

令和元年5月30日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14145

研究課題名(和文)中性子デバイリングを利用したエリアディテクタ式中性子残留応力測定機構の開発

研究課題名(英文) Development of quantum beam residual stress measurement system using Debye ring and area detector

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：中性子や放射光、X線などを利用した二次元検出器方式の(残留)応力測定技術の開発を目標として、データ解析理論(cos法)の適用を軸に検討を行った。実験室X線、高エネルギー加速器研究機構等の放射光、等による基礎実験をもとに検討を進め、X線領域での実験検証により、現在の世界標準技術(sin<sup>2</sup>法)に比べてほぼ10倍の高速測定とともに、装置の小型化による可搬性向上が可能である特長などが判明した。さらに、強加工を受けた鋼材で顕在化する三軸応力状態が出現したサンプルに対しては平面応力解析に比べて一層の効率的測定が可能であることを示し、転動接触疲労が重要な鉄道レールに対して有効に適用できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子ビーム材料評価技術の一翼を担う残留応力測定において、従来の標準的方式に対して二次元検出器方式と新解析理論(cos法)の適用により、その高速化、装置の小型可搬性、測定対象の広範化などの特長があることが分かり、この分野の発展に貢献できる見通しが明らかにできた。とくに、本技術はソフト面およびハード面において日本発の技術であり、この分野の世界的な貢献に寄与する点が大きな特徴の一つであると考えられる。なお、現状では平面応力測定が主であるが、今後、三軸応力状態、応力勾配、集合組織材料などの場合に対しても貢献する可能性が考えられる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was the development of a method for residual stress measurement using quantum beam and area detector. The study was conducted based on the fundamental experiment by means of laboratory X-rays, synchrotron radiation at the High Energy Accelerator Research Organization etc. It was found that high speed measurement of stress faster than about ten times than present world standard method is possible, as well as downsizing of the equipment and portability. It was also shown that this method is effective for samples in which tri-axial stress state occurred, such as steels processed heavily. This method was applied to railway rails, for which rolling contact fatigue is important.

研究分野：金属加工学

キーワード：残留応力 回折 X線 中性子 cos 法

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1)機械や構造物の耐久性や強度の保障を確保する上で、残留応力の正しい管理が重要である背景がある。しかし、残留応力を理論やコンピュータシミュレーション等で予測することには限界があり、測定を通して検査する必要がある。

(2)残留応力の検査方法として磁気や超音波、量子ビーム(中性子、X線等)を利用した非破壊的な方法や、切断して分割したり穴を開けるなどの破壊的な方法がある。これらの内、量子ビームによる方法である回折応力測定法が製品検査法として注目されている。

(3)既に、回折応力測定法が開発され、また、応用も進んでいるが、量子ビームに対する検出技術の制約があり、回折線の情報の一部分のみしか有効利用していなかった。

(4)本研究では、量子ビームの検出技術の発展を背景として、新たな二次元検出器に注目し、その回折応力測定への可能性に注目した。

### 2. 研究の目的

(1)二次元検出器を適用して回折環を計測し、得られた回折環データを精密に分析して有効に応力が評価できる方法を開発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1)回折環から得られる回折環半径、Bragg角を利用して測定サンプルのひずみ成分や応力成分との関係を理論的に導出する。

(2)使用する量子ビームの種類によっては、測定深さ(侵入深さ)が大きい場合があり、その影響を考慮する必要がある。この影響を実験及び理論的に補正した応力測定理論を導出する。

(3)侵入深さが小さいX線領域では応力状態を平面応力と仮定して理論展開を進めるが、侵入深さが大きい場合には三軸応力状態を考慮して理論を構築する。

(4)実験が容易なX線領域での検証を行う。また、侵入深さが大きい場合についてはコンピュータシミュレーションを行って検証する。

(5)適用例として、転動接触疲労を受けた鉄道レールの残留応力状態の解明に使用して検討する。

### 4. 研究成果

(1)X線領域において回折環を計測して $\cos$ 法を適用して応力測定を行った結果、工業的に十分な測定精度が得られることが判明した。

(2)中性子領域において回折環を計測して $\cos$ 法を適用して応力測定を行った結果、標準の解析結果のままでは大きな測定誤差が発生し、その原因は中性子侵入深さの影響による回折環の形状の変化によるものであることが判明した。

(3)上記の測定誤差は、中性子侵入深さとサンプルと間の幾何学的な原因に起因することが判明し、測定の考察に基づいた補正方法が有効であることを確認できた。

(4)X線領域における適用例として、転動接触疲労を受けた在来線レールの頭頂面の残留応力状態を三軸応力解析によりマッピング測定し、疲労き裂周辺部と健全部との相違点を明らかにした(図1)。

