

フロアブルレジンとユニバーサルレジンによる
歯頸部修復の接着差違

丸 山 沙絵子

**Difference in adhesion between flowable and universal resin composites
applied to cervical restorations**

Saeko MARUYAMA

日本歯科大学 大学院生命歯学研究科 歯科臨床系専攻

(指導：勝海一郎教授)

研究指導：柵木寿男准教授

(日本歯科大学 生命歯学部 接着歯科学講座)

The Nippon Dental University, Graduate School of Life Dentistry at Tokyo

(Director : Prof. Ichiroh KATSUUMI)

Conducted by Associate Prof. Toshio MASEKI

The Nippon Dental University, School of Life Dentistry at Tokyo

Department of Adhesive Dentistry

(2014年1月)

和文表題 [フロアブルレジンとユニバーサルレジンによる
歯頸部修復の接着差違]

和文著者氏名 [丸山沙絵子]

英文表題 [Difference in adhesion between flowable and universal resin
composites applied to cervical restorations]

英文著者氏名 [Saeko MARUYAMA]

本文

緒言

コンポジットレジン修復は、臨床の場において欠くことのできない主要な療法となっている。この修復法はレジン接着システムと修復材料それぞれの進歩と改善に支えられているとって過言ではない。

接着システムについては、改良開発努力の結果として、辺縁封鎖性や接着強さに長けていることはもちろん、操作性にも優れた材料となっている。その具体的な臨床成果として、10年の臨床経過によっても、歯髄為害性を示さず、口腔内生存率の高い修復であるという報告¹⁾が確認できる。

また、修復材料としてのコンポジットレジンについては、色調や審美性に長け、機械的性質の向上も著しいという報告²⁾がなされている。

最近では、これらの裏付けによって、コンポジットレジン修復の安定した臨床成績には異論がなくなりつつある。

コンポジットレジンには、フィラー組成に基づいた場合には、マクロフィラー型、MFR型、SFR型そしてハイブリッド型に分類される。また、応用部位に基づく場合には、前歯部用、臼歯部用そして前臼歯両用と、症例に応じた分類がなされている³⁾。近年、これら従前の分類に属さないコンポジットレジンが登場し、広く臨床に応用されている。なかでも機械的性質に優れ、審美性、汎用性に長けたユニバーサルレジンや、粘稠度が低く操作性に優れたフロアブルレジンが開発され、機械的性質の向上と共に修復応用頻度が増大しつつある。

フロアブルレジンには、一般的にダイレクトアプリケーションシリンジによって供給され、取り扱いや窩洞への填入操作が簡便であり、臨床において広く活用されている。また、このレジンには窩壁適合性に優れ⁴⁾、辺縁封鎖性も良いとされている⁵⁾ことが材料選択される一因と考えられる。

歯質接着を活用したコンポジットレジン修復に際しては、応用部位の形態学的特徴から修復材料を正しく選択する必要がある。Kuboら⁶⁾は *in vivo* における長期追跡調査により、窩洞の差違

による予後について報告し、特に歯頸部修復の高い難度に着目している。

歯頸部は齲蝕の好発部位であり⁷⁾、歯の形態上、咬合負荷や顎運動時の滑走誘導など、絶え間ない外力によって応力が集中する部位であり⁸⁻¹⁰⁾、また摩耗症やアブフラクションの好発部位である¹¹⁻¹⁶⁾。

さらに、同部位の窩洞は、5級窩洞のように全周がエナメル質である場合と、くさび状窩洞のように、歯頂側窩縁がエナメル質、象牙質窩縁が象牙質である場合とに区分できる。特に後者は、歯頂側窩壁がエナメル質と象牙質によって、歯肉側窩壁が象牙質のみによって構成され、歯質の性質・構造上からも安定した接着強さを獲得しにくい被着体であることが明らかになっている^{17,18)}。

一方、MFR型コンポジットレジン、ハイブリッド型コンポジットレジンより歯頸部修復に適した修復材料であるとされている¹⁹⁾。理由のひとつとして、MFR型コンポジットレジンはいくつかの弾性率を示し、変形することによって応力を緩和することが挙げられている²⁰⁾。

修復材料としての性質上、フロアブルレジン、ユニバーサルレジン、ハイブリッド型に近似しているが、歯頸部症例に際し、物性の異なる両者の応用がどのように挙動するかは不明な点が多い。

接着性修復を評価する代表的な指標としては、辺縁封鎖性と接着強さに対する評価を挙げる事ができる。

辺縁封鎖性は、二次齲蝕²¹⁾、修復物の維持²²⁾、辺縁の変色や漏洩を評価するために重要である^{23,24)}。

接着強さ、なかでも窩洞内接着強さは、修復中と修復後に生じる多様な侵襲を経た状況下の修復物保持について考察するために有用であり、これを測定するためには Micro-tensile bond test²⁵⁾の応用が必要となる。

さらに、接着強さに対する統計学的解析法については、平均値をはじめとする基本的統計値に基づく分析に加え、近年では信頼性の評価法であるワイブル分析を活用することによって、因子の特徴づけに有用であることが ISO/TS 11405²⁶⁾に明記されている。

そこで本研究では、フロアブルレジンとユニバーサルレジンによる歯頸部修復の接着差について検証することを目的に、ヒト抜去小白歯歯頸部の規格化V字状窩洞にフロアブルレジンとユニバーサルレジンを用いて修復後、口腔内環境を想定したサーマルサイクリングと繰り返し荷重による同時負荷を加えた。その後、色素浸透試験による辺縁封鎖性、規格化 Micro-tensile bond strength 測定法による窩洞内象牙質接着強さ、およびワイブル分析による接着信頼性について評価検討した。

材料および方法

1. 事前実験

1) 実験材料

最近のフロアブルレジンとユニバーサルレジンの特徴付ける基本的物性について確認し、本実験に用いる両レジンの代表材料を選択することを目的に、事前実験を行った。

Table 1, 2 に、実験に使用したフロアブルレジン 5 種およびユニバーサルレジン 5 種を示す。

2) 代表的なフロアブルレジンとユニバーサルレジンの基本的物性

(1) 重合収縮率

重合収縮率の測定は、Miyasaka ら²⁷⁾の方法に基づき行った。

コンポジットレジンの重合収縮測定には、レーザー変位センサ Laser Sensor HL-C105B-BK

(SUNX) を用いて、光照射開始直後から 3 分後まで、モールド内コンポジットレジン表面中央部における垂直変化量を $1\mu\text{m}$ 単位、1 秒間隔で測定し、照射前コンポジットレジンの高径と照射 3 分後コンポジットレジン高径の差を照射前コンポジットレジンの高径で除し、重合収縮率を算出した。

まず、内径 4.0mm ×高径 8.0mm の透明アクリルモールドを、カバーガラスを介して反射鏡の上に安置し、被験コンポジットレジンモールド内に填塞した。ついで、2 基の相対する照射器によって、モールド底部から重合を促進させるために、底面の反射鏡に対し照射角度 45° で 20 秒間の同時光照射を行った。その後、モールド長軸に対し照射角度 90° まで暫時変化させながら、2 基の照射器によって 20 秒間の同時光照射を行い、重合収縮測定 ($n=5$) を行った。

(2) 曲げ強さ

曲げ強さの測定は、ISO4049 : 2009²⁸⁾に基づき行った。

まず、幅 2.0mm ×深さ 2.0mm ×長さ 25.0mm の曲げ試験試料作製用金型内面にワセリンを塗布後、被験コンポジットレジンモールド内に填塞した。ついで、スライドガラスで圧接しながら中央部を含む 3 か所それぞれ 60 秒間、計 180 秒の照射後に、余剰部を除去し、試料面を耐水シリコンカーバイドペーパー 1,200 番で調整・研磨し、ISO 規格²⁸⁾に準拠した測定用試料とした。

試料は、 37°C 湿ボックス中に 24 時間保管後、万能試験機(島津製作所 Autograph AG-1)に試料を装着し、支点間距離 20mm 、クロスヘッドスピード $2.0\text{mm}/\text{min}$ の条件下にて 3 点曲げ強さの測定 ($n=5$) を行った。

(3) 圧縮強さ

圧縮強さの測定は、Silva ら²⁹⁾の方法に基づき行った。

まず、内径 4.0mm ×高さ 8.0mm の透明アクリルモールドの中に、被験コンポジットレジンモールドを約 2mm ずつ填塞し、それぞれ 4 方向から各 10 秒の照射を行い、測定用試料とした。

試料は、 37°C 湿ボックス中に 24 時間保管後、万能試験機(島津製作所 Autograph AG-1)に試料を装着し、クロスヘッドスピード $2.0\text{mm}/\text{min}$ の条件下にて圧縮強さの測定 ($n=5$) を行った。

2. 本実験

1) 実験材料

Table 3 に、本実験で用いた 2 ステップ型の接着システムに用いる酸処理材ならびにボンディング材を示す。また、Table 4 にはレジン接着システムの主成分を示す。

また、事前実験の結果を踏まえ、修復用コンポジットレジンとしては、フロアブルレジンである Filtek Supreme Ultra Flowable Restorative (以後 F、3M ESPE, USA) およびユニバーサルレジンである Filtek Supreme Ultra Universal Restorative (以後 U、3M ESPE, USA) のシェード A3 を用いた。また、レジン接着システムとしては、酸処理材とボンディング材から構成される 2 ステップ型エッチアンドリンズシステムである Scotchbond Etchant (3M ESPE, USA) および Adper Single Bond Plus (3M ESPE, USA) を用いた。

なお、全実験を通しての光照射には、平均照射強度： $700\text{mW}/\text{cm}^2$ を供出する $13/8\text{mm}$ ターボチップを装着した可視光線照射器 (Optilux501, sds Kerr, USA) を使用した。

2) 実験手順

(1) 歯頸部規格化 V 字状窩洞の形成

被験歯には、0.1%チモール水溶液に1年未満保存のヒト抜去健全下顎小白歯の中から、肉眼で容易に確認できる硬組織疾患や修復物が存在しない小白歯30本を選択し用いた。

なお、抜去歯の使用に関しては、本学生命歯学部研究倫理委員会の承認（NDU-T2012-26）を得て行った。

Fig. 1 に、辺縁封鎖性および接着強さの検討に際し用いた全30窩洞から算出した規格化 V 字状窩洞各部の寸法平均値ならびに標準偏差を示す。

すなわち、本実験における規格化 V 字状窩洞寸法平均値は、窩洞近・遠心幅 / 歯頂・歯肉側幅がそれぞれ 4.2 / 3.4mm で、窩縁部に厚さ 0.5mm のエナメル質が存在する平均長さ 1.6mm のエナメル質象牙質混成歯頂側壁と平均長さ 2.9mm の象牙質のみによって構成された歯肉側壁からなる窩洞である。

