原 著

レーザー歯科治療における加工音測定による除去量モニタリング

上 田 隆 司 山 田 啓 司 篠 崎 道*
堀 居 直 幸 細 川 晃 田 中 隆 太 郎

金沢大学工学部機能機械工学科

(主任：上田隆司教授)

* GE 横河メディカル株式会社

(受理：平成 16 年 6 月 21 日)

Monitoring of Dental Treatment with Laser by Measurement of Sound

Takashi UEDA, Keiji YAMADA, Toru SHINOZAKI*,
Naoyuki HORII, Akira HOSOKAWA and Ryutaro TANAKA

Faculty of Engineering, Kanazawa University

(Chief: Prof. Takashi UEDA)

*GE YOKOKAWA medical CO. LTD

(Accepted for Publication : June 21, 2004)

Abstract : In this paper, the removal-monitoring method is introduced and its feasibility for cavity formation is investigated with two kinds of pulsed YAG laser beam. The audible sound generated is measured under several process conditions, and the relation between the measured sound pressure level and the achieved removal rate of dental tissue is examined. The sound pressure level agrees well with the amount of removal by the laser irradiation. The sound pressure level increases as the laser power becomes large, and hence the depth of cavity formed increases. A high sound pressure is measured when an absorbent is evaporated, and the pressure becomes small with the increase in the depth of cavity, because the distance between a processing point and focal point increases.

(J. Jpn. Soc. Laser Dent. 15 : 61~66, 2004 Reprint requests to Dr. UEDA)

Key words=Cavity Formation, Sound Pressure Level, Removal Monitoring

キーワード=窩洞形成, 音圧, 加工量モニタリング

緒 言

レーザーを用いた歯科治療法の利点の一つとして、患部との接触による感染症媒介の危険がないことが挙げられる。しかしながら、物理的接触を伴わずに歯質を加工して窩洞を形成するために、加工状況を把握することが困難である。一般に、レーザー照射エネルギーからおよその除去量を推定はできるが、治療中に除去量を計測あるいは正確に予測する手法は未だ確立されていない。

一方、レーザーを用いた材料除去加工の分野において、レーザー照射時に発生する熱ひずみ波による音¹⁾やプルーム噴出に伴う音²⁾が加工現象と深い関連があることが既に指摘されている。金属材料に穴あけ加工した研究²⁾では、音圧にレーザー出力や焦点はずし量などの照射条件が反映されるばかりか除去質量とも相関があるとしている。ところが、セラミックスに溝加工を行った研究³⁾では、材質によっては加工量と音圧との相関が得られない場合もある。

そこで本論文では、レーザー治療の利点を失うことなく、

除去量を非接触に監視することを目的として窩洞形成加工時に発生する音に注目し、歯質除去量との関係について検討している。

実験方法

実験装置概略を図1に示す。表1に示す条件下で、発振波長 $\lambda = 1064\text{nm}$ の Nd:YAG レーザーおよび $\lambda = 2940\text{nm}$ の Er:YAG レーザーをヒトの抜去歯試料にパルス照射して窩洞形成加工を行う。集光レンズによりレーザー光を集束して焦点が試料表面に位置するように設置した。焦点距離は、Nd:YAG レーザー、Er:YAG レーザーともに 50mm である。また、加工点から水平に 100mm の距離に設置した精密騒音計（電子測器(株), TYPE1030）によって加工音音圧を測定した。なお、本報においては、非注水条件下で実験を行った。

実験には、抜去後ただちに生理食塩水中に保存したヒトの歯を試料として用いた。定量的な加工除去量評価のため、

Figure 1 Schematic illustration of experimental set-up

Table 1 Experimental conditions

Laser		Nd:YAG	Er:YAG
Wave length λ		1064nm	2940nm
Peak power P		70~1320W	44~523W
Pulse width τ		0.3~2.3ms	0.11~0.26ms
Frequency f		10Hz	10Hz
Number of pulses n		10, 70	10
Specimen (dentin of human tooth)			
Thickness h		2 mm	
Sound level meter			
Frequency range		20~13kHz	
SPL range		55~130dB	
Acoustic calibration circuit		A	

#400のダイヤモンド砥石によって図1に示す方向に削り出して厚さ 2mm の試料を作製した。窩洞形成は、歯冠部象牙質を対象とした。

Nd:YAG レーザーを用いた実験では、レーザー光吸収率を高めるために、レーザー照射面に歯科用吸収剤（エスエルティジャパン、レーザー試験マーカーD、主成分：アルコール、カーボン）を滴下・塗布した。ただし、連続パルスによる窩洞形成加工では、吸収剤は1パルス目の照射によって蒸散するため、後続のパルスレーザー光は象牙質組織に直接吸収され加工が進行する。

