

支台築造材料および荷重方向の違いが 上顎中切歯の応力分布に及ぼす影響

吉田 記代¹・田島 清司²・田中 達朗³
鱒見 進一¹

¹九州歯科大学口腔機能学講座顎口腔欠損再構築学分野

²九州歯科大学口腔機能学講座生体材料学分野

³九州歯科大学健康増進学講座歯科放射線学分野

平成25年5月30日受付

平成25年9月25日受理

Stress Distribution of Upper Central Incisor Restored with Different Types of Post and
Core Systems and Different Loading Conditions

Kiyo Yoshida¹, Kiyoshi Tajima², Tatsurou Tanaka³
and Shin-ichi Masumi¹

¹Division of Occlusion and Maxillofacial Reconstruction, Department of Oral Functions

²Division of Biomaterials, Department of Oral Functions

³Division of Diagnostic Radiology, Department of Physical Functions

Abstract

The purpose of this study was to evaluate the stress distribution of an upper central incisor treated with dental post and core. Three kinds of dental post and core systems (cast metal post and core, fiber post with composite resin core, and stainless steel post with composite resin core) were simulated through a 3-dimensional finite element analysis method. 100N of load was applied to the teeth from three different directions (center of the lingual surface of the crown at 45°, the incisal edge of the crown at 45°, and the incisal edge of the crown at 0° to the long axis of the tooth).

The following results were obtained. In the fiber post with composite resin core, maximum principal stress was more decreased than the cast metal post and stainless steel post, at the around the apical dentin area. Although maximum principal stress of each cores were almost same at the dentin around the alveolar bone area, the value of the fiber post with composite resin core was more increased than the value at the

責任者への連絡先：鱒見進一

〒803-8580 福岡県北九州市小倉北区真鶴2-6-1

九州歯科大学 口腔機能学講座顎口腔欠損再構築学分野

apical dentin area.

These results suggested that the fiber post with composite resin core would be the best choice for core buildup to avoid vertical root fracture. In each cores, ferrule effect is very important to avoid horizontal root fracture.

Key words : stress distribution, cast metal post and core, fiber post with composite resin core, stainless steel post with composite resin core

抄 録

支台築造処置を行った歯に咬合力が加わると、歯質や支台築造体材料など性質の異なる構造材料間に応力が発生し、この応力が、歯根破折や補綴装置の脱離の原因となる。本研究では、3次元有限要素解析を用いて支台築造材料および荷重方向の違いが上顎中切歯の応力分布に及ぼす影響について検討した。まず、上顎右側中切歯の人工歯から、生体に近似した有限要素解析モデルを構築した。3種の支台築造材料(鋳造支台築造・ファイバーポスト併用レジン支台築造・金属製既製ポスト併用レジン支台築造)について、3方向(口蓋側方向から切端と基底結節最深部との中央部および歯冠切端部へ歯軸に対して45°・歯軸方向)から100Nの荷重を負荷し残存歯質への応力発生について検討した。その結果、歯根尖部に発生する応力は、ファイバーポスト併用レジン支台築造が鋳造支台築造やステンレス鋼ポスト併用レジン支台築造と比較して小さく、歯槽骨縁部にかかる応力は、いずれの支台築造材料においても同程度の応力が発生した。ファイバーポスト併用レジン支台築造では歯槽骨縁部にかかる応力が歯根尖部よりも大であったことから、垂直歯根破折を考慮した支台築造材料としては、ファイバーポスト併用レジン支台築造が適切であると思われる。しかし、水平歯根破折に関してはいずれの支台築造材料でもリスクがあるため、帯環効果を付与した支台歯形成が重要であると考えられた。

キーワード : 応力分布, 鋳造支台築造, ファイバーポスト併用レジン支台築造, 金属製既製ポスト併用レジン支台築造

緒 言

根管治療を行った歯は、支台築造および歯冠補綴装置によりその形態を回復する。支台築造処置を行った歯に咬合力が加わると、歯質や支台築造体材料など性質の異なる構造材料間に応力が発生し、この応力が、歯根破折や補綴装置の脱離の原因となる。

現在、支台築造の方法は、ポストを併用しないレジンのみによる築造法、既製ポストを併用したレジンによる築造法および鋳造体による築造法などがある。鋳造支台築造は、支台築造として最も広く臨床応用されてきた。しかしながら、弾性率が金属と象牙質では大きく違うため、ポスト先端に応力集中が生じ、垂直歯根破折を起こす可能性が高いことが報告されるようになった^{1,2)}。鋳造支台築造は、弾性率が大きいいため、築造体自体が破折することはなく、咬合時における支台築造への負荷が直接歯根へ伝達され、応力集中を起こしてしまう。既製ポスト併用によるレジン支台築造には、金属製既製ポスト

によるものとファイバーポストによるものがある。ファイバーポストは2003年に認可された材料である³⁾。弾性率が象牙質に近似していて撓み易い性質を有しており、色調が半透明で審美性に優れている。また、金属アレルギー対策としても有用である。ファイバーポストは、他の材料と比較して歯根尖部に発生する応力を軽減させるという報告がある⁴⁾⁻⁶⁾。このことは、歯根尖部象牙質への応力集中を軽減するため、歯の保存にとって非常に有用であると考えられる。また、ファイバーポストの予後については、保存経過が良好との報告もある^{7),8)}。

一方、どのようなポストが歯根への負担を軽減でき、生体に対して良好な結果をもたらすかについても、様々な研究報告が行われている。従来より、ポストの形態^{9),10)}、長さや太さ^{11),12)}、ポストの材料^{13),14)}による違い、歯種による違い¹⁵⁾について報告されている。荷重方向の違いについても検討が行われてはいるが¹⁶⁾、ほとんどの報告が、正常な場合に加わるであろう1方向からの荷重による報告である。日常臨床において、ブラキシズムや

口腔悪習癖が原因と考えられる歯根破折や補綴装置の破損などの症例がよく認められるが、このような場合に歯に加わる荷重は、決して通常の荷重方向のみではないため、パラファンクション時における影響について検討するためには、他の荷重方向についても検討する必要があると思われる。

本研究の目的は、人工歯を用いて有限要素モデルを構築し、3種の支台築造材料(ファイバーポスト併用レジン支台築造、鋳造支台築造、金属製既製ポスト併用レジン支台築造)に対して、3方向からの荷重をかけた場合の残存歯質への応力発生の違いについて3次元有限要素解析により検討することにある。

材料および方法

1. 解析モデルについて

解析モデルの歯としては、上顎右側中切歯の形態を再現した複製根髄腔模型歯(B12 - 500 - #11, NISSIN, Kyoto, Japan)を用いた。まず、模型歯本体、支台歯形成後、および支台築造形成後の3種についてCTスキャナー(Activision, Toshiba Medical Systems, Ibaraki, Japan)を用いてCT撮像を行った。CT撮像条件は、管電圧120KV、管電流100mA、スライス幅0.3mm、FOV12×12cmとした。これら3種のDICOMデータを、画像デジタル処理と有限要素法解析の統合化ソフトウェア(Mechanical Finder, Research Center of Computational Mechanics, Inc. Tokyo, Japan)に直接取り込み、三次元の解剖学的上顎中切歯モデルの外形(クラウン部、コア部を区別)を再構築した。

