

氏 名	菅 原 康 弘
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 63 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気及通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	超音波顕微鏡システムにおける超音波集束素子に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 中鉢 憲賢
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 中鉢 憲賢    東北大学教授 清水 洋 東北大学教授 山之内和彦    東北大学助教授 櫛引 淳一

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

超音波顕微鏡システムは、物質のマイクロな部分の音響的性質を解析・評価する新しい測定装置として注目されている。その適用法としては、大別して、2次元的な超音波画像をとる画像計測法と物質の弾性的性質を定量的な数値として捉える定量計測法とがあり、現在、材料科学や生物科学など様々な分野への応用に関する研究が数多く行われている。

超音波顕微鏡において、超音波ビームを集束するための超音波集束素子としては、音響レンズ、凹面トランスジューサ、非同心球殻凹面トランスジューサ等が用いられている。ところで、画像計測においては、高い分解能と明瞭なコントラストの画像を得ることが重要である。しかしながら、所望の分解能をもつ超音波集束ビームを形成するためには、超音波集束素子の集束方式、動作周波数、使用媒質、凹面開口の曲率半径、開口角などの多様な構成パラメータをどのように設定すればよいか明確でなく、その設計・評価指針の確立が望まれている。また、試料の弾性的性質の変化を画像のコントラストに強く反映させるためには、どのような超音波集束素子の特性が求められるかシステムとの関連で明らかにする必要がある。一方、定量計測においては、 $V(z)$  曲線解析法が注目されている。これは、 $V(z)$  曲線より試料上を伝搬する漏洩弾性表面波(LSAW)の伝搬特性(位相速度、伝搬減衰)を抽出するものである。現在のシステムでは、LSAW伝搬減衰測定に対して数%から20%程度の誤差が存在するので、さらにより高精度の伝搬減衰測定法を開発するには、超

音波集束素子の特性をも含めてシステムを统一的に検討する必要がある。以上のように、超音波顕微鏡システム全体の性能は超音波集束ビームを形成する超音波集束素子の特性を考慮に入れなければ評価できないにもかかわらず、これまで超音波集束素子とシステムの特性と関連させた研究はほとんど行われていない。

本研究は、超音波顕微鏡システムとその超音波集束素子の動作特性を系統的に解析し、その評価・設計方法を明らかにし、さらに、超音波顕微鏡システムの新しい構成法を示したものである。

## 第2章 超音波顕微鏡システムとその集束素子

本章では、超音波顕微鏡システムにおける超音波集束素子に関する研究を進めるにあたり、その基礎として超音波集束素子の動作の概要を述べ、超音波顕微鏡のトランスジューサ出力 $V(z)$ が超音波集束素子の特性ならびに試料の音響特性とどのように関連するかをまとめた。次に、その $V(z)$ 出力が、画像計測において超音波画像を解釈する場合にどのような物理的な意味を有しているかを述べ、さらに $V(z)$ 曲線を用いたLSAW伝搬特性の定量計測法の原理を述べ、次章以下の議論に備えている。

