

課題名 (タイトル) :

大変形と組織成長を伴う生体組織の連続体力学を用いた定式化と数値解析手法の開発

利用者氏名 : ○木田 直樹

所属 : 生命システム研究センター 生命モデリングコア 発生幾何研究ユニット

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係 : 力学場は、生体組織の形態形成や形状保持にたいして、重要な役割を担っていることが知られている。生体内の力学場を知るためには、生体組織の数理モデルを構築し、数理モデルを用いた力学解析を行う必要がある。これまででは主として、定常状態に達した生体組織の変形を、連続体力学の枠組みで偏微分方程式の初期値境界値問題として記述し、有限要素法を用いてその数値解が計算されてきた。しかしながら、生体組織は成長・加齢にともない質量や力学的物性値が絶えず変化している。このため、従来の連続体力学の枠組みで記述された数理モデルによる力学解析には限界があった。そこで、本研究は、(i)連続体力学を基礎として、質量変化と変形履歴に依存する力学的物性値を考慮した新たな生体組織の数理モデルを開発し、(ii)有限要素法を用いて生体内の力学現象の数値シミュレーションを行い、(iii)形態形成や形状保持の仕組みを力学的側面から理解すること、を目的とする。これにより、生体内の力学現象に関する多くの知見が得られ、奇形発生や病的変化などの機序の解明の一助となることが期待される。

2. 具体的な利用内容、計算方法 : 平成 27 年度は、定常状態における生体部材の変形を境界値問題として数理モデル化し、境界値問題の数値解を計算するために有限要素法の(Fortran)コードを記述した。生体部材の数理モデル化においては、その変形を有限ひずみ(大変形)として扱い、構成則として非圧縮超弾性体を用いた。境界値問題は非線形偏微分方程式として与えられるため、従来の非線形有限要素法に倣い、境界値問題の弱形式を線形化し Newton 法を用いて数値解を計算した。線形化弱形式を離散化して得られる連立 1 次方程式の求解には、直接法スパースソルバーである PARDISO

を使用した。なお、生体特有の現象である質量変化や変形履歴に依存する力学挙動を取り扱うために、塑性論を模倣した数理モデルを開発中である。

3. 結果 : 形態形成過程にあるニワトリ足(図 1)を対象として力学解析を行った。図 2 に、ニワトリ足の形状モデルの要素分割(六面体要素分割)と超弾性体構成則での主応力分布図の例を示す。

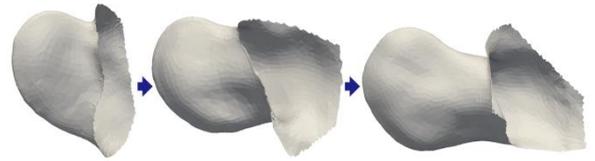


図 1. ニワトリ足の形態形成過程。

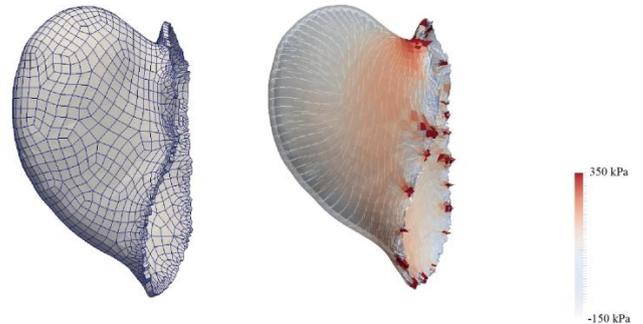


図 2. (左) 形状モデルの要素分割。  
(右) 主応力分布(主応力方向と主応力値)。

4. まとめ : 定常状態における生体組織の変形を連続体力学の枠組みで境界値問題として記述し、有限要素法を用いて境界値問題の数値解を計算した。

5. 今後の計画・展望 : 生体組織の力学解析を行うために、質量変化や変形履歴を考慮した数理モデル(初期値境界値問題)およびそれに対する数値解析手法(有限要素法)を継続して開発中である。