次に、この中切歯モデルを3Dモデラー(Metasequoia, Teraface Inc., Tokyo, Japan)に移行後、歯根部ポスト、コンジットレジン、レジンセメント、ガッタパーチャ、歯根膜、歯槽骨(緻密骨、海綿骨)をそれぞれ作成し、最終的な支台築造形状モデルとした。なお、ポスト孔は歯根の長さの2/3、太さは歯頸部およびポスト先端部の歯根直径をノギスを用いて計測し、それぞれの部位における最も短い歯根直径の1/3とした。ポストの直径は1.4mm、形状は平行で先端6mmにテーパが付き先端の直径が0.9mmとした。ポスト-歯質間のセメント厚は谷野ら(2004)¹⁷⁾の報告を参考とし約50 μ m、歯根膜はFerrari, M.ら(2008)¹²⁾の報告を参考とし200 μ mを想定し、模擬的な歯槽骨平面に植立した。

さらに、作成された三次元支台築造モデルを、メッシュ生成ソフト(ANSYS ICN CFD, ANSYS Japan, Tokyo, Japan)に移行してメッシュ作成を行った。メ

ッシュ分割には4面体生成要素を用い、要素サイズは最小0.1mm～最大2.0mmとした。解析モデルの総節点数は141,263、要素数は825,738とした。このようにして作成した分割モデルをFig. 1に示す。この分割モデルを骨強度評価ソフトウェア(Mechanical Finder, Research Center of Computational Mechanics, Inc. Tokyo, Japan)に移し、三次元有限要素解析モデルを作成した。

Fig. 2に外形断面図を、また各材料の弾性係数およびポアソン比はTable 1^{18,19)}に示すとおりである。クラウン部はポーセレン、根管ポストはファイバーポスト、ステンレス鋼ポスト、および鋳造支台築造(12%金銀パラジウム合金)の3種類とした。鋳造支台築造の場合には、歯根と相似形のポストや回転防止機構などが付与されることが多いが、今回の実験では他のファイバーポストやステンレス鋼ポストと単純に比較する目的から、同一形状での実験を行うこととした。

2. 荷重方向について

本研究では、正常咬合1種と単発的および持続的であるとされる異常咬合2種の計3種の咬合を想定した。正常咬合は、歯冠口蓋中央部(歯冠口蓋側から切端と基底結節最深部との中央部)へ歯軸に対して45°の角度で口蓋側から荷重した。また単発的異常咬合は、正常咬合の荷重位置から切端寄りに3mm上方で、正常咬合と同一の荷重とした。さらに持続的異常咬合は、切端咬合を想定して、歯冠切端に歯軸方向へ荷重した。なお、荷重量はいずれも静止荷重100Nの集中荷重とした(Fig. 3)。

3. 有限要素解析について

三次元有限要素解析には、上記の有限要素解析の統合化ソフトウェアおよびワークステーション(Endeavor

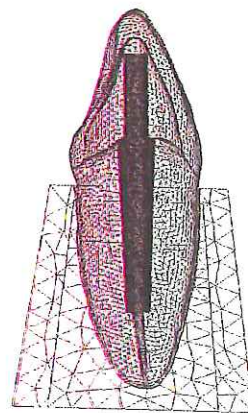


Fig. 1 Finite element analysis model

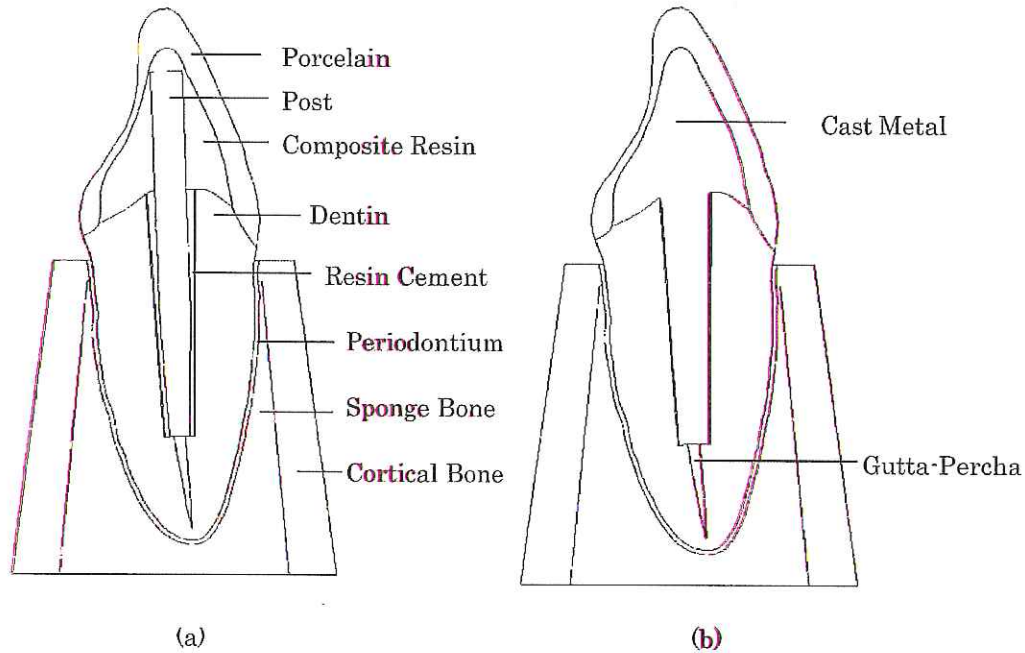


Fig. 2 Endodontic restoration with prefabricated post (a) and cast post-core(b)

Table1 Mechanical properties of materials

Material	Young's modulus(Mpa)	Poisson's ratio
Porcelain	69,000	0.28
12%Au-Ag-Pd alloy	77,000	0.33
Stainless steel	200,000	0.33
Fiber post	45,000	0.25
Composite Resin	16,600	0.24
Resin cement	3,200	0.38
Dentin	18,600	0.31
Cortical Bone	13,700	0.30
Sponge Bone	1,370	0.30
Periodontal ligament	6.90	0.45
Gutta-percha	0.69	0.45

