

学位論文の全文に代えてその内容を要約したもの

愛知学院大学

乙 第 551 号	論文提出者 稲垣輝行
論文題目 三次元有限要素法による歯冠外磁性アタッチメント 義歯に関する応力解析	

I. 緒言

近年、部分床義歯における審美性や異物感の軽減などに対する患者の要求が増大しつつある。磁性アタッチメントは、磁石構造体にネオジム磁石を組み込むことで、小型でかつ強力な維持力を実現した画期的な支台装置である。この磁性アタッチメントは、部分床義歯の支台装置として頻用されてきたクラスプに比べ、金属色が露呈しないため、審美的に優れ、また機能面に関しても、支台歯のアンダーカットを利用するクラスプとは異なり、支台歯に最も為害作用があるとされている側方力を緩和する等の特徴から、力学的に支台歯に優しい支台装置とされ、20 余年前の我が国での開発以来、現在にいたるまで良好な成績が報告されている。

義歯の支台装置として磁性アタッチメントを適用する場合には、磁石構造体とキーパーとの設置スペースが必要となるため、基本的には支台歯として利用できるのは失活歯に限定されていた。当講座では、磁性アタッチメントの最後のバリアーであった有髄歯への適応について、従来から多くの基礎的、臨床的研究を行い、現在では、我々が開発した既製パターンを利用した精密かつ簡便な歯冠外磁性アタッチメントの臨床システムを完成し、既に多くの臨床実績を挙げて来た。

しかし、歯冠外磁性アタッチメントは、その基本形態がカンチレバー構造であることから、義歯設計の際、特に長期間の利用に関する力学的強度が無視し得ない懸念事項であった。さらに、硬組織、軟組織が混在した口腔内において、本システムを適用した義歯を安全かつ有効に機能させるためには、咬合力が義歯に加えられた際、義歯床下粘膜や支台歯およびその周囲組織に如何なる応力が作用しているのか、またこの義歯の形状そのものが、これら諸組織に対してどのように作用し、どのような影響をもたらしているのかを把握する必要がある。

特に最近の臨床現場においては、片側遊離端欠損症例に対して、義歯を設計する際、大連結子に対する異物感の軽減等に対する患者からの強い要望により、やむを得ず片側処理として義歯を設計する場合が少なくない。この場合、最後方支台歯に加わる義歯のカンチレバー作用を如何に軽減させるかという、極めて重要な課題に対応しなければならない。当講座では、これらの諸問題を解決するため、歯冠外磁性アタッチメントを用いた義歯の設計については、義歯にブレーシングアーム、インターロックを併用して支持効果、把持効果を求め、さらに支台歯を隣接歯に連結することを設計の基本として荷重負担の軽減を図っている。しかしながら、これら義歯設計については、現時点でも歯科医師や歯科技工士の臨床経験に基づいて設計されているのが実情であり、未だこの種の設計に対する確固とした力学的効果および影響は報告されていない。

本研究はその様な現状に鑑み、三次元有限要素法を用いて、片側遊離端欠損症例における歯冠外磁性アタッチメントを用いた4種の義歯設計に関して、設計の違いがもたらす力学的影響、および歯冠外磁性アタッチメントと併用されるブレーシングアームの力学的効果を詳細に検討したものである。

II. 研究方法

1. 有限要素モデルの構築

硬組織、軟組織の混在する複雑な口腔内を対象とした有限要素法解析を行う際、その基盤となる解析モデルに関しては、その要素形態、要素分割数等が、解析結果に大きく影響を与える、非常に重要な因子であることは周知の事実である。さらに、解析モデル自体の形状に関しては、口腔内の形状は画一的なものではなく、各々固有の形態を有している。そのため、この種の

有限要素法解析を行う際には、これら固有の形態的特徴に可能な限り近似したモデル構築が必要であり、また、将来的にはこのようにして得られた解析結果を直接個々の患者に力学的に最も妥当と判断される義歯設計に活用できるものとなることが最終的な目標であると考えている。これらの要件を踏まえ、本研究に用いた有限要素法モデルの構築には、可及的に口腔内の形状を忠実に再現するため、実在する患者の CT データ及び研究用模型を用いた（愛知学院大学歯学部倫理委員会、承認番号 No. 259）

