解 説

REVIEW ARTICLE

歯内治療におけるレーザーの応用

竹田 淳志

東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科摂食機能保存学講座歯髓生物学分野

(平成16年11月2日受理, 平成16年12月7日掲載決定)

Laser application in endodontics

Atsushi Takeda

Pulp Biology and Endodontics, Department of Restorative Sciences, Graduate School, Tokyo Medical and Dental University

(Received November 2, 2004, Accepted December 7, 2004)

要 約

年々わが国の歯科医師の間でレーザー応用が普及しつつある。特に歯科診療において口腔軟組織および窩洞形成へ応用されるようになってきている。本論文は歯内治療学の分野における最近のレーザー応用, 特にレーザードップラー血流計による歯髓血流の測定, 直接覆髄法, 生活断髄法, 抜髄法, 根管消毒, 根管形成, 根尖切除術への応用について総括するものである。さらに, 根管内におけるレーザー照射に関する問題点について考察する。

キーワード: レーザー応用
 , 根管治療, 歯肉療法

Abstracts

The use of lasers is getting popular year by year among Japanese dental practitioner. Oral soft tissue and cavity preparation uses are becoming more common in dental offices. This article summarizes the new trend of laser application in endodontics, especially, measurement of pulpal blood flow by laser Doppler flowmetry, application of lasers to direct pulp capping, pulpotomy, pulpectomy, disinfection of root canal, root canal shaping, and apicoectomy. Additionally, we discuss the problem with the laser irradiation in the root canal.

Key Words: laser application, root canal treatment, endodontics

1. はじめに

近年、歯科臨床へのレーザー装置の普及はめざましく、多様な治療に応用されている。また、歯内療法領域では非常に多種類のレーザーに関し多数の論文が発表されており、レーザーの歯科応用研究の中でも活発な研究がなされている領域である。ただ、抜去歯を用いた *in vitro* の実験が多く、動物実験や臨床的な報告が少ないのが現状である。また、装置の普及や研究論文数と比較すると歯科治療の中で実際に用いられている頻度はそれほど高くないと考えられる。この点も含め、現時点での歯内療法へのレーザー応用、特に根管内へのレーザー応用についてこれまでの研究の経緯や最新の知見を含め、総括することがこの論文の目的である。

2. レーザードップラー法による歯髄診断

歯内治療では、適切な処置を行うために歯髄の生死を診断することが重要であり、その診断には歯髄血流の有無の確認が必要であるが、硬組織で囲まれた歯髄の血流を非侵襲的に測定する手段がなかったため、歯に電気刺激や温度刺激を加えたときの患者の痛みによる反応を利用した間接的な診断を行っている。このため、根末完成歯や外傷歯などでは電気刺激や温度刺激に反応しない場合があり、的確な診断は難しい場合がある。レーザードップラー血流計は非侵襲的に血流を測定できる装置であり、ヒトの歯髄血流の測定にも応用されるようになった^{1,2)}。これは、レーザー光を歯に照射し、エナメル質、象牙質を透過した光が血管内を移動中の赤血球に当たったときのドップラーシフトを検出し、血流量を相対値として測定するものである。臨床ではHe-Neレーザーや半導体レーザーが利用されている。Ebiharaら³⁾は、外傷受傷後の上顎前歯の歯髄診断にこの方法が有効であることを報告している。Emshoffら⁴⁾は、外傷受傷後の歯髄血流値の大きさと、固定除去後36週後の臨床所見は関連することを報告している。ただし、測定された値には歯髄以外の血流の影響を受けること⁵⁾、再現性のある測定をするためにはシーネ等でプローブを同じ位置に固定する必要があること、装置が高価であることなどの問題点もある。

3. 直接覆髄法・生活断髄法への応用

直接覆髄法や生活断髄法への応用として動物の歯の露髄面にレーザー照射した際の歯髄の反応も研究されている。初期にはCO₂レーザーをShojiら⁶⁾が生活断髄に、Melcerら⁷⁾が直接覆髄に応用した報告がなされ、海老原ら^{8,9)}は連続波Nd:YAGレーザーをラットの露髄面およびイヌの断髄面に照射し、レーザーのdentin bridge形成促進効果を報告した。以降、多数の動物実験が行われている。Wilder-smithら¹⁰⁾は、CO₂レーザーをイヌ断髄面に照射し、1年後の予後で17例中15例で臨床的およびエックス線上で問題がなかったと報告している。Utsunomiya¹¹⁾は、イヌの露髄面に830nmの半導体レーザーを3分間照射し、術後1週目で非照射の対照群より早期

にdentin bridgeの形成がみられたことを報告している。天谷ら¹²⁾は、Er:YAGレーザーによる窩洞形成時の偶発的露髄が歯髄に及ぼす影響をイヌを用いて検討し、直接覆髄を施すことにより回転切削器具による露髄と同様に生活歯髄を健全に保存できたことを報告している。これ以外にもNd:YAGレーザー^{13,14,15)}、CO₂レーザー¹⁶⁾など、レーザーの有効性を示す多くの研究報告がある。

直接覆髄への臨床応用としては、Moritzら¹⁷⁾は、歯髄にスーパーパルスモードでCO₂レーザーを照射し、2年予後で93%の歯髄が生活性を示したことを報告しており、これは対照群の成功率66.6%と比較し良好な成績だったとしている。Santucciら¹⁸⁾は、Nd:YAGレーザーを1.75W(20pps)の照射条件で露髄面および周囲象牙質に20秒程度照射し、Vitrebondで覆髄したところ、54ヶ月後で90.3%の成功率であったことを示している。

生活断髄法への臨床応用としては、Ellicottら¹⁹⁾は、CO₂レーザーを6W、0.1秒のシングルショットで乳歯の断髄面に炭化層が生じ、止血が認められるまで照射し、臨床症状、X線診査、組織学的所見を調べたところ対照のFC断髄群と比較し、良好な成績を得たと報告している。また、論文の照射条件では、照射ショット数が多いほど術後28日の組織像で炎症の程度が軽度であったとしている。井上ら²⁰⁾は、乳歯の生活断髄にEr:YAGレーザーを応用した。歯冠部歯髄除去後に根管口部の歯髄切断にEr:YAGレーザーを出力70-80mJ、10ppsで使用したところ、14例中13例で臨床的およびエックス線的に不快症状は生じなかったとしている。著者らはEr:YAGレーザー応用の利点として、1)すみやかな止血が得られる、2)診療時間が短縮される、3)術後の疼痛はほとんどない、などをあげており、Er:YAGレーザーの有効性を述べている。この研究では、1例では術後1年で歯根の内部吸収が生じており、さらに検討が必要と考えられる。

