Er:YAG レーザーを用いた根管洗浄時に生じる根尖孔外の圧力

佐竹和久¹⁾ 渡辺 聡¹⁾ 井手 彩 集¹⁾
八尾加奈子¹⁾ 市川 勝¹⁾ 安生 智 郎¹⁾
海老原 新¹⁾ 小林 千 尋²⁾ 須田 英 明¹⁾

¹⁾ 東京医科歯科大学 (TMDU) 大学院医歯学総合研究科医歯学系専攻
口腔機能再構築学講座歯髓生物学分野

²⁾ 東京医科歯科大学歯学部附属病院歯科総合診療部

(受付 : 2014 年 5 月 13 日, 受理 : 2014 年 7 月 2 日)

Pressure Generated Outside the Apical Foramen During Er:YAG Laser-activated Irrigation

Kazuhisa SATAKE¹⁾, Satoshi WATANABE¹⁾, Ayai IDE¹⁾,
Kanako YAO¹⁾, Masaru ICHIKAWA¹⁾, Tomoo ANJO¹⁾,
Arata EBIHARA¹⁾, Chihiro KOBAYASHI²⁾ and Hideaki SUDA¹⁾

¹⁾ Department of Pulp Biology and Endodontics, Division of Oral Health Sciences, Medical and Dental Sciences Track,
Graduate School of Medical and Dental Sciences, Tokyo Medical and Dental University (TMDU)

²⁾ Oral Diagnosis and General Dentistry, Dental Hospital, Tokyo Medical and Dental University (TMDU)

(Received: May 13, 2014, Accepted for Publication: July 2, 2014)

Abstract: Although root canal irrigation is an important process for successful root canal treatment, there is a high risk of irrigant extrusion into the periapical region. However, periapical pressure generated by laser-activated irrigation (LAI) using an Er:YAG laser has not been studied yet. The aim of this study was to investigate the root canal irrigation pressure generated outside the apical foramen during LAI using an Er:YAG laser in comparison with passive ultrasonic irrigation (PUI) and conventional irrigation (CI).

A plastic root canal model shaped to a working length of 20 mm with an apical diameter of 0.40 mm was used. They were assigned into the following three groups:

1) LAI group: Distilled water was activated by Er:YAG laser (Erwin AdvErL, Morita, Japan, 70 mJ 10 pps) with a cone-shaped tip (R200T, Morita, $\phi = 200 \mu\text{m}$) positioned 2 mm short of the working length for 20 seconds.

2) PUI group: PUI was performed for 20 seconds with an ultrasonic file, which was positioned 2 mm short of the canal end and driven by an ultrasonic device (Piezon Master 400, EMS, Switzerland, highest power setting).

3) CI group: Hand irrigation with 1 ml of distilled water was performed using a 27 gauge conventional flat needle (Nipro needle and syringe, Nipro, Japan) positioned 2 mm short of the working length for 20 seconds.

Each irrigation was performed ten times repeatedly. The mean maximum pressure caused by the irrigation was measured using a pressure sensor (AP-12S, Keyence, Japan) connected via a plastic tube to the model. Data were analyzed by one-way ANOVA and Tukey-Kramer test at a significance level of $p = 0.05$.

The mean maximum pressure caused by LAI and PUI was significantly lower than that caused by CI ($p < 0.05$), and that caused by PUI was significantly lower compared to LAI ($p < 0.05$). Under the conditions of this preliminary study, the pulsed Er:YAG laser did create irrigation pressure outside the simulated apical foramen. Although it was smaller than that caused by CI, possible irrigant extrusion through the apical foramen should be considered also in LAI.

(J. Jpn. Soc. Laser Dent. 25 : 70 ~ 74, 2014 Reprint requests to Dr. SATAKE)

Key words = LAI using Er:YAG laser, root canal irrigation, pressure generated outside the apical foramen

