

学位論文内容の要旨

愛知学院大学

論文提出者

林 建 佑

論文題目

三次元有限要素法による口腔内の力学解析への
口蓋粘膜の粘弾性特性の導入

I. 緒言

全部床義歯は、全ての天然歯を喪失したことに因り、粘膜を介した顎骨のみで、その維持安定を図り、かつ咬合力を支えざるを得ない、究極の補綴装置である。そのため、全部床義歯の製作にあたっては、義歯と接触している口腔粘膜の性状および力学的動態を的確に把握することは、極めて重要な事項である。しかし、此れまでの当課題に関する諸検討は、弾性解析、すなわち線形解析を主としたものであるため、その臨床的有用性は、極めて小荷重の範囲に限定されてきた。歯根膜に包まれた天然歯の変位量や顎堤粘膜の沈下量などは、荷重量の増大に伴い、線形－非線形の変位量の差が順次拡大して、解析値が非現実的なものと成るからである。

これらの複雑な力学的事象の解明を目的として、これまで当講座においては、有限要素法解析による様々な研究を行ってきたが、この粘膜の粘弾性特性を十分に加味するには至らなかった。また、粘膜における各部位の厚さによっても挙動が複雑に変動するため、粘弾性を有する粘膜を対象とした三次元有限要素解析は極めて困難なものとしてきた。

本研究は、これまでの研究実績を基盤として、多様な口蓋粘膜の厚さに応じて、それぞれの物性を三次元有限要素法に導入することで、全部床義歯の動態を、より忠実に再現する手法を確立したものである。

II. 解析モデル

1. モデル対象

全部欠損歯列にはニッシン社製の上顎無歯顎模型を使用し、その顎模型上に、ジーシー社製のパラフィンワックスおよび松風社製の硬質レジン歯を用いて、模擬的な全部床義歯を作製した。

2. モデル形状データの構築

顎模型および全部床義歯の外形を3Dレーザースキャナーにてデータ化を行い、データ形状の不要な箇所の修正を行い、可及的にデータ容量を軽量化した形状データを出力した。

3. 三次元有限要素モデルの構築

1) 上顎モデルの構築

作成した形状データを、CAE環境統合プリ・ポストソフトウェアにインポートし、三次元有限要素モデルの構築を行った。構築したモデルの上顎粘膜部の厚さについては、文献値を参考に、口蓋中央部 1.5mm、顎堤部 2.0 mm、口蓋側方部 2.5 mm として構築した。粘膜下の皮質骨、海綿骨については、便宜的に解析結果の影響を受けない厚さに設定した。

2) 全部床義歯モデルの構築

全部床義歯モデルに関しても、上顎モデルと同様に構築を行った。両モデルの位置関係については、模型上に作製した義歯の位置情報を基に正確に位置合わせを行った。

Ⅲ. 予備解析

1. 粘弾性特性の導入

1) 生体実測値

粘膜の粘弾性挙動に関しては、既に報告されている生体実測値を参考とし、解析に反映させる目標値とした。参考にした生体実測値は、経時的な測定値であるため、その目標値を測定条件に合わせて、それぞれ荷重時瞬間弾性変位量、荷重時遅延弾性変位量、除荷重時瞬間弾性変位量、除荷重時遅延弾性変位量とした。

2) 粘弾性を有する材料定数の決定方法

先ず、粘弾性特性の影響を受けない荷重時瞬間弾性変位量について、ヤング率を算出し、その後の変位量について、クリープ係数（変位係数、応力依存係数、時間依存係数）を算出し、生体実測値を参考に、それぞれの材料定数を決定する方法とした。

3) 予備解析

前述した上顎モデルを予備解析モデルとして、汎用非線形構造解析ソルバーを用いて解析を行い、生体実測値に近似する変位量を示す材料定数の検討を行った。

(1) 荷重条件

荷重部位は、口蓋中央部、顎堤部、口蓋側方部とした。経時的な荷重量の変化については、先ず荷重量を 0.8 N まで増加させ、次にその荷重量を

維持し、その後除荷重した設定とした。

(2) 荷重時瞬間弾性変位量の再現 (ヤング率の決定)

口蓋粘膜の厚さ 1.5、2.0、2.5 mm の部位における、生体実測値と近似した予備解析値が得られたヤング率を、それぞれの厚さにおける口蓋粘膜のヤング率として設定した。

(3) クリープ係数の決定

生体実測値と近似した予備解析値が得られたクリープ係数を、それぞれ荷重時遅延弾性変位量、除荷重時瞬間弾性変位量、除荷重時遅延変位量として、各部位の厚さに相当した口蓋粘膜のクリープ係数として設定した。

(4) 繰返し荷重条件下での材料定数の妥当性の検証

決定した口蓋粘膜の材料定数 (ヤング率、クリープ係数) が、繰返し荷重条件下における粘弾性として報告されている、同様な粘弾性挙動を示すことができるかどうか検証を行った。

