

Title	デュアルキュア型レジソコア材料を用いた直接法支台 築造システムの接着界面および築造体内部の多面的評価
Author(s)	松本, 真理子
Citation	大阪大学, 2013, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/55459
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

デュアルキュア型レジンコア材料を用いた直接法支台
築造システムの接着界面および築造体内部の多面的評価

大阪大学大学院歯学研究科

顎口腔機能再建学講座

クラウンブリッジ補綴学分野

松本 真理子

デュアルキュア型レジンコア材料を用いた直接法支台
築造システムの接着界面および築造体内部の多面的評価

大阪大学大学院歯学研究科

顎口腔機能再建学講座

クラウンブリッジ補綴学分野

松本 真理子

緒言

支台築造は、従来から間接法により行われるのが一般的であり、その方法として鑄造支台築造法が選択されることが多かった。しかし、鑄造支台築造法は、間接法であるためアンダーカット部が許されず、直接法と比較して歯質削除量が多くなることは否めなかった。また、根管内に挿入される金属ポストの弾性係数は象牙質と比べて非常に高いため、大きい咬合力が加わった際に鑄造体と象牙質の界面に応力が集中し¹⁾、歯根破折につながる危険性が指摘されている。したがって近年では、象牙質と弾性係数が近似していることから高い歯根破折抵抗性を有するレジン支台築造が選択される機会が増加してきている¹⁻⁶⁾。レジン支台築造は、他にも光透過性を有することによる審美性の向上が期待でき⁷⁾、直接法も可能であるといった利点も有している。レジン支台築造法に用いる材料は、ポストスペース内への光照射が困難であるという問題を回避するため、化学重合もしく

はデュアルキュア型の接着材およびコンポジットレジンが選択されるが，より操作時間の短縮が図れることからデュアルキュア型の材料が主流となってきた。しかしながら，デュアルキュア型レジンに比べると接着強さに劣るとの報告がある⁸⁾。また，根管内象牙質とレジンとの接着強さは，歯冠部象牙質とレジンとの接着強さに比べて劣っており^{9,10)}，「レジンコア失敗の主なものは脱離である」という根管内象牙質への接着不良を示唆する報告が多くなされている¹¹⁻¹⁴⁾。レジンコア脱離の原因としては，根管内の水分残存や，光重合器の光の不十分な到達^{15,16)}等が指摘されている他に，重合時の収縮応力の指標である C-factor が非常に高いことも推察されているものの^{17,18)}，レジンコア脱離の原因が十分に解明されたわけではない。

そもそも根管は細いうえに深く，接着操作が困難な形態を有しているものの，これまでの接着試験の多くは平滑面で評価¹⁹⁻²⁷⁾されており，根管内でも平滑面で得られるような接着界面が形成さ

れているかどうかは明らかとなっていない。したがって、これまで平滑面を対象として得られてきた知見がそのまま根管内象牙質の接着においても適用されるかどうかは不明である。

そこで本研究は、ヒト抜去歯に対し 2 種類のデュアルキュア型レジンコアシステムを使用して直接法レジン支台築造を行った際の根管内象牙質とレジンとの接着界面を詳細に比較検討し、根管内象牙質に対するレジンの接着様相を多面的に評価することを目的とした。

なお、本研究は大阪大学大学院歯学研究科倫理審査委員会の承認を受けて実施した（承認番号 H21-E27-1）。

材料と方法

1. 実験歯の準備 (図 1)

抜去後に 4 °C 平衡塩溶液 (Hanks' Balanced Salt Solution: HBSS) 中に保存された、う蝕に罹患していないヒト抜去歯のうち、前歯と下顎小臼歯で、かつ単根管歯であるものを本実験に使用した。まずセメントエナメル境で歯軸に対して垂直に歯冠部を切断したのち、K ファイル (マニ社、栃木) にて #80 まで拡大を行った。拡大中の根管内洗浄は、2.5 % 次亜塩素酸と 3 % 過酸化水素水を用いて交互洗浄を行った。拡大終了後、根管内を綿栓とエアブローを用いて十分に乾燥させ、ガッタパーチャポイント (ジーシー社、東京) とキャナルス N (昭和薬品化学工業社、東京) を使用して側方加圧法にて根管充填を行った。根管充填後、37 °C 水中に 24 時間以上保管したのち、根管形成バー (No. 1-5, トクヤマ FR ポスト用ドリル, トクヤマデンタル社、東京) でポストの長さをセメントエナメル境より 10 mm の長さに統一し、ガッ

タパーチャおよびシーラーの残留がないことを拡大鏡にて確認しながら，注水下にてポストスペースの形成を行った．根管内に3% EDTA（スメアクリーン，日本歯科薬品株式会社，山口）を2分間充満させた状態にした後，根管内シリンジを使用して精製水で十分に水洗し，乾燥後，10～15%次亜塩素酸ゲル（ADゲル，クラレノリタケデンタル社，岡山）を1分間根管内に充満し，再度精製水にて十分に水洗を行った．ポストスペースはスリーウェイシリンジによるエアブロー10秒間行った後に，数本のペーパーポイントを使用して，目視にてポイントが水分で濡れなくなるまで十分に乾燥した．