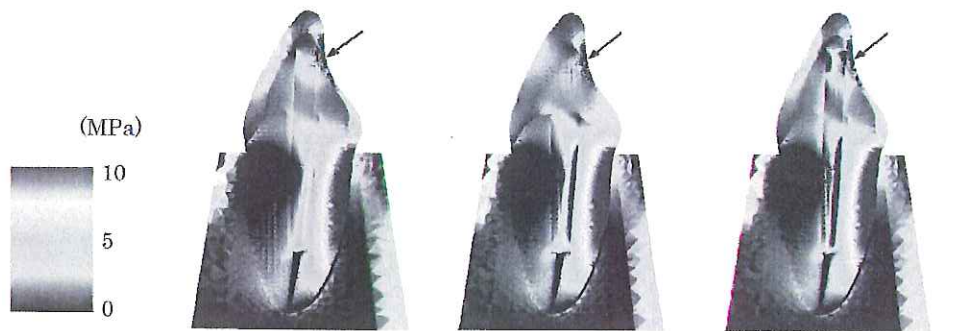
Pro4000, Epson Direct, Nagano, Japan) を用いた。なお、三次元有限要素解析モデルにおける各材料の界面は完全結合で均質等方性材料とし、歯槽骨底部は完全に拘束して静弾性解析を行った。

4. 検討項目

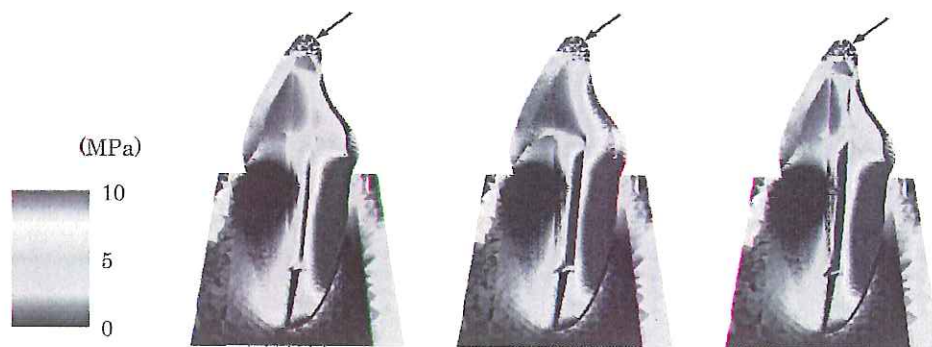
評価項目は、最大主応力と最小主応力とした。本研究では、主に歯質の破折について検討する目的から、残存象牙質内における象牙質・コア・ポストの接合部、歯槽骨縁部、歯根尖部の3領域について検討した。



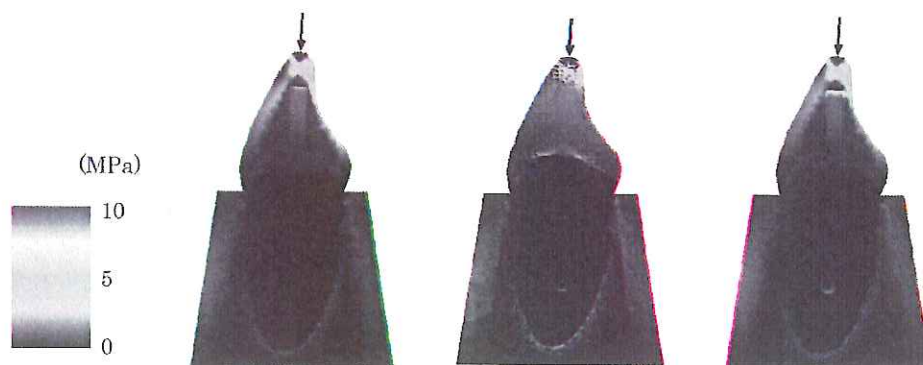
Fig. 3 Direction of the occlusal force
 a : Loading for the center of the lingual surface of the crown at 45°
 b : Loading for the incisal edge of the crown at 45°
 c : Loading for the incisal edge of the crown at 0° to the long axis of the tooth



Fiber post Cast metal post **Stainless steel post**
Loading for the **center** of the lingual surface of the **crown** at 45°



Fiber post Cast metal **post** **Stainless steel post**
Loading for **the incisal edge** of the **crown** at 45°



Fiber post **Cast metal post** **Stainless steel post**
Loading for **the incisal edge** of the **crown** at 0° to the long axis of the tooth

Fig. 4 Distribution of tensile stress in dentin (100N)

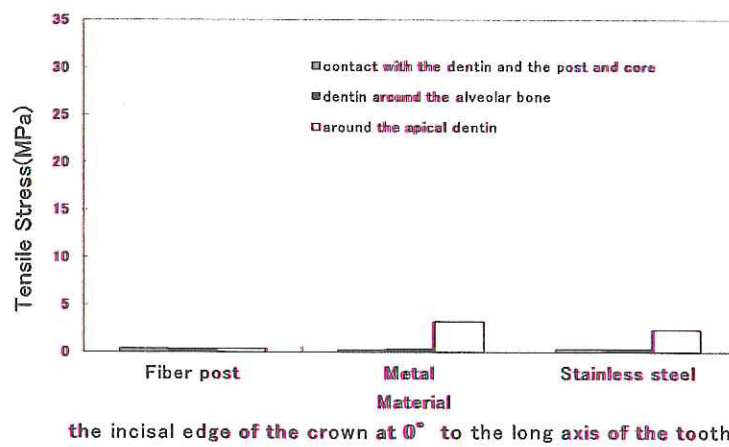
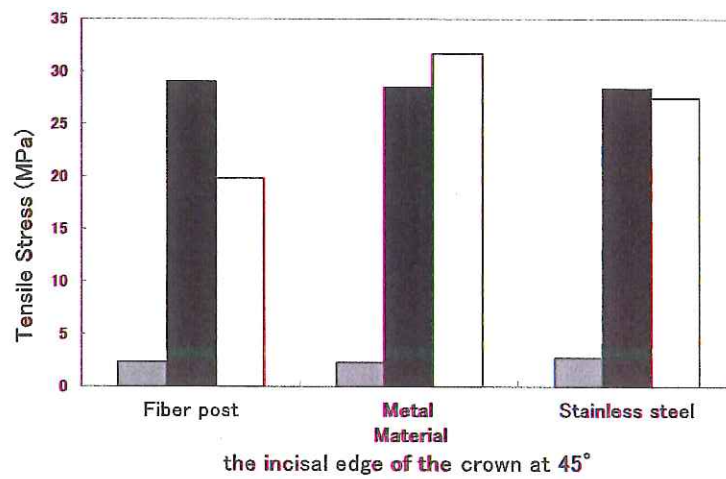
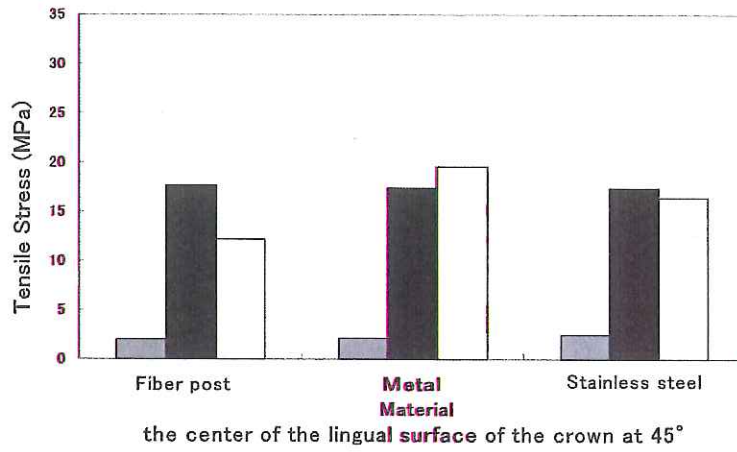


