

原 著

## 新世代「接着理論」の展開

——接着界面の定義——

若 狭 邦 男

### Development of Adhesion Theory in New Generation

—— Definition of Adhesion Interface ——

Kunio Wakasa

(平成17年9月20日受付)

#### 緒 言

歯科領域における象牙質接着システムとして、エッチング (conditioning), 水洗, 乾燥, 接着レジン塗布, コンポジットレジン充填という一連の接着技法を行なう場合 (three-step, あるいは two-step system) とワンステップワンボトルドシステム (one-step one-bottled system) 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という二つの接着技法がある<sup>1-3)</sup>。既報のように<sup>1)</sup>, 後者については新たな接着評価の方法を提案した。この場合, 象牙質接着強さを評価する方法には shear (せん断) 及び tensile (引張) 試験<sup>4-13)</sup> (本研究では, これらの方法を従来の方法と称している) 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) の二つの試験による評価方法がある。その結果, 前者の評価方法では接着部位を含む試験片自体の強さは「見かけ」の強さとして接着強さが実測され, 他方, 後者の評価方法を用いると, 接着面積 (bonded area) を限定した試験方法によって

「真」の強さが算出される一つの方法であった。

そこで, 著者が一連の研究で示した報告<sup>4-13)</sup> のように, 接着界面はレジン/象牙質界面として interface I, II, III の三つの interface (界面) を考え, 界面 II の界面強さを象牙質接着界面の接着強さとする。すなわち, 界面モデルでは resin composite/adhesive resin layer 界面 (界面 III とする), adhesive resin layer/hybrid layer 界面 (界面 II), hybrid layer/dentine 界面 (界面 I) が三つの界面として検討される。このような場合, 象牙質試験片の接着部の形状に注目すると, I-section model と non I-section model の二つとされ<sup>14,15)</sup>, 実測される強さとして, 界面を定義していない 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 MPa<sup>16)</sup> (歯冠部) や 20 MPa (歯頸部接着)<sup>17)</sup> であり, 他方, non I-section model による方法 (beam 法)<sup>18)</sup> によれば, 20 MPa (平均値) となることがわかっている。また, 従来の試験方法では 10 MPa 以下の値が得られる<sup>4,5)</sup>。

本研究では, 既報<sup>1,13)</sup> において, 新世代「接着理論」を展開した象牙質接着強さを評価する計算モデルに応用する。次節で述べるように, このモデルでは二つの試験片, すなわち, standard type (three-step, あるいは two-step system で得られる) の試験片と very thin hybrid layer type (one-step one-bottled system で得られる) であるので, 接着領域における layer (層) 及び界面を定義することが重要であることを指摘した。従って, 用いた計算方法では, Tanaka-Mori の方法を応用し<sup>19,20)</sup>, 従来の試験方法及び新定義マイクロ試験

広島大学大学院医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 8, 9, 10 及び 16 年度第 27 回 (平成 8 年 4 月), 30 回 (平成 9 年 9 月), 31 回 (平成 10 年 4 月) 及び 44 回 (平成 16 年 9 月) の日本歯科理工学会学術講演会において発表した。本稿は著者による『接着理論』(全 15 章構成) に所収される章 (第 10 章) であることを付記する。

における layer 及び界面を定義することによって接着強さを定義し、その例として、界面を定義した従来の試験方法における elasticity (弾性率) を算出することにする。

### 材料および方法

#### 1. 試験材料

従来の報告<sup>4-13)</sup>と同様に, Sano et al の報告に従って, 対照の象牙質は bovine dentine である<sup>16)</sup>。検討する材料は, 次節で説明する, standard type の試験片が得られる製品 (Sunmedical Multipurpose, 3M)<sup>11)</sup> と very thin hybrid layer type の試験片が得られる製品 (例えば, 宇野らの報告に従うと, Clearfil Tri-S Bond (Kuraray) や i-Bond (Heraeus Kulzer) や G Bond (GC) である)<sup>3)</sup> である。