窩洞形成に先立ち、抜去歯の解剖学的歯頸線を鉛筆にて明示後、Protect Varnish（Kuraray Noritake Dental）を頬側歯頸部に塗布した。その後、全被験歯に対して、ストレートシリンダータイプダイヤモンドポイント HP11（松風）をマイクロモーターに装着し、無注水下の低速研削による歯頂側壁の概研削を行った。ついで、014 ストレートクロスカットフィッシャーバー ST36（Meisinger, Germany）を用いて、無注水下の 3,000 rpm 低速切削によって、頬側解剖学的歯頸線の最下点から 1.0 mm 歯頂側方向に窩縁を有し、歯軸に対する傾斜角が 60°、長さ 1.6 mm の歯頂側壁を形成した。さらに、歯頂側壁とのなす角が 90°となる接続する歯肉側壁を形成し、これを規格化 V 字状窩洞試料とした。

(2) フロアブルレジンおよびユニバーサルレジンによる修復手順

基本的修復手順としては、規格化 V 字状窩洞の形成、歯面処理、2種コンポジットレジンによる修復、当該修復試料に対する複合ストレスの負荷、色素浸透試験および規格化した Micro-tensile bond strength（以後、 μ -TBS 値）の測定を行った。

まず規格化 V 字状窩洞に対し、注水による清掃と乾燥を行った。ついで、リン酸処理材 Scotchbond Etchant の 15 秒間の塗布、10 秒間の水洗、その後、歯面の湿潤状態が保たれるように、窩洞に貯留している余剰水分を間歇的なエアールで取り除いた。続いて、酸処理を施した窩壁に対し、15 秒間で Adper Single Bond Plus の 2 回連続塗布、緩やかなエアールによる 5 秒間以上の十分な乾燥、10 秒間光照射を行った。

ついで、修復材である F または U を気泡の混入に注意しながら窩洞内へ一括填塞し、窩洞中央部、近心部および遠心部に対し、各 20 秒間の計 60 秒間光照射を行った。照射を終えた試料は、37°C 湿ボックス中に 24 時間保管後、研磨システム Soflex[®] XT（3M ESPE, USA）を用いて、窩洞周辺部に残存する Protect Varnish を含め除去し、かつ修復面と歯面が等高移行的になるよう仕上げ研磨を行い、修復試料とした。

(3) ストレスの負荷

修復試料に対し複合機能試験機³⁰⁾（以後、MFA）を用いて、口腔内環境想定ストレスを負荷した。Table 5 には、MFA によって修復試料に対し負荷を加えた複合ストレス条件を示す。

また、Fig. 2 に、MFA による浴槽中の複合ストレス負荷模式図を示す。

すなわち、5°C / 55°C間、各 20 秒間浸漬による 200 サイクルのサーマルサイクリングと 118N(12kgf)、毎分 90 回のストロークで 10⁴ 回の繰り返し荷重による同時負荷を修復試料に対し加えた。

また、本実験で使用した被験歯は、下顎小白歯であることから、繰り返し荷重が機能咬頭である頬側咬頭の内斜面と外斜面に負荷されるよう、MFA の駆動部を精密に再現した対合体作製器を併用しながら急速硬化性常温重合レジン Adfa (松風) を用いて調整した。なお、実験の繰り返し数は 15 回とした。

(4) 試料の切断手順

Fig. 3 に、辺縁封鎖性の評価と μ -TBS 値測定のために行った試料の切断手順を示す。

まず、試料に対し修復部ならびに窩縁周囲 1 mm を除く歯面に対しネイルバーニッシュによる被覆を行い、37°C 1%メチレンブルー水溶液中に 60 分間の浸漬を行った。ついで、Soflex[®] XT のグリッド C (荒) によるレジン修復面の荒研削、研削面に対する K-etchant (Kuraray Noritake Dental) による清掃のための酸処理、Clearfil Ceramic Primer (Kuraray Noritake Dental) と Clearfil Bond SE ONE (Kuraray Noritake Dental) の併用による表面処理を行い、 μ -TBS 値測定用に修復部表面を中心に Clearfil AP-X (Kuraray Noritake Dental) を築盛した (Fig. 3-a)。

その後、試料の歯髓腔内処理を行うため、窩洞中央部矢状面から 1.5 mm 以上平行移動させた面による硬組織薄切機 Leitz 1600 Saw Microtome (Ernst Leitz Wetzlar, Germany) を用いた切断 (Fig. 3-b)、歯髓腔内の歯髓除去、Clearfil Bond SE ONE と Clearfil AP-X を用いた接着充填 (Fig. 3-c) を行った。ついで、窩洞正中部矢状面から厚さ 1.05 mm の近心部・遠心部板状試料 2 片を得るため、3 回の縦切断を行った (Fig. 3-d)。

その後、板状試料 2 片の切断面を注水下にてシリコンカーバイドペーパー 2,000 番まで順次研磨し、併せて試料の厚さを 1.0 mm に調整した (Fig. 3-e)。

(5) 辺縁封鎖性の評価

Fig. 4 に、色素浸透状態の評価に用いた判定基準を示す。

判定基準は、歯頂側壁および歯肉側壁ともに 4 分割し、全く色素浸透の認められない状態を 0、窩壁長 1/4 未満の色素浸透状態を 1、窩壁長 1/4 以上 1/2 未満の状態を 2、窩壁長 1/2 以上 3/4 未満の状態を 3、3/4 以上で窩底部線角には到達していない状態を 4、窩底部線角に到達した状態を 5 とした。なお、歯頂側壁においては、窩壁長 1/4 未満かつエナメル質内に限局した状態を 1a、窩壁長 1/4 未満かつエナメル象牙境を越え象牙質にまで達した状態を 1b として細分化した。

評価に際しては、近心部・遠心部板状試料それぞれの窩洞正中部切断研磨面における歯頂側壁と歯肉側壁の窩壁長さ、エナメル質厚さ、色素浸透状態のそれぞれを 200 倍の実体顕微鏡を用いて測定し、判定基準に基づく換算と確認を行いながら微少漏洩についての評価を経て、辺縁封鎖性の評価検討を行った。

なお、漏洩スコアについては、1 修復試料から得た近・遠心両試料のうち、より漏洩の進行した試料のスコアをその試料の代表値とした。

(6) 規格化 μ -TBS 値測定用試料の形態調整

Fig. 5 に、板状試料の歯肉側壁中央部健全象牙質を被着面とする規格化 μ -TBS 値測定用試料の調整手順を示す。

Fig. 6 には、本実験で用いた倣い加工応用の規格化試料形態調整器を示す。

本実験における μ -TBS 値測定用試料は信頼性に長けたデータを得るため、大下ら³¹⁾の報告に基づき Fig. 5 に示す接着面積 1.0mm^2 、最狭窄部幅 1.0mm 、最狭窄平行部長さ 1.0mm 、狭窄のための彎曲 $R0.65$ に設定し、Fig. 6 の調整器を用いてダンベル状試料を作製した。

(7) 窩洞内 μ -TBS 値の測定

Fig. 7 に、本実験における規格化 μ -TBS 値測定方法を示す。

規格化 μ -TBS 値測定用に考案した試料固定治具を万能試験機(島津製作所 Autograph AG-1)に設置後、試料を装着し、クロスヘッドスピード $1.0\text{mm}/\text{min}$ の条件下における μ -TBS 値の測定 ($n=30$) を行った。

3) 被験 2 種コンポジットレジンの基本的物性

本実験で使用した 2 種コンポジットレジンにおける物性の差を明らかにすることを目的に、フィラー配合率、熱膨張率、曲げ弾性率を測定した。

Table 6 に、2 種コンポジットレジンの配合フィラー^{32,33)}を示す。

(1) フィラー配合率

2 種コンポジットレジンのフィラー配合量をアッシュ法により測定し、配合率を算出した。それぞれのコンポジットレジンを恒量としたるつぼに入れ、室温 $\sim 800^\circ\text{C}$ まで昇温速度 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ の条件で加熱し、 800°C で 1 時間係留した。ついで、デシケータ内で冷却後に秤量し、これを繰り返して恒量としたるつぼ重量から残存重量を求めた。

なお、フィラー配合率は、焼却後の残存重量(焼却後測定重量 $-$ るつぼの重量)を熱負荷前のコンポジットレジンの重量(加熱前測定重量 $-$ るつぼの重量)で除すことによって算出 ($n=5$) した。

(2) 熱膨張率

熱膨張率の測定は、宮坂ら³⁴⁾の方法に基づき行った。

まず、幅 2.0mm \times 深さ 2.0mm \times 長さ 25.0mm の曲げ試験試料作製用金型内面にワセリンを塗布後、被験コンポジットレジンを填塞した。ついで、スライドガラスで圧接しながら中央部を含む 3 か所それぞれ 60 秒間、計 180 秒の照射後に、余剰部を除去し、試料面を耐水シリコンカーバイドペーパー1,200 番で調整・研磨し、 37°C 湿ボックス中に 24 時間保管後、測定用試料に調整した。

熱膨張率の測定には、PC 直結型熱膨張計(日本歯科大学生命歯学部歯科理工学講座)を用いて昇温速度 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ で $20\sim 80^\circ\text{C}$ の条件下にて測定 ($n=5$) を行った。

(3) 曲げ弾性率

事前実験と同様の方法によって 3 点曲げ強さを測定し、応力 $-$ ひずみ曲線の傾きから弾性率を算出 ($n=5$) した。

成 績

1. 事前実験

Fig.8~10 に、近年の代表的なフロアブルレジン 5 種およびユニバーサルレジン 5 種の重合収縮率、曲げ強さ、圧縮強さの値を示す。

5 種材料間の値について、Tukey の q 検定を行った。

重合収縮率は、フロアブルレジンにおいて 3.45~2.09%の値を示し、 $BFF \geq UFF \geq VNF \geq F \geq EFQ$ の順に大きな値であった。一方、ユニバーサルレジンでは 1.72~0.82%の値を示し、 $VNS \geq GDD \geq U > BF II \geq EL \Sigma$ の順に大きな値であった。以上から、フロアブルレジンでは、重合収縮率の点でユニバーサルレジンより大きな値を示すことを確認した。

曲げ強さは、フロアブルレジンにおいて 139.0~106.5MPa の値を示し、 $F \geq VNF \geq EFQ \geq UFF \geq BFF$ の順に大きな値であった。一方、ユニバーサルレジンでは 186.5~109.6MPa の値を示し、 $U \geq VNS \geq BF II > GDD \geq EL \Sigma$ の順に大きな値であった。以上から、フロアブルレジンでは、曲げ強さの点でユニバーサルレジンと同等またはやや小さい値を示すことを確認した。

