

Characterization of Nonlinear Mechanical Behavior of Arterial Tissues by Incompressible Hyperelastic Models with Initial Elastic Moduli: Formulation and Application to Atherosclerosis and Arterial Dissection

著者	Bhat Subraya Krishna
発行年	2020-09-25
その他のタイトル	初期弾性率を組み入れた非圧縮超弾性モデルによる動脈組織の非線形の力学的挙動の特性評価：定式化と動脈硬化，動脈解離への適用
学位授与番号	17104甲生工第382号
URL	http://hdl.handle.net/10228/00007941

氏名・(本籍)	BHAT SUBRAYA KRISHNA (インド)		
学位の種類	博 士 (工学)		
学位記番号	生工博甲第382号		
学位授与の日付	令和2年 9月25日		
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当		
学位論文題目	Characterization of Nonlinear Mechanical Behavior of Arterial Tissues by Incompressible Hyperelastic Models with Initial Elastic Moduli: Formulation and Application to Atherosclerosis and Arterial Dissection (初期弾性率を組み入れた非圧縮超弾性モデルによる動脈組織の非線形の力学的挙動の特性評価：定式化と動脈硬化、動脈解離への適用)		
論文審査委員会	委員長	教授	玉川 雅章
		准教授	高嶋 一登
		教授	山田 宏
		〃	宮崎 康次

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、加齢や病変の生じた動脈壁の非線形の変形挙動を記述するにあたって、低応力域と高応力域に特徴的に現れる弾性繊維と膠原繊維の伸展特性を構成式中の材料定数で定量的に表すことを目的として、等方性及び異方性の非圧縮超弾性モデルにおいて、実験によりひずみ零での初期弾性率を最初に定めてからモデルの残りの材料定数を用いて非線形な応力-ひずみ曲線を記述する手法を提案し、ヒトの動脈硬化や大動脈解離部の血管組織の変形挙動を記述するとともに、解離した動脈の有限要素解析を実施し、各応力域の弾性特性を材料定数と関連づけて明らかにしており、次の5章からなる。

第1章は緒言で、本研究の背景と目的および各章の概要について述べており、また、正常な動脈の構造や、加齢や病変による動脈の力学特性や構造の変化を概説するとともに、動脈の力学的挙動を記述するためにこれまで提案されてきた超弾性モデルを分類し、その材料定数の同定方法を示している。

第2章では頸動脈と胸部大動脈における粥状動脈硬化病変の生じた内膜と非病変部の単軸引張変形挙動に着目し、その力学的挙動の特性評価のため、代表的な非圧縮等方超弾性モデルのひずみエネルギー密度関数として、右 Cauchy-Green 変形テンソルの第一不変量の多項式で表される Yeoh モデル、3つの主伸びのべき乗の和で表される Ogden モデル、Green のひずみの垂直ひずみ成分の2次形式で表される指数部を有する指数関数の異方性 Chuong-Fung (CF)モデルを等方化したモデル、不変量で表される指数部を有する指数関数と第一不変量の線形項の和の異方性 Gasser-Ogden-

Holzapfel (GOH)モデルを等方化したモデルの合計4つを選び、さらに材料定数を3つに制限した上で、応力-ひずみ関係式の **Maclaurin** 展開によって初期弾性率をモデルの材料定数と関連付けている。また、モデル中の材料定数を初期弾性率、非線形項において非線形性の強さを表す係数と項の乗数に分類して、各材料定数の寄与を明らかにしている。さらに、3つの材料定数を同定するために、まず単軸引張試験の実験結果から初期弾性率を同定し、次に残りの2つの材料定数をカーブフィッティングによって同定している。カーブフィッティングの誤差評価を行った結果、**CF** モデルと **GOH** モデルが常に精度よく応力-ひずみ関係を再現しており、4つのモデルの中で特に有用であることを確認している。

第3章ではひずみエネルギー密度関数が指数関数で表される非圧縮直交異方性 **Fung** 型モデルを対象とし、**Green** のひずみの垂直ひずみ成分とせん断ひずみ成分の2次形式で表される指数部を **Green** のひずみテンソルと構造テンソルを用いて直接記法で表し、この記法による材料定数は従来の成分表示による記法の材料定数と関連付けられている。また、単軸引張りと同軸伸展の条件下で応力-ひずみ関係式を線形化し、それぞれの条件での初期弾性率を材料定数と関連付けるとともに、非圧縮直交異方性線形弾性モデルにおける他の弾性率についても材料定数と関連付けている。モデルの適用対象は大動脈解離病変部と非病変部の胸部上行大動脈で、単軸引張りの応力-ひずみ関係の実験結果に対しては等方のモデルを適用し、前章と同様の手法で精度よく材料定数を決定している。通常のカーブフィッティングであれば、初期弾性率を材料定数として正確に組み込むことはできないが、本手法を採用することにより、解離病変部群と非病変部群との間で統計的に有意な差が認められた初期弾性率を使って血管組織の力学特性を同定することを可能としている。さらに、等二軸伸展の応力-ひずみ関係の実験結果に対しては直交異方性のモデルを適用し、指数部のひずみの二次形式が正定値の条件を満足するように、二方向の応力-ひずみ曲線両方に精度よく合うように材料定数の同定を行っている。

第4章では動脈解離の生じた頭蓋内椎骨動脈を対象として有限要素解析を行っている。有限要素モデルは血管壁の伸展性を決定する内弾性板と外膜、主に平滑筋細胞から構成され容易に変形する中膜の3層からなっている。構成式としては第2章で調べた **Gasser-Ogden-Holzapfel** モデルを等方化した非圧縮超弾性モデルを採用し、解離して偽腔が形成された動脈に血圧が負荷された場合、初期弾性率と他の非線形項に関わる材料定数が外膜の膨隆に及ぼす影響を検討している。

第5章では本研究で得られた結論が要約されている。動脈の応力-ひずみ関係の実験データに対して、まず初期弾性率を決定し、残りの材料定数をカーブフィッティングによって決定する手法の有効性を動脈硬化と大動脈解離の実験データに適用して確認している。その際、指数関数で表されるひずみエネルギー密度関数においてはひずみの2次形式で表される指数部が正定値の条件を満足し、同時に非圧縮条件も満足するように

定めている。特に Fung 型モデルについては等方性だけでなく直交異方性のモデルの場合についても初期弾性率および他の弾性率をモデルの材料定数と関連付けている。また、解離の生じた動脈の有限要素解析においてモデル中の材料定数の寄与を明らかにしている。

学位論文審査の結果の要旨

本論文は、有限要素解析で一般的に用いられる非圧縮の等方および直交異方性の超弾性モデルに着目し、単軸引張りおよび等二軸伸展の条件下で応力-ひずみ関係式を線形化することによって初期弾性率とモデルの材料定数を関連付け、頸動脈と胸部大動脈の粥状動脈硬化病変部と胸部上行大動脈の解離病変部およびそれぞれの非病変部の応力-ひずみ関係の実験データを用いて、初期弾性率を決定してから残りの材料定数を精度よく同定する手法を確立し、さらに、椎骨動脈の解離病変部の有限要素解析を実施して超弾性モデルの材料定数の影響を調べており、学術的な価値を有している。また、公聴会においても、多数の出席者があり、種々の質問がなされたが、いずれも著者の説明によって質問者の理解が得られた。

以上により、論文審査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が博士（工学）の学位に十分値するものであると判断した。