#### 2. 接着試験

前報<sup>12)</sup>で報告した試験方法として, 新定義マイクロ試験で行なった定義をもとに, 今までに報告されてきた試験方法をあらためて定義しなおすことにする。その時, 対照とする試験方法は, 著者によれば従来の方法 (conventional test, せん断, あるいは引張試験: この試験を first generation における試験方法と称する) と Sano et al<sup>16)</sup> が提唱した micro-tensile bond 試験 (この場合, 試験片内部の界面及び layer を定義されていない: second generation と称する) である。

(1) 今までに報告された試験方法について

図 1 では, 従来用いられてきた試験方法を示す。(a) では引張試験, (b) では試験片を引き抜くように引張する試験を示し, これは (a) と同様に, 引張試験に相当する。(a), (b) の場合, 外からの力が試験片の接着部分に垂直にかかることになる。他方, (c) の場合, 試験片の接着部分に平行に力が加っており, これはせん断試験に相当する。今までの報告を参照すると, 外からの力が接着部分に力がかかるとされているが, どの部分に実際に加重がかかるかは明確にされていない。すなわち, 試験片が破壊したときに得られた力を用いて, その値を断面積で割った値を「接着強さ」と考えているため, その値は正しく「接着強さ」として評価されないことを著者は明らかにし<sup>4-13)</sup>, 従来の方法で得られた値を「見かけ」の接着強さと表現した。

表 1 (象牙質接着試験の方法) 及び 2 (象牙質接着試験の方法 (問題点)) では, 従来の試験方法と新定義マイクロ試験を比較して検討する。従来の方法についてすでに述べたように, 二つの方法であるせん断試験及び引張試験があり, 接着強さはおおよそ 10 MPa 以下であり, また破壊様式として界面破壊 (破壊する界面は特定されていない, 界面にある欠陥 (porosity, あるいは defect であるので, 本研究ではそれらを総称して microcracks と表現することにする)<sup>4-13)</sup>) と凝集破壊 (界面以外のレジン内部の欠陥に起因した破壊である) 及びそれらの混在があることが知られている。いずれの場合も, それらの欠陥 (microcracks) は試料作

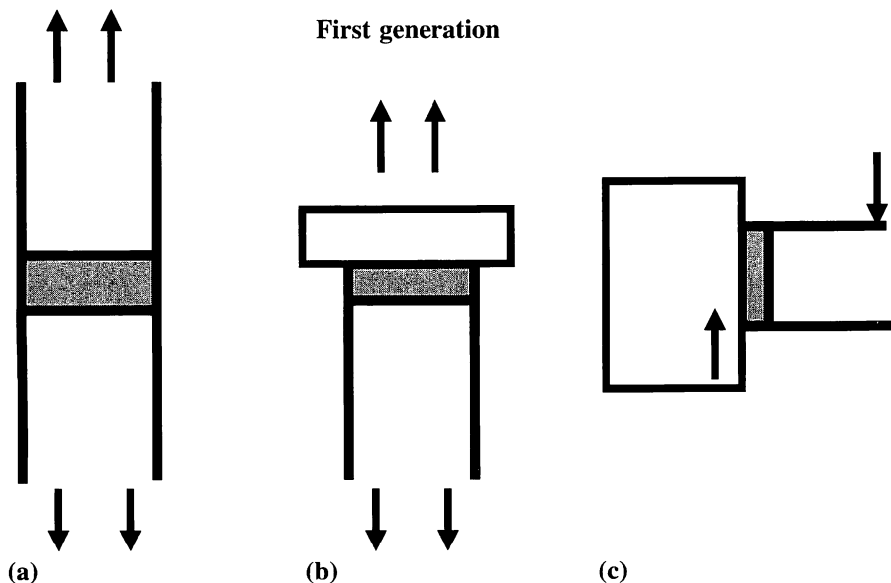


図 1 従来用いられてきた試験方法を示す。すなわち, (a) では引張試験, (b) では試験片を引き抜く (引張する) 試験を示し, (c) では試験片の接着部分に平行に力がかかる, せん断試験に相当する

