総 説

レーザーの歯周病罹患根面の処置への応用

青 木 章 安 藤 嘉 則* 渡 辺 久 石 川 烈

東京医科歯科大学大学院・歯科学総合研究科・

生体硬組織再生学講座・歯周病学分野

(主任：石川 烈教授)

*安藤歯科医院

(主任：安藤嘉則院長)

(受理：平成 13 年 7 月 18 日)

Laser treatment of
periodontally-diseased root surfaces

Akira AOKI, Yoshinori ANDO* Hisashi WATANABE
and Isao ISHIKAWA

Periodontology, Department of Hard Tissue Engineering,

Graduate School, Tokyo Medical and Dental University

(Chief : Prof. Isao ISHIKAWA)

*Ando Dental Office

(Chief : Dr. Yoshinori Ando)

(Accepted for Publication : July 18, 2001)

Abstract : The purpose of this review is to provide information about the current and potential applications of laser technology in the treatment of periodontally-diseased root surfaces and periodontal pockets. Based on its various characteristics, such as ablation or vaporization, hemostasis, and sterilization effect, laser treatment has been expected to serve as an alternative or adjunctive therapy to conventional, mechanical periodontal therapy. Carbon dioxide (CO₂) and neodymium : yttrium-aluminum-garnet (Nd:YAG) lasers have been approved for soft tissue treatment in periodontics, because of their excellent ability for soft tissue ablation, accompanied by hemostatic and bactericidal effects. However, these laser irradiations showed insufficient ability to ablate dental hard tissues, due to major thermal side-effects, when high energy output was applied. Recently, the erbium : yttrium-aluminum-garnet (Er:YAG) laser has been developed in dentistry, and its excellent ability for ablation in both soft and hard tissues has enabled laser application to root surface debridement, as well as to dental caries removal. Currently, laser application into periodontal pocket has become a promising field in laser dentistry, and much interest has been focused in this area. Further basic and clinical studies are required in order to establish a base for clinical use of laser energy in periodontal therapy, and clinicians should follow the results of scientific investigations to obtain successful outcomes.

(J. Jpn. Soc. Laser Dent. 12 : 109~117, 2001. Reprint requests to Dr. AOKI)

Key words=Laser, Root surface, Periodontal pocket

キーワード=レーザー, 根面, 歯周ポケット

〒113-8549 東京都文京区湯島 1-5-45 TEL 03-5803-5488 FAX 03-5803-0196

1-5-45 Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8549, Japan. TEL +81-3-5803-5488 FAX +81-3-5803-0196

*〒104-0061 東京都中央区銀座 8-19-3 TEL 03-3524-9679 FAX 03-3524-9678

*8-19-3 Ginza, Chuo-ku, Tokyo 104-0061, Japan. TEL +81-3-3524-9679 FAX +81-3-3524-9678

1. はじめに

歯周病罹患歯根面にはプラークや歯石が付着し、また壊死セメント質、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、これらを確実に除去しなければ歯周組織の治癒は得られない。とくに、ポケット内の根面の固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¹⁾。

歯周治療の基本は、スケーリング・ルートプレーニングにより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。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スケーリング・ルートプレーニングが行われている。一部には超音波スケーラーやエアスケーラーなどの動力器具 (power-driven instruments; power scalers) も併用されるようになり、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、従来の機械的なスケーリング・ルートプレーニングでは、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、臼歯部の遠心面へは器具の到達が困難なことが多く、従来の機械的処置には限界がある。一方、歯周ポケットへの抗菌薬の多用は、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、今後、現在用いられている機械的手技や化学療法さらなる改善は、当然必要であるが、他方、将来的にはこれらの補助あるいは代替的手技として新たな方法の開発も必要であろう。光エネルギーによる蒸散という優れた効果を発揮するレーザーの応用は、現在その可能性の一つとして期待されている²⁾。

さらに、従来法のスケーリング・ルートプレーニング処置面には機械的搔爬によってスミア層が形成され、また、しばしば深いグルーブが生じやすい。スミア層には細菌、セメント質および歯石の削片、プラークなどの起炎物質が含まれ、創傷治癒に影響を与えているといわれている³⁾。このため、これまで機械的な根面清掃の補助的・代替的手段として、さらに塩酸テトラサイクリンやクエン酸あるいはEDTAによる化学的処理を行い、スミア層や起炎物質を除去し、象牙質のコラーゲン線維や象牙細管を露出させることにより根面の生物学的適合性を高め、結合組織性付着やセメント質形成を伴う新付着を促進させたり、あるいはフィブロネクチンで処理することにより線維芽細胞の付着を促進させるなど、根面処理に関する研究も行われてきている⁴⁻⁶⁾。この点において、無菌状態にしやすく、スミア層の生じないレーザー照射面が組織付着において効果的に働く

可能性も期待されている。

2. 歯周病罹患根面へのレーザーの応用とその効果

1960年にMaimanがルビー・レーザーの発振に成功した後、1965年にはすでに、Kinerslyがルビー・レーザー照射による歯石の除去が可能であることを報告したが、レーザーの応用では歯石下の歯質の損傷が問題になることをすでに指摘している⁷⁾。歯周治療においては、歯周ポケット内の歯周病罹患根面のdebridementが基本的に重要な処置であるが、その後、歯周領域でのレーザーの臨床応用は、1990年代始めまでは歯肉切除や歯肉整形など軟組織処置に限られていた⁸⁻¹⁰⁾。

