

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K18765

研究課題名（和文）骨リモデリングの最適化アルゴリズムを組み込んだ長期的な歯の移動の可視化と移動予測

研究課題名（英文）Visualization of long-term tooth movement based on application of optimized algorithm to bone modeling

研究代表者

近藤 崇伸（Kondo, Takanobu）

長崎大学・医歯薬学総合研究科（歯学系）・客員研究員

研究者番号：20814106

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ラットを用いて実験的歯の移動を行うと同時に有限要素モデルを構築し、歯根膜外側面上の各節点の応力値ならびに変位量を出力した。解析した歯根膜における静水圧応力値と骨リモデリング量との関係を調べた結果、歯根膜応力の中で、骨添加量と最も強い相関関係であったものは、最大主応力値であった。また、歯根膜に対する最大主応力が増加すると骨添加が増加することが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の目的は矯正力負荷時の歯根膜に生じる応力および歯根周囲の骨密度と、骨改造速度の関係を明らかにし、骨改造を経た長期的な歯の移動予測を可能とすることである。歯根膜応力と骨改造の関係に関する研究は、歯根膜を線形材料として直線解析しているものがほとんどで、生体特有の非線形性が考慮されていない。そこで、本研究では生体データとしてラットを用いた実験的歯の移動とともに、同じラットから作成した有限要素モデルにおける歯の移動シミュレーションを併せて行い、これらの結果が一致するようなシミュレーションのパラメータを求める。本研究結果は臨床に応用しやすいことも従来の研究と比較して大きな利点である。

研究成果の概要（英文）：In this study, an experimental tooth movement was performed in rats, and at the same time, a finite element model was constructed to output the stress values and displacements at each node on the outer surface of the periodontal ligament. The relationship between the hydrostatic stress values in the analyzed periodontal ligament and the amount of bone remodeling was examined. The maximum principal stress value showed the strongest correlation with the amount of bone addition among the periodontal ligament stresses. It was also confirmed that bone apposition increased as the maximum principal stress on the periodontal ligament increased.

研究分野：歯科矯正学

キーワード：有限要素法 人工知能 歯の移動 歯槽骨のリモデリング

1. 研究開始当初の背景

マルチブラケット法は、現在の矯正臨床で最も多く利用されているテクニックであるが、その治療手順となるレベリング・空隙閉鎖・歯軸のコントロールまでの流れは、この半世紀以上ほとんど発展していない。理想的な矯正治療とは、歯根吸収や歯周組織の損傷を引き起こすことなく、可能な限り短期間で歯の移動を達成することである。これを実現するには最適な力系を歯に与えることで、歯に無駄な動きを生じさせることなく、矯正治療のゴールとなる目標位置へ最短距離で正確に歯を移動することが必要である。そのためには、歯の移動予測から力系（フォース・システム）を最適化し、治療手順を再構築した上で、新たな矯正治療メカニクスとして確立する必要がある。

これまでの歯の移動予測に関する研究では、3つの問題点があると考えられる。(1)有限要素法等の数値解析での歯の初期変位を繰り返すことで移動予測をしている。(2)歯根膜内での歯の移動のシミュレーションに限定され、骨改造の生体データが組み込まれていないこと。(3)歯根膜応力値と骨改造速度の関係が、線形シミュレーションとなっていること。これらの問題によって、歯の長期移動予測としては再現性が不十分である。今回、歯の移動予測の手法として、歯周組織(歯根膜・歯槽骨)に発生する応力分布と歯の移動の関係に、時間軸と非線形解析を加えた骨改造解析が必要であると考えた(図1)。

そこで矯正力負荷時の歯根周囲の骨改造の速度を、歯根膜の応力分布・歯槽骨密度との関係として明らかにし、非線形シミュレーションとして組み込むことで、骨改造の過程を含めた長期的な歯の移動の予測が可能になると考えられる。



図1. 骨改造と長期的な歯の移動モデルおよび非線形数値計算パラメータ

2. 研究の目的

本研究の目的は矯正力負荷時の歯根膜に生じる応力（メカニカルストレス）および歯根周囲の骨密度と、骨改造速度の関係を明らかにし、骨改造を経た長期的な歯の移動予測を可能とすることである。歯根膜応力と骨改造の関係に関する研究は、歯根膜を線形材料として直線解析しているものがほとんどで、生体特有の非線形性が考慮されていない。つまり、物理量に対する生体の反応が直線的であれば、矯正力が2倍になれば骨改造速度を含めた歯の動きも2倍になる必要があるが、臨床的にはそのような現象は観察されない。

