

研究題目	ひとつの球状試料から異方性弾性定数を決定する手法の開発	報告書作成者	中村暢伴
研究従事者			
研究目的	<p>科学技術創造立国を目指す我が国では、技術革新を引き起こすことを目的として新たな機能性材料の開発が推進されている。新材料の開発では、開発した材料が既存の材料に比べて優れているかどうかを判断するために、あらゆる計測技術を駆使してその物性が評価される。原子間の結合力を反映する弾性定数は力学特性を示す基礎パラメータとしてその重要性が認識されており、実用的には振動子、SAW フィルタをはじめとする電子デバイスの最重要設計パラメータでもある。身近のものでは水晶振動子が最も有名であり、時計、ガスセンサ、たんぱく質センサ、膜厚計など、幅広く実用化されている。これらはいずれも水晶の共振を利用しており、水晶振動子を特定の共振周波数でいかに正確かつ安定に振動させるかが重要になる。例えばクォーツ時計では水晶振動子を $32,768 (=2^{15})$ Hz で共振させ、振動回数をカウントすることで 1 秒を刻むため、共振周波数がずれると正確に時間を計ることができなくなる。ここで共振周波数は弾性定数に依存するため、弾性定数の正確な値が必要になる。</p> <p>このように、弾性定数の精密測定は重要な課題として認識されている。しかしながら、磁氣的性質や電氣的性質に関してはナノ薄膜のような微小構造物に対しても信頼性の高い計測ができる装置が既に市販されているのに対して、弾性特性の定量評価は数 mm 角の試験片に対しても容易ではない。固体の弾性定数は結晶の対称性などによって複数個存在する。例えば単結晶シリコンでは 3 つ、水晶では 6 つの弾性定が存在する。しかし、これら全ての弾性定数を測定する市販の装置はない。例えば、代表的な弾性定数計測法としてパルスエコー法があるが、この手法では弾性定数を決定するためにはひとつの試料から異なる結晶方位に沿って複数個の試料を切り出す必要があり、新たに開発された微小な試料に対して弾性定数を計測することはできない。このような研究背景のもと、本研究プロジェクトでは、球の共振を利用した「ひとつ」の「球状試料」から「全ての異方性弾性定数」を決定する手法を開発する。</p>		

研究内容

お寺の鐘の音色を聞くと、経験的におよその大きさと材質を推測することができる。これは鐘の音色(共振周波数)が形状と材質(密度と弾性定数)に依存するからである。つまり、形状と密度が既知の材料の共振周波数を測定すれば、弾性定数を決定することができる。本研究ではこのような測定原理に基づく弾性定数計測法を開発する。

なぜ「球」の「共振」を利用するのか 従来法の多くは、固体が有する複数の弾性定数を決定するためにひとつの試料から異なる結晶方位に沿って複数の試料を切り出す必要がある。新材料の多くは薄膜やワイヤーといった微小な試料しか作製できず、切り出しが困難なために切り出し時に生じる方位誤差を避けることができない。このような理由から、従来法では微小材料の弾性定数を測定することが容易ではない。しかし、球状試料を用いる場合は切り出しによる方位誤差を考慮する必要がない。さらに本研究で提案する手法では、ひとつの試料の複数の共振周波数から一度に全ての異方性弾性定数を決定することができる。

振動モード同定システムの開発 球の共振を利用した弾性定数計測では、説明書の図 1 に示すような共鳴スペクトルを測定する。球の共振周波数は多数存在し、それぞれが異なる振動変位(振動モード)を有している。それぞれの共振周波数の振動モードを同定することで弾性定数を決定することができる。球の共振を利用した弾性定数計測に関する研究はこれまでも行われているが、振動モードの同定手法が存在しなかった。本研究ではこの問題を解決すべく、振動モードの同定システムの確立を研究目的とする。研究内容は、まず球を共振させるための装置を開発する。その後、球を共振させた状態で表面の振動変位をレーザードップラー振動計で計測する。このとき、回転ステージを用いて球表面を走査させる。得られた画像を計算で得られる画像と比較してモード同定を行う。最後にこのシステムを用いて単結晶シリコン球の弾性定数を計測し、測定精度を検証する。

研究概要報告書

(3/3)

