

44. 高温環境下における弾性定数の高精度計測方法の確立

東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻 教授 森田 剛

概要

本研究では、材料の振動特性、特に高温環境下における Q 値を高精度に評価することを目的として、近距離場音波浮揚を用いた非接触計測手法を提案し、その有効性を検証した。従来の接触支持による測定では、支持部に起因するエネルギー散逸や熱影響により、高温条件での精密評価が困難であった。本手法では、試料を非接触で支持することにより支持損失を低減し、材料本来の減衰特性を高精度に取得可能とした。圧電振動子を用いた音響浮揚系と振動応答計測系を構築し、共振特性に基づく評価を行った結果、安定した浮揚状態において再現性の高い測定が可能であることを確認した。さらに、高キュリー点を有するニオブ酸リチウム単結晶振動子を用いることで、高温環境下においても安定した励振および計測が可能であることを実証した。本手法は、高温領域における材料評価技術として有効であり、精密な内部損失解析への応用が期待される。

背景および目的

材料の内部摩擦や弾性特性を評価する上で、振動系の Q 値（品質係数）は重要な指標であり、特に高温環境下における Q 値測定は、材料のエネルギー損失機構や耐熱特性の解明に不可欠であった。しかし、従来の接触支持による測定では、支持部からのエネルギー散逸が避けられず、試料本来の特性を高精度に評価することが困難であった。さらに、高温環境下では振動子の特性劣化や測定系の安定性低下が課題であった。

本研究では、これらの課題を解決するため、近距離場音波浮揚を用いた非接触支持技術により、試料を機械的拘束なしに保持した状態で振動特性を測定可能なシステムの構築を目的とした。さらに、キュリー点が高く高温環境でも安定に動作するニオブ酸リチウム単結晶を用いた振動子を採用することで、高温下においても安定した励振を実現し、材料の本質的な減衰特性の高精度評価を可能とすることを目指した。

方法

本研究では、近距離場音波浮揚を用いた非接触支持技術と電磁超音波励振技術(EMAT)により、材料の振動特性を高温環境化で高精度に評価する計測システムの構築およびその有効性の検証を行った。まず、試料を非接触で支持するための音響浮揚系として、ランジュバン振動子を用いた振動面を設計・製作し、その表面近傍に形成される薄い空気層における音響放射力を利用して試料を浮揚させる機構を構築した。振動子には高周波駆動が可能な構造を採用し、振動振幅および周波数を精密に制御することで、安定した浮揚状態の実現を図った。振動励振は EMAT による行い、EMAT の構成を変えることで円柱金属試料の縦振動とねじり振動を励振し、共振応答を測定することで Q 値を算出した。これにより、従来の接触支持系において問題となっていた支持損失の影響を大幅に低減した状態での評価を可能とした。また、測定する振動モードにおいて高次モードを励振することで、弾性特性の周波数依存性も計測可能である。構築した測定システムの概要を図 1 に示す。

