歯周治療におけるレーザーの Needs と Seeds

—Er:YAG レーザーの基礎研究と臨床応用—

青 木 章 水 谷 幸 嗣 高崎アリストオ淳志
渡 辺 久 石 川 烈

東京医科歯科大学大学院・医歯学総合研究科・生体硬組織再生学講座・歯周病学分野
(主任：石川 烈教授)

(受付：平成 17 年 7 月 7 日，受理：平成 17 年 8 月 22 日)

Needs and Seeds for Laser Application in Periodontal Therapy

—Basic Research and Clinical Application of Er:YAG Laser—

Akira AOKI, Koji MIZUTANI, Aristeo Atsushi TAKASAKI,

Hisashi WATANABE and Isao ISHIKAWA

Section of Periodontology, Department of Hard Tissue Engineering,

Graduate School, Tokyo Medical and Dental University

(Chief: Prof. Isao ISHIKAWA)

(Received: July 7, Accepted for Publication: August 22, 2005)

Abstract: Recently, the needs and seeds for laser application in periodontal therapy have been increasing. Due to various advantageous characteristics such as ablation or vaporization, hemostasis, and bactericidal effect, lasers are effective for the treatment of periodontitis, which is a chronic inflammatory disease caused by bacterial infection. Previous laser systems had limited potential for use in soft tissue surgery. However, recent development of the Er:YAG laser has increased the application of lasers in periodontal therapy. As it is applicable to both soft and hard tissues with extremely low thermal side effects, the Er:YAG laser has become a promising laser in periodontics and laser treatment provides an alternative or adjunctive therapy to conventional mechanical instrumentation in periodontal therapy. In this paper, the application of Er:YAG laser for periodontal therapy such as gingival tissue management including esthetic treatment, periodontal pocket treatment including calculus removal, periodontal surgery, and implant therapy are discussed, based on scientific evidence from currently available basic and clinical studies.

(J. Jpn. Soc. Laser Dent. 16 : 116 ~ 122, 2005 Reprint request to Dr. AOKI)

Key words = Er:YAG laser, Periodontitis, Periodontal therapy

キーワード= Er:YAG レーザー，歯周炎，歯周治療

1. 歯周治療におけるレーザーの Needs と Seeds

レーザー治療は，様々な優れた効果を有しているため，近年，歯周治療において有用な手段の一つとなっている。術者側の利点としては，組織の容易な蒸散や止血，殺菌効果があり，患者側の利点としては，術中の騒音や振動の軽減，術中術後の疼痛の軽減効果があり，これらは，しばし

ば従来の治療成績を向上させることにもつながっている。

新しい治療法は，基礎研究の成果が種 (Seeds) となり，臨床における必要性や要求度 (Needs) の中で発展し確立していくものであるが，歯周治療におけるレーザー応用の Needs としては，従来の治療よりも術式や手技が容易で確実にすること，患者の術中術後の状態が快適になること，歯周ポケットの深さや組織再生量などの治療成績が向

上すること、今まで改善しなかった病変部が治癒する、あるいは不可能であった治療が可能になること、などが求められ期待されている。

一方、具体的な Seeds (種) としては、当教室では主に Er:YAG レーザーの応用を中心に研究を行っているが、Er:YAG レーザーにおいて明らかにされている効果や技術としては、水への高い吸収性、歯肉組織・歯の硬組織・骨組織の正確で安全な蒸散能力、非常に軽微な熱傷害、注水による効果的な発熱抑制、軟組織の適度な止血効果、歯石の蒸散効果、殺菌および根面の無毒化、知覚過敏の軽減や疼痛のコントロール、低出力での生物学的効果、各種臨床応用における有効性と安全性、臨床用レーザー装置および各種チップの開発などの様々なエビデンスが挙げられる。これらが基になり、各種の治療法が徐々に発展してきている。審美治療を含む歯肉処置、歯周ポケット治療、歯周外科治療への応用などの具体的な Needs の一部は実現化しつつあり、今後のさらなる展開が期待されるところである。

2. 基礎研究の成果や技術と臨床応用

1) Er:YAG レーザーの特性と組織の蒸散メカニズム

Er:YAG レーザーは発振波長が $2.94\mu\text{m}$ のパルス波で、水への吸収性が非常に高いため¹⁾(図1)、軟組織だけでなく硬組織の蒸散能力に優れている。水分を含む生体組織の最表層でよく吸収されるため、周囲組織への高エネルギーの透過性は最小で、熱傷害も非常に少ない。硬組織処置の場合にも、注水を併用することにより発熱を効果的に抑制することができる。パルス型レーザーのため、組織の蒸散に伴い間欠的な粘撥音が生じ、特に注水を併用すると常に音を発するが、サクシジョンの吸引音によりある程度消音され、患者の受ける振動や騒音は比較的軽微である。

