

〔学位論文〕

## 矯正学的歯の移動における骨リモデリングの三次元非線形有限要素解析

岡 由紀恵

北海道医療大学歯学部大学院歯学研究科 口腔構造・機能発育学系 歯科矯正学分野

## Three-dimensional nonlinear finite element analysis of bone remodeling in orthodontic tooth movement

Yukie OKA

Division of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, Department of Oral Growth and Development,  
School of Dentistry, Health Sciences University of Hokkaido

Key words : finite element, orthodontic tooth movement, periodontal ligament

## 緒 言

矯正歯科分野において矯正力と歯の移動速度の関係に関する研究は数多く存在する。しかし、効率的な歯の移動と歯周組織への為害作用を可及的に軽減できる最適な矯正力は、未だ解明されていない。

矯正力の作用を受ける歯根膜は、微細で複雑な構造であることから矯正力に対する歯根膜の応力分布も実際の生体で観察することが不可能である。また、矯正学的歯の移動は、主に歯根膜の外力による変形とその後の組織改造（以下、リモデリング）の二段階から成立すると考えられている。前者は、ほぼ純粋な力学過程であり、ヒトの歯の初期変位における非線形挙動についての報告が数多くある。一方、後者は生物学的過程であり、荷重がある水準を超えると歯根膜に硝子様変性を生じさせ、歯の移動が停滞する hyalinization period（以下、硝子化期）が現れるなど、力学単独では説明できない側面を有している。さらに硝子様変化やリモデリングの起点となる力学的刺激の性質や閾値には不明な点が多く、歯根膜における骨の吸収速度、添加速度の定量化にも至っていない。そのため、現時点では実際の矯正歯科臨床での歯の移動様相をシミュレーションで正確かつ長期的に再現することは困難であるとされている。

そこで、骨リモデリングを考慮した長期的な歯の移動について、（１）歯根膜要素を考慮した歯の移動の有限

要素解析における非線形モデルを構築し、そのモデルの解析結果が過去の報告（生体計測）の変位挙動に近似していることを確認すること。（２）線形解析と非線形解析の結果の違いを明らかにすること。（３）Light forceとheavy forceにおいて、歯の移動の生物学的過程による長期的な歯の移動様相の違いを推測すること。（４）歯根膜要素を考慮した歯の移動の有限要素解析において、矯正装置を装着したモデル（以下、矯正モデル）の非線形有限要素解析を提示し、矯正装置を装着しないモデル（以下、単純モデル）との解析結果の違いを明らかにすることを目的とした。

## 資料および方法

日本人の解剖学的データに基づき上顎犬歯の三次元有限要素モデルを作成した。歯根膜モデルは、線維と非線維性成分の二重要素とした。歯根膜線維には特有の波状構造と部位特異的な配列を与えた。また、非線維性成分要素には血管含有量に応じた体積歪を計算し硝子様変性の出現予測部位を特定した。

まず歯根膜の物性設定の検証として、単純モデルの初期変位挙動と過去の報告（生体計測）の初期変位挙動の比較を行った。次に矯正モデルにおいて、単純モデルの歯冠唇側面にブラケット（0.022inchスロット）を配置し、ワイヤー（0.016inch×0.022inch）を通してその両端を拘束した。ブラケット中央から歯を遠心方向に牽引

し、ワイヤーに沿って歯が移動する状況を想定した。リモデリング解析は、まず、歯の初期変位を解析し硝子様変性予測部位を決定した。次に、前解析の最終変形状態を継承し、矯正装置と硝子様変性予測部位以外の内部応力を初期化した。さらに、外荷重と前解析で生じた内部応力によって新たな応力平衡に至る過程を解析した。以降は、歯の移動が所定量に達するまで上記の解析を繰り返し以下の結果を得た。解析には、神奈川歯科大学所有の汎用プログラムMARC-Mentat2012 (MSCソフトウェア社)を用い、歯根膜の応力—歪関係の設定と上記ステップの自動化のためのプログラムのサブルーチンをメインプログラムへ組み込んだ。以上の解析の結果と、過去の報告における生体計測データと比較し近似性を検討した。さらに、リモデリング解析時の応力分布や血管容積を超える体積歪の変化を観察した。

