

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 3 月 31 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22791839

研究課題名（和文） パルス波レーザーを用いた根管内洗浄法の確立

研究課題名（英文） Root canal irrigation by using Er:YAG laser

研究代表者

松本 妃可（MATSUMOTO HIMEKA）

九州大学・大学病院・医員

研究者番号：40467915

研究成果の概要（和文）：この研究の目的は、レーザー照射による根管内洗浄作用のメカニズムを解明することと安全性を確認することである。高速度カメラを用いて Er:YAG レーザーを照射した際の蒸気泡とキャビテーション気泡を、水中内およびガラス製模擬根管内で可視化した。さらに、ガラスビーズのトレーサーの動きを根管モデル内で捉えた。円錐型と平坦型のチップでは、蒸気泡の形状と存続期間が異なっていた。根管モデル内では、蒸気泡は根管壁に沿って上下に大きく変化し、その後多数のより小型のキャビテーション気泡の形成と崩壊が繰り返し観察された。トレーサーを用いた解析では、レーザー照射によって根管内には急速な攪拌作用が生じることが明らかとなった。また、模擬根管内でレーザー照射を行った時の根尖方向への圧力を測定したところ、2～3MPa の圧力が生じることが分かった。以上の結果は、Er:YAG レーザーによる根管内洗浄のメカニズムは気泡の形成・崩壊による高速の液体の動きに依存している可能性を示唆している。円錐型チップを装着した Er:YAG レーザーは、根管内洗浄法として有望であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study was to clarify the working mechanism of intracanal irrigation by pulsed lasers. Using a high speed camera, vapor and cavitation bubbles induced by Er:YAG laser were visualized in a water environment and in a glass root canal model. In addition, the motion of glass-bead tracers was captured in a root canal model. The vapor bubbles by a cone-shaped tip and flat one were different in shape and lifetime. In the root canal model, the vapor bubble grew up and down along the canal wall, followed by the formation and collapse of many smaller cavitation bubbles repeatedly. The analysis using tracers showed rapid agitation caused by laser irradiation. These results suggest that the mechanism of Er:YAG laser in the root canal irrigation might be attributed to high speed fluid motion due to bubble formation and collapse. Er:YAG laser with the cone-shaped tip may be promising for intracanal irrigation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：保存治療系歯学

キーワード：Er:YAG レーザー，根管内殺菌，圧力波，NaOCl，根管洗浄，キャビテーション，蒸気泡，高速度カメラ

## 1. 研究開始当初の背景

根管治療において、機械的拡大と化学的清掃の両者を併用する方法は広く受け入れられている。また、化学的清掃においては、その強い有機質溶解作用を期待して第一選択として NaOCl を使用することも一般化している。清掃効果を上げるために、予め洗浄液を加温する方法の意義に関しては、Sirtes ら (J Endod. 31:669-671, 2005) によって報告されている。彼らは、NaOCl の温度が 20°C から 45°C に上がると殺菌効果が 100 倍上昇すると指摘している。

一方、円錐型チップは約 8 割が側方へ、残りが前方へ照射されるように工夫されており、根管内でレーザーを安全かつ有効に使用することで優れている。また、Er:YAG レーザー自身が 2.94 $\mu$ m の周波数で水への吸収特性が高く、そのエネルギーの多くは表面で吸収されるため、歯周組織に対する熱による為害性が少ないことを特長としている。このような特色を生かして、根管内を無菌化、または少なくとも感染源を大幅に減少させることが出来ないだろうかという発想から本研究を構想するに至った。

## 2. 研究の目的

今日、歯科用レーザー機器の発達は目覚ましく、歯周ポケット内照射などの歯周病への応用、軟組織切開などの口腔内小手術への応用、う蝕予防やう蝕除去への応用、などの他に疼痛緩和や創傷治癒促進にも利用されている。歯内療法分野においても、断髄・覆髄法や根管治療における乾燥・殺菌などを目的とした応用の可能性が報告されている。

