

Resident's ridge 形成における骨形成の閾値による影響

Effect of Bone Remodeling Threshold on Resident's Ridge Formation

○ 高橋優輔 (工学院大) 藤江裕道 (首都大) 橋本成広 (工学院大)

Yusuke TAKAHASHI, Kogakuin University
Hiromichi FUJIE, Tokyo Metropolitan University
Shigehiro HASHIMOTO, Kogakuin University

Abstract: Resident's ridge (RR) was used landmark for ACL reconstruction surgery. However, studies on the mechanism of RR formation were not performed. In this study investigated that bone remodeling threshold was affected RR formation. A 3-D model was obtained from a CT image. The bone was assumed to be poroelastic material with Young's modulus of 20 GPa, Poisson's ratio of 0.3 and permeability of $5.13 \times 10^{-9} \text{ m}^2$. Viscosity of the interstitial fluid was set 0.001 Pas. The tibial and patellar force were increased to 600 N and 59.5 N, respectively. During the ACL force was increased up to 485 N for 1s. Bone remodeling analysis was performed; a voxel was added if the flow rate was higher than 0.75, 1.0, 1.25 or 1.5 $\mu\text{m/s}$. RR-like bone formation occurred at the thresholds of the flow rate of 0.75 and 1.00 $\mu\text{m/s}$. Another two results did not occur RR formation.

Key Words: Anterior Cruciate Ligament (ACL), Resident's Ridge, Bone Remodeling, Interstitial Fluid

1. 背景

近年、前十字靭帯(ACL)再建術において、Resident's ridge と呼ばれる骨隆起が骨孔同定の際に目印として使用されている⁽¹⁻³⁾。この ridge はほとんどの人に存在しているが、なぜ存在しているのかという検討は行われていなかった。我々は ACL 張力などの荷重により骨リモデリングが起こり Resident's ridge が形成されると仮定をして検討を行ってきた⁽⁴⁾。そこで、本研究では骨形成の閾値が Resident's ridge 形成にどのような影響を及ぼすか 3次元モデルを用いて調べた。

2. 実験方法

2.1 3次元解析

ヒト右膝 CT 画像より画像編集ソフト GIMP を用いて脛骨、膝蓋骨、海綿骨の除去を行った。その後、VOXELCON (QUINT, Japan)を用いて一辺が 500 μm の立方体要素で遠位大腿骨 3次元モデルを構成した。皮質骨を多孔質弾性体材料と仮定し、文献より弾性率を 20 GPa, ポアソン比 0.3⁽⁵⁾、透水率 $5.13 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ とし、間隙水の粘度を 0.001Pas とした⁽⁶⁾。Resident's ridge が多くのヒトに存在していることから、日常動作における荷重条件で ridge が形成されると考え、歩行時の踵接地時における脛骨、膝蓋骨、ACL 荷重を与えた。脛骨は体重が 60 kg のヒトを仮定し、大腿骨の内顆、外顆にそれぞれ 300 N の荷重を作用させた。膝蓋骨荷重は大腿四頭筋と膝蓋靭帯との釣り合いの式より、59.5 N の荷重を作用させた。ACL は文献より 485 N の荷重を作用させた^{(7),(8)}。ACL 張力は脛骨の前方移動の際にかかるため、初めに脛骨と膝蓋骨の荷重を Ramp 関数で 1 秒与え、その後、ACL 荷重を Ramp 関数で 1 秒与えた時点での流速値を用いて骨リモデリングが起こるかの判断を行った。

2.2 骨リモデリング手法

骨リモデリング手法は以下の手順で行った。ABAQUS 上で先の条件を入れて解析を行った後、要素内の流速の値を参照し、骨リモデリングが発生するかを判断した⁽⁵⁾。骨形成は要素内の流速の値がそれぞれ 0.75, 1.0, 1.25 または 1.5 $\mu\text{m/s}$ で起こるとし、骨形成の閾値を超えた要素の上に新たな要素を加える方法を繰り返し行った。ACL 付着部上に骨形成が起きた場合、ACL 付着部を骨表面に移動させる操作を行った(Fig. 1)。

