

新世代「接着理論」の展開

——接着強さと破壊様式の定義——

若 狭 邦 男

Development of Adhesion Theory in New Generation

—— Definition of Fracture Strength and Failure Mode during
Conventional and Newly-Defined Micro Tests ——

Kunio Wakasa

(平成17年3月15日受付)

緒 言

歯科領域では象牙質接着システムにおいて、ワンストップボンディング材といわれる歯科用接着材がすべてひとつのボトルに封入された連和操作がない新世代接着が登場しているので¹⁻³⁾、新たな接着評価の方法が必要になってきた。象牙質接着強さを評価する方法には、著者が従来の試験方法と呼んでいる shear (せん断) 及び tensile (引張) 試験⁴⁻⁶⁾ 及び著者が新しく定義した試験方法としての micro-tensile bond 試験 (以下、新定義マイクロ試験と略称する) がある⁴⁻¹³⁾。前者の方法では接着部位を含む試験片自体の強さを評価するので、「見かけ」の強さとして接着強さが測定され⁵⁻⁸⁾、後者では接着面積 (bonded area) を限定した試験方法であり、「真」の値が得られた。接着界面はレジジン/象牙質界面として interface I, II, III の三つの interface を考えており⁵⁻¹³⁾、界面 II の界面強さを象牙質接着界面の接着強さとする。界面モデルは resin composite/adhesive resin layer 界面 (以下、界面 III とする)、adhesive resin layer/hybrid layer 界面 (界面 II)、hybrid layer/dentine 界面 (界面 I) の三つから構成されている。Wakasa の報告では^{7,8)}、象牙質試験片の接着部の形状に注目して、I-section model と non

I-section model の二つに分類される。定義していない micro-tensile bond 試験 (接着面積 = $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$) での平均接着強さは、60 MPa¹⁴⁾ (歯冠部) や 20 MPa (歯頸部接着)¹⁵⁾ であり、他方、non I-section model による方法 (beam 法)¹⁶⁾ によれば、20 MPa (平均値) であった。なお、従来の試験方法では 10 MPa 以下の値が得られていた^{4,17,18)}。

本研究では、若狭ら¹⁾、海野ら²⁾ 及び吉田ら³⁾ の報告を参照して、新世代接着システムによる接着を検討し、新世代「接着理論」を展開するため、象牙質接着強さを評価する計算モデルを創案して、新世代接着システムにおける破壊強さ及び破壊様式を表現する。既報⁵⁻⁸⁾ と同様に Tanaka-Mori の方法を応用して¹⁹⁾、1) 従来の方法での破壊強さと破壊様式を明らかにする、及び 2) 新定義マイクロ試験方式でも同様に破壊強さと破壊様式を定義する。従って、従来の試験方法及び新定義マイクロ試験における破壊強さ及び破壊様式を理論的に求める計算モデルを提唱して、新世代「接着理論」の展開のための資料とすることができる。

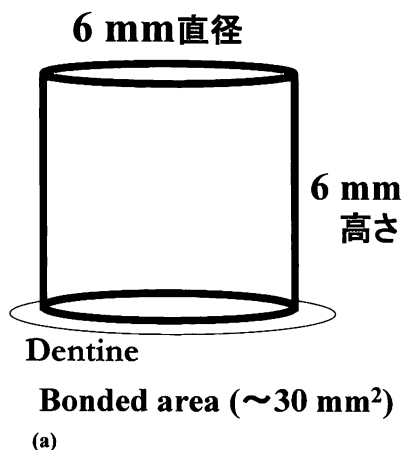
材料および方法

1. 試験材料

用いた試験材料は、既報⁵⁻¹³⁾ と同様に Sano et al の報告に従い、対照とする象牙質は bovine dentine である¹⁴⁾。従来の試験方法 (tensile test, 以下、引張試験とする) と新定義マイクロ試験を用いて、破壊強さとしての接着強さ及び破壊様式を検討する。

広島大学大学院歯薬学総合研究科創生医科学専攻探索医科学講座 (生体材料学) (主任: 岡崎正之教授) 本論文の要旨の一部は平成16年度春期第44回日本歯科理工学会学術講演会 (平成16年9月) において発表した。本稿は著者による『接着理論』(全15章構成) に所収される章のひとつであることを注記する。

■ First generation



■ Second generation

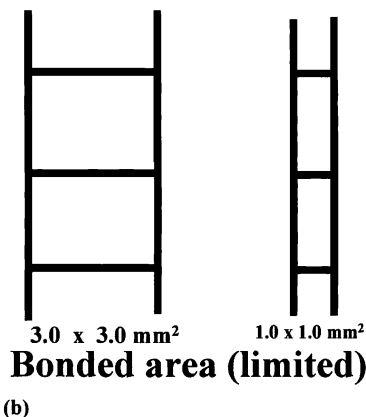


図1 今までに提案された試験片の模式図である。(a) 従来の引張試験（接着面積は約 30 mm^2 である）、(b) micro-tensile bond 試験（一般には、接着面積 (bonded area) = $0.25 \sim 12.25 \text{ mm}^2$ である）。本研究では、それぞれ、(a) first generation, (b) second generation の試験方法と称する。

