



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	根管の直径と数が高周波電流の焼灼効果に及ぼす影響
Author(s)	内沢, 英作
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(歯学)
Dissertation Number	甲第15003号
Issue Date	2022-03-24
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/doctoral.k15003">https://doi.org/10.14943/doctoral.k15003</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/90529">https://hdl.handle.net/2115/90529</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Eisaku_Uchizawa.pdf



博士論文

---

根管の直径と数が  
高周波電流の焼灼効果に及ぼす影響

---

令和4年3月申請

北海道大学  
大学院歯学研究科口腔医学専攻

内沢 英作

## 【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。また、高周波電流の通電により、根管が狭い部位では電極が接触しなくても根管壁の有機質を蒸散させたり、象牙質の溶融を起こしたりすることが可能であることが報告されている。本研究では、根管の直径が異なる場合や複数の根管がある場合に、焼灼状態にどのような影響をおよぼすかを検討した。

厚さ 1 mm の象牙質ブロックに #10 または 40 の単根管の模擬根管、および #10/#10、#10/#40、#40/#40 の 2 根管の模擬根管を形成し合計 5 群とした。象牙質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、周波数 520 kHz、duty 70 %、電圧 225 V の高周波電流を通電した。隔壁内および模擬根管内は 10 % 次亜塩素酸ナトリウムを満たし、能動電極は模擬根管から 1 mm 以上離して通電を行った。通電時間は、肉眼で模擬根管からの気泡発生を確認後、さらに 0 秒、2 秒、4 秒とした。通電後模擬根管に平行に象牙質ブロックを切断し、模擬根管壁の光学顕微鏡観察、走査型電子顕微鏡観察、元素分析を行った。

高周波電流の通電による根管壁の変色や脱灰層除去効果は、単根管モデルでは #10 より #40 の方が高く、#10/#40 の 2 根管モデルでも #40 の方が高かったが、通電時間を長くすることで #10 でも脱灰層の減少がみられた。また根管の太さが同じ 2 根管モデルでは、#10 でも #40 でも 2 根管で焼灼状態に差が見られたが、通電時間を長くすることで両根管の差は小さくなり、両根管とも脱灰層の残存は著しく減少した。

以上の結果より、能動電極が接触しない模擬根管が 2 根管であっても焼灼が可能であり、側枝や根尖分枝などが殺菌できる可能性が示唆された。

## 【緒言】

根尖性歯周炎は、根管内の細菌やその産生物などの病原因子を機械的に除去することにより治癒するが、ファイルが届かない側枝や副根管では病原因子が残存するために<sup>1,2)</sup>成功率が低下する<sup>3-5)</sup>。これらの部位では次亜塩素酸ナトリウムによる根管洗浄や水酸化カルシウムの貼薬等の化学的根管清掃に効果を期待することになる<sup>6,7)</sup>が、側枝や副根管を完全に無菌化することは難しいとされている<sup>8)</sup>。

一方、高周波電流は電気メスとして古くから軟組織の切開や止血に用いられており<sup>9,10)</sup>、根管内を高周波電流で殺菌する方法も以前から行われている<sup>11)</sup>。1920年代には Klein<sup>12)</sup>により高周波電流の根管内への応用が行われ、歯髓の凝固に応用した研究<sup>13)</sup>が報告されている。近年では坂東ら<sup>14)</sup>、富永ら<sup>15)</sup>より高周波電流による歯内療法臨床成績向上が報告されている。とくに高周波電流による根管の殺菌が有効と思われる部位はイスマスやフィンなどで、電極先端と根管壁との接触抵抗による発熱を利用して殺菌する方法が考えられる。しかし、ファイルを象牙質に接触させて通電することで象牙質が溶岩状に熔融する範囲は300  $\mu\text{m}$ 程度であり<sup>16)</sup>、側枝や副根管などではファイルの発熱を波及させて臨床的に有効な殺菌レベルを得るのは困難と考えられる。

一方、根管内を導電性の高い薬液で満たして高周波電流を通電し、温度分布を数値モデルで解析した Tarao ら<sup>17)</sup>の研究では、根尖狭窄部ではインピーダンスが高いため電流密度が高くなってジュール熱が発生することが報告されている。また、熊谷らは直径0.1 mm、長さ1 mmの人工根管を象牙質に作製して通電したところ、225 Vの電圧であれば5秒で根管表面の有機質が蒸散したり溶岩状に熔融凝固したりしたと報告している<sup>16)</sup>。しかし、この研究では模擬根管の太さは#10のみで検討されたもので、根管の太さによってインピーダンスが変わることから、電流量も変化して焼灼効果に大きく影響すると考えられる。また、

側枝や副根管でも導電性薬液が浸透すれば、高周波電流の通電により発熱し、焼灼できると推測されるが、一般に側枝や副根管は主根管より細いため、電流の多くはインピーダンスの低い主根管に流れ、側枝などでは電流量が不十分となって焼灼効果が得られない危険性もある。さらに、電流値が上がって発熱した根管で薬液が沸騰して気泡が発生したり、気泡内で放電が起こったりしてインピーダンスが変動したり、根管内容物が焼灼されて根管径が大きくなって導電性が高くなったりしたりすると、細い側枝への電流値も変化する可能性がある。

