総 説

レーザーの歯内療法への応用

木 村 裕 一 松 本 光 吉

昭和大学歯学部第1保存学教室

(主任：松本光吉教授)

(受理：平成12年1月10日)

Laser Applications in Endodontics

Yuichi KIMURA and Koukichi MATSUMOTO

Department of Endodontics, Showa University School of Dentistry

(Chief: Prof. Koukichi MATSUMOTO)

(Accepted for Publication: January 10, 2000)

Abstract: Since the development of the ruby laser by Maiman in 1960 and the application of the laser for endodontic field by Weichman in 1971, many papers on the applications of lasers have been reported. However, there are few review articles on laser applications in endodontics. The purpose of this study was to summarize the laser applications in endodontics. This paper includes diagnosis of dental pulp, treatment of dentinal hypersensitivity, applications for the treatment of pulp capping and pulpotomy, effects of laser on root canal walls, sterilization of root canals, root canal preparation by laser, effects of laser on periodontal tissues, application for apicoectomy, and other applications for endodontic treatment. The essential question is whether a laser can provide equal or improved treatment over conventional care. This article reviews the role of lasers in endodontics since the early 1970s, summarizes many research reports from the last decade, and proposes what the future may hold for lasers in endodontics. With the potential availability and future development of different laser wavelengths and methods of pulsing, much interest is developing in this promising field.

(J. Jpn. Soc. Laser Dent. 11 : 46~60, 2000. Reprint requests to Dr. KIMURA)

Key words=Laser, Endodontics, Diagnosis and treatment

キーワード=レーザー, 歯内療法, 診断と治療

緒 言

1960年にMaimanがルビーレーザーの発振に成功¹⁾して、1964年にSternとSognnaes²⁾そしてGoldmanら³⁾がこのルビーレーザーを歯科領域に初めて応用して以来、今日に至るまで各種レーザーを用いて実に数多くの歯科領域への応用に関する論文が報告された⁴⁻⁶⁾。その中で歯内療法領域に関しては1971年にWeichmanとJohnsonが根尖孔

を塞ぐために炭酸ガス(CO₂)レーザーを応用⁷⁾して以来、十数年間は根管壁の形態学的変化または器具の殺菌に関する報告などでその数は少なかったが、1985年を境にして急激に多くなった。1985年にはレーザードプラー法による歯髄血流の測定⁸⁾そして象牙質知覚過敏症の治療⁹⁻¹¹⁾と断髄法¹²⁾に、1986年には根管の殺菌¹³⁾に、1987年には直接覆髄法¹⁴⁾へ、1988年には根尖切除術^{15,16)}へと次々と歯内療法への応用が各種レーザーを用いて報告された。

近年、レーザーの歯内療法への応用に関する多くの研究が報告されているが、これらを総括し、まとめた総説はあまりない¹⁷⁻¹⁹⁾。その理由の1つには、ここ5～10年間の間に急激に論文の数が増え、また同じ種類のレーザーでも照射条件が異なれば、全く正反対の結果を生じたり、さらに、同じ照射条件なのに異なる結果の場合さえあるというように、統一された見解が出せないなど総括するのに多大の労力を要することなどがあげられる。しかし、一定期間ごとに報告された研究結果を総括し整理することは、緒問題を提起しその問題を解決する糸口の1つに繋がり、レーザー応用の更なる発展を促進するのに必要なことである。

本総説の目的はレーザーの歯内療法への応用に関する報告を診断法と治療法に分け、そしてさらに我々の研究室における最新の知見を加味して総括し、今後の展望を推測することである。

1. 診断への応用

1) レーザードプラー法による歯髄血流測定

レーザードプラー法による血流測定は最初、皮膚、網膜、腎皮質、腸間膜などの微小血管の血流を測定するために開発されたが、それを歯髄の血流測定に応用したのは笹野ら⁸⁾である。この測定方法の原理はレーザー光のコヒーレント性を利用して赤血球に照射されたレーザー光が運動速度に応じたドプラーシフトを受けることにあり、周波数の偏位量を解析しリアルタイムでデジタル表示する。この測定方法は従来の血流測定方法とは異なり、非観血的に、持続的にそして瞬時の血流測定が可能であり、再現性に優れるなどの多くの利点がある²⁰⁾。この方法に用いられたレーザーは最初、波長632.8nmのヘリウムネオン(He-Ne)レーザーであったが、その後、半導体(GaAlAs)レーザー(波長780-810nm)の方が組織に対して透過性が良いとされ²¹⁾、半導体レーザーが使用されるようになった。しかし、どちらのレーザーがこの測定方法に適しているかについては一長一短があるようで、Odorらの報告によると633nmの波長は特異性は良いが感受性に関して劣り、810nmの波長は逆に感受性は良いが特異性に関して劣るとされる²²⁾。

また、この方法では歯肉の血流に反応することもあり、振動とかでアーチファクトが出るなどこの方法に特有の問題もあり、まだ解決しなければならない問題点も残されている^{21, 23)}。その解決策の1つに反射レーザー光ではなく、透過レーザー光を利用する方法が考えだされた^{24, 25)}。反射光を利用するドプラー法ではエナメル質表面から照射されたレーザー光は硬組織内で散乱し、その反射成分は歯髄からのものばかりではなく、歯肉などの周囲組織からの成分も含まれ、これが誤反応の原因となるからである。今後この透過光を利用した方法の確立が望まれる。

レーザードプラー法に使用されるレーザーの出力は1-2mWであり、この出力での歯髄傷害に関する報告はなく、歯髄に対する安全性には問題はないと考えられる。

2) レーザーによる歯髄の生死に関する診断

レーザードプラー法は歯髄の血流を利用するのに対して、この方法は歯髄の神経系を利用するものである。Nd:YAGレーザーを2W, 20ppsで歯冠頰側のエナメル質上から5-6秒間照射すると有髄歯の場合、痛覚として感じるが、無髄歯の場合には痛覚はない²⁶⁾。Nd:YAGレーザーは他のレーザーと比較して歯質透過性がよく、現在この方法に応用されているのはこのレーザーだけである。

3) その他の応用

波長308nmのエキシマレーザーを根管内の残存組織の検出に応用した報告があり²⁷⁾、これは蛍光物質(溶液)でラベルしたものに紫外領域のレーザーを照射すると蛍光を発生することを利用したもので、抜去歯を用いた基礎実験であり、実際にこの方法を臨床応用した報告はまだない。

2. 治療への応用

1) 象牙質知覚過敏症への応用

1985年に松本ら⁹⁻¹¹⁾と千田ら²⁸⁾が象牙質知覚過敏症にレーザーを応用して以来、多くの報告がある。現在までに報告されているレーザーの種類はHe-Neレーザー(波長632.8nm)、半導体レーザー(波長780, 830, 900nm)、Nd:YAGレーザー(波長1.064 μ m)、炭酸ガスレーザー(波長10.6 μ m)の4種類である。表1～6にそれぞれのレー

表1 He-Neレーザー(波長632.8nm)の照射条件とその有効率

報告者	照射条件	有効率
千田ら(1985) ²⁸⁾	6 mW, 5 Hz または連続波で2-3分間	84%
松本ら(1986) ²⁹⁾	6 mW, 5 Hz で1-3分間	90%
五味ら(1986) ³⁰⁾	6 mW, 5 Hz で3分間	100%
松本ら(1988) ³¹⁾	6 mW 連続波で0.5-3分間	90%
Wilder-Smith(1988) ³²⁾	6 mW, 5 Hz で2.5分間それを3日間	5.2-17.5%
目澤ら(1992) ³³⁾	6 mW 連続波で5分間	55%

表 2 半導体レーザー（波長 780 nm）の照射条件とその有効率

報告者	照射条件	有効率
松本ら (1985) ¹⁰⁾	30 mW 連続波で 0.5-2.5 分間	100%
松本ら (1985) ¹¹⁾	30 mW 連続波で 0.5-3 分間	85%
海老原ら (1988) ³⁴⁾	30 mW 連続波で 1-2 分間	58.5%
川上ら (1989) ³⁵⁾	30 mW 連続波で 0.5-3 分間	95%

表 3 半導体レーザー（波長 830 nm）の照射条件とその有効率

報告者	照射条件	有効率
松本ら (1990) ³⁶⁾	60 mW 連続波で 0.5-3 分間	100%
瀬戸口ら (1990) ³⁷⁾	30 mW 連続波で 1 分間	85%
濱地ら (1992) ³⁸⁾	40 mW 連続波で 0.5-3 分間	83.9%
若林ら (1992) ³⁹⁾	40 mW 連続波で 0.5-3 分間	97%
目澤ら (1992) ³³⁾	30 mW 連続波で 5 分間	58%
立花ら (1992) ⁴⁰⁾	40 mW 連続波で 0.5-3 分間	92.5%
立花ら (1992) ⁴⁰⁾	20 mW 連続波で 0.5-3 分間	30%
Gerschman ら (1994) ⁴¹⁾	30 mW 連続波で 1 分間	65-67%
Liu & Lan (1994) ⁴²⁾	40-100 mW 連続波で 15-60 秒間	70-88%

表 4 半導体レーザー（波長 900 nm）の照射条件とその有効率

報告者	照射条件	有効率
飯田ら (1993) ⁴³⁾	2.4 mW, 1.2 kHz で 2.5 分間	73.3-100%

表 5 Nd:YAG レーザー（波長 1.064 μ m）の照射条件とその有効率

報告者	照射条件	有効率
松本ら (1985) ⁹⁾	10 W で 0.1 秒間を 5 回	100%
Renton-Harper & Midda (1992) ⁴⁴⁾	100 mJ/pulse, 10 Hz	90%
Gelskey ら (1993) ⁴⁵⁾	30-100 mJ/pulse, 10 Hz	58-61%
河田ら (1996) ⁴⁶⁾	2 W で 1 秒間を 20 回	74.8-85.7%
Lan & Liu (1996) ⁴⁷⁾	30 mJ/pulse, 10 Hz で 2 分間	65-72%
Gutknecht ら (1997) ⁴⁸⁾	0.3-1.0 W, 10 Hz で 30-90 秒間	83-93%
Yonaga ら (1999) ⁴⁹⁾	2 W, 20 Hz で 0.5-60 秒間	75.5-95.6%
小林ら (1999) ⁵⁰⁾	1.5 W, 15 Hz で 1 分間	51.5-95.8%