歯内療法における根管の化学的清掃は、通常、リーマー・ファイルを用いた機械的拡大・形成の過程およびその終了時点で実施され、根管治療を成功に導くための重要な要素の一つである。化学的清掃剤としては、抗菌性と有機質溶解作用に優れた次亜塩素酸ナトリウム溶液 (NaClO)、過酸化水素水、無機質溶解作用のある EDTA 溶液、などが主に使用されている。一般的には、これらの化学的清掃剤は専用シリンジを用いて根管内に応用され、壊死物質や象牙質削片などの根管内容物の洗浄、根管拡大用インストルメントが接触

できない部位の清掃、さらに機械的拡大操作によって根管壁に形成されるスミヤ層の除去、などを可能にしている。しかしながら、その洗浄効果は使用する洗浄針の形状や洗浄液の作用時間・量・温度などの影響を受けると考えられ、シリンジ法以外にも超音波・音波装置の応用などさまざまな方法が行われている。

キャビテーションは、液体の流れの中で圧力差によって短時間に泡の発生と消滅が起きる物理現象と定義され、空洞現象とも言われている。キャビテーション作用で形成された気泡が圧力の上昇でつぶれる際には衝撃波が発生する。この原理は、歯科医療の分野においても超音波洗浄機による各種器材の洗浄、超音波スケーラーによる歯周ポケット内の殺菌、専用ファイルを用いた根管内洗浄の補助、などに応用されている。一方、レーザーを用いた根管内でのキャビテーション作用に関して、Levy らは水を満たした根管内での Nd:YAG レーザー照射によって圧力波が生まれ、この波は音波器具および超音波器具のような振動に由来する波とは異なる性質を有することを圧電効果の原理を用いて報告している。また、Blanken らは Er, Cr:YSGG レーザーのキャビテーション作用による透明根管模型内での気泡発生を高速度カメラで撮影し、根管拡大後のスミヤ層除去や根管壁殺菌を目的とした応用、すなわち根管洗浄へのレーザー応用の可能性を指摘している。

そこで本研究では、Er:YAG レーザー照射による根管内洗浄作用に関して、そのメカニズムを解明する目的で、高速撮影用カメラを用いた水中照射時の気泡発生・消滅の撮影および模擬根管内でトレーサーを指標とした流体の観察を行った。さらに、模擬根管内での Er:YAG レーザーを用いた洗浄時に発生する圧力波を観察することで、根尖孔外への影響について検討した。

## 3. 研究の方法

### (1) 水中照射時の気泡パターンの観察

高速度デジタルカメラ (Phantom V4.2: Nobby Tech 社, 東京) の前方に蒸留水を入れたガラス製セル (10×10×45mm) を置き、斜め

前方に光源 (LS-M350: 住田光学ガラス社, 埼玉) を設置した。次に, Er:YAG レーザー (Erwin AdvErl: モリタ製作所, 京都) に, コア径  $400\mu\text{m}$  の円錐型チップ (R400T: 試作品) および平坦型チップ (C400F: モリタ) を装着し, 注水およびエア無しで,  $30\text{mJ}$  の表示出力エネルギーで単発照射 ( $1\text{pps}$ ) を行った。照射中にチップ先端周囲に生じる気泡発生から崩壊までの様子を  $20\mu\text{s}$  間隔で撮影した。次に, 先端部直径  $1\text{mm}$  のガラス製模擬根管モデル内において, コア径  $300\mu\text{m}$  の円錐型チップ (R300T: モリタ) を用いて上記と同じ条件で観察を行った。この際, チップの先端は模擬根管の底面から約  $2\text{mm}$  の位置に設置した。

#### (2) 模擬根管モデル内における流体の観察

実体顕微鏡 (Stemi2000C: Carl Zeiss 社製, ドイツ) に高速度デジタルカメラ (HAS-220M: DITECT 社, 東京) を装着し, 先端部直径  $1\text{mm}$  のガラス製模擬根管モデルを置き, 斜め後方に光源 (KL2500LCD: Carl Zeiss) を設置した。模擬根管内に, 微粒子状トレーサーとして直径約  $50\mu\text{m}$  の球形ガラスビーズ (Toshinriko 社, 東京) を含む蒸留水を注入し, 底部から  $2\text{mm}$  の位置にコア径  $300\mu\text{m}$  の円錐型チップ (R300T: モリタ) 先端を固定した。レーザー照射条件は, 注水およびエア無しで,  $30\text{mJ}$ ,  $50\text{mJ}$ ,  $70\text{mJ}$  の各表示出力エネルギー,  $20\text{pps}$  の繰り返し速度に設定した。照射中に模擬根管内で発生するトレーサーの動きを動画モード (シャッタースピード:  $1/1,000\text{s}$ ) で撮影した。

