Er:YAG および CO₂ レーザー照射象牙質面
に対するレジンの接着特性
—レーザー照射象牙質面に対しレジンはあるの
接着性能を発揮できるか?—

富士谷 盛興

広島大学大学院医歯薬学総合研究科顎口腔頸部医科学講座 (保存修復学研究室)
(主任: 富士谷盛興助教授)

(受付: 平成 18 年 6 月 9 日, 受理: 平成 18 年 7 月 6 日)

Adhesive Properties of Resin Bonding System
to Er:YAG or CO₂ Lased Dentin
—Does the resin bonding system exhibit its full
adhesive performance to lased dentin?—

Morioki FUJITANI

Department of Operative Dentistry and Dental Materials
Hiroshima University Graduate School of Biomedical Sciences
(Chief: Assoc. Prof. Morioki FUJITANI)

(Received: June 9, Accepted for Publication: July 6, 2006)

Abstract: Laser ablation [Er:YAG (Erwin Adverl[®], 60mJ/10pps), CO₂ (Topal[®], 1 W/0.3sec)] of dentin reduces the adhesive properties of resin bonding systems. The so-called “laser-etching” might not be effective in promoting adhesion. By TEM observations of non-decalcified specimens, such morphological changes as observed in the acid-etched dentin surface could not be detected in the subsurface layer of the lased dentin. It was mechanically weakened due to the formation of structural defects and heat-denatured layer, leading to considerably lower adhesive properties. Significantly lower bond strength was obtained in the wedge-shaped defects compared with the flat surfaces. The configuration factor (C-factor) might be an important factor especially for the adhesion to lased dentin.

However, high-energy laser ablation of dentin (Er:YAG: 250mJ/10pps, CO₂: 3 W/0.3sec) hardly reduced the bond strength. In the subsurface layer of low-power lased dentin (Er:YAG: 60mJ/1 pps, CO₂: 1 W/0.3sec), TEM observations of decalcified specimens revealed that amorphous matrix substances containing denatured collagen fibers were generated (Er:YAG: 3-4 μ m, CO₂: 1-2 μ m). On the other hand, in the high power-lased dentin (Er:YAG: 250mJ/1 pps, CO₂: 3 w/0.3sec), such morphological structure that could hardly be distinguished from sound dentin (Er:YAG) or the subsurface dentin layer having both little amorphous matrix and torn collagen fibers with cross-striation (CO₂) was observed. The effects of high-energy laser ablation might be limited to the superficial layer.

It was concluded that laser-etching might not be effective in promoting adhesion, and that the amount of irradiation energy should be considered when evaluating the adhesive properties of resin bonding systems.

(J. Jpn. Soc. Laser Dent. 17 : 74 ~ 80, 2006 Reprint requests to Dr. FUJITANI)

Key words = Er:YAG laser, CO₂ laser, Ultra-morphology, Adhesive resin

キーワード = Er:YAG レーザー, CO₂ レーザー, 超微細構造, 接着性レジン

緒 言

近年、レーザー照射された象牙質面におけるレジンの接着性に関し種々の報告、見解がある。すなわち、当該面に対するレジンの接着性は研削面に対するそれに比し低下しないという見解^{1,2)}がある一方、接着性は低下し³⁻⁶⁾、とくに接着耐久性に劣るという報告^{7,8)}もある。また、ボンディング材塗布に先立つ酸エッチングやプライマー処理などの必要性についても、必要⁷⁻⁹⁾、不要^{10,11)}と相反する考えがある。

また、最近、レーザーの種類、あるいは照射条件を選べばレジンの接着性は低下しないとの報告¹²⁾も見受けられ混乱を来している。しかし、それら照射面の性状変化に関する詳細な超微細構造学的ならびに分析化学的考察は加えられていないのみならず、接着性が低下しない明確な科学的根拠が提示されていない。

本稿では、「歯牙硬組織切削を適応」として「厚生労働省の許認可」を受けているレーザー装置の中で、Er:YAG レーザー装置 (Erwin Adverl[®], モリタ, 京都), ならびに CO₂ レーザー装置 (Topal[®], 吉田製作所, 東京) を用いて遂行された筆者の研究室における一連の研究をベースに、レーザー照射象牙質におけるレジンの接着性に関する

