QLF™によるEr:YAGレーザー照射歯面と エア・タービン切削窩洞の観察 — Er:YAGレーザー照射歯面の再石灰化動態について —

大 橋 英 夫 高 森 一 乗*
渡 部 茂 中 村 幸 生**

明海大学歯学部形態機能成育学講座 口腔小児科学分野

*日本大学歯学部小児歯科学講座

**明海大学歯学部機能保存回復学講座歯内療法学分野

(受付：2010年7月30日，受理：2010年10月16日)

Observation of Tooth Surfaces by QLF Following Er:YAG Laser or High-Speed Drill Preparation — The Remineralization Kinetics of Er:YAG Laser-irradiated Tooth Surface —

Hideo OHASHI, Kazunori TAKAMORI,

Shigeru WATANABE and Yukio NAKAMURA

Division of Pediatric Dentistry, Department of Human Development and Fostering,
Meikai University School of Dentistry

* Department of Pediatric Dentistry, Nihon University School of Dentistry

** Division of Endodontics, Department of Restorative and Biomaterial Science,
Meikai University School of Dentistry

(Received: July 30, 2010, Accepted for Publication: October 16, 2010)

Abstract: Although the histological changes in tooth enamel following Er:YAG laser application have been extensively studied, the acid resistance and remineralization of tooth surfaces after laser application have not been evaluated. In the present study, the tooth surfaces following Er:YAG laser application were observed by quantitative light-induced fluorescence (QLF) to ascertain the effects of laser output, and the following results were obtained.

After Er:YAG laser irradiation and high-speed drill preparation, the average fluorescence loss (ΔF) and mineral loss (ΔQ) increased and area decreased in specimens that had been immersed in remineralized solution for four weeks. However, the response of the laser-irradiation side was about three times better than that of the side ground by the high-speed drill.

These results suggest that:

1. Er:YAG laser irradiated enamel is effective for remineralization treatment.
2. QLF is a useful observation method for determining the prognosis of tooth surfaces following Er:YAG laser application.

(J. Jpn. Soc. Laser Dent. 21 : 141 ~ 148, 2010 Reprint requests to Dr. OHASHI)

Key words = QLF, Er:YAG laser, remineralization

キーワード = QLF, Er:YAG レーザー, 再石灰化

緒 言

脱灰病巣に対する非侵襲の診断機器の開発が国内外で求められ、近年オランダにて Quantitative Light-induced Fluorescence (以下 QLF とする) が開発された¹⁾。QLF は歯の自家蛍光発光現象²⁾ を応用し、高出力ランプから発生した白色光をフィルターを通すことで青紫色の光 (波長 290 ~ 450nm) として照射し、発生した黄色 (520nm) の蛍光強度を CCD カメラで画像として取り込む。そして、健全部からの蛍光強度を 100% として表した相対的な蛍光強度の減少量が 5% 以上となった部分をう蝕と判定する。その判定をコンピューター処理して各測定値を算出する仕組みである^{1,3,4-7)} (図 1, 2)。光学を応用しているために痛みや被曝が無いため、生体にとって非常に侵襲が少ない装置である。

QLF の脱灰検出能力は、脱灰深度 10 μ m の高い精度であり⁷⁾、蛍光減少度はマイクロラジオグラム、光学顕微鏡、共焦点微小顕微鏡で計測される脱灰深度と高い相関性のあることが報告されている^{1,8-10)}。何ら³⁾ は QLF 測定値の変動係数が 5% 程度であることを報告しており、高い再現性が得られることから多分野での応用が期待されている。

一方、う窩が形成された歯面に対しては修復治療の必要がある。長らく歯の切削にはエア・タービンに代表される高速回転切削機器が用いられてきた。しかし、高速回転切削機器の使用は痛みや振動、騒音などの不快事項が生じるため、それを理由に歯科治療自体に嫌悪感を抱く患者が少なくない。現在、レーザーが基礎的研究から臨床へと応用され、不快事項を軽減、消失させる機器として注目を集めている¹¹⁾。特に水の吸光帯に近似した Er:YAG レーザーは、歯の切削において注水を併用することにより熱の発生が少ないことに加え、表面吸収型であるため安全に歯質を蒸散できるレーザーであり¹²⁾、2007 年 4 月にはう蝕歯無痛の窩洞形成加算の名称で保険導入された。

