

6601

歯列弓内側からの矯正治療における 下顎中切歯の移動様式に関する研究

中 島 健 川 本 達 雄
なか じま たけし かわ もと たつ お

抄録：歯列弓内側からの矯正治療における歯の移動様式を明らかにするため、2次元有限要素法を用い、歯の歯冠舌側に荷重を加えた場合の歯周組織の力学的反応を、歯冠唇側に荷重を加えた場合と比較して検討した。有限要素法の汎用プログラムを用い、歯と歯周組織を含んだ2次元の有限要素法解析モデルを作製した。そのモデルの歯冠舌側中央部に、唇側に向かって歯軸に直角に、水平方向、水平方向に対して30°、60°および90°方向の力を加えた場合の歯周組織の応力分布をそれぞれ求めた。さらに、歯冠唇側中央部に同様の荷重を加えた場合の応力分布を求め、各々の条件で歯冠舌側に荷重を加えた場合と比較検討した。

また、歯列弓内側からの矯正治療と唇側からの矯正治療との非抜歯での下顎前歯レベリング時の移動様式の差を、術前術後の頭部X線規格写真の下顎前歯の変化量を統計学的に比較することによって検討した。

結果は以下のとおりであった。

1. 有限要素法の比較では、歯冠舌側中央部と歯冠唇側中央部に唇側に向かって水平方向に加力した場合の歯周組織には応力分布の差は認められなかった。加力の方向を水平に対して30°、60°および90°にするに従い、歯根唇側中央部歯周組織の応力分布が舌側に加力した場合より、唇側に加力した方が多くなった。
2. 頭部X線規格写真の計測値の比較においては、下顎歯列を非抜歯にてレベリングした場合、唇側からの治療の場合、歯列弓内側からの治療に比べて下顎前歯が有意に唇側傾斜していた。

緒 言

近年矯正歯科を受診する成人の患者数が急増している。これに伴い装置に対する審美的要求のため、歯列弓内側より行う矯正治療法が普及してきた。歯列弓内側から治療を行う矯正治療は、世界に先駆け1978年藤田¹⁻³によって日本で発表され、同時期にアメリカでも発表された。その後、装置や術式の改良がなされ、多くの症例報告⁴⁻⁶がなされてきた。従来方法である唇側矯正治療において歯に力を加えた場合の歯の移動様式についての報告⁷⁻¹¹は数多くみられるが、歯列弓内側から歯に力を加えた場合の歯の移動様式についての報告は少ない。¹²⁻¹⁴ 歯列弓内側からの矯正治療では、歯への加力部位が唇側矯正治療の場合とは異なるため、歯の移動様式も異なるのは当然であるが、^{2, 5, 14-18} 多くの臨床医にとっては唇側矯正治療との差を感じながらも、具体的な情報が少ないのが現状である。

一方、歯科矯正学の領域において歯に矯正力を加えた

場合その矯正力が歯周組織にどのように伝達されるのか、歯がどのように移動するのを知ろうとする試みは以前から数多く行われてきた。^{7-14, 17-20}

その試みのうち、歯および歯周組織をシミュレートして歯の移動様式を検討する方法の代表的なものとして有限要素法がある。^{7-10, 12, 14} 最近では、コンピュータ技術の進歩とともに、比較的簡単に有限要素の解析が行えるようになってきた。

今回、市販のソフトを用いて2次元有限要素法モデルを作製し、下顎歯列を非抜歯にてレベリングする場合を想定して歯列弓内側から力を加えた場合の歯および歯周組織の力学的反応を、唇側から力を加えた場合と比較して検討した。

また、下顎歯列を非抜歯にてレベリングした術前術後の側面頭部X線規格写真を用いて、下顎中切歯の移動様式を歯列弓内側からと唇側からの矯正治療間で統計学的に比較し、前述のシミュレーションによる結果と合わせて考察した。

