

論文の内容の要旨

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

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。非破壊検査は、検査対象物に損傷を与えることなく表面または内部のきずを検出し、検査対象物の安全性と信頼性を高める目的に使用される。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。渦電流探傷試験で使用される試験コイルには、試験対象ごとに貫通プローブや内挿プローブ、上置プローブなどがある。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、「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、炭素繊維と樹脂の複合材料である炭素繊維複合材は、航空機や自動車の構造材に広く使われており、軽量であり、強度と剛性に優れている。しかし、外部から衝撃が加わると機械的な強度が低下する問題がある。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、以下に各章ごとの要旨を述べる。

第1章 序論

本章では、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 上置プローブによる渦電流探傷試験

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 ステンレス鋼材のきず検出と評価

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、非接触か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 炭素繊維複合材のきず検出

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。そのため、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にした。

第5章 総括

本章では、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。