表1 象牙質接着試験の方法

試験方法		破壊強さ (MPa)	文献
従来の方法*	せん断	10以下	8, 10, 11
	引張	10以下	8, 10, 11
新定義マイクロ試験** (引張試験)	I-section	60 (平均値)	11, 16, 17
	non I-section	20~40	18

\* この呼び方は若狭によるものである

\*\* 若狭によって定義された micro-tensile bond 試験を意味する (bonded area がU字型の場合を I-section model と表記する)

表2 象牙質接着試験の方法 (問題点)

試験方法	破壊の強さ	破壊様式	問題点
従来の方法	「見かけ」の強さ	凝集破壊 界面破壊	接着強さではない
新定義マイクロ試験 (引張試験)	「真」の強さ**	界面破壊 凝集破壊+	接着強さが求められない場合がある

\*\* これは破壊条件によって決まり、界面破壊を呈さない場合もある

+ 凝集破壊が進展して、界面で破壊をとまなう (両者が「混在」する)

製時あるいは加重のもとで形成するものであると考えられる。他方、新定義マイクロ試験の場合、それらの得られた値 (平均値) は 20 MPa 以上で、表に示したように、最大で 60 MPa 程度である。

従来の方法及び新定義マイクロ試験における接着強さと破壊様式の問題点を見ると (表1, 2), 従来の試験方法による接着強さは「見かけ」の値であり、破壊様式も界面あるいはレジン内部に microcracks が存在することに起因したものであるため、接着強さに相当するものではない。他方、新定義マイクロ試験の場合、界面II (adhesive resin layer/hybrid layer 界面) の強さが得られると、接着界面の破壊であるので、正しく接着強さが算出され、破壊様式は接着界面 (界面II) での界面破壊に相当する。すでに報告したように<sup>4-13)</sup>, 界面以外の場所にある microcracks が界面IIに形成した a main crack との interaction energy の大きさによって凝集破壊が生じる場合があるので、凝集破壊の後、界面での破壊が生じる場合には、それらの破壊様式が「混在」する。つまり、この試験方法で得られる値は接着強さではなく、「真」の接着強さを意味していない。

(2) 界面の elasticity について

本研究では、検討する試験方法として、若狭<sup>21)</sup>, Wakasa et al<sup>20, 22)</sup>, Sano et al<sup>16)</sup>, 中林<sup>23)</sup> や Pashley

et al<sup>24)</sup> の研究をもとに、接着領域の layer は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) から構成されると仮定した。そこで、従来の方法及び新定義マイクロ試験における接着試験片の界面及び layer (層) を定義し、次に接着強さを実測するための試験片モデルを明らかにする。

図2 (a)は、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、一連の接着処理による露出した象牙質接着面上にある円柱状試験片を示す。この場合、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<sup>2</sup> である。(a)では外からの力が接着された面に平行に働く場合のせん断 (S: shear) と垂直に働く場合の引張 (T: tensile) について示される。(b)では既報に従い<sup>4-13)</sup>, bonded area (接着領域) における layer 及び界面を定義する。