キーワード = Er:YAG レーザーによる LAI, 根管洗浄, 根尖孔外の圧力

緒 言

根管洗浄は歯内療法成功のための重要なステップの一つであり、根管を拡大し根尖まで根管洗浄を行うことで根管の無菌化が図られる。根管洗浄は従来のシリンジを用いた洗浄法 (Conventional Irrigation, 以下「CI」) が基本的な術式であり、現在でも臨床において広く用いられている。しかし、CI に使用される次亜塩素酸ナトリウム溶液が根尖孔外へ溢出することにより、根尖周囲組織を化学的に傷害し、疼痛や腫脹を惹起することが数多く報告されている¹⁻³⁾。このため、CI を含む様々な根管洗浄法における根尖孔外への洗浄液の溢出量の測定や、根尖孔外へ加わる圧力の測定等が行われ、洗浄液の根尖孔外への溢出について検討がなされてきた。我々の過去の研究においても、CI によって根尖孔外に生じる圧力を測定し、洗浄針や手技による洗浄液の根尖孔外への溢出挙動について報告した⁴⁾。また、根管洗浄の安全性と有効性の向上を目的として、数多くの根管洗浄方法が行われており、洗浄液を満たした根管内に超音波ファイルを用いてキャビテーションを発生させ、洗浄効果を高める超音波洗浄 (passive ultrasonic irrigation, 以下「PUI」) や、歯科用レーザーを用いた根管洗浄 (laser-activated irrigation, 以下「LAI」) の有効性が近年報告されている⁵⁻⁹⁾。LAI においては Blanken と Verdaasdonk によって、洗浄液中で Er,Cr:YSGG レーザー照射した際のキャビテーション現象が示され、高い根管洗浄効果が期待されることが報告された⁵⁾。また、

LAI はキャビテーションの他に根管内に高速の水流、衝撃波を発生させるともいわれており、これらの現象によって Er,Cr:YSGG レーザーあるいは Er:YAG レーザーを用いた LAI では、PUI や CI よりも根管内の根尖部削片の除去効率が同程度⁶⁾あるいは有意に高かったと報告されている⁷⁾。また、チップ側方に照射できる根管照射用円錐型チップを用いた LAI によるキャビテーション挙動についても報告されている⁸⁾。他方、LAI においても根尖孔外への洗浄液の溢出が生じたという報告もあり⁹⁾、LAI による根管洗浄時には CI と同様に根尖孔外に圧力が生じる可能性が考えられる。しかしながら、LAI によって根尖孔外に生じる圧力を測定した報告はほとんどない。そこで、本研究では LAI によって根尖孔外に生じる圧力を検討することを目的とした。

材料および方法

I. 模擬根管模型

プラスチックピペットチップ (#204 10 μ l ショートタイプ, 先端径 0.40 mm, 0.06 テーパー, 深江化成, 兵庫) を調整し、20 mm の長さの模擬根管模型として用いた。使用する実験機器の保全のために、次亜塩素酸ナトリウム水溶液の代わりに蒸留水を模擬根管模型内に満たした。

II. 実験群

模擬根管模型に対して、以下の 3 群の根管洗浄法を設定して実験を行った (図 1)。

図 1 実験群および使用した装置・器具

図2 圧力測定実験装置の模式図

異なる肩文字（アルファベット）は群間に統計学的有意差が存在することを示す（Tukey-Kramer test, $p < 0.05$ ）

図3 根尖孔外に生じた圧力の比較

1. LAI 群

LAI 群における Er:YAG レーザー照射には、アーウィン・アドヴェール（モリタ製作所、京都）を用いた。本装置の仕様は、波長 $2.94 \mu\text{m}$ 、パルス波発振、出力エネルギー $30 \sim 350 \text{ mJ/pulse}$ 、繰り返しパルス数 1, 3.3, 5, 10, 20, 25 pps の各設定が可能であり、レーザーをファイバー伝送し、コンタクトチップを装着して照射する方式になっている。本実験に使用したレーザー照射用コンタクトチップは、R200T（レザチップ、同、 $\phi = 200 \mu\text{m}$ ）であった。照射出力は、過去の報告⁸⁾を参照し、同チップの最大設定値であった $70 \text{ mJ } 10 \text{ pps}$ の条件とした。照射位置は、模擬根管模型の底部から 2 mm 手前にチップの先端を設置し、模擬根管模型内の蒸留水中にて 20 秒間照射を行った。実験中はチップを同一位置に保持した。

2. PUI 群

超音波装置としてピエゾンマスター 400（EMS, Switzerland）を用いた。本装置は、高周波最大出力 8 W 、周

図4 根尖孔外に生じた圧力の代表例

波数 $24 \sim 32 \text{ kHz}$ となっている。超音波ファイルには #20 の U-ファイル（松風、京都）を用い、同超音波ファイルの最大設定値にて模擬根管模型の底部から 2 mm 手前にチップの先端を設置し、模擬根管模型内の蒸留水中にて 20 秒間作用させ、洗浄を行った。

