

人工股関節・転倒時保護パッド開発での生体力学シミュレーション事例

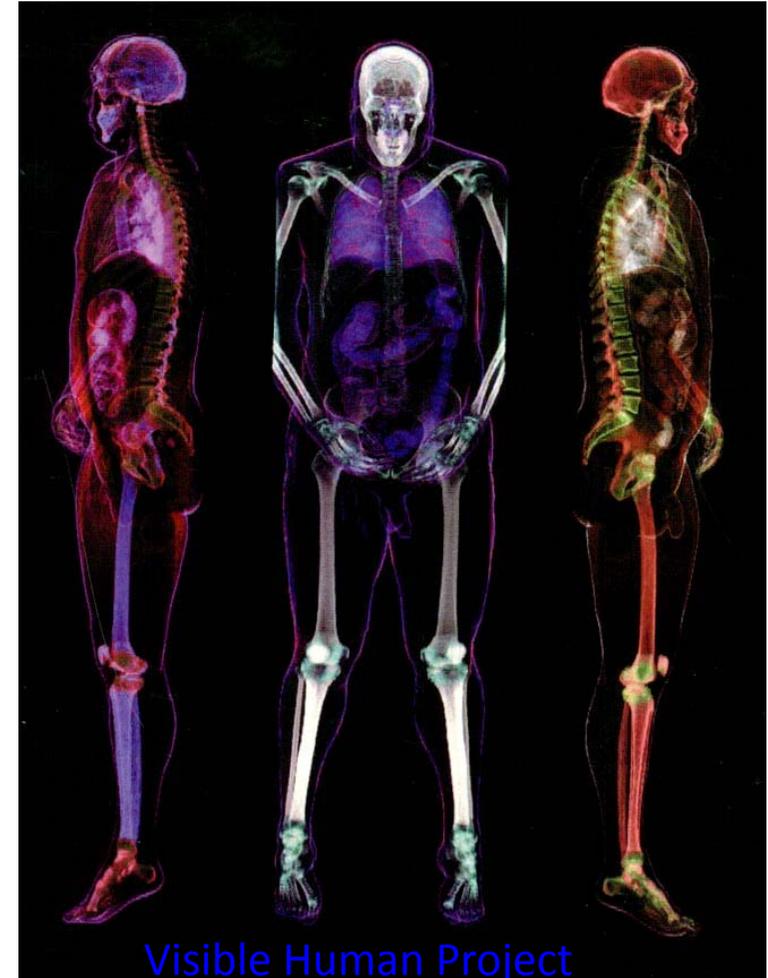
理化学研究所
情報基盤センター
姫野龍太郎

理研で取り組んだ生体力学シミュレーションが目指すもの



短期的目標

- **生きている人体の部分的な再現**
 - Visible Human Projectとは違う
- **すでに支配方程式の理解が進んだ領域**
 - 構造力学・流体力学・動力学など
 - マクロな立場でのシミュレーション
- **医療現場での実際の応用を図る**



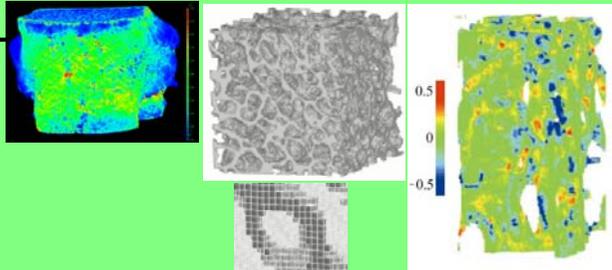


理研における生体力学 シミュレーション研究

- 1998年3月に最初のシンポジウム
- 1999年4月から第一期スタート
- 2004年3月第一期終了
- 2004年4月から第二期スタート
- 2006年10月から京のプロジェクトの次世代生命体統合シミュレーションに合流(2012年度末まで)

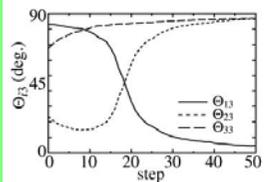
骨梁リモデリングのマイクロ・マクロシミュレーション手法の構築

骨構造の形状データ
(X線 μ CT)



骨材料データ取得
(微小材料試験機)

骨梁リモデリング機構の実験的検討
(in vitro および in vivo 実験系の開発)



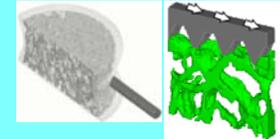
骨梁リモデリングシミュレーション手法の構築

骨梁リモデリングの大規模シミュレーション手法の構築 (並列計算用シミュレーション手法の開発)

骨梁リモデリングのマイクロ・マクロ連成シミュレーション手法の構築 (階層間横断リモデリングモデルの開発)

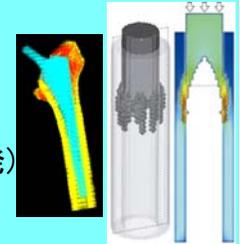
インプラント形状設計システムの構築

ヒト骨構造の形状データの取得
(X線 μ CT, MRI)



インプラント形状最適化シミュレーション手法の構築 (数理モデルの構築と検証, 大規模計算手法)

個別別形状モデリング手法の構築
(MRIを用いたVoxel形状モデリング手法の開発)



