

CT画像を利用した有限要素法 (CT-FEM)  
による骨解析法と  
人工股関節置換股の損傷解析への応用

東藤 貢

九州大学応用力学研究所  
新エネルギー力学部門

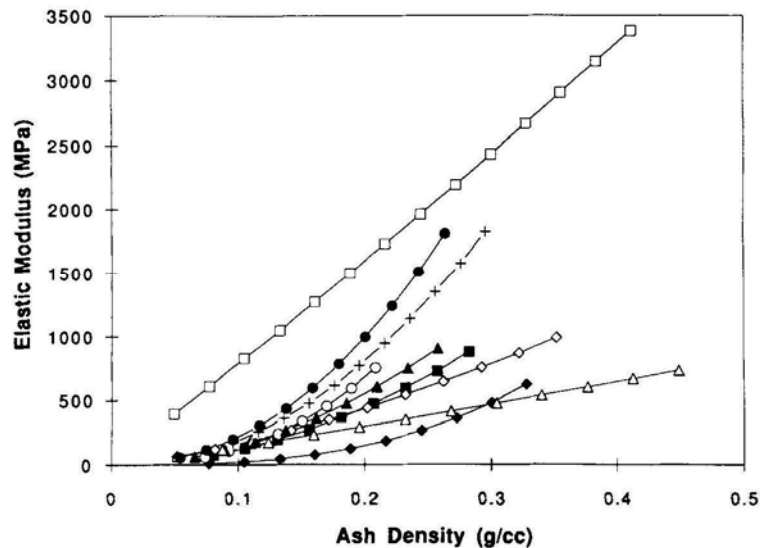
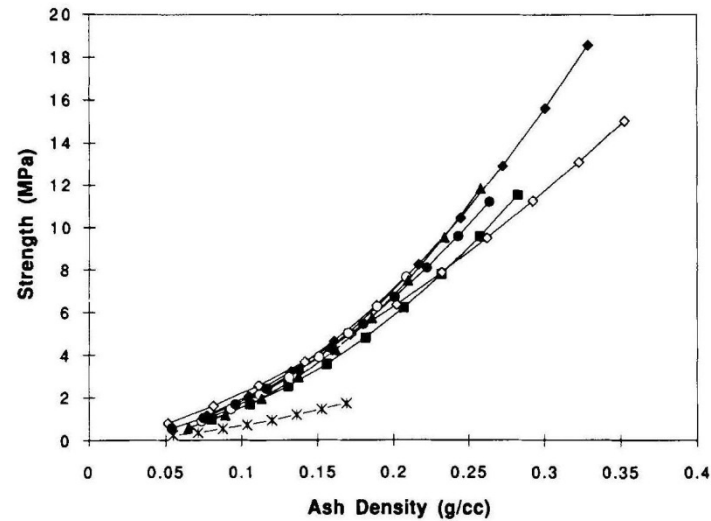
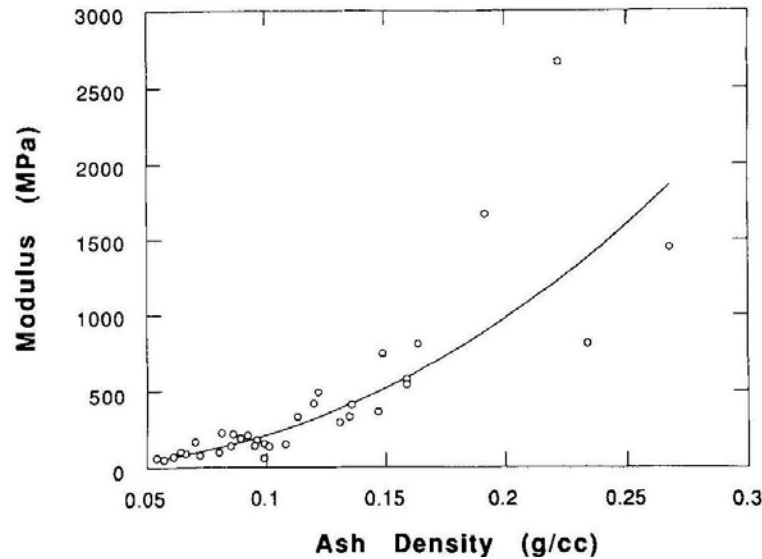
# 講演内容

- CT画像を利用した骨モデル構築とCT-FEM
- CT-FEMによる人工関節置換股の応力解析
- 損傷モデルの導入による人工股関節置換股の損傷・骨折解析
- 有効性と問題点

# CT画像を利用した骨モデル構築と CT-FEM

# 骨密度と力学特性との関係

Keyak, J.H., et al., J Biomedical Materials Research, 1994.



弾性率や圧縮強度を骨密度から推定することができる

# BMDを用いた弾性率と降伏強度の推定

## Young's Modulus (MPa)

## Density Range (g/cm<sup>3</sup>)

---

$$E = 0.001$$

$$\rho = 0$$

$$E = 33900\rho^{2.20}$$

$$0 < \rho \leq 0.27$$

$$E = 5307\rho + 469$$

$$0.27 < \rho < 0.6$$

$$E = 10200\rho^{2.01}$$

$$0.6 \leq \rho$$

## Yield Strength (MPa)

## Density Range (g/cm<sup>3</sup>)

---

$$\sigma_{\text{yield}} = 1.0 \times 10^{20}$$

$$\rho \leq 0.2$$

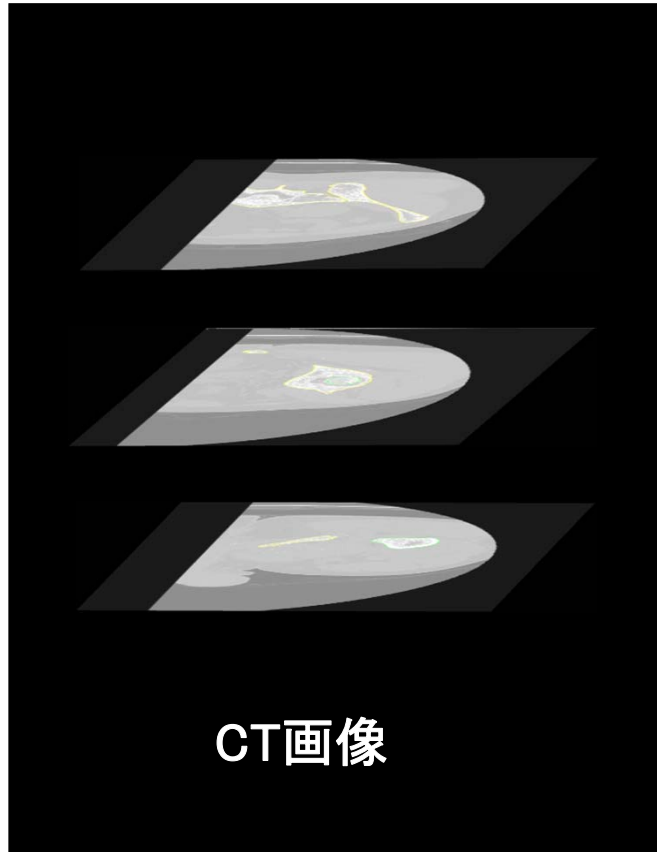
$$\sigma_{\text{yield}} = 137\rho^{1.88}$$

$$0.2 < \rho < 0.317$$

$$\sigma_{\text{yield}} = 114\rho^{1.72}$$

$$0.317 \leq \rho$$

# CT画像を利用した股関節モデル構築



(九州大学整形外科の提供)