3. CI 群

CI 群では、広く臨床で用いられている 27 G (0.40 mm) の洗浄針およびシリンジ（ニプロプラント針、ニプロ、大阪）を用い、蒸留水 1 ml で洗浄を行った。その際には、模擬根管模型の底部から 2 mm 手前に洗浄針の先端を設置し、手指により洗浄液を 20 秒間抽送した。

Ⅲ. 根尖孔外の圧力測定

根尖孔外に生じた圧力は、模擬根管模型および蒸留水を満たしたビニールチューブを介して圧力計測装置（AP-12S, キーエンス、大阪）をアンプ（AP-81A, 同）および記録装置（NR-1000, 同）に接続し（図2）、各群それぞれ 10 回ずつ計測し、最大圧力の平均値を測定した（図2）。

Ⅳ. 統計学的解析

実験結果の統計学的解析には、一元配置分散分析および Tukey-Kramer 法を用いた。有意水準はいずれも 5% とした。

結 果

LAI, PUI および CI の各群において、根尖孔外に生じた圧力の平均最大値はそれぞれ $0.918 \pm 0.134 \text{ kPa}$, $0.225 \pm 0.203 \text{ kPa}$, $1.887 \pm 0.931 \text{ kPa}$ であった（図3）。LAI 群および PUI 群において根尖孔外に生じた圧力の平均最大値は、CI 群において生じた圧力の平均最大値よりも有意に小さかった（ $p < 0.05$ ）。また、PUI 群は多くの計測で陰圧あるいは陰圧を中心とした圧の上下変化挙動を示し、LAI 群に比較して有意に小さな圧を示した（ $p < 0.05$ ）（図4）なお、LAI および CI 群の平均値は根尖部歯周組織

の組織圧の水準の一つである中心静脈圧 5.88 mmHg = 0.79 kPa) の値を超えていた。

考 察

LAIは根管内にキャビテーション、高速の水流、衝撃波を発生させるとされているが、本実験条件下ではLAIによって根尖孔外に生じた圧力変化は、従来法であるCIよりも小さい結果となった。他方、用いたレーザー装置、照射条件が本研究とは異なるものの、Georgeらの報告では、LAI群とCI群間に洗浄液の根尖孔外の溢出量に有意差がないという結果を示している⁹⁾。しかしながら、Georgeらの研究方法は抜去歯を水平に固定し、色素溶液をLAIにて作用させ、方眼紙に溢出した色素溶液をプロットするという計測方法(面積評価)であったため、CI群の溢出量の測定は困難であったことが考えられる。すなわち、溢出溶液が飛散する挙動を示すLAIと異なり、CIでは溢出溶液が垂れて、根尖孔直下付近に一箇所に溜まる挙動を示した。そのため面積の評価が実際の溢出量とは異なり、CI群での計測が過少になっていたことが推察される。

CIによる洗浄液の根尖孔外への溢出についての報告は数多くなされている¹⁰⁻¹⁶⁾。その測定方法としては、染色したゼラチンが次亜塩素酸ナトリウム溶液で漂白された面積を計測する方法^{10,11)}、溢出した洗浄液をピペットチップで吸引して体積を測定する方法¹²⁾、溢出した洗浄液の濃度を測定する方法¹³⁾、水溶液中に流出した染色液の面積を撮影して計測する方法¹⁴⁾、あるいは溢出した洗浄液の重さを測定する方法^{15,16)}等が用いられてきた。しかしながら、それぞれの方法における測定には限界があると考えられる。すなわち、多くの測定方法は面積を測定する2次元評価であること、また根尖孔外の媒体が水溶液あるいはゼラチン等である場合、時間の経過とともに、根管内に残留した洗浄液の浸透が起こりうること等が考えられる。また、体積の計測においても時間の経過とともに溢出した洗浄液の蒸発等による計測誤差が生じることが問題点として挙げられる。

根尖孔外に生じる圧力を測定する方法は、そのような誤差がなく、溢出する勢いの挙動等も計測できる。その反面、洗浄液の溢出量自体を測定していないところに問題点がある。またプラスチック製模擬根管模型は、標準的な根管形成後の形状を想定したものをを用いたが、洗浄液の溢出挙動が抜去歯の根管とは異なるという報告もある¹⁷⁾。今後、根尖孔外への洗浄液の溢出に関して、様々な実験手法を組み合わせることで総合的に勘案する必要があると考えられる。

