

Nd:YAG レーザによる先進歯科治療に関する研究 —酸化チタン粉末処理したファイバ先端の温度計測—

Studies on advancement of the dental treatment with YAG laser beam
-Measurement of the temperature at the processed fiber tip with TiO₂ powder-

○ 学 嵐 友哉(金沢大院), 正 古本 達明(金沢大院), 正 上田 隆司(金沢大院),
正 細川 晃(金沢大院), 正 田中 隆太郎(金沢大院)

Tomoya Arashi, Tatsuaki Furumoto, Takashi Ueda, Akira Hosokawa, Ryutaro Tanaka
Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

Key Words : Two colors pyrometer, Titanium Processed Fiber, Temperature on Processed fiber tip

1. 緒論

レーザによる歯科治療は、硬組織へのう蝕治療や予防、軟組織への歯肉切除やメラニン色素除去手術など臨床応用例は多岐に渡る。我々はこれまで、Nd:YAG レーザ光を伝送する石英ファイバについて、ファイバ先端を酸化チタン粉末で処理する方法(Titanium Processed Fiber, 以下、TP ファイバと呼称する)を提案し、先端処理条件とファイバ先端における直進及び側面レーザエネルギー、熱変換エネルギーとの分布について調べた¹⁾。

本報では、レーザ照射時のチタン処理ファイバ先端において生じる熱エネルギーが口腔組織に与える影響を調べるため、レーザ照射時のファイバ先端の温度測定を行い、温度計を用いてレーザ照射条件とファイバ先端の温度変化との関係について調べたので報告する。

2. 実験方法

2-1. レーザ仕様

本実験に用いたレーザ(株式会社アルテック製: STREAK-I)は、波長が 1064nm のパルス型 Nd:YAG レーザである。Table1 に示すように、パルス幅が 50 μ s から 400 μ s まで可変で、各パルス幅に応じた照射エネルギーおよびピーク出力を設定することができる。

2-2. セル積層型 2 色温度計

本実験で利用したセル積層型 2 色温度計の概要を Fig. 1 に示す。赤外線導光ファイバ、赤外線検出素子、増幅回路およびオシロスコープから構成されている。試料表面から輻射された赤外線は、コア径 $\phi=750\mu$ m のカルコゲナイド光ファイバで受光し、赤外線検出素子へ伝送する。

赤外線検出素子は、InSb 素子に InAs 素子を積層した 2 色素子を用いる。前面の InAs 素子によって 3 μ m 以下の赤外線を受光し、3 μ m 以上の長波長の赤外線を InSb 素子で受光する。

Table1 Condition of laser irradiation

Nd:YAG laser		
Wave length	λ	1064nm
Laser energy	E	1-4kW
Pulse duration	τ	100-800mJ/pulse
Laser frequency	f	50-400 μ s
Fiber		
Material		SiO ₂
Core diameter	ϕ	400 μ m
Numerical aperture		0.37

2-3. 温度測定方法

まず、TP ファイバの先端から照射されるレーザ光によって生じた熱が、ファイバ先端の温度に与える影響を調べるため、レーザ光を単発照射した際の温度変化を測定した。ファイバ先端の処理条件を Table2 に示す。次に、TP ファイバ先端における、レーザ照射条件とファイバ先端の温度変化との関係を調べるため、Table1 に示す種々の照射条件にて温度計測を行った。また、TP ファイバを単パルスで断続的に繰り返し照射し、ファイバ先端の変質について調査した。

3. 実験結果

3-1. 測定波形例

Fig. 3 に、 $\tau=400\mu$ s のパルスレーザを照射した際の各素子からの出力波形を示す。両素子ともにレーザ光の照射開始時間が $\tau=100\mu$ s となっている。各素子からの出力はレーザ光が照射されてから 50 μ s 経過後であり、これは温度計が約 300 $^{\circ}$ C 以上の温度に対して感度を有しているためである。その後レーザ照射終了と同時に減少している。また、レーザ照射終了時に最も高い出力を得ており、本実験では最大値での温度を測定している。

Table2 Condition of laser processing

Peak power	P	1.5kW
Laser energy	E	600mJ/pulse
Pulse duration	τ	400 μ s
Laser frequency	f	10Hz
Irradiation time	t_i	1sec

