

## 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25年 5月17日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22592127

研究課題名（和文） 自由電子レーザーの歯科治療への応用

研究課題名（英文） Application to the dental treatment of free electron laser

研究代表者

池見 宅司（IKEMI TAKUJI）

日本大学・松戸歯学部・教授

研究者番号：80102565

研究成果の概要（和文）：FEL の極短パルスの効果に着目し、Er:YAG レーザーと同じ  $2.94\mu\text{m}$  の波長に調整した FEL を用いて、ウシ象牙質蒸散時の様相を高速カメラにて観察するとともに、蒸散時の削片を走査電子顕微鏡（SEM）にて観察し、蒸散深さを Er:YAG レーザーと比較検討した。さらに、FEL の波長を  $2.50$ 、 $2.94$ 、 $3.50$ 、 $4.00\mu\text{m}$  に変化させてウシ象牙質に照射した際の蒸散深さ、照射部（照射側）および照射部直下の試料背面（歯髄側）の温度上昇を放射温度計にて測定した。その結果、 $2.94\mu\text{m}$  に近似した波長で、パルス幅が熱緩和時間よりも短いレーザーを使用することで、象牙質を効率的に蒸散できることが判明した。

研究成果の概要（英文）：The present study focused on the effect of ultrashort pulses emitted by a FEL, and a high-speed camera was used to observe the aspects of bovine dentin transpiration using the FEL tuned to the same wavelength as Er:YAG laser ( $2.94\mu\text{m}$ ). The ejected transpiration particles were also observed by a scanning electron microscope (SEM) and the depth of transpiration was compared with that obtained by an Er:YAG laser. Additionally, irradiation was performed on bovine dentin with varying FEL irradiation wavelengths of  $2.50$ ,  $2.94$ ,  $3.50$ , and  $4.00\mu\text{m}$ , the depth of transpiration was measured, and increases in temperature at the irradiated site (irradiated side) and the opposite side of the sample directly under the irradiated site (dental pulp side) were also measured by a radiation thermometer. The results showed that dentin could be ablated effectively by using a laser, having a pulse width shorter than the thermal relaxation time and an approximate wavelength of  $2.94\mu\text{m}$ .

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：歯学・保存治療系歯学

キーワード：歯学、高性能レーザー、応用工学・量子光工学

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 今日、歯科医療にレーザーが導入され、

軟組織あるいは硬組織の治療目的に対応した各種レーザーの応用・研究がなされている。

その中で、自由電子レーザー (FEL) は将来に向けた新しいレーザーとして注目されている。米国では既に医療 (バンダービルト大学) に FEL が応用されているが、特に、歯科医療に対する研究はスタートしたばかりで、海外においてもそれらの研究報告はほとんど見当たらない。歯科用レーザーの改良・開発を目的とした研究では、波長可変性を有する FEL が有益な情報をもたらしてくれる。

(2) FEL を現在歯科用に市販されている Er : YAG レーザーと同一波長としても、FEL と Er : YAG レーザーの歯質蒸散様式が異なるものと考えられた。FEL ではパルス幅がフェムト秒レベルの超短時間であるために、被照射体に与えるエネルギーが高いことからプラズマ蒸散が考えられている。一方、Er:YAG レーザーでは、周知のようにハイドロキシアパタイト結晶水が熱エネルギーで膨縮することにより破壊されるとしている。しかし、高速度カメラで被照射体の蒸散様式の違いを確認した報告は見られない。また、FEL の波長の違いによる象牙質蒸散深さや蒸散時の昇温についても調べる必要があるものと考えられる。それらの結果から、FEL や近年開発されたフェムト秒レーザーの歯科診療への応用が期待できる。

## 2. 研究の目的

(1) 日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設所有の FEL を使用し、象牙質蒸散時の昇温と形態変化について調べることを目的として実験を行った。比較対象としては、歯科臨床で使用されている Er:YAG レーザーを使用した。その際の照射条件は、波長ならびに照射エネルギー密度、毎秒の繰り返しパルス数 (pps)、照射時間を同一にして行い、FEL は無注水下、Er:YAG レーザーでは無注水下と注水下にて照射した。被照射体にはウシ象牙質を使用して、それぞれのレーザーを照射した際の照射部 (照射側) および照射部位直下の試料背面 (反対側) の昇温を放射温度計にて測定し、さらに、蒸散部の径と照射部の形態変化について目視ならびに SEM による観察を行った。

