

## 歯石除去を対象としたレーザー治療の安全ガイドライン

### 1. はじめに

歯科治療における口腔内でのレーザーによる歯石除去(スケーリング)について, その背景, 原理, 基礎的および臨床的エビデンス, 臨床応用の実際とその注意および安全対策について概説する<sup>[1]</sup>.

### 2. 背景: 歯周治療における歯石除去の意義とレーザー応用の役割

歯周治療の基本は, 歯周病罹患歯根面の生物学的親和性を回復し, 歯周組織を再び歯根面に付着させることである. 歯周病罹患歯根面にはプラークや歯石が付着し, また病的セメント質, 細菌由来の内毒素やその代謝産物などの有害物質が存在しており, 歯周組織の治癒を得るためにはこれらの確実な除去が必要である. とくに, ポケット内歯根面の付着性プラークは細菌バイオフィルムを形成しており, 抗菌薬は内部までは効果が及びにくく, 機械的に破壊しなければ除去できないといわれている<sup>[2]</sup>.

従来, 歯根面の沈着物や有害物質を除去するためには, 主に手用スケーラーを用いて機械的なスケーリング・ルートプレーニング(SRP)が行われている<sup>[3]</sup>. 一部には超音波スケーラーやエアスケーラーなどの機器も併用されるようになり<sup>[4]</sup>, 負担は軽減されつつあるが, 依然としてその処置は基本的に熟練を要し, 時間のかかる処置である. また, 従来のSRPでは, 必ずしも根面の沈着物を完全に除去できるわけではないことが明らかにされている. また, 分岐部や根面の溝および陥凹部, 臼歯部の遠心面のアクセスは困難なことが多く, 従来の機械的処置には限界がある. 一方, 除菌のための抗菌薬の歯周ポケットへの局所的応用や全身的応用も効果的に行われているが, 抗菌薬はアレルギー等の副作用や, その多用による耐性菌の出現を引き起こす潜在的な危険を伴っている. 従って, 現在, これらの補助あるいは代替的手段の一つとして, 殺菌効果を伴うレーザーという光エネルギーによる優れた組織蒸散効果を利用して, 歯石除去を含む根面のデブライドメントへのレーザーの臨床応用が行われている<sup>[5-7]</sup>.

### 3. 歯周病罹患根面へのレーザーの応用と Er:YAG レーザー

レーザーの歯周病罹患根面のデブライドメントへの応用に関しては, Nd:YAG レーザーでは, その波長の黒色への高い吸収性を利用して, 褐色の歯肉縁下歯石の除去が可能であることが報告され, 臨床応用されているが<sup>[8-10]</sup>, 従来の炭酸ガスレーザーや Nd:YAG レーザーでは, 基本的に硬組織の蒸散が困難であり, 歯石除去や根面への高出力照射においては, 熱作用により炭化や融解などが生じやすいため注意が必要である<sup>[11, 12]</sup>. 一方で, 1989年の Hibst と Keller<sup>[13]</sup> や茅野らの報告<sup>[14]</sup>により, Er:YAG レーザーによる歯の硬組織の蒸散が可能であることが示され, レーザーによるう蝕治療が可能となり<sup>[15-19]</sup>, 歯周領域においても, 90年代中頃からレーザーによる硬組織の蒸散, すなわち, より効果的な歯石除去や骨組織の処置が可能となった<sup>[5, 7, 19, 20]</sup>.

### 4. Er:YAG レーザーの特性と歯石蒸散のメカニズム

Er:YAG レーザーは, 1974年に Zharikov らによって発振された固体レーザーで<sup>[21]</sup>, 発振波長が 2.94  $\mu\text{m}$  のパルス波のレーザーである. Er:YAG レーザーは現在用いられている歯科用レーザーの中では, 水への吸収性が最も高く, 理論的に CO<sub>2</sub> レーザーより 10 倍, Nd:YAG レーザーよりも 15,000 ~ 20,000 倍の吸収性を示し<sup>[22, 23]</sup>, 水分を含む生体組織によく吸収される. そのため, 軟組織のみならず, 硬組織の蒸散能力にも優れたレーザーである. 水への高い吸収性により, 生体周囲組織への熱影響は極めて小さい. 硬組織処置の場合には, 組織の含水量がわずかであるため発

熱を生じやすいが、注水を併用することにより発熱を顕著に抑制することができ<sup>[24]</sup>、注水下での歯根セメント質、象牙質の変性層は約5～15 μmであると報告されている<sup>[25-27]</sup>。

蒸散のメカニズムは、光エネルギーが組織中の水および有機成分に吸収され、熱作用により蒸散する効果(photothermal evaporation)に加えて、特に硬組織では、その気化に伴い内圧が亢進し、“微小爆発”(microexplosion)による力学的作用により組織の崩壊が生じるという“熱力学的蒸散”(thermomechanical ablation)あるいは“光力学的蒸散”(photomechanical ablation)であると考えられている<sup>[28, 29]</sup>。歯石は多孔性の石灰化組織であり、その構成成分中だけでなく、生体内ではその構造上の小腔中にも水分を含んでいるため、より蒸散が起こりやすい硬組織である。また、Er,Cr:YSGG レーザーも Er:YAG レーザーに近い2.78 μmの波長を有しており、歯石除去についてもほぼ Er:YAG レーザーと同様の効果があることが報告されている<sup>[30]</sup>。

