荷重下での天然歯の挙動

高橋 典章** 奥 田 健* 北上 徹也* 小森 富夫*

Behavior of Tooth Supporting System under Loading

Noriaki Takahashi,** Ken Okuda,* Tetsuya Kitagami*
and Tomio Komori*

緒 言

荷重時の天然歯の挙動を把握することは、補綴学、矯正学および歯周病学的な立場からみて重要なことであり、その挙動様相についての研究は古くから数多くなされてきた。

Schwarz¹⁾ は種々の方向からの負荷に際しての動態について、Mühlemann²⁾ は荷重時の変位量およびその際の回転中心について組織学的所見とあわせて報告している。また Morris³⁾ は回転中心よりモーメントの大きさを求め、安定した咀嚼圧の歯への分布について検討し、Mühlemann⁴⁾ は歯の挙動を幾何学的に作図し、荷重時の回転中心を求める方法について検討している。また Haack⁵⁾、Christiansen⁶⁾ などは、適切な矯正力を検討すべく、歯の動態について調査するとともに、荷重時の回転中心についても考察している。しかしこれらの研究は、いずれも模型実験や直接生体から変位を測定する方法がとられているため、歯全体の変位状態や歯根膜内の応力分布については言及されていない。

Ledly⁷⁾ は in vivo で得られた変位の測定値をもとにして上顎中切歯の数値モデルを作製し、Huang⁸⁾ はそのモデルを使用して種々の荷重条件での変位を求めている。また、Thresher⁹⁾ は、有限要素法により荷重下での上顎中切歯モデル内に発生する応力について報告し、鬼頭^ら¹⁰⁾ も有限要素法により水平荷重時の歯、歯

根膜および下顎骨の力学的挙動の基礎的調査を行い、有限要素法を応用することの妥当性を強調している。

今回私たちは、種々の荷重に伴う歯の変位や歯根膜の動態に関して、有限要素法を導入することにより、より正確に詳細なデータを把握することを計画し、歯の有限要素モデルに、従来から歯周組織の機能構造、とくにその歯根膜線維の走向から有害であると多くの人々によって指摘されている側方圧^{11,12)}を加えて調査を試みたところ、興味ある知見を得たので報告する。

解析方法

対象歯としては、上顎中切歯、下顎第2小臼歯および下顎第1大臼歯を採りあげ、有限要素モデルを作製したが、各歯の寸法¹³⁾および歯根膜の厚み¹⁴⁾は成書を参考にして作図するとともに(図1)、エナメル質、象牙質および歯根膜のヤング率とポアソン比は先人達の報告¹⁵⁻¹⁷⁾にもとづき表1に示すようにした。また支持条件は、歯根膜外周全域を固定支持とし、歯軸に対し30°、60°および90°の傾斜をもつて静止集中荷重1kgを咬頭頂付近に負荷した。なお解析は、2次元平面応力問題とするとともに、紙面に対し垂直な方向には厚さを1.0mmとした。

上記条件のもとで応力解析を行い、各歯における変位状態、歯の回転中心および歯根膜の応力と支持力などについて検討した。なお解析には大阪大学大型計算機センターを利用した。

成 績

A. 変位および回転中心について

各荷重負荷時の変位状態および回転中心の位置は、図2~10に示すとおりであるが、破線は、変位後の状態、RC

* 大阪歯科大学歯科補綴学教室第2講座(主任:小森富夫教授)

* Osaka Dental University, 2nd Department of Prosthodontics (Director, Prof. Tomio Komori)

** 大阪歯科大学大学院歯学研究科歯科補綴学専攻(指導:小森富夫教授)

** Osaka Dental University, Graduate School Major in Prosthodontics (Director, Prof. Tomio Komori)

昭和52年5月26日受付

図1 解析に供した各歯モデルの寸法

図2 30°傾斜荷重時の変位図(破線)

RC: 回転中心

表1 各材質の物理的諸性質

Materials	Young's m.	Poisson's r.
Enamel	5000. kg/mm ²	0.30
Dentin	1200. "	0.30
Periodontium	1. "	0.45

