原 著

Q スイッチ Nd-YAG レーザー照射による 脱灰エナメル質の表面構造の変化*

Changes in the Surface Structure of Demineralized Enamel
Caused by Q-Switch Nd-YAG Laser Irradiation*

好 川 正** 稲 葉 大 輔**
飯 島 洋 一** 高 木 興 氏**

Tadashi YOSHIKAWA**, Daisuke INABA**,
Youichi IJIMA** and Okuji TAKAGI**

Received July 15, 1993; accepted August 11, 1993

Abstract: Changes in the surface structure of demineralized enamel caused by Q-switch Nd-YAG laser were investigated with a scanning electron microscope (SEM). A total 44 demineralized enamel samples were used for this study. Samples were divided into 3 groups, (1) laser-irradiated with Q-switch Nd-YAG laser (wave length $0.53\mu\text{m}$) at total energy density 25, 50, 75, 100 J/cm² or 125 J/cm² after using India ink, (2) irradiated similarly to group (1) without using India ink, and (3) control without further treatment. After laser irradiation, the enamel samples were coated, and their surface structure was observed with an SEM.

The demineralized enamel was mainly of two types, that dissolved from the enamel sheaths (Type I) or that dissolved from the enamel rods (Type II).

Demineralized enamel of Type I was melted and linked by laser irradiation with using India ink at over 100 J/cm² of total energy density. Demineralized enamel of Type II acquired a rough surface when treated with laser irradiation at over 100 J/cm². On the other hand, demineralized enamel of Type II was still porous after laser irradiation without India ink.

The Changes in the surface structure of demineralized enamel caused by Q-switch Nd-YAG laser depended on the type of demineralization.

索引用語: 脱灰エナメル質, Q スイッチ Nd-YAG レーザー, SEM

Key words: Demineralized enamel, Q-switch Nd-YAG laser, SEM

緒 言

著者らは、これまで脱灰エナメル質へのレーザー照射

による影響を再石灰化能と耐酸性の面から検討してきた¹⁻⁴⁾。また、表面構造の変化を TEM および制限視野

電子回折にて検討し、Q スイッチ Nd-YAG レーザー

* 本論文の一部は第15回日本口腔衛生学会九州地方会総会(平成5年7月3日:福岡市)において発表した。

** 長崎大学歯学部予防歯科学講座(主任:高木興氏 教授)

** Department of Preventive Dentistry, Nagasaki University School of Dentistry (Director: Prof. Okuji TAKAGI)

(第2高調波;波長 $0.53\mu\text{m}$)照射により表層 $0.5\mu\text{m}$ の範囲までレーザー照射によるものと思われる結晶配列の変化を確認してきた⁵⁾。これはエナメル質表層を側面より観察したものであり、エナメル質最表面の変化を確認したものではない。健全エナメル質については、レーザー照射による表面構造の変化がSEM像により確認されている。すなわち、レーザーの熱エネルギーによりエナメル質表面が溶融し再凝固したと思われる滑沢化像⁶⁻⁸⁾が認められている。

本研究の目的は、脱灰エナメル質を対象としてQスイッチNd-YAGレーザーを照射した場合、その表面にどのような構造変化が起こるのかをSEMにて検討することである。

材料および方法

材料は矯正的理由により抜歯されたヒト小臼歯を用いた。エナメル質試料調整の概要をFig. 1に示した。同歯牙の頬側および舌側面エナメル質を切り出し44例のブロック試料を作製した。抜去歯牙はフッ化物応用経験の有無を問わずに集められたため、歯牙表層のフッ素濃度の差より生じる個体差をなくし、さらに十分な実験面積を得る目的で、エナメル質表面を耐水研磨紙 #800および #1500を用い約 $400\mu\text{m}$ 削除して使用した。44例の試料を脱灰のみの群(4例)と脱灰後レーザー照射群(40

例)に群別した。

すべての試料を 0.1M 乳酸緩衝溶液(3.0mM Ca, 1.8mM P, 1.0% carboxymethylcellulose, pH 4.5)に 37°C , スターラー攪拌下(Mean: 216 rpm , S.D.: 26)で浸漬し、脱灰した。浸漬時間は12時間とし、1試料当たりの乳酸緩衝溶液量は 20ml とした。脱灰終了後レーザー照射群の試料20例に、黒色塗布剤として市販の墨汁を塗布した。

