

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：32710

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26462960

研究課題名(和文) 個別力学シミュレーションに基づいた補綴装置の設計最適化システムの構築

研究課題名(英文) Development of prosthetic devices based on the individual simulation of mechanical design optimization system

研究代表者

平井 真也 (Hirai, Shinya)

鶴見大学・歯学部・助教

研究者番号：20339815

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：補綴装置の設計は術者の技術や経験に委ねられ、口腔内にて発生する様々な要因について定量的な評価が欠落している。そこで、本研究で高精度な咬合接触解析システムを開発し、個別別の力学的シミュレーションを可能とすることで患者個々に対する補綴装置の設計最適化システムの構築を行った。咬合接触は透過法を用いて輝度値と咬合採得材の厚さを変換するキャリブレーションカーブを作成することで定量化が可能となり、二次元画像上で咬合力のデータと統合した、歯列形態上に咬合状態のデータを投射統合することにより個別別有限要素解析モデルを作成し、補綴装置や残存組織の力学的シミュレーションを行うことが可能であった。

研究成果の概要(英文)：Design of prosthetic devices is ordained to castor technology and experience on a variety of factors that occur in the oral cavity, quantitative A missing evaluation. Be there, and in this study developed precise occlusal contact analysis system and simulation of individual prosthetic devices for patients with individual design optimization system. The occlusal contacts by creating calibration curves using the transmission method to convert the brightness and occlusion samples obtained materials thickness of quantitative and integrated data of bite force on a two-dimensional image. Created by integrating occlusion data projection on the dental arch forms the individual finite element analysis model. This enables simulation of prosthetic equipment and remaining tissue is possible.

研究分野：歯科補綴学

キーワード：有限要素解析 三次元モデル 咬合接触 咬合力

## 1. 研究開始当初の背景

歯科治療において補綴装置の設計や装着した補綴装置の予後は患者のQOLに大きく関わる重要な要件の1つである。補綴装置の設計は、残存組織の形態や患者の年齢などを考慮にいれて行われており、術者の経験や技術に大きく依存している。特に、補綴装置装着後は咀嚼や噛みしめなどの外的荷重が補綴装置そのものだけでなく、残存の歯根や顎骨に対しても影響を与える。このような残存組織への応力状態を考慮に入れて補綴装置を設計することは非常に困難であり、高度な知識と技術が要求される。医療の均質化が求められている現在、客観的な力学的解析を行い、その結果に基づいた補綴装置の信頼性設計を行うことは有意義であると考えられる。

近年、有限要素解析を用いた力学的解析の研究において、補綴装置のさまざまなパターンを作成し、コンピューター上で最適な形状を提案する研究が行われている。これらの有限要素解析を用いた補綴装置の予後予測は、ブリッジのフレーム形態の設計や長期使用に耐える歯科材料の選択など、現在の臨床に大きな影響を与える有意義な研究として位置付けられる。しかし実際、臨床現場で治療する際には、それらのデータが個々の患者に必ずしも適応するとは限らない。つまり、歯や歯列の解剖学的形態、歯槽骨の状態、上下顎骨の大きさなど同じ形態を有する患者は存在しない。とくに有限要素解析においては咬合面形態および咬合接触部位・面積、咬合力の設定によって解析結果が異なることが知られている (Gomes et al. 2006; Dittmer et al. 2011; Benazzi et al. 2013)。また、歯科治療についても、それぞれの患者に対してカスタムメイドで行われることから、その多様性が高くなっている。そのため、個々の患者の予後を推定するためには、構造学的要件、材料学的要件、力学的要件、生物学的要件などが総括されなければならない。

## 2. 研究の目的

本研究では、高精度な咬合接触解析システムを開発し、個別別の力学的シミュレーションを可能とすることで患者ひとりひとりに優しい補綴装置の設計最適化システムを構築することを目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 咬合接触解析システムの構築

咬合接触の解析原理は、光源上にシリコンバイトを設置し、上方から撮影することで得られた画像を解析する透過法を用いた。まず、咬合採得材 (Correct Quick Bite, Pentron Clinical) を撮影し、画像から咬合接触部の厚さと面積を定量化するため、システムの基準を作成した。a) 厚さ: 校正基準として、規定された大きさの球の陰型を作製した。校正基準試料の作製には電磁式疲労・耐久試験