2. 直接法レジン支台築造

本研究では歯根部の築造を行ったのみで，歯冠部の支台築造は行っていないが，本研究で行った築造操作を便宜的に支台築造と呼ぶこととする．また，本研究では，レジンコア材料と象牙質の接着に焦点を絞るため，ファイバーポストを挿入せ

ずに実験を行った。

準備したポストスペースに，マニュアルに従って直接法支台築造用レジンを注入した(図 1)．本実験における支台築造用レジシステムには，2種類のデュアルキュア型システムを使用した．すなわち，Clearfil DC bond と Clearfil DC Core Automix の支台築造システム(クラレノリタケデンタル社，岡山)を SY1 とし，Clearfil bond SE one と Clearfil DC Core Automix One の支台築造システム(クラレノリタケデンタル社，岡山)を SY2 とした(表 1)．コア用コンポジットレジンの充填後の光照射は，LED 照射器(Mini L.E.D III，最大光量 $2,200\text{mW}/\text{cm}^2$ ，SATELEC 社，フランス)を用いて，両システム共に 40 秒間行った．光照射後は，試料を 6 分間静置したのち，水中に浸漬した．SY2 のボンディング材には化学重合促進剤および新規光触媒，コア用コンポジットレジンには新規重合促進剤が添加されており，SY1 と異なりコア用コンポジットレジンとボンディング材が接触することにより重合が促進されるという特徴を

有する。

3. 引張接着試験

支台築造を行った試料を，37℃水中に24時間浸漬したのち，ダイヤモンドカッター（MC201N，マルトー社，東京）にて0.2 mm厚さのダイヤモンドホイールで歯軸に直交するように1 mmの厚みで試料を6枚切り出した（図2a）。さらにレジンコア部を含む部位で1 mmの厚みで切断し，最終的に1 mm×1 mmの試料片を作製した（図2b）。各試料片を引張接着試験専用のジグにモデルリペア（デンツプライ三金社，東京）で装着し，小型卓上試験機（EZ-S，島津製作所社，京都）を使用してクロスヘッドスピード1.0 mm/minにて微小引張接着試験（Micro-tensile Bond Strength Test，以下 μ TBS試験と略す）を行った（図2c）。各試料片の断面積はマイクロメータ（ミットヨ CD15，ミットヨ社，神奈川）で測定し，測定時の引張強さの値をMPaに変換した。 μ TBS試験を行う前に破断した試料（pre-testing failure，以下ptfと略

す) は, 0 MPa として計算した.

4. 走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察および元素組成分析

μ TBS 試験後に破断した試料の象牙質側およびコア側の界面を, オスミウム蒸着後, 電界放出型走査型電子顕微鏡 FE-SEM (S5200, 日立社, 東京) にて 1,500~2,500 倍にて観察を行った. また, 同一部位をエネルギー分散型 X 線分析 (Energy Dispersive X-ray spectrometry, 以下 EDX) 装置 (GENESIS, エダックス社, アメリカ合衆国) を用いて, 接着界面の構成元素の分析を行った.

5. 透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察

レジン支台築造を行った歯を, 2.5% グルタル溶液で 2 時間固定後, カコジル酸緩衝溶液で洗浄し, 続いてオスミウム酸で 2 時間固定を行った. カコジル酸緩衝溶液で十分に洗浄した後, エタノール上昇系にて順次脱水を行った. 脱水後の試料をエポキシ樹脂に包埋し, 60 °C で 48 時間加熱重

合を行った。硬化後，歯軸に直交するように，約 400 μm の厚みで切出した (図 3a)。各試料は再度同様の方法でエポキシ樹脂包埋を行い，約 1 mm 角の試料を作製した (図 3b)。さらにダイヤモンドナイフ (ナノトーム シック，酒井電子顕微鏡応用研究所，埼玉) およびウルトラミクロトーム (ウルトローム V，LKB 社，スウェーデン) を用いて接着界面を含む部位において，1 スライスあたり約 70 ~ 90 nm の厚みで超薄切を行った (図 3c)。薄切後の試料は，透過型電子顕微鏡 (H800，日立社，東京) にて加圧電圧 200kV にて観察を行った。

6. コンピューター断層撮影 (μCT) による観察

支台築造後 24 時間水中に浸漬した試料を，マイクロフォーカス X 線システム (SMX100-CT，島津製作所社，京都) を使用し，X 線管電圧 65 kV，X 線管電流 32 μA にて試料を非破壊のまま撮影した。画像サイズは，縦 512 ピクセル，横 512 ピクセル，ピクセル等量長は約 7.8 μm /ピクセルとし，歯軸方向および水平方向の断面画像の観察を行っ