1) 生体情報 (CT データ)

本研究に用いた CT 画像データは、本学附属病院インプラント科にて診断・治療が終了し、現在は経過観察中の患者の中から、本研究の目的に相当と思われる症例の 1 名を選択し、当該患者の同意を得た後、その診断時における CT 画像データおよび研究用模型を用いた。今回利用した症例 (42 歳・女性) では、下顎左側第一、第二、第三大臼歯が欠損しており、残存歯の骨植は良好であり、歯周組織にも異常所見はみられなかった。

2) モデル形状データの作成

(1) CT 画像データ処理

患者 CT 画像データ (DICOM) を三次元画像処理・編集ソフト (Mimics Version 11.0、Materialise、Leuven、Belgium) を用いて三次元構築を行った。次に、構築画像の歯および顎骨に対して、それぞれの CT 濃度値に基づいてセグメンテーションを行い、これらの形状データを STL フォーマット形式にて出力した。

(2) 義歯データの作成

シリコン印象材にて患者の研究用模型の副印象採得を行い、これによって得られた複製模型を作業用模型と想定した。次に、X 線不透過性常温重合レジン (スキャニングレジン、山八歯材工業、愛知) を用いてこの作業用模型上で模擬的な義歯を作製し、CT スキャン用試料とした。

(3) CT スキャン

CT スキャン用試料を、産業用マイクロフォーカス X 線 CT (SMX-225CT、島津製作所、京都) にて、管電圧 60 kV、管電流 60 μ A、画像サイズ 512 \times 512 ピクセルにて撮影した。撮影した画像データ (Tiff) を三次元画像処理・編集ソフト (Mimics Version 11.0、Materialise、Leuven、Belgium) を用い、STL フォーマット形式にて出力した。

3) 有限要素解析モデルへの変換・構築

顎骨、歯、義歯の形状データ (STL データ) を CAE 環境統合プリ・ポスト総合ソフト (Patran 2010 Windows 64bit、MSC software、Los Angeles、USA) にインポートし、有限要素モデルを構築した。また、モデルの各部位における厚径は、皮質骨については、歯槽頂および下顎底部 3.0mm、大臼歯歯槽部 2.8mm、前歯舌側部 3.0mm、唇側部 1.2mm とした。顎堤粘膜については、皮質骨表面データと義歯床粘膜面データ間に形成される空間を、欠損部顎堤粘膜データとして置換した。顎堤粘膜の厚径は欠損部の顎堤頂部で 4.0 \sim 6.0 mm、頬舌側部で 1.0 \sim 2.0 mm であった。歯根膜に関しては、残存歯総ての歯根周囲に厚さ 0.2 mm の歯根膜層を便宜的に付与した。

4) 有限要素解析モデルの編集・完成

円滑な計算処理を行うため、有限要素モデルのメッシュワークに関しては、不自然な要素形状を適度なアスペクト比に編集する必要がある。主な観察領域に関しては、可及的に本来のモデル形状を保ち、かつ解析結果に影響の生じない要素分割数を設定し、逆に観察領域ではない部位に

関しては、要素数の削減のため要素分割数を荒く設定した。また、支台歯モデルに関しては、下顎左側第二小臼歯遠心側に歯冠外磁性アタッチメントを設置し、それを第一小臼歯および犬歯と3歯連結したモデルを構築した。

2. 有限要素法解析

有限要素解析には、汎用非線形構造解析ソルバー (Marc2008、エムエスシーソフトウェア、東京) を用いて演算を行った。解析の種類は弾性応力解析とし、解析に使用したコンピュータはデル社製ワークステーション DELL PRECISION T7400 である。

