



Title	高周波電流によるファイル未接触根管の焼灼
Author(s)	熊谷, 広道
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(歯学)
Dissertation Number	甲第13863号
Issue Date	2020-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k13863
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/94359
Type	doctoral thesis
File Information	Hiromichi_Kumagai.pdf



博 士 論 文

高周波電流によるファイル未接触根管の焼灼

令和2年3月申請

北海道大学
大学院歯学研究科口腔医学専攻

熊 谷 広 道

抄録

高周波電流は古くから電気メスとして軟組織の切開や止血などに応用され、根管治療では通常の機械的、化学的拡大清掃が困難な部位への殺菌に用いられてきた。しかし、通電による根管象牙質への影響、形態変化についての報告は少ない。本研究では、能動電極の接触しない部位に対する影響について検討を行った。

実験 1 として、牛歯より作製した象牙質ブロックに約 100 μm の間隙を作り、フィンやイスムスを想定した間隙モデルとした。能動電極として #20 K ファイルを用い、通電条件は周波数 520kHz、duty70%で、電圧は 150V または 225V、通電時間は 1 秒または 5 秒とし、間隙入り口に能動電極を接触させ通電した（各群 n=5）。通電後、間隙面を走査型電子顕微鏡（SEM）で観察し、象牙質の陥凹、粗造部の範囲を測定した。実験 2 として、厚さ 1mm の象牙質ブロックに #10 エンジンリーマーを用いて模擬根管を形成し、ブロック周囲に高さ 3 mm 程度の隔壁を作製後、Plank-Rychlo 溶液で 5 分間処理して根管壁に脱灰層を作製、根管モデルとした。能動電極には #50 K ファイルを用い、通電条件は周波数 520 kHz、duty 70%、電圧は 150V または 225V、通電時間は 0 秒、1 秒、5 秒とした。隔壁内および模擬根管内は生理食塩液または 10% 次亜塩素酸ナトリウムを満たし、能動電極を模擬根管から 1 mm 以上離して通電した（各群 n=6）。通電後模擬根管に平行に象牙質ブロックを切断し、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡観察、元素分析を行った。

実験 1 ではファイル接触部位の象牙質に陥凹が形成され、その周囲に鱗状となった粗造部が観察された。象牙質の陥凹部および粗造部は、出力や通電時間の増加に伴って大きくなり、225V、5 秒通電では 660 μm に及んだ。実験 2 では、根管壁の変色の範囲が出力や通電時間の増加にともなって拡大し、SEM 観察でも、出力、通電時間の増加に伴い無構造な脱灰面の割合は減少して、象牙細管の露出面や象牙質の溶融凝固面が多く観察され、生理食塩液より NaClO の方が溶融凝固面は多くなった。元素分析では出力、通電時間の増加に伴い

Ca 強度の上昇した部位が増え、NaClO 群でより顕著であった。

以上の結果より、イスマスやフィンなどファイルの接触は可能だが切削が困難な部位での殺菌に有効な可能性が示唆された。また能動電極と接触しない模擬根管の焼灼が可能であり、レッジやステップなどでファイルが到達不可能な未穿通根管などが殺菌できる可能性が示唆された。

本文

【緒言】

根尖性歯周炎の治療において、適切な根管治療を行うことで約 90%は治癒すると報告¹⁻³⁾されているが、根管の閉塞、レジ、ステップなどによりファイルが根尖まで穿通できない症例では治療成績が低下する。Sjögren ら⁴⁾の報告では根尖部エックス線透過像を有する初発症例で、根尖まで穿通できた症例は 90%の成功率を示したのに対し、非穿通症例では 69%に低下している。感染根管治療は、根管内の細菌やその産生物などの病原因子を除去することにより根尖病変が治癒するが、ファイルが根尖まで穿通できない場合、根尖付近の根管内に病原因子が残存するために成功率が低下すると考えられる。根管の病原因子除去には根管の機械的拡大に加え、NaClO による根管洗浄、水酸化カルシウムの貼薬等の化学的根管清掃が有効である^{5,6)}が、それでも根管内の完全な無菌化を達成することは難しいとされている⁷⁾。さらにファイルが穿通できない場合、ファイル未到達部分の根管は細く複雑な構造になっていると考えられ、洗浄、貼薬の効果は及ばにくいと思われる。

高周波電流はチップの発熱を利用して電気メスとして古くから軟組織の切開や止血、ジヤテルミー療法に臨床で用いられている^{8,9)}。根管内を高周波電流で殺菌する方法も古くから行われており¹⁰⁾、臨床成績の向上も報告されている¹¹⁻¹³⁾。根管内では、電極先端と根管壁との接触抵抗⁹⁾による発熱を利用して、イスマスやフィンなどファイルは接触できるが切削が難しい部位の殺菌に有効と考えられる。しかし、電極先端でどの程度の発熱が起こり、象牙質にどのような変化を生じるかは十分に解明されていない。

また、根管内に電流を通電した場合に生じる発熱は、電極と根管壁の接触抵抗で生じるほか、根管が狭くなっている根尖狭窄部や側枝ではインピーダンスが大きくなって熱エネルギーが増大し^{14,15)}、ジュール熱が生じて大きな温度上昇が得られる可能性がある。すなわち、レジやステップなどでファイルが到達できない根尖部根管が細いと、高周波電流

の電流密度が上昇して発熱し、根管を焼灼できるのではないかと考えられる。

そこで本研究は、まずウシ象牙質から作製した間隙モデルおよび模擬根管モデルを用いて、高周波電流の通電が象牙質面にどのような変化を及ぼすかを明らかにする目的で行った。

【材料および方法】

実験 1. 象牙質間隙における通電効果

1. 間隙モデルの作製

冷凍保存したウシ抜去歯の歯根象牙質よりタービンとダイヤモンドポイントを用いて厚さ 1 mm の象牙質ブロックを作製し、#2000 の耐水研磨紙で表面を研磨した。2 つのブロックの間に約 100 μm のアルミホイルを挟んで即時重合レジン（トレーレジン II 株式会社松風）を用い両端を固定後、アルミホイルを除去した。光学顕微鏡にて間隙幅を確認し間隙モデルとした。