#### (3) 模擬根管内的圧力波の観察

模擬根管として直径  $1\text{mm}$  のガラス管を用い, 底部にセンサー素子直径が  $0.5\text{mm}$  の圧力測定用 ニードル型 ハイドロフォン (PVDF-Needlehydrophone, Imotec 社, ドイツ) を常温重合型レジンで固定し, オシロスコープ (WaveRunner44Xi, LeCroy 社, 米国) に繋いで用いた。測定に当たり模擬根管内には蒸留水を上縁から  $1\text{mm}$  の高さまで注入した。

Er:YAG レーザーに根管内照射用石英ファイバーチップ (R200T, モリタ社) を装着し, 表示出力は  $30\text{mJ}$  または  $50\text{mJ}$  に設定して  $1\text{pps}$  (pulse per second) で照射した。測定に際しては, レーザー用チップおよび超音波用ファイバーが模擬根管壁に接触しない状態で固定した。また, ハイドロフォンのセンサーとレーザー用チップまたは超音波用ファイバーの先端までの距離は,  $2\text{mm}$  および  $5\text{mm}$  に設定した。各条件で 5 回の圧力波の計測を行った。

## 4. 研究成果

### 【結果】

#### (1) 水中照射時の気泡パターンの観察

円錐型チップでは, 気泡の発生はチップ先端を取り囲むように球形に近い形状で始まり, 気泡形成開始から約  $180\mu\text{s}$  後に, 水平方向に約  $2.6\text{mm}$ , 垂直方向に約  $2.2\text{mm}$  の大きさにまで成長した。その後, 気泡はチップ側から消滅を開始し, 最大のサイズに達した後, 約  $220\mu\text{s}$  で消失した。この後さらに, 小型の気泡形成が繰り返し観察された (図 1a-f)。

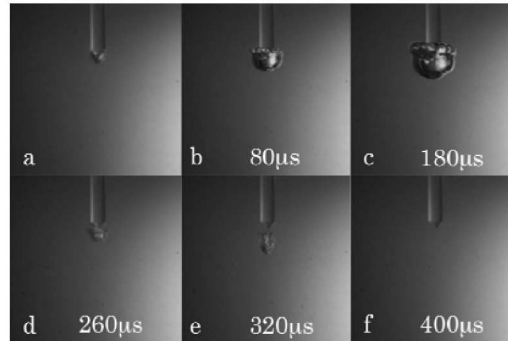


図 1 円錐型チップによる気泡パターン

一方, 平坦型チップでは, 気泡は垂直方向に円柱状に成長し, 上下に分離して約  $320\mu\text{s}$  後に消失した。この後, 小型の気泡形成を数回認めた。(図 2a-f)。

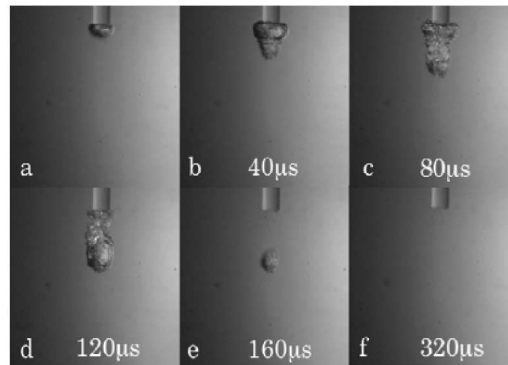


図 2 平坦型チップによる気泡パターン

模擬根管モデル内では, チップ先端に生じた蒸気泡は主に後方 (上方) に成長し, 同程度の時間をかけて消滅した。その後, 小型のキャビテーション気泡が繰り返し多数観察された。一連の過程終了には, 気泡形成開始後約  $2\text{ms}$  を要した (図 3a-j)。