表 6 炭酸ガスレーザー（波長 10.6 μ m）の照射条件とその有効率

報告者	照射条件	有効率
Moritz ら (1996) ⁵¹⁾	0.5 W 連続波で 5 秒間を 6 回	59.8-98.6%
Zhang ら (1998) ⁵²⁾	1 W 連続波で 0.5 秒間を 5-10 回	50-100%
Moritz ら (1998) ⁵³⁾	0.5 W 連続波で 5 秒間を 6 回	94.5-96.5%

レーザーの照射条件とその有効率を示す。レーザーの種類によっては有効率にかなりのばらつきがあるが、レーザーによる治療法は Grossman の象牙質知覚過敏症の治療必要条件⁵⁴⁾を初めて満たした方法と言われ、レーザー以外の治療法と比べると一般的には有効率は高いと考えられている。レーザーによる本症の治療の作用機序は、大部分、不明であるが、基礎実験によると低出力レーザーによる場合、He-Ne レーザーでは末梢神経の A δ または C 線維には影響を与えることなく、活動電位に影響するとの報告があり⁵⁵⁻⁵⁷⁾、波長 830nm の半導体レーザーでは C 線維の脱分極をブロックする^{58,59)}と報告されている。中出力レーザーによる場合、象牙細管の開口部を塞ぐことが確認されているが^{49,60)}、Nd:YAG レーザーの場合はこれとは別に麻酔鎮痛効果⁶¹⁾も報告されており、この効果も重複していると考えられる。また、ブラシーボ効果も数十パーセントあると考えられている⁶²⁾。象牙質知覚過敏症の治療で困難な点はその判定法にある。あくまで痛みというものは主観的なもので、痛みの閾値が社会的および心理的要因や個人の経験によって容易に変化することから客観的に測定することは非常に困難であるが、visual analogue scale (VAS) を使用すると再現性よく測定でき、有効との報告がある⁶³⁾。

レーザー照射による歯髄に対する影響に関して、サルを用いた動物実験で波長 780nm の半導体レーザーを 30mW で 3 分照射後、歯髄組織には何ら傷害は認められなかった⁶⁴⁾。ラットを用いた動物実験では Nd:YAG レーザーを 50mJ/pulse, 10Hz で 30 秒間照射後、組織学的に歯髄に傷害はなく⁶⁵⁾、またヒトの抜歯直後の有髄歯を用いた実験では、象牙質の厚さ 1mm 以上の歯に 2W, 20pps で 2 分間照射後歯髄組織に傷害は認められなかった⁶⁶⁾。サルとイヌを用いた動物実験では、炭酸ガスレーザーを 3W で 2 秒間照射後、やはり歯髄に何ら傷害は認められなかった⁶⁷⁾。また、ヒト抜去歯を用いた髄腔内の温度上昇に関する基礎実験では大臼歯において炭酸ガスレーザーを 2W で 2.5 秒間連続照射すると 1.12℃ の温度上昇が測定され⁶⁸⁾、サルを用いた実験では歯髄組織での温度上昇の限界値は 5.5℃ とされるので⁶⁹⁾、これを基に考えると安全であると判断できる。種の相違はあるが、今までに報告された象牙質知覚過敏症に使用されているレーザーの照射条件ではヒト歯髄組織に対して傷害はないと推測される。

レーザーによる象牙質知覚過敏症の治療法については詳しい総説⁷⁰⁾があるのでそれを参考にして頂きたい。

2) 直接覆髄法と生活歯髄切断法への応用

直接覆髄法への応用は 1987 年に Melcer らがイヌを用いた動物実験に炭酸ガスレーザーを使用したことで始まった¹⁴⁾。その後、海老原らは Nd:YAG レーザーをラットと

イヌに使用し、その結果は照射後の歯髄の治療を促進させた^{71,72)}。また、イヌを用いた動物実験で、波長 830nm の半導体レーザーを低出力 300mW で 3 分間直接歯髄に照射すると、非照射群と比較して治療が促進し、生化学的分析によるとレクチンやコラーゲンの出現が増加したと報告された⁷³⁾。そして炭酸ガスレーザーを実際に臨床応用した報告によると、治療後 1 年の治療成績（歯髄生存率 89%）はレーザーを使用しない場合（68%）と比べて有意差が認められた⁷⁴⁾。また、Nd:YAG レーザーを臨床応用した報告によると、水酸化カルシウム系（Dycal）を用いた従来の方法と比較して、レーザー照射後グラスアイオノマー系セメント（Vitrebond）を用いて治療した方が 54 ヶ月後の歯髄生存率で 2 倍以上（43.6%と 90.3%）の良い成績が得られた⁷⁵⁾。

断髄法への応用は 1985 年に Shoji らがイヌを用いた動物実験に炭酸ガスレーザーを使用したことで始まった¹²⁾。同様の研究は Nd:YAG レーザーを用いてイヌ⁷⁶⁾とラット⁷⁷⁾に、半導体レーザーを用いてマウス⁷⁸⁾に、アルゴンレーザーを用いてブタ⁷⁹⁾に応用し報告された。これらの報告によると、根尖部の歯髄組織には炭酸ガスレーザーによる断髄後の傷害は認められず¹²⁾、1 週間後の Nd:YAG レーザー照射面の治療はコントロールと比較してよく、4、12 週後のデンチンブリッジの形成はレーザー照射により促進した⁷⁶⁾。また、断髄後の患歯に低出力の半導体レーザーを臨床応用すると自発痛が軽減した⁷⁸⁾。レーザーを断髄法へ応用する場合の特徴は出血をコントロールしながら治療することにある。したがって従来の方法に比べて歯冠部歯髄の除去、歯髄の切断が円滑にできると考えられる。しかし、レーザー照射は熱の発生を伴うので過度の照射には注意する必要がある。炭酸ガスレーザーは生体組織に照射した場合、組織表層にエネルギーがほとんど吸収されるため、Nd:YAG レーザーに比べ、組織深部への影響は少ないと考えられている。実際、Nd:YAG レーザーを高出力で照射したため、被蓋硬組織が形成されなかった報告もある⁷⁷⁾。しかし、適切な照射条件で使用すればレーザーの直接覆髄法と断髄法への応用は止血、殺菌作用が期待でき有効であると考えられる。炭酸ガスレーザー、Nd:YAG レーザーは基本的にはメスとして使用しており、低出力の半導体レーザーは術後の創傷治療を促進させるものとして使用している。したがって、両者を併用すればよりよい結果を得ることができるとも考えられる。

3) 根管壁へのレーザー照射の影響

1971 年に Weichman と Johnson により炭酸ガスレーザーを根管内に応用した目的は根尖孔を塞ぐことであった⁷⁾。この試みは失敗に終わったが、その後、このレーザーを使

用して象牙質の透過性の減少⁸⁰⁾や表面融解などの様々な形態学的変化に関する報告⁸¹⁻⁸⁵⁾がなされた。さらにデブリスの蒸散や形態学的変化はフッ化ジアミン銀の塗布後に照射することにより促進した⁸⁶⁾。また、従来の炭酸ガスレーザー(波長 $10.6\mu\text{m}$)とは異なる、波長が短い(9.3, 9.6, $10.3\mu\text{m}$)炭酸ガスレーザーが開発され、表面融解作用、齶触抑制作用さらにコンポジットレジン接着を強固にするなどの報告がなされ⁸⁷⁻⁹⁰⁾、その根管内への応用が期待される。

Nd: YAG レーザーの根管内への応用は1972年 Weichman らが根尖孔を塞ぐことに始まったが、やはりこの試みもうまくいかなかった⁹¹⁾。Nd: YAG レーザーの応用で有利な点は根管内に使用できるような細いファイバーが早い時期に開発されたことであった。その後、このレーザーの根管内への応用に関する多くの論文が報告された⁹²⁻⁹⁹⁾。デブリスやスミア層は適切な照射条件を用いることにより除去可能で¹⁰⁰⁻¹⁰⁵⁾、レーザー照射により象牙質の表面を融解し、象牙細管を塞ぎ⁹²⁻¹⁰⁷⁾、色素の透過性も減少させることができる^{83, 98)}。また、Nd: YAG レーザーのエネルギーは黒インクに吸収されやすいので、黒インクを併用することでその効果を増強することができる¹⁰⁸⁾。

アルゴンレーザーにも同様にデブリスやスミア層の除去などの清掃効果があり¹⁰⁹⁻¹¹²⁾、その効果はフッ化ジアミン銀の塗布後、照射することにより促進した¹¹³⁾。

Er: YAG レーザーはデブリスやスミア層の除去などの清掃効果に関してNd: YAG, アルゴンレーザーよりもさらに効果があると報告されている¹¹⁴⁻¹¹⁹⁾。現在、Er: YAG レーザー用の最小チップの直径は 0.285mm であり、この大きさなら大部分の症例の根管に応用できるが、先端部分はフレキシブルになっていないので、彎曲根管には応用しにくいなど問題点もある。Er: YAG レーザーは出力を少し上げて照射すると根管壁の切削が可能で、根管拡大

への応用ができると考えられる。

その他、KTP レーザー(波長 532nm)^{120, 121)}、XeCl レーザー(波長 308nm)¹²²⁻¹²⁶⁾、ArF エキシマレーザー(波長 193nm)¹²⁷⁻¹²⁹⁾、Ho: YAG レーザー(波長 $2.10\mu\text{m}$)^{130, 131)}、Nd: YAP レーザー(波長 1340nm)^{132, 133)}、自由電子レーザー(波長 3.0 と $9.4\mu\text{m}$)^{134, 135)}の応用に関する報告があり、ほとんどのレーザーにおいて同様のデブリスやスミア層の除去などの清掃効果があり、また、照射表面を融解し、象牙細管を塞ぐ作用が報告されている。

最近、Er, Cr: YSGG レーザー(波長 $2.78\mu\text{m}$)が開発され、この領域に応用された^{136, 137)}。Er: YAG レーザー(波長 $2.94\mu\text{m}$)とは波長が近く、その作用もかなり相似しており、デブリスやスミア層の除去などの清掃に関して効果があり、また根管拡大にも応用できると考えられる。このレーザーの根管への応用の難点はそのファイバーチップの大きさ(直径 0.75mm)であり、この点が解消できればより容易に応用できるであろう。

4) 根管内殺菌への応用

根管内の殺菌に関する多くの研究は炭酸ガスレーザー^{13, 138, 139)}とNd: YAG レーザーを用いて行われた¹⁴⁰⁻¹⁵⁰⁾。Nd: YAG レーザーの方がより多く使用されており、それはやはり根管内に応用が容易な細いファイバーが早い時期から利用できた点にある。炭酸ガスレーザー用チップも直径 0.3mm とかなり細いものが最近、利用できるように

