

2点3次元変位測定法を用いた荷重時における歯の抵抗中心位の推定

吉田教明, 古賀義之, 三牧尚史, 小林和英, 山田好秋*

長崎大学歯学部歯科矯正学講座

*新潟大学歯学部口腔生理学講座

〔受付：平成12年2月21日〕

Estimation of the location of center of resistance of the tooth subjected to the load by measuring two target points' displacements in three dimensions

Noriaki Yoshida, Yoshiyuki Koga, Naofumi Mimaki, Kazuhide Kobayashi, Yoshiaki Yamada*

Department of Orthodontics, Nagasaki University School of Dentistry

**Department of Oral Physiology, School of Dentistry, Niigata University*

〔Received: February 21, 2000.〕

Key Words: center of resistance, tooth movement, orthodontic force, hall element, magnet

Abstract: The line of action of a force in relation to the center of resistance of a tooth is an important consideration in determining a set of force and moment acting on the tooth. If the relationship between them could be clarified experimentally, the type of tooth movement would be also estimated, and efficient tooth movements will be achieved through the minimum course without round-tripping of the tooth thereby.

We have developed a system for real-time measurement of two target points' displacements in three dimensions and determined the location of center of resistance of a maxillary central incisor subjected to orthodontic forces in human subjects. As a result, the center of resistance was observed at a point 0.19 times the root length from the alveolar crest and found to be closer to the crown than the location determined from a theoretical consideration. It was suggested that the location of center of resistance depends not simply on the shape of the root but on anatomical morphology of the surrounding tissues such as periodontal ligament and alveolar bone.

抄録 歯の抵抗中心位と荷重ベクトルの関係がわかれば、歯に与えられる力とモーメントの組み合わせが決定され、歯の移動様式を推定することができる。すなわち、歯を最終的な目標位置へ最短距離で移動するために必要な力系を設定することが可能となり、効率的な歯の移動が実現される。

本研究では、磁気センサを応用した変位測定システムを用いて、ヒト上顎中切歯に矯正力を負荷した時の2標点の変位を実時間で記録し、抵抗中心位を求めた。その結果、歯の抵抗中心は歯槽頂より歯根長の19%根尖側寄りの位置に観察された。これは、従来考えられていた歯根長の歯頸側1/3よりも歯冠側寄りに位置していた。荷重時の歯の抵抗中心位は歯の形態によって、単純に決定されるのではなく、それを取り巻く歯根膜や歯槽骨の解剖学的形態などの様々な要因が複合して決定されることが示唆された。

I. 緒 言

歯の抵抗中心位と荷重ベクトルの関係を把握することは、矯正力を負荷する際に歯がどのように移動していくかを理解する上で重要である。矯正治療時の歯の移動様式に、抵抗中心位が決定的な役割を持つことがこれまでの研究でも明らかになっている¹⁻³⁾。歯の抵抗中心とは、力の作用線が通過すると、歯体移動を引き起こすところの点と定義されている²⁾。逆に、荷重ベクトルが歯の抵抗中心からはずれて通過する場合には、力の大きさと、力の作用線と抵抗中心間の垂線距離との積の大きさで表されるモーメントが生じ、歯を傾斜させようとする。したがって、歯の抵抗中心位がわかれば、歯に与えられる力とモーメントの組み合わせが決定される。さらに、求められた力系より歯の動きを予測することができ、効率的な歯の移動をもたらされる。

歯の抵抗中心位を求める研究には、実験的解析⁴⁻⁸⁾や有限要素法を用いた数値解析^{9,10)}などがあるが、ヒト頭蓋骨を用いた実験やモデル解析のため、実際の臨床に応用するには、生体との条件が異なりすぎ、信頼性が少ないと思われる。そこで、生体における歯の抵抗中心位を実験的に解明することが求められている。矯正力負荷時の歯の変位測定には、ホログラフィー干渉法と呼ばれる、生体外部に設置したレーザー光源から変位前後の被測定歯を二重露光し、干渉縞を記録する光学的な手法

