

平成 30 年 5 月 7 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K11147

研究課題名(和文) 骨改造アルゴリズムを応用した生体荷重ベースのインプラント補綴力的最適化設計の検討

研究課題名(英文) A study on optimized biomechanical implant prosthetic design based on bone remodeling algorithm using in vivo measured load

研究代表者

川田 哲男 (Kawata, Tetsuo)

東北大学・歯学研究科・大学院非常勤講師

研究者番号：80292225

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)：近年，上顎前歯部のインプラント補綴治療後における頬側骨部の経年的な骨吸収が問題となっている．同部の骨吸収はインプラントの安定性だけでなく，粘膜退縮により審美性を損なう危険性もある．しかしながら，このインプラント周囲炎とは異なる骨吸収に対しては不明な点が多い．本研究は，上顎前歯部にインプラント治療が施された患者のCT画像を解析し，経年的な頬側骨壁の厚さの変化を実測，さらにはCT画像から構築した3次元有限要素モデルにより，骨形態変化と骨内歪みエネルギー密度との関連を解析し，両者が有意に関連していることを示した．また，インプラント頬側骨厚と骨内の機械的刺激分布との関連を明らかにした．

研究成果の概要(英文)：This study combines clinical investigation with finite element (FE) analysis to explore the effects of buccal bone thickness (BBT) on the morphological changes of buccal bone. One patient who had undergone an implant treatment in the anterior maxilla and experienced the buccal bone resorption on the implant was studied. Morphological changes of the bone were measured through a series of CT scans. A 3D heterogeneous nonlinear FE model was constructed based on the CT images, and the in-vivo BBT changes are correlated to the mechanical stimuli. The anterior incisory bone region of this model was then varied systematically to simulate different BBTs. Significant changes in BBTs were observed clinically. The pattern of bone resorption fell into a strong correlation with the distribution of mechanical stimuli onsite. This study revealed that the initial BBT can significantly affect mechanical responses, which consequentially determines the bone remodeling process.

研究分野：補綴理工系歯学

キーワード：インプラント 生体力学 有限要素解析 骨リモデリング

## 1. 研究開始当初の背景

歯科インプラント治療は適切なプロトコールに従うことで、10 年間後ろ向き調査にて 97.0% と非常に高い成功率が示されており、有効な欠損補綴歯科治療として確立されている。しかしながら、インプラント構造体の破折や、インプラントに加わる過荷重に起因するとされるインプラント周囲骨破壊・吸収等、力学的問題点も依然報告されている。したがって、インプラントに加わる荷重を生体力学的観点から適切に制御することは、インプラント治療の長期的な成功に導くために重要である。

インプラント補綴設計段階において、将来起こりうる力学的要因による問題を予測する診断基準があれば、問題の発生を未然に防ぐことが可能である。近年、上顎前歯部のインプラントにおいて、インプラント頰側部の骨の経年的な吸収が問題視されている。インプラント頰側壁の形状は周囲軟組織の形態を決定する主要な因子であり、これまで抜歯窩即時埋入インプラントを対象には骨治癒やリモデリングにおける骨形態変化が調査されてきた。一方、近年の CT 画像を用いた調査により補綴治療後の経年的な骨変化も起こることが明らかにされている。このような骨吸収はインプラントの安定性だけでなく、インプラント周囲粘膜の退縮を引き起こし、著しく審美性を損なう危険性がある。しかしながら、このインプラント周囲炎とは異なる要因による骨吸収に対してはほとんど研究がなされておらず、そのメカニズムに関しては不明な点が多いのが現状である。

## 2. 研究の目的

代表者はこれまで、荷重によりインプラント周囲骨内に生じる「歪みエネルギー密度」、ならびに経年的骨密度変化をベースに、臨床的に整合性が検証された非線形骨リモデリングアルゴリズムの構築を試み、このアルゴリズムを用いてインプラント周囲の骨密度の経年的変化に関する新たな予測方法を開発してきた。本研究では、上顎前歯部にインプラント治療が施された患者の埋入時および経過観察時のコーンビーム (CB) CT 画像を解析し、インプラント頰側骨壁の経時的な厚さの変化を実測し、さらに患者 CBCT 画像から構築した 3 次元有限要素モデルを構築し、患者の咬合力を荷重条件として解析することを目的とした。加えて、臨床的な骨形態変化と骨内歪みエネルギー密度との関連を解析することで、インプラント頰側骨壁における非線形骨リモデリングアルゴリズムを算出し、咬合力、頰側骨形態と経年的骨リモデリングの関連を明らかにすることを目的とした。