そこで本研究は、まずウシ象牙質から作製した模擬副根管モデルを用いて、根管径の違う模擬根管を作製し、高周波電流の通電がどのような変化を根管壁に及ぼすかを明らかにする目的で行った。さらに、側枝や副根管がある場合にどのような形態変化が起こるかについても検討した。

## 【材料および方法】

### 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1 mmの象牙質ブロックを170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3 mmの隔壁をポリプロピレンのチューブとモデルリペアーIIブルー（デンツプライシロナ）を用いて作製した。

模擬根管は、直径0.1 mmまたは0.4 mmの単根管、直径0.1 mm/0.1 mm、0.1 mm/0.4 mm、0.4 mm/0.4 mmの2根管とし、合計5種類の試料を作製した。模擬根管の作製は#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た後、#40まで拡大する根管ではKファイル（マニー）を使用した（図1）。さらに、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。

## 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、模擬根管内および上面の隔壁内に 10 % NaClO (ネオクリーナー「セキネ」、ネオ製薬) を満たした。能動電極は#50K ファイル (マニー) を用い、模擬根管から 1 mm 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 520 kHz、duty 70 %、電圧 225 V で通電した。通電時間は、模擬根管から気泡が発生した後、さらに 0 秒、2 秒、4 秒とした (各群 n=10)。#10 と #40 の単根管では通電時間 0 秒の未通電群を設定し、10% NaClO を模擬根管に満たして 10 秒後に水洗した (各群 n=4)。通電後、象牙質ブロックを超音波カッター、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 1)。

## 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の模擬根管壁を光学顕微鏡にて観察、根管壁の変色状態を象牙質色、白濁、茶褐色、黒変の 4 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 2)。#10/#10 および #40/#40 の複根管モデルでは、変色の強い根管と弱い根管に分けて集計を行った。

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 5.0 kV で根管壁を観察し、一部の標本は X 線光電子分光装置 (JSM-6510LA、日本電子) を用いて根管壁の元素分析を行った。SEM 観察により、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 3)、模擬根管の上部、中央、下部の 3 カ所で評価した。#10/#10 および #40/#40 の複根管モデルでは、形態変化の大きい根管と小さい根管に分けて集計を行った。

## 【結果】

### 1. 模擬根管壁の変色状態 (図 4)

切断した模擬根管壁は、通電していない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。

#10 単根管では象牙質色が多く、通電時間を長くすると白濁や黒変がわずかに増加したが、著しい差はなかった。#40 単根管では、発泡が確認できた時点で通電を終了した「0 秒」では、約半数が象牙質色であったが、通電時間を長くするにしたがって、白濁や黒変が増加し、4 秒では象牙質色はなかった。

#10/#10 の 2 根管のモデルでは、変色の少ない根管は通電時間を 4 秒に延長することにより白濁が増加して象牙質色は減少し、変色の大きかった根管は、通電時間を長くすると黒変部が増加して象牙質色が減少した。#10/#40 の 2 根管モデルでは、#10 の根管は 0 秒と 2 秒ではほとんど差がなかったが、4 秒の通電で黒変部がやや増加して象牙質色が減少し、#40 の根管も通電時間の延長により黒変部が増加して象牙質色は減少した。#40/#40 の 2 根管モデルでは、変色が少ない根管では、0 秒で半数が象牙質となったのに対して、4 秒ではほとんどが白濁で一部に黒変もみられた。変色が大きかった根管では 0 秒でも象牙質色は 20 %であったが、2 秒では白濁と黒変で、4 秒では黒変がさらに増加した。

### 2. 走査型電子顕微鏡による模擬根管壁の形態 (図 5)

通電していないコントロール群ではいずれも脱灰面であった。#10 単根管では、0 秒では半数が脱灰面であったのに対して、通電時間とともに脱灰面が減少して溶融凝固面が増加し、4 秒の通電で脱灰面は 20 %程度となった。#40 単根管では、#10 と同様に通電時間を長くすると溶融凝固面が増加し、4 秒ではほとんどが溶融凝固面となった。

#10/#10 の 2 根管のモデルでは、形態変化の少ない根管は 0 秒で 80 %が脱灰面であったのに対して、4 秒では 30 %まで低下した。形態変化の大きかった根管は 0 秒で約 50 %

が脱灰面であったのに対して、4秒では約13%に低下した。#10/#40の2根管モデルでは、#10の根管は0秒で70%が脱灰面であり4秒では22%となった。#40の根管は0秒で半数が脱灰面であったが、4秒では3.3%であった。#40/#40の2根管モデルでは、形態変化の少ない根管は0秒で73%が脱灰面、4秒では13.3%であった。形態変化の大きかった根管では、0秒で54%が脱灰面、4秒では10%であった。

### 3. 元素分析 (図6)

通電後の模擬根管壁の元素分析を行った結果、SEMで脱灰面と判定した部位ではCの強度が高かったが(図6)、PやCaもわずかに検出された。象牙細管面ではC、P、Caの強度が高かったが(図7)、Cの強度が低い試料もあった。熔融凝固面ではCaとPの強度が高く、Cはいずれの試料でも低かった(図8)。

#### 【考察】

本研究は、能動電極の接触しない根管を高周波電流の通電により焼灼する場合、根管の直径がどのように影響するか、さらに根管が2つある場合にそれぞれの根管壁にどのような形態変化が起こるかを明らかにする目的で、象牙質ブロックに規格したサイズの模擬根管を作製して検討を行った。

