

論文審査の結果の要旨

氏名：本 宮 寛 憲

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：上置プローブを用いた渦電流探傷試験によるステンレス鋼材及び炭素繊維複合材のきず検出と評価に関する研究

審査委員：(主査) 教授 小 山 潔

(副査) 教授 小井戸 純司

教授 中 西 哲 也

1970年代の高度経済成長期、あるいはそれ以前に建設された構造物には供用年数が50年近いものや超えるものもあり、社会基盤の構造物などの安全性を維持する必要があり、非破壊検査が非常に重要である。表面亀裂などの高速度で非接触な検出には、電磁誘導を利用した非破壊検査法である渦電流探傷試験が適用されている。渦電流探傷試験で多用されている上置プローブは、試験体の表面状態やプローブの走査時に発生する振動などにより、試験対象物とプローブとの相対距離（リフトオフ）が僅かに変化すると、大きな雑音が発生し、探傷の妨げとなる。そこで、新型の上置プローブである Θ プローブが星川、小山らにより開発提案された。発電プラントのステンレス鋼材において、応力腐食割れ（SCC）および熱疲労割れ（TFC）の発生が報告されている。これらSCCやTFCに対しての Θ プローブによる検出と評価に関する研究報告はされていない。また、炭素繊維複合材の損傷に対する Θ プローブによる検出と評価に関する研究報告もされていない。新型の上置プローブである Θ プローブを用いた渦電流探傷試験によるステンレス鋼材と炭素繊維複合材のきず検出と評価の向上を指向した。本論文は、全5章から構成されており、以下に各章ごとの概要を述べる。

第1章は序論であり、従来の上置プローブによる渦電流探傷試験の問題点を示し、開発提案された新型の上置プローブである Θ プローブを用いた渦電流探傷試験によるステンレス鋼材および炭素繊維複合材のきずの検出と評価の精度向上を指向し、「研究の背景」および「研究の目的」を示すとともに、「論文の構成」について概説した。

第2章では、上置プローブによる渦電流探傷試験の基礎的検討をまとめている。従来、構造物の表面や表面近傍のきずの検出には、自己誘導形の円形の上置プローブを用いている。しかし、試験対象とプローブとの相対距離（リフトオフ）が走査に伴う振動などによって僅かに変わるだけで、大きな雑音（リフトオフ雑音）が生じ小さいきずの検出が困難である。近年では、原理的にリフトオフ雑音が発生せず、きずによる信号のみを検出することが可能なプローブが開発され、これらのプローブは実際に雑音小さくきずを検出することが可能という報告がある。「きずによって発生する渦電流分布の変化だけを検出することで、原理的にリフトオフ雑音が発生しない」という考えに基づき新型の上置コイルである Θ プローブが星川、小山らにより開発提案された。 Θ プローブは、原理的にリフトオフ雑音が発生せず、各種プローブと同等以上の精度できずの検出が可能で、SN比高くきずの検出が行える。また、得られるきず信号の位相角が安定しており、きず信号の位相角に基づいたきずの評価への利用が可能である。本章では、単純形状のきずに対して、従来の上置プローブと新型の上置プローブである Θ プローブを適用した際に得られるきずの検出特性について比較検討を行い、 Θ プローブの優位性を明確とした。

第3章では、ステンレス鋼材のきず検出と評価に関する研究成果をまとめている。構造物の一つである発電プラントでは、保守検査期間が設けられており、その期間内できずの検出と評価を行ったうえで維持基準の判定を行う必要がある。検査には、きずの定量評価に優れる超音波探傷試験や放射線透過試験が行われているが、これらの試験方法は1か所の検査時間が長いので、構造物全体の検査には膨大な時間がかかってしまう。そこで、非接触且つ高速度での検査が可能な、渦電流探傷試験と組み合わせて行うことで、効率的な検査を行うことが可能である。しかし、単一の周波数による従来の自己誘導形の円形の上置プローブでは、リフトオフ雑音が発生するので小さなきずの検出は困難である。また、きず深さの評価精度が低いという問題点もある。近年では、リフトオフ雑音の問題を解決するために、原理的にリフトオフによ

