九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

シリンジ洗浄法、音波洗浄法、および低エネルギー短パルスLaser-activated irrigation法におけるスミヤー層除去効果ならびに象牙質浸食作用の比較 : 根管洗浄剤の使用順序および根管洗浄時間が与える影響について

倉富, 覚

https://hdl.handle.net/2324/5068183

出版情報：Kyushu University, 2022, 博士（歯学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

シリンジ洗浄法、音波洗浄法、および低エネルギー短パルス **Laser-activated irrigation** 法におけるスミヤー層除去効果ならびに象牙質浸食作用の比較
-根管洗浄剤の使用順序および根管洗浄時間が与える影響について-

2022 年

倉富　覚

九州大学大学院歯学府歯学専攻

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

指導教員　前田 英史　教授

目次

1　要旨　1

2　緒言　3

3　材料と方法　6

3-1. 被験歯の作製

3-1-1. 同意取得　6

3-1-2. 根管拡大　6

3-2. 被験歯における根管洗浄方法　7

3-2-1. シリンジ洗浄法　7

3-2-2. EDDY 洗浄法　8

3-3-3. LS-LAI 法　8

3-3. 走査型電子顕微鏡分析　9

3-4. 統計学的分析　10

4　結果　11

4-1. シリンジ洗浄法後におけるスミヤー層の残存状態　11

4-2. 1 EDDY 洗浄法後におけるスミヤー層の残存状態　13

4-3. LS-LAI 法後におけるスミヤー層の残存状態　16

4-4. シリンジ洗浄法後、EDDY 洗浄法後、および LS-LAI 法後における象牙質の浸食状態　18

5　考察　21

6　総括　25

7　謝辞　26

8　参考文献　27

本研究の一部は倉富 覚, 友清 淳, 吉田 晋一郎, 前田 英史. シリンジ洗浄法および音波洗浄法におけるスミヤー層除去効果ならびに象牙質浸食作用の比較 -根管洗浄剤の使用順序および根管洗浄時間が与える影響について-. 日本歯内療法学会雑誌に投稿し、掲載受諾を受け、43 巻 3 号 (2022 年 9 月発刊予定) に掲載予定である。

1. 要旨

シリンジ洗浄時に EDDY にて根管洗浄剤の攪拌を行う根管洗浄法 (EDDY 洗浄法) およびシリンジ洗浄時に根管内へ低エネルギー短パルスの Er: YAG レーザーを照射する Laser-activated irrigation with low pulse energy and a short pulse (LS-LAI) 法は、シリンジ洗浄法のみよりも高いスミヤー層除去効果を示すことが報告されている。しなしながら、これらの根管洗浄法を行う際に、根管洗浄剤であるエチレンジアミン四酢酸 (EDTA) および次亜塩素酸ナトリウム (NaOCl) を、どのような順序でどれぐらいの時間作用させると、象牙質の過剰な脱灰である浸食の発生を抑制しながら、効果的にスミヤー層を除去できるかは明らかとなっていない。そこで本研究では、EDDY 洗浄法および LS-LAI 法を行う際に、EDTA ならびに NaOCl の作用時間および使用順序を変化させ、根管洗浄後のスミヤー層の残存程度および象牙質の浸食程度を比較することで、EDDY 洗浄法および LS-LAI 法による最適な洗浄効果がみられる EDTA ならびに NaOCl の作用時間および使用順序を明らかにすることとした。

被験歯には単根管の下顎前歯を使用し、歯冠を切断したのち作業長 10mm にて#40 (8% テーパー) まで根管拡大を行った。これらの被験歯に対して、EDTA ならびに NaOCl の作用時間および使用順序を変化させながら、シリンジ洗浄法、EDDY 洗浄法、および LS-LAI 法にて根管洗浄を行った。洗浄後に被験歯を割断し、走査型電子顕微鏡分析にて根管壁表面の観察し、洗浄効果を評価した。

シリンジ洗浄では、いずれの条件においても、歯冠側および中央部のスミヤー層はある程度の除去を認めたが、根尖側のスミヤー層はほとんど除去されていなかった。EDTA ならびに NaOCl を各 60 秒間作用させた EDDY 洗浄法では、各 30 秒間作用させた EDDY 洗浄法および各 30 秒間ならびに各 60 秒間作用させたシリンジ洗浄法よりも、歯冠側から根尖側まで広範囲にスミヤー層が除去されていた。EDTA ならびに NaOCl を各 60 秒間作用させた LS-LAI 法においても、歯冠側から根尖側まで広範囲にスミヤー層が除去されてい

た。EDTA および NaOCl を各 60 秒間作用させた各洗浄法において、NaOCl の次に EDTA で洗浄した EDDY 洗浄法が、他の洗浄法よりも低い象牙質浸食作用を示した。

以上の結果より、EDTA ならびに NaOCl を各 60 秒間作用させた EDDY 洗浄法および LS-LAI 法は、根管全体のスミヤー層の除去に有効であるが、象牙質浸食の発生を抑制する上では EDDY にて NaOCl を 60 秒間攪拌したのち、EDTA を 60 秒間攪拌する洗浄法が効果的であると考えられた。

2. 緒言

根管治療における主要な目的の一つは、根管に感染した口腔内細菌を物理的および化学的に最大限除去することである。根管拡大は、細菌に感染した象牙質を切削し、物理的に除去することで、根管内の細菌数を減少させることができる。しかしながら、根管内には根管拡大後も細菌、象牙質片、壊死歯髄組織、象牙芽細胞等の有機質ならびに無機質が残存する (1)。これらの残存物によって、根管壁上に構成される層状構造物は「スミヤー層」と呼ばれる。スミヤー層は、象牙細管内への根管洗浄剤および根管充填材の浸透を妨げることから (2)、根管治療の成功率を低下させる因子の一つと推察されている。そのため、根管壁からスミヤー層を除去することを目的として、様々な根管洗浄剤および根管洗浄器機の開発が行われてきた (3).

エチレンジアミン四酢酸 (EDTA) および次亜塩素酸ナトリウム (NaOCl) は、現在最も一般的に使用されている根管洗浄剤である。無機質溶解作用を示す EDTA および有機質溶解作用を示す NaOCl を併用することで、根管内から無機質・有機質の両方を除去することができる。さらに、EDTA および NaOCl のスミヤー層除去効果は、根管洗浄剤の使用順序, 洗浄時間, 攪拌方法等の因子の影響を受けることが報告されている。根管洗浄剤の使用順序に関しては、根管内に NaOCl を満たしながら根管拡大を行ったのち、EDTA にて根管洗浄を行い、最終的に NaOCl にて根管洗浄を行う方法が、スミヤー層の除去に効果的であるとされてきた (4,5). しかしながら、EDTA にて洗浄したのち NaOCl にて洗浄した場合には、過剰な脱灰である「浸食」が象牙質に生じることが報告されている (6)。したがって、根管洗浄における EDTA および NaOCl の決定的な使用順序は、未だ明らかとなっていない。洗浄時間に関しては、EDTA および NaOCl を各 60 秒間作用させることで、根管の歯冠側 1/3 および中央部 1/3 のスミヤー層の大部分、ならびに根尖側 1/3 のスミヤー層の一部を除去できることが明らかとなっている (7). さらに EDTA および NaOCl の作用時間を延長し、各 120 秒間とすることで、根管全体のスミヤー層を除去できるとの報告もある (8). 一方で、

EDTA を 240 秒間以上作用させると象牙質に浸食が生じ (9)、さらに EDTA と NaOCl を併用すると、EDTA 単独を使用した場合よりも多くの象牙質浸食が生じてしまう (10)。すなわち、洗浄時間を延長するとスミヤー層の除去効果は上昇する一方、浸食による象牙質の脆弱化が生じてしまう。そのため洗浄時間は、スミヤー層を確実に除去できることに加え、象牙質に浸食を生じない時間が理想であると考えられる.

