原 著 論 文

軟質裏装材が床下組織の応力分布に及ぼす影響

—接触要素を導入した有限要素解析—

巫 春和

Influence of a Soft Lining Material on the Stress
Distributions in Denture-supporting Tissues
—The Finite Element Analysis Using the Contact Elements—

Chun-Ho Wu

Abstract : The stress and strain distributions in denture-supporting tissues when using a soft lining material were evaluated by the finite element method. The finite element model consisted of a mandibular occlusion rim, mucosa, cortical bone, and cancellous bone. Gap and truss elements were employed as the contact elements in order to simulate the dynamic behavior between the occlusion rim and mucosa.

The results were as follows :

1. By applying the contact elements to construct the contact relation between the occlusion rim and mucosa, the components of upward stress and strain in mucosa were eliminated. The displacement of the occlusion rim was minimized, although it was expected to be excessively increased by using the contact elements.

2. The stress components in denture-supporting tissues under the occlusion rim with soft lining material were reduced and distributed more evenly than those without lining.

3. The strain components in denture-supporting tissues under the occlusion rim with soft lining material were also reduced and distributed more evenly than those without lining.

The results demonstrated that gap and truss elements are valid contact elements for the finite element analysis. Furthermore, they indicated that complete dentures lined with a soft lining material can relieve and distribute the stress and the strain in denture-supporting tissues.

Key words : soft lining material, stress, strain, finite element analysis, gap element

I. 緒 言

義歯装着者では、義歯の装着が長期化すると顎堤が吸収するとされている^{1~3)}。顎堤吸収が著しい症例では機能時に義歯が容易に側方に移動し、また、顎堤に痛みが生じやすい。顎堤の吸収と同時に顎堤粘膜も菲薄化し、粘弾性が

失われるといわれており^{4,5)}、咬合力を負担するにはさらに不利な条件となる。

軟質裏装材は、このように顎堤の吸収が著しく、粘膜が菲薄な症例において、義歯使用時の疼痛緩和を図る有用な材料として用いられている^{6,7)}。軟質裏装材の疼痛緩和のメカニズムは粘膜の失われた厚さを補い、そのクッション作用で咬合時の衝撃を吸収緩和し、かつ床下組織に伝えられる応力を分散することにあると報告されている^{8~11)}。しかし、軟質裏装材による応力の分散効果を調べた模型実験では、センサの形状が粘膜の曲面に適合していないことなどにより、力学的等価性に問題があり¹²⁾、まだ不明な点も

東京医科歯科大学歯学部高齢者歯科学講座 (指導: 早川 巖助教授)
Department of Geriatric Dentistry, Faculty of Dentistry, Tokyo
Medical and Dental University (Director: Assoc. Prof. Iwao
Hayakawa)

平成 11 年 8 月 16 日受付

残っている。また、模型実験では義歯床下組織全域の応力分布を連続的に測定することは非常に困難である。

有限要素法はこれらの問題を解決する有効な方法である¹³⁻¹⁵⁾。有限要素法ではまずモデルを製作し、そのモデル上で力学的状態をシミュレートし、応力分布、歪み、変位などを算出する。しかし、現在のところ、義歯と粘膜、骨を一体化したモデルを用いた解析がほとんどであり、口腔内での義歯の動態を十分に反映しているとはいえない。本来、口腔内では、義歯は粘膜上で唾液を介して接触しており、力を受けると粘膜上で変位する。義歯から粘膜に伝達される応力と歪みを生体環境に近似の条件で解析するためには、義歯の粘膜上での変位をシミュレートしなければならない。特に、軟質裏装材を使用した場合には、軟質裏装材自体の変形により義歯の変位も増大することが予想されるため、義歯床下組織に一層複雑な影響を及ぼすと思われる。そのため、モデルでは義歯床粘膜面と粘膜との接触状態をより生体に近似させる必要があると考えられる。そこで、モデルにおいて義歯床粘膜面と義歯床下粘膜との接触関係を適切に設定する必要が生じるが、接触関係を考慮した報告は数少ない¹⁶⁻¹⁸⁾。

本研究の目的は、義歯と義歯床下粘膜との間に接触要素を取り入れた有限要素モデルを考案し、モデルの妥当性を検討すること、およびそのモデルで行った有限要素解析から、軟質裏装材が義歯床下組織の応力分布と歪みに及ぼす影響を明らかにすることである。

II. 材料と方法

1. 解析モデル

本研究では、咬合床、粘膜、骨からなるモデルを製作した。さらに、咬合床粘膜面と顎堤粘膜との接触関係をシミュレートするために、両者の間に接触要素として Gap

図1 Surface plots and a finite element model for the Connected model
連結型モデルの解析モデルと有限要素モデル