このように、露髄面あるいは断髄面へのレーザー応用が有効であるという報告も多く、一定の条件のレーザー照射による効果が臨床的にも確認されている。しかし、照射条件によってはレーザー照射が無効であったとする動物実験の結果^{14,21)}もあり、今後レーザーの種類ごとに適切な照射条件を確定させていく必要があると思われる。

4. 根尖切除術への応用

1988年にCO₂レーザーを根尖切除術に臨床応用したMiserendinoら²²⁾の報告以来、根尖切除術へのレーザー応用の報告がなされている。基礎実験として、Moritzら²³⁾は、抜去歯の根尖切除面に連続波CO₂レーザーを0.5Wで照射したところ、象牙質への色素浸透が減少したと報告している。同様の実験としてEsenら²⁴⁾はCO₂レーザーを、Stabholzら²⁵⁾はNd:YAGレーザーを用い、同様の結果を示している。海老原ら²⁶⁾はヒト単根抜去歯をEr:YAGレーザーあるいは歯科用電気エンジンで根尖切除する実験を行い比較検討したところ、切除に要する時間はレーザー群のほうが有意に長かったが、切除面にはスミヤー層が認められなかったと報告している。Paghdwala²⁷⁾も同様の報

告をしている。Komoriら²⁸⁾は、Ho:YAGレーザーによる根尖切除では変色やクラックが発生するとしている。

逆根管充填用窩洞形成をレーザーで行った基礎実験として、海老原ら²⁹⁾は、通常の超音波装置による拡大と比較し、レーザー群の方が短時間で窩洞形成を終了したことを示した。また、レーザー切削した窩洞は窩縁が広がり不整形であったが、スミヤー層は見られなかったとしている。

根尖切除に関する動物実験および臨床報告については、Friedmanら³⁰⁾は、イヌの感染根管治療で、根尖切除後の根尖部の歯根表面(15W, 焦点位, 0.05秒, シングルパルス)と骨にCO₂レーザー照射を行ったが、レーザー照射の有無は成績に影響しなかったと報告している。また、CO₂レーザーを臨床応用したBaderら³¹⁾は、CO₂レーザーの併用は治癒を改善しなかった、としている。Nd:YAGレーザーに関しては、Mailletら³²⁾がNd:YAGレーザーおよびバーで切除した根尖をラットの皮下に埋入した実験で、レーザーで切除した試料の方が組織修復が遅延したことを報告している。Nd:YAGレーザーをイヌの根尖切除術に応用した報告もされている³³⁾。

著者らも基礎実験の結果をもとに臨床でEr:YAGレーザーによる根尖切除をおこなっている³⁴⁾。従来の回転切削器具で根尖を切除する場合、バーの回転によりハンドピースが不意に動かされ、手がぶれて不必要な部分を切削してしまうおそれがあるが、レーザーによる切除では、このようなことが無いため、安心して処置を行うことができる。また、タービンや歯科用エンジンを使用した切削と比較すると、装置から発生する不快な振動がなく、患者に与える不快感も少ないと考えられる。ただし、切除に要する時間は従来の歯科用エンジンで行う方法と比較して長くなる傾向があり、今後の機器の改良に期待したい。レーザーを用いた逆根管充填用窩洞形成については、試作チップを用いた臨床応用を行っているが、単純な形態の窩洞形成は十分可能である。

5. 根管内へのレーザー応用

(1) 根管内への照射方法の改良

根管へのレーザー応用が最近まであまり行われてこなかった理由のひとつに、根管内へ効率的にレーザーを導光する導光系が開発されていなかったことがある。このため、根管へ応用はファイバー導光が可能なNd:YAGレーザーを中心として行われてきた。近年、CO₂レーザーやEr:YAGレーザーなど、これまで根管内へ照射が難しかったレーザーにも根管内照射用のプローブが開発されたため、これらのレーザーに関する研究論文が増加している。Fig.1は根管内にも挿入可能な先端部の外形が200 μ mのEr:YAGレーザー用のチップで、コア径が135 μ mである。多少の柔軟性があり、#20のKファイル等が挿入できる根管には挿入可能である。チップの先端が84度の円錐形をしており、チップから照射されるエネルギーは80%が側方に照射されるようになっている(Fig.2)。このチップの側方への照射状況を確認するため、ウシ象牙

Fig.1 Stereomicroscopic image of a cone-shaped irradiation tip

Fig.2 Schematic drawing of the experiment

Fig.3 SEM images of irradiated dentin surface by Er:YAG laser
A. Original magnification $\times 200$
B. Original magnification $\times 1,000$

質の研削面に接触させる形でレーザー照射した。Fig.3はその走査電子顕微鏡（以下SEM）像である。レーザー照射面はスミヤー層は認められず、象牙細管が開いているのが観察される。Cohenら³⁵⁾は245 μ m径のファイバー先端部に環状のリングによりHo:YAGレーザー光が側方に照射される装置を用いて実験を行っている。

Fig.4 A. Fiber Pot II
B. SEM image before processing with Fiber Pot II
C. SEM image after processing with Fiber Pot II

また、根管内に容易に導光できるNd:YAGレーザーについても、ベアファイバーを用いて根管照射を行うと、根尖方向のみへレーザーが照射され、根管壁方向へ効率的に照射できない。このことから、ファイバーを加工して側方へ照射する方法が開発されている。Fig.4はNd:YAGレーザーのファイバー先端加工用の器具と加工によるファイバー先端部のSEM像を示す。また、杉原ら³⁶⁾は、石英ファイバーの先端をTiO₂粉末のペレットの中に挿入し、レーザー照射することにより、ファイバー先端1~3mm部分の性状が変化し、レーザー光がファイバー側方から全周囲方向に照射されることを報告している。

(2)根管消毒への応用

根管形態の複雑性により、感染根管治療において機械的な拡大・清掃や、根管洗浄液による化学的清掃、根管貼薬剤による消毒を行っても根管内を無菌化できない場合がある。このため、各種のレーザーを用いて根管消毒を行う試みが行われてきた。著者らはNd:YAGレーザーを用いて根管消毒の基礎実験を行った³⁷⁾。ウシの歯の根管に*Streptococcus mutans*を培養した菌液を注入し、ファイバーを上下動しながらレーザー照射を行い、細菌数の変化を調べたところ、有意に細菌数の減少を確認した。このときの照射時間は30秒間で、100mJ 10pps, 200mJ 10pps, 100mJ 30pps, 200mJ 30ppsの照射条件を用いたが、イヌの抜髄根管で照射した実験では、100mJ 10ppsを超える条件では歯根象牙質の炭化、アンキローシスといった変化がみられた³⁸⁾。このため、安全に使える条件の100mJ 10ppsでは細菌数の減少率は60%程度に過ぎず、十分な殺菌作用をあらわす照射量では使えないことになる。