2. 高周波電流の通電

間隙モデルの上面、下面、間隙部を生理食塩液に浸漬し、能動電極は#20K ファイル（マニー）を用い、上面と間隙面との隅角部にファイルを接触させ高周波発生装置（モリタ製作所）を用いて以下の条件で通電を行った。周波数は 520kHz、duty 70% で、電圧は 150V または 225V、通電時間は 1 秒、5 秒とした（各群 n=5）（図 1）。

3. 走査型電子顕微鏡観察

通電後固定していたレジンを除去し自然乾燥後、イオンスパッター（E1030、日立製作所）にて白金 - パラジウム蒸着を行い、走査型電子顕微鏡（S4800、日立製作所）にて間隙面を観察し、象牙質の陥凹部の幅（①）と粗造部の幅（②）、陥凹部の長さ（③）、粗造部の長

さ (④) を測定した (図 2)。

実験 2. 非接触根管における通電効果

1. 根管モデルの作製

冷凍保存したウシ抜去歯の歯根象牙質よりタービンとダイヤモンドポイントを用いて厚さ 1mm の象牙質ブロックを 54 個作製し、#2000 の耐水研磨紙で表面を研磨した。次に象牙質ブロック周囲に高さ約 3mm の隔壁をポリプロピレンのチューブと 4-META/MMA-TBB レジン (スーパーボンド、サンメディカル株式会社) を用いて作製した。さらに #10 エンジンリーマー (マニー) にて象牙質ブロックを穿通し直径約 0.1 mm の模擬根管を作製後、Plank-Rychlo 溶液で 5 分間脱灰を行い模擬根管壁に脱灰層を作製した (図 3)。

2. 高周波電流の通電

象牙質ブロック下面は生理食塩液に浸漬し、上面の隔壁内には生理食塩液または 10% NaClO を約 1mm の高さまで満たした。能動電極は #50K ファイル (マニー) を用い、模擬根管から 1mm 以上離れた象牙質ブロック上面にファイルを接触させ、高周波発生装置 (モリタ製作所) を用いて周波数 520kHz、duty70%、電圧 150V または 225V、通電時間 0 秒、1 秒、5 秒で高周波電流を通電した。通電しないコントロールは 10% NaClO を満たして 10 秒後に水洗した (各群 n=6)。通電後象牙質ブロックをマイセル、マレットを用いて模擬根管に対して平行に切断した (図 4)。

3. 光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡観察、元素分析

切断した象牙質ブロックを自然乾燥し、模擬根管部を光学顕微鏡にて観察、根管壁の変色状態を象牙質色、茶褐色、黒変の 3 つに分類し、模擬根管の上部、中央、下部の 3 カ所で評価した (図 5)。

その後イオンスパッター（E1030、日立製作所）にて白金 - パラジウム蒸着を行い走査型電子顕微鏡（S4800 日立製作所）にて加速電圧 5.0KV で根管壁を観察した。根管壁の形態を無構造な脱灰面、象牙細管露出面、溶岩状の熔融凝固面の 3 つに分類し（図 6）、模擬根管の上部、中央、下部の 3 カ所で評価した。また走査型電子顕微鏡（S2380N、日立製作所）にて根管壁の元素分析を行い、根管壁の EDS によるスペクトルのパターンから健全、脱灰、炭化の 3 つに分類し（図 7）、模擬根管の上部、中央、下部の 3 カ所で評価した。

【結果】

実験 1．象牙質間隙における通電効果

光学顕微鏡による間隙モデルの間隙幅は $106.9 \pm 9.35 \mu\text{m}$ であった。

隅角部の陥凹部幅（①）、隅角部の粗造部（②）、間隙面の陥凹部（③）、間隙面の粗造部（④）をそれぞれ計測した（図 8）。150V、1 秒通電では① $81.4 \pm 31.4 \mu\text{m}$ 、② $99.4 \pm 39.0 \mu\text{m}$ 、③ $36.7 \pm 14.9 \mu\text{m}$ 、④ $48.1 \pm 22.0 \mu\text{m}$ であった。150V 5 秒通電では① $152.5 \pm 56.1 \mu\text{m}$ 、② $188.0 \pm 79.8 \mu\text{m}$ 、③ $97.0 \pm 50.1 \mu\text{m}$ 、④ $119.0 \pm 61.3 \mu\text{m}$ であった。225V 1 秒通電では① $192.0 \pm 25.5 \mu\text{m}$ 、② $216.0 \pm 20.7 \mu\text{m}$ 、③ $128.0 \pm 31.7 \mu\text{m}$ 、④ $136.8 \pm 26.1 \mu\text{m}$ であった。225V 5 秒通電では① $330.6 \pm 91.1 \mu\text{m}$ 、② $353.0 \pm 128.3 \mu\text{m}$ 、③ $304.5 \pm 195.3 \mu\text{m}$ 、④ $323.1 \pm 192.2 \mu\text{m}$ であった。

実験 2．非接触根管における通電効果

1．光学顕微鏡所見

切断した模擬根管壁は、コントロール群ではいずれも変色はなく象牙質色であった（図 9a）。生理食塩液群では、150V では 1 秒、5 秒通電のいずれでも根管壁の変色は認めなかった（図 9b, c）。225V、1 秒通電群では根管壁の一部に茶褐色の変色が見られた（図 9d）。5

秒通電では根管全体に茶褐色の変色が見られるものが多かったが、一部には黒変が見られた（図 9e）。10% NaClO 群では 150V、1 秒通電では大部分に変色は見られず、一部に黒変が見られるのみであった（図 9f）。150V、5 秒通電では変色がみられない部分が多かったが、一部に茶褐色あるいは黒変が見られた（図 9g）。225V、1 秒通電では黒変した部位が多く（図 9h）、225V、5 秒通電では根管全体が黒変したものがほとんどであった（図 9i）。生理食塩液群、10% NaClO 群とも、変色した部位に模擬根管の上部や下部など一定の傾向は見られず、10% NaClO 群では生理食塩液群より黒変する部位が多く観察された（図 10）。