① 解析項目

まず、30 サイクルの解析項目としては、繰返し荷重を 30 回し、その後に除荷重する設定とした。次に、60 サイクルの解析項目としては、繰返し荷重を 60 回し、その後に除荷重する設定とした。最後に、連続荷重の解析項目としては、荷重を付与させ、その荷重を維持し、除荷重する設定とした。

② 解析結果

連続荷重における荷重時遅延弾性変位量は、30 サイクルの荷重時遅延弾

性変位量と比較して、約2倍に増加した。

今回、予備解析で設定した材料定数（ヤング率、クリープ係数）は、口蓋粘膜における粘弾性挙動を再現することができる妥当なものであることが確認出来た。

IV. 本解析

1. 解析項目

以下の条件での解析結果を比較・検討した。

1) 口蓋粘膜を単一の材料定数にて定義したもの（単一材料定義）

予備解析で決定した口蓋粘膜の厚さ 2.0 mm の材料定数を、粘膜全ての部位に適用したものである。

2) 口蓋粘膜を複数の材料定数にて定義したもの（複数材料定義）

予備解析で決定した 3 種の材料定数を、各部の口蓋粘膜の厚さに応じて設定したものである。

2. 解析条件

解析モデルの粘膜部を除いた構成要素と、それぞれに各種文献値を参考に設定した材料定数を設定した。荷重部位は義歯人工歯咬合面部とし、経時的な荷重量の変化については荷重量を最大 200 N まで増加させ、その後荷重量を維持した後に、除荷重する設定とした。拘束部位は海綿骨底部とし、同部を X、Y、Z 方向を完全拘束した。

V. 解析結果

1. 応力分布 (von Mises 相当応力)

単一材料定義および複数材料定義に基づくいずれの解析においても、全ての部位において応力値の相違が観察された。すなわち、両者ともに前方顎堤頂部に高い応力集中が観察された。荷重直後に急速な内部応力の蓄積を示し、その後、緩やかな内部応力の増大を示す状態が観察された。また、除荷重時にも同様に、除荷重直後に急速な内部応力の解放を示し、その後、緩やかな内部応力の減少が示された。

2. 義歯床下粘膜変位量

上顎義歯床下粘膜の正中部付近において、単一材料定義では複数材料定義のものより変位量が大きい結果となった。両者の変位量の差は最大で 200 μm ほどであった。

VI. 考察

1. 三次元有限要素解析について

有限要素法において合理的な解析を行うためには、まず対象物である各構成要素の形状、次に各構成要素に対する物理的諸特性である材料定義、最後に生体に近似した荷重条件・拘束条件などの境界条件の、3つの要件が全て適切に設定されなければならない。そのため、過去の生体計測などの

研究結果を包括的に反映させた有限要素法は、複雑な形状の口腔内のシミュレーションに関して、極めて有用な方法であると考ええる。

2. 解析モデルについて

表面形状に関して高精度である光学印象画像に基づくモデル構築方法を採択したため、可及的に粘膜の表面形状の再現性が高いモデルである。また、口腔内の曲面部の要素を可及的に細分割したことで、解析精度の高いモデル構築ができたものと考ええる。

3. 予備解析について

予備解析における粘弾性特性の導入に関しては、臨床的には重要な価値判断条件となるが、従来では不可能とされて来たが、生体機能に直結する義歯への繰返し荷重時の動態の解析に、道を開く技法であると考ええる。

4. 本解析について

本研究においては、一構成要素に対して単一の材料定数を条件設定したものと、一構成要素に対して三種の材料定数を条件設定したもので、その条件設定の違いが、粘膜の力学的解析に如何なる影響をもたらすかを、比較・検討したものである。

また境界条件に関しては、義歯に加わる強い噛み締め状態と、その状態から解放する経時的な変化を想定し決定した。

5. 解析結果について

単一材料定義と複数材料定義の変位量の差が、 $200\mu\text{m}$ ほどであった結果

から見ると、顎堤粘膜の被圧変位量ほどの差は、生体において、また有限要素解析においても大きい影響である。以上のことから、材料定数の相違は、特に変位量においては解析結果に大きく影響するため、義歯床下粘膜の厚さや部位に基づいて適切な材料定数の設定が必要であると考えられる。

VII. 結論

本研究は、三次元有限要素法を用いて粘膜の挙動に対してクリープ係数を導入し、その粘弾性特性をクリープ挙動に近似させて再現したものである。さらに、上顎全部床義歯症例における義歯床下粘膜の応力解析を行う上で、口蓋粘膜要素に対して、多様な厚さに応じた材料定義を行い、以下の結論を得た。

1. 三次元有限要素法解析にクリープ係数を導入したことにより、口蓋粘膜の実際の粘弾性特性により近似したシミュレーションが可能となった。
2. 口蓋粘膜の部位による組織学的構造や厚さの違いに応じて、それぞれの状況に対応する複数の材料定数を複数設定にすることにより、より生体に近似したシミュレーションの可能性が示唆された。