総説**REVIEW ARTICLE****エルビウムレーザー照射歯質とレジン系修復材料との接着**亀山 敦史¹, 加藤 純二^{1,2}¹ 東京歯科大学千葉病院 総合診療科² 東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科 摂食機能保存学講座 う蝕制御学分野

(平成 22 年 12 月 1 日受理, 平成 23 年 3 月 2 日掲載決定)

Resin Bonding to Erbium Laser-Irradiated Tooth StructuresAtsushi Kameyama¹, Junji Kato^{1,2}¹ Division of General Dentistry, Tokyo Dental College Chiba Hospital² Cariology and Operative Dentistry, Department of Restorative Sciences, Graduate School of Medical and Dental Sciences, Tokyo Medical and Dental University

(Received December 1, 2010, Accepted February 2, 2011)

要旨

1996 年, Er:YAG レーザーは齲蝕除去・窩洞形成が可能な歯科用レーザー機器として認可を受けた。以来, レーザー照射歯質と修復材料との接着について, 数多くの報告がなされている。しかし, エナメル質, 象牙質のいずれにおいても, 接着性や辺縁封鎖性への効果はむしろ非照射歯質に比べて低いとする報告が多いのが現状である。本論文では, これまでに報告された数多くの関連文献から Er:YAG レーザーの照射条件や接着システムが修復材料の接着性に及ぼす影響についてまとめ, よりよい条件での接着性を検討した。

キーワード: レジン接着, Er:YAG レーザー, Er,Cr:YSGG レーザー, コンポジットレジン, 接着強さ, エッチング

Abstract

In 1996, Er:YAG laser was approved as a medical device for removal of carious tooth structures and cavity preparation in Japan. Since then, many reports have been published about the adhesion of dental restorative materials to Er:YAG laser-irradiated tooth structures, and almost all of them suggest negative effects on both enamel and dentin. This review article demonstrates the influences of laser settings and adhesive systems, and determines how to adhere effectively to Er:YAG laser-irradiated tooth surfaces.

Key word: resin bonding, Er:YAG laser, Er,Cr:YSGG laser, resin composite, bond strength, etching

1.はじめに

現在の保存修復処置は、齲蝕に感染し再石灰化が期待できない部位のみを選択的に除去し、そこへ歯質接着性を有する修復材料を応用し、強固に接着させることで、齲蝕罹患部位を機能的かつ審美的に回復するという MI (Minimal Intervention) のコンセプト¹⁾に基づいている。したがって、修復処置において良好な臨床結果を得るためには、①どのような接着材料を、どのように用いるかということに加え、②いかにして使用材料にとって接着に有利な被着面を得るか、という2つのポイントを押さえておく必要があり、被着面性状に対する接着材料の選択とその応用法を誤ると、その修復は信頼性の低いものになる。

接着性材料による修復処置を前提とした Er:YAG レーザーの使用には、齲蝕除去・窩洞形成を前提としたものと、レーザーコンディショニングとしての使用を前提としたものの2つが考えられ、文献によってその目的が異なる。そのため、これまでに多数の文献が発表されているものの、コントロールの設定1つにしても全く統一性がなく、実際の臨床応用を考えた場合にどの意見を参考にしたらよいのか、迷ってしまうのが現状である。本稿では、Er:YAG レーザーを齲蝕除去、あるいはレーザーコンディショニングとして使用する場合の被着面性状の変化とレジン接着に与える影響、および接着材料によるレジンとの接着性の違いについて、できる限り要因別に比較できるようまとめた。なお、一部において Er,Cr:YSGG レーザーによるものも扱った。

2. Er:YAG レーザー照射による歯質の変化とレジン接着界面の特徴

2.1 エナメル質の変化

Er:YAG レーザーの励起する $2.94\ \mu\text{m}$ の波長は水の吸収波長 (約 $3.0\ \mu\text{m}$) に近似している。このため、エナメル質に対して照射すると、ハイドロキシアパタイトの OH⁻ 基に反応し、micro explosion (水蒸気の微小爆発) という現象がおこり、その結果歯質のハイドロキシアパタイトが粉碎される^{2,3)}。このため、照射表層は微細な凹凸状を呈し、小柱構造が明瞭に観察されるとともに、照射周囲に微小亀裂を生じる場合もある⁴⁻⁹⁾。200 mJ/pulse 以上の出力では、照射表層が一部溶解したような像が見られる⁸⁾。また、XPS による観察では、エナメル質に極少量含まれている有機成分の減少がみられる¹⁰⁾。したがって、レーザー照射のエナメル質では形態変化のみならず組成変化も生じている。

2.2 象牙質の変化

象牙質についても同様に、レーザー照射表層は微細な鱗片状の凹凸や微小亀裂が認められる (Fig.1)。特筆すべきは、その表層にスミヤー層を認めず、象牙細管が開口していることである^{4,8,11)}。また、ヒドロキシプロリン含有率の比較による生化学的手法¹²⁾、FT-IR による方法¹³⁾、XPS を用いた方法¹⁴⁾、マッソン・トリクローム染色による方法¹⁵⁾などで、レーザー照射象牙質表層には有機成分の変性が生じていることが報告されており、組織切片においてレーザー照射象牙質表層がトルイジン

Fig.1 SEM photomicrograph of ground and Er:YAG laser-irradiated dentin¹¹⁾. (a) SiC paper-ground dentin surface. Dentin tubules are completely covered with smear plugs (White arrowhead). (b) Er:YAG laser-irradiated dentin surface. Irregular and imbricate patterned surfaces can be seen. No smear layer is observed and the dentin tubules are clearly visible (Pointer). Peritubular dentin is more prominent than intertubular dentin. No signs of melting or carbonization were seen

ブルーやエオジンなどに濃染する現象^{16,17)}は、この変性によるものと考えられている。また、XPS 分析による Ca/P 比の低下¹⁴⁾や XRD 分析による結果¹²⁾から、レーザー照射はハイドロキシアパタイトなどの無機成分にも変化を与えることが知られている。なお、他のレーザーとは異なり、照射表層の耐酸性は得られない¹⁸⁾。

このように、レーザー照射歯質の表層はエナメル質、象牙質にかかわらず、通常の回転切削器具で形成された歯質とは形態的にも、組成的にも全く異なるものであることを認識しなければならない。

3. Er:YAG レーザーの各種照射条件による接着性の変化

Er:YAG レーザー照射を行うと非照射歯質に比べて接着性が向上するという報告^{19,20)}、同等とする報告²¹⁾、低下するという報告²²⁻²⁵⁾のいずれも存在する。この理由はレーザーの設定、使用した接着材料の違いだけでなく、非照射コントロール群の設定が耐水研磨紙、ダイヤモンドポイント、カーバイドバーなど文献によってまちまちであることや、用いた接着試験法の違い (剪断試験、引張り試験、微小引張り試験など) などいろいろな要因が考えられる²⁶⁾。しかし残念ながら、エナメル質、象牙質を問わず、Er:YAG レーザーの照射は接着性を低下さ

せる, とする文献が最も多い.

以下に, レーザーの設定が接着性に及ぼす影響についてまとめた.

3.1 先端エネルギーおよび出力の影響

過去に報告された論文をみると, エナメル質では意外にも出力が小さいほど接着強さも低かった, との報告が多い. Başaran ら²⁷⁾, および Berk ら²⁸⁾ は, Er,Cr:YSGG レーザーを用い, 繰り返しパルス数やパルス幅, 照射時間などを一定にした状態で, 0.5 W, 0.75 W, 1 W, 1.5 W, 1.75 W および 2 W の出力で照射したエナメル質へのレジ接着を剪断接着試験にて比較したところ, 出力が小さいほど接着強さも低かった, と報告している. Er:YAG レーザーで行った Delfino ら²⁹⁾ も, 使用する接着システムによっては高出力のほうが有意に高い引張り接着強さを示したと報告している.

ここで注意しなければならないのは, Başaran ら²⁷⁾, および Berk ら²⁸⁾ の研究が剪断接着試験によるものである, という点である. 出力が大きくなると蒸散深さも増加するため³⁰⁻³³⁾, 接着界面は周囲歯質よりも低い位置に設定され, また照射表面の凹凸も増加することになる. このような歯質に対し, 通法で剪断接着試験を行っても, 剪断応力は接着界面に作用せず, むしろ接着させたレジン体に剪断応力が集中してしまう²⁶⁾. したがって, 見かけの接着強さが増してしまったのは, 実験手法そのものに問題があったとも考えられる. このような理由で, レーザー照射歯質への接着強さの測定には, 剪断接着試験より引張り接着試験を採用すべきと考えている.

一方, 象牙質では出力が高くなるほど, 接着強さは向上するとの報告³⁴⁾, 接着強さが低下するとの報告³⁵⁾ の両方が存在する.

3.2 繰り返しパルス数

繰り返しパルス数もまた接着強さに影響を及ぼす³⁶⁻⁴¹⁾. Aizawa らは照射エネルギーをいずれも 1 W に固定し, 出

Fig.2 Influence of laser setting on tensile bond strength (Mean $\pm$ S.D., MPa; $n = 8$)⁴⁰⁾. Total energies were set at 1 W in each group. Mean values designated with the same letter are not significantly different ($p > 0.05$). The results showed that a higher pulse frequency decreased bond strength even if the total energy was unified.

Fig.3 Mean nano-hardness values (mgf/μm²) of resin-dentin interfacial areas in Er:YAG laser-irradiated and non-irradiated group⁴²⁾.

*: $p < 0.05$, NS: no statistical significance ($p > 0.05$).

Fig.4 Cross-sectioned SEM photomicrographs of 4-META/MMA-TBB resin-dentin interface after being decalcified and deproteinized⁴²⁾. (a) Unlased dentin. The 2-3 μm-thick resin-impregnated dentin layer (RIDL) is identified. (b) Er:YAG-lased dentin. Thick RIDL is identified.

