

論文の内容の要旨

氏名：大塚賢哉

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査における劣化損傷の評価に関する研究

ワイヤロープは他の鋼材と比べて、可撓性を有しており引張強度も高いことから使用されている分野は多岐にわたっており、使用形態は動索と静索の二つに大別することができる。動索はエレベータやクレーン等に用いられ、長尺で曲げやすいという特徴を利用した動力を伝達する機械要素としての使用形態である。静索は橋梁等に用いられ、長尺で高強度であるという特徴を利用した引張荷重を担う構造要素としての使用形態である。どちらの使用形態においてもワイヤロープは主たる機能を担う要素として用いられており、ロープの劣化が構造物の破壊や人的な被害をもたらす危険性がある。そのため、微細な劣化も早期に発見することがワイヤロープの安全性を確保するのに重要な課題となっている。ワイヤロープは日本産業規格（JIS: Japan Industrial Standards）の JIS G 3525 において定められており、細かい施工管理については各用途によって定められている。しかし、機器によっても用いられているワイヤロープの種類は異なるため、施工管理者ごとに点検を行い、安全性について判断していることが多く、点検者の経験が浅いことによって事故に繋がっている事例もある。点検は主に目視による手法が採用されていることから、素線切れを含めた劣化損傷の有無の判断だけに留まっていた。また、定性的で曖昧な判断になることが多いため、点検者の熟練度に委ねられている。

このような背景から、定量的な判断を行うために 2000 年頃から漏洩磁束探傷法を用いた劣化損傷の検出手法に関して検討が行われている。特にエレベータでは 2007 年の高層ビルで発生したエレベータのワイヤロープの損傷事故により、全国でエレベータに用いられているワイヤロープの緊急点検を行う必要があることから、従来の目視による検査手法よりも迅速で正確な判断が可能な検査手法の確立が重要な課題となった。当時は目視による検査を補う手法として漏洩磁束探傷法を用いたロープテストの検討を行い、目視では確認ができなかったロープ表面に発生する初期の劣化損傷の有無を電気信号として確認することに留まったが、近年ではロープ表面に発生する劣化損傷の数やロープ内部に発生する劣化損傷の有無について判断が可能なロープテストが検討されている。しかし、ワイヤロープが複雑な形状をしていることから様々な因子の影響を受けるため、劣化損傷の箇所（ロープ表面や内部）や形態、本数等の評価は難しい。そのため、漏洩磁束探傷法を用いた検査手法によるワイヤロープの劣化損傷の評価を行うには次のような課題がある。

- 1) 磁束密度の低減のために劣化損傷の検出の際のワイヤロープの周囲にノイズとして発生しているワイヤロープの構造に起因した磁束密度の解明が行われていない
- 2) 劣化損傷の有無だけでなく、劣化損傷の箇所（ロープ表面や内部）や形態、本数といった劣化損傷の状態の特徴量について信号処理を用いて抽出し、分類を行う手法の検討が行われていない
- 3) 検出器（磁気センサ）の適正な検出角度やセンサアレイを組み込んだ際の適正な位置の検討が行われていない

本研究では上述の現状にある漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査における劣化損傷の検出精度の向上と劣化損傷の評価手法の確立に寄与するため、JIS G 3525 で定められた公称径 9mm の 6×24 ワイヤロープを対象とし、辺要素を用いた磁気ベクトルポテンシャル法による有限要素法を用いたワイヤロープの三次元静磁場解析によるワイヤロープの構造を起因としたノイズの低減が可能な検査手法を提示し、これらの計算結果と損傷検出試験の結果を比較検討して、ノイズ低減手法の有用性について考察を行っている。次に、漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査のロープテストとしてマルチチャンネルの磁気センサアレイによる測定値から、隣接する磁気センサ間の情報に着目して、二次元平面における素線切れの特徴量抽出手法について提示し、従来手法の単一のセンサの閾値を用いた手法との比較検討をして、提案手法の有用性について考察を行っている。さらに、ワイヤロープ検査のロープテストとして異なる物理量の検出を行う検出器（磁気センサと光学式センサ）による測定値より得られた時系列データの相互関係に注目し、異種の検出器を用いたワイヤロープテストによる損