2. 走査型電子顕微鏡所見

切断した模擬根管壁は、コントロール群では根管上部、中央、下部でいずれも無構造な脱灰面が観察された（図 11a）。生理食塩液群では 150V、1 秒通電では大部分が無構造な脱灰面（図 11b）であり一部に象牙細管の露出を認める程度であった。150V、5 秒通電では象牙細管の露出が認められる部分が多くなった（図 11c）。225V、1 秒通電では無構造な脱灰面は減少し、象牙細管の露出面や溶融凝固面が観察された（図 11d）。225V、5 秒通電では根管の大部分に象牙質の溶融凝固が観察された（図 11e）。10% NaClO 群では 150V、1 秒通電（図 11f）、5 秒通電（図 11g）で、共に根管の大部分に象牙細管の露出がみられ、一部に象牙質の溶融凝固が認められた。225V、1 秒通電では大部分で溶融凝固面が観察され、一部で亀裂や鱗状の形態変化が観察された（図 11h）。225V、5 秒通電ではさらに多くの部位で同様の形態変化が観察された（図 11i）。

象牙細管の露出や象牙質の溶融凝固などの形態変化が現れる部位は根管の上部、中央、下部でばらつきが見られ、一定の傾向は示さなかった。また、電圧の上昇、通電時間の増加に従い脱灰面の割合は減少し、生理食塩液群よりも 10%NaClO 群で象牙細管露出面や溶融凝固面が多く観察された（図 12）。

3. 元素分析

切断した模擬根管の元素分析では、コントロール群は根管上部、中央、下部で健全象牙質と比較し Ca 強度の低下を認めた。生理食塩液群では、150V、1 秒通電では一部で Ca の強度の上昇を認めたが、コントロール群と同様の Ca の強度の低下が見られた部位が多かった（図 13）。また、150V、5 秒通電では 1 秒通電と比較して Ca 強度の上昇した部位が増加した。225V、1 秒通電では 150V と比較してより多くの部位で Ca 強度の上昇を認め、5 秒通電でさらに増加した。10% NaClO 群では 150V、1 秒通電で Ca 強度の上昇が根管の大部分に認められ、5 秒通電でも同様の傾向であった。225V 通電では 1 秒、5 秒通電のいずれも Ca 強度の上昇が大部分で認められた。

生理食塩液群と比較し 10% NaClO 群でより Ca 強度の上昇した部位が多く、電圧が高く、通電時間が長い方が Ca 強度の上昇した部位が多くなった。C の強度が強い炭化面はいずれの実験群にもみられなかった。

【考察】

1920 年代の Klein¹⁶⁾による高周波電流の根管内への応用以降、高周波電流による歯髄の凝固¹⁷⁾や殺菌作用¹⁰⁾、組織再生促進作用¹⁸⁾などについて種々の研究がなされており、近年では富永ら¹²⁾により高周波電流による非外科的歯内療法 EMAT(Electro-Magnetic Apical Treatment)などが報告され臨床成績も向上している。しかし、高周波電流を根管内に応用した際の象牙質面にどのような性状変化が起きているかについての報告は少ない。そのため、今回の研究では高周波電流を象牙質に通電した場合について、能動電極の接触部位の過熱による影響と、能動電極の接触しない模擬根管でそれぞれどのような形態変化が起きるか、またその影響範囲について検討を行った。

まず実験 1 として高周波電流を応用した際の能動電極の過熱による影響がどの程度の範

囲に及ぶか検討した。イスマスやフィンなどの狭い間隙を想定し、間隙幅を一定にする目的で、研磨した象牙質片の間にアルミホイルを挟んで固定し実験モデルを作製した。間隙幅を計測した結果、ばらつきは少なく実験が一定の条件で行えたと考えられた。能動電極は間隙に入らないよう、さらに能動電極と象牙質面との接触面積が小さいほど接触抵抗が大きくなり効果的な発熱が得られると考えられることから、#20K ファイルを用いた。間隙内への導電性を確保するために、間隙には生理食塩液を満たして通電を行った。

研磨した象牙質面に能動電極(K ファイル)を接触させて通電を行いSEM観察したところ、ファイルが接触している象牙質面は陥凹し、その周囲に象牙質が鱗状に粗造となった面が観察された。これは高周波電流の通電により、能動電極先端で電流密度が集中し熱エネルギーに変換されジュール熱が導出されたためと考えられた。この熱による象牙質変性、形態変化はNd-YAG レーザーや炭酸ガスレーザーなどを照射した場合に類似しており¹⁹⁻²¹⁾、象牙質が溶融、凝固したと考えられた。ハイドロキシアパタイトの融点は1650℃とされており²²⁾、ファイル接触部位ではきわめて高い発熱が生じていたと考えられる。通電による象牙質の陥凹、粗造部の深度は出力、通電時間の増加に比例して大きくなり、225V 5 秒通電した場合では最大 660 μm 程度まで象牙質の形態変化が生じた。これは、イスマスやフィンをファイルサイズ#60 以上に拡大するのと同様以上の殺菌効果が得られると考えられ、5 秒で行えたことは臨床的に高い有効性が期待できると思われる。また象牙質表層の陥凹や粗造部の範囲と間隙面の陥凹や粗造部の範囲はある程度関連していたことから、イスマス等の焼灼では、ファイル周囲の変色した範囲から焼灼できたイスマスの深さをある程度推測することが可能と思われた。また、象牙質が溶融したことで歯根全体の温度上昇が懸念されるが、象牙質の欠損を生じたのは表層から象牙質内部へ100 μm 程度であり、象牙質深部まで温度が上昇することはなく影響は表層のみに局限しているのではないかと考えられた。

実験2では模擬根管にPlank-Rychlo 溶液を5分間作用させ約10 μm 程度の人工軟化象牙

質（脱灰層）を形成し実験を行った。脱灰層を形成して実験を行ったのは、露出した有機質層の焼灼は象牙質面の溶融より低温で起こること、根管壁に均一な層を形成しやすいこと、標本作製中に根管壁から脱落することがなく評価しやすいことから、根管壁の温度上昇を推測するのに有効と考えたためである。Plank-Rychlo 溶液を用いたのは、軟化象牙質のコラーゲンと Plank-Rychlo 溶液で脱灰して露出したコラーゲンの熱反応が類似しているという報告²³⁾を参考にしたためである。実験 1 の結果を踏まえ、ファイルの過熱による影響を除外するため能動電極を模擬根管から 1 mm 以上離して通電を行い、根管壁への影響を観察した。通電時、模擬根管からは気泡の発生やスパークが生じることがあり、能動電極から離れた模擬根管で電流密度が高くなって温度上昇が起こっていると推察される所見がみられた。気泡やスパークの発生は 10% NaClO 群でより多く確認され、出力、通電時間が増加するほど多く発生する傾向が見られた。光学顕微鏡観察では、10% NaClO 群は生理食塩液群と比較し黒変する部位が多く見られ、225V、5 秒通電では根管上部から象牙質ブロック下面まで黒変が広がるものも見られた。象牙質が茶褐色、黒色に変色している部位では SEM 観察において象牙細管の露出、または溶岩状の形態が見られ、元素分析においても Ca 強度の上昇が見られたことから、通電により脱灰層が焼灼、除去されたと考えられた。また、生理食塩液群 150V 通電においては根管壁の変色が見られなかったが、SEM 観察では一部に象牙細管の露出が見られ、元素分析においても Ca 強度が上昇している部位があったため、変色の見られない部位でも通電により温度上昇している場合があることが示唆された。