そこで、本研究では生体データとしてラットを用いた実験的歯の移動とともに、同じラットから作成した有限要素モデルにおける歯の移動シミュレーションを併せて行い、これらの結果が一致するようなシミュレーションのパラメータを求める。これには、人工知能 (AI) 技術を適用し、最適化問題を解く手法として共分散進化戦略 (CMA-ES) を用い(図2)、生体での実験結果とシミュレーション結果の誤差を最小とする骨改造量、すなわち歯の移動量を計算するパラメータの最適化を行う。

このような手法は工学においては設計最適化や機械学習の分野で広く用いられているが、本研究の分野においては例がなく、高い独自性を持つ。また、本研究の結果からは歯の移動シミュレーションモデルそのものが得られるため、臨床研究に応用しやすいことも従来の研究と比較して大きな利点である。

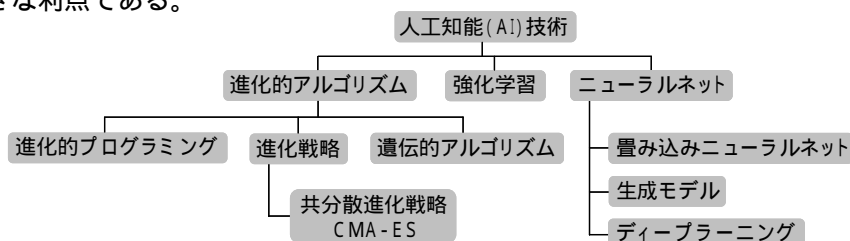


図2. 共分散進化戦略 (CMA-ES) の人工知能 (AI) 技術における位置づけ

3. 研究の方法

10 週齢ウィスター系ラット(雌)の第一臼歯に近心移動用コイルスプリングを装着し、実験的歯の移動を行う。牽引力は 5gf および 10gf とし、移動期間は 7, 14, 21, 28 日とする。移動様式としては、傾斜移動と歯体移動を行う。移動前後のマイクロ CT 画像を、3 次元画像造形編集ソフトウェア (Mimics、Materialize 社) を用いて 3 次元サーフェスデータへと変換する。移動前後のサーフェスデータを Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズムを使用して重ね合わせ、第一臼歯の 3 次元的な移動量 (回転量・並進量) を算出する。ラットを対象とした実験的歯の移動前のマイクロ CT データのボクセル値から骨密度を求め、マイクロ CT 上の座標と歯槽骨密度を対応づける。移動前のマイクロ CT データから 3 次元有限要素モデルを作成する。このモデルに実験的歯の移動と同一の矯正力を与え、有限要素解析を行うことで歯根膜応力を算出する。有限要素解析ソルバーには Marc (MSC Software 社) を使用する。この長期シミュレーションによる歯の移動結果が、ラット生体での実験的歯の移動で得られた 3 次元的な移動量と一致するような、骨改造量、すなわち歯の移動量を計算する最適なパラメータを探索する。最適なパラメータの探索には、人工知能 (AI) 技術を適用し、最適化問題を解く手法として共分散進化戦略 (CMA-ES) を用いる。得られた骨密度と応力から、単位時間当たりの骨改造量を計算する。計算した骨改造量を用いて有限要素モデルの歯槽骨部分を変形させ、新たな歯根膜の応力分布を得る。この操作を繰り返すことで長期的な歯の移動シミュレーションを行う。パラメータ最適化で得られた骨改造のパラメータを用いてラット別個体についてのシミュレーションを行い、実際の移動量との誤差を計測し、パラメータ最適化を繰り返す。骨改造の最適パラメータを、ヒト有限要素モデルに適用し、長期的な歯の移動シミュレーションを行う。次に、患者を対象に本シミュレーションに適用したものと同一の矯正治療メカニクスを用いて治療を行う。治療前後に作製した歯列模型を対象に、高速 3 次元形状計測装置を用いて歯の移動動態を計測し、シミュレーション結果と治療結果を比較し、本法の妥当性を検証する。