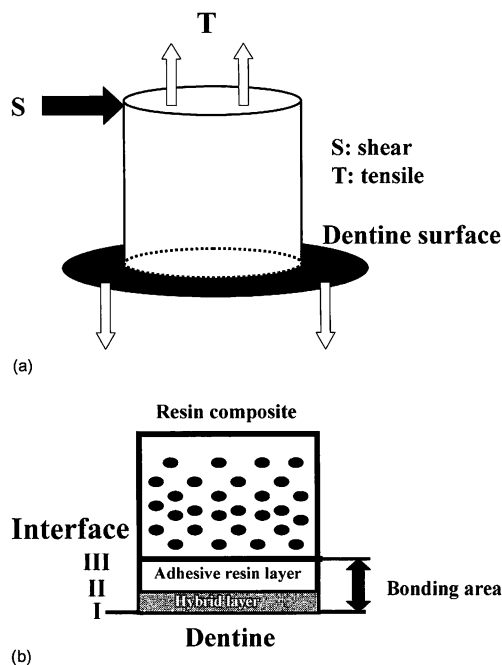


図2 従来用いられてきた試験方法である。(a)は first generation (従来の引張試験) で、象牙質接着面上にある円柱状試験片を示し (せん断 (S: shear) と垂直に働く場合の引張 (T: tensile) である), (b)では bonded area (接着領域) における layer (層) 及び界面を示す

図3 (a), (b)及び(c)では、(a)に示した、second generation (layer 及び界面を定義していない micro-tensile bond 試験の場合である) をもとに、(b)及び(c)では、今までの報告<sup>1, 4-13)</sup> に従って、異なる接着面

## Second generation

## Third generation

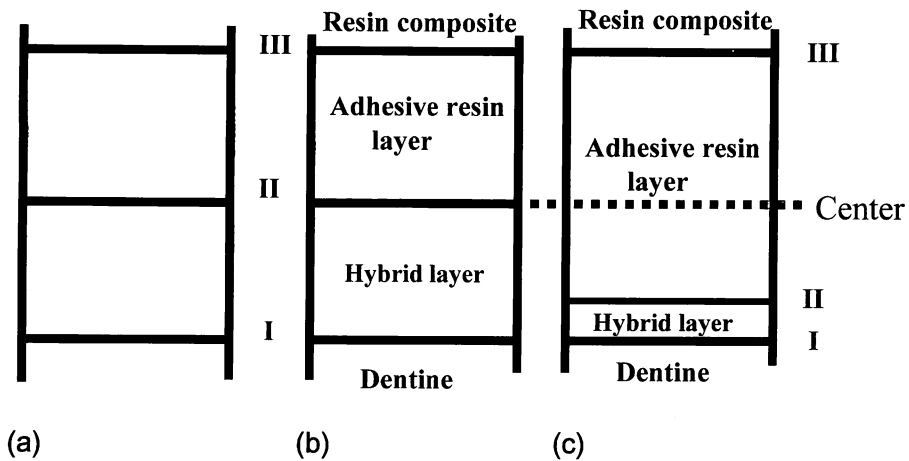


図3 (a) second generation (layer 及び界面を定義していない micro-tensile bond 試験の場合を示す) である。(b) standard type 及び(c) very thin hybrid layer type (hybrid layer の厚さが異なる試験片モデル) を示す third generation の新定義マイクロ試験である

(bonded area = 0.25 ~ 12.25 mm<sup>2</sup>) を持つ試験片を参考にして, hybrid layer の厚さが異なる試験片モデルを示している。この場合, 試験片全体の大きさは  $w$  (つかみ部の幅は 2~5 mm まで変わる) × 10 mm (試験片厚さは bonded area の幅に対応して, 0.25 ~ 3.5 mm になる) であるので, 1 × 1 mm<sup>2</sup> を使用した。(b), (c) では, 試験片の layer 及び界面を定義した試験方法 (新定義マイクロ試験と称する) として standard type (S-type と略記する) 及び very thin hybrid layer type (T-type) とする二つの試験片モデルが得られ, これらは one-step one-bottled system で得られる試験片 (例えば, 最近では宇野らの研究がそれに相当する)<sup>3)</sup> であり, 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 ~ 10 ミクロンの厚さの場合に相当するとした。

若狭によって与えられた表示法によれば<sup>4-13)</sup>, 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) という領域であるので, hybrid layer を含む bonding area を構成する「composite」を想定する。bonding area における hybrid layer の厚さが極めて小さいので, bonding area が変化したときの応力及びその影響が計算される。他方, 新定義マイクロ試験では, 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) の三つの界面から構成さ

れると定義する。

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, 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) を応用して<sup>4-13)</sup>, 従来の試験方法の場合における試験片内部の layer 及び界面の elasticity (弾性率) が算出される。