我々はすでに Er:YAG レーザーの照射歯面が QLF にて観察可能であり、照射面に対する注水の影響について報告し¹³⁾、その有用性を明らかにした。一方、石灰化療法に対するエア・タービン切削窩洞の動態を QLF にて観察した報告は無く、今後 Er:YAG レーザーの応用範囲や使用頻度が拡大することが予想され、誤照射や誤切削が生じた後の対応と定期的な管理も必要になってくると考えられる。その際にチェアサイドにて簡便にレーザー照射歯面を観察し、効果が判定できるなら患者との信頼関係の回復に繋がる。

しかし Er:YAG レーザー照射後の歯面観察に QLF を用いた研究は、極めて少なく、石灰化に対する評価法の指標も統一された見解は無い。そこで本研究では ΔQ がミネラ

図 1 QLF システム

ルの溶出量を表し、う蝕の進行と再石灰化の指標とされている¹⁴⁾ ことおよび何ら¹⁵⁾ の実験系に類似していることから、 ΔQ を用いた。そして ΔQ を基準とした回復率を用いて Er:YAG レーザーとエア・タービンの 2 つの異なる装置によるレーザー照射歯面とタービンによる切削歯面を比較し、石灰化に対する影響を検討した。

材料および方法

本実験は課題名「Er:YAG レーザー照射歯面ならびにエア・タービン切削面の再石灰化反応の評価」で明海大学歯学部倫理委員会規定に従って行った (承認番号 A0504)。

1. 試料の作製

肉眼的にう蝕や修復、着色のないヒト抜去永久歯 50 本を使用し、25 本をレーザー照射用、残りの 25 本をエア・タービン切削用の試料とした。試料の頬側面をレーザー照射部およびエア・タービン切削面とし、歯軸に対して垂直に観察を行えるように舌側面を削合した。さらに頬側面を研磨剤 (プレサージュ[®], 松風, 京都) を用いて 5 分間ロビンソンブラシにて研磨し、15 分間流水下で洗浄した後に、自然乾燥させた。照射ならびに切削対象は作製した試料のエナメル質とした。

2. Er:YAG レーザーの照射条件

使用したレーザー装置は Er:YAG レーザー (Erwin, ML-22, モリタ, 京都) で、ストレートチップ FTS-15 (直径 600 μ m) を用いた。照射出力は 100mJ の出力を使用し、パルス繰り返し数は 10pps, 照射時間は 30 秒とした。出力はパワーメータ (Field Master, Coherent, U.S.A) を使用し、チップ先端出力を測定した。試料面に対するレーザーの照射方向は歯冠中央面に対し垂直とし、照射チップ先端と試料の距離は約 1.0mm とした。レーザー照射に伴う注水は、ファイバー円周より同軸上に空気 2.5ml/min, 水 3 ml/min の混合比で噴霧した¹⁶⁾。

図 2 QLF の模式図

3. エア・タービンおよび形成用バー

エア・タービン（スーパーロード 600ST, ヨシダ, 東京）に球状ダイヤモンドバー（MI09R, GC, 東京）を装着し、切削深さはバー頭部最大径 0.9mm の 1/2 に相当する 0.4mm とした。

4. 再石灰化液への浸漬

レーザー照射後、歯面上の 3 ～ 4 mm 角のウインドーを除いた部分をネイルバーニッシュ（Win Wax®, ダイソー, 広島）で被覆し、20ml の再石灰化液中に浸漬した。再石灰化液は 150mM CaCl₂, 90mM KH₂PO₄, 200mM HEPES (pH7.0) の混合液¹⁷⁾ に 1 ppm フッ素を添加したものを用いた（ハイドロキシアパタイトに対する飽和度が 5.5）。実験は 37℃ の恒温槽内で行なった。また pH の変動が再石灰化に影響を与えることから⁴⁾, 安定した再石灰化の環境を得るために、再石灰化液は 5 日毎に新たに調整して交換した。

