

# 熱可塑性樹脂製歯列矯正装置が発揮する矯正力の推定手法

## Estimation of Orthodontic Force Generated by Thermoplastic Appliance Treatment

島田 幸世 (東工大), 小関 道彦 (東工大), 木村 仁 (東工大),  
伊能 教夫 (東工大), 永良 百合子 (昭和大), 槇 宏太郎 (昭和大)

S. SHIMADA<sup>1</sup>, M. KOSEKI<sup>1</sup>, H. KIMURA<sup>1</sup>, N. INOU<sup>1</sup>, Y. NAGARA<sup>2</sup>, K. MAKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. Mech. Ctrl. Eng., Tokyo Institute of Technology, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, Japan

<sup>2</sup>Dept. Dentistry, Showa University, Kitasenzoku, Ota-ku, Tokyo, Japan

An invisible orthodontic treatment using 3D CAD/CAM system is now becoming more prevalent than before. However, a mechanical effect on teeth by this appliance has not yet been clear. This study aims to investigate the mechanical states of periodontal tissues in the invisible orthodontic treatments. In this paper, we propose a method to estimate orthodontic forces using an experimental apparatus and the finite element analysis. The experimental apparatus is composed of three parts corresponding to teeth, periodontal tissue and alveolar bone. It provides displacement of teeth and mechanical conditions in the treatment. Tooth displacement is measured using a digital camera and a laser beam to achieve high precision. The finite element analysis provides elastic deformation of periodontal membrane. For the first step of this study, we discuss scale effect and influence of the shape of the periodontal membrane model.

**Key word:** Orthodontics, Thermoplastic appliance, Finite element analyses, Laser, Elastic deformation.

### 1. はじめに

近年, 図 1 に示すような CAD/CAM を用いて製作された透明な熱可塑性樹脂製装置による取り外し可能な矯正治療が普及しつつある。しかし, この装置が発現する矯正力は常に狙い通りに歯列に作用するとは限らず, 歯が予期せぬ動きを示す場合がある。これは, 矯正時の力学状態を正しく把握せずには矯正装置が作成されていることが原因である。

そこで本研究では, 適切な歯の移動を実現する矯正装置の設計方法について生体力学的な観点から検討している。前稿では, 矯正装置が発生する力を線形バネモデルとしてモデル化し, 矯正力を見積もる方法を提案した<sup>1)</sup>。本稿では, 歯根膜の弾性特性に着目し, それを考慮したモデルによる実験および有限要素解析によって矯正装置が発生する力をより実際の治療に近い環境で推定する手法について報告する。

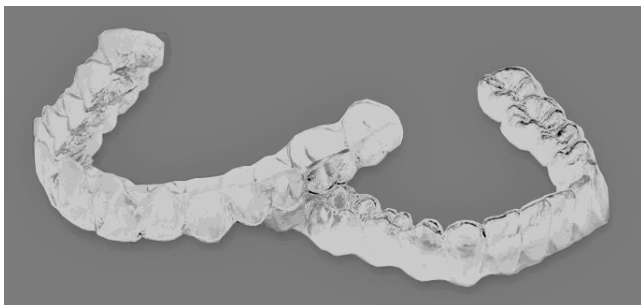


Fig.1 Thermoplastic orthodontic appliance.

### 2. 弾性特性を考慮した新実験手法

本研究ではこれまで図 2 に示すような円柱形の単純な歯冠模型を用い, 歯, 歯根膜, 歯槽骨は全て剛体であり矯正装置以外は変形しないという仮定で力学状態を測定する実験を行ってきた。しかし, 治療時には歯根膜が弾性変形していることを考慮したほうが実際の歯列矯正の力学状態をより再現していると考えられる。そこで, 歯と歯槽骨に対応する要素の間に弾性体を介在させた実験装置を提案する。

まずは歯根膜の力学特性の影響を確認するため, 図 3 に示すような歯列を模した実験装置を製作している。装置は図 4 のような構造となっている。中央の歯模型には歯根膜模型が付随しており, 歯模型に力をかけることで二次元的な変形を観察できるようになっている。現状では, 実験の利便性を考慮して歯模型の直径を 30mm, 歯根膜模型の厚みを 10mm としている。歯肉は矯正治療時には力学的影響は少ないと判断して省略した。十分な測定精度を得ることを目的としてデジタルカメラとレーザを併用する。すなわち, 平行移動量は図 3 に示した装置の正面から撮影したデジタルカメラの写真から求め, 回転移動量は図 5 の右端にある小孔から照射されるレーザのスポット位置を測定して求める。

現在は歯冠部分を円柱型として実験を行っているが, 今後は歯冠部分を実際の歯冠形状を反映させたモデルによる実験, および歯全体を実際のものに似せたモデルによる実験を行う予定である。

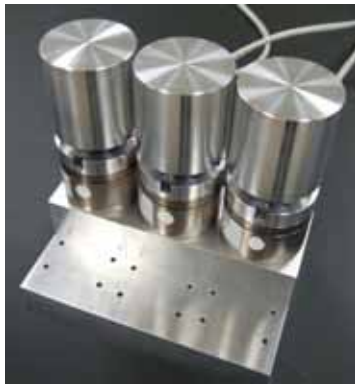


Fig.2 Previous experimental arrangement.