表 7 炭酸ガスレーザーの照射条件とその有効率

報告者	照射条件	有効率
Zakariasen ら (1986) ¹³⁾	10 W で 1 秒間を 4 回	99.9%
Dederich ら (1990) ¹³⁸⁾	10 W で 1 秒間を 5 回	97.46%
Le Goff ら (1999) ¹³⁹⁾	5 W で 9.9 秒間を 3 回	92.3%

表 8 Nd: YAG レーザーの照射条件とその有効率

報告者	照射条件	有効率
Rooney ら (1994) ¹⁴⁰⁾	3 W で 60 秒間 (総エネルギー 75J)	100%
海老原ら (1994) ¹⁴¹⁾	3 W, 30 Hz で 10 秒間	85.0%
Hardee ら (1994) ¹⁴²⁾	3 W, 20 Hz で 60 秒間	98%
Fegan ら (1995) ¹⁴³⁾	3 W, 20 Hz で 60 秒間	98%
Moshonov ら (1995) ¹⁴⁴⁾	4.5 W で 15 秒間を 4 回	99%
Goodis ら (1995) ¹⁴⁵⁾	1-3 W, 10-30 Hz	99.9%
関根ら (1995) ¹⁴⁶⁾	200 mJ, 30 Hz (6 W) で 30 秒間	98%
Gutknecht ら (1996) ¹⁴⁷⁾	100 mJ, 15 Hz (1.5 W) で 10 秒間を 4 回	99.91%
Ramskold ら (1997) ¹⁴⁸⁾	60 mJ, 50 Hz (3 W) で 15 秒間を 7 回	87.5%
五味ら (1997) ¹⁴⁹⁾	100 mJ, 30 Hz (3 W) で 5 秒間を 5 回	99.9%
Moritz ら (1999) ¹⁵⁰⁾	1.5 W, 10 Hz で 5 秒間を 5 回	99.16%

表 9 Er : YAG レーザーの照射条件とその有効率

報告者	照射条件	有効率
五味ら (1997) ¹⁴⁹⁾	30 mJ, 10 Hz (0.3 W) で 5 秒間を 5 回	99.9%
Moritz ら (1999) ¹⁵⁰⁾	1.5 W, 10 Hz で 5 秒間を 5 回	99.64%
Mehl ら (1999) ¹⁵¹⁾	50 mJ, 15 Hz で 60 秒間	99.9%

表 10 その他のレーザーの照射条件とその有効率

レーザーの種類	照射条件	有効率
Ho : YAG レーザー ¹⁵⁰⁾	1.5 W, 10 Hz で 5 秒間を 5 回	99.05%
XeCl レーザー ¹⁵²⁾	fluence 1.0 J/cm ² で 8 秒間	95.5%
高出力半導体レーザー ¹⁵³⁾	4 W, 50 Hz で 5 秒間を 5 回	100%
Nd : YAP レーザー ¹⁵⁴⁾	300 mJ, 30 Hz で 30 秒間	99.8%

なった。その他, Er : YAG レーザー¹⁴⁹⁻¹⁵¹⁾, Ho : YAG レーザー¹⁵⁰⁾, XeCl レーザー¹⁵²⁾, 高出力半導体レーザー¹⁵³⁾, Nd : YAP レーザー¹⁵⁴⁾ などの応用が報告されている。表 7~10 にそれぞれのレーザーの照射条件と根管内殺菌有効率を示している。どのレーザーでも基本的には高出力では殺菌作用があるが, 根管内への臨床応用となると歯周組織に対する影響を考慮しなければならず, そうなると出力は制限され, 殺菌作用が十分に発揮できない場合もある。ほとんどの報告において細菌数では有意に減少し有効率で考えるとかなり高いが, レーザーだけによる完全な殺菌となると根管内での使用は補助的なものとならざるを得ないと考えられる。実際にレーザー照射により細菌数の減少に有意差は認められたが, 次亜塩素酸ナトリウムより効果がなかったとの報告もある¹³⁹⁾。

5) 根管拡大, 形成と根管充填への応用

Er : YAG レーザーを用いて根管口の明示に応用した報告がある¹⁵⁵⁾。Er : YAG レーザーを使用後, 根管壁は実体顕微鏡所見ではスムーズで, 走査型電子顕微鏡所見では鱗片状に観察された。Nd : YAG レーザーを根管壁に応用すると照射面はきれいで, 規則正しい様相を示すことから, 根管形成への応用の可能性が示唆されたが⁹⁴⁾, 実際に根管拡大形成への応用に関する報告はまだない。一方, Er : YAG レーザー照射後の根管壁は非常にきれいで, そして根管壁の切削が可能であり, また根管内に容易に応用できるファイバーが開発されており, 実際に臨床応用できる可能性は高い。我々の研究室では抜去歯による基礎実験で根管拡大を行なっているが, 彎曲のない根管では非常によい結果を得ている。今後, 彎曲根管に対応できる細いフレキシブルファイバーチップの開発が待たれる。

根充後の根尖孔からの微少漏洩は根管治療の予後を左右する重大な因子である。抜去歯を用いた基礎実験で, 通常

の根管拡大形成後, アピカルシート部にアルゴン, Nd : YAG, Er : YAG レーザーを照射すると根充後の根尖孔からの微少漏洩を減少させることができた¹⁵⁶⁻¹⁵⁸⁾。特に, Nd : YAG レーザーと黒インクを併用した場合は有意差が認められた^{157, 158)}。これには, レーザーによるスミアー層とデブリスの除去効果と関係していると考えられる。それに加えて Nd : YAG レーザーの象牙細管の封鎖性も関与していると考えられる。このため, 根管壁がより清掃され, シーラーの根管壁への機械的接着性が向上し, 象牙細管の封鎖性と一緒になって根尖孔からの微少漏洩を減少させたためであろう。このことは実際に Nd : YAG レーザーを根管内に臨床応用した場合に治療成績が向上する要因の 1 つと考えられる。

抜去歯を用いた基礎実験で, 根充材としてのレジンの重合にアルゴンレーザーの応用例がある^{159, 160)}。同様の報告が根充材の AH-26¹⁶¹⁾ とコンポジットレジン¹⁶²⁾ の硬化にアルゴンレーザーを用いて行われた。走査型電子顕微鏡所見では垂直加圧されたものより側方加圧されたものが気泡が少ないと報告されている。

6) 歯周組織に対する影響

レーザー照射による歯髓組織への影響に関する論文は多いが, 歯周組織への影響に関する論文はそれに比較して少ない。Eriksson と Albrektsson によるとウサギの骨組織において傷害が認められない温度は 47℃ 以下であるとしている¹⁶³⁾。種の相違はあるもののヒトでもこの付近の温度以下では傷害が認められないと考えられる。イヌを用いた動物実験で Nd : YAG レーザー照射による歯周組織への影響を最初に報告したのは Bahcall ら¹⁶⁴⁾ であった。彼らが使用した照射条件はあまりにも強かったためかなりの傷害が認められた。しかし, その後, イヌやラットを用いたレーザー照射による歯周組織への影響に関する多くの報告

で適切な照射条件が決まり、これらの条件では歯周組織へ傷害がない事が判明した^{100, 101, 103-105, 165, 166)}。また、炭酸ガスレーザーを抜去予定の歯に使用して歯周組織への影響を調べた報告では、根管内の殺菌に用いられる照射条件では影響は認められなかった¹⁶⁷⁾。その他、抜去歯を用いた基礎実験では炭酸ガスレーザー^{168, 169)}、KTP:YAG レーザー¹²¹⁾、Er: YAG レーザー¹⁷⁰⁾、Ho: YAG レーザー^{171, 172)}の照射に伴う歯根表面の温度測定に関する報告がある。照射条件によっては10℃以上の温度上昇もあり、注水、冷却時間をとるなどの対策が必要であると考えられた。

7) 根管治療への臨床応用

Nd: YAG レーザーを通常の根管治療後に臨床応用したいいくつかの報告がある。感染根管治療において3、6ヵ月後の予後ではレーザーを照射して根管充填をした方が、照射しない場合と比べて術後の不快感や疼痛が有意に減少した¹⁷³⁾。しかし、麻酔抜髄後の症例に応用した場合では不快感や疼痛は減少したが有意差は得られなかった¹⁷⁴⁾。また、術後の根尖部の状態において、レーザー照射した症例では60%において炎症がないか、あっても極わずかであったのに対して、非照射の症例では70%が強い炎症を示した¹⁷⁵⁾。その他、Gutknecht らによるとレーザー照射による治療後、不快感や違和感がなく、3-12ヵ月後、根尖部の透過像の客観的減少を認めたと報告している¹⁷⁶⁾。

また、高出力の半導体レーザーを感染根管治療に使用した臨床報告では従来の方法と比較して、このレーザーによる方法は殺菌に適しているとし¹⁷⁷⁾、炭酸ガスレーザーを使用した臨床報告では、従来の方法で治癒しなかった症例でも約98%の割合で成功したと報告された¹⁷⁸⁾。

8) 根尖切除術への応用

根尖切除術へレーザーを最初に応用した報告は1988年のMiserendino によるものであった¹⁵⁾。彼は炭酸ガスレーザーを切除した面の殺菌と感染した根尖歯質の除去、および術野の止血を期待して使用した。その後、抜去歯を用いた基礎実験¹⁷⁹⁻¹⁸¹⁾やイヌを用いた動物実験¹⁸²⁻¹⁸⁴⁾により、レーザーの使用は治療結果を悪くしたり、治癒を遅らせたりはしなかった。臨床応用した結果でもやはり治癒過程を遅延させなかった¹⁸⁵⁾。

炭酸ガスレーザーが根尖切除術へ応用された同じ頃、Nd: YAG レーザーも根尖切除術へ応用された¹⁶⁾。抜去歯を用いた基礎実験ではレーザー照射した切断面での色素浸透や細菌の侵入を減少させた¹⁸⁶⁻¹⁸⁹⁾。その後Nd: YAG レーザーによる歯根切除に応用したラットを用いた動物実験では切削器バーを用いた対照群と比較して治癒が遅れたと報告された¹⁹⁰⁾。