圧縮強さは、フロアブルレジンにおいて 337.6~257.4MPa の値を示し、 $EFQ \geq F \geq UFF \geq VNF \geq BFF$ の順に大きな値であった。一方、ユニバーサルレジンでは 364.8~142.0MPa の値を示し、 $EL \Sigma > BF II \geq GDD \geq U > VNS$ の順に大きな値であった。以上から、フロアブルレジンでは、圧縮強さの点でユニバーサルレジンよりやや大きな値を示すことを確認した。

したがって、今回検討した代表的市販フロアブルレジンとユニバーサルレジン各 5 種の中にあつて、F と U は、重合収縮率、曲げ弾性率、圧縮強さの点で標準的な位置にある材料であり、本実験用材料として選択可能と評価できた。

2. 本実験

1) 辺縁封鎖性について

(1) 色素浸透状態の概要

Table 7 に、F と U の歯頂側窩壁および歯肉側窩壁それぞれの漏洩スコア結果を示す。

色素浸透試験の結果、F による修復試料の歯頂側窩壁では、15 試料すべてに漏洩が認められなかった。また、歯肉側窩壁では、7 試料（全試料の 45%）に窩壁長 1/4 未満の軽微な漏洩が認められた。

一方、U による修復試料の歯頂側窩壁では、5 試料（同 33%）に漏洩が認められないものの、他の 5 試料（同 33%）に窩壁長 1/4 未満かつエナメル質内に止まる漏洩、残る 5 試料（同 33%）に窩壁長 1/4 未満かつエナメル象牙境を超え象牙質に達する漏洩が認められた。また、歯肉側窩壁では、3 試料に漏洩が認められないものの、他の 8 試料（同 55%）に窩壁長 1/4 未満の漏洩、残る 4 試料（同 25%）に窩壁長 1/4 以上かつ 1/2 未満の漏洩が認められた。

また、F および U の辺縁漏洩はいずれも窩壁界面に局限し、象牙細管を通じた歯髓方向への浸透は認められなかった。

したがって、複合ストレス負荷後の代表的 2 ステップ型エッチアンドリンシステム Adper Single Bond Plus による色素浸透状態は、修復材料および窩壁の違いによって挙動が変化することが判明した。

(2) コンポジットレジン間の差違

Fig. 11 に、F および U による修復試料の歯頂側窩壁と歯肉側窩壁それぞれの漏洩スコアに基

づく微少漏洩差違を示す。

コンポジットレジン間の差違について、Mann-Whitney 検定の平均順位値に基づく検討を行った。その結果、歯頂側では F の漏洩が U より危険率 5% で有意に小さく、歯肉側では両者間に有意差が認められなかった。

したがって、エナメル質窩縁を有する歯頂側壁では、F の辺縁封鎖性が U より有意に優れ、象牙質のみで構成される歯肉側壁では、両者間の封鎖性には差違がないことが判明した。

(3) 窩壁間の差違

窩壁間の差違について、Wilcoxon の符号付順位検定を行った。その結果、F と U いずれも、歯肉側壁は歯頂側壁の漏洩より有意に大きかった。

したがって、使用コンポジットレジンにかかわらず、エナメル質窩縁を有する歯頂側壁では象牙質のみで構成される歯肉側壁より辺縁封鎖性が有意に優れていることが判明した。

2) 窩洞内 μ -TBS 値について

(1) 平均値における差違

Fig. 12 に、F および U の窩洞内歯肉側象牙質壁に対する平均 μ -TBS 値 (s.d.) を示す。

測定した μ -TBS 値に対し、分散比の検定によって等分散を確認後、t 検定を行った。

分析の結果、2 種コンポジットレジンによる窩洞内 μ -TBS 値には有意差が認められなかった。

したがって、複合ストレス負荷後の歯頸部規格化 V 字状窩洞内歯肉側壁象牙質面に対する平均 μ -TBS 値は、F と U とによる材料較差が認められなかった。

(2) 接着信頼性

μ -TBS 値について、メジアンランク法によるワイブル分析を行った。

Fig. 13 に、縦軸に累積破壊確率 (%) を、横軸に μ -TBS 値をとり、F および U によるワイブルプロット (n=30) に基づき Gauss の最小二乗法から求めた回帰直線を示す。なお、図中には回帰直線の傾きであるワイブル係数 (m 値) を併記する。

ワイブル分析から得た m 値について、回帰直線の傾きの有意差検定を行った結果、F の m 値は U より危険率 1% で有意に大きな値を示した。

したがって、F を用いた歯頸部修復の接着強さ獲得に際しての信頼性は、U を用いた場合より有意に優れていることが判明した。

(3) 臨床的な接着破壊耐久性

Fig. 13 に、ISO/TS 11405²⁶⁾ で提唱されている累積破壊確率 10%・90%における F および U の応力値、すなわち本研究では推定 μ -TBS 値を付記する。

累積破壊確率 10% においては、F の推定 μ -TBS 値が U より危険率 5% で有意に大きい値であった。一方、累積破壊確率 90% においては、F 値と U 値との間に有意差は認められなかった。

以上から、累積破壊確率 10% 条件下においては、F を用いた歯頸部修復の歯肉側壁象牙質面の接着破壊に要する応力は、U を用いた場合より大きいことが判明した。

したがって、破壊確率が低いと考えられる口腔内環境下では、F を用いた歯頸部修復の接着は、U を用いた場合より接着破壊耐久性に優れていると推察できた。

(4) μ -TBS 値測定後の破断面様相

Table 8 に、 μ -TBS 値測定後の全破断面 (n=30) の破壊様相を一括して示す。

破壊様相を分別すると、界面破壊 (以後、I)、I とコンポジットレジン内凝集破壊 (以後、CR) もしくは象牙質内凝集破壊 (以後、D) との組み合わせによる混合破壊、および凝集破壊 (CR、D) であった。

破断面観察の結果、F の破壊面様相は I と CR による混合破壊が 19 試料 (全試料の 63%) と最も多く、ついで CR による 9 試料 (同 30%) であった。一方、U では I の 10 試料 (同 33%) が最多であり、ついで I と CR による混合破壊が 7 試料 (同 23%)、CR による 6 試料 (同 20%)、I と CR と D による混合破壊が 5 試料 (同 17%) となっていた。

3) 被験 2 種コンポジットレジンの基本的物性結果について

Table 9 に、フィラー配合率、重合収縮率、熱膨張率および曲げ弾性率を示す。また、エナメル質、象牙質の熱膨張率および曲げ弾性率を付記した³⁵⁾。

(1) フィラー配合率

フィラー配合率 wt% (s.d.) は、F で 58.2 (0.1)、U で 72.0 (0.1) であった。分散比の検定によって等分散を確認後、t 検定を行った。

分析の結果、F は U より危険率 1% で有意に小さい値を示した。

(2) 重合収縮率

重合収縮率 % (s.d.) は、F で 2.25 (0.56)、U で 1.29 (0.29) であった。分散比の検定によって等分散を確認後、t 検定を行った。

分析の結果、F は U より危険率 1% で有意に大きい値を示した。

(3) 熱膨張率

熱膨張率 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (s.d.) は、F で 67.0 (5.7)、U で 45.5 (1.9) であった。分散比の検定によって等分散を確認後、t 検定を行った。

分析の結果、F は U より危険率 1% で有意に大きい値を示した。

(4) 曲げ弾性率

弾性率 GPa (s.d.) は、F で 6.74 (0.63)、U で 11.66 (0.89) であった。分散比の検定によって等分散を確認後、t 検定を行った。

分析の結果、F は U より危険率 1% で有意に小さい値を示した。

考 察

1. 本実験用材料の選択と意義について

近年のフロアブルレジンとユニバーサルレジンの特徴付ける基本的物性 (重合収縮率、曲げ弾性率、圧縮強さ) について確認し、本実験に用いる両レジンの代表材料を選択することを目的に、国内外の代表的な市販コンポジットレジン を各 5 種類ずつ選択し、事前実験を行った。

その結果、ナノサイズの粒子とそれら集合体であるクラスターによるフィラーを共に採用し³²⁾、配合率とフローを変化させることによって製品化されている F と U は、今回検討した代表的市販フロアブルレジンとユニバーサルレジン各 5 種の中であって、重合収縮率、曲げ弾性率、圧縮強さの点で標準的な位置にある材料であった。したがって、同一組成分によって構成された両材料を、本実験用材料として選択使用することによって得られる結果は、典型的なフロアブルレジンとユニバーサルレジンによる修復の差を明瞭化する方略として有効と考える。

2. 辺縁封鎖性について

1) 実験条件の設定背景

小臼歯歯頸部には、くさび状欠損に代表される NCCL（非齶蝕性歯頸部欠損）が好発することは周知である³⁶⁾。その成因としては、繰り返しの咬合力、ブラキシズム、クレンチングなどによる歯頸部への応力集中が考えられ³⁷⁾、なかでも咬合力が大きな要因となることが、*in vivo* における検討から報告されている³⁸⁾。

また、三浦ら³⁹⁾は、各歯群別による最大咬合圧と咀嚼時における咬合圧について検討している。その結果、小臼歯部の最大咬合圧は成人男性で約 22.5kg であり、咀嚼中の咬合圧は最大咬合圧の 1/2～1/4 程度であると報告している。

これらを踏まえ、直近の各種修復用レジンならびにレジン接着システムを用いて予備実験を実施した。その結果、使用材料の選択ならびにストレス負荷の条件設定によっては、本実験の目的である歯頸部修復に対するフロアブルレジンの有用性についての検証が叶わないことが判明した。したがって、フロアブルレジンとユニバーサルレジンとの差を引き出すことが可能となる諸条件、すなわち使用する修復用レジンとレジン接着システム、複合ストレスの負荷条件・回数についての精査を経て、実験を開始した。

また、予備実験の結果、F および U は μ -TBS 値の測定に際し、コンポジットレジン内の凝集破壊を生じる確率が低く、適正な接着界面部の接着強さ測定に寄与する材料であることが確認できた。

さらに、本実験で採用したレジン接着システム：Adper Single Bond Plus は、2 ステップ型エッチアンドリンシステムの商品として国内外の臨床で使用されている。また、当該製品は一定レベルの複合ストレス負荷によって、微少漏洩が確認されており^{40,41)}、適正な負荷条件設定によって、修復用レジンに基づく差を抽出できるレジン接着システムであることを事前実験によって確認した。

予備実験の精査を経て、本研究における設定荷重とした 118N (12.0kgf) は、三浦ら³⁹⁾の報告値と比較し、同等または大きな数値として捉えることができる。また、繰り返し荷重の設定回数は 10^4 回、サーマルサイクリングの設定回数は 200 サイクルに設定した。これらは 1 回あたりの食事時の咀嚼回数が約 689 回であるという報告⁴²⁾や、1 日あたりの口腔内で生じる温度変化が約 20～50 回程度であるという報告⁴³⁾から考察すると、非常に短期間の口腔内環境想定といえる。しかし、前述の 118N (12.0kgf) という設定荷重と共に、ISO 規格²⁶⁾に準じた 5°C/55°C 間各 20 秒間浸漬によるサーマルサイクリングを連続的に負荷するという条件は、日常の口腔内で生じている時間的間隔を空けた断続的な咀嚼力と温度変化による環境ストレスよりも、侵襲性の強い条件として試料に作用していると考えられる。

