

論文審査の結果の要旨

氏名 陳 媛

本論文は生体軟組織を対象として、「軟組織における力学・電気化学現象の三相理論に基づく非線形有限要素解析」と題し、6章よりなる。

関節軟骨や椎間板などの生体軟組織は間質液とプロテオグリカン凝集体やコラーゲン繊維で構成される2相性構造を持ち、さらに強い陰性荷電を持つグリコサミノグリカンがプロテオグリカンに含まれている。このような構造における力学並びに電気化学挙動は細胞代謝に大きく影響を与え、軟骨や椎間板の変性病変の病因を解明するためには力学・電気化学的連成を考慮した解析が必要となる。これに関連する研究として、プロテオグリカン凝集体やコラーゲン繊維と間質液をそれぞれ固体相と流体相として扱うと同時に、イオン相を取り入れる3相理論が提案され、軟骨や椎間板などの生体組織、さらには人工軟組織材料の力学・電気化学現象の解明に応用されている。しかし、3相理論の大変形問題への解析的適用は困難であり、また数値解析も理論の複雑さにより従来ほとんどなされてこなかった。そこで本論文は3相理論の大変形問題への拡張及び非線形有限要素解析手法の開発に的を絞って研究を行った。

第1章では本研究の背景、目的及び従来の研究がまとめられている。

第2章では3相理論の基本方程式、即ち連続方程式、運動量方程式、エネルギー方程式、エントロピー不等式、力学及び電気化学的構成則などの基礎理論を整理している。

第3章では3相理論を大変形問題へ拡張するための定式化が行われている。3相理論は軟組織を固体、流体及びイオン相が同時に同じ空間位置を占有する混合体として定式化されている。軟組織の大変形を考慮する際、ある時刻において同一空間位置を占めるイオン相、流体相と固体相は変形に伴う移流により分離していくため大変形解析における参照配置を定義することはできず、これまでに3相理論は微小変形問題のみに適用されてきた。そこで本論文では固体相の変形に着目し、変形前の固体相を参照配置として、3相理論の基礎方程式を参照配置へ変換することにより、大変形問題における3相理論の定式化を行った。変換の際に流体相及びイオン相の軟組織に対する相対速度の参照配置への写像は、現時刻

における単位時間内軟組織の微小体積から流出する流体体積及びイオンモル数を保つように整合性もたれている。

第4章では拡張した3相理論に基づく非線形有限要素解析の定式化が行われている。第3章で得られた大変形における3相理論の基礎式は解析的に解くことは困難であるため、本論文では重み付き残差法及び変分法に基づく非線形有限要素法の定式化を行った。重み付き残差法においては許容関数空間から選ばれた試行関数を重み関数とすると、速度型汎関数に非圧縮条件及び電気的中性条件をLagrange未定乗数法により導入する変分法と等価になることが証明され、有限要素解析における弱形式の方程式が得られた。さらに離散化を行うことにより、節点における固体変位、流体相対速度、イオン相対流束、静水圧及び電気ポテンシャルを変数とする非線形方程式、及び非線形方程式を解くためのNewton-Raphson法における接線剛性マトリックスが導かれた。

第5章では第4章の定式化に基づく解析プログラムを作成して数値解析を行った。まず、典型的実験配置であるconfined及びunconfined問題について、差分法及びイオン効果を取り除いた2相理論の解析結果と比較することにより開発したプログラムの有効性を検証した。また、イオン相による電気化学効果が軟組織の粘弾性特性、内部流体の流れ、電気ポテンシャル分布に及ぼす影響について基礎的検討を行い、解析結果は実験結果と同様な傾向を示すことを確認した。さらに、電解液に置かれた軟骨の自由膨張(free swelling)が軟骨内の固定陰性荷電分布により軟骨のゆがみを引き起こす現象についての解析を行った。この問題は大变形による強い非線形性を有しており、解析は実験と比較して良好な結果が得られた。

第6章では以上の成果を総括し、将来の展望を述べている。

以上を要するに、本研究は従来微小変形における生体軟組織の力学・電気化学挙動を対象とした3相理論を大变形問題へ拡張し、これに基づく非線形有限要素解析定式化を行うことにより、これまで解析が困難であった大变形を伴う生体軟組織における力学・電気化学連成現象の数値解析手法を開発したものであり、本研究の成果は生体力学、医学、再生医工学などに寄与するところが大きい。なお、本論文第4、5章は、陳 献、久田 俊明、との共同研究であるが、論文提出者が主体となって開発及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士(環境学)の学位を授与できると認める。