図3 60°傾斜荷重時の変位図

は回転中心を意味している。また表2は、各歯の参照点(上顎中切歯;切端,下顎第2小臼歯;頬側咬頭頂,下顎第1大臼歯;中央窩)における荷重角度の増加にともなう変位量を抽出して表示したものであるが、歯種に関係なく荷重角度が増加するにしたがい、変位量は増大した。また回転中心は、30°傾斜荷重時では、非傾斜側で

図 4 水平荷重時の変位図

図 5 30° 傾斜荷重時の変位図

図 6 60° 傾斜荷重時の変位図

図 7 水平荷重時の変位図

図 8 30° 傾斜荷重時の変位図

歯根根尖側 1/3 部の歯根外側にあり、荷重角度の増加とともに歯軸方向に近付き、水平荷重時ではほぼ歯軸上に存在していた。なお図 2～7 に示す上顎中切歯および下顎第 2 小臼歯では、回転中心は各部の変位にもとづき比較的 1 点に近く求めることが可能であつたが、図 8～10 に示す下顎第 1 大臼歯では、正確に 1 点としてその存在

を求めることが困難であつたので、上顎中切歯および下顎第 2 小臼歯の場合に比較してやや大きめの○印を記入して示すこととした。

図 9 60° 傾斜荷重時の変位図

図 10 水平荷重時の変位図

B. 歯根膜の挙動について

図 11~13 は歯根膜外周に設定した固定点における水平方向の反力を示したもので、実線は圧縮力を、破線は引張り力を表わしている。なお、この反力は歯根膜が受ける水平方向の支持圧と解釈して評価の資とした。図

表 2 各荷重条件下の参照点における変位量の比較 (mm)

Reference points	Loading angle		
	30°	60°	90°
Incisal edge (1)	0.115	0.223	0.273
Buccal cusp (5)	0.073	0.160	0.207
Central fossa (6)	0.058	0.143	0.192

図 11 歯根膜外周部の固定点における水平方向の反力 (上顎中切歯)

11~13 からは、歯種に関係なく歯根膜の受ける支持圧は、歯頸部寄りのやや根尖側に位置した所が最も大きく、次いで根尖部付近で、回転中心の存在する歯根 1/3 部では最も小さかった。また支持圧の大きさに関しては上顎中切歯、下顎第 2 小臼歯の単根歯では比較的似た分布様式であるのに比して、複根歯の下顎第 1 大臼歯ではその分布様式が若干異なり、とくに根尖部における支持圧が大きくなっていた。

荷重角度の変化とともに、歯根膜内に分布する応力も多様に変化するが、歯根膜全体における応力の大小関係を明瞭に把握するため、各歯の歯根膜内に発生した相当応力の総和を荷重角度ごとにまとめ、表 3 に示した。相当応力 (σ_e) とは単位面積中に貯えられるせん断ひずみエネルギーより、以下の式にて求められるものである。

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \times \sigma_2 + \sigma_2^2} \quad \sigma_1, \sigma_2; \text{主応力}$$

表 3 から明らかなように、歯種に関係なく荷重角度の増加とともに歯根膜内における相当応力の総和は著明

に増加を示した。

C. モーメントについて

回転中心が求まれば、荷重により歯の受けるモーメントを算出することができる。すなわち図 14 に示したように、回転中心 (RC) から荷重方向の延長線への垂直

距離 (D) と荷重との積 ($D \times 1 \text{ kg load}$) がモーメントの大きさとなる。各歯について荷重角度の増加に伴うモーメントを示したものが表 4 で、表からも明らかなように、歯種に関係なく荷重角度が大きくなるとモーメントも増大した。

総括と考察

A. 解析モデルについて

本解析モデルにおいては、歯髓の存在を無視したがその理由は、本解析は歯の挙動に対する歯髓腔の影響を調査するものではなく、おもに歯と歯根膜の supporting system を把握するためのものであり、仮に実際の歯の形状の断面を歯髓腔を含めてそのまま 2 次元モデルにするならば、歯髓腔の影響が 3 次元的な実際の歯よりも強く表現されることになり、歯の曲げ剛性が小さくなってしまふからである。したがって、上記のことを配慮して歯髓腔を含めず、エナメル質と象牙質とのみからなる歯のモデルを作製した。