熊谷の方法<sup>16)</sup>にしたがって、模擬根管内をPlank-Rychlo溶液で5分間脱灰し、有機質の層を根管壁に形成して高周波電流の通電を行った。脱灰層を形成したのは、根管壁に均一な有機質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、根管壁の温度上昇による焼灼効果を評価するのに有効と考えたためである。

通電時には根管内に10% NaClOを満たした。これは生理食塩液とNaClOで焼灼効果を比較した熊谷ら<sup>16)</sup>の実験で、NaClOの方が焼灼効果は高いとされていたためである。同様に、電圧は150Vより225Vの方が効果は高いことから225Vとした。また、通電時間は1

秒より 5 秒の方が焼灼効果は向上したとされているが、本実験では通電時間を発泡してからの時間としたため、4 秒までとした。発泡してからの通電時間としたのは、模擬根管内に削片や気泡があつて電流が流れにくい場合も想定され、単純に通電時間を基準にすると焼灼状態にばらつきが出ると考えられること、さらに模擬根管内の一定以上の発熱があつたことを示す指標として、臨床的にもわかりやすいためである。

模擬根管への通電の結果、光学顕微鏡では象牙質色のままであつた部位から黒変部までさまざまな変色を示した。また、SEM では脱灰されたコラーゲンが乾燥により収縮したと考えられる平坦な面や、象牙細管が露出している部位、溶岩状に粗造な部位が観察された。光学顕微鏡で白濁や茶褐色、黒変した部位では、SEM で一部に象牙細管もみられたが、溶岩状に粗造になっている部位が多かった。元素分析の結果では、SEM で平坦な部位は C の強度が高く P や Ca が低下していたことから、脱灰により露出したコラーゲンを主体とする有機質と考えられた。しかし、通電した試料の多くでは、SEM で「脱灰面」と分類されても P や Ca も検出されるものが多かった。これは、脱灰層の一部が通電により焼灼されて消失していたためと思われる。また、象牙細管が露出していた面では、C、P、Ca の強度が高かったことから、脱灰して露出したコラーゲンは焼灼されて消失していたと考えられる。コラーゲンの焼失温度は約 320 °C とされており<sup>18)</sup>、脱灰層が除去された根管表面ではこの温度を超えていたことが推察される。また、黒変部は SEM で溶岩状を呈しており、元素分析では P と Ca が多く C は少なかったこと、通電直後から黒変部を肉眼で観察でき、洗浄により洗い流されることはほとんどなかったため、脱灰層が炭化して表面を被覆して黒色を呈しているのではなく、溶岩状で微細な凹凸があるために黒くみえている可能性が高いと考えられた。この溶岩状に熔融凝固した部位では C がほとんど検出されなかったことは、象牙質のハイドロキシアパタイトが熔融する 1650°C<sup>19)</sup> 程度まで温度が上昇し、有機成分は蒸散して無機成分のみが凝固したことを示すものである。これは炭酸ガスレーザーを照射した場合に類似

した形態で<sup>20,21)</sup>、模擬根管内の薬液が沸騰して気泡が発生し、気泡内で放電が発生することによって生じたものと考えられる。

模擬根管は#10と#40の単根管、およびこの2種類の組み合わせの2根管を作製した。通電の結果を単根管の#10と#40を比較すると、0秒すなわち一度発泡が行った時点では#10も#40も脱灰層の残存が多かったが、4秒後には#40では脱灰層はほぼ消失し、#10では20%残存した。これは、#10では#40よりインピーダンスが大きいため、電流値が低く発熱が不十分であったことが原因と考えられる。しかし、#10の根管でも、通電時間の延長により溶融凝固面が増加して脱灰面が減少しているため、さらに通電時間を長くすることで、根管壁の有機質を完全に消失させることは可能と思われる。

#10と#10あるいは#40と#40の2根管の場合、一方の根管で脱灰層が焼灼されて根管が太くなったりしてインピーダンスが小さくなると、もう一方の根管にはさらに電流が流れにくくなって焼灼状態に大きな偏りが生じる可能性が考えられたため、焼灼効果の高い根管と低い根管でどの程度の差が生じるかを比較した。その結果、#10の2根管では焼灼効果の高い根管では2秒で脱灰層はほぼ消失し4秒と同等であったが、低い方では通電時間を長くすると脱灰層は減少傾向がみられたものの、4秒でも30%残存していた。これは、同じ径の根管であっても電流量に差があったことを示すもので、インピーダンスのわずかな違いで焼灼効果に大きな差が生じる可能性を示唆している。しかし、通電時間を長くすると焼灼効果が低かった根管でも脱灰層の残存は減少を示し、焼灼効果の差が通電時間の延長とともに拡大することはない、むしろ小さくなっていったことから、通電時間を長くすることで両根管とも十分に焼灼することは可能と考えられた。

一方、#40/#40の2根管では、焼灼効果の低かった根管でも4秒の通電で脱灰面は13.3%に低下し、焼灼効果が大きかったものと同等になった。したがって、インピーダン