(2) FEL の極短パルス幅に着目し、パルス幅の違いが象牙質蒸散に与える影響を検討することを目的として実験を行った。FEL と Er:YAG レーザーをウシ象牙質に照射して蒸

散時の様相の違いを高速度カメラにて観察するとともに象牙質蒸散時に生ずる削片を収集して SEM 観察を行った。そして、FEL と Er:YAG レーザーによる象牙質蒸散深さを比較検討した。さらに、FEL の波長の違いが象牙質蒸散に与える影響を調べるため、波長を変化させた FEL による象牙質蒸散深さとレーザー照射時の温度変化について検討した。

## 3. 研究の方法

(1) 自由電子レーザー照射したウシ象牙質の昇温と形態変化

### ①試料

ウシ前歯の唇側エナメル質を削除して象牙質ブロックを作製し、唇側の照射試料面 (照射側) と歯髓面 (反対側) を耐水研磨紙 #2000 にて最研磨したものを試料とした。

### ②使用レーザーおよび照射条件

日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設所有の FEL を使用した。発振波長は 2.94  $\mu\text{m}$ 、繰り返しパルス数は 3pps と 5pps とし、無注水下で非接触にて試料に照射した。比較対象として Er:YAG レーザー (アーウィンアドベール、モリタ) を使用した。照射条件は FEL と pps および照射エネルギー密度が同一となるように設定し、照射は注水下および無注水下で、先端チップには未使用の C400F チップを用い、加重 50gf で接触照射を行った。

### ③象牙質の昇温測定

試料表面に 5.0 秒間照射し、その後 5.0 秒間放冷して計 10.0 秒間の温度測定を行い、照射側と反対側について 1.0 秒ごとに測定した。測定時の室温は 26°C、Er:YAG レーザー照射時の注水に使用した水の温度は 21°C で、昇温のピーク値から照射前の温度の差を試料の昇温とした。温度の測定は、測定波長 7~15  $\mu\text{m}$ 、測定サイズ  $\phi$ 2.0mm、応答時間 1.0 秒の放射温度計 (TR-0506C、Minolta) を使用した。おのおのの条件で 10 試料に照射を行い、繰り返しパルス数条件と温度測定部位の実験条件別に Tukey-Kramer にて多重比較検定を行った ( $p < 0.01$ )。

### ④照射部の形態変化の観察

照射試料表層の観察では照射痕の着色の有無を目視にて確認し、SEM 像で蒸散部の径と

照射部象牙質の形態を調べた。蒸散部の径に関しては、周囲の正常象牙質とは異なった像を示した蒸散部辺縁の径を測定した。照射部象牙質の形態変化は、レーザー照射後の縦断面試料を作製して SEM 観察を行った。なお、縦断面試料に関しては、ダイヤモンドソウ (Mini Band Saw No. 28170、PROXXON) にて縦断後、10 分間超音波洗浄を行って SEM 試料とし、通法に従って、SEM (T-2150、日本電子) を用いて観察を行った。

## (2) 自由電子レーザーによる象牙質の蒸散

### ①試料

(1) と同様にして試料を作製した。

### ②レーザー照射

FEL の照射条件は、波長 2.94  $\mu\text{m}$ 、照射エネルギーを 4.8 mJ、繰り返しパルス数は 5 pps とし、無注水下にて試料表面から 150.0 mm の距離で、垂直方向から 5.0 秒間照射した。その際の照射エネルギー密度は 239  $\text{mJ}/\text{mm}^2$  であった。Er:YAG レーザーは、先端チップに未使用の C400F チップを用い、FEL と同様に繰り返しパルス数を 5 pps、照射エネルギー密度が FEL と同一となるように照射エネルギーを設定し、試料表面からチップ先端までの距離は 0.5 mm として垂直方向から 5.0 秒間照射した。その際の照射エネルギーは、導光ファイバーによるエネルギーの減衰率を加味して 54 mJ であった。なお、蒸散時の様相観察は無注水下で行い、蒸散深さの実験は注水下で行った。

### ③ウシ象牙質蒸散時の様相

FEL と Er:YAG レーザーによるウシ象牙質蒸散時の様相の違いを、高速度カメラ (動き解析マイクロスコープ VW-6000、KEYENCE) にてレーザー照射開始から 5 秒間撮影した。撮影には、拡大レンズ (VH-Z20R、KEYENCE) および外部光源 (Cold Light HL150、HOYA-SCHOTT) を用い、撮影条件は、フレームレート 8000 fps、シャッタースピード 1/20000 sec、解像度 128  $\times$  60 とし、倍率は Er:YAG レーザーで 20 倍、FEL で 50 倍とした。象牙質蒸散時に生じる削片の収集は、カーボン製両面テープを貼付した電子顕微鏡用試料台を、象牙質試料表面に対して 45° の角度で設置して行った。なお、この際、Er:YAG レーザー照射は無注水で行った。SEM 試料作製後、SEM にて観察した。