力と繰り返しパルス数を変化させた 3 条件にて象牙質へのレーザー照射を行い, 4-META/MMA-TBB レジン (スーパーボンド C&B, サンメディカル) を用いて引張り接着強さを比較したところ, 100 mJ/pulse-10 pps > 50 mJ/pulse-20 pps > 33 mJ/pulse-30 pps であったと報告している⁴⁰⁾ (Fig.2). 接着界面近傍の微小硬さを計測した結果, 100 mJ/pulse-10 pps では接着界面直下 5 μm 付近と 10 μm 付近の微小

硬さが 70 ~ 75 mgf/ μm^2 でほぼ同等なのに対し、他の 2 条件では 10 μm 付近の微小硬さが 100 mgf/ μm^2 程度あり、5 μm 付近 (70 ~ 75 mgf/ μm^2) に比べて明らかに高かったことから、繰り返しパルス数が増加するとレジンの浸透が阻害されるものと考えられる⁴²⁾ (Fig.3, Fig.4).

3.3 パルス幅

レーザーのパルス幅もまた、接着強さに影響すると報告されている。Firat ら⁴³⁾ は、エナメル質に対して 120 mJ, 10 Hz, 注水量 5 ml/min の条件下でパルス幅を 50 μs , 100 μs , 150 μs , 300 μs に変化させてレーザーを照射し、リン酸エッチング後に XP Bond (Dentsply, DeTrey GmbH, Konstanz, Germany; 日本未発売) を接着、微小引張り接着強さを検討したところ、パルス幅が大きいほど接着強さは低くなったと報告している。300 μs の群では他の群に比べてエナメル質で破断する確率が多かったことから、パルス幅を大きくするとレーザー照射によるエナメル質のダメージが大きくなり、エッチングを行ってもその影響を除外できなくなるものと思われる。

また、彼らは象牙質に対しても同様の検討を行っている (80 mJ, 10 Hz, 注水量 5 ml/min; パルス幅 50 μs , 100 μs , 150 μs)⁴³⁾。エナメル質と違い、比較的パルス幅の大きい 150 μs の群で最も高い接着強さを示し (平均 37.3 MPa), その値は非照射のコントロール群 (平均 31.9 MPa) より大きかったと報告している。XP Bond はボンディング材成分にナノサイズのシリカ系フィラーが比較的高密度に含有されており、ダイヤモンドポイント切削象牙質面への初期接着性は比較的良好であることが知られている⁴⁴⁾。この接着界面を TEM (透過電子顕微鏡) で観察すると、フィラーの侵入はレジントラップ内にまで及ぶ一方、樹脂含浸層内への侵入は認められない。Firat らの報告⁴³⁾ では界面の TEM 観察を行っていないため詳細は不明であるが、レーザー照射によるダメージが大きいであろう 150 μs の群では、むしろダメージを受けた部分にナノフィラーが侵入しやすくなり、象牙質の補強効果をもたらした可能性もある。パルス幅が接着強さに与える影響については報告が少なく、今後のさらなる報告が望まれる。

3.4 距離

レーザーのチップ先端から切削面までの距離の設定については、各レーザーによって異なってくるものと思われるが、一般的にはエナメル質、象牙質にかかわらず、距離が離れるほど接着強さが向上すると報告されている⁴⁵⁻⁴⁸⁾。しかしながら、距離の増大は照射部位に及ぼすパワーを減弱させるのみならず、その影響がより広範囲に及ぶことにもなる。歯質の除去効率や安全面を考慮すると、むやみに照射距離を遠ざけるのはできるだけ避けたほうが良いと思われる。

3.5 照射角度

Er:YAG レーザーで歯質を切削する場合、切削面に直角にチップを位置づけるより、角度をつけたほうが歯質除去効率は高い。これは、跳ね返ってきた切削片がレーザー光を遮ってしまうためである⁴⁹⁾。また、こうする

ことで切削片によるチップの損傷も防止できる。また、このテクニックを応用しても、接着強さには影響しないと言われている⁵⁰⁾。

3.6 注水量

Er:YAG レーザー、および Er,Cr:YSGG レーザーの最大の特徴は、回転切削器具と同様、注水下での使用ができることである。このことで、熱の発生を最小限に抑えることができる^{4,51)}。注水量は歯質の除去効率に影響するため⁵²⁻⁵⁴⁾、日常臨床では注水量をうまくコントロールしながら使用することも多いと思う。Colucci らは、注水量と接着強さとの関係を検討したところ、エナメル質では 1.0 ml/min, 1.5 ml/min, 2.0 ml/min の 3 群間に有意差を認めなかったが、象牙質では注水量が多いと接着強さも低下する傾向にあったと報告している⁵⁵⁾。彼らはこの理由について、注水量が多いほど象牙質除去効率も高くなり、これが接着強さに影響したのではないかと推察している。しかし、注水量と切削効率に関しては、注水量が 1.0 ml/min から 2.0 ml/min に増えると逆に象牙質除去効率が低くなるという報告もある⁵²⁾。したがって、注水量と接着強さに関してはさらなる検討が必要であろう。

4. 被着面への接着技法がレジンの接着性に及ぼす影響

4.1 歯質接着性材料の分類と特徴

歯質接着性材料は、他の接着材料にない様々な特徴を有する。まず、被着体の特殊性である。無機成分を主体とするエナメル質と、コラーゲンをはじめ有機成分を多く含む象牙質という、全く性質の異なる 2 つの被着体に対し、それぞれに接着性を発揮しなければならない。また、口腔内という特殊な環境下で用いられるため、生体、特に周囲組織や歯髄への影響を考慮した接着操作が求められる。このような歯質への良好な接着には、①エッチング、②プライミング、③ボンディングという 3 つの要素が不可欠である。近年では、より簡便に、短時間で接着操作を行うことができるような歯質接着性材料も数多く開発されている。以前はレジン系の歯質接着性材料を世代別に分類するのが一般的であったが、現在では Van Meerbeek らにより提唱された臨床ステップ数、および酸処理後の水洗の有無で分類する方法が一般的である^{44,56-58)}。(Fig.5)

Fig.5 Classification of contemporary adhesive systems and their application steps.

4.1.1. 3ステップ エッチ&リンスシステム (3-E&R)

歯質への接着に必要な3つのプロセス(エッチング、プライミング、ボンディング)をすべて別々に行うものである。このため、臨床ステップが多く、必要な操作時間も長くなるのが短所であるが、エナメル質、象牙質のいずれに対しても非常に高い接着強さを得ることができるのが最大の特徴である。

4.1.2. 2ステップ エッチ&リンスシステム (2-E&R)

脱灰処理後の水洗後、乾燥をプロットドライにとどめ、ジメタクリレートなど疎水性の強いモノマー、HEMAなどの親水性モノマー、重合開始剤およびエタノールやアセトンなどの溶媒を混合したボンディング材を用いることで、プライミングとボンディングを同時に行う、いわゆるウェットボンディング法によるシステムである。Kanca⁵⁹⁾らがこの方法を提唱した後、米国などではかなりこのシステムが普及したが、その後長期耐久性に不安のあるシステムであることが判明し^{58,60)}、近年では使用頻度が減少してきている。

4.1.3. 2ステップ セルフエッチングシステム (2-SEA)

1990年代初頭に日本で開発されたシステムである。プライミング処理材にリン酸基(MDP, phenyl-P など)やカルボキシル基(4-META, 4-AET, MAC-10 など)を含む酸性の機能性モノマーを配合することで、プライミングとエッチングの効果を同時に得るものである。エッチングとプライミングを同時に行うため、脱灰の最前線にまで機能性モノマーが確実に到達する。したがって、臨床上のエラーが少なく、非常に信頼性の高いシステムである⁶¹⁾。また一部の機能性モノマーは歯質のカルシウムイオンとの吸着能が強く⁶²⁾、これが安定した接着耐久性にも寄与していると考えられている⁶³⁾。

4.1.4. 1ステップ セルフエッチングシステム (1-SEA)

エッチング、プライミング、ボンディングの3プロセスを同時に行ってしまうものである。このため、非常に操作時間が短く、またステップ数も少ないことから一見テクニカルエラーが少なそうであるが、実際にはボンディング材成分に含まれる溶媒のコントロールが難しい⁶¹⁾。3-E&Rや2-SEAに比べて重合率が低く^{64,65)}、このため長期的な接着性には不安が多い^{66,67)}。

なお、セルフエッチングシステムでも、そのpHは製品により異なり、接着界面の性状も全く異なったものになる。したがって、pHが1以下の強酸タイプ(Adper Prompt L-Pop など)、pHが1.5付近のミディアムタイプ(AdheSE, Xeno など)、pHが2程度、またはそれ以上のマイルドタイプ・ウルトラマイルドタイプ(クリアフィルトライエスボンド、Gボンドプラス、AQボンドSP など)に細分化される^{44, 61, 68)}。特に、ウルトラマイルドタイプのものは、接着界面を透過電子顕微鏡(TEM)で観察しても樹脂含浸層はほとんど観察されず⁶⁸⁾、その接着性は機能性モノマーと被着面のカルシウムイオンとの化学的な結合で発揮されるといわれている^{62,69)}。