スが低い場合には 2 根管あっても両方の根管に十分な焼灼効果が得られたことになる。さらに、#10 と #40 の 2 根管では、#40 の方が #10 より焼灼効果が高かったが、通電時間を延長することで #10 の脱灰層も減少をみせた。したがって、#10/#10 と同様に、通電時間を延長することで両根管の焼灼が可能になると思われた。しかし、実際の臨床ではファイルが到達しない根管の径を把握することができないため、通電時間の指標を具体的に示すことは今のところ難しい。この対策としては、焼灼効果はインピーダンスにより強く影響を受けることから、520 kHz でのインピーダンスに応じて通電時間を変更したり、通電前後のインピーダンスの変化で根管径の変化を推測したりするなど、インピーダンスを計測しながら通電を行うことで、根管壁が十分焼灼されたことの指標が得られる可能性があり、今後の重要な課題の一つと考えている。また、交流の電流値は周波数が高いほどインピーダンスの影響を受けにくくなることから、周波数を高くした方がインピーダンスの小さい根管にも効率的に電流が流れる可能性があり、この点についても検討が必要と考えている

今回の実験では脱灰層と分類したものは、通電していない未通電群はきわめて平坦であったのに対して、通電した群では表面が粗造で脱灰層の表層が焼灼されてコラーゲンが一部除去されていると思われる所見が大多数であった。したがって、脱灰層が残存していても根管壁の細菌は蒸散や殺菌が行える可能性はあると考えられ、この点については細菌を根管内に付着させて実験を行って検討することが今後の課題の一つである。また、高周波電流の通電により主根管とともに側枝も焼灼できる可能性が示されたが、臨床では側枝の存在を根管治療中に知ることはほとんど不可能である。側枝は 33%の歯に存在するとの報告<sup>22)</sup>もあり、発現率の高さを考慮するとすべての症例で通電を行うことが、根尖性歯周炎の治療成績の向上につながると思われる。しかし、過剰な焼灼は根尖歯周組織に不可逆的な損傷を与える危険性もあり<sup>22, 23)</sup>、また、根管壁を過剰に溶解して根管充填の封鎖性を低下させる危険性もあることから、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

要と考えている。

また、今回の実験モデルでは模擬根管の直径を 0.1 mm と 0.4 mm、長さ 1 mm として、単根管と 2 根管で行ったが、今後は直径だけでなく長さの影響や、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検討していく予定である。

### 【結論】

単根管および 2 根管の模擬根管モデルに高周波電流の通電を行い、根管壁の色調と形態、性状の変化を光学顕微鏡観察、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. 模擬根管壁の脱灰層が消失したり、根管壁が熔融凝固したりする焼灼効果は、根管径が大きい方が高かった。
2. 2 根管でも両方の根管で焼灼効果はみられたが、2 根管の径が異なる場合には、根管径の大きい方が効果は高かった。
3. 2 根管モデルでは、通電時間を長くすることで両方の根管が十分に焼灼可能となった。

## 【参考文献】

- 1) Siqueira JF Jr, Pérez AR, Marceliano-Alves MF, Provenzano JC, Silva SG, Pires FR, Vieira GCS, Rôças IN, Alves FRF: What happens to unprepared root canal walls: a correlative analysis using micro-computed tomography and histology/scanning electron microscopy. *Int Endod J* 5: 501-508, 2018.
- 2) Tabassum S, Khan FR: Failure of endodontic treatment: the usual suspects. *Eur J Dent* 10: 144-147, 2016.
- 3) Gorni FG, Gagliani MM: The outcome of endodontic retreatment: a 2-yr follow-up. *J Endod* 30: 1-4, 2004.
- 4) Arias A, Azabal M, Hidalgo JJ, de la Macorra JC: Relationship between postendodontic pain, tooth diagnostic factors, and apical patency. *J Endod* 35: 189-192, 2009.
- 5) Ng YL, Mann V, Gulabivala K: A prospective study of the factors affecting outcomes of nonsurgical root canal. *Int Endod J* 44: 583-609, 2011.
- 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) 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.
- 8) 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.
- 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) Michelle HC: Physical agents in rehabilitation from research to practice 2nd

ed., 219-260, Saunders, Collingwood, 2003.

- 11) 石橋威郎：高周波電流による根管消毒の研究—特に一回治療への応用について—。日歯保存誌 16: 66-78, 1972.
- 12) Klein W: Einige Mitteilungen über die Anwendung des Diathermiestromes in der Zahnheilkunde, Z.F.Stomat 27: 443, 1929.
- 13) 戸村二郎、長田 保：高周波電流による歯髓処置に関する実験的研究(動物実験)。口腔病会誌 24 : 24-39, 1957.
- 14) 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.
- 15) 富永敏彦、北池光希、多田瑛一朗、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.
- 16) 熊谷広道、菅谷勉：高周波電流によるファイル未到達根管の焼灼。第151回日本歯科保存学会学術大会プログラムおよび講演抄録集: 127, 2019.
- 17) Tarao H, Akutagawa M, Emoto T, Takei A, Yumoto H, Tominaga T, Ikehara T, Kinouchi Y: Evaluation of temperature increase from joule heat in numerical tooth model by applying 500 kHz current for apical periodontitis treatment - effect of applied voltage and tooth conductivity. Bioelectromagnetics 42: 224-237, 2021.
- 18) 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.
- 19) Aoki A, Sasaki KM, Watanabe H, Ishikawa I: Lasers in nonsurgical periodontal therapy, Periodontology 2000, 36: 59-97, 2004.
- 20) 福田秀光：CO<sub>2</sub>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 : CO<sub>2</sub> 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) Martić D, Prpić-Mehićić G, Simeon P, Pevalek J. Morphometrical analysis of main and accessory canals in apical root portion of frontal teeth. Coll Antropol. 22 Suppl:153-159.1998.
- 23) 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.
- 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.

