

論 文 要 旨

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

平成 26 年度

北海道医療大学大学院歯学研究科

岡 由紀恵

【目的】

矯正治療のコンピュータ・シミュレーションは、至適矯正力の解明や治療メカニクスの開発、治療期間の短縮や予知性向上といった重要課題に大きく貢献する新たな手法として期待されている。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（リモデリング）の二段階から成ると考えられている。前者はほぼ純粋な力学過程であり、近年の構造解析の進歩と相まって数多くの研究が成されてきた。しかし、歯根膜の複雑、微細な組織構造を忠実にモデル化することは困難であることから、過去の報告の多くは平均的な物性に基づく線形解析で、結果的には初期変位を模倣するに留まっている。一方後者の生物学的過程では、力がある水準を超えると歯根膜に硝子様変性を生じ、かえって歯の移動が停滞するなど、力学単独では説明できない側面を有している。また、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、骨の吸収速度、添加速度の定量化にも至っていないことから、現時点では実用性の高いシミュレーションは困難とされている。

演者らは、①歯根膜の構造的特徴をモデル化し、歯の非線形挙動を忠実に再現すること、②歯周組織のリモデリングに関して適切な力学モデルを見出すこと、③実用性に鑑み、ワイヤーのたわみやワイヤーとブラケットの接触・摩擦を組み込むことを目的として、非線形有限要素法に基づく新たな解析手法の研究を進めてきた。今回は、臨床的に頻度の高いスライディング・メカニクスによる上顎犬歯の遠心移動を想定し、「歯根膜の組織内圧（静水圧）の上昇による循環障害が硝子様変性をもたらす」という仮説の下で、荷重の大小が歯周組織のリモデリングや歯の移動に及ぼす影響を解析したので、その概要を報告する。

【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製した。歯根膜のモデル化に際しては、要素を線維と実質とに分け、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。歯根膜実質には血管含有量に応じた体積弾性率を付与し、静水圧の計算に供した。まず予備的に、矯正装置のないモデル（以下、単純モデル）の変位挙動によりモデル化の妥当性を検証した。次に矯正装置を装着したモデル（以下、矯正モデル）として、単純モデルの歯冠唇側面にブラケット（0.022inch スロット）を装着し、ワイヤー（0.016×0.022inch）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。リモデリングの解析は次の3ステップを基本とした。まず第1ステップでは、歯の変位が始まり最初の応力平衡に至るまでを解析し（歯の初期変位）、その際の歯根膜の実質に生じる静水圧から硝子様変性の発生部位を決定した。第2ステップでは、前ステップの最終変形状態を継承し、硝子様変性の有無に応じて歯根膜の「厚さ」単独または「厚さと物性」の双方を自動修正するとともに、矯正装置以外の内部応力を初期化した（リモデリング過程）。第3ステップでは、外荷重と第1ステップで生じた矯正装置の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ステップを繰り返した。解析には、汎用プログラム MSC. MARC-Mentat2012 (MSC ソフトウェア社) を使い、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自製プログラムを組み込んだ。繰り返し増分計算にはアップデート・ラグランジェ法を用いた。

【結果および考察】

予備解析では、モデルの荷重-変位曲線は過去の報告（生体計測）に一致し、モデル化の妥当性が確認された。一方、歯根膜の応力分布は過去の報告（線形解析）とは大きく異なり、側方荷重下では牽引側の引張が圧迫側の圧縮より顕著に高かった。また、垂直荷重下でも歯根側面の引張が根尖の圧縮を上回り、主に歯根膜線維の張力によって歯が支持されていることが明らかとなった。

歯根膜の「厚さ」のみを自動修正したリモデリング解析では、第1ステップで歯は捻転しつつ遠心に傾斜し、接触判定も正常に行われた。歯根膜の硝子様変性は、50 g 以下の light force ではわずかな領域に留まるものの、荷重が増大するほど領域が拡大し、100 g 以上の heavy force では圧迫側のほぼ全域に達した。第2ステップ以降では、light force、heavy force とともに歯はさらに遠心に傾斜し、歯冠部の遠心移動量は時間とともにほぼ線形に増大するが、ワイヤー反力がある水準に達すると歯の移動は急激に減速した。その間の変位速度は荷重が大きいほど大きい、その差は小さかった。歯根膜の「厚さ」とともに硝子様変性に伴う「物性」の変化（弾性率の上昇）を導入した解析では、heavy force の初期にいわゆる移動停滞期（hyalinization period）が出現し、その変位様相は過去の報告（生体計測）に一致した。以上から、heavy force の下での歯根膜の硝子様変化は歯根膜実質の静水圧の上昇が誘因となっていること、また、いわゆる移動停滞期は歯根膜腔の狭窄と硬

化が原因であることが示唆された。

【結論】

heavy force 下で歯根膜圧迫側に見られる硝子様変性は、歯根膜実質の静水圧の上昇が力学的誘因あることが示唆された。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で、heavy force に見られる移動停滞期 (hyalinization period) が再現された。以上より、矯正学的歯の移動のシミュレーションに対する実用化の可能性が示された。