表 3 各荷重条件下において歯根膜内に発生した相当応力の総和の比較 (kg/mm²)

Teeth	Loading angle		
	30°	60°	90°
<u>1</u>	2.31	3.74	4.48
<u>5</u>	2.43	3.77	4.73
<u>6</u>	3.37	6.00	7.86

図 12 歯根膜外周部の固定点における水平方向の反力 (下顎第 2 小白歯)

図 13 歯根膜外周部の固定点における水平方向の反力 (下顎第 1 大白歯)

図 14 歯の受けるモーメントを求めるための模式図

RC : 回転中心, D : 回転中心から荷重方向の延長線への垂直距離

表 4 各荷重条件下でのモーメントの比較 (kg・mm)

Teeth	Loading angle		
	30°	60°	90°
<u>1</u>	10.7	15.3	17.2
<u>5</u>	9.7	11.7	14.3
<u>6</u>	7.1	11.7	15.0

歯根膜の厚みは歯種によつて異なるという報告¹⁸⁾もあるが、同一歯では歯頸部で最も厚く、次いで根尖部で、歯根中央部では最も薄いという報告^{14,19,20)}は一致した見解である。本実験は各歯種間での挙動の差を究明するものではなく、荷重角度による影響を調べるのが主たる目的であるため、上顎中切歯、下顎第2小臼歯および下顎第1大臼歯での歯根膜厚みはすべて歯頸部で 0.4 mm、中央部で 0.2 mm、根尖部で 0.3 mm とした。

荷重はすべての場合に 1 kg としたが、本解析は弾性範囲内で処理されているため、荷重の大小は変位、応力ともすべて比例的に換算されるため、結果を定性的に評価するかぎりでは問題とはならない。

B. 変位状態および回転中心について

Ledly ら⁷⁾は回転中心の存在を否定し、歯根膜の圧縮および引張りの状態にもとづいて数値モデルを作製しているが、私たちは、前述した図2~10に示したように、

表 5 荷重角度の増加に伴う変位 (Def), 相当応力の総和 (Est), 歯根膜の受ける水平方向の反力 (RX) の増加率

Teeth		Loading angle		
		30°	60°	90°
<u>1</u>	Def	1.	1.94	2.37
	Est	1.	1.62	1.94
	RX	1.	1.83	2.13
<u>5</u>	Def	1.	2.19	2.84
	Est	1.	1.55	1.95
	RX	1.	1.94	2.38
<u>6</u>	Def	1.	2.47	3.31
	Est	1.	1.78	3.32
	RX	1.	2.29	2.86
Increase rate of horizontal vector of load		1.	1.73	2.00

明らかに回転中心と思われるものの存在を認めることができた。しかしこの回転中心は、上顎中切歯および下顎第2小臼歯では比較的1点に近く定まったものの、下顎第1大臼歯では1点に定まりにくく、多少の移動範囲をもつ回転中心域と解されるものであつた。このことは下顎第1大臼歯が複根歯であるために、上顎中切歯や下顎第2小臼歯に比較して複雑な挙動を呈し、単純な回転運動を起こさなかつたものと思われる。