これらの見解に対し考察を加える。

レーザーエッチングとボンディング処理 のみでのレジンの象牙質接着性について

まず、本節で述べるレーザーの照射エネルギーは、臨床において痛みをほとんど感じないとされる低出力に設定した場合 (Adverl: 60mJ/10pps, Topal: 1 w/0.3sec) であり、後述の高出力照射の場合とは異なるので注意を要する。

レーザーにより「エッチング」処理済ということで、ボンディング材を酸処理なく直ちに塗布しても、レジンは接着しない、あるいは、初期接着性はある程度獲得できても接着耐久性に問題がある、というところが現在の一般的な見解であるように思われる。以下、その科学的根拠を提示する。

1. レーザーエッチング面と酸エッチング面の相違

レーザー照射した象牙質表面を走査電子顕微鏡等で観察すると、スミヤー層は形成されず象牙細管は開口している (図1)。本所見は、酸エッチングされた像に類似しており、「レーザーエッチング」といわれる所以である。

一方、酸によりエッチングされた象牙質表層の未脱灰、未染色切片の透過電子顕微鏡像 (図2a) を観察すると、脱灰によりハイドロキシアパタイトが消失し、基質のコ

図1 レーザー照射 (低出力) 象牙質表面ならびに側視断面 SEM 像
レーザー照射象牙質表面にはスミヤー層は形成されず象牙細管は開口している a. Er:YAG (60mJ) 弱拡大 b. Er:YAG (60mJ) 強拡大 層状構造 (矢印) が生じている c. CO₂ (1w) 弱拡大 d. CO₂ (1w) 強拡大 亀裂 (矢印) が生じている

図2 レーザー照射（低出力）象牙質表層のTEM像（未脱灰・未染色）

a. 酸エッチング面 酸処理された象牙質表層はハイドロキシアパタイト結晶が消失しコラーゲン基質が観察される（*） b. Er:YAG (60mJ) c. CO₂ (1 W) レーザー照射された象牙質表層においてはハイドロキシアパタイト結晶はほとんど蒸散されていない（矢印）

ラーゲン線維が認められる。ところが、レーザー処理象牙質表層の透過電子顕微鏡像（図2b, c）では、レーザー照射してもほとんどハイドロキシアパタイトは蒸散されず、消失していないことが観察される。また、脱灰、電子染色切片により当該部位のコラーゲン線維を観察すると、高次構造が破壊され横紋構造の消失した無構造の変性層となっている（図3）。すなわち、レーザー照射された象牙質表層には、アパタイト結晶が選択的に蒸散し、横紋構造の認められるコラーゲン基質のみとなっている層は存在しない。

このように、「レーザーエッチング」といっても、象牙細管の開口という表面の形態学的変化のみから呼称されており、酸エッチング剤で処理した象牙質表面ならびに表層の性状変化、すなわちハイドロキシアパタイトが脱灰、消失し、コラーゲンマトリックスが露出した層という概念まで「レーザーエッチング」という用語には含まれていないことに注意しなければならない¹³⁾。

さらに、これらの無構造の変性層に対応するように（図3）、照射時に発生した熱によるコラーゲタンパクの変性層も生じている（図4）。また、レーザー照射された象牙質表面ならびに表層には、亀裂あるいは鱗のような層状構造など構造欠陥も生成される^{8, 14, 15)}（図1）。

レジンの象牙質に対する良好な初期接着性ならびに接着耐久性獲得のためには、いわゆる「質の良いハイブリッド層」の形成が必須である¹⁶⁻¹⁸⁾。ところが、レーザー照射した面に直接ボンディングレジンを塗布しても、ほとんど浸透しないばかりか、もし、一部浸透しても、マトリックスコラーゲンが脆弱なため質の良いハイブリッド層は望めない

ことが容易に想像される^{14, 15)}。レーザーにより「エッチング」処理済ということでボンディング処理を直ちに行うことなどには問題があるように思われる^{8, 9, 13)}。

2. レーザー照射象牙質の構造変化とレジンの接着性

この仮説を証明すべく、レーザー照射された象牙質面においてレジンの接着試験（Clearfil Megabond/Clearfil AP-X）を行ったところ、研削面に比べレーザー照射面は接着性が有意に低下した。また、プライマー処理を行わずレーザー照射面を直接ボンディング処理すると、接着性はさらに低下した^{8, 14, 15)}（図5）。