2. 引張接着試験の方法

試験方法は Wakasa et al^{12,13}, Sano et al¹⁴, 中林²⁰ や Pashley et al²¹ を参考にして、従来のように、コンポジットレジン (resin composite), 接着レジン (adhesive resin), 樹脂含浸層 (hybrid layer) を定義していない模式図を図1 (a), (b) に示す⁵⁻⁸。(a) first generation (従来の引張試験) では象牙質全体をエッチングし、脱灰して、その後、一連の接着処理をおこない、露出した象牙質接着面上に円柱状試験片を得ることになる。そのため、その接着部の位置・大きさは規定されていなくて、図に示した場合の接着面積は約 30 mm^2 である。他方、(b) second generation (micro-tensile bond 試験) では異なる接着面積 (bonded area = $0.25 \sim 12.25 \text{ mm}^2$) を持つU字型マクロ試験片を得て、その接着部分を示したものである。試験片全体の大きさは w (つかみ部の幅は $2 \sim 5 \text{ mm}$ まで変わる) $\times 10 \text{ mm}$ (試験片厚さは bonded area の幅に対応して、 $0.25 \sim 3.5 \text{ mm}$ になる) である (図2 (b)を参照のこと)。bonded area として、図1 (b)の左が $3.0 \times 3.0 \text{ mm}^2$, その右が $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$ を示し^{14,15}, これらの first 及び second generation という表示法は著者が称するものである。

3. 接着試験片モデル

(1) 引張試験片の解析モデル

図2 (a) 及び (b) は引張試験モデルの座標を smear layer が完全に除去されている場合について示したもので

である (smear layer が存在する shear 試験片モデルはすでに報告されているので⁵, 参照すること)。著者による表示法では、(a) (従来の引張試験) では、座標軸は1軸 (x方向) — 3軸 (z方向) 系として象牙質の上に bonding area (本研究では接着領域として定義する) という領域を考えるので、hybrid layer を含む bonding area を構成する「composite」を想定することになる。この時、bonding area における hybrid layer の厚さが極めて小さく、それを含む bonding area が $0.1 \sim 100$ ミクロンまでに変化したときの応力及びその影響が計算される。本研究では、micro-tensile bond 試験の界面及び layer を定義した、新定義マイクロ試験を用いる (図2 (b))。hybrid layer を含む bonding area を構成する「composite」を想定することになり、resin composite/adhesive resin layer 界面 (界面Ⅲ), adhesive resin layer/hybrid layer 界面 (界面Ⅱ), hybrid layer/dentine 界面 (界面Ⅰ) の三つの interface (界面) から構成されると定義した。この時、bonding area における hybrid layer の厚さが極めて小さい時には、図3の右側に示す計算モデルになる。

図3の左及び右側に示すように、著者が新定義マイクロ試験を standard type 及び very thin hybrid layer type とした二つの試験片モデルを検討する。後者では、前者に比べて hybrid layer の厚さが極めて薄いので、それを含む bonding area が $0.1 \sim 100$ ミクロンまでに変化する場合に適応することにした。従って、外からの力が接着試験片にかかる場合には応力と象牙質の性質、

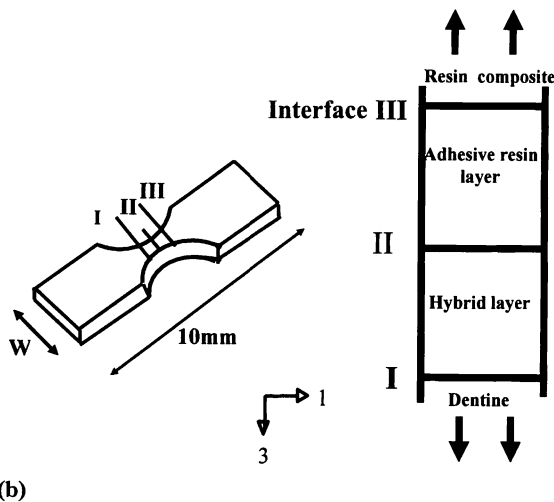
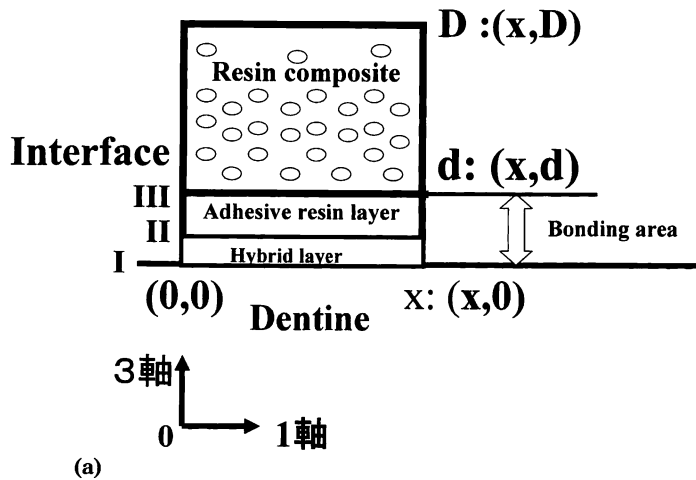