Er:YAG レーザー光の波長 2940nm は生体組織への吸収が非常に高い⁴⁾ ために吸収剤を使用する必要はなく、今回の実験では吸収剤を塗布していない。

Nd:YAG レーザーはコア径 $300\mu\text{m}$ の石英光ファイバで伝送後にレンズで集光しており、Er:YAG レーザーはドライエアでパージされた伝送路を反射鏡で伝送した後にレンズにより集光している。レーザースポットのエネルギー分布を測定した結果は、図2に示すように、ガウス分布を有しており、試料の表面上でのスポット直径はNd:YAG レーザーで $2a=1.26\text{mm}$ 、Er:YAG レーザーで $2a=0.22\text{mm}$ である。

図3に、形成された窩洞の断面写真の一例を示す。Nd:YAG レーザー光は組織への吸収性が低いため、照射パルス数が $n=70$ と多くても、窩洞深さは $d=400\mu\text{m}$ 程度である。一方、吸収性の高いEr:YAG レーザーの場合、 $n=10$ とパルス数は少ないが $d \approx 1\text{mm}$ と深い窩洞が形成されている。そこで、レーザーによる加工除去量は、同図のように窩洞断面から窩洞口径 D と窩洞深さ d を測定して評価する。

実験結果

1. 加工音の音圧と周波数成分

図4に騒音計による加工音の測定波形例を示す。同図

(a) Nd:YAG laser (b) Er:YAG laser

Figure 2 Energy distribution of laser beam (defocus=11.3mm)

(a) Nd : YAG laser ($P=350\text{W}$, $n=70$, $f=10\text{Hz}$, $\tau=0.3\text{ms}$) (b) Er : YAG laser ($P=137\text{W}$, $n=10$, $f=10\text{Hz}$, $\tau=0.15\text{ms}$)

Figure 3 Perforated cavity with Nd : YAG laser and Er : YAG laser

(a) Nd : YAG laser ($P=1320\text{W}$, 1st. pulse) (b) Er : YAG laser ($P=236\text{W}$, 3rd. pulse)

Figure 4 Output of sound level meter

(a) (b) から、いずれのレーザー光を照射した場合においても、加工音は照射開始とほぼ同時に発生していることがわかる。

図5には、連続して10パルス照射した際の加工音音圧 (SPL: Sound Pressure Level) の変化を示す。同図 (a)

(a) Nd : YAG laser ($\tau=0.3\text{ms}$)

(b) Er : YAG laser

Figure 5 Temporal change of SPL in perforating

において、Nd : YAG レーザーの1パルス目照射時には非常に大きな加工音が発生し、後続パルスでは音圧は低く安定している。これは、1パルス目の照射においては吸収剤の除去が伴うためである。

一方、図 (b) に示す Er : YAG レーザーでは、吸収剤を用いていないことから第一パルスの音圧は突出していない。また、Nd : YAG レーザーとは異なり5パルスを過ぎると音圧は徐々に低下している。

そこで照射条件の影響を検討する際には、安定した音圧が発生している5パルス目の加工音音圧を取り上げ評価することとする。

また、いずれのレーザーを用いた場合においても、レーザー出力 P が高いほど、発生音圧は大きくなっている。

測定された加工音の周波数スペクトルを図6に示す。いずれのレーザーにおいても、スペクトルのピークが 2kHz 付近にあり、加工音が甲高い音であることがわかる。パルスによる変化を見ると、図 (a) に示した Nd : YAG レーザーの場合、1パルス目では 5kHz 付近の成分が小さく、 8.5kHz 付近の成分は大きい。2パルス目以降には明確な差異は見られない。図 (b) に示した Er : YAG レーザーの場合、 2kHz 付近のピーク値は照射パルス数が増えて窩洞が深くなるにつれて低下傾向にあるが、 5kHz 付近および 8.5kHz 付近の成分はパルスごとに変動している。

2. 音圧レベルと窩洞深さに及ぼすレーザー出力の影響

Nd : YAG レーザーによる窩洞形成において、レーザー出力 P を変化した場合の音圧 SPL と窩洞深さ d の測定結果を図7に示す。パルス幅 τ は $0.3\sim 2.3\text{ms}$ の間で変化

Figure 6 Frequency spectrums of sound in perforating

させている。歯の組織は生体であるため、形成される窩洞深さに若干のばらつきがあるものの、発生する加工音圧と窩洞深さの増減はよく一致していることがわかる。またパルス幅 τ を変化させた図(a)~(d)の結果を比較すると、 τ が大きくなるほど窩洞深さ d は増大する傾向にある。

図8には、横軸に加工音圧 SPL をとり、(a) 窩洞深さ d および (b) 窩洞直径 D との関係を表している。窩洞深さ、窩洞直径のいずれも音圧と直線関係にあり、パルス幅 τ が一定の場合、加工音圧の監視により加工量を把握することができる。

図9は、Er:YAG レーザーを用いた窩洞形成におけるレーザー出力に対する窩洞深さ d 、および音圧 SPL の関係を示す。図から、エネルギーが高くなるにつれて窩洞深さは大きくなり、音圧も同様に増大していることがわかる。

図10は、音圧を横軸とし、窩洞深さ d 、窩洞口径 D との関係を示している。Nd:YAG レーザーの場合と同様に、Er:YAG レーザーの場合も音圧が高くなるにつれて窩洞深さおよび窩洞直径が線形的に増大していることがわかる。

