損耗した Er:YAG レーザー用石英ファイバーチップ の再利用の試み

佐藤 浩美¹⁾ 吉嶺 嘉人¹⁾ 松本 妃可¹⁾
坂田 篤信^{1,2)} 平井 千香子³⁾ 長瀬 隆之⁴⁾
柳 雅之⁵⁾ 西原 正治⁶⁾

¹⁾ 九州大学大学院歯学研究院口腔機能修復学講座歯科保存学研究分野

²⁾ 愛知県開業

³⁾ 京都府開業

^{4,5)} 北海道開業

⁶⁾ 福岡県開業

(受付 : 2011 年 7 月 25 日, 受理 : 2012 年 6 月 18 日)

An Attempt to Reuse Damaged Quartz-fiber Tips for an Er:YAG Laser

Hiroimi SATO¹⁾, Yoshito YOSHIMINE¹⁾, Himeka MATSUMOTO¹⁾,
Atsunobu SAKATA^{1,2)}, Chikako HIRAI³⁾, Takayuki NAGASE⁴⁾,
Masayuki YANAI⁵⁾ and Masaharu NISHIHARA⁶⁾

¹⁾ Department of Endodontology and Operative Dentistry, Division of Oral Rehabilitation,
Faculty of Dental Science, Kyushu University

²⁾ Sakata Dental Clinic

³⁾ Hirai Chika Dental Clinic

⁴⁾ Nagase Dental Clinic

⁵⁾ Yanagi Dental Clinic

⁶⁾ Nishihara Dental Clinic

(Received: July 25, 2011, Accepted for Publication: June 18, 2012)

Abstract: The output energy of quartz-fiber tips for an Er:YAG laser reduces with repeated or inappropriate handling during cavity preparation. The aim of this study was to find the best way to reuse a damaged tip for an Er:YAG laser. An amputated surface of a tip was produced by using the following: group 1 (G1): diamond disk; group 2 (G2): carborundum point; group 3 (G3): waterproof abrasive paper; group 4 (G4): ceramic scissors. An unused new tip was used as a control. The amputated tip surface was observed under a scanning microscope. G3 showed a relatively flat surface compared to G1, 2, and 4, which showed a rough and irregular surface. By analysis using a power meter, although G1 and 2 showed a large reduction of the output energy, G3 and 4 showed slightly lower energy than the control. In addition, the ablated cavity of a bovine dentine plate irradiated for 10 s with each tip was evaluated using a laser microscope. G1, 2, and 4 showed significant reduction of the ablation rate, whereas G3 showed no significant difference. These results suggest that among these four methods, waterproof abrasive paper might recover, to some extent, the tip surface morphology, output energy, and ablation rate.

(J. Jpn. Soc. Laser Dent. 23 : 78 ~ 85, 2012 Reprint requests to Dr. SATO)

Key words=Er:YAG Laser, Quartz-fiber Tip, Wear, Reuse

キーワード=Er:YAG レーザー, 石英ファイバーチップ, 損耗, 再利用

緒 言

近年, Er:YAG レーザーは保存修復の領域で, う蝕除去に際して MI コンセプトに基づいた治療を可能とする装置として期待されている^{1,2)}。レーザーによる切削法は, 従来のタービンなどの高速回転切削装置を用いた治療に比べ, 操作時間が長いという問題を抱えている³⁾が, 振動や騒音の問題が少なく, また症例によっては浸潤麻酔を必要としないなどの利点も有している。特に, Er:YAG レーザーは窩洞表面や歯髄への熱による影響が小さく⁴⁾, 生体への安全性は高い⁵⁾と言われており, 2008 年の診療報酬改正では「う蝕歯無痛の窩洞形成加算」として保険に収載されている。