た。

7. 統計処理

μ TBS 試験の試験結果は，二元配置分散分析，Scheffé 検定あるいは t 検定を行い，有意水準は 5% とした．統計分析には統計解析ソフトウェア SPSS (SPSS statistics 17.0 J, SPSS 社, 東京) を用いた．

結果

1. μ TBS 試験

図 4 に 2 種レジンコアシステムにおける象牙質の接着強さを示す．ポストスペースを 6 部位に分類し，最も歯冠側を 1，最も根尖側を 6 とした．SY1 における部位ごとの接着強さは，歯冠側より部位 1 が $15.00 \pm 10.01 \text{MPa}$ (ptf: 0)，部位 2 が $10.44 \pm 7.10 \text{MPa}$ (ptf: 2)，部位 3 が $6.31 \pm 6.83 \text{MPa}$ (ptf: 2)，部位 4 が $6.75 \pm 6.25 \text{MPa}$ (ptf:

3), 部位 5 が $2.44 \pm 5.50 \text{MPa}$ (ptf: 8), 部位 6 が $3.38 \pm 4.07 \text{MPa}$ (ptf: 6)であった. 同様に SY2 における部位ごとの接着強さは, 歯冠側より部位 1 が $31.80 \pm 14.32 \text{MPa}$ (ptf: 0), 部位 2 が $21.78 \pm 15.26 \text{MPa}$ (ptf: 1), 部位 3 が $9.66 \pm 9.97 \text{MPa}$ (ptf: 3), 部位 4 が $5.49 \pm 8.98 \text{MPa}$ (ptf: 6), 部位 5 が $9.27 \pm 7.45 \text{MPa}$ (ptf: 2), 部位 6 が $9.35 \pm 5.50 \text{MPa}$ (ptf: 1)であった.

二元配置分散分析の結果, 部位 ($F=15.22$, $P<0.05$)および材料 ($F=22.52$, $P<0.05$)ともに有意な差を認めた. Scheffé の多重比較検定の結果, 歯冠側接着強さ(部位 1 および 2)は根尖側(部位 3-6)に比べて有意に高い値を示した. 材料間については, t 検定の結果, 部位 3, 4 を除く部位 1, 2, 5, 6 において有意差が認められ, いずれも SY2 の方が SY1 に比べて高い値を示した.

ptf 数は, 歯冠側部位 1 では SY1, SY2 とともに 0 であったのに対し, 部位 4 より根尖側では ptf 数が増加し, 特に SY1 では部位 5 および 6 において, ptf 数がそれぞれ 8 および 6 サンプルと, 著

しく多く認められた。

2. SEM 観察および EDX 分析

SEM による破断面の観察の結果，いずれの接着システムにおいても，歯冠側では複数の試料において象牙質表層に一層ボンディング層を認め，主にボンディング層内での凝集破壊であった。そのことは，EDX 照合像において炭素を示す赤色のドットの層がコア側および象牙質側の両方の接着界面に一層認められることから確認された(図 5)。

一方，根尖側象牙質においてはシステム間で破断様相に差を認めた。すなわち，SY1 の根尖側の SEM 像では， μ TBS 試験においてコア用コンポジットレジン内で破断したため，象牙質側界面にコンポジットレジンが残留していた(図 6)。さらに，象牙質-コア用コンポジットレジン界面にボンディング層の形成が認められず，象牙細管内に象牙質表層に残留しているコンポジットレジンと同様にフィラーを含む材料が入り込んでいる様子が観

察された(図 6 左※部分). SY2 の根尖側では, 象牙質側界面にボンディング層を示す炭素(赤色のドット)の層を認めることから, 主にボンディング層下での界面破壊を呈する傾向にあった(図 6 右).

図 7 に両システムの根尖側象牙質界面の SEM, EDX 照合像および EDX スペクトルをそれぞれ示す. EDX 分析の結果から, SY1 根尖側において, SEM 像で確認された象牙細管内に残留しているフィラーの位置とバリウムを表すピンクのドット部分が一致することから(図 7a), 象牙細管内に浸入している材料はボンディング材ではなく, コア用コンポジットレジンであることが明確となった. 一方, SY2 根尖側の象牙質表面は赤のドットで表される炭素の層で覆われていることから, ボンディング層下で破断していることが複数の試料において認められた.