辺縁封鎖性の評価に際しては、1%メチレンブルー溶液への浸漬によって、窩壁接着界面部の

微少漏洩を可視化させる色素浸透試験によって対応した。色素浸透試験法に用いる色素は、メチレンブルー⁴⁴⁾、塩基性フクシン⁴⁵⁾、硝酸銀⁴⁶⁾、アシッドレッド⁴⁷⁾などが挙げられる。色素浸透試験は、窩縁部を起点とした窩壁に沿った接着破壊を探知することができる。また、その識別領域は選択した色素の分子粒径に依存する。この観点において、メチレンブルーの分子径は $1.70 \times 0.76 \times 0.33 \text{nm}$ ⁴⁸⁾と小さく、浸透性に富み、歯質と修復材料との色彩的識別が容易であり、従前の研究⁴⁴⁾でも使用されていることから、本研究の色素として選択した。

2) コンポジットレジン間の差違

エナメル質窩縁を有する歯頂側壁では、Fの辺縁封鎖性がUより有意に優れ、象牙質のみで構成される歯肉側壁では、両者間の封鎖性には差違がないことが判明した。

この結果は、両修復において共通のレジン接着システムを使用していることから、使用した修復用コンポジットレジン自体が有する特性が反映されていると考える。

コンポジットレジンを含めた修復材料の理工学的性質としては、物理・機械・化学・生物学的性質を挙げるができる⁴⁹⁾。本研究では、修復試料に対し、サーマルサイクリングと繰り返し荷重とによる複合ストレスを負荷していることから、使用コンポジットレジンレジンのフィラー配合率、重合収縮率に加え、物理的性質の熱膨張率、機械的性質の曲げ弾性率に着目した。

本研究で使用したコンポジットレジン、FとUはマトリックスレジンや配合フィラーなどの成分はほぼ同一である。しかし、フィラー配合率はFが58.2 wt %、Uが72.0 wt %と、FはUより約14 wt %少ない値となっている。フィラー配合率の増減はフローの調整にも関係するが、同時に重合収縮率、熱膨張率および弾性率などを左右する大きな要因となる⁵⁰⁾。

コンポジットレジンの硬化は光照射時、マトリックスレジンの重合によって進行し、重合収縮が生じる。光重合レジンでは、光照射の方向に重合収縮が生じることから、レジンが窩壁から離れ、接着界面にコントラクションギャップが生じる危険性が惹起する⁵¹⁻⁵⁴⁾。

マトリックスレジンのみ重合収縮率は約5%との報告がある⁵⁵⁾。したがって、修復に際し良好な辺縁封鎖性を得るためには、重合収縮率の小さいコンポジットレジン、すなわちマトリックスレジン量を減少させ、相対的にフィラー配合率を増加させたレジンの選択応用が望ましい。つまり、理論的にはUの辺縁封鎖性はFよりも優れることになるといえる。

しかし、本研究結果を確認すると、歯頂側壁ではFの辺縁封鎖性がUより有意に優れ、歯肉側壁では両者間に有意差を認めなかった。この両修復における辺縁封鎖性の挙動は、窩洞修復後の複合ストレス負荷によって生じたものと考えられる。

口腔内環境下の修復は、飲食物による温度変化による侵襲を受けることから、コンポジットレジンと歯質の熱膨張率の差は、膨縮の差となり、接着界面における応力発生の一因となる^{56, 57)}。また、歯頸部修復における温度ストレスの辺縁封鎖性に対する影響は、過去の研究によって確認されている⁵⁸⁾。

マトリックスレジンのみ熱膨張率は、歯質の約8~9倍⁵⁵⁾とされている。したがって、良好な辺縁封鎖性を得るためには、熱膨張率が歯質に近似したレジンを選択が望ましい。さらに、咀嚼力をはじめとする外力による変形を考えた場合、歯質と近似した弾性率を有するレジンが望ましい。

本研究で用いたコンポジットレジン熱膨張率を測定した結果、Fは $67.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 、Uは $45.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ であり、UはFより数値的には歯質に近似していた。同様に、曲げ弾性率測定の結

果、Fは6.74GPa、Uは11.66GPaであり、UはFより数値的には歯質に近似していた。したがって、数値的見地からすると、Uの辺縁封鎖性はFより優れるはずであるが、本研究結果では異なる事象を呈した。

歯頸部コンポジットレジン修復を対象とした研究において、原ら³⁰⁾は *in vitro* 検討によって、Qvist⁵⁹⁾は *in vivo* 検討によって、荷重あるいは咬合負荷は温度負荷より大きな影響を辺縁封鎖性に与えると述べている。

また、渡邊⁶⁰⁾は歯頸部修復において荷重を負荷した際には、フィラー含有量が少ないほど辺縁封鎖性は良好であり、温度ストレスを与えた際には、フィラー含有量が多いほど良好であったと述べている。

咀嚼によって、歯は咬合面側から歯根側に向けて荷重が負荷され、歯頸部に応力集中が発生する⁶¹⁾。その際に弾性変形しにくい修復物、換言すると、大きい弾性率の修復物が充填されていた場合には、接着界面部に応力集中が生じ、接着破壊に繋がる危険がある。コンポジットレジン修復は、歯質、接着システム、修復材であるコンポジットレジンが三位一体となって口腔内で機能する。したがって、歯質との堅固な接着が担保されている場合には、熱膨張率の点で負の要因を有していても、低い弾性率によってしなやかに変形するレジン、自らがストレスブレイカーとして機能し、臨床的に良好な辺縁封鎖性を示すと推測できる。

一方、Ghulman⁶²⁾は、歯頸部窩洞の C-factor 値を 0.2~5.0 まで変化させて、辺縁封鎖性の差を検討した結果、C-factor 値に伴う影響は 0.5~2.0 までは認められなかったことを報告している。

本研究における規格化 V 字状窩洞は、C-factor 値が約 1.3 であり、重合収縮によって接着界面部に生じる応力が、小さい弾性率に基づくしなやかさと融合し、辺縁封鎖性の挙動に影響していると考えられる。

3) 窩壁間の差違

本研究で採用した規格化 V 字状窩洞は、歯頸部に位置し、歯頂側がエナメル質窩縁、歯肉側が象牙質から構成されている。

研究の結果、使用コンポジットレジンにかかわらず、エナメル質窩縁を有する歯頂側壁では象牙質のみで構成される歯肉側壁より辺縁封鎖性が有意に優れていることが判明した。

従来、エッチアンドリンスシステムは、リン酸の有する積極的な脱灰効果によって、象牙質よりエナメル質に対して優れた接着強さ獲得を示すとされている⁶³⁻⁶⁵⁾。本研究で用いた Adper Single Bond Plus も、ボンディング材へのナノフィラー添加などに基づく改良がなされ、象牙質よりエナメル質に対し、大きな接着強さを示すとの報告がある⁶⁶⁾。

大きな接着強さは、良好な辺縁封鎖性の十分条件ではないが、エッチアンドリンスシステムによる優れたエナメル質への接着特性が、象牙質のみの窩壁である歯肉側に比べ、エナメル質窩縁を有する歯頂側の良好な辺縁封鎖性に寄与する⁶⁷⁾。

また、本実験で規格化した規格化 V 字状窩洞は、歯軸に対し 60° の傾斜角をなす歯頂側窩壁、ならびにこれと 90° の隅角、すなわち歯軸に対し 30° の傾斜角をなす歯肉側窩壁によって構成されている。

代表的な予後不良の修復物脱離を考えてみると、咀嚼により窩洞全体が圧縮変形し、窩洞内壁には圧縮応力より剪断応力が強く作用していると考えられることができる。したがって、歯軸と平行に負荷が加わるよう設定した繰り返し荷重による応力のベクトルによって考察すると、歯肉側窩

壁に作用する剪断応力に比べ、歯頂側窩壁の剪断応力の方が小さいことから、エナメル質窩縁を有する歯頂側の辺縁封鎖性が勝ったものと推察できる。

また、F の歯頂側において色素浸透が全く生じなかったことは、エナメル質との堅固な接着に加え、前述のストレスブレイカー効果が奏功したものと考えられる。

3. 窩洞内 μ -TBS 値について

1) 平均値における差違

複合ストレス負荷後の歯頸部規格化 V 字状窩洞内歯肉側壁象牙質面に対する平均 μ -TBS 値は、F と U とによる材料較差が認められなかった。

Hasegawa ら⁶⁸⁾は、引張接着強さとコンポジットレジンの機械的性質の関係を検討した結果、高い機械的性質を示すコンポジットレジンを接着させた際に、大きな接着強さが獲得されると述べている。また、より大きな接着強さを得るには、より多量のフィラーを有し、機械的性質の高いコンポジットレジンが必要であるとの報告がある⁶⁹⁾。さらに、F と U と同一のナノフィラーを採用したフロアブルレジンとユニバーサルレジンは、圧縮強さにおいては前者が、曲げ強さにおいては後者が優れる⁷⁰⁾とされる。

本研究においては、Table 9 に示すように、F と U との間に曲げ弾性率の有意差が認められた。窩洞内で修復物自体に負荷される応力は多種多様であり、大きな接着強さ獲得に関与する機械的性質の中で、圧縮強さ、曲げ強さ、間接引張強さなどが、どのように関与するかを確定させることは困難である。

しかし、接着界面を構成する歯質、接着材層、修復材一体化の程度、接着破壊をもたらす外的要因、抵抗しうる要因に関する探究は臨床的に重要であり、引き続きの検討課題である。

2) 辺縁封鎖性と μ -TBS 値との関係

F による修復窩洞の辺縁封鎖性は、U による修復窩洞より歯頂側において優れ、歯肉側では同等であったが、窩洞内接着強さについて、有意差は認められなかった。

吉川ら⁷¹⁾は、コンポジットレジンが窩底部から引き離される方向に重合することによって、重合収縮応力は窩底隅角部に最も集中し、窩洞辺縁では収縮応力の影響を受けにくいことを報告している。また、Hasegawa ら⁶⁸⁾は、コンポジットレジン修復の辺縁封鎖性は接着強さと相関していないと述べている。

接着破壊の探知という観点において、色素浸透試験は、窩縁部からの接着破壊を二次元的かつ可視的に判断することが可能である。前述の極微小な分子径からなるメチレンブルーを用いた本研究では、エナメル質内に限局する微少漏洩を検知していた。