図2 著者が提案した引張試験モデルとその座標を smear layer が完全に除去されている場合について示す。(a) 従来の引張試験, (b) 界面及び layer を定義した方法である新定義マイクロ試験

Third generation (新定義マイクロ試験)

- Standard type
- Very thin hybrid layer type

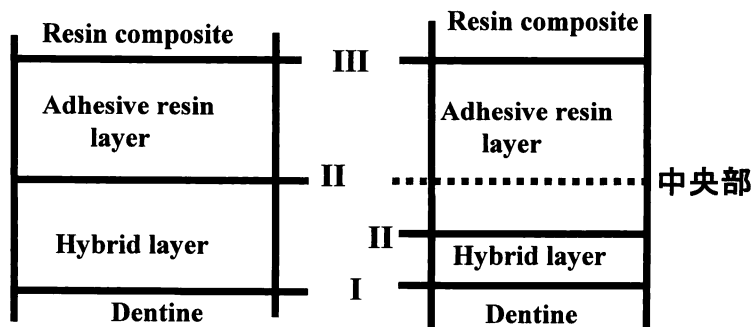


図3 新定義マイクロ試験には standard type 及び very thin hybrid layer type とした二つの試験片モデルがあり, 本研究ではこれらを third generation の試験方法と称している。

接着試験片にかかる応力（計算する応力は平均応力である）を Eshelby's inclusion 問題（一般には、matrix のなかに弾性率が異なる inclusion が存在している場合、すなわち「composite」を仮定している）を応用することができる²²⁾。

(2) 破壊強さを求める計算モデル

前節で示したように、図 2 (a) 及び (b) に示した引張試験片の大きさをあらわす座標軸を用いて、応力とひずみの関係を求める計算モデルを求める式は応力・ひずみ曲線の間接関係を表わすことになる^{5,6)}。その計算式はすでに報告した式を用いて従来の試験方法における破壊強さを求めることとし、その概略を次節で述べることにする。

結果および考察

1. 破壊様式

(1) 従来の引張試験の場合

図 4 (a), (b) では従来の引張試験によって試験片が破壊に至るまでの過程を示したものである。(a) では、microcracks が界面ではなくて、layer で生じ、降伏後の応力とひずみの増加をともなって、最大せん断応力面における最大せん断応力のもとで凝集破壊が生じ、その結果、引張方向と 45 度の最大せん断応力面に沿って鋸歯状に（ギザギザ状に）破壊が生じることになる。引張試験片の界面（I, II, III）を含む試験片を見ると、応力は界面ではなくて、試験片を構成している resin composite（コンジットレジンからなる layer に相当する）に外からの力がかかることになる。さらに具体的に考えるならば、(b) に示すように、その時の破壊過程（模式図）は resin composite 内部で引張方向と 45 度の最大せん断応力面に沿って鋸歯状に（ギザギザ

状に）破壊が生じることを示している。例えば、界面 II に達したならば、界面に沿って破壊する（界面破壊）ので、二つの破壊様式が生じることを意味している。以上のことから、フィラーの周辺における破壊時の応力はレジンマトリックスの破壊強さ（ σ_0 ）よりも大きな応力で壊れること示唆しており、破壊の進行とともに破壊は凝集破壊と界面破壊の「混在」になることがわかる。

図 5 では、界面に microcracks が存在すると、従来の引張試験では yielding（降伏現象；その時の値が降伏応力に相当する）に達して破壊に至るので、降伏引張応力に達したあと、応力一定のまま破壊すると考えられる。その時の「仮想モデル」を図に示したように考えると、破壊が界面 I で生じることがわかる。従って、次節にはこの時の破壊強さを計算するモデルを提案することができる。