実験との比較によるシミュレーション手法の検証

インプラント形状設計システムの臨床応用

Image-based modeling: example for rat vertebra

- 201 Slices
- 480×480 pixels
- 32mm/pixel

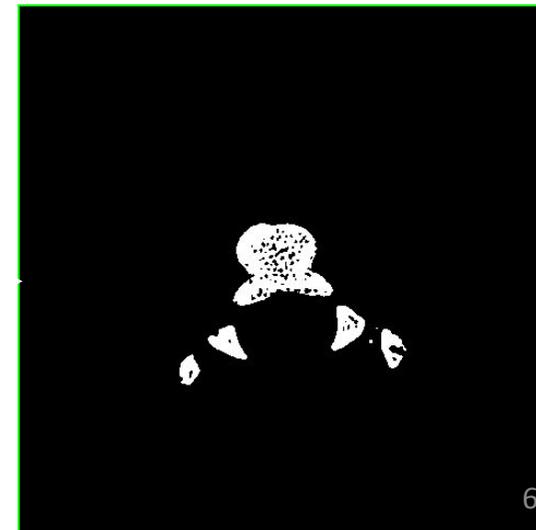
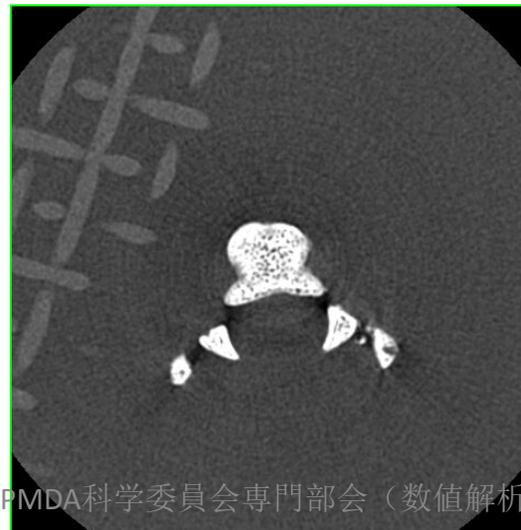
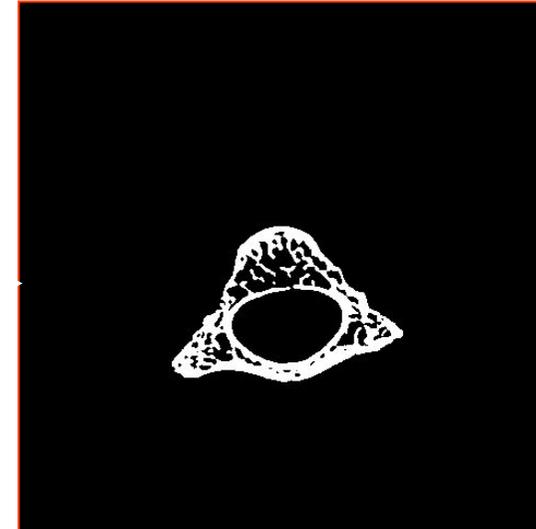
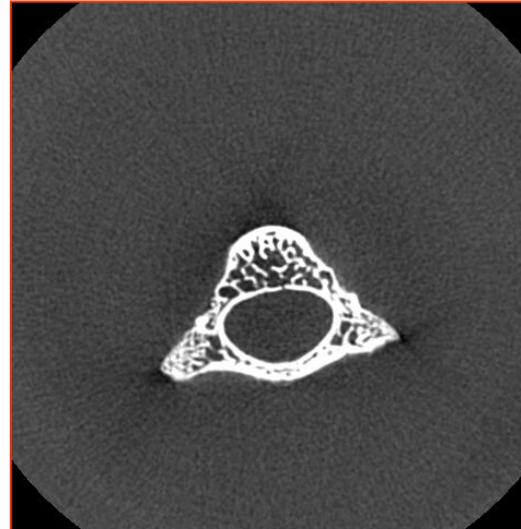
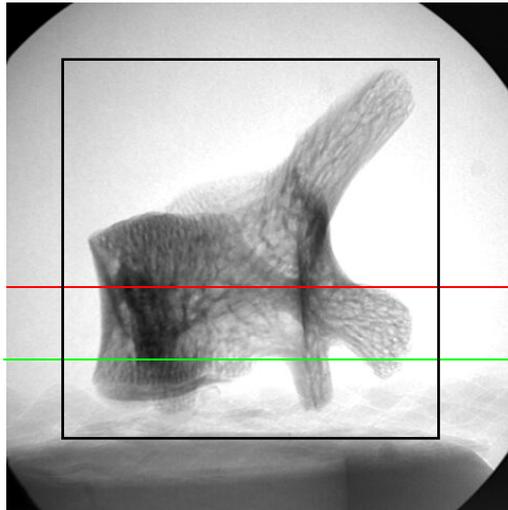
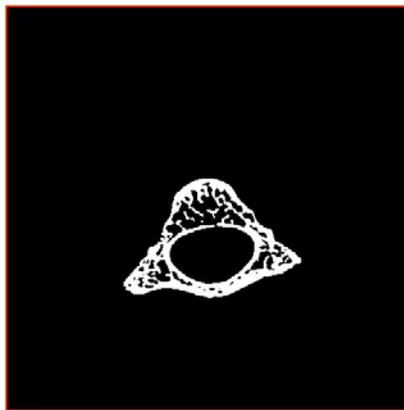
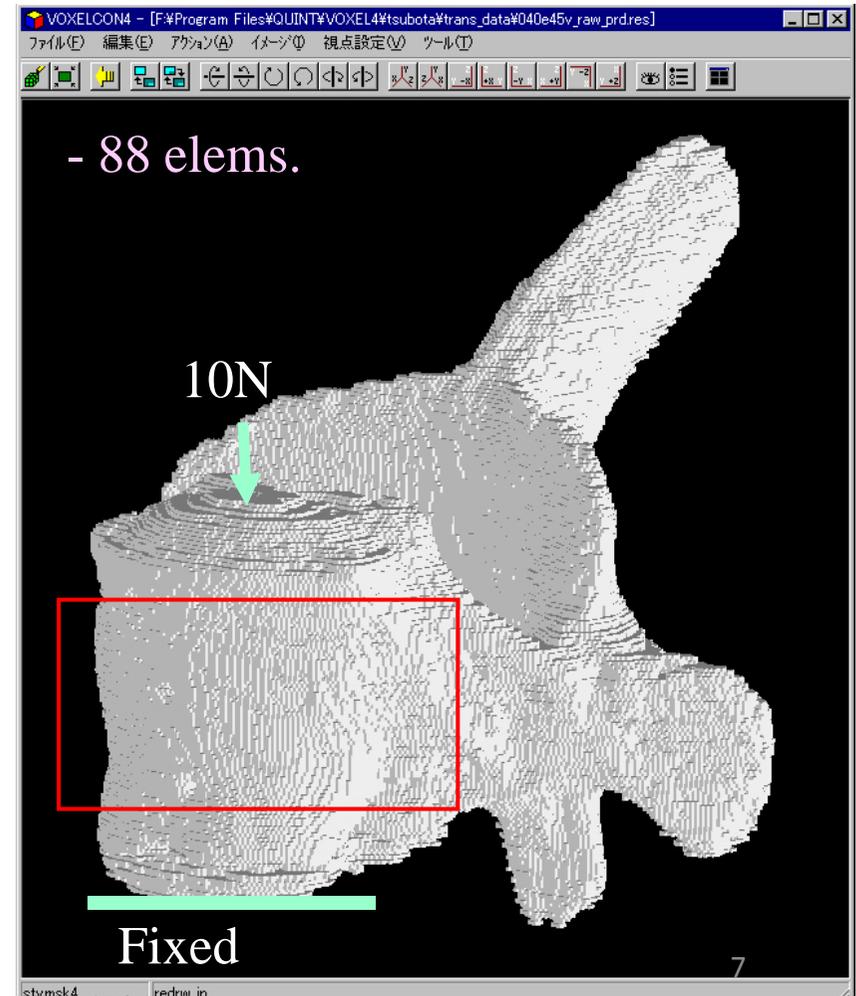
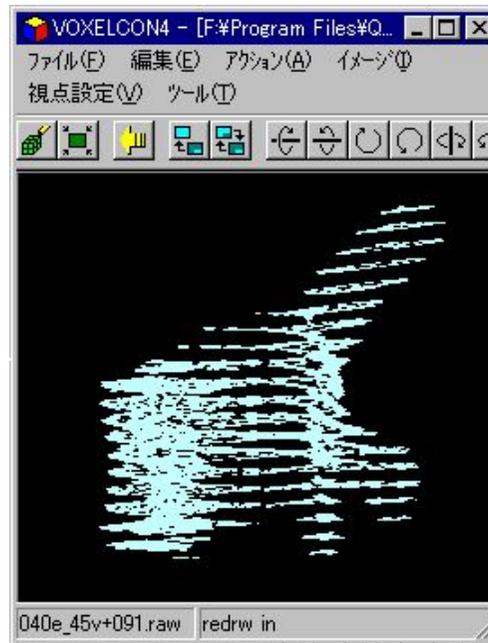


Image-based modeling: example for rat vertebra (cont.)