④Er:YAG レーザーと FEL の蒸散深さの比較  
レーザー照射した試料は、拡大鏡 (ラボスコープ S 山八歯材工業) を用いて照射痕中央部を確認し、レーザー照射方向と平行にダイヤモンドソウで縦断した。縦断後、2 分間超音波洗浄を行って SEM 試料を作製した。蒸散深さは、SEM 像を基に縦断試料表面から削除された最深部までをコンピュータ (Photoshop CS5 Adobe) にて測定し、深さの平均を求めた。なお、試料は 10 試料とし、得られた蒸散深さは、Student の t 検定 ( $p < 0.05$ ) にて有意差検定を行った。

### ⑤波長の異なる FEL 照射における象牙質の蒸散深さおよび温度上昇

FEL の照射条件は、波長を 2.50、2.94、3.50、4.00  $\mu\text{m}$  に調整し、それぞれの波長の繰り返しパルス数ならびに照射エネルギー密度は ②と同様にして無注水下で 5.0 秒間象牙質試料表面に照射した。それぞれの波長で照射した試料を ④と同様に縦断試料を作製して蒸散深さを測定し、Tukey-Kramer ( $p < 0.05$ ) にて多重比較検定を行った。

### ⑥波長の異なる FEL 照射における象牙質の温度上昇

ウシ象牙質に FEL を 5.0 秒照射して照射終了後 5.0 秒までの 10 秒間温度測定を行い、象牙質試料の照射側と歯髄側について 1.0 秒毎に測定した。それぞれの波長でレーザー照射を行い、照射前の象牙質表面温度とレーザー照射から照射終了後にかけて測定した象牙質表面温度の最大値との差を温度上昇値とした。試料数は 10 試料とし、その平均を求めた。温度の測定は、測定波長 7~15  $\mu\text{m}$ 、測定サイズ  $\phi$  2.0 mm、応答時間 1.0 秒の放射温度計 (TR-0506C、MINOLTA) を使用した。なお、実験時の室温は 24.0  $^{\circ}\text{C}$  であった。

## 4. 研究成果

### (1) 自由電子レーザー照射したウシ象牙質の昇温と形態変化

①3pps と 5pps の両条件において、照射側と反対側ともに FEL が最も低い昇温で、注水下 Er:YAG レーザー、無注水下 Er:YAG レーザーの順に高い昇温を示した。各々のレーザー条件について 3pps と 5pps を比較すると、5pps の方が照射側と反対側のいずれにおいても高い昇温を示した (図 1)。

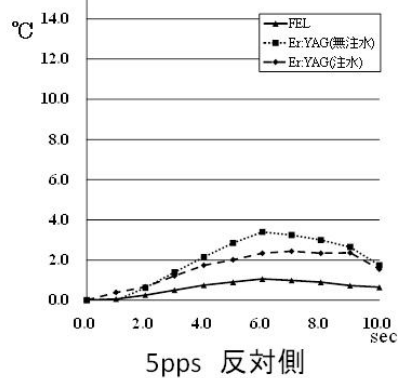
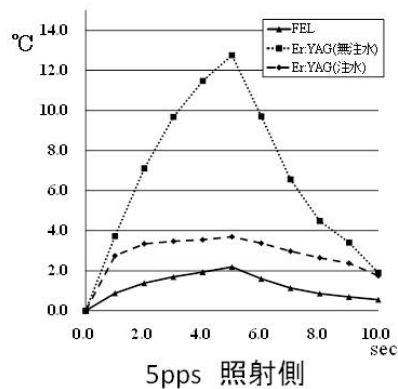
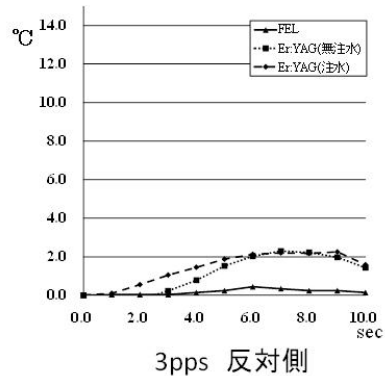
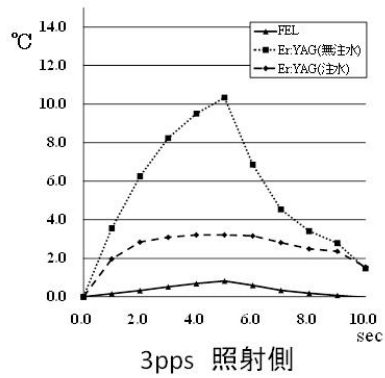