他方、本研究では、歯肉側象牙質窩壁の中央部被着面から接着試験試料を採取しているため、窩洞内部、特に歯肉側壁で生じている接着劣化や接着破壊を包含した測定値として捉えることができる。しかし、窩縁部に限局した辺縁漏洩として確認できる接着劣化と μ -TBS 値との厳密な相互関係については、現状では解析が困難である。今後、接着強さおよび微少漏洩について、非破壊的方法によって任意に測定が可能となれば、両指標に基づく接着破壊についての比較検討が可能になる。

3) ワイブル分析による検討

ワイブル分析は、信頼性の評価を行う際に用いられる分析法⁷²⁾であり、広瀬⁷³⁾は、医学、薬学、工学など、寿命や破壊を扱う分野で頻繁に用いられていると述べている。近年は、歯科の分野においても材料強度に加え、接着強さの解析などに幅広く応用されている⁷⁴⁻⁷⁷⁾。

Robin ら⁷⁸⁾は、セラミックスに対する接着強さについてワイブル分析を用いて検討を行い、ワイブルプロットによる回帰直線の傾きとして得られるワイブル係数（以後、 m 値）について述べている。それによると、 m 値は欠陥の広がり特徴づける係数であり、大きな m 値を示すことは、破壊挙動の予測が容易で、欠陥の分布が均一であることから、すべての材料において望ましいとしている。また、Burrow ら⁷⁹⁾によると、ワイブル分析は、レジン系歯科材料の強さと象牙質への接着強さにおける分析において信用できる手法であるとされている。さらに、臨床的には m 値が高い材料ほど簡便に使用でき、かつ術者の手技に左右されにくいものであるとしている。

したがって、大きな m 値を示すコンポジットレジン修復は、接着強さ獲得のための信頼性に優れていると捉えることができる。

真壁ら⁸⁰⁾によると、信頼性とは耐久性、保全性、設計信頼性による 3 つの要素で構成され、特に耐久性とは、寿命が長く、かつ故障の少ないことから、最も基本的な性質であるとしている。

破壊現象は、材料の最弱部にできた損傷が拡大することから、材料の平均的な性格とは関係なく、最弱部によって決定する⁷⁸⁾。したがって、ワイブル分析の活用により、接着強さの平均値と標準偏差のみでは解析できない、コンポジットレジン修復全体の質的パフォーマンスを評価することが可能となる。

McCabe ら⁸¹⁾は、破壊確率の評価は試料数が多いほど質が高くなると述べ、ISO/TS 11405²⁶⁾では試料数を 15 試料以上と推奨しており、本研究では試料数 15 によって検討した。

4) フロアブルレジンの接着信頼性に基づく有用性

平均 μ -TBS 値において統計学的有意差は認められなかったものの、ワイブル分析の結果、F を歯頸部修復に用いた場合の接着強さ獲得に際しての信頼性は、U を用いた場合より有意に優れていることが判明した。

原ら³⁰⁾は、歯頸部コンポジットレジン修復について検討を行い、荷重ストレスは温度ストレスより接着界面に与える影響が大きいことを報告している。

本研究では、歯頸部にかかる荷重ストレスに対して、F が有する小さい弾性率、すなわち自らの「しなやかさ」によって緩衝作用が生じ、接着界面への影響が低減することによって、F の信頼性が U より勝ったもの考える。したがって、多様なストレスが負荷される苛酷な口腔内環境における歯頸部修復に際しては、F の選択は U より信頼性に長けた予後を期待できる。

5) フロアブルレジンの臨床的接着破壊耐久性

ISO/TS 11405²⁶⁾では、ワイブル分析による統計解析に際して、累積破壊確率 10%と 90%の破壊を生じさせるストレスは、その時点における接着強さを特徴づけるのに有益な方法としている。

本研究では ISO/TS 11405 に準じ、累積破壊確率 10%（接着破壊が生じにくい条件）と累積破壊確率 90%（接着破壊が生じやすい条件）について検討を行った。その結果、累積破壊確率 10%では、F 値は U 値より危険率 1%で有意に大きく、接着破壊には大きな応力を必要とすることが明らかとなった。

Tjandrawinata ら⁸²⁾は、フロアブルレジンを用いた際の平均接着強さの検討に加え、累積破壊確

率 10%と 90%条件下の接着について検討している。また、Foster ら⁸³⁾は、矯正用ブラケット接着材の接着強さを測定し、累積破壊確率 10%における接着強さと臨床的な接着破壊との関係について検討している。

本研究のワイブル分析によって、F は U より接着破壊に際し大きな応力を必要とすることが明らかとなり、F による歯頸部修復は、臨床的な接着耐久性に優れていることが推察できた。

今日のコンポジットレジン修復は、レジン接着システムの進化とも相まって、術後短期間で不良予後を認める頻度は非常に低い。したがって、本研究で実施した複合ストレス負荷後の累積破壊確率 10%（接着破壊が生じにくい条件）における応力値を対象とする検討は有意義と考える。しかし、口腔内では温度刺激や咀嚼荷重のみならず、多種多様なストレスが混在し、継続的な侵襲が負荷されている。今後は、*in vivo* における比較試験や疫学的研究などの臨床研究を加味して、より良好な長期的予後を得るための検討が望まれる。

6) μ -TBS 値測定後の破断面様相

F の破壊様相は、I と CR による混合破壊が 19 試料(全試料の 63%)と最も多く、ついで CR による 9 試料(同 30%)であった。一方、U では I の 10 試料(同 33%)が最多であり、ついで I と CR による混合破壊が 7 試料(同 23%)であった。

F においては、小さい弾性率に基づく自己緩衝作用によって、複合ストレスが接着界面部に対し及ぼす影響が軽減し、コンポジットレジン自体の凝集破壊が多く発現したと考える。一方、U においては、接着界面に対し繰り返し荷重による侵襲が直接的に作用し、界面部に接着劣化が生じたと推察できる。

さらに、F と U とのコンポジットレジン自体の物性、特に引張強さが影響したことも考えられる。Jones ら⁸⁴⁾は、同一のフィラーを用いてフローを変化させたフロアブルレジンとユニバーサルレジンでは、引張強さに差があることを報告している。本研究で用いた F と U は、Table 9 に示すようにフィラー配合率が有意に異なり、F より勝る U の機械的強さの優位性が、 μ -TBS 値測定後の破断面様相に発現したと考える。

結 論

フロアブルレジン(F)とユニバーサルレジン(U)による歯頸部修復の接着差違について検証することを目的に、ヒト抜去小臼歯歯頸部の規格化 V 字状窩洞に両レジンを用いて修復後、口腔内環境想定 of サーマルサイクリングと繰り返し荷重による複合ストレスを負荷した。その後、色素浸透試験による辺縁封鎖性、規格化 Micro-tensile bond strength 測定法による窩洞内象牙質接着強さ(μ -TBS 値)、およびワイブル分析による接着信頼性について評価検討し、以下の結論を得た。

1. エナメル質窩縁を有する歯頂側壁では、F の辺縁封鎖性が U より有意に優れ、象牙質のみで構成される歯肉側壁では、レジン間の封鎖性には差がない。

2. 代表的エッチアンドリンシステムを用いた場合、レジンにかかわらず、エナメル質窩縁を有する歯頂側壁では象牙質のみで構成される歯肉側壁より辺縁封鎖性が有意に優れている。

3. 複合ストレス負荷後の歯頸部規格化 V 字状窩洞内歯肉側壁象牙質面に対する平均 μ -TBS 値は、F と U とによる材料較差が認められない。

4. F を用いた歯頸部修復の接着強さ獲得に際しての信頼性は、U を用いた場合より有意に優

れている。

5. 破壊確率が低いと考えられる口腔内環境下では、F を用いた歯頸部修復の接着は、U を用いた場合より接着破壊耐久性に優れていると推察できる。

謝 辞

稿を終えるにあたり、御懇篤なる御高配を賜りました日本歯科大学生命歯学部 歯科保存学講座 勝海一郎教授に謹んで深甚なる謝意を表します。

また、本研究の遂行と編纂において、終始温かい励ましと御指導を賜りました接着歯科学講座 柵木寿男准教授、多大な御教示を頂戴した奈良陽一郎教授、さらに、数々の御助言を頂いた原 学非常勤講師、山田正助教ならびに小川信太郎助教に厚く御礼申し上げます。

最後に、常に変わらぬ御支援を頂きました接着歯科学講座、歯科保存学講座および日本歯科大学附属病院総合診療科の諸先生方に謝意を表します。

文 献

- 1) Akimoto N, Takamizu M, Momoi Y. 10-year clinical evaluation of a self-etching adhesive system. *Oper Dent* 2007; 32: 3-10.
- 2) Lohbauer U, Belli R, Ferracane JL. Factors involved in mechanical fatigue degradation of dental resin composites. *J Dent Res* 2013; 92: 584-91.
- 3) 田上順次, 千田 彰, 奈良陽一郎, 桃井保子. 保存修復学 21. 第四版. 永末書店: 東京; 2011. 150-152.
- 4) 吉川孝子, Wattanawongpitak Nipaporn, 袁 楊, 田上順次. フロアブルレジン修復物の窩壁適合性ならびに諸物性について. *接着歯学* 2004; 22: 79-86.
- 5) Senawongse P, Pongprueksa P, Tagami J. The effect of the elastic modulus of low-viscosity resins on the microleakage of class V resin restorations under occlusal loading. *Dent Mater J* 2010; 29: 324-329.
- 6) Kubo S, Kawasaki A, Hayashi Y. Factors associated with the longevity of resin composite restorations. *Dent Mater J* 2011; 30: 374-383.
- 7) 森上 誠, 杉崎順平, 宇野 滋, 山田敏元. 接着性レジン修復の症例調査. *接着歯学* 2007; 25: 177-181.
- 8) 陳 克恭, 三宅清美, 小川孝雄, 寺下正道. くさび状欠損の発生にかかわる咬合の影響 —歯軸と直交する方向に生ずる歯頸部のひずみ—. *日歯保存誌* 2001; 44: 829-835.
- 9) 陳 克恭, 三宅清美, 庄野庸雄, 寺下正道. くさび状欠損の発生にかかわる咬合の影響 —歯軸方向に生ずる歯頸部のひずみ—. *日歯保存誌* 2000; 43: 870-876.
- 10) Maseki T, Tanaka H. Symmetry of non-carious cervical lesions in canines and premolars. *Gerodontology* 2006; 23: 183-186.
- 11) Mair LH. Wear in dentistry — current terminology. *J Dent* 1992; 20: 140-144.
- 12) Lee HE, Lin CL, Wang CH, Cheng CH, Chang CH. Stresses at the cervical lesion of maxillary premolar—a finite element investigation. *J Dent* 2002; 30: 283-290.
- 13) Radentz WH, Barnes GP, Cutright DE. A survey of factors possibly associated with cervical abrasion of tooth surfaces. *J Periodontol* 1976; 47: 148-154.
- 14) Bergström J, Eliasson S. Cervical abrasion in relation to toothbrushing and periodontal health. *Scand J Dent Res* 1998; 96: 405-411.
- 15) Bergström J, Lavstedt S. An epidemiologic approach to toothbrushing and dental abrasion. *Community Dent*