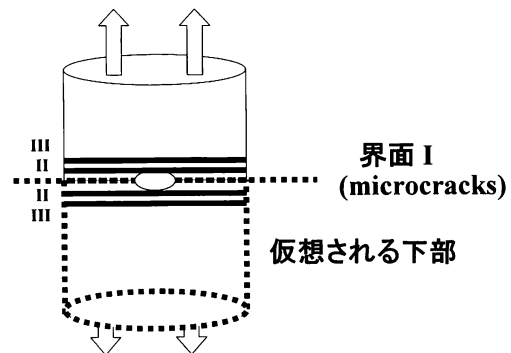


図 5 界面に microcracks が存在する、従来の引張試験では yielding（降伏現象；その時の値が降伏応力に相当する）に達して破壊に至る「仮想モデル」を示したものである。

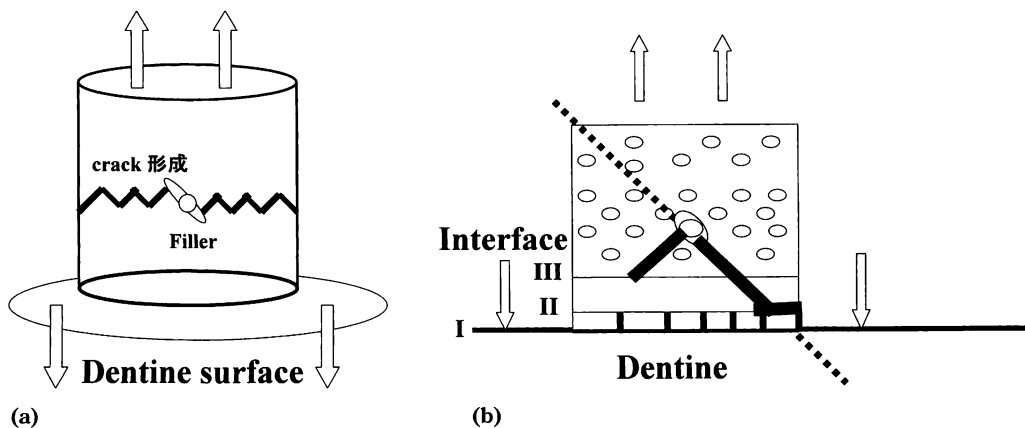


図 4 従来の引張試験の破壊過程。(a) microcracks が界面ではなくて、layer で生じる凝集破壊、(b) 凝集破壊に続いて、界面破壊をともなうような、二つの破壊様式が「混在」する場合

(2) 新定義マイクロ試験の場合

図6では新定義マイクロ試験(象牙質接着試験片は very thin hybrid layer type であるので, 図3の右側を参照のこと)における破壊様式の模式図を示す。他方, standard type の試験片(図3の左側)の場合, 界面の強さが測定されるので, その時の破壊様式は界面IIに沿って界面破壊を生じることになる。図6に示すように, adhesive resin layer で破壊が生じるような凝集破壊の場合, その破壊は降伏後の応力とひずみの増加とともに, 最大せん断応力面における最大せん断応力のもとで破壊する。すなわち, 引張方向と45度の最大せん断応力面に沿って破壊が生じ, 界面II及びIIIに対して破壊が達するので, その時の破壊は界面破壊であると考えられる。つまり, この試験片の場合, 凝集破壊及び界面破壊の「混在」を生じること意味する。この場合, 破壊の起点が adhesive resin layer 内部の「欠陥」に起因して破壊がはじまることになることから, 測定された値は「見かけ」の強さであり, 「真」の接着強さに相当しないことを意味する。

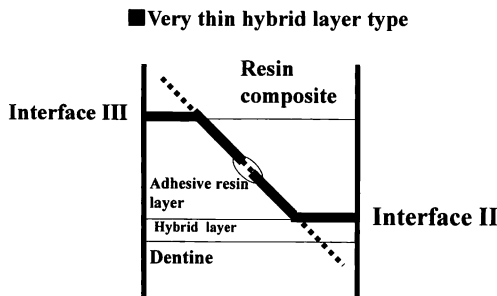


図6 新定義マイクロ試験(象牙質接着試験片は very thin hybrid layer type である)における破壊様式の模式図を示す。

そこで, 既報に従い^{5, 6, 22)}, 従来の shear 試験や引張試験における破壊強さの値と比較すると, 2~20 MPa (「見かけ」の値)であるので, 象牙質あるいは「真」の接着強さよりも極めて小さいことがわかる。従来の引張試験をおこなった場合, 接着過程で導入される欠陥や内部の欠陥のため, 得られた破壊強さの値は「見かけ」の強さ⁵⁻¹³⁾であるので, hybrid layer の厚さが極めて薄い場合にも, 得られる値は小さくなり, 従って, 「真」の値で葉なくて, 「見かけ」の値になることがわかった。

