

研究課題名：自由電子レーザー照射が歯質に与える影響

研究代表者：池見宅司（日本大学松戸歯学部 う蝕抑制審美治療学講座）
研究従事者：神谷直孝（日本大学松戸歯学部 う蝕抑制審美治療学講座）
共同研究者：岩井啓寿（日本大学大学院 松戸歯学研究科）

【研究目的】

近年、歯科領域において各種レーザーが市販されるようになり、臨床でレーザーを使用する頻度が高くなっている。現在、本邦において高出力レーザーは15%以上の診療室で用いられているといわれている。Er-YAG レーザーの波長 $2.94\mu\text{m}$ は歯質の主成分であるハイドロキシアパタイトの水成分に作用して、歯質を削除すると報告されており、市販されているレーザーの中で最も歯質削除能に優れていることから、主として窩洞形成に用いられている。一方、自由電子レーザーは任意の波長を選択して発振できるが、パルス幅等も市販の Er-YAG レーザーとは異なり、歯質に与える影響は異なるものと考えられる。そこで、ウシの歯を使用して、市販の Er-YAG レーザーと FEL の照射総エネルギー量を同一とした際のエナメル質と象牙質に与える歯質削除深さと削除面の性状を調べることを目的として実験を行う。

【研究概要】

1. 市販の Er-YAG レーザーと FEL の照射エネルギーを同一にして、歯質削除効果と削除面の性状変化について調べる。
2. 1 と同様にして、歯髄側の昇温を比較検討する。
3. 波長をシフトして、最も歯質削除効率の高い波長を見出す。
4. エキシマレーザーとの併用による歯質削除効率ならびに削除された形態について調べる。

【まとめ】

これまで行った実験に関してまとめると、総エネルギー量 1.5J における市販 Er-YAG ではエナメル質の削除はほとんど測定されず、象牙質の削除に有効であることが示され、1pulse 当たりの照射エネルギーが大きくなるほど深い削除深さが得られた。特に、脱灰象牙質において削除深さが深くなる傾向を示した。FEL に関しても、脱灰象牙質において Er-YAG の 30mJ/pulse と同程度の削除深さが得られ、FEL では 8mJ/pulse であることを勘案すると、ピーク出力や照射エネルギー密度の違いによって、照射エネルギーが低くても Er-YAG の 30mJ/pulse と同等の削除が認められたものと推測された。

脱灰エナメル質に関しては、Er-YAG で削除が観察されず、FEL では削除深さが深くなり、FEL との違いが顕著に示された。Er-YAG がハイドロキシアパタイトを破壊する過程は、その水成分が急激に熱せられて膨張し、冷却することによる急激な収縮で爆発的に破壊されると報告されており、脱灰によりチョーク状となったエナメル質の状態ではこのような膨張と収縮が周囲のハイドロキシアパタイトに影響を及ぼすことが少なかったのではないかと考えられる。一方、FEL に関しては、前述と同様にピーク出力が高いために脱灰エナメル質の深部までレーザー光が到達して削除深さが深くなったものと推測された。

SEM 写真においては、FEL に関して全ての試料で鋭利な削除形態が観察されたが、Er-YAG では

エナメル質の表層に亀裂が観察され、象牙質においては熱変性により生じたと考えられる鱗片状の構造が観察された。特に、脱灰エナメル質の照射痕の周囲には溶岩状の構造物が観察された。これらのことは、Er-YAG では歯質の削除時に波長特性だけでなく、熱の影響についても考える必要があるものと考えられ、FEL では被照射体に与える影響は波長特性が主として現れたものと考えられた。これらのことは、両者のパルス幅の違いが考えられ、それに伴うピーク出力の違いが歯質に影響したものと推測され、同一の波長を有するレーザーでもマイクロパルスの性状で被照射体に与える影響が異なることが判明した。

【研究業績等】

・ 発表論文

- (1) 深澤正幹（研究協力者）（2000）炭酸ガスレーザーと試作フッ素含有ペースト併用による歯質耐酸性効果、日本歯科保存学雑誌、43（3）、583～591.
- (2) 深澤正幹、内山敏一、杉山道紀、大村基守、田川剛司、荻野 朗、河野善治、池見宅司（2000）生活歯漂白後のエナメル質の耐酸性、日本歯科保存学雑誌、43（5）、1107～1112.
- (3) 山本憲廣（研究協力者）（2000）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の出力について-、日本歯科保存学雑誌、43（6）、1123
～1131.
- (4) 川本幸司、辻本恭久、飯田浩雅、木村 大、山崎宗与、池見宅司（2002）過酸化水素水に光あ
るいはレーザー照射した際に発生するヒドロキシラジカルが発生量、歯科の色彩、8（1）、31
～35.
- (5) 内山敏一（研究協力者）（2002）生活歯漂白-フッ化物塗布と炭酸ガスレーザー併用によるエナ
メル質耐酸性獲得、日本歯科保存学雑誌、45（2）、205～215.
- (6) 須原秀宣（研究協力者）（2002）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-、日本接着歯学会雑誌、20（2）、49～58.
- (7) 池見宅司、飯田浩雅、山本憲廣、神谷直孝、岩井啓寿、木場秀夫、山本浩嗣、藤田恵二郎、石
崎 勉（2004）エナメル質の脱灰深さの測定法、日本歯科保存学雑誌、47（1）、154～160.

・ 著書

- (1) 池見宅司（2001）光による目の障害 ドクターの目にやさしい歯科医療を求めて、デンタルダ
イヤモンド社、増刊号、98～101.
- (2) 池見宅司（2004）生活歯漂白とエナメル質耐酸性獲得、日本歯科漂白研究会、歯科漂白、2（1）、
18～23.

・ 学会発表

- (1) 内山敏一、深澤正幹、田川剛士、木村朋恵、須原秀宣、池見宅司（2000）CO₂ レーザーとフッ
化物併用によるエナメル質の耐酸性の経時的変化、日本歯科保存学会、大阪.
- (2) 深澤正幹、杉山道紀、内山敏一、木村朋恵、鈴木英明、河野善治、池見宅司（2000）エナメル
質研磨面の歯質耐酸性について、日大歯学会春季学会、東京.
- (3) K.Fujita, N.Yamamoto, T.Okada, N.Kamiya, Y.Kohno, T.Ikemi (2000) Bond Strength of Resin Composite
to Er-YAG Laser Irradiated Dentin、JADR、Chiba.
- (4) N.Yamamoto, T.Ikemi (2001) Adhessiveness of a Composite Resin to Er-YAG Laser Irradiated Dentin、
AADR、Chicago.
- (5) T.Uchiyama, S.Hirayama, Y.Kono, T.Ikemi (2001) Simple evaluative method for acid resistance of enamel
surface、IADR、Chiba.
- (6) 内山敏一、木村 大、飯田浩雅、藤田 光、森 俊幸、池見宅司（2002）炭酸ガスレーザーと
フッ化物併用による生活歯漂白後のエナメル質耐酸性、日本大学口腔科学会、千葉.
- (7) 内山敏一、平山聡司、鈴木英明、河野善治、岡田珠美、神谷直孝、森敏幸、池見宅司（2002）
漂白後のウシエナメル質に対するフッ化物と炭酸ガスレーザーの効果、国際接着歯学会学術

大会、東京.

- (8) 内山敏一、深澤正幹、杉山貴則、藤田 光、石崎 勉、池見宅司 (2002) 生活歯漂白後のフッ化物レーザー併用による歯質耐酸性効果、日本歯科保存学会、東京.
- (9) 川本幸司、辻本恭久、山崎宗与、木村 大、飯田浩雅、池見宅司 (2002) 光あるいはレーザー照射することで H_2O_2 から発生するヒドロキシラジカル量について、日本歯科保存学会、東京.
- (10) T.Uchiyama, S.Hirayama, H.Suzuki, Y.Kono, T.Ikemi (2002) Acid Resistance in Tooth Enamel by Simultaneous Use of Carbon Dioxide Laser and Fluoride after Bleaching、第 1 届国際 (中日) 口腔審美修復学学術研究会、北京.
- (11) 渋谷 功、西山典宏、早川 徹、根本君也、池見宅司 (2003) Nd:YAG レーザーによる歯質の削除 - 二酸化チタン分散溶液の効果 -、日本歯科保存学会.
- (12) K.Fujita, H.Kawamata, T.Ishizaki, R.E.Hayman, T.Uchiyama, M.Kimura, H.Kiba and T.Ikemi (2003) Two New Method for Evaluation of Subsurface Enamel lesions、IADR、Sweden.
- (13) 池見宅司 (2004) CAD/CAM とレーザーと漂白と、日本歯科理工学会 (シンポジウム)、千葉.

・学位の取得状況

- (1) 深澤正幹: 博士 (歯学)、炭酸ガスレーザーと試作フッ素含有ペースト併用による歯質耐酸性効果、2000 年 3 月、日本大学大学院松戸歯学研究科、保存修復学専攻
- (2) 山本憲廣: 博士 (歯学)、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との接着性 - プライマーの組成とレーザーの出力について -、2000 年 11 月、日本大学松戸歯学部、保存学 I
- (3) 内山敏一: 歯学 (博士)、生活歯漂白-フッ化物塗布と炭酸ガスレーザー併用によるエナメル質耐酸性獲得、2002 年 3 月、日本大学大学院松戸歯学研究科、保存修復学専攻
- (4) 須原秀宣: 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との接着性 - レーザー追照射の影響 -、2002 年 7 月、日本大学松戸歯学部、保存学 I

キーワード

- ・炭酸ガスレーザー
- ・耐酸性
- ・フッ化アンモニウム

日歯保存誌 43 (3) : 583~591, 2000

炭酸ガスレーザーと試作フッ素含有ペースト併用による歯質耐酸性効果

深 澤 正 幹

日本大学大学院松戸歯学研究科保存修復学専攻

(指導：池見宅司教授)

(受付：平成11年12月20日)

Acid Resistance Effect of Simultaneous Use of Carbon Dioxide Laser and Experimental Fluorine-containing Paste on Enamel

Masataka FUKAZAWA

Major in Operative Dentistry, Nihon University Graduate School of Dentistry at Matsudo

(Director : Prof. Takuji IKEMI)

870-1, Sakaecho, Nishi-2, Matsudo, Chiba 271-8587, Japan

(Received for Publication : December 20, 1999)

CO₂, Nd-YAG, and Er-YAG laser devices have been developed for dental applications. These laser devices improve the acid resistance of the enamel surface layer, however, a great deal of energy is required to improve the acid resistance of the enamel surface when using laser irradiation alone. To investigate efficient methods for improving the acid resistance of enamel, an experimental fluorine-containing paste was produced by dissolving ammonium fluoride in a water soluble polymer and this paste was used in conjunction with super-pulse irradiation of CO₂-laser. A colorimeter was used to evaluate the acquisition of acid resistance of the enamel surface based on the difference of reflected light (ΔY). Morphological changes in the enamel surface layer were observed by SEM. The ratio of fluorine atoms on the enamel surface was examined with element analyzer. The samples of this experiment were prepared as follows : without treatment (control 1), paste application without fluoride (control 2), laser irradiation alone (L), fluoride application alone (F), fluoride application after laser irradiation (LF), and laser irradiation

after LF (LFL).

The results were as follows :

1. ΔY was not significantly different between the control group 1 and the L group. Under the conditions of this experiment, the super-pulse irradiation of CO₂-laser alone did not improve the acid resistance of the enamel surface.
2. ΔY was not significantly different between the F and LF groups, but the LF group showed greater improvement in acid resistance than the F group.
3. The LFL group showed a significantly low ΔY compared with the other groups, indicating that the group acquired greater acid resistance than the other groups.
4. The super-pulse irradiation of energy density 20.6 J/cm² did not dissolve or coagulate apatite crystals in the enamel surface layer. However, SEM images showed that smear substances had been removed from the enamel surface.
5. When the experimental fluorine-containing paste was applied, SEM images showed a substance like calcium fluoride deposited on the enamel sur-

face. The deposit was more dense on the enamel surface of the LFL group than on that of any other group.

6. SEM images of the LFL group showed a dense substance similar to calcium fluoride on the enamel surface even after lactic acid treatment.

7. In the F, LF, and LFL groups, fluorine atoms were detected on the enamel surface before and after lactic acid treatment, however, fluorine atoms of all groups were decreased by acid treatment.

8. The F-atomic values (%) of the LFL group before and after lactic acid treatment were the highest among those of all groups.

The results suggested that the simultaneous use of experimental fluorine-containing paste and CO₂-laser in super-pulse mode could improve the acid resistance of the enamel surface more effectively and safely than the independent use of the fluoride or CO₂-laser.

(Request original article reprints to Dr. FUKAZAWA)

結 言

エナメル質の耐酸性を向上させることは、齲蝕予防の観点から重要なことと考えられている。その方法として、従来からフッ素歯面塗布¹⁻⁴⁾やイオン導入法⁵⁻⁷⁾などが歯科臨床において用いられているが、今日、歯科用高出力レーザー装置として炭酸ガスレーザーやネオジウム-YAG レーザー、さらにエルビウム-YAG レーザーなどが開発され、これら高出力レーザーの歯質に対する効果として、エナメル質表層における耐酸性の向上が挙げられている⁸⁻¹¹⁾。Stern ら^{12,13)}は炭酸ガスレーザーによるエナメル質耐酸性獲得の実験を行い、効果的であることを報告しており、清水¹⁴⁾も炭酸ガスレーザー照射のみでエナメル質の耐酸性が向上したとしている。しかし、レーザー照射だけでエナメル質表層を改質させるためには高エネルギーが必要となり、連続波で 20 J/cm² あるいは 30 J/cm² 以上の照射エネルギー密度で照射した場合には亀裂が発生するとされている⁸⁾。さらに、熱の蓄積による歯髄への影響など¹⁵⁾を考慮すると、現段階では、レーザー照射のみでエナメル質の耐酸性を獲得させることは困難と考えられる。それゆえ、レーザーとフッ化物を併用して、比較的低エネルギーのレーザー照射により効果的、かつ安全な方法が求められ、研究が進められている¹⁶⁻¹⁸⁾。最近では、レーザー照射装置の改良がなされ、従来の連続波だけでなくスーパーパルスといった照射方法が選択できるようになっている。現在、市販されている炭酸ガスレーザー装置のスーパーパルスモードは、0.6 msec のレーザー照射時間と 6 msec の休止時間の繰り返しパルスで、瞬間的なピークパワーを連続波の 2.5~3 倍に引き上げ、かつ照射野の熱の蓄積を抑制することができるという特徴を有してい

る。

そこで、エナメル質の耐酸性を向上させるための効率の良い方法を探究するために、著者は、フッ化物を水溶性ポリマーに溶解した試作フッ素含有ペーストを考案し、スーパーパルスのレーザー照射と併用することを試みた。

エナメル質表面における耐酸性獲得の評価に関しては、色彩色差計を使用し、国際照明委員会(CIE)の基準表色系¹⁹⁾とされている Yxy 表色系色度図の Y 値を利用して、エナメル質表面の乳酸処理前と後の Y 値の差を求め、耐酸性の評価を行った。エナメル質表層の形態的变化は、走査型電子顕微鏡により観察を行い、色彩色差計により得られた耐酸性評価との関連を調べた。また、走査型電子顕微鏡で観察されたエナメル質表層の生成物については、エネルギー分散型蛍光 X 線装置を用いて、そのフッ素原子の割合を調べ耐酸性獲得の要因を検討した。

材料および方法

1. 試料の作製

抜去・抜髄して冷凍保存したウシ下顎前歯を、使用直前に注水下・室温にて解凍した。耐水ペーパー(#800, #1,000)を用いて、唇側エナメル質の表層から約 200 μm までを研磨し、最終 #2,000 のインペリアルラッピングフィルム(3M)で鏡面研磨を行い、その後 15 分間超音波洗浄を行った。

2. 試作フッ素含有ペースト

蒸留水にカルボキシメチルセルロースナトリウム(和光純薬)を溶解して 1% 水溶性ポリマー溶液を調製した。その溶液中にフッ素濃度 10,000 ppm(pH 6.5)となるようにフッ化アンモニウムを溶解して試作フッ素含有ペーストとした。

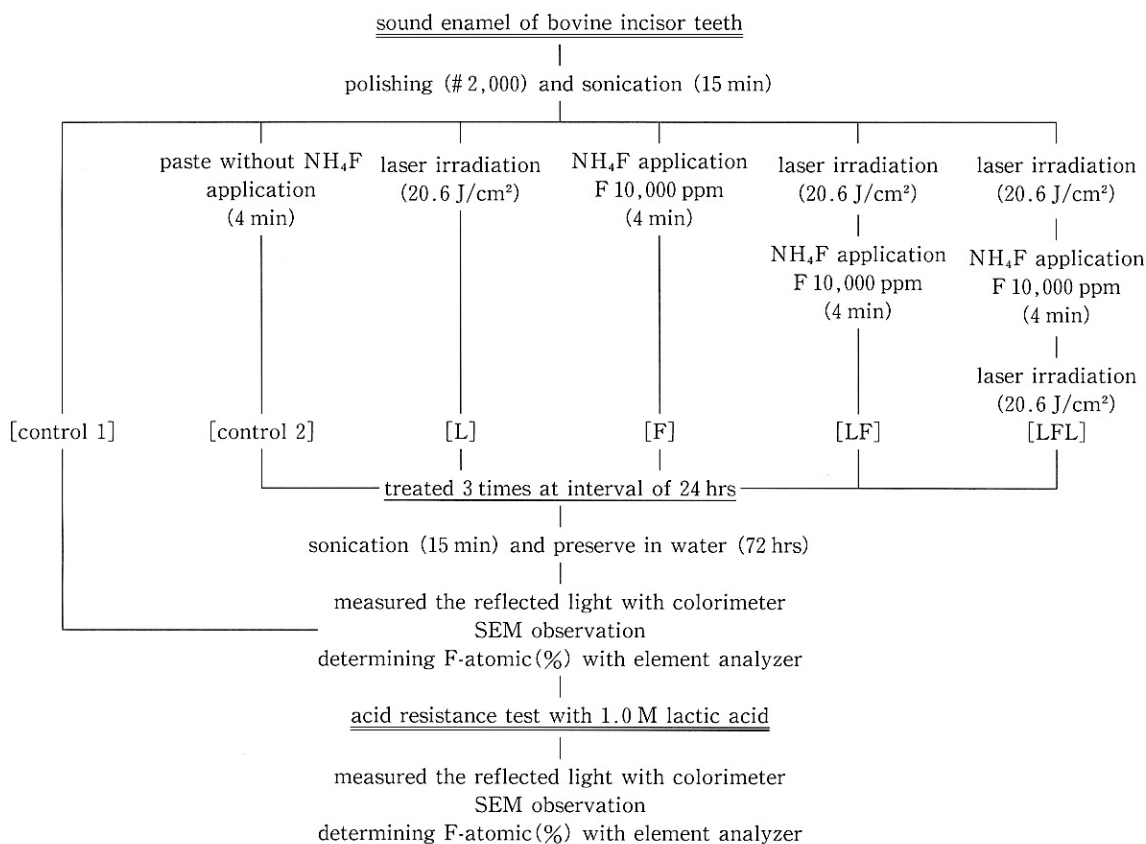


Fig. 1 Experimental procedure

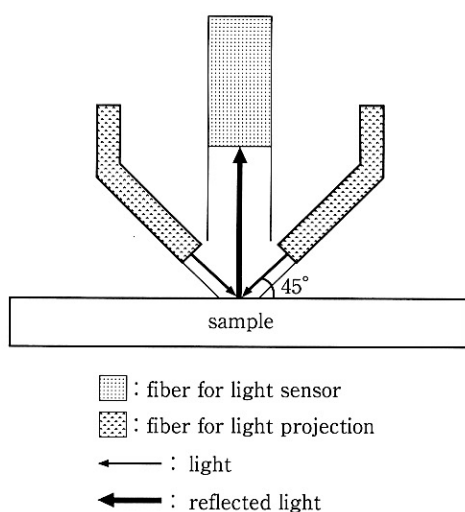


Fig. 2 Structural schema of colorimeter

3. レーザー装置および照射条件

レーザー装置は光ファイバー導光方式の炭酸ガスレーザーPanalas C 10(ZH-5 DL 10, 松下産業)を使

用し、スーパーパルスにてレーザー照射を行った。レーザー出力の設定には、パワーメーター(Nova Ophir)を使用して連続波にてチップ先端からの照射出力を測定後、減衰率を計算してスーパーパルスモードで 20.6 J/cm^2 の照射エネルギー密度となるよう算出し、本機の出力は7 W, 照射時間は3秒に設定した。なお、先端チップの内径は2.6 mmとし、照射野径が3.0 mmとなるように試料と先端チップの距離を1.0 mmとした。

4. 耐酸性試験

対照ならびに試験試料群は以下の処理を施した。なお、対照群2と試験試料群についてはおのこの処理を24時間ごと、3回繰り返した(Fig. 1)。

対照群1：鏡面研磨後、何も処理しなかったもの。

対照群2：フッ化アンモニウムを含有しない試作ペーストを4分間塗布したもの。

L群：レーザー照射のみを行ったもの。

F群：試作フッ素含有ペーストを4分間塗布したもの。

LF 群：レーザー照射後，試作フッ素含有ペーストを 4 分間塗布したもの。

LFL 群：レーザー照射後，試作フッ素含有ペーストを 4 分間塗布し，再度レーザー照射したもの。

各処理後，15 分間超音波洗浄し，3 日間 37°C 蒸留水中に保管した。各試料表層の Y 値を色彩色差計 (CR-321, ミノルタ) にて測定を行った (Fig. 2)。その後，杉山²⁰⁾の方法に準じて 1.0 M 乳酸を 30 μ l 滴下して 60 秒間作用させ，蒸留水にて 15 秒間水洗・乾燥した後，再び Y 値の測定を行った。そして，乳酸処理前と乳酸処理後の Y 値の差を光反射増加量 (以下 ΔY) とし，エナメル質耐酸性の指標とした。色彩色差計の校正は白色校正板 (Y=82.5, x=0.3132, y=0.3139) を用いて行った。各群の試料数は 12 とし，得られた ΔY については Scheffé 法を用いて有意差検定 ($p=0.05$) を行った。

5. エナメル質表層の走査型電子顕微鏡 (以下 SEM) 観察

乳酸処理前と後のエナメル質表層を SEM で観察した。4. と同様に作製した試料をアルコール昇順脱水後， t -ブチルアルコールで 3 回，各 2 時間の溶液置換を行い，凍結後フリーズドライヤー (ES-3020, Hitachi) にて乾燥を行った。試料の蒸着処理は，Ion Sputter (E-1030, Hitachi) にて白金パラジウムターゲットを用い，15 mA，3 分間の条件で行った。試料表面ターゲット間距離は 30 mm とした。蒸着後，FE-SEM (S-4500, Hitachi) にて加速電圧 5 kV，エミッション電流 11 μ A，ワーキングディスタンス 5 mm の条件で，倍率は 5,000 倍ならびに 100,000 倍として SEM 観察を行った。

6. フッ素原子の測定 (以下 F-atomic%)

4. と同様に作製した試料は，エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置 (JSX-3200, 日本電子) を用いて，乳酸処理前と後のエナメル質表層における F-atomic (%) の測定を行った。測定にはファンダメンタルパラメータ法を利用して，蛍光 X 線強度から F-atomic (%) を得た。また，F-atomic (%) はエナメル質表層に存在する Ca, P, O, F の 4 元素中のフッ素原子の割合で示した。測定電圧は 30 kV とし，エネルギー校正には Al, Mn, Mo の混合試料を使用して校正定数 $y=0.00999034$, $x=0.00004968$ とした。

結 果

1. 色彩色差計による耐酸性試験

おのおのの群から得られた ΔY を Table 1 ならびに Fig. 3 に示した。対照群 1 では ΔY が $4.83(\pm 0.65)$ の最高値を示し，次いで対照群 2, L, F, LF 群，そして LFL 群の順に低い値を示した。有意差検定の結果，対照群 1, 2, L 群との間に有意差は認められず，試作フッ素含有ペーストを塗布した F, LF, LFL 群は，対照群 1, 2, L 群との間に有意差が認められた。そして，LFL 群は ΔY が $1.69(\pm 0.45)$ を示し，ほかの試料群と比較して有意に低い値を示した。

2. エナメル質表層の SEM 観察

Fig. 4 に乳酸処理前の SEM 像を示した。対照群 1, 2 の SEM 像における弱拡大 (Fig. 4-A, B) では，エナメル小柱の走行は観察されず，表層は部分的にのりで固められたような状態と数条の研磨傷が観察された。強拡大 (Fig. 4-a, b) では，研磨により生じた微小な削片が観察された。L 群の弱拡大 (Fig. 4-C) では，エナメル質表層が対照群に比べて粗糙となってい

Table 1 Acid resistance test with colorimeter

groups	the difference of reflected light (ΔY)
control 1	4.83 (± 0.65)
control 2	4.72 (± 0.85)
L	4.60 (± 0.51)
F	3.10 (± 0.68)
LF	2.76 (± 0.59)
LFL	1.69 (± 0.45)

mean $\pm$ SD n=12 * $p < 0.05$ (Scheffé's F)

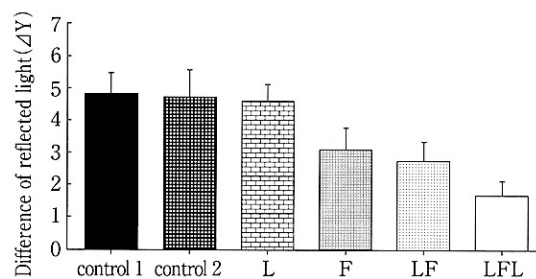


Fig. 3 Acid resistance test based on the difference of reflected light (ΔY) on the bovine enamel. The bars show standard deviation. (n=12)

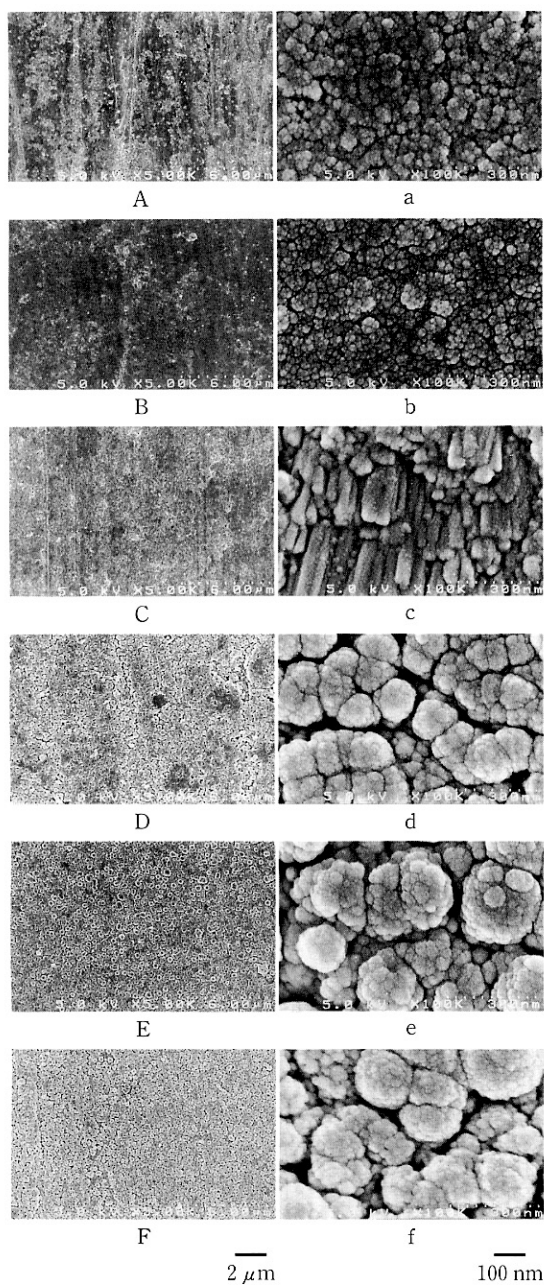


Fig. 4 SEM of the enamel surface after each treatment

- A, a : control 1
 B, b : control 2
 C, c : laser (L)
 D, d : fluoride (F)
 E, e : laser+fluoride (LF)
 F, f : laser+fluoride+laser (LFL)