1990年代に入り、レーザー光の有する蒸散や気化、滅菌作用などのいくつかの優れた特性を利用して、Nd:YAGレーザーを歯周病罹患根面の処置へ応用しようとする研究が盛んに行われるようになった。さらに、従来のCO₂レーザーやNd:YAGレーザーでは熱傷害が大きく、硬組織の蒸散が困難であったが、1989年のKellerとHibstや¹¹⁾、茅野ら¹²⁾の報告により、Er:YAGレーザーで歯硬組織の蒸散が可能であることが示され¹³⁾、齲蝕治療だけでなく歯周領域においても、レーザーによる硬組織の蒸散、すなわち歯石や根面の汚染歯質の除去の可能性が注目されるようになった¹⁴⁻¹⁷⁾。

すでに臨床家の間では、導入や手技の容易性から、Nd:YAGレーザーや半導体レーザーを始めとした各種レーザーの歯周ポケット搔爬への臨床応用が盛んに行われてきているが、基礎および臨床研究がまだ少なく、学術的裏付けが追いついていないのが現状である。歯周病罹患根面のdebridementについても、Nd:YAGレーザーやEr:YAGレーザーを用いて、臨床で徐々に行われては始めているが、さらに学術的研究が必要な状況である。

レーザー治療に期待されている効果としては、根面のプラークや歯石の除去、lipopolysaccharide (LPS)などの細菌由来の毒素や代謝産物の除去であり、歯周ポケット内で用いられた場合には、さらに歯周ポケット内壁の上皮層や慢性炎症層の除去、周囲組織の賦活化による創傷治癒の促進、術後の疼痛緩和などが考えられている。歯周病罹患根面のdebridementについて研究されているレーザーとしては、Nd:YAGレーザー、CO₂レーザー、Er:YAGレーザー、エキシマ・レーザー、アレクサンドライト・レーザーなどがあげられる。

3. 各種レーザーの研究の動向と臨床応用

1) Nd:YAGレーザー

歯科臨床に用いられているNd:YAGレーザーは、波長

1,064nm のパルス波レーザーである。軟組織の蒸散に効果的であるが、組織の蒸散は主に熱作用によるものであり、軟組織処置面における熱凝固層は比較的厚くなる。CO₂レーザーと異なり水への吸収性がかなり低いいため、生体組織中では吸収よりも透過・散乱が大きくなる。Nd:YAG レーザーの吸収には色素選択性があるため、組織の蒸散の際には、吸収効率を高めるためにしばしば、墨などの黒色色素が照射部位に塗布される。Nd:YAG レーザーはしなやかな光ファイバーによる伝送が容易であり、直径 400 μ m のコンタクトチップの使用により操作性に優れているため、近年、Nd:YAG レーザーを用いた歯周ポケットのキュレタージや歯根面の debridement などへの応用に関する研究や臨床応用が多く行われてきている。

歯石除去については、森岡らは、1982 年に Q スイッチ付き Nd:YAG レーザーを用い、1.2~2.7J/cm²/pulse の出力で、抜去歯の歯面の着色や歯石の除去が可能であることを報告している¹⁸⁾。1993 年に石川らは、Nd:YAG レーザーを用い、抜去歯に対して、ファイバーを根面に平行にあて、注水下で接触照射を行い、歯肉縁下歯石のスケーリングが 2 W (100mJ/pulse, 20pps) で効率的であったと報告している¹⁹⁾。一方、Tseng と Liew は、*in vitro* において、Nd:YAG レーザーでは完全な歯石除去はできず、部分的な歯石除去や根面からの歯石の遊離は認められ、その際、歯石の融解や限局的なセメント質および象牙質の熱損傷が生じたが、レーザー照射後は手用スケーラーによる歯石除去が容易になったと述べている²⁰⁾。ただし、注水の有無については明記されていないので、無注水下での実験と考えられる。Cobb らは *in vivo* において歯周ポケットへの照射を行い、Nd:YAG レーザー単独でも機械的な debridement を併用しても歯石の残存が認められたことを報告し、また、レーザー照射された残存歯石の表面は、プラークは認められず、炭化や融解と再凝固による特徴的な多孔性の像を呈し、レーザー処置後は機械的な debridement が必要であろうと述べている²¹⁾。

Nd:YAG レーザーの根面への影響としては、*in vitro* において根面に平行に照射した場合でも、根面に炭化、融解、クレーターを生じたという報告²²⁾や歯石が完全に蒸散された場合にはその直下のセメント質も損傷を生じていたとの報告²³⁾があるが、これらは無注水下での照射実験であり、注水下における根面に平行な照射では変化は認められないという報告もあり²⁴⁾、注水や出力、照射角度などの条件によって相違がみられる。先に述べた Cobb らの *in vivo* での歯周ポケット照射では、1.75W~3 W の出力を用い、出力や照射時間に相関して、根面の炭化や融解と再凝固を伴うクレーターや溝の形成がみられたことを報告して

いる。また、このような変化を示す Nd:YAG レーザー照射面は *in vitro* では線維芽細胞の付着を阻害することが報告されている²⁵⁾。*in vivo* においては、Nd:YAG レーザーと CO₂ レーザーの同時照射根面に対して、軟組織付着は機械的処置に比べて改善がないか、低下したとの報告があるが²⁶⁾、Nd:YAG レーザー照射単独の研究はみられないため、今後、この点について検索が必要である。