Fig. 5 Tensile stress distribution of the concentrated area

結 果

1. 最大主応力について

3種の荷重方向における解析結果についてFig. 4に、また、各注目領域における最大主応力の最大値(引張応力)をFig. 5に示す。

歯軸に対して歯冠中央部へ45°の荷重をかけた場合、象牙質・コア・ポストの接合部では、ファイバーポストが2.04MPa、鋳造支台築造が2.14MPa、ステンレス鋼ポストが2.50MPaであり、ステンレス鋼ポストが最も大きく、ついで鋳造支台築造、ファイバーポストの順に減少傾向を示した。口蓋側歯槽骨縁部象牙質では、ファイバーポストが17.65MPa、鋳造支台築造が17.39MPa、ステンレス鋼ポストが17.37MPaであり3種ともほぼ同等の値を示した。歯根尖部象牙質では、ファイバーポストが12.19MPa、鋳造支台築造が19.59MPa、ステンレス鋼ポストが16.39MPaであり、鋳造支台築造が最も大きく、ついでステンレス鋼ポスト、ファイバーポストの順に減少傾向を示した。また、象牙質・コア・ポストの接合部における最大主応力値は、口蓋側歯槽骨縁部象牙質や歯根尖部象牙質と比較して、非常に小さな値であった。

歯冠切端部へ45°の荷重をかけた場合、象牙質・コア・ポストの接合部では、ファイバーポストが2.33MPa、鋳造支台築造が2.31MPa、ステンレス鋼ポストが2.77MPaであり、ステンレス鋼ポストが最も大きく、鋳造支台築造およびファイバーポストの2種はほぼ同じ値を示した。口蓋側歯槽骨縁部象牙質では、ファイバーポストが29.05MPa、鋳造支台築造が28.50MPa、ステンレス鋼ポストが28.39MPaであった。3種の材料間で比較すると、ファイバーポストで発生する応力値が他の2種よりもわずかに大きな値を示した。唇側歯根尖部象牙質では、ファイバーポストが19.84MPa、鋳造支台築造が31.70MPa、ステンレス鋼ポストが27.47MPaであり、鋳造支台築造が最も大きく、ついでステンレス鋼ポスト、ファイバーポストの順に減少傾向を示した。また、象牙質・コア・ポストの接合部における最大主応力値は、歯軸に対して歯冠中央部へ45°の荷重をかけた場合と同様に、口蓋側歯槽骨縁部象牙質や歯根尖部象牙質と比較して、非常に小さな値であった。

歯冠切端に歯軸方向の荷重をかけた場合、象牙質・コア・ポストの接合部では、ファイバーポストが0.38MPa、鋳造支台築造が0.21MPa、ステンレス鋼ポストが0.30MPaであり、ファイバーポストが最も大きく、つ

いでステンレス鋼ポスト、鋳造支台築造の順に減少傾向を示した。口蓋側歯槽骨縁部象牙質では、ファイバーポストが0.30MPa、鋳造支台築造が0.30MPa、ステンレス鋼ポストが0.30MPaであり、3種ともほぼ同一の値を示した。唇側歯根尖部象牙質では、ファイバーポストが0.35MPa、鋳造支台築造が3.19MPa、ステンレス鋼ポストが2.34MPaであり、鋳造支台築造が最も大きく、ついでステンレス鋼ポスト、ファイバーポストの順に減少傾向を示し、ファイバーポストにおける応力が極端に小さいことがわかった。

また、いずれの荷重方向においても、ファイバーポストは他の2種の材料と比較して唇側歯根尖部象牙質で発生する応力値が小さいことがわかった。

2. 最小主応力について

3つの荷重方向からの解析結果についてFig. 6に、また、各注目領域における最小主応力の最大値(圧縮応力)をFig. 7に示す。

歯軸に対して歯冠中央部へ45°の荷重をかけた場合、象牙質・コア・ポストの接合部では、ファイバーポストが2.19MPa、鋳造支台築造が2.41MPa、ステンレス鋼ポストが2.07MPaであり、鋳造支台築造が最も大きく、ついでファイバーポスト、ステンレス鋼ポストの順に減少傾向を示した。唇側歯槽骨縁部象牙質では、ファイバーポストが21.95MPa、鋳造支台築造が21.30MPa、ステンレス鋼ポストが21.41MPaであり3種ともほぼ同等の値を示した。歯根尖部象牙質では、ファイバーポストが13.62MPa、鋳造支台築造が20.14MPa、ステンレス鋼ポストが15.46MPaであり、鋳造支台築造が最も大きく、ついでステンレス鋼ポスト、ファイバーポストの順に減少傾向を示した。また、象牙質・コア・ポストの接合部における最小主応力値は、唇側歯槽骨縁部象牙質や歯根尖部象牙質と比較して、非常に小さな値であった。

歯冠切端部へ45°の荷重をかけた場合、象牙質・コア・ポストの接合部では、ファイバーポストが2.29MPa、鋳造支台築造が3.29MPa、ステンレス鋼ポストが2.45MPaであり、鋳造支台築造が最も大きく、ステンレス鋼ポスト、ファイバーポストの順に減少傾向を示した。また、歯冠中央部へ45°の荷重をかけた場合と比較すると、いずれも増加傾向を示した。唇側歯槽骨縁部象牙質では、ファイバーポストが34.43MPa、鋳造支台築造が33.44MPa、ステンレス鋼ポストが33.86MPaであった。3種の材料間で比較すると、ファイバーポストで発生する応力値が他の2種よりもわずかに大きな値を