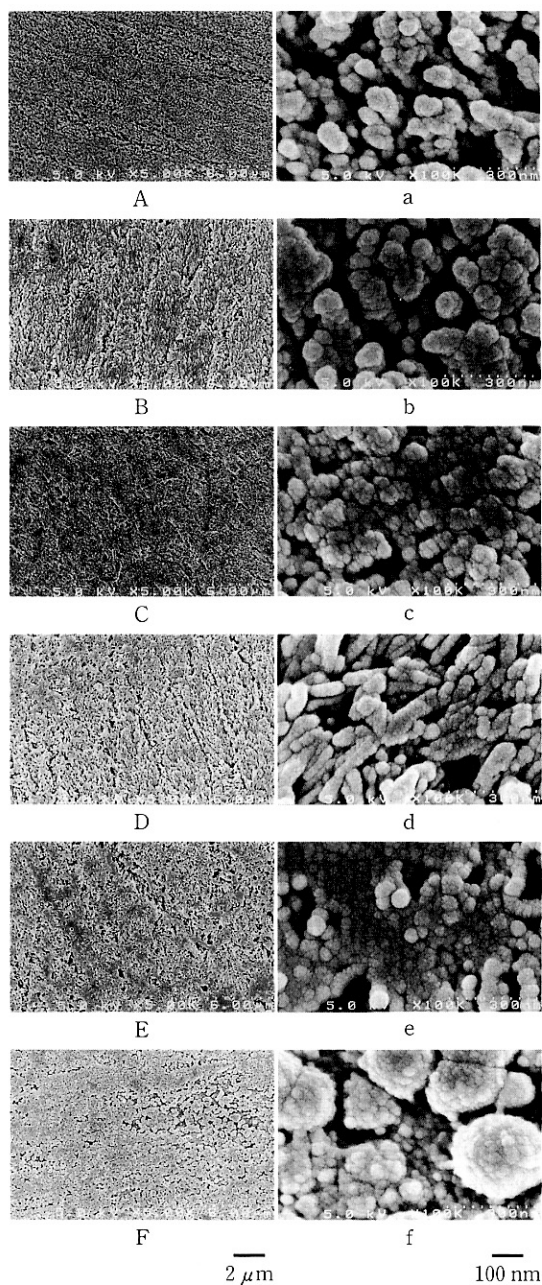


Fig. 5 SEM of the enamel surface after acid resistance test

- A, a : control 1
 B, b : control 2
 C, c : laser (L)
 D, d : fluoride (F)
 E, e : laser+fluoride (LF)
 F, f : laser+fluoride+laser (LFL)

Table 2 Determining F-atomic(%) with element analyzer

groups	after treatment	after acid resistance test
control 1	—	—
control 2	—	—
L	—	—
F	4.87(±0.56)	1.18(±0.84)
LF	5.54(±1.73)	3.25(±1.72)
LFL	8.01(±1.71)	6.48(±1.26)
mean±SD n=5		

た。強拡大(Fig. 4-c)では、六角柱状のハイドロキシアパタイト結晶が明瞭に観察され、対照群で認められた微小な削片はほとんど観察されなかった。F群の弱拡大(Fig. 4-D)では、円形または不定形の沈着物が表層に観察された。強拡大(Fig. 4-d)では、表面に凹凸を有する、形が不揃いの球形に近い構造物で覆われており、ハイドロキシアパタイト結晶形は認められなかった。LF群とLFL群の弱拡大(Fig. 4-E, F)では、円形の沈着物が表層を覆っていた。強拡大(Fig. 4-e, f)では、小粒塊が集合したような、表面に凹凸を有する、球形または半球形の構造物が観察され、ハイドロキシアパタイト結晶形は認められなかった。

Fig. 5に乳酸処理後のSEM像を示した。対照群1, 2のSEM像において、乳酸を作用させることにより、弱拡大(Fig. 5-A, B)ではエナメル小柱の走行が観察された。強拡大(Fig. 5-a, b)では、酸により侵蝕されたエナメル質の表面性状が観察され、ハイドロキシアパタイト結晶間に空隙が生じていた。L群とF群の弱拡大(Fig. 5-C, D)では、対照群と同様にエナメル小柱の走行が観察された。強拡大(Fig. 5-c, d)では、ハイドロキシアパタイト結晶が対照群に比べ密に存在していた。LF群の弱拡大(Fig. 5-E)では、エナメル小柱の走行は観察されず、エナメル質表層にのりて固められたような沈着物が部分的に認められ、それらの間には空隙が観察された。強拡大(Fig. 5-e)では、結晶の集合体が酸により侵蝕された空隙を認めたが、L群およびF群よりもさらに密な結晶が観察された。LFL群の弱拡大(Fig. 5-F)では、乳酸処理前に観察された円形の沈着物がエナメル質表層に残留しているのが観察され、強拡大(Fig. 5-f)でも乳酸処理前に認められた球形または半球形の構造物が観察された。

3. F-atomic(%)の測定

Table 2に乳酸処理前と後のエナメル質表層のF-

atomic(%)を示した。対照群1, 2およびL群では、乳酸処理前後のエナメル質表層におけるフッ素原子は本方法では検出されなかった。乳酸処理前のF, LF群、そしてLFL群のエナメル質表層ではフッ素原子が検出され、LFL群においては、F-atomic(%)が8.01(±1.71)とほかの試料群と比較し、最も高い値を示した。乳酸処理後のエナメル質表層におけるF-atomic(%)は、F群では1.18(±0.84)、LF群では3.25(±1.72)であった。LFL群ではF-atomic(%)が6.48(±1.26)と最も高い値を示した。

考 察

近年、歯科用高出力レーザーの普及に伴い、その臨床的応用法の1つとしてエナメル質表層の耐酸性を向上させる試みがなされている。ルビーレーザーあるいは炭酸ガスレーザーをエナメル質表面に照射後、乳酸を作用して表層下脱灰の有無をコンタクトマイクロラジオグラムや電子顕微鏡を用いて検討した研究^{12,13)}によると、レーザー照射により生じたクレーターやエナメル質の溶融・凝固した領域は不透過性が増大し、表層下脱灰は全く生じていないか、あるいは抑制されていることが報告されている。さらに、最近の研究^{21,22)}では炭酸ガスレーザーを照射してエナメル質の脱灰程度を微小硬度計で測定したところ、対照群と比べて表層下脱灰を50%抑制し、エナメル質の溶融・凝固した領域は、Tetracalcium diphosphate monoxide $[\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2\text{O}]$ が約5 μm の厚さでエナメル質表層に形成され、耐酸性を向上させたと報告している。しかし、こうした高いエネルギー密度でのレーザー照射は、エナメル質の溶融・凝固といった改質を伴い亀裂の発生が問題点として指摘されている²³⁾。

一方、小児から成人、高齢者まで年齢特性など実情にあった応用方法が確立されつつある齲蝕予防法の1つに、フッ化物の応用^{1-4,24)}が挙げられる。フッ化物の抗齲蝕作用は、フッ素イオンの2つの主な効果によるとされている²⁵⁾。1つは、乳酸をはじめとする有機酸を産生して歯垢pHを低下させる *Streptococcus mutans*²⁶⁾ や *Lactobacillus*²⁷⁾ といった口腔細菌の増殖、糖代謝・酸産生能を抑制する効果。もう1つは、フルオロアパタイトの形成により歯質の結晶構造を安定させ、それによってエナメル質の耐酸性が向上するといわれている。

本研究は炭酸ガスレーザーでエナメル質に傷害を与

えることなく、耐酸性の向上を目的としてフッ化物を併用することを試みようとしたものである。レーザー照射に関してはスーパーパルスモードを用い、フッ化物に関してはペースト状にしたものを試作して用いた。この試作フッ素含有ペーストは、水溶性ポリマーが配合されているため水溶液と比べて粘性を有しており、歯面における停滞性、またレーザー先端チップからの冷却用エアによる塗布材の飛散を予防するものである。大橋ら²⁸⁾の研究によると、高濃度フッ化物の歯面塗布において、従来から歯科臨床で多用されているフッ化ナトリウムよりもフッ化アンモニウムのほうが、効果的にエナメル質の耐酸性を向上すると報告していることから、本研究ではフッ化アンモニウムをペースト中に配合して、試作フッ素含有ペーストとした。

エナメル質表面の耐酸性獲得の評価には色色差計を使用した。本測定器はJIS Z 8722の45-0法に準拠して設計されており、パルスキセノンランプからの光を環状に配置された直径1mmのファイバー30本で導き、45度の角度で試料面を均一に照射し、試料表面から垂直方向の反射光を測定するものである。その際のY値の増減は、試料表面の凹凸の程度を表す指標とすることが可能と考えられる。杉山²⁹⁾はウシエナメル質表面における脱灰程度とY値の変化量との間に相関がみられ、1.0M乳酸を60秒あるいは90秒間作用した場合、カルシウム溶出量と光反射増加量の高い相関が得られたと報告している。この方法は歯質の耐酸性を迅速に、かつ簡便に調べることができるものと考えられ、本実験の耐酸性試験もこの測定方法に準じて行った。

その結果、対照群1の試料において ΔY が最も高い値を示した。乳酸処理前のSEM像(Fig. 4-A, a)では、エナメル小柱の走行は観察されなかったが、微小な削片が観察された。そして、乳酸処理後のSEM像(Fig. 5-A, a)では、乳酸処理前に観察された微小な削片は酸により除去され、さらにエナメル質の脱灰によりエナメル小柱の走行が観察された。強拡大では脱灰に伴うハイドロキシアパタイト結晶間の間隙が多く認められた。こうした酸による侵蝕がエナメル質表層に凹凸を形成しY値の増加に深く関与したものと考えられる。また、対照群2の ΔY 、乳酸処理後のSEM像(Fig. 5-B, b)からも対照群1と同様に脱灰されている結果が得られ、ここで使用したフッ化物を含まないペーストでは耐酸性に影響を与えなかったことが示

された。

L群の試料も比較的高い ΔY を示し、本実験条件のレーザー照射のみでは、耐酸性が得られなかったものと考えられた。前述のように連続波で20 J/cm²あるいは30 J/cm²以上のエネルギー密度で照射すると亀裂などが生じるとされているので、本実験ではスーパーパルスの計算値エネルギー密度20.6 J/cm²で照射を行った。連続波とほぼ同一のエネルギー照射密度にもかかわらず、実験に使用した試料のエナメル質表面にはレーザー照射によって生じた亀裂などは観察されなかった。このことは、スーパーパルス照射では熱の蓄積が抑制され、エナメル質表層の溶融・凝固また亀裂といった形態変化を生じさせなかったものと考えられる。しかし、レーザー発振時のピークパワーが連続波の2.5~3倍とされているので、照射後のSEM像(Fig. 4-C, c)で観察されるように、エナメル質表層に存在する微小な削片を除去できたものと思われる。

F、LF群の ΔY は、対照群1、2と比較して低い値で、耐酸性を獲得したことを示しており、乳酸処理前のSEM像(Fig. 4-D, d, E, e)ではエナメル質表層に沈着物が観察された。しかし、乳酸処理後(Fig. 5-D, d, E, e)には、これらの沈着物はほとんど観察されず、エネルギー分散型蛍光X線装置によるF-atomic(%)では、乳酸処理前と比較して乳酸処理後はその割合が減少していた。今回用いた試作フッ素含有ペーストが高濃度のフッ化物であることから、この沈着物はフッ化カルシウムであろうと考えられた^{29,30)}。F群とLF群の間では ΔY に関して、有意差は認められないが、LF群のほうが耐酸性を獲得している傾向がみられた。このことは、Table 2に示したように、LF群のほうがF群よりも乳酸処理後のフッ素の残存量が多いことに起因しているものと考えられる。田籠ら³¹⁾はエナメル質表面にフッ化物を作用後レーザー照射したものと、レーザー照射後フッ化物を作用したものについてカルシウムの溶出量を検討した結果、レーザー照射後にフッ化物を作用させたほうがカルシウムの溶出量が少なかったと報告している。山田ら³²⁾は人工齲蝕を作製したエナメル質について同様の実験を行い、レーザー照射を先に行うことが耐酸性を得るうえで効果的であるとしている。これらの報告をふまえて、本研究ではレーザー照射後に試作フッ素含有ペーストを作用させた。

その結果、試作フッ素含有ペーストを単独で作用さ

せるよりも、レーザー照射と併用させるほうがエナメル質の耐酸性は向上する傾向を示した。その理由として、レーザー照射後のSEM像(Fig. 4-C, c)において観察されたように、削片と思われる物質が除去され、アパタイト結晶が露出してフッ素との反応性が促進したものと考えられた。そうした反応性の促進により、乳酸処理後も多くのフッ素が残留していたものと思われた。あるいは、F群(Fig. 4-D, d)で観察された沈着物は、研磨によりエナメル質表面に生成した削片由来のフッ化カルシウム様物質と考えられ、LF群(Fig. 4-E, e)とLFL群(Fig. 4-F, f)のそれは露出したハイドロキシアパタイト結晶由来のフッ化カルシウム様物質であろうと推測され、由来の違いがエナメル質表層の耐酸性に影響を及ぼした可能性も考えられる。以上のことは、エナメル質に対するフッ素の効果をより確実にするためには、まずレーザー照射を行い、エナメル質表層の汚物を除去してハイドロキシアパタイトを露出させることの必要性を示したものと考えられる。

LFL群の ΔY は実験試料群のなかで有意に低い値を示し、最も耐酸性を獲得していた。乳酸処理前のSEM像(Fig. 4-F, f)から、フッ化カルシウム様の沈着物がほかの群に比べ密に存在していることが観察された。また、乳酸処理後のSEM像(Fig. 5-F, f)においても、乳酸処理前に観察されたフッ化カルシウム様の沈着物が多く残留して、エナメル質表層を覆っていた。それゆえ、乳酸処理前と後のエナメル質表層のF-atomic(%)もほかの試料群と比べて高い値を示したものと考えられる。レーザー照射後に試作フッ素含有ペーストを作用した場合の効果は前述のとおりであり、その後、さらにレーザー照射を行うことでペースト内の水酸基、もしくはエナメル質表層に存在する水酸基、リン酸基に10.6 μm の波長が吸収され蒸散熱が発生し、化学的反応性を促進したものと考えられる。そして、エナメル質表層に密に存在するフッ化カルシウム様の物質がバリアーの役目をして、エナメル質の耐酸性を向上させたものであろうと推測された。以上のことから、炭酸ガスレーザーにおけるスーパーパルスの照射と試作フッ素含有ペーストの併用により、エナメル質表層の耐酸性が向上することが確認された。特に、LFLの作用方法は、エナメル質の耐酸性向上に有効であり、その効果はエナメル質表層に生成されたフッ化カルシウム様物質によるものであろうと考えられた。

結 論

1. 対照群1とL群の ΔY は有意差がみられず、本実験条件の炭酸ガスレーザーのスーパーパルス照射だけではエナメル質表面の耐酸性向上は示されなかった。

2. F群とLF群の ΔY は有意差がみられなかったが、LF群のほうがF群よりも耐酸性が向上している傾向がみられた。

3. LFL群の ΔY はほかの試料群と比較して有意に低い値を示し、最も耐酸性を獲得していることが示された。

4. スーパーパルスにおける照射エネルギー密度20.6 J/cm²では、エナメル質表層のアパタイト結晶の溶融・凝固、亀裂といった傷害は認められなかったが、エナメル質表層に存在する削片が除去されているSEM像が観察された。

5. 対照群2と試作フッ素含有ペーストを塗布した試料のSEM像において、試作フッ素含有ペーストを塗布したエナメル質表層にはフッ化カルシウム様の沈着物が確認され、LFL群のエナメル質表層では最も密に存在していた。

6. LFL群のSEM像において、乳酸処理後もエナメル質表層にフッ化カルシウム様物質が密に存在していた。

7. 試作フッ素含有ペーストを用いたF, LF, LFL群では、乳酸処理前と後にフッ素原子を検出することができたが、乳酸処理後はいずれもその検出率は減少していた。

8. LFL群の乳酸処理前と後のF-atomic(%)は、試料群中最も高い値を示した。

以上の結果から、炭酸ガスレーザーのスーパーパルスモードでのレーザー照射と試作フッ素含有ペーストの併用によって、フッ化物の単独応用あるいはレーザー照射だけを施す方法よりも効果的、かつ安全にエナメル質表層の耐酸性を向上させることが示唆された。

謝 辞

本稿を終えるに臨み、終始御懇篤なる御指導、御校閲を賜りました日本大学松戸歯学部保存修復学講座、池見宅司教授に対し深甚の謝意を表するとともに、御助力を賜った教室員各位に対し深く感謝いたします。また、本研究遂行に

多大なる御協力を頂いた(株)ビーブランド・メディコ・デ
ンタルならびに(株)サンギに厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 奥田正計: Intraoral Fluoride Releasing System に関する研究—低濃度のフッ素を作用させたエナメル質の耐酸性について—; 歯科医学 51, 912—944, 1988.
- 2) 池見宅司, 岩佐俊夫, 並木勇次, Koulourides T: 耐酸性の層のフッ素と density の測定; 日歯保存誌 32, 1599—1604, 1989.
- 3) 澤田曜信: 各種フッ化物のヒトエナメル質への取り込みについて; 日大口腔科学 12, 106—118, 1986.
- 4) 可見瑞夫, 可見徳子: う蝕予防のためのフッ化物応用法 I. フッ素のう蝕予防機序; 岐歯学誌 12, 1—12, 1985.
- 5) 近藤 武: フッ素イオン電極法の衛生学的応用(F Series No. 14) 第3報 酸蝕法(生検法)による表層珐瑯質の溶解量とフッ素量 特に局所フッ素塗布剤との関連について; 口腔衛生会誌 20, 173—179, 1970.
- 6) 小林 博: 弗素イオン導入法が珐瑯質の耐酸性(抗蝕蝕性)増強に及ぼす効果についての実験的ならびに臨床的研究; 歯科学報 72, 1881—1902, 1972.
- 7) 尾辻 淳: エナメル質におけるフッ素保持に関する研究—とくに、フッ化ナトリウム溶液の通電下での作用について—; 歯科医学 53, 1—24, 1990.
- 8) 金 光旬, 神原正樹: レーザー照射後のエナメル質および象牙質表面の微細構造; 歯科医学 60, 45—57, 1997.
- 9) 白須賀哲也, 若林 始, 出張一博, 小高鉄男, Sharif A, 松本光吉: 連続波 Nd-YAG レーザー照射時のエナメル質表面の形態的变化; 昭歯誌 10, 206—215, 1990.
- 10) 茅野照雄, 落合 聡, 清野和夫, 山本 肇, 中島貞洋, 望月孝晏: Erbium: YAG レーザ照射ヒト抜去歯の病理組織学的変化について; 口病誌 56, 381—392, 1989.
- 11) Yamamoto H, Sato K: Prevention of dental caries by Nd: YAG laser irradiation; J Dent Res 59, 2171—2177, 1980.
- 12) Stern RH, Vahl J, Sognnaes RF: Lased enamel: Ultrastructural observations of pulsed carbon dioxide laser effects; J Dent Res 51, 455—460, 1972.
- 13) Stern RH, Sognnaes RF: Laser inhibition of dental caries suggested by first tests *in vivo*; J Am Dent Assoc 85, 1087—1090, 1972.
- 14) 清水俊昭: 炭酸ガスレーザーがエナメル質に及ぼす物理・化学的效果; 歯材器 3, 95—101, 1984.
- 15) 菅田文雄, 大森康以知, 田中昭男, 遊津隆義, 千田彰, 五味明良, 神谷一有, 長谷川二郎: 象牙質に対する炭酸ガスレーザーの照射効果; 日本レーザー歯学会誌 5, 73—80, 1994.
- 16) 白須賀哲也: APF 併用レーザー照射による歯質耐酸性付与効果に関する研究; 日歯保存誌 31, 283—293, 1988.
- 17) 国分美和子, 秋山哲夫, 結城昌子, 瀬川 洋, 田村基政, 清水秋雄, 楠 憲治: 高濃度再石灰化液のエナメル質作用時におけるエキシマレーザー光照射の影響; 口腔衛生会誌 47, 636—637, 1997.
- 18) 好川 正: 脱灰エナメル質の再石灰化に及ぼすレーザー照射ならびにフッ素の影響; 口腔衛生会誌 42, 211—218, 1992.
- 19) 日本歯科色彩学会: 歯の色の話; クインテッセンス出版, 東京, 35—40, 1999.
- 20) 杉山道紀: エナメル質表面の耐酸性の評価に関する研究—色彩色差計を用いた測定法—; 日大口腔科学 25, 326—338, 1999.
- 21) Nelson DGA, Shariati M, Glena R, Shields CP, Featherstone JDB: Effect of pulsed low energy infrared laser irradiation on artificial caries-like lesion formation; Caries Res 20, 289—299, 1986.
- 22) Nelson DGA, Wefel JS, Jongbloed WL, Featherstone JDB: Morphology, histology and crystallography of human dental enamel treated with pulsed low-energy infrared laser radiation (with 1 color plate); Caries Res 21, 411—426, 1987.
- 23) 森岡俊夫, 鈴木和雄: レーザーによる蝕蝕予防(下)—機種選択と照射時に歯面に生じる問題点—; 歯界展望 62, 787—796, 1983.
- 24) 川島 正, 松島 潔, 辻本恭久: フッ化ナトリウムがエナメル質に与える影響—作用温度と作用時間について—; 日大口腔科学 20, 335—348, 1994.
- 25) 日本口腔衛生学会 フッ化物応用研究委員会編: フッ化物応用と健康—う蝕予防効果と安全性—; 第1版, 口腔保健協会, 東京, 27—36, 1998.
- 26) 池田 正: 蝕蝕の病因; 歯界展望 74, 1107—1115, 1989.
- 27) Seow WK: Biological mechanisms of early childhood caries; Community Dent Oral Epidemiol 26, 8—27, 1998.
- 28) 大橋たみえ, 岩田幸子, 廣瀬晃子, 可見徳子, 可見瑞夫: NaF 溶液および NH₄F 溶液の濃度の差によるエナメル質表面への影響; 口腔衛生会誌 48, 201—208, 1998.
- 29) 新谷祐久: 低濃度フッ化アンモニウム歯面塗布溶液のエナメル質粉末に及ぼす影響について; 口腔衛生会誌 40, 270—286, 1990.
- 30) 山村利貞: リン酸酸性フッ化アンモニウムのエナメル質におよぼす影響について; 口腔衛生会誌 35, 330—344, 1985.
- 31) 田籠祥子, 森岡俊夫: エナメル質耐酸性付与に及ぼす YAG レーザー照射とフッ化物塗布の併用効果; 口腔衛生会誌 34, 344—345, 1984.
- 32) 山田恵子, 桜井 聡, 神山紀久男: 人工的初期脱灰エナメル質へのレーザー照射とフッ化物塗布併用による蝕蝕抑制効果に関する実験的研究; 小児歯誌 26, 732—741, 1988.

キーワード

- ・漂白
- ・エナメル質
- ・耐酸性

日歯保存誌 43 (5) : 1107~1112, 2000

生活歯漂白後のエナメル質の耐酸性

深澤正幹 内山敏一 杉山道紀
大村基守 田川剛士 荻野朗
河野善治 池見宅司

日本大学松戸歯学部保存学I講座(保存修復学)

(主任: 池見宅司教授)

(受付: 平成12年8月1日)

Acid Resistance of Enamel Surface after Vital Bleaching

Masataka FUKAZAWA, Toshikazu UCHIYAMA, Michinori SUGIYAMA,
Motomori OHMURA, Tsuyoshi TAGAWA, Akira OGINO,
Yoshiharu KONO and Takuji IKEMI

Department of Operative Dentistry, Nihon University School of Dentistry at Matsudo

(Chief: Prof. Takuji IKEMI)

870-1, Sakaecho, Nishi-2, Matsudo, Chiba 271-8587, Japan

(Received for Publication: August 1, 2000)

Bleaching of vital teeth is currently being performed in response to the growing aesthetic demands of patients. Products that contain 35% hydrogen peroxide solution as the main constituent are being marketed in Japan for in-office bleaching. This bleaching method does not require tooth grinding, and it has become the preferred initial choice for patients who want to improve the color of their teeth. Some reports have described dissolution of organic substances in the enamel surface and changes in surface properties due to the oxidative effect of the 35% hydrogen peroxide solution used in this bleaching. However, the enamel surface is only temporarily roughened, since the action of minerals and organic substances contained in saliva is thought to promote gradual smoothening of these irregularities.

Some studies have reported that the use of fluo-

ride improves the acid resistance of enamel that has been artificially demineralized or caries. However, the effect of fluoride after vital bleaching in the enamel layer remains to be elucidated. Therefore, we investigated the changes in the surface properties of enamel immediately after bleaching, in the present study, by determining if the use of fluoride directly after bleaching improved the acid resistance of the enamel. Furthermore, we investigated if fluoride effectively accomplished the principal objective of bleaching, and if it contributed to the prevention of dental caries.

Results indicated that the use of acidulated phosphate fluoride solution and sodium fluoride after bleaching improved enamel acid resistance more than ammonium fluoride.

