

日本機械学会 2015 年度年次大会 に参加して

小北 拓 侑

Hiroyuki KOGITA

機械システム工学専攻修士課程 2年

1. はじめに

私は、2015年9月13日から9月16日に北海道大学札幌キャンパスで開催された日本機械学会2015年度年次大会に参加し、バイオエンジニアリング部門「生命体統合シミュレーション」のセッションにおいて、「リモデリングに伴う変形性股関節症骨嚢胞の壁厚さの変化と骨嚢胞成長の関連」という題目で発表を行った。以下に、その概要を示す。

2. 研究内容

2.1 研究背景と目的

難治性の骨疾患である変形性股関節症の進行のメカニズムの解明における重要な因子として、病態の進行過程で好発する骨嚢胞の成長過程の理解があげられる。骨嚢胞は周囲を骨嚢壁に覆われているため、骨嚢壁のモデル化を行った上での周囲のリモデリングによる海綿骨の形態変化の評価が望まれる。本研究では、新たに骨嚢壁をモデル化し、壁の厚さの差が骨嚢胞周囲のリモデリングに与える影響を評価した。さらに、得られた計算結果から、骨嚢胞の成長とリモデリングの関連を考察した。

2.2 解析手法⁽¹⁾

骨嚢胞周囲の骨再構築シミュレーションにおいて、骨再構築の力学刺激として骨梁内局所の応力の関数 σ 、その一様化に向かう再構築駆動力として応力不均一性 Γ を導入する。図1(a)に示すように、骨梁表面の点 x_c の応力値を σ_c 、点 x_c 近傍の応力代表値を σ_d とするとき、 Γ を式(1)のように定義する。

$$\Gamma = \ln(\sigma_c / \sigma_d) \quad (1)$$

ここで、 σ_d は点 x_c から半径 l_L 内の骨梁表面上の点 x_r における応力値 σ_r の重み付き平均値により

$$\sigma_d = \frac{\int_S w(l) \sigma_r dS}{\int_S w(l) dS} \quad (2)$$

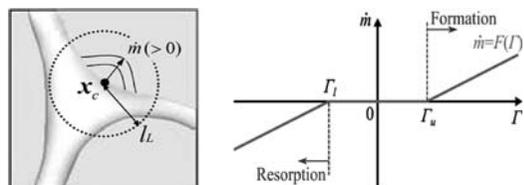
と表す。 S は、骨梁表面、 $w(l)$ は、点 x_c と x_r の距離 l に関する重み関数として

$$w(l) = \begin{cases} 1 - l/l_L & (0 < l < l_L) \\ 0 & (l < l_L) \end{cases} \quad (3)$$

と表す。局所での応力一様化を表現するため、 Γ と骨梁表面移動速度 \dot{m} の関係を図1(b)のように、連続関数によりモデル化する。 Γ_l と Γ_u は、再構築平衡の不感帯の閾値で、骨梁表面の見かけの移動速度を調整する値であり、骨梁形態変化に影響を与える。計算では、海綿骨のボクセルモデルの応力解析と応力不均一性の評価による要素の付加・消去を1stepとして繰り返し、形態変化を表す。

2.3 解析結果と考察

骨嚢壁の厚さを変化させて計算を行ったリモデリングシミュレーション結果として、壁厚さが0.192 mm と0.448 mm のモデルの $x-z$ 断面におけるリモデリング後の形態をミーゼスの相当応力分布と合わせて図2にそれぞれ示す。図では、骨嚢胞近傍の上下において、骨吸収により骨梁が消失した。また、壁厚さの差に依存して、骨嚢胞上下で骨吸収により発生した空隙の大きさに差が見られた。次に、骨嚢胞の外郭から0.640 mm 外側の三次元的な評価領域における正中断面とその評価領域内の各モデルの空隙(骨梁部以外の部分)の存在割合の変化および、各モデルの初期とリモデリング後の空隙の存在