3. TEM 観察

歯冠側においては両システムともに, ボンディ

ング材が象牙細管に浸透しレジンタグを形成している良好な接着界面が認められた(図 8)。一方, SY1 の根尖側では, まず SEM でも認められた現象と同様に, 象牙細管内にコア用レジンのフィラーが確認できる試料が認められた(図 9a)。このような試料ではボンディング層が明瞭ではなかった。また, ボンディング層が確認できる試料においてもボンディング層内に水分の残留が原因と考えられる多数の気泡と, それに伴うボンディング層-象牙質界面の間隙への包埋用レジンの浸入が認められた(図 9b)。さらに, ボンディング材と象牙質界面の間に, 包埋用レジンの層が形成され, ボンディング材が層状に剥離している試料が両システムにおいて認められた(図 9c)。

4. μ CT による観察

SY1 において, 根尖側でコア用コンポジットレジンとポストスペースの間に空隙が認められた。SY2 ではポストスペースにほぼ緊密にコア用コンポジットレジンが充填できていることが確認され

た．また，両システムともに築造体内部に多数の気泡が認められ，特に根尖部で顕著であった(図 10)．

連続横断図において，SY1 では歯冠側 b より象牙質とレジンコアの間のギャップが認められ，k 以降ではギャップがより顕著であった．同一スライス内においてもギャップの部位にばらつきが認められた．築造体内部には大小様々な多数の気泡を認め，歯冠側 c, d, h においては非常にわずかであったのに対して，根尖側 i, j, l, m において著明であった(図 11)．SY2では，象牙質-レジンコア界面におけるギャップが g 以降より認められたが，SY1 に比較して非常に少なかった．最も根尖側 n においてもギャップはわずかししか認められなかった．築造体内部の気泡は，SY1 と同様に大小様々な多数の気泡を認めたが，根尖側に著明であった SY1 と比較して，気泡の所在がポストスペース全域に分布する傾向を認めた(図 12)．

考察

1. 引張接着試験法

レジンコアと象牙質の接着強さの試験方法には、 μ TBS 試験を使用した実験^{14, 15, 28-33)}の他に、push-out 試験³⁴⁻³⁷⁾や pull-out 試験³⁸⁻³⁹⁾等があり、それらのうちいくつかはポストを挿入して実験が行われている。臨床のプロトコールからもポストの挿入は、歯冠部の維持の観点から一般的な方法である¹¹⁾。しかしながら、ポストを挿入すると、象牙質—レジン間に加えてレジン—ポスト間にも接着界面が存在することになり、 μ TBS 試験を行った際にレジン—ポスト間で破断することも考えられ^{40, 41)}、本実験での目的である、象牙質とレジンの界面の接着様相に焦点を絞ることが難しくなる。したがって、本実験ではポストを挿入せずに築造を行った。また、push-out 試験や pull-out 試験では剥離部分の面積が大きいため、試験結果と形態学的評価を部位特異的に相互評価することが困難となる。一方、 μ TBS 試験で

は界面部位が非常に限局されるため、 μ TBS 試験と SEM 観察の結果を直接関連付けるには最適な方法であると考えられる。今回の μ TBS 試験の結果に関して問題となるのは、試料の界面が湾曲しており、マイクロメータでの界面の二辺の計測値から求めた接着界面の断面積と、実際の断面積には若干の誤差が生じていることである。界面の湾曲度は根尖に向かうに従って強くなるため、根尖側の試料の断面積が計測値よりも歯冠側と比較してより大きくなると考えられるが、実際の μ TBS の値は根尖側に向うに従って逆に小さくなったことから、たとえ断面積の誤差を補正したとしても歯冠側と比べて根尖側で接着強さの低下を認めたという実験結果に変化はないものと考えられる。なお、Pre-testing failure sample のデータを 0MPa として加えるか^{14, 42)}、除外すべきか^{18, 43)}、もしくは実験データの最小値として加えるか、過去の報告においても議論はさまざまであるが、本実験において、各部位毎に n 数を揃えること、また除外ではなく 0MPa とすることで、より状況を厳し

く捉えることができたものとする。

本実験においては直接法におけるレジン支台築造の評価を行ったが、間接法のみでの鑄造支台築造とは異なり、レジン支台築造においては間接法と直接法の両者の選択が可能である。間接法では、適正な支台歯形態を付与することができ、またレジン材料を使用する上で問題となる重合収縮を可及的に小さくすることができる⁴⁴⁾という利点を有する。一方、来院回数の増加による患者への負担や、直接法では不要な印象操作や技工操作が必要となるといった欠点もある。直接法においては、即日修復が可能であり、アンダーカットを許容できるため歯質削除量を必要最小限に抑えることが可能である。また、現在では実際の臨床において最も多用されていることから、本実験では直接法を採用した。

2. 材料

本実験において、材料は2種類のボンディング材と2種類のコンポジットレジンを使用している。

過去の報告において，築盛するコンポジットレジンの種類によって μ TBS試験の結果が異なるとの報告もある．それらは，主にフィラーの含有量に違いによる重合収縮の差によって影響を受けるとされている^{45,46)}．しかしながら，本実験で使用したボンディング材はいずれも

MDP (10-Methacryloyloxydecyl Dihydrogen

Phosphate) 配合の材料であり，またコンポジットレジンはほぼ同等のフィラー含有率の材料のため，硬化状態での物性に関してはほぼ同等と考えられる．したがって，硬化状態においては，コンポジットレジンの種類の相違による結果への影響は小さいものと判断される．しかし，根尖側において重合不十分で硬化していない状態となる可能性があること，SY2ではボンディング材とコンポジットレジンが接することにより重合が開始，促進されるといった材料上の特性があり，システムによる重合機序の違いが存在する． μ TBS試験における両システム間の接着強さの差には，コンポジットレジンやボンディング材の重合度の違いに

