

Representation of Internal Bone Remodeling  
by Using Finite Element Analysis

正 田中 英一 (名大)      正 山本 創太 (名大)  
○学 木村 和昭 (名大院)

Eiichi TANAKA, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya  
Sota YAMAMOTO, Nagoya University  
Kazuaki KIMURA, Nagoya University

Key Words : Biomechanics, Bone Remodeling, Finite Element Analysis

## 1. 緒 言

骨の力学的リモデリングに関して、これまでに多くの研究者が実験的観察を行っており<sup>(1)-(5)</sup>、リモデリングの特徴について様々なことが分かっている。また、骨リモデリングを表現するためのモデルも提案されてきたが<sup>(6)-(9)</sup>、これらの多くは骨の最適構造の表現に重点が置かれており、時間の経過に沿ったリモデリングの表現は困難であった。

当研究室ではこれまで、従来の実験的観察が示す骨リモデリングの特徴を表現でき、実際の時間経過に沿った解析が可能なモデルの定式化を行ってきた<sup>(10)</sup>。本研究では、このモデルを実際の整形外科領域やリハビリテーションにおける具体的な臨床問題へ適用するために有限要素解析に組み込み、その記述能力を検証した。

## 2. 力学的リモデリング構成式

本解析においては、従来著者らの開発してきた骨リモデリング構成式<sup>(10)</sup>を用いた。この構成式では骨リモデリングを引き起こす力学的刺激として静水応力 $\sigma_m$ 、体積ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_v$ 、骨密度 $\rho$ から決まる $S$ を定義し、力学的刺激を蓄積・伝達する過程を、内部状態変数 $R_i$  ( $i=0,1,\dots,n$ )を用いて表現している。この過程では、過大な刺激に対しては骨吸収を生じる表現となっている。骨密度は、伝達された力学的刺激 $R_n$ の値により決定される。

$$S = \left| \frac{\sigma_m \cdot \dot{\epsilon}_v}{\rho} \right| \quad (1)$$

$$\dot{R}_0 = F(S) - r_0 \langle R_0 \rangle' \quad (2)$$

$$F(S) = S - aS^3 \quad (3)$$

$$\dot{R}_k = r_k \{ R_{k-1} - R_k \} \quad (k=1,\dots,n) \quad (4)$$

$$\rho_i = \rho_{\max} \tanh(hR_n) \quad (5)$$

$$\dot{\rho} = \alpha(\rho) \{ \alpha_c(\rho_i - \rho) - \alpha_l(\rho - \rho_i) \} \quad (6)$$

$$E = g\rho^k \quad (7)$$

ここで、 $r_0, l, r_k, h, \alpha_c, \alpha_l, g$ は定数、記号 $\langle \rangle'$ はマコーレー括弧である。 $\rho_{\max}$ は骨密度のとりうる上限値であり、関数 $\alpha(\rho)$

は、単位体積あたりの海綿骨骨梁のリモデリング可能な自由表面積、 $\rho_i$ は骨密度の目標値を表す。定数 $k$ は、格子の構造的特徴によって定まるパラメータで、本研究では等方な格子構造を仮定し、 $k=2$ <sup>(11)</sup>とした。

## 3. 有限要素解析への適用

有限要素解析への適用には、Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. 汎用非線形有限要素解析ソフト ABAQUS ver. 5.8-1 のユーザサブルーチン機能を利用し、定式化した構成式を組み込んだサブルーチンとして組み込んだ。

まず、有限要素解析の検証として、1個の立方体1次要素に対する単軸繰り返し負荷シミュレーションを行った。初期状態でひずみ0.2%を生ずる台形応力波を、1日あたり0, 4, 36サイクル、計50日間負荷した。Fortranプログラムによる数値解析結果との比較を図1に示す。各刺激条件ともに有限要素解析の結果が数値解析の結果とよく一致した。但し、数値解析と有限要素解析の結果を一致させるためには、有限要素解析において1日の大半を占める休止期での時間増分を十分に細かく設定する必要がある、ABAQUSの自動増分機能は必ずしも適切には働かないことがわかった。これは計算アルゴリズム