従って, very thin hybrid layer type の新定義マイクロ接着試験片における破壊強さ, すなわち接着強さを計算するモデルを創案することが必要となった。

2. 従来の引張試験での応力計算(計算モデル):

first generation

bonding area の厚さは引張試験での計算モデル(直径 6 mm 及び高さ 6 mm (D とする)の円柱状試験片である)に示したように(図4(a)及び(b)参照), 界面Iから界面IIIまでの厚さであるので, hybrid layer の厚さ(界面Iと界面IIの間の距離)の変化によって影響されると仮定する。本研究では, bonding area の厚さ(d とする)が 0.1~100 ミクロンまで変化するものと考ええることにする。

(1) microcracks が resin composite 内部にある場合
本研究では図2(a)及び図4(a)に示した引張試験片モデルを用いて, bonding area に相当する部分を「composite」としての変形挙動として求めるので, Wakasa が導入した式を応用して^{7, 8)}, 次のように破壊時の強さ(破壊強さ)として与えられる。

$$\sigma_F = \{(1-f)/(1-Df)\} \sigma_0 + \{f(1-f)/(1-Df)\} C \cdot E \cdot \varepsilon_p \quad (1)$$

が導びかれた。ここで, それぞれの定数は

$$C = 3(E'/E)(7-5\nu)/2\{(E'/E)A+B\} \quad (2)$$

$$D = 15(E'/E)(1-\nu^2)/\{(E'/E)A+B\} \quad (3)$$

であり, $A = (1+\nu)(8-10\nu)$ 及び $B = (1+\nu)(7-5\nu)$ として与えられた。 σ_0 は resin matrix の降伏引張応力であり, ε_p はその時の塑性変形を表わし, E' 及び E (弾性率) はそれぞれ resin composite のフィラー及び resin matrix の値を示している。 ν' 及び ν (ポアソン比) はそれぞれ resin composite のフィラー及び resin matrix の値を示している。

図7(従来の引張試験: layer 内部に microcracks が存在する場合はそれぞれ, 式(1)を用いて計算した値を示したものであり, 以下のように要約される。

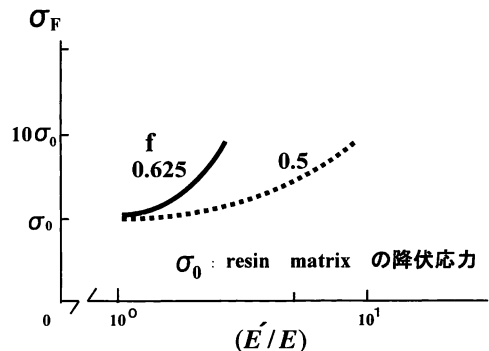


図7 従来の引張試験(layer 内部に microcracks が存在する場合はそれぞれ, 式(1)を用いて計算した値を示したものである。

① (E'/E) の値が増加した時、破壊強さは resin composite のフィラー含有量によって漸次的に変化し、 $f=0.625$ 及び 0.5 の両者での値は異なる

① (E'/E) が一定では、 $f=0.625$ での破壊強さは $f=0.5$ でのそれよりも大きい

従って、従来の試験方法における引張試験 (図 7) では計算される破壊強さがレジンマトリックスの降伏応力よりも大きい値で破壊されることがわかった。

(2) microcracks が界面 I にある場合 (従来の引張試験)

本研究では図 2 (a) 及び 4 (b) に示した引張試験片モデルを用いて、bonding area に相当する部分を「composite」としての変形挙動として求めるので、Wakasa が導入した式を応用して^{7,8)}、microcracks が penny-shaped である場合、次のように σ_c (臨界値としての値) が破壊時の強さ (破壊強さ) として与えられた。

$$\sigma_c = \pi^{1/2} \Gamma^{1/2} E^{1/2} (1-\nu^2)^{-1/2} (2a)^{-1/2} \quad (4)$$

が導かれた。ここで、それぞれの値として、 Γ はクラック (大きさは $2a$ である) の表面張力であり、 E (弾性率) 及び ν (ポアソン比) は試験片全体の値を示し、resin matrix の値を示している。

図 8 (従来の引張試験) は界面に microcracks が存在するときの破壊応力を式 (4) を用いて計算した値を示したものであり、以下のように要約される。

- ① それぞれの弾性率で見ると、破壊強さは crack length の長さ ($2a$) が大きくなる場合、小さくなる
- ② 弾性率が大きくなると、その破壊強さの値は増加する

以上のことから、従来の試験方法において microcracks が界面 I にある引張試験片では (図 8)、計算される破壊強さが crack length の長さ ($2a$) や弾性率によって影響されることがわかった。従って、従来の引張試験によって外からの力が microcracks が存在する