4.2 接着システムの選択による接着性の相違

現在、種々ある接着システムの中において最も信頼性が高いといわれているのが、3-E&Rとマイルドタイプの2-SEAである^{58,61)}。3-E&Rについては、エッチングによりエナメル質の処理表面にエッチドポケットが形成され、ここにボンディング材が浸透・硬化することで確実なメカニカルリテンション効果が得られる^{70,71)}。一方、マイルド2-SEAではリン酸エッチングだけでなく、その後の水洗・乾燥も不要であるため、水分のコントロールなど術者のテクニックに起因する誤差が生じにくい⁶¹⁾。さらに、この両者はボンディング材成分に溶媒を含まないため、ボンディング材自体の重合率も高い^{64,65)}。したがって、3-E&Rと2-SEA、中でもOptiBond FL(Kerr, 日本未発売)とクリアフィルメガボンド(クラレメディカル; 海外名 Clearfil SE Bond)は『ゴールドスタンダード』の接着システムと呼ばれている⁷²⁾。

一方で、2-E&Rと1-SEAについては、現在のところその信頼性においてあまり高い評価が得られていない。これは前述のように、ボンディング材成分に含まれる溶媒の残留が重合率を低下させ、これがひいては長期的な接着界面の劣化をもたらすためである^{58,60,73)}。

ところが、Er:YAGレーザー照射歯質に対する接着ではこの一般的な認識とは異なる評価がしばしば見られる。以下に、各種接着システムによるEr:YAGレーザー歯質へのレジン接着性について示す。

4.2.1. Er:YAGレーザー照射エナメル質への接着

De MunckらはEr:YAGレーザー照射エナメル質にOptiBond FL、クリアフィルメガボンドをそれぞれ接着させたところ、両者の接着強さはほぼ同等であり、レーザー非照射エナメル質への接着強さに比べて低かったと報告している⁷⁴⁾。Vivan Cardosoらも、Er,Cr:YSGGレーザー照射エナメル質に対してOptiBond FL、クリアフィルメガボンド、強酸タイプの1-SEAであるAdper Prompt L-Pop(3M ESPE)、そしてウルトラマイルドタイプの1-SEAであるクリアフィルトライエスボンド(クラレメディカル)の4種接着材料を応用し、接着強さを比較したところ、非照射エナメル質ではOptiBond FL(平均45.2 MPa)、クリアフィルメガボンド(38.8 MPa)、Adper Prompt L-Pop(29.6 MPa)、クリアフィルトライエスボンド(25.3 MPa)の順に高かったのに対し、レーザー照射エナメル質ではクリアフィルトライエスボンドが最も高い接着強さを示し(22.6 MPa)、以下OptiBond FL(20.5 MPa)、クリアフィルメガボンド(15.1 MPa)、Adper Prompt L-Pop(7.9 MPa)の順であったと報告している⁷⁵⁾。

われわれはクリアフィルメガボンドと、3種類のウルトラマイルドタイプの1-SEA(AQボンドプラス、サンメディカル; G-Bond, ジーシー; クリアフィルトライエスボンド, クラレメディカル)を比較したが⁷⁶⁾、4群間に有意差を認めなかった。また、いずれの材料もレーザー照射・非照射の間に有意差を認めなかった(Fig.6)。

以上の結果から、Er:YAGレーザー照射エナメル質への接着強さは非照射エナメル質に対してウルトラマイルドタイプの1-SEAを接着させた場合とほぼ同程度であ

Fig.6 Tensile bond strengths of four adhesives to Er:YAG laser-irradiated and non-irradiated enamel (Mean ± S.D., MPa; n = 10)⁷⁶⁾. There is no significant difference among four adhesives in Er:YAG laser-irradiated group ($p > 0.05$). AQP: AQ Bond Plus (Sun Medical), GB: G-Bond (GC), CTS: Clearfil S³ Bond (Kuraray Medical), CMB: Clearfil Megabond (Kuraray Medical)

Fig.7 Tensile bond strengths of four adhesives to Er:YAG laser-irradiated and non-irradiated dentin (Mean ± S.D., MPa; n = 10)⁷⁹⁾. Mean values designated with the same letter are not significantly different ($p > 0.05$). AQ Bond Plus showed the highest tensile bond strength among four adhesives in the Er:YAG laser-irradiated group ($p < 0.05$). AQP: AQ Bond Plus (Sun Medical), GB: G-Bond (GC), CTS: Clearfil S³ Bond (Kuraray Medical), CMB: Clearfil Megabond (Kuraray Medical)

り、接着システムの影響は比較的少ないものと思われた。言い方を変えれば、どの材料を用いたとしても、一応合格点程度の接着性は得られる可能性が高いが、非照射エナメル質に対して OptiBond FL を接着させたときのような絶対的信頼のおける接着状態は得られない、ということになる。

なお、エッチ&リンスシステムにおけるエッチングの是非については後述する。

4.2.2. Er:YAG レーザー照射象牙質への接着

De Munck らは OptiBond FL とクリアフィルメガボンドを用い、Er:YAG レーザー照射象牙質に対する微小引張り接着強さを比較した。その結果、Er:YAG レーザー照射象牙質への接着強さはどちらの材料を用いた場合もダイヤモンドポイント切削象牙質に比べて低かったと報告している⁷⁴⁾。同様に、de Oliveira らも 2-SEA3 種類 (Tyrian SPE+One-Step Plus; クリアフィルメガボンド; ユニフィルボンド, ジーシー) と 2-E&R1 種類 (シングルボンド) を用いて微小引張り接着強さを測定し、いずれも耐水研磨紙 (#600) 研削象牙質面に比べて接着強さが低く、またレーザー照射群ではこの 4 材料間に有意差を認めなかったと報告している⁷⁷⁾。Vivan Cardoso らはエナメル質での報告と同じ 4 種材料 (OptiBond FL, クリアフィルメガボンド, Adper Prompt L-Pop, クリアフィルトリエスボンド) を用いて Er,Cr:YSGG レーザー照射象牙質面への接着強さを比較したところ、OptiBond FL, クリアフィルメガボンド, クリアフィルトリエスボンド, Adper Prompt L-Pop の順に接着強さが高く、この順序はダイヤモンドポイント切削面と同様であった。しかし 4 材料のいずれについても、レーザー照射象牙質面への接着強さはダイヤモンドポイント切削面に比べて有意に低いものであったと報告している。

Fig.8 Viscosity of three 1-SEA adhesives and one 2-SEA primer/adhesive⁷⁹⁾. 1-SEAs showed the lower viscosity than 2-SEA. The results suggested that the viscosity of the adhesive is one of the factors that influences the bond strengths to Er:YAG-lased dentin. AQP: AQ Bond Plus (Sun Medical), GB: G-Bond (GC), CTS: Clearfil S³ Bond (Kuraray Medical), CMB: Clearfil Megabond (Kuraray Medical)

これらの報告にあるように、残念ながら Er:YAG レーザー照射象牙質に対するレジンの接着性は非照射象牙質に比べて明らかに低い。この原因についてはいくつかの要因が関与しているものと思われるが、われわれはボンディング材の浸透を高めることで接着強さを多少改善できるのではないかと考え、Er:YAG レーザー照射象牙質に対して、エナメル質と同様の 4 材料を用いて Er:YAG レーザー照射象牙質に対する引張り接着強さを検討した。その結果、最もボンディング材の粘性が低い AQ ボ

ンドプラスで最も高い接着強さを示した。この値は耐水研磨紙 (#180) で研削した象牙質にクリアフィルメガボンドを接着させたものに比べ若干低いものの、統計学的には有意差を認めなかった (Fig.7, Fig.8)⁷⁹⁾。

実際の臨床において、エナメル質、象牙質のそれぞれに異なる接着システムを使うことは不可能である。したがって、Er:YAG レーザーで齲蝕除去・窩洞形成を行った窩洞に対するコンポジットレジン修復においては、マイルドタイプ、あるいはウルトラマイルドタイプの 1-SEA、なかでも粘性が低いタイプのものを選択するのが現状では望ましいのではないかと考えている。

4.3 レーザー照射歯質にエッチング処理は必要か？

前述のように、日本では 1990 年代初頭から、2 ステップのセルフエッチングシステムが広く普及した。一方、ほぼ時期を同じくしてウェットボンディングテクニックを併用する 2 ステップのエッチ & リンスシステムが開発され⁵⁹⁾、欧米をはじめ海外ではこちらのシステムが広く普及した。このような歴史的背景の違いから、日本では齲蝕除去・窩洞形成を前提とした Er:YAG レーザーの使用に関する研究が数多く行われたのに対し、海外ではリン酸エッチングの代用、つまりエナメル質、象牙質を問わず、レーザーコンディショニング (スミヤー層の除去) としての Er:YAG レーザー応用を前提とした研究が数多く見られる。

したがって、本項はあくまで「エッチ & リンスシステム」におけるエッチングの是非について述べたものであり、セルフエッチングシステムに関するものは含まないことをご理解いただきたい。

4.3.1. エナメル質

数ある論文の中でも、比較的信頼性が高いと思われる引張り試験法を採用して検討したものを抽出してみると、それらのほとんどは、「Er:YAG レーザー照射したエナメル質であっても、エッチ & リンスタイプのボンディング材を用いる場合にはリン酸エッチングを行うべきである」という結論であった^{74,80-82)}。またリン酸の処理時間を延長させることにより接着強さが向上する、との報告もある⁸³⁾。ただし、いずれの文献においても、Er:YAG レーザー照射後リン酸処理を行ったとしても、その接着強さは非照射エナメル質へのそれより有意に低い。レーザー照射エナメル質へのレジジン接着では、接着試験時にエナメル質内部で破断する確率が多い^{74,75)}ことから、照射により低下したエナメル質そのものの機械的性質低下が接着強さに反映されているものと考えられる⁶⁻¹⁰⁾。

4.3.2. 象牙質

われわれは 4 種類の酸処理材 (37% リン酸, 65% リン酸, 10% クエン酸, 10% クエン酸 + 3% 塩化第二鉄) にてエッチング処理したウシ象牙質に 4-META/MMA-TBB レジン (スーパーボンド C&B, サンメディカル) を接着させ、引張り接着強さを比較した⁸⁴⁾。その結果、レーザー照射 + エッチング処理では平均 5.5-7.7MPa 程度の接着強

