

粒子法によるVR触診訓練システムのためのしこりが内在する直方体生体モデルの弾性解析

Elastic Analysis of a Cuboid Bio-Tissue Model with a Lump by Particle Method for VR Palpation Training System

○杉山智美, 利光和彦, 窪 蒼史, 日高雄也, 福田裕一 (福岡工大)

1. 研究背景

- 触診とは、医師が初期診療などにおいて患者の症状を大まかに把握するための有用な診断技術
- 医師の触診に関する暗黙知（経験や感覚）が大きく診断に影響する
- 歯学教育では、患者リスクの回避・時間の制約により、触診研修を行う機会はほとんどない



触診の様子

仮想現実を用いて、触診が必要な患者の症例をコンピュータ上で再現し、人工生体モデルを触診して、**非接触で診断技術を学ぶことができるVR触診訓練システム**が望まれている

2. 研究目的

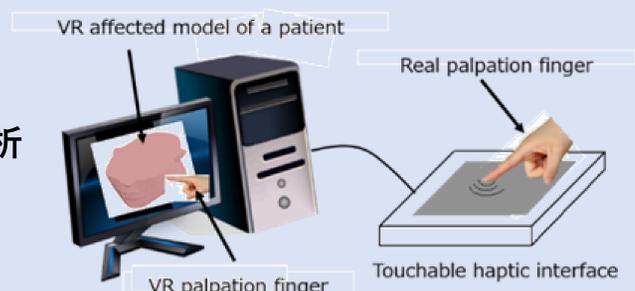
最終目標：VR触診訓練システムの開発

仮想現実（VR）を用いて、任意の触診患部をコンピュータ上で再現し、人工生体モデルを触診して診断技術を学ぶことができるシステムの開発

本研究の目的：VRモデル変形を計算できる粒子法解析プログラムの開発と触診への適用性の検討

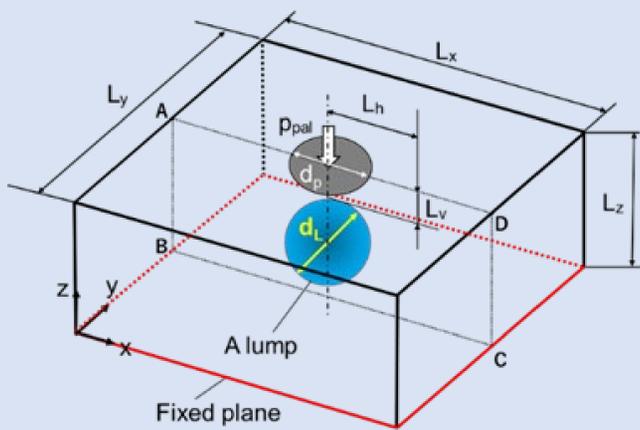
- 微小変形での変形精度の検討
- 微小変形でのvon Mises応力の検討
- 大変形での変形精度の検討

VR触診訓練システム



3. 解析

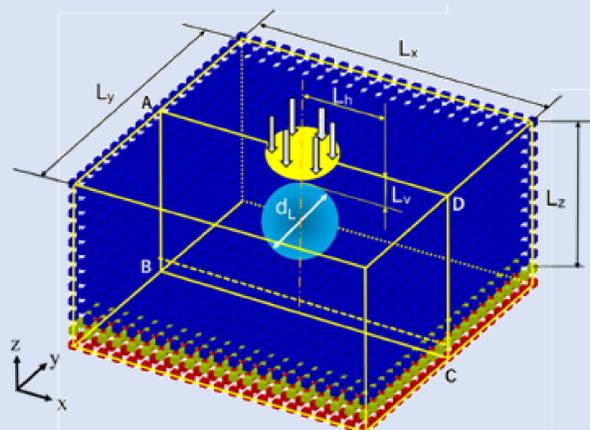
解析モデル



$L_x \times L_y \times L_z$	60 mm × 60 mm × 20 mm	
L_p	3 mm	
d_L, d_p	$d_L = 10 \text{ mm}, d_p = 14 \text{ mm}$	
density	$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$	
Poisson's ratio (ν)	0.45	
Elastic modulus	Normal (E_N)	$1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$
	Lump (E_L)	$2.6 \times 10^5 \text{ Pa}$