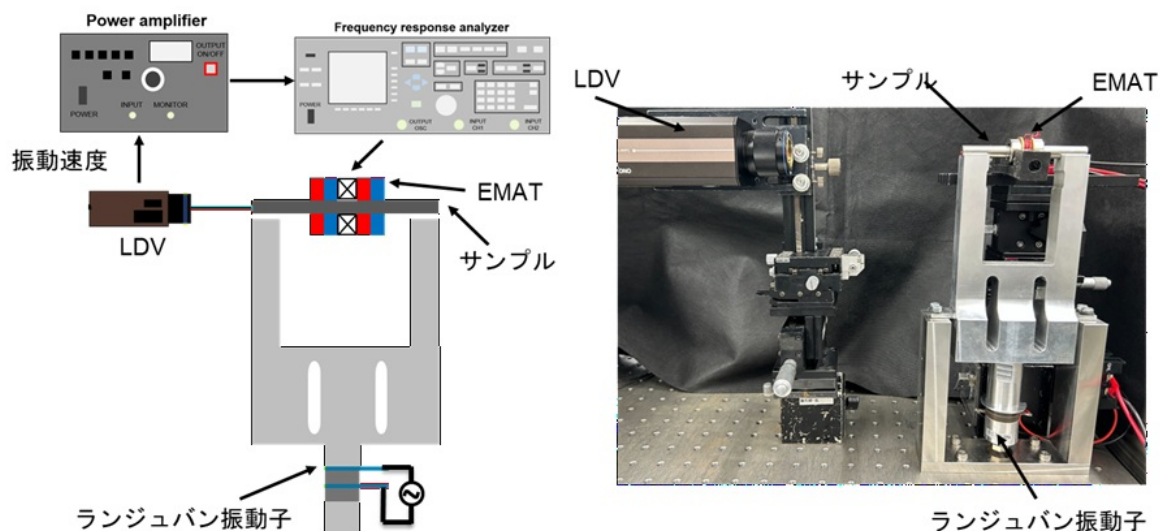


図 1. 非接触での弾性特性測定システム

非接触測定を可能にするため、ランジュバン振動子の超音波振動によりサンプルを浮上させ、EMAT により非接触励振を行うシステムとなっている。

これに加えて、高温環境下での測定を見据え、図 2 のように振動子としてキュリー点の高いニオブ酸リチウム単結晶を用いた圧電素子を採用した。この材料は高温下でも圧電特性の劣化が小さく、安定した振動励起が可能であることから、高温条件における測定系の信頼性向上に寄与する。これにより、従来の圧電材料では困難であった高温領域での振動特性評価への適用可能性を示した。

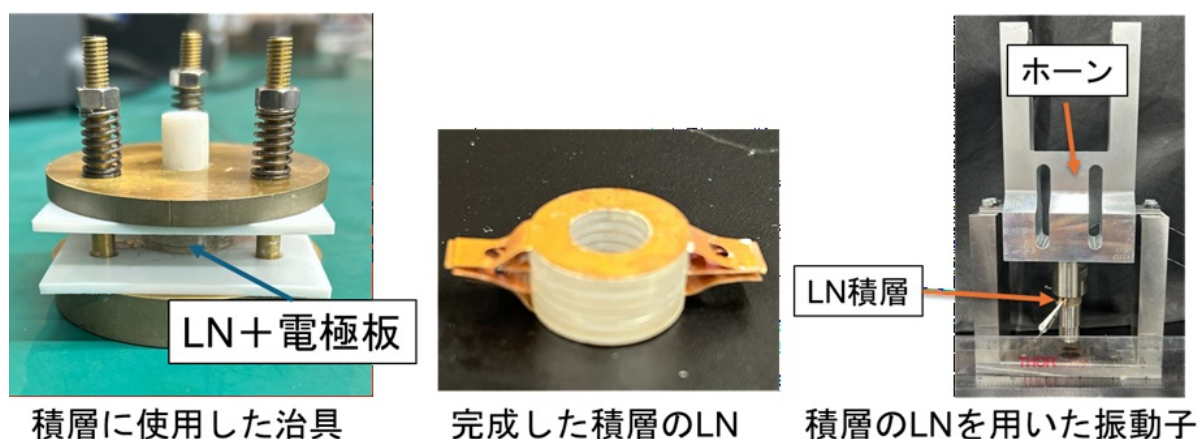


図 2. ニオブ酸リチウム単結晶による振動子の製作

キュリー点が 1210°C と高いニオブ酸リチウム単結晶を利用したランジュバン振動子を製作した。これにより、高温環境での測定が可能になる。

以上のように、本研究では非接触支持による測定環境の構築、振動励起・計測手法の確立、ならびに浮揚安定化技術および高温対応振動子の導入を行い、材料の振動特性を高精度に評価するための基盤技術を確立した。

結果および考察

構築した非接触計測システムを用いて試料の振動特性評価を行った結果、近距離場音波浮揚により試料を安定して非接触支持できることを確認した。浮揚状態において試料は外部からの機械的拘束を受けないため、従来の接触支持に起因する支持損失の影響が大幅に低減され、共振応答に基づく Q 値を高精度に取得できることが示された。特に、共振ピークの鋭さおよび減衰特性の再現性が向上しており、本手法が材料固有の振動特性評価に有効であることが確認された。

また、振動振幅および浮揚距離の調整により、非接触支持を行う際のサンプル位置の復元力を増加させて横方向の変位を抑制し、測定中の姿勢安定化に寄与した。この結果、測定データのばらつきが低減され、定量的評価の信頼性が向上した。室温において、サンプルを SUS304 としたとき、EMAT の構成を変更して縦振動とねじり振動の Q 値を測定した結果を図 3 に示す。