5. QLF の測定方法

レーザー照射された試料を QLF（QLF™ Clin System, Inspektor Research Systems, The Netherlands）で検知し、得られた画像を画像解析ソフト（QLF™ Clin Software version 2.0.038, InspektorResearch Systems, The Netherlands）を用いて解析した。

測定項目は、①平均蛍光減少度 [%]（以下 ΔF と略：健全歯質からの蛍光減少度を 100% として表した相対的な蛍光強度変化量の平均値で、平均脱灰深度を表す⁵⁾）②面積 [mm²]（以下 エリア と略：脱灰した歯面の面積を表す）③脱灰量 [% × mm²]（以下 ΔQ と略）の 3 項目とした。

すべての試料を両面テープにて床面と平行な台上に固定

後、フレームキャプチャーレベル 0.98 以上で、自作した 25 × 45cm² の遮光性の箱内にて QLF の撮影を行った。

6. 回復率

初期う蝕試料の再石灰化の評価には様々な方法が報告されている^{3, 15)}。脱灰程度の異なる病変の回復状態を客観的に評価する方法として、今回は以下の回復率の式を用いた。

$$\text{回復率} = 100(\Delta Q_0 - \Delta Q_n) / \Delta Q_0 \quad 17)$$

(ΔQ_0 : 照射直後の ΔQ 値, ΔQ_n : n 週後の ΔQ 値をそれぞれ表す)

7. 統計処理

同一試料の再石灰化における経日的な差の検定は Friedman's test を、Er:YAG レーザーとエア・タービンの検定は Kruskal-Wallis H-test, 並びに Student-Newman-Keuls test を用いて行った。

結 果

Er:YAG レーザー照射後とエア・タービン切削後に、再石灰化液に浸漬した試料の経時的な推移を QLF により測定したところ、以下の結果を得た。

図 3 に ΔF の推移を示す。Er:YAG レーザーでは、週を経るごとに増加傾向を示し、各週間で有意差 ($p < 0.01$) が認められた。一方、エア・タービン切削面も増加傾向を示し、切削直後と 2, 3, 4 週後、1 週後と 2, 3, 4 週後において有意差 ($p < 0.01$) が認められたが、増加率は Er:YAG レーザーの方が高かった。

エリアの推移と ΔQ の推移を図 4 および図 5 に示す。エリアは Er:YAG レーザーでは照射直後と 1, 2, 3, 4 週後、

図 3 ΔF の推移

図 4 エリアの推移

1 週後と 2, 3, 4 週後, 2 週後と 3, 4 週後, 3 週後と 4 週後に時間の経過とともに比例的に変化し有意差 ($p < 0.01$) が認められた。エア・タービンでは形成直後と 2, 3, 4 週後, 1 週後と 3, 4 週後に有意差 ($p < 0.01$) が認められた。

ΔQ においてもエア・タービンで形成直後と 2 週後に有意差が認められない以外は同様であり, QLF の 3 つの測定値すべてにおいて Er:YAG レーザー照射面はエア・タービン切削面より再石灰化液浸漬後, 経時的に大きな推移を示した。

図 5 ΔQ の推移

図 6 回復率の推移

Er:YAG レーザーとエア・タービンとの群間の比較は ΔF では 4 週後に有意差 ($p < 0.05$), エリアでは照射・形成後, 1, 2, 3, 4 週後に有意差 (照射・形成後は $p < 0.05$, 1, 2, 3, 4 週後は $p < 0.01$), ΔQ では 1, 2, 3, 4 週後に有意差 ($p < 0.01$) が認められた。

回復率の推移を図 6 に示す。Er:YAG レーザー 100mJ では再石灰化液に浸漬して 4 週後には約 60% の高い回復率が得られたのに対して、エア・タービンでは 20% 以下の回復率で、Er:YAG レーザー群の 3 分の 1 以下に留まった。また Er:YAG レーザーでは経時的に回復率が上昇し、