大阪歯科大学歯科矯正学講座
〒573-1121 大阪府枚方市楠葉花園町 8-1

資料および方法

実験 1

有限要素法モデルの作製

有限要素法解析ソフト COSMOS/Mver. 2.0 (SRA 社 U. S. A 製) を用い、下顎中切歯と歯周組織を含んだ 2 次元有限要素法モデルを作製した。下顎中切歯をモデル化するために、藤田 21 による日本人の平均的な下顎中切歯の大きさを参考にして、歯冠長 9.1 mm, 歯冠厚 5.7 mm, 歯根長 10.8 mm, 歯根膜厚 0.1 mm~0.4 mm とした。

有限要素法の条件としては、総要素数を 1554, 総接点数を 1651 とし、拘束点は解析結果にあまり影響がないと思われる基底部分および歯槽骨外縁に 66 か所設定して 2 次元線形応力解析を行った。また、モデルの厚みは 0.1 mm と仮定し、各材料の物性定数のヤング率とポアソン比はそれぞれ、エナメル質 8,000 Kg/mm², 0.2, 象牙質 1,400 Kg/mm², 0.2, 歯髄 1.0 Kg/mm², 0.49, 歯根膜 0.7 Kg/mm², 0.49, 歯槽骨 2,000 Kg/mm², 0.15 に設定した。また、下顎中切歯歯軸を水平面に対して直立させ、その水平面に対して平行な面を X 軸、X 軸と直交する面を Y 軸とした (Fig. 1)。

荷重条件および解析方法

荷重は、歯冠舌側中央部に舌側から唇側に向かって X

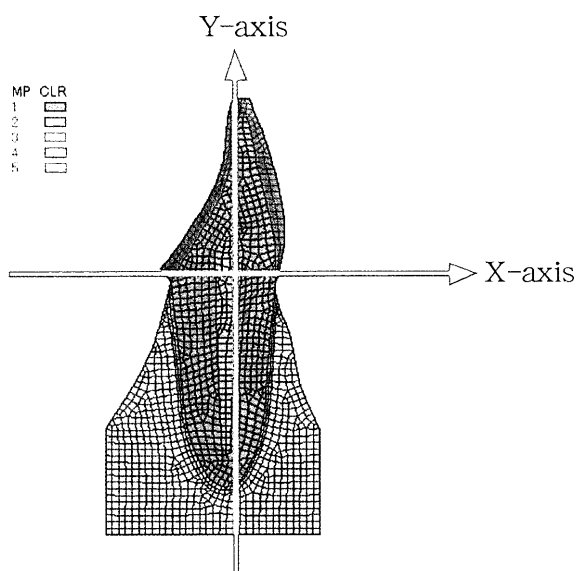


Fig. 1 Labiolingual section of a mandibular central incisor for two-dimensional finite element analysis. Blue: Enamel, Green: Dentin, Red: Periodontal membrane, Pink: Alveolar bone, Light blue: Pulp

軸に平行, X 軸に対して下方へ 30°, 60° および Y 軸に対して平行に加えた。同様の荷重を歯冠唇側中央部に加え、両者の下顎中切歯および歯周組織における応力分布を解析し、比較した。

実験 2

資料

資料として、歯列弓内側から非抜歯にてレベリングを行った、下顎歯列弓の叢生量が 3 mm 以下、スピーカーが 2 mm 以下で歯軸と下顎下縁平面とのなす角度 (以下 IMPA と略す) が 90° ± 5° の成人女性 20 名 (平均年齢 24.5 歳) の術前術後の側面頭部 X 線規格写真を用いた。

対照群として、同様の条件を満たす成人女性 20 名 (平均年齢 23.6 歳) を非抜歯にて唇側からレベリングを行った術前術後の側面頭部 X 線規格写真を用いた。

いずれの症例も Class III エラスティック等の補助的装置は使用せず、通法に従ってレベリングした。

測定部位

下顎前歯の基準点として側面頭部 X 線規格写真のトレース上の下顎中切歯切端を L1 i とし、歯軸上の切端から 11 mm を抵抗中心 L1 cr と設定した。Fig. 2 に示

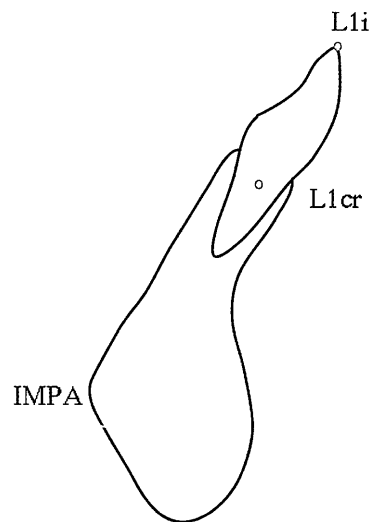


Fig. 2 Measurement points.