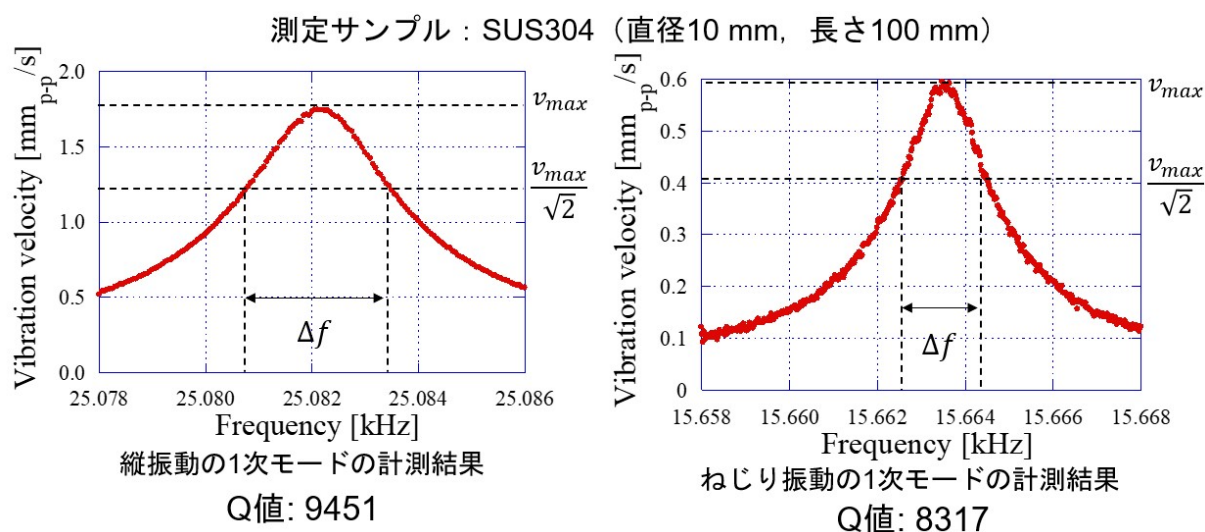


図 3. 室温での SUS304 の Q 値測定結果

SUS304 をサンプルとして室温で共振特性を計測した。EMAT の構成を変えることで、縦振動とねじり振動の異なる Q 値を測定することができた。

さらに、ニオブ酸リチウム単結晶を用いた圧電振動子により、高温環境を想定した条件下においても安定した振動励起が可能であることを確認した。従来の圧電材料では温度上昇に伴う特性劣化が問題となるが、本手法では高キュリー点材料の採用によりその影響を抑制できることが示唆された。これにより、高温領域における材料の Q 値評価への適用可能性が見出された。測定結果例として、SUS304 の Q 値がどのように変化するかを測定した結果を図 4 に示す。このとき、高次モードを測定することで Q 値の周波数依存性を計測することもできている。

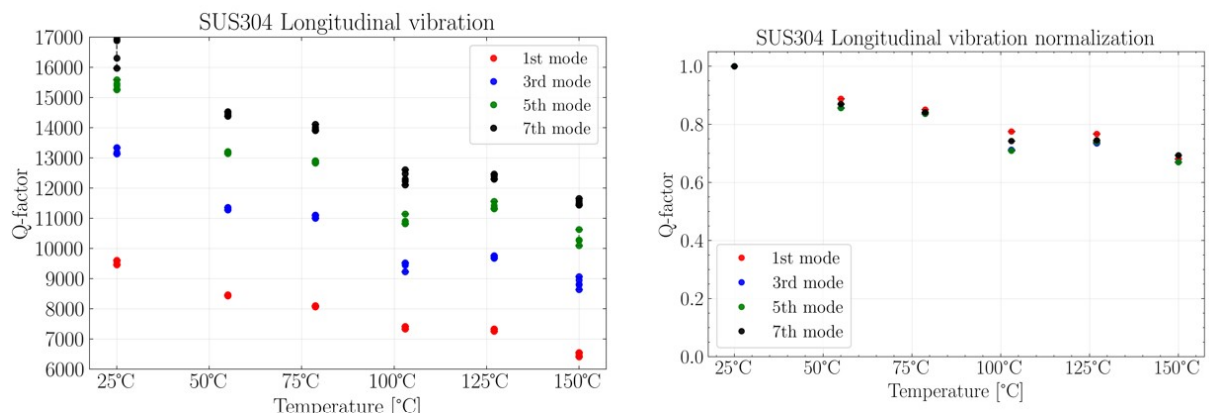


図 4. 高温環境における Q 値の変化

測定システムを電気炉に入れ、温度環境を変化させながら SUS304 の Q 値の変化を測定した。

以上の結果より、本研究で構築した非接触計測手法は、支持損失を低減した高精度な振動特性評価を実現するとともに、高温環境への拡張性を有する有効な計測技術であると考えられる。

(完)

発表論文

- 1) Masatoshi TSUCHIDA and Takeshi MORITA, "Non-contact mechanical Q-factor measurement system based on electromagnetic acoustic transducer", Precision Engineering , vol. 91, pp. 390-395, 2024