

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：30110

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24659915

研究課題名(和文) 効率的な歯の移動様式の確立に向けて—最適な矯正力と作用様式について—

研究課題名(英文) Establishment of the effective force system for orthodontic tooth movement.

研究代表者

溝口 到 (Mizoguchi, Itaru)

北海道医療大学・歯学部・教授

研究者番号：20200032

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、矯正治療用口蓋インプラントを不動点として利用し、口腔内の直接計測が可能な光学印象システム(歯型のデジタル化)を用いた高精度な三次元計測データを用い、新しい表現系(動きの表現や計算方法)を用いた矯正学的歯の移動の三次元的解析システムを構築することによって、臨床的に曖昧であった歯の移動の法則性および最適な矯正力について明らかにすることである。また最新の有限要素法解析を用いた歯の移動シミュレーションモデルの開発も合わせて行った。本研究で明らかにされた解析結果は、矯正臨床における最適な力系の設計に関して科学的な根拠を与えらるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Propose of this study was to establish a novel three-dimensional analysis system based on newly developed optical scanning system, new calculating system of rigid body in the space, and reconstruction of three-dimensional morphology of cranial base. Furthermore, the latest finite element method was used to establish the basic behavior of orthodontic tooth movement. The results of this study provide scientific backing for the force system of orthodontic treatment in practice.

研究分野：歯科矯正学

キーワード：矯正的な歯の移動

## 1. 研究開始当初の背景

矯正歯科臨床において optimal occlusion を獲得するためには、三次元的に正確な歯の移動、最適な矯正力による効率のよい移動、および可久的に少ない歯周組織への為害作用が必要となってくる。しかし、矯正的な歯の移動が適用される個々の症例における歯列の状態は多様性に富んでおり、矯正装置による歯の移動様相や治療に用いるワイヤー選択、メカニクス等も大きく異なり、矯正力ひとつをみても、最適な力の大きさの科学的基準は明確にされていない。その1つの要因として考えられるのは、三次元的な歯の移動を正確に解析する手法が確立されていない事である。一般的に三次元的に剛体の移動を規定する場合、デカルト座標系 (XYZ 系) が用いられる。しかしながらデカルト座標系では、各軸の回転の順序および平行移動のタイミングにより各軸の回転角度や並進量が異なってくる。またより高度なオイラ角を用いた表現手法であっても、軸の回転順序に依存した回転角となる。多くのコマーシャルベースの解析ソフトウェアはその解析アルゴリズムを非公開にしており、どのような演算および計算が内部で行われているのか判断することができない。つまり、歯の移動を解析する際、異なった解析システムやソフトウェアを使用した場合、その結果を比較することは非常に困難である。もう一つの要因として、解析基準としての三次元的な不動点を口腔内に確立することが非常に困難である事があげられる。いくつかの研究では上顎の口蓋皺襞を不動の基準と仮定して解析が行われてきた。しかしながら歯の移動量が大きくなると口蓋部も変形し、基準としての精度が著しく低下する。上記のような問題点を克服するには、(1) 解析手法に Finite Helical Axis (FHA) 系を単独もしくは付加的に用い、(2) 解析基準としてオッセオインテグレーションが得られる歯科用インプラントを用

いることである。FHA は、剛体の移動を空間上の1つの軸の回転と軸に沿った平行移動で表現することができ、他の座標系に存在するような多軸回転の影響を排除することができる。FHA は単独でも用いることはできるが、他の座標系の妥当性確認として用いることもできる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、矯正治療用口蓋インプラントを不動点として利用し、新しい光学印象システムおよび三次元表現系を用いた矯正学的歯の移動の三次元解析システムを構築することによって、歯の移動様相の法則性、さらには最適な矯正力について明らかにすることである。

## 3. 研究の方法

### 平成 24 年度

#### 光学印象システムの開発・改良

本研究課題で開発する光学印象システムは白色光を用いるため、エナメル質表面の光の散乱を防止する何らかの表面処理が必要になる。本研究では、二酸化チタンを主成分とする表面処理剤を新たに開発し、その処理性能の向上を図る。また、スキャナーの検知像の動的なレジストレーションが可能なアルゴリズムの設計開発およびシステムへの実装を目指す。またシステム精度の客観的な評価には、ベイズ統計学的手法による誤差伝搬解析を行う予定である。

