

接着理論の新しい展開

—従来の場合, shear 及び tensile 試験—

池田 敦治, 若狭 邦男

New Development of Adhesion Theory

— Conventional Methods of Shear and Tensile Test —

Atsuharu Ikeda and Kunio Wakasa

(平成15年9月4日受付)

緒 言

象牙質接着強さを評価する方法には, 平滑な象牙質接着面に直接接着した試験片の強さを測定する, いわゆる従来の方法 (shear 及び tensile 試験) と新しい試験方法である micro-tensile bond 試験がある。著者らは接着される象牙質及びその諸性質を評価する接着理論の新しい展開のために, 接着界面としてレジン/象牙質界面として interface I, II, III の三つの interface を考えて, その界面 II の界面強さが接着強さであると定義した¹⁻⁶⁾。すなわち, 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) の三つの界面を想定する。

従来の試験方法には, shear (せん断) 試験と tensile (引張) 試験がある⁷⁻¹¹⁾。その方法は正しく接着強さを求める方法ではなく, 欠陥を内在する試験片自体の強さを求めるものであるので, 「見かけ」の強さを測定する方法である。他方, micro-tensile bond 試験片 (接着面積を限定した試験方法である) があり, 著者のひとり, Wakasa によれば, そ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¹⁾。前者の方法では, 接着面積 = $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$ における接着強さは 60MPa (平均値, Sano et al^{12, 13)} に従う) や 20MPa (歯頸部に接着した場合, Yoshiyama

et al¹⁴⁾ の報告に従う) であることが知られている。後者の方法は Shono et al¹⁵⁾ によって行われ, その試験片形状から beam 法と知られている (接着面積 = $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$ における接着強さは 20MPa 以上である)。

そこで, 従来の方法で行われていた shear 及び tensile 試験の接着試験片をモデル化して, 計算モデルを創案することにする。著者が健全象牙質に対する接着強さを求める方法としての micro-tensile bond 試験, あるいは micro-tensile 試験 (象牙質あるいは脱灰象牙質等の試験に用いる) による強さの評価方法を従来の試験方法に対して応用する。つまり,

- 1) 従来の方法によって接着強さではなくて, 測定される破壊時の加重から計算する
- 2) micro-tensile bond 試験方式で求めた計算モデルを従来の方法による接着試験での計算モデルに応用する

という二つのことを行うこととした。従って, 応力の大きさに対して影響する因子を用いた計算モデルが提唱され, かつ応力・ひずみ関係の意味を表わすことができる。

材料および方法

1. 試験片としての象牙質について

既報^{16, 17)} (micro-tensile bond あるいは micro-tensile 試験) では, 他の報告と同様に, 用いた象牙質は human dentine (coronal) と bovine dentine であった^{12, 13, 16, 17)}。

本研究では bovine dentine を象牙質試料として用い, それらを従来の試験方法 (shear 及び tensile 試験) で求められる強さとしては, 本研究では「真」の接着強さではなく, 「見かけ」の強さであると定義した。断らない限り, 求める強さは「見かけ」の強さを意味する。

広島大学大学院医歯薬学総合研究科創生医科学専攻生体材料学教室 (主任: 岡崎正之教授)

本論文の要旨の一部は平成15年度春期第41回日本歯科理工学会学術講演会 (平成15年4月), 第36回広島大学歯学会総会 (平成15年6月) において発表した。

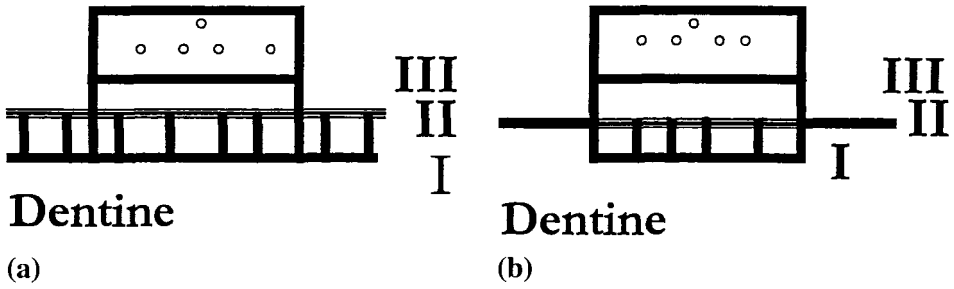


図1 接着試験片の模式図である。
 (a) 象牙質露出全面を脱灰した時、及び (b) 接着試験片の直径の大きさに局所的に脱灰後試験片として作成した時である。それぞれの記号の説明は本文にある。

