

(論文内容の要旨)

本論文は、小型で高感度な磁気センサを用いて、構造材料の表面欠陥の位置や形状、材料劣化にともなう材質変化を測定する漏洩磁束探傷法について論じたもので、以下の8章からなっている。

第1章の序論では、非破壊検査技術としての磁気探傷法について概説し、漏洩磁束探傷法の現状や問題点、および課題について論じている。すなわち、近年の欠陥探傷ではその位置や形状だけでなく、正確な寸法を同定することが求められている。しかしながら、漏洩磁束分布と欠陥寸法は複雑な非線形の相関関係にあり、多重回帰分析法などの解析的方法は複雑形状の欠陥に適用することが困難である。一方、ニューラルネットワークなどの知識工学的手法では、より少ない計算量で高精度な寸法の評価を可能とすることが課題となっている。

第2章では、磁気的非線形性を有する強磁性材料の漏洩磁束の発生機構について述べ、材料表面に侵入した磁束の屈折挙動について説明している。また、代表的な漏洩磁束の解析的表現である磁気双極子モデルと実験による測定結果をもとに、欠陥形状等の諸因子が漏洩磁束分布に及ぼす影響について論じている。

第3章では、高感度なアモルファス磁気インピーダンスセンサ(AMIセンサ)を用いることにより、地磁気レベルの微小な環境磁場で強磁性材料の表面欠陥近傍から発生する微弱な漏洩磁束を測定することが可能であることを示した。さらに、センサを2次元的に走査することにより、欠陥の開口部形状を表面だけでなく背面からでも同定することが可能なことを検証した。

第4章では、深さや幅などの欠陥形状の定量的評価法について検討している。まず、これまでの逆解析で用いられてきた特徴量抽出法およびその問題点について述べ、それらの問題を解決するために、回帰分析法を用いて特徴量を抽出する方法を提唱している。そして、磁気双極子モデルに基づく解析的表現を回帰分析法に用いれば、より少ない特徴量で精密な漏洩磁束分布を表現できることを示した。そのような特徴量を用いた欠陥寸法の逆解析手法の原理、および本研究で用いる欠陥形状の3次元定量的評価法を説明している。

第5章では、提唱した回帰分析法および3次元欠陥形状の定量的評価法をSS400鋼試験片中に人工的に設けた溝状欠陥に適用した。まず、逆解析に用いるニューラルネットワークの原理について説明し、既知の溝状欠陥について漏洩磁束を測定し、回帰分析法により特徴量を抽出してニューラルネットワークを構築した。最後に、構築したニューラルネットワークを用いて、未知の溝状欠陥について3次元形状評価を行い、本手法の有効性を検証した。

第6章では、第5章で溝状欠陥に適用した回帰分析法およびニューラルネットワークを用いた欠陥形状の定量的評価法を、材料表面法線方向に対して傾きを持つ傾斜欠陥の形状評価に拡張した。すなわち、まずSS400鋼試験片における漏洩磁束探傷を想定した2次元静磁場解析を行い、傾斜欠陥近傍で生じる漏洩磁束分布を計算した。続いて、傾斜欠陥に対応した漏洩磁束分布関数を用いた回帰分析法により特徴量を抽出し、ニューラルネット

ワークの構築を行った。最後に、構築したニューラルネットワークを用いて、未知の傾斜欠陥について断面の 2 次元形状評価を行い、本手法の有効性を示した。

第 7 章では、従来非磁性として漏洩磁束探傷法の対象ではなかったオーステナイト系ステンレス鋼について、表面加工や溶接、疲労、損傷などにより生じたマルテンサイト相などによる磁気的非均質性の測定が可能であることを示した。すなわち、表面加工や溶接部、疲労き裂、SCC を持つ SUS304 試験片および SUS316 試験片について、高感度磁気センサを用いた漏洩磁束探傷を行い、上記の磁気的非均質性が漏洩磁束分布の局所的パターンとして検出できることを示した。漏洩磁束探傷法を、より多様な材料やその劣化などの非破壊評価に適用できる可能性について検討している。

第 8 章では本研究をまとめるとともに、提唱した高感度な磁気センサを用いた漏洩磁束探傷法に関する今後の課題および展望について述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、構造材の強度や機能に影響を与える表面欠陥の形状および材料劣化による材質変化を評価するため、小型で高感度な磁気センサを用いた漏洩磁束探傷法を提唱し、その有効性の検証をおこなったものである。得られた主な成果は以下のとおりである。

1. ホール素子などの従来の磁気センサによる漏洩磁束探傷法は、消磁や着磁のための装置を必要とし、現場での適用範囲が限られていた。本論文では、小型で高感度なアモルファス磁気インピーダンスセンサ (AMI センサ) を用いることにより、地磁気レベルの弱い環境磁場下でも適用できる漏洩磁束探傷法を提唱した。その有効性を検証するために、地磁気中におかれた人工欠陥を有する SS400 鋼試験片の漏洩磁束分布を測定して、その特徴的なパターンから欠陥の検出およびその開口部形状の同定が可能であることを示した。

2. 従来の漏洩磁束探傷法による欠陥断面形状の定量的評価法は、信号処理や評価手法の煩雑さ、評価精度の低さなどから、ほとんどが実用化されていない。本論文では、このような問題を克服し、現場で適用が可能な評価法を開発した。すなわち、測定した漏洩磁束分布から回帰分析法により特徴量を抽出し、あらかじめ学習させたニューラルネットワークを用いて欠陥寸法を推定する。少ない計算量で高精度な推定をおこなうために、単純な断面形状の欠陥に対しては、その解析的な漏洩磁束分布を表すパラメータを特徴量として採用する。矩形断面の欠陥を設けた SS400 鋼試験片に対して、欠陥が存在する面とその位置、断面寸法および3次元形状が精度よく推定できることを明らかにした。また、深さ方向に対して傾いた傾斜欠陥に対しても、磁場解析によるシミュレーションによって、欠陥の位置や傾斜角、断面寸法などが精度よく推定できることを確認した。

3. 原子力プラントの構造材料として用いられているオーステナイト系ステンレス鋼は、非磁性という理由により今まで漏洩磁束探傷法が適用されてこなかった。本論文では、表面加工、溶接、疲労、損傷などにより生じる残留応力、塑性変形、加工誘起マルテンサイト変態を、磁性の局所的変化による漏洩磁束から検出できることを示した。すなわち、溶接部と疲労き裂、SCC を持つ SUS304 および SUS316 試験片について、AMI センサによって試験片表面に水平および垂直な漏洩磁束成分を測定して、表面形状、加工痕や溶接部、き裂周辺の磁気的非均質が測定できることを確認した。

上記の高感度磁気センサによる漏洩磁束探傷法は、簡便な装置と少ない処理量によって、表面欠陥形状の高精度な評価を可能とするものである。さらに、非磁性とされてきた材料に対して、材料劣化を示す材質の非均質性を検出できることを示し、エネルギー関連施設の健全性評価技術の発展に有用であり、学術上、実用上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (エネルギー科学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成21年4月22日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。