臨床においては Er:YAG レーザーの安全性を維持しつつ, 切削効率をさらに向上させることが重要な課題である。現在, う蝕治療に広く使用されている Er:YAG レーザー用石英ファイバーチップの一般的な構造は, コアと呼ばれる芯と, その外側のクラッド, そしてそれらを被う被膜の三層から構成されている。コアの主成分は石英であり, 屈折率がクラッド部より高いために, 光はコアから漏れることなくチップを伝搬する。しかしながら, 石英を母材にしたコンタクトチップに関しては, 切削に伴うチップの損耗と切削効率の低下などの問題点が指摘されている⁶⁻⁸⁾。チップの損耗を防ぐには, 出力を下げる, 照射対象までの距離を大きくする, 注水量を多くする, などの手段が挙げられるが, 結果的に切削効率の低下を招き, 治療時間が長くなるため臨床への応用は困難である。このため現状では, チップが損耗するたびに未使用の物と交換することになり, 保険治療の範囲ではコストの問題も生じることになる。

そこで, この問題の解決策として損耗したチップの再生利用が考えられる。チップの再生法については, シリコンカーバイドペーパーを用いたチップ先端の研磨による先端出力の回復に関する報告⁸⁾はあるが, その他の報告や有効な手段についてはほとんど知られていない。そこで本研究では, Er:YAG レーザー用石英ファイバーチップの再利用を試みた。チップ先端を歯科用器材であるダイヤモンドディスクやカーボランダムポイント, あるいは身近な素材である耐水研磨紙やセラミック製ハサミなどの複数の方法で切断し, その後のチップ先端面の形態, チップ先端出力, 切削効率について比較検討し, 再利用に有効な手段を見つけることを目的とした。

材料および方法

1. 被照射試料の作製

抜歯後に冷凍保存したウシ健全前歯を実験直前に解凍し, 歯冠部唇側エナメル質を注水下にてダイヤモンドバー

で削除し平坦な象牙質面を露出させた。次に, 表面を耐水研磨紙 (〜 #800) で研磨し, 近遠心方向 10mm, 歯軸方向 15mm, 厚さ 4 mm の象牙質プレートを作製し被照射試料とした。

2. 使用機器

レーザー発振装置として Er:YAG レーザー (Erwin AdvErl: モリタ) を使用した。チップには, 主にう蝕の蒸散を目的とした先端が平坦で直径 600 μ m の石英ファイバー製コンタクトチップ (C600F: モリタ) を用いた (図 1)。照射出力は, パワーメータ (Field Master GS: Coherent) を用いて導光ファイバー先端の出力が 100mJ になるようにコントロールパネル値を 110mJ に調整した。なお, 繰り返し速度 10pps (pulse per second), 注水下 (4.5ml/min) の条件で照射を行った。

3. チップの切断方法

チップの切断は, ①ダイヤモンドディスク (H635F190: GMBH & CIE), ②カーボランダムポイント (HP28: 松風), ③耐水研磨紙 (#180, #600: 三共理化学), ④セラミック製ハサミ (CS-250: KYOCERA) の 4 つの方法で行った。チップ先端より 1 mm と 2 mm の位置に印記後, 1 本のチップに対し 2 回の切断を行った。ダイヤモンドディスクとカーボランダムポイントはエンジン用ストレートハンドピースに装着し, 回転数 8000 ~ 9000rpm で, 前者では印記位置に合わせて切断, 後者では印記位置まで割合した。耐水研磨紙では #180 で印記位置まで研削し, 次に #600 で仕上げ研磨を行った。

4. チップ先端出力の測定およびチップ先端部の形態観察

①~④の各方法で, 未使用時, チップ切断後におけるチップ先端出力をパワーメータにて測定し, 透過率を算出した。チップ先端出力の測定に際しては, 測定前にチップ先端をエアーで乾燥し, パワーメータ受光面とチップ先端までの距離を 5 cm に固定し, 5 回測定して平均値を求めた。透過率への変換においては, チップ未装着のアタッチメント先端の光出力 (P-in) と, チップを取り付けた後のチップ先端出力 (P-out) から, 透過率 (%) = (P-out)/(P-in) × 100 を算出した。この操作を各条件につき, 未使用チップ 5 本ずつを使用して行った。