骨の輪郭を抽出し  
3D骨構造を再現



Mechanical Finder  
(株) 計算力学研究センター



軟骨は解剖学的  
判断に基づき作  
成

3D股関節モデル

従来法:  
骨の輪郭形状のみを使用し, 内部は  
皮質骨と海綿骨の2層構造を仮定

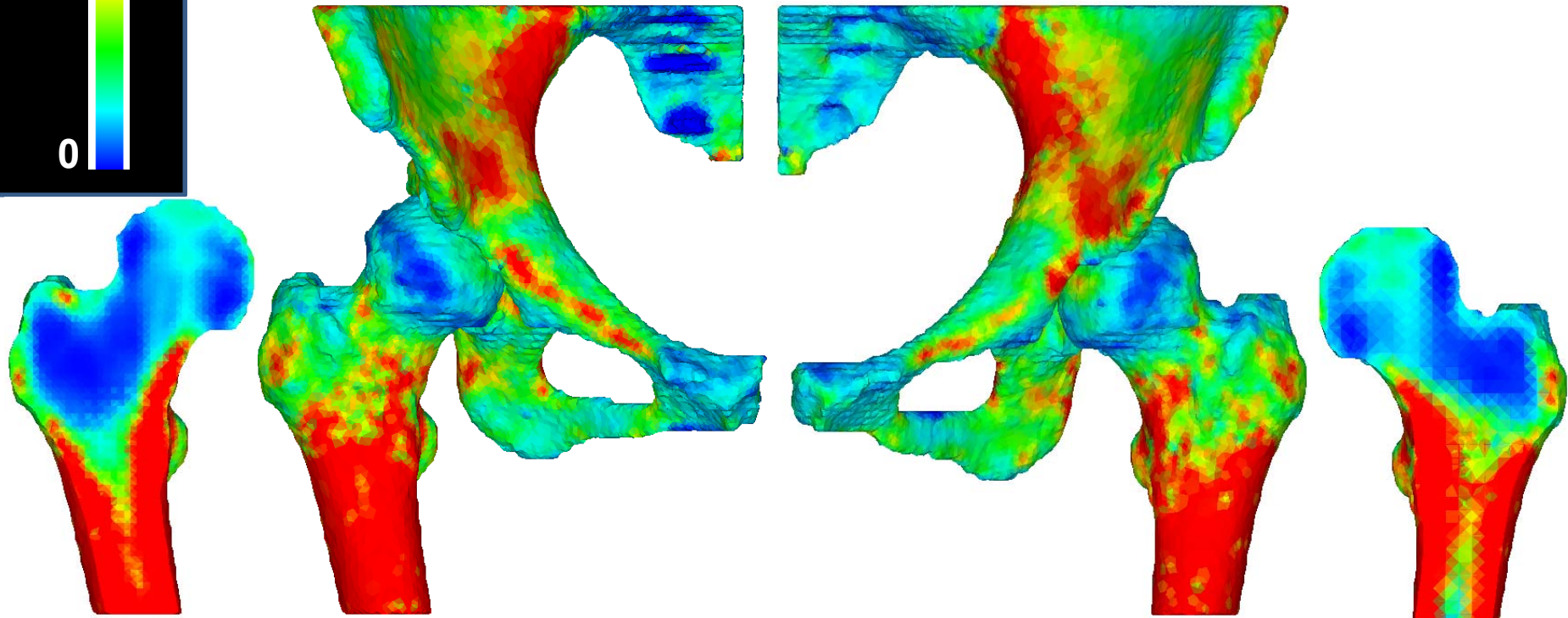
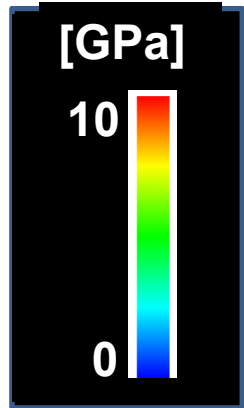


Mechanical Finder:  
CT値に基づくBMD分布を考慮した  
内部構造

# 弾性率分布状態

CT値から骨密度 (BMD) を推定

$$\begin{aligned} \text{BMD [g/cm}^3\text{]} &= (\text{CT [H.U.]} + 1.4246) \times 0.001 / 1.0580 : (\text{CT} > -1) \\ \text{BMD [g/cm}^3\text{]} &= 0.0 : (\text{CT} \leq -1) \end{aligned}$$



断面

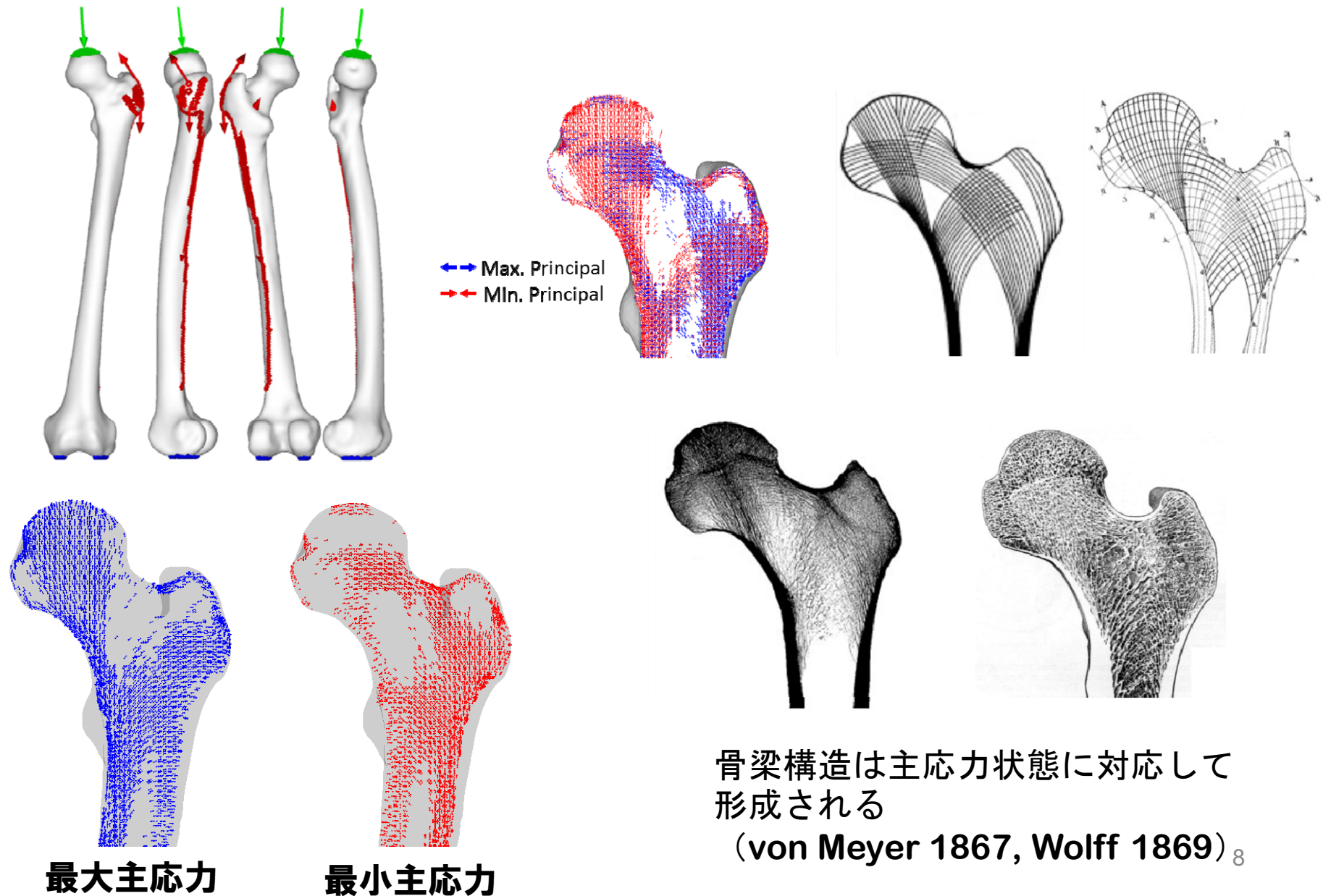
健側

患側

断面

(臼蓋形成不全)

# 解析例～骨梁構造と主応力分布の関係～





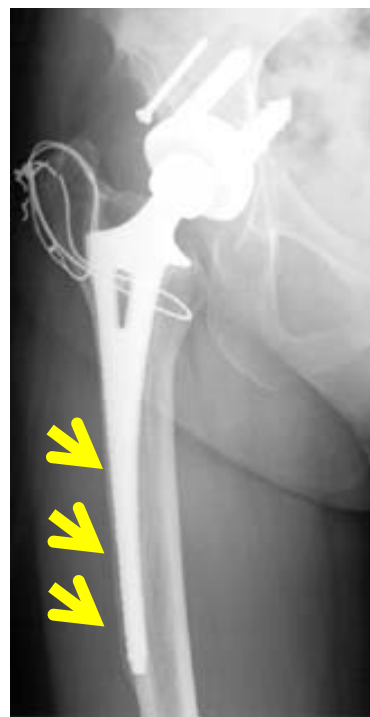
# CT-FEMによる人工股関節置換股 の応力解析

# THAに関連する合併症

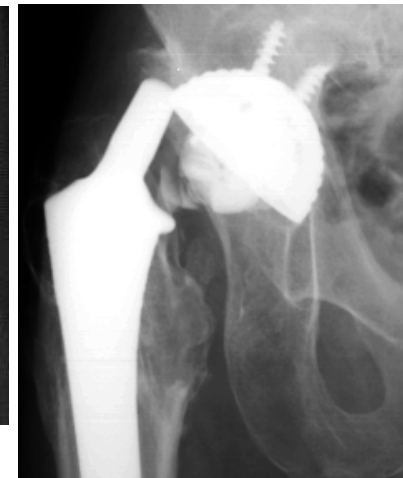
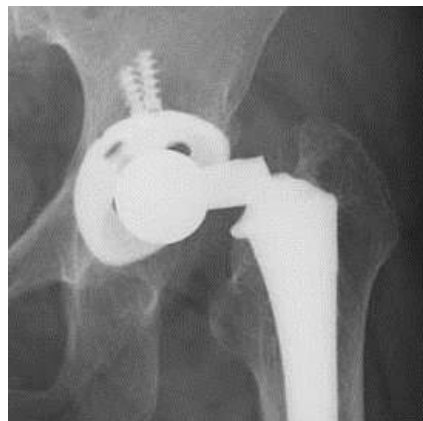
変形性股関節症



