429 咬合時における歯周組織の荷重-変位曲線と微視的変位挙動に関する研究

Research on Microscopic Displacement Behavior of Periodontium with Load-Displacement Curve Under Dental Occlusion

○正 森田 康之 (九大応研) 正 内野 正和 (福岡工技セ) 正 東藤 貢 (九大応研)
松下 恭之 (九大院歯) 正 新川 和夫 (九大応研) 古谷野 潔 (九大院歯)

Yasuyuki MORITA, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka
Masakazu UCHINO, Fukuoka Industrial Technology Center
Mitsugu TODO, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
Yasuyuki MATSUSHITA, Graduate School of Dental Science, Kyushu University
Kazuo ARAKAWA, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
Kiyoshi KOYANO, Graduate School of Dental Science, Kyushu University

1. まえがき

咬合時における歯周組織、すなわち歯牙、歯根膜、歯槽骨(顎骨)の変位・変形挙動の解明は、矯正や歯周病の原因究明の観点から歯科医学分野において重要な研究課題の一つである。したがって、以前より様々な見地からそれに関する研究が行われており、計測手法も多様に開発されている。しかしながら計測装置の空間的制約などにより、歯周組織の局所的な変位量・ひずみである一点計測しか行えていない。したがって現状では、この一点計測による変位情報とロードセルによる荷重情報から荷重-変位曲線を構成し、咬合時における歯周組織の変位・変形挙動を推測しているに過ぎない。すなわち、以前の研究により、歯周組織の荷重-変位曲線は咬合の初期段階で変位が急激に増加し、その後、荷重が急激に増加するという二相性が指摘されている^{(1),(2)}。しかし、その特徴を変位・変形分布と関連付けた研究はない。

そこで本研究では、咬合時における歯周組織の荷重-変位曲線を得るとともに、デジタル画像相関法を用いて歯周組織の変位・変形分布の可視化を試み、荷重-変位曲線と変位・変形分布の関連付けを試みた。

2. 実験方法

2.1 デジタル画像相関法 デジタル画像相関法は、被測定物表面の固有に存在するパターン、あるいはスプレー塗料などの噴霧により意図的に作成したランダムパターンを利用する。被測定物の変位前後を CCD カメラなどで撮影し、得られた変位前後のデジタル画像の輝度値分布を比較することにより、被測定物表面全体の変位ベクトルを計測することが可能な方法である。変位量と変位方向は変位前の画像中の任意の位置を中心とする小さい画素領域(サブセット: $N \times N$ 画素)を基準として、変位後の画像より最も相関の良い画素領域を求め、その中心を変位後の移動位置とする。相関値 C_R を求める方法として使用した残差最小法の式を以下に示す。

$$C_R(X+u, Y+v) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M |I_d(X+u+i, Y+v+j) - I_u(X+i, Y+j)| \quad (1)$$

ここで、 $I_u(X, Y)$, $I_d(X+u, Y+v)$ はそれぞれ変位前後の画像光強度を示し、 X, Y はサブセットの中心座標、 u, v はそれぞれ x, y 方向への移動量である。また、 $N = 2M+1$ である。式(1)の総和が最小になる位置がそのサブセットの中心が移動した位置の最近接画素となる。しかしながら式(1)により得られた画素の位置が、必ずしも最も高い相関値を得るとは限らない。すなわち、実際の移動量は画素の整数倍とはならないため、画素間に相関のピークが存在することが一般的である。そのため画素間の補間を行う必要があり、それを考慮した相互相関法の式を次に

示す。

$$C_p(X+u, Y+v) = \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+u+i, Y+v+j) \times I_u(X+i, Y+j)}{\sqrt{\left(\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+u+i, Y+v+j) \right)^2 \times \left(\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_u(X+i, Y+j) \right)^2}} \quad (2)$$

補間方法は、最近接画素の前後の画素で式(2)より得られた相関値を用いて二次曲線近似による補間を行い、二次曲線の極大値を最も相関の良い位置とした。式(2)は式(1)に比べて計算に時間がかかる反面、画素間を補間する場合にはさらに良い相関が得られる利点をもつ。