図7 Er:YAG レーザー照射歯面 QLF 画像

有意差 ($p < 0.01$) が認められたのに対して、エア・タービンでは切削直後と2, 3, 4週後および1週後と3, 4週後では有意差 ($p < 0.01$) が認められたが、3週以降は有意差が認められなかった。

両群間は2週後以降、Er:YAG レーザーの回復率が有意 ($p < 0.01$) に高い結果となった。図7にレーザー照射直後ならびに再石灰化液浸漬後の代表的なQLF画像を示す。4週後の画像ではレーザー照射による影響を受けた部分の縮小を認めた。

考 察

エア・タービンでの歯の切削は回転数 500,000rpm, 60～90g の荷重, 送り速度 5 mm/s 以下の条件の場合に歯質損傷が少ないことが報告されている¹⁸⁾。しかしエナメル質の構造は規則的な変化の無いエナメル叢が前歯の唇面, 頬側面では密度が高くエア・タービンなどによる急速な切削による応力のために切削面直下または同縁部に応力方向に直角に微細な葉板状の亀裂を呈しやすいとされる¹⁸⁾。その大きさは20から200 μm ほどと報告されている^{18, 19)}。亀裂発生の頻度は円形窩洞では少なく, 回転数の増加とともに減少傾向を示す。

しかし, 切削面の粗さはダイヤモンドポイントではカーバイドバーより粗糙となる上に先端部による切削面は側面部を使用した面と比較して粗いことが知られている²⁰⁾。本研究では歯面に対して垂直方向にダイヤモンドポイントを接触させているため, 先端部と同様な粗さと考えられる。

スマヤー層は歯質を切削した際に数 μm の厚みで削片が付着した層と定義され²¹⁾, エナメル質の切削においても生じることが知られている²²⁾。

このことからエア・タービン切削面は相当粗く, 切削牙粉や Organic Film も堆積していると想像されるため, これらの層が石灰化を阻害するような影響を及ぼしたと推察される。

一方, Er:YAG レーザーの歯質蒸散のメカニズムは2.94 μm の波長が水のOH基と反応することによる水和殻の水蒸気爆発とされている²³⁾。そのために照射面のエナメル小柱や象牙細管は明瞭でありスマヤー層は生じないことが多く報告されている^{24, 25)}。本研究では, 一般的に歯質の蒸散に用いられる出力より幾分低い出力で施行されたが, 守矢ら²⁶⁾は乳歯歯質に対して100mJ, 1.0mmの距離から注水下にて5秒間照射した際に最深部までの深さが0.3mmでありスマヤー層を認めなかったことを明らかにしており, 本研究も同様の傾向を示した。また, 接着歯学における研究では, スマヤー層の存在はボンディング剤の浸透を阻害し接着力を低下させるという内容の報告が多く認められる^{27, 28)}。

またフッ化物で洗口した場合, 表層のエナメル質が最もフッ素取り込み量が高いことが微小焦点エックス線回折法により確認されており²⁹⁾, 局所的にフッ素を応用した場合, フッ素の取り込みはエナメル質との接触により得られ, 最表層の10から30 μm 程度の深さで取り込み量が多いとされる³⁰⁾。フッ素イオンはマイナスに荷電し, カルシウムイオンと静電的な引力により強く結合することで構造を安定化させる³¹⁾。そのため静電的に歯面に付着しているスマヤー層²¹⁾が介在することにより, フッ素イオンはスマヤー層に引き寄せられ, 歯質のカルシウムイオンとの結合が阻害されると推察でき, スマヤー層がボンディング剤と同様にフッ素の浸透に関して影響を及ぼしたため,

回復率が低い値を示したのではないかと推察している。

レーザー照射後の歯面はカルシウムの溶出などでCa/P比が変化^{32,33)}し、脱灰様歯面となっていると考えられる。佐藤ら³⁴⁾は初期う蝕歯面にNd:YAGレーザーを照射し、再石灰化液に浸漬することによりマイクロラジオグラム上でエックス線不透過像の拡大を認めた。このことより、低エネルギー密度のレーザー照射がフッ素の取り込み量の増大に寄与したことを示唆している。レーザー照射とフッ素の取り込み量の関係については、主に耐酸性に関する報告が多くなされている³⁵⁻³⁷⁾。Er:YAGレーザーにおいても高橋³⁷⁾がフッ素とレーザーを作用させる順序により耐酸性の程度に差が生じることを示し、レーザー照射に伴う微小亀裂が原因と推察している。