図 1

②照射試料表層の SEM 観察では、FEL において蒸散部の径は約 200 μm で、Er:YAG レーザーの C400F チップでは約 500 μm の径となることが示された (図 2)。

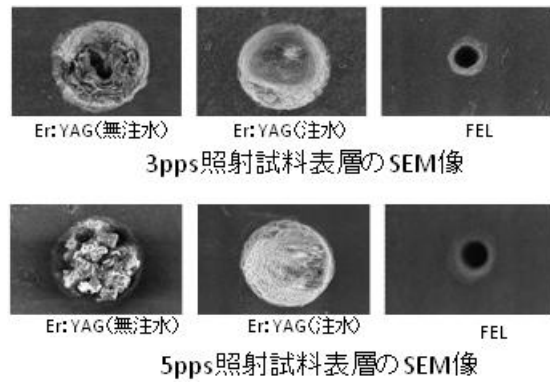


図 2

③照射試料縦断面の SEM 観察では、3pps と 5pps の各試料において同様な象牙質面の形態が観察され、FEL では全ての試料において象牙細管が明瞭に観察された。注水下 Er:YAG レーザーでは、溶岩状に変成した組織と象牙細管の認められる部分の混在している像が観察された。無注水下 Er:YAG レーザーでは、溶岩状に変成した組織で全面が覆われている形態が観察され、一部に象牙細管が認められた。照射試料表層ならびに縦断面の SEM 写真を示す (図 3)。

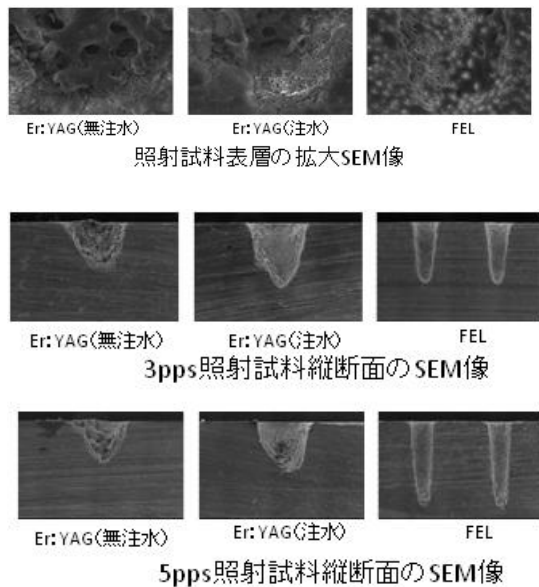


図 3

以上のことから、FEL のような極短パルスレーザーを歯質削除に利用することができれば、無注水下で歯髄や象牙質表層に熱の傷害を与えることなく、また熱変成物やスミヤ層を生じることなく罹患歯質の削除が可能となり、将来に向けた歯科用レーザー開発の端緒となるものと考えられた。

(2) 自由電子レーザーによる象牙質の蒸散

①高速度カメラで得られたウシ象牙質蒸散時の 1/8000 秒の画像 (図 4) から、Er:YAG 照射では象牙質削除片の飛散が観察でき、削除片の SEM 像から、 $100\mu\text{m}$ ~ $10\mu\text{m}$  の大きささまざまな削除片が観察できた。

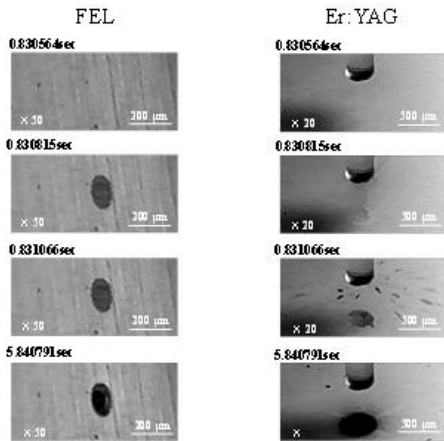
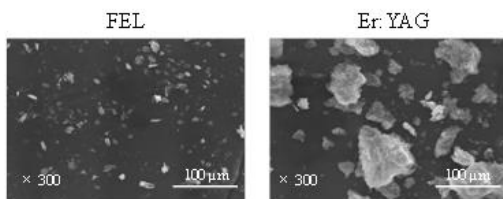