L1 i-MP: Perpendicular distance between incisal edge of the mandibular central incisors and mandibular plane.

L1 cr-MP: Perpendicular distance between center of resistance and mandibular plane where the center of resistance of the tooth is standardized as a point 11 mm from the incisal edge of the mandibular incisor.

IMPA (degrees): Angle formed by the long axis of the mandibular central incisors and mandibular plane.

すように下顎前歯のそれぞれの点から下顎下縁平面までの垂直的距離を L1 i to MP, L1 cr to MP として測定した。また、下顎切歯歯軸と下顎下縁平面とのなす角度を IMPA として測定した。その後、それぞれの計測部位での術前術後の変化量を求め、歯列弓内側からの矯正治療群と唇側矯正治療群とを統計学的に比較検討した。

結 果

有限要素法

歯冠舌側中央部に舌側から唇側に向かって X 軸に平行に荷重した場合と (Fig. 3), 歯冠唇側中央部に舌側から唇側へ荷重した場合 (Fig. 4) には、歯根唇舌側中央部歯周組織に応力の集中が認められたが、唇側への荷

重の方が、歯根舌側部歯周組織における応力集中範囲はやや大きかった。

歯冠舌側中央部に舌側から唇側に向かって X 軸に対して下方 30° に荷重した場合 (Fig. 5) は、X 軸に平行に荷重した場合に比べ、歯根唇舌側中央部歯周組織の応力集中範囲は減少した。一方、歯冠唇側中央部に X 軸に対して下方 30° に荷重をした場合 (Fig. 6) は、舌側に荷重した場合と比較すると、歯根唇舌側中央部歯周組織の応力集中範囲は大きかった。

歯冠舌側中央部に舌側から唇側に向かって X 軸に対して下方 60° に荷重した場合 (Fig. 7) は、応力が分散傾向になり、集中範囲が減少した。一方、歯冠唇側中央部に X 軸に対して下方 60° に荷重をした場合 (Fig. 8)

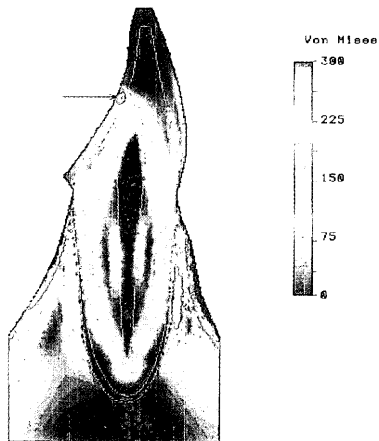


Fig. 3 Horizontal force applied to the lingual surface of the tooth.

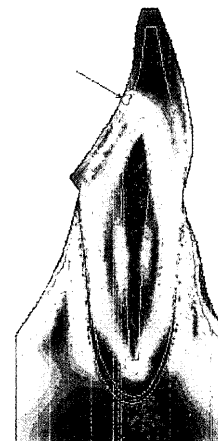


Fig. 5 Oblique 30° force applied to the lingual surface of the tooth.

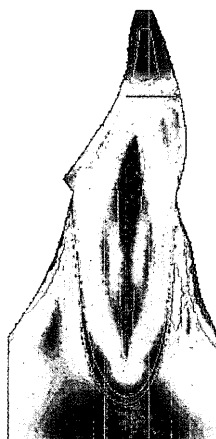


Fig. 4 Horizontal force applied to the labial surface of the tooth.

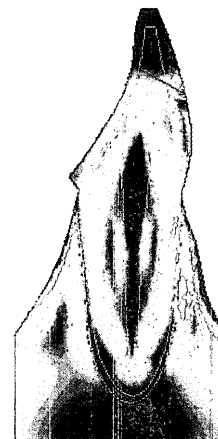


Fig. 6 Oblique 30° force applied to the labial surface of the tooth.