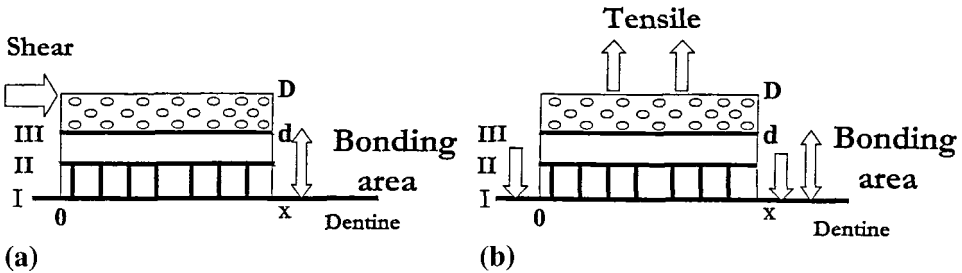


図2 象牙質接着試験片の (a) shear 及び (b) tensile である。図の詳細な説明は本文を参照のこと。

2. 従来の試験方法について

はじめに、理論的に計算するためのモデルを提示するために、図1を示す。(a)では象牙質露出全面を脱灰した時の模式図であり、(b)が接着試験片の直径の大きさに局所的に脱灰後、試験片として作成した時の模式図である。

外からの力がかかる界面を限定する方法、すなわち micro-tensile あるいは micro-tensile bond 試験を用いるならば¹⁻⁶⁾、レジン/象牙質界面 (interface I, II, III) を仮定することになる。従って、従来の方法でも、shear あるいは tensile 試験では、想定している試験片の中央部位に対して外からの力が負荷した時の強さを応力・ひずみ関係から測定されることを示した。

3. 計算モデルについて

(1) shear 及び tensile 試験の場合

図2には象牙質接着試験片の shear (a) 及び tensile 試験 (b) の座標を示す。従来の試験方法では力がかかる部位は interface であると考えていないので、本研究では象牙質の上に bonding area (接着領域として定義する) とする領域を考え、resin composite をその上に想定する。従って、二試験方法では、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 (計算できる応力は平均応力である) を Eshelby's inclusion 問題 (一般には、その問題は matrix のなかに弾性率が異なる inclusion が存在している場合について考えられている) を応用して、求めることにした^{1, 18, 19)}。

以上のことから、tensile 試験の場合、shear 試験と同様な座標を用いることにした。従来の二試験方法では本研究で求める式は既報¹⁷⁾と同様に応力・ひずみ曲線の関係を表わす式を導入する。二つの場合における計算式は次の結果および考察の、小節2.において示される。

結果および考察

1. 応力・ひずみ曲線について

図3 (応力とひずみの関係を表す) は shear (a) 及び tensile 試験 (b) の結果である。二試験では共通して、降伏現象のまま破壊する場合 (adhesive failure; 界面破壊) と降伏後の応力とひずみの増加を伴う関係 (cohesive failure; 凝集破壊) が求められる。既報¹⁷⁾のように、弾性領域では yielding (降伏現象; その時の値が降伏応力である) が生じて、fracture に至り、破壊することがわかる。これらの場合、低い値での adhesive failure であり、それよりも高い値での cohesive

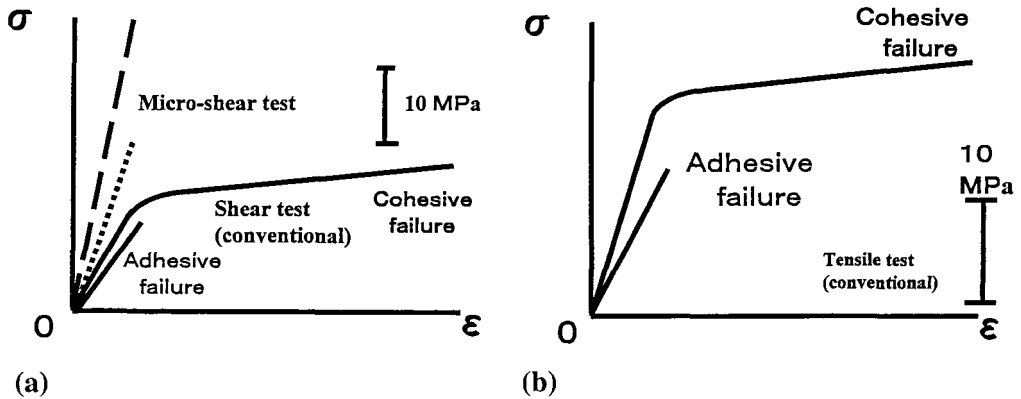


図3 応力・ひずみの関係を表わす。(a) shear 及び (b) tensile 試験による結果である。micro-shear test の結果は本文に示した引用文献から引用した。

