

機関番号：12602

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20592307

研究課題名（和文） 顎骨のリモデリングを制御する補綴誘導ストレスの分析

研究課題名（英文） Denture-induced mechanical stress controls bone remodeling.

研究代表者

若林 則幸（WAKABAYASHI NORIYUKI）

東京医科歯科大学・大学院医歯学総合研究科・准教授

研究者番号：00270918

研究成果の概要（和文）：義歯を装着する高齢者の口腔機能と形態の保全を目指すため、口腔粘膜と顎骨内部に安全で望ましい荷重環境を誘導する理論的背景を明らかにした。口腔内の荷重試験により明らかにした顎堤粘膜の粘弾性性質を挿入した被検者それぞれの三次元力学モデルを CT データから構築し、粘膜と骨内部の歪みと応力を分析した。荷重時には粘膜と顎骨に微小歪みが蓄積するため、これを抑制する義歯の設計と新しい診療アプローチを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：To enhance function and appearance in denture-wearing elderly, the biomechanical implications for the denture-induced stress and strain in the oral soft tissues and the supporting bone were evaluated. The viscoelastic properties obtained from the time-displacement relationship in the in vivo measurement and the morphologic data based on the cone beam CT images were used to construct the patient-specific finite element models. Based on the predicted phenomenon of the strain accumulation inside the oral soft and hard tissues, an approach to the alternative design protocol for the prosthodontic treatment was proposed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：歯学 歯科医用工学・再生歯学

キーワード：再生歯学，メカニカルストレス，生体工学，義歯

1. 研究開始当初の背景

メカニカルストレスと生体組織のリモデリングとの関係が注目されている。本研究の目的は、歯の喪失後、補綴治療を受けた患者の顎骨の形態変化と、咬合力下で顎堤粘膜と骨内部に生じる歪みとの関係を明らかにし、これを天然歯列のデータと比較することにより、メカニカルストレスが顎口腔組織のリモデリングに及ぼす影響を明らかにするこ

とである。本研究は、補綴診療により骨内部に安全で望ましいストレス環境を誘導し、これにより高齢者の口腔機能と形態の保全を目指す、新しい診療アプローチを推進するものである。

2. 研究の目的

顎堤粘膜と支持骨は義歯床に負荷された咬合力を受け止め、その力を顎骨と顎口腔系に

伝える役割を担う。粘膜は支持骨に過度な咀嚼力が及ぶのを防ぐ一方、咬合力により疼痛や損傷を生じることがある。このような義歯床下粘膜の疼痛や腫脹、萎縮などは、治療の予後を左右する主要なリスクファクターである。咀嚼粘膜が損傷を受けるリスクは咬合力や咬合接触の頻度からある程度予測されるが、粘膜損傷を引き起こす原因となる荷重の閾値、すなわち損傷を生じる力の大きさや継続時間、頻度は不明である。

これまでの研究では、口腔粘膜の粘弾性性質を力学モデルに導入する方策の検討を進め、義歯床を支持する咀嚼粘膜の動的機序を応力と歪みの観点から算出する方法論を提示した。本研究では、顎堤粘膜と骨の荷重下における挙動を時間と変位の関係を被験者ごとに分析する。目的は、荷重下における粘膜表面の変位が粘弾性性質を示すモデルにおいて、粘膜内部と粘膜下の骨表面部に生じる応力と歪みの分布を明らかにすることである。

3. 研究の方法

上顎大臼歯部の欠損に義歯を装着し顎口腔系に問題のない、メンテナンス中の患者を被験者とした。自作した口内法粘膜変位量測定システムを残存歯列に仮固定し、顎堤粘膜に垂直に 0.038N/mm^2 の一定荷重を10秒間負荷して除荷20秒後までの変位を記録した。

各被験者の顎堤粘膜と顎骨の三次元有限要素モデルを歯科用コーンビームCTの断層画像を基にトレース法で構築した。モデルは均質、等方性の線形弾性体とし、弾性率は報告されている値を採用した。粘膜は均質な等方性弾性体とし、非線形特性である粘弾性を付与した。粘弾性性質は、緩和弾性率

$$G(t) = G_0 \times \text{EXP}(-t/\tau)$$

の式を応用し、被験者ごとの初期弾性率(G_0)と緩和時間(τ)を、測定データを基に算出して求めた。解析条件は、測定と同じ単荷重条件、および咀嚼を想定した繰り返し荷重条件で行った。繰り返し荷重は、単荷重と同じ荷重量を用い、1秒間負荷後に1秒間除荷、1秒間負荷後に2秒間除荷、2秒間負荷後に1秒間除荷する3種類のパターンを、それぞれ10回繰り返し条件で解析を行った。分析対象は、粘膜の厚さの中央部ならびに荷重部直下の粘膜表層における主応力および主歪みの大きさの経時的変化とした。