- Oral Epidemiol 1979; 7: 57-64.
- 16) Nemcovsky CE, Artzi Z. Erosion-abrasion lesions revisited. *Compend Contin Educ Dent* 1996; 17: 416-423.
 - 17) De Goes MF, Giannini M, Foxton RM, Nikaido T, Tagami J. Micortensile bond strength between crown and root dentin and two adhesive systems. *J Prosthet Dent* 2007; 97: 223-228.
 - 18) 中島正俊, 高田恒彦, 田上順次, 細田裕康. 歯種および歯面の異なる象牙質に対するレジンの接着性に関する研究. *日歯保存誌* 1991 ; 34 : 266-274.
 - 19) Ferracane JL, Mitchem JC. Relationship between composite contraction stress and leakage in class V cavity. *Am J Dent* 2003; 4: 239-243.
 - 20) Van Meerbeek B, Braem M, Lambrechts P, Vanherle G. Evaluation of two dentin adhesives in cervical lesions. *J Prosthet Dent* 1993; 70: 308-314.
 - 21) Eriksen HM, Pears G. In vitro caries related to marginal leakage around composite resin restorations. *J Oral Rehabil* 1978; 5: 15-20.
 - 22) 加藤喜郎, 蜂須賀洋, 大川 新, 林 成憲, 大沼達夫, 安西孝史, 伊藤高夫, 小倉英夫. 複合レジンの辺縁封鎖性に関する研究 第3報 脱灰時間と窩壁嵌合効力との関係について. *日歯保存誌* 1976 ; 19 : 23-31.
 - 23) 水津修司. 接着性コンポジットレジンの辺縁微小漏洩—歯質接着性評価の指標として—. *日歯保存誌* 1985 ; 28 : 873-886.
 - 24) Sparrius O, Grossman ES. Marginal leakage of composite resin restorations in combination with dentinal and enamel bonding agents. *J Prosthet Dent* 1989; 61: 678-684.
 - 25) Sano H, Shono T, Sonoda H, Takatsu T, Ciucchi B, Carvalho R, Pashley DH. Relationship between surface area for adhesion and tensile bond strength – Evaluation of micro-tensile bond test. *Dent Mater* 1994; 10: 236-240.
 - 26) ISO/TS 11405: 2003, Dental materials – Testing of adhesion to tooth structure; ISO/TS 11405, 2003.
 - 27) Miyasaka T, Okamura H, Dimensional change measurements of conventional and flowable composite resins using a laser displacement sensor. *Dent Mater J* 2009; 28: 544-551.
 - 28) ISO 4049 : 2009, Dentistry – Polymer-based restorative materials, 2009.
 - 29) Silva CM, Dias KR. Compressive strength of esthetic restorative materials polymerized with quartz-tungsten-halogen light and blue LED. *Braz Dent J* 2009; 20: 54-57
 - 30) 原 学, 貴美島哲, 奈良陽一郎. 口腔内環境想定ストレス因子が歯頸部コンポジットレジン修復の接着特性に及ぼす影響 —接着信頼性について—. *接着歯学* 2010 ; 28 : 121-132.
 - 31) 大下純世, 奈良陽一郎, 田中久義. 試料形態と Micro-tensile bond strength との関係. *日歯保存誌* 2004 ; 47 : 587-607.
 - 32) 3M ESPE. Filtek Supreme Ultra Flowable Technical Product Profile
http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSufSevTsZxtUO8m15x_BevUqevTSevTSevTSeSSSSSS--&fn=fsu_flow_tpp.pdf
 - 33) 3M ESPE. Filtek Supreme Ultra Technical Product Profile
http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=66666UgxGCuNyXTtnXf2LxfEVtQEcuZgVs6EVs6E666666--&fn=supr_ultra_tpp.pdf
 - 34) 宮坂 平, 吉田隆一, 岡村弘行. 試料形態を問わないマイコン直結型熱膨張計の試作 埋没材原石ならびにメタルボンド用金属・陶材の熱膨張の測定. *歯学* 1984 ; 71 : 970-988.
 - 35) 歯科器材調査研究委員会. 歯科修復物に望まれる物理的・機械的性質の適性値について. *歯材器* 1997 ; 16 : 556-562.
 - 36) Borcic J, Anic I, Urek MM, Ferreri S. The prevalence of non-cariou cervical lesions in permanent dentition. *J Oral Rehabil* 2004; 31: 117-123.
 - 37) Grippo JO, Simring M, Coleman TA. Abfraction, Abrasion, Biocorrosion, and the enigma of noncariou

- cervical lesions: A 20-year perspective. *J Esthet Restor Dent* 2012; 24: 10-23.
- 38) Takehara J, Takano T, Akhter R, Morita M. Correlations of noncarious cervical lesions and occlusal factors determined by using pressure-detecting sheet. *J Dent* 2008; 36: 774-779.
- 39) 三浦不二夫, 角田正明. 咬合圧 (咀嚼圧) に関する研究. *日歯医師会誌* 1965 ; 7 : 293-298.
- 40) Sánchez-Ayala A, Farias-Neto A, Vilanova LS, Gomes JC, Gomes OM. Marginal microleakage of class V resin-based composite restorations bonded with six one-step self-etch systems. *Braz Oral Res* 2013; 27: 225-230.
- 41) Pongprueksa P, Kuphasuk W, Senawongse P. Effect of elastic cavity wall and occlusal loading on microleakage and dentin bond strength. *Oper Dent* 2007; 32: 466-475.
- 42) 文部省特定研究「咀嚼システムの基礎的研究」総括班. 咀嚼システム入門. 風人社: 東京; 1987. 115-129.
- 43) Gale MS, Darvell BW. Thermal cycling procedures for laboratory testing of dental restorations. *J Dent* 1999; 27: 89-99.
- 44) Ernst CP, Galler P, Willershausen B, Haller B. Marginal integrity of class V restorations: SEM versus dye penetration. *Dent mater* 2008; 24: 319-327.
- 45) Savadi Oskoe S, Alizadeh Oskoe P, Jafari Navimipour E, Ahmad Ajami A, Pournaghi Azar F, Rikhtegaran S, Amini M. Comparison of effect of Nd : YAG and Diode lasers and photodynamic therapy on microleakage of class V composite resin restorations. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects* 2013; 7: 74-80.
- 46) Senawongse P, Pongprueksa P, Harnirattisai C, Sumi Y, Otsuki M, Shimada Y, Tagami J. Non-destructive assessment of cavity wall adaptation of class V composite restoration using swept-source optical coherence tomography. *Dent mater J* 2011; 30: 517-522.
- 47) Mousavinasab SM, Atai M, Alavi B. To compare the microleakage among experimental adhesives containing nanoclay fillers after the storages of 24 hours and 6 months. *Open Dent J* 2011; 5: 52-57.
- 48) Hang PT, Brindley GW. Methylene blue absorption by clay minerals. Determination of surface areas and cation exchange capacities (Clay-organic studies XVIII). *Clays & clay miner* 1970; 18: 203-212.
- 49) 鈴木一臣, 榎本貢三, 岡崎正之, 中嶋 裕, 西山典宏. スタンダード歯科理工学 —生体材料と歯科材料—. 第4版. 学建書院: 東京; 2009, 23-39.
- 50) Anusavice KJ. Phillips' science of dental materials. 11th ed. Saunders: St. Louis; 2003. 399-440.
- 51) 久保田祐, 山本雄嗣. 接着修復直後に窩洞周囲の歯質に生じる応力. *日歯保存誌* 2008 ; 51 : 700-715.
- 52) Munksgaard EC, Irie M, Asmussen E. Dentin-polymer bond promoted by Gluma and various resins. *J Dent Res* 1985; 64: 1409-1411.
- 53) 加藤裕正, 渡辺 昭, 久光 久, 和久本貞雄. 光線重合型レジンの重合収縮の観察. *日歯保存誌* 1981 ; 24 : 941-953.
- 54) Irie M, Suzuki K, Watts DC. Marginal gap formation of light-activated restorative materials: effects of immediate setting shrinkage and both strength. *Dent Mater* 2002; 18: 203-210.
- 55) Vanherle G, Lambrechts P, Braem M. Overview of the clinical requirements for posterior composites. Vanherle G, Smith DC. Posterior composite resin dental restorative materials: 3M Co. Minnesota; 1985. 21-40.
- 56) Kubo S, Yokota H, Yokota H, Hayashi Y. Effect of low-viscosity resin-based composite on the microleakage of cervical restoration. *Am J Dent* 2003; 16: 244-248.
- 57) Kubo S, Yokota H, Sata Y, Hayashi Y. Microleakage of self-etching primers after thermal and flexural load cycling. *Am J Dent* 2001; 14: 163-169.
- 58) Chimello DT, Chinelatti MA, Ramos RP, Palma Dibb RG. In vitro evaluation of microleakage of