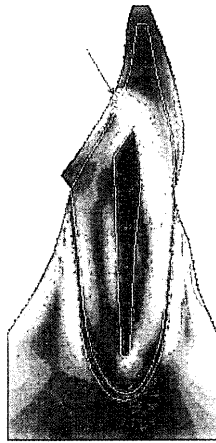


Fig. 7 Oblique 60° force applied to the lingual surface of the tooth.



Fig. 9 Vertical force applied to the lingual surface of the tooth.

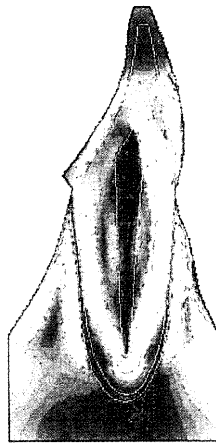


Fig. 8 Oblique 60° force applied to the labial surface of the tooth.



Fig. 10 Vertical force applied to the labial surface of the tooth.

は、歯根唇側中央部歯周組織には応力集中が認められ、舌側への荷重と比較すると差が著明となった。

歯冠舌側中央部に Y 軸に平行に荷重した場合 (Fig. 9) は、応力集中部位は消失した。一方、歯冠唇側中央部に Y 軸に平行に荷重をした場合 (Fig. 10) は、唇側歯頸部から歯根に沿った歯周組織に応力が集中し、舌側に荷重した場合との差はより著明となった。

頭部 X 線規格写真の計測値の統計処理

L1 i to Mp, L1 cr to Mp および IMPA の術前術後の変化量それぞれの母集団について正規性が認められたので、各々の計測値間で Student t-test を行った。

その結果 IMPA の変化は、歯列弓内側からの矯正治療法群が唇側から矯正治療を行った群よりも、危険率 0.05 で有意に小さい値を示した (Table 1)。

Table 1 Changes in IMPA during treatment, grouped by appliance

| | Lingual appliance | Labial appliance |
|-----------------------|-------------------|------------------|
| Pre-treatment | 96.2±3.65 | 90.9 ±3.50 |
| Post-treatment | 97.0±2.39 | 96.25±5.31 |
| Change with treatment | +0.80 | +5.35* |

Mean±S. D., *p<0.05

(degrees)

考 察

実験方法について

歯科矯正学の分野で歯の移動の力学的研究は、古くから行われてきた。初期の頃には、橋や建造物などの力学的解析に用いられていたストレインゲージ法を乾燥頭蓋骨

に利用する研究²²が行われていた。しかし、この方法では、歯の移動時に重要な働きをする歯根膜の特性が著しく損なわれ、定性的な解析の際、誤った結果が出る恐れがあった。次に、ホログラフィーを用いた理論モデルや物理モデルを用いた解析^{11, 23}があるが、生体における歯と歯周組織の複雑な解剖学的形態に近似させることは不可能であった。さらに、より実際のヒトに近づけるため、遺体や生体を用いた研究^{24, 25}も行われるようになった。しかし、これらの研究は実験対象数に限りがあり、歯および歯周組織の被験者間の個人差のため、かえって統一的な結果が得られなかった。最近になって動物愛護の観点から、実験動物による研究が敬遠されるようになるとともに、コンピュータの発達に伴い、精度の高い力学的なシミュレーション実験が容易にできるようになった。

今回用いた有限要素法の数値的解析は、1950年 Turner¹⁹によって構造力学の分野に導入され、コンピュータの進歩にともない、急速に発展してきた。その後、1973年 Thresher²⁰によって歯と歯周組織の力学的研究に取り入れられて以来、多くの研究^{7-10, 12, 14}がなされてきた。過去の研究においてははかなり大がかりな計算機を用いても、要素数、接点数が少なく、応力勾配の不連続性が解決されず、解析モデルと生体の近似という点で劣っていた。今回、過去の有限要素法における要素数、総接点数の10倍のモデルを作製し、より生体に近いモデルを作製することができた。