4. 研究成果

解析した歯根膜における静水圧応力値と骨リモデリング量との関係を図 3 に示す。スピアマンの順位相関係数は 0.382 で、これらの間には有意に相関関係があった。また、歯根膜応力の中で、骨添加量と最も強い相関関係であったものは、最大主応力値であった ($p < 0.01$, $r = 0.443$) (図 4)。

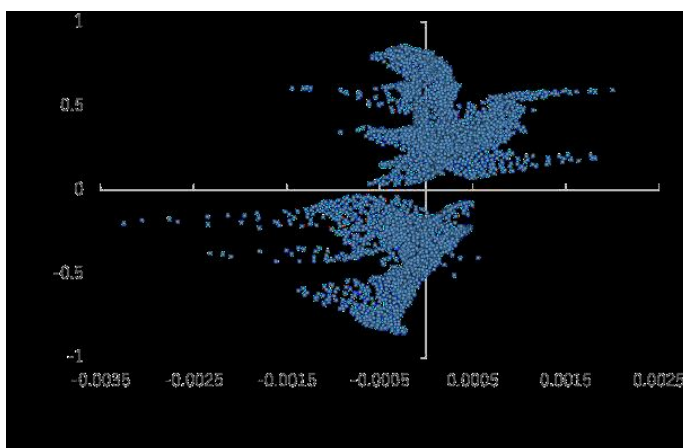


図 3 静水圧応力値と骨リモデリング量との関係

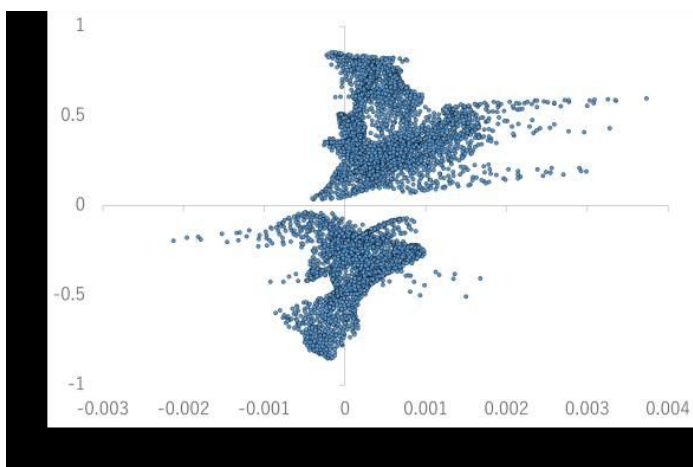


図 4 最大主応力値と骨添加の関係

歯根膜に対する最大主応力が増加すると、骨添加が増加することが確認された。ラットの歯根膜静水圧応力値と骨リモデリング量は、有意に相関していることが確認された。加えて最大主応力値が骨添加量に影響を与えることも示唆された。しかし、今回解析した静水圧応力値が 0 付近で、牽引側において骨吸収を示す部位や圧縮力側において骨添加を示す部位が観察された。今回の実験的歯の移動では第一臼歯の近心根が近心傾斜によって上顎洞底に大きく陥入するため、移動量は純粋な骨吸収量を表しておらず、単に骨が存在しない部位に向けて歯が移動した可能性が考えられた。歯根膜応力値と骨リモデリング量の関係を正確に評価するためには、近心根歯根尖周囲節点の応力値と骨リモデリング値の再評価と有限要素解析するラットのサンプル数を増やすことが必要と考えられる。

現在、生体データとしてラットを用いた実験的歯の移動とともに、同じラットから作成した有限要素モデルにおける歯の移動シミュレーションを併せて行い、これらの結果が一致するようなシミュレーションのパラメータを共分散進化戦略 (CMA-ES) を用いて求めている。今後、生体での実験結果とシミュレーション結果の誤差を最小とする骨改造量、すなわち歯の移動量を計算するパラメータの最適化を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 井野愛理、佛坂斉社、佛坂由可、近藤崇伸、有菌ケイラ、橋本恵、吉田教明
2. 発表標題 塩化リチウムによる歯槽骨の形態変化、歯の移動および歯根吸収への影響 - ラット実験モデル -
3. 学会等名 第80回日本矯正歯科学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近藤崇伸、佛坂斉社、濱中僚、近藤愛理、吉田教明
2. 発表標題 歯の移動様式による抵抗中心の移動量と歯槽骨吸収量への影響
3. 学会等名 第81回日本矯正歯科学会学術大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------