要素と Truss 要素を導入した。これらの要素を取り入れたモデルで二次元有限要素解析を行い、義歯の変位と床下組織が受ける力学的な影響を明らかにし、モデルの妥当性を検討した。次いでこのモデルを用いて軟質裏装材の効果を解析した。以下に、使用したモデルについて説明する。

1) 連結型モデル

解析に用いた二次元有限要素モデルは、下顎無歯顎の右側第一大臼歯相当部の前頭断面であり、義歯床用アクリルレジン製の咬合床を装着した状態を想定しており、厚み 1.5 mm の粘膜および 2 mm の皮質骨、そして海綿骨からなっている。それぞれの界面において節点は共有されており、723 節点、576 要素から構成されている (図1)。これを連結型モデルとし、このモデルを基に以下のモデルを作成した。

2) 分離型モデル

咬合床の可動状態をシミュレートするため、咬合床粘膜面と粘膜表面の間に Gap 要素と Truss 要素を導入した。まず、連結型モデルにおいて咬合床を粘膜から上方に 0.1 mm 引き離し、咬合床と粘膜を分離した。次いでもともと共有されていた咬合床粘膜面と粘膜表面上の 2 節点を Gap 要素と Truss 要素により結合した (図2, 3)。

図2 Surface plots and a finite element model for the Separated model
分離型モデルの解析モデルと有限要素モデル

図3 Gap elements and Truss elements for constructing the occlusion rim-mucosa interface
咬合床粘膜面と粘膜表面の境界面を構成する Gap 要素と Truss 要素

図 4 Surface plots and a finite element model for the Control model and the Soft-lining model
コントロールモデルおよび軟質モデルの解析モデルと有限要素モデル

表 1 Mechanical properties used for the finite element analysis
有限要素解析に用いた材料定数

	ヤング率 (kgf/mm ²)	ポアソン比
義歯床	250	0.3
軟質裏装材	0.2	0.3
粘膜	0.1	0.3
皮質骨	2000	0.3
海綿骨	150	0.3
Truss 要素	1×10^{-7}	

3) コントロールモデルと軟質モデル

分離型モデルにおいて、咬合床粘膜面から咬合面方向に 1.5 mm の位置に境界線を設け、境界線より粘膜面側を義歯床用アクリルレジンとしたものをコントロールモデル、軟質裏装材としたものを軟質モデルとした (図 4)。つまり、コントロールモデルと軟質モデルは裏装部分の材料定数が異なるだけで、要素の数と形は全く一致している。

以上のモデルを用いて、咬合床の変位量と、咬合床粘膜面、粘膜、および骨の応力と歪みに関する線形静解析を行った。解析に用いた咬合床、粘膜、骨の材料定数は従来の報告¹⁹⁻²¹⁾を参考に設定した。軟質裏装材の材料定数については、市販軟質裏装材のモロプラスト-B とクレペート・ドゥーに関して報告されている値²²⁾の中間値を定数として採用した。また、Truss 要素の弾性係数は、モデルの変形に影響を与えないように、ほかの部分の弾性係数より約 6 桁小さく設定した (表 1)。拘束条件は、下顎骨下縁のみすべての方向の変位を拘束することとした。有限要素モデルの構築および解析には有限要素解析システム (COSMOS/M Version 2.0, Structure Research and Analysis Co. Ltd., USA) を用いた。

図 5 Loading point on the occlusal surface and elements in mucosa for evaluating stress and strain
咬合面上の荷重点および応力と歪みの評価に用いた粘膜の要素

図 6 Nodes on the occlusal surface for evaluating the displacement of the occlusion rim, and elements in the mucosal surface of the occlusion rim, mucosa, cortical bone for evaluating stress and strain
咬合床の変位の評価に用いた咬合面上の節点、および応力と歪みの評価に用いた咬合床粘膜面、粘膜表面、皮質骨表面の要素

2. 解析内容

1) 分離型モデルの妥当性の検討

Gap 要素と Truss 要素を導入した分離型モデルの妥当性を検討するために、連結型モデルと分離型モデルにおいて、図 5 に示すように咬合面上の頬舌側中央から頬側寄りの荷重点に 1 kgf/cm² の垂直荷重を加えて、床下粘膜の m1~m9 要素における水平および垂直方向の主応力と主歪みについて連結モデルと分離型モデル間で比較した。

2) 摩擦係数の影響について

Gap 要素を用いた場合、摩擦係数を設定する必要がある。そこで図 6 の分離型モデルにおいて、Gap 要素の摩擦係数を 0.5, 0.05, 0.005 とした場合の節点 ①, ②, および ③ の 1 kgf/cm^2 荷重時の変位量を算出し、妥当な摩擦係数について検索した。