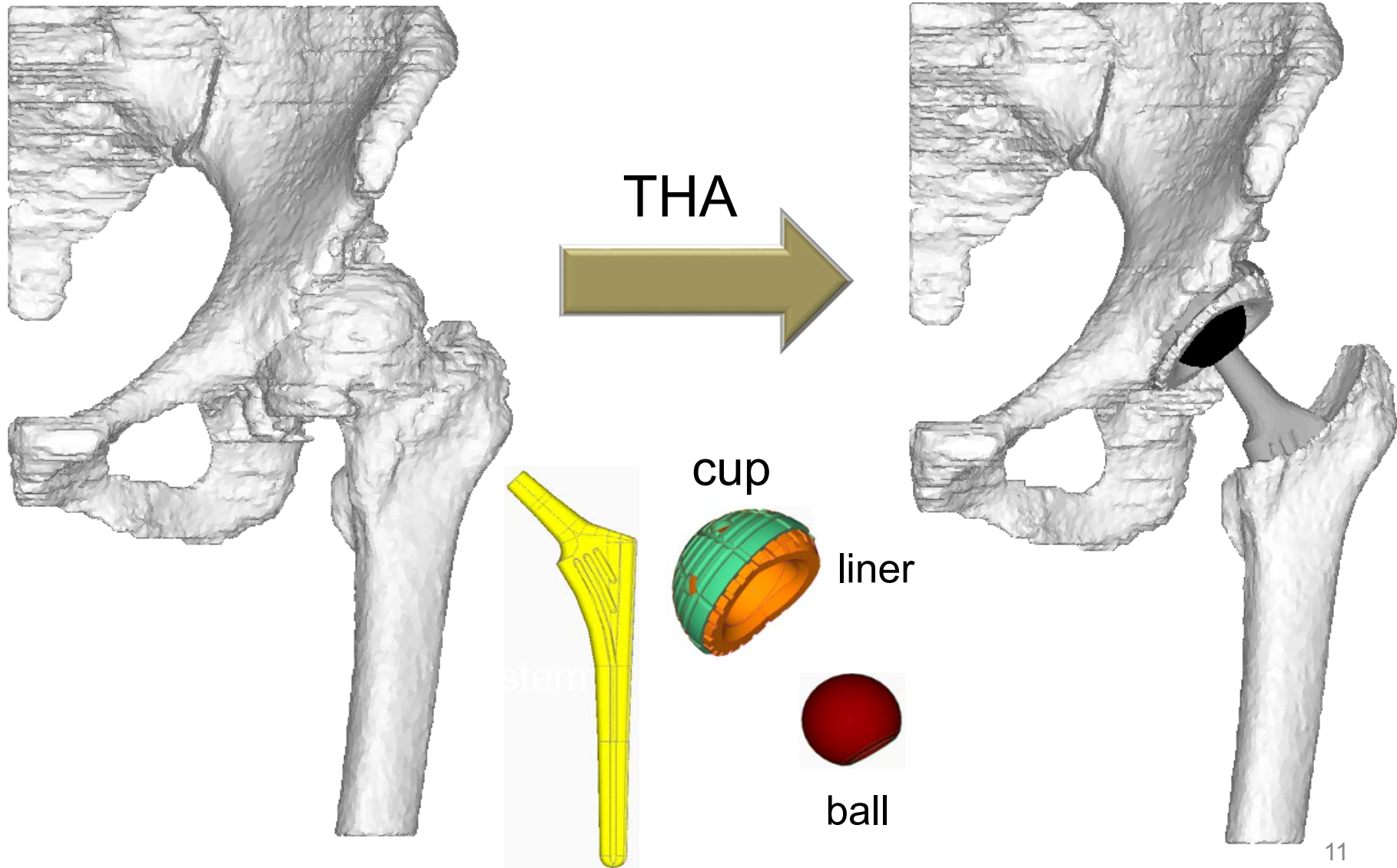
人工股関節置換術(THA)



