傷が発生する。損傷の発生時期の予測は重要なテーマであり、残留応力や回折環の半価幅などの測定値を用いて余寿命の推定が行われているが十分に解明されていない。それは複合的な要因により損傷が発生するためであり、転がり疲労の定量的な評価手法の開発が求められている。そこで我々は、開発した高速な X 線残留応力測定装置(文献 1)による大量の測定データを機械学習により学習することで、転がり疲労を定量的に評価する研究を行った。

### 3. 研究の方法

#### (1) レールの異常検知

亀裂のある使用済みレールの垂直応力の x 軸方向成分  $\sigma_x$ 、せん断応力の  $\tau_{xy}$ 、回折環の半価幅 FWHM のマッピング測定を行い、統計的解析と機械学習により異常度を評価して、亀裂部の異常検知を行った。測定は、レールの短手方向に 40 mm を 5 mm 間隔、長手方向に 190 mm を 1 mm 間隔で行った。測定点の短手方向の一系列を一つのデータとして、長手方向にデータセットを作成して、亀裂のない正常部データのみから成る正常部分空間からの距離を異常度として異常検知を行った。正常部分空間の正規直交基底を求める際に、主成分分析 (PCA)、カーネル主成分分析 (KPCA)、オートエンコーダ (AE) を用いた。

#### (2) スラスト荷重試験による転がり疲労の定量的評価

スラスト荷重試験を行った試験片の転がり疲労の定量的評価を行うために、統計的解析、および機械学習による試験時間の回帰分析を行った。スラスト荷重試験(図 1)では、SUJ2 試験片に対して鋼球を接触させ、通過回数が  $10^8$  回(556 時間)を終了回数として疲労試験を行い、途中の 0、24、72、120、240 時間で試験片を抜き取り、残留応力および回折環の半価幅の測定を行った。測定は、試験片上の半径 15.75-22.75 mm を半径方向に 0.5 mm 間隔で 15 点、円周方向に 3 度間隔で 120 点、合計 1800 点の測定を行った。垂直応力の x 軸方向成分  $\sigma_x$ 、せん断応力の  $\tau_{xy}$ 、回折環の半価幅 FWHM の 3 つを組みとして各測定点の測定データとした。

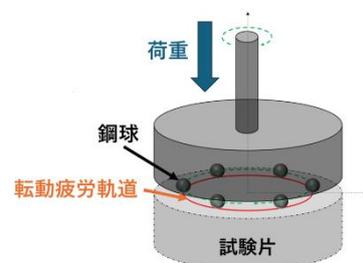


図 1 スラスト荷重試験

### 4. 研究成果

図 2 に、亀裂のあるレールの回折環の半価幅分布を示す。亀裂部で半価幅が大きくなっている。

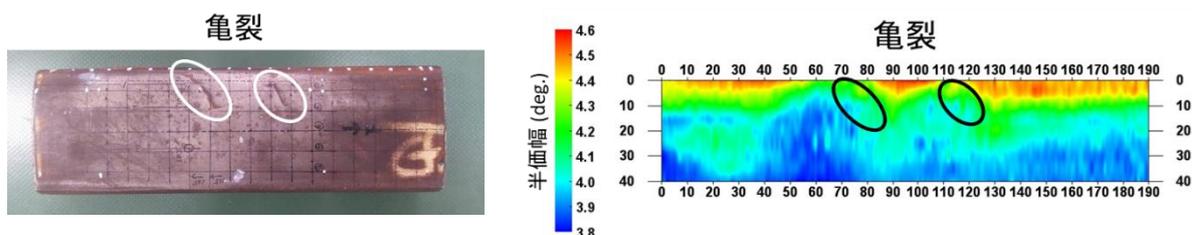


図 2 亀裂のあるレール試験片(左)と測定した半価幅分布(右)

図 3 に、PCA、KPCA、AE による亀裂部の異常度分布と各モデルの精度を比較するための ROC 曲線を示す。いずれのモデルでも亀裂部の異常度が高く評価されているが、ROC 曲線を比較すると AE が最も精度が良いことが分かった。

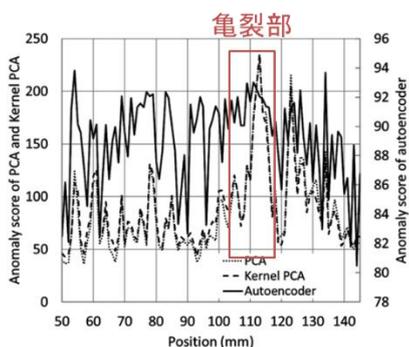


Fig. 8. Anomaly score distribution when data is compressed to two dimensions.

