

下顎全部床義歯における義歯床下粘膜挙動の有限要素法解析に関する研究

A study on Finite Element Analysis of the behavior in basal seat mucosa under mandibular complete denture

○正 荒井 皓一郎^{*1}, 谷内 佑起 ^{*2}

青木 健児^{*2}, 岡本 和彦^{*3}, 正 渡邊 浩志^{*4}

Koichiro ARAI^{*1}, Yuki TANIUCHI ^{*2},

Kenji AOKI ^{*2}, Kazuhiko OKAMOTO^{*3} and Hiroshi WATANABE^{*1}

^{*1} HEXAGON

^{*2} 明海大学大学院歯学研究科 Regenerative and Reconstructive Medicine (Prosthetics), Meikai University Graduate school of Dentistry

^{*3} 明海大学歯学部機能保存回復学講座有床義歯補綴学分野 Division of Removable Prosthodontics, Department of Restorative and Biomaterials Sciences, Meikai University School of Dentistry

^{*4} 株式会社テクスパイア Techspire Co., Ltd

It is important to understand the mechanical behavior of the surrounding tissues when prosthetic devices such as dentures are placed in order to predict the onset of pain and the prognosis of the disease. 3D dental scanners and CAD are being considered, but creating an anatomical model is still difficult due to the uniqueness and complexity of each patient's oral morphology. Therefore, there are limited examples of numerical analyses that agree with clinical findings. In previous studies, the authors have proposed a modeling procedure to create finite element models using 3D dental scan images. In this study, we apply the proposed procedure to evaluate the behavior in basal seat mucosa under mandibular complete denture.

Key Words : Denture, Biomechanics, Nonlinear Finite Element Analysis, Finite Element Modeling, 3D Scan Image

1. 緒 言

高齢化が進む現代において、健康寿命の延伸は社会機能維持の観点から重要な課題である。健康寿命の延伸には運動習慣の獲得や食生活の改善などが有効であることが知られている。特に食事は生命を維持する上で欠かせない要素であり、自身の歯の維持、あるいは義歯を活用することによって食事を行う機能を維持することが重要である。食事を行うという点以外にも、自身の歯が多く残っている、あるいは義歯等を使用している高齢者は認知症や転倒するリスクが低いことも知られている^[1]。このように、自身の歯を喪失したとしても、義歯を活用することで健康寿命の延伸が期待できる。

義歯を活用するにあたって、使用時に違和感のない義歯を設計・製作することが求められる。義歯は患者の状態に合わせて歯科技工士によって手作業で製作される。口腔内形状は患者によって異なるため、印象材を口の中に入れて型を採り、その形状を基に義歯の製作が行われる。また、義歯の使用に伴って痛みが発現する場合があります。このような場合は患者の状態に合わせて義歯の調整がおこなわれる。このように義歯は手作業で製作・調整が行われるため、一般の工業製品のような三次元 CAD データや図面情報は存在せず、製作した義歯の再現や初期状態からの経年変化などの観測は困難である。また、義歯の設計・製作・調整手法は経験則に依存するものが多く、力学的根拠が不明瞭なものも多く存在する。

一方で近年のデジタル技術の発展に伴い、義歯の設計・製作に対して三次元スキャナーや CAD/CAM, 3D プリンターなどの活用が検討され始めている^[2,3]。例えば、患者の口腔内形状を三次元計測し、その情報を基に義歯の製作が可能となれば、印象材を口に入れて型を取る必要がなくなる。また、口腔内や義歯の形状の 3D スキャンデータを保存しておくことで、予後観察に活用することも可能と考えられる。さらに、このような三次元計測デ

ータを基に使用状況を想定した構造解析を行うことで、予め痛みの発現箇所の予測や、最適設計を行うことも可能と考えられる。将来的にはこれらの技術を活用した義歯のデジタル設計や 3D プリンターによる製造が期待される。

