

研究者：沼崎 研人（所属：東北大学大学院歯学研究科 頸口腔矯正学分野）

研究題目：歯科用磁性アタッチメントの応用による高精度な埋伏歯牽引 3D デジタルシミュレーションの開発

目的：

東北大学病院では近年、埋伏歯を有する小児患者数が増加している。これまで、埋伏歯牽引にはエラスティックが用いられてきたが、エラスティックは経時に弾性力が低下するため牽引力が不安定であり、正確な牽引力を計測することが難しい。そのため、コンピュータシミュレーションによる埋伏歯の牽引方向の予測が非常に困難であった。

そこで、磁石の埋伏歯牽引への応用を着想した。磁石の強さで正確に牽引力を調節でき、位置を変えれば牽引方向の制御も可能となるため、エラスティックより有利な点があると考えた。これまで、矯正歯科治療に磁力を用いた研究は行われてきたが、磁石が大きい、口腔内で腐食する、漏洩磁場による健康への懸念といった問題が有り、実用には至らなかった。近年、歯科用磁性アタッチメントの開発が進み、磁気回路を持った磁石構造体が登場した。磁石と比べて、磁石構造体は小型で大きな吸引力を持ち、また、腐食や漏洩磁場の問題もほとんどない。しかしながら、歯科用磁性アタッチメントを歯の移動に応用した研究は現在まで行われていない。

本研究では、有限要素法解析により埋伏歯牽引の高精度な3Dシミュレーションを行い、そこに歯科用磁性アタッチメントを組み込むことで、精度の高い矯正歯科治療の実現を目指す。

対象および方法：

1. 解析環境

本研究に用いた解析環境について、解析モデルの構築は、汎用有限要素プリポストプロッサー（Patran 2013.1, MSC software）を用い、解析には、汎用非線形構造解析ソルバー（Marc 2023.4.0, MSC software）を用いた。

2. 埋伏歯の有限要素モデル化

実験モデルには、埋伏が多く認められる上顎犬歯を想定した。口腔内スキャナー（i700 オーラルスキャナ、Medit）を使用して模型歯（ニッシン社）をスキャンし、模型歯の形状データをSTLフォーマットにて作成した。STLフォーマットにて作成されたデータを前述の汎用有限要素プリポストプロッサーにインポートし、三次元有限要素モデルの構築を行った（図1）。

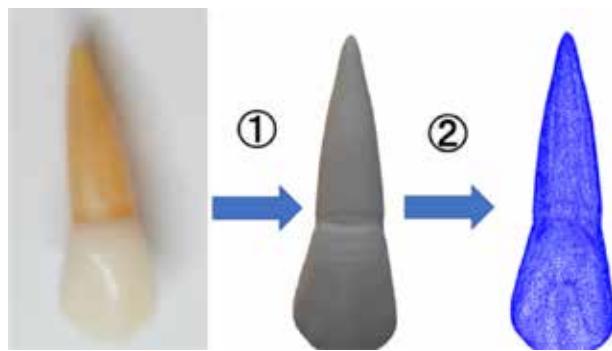


図1 埋伏歯の有限要素モデル化

3. 有限要素解析条件

(1)力学的物性値

解析モデルの力学的物性値は表1に示したように設定した。

(2)境界条件

①荷重条件

解析に用いた荷重条件は、荷重部位を上顎犬歯尖頭に設定し、荷重方向はZ軸方向に強制変位で-1.0 mm付与した。

②拘束条件

拘束条件は、上顎犬歯歯根根尖部をX、Y、Z方向に完全拘束とした。

(3)解析条件

傾斜(0°、30°、60°)した上顎犬歯にZ軸方向に負荷を加えた際の応力を評価する。

表1 力学的物性値

	ヤング (Mpa)	ポアソン比
象牙質	18,700	0.35

4. 歯科用磁性アタッチメントの引張力測定

埋伏歯の牽引に使用予定の歯科用磁性アタッチメント(Physio Magnet 5213、モリタ)の引張力(吸引力)をISO 13017(歯科用磁性アタッチメント)の規定する維持力測定装置を用いて測定した。取得したデータから引張力—移動距離曲線を作成した。