さしか得られず、むしろレーザー照射後、エッチング処理を行わずに接着させた群で高い接着強さを示した (平均 11.1 MPa)。またその接着界面を走査電子顕微鏡で観察したところ、エッチング処理をしていないにもかかわらず、非常に厚い樹脂含浸層様構造物を認めたことから、4-META/MMA-TBB レジンはレーザー照射により多孔性で脆弱になった象牙質層に浸透し、機械的に結合したものと思われた。

しかしながら、われわれの得た知見とは反対に、エッチ & リンスタイプのボンディング材を用いる場合にはエッチングをしたほうがむしろ高い接着性が得られる、とする論文が多い^{74,85,86)}。これは、使用した接着材料の違いが影響しているものと考えられる。つまり、われわれの実験系では、一般には化学重合型のスーパーボンド C&B を筆積み法にて応用したため、先に塗布したモノマーの浸透性が非常に高く、レーザー影響層の比較的深部にまでレジジンが浸透した可能性があったこと、そして化学重合であったために、完全重合までに長時間を要し、この間に徐々にレジジンが浸透することができたことが相違の理由であろうと考えている。実際に、われわれが SEM 観察により得た樹脂含浸層様構造は 10 μm 以上の非常に厚いものであったが^{42,84)} (Fig.4)、一般のレジジン接着システムを用いた場合には数 μm 程度の樹脂含浸層様構造しか観察できず、その直下に厚いレーザー影響層が観察できる⁸⁵⁻⁸⁷⁾。

なお、リン酸での処理時間については影響を及ぼさないとする論文が多い^{84,88)} が、Chousterman らは、15 秒、30 秒、60 秒の間に有意差はないものの、90 秒処理すると接着強さが上昇したと報告している⁸⁹⁾。ただし、彼らは接着試験後の破断面観察や、接着界面の観察などを行っておらず、この理由については明らかでない。結論として、エッチ & リンスタイプの接着システムを用いる場合にはエッチング処理をすべきであるが、それでも回転切削器具により形成した被着面ほどの高い接着強さは得られないことを覚悟しなければならない。

5. レーザー影響層の存在とその対応

前述のように、Er:YAG レーザーを象牙質に照射した際の最大の問題点は、照射表層に構造欠陥部²⁶⁾、変性層¹²⁾、あるいはレーザースミヤー層³⁰⁾と呼ばれる、厚さ 10 μm 以上の脆弱な層が形成されてしまうことである¹⁵⁻¹⁷⁾ (本稿ではレーザー影響層と呼ぶことにする)。同部は鱗片状のポーラスな構造を呈しているため^{4,11,90,91)}、レーザー非照射象牙質に比べて機械的性質は低い^{30,92)}。正常な象牙質コラーゲンは本来不溶性であるが、レーザー影響層のコラーゲンはその多くが変性し、可溶性タンパク質に変質しているものと思われる。このため、レーザー影響層に残存するコラーゲンは歯質中に含まれる水分によって長期的に溶解され、接着性の経時的低下を招いてしまうことになる⁸⁹⁾。また、たとえレーザー影響層深部にまで接着材料が浸透・硬化したとしても、非照射歯質で得られるほどの接着向上効果は認められない。現在のところ、レーザー影響層への対応としては、以下に示す方法が考案されている。

Fig.9 Comparison of the mechanical removal method of laser-affected layer on tensile bond strength⁹⁴⁾. Mean values designated with the same letter are not significantly different ($p>0.05$).

5.1 機械的除去による方法

天谷らは、レーザー照射象牙質表層にスプーンエキスカベーター、ポリッシングブラシ、超音波スケーラーを応用して機械的除去を試みたところ、接着強さが有意に向上したと報告している⁹⁴⁾ (Fig.9). また Eguro らも、エアースケーラーや重炭酸ナトリウムを用いたエアークパウダーポリッシングを5秒間行くと接着強さが向上することを報告している⁹⁵⁾. さらに、スプーンエキスカベーターによる除去と30秒間のリン酸エッチングを併用することで接着強さを向上させることができたとする報告もある⁹⁶⁾. レーザー影響層は齶蝕検知液で染色されるため、染色の度合いを指標に除去することが可能である⁹⁷⁾. レーザー影響層をこれらの方法で機械的に除去する場合は、これらの方法はエナメル質に適用しても同様の効果があり⁹⁸⁾、比較的簡便で確実に接着強さを向上させることができるが、特にエアースケーラーや超音波スケーラーを用いる方法は患者の痛みや恐怖心を伴うことも考えられるため、注意も必要である。

なお、セルフエッチングプライマーを被着面に擦り塗りしながら応用する、いわゆるアクティブ処理やアジェーション法と呼ばれる方法は、被着面表層のスミヤー層の溶解が促進され、より高い接着性が得られることが知られている^{99,100)} が、レーザー照射面にこの方法を応用しても効果は認めないとの報告がある¹⁰¹⁾.

5.2 化学的除去による方法

Er:YAG レーザー照射象牙質に37%リン酸(Kエッチャント、クラレメディカル)を30秒間、さらに次亜塩素酸ナトリウムゲル(ADゲル、クラレメディカル)を90秒間応用した後セルフエッチングプライマー、ボンディングレジンを応用すると接着強さが向上するとの報告がある¹⁰²⁾. ただし、次亜塩素酸ナトリウムのような酸化剤を被着面に応用すると、接着システムによっては重合阻害を招くことも考えられるため¹⁰³⁾、応用時には注意が必要となる。

Fig.10 Effect of HEMA and glutaraldehyde (GA) pre-treatments on tensile bond strength of 4-META/MMA-TBB resin to Er:YAG laser-irradiated, heated and normal dentin^{105,109,110)}. HEMA pre-treatment contributed to enhance the bond strength in each group ($p<0.05$). In normal dentin, GA pre-treatment significantly reduced the bond strength ($p<0.05$). In contrast, GA pre-treatment enhanced the bond strength to both laser-irradiated and heated dentin ($p<0.05$).

5.3 浸透性向上の試み

厚いレーザー影響層に対し、可及的に深部までボンディングレジンを浸透させる試みに関する論文は比較的多い。非常に浸透性の高いモノマーである HEMA を前処理剤として用いることで、接着強さが向上することが知られている^{104,105)} (Fig.10).

リン酸エステル系の機能性モノマーである MDP はハイドロキシアパタイトへの吸着能が高く⁶²⁾、アパタイト中のカルシウムイオンと化学的に結合し、カルシウム塩を形成する¹⁰⁶⁾. また、プライマーの溶媒成分として用いることのあるアセトンは被着面への浸透性向上に関与するとともに、水の代わりに溶媒として用いることで MDP のリン酸基が遊離しにくくなるため、脱灰能を抑制する効果も期待できる。山本は、220 mJ の条件で 10% MDP-35% HEMA アセトン溶液をプライマーとして使用し、クリアフィルメガボンドのボンディングレジンを応用すると、非常に高い強さを得ることができたと報告している³⁵⁾. また石丸らは、phenyl-P 含有 HEMA 溶液と MDP 含有 HEMA 溶液のプライマー効果の比較を行い、MDP 含有 HEMA 溶液のほうが高い接着向上効果を示したと報告している¹⁰⁷⁾. phenyl-P は MDP と同じくリン酸エステル系の接着性モノマーであるが、MDP に比べてアパタイト吸着能が低く、水に溶けやすいことが接着性の違いに影響しているのかもしれない。

5.4 化学的改質による方法

レーザー照射象牙質同様、象牙質への加熱処理は接着強さを有意に低下させる^{108,109)}. これは、象牙質タンパ

クの熱変性による影響と考えられるが、水沼は、60℃水中で15分加熱した象牙質に対し、グルタルアルデヒド(GA)溶液の追加処理を行うと、非加熱象牙質と同等の接着強さにまで回復したと報告している¹⁰⁸⁾。これをヒントに、われわれはレーザー照射象牙質を用いて同様の実験を行った。その結果、3%塩化第二鉄添加10%クエン酸溶液(スーパーボンド処理液グリーン、サンメディカル)によるエッチング後に25% GA溶液で10分間の改質処理を行うと、高い接着強さを示した¹¹⁰⁾ (Fig.10)。そのほかにも、5%または10%のGA水溶液、あるいは5%GA含有35% HEMA水溶液(Gluma Disensitizer, Heraeus Kulzer)で処理後水洗し、クリアフィルメガボンドを用いて接着すると接着強さの回復を認め、さらにある程度の接着耐久性も得られたとの報告がある^{111,112)}。なお、Er:YAGレーザー照射後に5% GA処理を行っても歯髄へのダメージは認めないとの報告がある¹¹³⁾。

5.5 低出力での追照射による方法

レーザー影響層は、出力が高くなるほどその厚みが増加する¹²⁾。しかし低出力での照射では、効率的な歯質除去を行うことができない¹¹⁴⁾。そこで、表層の接着環境を整える目的で、高出力での照射後に低出力の追照射を行う試みも報告されている¹¹⁵⁻¹¹⁷⁾。特に、200 mJでの照射後に30~90 mJでの追照射を行った象牙質に対し、10% MDP-35% HEMA アセトン溶液でブライミング処理、その後クリアフィルメガボンドを応用すると、非常に高い接着強さが得られたとの報告がある¹¹⁵⁾。井原らは、各種照射方法によるレーザー影響層の厚みの変化を透過電子顕微鏡(TEM)にて調べた結果、高出力での照射後に低出力での追照射を行うとレーザー影響層の厚みを有意に減少できるとの報告がある¹⁶⁾。ことから、この効果はレーザー影響層の厚みを減少させたうえで、非常に歯質浸透性の高いプライマーを用いた結果得られたものと推測できる。なお、低出力での追照射は象牙質のみならず、Er:YAGレーザー照射エナメル質に対するレジンの接着強さを向上させる効果もある¹¹⁸⁾。