4. 研究成果

(1) 粘膜の厚みと粘弾性性質

歯を欠損した患者の顎堤粘膜に荷重を負荷して経時的な変位を計測した。粘膜表面の変位は、持続荷重下で変位が増加するクリープ効果を示した。除荷直後に大きな弾性回復を示すが完全には元に戻らず、その後緩やかに変位が回復する時間に依存性の性質が示された。

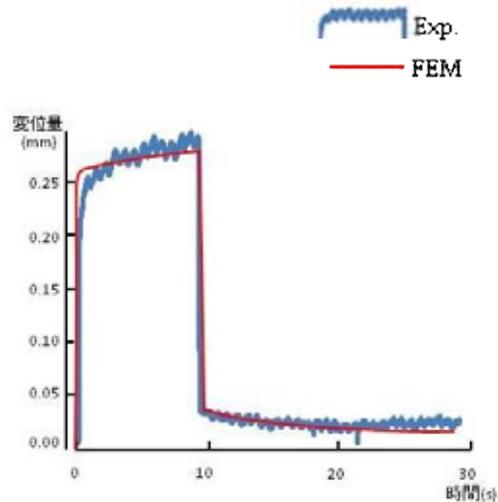


図1. 持続荷重と除荷後における粘膜表面の変位量。実験値(青)と力学モデルによる計算値(赤)。

荷重下におけるヒト口腔粘膜の変位は、過去に動物の口腔粘膜から計測された特徴と一致する粘弾性特性を示した。垂直的な最大変位量は最小 0.24mm 、最大 0.53mm であり、変位量と粘膜の厚さとの相関は認められない一方で、初期弾性率と変位との関連が示唆された。粘膜の痛みや支持骨の吸収の原因となる粘膜内部の歪み量は、粘膜の厚さではなく個々の粘弾性性質によって決まることが明らかとなった。

(2) 内部歪みの蓄積効果

変位測定から得られた粘弾性性質の基本的なパラメータを被験者ごとに明らかにし、被験者個々の有限要素モデルを構築した。モデルから粘膜と粘膜下の骨に生じる応力と歪みを分析した結果、持続荷重下では粘膜表面の最大歪みは変位量と同様に増加した。粘膜内部では最大歪み量が比較的一定であったことから、クリープ現象は主に表面領域が担っていることが示唆された。

その一方、持続荷重下で最大応力はわずか

に減少した。持続荷重と繰り返し荷重により粘膜表面には歪みの蓄積が生じたが、同じ部位では同時に応力の緩和が見られた。応力緩和特性は粘弾性体の主要な性質の一つであるが、歪みの増加と同時に起こる応力の緩和は、軟組織が荷重を受けるとクリープ現象によって応力集中を回避し、周囲に応力を分散させる自己防衛的な反応と捉えることができる。

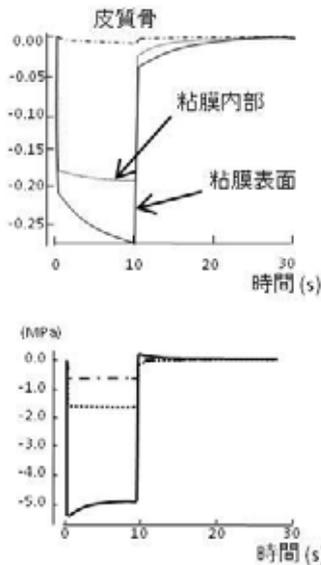


図2．持続荷重と除荷後における主応力値の推移．上図が歪み，下図は応力を示し，どちらも縦軸の下方ほど圧縮が大きいことを示す．粘膜表面，粘膜内部，皮質骨表面のそれぞれにおける値を示す．

骨組織の吸収を喚起する力学的な閾値として、動的圧縮荷重下における 0.004 歪み、引っ張り荷重下における 0.0025 歪みが報告されているので、本研究の最大圧縮歪みである 0.015 以下と小さく、骨吸収を引き起こす歪みではないと言える。これは、義歯からの負荷として正常である比較的小さな荷重量を設定したことによる。しかしながら、粘膜と骨の損傷は鋭利な骨の周囲や粘膜の菲薄な部分に生じやすく、顎堤の部位や形態が異なれば、内部のストレスと歪みは容易に変化するので、本研究で見られた歪みや応力の数値から組織損傷のリスクを過小評価することはできない。さらに、皮質骨表面が最も高いクリープ率と除荷後に最も低い歪みの回復率を示したことに着目する必要がある。

弾性率が強く強固な骨においては、歪みや応力の蓄積効果は比較的大きく、とくに持続荷重下での歪みの増加率が平均 212.8 % と粘膜よりも高く、除荷直後の回復率が平均 41.3 % と低かった。この結果は、粘膜は非線