また、洗浄針を装着したシリンジにて行う根管洗浄法 (シリンジ洗浄法) では, 根管の根尖側 1/3 に十分量の根管洗浄剤を到達させることができないが(3)、根管洗浄剤の攪拌により到達量を増加させることができる (11). したがってシリンジ洗浄時には、手用器機または機械式器機を併用し、根管洗浄剤を攪拌することで根管全体へと到達させることが推奨されている。EDDY (VDW, Germany) はエアスケーラー用根管洗浄チップであり、音波振動にて根管洗浄剤を攪拌させることが可能である。さらに EDDY はポリアミド製であり、靭性に優れることから、根管壁の偶発的な切削を予防することができる。したがって、シリンジ洗浄時に EDDY にて根管洗浄剤の攪拌を行う根管洗浄法 (EDDY 洗浄法) は、根管洗浄剤の到達に効果的であることに加え、根管壁に対する侵襲性の低い根管洗浄法であると考えられる。また以前より、根管洗浄に歯科用レーザーを応用する、レーザー活性化洗浄 (laser-activated irrigation : LAI) が試みられてきたが、さらに近年、従来の LAI よりも効果的な方法として、根管内へ低エネルギー短パルスの Er: YAG レーザーを照射する LAI with low pulse energy and a short pulse (LS-LAI) 法が開発された (12). LS-LAI 法では、低エネルギー短パルスの Er: YAG レーザー照射により、根管洗浄剤の攪拌に加え、真空気泡の形成および崩壊であるキャビテーションが生じる。この真空気泡の崩壊により生じる衝撃波が、スミヤー層を物理的に除去すると考えられている。こうした EDDY 洗浄法や LS-LAI 法は、シリンジ洗浄法よりも高いスミヤー層除去効果を示すことが明らかとなっているが (13, 14)、洗浄時間および根管洗浄剤の使用順序が、EDDY 洗浄法および LS-LAI 法のスミヤー層除去効果および象牙質浸食作用へ及ぼす影響は明らかとなっていない。そこで本研究では、シリンジ洗浄法、EDDY 洗浄法、および LS-LAI 法を行う際に、洗浄時間ならびに根管

洗浄剤の使用順序を変化させ、根管洗浄後のスミヤー層の残存程度および象牙質の浸食程度を比較することで、EDDY 洗浄法および LS-LAI 法における最適な洗浄時間および根管洗浄剤の使用順序を明らかにすることとした。

3. 材料と方法

3-1. 被験歯の作製

3-1-1. 同意取得

本研究は、課題名「根管洗浄によるバイオフィルム除去効果について」にて、九州大学医系地区部局観察研究倫理審査委員会へ人を対象とする医学系研究等実施申請を行い、同委員会の承認 (承認番号: 30-129) を得た上で実施した。くらとみ歯科クリニックを受診し、下顎前歯の抜歯が必要と判断された患者に、本研究に関する説明を行った。説明後、本研究への協力が得られた患者に対し、インフォームドコンセントを取得した上で抜歯を行った。

3-1-2. 根管拡大

被験歯の作製には、同意を取得した患者より得たヒト単根下顎前歯抜去歯 75 本を使用した。全ての抜去歯を、根尖からの長さが 12 mm になるようにセメント—エナメル境付近で水平に切断したのち (Figure. 1A, B)、作業長を 10 mm として Wave One (Dentsply Sirona, USA) を用いて#40 (8%テーパー) まで根管拡大を行った。歯冠部で水平に切断した時点で 2 根管が確認された下顎前歯は、本実験から除外した。根管拡大時における穿通性の確認は, #15K ファイル (MANI 株式会社) にて行い、根管拡大後における作業長の確認は, #40K ファイル (MANI 株式会社) にて行った。

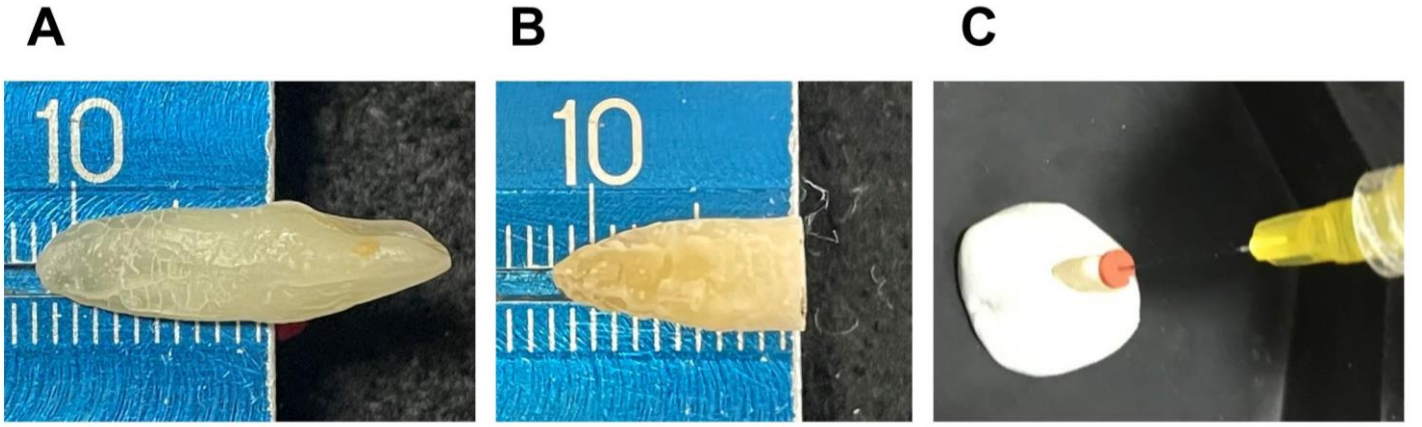

Figure. 1 Preparation and irrigation of incisor samples
(A, B) The teeth were horizontally decoronated at 12 mm from the apex. (C) After root canal preparation, the root was placed in silicone impression material before irrigating the root canal.

3-2. 被験歯における根管洗浄方法

根管拡大を行った被験歯を、ポリビニルシロキサン印象材にて作製した型枠に挿入し直立させたのち、それらの根管を以下の手順にて洗浄した。

3-2-1. シリンジ洗浄法

30G 洗浄針 (日本歯科薬品株式会社) を装着した 3 ml シリンジ (ニプロ株式会社) を用い, 針の先端を作業長から 1 mm 手前まで挿入したのち (Figure. 1C)、17% EDTA (株式会社ビーエスエーサクライ) および 4.5% NaClO (日本歯科薬品株式会社) を各 0.5 ml 灌流させることで根管洗浄を行った。その際、EDTA、NaOCl のいずれも 30 秒間 (Group30)、60 秒間 (Group60)、または 120 秒間 (Group120) 行った。各々の洗浄時間において洗浄液の使用量が 0.5 ml となるように、シリンジからの洗浄液の流出速度を調整した。続いて、無作為に 35 本の被験歯を 5 本ずつ以下の群に分類した。E30N30: EDTA にて 30 秒間洗浄後、NaOCl にて 30 秒間洗浄。N30E30: NaOCl にて 30 秒間洗浄後、EDTA にて 30 秒間洗浄。E60N60: EDTA にて 60 秒間洗浄後、NaOCl にて 60 秒間洗浄。N60E60: NaOCl にて 60 秒間洗浄後、EDTA にて 60 秒間洗浄。E120N120: EDTA にて 120

秒間洗浄後、NaOCl にて 120 秒間洗浄。N120E120: NaOCl にて 120 秒間洗浄後、EDTA にて 120 秒間洗浄。これらの洗浄後に、2 ml の蒸留水にて最終洗浄を行った。また、蒸留水のみで 120 秒間洗浄を行ったものを対照群 (Control) とした。