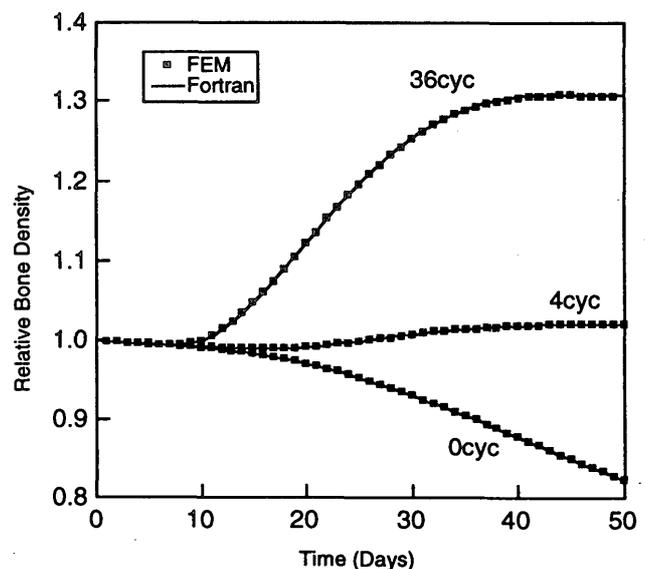


Fig. 1 Comparison with FE Analysis to Numerical Simulations

ムの違いのためと考えられ、同じ刺激が長く続くような有限要素解析を行う際には、時間増分を十分に細かく設定する必要があることがわかった。

次に、本モデルによる構造体のリモデリングの表現能力を検討するため、図2のような解析を実施した。負荷条件は前述の1要素モデルと同様に1日あたり0.4または36サイクルの圧縮繰り返し負荷を50日間を与えることとした。刺激回数が1日あたり0サイクル、つまり無負荷の場合の骨密度は全ての要素で一様に骨吸収が進行した。刺激回数が1日4、36サイクルの結果を図3、図4に示す。両解析結果ともに、骨密度は負荷部位、拘束部位で大きく、負荷を受けない左右上端部で最小となった。左右上端部の骨密度は無負荷条件下での骨密度とほぼ同じ値であった。4サイクル/日の場合は部位による骨密度差は小さく、全ての要素で骨吸収が生じた。36サイクル/日では、負荷部位から斜下方、拘束部位にかけての領域で骨形成が生じ、力学的刺激の分布に対し配向したような構造を形成した。以上の結果より局所の力学的刺激に対する応答を記述するリモデリングモデルにより、負荷を受ける骨の内部構造を表現できる可能性が示された。