蒸散のメカニズムは、光エネルギーがまず生体組織中の水および有機成分に選択的に吸収され、熱作用により組織中の水および有機成分が蒸散する効果 (thermal effect) 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が生じ、その力学的作用によって機械的に組織の崩壊が生じるメカニズム (mechanical effect) が働くと考えられ、熱力学的効果 (thermomechanical effect) あるいは光力学的効果 (photomechanical effect) と呼ばれている²⁾。

従来の高出力レーザーは硬組織に対する熱傷害により、歯周治療においてその応用は軟組織処置に限られてきたが、Er:YAG レーザーの登場により、レーザーの応用の可能性がこれまでの軟組織処置中心から歯周病罹患根面や歯槽骨などの硬組織処置へ拡大し、Er:YAG レーザーは多様な応用が可能な、有望なレーザーとなりつつある²⁻⁵⁾。

また、基本的に表面吸収型のレーザーであることから、

図1 水の光吸収曲線。Hale と Querry のデータ¹⁾による。横軸は波長 (nm), 縦軸は吸収係数を示す。Ar (488nm), Diode (810nm), Nd:YAG (1,064nm), Er,Cr:YSGG (2,780nm), Er:YAG (2,940nm), および CO₂ (10,600nm)。

歯肉の治療において直下の骨膜や歯槽骨に対して不慮の重篤な熱変性を起こすことがないため、臨床上非常に安全なレーザーで、他のレーザーで散見される深部組織への予期せぬ熱傷害を常に懸念する必要はなく、安心して用いることができる。これまで当教室では、レーザー治療後の術後の異常な疼痛や潰瘍形成、歯槽骨の壊死などの治療遅延は現在まで全く経験されていない⁶⁻⁸⁾。経験的には、軟組織処置においては従来の手段より術後疼痛が少なく、早期に良好な治癒が得られる場合が多い。

2) 臨床用装置と各種コンタクトチップの開発

Er:YAG レーザーは、我が国において1995年にう蝕治療や軟組織処置、歯石除去について、2003年に歯周ポケットへの照射やポケット搔爬などについて厚生労働省の認可を受けている。アメリカではFDAが1997年にう蝕治療、1999年に口腔軟組織処置および歯肉溝のディブライドメント、2004年に骨外科処置への使用について認可を与えており、徐々にその応用範囲は広がりを見せている。

現在、歯科領域において国内で認可されているEr:YAG レーザー装置には、認可順にErwin™ (アーウィン; モリタ・HOYA), Dentlite™ (デントライト; HOYA フォトニクス), Elfine 400™ (エルファイン 400; オサダ), Erwin AdvErl™ (アーウィン・アドベール; モリタ) の4機種があり、ストレート、湾曲型、テーパー型、チゼル型など、135-800 μm の各種の直径を有する様々なコンタクトチップや、ストレートおよびコントラ型のハンドピースが開発されている。最大繰り返しパルス数は10~25 Hz (pps) である。アメリカではすでに50Hzの機種が市場に出ている。ヨーロッパでは、KEY レーザー™ (KaVo, ドイツ) が代表的で、ポケット治療用には、コントラ型に装着したチゼルチップを採用している。

3) 軟組織処置と審美治療への応用

Er:YAG レーザーは、多量の軟組織の蒸散にはやや効率が劣るが、コンタクトプローブを用いることにより正確で繊細な照射が可能であり、歯周領域では歯肉の蒸散・形態修正や小帯切除、色素沈着の除去などの minor surgery に用いることができる^{6,7)}。Er:YAG レーザーは、組織蒸散時の発熱が非常に少ないため、蒸散後の組織の熱変性が少ない。軟組織の場合、熱変性層の厚さは CO₂ レーザーが 0.1 ~ 0.3mm であるのに対し、Er:YAG レーザーでは基本的に 10 ~ 50 μ m 程度である。その結果、他のレーザーに比べて止血効果が弱くなり、舌などの易出血性の組織の切除には適していない。