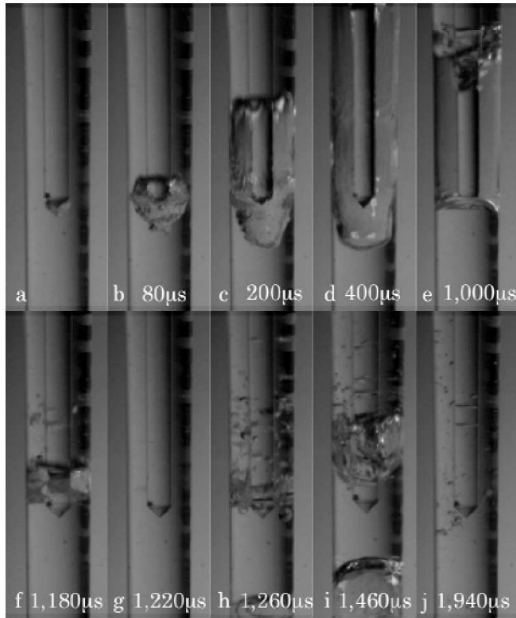


図3 模擬根管内的気泡パターン

### (2) 模擬根管モデル内における流体の観察

模擬根管内的照射によって生じたガラスビーズの動きを捉えた静止画像を図5に示す。模擬根管の底部から2mmの位置にチップ先端を設置した場合、30mJでは攪拌作用はチップ先端より前方(下方)に限局していたのに対して、50mJではチップ先端部よりも後方(上方)、すなわち根管底部から約5mmの範囲に及んでいた。70mJでは、さらに上方の根管領域にまで攪拌作用が認められた。

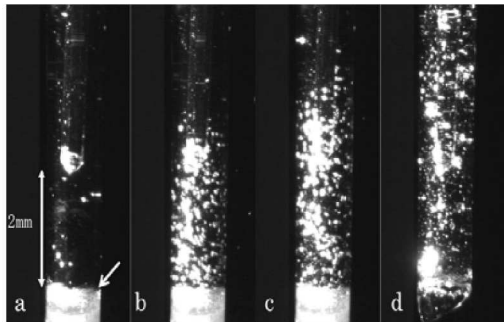
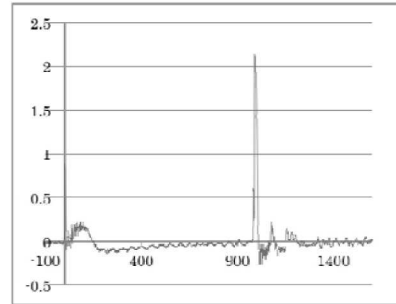


図4 模擬根管内的攪拌作用

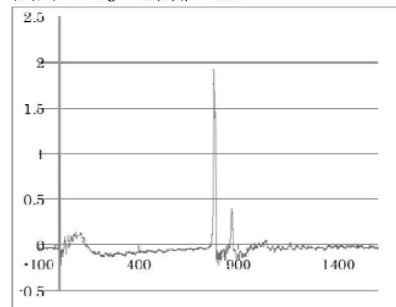
### (3) 模擬根管内的圧力波の観察

レーザー照射後に観察される圧力として、出力30mJまたは50mJ・チップ-センサー間距離2mmまたは5mmの各条件における波形の代表例を図5に示す。各条件に共通して、類似した波形が観察された。すなわち、照射直後(約2.0μs以内)の急峻なピーク(第1ピーク)の後に、一旦平坦化し、再度のピーク(第2ピーク)とその後の複数の低いピークを繰り返しながら次第に平坦化した。

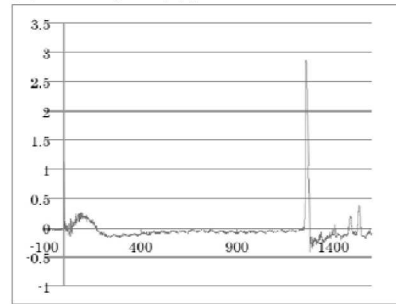
また、第1ピーク後に第2ピークが出現するまでの時間は、出力が高い方が、またチップ-センサー間距離が短い方が長くなる傾向を示した。