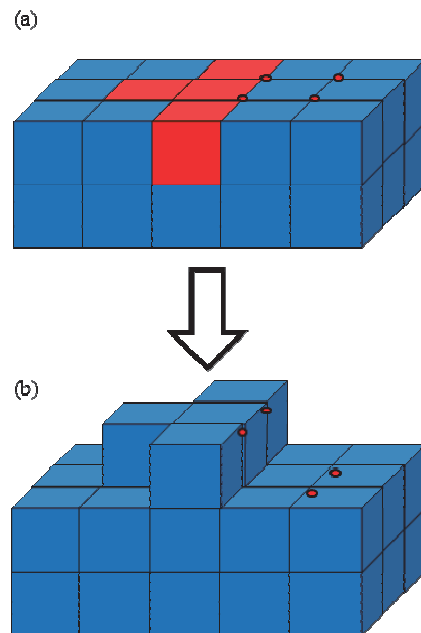


Fig. 1 Bone remodeling process.

3. 解析結果

ACL 付着部前方に高い流速が現れた。流速の閾値が 0.75, 1.00 $\mu\text{m/s}$ の時には ACL 付着部前方に Resident's ridge 様の骨隆起が形成された。しかし、骨形成の流速の閾値が 1.25, 1.5 $\mu\text{m/s}$ では Resident's ridge の形成は見られなかった。

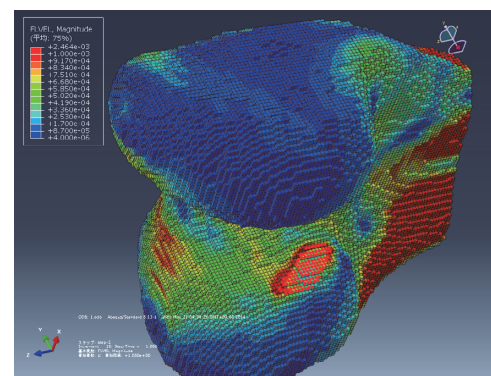
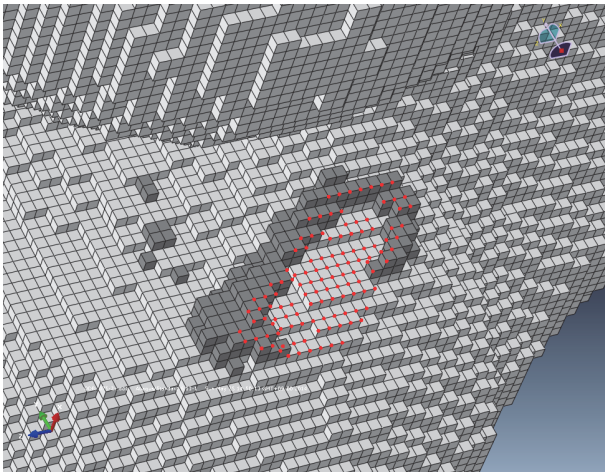
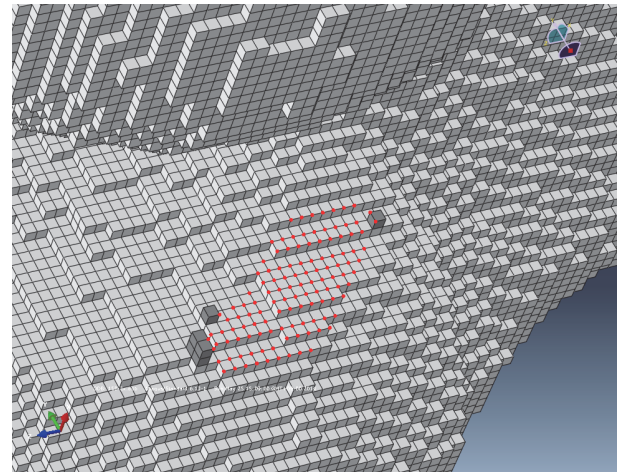
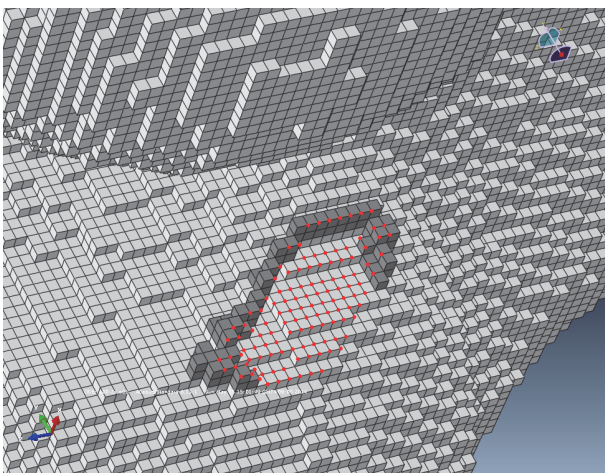
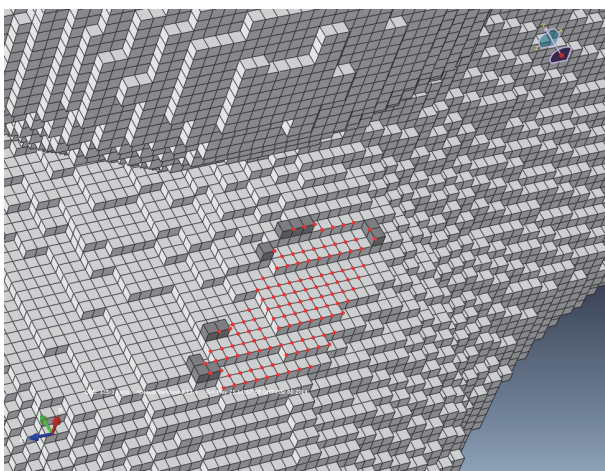