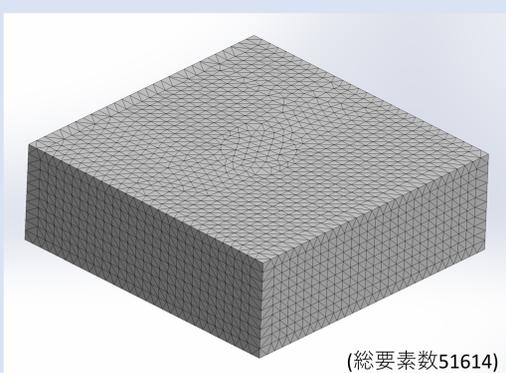
- 球形しこり：表面から下3mmの位置、直径10mm（非一様剛性モデル）
- 触診圧：微小変形 $p_{\text{pal}} = 20 \text{ Pa}$
微小変形～大変形 $p_{\text{pal}} = 3.2 \sim 45 \text{ kPa}$ (0.5N～7N)

粒子法モデル



(粒子間距離2mm. 総粒子数12493)

有限要素法モデル



(総要素数51614)

【計算法について】

- 粒子法(MPS)・・・粒子（点群）でモデル化し、計算する解析手法。計算法としては比較的新しく、医療に適用するため現在研究が進められている。大変形、切断などにも適用可能
- 有限要素法(FEM)・・・メッシュでモデル化し、計算する方法。弾性解析法として広く使用され、汎用解析コードが多数あり。メッシュの粗密調整により複雑な形状を精度良く計算可能

● 計算条件

	Particle method	FEM
Number of particles (Number of elements)	12493	51614
Number of nodes	N/A	74315
Marching time (Δt)	$5.0 \times 10^{-5} \text{ sec}$	—
Convergence Time (Number of iterations)	0.11sec (2200 steps)	—
Convergence conditions	$1.0 \times 10^{-2} \sim 1.0 \times 10^{-4}$	—
CPU time	$3.6 \times 10^4 \text{ sec}$ (10 hours)	—

4. 結果

1. 微小変形での変形について【粒子法とFEMとの比較】

	Particle method	FEM	Difference
No lump	1.97mm	1.64mm	+0.33mm
With lump	1.72mm	1.30mm	+0.42mm

- 最大変形は、粒子法のほうがFEMより0.3~0.4mm大きい。
- 変形精度については問題ない

2. 微小変形でのVon Mises応力について【粒子法とFEMとの比較】

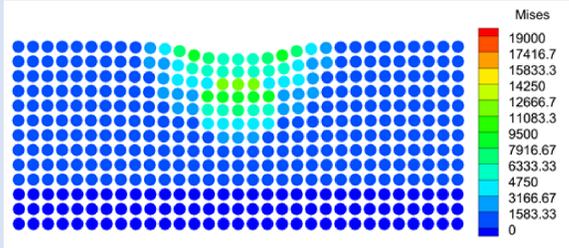


Fig. 5 Distribution of von Mises stress on the cross section ABCD of Figure 3 with a lump at $p_{pal} = 20kPa$, $L_v = 3mm$ and $L_h = 0 mm$ by the particle method.

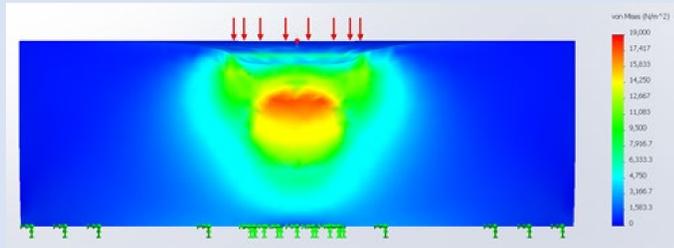


Fig. 6 Distribution of von Mises stress on the cross section ABCD of Figure 3 with a lump at $p_{pal} = 20kPa$, $L_v = 3mm$ and $L_h = 0 mm$ by FEM.

3. 微小変形~大変形での変形精度の検討

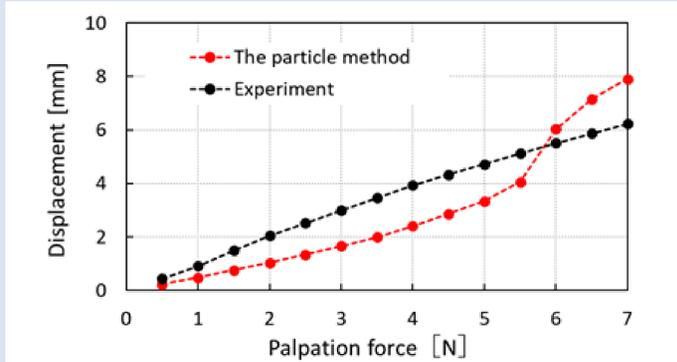


Fig. 7 Comparison of the displacement at the center of palpation between the particle method and FEM.