炭酸ガスレーザーやNd: YAG レーザーはどちらかと

いうと根尖切断後の切断面の表面形態を修正することにより象牙細管を封鎖し、その部分の殺菌を期待して応用されたが、Er: YAG レーザーは切断そのものに応用されている。抜去歯を用いた基礎実験で、Er: YAG レーザーにより切断された面では炭化は認められず、スムーズできれいな切断面を示した¹⁹¹⁻¹⁹³⁾。また、根充剤と根管壁との間には空洞は認められず、電気エンジンによる切断と同様に緊密な根充状態が維持されていた¹⁹²⁾。Er: YAG レーザーによる切断面では象牙細管は封鎖されていないが、電気エンジンによる切断と比較すると色素浸透性では有意差は認められなかった¹⁹³⁾。臨床例において根尖切断面の象牙細管の封鎖がどれくらい予後を向上させるかについての報告はない。実際にこのレーザーを臨床応用した報告では治癒が促進し、術後の不快感が減少した¹⁹⁴⁻¹⁹⁶⁾。またEr: YAG レーザーを逆根充のための窩洞形成に応用した基礎実験の報告があり、レーザーを使用した方が作業時間において超音波器具より短かったが、色素の浸入においては両者に有意差は認められなかった¹⁹⁷⁾。

Ho: YAG レーザーを用いて根尖切除術に応用した抜去歯による基礎実験では根充剤と根管壁との封鎖能力はEr: YAG レーザーに比較して劣り、熱傷害の兆候も認められたと報告された^{198, 199)}。その他、根尖切除術に応用できる可能性があるレーザーはEr, Cr: YSGG レーザーと考えられるが、まだその報告はない。

9) その他の応用

パルス型ダイレーザー（波長504nm）が髓室の象牙質粒の除去に応用され、除去後の走査型電子顕微鏡所見では、輪郭のはっきりした面を示した²⁰⁰⁾。

抜去歯による基礎実験で炭酸ガスレーザー（出力3-10W）とNd: YAG レーザー（出力10-14W）が歯根破折歯に応用されたが、破折片の接合はできなかった²⁰¹⁾。しかし、出力15Wで炭酸ガスレーザーを垂直破折歯に応用した症例報告では予後は良かったと報告されている²⁰²⁾。

アルゴンレーザー、炭酸ガスレーザー、Nd: YAG レーザーが歯科用器具の殺菌に応用され、この三種類のレーザーにはその能力があることが示された。その中でアルゴンレーザーは1Wという低出力で2分間の照射により殺菌能力があり²⁰³⁻²⁰⁵⁾、臨床での使用の可能性が示唆された。

また、アルゴンレーザー、炭酸ガスレーザー、Nd: YAG レーザーがガッタパーチャを軟化させるのに使用され、この中でアルゴンレーザーはガッタパーチャを軟化させ根尖を塞ぐのに有効であることが示唆された^{206, 207)}。ガッタパーチャの軟化が可能なら除去も可能であると考えられ、実際、Nd: YAG レーザーを使用してガッタパーチャ除去が可能との報告がある²⁰⁸⁾。さらに抜去歯を用いた基礎実

験でNd:YAGレーザーを使用して根管内異物（破折した根管器具）の除去に関する報告がある^{208,209}。レーザーの出力を高くすればするほど、根管内異物の除去は容易であるが、そのため、熱の発生が避けられず、臨床応用するにはレーザー照射に伴う熱をいかに制御するかが問題となる。我々の研究によると、冷却水の使用と冷却時間を適度にとると熱の制御が可能であったが、そうすると臨床でのチェアタイムが長くなるなど、新たな問題もある。実際に臨床応用して根管内異物が除去できるかは根管の状態（彎曲、根管の大きさ）と異物の位置（根尖部、根中央部）に依存していると考えられる。

Nd:YAGレーザーを歯の漂白に応用した抜去歯による基礎実験では、従来の30%過酸化水素水による漂白を促進し²¹⁰、レーザーを併用した漂白法が有効であることが示唆された。

結 論

以上、記述したように、歯内療法の分野でも多岐に渡る応用がなされている。ある応用はまだ抜去歯による基礎実験の段階であり、またある応用では既に臨床応用され成果を挙げているものもある。レーザーが歯内療法の分野に次々と応用されるようになると、従来の方法を大きく変える可能性がある。例えば、何十年もの間、リーマー、ファイル等を用いて根管拡大を行ってきたのが、レーザーを用いることによりスミアー層のない、根管壁が清掃された封鎖性のよい根管拡大形成ができるなど画期的な進歩をもたらすことになる。しかし、その前に解決しなければならない問題が多く残されている。同じ種類のレーザーでも照射条件が異なれば全く正反対の結果を生じることがあるので、それぞれの照射条件での効果を正確に把握しておかなければならない。ここにレーザー応用の難しさがある。そして根管内に応用するとなるとファイバーの大きさが問題となり、また直進しようとするレーザー光をいかに根管壁に照射するかが問題となる。さらに根管内への応用では直接、肉眼で見ながら照射することが不可能なのでファイバースコープを使用しながらの応用となるが、ファイバースコープ先端のチップの大きさも問題となる。このようにまだ解決しなければならない多くの問題がある。これらの問題を1つずつ解決することで歯内療法学ひいては歯科全領域への応用はより容易になり、より多岐に渡るようになると考えられる。

文 献

- 1) Maiman, T.H.: Stimulated optical radiation in ruby. *Nature*, **187**: 493-494, 1960.
- 2) Stern, R.H. and Sognnaes, R.F.: Laser beam effect on dental hard tissues. *J. Dent. Res.*, **43**: 873, 1964.
- 3) Goldman, L., Hornby, P., Meyer, R. and Goldman, B.: Impact of the laser on dental caries. *Nature*, **203**: 417, 1964.
- 4) Midda, M. and Renton-Harper, P.: Lasers in dentistry. *Br. Dent. J.*, **170**: 343-346, 1991.
- 5) Pick, R.M.: Using lasers in clinical dental practice. *J. Am. Dent. Assoc.*, **124**: 37-47, 1993.
- 6) Wigdor, H.A., Walsh, J.T., Featherstone, J.D.B., Visuri, S.R., Fried, D. and Waldvogel, J.L.: Lasers in dentistry. *Lasers Surg. Med.*, **16**: 103-133, 1995.
- 7) Weichman, J.A. and Johnson, F.M.: Laser use in endodontics. —A preliminary investigation—. *Oral Surg.*, **31**: 416-420, 1971.
- 8) 笹野高嗣, 田中尊仁, 三条大助: 歯髓の血流動態に関する研究。—レーザードプラー法の応用—。日歯保存誌, **28**: 779-783, 1985.
- 9) 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.
- 10) 松本光吉, 船井博雄, 若林 始, 小山隆夫: GaAlAs 半導体レーザー（象牙質知覚過敏治療器一型）による象牙質知覚過敏の処置に関する研究。日歯保存誌, **28**: 766-771, 1985.
- 11) 松本光吉, 友成 宏, 若林 始: レーザーによる象牙質知覚過敏の処置に関する研究。—照射部位に関する検討—。日歯保存誌, **28**: 1366-1371, 1985.
- 12) Shoji, S., Nakamura, M. and Horiuchi, H.: Histopathological changes in dental pulps irradiated by CO₂ laser: A preliminary report on laser pulpotomy. *J. Endod.*, **11**: 379-384, 1985.
- 13) Zakariasen, K.L., Dederich, D.N., Tulip, J., DeCoste, S., Jensen, S.E. and Pickard, M.A.: Bactericidal action of carbon dioxide laser radiation in experimental dental root canals. *Can. J. Microbiol.*, **32**: 942-946, 1986.
- 14) Melcer, J., Chaumette, M.-T. and Melcer, F.: Dental pulp exposed to the CO₂ laser beam. *Lasers Surg. Med.*, **7**: 347-352, 1987.
- 15) Miserendino, L.J.: The laser apicoectomy: Endodontic application of the CO₂ laser for periapical surgery. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol.*, **66**: 615-619, 1988.
- 16) Sumitomo, M. and Furuya, H.: Biomedical engineering for the conservation of teeth—the use of a Nd-YAG laser for a treatment of apical focus. *Front. Med. Biol. Eng.*, **1**: 89-97, 1988.
- 17) 庄司 茂: 保存・歯周病科領域におけるレーザーの応用。森岡俊夫編: レーザー歯学（第1版）。東京, 1986, 医歯薬出版, pp 117-137.
- 18) 井澤常泰, 須田英明: レーザーの歯内療法への応用。下野正基, 飯島国好編: 治癒の病理 臨床編第1巻 歯内療法 歯髓保存の限界を求めて。東京, 1993, 医歯薬出版, pp 265-277.
- 19) Kimura, Y., Wilder-Smith, P. and Matsumoto, K.: Lasers in endodontics: A review. *Int. Endod. J.*, in press.
- 20) 笹野高嗣, 庄司憲明, 栗和田しづ子, 三条大助: 歯肉血流測定におけるレーザードプラー法と水素ガスクリアランス法の比較検討。東北歯誌, **14**: 46-52, 1995.
- 21) Vongsavan, N. and Matthews, B.: Some aspects of