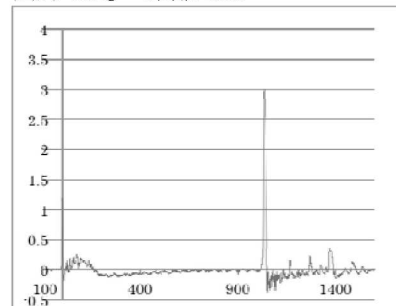
出力30mJ・距離2mm



出力30mJ・距離5mm



出力50mJ・距離2mm



出力50mJ・距離5mm

図5 模擬根管内の圧力波(縦軸:MPa, 横軸; μs)

## 【考 察】

医療用レーザーのキャビテーション作用は、泌尿器科領域における Ho:YAG レーザーを用いた膀胱結石の粉碎、眼科領域における Q スイッチ型 Nd:YAG レーザーによる白内障の治療など多彩な用途に応用されており、この作用には微小気泡の発生と崩壊が重要な働きを果たしている。根管内でのレーザーによるキャビテーション現象に関しては、Blanken らが Er, Cr:YSGG レーザー照射時における特異的な微小気泡の形成と崩壊の様子を詳細に報告している。

本研究では、Er:YAG レーザーに円錐型チップと平坦型チップを装着して、水中で単発照射した際の気泡パターンを高速度カメラで観察したところ、両者には形状と経過時間に違いが認められた。形状に関しては、円錐型チップでは球形に近い形で気泡が拡大したが、その理由としてチップの先端角度が 84 度の円錐型に加工されており、照射エネルギーの約 8 割は側方へ、残りの約 2 割が前方に照射されるように工夫されていることが影響していると考えられる。また、同一の照射条件でパルス幅が同じにも関わらず気泡形成開始から終了までの時間が異なる点に関しては、生成される気泡の形状の違いにより、運動エネルギーと界面エネルギーに差があるためと推測される。すなわち、円錐型チップによる球形気泡では重心がほとんど移動しないために運動エネルギーが小さく、かつ表面積が小さいために界面エネルギーも小さく、平坦型チップに比べて気泡形状の維持が容易で安定していると考えられる。根管洗浄を目的として使用する場合、前方への気泡の成長が少なく根尖孔からの押し出しの危険性が少ない点を考慮すると、円錐型チップの方が適していると考えられる。

気泡発生の原理に関しては、Er:YAG レーザーのエネルギーは水への吸収特性が高く、水中で照射するとチップ表面近くの水は直ちに沸点に達し、気化に伴う気泡（蒸気泡）が発生することが知られている。棚橋ら<sup>14)</sup>は、パルス波レーザーによる水中での衝撃波や気泡の発生に関して、前者はレーザー照射後約 0.05 $\mu$ s の極く初期に水中で発生したプラズマの爆発的なエネルギー放出により生じる物理現象で、後者はレーザー照射後の数[ $\mu$ s で発生し約 500 $\mu$ s で消失すると報告している。本研究における出力条件 (30mJ, 10pps) でのパルス幅は約 100 $\mu$ s と考えられるが、円錐型チップでは気泡の発生と消滅を繰り返す傾向が強く、レーザー誘発気泡の過程が終了するまでに照射開始後 500 $\mu$ s 以上を要した。

模擬根管モデル内では、チップの後方のみが開放されているため、レーザー照射により誘発される蒸気泡は主に上方に拡大したと考えられる。さらに、根管のような狭小な空間内では圧力の変化が生まれ易く、気泡が崩壊し減圧状態にある環境下では、2 次的な小型の気泡（キャビテーション気泡）が発生と消滅を繰り返したものと考えられる。

本研究において観察された模擬根管内での水の急速な流れは、レーザー照射によって誘発される気化による蒸気泡の急激な膨張・収縮とその後のキャビテーション気泡の発生・消滅が周囲の水を移動させ、連続的な圧力波となって伝播することがその一因であると推察される。根管壁に残存する感染物質やスミヤ層の除去効果をレーザー照射による圧力波に期待する場合、根管内での流体の活動範囲と速度が重要な指標になると考えられる。今回は、微粒子トレーサーの動きを観察することで、出力エネルギーの違いによって根管内での洗浄範囲が異なることが明らかとなった。