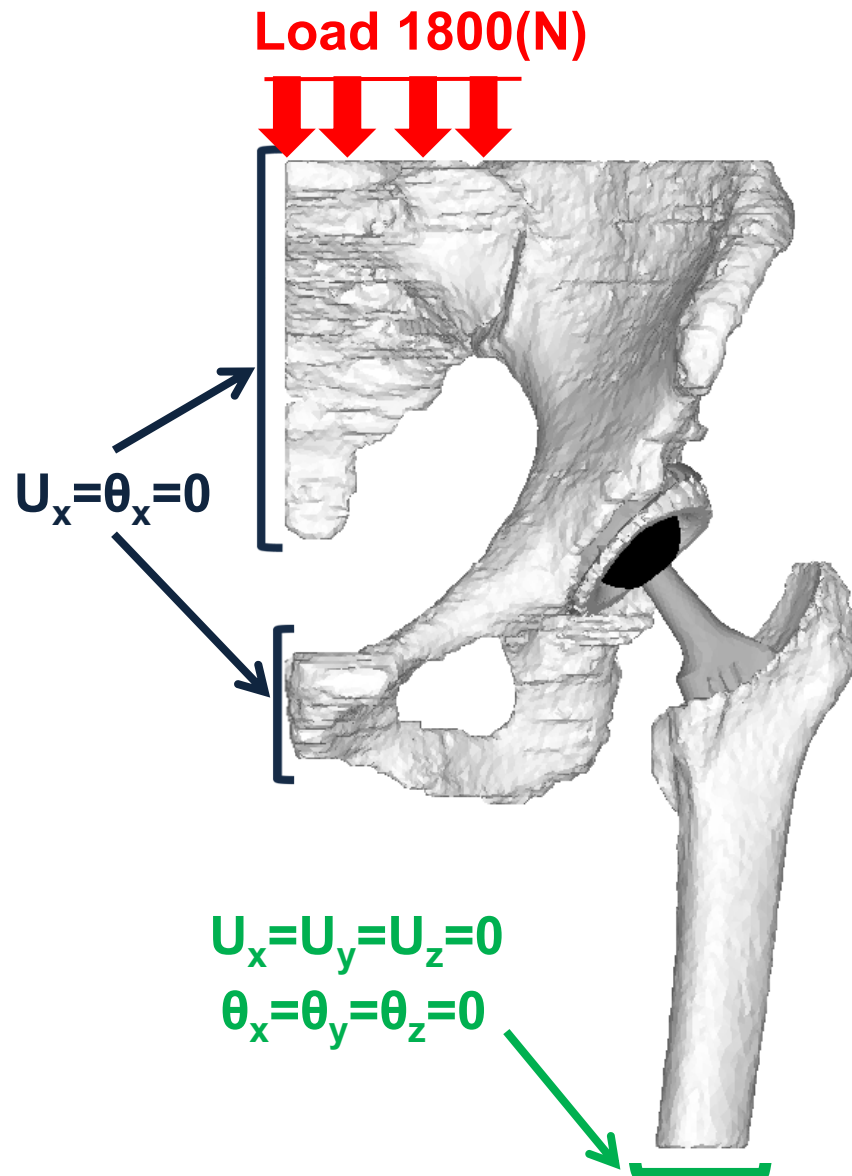
大腿骨頭壊死症



# 人工股関節置換モデル

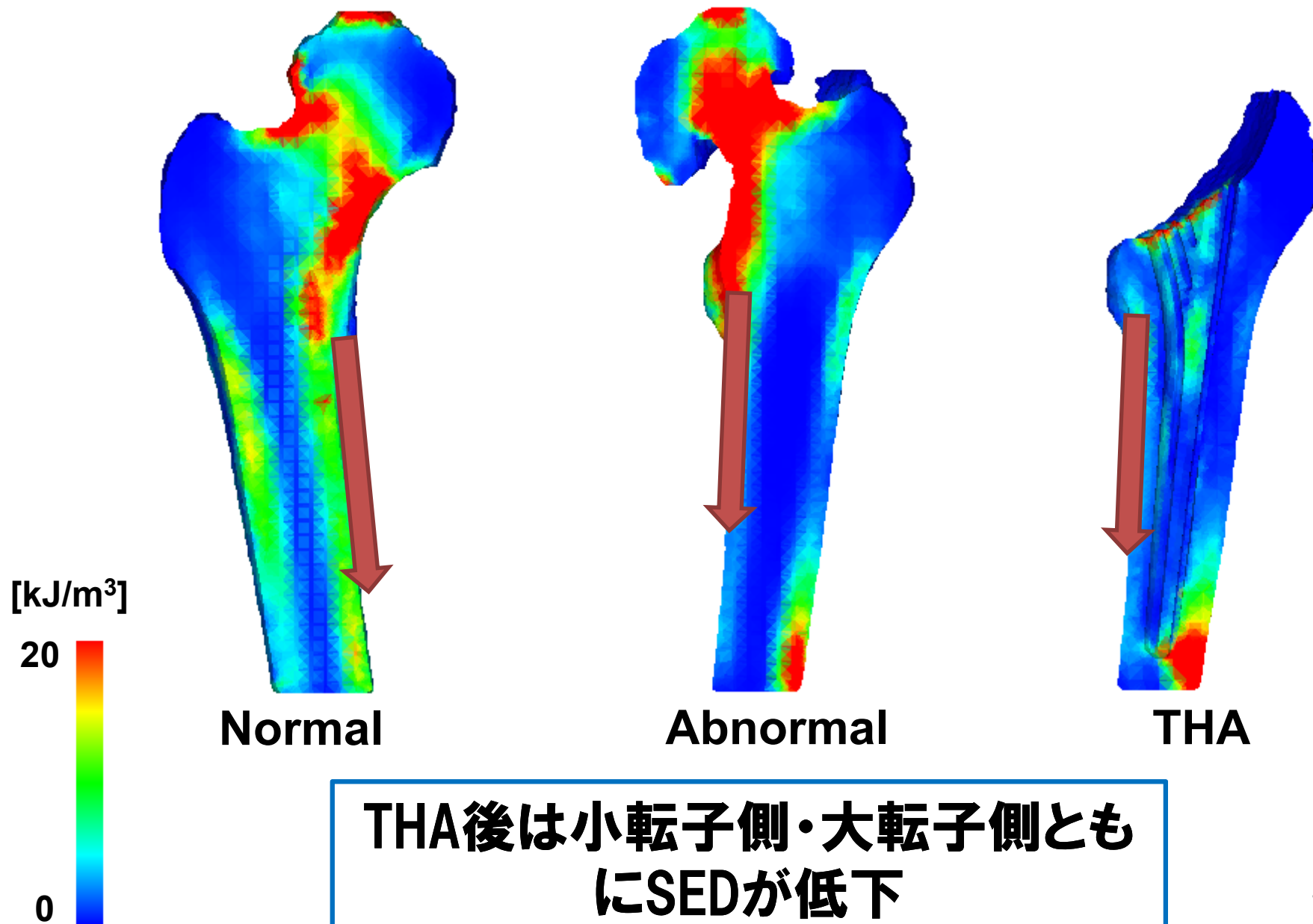


# 境界条件

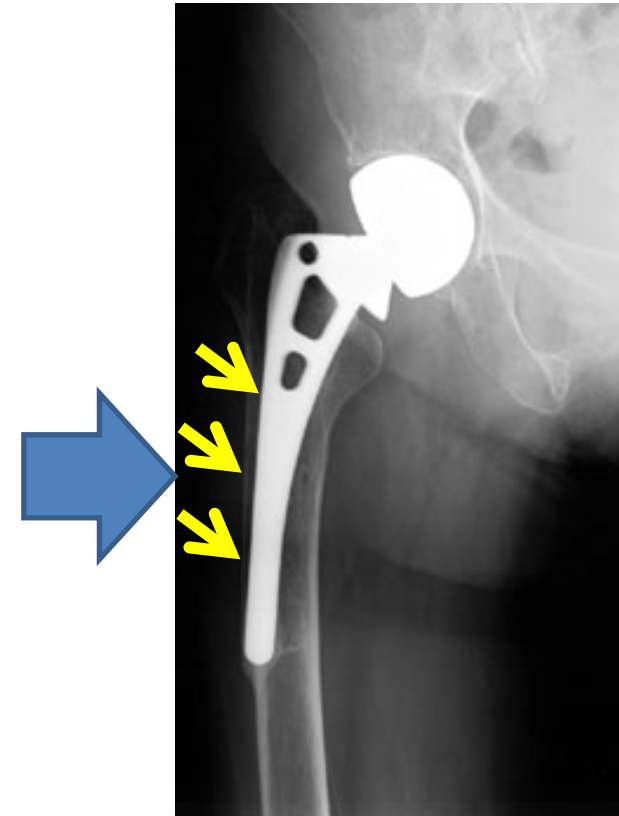
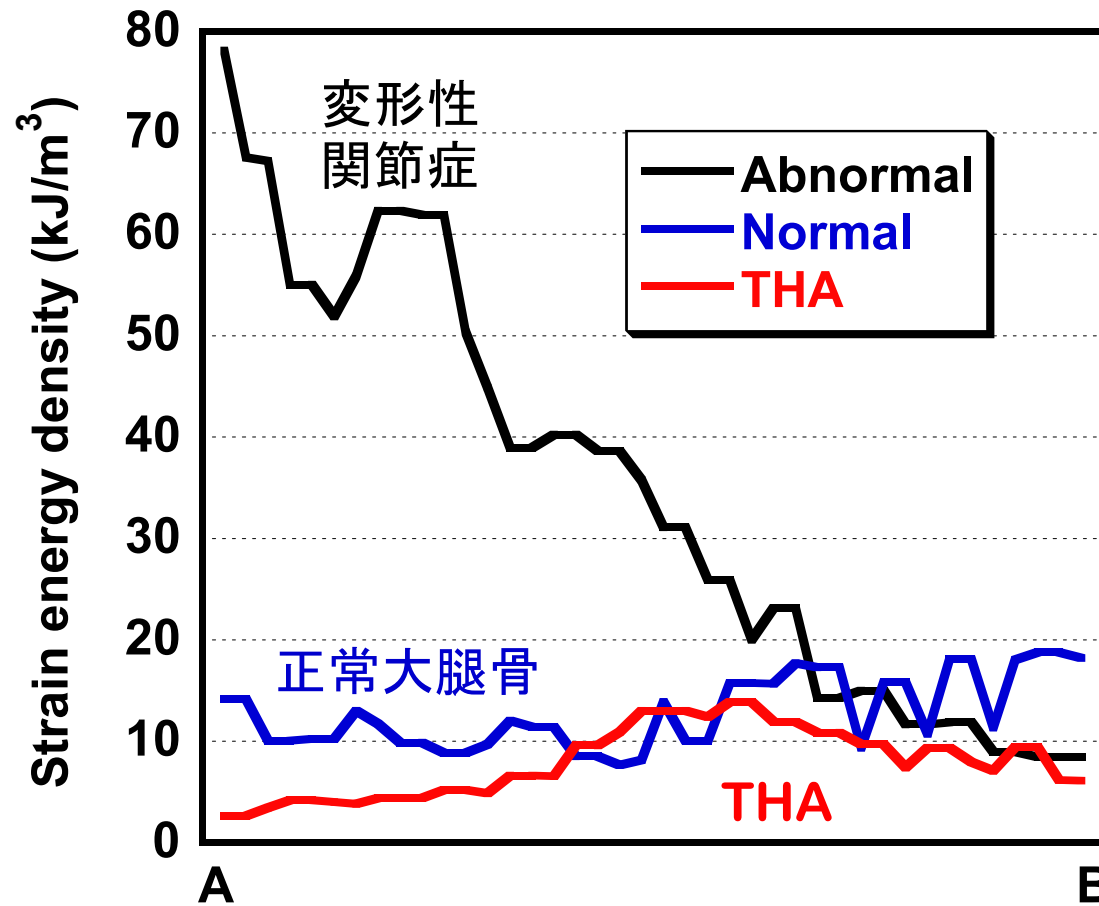


	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
Stem( Ti-6AL-4V)	110	0.3
Cup( Ti-6AL-4V)	110	0.3
Head (Ceramic)	380	0.26
Liner (UHMWPE)	1.95	0.43

# ひずみエネルギー密度分布の比較



# 小転子下部方向のSED



Stress shieldingの再現

# 損傷モデルの導入による人工股関節置換股の損傷・骨折解析

# 損傷モデルの設定

## 降伏応力の推定

降伏応力 (MPa)	骨密度 (g/cm <sup>3</sup> )
$\sigma_{\text{yield}} = 1.0 \times 10^{20}$	$\rho \leq 0.2$
$\sigma_{\text{yield}} = 137\rho^{1.88}$	$0.2 < \rho < 0.317$
$\sigma_{\text{yield}} = 114\rho^{1.72}$	$0.317 \leq \rho$



### 引張強度 (Kaneto, 2003)

最大主応力  $\sigma = 0.8 \sigma_{\text{yield}}$

### 圧縮強度 (Taylor, 2003)

最小主ひずみ  $\varepsilon = 3000 \mu\varepsilon$

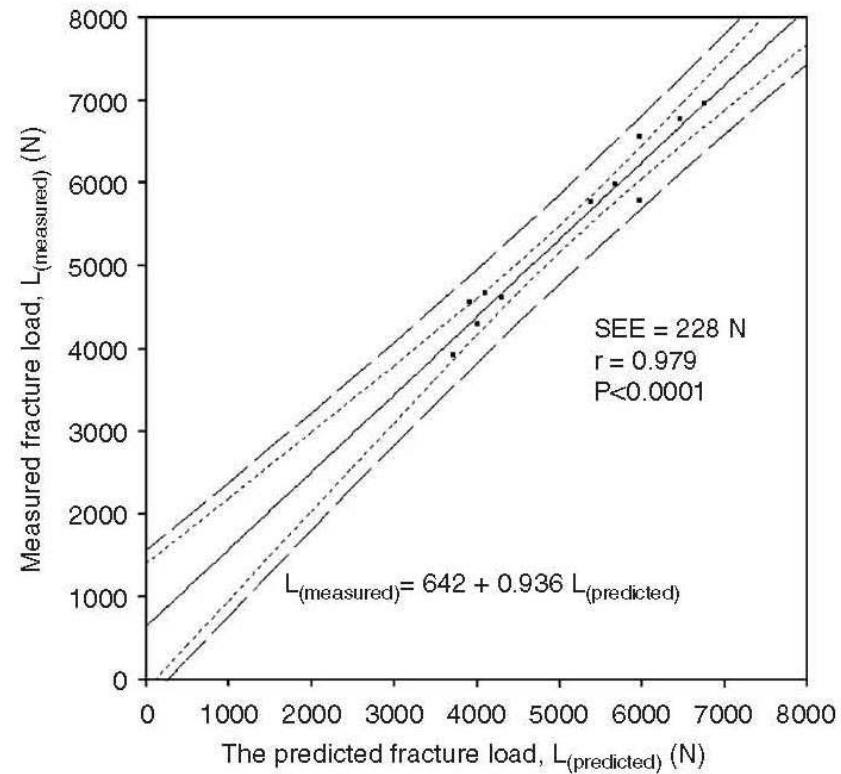
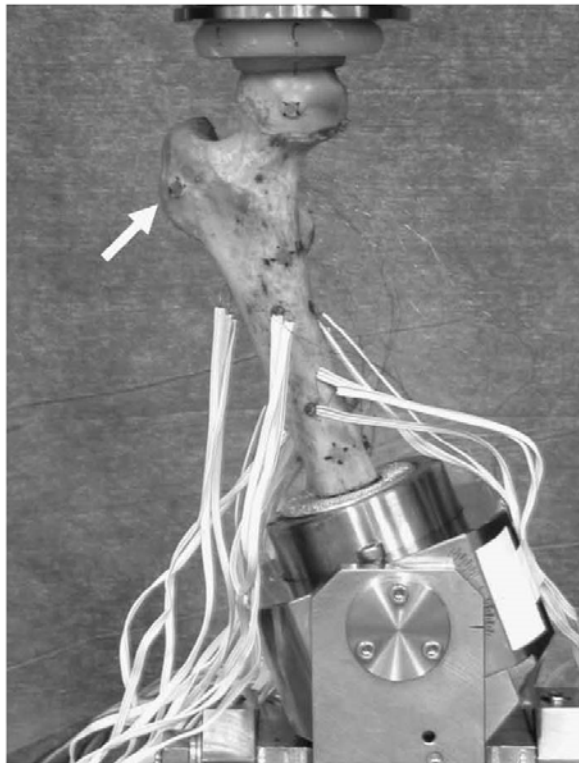
破壊基準の  
設定