3-2-2. EDDY 洗浄法

EDDY はエアスケーラー (Ti-Max S970; 株式会社ナカニシ) に装着した。被験歯の根管内を EDTA または NaOCl にて満たし、EDDY の先端を作業長から 1 mm 手前まで挿入したのち、EDDY に音波振動を加えることで根管洗浄を行った。根管洗浄は EDTA、NaOCl のいずれも 30 秒間または 60 秒間行った。各々の洗浄時間において洗浄液の総使用量が 0.5 ml となるように、シリンジからの洗浄液の流出速度を調整した。続いて、無作為に 25 本の被験歯を 5 本ずつ以下の群に分類した。E30N30 with EDDY: EDDY にて EDTA を 30 秒間攪拌後 NaOCl を 30 秒間攪拌。N30E30 with EDDY: EDDY にて NaOCl を 30 秒間攪拌後 EDTA を 30 秒間攪拌。E60N60 with EDDY: EDDY にて EDTA を 60 秒間攪拌後 NaOCl を 60 秒間攪拌。N60E60 with EDDY: EDDY にて NaOCl を 60 秒間攪拌後 EDTA を 60 秒間攪拌。これらの洗浄後に、2 ml の蒸留水にて最終洗浄を行った。また、EDDY にて蒸留水を 60 秒間攪拌したものを対照群 (Control with EDDY) とした。

3-2-3. LS-LAI 法

波長 2.94 μm の Er: YAG レーザー (Erwin AdvErL EVO; 株式会社モリタ製作所) に、先端が平坦型の石英ファイバーチップ (C400F；株式会社モリタ製作所) を装着した (Figure. 2)。EDTA または NaOCl にて被験歯の根管内を満たし、チップの先端を根管口部から 3 mm まで挿入したのち、表示出力 30 mJ、繰り返し速度 10 pps、注水およびエアー無しの設定にて Er: YAG レーザーを照射することで根管洗浄を行った。根管洗浄は EDTA、NaOCl のいずれも 60 秒間行った。各々の洗浄時間において洗浄液の総使用量が 0.5 ml となるように、シリンジからの洗浄液の流出速度を調整した。続いて、無

作為に 15 本の被験歯を 5 本ずつ以下の群に分類した。E60N60 with LS-LAI: 根管内に EDTA を満たした状態で Er: YAG レーザーを 60 秒間照射後、NaOCl を満たした状態で Er: YAG レーザーを 60 秒間照射。N60E60 with LS-LAI: 根管内に NaOCl を満たした状態で Er: YAG レーザーを 60 秒間照射後、EDTA を満たした状態で Er: YAG レーザーを 60 秒間照射。これらの洗浄後に、2 ml の蒸留水にて最終洗浄を行った。また, 根管内に蒸留水を満たした状態で、表示出力 30 mJ、繰り返し速度 10 pps、注水有り、エアー無しの設定にて Er: YAG レーザーを 120 秒間照射したものを対照群 (Control with LS-LAI) とした。

Figure. 2 The image of the fiber tip for Er: YAG laser
LS-LAI was performed by the C400F fiber tip placed into the pulp chamber filled with an irrigation fluid.

3-3. 走査型電子顕微鏡分析

カーバイトバー (#33 1/2; MANI 株式会社) にて、被験歯の歯軸に沿って頬舌的に溝を作製したのち、ペリオトームにて被験歯を割断した。試料を乾燥させた後、割断面に金およびパラジウムを蒸着し、Scanning Electron Microscope (SEM; S-3400N, 日立ハイテクノロジーズ) を使用して、加速電圧 10 kV の条件下にて根管壁表面の観察を行った。各試料の根管壁を歯冠側、中央部、および根尖側に分類して、根管壁表面におけるスミヤー層の残存状態を、Saber らの分類 (13) に準じてスコア化した (Table. 1)。同様に、根管壁表面における象牙質浸食の程度を、Torabinejad らの分類 (8) に準じてスコア化した (Table. 2)。

Table. 1 Scoring for smear layer remaining on the root canal walls

Score	The percentage of smear layer remaining
1	The smear layer is almost absent.
2	Less than 25%.
3	25%-50%
4	50%-75%
5	75%-100%

Table. 2 Scoring for dentinal erosion on the root canal walls

Score	The degree of erosion on the root canal wall
1	No erosion. All tubules looked normal in appearance and size.
2	Moderate erosion. The peritubular dentin was eroded.
3	Severe erosion. The intertubular dentin was destroyed.

3-4. 統計学的分析

各洗浄法後の歯冠側、中央部、および根管壁表面におけるスミヤー層の残存状態ならびに象牙質浸食の程度のスコアに対し、一元配置分散分析および Bonferroni の多重比較法にて統計学的解析を行い、$p<0.05$ を有意差有りとした。

4. 結果

4-1. シリンジ洗浄法後におけるスミヤー層の残存状態

いずれの実験群においても、歯冠側 (Figure. 3A, D, G, J, M, P) および中央部 (Figure. 3B, E, H, K, N, Q) のスミヤー層は大部分が除去されていた。しかしながら、根尖側 (Figure. 3C, F, I, L, O, R) には多量のスミヤー層が残存していた。

Group30 では、E30N30 が N30E30 よりも低いスミヤー層残存スコアを示す傾向にあったが (Table. 3)、歯冠側では有意差が認められたものの、中央部および根尖側では有意差が認められなかった (Table. 3)。

Group60 では、いずれの位置においても、E60N60 および N60E60 のスミヤー層残存スコアに有意差は認められなかった (Table. 3)。

Group120 では、中央部において E120N120 が N120E120 よりも有意に低いスコアを示したが、他の位置では有意差は認められなかった (Table. 3)。

Control では、いずれの位置においても、多量のスミヤー層が残存していた (Figure. 3S-U)。

さらに Group60 および Group120 では、根管洗浄剤の使用順序ならびに根管の位置に関係なく、Group30 よりも低いスミヤー層残存スコアを示す傾向にあった (Table. 3)。一方、Group60 と Group120 の間に有意差は認められなかった (Table. 3)。