図表

図 1

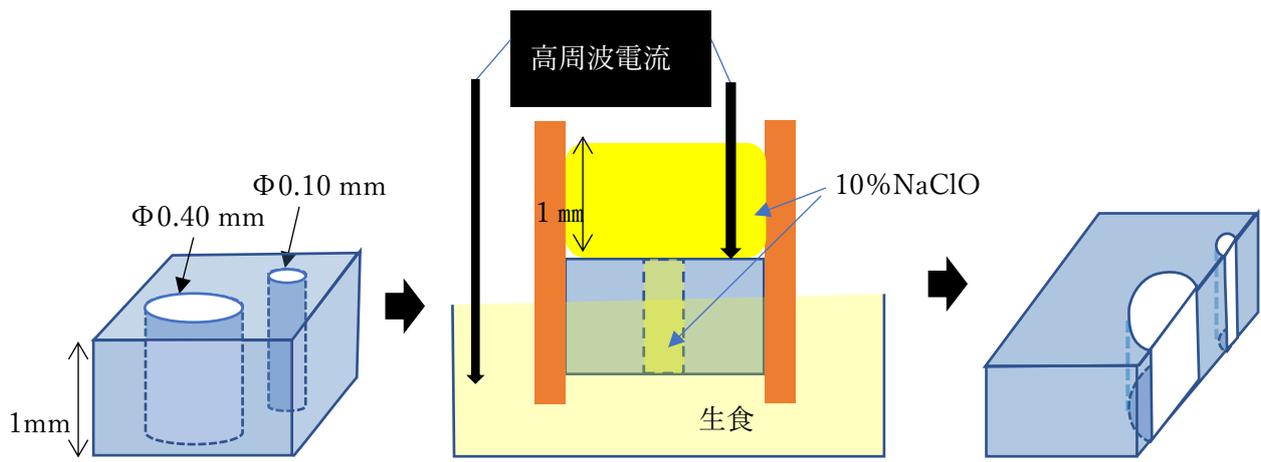
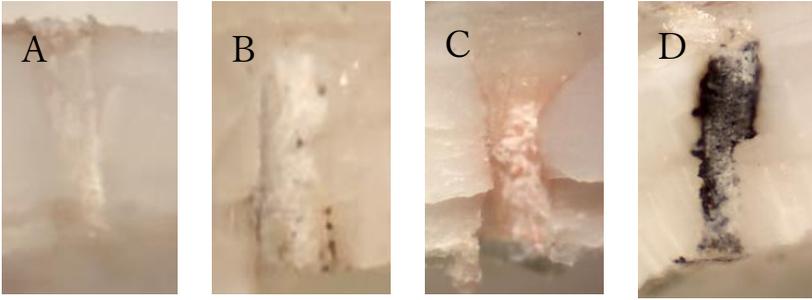