^{11,12)}と歯に取りつけた磁石の変位を口腔内に設置した磁気センサで記録する方法¹³⁻¹⁷⁾が用いられてきた。前者は頭部の変動が測定精度を著しく悪化させ、後者は複数個の磁石による磁場の相互干渉が懸念されるために測定点が1点に限定され、3自由度のみの変位測定にとどまっていた。このような理由から、ヒト生体を対象として歯の抵抗中心位を実際に求めることに成功した研究はこれまでになかった。

本研究では、磁気センサを応用した変位測定システムを用いて、ヒト上顎中切歯に矯正力を負荷した時の2標点の変位を実時間で記録し、抵抗中心位を求めた。

II. 方 法

荷重時の歯の動態を解析するために、磁気センサを応用した3次元変位測定システム¹⁷⁾を用いた。変位センサとして小型で分解能に優れたホール素子(旭化成電子社:HW-302B)と、標点としてネオジウム磁石(IBS Magnet Ing.社:NE412,直径4.0 mm,厚さ1.2 mm)を組み合わせた。3次元の変位を測定するために、磁石を中心として、8個のホール素子を立方体の各頂点に位置するようにコの字型のアルミチャンネル上に貼付し、センサ部を構成した(図1)。ネオジウム磁石は、サマリウム・コバルト磁石と比較してエネルギー積が大きい反面、腐蝕性があるためニッケルメッキし、さらにア

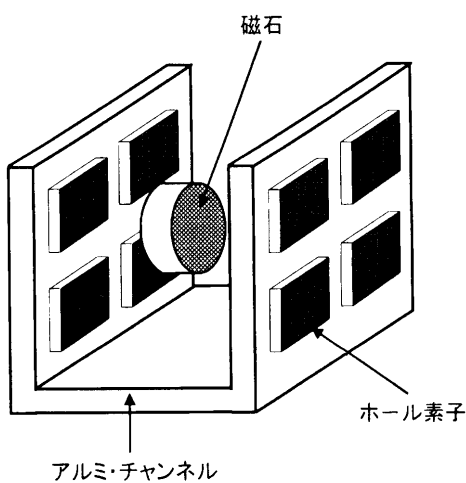


図1 3次元変位測定装置のセンサ部
Fig. 1 Sensor unit for detecting three dimensional displacement