よる影響が強く関与している可能性が考えられる。

μ TBS 試験において，歯冠側と比較して根尖側で有意に接着強さの低下を認めたことより，根尖側には接着を阻害する要因が存在しているものと考えられる。 μ TBS 試験において接着強さに有意な低下が認められたのが照射位置より約 2.5 mm 以降の部位 3 より根尖側であった。この接着強さの低下は光重合深度の目安である 2 mm を超える深度より生じていると考えられ，根尖側では歯冠側に比べて光重合が不十分となっているため，全体として重合が不十分となり，接着強さの低下を引き起こした可能性が示唆された。さらに，根管内への光照射では，照射光が根管に対してほぼ平行に当たるため，根管内では接着界面に対して重合に必要な光量が不足しがちになることも影響していると考えられる²⁰⁻²⁷⁾。SY1 で観察されたコア用コンポジットレジンの象牙細管への浸入は，根尖側へ光が十分に届かないため重合不足が起き，

コア用コンポジットレジン填入時に重合していないボンディング材とコンポジットレジンが混ざって象牙細管内に入ったものと考えられる。このことは、SY1 根尖側において、SEM 観察で認められた象牙細管に浸入しているフィラーの部位に一致して、EDX 分析の結果バリウムが検出されたことから裏付けられる。すなわち、バリウムはコア用コンポジットレジンのみに添加されていることから、象牙細管に浸入している材料がコンポジットレジンであることは明白である。さらにコア用コンポジットレジン自体も重合が不十分で脆弱となったため、 μ TBS 試験の際にコア用コンポジットレジン内で凝集破壊が生じたのではないかと考えられる。一方 SY2 では、SEM 観察において破断面にボンディング層を認めたことより、根尖側においてもボンディング材の重合が進んでボンディング層が形成されたことがうかがわれる。

SY1 と比較して SY2 の μ TBS の値が有意に高くなったことに関しては、SEM 観察および EDX 分析の結果において接着界面表層にボンディング層が

一層認められた結果から，新規重合触媒（成分未公開）が加えられたことにより，ボンディング材およびコンポジットレジンとの重合が促進したことが貢献しているのではないかと考えられる．さらに，根尖側で化学重合により重合が促進されたことや，2液混和型ワンステップの SY1 に比べて，ワンボトルワンステップの SY2 の方が処理毎のばらつきが小さくなったことも結果に影響を与えた可能性がある．

3. 接着阻害因子

過去の報告によれば，歯冠側に比べて根尖側で接着強さが低下する要因として，狭くて深い根管の根尖部のスミア除去が不十分となり接着阻害となる可能性^{47, 48)}，根尖側での象牙細管の数や密度の違いによる接着への影響^{49, 50)}，根尖部象牙質の硬化⁵¹⁾ および C-Factor による影響などがあげられている^{14, 17)}．しかしながら，それらは μ TBS 試験と接着界面の破壊形態の分類からの推測であるものが多く，根尖側での接着強さの低下

の原因が十分に解明できているとは言い難い。本研究では、まず μ TBS試験により根尖側に向かうに従って接着強さが低下する傾向を明確にするとともに、その原因を詳細かつ多面的に評価するため、ポストスペースを6部位に細分化して様々な手法を用いて実験を行った。

その結果、TEM観察で水分残留によると思われる多数の泡状の構造物(図9b)が認められたことにより、本実験で行ったエアブローとペーパーポイントによる根管内乾燥ではまだ乾燥が不十分である可能性が示唆された。根管形態が狭くて深いことにより従来のエアブローによる乾燥では空気の対流が根尖から歯冠側に抜けにくく、水分が根尖に滞留してしまうと考えられる。したがって、根管形態に即したエアブローシステムやエタノールによる根管乾燥等も今後検討していく必要があると考えられる。

また、特にSY1根尖側において象牙質とボンディング層の間に試料包埋用のエポキシレジンが入り込んでいるのが観察された(図9c)。これはレ

ジン支台築造24時間後のエポキシレジン包埋の時点で既にボンディング層が象牙質より剥離していたことを示しており，接着が不完全であることにより，重合収縮力が弱い接着強さを超えたために生じたと考えられる．なお，本現象は μ TBS試験において ptf の数が根尖において多くなる傾向が認められた原因と考えられる．また，コア用コンポジットレジン内で破断した根尖部の接着界面に関して，SEM観察，EDX分析およびTEM観察を加えて評価を行い，コア用コンポジットレジンが象牙細管に浸入している現象を捉えたことで，接着阻害の原因の一つがボンディング材およびコア用コンポジットレジンの未重合に起因する可能性が高いことを示すことができた．