图 2



☒ 3

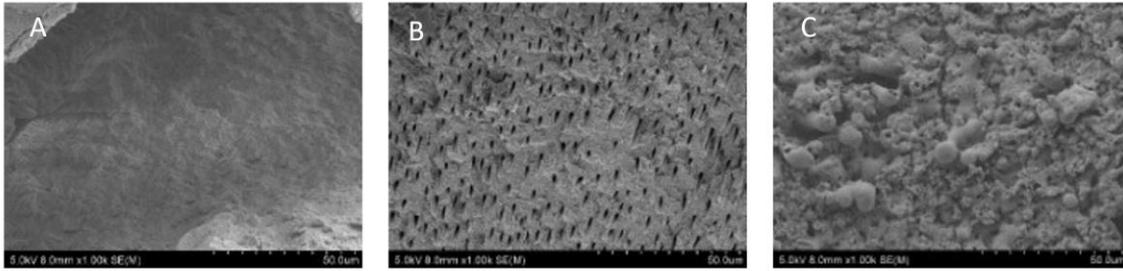


図 4

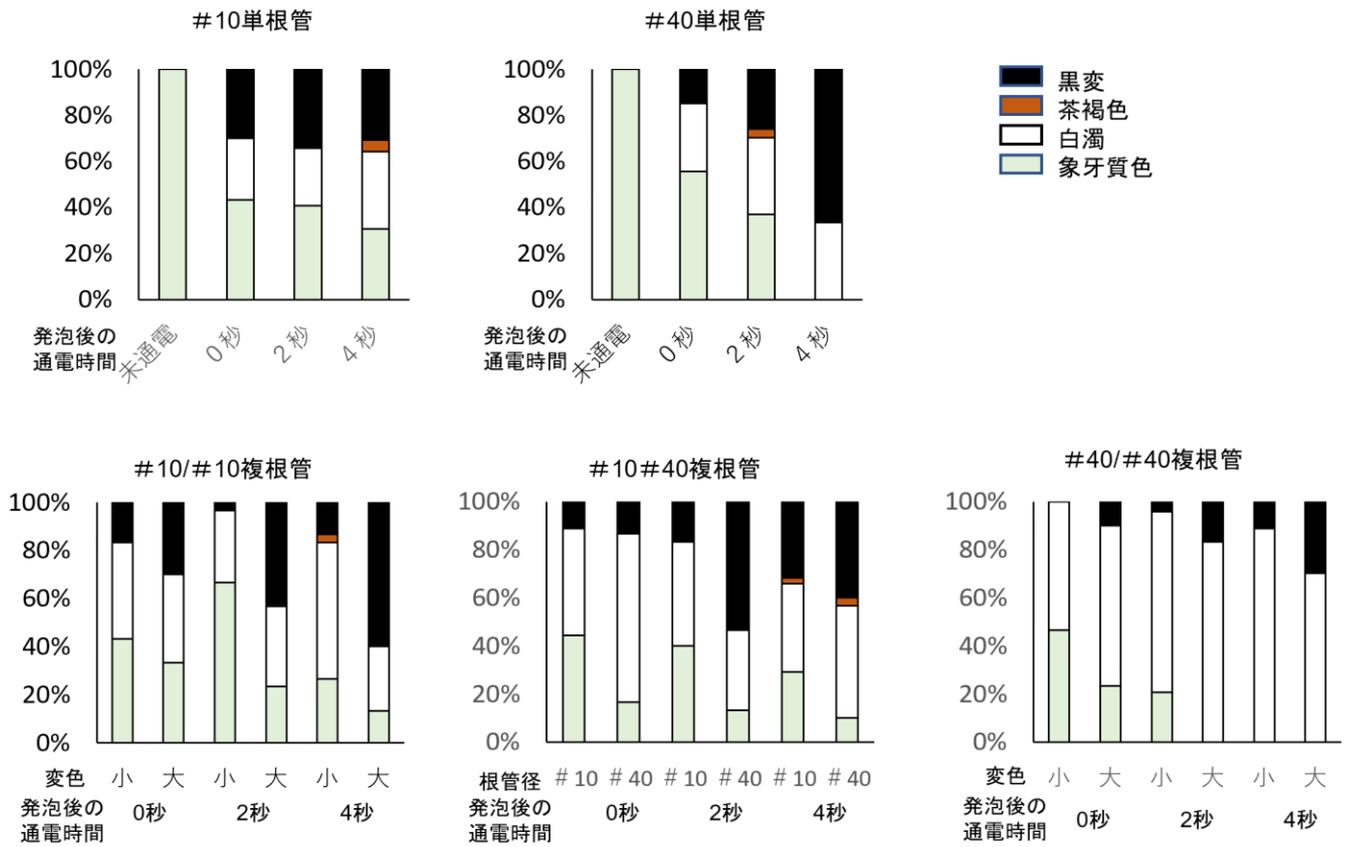


図 5

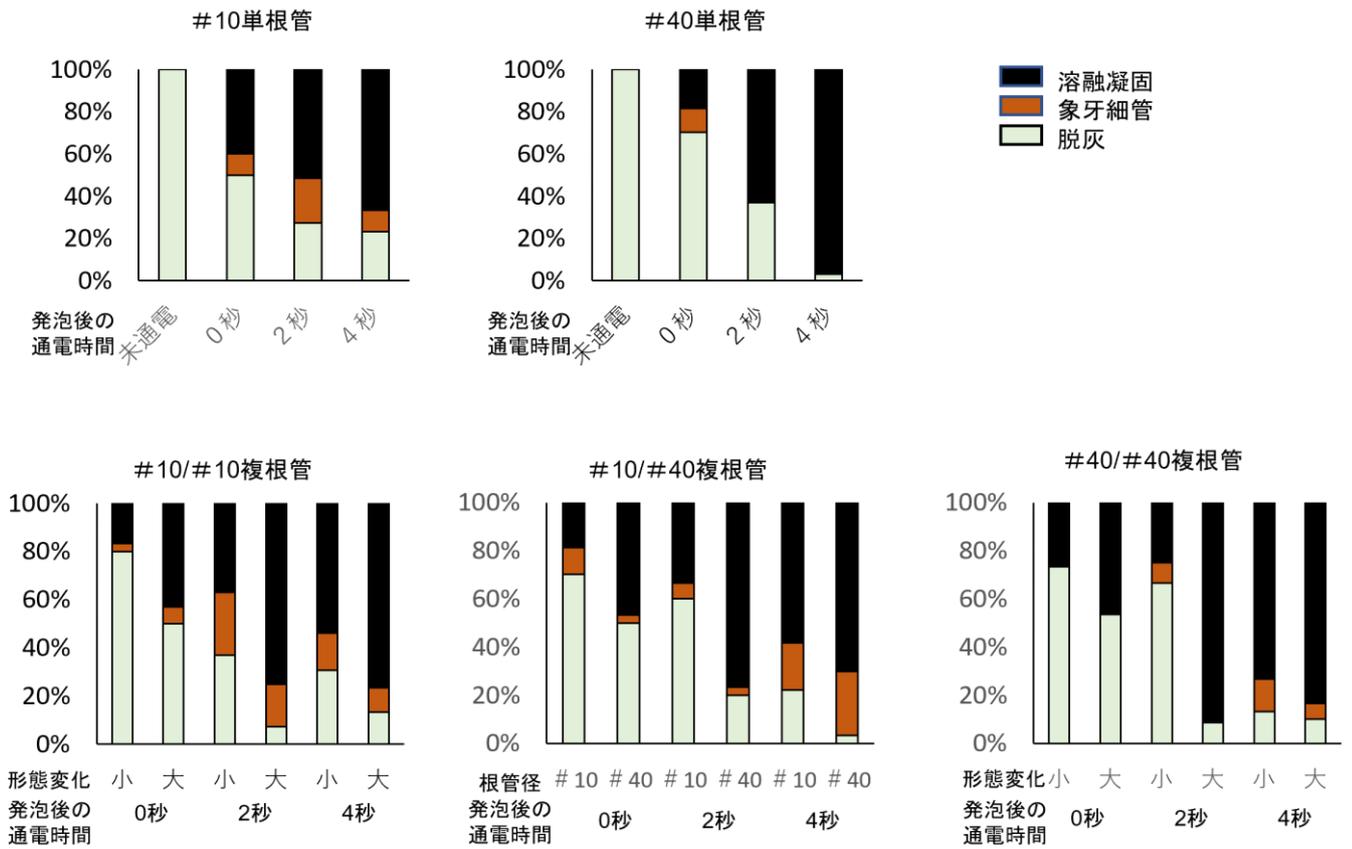