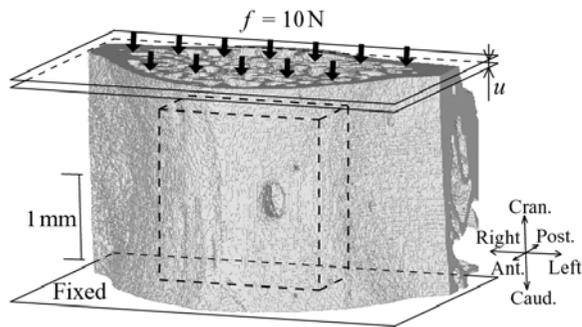


2014/11/14

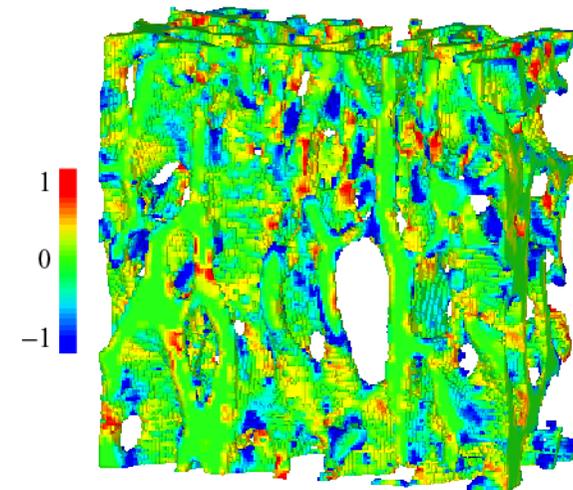
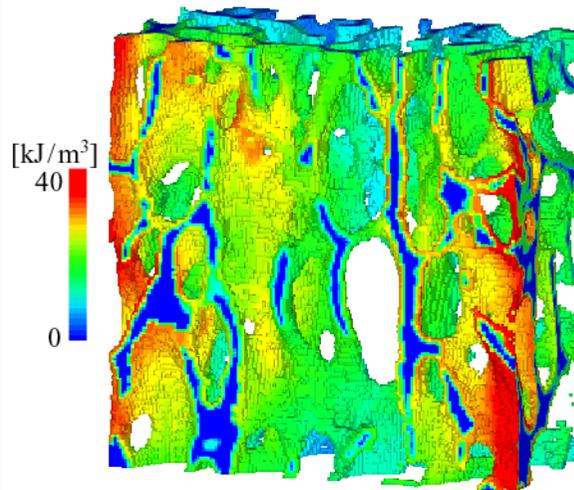
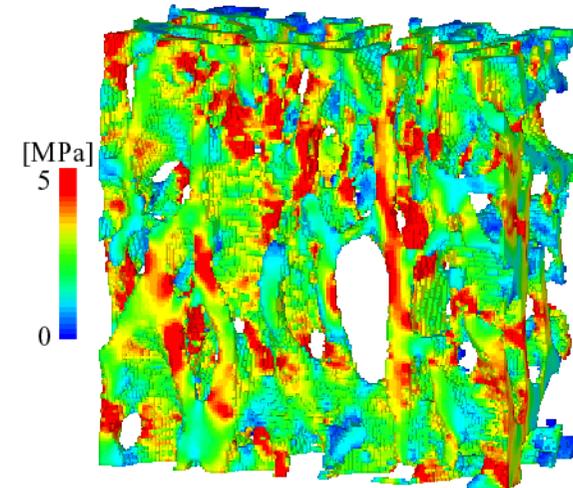
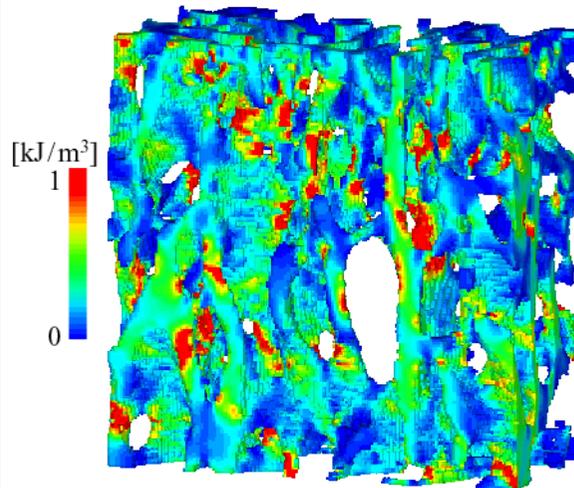




Distribution of mechanical quantities in rat vertebra predicted by image-based FE analysis



- 4.5 million elems.
- 12.8 $\mu\text{m}/\text{voxel}$



SED integration

Stress nonuniformity⁸



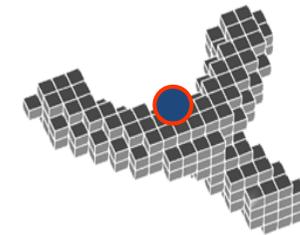
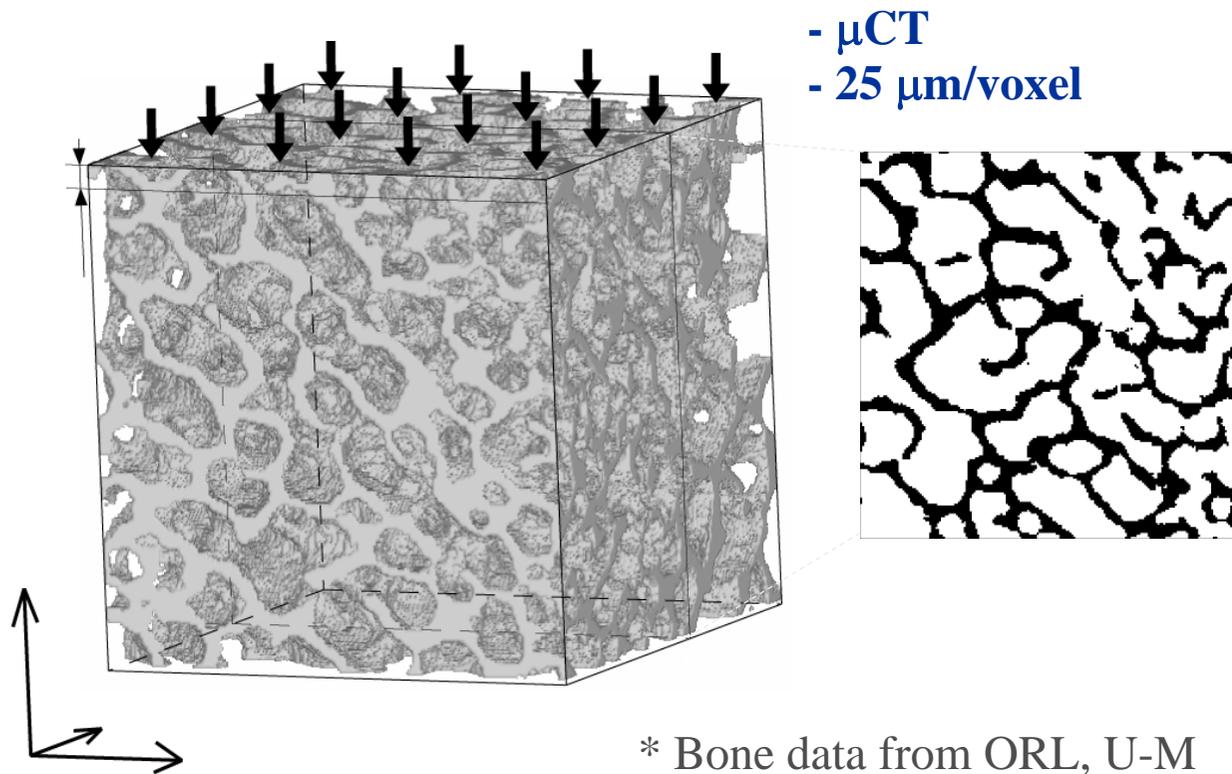
Computational biomechanics for bone remodeling

- **Understanding mechanical bone remodeling**
 - **Complicated three-dimensional structure**
 - **Mechanical environment of trabeculae**
 - **Morphological change of trabeculae**
- **Application of the simulation method**
 - **Medical image data**
 - **Individual comp. modeling**
 - **Evaluation and design of bone-implant**