走査型電子顕微鏡 (SEM) (JSM-5400LV: 日本電子) を用いて, 各条件で使用するチップ先端面の未使用時およびチップ先端を切断した後の形態を観察した。

5. 被照射部の形態観察および切削量の測定

2 台のクランプ付複合軸ステージを用いて, チップを装着したアタッチメントと象牙質プレートを各々固定した。象牙質プレート表面に対して, 垂直で非接触 (0.5mm) の位置にチップを設置した。チップ未使用時と①~④の各方法によるチップ切断後に, 象牙質プレートに対して 10 秒

図1 平坦型チップ (C600F, コア径: $600\mu\text{m}$) の構造
a: チップ側面, b: チップ先端面, c: チップ先端部 (SEM像: 150倍)
コアと呼ばれる芯と, その外側のクラッド, それらを被う被膜の三層構造となっている。

図2 チップ先端出力の変化 (n=25)

間のレーザー照射を行った。次に, アルコール上昇系列で脱水, 乾燥し, 金蒸着後に被照射部のSEM観察を行った。5枚の象牙質プレートを用いて同様の照射を各条件において行い, 15箇所ずつの蒸散痕を形成した後に, レーザー顕微鏡 (VK-8500: KEYENCE) を用いて被照射部の蒸散量 (体積) を計測した。

6. 統計処理

チップ先端出力と蒸散量 (体積) に関して, 各条件におけるチップ未使用時と切断後の有意差の判定を独立した2群の差の検定 (Student's *t*-test, Welch's *t*-test) を用いて

解析した。

結 果

1. チップ先端出力およびチップ先端部の形態

各切断方法における未使用時と切断後のチップ先端出力を図2 (n=25) に示す。カーボランダムポイントで切断後の先端出力は著しく低下し, 次いでダイヤモンドディスクで有意に低下した。一方, 耐水研磨紙およびセラミック製ハサミでは切断後の出力は未使用時より低下するが, 高い出力を維持した。

＜①ダイヤモンドディスク＞

＜②カーボランダムポイント＞

＜③耐水研磨紙＞

＜④セラミック製ハサミ＞

図 3 チップ先端部の形状
左：側面（実体顕微鏡像），中央：先端面（実体顕微鏡像），右：先端部（SEM 像：150 倍）

チップ先端部の切断後の実体顕微鏡像および SEM 像を図 3 に示す。カーボランダムポイントでチップ先端面が大きく損壊し、コア部とクラッド部の形態の崩壊を認めた。ダイヤモンドディスクとセラミック製ハサミでは、コア辺縁部とクラッド部の損傷が観察された。耐水研磨紙では被膜の損傷とコア部に微少な粗造面を認めるが、全体像としては平坦な形態が観察された。

2. 被照射部の形態および切削量

各条件におけるレーザー照射 10 秒後の被照射部の SEM 像（図 4）とレーザー顕微鏡立体像（図 5）を示す。カーボランダムポイントでは蒸散部と非蒸散部の境界はやや不明瞭で不整な辺縁を認め、未使用時と比較して蒸散痕の幅が小さかった。ダイヤモンドディスクとセラミック製ハサミでは蒸散部と非蒸散部の境界は明瞭であるが、未使用時と比較して辺縁部に軽度な不整が観察された。耐水研磨紙

<未使用時(コントロール)>

<①ダイヤモンドディスク>

<②カーボランダムポイント>

<③耐水研磨紙>

<④セラミック製ハサミ>

図 4 被照射部の SEM 像
左:75 倍, 中央 (*):750 倍, 右 (**):750 倍
*は蒸散痕底部を, **は蒸散痕境界部を示す。

<未使用時(コントロール)>

<①ダイヤモンドディスク>

<②カーボランダムポイント>

<③耐水研磨紙>

<④セラミック製ハサミ>

図 5 蒸散痕の立体像 (レーザー顕微鏡像)