<p>研究のポイント</p>	<p><u>ひとつの試料から簡単に信頼性の高い弾性定数を決定する</u> 他の手法では複数の試料を必要とするのに対して、本手法ではひとつの球状試料を用意するだけでよい。また、球の共振を利用した従来法では振動モードの同定法がないことが問題とされてきたが、本研究ではこの問題を解決する。新たに開発される機能性材料は結晶の対称性が低いことが多く複数の弾性定数が存在するが、このような材料では特にモード同定が困難であり、振動モードの誤った同定による測定の信頼性の低下が懸念されてきた。しかしながら、本研究で得られた成果はこの問題を解決しており、物性評価の分野において重要な貢献を果たす。</p>
<p>研究結果</p>	<p>本研究で開発したモード同定システムの概要と、実際に測定した振動画像の一例を別紙(説明書)に示す。試料表面の一部の振動振幅を画像化したところ、明瞭な振動分布が確認できた。計算画像と比較すると両者は良く一致しており、振動モードの同定ができたことを示している。実際にはこのようなモード同定を複数の共振周波数に対して行った。</p> <p>本手法の妥当性と弾性定数の測定精度を検証するために、単結晶シリコンの弾性定数を計測した。単結晶シリコンは立方晶の弾性対称性を示し、3つの独立な弾性定数を有しているが、いずれの弾性定数も報告値(H. J. McSkimin and P. Andreatch, J. Appl. Phys. 35 (1964) 3312.)と0.5%以内の誤差で一致し、本手法による弾性定数計測の有効性が示された。</p>
<p>今後の課題</p>	<p>本研究で開発した振動モードの可視化装置は手動で試料表面を走査し、測定領域も装置の制約のために限られているが、今後は試料全面の変位分布を計測できる全自動測定システムを開発する。また、試料を圧電振動子で挟んで計測を行っているが、試料を保持する力が球の振動を阻害する恐れがあるため、より簡便かつ振動への影響の小さい計測システムを構築する。さらに、圧電体の共振では、弾性定数に加えて圧電率も共振周波数に寄与するため、本手法による圧電率の計測も実施する予定である。</p> <p>球は各種ベアリングやボールペンの先、光学レンズなど幅広い用途で使われているが、弾性手数は欠陥や結晶構造の変化などの組織変化に敏感であるため、共振周波数から不良品の検査も可能になる。本研究で考案した計測法が弾性定数計測にとどまらず、球形状の製品の健全性評価手法として幅広い分野に貢献することを期待する。</p>

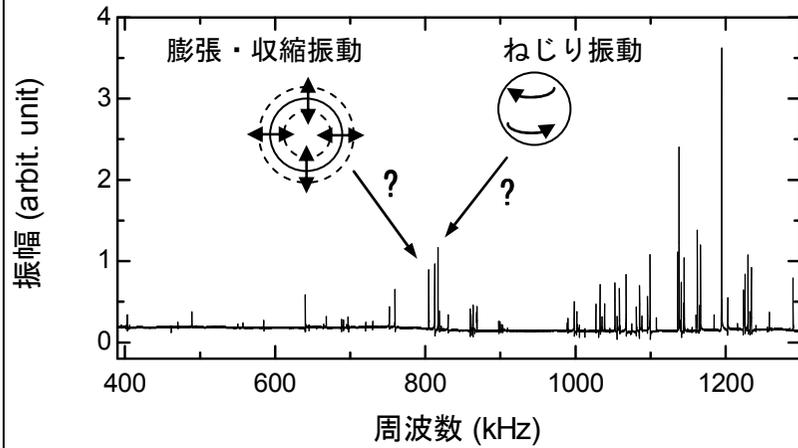


図 1 単結晶シリコン球(直径 9.5mm)の共振スペクトル。各共振ピークは膨張収縮振動、ねじり振動などの異なる振動モードに属している。弾性定数を決定するためには全ての共振周波数(共振ピーク)の共振モードを同定しなければならない。

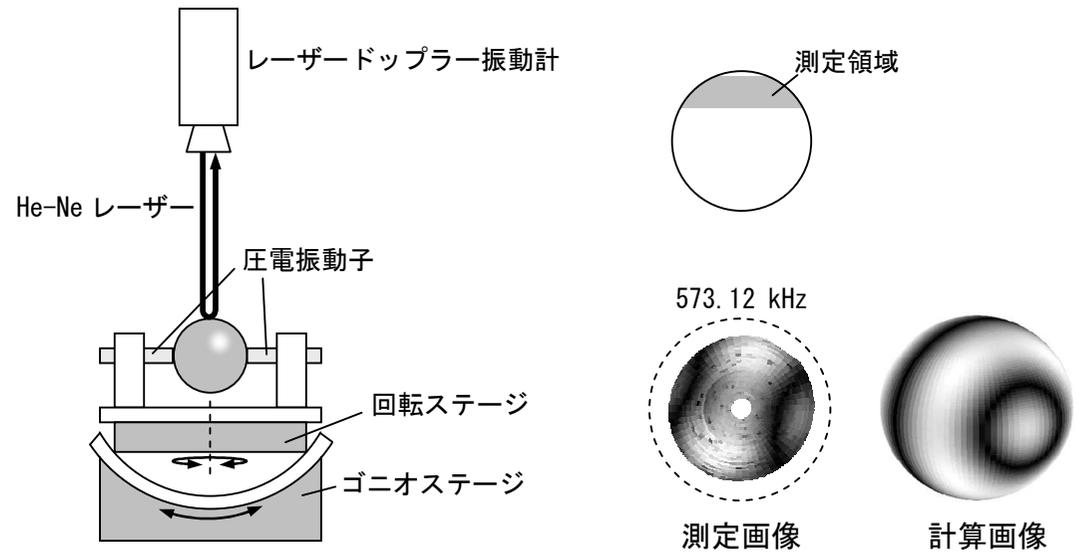


図 2 レーザードップラー振動計による球の振動変位可視化システム(左図)。右では実際に計測した単結晶シリコン球の振動変位分布と計算結果を比較している。