本研究から得られる知見は、上顎前歯部インプラント頰側骨壁形態の経年的変化予測し、将来的な骨吸収を制御するための患者個々の荷重条件、骨形態条件を明らかにす

るための重要なエビデンスになり、これは骨造成等の付加的手術を含め長期的予後を良好にするためのインプラント術前設計に対する明確な基準を提示することもでき、臨床的意義は非常に大きいと考えた。

## 3. 研究の方法

### 1) 上顎前歯部にインプラントが埋入された被験者の時系列 CBCT 画像解析、ならびに骨形態の経年的変化測定。

東北大学病院にて上顎前歯部領域にインプラントが埋入され、その後補綴治療が施され成功基準を満たしている前歯部正被害の患者を被験者とした。CBCT 画像から構築した 3 次元モデル (Amira 2016.22, Zuse Institute Berlin (ZIB), Germany) または MPR 法 (EV Insite S, PSP Co., Japan) による 2 次元画像を基に経時的骨形態変化を評価した。

### 2) CT データベースの 3 次元有限要素解析モデルの構築、および骨内応力・歪み解析。

患者 CT データをセグメンテーションし、3 次元モデル作成・編集ソフトウェア (ScanIP Ver. 4.3, Simpleware Ltd, Exeter, UK) および 3D モデリングソフトウェア (Rinoceros 4.0, Robert McNeel & Associates, Seattle, USA) にて、顎骨およびインプラント・上部構造をモデル化した。モデル上の骨は CT 値をベースに不均質弾性体を再現した。荷重条件は過去の文献データを応用した。上顎骨に境界条件を設定し、解析ソフトウェア (ABAQUS 6.9.2, Dassault Systèmes, Tokyo Japan) 用いて有限要素解析を行った。

### 3) インプラント周囲骨内に生じる機械的刺激と経年的頰側骨形態変化との関連性の把握。

2) の有限要素解析により得られたインプラント周囲骨内の機械的刺激 (歪みエネルギー密度 (Strain Energy Density: SED), 相当応力, 相当歪み) の経時的変化と、同一被験者の CT 画像解析から得られた経年的骨吸収との関連性を分析した。

### 4) 上顎前歯部インプラントの頰側骨壁の将来的な骨吸収を制御するための骨形態条件解明。

2) の有限要素モデル上において、頰側骨壁の厚さを人工的に変化させ、様々な頰側骨厚において上記の骨内機械的刺激の変化様相を解析した。

## 4. 研究成果

### 1) 被験者の時系列の CBCT 画像解析による骨形態の経年的変化測定。

3 次元モデルを用いた、荷重開始 6 ヶ月間における骨表面の形態変化 (形成・吸収) 測定と再構築後の CT 像を MPR 処置した画像による頰側骨壁の厚さの比較 (同一部位) (図 1-3)。

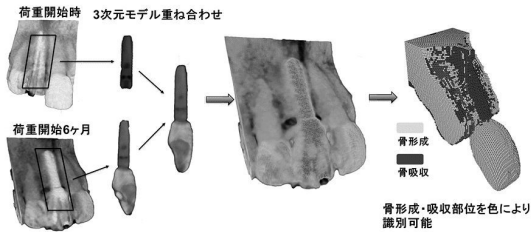


図1 .3次元モデルを用いた、荷重開始6ヶ月間における骨表面形態変化測定

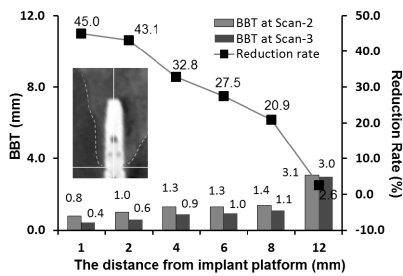


図2 .再構築後のCT像をMPR処置した画像による頬側骨壁の厚さの比較(同一部位) BBT:頬側骨厚, Scan-2:インプラントTEC装着時, Scan-3:TEC装着6か月後

CTのMPR画像を比較した結果、インプラント荷重後に頬側骨の水平的な吸収が認められた。特に、インプラントプラットフォーム側の頬側骨の吸収量が大きかった。



図3 .CTを用いた有限要素モデルの構築および解析

本研究では、被験者口腔内のインプラントを忠実に再現するために、当該インプラント(OsseospeedTX, Dentsply Sirona Implant)、スクリュー、および上部構造をCADソフト上で設計し、有限要素解析ソフトウェア(ABAQUS 6.9.2)にて再構築した。さらに、CT画像をセグメンテーションし、被験者の骨形態を精密に再現し、CT値をベースに骨の不均質性(Heterogeneous Property)を再現し(図3)、より臨床的妥当性の高い有限要素解析モデルを構築した。

