

論文審査の結果の要旨

論文題目 **STUDY ON DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES FOR BIOMATERIALS USING FEM**

(有限要素法によるバイオ材料の力学的物性値推算法に関する研究)

氏 名 金 景遠 (Gyeong-Won KIM)

バイオ材料を原料として用いる食品の設計、加工あるいは製造機械の操作においては、対象とする材料の理工学的諸特性を把握する必要がある。しかし、バイオ材料は一般の工業製品とは異なり、均質等方性体として存在し、さらに、水分が多く組織が脆弱であるため理工学的特性、特に本研究で対象とした力学的物性の計測とこれに伴う解析が困難である。また、バイオ材料の加工により創出される新しい構造や性状にも普遍的に適応可能な力学的物性計測法も存在しない。このためには、計測対象の外的形態と内部構造・性状を定量的に把握し、非破壊により力学的物性を計測する適用性の高い手法の開発が望まれてきた。しかし、バイオ材料の構造計測が困難であったため、同一条件下で計測し、公表された実測値の変動幅も大きく、また、信頼性や再現性にも疑問が残り、確からしい物性値を推算するためには、再度の繰り返し測定を必要としている現状にある。

他方、バイオ材料の粘弾性特性については、弾性率、粘性率、動的粘弾性などのパラメータを組み合わせた粘弾性モデルの係数により表現されてきた。しかし、これらのモデルの有効性を測定結果により実証することは困難であった。その主な原因として、バイオ材料は上述した理由により、計測用均質試片のサンプリングや同一形態作成が困難であることが挙げられる。これらの事由により、従来の計測法により得られた力学的物性やパラメータに関するデータをそのまま用いた多様なシミュレーション結果は、その信頼性および再現性に疑問が残されてきた。これらの現状を打破するために、バイオ材料の形態・内部構造などの情報を加味した新しい力学的物性計測法、いわゆる、シミュレーションによる解析法の開発が必要と考えた。

有限要素法 (Finite Element Method: FEM) は複雑な連続体を単純な形状、領域 (要素) に分割し、個々の要素に補間関数を用いることで全体の挙動を予測する手法であり、主に構造力学において物体全体の変形や応力の解析に多用されている。そこで、本研究では力学的物性試験から得られた力学的物性パラメータ値を推算し、材料の形態と内部性状を加味した力学的物性値測定法最適化に FEM 最適化アルゴリズムを開発し、シミュレーションにより推算する方法を開発することに着目した。

本研究の目的は、均質および不均質・不等方性バイオ材料の力学的特性を把握するための FEM シミュレーション手法に基づくバイオ材料の力学的物性値の推算法を開発することにある。以下に得られた研究成果を要約する。

まず、均質材料の粘弾性特性を推算する FEM 最適化アルゴリズムを開発した。供試試料には従来から均質食品モデルとして用いられてきた典型的均質等方性材料として、寒天ゲルおよび寒天ゲルゼラチンゲルを選び、工業材料試験法を用いて単純圧縮、応力弛緩、ク

リープ解析を行なった。その結果、実験値と非線形回帰解析結果間の誤差は従来法に比べて高精度であることを確認した次に、不均質・非等方生2層構造食品モデルとして、凍結層を含む寒天ゲルおよびゼラチンゲルを供試モデル試料とし、本方法の普遍的適用性について検討した。これらの結果、FEM最適化アルゴリズム手法は、基本的に多相系食品モデルの力学的物性測定に優位に有用であることを確認した。

次に、軟弱な組織を持つ典型的バイオ材料としてリンゴを選び、その果肉試片を試料としてFEM最適化アルゴリズムにより粘弾性値を推算した。また、推算精度を高めるために、新しく2段階最適化アルゴリズムを開発した。その特徴は、短期圧縮における弾性係数とポアソン比、長期圧縮における相対弾性係数、弛緩時間を同時に決定可能なモデルとして構築したことにある。この手法によりさらに測定精度が向上したことを実証した。

最終的に、本手法をリンゴ固体の粘弾性値測定に適用し、その測定精度検証のための比較手法として、米国農業工学会が青果物の3次元標準計測法として提唱し、世界的にも使用されてきた計測・解析法を採用した。まず、リンゴ固体のデジタル3次元形態モデルを構築した。得られた形態データを用いてFEM最適化シミュレーションを行った。その結果、本手法の測定精度はASAE標準計測法よりも高いことが実証された。

すなわち、本研究の成果は、均質および不均質・非等方性バイオ材料の3次元形態を加味した力学的物性値を推算する高精度FEM最適化シミュレーションモデルを開発し、このモデルが現存する計測法の測定精度に比べて優位であり、適用性にも優れていることを実証したことにある。

以上の研究成果により、審査委員一同は本論文の学術的な独創性と実用的な有用性を高く評価し、博士学位論文として価値あるものと認めた。