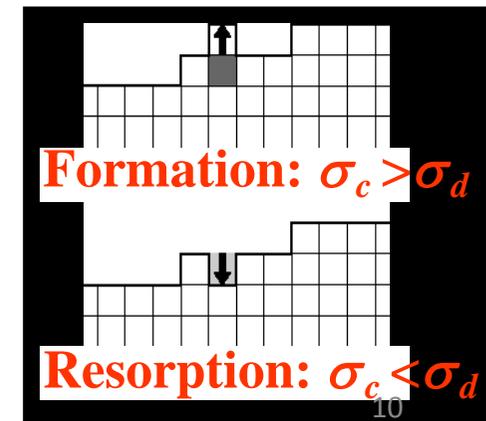


Microstructural changes under compressive loading

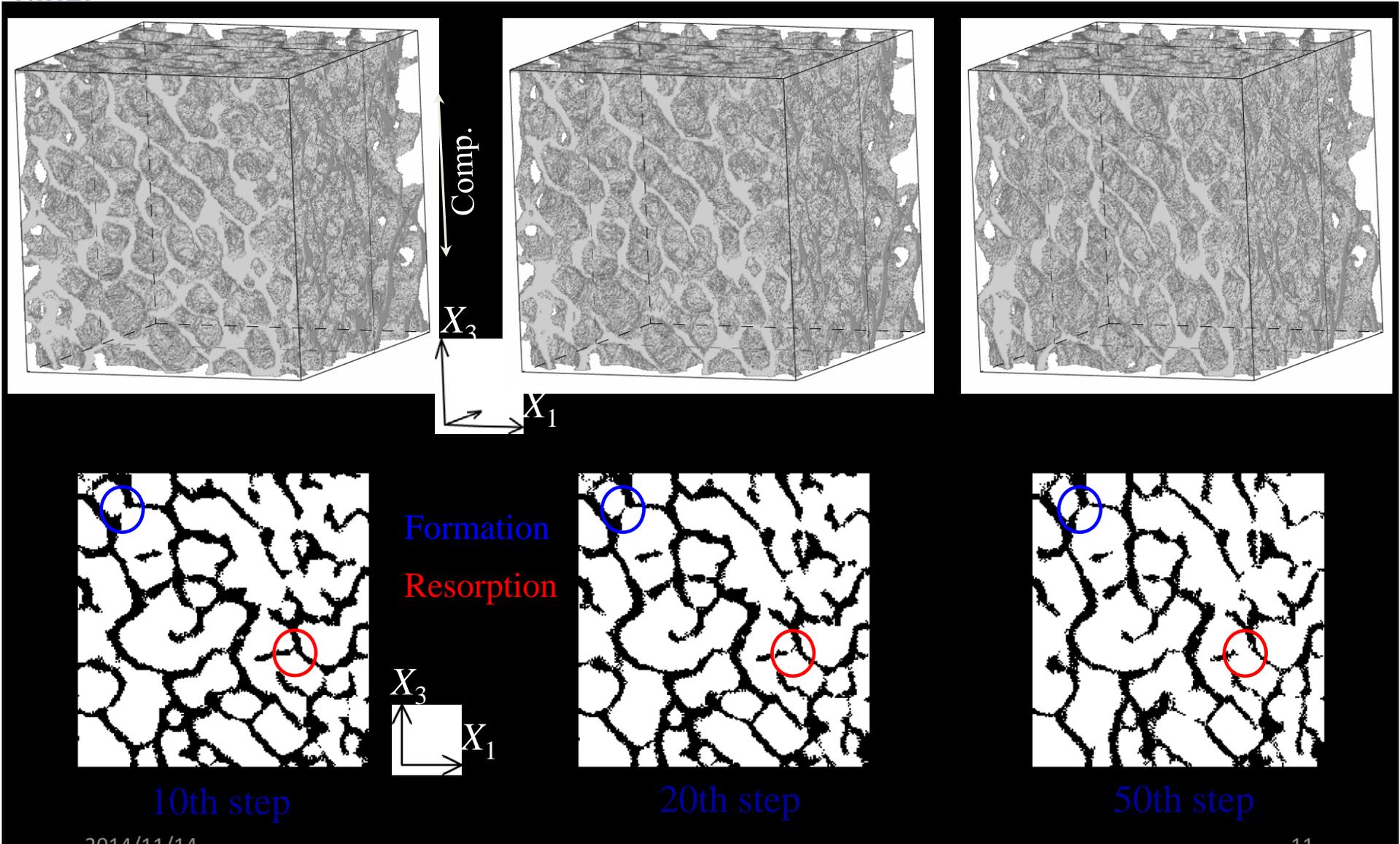
- Canine distal femur under compressive loading (Guldberg97)
- Local stress nonuniformity as a mechanical stimulus



σ_c : Stress at point c
 σ_d : Representative stress around c

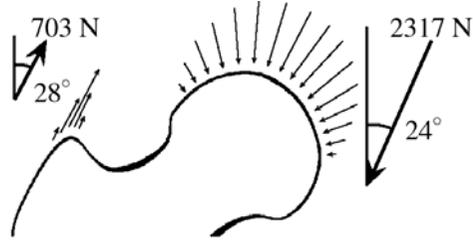


Microstructural changes under compressive loading

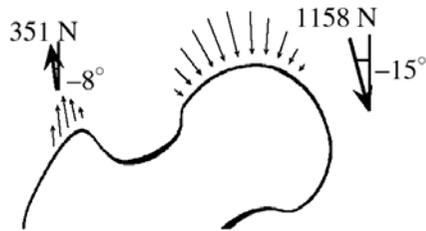


Trabecular surface remodeling for proximal femur

(1) One-legged stance: 6000/day



(2) Abduction: 2000/day



(3) Adduction: 2000/day

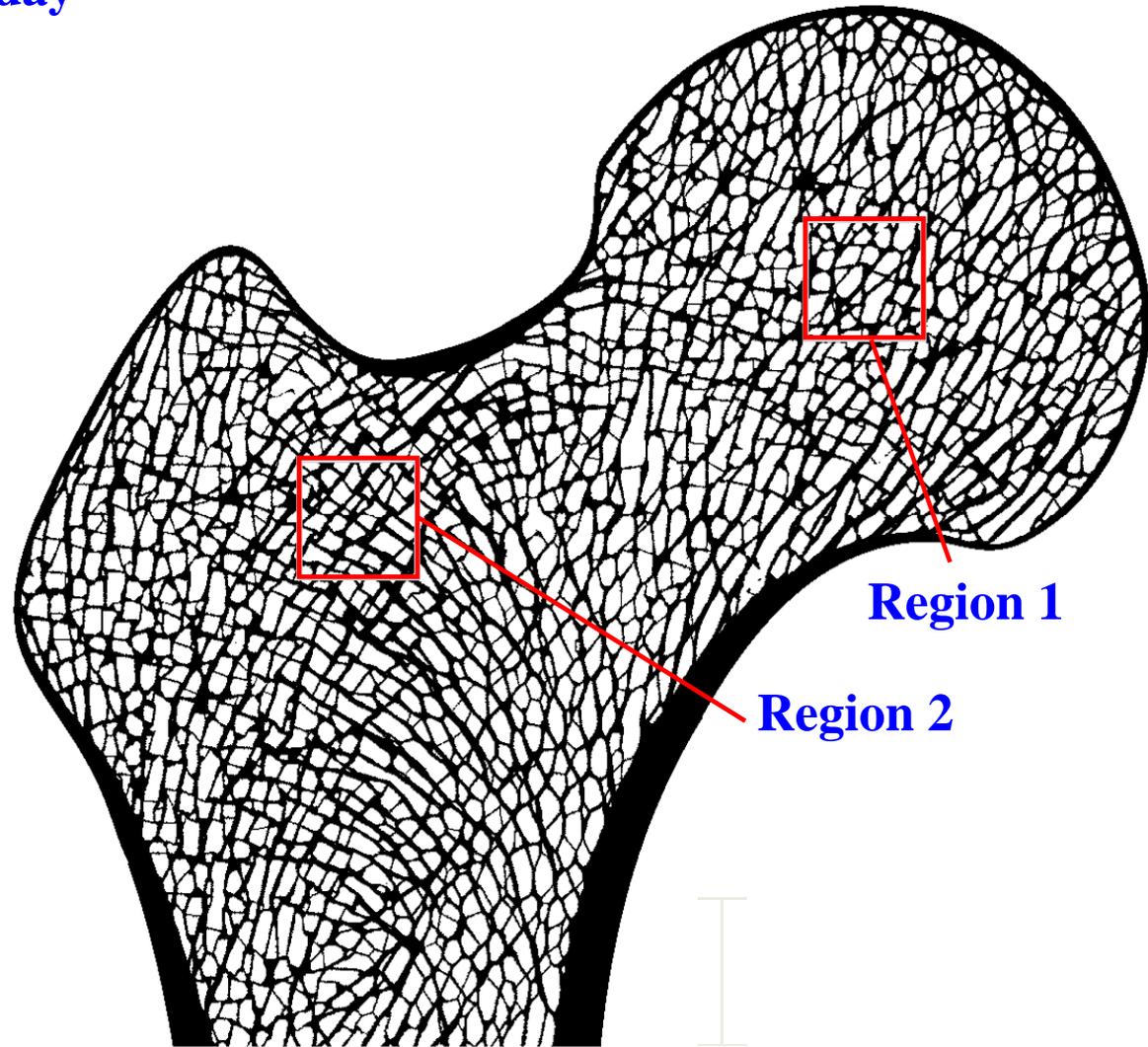
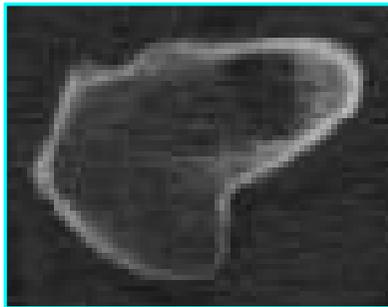