インプラント埋入方向は、CT画像を参考に実際の被験者の埋入位置と同様にした。荷重条件は、荷重の大きさと方向を過去の文献データ(Svensson KG and Trulsson M. J Clin Periodontol 2011; 38: 1137-1146)を参考に決定し、上部構造の舌側面へ付与した。

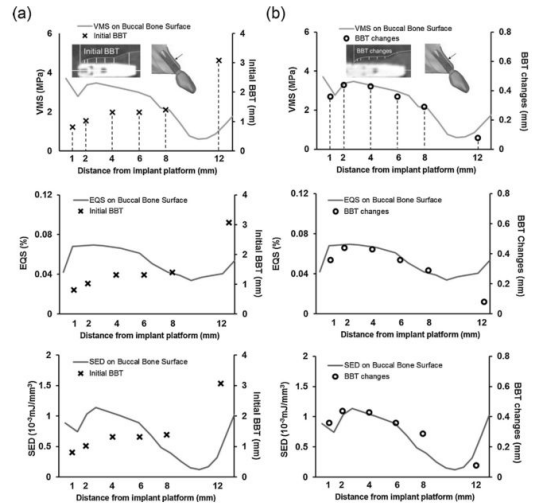


図4 .頬側骨厚(BBT)と頬側骨表面の応力・歪みとの関連

BBT change:荷重6か月後の頬側骨厚の変化量, SED:歪エネルギー密度, EQS:相当歪み, VMS:相当応力

図4の左側の列は初期の頬側骨厚と有限要素解析で計測された各種骨内機械的刺激との関連を示すが、頬側骨厚が大きい部分において各機械的刺激は小さくなる傾向が認められた。一方、右側の列は荷重後6か月間における頬側骨厚の変化量と各骨内機械的刺激との関連を示すが、特に頬側骨厚変化量が大きい部位で有意な相関が認められた。これは頬側骨表面において機械的刺激が骨リモデリング活動と大きく関連していることを示唆している。

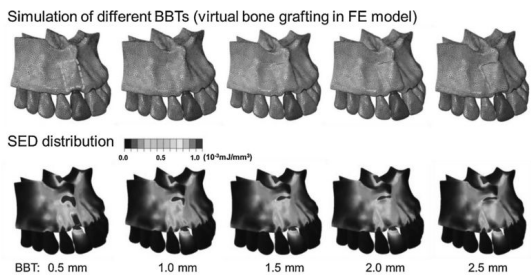


図5 .上顎前歯部の頬側骨付近にバーチャルの骨造成を行った有限要素モデル(上段)とその解析結果(下段:SED分布)

臨床的には、インプラント埋入設計段階において頬側骨厚が不足している場合は骨造成を行うことが多い。そこで本研究では、図5で示すように患者データから構築した有限要素モデルにおいて、臨床的に妥当な範囲において頬側骨部位の骨造成をバーチャルに実施し、それぞれのモデルにおいて機械的刺激の分布を再調査した。図5の下段にはSED分布の一例を示すが、頬側骨厚が増加するに

つれて SED 分布が変化する様相が認められた。

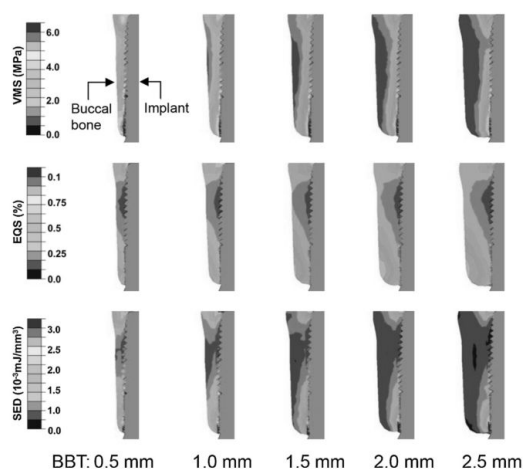


図 6 . パーチャル骨造成後の頬側骨部における機械的刺激の分布

図 6 には頬側骨部における機械的刺激分布の詳細を示す。骨厚が大きくなるにつれて頬側骨表層の機械的刺激分布が小さくなる傾向が認められた。一方で、インプラントネック部においてはどのモデルにおいても機械的刺激の集中が認められた。