6. 齲蝕除去法としてのEr:YAGレーザー

冒頭に述べたように、現在のMIコンセプトでは感染部分のみを過不足なく除去することが推奨される。従来のMIコンセプトでは、アシッドレッドのプロピレングリコールまたはポリプロピレングリコール溶液を用いて齲蝕象牙質の第一層のみを染色し、これをガイドとしながらスプーンエキスカベーターやスチールラウンドバーで除去することが推奨されている¹¹⁹⁾。また近年ではレーザーによる歯質除去法以外に、齲蝕象牙質第2層を削らない程度の材質を用いたバー(スマートブレップなど)やカリソルブなどの回転切削器具を使わない齲蝕除去法などが開発されている¹²⁰⁾。これらの方法は、従来の回転切削法の欠点でもあった、不快音の発生や切削時疼痛が少ないことから、歯科治療に恐怖心の強い患者に対する応用が期待される。

日本国内では未認可であるが、レーザー蛍光強度測定器(DIAGNOdent, KaVo)¹²¹⁻¹²³⁾を内蔵し、齲蝕罹患歯質

を感知しながら当該部を除去できるEr:YAGレーザー(KEY Laser III, KaVo)が開発され、海外ではすでに臨床応用が始まっている。しかしながら、このレーザー装置を用いた齲蝕除去法は約40%の歯に取り残しが見られる一方で、逆に過剰除去している部分もあることがマイクロCTを用いたミネラル密度測定の結果から明らかになっている¹²⁴⁾。レーザーによる歯質除去法に関しては、レーザー機器の相違や照射方法(コンタクト法、ノンコンタクト法)などにより異なってくるが、レーザーがエナメル質から象牙質に及んだ途端、急激に除去効率が上昇し、過剰な除去が生じやすい。レーザー照射後の齲蝕罹患歯質の取り残しについては、齲蝕検知液による染色やDIAGNOdentの測定値を指標にして^{97,125)}、齲蝕罹患象牙質の残存部とレーザー影響層をスプーンエキスカベーターで注意深く除去するのが現状では最も望ましいと考えている⁹⁷⁾。しかしながら、過剰除去の問題に対しては現在のところ対応策がないため、今後はMIのコンセプトに基づいた新たな対応を考える必要であろう。

7. 結語

Er:YAGレーザーは1996年、窩洞形成に用いることのできるレーザーとして、日本での販売が開始された。この時われわれは、これからの歯科医療が大きく変わっていくかもしれないと心が躍ったことを今でも覚えている。以来14年間、MI修復における有効な齲蝕除去法としての確立を目指し、国内外の多くの研究者がEr:YAGレーザーの効果的な使用法を模索したにも関わらず、いまだEr:YAGレーザーそのものの持つ欠点を補うことができないのが現状である。しかしながら、歯髄にさほど大きなダメージを与えず、患者に与える不快感や恐怖感を少なくできる利点は大いなる魅力であることは間違いない。したがって、今後はMIの観点からEr:YAGレーザーの齲蝕除去に関する齲蝕除去法の再検討、ならびに修復物との接着に関するさらなる研究が喫緊の課題と思われ、あわせて臨床応用後の長期的経過報告も待ち望まれる。最後に、Er:YAGレーザーを用いた齲蝕除去時は、回転切削器具により得られた被着面での常識がほとんど通用しないことを認識し、使用するレーザーや接着材料の性質を十分熟知した上で臨床に応用されることを望みたい。

参考文献

- 1) M.J. Tyas, K.J. Anusavice, J.E. Frencken, G.J. Mount: Minimal intervention dentistry - a review. FDI Commission Project 1-97. Int Dent J, 50: 1-12, 2000.
- 2) 熊崎 護: Er:YAGレーザーを使用した歯の硬組織切削(窩洞形成) - 歯の吸収スペクトルおよび切削機序について. 日本レーザー医学会誌, 17: 1-8, 1996.
- 3) U. Keller, R. Hibst: Experimental studies of the application of the Er:YAG laser on dental hard tissues. Lasers Surg Med., 9: 345-351, 1998.
- 4) 瀧澤雅一: Er:YAGレーザーによる歯牙硬組織切削に関する検討. 日本歯科保存学雑誌, 39: 1099-1128, 1996.
- 5) 高野達治: Er:YAGレーザーの照射面形態および成分の変化について. 日本歯科保存学雑誌, 40: 908-919, 1997.
- 6) 江黒 徹: Er:YAGレーザー照射エナメル質の構造・組

- 成変化. 日本歯科保存学雑誌, 41: 582-595, 1998.
- 7) 外山敬久, 磯貝美佳, 入野田芳子, 渥美信子, 松村 裕, 土田友幸: Er:YAG レーザー照射によるエナメル質の形態変化—microcrack について—. 日本歯科保存学雑誌, 42: 975-981, 1999.
 - 8) K.I.M. Delmé, P.J. Deman, M.A.A. De Bruyne, R.J.G. De Moor: Influence of different Er:YAG laser energies and frequencies on the surface morphology of dentin and enamel. J Oral Laser Appl, 6: 43-52, 2006.
 - 9) N. Luddin, H. Ngo, J. McIntyre, J. Abbott: Comparative study of the ultrastructure and adhesive properties of enamel prepared by Er:YAG laser and conventional bur. J Oral Laser Appl, 6: 89-94, 2006.
 - 10) A. Mine, Y. Yoshida, K. Suzuki, Y. Nakayama, H. Yatani, T. Kuboki: Spectroscopic characterization of enamel surfaces irradiated with Er:YAG laser. Dent Mater J, 25: 214-218, 2006.
 - 11) 亀山敦史, 河田英司, 瀧澤雅一, 天谷哲也, 牟田具城, 保坂 誠, 小田 豊, 平井義人: Er:YAG レーザー照射ウシ象牙質の酸処理による影響—表面の形態的变化について—. 接着歯学, 18: 126-132, 2000.
 - 12) 岩田有弘: Er:YAG レーザー照射歯質に関する研究. 日本歯科保存学雑誌, 45: 147-158, 2002.
 - 13) Y. Ishizaka, T. Eguro, T. Maeda, H. Tanaka: Effects of Er:YAG laser irradiation on human dentin: Polarizing microscopic, light microscopic and microradiographic observations, and FT-IR analysis. Lasers Surg Med., 31: 171-176, 2002.
 - 14) M. Omae, Y. Shinnou, K. Tanaka, T. Abo, T. Nakata, K. Suzuki, Y. Hatsuoka, N. Iwata, K. Yoshikawa, Y. Nishitani, K. Yamamoto, M. Yoshiyama: XPS analysis of the dentin irradiated by Er:YAG laser. Dent Mater J, 28: 471-476, 2009.
 - 15) A.A. Neves, E. Coutinho, M. Vivan Cardoso, J. De Munck, B. Van Meerbeek: Micro-tensile bond strength and interfacial characterization of an adhesive bonded to dentin prepared by contemporary caries-excitation techniques. Dent Mater (in press), doi: 10.1016/j.dental.2011.02.008.
 - 16) 井原聡一郎, 平井義人, 見明康雄: Er:YAG レーザー照射による象牙質表層の構造変化. 日本歯科保存学雑誌, 46: 400-407, 2003.
 - 17) 岩田有弘: Er:YAG レーザー照射歯質に関する研究 第2報 エオジン濃染層について. 日本歯科保存学雑誌, 44: 810-816, 2001.
 - 18) A. Kameyama, H. Koga, M. Takizawa, Y. Takaesu, Y. Hirai: Acid resistance of Er:YAG laser-irradiated bovine dentin *in vitro*. Bull Tokyo Dent Coll, 41: 43-48, 2000.
 - 19) S.R. Visuri, L. Gilbert, D.D. Wright, H.A. Wigdor, J.T. Walsh Jr: Shear strength of composite to Er:YAG laser-prepared dentin. J Dent Res, 75: 599-605.
 - 20) A. Moritz, U. Schoop, K. Goharkhay, S. Szakacs, W. Sperr, E. Schweidler, J. Wernisch, N. Gutknecht: Procedures for enamel and dentin conditioning: A comparison of conventional and innovative methods. J Esthet Dent, 10: 84-93, 1998.
 - 21) V. Armengol, A. Jean, P. Weiss, H. Hamel: Comparative *in vitro* study of the bond strength of composite to enamel and dentine obtained with laser irradiation or acid-etch. Lasers Med Sci, 14: 207-215, 1999.
 - 22) 西沢 修: 光重合型レジンに関する研究 —とくに歯質切削法がエナメル質接着性におよぼす影響について—. 日本歯科保存学雑誌, 45: 665-675, 2002.
 - 23) K. Yamamoto, M. Omae, K. Yoshikawa, M. Kawamoto, M. Inoue, M. Inoue, F. Yang, L. Ni, J.H. Chen: Bond strength of composite resin to dentin irradiated with Er:YAG laser. J Osaka Dent Univ, 38: 17-22, 2004.
 - 24) 鈴木貴規, 奈良陽一郎, 田中久義: Er:YAG レーザー照射が歯頸部コンポジットレジン修復の接着性に及ぼす影響. 日本歯科保存学雑誌, 48: 104-122, 2005.
 - 25) 鈴木貴規, 奈良陽一郎: Er:YAG レーザー照射が歯頸部コンポジットレジン修復の接着信頼性に及ぼす影響. 接着歯学, 26: 17-29, 2008.
 - 26) 亀山敦史, 天谷哲也, 瀧澤雅一, 平井義人: Er:YAG レーザー照射象牙質へのレジン接着. 歯科学報, 103: 115-129, 2003.
 - 27) E.G. Başaran, E. Ayna, G. Başaran, K. Beydemir: Influence of different power outputs of erbium, chromium: yttrium-scandium-gallium-garnet laser and acid etching on shear bond strengths of a dual-cure resin cement to enamel. Lasers Med Sci, 26: 13-19, 2011.
 - 28) N. Berk, G. Başaran, T. Özer: Comparison of sandblasting, laser irradiation, and conventional acid etching for orthodontic bonding of molar tubes. Eur J Orthod, 30: 183-189, 2008.
 - 29) C.S. Delfino, W.C. Souza-Zaroni, S.A.M. Corona, R.G. Palma-Dibb: Microtensile bond strength of composite resin to human enamel prepared using erbium: yttrium aluminum garnet laser. J Biomed Mater Res Part A, 80: 475-479, 2007.
 - 30) 峯 篤史: Er:YAG レーザー照射歯質被着体の性質と接着に関する研究. 岡山歯学会雑誌, 22: 123-137, 2003.
 - 31) 五十嵐章浩, 高瀬保晶, 平井義人: 象牙質に対する Er:YAG レーザー切削の検討—先端エネルギーと繰り返しパルス数の影響—. 日本歯科保存学雑誌, 48: 303-313, 2005.
 - 32) A. Igarashi, J. Kato, Y. Takase, Y. Hirai: Influence of output energy and pulse repetition rate of the Er:YAG laser on dentin ablation. Photomed Laser Surg, 26: 189-195, 2008.
 - 33) M. Mir, J. Meister, R. Franzen, S.S. Sabounchi, F. Lampert, N. Gutknecht: Influence of water-layer thickness on Er:YAG laser ablation of enamel of bovine anterior teeth. Lasers Med Sci, 23: 451-457, 2008.
 - 34) W. Raucci-Neto, M.A. Chinelatti, R.G. Palma-Dibb: Ablation rate and morphology of superficial and deep dentin irradiated with different Er:YAG laser energy levels. Photomed Laser Surg, 26: 523-529, 2008.
 - 35) 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—プライマーの組成とレーザー出力について—. 日本歯科保存学雑誌, 43: 1123-1131, 2000.
 - 36) M. Gonçalves, S.A.M. Corona, J.D. Pécora, R.G. Palma-Dibb: Influence of the frequency of Er:YAG laser on the bond strength of dental enamel. J Clin Laser Med Surg, 21: 105-108, 2003.
 - 37) M. Gonçalves, S.A.M. Corona, M.C. Borsatto, J.D. Pécora, R.G. Palma-Dibb: Influence of pulse frequency Er:YAG laser on the tensile bond strength of a composite to dentin. Am J Dent, 18: 165-167, 2005.
 - 38) K. Aizawa, A. Kameyama, J. Kato, T. Amagai, Y. Takase, E. Kawada, Y. Oda, Y. Hirai: Resin bonding to dentin irradiated by high repetition rate Er:YAG laser. Photomed Laser Surg, 24: 397-401, 2006.
 - 39) N.C. de Souza, J.R.P. Jorge, O.B. de Oliveira Jr., A.H. Susin, V.S. Bagnato, R.F.Z. Lizarelli: Effect of Er:YAG laser pulse repetition rate variation on bond strength to re-wet dentin. J Oral Laser Appl, 7: 239-245, 2007.
 - 40) K. Aizawa, A. Kameyama, J. Kato, Y. Oda, Y. Hirai: Influence of free-hand vs. uniform irradiation on tensile bond strength in