しかしながら、この非常に少ない組織変性と適度な出血は、逆に、術後の早期の創傷治癒をもたらす。とくに蒸散により組織欠損部位が生じた場合、血餅形成が確実となるため、良好な形態回復が期待される。従って、審美性にかかわる辺縁歯肉付近の処置において、Er:YAG レーザー照射は術後の歯肉退縮や予期せぬ形態不良を起こす心配が非常に少ないという利点を有している。

さらに低出力レベルでは、細胞の増殖効果が認められることから^{9,10)}、高出力での処置中に周囲組織へ浸透拡散する低出力エネルギー、いわゆる LLLT (low level laser therapy) 効果による創傷治癒促進効果も期待される。

ビーグル犬を用いた動物実験において、30Hz の Er:YAG レーザーによる歯肉切除では、十分な止血効果が得られ、従来の替え刃メスと組織学的にも同等な治癒経過が認められている¹¹⁾。また、メラニン除去においては、注水下での Er:YAG レーザーの斜め接触照射は、歯肉のメラニン上皮を効果的に除去することができ、特に注水により術野が明瞭になるため、その処置は安全で正確である。この場合、組織学的には、照射面の熱凝固層は厚さ 5-25 μ m とわずかであり、術後の創傷治癒も機械的除去面とはほぼ同じで、4 日後にはすでに上皮化が認められ、早期の創傷治癒が得られることがわかっている¹¹⁾。

従って、Er:YAG レーザーは歯肉のメラニン色素や歯の補綴治療後にみられる埋入金属削片の除去においても適応が高く、正確で安全な処置が可能である^{3,12,13)}。さらに、従来の高出力レーザーと異なり、手術用顕微鏡の併用による注水下での軟組織の microsurgery は非常に有用で、軟組織をより繊細に扱うことができるため、従来の機械的処置よりも術式が容易となり、良好な結果が得られている。

4) レーザーによる殺菌・無毒化効果

歯周治療においては、歯周ポケット内からの歯周病原性細菌の徹底的な除去が治療の成否を決める要因である。レーザーの特徴のひとつに殺菌効果があるが、Er:YAG レーザーにおいても非常に低出力で歯周病原性細菌に対する殺菌効果が認められている¹⁴⁾。また、細菌壁由来のエ

ンドトキシンであるリポ多糖 (LPS) などの毒性物質の除去効果も認められるため¹⁵⁾、歯周病罹患根面の処置においては細菌や歯石の除去効果に加えて、LPS などに汚染された根面の無毒化に有利となる。

5) 非外科的歯周ポケット治療への応用

Er:YAG レーザーは歯根面に炭化や融解などの重篤な熱変性を生じることなく歯石を効果的に蒸散することが可能で^{16,17)}、また歯周病罹患根面への臨床応用における有効性と安全性も確認されている⁶⁾。レーザーに期待されるのは、歯石除去効果、根面およびポケット内の殺菌効果、根面の無毒化に加え、重篤な歯周ポケットにおいては、ポケット内上皮と慢性炎症巣の除去、炎症状態の急速な改善および創傷治癒促進効果である。しかし、後者 2 点はまだ科学的には十分立証されていない。

また、従来の歯周治療のコンセプトでは、ポケット内壁の軟組織の積極的なディブライドメントについては効果が乏しいと報告され、推奨されていない。しかしながら、重度の歯周ポケットにおいては、軟組織壁の高度な慢性炎症状態と骨欠損部の病的肉芽組織の存在を考えると、根面だけではなく軟組織壁のディブライドメントも含めた包括的な治療がさらに効果的と考えられる。レーザーはそれらの処置を可能にし、さらには付加的効果として周囲細胞への刺激 (biostimulation) による細胞レベルでの炎症状態の改善と治癒促進も期待できるかもしれない。

臨床応用においては、歯石の探知と選択的除去および照射根面のわずかな変化が課題である。基本的に歯石の選択的除去は困難であるため、出力や照射法などの条件を正しく設定して照射する必要がある。また、注水により根面の炭化は生ぜず新たな毒性物質の産生はないが¹⁸⁾、照射表面は電子顕微鏡レベルで粗造化し数ミクロンの熱変化層を残すので¹⁷⁾、これが軟組織の付着を阻害するか否かについて詳細な組織学的検索が必要である。最近の研究で、外科治療での応用後の創傷治癒過程においては、基本的にこの変化層は吸収され消失することが判明しているが、部分的な残存も認められている¹⁹⁾。今後さらに非外科的治療への応用後の治癒状態の組織学的検索も必要である。後述するようにレーザー治療後の良好な治癒は臨床研究により報告されているが、理想的には、レーザー処置後に軽微な酸処理や軽いルートプレーニングによる除去が必要であるかもしれない²⁰⁾。