Fig. 2 Result of First time analysis.

Fig. 3 Result of bone formation threshold was 0.75 $\mu\text{m/s}$.Fig. 6 Result of bone formation threshold was 1.50 $\mu\text{m/s}$.Fig. 4 Result of bone formation threshold was 1.00 $\mu\text{m/s}$.Fig. 5 Result of bone formation threshold was 1.25 $\mu\text{m/s}$.

4. 考察

流速の閾値が上がるにつれて骨形成が起りにくくなることがわかった。本研究で用いた条件では 0.75, 1.0 $\mu\text{m/s}$ で Resident's ridge 形成が見られ, 1.25, 1.5 $\mu\text{m/s}$ では Resident's ridge 形成は見られなかった。このことから, 本研究で用いたモデルでは 0.75~1.0 $\mu\text{m/s}$ の範囲の閾値を使うことが良いと思われる。

参考文献

- (1) K. Shino, T. Suzuki et al., The Resident's Ridge as an Arthroscopic Landmark for Anatomical Femoral Tunnel Drilling in ACL Reconstruction, *Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy*, vol. 18, no. 9, pp. 1164-1168, 2010.
- (2) Fu F.H., Jordan S.S., The lateral intercondylar ridge - A key to anatomic anterior cruciate ligament reconstruction, *Journal of Bone and Joint Surgery - Series A*, V Vol. 89, No. 10, pp. 2103-2104, 2007.
- (3) M.L. Purnell, A.I. Larson et al., Relationships to Critical Bony Landmarks Using High-resolution Volume-rendering Computed Tomography, *American Journal of Sports Medicine*, Vol. 36, 2008, pp. 2083-2090.
- (4) H. Fujie, S. Yamakawa et al., Resident's Ridge Formation Due to ACL Force-Induced Bone Remodeling, *Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy*, vol. 19, no. 1, pp. 47-53, 2011.
- (5) K. Tsubota, T. Adachi et al., Functional Adaptation of Cancellous Bone in Human Proximal Femur Predicted by Trabecular Surface Remodeling Simulation Toward Uniform Stress State, *Journal of Biomechanics*, vol. 35, no. 12, pp. 1541-1551, 2002.
- (6) H. Fujie, H. Otsubo et al., Mechanical Functions of the three bundles consisting of the human anterior cruciate ligament, *Proceedings of the Orthopaedic Research Society*: 2013, p. 1383.
- (7) E.A. Nauman, K.E. Fong et al., Dependence of Intertrabecular Permeability on Flow Direction and Anatomic Site, *Annals Biomedical Engineering*, vol. 27, no. 4, pp. 517-524, 1999.
- (8) E.H. Chen, J. Black, Materials Design Analysis of the Prosthetic Anterior Cruciate Ligament, *Journal of Biomedical Materials Research*, vol. 14, no. 5, pp. 567-586, 1980.
- (9) Weinbaum S., Cowin S. et al., A model for the excitation of osteocytes by mechanical loading-induced bone fluid shear stresses, *Journal of Biomechanics*, vol. 27, no. 3, pp. 339-360, 1994.