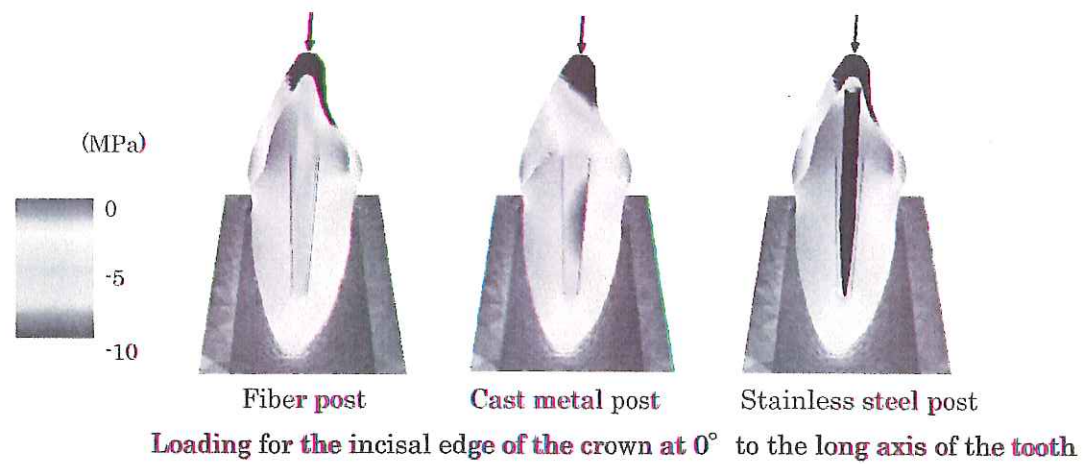
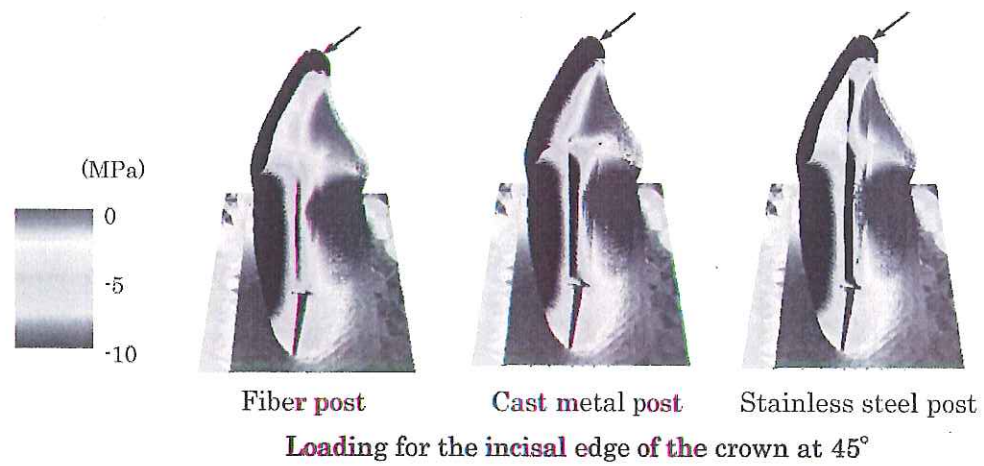
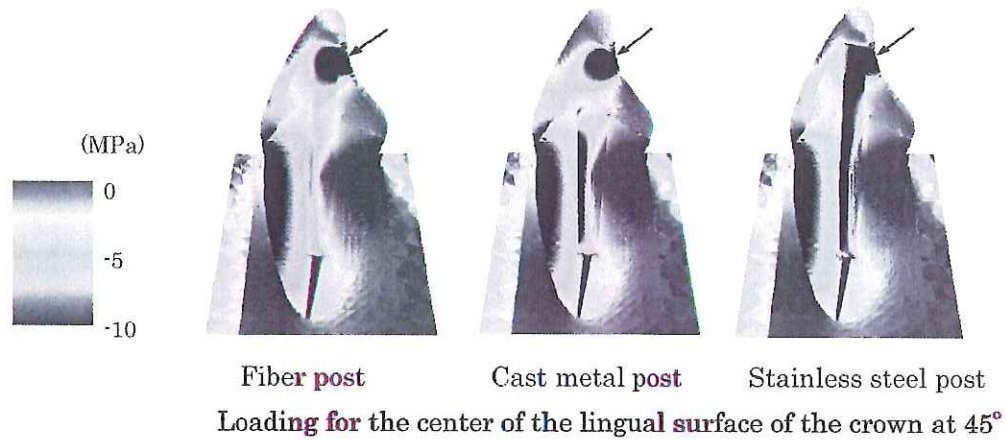


Fig. 6 Distribution of compressive stress in dentin (100N)

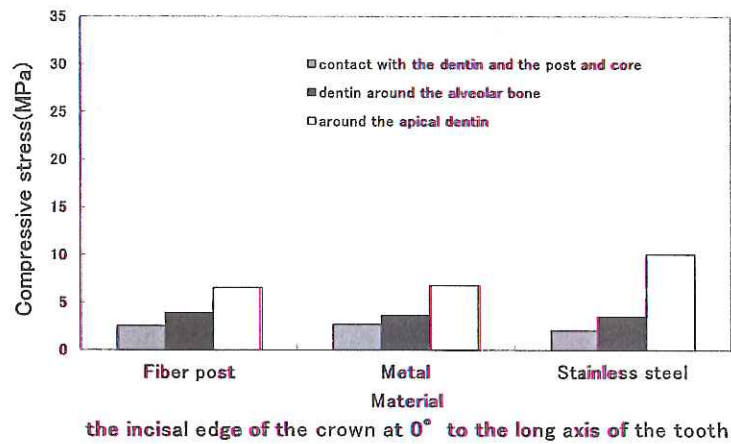
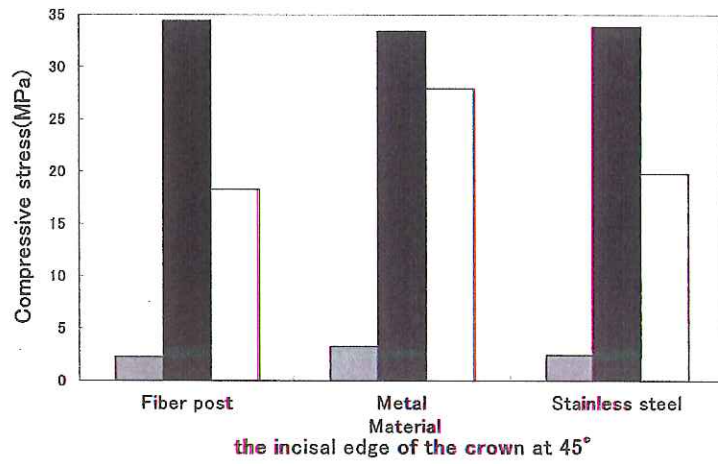
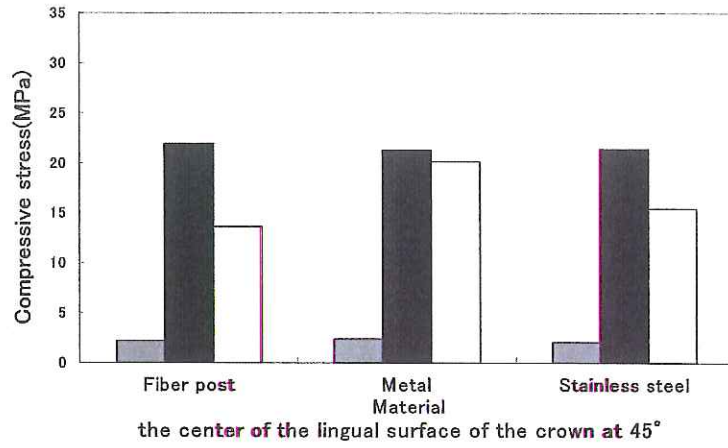