#### 被験者の選定と資料採得

歯の移動を解析するため、前歯部叢生を呈し初期治療において Ni-Ti ワイヤーによる歯の初期配列、および犬歯の遠心移動を行う症例を選択する。なお、移動前後での歯の移動の解析基準構造としてインプラント利用するため、口蓋インプラントを適用する上顎 maximum anchor の抜歯症例に限定する。解析予定の矯正力は、力の大き

さを変化させた持続的矯正力、断続的矯正力である。持続的矯正力は Ni-Ti 合金のクローリングコイルスプリング、断続的矯正力はスクリュー装置を用いて力系を設計する。力の適用直後から、最長で6か月間、1週間ごとに三次元スキャンを行い歯の移動データを蓄積する。

#### 新しい歯の移動解析システムの開発

まず、光学印象から得られた三次元形状モデルから解析対象とする歯を自動で分割可能なアルゴリズムを構築する。具体的には B ス プ ラ イ ン 基 底 関 数 と Self-modeling-regression(SEMOR)などの数値解析を用い、最適形状の予測と関心領域の分割を行う。分割された解析対象の歯は、口蓋インプラントの構造を基準に最小二乗法を用いて重合せを行い、空間における位置変化パラメータを算出する。この段階ではどのような座標系を用いても良い。次に、FHA 系を単独で用いる場合とデカルト座標系などの妥当性評価に付加的に FHA 系を用いる場合の2つの異なった設計を持つ解析システムを構築する。一般的に FHA 系は回転移動が非常に小さい場合は、測定誤差の影響を受けやすく、計算結果が不安定なる。よって FHA 系単独で解析システムを構築した場合、どの程度計測誤差を受けるのか、また空間変位マトリックスを正規化し直した場合の解析精度の検証を行う。また異なる座標系に補助的に FHA 系を組み込んだ場合の解析精度を検討する。また実際の運用を行う場合、無駄な計算処理をなくし効率的な解析が行えるようなシステムの構築を目指す。

#### 平成 25 年度以降

解析システム全体の誤差評価システム構築

本研究では、De Lange ら(1990)の FHA にお

ける計測誤差の関係式を三次元に拡張し、誤差評価システムに組み込んだ場合の有効性を検討する。統計言語 R およびベイズ統計学の BUGS for Windows などを用い、システムの全行程の総括的な精度検証を最新の統計学的手法を用いて行う予定である。

#### 本格的な資料の採得

口蓋インプラントを固定源にした症例を可能な限り追加し、さまざまな矯正治療における力系のデータを採得する。また、可能であればコーンビーム CT から歯根データを抽出し、歯の移動と力の大きさおよび歯根膜における力の分布を解析対象に追加する。コーンビーム CT のデータから歯および歯根のデータを正確に再構築するには、0.2 mm 以下の空間解像度が求められる。本研究ではさらに高い解像度での形状再構築像を用いた解析データの有効性の検証を行う予定である。

#### 歯の移動の法則性、最適な矯正力とメカニクスの検討

累積されたデータを基に、歯の移動の法則性、最適な矯正力と治療メカニクスの評価を各種の統計学的手法を用いて検討する。また最新の生物学的なデータと本研究課題で得られたデータの整合性を今後検討する必要も考えられる。

#### 4. 研究成果 平成 24 年度

本研究課題で開発する光学印象システムは白色光を用いるため、エナメル質表面の光の散乱を防止する何らかの表面処理が必要なり、二酸化チタンを主成分とする表面処理剤を新たに開発し、その処理性能の評価を行った。歯表面の処理層の厚さをいかに薄くするかということが非常に重要であり、塗布器材に改良を加え、より効果的な塗布が行なえるようになった。また、スキャナーの検知像の動的なレジストレーションが可能なアルゴリズム

の設計開発を開始したが、システムへの実装は今後の課題として残っている。システム精度の客観的な評価では、ベイズ統計学の手法による誤差伝搬解析を行うが、その全段階として高精度のコーンビームCTによる三次元仮想モデルとの比較を行った。本研究において改良を試みている光学スキャナーの精度は高く、その他の非接触三次元計測器との比較においても十分な精度と信頼性を明らかにすることができた。歯の移動解析システムでは、Finite Helical Axis系を用いた新しいアルゴリズムを開発したが、歯の移動量が比較的小さい場合の変換マトリックスの正規化に対するより正確なアプローチ法の開発が必要なが分かってきた。