- Er:YAG-lased dentin. *J Adhes Dent*, 10: 295-299, 2008.
- 41) M. Gonçalves, S.A.M. Corona, R.G. Palma-Dibb, J.D. Pécora: Influence of pulse repetition rate of Er:YAG laser and dentin depth on tensile bond strength of dentin-resin interface. *J Biomed Mater Res Part A*, 86: 477-482, 2008.
 - 42) K. Aizawa, A. Kameyama, J. Kato, Y. Oda, Y. Hirai: Nano-hardness of adhesive interface between Er:YAG laser-irradiated dentin and 4-META/MMA-TBB resin. *Photomed Laser Surg*, 26: 107-111, 2008.
 - 43) E. Firat, S. Gurgan, N. Gutknecht: Microtensile bond strength of an etch-and-rinse adhesive to enamel and dentin after Er:YAG laser pretreatment with different pulse durations. *Lasers Med Sci* (in press), doi: 10.1007/s10103-010-0830-9
 - 44) M. Sarr, A.W. Kane, J. Vreven, A. Mine, K.L. Van Landuyt, M. Peumans, P. Lambrechts, B. Van Meerbeek, J. De Munck: Microtensile bond strength and interfacial characterization of 11 contemporary adhesives bonded to bur-cut dentin. *Oper Dent*, 35: 94-104, 2010.
 - 45) S.A.M. Corona, J.A. Atoui, D.T. Chimello, M.C. Borsatto, J.D. Pécora, R.G. Palma-Dibb: Composite resin's adhesive resistance to dentin: Influence of Er:YAG laser focal distance variation. *Photomed Laser Surg*, 23: 229-232, 2005.
 - 46) D.T. Chimello-Sousa, A.E. de Souza, M.A. Chinelatti, J.D. Pécora, R.G. Palma-Dibb, S.A.M. Corona: Influence of Er:YAG laser irradiation distance on the bond strength of a restorative system to enamel. *J Dent*, 34: 245-251, 2006.
 - 47) G. Başaran, N. Hamamcı, A. Akkurt: Shear bond strength of bonding to enamel with different laser irradiation distances. *Lasers Med Sci*, 26: 149-156, 2011.
 - 48) C. Scatena, C.P. Torres, J.M. Gomes-Silva, M.M. Contente, J.D. Pécora, R.G. Palma-Dibb, M.C. Borsatto: Shear strength of the bond to primary dentin: influence of Er:YAG laser irradiation distance. *Lasers Med Sci*, 26: 293-297, 2011.
 - 49) 加藤純二, 亀山敦史, 五十嵐章浩, 明石 豪, 春山親弘, 津久井 明, 守矢佳代子, 篠木 毅, 平井義人: Er:YAG レーザーによる齲蝕歯の治療とその修復. 歯界展望, 111: 1033-1046, 2008.
 - 50) R.C.R. de Carvalho, P.M. de Freitas, M. Otsuki, C.P. Eduardo, J. Tagami: Micro-shear bond strength of Er:YAG-laser-treated dentin. *Lasers Med Sci*, 23: 117-124, 2008.
 - 51) 瀧澤雅一, 天谷哲也, 春山親弘, 亀山敦史, 高瀬保品, 平井義人, 熊崎 護: Er:YAG レーザー照射時の注水量が象牙質切削に及ぼす影響. 日本レーザー歯学会誌, 12: 84-91, 2001.
 - 52) M.E. Kim, D.J. Jeoung, K.S. Kim: Effects of water flow on dental hard tissue ablation using Er:YAG laser. *J Clin Laser Med Surg*, 21: 139-144, 2003.
 - 53) 福岡哲郎, 柿本和俊, 小正 裕: Er:YAG レーザーによる歯の切削に与える水の影響. 歯科医学, 71: 73-87, 2008.
 - 54) V. Colucci, F.L.B. do Amaral, J.D. Pécora, R.G. Palma-Dibb, S.A.M. Corona: Water flow on erbium:yttrium-aluminum-garnet laser irradiation: effects on dental tissues. *Lasers Med Sci*, 24: 811-818, 2009.
 - 55) V. Colucci, M.P. Lucisano, F.L. Amaral, J.D. Pécora, R.G. Palma-Dibb, S.A. Corona: Influence of water flow rate on shear bond strength of resin composite to Er:YAG cavity preparation. *Am J Dent*, 21: 124-128, 2008.
 - 56) B. Van Meerbeek, M. Vargas, S. Inoue, Y. Yoshida, M. Peumans, P. Lambrechts, G. Vanherle: Adhesives and cements to promote preservation dentistry. *Oper Dent*, (Suppl 6): 119-144, 2001.
 - 57) B. Van Meerbeek, J. De Munck, Y. Yoshida, S. Inoue, M. Vargas, P. Vijay, K. Van Landuyt, P. Lambrechts, G. Vanherle: Buonocore memorial lecture: adhesion to enamel and dentin: current status and future challenges. *Oper Dent*, 28: 215-235, 2003.
 - 58) J. De Munck, K. Van Landuyt, M. Peumans, A. Poitevin, P. Lambrechts, M. Braem, B. Van Meerbeek: A critical review of the durability of adhesion to tooth tissue: methods and results. *J Dent Res*, 84: 118-132, 2005.
 - 59) J. Kanca 3rd: Wet bonding: effect of drying time and distance. *Am J Dent*, 9: 273-276, 1996.
 - 60) J. De Munck, B. Van Meerbeek, Y. Yoshida, S. Inoue, M. Vargas, K. Suzuki, P. Lambrechts, G. Vanherle: Four-year water degradation of total-etch adhesives bonded to dentin. *J Dent Res*, 82: 136-140, 2003.
 - 61) B. Van Meerbeek, K.L. Van Landuyt, J. De Munck, M. Hashimoto, M. Peumans, P. Lambrechts, Y. Yoshida, S. Inoue, K. Suzuki: Technique sensitivity of contemporary adhesives. *Dent Mater J*, 24: 1-13, 2005.
 - 62) Y. Yoshida, K. Nagakane, R. Fukuda, Y. Nakayama, M. Okazaki, H. Shintani, S. Inoue, Y. Tagawa, K. Suzuki, J. De Munck, B. Van Meerbeek: Comparative study on adhesive performance of functional monomers. *J Dent Res*, 83: 454-458, 2004.
 - 63) S. Inoue, K. Koshiro, Y. Yoshida, J. De Munck, K. Nagakane, K. Suzuki, H. Sano, B. Van Meerbeek: Hydrolytic stability of self-etch adhesives bonded to dentin. *J Dent Res*, 84: 1160-1164, 2005.
 - 64) M. Cadenaro, F. Antoniolli, S. Sauro, F.R. Tay, R. Di Lenarda, C. Prati, M. Biasotto, L. Contrardo, L. Breschi: Degree of conversion and permeability of dental adhesives. *Eur J Oral Sci*, 113: 525-530, 2005.
 - 65) C.O. Navarra, M. Cadenaro, B. Codan, A. Mazzoni, V. Sergo, E. De Stefano Dorigo, L. Breschi: Degree of conversion and interfacial nanoleakage expression of three one-step self-etch adhesives. *Eur J Oral Sci*, 117: 463-469, 2009.
 - 66) K.L. Van Landuyt, J. De Munck, A. Mine, M.V. Cardoso, M. Peumans, B. Van Meerbeek: Filler debonding & subhybrid-layer failures in self-etch adhesives. *J Dent Res*, 89: 1045-1050, 2010.
 - 67) B. Van Meerbeek, K. Yoshihara, Y. Yoshida, A. Mine, J. De Munck, K.L. Van Landuyt: State of the art of self-etch adhesives. *Dent Mater*, 27: 17-28, 2011.
 - 68) K. Koshiro, S.K. Sidhu, S. Inoue, T. Ikeda, H. Sano: New concept of resin-dentin interfacial adhesion: The nanointeraction zone. *J Biomed Mater Res Part B: Appl Biomater*, 77B: 401-408, 2006.
 - 69) 吉田靖弘, 中山陽一, 吉原久美子, 英 將生, 峯 篤史, 井上 哲, 鈴木一臣, B. Van Meerbeek: 歯質接着における化学分析の応用. 接着歯学, 28: 1-13, 2010.
 - 70) M.G. Buonocore: A simple method of increasing the adhesion of acrylic filling materials to enamel surfaces. *J Dent Res*, 34: 849-853, 1955.
 - 71) M.G. Buonocore, A. Matsui, A.J. Gwinnett: Penetration of resin dental materials into enamel surfaces with reference to bonding. *Arch Oral Biol* 13: 61-70, 1968.
 - 72) B. Van Meerbeek, M. Peumans, A. Poitevin, A. Mine, A. Van Ende, A. Neves, J. De Munck: Relationship between bond-strength tests and clinical outcomes. *Dent Mater*, 26: e100-e121, 2010.
 - 73) M. Hashimoto, F. Nagano, K. Endo, H. Ohno: A review: Biodegradation of resin-dentin bonds. *Jpn Dent Sci Rev* 2011 47: 5-12, 2011.