3) 軟質裏装材の裏装効果について

図 6 に示すように、コントロールモデルと軟質モデルにおいて、咬合面の荷重点に、 1 kgf/cm^2 荷重を负荷した際の応力と歪みについて、それぞれ分布の様相を比較した。次いで咬合床粘膜面の要素 D1~D9, 粘膜表面の要素 M1~M9, および骨表面の要素 B1~B12 において水平および垂直方向の主応力, 主歪みを調べ、軟質裏装材の効果を比較した。なお、摩擦係数は 0.005 に設定した。

III. 結 果

1. 連結型モデルと分離型モデルにおける咬合床と粘膜の力学的挙動

1) 粘膜の応力分布について

図 7 に示すように粘膜表面の要素における水平, 垂直方向の主応力には、モデル間で相違点が観察された。水平方

図 7 Results of principal stress in horizontal and vertical directions for elements (m1~m9, from buccal to lingual) of mucosa in the Connected model and the Separated model

連結型モデルと分離型モデルにおける粘膜の各要素 (m1~m9, 頬側から舌側まで) の水平方向と垂直方向の主応力

向の応力については、分離型モデルにおいて大きさの減少がみられた。さらに連結型モデルでは、舌側部の要素 m9 に舌側方向の応力がみられたのに対し、分離型モデルでは中央部の要素 m5 に舌側方向の応力がみられた。また、頬側部の要素 m1, 舌側部の要素 m9 では応力が観察されず、要素 m1, m5, および m9 以外では頬側方向の応力が観察された。また垂直方向の応力分布はいずれのモデルでも荷重を负荷した点の直下において下方に最大の応力がみられた。しかし、連結型モデルでは舌側部の要素 m9 において、実際には起こりえない上方への応力がみられたのに対し、分離型モデルの同部では観察されなかった。

2) 粘膜の歪みについて

粘膜要素における主歪みについては、図 8 に示すように、水平方向でモデル間で異なった様相を示した。連結型モデルでは頬舌側中央部の要素 m5, m8 を境に歪みの方向が変化し、舌側部の要素 m9 で実際にはありえない舌側方向の歪みが観察された。これに対し、分離型モデルでは要素 m9 では歪みは観察されず、歪みがみられたすべての要素において、その方向は舌側方向となった。垂直方向においても連結型モデルの要素 m9 では実際にはありえない上方への歪みが観察された。

図 8 Results of principal strain in horizontal and vertical directions for elements (m1~m9, from buccal to lingual) of mucosa in the Connected model and the Separated model

連結型モデルと分離型モデル粘膜の各要素 (m1~m9, 頬側から舌側まで) の水平方向と垂直方向の主歪み

図 9 Displacements of nodes on the occlusal surface for three different frictions in the Separated model
3 種の異なる摩擦係数における咬合面上の節点の変位

図 10 Results of principal stress in horizontal and vertical directions for elements (D1~D9) in the mucosal surface of the occlusion rim in the Control model and the Soft-lining model
コントロールモデルと軟質モデルにおける咬合床粘膜面の要素 (D1~D9) の水平方向と垂直方向の主応力

2. 咬合床の変位量に対する摩擦係数の影響

各摩擦係数における咬合床の咬合面上の節点 ①, ②, ③の変位を図 9 に示す。水平方向では摩擦係数の減少に伴い、咬合床の変位が増加した。しかし、摩擦係数を最小の 0.005 に設定した場合でも、その変位は 0.44 mm 程度

図 11 Results of principal stress in horizontal and vertical directions for elements (M1~M9) of mucosa in the Control model and the Soft-lining model
コントロールモデルと軟質モデルにおける粘膜の各要素 (M1~M9) の水平方向と垂直方向の主応力

であり、増加量はわずかであった。垂直方向の変位は頬側部の節点 ① において最も大きな変位がみられたが、摩擦係数の影響はほとんどみられなかった。

3. 軟質裏装材の裏装効果について

1) 応力分布

(1) 咬合床粘膜面

図 10 に示すように、水平方向の応力は、コントロールモデルで中央部の要素 D4 を境に頬側方向と舌側方向に分かれたが、軟質モデルではその境が要素 D5 と D6 の中間となり舌側移動した。また、軟質モデルでは要素 D4 で頬側方向の最大主応力が観察され、全体的に頬側方向の主応力がやや増加した。これに対し、垂直方向では、頬側部の要素 D1 を除いてコントロールモデルと軟質モデルの応力分布はほぼ一致した。

(2) 粘膜表面

図 11 に示すように、水平方向の主応力は軟質モデルでは頬側部の要素 M2 において最大値を示し、コントロールモデルに比べて、やや増加した。しかし要素 M2 以外ではコントロールモデルとほぼ同程度の値を示した。垂直方向の主応力は、いずれのモデルでも頬側部の要素 M3 において最大の応力を示した。また、軟質モデルではコントロールモデルと比較して、比較的大きな主応力が観察され

図 12 Results of principal stress in horizontal and vertical directions for elements (B1~B12) of cortical bone in the Control model and the Soft-lining model
コントロールモデルと軟質モデルにおける皮質骨の各要素 (B1~B12) の水平方向と垂直方向の主応力