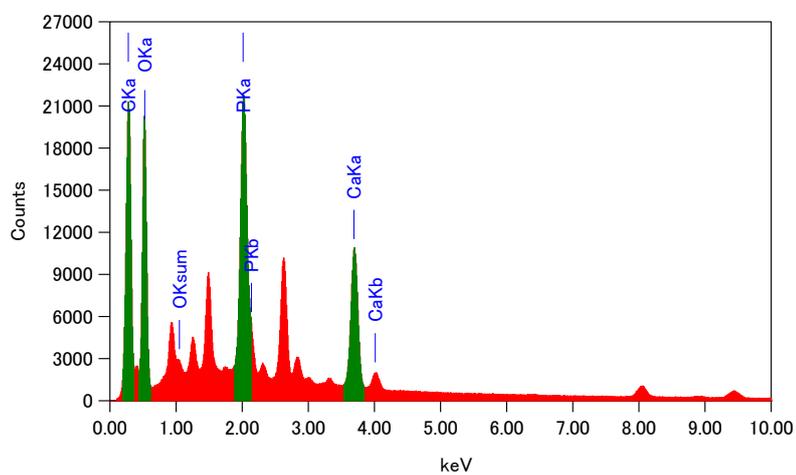
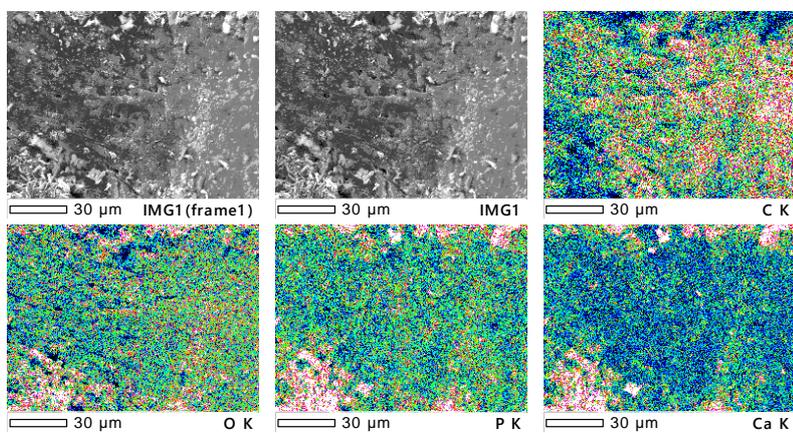


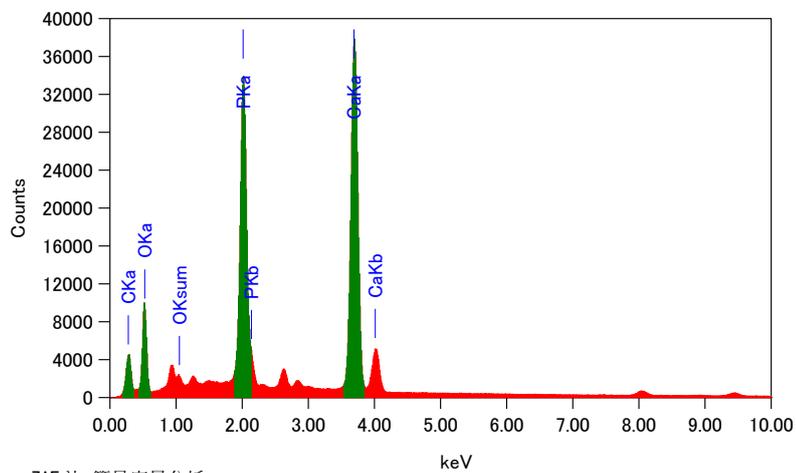
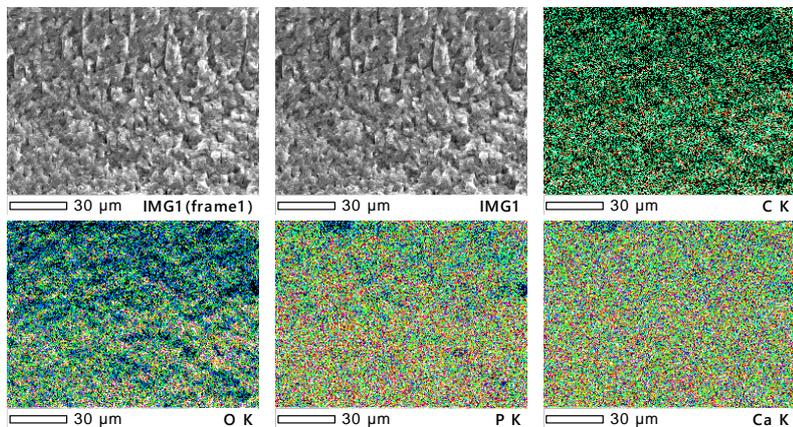
図 6