failure であった。最近の報告（エナメル質への接着）によると¹¹⁾，micro-shear 試験では 50MPa に及ぶ値が求められているが，この値は resin composite の破壊によるものであり，「真」の接着強さを意味していない。

従って，この時の応力が「見かけ」の強さ（従来では接着強さとして考えられていた）とされるものである。なお，micro-tensile 試験により得られた健全象牙質の応力・ひずみ曲線を見ると，降伏応力（約 100MPa）まで増加して降伏した後，応力は増加して破壊に至り¹⁷⁾，破壊ひずみは 0.025（平均値）であった。さらに，象牙質接着試験片の micro-tensile bond 試験の場合，接着面積 = 1 mm² で 60MPa であるので，従来の方法により求めた値（2~20MPa）よりも極めて小さいことが判明した。これらのことから，従来の方法により得られた強さは象牙質それ自体の値を求めた値ではなく，かつ極めて小さくなり，降伏現象以後のひずみが小さいので，接着時の欠陥の導入により，「見かけ」の値が小さくなったものと推測された。これらのことは Wakasa¹⁾，若狭²⁻⁶⁾，Sano et al^{12, 13)} の報告によって確認されている。

他方，mini-dumbbell type 接着試験片を用いた中林らは脱灰象牙質内に残存する欠陥が検出されることも報告されている²⁰⁾。また，micro-tensile bond 試験では接着領域の面積と象牙質接着試験の関係が求められている^{21, 22)}。

以上に基づいて，従来の方法による結果と文献での報告を参考にし，次のことが判明した。

(1) 従来の shear あるいは tensile 試験によれば，界面破壊は小さな応力で生じて，欠陥に起因するため，界面上の欠陥による破壊によることから，求められた値は「真」の接着強さではなく，「見かけ」の強さである。そのために，直線的に応力が増加して，小さなひ

ずみで破壊することになった（図3参照）。

(2) 他方，凝集破壊は界面破壊に比べて大きな応力で生じて，界面以外の欠陥に起因して破壊するため，欠陥による破壊によることから，求めた値は象牙質接着強さではなく，欠陥が内在する材料自体の「見かけ」の強さである。すなわち，脱灰象牙質，接着レジジン，コンポジットレジン内部に欠陥が存在する時，欠陥を含む材料の強さが求められたことになる。この場合，応力は降伏現象を生じた後，変形を生じて破壊に至ることになる（図3参照）。

2. 従来の方法に基づいて計測された応力とひずみの計算（計算モデル）

(1) shear 試験の場合

bonding area と resin composite を composite とする領域の変形挙動を求めることになるので，著者のひとりが導入した式を応用して求めることにする²³⁾。この時，次のような仮定のもとで算出することにした。

- ① composite として，bonding area と resin composite からなる領域を考える。それぞれの弾性率を E_B と E_R とする。ここでは，bonding area の厚さを d とする。 D は試験片の厚さ（高さ）に相当する。以下の式では，剛性率を μ ，弾性率を E と表わすこととして，それぞれ，bonding area と resin composite の場合には，添字として B 及び R を付けることにした
- ② 応力方向を 3 軸方向（ z 軸方向），それに垂直な方向を 1 軸（ x 軸），厚さ方向を 2 軸（ y 軸）と想定する。 x 軸方向では試験片の長さは L とする
- ③ 塑性変形による応力を平均値として求めることとして，それを $\langle \sigma \rangle$ または $\langle \tau \rangle$ として求めた Wakasa が表わした式²³⁾ 及び Eshelby の考え方を

いた Mori et al の方法^{18,19)} を用いて、次のように与えられた。

$$\langle \sigma_L \rangle = E_B \varepsilon \{ 1 + (\tanh(B_S L) / B_S L)(B-1) \} \quad (1)$$