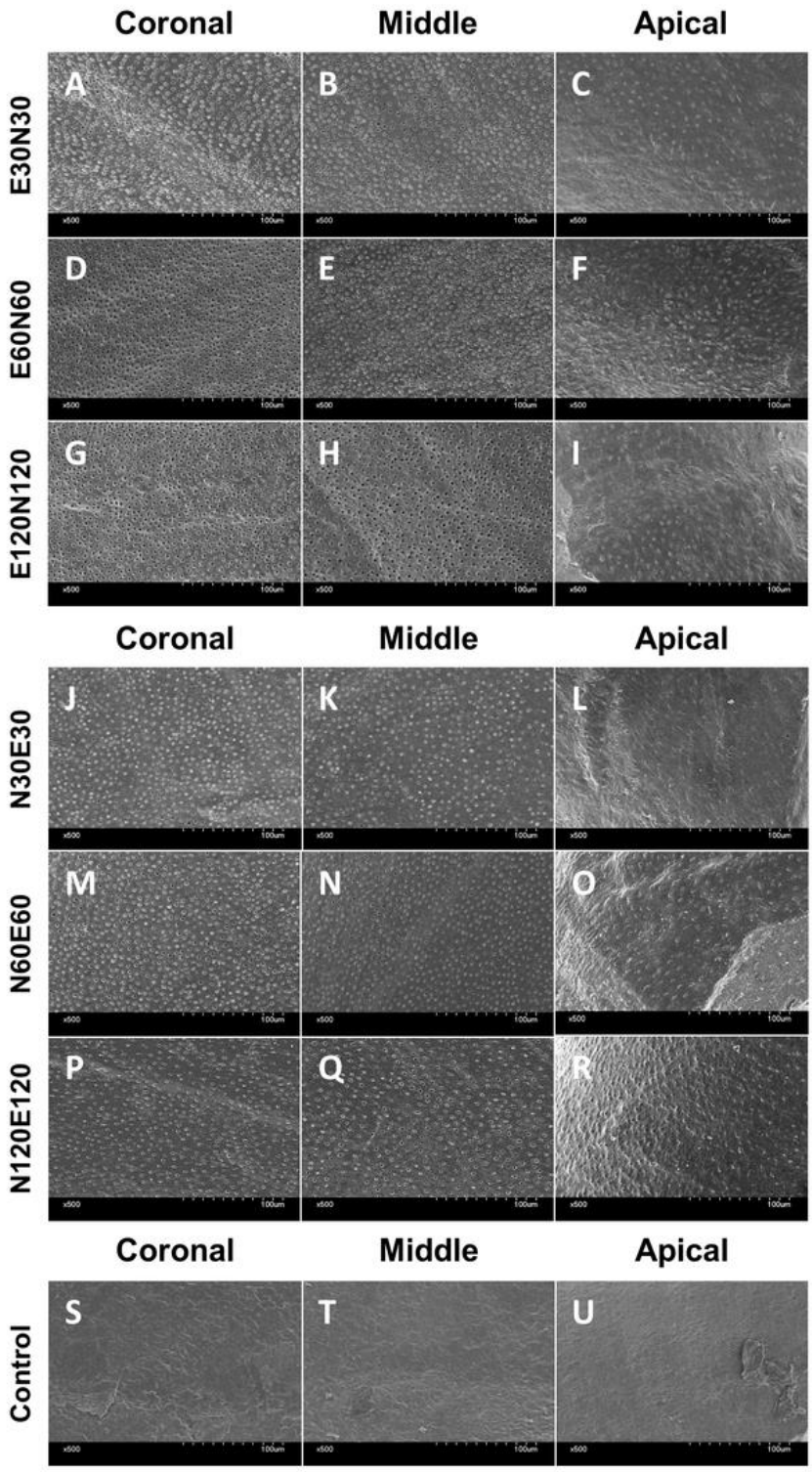

Figure. 3 SEM observation of root canal walls after syringe irrigation

(A–I) SEM images of root canals irrigated with EDTA followed by NaOCl for 30 (A-C), 60 (D-F), or 120 (G-I) seconds in the coronal (A, D, G), middle (B, E, H), and apical (C, F, I) regions. (J–R) SEM images of root canals irrigated with NaOCl followed by EDTA for 30 (J-L), 60 (M-O), or 120 (P-R) seconds in the coronal (J, M, P), middle (K, N, Q), and apical (L, O, R) regions. (S–U) A root canal irrigated with distilled water for 120 s served as a control.

	Coronal	Middle	Apical
E30N30	1.6±0.48 Aa	1.7±0.42 Aa	4.8±0.32 Ab
N30E30	2.4±0.56 Ba	2.3±0.48 ACa	5.0±0.00 Ab
E60N60	1.0±0.00 Aa	1.2±0.32 ADa	4.1±0.90 ACb
N60E60	1.4±0.48 Aa	1.4±0.48 ADa	4.3±0.70 ACb
E120N120	1.2±0.32 Aa	1.2±0.32 ADa	4.1±0.90 ACb
N120E120	1.6±0.60 Aa	1.7±0.70 ACa	3.3±1.30 BCb
Control	5.0±0.00 Ca	5.0±0.00 Ba	5.0±0.00 Aa

Table. 3 Statistical analysis of smear layer removal by syringe irrigation
Different capital letters represent statistical differences in the same region of the root canal ($p < 0.05$).
Different small letters represent statistical differences in the same irrigation sequence and duration.

4-2. EDDY 洗浄法後におけるスミヤー層の残存状態

シリンジ洗浄法における Group60 と Group120 では、スミヤー層の除去効果に差が生じなかったことから、EDDY 洗浄法におけるスミヤー層の除去効果の評価は 30 秒間および 60 秒間にて行った。

いずれの実験群においても、歯冠側 (Figure. 4A, D, G, J) および中央部 (Figure. 4B, E, H, K) のスミヤー層は大部分が除去されていた。さらに、根尖側 (Figure. 4C, F, I, L) においてもスミヤー層の除去が確認された。

Group30 では、根管洗浄剤の使用順序を変化させても、スミヤー層の残存状態に大きな差は認められなかった (Table. 4)。

Group60 では、中央部において、E60N60 with EDDY が N60E60 with EDDY よりも有意に低いスミヤー層残存スコアを示した (Table. 4)。

Control with EDDY では、いずれの位置においても多量のスミヤー層が残存していた

(Figure. 4M-O)。

また中央部においては、E60N60 with EDDY が、E30N30 with EDDY よりも有意に低いスミヤー層残存スコアを示した (Table. 4)。さらに根尖側においては、E60N60 with EDDY および N60E60 with EDDY が、E30N30 with EDDY および N30E30 with EDDY よりも有意に低いスコアを示した (Table. 4)。