破壊基準に達した要素は剛性がゼロになる



# CT値に基づくヤング率の推定

Bessho, M., et al., J Biomechanics, 2007



実験結果とCT-FEMによる解析結果が良く一致している



先進医療として認定！

# 先進医療でのFEA

- 先進医療技術名：

定量的CTを用いた有限要素法による骨強度予測評価

(告示日：H19/6/1)

- 適応症：

骨粗鬆症，骨変形若しくは骨腫瘍又は骨腫瘍搔爬術後のもの

- 技術の概要：

骨塩定量ファントムとともに対象骨のCTを撮影し，データをワークステーションに入力，有限要素解析のプログラムによって処理する．これにより，患者固有の三次元骨モデルが作成され，これをもとに3次元有限要素解析モデルを作成．この解析モデルに対して，現実の加重条件を模擬した加重・拘束条件を与えて応力・歪みを解析し，破壊強度を計算・算出する．

- 実施医療機関：

東京大学医学部附属病院

化学療法研究所附属病院

横浜市立大学附属病院

東北大学病院

国立長寿医療研究センター

川崎医科大学附属病院

- 実施件数：

H25: 110件， H23: 12件， H21: 18件

# 人工股関節置換術と骨折

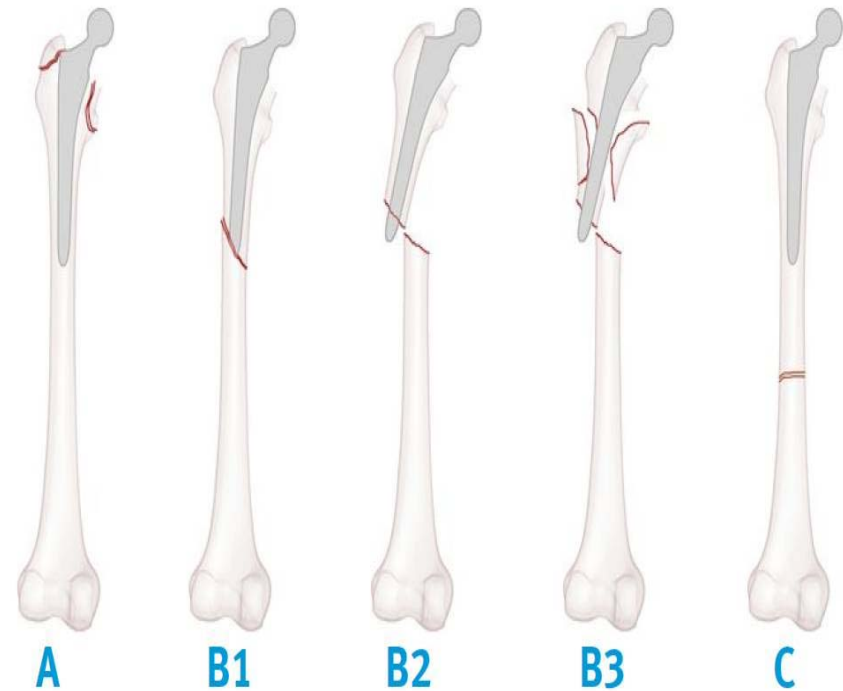
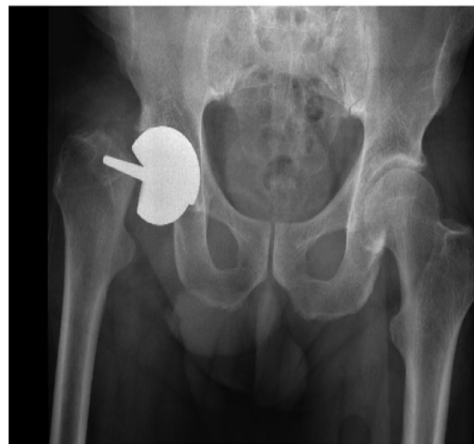
Fracture types



<http://www.orthohyd.com/>



Brooks, P. in *Orthopaedic*  
2010, 33: 9



<http://fractureguide.zimmer.com/>

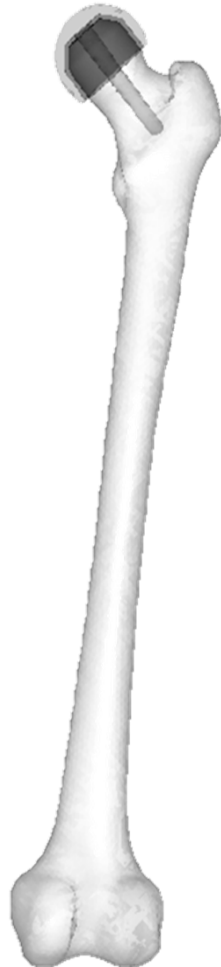
異なる骨折形態をFEMにより再現し、そのメカニズムを明らかにする

# THA & RHAモデルの構築

THA

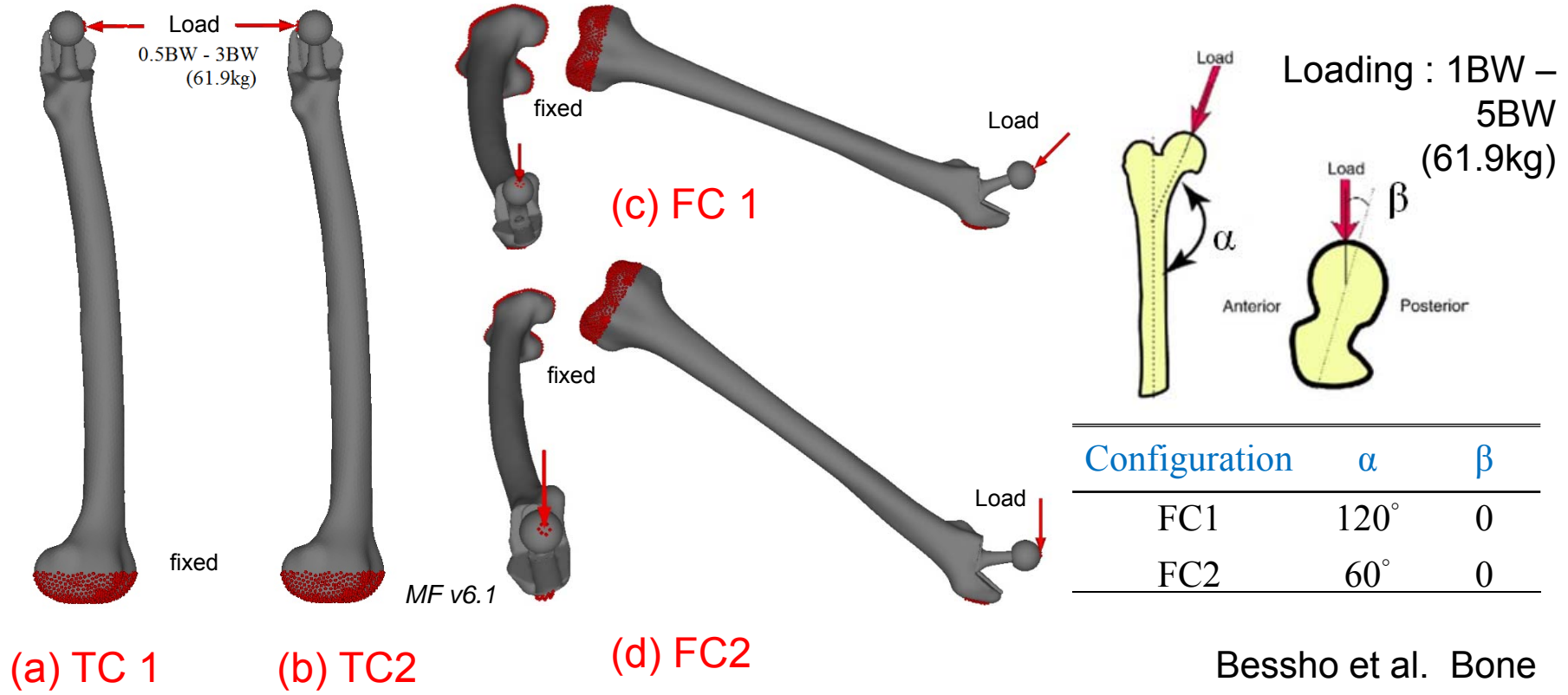


RHA



Properties	Ti6Al4V	Alumina	Co-Cr
Elastic Modulus (GPa)	114	370	230
Poisson Ratio	0.34	0.22	0.30
Critical Stress (GPa)	0.88	0.40	0.94
Yield Stress (GPa)	0.97	3.00	2.70
Density (g/cm <sup>3</sup> )	4.43	3.96	8.28