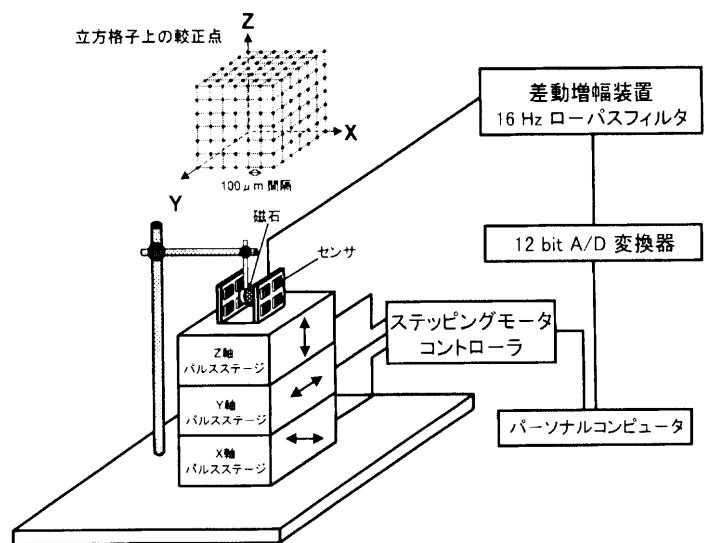


図2 較正システム
Fig. 2 Calibration system

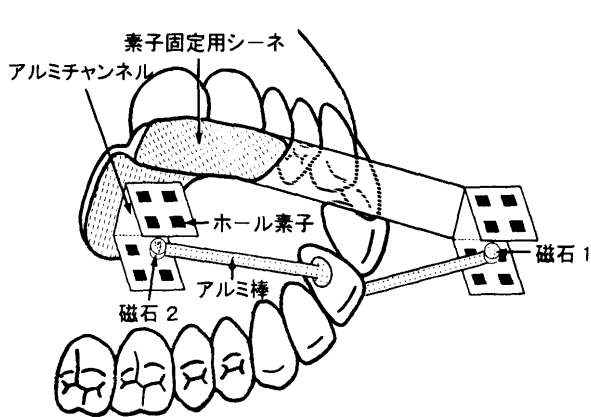


図3 2点3次元変位測定システムのプロックダイアグラム

Fig. 3 Block diagram of the measurement system for two target points' displacements in three dimensions

クリルレジンで包埋した。ホール素子は絶縁、防湿を目的に、吸水性のないエポキシ系接着剤（コニシ社：ボンドクイック5）で被覆した。

システムの較正を行うために、8個のホール素子が貼付されたアルミチャンネルを1ステップ $1\mu\text{m}$ の送り出しが可能な3軸自動パルスステージ（中央精機社：MM-60X・Y, MM-60V）上に取り付けた（図2）。次に、磁石をホール素子部の中心に位置するようにアルミ製ポールを介して固定した。3軸自動パルスステージを3次元的にステップ移動させることで、磁石とホール素子の相対移動を行った。一辺 $600\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 間隔の立方格子上の343（ $7 \times 7 \times 7$ ）点で較正を行った。各較正点におけるホール素子8個の出力電圧とX, Y, Z座標値から重回帰分析を行い、出力-変位変換近似式を作成した。

ホール素子8個の出力電圧は、それぞれ高精度ローパワー計測アンプ（BURR-BROWN社：INA118）で500倍に差動増幅し、同時にDC-オフセットを補正した。増幅した信号は、16 Hzのローパスフィルタにより、高域ノイズを除去した後、12bit A/D変換器を介して、パーソナルコンピュータに入力し、必要な演算を行った。3軸自動パルスステージの各較正点への順時送り出しは、多軸ステッピングモータコントローラ（中央精機社：MMC-2）を介してパーソナルコンピュータで制御した。

歯の変位測定を行うにあたり、磁石を移動部である被測定歯の上顎中切歯に、ホール素子を固定部である臼歯部に固定した。測定点は、上顎中切歯から唇側と口蓋側に延長した2点とした。素子固定用シーネ上に、8個の

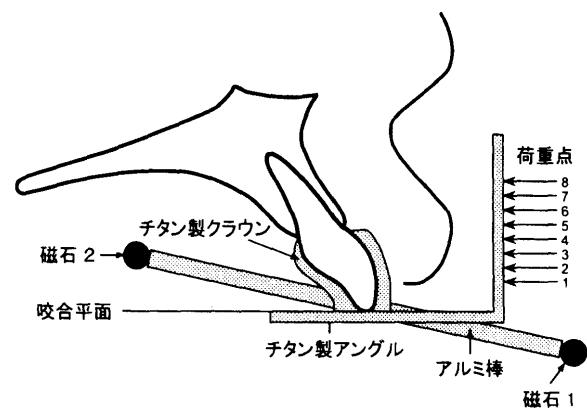


図4 荷重点と被験歯の位置関係

Fig. 4 Lateral view the demonstrating the relationship between the loading levels and the subject tooth