4. μ CTによる非破壊的観察

μ TBS試験を始め，SEM観察，TEM観察等の評価によってこれまで述べてきたような様々な現象を捉えることができたが，これらの手法は試料作製時に何らかの外力が界面に少なからず加わってし

まうため、特に接着強さの弱い部分の評価が難しいというのが欠点である。そこで、より多くの知見を得るため、破壊的なミクロスケールでの評価ではなく、非破壊的に全体像を把握することが可能な評価法として μ CT を用いた観察を行った。築造体内部に多数の泡状構造物の混入が認められたことに関しては、レジンを添入時にシリンジ内で発生している可能性と、それらが根尖側でやや著明に認められたことより、レジンを添入時に根管内の空気もしくは水分を巻き込んだ可能性とが考えられる。界面付近ではなく、築造体内部に生じた泡状の構造物が界面の接着強さへ関与する可能性は低いと考えられるが、これらはレジン築造体自体の物性の低下を引き起こすため、レジン築造全体の予後を考える上ではこれらの泡状構造物混入の改善法を検討することも必要ではないかと考えられる。界面の状態に関しては、TEM 観察でも認められたレジンコア材料と象牙質との間のギャップが根尖側でより顕著(図 11, 12)であった。これはレジン重合時の重合収縮応力が接着強さを上ま

わったことにより生じたものと考えられる。また、同一スライスにおいてもギャップの生じた部位にばらつきがあることに関しては、材料による影響ではなく、象牙質側の状態や接着阻害因子の程度により接着強さに差が生じたためと考える。

本研究において、従来のミクロスケールでの評価である μ TBS 試験、SEM 観察・EDX 分析および TEM 観察に加えて、マクロスケールでの μ CT による非破壊での全体像の評価を加えることにより、直接法によるレジン支台築造法にはいまだに改善の余地が残されていることが明らかとなった。今後、本研究結果を踏まえてさらに臨床手技を改良していくことが求められる。

結論

本研究では，ヒト抜去歯に直接法にてレジン支台築造を行い，築造用レジン材料と象牙質との接着界面様相を詳細に評価した．

まず μ TBS 試験により、歯冠側に比べて根尖側では接着強さが低下することが明らかとなった．この接着強さの低下は，SEM，EDX，TEM および μ CT を用いた多面的評価により，根尖側での光の到達が不十分であることによるレジンの重合不足，水分の残留および重合収縮が原因と推察された．

また， μ CT を用いたレジン築造体の非破壊的かつ三次元的な観察により，レジンコアと根管象牙質の間に生じたギャップ，接着様相の部位によるばらつきおよび築造体への泡状の構造物の混入を可視的に明らかにすることができた．

謝 辞

稿を結ぶにあたり，御懇切なる御指導，御校閲を賜りました大阪大学大学院歯学研究科顎口腔機能再建学講座クラウンブリッジ補綴学分野矢谷博文教授に深甚なる謝意を表します．研究の遂行に際し終始御指導，御鞭撻を賜りました大阪大学歯学部附属病院口腔総合診療部三浦治郎助教，大阪大学大学院歯学研究科顎口腔機能再建学講座クラウンブリッジ補綴学分野峯篤史助教に深謝いたします．

また，実験遂行において多大な御教示，御示唆を頂いた，大阪大学大学院歯学研究科歯科理工学講座教授今里聡教授，大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻材料機能化プロセス工学講座生体材料領域中野貴由教授ならびに石本卓也助教（ μ CT観察）に謹んで感謝の意を表します．

さらに，本研究に種々の御配慮，御援助，御助言を頂いた大阪大学大学院歯学研究科顎口腔機能再建学講座クラウンブリッジ補綴学分野の諸先生方に厚く御礼申し上げます．

参 考 文 献

- 1 Pegoretti A, Fambri L, Zappini G, Bianchetti M. Finite element analysis of a glass fiber reinforced composite endodontic post. *Biomaterials* 2002; 23: 2667-82.
- 2 Isidor F, Odman P, Brondum K. Intermittent loading of teeth restored using prefabricated carbon fiber posts. *Int J Prosthodont* 1996; 9: 131-6.
- 3 Mannocci F, Ferrari M, Watson TF. Intermittent loading of teeth restored using quartz fiber, carbon-quartz fiber, and zirconium dioxide ceramic root canal posts. *J Adhes Dent* 1999; 1: 153-8.
- 4 Akkayan B, Gulmez T. Resistance to fracture of endodontically treated teeth restored with different post systems. *J Prosthet Dent* 2002; 87: 431-7.
- 5 Fokkinga WA, Kreulen CM, Vallittu PK, Creugers NH. A structured analysis of in vitro failure loads and failure modes of fiber, metal and ceramic post-and-core systems. *Int J Prosthodont* 2004; 17: 476-82.