2.2 試験片 可及的に生体に近い状態を実現するため、二～三日前に食用肉としてと畜されたブタの頭蓋骨を使用した。頭蓋骨から下顎骨を分離し、低速精密切断機(BUEHLER 社製 ISOMET)を用いて、後臼歯・歯根膜・歯槽骨からなる厚さ 2 mm の試験片を作製した。試験片の一例を図 1 に示す。後臼歯と歯槽骨は、歯根全域で厚さ数十～数百 μm の歯根膜と呼ばれる線維性結合組織により接着されている。なお切り出した試験片は、咬合試験を行う直前まで生理食塩水に浸け、乾燥を防いだ。

2.3 実験手順 咬合機能を模擬した圧縮試験に関しては、Gathercole⁽³⁾の手法に倣ったが、デジタル画像相関法を適用するため下記の手順で行った。(i) 生理食塩水から試験片を取り出し、表面の水分をデジタル画像相関法に用いるスプレー塗料が塗布できる程度に乾燥させる。(ii) スプレー塗料の噴霧により試験片表面にランダムパ

Fig. 1 Periodontium structure.

Fig. 2 Load-displacement curve.

ターンを形成する。(iii) 試験片の髓腔周辺の顎骨をバイスにより固定し(図1の破線A), 小型卓上試験機(島津製作所製 EZ Test)に設置する。(iv) 歯冠上端(図1の点B)に圧縮荷重を付与する。(v) CCDカメラにより変位画像を撮影する。

これまでの研究により単一の後臼歯に作用する咬合荷重は明らかになっているが, 今回のような薄片の後臼歯試験片に作用する実際の咬合荷重は不明である。したがって本研究では, 試験機による強制変位を付与することにより咬合荷重を負荷した。その押し込み量は $200\ \mu\text{m}$ とし, $20\ \mu\text{m}$ ごとに画像を取得した。

3. 実験結果

咬合試験により得られた荷重-変位曲線の一例を図2に示す。横軸が強制変位の値, 縦軸がその時の荷重を表している。約 $100\ \mu\text{m}$ 程度までは荷重が緩やかに増加しているのに対し, それ以降は荷重が急激に増加しており, まえがきで述べた荷重-変位曲線の二相性が実験でも得

られていることがわかる。

図2に示す点A~Eにおける変位分布を図3および図4に示す。図3は歯軸方向である y 方向の変位分布を示しており, 白色になるほど下方向の変位分布が大きいことを意味する。また図4は x 方向の変位分布を示しており, 白色になるほど右方向の変位分布が大きいことを意味する。まず歯軸方向である y 方向に注目する。白黒印刷の関係により図3からでは若干わかりにくいかもしれないが, (a)~(b)に示す $80\ \mu\text{m}$ 程度までは後臼歯のみ変位しているのに対し, (c)~(e)と押し込み量が増加するにつれ, 歯槽骨が変形していることがわかる。すなわち咬合の初期段階では, 歯槽骨と歯根膜の間に介在する歯根膜が大きく変形することにより, 変位のみが大きく増加している。一方, 次の咬合段階では, 歯槽骨が変形することにより, 荷重が急激に増加することがわかる。

また, 図4に示す x 方向の変位分布では, 咬合が進行するにつれ, 頬側の歯槽骨が大きく後臼歯の方向に変位していることを示している。これは, 咬合による後臼歯の大きな変位により, 歯槽骨と後臼歯の間に大きな間隙が開かないよう歯根膜が歯槽骨を引っ張っていると推測できる。

4. まとめ

咬合時における歯周組織の荷重-変位曲線を得るとともに, デジタル画像相関法を用いて歯周組織の変位・変形挙動を可視化し, 荷重-変位曲線と歯周組織の変位・変形挙動の関連付けた。

参考文献

- (1) Parfitt G.J., *J. Dent. Res.*, **39**-3, (1960), 608-618.
- (2) Berkovitz, B.K.B, Moxham B.J. and Newman H.N., *The Periodontal Ligament in Health and Disease 2nd Edition*, (1995), 215-241, Mosby-Wolfe.
- (3) Gathercole L.J., *Archs. Oral Biol.*, **32**-4, (1987), 249-255.

Fig. 3 v -displacement field of the fresh periodontium specimen. Fig. 4 u -displacement field of the fresh periodontium specimen.