高周波電流が能動電極と接触していない根管壁を焼灼する原理については、現時点では詳細は不明であるが、まず通電により模擬根管内の電流密度の上昇に伴い発熱、気泡が発生したと考えられる。この気泡の発生により根管内のインピーダンスがさらに上昇し、気泡と根管壁の間でジュール熱が発生したり、放電現象が起こったりして根管壁が焼灼されたのではないかとと思われる。また、生理食塩液群では気泡は水蒸気で、NaClO 群では気泡内に酸素が豊富であると推測され、そのために電流によって高温になった根管壁の有機質は

NaClO 群でより酸化しやすくなって焼灼効果に差が出たのではないかと考えられる。

今回の実験結果から、生理食塩液群と比較し 10% NaClO 群で根管壁の焼灼効果が高く、225V、5 秒通電で根管壁全体の脱灰層を除去できることが分かった。元素分析では、脱灰層が除去され象牙細管が露出した面と焼灼により炭化したと思われる象牙質面について、C, O, Ca に大きな差は見られなかった。そのため炭化はごく表層に局限しているとも考えられたが、過剰な焼灼は根尖歯周組織に不可逆的な損傷を生じる危険性もあるため^{24, 25)}、高周波電流の出力、通電時間についてはさらに詳細な検討が必要となると考えられる。さらに、能動電極と非接触の根管壁の焼灼が可能であったが、根管壁の殺菌が実現しているか、臨床成績の向上が得られるかは検証が必要と考えられる。また、今回の実験モデルでは直径 0.1 mm、長さ 1 mm でレッジ等によりファイルが到達しない根管を想定したが、根管の太さや長さの変化や切削片等で根管が閉塞している場合などで、どのような効果を発揮できるかも今後の検討課題である。

【結論】

象牙質間隙モデルと模擬根管モデルに対し、高周波発生装置を用いて通電を行い、象牙質の形態、性状変化について光学顕微鏡観察、走査型電子顕微鏡観察、元素分析を行い評価した。その結果、以下の結論を得た。

- 1 通電による能動電極先端の過熱で象牙質が焼灼されて溶岩状に熔融凝固し、その範囲は出力、通電時間に比例して大きくなり、225V、5 秒通電で最大 660 μm となった。
- 2 能動電極と非接触の模擬根管が焼灼されて象牙質脱灰層が消失したり、根管壁が熔融凝固した。その効果は根管内容液は生理食塩液より 10% NaClO の方が高く、出力や通電時間の増加に伴って向上した。

参考文献

- 1)Wu MK, Wesselink PR: A primary observation on the preparation and obturation of oval canals. *Int Endod J*, 34:137-141, 2001.
- 2)Tucker DM, Wenckus CS, Bentkover SK: Canal wall planning by engine-driven nickel-titanium instruments, compared with stainless-steel hand instrumentation. *J Endod*, 23:170-173, 1997.
- 3)Leonardo MR, Rossi MA, Silva LA, Ito IY, Bonifácio KC: EM evaluation of bacterial biofilm and microorganisms on the apical external root surface of human teeth. *J Endod*, 28: 815-818, 2002.
- 4)Sjogren U, Hagglund B, Sundqvist G, and Wing K: Factors affecting the long-term results of endodontic treatment. *J Endod*, 16: 498-504, 1990.
- 5)Wadachi R, Araki K, Suda H: Effect of calcium hydroxide on the dissolution of soft tissue on the root canal wall. *J Endod*, 24: 326-330, 1998.
- 6)Hasselgren G, Olsson B, Cvek M: Effects of calcium hydroxide and sodium hypochlorite on the dissolution of necrotic porcine muscle tissue. *J Endod*, 14:125-127, 1988.
- 7) Shuping GB, Ørstavik D, Sigurdsson A, Trope M: Reduction of intracanal bacteria using nickel- titanium rotary instrumentation and various medications. *J Endod*, 26: 751-755. 2000.
- 8)Michelle HC: Physical agents in rehabilitation from research to practice 2nd ed., 219-260, Saunders, Collingwood, 2003.
- 9) 小野 哲章: 電気メスの原理と安全対策. 体外循環技, 10: 10-18, 1984.
- 10) 石橋威郎: 高周波電流による根管消毒の研究一特に一回治療への応用について一. 日歯保存誌, 16: 66-78, 1972.

- 11) 坂東直樹、富永敏彦、湯本浩通、住友孝史、平尾早希、平尾功治、松尾敬志：電磁波照射の歯内療法への応用．日歯内療法誌，32：184-200，2011.
- 12) 富永敏彦、北池光希、多田瑛一郎、高比良一輝、坂東直樹、平尾早希、林邦彦、横山昌憲、吉永仁：電磁波刺激を応用した根尖性歯周炎への対応．日歯内療法誌，38：36-47，2017.
- 13) 竹内義和：コスモエンドシステム．デンタルダイヤモンド．21：92-96，1996.
- 14) Callen HB：Thermodynamics. Wiley International ed, John Wiley and Sons, New York and London, 300, 1960.
- 15) 牧田道明：改良型電気メスを用いた高周波治療．顎咬合誌，24，298-301，2004.
- 16) Klein W: Einige Mitteilungen über die Anwendung des Diathermiestromes in der Zahnheilkunde, Z. F. Stomat, 27: 443, 1929.
- 17) 渡辺浩寿：短波的高周波電流に依る余の所謂歯髓外科に就て．歯科臨床，12：1191，1940.
- 18) Yumoto H, Tominaga T, Hirao K, Kimura T, Takahashi K, Sumitomo T, Bando N, Matsuo T: Bactericidal activity and oral pathogen inactivation by electromagnetic wave irradiation. J Appl Microbiol, 113: 181-191, 2012.
- 19) 根本章吾、岩井仁寿、鈴木英明、神谷直孝、岩井啓寿、壺岐宏二、池見宅司：自由電子レーザー照射したウシ象牙質の昇温と形態変化 - Er:YAG レーザーとの比較 - ：日歯保存誌、53：419-427，2010.
- 20) 福田秀光：CO₂ レーザー（波長 9.3 μm）照射された象牙質の表面性状変化に関する研究．日歯保存誌、55：411-423，2012.
- 21) 堀江和彦、岡本佳三、宮崎光治：CO₂ レーザー照射後のヒトの歯牙硬組織の形態的および物理的・化学的变化．歯材器，24：203-210，2005.
- 22) Aoki A, Sasaki KM, Watanabe H, Ishikawa I: Lasers in nonsurgical periodontal

therapy, Periodontology 2000, 36: 59-97, 2004.