機 (サーボパルサ, MMT-101NV-10, 島津製作所) にスチール球 (直径 10 mm, JIS 規格 28 等級, 大旺鋼球製造) とスチール板を固定し、球-板間の距離を 0~200  $\mu\text{m}$  の範囲で 10  $\mu\text{m}$  間隔に規定し、21 種類の厚さの試料を作製した。開発した計測装置によりその陰型を撮影し、グレースケール変換と二値化処理を行うことで、輝度値を厚さに変換する式 (キャリブレーションカーブ) を算出した。b) 接触面積: 1 辺を 5 mm に規定したチェッカーフラッグ模様の OHP フィルムを撮影し、そのピクセル数と規定値の関係から、面積算出のための基準 (ピクセルサイズ) を作成した。

### (2) 咬合接触評価システムの妥当性の検証

仮想空間上で再現した球体の断面積をコントロールとし、透過法から算出した半球体試料の面積との比較を行うことにより、キャリブレーションカーブとピクセルサイズの検証を行った。試料の製作はキャリブレーションカーブの作成のときと同様の方法を用いて、最薄部の厚さが 20  $\mu\text{m}$  の試料を各 5 試料ずつ作製した。半球体試料の撮影および画像処理も先に示した方法と同様に行った。印象材厚さ 20~200  $\mu\text{m}$ 、10  $\mu\text{m}$  ごとに相当する輝度値をキャリブレーションカーブから求め、各輝度値から抽出されるピクセル数とそのピクセルサイズから、半球体試料の面積を算出した。

咬合接触定量化システムの特徴を調査するため、咬合器に装着した歯列模型に対して印象材を用いて咬合接触の記録を採り、上顎左側第一大臼歯にて咬合接触評価を行った。また、本評価法と咬合紙を用いた咬合検査法との比較を行った。

### (3) 個別別力学的シミュレーションを用いた補綴装置の設計最適化システム

咬合接触データを三次元有限要素解析の設定に利用できるように歯列の三次元モデルに咬合接触データの統合を行った。対象となる歯列石膏模型は、顎模型 STD28F-HDLA (松風) を、シリコンラバー印象材 (デュプリコン, 松風) にて印象採得し、超硬質石膏 (ニューフジロック, GC) を用いて作製した。歯列の三次元モデルは、三次元形状計測装置 (Optrace, 松風) を用いてデータを取得した。咬合採得したシリコンラバー印象材は、光源上に設置し透過法にて咬合接触状態をデジタル化した。歯列形態と咬合接触の統合は、仮想空間上に製作した歯列模型の三次元モデルを基準として咬合接触を抽出した透過光画像のスケールと位置関係を調節し、写真の撮影方向に対し、垂直に透過光画像を歯列模型の三次元モデルに投射することにより行った。

本手法による三次元的な咬合接触の再現性を検証するため、咬合採得したシリコン

ラバー印象材の三次元モデルから得た咬合接触状態をコントロールとし、比較を行った。検討項目はDeLongらの報告 (DeLong et al. 2002) を参考に咬合接触面積、咬合接触面積のオーバーラップ率、咬合接触部の重心の3項目とした。

#### (4) 臨床応用による信頼性設計の妥当性の検証

本手法にて臨床症例の有限要素解析モデルを作成し、咬頭嵌合位の咬合力による補綴装置および生体組織に生じる応力を解析した (図1)。本症例は習癖として Tooth Contacting Habit (TCH) やブラキシズムが認められ、強力な咬合力に耐えられる補綴装置として、上顎歯列には歯冠修復と可撤性義歯を装着する治療を施した。有限要素解析モデルは補綴装置・築造体・支台歯・歯根膜・骨から構成され、荷重条件はシリコンバイトと感圧シートによる咬合状態を入力し、拘束条件は骨のフランクフルト平面を完全固定、材料定数は表1のように設定した。