- 74) J. De Munck, B. Van Meerbeek, R. Yudhira, P. Lambrechts, G. Vanherle: Micro-tensile bond strength of two adhesives to Erbium:YAG-lased vs. bur-cut enamel and dentin. *Eur J Oral Sci*, 110: 322-329, 2002.
- 75) M.V. Cardoso, J. De Munck, E. Coutinho, R.B. Ermis, K. Van Landuyt, R.C.R. de Carvalho, B. Van Meerbeek: Influence of Er,Cr:YSGG laser treatment on microtensile bond strength of adhesives to enamel. *Oper Dent*, 33: 448-455, 2008.
- 76) A. Kameyama, J. Kato, K. Aizawa, T. Suemori, Y. Nakazawa, T. Ogata, Y. Hirai: Tensile bond strength of one-step self-etch adhesives to Er:YAG laser-irradiated and non-irradiated enamel. *Dent Mater J*, 27: 386-391, 2008.
- 77) M.T. de Oliveira, P.M. de Freitas, C.P. Eduardo, G.M.B. Ambrosano, M. Giannini: Influence of diamond sono-abrasion, air-abrasion and Er:YAG laser irradiation on bonding of different adhesive systems to dentin. *Eur J Dent*, 1: 158-166, 2007.
- 78) M.V. Cardoso, E. Coutinho, R.B. Ermis, A. Poitevin, K. Van Landuyt, J. De Munck, R.C.R. Carvalho, B. Van Meerbeek: Influence of dentin cavity surface finishing on micro-tensile bond strength of adhesives. *Dent Mater*, 24: 492-501, 2008.
- 79) A. Kameyama, J. Kato, K. Aizawa, Y. Hirai: Tensile bond strength of single-step self-etch adhesives to Er:YAG laser-irradiated dentine. *Photomed Laser Surg*, 27: 3-10, 2009.
- 80) N. Luddin, H. Ngo, J. McIntyre, J. Abbott: Comparative study of the ultrastructure and adhesive properties of enamel prepared by Er:YAG laser and conventional bur. *J Oral Laser Appl*, 6: 89-94, 2006.
- 81) L.H. Sasaki, P.D.C. Lobo, Y. Moriyama, I.S. Watanabe, A.B. Villaverde, C.S.I. Tanaka, E.H. Moriyama, A. Brugnera Jr: Tensile bond strength and SEM analysis of enamel etched with Er:YAG laser and phosphoric acid: A comparative study *in vitro*. *Braz Dent J*, 19: 57-61, 2008.
- 82) B. Van Meerbeek, J. De Munck, D. Matter, K. Van Landuyt, P. Lambrechts: Microtensile bond strengths of an etch&rinse and self-etch adhesive to enamel and dentin as a function of surface treatment. *Oper Dent*, 28: 647-660, 2003.
- 83) 大月将人, 江黒 徹, 前田 徹, 西村弥生子, 田中久義: Er:YAG レーザー照射エナメル質とコンポジットレジンとの接着強さーリン酸処理時間が接着強さに及ぼす影響ー. *日本レーザー歯学会誌*, 11: 98-103, 2000.
- 84) A. Kameyama, E. Kawada, M. Takizawa, Y. Oda, Y. Hirai: Influence of different acid conditioner on the tensile bond strength of 4-META/MMA-TBB resin to Er:YAG laser-irradiated bovine dentin. *J Adhes Dent*, 2: 297-304, 2000.
- 85) M. Kataumi, M. Nakajima, T. Yamada, J. Tagami: Tensile bond strength and SEM evaluation of Er:YAG laser irradiated dentin using dentin adhesive. *Dent Mater J*, 17: 125-138, 1998.
- 86) L. Ceballos, M. Toledano, R. Osorio, F.R. Tay, G.W. Marshall: Bonding to Er-YAG-laser-treated dentin. *J Dent Res*, 81: 119-122, 2002.
- 87) M.O. Barceleiro, J.B. Mello, G.P.S. Mello, K.R.H.C. Dias, M.S. Miranda, H.R. Sampaio Filho: Hybrid layer thickness and morphology: The influence of cavity preparation with Er:YAG laser. *Oper Dent*, 30: 304-310, 2005.
- 88) A. Obeidi, P.R. Liu, L.C. Ramp, P. Beck, N. Gutknecht: Acid-etch interval and shear bond strength of Er,Cr:YSGG laser-prepared enamel and dentin. *Lasers Med Sci*, 25: 363-369, 2010.
- 89) M. Chousterman, D. Heysselaer, S.M. Dridi, F. Bayet, B. Misset, L. Lamard, A. Peremans, C. Nyssen-Behets, S. Nammour: Effect of acid etching duration on tensile bond strength of composite resin bonded to erbium:yttrium-aluminium-garnet laser-prepared dentine. Preliminary study. *Lasers Med Sci*, 25: 855-859, 2010.
- 90) M. Vivan Cardoso, K.I.M. Delmé, A. Mine, A.A. Neves, E. Coutinho, R.J.G. De Moor, B. Van Meerbeek: Towards a better understanding of the adhesion mechanism of resin-modified glass-ionomers by bonding to differently prepared dentin. *J Dent*, 38: 921-929, 2010.
- 91) K.I.M. Delmé, M. Vivan Cardoso, A. Mine, R.J.G. De Moor, B. Van Meerbeek: Transmission electron microscopic examination of the interface between a resin-modified glass-ionomer and Er:YAG laser-irradiated dentin. *Photomed Laser Surg*, 27: 317-327, 2009.
- 92) K.I. Tonami, H. Takahashi, J. Kato, F. Nakano, F. Nishimura, Y. Takagi, N. Kurosaki: Effects of laser irradiation on tensile strength of bovine dentin. *Photomed Laser Surg*, 23: 278-283, 2005.
- 93) F.L.B. Amaral, V. Colucci, A.E. Souza-Gabriel, M.A. Chinelatt, R.G. Palma-Dibb, S.A.M. Corona: Adhesion to Er:YAG laser-prepared dentin after long-term water storage and thermocycling. *Oper Dent*, 33: 51-58, 2008.
- 94) 天谷哲也, 亀山敦史, 井原聡一郎, 篠原 崇, 春山親弘, 瀧澤雅一, 高瀬保晶, 平井義人: Er:YAG レーザー照射象牙質に対する表面処理と接着強さ. *日本レーザー歯学会誌*, 11: 109-115, 2000.
- 95) T. Eguro, T. Maeda, M. Otsuki, Y. Nishimura, I. Katsuumi, H. Tanaka: Adhesion of Er:YAG laser-irradiated dentin and composite resins: application of various treatments on irradiated surface. *Lasers Surg Med*, 30: 267-272, 2002.
- 96) A. Obeidi, M.S. McCracken, P.R. Liu, M.S. Litaker, P. Beck, F. Rahemtulla: Enhancement of bonding to enamel and dentin prepared by Er,Cr:YSGG laser. *Lasers Surg Med*, 41: 454-462, 2009.
- 97) 天谷哲也, 平井義人: Er:YAG レーザー照射後における修復処置. *日本レーザー歯学会誌*, 16: 105-110, 2005.
- 98) M. Otsuki, T. Eguro, T. Maeda, H. Tanaka: Comparison of the bond strength of composite resin to Er:YAG laser irradiated human enamel pre-treated with various methods *in vitro*. *Lasers Surg Med*, 30: 351-359, 2002.
- 99) M. Miyazaki, J.A. Platt, H. Onose, B.K. Moore: Influence of dentin primer application methods on dentin bond strength. *Oper Dent*, 21: 167-172, 1996.
- 100) S. Ando, T. Watanabe, K. Tsubota, T. Yoshida, A. Irokawa, T. Takamizawa, T. Kurokawa, M. Miyazaki: Effects of adhesive application methods on bond strength to bovine enamel. *J Oral Sci*, 50: 181-186, 2008.
- 101) L. Manhães, D.C. Oliveira, M.M. Marques, A.B. Matos: Influence of Er:YAG laser surface treatment and primer application methods on microtensile bond strength self-etching systems. *Photomed Laser Surg*, 23: 304-312, 2005.
- 102) M. Fujitani, T. Harima, H. Shintani: Does Er:YAG or CO₂ laser ablation of dentin affect the adhesive properties of resin bonding systems? *International Congress Series* 1248: 161-6, 2003. doi:10.1016/S0531-5131(02)01316-X
- 103) S. Nomoto, A. Kameyama, T. Nakazawa, K. Yazaki, T. Amagai, E. Kawada, Y. Oda, Y. Hirai, T. Sato: Influence of ascorbic acid on bonding of peroxide-affected dentin and 4-META/MMA-TBB resin. *Clin Oral Invest*, 10: 325-330, 2006.
- 104) 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. *日本歯科保存学雑誌*, 41: 207-219, 1998.