Fig. 7 Compressive stress distribution of the concentrated area

示した。口蓋側歯根尖部象牙質では、ファイバーポストが18.31MPa、鋳造支台築造が27.9MPa、ステンレス鋼ポストが19.81MPaであり、鋳造支台築造が最も大きく、ついでステンレス鋼ポスト、ファイバーポストの順に減少傾向を示した。また、象牙質・コア・ポストの接合部における最小主応力値は、歯軸に対して歯冠中央部へ45°の荷重をかけた場合と同様に、唇側歯槽骨縁部象牙質や歯根尖部象牙質と比較して、非常に小さな値であった。

歯冠切端に歯軸方向の荷重をかけた場合、象牙質・コア・ポストの接合部では、ファイバーポストが2.55MPa、鋳造支台築造が2.70MPa、ステンレス鋼ポストが2.04MPaであり、鋳造支台築造が最も大きく、ついでファイバーポスト、ステンレス鋼ポストの順に減少傾向を示した。唇側歯槽骨縁部象牙質では、ファイバーポストが3.92MPa、鋳造支台築造が3.62MPa、ステンレス鋼ポストが3.50MPaであり、3種ともほぼ同一の値を示した。口蓋側歯根尖部象牙質では、ファイバーポストが6.55MPa、鋳造支台築造が6.78MPa、ステンレス鋼ポストが10.04MPaであり、ステンレス鋼ポストが最も大きく、ついで鋳造支台築造、ファイバーポストの順に減少傾向を示し、ファイバーポストにおける応力が小さいことがわかった。

また、最大主応力の場合と同様に、いずれの荷重方向においても、ファイバーポストは他の2種の材料と比較して口蓋側歯根尖部象牙質で発生する応力値が小さいことがわかった。

最大主応力・最小主応力では、発生する応力の最大値の発生部位はほぼ対照的になる。いずれの場合も、側方部から45°の荷重が負荷された場合には、歯に回転力が加わるために発生する応力値は大きくなり、切端部からの荷重に対しては、より大きな応力が発生する。一方、歯軸方向からの荷重に対しては、応力発生が著しく小さい。

考 察

1. 解析モデルについて

本研究では、解析モデルの歯としてNISSIN社製上顎右側中切歯模型歯を用いたが、異なるメーカーのモデルを用いた場合には、当然のことながら実験結果も異なると思われる。Khanala, M. ら(2006)²⁰⁰は、歯根形態が異なる解析モデルを用いて解析を行うと解析結果に影響を及ぼすと報告している。そのため、できる限り正確な形態を再現することを目的に、模型歯本体、支台歯形

成後、および支台築造形成後の3種についてCTデータから形態を再現し、3次元有限要素法を用いて応力集中部位について検討することとした。支台歯形成および支台築造形成については成書²¹¹を参考に形成した。一方、解析においては、各界面を完全結合とし、材料定数を均質等方性として扱ったが、象牙質構造の異方性、歯根膜の性状、骨の粘弾性を考慮すると、有限要素解析には不十分な部分があることは否めない。

2. 荷重方向について

咬合により口腔内の支台歯に加わる荷重は、反復して加わる繰り返し荷重が大部分であり、とくに歯の保存の可否を左右する垂直歯根破折に関しては、瞬間的な衝撃力というよりも、むしろ繰り返し荷重による慢性的な咬合性外傷の結果として生じると考えられる。支台築造後の歯根破折の原因としては、歯周病進行による骨吸収によって生じる歯槽骨縁部の低下^{221,223}、パラファンクションにおける過剰な咬合力や側方咬合力の負担^{241,251}、歯質保存の程度または齶蝕による歯質喪失²⁶¹、ポストの種類・長さ・太さ^{271,281}、根管形成時の歯質の亀裂や穿孔²⁹¹、根管の形態³¹¹、セメント層の厚さや種類³²¹などが挙げられる。

今回の実験では、根管やポストおよび残存歯質の形態、セメント層の厚さや種類は一定であるため、正常咬合、単発的異常咬合、および持続的異常咬合を想定した3種の方向からの荷重を負荷することによる影響について検討することとした。

3. 支台築造材料と応力との関係について

支台築造材料は、鋳造支台築造と既製ポスト併用レジジン支台築造とに大きく分けられる。鋳造支台築造は、弾性率が高く破折強度が高いことから、長年支台築造の主流であったが、その剛性のために、歯根尖部に応力集中を起し歯根破折へつながることが危険視されてきた。事実、鋳造支台築造は垂直歯根破折を起しやすく、その破折様相は再修復不可能な状態へと導くという報告³³¹⁻³⁴¹もある。

一方、既製ポスト併用レジジン支台築造では、ポストの材料として金属既製ポストとファイバーポストの2種類がある。この既製ポスト併用レジジン支台築造の利点は、ポスト孔形成時にアンダーカットを許容できるため、鋳造支台築造よりも歯質が保存できる点にある。歯冠部・歯根部の歯質を保存することは、歯の強度を高めるために重要であるという報告^{351,361}もあることから、この点

については鋳造支台築造よりも優れていると言える。また、ファイバーポストは弾性率が象牙質に近似しており、撓み易い性質を有することから、支台築造と歯の構造間における応力発生を抑制すると考えられる。

正常咬合を想定した歯軸方向45°口蓋側から歯冠口蓋中央部への荷重を加えた場合、歯根尖部に発生する応力は、ファイバーポスト併用レジン支台築造が他の2種と比較して小さかった。歯根尖部での応力発生は垂直歯根破折の可能性を示していることから、鋳造支台築造は歯根破折が生じやすく、ファイバーポスト併用レジン支台築造は生じにくいと考えられる。歯槽骨縁部にかかる応力は、いずれの支台築造材料においても同程度の応力が発生したが、ファイバーポスト併用レジン支台築造ではこの領域の応力が歯根尖部よりも大であった。咬合時には上顎中切歯には下顎中切歯からの突き上げる力が常時加わっており、歯に回転力が働くために歯槽骨縁部に発生する応力は大きくなる。歯槽骨縁部での大きな応力発生は、同部の残存象牙質に過剰荷重がかかり、歯質の亀裂や破折を発生する原因となる。また、咬合による繰り返し荷重により、最終的に水平歯根破折の発生原因となる。他の築造材料と比較してファイバーポスト併用レジン支台築造におけるこの領域の応力が大であった原因としては、ファイバーポスト材料の撓みが考えられる。谷野ら(2004)¹⁷⁾および黒江ら(2004)³⁷⁾は、支台築造材料の弾性係数が小さい場合には、咬合力が負荷された時の変形量が大きくなるため、ポスト先端周囲の応力は軽減するが、歯冠部でのマイクロムーブメントが大となり、歯頸部での負担が増大すると述べている。今回の実験結果は、これらの報告を支持するものである。