(Request original article reprints to Dr. FUKAZAWA)

緒 言

近年、患者の審美的な要求の高まりに伴い、生活歯に対する漂白処置が行われることがある。本邦では、生活歯のオフィスブリーチング用に 35% 過酸化水素水を主剤とした松風ハイライトが市販され、臨床で用いられている。この生活歯漂白法は歯質の削除を必要とせず、変色歯で悩みを有する患者にとっては、歯の色を改善するためのまず最初の選択肢として受け入れられてきている¹⁻³⁾。しかし、漂白に使用される 35% 過酸化水素水はその酸化作用で、エナメル質表面の有機質を溶解して表面性状を変化させると報告されている⁴⁾。また、症例によってはエナメル質表面を酸処理することもある⁵⁾。いずれにしても、漂白によって一時的にエナメル質表面は粗糙感を呈するが、唾液中のミネラルや有機質の作用でそれらの凹凸は徐々に改善されていくものと考えられる⁶⁻⁸⁾。

一方、齲蝕や酸などで一度脱灰されたエナメル質は、フッ化物を作用することで耐酸性が向上するという報告がなされている⁹⁻¹²⁾。しかし、エナメル質面に過酸化水素水を作用した後のフッ化物の効果は明確にされていない。そこで、著者らは漂白直後のエナメル質表面性状の変化に着目し、その際にフッ化物を作用することにより、エナメル質の耐酸性を向上させ、主眼とした漂白だけでなく齲蝕予防の一助となる可能性を検討する目的で実験を行った。

本実験では、研磨したウシのエナメル質を松風ハイライトで漂白処理し、漂白直後のエナメル質耐酸性、漂白後にフッ化ナトリウムやフッ化アンモニウム、あるいは酸性フッ素リン酸溶液を作用させた場合の耐酸性について、乳酸を用いて検討した。乳酸や漂白剤、フッ化物の作用によるエナメル質表面の形態変化の指標としては色彩色差計の Y 値を利用して行い^{13,14)}、おのおののフッ化物の効果を比較検討した。

材料および方法

1. 試料作成

ウシ下顎前歯の新鮮抜去歯を用いた。耐水研磨紙で唇側面のエナメル質表面の平坦部が直径 8 mm 以上となるまで削除し、さらに、No. 2,000 インペリアルラッピングフィルム (3 M) にて最終研磨を行った。研磨したエナメル質表面に直径 5 mm の穴を開けたセル

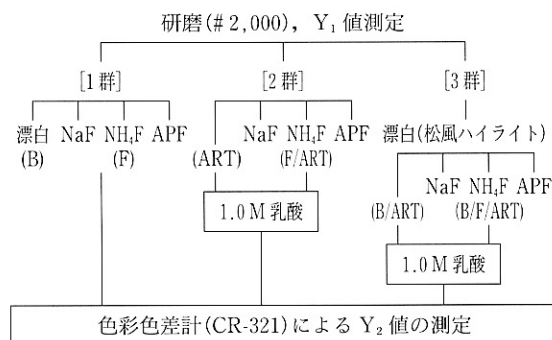


図 1 実験手順

ロイド製のウインドウを貼付して試料とした。

試験試料は以下の 3 群に分けた (図 1)。

1 群: 漂白処理したもの (B)。

各種フッ化物を作用したもの (F)。

2 群: 耐酸性試験を行ったもの (ART)。

各種フッ化物を作用後、耐酸性試験を行ったもの (F/ART)。

3 群: 漂白処理後、耐酸性試験を行ったもの (B/ART)。

漂白処理後、各種フッ化物を作用させて耐酸性試験を行ったもの (B/F/ART)。

漂白処理は松風ハイライト (松風) を混和後、ウインドウ内の歯面に塗布し、6 分間放置後、キュアリングライト (XL-3000, 3 M) 照射器にて 60 秒間光照射した。照射後、さらに 2 分間放置して水洗を行った。この操作を 3 回繰り返して漂白処理試料とした。

フッ化物は 9,050 ppmF のフッ化ナトリウムとフッ化アンモニウムそして酸性フッ素リン酸溶液 (フローデン A, サンスター) を使用した。各フッ化物をウインドウ内の歯面に 120 秒間作用し、水洗後、再度 120 秒間作用してフッ化物作用試料とした。

B/F/ART に関しては、漂白終了後、水洗を十分に行って漂白剤を除去しておのおののフッ化物を歯面に作用した。

すべての試験試料は十分な水洗の後、おのおのの試料を分別して蒸留水中に 2 時間浸漬したものを試験試料とした。

2. 耐酸性試験

2, 3 群における耐酸性試験は、杉山の方法¹³⁾に準じて行った。まず研磨直後のウインドウ内に色彩色差計 (CR-321, ミノルタ) の測色部をあて Y 値 (Y₁) を測定する。次におのおのの処理を施した後、1.0 M 乳酸

(和光)をウインドウ内に60秒間作用させ、15秒間水洗し、10秒間乾燥後、同様に色彩色差計でY値(Y_2)を測定する。 $Y_2 - Y_1 = \Delta Y$ からエナメル質表面の反射量の差、すなわち拡散光の反射増加量を求めた。なお、1群については耐酸性試験を行わず、研磨直後の Y_1 と漂白処理後あるいは各種フッ化物作用後の Y_2 の値から ΔY 値を求めた。実験はそれぞれの条件で7試料ずつ行い、各群について危険率5%(Scheffé)で多重比較検定を行った。

結 果

1群におけるBの ΔY 値は平均で約2.4を示したが、Fのフッ化ナトリウムで約0.3、フッ化アンモニウムで約2.9、酸性フッ素リン酸溶液では約2.4を示した(図2)。フッ化ナトリウムはBやほかのフッ化物に比べて有意に低い ΔY 値を示した。Bおよびフッ化アンモニウム、酸性フッ素リン酸溶液の間には有意差が認められなかった。

2群におけるARTの ΔY 値は約5.3を示し、F/ARTのフッ化ナトリウムで4.2、フッ化アンモニウムで3.5、酸性フッ素リン酸溶液では3.8を示した(図3)。ARTはF/ARTと比較して有意に高い ΔY 値を示し、F/ART間では有意差が認められなかった。

3群におけるB/ARTの ΔY 値は約7.9を示し、B/F/ARTのフッ化ナトリウムで5.7、フッ化アンモニウム

ウムで6.4、酸性フッ素リン酸溶液では5.3を示した(図4)。B/ARTはB/F/ARTのフッ化ナトリウムおよび酸性フッ素リン酸溶液と比較して有意に高い ΔY 値を示し、B/F/ART間では有意差が認められなかった。

本実験において耐酸性試験を行った試料ではB/ARTが最も高い ΔY 値を示した。そして、フッ化物を作用したものではフッ化アンモニウムが低い ΔY 値

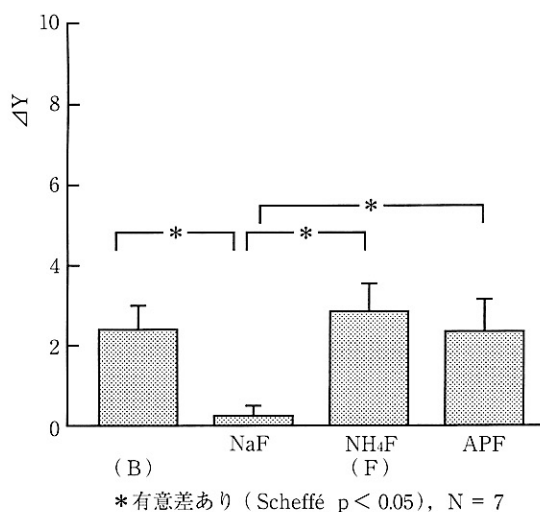


図2 1群:漂白処理(B)および各種フッ化物を作用した(F)試料の ΔY

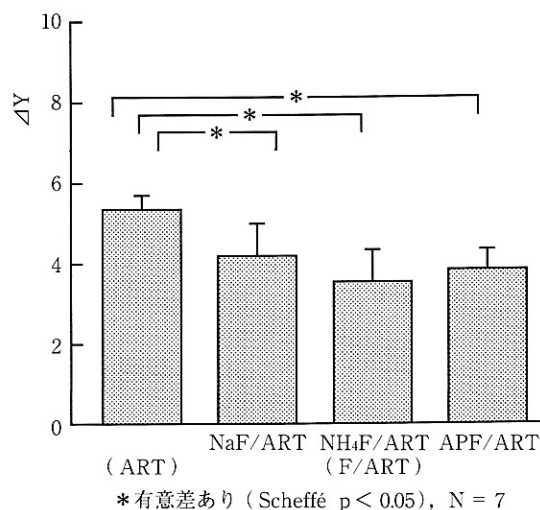


図3 2群:耐酸性試験(ART)および各種フッ化物を作用後、耐酸性試験を行った(F/ART)試料の ΔY

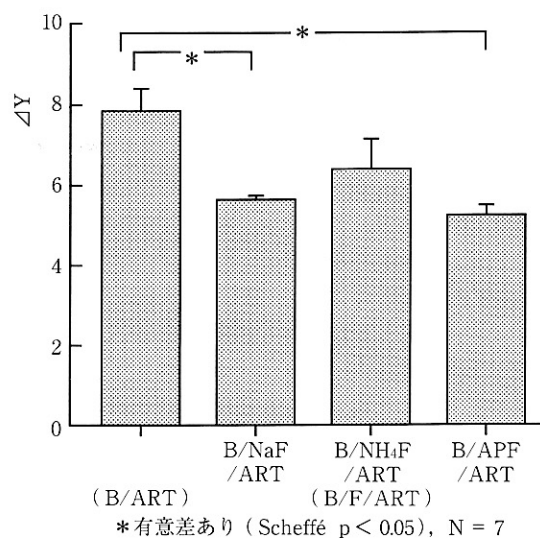


図4 3群:漂白処理後、耐酸性試験(B/ART)および漂白処理後、各種フッ化物を作用させて耐酸性試験を行った(B/F/ART)試料の ΔY

を示し、漂白処理後にフッ化物を作用したものでは酸性フッ素リン酸溶液が低い ΔY 値を示した。

考 察

患者の審美的な歯に対する関心の深まりとともに、歯の色調改善が歯科医療における診療の一分野を占めようとしており、着色歯あるいは変色歯の色調改善は個人の心的悩みの緩和、解消につながる重要な処置であると考えられるようになった。1963年にNuttingら¹⁵⁾がスーパーオキソールに過ホウ酸ナトリウムを混合してウォーキングブリーチ法を開発してから、漂白処置の多くは失活歯に対して応用されてきた¹⁶⁻²⁴⁾。生活歯に関しては、米国でナイトガードによる漂白法が発案されてホームブリーチング法が行われるようになり²⁵⁻³¹⁾、その後、歯科診療室において安全かつ比較的短時間のチェアタイムで生活歯の漂白を行う方法が米国Shofuにより開発された³²⁾。

この方法は歯科医師が行うオフィスブリーチングとして急速に普及し、本邦においても松風ハイライトが市販されるようになり、その効果についてはいくつかの報告がみられる³³⁻³⁵⁾。本生活歯漂白法は適応症をある程度限定しなければならないが、歯質切削を必要としないことから、患者の満足が得られない場合にはラミネートベニア修復あるいはその他の審美的修復へと移行することも可能で、患者だけでなく術者側としても受け入れやすいという利点を有している。

松風ハイライトには35%の過酸化水素水が液剤として、硫酸マンガンを硫酸第一鉄が光あるいは化学的活性化物質いわゆるデュアルアクチベーターとして粉剤に混入されていると報告されている³⁶⁾。過酸化水素水の酸化作用でエナメル質内の有機質を分解して漂白するとされており、漂白を繰り返すことでエナメル質面も有機質の溶解と思われるSEM像が観察されている⁴⁾。また、症例によっては酸処理を施す場合もあり、この場合には酸によって無機質が脱灰されエナメル質表面は凹凸を示すものと考えられる³⁾。いずれにしてもこれらの粗硬化した表面は、比較的新鮮なエナメル質が露出しているものと推測される。

そこで、著者らは、漂白直後のエナメル質に対してフッ化物を作用すると、効果的にエナメル質の耐酸性が向上するのではないかと考え、フッ化ナトリウム、フッ化アンモニウムそして酸性フッ素リン酸溶液の3種類のフッ化物について、耐酸性獲得の比較検討を

行った。フッ化物をエナメル質に作用させた場合の歯質耐酸性獲得については、齲蝕や人工的に脱灰した歯質に対して効果的であると報告されている⁹⁻¹²⁾。そして、漂白剤にフッ化物を混入してその効果を検討した報告³⁷⁾もみられ、漂白処理後にフッ化物を塗布することもあるが、混入したフッ化物の効果あるいは有機質が除去された後にフッ化物を作用したエナメル質の耐酸性については明確にされていない。本実験では一般的に行われている酸脱灰を伴わない生活歯漂白法を想定して実験を行った。その際のフッ素濃度に関しては、酸性フッ素リン酸溶液のフッ素濃度が約9,050 ppmであることから、ほかのフッ化物についても9,050 ppmとした。

耐酸性獲得の指標としては、杉山¹³⁾、深澤¹⁴⁾の報告に準じて色彩色差計のY値をもとにして実験を行った。この方法は、同一歯の酸処理前と酸処理後の ΔY 値を求めることにより、軽度の脱灰でエナメル質表面の粗糙性の変化を数値化することができるという迅速性と簡便さを有している。さらに、得られたY値はXYZ表色系のなかにおいて、有意差検定が可能であるという利点も有している。しかし、過度の脱灰ではエナメル質表面の凹凸と ΔY 値との間に誤差が生じてくることから、1.0 M 乳酸を60秒あるいは90秒作用させる方法が推奨されている¹³⁾。本実験においては、1.0 M 乳酸60秒間処理を採用した。さらに、漂白処置やフッ化物を塗布したエナメル質表面の性状変化についても、この方法を利用して実験を行った。

1群のBでは約2.4の ΔY 値を示し、Fのフッ化ナトリウムを作用したものは約0.3でフッ化アンモニウムと酸性フッ素リン酸溶液ではそれぞれ約2.9と2.4を示した。これは、フッ化ナトリウムを作用する前と後のエナメル質表面ではほとんど変化を示さず、漂白処理あるいはほかのフッ化物を作用したものでは表面が多少粗糙になったことを表している。深澤¹⁴⁾は、エナメル質研磨面には削片層が存在していることを報告している。本実験で使用した松風ハイライトとフッ化物でpH 5.5よりも低いものは松風ハイライトと酸性フッ素リン酸溶液である。これらは研磨によって生じた削片層を除去して、エナメル質小柱を露出させ、有機質の溶解あるいはエナメル質最表層の非常に軽微な脱灰が生じたものと考えられる。また、フッ化アンモニウムに関しては、pH 6.1であったことから脱灰などに起因するものではなく、エナメル質表層にフッ化カルシウムの沈着が生じたためと考えられる。フッ化

ナトリウムの作用によるエナメル質表面の変化は最も少なかった。

2群のARTでは約5.3の ΔY 値を示し、F/ARTよりも有意に高い ΔY 値を示すことから、従来より報告されているようにエナメル質にフッ化物を作用させると耐酸性が向上することが示された。そのなかでも、フッ化アンモニウムが最も低い ΔY 値を示し、通常のフッ化物による齲蝕予防法においてはフッ化ナトリウムよりも効果的であろうと推測された。

3群のB/ARTでは約7.9の ΔY 値を示し、本実験中で最も高い値であった。このことは、漂白処理後のエナメル質は酸による影響を受けやすいことを示唆するものである。一方、B/F/ARTではフッ化ナトリウムと酸性フッ素リン酸溶液において、B/ARTよりも有意に低い ΔY 値が得られた。そして、本実験条件では、漂白処理後にフッ化アンモニウムを作用したものはほかのフッ化物よりもエナメル質耐酸性獲得効果の低い傾向が示され、2群の場合とは異なる結果が得られた。また、3群のB/F/ARTにおけるフッ化ナトリウムあるいは酸性フッ素リン酸溶液を作用したものと2群のARTを比較してみると、両フッ化物の ΔY 値は2群のARTと近似した値が得られたことから、漂白処理後にこれらのフッ化物を作用すると、漂白処理前と同程度の耐酸性まで回復していることが判明した。

エナメル質耐酸性獲得に関する実験は、個人差をなくするため、あるいは比較的広い面積を持つ試験体を得るために、従来からウシエナメル質が使用されている。さらに、本実験方法の特殊性からエナメル質の研磨が必要となってくる。したがって、本研究が歯科臨床における漂白と耐酸性に直結するものではないが、著者らは各種フッ化物の耐酸性を比較検討するうえにおいては適した方法と考えている。また、色彩色差計のY値に関しても、これまでの実験^{13,14)}で1.0乳酸を研磨ウシエナメル質に60秒または90秒作用すると ΔY 値は4.5から5.5までの範囲を示し、フッ化ナトリウムやフッ化アンモニウム塗布後に乳酸を作用したもので、フッ化物を塗布しなかったものと比べて有意に低い値を示すことが確認されている。

これらの背景をもとにして本実験を行い、漂白処理後のエナメル質は酸によって脱灰されやすい状態にあるが、フッ化物を作用させることでその耐酸性を改善することができ、酸性フッ素リン酸溶液またはフッ化ナトリウムが効果的であると示唆された。

結 論

1. エナメル質研磨面に漂白処理あるいはフッ化物を作用することにより ΔY 値の上昇が認められたが、フッ化ナトリウムはほかの試験試料に比べて有意に低い ΔY 値を示した。
2. エナメル質研磨後、単に耐酸性試験を行ったものは、フッ化物を作用して耐酸性試験を行った試験試料よりも有意に高い ΔY 値が得られた。そのなかでもフッ化アンモニウムが最も低い ΔY 値を示した。
3. 漂白処理後に耐酸性試験を行ったものは、本実験中で最も高い ΔY 値を示し、漂白後のエナメル質は酸による脱灰を受けやすいことが示唆された。
4. 漂白処理後にフッ化ナトリウムあるいは酸性フッ素リン酸溶液を作用したものでは、漂白処理前のエナメル質耐酸性と同程度まで回復していた。漂白処理後にフッ化アンモニウムを作用させたものは、耐酸性獲得効果が低いことが示された。

文 献

- 1) McEvoy SA: Chemical agents for removing intrinsic stains from vital teeth. II. Current techniques and their clinical application; Quintessence Int 20, 379-384, 1989.
- 2) 東光照夫, 矢尾板恵美, 齋藤佳子, 金 良子, 久光久, 五十嵐孝義, 萩原芳幸, 棧 淑行, 千葉 治, 小峰 太, 田村好之: Nite White Excel™を用いた有髄変色歯漂白法の臨床成績; 日歯保存誌 41, 985-1008, 1998.
- 3) 松見秀之, 山崎一義, 須田朋代, 中村有良, 村岡亮, 小林晴行, 西川博文: 漂白歯におけるエナメル質の表面性状; 日歯保存誌 41, 1093-1100, 1998.
- 4) 小林 平, 妻鹿純一, 三島弘幸, 小澤幸重, 後藤治彦, 小池國晃, 水川一廣: 生活歯の漂白-Hi Lite™を用いた漂白処理による歯質表層の変化-I; 補綴誌 39, 303-307, 1995.
- 5) 中島勇人, 小川宏行, 姜 熙準, 高 永和, 日野年澄, 中村隆誌, 丸山剛郎: バイタルブリーチングの効果に関する臨床的研究(第一報)-色調と表面性状の変化-I; 歯科審美 4, 8-13, 1992.
- 6) Feagin F, Koulourides T, Pigman W: The characterization of enamel surface demineralization, remineralization and associated hardness changes in human and bovine material; Arch Oral Biol 14, 1407-1417, 1969.
- 7) Shannon H, Spencer P, Gross K, Tira D: Characterization of enamel exposed to 10% carbamide peroxide bleaching agents; Quintessence Int 24,

- 39-44, 1993.
- 8) McCracken MS, Haywood VB: Effects of 10% carbamide peroxide on the subsurface hardness of enamel; Quintessence Int 26, 21-24, 1995.
- 9) ten Cate JM, Arends J: Remineralization of artificial enamel lesions *in vitro*; Caries Res 11, 277-286, 1977.
- 10) ten Cate JM, Duijsters PPE: Influence of fluoride in solution on tooth demineralization II; Caries Res 17, 513-519, 1983.
- 11) Koulourides T, Phantumvanit P, Munksgaard EC, Housch T: An intraoral model used for studies of fluoride incorporation in enamel; J Oral Path 3, 185-196, 1974.
- 12) Ikemi T, Koulourides T: Abrasion biopsy in studies of mineral density of experimental enamel lesions; J Dent Res 67, 508-514, 1988.
- 13) 杉山道紀: エナメル質表面の耐酸性の評価に関する研究—色彩差計を用いた測定法—; 日大口腔科学 25, 326-338, 1999.
- 14) 深澤正幹: 炭酸ガスレーザーと試作フッ素含有ペースト併用による歯質耐酸性効果; 日歯保存誌 43, 583-591, 2000.
- 15) Nutting EB, Poe GS: Chemical bleaching of discolored endodontically treated teeth; J Endod 16, 570-574, 1993.
- 16) 小野瀬英雄, 野本義文, 森 正昭, 清水千鶴, 鎌田孝, 渡部哲人: 変色無髄歯の漂白; 日大歯学 44, 653-655, 1970.
- 17) 長田 保, 浜崎嘉六: 変色無髄歯の簡便な漂白法; 歯界展望 39, 789-792, 881-885, 1972.
- 18) 大川 新, 長島 修, 安西孝史, 大沼達夫, 加藤喜郎: 変色無髄歯の漂白について; 歯学 63, 365-372, 1975.
- 19) Holmstrup G, Palm AM, Lambjerg-Hansen H: Bleaching of discoloured root-filled teeth; Endod Dent Traumatol 4, 197-201, 1988.
- 20) 東光照夫, 久光 久, 和久本貞雄, 小高鐵男: 漂白歯の物性に関する研究(第1報) 漂白剤による歯質の変化; 日歯保存誌 33, 1102-1113, 1990.
- 21) 東光照夫, 久光 久, 和久本貞雄, 小高鐵男: 漂白歯の物性に関する研究(第2報) 漂白剤が歯の微小硬さとハイドロキシアパタイトに及ぼす影響; 日歯保存誌 34, 348-357, 1991.
- 22) 福地芳則, 長田 保, 砂田今男: 歯内治療学; 第1版, 医歯薬出版, 東京, 290-294, 1982.
- 23) 高水正明, 河野 篤: 無髄歯の漂白法; デンタルダイヤモンド 10, 54-57, 1992.
- 24) 斉藤 淳: 無髄歯変色の機序とその漂白に関する基礎的研究; 日歯保存誌 36, 1783-1793, 1993.
- 25) Haywood VB, Heymann HO: Nightguard vital bleaching; Quintessence Int 20, 173-176, 1989.
- 26) Haywood VB, Leech T, Heymann HO, Crumpler D, Bruggers K: Nightguard vital bleaching: effects on enamel surface texture and diffusion; Quintessence Int 21, 801-804, 1990.
- 27) Haywood VB, Houck VM, Heymann HO: Nightguard vital bleaching: Effects of various solutions on enamel surface texture and color; Quintessence Int 22, 775-782, 1991.
- 28) Haywood VB: History, safety, and effectiveness of current bleaching techniques and applications of the nightguard vital bleaching technique; Quintessence Int 23, 471-488, 1992.
- 29) Haywood VB, Leonard RH, Nelson CF, Brunson WD: Effectiveness, side effects and long-term status of nightguard vital bleaching; J Am Dent Assoc 125, 1219-1226, 1994.
- 30) 妻鹿純一, 小林 平, 三島弘幸, 小澤幸重, 後藤治彦, 小池國晃, 水川一廣: 生活歯の漂白—10% 過酸化尿素処理による歯質表層の変化—; 補綴誌 38, 1055-1060, 1994.
- 31) 細矢由美子, 富永礼子, 後藤譲治: home bleaching による歯牙漂白効果に関する臨床的研究(第一報) テトラサイクリンによると思われる変色歯に10% 過酸化尿素を用いた場合; 歯学 96, 723-735, 1996.
- 32) 東光照夫, 久光 久: 無髄変色歯の漂白とオフィスブリーチング(有髄変色歯の漂白), 久光 久, 松尾 通, 山岸一枝: 漂白; 第1版, デンタルダイヤモンド社, 東京, 74-81, 2000.
- 33) 山口龍司, 木村 暢, 稲葉友良, 海老原 隆, 須崎智勝, 大原 睦, 小野沢隆行, 加藤喜郎: 生活歯漂白法がカンクイザルの歯髄に及ぼす影響について; 歯科審美 7, 248-256, 1995.
- 34) 山口龍司, 新海航一, 加藤喜郎, 下河辺宏功, 川上進, 金子 潤, 久光 久, 東光照夫, 松葉浩志, 新谷英章, 妹尾博文, 占部秀徳: 松風ハイライトを用いた変色歯漂白法の臨床成績; 日歯保存誌 40, 204-233, 1997.
- 35) 金子 潤, 青柳麻里子, 川上 進, 下河辺宏功: Hi Lite™ の変色無髄歯における漂白効果; 歯科審美 9, 227-233, 1997.
- 36) 近藤隆一, McLaughlin G, Freedman GA: カラーアトラス 歯の漂白法; 第1版, 医歯薬出版, 東京, 22-30, 1999.
- 37) 山岸一枝: カウンセリングからメンテナンスまで, 久光 久, 松尾 通, 山岸一枝: 漂白; 第1版, デンタルダイヤモンド社, 東京, 60-64, 2000.

キーワード

- ・エルビウムヤグレーザー
- ・象牙質
- ・接着強さ
- ・プライマー

日歯保存誌 43 (6) : 1123~1131, 2000

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—

山 本 憲 廣

日本大学松戸歯学部保存学Ⅰ講座(保存修復学)

(指導: 池見宅司教授)

(受付: 平成12年7月10日)

Bond Strength of Resin Composite to Dentin Irradiated with an Er-YAG Laser

—Components of Primer and Power of the Laser—

Norihiro YAMAMOTO

Department of Operative Dentistry, Nihon University School of Dentistry at Matsudo

(Director: Prof. Takuji IKEMI)

870-1, Sakaecho, Nishi-2, Matsudo, Chiba 271-8587, Japan

(Received for Publication: July 10, 2000)

Several types of laser devices for dental use have been developed. An Er-YAG laser is better for resin cavity preparation than a CO₂ laser or an Nd-YAG laser, which are both used mainly for conservation and restoration. According to some reports, however, if a resin is applied to a dentin surface irradiated with an Er-YAG laser using the conventional resin composite adhesion system, the resin adhesiveness decreases remarkably. This decrease in resin adhesiveness is contrary to the recent concept of restoration using an adhesive.

Therefore, in order to improve the adhesiveness of a resin composite to a dentin surface irradiated with an Er-YAG laser, the author created experimental primers and investigated the Er-YAG laser irradiation power.

Consequently, acetone solutions based on MDP and HEMA improved the adhesiveness of a resin composite to dentin irradiated with a 220 mJ Er-YAG laser beam.

