

## Nd:YAG レーザによる高度歯科治療に関する研究

金沢大学 青木慎太郎, 葛西惇士, 上田隆司, 細川晃, 古本達明, 田中隆太郎

## Study on advanced progressive dental treatment with Nd:YAG laser

Kanazawa university S. Aoki, A. Kasai, T. Ueda, A. Hosokawa, T. Furumoto, and R. Tanaka

Using the Nd:YAG laser for the clinical ablation of teeth can generate thermal elevation and shock waves. The purpose of this study is to investigate the relationship between the irradiation condition and the shock wave. In this paper, we measured deformation by strain gage, and commute compressive stress. As a result, there is a trend that the shock wave pressure is influenced by the laser energy, not peak power and pulse duration. We also have observed a behavior of propagation, and it indicate that the shock waves transmit by intricately reflecting.

## 1. 緒言

現在、歯科治療におけるレーザの臨床応用例は多岐に渡り、様々な研究報告がなされている。歯質表面にレーザ照射した時、レーザ光は表面で吸収され歯質が加熱、溶融される。溶融した歯質の一部は蒸散するが、蒸散しきれなかった歯質は表面に残存して再凝固層を形成する。この時、歯質表面に細菌が存在すると、レーザ照射に起因して細菌数が減少することが知られている<sup>1)</sup>。その殺菌メカニズムとしては、レーザ照射によって生じた熱エネルギーによるもの、レーザ照射によって歯質が加熱、蒸散するときに生じる衝撃波によるものなど、諸説考察されている。しかしながら、殺菌に至るメカニズムやレーザ照射時に歯質表面で生じる物理現象などを詳細に検討した報告はなされていない。そこで本研究では、レーザ照射によって生じる物理現象が、歯科治療における殺菌効果に与える影響やそのメカニズムを解明することを目的として、棒材にひずみゲージを貼付した衝撃試験装置を用いて衝撃力を測定し、レーザ照射条件と発生する衝撃力の関係を調べた。

## 2. 一次元波動理論

細い棒中では応力は形を変えずに一定速度で伝ばする性質がある<sup>2)</sup>。これを利用して1点もしくは2点のひずみを測定すれば、棒中の測定点のみならず任意位置や試験片に接する境界端面での応力や変位速度を知ることができ、様々な衝撃試験法に用いられている。

棒とひずみゲージを用いた衝撃試験装置の例を図1に示す。この装置において、棒の端面に取り付けた試料に荷重を加えると、衝撃力は試料を通して棒に伝播していく。この時、時間 $t$ における棒端面Eでの応力は、 $t_0$ 秒後のA面での応力に一致するから、

$$\sigma(t) = \sigma_A(t + t_0) \quad (1)$$

となる。ここで端面からA面までの距離を $l_0$ 、応力波の伝ば速度を $C_0$ とすると、 $t_0 = l_0 / C_0$ である。

本装置において、棒の終端E'は自由端となっているため、終端で応力が反射するとき、応力は異符号となる。棒の長さに対して衝撃応力波のパルス幅が長い場合や、伝ば速度が速い場合には、反射した応力は既に生じている応力に加算される。そこで、2点のひずみを測定することにより、各点の応力波とそれらの時間差から、任意位置での反射波を考慮したひずみを算出することができる。

まず、ある地点での応力波は、右方向に伝ばする $\sigma_L(t)$ と左方向に伝ばする $\sigma_R(t)$ によって、

$$\sigma(t) = \sigma_L(t) + \sigma_R(t) \quad (2)$$

と表すことができる<sup>3)</sup>。

ここで2点A, B面でのそれぞれの応力 $\sigma_A(t)$ ,  $\sigma_B(t)$ は、

$$\begin{aligned} \sigma_A(t) &= \sigma_L(t - t_0) + \sigma_R(t + t_0) \\ \sigma_B(t) &= \sigma_L(t - 2t_0) + \sigma_R(t + 2t_0) \end{aligned} \quad (3)$$

と表される。よって(2), (3)式より、

$$\sigma(t) = \sigma_A(t + t_0) + \sigma_A(t - t_0) - \sigma_B(t) \quad (4)$$

が得られ、反射波が存在しても2点で測定することによって、端面にかかる衝撃力を求めることができる。

## 3. 実験装置及び実験方法

本研究では、ひずみゲージが貼付してある棒材の先端に試料(歯)を接着剤で固定した装置を用いる。本実験に用いたレーザは、波長が $\lambda = 1064\text{nm}$ のパルス型Nd:YAGレーザ(STREAK-1 (株)アルテック)である。レーザ仕様をTable 1に、実験装置を図2に示す。衝撃試験装置は長さが1800mm、直径が10mmのSS400の棒材を使用し、半導体ひずみゲージを棒の側面に軸方向に貼付した。ひずみゲージを貼付した位置は、試料端面からそれぞれ200mm, 400mmとした。また、試料である歯はレーザの衝撃が一方向に伝わるように両端面を削り、棒の端面に接着して固定した。