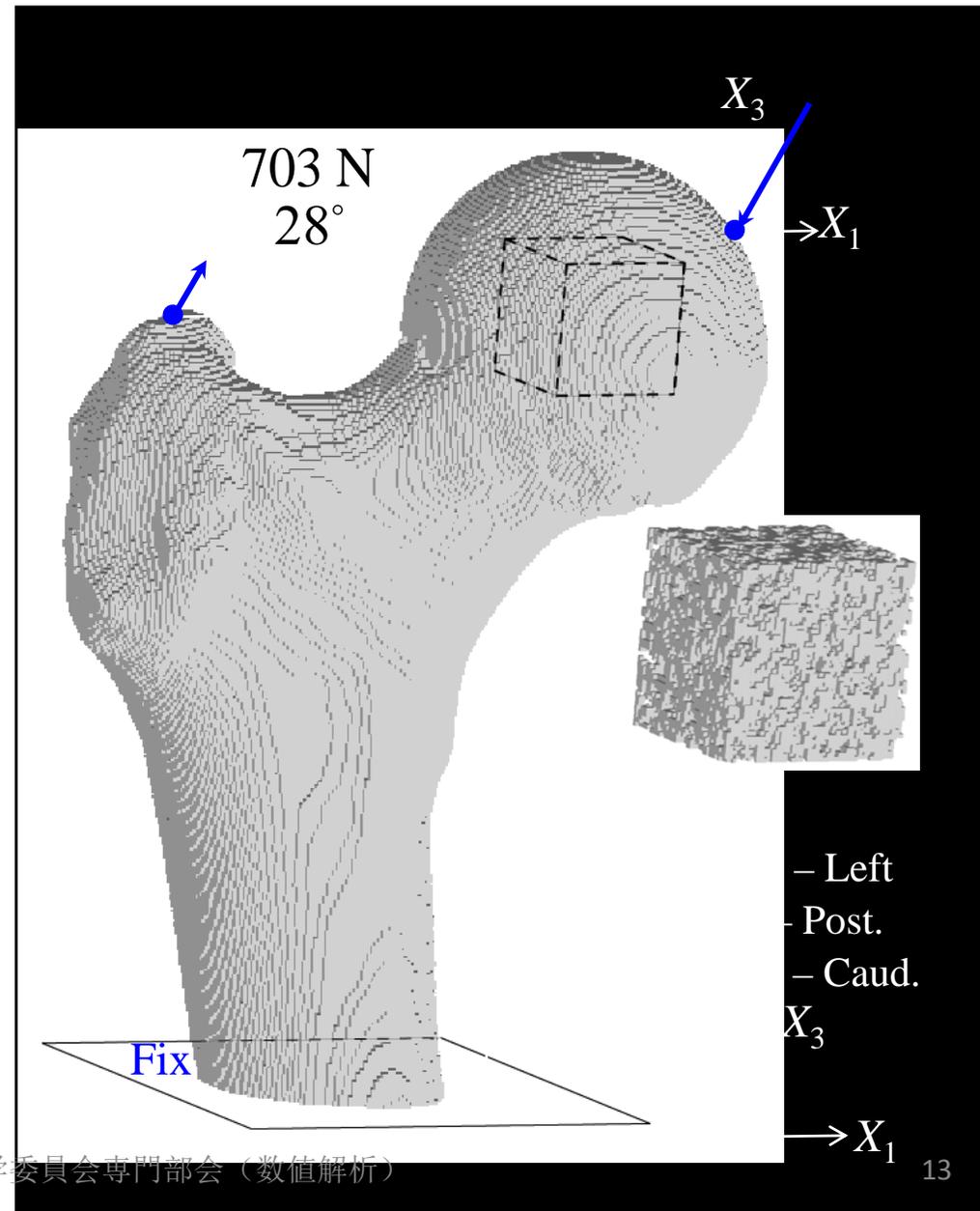
Image-based model of human proximal femur

- CT image data



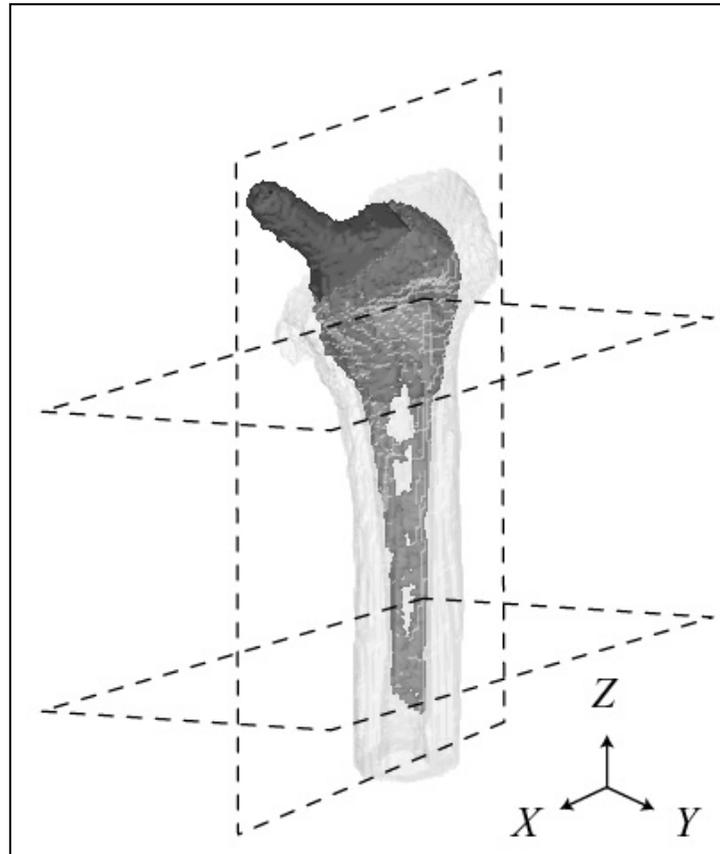
(Research systems inc.)