1) 解析対象

解析対象は、下顎左側第一、第二大臼歯欠損症例に対して、歯冠外磁性アタッチメントを用いた4種類の設計を行った義歯とした。義歯設計としては、片側処理のもの3種と、大連結子にて反対側に間接支台装置として双子鉤を設置した義歯とした。

片側処理の義歯設計の具体的内容は、支台装置に歯冠外磁性アタッチメントを適用し、支台歯にブレイシングアームおよびインターロックを併用したモデル (以後 B-A モデル)、B-A モデルからブレイシングアーム、インターロックを除去したモデル (以後 B-A less モデル)、B-A Less モデルに支台歯である下顎左側第一・第二小臼歯に近心レストを追加したモデル (以後レストモデル) とした。また、反対側に間接支台装置を設置した義歯設計としては、B-A less モデルにリングバーを加え、下顎右側第二小臼歯および第一大臼歯へ双子鉤を設置したリングバーモデル (以後 L-B モデル) とした。

なお、解析モデルの歯冠外磁性アタッチメント形態には、既製のプラスチックパターン (EC キーパートレ、ジーシー、東京) に従い、総てのモデルでスリットを付与した。これら4種の義歯設計に対して、様々な解析条件下における詳細な力学的影響の検討を行った。

2) 解析条件

(1) 構成要素と力学的物性値

歯冠補綴装置、フレームワーク、支台装置、アタッチメントに関しては、歯科用メタルセラミック修復用貴金属材料 (デグデントユニバーサル、デンツプライ三金、東京) の力学的物性値を適用した。また、歯根膜や顎堤粘膜においては、歯および顎堤粘膜の沈下量が文献値と近似する力学的物性値に設定した。

(2) 境界条件 (接触条件・拘束条件・荷重条件)

接触条件としては、解析モデル上で接触関係にある部分床義歯と支台歯および顎堤粘膜間に、クーロン摩擦係数 $\mu = 0.01$ を設定した。

拘束条件は、本解析において解析結果に直接的な影響が無いと考えられる下顎両側筋突起相当部を X、Y、Z 方向に完全拘束とした。

荷重条件は、義歯人工歯咬合面相当部に、総荷重量 10N の3方向の面圧荷重を付与した。荷重の方向としては、咬合平面に対して垂直方向から 30 度頬側方向に傾斜させた頬側方向荷重、咬合平面に対して垂直方向に付与した垂直方向荷重、咬合平面に対して垂直方向から 30 度舌側方向に傾斜させた舌側方向荷重の3種類とした。

III. 結果

1. 義歯変位量

本研究における義歯変位量に関しては、義歯床の歯冠外磁性アタッチメントを設置した支台歯に対する変位量とし、各種形態の義歯間の差異を比較検討した。

1) 義歯垂直変位量

全ての方向荷重において、最も少ない義歯垂直変位量を示したモデルはL-Bモデルであり、最も多くの義歯垂直変位量を示したモデルはB-A lessモデルであった。B-Aモデルとレストモデルに関しては、垂直方向荷重時には同程度の変位量を示したが、頬側方向、舌側方向荷重では、レストモデルの方が少ない変位量を示した。

2) 義歯側方変位量

義歯側方変位量の評価は、頬側方向荷重および舌側方向荷重についてのみ行った。

頬側方向荷重および舌側方向荷重において、最も少ない義歯側方変位量を示したモデルはL-Bモデルであった。片側処理とした義歯の3モデルに関しては、頬側方向荷重において、最も少ない舌側変位量を示したモデルはレストモデルであり、舌側方向荷重において、最も少ない頬側変位量を示したモデルはB-Aモデルであった。また、片側処理の3モデルにおいて、いずれも義歯側方変位量は舌側変位量の方が頬側変位量よりも大きい結果を示した。

2. 応力分布

本研究における発生応力の評価はVon Mises相当応力にて行った。

1) 支台歯

全ての解析モデルにおいて、支台歯に応力集中が観察された部位は、第二小臼歯、第一小臼歯、犬歯のいずれにおいても、それぞれの遠心歯頸部であった。いずれの方向からの荷重においても、支台歯全てで最も小さな応力が観察されたモデルはL-Bモデルであり、最も応力の集中が観察されたモデルはB-A lessモデルであった。B-Aモデルとレストモデルに関しては、応力の分布域は若干異なるが、その大きさは同程度であることが観察された。