以上の科学的根拠から、臨床において使用できる照射出力（痛みを感じない低出力）によりレーザー照射した象牙質面に対するレジンの接着性は、たとえ酸処理、あるいはプライマー処理を施しても構造欠陥や熱変性層などの影響で阻害される。また、いわゆる「レーザーエッチング」による歯面処理効果も当然のことながら期待できない。一方、プライマー処理に先立ってリン酸エッチングを施すとレジンの接着は低下しないという見解もあるが、熱変性したコラーゲン線維はエッチングしても残るので、初期接着は獲得できても接着耐久性に疑問が残るものと考えられる（図6）。

照射出力がレジンの象牙質接着性に及ぼす影響について

照射時に痛みを感じないレベルの低出力でレーザーを象牙質に照射するとレジンの接着性は低下する。しかしその一方で、高出力の場合レジンの接着性はあまり低下しないという報告¹²⁾があり、混乱を来しているのが現状である。そこで、照射エネルギーの大きさを変化させ、レー

図 3 レーザー照射（低出力）象牙質表層の TEM 像（脱灰・UA/LC 染色）
 a. Er:YAG (60mJ) 弱拡大 b. Er:YAG (60mJ) ☆部の強拡大 コラーゲン線維の変性した無構造の一層が形成され正常部分との境界は明瞭である（矢印） c. CO₂ (1W) 弱拡大 d. CO₂ (1W) ☆部の強拡大 コラーゲン線維の変性した無構造の一層が形成されているが正常部分との境界は不明瞭である

ザー照射した象牙質表層の超微細構造学的性状変化，ならびに，それらの照射条件におけるレジンの接着性の変化を検討した。

1. 照射エネルギーの相違と象牙質表層の超微細構造学的変化

Er:YAG レーザーの低出力（60mJ/1 pps）照射象牙質表

図 4 熱発生による象牙質表層のコラーゲンタンパクの変性（マッソントリクローム染色）
a. Er:YAG (60mJ) b. CO₂ (1 W) 赤く染色された一層が熱変性層である（矢印）

図 5 レーザー照射（低出力）象牙質におけるレジンの接着強さ
レーザーエッチングのみ（レーザー照射面に直接ボンディング材塗布）におけるレジンの接着性は #600 研削面に比し有意に低下する

図 6 レーザー照射（低出力）象牙質とレジンの接界面の SEM 像
a. Er:YAG (60mJ) b. CO₂ (1 W) 温度負荷（サーマルサイクリング）試験後の接界面 構造欠陥あるいは変性層に歪が集中し接界面以外のところでレジンの接着が破壊されている（矢印）

層には、前述のごとくコラーゲン線維の高次構造が破壊された無定形の一層（3～4 μm）が生成される（図 3）。ところが、高出力（250mJ/1 pps）照射象牙質表層では、全く形成されず形態学的には正常象牙質と識別が一般的に困難であった（図 7）。一方、CO₂ レーザーの低出力（1 w/0.3sec）照射象牙質の表層においては、外形不明瞭で横紋構造が消失し変性したコラーゲン線維を有する無定形の一層（1～2 μm）が形成される（図 3）。しかし、高出力（3 w/0.3sec）照射では、横紋構造の存在するコラーゲン線維が断裂した様な像が一般的に観察されるが、そのような変性層は形成されなかった（図 7）。すなわち、レーザーの照射エネルギーが大きいとその影響は深部まで及ぶことなく表層に限局され、象牙質にあまりダメージを与えないようである^{13, 19)}。

図 7 レーザー照射（高出力）象牙質表層の TEM 像（脱灰・UA/LC 染色）
a. Er:YAG (250mJ) b. CO₂ (3 W) 表層にやや疎で細く毛羽立った線維が散見されるがほぼ正常に近い構造を保っている 低出力の場合（図 3 参照）と異なりレーザーの影響は表層に限局されている

図 8 Er:YAG レーザー照射された象牙質面におけるレジンの接着強さ
高出力照射ではレジンの接着強さは研削面に比べやや低下するものの低出力照射におけるそれより有意に高い