## 5. Er:YAG レーザーによる歯石除去に関する基礎的エビデンス

### 1) 歯石除去効果と歯石下の歯質への影響

Er:YAG レーザーは、歯の硬組織より低出力の照射(先端エネルギー密度 11-19 J/cm<sup>2</sup>/pulse)で容易に歯石を蒸散することができる<sup>[5, 25, 31-34]</sup>。注水下の照射では、捻撥音を発しながら蒸散し、歯石の蒸散面には、炭化や融解などの熱傷害は認められず、力学的に破碎されたと推測される粗造な面が認められる<sup>[25]</sup>。*In vitro*での抜去歯上での歯石除去効率(コンタクトチップ先端出力 40 mJ/pulse (エネルギー密度 14.1 J/cm<sup>2</sup>/pulse)、繰り返しパルス数 10 pps (Hz)で、超音波スケーラーと同程度であり<sup>[25]</sup>、パルス数を 20-30 pps に上げるにより向上し、超音波スケーラーより効率は高くなる。

Er:YAG レーザーでは基本的に歯石の完全な選択的蒸散は不可能なので、エナメル質上の歯肉縁上歯石の場合には、歯石直下のエナメル質の蒸散が避けられないため禁忌である<sup>[35]</sup>。一方、歯根面上の歯肉縁下歯石の場合には、歯石を除去するだけでなく、さらに歯石下の汚染されたセメント質を除去するルートプレーニングも必要であるため、レーザーによって歯石下のセメント質が一層蒸散されるのは許容される。従って、根面上の縁下歯石が適応となる。ただし、歯石除去において根面を過剰に蒸散しないように、コンタクトチップを根面に平行あるいはわずかに斜めに保持するような照射法に配慮する必要がある<sup>[5, 25, 36]</sup>。照射法と出力をコントロールすることによりセメント質の保存は可能で<sup>[25, 31, 36]</sup>、*in vivo*においては、非外科的治療において SRP が完全にセメント質を除去してしまうのに対して Er:YAG レーザーではセメント質を保存できるとの報告<sup>[37]</sup>や、あるいは従来法と損失量は同程度という報告<sup>[32]</sup>もある。一方で、過剰に損失するという報告もあり<sup>[33]</sup>、これらは根面へのチップの適合の状態や出力、照射手技などの相違によるものと思われる。

### 2) 照射時の発熱と根面および歯髄への影響

発熱に関しては、注水の併用により、根面や歯髄側への影響はわずかであり<sup>[25, 31]</sup>、根面の炭化のような熱傷害は生じないが、レーザー照射により一層の歯質の蒸散を生じた面は微細構造を示すため、乾燥させると白色を呈する<sup>[27, 31, 35, 38]</sup>。また、蒸散面の微細構造を示す最表層は顕著な有機成分の減少が生じており<sup>[39]</sup>、その下層に局限した熱変性と推測される数ミクロンの変化層が生じる<sup>[25, 27]</sup>。ただし、注水下の照射では、CO<sub>2</sub> レーザー照射で認められるような炭化に伴う毒性物質の産生<sup>[40]</sup>はほとんど認められない<sup>[39]</sup>。また、Er:YAG レーザーは非常に低い出力で殺菌作用を生じ<sup>[41]</sup>、さらに照射根面にはエンドトキシンの分解・除去効果が認められるなど<sup>[42, 43]</sup>、レーザー

処置面にはスメア層がなく<sup>[25, 44]</sup>, 殺菌効果および無毒化が期待され<sup>[44]</sup>, これらは従来の機械的手段に優る点で, 歯周ポケットの創傷治癒に有利に働く可能性がある。

歯髄への影響については, もともと歯石除去よりもはるかに高出力で行われる窩洞形成において, 歯髄への影響は従来の高速切削と同程度と報告されており<sup>[45, 46]</sup>, 根面の歯石除去の際の影響はレーザーの照射方向も考えると極めて少ないと推測される。実際に動物実験において, フラップ手術時に行われた根面のデブライドメント後の歯髄の組織学的変化は認められていない<sup>[47]</sup>。

### 3) レーザー照射根面の細胞・組織の付着への影響

Er:YAG レーザー照射面に対する歯周組織の付着については, キュレットによる SRP とレーザーによるデブライドメントを歯周病罹患根面にて比較した *in vitro* の研究があり, レーザー治療の方が有意に高い細胞付着を示すことが複数の論文で報告されている<sup>[48-50]</sup>。一方で, 健全セメント質を用いた研究では, 微細構造を呈する照射セメント質への細胞の付着は低下するが, さらにテトラサイクリン塩酸塩や EDTA などの根面処理によって, 付着が回復向上することが示されている<sup>[51]</sup>。

