

論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 青木義男

（副査） 教授 今井郷充 教授 篠田之孝

教授 高橋聖

現在、建築基準法第12条第3項の規定に基づき、エレベータの所有者はワイヤロープの経年劣化などの状況を昇降機等検査員等に検査させて監督官庁に報告することが義務付けられており、同法施行規則第6条及びこれに基づく平成20年国土交通省告示第283号により、エレベータのワイヤロープ等の劣化状況については1年に1回、目視や寸法測定により検査することとされている。ワイヤロープ等の劣化状況についての検査は、昇降機等検査員や一級建築士、二級建築士等がエレベータのかごの上に乗る、かごを少しずつ動かしながら目視や寸法測定を行っており、危険を伴う上、時間を要する作業となっている。これらの課題に対応して、現在センサを活用した検査も一部で導入されているが、ワイヤロープを接触させる方法であるため、低速運転の状況下でなければ活用できず、検査に時間を要することやセンサに接する側のワイヤロープの半面しか診断できないといった課題がある。また、「錆び」の程度を診断できず、既存のセンサを目視や寸法測定の代替手段とすることができない。

センサを活用したエレベータの検査は、危険で負担のかかる検査員の目視や寸法測定による検査の代わりとなりうる上、検査時間の短縮につながるものと考えられ、また、新技術の活用研究が発展途上にある建築分野において実装が期待できる数少ない事例であることから、高精度センサを用いたエレベータの定期検査の合理化に係る研究開発が必要である。

このような背景から、定量的な判断を行うために、近年、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。しかし、ワイヤロープは一般的に複雑な構造形態をとっており、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、本数等の定量的評価は難しい。そのため、注目されている漏洩磁束探傷法を用いた非接触検査によるワイヤロープの劣化損傷の評価に際して、

- 1) 劣化損傷の検出の際にセンサノイズとして発生している磁束密度に対し、ワイヤロープの周囲に発生するワイヤロープ構造に起因した磁束密度の乱れ等の解明が行われていない。
- 2) 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形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なされていない。
- 3) 漏洩磁束を検出する磁気センサの適正な設置方法や、センサアレイを組み込んだ際の最適な配置レイアウト等の検討がなされていない。

などの課題がある。

本論文では、前述の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、ワイヤロープの周囲に発生する磁束密度の分布等を数値解析によって解明し、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知実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している。次に、マルチチャンネルの磁気センサアレイによる損傷検知システムを試作し、検知が困難である谷切れ素線の検出を可能にするために、隣接するセンサ間の情報に着目した信号処理から特徴量を抽出する手法について提案した上で、JIS G 3525 で定められた公称径 9mm の 6×24 のワイヤロープを対象として、従来の磁気センサの閾値のみを用いた手法（線形識別器）との比較検討を行っている。さらに、異なる物理量を同時検出可能な損傷検知システム（磁気センサと光学式センサ）を試作して、磁気センサのみの損傷検知システムとの結果を比較考察して、多様な形態の劣化損傷の要因の判別に提案した手法が有用性であることを示唆している。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、損傷検知実験、信号処理ならびに機械学習による損傷形態判別について以下の新たな知見を得たことを述べている。

第1章では、本研究の背景と、ワイヤロープが構造や機能の主たる役割を果たすシステムにおいて、劣化損傷をいち早く検知して事故を抑制するために解決すべき課題について言及している。

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発展に寄与するため、有限要素法を用いた三次元の磁場解析により、ワイヤロープの周囲に発生するワイヤロープの構造に起因した磁束密度の解明を行った。新たな数値解析モデルとして漏洩磁束探傷法を用いた磁化器と素線切れを有したワイヤロープ双方を作成し、相互作用を考慮して磁気ベクトルポテンシャル法によるワイヤロープの三次元静磁場解析の結果から、ワイヤロープの構造に起因して漏洩する磁束密度や素線切れより漏洩する磁束密度を三次元のベクトルに変換して整理した上でノイズ低減可能な検査手法について提案している。