一方で、Nd:YAG レーザーはルートプレーニング後のスミア層の除去に有効であり²⁷⁾、露出根面の細菌細胞壁由来の LPS などのエンドトキシンを失活させる効果があるという報告²⁸⁾や、*in vivo* で歯周ポケット内に照射した場合、歯周ポケットの内縁上皮の除去が可能であることが報告されている²⁹⁾。また、Cobb ら、石川ら、増永らによりポケット内細菌数の減少やポケット深さの減少やアタッチメントレベルの改善に効果があったとの報告がなされている^{21,24,30)}。また、歯周治療後の知覚過敏の処置に有効であることに関しては、すでに多くの報告によって確認されており³¹⁻³³⁾、根面カリエスの予防への応用についても期待されている³⁴⁾。

このように、現在広く用いられている Nd:YAG レーザーでは、歯周病罹患根面の硬組織の直接的な debridement 効果よりも、歯周ポケット内および根面のプラークの除去や無毒化と、ポケット内壁の上皮や肉芽組織の搔爬に有効であると考えられる。もともと、歯石は黒褐色で Nd:YAG レーザーが吸収されやすいので、高い出力や高いピークパワーを用いた場合には、歯石除去が効率的に行われる可能性が期待されるが、発熱の増大やそれに伴う根面および歯髄への熱傷害の懸念があり、スケーリング効果について有効性を証明するような臨床的報告はまだ出されていない。

アメリカの FDA では、1997 年にはじめて Nd:YAG レーザーによる sulcular debridement を認可しているが、ALD (Academy of Laser Dentistry: アメリカレーザー歯学会) では、Nd:YAG レーザーを歯周ポケットに応用する場合には、基本的に根面の debridement については、まず従来の機械的方法を推奨しているのが現状である。Liu らは、キュレットによる従来のスケーリング・ルートプレーニング (scaling and root planing: SRP) と Nd:YAG レーザーによる処置およびその組み合わせを比較し、Nd:YAG レーザー照射単独では、術後の歯肉溝滲出液中の炎症性サイトカインである IL-1 β 量や歯肉の炎症の減少度において、機械的な SRP より効果が低かったことを報告している。また、レーザー単独、SRP 単独、SRP 後にレーザー照射併用の各群に比べて、SRP 前にレーザー照射を併用した場合が、長期経過において最も効果的

であったと報告している³⁵⁾。Nd:YAG レーザーによる歯周ポケットの搔爬は、その簡便性から臨床家の間で多く行われている処置であるが、まだその有効性を明確に示した学術的論文は、国内外において少ない状態であり³⁶⁾、初期治療後やメンテナンス時の残存ポケットの処置なども含めて、効果的な臨床術式を確立するために今後の研究報告が待たれるところである。

なお、Nd:YAG レーザーにおいては、レーザー光の色素による吸収の相違や組織深達性による歯髄や歯槽骨などの周囲組織への熱影響に常に注意を払う必要がある。

2) CO₂ レーザー

CO₂ レーザーは、波長 10,600nm で、連続波あるいはパルス波として用いられている。水への吸収性が高いため、水を多量に含む軟組織によく吸収され、軟組織を効果的に蒸散する。熱作用が主であるため照射面に炭化を生じ易いが、周囲へ散乱することなく、ブタの皮膚切開における熱変性層は 100-300 μ m 程度である³⁶⁾。ファイバー伝送が困難で、以前は多関節ミラーによる導光しかできなかったが、近年、ファイバー伝送や中空導波管方式が開発され操作性が向上し、また各種のコンタクトチップも開発されてきている。

基本的に、硬組織に対しては、熱作用により炭化や融解を起こし、蒸散が困難なので、軟組織への応用が主であるレーザーであるが、根面への応用研究も行われている。Tucker らは、歯周病罹患根面に CO₂ レーザー照射を行い、プラークは除去できたが、歯石の融解や炭化を生じたことを 1996 年に報告した³⁷⁾。また、炭化層が形成された場合には、炭化層には細胞毒性のあるシアン化合物が生じており³⁸⁾、歯周組織付着が阻害されることが *in vivo* で示されている³⁹⁾。一方、我妻らは、イヌの実験的歯周炎の歯肉剥離搔爬術において、熱傷害を起こさないレベルの低出力で根面照射を行い、レーザー照射を行わなかった群に比較し、新付着および新生骨形成に有意な差が認められたという興味ある知見を報告している⁴⁰⁾。このように CO₂ レーザーにおいては、高出力では容易に炭化を生じ歯石の除去は困難であるが、比較的低出力にしたり、ディフォーカスの照射により、根面の殺菌や無毒化を目的とした根面処理が期待されている。

3) Er:YAG レーザー

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⁴¹⁾、発振波長が 2,940nm のパルス波のレーザーである。理論的に水への吸収性が CO₂ レーザーの 10 倍、Nd:YAG レーザーの 15,000~20,000 倍と非常に高いため⁴²⁾、水分を含む生体組織によく吸収され、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

であり、齲蝕除去・窩洞形成への臨床応用が進んでいる⁴³⁻⁴⁸⁾。水への高い吸収性が、生体周囲組織への熱影響を極めて小さくしており、ブタの皮膚切開において、非接触照射での Er:YAG レーザー光そのものによる軟組織の熱変性層は 10~50 μ m である⁴⁹⁾。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可能で⁵⁰⁾、注水下での歯根セメント質、象牙質の変性層は約 5~15 μ m であると報告されている^{17, 48, 51)}。

蒸散のメカニズムは、光エネルギーが吸収され、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 (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” (microexplosions) による“キャビテーション (cavitation)” 効果が生じ、その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^{52, 53)}。“水を媒介とした爆発的蒸散” (water-mediated explosive ablation) とも表現される⁵⁴⁾。熊崎は、歯の硬組織の場合には、Er:YAG レーザーはハイドロキシアパタイト中の結晶水 (solid) および周囲の水和殻 (hydration shell; liquid) に選択的に吸収され、アパタイトの結合が崩壊されると推測している⁵³⁾。