2) 支台歯周囲歯槽骨

全ての解析モデルにおいて、支台歯周囲歯槽骨に応力集中が観察された部位は、支台歯歯槽窩周囲および頬側歯槽骨部であった。いずれの方向からの荷重においても、最も小さな応力が観察されたモデルは両側に維持を求めたL-Bモデルであり、片側のみの義歯設計の3モデルと比較して明確な応力緩和が観察された。

3) 歯冠外磁性アタッチメント

全ての解析モデルにおいて、歯冠外磁性アタッチメントに応力集中が観察された部位は、アタッチメントのネック部およびアタッチメント結合部上方であった。いずれの方向からの荷重において、最も応力の緩和が観察されたモデルはL-Bモデルであり、最も応力の集中が観察されたモデルはB-A lessモデルであった。B-Aモデルとレストモデルに関しては、頬側方向荷重ではB-Aモデルに応力の集中が観察され、垂直方向荷重および舌側方向荷重時においては、レストモデルに若干大きな応力の集中が観察された。

IV. 考 察

1. 有限要素法解析について

部分床義歯部における力学的な解析は、複雑な挙動を示す顎堤粘膜や歯根膜、さらにそれぞれ形状の異なる数種の構成要素からなる部分床義歯自体が関与するため、非常に複雑なものとなる。

これらの研究方法としては、本研究で用いた有限要素法の他に、従来から様々報告されて来たストレーンゲージ法や光弾性法などの物理的模型実験が挙げられる。ストレーンゲージ法では、生体情報を得るために、ストレーンゲージを直接生体に適用可能であることが利点として挙げられる。しかし、この方法では測定部位表面に限定した情報しか得ることができず、その測定部位内部の応力分布やひずみ等の情報を補えることは不可能である。これに対し、光弾性法は表面応力だけでなく内部応力についても測定が可能なことに加え、実際義歯に使用する材料や支台装置等を用いることが可能な模型実験である。しかし、複雑な挙動を示す生体の硬組織や軟組織の口腔内組織の諸特性を再現できる材料が少なく、現時点では的確な材料定数の比率を考慮に入れた模型の構築がほぼ不可能に近い。さらに当システムは本質的に連続的な測定には不向きであることがこの種の実験には大きな欠点となる。

有限要素法は、実際に模型を作製する必要が無く、コンピュータ上で解析モデルを構築することにより、研究対象部位の応力分布やひずみ量等を計測することが可能である。またコンピュータ上でのモデルの編集もできることから、本研究の如く、同一生体モデル上で異なる義歯設計のモデルを数種構築することも容易である。さらに、有限要素法はストレーンゲージ法や、光弾性法では最も困難とされている複数形状の試料に対する確実な同一条件下での解析が可能であることが特長として挙げられる。

本研究で対象とした口腔内は、補綴装置は勿論のこと、さらに歯、歯周組織、顎骨等の複雑な物理特性や形状を有した様々な構成要素の複合体である。そのため、口腔内における部分床義歯の力学的検討を行うにあたり、本研究で用いた有限要素法は極めて妥当な手法と考えられる。

2. 解析モデルについて

近年、コンピュータの処理能力の向上や、画像解析技術の進歩に伴い、三次元モデルにおける有限要素法を用いた理論解析も多数報告されている。我々が解析対象とする口腔内は現実的に複雑な構造、形態を有しており、その細部の再現精度が解析結果に多大な影響を与える。それゆえ、それらの構造、形態を可及的に忠実に再現する必要があることは言うまでもない。本研究に用いたモデル構築法は、生体情報および補綴装置の形状を可及的に忠実に三次元有限要素モデルに反映させるため、実在する患者のCTデータを用いて下顎骨モデルの製作を行い、また、同患者の研究用模型から補綴装置を模したスキャン用試料を作製したことにより、可及的に臨床に即した形態の義歯モデルの構築が可能となった。

