

# 境界域の骨硬化性変化が圧潰形態に及ぼす影響

河野 紘一郎、本村 悟朗、池村 聡、山口 亮介、馬場 省次、徐 明剣、山本 典子、中島 康晴  
(九州大学大学院医学研究院 整形外科)

大腿骨頭壊死症(ONFH)において、骨硬化性変化を伴う境界域に応力・ひずみが集中し圧潰の起点となる可能性が報告されている。今回、我々は ONFH の摘出骨頭から作成した非圧潰標本を用いて力学試験を行い、骨硬化の有無による圧潰形態の違いを評価したので報告する。

## 1. 研究目的

大腿骨頭壊死症(ONFH)の圧潰に関して、境界域に着目した有限要素法(FEM)を用いた研究で、硬化を伴う境界域に応力・ひずみが集中することが圧潰の要因となることが示唆されている<sup>1)</sup>。また、骨頭全体における FEM においては、骨頭外側境界域の硬化部にストレスが集中することが報告されている<sup>2)</sup>。一方、実際に境界域に負荷をかけ、圧潰形態を評価した報告はない。

今回我々は、ONFH の力学試験を行い、硬化性変化の有無による圧潰形態を評価した。

## 2. 研究方法

ONFH の摘出骨頭を用いて検討を行った。骨頭の高圧潰部から壊死域・境界域・健常域の3層構造を含む 12 検体(縦 10mm × 横 15mm × 幅 5mm)を作成した。これらを境界域における硬化性変化の有無で 2 群に分け、硬化性変化あり 7 検体、硬化性変化なし 5 検体とした。

$\mu$ CT にて圧潰がないことを確認し、FEM による応力解析を行った。骨モデルは画像解析システム(TRI/3D BON; ラトックシステムエンジニアリング)を用いて作成し、せん断応力・von Mises の相当応力を有限要素解析ソフト(TRI/3D-FEM)を用いて計測した。FEM では、海綿骨全体に均等に荷重をかけるために骨キャップを関節面に設置し、関節面から 100N の荷重をかけて評価した(図1)。

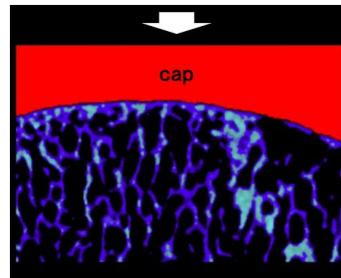


図1 FEM

海綿骨の関節面に骨キャップを設置し、矢印方向に荷重をかけた。

続いて、力学試験を行った。圧縮試験機(SHIMADZU)の圧盤にアクリル樹脂製剤を装着し、関節面に均等に荷重がかかるようにし、1.0mm/min で関節面から圧縮を加えた。荷重-変位曲線を作成し、降伏点を経て、曲線がプラトーになった位置を骨折と定義し<sup>3)</sup>、骨折後に再度  $\mu$ CT を撮像し、圧潰部の評価を行った。



図2 力学試験

関節面に圧縮を加え、荷重-変位曲線にて圧潰を確認した。

### 3. 研究結果

応力解析では、硬化あり検体において、硬化領域にせん断応力・Von Mises の相当応力が集中していた。一方、硬化なし検体においては、検体全体に均一に応力分布していた。

力学試験では、硬化あり検体は全例(7例)硬化に隣接する壊死域に圧潰を認めた。そのうち、硬化に沿って骨折線を認めたものが3例、関節面に沿って骨折を認めたものが4例であった。一方、硬化なしの検体では、圧縮方向と垂直に海綿骨領域に骨折線を認めたものが3例、海綿骨領域の骨折に加えて subchondral plate の破断を認めたものが2例であった。

### 4. 考察

本研究において、硬化あり検体では、FEMにて硬化に隣接する外側壊死境界域に応力集中を認め、力学試験では、全例、外側壊死境界域に骨折を来していた。一方、硬化なし検体では、FEMにおける応力は検体に均一に分布しており、力学試験では圧縮方向と垂直に骨折を来していた。以上より、硬化性変化の有無が圧潰形態に影響を及ぼすと考えられた。

また、ONFHの圧潰に関する報告では、圧潰骨頭において、軟骨下骨折が必ず外側壊死境界域に隣接していたとの報告がある<sup>4)</sup>。したがって、本研究における硬化あり検体の圧潰は、臨床的な圧潰と矛盾しない所見であった。以上より、硬化性変化の有無で境界域における応力分布が変化し、硬化性変化が圧潰の原因となる可能性が示唆された。

### 5. 結論

境界域における硬化性変化の有無で圧潰形態に違いが見られた。硬化性変化により応力が集中し、圧潰の起点となる可能性が示唆された。

### 6. 研究発表

1. 論文発表  
なし
2. 学会発表  
なし

### 7. 知的所有権の取得状況

1. 特許の取得

なし

2. 実用新案登録  
なし
3. その他  
なし

### 8. 参考文献

- 1) Karasuyama K, Yamamoto T, Motomura G, Sonoda K, Kubo Y, Iwamoto Y. The role of sclerotic changes in the starting mechanisms of collapse: A histomorphometric and FEM study on the femoral head of osteonecrosis. Bone 2015 Dec;81:644-8.
- 2) Utsunomiya T, Motomura G, Ikemura S, Kubo Y, Sonoda K, Hatanaka H, Baba S, Kawano K, Yamamoto T, Nakashima Y. Effects of sclerotic changes on stress concentration in early-stage osteonecrosis: A patient-specific, 3D finite element analysis. J Orthop Res 2018 Dec;36(12):3169-77.
- 3) Hambli R. Micro-CT finite element model and experimental validation of trabecular bone damage and fracture. Bone 2013 Oct;56(2):363-74.
- 4) Motomura G, Yamamoto T, Yamaguchi R, Ikemura S, Nakashima R, Mawatari T, Iwamoto Y. Morphological analysis of collapsed regions in osteonecrosis of the femoral head. J Bone Joint Surg Br 2011 Feb;93(2):184-7.