義歯のデジタル設計を行うにあたって、経験則に基づく義歯の設計指針の力学的根拠を明らかにし、一般化を図る必要がある。三次元スキャナーの普及に伴い、義歯の三次元データの取得は比較的容易となってきたが、義歯及び口腔内形状の個人差や生態特有の形状の複雑性から解析モデルの構築には課題があり、臨床的知見と整合する解析例は限られる。

著者らは前報^[4]で実習用顎模型を基に作成した上顎全部床義歯と顎模型の三次元スキャンデータから義歯、義歯床下粘膜及び歯槽骨の有限要素法解析モデルを作成する方法を検討し、非線形有限要素法による人工歯部への荷重負荷時に義歯床粘膜部に生じる力学挙動の評価を行った。その結果として臨床でみられる義歯装着時の疼痛発現部位と整合することを確認した。本報では、前報で構築した有限要素法解析モデルの構築手法を用いて下顎モデルの構築を行い、人工歯部への荷重負荷時に義歯床粘膜部に生じる力学挙動の評価および臨床で見られる義歯装着時の疼痛発現部位との整合性を確認する。

2. 3D スキャン画像に基づく有限要素法解析モデルの生成方法

本章では前報^[4]で検討した義歯及び顎模型の 3D スキャンデータから有限要素法解析モデルを構築する方法について概要を示す。

義歯は人工歯と義歯床で異なる材料が使用されるため、これらの境界を保持した形状データの取得を行い、個々のモデルとして適切にメッシュ作成を行う必要がある。一般的な義歯の製作は義歯床に対して人工歯を 1 本 1 本排列して行われる。しかしながら、この方法では人工歯を 1 本ずつ 3D スキャンし、位置合わせを行う必要が生じる。本研究ではこの工程を簡略化するため、図 1 に示すように予め人工歯を排列して常温重合レジンで固定し、一塊としてから義歯の製作を行う方法を採用した。義歯の外観を図 2 に示す。義歯の製作にあたって基礎とする口腔内形状には、教育等で一般的に使用される実習用顎模型を使用した。

義歯および一塊とした人工歯、顎模型の 3D スキャンデータを図 3 に示す。3D スキャンデータ (STL データ) は表面の三角形パッチ情報で構成される。計測データの表面情報は有限要素法解析モデルの構築に使用するにはデータ点数が過大であり、計測時のノイズがメッシングの妨げとなる。



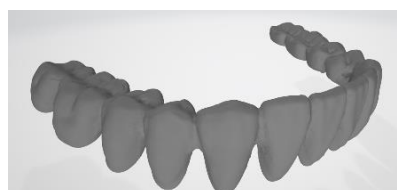
Fig.1 mandibular artificial teeth fixed with room temperature curing resin



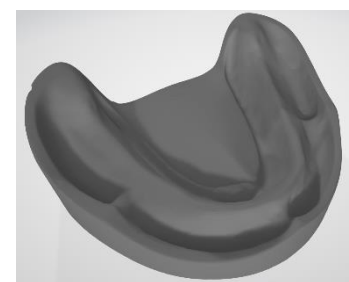
Fig.2 Overview of wax mandibular denture



(a)



(b)



(c)

Fig.3 3D scan image of (a)denture, (b) mandibular artificial teeth and (c) mandibular model

有限要素法解析モデルの構築にあたって、前処理としてパッチ数の削減および不整合の修正を行い、スムージング処理を施した表面パッチデータから四面体メッシュ生成を行った。また、顎模型の部分は義歯床下粘膜と歯槽骨に相当する。本研究では平均的な義歯床下粘膜厚さとして2mmを想定し、顎模型の3D スキャンデータから義歯床下粘膜モデルと歯槽骨モデルをそれぞれ作成した。作成された有限要素法解析モデルを図4に示す。前報^[4]では義歯床下粘膜は歯槽骨上部のみモデル化を行ったが、本研究で使用する下顎モデルでは歯槽骨の周囲の粘膜までモデル化を行った。