- 23) 田川元、寒河江登志朗. 軟化象牙質の熱分析的研究. 日大口腔科学. 27: 297-303, 2001.
- 24) Saunders EM: In vitro findings associated with heat generation during thermomechanical compaction of gutta-percha. Part II. Histological response to temperature elevation on the external surface of the root. Int Endod J, 23: 268-274, 1990.
- 25) Gutmann JL, Rakusin H, Powe R, Bowlws WH: Evaluation of heat transfer during root canal obturation with thermoplasticized gutta-percha. Part II. In vivo response to heat levels generated. J Endod, 13: 441-448, 1987.

図表

図 1

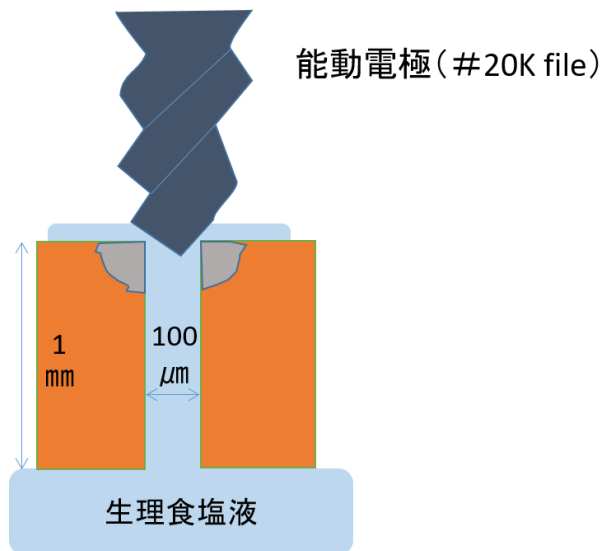


図 2

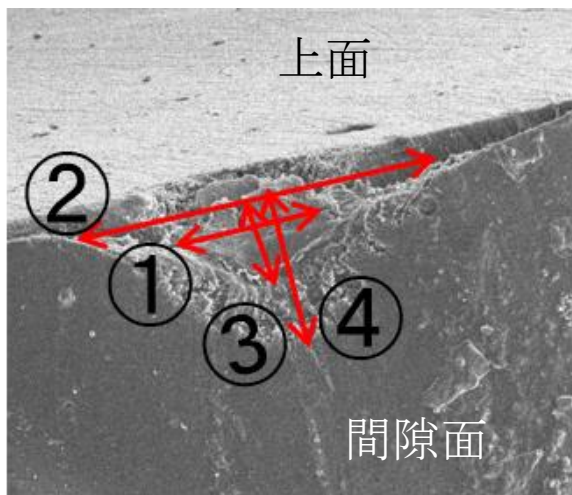


図 3

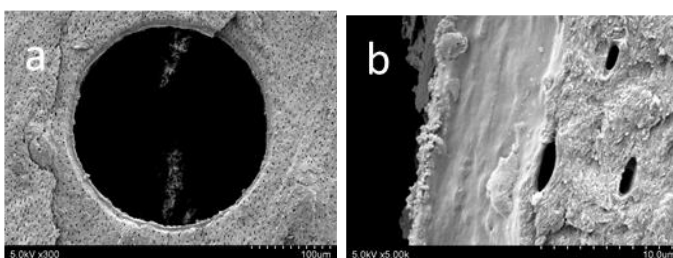


図 4

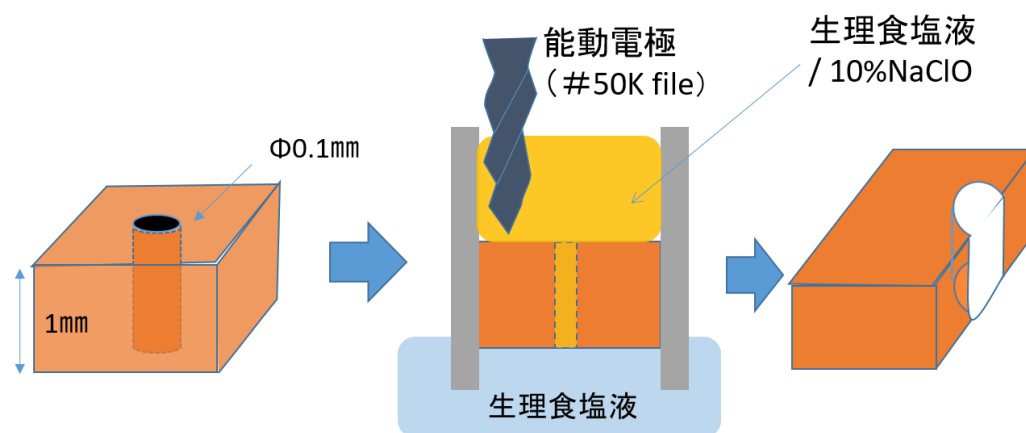


図 5

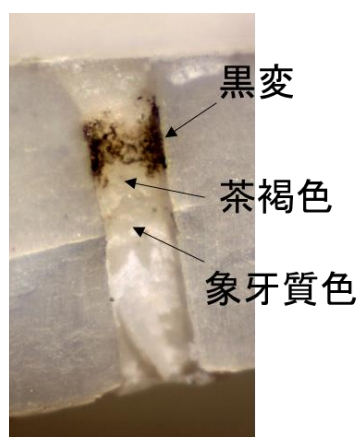


図 6

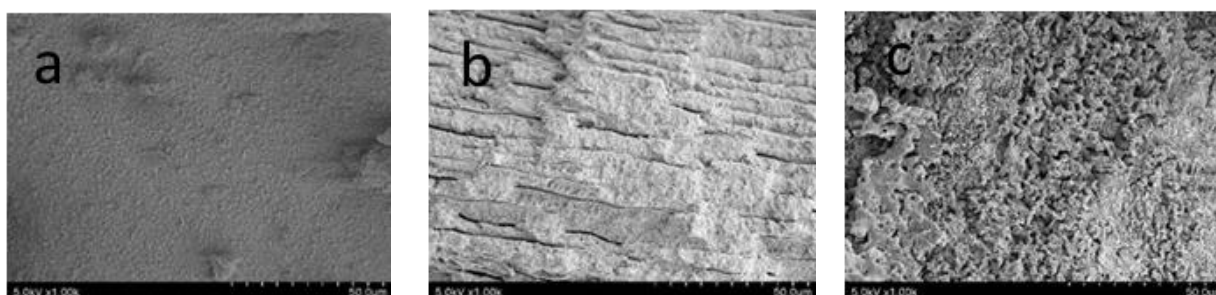


図 7

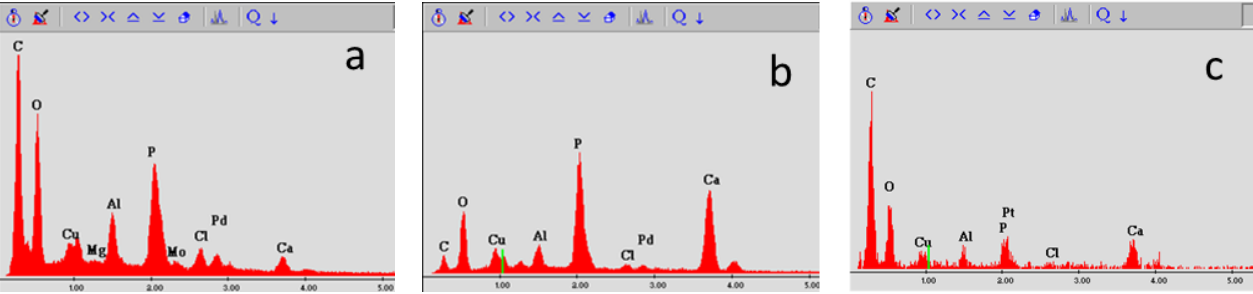


図 8

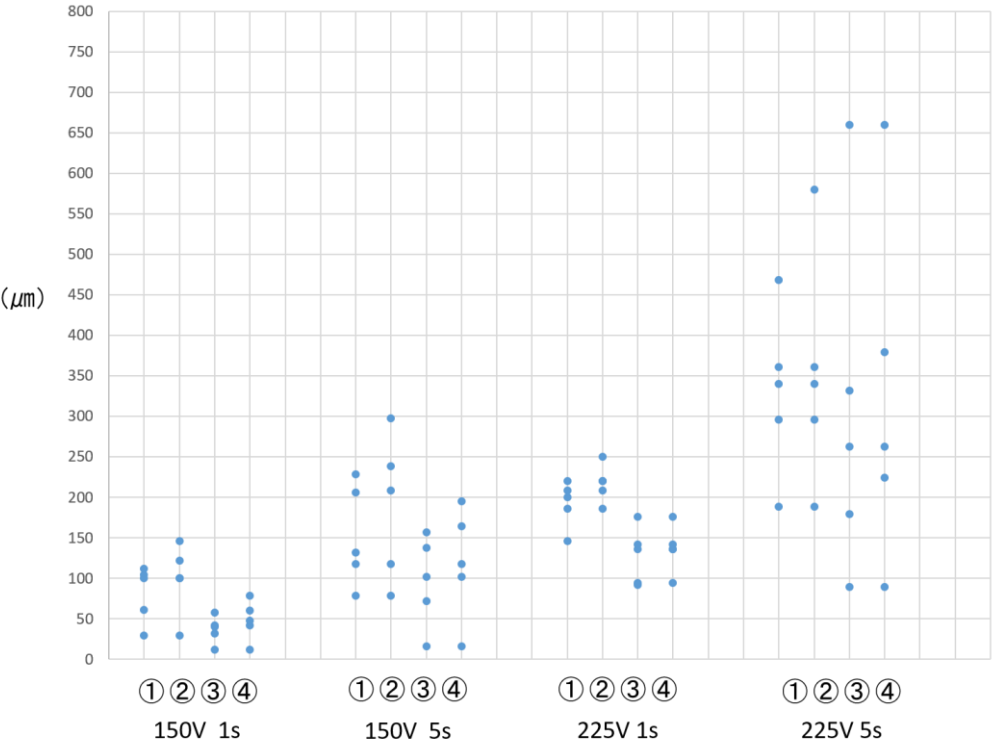


图 9

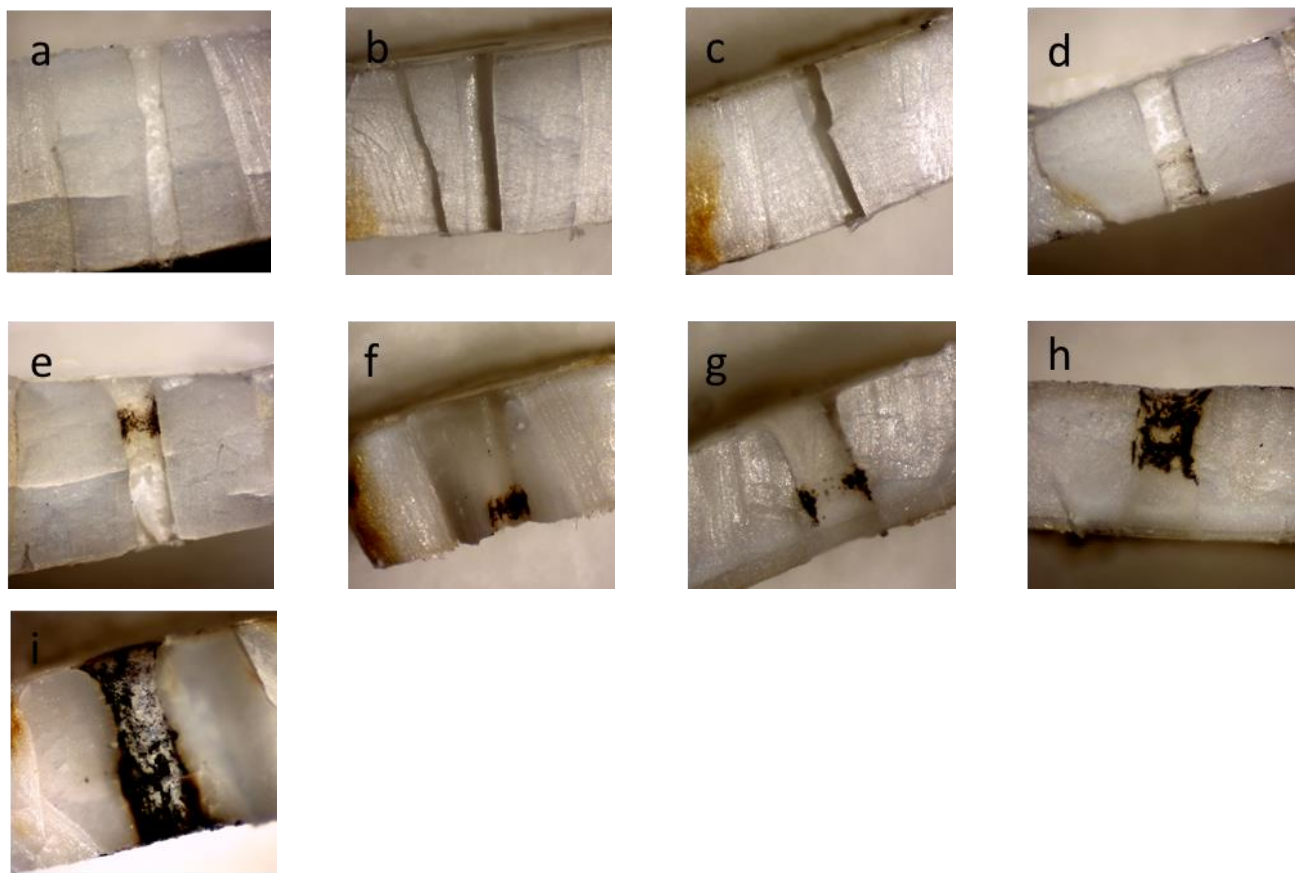


图 10