Nd:YAGレーザーだけでなく、CO₂レーザー^{39,40)}、Er:YAGレーザー⁴¹⁻⁴³⁾、Ho:YAGレーザー⁴⁴⁾、半導体レーザー⁴⁵⁾などの多くのレーザーの消毒効果をみた実験が行われているが、一定の消毒効果はみられるものの完全に無菌化できないという報告が多い。また、消毒効果としてはレーザーよりもNaClOの方が優れているという実験結果も多い^{39,41,45)}。

Moshonovら⁴⁶⁾は、抜去歯の根管内に色素(1%ニグロシン)を入れた後、4.5Wで1分間Nd:YAGレーザーを根管照射し、*Enterococcus faecalis*が99%以上減少したことを報告している。一方、1%NaClOを2分間根管に入れた群では100%の致死率を示した。Sealら⁴⁷⁾は、光増感剤のtoluidine blue Oを用いて35mWのヘリウムネオンレーザーを照射し、消毒効果を報告している。ただし、3%NaClOの10分間の処理では、完全な無菌化が達成されたとしている。Moritzら⁴⁸⁾は、根管内の*Escherichia coli*と*Enterococcus faecalis*に1.5W, 10ppsの条件でNd:YAGレーザー、Ho:YAGレーザー、Er:YAGレーザーを5秒間を5回照射したところ、いずれも過度な温度上昇なく99%以上の消毒効果を報告している。さらに、Schoopら⁴²⁾は、Er:YAGレーザーの実効出力1W, 15ppsでの照射により歯根表面の温度上昇は3.1℃であり、6種の細菌のうち5種では99.99%の殺菌効果を示したとしている。

これらの実験の多くは、抜去歯の根管内で培養した細菌に対するレーザー照射による消毒効果をみる実験である。限られた細菌種に対する実験ではあるが、レーザー照射が持つ消毒効果については一定の評価ができと思われる。ただ、通常、レーザーの出力を増すと消毒効果も増大するが、それに伴って歯根周囲組織への傷害が強くなる傾向がある。このようなことから、レーザーを根管消毒に応用する場合には、レーザーのみに消毒効果を期待するのではなく、通法の根管形成、消毒の手順を踏み、かつ、レーザーを補助的な位置付けで使用するのがよいと考えられる。

(3)根管照射による根管清掃、根管象牙質の表面性状の変化

Weichmanら⁴⁹⁾は、CO₂レーザーにより根尖孔を封鎖することを試みたが、うまくいかなかったことを報告した。以後、根尖孔の封鎖に関する報告もいくつかあるが^{50,51)}、臨床応用できるような結果は得られていない。

一方、根管内でレーザー照射することにより根管壁表面の構造変化、根管内のスミヤ層や残渣の除去に関する形態学的な多数の研究がある。特に、近年は複数種のレーザーを用いた実験報告が多い。Kahnら⁵²⁾は、Nd:YAGレーザー、CO₂レーザー、アルゴンレーザーを抜去歯に照射し、Nd:YAGレーザーの2W, 20pps, 1秒の条件が根尖部のデブリーの除去に有効であることを報告している。Takedaら⁵³⁾は、アルゴン、Nd:YAG、Er:YAGの3種のレーザーを用いてスミヤ層の除去効果を比較したところ、Er:YAGレーザーが最も効果的だった、としている。Moshonovら⁵⁴⁾は、抜去歯でKファイルと併用しながら、波長1.34μmのNd:YAGレーザーで根管形成後SEM観察し、Kファイルのみで形成した根管よりも根管の清掃状態が良好であり、また、根管象牙質のカルシウム/リンの比に影響はなかったとしている。Saundersら⁵¹⁾は、Nd:YAGレーザーを1~1.7W, 15pps, 60秒で抜去歯の根管内に照射したが、根管内のデブリーの状態は対照との間に有意差はなかった、としている。また、歯髓

組織の除去に関しては、歯冠側1/3のみで対照より有意に歯髄組織が除去されたと報告している。Moshonovら⁵⁵⁾は、アルゴンレーザーの照射により根管内のデブリーの除去を報告している。Machidaら⁵⁶⁾はKTPレーザー、Nd:YAGレーザーによりスミヤー層やデブリーの除去効果を報告している。

これ以外にもNd:YAGレーザー^{57,58)}、CO₂レーザー^{59,60)}、Ho:YAGレーザー⁶¹⁾、Nd:YAPレーザー^{62,63)}、Er:YAGレーザー⁶⁴⁾、KTPレーザー^{65,66)}等の多数の抜去歯を用いた論文報告がある。いずれも、スミヤー層の除去、根管内のデブリーの減少、象牙質表面の溶融等の変化を示している。

(4)根管充填後の根尖部の封鎖性への影響

根管内にレーザー照射することにより、根管充填後の根尖部の封鎖性が向上するかを調べた研究も行われている。

Parkら⁶⁷⁾は、5W、20Hz、3秒の条件でNd:YAGレーザーを根管全体に照射し、根管充填後の封鎖性を電気抵抗値により経時的に評価したところ、レーザー照射により有意に封鎖性が向上したことを示している。Antonioら⁶⁸⁾は、根尖部の封鎖性を色素浸透で計測し、Er:YAGレーザーを120mJ、10ppsで合計20秒間照射したものと比較し、Nd:YAGレーザーを100mJ、15ppsで20秒間照射したものの方が有意に色素浸透が少なかった、としている。Goya、Kimuraら⁶⁹⁻⁷¹⁾は、根管内に墨汁を塗付し、ファイバー先端をアピカルストップに置いた状態でNd:YAGレーザーを照射すると根尖部の封鎖性が向上することを報告している。また、墨汁なしのNd:YAGレーザーやArレーザー、Er:YAGレーザーでは封鎖性にコントロールと差がないとしている。このように、根尖部付近あるいは根管全体にレーザー照射することにより、根管充填後の根尖部の封鎖性が向上する、という結果が多数報告されている。

(5)根管形成について

レーザーで根管形成を行うことについて抜去歯を用いた基礎実験の報告がある。Shojiら⁷²⁾は、Er:YAGレーザーを根管内に導光し、根管壁方向への照射を可能にした円錐形のチップを用いた根管拡大について報告している。Kimuraら⁷³⁾はEr:YAGレーザーで根管形成した歯を根管充填して根尖部の封鎖性をKファイルで形成した歯と比較し、根尖部の封鎖性に有意差はなかったとしている。Kimuraら⁷⁴⁾は抜去歯を用い、Er:YAGレーザーで根管形成したところ、根尖部での温度上昇は6度未満、歯根中央部では3度未満であったことを報告している。また、彎曲根管の形成は難しく、臨床応用にはさらなる研究が必要であると述べている。Keslerら⁷⁵⁾は抜去歯で直線的な根管の根管形成を、Kファイルによる根管形成と比較したところ、Er:YAGレーザーでは、根管の清掃・拡大・形成がより効率的にできたと報告している。SEMでは、根管内の残渣はなく、スミヤー層も除去され、象牙細管が開口しているのが観察された。レーザー群におい