一方、パルス波レーザーをスミヤ層の除去を目的として根管内で使用する際の注意点として、George R らは洗浄液を根尖孔外へ押し出す危険性について報告している。この点に関しては、照射出力やチップのタイプおよび正常な歯根膜組織の有無などが影響すると考えられることから、適切な照射条件を決定するには今後さらに研究が必要である。

レーザーの出力の違いによる波形の違いに関しては、出力が大きいほど第 2 ピークの衝撃波は大きくなり、遅れて出現する傾向がみられた。これはレーザー照射による蒸気泡が大きく形成されるために、気泡崩壊時の圧力変化が大きくなり、その後のキャビテーションも大きくなることが影響していると考えられる。また、蒸気泡の膨張と収縮に要する時間は、出力が大きいほど長くなるために、第 2 ピーク以後の衝撃波は遅れて発生したと考えられる。

根管治療において、リーマー・ファイルなどを用いた機械的拡大には限界があり、器具が接触しない領域の存在が指摘されている。さらに、根尖近くには分岐・吻合・イスマス・フィンなど複雑な解剖学的構造が存在する可能性が高く、根管壁に形成されたスミヤ層を除去することに加えて、これらの領域に残存する細菌を含む感染物質を可及的に取り除くことは根管治療の成功率を高める上で重要な課題である。今回の模擬根管モデルで観察された高速の攪拌作用は、Er:YAG レーザーが



根管内の洗浄に有効な手段である可能性を示唆していると考えられる。今後さらに、NaClO 溶液や EDTA 溶液などの化学的根管清掃剤の洗浄作用を増強する効果に対して、チップのサイズや照射条件がどのように影響するかを検討する必要があると思われる。

#### 【結 論】

Er:YAG レーザーによる洗浄作用に関して、高速度カメラを用いたレーザー誘発気泡とトレーサーの動きの観察と圧力波を測定した結果、次のような結論を得た。

- ①チップの形状によって気泡パターンは異なり、根管内の洗浄には円錐形チップが適していると考えられた。
- ②照射エネルギーが高い程、根管内での攪拌作用が到達する領域が広がる傾向を示した。
- ③パルス波レーザー照射は根管洗浄に有用である可能性が示唆された。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計3件）

- ①吉嶺嘉人, 松本妃可 他3名, Er:YAGレーザーを用いた根管洗浄効果に関する研究第1報 高速度カメラによるレーザー誘発気泡の観察, 日本レーザー歯学会誌, 査読有, 21巻2号78-82. 2010.
- ②Matsumoto H, Yoshimine Y, Akamine A, Visualization of Irrigant Flow and Cavitation Induced by Er:YAG Laser within a Root Canal Model, J Endod, 査読有, 37(6): 839-843, 2011.
- ③坂田篤信, 吉嶺嘉人, 松本妃可 他3名, Er:YAGレーザーを用いた根管洗浄時の圧力波に関する研究, 日本歯内療法学会雑誌, 査読有, 32巻3号101~105. 2011.

〔学会発表〕（計3件）

- ①坂田篤信, 松本妃可 他3名, 根管洗浄における Er:YAG レーザーの応用と作用機序, 日本歯内療法学会西日本支部会第10回記念研修会 2010.7.4 プリーゼプラザ
- ②坂田篤信, 松本妃可 他2名, Er:YAGレーザーを用いた歯髄除去療法の試み, 第22回日本レーザー歯学会総会・学術大会 2010.11.14. ウィンクあいち
- ③Himeka MATSUMOTO, 他3名, Retreatment of Root Canals Using Intracanal Endoscope in Combination with Er:YAG Laser. The 10th JEA-KAE Joint Scientific Meeting, 2012. 3.24-25. SETEC, Seoul, Korea

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

松本 妃可 (MATSUMOTO HIMEKA)

九州大学・大学病院・その他

研究者番号：40467915