- One million voxels
- 250 μm /voxel
- Isotropic structure
- Volume fraction of cancellous bone: 0.51

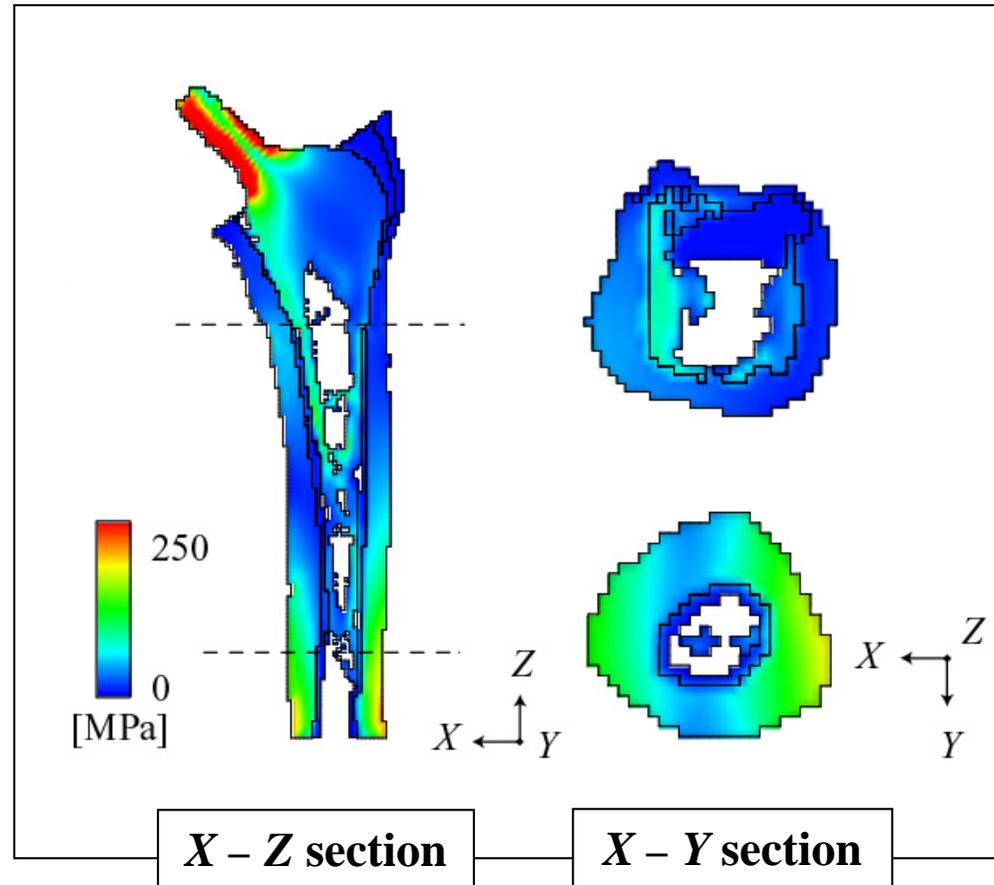


骨のインプラントシミュレーション

Case L1 : L2 : L3 = 3 : 1 : 1



Stem Shape



X - Z section

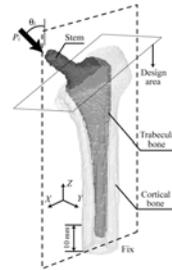
X - Y section

Equivalent Stress

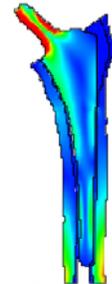
Computational design system for bone implant

**Individual modeling
of bone and implant**

Medical image, 3D CAD data



**Evaluation
of implant**



* IPA: Information-technology
Promotion Agency, Japan

**Choice of the
implant type**

**Design of
stem shape**



**Manufacturing directly
from image-based model**



更なる検討が必要な事

- 骨強度はCTの輝度値から推定可能だが、適応の方は個人・年齢によって異なる
 - DBの整備
 - 検証



人体モデルの構築と応用

骨折防止パッドの効果のシミュレーション (2007年4月にプレス発表)



- 理研と静岡県工業技術研究所との共同研究
- 高齢者は加齢に伴う骨密度の低下から転倒による大腿骨頸部骨折を起こしやすい



ゲンゼHPより

骨折防止パッドが開発

目的

骨折防止パッドの有無により身体組織の応力分布と変位がどのように変化するかを検証

解析の特徴

- ① 複数の組織を含んだ人体のモデルを使用
- ② 組織ごとに個別の物性値を入力

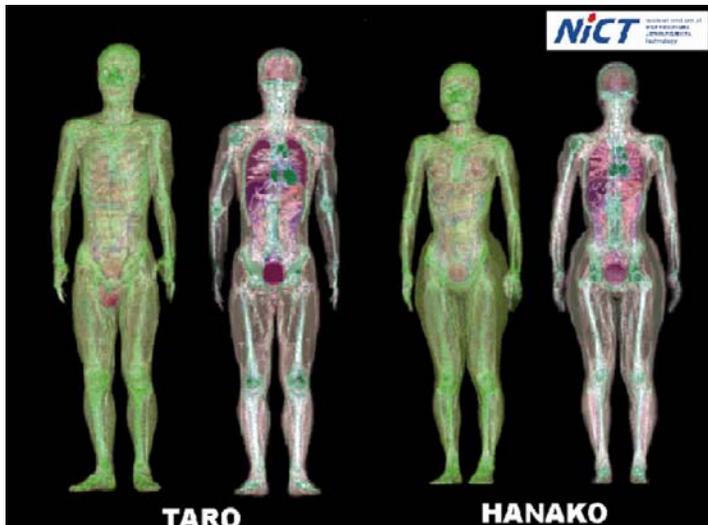
方法

- ボクセルデータでの解析が可能なVOXELCONを使用
- VOXELCONは静解析のみ実施可能

静解析を行うことでパッドを装着したときの力の分散を定性的に評価

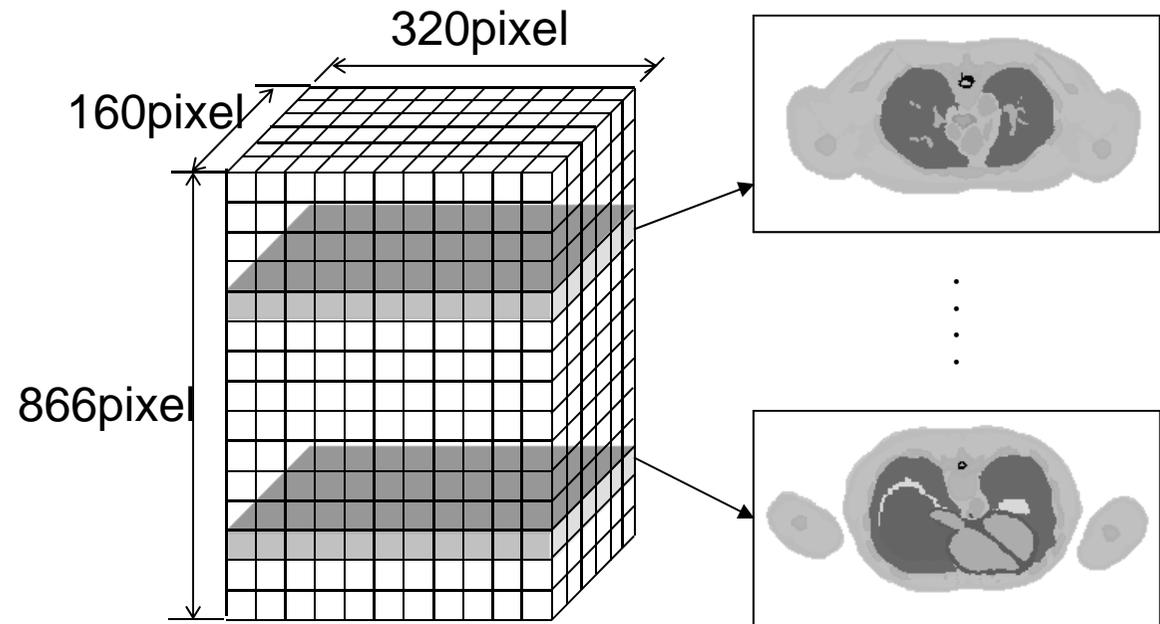
解析モデル(1)