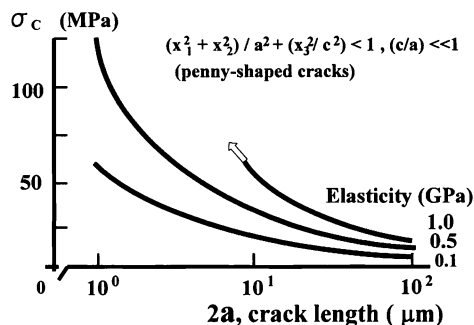


図 8 従来の引張試験。界面に microcracks が存在するときの破壊応力を式 (4) を用いて計算した値を示したものである。

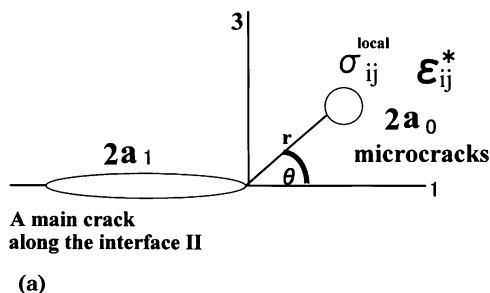
場所 (resin composite 内部及び界面 I) が異なる接着試験片の破壊強さとして評価することができ、しかも得られる値は「真」の接着強さ (界面強さ) ではなくて、「見かけ」の値であった。

3. 新定義マイクロ試験での応力計算 (計算モデル): third generation

(1) 界面強さの定義 (standard type 試験片)

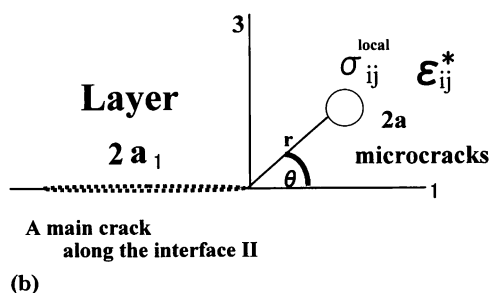
図 9 (a) 及び (b) はそれぞれ standard type 及び very thin hybrid layer type の新定義マイクロ試験における接着強さをあらわす界面モデルを示したものである。(a) の場合、著者らの研究によれば⁴⁻¹³⁾、新定義マイクロ試験では「真」の象牙質接着強さが得られ、それは最初に layer 内部で microcracks が生じる (stage I とする)、次いで界面 II (adhesive resin layer/hybrid layer 界面) でのクラックが形成する (stage II)、さらに両者間で相互作用が生じる (interaction energy) ので (stage III)、その結果、界面破壊が生じた時の値が「真」の象牙質接着強さとなることがわかる。(b) の場合 (海野ら²⁾ 及び吉田ら³⁾ の報告)、界面 II に外からの力がかからないので、stage I のみの現象であるの

■ Standard type



(a)

■ Very thin hybrid layer type



(b)

図 9 新定義マイクロ試験における接着強さをあらわす界面モデルである。
(a) standard type, (b) very thin hybrid layer type

で、破壊は layer における凝集破壊であることがわかる。

それらを基にして、破壊に至るまでの過程を表1にあらわすことにした。すなわち、界面IIでの界面強さは界面IIでの main crack の発生ではじめて、界面破壊が生じることになり(図9(a)), 他方, layer 内部で microcracks の発生にともなって、凝集破壊が生じることになる(図9(b))。すでに報告したように⁴⁾, 従来の試験方法の場合、測定される「見かけ」の強さの値が bonding area の性質により影響され、従来の試験方法では、「真」の象牙質接着強さが得られないことが理論的に求められている。このことは図4及び5に示されているように、凝集破壊の強さに相当しており、他方, very thin hybrid layer type の新定義マイクロ試験の破壊を示す図9(b)では、界面II (adhesive resin layer/hybrid layer 界面)でのクラック形成に伴う界面破壊が生じていないので、その時の値が「見かけ」の値を意味する。

表1 新定義マイクロ試験における接着強さを決めるメカニズム

stage I : layer 内での microcracks 形成
stage II : main crack (interface II) 発生
stage III : 両者の間の interaction energy が生じる

(2) 凝集破壊強さの定義 (very thin hybrid layer type の場合)

図9(b)に示したように、very thin hybrid layer type 新定義マイクロ試験で得られた値は界面接着強さではなくて、凝集破壊強さであった。すなわち、凝集破壊強さの定義(新定義マイクロ試験における very thin hybrid layer 試験片の場合)は次のような式によって評