図 4

②FEL では削除片の飛散を観察できなかったが、収集した削除片の SEM 像から、 $20\mu\text{m}$  程度の微細な削除片が多く認められた (図 5)。



象牙質削片のSEM像

図 5

③Er:YAG と FEL の蒸散深さは、各々 208、670  $\mu\text{m}$  で、FEL では Er:YAG の 3 倍以上の蒸散深さであった (図 6)。

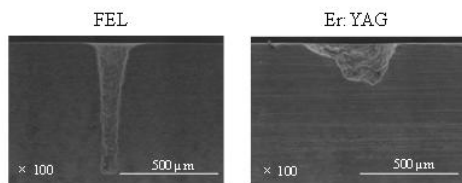


図 6

④FEL の波長を 2.50、2.94、3.50、4.00  $\mu\text{m}$  に変化させた際の蒸散深さは、各々 35、671、414、220  $\mu\text{m}$  で (図 7)、波長 2.94  $\mu\text{m}$  において有意に蒸散深さが大きくなり、昇温ピークは、照射側で各々 2.4、2.2、2.0、2.2  $^{\circ}\text{C}$  であり、歯髄側では 1.1、1.1、1.3、1.3  $^{\circ}\text{C}$  であった (図 8)。

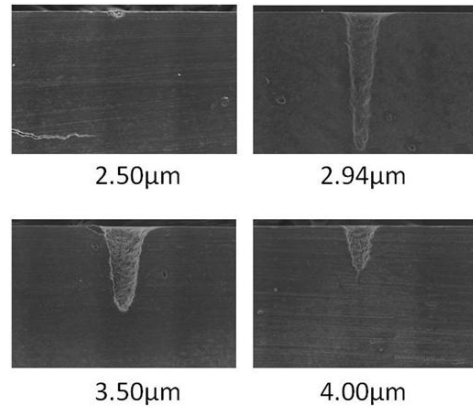


図 7

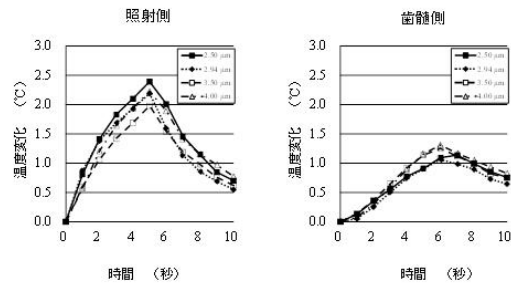


図 8

以上のことから、2.94  $\mu\text{m}$  に近似した波長で、パルス幅が熱緩和時間よりも短いレーザーを使用することによって、象牙質を効率的且つ熱を発生することなく蒸散できることが示唆された。今後、一般的臨床で極短パルスレーザーを歯質削除に利用することができれば、無注水で歯髄や象牙質表層に熱の傷害を与えることなく削除が可能となり、将来に向けた歯科用レーザー開発の一助となるものと考えられた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

(1) 根本章吾、岩井仁寿、鈴木英明、神谷直孝、岩井啓寿、壹岐宏二、池見宅司、自由電子レーザー照射したウシ象牙質の昇温と形態変化、日本歯科保存学雑誌、査読有、54 巻、2010、419-427

(2) 根本章吾、自由電子レーザーによる象牙質の蒸散、日本歯科保存学雑誌、査読有、55 巻、2012、185-194

〔学会発表〕(計 2 件)

(1) 根本章吾、神谷直孝、鈴木英明、岩井啓寿、壹岐宏二、岩井仁寿、池見宅司、象牙質への自由電子レーザー照射による波長と昇温との関連、第 132 回日本歯科保存学会春季大会、2010 年 6 月 4 日、崇城大学市民ホール、熊本

(2) 根本章吾、岩井啓寿、池見宅司、自由電子レーザーと Er:YAG レーザーによる歯質の蒸散深さ、第 22 回日本レーザー歯学会学術大会、2010 年 11 月 14 日、愛知県産業労働センター、愛知

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

池見 宅司 (IKEMI TAKUJI)  
日本大学・松戸歯学部・教授  
研究者番号：80102565

### 研究協力者

根本 章吾 (NEMOTO SHOGO)  
日本大学・大学院松戸歯学研究科保存修復学専攻・大学院生