

博士論文（要約）

粘弾性測定方法とその加振機構に関する研究

指導教員 樋口 俊郎 教授

東京大学 大学院工学系研究科 精密工学専攻

学生証番号 37-127047

難波江 裕之

論文の要約

製造や管理、設計において使用する材料の特性を評価することは極めて重要であり、中でも機械的特性は最も使用される材料の特性の一つである。機械的特性については材料力学等に見受けられるようにその弾性的な性質、特に線形範囲における性質について研究が昔から盛んに行われており、これらの研究において提案された評価手法は金属等の強度が高く、弾性的な性質の強い材料において有用な指標として広く使用されている。しかしながら、近年使用が増加している高分子材料や食品、生体物質の評価においてはこれらの評価方法では不十分である。なぜならこれらの物質は複合的な組成・構造を持ち、粘性と弾性の両方の性質を持つため粘弾性として評価する必要があるからである。また、工場等の現場においてこのような物質の品質管理は、官能検査によって行われる場合が多いが、近年、再現性や客観性の問題から定量的評価による管理の必要性が高まっており、食品や生体物質の分野で粘弾性評価の需要の高まりが予想される。線形範囲における粘弾性の評価法としては、大きく分けて準静的測定法と動的測定法がある。準静的測定法は、ステップ状のひずみ又は応力の入力に対して、それぞれに対する応力またはひずみの応答を計測し、このひずみと応力の入出力関係から粘弾性を評価するものである。前者は応力緩和試験、後者はクリープ試験と呼ばれ、一回の測定で広い周波数範囲の特性を取得することが出来るが、正確なステップ状のひずみ及び応力を試料に与えることは一般的に困難であるため、周波数分解能が低い。これに対して動的測定は、正弦波状のひずみまたは応力を入力した際の応力又はひずみの関係から粘弾性を評価するものである。これは一度の測定において単一の周波数についての測定結果しか得られないため広い周波数範囲を測定するには時間がかかるものの、周波数分解能が高く、精度の高い測定が可能であるためよく用いられている。

材料の機械的特性の取得法として動的粘弾性測定は有用性の高いものであるが、測定値の校正に必要な標準物質の規定が未だ行われていないなど、その整備が十分であるとは言い難い状況となっている。そのため解決すべき問題点が多く存在しており、以下に示す点が挙げられる。

- ・装置間の測定値の差異が大きい。

測定装置の測定値については、校正に必要な標準物質が無い場合、各装置間における測定値の差異が問題となっており、検証により数十%に上る誤差が生じたという報告もされている。特に製造や管理での使用を目的としたアクチュエータの出力自身を測定における力応答とすることにより、力センサを用いずに測定を行う装置においてその差は大きく、加振機構自体の質量や摩擦による影響が示唆されている。

- ・大変形を伴う測定の際に所望の加振プロファイルを実現するのが困難

粘弾性を示す物質には、ゲルのように”柔らかい”物質が多く存在する。このような柔らかい物質は、大きく変形する状態での使用が想定され、そのような状況での粘弾性の特性の測定が重要である。しかしながら、変形が大きくなると材料的非線形性や幾何学的非線形性のため応答が非線形になるため、PID 制御等の制御では位相遅れやゲインの過不足により波形が歪み、所望の変位プロファイルである正弦波状の変位を測定対象に与えることが難しくなる。

- ・測定装置から得られた測定結果からの粘弾性特性の取得法

動的粘弾性測定において簡便でよく使用される加振方法にせん断と引張・圧縮がある。また、線形粘弾性固体は線形弾性体との類似性から、線形弾性体におけるヤング率やせん断剛性率といったパラメータを複素化したパラメータのうち2つのパラメータによってその特性を完全に表すことが出来る。せん断変形では、試料の形状に依存しない（複素）せん断剛性率を単純な計算から得ることが出来るが、引張・圧縮では、試料と装置間における摩擦や吸着が不可避であることに起因する端効果の影響で単純な計算では形状非依存な粘弾性特性である（複素）ヤング率を算出することは難しい。そのため、動的粘弾性測定によって簡便に線形粘弾性固体の特性を完全に取得するのが困難となっている。

以上の問題点に対して、本論文では、繰り返し制御を用いた粘弾性測定装置及び逆解析を用いた粘弾性特性の取得法を提案する。

本論文は、3部・7章から構成される本論、並びに緒言と結言を合わせた全9章により構成される。本論を構成する3部の概要は以下の通りである。

第I部では、繰り返し制御を利用することで、機構及び測定対象の力応答に非線形性が存在する場合でも高精度の加振プロファイルを実現し、力センサレスでの測定を実現可能な粘弾性測定装置の提案を行う。

第II部では、測定装置から得られた変位と力応答の測定結果から線形粘弾性固体の粘弾性特性を同定する手法について述べる。

第III部では、低コスト化を目指し、永久磁石を用いない電磁吸引力によるアクチュエータを提案し、粘弾性測定装置の加振機構への適用性を検証する。

以下に各章の概要を示す.