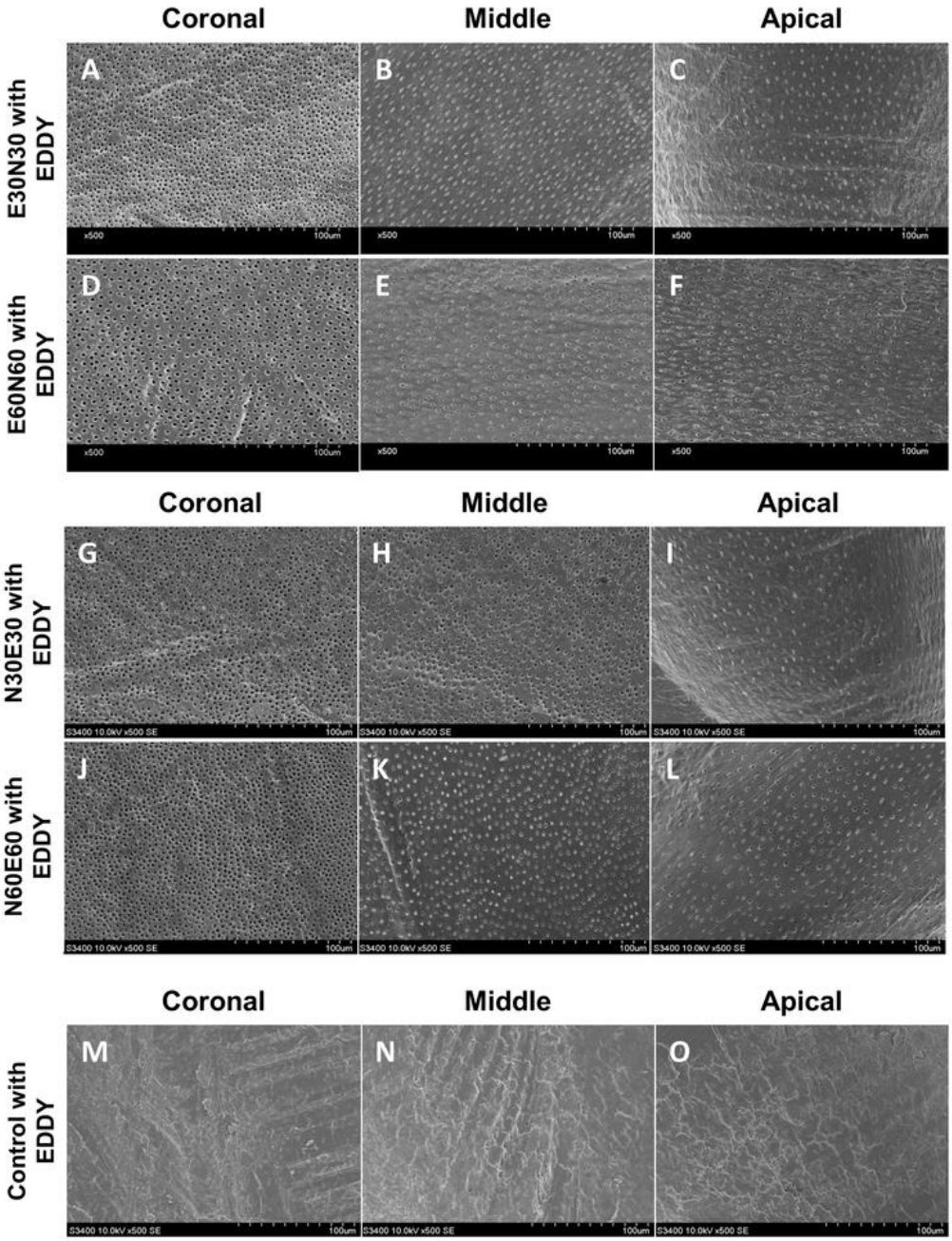

Figure. 4 SEM observation of root canal walls after EDDY irrigation

(A–F) SEM images of root canals irrigated with EDTA followed by NaOCl for 30 (A-C) and 60 (D-F) seconds in the coronal (A, D), middle (B, E), and apical (C, F) regions. (G–L) SEM images of root canals irrigated with NaOCl followed by EDTA for 30 (G-I) and 60 (J-L) seconds in the coronal (G, J), middle (H, K), and apical (I, L) regions. (M–O) A root canal irrigated with distilled water with EDDY for 60 s served as a control.

	Coronal	Middle	Apical
E30N30 with EDDY	1.1±0.18 Aa	1.7±0.56 Aa	4.1±0.54 Ab
N30E30 with EDDY	1.2±0.32 Aa	1.5±0.70 Aa	4.1±0.90 Ab
E60N60 with EDDY	1.0±0.00 Aa	1.0±0.00 Ba	1.9±0.36 Bb
N60E60 with EDDY	1.0±0.00 Aa	1.3±0.42 Aa	2.0±0.60 Bb
Control with EDDY	5.0±0.00 Ba	5.0±0.00 Ca	5.0±0.00 Aa

Table. 4 Statistical analysis of smear layer removal by EDDY irrigation
Different capital letters represent statistical differences in the same region of the root canal ($p < 0.05$). Different small letters represent statistical differences in the same irrigation sequence and duration.

4-3. LS-LAI 法後におけるスミヤー層の残存状態

EDDY 洗浄法において、E60N60 with EDDY および N60E60 with EDDY が、E30N30 with EDDY および N30E30 with EDDY よりも低いスコアを示す傾向にあったことから、LS-LAI 法におけるスミヤー層の除去効果の評価は、60 秒間にて行った。

EDDY 洗浄法と同様に、いずれの実験群においても、歯冠側 (Figure. 5A, D) および中央部 (Figure. 5B, E) のスミヤー層は大部分が除去されており、根尖側 (Figure. 5C, F) においてもスミヤー層の除去が確認された。また歯冠側、中央部、および根尖側のいずれにおいても、E60N60 with LS-LAI と N60E60 with LS-LAI の間に、大きなスミヤー層の残存状態の差は認められなかった (Figure. 5A-F, Table. 5)。

一方、E60N60 with LS-LAI では、根尖部が歯冠側および中央部よりも有意に高いスミヤー層残存スコアを示したが、N60E60 with LS-LAI では、位置による差を認めなかった（Table. 5)。

Control with LS-LAI では、いずれの位置においても多量のスミヤー層が残存していた (Figure. 5G-I)。

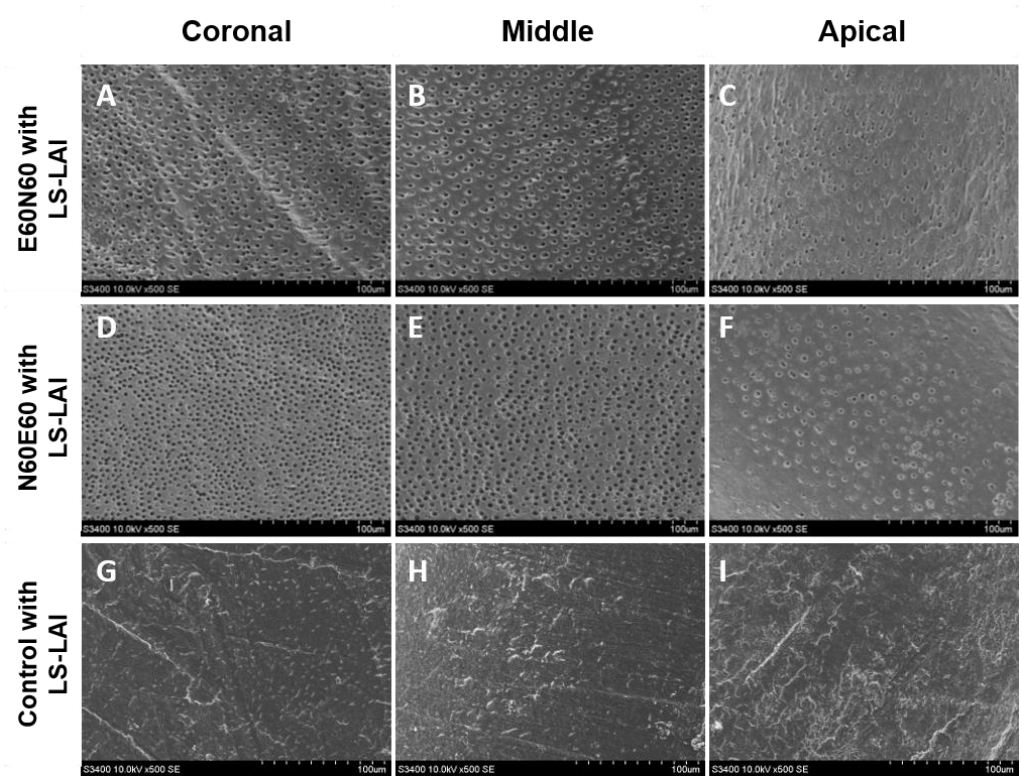

Figure. 5 SEM observation of root canal walls after LS-LAI

(A–C) SEM images of root canals irrigated with EDTA followed by NaOCl for 60 seconds in the coronal (A), middle (B), and apical (C) regions. (D-F) SEM images of root canals irrigated with NaOCl followed by EDTA for 60 seconds in the coronal (D), middle (E), and apical (F) regions. (G–I) A root canal irrigated with distilled water with LS-LAI for 60 s served as a control.

	Coronal	Middle	Apical
E60N60 with LS-LAI	1.0±0.00 Aa	1.0±0.00 Aa	1.7±0.64 Ab
N60E60 with LS-LAI	1.0±0.00 Aa	1.1±0.30 Aa	1.5±0.67 Aa
Control with LS-LAI	4.6±0.49 Ba	4.9±0.30 Ba	5.0±0.00 Ba

Table. 5 Statistical analysis of smear layer removal by LS-LAI

Different capital letters represent statistical differences in the same region of the root canal ($p < 0.05$). Different small letters represent statistical differences in the same irrigation sequence and duration.