## 結果および考察

## 1. 破壊強さについて

## (1) 従来の試験方法の場合 (first generation)

図 4 (a) 及び (b) では, それぞれ, 図 2 (a) で示したせん断及び引張試験によって得られる, 接着試験片が破壊にいたる時の応力・ひずみ曲線を示したものである。破壊が layer で生じる場合と界面で生じる場合が考えられるので, 得られる値の大きさには差が生じることになる。すなわち, 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破壊に至る。つまり, 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 (ここでは, cohesive failure, C と表示する) が生じ, 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る。図 2 (b) に示したように, 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 (コンポ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。

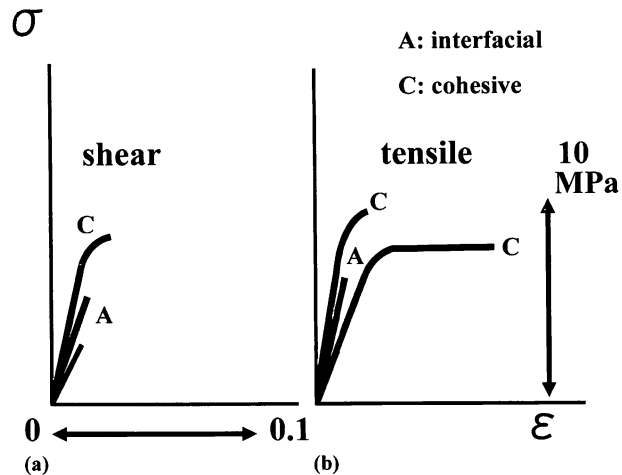


図4 (a)及び(b)では、それぞれ、図2(a)で示したせん断及び引張試験によって得られる、接着試験片が破壊(A:界面破壊, C:凝集破壊)にいたる時の応力・ひずみ曲線を示す

その時の破壊過程は resin composite 内部で引張方向と45度の最大せん断応力面に沿う破壊が生じ、破壊の進行とともに界面IIに達するならば、界面に沿って界面破壊(Aとして, adhesive interfacial failureを表示する)するので、凝集破壊と界面破壊の二つの破壊様式が生じることになる。

以上のことについて図4(a)から考えると、せん断応力が layer (この場合, resin composite から構成されている)内に作用するので、破壊は凝集破壊であり、界面に microcracks が存在する場合には、降伏せん断応力に達する前に界面で破壊が生じる(界面破壊)ものと考えられる。他方、図4(b)を考えると、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( $\sigma_0$ )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。また、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て破壊する。

#### (2) micro-tensile bond 試験の場合 (second generation)

図5には micro-tensile bond 試験 (second generation) によって得られた (Sano et al<sup>16</sup>) の報告を参照した) 試験片の破壊強さを bonded area の大きさに対して示している。破壊強さは bonded area の増加とともに減少している。破壊様式が界面破壊と凝集破壊の境界となる時の、破壊強さの値を 20 MPa とし、20 MPa 以上の値を界面強さ (adhesive strength), それ以下を凝集破壊強さ (cohesive strength) とする。

従来のせん断試験や引張試験における破壊強さの値

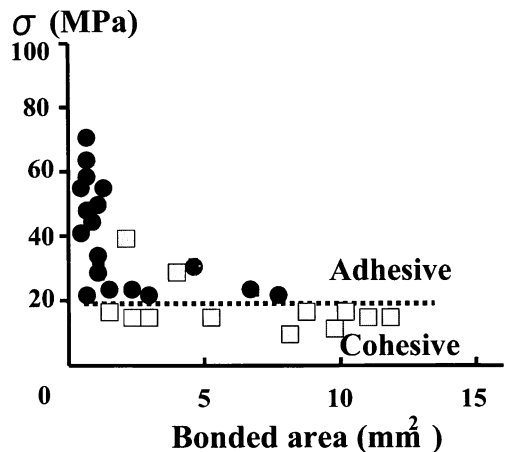


図5 micro-tensile bond 試験 (second generation) を用い、Sano et al<sup>16</sup>) の報告を参照し、その時の試験片の破壊強さを bonded area の大きさに対して示す。