脱灰後レーザー照射群にプリズム導光でレーザー照射を行った。照射したレーザーはNd-YAGレーザー(DCR-3型レーザー発生装置, Spectra Physics社製;基本波長 $1.06\mu\text{m}$)である。ただし、同機種においてはノーマルパルス発振も可能ではあるが、十分なエネルギーを得るためQスイッチを併用した。またプリズム導光を容易にするため、可視光領域である第2高調波(波長 $0.53\mu\text{m}$)を用いた。プリズムにて導光されたレーザー光の照射野は、直径 6mm の円形であるが、ガウスビームであるレーザー光の、より平均に近似したエネルギーを得るため、照射野を $3\times 3\text{mm}$ の正方形に規定できる銅製の絞りを作製し、これを介在させて照射を行った。なお、絞りを介しての照射野の実測面積は 8.9mm^2 であった。

照射エネルギーは、絞り介在下でエネルギーパワーモニター(Laser power/energy monitor model DG, Ophir社製)にて測定し、1 pulse当たりのエネルギーを 90mJ ($=0.09\text{ J/pulse}$)となるよう発生装置を調整した。絞りにより規定された照射野の面積は、 0.089 cm^2 であるから、1 pulse当たりのエネルギー密度は $1.0\text{ J/cm}^2/\text{pulse}$ と算出される。レーザー発生装置を1発で1 pulseを発振するように設定し、照射回数で総エネルギー密度をコントロールした。エネルギー密度とその効果に関しては、QスイッチNd-YAGレーザー照射による健全エナメル質の耐酸性付与の報告では、 20 J/cm^2 の照射で効果を得たという報告⁹⁾と、 100 J/cm^2 の照射を要するという事実¹⁰⁾が既に知られている。そこで試料へのレーザー照射は、総エネルギー密度25(照射回数: 25発), 50(50発), 75(75発), 100(100発)および 125 J/cm^2 (125発)の5種のエネルギー密度で行った(各群4例)。

試料表面の観察は、全試料をアルミニウム製試料ホルダーに両面接着テープで固定し、イオンコーター(1B-2型, Eiko Engineering製)を用いて金蒸着を行った後、加速電圧 20kV , 倍率600および3,000倍でSEM(S520型, HITACHI製)にて実施した。

Fig. 1 Preparation of enamel samples

結 果

1. 脱灰エナメル質の所見

脱灰エナメル質の SEM 所見を Fig. 2 に示した。脱灰エナメル質の表面構造は 3 つの型に分けられた。第 1 は、主としてエナメル小柱鞘部が溶解し、エナメル小柱間空隙が拡大、小柱構造が明瞭となったもの（以下、Type I）である（Fig. 2a, a'）。第 2 は、主としてエナメル小柱体部が溶解し、多孔性の構造になったもの（以下、Type II）である（Fig. 2b, b'）。第 3 は、エナメル小柱構造とは無関係に不規則な構造を有する溶解例が認められた。

2. 脱灰後レーザー照射エナメル質の所見

1) 黒色塗布剤を用いての照射

Fig. 3 にレーザー照射した領域が Type I であったと思われる脱灰エナメル質の所見を示した。総エネルギー密度 $50\text{J}/\text{cm}^2$ の照射では、エナメル小柱の境界は弱拡大（600倍）では不明瞭であるが（Fig. 3a）、強拡大（3,000倍）では明瞭であり（Fig. 3a'）、エナメル小柱構造が確認された。 $75\text{J}/\text{cm}^2$ においてもほぼ同様の所見を示した（Fig. 3b, b'）。

$100\text{J}/\text{cm}^2$ の弱拡大では 50 および $75\text{J}/\text{cm}^2$ （Fig. 3a, b）と類似の所見を示した（Fig. 3c）。強拡大でみると、エナメル小柱の境界が 50 および $75\text{J}/\text{cm}^2$ と比較してやや不明瞭となり、溶融によると思われる小柱が癒合した所見を示した（Fig. 3c'）。 $125\text{J}/\text{cm}^2$ では小柱の癒合は進行するが、亀裂の発生と表層エナメル質の実質欠損が部分的に確認された（Fig. 3d, d'）。