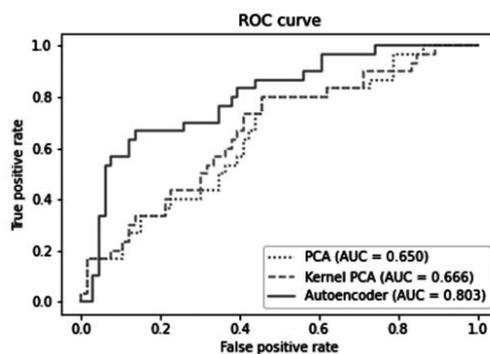


Fig. 11. ROC curve in two dimensions for each model.

図 3 異常度分布(左)と ROC 曲線(右)(文献 2)

図 4 に、鋼球の接触位置における予測した試験時間と実際の試験時間の関係を示す。回帰分析の手法は、重回帰分析とニューラルネットワーク回帰分析、ランダムフォレスト回帰分析を用いた。いずれの手法でも正解の試験時間 24 時間まで予測時間が増加してその後変化が少なくなる傾向となった。しかし、正解となる試験時間 24 時間に対して予測した試験時間は 100 時間程度となり差異が生じている。これは、接触位置のデータのみを用いたためであり、損傷部周辺の応力や回折環の半価幅の変化もデータに加えることで精度の向上が期待できる。

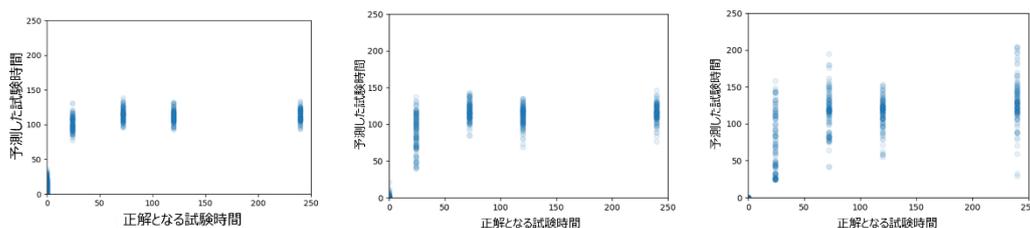


図 4 残留応力と回折環の半価幅による試験時間の回帰結果 重回帰分析(左)、ニューラルネットワーク回帰分析(中央)、ランダムフォレスト回帰分析(右)

<引用文献>

1. S. Mitsui, T. Sasaki, Y. Arai, T. Miyoshi, R. Nishimura: Development of Debye-ring measurement system using SOI pixel detector, Nuclear Instruments and Methods A 924 pp.441-447 (2019)
2. Shingo Mitsui, Toshihiko Sasaki, Masayoshi Shinya, Yasuo Arai, Ryutarō Nishimura: Anomaly detection in rails using dimensionality reduction, ISIJ International 63(1) pp.170-178 (2023)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mitsui Shingo, Sasaki Toshihiko, Shinya Masayoshi, Arai Yasuo, Nishimura Ryutaro	4. 巻 63
2. 論文標題 Anomaly Detection in Rails Using Dimensionality Reduction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 170 ~ 178
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-279	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nishimura R., Kishimoto S., Sasaki T., Mitsui S., Shinya M., Arai Y., Miyoshi T.	4. 巻 16
2. 論文標題 “INTPIX4NA” - new integration-type silicon-on-insulator pixel detector for imaging application	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P08054 - P08054
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-0221/16/08/p08054	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計1件

1. 著者名 佐々木敏彦、西村龍太郎、乾 典規	4. 発行年 2022年
2. 出版社 日本工業出版	5. 総ページ数 8
3. 書名 検査技術 2022年5月号	

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	西村 龍太郎  (Nishimura Ryutaro)  (00828189)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・特別助教    (82118)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	新谷 正義  (Shinya Masayoshi)  (20909337)	石川県工業試験場・機械金属部・技師     (83303)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関