ホール素子が貼付されたアルミチャンネルを唇側と口蓋側にそれぞれ固定し、臼歯部に装着した（図3）。標点となる2個の磁石は唇側と口蓋側のホール素子部の中心に配置し、アルミ棒を介して上顎中切歯に接合した。この際に、2つの磁石による相互干渉を極力排除するために、磁石間の距離を70mmと十分に離れた。被測定歯の唇側に設置された磁石を単独でX, Y, Z軸方向へそれぞれ $2000\mu\text{m}$ 変位させた時の口蓋側に設置されたセンサ部のX, Y, Z座標測定値の変化は、いずれも $1\mu\text{m}$ 以下で有意な変化がみられなかった。荷重時のガイドとして、厚さ2mmのチタン製アングルの一侧に荷重点として、2mm間隔の半球の穴を8個形成し、中切歯に装着するチタン製クラウンにレーザー溶接した（図4）。この際に、チタン製アングルの荷重点側の面を唇側に向け、咬合平面に直交するように設置した。一つ目の荷重点を中切歯ブラケットのスロット位置に相当する、切縁より4.5mmに設定し、その点から歯根側に向けて2mm間隔でさらに7個の荷重点を設定した。荷重方向は、咬合平面と平行の舌側方向とした。

磁石を被測定歯に、ホール素子を臼歯部にそれぞれ固定するために、チタン製クラウンおよび素子固定用シーネをユージノールセメントで合着した。

荷重は、被測定歯から延長したチタン製アングルを介して、鉛の重力を歯に伝達する方法を用いた。この際、被験者に装着されたセンサ部座標系における荷重方向、すなわち咬合平面と正中矢状平面の交線方向が重力方向に一致するよう、頭部を位置づけた。すなわち、鉛製のおもりを載せるチタン製アングルの荷重点側の面が地面

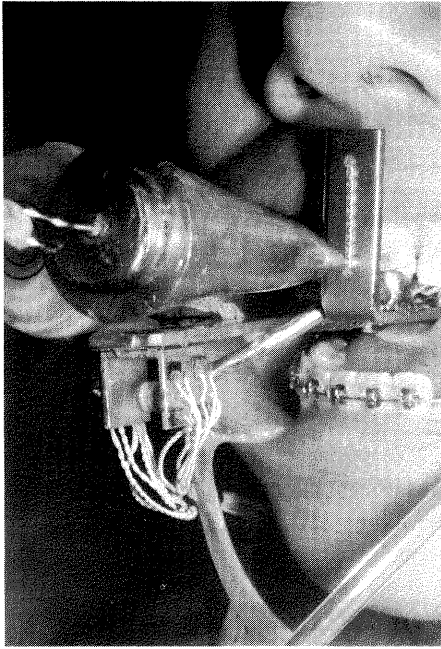


図5 測定状況
Fig. 5 Scene of practical measurement

と平行となるように、実測中水準器を用いて頭位のモニタリングを行った。測定状況を図5に示す。

各荷重点につき100gの荷重を5秒ずつ負荷し、その際の被験歯の変位量を測定した。除重後、変位量が十分に原点復帰するのを確認し、次の測定を行った。測定は、1日3回を2日繰り返し、合計6回行った。

測定は、正常歯列を有する24歳の成人女性を対象として行った。被験歯は上顎左側中切歯とした。

上顎前歯の舌側移動時において、正中矢状平面上に投影した歯の動態解析が臨床上重要なため、同平面上における2つの磁石の変位量から歯の回転角を算出した(図6)。磁石1の変位ベクトル $\overline{M_1M_1'}$ の成分を $(\Delta X_1, \Delta Y_1)$ 、磁石2の変位ベクトル $\overline{M_2M_2'}$ の成分を $(\Delta X_2, \Delta Y_2)$ とする。線分 $\overline{M_1M_2}$ をX軸方向に $-\Delta X_2$ 、Y軸方向に $-\Delta Y_2$ 平行移動させると、 M_2 を頂点とする、頂角 θ 、等辺L、底辺

$\sqrt{(\Delta X_1 - \Delta X_2)^2 + (\Delta Y_1 - \Delta Y_2)^2}$ からなる2等辺三角形を形成する。したがって、頂角 θ は、底辺の長さを用いた三角関数で表すことができる。次に、荷重位置と回転角のグラフを作成し、回転角を示す折れ線が荷重位置を示す縦軸と交わる点、すなわち回転角がゼロとなる荷重レベルを求めた。そのレベルに力の作用線を設定した場合に、歯は歯体移動すると考えられ、歯軸と交わる点を代表して抵抗中心位と決定した。