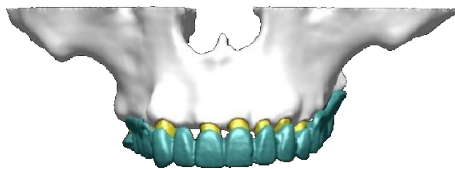


図1：患者固有の三次元形態モデル

表1：有限要素解析に用いた材料定数

モデル	ヤング率 (MPa)	ポアソン比
補綴装置	10780	0.30
築造体	20000	0.24
支台歯	18000	0.30
歯根膜	0.66	0.49
骨	13000	0.30

## 4. 研究成果

### (1) 咬合接触解析システムの構築

キャリブレーションカーブは  $y = 0.0013x^2 - 1.0752x + 189.95$  (厚さ 0~100  $\mu\text{m}$ )、 $y = 0.0195x^2 - 5.0093x + 403.68$  (厚さ 100~200  $\mu\text{m}$ ) ( $x$ : 写真画像の輝度値,  $y$ : 印象材の厚さ) であった (図2)。それぞれの  $R^2$  値 (決定係数, 寄与率) は 0.9942, 0.9899 であった。対象とした印象材の厚さ 0~200  $\mu\text{m}$  の範囲に対し、写真画像の輝度値は 51~250 の範囲となった。つまり、51~250 の輝度値に対して本キャリブレーションカーブを用いた厚さの算出が可能となった。

チェッカーフラッグ模様の1辺のピクセル数は、最大 58 ピクセル、最小 56 ピクセル、平均  $56.9 \pm 0.55$  ピクセルであった。そのた

め、1ピクセルの1辺の長さは  $8.79 \times 10^{-2}$  mm となり、1ピクセルの面積は  $7.72 \times 10^{-3}$  mm<sup>2</sup> となった。これにより、咬合採得材の透過光画像から咬合接触面積を算出することが可能となった。

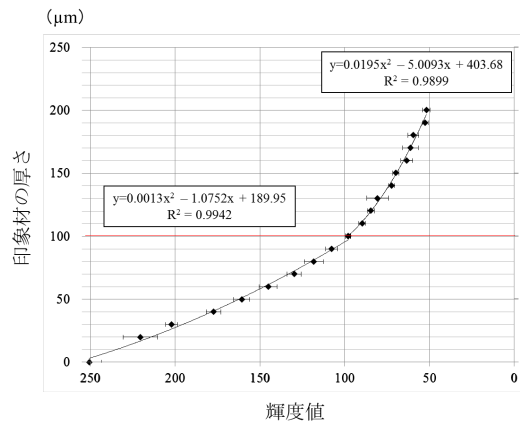


図2：キャリブレーションカーブ

### (2) 咬合接触評価システムの妥当性の検証

最薄部の厚さが 20  $\mu\text{m}$  の半球体試料において、コントロールである仮想空間上の球体断面の面積と、透過法から算出した半球体試料の面積の比較を図3に示す。このとき、透過法によって生じる全試料の誤差は平均  $0.09 \pm 0.06$  mm<sup>2</sup> であり、本手法で算出した半球体試料の面積は、コントロールとほぼ等しい値となった。

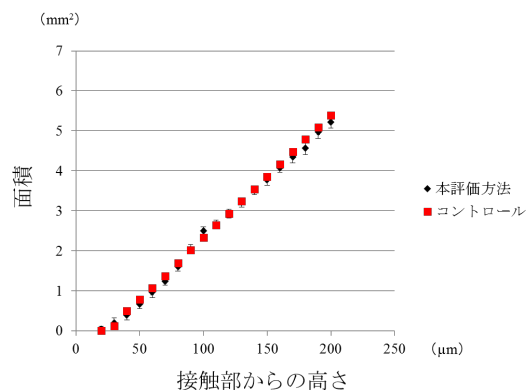


図3：コントロールと透過法による半球体試料の面積の比較

咬合紙を印記させた上顎左側第一大臼歯を図4aに示す。歯列模型に 35  $\mu\text{m}$  咬合紙を印記させた咬合接触像では設定した咬合接触部位以外にも数カ所の印記が認められた。咬合紙の厚さ 100  $\mu\text{m}$  では、咬合接触点の増加が認められた。