*In vivo* においては, 非外科的ポケット治療における創傷治癒を調べた Schwarz らの動物研究では, Er:YAG レーザーによるデブライドメント後の根面には明らかに重篤な熱傷害はなく, 根面の蒸散も多くはセメント質内で, SRP と同等以上の新生セメント質形成が認められている<sup>[52]</sup>。外科的治療において Er:YAG レーザーの根面および骨欠損部のデブライドメントを行った Mizutani らの動物研究においては, レーザー照射根面は歯周組織の付着を妨げることなく, 一部に変成層の残存も認められたが, 全体的に変成層は吸収されており, SRP と同程度に新生セメント質の形成を伴う結合織性付着が認められている<sup>[47]</sup>。後述する臨床研究における良好な成績やその長期安定性から考えると, 臨床的には, レーザー照射根面が組織付着を阻害することではなく, 得られた付着は安定しているものと推測される。しかしながら, レーザー照射根面に対する歯周組織付着については, エビデンスがまだ不十分であり, 今後 *in vivo* でのさらに詳細な検証が必要である。

## 6. 根面のデブライドメントへの Er:YAG レーザーの応用に関する臨床的エビデンス

### 1) 非外科的歯周ポケット治療における応用

Schwarz ら<sup>[53]</sup> は, Er:YAG レーザーを用いて非外科的ポケット治療を行い, スプリットマウスデザインのランダム化比較試験 (Randomized controlled trial: RCT) の結果を報告している。結果として, レーザー群の方が, 従来のキュレットによる SRP 群より処置時間は短く, 6 か月後の診査において SRP 群とポケット減少量は同等で, プロービング時の出血 (BOP) およびアタッチメントレベルはレーザー群のほうが有意に高い改善を示し, その結果は2年後も維持された<sup>[54]</sup>と報告している。さらに, 彼らの別の報告<sup>[55]</sup>ではレーザー治療後のキュレットによる追加のルートプレーニング処置は付加的効果がなかったとしている。

超音波スケーラーとの比較では, Sculean らは, Er:YAG レーザーによる治療は術後6か月において超音波スケーラーと同様な臨床的改善を示したことを報告し<sup>[56]</sup>, Crespi らは, 術後1,2年において Er:YAG レーザーは超音波スケーラーより有意に高い臨床的改善を示したと報告している<sup>[57]</sup>。また, Tomasi らはメンテナンス治療での応用において, Er:YAG レーザー治療は, 1か月後では超音波より有意に高い臨床的改善を示したが, 4か月後には臨床的改善および細菌レベルは同程度であり, また, 治療時の不快感は Er:YAG レーザーの方が少なかったことを報告している<sup>[58]</sup>。一方で, 超音

波スケーリングの方が、Er:YAG レーザー治療より細菌の減少度が大きく、レーザー治療より超音波治療の方が患者に好まれたとの報告<sup>[59]</sup>がある。また、Er:YAG レーザーによるポケット内での盲目的な歯石除去は従来のキュレット治療に比べて除去率が劣るとの報告<sup>[37]</sup>や、Er:YAG レーザーは従来の機械的手段の補助として用いられるであろうという報告<sup>[60]</sup>などがあり、その評価はまだ一定していない。

このように、Er:YAG レーザー単独療法で SRP より有意に高いあるいは同等以上の長期的な臨床的改善効果を示すことが複数の論文で示されてはいるが、まだ十分なコンセンサスを得られるまでには至っていない<sup>[6]</sup>。

## 2) 歯周外科治療における応用

外科治療における応用では、明視下において歯石の沈着の確認とコンタクトチップの適合が容易であることから、レーザー照射のコントロールがしやすく、結果的に根面の蒸散も少ない。従って、明視下での Er:YAG レーザーによる根面のデブライドメントは非常に容易で確実性が高い。さらに、フラップ手術においては、Er:YAG レーザーが軟組織の蒸散にも優れ、骨面への応用も行われていることから、同時に骨欠損部の不良肉芽組織掻爬が主要な目的となっている<sup>[7, 47]</sup>。Mizutani らの動物実験では、フラップ手術において Er:YAG レーザーによる根面のデブライドメントとともに肉芽組織の除去が安全で効果的に達成できることが示され、さらには新生骨形成を促進する可能性が示唆されている<sup>[47]</sup>。

臨床研究では、Sculean らはフラップ手術において Er:YAG レーザーによる骨欠損および根面のデブライドメントと、キュレットと超音波器具による治療を比較し、臨床的改善度に有意差はなかったが、Er:YAG レーザーは歯周外科治療に適した代替手段になるであろうと報告している<sup>[61]</sup>。Gaspirc らは Er:YAG レーザーを骨欠損および根面のデブライドメントに応用し、レーザーは従来の機械的手段によるフラップ手術に比べて術後 3 年まで、有意に高い臨床的改善度、すなわち有意に大きいポケット深さの減少とアタッチメントゲインの増加を示したことを報告している<sup>[62]</sup>。このように歯周外科治療への応用において、とくに根面のデブライドメントは明視下で容易に達成でき、術後の創傷治癒は従来の機械的治療と同等あるいはそれ以上であることが示されているが、今後、多施設において多数の被験者を対象とする研究や、治療効果に対する多角的な分析評価など、より多くのエビデンスが必要である。