- the use of laser Doppler flow meters for recording tissue blood flow. *Exp. Physiol.*, **78**: 1-14, 1993.
- 22) Odor, T.M., Pitt Ford, T.R. and McDonald, F.: Effect of wavelength and bandwidth on the clinical reliability of laser Doppler recordings. *Endod. Dent. Traumatol.*, **12**: 9-15, 1996.
 - 23) 笹野高嗣, 仲島一郎, 庄司憲明, 佐藤しづ子, 三條大助: レーザードブラー法による歯髓血流測定の問題点. *東北大歯誌*, **16**: 32-36, 1997.
 - 24) Zang, D.Y., Millerd, J.E., Wilder-Smith, P.B.B. and Arrastia, A.M.A.: A novel laser Doppler flowmeter for pulpal blood flow measurements. *SPIE Proceedings*, **2672**: 21-26, 1996.
 - 25) 笹野高嗣, 仲島一郎, 庄司憲明, 栗和田しづ子, 三條大助: 透過レーザー光を用いた歯髓の生死診断. *東北大歯誌*, **15**: 91, 1996.
 - 26) 松本直人: パルス型 Nd: YAG レーザーを応用した歯髓診断法に関する基礎並びに臨床的研究. *昭歯誌*, **20**: 40-51, 2000.
 - 27) Pini, R., Salimbeni, R., Vannini, M., Cavalieri, S., Barone, R. and Clauser, C.: Laser dentistry: Root canal diagnostic technique based on ultraviolet-induced fluorescence spectroscopy. *Lasers Surg. Med.*, **9**: 358-361, 1989.
 - 28) 千田 彰, 五味明良, 谷 智也, 吉野裕之, 原 学郎, 山口正孝, 松本 亨, 成田幸憲, 長谷川二郎: He-Ne レーザー治療器 "Soft Laser 632" の臨床成績. 第1報 レーザー照射直後の鎮痛効果. *愛院大歯誌*, **23**: 773-780, 1985.
 - 29) 松本光吉, 中村 玄, 友成 宏: He-Ne レーザーによる象牙質知覚過敏の処置に関する研究. *日歯保存誌*, **29**: 312-317, 1986.
 - 30) 五味明良, 神谷一有, 山下久明, 伴 佳道, 千田 彰, 原学郎, 山口正孝, 成田幸憲, 長谷川二郎: He-Ne レーザー治療器 "Soft Laser 632" の臨床成績. 第2報 象牙質知覚過敏症に対する効果およびインレー合着操作時の鎮痛効果. *愛院大歯誌*, **24**: 390-399, 1986.
 - 31) 松本光吉, 西濱亮介, 小野寺篤, 若林 始: He-Ne レーザーによる象牙質知覚過敏症の処置に関する研究. *昭歯誌*, **8**: 180-184, 1988.
 - 32) Wilder-Smith, P.: The soft laser: Therapeutic tool or popular placebo? *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol.*, **66**: 654-658, 1988.
 - 33) 日澤修二, 塩野 真, 佐藤鶴英, 三上智正, 林 誠, 前田圭司, 小川 充, 斎藤 毅: 象牙質知覚過敏症に対する低出力レーザーの照射効果. 一照射部位の違いが照射効果に及ぼす影響一. *日本レーザー歯学会誌*, **3**: 87-91, 1992.
 - 34) 海老原新, 竹田淳志, 荒木孝二, 須田英明, 砂田今男: 試作型 GaAlAs レーザーの象牙質知覚過敏症への応用. 一重盲検法による効果の判定一. *日歯保存誌*, **31**: 1782-1787, 1988.
 - 35) 川上智史, 荊木裕司, 原口克博, 尾立 光, 川村周徳, 久保田瑞尚, 宮田武彦, 渡辺敏彦, 飯岡淳子, 入戸野誠, 尾立達治, 大沼修一, 関口 昇, 横内厚雄, 松田浩一: GaAlAs 半導体レーザーの歯科臨床応用. *東日本歯誌*, **8**: 57-62, 1989.
 - 36) 松本光吉, 中村幸生, 若林 始: 60mW GaAlAs 半導体レーザーによる象牙質知覚過敏の臨床成績に関する研究. *昭歯誌*, **10**: 446-449, 1990.
 - 37) 瀬戸口尚志, 松永 信, 鎮守紀生, 横田 誠, 末田 武: 歯周治療中に発現した象牙質知覚過敏症に対するソフトレーザーおよび塩化ストロンチウムの効果について. *日歯保存誌*, **33**: 620-627, 1990.
 - 38) 濱地貴文, 岩本恭行, 広藤卓雄, 梶島浩明, 前田勝正: GaAlAs 半導体レーザーの歯頸部象牙質知覚過敏症に対する鎮痛効果. *日歯保存誌*, **35**: 12-17, 1992.
 - 39) 若林 始, 立花 均, 松本光吉: 40mW GaAlAs 半導体レーザーによる歯頸部象牙質知覚過敏症の疼痛緩和に関する臨床的研究. *昭歯誌*, **12**: 10-16, 1992.
 - 40) 立花 均, 若林 始, 松本光吉: 20mW 及び 40mW GaAlAs 半導体レーザーによる象牙質知覚過敏の臨床成績の比較に関する研究. *昭歯誌*, **12**: 343-347, 1992.
 - 41) Gerschman, J.A., Ruben, J. and Gebart-Eaglemont, J.: Low level laser therapy for dentinal tooth hypersensitivity. *Aust. Dent. J.*, **39**: 353-357, 1994.
 - 42) Liu, H.-C. and Lan, W.-H.: The combined effectiveness of the semiconductor laser with Duraphat in the treatment of dentin hypersensitivity. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, **12**: 315-319, 1994.
 - 43) 飯田雅博, 安藤嘉則, 渡辺 久, 石川 烈: 半導体 (GaAlAs) レーザーの露出根面の知覚過敏症に対する効果および歯肉溝領域の細菌叢に及ぼす影響. *日本レーザー歯学会誌*, **4**: 3-7, 1993.
 - 44) Renton-Harper, P. and Midda, M.: NdYAG laser treatment of dentinal hypersensitivity. *Br. Dent. J.*, **172**: 13-16, 1992.
 - 45) Gelskey, S.C., White, J.M. and Pruthi, V.K.: The effectiveness of the Nd: YAG laser in the treatment of dental hypersensitivity. *J. Can. Dent. Assoc.*, **59**: 377-386, 1993.
 - 46) 河田克之, 大塚秀春, 市村 光, 下島孝裕, 池田克己: 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.
 - 47) Lan, W.-H. and Liu, H.-C.: Treatment of dentin hypersensitivity by Nd: YAG laser. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, **14**: 89-92, 1996.
 - 48) Gutknecht, N., Moritz, A., Dercks, H.W. and Lampert, F.: Treatment of hypersensitive teeth using neodymium: yttrium-aluminum-garnet lasers: A comparison of the use of various settings in an *in vivo* study. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, **15**: 171-174, 1997.
 - 49) Yonaga, K., Kimura, Y. and Matsumoto, K.: Treatment of cervical dentin hypersensitivity by various methods using pulsed Nd: YAG laser. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, **17**: 205-210, 1999.
 - 50) 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**: 180-187, 1999.
 - 51) Moritz, A., Gutknecht, N., Schoop, U., Goharkhay, K., Ebrahim, D., Wernisch, J. and Sperr, W.: The advantage of CO₂-treated dental necks, in comparison with a standard method: Results of an *in vivo* study. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, **14**: 27-32, 1996.
 - 52) Zhang, C., Matsumoto, K., Kimura, Y., Harashima, T., Takeda, F.H. and Zhou, H.: Effects of CO₂ laser in treatment of cervical dentinal hypersensitivity. *J. Endod.*, **24**: 595-597, 1998.
 - 53) Moritz, A., Schoop, U., Goharkhay, K., Aoid, M., Reichenbach, P., Lothaller, M.A., Wernisch, J. and Sperr, W.: Long-term effects of CO₂ laser irradiation on treatment of hypersensitive dental necks: Results of an *in vivo* study. *J. Clin. Laser Med.*

- Surg., **16** : 211-215, 1998.
- 54) Grossman, L.I.: A systematic method for the treatment of hypersensitive dentin. J. Am. Dent. Assoc., **22** : 592-602, 1935.
 - 55) Jarvis, D., Bruce MacIver, M. and Tanelian, D.L.: Electrophysiologic recording and thermodynamic modeling demonstrate that helium-neon laser irradiation does not affect peripheral A δ - or C-fiber nociceptors. Pain, **43** : 235-242, 1990.
 - 56) Rochkind, S., Nissan, M., Razon, N., Schwartz, M. and Bartal, A.: Electrophysiological effect of HeNe laser on normal and injured sciatic nerve in the rat. Acta Neuro. (Wien), **83** : 125-130, 1986.
 - 57) Rochkind, S., Nissan, M., Barr-Nea, L., Razon, N., Schwartz, M. and Bartal, A.: Response of peripheral nerve to He-Ne laser: Experimental studies. Lasers Surg. Med., **7** : 441-443, 1987.
 - 58) 若林 始, 半場道子, 松本光吉, 中山哲夫: 半導体レーザーによる鎮痛の神経生理学的研究. 日本レーザー歯学会誌, **3** : 65-74, 1992.
 - 59) Wakabayashi, H., Hamba, M., Matsumoto, K. and Tachibana, H.: Effect of irradiation by semiconductor laser on responses evoked in trigeminal caudal neurons by tooth pulp stimulation. Lasers Surg. Med., **13** : 605-610, 1993.
 - 60) Moritz, A., Gutknecht, N., Schoop, U., Wernisch, J., Lampert, F. and Sperr, W.: Effects of CO₂ laser irradiation on treatment of hypersensitive dental necks: Results of an *in vitro* study. J. Clin. Laser Med. Surg., **13** : 397-400, 1995.
 - 61) Whitters, C.J., Hall, A., Creanor, S.L., Moseley, H., Gilmour, W.H., Strang, R., Saunders, W.P. and Orchardson, R.: A clinical study of pulsed Nd: YAG laser-induced pulpal analgesia. J. Dent., **23** : 145-150, 1995.
 - 62) West, N.X., Addy, M., Jackson, R.J. and Ridge, D.B.: Dentine hypersensitivity and the placebo response. A comparison of the effect of strontium acetate, potassium nitrate and fluoride toothpastes. J. Clin. Periodontol., **24** : 209-215, 1997.
 - 63) 栗和田しづ子, 笹野高嗣, 三条大助: 歯痛の定量に関する研究. 日歯保存誌, **34** : 1755-1762, 1991.
 - 64) 松本光吉, 若林 始, 船登章嘉, 白須賀哲也: GaAlAs 半導体レーザー (知覚過敏治療器) の歯髄刺激に関する病理組織学的所見. 日歯保存誌, **28** : 1361-1365, 1985.
 - 65) White, J., Goodis, H. and Kudler, J.: Laser thresholds in pulp exposure: A rat animal model. SPIE Proceedings, **2394** : 160-169, 1995.
 - 66) White, J.M., Goodis, H.E. and Daniels, T.E.: Effects of Nd: YAG laser on pulps of extracted teeth. Lasers Life Sci., **4** : 191-200, 1991.
 - 67) Melcer, J., Chaumette, M.T., Melcer, F., Zeboulon, S., Hasson, R., Merard, R., Pinaudeau, Y., Dejaradin, J. and Weill, R.: Preliminary report on the effect of the CO₂ laser beam on the dental pulp of the *Macaca Mulatta* primate and the beagle dog. J. Endod., **11** : 1-5, 1985.
 - 68) Miserendino, L.J., Neiburger, E.J., Walia, H., Luebke, N. and Brantley, W.: Thermal effects of continuous wave CO₂ laser exposure on human teeth: An *in vitro* study. J. Endod., **15** : 302-305, 1989.
 - 69) Zach, L. and Cohen, G.: Pulp response to externally applied heat. Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol., **19** : 515-530, 1965.
 - 70) Kimura, Y., Wilder-Smith, P., Yonaga, K. and Matsumoto, K.: Treatment of dentine hypersensitivity by lasers: A review. J. Clin. Periodontol., in press.
 - 71) 海老原新, 澤田則宏, 奥山雅之, 王 紅虹, 竹田淳志, 中島光雅, 荒木孝二, 小林千尋, 砂田今男: Nd: YAG レーザーのラット露髄面への照射による歯髄反応について. 日本レーザー医学会誌, **9** : 169-172, 1988.
 - 72) 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研究. 日歯保存誌, **35** : 876-886, 1992.
 - 73) Utsunomiya, T.: 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. Endod., **24** : 187-193, 1998.
 - 74) Moritz, A., Schoop, U., Goharkhay, K. and Sperr, W.: The CO₂ laser as an aid in direct pulp capping. J. Endod., **24** : 248-251, 1998.
 - 75) Santucci, P.J.: Dycal versus Nd: YAG laser and Vitrebond for direct pulp capping in permanent teeth. J. Clin. Laser Med. Surg., **17** : 69-75, 1999.
 - 76) 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.
 - 77) 加藤純二, 橋本雅子, 小野博志: Nd: YAG レーザーによるラット生活歯髄切断法における歯髄の組織学的変化. 日本レーザー医学会誌, **10** : 521-524, 1989.
 - 78) 車田文雄: Ga-As 半導体レーザーの歯内療法への応用に関する研究. 奥羽大歯誌, **17** : 233-244, 1990.
 - 79) Wilkerson, M.K., Hill, S.D. and Arcoria, C.J.: Effects of the Argon laser on primary tooth pulpotomies in swine. J. Clin. Laser Med. Surg., **14** : 37-42, 1996.
 - 80) Pashley, E.L., Horner, J.A., Liu, M., Kim, S. and Pashley, D.H.: Effects of CO₂ laser energy on dentin permeability. J. Endod., **18** : 257-262, 1992.
 - 81) Tanji, E.Y. and Matsumoto, K.: The comparative study of the morphological changes of dentin surface after Nd: YAG, CO₂ and argon lasers irradiation. 日歯内療誌, **15** : 14-20, 1994.
 - 82) Lopes, M.C.S., Matsumoto, K., Watanabe, N.-S. and Bnugnera, A.: A comparative study of CO₂ and Nd: YAG laser on dentin layer of human root canals of permanent teeth utilizing scanning electron microscopy. 日歯内療誌, **16** : 1-5, 1995.
 - 83) Anic, I., Tachibana, H., Matsumoto, K. and Qi, P.: Permeability, morphologic and temperature changes of canal dentine walls induced by Nd: YAG, CO₂ and argon lasers. Int. Endod. J., **29** : 13-22, 1996.
 - 84) Khan, M.A., Khan, M.F.R., Khan, M.W., Wakabayashi, H. and Matsumoto, K.: Effect of laser treatment on the root canal of human teeth. Endod. Dent. Traumatol., **13** : 139-145, 1997.
 - 85) Kimura, Y., Wilder-Smith, P., Krasieva, T.B., Liaw, L.-H.L. and Matsumoto, K.: Effects of CO₂ laser on human dentin: A confocal laser scanning microscopic study. Lasers Life Sci., **8** : 1-12, 1998.
 - 86) Eto, J.N., Niu, W., Takeda, F.H., Kimura, Y. and