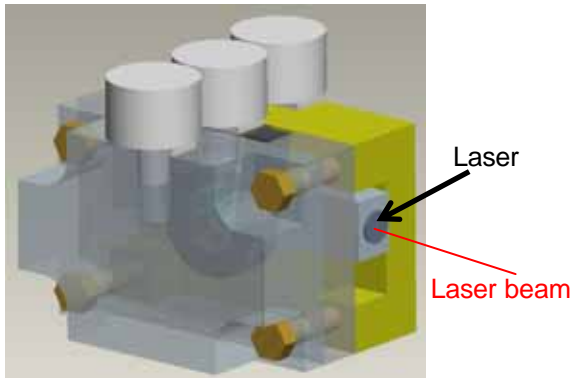


Fig.3 New experimental arrangement.  
(Overall view.)

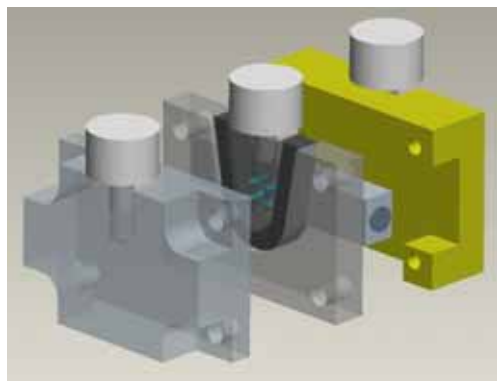


Fig.4 New experimental arrangement.  
(Exploded view.)

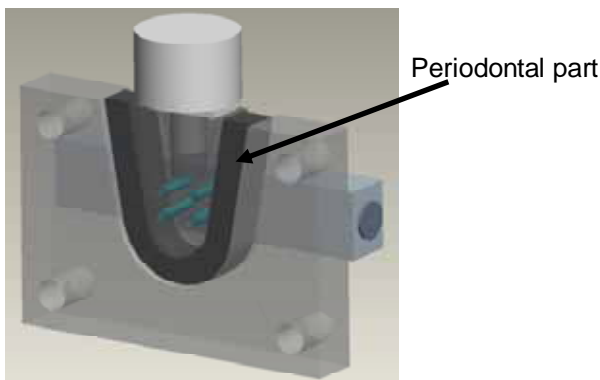


Fig.5 Center parts in the new experimental arrangement.

### 3. 新手法に対する有限要素解析

今回提案する実験装置によって得られる結果は変位と荷重のみであり、応力状態については詳細を得ることが出来ない。そこで、有限要素モデルによる解析を合わせて行う。有限要素解析を行うことによって、実験では不明な値を求めることおよび実験で求まる値の信頼性を高めることが出来る。歯周組織を含む歯部の有限要素解析は最近では数多く報告されているが<sup>2,3,4,5)</sup>、本手法は熱可塑性樹脂製歯列矯正装置により歯列に荷重が加わった環境での矯正力推定に主眼を置いている。図5の歯模型頂点に水平方向の荷重を加えた場合の解析結果を図6に示す。

図6は、図5に示す歯、歯周組織模型と同形状、同物性値のモデルに荷重を歯模型の頂部分に左方向へ7.5N加えた場合の解析結果である。解析は静解析プログラム(ABAQUS Standard 6.7)を用いて行った。全体の要素数は31,140であり、要素分割は十分細かく行った。また、三次元ソリッドモデルとシェルモデルで解析を行ったところ結果に大きな差が見られなかったため、今回は細かい要素分割に有利なシェルモデルで二次元的な解析を行った。紙面垂直方向へのシェルの厚さは10mmである。歯根膜上部で大きな応力値が観察でき、また、歯が傾くような変形を確認できた。

実験装置は実際の歯とはスケールが異なっており、また、歯根膜形状も異なっている。そこで、歯根膜形状の違いとスケールの違いが応力解析結果に及ぼす影響について調べるため、下記の3種類のモデルを追加して解析を行った。