# 境界条件



Twisting

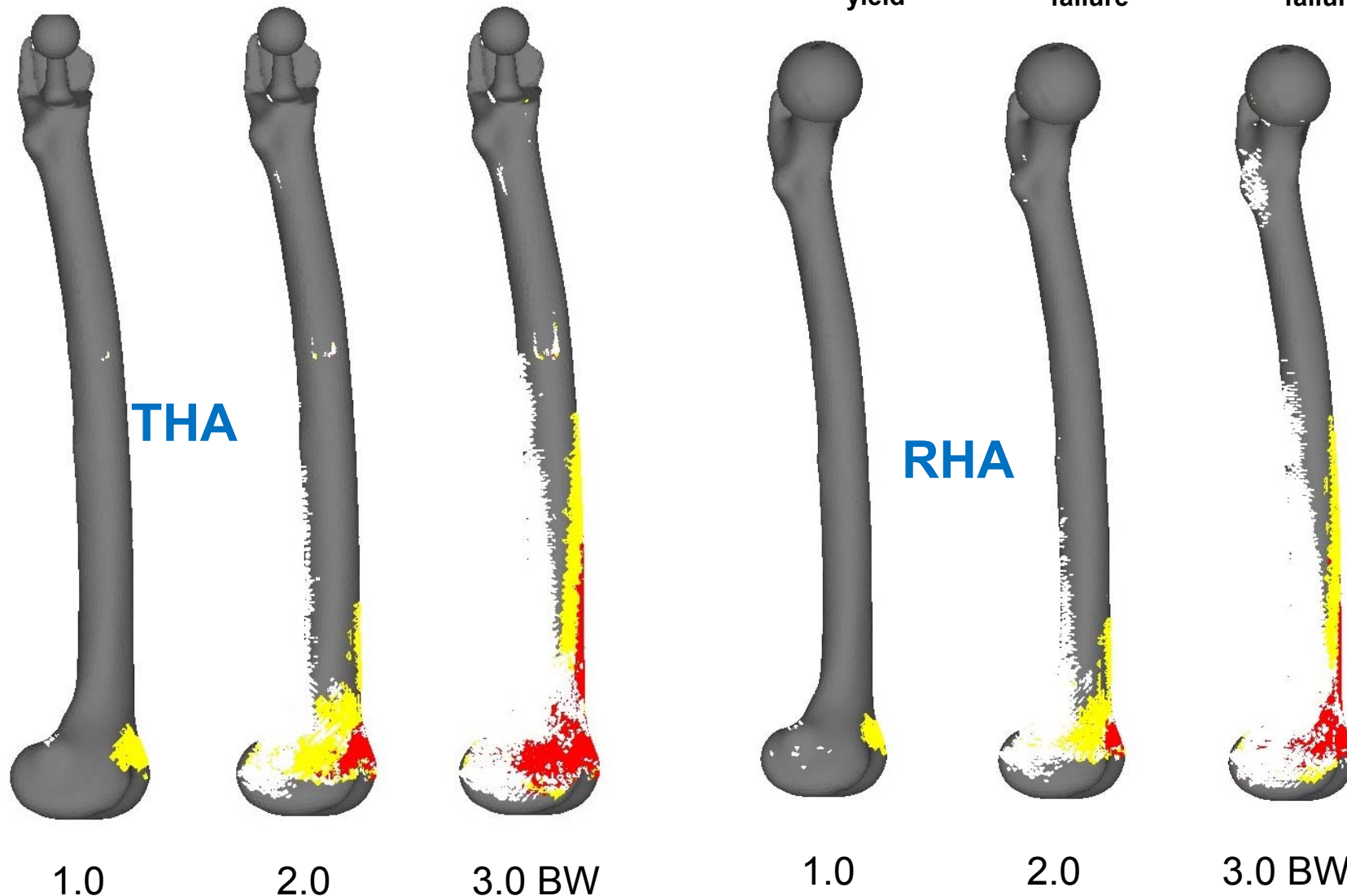
Falling

Bessho et al. Bone  
2009

# 骨損傷の累積挙動（ねじり）

TC-1

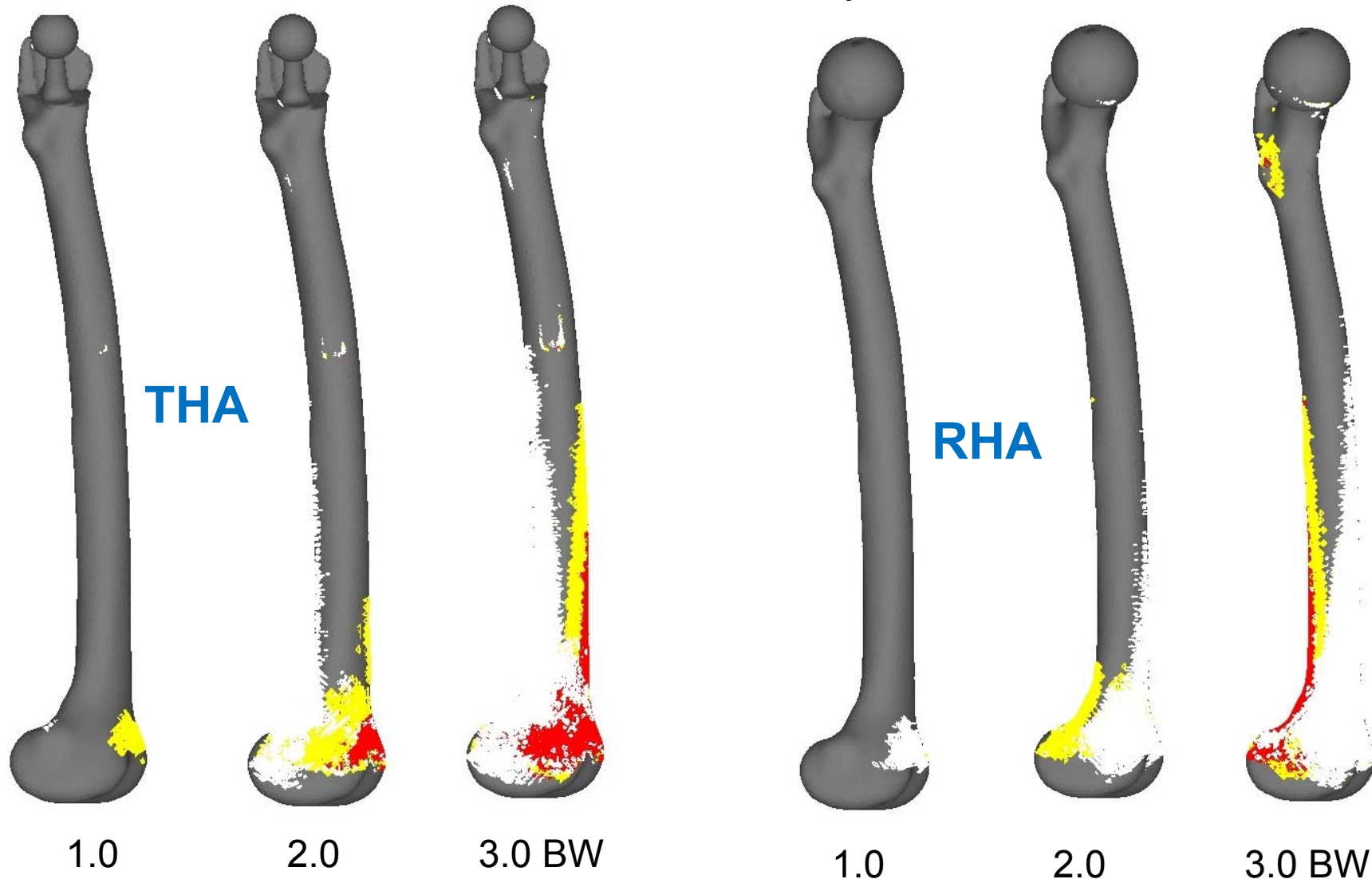
● Compressive yield ● Compressive failure ○ tensile failure