ても、Kファイル群と同様のテーパーの形成がなされたが、根管壁に波状の形態を報告している。

Cohenら³⁵⁾はHo:YAGレーザーで#25の径から#40まで根管拡大を行ったところ、根管壁には有機質の残渣もなくきれいであったこと、また、歯根の温度上昇は5℃以内であったことを報告している。Cohenら⁷⁶⁾は、Ho:YAGレーザーで4種の直径(140~410μm)を持つファイバーにより0.5W、0.75W、1Wの3条件で抜去歯を根管形成したところ、98%で歯根の温度変化が5℃以内であったことを報告しており、歯根周囲組織に対して安全な処置であると推論している。

Nd:YAGレーザーによる根管形成に関しては仲嶋ら^{77,78)}が透明根管模型および抜去歯を用いて実験しているが、Nd:YAGレーザーでも根管壁象牙質の切削能は認められるが、彎曲根管では階段形成により根尖部までの形成ができなかったこと、照射にともなう圧力によって根管内容物が根尖孔外に押し出されることを報告している。

これまでに開発されている根管形成用のチップは200μm~250μm程度以上の直径を有する。このため、現時点ではレーザー単独で根管形成は行えず、あらかじめKファイル等でチップが作業長まで挿入できるようにしておくことが必要である。いずれにしても、根管形成するためのプローブ等のさらなる改良が必要である。また、彎曲根管への追従性についてはファイル等の機械的拡大を行う場合と同様にレジ形成の傾向が認められることから、この点についても検討が必要であろう。

(6)根管内容物除去

海老原ら⁷⁹⁾は、抜去歯を用いた実験で、Nd:YAGレーザーにより金属ポストおよびガッタパーチャポイントの除去が可能であったこと、また、根管破折ファイルの除去は8例中5例が成功したことを報告している。Viducicら⁸⁰⁾は、抜去歯を用い、根管充填材の除去にNd:YAGを応用したところ、1.5W、20Hzの条件でガッタパーチャの除去が可能であったことを報告している。レーザー照射は歯根の温度上昇が4℃になったところで中止し、室温に下がったところで再度開始した。最大の温度上昇は10℃を超える場合があったことから、臨床で使用する際にはより弱い照射条件と照射時間を短くすることを提案している。また、Fargeら⁸¹⁾は、Nd:YAPレーザーを用い、ガッタパーチャポイント、根管充填用シーラー、銀ポイント、破折ファイルの除去の報告をしている。

Takashinaら⁸²⁾は、金属ポストの除去の基礎的な実験を行い、白金加金、金銀パラジウム合金、銀合金で作製したポストを3種のセメント合着したものをNd:YAGレーザーで除去し、いずれも除去が可能であったことを示した。また、安生ら⁸³⁾は、根管充填材AH26の除去をNd:YAGレーザーで行い、超音波による除去と比較し短時間で効率よく除去できたことを報告している。Fig.5はNd:YAGレーザー(A)および超音波(B)で除去を行った後のコンタクトマイクロラジオグラフィ(以下CMR)像の代表例で、超音波群にシーラーの残存が多く認められる。

Fig.5 A. CMR image of a tooth after removal of AH 26 with Nd:YAG laser
B. CMR image of a tooth after removal of AH 26 with ultrasonic device

Fig.6 Schematic drawing of experimental setup

また、根管内破折器具を除去する方法には、前述のようにレーザーで破折器具自体を蒸散させることにより除去する方法もあるが、著者らはNd:YAGレーザーで破折片を金属チューブに溶接する方法を考案し、基礎的実験を行なった⁸⁴⁾。24本のKファイルの刃部先端から長さ10mm(直径0.35mm)を試料とした。試料をステンレスチールのチューブに挿入後、チューブに光ファイバー(直径=400 μm)を挿入しファイバー先端を試料と接触させ、10ppsで1秒間Nd:YAGレーザー照射(照射エネルギー:300mJ,400mJ,500mJ,600mJ)を行った(Fig.6)。その後引張り試験を行い、溶接部が破壊される荷重を測定した。結果は全例でレーザー溶接が成功した(Fig.7)。引張り試験による破壊荷重は、300mJ群、400mJ群、500mJ群、600mJ群それぞれ20.6±12.6N, 57.5±13.9N, 51.9±11.6N, 50.7±11.5Nとなった。統計処理の結果、300mJ群の荷重はその他の群の荷重より有意に小さかった(Fig.8)。破折片の断端部の直径が小さい場合には溶接が難しいが、直径がある程度以上の大きさの破折片の除去は十分に可能と考えられる。ただし、この方法はまだ基礎実験の段階であり、臨床応用のためにはレーザー照射による歯周組織への影響についても検討する必要がある。

Fig.7 Stereomicroscopic image of the samples

Fig.8 Maximum load for removing tips

(7)根管内でのレーザー照射による根尖歯周組織への影響

レーザー照射に伴う根尖歯周組織への影響を考慮し、抜去歯を用いた歯根表面の温度測定を行った実験が多数報告されている⁸⁵⁻⁸⁷⁾。しかしながら、レーザーを根管内で照射した際の根尖歯周組織への影響としてはFig.9に示すように歯根の温度上昇による熱の伝導によるものだけでなく、透過光が直接歯周組織に到達する影響や根尖孔を通じての圧力波・衝撃波の影響なども考えられるので、抜去歯の温度変化は安全性を示すひとつの指標にすぎない。このため、動物実験による安全性の確認が必要であるが、現時点では動物実験で病理組織学的に検討した報告はそれ程多くはない。また、多種類のレーザーの多様な照射条件を網羅するような動物実験を行うのは現実問題として難しいのが実情である。

Bahcall⁸⁸⁾らは、3W, 25ppsの条件でNd:YAGレーザーを照射したところ、術後1日で歯根膜細胞の壊死、術後30日でアンキローシスとセメント質の吸収を報告している。関根ら³⁸⁾は、レーザー照射の安全性確認のためイヌの歯を用いて実験を行い、100mJ 10pps, 30秒の照射であれば安全にレーザーを使用できるとしている。しかし100mJ 10ppsを超える照射条件では、セメント質の吸収、

Fig.9 Effect of intracanal laser irradiation on the periapical tissue

歯根の外部吸収、歯根膜線維の変性、あるいはアンキローシス等が認められたことも報告している。

これ以外にも歯周組織への影響を調べた多くの実験⁸⁹⁻⁹²⁾があるが、レーザーの根管内照射により歯周組織への重篤な傷害が生じる可能性があるため、レーザー照射に際しては慎重な条件設定が不可欠と考えられる。

