P113 生体硬組織のイメージベースモデリングと 重合メッシュ法による in vivo 応力解析

Image-based modelling of biological hard tissues and in vivo stress analysis
by mesh superposition method

○ 山東篤 (科学技術振興機構) 正 高野直樹 (立命館大, JST)
中野貴由 (大阪大, JST) 馬越佑吉 (大阪大, JST)
正 安達泰治 (京都大, JST) 山本敏男 (岡山大)
河井まりこ (岡山大) 河貝光寛 (立命館大院)
榎元孝俊 (立命館大院)

Atsushi SANDO, Japan Science and Technology Agency, 1-1-1, Nojihigashi, Kusatsu, Shiga
Naoki TAKANO, Ritsumeikan University, JST
Takayoshi NAKANO, Yukichi UMAKOSHI, Osaka University, JST
Taiji ADACHI, Kyoto University, JST
Toshio YAMAMOTO, Mariko KAWAI, Okayama University
Mitsuhiro KAWAGAI, Takatoshi ENOKIMOTO, Graduate School of Ritsumeikan University

Key Words: Mesh superposition method, Homogenization technique, Image-based modelling
Morphology analysis, Biomechanics

1. 緒言

現在, 骨粗鬆症の診断支援あるいは骨再生医療を目指した in vivo 応力解析が望まれており, 中でも均質化法をはじめとしたマルチスケール解析技術の導入が盛んに行われている。人の様々な活動に対して骨に作用する外乱は必ずしも一様ではないため, 任意の非一様応力場を評価できるマルチスケール解析技術が必要となるが, Y 周期性などの仮定を用いた均質化法では, その適用範囲が大幅に限定される。著者らは, 局所化処理に重合メッシュ法を用いることで, 任意のマイクロ応力を評価できることを報告し, 多孔質体のマルチスケール解析においてその有効性を証明している¹⁾。本プロジェクトでは前述の解析法を用いた生体硬組織のマルチスケール解析システムを構築しており, 対話的なモデリングや解析手法上必要となる特殊な処理の自動化を実現している²⁾。

本稿では, 均質化法と重合メッシュ法を用いた生体硬組織のマルチスケール解析システムにおいて, その概要を示すと共に, 骨梁組織に対する高解像度 X 線 CT 画像を用いたイメージベースモデリングと, システム上では内部で自動的に行っている特殊な処理の背景について述べる。

2. in vivo 応力解析による骨粗鬆症診断

海綿骨は微視的に網目状の構造を有しており, それに起因する局所破壊の指標となるマイクロ応力が骨粗鬆症の診断値として適切と考える。また, 骨質は in vivo 応力分布に従ってリモデリングを繰り返すことで, 生体アパタイト (BAP) の配向が変化し, C 軸方向に強い異方性を有することが実験により確認されている³⁾。

以上の背景から, 骨粗鬆症診断システムにおいては, in vivo 応力解析により得られたマイクロ応力を評価値として設定している。その解析にはマクロスケールモデルに対して, ミクロスケールの骨梁構造, さらにナノスケールの BAP 配向を考慮した 3 スケールの連成解析システムを用いる。

Fig.1 Three scales modelling for in vivo stress analysis

3. システムの概要

本解析システムのフローチャート, システム内における均質化法と重合メッシュ法の位置付けを Fig.2 に示す。均質化法はマクロモデルの均質化, 重合メッシュ法はマクロ・ミクロモデルのマルチスケール解析に用いられる。

Fig.2 Flowchart of the system

4. 骨梁組織のイメージベースモデリングとマクロモデルの均質化

たとえば長管骨の場合、その骨梁構造は放射状に形成されており、その材料特性も放射状に変化する。ある一箇所からユニットセルを抽出し、得られた等価物性値を別の領域の物性値として設定することは不適切である。また、海綿骨は骨の中心ほど疎であるため、海綿骨内でもいくつかの分類が必要となる。よって、モルフォロジー分析により海綿骨の密度分布を基にモデル領域をグループ化し、それぞれの領域における等価物性値を計算する。さらにユニットセルの抽出箇所と対応する要素の相対角度を用いて弾性マトリックスを回転させることにより、放射状の分布を表現する。Fig.3はウズラの骨³⁾を例としたマクロモデルのグルーピング過程である。骨の中心から角度毎の密度分布を分析し、モデル領域内を類似の特性を有するA~Gの7区分に設定した。

Fig.3 Morphology analysis and homogenization

5. 重合メッシュ法によるマイクロ構造のモデリング

重合メッシュ法はマクロ構造を表すグローバルメッシュ、マイクロ構造を表すローカルメッシュという2種類のメッシュを重ね合わせ、それぞれの連成を考慮して解く構造解析手法である。最近の研究でローカルメッシュにより小孔のような局所構造の形状評価が可能であることが報告され⁴⁾、本システムではこの特性を骨梁構造のモデリングに応用する。つまり、マクロモデルを表す均質化されたグローバルメッシュに骨梁構造をモデリングしたローカルメッシュを重ね合わせることで、その領域内において骨梁構造を反映した非一様な応力分布を得ることができる。ただし、前述のモデリング手法が成立するためには、モデリング対象となる局所構造がグローバルメッシュと接触しないことが条件となり、これはローカルメッシュ外部に被覆に相当する要素を配置することで達成される。Fig.4はFig.3で用いたウズラ海綿骨マイクロモデルのボクセルメッシュに対する被覆処理を示している。

Fig.4 Insulation for shape control in mesh superposition method

マイクロ構造を表すローカルメッシュにBApを考慮した異方性を設定することで、ミクロスケールとナノスケールを関連付けることができ、重合メッシュ法によってローカルメッシュを埋め込むことで、3スケールの連結が達成される。

6. 解析例

ウズラ脚骨から抽出したマイクロモデルを用いたマルチスケール解析結果を以下に示す。グローバルメッシュとローカルメッシュの位置関係はFig.5のとおりである。境界条件として、グローバルメッシュのXY平面下端を完全拘束、上端にX方向強制変位を設定した。Fig.6はX方向強制変位によるローカルメッシュの変位およびvon Mises応力分布である。

Fig.5 Superimposed position of the local mesh

Fig.6 Displacement and von Mises stress of the local mesh

7. まとめ

本稿では生体硬組織のマルチスケール解析システムのモデリング、解析部分の詳細について記した。今後はヒトの腰椎骨に対する解析結果から、応力をベースとした診断評価値のデータベースを作成し、骨粗鬆症の進行度、危険度を推定する医療システムとして構築する予定である。

参考文献

- 1) Naoki Takano and Yoshihiro Okuno: Three-scale finite element analysis of heterogeneous media by asymptotic homogenization and mesh superposition method, *IJSS*, 41 (2004), pp.4142-4135
- 2) 河貝光寛, 高野直樹, 中野貴由, 馬越佑吉, 安達泰治, 山本敏男, 榎元孝俊: 生体硬組織のマルチスケール解析システムの開発, 計算工学会講演会論文集, Vol.10, pp.457-460, 2005.
- 3) 中野貴由, 石本卓也, 李志旭, 馬越佑吉, 山本雅哉, 田端泰彦, 小林章郎, 岩城啓好, 高岡邦夫, 山本敏男: 骨の力学的機能とミネラルの配向, 日本バイオレオロジー学会誌別刷, 第18巻3号, pp.21-31, 2004.
- 4) 中住昭吾, 鈴木克幸, 藤井大地, 大坪英臣: 重合メッシュ法による穴あき板の解析に関する一考察, 日本計算工学会論文集, Vol.3, pp.145-150, 2001.