(a) Model of trabecular surface remodeling

(b) Schematic representation of representation between \dot{m} and Γ

Fig. 1 Model of trabecular remodeling simulation

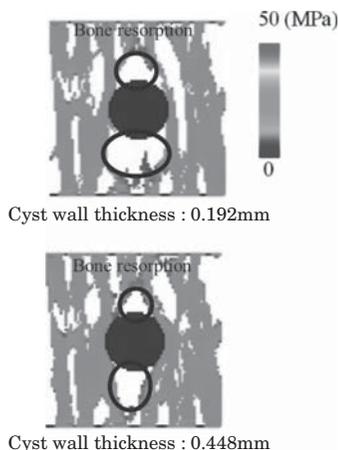


Fig. 2 Remodeled morphology with its Von Mises stress distribution of the cross section

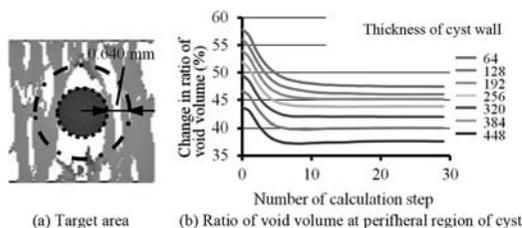


Fig. 3 Change in ratio of void volume from initial to remodeled morphology

割合の差を図3, 4にそれぞれ示す。図3より、いずれのモデルの空隙部の割合も減少しており、骨量が増加したことを示している。これは、変形性股関節症の進行過程において見られる骨嚢胞周囲の骨量の増加の観察結果⁽²⁾に対応している。また、図4は、壁が厚くなるに伴い、リモデリングの初期と後における骨嚢胞周囲の空隙の体積の差が小さく、骨嚢胞の成長が緩やかになることを示唆している。これは、壁が厚くなることで壁が周囲の多くの骨梁とつながり、海綿骨から壁へ伝達される荷重が大きくなることで骨形成が顕著に発生し、空隙の体積が小さくなったためであると考えられる。骨嚢胞の成長は、壁周囲の骨吸収により、骨梁が侵食され、骨嚢胞が肥大化するために進行すると考えられる。このため、本結果は、骨嚢胞は発生間もない段階、すなわち、自身の大きさが小さく、壁厚さが薄いときに特に成長しやすく、壁厚の増加に伴ってその肥大化

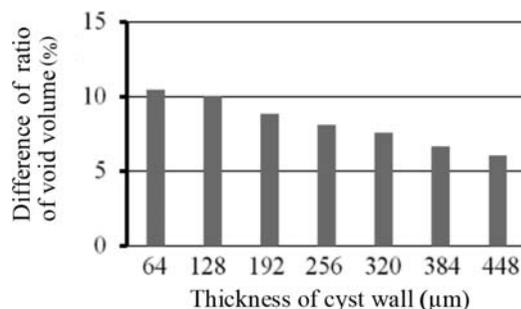


Fig. 4 Difference of ratio of void volume between initial to remodeled morphology

の速度は低下するが、成長は継続することを示している。以上の検討により、骨嚢胞の壁厚さの変化に伴うリモデリングと骨嚢胞の成長の関連が示唆された。

2.4 結言

本研究では、壁厚さを変化させた海綿骨内の骨嚢胞周囲のリモデリングによる微視的な骨梁形態変化の評価を行った。その結果、骨嚢胞発生時の骨嚢胞が小さく、壁が薄いときは骨嚢胞の肥大化につながる骨吸収が顕著に発生することが示された。また、骨嚢胞の厚さの増加に伴い、骨嚢胞周囲に存在する空隙の体積の変化が小さくなり、骨嚢胞の成長が緩やかになることが示された。以上の結果より、骨嚢胞の壁厚さの変化に起因する骨嚢胞周囲のリモデリングによる骨梁形態変化と骨嚢胞の成長の関連が示されたとともに、本計算手法が、骨嚢胞成長の予測に応用できる可能性が示された。

3. おわりに

今回の発表で多くの研究者から質問や意見をいただき、大変参考になりました。また、ご指導をいただいた田原大輔先生、横浜市立大学整形外科の皆様、研究室の皆様様に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 安達泰治ほか, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.66, No.648, pp.200-207, (2000).
- 2) 関水正之, 昭医会誌, Vol.52, No.4, pp.369-384, (1991).