た要素 M3 と M4 において減少し、また比較的小さな主応力が観察された M7 と M8 では増加の傾向がみられた。

(3) 骨表面

骨表面の主応力分布を図 12 に示す。水平方向の主応力は軟質モデルのすべての要素でやや減少した。垂直方向の主応力は軟質モデル要素 B3, B4, B5 において、やや減少が観察されたが、その他の要素では大きな差はみられなかった。

2) 歪み

(1) 咬合床粘膜面

図 13 に示すように、コントロールモデルでは歪みは観察されなかったのに対し、軟質モデルでは歪みが観察された。水平方向では頬側部の要素 D9 と、中央部の要素 D5 より舌側の要素において舌側方向の歪みが観察され、要素 D2, D3, D4 のみ頬側方向の歪みがみられた。垂直方向にはほとんどの部位で下方への歪みがみられたが、舌側部の要素 D8, D9 では、軟質モデルにおいても、歪みはほとんど観察されなかった。

(2) 粘膜表面

図 14 に示すように、水平方向の歪みは軟質モデルの頬側部の要素 M2, M3 においてコントロールモデルより増加した。一方、垂直方向の歪みに関して、コントロールモ

図 13 Results of principal strain in horizontal and vertical directions for elements (D1~D9) in the mucosal surface of the occlusion rim in the Control model and the Soft-lining model
コントロールモデルと軟質モデルにおける咬合床粘膜面の要素 (D1~D9) の水平方向と垂直方向の主歪み

デルで下方に大きな歪みを示した要素 M3, M4, M5 では軟質モデルにおいて主歪みは減少し、要素 M3, M4, M5 以外の軟質モデルの要素ではコントロールモデルよりやや増加した。

(3) 皮質骨表面

図 15 に示すように、観察された歪みは非常に微少であった。軟質モデルにおける水平方向の歪みは、B1を除いたすべての要素でコントロールモデルに比べて減少したが、その差は最大で $1.2 \times 10^{-4} \%$ であった。また、垂直方向の歪みに関しては顕著な変化はみられなかった。

IV. 考 察

1. 解析方法について

義歯の力学的挙動を調べる方法として、臨床実験とモデル実験があげられる。臨床実験では被験者間の個人差が影響し、明確な結論を引き出すことは非常に難しい。このため、模型を使った実験が数多く行われてきたが、近年では、実際の義歯の力学的挙動、床下組織の応力分布、歪み変化などをセンサで実際に測定する代わりに、コンピュータ上のシミュレーションにより解析する方法も多く取り入れられている²³⁻²⁵⁾。有限要素法はそのなかの一手法で、対象となる粘膜と顎骨の応力、歪みおよび変位をその形態

図 14 Results of principal strain in horizontal and vertical directions for elements (M 1~M 9) of mucosa in the Control model and the Soft-lining model
コントロールモデルと軟質モデルにおける粘膜の各要素 (M 1~M 9) の水平方向と垂直方向の主歪み

に制限されずに広範囲に調べることができる。しかしながら、これまでの有限要素モデルを用いた全部床義歯に関する研究では、粘膜と義歯床の界面に位置する節点を双方で共用し、義歯と粘膜を連結した状態で解析しているため、モデル上での義歯の挙動は実際の粘膜上で変位する義歯の挙動と大きく異なっている可能性がある。今回、著者はこのような点を考慮し、まず接触関係を改善した力学的等価性の高い有限要素モデルを構築し、次いで、これを用いて軟質裏装材の裏装効果を解析した。

2. 解析モデルについて

本研究における解析モデルは、下顎右側第一大臼歯の前頭断面の二次元有限要素モデルであり、顎堤の吸収状態は上條²⁶⁾と Cawood²⁷⁾ の分類を参考に中等度の吸収度とした^{28,29)}。

また、皮質骨、顎堤粘膜の厚さについては、種々の報告があり^{4,5,30-32)}、被験者および部位、歯の有無によりその数値は異なるが、本研究では平均的な数値として粘膜では 1.5 mm、皮質骨では 2.0 mm を採用した。

3. 接触関係の影響について

咬合床と粘膜の接触状態については連結型モデルを基に、咬合床と粘膜を境界面において 0.1 mm 引き離し、互

図 15 Results of principal strain in horizontal and vertical directions for elements (B 1~B 12) of cortical bone in the Control model and the Soft-lining model
コントロールモデルと軟質モデルにおける皮質骨の各要素 (B 1~B 12) の水平方向と垂直方向の主歪み