4-4. シリンジ洗浄法後、EDDY 洗浄法後、および LS-LAI 法後における象牙質の浸食状態

LS-LAI 法におけるスミヤー層の除去効果の評価を、60 秒間にて行ったことから、シリンジ洗浄法後、EDDY 洗浄法後、および LS-LAI 法後の根管壁における象牙質の浸食状態の評価は、60 秒間洗浄後にて行った。

歯冠側では、シリンジ洗浄法、EDDY 洗浄法、および LS-LAI 法のいずれにおいても、NaOCl を先に使用した方が EDTA を先に使用するよりも低い浸食スコアを示す傾向にあったが、有意差が認められたものは EDDY のみであった (Figure. 6A, D, G, J, M, P, Table. 6)。中央部では、N60E60 with EDDY が E60N60 with EDDY よりも有意に低い浸食スコアを示し、N60E60 with LS-LAI が E60N60 with LS-LAI よりも有意に低い浸食スコアを示したが (Figure. 6H, K, N, Q, Table. 6)、N60E60 は E60N60 よりも低い浸食スコアを示す傾向にあったものの、有意差は認められなかった (Figure. 6B, E, Table. 6)。

根尖部では、いずれの条件においても有意差を認めなかった (Figure. 6C, F, I, L, O, R, Table. 6)。

E60N60、E60N60 with EDDY、E60N60 with LS-LAI 間、ならびに N60E60、N60E60 with EDDY、N60E60 with LS-LAI 間の比較では、歯冠側でのみ N60E60 with EDDY が N60E60 および N60E60 with LS-LAI よりも有意に低い浸食スコアを示したが、他の条件では有意差は認められなかった (Table. 6)。

E60N60、E60N60 with EDDY、E60N60 with LS-LAI のいずれにおいても、歯冠側および中央部が、根尖部よりも有意に高い浸食スコアを示したが、N60E60、N60E60 with EDDY、N60E60 with LS-LAI においては、位置による差を認めなかった (Table. 6)。

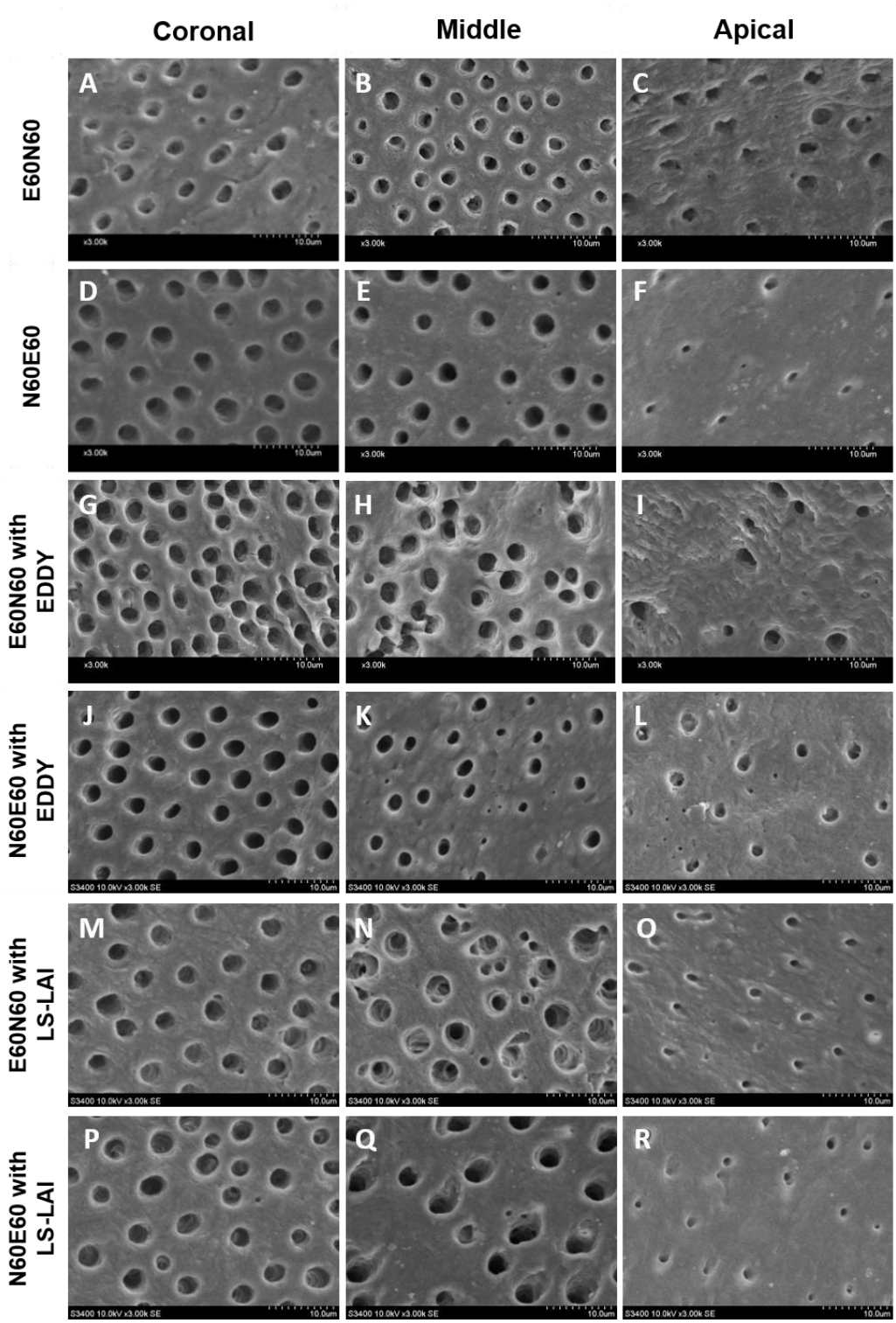

Figure. 6 Higher magnification of SEM images for root canal walls after syringe, EDDY irrigation, and LS-LAI

(A–C) SEM images of root canals irrigated with EDTA followed by NaOCl for 60 seconds in the coronal (A), middle (B), and apical (C) regions. (D-F) SEM images of root canals irrigated with NaOCl followed by EDTA for 60 seconds in the coronal (D), middle (E), and apical (F) regions. (G–I) A root canal irrigated with distilled water with LS-LAI for 60 s served as a control.

	Coronal	Middle	Apical
E60N60	1.9±0.30 Aa	1.6±0.49 Aa	1.1±0.30 Ab
N60E60	1.4±0.49 ACa	1.3±0.46 Aa	1.0±0.00 Aa
E60N60 with EDDY	2.3±0.46 ADa	1.8±0.60 ABa	1.1±0.30 Ab
N60E60 with EDDY	1.0±0.00 Ba	1.1±0.30 ACa	1.1±0.30 Aa
E60N60 with LS-LAI	2.2±0.40 ADa	2.2±0.40 ABa	1.4±0.49 Ab
N60E60 with LS-LAI	1.5±0.65 ACa	1.5±0.50 ACa	1.1±0.28 Aa

Table.6 Statistical analysis of dentinal erosion by syringe, EDDY irrigation, and LS-LAI

Different capital letters represent statistical differences in the same region of the root canal ($p < 0.05$). Different small letters represent statistical differences in the same irrigation sequence and duration.

5. 考察

Figure. 3 および Table. 3 に示すように、シリンジ洗浄法においては、EDTA に続いて NaOCl を使用した方が NaOCl に続いて EDTA を使用するよりもスミヤー層の除去効果が高くなることが明らかとなった。この結果は、EDTA にて 60 秒間シリンジ洗浄後に NaOCl にて 60 秒間シリンジ洗浄を行った場合、NaOCl にて 60 秒間シリンジ洗浄後に EDTA にて 60 秒間シリンジ洗浄を行った場合よりも、根管壁における開口した象牙細管の面積が広くなるという報告と一致する (6)。スミヤー層には細菌、象牙質片、壊死歯髄組織、象牙芽細胞等の有機質ならびに無機質が含まれるが、このうち象牙質は、ハイドロキシアパタイトで覆われた高密度のコラーゲン線維から形成される (15)。そのため、初めに EDTA を作用させることで、象牙質のハイドロキシアパタイトの除去を通じてコラーゲン線維が露出し、続いて NaOCl を作用させることで、有機質である細菌、象牙芽細胞、歯髄組織、コラーゲン線維等が除去されると考えられる。一方、初めに NaOCl を作用させた場合には、スミヤー層内の有機質が除去されるが、象牙質内のコラーゲン線維は象牙質の無機質で保護されるために除去されず、続いて EDTA を作用させたとしても、これらのコラーゲン線維はそのまま残留することとなる。したがって、象牙質に由来するコラーゲン線維の残留量の差が、EDTA および NaOCl の使用順序によってスミヤー層の除去効果に差が生じた原因の一つと推察される。