また、レーザーを生体に照射すると熱膨張などによって大きな応力が生じることが知られている³⁸⁾。また古本ら³⁹⁾はNd:YAGレーザー照射時の衝撃応力を測定した結果、被照射面には静的ではない衝撃的な応力が働いていることを報告している。ところでエナメル質の引っ張り強さは10.4MPa程度⁴⁰⁾であり、蒸散の際に生じる応力により微小亀裂が生じると考えられる。外山ら⁴¹⁾はEr:YAGレーザーでは50mJの低出力でもレーザー照射面に数10 μ mの微小亀裂が生じたことを報告している。本研究で用いた出力である100mJでも微小亀裂に沿って色素が浸入し、15 μ m前後の濃染層が観察されたことが報告されている⁴²⁾。山田ら³⁵⁾はEPMA (Electron probe micro analyzer) 分析でNd:YAGレーザー照射面下10から15 μ mにおいてフッ素濃度が著しく高いことを認めている。これはEr:YAGレーザーの微小亀裂の深さと一致するため亀裂内にフッ素が浸透していることが推測される。

以上のことから、本研究でのEr:YAGレーザー照射面の高い回復率は、いわゆるスミヤー層を欠き、脱灰様歯面上に微小亀裂が存在しフッ素が早期に浸透した結果、相乗効果により石灰化が促進的に認められたのではないかと考えられる。

また何らの報告⁶⁾ではレーザー照射群は再石灰化液に浸漬した後、一旦ミネラル喪失量が増加したのちに再石灰化が進行したのに対して、本研究では経日的に再石灰化が生じた。これは何らが考察しているように、用いたレーザーが組織浸透型で熱影響の大きいNd:YAGレーザーであるため表層の一部が溶融したことに加え、フッ素の用い方の違いのためと考えられる。すなわち、何らはレーザー照射前と2日毎に9000ppm (フローデンA, サンスター, 大阪) APF (acid phosphate fluoride) 溶液に5分間浸漬させる方法を行っているが、本研究では1ppmのフッ素を添加した再石灰化溶液に1週間浸漬させ期間中は常にフッ素が作用する方法を用いた。近年のフッ素による再石灰化に関する研究から高濃度のフッ素を間歇的に用いる方

法よりも、低濃度のフッ素を高頻度に作用させる方法が効果的である⁴³⁾とされており、これも本研究でより高い石灰化が生じた一因であると考えられる。

結 語

QLFによるEr:YAGレーザー照射歯面の観察を行い、レーザー照射後の歯面の石灰化に及ぼすエア・タービンによる切削面との比較検討を行い、以下の結果を得た。

Er:YAGレーザー照射面が ΔF , エリア, ΔQ の全ての測定項目で浸漬時間に対して線形に石灰化方向に大きく推移したが、エア・タービン切削面の推移は小さかった。

レーザー照射を行った試料とエア・タービンによって切削した試料をそれぞれ再石灰化液に浸漬した後の回復率はレーザー照射後の歯面の方が3倍程度、高かった。

以上の結果、Er:YAGレーザー照射面は石灰化療法に良好に反応し、その予後管理をQLFによる観察を行うことは有効な方法であることが示された。

謝 辞

稿を終えるに当たり、懇切なるご指導、ご校閲を賜りました明海大学歯学部社会健康科学講座口腔衛生学分野安井利一教授に深く感謝の意を表します。また終始ご理解とご協力を戴きました同講座口腔小児科学分野の諸先生に心よりお礼申し上げます。