しかしながら、Er:YAG レーザー処置面にはスミア層がなく^{17,21)}、滅菌効果を伴い¹⁴⁾、それに加えて根面の無毒化¹⁵⁾、さらには治癒促進効果も期待されるため、レーザー治療は従来の機械的方法よりも歯周組織の付着や治癒に効果的となる可能性もある。歯周病罹患根面を用いた細胞付着の実験では、適切な条件下ではレーザー処置面の方が従来のキュレット処置よりも細胞の付着が有意に多かつ

たという結果も報告されている^{22,23)}。

近年、ドイツの Schwarz らは、Er:YAG レーザーの歯周ポケット治療への応用に関する臨床比較研究を行い、興味深いデータを示している²⁴⁾。彼らは、チゼルタイプのコンタクトチップを用いて歯周ポケットへの Er:YAG レーザーの臨床応用を行い、従来のキュレットによるスケーリング・ルートプレーニングと Er:YAG レーザー治療を比較し、6ヶ月後において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においてレーザー処置の方が有意に高い改善を示したことを報告した。さらに彼らは、その結果が2年後も維持されたこと²⁵⁾、およびレーザー処置後に付加的にキュレットによる機械的なスケーリング・ルートプレーニングを行っても結果に差はなかったことを報告している²⁶⁾。

このように、Er:YAG レーザーは歯周ポケット治療の新しい手段の一つとなりうる可能性を有している^{2,27)} (図2)。しかしながら、in vivo における歯石除去について、Schwarz らは、歯石は選択的に除去され根面の損傷は少ないと報告しているが²⁸⁾、Eberhard らは、キュレット処置よりセメント質は確実に保存されるのでメンテナンス治療における Er:YAG レーザーの有用性を示唆しているものの、歯石の除去効果はキュレット処置より劣ることを報告している²⁹⁾。従って、in vivo における歯石除去効果および根面の変化と組織付着についてはまだ十分に明らかになっておらず、今後の詳細な研究が必要である。

6) 歯周外科治療への応用

歯肉剥離搔爬術においては、歯周病罹患根面の処置をはじめとして、より効率的で確実な不良肉芽組織の除去や、骨形態の容易な修正、術野の殺菌が可能で、かつ歯周組織の再生を促進するような手段の開発が望まれているが、Er:YAG レーザーはこれらの処置の有効な手段の一つになるかもしれない。

①レーザーによる歯槽骨の切除・整形

術後の良好な歯肉形態を得るため、一般的に、バーなどの回転式切削器具やチゼルやファイルなどの手用器具が骨形態の修正のために用いられているが、患者へ与える振動などのストレスが大きく、臼歯部においては器具の到達性に難点があり、またバー処置では剥離翻転している歯肉弁を巻き込む危険がある。

Er:YAG レーザーは骨組織の効果的な切削が可能である。レーザー処置では、炭化や肉眼的に明かな凝固変性などは生じない³⁰⁻³²⁾。SEM 像では、表面は鱗片状を呈しており、骨小腔あるいは骨細管と思われる多数の微細な小孔の開口が認められる^{31,33)}。組織所見では、注水下でのレーザー照射では表層にわずかな変化層が認められるが毒性はなく^{31,34)}、新生骨はこの変化層に直接添加し、術後の新生骨の形成に悪影響を与えることはない。逆に新生骨形

成が速く、形成状態も良好である傾向も認められている^{32,33)}。照射面の変化層は、いったん新生骨の添加により皮質骨の中に包埋されてしまった場合には、長期に残存するため接合部の機械的強度が問題となるが³³⁾、歯槽骨のような海綿骨の場合にはこの変化層はリモデリングにより早期に吸収され消失するので問題は生じない。

骨整形への臨床応用において有効性および安全性は確認されている⁸⁾。骨除去効率はバー切削よりはやや劣るが、臼歯部においても操作性は非常に良好で、歯槽骨は効果的に蒸散し除去された。患者の感じる振動や騒音などのストレスは非常に少なく、処置面には明らかな骨組織の炭化や壊死などは認められず、術後の治療経過も良好であった。このように、歯周外科においては、すでに骨外科処置への応用が可能となりつつある³⁾ (図3)。