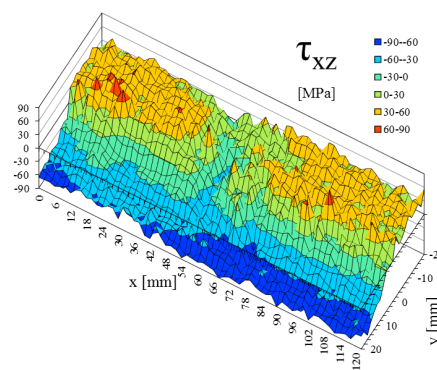


図1. 在来線で使用された鉄道レールの頭頂面における三軸応力測定結果

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

松田 真理子, 兜森 達彦, 高峯 弘行, 高島 一郎, 佐々木 敏彦, 大型鍛鋼品の偏析部がX線応力測定に与える影響, 材料, 査読有, Vol.68, No.3, (2019), pp.285-291.  
<https://doi.org/10.2472/jsms.68.285>  
Toshihiko Sasaki, Shingo Mitsui, Masayoshi Shinya, Kayoko Yanagi; Ryutaro Nishimura,

Toshinobu Miyoshi, Yasuo Arai, Study on application of a monolithic SOI pixel detector to residual stress measurement using X-rays, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 査読有, vol.924, pp.452-456(2018)

嘉村直哉, 藤田工, 佐々木敏彦, X線回折環分析装置によるピーリング損傷の評価, 材料, 査読有, Vol.67, No.7, (2018). pp.694-699

嘉村直哉, 宮崎利行, 佐々木敏彦, X線回折環のフーリエ解析によるアルミニウム合金の応力測定, 非破壊検査, 査読有, Vol.66, No.10, (2017), pp.492-497

ISSN 0367-5866

Mariko MATSUDA, Keisuke OKITA, Tomokazu NAKAGAWA and Toshihiko SASAKI, Application of X-ray stress measurement for residual stress analysis by inherent strain method - Comparison of  $\cos$  and  $\sin^2$  method, The Japan Society of Mechanical Engineers, Mechanical Engineering Journal, 査読有, Vol.4, No.5, Paper No.17-00022, (2017)

DOI:10.1299/mej.17-00022

T. Miyazaki, Y. Fujimoto, T. Sasaki, Improvement in X-ray stress measurement using Debye-Scherrer ring by in-plane averaging, Journal of Applied Crystallography, 査読有, 49, (2016), pp.241-249.

ISSN 1600-5767

#### [学会発表](計9件)

佐々木敏彦, 一体型 SOI ピクセル検出器による残留応力分布の超高速測定技術, 平成 30 年度第 2 回残留ひずみ・応力解析研究会, 2019 年

佐々木敏彦, 最新の X 線応力測定技術 - 小型・リアルタイム化による現場適用の動向 -, 国際連携 溶接計算科学研究拠点主催 第 12 回講演会, 2019 年

佐々木敏彦, 高感度 X 線検出器を利用した機械構造物の高速診断技術, 石川県次世代産業育成講座・新技術セミナー, 2018 年

佐々木敏彦,  $\cos$  法の最新の適用事例, 平成 30 年度第 2 回  $\cos$  法方式 X 線残留応力測定法研究会, 2018 年

佐々木敏彦, 最新 X 線技術を利用した機械構造物の診断技術, 石川県次世代産業育成講座・新技術セミナー, 2018 年

T. Sasaki, TRI-AXIAL RESIDUAL STRESS ANALYSIS OF RAILWAY RAIL USING TWO-DIMENSIONAL X-RAY DIFFRACTION METHOD, the 11th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM 2018), 2018 年

佐々木敏彦, 各種の鋼材に対する  $\cos$  法の応力測定精度の比較, 平成 30 年度第 2 回  $\cos$  法方式 X 線残留応力測定法研究会, 2018 年

T. Sasaki, Evaluation of railway rails suffered from rolling contact fatigue using X-ray  $\cos$ -alpha method, International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials, 2018 年

佐々木敏彦, 二次元 X 線検出器を用いた深さ方向の応力勾配の評価, 平成 30 年度総合シンポジウム, 2018 年

#### [産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年:

国内外の別:

#### [その他]

ホームページ等

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：三井真吾

ローマ字氏名：MITSUI, Shingo

所属研究機関名：金沢大学

部局名：人間科学系

職名：特任助教

研究者番号（8桁）: 10714438

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。