価される^{12,13)}。

$$\begin{aligned} & (\sigma_c / E_R^{1/2}) \\ & = \{\pi\Gamma / (1-\nu^2)\}^{1/2} (E_B / E_R)^{1/2} (1/2a)^{1/2} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、それぞれの値として、 Γ はクラック(大きさは $2a$ である)の表面張力であり、 E (弾性率)の添え字 B は bonding area, R は resin composite での値を示し、 ν (ポアソン比; 0.3) は resin matrix での値を示している。

very thin hybrid layer type の新定義マイクロ試験での応力・ひずみ曲線は図10(a)であり、crack length に対する normalize された値 $(\sigma_c / E_R^{1/2})$ は図10(b)に示される。それらの結果、次のように要約される。

- ① 応力・ひずみ曲線はふたつの場合がある。すなわち、yielding のあと、すぐに破壊するものと、応力一定のまま変形するものがある。その破壊強さは 20~30 MPa になった(図10(a))
- ② 弾性率の比 $(E_B/E_R) = 0.9$ における $(\sigma_c/E_R^{1/2})$ の値は、0.5 の場合よりも、normalize された値は大きく、crack length ($2a$) が大きくなると、低下した(図10(b))

従って、very thin hybrid layer type 新定義マイクロ試験を行なうと、その接着強さは「見かけ」の値であり、「真」の接着強さでないことがわかった。しかも、その時の破壊様式は界面IIでの界面破壊ではなくて、adhesive resin layer における凝集破壊であることも判明した。

以上に述べたように、本研究では新世代「接着理論」の展開について、その接着強さ及び破壊様式を考慮しているため、新定義マイクロ試験における hybrid layer の機能性と破壊強さ、接着強さと破壊様式について解析する予定である。

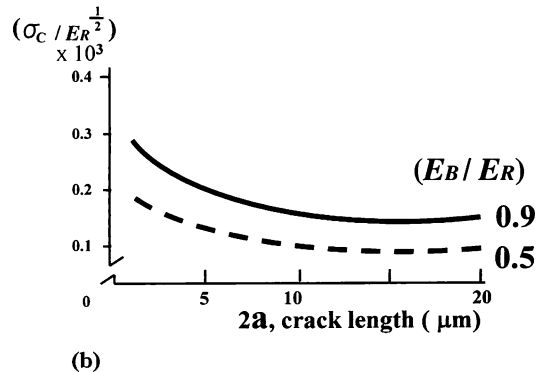
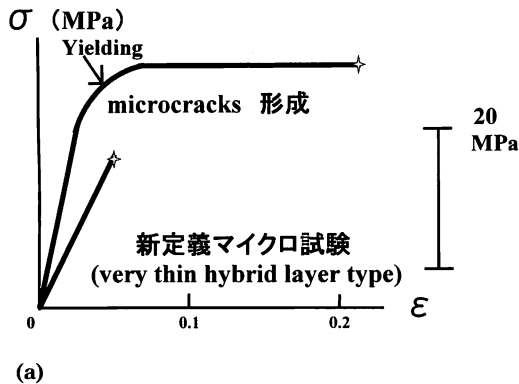


図10 very thin hybrid layer type の新定義マイクロ試験の結果である。

(a) 応力・ひずみ曲線, (b) crack length に対する normalize された値 $(\sigma_c / E_R^{1/2})$

結 論

本研究の結果は以下に簡潔に要約される。

(1) first generation : 従来の引張試験の場合。試験片内部に microcracks が存在する場合として, resin composite 内部にある場合と界面 I (mineralized dentine/hybrid layer 界面) にある場合が想定される。前者では resin composite 内のフィラーの周辺における破壊時の応力はレジンマトリックスの破壊 (σ_0) よりも大きな応力で壊れ, その破壊の進行とともに破壊は凝集破壊と界面破壊の「混在」になることがわかる。後者では界面 I に microcracks が存在すると, yielding に達して破壊に至るので, 降伏引張応力に達したあと, 応力一定のまま破壊する。「仮想モデル」を考えるならば, 破壊が界面 I で生じるモデルを意味する計算モデルを用いて計算できる。従って, 界面破壊は小さな応力で生じて, 界面 I 上の欠陥による破壊であることから, 求められる値は「真」の接着強さではなく, 「見かけ」の強さ(破壊強さ)であることを理論的に求めることができた。

(2) third generation : 新定義マイクロ試験の場合 (standard type 及び very thin hybrid layer type)。これは second generation の試験片の界面と layer を定義した試験方法である。前者では界面 II での界面強さが界面 II での main crack の発生ではじめて, 界面破壊が生じることになり (接着強さとしての界面強さである), 後者では layer 内部で microcracks の発生にともなって凝集破壊が生じ, 凝集破壊強さの下で界面破壊が生じて, その結果, 二つの破壊様式が「混在」することになる。

謝 辞

本研究では広島大学歯学部大学院 (当時) 最先端設備「バイオマテリアル複合解析システム」を使用したので, 感謝する。佐野英彦教授 (北海道大学大学院歯学研究科) には, その提唱された試験方法を参考にした共同研究であることを付記して, 感謝する。