(Request original article reprints to Dr. YAMAMOTO)

緒 言

歯質接着性修復材料の開発と接着性の向上に伴い、コンポジットレジン修復においては定型的な窩洞に拘泥することなく修復処置ができるようになり、罹患歯質を選択的に除去できる可能性を有したレーザーや粉末噴射式窩洞形成装置の臨床応用が試みられてい

る^{1,2)}。レーザーによる窩洞形成は、エアタービンを使用した際の騒音や振動、粉末噴射式装置を用いた際の粉末の飛散などがないことから、患者の不快感を軽減し、一般の診療室でも特別な集塵機を用いずに使用できる利点を有している。また、罹患歯質の選択的な除去による窩洞形成に関しては、ダウンサイジングが提唱されており³⁻⁵⁾、このような目的を達成するための歯質削除装置としても期待されている。

エルビウムヤグレーザーは、炭酸ガスレーザーあるいはネオジウムヤグレーザーと比較して歯質削除能が優れているために、主として窩洞形成用として用いられている^{6,7)}。しかし、エルビウムヤグレーザーを照射した象牙質に市販のコンポジットレジン接着システムを応用した場合、接着強さが著しく低下すると報告されており^{8,9)}、その理由として、照射野の象牙質表層には脆弱となった熱変性層が生成されているからであろうと考えられている。また、エルビウムヤグレーザーはOH基に吸収される波長特性を有しているとされており⁶⁾、レーザー照射された象牙質表層では熱変性層だけでなく、アパタイトのOH基が影響を受けて水溶性プライマーの浸透機序が変化して接着強さが低下することも考えられる。エルビウムヤグレーザー照射後の象牙質に対するコンポジットレジンの接着強さに関しては、HEMA処理の影響^{10,11)}、セルフエッチングとウェットボンディングシステムを比較した報告^{12,13)}などはみられるが、十分な接着強さを得る方法は明確にされていない。コンポジットレジンの象牙質に対する接着性が低下することは、冒頭で述べたような定型的な窩洞形態が不必要となったということと否定するものであり、レーザー照射した象牙質に対するコンポジットレジン修復処置法を確立するためにはこの問題を解決しなければならない。

そこで、著者はエルビウムヤグレーザー照射後の象牙質とコンポジットレジンの接着強さを向上させることを目的として、レーザー出力の違いと試作したプライマー組成の違いが、象牙質接着性に与える影響を調べた。試作プライマーに関しては、市販のセルフエッチングプライマーに準じた水を基材とする水溶性プライマーと、アセトンに基材とするプライマーを試作し、引張り接着強さに及ぼす影響を比較検討した。

材料および方法

1. 試作プライマーの調製

試作プライマーは水溶性メタクリレート(以下 HEMA)を35 wt%と一定にして、メタクリロイルオキシデカメチレンリン酸(以下 MDP)の濃度を0, 10, 20, 30 wt%の割合で加え、残余の65, 55, 45, 35 wt%は蒸留水を添加したもの(水溶液群)とアセトンを添加したもの(アセトン群)の2種類のプライマーを使用直前に調整し、実験に供した。これらの試作プライマーの略号と

表 1 試作プライマーの略号および組成

	MDP	HEMA	DW	Aceton
水溶液群				
0 M 65 DW	0	35	65	0
10 M 55 DW	10	35	55	0
20 M 45 DW	20	35	45	0
30 M 35 DW	30	35	35	0
アセトン群				
0 M 65 Ac	0	35	0	65
10 M 55 Ac	10	35	0	55
20 M 45 Ac	20	35	0	45
30 M 35 Ac	30	35	0	35

(wt%)

組成を表1に示す。

2. 試験体の作製

被着体として用いたウシ下顎前歯は、歯髄を除去してただちに冷凍保存した。これを使用直前に流水下で解凍後、注水下にて唇面からNo. 100の耐水研磨紙で研削し、象牙質を露出して直径3.1 mmの円形に穿孔したセロハンシートを貼付し、照射面積を限定した。エルビウムヤグレーザー(Erwin, モリタ, 以下 Er-YAG)は曲-80のチップを用いて出力を30, 60, 90, 150および220 mJとし、10 ppsの条件で注水下にて象牙質面に接触、移動させながら10秒間照射した。なお、対照としてはNo. 100の耐水研磨紙で研削した象牙質を用い、0 mJと表記した。

接着試験体の作製方法を図1に示す。被着体をエアーにて5秒間乾燥した後、試作プライマーを塗布した。プライマーを20秒間作用後、5秒間のエアブローを行い、被着体に内径3.5 mm、厚さ2.0 mmのシリコンリングを仮着し、ボンディング材を塗布した。ボンディング材はメガボンド(クラレ)のボンディングエージェント(Lot No. 011111)を使用した。その後、光照射器(XL-3000, 3 M)で10秒間照射を行い、光重合型コンポジットレジン(クリアフィル AP-X (Lot No. 0423 AC, ShadeA-3.5, クラレ)を充填した。40秒間光照射を行って重合硬化させ、試験体は37°C水中に24時間浸漬して引張り接着強さの測定に供した。

3. 引張り接着強さの測定

コンポジットレジン上部に黄銅製アタッチメントをシアノアクリレート系接着剤で固定し、インストロン型万能試験機(TCM 500, シンコー)を用いて、クロスヘッドスピード2 mm/minで引張り接着強さを測

定した。接着試験後の破壊形態は肉眼的に観察した。測定はそれぞれの条件につき 7 試験体で行い、得られた引張り接着強さの値は、各レーザー出力における試作プライマー組成の違いについて危険率 5% (Scheffé) で有意差検定を行った。

4. SEM 観察

レーザー照射後の象牙質表面の SEM 観察は、各出力でレーザー照射した直後の試料を通常に従ってアルコール脱水し、臨界点乾燥後、イオンコーター (IB-3, Eiko) で金のスパッタリングを施して走査型電子顕微鏡 (SEM, T-2150, 日本電子) にて観察を行った。

象牙質とコンポジットレジン接合部の SEM 観察は、2 と同様に作成した試験体の中央部を歯軸と平行にアイソメット (Buehler) で切断し、No. 100 の耐水研磨紙と 6, 1, 0.25 μm のダイヤモンドペースト (Staeus) を順次用いて鏡面研磨を行った後、アルゴンイオンシャワー装置 (EIS-200 ER, エリオニクス) を用いて試料表面を処理した。その後、イオンコーターにて金のスパッタリングを施し、象牙質とコンポジットレジン接合部の SEM 観察を行った。

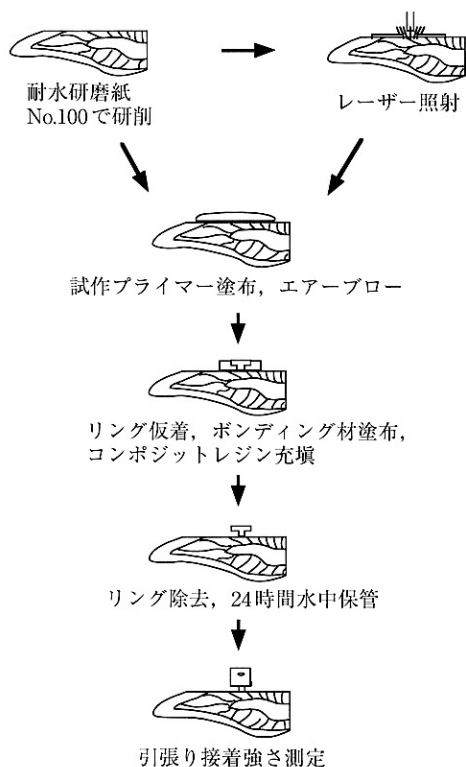


図 1 接着試験体の作製方法

結 果

1. 引張り接着強さ

図 2, 3 および表 2 には、各レーザー出力で照射した象牙質面を試作プライマーで処理し、コンポジットレジンを充填したときの引張り接着強さを示す。

水溶液群において、0 M 65 DW および 10 M 55 DW をプライマーとして用いた場合、レーザー出力が 0~220 mJ の間で平均は約 2.6~6.4 MPa の値で

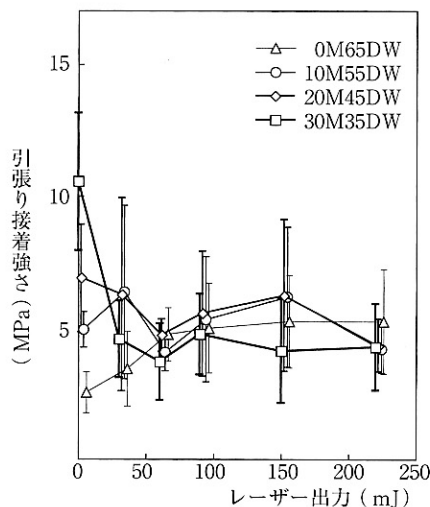


図 2 レーザー出力と水溶液群の引張り接着強さ

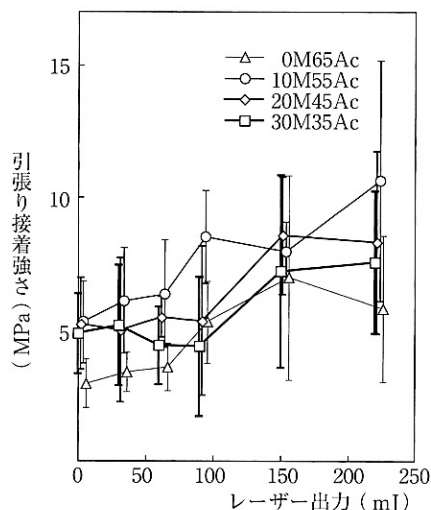


図 3 レーザー出力とアセトン群の引張り接着強さ

表 2 エルビウムヤグレーザー照射後、試作プライマーで処理した象牙質とコンポジットレジン接着強さ

	0 mJ	30 mJ	60 mJ	90 mJ	150 mJ	220 mJ
水溶液群						
0 M 65 DW	2.55(0.79)	3.46(1.42)	4.76(1.01)	5.00(1.70)	5.26(1.76)	5.26(1.99)
10 M 55 DW	4.64(0.66)	6.38(3.31)	4.10(0.71)	5.34(2.37)	6.19(2.67)	4.21(0.92)
20 M 45 DW	6.88(2.06)	6.26(3.66)	4.72(0.62)	5.53(2.37)	6.23(2.89)	4.33(1.01)
30 M 35 DW	10.56(2.61)	4.57(1.47)	3.71(1.46)	4.76(1.55)	4.14(2.01)	4.29(1.65)
アセトン群						
0 M 65 Ac	2.94(0.93)	3.38(0.74)	3.56(0.89)	5.28(1.56)	6.96(3.88)	5.76(2.77)
10 M 55 Ac	5.28(1.56)	6.09(2.00)	6.34(2.04)	8.51(1.76)	7.93(1.15)	10.63(4.56)
20 M 45 Ac	5.18(1.74)	4.95(2.74)	5.45(0.76)	5.30(2.84)	8.53(2.22)	8.27(3.46)
30 M 35 Ac	4.83(1.52)	5.14(2.29)	4.37(1.49)	4.33(2.66)	7.19(3.65)	7.54(2.69)

| ; 有意差あり (Scheffé; $p < 0.05$) MPa (SD)

推移し、接着試験後の破壊は、界面破壊が多く認められ、象牙質表層部分の凝集破壊も一部認められた。20 M 45 DW をプライマーとして使用した場合、レーザー出力が 0 mJ の条件では約 6.9 MPa を示し、接着試験後の破壊はレジン内の凝集破壊が多く認められた。30~220 mJ の条件では約 4.3~6.3 MPa の値を示し、接着試験後の破壊は、界面破壊が多く認められ、象牙質表層部分の凝集破壊も一部認められた。30 M 35 DW をプライマーとして使用した場合、レーザー出力が 0 mJ の条件では約 10.6 MPa を示し、接着試験後の破壊はレジン内の凝集破壊が多く認められた。30~220 mJ の条件では約 3.7~4.8 MPa の値を示した。接着試験後の破壊は、界面破壊が多く認められ、象牙質表層部分の凝集破壊も一部認められた。

有意差検定の結果、0 mJ において 30 M 35 DW はほかのプライマーよりも有意に高い接着強さが得られた。

一方、アセトン群において 0 M 65 Ac をプライマーとして用いた場合、0~60 mJ の条件では約 2.9~3.6 MPa の低い接着強さで推移し、接着試験後の破壊は界面破壊が多く認められた。レーザー出力 90~220 mJ の条件では約 5.3~7.0 MPa の接着強さを示し、接着試験後の破壊は歯の凝集破壊が多く認められた。10 M 55 Ac をプライマーとして用いた場合、レーザー出力が 0~60 mJ の条件で約 5.3~6.3 MPa の接着強さを示し、接着試験後の破壊は、レーザー出力 0 mJ の条件で界面破壊が多く認められ、レーザー出力 30, 60 mJ の条件では象牙質表層部分の凝集破壊が認められた。レーザー出力 90 mJ の条件では約 8.5 MPa と接着強さは高くなる傾向を示し、150 mJ

の条件では約 7.9 MPa、220 mJ の条件では約 10.6 MPa の接着強さを示した。接着試験後の破壊は、象牙質の凝集破壊が認められ、特に 220 mJ の条件では象牙質の深い位置での破壊が認められた。20 M 45 Ac をプライマーとして使用した場合、レーザー出力が 0 mJ のときに約 5.2 MPa を示し、接着試験後の破壊は、界面破壊が多く認められた。30~90 mJ では 5.0~5.5 MPa の値を示し、接着試験後の破壊は、象牙質表層部分の凝集破壊が認められた。150, 220 mJ の条件では約 8.3~8.5 MPa と接着強さは高くなる傾向を示した。この場合の接着試験後の破壊は、象牙質の比較的深い部位での凝集破壊が多く認められた。30 M 35 Ac をプライマーとして使用した場合、レーザー出力が 0 mJ の条件では約 4.8 MPa を示し、接着試験後の破壊は界面破壊が多く認められた。30~90 mJ の条件では約 4.3~5.1 MPa の値を示し、象牙質表層部分の凝集破壊が認められた。150, 220 mJ の条件では約 7.2~7.5 MPa と接着強さは高くなる傾向を示した。接着試験後の破壊は、象牙質の比較的深い部位での凝集破壊が多く認められた。

有意差検定の結果、90 mJ において 10 M 55 Ac は 20 M 45 Ac、30 M 35 Ac よりも有意に高い接着強さが得られた。全体的にはレーザー出力が高くなるほど接着強さは向上する傾向が認められ、220 mJ の 10 M 55 Ac では 0 mJ の 30 M 35 DW と同程度の接着強さを示した。

2. 象牙質表面の SEM 観察

図 4 には、レーザー照射を行わなかった 0 mJ ならびに各レーザー出力で照射した象牙質表面の SEM 像を示す。0 mJ では象牙質表面にスミヤー層が観察さ

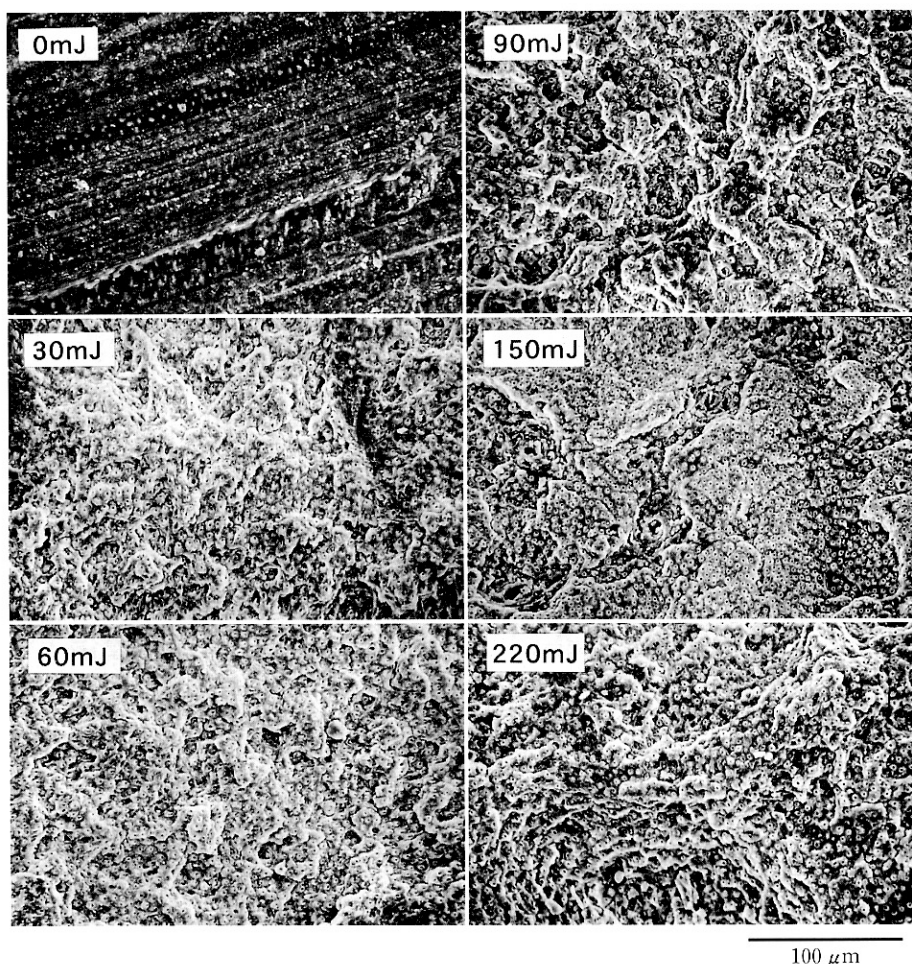


図 4 レーザー照射後の象牙質表面の SEM 像

れ、象牙細管の開口は認められなかった。レーザー出力 30 mJ では象牙細管が開口しており、鱗片状になった象牙質表面が観察されたが、220 mJ では鱗片状の象牙質が生成しにくい傾向を認めた。

3. 接合部の SEM 観察

図 5 には、本実験中最も高い接着強さが得られた 10 M 55 Ac で処理した象牙質とコンポジットレジン接合部断面の SEM 像を示す。0 mJ では、象牙質とボンディング材が界面で剝離した像が観察された。レーザー出力 30～150 mJ では、象牙質表層とボンディング材との接合状態は良好であるが、象牙質表層下に矢印で示す亀裂が観察された。220 mJ では、象牙質表層下に亀裂は観察されなかった。

考 察

近年、歯質接着性コンポジットレジンシステムの改善に伴い、定型的な窩洞形態にとらわれることなく窩洞のダウンサイジングが提唱されるようになってきた³⁻⁵⁾。このような修復処置の時代的背景と Er-YAG レーザーの開発によって、従来とは異なった修復術式が確立されようとしている。Er-YAG レーザーによる窩洞形成は、歯髄への影響が少ないとされており¹⁴⁻¹⁷⁾、窩洞形成時の疼痛も軽微であると報告されている^{7,18)}。

しかし、Er-YAG レーザー照射後の象牙質とコンポジットレジンの接着性に関する研究報告によると、現在のコンポジットレジン接着システムでは、その接

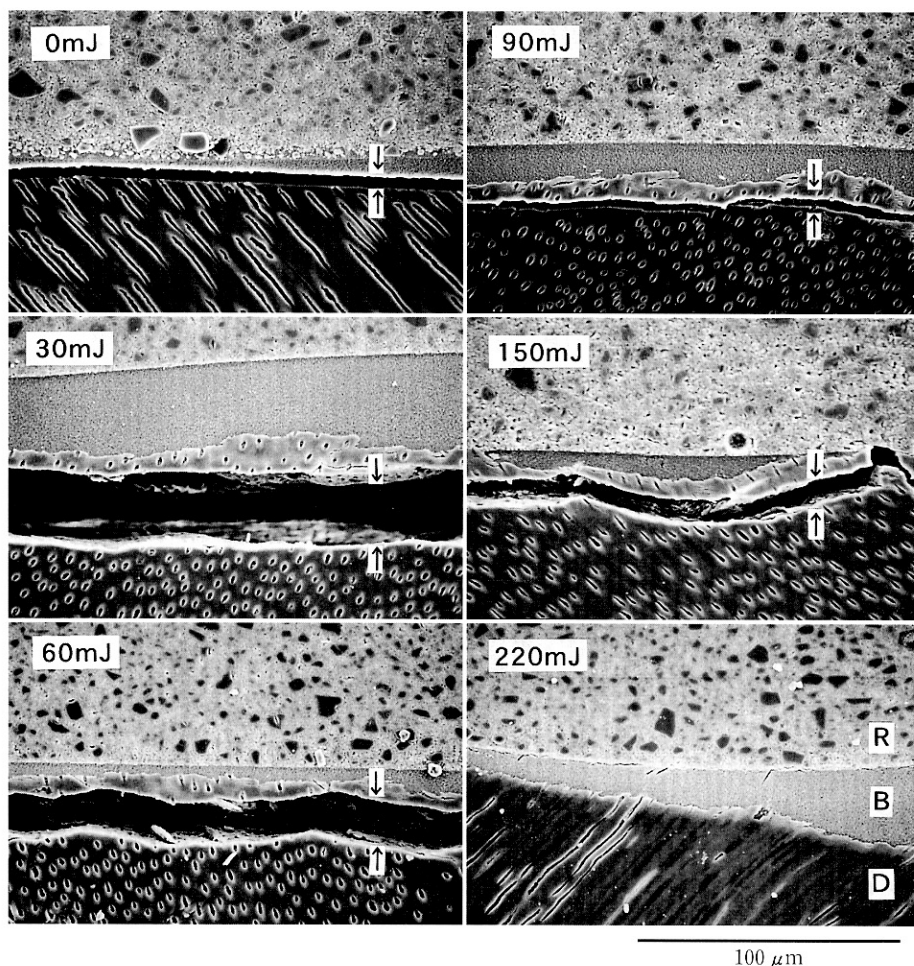


図5 レーザー照射後、10 M 55 Ac で処理した象牙質とコンポジットレジンの接合部断面のSEM像
(R：コンポジットレジ、B：ボンディングレジ、D：象牙質、↓：亀裂)

着強さが著しく低下することが報告されている^{8,9,19)}。

Er-YAG レーザーによる歯質削除の原理は、歯質の水分子がレーザー照射により気化する際の小爆発で歯質を破壊するとされており²⁰⁻²⁵⁾、その際に発生する熱で象牙質表層が変性すると報告されている^{26,27)}。また、アパタイトのOH基の変化に伴い、象牙質表層は疎水性になることも考えられる。これらの象牙質表層の性状あるいは形状の変化が接着強さを低下させる原因と考えられる。

すなわち、レーザー照射後の象牙質面にはスミヤーク層が存在せず、象牙細管が露出してコンポジットレジンの接着には好条件のように思われるが、象牙質接着システムの主体をなすと考えられているコラーゲン線維の熱による変性や象牙質表面が鱗片状を呈する形状

変化、さらに疎水性となる性状変化により、十分な接着性が得られないものと推測される。このような状況下において、Er-YAG レーザー照射後の象牙質に対する接着性をセルフエッチングとウェットボンディングシステムで比較すると、レーザー出力 100 あるいは 150 mJ において、セルフエッチングシステムのほうが高い接着強さを示したと報告されている¹²⁾。

Er-YAG レーザー照射による象牙質面の熱変性層の存在や疎水性変化、さらにセルフエッチングシステムの接着強さを勘案して、著者はプライマーをより歯質内に浸透させることを目的とし、MDP/HEMA 水溶液が主成分であるプライマー中の水をアセトンに置き換えて用いることを試みた。なお、その効果を比較するために水溶性のプライマーについても検討した。

試作プライマーを調整するにあたり、水溶性モノマーの HEMA 濃度 35 wt% が研磨象牙質あるいは 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に有効であるとの報告^{10,28)}から、これを 35 wt% と一定にしてプライマーを調製した。そして、リン酸エステル系モノマーの MDP 濃度は 0, 10, 20, 30 wt% の割合で混合し、残余の成分は蒸留水あるいはアセトンを追加してそれぞれのプライマーを試作した。

西山²⁹⁾は、MDP/HEMA 水溶液の保管温度が高い場合や混合してからの保管期間が長くなると、MDP のリン酸基が HEMA のエステル基の加水分解を促進し、セルフエッチングプライマーの組成成分を変質させると報告している。また、中島ら³⁰⁾は 37°C の高い温度条件で長期間保管すると、接着性が低下すると報告している。これらの報告ならびにアセトンの揮発性を考慮して、本実験では冷蔵状態で保管した MDP と HEMA の混合液を、使用直前に蒸留水またはアセトンと混合して使用した。なお、Er-YAG レーザーの出力は 30, 60, 90, 150 および 220 mJ とし、レーザー照射を行わなかったものは 0 mJ とした。

予備実験において、エアタービンを用いてダイヤモンドポイントで切削した象牙質と、No. 100 の耐水研磨紙で研削した象牙質に対するコンポジットレジンの引張り接着強さが近似していたことから、本実験の対照およびレーザー照射象牙質面に関しては、No. 100 の耐水研磨紙で研削した象牙質を使用した。

レーザー照射を行わなかった 0 mJ の象牙質に対するコンポジットレジンの接着強さは、水溶液群で 30 M 35 DW のときに最も高い接着強さを示し、ほかのプライマーとは有意差が認められた。Hayakawa ら³¹⁾はリン酸エステル系モノマーを成分としたセルフエッチングプライマーを試作し、研磨象牙質に作用すると MDP の濃度が高くなるほどコンポジットレジンの接着強さは高くなり、30 wt% MDP, 35 wt% HEMA 水溶液で最も高い接着性が得られたと報告している。本実験でも MDP 濃度の違いと象牙質接着性の関係は同様の傾向が認められた。レーザーを照射した象牙質面に 30 M 35 DW で処理した場合、その接着強さは顕著に低下し、ほかのプライマーではレーザー出力を変えても接着強さに大きな変化はみられなかった。接着強さが低下した要因の 1 つとして、レーザー照射で脆弱化した象牙質表層に MDP/HEMA 水溶液を塗布することにより、電離したリン酸基の脱灰

作用でさらに象牙質が脆くなったものと考えられる。接着試験後の破壊は、界面破壊が多く認められ、象牙質表層部分の凝集破壊も一部認められたことからこのような原因が考えられた。

一方、アセトン群ではレーザー出力 0, 30 および 60 mJ において、いずれのプライマーも低い接着強さであった。90 mJ において 10 M 55 Ac と 0 M 65 Ac 処理で 60 mJ のときよりも接着強さが向上した。また、150 mJ においては 20 M 45 Ac と 30 M 35 Ac 処理で 90 mJ のときよりも接着強さが向上した。220 mJ では 10 M 55 Ac で最も高い接着強さを示し、0 mJ における水溶性プライマー 30 M 35 DW の場合と同程度の接着強さが得られた。このように、アセトン群ではレーザー出力が高くなるほど、接着強さは向上する傾向が全体的に認められた。その要因としては、プライマーに含まれるアセトンの浸透作用により、レーザー照射で脆弱あるいは疎水性となった象牙質内にモノマーが深く浸透しやすくなったものと考えられた。また、プライマー中に水分が存在しないため、MDP 中のリン酸基が電離しにくくなり、脆弱部の脱灰による影響を少なくしたものと考えられた。

10 M 55 Ac で処理した象牙質とコンポジットレジンの接合部の SEM 観察を行った結果、0 mJ では界面で剝離しており、30~150 mJ のレーザー出力において象牙質表層との接合は良好であるが、象牙質表層下に亀裂の生じた像が観察された。これらの亀裂はコンポジットレジンの重合収縮あるいは SEM 観察の人工的操作によって生じたものと思われた。いずれにしても、亀裂の生じた部位は脆弱な層と考えられ、接着強さの低い理由はこの層の存在によるものと考えられる。これに対して、220 mJ では前述のような亀裂が存在せず、接合状態は良好であるために最も高い接着強さを示したものと考えられた。象牙質表面の SEM 観察において鱗片状の構造物がレーザー出力 60~150 mJ で観察されたが、220 mJ では生成しにくい傾向が認められ、本実験条件におけるレーザー出力が低い場合と高い場合とでは、照射野の象牙質表層に与える影響が異なるものと考えられた。

以上のことから、レーザー出力が 30~60 mJ と低い場合には、破壊に至らない変性層および疎水化した層が象牙質表層に存在しており、水溶性プライマーの脱灰作用と拡散浸透性の低下によって接着強さが低下する傾向を示したものと考えられた。これに対して、レーザー出力が高くなると象牙質表層の変性層や疎水

化した層が薄くなり、アセトン群のプライマーによる非脱灰作用と拡散浸透性の増大により、接着強さが向上する傾向を示したものと考えられた。

結 論

1. Er-YAG レーザー照射した象牙質表面の SEM 像では、象牙細管の開口が認められ、30, 60, 90 および 150 mJ において鱗片状の構造物が認められたが、220 mJ ではその構造物が生成されにくい傾向が観察された。

2. 水溶液群の対照であるレーザー出力 0 mJ における象牙質とコンポジットレジンとの引張り接着強さは、30 M 35 DW で、平均約 10.6 MPa の高い接着強さを示した。レーザー出力 30, 60, 90, 150 および 220 mJ ではプライマー中の MDP 濃度の違いで接着強さは異なるが、約 3.5~6.4 MPa の範囲の接着強さであった。

3. アセトン群におけるレーザー出力 0~60 mJ までは、プライマー中の MDP 濃度の違いによる接着強さは異なるが、約 2.9~6.3 MPa の範囲の接着強さであった。いずれのプライマーでもレーザー出力が高くなるほど接着強さは向上する傾向が認められ、220 mJ の 10 M 55 Ac では 0 mJ の 30 M 35 DW と同程度の約 10.6 MPa の接着強さを示した。

4. 10 M 55 Ac で処理した象牙質とコンポジットレジン接合部の SEM 像において、0 mJ では界面で剝離が生じていた。30~150 mJ では象牙質表層とコンポジットレジンが接合しており、象牙質表層下に亀裂を生じた像が観察された。220 mJ ではそのような亀裂は観察されなかった。

以上のことから、レーザー照射後の象牙質面に対する引張り接着強さは、現在のセルフエッチングプライマーの成分として応用されている MDP/HEMA 水溶液では低く、MDP/HEMA アセトン溶液では、レーザー出力が、高いほど引張り接着強さが向上する傾向を見いだした。

謝 辞

稿を終えるにあたり、本論文の御指導と御校閲を賜りました本学保存学 I 講座池見宅司教授に深謝の意を表するとともに、御助言を賜りました本学歯科理工学教室根本君也教授ならびに本研究遂行にあたり絶えず暖かい御支援を賜りました本学保存学 I 講座各位に深くお礼申し上げます。