文 献

- 1) 神原正樹：予防歯科へのテクノロジー。日歯会誌, 56: 15-22, 2003.
- 2) Benedict HC: Note on the fluorescence of teeth in ultraviolet rays. Science, 67: 442, 1928.
- 3) 何 陽介, 岡本佳三, 馬場篤子, 他：エナメル質初期齲蝕の診断技術の進歩と予防管理。福歯大誌, 34: 56-62, 2008.
- 4) 高島隆太郎, 川崎弘二, 上村参生, 他：エナメル質人工初期う蝕試料の再石灰化におけるQLF観察。口腔衛生会誌, 55: 41-49, 2005.
- 5) 安藤昌俊：定量蛍光法 (Quantitative Light-induced Fluorescence) による初期う蝕。歯科評論, 63: 155-160, 2003.
- 6) 何 陽介, 本川 渉, 宮崎光治：定量的光誘導蛍光法を用いたヒトエナメル質表層下脱灰層の検討。歯材器歯誌, 24: 189-194, 2005.
- 7) Al-Khateeb S, ten Cate JM, Angmar-Månsson B, et al: Quantification of formation and remineralization of artificial enamel lesions with a new portable fluorescence device. Adv Dent Res, 11: 502-506, 1997.
- 8) Al-Khateeb S, Oliveby A, de Josseline de Jong E, et al: Laser fluorescence quantification of remineralization in situ of incipient enamel lesions: Influence of Fluoride supplements. Caries Res, 31: 125-131, 1997.
- 9) Hall A, DeSchepper E, Ando M, et al: *In vitro* studies of laser Fluorescence for detection and quantification of mineral loss from dental caries. Adv Dent Res, 11: 507-514, 1997.
- 10) Ando M, Hall AF, Eckert GJ, et al: Relative ability of laser fluorescence techniques to quantitate early mineral loss *in vitro*. Caries Res, 31: 125-131, 1997.
- 11) 高森一乗, 福島理恵, 古川裕彦, 他：硬組織切削振動と疼痛との関係についての基礎的研究 第1報 Er:YAGレーザー切削時の微小振動について。日歯保存歯, 44: 699-705,

