



…平成21年度助成研究より…

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

大阪大学 大学院 基礎工学研究科
助教 博士（工学）

中村 暢伴

1. 音を使った材料評価

私たちは日常生活の中で音を聞いて物質の性質を把握するという作業を知らず知らずのうちにこなしています。スーパーでスイカを買うときにスイカを軽く叩き、その音からおいしいスイカを選ぶことはないでしょうか。また、遠くから聞こえてくるお寺の鐘の音を聞いて、どれくらいの大きさの鐘が鳴っているか想像することはないでしょうか。これらは、物体が鳴り響くときの音色が材質や大きさによって変化することを、私たちが経験的に知っているからできるのです。

物体が鳴り響いているとき、その物体は共振しています。つまり、音色を聞くということは「共振周波数」を測定することに相当します。共振周波数は「形状」と「材質」によって変化しますが、ここでの材質とは「密度」と「弾性定数」を指しています。つまり、形状と密度が既知の試料に対して共振周波数を測定することで、弾性定数を決定することができます。私たちの研究グループではこのような測定原理に基づく固体の弾性定数計測技術の開発を行っています。

2. 研究の背景

新たな機能性材料の開発は、既存の電子デバイス等の性能を飛躍的に向上させる可能性を秘めていることから精力的に行われています。新

たに材料が開発されると最初に各種物性値を正確に把握する必要があり、力学特性を示す基礎パラメータとして弾性定数の計測も行われています。弾性定数とは固体に力を加えたときの変形のしにくさ（剛性）を示す物理量で、ビルや橋、車などの力学的な負荷を受ける構造物の設計はもちろんのこと、携帯電話などで使われている表面弾性波（surface acoustic wave：SAW）フィルタやFBAR（film bulk acoustic resonator）などのバンドパスフィルタ、質量検出型バイオセンサなど各種デバイスの設計においても必須のパラメータであり、弾性定数計測は重要な研究課題であります。

しかしながら、新たに開発される材料の多くは数mm以下の寸法であることが多く、従来法では全ての異方性弾性定数を精度よく決定することが容易ではありませんでした。代表的な計測法に超音波パルスエコー法がありますが、この手法で異方性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の試料を切り出す必要があります。このとき、小さい試料から結晶方位に沿って複数の試料を切り出すことは極めて困難であり、切り出し時に生じる方位誤差を避けることもできません。しかしながら、球状試料の共振を利用した計測法では、切り出しによる方位誤差を考慮する必要がなく、ひとつの試料で一度に全ての異方性弾性定数を決定することができるため、従来法に比べて高い精度での計測を実現できます。

球の共振を利用した弾性定数計測はこれまでも試みられていますが^{1), 2)}、重大な問題点が存在しました。それは、球の共振には膨張収縮振動やねじり振動などの複数の振動モードが存在するのですが、測定した共振周波数がどの振動モードに属しているかを同定することができないことです。振動モードが不明であれば弾性定数を決定することはできません。サウンド技術振興財団よりご助成いただいているこの研究では、レーザードップラー振動計と可動ステージを組み合わせて共振している球表面の振動振幅をマッピングして振動形態を可視化・同定し、球の共振を利用した弾性定数計測法を確立することを目的としています。

3. 研究成果

開発した計測システムを図1に示します。2本の圧電振動子で球形試料をはさみ、一方の圧電振動子で球に振動を励起し、他方で振動振幅を検出します。周波数を変えながら球を振動させると、共振周波数と一致するときに振幅が急激に大きくなり、共振スペクトルにピークが現れます(図2)。共振周波数は複数存在し、これらを測定して逆計算によって複数の異方性弾性定数を一度に決定します。従来の問題点は、共振スペクトルに見られるピークがいずれの振動モードに属しているかを決定できないことでした。そこで、本研究ではレーザードップラー