②レーザーによる骨欠損部の病的肉芽組織の搔爬

Er:YAG レーザーは骨組織に対して安全なレーザーであるため、骨欠損部の搔爬への応用も可能である。教室では、ビーグル犬に実験的歯周炎を惹起し Er:YAG レーザーを用いて、肉芽組織の搔爬が効果的であったことを報告した¹⁹⁾。組織学的にも、周囲組織への熱傷害はなく、興味深いことに術後の新生骨形成は同等以上であったことから、レーザー治療による骨再生の促進効果も期待されている¹⁹⁾。

臨床応用はすでに行われており、Sculean らが肉芽組織除去への臨床評価を行い、安全性には問題はなく、治療成績は手用器具と同等以上であったことを報告している³⁵⁾。われわれも、現在、歯肉剥離搔爬術への Er:YAG レーザーの応用を評価中であり、30Hz で不良肉芽組織の除去が効果的に行えることおよび良好な術後経過を確認している³⁾ (図4)。

このように、Er:YAG レーザーは歯周外科治療においても、従来の機械的手段の補助あるいは代替手段となることが徐々に明らかにされつつある。

7) インプラント治療への応用

歯科インプラントにも天然歯と同様に周囲の炎症 (インプラント周囲炎) を生じることがある。チタン表面は非常に柔らかく損傷が容易に生じるので金属器具の使用は禁忌であり、従来はあまり有用ではないプラスチックスケーラーしか治療手段がなかった。

Er:YAG レーザーの場合、高出力であればチタンの融解を起こすが、低出力であればチタンを蒸散せず、チタン表面の歯石を含む沈着物を選択的に除去することができる³⁶⁾。また照射面は細胞付着に悪影響を与えないことも明らかにされている³⁷⁾。教室では、インプラント周囲炎に対する外科治療への応用について動物実験での評価を行っている。臨床研究も報告されつつあり³⁸⁾、従来臨床で多用されているインプラント周囲の軟組織の処置だけで

図 2 Er:YAG レーザーの歯周ポケット治療への応用

(a) 上顎左側犬歯頰側中央には歯肉の腫脹・増殖を伴う 5 mm の歯周ポケットが認められた。(b) このポケットは手用キュレットや超音波スケーラーによるディブライドメントでは治癒しなかったため、レーザーによる歯肉切除と歯周ポケット搔爬を併用した。まず、局所麻酔下で先端出力約 30mJ/pulse, 10Hz で約 2 mm の幅で歯肉切除を行った。ほとんど出血はなく歯肉は容易に切除された。次に、先端出力約 30-40mJ/pulse で残存ポケット内壁全体をレーザーで搔爬し慢性炎症性の病的肉芽組織を除去した。肉芽組織は効果的に除去され、出血はわずかで明かな熱傷害は認められなかった。(c) 1 週後術後経過は良好で安定し、最終的に歯周ポケットは深さ 1 mm に改善し再付着が得られた。(Photographs from Aoki A et al. Lasers in non-surgical periodontal therapy. Periodontology 2000 Vol.36: 59-97, 2004; with permission. Journal of Periodontal Research © copyright (2004) Blackwell Munksgaard, Inc.)

図 3 フラップ手術における歯槽骨整形への応用

(a) 歯肉剥離後に限局的な骨組織の隆起(外骨症)が認められた。(b) 先端出力 100mJ/pulse, 10Hz, 生理食塩水の注水下で Er:YAG レーザー照射を行ない、骨組織は軽度の捻撥音とともに効果的に蒸散し、突出部は切離された。(c) 歯槽骨形態は改善され、照射面には明かな骨組織の炭化や凝固などの熱傷害は認められず、術後の治癒経過も良好であった。(Photographs from Ishikawa I et al. Potential applications of Erbium:YAG Laser in Periodontics. J Periodont Res; 2004; 275-285; with permission. Journal of Periodontal Research © copyright (2004) Blackwell Munksgaard, Inc.)

図 4 フラップ手術における病的肉芽組織の除去への応用

(a) 上顎第一大臼歯の頰側近心根周囲に垂直正の骨吸収による病的肉芽組織が認められた。(b) 同部の肉芽組織の搔爬および根面のディブライドメントを Er:YAG レーザー照射により行った。先端出力 100mJ/pulse, 10Hz, 生理食塩水の注水下で照射を行ない、根面の残存歯石や骨欠損部の肉芽組織は効果的に蒸散し、除去された。歯根および骨の照射面には明かな炭化や凝固などの熱傷害は認められず、術後の治癒経過も良好で、同部位の歯周ポケットは 6 mm から 2 mm に減少した。(Photographs from Ishikawa I et al. Potential applications of Erbium:YAG Laser in Periodontics. J Periodont Res; 2004; 275-285; with permission. Journal of Periodontal Research © copyright (2004) Blackwell Munksgaard, Inc.)