CO₂ レーザーと異なり、Er:YAG レーザーの場合に硬組織の蒸散が可能であるのは、水とハイドロキシアパタイトへの吸収率のバランスによると考えられる⁵²⁾。CO₂ レーザーでは、水への吸収度は Er:YAG に比べて約 10 分の 1 と低いものの、実際にはそれでもかなり高い値となるので、水への吸収度だけからみると、Er:YAG レーザーと同様の熱力学的効果がある程度生じるはずであるが、一方で CO₂ レーザーでは、硬組織の主要成分であるアパタイトへの吸収、とくに CaCO₃ 基や PO₄ 基への吸収がはるかに高いため⁵³⁾、照射部の無機成分に容易にエネルギーが吸収され急速に熱が蓄積し、物理的な崩壊が生じることなく有機成分の炭化や無機成分の融解を起こしてしまう。逆に Er:YAG レーザーの場合には、アパタイト中の無機成分への吸収度は CO₂ レーザーの場合よりもかなり低いので、無機成分よりも水や有機成分への吸収が先に進み、その結果、無機成分が強力に発熱融解する前に熱力学的効果が生じ、硬組織が破壊されることになる。

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、その構造上の小腔中にも水分を含んでいるため、Er:YAG レーザーによるエナメル質や象牙質の蒸散効率の良さを考えると、それよりはるかに低いエネルギー密度で歯石の蒸散が生じると考えられる。1994 年に Aoki らは

Er:YAG レーザーが歯肉縁下歯石を効果的に蒸散することが可能であることを報告し¹⁴⁾、注水下の照射では、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、力学的に破壊されたと推測される粗造な面が認められることを示している^{14,17,55)}。スケーリング効率は繰り返しパルス数を 20-30Hz に上げることににより向上し⁵⁶⁾、超音波スケーラーと同等以上となる。ただし、Er:YAG レーザーの場合は、完全な選択的除去は不可能で、歯石だけでなく歯石の付着している根面（セメント質）を一層蒸散するので、根面を蒸散し過ぎないように照射法を配慮する必要がある^{14,17,55)}。

また、注水により根面の炭化は生じないが、蒸散面はミクロのレベルで粗造化するため、乾燥させると白色を呈することが観察されている^{14,51,55,57,58)}。また、蒸散面最表層は、顕著な有機成分の減少が生じ⁵⁹⁾、脆弱な構造に変化しており¹⁷⁾、その下層には、主に熱作用により限局したコラーゲンの変性を伴う、数ミクロンの変化層（染色層）が認められており^{17,51)}、これらが歯周組織の付着に影響を与える可能性がある。*in vitro* の実験では、Er:YAG レーザー照射象牙質に対して線維芽細胞の付着は低下するが、さらに酸処理によって回復すること示されており⁶⁰⁾、今後、この蒸散面が組織付着において良好であるか、あるいは酸処理やルートプレーニングなどによる表層の除去が必要であるか、*in vivo* での検証が必要である。発熱に関しては、注水の併用により歯髄側への影響はわずかであることが示されており^{14,17)}、動物実験においても、縁上歯石を Er:YAG レーザーにより除去した研究ではあるが、レーザー治療後に歯髄への影響は認められなかったことが報告されている⁶¹⁾。

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生じるので Er:YAG レーザー照射は禁忌であるが⁵⁵⁾、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が必要であるため、レーザーによって歯石下のセメント質がある程度蒸散するのは許容される。また、Er:YAG レーザーは極めて低い出力で殺菌作用を生じ⁶²⁾、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^{63,64)}、レーザー処置面にはスミア層がなく滅菌効果および無毒化が期待され、これらは従来の超音波スケーラーに優る点といえる。また、Er:YAG レーザーの注水下の照射では、照射面に CO₂ レーザーの場合にみられるような顕著な炭化で生じる毒性物質の産生もほとんど認められない⁵⁹⁾。

臨床応用の報告では、1996 年に Watanabe らは、歯肉退縮により露出した歯石や歯周外科治療中の残存歯石に対して、平均出力約 40mJ/pulse, 10Hz, 注水下で、直径 600

μm のコンタクトチップを用いて Er:YAG レーザーによるスケーリングを行い、レーザースケーリングは有効で、処置後の問題は認められず安全であったことを報告した⁶⁵⁾。アメリカの FDA は、1999 年に debridement を認可している。最近、ドイツの Schwarz らにより興味深いデータが示された。彼らは、積極的に歯周ポケットへの臨床応用を行い、従来のキュレットによる SRP と Er:YAG レーザー処置を比較し、6 か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（bleeding on probing: 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⁶⁶⁾。レーザー処置では、先端径が 0.5×1.65 あるいは 0.5×1.1mm のチゼルタイプのコンタクトチップ⁶⁷⁾を用いて、出力 160mJ/pulse, 10Hz, 注水下で、歯冠側から根尖側へ向かって根面に対して 15 度から 20 度の角度で根面の debridement を行っている。両者とも浸潤麻酔下の処置であり、キュレットでは、単根歯に 9 分、多根歯に 15 分を要したが、レーザーでは、それぞれ 5 分、10 分と所要時間も短縮している。

Er:YAG レーザーは、硬組織および軟組織の熱変性が極めて小さいので、歯周ポケット処置後の治癒も非常に早く良好であると推測される。ただし、根面の蒸散表面と歯周組織の付着については詳細は不明であり、先にも述べたように、今後、長期経過も含めた更なる研究が必要である。