## 7. Er:YAG レーザーによる歯石除去の実際

### 1) レーザーによる歯石除去を施行するための医師および医療機関の条件

施行歯科医師は、口腔組織のレーザー治療と歯周治療に関する十分な知識を有し、レーザー機器の取り扱いおよびレーザーの臨床使用に習熟している必要がある。従って、日本レーザー歯学会の認定医・指導医あるいは特定非営利活動法人日本レーザー医学会の認定歯科医、特定非営利活動法人日本歯周病学会の専門医・指導医であることが望ましい。

レーザー治療を実施する医療機関には上記の歯科医師が常勤し、必要なレーザー装置を備え、遮光設備等の安全対策がなされていなければならない。従って、レーザー治療専用の独立した治療室もしくはパーティションで区切られた治療ユニットでレーザーを使用すべきである。

### 2) スケーリングへの応用の認可の得られているレーザー装置

歯石除去に関して認可の得られている装置は、Er:YAG レーザー装置のみで、アーウィン<sup>®</sup>、アーウィンアドベール<sup>®</sup>、デントライト<sup>®</sup>、デントライト 30<sup>®</sup> の 4 機種である。

## 3) レーザーによるスケーリングの対象となる歯石沈着

Er:YAG レーザーは歯質も蒸散するので、エナメル質上の歯石除去は禁忌である。根面の歯肉縁下歯石あるいは歯肉退縮により歯肉縁上に露出した根面の歯石あるいは、および歯周外科治療中の根面上の歯石である。

## 4) 臨床応用上の注意および安全対策

## ①術前の機器の点検

目視による始業時点検を必ず実施する。オートクレーブにて滅菌されたコンタクトチップおよびハンドピースカバーを装着し、装置の動作に異常のないこと、レーザー光出力や注水量が適切であるかどうかを確認する。出力チェックの結果、レーザー光出力が大幅に低下していた場合は、本体部とハンドピースカバー、コンタクトチップの接続状態、および集光レンズの汚れをチェックし、再度出力チェックを行う。なお、コンタクトチップは消耗品であるので、先端部の損耗の状態を定期的にチェックし、必要に応じて研磨などを行う。損耗が著しい状態のものや十分な出力が得られないものは廃棄する。また照射中にコンタクトチップ先端の破損等によりレーザー光出力が低下をきたす恐れがあるため、常に予備のコンタクトチップを準備しておく。また、口腔内での照射の直前に、必ず、デンタルバキュームの中に向けてなどの状態で、試験照射(テストファイアー)を行い、レーザーの照射の確認とエアースプレーの状態をチェックする。

## ②術中の注意

## (a) 保護めがねの着用による目の保護

レーザーは新しい治療器具として有用であるが、従来の機械的器具とは全く異なり非接触でも作用を及ぼすため、誤照射を起こす可能性があり、使用には特別な注意が必要である。基本的に眼への誤照射に最も注意しなければならない。そのため、レーザー使用時には、患者、術者およびアシスタントの全員が、それぞれの波長に適した十分な OD 値 (Optical density: 光学濃度) を有する保護めがねを着用することが必須であり、デンタルミラーや金属修復物からの反射光にも注意する必要がある<sup>[5, 63, 64]</sup>。

## (b) 適切な照射条件の設定

歯石の硬さや付着力などの条件に応じて、径 600  $\mu\text{m}$  のコンタクトチップにおいてはパネル設定 40-80mJ/pulse (先端出力 20-40 mJ/pulse) をおよその基準とし(エネルギー密度 7.1-14.2 J/cm<sup>2</sup>/pulse), 繰り返しパルス数 10-30 pps (Hz) に応じて適切に設定する。また、歯周ポケットや根面の状況に応じて適切な種類のコンタクトチップを選択する。硬組織の蒸散においては、発熱を抑制するために、エアースプレーによる注水を必ず併用する必要があり、適切な水量とエアースプレー量に設定する。ただし、歯周ポケットの使用においては、冷却用のエアースプレーによりごくまれに皮下気腫を発生することがあるので、歯周ポケット内照射を行う場合には、極力エアースプレーを少なくするか、あるいはオフにするなどの配慮が必要である。歯周外科手術での使用時には、皮下気腫の心配はないが、注水は滅菌生理食塩水に切り替える必要がある。

## (c) 歯石の探知と確認

通法に従い、歯周ポケット内の縁下歯石の場合には、歯周ポケット探針を用いて、歯周ポケットの深さと歯石の沈着部位およびその程度を十分に把握する。術後は、歯周ポケット探針を用いて、歯石の除去状態根面の凹凸の程度を診査確認する。歯周外科処置時には、歯根面は明視下にあるので、探知と除去の確認は容易である。局所麻酔は、歯周外科手術時には常に必要であるが、非外科的処置時には必要に応じて行う。