単発的異常咬合を想定した歯冠切端部へ45°の荷重を加えた場合、歯冠中央部へ45°の荷重を負荷した場合と比較すると、いずれの築造体材料においても歯槽骨縁部および歯根尖部に発生する応力が増大した。これは、通常の咬合時よりも切端側に荷重点が移動したことにより、歯の回転軸からの距離が長くなるため大きなトルクが発生することによるものと思われる。すなわち、パラファンクションによる異常咬合は、通常の咬合時よりも大きな荷重が残存歯へかかるため、歯根破折の危険性は高くなることが推察される。特に歯根尖部における応力は、鋳造支台築造やステンレス鋼ポスト併用レジン支台築造では正常咬合時よりも増大し、引張応力で約60%圧縮応力で約30%の増加率であった。一方、ファイバーポスト併用レジン支台築造でも増大傾向を示したが、正常咬合における鋳造支台築造のレベルであった。垂直歯

根破折の点からみると、ファイバーポスト併用レジン支台築造は他の支台築造よりも優れた材料といえる。しかしながら、歯槽骨縁部における応力は3種の材料とも同程度ではあるが増大していたことから、水平歯根破折の危険性はいずれの材料においても同程度に生じる危険性があることを示唆している。

パラファンクション時の咬合は、単発的異常咬合に止まらず、クレンチングなどの持続的な異常咬合も考えられるため、今回の実験では、持続的異常咬合として切端咬合におけるクレンチングを想定して、歯冠切端部に歯軸方向への荷重を加えて検討したところ、すべての領域において応力は激減した。これは歯に側方力が加わらないため、トルクが生じないことによるものと考えられる。ただし、本実験における荷重量はいずれも静止荷重100Nの集中荷重としており、クレンチング時には200N以上の荷重が加わることとなるため³⁸⁾、歯軸に対して平行な荷重は歯根破折に対して問題がないとは言いつても、異常咬合について2方向を設定して行ったが、パラファンクション時には様々な方向からの応力が発生すると考えられるため、今後種々の方向からの応力解析による検討が必要と思われる。

今回の実験から、垂直歯根破折を考慮した支台築造材料としては、ファイバーポスト併用レジン支台築造が適切であると思われるが、水平歯根破折に関してはいずれの支台築造材料でもリスクがあるのは事実である。応力解析の結果から、歯頸部は咬合荷重が歯冠補綴装置から歯根象牙質へ伝達される部位であることを示しており、水平歯根破折に対する方法として、歯冠補綴装置による歯頸部の帯環効果^{39),40)}を付与し、歯槽骨縁部の応力に抵抗することが重要であると考えられる。

結 論

生体に近似した上顎右側中切歯の人工歯から得たCTデータをもとに、3次元有限要素解析により支台築造材料および荷重方向の違いが支台歯の応力分布に及ぼす影響について検討した結果、以下の結論を得た。

1. 歯軸方向45°口蓋側方向から歯冠口蓋中央部への荷重を加えた場合、歯根尖部に発生する応力は、ファイバーポスト併用レジン支台築造が鋳造支台築造やステンレス鋼ポスト併用レジン支台築造と比較して小さかった。
2. 歯軸方向45°口蓋側方向から歯冠口蓋中央部への荷重を加えた場合、歯槽骨縁部にかかる応力は、いずれの支台築造材料においても同程度の応力が発生したが、ファイバーポスト併用レジン支台築造ではこの領域の応

力が歯根尖部よりも大であった。

3. 歯冠切端部へ45°の荷重を加えた場合、歯冠中央部へ45°の荷重を負荷した場合と比較すると、いずれの築造体材料においても歯槽骨縁部および歯根尖部に発生する応力が増大した。

4. 歯冠切端部に歯軸方向への荷重を加えた場合、いずれの築造体材料においても発生する応力は激減した。

5. ファイバーポスト併用レジン支台築造では、いずれの方向から荷重を加えても歯根尖部に発生する応力が他の2種の材料に比べて小さかった。

6. 3種の材料とも歯槽骨縁部に発生する応力は大きであるが、ファイバーポスト併用レジン支台築造値が最大であった。

以上のことから、垂直歯根破折を考慮した支台築造材料としては、ファイバーポスト併用レジン支台築造が適切であると思われる。

文 献

- 1) Nakamura, T., Ohyama, T., Waki, T., Kinuta, S., Wakabayashi, K., Mutoke, Y., Takano, N., Yatani, H.: Stress analysis of endodontically treated anterior teeth restored with different types of post material. *Dent. Mater. J.* 25:145-150, 2006.
- 2) 坪田有史, 福島俊士: ファイバーポスト. *Quintessence. Dent. Technol.* 32:98-100, 2007.
- 3) 福島俊士, 坪田有史: 今, 支台築造をどう考えるか. *日歯医歯会誌* 63:140-149, 2010.
- 4) Lassila, L. V. J., Tanner, J., LeBell, A.-M., Narva, K., Vallittu, P. K.: Flexural properties of fiber reinforced root canal posts. *Dent. Mater.* 20:29-36, 2004.
- 5) Davis, P., Melo, L. S. D., Foxton, R. M., Sherriff, M., Pilecki, P., Mannocci, F., Watson, T. F.: Flexural strength of glass fibre-reinforced posts bonded to dual-cure composite resin cements. *Eur. J. Oral Sci.* 118:197-201, 2010.
- 6) 時庭由美子, 坪田有史, 佐々木圭太, 北村 茂, 野本理恵, 平野 進, 福島俊士: 支台築造用コンポジットレジンとファイバーポスト複合体の三点曲げ強さ. *日歯理工会誌* 29:82-89, 2010.
- 7) Ferrari, M., Vichi, A., Garcia-Godoy, F.: Clinical evaluation of fiber-reinforced epoxy resin posts and cast post and core. *Am. J. Dent.* 13:15B-18B, 2000.
- 8) Piovesan, E. M., Demarco, F. F., Cenci, M. S., Pereira-Cenci, T.: Survival rates of endodontically treated teeth restored with fiber-reinforced custom posts and cores: A 97-month study. *Int. J. Prosthodont.* 20:633-639, 2007.
- 9) 谷野之紀, 比嘉 昌, 西村生哉, 石田敏真, 大畑 昇, 三田

村好矩: ポスト形態および材料が歯質に及ぼす影響—3次元有限要素法による内部応力の検討—. *日臨バイオメカ会誌* 25:223-228, 2004.