実験はレーザのパルスを50 ~ 400 $\mu\text{s}$ 、エネルギーを50 ~ 990mJ/pulseに変えて単パルス照射し、測定を行った。また、照射面に吸収率を上げるための墨や酸化チタン溶液を塗付して、塗付していない場合と比べた。

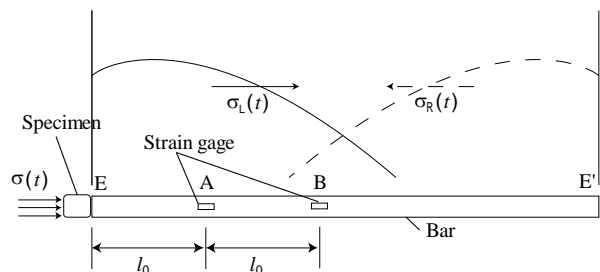


Fig.1 Schematic illustration for measuring a shock wave

Table 1 Irradiation conditions of Nd:YAG laser

Nd:YAG laser		
Wavelength	$\lambda$	1064nm
Laser energy	$E$	50-990mJ/pulse
Pulse duration	$\tau$	50-400 $\mu\text{s}$
Frequency	$f$	1Hz
Fiber		
Core diameter	$\phi$	400 $\mu\text{m}$
Numerical aperture	NA	0.37

4. 実験結果

図3に、パルス幅  $\tau=200\mu s$  , エネルギー  $E=600mJ/pulse$  で照射した時の出力波形を示す。立ち上がりから0に戻るまでおよそ60ms程度要している。応力波の伝播速度  $C_0$  が5100m/sということ考えると長いと考えられるが、これは歯質のような軟らかい材料内を伝播することで、レーザによる衝撃波の幅が広がったためだと考えられる。

図4は図3の出力波形の立ち上がりから2msを拡大したものである。ひずみゲージ2の波形に比べひずみゲージ1の波形は0.04ms遅れている。これは2点間の距離が  $l_0=200mm$  であるから  $t_0=l_0/C_0=0.04ms$  と一致する。また立ち上がり時間はレーザエネルギーやパルス幅に関係なく0.65ms程度であった。これも衝撃波が通過してから反射波が帰ってくるまでの時間と一致する。すなわち、各ひずみゲージからの出力が反射波の影響を受けていることとなる。しかしながら、波形の下がり方が緩やかとなっていることから、一般的な金属材料で生じる衝撃波よりも、反射波の影響が小さいといえる。

図5は測定された出力波形から試料の端面に加わるひずみと応力を算出し、レーザエネルギーとの関係を示したものである。エネルギーをあげていくと、衝撃応力は増加していくが、その増加の割合は次第に緩やかになっている。また衝撃応力を算出したところ0.04 ~ 0.14MPaとなった。この力の大きさや妥当性については今後考察していきたい。

図6はレーザのパルス幅と応力・ひずみとの関係を示したものである。グラフよりパルス幅を変化させても、エネルギーが等しければ衝撃力の大きさはあまり変わらないことがわかった。

5. 結言

Nd:YAGレーザ照射時に歯にかかる衝撃応力と照射条件の関係について調べた。また、測定された波形より衝撃力がどのように伝わるかを調べた結果、以下の結言を得た。

- (1)Nd:YAGレーザによる衝撃力は歯質内を伝播することで衝撃の幅が広がる。
- (2)歯科治療用レーザ加工機において発生する衝撃応力に与える影響が大きいパラメータはレーザエネルギーである。またエネルギーが大きくなるほど応力の増加の割合は緩やかとなる。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金若手研究B(課題番号19791395)の助成を受けて行われたものであり、記して謝意を表します。