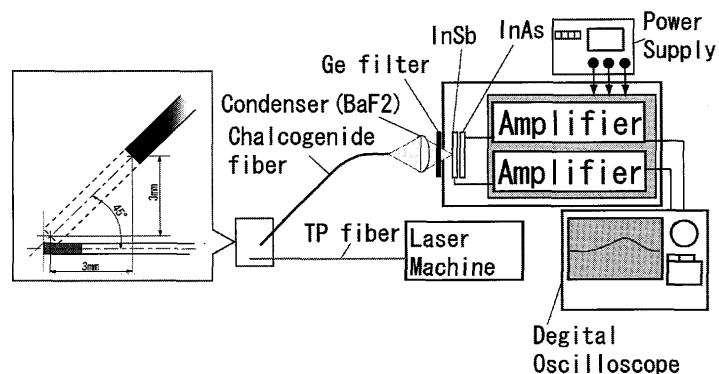


Fig.1 Schematic illustration of two-color pyrometer

3-2. 繰り返し照射による TP ファイバ先端の温度変化

Fig. 4 は Nd:YAG レーザを単パルスで繰り返し照射した際の照射回数 n とファイバ先端の温度 T との関係を示した結果である。Fig. 4(a) はパルス幅 $\tau=100\mu\text{s}$ 、Fig. 4(b) はパルス幅 $\tau=400\mu\text{s}$ におけるレーザエネルギー E をパラメータとした温度測定結果である。TP ファイバ先端が持つ熱エネルギーの割合は Table2 における処理条件で 7% である。グラフより、単パルスレーザを繰り返し照射することによりファイバ先端部の温度は次第に低下している。Fig. 4(a) において、レーザエネルギー $E=100\text{mJ/pulse}$ の条件では照射回数 $n=1$ では 2250°C であったファイバ先端の温度は、 $n=100$ では 1750°C まで低下している。また、照射エネルギー E の増加に伴い、TP ファイバ先端で発生する熱は増加している。これは、Fig. 4(b) でも同様の傾向を示している。

次に、Fig. 5 は減衰率 (Attenuation Ratio) AR をパラメータとして照射回数 n とファイバ先端の温度 T との関係を示した結果である。パルス幅 $\tau=100\mu\text{s}$ 、レーザエネルギー $E=400\text{mJ}$ で固定している。減衰率 $AR=21\%$ における TP ファイバ先端で熱に変換されたエネルギーの割合は 7%、同様に $AR=12\%$ では 5% となっている。

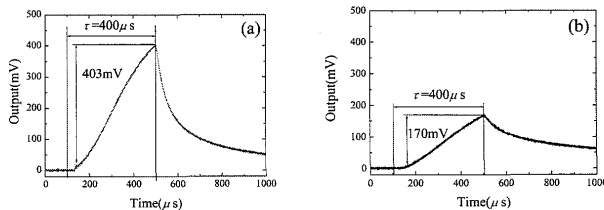
グラフから、 $n=1$ における $AR=21\%$ での $T=2905^\circ\text{C}$ に対して、 $AR=12\%$ での $T=2635^\circ\text{C}$ となっている。また、 $n=100$ でのファイバ先端温度は、 $AR=21\%$ では $T=2475^\circ\text{C}$ 、 $AR=12\%$ では $T=2020^\circ\text{C}$ まで低下している。したがって、減衰率の増加に伴いファイバ先端の加工が進展するため、ファイバ先端で発生する熱量は大きくなる。

Fig. 6, 7 はレーザ照射回数の違いによるファイバ先端部の SEM 観察結果である。 $n=1$ の時、Fig. 6 に示すようにファイバ先端部は元の円柱形状を保ったまま、表面に凹凸が発生しているが、 $n=100$ では Fig. 7 に示すようにファイバ先端の形状は円錐状になり、ファイバコア方向への劣化が著しい。