点線は界面破壊と凝集破壊の間の境界 (臨界) 値を示している

を見ると (図4), 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 (約 60 MPa) よりも極めて小さく、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」の強さであるので、「真」の値ではなくて、「見かけ」の値になった。また、micro-tensile bond 試験 (second generation) による接着試験片の破壊強さが bonded area に対して変化すること (図5) を検討する計算モデルを創案することが必要とされる。

## 2. 破壊強さの計算モデル (micro-tensile bond 試験: second generation)

著者の研究によれば<sup>4-13)</sup>, 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), さらに両者の間で相互作用 (interaction energy) が生じるので (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になる。このことを考えると, 海野ら<sup>2)</sup> 及び吉田ら<sup>3)</sup> の報告によれば, 界面 II に外からの力がかからなく, しかも stage I のみの現象であることから, この時の破壊は layer 内部での凝集破壊であることが理解される。

従って, 従来の試験方法によって測定される「見かけ」の強さの値を見ると, その値は bonding area の性質により影響されるので, 「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<sup>4-13)</sup>。このことは図 4 及び 5 に示された, 凝集破壊の強さの大きさにあらわれる。他方, S-type の新定義マイクロ試験では, 図 5 に示されたように, 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と凝集破壊が生じていることが破壊強さの大きさから明らかであった。そこで, 破壊強さの大きさを著者が報告した前報にしたがい, 次のように算出することができる<sup>13)</sup>。

$$\left(\frac{\sigma_C}{E_R^{1/2}}\right) = \{\pi \Gamma / (1-v^2)\}^{1/2} (E_B / E_R)^{1/2} (1/2a)^{1/2} \quad (1)$$

ここで, それぞれの値として,  $\Gamma$  はクラック (大きさは  $2a$  である) の表面張力 (本研究では,  $350 \times 10^{-10}$  MPa $\cdot$ m, とした) 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,  $v$  (ポアソン比; 0.3) は resin matrix での値を示している。

その結果を図 6 に示すと,

- ① 弾性率の比 ( $E_B/E_R$ ) = 0.5 における ( $\sigma_C/E_R^{1/2}$ ) の値は, crack length 長さ ( $2a$ ) が大きくなると低下する
- ② 点線で示した値は図 5 で示した adhesive strength 及び cohesive strength の境界の値 (20 MPa) に相当していると考えられる

従って, 図 5 と 6 を比較すると, S-type の新定義マイクロ試験では, 破壊強さとしての接着強さは界面 II での crack length に影響されることが判明した。このことは新世代「接着理論」としての値を決めるのは, 前報<sup>13)</sup> で述べたように, 界面 II における a main crack

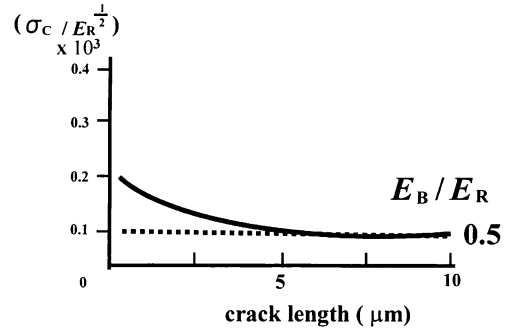


図 6 ( $E_B / E_R$ ) = 0.5 における ( $\sigma_C / E_R^{1/2}$ ) を界面 II での crack length に対して示す (S-type 新定義マイクロ試験の場合)。詳細は本文に示される