いに向かい合った 2 節点を長さ 0.1 mm の Gap 要素と Truss 要素により結合した。Gap 要素は線形構造解析において使用される接触要素であり、2 つの剛体を連結し、接触面に対して垂直方向の圧縮あるいは引っ張りに抵抗する。本研究では、Gap 要素は咬合床粘膜面と粘膜を連結し、圧縮だけに抵抗するように設定した。つまり、咬合床が荷重を受けて沈下し、Gap 要素の縮み量が 0.1 mm を超えたときに咬合床粘膜面は粘膜表面に接触したとみなされ、引き続き荷重がかかると、粘膜に応力が伝達される。反対に、咬合床が浮き上がるような力を受けた場合には、咬合床は抵抗なく浮き上がり、粘膜に応力は生じない。

しかし、Gap 要素は剛性を持たないため、接触要素として咬合床と粘膜の間に Gap 要素のみを用いた場合、咬合床は任意の方向へ自由に動くことになる。このため、モデルが構造的に不安定となり、解析が不可能になることもある。そこで、Gap 要素に剛性の性質をもつ Truss 要素を直列に連結してモデルの安定化を図った³³⁾。Truss 要素の弾性係数は、モデルの変形に影響を与えないように、モデルの弾性係数より 4 から 6 桁ほど小さな値を用いた。この結果、連結型モデルでは頬側部荷重時に粘膜の舌側部の要素 m 9 (図 7, 8) において約 0.2 kgf/cm² の上方への応力と約 0.01 の歪みが観察されたのに対し、分離型モデルでは舌側部粘膜ではほとんど観察されず、実際の義歯の

動態に近似させることができたと思われる。

解析プログラムの設定上、1節点は 1.25 mm^2 の面積をもつため、プログラム上では荷重量を 0.0125 kgf に設定し、 1 kgf/cm^2 の荷重負荷をシミュレートした。この荷重量は、荷重量と粘膜の被圧変位量が直線的関係を示す範囲内にあり¹⁹⁾、線形解析を行える範囲内であると考えられる。岸³⁴⁾は、荷重量が 1.5 kgf/cm^2 の範囲を越えると、荷重量の増大に対する変位量の増大が急激に小さくなると報告した。石鍋³²⁾は、荷重時における義歯床下粘膜の平均沈下量が $0.25\sim 0.32\text{ mm}$ であったと報告した。また、荷重量と義歯の変位量について、砂川³⁵⁾は弾性裏装材を裏装した義歯での第一大臼歯部の平均咬合力は $15.5\sim 16.7\text{ kgf}$ 、平均沈下量は $0.3\sim 0.49\text{ mm}$ であり、咬合力が 1 kgf/cm^2 以下の咬合圧で、義歯の沈下はほぼ最大沈下に至ったと報告した。本研究で使用した二次元有限要素モデルにおける解析結果はこれらと同程度であった。これらのことから、本研究の接触関係の設定は有効なものであったと考えられる。

4. 摩擦係数の違いによる影響について

粘膜上での義歯床の変位をGap要素を用いてモデル上で再現するためには、摩擦係数を設定する必要がある。しかし、実際に義歯床粘膜面と顎堤粘膜の間、または軟質裏装材を裏装した義歯床粘膜面と顎堤粘膜の間の摩擦力を測定することは困難である。仮に測定できたとしても、顎堤形態や口腔内の唾液の粘稠度など影響する因子が多く、測定値よりシミュレーションのための数値を決定することは不可能である。そこで、今回の静解析では、Gap要素が受けた垂直力と摩擦係数の積により算出される静摩擦力を用いた。唾液が義歯床粘膜面と粘膜の間に介在する状況においては、おそらく摩擦係数は微小なものであると考えられるが、モデル上では摩擦係数が小さいほど、荷重時の咬合床の変位量が増加し、臨床的に観察される範囲をはるかに越える可能性がある。今回の解析では、摩擦係数を最小の 0.005 に設定した状態でも、水平方向で 0.44 mm 、垂直方向で 0.28 mm であり、従来の報告^{32,34,35)}の範囲内であったため、軟質裏装材の効果の判定には摩擦係数 0.005 を採用した。

5. 軟質裏装材の裏装効果について

1) 応力分布について

図11に示したように粘膜表面では、軟質モデルの要素M2、M3において水平方向の主応力値が増し、特に要素M2では、約 0.186 kgf/cm^2 となった。頬側部に荷重することにより、咬合床全体がやや頬側に変位し、同時に反時計回りの回転が生じる。その結果、咬合床の頬側床縁部が粘膜と接する点を境に、頬側寄りの粘膜要素の表面ではやや頬側方向の応力が生じるのに対し、舌側に隣接する粘

膜要素M2、M3では舌側方向の応力が生じる。コントロールモデルでは粘膜面の変形が微小であるのに対し、軟質モデルでは軟質裏装材の変形が生じるため、より大きな舌側方向の応力が観察されたものと考えられる。要素M2、M3以外の要素では軟質モデルにおいて頬側から舌側まで、応力分布曲線が平坦化され、応力の集中部位では約 0.04 kgf/cm^2 減少した。また、垂直応力では軟質裏装材の有無により水平方向ほどの変化はみられなかったが、軟質モデルで頬側から舌側まで、応力分布曲線が平坦化され、応力の集中部位では約 0.01 kgf/cm^2 程度減少した。一方、その他の部位では水平および垂直方向ともに応力はやや増加した。これらのことは応力分布に分散化が生じたことを示すものと考えられる。