C. 歯根膜の動態について

歯種に関係なく歯根膜の支持圧は、歯頸部からやや根尖側に寄つた所で最大であつたが、このことは歯根膜の厚みおよび歯根の形態などに影響されたものと推察される。

表5は荷重角度の増加にともなう変位 (Def), 歯根膜内の相当応力の総和 (Est) および最大支持圧 (RX) を各歯種別に、30°傾斜荷重時の場合を1としておのの増加率を示したものである。表5からも明らかなように、荷重角度が30°, 60°および90°と増加するにしたがつて荷重の水平分力は 0.5 kg, 0.866 kg, 1.0 kg (ratio, 1 : 1.73 : 2) と増加するが、歯種に関係なく変位および歯根膜の最大支持圧は、荷重の水平分力の増加率以上に増大していた。一方荷重の垂直分力は、荷重角度の増加とともに 0.866 kg, 0.5 kg, 0. kg と減少して行くのであるが、歯根膜内の相当応力の総和が、ほぼ荷重の水平分力の増加率と等しい割合で増加していることからみても、水平分力のほうがtooth supporting systemにいかにか大きな影響を与えるかということが明らかになった。また水平分力が歯に与える影響力の強さは下顎第1大臼歯で最も大きく、次いで下顎第2小臼歯、上顎中切歯の順であつた。

D. モーメントについて

Morris³⁾ は、種々の荷重方向からの負荷時の歯の挙動に関して、回転中心は常に一定と仮定して、歯の受けるモーメントを算出しているが、荷重角度の増加により回転中心は歯根外側から歯軸上へと移動するので、Morrisの計算によるモーメントは、本解析結果より小さめに評価されていることになる。したがって傾斜荷重の生み出すモーメントは、Morrisの結果よりも大きいということが判明した。

E. 有限要素法による解析について

有限要素法は、Turner ら²¹⁾により発表されて以来急速な発展をとげ、最近では歯学分野でも数多く採りあげられている^{9,10,22-24)}。なお有限要素法についての詳細および歯学分野での研究成果などについては末尾文献を参照されたい^{25,26)}。

本法を採用した生体に関する数値 simulation は、境界条件の設定および材料定数などの面で、まだ不確定因子が多く、歯を2次元解析した場合には、とくにその評価は慎重に行う必要がある。私たちは、従来から有限要素法の適用に際しては、まず得られた結果を定性的に評価すべきことを強調したが²⁷⁾、本解析においても、2次元解析法であることを十分考慮し、結果はすべて定性的に評価するように配慮した。

結 論

歯に悪影響を与えやすい側方圧が負荷された場合の歯および歯根膜の挙動について調査する目的で、有限要素法を用いて解析を試みた。対象として上顎中切歯、下顎第2小臼歯および下顎第1大臼歯の3種を採りあげ、おのおのの有限要素モデルを作製し、歯軸に対し30°、60°および90°の角度で静止集中荷重1kgを負荷し、その際の歯の変位状態、回転中心、歯根膜の応力ならびに支持圧などについて検討し、歯種に関係なく次のごとき結果を得た。

- 1) 荷重角度が増加するにしたがい変位量は増大した。
- 2) 回転中心は、30°傾斜荷重時では非傾斜側で歯根根尖側1/3部の歯根外側にあり、荷重角度の増加とともに歯軸方向に近付き、水平荷重時にはほぼ歯軸上にあった。
- 3) 歯根膜の支持圧は、荷重角度に関係なく、歯頸部からやや根尖寄りの所で最も大きく、次いで根尖付近で、回転中心の存在する歯根側1/3部で最も小さかった。

4) 歯根膜内に発生する相当応力の総和は、荷重角度が大きくなるにつれて増大した。

5) 歯の受けるモーメントは、荷重角度が増加するにつれて増大した。

6) 変位および歯根膜の最大支持圧は、荷重角度の増加にともなう荷重の水平分力の増加以上に大きくなり、荷重の水平分力が歯および歯根膜に与える影響がいかに大きいかが発明された。また下顎第1大臼歯が最もその影響を受けやすく、次いで下顎第2小臼歯、上顎中切歯の順であることも判明した。

