

氏 名	いまの野かずひこ彦
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成5年2月10日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最終学歴	昭和54年3月 秋田大学鉱山学部電子工学科卒業
学位論文題目	超音波相関法による物質の音響特性の測定に 関する研究
論文審査委員	東北大学教授 中鉢 憲賢 東北大学教授 山之内和彦 東北大学教授 中村 信良

論 文 内 容 要 旨

近年、数 MHz 帯以上 GHz 帯にわたる超音波を用いて物質中の音速や減衰を測定することにより、物質、材料の評価を行う超音波スペクトロスコーピーが発展している。これは音波物性の分野だけでなく、最近の新材料や新機能素子の開発に伴って、これらの材料や機能素子の非破壊的な評価手法として工学、技術、産業分野においても不可欠な学術となっている。現在、超音波スペクトロスコーピーを発展させるためには広帯域にわたって高精度の測定が可能なシステムの開発が望まれている。一方、測定対象は様々な物質の微細構造や生体組織などの顕微鏡的な分野から最近の素子の高機能・小型化の傾向の中にあって、これら微量の物質あるいは微小な素材やマイクロデバイスを対象とした新しい超音波マイクロスペクトロスコーピーといわれる分野の開発が必要になっている。

本研究は、少量の試料で高精度の測定を可能とする新しい計測システムの開発をめざして行ったもので、これまで、超音波計測の分野ではあまり取り上げられていなかった相関法を新たに導入している。特に従来のような連続波によらないで、パルス超音波を用いた反射型の相関システムを開発している。具体的には反射型の可変路長システムと3種類の固定路長システム（Ⅰ、Ⅱ及びⅢ）を提案し音速や減衰の測定についての実験例を示し、本相関法による計測システムによれば1～700 MHzの広帯域にわたり高精度の測定が可能なことを明らかにしている。また、相関出力を波数解析法によって解析することにより試料量を従来の1/20～1/30に減少できることも明らかにした。さらに、相関システムに周波数通倍法を導入し、超音波測定システムの適用範囲の拡大を計るなど相関法の新しい活用法を提案している。

第1章 序 論

本研究の背景、目的と意義及び各章の概要を述べている。

第2章 相関法及び波数解析を用いた測定原理

相関法を用いた従来までの測定システムの問題点を挙げ、本研究で用いるシステムの構成を行う上での基本的な考え方を述べている。本研究ではパルス反射法を基本とし連続波を参照波として用い受波信号との相関をとる方法を採用することにより、従来までの相関法の制限を緩和している。さらに、相関によって得られる空間領域のデータを波数領域のデータに変換して解析する方法を用いた。空間領域のデータから波数領域のデータへの変換法としてデータの複素化を行った後でフーリエ変換を行う“複素フーリエ変換法”を採用している。この方法に対して様々な実験データを仮定し、波数推定精度を計算機シミュレーションにより検討したところ5周期程度の正弦波から0.1%以内の精度で波数推定ができ、短い相関出力データから少量の試料で高精度測定が可能であることを述べている。

第3章 超音波相関システムによる音速測定

相関法を導入した MHz 帯及び V・UHF 帯の可変路長システムの構成について述べている。MHz 帯の可変路長システムでは波数解析法の導入により、従来の空間領域の解析法を用いた場合に比べ、同じ測定精度を得るのに1/20~1/30程度短いデータで音速の測定が可能で、数 cc 程度の試料量で測定が可能であることを明らかにしている。

V・UHF 周波数帯用のシステムは反射型超音波顕微鏡システムを基本とし、これに新たに相関法を導入したものである。システムの有効性を明らかにするため、標準液体試料として水を用いて100~700MHzの周波数において音速と減衰の測定を行っている。その結果、音速については低周波での文献値と0.1%、減衰については3%以内で一致する結果が得られ、この周波数領域での水の音速分散がないことが明らかにしている。また、測定に必要な試料量は0.1~0.2 ccと微量である。

次に、MHz 帯のシステムの応用として緩和及び相転移を示す液体試料としてそれぞれ電解液と液晶の音速及び減衰の測定を行っている。MnSO₄電解液では数10cm/s~2 m/s程度の緩和による音速上昇と緩和周波数付近での減衰のピークが明瞭に観測されている。また、液晶(MBBA)では相転移温度付近での音速と減衰のピークが観測され、これらの観測での本システムの有用性を述べている。

さらに、固定路長システム(固定路長システムI)を用いて液体及び固体試料の音速測定を行っている。水については文献値と0.01%以内の差で、また種々の固体の音速測定ではPEOによる測定値と0.1%以内で一致する結果が得られている。このシステムは試料内部での音波の減衰が大きく反射波のS/Nが低くても相関出力のS/Nへの影響が少なく高精度測定が可能であることを述べている。