下顎骨の表面では、軟質裏装材の使用により応力の分散化がみられ、水平方向で約 0.3 kgf/cm^2 、垂直方向で約 0.13 kgf/cm^2 の減少が観察された(図12)。義歯装着により顎堤形態が経時的に変化することについては多くの臨床報告があり³⁶⁻³⁸⁾、一般に、骨内に生じる応力が骨吸収および顎堤変化を引き起こす機械的要因の一つといわれている^{39,40)}。今回の解析結果では、軟質裏装材により、粘膜および支持骨において応力の分散状態が改善されたことは、軟質裏装材のクッション作用が顎堤の吸収を抑制する効果をもつ可能性があることを示唆している。

河野ら⁴¹⁻⁴³⁾は、本研究の連結型モデルと類似した有限要素モデルを用いてVoigtモデルによる粘弾性解析を行い、軟質裏装材の有用性を調べた。その結果、軟質裏装材を裏装しても、粘膜の応力分布様式はほとんど変化しなかったが、顎舌筋線部の骨の応力値は減少し、分散されたとしている。この傾向は本研究で得られた結果と類似しているが、実際には義歯は口腔内で荷重を受けた際に変位し、顎骨内に生じる応力値も影響を受けることが予想されるため、真の応力値を知るためには、義歯床と粘膜との間の滑りを考慮する必要があると考察している。本橋¹⁹⁾、山本²¹⁾は義歯と粘膜の有限要素モデルで床下粘膜における応力分布を主として相当応力値を用いて解析した。しかし、相当応力では方向性が考慮されていないため、義歯床の沈下によって生じる応力と義歯床の浮上によって生じる応力が同じ値をとる場合、応力分布図においてこれを認識することはできないという問題点を指摘している。本研究ではこれらの問題を克服できたと考えられる。

2) 歪みについて

図14にみられるように、軟質モデルの粘膜の要素M2、M3ではコントロールモデルに比較して、水平方向の歪み量が舌側方向に約2%増加した。これらの部位は、応力分布においても同様の傾向がみられ、頬側部への荷重負荷時による咬合床の頬側床縁部の粘膜に対する接触の様相がこのような現象を引き起こしたと思われる。要素M2、M3以外の粘膜の要素は軟質裏装材の変形に従い、コントロー

ルモデルと比べて、0.1~0.4% 程度の歪みの増加がみられた。一方、頬側から舌側まで、垂直方向の歪み分布曲線はやや平坦化し、軟質モデルにおいて集中部位では歪みが約 1% 減少し、同時にその他の部位では約 1% 増大し、分散化が観察された。

皮質骨表面の歪みについては若干の分散化がみられたが水平方向に限られたものであった。骨表面の歪みは骨のモデリングまたはリモデリングに影響する重要な因子であるといわれている⁴⁴⁾。また、骨膜を含む粘膜と皮質骨における変形は骨代謝に影響を及ぼすとの報告もある^{45,46)}。今回の応力と歪みに関する結果は二次元の有限要素解析による限られたものであったが、軟質裏装材が骨代謝に影響を及ぼす可能性が示唆された。

本研究の実験条件では、粘膜において応力および歪みの分散化に関する軟質裏装材の有用性が確認された。しかし、さらに臨床的な観点から軟質裏装材の評価を行う場合、軟質裏装材の厚さの違いによる義歯の動揺への影響や粘膜厚径の違いなどについても考慮する必要がある。これらの点をふまえて臨床に即した条件を設定し、より生体に類似したモデルを用いて解析を進めることが今後の検討課題である。

V. 結 論

軟質裏装材の効果を解明するために、接触要素として Gap 要素と Truss 要素を導入した二次元有限要素モデルを考察し、モデルの妥当性を検討した。さらに、そのモデルを用いて線形静解析を行い、咬合床に 1 kgf/cm² の荷重量を負荷した際の床下組織の応力と歪みについて検討し、以下の結論を得た。

1. Gap 要素と Truss 要素の使用により、粘膜での上方への引っ張り応力と引っ張り歪みが解消され、これらの接触要素の使用により咬合床の変位は 0.44 mm 程度であった。Gap 要素と Truss 要素の導入は有限要素法を用いた有床義歯の力学解析に妥当であることが確認された。

2. 軟質裏装材により、応力の集中部位において、粘膜では垂直方向のみ約 0.01 kgf/cm²、皮質骨では水平方向に約 0.3 kgf/cm²、垂直方向に約 0.13 kgf/cm² の減少が認められ、分散化も観察された。