が導びかれた。ここで、

$$B_S = (2^{1/2} / (Dd)^{1/2}) (\mu_R / E_B)^{1/2} [1 / \ln(D/d)]^{1/2} \quad (2)$$

であり、

$$B = \sigma_0 / E_B \varepsilon$$

として与えられた。 σ_0 はその時の降伏引張応力である。なお、 E は弾性率を表わし、 ε は塑性変形を示している。それらの添字として、resin composite と bonding area ではそれぞれ R 及び B を用いる。

従って、破壊時の臨界応力 (critical stress) を von Mises の yield criteria を用いて²⁴⁾、次のように求めることができる。

$$\langle \tau_c \rangle = (1 / 2^{1/2}) (\sigma_3 - \langle \sigma_L \rangle) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで、} \quad \sigma_3 - \sigma_1 &= (3 / 2^{1/2}) \langle \tau_c \rangle \\ \sigma_3 - 2^{1/2} \langle \tau_c \rangle &= \langle \sigma_L \rangle \end{aligned}$$

である。

(2) tensile 試験の場合

求める計算方法は shear 試験での場合と同様である。すなわち、Wakasa が表わした式²³⁾ 及び Eshelby の考え方を用いた Mori et al の方法^{18,19)} を用いて、次のように平均応力が破壊時の強さとして与えられた。

$$\begin{aligned} \langle \tau_L \rangle &= 2^{1/2} (\mu_B \gamma) \cdot \\ & \{ 1 + (\tanh(A_r L) / A_r L)(B'-1) \} \quad (4) \end{aligned}$$

が導びかれた。ここで、それぞれの定数は

$$\begin{aligned} A_r &= \{ 2^{1/2} / (Dd)^{1/2} \} \cdot \\ & (E_R / E_B)^{1/2} [1 / \ln(D/d)]^{1/2} \quad (5) \end{aligned}$$

であり、

$$B' = \tau_0 / \mu_B \gamma$$

として与えられた。 τ_0 はその時の降伏せん断応力である。 μ_B は bonding area の剛性率を表わし、 E (弾性率) の添字はそれぞれ resin composite 及び bonding area での値を示している。 γ は塑性変形である。従って、破壊時の応力 (critical stress) を次のように求めることができる。

$$\begin{aligned} \langle \tau_c \rangle &= (2^{1/2}) \langle \tau_L \rangle \quad (6) \end{aligned}$$

ここで、 $\tau_1 = 0$

$$\begin{aligned} \tau_2 &= (1/2) |\sigma_1 - \sigma_3| \\ \tau_3 &= (1/2) |\sigma_2 - \sigma_1| \end{aligned}$$

である。

以上の式を用いるならば、shear 及び tensile 試験によって外からの力が接着試験片にかかる時の平均応力を破壊時の応力として評価することができた。この時、試験片の bonding area の厚さ (d として与えられる) を考えることで、その領域における破壊応力が「見かけ」の強さに相当することを明らかにすることができるものと思われる。

3. 従来の方法、すなわち shear 及び tensile 試験での理論計算結果

(1) shear 試験の応力変化、bonding area の厚さ、弾性率、interfacial strength との関係

図4、5、6は shear 試験について、それぞれ、式(3)を用いて計算した値を示したものである。

図4は shear 試験による yielding 後の応力変化を bonding area (接着領域を表わし、以下同様である) の厚さ、100ミクロンの場合、それぞれ interfacial strength=10, 20MPa ごとに 10^2 から 10^3 MPa の bonding area の弾性率変化に対して求めたものである。その結果、以下のことが要約された。

- ① それぞれの interfacial strength に対して応力変化は弾性率の増加とともに漸次増加する
- ② 一定の弾性率の場合、interfacial strength=20MPa での応力変化は 10MPa でのそれよりも大きくなった

図5は shear 試験において bonding area=10 ミクロンでの平均応力を applied strength=20MPa における bonding area の弾性率に対して求めたものである。以

Stress increment

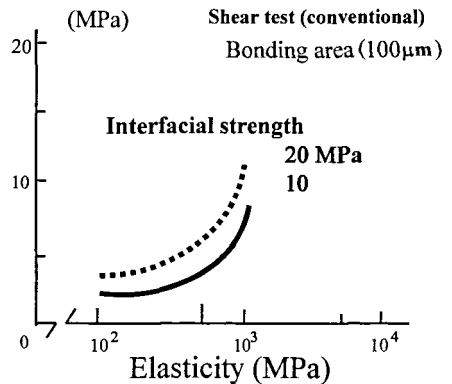


図4 yielding 後の応力変化を bonding area (接着領域を表わし、以下同様である) の厚さ、100ミクロンで、それぞれ interfacial strength=10, 20 MPa ごとに 10^2 から 10^3 MPa の弾性率変化に対して求めている。