2. 照射エネルギーの相違とレジンの象牙質接着性

前述の超微細構造学的変化を勘案すると、高出力照射象牙質におけるレジンの接着性はあまり低下しないのではと予想される。そこで、照射エネルギーを変化させ (Er:YAG レーザー: 60mJ/10pps, 250mJ/10pps), レーザー処理された象牙質面においてレジンの接着試験 (Clearfil Megabond/Clearfil AP-X) を行った。低出力照射では有意に低下していたレジンの接着性であるが、高出力照射では研削面に比べやや低下するものの、低出力照射におけるそれより有意に高い結果が得られた (図 8)。すなわち、高出力でレーザー照射した象牙質におけるレジンの接着性はあまり低下しないことが判明した^{13, 19)}。

このように、レーザーの照射エネルギーが大きいと、一般的にその影響は表層に局限され、それに伴いレジンの接着性はあまり低下しないようである。その理由は想像の域を超えないが、低温熱傷と類似した現象と考えている¹³⁾。

レーザー照射象牙質におけるレジンの接着性を考察するときの留意点

レーザー照射された象牙質面におけるレジンの接着性について検討する場合、筆者の研究も含めた種々の研究を鑑みると、以下のような観点に留意しながら評価すると誤解がない。

1) 窩洞における接着試験

いわゆる C-factor^{20, 21)} を考慮した接着試験法を採用しているかがポイントである。平坦面より窩洞の方がレジンの重合収縮の影響は大きく、したがって、接着性の不安定な部分に歪が集中し、レジンが窩壁から剥離し易くなる。ゆえに、窩洞の方がレジンの接着性に大きく差異が現れるので、評価に誤解の生じることが少ない²²⁾。

2) 微小引張り試験

いわゆる引張り接着試験は、被着面に対し垂直に負荷をかけるため平坦面が必要とされる。平坦面は研削により容易に調製可能であるが、レーザー照射面は前述したごとく起伏が激しい。したがって、限りなく微小な面で接着試験を行うことが要求される¹⁵⁾。

3) 温度負荷試験や繰返し加重試験

初期接着性の評価も重要であるが、接着界面において構造欠陥や変性層など接着に不安定要素を抱える場合は接着耐久性試験も必須である。したがって、温度負荷 (サーマルサイクリング) 試験や繰返し荷重試験の併用が要求される^{7, 15)}。

4) 臨床応用可能な照射出力

痛みを伴うなど臨床応用不可の環境下で得られた実験結果でも、現象の解明や比較対照として用いることは非常に重要である。しかし、その結果のみで論理を展開しても、それは片手落ちというものである¹³⁾。

したがって、臨床応用可能な照射出力に設定された実験群も配置されていない限り、臨床的に正しく評価ができていない研究か疑問と考えるべきであろう。

結 論

痛みなどの観点より、臨床で実際に使用できる出力レベルのエネルギーでレーザー照射された象牙質面におけるレジンの接着性は低下する。臨床的には填塞したレジンが直ちに脱落するというレベルの問題ではないと思われるが、通常の回転切削器具により形成した窩洞におけるレジン修復と同等の接着耐久性は期待できそうにない。また、出力レベルを上げるとレジンの接着性は確かに上がるが、痛みが生じる、あるいはエナメル質には亀裂が入るなどの観点より臨床での使用には問題がある。

レーザー処理象牙質面に対し安定したレジンの接着を獲得するには、現段階では生じた構造欠陥や熱変性層をレジンの接着操作に先立って除去する必要がある。具体的には、リン酸エッチング剤および次亜塩素酸ナトリウム水溶液による溶解処理、あるいは、低速ラウンドバーで皮剥くような感覚で窩洞を一層削除するなど科学的根拠の取れた方策はないのが現状である^{8, 15)}。将来的には、これらの処理も含めレーザー専用の接着システムの開発が望まれる。