EDTA は、60 秒間以上作用させた場合に、高いスミヤー層の除去効果を示すことが報告されており (9)、本研究においても Figure. 3 および Table. 3 に示すように、EDTA および NaOCl を 60 秒間ならびに 120 秒間作用させた方が、30 秒間作用させた場合よりもスミヤー層残存スコアが低くなった。しかしながら、この結果は歯冠側および中央部のみのものであり、根尖側においては作用時間に関係なく多量のスミヤー層が残存していた。根尖側のスミヤー層の除去には、EDTA および NaOCl の攪拌が有効であることが報告されており (11)、本研究においても Figure. 4 および Table. 4 に示すように、EDDY にて EDTA および

NaOCl を各 60 秒間攪拌することで、歯冠側から根尖側までのスミヤー層の除去が可能となった。一方 Plotino らは、EDDY にて根管洗浄剤を 60 秒間攪拌しても、根尖側に多くのスミヤー層が残存することを報告している (16)。このような相違が生じた原因として、被験歯に対する根管拡大法の違いが挙げられる。Plotino らは、HyFlex CM を使用し#20 (6%テーパー) または#25 (6%テーパー) まで根管拡大を行ったが、本研究では Wave One を使用し#40 (8%テーパー) まで根管拡大を行った。EDDY 先端の直径は 0.2 mm であり、振幅は 160 μm であることから、EDDY を作業長から 1 mm 手前まで挿入し、根管壁に接触することなく振動させるためには、少なくとも 0.2 mm + 0.16 mm = 0.32 mm の空隙が必要となる。しかしながら、#20 (6%テーパー) または#25 (6%テーパー) の根管拡大では、作業長から 1 mm 手前における根管の直径はそれぞれ 0.2 mm + 0.06 mm = 0.26 mm、0.25 mm + 0.06 mm = 0.31 mm となることから、EDDY を振動させると根管壁に接触することとなる。そのため、Plotino らの条件では、EDDY を使用しても EDTA および NaOCl が十分に攪拌されず、結果として根尖側に多くのスミヤー層が残存したと考えられる。一方、本研究で用いた#40 (8%テーパー) の条件では、作業長から 1 mm 手前における根管の直径は 0.4 mm + 0.08 mm = 0.48 mm となる。したがって、EDDY の振動に十分な空隙が得られた結果、EDDY 使用時に EDTA および NaOCl が十分に攪拌されたため、高いスミヤー層の除去効果が得られたと考えられる。

LS-LAI 法では、レーザーの照射によりチップ先端周囲に真空気泡が発生し、その崩壊による衝撃波が発生することに加え、短パルス照射によりチップから前方に向かう高速の水流が発生する (17)。この衝撃波および高速水流により、高い根管洗浄効果が得られると考えられており、本研究においても Figure. 5 および Table. 5 に示すように、EDTA および NaOCl を使用した LS-LAI 法は、歯冠側および中央部に加え根尖側においても高いスミヤー層除去効果を示した。一方、蒸留水を使用して LS-LAI 法を行った Control + LS-LAI では、多量のスミヤー層が残存していた。蒸留水を満たした模擬根管内に Er: YAG レーザーを照射した場合にも、真空気泡の発生および崩壊は生じることが報告されていることから

(18)、Control + LS-LAI においても、真空気泡の発生および崩壊に由来する衝撃波が発生していたと考えられるが、スミヤー層の大部分は除去されなかった。したがって本研究で用いた LS-LAI 法では、真空気泡の崩壊に由来する衝撃波はスミヤー層の除去にほとんど影響を及ぼさず、主に高速水流による根管洗浄剤の攪拌がスミヤー層の除去効果向上に寄与したと推察される。また本研究では、LS-LAI 法時に挿入するチップの先端を根管口から 3 mm の位置に設定した。従来の LAI 法では、根尖側において高い洗浄効果を得るため、直径の小さいチップを使用し、その先端を根尖孔近くに挿入していた (19)。しかしながら、根尖付近でのレーザー照射は、根管洗浄剤を根尖孔外へと溢出させてしまう危険性があり、さらに根未完成歯や歯根吸収によって根尖孔が開大した歯では溢出の危険性が増大する (20)。そこで、近年では直径の大きいチップ使用し、その先端を根管口付近に挿入した状態でレーザーを照射する LAI 法が推奨されている (21)。この方法では、チップの挿入深度を浅くすることで、レーザー照射時に根管洗浄剤が根尖孔外へと溢出する危険性を低減できるほか、チップの破折や根管壁の削合といった偶発症の発生を予防することもできる。さらに本研究では、LS-LAI 法を行う際の Er: YAG レーザーの出力を 30 mJ に設定した。チップの先端から根尖までの距離に加え、レーザーの出力が根尖部の流体圧力に影響を及ぼすことが報告されており (22)、低エネルギーの LS-LAI では、高エネルギーの挿入深度の LS-LAI と比較して、根尖付近における根管洗浄剤の流体圧力が減少すると考えられる。しかしながら、20~50 mJ の低エネルギーにて LS-LAI を行った場合でも、根尖側のスミヤー層に対して高い除去効果が得られることが報告されていることから (23)、低エネルギーの LS-LAI においても、根尖付近に高速水流による根管洗浄剤の攪拌が十分に生じていると考えられる。したがって、本研究で使用した「エネルギー値 30 mJ およびチップの先端を根管口から 3 mm に位置」という条件での LS-LAI は、根管洗浄剤が根尖孔外へと溢出する危険性を低減しながら、根管全体に対し高いスミヤー層除去効果を得ることのできる根管洗浄方法であると推察される。

EDTA の長期作用により発生する象牙質浸食は、象牙質の曲げ強度および微小硬度を低

下させるほか (24)、重度の場合には垂直性歯根破折の原因となる可能性が示唆されている (25)。本研究では、Figure. 6 および Table. 6 に示すように、歯冠側においてシリンジ洗浄法、EDDY 洗浄法、および LS-LAI 法のいずれにおいても、E60N60 が N60E60 よりも有意に高い浸食スコアを示した。さらに中央部においても、EDDY 洗浄法および LS-LAI 法では E60N60 が N60E60 よりも有意に高い浸食スコアを示した。この結果は、EDTA を 60 秒間作用させた後に NaOCl を 60 秒間作用させた方が、NaOCl を 60 秒間作用させた後に EDTA を 60 秒間作用させた場合よりも、スミヤー層の除去効果は高くなる一方、象牙質浸食が生じる危険性も増すことを示唆するものである。興味深いことに、N60E60 with EDDY および N60E60 with LS-LAI においては、高いスミヤー層除去効果が認められたにも関わらず、歯冠側、中央部、および根尖部のいずれにおいても、象牙質浸食が少なかった。さらに歯冠部においては、N60E60 with EDDY が N60E60 with LS-LAI よりも、有意に低い浸食スコアを示した。EDDY と象牙質浸食の関係性を検証した報告は行われていないため、N60E60 with EDDY において象牙質浸食が少なかった理由は、現在のところは不明確である。一方 LS-LAI 法においては、17% EDTA 存在下にて 40 秒間行った場合に、象牙質に浸食が認められたとの報告がある (23)。本研究でも 17% EDTA を使用しており、さらに 60 秒間作用させていることから、N60E60 with LS-LAI では、この報告の結果以上に浸食が生じた可能性がある。

これらの結果から、N60E60 with EDDY は高いスミヤー層の除去効果を示す一方、シリンジ洗浄法および LS-LAI 法よりも象牙質への浸食作用は低い洗浄法であることが示唆された。しかしながら、本研究では EDTA および NaOCl を各 60 秒間作用させた条件下での象牙質浸食に関して検証を行ったのみである。そのため、今後様々な条件下において EDDY 洗浄法および LS-LAI 法を行ったのち、それらの浸食スコアについて解析を行うことで、EDDY 洗浄法および LS-LAI 法が象牙質浸食の発生に及ぼす影響について明らかにする計画である。