- NICTの数値人体モデルデータを使用
- $320 \times 160 \times 866$ 個の立体要素で構成
- 58種類の組織に分かれている
- 数値人体モデルデータを断層ごとに 320×160 pixelの画像ファイルに変換してVOXELCONに入力



数値人体モデルデータ

2014/11/14



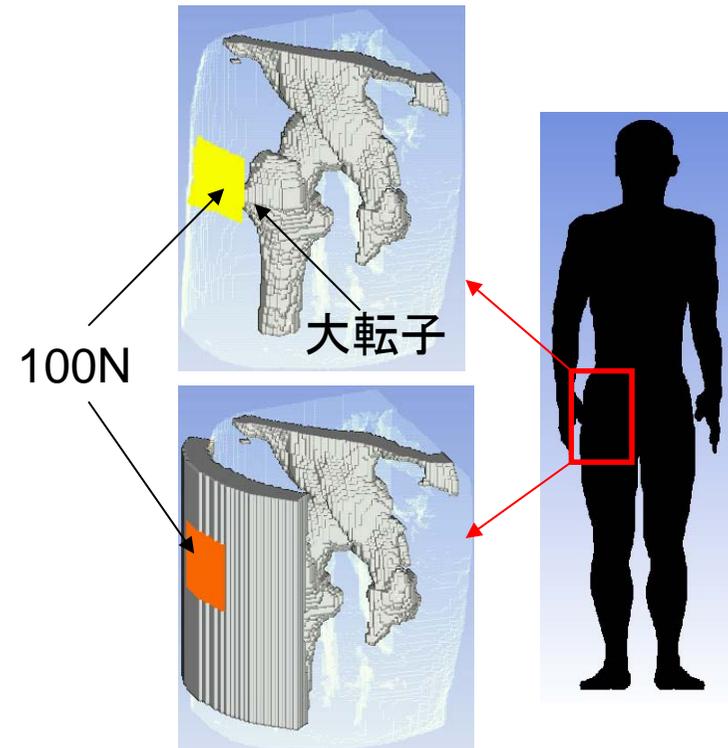
PMDA科学委員会専門部会（数値解析）

解析モデル(2)

- NICTの数値人体モデルデータを使用
- 腰部の2分の1モデル

① 大転子の軟組織外側に直接荷重をかけた場合(パッド無)

② 大転子周辺の軟組織外側に骨折防止パッドを装着し、パッド上から荷重をかけた場合(パッド有)



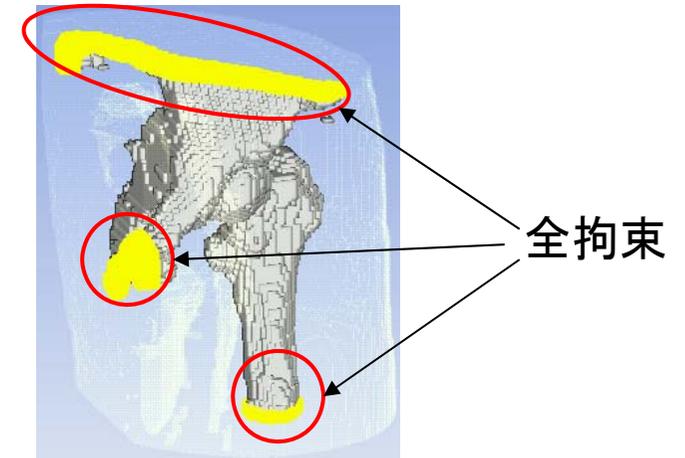
身体を後方から見た図

■ 含まれる組織は

膀胱、大腸、脂肪、筋肉、皮膚、皮質骨、骨髄—海面骨

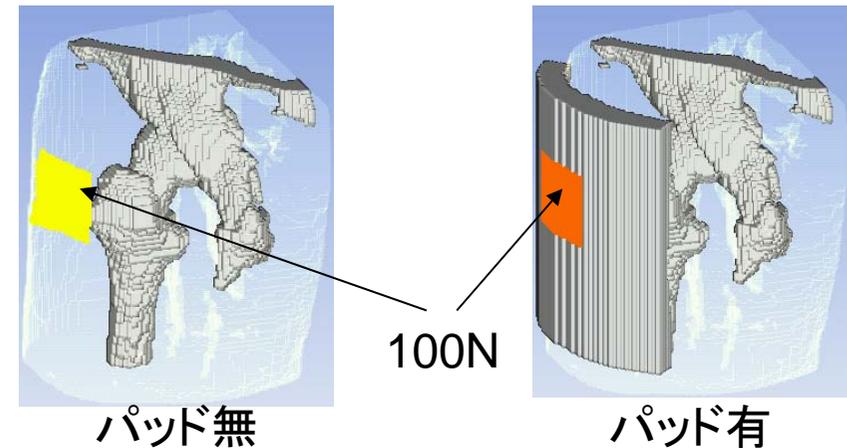
境界条件

- 骨盤の断面および大腿骨断面を全拘束



身体を前方から見た図

- 100N(約10kgf)の荷重を大転子外側のパッド上約60mm四方の範囲に負荷



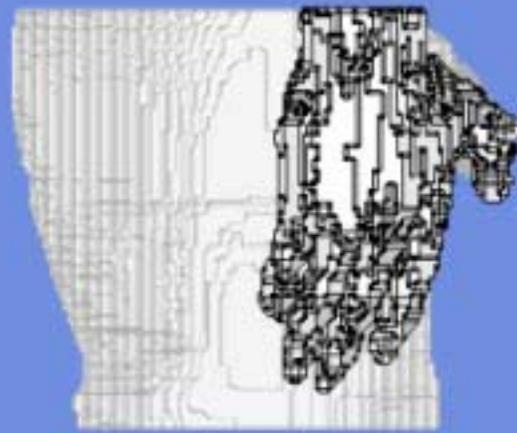
身体を後方から見た図

物性値

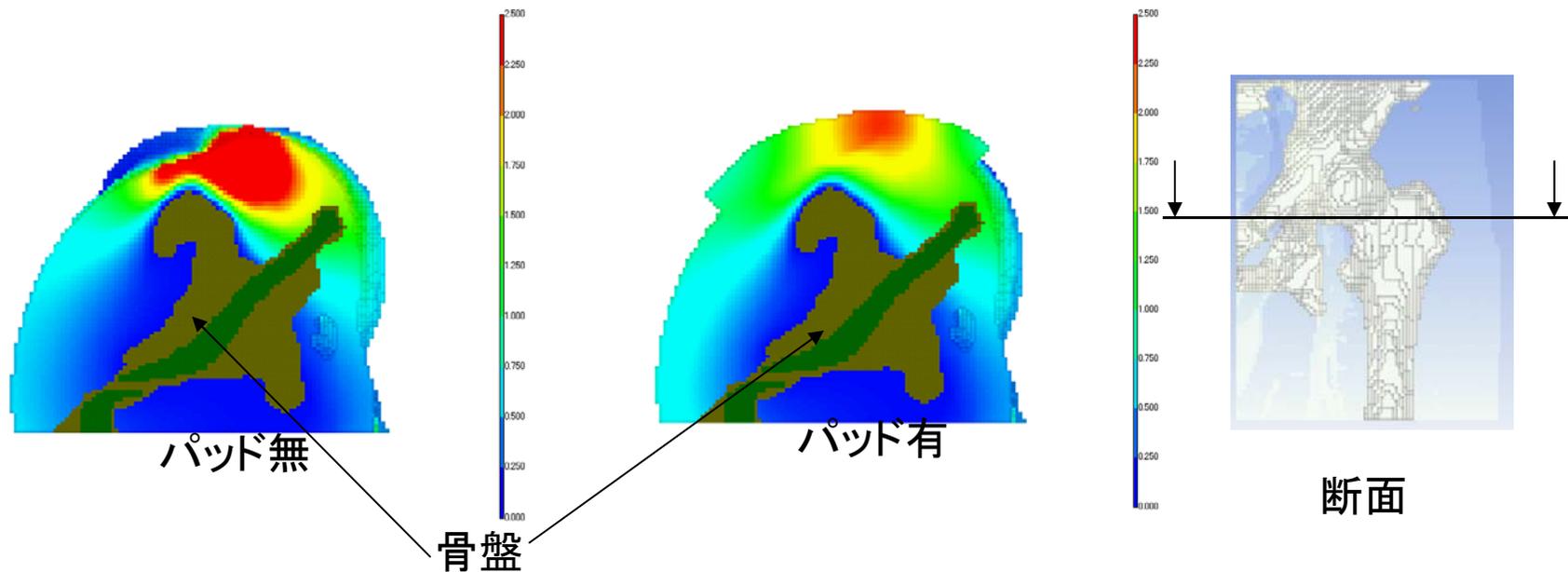
- 理研で構築した物性値データベースからヤング率を使用（理研から公表、アクセス可能）
- ポアソン比は軟組織（膀胱、大腸、脂肪、筋肉、皮膚）の場合0.45を、皮質骨、骨髄-海面骨、軟骨の場合は0.46を使用
- 骨折防止パッドの物性値は、ヤング率10MPa、ポアソン比0.49とした（固めのゴムパッドを想定）