有限要素法での加力方向

今回の歯の移動様式は、叢生がわずかでスピーカーブの存在する歯列を補助的装置を使用せずに非抜歯にてレベリングする際を想定している。その際、下顎前歯には唇側への力と下方の力が同時に作用する。

しかしながら、実際その加力方向を個々の症例で特定することはできないのが現実である。そのため、本研究の有限要素法のモデルには X 軸に対して 0°, 30°, 60°, 90° の加力すべてを検証することにした。これによって、上記の条件下での下顎前歯にかかる力をすべて含んでいると推測される。

結果について

結果を考察するに当たり重要になってくるのは歯の移動時の抵抗中心である。歯の移動時の抵抗中心は、Burstone²⁶が理論的解析を行い、単根歯の場合歯根形態が放物体に近似しているため、歯根長の根尖寄り 2/3 (0.67) の位置であると報告しており、モデル実験でもほぼこの位置が正しいとされている。

また丹根ら²⁷は有限要素法を用いた変位量解析で上顎中切歯の抵抗中心は歯根長の根尖寄り 0.76 であるが、傾斜移動、歯体移動、トルクなどの移動形態の違いによって抵抗中心は変位すると報告している。

一方、限りなく生体に近似した研究を目的に 3 遺体における下顎小白歯の変位測定を行った研究²⁴では、歯の抵抗中心は歯根長の根尖寄り 0.47, 0.60, 0.69 であった。さらに、生体の測定では、圧下時の測定で、0.59~0.66 という結果が得られている。²⁵ 両方とも実験材料の数の限界と唇側歯槽骨の高さや歯根膜の性状の個人差および力の伝達方向および大きさが特定できなかったことにより、画一的な結果が求められなかった。

本研究において、Fig. 11, 12 に示すように下顎中切歯のモデルに X 軸に平行に唇側方向に荷重した場合、加力点が歯冠唇側中央部と歯冠舌側中央部のいずれの場合においても唇側傾斜を起こす応力が認められたが、こ



Fig. 11 Moment with horizontal force applied to the lingual surface of the tooth.

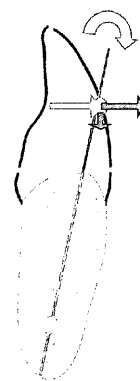


Fig. 12 Moment with horizontal force applied to the labial surface of the tooth.



Fig. 13 Moment with oblique 30° force applied to the lingual surface of the tooth.

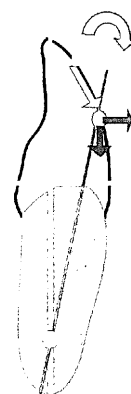


Fig. 16 Moment with oblique 60° force applied to the labial surface of the tooth.

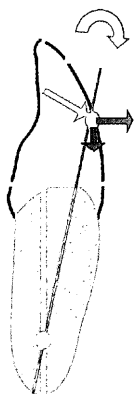


Fig. 14 Moment with oblique 30° force applied to the labial surface of the tooth.



Fig. 17 Moment with vertical force applied to the lingual surface of the tooth.



Fig. 15 Moment with oblique 60° force applied to the lingual surface of the tooth.

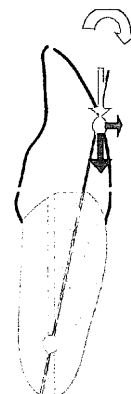


Fig. 18 Moment with vertical force applied to the labial surface of the tooth.

れはモーメントが作用したためである。回転を起こすモーメントは、抵抗中心から加力点までの直線距離と作用する力で決定される。Fig. 11, 12のように歯冠唇側および歯冠舌側の中央部にX軸に平行に荷重した場合は、抵抗中心からの直線距離、荷重方向にほとんど差がなく、応力の分布は同様であったと考えられる。

一方、X軸に対して下方へ加力角度を増加させる Fig. 13~18 と、舌側中央部へ加力する場合は唇側中央部に加力する場合と比べて作用力がより抵抗中心の近くを通過することになる。したがって、舌側中央部への加力は歯軸の傾斜を起こすことは少なく、唇側中央部への加力は唇側傾斜を起こす力が大きいと考えられる。