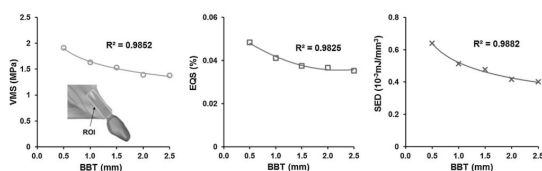


図 7 . パーチャル骨造成後のインプラント周囲における機械的刺激分布の変化

図 7 にはインプラント体周囲における機械的刺激分布の変化を示す。頬側骨厚が増加するにつれて、骨内の機械的刺激が減少する傾向が認められた。

以上、本研究期間においては被験者 1 名のみではあるが、生体データを活用した骨リモデリング解析の新規手法の開発を行うことができた。このような手法を活用し、データを蓄積することで、上顎前歯部の経年的頬側骨吸収を制御するための生体力学的要件の解明が進むことが期待される。特にこのような生体ベースの研究から得られる知見は、患者個々の条件（骨形態・咬合力）に即したテーラーメイドのインプラント治療計画の立案を実現するために重要である。

本研究は、上顎前歯部インプラントにおける頬側骨壁の吸収を制御し、インプラントの機能・審美における長期的安定性の実現に大きく貢献するものである。

## 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)

Yoda N, Zheng K, Chen J, Li W, Sasaki K, Swain M, Li Q. Bone morphological effects on post-implantation remodeling of maxillary anterior buccal bone: a clinical and biomechanical study. J Prosthodont Res 査読有 61: 393 - 402, 2017.

DOI: 10.1016/j.jpor.2016.12.010

Liao Z, Yoda N, Chen J, Zheng K, Sasaki K, Swain M, Li Q. Simulation of multi-stage non-linear bone remodeling induced by fixed partial dentures of different configurations: a comparative clinical and numerical study. Biomech Model Mechanobiol 査読有 16: 411 - 423, 2017.

DOI: 10.1007/s10237-016-0826-x

依田信裕, 末永華子, 佐々木啓一. パイオメカニクス・メカノバイオロジーの観点から欠損歯科補綴を考える. 日補綴会誌 査読有 9: 291 - 296, 2017 .

Yoda N, Liao Z, Chen J, Sasaki K, Swain M, Li Q. Role of implant configurations supporting three-unit fixed partial denture on mandibular bone response: biological-data-based finite element study. J Oral Rehabil 査読有 43: 692 - 701, 2016.

DOI: 10.1111/joor.12411

〔学会発表〕(計 6 件)

Yoda N, Sasaki K. Bone Biomechanics and Remodeling Following Dental Implant Treatment. China-Japan Dental Science Symposium 2017. Dalian Stomatological Hospital. 2017/11/17-18. (Dalian, China)

佐藤愛美加, 重光竜二, 水戸武彦, 依田信裕, 佐々木啓一. 有限要素解析を用いたインプラント機能時の動的力学挙動に関する研究. 第 47 回 日本口腔インプラント学会学術大会. 2017/09/22-24 (仙台国際センター, 宮城)

依田信裕, 小針啓司, 松館芳樹, 川田哲男, 佐々木啓一. 生体ベース非線形骨改造アルゴリズムに基づくインプラント周囲の経年的骨密度変化解析. 日本補綴歯学会第 126 回学術大会 .2017/6/30-7/2 (パシフィコ横浜, 神奈川)

Yoda N, Zheng K, Chen J, Swain M, Li Q, Sasaki K . Investigation of Bone Morphological Change in Maxillary Anterior Buccal Bone on

Implant: a Clinical and Numerical Study.  
Dentsply Implants World Summit Tour 2017.  
2017/2/18,19. (ヒルトン東京お台場, 東京)

依田信裕. バイオメカニクス・メカノバ  
イオロジーの観点から欠損歯科補綴を考  
える. 第2回 補綴歯科臨床研鑽会 プロソ'16.  
2016/12/10-11. (ベルサール新宿, 東京)

Yoda N, Liao Z, Chen J, Sasaki K, Li Q.  
The biomechanical responses of mandibular bone  
installed with implant-supported dental bridges -  
a computational mechanics study. The 2nd  
Australasian Conference on Computational  
Mechanics. 2015/11/30-12/1. QUT Gardens Point  
campus (ブリスベン, オーストラリア).

〔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：  
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

川田 哲男 (KAWATA, Tetsuo)  
東北大学・大学院歯学研究科・大学院非常  
勤講師  
研究者番号：80292225

### (2)研究分担者

依田 信裕 (YODA, Nobuhiro)  
東北大学・大学院歯学研究科・助教  
研究者番号：20454601

佐々木 啓一 (SASAKI, Keiichi)  
東北大学・大学院歯学研究科・教授  
研究者番号：30178644

小川 徹 (OGAWA, Toru)  
東北大学・大学院歯学研究科・准教授  
研究者番号：50372321

(3)連携研究者  
( )

研究者番号：

(4)研究協力者  
( )