また、本研究の器材の提供をして頂いた(株)モリタ、ならびに(株)クラレ河島光伸様に深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) 堀口尚司, 田上順次, 加藤純二, 守矢佳世子: エアブレースによる歯質切削器具の概要と歯牙切削・修復; The Quintessence Year Book, 20-22, 1997.
- 2) 日野浦 光: 修復治療のダウンサイジング; デンタルダイヤモンド増刊号, う蝕治療・リポリューション, 148-154, 1997.
- 3) 日野浦 光: 小さな歯蝕最小限の切削で修復; 歯界展望 93, 278-284, 1999.
- 4) 猪越重久: できるだけ削らないで修復するには; 歯界展望 93, 274-277, 1999.
- 5) 津田忠政: 歯科治療におけるレーザー使用の現状と展望; デンタルダイヤモンド 23, 28-33, 1998.
- 6) 松本光吉: どんなレーザーがすでに応用され、今後開発されようとしているか; デンタルダイヤモンド臨時増刊号, 歯科用レーザー最前線, 18-23, 1999.
- 7) 篠木 毅: Er: YAG レーザー(アークウィン)を使用した例; デンタルダイヤモンド 23, 34-38, 1998.
- 8) 西村弥生子, 棚木寿男, 江黒 徹, 田邊 翠, 前田徹, 田中久義: Er: YAG レーザー照射象牙質に対する接着; 日歯保存誌 42(春季特別号), 75, 1999.
- 9) 亀山敦史, 津守将充, 中澤祐一, 保坂 誠, 河田英司, 小田 豊, 平井義人: Er: YAG レーザー照射ウシ象牙質における 4-META/MMA-TBB レジンの接着強さ; 日歯保存誌 42(秋季特別号), 35, 1999.
- 10) 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.
- 11) 亀山敦史, 津守将充, 中澤祐一, 保坂 誠, 河田英司, 小田 豊, 平井義人: Er: YAG レーザー照射象牙質へのレジック接着における HEMA 処理の効果; 接着歯学 17, 304-305, 1999.
- 12) 片海正明, 大槻昌幸, 田上順次: 照射条件が Er: YAG レーザー照射象牙質と各種レジックボンディングシステムの接着強さに及ぼす影響; 接着歯学 16, 194-195, 1998.
- 13) 西村弥生子, 棚木寿男, 江黒 徹, 田中久義: Er: YAG レーザー照射象牙質に対する接着; 接着歯学 16, 232-233, 1998.
- 14) 関根義郎: Er: YAG レーザーによる歯牙硬組織切削の病理組織学的研究; 日歯保存誌 38, 211-233, 1995.
- 15) 大槻昌幸, 田上順次, 青木 章, 三浦真子, 渡辺久, 石川 烈, 江口哲也: Er: YAG レーザーによる歯質除去が歯髄に及ぼす影響; 日歯保存誌 43(春季特別号), 52, 2000.
- 16) 瀧澤雅一, 天谷哲也, 亀山敦史, 春山親弘, 高瀬保晶, 平井義人, 井上 孝, 下野正基, 熊崎 護: Er-YAG レーザーの照射条件と歯髄反応-イヌ歯牙における短期観察-; 日歯保存誌 43(春季特別

- 号), 28, 2000.
- 17) 田中紀裕, 加藤義郎: Er: YAG レーザーによる窩洞形成と高分子接着性レジン修復システムがカニクイザル歯髄に及ぼす影響に関する病理組織学的研究; 日歯保存誌 42(春季特別号), 75, 1999.
- 18) 瀧澤雅一, 青木 聡, 高瀬保品, 石川達也, 熊崎護, 井上昌孝, 善入邦男, 藤井辨次, 長谷川紘司, 石川 烈: Er: YAG Laser の窩洞形成への応用と臨床評価; 日歯保存誌 38, 1035—1047, 1995.
- 19) 播磨貴裕, 馬場奈穂子, 梶原靖代, 木村菜穂子, 富士谷盛興, 新谷英章: 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.
- 20) 石丸和俊, 高野達治, 浅野倉栄, 日下輝雄, 小澤正明, 薄井秀樹, 榊原康智, 高水正明, 河野 篤: Erbium: YAG レーザーの歯質への影響—形成された窩洞表面の形態について—; 鶴見歯学 22, 175—184, 1996.
- 21) 石丸和俊, 高野達治, 浅野倉栄, 日下輝雄, 陳 昭清, 榊原康智, 高水正明, 後藤 繁, 河野 篤: Er: YAG レーザーの歯質への影響 第一報 出力による窩洞の大きさと深さ; 日歯保存誌 39, 1229—1239, 1996.
- 22) Hibst R, Keller U: Experimental studies of the Er: YAG laser on dental hard substances: I. Measurement of the ablation rate; Lasers Surg Med 9, 338—344, 1989.
- 23) Nelson JS, Yow L, Liaw LH, Macleay L, Zavar RB, Orenstein A, Wright WH, Andrews JJ, Berns MW: Ablation of bone and methacrylate by a prototype mid-infrared erbium: YAG laser; Lasers Surg Med 8, 494—500, 1988.
- 24) Keller U, Hibst R: Experimental studies of the application of the Er: YAG laser on dental hard substances: II. Light microscopic and SEM investigations; Lasers Surg Med 9, 345—351, 1989.
- 25) Jacques SL, Gofstein G: Laser-flash photographic studies of Er: YAG laser ablation of water; SPIE Laser-tissue interaction II 1427, 63—67, 1991.
- 26) 播磨貴裕, 富士谷盛興, 藤田裕樹, 村上明延, 大島一宣, 新谷英章: レーザー処理象牙質におけるレジンの接着 第3報 構造欠陥ならびに熱変成層の処理について; 日歯保存誌 42(春季特別号), 78, 1999.
- 27) 播磨貴裕, 村上明延, 藤田裕樹, 荷堂友紀, 田島美雪, 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 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.
- 28) 早川 徹, 菊竹一代, 根本君也: カルボン酸系モノマーを含有するセルフエッチングプライマーに関する研究; 接着歯学 15, 211—220, 1997.
- 29) 西山典宏: セルフエッチングプライマーの組成と安定性; DE 132, 1—4, 2000.
- 30) 中島正俊, 緒方美和子, 奥田真実子, 原田直子, 田上順次: 1 液性セルフエッチングプライマーの歯質接着性能; DE 132, 5—8, 2000.
- 31) Hayakawa T, Kikutake K, Nemoto K: Influence of self-etching primer treatment on the adhesion of resin composite to polished dentin and enamel; Dent Mater 14, 99—105, 1998.

過酸化水素水に光あるいはレーザー照射した際に発生するヒドロキシラジカルの発生量

川本 幸司 辻本 恭久 飯田 浩雅*
木村 大* 山崎 宗与 池見 宅司*

日本大学松戸歯学部（保存学Ⅲ講座）歯内療法学

*日本大学松戸歯学部（保存学Ⅰ講座）保存修復学

The Amount of Generated Hydroxyl Radicals by Lights
or Lasers Irradiation of Hydrogen Peroxide

Kohji Kawamoto, Yasuhisa Tsujimoto, Masahiro Iida*,
Masaru Kimura*, Muneyoshi Yamazaki, Takuji Ikemi*

Department of Endodontics and *Operative Dentistry, Nihon University School of Dentistry at Matsudo

本実験の目的は、 H_2O_2 溶液から発生するヒドロキシラジカルについてレーザーあるいは光重合照射による効果について検討したものである。一般的に、歯科臨床において歯の漂白に H_2O_2 溶液が使用されている。その際、発生したヒドロキシラジカル量は歯の漂白能力と関係していると考えられるが、それらに関する報告はほとんど無い。そこで、著者らはヒドロキシラジカルについて H_2O_2 濃度とレーザーあるいは光重合照射との関係を明らかにするために実験を行った。

その結果、以下の結論が得られた。

- 1) H_2O_2 溶液から・OHが発生することをESR spin-trapping法にて確認することができた。
- 2) H_2O_2 溶液から発生する・OH量は H_2O_2 濃度に依存していた。
- 3) ハロゲン照射、キセノン照射、アルゴンレーザー照射、炭酸ガスレーザー照射を行うことで、・OHの発生量は増加した。特にキセノン照射においては増加率が高かった。

キーワード：漂白／ヒドロキシラジカル／レーザー／光照射器

The aim of this study was to examine the effect of laser and composite curing light irradiation on the generated hydroxyl radicals from H_2O_2 solution. In generally, H_2O_2 solution is used for tooth bleaching in dental practice. It is considered that the amount of generated hydroxyl radicals is related to the capability of tooth bleaching. However, there are few report concerning about the matter. Therefore, we attempted to clarify the relation between the concentration of H_2O_2 and the lasers or composite curing lights irradiation with respect to generation of hydroxyl radicals.

The following results were obtained

- 1) Hydroxyl radicals generated from H_2O_2 solution were detected in all samples by ESR spin-trapping technique.
- 2) Hydroxyl radicals generated from H_2O_2 was dependent on the concentration manner of H_2O_2 solution.
- 3) The amount of hydroxyl radical increased with Halogen, Xenon, Argon laser or Carbon dioxide laser irradiation. Especially, the greatest generation of hydroxyl radical was observed by the irradiation of Xenon.

Key Words : Tooth bleaching / Hydroxylradicals / Laser irradiation / Light irradiation

緒言

歯の漂白にはさまざまな薬剤が使用されているが、過酸化水素水(H_2O_2)は古くから失活歯の漂白等で歯科臨床において使用されてきた。そして、今日では審美性を重視した歯科医療が望まれるようになり、生活歯の漂白が行われるようになった。オフィスブリーチングにおける生活歯漂白の主剤としても H_2O_2 溶液が用いられているが、市販品ではそれに光活性剤を配合しており¹⁾、コンポジットレジン用光重合照射器や(光照射)²⁾、レーザー照射で漂白を行う場合もある³⁾。

一般的に、光照射やレーザー照射を行うことによって H_2O_2 溶液から発生するフリーラジカルが有機質に作用し、漂白効果を発揮するといわれている⁴⁾が詳細なメカニズムについては明らかにされていない。 H_2O_2 に関しては、金属イオンがスーパーオキサイドと反応すると、活性酸素の中でも最も強力なヒドロキシラジカル($\cdot\text{OH}$)が発生することが良く知られている⁵⁻⁸⁾。一方、 H_2O_2 溶液に光照射やレーザー照射をすることによっても $\cdot\text{OH}$ の発生量を増大させることが判明し、すでに報告されている⁹⁾。Kashima-Tanakaら⁹⁾は各種濃度の H_2O_2 溶液にハロゲンランプ、キセノンランプあるいは、He-Neレーザー、イエローHe-Neレーザーを照射して $\cdot\text{OH}$ の発生量について検討を行い、光照射を行ったほうがレーザー照射よりも多くの $\cdot\text{OH}$ 発生量があったと報告している。また、辻本ら¹⁰⁾、Dahlstromら¹¹⁾は $\cdot\text{OH}$ が歯の漂白に強く関与していることを報告しており、 H_2O_2 溶液に光照射あるいはレーザー照射した際の $\cdot\text{OH}$ 発生量は興味深く、さらに解明する必要があるものと考えられた。今回の実験は、 H_2O_2 溶液から発生する $\cdot\text{OH}$ 量を基礎的に調べることを目的とし、光活性剤を含まない H_2O_2 溶液の濃度を変化させて、アルゴンレーザー、炭酸ガスレーザー、ハロゲンランプそしてキセノンランプを照射して $\cdot\text{OH}$ 量の変化を検討した。

材料と方法

試薬と照射器

H_2O_2 は和光純薬工業より入手した。フリーラジカル測定のためのスピントラップ剤は同仁化学社の5, 5, Dimethyl-1-pyrroline-N-oxide (DMPO)を用いた。

レーザーはアルゴンレーザー(CureStar, Lares)波長486nm、炭酸ガスレーザー(Panalas C10, パナヘラウス)波長10.6 μm を用いた。光照射器はハロゲンランプ(XL3000, 3M)波長400-520nm、キセノンランプ(APOLLO95E, Dental/Medical Diagnostic Systems)波長400-500nmの2機種を用いた。

ヒドロキシラジカルの測定

H_2O_2 溶液から発生してくる $\cdot\text{OH}$ の検出はelectron spin resonance (ESR) spin-trapping法⁹⁾を用いた。96穴のパイル皿を使用し、200 μl の3、10、20、30%各濃度の H_2O_2 溶液に20 μl のDMPOを添加して、光照射あるいはレーザー照射を15ならびに30秒間行い、ESR用フラットセルで吸い上げ、DMPO添加60ならびに90秒後にESRで測定を行った。コントロールとして、無照射の H_2O_2 溶液の測定を行った。ESRはJEOLの

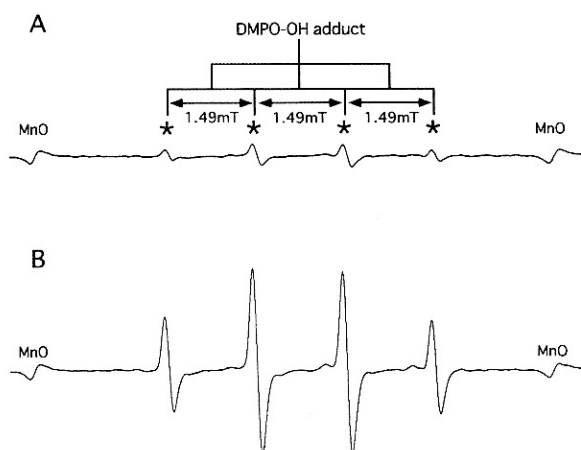


図1 ESR spin-trapping 法による $\cdot\text{OH}$ シグナル
A: 3% H_2O_2 にDMPO添加90秒後のESRシグナル($\cdot\text{OH}$ シグナル)
B: 3% H_2O_2 にDMPO添加後、キセノンランプで30秒照射した後のESRシグナル($\cdot\text{OH}$ シグナル)

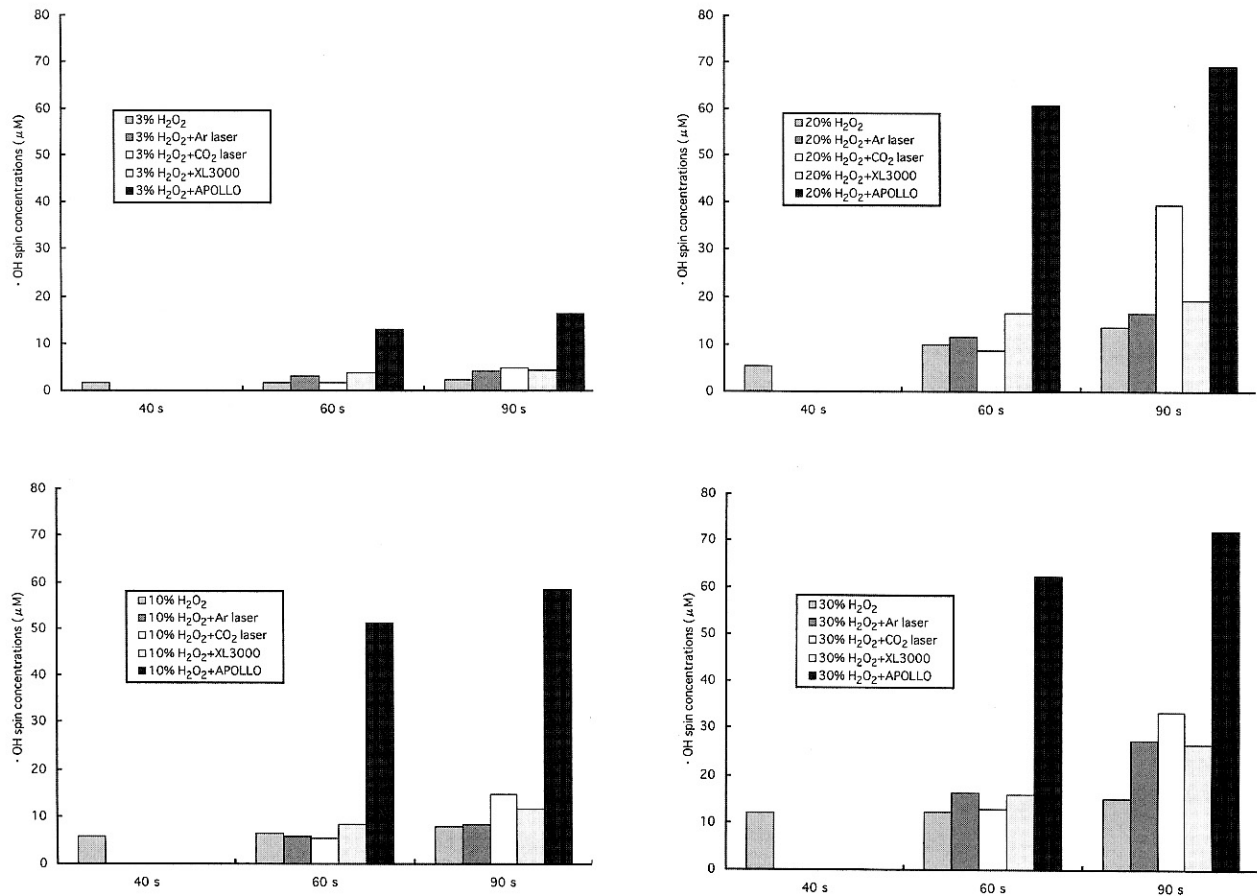


図2 各種濃度 H_2O_2 からの $\cdot\text{OH}$ 発生量
光ならびにレーザー照射した後の $\cdot\text{OH}$ 量を示した。DMPO 添加後 15 秒照射、60 秒後に測定したものを 60s に、30 秒照射、90 秒後に測定したものを 90s に示した。40s はコントロール値であり、DMPO 添加 40 秒後に測定したものである。
a : 3% H_2O_2 b : 10% H_2O_2 c : 20% H_2O_2 d : 30% H_2O_2

FA3000 を用いて行った。測定条件は microwave power 8.0mW, magnetic field $335.4 \pm 5 \text{ mT}$, sweep time 0.5 分, modulation frequency 100kHz, time constant 0.03 秒で行った。なお、スピンコンセンレーションの定量方法は Kohno ら¹²⁾ が報告した方法に従った。

結果

図1 に代表的な DMPO- $\text{OH}(\cdot\text{OH})$ の ESR 波形を示した。超微細結合定数は $a_N = a_{\beta\text{H}} = 1.49 \text{ mT}$ であり、これまでの報告¹³⁾ と一致しており $\cdot\text{OH}$ であることを確認した。図2 a~d に示したように、コントロールの無照射の H_2O_2 溶液からも $\cdot\text{OH}$ の検出がされた。DMPO を H_2O_2 溶液に添加してから 40、60、90 秒のそれぞれの時間におい

て、それぞれの濃度の H_2O_2 溶液から $\cdot\text{OH}$ は検出された。また、時間の経過とともに $\cdot\text{OH}$ 量は増加する傾向にあった。

光照射ならびにレーザー照射を 15 秒行った後の測定、すなわち DMPO を添加してから 60 秒経過時における結果から、 $\cdot\text{OH}$ の検出量はコントロールと、アルゴンレーザー照射後、炭酸ガスレーザー照射後、ハロゲン照射後ともにほぼ同程度の値であったのに対し、キセノン照射を行った場合には増加傾向が強かった。濃度別でみた場合、コントロール、炭酸ガスレーザー照射、アルゴンレーザー照射において H_2O_2 の濃度の上昇とともに $\cdot\text{OH}$ 量もほぼニアに増加した。しかし、ハロゲン照射の場合には、20% と 30% H_2O_2 溶液間においてほぼ同程度の $\cdot\text{OH}$ が検出された。ま

た、キセノン照射の場合においても同様の結果であった。

90秒経過時の結果をみると、コントロールに比べてアルゴンレーザー照射ではほぼ同様の・OH量を検出したが、炭酸ガスレーザー照射においては15秒照射時よりも30秒照射時のほうがコントロールよりも増加傾向を示した。また、20% H_2O_2 溶液に照射した場合のほうが30% H_2O_2 溶液に照射したときよりも・OH量は多く検出された。また、15秒照射時ではハロゲン照射よりも若干検出量が少なかったのが、30秒照射では逆転している。一方、ハロゲン照射、キセノン照射ともにほぼ濃度依存的に・OH量は検出された。

考察

歯の漂白を行う場合、 H_2O_2 の濃度と関連して発生する・OH量が重要となる。臨床では、フリーラジカルを発生させるために、 H_2O_2 溶液に対して光照射やレーザー照射をすることが有効であろうという考えから、さまざまな照射器が使用されている¹⁻³⁾。しかし、歯科用の光照射器やレーザー照射器を使用し H_2O_2 溶液に照射を行うことによって、どのような現象が生じているのかについての報告は少ない⁹⁾。歯の漂白を行うために、・OHがどの程度発生することが有効で、かつ歯にとって安全であるのかについても結論はまだ出ていない。高濃度の H_2O_2 溶液を使用すれば低濃度の H_2O_2 溶液を使用したときよりも歯の漂白は進行すると考えられるが、エナメル質の構造にダメージを与え、エナメル質表層の耐酸性が低下し¹⁴⁾、その結果として色の後戻りを引き起こすことも考えられる。小塚ら¹⁵⁾は、 H_2O_2 の濃度、作用時間を変化させ、根管象牙質表面に対する影響を調べているが、 H_2O_2 が高濃度で作用時間が長いほど象牙質の構造は破壊されていくと報告している。象牙質と同様にハイドロキシアパタイトを主組成とするエナメル質においてもそれと似た変化が生じているものと推測される。

今日、本邦で生活歯の漂白剤として市販されている松風ハイライトには35%の H_2O_2 溶液以外に

光活性剤等が配合されて、ある波長域の光照射で効果的に漂白されるようになっている。そして、今後さらに効果的な漂白剤あるいは漂白法の開発を意図するには、光照射やレーザー照射による H_2O_2 溶液自体からの・OH発生量を調べておく必要がある。

本実験結果から、 H_2O_2 の濃度の増加によって発生してくる・OHの量に差があることが分かった。また、光照射やレーザー照射をすることによって・OH発生量が増加することも分かった。さらに、 H_2O_2 溶液に対してレーザー照射を行ったときよりも、キセノンランプで光照射したほうが、・OHの発生量が多いことがわかった。しかし、炭酸ガスレーザーは15秒照射では、コントロールやアルゴン照射、ハロゲンランプ照射と大きな差がなかったのに対し、30秒照射したときには、これらのものよりも多量に・OHの発生が確認された。このことは、炭酸ガスレーザーの波長が遠赤外領域で、主に熱エネルギーとして被照射体に作用するものと考えられ、さらに水の吸収波長と符号しているからであろうと思われる。すなわち、短い照射時間では H_2O_2 溶液の表層部分の加熱にとどまっているが、照射時間が長くなると H_2O_2 溶液全体の温度が上昇して、多量の・OHを発生するものと考えられる。さらに、Kashima-Tanakaらの報告⁹⁾と比較すると、ハロゲン照射よりもキセノン照射の方が多量の・OHを発生したが、その実験では、試験管のガラス越しに照射したのに対し、今回は反応液に直接照射したために差が生じたものと考えられ、さらに、キセノン照射器とハロゲン照射器から発生する熱が影響したものと考えられる。

しかし、現在市販されているオフィスブリーチング剤には光活性剤が配合されている。そこで、光の波長に依存した・OH発生と照射熱による・OH発生とを分けて考える必要がある。今後はこれらの結果を踏まえて、さらに安全で効果的な漂白を行うためのフリーラジカルの検索を続ける予定である。

結論

歯の漂白に用いられている H_2O_2 溶液に、照射、レーザー照射を行った場合のフリーラジカルの発生量を ESR spin-trapping 法を用いて検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) H_2O_2 溶液から $\cdot\text{OH}$ が発生することを ESR spin-trapping 法にて確認することができた。
- 2) H_2O_2 溶液から発生する $\cdot\text{OH}$ 量は H_2O_2 濃度に依存していた。
- 3) ハロゲン照射、キセノン照射、アルゴンレーザー照射、炭酸ガスレーザー照射を行うことで、 $\cdot\text{OH}$ の発生量は増加した。特にキセノン照射においては増加率が高かった。

以上のことから、 H_2O_2 溶液から $\cdot\text{OH}$ をより多く発生させるためには、キセノン照射が有効であることが示唆された。

本研究の一部は日本学術振興会 平成 11～13 年度科学研究費補助金(基盤研究(A)課題番号 11307046、基盤研究(C)(2)課題番号 11671909)、平成 12～13 年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2)課題番号 12671863)によって、行われた。

参考文献

- 1) 近藤隆一, McLaughlin G, Freedman GA: カラーアトラス 歯の漂白法, 第 1 版, 医歯薬出版, 東京, 22～30, 1999.
- 2) 東光照夫, 久光 久: 漂白—無髄変色歯の漂白とオフィスブリーチング, デンタルダイヤモンド社, 東京, 74～81, 2000.
- 3) 大原盛勝: 漂白—アルゴンレーザーによるホワイトニング, デンタルダイヤモンド社, 東京, 120～125, 2000.
- 4) Goldstein RE, Garber DA, 坂本洋介監訳: 歯科漂白のすべて, 初版, 25～33, クインテッセンス, 東京, 1998.
- 5) Walling C, Kurz M, Schugar HJ: The iron(III)-ethylenediaminetetraacetic acid-peroxide systems. *Inorg Chem*, 9, 931～37, 1970.

- 6) Cohen G, Sinet PM: Fenton reaction between ferrous-diethylenetriaminepentaacetic acid and hydrogen peroxide. *FEBS Lett*, 138, 258～260, 1982.
- 7) Dunford HB: Free radicals in iron-containing systems. *Free Rad Biol Med*, 3, 405～421, 1987.
- 8) Haber F, Weiss J: The catalytic decomposition of hydrogen peroxide by iron salts. *Proc R Soc Lond Ser A Math Phys Sci*, 147, 332～351, 1934.
- 9) Kashima-Tanaka M, Tsujimoto Y, Kawamoto K, Senda N, Ito Koichi, Yamazaki M: *J Endodon*, 2001 (in press).
- 10) 辻本恭久, 小塚昌宏, 塩沢 督, 鹿島みどり, 川本幸司, 三浦 浩, 斎藤一央, 松島 潔, 山崎宗与: 歯の漂白法に使用されるスーパーオキシソールの効果, *日歯保存誌*, 43, 10～15, 2000.
- 11) Dahlstrom SW, Heithersay GS, Bridges TE: Hydroxyl radical activity in thermo-catalytically bleached root-filled teeth. *Endod Dent Traumatol*, 13, 119～125, 1997.
- 12) Kohno M, Mizuta Y, Kusai M, Masumizu T, Makino K: Measurements of superoxide anion radical and superoxide anion radical scavenging activity by electron spin resonance spectroscopy coupled with DMPO spin trapping. *Bull Chem Soc Jpn*, 67, 1085～1090, 1994.
- 13) Buettner GR: Spin trapping; ESR parameters of spin adducts. *Free Rad Biol Med*, 5, 259～303, 1987.
- 14) 内山敏一: 生活歯漂白—フッ化物塗布と炭酸ガスレーザー併用によるエナメル質耐酸性; *日歯保存誌*, 45 (2), 2002. (掲載予定)
- 15) 小塚昌宏, 川本幸司, 三浦 浩, 辻本恭久, 山崎宗与: 漂白に用いる H_2O_2 の根管象牙質表面に対する影響—作用濃度と作用時間の電子顕微鏡的検討—. *日歯内療誌*, 22, 16～19, 2001.