臨床応用

実際に歯列弓内側から矯正治療を行っている臨床医は、経験的に下顎歯列の臼歯部の固定が唇側からの矯正治療に比べて強固であることを認識している。そのため、診断時に下顎の抜歯部位を変更している。つまり、唇側矯正治療では下顎第2小臼歯抜歯症例が、歯列弓内側から治療を行う場合には非抜歯で行う場合がある。そのため、歯列弓内側から治療を行う場合、下顎非抜歯で治療することが、唇側矯正治療よりも多くなっている。^{17, 18}

非抜歯で下顎歯列をレベリングする際、唇側矯正治療では前歯が唇側傾斜することが多く、審美的にも大きな問題が生じやすい。それを避けるため、Class III エラスティック、²⁸ J-hook ヘッドギヤー、リップバンパーなどの補助的装置を使用する必要がある。歯列弓内側からの治療の場合、上記のいずれの装置も、ブラケットの装着部位の関係で作用させることがきわめてむずかしく、臨床医はある程度下顎前歯の唇側傾斜を容認しているのが現状である。ただし、術後の評価の際に下顎前歯の傾斜が予想よりも少ないことを経験している。

本研究のモデル実験と実際の症例との比較において、歯列弓内側からレベリングを行った場合、下顎前歯は唇側傾斜を起こすことが少なく、临床上、下顎前歯の傾斜のコントロールにおいて有利であることが、理論的に、また実際の症例間の比較で解明することができた。

しかしながら、臨床では舌側からの矯正治療において、かならずしも本研究のような歯の移動様式を示さない症例がわずかではあるがみられる。これは、舌側からの矯正治療独特のパラメータが下顎前歯に作用していることが考えられる。今後は、これらのパラメータを考察して、より精度の高い研究が期待される。

本論文の要旨は、第485回大阪歯科学会例会(2002年10月12日、枚方市)において発表した。

本研究を行うにあたり、御指導いただいた大浦寿哉非常勤講師、古谷直樹嘱託指導医、関 詔夫非常勤講師ならびに御協力いただいた講座員の皆様に心から深く感謝の意を表します。

引用文献

1. Fujita K. Development of lingual bracket technique, esthetic and hygiene approach to orthodontic treatment. *J Dent Res Dent Mater Appliances* 1978; **46**: 81-86.
2. 藤田欣也. リンガルブラケット法の開発(第3報)歯の舌面の傾斜度と lingual-bracket の改良. *日本矯正歯科学会雑誌* 1978; **37**: 381-384.
3. Fujita K. New orthodontic treatment with lingual bracket mushroom archwire appliance. *Am J Orthod* 1979; **76**: 657-675.
4. Kurz C. *Lingual Orthodontics Course Syllabus*. Ormco Co. 1989: 1-14.
5. Gorman J C, Kurz C, Smith J R. Lingual Orthodontics A Status Report. *J Clin Orthod* 1982; **16**: 255-262.
6. 前田卓也, 古谷直樹, 大浦寿哉, 川本達雄. 成人空隙歯列弓の舌側矯正治療による治験例. *近畿東海矯正歯科学会雑誌* 2000; **35**: 56-65.
7. 丹根一夫, 作田 守. 歯および歯周組織に生じる応力の力学的解析. *日本矯正歯科学会雑誌* 1979; **38**: 372-382.
8. 丹根一夫. 歯に種々の矯正力を加えた初期に誘発される歯周組織の応力に関する研究—有限要素法による三次元解析—. *大阪大学歯学雑誌* 1983; **28**: 209-261.
9. 丹根一夫, 長滝孝夫, 加藤稜慈, 山形嘉明, 井上裕子, 作田 守. 矯正治療における種々の力系に対する歯根膜の生力学的反応—moment/force 比と歯根膜での応力分布の関係—. *日本矯正歯科学会雑誌* 1988; **47**: 526-535.
10. 文 鳳植. 有限要素法による歯の移動に関する力学的研究. *日本矯正歯科学会雑誌* 1986; **45**: 411-430.
11. 小林和英, 秋山 譲, 光谷国智. 光弾性実験法による歯の移動に関する研究. *日本矯正歯科学会雑誌* 1974; **33**: 91-98.
12. Tanne K, Lu Y C, Sakuda M. Biomechanical responses of Tooth to Orthodontic Forces Applied at the Lingual Bracket Positions. *J Osaka Univ Dent Sch*. 1992; **32**: 6-13.
13. Gorman J C, Smith J R. Comparison of treatment effects with labial and lingual fixed appliances. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1991; **99**: 202-209.
14. 古谷直樹, 川本達雄. 歯列弓内側からの矯正治療における上顎中切歯の移動様式に関する研究. *歯科医学* 2002; **65**(1): 23-30.
15. Moran K I. Relative wire stiffness due to lingual versus labial interbracket distance. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1987; **92**: 24-32.
16. Fulmer D T, Kuflinec M M. Cephalometric appraisal of patients treated with fixed lingual orthodontic appliances: historical review and analysis of cases. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1989; **95**: 514-520.