- Matsumoto, K.: Morphological and atomic analytical changes of root canal wall dentin after the treatment with thirty-eight percent $\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{F}$ solution and CO_2 laser. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, **17**: 19-24, 1999.
- 87) Featherstone, J.D.B. and Nelson, D.G.A.: Laser effects on dental hard tissues. *Adv. Dent. Res.*, **1**: 21-26, 1987.
 - 88) Onal, B., Ertl, T., Siebert, G. and Muller, G.: Preliminary report on the application of pulsed CO_2 laser radiation on root canals with AgCl fibers: A scanning and transmission electron microscopic study. *J. Endod.*, **19**: 272-276, 1993.
 - 89) Takahashi, K., Kimura, Y. and Matsumoto, K.: Morphological and atomic analytical changes after CO_2 laser irradiation emitted at $9.3\mu\text{m}$ on human dental hard tissues. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, **16**: 167-173, 1998.
 - 90) Kimura, Y., Takahashi, K., Wilder-Smith, P. and Matsumoto, K.: Effects of $9.3\mu\text{m}$ carbon dioxide laser on human dentin: A morphological study using scanning electron microscopy and confocal laser scanning microscopy. *Scanning Microsc.*, in press.
 - 91) Weichman, J.A., Johnson, F.M. and Nitta, L.K.: Laser use in endodontics. Part II. *Oral Surg.*, **34**: 828-830, 1972.
 - 92) Dederich, D.N., Zakariasen, K.L. and Tulip, J.: Scanning electron microscopic analysis of canal wall dentin following neodymium-yttrium-aluminum-garnet laser irradiation. *J. Endod.*, **10**: 428-431, 1984.
 - 93) Dederich, D.N., Zakariasen, K.L. and Tulip, J.: An *in-vitro* quantitative analysis of changes in root canal wall dentin due to pulsed neodymium-yttrium-aluminum-garnet laser irradiation. *Lasers Life Sci.*, **2**: 39-51, 1988.
 - 94) Levy, G.: Cleaning and shaping the root canal with a Nd: YAG laser beam: A comparative study. *J. Endod.*, **18**: 123-127, 1992.
 - 95) Bahcall, J.K., Miserendino, L., Walia, H. and Belardi, D.W.: Scanning electron microscopic comparison of canal preparation with Nd: YAG laser and hard instrumentation: A preliminary study. *Gen. Dent.*, **41**: 45-47, 1993.
 - 96) Goodis, H.E., White, J.M., Marshall, S.J. and Marshall, G.W. Jr.: Scanning electron microscopic examination of intracanal wall dentin: Hard versus laser treatment. *Scanning Microsc.*, **7**: 979-987, 1993.
 - 97) Marques, J.L.L., Eduardo, C.P. and Matsumoto, K.: A study on morphological changes of the root canal walls lased by pulsed Nd: YAG laser. *日歯内療誌*, **16**: 64-69, 1995.
 - 98) Miserendino, L.J., Levy, G.C. and Rizoio, I.M.: Effects of Nd: YAG laser on the permeability of root canal wall dentin. *J. Endod.*, **21**: 83-87, 1995.
 - 99) Saunders, W.P., Whitters, C.J., Strang, R., Moseley, H., Payne, A.P. and McGadey, J.: 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.
 - 100) 森田修平: Pulsed Nd: YAG レーザー併用による直接抜髄即時根管充填法における病理組織学および臨床的研究. *日本レーザー歯学会誌*, **5**: 91-101, 1994.
 - 101) 木庭健次: 感染根管の一回治療における Pulsed Nd: YAG レーザーの照射効果に関する病理組織学および臨床的研究. *日歯内療誌*, **16**: 20-37, 1995.
 - 102) Harashima, T., Takeda, F.H., Kimura, Y. and Matsumoto, K.: 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.
 - 103) Koba, K., Kimura, Y., Matsumoto, K., Takeuchi, T., Ikarugi, T., Shimizu, T. and Saito, K.: 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.
 - 104) Koba, K., Kimura, Y., Matsumoto, K., Takeuchi, T., Ikarugi, T. and Shimizu, T.: 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.
 - 105) Koba, K., Kimura, Y., Matsumoto, K., Takeuchi, T., Ikarugi, T. and Shimizu, T.: A histopathological study of the effects of pulsed Nd: YAG laser irradiation on infected root canals in dogs. *J. Endod.*, **25**: 151-154, 1999.
 - 106) Kimura, Y., Wilder-Smith, P., Arrastia-Jitosho, A.M.A., Liaw, L.-H.L., Matsumoto, K. and Berns, M.W.: Effects of nanosecond pulsed Nd: YAG laser irradiation on dentin resistance to artificial caries-like lesions. *Lasers Surg. Med.*, **20**: 15-21, 1997.
 - 107) Kimura, Y., Arrastia-Jitosho, A.M.A., Wilder-Smith, P., Liaw, L.-H.L., Lin, S., Matsumoto, K. and Berns, M.W.: Thermal, microstructural and physicochemical effects of nanosecond pulsed Nd: YAG laser irradiation on dentin. *Lasers Life Sci.*, **8**: 37-50, 1998.
 - 108) Zhang, C., Kimura, Y., Matsumoto, K., Harashima, T. and Zhou, H.: Effects of pulsed Nd: YAG laser irradiation on root canal wall dentin with different laser initiators. *J. Endod.*, **24**: 352-355, 1998.
 - 109) Moshonov, J., Sion, A., Kasirer, J., Rotstein, I. and Stabholz, A.: Efficacy of argon laser irradiation in removing intracanal debris. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol.*, **79**: 221-225, 1995.
 - 110) 松岡英美, 船登章嘉, 木村裕一, 松本光吉: File と argon laser による根管拡大時根管壁微細構造変化に関する形態学的研究. *日歯内療誌*, **17**: 185-189, 1996.
 - 111) Harashima, T., Takeda, F.H., Zhang, C., Kimura, Y. and Matsumoto, K.: Effects of the argon laser on the instrumented root canal walls. *日歯内療誌*, **18**: 12-18, 1997.
 - 112) Harashima, T., Takeda, F.H., Zhang, C., Kimura, Y. and Matsumoto, K.: Effect of argon laser irradiation on instrumented root canal walls. *Endod. Dent. Traumatol.*, **14**: 26-30, 1998.
 - 113) Zhang, C., Kimura, Y. and Matsumoto, K.: Effects of argon laser irradiation with 38% $\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{F}$ on the permeability of root canal wall