6. 総括

本研究では、EDDY 洗浄法および LS-LAI 法が、高いスミヤー層除去効果および低い象牙質浸食作用を示す条件を明らかにすることを目的とした。被験歯に対し、EDTA ならびに NaOCl の作用時間および使用順序を変化させてシリンジ洗浄法、EDDY 洗浄法、および LS-LAI 法を行ったのち、根管壁表面のスミヤー層の残存状態および象牙質の浸食程度について評価を行った。以下のように総括する。

1. シリンジ洗浄法では、歯冠側および中央部のスミヤー層はある程度されるが、EDTA ならびに NaOCl の作用時間および使用順序を変化させても、根尖側のスミヤー層はほとんど除去されない。
2. EDDY 洗浄法および LS-LAI 法では、EDTA ならびに NaOCl を各 60 秒間ずつ作用させると、歯冠側および中央部に加え、根尖側のスミヤー層も除去される。
3. EDDY 洗浄法および LS-LAI 法では、NaOCl を 60 秒間作用させた後に EDTA を 60 秒間作用させる方が、EDTA を 60 秒間作用させた後に NaOCl を 60 秒間作用させる場合よりも、象牙質浸食が少ない。
4. NaOCl を 60 秒間作用させた後に EDTA を 60 秒間作用させる条件では、EDDY 洗浄法後に生じる象牙質浸食は、シリンジ洗浄法後および LS-LAI 法後に生じる象牙質浸食よりも少ない。
5. スミヤー層の除去および象牙質浸食作用の観点から、NaOCl を 60 秒間作用させた後に EDTA を 60 秒間作用させる EDDY 洗浄法が、今回の実験条件の中で最適であると示唆された。

7. 謝辞

本研究は、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 前田 英史教授の御指導のもとに行われたものであり、先生の懇篤な御指導、御助言、ならびに御校閲に深く感謝致します。本研究を遂行するにあたり終始御指導を賜りました九州大学病院歯内治療科 友清 淳診療准教授に深甚なる謝意を表します。さらに実験手法の御指導及び御助言を賜りました吉田 晋一郎助教に厚く感謝致します。最後に、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、ならびに九州大学病院歯内治療科医局員の皆様に心より御礼申し上げます。

8. 参考文献

1. Peters OA, Barbakow F. Effects of irrigation on debris and smear layer on canal walls prepared by two rotary techniques: a scanning electron microscopic study. J Endod, 35: 6-10, 2000.
2. White RR, Goldman M, Lin PS. The influence of the smeared layer upon dentinal tubule penetration by endodontic filling materials. Part II. J Endod, 13: 369-374, 1987.
3. Konstantinidi E, Psimma Z, Chavez de Paz LE, Boutsioukis C. Apical negative pressure irrigation versus syringe irrigation: a systematic review of cleaning and disinfection of the root canal system. Int Endod J, 50: 1034-1054, 2017.
4. Goldman M, Goldman LB, Cavaleri R, Bogis J, Lin PS. The efficacy of several endodontic irrigating solutions: a scanning electron microscopic study: Part 2. J Endod, 8: 487-492, 1982.
5. Yamada RS, Armas A, Goldman M, Lin PS. A scanning electron microscopic comparison of a high volume final flush with several irrigating solutions: Part 3. J Endod, 9: 137-142, 1983.
6. Qian W, Shen Y, Haapasalo M. Quantitative analysis of the effect of irrigant solution sequences on dentin erosion. J Endod, 37: 1437-1441, 2011.
7. Teixeira CS, Felippe MC, Felippe WT. The effect of application time of EDTA and NaOCl on intracanal smear layer removal: an SEM analysis. Int Endod J, 38: 285-290, 2005.
8. Torabinejad M, Cho Y, Khademi AA, Bakland LK, Shabahang S. The effect of various concentrations of sodium hypochlorite on the ability of MTAD to remove the smear layer. J Endod, 29: 233-239, 2003.
9. Cergneux M, Ciucchi B, Dietschi JM, Holz J. The influence of the smear layer on the sealing ability of canal obturation. Int Endod J, 20: 228-232, 1987.
10. Niu W, Yoshioka T, Kobayashi C, Suda H. A scanning electron microscopic study of dentinal erosion by final irrigation with EDTA and NaOCl solutions. Int Endod J, 35: 934-939, 2002.
11. Rodig T, Dollmann S, Konietschke F, Drebenstedt S, Hulsmann M. Effectiveness of different

irrigant agitation techniques on debris and smear layer removal in curved root canals: a scanning electron microscopy study. J Endod, 36: 1983-1987, 2010.

12. Olivi G, DiVito E. Photoacoustic endodontics using PIPS: experimental background and clinical protocol. J Laser Health Acad, 1: 22-25, 2012.
13. Saber Sel D, Hashem AA. Efficacy of different final irrigation activation techniques on smear layer removal. J Endod, 37: 1272-1275, 2011.
14. Arslan H, Capar ID, Saygili G, Gok T, Akcay M. Effect of photon-initiated photoacoustic streaming on removal of apically placed dentinal debris. Int Endod J, 47: 1072-1077, 2014.
15. Di Renzo M, Ellis TH, Sacher E, Stangel I. A photoacoustic FTIRS study of the chemical modifications of human dentin surfaces: II. Deproteination. Biomaterials, 22: 793-797, 2001.
16. Plotino G, Ozyurek T, Grande NM, Gundogar M. Influence of size and taper of basic root canal preparation on root canal cleanliness: a scanning electron microscopy study. Int Endod J, 52: 343-351, 2019.
17. Arslan D, Kustarci A. Efficacy of photon-initiated photoacoustic streaming on apically extruded debris with different preparation systems in curved canals. Int Endod J, 26: 65-72, 2018.
18. 高野 晃, 渡辺 聡, 八尾 香奈子, 佐竹 和久, 興地 隆史. Er:YAG レーザーを用いた根管洗浄時に生じる根管内蒸気泡および根尖孔外に発生する圧力の挙動 −チップ形態および照射時間による影響−. 日本レーザー歯学会誌, 30: 57-62, 2020.
19. Blanken J, De Moor RJ, Meire M, Verdaasdonk R. Laser induced explosive vapor and cavitation resulting in effective irrigation of the root canal. Part 1: a visualization study. Lasers Surg Med, 41: 514-519, 2009.
20. 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.
21. DiVito E, Peters OA, Olivi G. Effectiveness of the erbium:YAG laser and new design radial and stripped tips in removing the smear layer after root canal instrumentation. Lasers Med Sci, 27: 273-280, 2012.

22. Peeters HH, De Moor RJ. Measurement of pressure changes during laser-activated irrigant by an erbium, chromium: yttrium, scandium, gallium, garnet laser. Lasers Med Sci, 30: 1449-1455, 2015.
23. Do QL, Gaudin A. The Efficiency of the Er: YAG Laser and PhotonInduced Photoacoustic Streaming (PIPS) as an Activation Method in Endodontic Irrigation: A Literature Review. J Lasers Med Sci, 11: 316-334, 2020.
24. Zhang K, Kim YK, Cadenaro M, Bryan TE, Sidow SJ, Loushine RJ, Ling JQ, Pashley DH, Tay FR. Effects of different exposure times and concentrations of sodium hypochlorite/ethylenediaminetetraacetic acid on the structural integrity of mineralized dentin. J Endod, 36: 105-109, 2010.
25. Mai S, Kim YK, Arola DD, Gu LS, Kim JR, Pashley DH, Tay FR. Differential aggressiveness of ethylenediamine tetraacetic acid in causing canal wall erosion in the presence of sodium hypochlorite. J Dent, 38: 201-206, 2010.