

B-45

大腿骨モデルを用いた有限要素法によるステム周囲骨折の亀裂進展解析

Finite Element Simulation of Crack Propagation in Periprosthetic Femoral Fractures Using a Femoral Model

○岩崎有稀¹, 久留隆史², 内木場文男³, 金子美泉³*Yuki Iwasaki¹, Takashi Hisatome², Fumio Uchikoba³, Minami Kaneko³

Abstract: With the increasing aging of the population, the prevalence of disorders leading to dysfunction of the hip joint has been rising. Total hip arthroplasty (THA) has been established as an effective treatment for these conditions. Nevertheless, periprosthetic fractures occurring around the implanted prosthesis following THA have been reported. Although such fractures, referred to as periprosthetic femoral fractures, impose a substantial impact on patients, comprehensive analyses remain insufficient. The present study aims to investigate periprosthetic femoral fractures using a three-dimensional femoral model.

1. 緒言

日本は、65歳以上の人口が総人口の29.1%を占める超高齢社会である。総人口に対する高齢者の割合を示す高齢化率は、平成7年度以降一貫して上昇しており、今後もこの傾向が継続すると予測されている。高齢化の進行に伴い、変形性股関節症、大腿骨頭壊死、関節リウマチなど、股関節周辺の機能不全を引き起こす疾患の患者数が増加している^[1]。これらの疾患に対する有効な治療法の一つとして、人工股関節全置換術 (Total Hip Arthroplasty: THA) が挙げられる。THAは機能不全に陥った股関節を人工関節 (ステム) に置換する手術法であり、患者数の増加と医療技術の進展に伴い、2013年以降その手術件数は増加傾向にある。また今後もさらなる需要の高まりが見込まれている。

一方で、THA施行後に大腿骨へ埋入されたステム周囲に骨折が発生する事例が報告されている^[2]。この骨折はステム周囲骨折と呼ばれ、治療には手術療法が必要となることから患者への負担が大きい。また、治療後においても自立歩行が困難となるなど、術後生活に深刻な影響を及ぼす要因となる。そのため、ステム周囲骨折の発生の予防は極めて重要である。ステム周囲骨折に関しては、これまでも患者の追跡調査や症例解析など医学的観点からの研究が行われてきた^[3]。しかし大腿骨検体の入手が困難であることから十分な解析が進んでいるとは言い難い。近年では、この問題を克服するために工学的手法を導入した解析が注目されており、その代表的手法として有限要素法 (Finite Element Method: FEM) が用いられている^[4]。FEMは解析対象を多数の要素に分割し、各要素ごとに応力や変形を近似的に解析する方法である。この手法は複雑形状の解析や、異なる物性値を有する複合モデルの解析に適している。先行研究においては、FEM解析の結果

が実際の大腿骨を用いた破断試験の結果と良好な一致を示すことが報告されている^[5]。しかし、骨折における亀裂の進展位置や進展方向に関する詳細な解析は依然として不十分である。

本研究では、ステムを挿入した大腿骨モデルを対象に有限要素法による亀裂進展解析を行い、亀裂の進展箇所および進展方向を明らかにすることを目的とする。

2. 解析モデル

本研究で用いる大腿骨モデル (Figure 1) は、CT画像データを基に Space Claim (Ansys Inc) を用いて作成し、解析ソフト上で人工関節を挿入したものとした。ただし、計算負荷を軽減するため、大腿骨の下部はモデルから除外した。また大腿骨は二層構造となるが、外側の皮質骨は大腿骨の強度に主要な役割を担う一方、内側の海綿骨はスポンジ状の多孔質構造を有し、強度への影響は限定的であるとされている。そのため本研究では、海綿骨を省略した大腿骨モデルを対象として解析を実施した。

亀裂進展解析に際しては、大腿骨モデルに初期亀裂を導入した。初期亀裂は骨表面に存在するマイクロクラックを表現したものであり、シミュレーションにおいては亀裂進展の開始点として任意に付与することができる。本研究では、(A) 皮質骨と人工関節の固定部に初期亀裂を付与したモデル、および (B) 応力集中が生じると推定される人工関節先端部に初期亀裂を付与したモデルの二種類を作成し、解析を行った。

解析条件の詳細は Table 1 に示す。人工関節および皮質骨の物性値については、先行研究を参考に設定した^[6]。また亀裂の進展は Griffith 理論に基づいて解析される^[7]。