- dentin. 日歯内療誌, **17** : 179-184, 1996.
- 114) 高橋啓子, 町田 孝, 木村裕一, 松本光吉: Er: YAG レーザーの根管壁に対する形態学的研究. 日歯内療誌, **17** : 197-203, 1996.
 - 115) Matsuoka, E., Kimura, Y. and Matsumoto, K.: Studies on the removal of debris near the apical seats by Er: YAG laser and assessment with a fiberscope. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, **16** : 255-261, 1998.
 - 116) Takeda, F.H., Harashima, T., Kimura, Y. and Matsumoto, K.: Comparative study about the removal of smear layer by three types of laser devices. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, **16** : 117-122, 1998.
 - 117) Takeda, F.H., Harashima, T., Kimura, Y. and Matsumoto, K.: Efficacy of Er: YAG laser irradiation in removing debris and smear layer on root canal walls. *J. Endod.*, **24** : 548-551, 1998.
 - 118) Takeda, F.H., Harashima, T., Eto, J.N., Kimura, Y. and Matsumoto, K.: Effect of Er: YAG laser treatment on the root canal walls of human teeth: An SEM study. *Endod. Dent. Traumatol.*, **14** : 270-273, 1998.
 - 119) Takeda, F.H., Harashima, T., Kimura, Y. and Matsumoto, K.: A comparative study of the removal of smear layer by three endodontic irrigants and two types of laser. *Int. Endod. J.*, **32** : 32-39, 1999.
 - 120) Tewfik, H.M., Pashley, D.H., Horner, J.A. and Sharawy, M.M.: Structural and functional changes in root dentin following exposure to KTP/532 laser. *J. Endod.*, **19** : 492-497, 1993.
 - 121) Machida, T., Wilder-Smith, P., Arrastia, A.M., Liaw, L.-H.L. and Berns, M.W.: Root canal preparation using the second harmonic KTP:YAG laser: A thermographic and scanning electron microscopic study. *J. Endod.*, **21** : 88-91, 1995.
 - 122) Pini, R., Salimbeni, R., Vannini, M., Barone, R. and Clauser, C.: Laser dentistry: A new application of excimer laser in root canal therapy. *Lasers Surg. Med.*, **9** : 352-357, 1989.
 - 123) Stabholz, A., Neev, J., Liaw, L.-H.L., Stabholz, A., Khayat, A. and Torabinejad, M.: Sealing of human dentinal tubules by XeCl 308-nm excimer laser. *J. Endod.*, **19** : 267-271, 1993.
 - 124) Stabholz, A., Rotstein, I., Neev, J., Moshonov, J. and Stabholz, A.: Efficacy of XeCl 308-nm excimer laser in reducing dye penetration through coronal dentinal tubules. *J. Endod.*, **21** : 266-268, 1995.
 - 125) Lee, J.P., Cheung, E., Wilder-Smith, P., Desai, T.J., Liaw, L.H., Berns, M.W. and Neev, J.: Thermal, ablative, and physicochemical effects of XeCl laser on dentin. *SPIE Proceedings*, **2394** : 188-195, 1995.
 - 126) Dankner, E., Neev, J., Stabholz, A. and Rotstein, I.: Effect of XeCl-308nm excimer laser on the mineral content of human dentin. *Endod. Dent. Traumatol.*, **13** : 234-237, 1997.
 - 127) Stabholz, A., Neev, J., Liaw, L.-H.L., Stabholz, A., Khayat, A. and Torabinejad, M.: Effect of ArF-193nm excimer laser on human dentinal tubules. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol.*, **75** : 90-94, 1993.
 - 128) Arima, M. and Matsumoto, K.: Effects of ArF: excimer laser irradiation on human enamel and dentin. *Lasers Surg. Med.*, **13** : 97-105, 1993.
 - 129) Wilder-Smith, P., Lin, S., Nguyen, A., Liaw, L.-H., Arrastia, A.M.A., Lee, J.P. and Berns, M.W.: Morphological effects of ArF excimer laser irradiation on enamel and dentin. *Lasers Surg. Med.*, **20** : 142-148, 1997.
 - 130) Stevens, B.H., Trowbridge, H.O., Harrison, G. and Silverton, S.F.: Dentin ablation by Ho: YAG laser: Correlation of energy versus volume using stereophotogrammetry. *J. Endod.*, **20** : 246-249, 1994.
 - 131) Cernavin, I.: A comparison of the effects of Nd: YAG and Ho: YAG laser irradiation on dentine and enamel. *Aust. Dent. J.*, **40** : 79-84, 1995.
 - 132) Blum, J.-Y. and Abadie, M.J.M.: Study of the Nd: YAP laser. —Effect on canal cleanliness—. *J. Endod.*, **23** : 669-675, 1997.
 - 133) Farge, P., Nahas, P. and Bonin, P.: *In vitro* study of a Nd: YAP laser in endodontic retreatment. *J. Endod.*, **24** : 359-363, 1998.
 - 134) Hoke, J.A., Burkes, E.J., Gomes, E.D., Hooper, B.A. and Wolbarsht, M.L.: The effect of free electron laser exposure on tooth structure. *Lasers Life Sci.*, **6** : 251-257, 1995.
 - 135) 荻野誠司, 栗津邦男, 富增多喜夫: 象牙質に対する自由電子レーザー (FEL) の照射効果. 日本レーザー歯学会誌, **7** : 67-71, 1996.
 - 136) Hossain, M., Nakamura, Y., Yamada, Y., Kimura, Y., Matsumoto, N. and Matsumoto, K.: Effects of Er, Cr: YSGG laser irradiation in human enamel and dentin: Ablation and morphological studies. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, **17** : 155-159, 1999.
 - 137) Yamazaki, R., Goya, C., Yu, D.-G., Kimura, Y. and Matsumoto, K.: Effects of erbium, chromium: YSGG laser irradiation on root canal walls: A scanning electron microscopic and thermographic study. *J. Endod.*, in press.
 - 138) Dederich, D.N., Pickard, M.A., Vaughn, A.S., Tulip, J. and Zakariasen, K.L.: Comparative bactericidal exposures for selected oral bacteria using carbon dioxide laser radiation. *Lasers Surg. Med.*, **10** : 591-594, 1990.
 - 139) Le Goff, A., Dautel-Morazin, A., Guigand, M., Vulcain, J.-M. and Bonnaure-Mallet, M.: An evaluation of the CO₂ laser for endodontic disinfection. *J. Endod.*, **25** : 105-108, 1999.
 - 140) Rooney, J., Midda, M. and Leeming, J.: A laboratory investigation of the bactericidal effect of a Nd: YAG laser. *Br. Dent. J.*, **176** : 61-64, 1994.
 - 141) 海老原新, 上野健一, 西岡政道, 関根義朗, 竹田淳志, 中島光雅, 須田英明: Nd: YAG レーザーの人工感染象牙質に与える影響について. 日歯保存誌, **37** : 1029-1036, 1994.
 - 142) Hardee, M.W., Miserendino, L.J., Kos, W. and Walia, H.: Evaluation of the antibacterial effects of intracanal Nd: YAG laser irradiation. *J. Endod.*, **20** : 377-380, 1994.
 - 143) Fegan, S.E. and Steiman, H.R.: Comparative evaluation of the antibacterial effects of intracanal