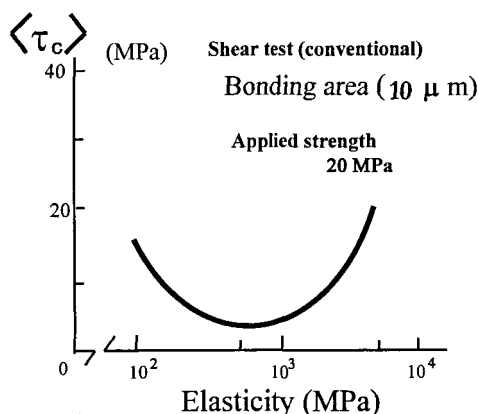


図5 bonding area=10ミクロンでの平均応力を applied strength=20MPa での bonding area の弾性率に対して求めたものである。

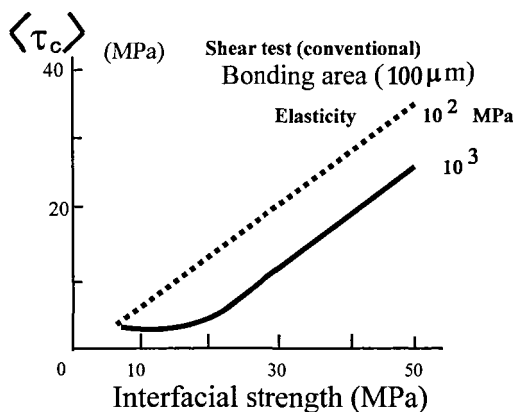


図6 bonding area=100ミクロンでの平均応力を interfacial strength に対して二つの bonding area の弾性率で求めた。

下のことが要約される。

- ① 平均応力は弾性率=1GPa (10^3 MPa) で他の値よりも小さくなった
- ② 一定の弾性率で見ると、平均応力の大きさは applied strength の値よりも小さくなった

図6では shear 試験において bonding area=100ミクロンでの平均応力を interfacial strength に対して二つの bonding area の弾性率で求めた結果、次のように要約される。

- ① interfacial strength の増加に対して平均応力は弾性率= 10^2 MPa では他の値の場合と比べて増加した
- ② 平均応力の値は bonding area の弾性率によって左右される

従って、従来の試験方法における shear (図4, 5,

6) では計算される平均応力が bonding area の厚さ、弾性率、interfacial strength によって影響されることがわかった。

(2) tensile 試験の場合

図7, 8, 9 (tensile 試験の結果) はそれぞれ, 式(6)を用いて計算した値を示したものである。

図7は応力変化を bonding area (接着領域とする)の厚さ, 10ミクロンでの弾性率に対して求めたものである。その結果,以下のことが要約された。

- ① 応力変化は弾性率の増加とともに増加する
- ② 一定の弾性率で見ると、応力変化は interfacial strength=20MPa では10MPa でのそれよりも大きくなった

Stress increment

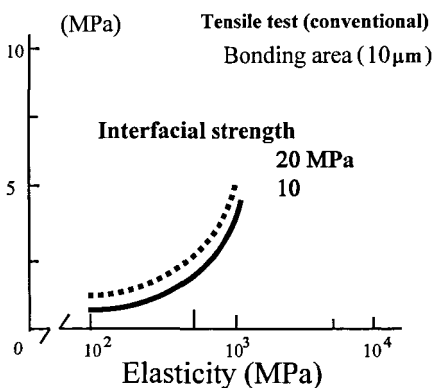


図7 応力変化を bonding area (接着領域を表わし, 以下同様である)の厚さ, 10ミクロンでの弾性率に対して求めている。

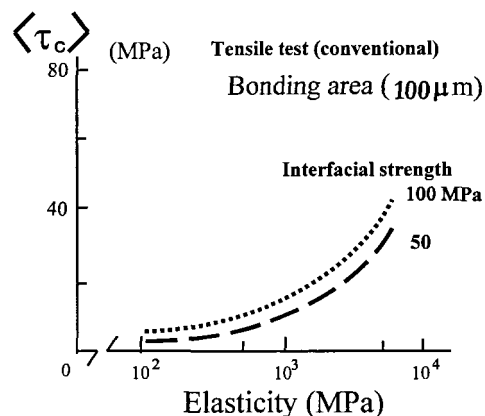


図8 bonding area=100 ミクロンでの平均応力を interfacial strength=50, 100MPa (界面強さ, 以下同様である) ごとに bonding area の弾性率に対して求めたものである。