②の蒸散痕は相対的に小さく辺縁不整である。①、④では辺縁がやや不整、③では円形で未使用時と類似している。

では蒸散部と非蒸散部の境界は明瞭であった。外形は円形で未使用時と類似しているが、中心部が円錐状に深く陥凹していた。いずれの切断方法においても開口した象牙細管が明瞭に観察されたが、亀裂や炭化などの熱による傷害は認められなかった。

レーザー照射 10 秒後の蒸散痕の蒸散量 (体積) の解析結果を図 6 (n=15) に示す。カーボランダムポイントで

は未使用時と比較して蒸散量の大幅な低下を認めた。ダイヤモンドディスクとセラミック製ハサミは、次に有意に低下した値を示した。耐水研磨紙ではやや低下したものの有意差を示さなかった。

考 察

Er:YAG レーザー用チップは長時間の接触照射により経

図 6 被照射部の蒸散量 (体積) の変化 (n=15)

時的にチップ先端出力が低下すると言われている⁶⁻⁸⁾。出力低下に伴い切削効率が低下し、操作時間が長くなるのに伴い、患者への負担が増大するなどの問題が生じる。一方で、レーザー照射出力やパルス数、操作方法や操作環境を変えることでチップ先端出力の低下を抑えることは可能であるが、切削効率の低下を余儀なくされる。そこで、これらの条件を変えずに低下したチップ先端出力を改善する目的で、損耗したチップの回復法に着目した。

チップ自体の問題による先端出力低下の原因としては、チップの損傷によるレーザー光の散乱、切削片がチップ先端面に付着・融解することによるレーザー光の遮蔽、などが報告されている⁶⁻⁸⁾。このため、ダメージを受けたチップ先端部を除去することで先端出力を回復できる可能性があると考えられる。そこで、本研究では4種類の方法を用いてチップの新鮮面を出し、チップの形態を可及的に本来の形状に近づけることで、レーザー光の伝搬を回復させる方法を検討した。

今回の実験結果より、カーボランダムポイントを使用する方法では、チップが大きく損壊し、それに伴い先端出力が大幅に低下することが分かった。これは損壊したチップ先端面でレーザー光が大きく散乱したことが原因と推察さ

れる。

ダイヤモンドディスクやセラミック製ハサミによる切断ではコア中心部の新鮮面を出すことができたが、コア辺縁部からクラッド部にかけて破折が生じたため、破折部位からレーザー光が散乱し、出力低下に至ったと推察される。ただし、セラミック製ハサミの場合、ある程度の出力を維持できることも分かった。ダイヤモンドディスクでは、チップ先端面を一様に平坦に切断することは困難である。また、セラミック製ハサミは操作が容易であるが、切断時にチップ辺縁部に応力が集中するため同部が破折する恐れがある。

耐水研磨紙においては研削後のチップ先端出力は低下するものの、ある程度の出力を維持できた。SEM像の観察より、チップ表面は微小な粗造面となるが、全体としては新鮮面を出すことが可能で、コア部やクラッド部の損傷はほとんど認められないことが、レーザー光の散乱を最小限に抑えられた要因と考えられる。

蒸散痕の形態および蒸散量を比較したところ、カーボランダムポイント使用後の蒸散痕は最も小さく、蒸散量は大幅に低下しているため、切削効率は最も低くなり再生利用には不適と言える。ダイヤモンドディスクやセラミック製

ハサミ使用後の蒸散痕の形態は、未使用時と比較して不整で、蒸散量は有意に低下している。この原因として、処理後のチップ先端面は全体が平坦でないこと、一部の破折によりレーザー光の散乱が生じ、蒸散痕の形態や量に影響を及ぼしていることなどが考えられる。耐水研磨紙においては、蒸散痕の形態は未使用時と類似しており、蒸散量も有意に低下しなかった。この方法では、レーザー光の散乱が最小限に抑えられているため蒸散痕への影響は小さく、切削効率の点では他の方法よりも有効に使用できるものと考えられる。

