

# 荷重負荷が圧潰骨頭に及ぼす力学的影響

宇都宮健、本村悟朗、久保祐介、池村聡、中島康晴 (九州大学整形外科)  
下戸健 (福岡工業大学情報工学部情報システム工学科)  
日垣秀彦 (九州産業大学生命科学部生命科学科)

力学的負荷が圧潰骨頭に及ぼす影響を評価するために、万能試験機 (SHIMAZU 社製, EZ test EZ LX)を用いて骨頭圧縮試験を行い、荷重-変位の関係を Stage 3A 骨頭と Stage 3B 骨頭で比較した。さらに、リン酸カルシウム骨セメント (CPC)を充填した Stage 3B 骨頭においても圧縮試験を行った。荷重 1000 N における変位は Stage 3B 骨頭の方が Stage 3A 骨頭よりも大きく、3 mm の変位を生じるために必要な荷重は Stage 3B 骨頭の方が Stage 3A 骨頭よりも小さかった。Stage 3B 骨頭に CPC を充填した場合、荷重-変位の関係は Stage 3A 骨頭とほぼ同等であった。圧潰の程度が大きいほど力学的負荷が圧潰骨頭に与える影響は大きいことが示唆された。Stage 3B 骨頭に CPC を充填することで、関節面の不安定性が改善する可能性がある。

## 1. 研究目的

特発性大腿骨頭壊死症 (ONFH)では、いったん骨頭圧潰を生じると高率に関節症性変化を招き、この形態変化には力学的影響が関与すると考えられている<sup>1)</sup>。ONFH に関する力学試験としては、摘出骨頭の小切片を用いた材料特性を評価した報告<sup>2)</sup>や、顕微鏡下に骨梁の硬度を評価した報告<sup>3)</sup>はあるが、骨頭全体を用いたものではなく、力学的負荷が圧潰骨頭に与える影響は検討されていない。

本研究の目的は、圧潰骨頭に力学的負荷が与える影響は Stage 3A 骨頭と Stage 3B 骨頭で異なるかどうかを明らかにすることである。

## 2. 研究方法

実験 1. Stage 3A 骨頭と Stage 3B 骨頭での比較

当科で人工物置換術を施行し摘出骨頭全体が評価可能であった男性のアルコール関連 ONFH 症例を対象とした。Stage 3A: 6 例 (平均年齢 52.0 歳、45 ~ 61 歳)、Stage 3B: 5 例 (平均年齢 50.1 歳、33 ~ 65 歳)であり、Type の内訳 (C1/C2)は、Stage 3A: 3/3、Stage 3B: 1/4 であった。標本は 4%パラホルムアルデヒドで固定されていた。

圧縮試験は万能試験機 (SHIMAZU 社製, EZ test EZ LX)を用いた。骨頭の遠位を骨セメントで完全拘

束し、試験機を壊死部直上に設置した。試験機を 0.5 mm/min の一定の速度で骨頭関節面から遠位に向けて鉛直方向に圧縮させ、荷重-変位の関係を経時的に記録した。終了条件は変位が 10 mm に達する 20 分後、または 20 分以内であっても荷重が 5000 N に達する場合とした。

荷重に対する変位の関係について、検討項目(1)として歩行中期の荷重に相当する荷重 1000 N<sup>6)</sup>における変位を、検討項目(2)として 3 mm の変位を生じるために必要な荷重について調査し、Stage 3A 骨頭と Stage 3B 骨頭で比較した。

統計学的検討は Wilcoxon 検定を行い、5%未満を有意水準とした。

## 3. 研究結果

実験 1. Stage 3A 骨頭と Stage 3B 骨頭での比較

荷重 1000 N における変位は、Stage 3A 骨頭で  $1.8 \pm 0.4$  mm、Stage 3B 骨頭で  $3.3 \pm 1.0$  mm であり、統計学的に有意差を認めた ( $p = 0.044$ )。3 mm の変位を生じるために必要な荷重は、Stage 3A 骨頭で  $2175 \pm 720$  N、Stage 3B 骨頭で  $890 \pm 760$  N であり、統計学的に有意差を認めた ( $p = 0.044$ )。

この結果は力学的負荷が与える影響は Stage 3B 骨頭の方が大きく、より小さな荷重で大きく変位したこと

を示しており、圧潰の程度が大きいほど関節面の不安定性が増大することが示唆された。この理由として $\mu$ CTでStage 3B 骨頭では5 骨頭中4 骨頭で軟骨下に幅広い間隙が存在したためである可能性が考えられた。