- 105) A. Kameyama, E. Kawada, T. Amagai, M. Takizawa, Y. Oda, Y. Hirai: Effect of HEMA on bonding of Er:YAG laser-irradiated bovine dentine and 4-META/MMA-TBB-resin. *J Oral Rehabil*, 29: 749-755, 2002.
- 106) K. Yoshihara, Y. Yoshida, N. Nagaoka, D. Fukegawa, S. Hayakawa, A. Mine, M. Nakamura, S. Minagi, A. Osaka, K. Suzuki, B. Van Meerbeek: Nano-controlled molecular interaction at adhesive interfaces for hard tissue reconstruction. *Acta Biomater*, 6: 3573-3582, 2010.
- 107) 石丸和俊, 江夏一彰, 榊原康智, 陳 昭清, 高水正明, 河野 篤: Er:YAG レーザー照射象牙質への接着に関する研究 第 2 報 試作酸性プライマーの効果について. *日本歯科保存学雑誌*, 44: 966-972, 2001.
- 108) 水沼 徹: レジンの象牙質に対する接着と象牙質コラーゲンの構造変化—塩化第二鉄がコラーゲンに与える影響—. *歯科材料・器械*, 5, 54-64, 1986.
- 109) A. Kameyama, S. Ihara, T. Amagai, E. Kawada, Y. Miake, T. Yanagisawa, Y. Oda, Y. Hirai: Adhesion of 4-META/MMA-TBB resin to heated dentin: effects of pre-treatments with FeCl₃ and/or HEMA. *Dent Mater J*, 21: 1-9, 2003.
- 110) A. Kameyama, Y. Oda, Y. Hirai, E. Kawada, M. Takizawa: Resin bonding to Er:YAG laser-irradiated dentin: combined effects of pre-treatments with citric acid and glutaraldehyde. *Eur J Oral Sci*, 109: 354-360, 2001.
- 111) 大前正範: Er:YAG レーザー照射象牙質に対するコンポジットレジンの接着強さ—フッ化物およびグルタルアルデヒドの影響—. *日本歯科保存学雑誌*, 47: 110-122, 2004.
- 112) M. Omae, M. Inoue, T. Itota, W.J. Finger, M. Inoue, K. Tanaka, K. Yamamoto, M. Yoshiyama: Effect of a desensitizing agent containing glutaraldehyde and HEMA on bond strength to Er:YAG laser-irradiated dentine. *J Dent*, 35: 398-402, 2007.
- 113) G. Akashi, J. Kato, Y. Hirai: Pathological study of pulp treated with chemicals after Er:YAG laser preparation. *Photomed Laser Surg*, 24: 698-704, 2006.
- 114) S.A.M. Corona, A.E. de Souza, M.A. Chinelatti, M.C. Borsatto, J.D. Pécora, R.G. Palma-Dibb: Effect of energy and pulse repetition rate of Er:YAG laser on dentin ablation ability and morphological analysis of the laser-irradiated substrate. *Photomed Laser Surg*, 25: 26-33, 2007.
- 115) 須原秀宜: 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—レーザー追照射の影響—. *接着歯学*, 20: 49-58, 2002.
- 116) S. Gurgan, A. Kiremitci, F.Y. Cakir, E. Yazici, J. Gorucu, N. Gutknecht: Shear bond strength of composite bonded to erbium:yttrium-aluminum-garnet laser-prepared dentin. *Lasers Med Sci*, 24: 117-122, 2009.
- 117) B. Bahrami, N. Askari, M. Tieleman, D. Heysselaer, L. Lamard, A. Peremans, C. Nyssen-Behets, S. Nammour: Effect of low fluency dentin conditioning on tensile bond strength of composite bonded to Er:YAG laser-prepared dentin: a preliminary study. *Lasers Med Sci*, 26: 187-191, 2011.
- 118) T. Toyama, Y. Matsumura, N. Atsumi, T. Ono, C. Kitabayashi, T. Inabe, T. Achiwa, T. Tsuchiya: Effectiveness of double irradiation with Er:YAG laser concerning tensile bond strength. *Aichi-Gakuin Dent Sci*, 17: 23-27, 2004.
- 119) 特定非営利活動法人日本歯科保存学会 編. MI (Minimal Intervention) を理念としたエビデンス (根拠) とコンセンサス (合意) に基づく歯蝕治療ガイドライン. 第 1 版, 永末書店, 2009, 東京.
- 120) A.A. Neves, E. Coutinho, M. Vivan Cardoso, P. Lambrechts, B. Van Meerbeek: Current concepts and techniques for caries excavation and adhesion to residual dentin. *J Adhes Dent* 2011 (in press). doi: 10.3290/j.jad.a18443.
- 121) 高瀬保品, 瀧澤雅一, 天谷哲也, 春山親弘, 亀山敦史, 平井義人: 齲蝕診断装置 Diagnodent に関する基礎的研究. *日本レーザー歯学会誌*, 12: 37-40, 2001.
- 122) T. Shinohara, Y. Takase, T. Amagai, C. Haruyama, A. Igarashi, N. Kukidome, J. Kato, Y. Hirai: Criteria for a Diagnosis of Caries through the DIAGNOdent. *Photomed Laser Surg*, 24: 50-58, 2006.
- 123) 平井義人, 篠原 崇, 高瀬保品: 齲蝕治療・診断におけるレーザーの応用. *日本レーザー医学会誌*, 25: 275-280, 2005.
- 124) A.A. Neves, E. Coutinho, J. De Munck, H. Van Oosterwyck, B. Van Meerbeek: Caries-removal effectiveness and minimal-invasive potential of caries-excitation techniques: A micro-CT investigation. *J Dent*, 39: 154-162, 2011.
- 125) 江黒 徹, 米本和顕, 前田 徹, 小川正明, 田中久義, 勝海一郎: Er:YAG レーザーを用いた齲蝕除去の指標に関する研究 — Er:YAG レーザー照射歯質と DIAGNOdent 値の関係. *日本歯科保存学雑誌*, 46: 935-940, 2003.

著者紹介

亀山 敦史 (Atsushi Kameyama)

1997 年 3 月, 東京歯科大学 卒業. 2001 年 3 月, 東京歯科大学大学院歯学研究科博士課程 修了 (歯科保存学専攻), 博士 (歯学). 2001 年 4 月, 東京歯科大学 助手 (歯科保存学第三講座). 2003 年 5 月, 医療法人亀山歯科医院 (大分県別府市) 副院長. 2006 年 4 月, 東京歯科大学に復職, 保存修復学講座 助手・助教・講師を経て, 2009 年 4 月より東京歯科大学講師 (千葉病院総合診療科). 2010 年 3 月より 2011 年 2 月までベルギー ルーヴェン・カトリック大学 客員研究員. 日本歯科保存学会 指導医・専門医, 日本接着歯学会 認定医, 日本レーザー歯学会 指導医・認定医, 日本歯科理工学会 シニア・アドバイザー (歯科接着器材), 日本歯科東洋医学会 認定医.

加藤 純二 (Junji Kato)

1980 年, 東京医科歯科大学歯学部 卒業. 1985 年, 東京医科歯科大学大学院 修了, 歯学博士. 1985 年 -2004 年, 東京医科歯科大学小児歯科学講座. 2000 年 -2002 年, JICA (国際協力事業団) 専門家. 2004 年 -2008 年, 東京歯科大学保存修復学講座. 現職は東京歯科大学非常勤講師 (千葉病院総合診療科), 東京医科歯科大学非常勤講師 (大学院医歯学総合研究科摂食機能保存学講座 歯蝕制御学分野). 日本レーザー歯学会 理事, 日本レーザー医学会 評議員.