17. 義澤祐二, 田中勝治, 三根 治. 舌側装置による矯正治療—力学的考察について—. *Journal of orthodontic practice* 1996; **10**: 51–66.
18. 竹本京人. 舌側からの矯正臨床の実際. *日本成人矯正歯科学会雑誌* 1995; **2**: 35–43.
19. Turner M J, Clough R W, Martin H, Topp L. Stiffness and deflection analysis of complex structure. *J Aero Soci* 1956; **23**: 805–823.
20. Thresher R W, Saito G E. The stress analysis of human teeth. *J Biomech* 1973; **6**: 443–449.
21. 藤田恒太郎. 歯の解剖学. 東京: 金原出版, 1996: 36–39.
22. 大岩逸朗, 川本達雄. ヒト乾燥頭蓋骨を用いたⅢ級ゴムの上顎骨に及ぼす影響に関する実験的研究—Anchorage preparation に関して—. *歯科医学* 1995; **58**: 317–335.
23. Burstone C J, Pryputniewicz R J. Holographic determination of centers of rotation produced by orthodontic forces. *Shika Igaku (J Osaka Odontol Soc)* 2003 Mar; **66(1)**: 1–8.
- Am J Orthod* 1980; **77**: 396–409.
24. Pedersen, E, Andersen, K and Melsen, B. Tooth displacement analysed on human autopsy material by means of a strain gauge technique. *Eur J Orthod* 1991; **13**: 65–74.
25. 吉田教明, 古賀義之, 三牧尚史, 渡邊悦子, 中島美紀, 小林和英. 圧下時における上顎中切歯の抵抗中心に関する研究. *日本矯正歯科学会雑誌* 2000; **59(5)**: 312–316.
26. Burstone C J. Deep overbite correction by intrusion. *Am J Orthod* 1977; **72**: 1–22.
27. Tanne K, Koenig H A, Burstone C J. Moment to force ratios and the center of rotation. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1988; **94**: 426–431.
28. 好田春樹, 古谷直樹, 加藤敬三, 岩崎利員, 川本達雄, 木下善之助. 下顎切歯の望ましい位置付けを行うための一考察. *日本矯正歯科学会雑誌* 1991; **50**: 251–260.

Movement of the mandibular central incisors with a lingual fixed appliance

Takeshi Nakajima and Tatsuo Kawamoto

Department of Orthodontics, Osaka Dental University, 8-1 Kuzuhahanazono-cho, Hirakata-shi, Osaka 573-1121, Japan

Abstract We used two-dimensional finite element analysis to compare the mechanical reaction in tissues surrounding the mandibular central incisors for cases where force was applied to the lingual and labial sides of the teeth. Using preoperative and postoperative cephalograms, movements of the mandibular central incisors during orthodontic treatment with lingual fixed appliances were compared to movements with labial fixed appliances during leveling of the mandible in non-extraction cases. Both studies indicated that reactive flare-out movements of mandibular central incisors were less with lingual fixed appliances than with labial fixed appliances. **Shika Igaku (J Osaka Odontol Soc) 2003 Mar ; 66(1) : 1–8.**

Key words : Tooth movement ; Finite element analysis ; (Lingual fixed appliance)