連絡先 (辻本 恭久) 〒271-8587
千葉県松戸市栄町西 2-870-1
日本大学松戸歯学部歯内療法学講座
Tel.047-360-9371
Fax.047-360-9370

(論文受付: 平成 13 年 12 月 29 日)

キーワード

- ・漂白
- ・エナメル質耐酸性
- ・炭酸ガスレーザー

日歯保存誌 45 (2) : 205~215, 2002

生活歯漂白ーフッ化物塗布と炭酸ガスレーザー併用による エナメル質耐酸性

内 山 敏 一

日本大学大学院松戸歯学研究科歯学専攻

(指導: 池見宅司教授)

(受付: 平成 13 年 10 月 31 日)

Acid Resistance Effect of Simultaneous Use of Carbon Dioxide Laser and Fluoride on Bleached Enamel Surface

UCHIYAMA Toshikazu

Nihon University Graduate School of Dentistry at Matsudo, Major in Operative Dentistry

(Director: Prof. IKEMI Takuji)

870-1, Sakaecho, Nishi-2, Matsudo, Chiba 271-8587, Japan

(Received for Publication: October 31, 2001)

The purpose of this study was to find the best way of improving the acid resistance of the enamel surface. Nowadays, office bleaching products, containing a 35% hydrogen peroxide solution and powder, are commercially available. However, this hydrogen peroxide dissolves organic compounds due to its potent oxidizing action, and some studies reported that this solution changed the characteristics of enamel surfaces and made them rough in appearance. We previously reported that the acid resistance of tooth enamel decreased after bleaching, and that the acid resistance of tooth enamels could be acquired with the use of fluoride. However, a greater level of acid resistance could not be achieved. It has been reported that the acid resistance of sound enamel can be improved by combining the application of fluoride with carbon-dioxide laser irradiation.

Improved acid resistance leads to better prevention of dental cavities, and the above findings suggest that the best time to acquire acid resistance is immediately after bleaching. As a result, fluoride

application and laser irradiation were combined after bleaching and changes in the properties of enamel surfaces and surface layers were ascertained, leading to improved acid resistance in tooth enamel. Then five types of specimens were studied: sound (C); bleaching (B); fluoride application (F); fluoride application after bleaching (B/F); and carbon-dioxide laser irradiation after B/F treatment (B/F/L).

A differential colorimeter was used to assess the acquisition of the acid resistance of enamel surfaces. Morphological changes in enamel surfaces were examined by scanning electron microscopy. The elemental analysis of enamel surface layers after fluoride application and laser irradiation was carried out by ESCA. In addition, contact micro-radiograms were prepared to assess the acid resistance of enamel surfaces on longitudinal sections.

The following results were obtained.

1. Differential colorimetry revealed that the ΔY value was the highest for B and the lowest for B/F/L.

2. SEM images prior to lactic acid treatment demonstrated calcium fluoride-like products on enamel surface layers in the fluoride-treated samples, and these products were most prevalent for B/F/L.

3. For SEM images after lactic acid treatment, demineralization was most advanced and the morphology of enamel prisms was not clear for B. While, more dense enamel crystals were observed on the surfaces of B/F/L.

4. ESCA analysis revealed that the peak area of F_{1s} was largest for B/F/L. By comparison of the

peak area of Na (KLL), while defining F_{1s} as 1, the amount of fluoride found on the enamel surface after B/F/L was 1.5-fold that after F or B/F.

5. CMR observations following ART demonstrated that about 50 μm of the enamel surface was dissolved for B. The depth of B, demineralization involving the dissolution of enamel, was deepest, followed by C, B/F, F, B/F/L. For F, B/F and B/F/L, a radio-opaque layer was seen in the enamel surface.

(Request original article reprints to Dr. UCHIYAMA)

緒 言

歯質の耐酸性を向上させてう蝕を予防する方法には、従来からフッ化物の応用がなされており、フッ化物をより効果的に歯質に取り込ませるためにフッ化物の種類や濃度、方法などについて多角的に研究されてきた。特に、う蝕の初発の多くはエナメル質であることから、エナメル質表面の耐酸性獲得については多くの報告がみられ¹⁻⁴⁾、今日では、フッ化物とレーザーを併用した研究報告^{5,6)}がみられる。

一方、最近の審美歯科に対する関心の高まりとともに、変色歯の色調改善のために生活歯の漂白が行われるようになってきた。本邦でもオフィスブリーチングとして35%の過酸化水素水を漂白の主剤とし、これにデュアルアクチベーターとして硫酸マンガンの粉末を配合した漂白剤が市販されている⁷⁻⁹⁾。本法は生活歯のエナメル質表面からの漂白が可能であるという利点を有しており、歯を削除する必要のないことから好評を得ている⁸⁾。漂白によるエナメル質の構造的変化については、単に着色を除去するだけで、構造的な変化は認められないとする報告^{10,11)}と、35% 過酸化水素水はその強い酸化作用により着色成分の有機質の分解だけでなく無機質が脱灰されエナメル質表面が凹凸を示すとの報告もみられる¹²⁾。いずれにしても漂白直後のエナメル質表面はペリクルなどの有機質が除去されて、新鮮なエナメル質が露出しているものと推測される。

著者らは、漂白によってエナメル質の耐酸性が低下しており、漂白後にフッ化物を作用することで漂白前のエナメル質耐酸性と同程度に回復することを報告し

た¹³⁾。しかし、漂白前以上の耐酸性は得られなかった。エナメル質の耐酸性獲得の報告では、実験的に乳酸などにより一度脱灰されたエナメル質表層は、フッ化物を作用させることで耐酸性を獲得することが報告されている¹⁴⁾。また、健全エナメル質にフッ化物塗布と炭酸ガスレーザー照射を併用すると、耐酸性が向上するという報告がなされている。その理由の1つとして、レーザー照射を受けたエナメル質表面は浄化され、フッ化物との反応性が高くなっているものと考えられている¹⁵⁾。

以上の観点から、歯質強化の一助となるエナメル質の耐酸性獲得を効果的に行うには、漂白直後が好機と考えられるが、その際のう蝕予防処置の考えに立脚した実験報告は少ない¹³⁾。そこで、エナメル質の耐酸性の向上を図る目的で、著者は漂白後のエナメル質表面にフッ化物とレーザー照射を併用して、実験を行った。

エナメル質表面における耐酸性評価としては、色彩色差計を使用して乳酸処理前と後のエナメル質の表面粗さを調べ、エナメル質表面の形態変化は走査型電子顕微鏡で観察した。フッ化物塗布あるいはフッ化物とレーザー照射の併用によるエナメル質表層の元素分析はX線光電子分光分析装置を用いて行い、さらに、側面からみたエナメル質表層の耐酸性を調べるために、コンタクトマイクロラジオグラムを作製して比較検討を行った。

材料および方法

1. 試料の作製

抜去後、冷凍保存したウシ下顎前歯を、使用直前に

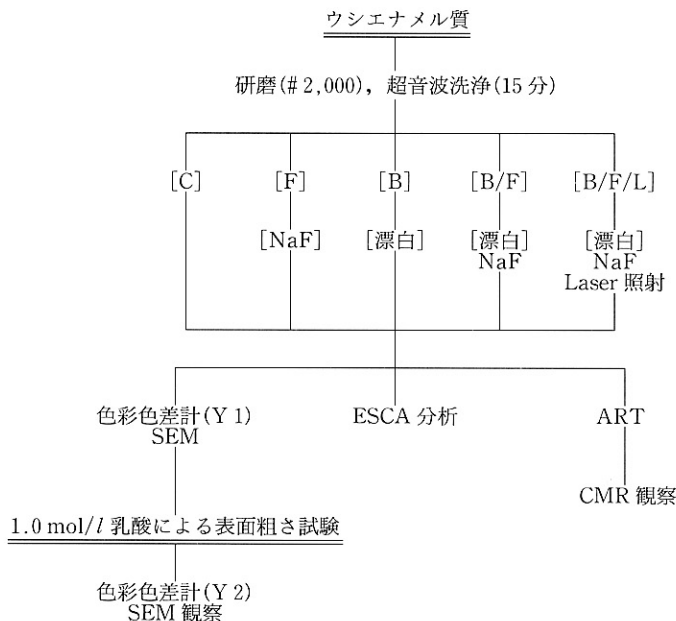


図 1 実験手順

注水下・室温にて解冻した。耐水ペーパーを用いて、唇側エナメル質の表層から約 $200\ \mu\text{m}$ までを研磨し、最終 #2,000 のインペリアルラッピングフィルム (3 M) で鏡面研磨を行い、15 分間超音波洗浄を行った。その後、直径 5 mm に開孔したポリストリップスをエナメル質表面に貼付し、ウインドウを作製した。

試料は以下の処理を施し、図 1 に示す手順で実験を行った。

C：無処理

F：フッ化物塗布

B：漂白

B/F：漂白後、フッ化物塗布

B/F/L：漂白後、フッ化物塗布、レーザー照射

フッ化物は、2% NaF 溶液 (ネオ) を使用した。これをウインドウ内の歯面に 4 分間作用後、十分に水洗して F の試料とした。

漂白は松風ハイライト (松風) の粉末と液を混和後、ウインドウ内の歯面に塗布して 3 分間放置後、光重合照射器 (キュアリングライト XL-3000, 3 M) にて 4 分間光照射し、照射後、さらに 2 分間放置して水洗を行った。この操作を 3 回繰り返して、漂白試料の B とした。

B の手順に従って作製した試料を十分に水洗した後、ウインドウ内にフッ化物を塗布して 4 分間作用さ

せ、水洗したものを B/F の試料とした。

B/F の手順に従って作製した試料にレーザー照射を 1 スポット 3 秒で、合計 12 秒間行ったものを B/F/L の試料とした。

レーザーに関しては、炭酸ガスレーザー (Panalas C 10, 松下) を使用し、スーパーパルスモードにてレーザー照射を行った。レーザーの出力は 7 W とし、1 スポットの照射時間は 3 秒の条件で行った。なお、先端チップの内径は 2.6 mm で、照射野径が 3.0 mm となるように試料と先端チップの距離を 1.0 mm とした。その際の照射エネルギー密度は、パワーメーター (Nova, Ophir) にてチップ先端からの照射出力を測定し、スーパーパルスモードの照射エネルギー密度に換算すると $20.6\ \text{J}/\text{cm}^2$ であった。

2. 色彩色差計によるエナメル質の表面粗さ試験

乳酸によるエナメル質の表面粗さ試験は、杉山¹⁶⁾の方法に準じて行った。色彩色差計における Y 値は明度を表し、光の反射量を数値化したもので、脱灰によるエナメル質表層の凹凸の変化を光の反射量の違いとして表すことができる。まず、おのおのの処理を施した試料表面を色彩色差計 (CR-321, ミノルタ) にて測定し、得られた Y 値を Y1 とした。なお、C に関しては、研磨直後の値を Y1 とした。

その後、1.0 mol/l 乳酸を $30\ \mu\text{l}$ 滴下して 60 秒間

作用させ、蒸留水(以下, D.W.)にて15秒間水洗・乾燥した後, 再びY値の測定を行い, 得られた値をY2とした。そして, $\Delta Y = Y2 - Y1$ を光反射増加量とし, エナメル質耐酸性の指標とした。色彩色差計の校正は白色校正板($Y=82.5$, $x=0.3132$, $y=0.3139$)を用いて行った。試料数は7とし, 得られた ΔY についてはSchefféにて有意差検定($p<0.05$)を行った。

3. エナメル質表面の走査型電子顕微鏡観察

おのおのの乳酸処理前と後のエナメル質表面について, 走査型電子顕微鏡(以下, SEM)にて観察を行った。色彩色差計による耐酸性試験前と後の試料を $4 \times 3 \times 1.5$ mmのエナメルブロックにし, アルコール昇順脱水後, τ -ブチルアルコールで3回, 各2時間の溶液置換を行い, 凍結後フリーズドライヤー(ES-3020, 日立)にて乾燥を行った。蒸着は, イオンコーター(E-1030, 日立)にて白金パラジウムターゲットを用い, 15 mA, 3分間の条件で行った。試料表面とターゲット間の距離は30 mmとした。

蒸着後, FE-SEM(S-4500, 日立)にて加速電圧5 kV, エミッション電流11 μ Aとし, 倍率は10,000倍でSEM観察を行った。

4. X線光電子分光分析装置によるエナメル質表層の元素分析

1と同様にして作製したおのおのの試料を $4 \times 3 \times 1.5$ mmのエナメルブロックにした。

装置はX線光電子分光分析装置ESCA(ESCA-750, 島津, 以下, ESCA)を使用し, 励起X線源はMgK α (1.253 eV), 加速電圧8 kV, 加速電流30 mA(出力240 W), 真空度 5.0×10^{-5} Torrの条件で, FとNa原子について表層分析を行った。帯電によるケミカルシフトの補正は, 真空中の残留ガスに含まれる炭素化合物に由来するC_{1s}の結合エネルギー285 eVを基準として行った。

おのおのの試料についてFとNa原子の結合エネルギーを調べ, ピークの確認できた試験試料のピーク面積を比較するためにNaF標品(和光)を用いて検討した。さらに, 最大ピーク面積が得られた試料の定性分析のためにNaF標品, CaF₂標品(和光)およびフロールアパタイト(以下, FAP)標品(和光)を用いて調べた。

なお, 定量分析は, 測定された光電子スペクトル強度から電子の光イオン化断面積, 平均自由行程および装置関数を考慮し, F_{1s}のピーク面積を基準としたNa(KLL)の相対強度を比較した。

5. 耐酸性試験後のコンタクトマイクロラジオグラムの作製

1と同様にして作製したおのおのの試料を, $4 \times 3 \times 3$ mmのエナメルブロックにした。研磨面以外の歯面は, スティックワックスで被覆し, エナメル質表面の両端0.5 mmにはネイルバーニッシュを塗布した。試料は3.0 mmol/l Caを含んだ0.01 mol/l 乳酸緩衝溶液pH=4.0, 50 ml中に浸漬し, 4日間37°C恒温槽中に静置して耐酸性試験(以下, ART)を行った。

ART後, 各試料をアセトンにて昇順脱水を行い, 包埋材(Rigolac, 応研)に置換包埋した。包埋材硬化後, アイソメット(Buehler)で切断し, 厚さ約90 μ mまで研磨して試料を作製した。試料の下面にフィルム(ソフロン)を置き, 軟X線装置(Sofron SRO-M 40, MFG)にて, 電圧20 kV, 電流3.0 mA, 照射時間14分の条件で照射を行い, コンタクトマイクロラジオグラム(以下, CMR)を作製し, 光学顕微鏡にて観察を行った。

結 果

1. 色彩色差計によるエナメル質の表面粗さ試験

Cの ΔY は $4.80(\pm 0.56)$, Fは $3.90(\pm 0.36)$, Bは $5.24(\pm 0.64)$, B/Fは $4.08(\pm 0.57)$ そしてB/F/Lでは $2.05(\pm 0.36)$ を示した。統計学的にはSchefféの検定($p<0.05$)において, CとB, CとB/F, FとB/F以外の各試料間に有意差が認められた(図2)。そして, B/F/Lは他のすべての試料よりも有意に低い ΔY 値を示した。

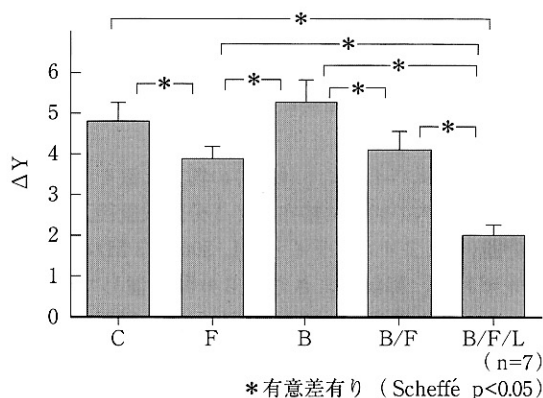


図2 色彩色差計によるエナメル質の表面粗さ試験

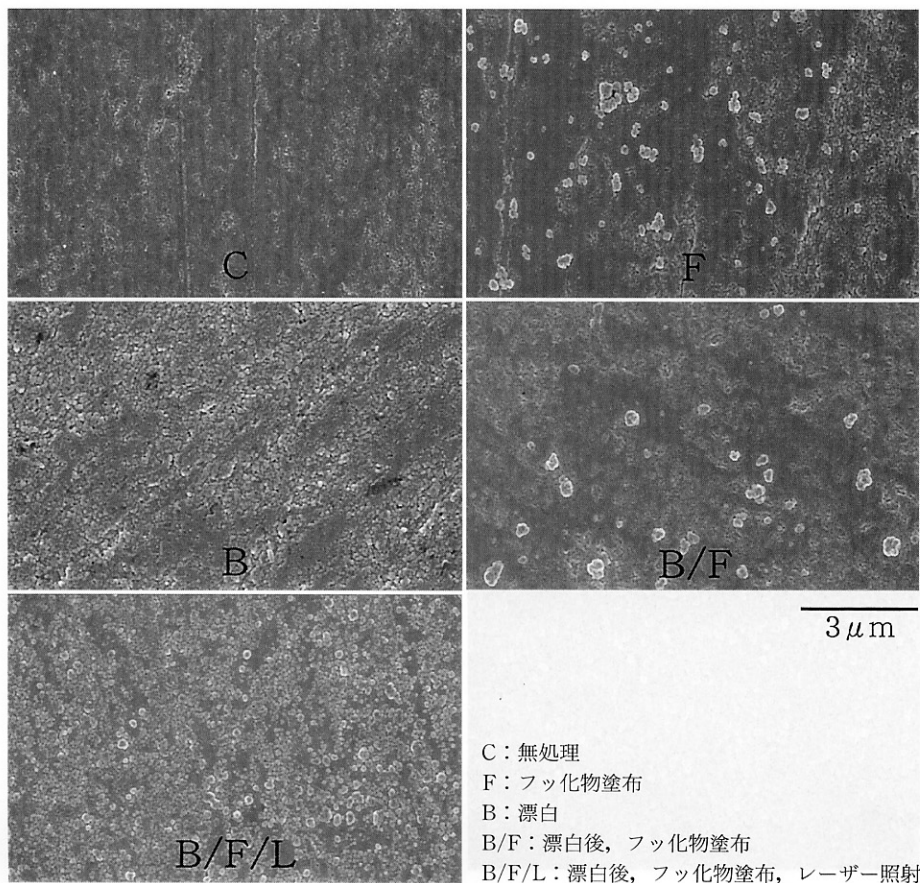


図 3 乳酸処理(エナメル質表面粗さ試験)前の SEM 像

2. エナメル質表面の SEM 観察

図 3 に乳酸処理前の SEM 像を示した。C ではエナメル小柱が観察されず、数条の研磨傷が観察された。B ではエナメル質表面が C に比べ粗糙になっており、エナメル小柱の形態とアパタイト様結晶が確認できた。フッ化物を作用させた試料では、エナメル小柱の形態を観察することができず、F および B/F では円形の生成物が散見され、B/F/L ではほぼ全面に円形の生成物が認められた。

図 4 に乳酸処理後の SEM 像を示した。C の SEM 像では、エナメル小柱の形態が認められ、結晶間に間隙の生じた像が観察された。F ではエナメル小柱の形態が確認でき、小さなアパタイト様の結晶が認められ、それらの結晶と結晶の間には小さな間隙がみられた。B ではさらに結晶間の間隙が拡大し、エナメル小柱の形態が不明瞭であった。B/F ではエナメル小柱の形態が不明瞭で、結晶は C に比べ密に存在している

が、結晶と結晶の間隙の少ない像が観察された。B/F/L では、エナメル小柱の形態は不明瞭であるが、F よりも粒径の大きい結晶が認められ、結晶と結晶の間隙は小さく、密に結晶で覆われた表面形態が観察された。

3. ESCA によるエナメル質表層の F と Na 原子の定量・定性分析

おのおのの試料について ESCA 分析を行い、 F_{1s} と $Na(KLL)$ のスペクトルを図 5 に示した。 F_{1s} と $Na(KLL)$ の両方において、C と B ではピークが不明瞭であるが、フッ化物を作用させた試料の F、B/F および B/F/L ではピークが確認できた。

そこで、NaF 標品と F、B/F および B/F/L のピーク面積を比較するために、それぞれのスペクトルを図 6 に示した。 F_{1s} に関して、NaF 標品では 13,664.61 cps・eV を示し、F と B/F はほぼ同様のピーク面積であった。そして、B/F/L のピーク面積

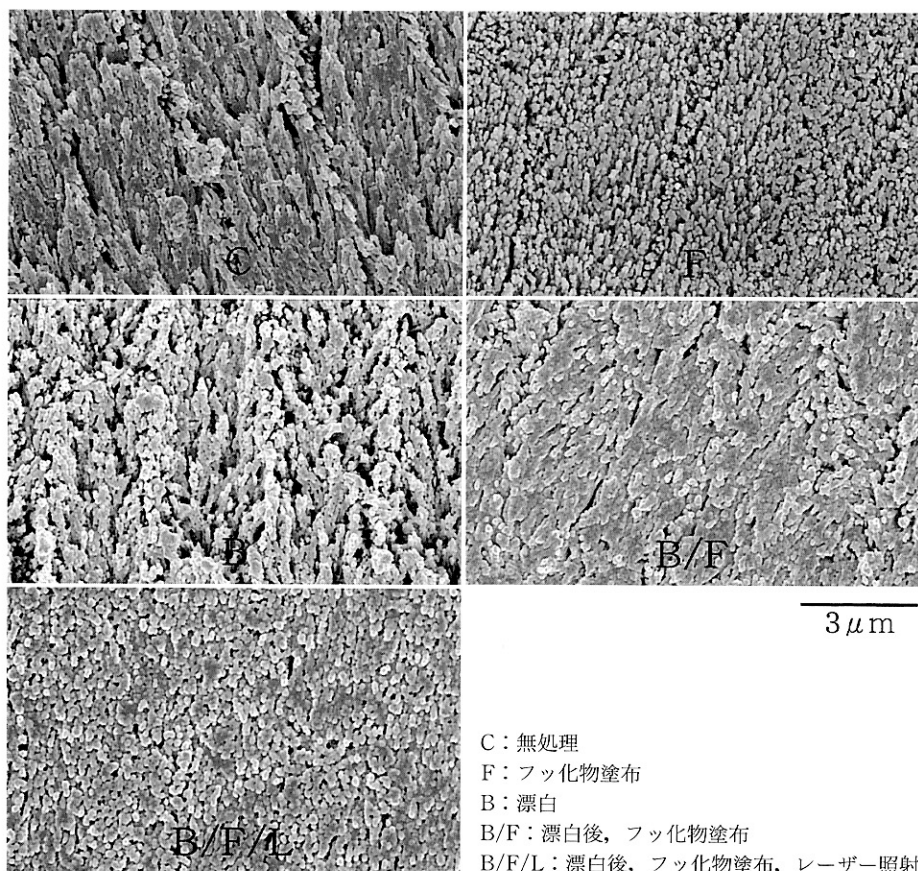


図4 乳酸処理(エナメル質表面粗さ試験)後のSEM像

はFとB/Fの約2倍の面積を示した。Na(KLL)に関して、NaF標品では20,480.93 cps・eVを示し、F、B/FおよびB/F/Lはほぼ同様のピーク面積を示した。

表1には F_{1s} を1としたときのNa(KLL)のピーク面積の相対強度比を示した。NaF標品は1.50で最も高く、FとB/Fは0.71で、B/F/Lは0.36であった。したがって、NaF標品のNaの残留量を100%としたときのNaの残留量はFとB/Fは47.3%で、B/F/Lは24.0%であった。そこで、さらにB/F/Lの定性を目的として、NaF標品、 CaF_2 標品、FAP標品およびB/F/Lの F_{1s} における結合エネルギー値を測定し、図7に示した。それぞれ684.70 eV, 685.20 eV, 684.90 eVおよび685.00 eVの値を示した。

4. ART後のCMR観察

ネイルバーニッシュで乳酸による脱灰から保護され

たエナメル質表面を基準面とし、乳酸により溶解あるいは脱灰された深さについて写真上で測定した結果、Cでは表層から約20 μm が溶解し、その下に約80 μm の脱灰像が観察された。Fでは表層が溶解することなく、約85 μm の深さで脱灰像が認められた。Bではエナメル質表面から約50 μm が溶解し、その下に約60 μm の脱灰像が観察された。B/Fではエナメル質表面から約10 μm が溶解し、その下に約85 μm の脱灰像が観察された。B/F/Lでは表層が溶解することなく、60 μm の深さで脱灰像が認められた。

フッ化物を作用した試料ではいずれも表層に一層のX線不透過像が観察され、B/F/Lでは厚く明瞭なX線不透過像が観察された。また、FとB/F/Lではエナメル質表層の溶解が認められなかった。ARTによるエナメル質表層の溶解を含む脱灰深度はB/F/Lが最も浅く、F、B/F、C、Bの順に深くなった。

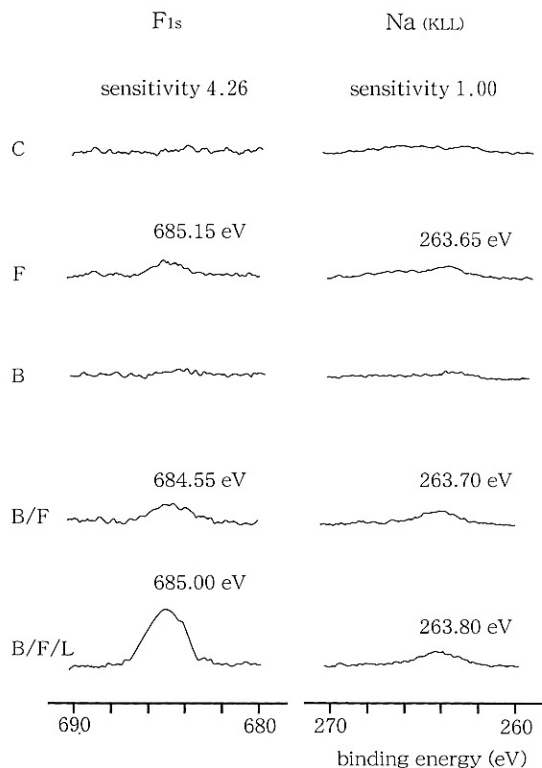


図 5 ESCA による結合エネルギーの比較

表 1 F_{1s} を 1 としたときの Na(KLL) のピーク面積

測定品目	F _{1s}	Na の残留量
NaF 標品	1	1.50 100%
F	1	0.71 47.3%
B/F	1	0.71 47.3%
B/F/L	1	0.36 24.0%

考 察

歯冠部う蝕は、口腔内細菌の代謝産物として有機酸が産生^{17,18)}され、エナメル質が脱灰することで発症するとされている。これは、エナメル質の主成分であるハイドロキシアパタイトが酸の侵食に弱いためである¹⁹⁾。そのため、今日の歯科臨床で最も一般に行われているう蝕予防法の一つとして、エナメル質の耐酸性を向上させる方法がとられており、多くはフッ化物歯面塗布²⁰⁻²³⁾が行われている。また、最近ではレーザー照射により歯質の耐酸性を向上させる試みがなされており、炭酸ガスレーザーを用いた実験が行われて