口腔粘膜や歯根膜の軟組織部のモデル構築に関しては、義歯床下粘膜の構築に、CTデータから得られた皮質骨の表面と模擬的に作製した義歯粘膜面とで形成される空間を義歯床下粘膜と想定して構築を行った。この義歯床下粘膜の厚径は、顎堤頂部で4~6mmであり、生体実測値とほぼ同等であったことから、ほぼ妥当な方策であったものと考えられる。また、歯根膜は、残存歯歯根周囲に五面体要素にて厚さ0.1mmの幅にて二層構造を作製し、合計0.2mmの歯根膜層を構築した。

以上のことから、本研究に用いた三次元有限要素モデルは、細部再現性が非常に高いため、解析モデルとして極めて優れたモデルであると判断する。

3. 解析方法について

1) 解析項目について

本研究では、ブレーシングアームと歯冠外磁性アタッチメントとの併用効果を知る上で、ブレ

ーシングアームの有無による解析結果の検討が必要不可欠であると考えた。そのため、基本となる B-A モデルからブレーシングアームのみを除去した B-A less モデルを作製した。

レストモデルに関しては、B-A モデルにみられるブレーシングアームやインターロックと比べ、実際の臨床現場では、技工操作が極めて簡便であり作製が容易である。また、そのレストの歯冠外磁性アタッチメントと併用する支台装置としての効果を検討し、ブレーシングアームやインターロックの代替となる可能性を検討した。さらに、レストの小連結部に接する支台歯舌側面には、把持効果もある程度期待できるようにレストシートから連続する形態でガイド面を設置した。L-B モデルは、反対側に間接支台装置を設置し、維持を求めた設計であり。片側処理による義歯設計との力学的な比較対象とした。

2) 解析条件について

(1) 拘束条件について

この種の解析においては、その拘束部位を解析モデルのどこに設定するかにより、解析対象における応力分布や変位量に多大な影響を与え、結果の信頼性を失墜させてしまうことになるため、非常に重要な設定条件である。本解析では、拘束点の設定部位として、解析結果に直接影響のないことを確認の後、荷重部位よりも可及的に遠方となる下顎両側筋突起部を完全拘束とした。

(2) 荷重条件について

本研究では、荷重条件として義歯咬合面相当部において、咬合平面に対して垂直方向、頬側方向、舌側方向の3方向からの荷重を付与し、義歯の変位を総合的に評価し、各種の形態の義歯において、それぞれの荷重方向に対する変位量を検討した。

4. 解析結果について

1) 義歯変位量について

本研究では、義歯変位量を、最後方支台歯である下顎左側第二小臼歯に対する義歯後縁部の変位量として評価を行った。

今回得られた結果から、義歯変位量は垂直変位量、側方変位量ともに最も変位量が少なかったモデルはL-Bモデルであり、最も変位量が多かったモデルはB-A lessモデルであった。このことは、反対側にまで及ぶ義歯であるL-Bモデルは、義歯部に付与された荷重を反対側の双子鉤にも効果的に分散した結果と考えられる。また、片側処理の義歯であり、通常は歯冠外磁性アタッチメントと併用されるブレーシングアーム、インターロックを除いたB-A lessモデルでは、歯冠外磁性アタッチメントのスリット部のみが、義歯に加えられた荷重に抵抗するため、義歯部が歯冠外磁性アタッチメント部を中心に回転運動を発現した結果と考えられる。また、片側のみの義歯設計であるB-Aモデルとレストモデルに関しては、B-A lessモデルと比べ、義歯変位量が少ない結果となった。このことに関しては、歯冠外磁性アタッチメントと併用しているブレーシングアーム、インターロック、さらには、レストにより、荷重に対する義歯の支持力が増加し、B-A lessモデルと比べ、効果的に支台歯へ荷重を分散させたためと考えられる。また、レストモデルにおける垂直変位量がB-Aモデルより小さく、この結果から、B-Aモデルよりもレストモデルのほうが、より支持力が強く、荷重の分散に効果的な設計であったことが示された。