3. 軟質裏装材により、歪みの集中部位において、粘膜では垂直方向に約 1%、皮質骨では水平方向のみ最大で 1.2×10^{-4} % の減少が認められ、分散化も観察された。

稿を終えるにあたり、ご懇篤なるご指導とご校閲を賜りました本学歯学部高齢者歯科学講座早川 巖助教授に深甚なる謝意を表します。また日頃より有意義なご教示を賜りました長尾正憲名誉教授に心より感謝いたします。さらに直接のご指導、ご助言を頂きました平野滋三博士をはじめ教職員各位、大学院諸氏に深く感謝いたします。

本論文の要旨の一部は、第 101 回日本補綴歯科学会学術大会 (1999 年 5 月 21 日、福岡) において発表した。

文 献

- 1) Tallgren A. Alveolar bone loss in denture wearers as related to facial morphology. *Acta Odontol Scand* 28 : 251-270, 1970.
- 2) Tallgren A. The continuing reduction of the residual alveolar ridges in complete denture wearers : A mixed-longitudinal study covering 25 years. *J Prosthet Dent* 27 : 120-132, 1972.
- 3) Enlow DH, Bianco HJ, Eklund S. The remodeling of the edentulous mandible. *J Prosthet Dent* 36 : 685-693, 1976.
- 4) 松浦基一. 口蓋部軟組織の加圧時の変化ならびにその組織学的研究. *口病誌* 46 : 323-362, 1979.
- 5) Uchida H, Kobayashi K, Nagao M. Measurement in vivo of masticatory mucosal thickness with 20 MHz B-mode ultrasonic diagnostic equipment. *J Dent Res* 68 : 95-100, 1989.
- 6) 早川 巖. 軟質裏装材の応用. *歯科ジャーナル* 20 : 702-706, 1984.
- 7) 早川 巖, 長尾正憲, 坂内信男ほか. 新開発の餅状フッ素系軟質裏装材の性質と使用法. *歯界展望* 68 : 383-392, 1986.
- 8) 森 正博, 松本亀治ほか. 軟質裏装材を使用した全部床義歯患者の臨床的観察. *鶴見歯学* 16 : 289-296, 1990.
- 9) 柴村 勲, 伊堂寺 茂, 前田芳信ほか. 義歯軟質弾性裏装材による裏装効果一咬合力分布に関する臨床的検討ならびに模型実験による考察一. *補綴誌* 36 : 644-649, 1992.
- 10) 守谷直史, 赤川安正. 義歯床用軟質裏装材の現状と将来. *広大歯誌* 26 : 360-368, 1994.
- 11) 高橋保樹. 軟質裏装材の使用が全部床義歯装着者の咀嚼機能に及ぼす影響. *口病誌* 64 : 518-533, 1997.
- 12) 米山喜一. 咬合力の床下支持組織への伝達に関する基礎的研究. *鶴見歯学* 16 : 173-195, 1990.
- 13) 田中正夫, 瀬口靖幸. 有限要素法の基礎知識と注意点. *バイオメカニズム学会誌* 11 : 43-51, 1987.
- 14) Maeda Y, Wood WW. Finite element method simulation of bone resorption beneath a complete denture. *J Dent Res* 68 : 1370-1373, 1989.
- 15) 河野文昭, 多田 望, 永尾 寛ほか. 粘弾性解析による義歯床下組織の応力分布一粘弾性解析の導入. *補綴誌* 34 : 623-630, 1990.
- 16) 高山芳幸, 山田 亨, 川崎貴生ほか. 下顎総義歯の動態解析 (第 2 報)一有限要素法による義歯床と粘膜の接触状態のモデル化一. *補綴誌* 35・86 回特別号 : 42, 1991.
- 17) 高山芳幸, 服部元子, 森 公寿ほか. 下顎総義歯の動態解析 (第 3 報)一義歯と粘膜の接触滑走を考慮した解析一. *補綴誌* 37・90 回特別号 : 36, 1993.
- 18) Panduric J, Husnjak M, Guljas K et al. The simulation and calculation of the fatigue of the lower complete denture in function by means of the finite element analysis. *J Oral Rehabil* 25 : 560-565, 1998.
- 19) 本橋宏明. 義歯床下粘膜における応力分布の有限要素法による解析. *補綴誌* 37 : 1059-1073, 1993.
- 20) 井上義久, 黒岩昭弘, 鷹股哲也ほか. 全部床義歯床下支持組織