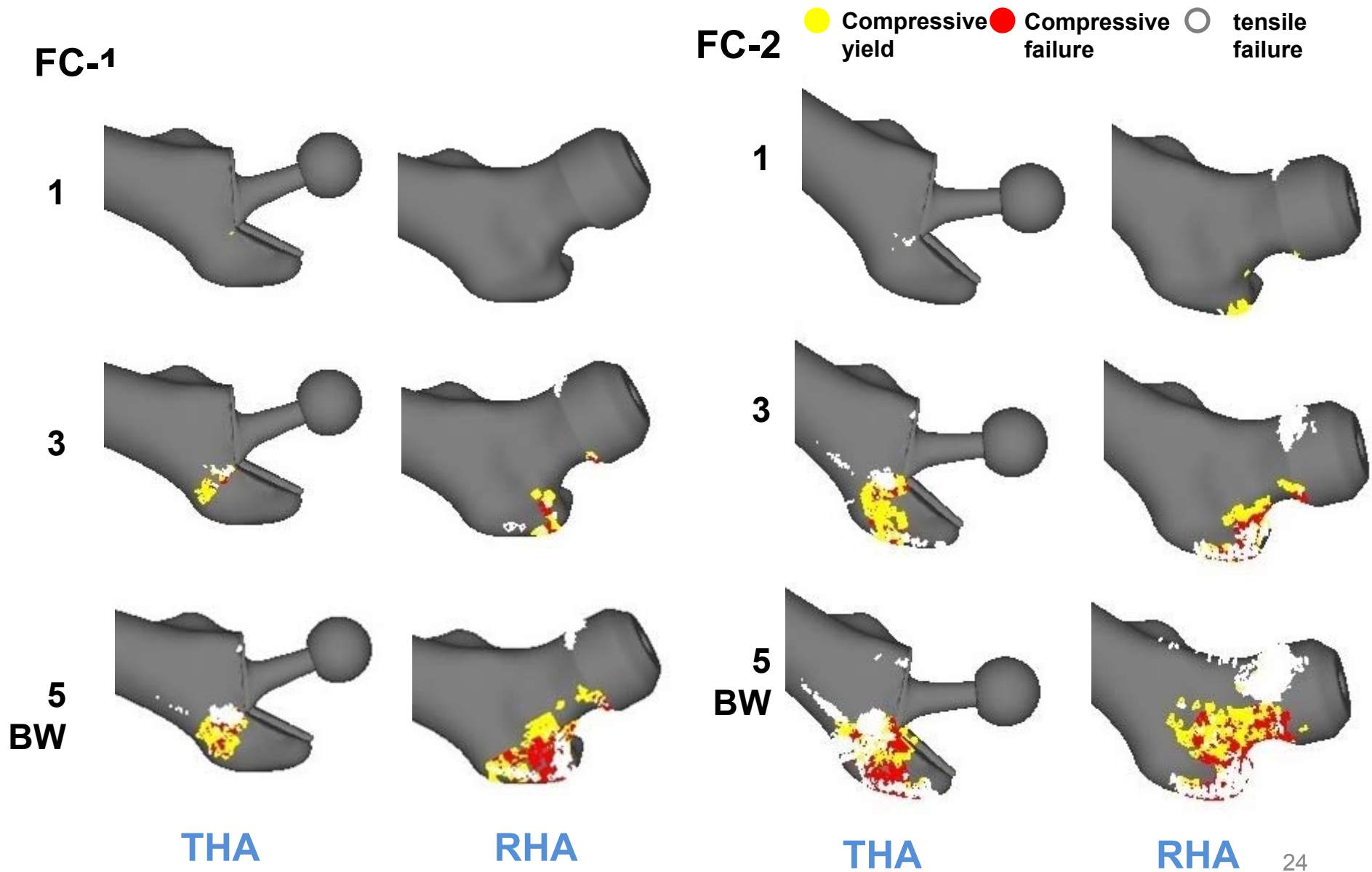
# 骨損傷の累積挙動（ねじり）

TC-2

● Compressive yield ● Compressive failure ○ tensile failure



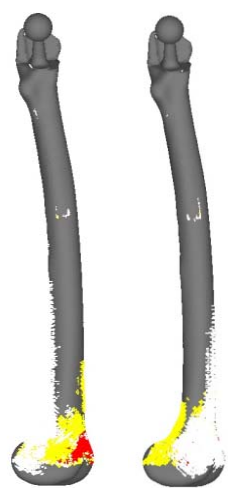
# 骨損傷の累積挙動（転倒）



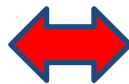


# 解析結果と骨折形態の対応

THA

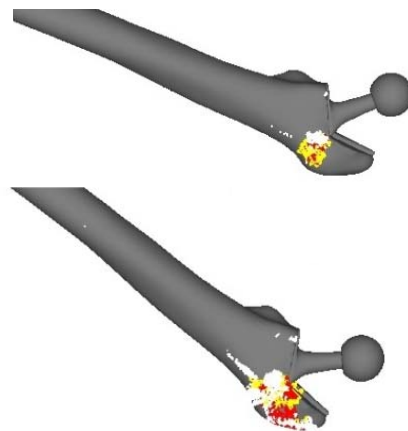


twisting

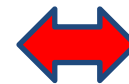


Type C

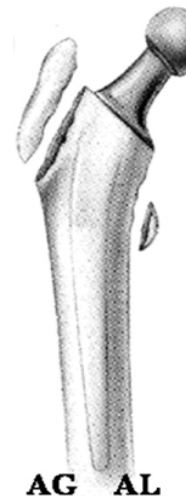
<http://reviews.jbjs.org/>



falling



Type A

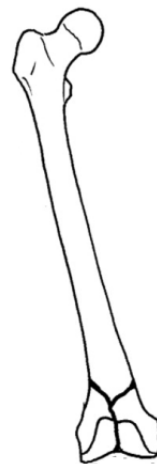


AG AL ]

Intact/  
RHA

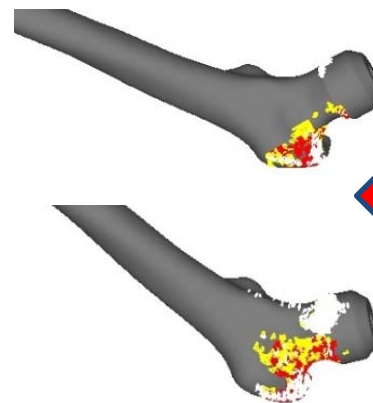


Comminuted



IIB

[www.jaas.org](http://www.jaas.org)

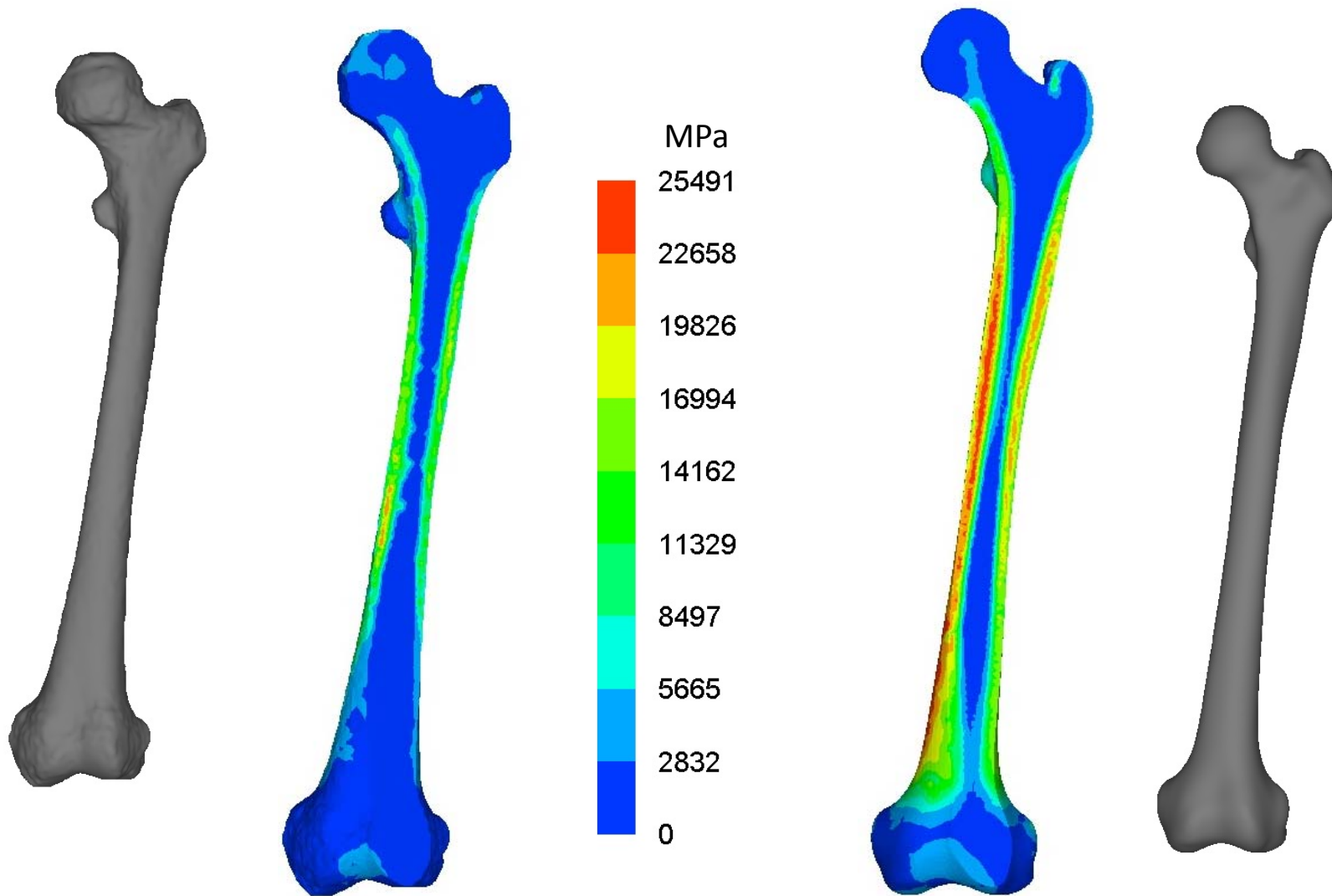


[www.eorthopod.com/](http://www.eorthopod.com/)