6 Rolf KC, Parker MW, Pelleu GB. Stress analysis of five prefabricated endodontic dowel designs: a Photoelastic Study. Oper Dent 1992; 7 :86-92.

7 Vichi A, Ferrari M, Davidson CL. Influence of ceramic and cement thickness on the masking of various types of opaque posts. J Prosthet Dent 2000; 83: 412-7.

8 Foxtan RM, Nakajima M, Tagami J, Miura H. Bonding of photo and dual-cure adhesives to root canal dentin. Oper Dent 2003; 28: 543-51.

9 Marques de Melo R, Galhano G, Barbosa SH, Valandro LF, Pavanelli CA, Bottino MA. Effect of adhesive system type and tooth region on the bond strength to dentin. J Adhes Dent 2008; 10: 127-33.

10 Onay EO, Korkmaz Y, Kiremitci A. Effect of adhesive system type and root region on the push-out bond strength of glass-fibre posts to radicular dentine. Int Endod J 2010; 43: 259-68.

11 Ferrari M, Vichi A, Mannocci F, Mason PN. Retrospective study of the clinical performance of fiber posts. Am J Dent 2000; 13: 9B-13B.

12 Martinez-Insua A, da Silva L, Rilo B, Santana U. Comparison of the fracture resistances of pulpless teeth restored with a cast post and core or carbon-fiber post with a composite core. *J Prosthet Dent* 1998; 80: 527-32.

13 Rasimick BJ, Wan J, Musikant BL, Deutsch AS. A review of failure modes in teeth restored with adhesively luted endodontic dowels. *J Prosthodont* 2010; 19; 8: 639-46.

14 Bouillaguet S, Troesch S, Wataha JC, Krejci I, Meyer JM, Pashley DH. Microtensile bond strength between adhesive cements and root canal dentin. *Dent Mater* 2003; 19: 199-205.

15 Wu H, Hayashi M, Okamura K. Effects of light penetration and smear layer removal on adhesion of post-cores to root canal dentin by self-etching adhesives. *Dent Mater* 2009; 25: 1484-92.

16 Goracci C, Corciolani G, Vichi A, Ferrari M. Light-transmitting ability of marketed fiber posts. *J Dent Res* 2008; 12: 1122-6.

17 Tay FR, Loushine RJ, Lambrechts P, Weller RN, Pashley DH. Geometric factors affecting dentin bonding in root canals: A theoretical

modeling approach. J Endod 2005; 31: 584-9.

18 J. Aksornmuang, M. Nakajima, P. Senawongse, J. Tagami Effects of C-factor and resin volume on the bonding to root canal with and without fibre post insertion Effects of C-factor and resin volume on the bonding to root canal with and without fibre post insertion. J Dent 2011; 39: 422-9.

19 El-Badrawy WA, El-Mowafy OM. Chemical versus dual curing of resin inlay cements. J Prosthet Dent 1995; 73: 515-24.

20 Tanoue N, Koishi Y, Atsuta M, Matsumura H. Properties of dual-curable luting composites polymerized with single and dual curing modes. J Oral Rehabil 2003; 30: 1015-21.

21 Yamamoto A, Tsubota K, Takamizawa T, Kurokawa H, Rikuta A, Ando S, Takigawa T, Kuroda T, Miyazaki M. Influence of light intensity on dentin bond strength of self-etch systems. J Oral Sci 2006; 48: 21-6.

22 Peutzfeldt A, Asmussen E. Resin composite properties and energy density of light cure. J Dent Res 2005; 84: 659-62.

- 23 Lindberg A, Peutzfeldt A, van Dijken JW. Effect of power density of curing unit, exposure duration, and light guide distance on composite depth of cure. Clin Oral Investig 2005; 9: 71-6.
- 24 Halvorson RH, Erickson RL, Davidson CL. Energy dependent polymerization of resin-based composite. Dent Mater 2002; 18: 463-9.
- 25 Yap AU, Seneviratne C. Influence of light energy density on effectiveness of composite cure. Oper Dent 2001; 26: 460-6.
- 26 Miyazaki M, Oshida Y, Moore BK, Onose H. Effect of light exposure on fracture toughness and flexural strength of light-cured composites. Dent Mater 1996; 12: 328-32.
- 27 Nomoto R, Uchida K, Hirasawa T. Effect of light intensity on polymerization of light-cured composite resins. Dent Mater J 1994; 13: 198-205.
- 28 Bitter K, Paris S, Pfuertner C, Neumann K, Kielbassa AM. Morphological and bond strength evaluation of different resin cements to root dentin. Eur J Oral Sci 2009; 117: 326-33.

29 Hayashi M, Okamura K, Wu H, Takahashi Y, Koytchev EV, Imazato S, Ebisu S. The root canal bonding of chemical-cured total-etch resin cements. *J Endod* 2008; 34: 583-6.

30 Goracci C, Sadek FT, Fabianelli A, Tay FR, Ferrari M. Evaluation of the adhesion of fiber posts to intraradicular dentin. *Oper Dent* 2005; 30: 627-35.