実際の臨床では根尖部歯周組織の組織圧が存在し、その値はヒト中心静脈圧(5.88 mmHg = 0.79 kPa)に近似する

と報告されている^{18,19)}。根尖部歯周組織の組織圧は、根管洗浄時の圧力に抗すると考えられるが、本実験の設定条件下ではCI群、LAI群において上記の値を超えている例が認められた。

なお、本研究ではLAI群の出力がレーザーチップの推奨出力(30 mJ 10 pps)を超えており、またチップ先端の位置は根尖付近に設定した。したがって、出力や設定位置を変動させた際のLAIにおける根尖孔外への圧力についても測定を行い、最適な照射条件を検討する必要がある。PUI群では上記の中心静脈圧値を超えた例は認められず、根尖孔外の圧力は陰圧あるいは陰圧を中心とした圧の上下変化挙動を示していた。また、本研究でのPUI群とCI群の結果はTasdemiraらによる報告と同様であった¹²⁾。

キャビテーション発生に関し、PUIでは主に超音波振動によってキャビテーションが生じるのに対して、LAIではチップ周囲の水の微小爆発によってキャビテーションが生じると考えられる。チップ周囲部位においては、キャビテーションによる減圧によりLAI、PUIともに陰圧が生じると考えられるが、LAIでは微小爆発およびパルス照射によってチップ前方へ向かう水流が生じ、根尖孔外に洗浄液を溢出させ、根尖孔外に陽圧を生じさせたものと考えられる。

本研究で用いた根管照射用レーザーチップは、チップ側方に80%、前方に20%のエネルギーを分配するために、先端が平坦なチップと比べてチップ前方の圧力は小さい結果となったものと考えられる。今後、平坦なチップと比較した圧力挙動変化についても今後検討する必要がある。

本実験におけるCI群の洗浄液流量は約3 ml/minであった。福元らは、同僚教室員を対象に根管洗浄液の流量を測定し、根管洗浄における平均流量は3.46 ml/minであったと報告している¹⁷⁾。また、Parkらは4 ml/min以上の流量では洗浄効率に有意差がなかったという結果を示している²⁰⁾。すなわち、本実験で計測された流量は臨床的な値であったと考えられる。

CIによる根尖孔外の圧力を調べたKhanらの報告²¹⁾では、2~3 ml/minの流量で洗浄した場合、根尖孔外の圧力は 1.89 ± 0.13 kPa - 3.61 ± 0.27 kPa (14.15 ± 0.99 - 27.1 ± 2.02 mmHg)であり²¹⁾、本研究と同様の結果であった。また、1 ml/minを超える流量の場合にはヒト中心静脈圧(5.88 mmHg = 0.79 kPa)を超える圧力が発生したことも報告している²¹⁾。Georgeらは、*in vitro*研究でside-vented洗浄針を根尖から10 mm離れた位置で洗浄したCI群を除き、CIおよびLAIの全ての群で根尖からの洗浄液の溢出を認めたと報告している⁹⁾。また、SalzgeberとBrilliantによる臨床研究では、歯髄壊死症例に対して造影性を付与した洗浄液を用いて従来法で根管洗浄を行った結果、洗浄液が根尖歯周組織へ溢出していたと報告している²²⁾。臨床

的にどの程度の溢出量で事故に到るか不明であるものの、洗浄液の溢出は可及的に少なくすることが望ましいといえよう。今後、レーザーを用いた根管洗浄の臨床応用に際して、抜去歯根等を用いて、照射出力、パルスおよびチップの設置距離等の照射条件の詳細な設定、根管側枝の洗浄効果の有効性の検討等、さらに多角的に明らかにしていく必要がある。