## 結 果

歯根膜の物性設定の検証において、モデルの荷重—変位曲線は非線形を示し、過去の報告(生体計測)に近似していた。また、歯根膜の応力分布は線形解析と大きく異なり、側方荷重下は牽引側の引張応力が圧迫側の圧縮応力より高かった。さらに、垂直荷重下でも歯根側面の引張応力が根尖の圧縮応力を上回っていた。

リモデリング解析においてheavy forceの初期に硝子化期が認められ、一方light forceを付加した解析では比例的に歯が移動した。また、単純モデルと矯正モデルにおけるリモデリング解析の結果、矯正モデルは単純モデルよりも歯の変位量が減少した。さらに、血管容積を超える体積歪は、light forceで観察できなかった。Heavy forceにおいて血管容積を超える体積歪が観察された。

## 考 察

本研究における荷重—変位曲線は過去の報告(生体計測)の非線形挙動とほぼ一致しており、非線形モデルの解析結果が過去の報告(生体計測)の変位挙動に近似していた。また、歯根膜の応力分布において、非線形解析は線形解析の結果と大きく異なり、牽引側の引張応力が圧迫側の圧縮応力よりも大きく、主に歯根膜線維の張力によって歯が支持されていた。生体における正確な応力分布を知ることは現在のところ不可能であるが、垂直荷重によって血管や神経の多い根尖部に応力が集中することは考え難いことから、線形解析より生体の挙動に近い非線形応力解析が妥当であると示唆された。

単純モデルよりも矯正モデルの解析結果が変位量、傾斜角度共に生体計測データに近似した。これは、節点が

要素の平面(surface)の内部へ嵌入しないという接触条件を設定したことによって、生体計測データの条件と近似したためと考えられる。

また、血管容積を超える体積歪を硝子様変性出現の条件にしたことによってlight forceとheavy forceの硝子化期の有無による歯の移動の違いを再現することができた。

## 結 論

本研究の結果より次のことが示された。

(1) 歯根膜要素を考慮した歯の移動の有限要素解析における非線形モデルの荷重—変位曲線は過去の報告(生体計測)の非線形挙動と近似していた。

(2) 歯根膜の物性を線形解析で行った場合、歯に加わる荷重の増加に伴い、線形解析結果の変位量が非線形解析結果よりも大きく認められた。さらに、非線形解析では荷重に対する応力分布図において、線形解析よりも引張応力が大きく認められ、線形解析と非線形解析の結果における違いが明らかになった。

(3) 歯根膜腔の狭窄と硝子様変性に伴う歯根膜の硬化を考慮することにより、heavy forceを付加した際にみられる硝子化期を予測することができた。さらに、light forceでは硝子化期が認められず比例的な移動様相を示した。このことよりlight forceとheavy forceにおいて、歯の移動の生物学的過程による長期的な歯の移動様相の違いを推測することができた。

(4) 単純モデルと矯正モデルのリモデリング解析の変位量に大きな差があった。変位量の大きな単純モデルよりも、接触関係を組み込んだ矯正モデルのリモデリング解析結果が、過去の報告と近似していた。このことから、ワイヤーとブラケットの接触関係を力学モデルに組み込むことにより、より現実に則したシミュレートが可能になった。

以上より、歯根膜要素を考慮した非線形有限要素解析を行うことにより、矯正学的歯の長期的な移動のシミュレーションの有効性が示唆された。



岡 由紀恵

北海道医療大学歯学部口腔構造・機能発育学系歯科矯正学分野

平成22年 3月 北海道医療大学歯学部卒業

平成27年 3月 北海道医療大学大学院歯学研究科博士課程修了

平成27年 4月 北海道医療大学歯学部口腔構造・機能発育学系歯科矯正学分野  
任期制助手