はなく、インプラントのメンテナンス治療やインプラント周囲炎の非外科的・外科的治療においても、Er:YAG レーザーは有効な手段の一つとなりつつある^{2,3)}。

3. 今後の課題と展望

レーザーによる治療は、容易な組織の除去効果だけでなく、術中に従来の機械的処置では得られない止血、殺菌、

無毒化などの効果を伴い、さらには術後の炎症・疼痛の軽減、創傷治癒促進、再生の促進などの付加的効果を有することが明らかにされつつあるため、細菌感染による慢性炎症性疾患である歯周治療において有効な手段となるであろう。

Er:YAG レーザーは、近い将来、ハンドスケーラーや超音波スケーラーなどの機械的器具の補助あるいは代替手段の一つとなり、歯周治療において光エネルギーを用いた新しい臨床術式として従来の治療を変革していくかもしれない。今後さらなる基礎研究や臨床研究によるEBMの確立が必要である。装置に関しては、各種コンタクトチップの改良開発、装置の性能の向上および小型化・低価格化が望まれる。

また、今までは、高出力レベルでの応用の可能性や有効性および安全性が研究の主体であったが、今後は、低出力レベルでのレーザーの有する抗炎症作用、治癒促進作用の効果について基礎的臨床的研究が必要であり、また、歯周ポケット治療や組織再生治療の成績の向上のために適した照射条件や照射法などについて検討していく必要があるであろう。

4. おわりに

近年、歯周治療において、レーザーが臨床で多用されるようになってきているが、現時点ではどのレーザーも、まだ従来の機械的治療法の完全な代替手段ではない。まずは歯周治療における従来の機械的治療法に対する十分な理解と確実な技術に基づいた臨床手技が必要であり、それらを基盤として、レーザーの使用目的、期待される結果と限界および安全性を十分に熟知し、レーザーを効果的に使用したいものである。レーザー治療にもエビデンスが求められる時代になっている。

レーザーの研究は日進月歩の状態にあり、研究者は革新的な治療法の芽となる Seeds を提供しつつ、日常臨床の Needs に役立つエビデンスを正しく提供あるいは伝達していく義務がある。臨床家はエビデンスを熟知したうえでレーザー治療に従事し、また倫理面に留意しながら新しいアイデアにトライして応用範囲を拡大し、臨床手技や術式および安全性を確立し、治療成績を明らかにしていく役割があるであろう。