考 察

硬組織のレーザー切除においては、発生する音量が除去率を反映していることが経験的に知られている。この音は、低く見積もっても 150℃ 以上には達している加工部温度⁵⁾における衝撃的な熱ひずみ波が主たる原因と考えられる。

Figure 7 Relation between sound pressure level, depth of cavity and peak power (Nd:YAG laser, $n=10$)

また、レーザー出力が大きい場合には、前報⁶⁾において筆者らが指摘したようにブルーム光が観察されることから、ブルーム噴出反力も関与していると推測される。したがって、加工部がより高温になるほど、多くの蒸散物質が噴出されるほど大きな加工音が発生する。

図4に示したように、レーザー照射時の発生音は非常に高音圧で、また図6に示した周波数スペクトルのように可

Figure 8 Relation between sound pressure level and removal (Nd:YAG laser, $n=10$) Figure 9 Relation between sound pressure level, depth of cavity and laser energy (Er:YAG laser, $n=10$) Figure 10 Relation between sound pressure level and removal (Er:YAG laser, $n=10$)

聴域に分布している。これらの特徴は二種類のレーザーに共通しており、周囲雑音に妨げられることなく明確に聞き取ることが可能であり、プロセスの監視信号として極めて有効であるといえる。

図5に示した結果では、吸収剤のように高い吸収率を有し、大きな蒸散現象を伴う場合には、音圧が非常に高くなっていた。このことから、Nd:YAGレーザーを用いた治療における吸収剤の有効性を確認する手段としても適用が期待でき、今後の調査・検討課題のひとつである。

さらに、図5(b)に示したEr:YAGレーザー照射時の加工音音圧の推移では、興味深いことに、照射窩洞深さが増大するにつれて音圧の低下を示した。この原因としては、加工音発生源である加工点が深くなって発生音が観測されにくくなる影響と、加工点が焦点位置からはずれてエネルギー密度が低減した影響が考えられる。

照射レーザー出力が高くなると形成される窩洞深さは増大するが、このとき発生する音圧は高くなる。セラミックス材料にレーザー溝加工を行なった実験においても、除去加工量と発生音圧との相関性は指摘されており⁷⁾、象牙質を対象とした本研究でも音圧は蒸散除去される組織体積を反映していると考えられる。実際に、図7, 9に示したよ

うに、加工部位によって被加工性にはばらつきが生じている場合にも、加工音圧は窩洞深さとよく一致していた。

パルス幅によって形成される窩洞の深さおよび直径は影響を受けるが、図8, 10に示したように、加工音圧が深さや直径の変動をよく反映していた。

以上のことから、Nd:YAGレーザー、Er:YAGレーザーのいずれを用いた窩洞形成においても加工音圧の測定は除去量の監視方法として有効である。

結 論

本論文では、Nd:YAGレーザー及びEr:YAGレーザーを用いた窩洞形成時の除去量監視を目的として、レーザー照射に伴い発生する加工音測定を行った。本論文で得られた結果を以下に要約する。

- (1) 窩洞形成に吸収剤蒸散を伴う際にはレーザー照射時の発生音圧は高くなり、加工点がレーザー光焦点から離れるにつれて低音圧となる。
- (2) レーザー出力が高くなるほど、パルス幅が大きくなるほど形成される窩洞深さは大きくなり、観測される音圧は高くなる。
- (3) 発生する加工音音圧と窩洞直径、窩洞深さは線形関

係にあり，加工音観測から除去量を監視できる。

謝 辞

本研究で行った実験に試料を提供していただいた歯科医小竹英夫氏，中山春比古氏，杉原成良氏に深く感謝致します。

文 献

- 1) 宮崎俊行，吉岡俊朗，白井靖幸，金釜憲夫，佐田登志夫：パルスレーザー加工の音響法による観察.精密機械，**51**: 596-601, 1985.
- 2) 韓 希壮，二俣正美：Nd: YAG レーザ穴あけ加工に伴うブルーム噴出音の特性.溶接学会論文集，**18**: 667-673, 2000.
- 3) 栗田恒雄，大野幸彦，仲井 強：加工音を用いた YAG レー

ザ加工溝深さ変化のモニタリング. レーザー研究，**27**: 777-781, 1999.

- 4) 上田隆司，山田啓司，篠崎 道，細川 晃：YAG レーザによる歯科治療に関する研究（第2報）—Nd: YAG レーザと Nd: YAG レーザの比較—. 精密工学会誌，**68**: 1580-1584, 2002.
- 5) 上田隆司，山田啓司，古本達明：YAG レーザによる歯科治療に関する研究（第1報）—レーザー照射部の温度—. 精密工学会誌，**66**: 1388-1393, 2000.
- 6) 山田啓司，近川真一，細川 晃，上田隆司：レーザー歯科治療における分光分析による熱損傷モニタリング，日レ歯誌，**15**: 1-5, 2004.
- 7) 栗田恒雄：レーザー溝加工時の除去断面積と加工音圧の相関性，機械設計，**46**: 132-135, 2002.