(d) 適切な照射手技の採用

接触あるいは非接触照射でも除去が可能で、接触の場合にもチップを歯石に軽く当てる程度で、強く押しつける必要はない。歯根面上の歯石の除去に用いる場合には、コンタクトチップを根面に対して常に平行あるいはわずかに傾斜させる程度に保持し、定点照射をすることなく常にチップを上下あるいは左右に振る動作を用い、不適切な照射で過剰な蒸散による損傷を起こさないよう注意する

(e) 周囲組織への影響

Er:YAG レーザーの場合には、表面吸収型のレーザーであるため<sup>[19]</sup>、基本的に照射部深部へのエネルギーの深達が少なく、予期せぬ熱傷害の危険が非常に少ないため臨床における安全性は高いが、それでも骨膜などへの熱影響には十分注意する必要がある。また、ポケット底部や側方部の歯周組織付着部位を過剰に蒸散しないように注意する。歯髄に関しては、出力、照射法、注水を遵守することにより、基本的に熱傷害などの悪影響を防止できる。

(f) 誤照射の防止

レーザー光の進行方向上にある対象組織に注意し、必要に応じて周囲組織の保護あるいはレーザー光の遮断措置を取る。また、フットペダルの不用意な踏み込みによる治療対象部以外への不慮の照射がないように注意し、確実な操作を心がける。

(g) 蒸散物の的確な吸引操作

Er:YAG レーザーの場合には、ポケット内照射においてはその爆発的蒸散効果に伴いポケット内からの血液の飛散が起こりやすいため、フェイスガードの着用および的確なバキューム操作が必要で、さらに口腔外バキュームの併用が望ましい。

(h) 急な異状時の対応

レーザー照射中に患者の状態に異常をきたしたとき、あるいはレーザーの発振に異状が生じた場合には、すぐにフットペダルの踏み込みを停止するか、緊急の照射停止スイッチを押して照射を中断し、その原因を判断する。また、ポケット内での照射で、チップの破折が生じた場合には、破折片を確実に除去する。

③術後の注意

(a) 処置部位の診査

異常な出血や疼痛がないかどうか、照射部位の熱傷害の程度および過剰な損傷の有無を診査し、止血を確認する。

(b) 照射歯根面に対する追加処置

現時点では、臨床応用において、レーザー照射根面の機械的あるいは化学的追加処理を行うことは必ずしも必要ではないと考えられるが、外科手術時など明視下での処置では、歯根面の化学的追加処理を行うことは術後の創傷治癒において効果的に働くと推測される。

(c) 使用後の部品の消毒・滅菌

術後には、ハンドピースカバーおよびコンタクトチップを外し、十分に清拭し、タンパク溶解剤に浸漬し、乾燥した後、個別にパックしオートクレーブにて滅菌を行う。なお、目視によりコンタクトチップ先端部の破折等の異状がないかどうかチェックする。

(d) 装置の安全管理責任者の設置と定期点検

装置の安全管理責任者を設置し、定期的なメンテナンスを行う<sup>[64]</sup>。

## 8. おわりに

歯周ポケット内での歯周病罹患根面の処置は、従来の機械的処置では到達度や除菌効果には限界があり、治療成績は技術に大きく左右され、時間のかかる処置である。新たな手段のひとつとして、レーザーの応用が期待され、Er:YAG レーザーによる歯石除去の効果と安全性、有効性については多くのエビデンスが得られ、非外科的および外科的治療において徐々に臨床応用されている。<sup>[7]</sup> しかしながら、まだ、非外科治療において、レーザー単独療法におけるポケット内での歯石除去の達成度や治療後の長期経過、機械的治療との併用療法の効果に関して、従来の治療法との比較研究が少なく、レーザー治療の真の臨床有用性は十分に明確にされていない。今後、さらに多くの RCT による臨床研究やそれに基づくシステマティック・レビューおよびメタアナリシスが必要である。

また、実際の臨床でのレーザーの使用においては、従来の機械的治療法をまず十分に習得した上で、レーザー光の有する硬組織・軟組織に対する効果、および科学的研究結果に基づくエビデンスを正しく理解し、正しい技術を持って常に慎重な態度で応用する必要がある。