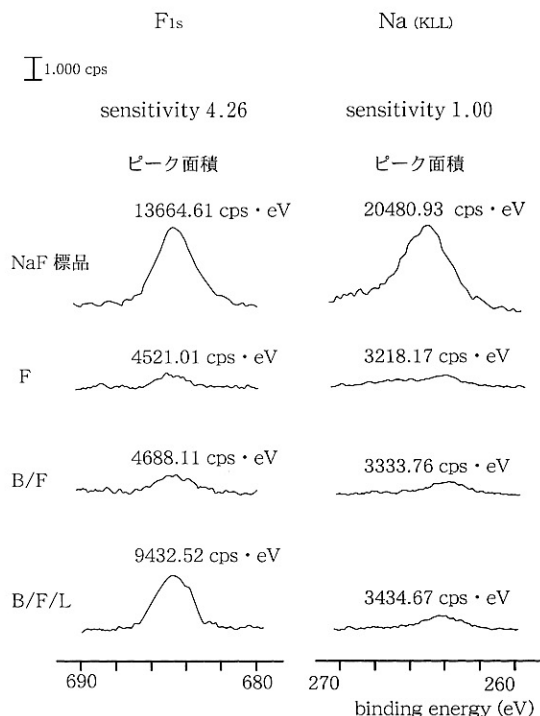


図 6 NaF 標品, F, B/F, B/F/L のピーク面積の比較

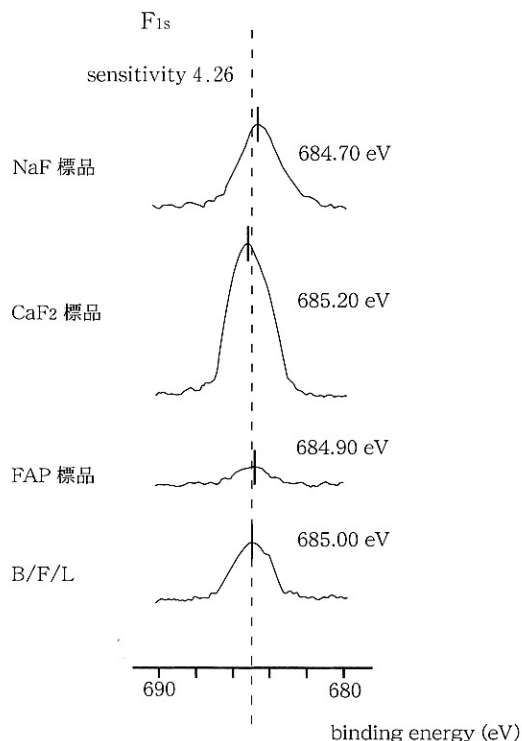


図 7 B/F/L の定性分析

いるが、エナメル質の耐酸性を獲得させるためには高いエネルギー密度での照射が必要となり、エナメル質の溶融・凝固あるいは亀裂の発生などが問題点として指摘されている²⁴⁾。そこで、フッ化物とレーザー照射を併用したエナメル質の耐酸性獲得の研究が行われ、田籠らはレーザー照射後にフッ化物を作用した方が効果的であることを報告している²⁵⁾。また、深澤は炭酸ガスレーザー照射後にフッ化物を塗布し、さらにレーザー照射した方が効果的であると報告している。その理由として、まず炭酸ガスレーザー照射によってエナメル質表層の汚物を除去することで新鮮なハイドロキシアパタイトが露出し、再度のレーザー照射で熱を加えることによりフッ化物の反応性を高めるからではないかと考えている¹⁵⁾。

一方、歯の色調は、患者の対人関係や精神面に影響を与えることが考えられ、最近では歯科医療の進展に伴って、う蝕を処置することだけにとどまらず、患者の審美的要求に対応できる材料ならびに技法が開発されている。生活歯漂白直後のエナメル質の構造的変化については、変化が認められないとする報告^{10,11)}と、35% 過酸化水素水の酸化作用で無機質が脱灰されエナメル質表面が粗糙になるとの報告もみられる¹²⁾。いずれにしても漂白直後のエナメル質表面は新鮮なエナメル質が露出し、化学的な反応性が亢進しているものと推測される。

このように新鮮なエナメル質が露出した状態にある漂白直後の歯はフッ化物を取り込みやすいものと推測され、歯の審美性回復と耐酸性獲得が同時に達成できれば今後の歯科医療に貢献できるものと考えて、著者は漂白直後の歯にフッ化物を作用した際の耐酸性について研究を行ってきた¹³⁾。しかし、NaFあるいは酸性フッ素リン酸溶液(フローデン A, サンスター)を漂白直後のエナメル質表面に作用しても、漂白前のエナメル質表面の耐酸性と同程度で、それ以上の耐酸性は得られなかった。そして、漂白後のエナメル質の耐酸性は低く、飲食物による酸の影響を受けやすいものと考えられた。

そこで、本実験では漂白後のエナメル質の耐酸性向上を安全かつ確実に図る目的として、フッ化物とレーザーの併用に着目して研究を行った。今回の実験では漂白によってすでにエナメル質表面の汚物が除去されているものと考え、フッ化物を塗布した後にレーザー照射を行った。また、フッ化物とレーザー照射の併用の効果を比較検討するために、無処理、フッ化物塗

布、漂白後、漂白後にフッ化物塗布、そして漂白してフッ化物塗布後レーザー照射した試料を用いた。

レーザーは炭酸ガスレーザーを使用し、スーパーパルスモードで試料表面に照射した。炭酸ガスレーザーは波長 10.6 μm で、遠赤外領域の波長を有するために、被照射体に与える影響は熱が主体となる。したがって、安心して臨床的にエナメル質に応用する必要性を考慮し、スーパーパルスモードを選択した。本モードでは、局所的には瞬間的に連続波の 2.5~3 倍のエネルギーを被照射体に与えることができるが、0.6 msec on, 6 msec off のパルス波であることから熱の蓄積が少なく、被照射体の発熱を抑制することができるものと考えられた。

エナメル質表面の耐酸性評価には色彩色差計を使用した。本測定器は JIS Z 8722 の 45-0 法に準拠して設計されており、パルスキセノンランプからの光を環状に配置された直径 1 mm のファイバー 30 本で導き、45 度の角度で試料面を均一に照射し、試料表面から垂直方向の反射光を測定するものである。その際の Y 値の増減は、試料表面の凹凸の程度を表す指標とすることが可能である。杉山¹⁶⁾はウシエナメル質表面における脱灰程度と Y 値の変化量との間に相関がみられ、1.0 mol/l 乳酸を 60 秒あるいは 90 秒間作用した場合、カルシウム溶質量と光反射増加量の高い相関が得られたと報告している。この方法はエナメル質表面の耐酸性を迅速に、かつ簡便に調べることができるものと考えられ、本実験のエナメル質の表面粗さ試験もこの測定方法に準じて行った。

その結果、C と F では有意差が認められフッ化物塗布による耐酸性の効果は従来の報告と同様であった。しかし、C と B では有意差は認められないが、B の方が乳酸による影響を受けやすい傾向が示された。B と B/F では有意差が認められ、フッ化物塗布の効果は示された。B/F/L はすべての試料との間に有意差が認められ、最も高い耐酸性が得られていた。

そこで、表面形態を SEM 観察すると、乳酸処理前に比べて処理後では、すべての試料において粗糙感を呈しており、特に C と B ではエナメル質表面の凹凸が顕著であった。しかし、F、B/F および B/F/L では粗糙感が C や B に比べて小さいものと観察された。なかでも、B/F/L は小さな結晶様物質で表面が緻密に覆われている像が観察された。そして、乳酸処理前と後のエナメル質表面の形態変化は、B/F/L が最も少なく、色彩色差計による耐酸性の順との一致がみられ

た。

これらの耐酸性の違いを生ずる原因を調べるために、エナメル質表面性状の違いについては、ESCAを用いて調べた。ESCAは、単色のX線を物質表面に照射し、表面から放出される光電子エネルギーを測定する方法で、物質の構成元素の定性・定量分析のみならず、化学結合状態を解析できる有力な表面分析法である²⁶⁾。そして、そのなかでも特にF_{1s}の分析に高感度であり、これはフッ素が最も電気陰性度が高い元素で物質を化学シフトさせやすいからと報告されており²⁷⁾、歯質の分析にもよく用いられている²⁸⁻³¹⁾。今回使用した2% NaFは市販の局所塗布用のもので、フッ素濃度は9,040 ppmと高濃度のフッ化物である。このような高濃度のフッ化物はエナメル質表面にCaF₂様の析出物を生じるとされているが、漂白あるいはレーザー照射によってどの程度、そしてどのようなフッ化物がエナメル質表層に存在しているかは明確にされていない。

分析の結果、図5においてCとBではF_{1s}のピーク値は確認されず、フッ化物を塗布した試料にピークが確認された。そこで、NaF標品とピークが確認された試料のピーク面積を調べた。このピーク面積はNaおよびFを定量したもので、B/F/LはNaF標品の次に大きなピーク面積を示し、FあるいはB/Fの約2倍のピーク面積であった。このことはB/F/Lの処理によって、エナメル質表面に最もフッ化物が存在していることを表している。Naにおいても同様の傾向が認められるが、NaF標品に比べて低いピーク面積を示し、F、B/FおよびB/F/Lでは同程度のピーク面積を示した。そこで、表1に示すようにF_{1s}を1としてNa(KLL)を求めると、NaF標品では1.50、FとB/Fでは0.71、B/F/Lは0.36の値を示し、NaF標品のNa残留量を100%としたときのおのおのNa残留量は47.3、47.3、24.0%を示した。このことはNaFを作用すると、FとB/Fのエナメル質表面にはNaあるいはNaF等が作用したNaF量の47.3%存在し、それ以外のフッ化物が52.7%存在していることを示している。したがって、B/F/Lでは76.0%のフッ化物が存在するものと考えられ、FやB/Fの約1.5倍のフッ化物が生成された可能性が示唆された。このことは、臨床でのフッ化物塗布法において、塗布後30分程度の摂飲食制限が必要となるが、レーザー照射を併用するとそのような制限を課することなく、効果的にフッ化物をエナメル質に取り込ませることを

示している。

そこで、B/F/L処理後にエナメル質表面に生成したフッ化物の定性を行うためにNaF標品、CaF₂標品およびFAP標品とB/F/Lの試料のF_{1s}における結合エネルギーについて検討した結果(図7)、B/F/Lでは685.00 eVを示し、FAP生成の可能性が推測された。そして、SEM所見からCaF₂様の生成物も認められ、漂白によって溶解した有機質のスペースやCaF₂様の結晶内にはNaが残存したり、取り込まれたりしているものと考えられた。

さらに、本実験ではARTを行ってエナメル質が獲得した耐酸性をCMRにてエナメル質の側面から調べた。その結果、図8に示すようにC、B、B/Fではエナメル質表層が溶解している像が認められ、Bでは約50 μmの深さまで溶解していた。また、フッ化物を作用した試料ではいずれも表層に一層の不透過像が観察され、B/F/Lでは厚く明瞭な不透過像が観察された。そして、ARTによるエナメル質表層の溶解を含む脱灰深度はB/F/Lが最も浅く、F、B/F、C、Bの順に深くなった。このことは、漂白直後は酸により表層が溶解しやすくなっており、酸性の飲食物によって硬組織実質欠損を生じやすい状況にあるものと考えられた。そして、漂白後にフッ化物を作用してさらにレーザー照射すると、漂白をせず、単にフッ化物を作用したものよりも耐酸性が獲得されているものと考えられた。この耐酸性獲得の順は、色差計によるエナメル質の表面粗さの順と一致していた。

以上により、生活歯の漂白はエナメル質の耐酸性を低下させるが、漂白直後にフッ化物塗布とレーザー照射を併用すると、漂白をせず単にフッ化物を作用したものよりもエナメル質の耐酸性が向上し、フッ化物が1.5倍の量で存在することが示唆された。そして、フッ化物塗布とレーザー照射の併用は、短時間でエナメル質の耐酸性を向上させる効果があり、臨床的にも有意義なう蝕予防手段であると考えられた。

結 論

1. 耐酸性評価の一方法と考えられる色彩色差計によるエナメル質の表面粗さ試験において、漂白試料(B)は最も高いΔY値を示し、本実験中で最も耐酸性が劣っていることが判明した。なお、漂白後フッ化物塗布、レーザー照射を行った試料(B/F/L)は最も低いΔY値を示し、本実験中で最も耐酸性に優れてい

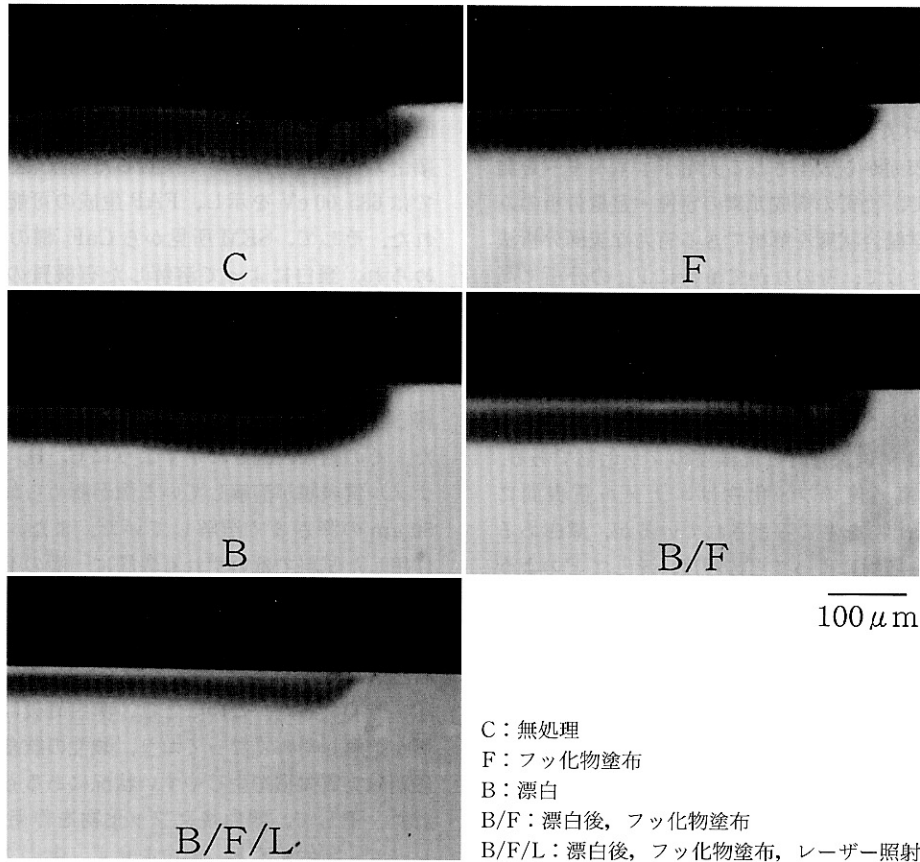


図8 ART後のCMR

ることが判明した。

2. 乳酸処理前のSEM像において、フッ化物を塗布したエナメル質表層には CaF_2 様の生成物が確認され、B/F/Lのエナメル質表層では最も多く存在していた。

3. 乳酸処理後のSEM像において、Bでは最も脱灰が進行し、エナメル小柱の形態が不明瞭となった像が観察され、B/F/Lでは密な結晶がエナメル質表面に観察された。

4. ESCA分析による F_{1s} のピーク面積において、B/F/Lが最も大きい値を示した。また、 F_{1s} を1としたときの $\text{Na}(\text{KLL})$ のピーク面積の比較において、B/F/Lでは、フッ化物塗布後の試料(F)や漂白後、フッ化物塗布した試料(B/F)よりも1.5倍のフッ化物が存在しているものと考えられた。

5. ART後のCMR観察において、Bではエナメル質表面から約 $50 \mu\text{m}$ が溶解しており、エナメル質表層の溶解を含む脱灰深度はB/F/Lが最も浅く、

F, B/F, 無処置の試料(C), Bの順に深くなった。また、 NaF を作用したF, B/F, B/F/Lでは表層にX線不透過像が観察された。

以上のことから、漂白はエナメル質表層の耐酸性を低下させるが、漂白後にフッ化物を塗布してレーザー照射したものは、漂白をせず単にフッ化物を塗布しただけのものよりもエナメル質表層の耐酸性が向上することが示唆された。このことは漂白と同時に、短時間で効果的なエナメル質の耐酸性獲得がなされるものと考えられた。

謝 辞

本稿を終えるに臨み、終始御懇篤なる御指導、御校閲を賜りました本学松戸歯学部保存学I講座、池見宅司教授に対し深甚の謝意を表すとともに、御協力を賜った教職員各位、病理学講座の木場秀夫専任講師、理工学講座の西山典宏助教授に対し深く感謝いたします。また、本研究遂行に多大なる御協力を頂いた(株)サンギならびに本学生産工学

部応用分子工学科の山田和典助教授に厚く御礼申し上げます。

本研究の一部は、文部科学省平成13年度学術フロンティア推進事業の補助を受けて行った。

文 献

- 1) Arends J, Reintsema H, Dijkman TG: 'Calucium fluoride-like' material formed in partially demineralized human enamel in vivo owing to the action of fluoridated toothpastes; *Acta Odontol Scand* 46, 347—353, 1988.
- 2) Chow LC, Brown WE: Reaction of dicalcium phosphate dihydrate with fluoride; *J Dent Res* 52, 1220—1227, 1973.
- 3) Iijima Y, Koulourides T: Mineral dentistry and fluoride content of in vitro remineralized lesions; *J Dent Res* 67, 577—581, 1988.
- 4) Little MF, Casciani FS, Rowley J: Site of fluoride accumulation in intact erupted human enamel; *Arch Oral Biol* 12, 839—847, 1967.
- 5) 森岡俊夫編：レーザー歯学；第1版，医歯薬出版，東京，77—98，1986.
- 6) 白須賀哲也：APF 併用レーザー照射による歯質耐酸性付与効果に関する研究；*日歯保存誌* 31, 283—293, 1988.
- 7) McEvoy SA: Chemical agents for removing intrinsic stains from vital teeth. II. Current techniques and their clinical application; *Quintessence Int* 20, 379—384, 1989.
- 8) 東光昭夫，久光 久：無髄変色歯の漂白とオフィスブリーチング(有髄変色歯の漂白)，久光 久，松尾 通，山岸一枝：漂白；第1版，デンタルダイヤモンド社，東京，74—81，2000.
- 9) 近藤隆一，McLaughlin G, Freedman GA：カラーアトラス 歯の漂白法；第1版，医歯薬出版，東京，22—30，1999.
- 10) 山岸一枝：カウンセリングからメンテナンスまで，久光 久，松尾 通，山岸一枝：漂白；第1版，デンタルダイヤモンド社，東京，60—64，2000.
- 11) 山口龍司，木村 暢，稲葉友良，海老原 隆，須崎智勝，大原 睦，小野沢隆行，加藤喜郎：生活歯漂白法がカニクイザルの歯髄に及ぼす影響について；*歯科審美* 7, 248—256, 1995.
- 12) 中島勇人，小河宏行，姜 熙準，高 永和，日野年澄，中村隆志，丸山剛郎：バイタルブリーチングの効果に関する臨床的研究(第一報)一色調と表面性状の変化一；*歯科審美* 4, 8—13, 1992.
- 13) 深澤正幹，内山敏一，杉山道紀，大村基守，田川剛士，荻野 朗，河野善治，池見宅司：生活歯漂白後のエナメル質の耐酸性；*日歯保存誌* 43, 1107—1112, 2000.
- 14) Ikemi T, Koulourides T: Abrasion biopsy in studies of mineral density of experimental enamel lesions; *J Dent Res* 67, 508—514, 1988.
- 15) 深澤正幹：炭酸ガスレーザーと試作フッ素含有ペースト併用による歯質耐酸性効果；*日歯保存誌* 43, 583—591, 2000.
- 16) 杉山道紀：エナメル質表面の耐酸性の評価に関する研究一色彩色差計を用いた測定法一；*日大口腔科学* 25, 326—338, 1999.
- 17) 池田 正：齲蝕の病因；*歯界展望* 74, 1107—1115, 1989.
- 18) Seow WK: Biological mechanisms of early childhood caries; *Community Dent Oral Epidemiol* 26, 8—27, 1998.
- 19) 岡崎正之：歯と骨をつくるアパタイトの化学；第1版，東海大学出版会，東京，27, 1992.
- 20) Cheyne VD: Human dental caries and topically applied fluorine; A preliminary report, *J Am Dent Assoc* 29, 804—807, 1942.
- 21) Howell CL, Gish CW, Smiley RD, Muhler JC: Effect of topically applied stannous fluoride on dental caries experience in children, *J Am Dent Assoc* 50, 14—17, 1955.
- 22) 可児瑞夫，可児徳子：う蝕予防のためのフッ化物応用法 I. フッ素のう蝕予防機序；*岐歯学誌* 12, 1—12, 1985.
- 23) 加藤二郎：エナメル質におけるフッ素保持に関する研究一とくにフッ化物歯面塗布溶液とフッ素配合歯磨剤との併用について一；*歯科医学* 49, 445—474, 1986.
- 24) 金 光旬，神原正樹：レーザー照射後のエナメル質および象牙質表面の微細構造；*歯科医学* 60, 45—57, 1997.
- 25) 田籠祥子，森岡俊夫：エナメル質耐酸性付与に及ぼす YAG レーザー照射とフッ化物塗布の併用効果；*口腔衛生会誌* 34, 344—345, 1984.
- 26) 染野 檀，安盛若雄編：表面分析；第12版，講談社，東京，224—266, 1977.
- 27) Briggs D, Seah MP：合志陽一，清水隆一 監訳：表面分析(下)；第1版，アグネ承風社，東京，141—178, 1990.
- 28) 川上智史，大野弘機，松田浩一：ESCA によるヒト歯質の分析(第1報)一ハイドロキシアパタイトの分析とエナメル質生検法への応用一；*日歯保存誌* 38, 1205—1211, 1995.
- 29) 加藤成樹：NaF 処理合成ハイドロキシアパタイトの表面性状に関する X 線光電子学および界面電気化学的研究；*歯科医学* 52, 381—406, 1989.
- 30) 野村裕信，上村参生：原子間力顕微鏡によるエナメル質表層下脱灰部表面の微細構造およびその表面性状；*口腔衛生会誌* 46, 187—198, 1996.
- 31) 福田 康，中嶋省志，谷沢善明，金子憲司：フッ素歯磨剤処理によりハイドロキシアパタイト表面に形成されたフッ素性アパタイトの¹⁹F-MAS 固体 NMR および ESCA による同定；*口腔衛生会誌* 47, 266—273, 1997.

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接着性

— レーザー追照射の影響 —

須原秀宜

日本大学松戸歯学部保存学Ⅰ講座（保存修復学）

Bond strength of resin composite to dentin irradiated with an Er-YAG Laser

— Effect of additional laser irradiation —

SUHARA Hideki

Department of Operative Dentistry, Nihon University School of Dentistry at Matsudo

本研究は、エルビウムヤグレーザー照射した象牙質に対するコンポジットレジンの接着性を向上させることを目的として行った。エルビウムヤグレーザー照射で削除された部分のレジン修復に市販のボンディングシステムで処理すると、象牙質においてその接着力が減少することが報告されている。そこで、著者は象牙質を脱灰しないように、水の代わりにアセトンを含合した試作プライマーを用いて、レーザーの追照射の照射エネルギーを変化させた際の接着について比較検討した。ウシの歯の象牙質面に対して、220mJの照射エネルギーでレーザー照射し、その後、30、60、90あるいは150mJで照射した。照射した象牙質面に試作プライマーとボンディング材を塗布してコンポジットレジンを含填した。引張り接着強さはユニバーサル試験機にて測定した。

その結果、220mJの照射エネルギーで削除した象牙質に30～90mJの追照射を行い、10%10-メタクリロイルオキシデカメチレンリン酸（MDP）/35%2-ヒドロキシエチルメタクリレート（HEMA）/55%アセトン（Ac）の試作プライマーをすることで接着力は向上した。その理由として、レーザーの追照射により熱変性層の厚さが減少した象牙質に、プライマー中のアセトンがモノマーの浸透と拡散を助長したものと考えられる。

キーワード：Er-YAGレーザー、追照射、象牙質接着、プライマー

This experiment was conducted in order to improve the adhesiveness of a resin composite to Er-YAG laser irradiated dentin. According to some reports if a resin was applied to a dentin surface irradiated with the Er-YAG laser using the conventional resin composite adhesion system, the resin adhesiveness decreased remarkably. The author examined experimental primers containing some concentrations of acetone instead of water, so as not to decalcify the dentin, and conducted a comparative study by changing the energy of additional laser irradiation. Er-YAG laser irradiation was applied to the surfaces of bovine teeth at an output power of 220mJ, followed by 30, 60, 90, or 150mJ, to form concavities in the dentin. The experimental primer and bonding material were then placed onto the laser irradiated dentin, and the concavities were filled with composite resin. The tensile adhesion strength was measured by universal tester. Consequently, 10wt% MDP/35wt% HEMA/55wt% Acetone primer improved adhesion of a composite resin to irradiated dentin with a 220mJ Er-YAG laser followed by additional 30 to 90mJ. Probably, the acetone solution primers were improved both monomer penetration and infiltration, that decreased thermally - modified layer with additional laser irradiation.

