

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(Quinn & Yoshikawa, 1985; Ren et al., 2004). 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(野田ら, 2000).

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(Proffit et al., 2012; 小林, 2014). 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(Mühlemann, 1954; Picton, 1963; Göllner et al., 2010). 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.

そこで本研究の目的は、骨リモデリングを考慮した長期的な歯の移動について、以下の点を明らかにすることである.

(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)単純モデルとの解析結果の違いを明らかにすること.

さらに、長期的な矯正学的歯の移動に関する、歯根膜要素を考慮した非線形有限要素解析の意義についても併せて考察した。

【資料および方法】

日本人の解剖学的データ（上条，1962）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（Mühlemann, 1954; Picton, 1963; Göllner et al., 2010）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（0.022 inch スロット）を配置し、ワイヤー（0.016 inch×0.022 inch）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サブルーチン（作成者：神奈川歯科大学顎顔面外科学講座，小林優）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。

【結果および考察】

歯根膜の物性設定の検証において、モデルの非線形な荷重－変位曲線は過去の報告（生体計測）に近似していた（Mühlemann, 1954; Picton, 1963; Göllner et al., 2010）。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。

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た．一方 **light force** を付加した解析では比例的に歯が移動した．その変位様相は過去の報告 (Hayashi et al., 2007) と近似した．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．これは矯正装置の接触関係があると考えられ，矯正モデルの歯の変位量が過去の生体計測データ (Hayashi et al., 2007) の値に近似していた．

【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，より現実に近い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．

【文献】

Göllner M, Holst A, Berthold C, Schmitt J, Wichmann M, Holst S. Noncontact

- intraoral measurement of force-related tooth mobility. Clin Oral Invest 14: 551-557, 2010.
- Hayashi K, Uechi J, Lee SP, Mizoguchi I. Three-dimensional analysis of orthodontic tooth movement based on XYZ and finite helical axis systems. Eur J Orthod 29: 589-595, 2007.
- 上条雍彦. 日本人永久歯の解剖学第 1 版, アナトーム社, 東京, 1962, 93-94, 166-173.
- 小林優. 矯正臨床に関わる歯周病学的背景—歯根膜のバイオメカニクス・前. J Orthodontic Practice 3: 37-45 2014.
- Mühlemann HR. Tooth mobility changes through artificial alteration of the periodontium. J Periodontol 25: 199-202, 1954.
- 野田晃司, 吉井妙子, 中村芳樹, 桑原洋助. 至適矯正力を多様な歯の移動条件から評価する研究 (第 1 報): 傾斜移動を行った際の歯の移動量, 歯根吸収, 変性組織量による比較. Orthod Waves 59: 329-341, 2000.
- Proffit WR, Henry WF, David M. Contemporary orthodontics. 5th ed. Elsevier: 2012, p279-286.
- Picton DCA. The effect on normal vertical tooth mobility of the rate of thrust and time interval between thrusts. Arch Oral Biol 8: 291-299. 1963.
- Quinn RS, Yoshikawa K. A reassessment of force magnitude in orthodontics. Am J Orthod 88: 252-260, 1985.
- Ren Y, Maltha JC, Van 't Hof MA, Kuijpers-Jagtman AM. Optimum force magnitude for orthodontic tooth movement: a mathematic model. Am J Orthod Dentofacial Orthop 125: 71-77, 2004.