

京都大学教育研究振興財団助成事業
成果報告書

平成24年9月19日

公益財団法人京都大学教育研究振興財団

会長 辻 井 昭 雄 様

所属部局 エネルギー科学研究科

職 名 准教授

氏 名 今 谷 勝 次

助成の種類	平成24年度 ・ 研究者交流支援 ・ 外国人研究者招へい助成	
招へいた研究者	所属・職名	カナダ カルガリー大学・准教授
	氏 名	FEDERICO , Salvatore
研究課題名	連続体力学に基づく生体材料の構成関係の構築と数値解析手法への応用	
招へい期間	平成24年 5月 9日 ～ 平成24年 5月26日	
招へい成果の概要	タイトルは「成果の概要／報告者名」として、A4版2000字程度・和文で作成し、添付して下さい。「成果の概要」以外に添付する資料 <input checked="" type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有()	
会計報告	交付を受けた助成金額	270,000 円
	使用した助成金額	270,000 円
	返納すべき助成金額	0 円
	助成金の使途内訳	宿泊料・日当 15,000円×18日=270,000円 ----- ----- ----- -----
当財団の助成について	(今回の助成に対する感想、今後の助成に望むこと等お書き下さい。助成事業の参考にさせていただきます。)	

研究成果の概要／今谷 勝次

「連続体力学に基づく生体材料の構成関係の構築と数値解析手法への応用」

1. はじめに

生体材料のうちで力学的刺激を直接的に受け持つ軟骨 (cartilage) は、刺激によって組織の方向が変化する。このような性質を理解し適切なモデル化を行って境界値問題に適用することは、リハビリテーションでの指針に不可欠であるほかスポーツにおける訓練／強化にとって重要なこととなっている。招聘研究者である Salvatore FEDERICO 博士 (カナダ・カルガリー大学准教授) は、申請者が提案した異方性軸の発展モデルをきっかけに知り合い、博士 (イタリア人) が日本人女性と結婚していることもあり、来日するときには申請者の研究室において共同研究を行っている。博士は、特に非線形連続体力学に基づいて軟骨組織の力学的異方性に関する研究を行ってきた。本共同研究では、博士のアイデアをさらに進めて構成関係の精緻なモデル化とエネルギー密度の分割、さらにエネルギー原理に基づく解法への応用を指向したものである。

2. 経緯：軟骨組織のモデル化

連続体力学では配置の変換が重要な役割を果たす。異方性を有する材料には異方性軸が存在し、配置とともに変化していくと考える。申請者が提案した異方性軸のテンソル積を構造テンソルとして表し、構造テンソルの変化を記述することが材料異方性を定式化する際のキーポイントとなる。

(1) 生体組織 (軟骨) では位置によって異方性の方位と強さが異なることが知られている。このような空間的な性質の変化について、確率密度関数を用いて乱雑な構造 (疑似等方) から異方性軸の発達を表現できる。

(2) 生体組織は透水性を示すため、ダルシーの法則と混合体の理論に基づいて流体 (ほとんど静止状態で圧力のみに応答) との練成問題と考え、異方性を考慮した透水性に関するつり合い方程式を定式化している。

(3) 代表体積にわたり正規分布関数を仮定して、解析的に平均的な透水性係数に関するテンソル表示を得ている。

3. 概要：有理表現とエネルギー原理への適用

実際の軟骨組織の透水性および力学応答に適用するためには、固体部分に関する構成式と異方性に関する情報が必要となる。実際のデータ収集と解析作業は後に回し、ここではエネルギー密度関数の表現と有限要素法による適用に向けた基礎検討を行った。

(1) 非線形連続体力学に立脚して、変形勾配を体積一定の変形 ($J_F=1$) による寄与 (後にペナルティー処理のため) と体積変化を許容する部分に分割して定式化した。構成式の表現においては、4階のテンソルでも体積一定の部分とせん断変形の部分に分けることで、表示を単純かつ合理的にして後の数値解析への適用を容易にしている。

(2) 変形応答について、非線形性を含む等方な変形によるエネルギー密度 (すなわち超弾性体) と (線形な) 異方性によるエネルギー密度に分けられるとして、テンソルの不変式による多線形性の有理表現を得た。上記(1)の4階のテンソルの分割表現によって、エネルギー密度関数の表現も容易になることが示された。

(3) 1軸異方性および直交異方性の場合には従来の定式に等価であるものの、数値解析への適用がより容易な表現が得られていると考えられる。さらにより一般的な異方性の表現については、異方性軸の発展に関する検討が必要であり、今後もこの方面での共同研究を継続していく予定である。

4. その他：異方性の表現とテンソル代数

材料異方性は、異方性軸の存在によって特徴づけられる。本共同研究を通じた議論の間に、これまでの連続体力学では絶対ベクトル (absolute vector) と擬ベクトル (pseudo-vector) の取り扱い方が必ずしも十分に意識されていない (あるいは意識して周知していない) ことを話し合った。特に内部構造を考慮するために一般化した連続体モデル (generalized continua) では、擬ベクトルあるいは擬テンソルに関する基本的な理解が必須であり、今後とも連続体力学における基礎概念についても研究を進めていくことを確認した。

なお、研究室に在籍する修士/博士学生を対象にして研究セミナーを開催し、
「非線形弾性学におけるテンソル代数」

(Tensor Algebra of Nonlinear Elasticity)

と題して、当該分野を含む基本的な話題について博士の研究の一端を紹介してもらった。内容は生体材料に限らず、複合材料などの異方性の表現をどのように取り入れてモデル化するか、あるいはベクトルやテンソルの表現の基本となる計量 (あるいは基底) の計算ルールといった、ごく基本的な内容に至まで平易な英語で話題提供してくれたため、学生にとってもわかりやすい優れた教材になったと確信している。

このような機会を与えてくださった公益財団法人京都大学教育研究振興財団の助成に対し、謝意を表したい。