Fig. 4 には、レーザー照射した領域が Type II であったと思われる脱灰エナメル質の所見を示した。 $100\text{J}/\text{cm}^2$ の照射で Fig. 2b にみられた多孔性の構造がほぼ消失し、粗造化した不規則な構造が確認された（Fig. 4a, a'）。 $125\text{J}/\text{cm}^2$ においても $100\text{J}/\text{cm}^2$ の場合とほぼ同様、破壊的な構造変化を示した（Fig. 4b, b'）。

2) 塗布剤なしでの照射

Fig. 5 には、黒色塗布剤を用いず、レーザー照射を行った所見を Type II と思われる試料について示した。 $100\text{J}/\text{cm}^2$ のエネルギー密度では塗布剤併用例の Fig. 4c とは対照的に多孔性の構造を依然有する所見を示した（Fig. 5a, a'）。 $125\text{J}/\text{cm}^2$ においても同様に多孔性が依然残存する所見が確認された（Fig. 5b, b'）。ただし、いずれにおいてもエナメル小柱の中空部分がいくつか連続した状態の亀裂様構造が確認された。また、小柱鞘は隣接する小柱鞘と癒合する所見を示した。

考 察

脱灰後レーザー照射した領域が Type I であったエナメル質では、黒色塗布剤を用いての 50 および $75\text{J}/\text{cm}^2$ ではエナメル小柱の境界は依然明瞭であった（Fig. 3a, b'）。エネルギー密度 $100\text{J}/\text{cm}^2$ では、エナメル小柱間の境界が不明瞭となり癒合する所見を示した（Fig. 3c'）。これは、 $100\text{J}/\text{cm}^2$ のエネルギーでエナメル小柱が溶融したためと思われる。ただし、完全な滑沢化像は得られなかった。田籾ら¹⁰⁾は表面未研磨のエナメル質を対象として、表層下脱灰状態の表面へ総エネルギー密度 $30\text{J}/\text{cm}^2$ のノーマルパルス Nd-YAG レーザー照射を行い、エナメル質表面が溶融し、表面全体が滑沢となることを報告している。本実験において、脱灰エナメル質は溶解型のミネラル喪失状態となっている¹¹⁾。また、田籾らの SEM 像では脱灰エナメル質表面にエナメル小柱構造が観察されなかったのに対し、本研究では脱灰エナメル質表面に小柱構造が確認された。このような脱灰状態の差が、レーザー照射後の表面構造の違いをもたらしただけの可能性が考えられる。この他、Q スイッチ Nd-YAG レーザーの深部到達性は低い¹²⁾ため、塗布剤を介しての熱伝導が田籾らのノーマルパルス Nd-YAG レーザーと比較し低かったことも一因と思われる。

森岡ら⁹⁾は健全エナメル質へのノーマルパルス Nd-YAG レーザー照射により、その表面にモザイク状に微細な亀裂が発生すると報告している。さらに、レーザー照射したエナメル質断面を SEM にて観察し、亀裂深度を 50 から $100\mu\text{m}$ であることを確認している⁹⁾。また Ferreira ら¹³⁾は、健全エナメル質への CO_2 レーザー照射によりひびわれ状の亀裂と、クレーターが発生することを報告している。脱灰エナメル質に Q スイッチ Nd-YAG レーザー照射を行った本実験においてはエネルギー密度 $125\text{J}/\text{cm}^2$ で明瞭な亀裂発生ならびに実質欠損も生じていた（Fig. 3d）。この原因は、ミネラルの少ない脱灰エナメル質へのレーザー照射のためエネルギーが過大でエナメル質表面が破壊されたためか、あるいはレーザー照射による熱エネルギーによりエナメル質が溶融、再凝固した際に収縮したことが考えられる。

脱灰後レーザー照射した領域が Type II であったエナメル質では、黒色塗布剤を用いて 100 および $125\text{J}/\text{cm}^2$ の照射で表面が実質欠損をとまって粗造となる所見を示した（Fig. 4）。多孔性を示す Type II の脱灰エナメル質では、最表層に残存するミネラルが Type I と比較して少ないことが考えられ、レーザーのエネルギーによ

Fig. 2 SEM images of demineralized enamel
 a : dissolution from enamel sheaths (Type I)
 b : dissolution from enamel rods (Type II)
 (a and b : $\times 600$, a' and b' : $\times 3,000$)

Fig. 3 SEM images of laser demineralized enamel (Type I) using India ink
a : 50 J/cm², b : 75 J/cm², c : 100 J/cm² and d : 125 J/cm² of total energy
density (a-d : $\times 600$, a'-d' : $\times 3,000$)