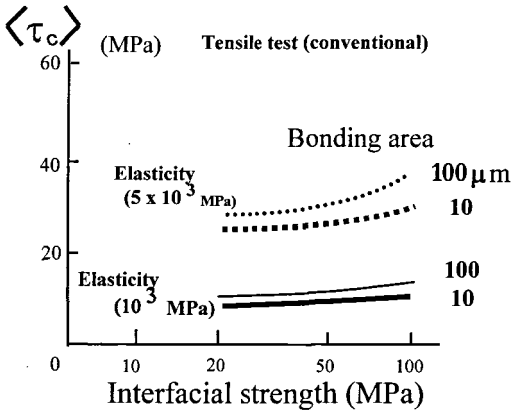


図9 bonding area=10, 100 ミクロンでの平均応力を interfacial strength に対して bonding area の弾性率ごとに求めた。

図8は bonding area=100ミクロンでの平均応力を interfacial strength=50, 100MPa (界面強さ, 以下同様である) ごとに bonding area の弾性率に対して求めたものである。以下のことが要約される。

- ① 平均応力は弾性率の増加とともに増加する
- ② 一定の弾性率でみると, 平均応力の大きさは interfacial strength=100MPa での値は 50MPa でのそれよりも大きくなった

図9では bonding area=10, 100ミクロンでの平均応力を interfacial strength に対して bonding area の弾性率ごとに求めた結果, 次のように要約される。

- ① interfacial strength の増加に対して平均応力は弾性率の増加とともに増加した
- ② 弾性率が 5GPa では, interfacial strength の増加とともに増加し, 他の値の場合よりも大きくなった

以上の結果, 従来の試験方法における tensile 試験 (図7, 8, 9) では計算される平均応力が bonding area の厚さ, 弾性率, interfacial strength によって影響されることがわかった。

従って, 従来の二試験方法によって測定された「見かけ」の強さの値が bonding area の性質により影響されることが判明した。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た。

4. 「見かけ」の強さと「真」の象牙質接着強さについて (従来の方法と micro-tensile bond あるいは micro-tensile 試験の比較)

著者らの研究では^{1-6, 16, 17)}, micro-tensile bond 試験における応力・ひずみ曲線を参考にして, 「真」の象牙質接着強さをすでに検討した。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, その時の値が「真」の象牙質接着強さを意味していた。さらに, 象牙質の micro-tensile 試験方法では, dentinal tubule と外からの応力の関係を見ると, 次のような因子が指摘されている¹⁷⁾。dentinal tubule の方向と応力負荷方向としてそれが平行と垂直の場合, dentinal tubule が composite としての象牙質の強さに影響した。dentinal tubule が外からの応力の負荷する角度を考慮して応力とひずみの関係が求められることになる。

そこで, 従来の方法 (shear 及び tensile 試験) と micro-tensile bond 試験を比較すると, 前者では界面の強さが測定されなくて, 後者の試験では界面の強さが求められた¹⁻⁶⁾。さらに, 同じ形態の micro-tensile 試験による脱灰象牙質の応力の塑性変形に対して測定できた²⁾。Wakasa の報告¹⁾ では, 応力変化は collagen fibre の量に依存し, 脱灰後の collagen fibre 量によって影響されることが明らかにされている。

従って, micro-tensile bond あるいは micro-tensile 試験の有用性が明らかになり^{16, 17)}, 従来の試験方法では, 応力・ひずみ関係に影響する因子が欠陥のみであることがわかった。つまり, micro-tensile 試験では象牙質の性質や dentinal tubule の方向と応力・ひずみの挙動が明らかにされるが, それらを検討できない従来の試験方法は接着試験による「真」の接着強さの評価方法として推奨できないものであった。