#### 平成25年度

解析システム全体の誤差評価システム構築として、二次元誤差伝搬の関係式を三次元に拡張し、誤差評価システムに組み込んだ場合の有効性を検討した。統計言語Rおよびベイズ統計学などを用い、システムの全行程の総合的な精度検証を最新の統計学的手法を用い、ある程度の精度をもったシステムの構築を行うことができた。昨年から引き続き、歯科用コーンビームCTデータからの仮想モデルの構築と精度検証を行った。高精度のモデル化においては被ばく線量が問題となり照射時間を短縮した場合における最適な再構築の手法に関する解析を開始した。歯の移動解析システムでは、Finite Helical Axisを用いた新しいアルゴリズムを昨年開発したが、歯の移動量が比較的小さい場合の変換マトリックスの正規化に対するより良いアプローチ法に関して、ある程度の精度で正規化が行なえるようになった。

#### 平成26年度

すでに報告されている実際の患者における矯正学的歯の移動の実測値データを参考に、骨リモデリングを考慮した長期的な矯正学的歯の移動を非線形有限要素法にて解析

を行なった。また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、「歯根膜実質の血管容積をこえる体積歪による循環障害が硝子様変性をもたらす」との仮説のもと、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について解析した。長期的な歯の移動に関する新たな解析手法の開発の予備解析としては、歯根膜の構造的特徴のモデル化と過去に報告された歯の初期変位を参考にした歯の非線形挙動の忠実な再現、および歯周組織のリモデリングに関する適切な力学モデルの作成を行った。次にリモデリングモデルに対する実用性に鑑みたワイヤーのたわみやワイヤー・ブラケット間の接触関係の力学モデルの組み込み、矯正装置を装着したモデル解析と過去の報告との歯の移動挙動の比較を行い、用いた解析手法の妥当性について検討した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

1) Hayashi K, Chung O, Par S, Seung-Pyo Lee S-P, Sachdeva RCL, Mizoguchi I. Influence of standardization on the precision (reproducibility) of dental cast analysis using virtual three-dimensional models. Am J Orthod Dentofacial Orthop 147(3): 373 -380.2015, doi: 10.1016/j.ajodo.2014.11.015. (査読有)

2) Hayashi K, Sachdeva AU, Saitoh S, Lee SP, Kubota T, Mizoguchi I. Assessment of the accuracy and reliability of new 3-dimensional scanning devices. Am J Orthod Dentofacial Orthop 144(4): 619-625.2013, doi: 10.1016/j.ajodo.2013.04.021. (査読有)

3) Hayashi K, Saitoh S, Mizoguchi I. Morphological analysis of the skeletal remains of Japanese females from the Ikenohata-Shichikencho site. Eur J Orthod 34(5): 575-581.2012 (査読有)

4) Hayashi K, Hayashi M, Reich B, Lee SP, Sachdeva A, Mizoguchi I. Functional data analysis of mandibular movement using third-degree b-spline basis functions and self-modeling regression. Orthodontic Waves 71(1): 17-25.2012 (査読有)

〔学会発表〕(計 3 件)

1) 岡由紀恵, 小林 優, 林 一夫, 溝口 到 . あたらしい矯正学的歯の移動の非線形三次元シミュレーションシステム . 北海道医療大学歯学会第 32 回学術大会定例講演会 . 2014 年 2 月 札幌

2) 中尾友也, 鳥谷奈保子, 林 一夫, 溝口 到 . 咬合挙上による咬合変化が成長期ラット関節円板の versican の発現に及ぼす影響 . 第 26 回 日本顎関節学会学術大会 . 2013 年 7 月 東京

3) 内澤 朋哉, 林 一夫, 溝口 到 . 幾何学的形態解析におけるブートストラップ法を用いた主成分分析での因子負荷量の推定 . 第 72 回日本矯正歯科学会大会 . 2013 年 10 月 松本

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :

番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

〔その他〕  
ホームページ等

6 . 研究組織  
(1) 研究代表者  
溝口 到 (Mizoguchi, Itaru)  
北海道医療大学・歯学部・教授  
研究者番号 : 20200032

(2) 研究分担者  
林 一夫 (Hayashi, Kazuo)  
北海道医療大学・歯学部・准教授  
研究者番号 : 20316269

(3) 連携研究者  
( )

研究者番号 :