Key words : Er-YAG Laser, additional irradiation, dentin adhesion, primer

緒 言

近年、う蝕治療において、罹患歯質のみを選択的に除去する窩洞のダウンサイジングが提唱されている¹⁻³⁾。この発想の背景には、接着性修復材料の進歩による歯質との接着性の向上が考えられる。それに伴い、罹患歯質を選択的に除去できる可能性を有したレーザーや粉末噴射式歯質研削装置、化学—機械的う蝕除去システムの基礎的研究、あるいは臨床応用が試みられるようになった⁴⁻⁷⁾。レーザーによる歯質削除は、高音を発することなく、歯に与える振動が少ないことから患者の不快感を軽減することができる。現在市販されている歯科用レーザー機器の中で、エルビウムヤグレーザー（Eirwin, モリタ：以下Er-YAG）は歯質削除を主目的として、すでに歯科臨床で応用されている⁸⁻¹⁰⁾。

しかし、本レーザーを照射して削除した象牙質面に市販のコンポジットレジン接着システムを応用した場合、接着強さは大きく低下すると報告されている¹¹⁾。その理由として、照射された象牙質表層には、熱によって脆弱となった層が生成されるからであろうと考えられており、2-ヒドロキシエチルメタクリレート（以下HEMA）処理の影響¹²⁾やボンディングシステムを比較したもの^{13,14)}、プライマーの浸透性に着目した報告などがみられる¹⁵⁾。最近では、レーザーの再照射により、その厚さが減少するとの報告がある¹⁶⁾。

そこで、これらの報告をもとに、本実験では、Er-YAGレーザーで削除した象牙質面に対するコンポジットレジンの接着強さを向上させることを目的として、レーザーで削除した後に低エネルギーで追照射を行い、市販の水溶性セルフエッチングプライマーあるいはアセトンを含む試作プライマーで象牙質面を処理して接着強さを検討した。

表1 試作プライマーの略号および組成

略号	MDP	HEMA	Acetone
0M65Ac	0	35	65
10M55Ac	10	35	55
20M45Ac	20	35	45
30M35Ac	30	35	35

材料と方法

1. 試作プライマーの調製¹⁵⁾と使用材料

試作プライマーは水溶性メタクリレートのHEMAを35wt%と一定とし、10-メタクリロイルオキシデカメチレンリン酸（以下MDP）の濃度を0, 10, 20, 30wt%の割合で添加し、残余の65, 55, 45, 35wt%はアセトンを加えた試作プライマーを調製し、直ちに実験に供した。これらの試作プライマーの略号と組成を表1に示す。対照としてメガボンド（クラレ）システムに付属するセルフエッチングプライマーのメガプライマー（以下MEGA）を用いた。

ボンディング材はメガボンドシステム付属のボンディングエージェントを使用し、光重合型コンポジットレジンクリアフィルAP-X（ShadeA-3.5, クラレ）を用いた。

2. 被着体試料の作製とレーザー照射条件

被着体として用いたウシ下顎前歯は、歯髄を除去した後、直ちに冷凍保存した。使用直前に流水下で解凍後、注水下にて唇面から#100の耐水研磨紙で平坦に研削し、象牙質を露出させ、直径3.1mmの円形に穿孔したセロハンシートを貼付してレーザーの照射面積を規定した。

レーザーの照射条件は、Er-YAGレーザーに曲-80のチップを装着し、照射エネルギー220mJ, 10ppsで注水下にて象牙質面に接触、移動させながら10秒間照射して削除した（図1-A）。追照射は、220mJで削除後、照射エネルギー30, 60, 90, 150mJでそれぞれ10pps, 10秒間、注水下にて再度照射した。それぞれ

の照射エネルギーはパネル表示に従って行った。その際のチップ先端でのエネルギー減衰率は約35%である（メーカー提示）。

なお、#411ダイヤモンドポイントを用いて象牙質面を注水下で10秒間削除したものを、エアタービン試料とした（図1-B）。

3. 引張り接着強さ試験試料の作製

引張り接着強さ試験試料の作製は、2で作製した被着体試料を5秒間エアブローし、MEGAプライマーあるいは各濃度に調製した試作プライマーを20秒間作用させた。再度エアブローを5秒間行い、試験試料面に内径3.5mm、厚さ2.0mmのシリコンリングを仮着し、ボンディング材を塗布後、光照射器（XL-3000, 3M）にて10秒間照射を行った。その上に光重合型コンポジットレジンを充填して40秒間照射し、重合硬化した試験体を37℃水中に24時間浸漬して引張り接着強さの測定に供した。

4. 引張り接着強さ測定と破壊形態

コンポジットレジン上部に黄銅製アタッチメントをシアノアクリレート接着剤で固定し、インストロン型万能試験機（TCM500, シンコー）を用いて、クロスヘッドスピード2mm/minで引張り接着強さを測定した。測定はそれぞれの条件につき7試験体で行い、得られた引張り接着強さの値をもとに二元配置分散分析を行い、削除要因とプライマー要因で交互作用があると（危険率5%）判断され、すべての条件について危険率5%（Scheffe）で有意差検定を行った。なお、接着試験後の破壊形態は肉眼にて観察した。

5. 電子顕微鏡（SEM）観察

3.と同様にして作製した試験体の中央部を歯軸と平行にアイソメット（Buehler）で切断し、#100の耐水研磨紙と6, 1, 0.25μmのダイヤモンドペースト（Staeus）を順次用いて鏡面研磨を行った後、小型ECRイオンシャ

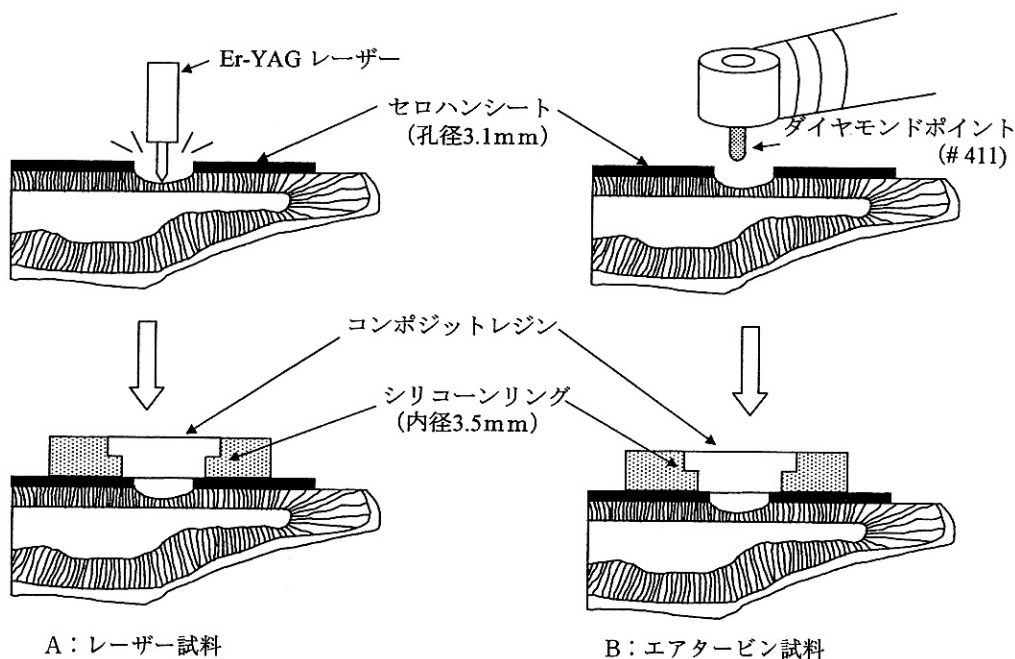


図1 引張り接着試験試料の作製方法

ワー装置 (EIS-200ER, エリオニクス) を用いて1KeV, 15mAの条件で5分間アルゴンイオンエッチングを行った。イオンコーター (IB-3, エイコーエンジニアリング) で金のスパッタリングを施し、走査電子顕微鏡 (T-2150, 日本電子) にて象牙質とコンポジットレジン接合部のSEM観察を行った。

結 果

1. 引張り接着強さの測定

図2および表2は、それぞれの条件で削除あるいは追照射した象牙質面をMEGAプライマーあるいは試作プライマーで処理し、コンポジットレジンを充填したときの引張り接着強さを、表3は接着試験後の破壊様式を示した。

エアタービン試料におけるMEGAプライマー処理では、10.6MPaの接着強さで、レーザーで削除あるいは追照射後に象牙質面を処理したものよりも高い値を示し、破壊様式は

レジン内の凝集破壊であった。試作プライマー処理では、MEGAプライマーに比べ接着強さは低下し、5.9~6.8MPaで、その破壊様式は界面破壊であった。エアタービン削除条件において、MEGAプライマーは試作プライマーより高い接着強さを示した。

Er-YAG220mJで削除した象牙質面におけるMEGAプライマーと0M65Acは、5.9と5.4MPaの低い接着強さを示し、破壊様式は、界面破壊あるいは象牙質表層の凝集破壊であった。10M55, 20M45, 30M35Acでは、それぞれ10.2, 8.4, 6.7MPaの接着強さを示し、破壊様式は深部象牙質内における凝集破壊が多く認められた。220mJ削除条件では10M55Acと20M45Acが他のプライマーよりも高い接着強さを示した。

30mJで追照射を行った場合、MEGAプライマーと0M65Acでは6.0と6.9MPaの低い接着強さを示し、破壊様式は界面破壊あるいは象牙質表層の凝集破壊であった。10M55, 20M45,

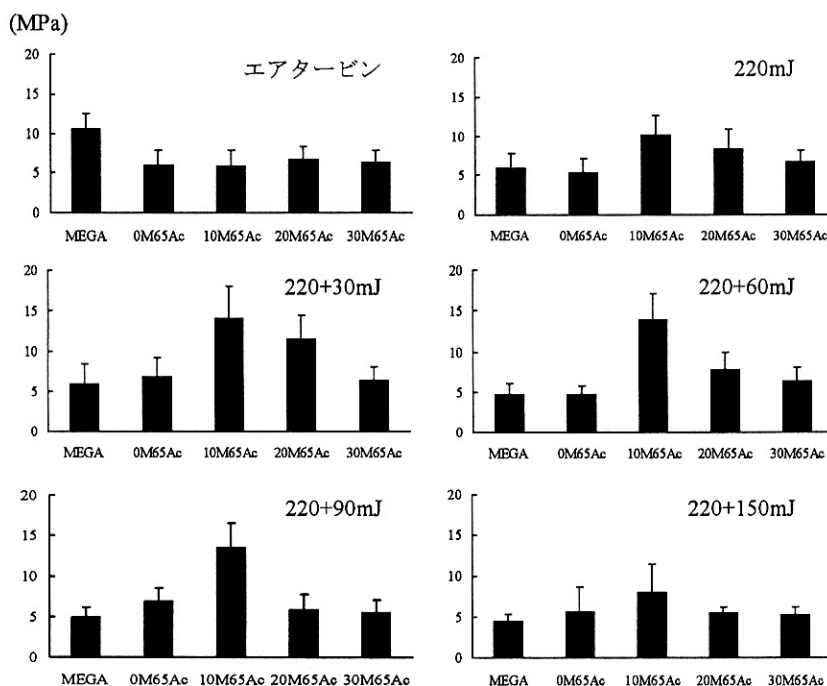


図2 象牙質削除条件と各種プライマー処理における引張り接着強さ

表2 象牙質削除条件と各種プライマー処理における引張り接着強さ

	エアタービン	220mJ	220 + 30mJ	220 + 60mJ	220 + 90mJ	220 + 150mJ
MEGA	10.6 (1.9)	5.9 ^b (1.9)	6.0 ^{+30, +60} (2.4)	4.7 ^b (1.4)	5.0 ^b (1.1)	4.5 ^b (0.8)
0M65Ac	6.0 ^b (1.8)	5.4 ^b (1.7)	6.9 (2.3)	4.7 ^b (1.1)	6.9 (1.7)	5.7 ^b (3.0)
10M55Ac	5.9 ^b (1.9)	10.2 (2.4)	14.1 ^a (3.9)	13.9 ^a (3.2)	13.5 ^a (3.0)	8.1 (3.3)
20M45Ac	6.8 (1.6)	8.4 (2.4)	11.6 (2.8)	7.9 (2.1)	5.9 ^b (1.9)	5.5 ^b (0.8)
30M35Ac	6.4 ⁺³⁰ (1.5)	6.7 (1.5)	6.4 ⁺³⁰ (1.7)	6.4 ⁺³⁰ (1.7)	5.6 ^b (1.5)	5.3 ^b (0.9)

^bは^aのすべてに共通して有意差が認められた (p<0.05)

(MPa)

⁺³⁰は10M55Ac/220 + 30mJと有意差が認められた (p<0.05)

平均 (標準偏差), 試料数=7

⁺⁶⁰は10M55Ac/220 + 60mJと有意差が認められた (p<0.05)

表3 引張り接着試験後の各群の破壊様式

	エアタービン	220mJ	220 + 30mJ	220 + 60mJ	220 + 90mJ	220 + 150mJ
MEGA	R	S, DS	S, DS	S	S, DS	S, DS
0M65Ac	S	DS	DS	S	S, DS	DS
10M55Ac	S	D	D	D	D	DS
20M45Ac	S	D	D	D	DS	DS
30M35Ac	S	D	D	D	DS	DS

R: コンポジットレジン内の凝集破壊, S: 界面破壊, DS: 象牙質表層の凝集破壊,

D: 象牙質内の凝集破壊

30M35Acでは、それぞれ14.1, 11.6, 6.4MPaの接着強さを示し、深部象牙質内における凝集破壊が多く認められた。検定の結果、30mJ追照射条件では、10M55AcがMEGA, 30M35Acよりも有意に高い接着強さを示した。

60mJで追照射を行った場合、MEGAプライマーと0M65Acでは両者とも4.7MPaの低い接着強さを示し、破壊様式は界面破壊であった。10M55, 20M45, 30M35Acでは、それぞれ13.9, 7.9, 6.4MPaの接着強さを示し、象牙質内における凝集破壊が多く認められた。検定の結果、60mJ追加照射条件では、10M55AcがMEGA, 0M65Acよりも有意に高い接着強さを示した。

90mJで追照射を行った場合、MEGAプライマーと0M65Acでは5.0と6.9MPaの低い接着強さを示し、破壊様式は象牙質表層の凝集破壊であった。10M55, 20M45, 30M35Acでは、それぞれ13.5, 5.9, 5.6MPaの接着強さを示した。破壊様式は、10M55Acにおいて、象牙質内における凝集破壊が多く認められ、20M45Ac, 30M35Acでは象牙質表層の凝集破壊であった。検定の結果、90mJ追照射条件では、0M65Acを除き10M55Acが他のプライマーより有意に高い値を示した。

150mJで追照射を行った場合、MEGAプライマーと0M65Acでは4.5と5.7MPaの低い接着強さを示し、破壊様式は界面破壊あるいは

象牙質表層の凝集破壊であった。10M55, 20M45, 30M35Acでは、それぞれ8.1, 5.5, 5.3MPaの接着強さを示し、破壊様式は象牙質表層の凝集破壊であった。検定の結果、150mJ追加照射条件においてプライマー間で有意差は認められなかった。

2. 接合部のSEM観察

図3は、全体的に高い接着強さを示した試作プライマー10M55Ac処理象牙質とコンポジットレジン接合部断面のSEM像を示す。エアタービン試料では、象牙質とボンディング材が界面で剥離した像が観察された。

220mJで削除した試料と30, 60および90mJで追照射した試料では、象牙質表層とボンディング材の界面に亀裂の存在が観察されることなく接合状態は良好であった。しかし、150mJで追照射した試料では、象牙質とボンディング材との接合状態は良好であるが、象牙質表層において亀裂が観察された。

考 察

近年、グラスアイオノマーセメント等の歯質接着性材料の開発やコンポジットレジン修復における接着システムの進歩に伴い、従来の窩洞形態に拘泥する必要がなくなった。そして、できるだけ健全歯質を残し、罹患歯質の選択的除去を行う、窩洞のダウンサイジングが提唱されている。このような修復法の変化は、歯質切削器具に関する概念をも変化させ、治療を受ける側の立場に立った切削器具の導入が可能となり、エアタービンや電気エンジンに代わる歯質削除機器としてEr-YAGレーザーあるいは粉末噴射式歯質研削装置などが市販されるようになった^{8,17)}。

歯科用Er-YAGレーザーは歯の硬組織削除を主目的に開発され、本レーザーによる罹患歯質除去は歯髄への影響が少なく、治療時の不快感が少ない特徴を有している¹⁸⁾。Er-YAGレーザーによる歯質削除の原理は、レーザー照射によって歯質の水分子が気化する

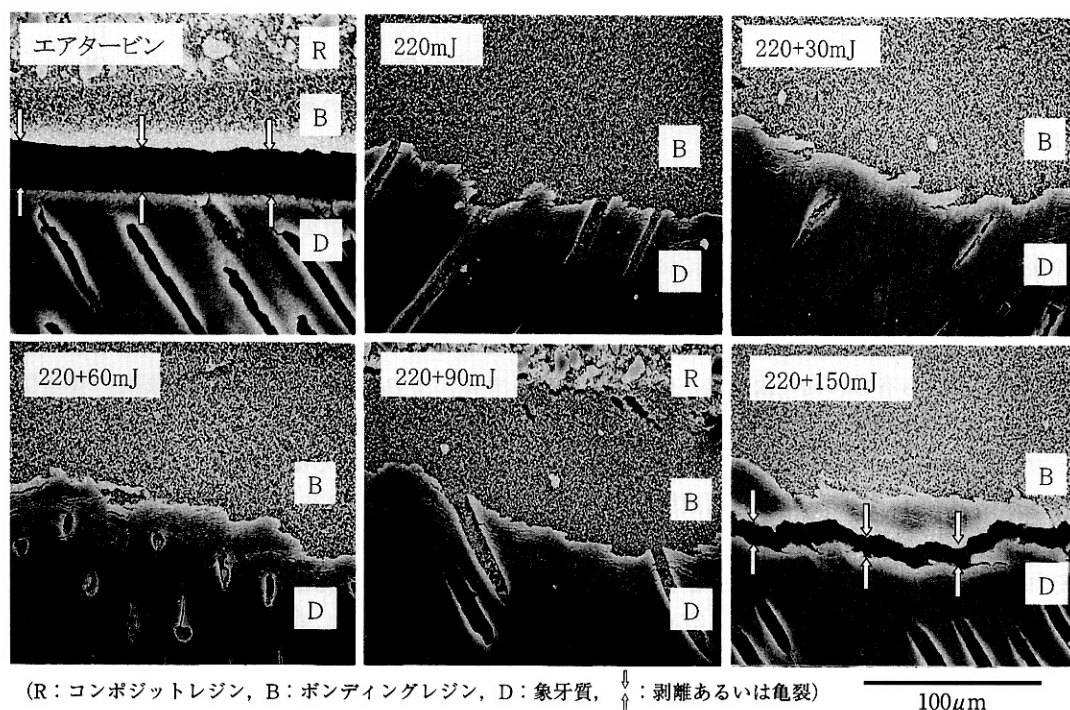


図3 10M55Acで処理した象牙質とコンポジットレジンの接合部断面のSEM像

際に小爆発を起こして歯質を破壊するとされており^{19, 20)}、照射象牙質面にはスミヤー層が存在せず、象牙細管が露出していると報告されているが¹⁹⁾、レーザー照射により生じる熱で変性した象牙質が表層を覆っていると報告されている^{21, 22)}。そして、熱による象牙質表層の性状あるいは形状の変化はコンポジットレジンとの接着強さを低下させる原因と考えられている¹⁵⁾。すなわち、象牙質接着システムの主体をなすと考えられているコラーゲン線維が熱変性し、さらに象牙質表面の鱗片状化、疎水性変化した変性層が存在することで、今日行われている接着システムでは十分な接着性が得られないものと推測される。したがって、本レーザー照射により削除された象牙質面に対するコンポジットレジンの接着性を向上させるには、プライマー組成の改良あるいは変性層の除去を図る必要があるものと考えられた。

プライマーの効果については、セルフエッチングとウェットボンディングシステムで比較すると、Er-YAGレーザー照射エネルギー100あるいは150mJにおいて、セルフエッチングシステムの方が高い接着強さを示したと報告されている¹³⁾。そして、山本はコンポジットレジンと象牙質の接着強さについて、Er-YAGレーザーの照射エネルギーの違いとプライマー組成の関係について報告しており、220mJで10%MDP/35%HEMA/55%Acetoneの組合せが最も接着に有効であったとしている。また、照射エネルギーが象牙質削除に与える影響に関して、低エネルギーのレーザー照射では象牙質を削除するまでに至らない熱変性層が表面に多く存在するからではないかと推測している¹⁵⁾。

変性層の除去については、手用切削器具、回転切削器具あるいは化学的な方法が報告されている^{21~23)}が、これらの後処理は煩雑な術式となる。岩田ら¹⁶⁾は変性層にEr-YAGレーザーを再度照射することで、その厚さが減少

したと報告し、レーザー照射だけでこの変性層を薄くできる可能性を示唆した。

そこで、これらの報告をもとに、著者はEr-YAGレーザー照射220mJによる熱変性層を有する象牙質に対するコンポジットレジンの接着強さの向上を目的として、エアタービンで削除した象牙質面と照射エネルギーを変化させて追照射した象牙質面に、試作プライマーを作用させて歯質接着強さの比較検討を行い、破壊様式を観察し、接合面のSEM観察を行った。

エアタービンで削除した象牙質面に対するコンポジットレジンの接着強さは、本実験でMEGAプライマー処理したものが最も高い10.6MPaの接着強さを示した。そして、破壊様式は、この組合せでコンポジットレジン内の凝集破壊が観察された。しかし、レーザー照射を行った試料にMEGAプライマーを用いた場合には、接着強さが低下し、追照射を行った試料においても同様の傾向を示した。石丸ら²⁴⁾はEr-YAGレーザーを照射した象牙質面に、35wt%HEMAを配合させたプライマーのMDPが5wt%と比較的低濃度のものを用いると、コンポジットレジンの接着強さが向上することを報告している。本実験で用いた市販接着システムのMEGAプライマーはMDPの濃度がそれよりも高いことが、接着強さの低下した要因の一つと考えられる。すなわち、レーザー照射で変性・脆弱化した象牙質表層にMEGAプライマーを塗布すると、MDPの脱灰作用でさらに象牙質が脆くなることや、深部の健康な象牙質にまでモノマーが浸透しないものと考えられる。このことは、接着試験後の破壊様式において、界面あるいは象牙質表層部分の凝集破壊が多く観察された結果からも推測された。

また、エアタービンの試料では試作プライマーによる接着強さの向上は認められず、界面破壊であった。これは、試作プライマーには水の代わりにアセトンが含まれていること

から、MDPによる象牙質の脱灰が軽度で、象牙質に対するプライマーの役割が十分に果たせなかったものと思われた。

レーザー照射した試料では、全体的にみると試作プライマーの10M55Acおよび20M45Acにおいて接着強さが向上した。そして、追照射しなかった試料では10M55Acが高い接着強さを示し、山本の報告¹⁵⁾と同様の結果が得られた。

220mJで削除した後、30、60、90mJで追照射した試料に10M55Acで処理をすると、それぞれ14.1、13.9、13.5MPaと高い接着強さを示し、エアタービンとMEGAプライマーの組合せ以上の接着強さが得られた。接合界面のSEM観察においても象牙質の破壊が認められなかった。これは、220mJのレーザー照射により象牙質表層に生じた変性層が、比較的弱い照射エネルギーの追照射によって除去されたものと考えられ、アセトン含有したプライマーが浸透、拡散しやすくなったものと推測された。また、プライマー中に水分が存在しないため、MDP中のリン酸基が遊離しにくくなり、脆弱部の脱灰が少なかったものと考えられた。そして、プライマーの組成では、10M55Acが本実験条件におけるすべての象牙質削除条件とプライマー組成の組合せの中で良好な接着強さを示した。したがって追照射は、コンポジットレジン象牙質接着性を向上させ得る可能性を有しているとともに、歯質削除効率の向上による診療時間の短縮にも効果的であると思われた。

破壊様式では220mJで削除したものと30、60mJの追照射における、10M55、20M45、30M35Acの組合せ、および90mJの追照射と10M55Acで象牙質内の凝集破壊が観察された。それらの接着強さは、その他の組合せよりも比較的高い接着強さを示していることから、前述のアセトンの効果を裏付けるものと考えられた。

しかし、追照射の照射エネルギーを150mJ

に上昇すると、10M55Acにおいても接着強さは低下し、象牙質表層の凝集破壊が観察された。接合界面のSEM像においても象牙質表層に亀裂を生じた像が認められた。このことは、追照射の照射エネルギーが高いと、変性層を含む象牙質が再度削除されて、表層に脆弱となった層が再び厚く存在するようになったのではないかとと思われる。

以上のことより、220mJの照射エネルギーで削除した象牙質面に30～90mJの範囲で追照射し、10M55Acをプライマーとして作用させることによって、象牙質とコンポジットレジンの接着強さを向上させ得ることが示唆された。

結 論

1. エアタービンで削除した象牙質面にMEGAプライマー処理を施すと10.6MPaの接着強さを示したが、試作プライマー処理を施しても接着強さは向上しなかった。

2. Er-YAGレーザー220mJで削除した象牙質面にMEGAプライマー処理を施すと接着強さは低下した。35%HEMAに10%MDP/55%Acetone (10M55Ac)を配合した試作プライマーでは10.2MPaを示した。

3. Er-YAGレーザー220mJで削除後、追照射した象牙質面にMEGAプライマー処理を施しても接着強さの向上は認められなかった。しかし、追照射30、60、90mJにおいて試作プライマー10M55Ac処理を施すと13.5～14.1MPaの高い接着強さを示した。

4. 破壊様式はエアタービンとMEGAプライマーの組合せでコンポジットレジン内の凝集破壊が認められ、220mJで削除したものと30、60mJの追照射における、10M55、20M45、30M35Acの組合せ、および90mJと10M55Acで象牙質内の凝集破壊が観察された。その他の組合せでは、界面破壊あるいは象牙質表層の凝集破壊を示した。

5. 10M55Ac処理した象牙質とコンポジット

トレジン接合部のSEM像において、エアタービンで削除した場合は界面で剥離が生じていた。照射エネルギー30, 60, 90mJで追照射したものは、象牙質表層とコンポジットレジンが良好に接合していた。しかし、150mJで追照射したものは、象牙質表層に亀裂が観察された。

本稿を終えるに臨み、終始ご懇篤なるご指導、ご校閲を賜りました日本大学松戸歯学部保存修復学講座、池見宅司教授に対して深甚の謝意を表するとともに、ご協力を賜った山本憲廣助手、平山聡司講師、ならびに保存修復学講座の教室員の皆様に対し、深く感謝いたします。

本研究の一部は文部科学省平成10年度および13年度学術フロンティア推進事業の補助のもとに行われた。

文 献

- 1) 日野浦光：修復治療のダウンサイジング。Dental Diamond増刊号／う蝕治療・リポリユーシオン：148～154, 1997.
- 2) 日野浦光：小さな齲蝕は最小限の切削で修復。歯界展望 93 (2) J：278～284, 1999.
- 3) 猪越重久：できるだけ削らないで修復するには。歯界展望 93 (2)：274～277, 1999.
- 4) 堀口尚司, 田上順次, 加藤純二, 守矢佳世子：エアブレイシブによる歯質切削器具の概要と今後の歯牙切削・修復。the Quintessence Year Book：20～22, 1997.
- 5) 柿澤俊樹, 熱田 互, 鈴木克彰, 平山聡司, 河野善治, 野村 充, 木村 寿, 福田 稔, 池見宅司：粉末噴射式歯質研削装置の基礎的研究。日歯保存誌 44：153～158, 2001.
- 6) 熱田 互, 内山敏一, 河野善治, 平山聡司, 渡辺珠江, 藤田 光, 池見宅司：キトサン粉末を用いた噴射式歯質研削装置の軟化象牙質研削性。日歯保存誌 44：265～271, 2001.
- 7) 五十嵐公, 橋本佳奈, 礪波健一, 清水チエ, 俣木志朗, 黒崎紀正：Carisolv Gelによるう蝕象牙質の軟化について。日歯保存誌 41：704～707, 1998.
- 8) 津田忠政：歯科治療におけるレーザー使用の現状と展望。Dental Diamond 23：28～33, 1998.
- 9) 松本光吉：どんなレーザーがすでに応用され、今後開発されようとしているか 1.すでに臨床に應用されているレーザー。Dental Diamond 臨時増刊号 歯科用レーザー最前線：18～23, 1999.
- 10) 篠木 毅：Er：YAGレーザー（アーウィン）を使用した例。Dental Diamond 23：34～38, 1998.
- 11) 西村弥生子, 柵木寿男, 江黒 徹, 田邊 翠, 前田 徹, 田中久義：Er：YAGレーザー照射象牙質に対する接着 第2報 被照射象牙質に対するレジン接着システムの接着強さ。日歯保存誌（春季特別号）42：75, 1999.
- 12) 亀山敦史, 津守将充, 春山親弘, 天谷哲也, 瀧澤雅一, 平井義人, 河田英司, 小田 豊：Er：YAGレーザー照射ウシ象牙質における4META/MMA-TBBのレジンの接着強さ。日歯保存誌（秋季特別号）42：35, 1999.
- 13) 片海正明, 大槻昌幸, 田上順次：照射条件がEr：YAGレーザー照射象牙質と各種レジンボンディングシステムの接着強さに及ぼす影響。接着歯学 16：194～195, 1998.
- 14) 西村弥生子, 柵木寿男, 江黒 徹, 田中久義：Er：YAGレーザー照射象牙質に対する接着。接着歯学 16：232～233, 1998.
- 15) 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—。日歯保存誌 43：1123～1131, 2000.
- 16) 岩田有弘, 岩本圭司, 藤戸 寛, 吉川一志, 井上昌孝, 井上正義：Er：YAGレーザー照射歯質に関する研究（第2報）, エोजン濃染層について。日歯保存誌 44：810～816, 2001.
- 17) 吉田直人：最新 Air Abrasive Technique を用いた無痛治療のシステム化について。the Quintessence 15：147～154, 1996.
- 18) 関根義朗：Er：YAGレーザーによる歯牙硬組織切削の病理組織学的研究。日歯保存誌 38：211～233, 1995.
- 19) 石丸和俊, 高野達治, 浅野倉栄, 日下輝雄, 小澤正明, 薄井秀樹, 榊原康智, 高水正明, 河野 篤：Erbium：YAGレーザーの歯質へ

- の影響—形成された窩洞表面の形態について．鶴見歯学 22：175～184，1996.
- 20) 石丸和俊，高野達治，浅野倉栄，日下輝雄，陳 昭清，榊原康智，高水正明，後藤 繁，河野 篤：Erbium：YAGレーザーの歯質への影響（第一報），出力による窩洞の大きさと深さ．日歯保存誌 39：1229～1239，1996.
- 21) 播磨貴裕，富士谷盛興，藤田裕樹，村上明延，大島一宣，新谷英章：レーザー処理象牙質におけるレジン接着（第3報），構造欠陥ならびに熱変成層の処理について．日歯保存誌（春季特別号）42：78，1999.
- 22) 播磨貴裕，村上明延，藤田裕樹，荷堂友紀，田島美雪，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接着（第4報），接着耐久性について．日歯保存誌（秋季特別号）42：78，1999.
- 23) 天谷哲也，瀧澤雅一，井原聡一郎，春山親弘，
- 亀山敦史，高瀬保晶，保坂 誠，平井義人：Er：YAGレーザー照射後の象牙質表面処理について．日歯保存誌（春季特別号）43：26，2000.
- 24) 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．日歯保存誌 44：966～972，2001.
- （原稿受付日：平成14年4月1日）
（原稿受理日：平成14年5月20日）

著者連絡先：須原秀宜

〒271-8587

松戸市栄町西2-870-1

日本大学松戸歯学部

TEL & FAX 047-360-9357