文 献

- 1) 若狭邦男, 池田敦治, 野村雄二, 平田伊佐雄, 岡崎正之, 佐野英彦: 象牙質接着システム—破壊様式の定義 (接着理論モデル)—。歯科材料・器械 **23**, 409, 2004.
- 2) 海野亜由子, 池田正臣, 二階堂徹, 田上順次: 新規ワンステップボンディング材の象牙質接着性について。歯科材料・器械 **23**, 410, 2004.
- 3) 吉田英史, 宇野 滋, 野田坂佳伸, 山田敏元, 加我正行: all-in-one adhesive/dentin 接着に及ぼす

- スミア層の影響。歯科材料・器械 **23**, 411, 2004.
- 4) 若狭邦男: 接着理論の新しい展開—従来の試験方法による破壊強さに及ぼす bonding area (接着領域) の厚さの影響—。廣大歯誌 **36**, 192-197, 2004.
- 5) 池田敦治, 若狭邦男: 接着理論の新しい展開—従来の場合, shear 及び tensile 試験—。廣大歯誌 **35**, 177-183, 2003.
- 6) 若狭邦男: 接着理論の新しい展開—smear layer の解析—。廣大歯誌 **36**, 106-111, 2004.
- 7) Wakasa K: Calculation model of fracture stress during bond test. *J Dent Res* **75**, Abst. No. 1764, 1996.
- 8) Wakasa K: Analytical model of micro-tensile bond strength and factors in dental adhesive systems. Proceeding of ICCE/9 (San Diego, USA), pp 827-828, 2002.
- 9) 若狭邦男, 吉田靖弘, 池田敦治, 山崎保彦, 福田竜一, 吉岡雅之, 野村雄二, 岡崎正之, 佐野英彦: 象牙質接着システム—脱灰象牙質, 特に collagen fibre 密度の解析 (micro-tensile bond test)—。歯材器 **18** 特別号**34**, 229, 1999.
- 10) 若狭邦男: 歯質接着性—脱灰象牙質の界面モデル (micro-tensile bond test 解析)。接着歯学 **17**, 324-325, 1999.
- 11) 若狭邦男: 歯質接着性—象牙質の諸性質と応力解析 (micro-tensile bond test モデル)。接着歯学 **18**, 308-309, 2000.
- 12) Wakasa K, Shintani H, Matsui A, Yamaki M: Calculation model of fracture stress during bond test. *J Dent Res* **75**, Abst. No. 1764, 1996.
- 13) Wakasa K, Yoshida Y, Ciucchi B, Sano H, Pashley DH: Calculation of stress zone during crack propagation. *J Dent Res* **76**, Abst. No. 1946, 1997.
- 14) Sano H, Shono T, Sonoda H, Takatsu T, Ciucchi B, Carvalho RM, Pashley DH: Relation between surface area for adhesion and tensile bond strength-Evaluation of a micro-tensile bond test. *Dent Mater* **10**, 236-240, 1994.
- 15) Yoshiyama M, Sano H, Ebisu S, Tagami J, Ciucchi B, Carvalho RM, Johnson MH, Pashley DH: Regional strengths of bonding agents to cervical sclerotic root dentin. *J Dent Res* **75**, 1404-1413, 1996.
- 16) Shono Y, Yano J, Ogawa T, Bori K, Kawano N, Terashita M: Regional microtensile bond strengths of newly developed dentin bonding system mad to superficial versus root dentin. *Proceedings of ICCE 7*, 803-804, 2003.
- 17) 若狭邦男, 佐野英彦: 歯質接着性—象牙質の諸性質と応力解析 (micro-tensile bond test モデル) その 1. 健全象牙質の弾性変形。接着歯学 **19**, 94-101, 2001.
- 18) 池田敦治, 若狭邦男: 健全および脱灰象牙質の変

- 形挙動—micro-tensile test による解析—。広大歯誌 **34**, 141–146, 2002.
- 19) Tanaka K, Mori T: The hardening of crystals by non-deforming particles and fibres. *Acta Metallurgica* **18**, 931–941, 1970.
- 20) 中林宣男：接着界面の象牙質側に生成した樹脂含浸象牙質について。歯材器 **1**, 78–81, 1982.
- 21) Pashley DH, Sano H, Ciucchi B, Yoshiyama M, Carvalho RM: Adhesion testing of dentin bonding agents. *Dent Mater* **11**, 117–125, 1995.
- 22) Wakasa K: Development of nano evaluation in adhesion theory. Proceeding of ICCE-11 (Hilton-Head Island, South Carolina, USA), CD-R Proceeding Disc, 2004.