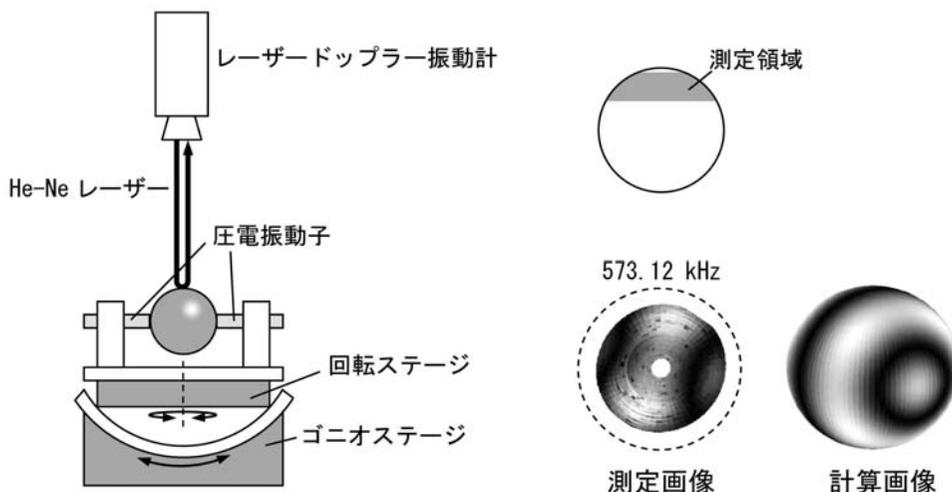


図1 レーザードップラー振動計による球の振動変位可視化システム(左図)。右では実際に計測した単結晶シリコン球の振動変位分布と計算結果を比較している。

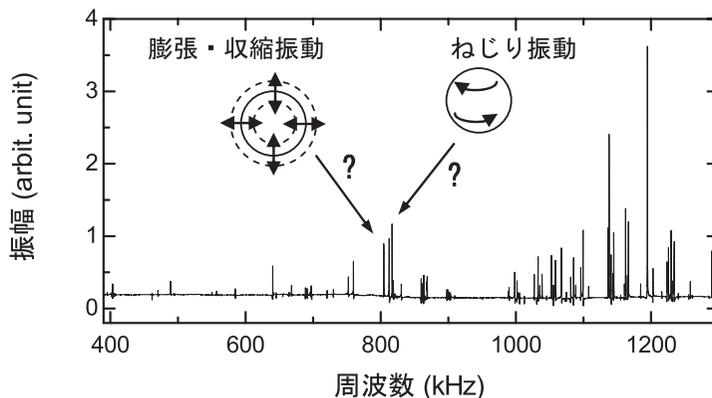


図2 単結晶シリコン球（直径9.5mm）の共振スペクトル。各共振ピークは膨張収縮振動、ねじり振動などの異なる振動モードに属している。弾性定数を決定するためには全ての共振周波数（共振ピーク）の共振モードを同定しなければならない。

振動計と可動ステージを組み合わせモード同定を試みました。圧電振動子をステージ上に設置し、球を共振させます。レーザードップラー振動計からレーザーを球面に対して垂直に照射し、面外方向の振動変位を計測しながら球を回転させることによって変位分布を画像化します。図1では測定した振動分布画像と計算画像を比較しています。振幅が大きい箇所を明るく示しています。両者は良く一致しており、変位分布を正確に計測できたことと、誤りのない振動モードの同定を実施できたことを示しています。このようなモード同定を複数の共振周波数に対して行い、弾性定数を決定します。

球の共振による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ました。単結晶シリコンは立方晶系の弾性対称性を示し、3つの独立な弾性定数を有していますが、いずれも報告値³⁾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ました。

4. 今後の展望

これまでに開発した振動モードの可視化装置は手動で試料表面をスキャンし、測定領域も装置の制限によって限られています。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します。また、試料を圧電振動子で挟んで計測を行っていますが、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します。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す。

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ます。弾性定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、共振周波数変化から不良品の検査も可能になります。本研究で考案した計測手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

ることを期待しています。

最後になりましたが、研究助成のご支援を頂きましたサウンド技術振興財団に対して、心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) D. B. Fraser and R. C. LeCraw, Novel Method of Measuring Elastic and Anelastic Properties of Solids, Rev. Sci. Instrum. 35 (1964) 1113.
- 2) N. Soga and O. L. Anderson, Elastic Properties of Tektites Measured by Resonant Sphere Technique, J. Geophys. Res. 72 (1967) 1733.
- 3) H. J. McSkimin and P. Andreatch, Measurement of Third-Order Moduli of Silicon and Germanium, J. Appl. Phys. 35 (1964) 3312.