

論文の内容の要旨

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

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されると、人々の生活や経済活動に甚大な被害をもたらす。特に、我が国では高度経済成長期に急速にインフラ構造物が建設されたため、その老朽化が問題として指摘されており、健全性の確保は極めて重要な課題である。そのため、定期的な点検による対象の状態把握が義務付けられており、それに基づいた適切な対応が行われている。また、これら構造物（対象）の検査は対象を破壊することなく非破壊で行う必要がある。これまでに、X線試験や浸透深傷試験、磁粉深傷試験、渦流深傷試験、超音波探傷試験等の種々の検査手法・技術が開発され、発展してきた。検査対象は主に各種プラント構造物の金属やコンクリート内に発生した亀裂や減肉等の部位である。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、対象内部の欠陥部における反射波を受信し、欠陥位置を推定する方法である。

一般に、超音波探傷法を用いて検査を行う場合には、超音波探傷子を検査対象の表面にカップリング材（水・グリセリンなど）を介して接触させて行う。このカップリング材は、検査前に検査対象となる範囲に塗布し、検査終了後に拭き取る必要となる。この作業は検査の効率化の妨げとなっており、検査作業の長時間化の一因となっている。また、カップリング材の塗布によって対象物が汚染されてしまう恐れがある場合には、超音波探傷による検査が実施できない。例えば、電池等の製品はカップリング材の塗布による故障を誘発させてしまう恐れがある。さらに、対象物表面の凹凸が著しい場合は、カップリング材を用いても超音波を対象内に良好に入射させることができなくなる。以上のような背景により、超音波探傷の分野では非接触での検査方法の確立が望まれており、これまで勢力的に研究されてきた。

現在までに研究開発されてきた非接触での超音波探傷は、主にレーザ超音波、電磁超音波、空中超音波を利用した方法である。これらの方法の中で、空中超音波を用いた超音波探傷では、超音波振動の発生に空気媒質の圧縮膨張による縦波を利用しているため、検査対象にダメージが生じることはなく、安全な非破壊検査を行える。また、実際の運用においては検査に要する時間、すなわち計測の高速化が重要となる。

このような状況の下、本論文では空中超音波フェーズドアレイを用いた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を行い、その実現を目指している。

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、研究動向および空中超音波を用いた高速非破壊検査手法の重要性を述べた。

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した。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した。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示した。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示した。

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した。具体的には、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示した。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 4000 Pa 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した。

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した。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た。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た。

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した。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た。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を示した。

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た。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した。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を示した。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を示した。

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を示した。

以上、本研究では空中超音波フェーズドアレイを用いた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を行い、その有効性について明らかにした。