第4章 可変路長型相関システムにおける S/N と測定精度

この章では測定精度とデータ S/N の関係を計算機シミュレーションと実験により検討した。雑音を含む正弦波に対する複素FFTの波数推定特性を明らかにするため、種々の S/N を有する、約 10000組の正弦波データに対する計算機シミュレーションを行っている。その結果、波数推定精度は S/N の 1 乗に、また、データ長の 1/2 乗に比例して向上することを明らかにしている。すなわち、波数スペクトルから試料の波数を推定する場合には、データ長を長くともよりも S/N の向上がより有効であることを述べている。次に、計算機シミュレーションの結果を検証するための実験について述べている。相関出力に加算平均を行って、データの S/N を変化した音速測定実験結果から、測定精度は計算機シミュレーションと同様の結果となることを明らかにしている。加算平均による測定精度の向上を制限する要因として、参照波とコヒーレンスな成分をもつ雑音成分の存在について述べ、異なるパルス変調素子を用いることにより、コヒーレンス雑音成分のレベルが異なる場合の実験を行いこれを実証している。

第5章 固定路長型相関システムによる音速変化の測定

2種類の固定路長システム（固定路長システムⅡ、Ⅲ）を用いて音速変化を測定する方法について述べている。固定路長システムⅡは相関出力電圧の偏位を測定する、偏位法であり、固定路長システムⅢは音速変化量を測定周波数の変化によって補償する零位法を用いた方法である。両システムの特性を明らかにするために試料として水を用いて、温度を変化させた場合の音速変化の測定を行っている。その結果、固定路長システムⅡでは音波伝搬路長、測定周波数に比例して位相感度が上昇し、10MHz で10~20ppm 前後の音速分解能が得られている。固定路長システムⅢでは音波伝搬路長の絶対値を測定する必要がないという利点があり、また、用いる発振器の周波数分解能に比例して音速分解能が向上する。実験結果から数 ppm~10ppm 音速分解能が得られている。

第6章 周波数通倍型相関システムによる音速及び音速変化の測定

相関システム測定範囲の拡大のために周波数通倍法を導入したシステムについて述べた。周波数通倍法はシステムの音響的な部分を変更する事無く、電気的な操作により音波の位相情報を拡大するものである。システムの特性を明らかにするために試料として水を用いた実験を行っている。可変路長システムでは通倍率に比例して、得られる相関出力周期数が増加し、文献値との音速差が 0.01~0.03% で測定できている。また、波数解析法の導入により機械的な誤差が、試料の持つ波数とは異なる成分として分離できるという、利点について述べている。

次に、周波数通倍法を導入した固定路長システムⅠを用いた液体及び固体の音速測定を行った。このシステムでは通倍出力のディップ周波数間隔 Δf_d が周波数通倍に比例して減少でき、測定周波数に対して $1/1000 \sim 1/100$ の周波数変化量で音速の測定ができることを述べ、超音波変換器の帯域の制限の緩和や低周波において多くの Δf_d のデータが得られ測定精度向上に有用であること、及び、薄い試料、すなわち少量の試料の測定に有効であると述べている。測定結果は PEO 法による測定値と 0.1% 以内で一致し、高精度測定が可能であることを明らかにしている。

さらに、固定路長システムⅡ及びⅢを用いた音速変化の測定結果を示し、両システムとも周波数通倍法の導入により位相感度が増大し 2 ppm 程度の音速変化が検出可能であることを述べている。

第 7 章 結 論

本章では、全体の総括を行い、各章に述べられている結論を要約し、今後の課題について述べている。

審査結果の要旨

微小な物質・材料の評価法として注目されている超音波マイクロスペクトロスコピー（UMS）の分野において、著者は少量の試料で高精度の音速測定が可能な新しい計測システムであるパルス超音波を用いた反射型超音波相関システムを開発した。本論文は、その計測システムの原理から応用までをとりまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論である。第2章では、まず超音波伝搬路長可変型と固定型の超音波相関システムの特徴について述べ、次に種々の超音波相関法を検討して、UMSの分野への適用にあたっては、パルス反射法に参照波として連続信号を用いる相関システムが有利であり、これに複素データFFT法をとり入れた波数解析法を導入することにより、高精度の計測システムが実現できることを示している。

第3章では、まずMHz帯において、可変路長型相関システムに波数解析法を導入することにより、従来と比較して1/20以下の短いデータ長でも同程度の音速測定精度が得られることを確かめ、次に反射型超音波顕微鏡の技術を利用して、100～700MHz帯の可変路長型相関システムを実現している。この計測システムを用いて、水の音速及び減衰を測定し、それぞれ、文献値と0.1%及び3%以内で一致することを確認し、MnSO₄電解液や液晶などの物性研究への応用に適用している。

第4章では、可変路長型相関システムにおいてS/Nが測定値に及ぼす影響について計算機シミュレーションと実験により検討を行い、波数推定精度がS/Nに比例して向上することを明らかにしている。

第5章では、物質の音速変化を時間的に連続的に測定できる固定路長型相関システムについて、相関出力電圧の偏位として測定する偏位法と、音速の変化量を測定周波数の変化によって補償する零位法の2方式を提案し、それらの特性を実験的に明らかにしている。とくに、零位法の方法によれば、実験的に10ppm以下の分解能が得られることを確かめている。これは優れた成果である。

第6章では超音波相関システムの測定範囲を拡大するために、周波数通倍法の導入を提案している。位相感度が通倍率に比例して向上することを示し、高分解能の計測システムを得ている。これは新しい着想である。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は少量の試料でも高精度で音速測定を可能とする計測システムとして、パルス超音波を用いた反射型超音波相関システムを開発し、新しい計測手法を確立したもので、通信工学および情報・計測工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。