の形成が界面強さとしての接着強さに関連していることが明らかになった。

## 3. 界面での elasticity (計算モデル)

図 2 (b) では, 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) を表わしている bonding area (接着領域) における界面 I から界面 III では, bonding area の厚さ ( $d$  とする) が変化する。そこで, 従来の引張における試験片モデル (図 1, 2) を創案すると, 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, すでに報告した式を応用して<sup>4-13)</sup>, microcracks が penny-shaped である場合,  $\sigma_C$  (臨界値としての値) を破壊時の強さ (破壊強さ) として与えられる。つまり, 次のように, それぞれの界面における ( $E_C(0.5) / E_C(3.0)$ ) 及び ( $E_C / E_R$ ) の値は与えられるので, 例えば, 界面 II における値  $E_C$  を算出する。

$$(E_C / E_R) = (E_C / E_B) (E_B / E_R) \quad (2)$$

ここで, ( $E_R / E_B$ ) = 10, ( $E_C / E_B$ ) =  $(1/2)(1 + C1) + (1/2)(E_H / E_B)(1 + C2)$ , として

$$C1 = (\tanh(AT \cdot x) / (AT \cdot x)) (B1 - 1)$$

$$C2 = (\tanh(AH \cdot x) / (AH \cdot x)) (B2 - 1)$$

$$C3 = (\tanh(AD \cdot x) / (AD \cdot x)) (B3 - 1)$$

である。また, ( $E_H / E_B$ ) = 1,  $B1 = \tau_B / \mu_B \gamma$ ,  $B2 = \tau_H / \mu_H \gamma$ ,  $B3 = \tau_D / \mu_D \gamma$ , として

$$AT = (\mu_R / \mu_B) (1/d)^{1/2} (1/(\ln(D/d)))^{1/2}$$

$$AH = (\mu_B / \mu_H) (1/d)^{1/2} (1/(\ln(D/d)))^{1/2}$$

$$AD = (\mu_H / \mu_D) (1/d)^{1/2} (1/(\ln(D/d)))^{1/2}$$

である。ここで, それぞれの値として,  $E$  (弾性率),  $\mu$  (剛性率),  $\tau$  (せん断応力) における添字, B, H, D, R はそれぞれ, Bonding area, Hybrid layer, Den-

tine, Resin composite)での値を示し、Cは「composite」としての値を意味している。その他は、式(1)に従うものとする。このとき、 $x$ の値は0.5及び3.0であるとした。従って、 $(E_C(0.5)/E_C(3.0))$ の比は、それぞれ、 $x$ の値を与えて算出される。界面I及びIIIにおける値を求める時には、界面IIと同様に与えられた。

図7(a)及び(b)には、式(1)、(2)によって得られた結果が示され、次のように要約される。

- ① 界面Iと界面IIIでの値( $E_C(0.5)/E_C(3.0)$ )を比較すると、界面Iでの値は界面IIIでの値よりも大きくなった(図7(a))
- ② 弾性率の比( $E_C/E_R$ )を見ると、界面IIIでの値は界面I、あるいは界面IIよりも、いずれの界面強さに対しても大きくなった(図7(b))

従って、bonding areaの大きさが異なる試験片を用いるならば、界面の性質を検討することが必要であり、しかもそれは界面の強さに影響していることがわかった。

次の研究として、本研究では新世代「接着理論」を

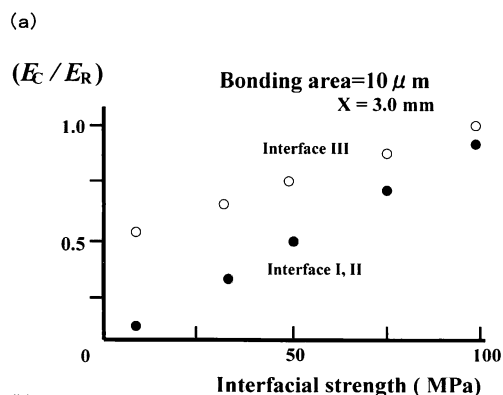
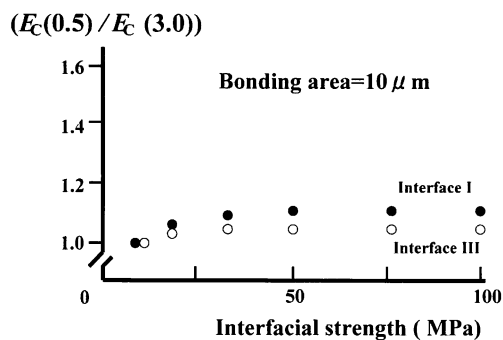