	ヤング率 (MPa)	ポアソン比
膀胱	0.02	0.45
大腸	6.14	0.45
皮質骨	17000.00	0.46
骨髄-海綿骨	17000.00	0.46
軟骨	23.145	0.46
脂肪	0.20	0.45
筋肉	0.10	0.45
皮膚	0.85	0.45

解析結果

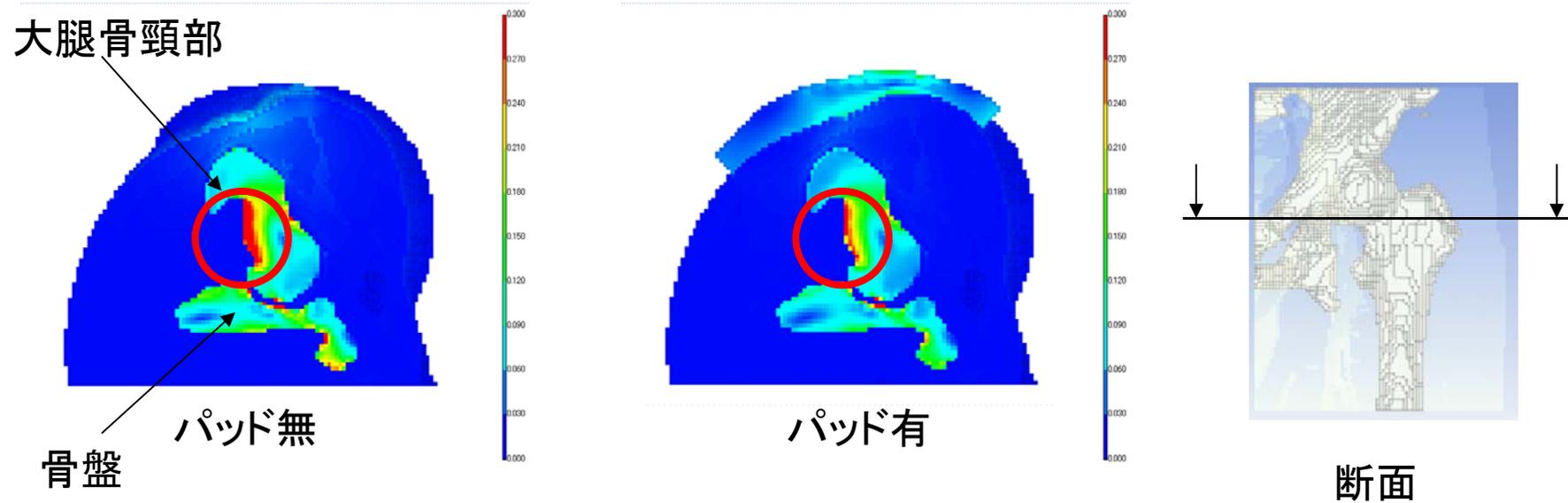


解析結果(変位)



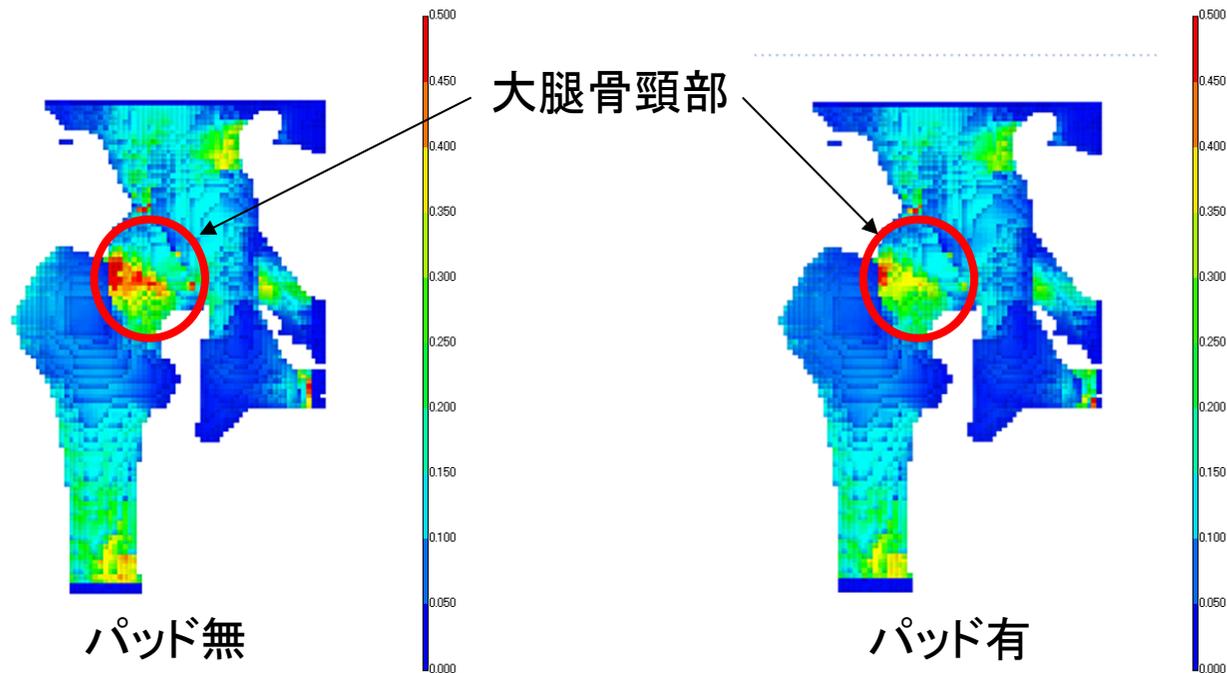
- パッド無では大転子付近に大きな変形が起こっている

解析結果(応力分布)



- 骨折部位にあたる大腿骨頭頸部に生じる応力がパッド無よりパッド有の方が低い

解析結果(大腿骨、骨盤の応力分布)



- 骨折部位にあたる大腿骨頭頸部に生じる応力がパッド無よりパッド有の方が低下している

保護パッド部分まとめ

- 保護パッドの効果のシミュレーションを行った
- 腰の両側側面に保護パッドを装着すると、応力集中が緩和、効果がある事が分かった

問題点

- 1) 解析結果の検証は未実施
- 2) 解像度が粗いため、この後の解析には理研で開発した高精細モデルを使用
- 3) 静解析のため、正確な予測には動的な計算が必要。(可能な解析コードがない)
- 4) 骨や必要な組織の動的な物性値データベースがない