結果および考察：

1. 模型歯の三次元有限要素モデル化

本研究では、口腔内スキャナーによる模型歯スキャンデータから三次元有限要素モデルを生成した(図1)。一般的には、CT撮影から得られたDICOMデータをSTLデータに変換し、歯根のセグメンテーションを行ってからシミュレーションを行うなど複雑な作業工程を経る必要があ

る^{1、2)}。一方で、口腔内スキャナーは CT に比べて精度の高いデータを取得でき、スキャンデータを迅速に STL データに変換できるため、解析モデルの作成が容易である。本研究では、上顎犬歯のみに主点を置いたことから、口腔内スキャナーを使用した模型歯のモデル化が非常に有効であり、高精度なスキャンデータを取得することができた。一方で、口腔内スキャナーによるスキャンデータは高精度である故に三次元有限要素モデルを生成した際の要素数が膨大となり、シミュレーション動作への負荷が非常に大きくなつた。今回は歯の物性を象牙質のみ付与することで負荷の増加に対応したが、本来であればエナメル質やセメント質等の物性を付与する必要性がある。今後は埋伏歯牽引のシミュレーション精度に影響が最小限となる範囲でモデル構造の簡素化および要素数の削減を進めることで、有限要素モデルへのエナメル質、象牙質、セメント質等の物性の付与を可能にし、適切なモデルサイズを検討していく。

2. 上顎犬歯牽引の有限要素解析

上顎犬歯は上顎骨内に傾斜した状態で埋伏しているケースが多い。そのため、上顎犬歯歯軸を 0° 、 30° 、 60° と傾斜させ、尖頭を Z 軸方向に牽引した際の歯への応力分布を有限要素解析した。その結果、どの傾斜でも牽引している尖頭と根尖に強い応力の分布がみられた（図 2）。本解析結果は、埋伏犬歯の牽引において歯冠部全体に応力が集中し、根尖部への応力集中が認められなかった Prasad らの報告とは異なつた²⁾。その原因として、本研究では上顎犬歯のみを解析対象として根尖部を拘束し、尖頭部を牽引する条件で有限要素解析を行つたためと考えられる。埋伏している上顎犬歯は上顎骨内に存在しており、歯冠部は顎骨と接触した状態で牽引が進むことから、歯冠部では骨に接している面全体に応力が発生すると考えられる。また、歯根が拘束された状態は実際の牽引では生じないことから、拘束条件を再検討する必要がある。今後の解決策として、上顎犬歯が上顎骨内に含まれた状態のモデルを作成、拘束部位を上顎骨頂部とし、上顎犬歯モデル部位が拘束されないようにすることで、より正確な応力解析を目指していく。

