101 成長ひずみ法を用いた足関節の生体適応形状解析

Optimal Shape Analysis of Ankle Using Growth-Strain Method

○伴野慎哉 (山梨大院)
中村祐敬 (山梨大医)

正 水口義久 (山梨大工)

Shinya BANNO, University of Yamanashi, 4-3-11 Takeda, Kofu-shi, Yamanashi

Yoshihisa MINAKUCHI, University of Yamanashi, 4-3-11 Takeda, Kofu-shi, Yamanashi

Masahiro NAKAMURA, University of Yamanashi, 1110 Shimokato, Tamaho-cho, Nakakoma-gun, Yamanashi

Key Words: Biomechanics, Growth-Strain Method, Finite Element Method, Ankle, Optimal Shape

1. 緒言

足関節は体の全体重を支え、運動時の体の移動などにおいて大変重要な働きをしている。その足関節に偏荷重が加わると、変形性足関節症や慢性関節リュウマチなどの疾患を引き起こす可能性がある。これらの疾患から引き起こされる足部の後天的変形として扁平足などがある。しかし、足関節の力学的成長挙動を解析した研究¹⁾は、ほとんど行われていないようである。そこで本研究では成長ひずみ法を用いて正常足と扁平足の解析モデルを用い、足関節に偏荷重を加えることにより骨の力学的成長挙動を解析することを目的とする。

2. 成長ひずみ法

畔上氏らが提案した成長ひずみ法の原理²⁾とは、物体中の各要素に生じる応力やひずみエネルギー密度が目標とする基準値よりも低ければ収縮の体積ひずみを式(1)の成長則に従って発生させ、逆に高ければ膨張の体積ひずみを発生させる。そして、応力やひずみエネルギー密度分布が均一化されるまで繰り返し計算を行い、物体の形状最適化を行う手法である。

$$\varepsilon_{ij}^B = \frac{\sigma - \bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} \delta_{ij} h \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 ε_{ij}^B は成長ひずみテンソル、 σ は分布パラメータ、 $\bar{\sigma}$ は基準パラメータ、 δ_{ij} はクロネッカのデルタ、 h は一回の成長変形の大きさを表す成長増分比である。

3. 解析方法

図1(a),(b)は正常な足、扁平足の二次元有限要素モデルを示す。解析モデルはそれぞれ、奥行き50mmで、皮質骨、海綿骨、軟骨、靱帯、足底筋膜、軟部組織の領域からなる。荷重条件として、それぞれの脛骨上端より300Nを加え、アキレス腱を仮定して踵骨上端に30Nを加える。表1には各領域の材料特性を示す。本解析では各領域の基準パラメータとして、各領域に対する初期応力解析時のひずみエネルギー密度分布値の平均値を用いる。次に、骨の力学的成長挙動を調べるために骨領域のみに成長増分比 $h=0.001$ を与え、正常足モデル、扁平足モデルにおいて有限要素法による応力解析を行い、初期ひずみエネルギー密度分布の比較検討を行う。このとき、各モデルの脛骨上端に加える荷重条件において、脛骨前方に荷重を多く加えた場合と脛骨後方に荷重を多く加えた場合について成長解析を行い、足関節に偏荷重が加わったときの各モデルにおける骨の力学的成長挙動を比較検討する。

4. 解析結果と考察

図2(a),(b)は正常足モデルと扁平足モデルの初期ひずみエネルギー密度分布を示す。各モデルとも、脛骨の皮質骨部、距骨後部から踵骨上端にかけてひずみエネルギー密

度の集中がみられる。正常足モデルでは、ひずみエネルギー密度が距骨、踵骨また距骨、踵骨から舟状骨、楔状骨へと伝達していた。一方、扁平足モデルでは、ひずみエネルギー密度が脛骨から距骨、踵骨へと伝達していた。距骨、踵骨から舟状骨、楔状骨、中足骨へのひずみエネルギー密度の伝達は正常足モデルのときと比べ小さいことがわかった。各モデルにおける解析回数は各領域の面積変化率が少なくなった50回と選定し、計算を行った。