本論文は、平成16年12月11日に開催された第16回日本レーザー歯学会でのシンポジウム「レーザー歯科治療最前線—基礎から臨床へ—」における講演をもとに作成した。

謝 辞

研究にあたり Er:YAG レーザー装置をご提供いただいた、HOYA フォトニクス株式会社および株式会社モリタ製作所に感謝の意を表します。

文 献

- 1) Hale, G.M. and Querry, M.R.: Optical constants of Water in the 200-nm to 200- μ m wavelength region. *Appl Optics*, **12** : 555-563, 1973.
- 2) Aoki, A., Sasaki, K., Watanabe, H. and Ishikawa, I.: Lasers in non-surgical periodontal therapy. *Periodontology* 2000, **36** : 59-97, 2004.
- 3) Ishikawa, I., Aoki, A. and Takasaki, A.: Potential applications of erbium:YAG laser in periodontics. *J Periodont Res*, **39** : 275-285, 2004.
- 4) 石川 烈, 青木 章, 水谷幸嗣, 渡辺 久: 歯周治療における Er:YAG レーザー応用の現状. *日本歯科評論*, **65** : 77-86, 2005.
- 5) 青木 章, 石川 烈: 歯周治療におけるレーザーの応用. *日レ歯誌*, **25** : 291-299, 2005.
- 6) Watanabe, H., Ishikawa, I., Suzuki, M. and Hasegawa, K.: Clinical assessments of the erbium:YAG laser for soft tissue surgery and scaling. *J Clin Laser Med Surg*, **14** : 67-75, 1996.
- 7) Aoki, A., Watanabe, H., Namiki, N., Takiguchi, T., Miyazawa, Y., Suzuki, M., Hasegawa, K. and Ishikawa, I.: Periodontal soft tissue management with a high pulse rate Er:YAG laser, in *Lasers in Dentistry - Revolution of Dental Treatment in the New Millennium*, Ishikawa I, Frame JW, Aoki A, Eds., Elsevier Science: Amsterdam. p.367-369, 2003.
- 8) Aoki, A., Watanabe, H., Akiyama, F., Shoji, S., Horiuchi, H. and Ishikawa, I.: Clinical evaluation of periodontal osseous surgery with Er:YAG laser. *J Acad Laser Dent*, **12** : 13, 2004.
- 9) Pourzarandian, A., Watanabe, H., Ruwanpura, S.M., Aoki, A. and Ishikawa, I.: Effect of low-level Er:YAG laser irradiation on cultured human gingival fibroblasts. *J Periodontol*, **76** : 187-193, 2005.
- 10) Pourzarandian, A., Watanabe, H., Ruwanpura, S.M., Aoki, A., Noguchi, K. and Ishikawa, I.: Er:YAG laser irradiation increases prostaglandin E production via the induction of cyclooxygenase-2 mRNA in human gingival fibroblasts. *J Periodontol Res*, **40** : 182-186, 2005.
- 11) 三浦真子, 青木 章, 亀山文彦, 中川尚彦, 江口哲也, 大槻昌幸, 渡辺 久, 田上 順, 石川 烈: 繰り返しパルス数 30pps を用いた Er:YAG レーザー照射による軟組織処置の組織評価—ビーグル犬における歯肉切除およびメラニン除去—. *日歯保存誌*, **42** (秋季特別), p.83 (抄録), 1999.
- 12) 石井さやか, 青木 章, 川嶋庸子, 渡辺 久, 石川 烈: Er:YAG レーザーの歯肉メラニン除去への応用. *日レ歯誌*, **13** : 89-96, 2002.
- 13) 青木 章, 石川 烈: Er:YAG レーザーによるメラニン除去. *日歯審美誌*, **16** : 143-148, 2003.
- 14) Ando, Y., Aoki, A., Watanabe, H. and Ishikawa, I.: Bactericidal effect of erbium YAG laser on periodontopathic bacteria. *Lasers Surg Med*, **19** : 190-200, 1996.
- 15) Yamaguchi, H., Kobayashi, K., Osada, R., Sakuraba, E., Nomura, T., Arai, T. and Nakamura, J.: Effects of irradiation of an erbium:YAG laser on root surfaces. *J Periodontol*, **68** : 1151-1155, 1997.
- 16) Aoki, A., Ando, Y., Watanabe, H. and Ishikawa, I.: In vitro studies on laser scaling of subgingival calculus with an erbium:YAG laser. *J Periodontol*, **65** : 1097-1106, 1994.
- 17) Aoki, A., Miura, M., Akiyama, F., Nakagawa, N., Tanaka, J., Oda, S., Watanabe, H. and Ishikawa, I.: In vitro evaluation of Er:YAG laser scaling of subgingival calculus in comparison with ultrasonic scaling. *J Periodont Res*, **35** : 266-277, 2000.
- 18) Sasaki, K.M., Aoki, A., Masuno, H., Ichinose, S., Yamada, S. and Ishikawa, I.: Compositional analysis of root cementum