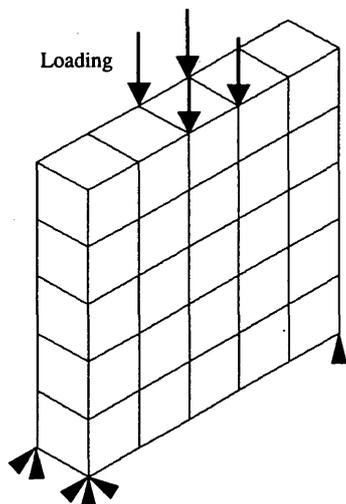


Fig. 2 Finite Element Model and Boundary Condition

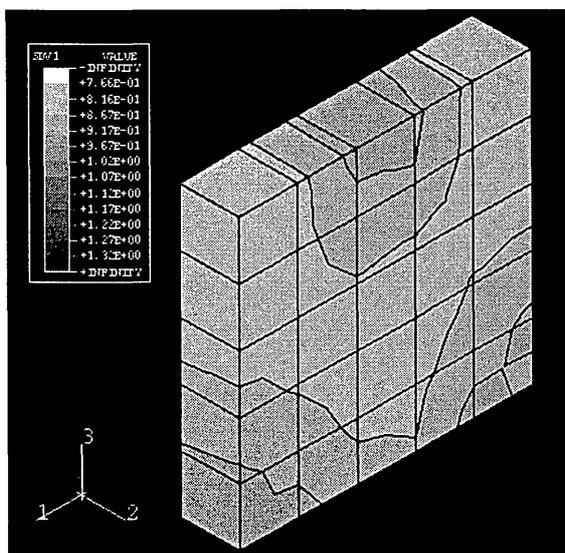


Fig. 3 Bone Density Distribution (4 Cycles/Day, 50 Days Loading)

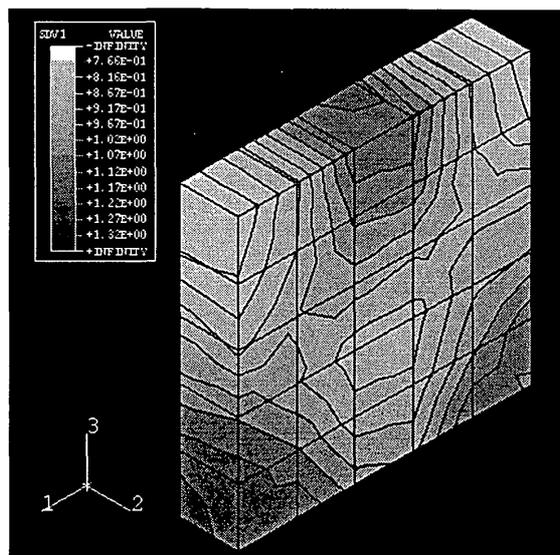


Fig. 4 Bone Density Distribution (36 Cycles/Day, 50 Days Loading)

## 5. 結 言

本報では、当研究室において定式化した構成式を有限要素解析に適用し、その記述能力を検討した。その結果、当研究室で行ってきた数値シミュレーション結果と良く一致することが確認できた。さらに、当モデルのリモデリング表現能力の検討を行い、刺激条件の違いによる骨密度分布の違いを表現することができることが確かめられた。今後は、実際の骨で生じ得るような骨密度分布の表現を試み、検証を行う。

## 参考文献

- (1) Rubin, C.T. and Lanyon, L.E., *J. Bone and Joint Surgery*, **66-A**, (1984), 397-402.
- (2) O'Connor, J.A. and Lanyon, L.E., *J. Biomechanics*, **15**, (1982), 767-781.
- (3) Hert, J., Liskova, M., Landrgot, B., *Folia Morphologica*, **17**, (1969), 389-399.
- (4) Lanyon, L.E., Rubin, C.T., *J. Biomechanics*, **17**, (1984), 897-905.
- (5) Olsson, M., Friberg, B., Nilson, H., Kultje, C., *The International J. Oral&Maxillofacial Implants*, **10**, (1995) 15-21.
- (6) Cowin, S.C. and Buskirk, W. C.V., *J. Biomechanics*, **11**, (1979), 269-276.
- (7) Carter, D.R., Fyhrie, D.P., Whalen, R.T., *J. Biomechanics*, **20**, (1987), 785-794.
- (8) Fyhrie, D.P., Carter, D.R., *J. Biomechanics*, **23**, (1990), 1-10.
- (9) Weinans, H., Huiskes, R., Grootenboer, H.J., *J. Orthop. Res.*, **10**, (1992), 845-853.
- (10) 田中英一, 山本創太, 青木洋一, 山田宏, 岸川景介, 過負荷時の骨吸収を考慮した骨リモデリングの多軸数理モデル, 機講論, No.99-37, 257-258.
- (11) Gibson, L.J., Ashby, M.F., 大塚正久訳, セル構造体 多孔質材料活用のために, 内田老鶴圃, 446-450.