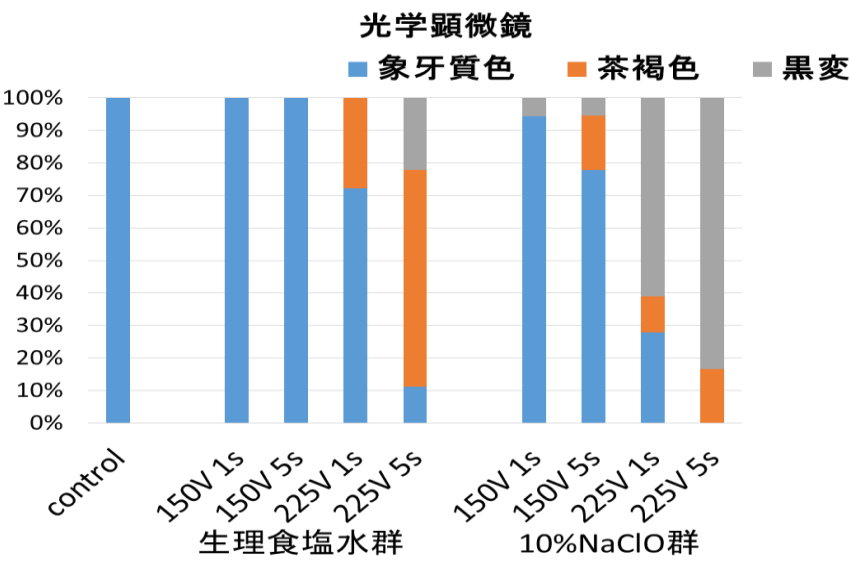


图 1 1

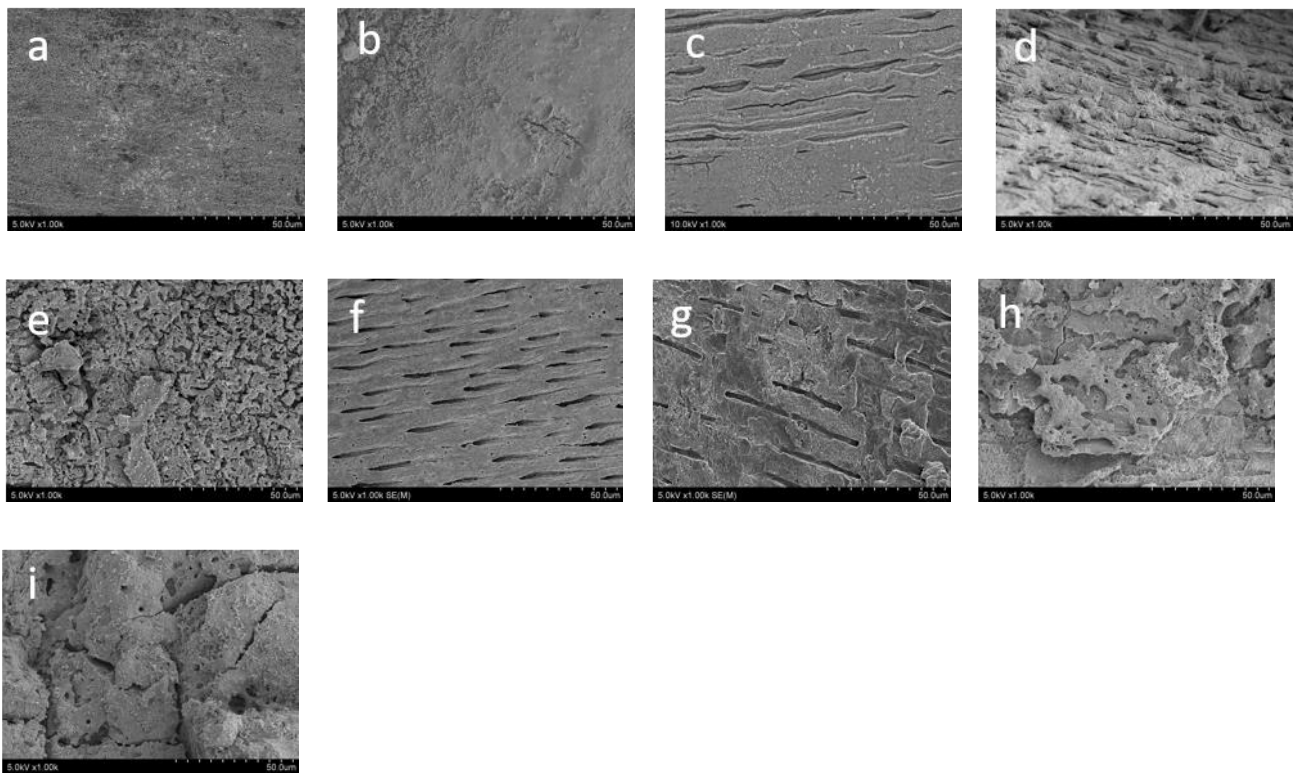


图 1 2

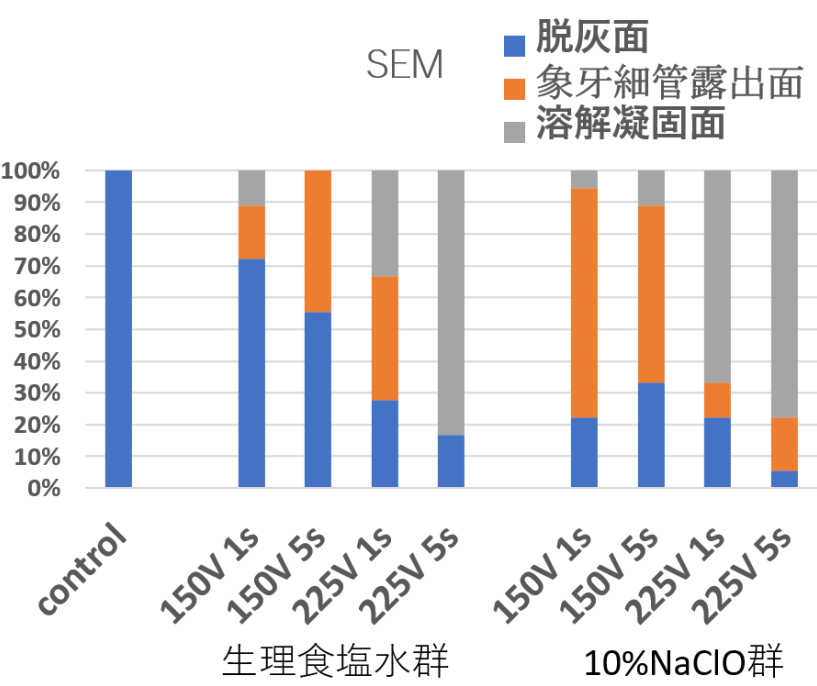
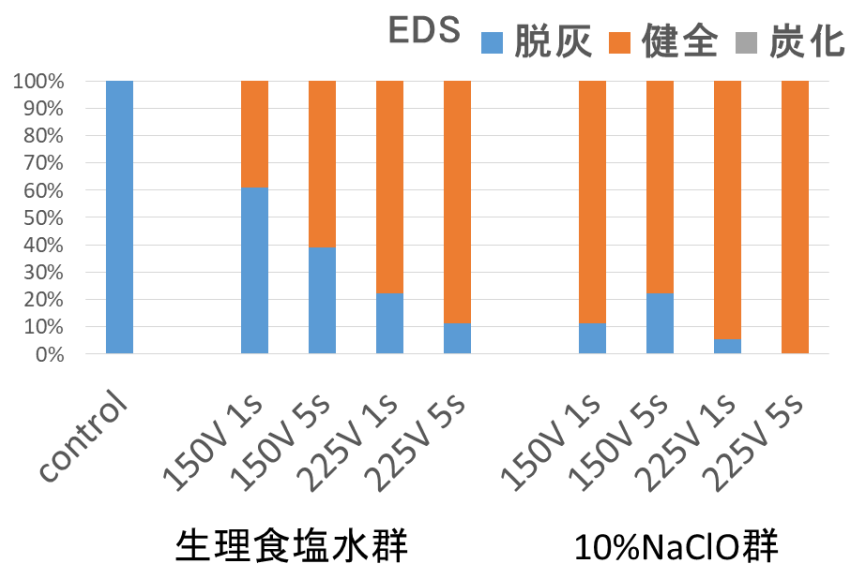


图 1 3



図説

図 1 間隙モデルの模式図

図 2 間隙面における象牙質形態変化部の計測方法

- ① 象牙質表面の陥凹部の幅 ② 象牙質表面の粗造部の幅 ③ 間隙面の陥凹部の長さ ④ 間隙面の粗造部の長さ

図 3 脱灰後の模擬根管

- a. 脱灰後の模擬根管 (×300)
b. 強拡大像 (×5000) 約 10 μm の無構造な層が根管壁に均一に形成された

図 4 模擬根管モデルへの通電及び切断面の模式図

図 5 根管壁の変色状態の分類方法

図 6 SEM による根管壁の形態の分類方法

- a. 脱灰面 b. 象牙細管露出面 c. 熔融凝固面

図 7 根管壁の元素分析による分類方法

- a. 脱灰 b. 健全 c. 炭化

図 8 実験 1 計測結果

図 9 光学顕微鏡観察結果

a コントロール b 生理食塩液群 150V1 秒通電 c 生理食塩液群 150V5 秒通電 d 生理食塩液群 225V 1 秒通電 e 生理食塩液群 225V5 秒通電 f 10%NaClO 群 150V1 秒通電 g 10%NaClO 群 150V5 秒通電 h 10%NaClO 群 225V1 秒通電 i 10%NaClO 群 225V5 秒通電

図 1 0 根管壁の変色状態の分類結果

図 1 1 走査型電子顕微鏡観察結果

a コントロール。b 生理食塩液群 150V、1 秒通電。c 生理食塩液群 150V、5 秒通電。d 生理食塩液群 225V、1 秒通電。e 生理食塩液群 225、V5 秒通電。f 10% NaClO 群 150V、1 秒通電。 g 10% NaClO 群 150、V5 秒通電。 h 10% NaClO 群 225V、1 秒通電。 i 10% NaClO 群 225V、5 秒通電。

図 1 2 走査型電子顕微鏡による根管壁の形態の分類結果

図 1 3 根管壁の元素分析による分類結果