

論文審査の結果の要旨

氏名：清水 鏡 介

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：空中超音波フェーズドアレイを用いた金属板内欠陥の非接触計測に関する研究

審査委員：（主査） 教授 篠 田 之 孝

（副査） 教授 河 府 賢 治 准教授 大 隅 歩

名誉教授 伊 藤 洋 一

我が国の社会インフラは、1960年代の高度経済成長期にその多くが整備された。しかしながら、それから半世紀以上が経過して老朽化が進み、非破壊検査による定期点検の重要性は年を追うごとに増している。特に、発電所や工場、橋梁、トンネルなどのインフラ大型構造物は、社会活動の重要な基盤であり、災害や経年劣化により破壊が起きると、人々の生活や経済活動に甚大な被害をもたらすため、その重要性は高い。一方、生産年齢人口は1995年から減少傾向に転じており、労働人口ひいては定期点検を行う技術者不足も指摘され、その健全性の確保は極めて重要な課題である。

実際の非破壊検査では、それぞれの検査法の特徴を活かして検査対象ごとに異なる手法が適用される。中でも、超音波探傷試験は安全性や利便性に優れ、定量的な検査を実現する方法として広く用いられてきた。この探傷法にはいくつかの種類があるが、最も一般的に用いられるのはパルスエコー法である。具体的には、対象の内部に超音波パルスを入射させ、内部の欠陥部で反射する超音波を受信し、欠陥位置を推定する方法である。

しかしながら、超音波探傷法を用いて検査する場合には、超音波探触子を検査対象の表面にカップリング材を介して接触させて行う必要があり、非常に検査に時間を要する。これは、定期点検を行う技術者の不足と相まって、重要な課題となっている。そのため、できるだけ高速で検査できる超音波探傷技術の確立が求められている。超音波探傷法を高速化するためには、まず非接触での計測を実現すること、そして、超音波探触子を高速で自在に走査することが必要となる。

本論文の提出者は、高速かつ非接触計測が可能な新たな超音波探傷法を提案している。具体的には、空中超音波フェーズドアレイを非破壊検査に利用することを提案し、提案手法による高速非破壊検査手法の開発とその計測システムの構築を目的に研究がなされ、その成果が纏め上げられている。

本論文は7章で構成されている。各章の概要とその成果を以下に示す。

第1章「緒言」では、本研究の背景と目的、研究動向について述べられており、空中超音波を用いた高速非破壊検査手法の重要性を示唆している。

第2章「空中超音波を利用した非破壊検査手法の概要」では、空中超音波励起による金属板での超音波振動の発生とそれを利用した非破壊検査、及び提案する空中超音波波源走査法の概要について示されている。金属等の固体媒質に空中超音波を照射した際の固体表面での音波の反射と透過について述べ、僅かではあるが音波が金属内に侵入できることを示唆している。また、金属等の固体媒質内に侵入した超音波により発生する Rayleigh 波と Lamb 波の諸特性について示し、本研究で対象とする金属板では超音波励振により主に A0 モードの Lamb 波が発生することを述べている。最後に、検査のための計測時間の長時間化を改善する一手法である波源走査法及びその基となる相反定理の概要を述べている。

第3章「超音波振動励起のための空中超音波フェーズドアレイの構築」では、金属板に超音波振動を非接触励起させるための強力空中超音波の発生、及びその照射位置を電子的に高速走査できる、空中超音波フェーズドアレイの構築について示されている。強力な空中超音波を発生させる方法と本研究で用いる空中超音波フェーズドアレイの音波の集束原理および、これに基づいた空中超音波フェーズドアレイデバイスの設計、作製及び駆動システムの構築について述べられている。次に、作製した空中超音波

フェーズドアレイの音波放射特性について検証し、音波集束点において最大約 4000Pa の所望の強力点集束超音波の発生が可能であることを実験的に示されている。

第4章「超音波照射により試料に発生した超音波振動の振幅ピーク分布による非破壊検査」では、金属板に超音波振動を非接触励起させるための強力空中超音波の発生、及びその照射位置を電子的に高速走査できる空中超音波フェーズドアレイの構築について示されている。構築した空中超音波フェーズドアレイによる波源走査法を実現させるための装置を実装した計測システムにより、金属板に発生させた超音波振動の基本特性について検討し、本システムにおいて波源走査法が適用可能であることを明らかにしている。また、減肉欠陥のある金属板に対して欠陥の検出を試み、計測領域での Lamb 波の振動振幅のピーク値分布を得ることで、欠陥の検出が可能であることを明らかにしている。

第5章「グレーティングローブを抑制する空中超音波フェーズドアレイの構築と新たな走査方法」では、超音波エミッタアレイの音波放射時に発生するグレーティングローブの抑制を目的とした空中超音波フェーズドアレイの改良、新たなスキャン方式を導入した波源走査法の提案、及び作製した改良型空中超音波フェーズドアレイの音波放射特性について示されている。空中超音波フェーズドアレイの放射音波を点集束させる際に発生するグレーティングローブの抑制条件を明らかにし、これに基づきを抑制した改良型空中超音波フェーズドアレイの設計ならび作製について述べられている。次に、改良型空中超音波フェーズドアレイの音波放射特性について検証を行い、音波集束点において最大約 5000 Pa の所望の強力点集束超音波が発生可能であること、従来に比べてグレーティングローブが大幅に抑制されていることが示されている。

第6章「超音波振動の波動伝搬特性を利用した非破壊検査」では、改良型空中超音波フェーズドアレイとリニアスキャンによる波源走査方式、及び Lamb 波伝搬特性を利用した金属板内の減肉欠陥の検出方法について述べられている。金属板に発生する Lamb 波 A0 モードの波動伝搬像を得るためにグレーティングローブの発生を抑制した空中超音波フェーズドアレイと波源走査法により構築した計測システムについて示されている。次に、構築したシステムにより計測した金属板に発生させた Lamb 波 A0 モードの波動伝搬情報を基に、減肉欠陥の検出が可能であることが示されている。さらに、空中超音波フェーズドアレイが発生する強力超音波の非線形性により生ずる高調波振動を利用することで、金属板中の欠陥をより鮮明に検出できることも示されている。

第7章「結言」では、本研究で得られた成果を纏めている。また、本論文で提案した計測手法が、新たな高速非破壊検査手法として確立できる可能性を示唆するとともに、併せて今後の研究の展望が述べられている。

以上を要約すると、空中超音波を利用して非破壊検査を行う上での、空中超音波の金属板への反射および透過ならびに金属板を伝搬する超音波の理論検証を行い、高速かつ非接触でそれを実現するための空中超音波フェーズドアレイの利用提案ならび駆動システムを含めた開発を行った。また、空中超音波フェーズドアレイの音波放射特性の検証、非破壊非接触計測システムへの実装、そして開発した計測システムによって金属板減肉部の可視化できることを明らかにした。最後に、空中超音波フェーズドアレイを改良し、金属板減肉部を高調波成分を用いた超音波伝搬画像からより精度よく視覚化できることを示した。

以上のように、非破壊検査の分野において非接触かつ高速で超音波探傷を行える計測技術ならびにシステムとして確立させた業績は、今後の社会インフラを支えていくための一技術として非常に有意義であると言える。

このことは、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6年2月15日