- and dentin after Er:YAG laser irradiation compared with CO₂ lased and intact roots using Fourier transformed infrared spectroscopy. *J Periodont Res*, **37**: 50-59, 2002.
- 19) 水谷幸嗣, 青木 章, 木下淳博, 高崎アリステオ淳志, 小田茂, 石川 烈: Er:YAG レーザーの歯肉剥離掻爬術への応用—ビーグル犬における組織学的評価. *日歯保存誌*, **47**(秋季特別号), 35, 2004.
 - 20) 丸山裕昭, 青木 章, 佐々木カチア美幸, 渡辺 久, 石川烈: Er:YAG レーザー照射歯根セメント質に対する各種根面処理の効果について. *日歯保存誌*, **45**(秋季特別号), 116, 2002.
 - 21) Aoki, A., Ishikawa, I., Yamada, T., Otsuki, M., Watanabe, H., Tagami, J., Ando, Y. and Yamamoto, H.: Comparison between Er:YAG laser and conventional technique for root caries treatment in vitro. *J Dent Res*, **77**: 1404-1414, 1998.
 - 22) Feist, L., Micheli, G., Carneiro, S., Eduardo, C., Miyagi, S. and Marques, M.: Adhesion and growth of cultured human gingival fibroblasts on periodontally involved root surfaces treated by Er:YAG laser. *J Periodontol*, **73**: 1368-1375, 2003.
 - 23) Schwarz, F., Aoki, A., Sculean, A., Georg, T., Scherbaum, W. and 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**: 140-147, 2003.
 - 24) Schwarz, F., Sculean, A., Georg, T. and Reich, E.: Periodontal treatment with an Er:YAG laser compared to scaling and root planing. A controlled clinical study. *J Periodontol*, **72**: 361-367, 2001.
 - 25) Schwarz, F., Sculean, A., Berakdar, M., Georg, T., Reich, E. and 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**: 590-596, 2003.
 - 26) Schwarz, F., Sculean, A., Berakdar, M., Georg, T., Reich, E. and 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**: 26-34, 2003.
 - 27) 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. *日歯誌*, **12**: 109-117, 2001.
 - 28) Schwarz, F., Putz, N., Georg, T. and Reich, E.: Effect of an Er:YAG laser on periodontally involved root surfaces: an in vivo and in vitro SEM comparison. *Lasers Surg Med*, **29**: 328-335, 2001.
 - 29) Eberhard, J., Ehlers, H., Falk, W., Acil, Y., Albers, H.K. and Jepsen, S.: Efficacy of subgingival calculus removal with Er:YAG laser compared to mechanical debridement: an in situ study. *J Clin Periodontol*, **30**: 511-518, 2003.
 - 30) 吉野敏明, 青木 章, 大野純一, 小田 茂, 渡辺 久, 石川烈: 骨組織への Er:YAG レーザー照射の影響について—ラット頭頂骨への照射後の SEM および組織学的検索—. *日歯保存誌*, **40**: 1154-1164, 1997.
 - 31) Sasaki, K.M., Aoki, A., Ichinose, S., Yoshino, T., Yamada, S. and Ishikawa, I.: Scanning electron microscopy and Fourier transformed infrared spectroscopy analysis of bone removal using Er:YAG and CO₂ lasers. *J Periodontol*, **73**: 643-652, 2002.
 - 32) Pourzarandian, A., Watanabe, H., Aoki, A., Ichinose, S., Sasaki, K., Nitta, H. and Ishikawa, I.: Histological and TEM examination of early stages of bone healing after Er:YAG laser irradiation. *Photomed Laser Surg*, **22**: 355-363, 2004.
 - 33) Aoki, A., Yoshino, T., Akiyama, F., Miura, M., Kinoshita, A., Oda, S., Watanabe, H. and Ishikawa, I.: Comparative study of Er:YAG laser and rotating bur for bone ablation: SEM and long-term histological examinations. In: *Lasers in Dentistry - Revolution of Dental Treatment in the New Millennium*, Ishikawa I, Frame JW, Aoki A, Eds., Elsevier Science: Amsterdam. p.389-391, 2003.
 - 34) Sasaki, K.M., Aoki, A., Ichinose, S. and Ishikawa, I.: Ultrastructural analysis of bone tissue irradiated by Er:YAG Laser. *Lasers Surg Med*, **31**: 322-332, 2002.
 - 35) Sculean, A., Schwarz, F., Berakdar, M., Windisch, P., Arweiler, N.B. and Romanos, G.E.: Healing of intrabony defects following surgical treatment with or without an Er:YAG laser. *J Clin Periodontol*, **31**: 604-608, 2004.
 - 36) Matsuyama, T., Aoki, A., Oda, S., Yoneyama, T. and Ishikawa, I.: Effects of the Er:YAG laser irradiation on titanium implant materials and contaminated implant abutment surfaces. *J Clin Laser Med Surg*, **21**: 7-17, 2003.
 - 37) Schwarz, F., Rothamel, D., Sculean, A., Georg, T., Scherbaum, W. and Becker, J.: Effects of an Er:YAG laser and the Vector[®] ultrasonic system on the biocompatibility of titanium implants in cultures of human osteoblast-like cells. *Clin Oral Implants Res*, **14**: 784-792, 2003.
 - 38) Schwarz, F., Sculean, A., Rothamel, D., Schwenzer, K., Georg, T. and Becker, J.: Clinical evaluation of an Er:YAG laser for nonsurgical treatment of peri-implantitis. A pilot study. *Clin Oral Implants Res*, **16**: 44-52, 2005.