- における咬合圧による応力分布に関する研究—第1報 下顎第一大臼歯の二次元要素分割と荷重点の条件について—。補綴誌 38 : 997-1004, 1994.
- 21) 山本 健. 顎堤形態が床下支持域の応力分布および義歯挙動に及ぼす影響。補綴誌 40 : 1090-1101, 1996.
- 22) 河野文昭, 浅岡憲三, 永尾 寛ほか. 粘弾性解析による軟質裏装材の有用性に関する研究—第1報 軟質裏装材が床下組織の応力分布に及ぼす影響—。補綴誌 36 : 1305-1311, 1992.
- 23) 野川哲義. 有限要素法による遊離端義歯の力学的研究—第1報 二次元非線形弾性解析の導入—。補綴誌 33 : 952-965, 1989.
- 24) 佐藤裕二, 守谷直史ほか. 義歯床用軟質裏装材の応力緩和能に関する有限要素解析。広大歯誌 26 : 134-137, 1994.
- 25) 佐藤裕二, 天間弘文ほか. 総義歯装着者の顎堤状態の数量化。補綴誌 39 : 683-687, 1995.
- 26) 上條雍彦. 図説口腔解剖学(1) 骨学 156-176, 東京: アナトーム社出版, 1979.
- 27) Cawood JI, Howell RA. A classification of the edentulous jaws. Int J Oral Maxillofac Surg 17 : 232-236, 1988.
- 28) Mercier P, Lafontant R. Residual alveolar ridge atrophy : Classification and influence of facial morphology. J Prosthet Dent 41 : 90-100, 1979.
- 29) Xie Q, Wolf J, Ainamo A. Quantitative assessment of vertical heights of maxillary and mandibular bones in panoramic radiographs of elderly dentate and edentulous subjects. Acta Odontol Scand 55 : 155-161, 1997.
- 30) Kydd WL, Daly CH, Wheeler JB. The thickness measurement of masticatory mucosa in vivo. Int Dent J 21 : 430-441, 1971.
- 31) 寺倉 健. 顎粘膜厚径に関する研究—無歯顎者補綴における診断への可能性について—。補綴誌 32 : 546-560, 1988.
- 32) 石鍋 聡. 荷重時における義歯床下粘膜の厚さの変化に関する研究。補綴誌 35 : 111-124, 1991.
- 33) Structure Research and Analysis Co. Ltd. COSMOS/M 要素ライブラリ 244-255, 東京: 横河技術情報, 1995.
- 34) 岸 正孝. 歯槽堤粘膜の被圧変位性に関する加圧面の面積と変位量との関係についての実験的研究。歯科学報 72 : 1043-1071, 1972.
- 35) 砂川 孝. 弾性裏装材が咬合力および義歯沈下量に及ぼす影響に関する研究—下顎両側性遊離端義歯について—。補綴誌 23 : 195-208, 1979.
- 36) Aydinlik E, Akay HU. Effect of a resilient layer in a removable partial denture base on stress distribution to the mandible. J Prosthet Dent 44 : 17-20, 1980.
- 37) 三輪悦子. 義歯床の適合試験に関する実験的研究—顎堤の形態と咬合力の影響について—。鶴見歯学 8 : 35-54, 1982.
- 38) Wright PS. Observations on long-term use of a soft-lining material for mandibular complete dentures. J Prosthet Dent 72 : 385-392, 1994.
- 39) Hara T, Sato T, Nakashima K et al. Effect of occlusal pressure on the histopathological changes in denture supporting tissues. J Oral Rehabil 23 : 363-371, 1996.
- 40) Sato T, Hara T, Mori S et al. Threshold for bone resorption induced by continuous and intermittent pressure in the rat hard palate. J Dent Res 77 : 387-392, 1998.
- 41) 河野文昭, 浅岡憲三, 永尾 寛ほか. 粘弾性解析による義歯床下組織の応力分布—第1報 人工歯の排列位置が義歯床下組織の応力分布に及ぼす影響—。補綴誌 36 : 1186-1192, 1992.
- 42) 河野文昭, 永尾 寛, 井上三四郎ほか. 粘弾性解析による軟質裏装材の有用性に関する研究—第2報 軟質裏装材の裏装法の違いが床下組織の応力分布に与える影響—。補綴誌 38 : 1328-1335, 1994.
- 43) 河野文昭, 永尾 寛, 岡 謙次ほか. 粘弾性解析による軟質裏装材の有用性に関する研究—第3報 軟質裏装材の粘性が床下組織の応力分布に及ぼす影響—。補綴誌 39 : 1004-1009, 1995.
- 44) Lanyon LE. Osteocytes, strain detection, bone modeling and remodeling. Calcif Tissue Int 53 : S 102-S 107, 1993.
- 45) Lytle RB. Soft tissue displacement beneath removable partial and complete dentures. J Prosthet Dent 12 : 34-43, 1962.
- 46) Bentolila V, Boyce TM, Fyhrie DP et al. Intracortical remodeling in adult rat long bones after fatigue loading. Bone 23 : 275-281, 1998.

著者連絡先: 巫 春和

〒113-8549 東京都文京区湯島 1-5-45

TEL : 03-5803-5561