- 10) Naumann, M., Blankenstein, F., Kießling, S., Dietrich, T.: Risk factors of failure of glass fiber-reinforced composite post restorations: a prospective observational clinical study. *Eur. J. Oral Sci.* 113:519-524, 2005.
- 11) Holmes, D. C., Diaz-Arnold, A. M., Leary, J. M.: Influence of post dimension on stress distribution in dentin. *J. Prosthet. Dent.* 75:140-147, 1996.
- 12) Ferrari, M., Sorrenyino, R., Zarone, F., Apicella, D., Aversa, R., Apicella, A.: Non-linear viscoelastic finite element analysis of the effect of the length of glass fiber posts on the biomechanical behaviour of directly restored incisor and surrounding alveolar bone. *Dent. Mater. J.* 27:485-498, 2008.
- 13) Plotino, G., Grande, N. M., Bedini, R., Pameijer, C.H., Somma, F.: Flexural properties of endodontic posts and human root dentin. *Dent. Mater.* 23:1129-1135, 2007.
- 14) Coelho, C. S. M., Biffi, J. C. G., Silva, G. R., Abraham, A., Campos, R. E., Soares, C. J.: Finite element analysis of weakened roots restored with composite resin and posts. *Dent. Mater. J.* 28:671-678, 2009.
- 15) Castro, C. G., Santana, F. R., Roseoe, M. G., Simamoto, P. C., Santos-Filho, P. C. F., Soares, C. J.: Fracture resistance and mode of failure of various types of root filled teeth. *Int. Endod. J.* 45:840-847, 2012.
- 16) Al-Omiri, M. K., Rayyan, M. R., Abu-Hammad, O.: Stress analysis of endodontically treated teeth restored with post-retained crowns. *J. Am. Dent. Assoc.* 142:289-300, 2001.
- 17) 谷野之紀, 黒江敏史, 佐藤範幸, 立花佳奈, 三田村好矩, 大畑 昇: 3次元有限要素法を用いた支台築造の応力解析—ファイバーポストおよび各種金属ポストの弾性係数の違いによる影響. *北海道歯誌* 25:10-18, 2004.
- 18) 北村 茂, 積田光山, 坪田有史, 小久保裕司, 福島俊士: 3次元有限要素解析による支台築造の力学的検討. *鶴見歯学* 33:21-29, 2007.
- 19) Okamoto, K., Ino, T., Iwase, N., Shimizu, E., Suzuki, M., Satoh, G., Ohkawa, S., Fujisawa, M.: Three-dimensional finite element analysis of stress distribution in composite resin cores with fiber posts of varying diameters. *Dent. Mater. J.* 27:49-55, 2008.
- 20) Khanala, M., Chen, Z., Zheng, Y.: Finite element analysis of mechanical behaviour of dental materials. *Internet J. Bioeng.* 1:1-23, 2006.
- 21) 石橋寛二, 川添嘉彰, 川和忠治, 福島俊士, 矢谷博文 編: *クラウンブリッジ補綴学* 第3版, 医歯薬出版, 東京, 2004, 77-95.

- 22) 遠藤英昭, 渋谷夏子, 佐々木具文, 伊藤秀美, 安藤中直, 島内英俊: 歯根破折とその臨床. *Quintessence* 23:64-71, 2004.
- 23) 三澤弘子: ポストを応用した下顎小白歯支台歯の歯根破折と歯槽骨吸収に関する研究. *補綴誌*50:414-421, 2006.
- 24) 高橋英和: 支台築造歯の歯根破折のメカニズム. *補綴誌* 45:669-678, 2005.
- 25) Okada, D., Miura, H., Suzuki, C., Kodama, W., Shin, C., Yamamoto, M., Masuoka, D.: Stress distribution in roots restored with different types of post systems with composite resin. *Dent. Mater. J.* 27:605-611, 2008.
- 26) 福島俊士, 三浦宏之, 新谷明彦, 田中卓男, 坪田有史, 駒田 亘, 新谷明一, 嶺崎良人: ファイバーポスト併用レジジン支台築造に関する臨床研究. *日歯医学会誌* 30:55-59, 2011.
- 27) Sorrentino, R., Aversa, R., Ferro, V., Auricemma, T., Zarone, F., Ferrari, M., Apicella, A.: Three-dimensional finite element analysis of strain and stress distributions in endodontically treated maxillary central incisors restored with different post, core and crown materials. *Dent. Mater.* 23:983-993, 2007.
- 28) 福島俊士, 坪田有史: 支台築造の予後成績. *補綴誌*45:660-668, 2001.
- 29) 長谷川晃嗣, 小田 豊: 破折を起こさない支台築造を考察する. *接着歯学* 16:88-95, 1998.
- 30) 福島俊士, 坪田有史: ファイバーポスト—すべてのインターフェイスでの有効な接着が重要—. *Quintessence Dent. Technol.* 32:80-82, 2007.
- 31) Akkayan, B., Dent, M., Gülmez, T.: Resistance to fracture of endodontically treated teeth restored with different post systems. *J. Prosthet. Dent.* 87:431-437, 2002.
- 32) Fokkinga, W. A., Kreulen, C. M., Vallittu, P. K., Creugers, N. H. J.: A structured analysis of in vitro failure loads and failure modes of fiber, metal, and ceramic post-and-core systems. *Int. J. Prosthodont.* 17:476-482, 2004.
- 33) 岡本和彦, 猪野照夫, 日比野靖, 曾根峰世, 中島 裕, 大川周治: 支台築造歯の歯根破折に関する実験的研究—歯根部歯質の残存量および支台築造法の影響について—. *明海歯学*35:69-75, 2006.
- 34) 佐々木主太: 漏斗状根管に対するファイバーポスト併用レジジン支台築造の補強に関する研究. *補綴誌* 2:157-166, 2010.
- 35) 岡本和彦, 猪野照夫, 岩瀬直樹, 清水栄太郎, 鈴木めぐみ, 佐藤 剛, 曾根峰世, 大川周治: 三次元有限要素法を用いたポストコア装着歯における応力解析. *明海歯学* 36:30-36, 2007.
- 36) 坪田有史, 前田祥博: 髄腔保持型 失活歯のリコンストラクション(福島俊士編), 医歯薬出版, 東京, 2007, 44-51.
- 37) 照江敏史, 坂本 信, 伊藤秀美, 大畑 昇, 井上農夫男: 歯根破折を起こしにくい支台築造を求めて. *Quintessence* 23:55-63, 2004.
- 38) 杉山 豊: 過度の咬合力によって生じる歯髓の痛み感覚閾値の低下に関する研究. *東北歯誌* 26:129-139, 2007.
- 39) 西村 靖: 歯冠部歯質が失われた失活歯に対する支台築造に関する研究. *補綴誌* 48:49-58, 2004.
- 40) 大塚貞俊, 坪田有史, 福島俊士: 支台築造—フェルルールとは. *Quintessence Dent. Technol.* 30:45-49, 2005.