### 【参考文献】

- [1] 青木章, 水谷幸嗣, 渡辺久, 和泉雄一, 石川烈, 富士谷盛興, 千田彰, 吉田憲司, 栗原英見, 吉江弘正, 伊藤公一. ポジション・ペーパー (学会見解論文): レーザーによる歯石除去 (監修: 特定非営利活動法人日本歯周病学会, 日本レーザー歯学会). 日歯周誌 52(2): 180-190, 2010. 日レ歯誌, 21(2): 100-109, 2010.
- [2] Darveau RP, Tanner A, Page RC. The microbial challenge in periodontitis. *Periodontol*, 2000, 14: 12-32, 1997.
- [3] Cobb CM. Clinical significance of non-surgical periodontal therapy: an evidence-based perspective of scaling and root planing. *J Clin Periodontol* 29 (Suppl 2): 6-16, 2002.
- [4] Oda S, Nitta H, Setoguchi T, Izumi Y, Ishikawa I. Current concepts and advances in manual and power-driven instrumentation. *Periodontol*, 2000, 36: 45-58, 2004.
- [5] Aoki A, Sasaki K, Watanabe H, Ishikawa I. Lasers in non-surgical periodontal therapy. *Periodontology*, 2000, 36: 59-97, 2004.
- [6] Cobb CM. Lasers in periodontics: a review of the literature. *J Periodontol* 77(4): 545-564, 2006.
- [7] Ishikawa I, Aoki A, Takasaki AA, Mizutani K, Sasaki KM, Izumi Y. Application of lasers in periodontics: true innovation or myth? *Periodontol*, 2000, 50: 90-126, 2009.
- [8] 石川和弘, 福田光男, 箕浦伸吾, 村瀬元康, 村瀬尚子, 黒須直子, 杉原信久, 野口俊英. Nd:YAG レーザーによる歯肉縁下歯石除去に関する基礎的研究. 日歯保存誌 36(3): 902-909, 1993.
- [9] Arcoria CJ, Vitasek-Arcoria BA. The effects of low-level energy density Nd:YAG irradiation on calculus removal. *J Clin Laser Med Surg*, 10(5): 343-347, 1992.
- [10] Noguchi T, Sanaoka A, Fukuda M, Suzuki S, Aoki T. Combined effects of Nd:YAG laser irradiation with local antibiotic application into periodontal pockets. *J Int Acad Periodontol*, 7(1): 8-15, 2005.
- [11] Tucker D, Cobb CM, Rapley JW, Killoy WJ. Morphologic changes following *in vitro* CO<sub>2</sub> laser treatment of calculus-laden root surfaces. *Lasers Surg Med*, 18(2): 150-156, 1996.
- [12] Morlock BJ, Pippin DJ, Cobb CM, Killoy WJ, Rapley JW. The effect of Nd:YAG laser exposure on root surfaces when used as an adjunct to root planing: an *in vitro* study. *J Periodontol*, 63(7): 637-641, 1992.
- [13] Hibst R, Keller U. Experimental studies of the application of the Er:YAG laser on dental hard substances: I. Measurement of the ablation rate. *Lasers Surg Med*, 9(4): 338-344, 1989.

- [14] 茅野照雄, 落合聡, 清野和夫, 山本肇, 中島貞洋, 望月孝晏: Erbium:YAG レーザー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.
- [15] Kumazaki M, Toyoda K: Removal of hard dental tissue (cavity preparation) with the Er:YAG laser. 日レ歯誌, 6(1): 16-24, 1995.
- [16] 瀧澤雅一, 青木聡, 高瀬保晶, 石川達也, 熊崎護, 井上昌孝, 善入邦男, 藤井弁次, 長谷川紘司, 石川烈: Er:YAG レーザーの窩洞形成への応用と臨床評価. 日歯保存誌, 38(4): 1035-1047, 1995.
- [17] Matsumoto K, Nakamura Y, Mazeki K, Kimura Y. Clinical dental application of Er:YAG laser for Class V cavity preparation. J Clin Laser Med Surg, 14(3): 123-127, 1996.
- [18] Keller U, Hibst R. Effects of Er:YAG laser in caries treatment: a clinical pilot study. Lasers Surg Med, 20(1): 32-38, 1997.
- [19] 加藤純二, 粟津邦男, 篠木毅, 守谷佳世子: 一からわかるレーザー歯科治療. 医歯薬出版, 東京, 2003.
- [20] 青木章, 安藤嘉則, 渡辺久, 石川烈: レーザーの歯周病罹患根面の処置への応用. 日レ歯誌, 12(2): 109-117, 2001.
- [21] Zharikov EV, Zhecov VI, Kulevskii LA, Murina TM, Osiko VV, Prokhorov AM, Savel'ev AD, Smirnov VV, Starikov BP, Timoshechkin MI. Stimulated emission from Er<sup>3+</sup> ions in yttrium aluminum garnet crystals at  $\lambda=2.94 \mu\text{m}$  Sov J Quantum Electron, 4(8): 1039-1040, 1975.
- [22] Hale GM, Querry MR. Optical Constants of Water in the 200-nm to 200-microm Wavelength Region. Appl Opt, 12(3): 555-563, 1973.
- [23] Niemi MH: Laser-Tissue Interaction. Fundamentals and Applications. Berlin, Springer-Verlag, 1996.
- [24] Burkes EJ, Jr, Hoke J, Gomes E, Wolbarsht M: Wet versus dry enamel ablation by Er:YAG laser. J Prosthet Dent, 67(6): 847-851, 1992.
- [25] Aoki A, Miura M, Akiyama F, Nakagawa N, Tanaka J, Oda S, Watanabe H, Ishikawa I: *In vitro* evaluation of Er:YAG laser scaling of subgingival calculus in comparison with ultrasonic scaling. J Periodont Res, 35(5): 266-277, 2000.
- [26] Aoki A, Ishikawa I, Yamada T, Otsuki M, Watanabe H, Tagami J, Ando Y, Yamamoto H. Comparison between Er:YAG laser and conventional technique for root caries treatment *in vitro*. J Dent Res, 77(6): 1404-1414., 1998.
- [27] Fujii T, Baehni PC, Kawai O, Kawakami T, Matsuda K, Kowashi Y: Scanning electron microscopic study of the effects of Er:YAG laser on root cementum. J Periodontol, 69(11): 1283-1290, 1998.
- [28] Koort HJ, Frentzen M: Laser effects on dental hard tissue. In: Miserendino LJ, Pick RM, eds. Lasers in Dentistry, vol Chicago, Quintessence Publishing Co, Inc., 57-70; 1995.
- [29] Seka W, Featherstone JDB, Fried D, Visuri SR, Walsh JT: Laser ablation of dental hard tissue: from explosive ablation to plasma-mediated ablation. Proc SPIE, 2672: 144-158, 1996.
- [30] Ting CC, Fukuda M, Watanabe T, Aoki T, Sanaoka A, Noguchi T: Effects of Er,Cr:YSGG laser irradiation on the root surface: morphologic analysis and efficiency of calculus removal. J Periodontol, 78(11): 2156-2164, 2007.
- [31] Aoki A, Ando Y, Watanabe H, Ishikawa I: *In vitro* studies on laser scaling of subgingival calculus with an erbium:YAG laser. J Periodontol, 65 (12): 1097-1106, 1994.
- [32] Folwaczny M, Mehl A, Haffner C, Benz C, Hickel R: Root substance removal with Er:YAG laser radiation at different parameters using a new delivery system. J Periodontol, 71(2): 147-155, 2000.
- [33] Frentzen M, Braun A, Aniol D: Er:YAG laser scaling of diseased root surfaces. J Periodontol, 73(5):