3. 下顎を対象とした有限要素法解析

3・1 解析条件

図4に示した有限要素法解析モデルを対象に、噛み合わせ時の荷重を模した外力を人工歯に与える解析を実施し、義歯床下粘膜の応力状態を確認した。解析には汎用非線形有限要素法解析ソフトウェア Marc 2023.4 を用いた^[5]。幾何学的非線形性を考慮し、材料は等方性線形弾性体とした。各部位の材料特性を表1に示す。人工歯、義歯床(アクリルレジン)、歯槽骨の材料物性は Atais らの文献^[6]を参考に、義歯床下粘膜の物性は Yi らの文献^[7]を参考に設定した。各部位の境界部では接触を考慮した解析を行った。人工歯 - 義歯床間、義歯床下粘膜 - 歯槽骨間は接着接触条件とし、接触部の相対位置を固定する条件とした。前報^[4]の計算結果より、義歯床 - 義歯床下粘膜については接着接触条件とすると実現象よりも過剰な拘束となることが確認されていることから、摩擦係数を0.3とした摩擦接触条件として解析を実施した。図5に境界条件を示す。下顎骨基底部に位置する節点に全自由度に対する変位拘束を与え、下顎第一小臼歯から下顎第二大臼歯の人工歯に対して垂直方向から50～230 Nの荷重を負荷し、義歯床下粘膜の応力状態を確認した。

3・2 解析結果

解析結果として得られた義歯床下粘膜におけるミーゼス相当応力分布を図6に、主応力3成分のうち絶対値の大きい成分の分布を図7に示す。図6より、下顎義歯の支持領域とされる頬棚周辺部でミーゼス相当応力が最大値を示すことがわかる。また、図7より頬棚周辺部で主応力の最小値つまり圧縮応力を示すことがわかる。これらは Ogawa ら^[8]の頬棚部で高い平均圧痛閾値がみられる報告と概ね一致していた。

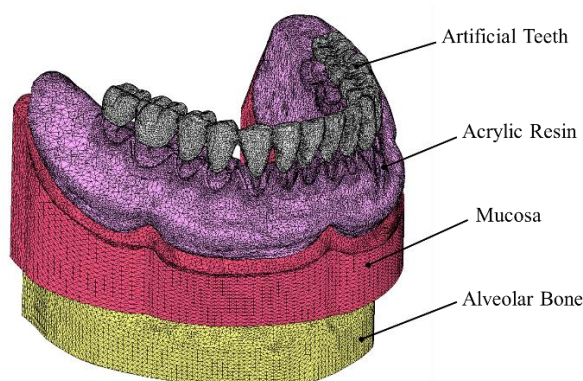


Fig.4 Finite element model

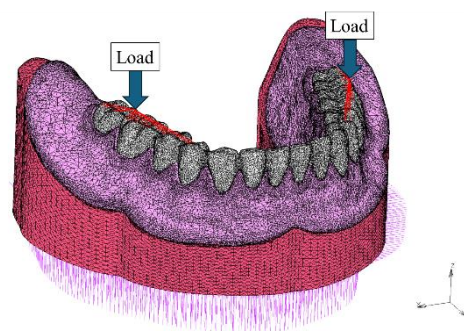


Fig.5 Boundary Condition

Table1 Material Property

	Young's modulus [MPa]	Poisson's ratio
Artificial teeth	2,940	0.3
Acrylic resin	1,960	0.3
Mucosa	2.8	0.4
Alveolar bone	13,700	0.3