形性質を付与したのに対して骨には線形体としたことも一因であるが、持続的かつ連続的な負荷環境における骨組織の疲労と損傷のリスクを検討すべきことを示すものである。

(3) 咀嚼運動による内部歪みへの影響

持続荷重および繰り返し荷重により粘膜表面の歪みが蓄積することが明らかとなった。咀嚼時には咀嚼サイクルは 1 秒以内に繰り返され、この繰り返し咀嚼により粘膜の圧縮が完全に回復する前に新たな歪みを生じたと考えられる。繰り返しの咀嚼サイクルのリズムを分析すると、咬合する時間が長く、あるいは咬合していない時間が短いと、表面の圧縮歪みはより高い蓄積効果を示した。この結果は、義歯などの補綴物を支持する粘膜の痛みや損傷が、単発の荷重よりも咀嚼運動の繰り返しと深く関係していることを示唆するものである。

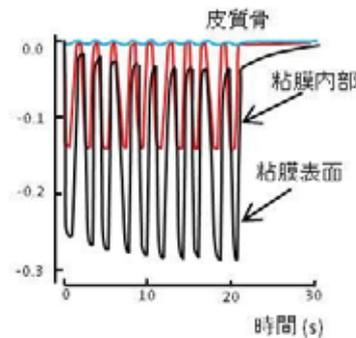


図3．粘膜中央部および表層部における主歪みの経時変化．縦軸の下方ほど圧縮が大きいことを示す．

咬合力を受け止める機能を担うエナメル質や歯根膜とは異なり、顎堤粘膜は義歯床を介して咬合力を受け止めるための構造を有しているわけではないため、義歯の設計と製作に際しては粘膜への負担荷重のリスクを最小限に抑えるために、本研究で明らかとなった顎堤粘膜の粘弾性性質を考慮すべきである。

(4) 咬合力による影響

本課題の目的は、補綴診療により骨内部に安全で望ましいストレス環境を誘導し、これにより高齢者の口腔機能と形態の保全を目指す、新しい診療アプローチを推進することにある。研究初年度には患者ごとの咬合力に基づいた個別の力学モデルを用い、様々なパラメータを指標として力学解析を行った。

大臼歯部を欠損した患者の小臼歯歯周組織に起こる力学的環境の変化と、義歯装着がこれに及ぼす影響を明らかにするため、患者

個々の画像データを元にした三次元モデルと口腔内で計測した咬合接触部位と咬合力を基に、小白歯部の歯周組織に生じる歪みと応力の分析を行った。

その結果、大きな咬合力を示す患者においては、両側の大白歯部を喪失することが、最後方歯群となる小白歯の歯周組織の力学的環境に強い影響を及ぼすことが示唆された。

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 15 件)

Sawada A, Wakabayashi N, Ona M, Suzuki T. Viscoelasticity of human oral mucosa: Implications for masticatory biomechanics.
-*Journal of Dental Research* 査読有 90, 2011, 590-595.

Borák L, Florian Z, Bartáková S, Prachár P, Murakami N, Ona M, Igarashi Y, Wakabayashi N. Bilinear elastic property of the periodontal ligament for simulation using a finite element mandible model.
-*Dental Materials Journal* 査読有 受理, Mar. 2011.

Hudeab M, Wakabayashi N, Kasugai S. Magnitude and direction of mechanical stress at the osseointegrated interface of the microthread implant.
-*Journal of Periodontology* 査読有 Epub ahead of print, Dec. 2010.

Ona M, Watanabe C, Igarashi Y, Wakabayashi N. Influence of preparation design on failure risks of ceramic inlays: A finite element analysis.
-*Journal of Adhesive Dentistry* 査読有 Epub ahead of print, Sep. 2010.

Wakabayashi N, Kondo T, Yahagi R, Suzuki T. A patient-based model study of fixed splinting of premolar teeth with reduced periodontal support.
-*International Journal of Computerized Dentistry* 査読有 13, 2010, 317-330.

Minami I, Oogai Y, Nemoto T, Nakamura T, Igarashi Y, Wakabayashi N. Measurement of jerk-cost by using a triaxial piezoelectric accelerometer for the evaluation of jaw movement smoothness.

-*Journal of Oral Rehabilitation* 査読有 37, 2010, 590-595.

Ona M, Takahashi H, Sato M, Igarashi Y, Wakabayashi N. Effect of reactive adhesives on the tensile bond strength of vinyl polysiloxane impression materials to methylmethacrylate tray material.
-*Dental Materials Journal* 査読有 29, 2010, 336-340.

Hudeab M, Wakabayashi N, Suzuki T, Kasugai S. Morphological classification and stress analysis of the mandibular bone at premolar region for implant placements.
-*International Journal of Oral Maxillofacial Implants* 査読有 25, 2010, 482-490.