[mendezortho.com/](http://mendezortho.com/)

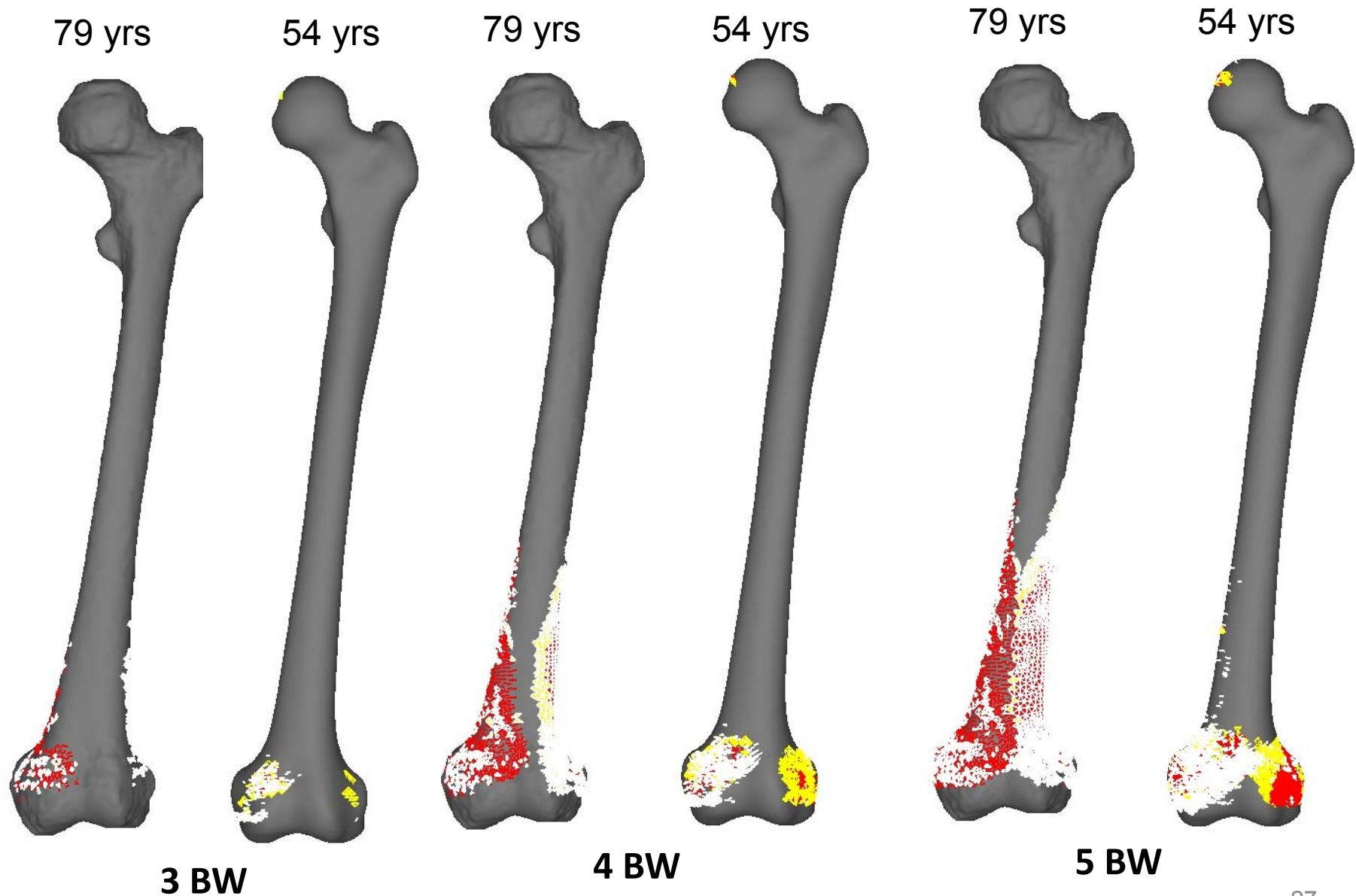
# 異なる患者の比較～79歳 vs 54歳～



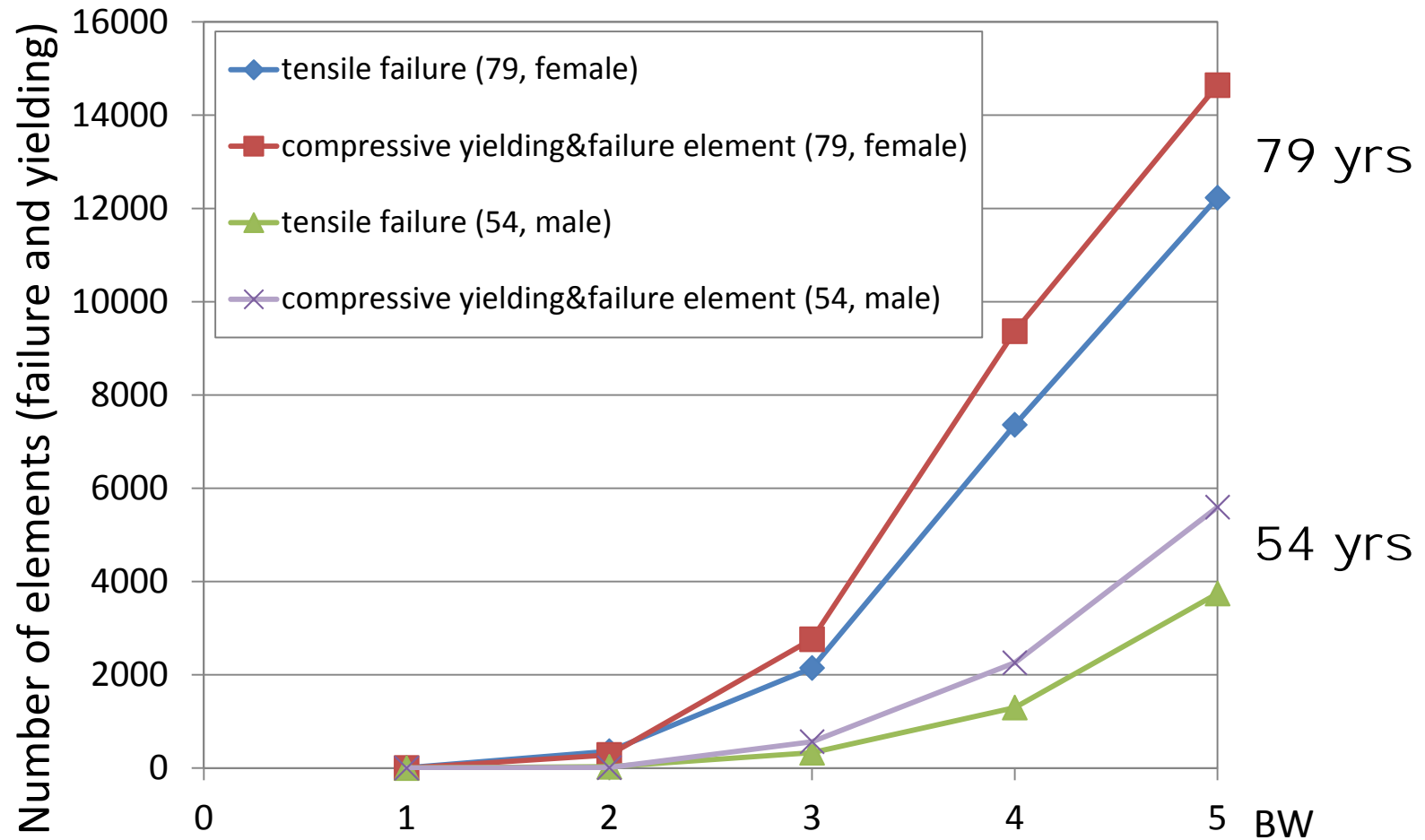
79 yrs old, female, hip OA

54 yrs old, female,  
healthy

# 骨損傷の累積挙動～79歳 vs 54歳～



# 損傷要素数の推移～79歳 vs 54歳～



# 有効性

- CT画像を利用することで実構造に近い骨構造の数値モデルの作成が可能
- CT値を利用することで骨密度分布の推定と弾性率や圧縮降伏強度への変換が可能
- 骨モデルと人工関節CADデータを組み合わせることで人工関節置換股の数値モデルの作成が可能
- CT-FEMにより人工関節置換が骨に及ぼす影響の定量的評価が可能
- 損傷モデルを導入することで骨折予測が可能
- 人工関節デザインの最適化，加齢・性別・骨粗鬆症等の影響の調査等への応用も可能

# 問題点

- CT画像の解像度に影響されるモデルの精度
- 部分的（股関節，大腿骨等）に抽出した骨モデルの妥当性
- 複雑な境界条件（拘束条件と荷重条件）の設定
- 解析結果の妥当性の検証（臨床結果や実験との比較）
- ミクロ構造（コラーゲンと炭酸アパタイトの複合構造）が影響を及ぼす骨折現象に対するマクロな損傷評価パラメータ（主応力や主ひずみ）の適応性