透過法による咬合接触像を図4bに示す。印象材の厚さ 35  $\mu\text{m}$  では設定した咬合接触部に一致した接触が確認できた。また、厚さ 100  $\mu\text{m}$  では咬合接触点の他に咬合面の近接部位

が表示され、咬合紙の咬合接触像と比較して接触面積が大きくなり、面で表現された像となった。また、咬合紙では評価することができない咬合接触面積は、印象材の厚さ 35  $\mu\text{m}$ 、100  $\mu\text{m}$  において、それぞれ 0.50  $\text{mm}^2$ 、8.37  $\text{mm}^2$  であり、定量化することが可能となった。

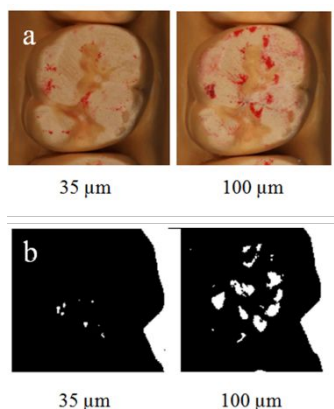


図 4：歯列模型における咬合接触像（上顎左側第一大臼歯）a：厚さ 35, 100  $\mu\text{m}$  の咬合紙を用いて印記した咬合接触像  
b：厚さ 35, 100  $\mu\text{m}$  に相当する輝度値で領域指定した二値化画像

### （3）個別力学的シミュレーションを用いた補綴装置の設計最適化システム

歯列形態と咬合接触の統合を行った結果を図 5a に示す。仮想空間上で三次元歯列モデルに咬合接触部位が表示されている。歯列形態と咬合接触の各画像のレジストレーションにおける水平的位置の誤差は特徴点 6 点で平均  $0.14 \pm 0.08 \text{ mm}$  であった。図 5b に厚さ 100  $\mu\text{m}$  の咬合紙（プロGRESS、パウシュ咬合紙ジャパン）を 2 枚用いて 200  $\mu\text{m}$  以下の咬合接触を印記させた歯列模型の咬合面を示す。三次元モデルに再現された咬合接触部位と比較すると、おおよそ一致していることがわかる。

本手法により再現された咬合接触は、咬合採得した印象材の三次元モデルによる咬合接触と比較した結果、その面積の差は  $0.30 \pm 0.45 \text{ mm}^2$ 、オーバーラップ率は  $75.2 \pm 14.1\%$ 、重心のずれは  $0.25 \pm 0.10 \text{ mm}$  であった。

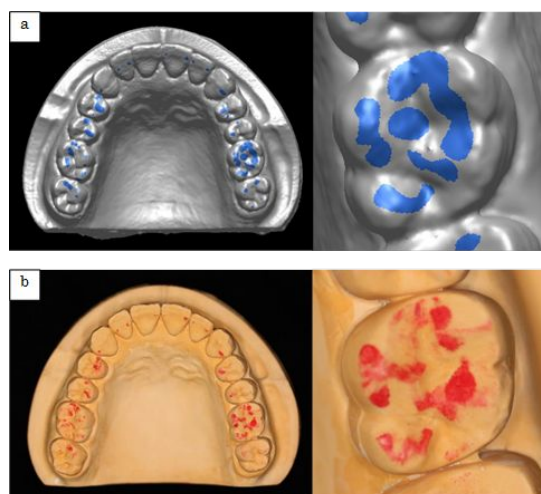


図 5：(a) 歯列形態・咬合接触を統合した三次元モデル、(b) 咬合紙を用いて咬合接触を印記した歯列模型  
（左図：歯列全体像、右図：上顎左側第一大臼歯部の拡大像）

### （4）臨床応用による信頼性設計の妥当性の検証

応力解析を行った結果、補綴装置や築造体の応力分布に着目すると、上顎左側犬歯部に応力集中が予測され、この結果を歯科医師に伝え経過観察を行った。補綴装置装着 5 ヶ月後、本症例において上顎左側犬歯部の築造体の破折が生じ、個別の有限要素解析の結果と類似する傾向がみられた。完全に患者を再現したモデルの作成は非常に困難であるが、近似したモデルにより治療経過の予測ができ、補綴装置設計の一助になる可能性が示唆された。