第1章では, 研究の背景として一般的な粘弾性測定法について述べ, 測定標準が存在しないことや測定装置の高コスト化等の問題点, 特に生産管理への普及に関わる課題を提起する. そして, それらの問題を解決するため, 高精度な加振が可能かつ, 力センサを用いずに測定が可能な測定装置及びこれを用いた粘弾性特性の同定手法の開発を研究目的とすることを述べる.

第I部は第1章及び第2章の2章から構成されている.

第2章では, 機構の摩擦やガタ, また測定試料が大きく変形することによる粘弾性体の応答に起因する変位波形のひずみを繰り返し制御を適用することにより, 精度の高い所望の加振を実現するとともに, 加振機構の質量や摩擦の影響をキャンセルし, 力センサレスでの測定を実現可能な粘弾性測定装置について述べる.

第3章では, 第2章にて提案した測定手法について, 試料を大きく変形させて動的粘弾性測定を行う際の有用性について検証を行う. 試料が大きく変形した際には, 変位に対する力の応答の非線形性が強くなるため, 目標値に対して変位波形の歪みが生じる. この問題に対して, 繰り返し制御によりこの非線形性を補償することで, 精度の高い正弦波状の加振の実現を試料の大変形時において試みる. 本章では, 従来法としてオートゲインコントロールとの加振精度の比較を行い, 提案手法の有効性を示す.

第II部は第4章及び第5章, 第6章から構成される.

第4章では, 線形粘弾性の領域において, 前章までに検討を行った粘弾性測定装置により得られた測定データから有限要素法及び逆解析手法を用いて粘弾性特性を取得する方法について線形範囲において述べる. また, 取得した粘弾性特性を用いて, 実際の粘弾性体の応答をシミュレーション可能であることを確認する.

第5章では, 第3章にて述べた有限要素法及び逆解析による粘弾性特性の取得手法において問題となる計算機への高負担を近似式を用いることにより改善する手法について述べる. 測定試料の形状に則した近似式を適用することにより, 有限要素法を用いた場合と同等の結果を得ることが出来ることを確認する.

第6章では, 第3章・第4章にて述べた2種類の形状の試料から粘弾性特性を同定する手法に対して, せん断変形と引張・圧縮の2つの変形により得られた測定データを用

いることにより、1つの試料から粘弾性特性を同定する手法を提案する。本手法においては、試料に対して引張・圧縮およびせん断変形の加振を同時に行うことにより、1度に完全な粘弾性特性の取得が可能であると考えられる。そこで、力センサレスでの測定が可能であるため、簡便な構造にて多自由度での測定が可能な測定装置の構成が可能である第I部にて開発した加振システムを用いて2軸での加振が可能な測定装置を作製し、本手法の検証を行う。

第III部は、第7章及び第8章の2章から構成される。

第7章では、今後の製造管理の場での粘弾性測定装置の普及に向けて、永久磁石を使用しない、電磁吸引力と変位拡大機構を組み合わせた新しい電磁アクチュエータの提案を行う。粘弾性測定装置は製造管理の場での需要が高くなっているが、高コストなものが多く、なかなか普及が進まない状況となっている。リラクタンス型のアクチュエータは永久磁石を用いないため低コスト化を図ることが可能であり、リラクタンス型のアクチュエータで最も簡単な構造のものがソレノイドアクチュエータである。しかしながら、通常ソレノイドアクチュエータは、その電磁吸引力と変位及び印加電流の関係の非線形性が高く、正弦波上の加振を行うのは難しい。そこで本章では、電磁吸引力と変位拡大機構を組み合わせることにより、制御性を高めるとともに微小ギャップにおける電磁吸引力を効率良く用いる新しい電磁アクチュエータを提案し、その基礎原理の検証を行う。

第8章では、第7章にて提案したアクチュエータに対して、繰り返し制御を組み合わせることにより、粘弾性測定用の加振機構への適用を試みる。試作機による加振精度の検証により、本アクチュエータが粘弾性測定用の加振機構に適用可能であることを示す。

第9章では、本論文における研究結果を纏めると共に、本研究の今後の展望について述べる。