文 献

- 1) Schwarz, A.M.: Über die Bewegung belasteter Zähne, Zschr. f. Stom., 1: 40~83, 1928.
- 2) Mühlemann, H.R.: Tooth Mobility (I)~(V), J. Periodont., 25: 22~29, 125~128, 128~137, 198~202, 202~208, 1954.
- 3) Morris, M.L.: The Diagnosis, Prognosis and Treatment of The Loose Tooth, Oral Surg., Oral Med. and Oral Path., 6: 957~964, 1037~1046, 1953.
- 4) Mühlemann, H.R., Houghlum, M.W.: The Determination of The Tooth Rotation Center, Oral Surg., Oral Med. and Oral Path., 7: 392~394, 1954.
- 5) Haack, D.C., Weinstein, S.: Geometry and Mechanics as Related to Tooth Movement Studied by Means of Two-dimensional Model, J. Amer. Dent. Ass., 66: 157~164, 1963.
- 6) Christiansen, R.L., Burstone, C.J.: Centers of Rotation within The Periodontal Space, Amer. J. Orth., 55: 353~369, 1969.
- 7) Ledley, R.S., Huang, H.K.: Linear Model of Tooth Displacement by Applied Forces, J. Dent. Res., 47: 427~432, 1968.
- 8) Huang, H.K., Ledly, R.S.: Numerical Experiments with a Linear Force-Displacement Tooth Model, J. Dent. Res., 48: 32~37, 1969.
- 9) Thresher, R.W., Saito, G.E.: The Stress Analysis of Human Teeth, J. Biomech., 6: 443~449, 1973.
- 10) 鬼頭政勝, 近藤 晃, 水上 深, 末次恒夫, 村上敬宣: 有限要素法による咬合力と歯、歯根膜および下顎骨の力学的挙動に関する基礎的研究, 補綴誌, 19: 693~701, 昭 51 (1976).
- 11) 石川梧朗, 秋吉正豊: 口腔病理学, 490~495, 永末書店,

- 京都, 昭 46 (1971).
- 12) 石川 純, 加藤 潔: 咬合性外傷, 歯界展望別冊一咬合を考える一, 69~87, 昭 48 (1973).
- 13) 白敷美輝雄, 中村正雄, 古橋九平: 歯の形態学, 臨床歯科社, 京都, 昭 43 (1968).
- 14) Kiein, A.: Systematische Untersuchungen über die Periodontalbreite, Zschr. f. Stom., 26: 417~439, 1928.
- 15) Stanford, J.W., Weigel, K.V., Paffenbarger, G.C., Sweeney, W.T.: Compressive Properties of Hard Tooth Tissues and some Restorative Materials, J. Amer. Dent. Ass., 60: 746~756, 1960.
- 16) Bowen, R.L., Rodriguez, M.S.: Tensile Strength and Modulus of Elasticity of Tooth Structure and several Restorative Materials, J. Amer. Dent. Ass., 64: 378~387, 1962.
- 17) Katz, J.L.: Hard Tissue as a Composite Material, J. Biomech. 4: 455~473, 1971.
- 18) Coolidge, E.D.: The Thickness of The Human Periodontal Membrane, J. Amer. Dent. Ass., 24: 1260~1270, 1937.
- 19) Sicher, H.: Orban's Oral Histology and Embryology, 6th ed, 191, The C.V. Mosby Co., Saint Louis, 1966.
- 20) 黒川博行: 成人歯根膜の厚さと線維の走行方向, 日組織誌, 1: 227~230, 昭 25 (1950).
- 21) Turner, M.J., Clough, R.W., Martin, H.C., Topp, L.J.: Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures, J. Aero. Sci., 23: 805~823, 1956.
- 22) 小森富夫, 北上徹也, 高橋典章, 他: ブレードインプラントの応力解析, 第1報, 歯科医学, 39: 810~818, 昭 51 (1976).
- 23) 小森富夫, 北上徹也, 高橋典章, 他: ブレードインプラントの応力解析, 第2報, 歯科医学, 40: 112~118, 昭 52 (1977).
- 24) 小森富夫, 北上徹也, 高橋典章, 他: 骨内埋入時のブレードインプラントの応力解析, 第3報, 歯科医学, 40 (2), (印刷中).
- 25) 堤 定美: 有限要素法の基礎, 国際歯科ジャーナル, 5: 231~242, 昭 52 (1977).
- 26) 宮川 修, 塩川延洋: 有限要素法について, 歯界展望, 44: 903~911, 昭 49 (1974).
- 27) Takahashi, N., Kitagami, T., Komori, T.: Stress Analysis of Bridge on Blade-Vent Implant. (投稿中).