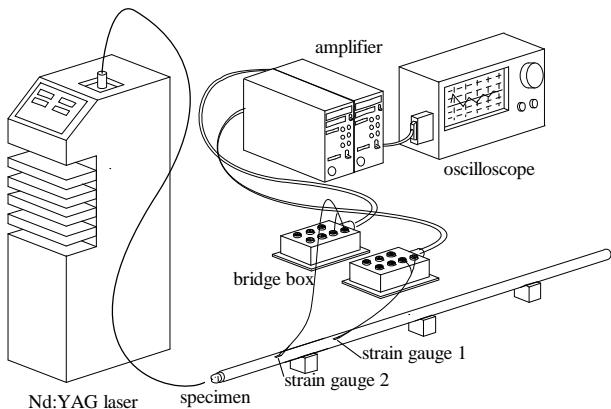


Fig.2 Experimental equipment

6. 参考文献

- 1) 和賀正明, 上田隆司, 古本達明, 他: Nd:YAG レーザとTiO2 によるin vitroでの殺菌作用, 日本レーザ歯学会誌, 19,1,(2008) 10-16.
- 2) 茶谷明義: 衝撃強度設計(1), 機械の研究, 41,5,(1989) 613-617.
- 3) 柳原直人: 一次元弾性応力波理論による衝撃応力測定法, 日本機械学会論文集(第1部), 43,375,(1977)4048-4052

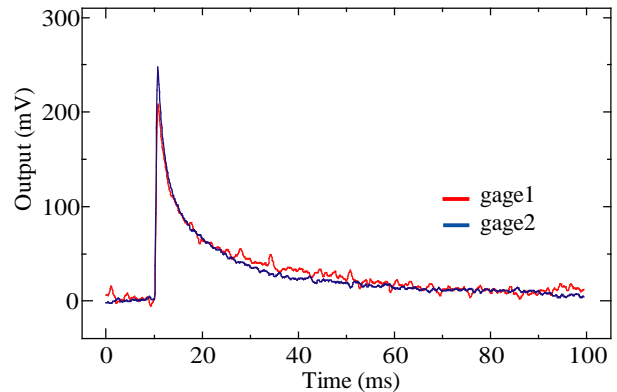


Fig.3 Output of strain gage ( $\tau=200\mu s, E=600mJ/pulse$ )

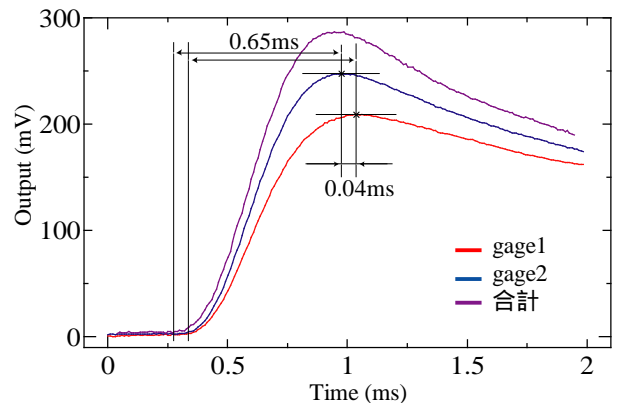


Fig.4 Output of strain gage ( $t=0-2ms, \tau=200\mu s, E=600mJ/pulse$ )

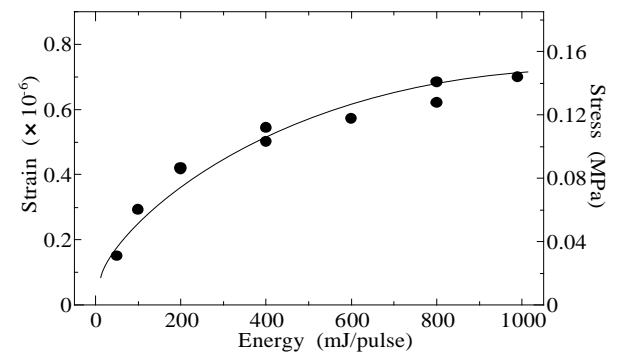


Fig.5 Relation between irradiation energy and stress

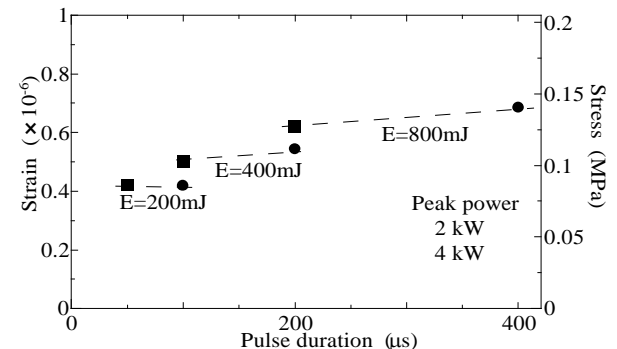


Fig.6 Relation between pulse duration and stress