図3(a),(b)は正常足モデルにおいて脛骨前方に多く荷重を加えた場合と脛骨後方に多く荷重を加えた場合の初期ひずみエネルギー密度分布と形状変化を示す。脛骨前方に多く荷重を加えた場合は荷重の多く加わっている脛骨前方から距骨上端にかけてひずみエネルギー密度の集中がみられた。また距骨から前足部へのひずみエネルギー密度の伝達が正常のときと比べ大きかった。舟状骨、楔状骨は上方に盛り上がる形状変化を示した。脛骨後方に多く荷重を加えた場合は脛骨後方から距骨後方、踵骨上端にかけてひずみエネルギー密度の集中がみられた。

図4(a),(b)は扁平足モデルにおいて脛骨前方に多く荷重を加えた場合と脛骨後方に多く荷重を加えた場合の初期ひずみエネルギー密度分布と形状変化を示す。脛骨前方に多く荷重を加えた場合は、ひずみエネルギー密度の集中部は正常足モデルと同様の傾向を示したが、前足部へのひずみエネルギー密度の伝達が小さくなった。脛骨前方に多く荷重を加えた場合、正常足モデル時と同様に舟状骨、楔状骨が上方に盛り上がった形状変化を示した。一方、脛骨後方に多く荷重を加えた場合は荷重の多く加わっている脛骨後方から距骨後方、踵骨上端にひずみエネルギー密度の集中がみられた。全体的にひずみエネルギー密度が後足部に集中しているために前足部へのひずみエネルギー密度の伝達が極端に小さい傾向を示した。

正常足モデルと扁平足モデルにおいて、脛骨前方に多く荷重を加えた場合と脛骨後方に荷重を多く加えた場合で、ひずみエネルギー密度の集中部は同様の傾向を示した。扁平足モデルにおいて前足部へのひずみエネルギー密度の伝達が小さいのは、距骨と舟状骨の接する領域が正常足モデルと比べて少ないためと考えられる。距骨から舟状骨へのひずみエネルギー密度の伝達は大きな影響を示していると考えられる。

5. 結言

- (1) 正常足モデルと扁平足モデルにおいて脛骨上端に等分布荷重を加えたとき、脛骨の皮質骨部、距骨後部から踵骨上端にかけてひずみエネルギー密度の集中がみられる。
- (2) 扁平足モデルは前足部へのひずみエネルギー密度の伝

達が小さくなる。

- (3) 正常足モデルと扁平足モデルにおいて脛骨前方に多く荷重を加えた場合、舟状骨、楔状骨が上方に盛り上がった形状に変化する。

参考文献

- (1) 加藤信岳・後藤八郎・竹内良平・森井孝通・腰野富久, 三次元有限要素法を用いた正常ヒト足部の応力解析, 日本臨床バイオメカニクス学会, 14, (1992), pp. 349-353.
 (2) 畔上秀幸, 成長の構成則を用いた形状最適化手法の提案 (静的弾性体の場合), 機論 (A 編), 54-508 (1988), pp. 2167-2175.

(a) Normal foot

(b) Flatfoot

Fig.1 Analytical models of foot ankle.

Table.1 Material properties of foot.

Area	Young's modulus E (MPa)	Poisson's ratio ν
Cancellous bone	1000	0.3
Cortical bone	15000	0.3
Cartilage	14	0.4
Ligaments	300	0.22
Fascia	1200	0.4
Soft tissue (planta)	200	0.3
Soft tissue	10	0.3

(a) Initial strain energy density distribution in a normal foot

(b) Initial strain energy density distribution in a flatfoot

Fig.2 Growth analysis results of foot ankle.

(a) Adding larger loads to the front of tibia

(b) Adding larger loads to the back of tibia

Fig.3 Initial strain energy density distribution and remodeling shape in a normal foot.

(a) Adding larger loads to the front of tibia

(b) Adding larger loads to the back of tibia

Fig.4 Initial strain energy density distribution and remodeling shape in a flatfoot