そこで、Stage 3B 骨頭において軟骨下の間隙を補填できれば関節面の不安定性を改善できるのではないかという仮説を立て、実験2を行った。

#### 実験2. CPC 充填による力学的影響の検討

当科で人工物置換術を施行し摘出骨頭全体が評価可能であった男性のアルコール関連 ONFH 症例を対象とし、実験1とは異なるStage 3B の5 骨頭(平均年齢 53.0 歳、48 ~ 61 歳)を使用した。前方壊死部の瓣形成部を約5 mm 大に開窓し、圧潰部を拳上しCPCを充填した。圧縮試験前に施行した $\mu$ CTでCPC充填前に軟骨下領域において幅広い間隙を認めたが、CPC 充填後に間隙は補填されていた。

CPC 充填後、同様に骨頭圧縮試験を行い実験1のStage 3B 骨頭の結果と比較した。

#### 実験2. 結果

荷重1000 Nにおける変位は、CPCを充填した骨頭で $1.7 \pm 0.2$  mm、Stage 3B 骨頭で $3.3 \pm 1.0$  mmであり、統計学的に有意差を認めた( $p = 0.047$ )。3 mmの変位を生じるために必要な荷重は、CPCを充填した骨頭で $2270 \pm 410$  N、Stage 3B 骨頭で $890 \pm 760$  Nであり、統計学的に有意差を認めた( $p = 0.047$ )。

#### 4. 考察

本研究では、荷重1000 Nにおける変位はStage 3B 骨頭の方がStage 3A 骨頭より大きく、3 mmの変位を生じるために必要な荷重はStage 3B 骨頭の方がStage 3A 骨頭より小さかった。従って力学的負荷が与える影響はStage 3B 骨頭の方がStage 3A 骨頭より大きいことが示唆された。Stage 3B 骨頭の方が小さな荷重でより大きく変位したことから、圧潰の程度が大きいほど関節面の不安定性が増大する可能性が考えられた。

力学的負荷が与える影響はStage 3B 骨頭の方がStage 3A 骨頭より大きかった理由としては、Stage 3B 骨頭では軟骨下に幅広い間隙が存在したことによる可能性が考えられた。軟骨下の間隙にCPCを充填し

た場合、荷重-変位の関係はStage 3A 骨頭とほぼ同等の結果であった。従ってStage 3B 骨頭に対しCPCを充填することによって、関節面の不安定性が改善する可能性が示唆された。

CPC 充填の臨床応用としてAROの際、移動した壊死部の骨欠損部にCPCを充填する試みがなされている<sup>5)</sup>。AROでは術前圧潰幅が3 mm以上の場合、移動した壊死部の圧潰進行の危険因子であったことが報告<sup>4)</sup>されている。またARO術前に骨頭の球形が温存されている場合、術後成績は良好であったことが報告されている<sup>7)</sup>。本研究においてCPCを充填することで荷重-変位の関係はStage 3Aと同等の結果であったことから、AROの際、移動した壊死部にCPCを充填することによって関節面の不安定性が改善し圧潰進行を防ぐ効果が期待される。

#### 5. 結論

ONFH 圧潰骨頭を用いた圧縮試験を行った。

圧潰の程度が大きいほど力学的負荷が圧潰骨頭に与える影響は大きかった。

Stage 3B 骨頭に対しCPCを充填することで関節面の不安定性が改善する可能性がある。

#### 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) Mont MA, Hungerford DS. Non-traumatic avascular necrosis of the femoral head. J Bone Joint Surg Am. 1995 Mar;77(3):459-74.
- 2) Brown TD, Way ME, Ferguson AB Jr. Mechanical characteristics of bone in femoral

capital aseptic necrosis. Clin Orthop Relat Res. 1981 May;(156):240-7.

- 3) Wang C, Wang X, Xu XL, Yuan XL, Gou WL, Wang AY, Guo QY, Peng J, Lu SB. Bone microstructure and regional distribution of osteoblast and osteoclast activity in the osteonecrotic femoral head. PLoS One. 2014 May;6;9(5):e96361.
- 4) Kubo Y, Motomura G, Ikemura S, Sonoda K, Yamamoto T, Nakashima Y. Factors influencing progressive collapse of the transposed necrotic lesion after transtrochanteric anterior rotational osteotomy for osteonecrosis of the femoral head. Orthop Traumatol Surg Res 2017 Apr; 103(2):217-222.
- 5) 久保祐介、本村悟朗、池村聡、中島康晴、山本卓明. 大腿骨頭回転骨切り術後の関節症性変化の進行防止に向けた試み 整・災外 2017; 60: 1401-1406.
- 6) Bergmann G, Deuretzbacher G, Heller M, Graichen F, Rohlmann A, Strauss J, Duda GN. Hip contact forces and gait patterns from routine activities. J Biomech. 2001 Jul;34:859-71.
- 7) Hisatome T, Yasunaga Y, Takahashi K, Ochi M. Progressive collapse of transposed necrotic area after transtrochanteric rotational osteotomy for osteonecrosis of the femoral head induces osteoarthritic change; mid-term results of transtrochanteric rotational osteotomy for osteonecrosis of the femoral head. Arch Orthop Trauma Surg 2004 Mar; 124(2):77-81.