結 論

本実験条件下において、Er:YAG レーザーを用いた根管洗浄法 (LAI) は、従来の根管洗浄法 (CI) よりも根尖孔外に生じる圧力が小さかった。しかしながら、LAI においても根尖孔外へ洗浄液が溢出する可能性があり、その臨床応用については更なる検討が必要である。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費 (平成 25 ~ 27 年度) 若手研究 (B) 「分子レベルでの微小破折発生機構の解明と新しい破折制御概念に基づく歯科治療法の確立」 (課題番号: 25870195) による助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) Sermeño R, Silva L, Herrera H, et al: Tissue damage after sodium hypochlorite extrusion during root canal treatment. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 108 : e46-e49, 2009.
- 2) Serper A, Ozbek M, Calt S: Accidental Sodium Hypochlorite-Induced Skin Injury During Endodontic Treatment. *J Endod*, 30 : 180-181, 2004.
- 3) Witton R, Henthorn K, Ethunandan M, et al: Neurological complications following extrusion of sodium hypochlorite solution during root canal treatment. *Int Endod J*, 38 : 843-848, 2005.
- 4) 小林千尋, 福元康恵, 吉岡隆知, 他: 根管洗浄時に根尖孔外に生じる圧力. *日歯内誌*, 29 : 164-169, 2008.
- 5) Blanken JW, Verdaasdonk RM: Cavitation as a working mechanism of the Er,Cr:YSGG Laser in endodontics: a visualization study. *J Oral Laser Appl*, 7 : 97-106, 2007.
- 6) De Moor RJ, Meire M, Goharkhay K, et al: Efficacy of ultrasonic versus laser-Activated irrigation to remove artificially placed dentin debris plugs. *J Endod*, 36 : 1580-1583, 2010.
- 7) De Groot SD, Verhaagen B, Versluis M, et al: Laser-activated irrigation within root canals: cleaning efficacy and flow visualization. *Int Endod J*, 42 : 1077-1083, 2009.
- 8) Matsumoto H, Yoshimine Y, Akamine A: Visualization of irrigant flow and cavitation induced by Er:YAG laser within a root canal model. *J Endod*, 37 : 839-843, 2011.
- 9) George R, Walsh LJ: Apical extrusion of root canal irrigants when using Er:YAG and Er,Cr:YSGG lasers with optical fibers: an in vitro dye study. *J Endod*, 34 : 706-708, 2008.
- 10) Fukumoto Y, Kikuchi I, Yoshioka T, et al: An ex vivo evaluation of a new root canal irrigation technique with intracanal aspiration. *Int Endod J*, 39 : 93-99, 2006.
- 11) Mitchell RP, Baumgartner JC, Sedgley CM: Apical extrusion of sodium hypochlorite using different root canal irrigation systems. *J Endod*, 37 : 1677-1681, 2011.
- 12) Tasdemir T, Er K, Celik D, et al: Effect of passive ultrasonic irrigation on apical extrusion of irrigating solution. *Eur J Dent*, 2 : 198-203, 2008.
- 13) Psimma Z, Boutsoukis C, Kastrinakis E, et al: Effect of needle insertion depth and root canal curvature on irrigant extrusion ex vivo. *J Endod*, 39 : 521-524, 2013.
- 14) Camoes ICG, Salles MR, Fernando MVM, et al: Relationship between the size of patency file and apical extrusion of sodium hypochlorite. *Indian J Dent Res*, 20 : 426-430, 2009.
- 15) Yeter KY, Evcil MS, Ayranci LB, et al: Weight of apically extruded debris following use of two canal instrumentation techniques and two designs of irrigation needles. *Int Endod J*, 46 : 795-799, 2013.
- 16) Altundasar E, Nagas E, Uyanik O, et al: Debris and irrigant extrusion potential of 2 rotary systems and irrigation needles. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 112 : e31-e35, 2011.
- 17) 福元康恵, 吉岡隆知, 須田英明: 根管内吸引を用いた根管洗浄法—1. 洗浄液の根尖孔外への溢出について—. *日歯保学雑誌*, 47 : 37-42, 2004.
- 18) Baumann UA, Marquis C, Stoupis C, et al: Estimation of central venous pressure by ultrasound. *Resuscitation*, 64 : 193-199, 2005.
- 19) Lyons RH, Kennedy JH, Burwell CS: Measurement of venous pressure by direct Method. *Am Heart J*, 160 : 675-693, 1938.
- 20) Park E, Shen Y, Khakpour M, et al: Apical pressure and extent of irrigant flow beyond the needle tip during positive-pressure irrigation in an in vitro root canal model. *J Endod*, 39 : 511-515, 2013.
- 21) Khan S, Niu LN, Eid AA, et al: Periapical pressures developed by nonbinding irrigation needles at various irrigation delivery rates. *J Endod*, 39 : 529-533, 2013.
- 22) Salzgeber RM, Brilliant JD: An in vivo evaluation of the penetration of an irrigating solution in root canals. *J Endod*, 3 : 394-398, 1977.