チップを再生利用する際の考慮すべき条件として、操作時間が挙げられるが、最も簡便で短時間で操作できるのはセラミック製ハサミである。また、大幅な出力低下がない点も臨床応用を考える上で望ましいと考えられる。耐水研磨紙は研磨によって新鮮面を出すことで出力が回復するため、チップを大幅に消耗する必要はなく、再生利用の回数が増えるという利点がある。

従来の回転切削器具と異なり、レーザーによる窩洞形態は不規則なマージンと窩洞内壁を示し、切削後は成形修復に限られることとなり、窩洞形態のコントロールには限界がある⁹⁾。特に、今回の結果より、カーボランダムポイントを使用した場合、先端出力の大幅な低下だけでなく、チップ先端面が崩壊し、蒸散痕の形態も相対的に小さく不整となるため、より一層術前に意図した窩洞形成が難しくなる。一方、耐水研磨紙によるチップ再生後に、先端出力を概ね維持できれば、再利用の可能性があると思われる。また、ファイバーの再利用の観点から、今後、ダイヤモンドカッターやファイバーカッターについても検討していきたい。

今後さらに、再生処理後のチップを用いて窩洞形成を行い、窩洞形態や作業効率を未使用チップと比較検討する必要があると考えられる。

結 論

平坦型の石英ファイバー製チップの再生利用を目的に、チップ先端を各種方法で切断した際に、チップ先端の形態、先端出力、被照射面の形状と切削量にどのように影響

するかを調べた結果、以下のような結論を得た。

1. 耐水研磨紙を使用した場合、チップ先端面の形態の再現性が高く、チップ先端出力の回復を期待できる。
2. 耐水研磨紙を使用した場合、蒸散痕の形態がチップ未使用時と類似し、高い切削効率を維持できる。

謝 辞

本研究を遂行するに際してご協力いただいた株式会社モリタ製作所（京都市）の岡上吉秀氏、西村巳貴則氏、岩根聖二氏に衷心より感謝いたします。

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（A）21249091）の補助の下に行われた。

文 献

- 1) Eberhard J, Bode K, Hedderich J, et al: Cavity size difference after caries removal by a fluorescence-controlled Er:YAG laser and by conventional bur treatment. Clin Oral Investig, 12 : 311-318, 2008.
- 2) Eberhard J, Eisenbeiss AK, Braun A, et al: Evaluation of selective caries removal by a fluorescence feedback-controlled Er:YAG laser *in vitro*. Caries Res, 39 : 496-504, 2005.
- 3) Aoki A, Ishikawa I, Yamada T, et al: Comparison between Er:YAG laser and conventional technique for root caries treatment *in vitro*. J Dent Res, 77 : 1404-1414, 1998.
- 4) Kilinc E, Roshkind DM, Antonson SA, et al: Thermal safety of Er:YAG and Er,Cr:YSGG lasers in hard tissue removal. Photomed Laser Surg, 27 : 565-570, 2009.
- 5) Matsumoto K, Wang X, Zhang C, et al: Effect of a novel Er:YAG laser in caries removal and cavity preparation: a clinical observation. Photomed Laser Surg, 25 : 8-13, 2007.
- 6) 江黒 徹, 前田 徹, 青木 章, 他: Er:YAG レーザー用コンタクトチップ先端出力の変化—エナメル質接触照射における石英チップとサファイアチップの比較—. 日歯保存誌, 48 : 96-103, 2005.
- 7) Eguro T, Aoki A, Maeda T, et al: Energy output reduction and surface alteration of quartz and sapphire tips following Er:YAG laser contact irradiation for tooth enamel ablation. Lasers Surg Med, 41 : 595-604, 2009.
- 8) Yamazaki K, Eguro T, Maeda T, et al: Output energy changes of quartz contact probe for Er:YAG laser with tooth ablation. Dent Mater J, 22 : 292-300, 2003.
- 9) Navarro RS, Gouw-Soares S, Cassoni A, et al: The influence of erbium:yttrium-aluminium -garnet laser ablation with variable pulse width on morphology and microleakage of composite restorations. Lasers Med Sci, 25 : 881-889, 2010.