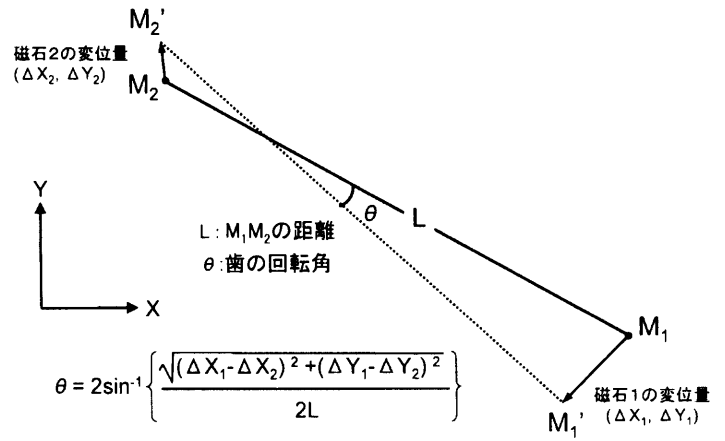


図6 回転角の算出法
Fig. 6 Numerical expression for angle of tooth rotation

III. 結果および考察

1. 歯の回転角および抵抗中心

荷重点と歯の回転角の関係を図7に示す。プラス側が歯冠舌側傾斜の回転、マイナス側が歯冠唇側傾斜を示す。

ブラケット位置に相当する荷重点1に100gの舌側力を負荷した時には、上顎中切歯は0.13°歯冠舌側傾斜した。荷重位置をブラケット位置から根尖側へ2mm移動した荷重点2では、回転角の大きさが0.07°に減少した。荷重点3でさらに減少し、荷重点4付近で、回転角がゼロとなり、この荷重レベルで歯が歯体移動することを示した。荷重点5では回転方向が逆転し、上顎中切歯は歯冠唇側傾斜した。荷重点6, 7, 8でさらに歯冠唇側傾

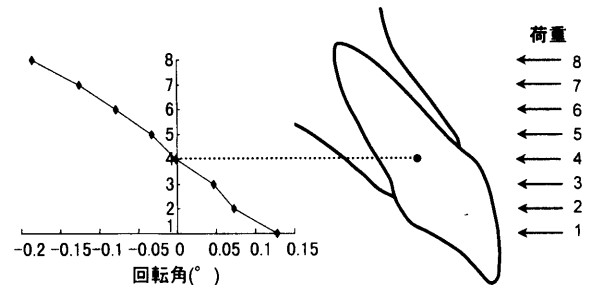


図7 荷重点と歯の回転角の関係
Fig. 7 Relationship between loading level and angle of tooth rotation

斜方向に回転角が増加した。

上顎中切歯に舌側力を負荷した時の抵抗中心は、回転角がゼロを示す荷重点4付近に存在することが示された。この位置は、側方頭部X線規格写真上で確認された歯槽頂より歯根長の19%根尖側寄りであった。Burstoneら¹⁾によると、歯根形態が放物体に近似される場合には、幾何学的な図心が歯槽頂より歯根長の1/3(約33%)に位置し、モデル実験によっても、ほぼこの位置に抵抗中心が存在することを示した。Tanneら⁹⁾は有限要素法を用いて抵抗中心位を求め、歯槽頂より歯根長の24%の距離にあると報告している。この結果は、Burstoneらの報告よりも歯冠側にあり、著者らは解剖学上歯槽頂近遠心面が咬合面側にせりあがっているためと結論づけている。今回生体で求められた抵抗中心は、Tanneらの報告よりもさらに歯冠側に観察された。彼らが咬合平面に対し直立した歯の有限要素モデルを用いたのに対し、本研究で用いた被験歯は、著しく唇側傾斜しており、植立状態に大きな違いがあったことから、単純に比較することはできないが、歯根膜および歯槽骨の物性値には応力依存性があり、有限要素法を用いた線形解析により、実際の歯の初期変位を表現することの難しさが示唆された。