- Nd: YAG laser irradiation: An *in vitro* study. J. Endod., **21**: 415-417, 1995.
- 144) Moshonov, J., Orstavik, D., Yamauchi, S., Pettiette, M. and Trope, M.: Nd: YAG laser irradiation in root canal disinfection. Endod. Dent. Traumatol., **11**: 220-224, 1995.
 - 145) Goodis, H., White, J., Yee, B., Marshall, S. and Marshall, G.: Sterilization of root canal spaces using an Nd: YAG laser, *in vitro*. SPIE Proceedings, **2394**: 154-159, 1995.
 - 146) 関根義朗, 和達礼子, 海老原新, 竹田淳志, 須田英明: Nd: YAG レーザーによる根管消毒. 日本レーザー歯学会誌, **6**: 31-39, 1995.
 - 147) Gutknecht, N., Moritz, A., Conrads, G., Sievert, T. and Lampert, F.: Bactericidal effect of the Nd: YAG laser in *in vitro* root canals. J. Clin. Laser Med. Surg., **14**: 77-80, 1996.
 - 148) Ramskold, L.O., Fong, C.D. and Stromberg, T.: Thermal effects and antibacterial properties of energy levels required to sterilize stained root canals with an Nd: YAG laser. J. Endod., **23**: 96-100, 1997.
 - 149) 五味一博, 小林禎子, 中野雅子, 山口博康, 金指幹元, 小鮎正明, 藤田清子, 新井 高, 中村治郎: 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.
 - 150) Moritz, A., Schoop, U., Goharkhay, K., Jakolitsch, S., Kluger, W., Wernisch, J. and Sperr, W.: 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.
 - 151) Mehl, A., Folwaczny, M., Haffner, C. and Hickel, R.: Bactericidal effects of 2.94 μ m Er: YAG-laser radiation in dental root canals. J. Endod., **25**: 490-493, 1999.
 - 152) Stabholz, A., Kettering, J., Neev, J. and Torabinejad, M.: Effects of the XeCl excimer laser on *Streptococcus mutans*. J. Endod., **19**: 232-235, 1993.
 - 153) Moritz, A., Gutknecht, N., Goharkhay, K., Schoop, U., Wernisch, J. and Sperr, W.: *In vitro* irradiation of infected root canals with a diode laser: Results of microbiologic, infrared spectrometric, and stain penetration examinations. Quintessence Int., **28**: 205-209, 1997.
 - 154) Blum, J.-Y., Michalesco, P. and Abadie, M.J.M.: An evaluation of the bactericidal effect of the Nd: YAG laser. J. Endod., **23**: 583-585, 1997.
 - 155) 眞関 和, 幸治 亮, 斎藤恭子, 船登章嘉, 松本光吉: Er: YAG Laser による根管口部の拡大, 形成に関する形態学的研究. 日歯内療誌, **19**: 5-9, 1998.
 - 156) Yamazaki, R., Goya, C., Tomita, Y., Kimura, Y. and Matsumoto, K.: Study on apical leakage of the teeth after argon laser treatment and obturation. J. Clin. Laser Med. Surg., **17**: 121-125, 1999.
 - 157) Kimura, Y., Yamazaki, R., Goya, C., Tomita, Y., Yokoyama, K. and Matsumoto, K.: 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.
 - 158) Goya, C., Yamazaki, R., Tomita, Y., Kimura, Y. and Matsumoto, K.: Effects of pulsed Nd: YAG laser irradiation on smear layer at the apical stop and apical leakage after obturation. Int. Endod. J., in press.
 - 159) Potts, T.V. and Petrou, A.: Laser photopolymerization of dental materials with potential endodontic applications. J. Endod., **16**: 265-268, 1990.
 - 160) Potts, T.V. and Petrou, A.: Argon laser initiated resin photopolymerization for the filling of root canals in human teeth. Lasers Surg. Med., **11**: 257-262, 1991.
 - 161) Zaman, D.S., Khan, M.A., Saito, Y., Tachibana, H., Wakabayashi, H. and Matsumoto, K.: New root canal obturation system in combination with AH-26 and argon laser. 日歯内療誌, **15**: 151-155, 1994.
 - 162) Anic, I., Shirasuka, T. and Matsumoto, K.: Scanning electron microscopic evaluation of two compaction techniques using a composite resin as a root canal filling material. J. Endod., **21**: 594-598, 1995.
 - 163) Eriksson, A.R. and Albrektsson, T.: Temperature threshold levels for heat-induced bone tissue injury: A vital-microscopic study in the rabbit. J. Prosthet. Dent., **50**: 101-107, 1983.
 - 164) Bahcall, J., Howard, P., Miserendino, L. and Walia, H.: Preliminary investigation of the histological effects of laser endodontic treatment on the periradicular tissues in dogs. J. Endod., **18**: 47-51, 1992.
 - 165) 関根義朗, 和達礼子, 海老原新, 竹田淳志, 須田英明: Nd: YAG レーザーの根管内照射による歯周組織への影響. 日本レーザー歯学会誌, **7**: 12-21, 1996.
 - 166) 稲本雄之, 林 宏行, 奥野一吉, 野口勝司, 戸田忠夫: Nd: YAG レーザーの根管内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.
 - 167) Kesler, G., Koren, R., Kesler, A., Hay, N. and Gal, R.: 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.
 - 168) Pogrel, M.A., Yen, C.K. and Taylor, R.C.: Thermographic evaluation of the temperatures achieved by carbon dioxide laser on soft tissues and teeth. Thermology, **3**: 50-52, 1988.
 - 169) Anic, I., Dzibur, A., Vidovic, D. and Tudja, M.: Temperature and surface changes of dentine and cementum induced by CO₂ laser exposure. Int. Endod. J., **26**: 284-293, 1993.
 - 170) 町田 孝, 眞関 和, 成島浩司, 松本光吉: Er-YAG レーザー照射時の温度上昇に関する研究. 日歯内療誌, **17**: 38-40, 1996.
 - 171) Cohen, B.I., Deutsch, A.S. and Musikant, B.L.: Effect of power settings on temperature change at the root surface when using a holmium YAG laser in enlarging the root canal. J. Endod., **22**: 596-599, 1996.
 - 172) Cohen, B.I., Deutsch, A.S., Musikant, B.L. and Pagnillo, M.K.: 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. Endod.*, **24** : 802-806, 1998.
- 173) Koba, K., Kimura, Y., Matsumoto, K., Watanabe, H., Shinoki, T., Kojy, R. and Ito, M.: Post-operative symptoms and healing after endodontic treatment of infected teeth using pulsed Nd: YAG laser. *Endod. Dent. Traumatol.*, **15** : 68-72, 1999.
 - 174) Koba, K., Kimura, Y., Matsumoto, K., Gomyoh, H., Komi, S., Harada, S., Tsuzuki, N. and Shimada, Y.: 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.
 - 175) Hassan, F.E.Z.: A new method for treating weeping canals: Clinical and histopathologic study. *Egypt. Dent. J.*, **41** : 1403-1408, 1995.
 - 176) Gutknecht, N., Kaiser, F., Hassan, A. and Lampert, F.: Long-term clinical evaluation of endodontically treated teeth by Nd: YAG lasers. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, **14** : 7-11, 1996.
 - 177) Moritz, A., Gutknecht, N., Schoop, U., Goharkhay, K., Doertbudak, O. and Sperr, W.: Irradiation of infected root canals with a diode laser *in vivo*: Results of microbiological examinations. *Lasers Surg. Med.*, **21** : 221-226, 1997.
 - 178) Kesler, G., Koren, R., Kesler, A., Hay, N. and Gal, R.: Three years of clinical evaluation of endodontically treated teeth by 15F CO₂ laser microprobe: *In vivo* study. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, **17** : 111-114, 1999.
 - 179) Neiburger, E.J.: Tooth apex welding using the CO₂ laser. *Ill. Dent. J.*, **58** : 108-110, 1989.
 - 180) Read, R.P., Baumgartner, J.C. and Clark, S.M.: Effects of a carbon dioxide laser on human root dentin. *J. Endod.*, **21** : 4-8, 1995.
 - 181) Moritz, A., Gutknecht, N., Goharkhay, K., Schoop, U., Wernisch, J., Pohn, C. and Sperr, W.: The carbon dioxide laser as an aid in apicoectomy: An *in vitro* study. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, **15** : 185-188, 1997.
 - 182) Friedman, S., Rotstein, I. and Mahamid, A.: *In vivo* efficacy of various retrofills and of CO₂ laser in apical surgery. *Endod. Dent. Traumatol.*, **7** : 19-25, 1991.
 - 183) Friedman, S., Rotstein, I., Koren, L. and Trope, M.: Dye leakage in retrofilled dog teeth and its correlation with radiographic healing. *J. Endod.*, **17** : 392-395, 1991.
 - 184) Friedman, S., Rotstein, I. and Bab, I.: Tissue response following CO₂ laser application in apical surgery: Light microscopic assessment in dogs. *Lasers Surg. Med.*, **12** : 104-111, 1992.
 - 185) Bader, G. and Lejeune, S.: Prospective study of two retrograde endodontic apical preparations with and without the use of CO₂ laser. *Endod. Dent. Traumatol.*, **14** : 75-78, 1998.
 - 186) Stabholz, A., Khayat, A., Weeks, D.A., Neev, J. and Torabinejad, M.: Scanning electron microscopic study of the apical dentine surfaces lased with Nd: YAG laser following apicectomy and retrofill. *Int. Endod. J.*, **25** : 288-291, 1992.
 - 187) Stabholz, A., Khayat, A., Ravanshad, S.H., McCarthy, D.W., Neev, J. and Torabinejad, M.: Effects of Nd: YAG laser on apical seal of teeth after apicoectomy and retrofill. *J. Endod.*, **18** : 371-375, 1992.
 - 188) Arens, D.L., Levy, G.C. and Rizioi, I.M.: A comparison of dentin permeability after bur and laser apicoectomies. *Compend. Contin. Educ. Dent.*, **14** : 1290-1297, 1993.
 - 189) Wong, W.S., Rosenberg, P.A., Boylan, R.J. and Schulman, A.: A comparison of the apical seals achieved using retrograde amalgam fillings and the Nd: YAG laser. *J. Endod.*, **20** : 595-597, 1994.
 - 190) Maillet, W.A., Torneck, C.D. and Friedman, S.: Connective tissue response to root surfaces resected with Nd: YAG laser or burs. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol.*, **82** : 681-690, 1996.
 - 191) Paghdwala, A.F.: Root resection of endodontically treated teeth by erbium: YAG laser radiation. *J. Endod.*, **19** : 91-94, 1993.
 - 192) 横山恵以子, 古森孝英, 松本葉子, 松本光吉: Er: YAG レーザーによる歯根切断面の形態学的研究. *日口診誌*, **9** : 200-204, 1996.
 - 193) 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. *日本レーザー歯学会誌*, **8** : 23-30, 1997.
 - 194) 古森孝英, 横山恵以子, 松本葉子, 松本光吉, 高戸 毅: Er: YAG レーザーによる歯根尖切除術の経験. *口病誌*, **63** : 516-520, 1996.
 - 195) 古森孝英, 横山恵以子, 松本葉子, 富塚 健, 高戸 毅, 松本光吉: Er: YAG レーザーによる硬組織疾患の治療. *日口診誌*, **9** : 312-315, 1996.
 - 196) Komori, T., Yokoyama, K., Takato, T. and Matsumoto, K.: Clinical application of the erbium: YAG laser for apicoectomy. *J. Endod.*, **23** : 748-750, 1997.
 - 197) 海老原新, 和達礼子, 関根義朗, 竹田淳志, 須田英明: 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. *日本レーザー歯学会誌*, **9** : 23-31, 1998.
 - 198) 古森孝英, 横山恵以子, 松本葉子, 高戸 毅, 松本光吉: Hol: YAG レーザーによる硬組織切削面の形態学的研究. *歯内療法誌*, **17** : 175-178, 1996.
 - 199) Komori, T., Yokoyama, K., Matsumoto, Y. and Matsumoto, K.: Erbium: YAG and holmium: YAG laser root resection of extracted human teeth. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, **15** : 9-13, 1997.
 - 200) Rocca, J.P., Jasmin, J.R. and Duprez, J.P.: Removal of calcified attached denticle with a pulsed dye laser. —A case report—. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol.*, **77** : 281-284, 1994.
 - 201) Arakawa, S., Cobb, C.M., Rapley, J.W., Killoy, W.J. and Spencer, P.: Treatment of root fracture by CO₂ and Nd: YAG lasers: An *in vitro* study. *J. Endod.*, **22** : 662-667, 1996.
 - 202) Dederich, D.N.: CO₂ laser fusion of a vertical root fracture. *J. Am. Dent. Assoc.*, **130** : 1195-1199, 1999.
 - 203) Adrian, J.C. and Gross, A.: A new method of sterilization: The carbon dioxide laser. *J. Oral Pathol.*, **8** : 60-61, 1979.
 - 204) Hooks, T.W., Adrian, J.C., Gross, A. and Bernier, W.E.: Use of the carbon dioxide laser in sterilization of endodontic reamers. *Oral Surg.*, **49** : 263-265,

- 1980.
- 205) Powell, G.L. and Whisenant, B.K. : Comparison of three lasers for dental instrument sterilization. *Lasers Surg. Med.*, **11** : 69-71, 1991.
- 206) Anic, I. and Matsumoto, K. : Comparison of the sealing ability of laser-softened, laterally condensed and low-temperature thermoplasticized gutta-percha. *J. Endod.*, **21** : 464-469, 1995.
- 207) Anic, I. and Matsumoto, K. : Dentinal heat transmission induced by a laser-softened gutta-percha obturation technique. *J. Endod.*, **21** : 470-474, 1995.
- 208) Yu, D.-G., Kimura, Y., Tomita, Y., Nakamura, Y., Watanabe, H. and Matsumoto, K. : Study on removal effects of filling materials and broken files from root canals using pulsed Nd : YAG laser. *J. Clin. Laser Med. Surg.*, **18** : 23-28, 2000.
- 209) 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. *日本レーザー歯学会誌*, **10** : 25-33, 1999.
- 210) 平山 健 : レーザー併用による歯の漂白法に関する研究. *日本レーザー歯学会誌*, **4** : 9-19, 1993.