- a flowable composite in Class V restorations. *Braz Dent J* 2002; 13: 184-187.
- 59) Qvist V. The effect of mastication on marginal adaptation of composite restorations *in vivo*. *J Dent Res* 1983; 62: 904-906.
- 60) 渡邊 太平. 歯頸部コンポジットレジン修復の辺縁封鎖性に及ぼすフィラー含有量の影響 —不正咬合を想定した荷重およびサーマルストレス下での評価—. *日歯保存誌* 2000 ; 43 : 308-317.
- 61) Lee WC, Eakle WS. Possible role of tensile stress in the etiology of cervical erosive lesions of teeth. *J Prosthet Dent* 1984; 52: 374-380.
- 62) Ghulman MA. Effect of cavity configuration (C factor) on the marginal adaptation of low-shrinkage composite: a comparative *ex vivo* study. *Int J Dent* 2011; 2011: 159749.
- 63) Brackett WW, Tay FR, Looney SW, Ito S, Haisch LD, Pashley DH. Microtensile dentin and enamel bond strengths of recent self-etching resins. *Oper Dent* 2008; 33: 89-95.
- 64) Walter R, Swift EJ, Boushell LW, Braswell K. Enamel and dentine bond strength of a new self-etch adhesive system. *J Esthet Restor Dent* 2011; 23: 390-396.
- 65) Mortazavi V, Fathi M, Ataei E, Khodaeian N, Askari N. Shear bond strengths and morphological evaluation of filled and unfilled adhesive interfaces to enamel and dentine. *Int J Dent* 2012; 2012: 858459.
- 66) Kimmes NS, Barkmeier WW, Erickson RL, Latta MA. Adhesive bond strengths to enamel and dentin using recommended and extended treatment times. *Oper Dent* 2010; 35: 112-119.
- 67) Maseki T, Miyamoto M, Kizuki I, Kimishima T, Nara Y, Tanaka H, Dogon IL. Microleakage of one-step and two-step adhesive systems under thermocycling and simultaneous repeated load. *J Dent Res* 2001 80-SI; 106: 562.
- 68) Hasegawa T, Itoh K, Koike T, Yukitani W, Hisamitsu H, Wakumoto S, Fujishima. A Effect of mechanical properties of resin composites on the efficacy of the dentin bonding system. *Oper Dent* 1999; 24: 323-330.
- 69) Willems G, Lambrechts P, Braem M, Vanherle G. Composite resins in the 21st century. *Quintessence Int* 1993; 24: 641-658.
- 70) Yamase M, Maseki T, Nitta T, Kimishima T, Nara Y. Mechanical properties of various latest resin composite restoratives. *J Dent Res Special Issue* 2010, #464, <http://iadr.confex.com/iadr/2010dc/webprogram/Paper128786.html>.
- 71) 吉川孝子, Wattanawongpitak Nipaporn, 田上順次. V 級窩洞における象牙質接着強さと窩壁適合性の関係について. *日歯保存誌* 2009 ; 25 : 441-445.
- 72) Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability. *J Appl Mech* 1951; 18: 293-297.
- 73) 広瀬英雄. ワイブル分布の周辺. *応用数理* 1991 ; 1 : 34-47.
- 74) McCabe JF, Watts DC, Wilson HJ, Worthington HV. An investigation of test-house variability in the mechanical testing of dental materials and the statistical treatment of results. *J Dent* 1990; 18: 90-97.
- 75) 木津喜出, 奈良陽一郎, 田中久義. 口腔内環境を想定した複合ストレスがオールインワンアドヒーズシステム微小漏洩と接着強さに及ぼす影響. *日歯保存誌* 2004 ; 47 : 184-205.
- 76) 礪波賢一, 田村友寛, 高橋英和, 荒木孝二. 漂白歯象牙質引張強さのワイブル分析. *日歯保存誌* 2012 ; 55 : 320-327.
- 77) Inokoshi M, Kameyama A, De Munck J, Minakuchi S, Van Meerbeek B. Durable bonding to mechanically and/or chemically pre-treated dental zirconia. *J Dent* 2013; 41: 170-179.
- 78) Robin C, Scherrer SS, Wiskott HW, de Rijk WG, Belser UC. Weibull parameters of composite resin bond strengths to porcelain and noble alloy using the Rocatec system. *Dent Mater.* 2002; 18: 389-95.
- 79) Burrow MF, Thomas D, Swain MV, Tyas MJ. Analysis of tensile bond strengths using Weibull statistics. *Biomater* 2004; 25: 5031-5035.
- 80) 眞壁 肇, 宮村鐵夫, 鈴木和幸. 信頼性モデルの統計解析. 共立出版: 東京 ; 1998. 1-14.

- 81) McCabe JF, Carrick TE. A statistical approach to the mechanical testing of dental materials. *Dent Mater* 1986; 2: 139-142.
- 82) Tjandrawinata R, Irie M, Suzuki K. Twenty-four hour flexural and shear bond strengths of flowable light-cured composites: a comparison analysis using Weibull statistics. *Dent Mater J* 2007; 26: 589-597.
- 83) Foster JA, Berzins DW, Bradley TG. Bond strength of an amorphous calcium phosphate-containing orthodontic adhesive. *Angle Orthod* 2008; 78: 339-344.
- 84) Jones CT, Chan DC, Pashley D, de Goes MF, Nelson SK.. Microtensile bond strength testing and failure analysis of hybrid and flowable composites. *J Adhes Dent* 2006; 8: 13-20.

図表
表 1

Table 1 Recent typical flowable resin composite materials examined

Resin Composite	Code	Lot No.	Manufacturer
UniFil Flow	UFF	0608241	G C
Venus flow	VNF	010105	Heraeus Kulzer
Beautiful Flow F10	BFF	090611	Shofu
Estelite Flow Quick	EFQ	J214	Tokuyama Dental
Filtek Supreme Ultra Flowable Restorative	F	N184933	3M ESPE

表 2

Table 2 Recent typical universal resin composite materials examined

Resin Composite	Code	Lot No.	Manufacturer
Gradia direct	GDD	0607281	G C
Venus	VNS	010121	Heraeus Kulzer
Beautiful II	BF II	100612	Shofu
Estelite Σ	ELΣ	J236	Tokuyama Dental
Filtek Supreme Ultra Universal Restorative	U	N265508	3M ESPE

表 3

Table 3 Materials

Adhesive system material	Lot No.	Manufacturer
Scotchbond Etchant	Etching agent N330734	3M ESPE
Adper Single Bond Plus	Bonding agent N369062	

表 4

Table 4 Principal ingredients of adhesive system material

Scotchbond Etchant	37 % Phosphoric acid
Adper Single Bond Plus	Bis-GMA, HEMA, nanofiller, dimethacrylates, ethanol, water, a novel photoinitiator system, a methylacrylate functional copolymer

表 5

Table 5 Experimental conditions

Function	Experimental conditions	
Repeated load	Load	118N (12kgf)
	Frequency	90 strokes / min
	The number of strokes	10,000 times
Thermal stress	Warm water	55±1°C
	Cool water	5±1°C
	Soaking time	20 sec
	Cycling	Yes
	Transfer time	10 sec
	The number of cycles	200 cycles

表 6

Table 6 Fillers loaded into F and U restoratives

F	75nm silica nano filler 20nm silica nano filler Zirconia • silica cruster filler
U	20nm silica nano filler 4-11nm zirconia nano filler Zirconia • silica cruster filler

表 7

Table 7 Microleakage score obtained from the dye penetration test

Code	Graded criterion												
	Occlusal wall							Gingival wall					
	0	1a	1b	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5
F	15	0	0	0	0	0	0	8	7	0	0	0	0
U	5	5	5	0	0	0	0	3	8	4	0	0	0

表 8

Table 8 Fracture mode of debonded μ -TBS specimens

	Fracture mode	F	U
Interfacial	I	2	10
	I + CR	19	7
Mixed	I + D	0	0
	I + CR + D	0	5
Cohesive	CR	9	6
	D	0	2

I : Fracture occurred at interface
 CR : Fracture occurred in resin composite
 D : Fracture occurred in dentin

表 9

Table 9 Measured values of filler contents, coefficient of polymerization shrinkage, coefficient of thermal expansion and flexural modulus

Code	filler contents [wt %(s.d.)]	Coefficient of polymerization shrinkage [%(s.d.)]	Coefficient of thermal expansion [$\times 10^6 / ^\circ\text{C}$, 30~80 $^\circ\text{C}$ (s.d.)]	Flexural modulus [GPa(s.d.)]
F	58.2 (0.1)	2.25 (0.56)	67.0 (5.7)	6.74 (0.63)
U	72.0 (0.1)	1.29 (0.29)	45.5 (1.5)	11.66 (0.89)
Enamel			11.4 ³⁵⁾	47 ~ 84 ³⁵⁾
Dentin			8.0~8.3 ³⁵⁾	12 ~ 19 ³⁵⁾

** : p < 0.01

☒ 1

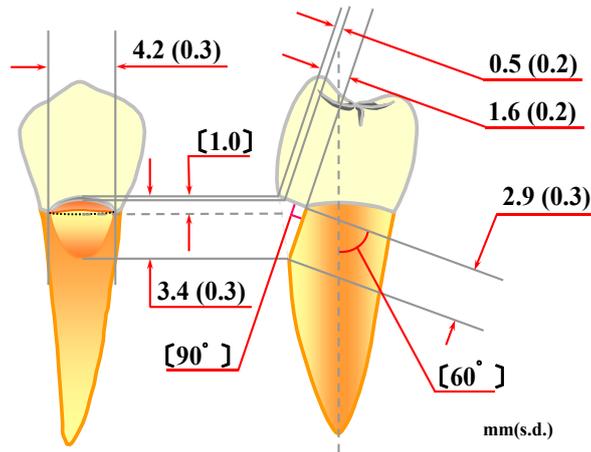


Fig. 1 Standardized V-shaped cavity specimen

☒ 2

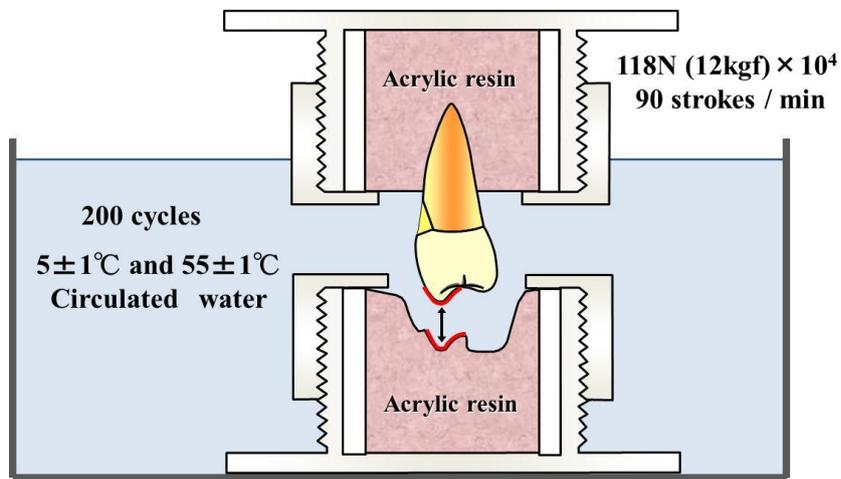


Fig. 2 Applied combination stress operated by MFA

☒ 3

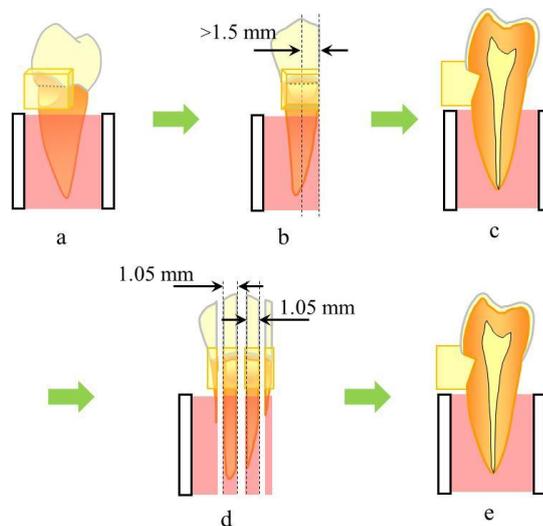


Fig. 3 Sectioning procedures of slabs for evaluating marginal sealing and micro-tensile bond strength