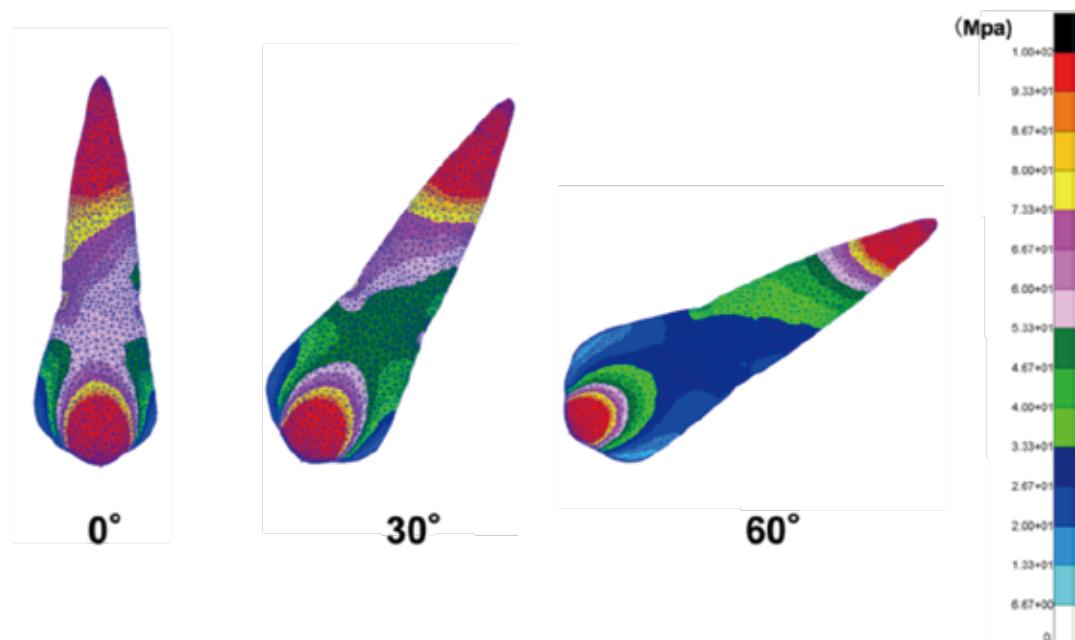


図 2 上顎犬歯牽引の有限要素法解析結果

3. 歯科用磁性アタッチメントの引張力測定

歯科用磁性アタッチメントの引張力一移動距離曲線を図3に示す。磁石構造体とキーパーが離れる瞬間を移動距離0としている。両者が離れると速やかに引張力が低下する様子が観察された。このことは、磁石構造体には漏洩磁場がほとんどないことも意味している。歯科用磁性アタッチメントは距離が離れるほど牽引力が弱くなるが、エラスティックは距離が離れるほど強くなる。このことから、歯科用磁性アタッチメントとエラスティックを組み合わせることで両者の弱点を補える可能性がある。

今後の計画として、歯科用磁性アタッチメントとエラスティックを組み合わせ、一定の力で牽引し続ける装置の開発を目指す。矯正歯科治療において、歯を一定の力で動かすことで歯根吸収を抑制しつつ歯を移動することができ、この装置の開発は高精度な3Dシミュレーションの実現に寄与すると考えられる。

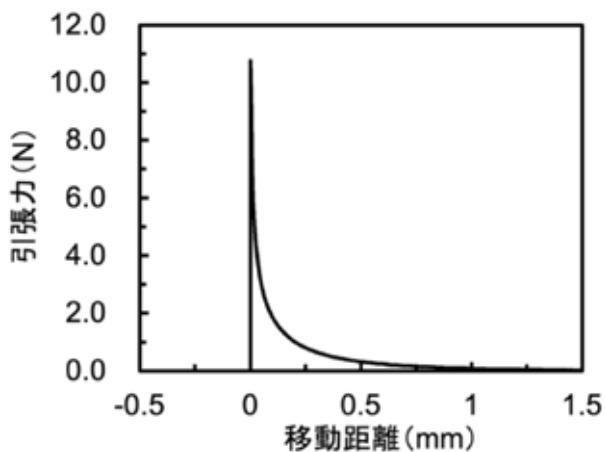


図3 歯科用磁性アタッチメントの引張力曲線

参考文献

- 1) Nagendraprasad, K. et al.; Displacement and periodontal stress analysis on palatally impacted canine - A finite element analysis., Indian J Dent Res. 2019; 30(5): 788-793.
- 2) Prasad, K.N. et al.; Orthodontic displacement and stress assessment: A finite element analysis., World J. Dent. 2017; 8: 407-412.

成果発表：(予定を含めて口頭発表、学術雑誌など)

成果発表としては、日本磁気歯科学会学術大会での学術発表を予定している。また、本研究の結果は歯科矯正学または歯科理工学に関連する学術雑誌にて発表予定である。