一般に、歯根形態は完全な放物体とは考えられず、単根歯の抵抗中心が、歯槽頂より歯根長の1/3に位置するという仮説には信頼性がない。また、歯の形態以外に、歯を支持する歯根膜や歯槽骨の解剖学的形態や物理的性状などの様々な要因が歯の抵抗中心位に複雑に影響を及ぼし合うために、大きな個体差があると考えられる。今後被験者数を増加し、抵抗中心位と歯および歯槽骨の解剖学的形態との関係を解明していきたい。また、同一個体においても、荷重量や荷重時間などの力学的パラメータや歯根膜の機能的状態など複数の要因が抵抗中心位を決定していると考えられるため、これらの点についても明らかにしていきたい。

2. 測定システムについて

本研究に先立ち、1点3次元変位測定システムを開発し、荷重時の歯の回転中心位を求めた¹⁷⁾。これにより、歯の動きを回転中心の位置と角度で表現することができた。しかしながら、得られる情報は1点の3自由度の動きに限られていた。標点である磁石の変位量から歯の回転角あるいは回転中心の位置を算出するにあたり、被測定歯が荷重方向と平行に変位し、荷重と直交する方向へは変位しないという仮定が必要となった。歯が荷重方向に垂直な方向に大きく変位することは考えにくい。唇側に傾斜した前歯に水平力が負荷される際に、歯根膜が

歯軸方向に剪断変形することが考えられる。このため、実際には歯が垂直方向へ若干の変位を示す可能性が否定できず、算出された歯の回転角にわずかな誤差を生じていることが考えられた。

この問題点を解決するために、変位を測定する標点を2点、磁気センサを16個に増加した、2点3次元変位測定システムを開発した。本システムを用いることにより、2標点を結ぶ線上の回転運動以外の5自由度の変位パラメータを算出することが可能である。今回、正中矢状平面に投影した歯の回転角を算出することにより、矯正臨床上重要な上顎前歯舌側移動時の歯の抵抗中心位を正確に求めることができた。

複数個の永久磁石を使用する場合に、お互いの磁場が干渉し、歪め合うために、較正によりあらかじめ作成した出力-変位変換式が無効となる。このため、測定精度が悪化する可能性が懸念された。そこで、磁石間を十分に離すことで、干渉を減弱した。さらに、3軸自動パルスステージ上で口腔内と同じ位置関係に設置した2個の磁石を一体化し同時移動させることにより、干渉下での各センサの較正を行い、磁石の相互干渉による影響を完全に取り除いた。

今後、さらに標点を3個に増加することにより、歯の動きを全6自由度のパラメータに分離して解析することが望まれる。合計24個のセンサから、歯の変位に関する膨大な情報が得られ、より多角的な動態解析とともに、矯正力作用時の回転中心あるいは抵抗中心をさらに高精度で測定可能になるものと期待される。

IV. 結 論

2点3次元変位測定法を用いて、これまで困難とされてきた、生体を対象とした矯正力作用時の上顎中切歯の抵抗中心位を求めた。その結果、抵抗中心は歯槽頂より歯根長の19%根尖側寄りの位置に観察された。これは、従来考えられていた歯根長の歯頸側1/3の位置よりも歯冠側寄りであった。矯正治療において、歯に与えられる力系から歯の移動を予測し、的確にコントロールするために、抵抗中心の位置を知ることが、極めて重要であり、今後被験者数を増やし、抵抗中心位を決定する形態的および機能的要因の解明が望まれる。

稿を終えるにあたり、システムソフトウェアの開発に際し、終始懇篤なるご支援をいただいた三菱電機コントロールソフトウェア株式会社の米田利己氏に深く感謝いたします。また、チタン casting および溶接に際し、技術協力をいただきました長崎大学歯学部附属病院中央技工室