## 第3章 超音波集束素子とその集束特性

本章では、超音波顕微鏡システム用としてこれまで開発された音響レンズ、凹面トランスジューサ、非同心球殻凹面トランスジューサの3種類の超音波集束素子の集束特性を统一的に把握することを目的とし、超音波集束素子を構成するパラメータと形成される集束音場分布との関係について理論的に検討した。特に、集束音場は、液体カプラに面する凹面開口から放射される音場の位相分布に強く影響されることに着目し、波面光学的概念と波動光学的概念を結合させて理論を展開した。まず、波面光学的概念に基づき、液体カプラに面する凹面開口から放射される音場分布を求め、次に、波動光学的概念より焦点領域での集束音場をLommelの近似法を適用して導出した。その結果、集束音場は2つのパラメータ $D = a^2 / R_L \lambda_L$  ( $a$ は凹面開口の半径,  $R_L$ は曲率半径,  $\lambda_L$ は液体カプラ内の音波の波長)ならびに $E = k_S / k_L \cdot \epsilon / (1 + \epsilon)$  ( $k_S$ ,  $k_L$ はそれぞれロッド材料, 液体カプラ内の波数,  $\epsilon$ は規格化偏心率)により一義的に決定されることを明らかにした。さらに、本解析法に基づいた数値計算により求めた集束特性と、回析理論に基づいた直接的な数値計算により求めた集束特性とを比較し、両者はほぼ同じ傾向をもつことを明らかにした。その結果、超音波集束素子の集束方式、動作周波数、使用媒質、曲率半径ならびに開口角などに関連づけられた上述の2つのパラメータの値を吟味することにより、音場に対する複雑な数値計算をするまでもなく素子の特性を簡便に評価できることが分かった。このような意味から、この2つのパラメータを“音場制御パラメータ”と名付けた。

## 第4章 超音波顕微鏡像のコントラスト

本章では、超音波顕微鏡画像のコントラストが超音波集束素子の特性および試料の弾性的性質とどのように関連しているかを理論的に検討を行った。まず、第2節では、超音波集束素子として、

具体的に、音響レンズと凹面トランスジューサを取り上げ、超音波顕微鏡画像のコントラストと密接に関係する LSAW 伝搬特性と  $V(z)$  曲線との関係について検討した。その結果、音響レンズの場合には、LSAW 伝搬特性の変化が  $V(z)$  曲線へ顕著に現れるが、凹面トランスジューサの場合には、焦点付近に LSAW 伝搬とは関連しない周期的な極大・極小が現れるため、LSAW 伝搬特性の変化があまり現れないことを明らかにした。次に、第 3 節では、超音波集束素子の特性だけを抽出するために試料として LSAW を励振しない理想的な完全反射体を仮定し、その場合の  $V(z)$  曲線に関して理論的に検討を行った。その結果、両集束素子に対する  $V(z)$  曲線の違いの根本原因は、試料からの直接反射波が寄与する出力の振幅変化ならびに位相変化の違いにあることが明らかになった。さらに、第 4 節では、画像計測を目的とした超音波集束素子に求められる特性に関して検討を行い、単に音響レンズを凹面トランスジューサへ置き換えただけでは、その超音波画像から物質の音響特性を正確に解釈することは困難になることを示した。

## 第 5 章 $V(z)$ 曲線を用いた超音波集束素子の評価

本章では、VHF・UHF 帯の周波数領域における超音波集束素子の特性評価法の確立を目的として、 $V(z)$  曲線から間接的に超音波集束素子の集束音場分布を測定する方法について理論的ならびに実験的に検討を行った。まず、第 2 節では、集束音場分布の測定原理について詳述した。フーリエ光学的概念より、反射型超音波顕微鏡で得られる  $V(z)$  曲線は、超音波集束素子の伝達関数と固体試料の反射関数の積とフーリエ変換の関係にある。この関係に着目し、測定された  $V(z)$  曲線より超音波集束素子の伝達関数を導出し、さらに逆ハンケル変換により、集束音場分布を導出する。この測定法は、平坦な固体試料を  $z$  軸に沿って移動させることにより間接的に集束音場分布を測定できるため、アライメント技術などの問題が軽減できるという利点がある。次に、第 3 節では、測定システムの構成およびその動作特性について詳述した。さらに、4 節では、375 MHz 帯のサファイア音響レンズを取り上げて実験を行い、集束音場分布を測定できることを実証し、本評価法の有用性を実験的に示した。