る雑音が発生せず、きずによる信号のみを検出することができる新型の上置プローブが開発されている。SCC や TFC に対する先行研究として、複雑な自然き裂の分布形状を把握するのに有効とされる一様渦電流プローブに着目したマルチ一様渦電流プローブの報告がある。さらに、きずを正確に評価するために、有限要素法を利用した数値解析を行い、実測データと解析データを比較することで、逆問題的にきずの深さや形状の推定手法の報告がある。しかし、各種プローブと同等の精度できずの検出が可能で、得られるきず信号の位相角が安定しているため、位相角を利用したきずの深さ評価が可能である Θ プローブを適用した SCC および TFC の検出と評価についての報告はない。本章では、初めに EDM きずに対して Θ プローブを適用したきず検出を行い、きず検出特性について検討を行った。得られたきず信号からきずの評価方法の検討を行い、12dB 法を提案しきず長さを精度高く評価できることを示した。EDM きずから得られた知見に基づき、SCC や TFC に対して Θ プローブを適用したきずの検出を行い、得られたきず信号からきずの評価の検討を行い、SCC や TFC の検出に対する Θ プローブの有効性を明確とした。また、TFC に対し高い精度のきず評価を行えることを明確とした。一方、SCC に対するきず評価の課題を明示した。

第4章では、炭素繊維複合材のきず検出の研究成果をまとめている。炭素繊維複合材の一つである CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) は、炭素繊維と樹脂の複合材料であり、軽量で強度や剛性が優れていることから航空宇宙機や自動車などの構造材、構造物の補強材など幅広い分野で用いられている。しかし、外部から強い衝撃を受けると、樹脂割れ、層間はく離、積層破断など損傷が生じ、力学特性が低下する問題があり、非破壊検査による損傷検出が重要である。CFRP は、炭素を含有することから、金属と比較して $10^4 \sim 10^6$ 倍と低いが導電性を有するので、渦電流探傷試験の適用が可能である。渦電流探傷試験は、非接触で高速かつ簡便に試験を行えるので、CFRP の検査に適用すれば他の試験法にはないメリットを持つ。しかし、CFRP の導電率が低いことに加え、繊維方向に大きな導電性を有する異方性材料であることや、繊維配向やうねりに起因する雑音が大きいため、金属の試験体と異なり、誘導される渦電流が小さく検出信号の SN 比が低下するなどの問題がある。したがって、CFRP の検査に渦電流探傷試験を適用するには、雑音小さくきず検出性能の高い開発提案された Θ プローブの適用を考えた。 Θ プローブは従来の上置プローブと比べて雑音が小さく、SN 比高くきず検出が可能である。先行研究として、回転渦電流プローブを用いた電気特性の測定、渦電流法を用いた CFRP ラミネートにおけるバルク導電率の特性評価、熱可塑性 CFRP の溶接部の剥離検出のための誘導加熱渦電流試験、多方向 CFRP の繊維うねりを可視化する渦電流法、線状励磁電流が CFRP 板上に配置された際の電磁場の解析解を用いた導電率測定に適した渦電流センサの設計などの報告がある。しかし、CFRP には繊維シートや積層方法などの違いにより各種あるが、これまでに、各種 CFRP に誘導される渦電流分布や実損傷を模したきず検出などに関する検討はほとんど見られない。本章では、以上の背景の下、初めに、電磁気特性の異方性を考慮した有限要素法により求めた渦電流分布を示し、 Θ プローブによる各種 CFRP 板のきず検出に関する基礎的な検討結果について述べる。次に、人工的に衝撃を与え作製したきずの検出結果の検討を行い、CFRP 板に対する Θ プローブの有効性を明らかとした。

第5章は総括であり、各章から得られた結果を総括したうえで、新型の上置プローブである Θ プローブを用いた渦電流探傷試験によれば、ステンレス鋼材及び炭素繊維複合材のきずの検出と評価の精度向上に有効であることを示し結論を述べている。

以上の研究成果は、ステンレス鋼材の応力腐食割れ及び熱疲労割れの検出と評価、炭素繊維複合材の損傷検出に電磁誘導を利用した非破壊検査法である渦電流探傷試験の適用の可能性を示唆するものであり、斯界に貢献するものであると考える。また、この成果は、生産工学、特に電気電子工学に寄与するものと評価できる。

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

平成 31年 3月 7日