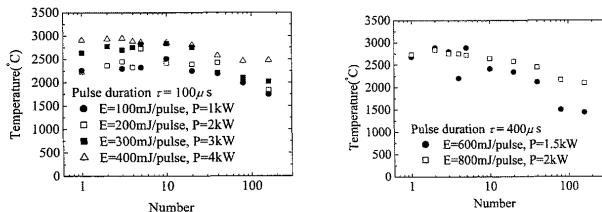
4. 考察

4-1. ファイバ先端の温度変化

TP ファイバ先端の温度は、各条件において 1500°C 以上と非常に高温となった。本研究で用いる石英ファイバの融点は 1900°C ²⁾、沸点は 2940°C ³⁾ である。チタン処理後のファイバ先端は Fig. 6, 7 に示すように表面が溶融及び再凝固しているため、温度計測結果は妥当と考えた。



(a) Output voltage of pyrometer by InSb,
(b) Output voltage of pyrometer by InAs
Fig. 3 Trace of single pulse laser



(a) $\tau=100\mu\text{s}$, (b) $\tau=400\mu\text{s}$

Fig. 4 Alteration of temperature (Stable pulse duration)

4-2. Nd:YAG レーザ光の照射回数と最高温度との関係

Fig. 3, 4, 5 に TP ファイバ先端から照射される Nd:YAG レーザ光の照射回数 n とレーザ照射時の TP ファイバ先端の温度変化 T との関係を示す。いずれの照射条件においても、照射回数の増加に伴いファイバ先端の温度は低下した。これは、Fig. 6, 7 に示すように、 TiO_2 粉末がレーザ光を吸収して熱に変換され、ファイバ先端を溶融、再凝固させていると考えられる。また、照射回数の増加とともに TP ファイバ先端に付着した TiO_2 粉末が蒸散して消失するため、温度は次第に低下する。

5. 結論

Nd:YAG レーザ照射時における TP ファイバ先端の温度変化について、以下の結果を得た。

- (1) TP ファイバ先端から Nd:YAG レーザ光を照射すると、レーザ光の照射と同時にファイバ先端において熱が発生する。その温度は照射終了時に最高温度となっている。
- (2) TP ファイバ先端から Nd:YAG レーザ光を繰り返し照射すると、ファイバ先端の温度は徐々に低下する。また、ファイバ先端温度が上昇するために寄与するパラメータはレーザエネルギー、減衰率だと考えられる。

参考文献

- 1) 古本達明, 上田隆司ら: Nd:YAG レーザ用光ファイバの TiO_2 による先端加工 (第 2 報) —TP ファイバによるエナメル質除去特性, 日レ歯誌, 16, 2, 86-92, 2005
- 2) 末松安晴, 伊賀健一: 光ファイバ通信入門, 改訂 3 版, 東京, 1989, オーム社, 199
- 3) 中原勝儼: 無機化合物・錯体辞典, 東京, 1997, 講談社, 665-666.

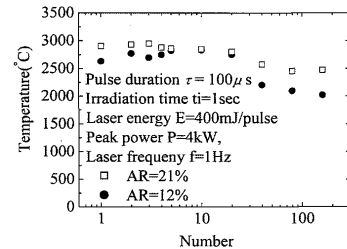
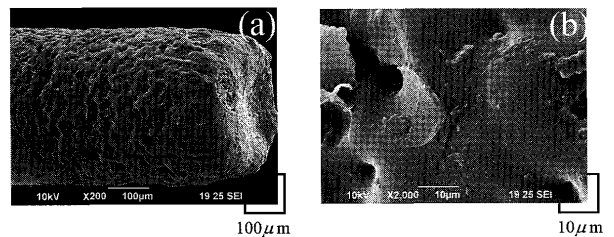
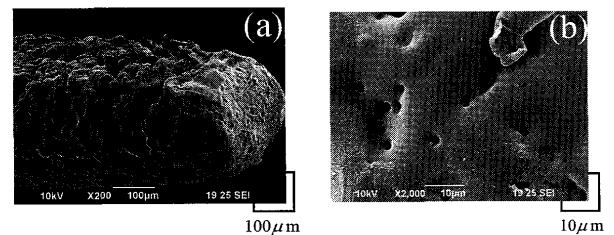


Fig. 5 Alteration of temperature
(Two types of attenuation ratio)



(a) overall view, (b) enlarged view

Fig. 6 SEM photograph on SiO_2 fiber tip, ($n=1$),



(a) overall view, (b) enlarged view

Fig. 7 SEM photograph on SiO_2 fiber tip, ($n=100$),