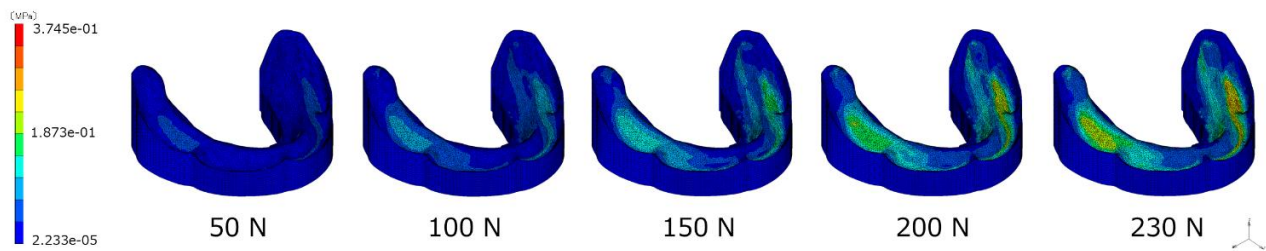


Fig.6 Distribution of Von Mises Stress on Mucosa

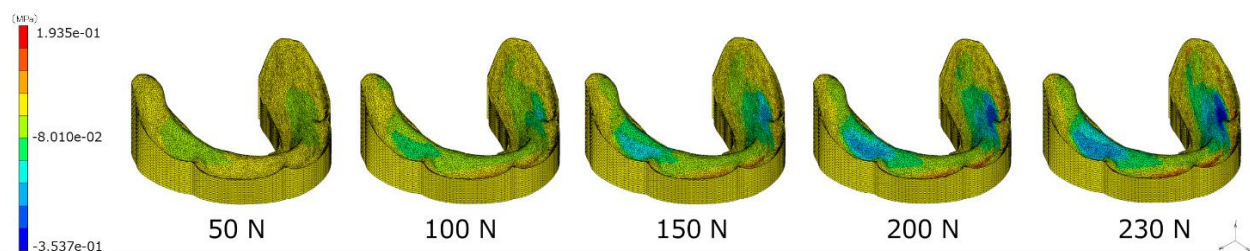


Fig.7 Distribution of Major Principal Value of Stress on Mucosa

4. 結言

本論文では前報[4]で構築したモデル化手法を用いて下顎全部床義歯、義歯床下粘膜および歯槽骨の有限要素法解析モデルを構築し、非線形構造解析を実施した。得られた義歯床下粘膜の応力分布は臨床的な報告例と整合する結果であった。本論文で使用した義歯床下粘膜モデルは厚みを均一としているが、実際の生体の粘膜厚とはやや異なる。今後は粘膜厚を生体に近似させた解剖学的モデルを構築し、さらなる検証を行う予定である。

文 献

- (1) 日本歯科医師会, テーマパーク 8020, 現在歯数と健康寿命, <https://www.jda.or.jp/park/relation/teethlife.html>, 2024/8/23 参照
- (2) 金澤学, “有床義歯補綴のデジタルトランスフォーメーション”, 口腔病学会雑誌, Vol.89, No.1 (2022), pp. 13-17.
- (3) 金澤学, “デジタルデンチャーの現状と今後の展望”, 神奈川歯学, Vol.57, No.1 (2022), pp.77-81.
- (4) 荒井 皓一郎, 谷内 佑起, 青木 健児, 岡本 和彦, 渡邊 浩志, 義歯床下粘膜挙動の有限要素法解析のためのモデル化に関する検討, 日本機械学会 M&M2023 材料力学カンファレンス, No23-15.
- (5) MSC Software, Marc® 2023.4 Volume A: theory and user information, MSC Software corporation, (2023)
- (6) Ataís Bacchi, Rafael L. X. Consani, Marcelo F. Mesquita, Mateus B. F. dos Santos, “Influence of different mucosal resiliency and denture reline on stress distribution in peri-implant bone tissue during osseointegration. A three-dimensional finite element analysis”, Gerodontology, Vol. 29, No.2(2012), pp. e833–e837.
- (7) Yi, Y. Cheng, Wai, L. Cheung, Tak, W. Chow, “Strain Analysis of Maxillary Complete Denture with Three-Dimensional Finite Element Method”, *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Vol.103, Issue 5 (2010), pp.309-318.
- (8) T. Ogawa, M Tanaka, T Ogimoto, N Okushi, K Koyano, K Takeuchi, Mapping, profiling and clustering of pressure pain threshold (PPT) in edentulous oral mucosa, *Journal of Dentistry*, Volume 32, Issue 3 (2004), Pages 219-228.