(8)根管治療への臨床応用

Nd:YAGレーザーを根管治療に臨床応用した報告として、Gutknechtら⁹³⁾は、感染根管治療で、パルス波Nd:YAGレーザーを1.5W、15ppsの条件で照射し、根管充填したところ、82%の症例で術後3～12ヶ月に根尖部透過像が減少し、打診痛・異和感がない状態であったと報告している。Kobaら⁹⁴⁾は、感染根管治療で1W、15pps、1秒の条件でアピカルシート部で照射したところ、術後1週および3ヶ月後の打診痛が有意に少なかった、としている。Kobaら⁹⁵⁾は、抜髄後の根管にNd:YAGレーザー照射し、根管充填を行ったが、術後の自発痛、打診痛の程度は、レーザーを照射しなかった対照との間で有意差はなかったと報告している。

CO₂レーザーの臨床応用として、Keslerら⁹⁶⁾は、抜去予定歯に対し抜髄後、レーザーを照射し、歯根表面温度を熱電対で温度測定したところ、温度上昇は38度以下であったことを報告している。またKeslerら⁹⁷⁾は、900歯、1512根管の感染根管治療にCO₂レーザーを250 mJ、20ppsの条件で断続的に60パルス照射したところ、98%の成功率をしめしたと報告している。

(9)根管への応用が難しい理由について

根管内へのレーザー応用が広く普及していない理由としては以下の点が考えられる。

1)解剖学的要因

根管の形態は複雑で、断面の形態も円ではなく、複雑な形態をしている場合がある。また、副根管、側枝、網目状の形態など根管系自体が複雑なため、レーザーを根管全体に照射することは難しい。

2)根管内へ照射するための導光系、照射方向の問題

根管内への応用研究は、光ファイバーで根管内に容易に導光できるNd:YAGレーザーを用いた実験が以前から行われてきた。ファイバー導光が難しかったCO₂レーザーやEr:YAGレーザー等についても近年ようやく根管内照射用のチップ等が開発され、応用範囲が拡大しつつある。また、根管内で照射するターゲットは多くの場合、歯軸と垂直方向にある根管象牙質であるが、通常ファイバーでレーザー照射するとレーザー光は大部分が根尖方向に照射されることになる。このため、側方へ照射する仕組みが必要である。

3)歯周組織への影響

レーザーの波長にもよるが、レーザー照射に伴い、歯根の周囲にある歯根膜、歯槽骨等にレーザーの透過光が到達するため、高出力のレーザー照射は歯周組織を直接的に傷害する可能性がある(Fig.9)。また、レーザー照射により歯根象牙質、セメント質が高温になり、歯に接している歯根膜に熱の影響がおよぶ可能性がある。また、根尖孔を通じて衝撃波が直接歯周組織に影響する可能性もある⁹⁸⁾。このようなことから、歯周組織を傷害しない照射条件を決定することが肝要である。

4)レーザー照射効果の確認の困難性

狭小な根管内という環境では、レーザー被照射部位の状況をリアルタイムに確認しながらレーザー照射を行うことが難しい。近年では歯内療法に手術用実体顕微鏡が導入されつつあるが、直線的な太い根管においても歯根中央部付近から根尖にかけての根管壁の性状を正確に視認することは難しい。弯曲している根管では弯曲部より根尖側は見えない。また、根管に挿入したレーザーのプロープが視野を妨げることもある。

5)照射条件の制御の困難性

根管は細い管状の構造をしており、プロープを操作する方向の自由度が低いことと、直視できないことから、術者が被照射面とプロープの距離の調節することが困難である。また、根管内に導光するためにファイバー先端の加工や特殊なチップを使用する場合には、レーザー装置本体でのレーザー光の出力から相当減衰する。側方に照射されるようなプロープや加工したファイバーの場合には、パワーメーターで実効出力を測定すること自体が難しい。さらに、根管内で照射するうちに実効出力が低下する。このようなことから、根管内照射の場合には特に照射条件を制御することが難しいと考えられる。

以上のようなことから、特に根管内照射する際には、歯周組織への安全性を考慮して使用することが必要である。

6. おわりに

歯内療法へのレーザー応用は、基礎的な研究報告が占める割合が非常に高かったが、最近になり直接覆髄法、生活断髄法、感染根管治療などの臨床応用で良好な結果を示す論文がいくつか報告されるようになり、ようやく