- 524-530, 2002.
- [34] Schwarz F, Sculean A, Berakdar M, Szathmari L, Georg T, Becker J: *In vivo* and *in vitro* effects of an Er:YAG laser, a GaAlAs diode laser, and scaling and root planing on periodontally diseased root surfaces: a comparative histologic study. *Lasers Surg Med*, 32(5): 359-366, 2003.
- [35] 青木章, 石川烈: Er:YAG レーザーの歯石除去への応用. *歯科ジャーナル*, 39(3): 279-287, 1994.
- [36] Folwaczny M, Thiele L, Mehl A, Hickel R: The effect of working tip angulation on root substance removal using Er:YAG laser radiation: an *in vitro* study. *J Clin Periodontol*, 28(3): 220-226, 2001.
- [37] Eberhard J, Ehlers H, Falk W, Acil Y, Albers HK, Jepsen S: Efficacy of subgingival calculus removal with Er:YAG laser compared to mechanical debridement: an *in situ* study. *J Clin Periodontol*, 30(6): 511-518, 2003.
- [38] Israel M, Cobb CM, Rossmann JA, Spencer P: The effects of CO<sub>2</sub>, Nd:YAG and Er:YAG lasers with and without surface coolant on tooth root surfaces. An *in vitro* study. *J Clin Periodontol*, 24(9): 595-602, 1997.
- [39] Sasaki KM, Aoki A, Masuno H, Ichinose S, Yamada S, Ishikawa I: Compositional analysis of root cementum and dentin after Er:YAG laser irradiation compared with CO<sub>2</sub> lased and intact roots using Fourier transformed infrared spectroscopy. *J Periodont Res*, 37(1): 50-59, 2002.
- [40] Spencer P, Cobb CM, McCollum MH, Wieliczka DM: The effects of CO<sub>2</sub> laser and Nd:YAG with and without water/air surface cooling on tooth root structure: correlation between FTIR spectroscopy and histology. *J Periodont Res*, 31(7): 453-462, 1996.
- [41] Ando Y, Aoki A, Watanabe H, Ishikawa I: Bactericidal effect of erbium YAG laser on periodontopathic bacteria. *Lasers Surg Med*, 19(2): 190-200, 1996.
- [42] Yamaguchi H, Kobayashi K, Osada R, Sakuraba E, Nomura T, Arai T, Nakamura J: Effects of irradiation of an erbium:YAG laser on root surfaces. *J Periodontol*, 68(12): 1151-1155, 1997.
- [43] 杉大介, 福田光男, 箕浦伸吾, 山田泰生, 多湖準, 三輪晃資, 野口隆, 中島一総, 祖父江尊範, 野口俊英: Er:YAG レーザー照射による歯石除去後のセメント質内エンドトキシン量および表面硬度に関する研究. *日歯保存誌*, 41(6): 1009-1017, 1998.
- [44] Akiyama F, Aoki A, Miura-Uchiyama M, Sasaki KM, Ichinose S, Umeda M, Ishikawa I, Izumi Y: *In vitro* studies of the ablation mechanism of periodontopathic bacteria and decontamination effect on periodontally diseased root surfaces by erbium:yttrium-aluminum-garnet laser. *Lasers Med Sci*, 2010 March (E-pub), DOI 10.1007/s10103-010-0763-3 (in press).
- [45] Sekine Y, Ebihara A, Takeda A, Suda H: Pulpal reaction in dog following cavity preparation by Er:YAG laser. *Proc SPIE*, 1984: 159-167, 1995.
- [46] Sonntag KD, Klitzman B, Burkes EJ, Hoke J, Moshonov J: Pulpal response to cavity preparation with the Er:YAG and Mark III free electron lasers. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 81(6): 695-702, 1996.
- [47] Mizutani K, Aoki A, Takasaki AA, Kinoshita A, Hayashi C, Oda S, Ishikawa I: Periodontal tissue healing following flap surgery using an Er:YAG laser in dogs. *Lasers Surg Med*, 38(4): 314-324, 2006.
- [48] Schwarz F, Aoki A, Sculean A, Georg T, Scherbaum W, Becker J: *In vivo* effects of an Er:YAG laser, an ultrasonic system and scaling and root planing on the biocompatibility of periodontally diseased root surfaces in cultures of human PDL fibroblasts. *Lasers Surg Med*, 33(2): 140-147, 2003.
- [49] Feist IS, De Micheli G, Carneiro SR, Eduardo CP, Miyagi S, Marques MM: Adhesion and growth of cultured human gingival fibroblasts on periodontally involved root surfaces treated by Er:YAG laser.