また、B-Aモデルとレストモデルの義歯側方変位量に関しては、舌側方向荷重時に、B-Aモデルでレストモデルよりも変位量が小さい結果が得られ、また、同荷重において、垂直変位量は支持効果の高いレストモデルにおいて小さい結果となった。このことは、舌側方向荷重において

B-A モデルではレストモデルと比べて垂直変位は多いが、側方変位は少ないことを示している。これは、ブレーシングアームの形態および、鉤歯との良好な適合性に基づいた把持効果のためと考えられる。

(2) 応力分布について

本研究では、義歯人工歯部への荷重時における、支台歯、支台歯周囲歯槽骨に加えて、歯冠外磁性アタッチメント各部における応力分布の評価を行った。歯冠外磁性アタッチメントに関しては、これまで様々な力学的な研究も報告されており、現在、極めて有用なシステムとして臨床の現場で用いられている。しかしながら、いまだ破折、変形などの失敗例も全くないとは言えないため、義歯設計の違いによる歯冠外磁性アタッチメント自体への力学的な影響を検討することは非常に重要であると考えられる。

今回得られた結果から、L-B モデルは、支台歯、支台歯周囲歯槽骨、歯冠外磁性アタッチメントのいずれに関しても、他の3モデルと比べて応力集中の小さい設計であることが確認された。これは、義歯に加えられた荷重を可及的に広範囲に分散させるという、旧くからの義歯設計の基本に合致する合理的な結果であった。片側処理の義歯設計の3モデルに関しては、B-A less モデルが支台歯、支台歯周囲歯槽骨、歯冠外磁性アタッチメントのすべての部位に最も応力が集中する設計であった。

歯冠外磁性アタッチメントの応力分布に関して、B-A モデルは、舌側方向荷重において片側処理の義歯の3モデルの中で最も応力の集中が少ない結果となった。このことも、ブレーシングアームの把持効果によるものであると考えられる。また、この3モデルの応力分布から、歯冠外磁性アタッチメントにブレーシングアーム、インターロックあるいは、レストを併用することにより、歯冠外磁性アタッチメントに集中しやすい応力を効果的に分散できることが示された。

また、B-A モデルとレストモデルの応力分布に関しては、支台歯、歯冠外磁性アタッチメント、支台歯周囲歯槽骨においてほぼ同レベルのものと考えられるため、本解析において、レストモデルで付与した近心レストは、B-A モデルに設計したブレーシングアーム、インターロックの代替となる可能性が示唆された。

V, 結 論

本研究では、三次元有限要素法を用いて、片側遊離端欠損症例において、歯冠外磁性アタッチメントを用いた各種義歯設計がもたらす力学的影響、および歯冠外磁性アタッチメントと併用されるブレーシングアーム、インターロックの力学的効果を詳細に比較、検討し、以下の結論を得た。

1. 反対側に間接支台装置を設置した義歯設計である L-B モデルは、検討したモデルの中で最も義歯変位量が少なく、また支台歯、支台歯周囲歯槽骨、歯冠外磁性アタッチメントのいずれの部位に発生する応力に関しても、明確に緩和させる設計であることが確認された。

2. 歯冠外型磁性アタッチメントと併用して用いられるブレーシングアームおよびレストの併用効果は、義歯の支持力を増加させ、義歯部に負荷した荷重に対して、義歯変位量を抑制するだけでなく、支台歯、歯冠外磁性アタッチメント、支台歯周囲歯槽骨に発生する応力を緩和させるものであった。

3. 片側処理の義歯設計を行う際、歯冠外磁性アタッチメントと併用した近心レストが、ブレー

(学位論文の内容を要約したもの)

No. 8

愛知学院大学

シングアームおよびインターロックの代替となる可能性が力学的に示唆された。