謝 辞

本研究遂行ならびに本論文作製にご協力いただきました広島大学大学院医歯薬学総合研究科顎口腔頭部医学講座 (保存修復学研究室) 播磨貴裕助手に感謝申し上げます。

本論文の要旨は、第 17 回日本レーザー歯学会学術大会 (2005

年10月29, 30日, 新潟)におけるシンポジウム「コンポジットレジン修復とレーザー」において発表した。

文 献

- 1) Steven RV, Jeremy LG, Joseph TW Jr: Shear test of composite to dentin: Er:YAG laser versus dental handpiece preparations. *Proc SPIE*, 2394: 223-228, 1995.
- 2) Visuri SR, Gilbert JL, Wright DD, et al: Shear strength of composite bonded to Er:YAG laser-prepared dentin. *J Dent Res*, 75: 599-605, 1996.
- 3) 榊原康智, 石丸和俊, 高水正明: Erbium:YAG レーザー照射象牙質への接着に関する研究. *日歯保存誌*, 41: 207-219, 1998.
- 4) Ceballos L, Toledano M, Osorio R, et al: Bonding to Er:YAG-laser-treated dentin. *J Dent Res*, 81: 119-122, 2002.
- 5) 播磨貴裕, 馬場奈穂子, 梶原靖代, 他: Er:YAG および CO₂ レーザー処理面における各種接着性修復材料の初期接着強さについて. *接着歯学*, 15: 348-349, 1997.
- 6) 日下輝雄: Er:YAG レーザーによって形成された窩洞の辺縁漏洩について 窩洞の位置と接着システムについて. *日歯保存誌*, 43: 221-238, 2000.
- 7) 播磨貴裕, 村上明延, 藤田裕樹, 他: レーザー処理象牙質におけるレジンの接着 第4報 接着耐久性について. *日歯保存誌*, 42(秋季特別号): 78, 1999.
- 8) Fujitani M, Harima T, Shintani H: Does Er:YAG or CO₂ laser ablation of dentin affect the adhesive properties of resin bonding systems? *Excerpta Medica International Congress Series*, 1248: 193-199, 2003.
- 9) 富士谷盛興: レーザー処理象牙質におけるレジンの接着—レーザーエッチングで, レジンは本当に接着するのか?—. 第4回日本歯科用 Nd:YAG, 炭酸ガスレーザー学会合同学術大会プログラム・講演抄録集: 49-50, 2004.
- 10) Melendez EJ, Arcoria CJ, Dewald JP, et al: Effect of laser-etch on bond strengths of glass ionomers. *J Prosthet Dent*, 67: 307-312, 1992.
- 11) 松本光吉, 中村幸生, 若林 始: Er:YAG レーザーによる窩洞形成に関する形態学的研究. *日歯保存誌*, 34: 729-733, 1991.
- 12) 山本憲廣: エルビウムヤグレーザー照射した象牙質とコンポジットレジンの接着性. *日歯保存誌*, 43: 1123-1131, 2000.
- 13) 富士谷盛興: CO₂ および Er:YAG レーザー照射象牙質面に対するレジンの接着特性. *日歯誌*, 17: 26, 2006.
- 14) Shintani H, Fujitani M, Harima T, et al: Studies on Laser Applications to Dental Hard Tissues. *Dentistry in Japan*, 39: 193(Abstract), 2003.
- 15) 新谷英章, 富士谷盛興, 播磨貴裕, 他: 歯牙硬組織切削用レーザーによる象牙質切削に関する研究. *日歯医学会誌*, 22: 62-69, 2003.
- 16) Van Meerbeek B, Inokoshi S, Braem M, et al: Morphological aspects of the resin-dentin interdiffusion zone with different dentin adhesive systems. *J Dent Res*, 71: 1530-1540, 1992.
- 17) Pashley DH, Ciucci B, Sano H, et al: Permeability of dentin to adhesive agents. *Quintessence Int*, 24: 618-631, 1993.
- 18) 中林宣男: 樹脂含浸層の機能について. *接着歯学*, 13: 8-13, 1995.
- 19) 播磨貴裕, 富士谷盛興: レーザー処理象牙質におけるレジンの接着性と界面の超微細構造—照射エネルギーの大きさの影響について—. *日歯誌*, 17: 37(抄), 2006.
- 20) Feilzer AJ, De Gee AJ, Davidson CL: Setting stress in composite resin in relation to configuration of restoration. *J Dent Res*, 66: 1636-1639, 1987.
- 21) 吉川孝子, 佐野英彦, 田上順次: 修復用コンポジットレジンの窩底象牙質に対する接着に及ぼす窩洞形態の影響. *接着歯学*, 14: 43-49, 1996.
- 22) 播磨貴裕, 富士谷盛興, 新谷英章: レーザー処理象牙質におけるレジンの接着—C-factor の影響について—. *日歯誌*, 15: 37(抄), 2004.