また、盲目下のレーザー処置では、歯石の探知と除石の確認や、根面歯質の蒸散のコントロールが最も大きな問題となるが、まず、歯周ポケット専用のチップの改良^{67,68)}が必要であろう。さらに、Er:YAG レーザーの場合にはポケット内照射では、爆発的蒸散に伴うポケット内からの血液の飛散に対し、的確なバキューム操作が必要となる。

現在、歯石の探知のための革新的な技術が研究されており、ドイツの KaVo 社により齲蝕診断用に開発された Diagnodent™ が歯石についても明かな反応を示すことから⁶⁹⁾、現在 Hibst らにより Diagnodent™ による歯石の探知と Er:YAG レーザーによる歯石の蒸散を組み合わせた装置の開発が行われつつあるようである。

また、ごく最近登場した erbium, chromium: yttrium-scandium gallium-garnet (Er,Cr:YSGG) レーザーも Er:YAG レーザーに近い 2,780nm の波長を有しており、この波長では、水よりも OH 基への吸収が高いといわれており⁵⁴⁾、ほぼ Er:YAG レーザーと同様の効果があると考えられ期待されている。

4) エキシマ (excimer) レーザー

エキシマ・レーザーは、紫外領域のレーザーで、励起状態でのみ形成される不安定な分子（エキシマ）が分解する際に出す光を利用するものである。レーザー媒質の化合物

の種類によりいくつかの波長がある。組織の蒸散は、熱作用が非常に少なく、波長 193nm ではほとんど熱傷害は認められないため、直接化学結合を切断している可能性や、熱力学的な蒸散が極めて瞬時に起こっている可能性などが考えられている⁷⁰⁾。1992 年 Frentzen らは波長 193nm の ArF エキシマ・レーザーを用い、*in vitro* においてスケーリングが可能であったことを報告し、スケーリング後のセメント質には病原因子はなく、微細な粗造性を示すのみであり、エキシマ・レーザーによるスケーリングは非常に有望であったと述べている⁷⁰⁾。また、Folwaczny らも、308nm の XeCl エキシマ・レーザーを用いて、歯石除去が容易で、スミア層や熱変性のない処置面が得られたことを報告している⁷¹⁾。

近年、エキシマ・レーザーでも光ファイバーによる導光が可能になりつつあるが、現時点では、機械のコストやサイズの面から臨床への応用には時間を要すると考えられる。特に、波長が紫外線領域にあることから生体組織への応用については注意を要するところである。

5) アレクサンドライト・レーザー

1995 年に Rechmann らは、波長 337nm のアレクサンドライト・レーザー (frequency doubled Alexandrite laser) により歯肉縁下歯石の完全な選択的除去が可能であると報告している⁷²⁾。アレクサンドライト・レーザーは、歯石やブランク、色素沈着を選択的に容易に除去できると報告されているが、そのメカニズムについては、まだ詳細は不明である。波長は、紫外線領域に入るものの、エナメル質上の歯肉縁上歯石についても、エナメル質の損傷が全くなく、しかも超音波スケーラーのような振動や騒音のない新たな手段として期待され、今後の研究が注目されるレーザーである。

6) 半導体レーザー、アルゴンレーザー

半導体レーザー、アルゴンレーザーでは、歯周病罹患根面の debridement への直接の応用は検討されていないが、歯周ポケット治療において従来の機械的 debridement と併用した場合に効果的であったという報告が出されている⁷³⁻⁷⁵⁾。また、アルゴンレーザーでは、根面カリエスの抑制効果についても報告されている⁷⁶⁾。

4. 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。レーザー光の到達性やその手技の容易性などの臨床的操作上の利点と、同時に得られる滅菌効果やエンドトキシンなどの無毒化、ポケット内壁の搔爬や周囲の細胞への刺激効果な

どを考えると、従来の機械的処置以上に、歯周病罹患根面と歯周ポケット内の状況を改善できる可能性がある。とくにポケット内の盲目下での歯石の探知にレーザーが威力を発揮する可能性も見込まれている。

また、従来の歯周ポケット治療においては、歯周病罹患根面のディブライドメントのみに焦点が当てられ、軟組織壁の搔爬は重要視されず積極的には行われていなかった。これは、これまでのキュレットなどの機械的な器具では、軟組織の搔爬を確実に行うことが困難であったことによる可能性もあり、今後、レーザーによるポケット搔爬の容易性および有効性が証明されれば、歯周ポケットの治療法の概念にも新たな変化がみられるかもしれない。

従って、将来、歯肉縁下歯石の除去やポケット内壁の搔爬、ポケット内の滅菌無毒化を含む非外科的な歯周ポケット治療において、レーザーの果たす役割は増大していくものと予想される。今後、さらに詳細な基礎的・臨床的研究、ならびにコンタクトチップなどの装置の改良や新しい波長やシステムのレーザーの開発が必要である。

とくに、レーザー歯学の分野では、まだ従来の手法との臨床比較研究が少なく、レーザー治療の真の有効性や有益性は明確にされていない点が多いので、randomized control study など、より厳密な臨床研究が必要である。

また、実際の臨床でのレーザーの使用においては、従来の機械的処置法をまず十分に習得し、それぞれのレーザー光の有する硬組織・軟組織に対する特性、および科学的研究結果を正しく理解したうえで、常に慎重な態度で望まなければならないであろう。