ZAF 法 簡易定量分析  
 フィッティング係数 : 0.2637

元素	(keV)	質量%	$\sigma$	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
C K	0.277	40.14	0.05	49.75				29.1425
O K	0.525	48.98	0.12	45.57				49.1327
P K	2.013	5.80	0.02	2.79				11.4297
Ca K	3.690	5.08	0.02	1.89				10.2951
合計		100.00		100.00				

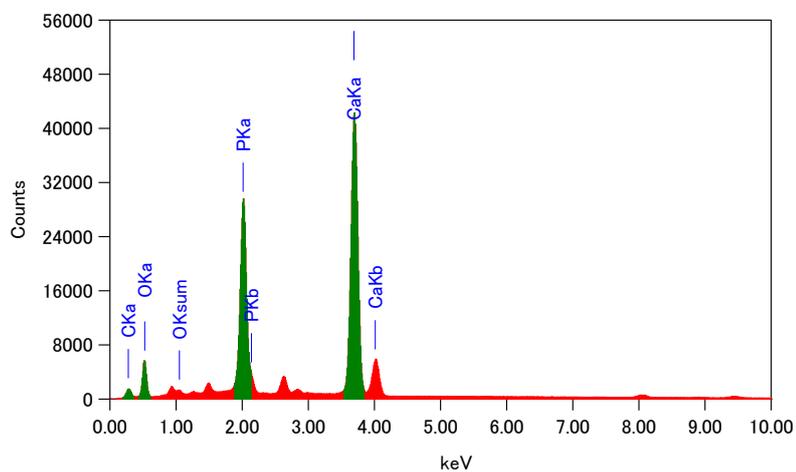
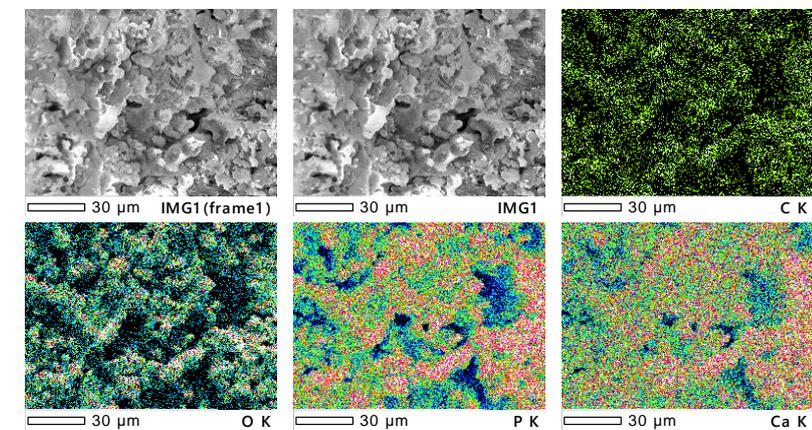
図 7



ZAF 法 簡易定量分析  
 フィッティング係数 : 0.0564

元素	(keV)	質量%	$\sigma$	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
C K	0.277	16.04	0.05	25.87				5.7669
O K	0.525	43.36	0.15	52.50				27.0709
P K	2.013	14.17	0.03	8.86				23.1292
Ca K	3.690	26.43	0.05	12.77				44.0330
合計		100.00		100.00				

図 8



ZAF 法 簡易定量分析  
 フィッティング係数 : 0.0558

元素	(keV)	質量%	$\sigma$	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
C K	0.277	4.92	0.03	9.38				1.3893
O K	0.525	38.95	0.18	55.75				18.1432
P K	2.013	16.71	0.04	12.35				23.5717
Ca K	3.690	39.43	0.07	22.53				56.8958
合計		100.00		100.00				

## 図説

図 1 模擬根管モデルへの通電及び切断面の模式図

図 2 根管壁の変色状態の分類方法

- A. 象牙質色
- B. 白濁
- C. 茶褐色
- D. 黒変

図 3 SEM による根管壁の形態の分類方法

- A. 脱灰面（未通電）
- B. 象牙細管露出面
- C. 熔融凝固面

図 4 光学顕微鏡による模擬根管壁の変色状態の分類

図 5 走査型電子顕微鏡による模擬根管壁の分類結果

図 6 脱灰面の元素分析結果

図 7 象牙細管面の元素分析結果

図 8 熔融凝固面の元素分析結果