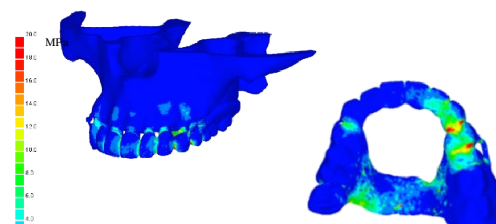


図 6：有限要素解析を用いた個別力学的シミュレーション

本手法により、患者固有の咬合要素を有限要素モデルに再現することができ、補綴治療の予後予測や補綴装置の設計の最適化など、補綴診療の治療計画に対する新たなアプローチの可能性が示された。

## <引用文献>

Gomes O.S., Seraidarian P.I., Landre J.J., Oliveira D.D., Cavalcanti B.N.: Tooth displacement due to occlusal contacts: a three-dimensional finite element study. J Oral Rehabil 33, 874-880, 2006.

Dittmer M.P., Kohorst P., Borchers L., Schweska-Polly R., Stiesch M.: Stress analysis of an all-ceramic FDP loaded according to different occlusal concepts. J Oral Rehabil 38, 278-285, 2011.

Benazzi S., Grosse I.R., Gruppioni G., Weber G.W., Kullmer O.: Comparison of occlusal loading conditions in a lower second premolar using three-dimensional finite element analysis. Clin Oral Investig 16 online, 2013.

Delong R., Ko C.C., Anderson G.C., Hodges J.S., Douglas W.H.: Comparing maximum intercuspal contacts of virtual dental patients and mounted dental casts. J Prosthet Dent 88, 622-630, 2002.

## 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)

[学会発表](計6件)

伊藤光彦, 井川知子, 平井健太郎, 重田優子, 木原琢也, 重本修伺, 二川浩樹, 小川 匠: 各種スキャナーを用いた計測用石膏模型の計測: 第7回日本デジタル歯科学会学術大会, 2016.5.28 北海道立道民活動センター(北海道札幌市)

木原琢也, 藤川佳也, 井川知子, 田地 豪, 小川 匠, 二川浩樹: 上下顎歯列三次元モデルの位置関係再現についての検討: 第7回日本デジタル歯科学会学術大会, 2016.5.28 北海道立道民活動センター(北海道札幌市)

木原琢也, 井川知子, 重田優子, 平林里大, 平井真也, 平井健太郎, 熊谷 宏, 佐々木正和, 瀧本有美, 藤川佳也, 田地豪, 小川 匠, 二川浩樹: シリコーン印象材を用いた咬合接触の定量的評価: 平成27年度公益社団法人日本補綴歯科学会中国・四国支部学術大会, 2015.9.5,6 くにびきメッセ(島根県松江市)

Kihara T, Ikawa T, Hirabayashi R, Shigeta Y, Hirai K, Mimura S, Taji T, Ogawa T, Nikawa H: Reconstruction of Three-Dimensional Occlusal Contacts Model on a Dental Morphology: The 9th Scientific Meeting of the Asian Academy of Osseointegration, 2014.7.4,5 Sapporo education and culture hall (Sapporo city)

木原琢也, 井川知子, 平林里大, 平井真也, 佐々木圭太, 重田優子, 安藤栄里子, 平井健太郎, 二川浩樹, 小川 匠: 咬合接触部位と咬合力の統合システムの構築: 社団法人日本補綴歯科学会第123回学術大会, 2014.5.24 仙台国際センター(宮城県仙台市)

木原琢也, 井川知子, 平林里大, 重田優子, 平井健太郎, 小川 匠, 二川浩樹: 三次元歯列モデルにおける咬合接触状態の再現: 日本顎口腔機能学会第52回学術大会, 2014.4.19 岡山大学歯学部(岡山県岡山市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

平井 真也 (HIRAI, Shinya)  
鶴見大学・歯学部・助教  
研究者番号: 20339815

### (2) 研究分担者

小川 匠 (OGAWA, Takumi)  
鶴見大学・歯学部・教授  
研究者番号: 20267537

### (3) 研究分担者

佐々木 圭太 (SASAKI, Keita)  
鶴見大学・歯学部・助教  
研究者番号: 60582343