Fig. 4 SEM images of lased demineralized enamel (Type II) using India ink
a : 100 J/cm² and b : 125 J/cm² of total energy density (a and b : $\times 600$, a'
and b' : $\times 3,000$)

Fig. 5 SEM images of laser demineralized enamel (Type II) without India ink
a : 100 J/cm² and b : 125 J/cm² of total energy density (a and b : $\times 600$, a' and b' : $\times 3,000$)

りエナメル質表面が破壊された可能性が推測された。すなわち、Type I と Type II の所見を総合して考察すると、レーザー照射による脱灰エナメル質の構造変化は、脱灰直後のエナメル質の構造の違いによって異なることが考えられた。

黒色塗布剤なしの条件でレーザー照射した脱灰エナメル質 (Type II) 表面は、 $125\text{J}/\text{cm}^2$ のエネルギー密度においても依然多孔性の所見を示した (Fig. 5b, b')。これに対し、塗布剤を用いての照射では、前述した通り粗造となる所見を示した (Fig. 4b, b')。このことは、塗布剤の存在がレーザー光のエネルギー吸収効率に大きく関与しているという森岡らの知見⁹⁾と一致する結果であった。

なお、エナメル小柱とは無関係に不規則な構造を有する第3の溶解例は、レーザー照射試料においてはその存在を確認できた例は僅かであった。

結 論

第2高調波Qスイッチ Nd-YAG レーザー照射による脱灰エナメル質の構造変化は、脱灰直後のエナメル質の構造の違い (Type I, Type II) によって異なることが示唆された。また、黒色塗布剤の併用は、レーザーのエネルギー吸収効率を向上させ、より著しい構造変化をもたらすことが確認された。

謝 辞

レーザー発生装置使用について御配慮いただきました、長崎大学歯学部口腔外科第二講座井口次夫教授に深く感謝いたします。またイオンコーター使用に際し御配慮いただきました、長崎大学歯学部口腔解剖学第二講座高野邦雄教授に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 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の影響，口腔衛生会誌，41；314-

- 318, 1991.
- 2) 好川 正：レーザー被照射再石灰化エナメル質における耐酸性の評価，口腔衛生会誌，42；61-65, 1992.
- 3) 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.
- 4) 好川 正，飯島洋一，稲葉大輔，川崎浩二，田口円裕，高木興氏：レーザー照射-再石灰化エナメル質における耐酸性能の変化，口腔衛生会誌，42；675-681, 1992.
- 5) 好川 正，田中康弘，安田克廣，高木興氏：透過電子顕微鏡，制限視野電子回折によるレーザー被照射脱灰エナメル質の微細構造，口腔衛生会誌，43；153-160, 1993.
- 6) 森岡俊夫，森田恵美子，鈴木和雄：各種レーザー照射によるエナメル質耐酸性向上に関する研究(第1報)—歯面黒色塗布剤の応用並びに亀裂の発生—，日本レーザー医学会誌，3；605-612, 1982.
- 7) 鈴木和雄，森田恵美子，森岡俊夫：各種レーザー照射によるエナメル質耐酸性向上に関する研究(第2報)—計算によるエナメル質温度上昇と耐酸性との相関—，日本レーザー医学会誌，3；613-618, 1982.
- 8) 森岡俊夫，田箒祥子，堤 裕之：エナメル質のフッ素とりこみに及ぼすレーザー照射の影響—EPM 面分析による—，日本レーザー医学会誌，6；235-238, 1986.
- 9) Yamamoto, H. and Sato, K.: Prevention of dental caries by Nd: YAG laser irradiation, J. Dent. Res., 59；2171-2177, 1980.
- 10) 田箒祥子，宮谷範子，森岡俊夫：レーザー照射によるエナメル質表層下脱灰の進行抑制に関する研究，口腔衛生会誌，38；514-515, 1988.
- 11) 好川 正，川崎浩二，飯島洋一，高木興氏：エナメル質の脱灰におよぼす0.1M乳酸の pH ならびに作用時間の影響，口腔衛生会誌，40；671-677, 1990.
- 12) Ferreira, J. M., Palamara, J. and Phakey, P. P.: Effect of continuous-wave CO₂ laser on the ultrastructure of human dental enamel, Achs. oral Biol., 34；551-562, 1989.