文 献

- 1) Daeveau, R.P., Tanner, A., Page, R.C.: The microbial challenge in periodontitis. *Periodontology* 2000, 14: 12-32, 1997.
- 2) 石川 烈, 青木 章: 歯周病よりみた最近のレーザーの応用. *日レ医誌*, 20(1): 21-29, 1999.
- 3) Polson, A.M., Frederic, G.T., Ladenheim, S., Hanes, P.J.: The production of a root surface smear layer by instrumentation and its removal by citric acid. *J. Periodontol.*, 55: 443-446, 1984.
- 4) Register, A.A. and Burdick, F.A.: Accelerated reattachment with cementogenesis to dentin, demineralized in situ. II. Defect repair. *J. Periodontol.*, 47: 497-505, 1976.
- 5) Moore, J.A., Ashley, F.P., Waterman, C.A.: The effect on healing of the application of citric acid during replaced flap surgery. *J. Clin. Periodontol.*, 14: 130-135, 1987.
- 6) Ripamonti, U., Petit, J.C., Lemmer, J., Austin, J.C.: Regeneration of the connective tissue attachment on surgically exposed roots using a fibrin-fibronectin adhesive system. An experimental study on the baboon. *J. Periodontol. Res.*, 22: 320-326,

- 1987.
- 7) Kinersly, T., Jarabak, J., Phatak, N.M., Demernt, J.: Laser effects on tissue and materials related to dentistry. J. Am. Dent. Assoc., **70**: 593-600, 1965.
- 8) Pick, R.M., Colvard, M.D.: Current status of lasers in soft tissue dental surgery. J. Periodontol., **64**: 589-602, 1993.
- 9) Rossmann, J.A., Cobb, C.M.: Lasers in periodontal therapy. Periodontology 2000, **9**: 150-164, 1995.
- 10) Cohen, R.E., Ammons, W.: The Research, Science and Therapy Committee of The American Academy of Periodontology: Lasers in periodontics (position paper). J. Periodontol., **67**: 826-830, 1996.
- 11) 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.
- 12) 茅野照雄, 落合 聡, 清野和夫, 山本 肇, 中島貞洋, 望月孝安: 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.
- 13) Rechmann, P., Goldin, D.S., Henning, T.: Er:YAG lasers in dentistry: an overview. Proc SPIE, **3248**: 2-13, 1998.
- 14) 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**: 1097-1106, 1994.
- 15) Keller, U., Hibst, R.: Experimental removal of subgingival calculus with an Er:YAG laser. SPIE, **2623**: 189-198, 1995.
- 16) Stock, K., Hibst, R., Keller, U.: Er:YAG removal of subgingival calculi; efficiency, temperature and surface quality. SPIE, **2922**: 98-1406, 1996.
- 17) 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**: 266-277, 2000.
- 18) 森岡俊夫, 森田恵美子, 鈴木和雄: Nd:YAG レーザーの歯牙沈着物および歯質着色の除去に関する実験的研究. 口腔衛生会誌, **31**(5): 39-43, 1982.
- 19) 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**: 902-909, 1993.
- 20) Tseng, P., Liew, V.: The use of a Nd:YAG dental laser in periodontal therapy. ADA News Bulletin (Australia), November: 3-6, 1991.
- 21) Cobb, C.M., McCawley, T.K., Killoy, W.J.: A preliminary study on the effects of the Nd:YAG laser on root surfaces and subgingival microflora *in vivo*. J. Periodontol., **63**: 701-707, 1992.
- 22) Morlock, B.J., Pippin, D.J., Cobb, C.M., Killoy, W.J., Rapley J.W.: 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**: 637-641, 1992.
- 23) Radar, M., Creanor, S.L., Gilmour, W.H., Payne, A.P., McGadey J, Foye RH, Whitters CJ, Kinane DF: An evaluation of the effects of an Nd:YAG laser on subgingival calculus, dentine and cementum. An *in vitro* study. J. Clin. Periodontol., **22**: 71-77, 1995.
- 24) 石川和弘: レーザーの歯周ポケット内照射が, 細菌の根面への再付着, 根面の温度変化および臨床症状に及ぼす影響. 愛大院大歯誌, **34**(3): 465-480, 1996.
- 25) Trylovich, D.J., Cobb, C.M., Pippin, D.J., Spencer, P., Killoy W.J.: The effects of the Nd:YAG laser on *in vitro* fibroblast attachment to endotoxin-treated root surfaces. J. Periodontol., **63**: 626-632, 1992.
- 26) Arcoria, C.J., Steele, R.E., Vitasek, B.A., Wagner, M.J.: Effects of Coaxial CO₂/Nd:YAG irradiation on periodontal wound healing. Lasers Surg. Med., **12**: 401-409, 1992.
- 27) Ito, K., Nishikata, J., Murai, S.: Effects of Nd:YAG laser radiation on removal of a root surface smear layer after root planing. A scanning electron microscopic study. J. Periodontol., **64**: 547-552, 1993.
- 28) 福田光男, 箕浦伸吾, 石川和弘, 小倉延重, 上田信男, 村瀬元康, 杉原信久, 加藤一夫, 中垣晴男, 野口俊英: 露出根面のエンドトキシンに対するNd:YAG レーザー照射の効果について. 日歯保存誌, **37**(2): 711-716, 1994.
- 29) Gold, S.I., Vilardi, M.A.: Pulsed laser beam effects on gingiva. J. Clin. Periodontol., **21**: 391-396, 1994.
- 30) 増永 浩, 遠藤弘康, 杉下彰男, 淡路美保, 田原 洋, 松江美代子, 松江一郎: 歯周ポケット搔爬術におけるNd:YAG レーザー治療の臨床的評価. 日歯保存誌, **36**(5): 1483-1490, 1993.
- 31) 松本光吉, 船井博雄, 白須賀哲也, 若林 始: Nd:YAG-Laser による歯頸部象牙質知覚過敏症の除痛効果について. 日歯保存誌, **28**: 760-765, 1985.
- 32) 河田克之, 大塚秀春, 市村 光, 下島孝裕, 池田克巳: 歯周疾患を伴う象牙質知覚過敏症に対するNd:YAG レーザーの治療効果. 日歯保存誌, **39**: 989-995, 1996.
- 33) 小林一行, 山口博康, 熊井麻子, 田中麻起, 櫻庭栄一, 野村典生, 中村治郎, 新井 高: 歯周治療中に生じた象牙質知覚過敏症に対するNd:YAG レーザー照射による疼痛緩和効果. 日歯周誌, **41**(2): 180-187, 1999.
- 34) 永井伸頼, 福田光男, 箕浦伸吾, 山田泰生, 多湖 準, 三輪晃資, 野口 隆, 林 潤一郎, 和久田志賀司, 祖父江尊範, 坪井信二, 中垣晴男, 野口俊英: Nd:YAG レーザー照射とフッ化物塗布の併用による歯根面の耐酸性付与に関する研究. 日歯周誌, **41**(1): 36-42, 1999.
- 35) Liu, C.M., Hou, L.T., Wong, M.Y., Lan, W.H.: Comparison of Nd:YAG laser versus scaling and root planing in periodontal therapy. J. Periodontol., **40**: 1276-1282, 1999.
- 36) Arashiro, D.S., Rapley, J.W., Cobb, C.M., Killoy, W.J.: Histologic evaluation of porcine skin incisions produced by CO₂ laser, electrosurgery, and scalpel. Int. J. Periodont Rest. Dent., **16**: 479-491, 1996.
- 37) Tucker, D., Cobb, C.M., Rapley, J.W., Killoy, W.J.: Morphologic changes following *in vitro* CO₂ laser treatment of calculus-laden root surfaces. Lasers Surg. Med., **18**: 150-156, 1996.
- 38) Spencer, P., Cobb, C.M., McCollum, M.H., Wieliczka, D.M.: The effects of CO₂ laser and Nd:YAG with and without water/air surface cooling on tooth structure: correlation between FTIR spectroscopy and histology. J. Periodont. Res., **61**: 453-462, 1996.
- 39) Bruce, W.G., Cobb, C.M., Rapley, J.W., Killoy, W.J.: Histologic evaluation of soft tissue attachment to CO₂ laser-treated root surfaces: An *in vitro*