また、試作したワイヤロープ損傷検知システムによる損傷検知実験も行い、計算結果と実験結果を比較検討した。この結果より、数値解析モデルがワイヤロープ周囲に発生する磁束密度及びワイヤロープの構造を起因としたノイズ評価に有用であることを示し、損傷検知実験で計測されたセンサ設置角度ごとの磁束密度の変化と比較的良好一致することを検証した。併せて、磁気センサの感磁方向をストランドのより角度に沿わせることでノイズ低減が可能となり、これまでに開発された漏洩磁束検知システムに比べて高い検出精度が得られることを検証しており、この点が高く評価できる。

第3章では、ロープ円周方向に複数のホールセンサを配置した磁気センサアレイの隣接するセンサ間の情報に着目した信号処理により、損傷の箇所や形態、本数といった劣化損傷の状態の特徴量について抽出し、機械学習を用いて損傷形態の分類を行う手法について検討を行っている。第2章の結果を踏まえ、ノイズ軽減が可能な漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープの損傷検知システムとしてマルチチャンネルの磁気センサアレイによる損傷検知システムを試作し、隣接するホールセンサの測定値からSN比を用いたベクトル量による二次元平面を作り出し、パターン認識手法の一つであるカーネルサポートベクターマシン (K-SVM: Kernel Support Vector Machine) により閾値を算出して、ワイヤロープの素線切れの位置と損傷度合について定量的な評価を行う手法について提案している。この結果より、提案手法による信号処理と特徴抽出によるベクトル量からK-SVMにより算出した閾値と、従来手法の単一の磁気センサの閾値を用いた素線切れの特徴量手法とを比較検討し、本提案手法がワイヤロープ軸方向の素線切れの位置検出に高い精度が得られることを検証した。また、ワイヤロープ軸方向の素線切れの位置検出結果から隣接する磁気センサの測定値を用いて磁気センサの角度位置に合わせた演算を行い、円形レーダーチャートに図示することで、谷切れと山切れの位置と違いなどワイヤロープ断面内の位置検出に関しても高い検出精度が得られることを示した。さらに、円形レーダーチャートに図示した結果から、漏洩磁束波形の面積や最大ベクトルを算出することで素線切れの形態や損傷度合についても評価できる可能性を示しており、損傷認知判断の新たな可能性と検査の合理化の両立性の観点からも評価できる。

第4章では、磁気センサと光学式センサによる同時計測が可能なセンサフュージョン損傷検知システムを試作し、測定値より得られた時系列データの相互関係に注目し、損傷検知実験において検出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K-SVMによる分類を行う劣化損傷の要因判別手法について述べている。また、提案した判別手法と従来の磁気センサのみによる損傷検知実験の結果と比較検討し、多様な形態の劣化損傷の分類や判別に提案手法が有用であるか否かの考察を行っている。これらの結果により、CWTを用いた信号処理を用いることにより、素線切れ (山切れ、谷切れ) のみならず、腐食錆や摩耗による劣化損傷について分類・判別できる可能性があることを検証した。また、磁気センサと光学式センサによる同時計測が可能なセンサフュージョン損傷検知システムを用いた損傷検知の結果は、CWTとPCAを行うことで損傷に関する特徴量のみを増幅させることができ、さらにK-SVMによって分類を行うことで、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ている。これらの成果はセンサフュージョンのシステム実装例として企業技術者からも高く評価されている。

第5章では、第2章から第4章の結果について取り纏め、本研究によって得られた知見について総括している。また、本研究で十分に検討がなされていない構造形態の異なるワイヤロープについての検証や、エレベーターロープのようにロープ駆動ワイヤロープの検査時におけるロープ振動の影響などが未検討である点などを今後の課題として言及しており、今後の研究の進展・実用化も期待できる。

さらに、本研究の一部は、研究業績ともなっている日本機械学会の交通物流部門講演会における研究発表で高い評価を受け、2019年(第97期)日本機械学会交通物流部門優秀論文講演表彰を受賞している。

これらのことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。
よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和4年2月17日