臨床応用の段階に到達しつつある。今後、さらなる発展が期待される。

参考文献

- 1) B. Gazelius, L. Olgart, L. Edwall: Non-invasive recording of blood flow in human dental pulp. *Endod. Dent. Traumatol.*, 2: 219-221, 1986.
- 2) L. Olgart, B. Gazelius, U. Lindh-Strömberg: Laser Doppler flowmetry in assessing vitality in luxated permanent teeth. *Int. Endod. J.*, 21: 300-306, 1988.
- 3) A. Ebihara, Y. Tokita, T. Izawa, and H. Suda: Pulpal blood flow assessed by laser Doppler flowmetry in a tooth with a horizontal root fracture. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. & Endod.*, 81: 229-233, 1996.
- 4) R. Emshoff, I. Emshoff, I. Moschen, H. Strobl: Laser Doppler flow measurements of pulpal blood flow and severity of dental injury. *Int. Endod. J.*, 37: 463-467, 2004.
- 5) K. E. Akpınar, K. Er, S. Polat, N. T. Polat: Effect of gingiva on laser Doppler pulpal blood flow measurements. *J. Endodon.*, 30: 138-140, 2004.
- 6) S. Shoji, M. Nakamura, H. Horiuchi: Histopathological changes in dental pulp irradiated by CO₂ laser: A preliminary report on laser pulpotomy. *J. Endodon.*, 11: 379-384, 1985.
- 7) J. Melcer, M. T. Chaumette, and F. Melcer: Dental pulp exposed the CO₂ laser beam. *Lasers Surg. Med.*, 7: 347-352, 1987.
- 8) 海老原新, 関根義朗, 竹田淳志, 須田英明: Nd:YAGレーザーの直接覆髄法への応用に関する実験的研究, *日歯保存誌*, 35: 876-886, 1992.
- 9) 海老原新: Nd:YAGレーザーの生活断髄法への応用に関する実験的研究, *日歯保存誌*, 32: 1670-1684, 1989.
- 10) P. Wilder-Smith, G. M. Peavy, D. Nielsen, and A. Arrastia-Jitosho: CO₂ laser treatment of traumatic pulpal exposures in dogs. *Lasers Surg. Med.*, 21: 432-437, 1997.
- 11) T. Utsunomiya: A histopathological study of the effects of low-power laser irradiation on wound healing of exposed dental pulp tissues in dogs, with special reference to lectins and collagens. *J. Endodon.*, 24: 187-193, 1998.
- 12) 天谷哲也, 瀧澤雅一, 平井義人: Er:YAGレーザーによる露髄組織への影響に関する研究 成犬歯牙における実験病理学的検討, *日レ歯誌*, 11: 8-21, 2000.
- 13) 貝津徹, 五十嵐勝, 川崎孝一: Nd:YAGレーザーの歯髄・根尖歯周組織への影響に関する組織学的研究 水酸化カルシウムを断髄・根管封薬に用いた場合, *日歯保存誌*, 43: 1290-1311, 2000.
- 14) 北村慶史, 加藤喜郎: レーザー照射と高分子接着性レジンによる直接歯髄覆髄が露髄部の創傷治癒に及ぼす効果に関する病理組織学的研究, *日歯保存誌*, 42: 461-477, 1999.
- 15) 庄司桂子, 五十嵐勝, 川崎孝一: α -TCPセラミックスをサル的生活断髄・麻酔抜髄に用いたNd:YAGレーザーの創傷治癒効果に関する組織学的観察, *日歯保存誌*, 45: 1095-1111, 2002.
- 16) 井野場朗子, 五十嵐勝, 川崎孝一: HAPと α -TCPセラミックスを用いる生活歯髄切断法のCO₂レーザー光によるサル歯髄反応の組織学的観察, *日歯保存誌*, 46: 118-131, 2003.
- 17) A. Moritz, U. Schoop, K. Goharkhay, and W. Sperr: Advantages of a pulsed CO₂ laser in direct pulp capping: A long-term in vivo study. *Lasers Surg. Med.*, 22: 288-293, 1998.
- 18) P. J. Santucci: Dycal versus Nd:YAG laser and Vitrebond for direct pulp capping in permanent teeth. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 17: 69-75, 1999.
- 19) R. D. Elliott, M. W. Roberts, J. Burkes, C. Phillips: Evaluation of the carbon dioxide laser on vital human primary pulp tissue. *Pediat. Dent.*, 21: 327-331, 1999.
- 20) 井上友紀, 大西智之, 大嶋隆: Er:YAGレーザーの乳歯生活歯髄切断法への応用, *小児歯科学雑誌*, 40: 739-743, 2002.
- 21) 白野学, 海老原隆, 加藤喜郎: 露髄面に対するCO₂レーザー照射が接着性レジン直接覆髄創面の治癒態度に及ぼす影響について, *日歯保存誌*, 46: 761-781, 2003.
- 22) L. J. Miserendino, W. III: The laser apicoectomy: Endodontic application of the CO₂ laser for periapical surgery. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol.*, 66: 615-619, 1988.
- 23) A. Moritz, N. Gutknecht, K. Goharkhay, U. Schoop, et al.: The carbon dioxide laser as an aid in apicoectomy: an in vitro study. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 15: 185-188, 1997.
- 24) E. Esen, O. Yoldas, M. Kürkcü, M. C. Dogan, et al.: Apical microleakage of root-end cavities prepared by CO₂ laser. *J. Endodon.*, 30: 662-4, 2004.
- 25) A. Stabholz, A. Khayat, S. H. Ravanshad, D. W. McCarthy, J. Neev, M. Torabinejad: Effects of Nd:YAG laser on apical seal of teeth after apicoectomy and retrofill. *J. Endodon.*, 18: 371-375, 1992.
- 26) 海老原新, 関根義朗, 竹田淳志, 須田英明: Er:YAGレーザーの根尖切除術への応用に関する基礎的検討, *日レ歯誌*, 8: 23-30, 1997.
- 27) A. F. Paghdwala: Root resection of endodontically treated teeth by erbium: YAG laser radiation. *J. Endodon.*, 19: 91-94, 1993.
- 28) T. Komori, K. Yokoyama, Y. Matsumoto, and K. Matsumoto: Erbium:YAG and holmium:YAG laser root resection of extracted human teeth. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 9: 9-13, 1997.
- 29) 海老原新, 和達礼子, 関根義朗, 竹田淳志, ほか: Er:YAGレーザーを用いた逆根管充填窩洞形成に関する研究, *日レ歯誌*, 9: 23-31, 1998.
- 30) S. Friedman, I. Rotstein, and A. Mahamid: In vivo efficacy of various retrofills and of CO₂ laser in apical surgery. *Endod. Dent. Traumatol.*, 7: 19-25, 1991.
- 31) G. Bader, S. Lejenue: Prospective study of two retrograde endodontic apical preparations with and without the use of CO₂ laser. *Endod. Dent. Traumatol.*, 14: 75-78, 1998.
- 32) W. A. Mailliet, C. D. Torneck, and S. Friedman: Connective tissue response to root surfaces resected with Nd:YAG laser or burs. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. & Endod.*, 82: 681-690, 1996.
- 33) 竹田淳志: 外科的歯内療法におけるNd:YAGレーザー応用に関する実験的研究, *日歯保存誌*, 32: 541-553, 1989.
- 34) A. Takeda, T. Anjo, M. Takashina, A. Ebihara, et al.: Apicoectomy using Er:YAG laser - a clinical study -, *Lasers in Dentistry Revolution of Dental Treatment in the New Millennium*, Elsevier: 261-264, 2003.
- 35) B. I. Cohen, A. S. Deutsch, and B. L. Musikant: Effect of power settings on temperature change at the root surface when using a Holmium YAG laser in enlarging the root canal. *J. Endodon.*, 22: 596-599, 1996.
- 36) 杉原成良, 神谷誠, 和賀正明: Nd:YAGレーザー用光ファイバーのTiO₂による先端加工, *日レ歯誌*, 14: 25-31, 2003.
- 37) 関根義朗, 和達礼子, 海老原新, 竹田淳志, ほか: Nd:YAGレーザーによる根管消毒, *日レ歯誌*, 6: 31-39, 1995.
- 38) 関根義朗, 和達礼子, 海老原新, 竹田淳志, ほか:

- Nd:YAGレーザーの根管内照射による歯周組織への影響, 日歯誌, 7: 12-21, 1996.
- 39) A. Le Goff, A. Dautel-Morazin, M. Guigand, J. M. Vulcain, et al.: An evaluation of the CO₂ laser for endodontic disinfection. *J. Endodon.*, 25: 105-108, 1999.
 - 40) 伊藤彩子, 濱口明子, 鈴木隆一, 堀場直樹, ほか: 炭酸ガス (CO₂)レーザーの根管処置応用への基礎的研究 人工根管を用いた殺菌消毒効果の検討, 日歯保存誌, 44: 86-95, 2001.
 - 41) A. Mehl, M. Folwaczny, C. Haffner, and R. Hickel: Bactericidal effects of 2.94 microns Er:YAG-laser radiation in dental root canals. *J. Endodon.* 25: 490-493, 1999.
 - 42) U. Schoop, A. Moritz, W. Kluger, S. Patruta, et al.: The Er:YAG laser in endodontics: results of an in vitro study. *Lasers Surg. Med.*, 30: 360-364, 2002.
 - 43) 五味一博, 小林禎子, 中野雅子, 山口博康, ほか: Er及びNd YAG Laserの感染根管消毒効果について, 日歯保存誌, 40: 800-806, 1997.
 - 44) N. Gutknecht, M. Nuebler-Moritz, S. F. Burghardt, and F. Lampert: The efficiency of root canal disinfection using a holmium:yttrium-aluminum-garnet laser in vitro. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 15: 75-78, 1997.
 - 45) M. Kreisler, W. Kohnen, M. Beck, H. Al Haj, et al.: Efficacy of NaOCl/H₂O₂ irrigation and GaAlAs laser in decontamination of root canals in vitro. *Lasers Surg. Med.*, 32: 189-196, 2003.
 - 46) J. Moshonov, D. Ørstavik, S. Yamauchi, M. Pettiette, et al.: Nd:YAG laser irradiation in root canal disinfection. *Endod. Dent. Traumatol.*, 11: 220-224, 1995.
 - 47) G. J. Seal, Y. L. Ng, D. Spratt, M. Bhatti, et al.: An in vitro comparison of the bactericidal efficacy of lethal photosensitization or sodium hypochlorite irrigation on *Streptococcus intermedius* biofilms in root canals. *Int. Endod. J.* 35: 268-274, 2002.
 - 48) A. Moritz, U. Schoop, K. Goharkhay, S. Jakolitsch, et al.: The bactericidal effect of Nd:YAG, Ho:YAG, and Er:YAG laser irradiation in the root canal: an in vitro comparison. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 17: 161-164, 1999.
 - 49) J. A. Weichman, F. M. Johnson: Laser use in endodontics. - A preliminary investigation-. *Oral Surg.*, 31: 416-420, 1971.
 - 50) C. Mor, A. Stabholz, J. Neev, and I. Rotstein: Efficacy of XeCl-308 excimer laser in fusing hydroxyapatite to seal the root apex. *Endod. Dent. Traumatol.*, 11: 169-171, 1995.
 - 51) W. P. Saunders, C. J. Whitters, R. Strang, H. Moseley, et al.: The effect of an Nd-YAG pulsed laser on the cleaning of the root canal and the formation of a fused apical plug. *Int. Endod. J.*, 28: 213-220, 1995.
 - 52) M. A. Khan, M. F. Khan, M. W. Khan, H. Wakabayashi, et al.: Effect of laser treatment on the root canal of human teeth. *Endod. Dent. Traumatol.*, 13: 139-145, 1997.
 - 53) F. H. Takeda, T. Harashima, Y. Kimura, and K. Matsumoto: Comparative study about the removal of smear layer by three types of laser devices. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 16: 117-122, 1998.
 - 54) J. Moshonov, B. Peretz, T. Brown, and I. Rotstein: Cleaning of the root canal using Nd:YAP laser and its effect on the mineral content of the dentin. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 21: 279-282, 2003.
 - 55) J. Moshonov, A. Sion, J. Kasirer, I. Rotstein, et al.: Efficacy of argon laser irradiation in removing intracanal debris. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. & Endodon.*, 79: 221-5, 1995.
 - 56) T. Machida, P. Wilder-Smith, A. M. Arrastia, L. H. Liaw, et al.: Root canal preparation using the second harmonic KTP:YAG laser: a thermographic and scanning electron microscopic study. *J. Endodon.*, 21: 88-91, 1995.
 - 57) T. Harashima, F. H. Takeda, Y. Kimura, and K. Matsumoto: Effect of Nd:YAG laser irradiation for removal of intracanal debris and smear layer in extracted human teeth. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 15: 131-135, 1997.
 - 58) C. Zhang, Y. Kimura, K. Matsumoto, T. Harashima, et al.: Effects of pulsed Nd:YAG laser irradiation on root canal wall dentin with different laser initiators. *J. Endodon.*, 24: 352-355, 1998.
 - 59) B. Önal, T. Ertl, G. Siebert, and G. Müller: Preliminary report on the application of pulsed CO₂ laser radiation on root canals with AgCl fibers: a scanning and transmission electron microscopic study. *J. Endodon.*, 19: 272-276, 1993.
 - 60) J. N. Eto, W. Niu, F. H. Takeda, Y. Kimura, et al.: Morphological and atomic analytical changes of root canal wall dentin after treatment with thirty-eight percent Ag(NH₃)₂F solution and CO₂ laser. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 17: 19-24, 1999.
 - 61) B. H. Stevens, H. O. Trowbridge, G. Harrison, and S. F. Silverton: Dentin ablation by Ho: YAG laser: correlation of energy versus volume using stereophotogrammetry. *J. Endodon.*, 20: 246-249, 1994.
 - 62) J. Y. Blum, and M. J. Abadie: Study of the Nd:YAP laser. Effect on canal cleanliness. *J. Endodon.*, 23: 669-675, 1997.
 - 63) 山崎裕司, 中川寛一: Nd:YAPレーザー照射と根管清掃剤の併用が根管壁象牙質の変化に及ぼす影響, 日歯保存誌, 44: 869-880, 2001.
 - 64) F. H. Takeda, T. Harashima, Y. Kimura, and K. Matsumoto: Efficacy of Er:YAG laser irradiation in removing debris and smear layer on root canal walls. *J. Endodon.*, 24: 548-551, 1998.
 - 65) H. M. Tewfik, D. H. Pashley, J. A. Horner, M. M. Sharawy: Structural and functional changes in root dentin following exposure to KTP/532 laser. *J. Endodon.*, 19: 492-497, 1993.
 - 66) A. M. Arrastia-Jitosho, L. H. Liaw, W. Lee, P. Wilder-Smith: Effects of a 532 nm Q-switched nanosecond pulsed laser on dentin. *J. Endodon.*, 24: 427-431, 1998.
 - 67) D. S. Park, H. J. Lee, H. M. Yoo, and T. S. Oh: Effect of Nd:YAG laser irradiation on the apical leakage of obturated root canals: an electrochemical study. *Int. Endod. J.*, 34: 318-321, 2001.
 - 68) C. A. Carvalho, M. C. Valera, S. Gown-Soares, C. de Paula Eduardo: Effects of Nd:YAG and Er:YAG lasers on the sealing of root canal fillings. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 20: 215-219, 2002.
 - 69) C. Goya, R. Yamazaki, Y. Tomita, Y. Kimura, et al.: Effects of pulsed Nd:YAG laser irradiation on smear layer at the apical stop and apical leakage after obturation. *Int. Endod. J.*, 33: 266-271, 2000.
 - 70) Y. Kimura, R. Yamazaki, C. Goya, Y. Tomita, et al.: A comparative study on the effects of three types of laser irradiation at the apical stop and apical leakage after obturation. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 17: 261-266, 1999.
 - 71) R. Yamazaki, C. Goya, Y. Tomita, Y. Kimura, et al.: Study on apical leakage of the teeth after argon laser treatment and obturation. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 17: 121-5, 1999.
 - 72) S. Shoji, H. Hariu, H. Horiuchi: Canal enlargement by Er:YAG laser using a cone-shaped irradiation tip. *J. Endodon.*, 26: 454-458, 2000.
 - 73) Y. Kimura, K. Yonaga, K. Yokoyama, E. Matsuoka, et al.:

- Apical leakage of obturated canals prepared by Er:YAG laser. *J. Endodon.*, 27: 567-570, 2001.
- 74) Y. Kimura, K. Yonaga, K. Yokoyama, J. Kinoshita, et al.: Root surface temperature increase during Er:YAG laser irradiation of root canals. *J. Endodon.*, 28: 76-78, 2002.
- 75) G. Kesler, R. Gal, A. Kesler, R. Koren: Histological and scanning electron microscope examination of root canal after preparation with Er:YAG laser microprobe: A preliminary in vitro study. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 20: 269-277, 2002.
- 76) B. I. Cohen, A. S. Deutsch, B. L. Musikant, and M. K. Pagnillo: Effect of power settings versus temperature change at the root surface when using multiple fiber sizes with a Holmium YAG laser while enlarging a root canal. *J. Endodon.*, 24: 802-806, 1998.
- 77) 中嶋正人, 平田健一, 今井潔, 関根一郎: Nd:YAGレーザーを用いた根管形成の可能性について(第1報) 直線根管への応用, 日歯保存誌, 45: 977-983, 2002.
- 78) 中嶋正人, 平田健一, 今井潔, 関根一郎: Nd:YAGレーザーを用いた根管形成の可能性について(第2報) 湾曲根管への応用, 日歯保存誌, 46: 289-295, 2003.
- 79) 海老原新, 高品正明, 竹田淳志, 須田英明: パワーパルスNd:YAGレーザーを用いた根管内異物除去に関する基礎的検討, 日レ歯誌, 10: 25-33, 1999.
- 80) D. Viducic, S. Jukic, Z. Karlovic, Z. Bozic, et al.: Removal of gutta-percha from root canals using an Nd:YAG laser. *Int. Endod. J.*, 36: 670-673, 2003.
- 81) P. Farge, P. Nahas, and P. Bonin: In vitro study of a Nd:YAP laser in endodontic retreatment. *J. Endodon.*, 24: 359-363, 1998.
- 82) M. Takashina, A. Ebihara, M. Sunakawa, T. Anjo, et al.: The possibility of dowel removal by pulsed Nd:YAG laser irradiation. *Lasers Surg. Med.*, 31: 268-274, 2002.
- 83) 安生智郎, 高品正明, 海老原新, 竹田淳志, ほか: パルス波Nd:YAGレーザーによるレジン系糊剤根管充填材AH26の除去に関する基礎的研究, 日歯保存誌, 46: 896-903, 2003.
- 84) 竹田淳志, 安生智郎, 海老原新, 須田英明: Nd:YAGレーザーによる根管破折器具除去に関する基礎的研究, 日レ歯誌, 15: 14-19, 2004.
- 85) 高品正明, 竹田淳志, 安生智郎, 海老原新, ほか: パルス波Nd:YAGレーザーによる金属ポスト除去時の歯根表面の温度上昇に関する基礎的研究, 日レ歯誌, 11: 27-34, 2000.
- 86) W. H. Lan: Temperature elevation on the root surface during Nd:YAG laser irradiation in the root canal. *J. Endodon.*, 25: 155-156, 1999.
- 87) 伊藤彩子, 堀場直樹, 山口正孝, 松本享, ほか: 炭酸ガスレーザーの根管照射時における歯根表面の温度変化, 日歯保存誌, 46: 970-977, 2003.
- 88) J. Bahcall, P. Howard, L. Miserendino, H. Walia: Preliminary investigation of the histological effects of laser endodontic treatment on the periradicular tissues in dogs. *J. Endodon.*, 18: 47-51, 1992.
- 89) 稲本雄之, 林宏行, 奥野一吉, 野口勝司, ほか: Nd:YAGレーザーの根管照射による根管壁および歯周組織の変化, 日歯保存誌, 40: 240-244, 1997.
- 90) K. Koba, Y. Kimura, K. Matsumoto, T. Takeuchi, et al.: Pulsed Nd:YAG laser application to one-visit treatment of infected root canals in dogs: a histopathological study. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 16: 217-221, 1998.
- 91) K. Koba, Y. Kimura, K. Matsumoto, T. Takeuchi, et al.: A histopathological study of the effects of pulsed Nd:YAG laser irradiation on infected root canals in dogs. *J. Endodon.*, 25: 151-154, 1999.
- 92) K. Koba, Y. Kimura, K. Matsumoto, T. Takeuchi, et al.: A histopathological study of the morphological changes at the apical seat and in the periapical region after irradiation with a pulsed Nd:YAG laser. *Int. Endod. J.*, 31: 415-420, 1998.
- 93) N. Gutknecht, F. Kaiser, A. Hassan, and F. Lampert: Long-term clinical evaluation of endodontically treated teeth by Nd:YAG lasers. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 14: 7-11, 1996.
- 94) K. Koba, Y. Kimura, K. Matsumoto, H. Watanabe, et al.: Post-operative symptoms and healing after endodontic treatment of infected teeth using pulsed Nd:YAG laser. *Endod. Dent. Traumatol.*, 15: 68-72, 1999.
- 95) K. Koba, Y. Kimura, K. Matsumoto, H. Gomyoh, et al.: A clinical study on the effects of pulsed Nd:YAG laser irradiation at root canals immediately after pulpectomy and shaping. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 17: 53-56, 1999.
- 96) G. Kesler, R. Koren, A. Kesler, N. Hay, et al.: Histological changes induced by CO₂ laser microprobe specially designed for root canal sterilization: in vivo study. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 16: 263-267, 1998.
- 97) G. Kesler, R. Koren, A. Kesler, N. Hay, et al.: Three years of clinical evaluation of endodontically treated teeth by 15 F CO₂ laser microprobe: in vivo study. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, 17: 111-114, 1999.
- 98) G. Levy, I. Rizoio, S. Friedman, and H. Lam: Pressure waves in root canals induced by Nd: YAG laser. *J. Endodon.*, 22: 81-84, 1996.

著者紹介

竹田淳志 (Atsushi Takeda)

昭和33年5月14日生, 歯学博士。

昭和59年3月, 東京医科歯科大学歯学部卒業。平成元年3月, 東京医科歯科大学大学院歯学研究科修了。平成元年4月, 東京医科歯科大学歯学部附属病院医員。平成2年4月, 東京医科歯科大学文部教官助手。平成13年4月, 文部科学教官講師。日本歯科保存学会認定医。日本レーザー歯学会認定医・指導医。