- study: Int. J. Periodont. Rest. Dent., **17**: 317-325, 1997.
- 40) 我妻瑞穂, 鴨井久博, 佐藤 聡, 鴨井久一: CO₂ レーザー照射が歯周組織再生に与える影響について. 日歯周誌, **41**: 264-276, 1999.
 - 41) Zharikov, E.V., Zhecov, V.I., Kulevskii, L.A., Murina, T.M., Osiko, V.V., Prokhorov, A.M., Savel'ev, A.D., Smirnov, V.V., Starikov, B.P., Timoshechkin, M.I.: Stimulated emission from Er³⁺ ions in yttrium aluminum garnet crystals at $\lambda = 2.94 \mu$. Sov. J. Quantum Electron, **4**(8): 1039-1040, 1975.
 - 42) Robertson, C.W., Williams, D.: Lambert absorption coefficients of water in the infrared. J. Opt. Soc. Am., **61**: 1316-1320, 1971.
 - 43) Kumazaki, M., Toyoda, K.: Removal of hard dental tissue (cavity preparation) with the Er:YAG laser. 日歯誌, **6**: 16-24, 1995.
 - 44) 瀧澤雅一, 青木 護, 高瀬保品, 石川達也, 熊先 護, 井上昌孝, 善入邦男, 藤井弁次, 長谷川絃司, 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**: 1035-1047, 1995.
 - 45) 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**: 123-127, 1996.
 - 46) Keller, U., Hibst, R.: Effects of Er:YAG laser in caries treatment: a clinical pilot study. Lasers Surg. Med., **20**: 32-38, 1997.
 - 47) Cozean, C., Arcoria, C.J., Pelagalli, J., Powell, G.L. Dentistry for the 21st century? Erbium:YAG laser for teeth. J. Am. Dent. Assoc., **128**: 1080-1087, 1997.
 - 48) 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**: 1404-1414, 1998.
 - 49) Walsh, J.T., Flotte, T.J., Deutsch, T.F.: Er:YAG laser ablation of tissue: effect of pulse duration and tissue type on thermal damage. Lasers Surg. Med., **9**: 314-326, 1989.
 - 50) Burkes, E.J. Jr, Hoke, J., Gomes, E., Wolbarsht, M.: Wet versus dry enamel ablation by Er:YAG laser. J. Prosthet. Dent., **67**: 847-851, 1992.
 - 51) Fujii, T., Baehni, P.C., Kawai, O., Kawakami, K., Matsuda, K., Kowashi, Y.: Scanning electron microscopic study of the effects of Er:YAG laser on root cementum. J. Periodontol., **69**: 1283-1290, 1998.
 - 52) Koort, H.J., Frentzen, M.: Laser effects on dental hard tissue. In: Miserendino LJ, Pick RM (eds), Lasers in Dentistry. Quintessence Publishing Co. Inc., 57-70, 1995.
 - 53) 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. 日歯誌, **20**(1): 55-61, 1999.
 - 54) Seka, W., Featherstone, JDB., Fried, D., Visuri, S.R., Walsh, J.T.: Laser ablation of dental hard tissue: from explosive ablation to plasma-mediated ablation. Proc. SPIE., **2672**: 144-158, 1996.
 - 55) 青木 章, 石川 烈: エルビウム・ヤグ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.
 - 56) 青木 章, 大槻昌幸, 穂山文彦, 松山智子, 江口哲也, 渡辺久, 田上順次, 石川 烈: Er:YAG レーザーによるう蝕除去および歯石除去時の歯髄側の温度変化. 日歯保存誌, **43**(秋期特別号): 130, 2000.
 - 57) 安藤嘉則, 青木 章, 山田敏元, 大野純一, 渡辺 久, 田上順次, 石川 烈: ヒト歯根面に対するEr:YAG レーザー照射の影響- Nd:YAG レーザー, CO₂ レーザーと比較した *in vitro* における形態的研究-. 日歯誌, **7**(1): 58-66, 1996.
 - 58) Israel, M., Cobb, C.M., Possmann, J.A., Spencer, P.: The effects of CO₂, Nd:YAG and Er:YAG lasers with and without surface coolant on tooth root surfaces. An *in vitro* study. J. Clin. Periodontol., **24**: 595-602, 1997.
 - 59) Sasaki, K.M., Aoki, A., Masuno, H., Ichinose, S., Yamada, S., Ishikawa, I.: Compositional analysis of root cementum and dentin after Er:YAG laser irradiation compared with CO₂ laser and intact roots using Fourier transformed infrared spectroscopy. J. Periodont. Res., 2001 (in press).
 - 60) 安藤嘉則, 青木 章, 杉山榮一, 山田敏元, 渡辺 久, 石川 烈: Er:YAG レーザー照射歯根象牙質に対するヒト歯根膜由来線維芽細胞の付着について. 日歯周誌, **37**(春季特別号): 78, 1995.
 - 61) 青木 章, 安藤嘉則, 木下淳博, 静谷斗志夫, 渡辺 久, 石川 烈: Er:YAG レーザーのスケーリングへの応用に関する研究—歯髄およびエナメル質への影響について—. 日歯誌, **4**: 114-115, 1993.
 - 62) Ando, Y., Aoki, A., Watanabe, H., Ishikawa, I.: Bactericidal effect of Er:YAG laser on periodontopathic bacteria. Lasers Surg. Med., **19**: 190-200, 1996.
 - 63) 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.
 - 64) Yamaguchi, H., Kobayashi, K., Osada, R., Sakuraba, E., Nomura, T., Arai, T., Nakamura, J.: Effects of irradiation of an Er:YAG laser on root surfaces. J. Periodontol., **68**: 1151-1155, 1997.
 - 65) Watanabe, H., Ishikawa, I., Suzuki, M., Hasegawa, K.: Clinical assessments of the erbium:YAG laser for soft tissue surgery and scaling. J. Clin. Laser. Med. Surg., **14**(2): 67-75, 1996.
 - 66) Schwarz, F., Sclan, 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**: 361-367, 2001.
 - 67) Folwaczny, M., Mehl, A., Haffer, C., Benz, C., Hickel, R.: Root substance removal with Er:YAG laser radiation at different parameters using a new delivery system. J. Periodontol., **71**: 147-155, 2000.
 - 68) Watanabe, H., Kataoka, K., Ishikawa, I.: A novel laser contact probe for periodontal treatment. SPIE, **4249**: 15-21, 2001.
 - 69) 高瀬保品, 瀧澤雅一, 天谷哲也, 春山親弘, 亀山敦史, 平井義人: 齶蝕診断装置 Diagnodent 応用に関する基礎的研究. 日歯誌, **12**(1): 37-40, 2001.
 - 70) Frentzen, M., Koort, H., Thiensiri, I.: Excimer lasers in dentistry: future possibilities with advanced technology. Quintessence International., **23**(2): 117-133, 1992.