- von Mises応力は、触診表面ではほぼ一致している。内部応力分布も定性的に同じ傾向

【粒子法と実験値との比較】

- 押込力が約5.9N未満では、実験値より計算値が小さく、約5.9N以上では逆に実験値より計算値が大きい
- 測定した範囲で、最大約2 mmの差あり

5. まとめと今後の課題

本粒子法解析の適用性の検討

- 微小変形では、汎用ソフトウェアSolidWorks Research Premium 2021（有限要素法）による解析と比較し検討
- 微小変形から大変形について、本粒子法計算値と実験値を比較検討

1. 微小変形範囲での有限要素法との比較

- 触診圧力20kPaでの触診中心変形は、しこりあり・なしでほぼ一致する
- 触診表面でのvon Mises応力はほぼ一致する
⇒ 変形量については、粒子法とFEMの違い（0.3~0.4mm）では、触診ではほとんど違いを感じることができないため、**本粒子法は十分な精度で計算可能で有用である**
- 最大のvon Mises応力はしこり内部の上側で発生し、粒子法が約12kPa、FEMが18kPaで約6kPa小さい
⇒ 内部応力の計算については、**粒子法の計算精度の向上が必要**

2. 微小変形から大変形範囲での実験との比較

- 本粒子法は、微小変形から大変形（幾何学的非線形）の広範囲で、特に計算が止まることなく**ロバーストに計算が可能**である
- 力0.5N~7Nで押す場合、**約5.9N以下**では、実験値より計算値が小さく、**約5.9N以上**では逆に実験値より計算値が大きく、この範囲では、最大約2 mmの差が生じる
⇒ **今後の改善課題とし、以下に考えられる原因を2つ示す**

3. さらに実験値に近い変形量を予測するには

(1) 粒子間距離について

粒子法のモデル化精度の検討：粒子間距離を変化させて結果への影響を把握する。志野らの先行研究を参考に、本計算では粒子間距離2 mmでモデル化している。しかし、本計算とは、モデルや荷重条件が異なるため、**今後、最適な粒子間距離を調べる必要がある**

(2) 材料弾性係数非線形性の考慮

実験により求めた縦弾性係数の応力-ひずみ (σ - ϵ) 関係を図8に示す。本粒子法では、縦弾性係数Eはフックの法則したがう弾性体として黒破線の線形近似 ($\sigma = E\epsilon = 1.0 \times 10^5 \epsilon$) とした。支配方程式もその理論に基づいて定式化している。しかし、正常組織の σ - ϵ の関係は、赤破線の2次曲線 ($\sigma = 3.7 \times 10^5 \epsilon^2 + 4.6 \times 10^4 \epsilon$) で非線形近似する方がより実験値を再現できる

⇒ 実験より求めた弾性係数の非線形性を計算で考慮すれば、計算値は実験値により近い値を予測することができる

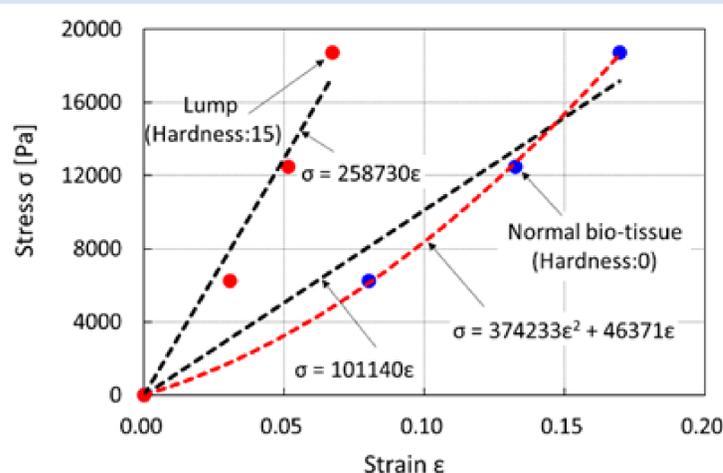


Fig. 8 Stress-strain diagram to determine the elastic moduli of the artificial bio-tissue model.