## 第 6 章 複素数化による漏洩弾性表面波伝搬特性抽出法とその定量計測・画像計測への応用

本章では、LSAW の伝搬特性の抽出法について理論的ならびに実験的に検討を行った。まず、音場理論に基づいた数値計算により検討を行った。その結果、従来の振幅情報だけを用いた  $V(z)$  曲線解析法では、音響レンズに対してはほぼ正確な LSAW 伝搬特性を抽出できるが、凹面トランスジューサに対しては正確な LSAW 伝搬特性を抽出することは困難であることを明らかにした。また、 $V(z)$  曲線より抽出された波形に歪が存在することを指摘し、これが、音響レンズによる LSAW 伝搬減衰の測定精度を制限している主要原因であることを見出した。次に、 $V(z)$  出力の振幅情報と位相情報とを取り入れた、いわゆる“複素  $V(z)$  曲線解析”を開発し、音響レンズのみならず凹面トランスジューサに対しても、LSAW 伝搬特性を正確に測定できることを示した。実際に、375 MHz 帯の音響レンズおよび凹面トランスジューサを作製し、実験的に検討し、両集束素子に対

して、理論解析結果の妥当性を検証した。最後に、このLSAW伝搬特性抽出法が、今後の超音波顕微鏡システムにおいて画像計測法・定量計測法にどのように応用されるかを述べた。

## 第7章 結 論

本論文では、超音波顕微鏡システムとその超音波集束素子の特性を系統的に検討し、集束音場分布を支配する“音場制御パラメータ”を導出すると共に、“複素 $V(z)$ 曲線解析”によるLSAW伝搬特性抽出法を考案し、超音波顕微鏡により物質の音響特性を計測する上での超音波集束素子のシステムへの適用に関する基本的指針を与えた。

## 審査結果の要旨

超音波顕微鏡は、物質のマイクロな部分の音響的性質を解析・評価する新しい装置であり、材料科学や生物科学などの分野への応用が期待されている。そのシステム全体の性能は、使用する超音波集束素子の特性に大きく依存するが、超音波集束素子をシステムと関連させた研究はこれまで殆どなされていなかった。

そこで、著者は、現在使用されている3種類の超音波集束素子について、動作特性を系統的に解析し、その評価・設計方法を明らかにし、さらに超音波顕微鏡システムの新しい構成法を提案した。本論文はこの成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は緒論で、本研究の背景を述べ、研究の目的を明示している。

第2章では、超音波顕微鏡システムにおける超音波集束素子の動作原理及び動作特性、並びにこれらと画像計測及び定量計測との関連について説明し、次章以下の研究に備えている。

第3章では、音響レンズ、凹面トランスジューサ及び非同心球殻凹面トランスジューサの3種類の超音波集束素子の集束特性を統一的に把握するため、波面光学的概念と波動光学的概念を有機的に結合させて音場解析を行い、集束音場を支配する重要なパラメータを見出した。著者は、これを「音場制御パラメータ」と呼び、このパラメータを用いることにより複雑な数値計算をしなくても簡便に素子の特性を評価できることを示した。これは有用な成果である。

試料の弾性的性質に依存する超音波顕微鏡画像のコントラストは、超音波集束素子の特性にも依存する。第4章では、画像計測にあたって明瞭なコントラストを得るために要求される超音波集束素子の特性を明らかにしている。

第5章では、超音波集束素子の特性を評価するために、微小領域における集束音場分布の計測法を開発している。これは、 $V(z)$  出力から間接的に測定するもので、新しい計測技術として評価できる。

第6章では、定量計測について、新たに位相情報を取り入れた複素 $V(z)$  曲線解析法を考案し、これによれば従来の $V(z)$  曲線解析法よりも漏洩弾性表面波伝搬特性の測定精度を大幅に改善できることを理論的並びに実験的に示した。これは優れた成果といえる。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、超音波集束素子の統一的な特性評価に関する研究で、まず、「音場制御パラメータ」を導出し、さらに、「複素 $V(z)$  曲線解析法」を開発するなど、超音波顕微鏡システムの性能を一段と向上させたもので、電気計測工学、超音波工学の発展に寄与するところが少ない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。