- 71) Folwaczny, M., Mehl, A., Haffer, C., Hickel, R.: Substance removal on teeth with and without calculus using 308 nm XeCl excimer laser irradiation. An in vitro investigation. *J. Clin. Periodontol.*, **26**: 306-312, 1999.
- 72) Rechmann, P., Henning, T.H.: Selective ablation of sub- and supragingival calculus with a frequency-doubled Alexandrite laser. *Proc. SPIE.*, **2394**: 203-210, 1995.
- 73) Moritz, A., Gutknecht, N., Doertbudak, O., Goharkhay, K., Schoop, U., Schauer, P., Sperr, W.: Bacterial reduction in periodontal pockets through irradiation with a diode laser: a pilot study. *J. Clin. Laser. Med. Surg.*, **15**(1): 33-37, 1997.
- 74) Moritz, A., Schoop, U., Goharkhay, K., Schauer, P., Doertbudak, O., Wernisch, J., Sperr, W.: Treatment of periodontal pockets with a diode laser. *Lasers Surg. Med.*, **22**: 302-311, 1998.
- 75) Finkbeiner, R.L.: The results of 1328 periodontal pockets treated with the argon laser: selective pocket thermolysis. *J. Clin. Laser. Med. Surg.*, **13**(4): 67-75, 1995.
- 76) Westerman, G.H., Hicks, M.J., Flaitz, C.M., Blankenau, R.J., Powell, G.L., Berg, J.H.: Argon laser irradiation in root surface caries. *J. Am. Dent. Assoc.*, **125**: 401-407, 1994.