31 Aksornmuang J, Nakajima M, Foxton RM, Tagami J. Effect of prolonged photo-irradiation time of three self-etch systems on the bonding to root canal dentin. *J Dent* 2006; 34: 389-97.

32 Goracci C, Tavares AU, Fabianelli A, Monticelli F, Raffaelli O, Cardoso PC, Tay F, Ferrari M. The adhesion between fibre posts and root canal walls: comparison between microtensile and push-out bond strength measurements. *Eur J Oral Sci* 2004; 112: 353-61.

33 de Durão Mauricio PJ, González-López S, Aguilar-Mendoza JA, Félix S, González-Rodríguez MP. Comparison of regional bond strength in root thirds among fiber-reinforced posts luted with different cements. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 2007; 83: 364-72.

34 Grassi FR, Pappalettere C, Di Comite M, Corsalini M, Mori G, Ballini A, Crincoli V, Pettini F, Rapone B, Boccaccio A. Effect of different irrigating solutions and endodontic sealers on bond strength of the dentin-post interface with and without defects. *Int J Med Sci* 2012; 9: 642-54.

35 Scotti N, Rota R, Scansetti M, Migliaretti G, Pasqualini D, Berutti E. Fiber post adhesion to radicular dentin: The use of acid etching prior to a one-step self-etching adhesive. *Quintessence Int* 2012; 43: 615-23.

36 Lopes GC, Ballarin A, Baratieri LN. Bond strength and fracture analysis between resin cements and root canal dentin. *Aust Endod J* 2012; 38:14-20.

37 Zicari F, De Munck J, Scotti R, Naert I, Van Meerbeek B. Factors affecting the cement-post interface. *Dent Mater* 2012; 28: 287-97.

38 Castellán CS, Santos-Filho PC, Soares PV, Soares CJ, Cardoso PE. Measuring bond strength between fiber post and root dentin: a comparison of different tests. *J Adhes Dent* 2010; 12: 477-85.

39 Ebert J, Leyer A, Günther O, Lohbauer U, Petschelt A, Frankenberger R, Roggendorf MJ. Bond strength of adhesive cements to root canal dentin tested with a novel pull-out approach. *J Endod* 2011; 37: 1558-61.

40 L. Zhang, E. Magni, I. Radovic, Y.J. Wang, J.H. Chen, M. Ferrari. Effect of curing modes of dual-curing luting systems and root regions on retention of translucent fiber posts in root canals. *J Adhes Dent* 2008; 10: 219-26.

41 K. Bitter, J. Perdigao, M. Exner, K. Neumann, A. Kielbassa, G. Sterzenbach. Reliability of fiber post bonding to root canal dentin after simulated clinical function in vitro. *Oper Dent* 2012; 37: 397-405.

42 Y.J. Wang, O. Raffaelli, L. Zhang, J.H. Chen, M. Ferrari. Effect of different bonding procedures on micro-tensile bond strength between a fiber post and resin-based luting agents. *J Oral Sci* 2007; 49: 155-60.

43 J. Aksornmuang, M. Nakajima, R.M. Foxton, J. Tagami. Effect of prolonged photo-irradiation time of three self-etch systems on the bonding to root canal dentine. *J Dent* 2006; 34 : 389-97.

44 Braga RR, Boaro LC, Kuroe T, Azevedo CL, Singer JM. Influence of cavity dimensions and their derivatives (volume and 'C' factor) on shrinkage stress development and microleakage of composite restorations. Dent Mater 2006; 22: 818-23.

45 Miyazaki M, Hinoura K, Onose H, Moore BK. Effect of filler content of light-cured composites on bond strength to bovine dentine. J Dent 1991; 19: 301-3.

46 Ilie N, Kunzelmann KH, Hickel R. Evaluation of microtensile bond strengths of composite materials in comparison to their polymerization shrinkage. Dent Mater 2006; 22: 593-601.

47 Serafino C, Gallina G, Cumbo E, Ferrari M. Surface debris of canal walls after post space preparation in endodontically treated teeth: A scanning electron microscopic study. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2004; 97: 381-7.

48 Coniglio I, Carvalho CA, Magni E, Cantoro A, Ferrari M. Post space debridement in oval-shaped canals: The use of a new ultrasonic tip with oval section. J Endod 2008; 34: 752-5.

49 Carrigan PJ, Morse DR, Furst ML, Sinai IH. A scanning electron microscopic evaluation of human dentinal tubules according to age and location. J Endod 1984; 10: 359-63.

50 Mjor IA, Nordahl I. The density and branching of dentinal tubules in human teeth. Arch Oral Biol 1996; 41: 401-12.

51 Paque F, Luder HU, Sener B, Zehnder M. Tubular sclerosis rather than the smear layer impedes dye penetration into the dentine of endodontically instrumented root canals. Int Endod J 2006; 39: 18-25.