1 : 日本大学大学院精密機械工学専攻 2 : 日本大学病院 3 : 日本大学理工学部

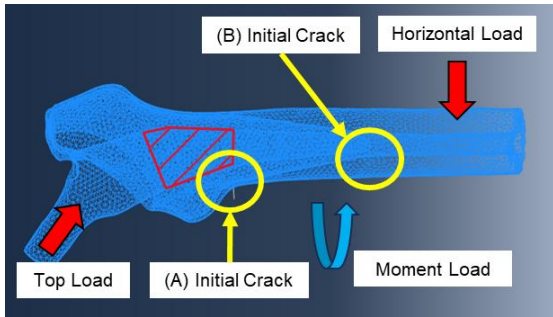


Figure 1. The femoral model used in this analysis

Table 1. Analysis Condition

| | |
|---|-------|
| The femoral model used in this analysis | 78552 |
| Top load (N) | 600 |
| Horizontal load (N) | 3000 |
| Moment load (Nm) | 100 |
| Young's modulus (stem) (GPa) | 113 |
| Poisson's ratio (stem) | 0.315 |
| Young's modulus (cortical bone) (GPa) | 12000 |
| Poisson's ratio (cortical bone) | 0.4 |

3. 解析結果と考察

各条件下の解析結果を以下に示す (Figure 2).

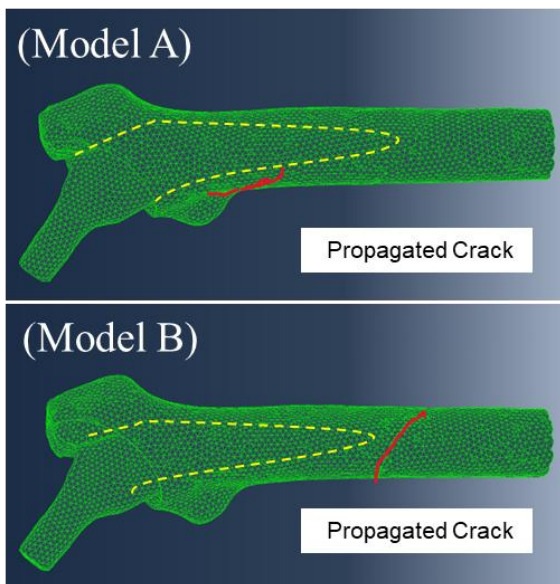


Figure 2. The finite element analysis results for Model
 (A) Model with an initial crack at the fixation site between the cortical bone and the stem
 (B) Model with an initial crack at the distal tip of the stem

(A) 皮質骨と人工関節の固定部に初期亀裂を付与したモデルでは、亀裂が人工関節に沿って進展する様子

が確認された。この要因としてステムが支柱の役割を果たし、ステムと接していない領域では亀裂が進展しにくかったことが考えられる。

(B) 応力集中が生じると推定される人工関節先端部に初期亀裂を付与したモデルでは亀裂が水平荷重の方向へ進展する様子が確認された。

また両モデルに共通する特徴として、モーメント荷重の作用方向に亀裂が進展する傾向が確認された。これらの特徴は大腿骨モデルに作用する荷重によって蓄積されたひずみエネルギーを解放するため亀裂が荷重方向へ進展したことに起因すると考えられる。

4. 結論

本研究では、ステム周囲骨折における亀裂進展を検討するため、CT画像から作成した大腿骨モデルを用いて亀裂進展解析を実施した。解析の結果、初期亀裂位置の違いは亀裂進展部位に影響を及ぼし、荷重条件の違いは亀裂進展方向に影響する傾向が認められた。

5. 参考文献

- [1] 厚生労働省:患者調査傷病分類編(傷病別年次推移)令和2年度報告, pp50, 2021.
- [2] Oriol Pujol: "High reoperation and mortality rate after distal femoral replacement for periprosthetic knee fracture in the elderly", Eur J Orthop Surg Traumatol, Epub, 2022.
- [3] 松下任彦ら: 大腿骨ステム周囲骨折の発生頻度, 整形外科と災害外科, Vol.63, No.4, p708-713, 2014.
- [4] 久留隆史: 前傾位設置と中間位設置における人工股関節全置換術ステム周囲の回旋モーメントを伴う応力解析, 整形外科, 73 巻 1 号, p51-55, 2022
- [5] Enrico Schileo et al.: "Subject-specific finite element models implementing a maximum principal strain criterion are able to estimate failure risk and fracture location on human femurs tested in vitro", Journal of Biomechanics, Vol41, No.2, p356-367, 2008
- [6] 坂上敦・久留隆史: 「前傾位設置と中間位設置における THA ステム周囲の応力解析」, Hip Joint, 45, pp553-558, 2019.
- [7] Griffith, A. A: "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids". Philosophical Transactions of the Royal Society. Series A, Containing Paper of a Mathematical or Physical Character 221, p163-198, 1921