Nagata K, Takahashi H, Ona M, Hosomi H, Wakabayashi N, Igarashi Y. Reinforcement effects of fiberglass on telescopic dentures using a three-dimensional finite element analysis and fracture test.
-*Dental Materials Journal* 査読有 28, 2009, 649-656.

近藤貴之, 若林則幸, 澤田 愛, 織田展輔, 大久保卓也, 鈴木哲也. 下顎大白歯欠損症例における小白歯歯周組織の応力と歪みの分析. 岩手歯学 査読有 34, 2009, 39-50.

Kondo T, Wakabayashi N. Influence of molar support loss on stress and strain in premolar periodontium: A patient-specific FEM Study.
-*Journal of Dentistry* 査読有 37, 2009, 541-548.

Oda N, Wakabayashi N, Yoneyama T, Suzuki T. Effect of bending on the mechanical properties of gold wrought-wire clasps: A non-linear finite element analysis.
-*Dental Materials Journal* 査読有 28, 2009, 121-127.

Shirasu K, Wakabayashi N, Yoneyama T, Igarashi Y. Non-linear finite element stress analysis of plastic deformation in Co-Cr wrought-wire clasps.
-*Dental Materials* 査読有 24, 2008, 1518-1524.

Wakabayashi N, Ona M, Suzuki T, Igarashi Y. Nonlinear finite element analyses: Advances and challenges in dental applications.
-*Journal of Dentistry* 査読有 36, 2008, 463-471.

Yamazaki K, **Wakabayashi N**, Kobayashi T, Suzuki T. Effect of tooth loss on spatial memory and TrkB-mRNA levels in rats. *-Hippocampus* 査読有18, 2008,542-547.

〔学会発表〕(計 18 件)

小奈正弘, **若林則幸**, Malik Hubdieb, 春日井昇平, 五十嵐順正. マイクロスレッド構造がインプラント周囲骨の応力と歪み分布に及ぼす影響. 平成 22 年度社団法人日本歯科補綴学会東京支部総会・第 14 回学術大会(東京) 2010.10.16.

Ona M, Igarashi Y, **Wakabayashi N**. Failure Risks of CAD/CAM Ceramic Inlays Depending on Preparation Design. 88th General Session & Exhibition of the International Association for Dental Research (Barcelona). 2010.7.14.

Yoda K, Ona M, Takahashi H, Sato M, Igarashi Y, **Wakabayashi N**. Bond strength of reactive adhesives between impression material and methylmethacrylate. 88th General Session & Exhibition of the International Association for Dental Research (Barcelona). 2010.7.14.

Hudeab M, **Wakabayashi N**, Kasugai S. Stress Transferring Mechanism around Microthreaded and Smooth Dental Implants. 88th General Session & Exhibition of the International Association for Dental Research (Barcelona). 2010.7.14.

澤田愛, **若林則幸**, 小奈正弘, 渡邊竜登美, 小林琢也, 野村太郎, 近藤貴之, 菅野夕貴, 鈴木哲也. 顎堤粘膜の粘弾性性質が内部歪みに及ぼす影響. 第 119 回日本補綴歯科学会学術大会(東京). 2010.6.12.

Hudeab M, **Wakabayashi N**, Suzuki T, Kasugai S. Morphological Classification and Stress Analysis of Mandibular Bone for Implant Placement. The 4th Congress of Asian Academy of Osseointegration (Hiroshima). 2008.7.18.

Yamazaki K, **Wakabayashi N**, Suzuki T, Furuya J, Kobayashi T. Effects of Tooth Loss and Aging on Memory in Rats. 86th General Session & Exhibition of the International Association for Dental Research (Toronto). 2008.7.1-5.

Yahagi R, **Wakabayashi N**, Suzuki T, Kitada Y. Swallowing function and oral sensation in young and elderly humans.

86th General Session & Exhibition of the International Association for Dental Research (Toronto). 2008.7.1-5.

Kondo T, **Wakabayashi N**, Suzuki T, Sawada A, Oda N, Ona M, Igarashi Y. Stress Analysis of the Mandibular Premolar Teeth in Molarless Patients. 86th General Session & Exhibition of the International Association for Dental Research (Toronto). 2008.7.1-5.

近藤貴之, **若林則幸**, 鈴木哲也, 澤田愛, 織田展輔, 小奈正弘, 五十嵐順正. 下顎大白歯欠損症例における小白歯部歯周組織の応力分析. 第 117 回日本補綴歯科学会学術大会(名古屋). 2008.6.7.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tmd.ac.jp/dent/pro1/Research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

若林 則幸(WAKABAYASHI NORIYUKI)
東京医科歯科大学・大学院医歯学総合研究科・准教授

研究者番号：00270918