☒ 7

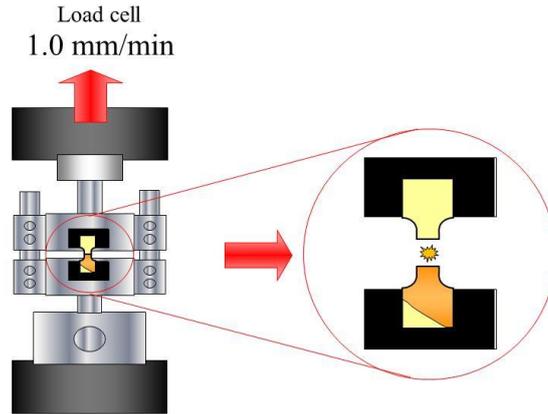


Fig. 7 Measurement method of micro-tensile bond strength

☒ 8

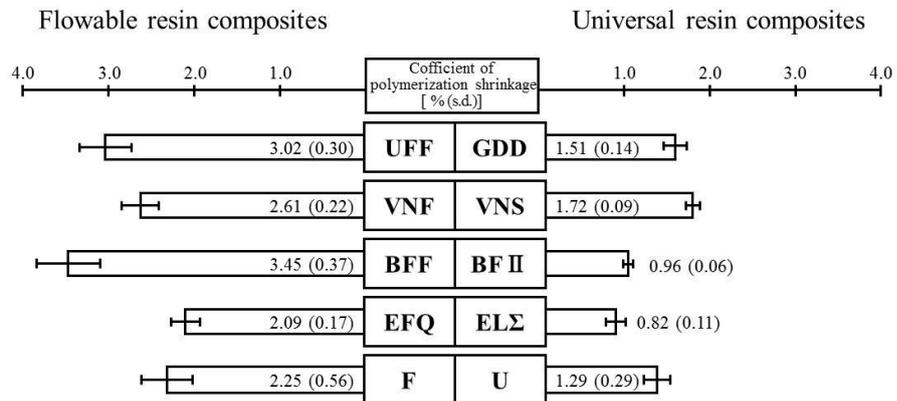


Fig. 8 Coefficient of polymerization shrinkage of recent typical flowable and universal resin composites

☒ 9

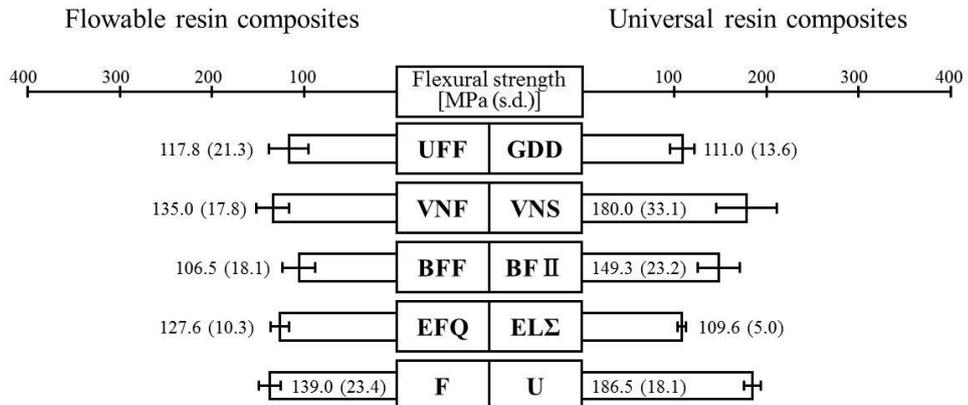


Fig. 9 Flexural strength of recent typical flowable and universal resin composites

☒ 10

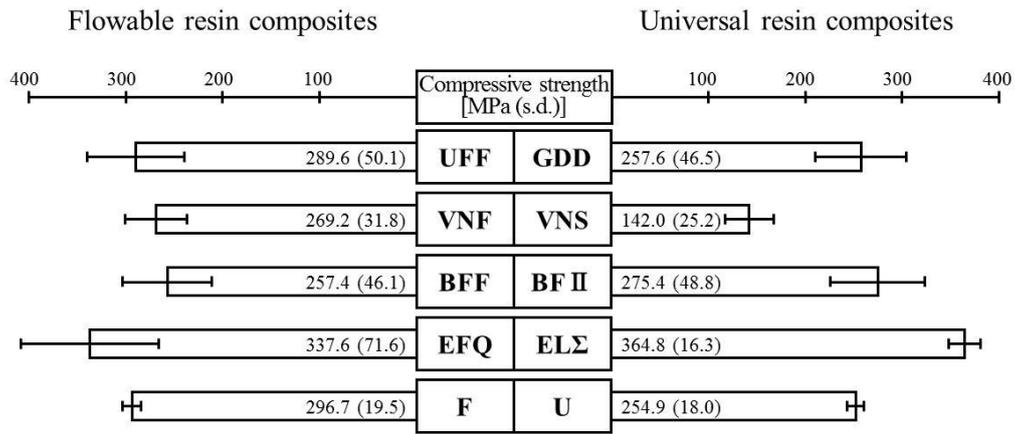


Fig. 10 Compressive strength of recent typical flowable and universal resin composites

☒ 11

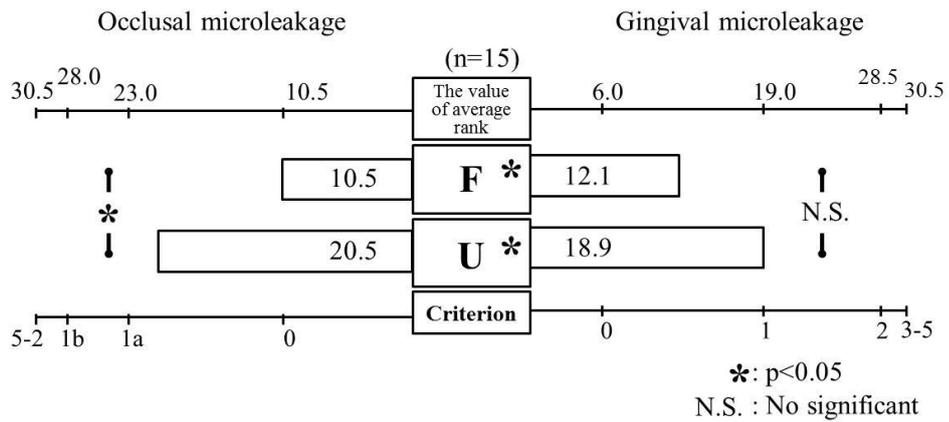


Fig. 11 Difference in the microleakage between F and U restorations

☒ 12

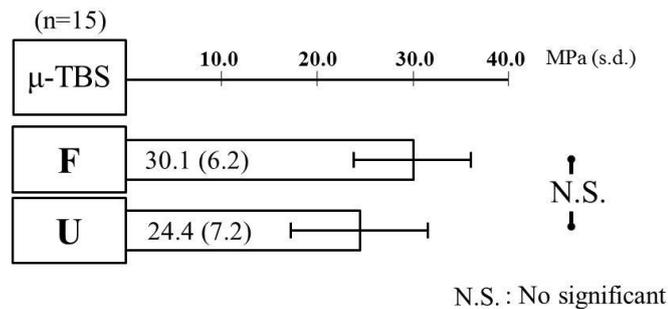


Fig. 12 Mean μ-TBS of F and U to intra-cavity dentin wall

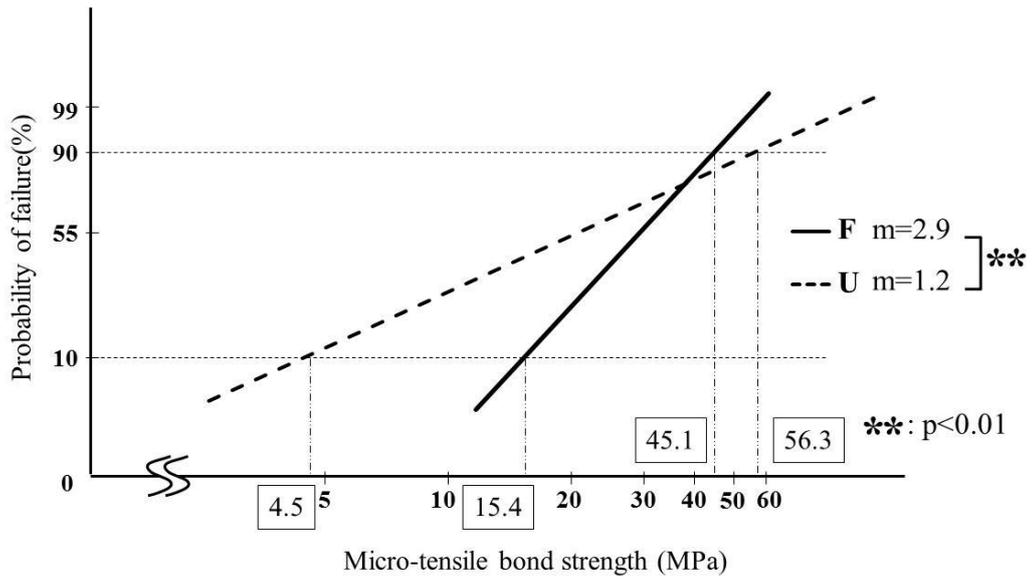


Fig. 13 Difference in the bonding reliability between F and U restorations

付表・付図説明

- 表 1 Recent typical flowable resin composite materials examined
- 表 2 Recent typical universal resin composite materials examined
- 表 3 Materials
- 表 4 Principal ingredients of adhesive system material
- 表 5 Experimental conditions
- 表 6 Fillers loaded into F and U restoratives
- 表 7 Microleakage score obtained from the dye penetration test
- 表 8 Fracture mode of debonded μ -TBS specimens
- 表 9 Measured values of filler contents, coefficient of polymerization shrinkage,
coefficient of thermal expansion and flexural modulus
-
- 図 1 Standardized V-shaped cavity specimen
- 図 2 Applied combination stress operated by MFA
- 図 3 Sectioning procedures of slabs for evaluating marginal sealing and micro-tensile bond strength
- 図 4 Criteria for scoring dye penetrations
- 図 5 Trimming procedures of standardized test piece for micro-tensile bond test
- 図 6 Custom-made test piece duplicator
- 図 7 Measurement method of micro-tensile bond strength
- 図 8 Coefficient of polymerization shrinkage of recent typical flowable and universal resin composites
- 図 9 Flexural strength of recent typical flowable and universal resin composites
- 図 10 Compressive strength of recent typical flowable and universal resin composites
- 図 11 Difference in the microleakage between F and U restorations
- 図 12 Mean μ -TBS of F and U to intra-cavity dentin wall
- 図 13 Difference in the bonding reliability between F and U restorations