長永野清司氏に深甚なる感謝の意を表します。

文 献

- 1) Burstone, C. J. and Pryputniewicz, R. J.: Holographic determination of centers of rotation produced by orthodontic forces, *Am J Orthod*, 77 : 396-409, 1980.
- 2) Smith, R. J. and Burstone, C. J.: Mechanics of tooth movement, *Am J Orthod*, 85 : 294-307, 1984.
- 3) Göz, G. and Rahn, B.: Die Bedeutung des Widerstandszentrums für die Biologie der Zahnbewegung, *Fortschr Kieferorthop*, 53 : 137-141, 1992.
- 4) Burstone, C. J., Pryputniewicz, R. J. and Weeks, R.: Center of resistance of the human mandibular molar, *J Dent Res*, 60 : 515, 1981.
- 5) Dermaut, L. R., Kleutghen, J. P. J. and De Clerck, H. J. J.: Experimental determination of the center of resistance of the upper first molar in a macerated, dry human skull submitted to horizontal headgear traction, *Am J Orthod Dentofac Orthop*, 90 : 29-36, 1986.
- 6) Vanden Bulcke, M. M., Dermaut, L. R., Sachdeva, R. C. et al.: The centers of resistance of anterior teeth during intrusion using the laser reflection technique and holographic interferometry, *Am J Orthod Dentofac Orthop*, 90 : 211-220, 1986.
- 7) Vanden Bulcke, M. M., Burstone, C. J., Sachdeva, R. C. et al.: Location of the centers of resistance for anterior teeth during retraction using the laser reflection technique, *Am J Orthod Dentofac Orthop*, 91 : 375-384, 1987.
- 8) Pedersen, E., Isidor, F. Gjessing, P. et al.: Location of centres of resistance for maxillary anterior teeth measured on human autopsy material, *Eur J Orthod*, 13 : 452-458, 1991.
- 9) Tanne, K., Koenig, H. A. and Burstone, C. J.: Moment to force ratios and the center of rotation, *Am J Orthod*, 94 : 426-431, 1988.
- 10) Tanne, K., Nagataki, T., Inoue, Y. et al.: Patterns of initial tooth displacements associated with various root lengths and alveolar bone height, *Am J Orthod Dentofac Orthop*, 100 : 66-71, 1991.
- 11) Pryputniewicz, R. J. and Burstone, C. J.: The effect of time and force magnitude on orthodontic tooth movement, *J Dent Res*, 58 : 1754-1764, 1979.
- 12) Burstone, C. J., Every, T. W. and Pryputniewicz, R. J.: Holographic measurement of incisor extrusion, *Am J Orthod*, 82 : 1-9, 1982.
- 13) 吉田教明, 鈴木弘之, 小林和英ほか: 矯正力作用時の大白歯の動態に関する実験的解析-磁気センサを応用した変位測定システム-, 顎機能誌, 6 : 189-194, 1988.
- 14) 吉田教明: 上顎顎外固定装置による第一大臼歯の動態に関する実験的解析-磁気測定システムによる3平面内での変位測定-, 日矯歯誌, 49 : 207-217, 1990.
- 15) Yoshida, N., Jost-Brinkmann, P.- G. and Yamada, Y.: Initial tooth movement under extraoral force and considerations for controlled molar movement, *Angle Orthod*, 65 : 199-208, 1995.
- 16) Yoshida, N., Jost-Brinkmann, P.- G., Miethke, R.-R. et al.: An experimental evaluation of effects and side effects of asymmetric facebows in the light of in-vivo measurements of initial tooth movements, *Am J Orthod Dentofac Orthop*, 113 : 558-566, 1998.
- 17) 吉田教明, 古賀義之, Jost-Brinkmann, P.- G. ほか: 荷重時の歯の回転中心に関する研究-磁気センサを応用した3次元変位測定システムの生体への応用-, 顎機能誌, 5 : 21-30, 1998.