- ・ 歯根膜形状が実際と異なるが全体のスケールは実際の歯と同等の場合(歯の直径10mm, 要素数13,814)
- ・ 実際の歯根膜と同等の形状だがスケールが異なる場合(歯の直径30mm, 要素数98,314)
- ・ 実際の歯根膜と同等の形状・スケールにした場合(歯の直径10mm, 要素数106,506)

7.5Nの荷重を加えた場合のそれぞれの結果を図7~9に示す。歯槽骨の応力状態について比較したところ、歯根膜形状やスケールが異なっても応力分布の傾向はほぼ同じであった。

また、図6~9の4種類の有限要素モデルに対して荷重を変化させて解析を行った。各歯槽骨モデルの最大応力値を図10に示す。各モデルとも荷重に対して最大応力値が比例関係になっていることがわかる。そして、負荷を7.5Nの同一条件としてスケール、歯根膜形状を変化させたときの歯槽骨モデルの最大応力値を比較すると表1のようになる。この表をもとに、歯の直径 $d$ と最大応力値 $\sigma_{max}$ を用いて $\sigma_{max} \times d^2$ を計算するとほぼ一定となることがわかる。つまり、最大応力値がスケール倍率の二乗に反比例することが確認できる。このスケール則は線形はり理論によって説明できる。線形はりにおいて最

大応力値は曲げモーメント $M$ と断面係数 $Z$ を用いて式(1)のように表せる。

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{Z} \quad (1)$$

負荷を $F$ とすると、歯槽骨モデルは幾何学的に相似であるので曲げモーメントと断面係数には式(2)、(3)のような比例関係が成立する。

$$M \propto Fd \quad (2)$$

$$Z \propto d^3 \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)より式(4)を導き出せる。

$$\sigma_{\max} \propto Fd^{-2} \quad (4)$$

式(4)のように、最大応力値のスケール則は線形はり理論に則っていることがわかり、スケールが異なる場合の応力値を見積もるときに利用できると考えられる。他にグラフから読み取れる特徴として、歯根膜の形状が変化しても同様な挙動(荷重に対して最大応力値が線形的に増加)を示すことがわかる。ただし、異なる歯根膜形状の場合には歯槽骨形状も異なるため、歯根膜形状の変化による歯槽骨モデルの応力状態に単純に比較することは出来ないといえる。

本稿では解析的研究の第一ステップとして二次元的な力学解析について報告したが、今後は実際の歯に近い形状での三次元解析を行う予定である。

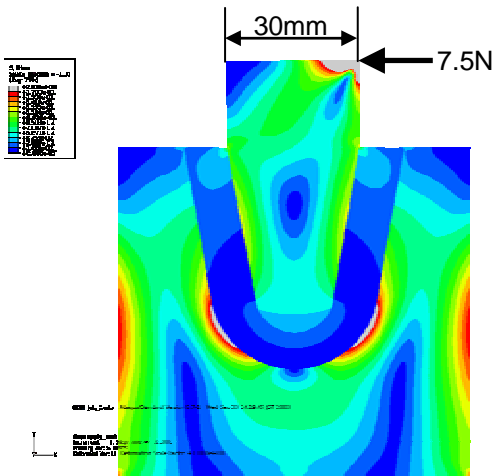


Fig.6 Model of tooth and periodontal tissue which has a thick periodontal membrane. (Tooth diameter is 30mm.)

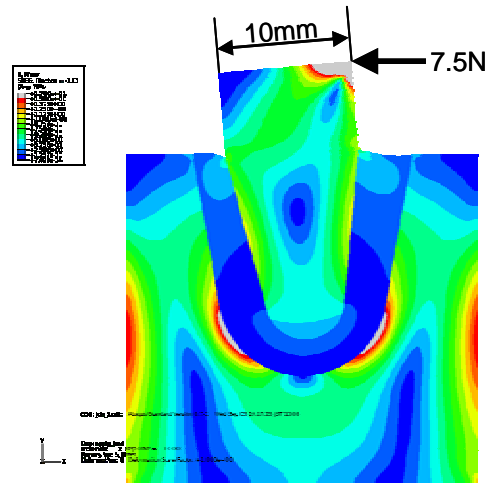


Fig.7 Model of tooth and periodontal tissue which has a thick periodontal membrane. (Tooth diameter is 10mm.)