今後, 従来の方法では bonding area を仮定するので, 得られる応力・ひずみの関係から smear layer と応力との関係を解析する予定である。

結 論

本研究の結果は以下に簡潔に要約される。

(1) 従来の shear あるいは tensile 試験によれば, 界面破壊は小さな応力で生じて, 界面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」の強さであった。その値は直線的に応力の増加とともに増加して, 破壊した。他方, 凝集破壊は界面破壊での値に比べて大きな応力で生じて, 界面以外の欠陥に起因して破壊するので, 求められた値は象牙質への接着強さではなく, 欠陥が内在する材料自体の「見かけ」の強さに相当しており, 降伏現象を生じた後, 界面破壊時のひずみよりも大きな変形を生じて破壊に至ると推測される。これらのことから, 従来の試験方法では欠陥が生じた部位によって破壊様式が異なることが予想された。

(2) 従来の shear あるいは tensile 試験では, 平均の応力 (破壊時の強さに相当する) が界面の強さ (inter-

facial strength である) 及び bonding area (接着領域) の弾性率に影響され、さらにその接着領域の厚さ (例えば, 10, 100 ミクロンを計算に使用している) によって影響されることが理論的に明らかになった。

謝 辞

本研究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」を使用したもので、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) Wakasa K: Calculation model of fracture stress during bond test. *J Dent Res* **75**, Abst. No. 1764, 1996.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Wakasa K, Shintani H, Matsui A, Yamaki M: Calculation model of fracture stress during bond test. *J Dent Res* **75**, Abst. No. 1764, 1996.
- 6) Wakasa K, Yoshida Y, Ciucchi B, Sano H, Pashley D H: Calculation of stress zone during crack propagation. *J Dent Res* **76**, Abst. No. 1946, 1997.
- 7) 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.
- 8) 杉崎順平, 細田裕康: 露出根面塗布材に関する基礎的研究 (第1報) 接着性と耐磨耗性について. 日歯保存誌 **32**, 666–676, 1989.
- 9) 柴岡永子: 露出歯根部象牙質におけるコンポジットレジン修復システムの接着強さに関する研究. 日歯保存誌 **40**, 1183–1199, 1997.
- 10) 山田満憲, 宮崎真至, 安藤 進, 小野瀬英雄: 光重合型レジンに関する研究—とくにセルフエッチングシステムにおけるプライマーとボンディング材の交叉使用について—. 歯材器 **21**, 12, 2002.
- 11) 今宮智恵子, 石川礼乃, 島田康史, 田上順次: 新規審美修復材 TMX-200 のエナメル質に対する接着性. 歯材器 **22**, 64, 2003.
- 12) 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.
- 13) Sano H, Ciucchi B, Matthews WG, Pashley DH: Tensile properties of mineralized and demineralized human and bovine dentin. *J Dent Res* **73**, 1205–1211, 1994.
- 14) 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.
- 15) Shono Y, Yano J, Ogawa T, Bori K, Kawano N, Terashita M: Regional microtensile bond strengths of newly developed dentin bonding system made to superficial versus root dentin. *Proceedings of ICCE* **7**, 803–804, 2003.
- 16) 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.
- 17) 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—*廣大歯誌* **34**, 141–146, 2002.
- 18) Tanaka K, Mori T: The hardening of crystals by non-deforming particles and fibres. *Acta Metallurgica* **18**, 931–941, 1970.
- 19) Mori T, Tanaka K: Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica* **21**, 571–574, 1973.
- 20) Nakabayashi N: Bonding of restorative materials to dentine: the present status on Japan. *Int Dent J* **35**, 145–154, 1985.
- 21) 佐野英彦, 庄野常一, 園田秀一, 高津寿夫, Ciucchi B, Horner JA, Carvalho RM, Pashley DH: レジン系接着剤の被着面積と接着強さとの関係—微小な被着面を用いた接着試験の検討—. 日歯保存誌 **37**, 882–887, 1994.
- 22) Pashley DH, Sano H, Ciucchi B, Yoshiyama M, Carvalho RM: Adhesion testing of dentin bonding agents. *Dent Mater* **11**, 117–125, 1995.
- 23) Wakasa K, Yoshida Y, Nakayama Y, Nakatsuka A, Yamaki M: Stress analysis after yielding at the resin composite/dentine interface. *Computer methods in biomechanics & Biomedical engineering-2*, (ICBN: 90-5699-206-6), Gordon & Breach Publishers, UK, pp 673–680, 1998.
- 24) 山田嘉昭: 塑性力学, 第3章 降伏条件, ひずみ硬化, 応力—ひずみ方程式. 日刊工業新聞社, pp 44–97, 1964.