- 2001.
- 12) Keller U, Hibst R: Experimental studies of the Er:YAG Laser on dental hard substances: Light microscopic and SEM investigations. *Laser Surg Med*, 9: 345-351, 1989.
- 13) 大橋英夫, 高森一乗, 遠藤康亮, 他: QLF による Er:YAG レーザー射後の歯面変化の観察. *日歯保存誌*, 52: 426-436, 2009.
- 14) van der Veen H, de Josselin de Jong E: Application of quantitative light-induced fluorescence for assessing early caries lesion; in Faller. R.V. (ed): *Assessment of oral health*. Monogr Oral Sci Basel Karger, 17: 144-162, 2000.
- 15) 何 陽介, 岡本佳三, 野村隆子, 他: Nd:YAG レーザーによる歯質照射部の結晶学的変化と器械的性質. *小児歯誌*, 45: 603-610, 2007.
- 16) 篠木 毅: Er:YAG レーザーの硬組織への応用. *日レ歯誌*, 14: 139-143, 2003.
- 17) Ten Cate JM, Arends J: Remineralization of artificial enamel lesion *in vitro*. *Caries Res*, 11: 277-286, 1997.
- 18) 篠原正氣: 高速切削により発生するエナメル質亀裂に関する研究. *廣大歯誌*, 18: 120-148, 1986.
- 19) 篠原正氣: 高速切削時の歯質変化に関する研究によるエナメル質亀裂発生を検索について. *日歯保存誌*, 16: 120-126, 1973.
- 20) 嶋 良男, 井上時雄, 土谷裕彦, 他: 窩洞形成に関する研究 II 高速電気エンジンおよび air turbine 使用による歯牙切削面の様相について. *阪大歯誌*, 5: 351-357, 1960.
- 21) 片山 直: 窩洞形態に具備すべき条件. 平井義人, 寺中敏夫, 寺下正道, 千田 彰編, *保存修復学*, 第5版, 東京, 2007, 医歯薬出版, pp.120.
- 22) 鈴木一臣: エナメル質・象牙質に対する接着. 真坂信夫編, *日本歯科評論臨時増刊 2000 接着臨床の新たな展開*, 東京, 2000, 日本歯科評論社, 231-237.
- 23) 熊崎 護: Er:YAG レーザーおよび分子振動レーザーによる歯牙硬組織切削について. *日レ歯誌*, 20: 55-61, 1999.
- 24) 関根義朗: Er:YAG レーザーによる歯牙硬組織切削の病理学的研究. *日歯保存誌*, 38: 211-233, 1995.
- 25) 瀧澤雅一: Er:YAG レーザーによる歯牙硬組織切削に関する検討. *日歯保存誌*, 39: 1089-1128, 1996.
- 26) 守矢佳世子, 加藤純二: Er:YAG レーザー照射時における乳歯質の形態学的変化について. *小児歯誌*, 7: 6-11, 1996.
- 27) Ishioka S, Caputo AA: Interaction between the dentinal smear layer and composite bond strength. *J Prosthet Dent*, 61: 180-185, 1989.
- 28) 川崎浩二, 飯島洋一, 高木興氏: *In vivo* における各種フッ化物応用後の脱灰エナメル質へのフッ素取り込みと再石灰化. *口腔衛生会誌*, 39: 337-344, 1989.
- 29) 飯島洋一: 乳歯エナメル質フッ素濃度におよぼすフッ素洗口ならびに飲料水の由来のフッ素の影響. *口腔衛生会誌*, 35: 43-50, 1985.
- 30) Nikiforuk G: 齲蝕 2 —予防の理論と臨床—. 飯塚喜一, 小西浩二, 堀井欣一監訳, フッ素の齲蝕抑制作用のメカニズム, 第1版, 東京, 1987, 学研書院, 44-55.
- 31) Verbeeck RMH, Driessens FCM, Schaeken HG, et al: Diffusion inhibition as a mechanism for the caries-reducing of fluoride. *Caries Res*, 14: 311-314, 1980.
- 32) 峯 篤史: Er:YAG レーザー照射歯質被着体の性質と接着に関する研究. *岡山歯誌*, 22: 123-137, 2003.
- 33) 幸治 亮: Er:YAG レーザー照射時のエナメル質および象牙質の微細構造変化と歯髄刺激に関する研究. *昭歯誌*, 19: 42-55, 1999.
- 34) 佐藤秀人: 人工初期齲蝕に対する超音波 Q スイッチ Nd:YAG レーザー照射後の影響について. *歯基礎誌*, 24: 914-926, 1982.
- 35) 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齲蝕抑制効果に関する実験的研究. *小児歯誌*, 26: 732-741, 1988.
- 36) 森岡俊夫, 森田恵美子, 鈴木和夫: 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. *日レ歯誌*, 3: 605-612, 1982.
- 37) 高橋亨典: Er:YAG レーザー照射及び APF 塗布で処理したエナメル質の耐酸性と組織学的変化. *愛院大歯誌*, 39: 19-31, 2001.
- 38) 桜井靖久, 菊池 真: レーザー光の生体への作用機序, 渥美和彦編, *レーザー医学 基礎と臨床*, 第1版, 東京, 1980, 中山書店, 27-40.
- 39) 古本達明, 上田隆司, 細川 晃, 他: Nd:YAG レーザー照射時の誘起衝撃応力の測定—吸収剤の違いによる衝撃応力の変化—. *日レ歯誌*, 20: 67-73, 2009.
- 40) 岩久正明, 河野 篤, 千田 彰, 田上順次編: *保存修復学* 21, 東京, 1998, 永末書店, 5-7.
- 41) 外山敬久, 磯貝美佳, 入野田芳子, 他: Er:YAG レーザー照射によるエナメル質の形態変化—microcrack について—. *日歯保存誌*, 42: 975-981, 1999.
- 42) 岩田有弘, 岩田圭司, 藤戸 寛, 他: Er:YAG レーザー照射歯質に関する研究 第2報エオジン濃染層について. *日歯保存誌*, 44: 810-816, 2001.
- 43) 飯島洋一, 熊谷 崇: カリエスコントロール 脱灰と再石灰化のメカニズム, 東京, 1999, 医歯薬出版, 53-57.