傷検出試験において計測された値から連続ウェーブレット変換 (CWT : Continuous Wavelet Transform) と主成分分析 (PCA : Principal Component Analysis) を行うことで特徴量を抽出し、機械学習の手法の一つであるカーネルサポートベクタマシン (Kernel-SVM : Kernel Support Vector Machine) による分類を行う劣化損傷の要因判別手法について提示し、従来手法としてロープテストに用いられている単一種の検出器 (磁気センサ) による結果と比較検討して、多様に在る劣化損傷の要因の判別に提案手法が有用であるか考察を行ったものである。これらの研究結果を取り纏めた論文は 5 章で構成されており、各章では数値解析および損傷検出実験によるストランドノイズの評価、信号処理ならびに機械学習による劣化損傷の形態判別について以下の知見を得たことを述べている。

第 1 章では、過去のワイヤロープの破断事例と日本産業規格からワイヤロープの廃棄基準や漏洩磁束探傷法を用いた検査における素線切れの評価の必要性について触れ、これに関連した従来の研究を紹介し、漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査における課題について言及を行っている。

第 2 章では、漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査の際のワイヤロープ周囲に発生する磁束密度について、検査の際の測定値に含まれる周期的なストランドノイズについて明言しているものが少ないことから、特に周期的なノイズの発生要因の一つであるワイヤロープの構造特性の中でもストランドのよりに注目し、山切れおよび谷切れの素線切れに対してストランドに起因したノイズの影響について有限要素法を用いた数値解析により三次元のベクトルで評価および損傷検出試験を行い、比較と検討を行っている。これより、漏洩磁束探傷法を用いた際の磁束密度の数値解析において、多種多様なワイヤロープにおいてもストランドのより角度について考慮することでノイズ発生原因を解明し、ストランドに起因する磁束密度の発生方向はストランドのより角度に対して垂直であることを示している。また、検出器が一方向のみに測定可能であることを利用して、検出器の配置角度の適正化をすることがストランドに起因するノイズの低減に有用であることを示唆している。

第 3 章では、多数配置した検出器の測定値を用いて機械学習等による劣化損傷の検出について様々な手法の検討が行われているが、劣化損傷の大きさとロープ長手および円周方向の位置検出の全ての評価について検討を行っているものは少ないことから、漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープの損傷検出手法として、劣化損傷の中でも損傷の大きさが小さく検出や評価が難しい山切れおよび谷切れの素線切れを対象とし、ロープ円周方向に多数配置した隣接する磁気センサ間の情報に着目することで二次元平面におけるマルチセンサデータを用いた特徴量抽出による損傷検出手法を提案し、ロープ円周方向の劣化損傷の位置および形態についても検出できる可能性を示唆した。また、従来の単一センサの閾値を用いた特徴量抽出手法と比較して、提案手法はロープ軸方向の位置検出に有用であることを示している。

第 4 章では、異種センサを搭載したワイヤロープテストを製作し、異種センサの複合センサデータと CWT を用いた特徴量抽出手法を活用する手法の提案を行った。異種センサのセンサアレイのセンサデータを統合し、CWT による劣化損傷の特徴量抽出を用いることで劣化損傷の検出能力を向上させ、磁気センサおよび光学式センサの値から劣化損傷の種類判別の精度向上に有用であることを示している。これより、劣化損傷の程度、位置、種類の認知判断に対して従来の磁気センサのみによる損傷検知システムの実験結果と比べて高い分類・判別性能を有することを示唆した。

第 5 章では、本研究の成果として第 2 章から第 4 章の結果についてまとめ、本研究によって得られた知見について述べている。さらに本研究で取り上げられなかった問題を今後の研究課題としてワイヤロープの公称径やストランドの数の違いによる影響、検査の際のワイヤロープの振動による影響等について言及している。