- J Periodontol, 74(9): 1368-1375, 2003.
- [50] Belal MH, Watanabe H, Ichinose S, Ishikawa I: Effect of Er:YAG laser combined with rhPDGF-BB on attachment of cultured fibroblasts to periodontally involved root surfaces. J Periodontol, 78(7): 1329-1341, 2007.
- [51] Maruyama H, Aoki A, Sasaki KM, Takasaki AA, Iwasaki K, Ichinose S, Oda S, Ishikawa I, Izumi Y: The effect of chemical and/or mechanical conditioning on the Er:YAG laser-treated root cementum: analysis of surface morphology and periodontal ligament fibroblast attachment. Lasers Surg Med, 40(3): 211-222, 2008.
- [52] Schwarz F, Jepsen S, Herten M, Aoki A, Sculean A, Becker J: Immunohistochemical characterization of periodontal wound healing following nonsurgical treatment with fluorescence controlled Er:YAG laser radiation in dogs. Lasers Surg Med, 39(5): 428-440, 2007.
- [53] Schwarz F, Sculean A, Georg T, Reich E: Periodontal treatment with an Er:YAG laser compared to scaling and root planing. A controlled clinical study. J Periodontol, 72(3): 361-367, 2001.
- [54] Schwarz F, Sculean A, Berakdar M, Georg T, Reich E, Becker J: Periodontal treatment with an Er:YAG laser or scaling and root planing. A 2-year follow-up split-mouth study. J Periodontol, 74(5): 590-596, 2003.
- [55] Schwarz F, Sculean A, Berakdar M, Georg T, Reich E, Becker J: Clinical evaluation of an Er:YAG laser combined with scaling and root planing for non-surgical periodontal treatment. A controlled, prospective clinical study. J Clin Periodontol, 30(1): 26-34, 2003.
- [56] Sculean A, Schwarz F, Berakdar M, Romanos GE, Arweiler NB, Becker J: Periodontal treatment with an Er:YAG laser compared to ultrasonic instrumentation: a pilot study. J Periodontol, 75(7): 966-973, 2004.
- [57] Crespi R, Cappare P, Toscanelli I, Gherlone E, Romanos GE: Effects of Er:YAG laser compared to ultrasonic scaler in periodontal treatment: a 2-year follow-up split-mouth clinical study. J Periodontol, 78(7): 1195-200, 2007.
- [58] Tomasi C, Schander K, Dahlen G, Wennstrom JL: Short-term clinical and microbiologic effects of pocket debridement with an Er:YAG laser during periodontal maintenance. J Periodontol, 77(1): 111-118, 2006.
- [59] Derdilopoulou FV, Nonhoff J, Neumann K, Kielbassa AM: Microbiological findings after periodontal therapy using curettes, Er:YAG laser, sonic, and ultrasonic scalers. J Clin Periodontol, 34(7): 588-598, 2007.
- [60] Lopes BM, Marcantonio RA, Thompson GM, Neves LH, Theodoro LH: Short-term clinical and immunologic effects of scaling and root planing with Er:YAG laser in chronic periodontitis. J Periodontol, 79(7): 1158-1167, 2008.
- [61] Sculean A, Schwarz F, Berakdar M, Windisch P, Arweiler NB, Romanos GE: Healing of intrabony defects following surgical treatment with or without an Er:YAG laser. J Clin Periodontol, 31(8): 604-608, 2004.
- [62] Gaspirc B, Skaleric U: Clinical evaluation of periodontal surgical treatment with an Er:YAG laser: 5-year results. J Periodontol, 78(10): 1864-1871, 2007.
- [63] AAP. The Research, Science and Therapy Committee of the American Academy of Periodontology: Lasers in periodontics (Academy report), authored by Cohen RE and Ammons WF, revised by Rossman JA. J Periodontol, 73(10): 1231-1239, 2002.
- [64] 永井茂之：歯科用レーザーの安全管理とは？. 日レ歯誌, 19(3): 145-150, 2008.