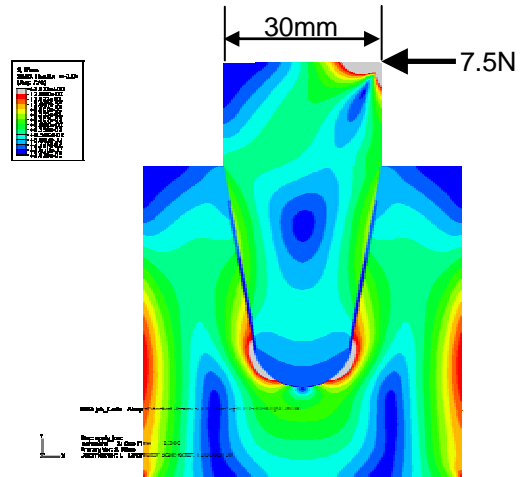


Fig.8 Model of tooth and periodontal tissue which has a thin periodontal membrane. (Tooth diameter is 30mm.)

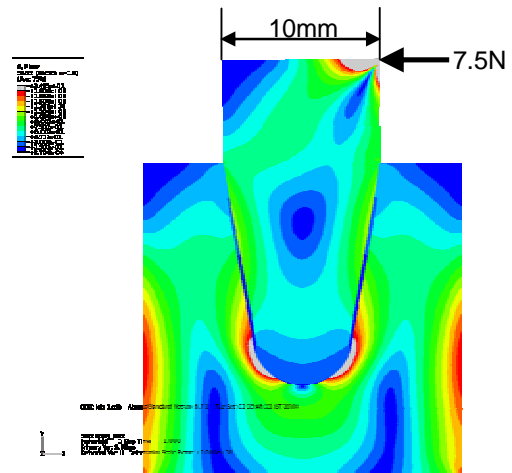


Fig.9 Model of tooth and periodontal tissue which has a thin periodontal membrane. (Tooth diameter is 10mm.)

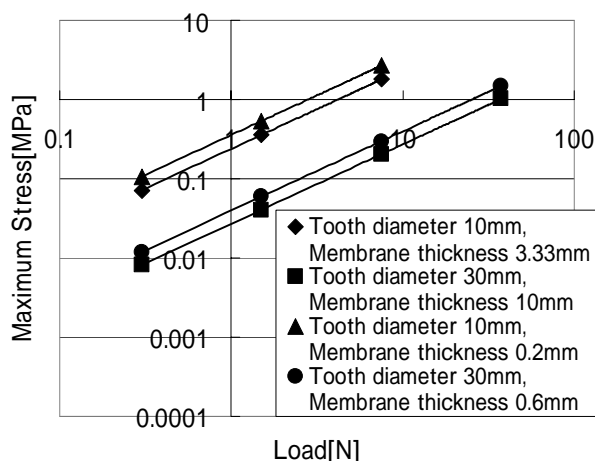


Fig.10 Maximum stresses in parts of alveolar bone.

Table 1 Maximum stresses in parts of alveolar bone under the same load(7.5N).

Tooth diameter	Thin membrane (0.2/0.6mm)	Thick membrane (3.33/10mm)
10mm	2.7MPa	1.8MPa
30mm	0.30MPa	0.20MPa

#### 4. まとめ

本稿では、熱可塑性樹脂製矯正装置が発揮する矯正力を推定する手法として、歯根膜の弾性特性を考慮した歯列模型を用いた実験および有限要素解析について報告した。

今後、より実際の矯正治療に近いモデルに対して本手法を適用し、また、様々な治療形態に対応できるようにする予定である。

#### 参考文献

- 1) 永良百合子, 小関道彦, 島田幸世, 木村仁, 伊能教夫, 小倉有美子, 槇宏太郎: CAD/CAMを用いた熱可塑性樹脂製矯正装置の矯正力発現に関する考察; 第15回顎顔面バイオメカニクス学会大会抄録集, vol. 13(1), pp. 99-100, 2007.
- 2) K. Tanne, S. Yoshida, T. Kawata, A. Sasaki: An Evaluation of the Biomechanical Response of the Tooth and Periodontium to Orthodontic Forces in Adolescent and Adult Subjects; British Journal of Orthodontics, vol. 25, pp. 109-115, 1998.
- 3) M. L. Jones, J. Hickman, J. Middleton, J. Knox, C. Volp: A Validated Finite Element Method Study of Orthodontic Tooth Movement in the Human Subject; Journal of Orthodontics, vol. 28, pp. 29-38, 2001.
- 4) P. M. Cattaneo, M. Dalstra, B. Melsen: The Finite Element Method: a Tool to Study Orthodontic Tooth Movement; Journal of Dental Research, vol. 84(5), pp.428-433, 2005.
- 5) H. Morikawa, S. Yamanami, M. Nishihira, K. Yamamoto, Y. Satoh, H. Ishikawa, S.