図7 界面強さと elasticity (弾性率) の変化を示した。詳細は本文に示される

- (a) 界面での値、 $(E_C(0.5)/E_C(3.0))$ の界面強さに対する変化
- (b) 界面での値、 $(E_C/E_R)$ の界面強さに対する変化

展開するため、その接着強さ及び破壊様式を考慮している。新定義マイクロ試験における layer (層) と界面について検討する予定である。

## 結 論

本研究の結果は以下に簡潔に要約される。

従来の引張試験の場合 (first generation) おける接着界面の定義を行い、さらに新定義マイクロ試験の象牙質接着試験片モデルを創案した。

(1) first generation における試験片モデル (図1) では、試験片内部の layer (層) 及び interface (界面) が定義されていなかった。そこで、著者がはじめて third generation である新定義マイクロ試験で用いた定義 (図3) を応用し、first generation における試験片モデルを定義した (図2)。その結果、界面破壊は小さな応力で生じ、界面I上の欠陥による破壊であるので、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) であることを示唆することができた。

(2) 新定義マイクロ試験 (third generation) の場合、bonded area が  $0.25 \sim 12.25 \text{ mm}^2$  のように制限されているので、従来の引張試験における試験片の大きさとして、最小では  $0.5 \text{ mm}$ 、最大では  $3.0 \text{ mm}$  として想定、それらの試験片における弾性率の変化を算出、それぞれの界面強さにおいて弾性率変化に対する bonded area の大きさの影響が明らかになった。

## 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」を使用したのに感謝する。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 接着に及ぼすミリア層の影響. 歯科材料・器械 23, 411, 2004.
- 4) 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.

- 5) 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.
- 6) 池田敦治, 若狭邦男: 健全および脱灰象牙質の応力・ひずみ曲線に及ぼす象牙質の諸性質の影響—計算モデルの提唱—. 広大歯誌 35, 105-110, 2002.
- 7) 若狭邦男, 池田敦治: 接着理論の新しい展開—象牙質接着性に及ぼす microcracks の影響—. 広大歯誌 35, 111-117, 2002.
- 8) 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—. 広大歯誌 35, 177-183, 2003.
- 9) 若狭邦男: 接着理論の新しい展開— smear layer の解析—. 広大歯誌 36, 106-111, 2004.
- 10) 若狭邦男: 接着理論の新しい展開—従来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—. 広大歯誌 36, 192-197, 2004.
- 11) 池田敦治: 象牙質接着界面の力学的モデル解析. 広大歯誌 37, 42-51, 2005.
- 12) 若狭邦男: 新世代「接着理論」の展開—接着強さと破壊様式の定義—. 広大歯誌 37, 52-60, 2005.
- 13) 若狭邦男: 新世代「接着理論」の展開—hybrid layer のダイナミックス—. 歯科材料・機械 24, 148, 2005.
- 14) Wakasa K: Calculation model of fracture stress during bond test. *J Dent Res* 75, Abst. No. 1764, 1996.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) Tanaka K, Mori T: The hardening of crystals by non-deforming particles and fibres. *Acta Metallurgica* 18, 931-941, 1970.
- 20) Wakasa K, Shintani H, Matsui A, Yamaki M: Calculation model of fracture stress during bond test. *J Dent Res* 75, Abst. No. 1764, 1996.
- 21) 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 17, 324-325, 1999.
- 22) 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.
- 23) 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.
- 24) Pashley DH, Sano H, Ciucchi B, Yoshiyama M, Carvalho RM: Adhesion testing of dentin bonding agents. *Dent Mater* 11, 117-125, 1995.