



Title	高周波電流による歯髄の焼灼
Author(s)	森, 厚志
Citation	北海道大学. 博士(歯学) 甲第15018号
Issue Date	2022-03-24
DOI	10.14943/doctoral.k15018
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/90424">http://hdl.handle.net/2115/90424</a>
Type	theses (doctoral)
File Information	Atsushi_Mori.pdf



[Instructions for use](#)

博士論文

---

高周波電流による歯髓の焼灼

---

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

森 厚志

## 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、通電による生活歯髄、歯根膜、歯槽骨への影響についての報告は少ない。本研究では、高周波電流を歯髄の蒸散、壊死に応用する目的で、生活歯髄に対して通電を行った際の歯髄や歯周組織への影響について組織学的検討を行った。

10ヶ月齢ビーグル犬の前臼歯を用い、通法にて髓腔開拓、上部根管形成を行った後、根尖孔を穿通または未穿通とし、#10または#20K ファイルを根管内に挿入して高周波電流の通電を行った。高周波電流は、周波数は520 kHz、duty 70%で、電圧は150 Vまたは225 V、通電時間は0.2秒または1秒、通電回数1回、通電時のファイル先端位置は、根尖、根尖から1 mm 歯冠側、根尖から2 mm 歯冠側、根尖から4 mm 歯冠側とした。通電直後または1週後に脱灰、薄切標本を作製して、主根管内、根尖分枝内、歯周組織の状態を組織学的に評価した。

その結果、根尖孔の穿通や根管拡大は行わず、150 Vまたは225 V、ファイル先端位置を根尖から1 mm または2 mm 歯冠側で1秒通電した場合、主根管の歯髄は蒸散および壊死し、根尖分枝内にも空洞化したり壊死したりした。また、歯根膜や歯槽骨にはほとんど傷害はなかった。しかし通電時間を0.2秒にしたり、ファイル先端の位置を根尖から4 mm 歯冠側にしたりすると、根尖分枝内に残存する歯髄が多くなった。また、ファイル先端位置を根尖として通電した場合、通電時間が0.2秒であっても歯根膜に強い炎症性細胞浸潤がみられ骨吸収も観察された。一方、根尖孔を穿通し#20まで予備拡大（グライドパス）した後に、ファイル先端位置を根尖から1 mm 歯冠側として1秒通電した場合、根尖分枝内に歯髄が残存するものが増加し、術後1週では歯根膜には穿通による機械的刺激やセメント質の破折片が原因と思われる炎症が認められた。

これらの結果から、ファイル先端位置を根尖孔から1~2 mm 歯冠側として225 Vの高周波電流を1秒通電することで、根尖孔の穿通や根管拡大を行わなくても歯周組織に障害なく主根管及び根尖分枝内の歯髄を蒸散、壊死させることが可能なことが明らかとなった。抜髄時に高周波電流を応用することは、とくに穿通や拡大形成が困難な症例では効果の高い治療法になる可能性が示唆された。

キーワード：高周波電流、抜髄、電圧、ファイル位置、インピーダンス

## 【緒言】

抜髄後に強い術後疼痛なく貼薬または根管充填に移行できる症例は 96%と報告<sup>1)</sup>されているように、抜髄は根尖性歯周炎を発症することなく良好な経過が得られる成功率の高い治療法である。しかし、根管形態によっては多大な時間を要し歯髄除去が不完全になることもあり、残髄すると、残髄炎による術後疼痛や歯根膜炎を誘発する可能性がある<sup>2)</sup>

歯髄除去は一般的に根管の機械的拡大形成により行っているが、イスマス、フィン、湾曲根管、槌状根、側枝ではファイルが根管壁に十分に届かず<sup>3)</sup>、あるいは意図せず形成されたレジヤステップがあるとその根尖側の根管にはファイルが到達しないため歯髄が除去できなくなる<sup>4)</sup>。また、根管長の測定には電氣的根管長測定器が用いられるが、単波長の測定器では、根管内に電導性物質が存在すると正確な測定ができないとされており、さらに根尖孔の大きさや根管の形態などの解剖学的因子、さらには測定針の太さや材質、測定電流の大きさなどによって影響を受けるとされている<sup>5-7)</sup>。そのため、2波長相対値法による測定が行われるようになったが、ファイル位置を計測した実験<sup>8,9)</sup>では、いずれも 0.5~1mm のばらつきが報告されており、電位的根管長測定により作業長を決定した場合、根尖狭窄部より 1mm 程度歯冠側になってしまい、ある一定の確率で残髄が生じることが避けられないと考えられる。

一方、電氣的根管長測定は、ファイル先端が歯根膜に達したときに一定の値をとることを利用しているため、根尖孔を穿通しなければ精度が低下することになる<sup>10)</sup>。根尖孔はとくに高齢者では細くなっていることが多く、ファイルを穿通するためには狭窄部根管壁の切削が必要であり、切削片や根管内容物を根尖孔から押し出す危険性があるとともに、歯根膜の物理的損傷も避けられないと言われており<sup>11,12)</sup>、これが術後疼痛になる危険性を指摘する報告もある<sup>13)</sup>。

このような要因で機械的歯髄除去が不完全になった場合、次亜塩素酸ナトリウムなどによる化学的根管洗浄による歯髄の除去や、根管貼薬剤による残存歯髄の壊死を期待することになる。しかし最も多用されている<sup>14)</sup>次亜塩素酸ナトリウムを用いた根管の化学的清掃は、時間を要する上に<sup>15)</sup>、バイオフィルム内の細菌は完全に死滅できないとも報告されている<sup>16)</sup>。また、根管内にイスマス、フィン、側枝、分枝など薬剤が到達しにくい部位では期待した十分な効果が得られない<sup>17)</sup>。また貼薬剤として広く使用されている水酸化カルシウム製剤は、有機質溶解作用を有し抜髄後の残存歯髄の失活に有効に作用するという報告もあるが<sup>18,19)</sup>、十分な効果は得られないという研究結果も報告されている<sup>20,21)</sup>。一方、ホルマリン製剤を使用した貼薬処置は、残存した歯髄を変性、壊死させることはあるものの<sup>22,23)</sup>、確実に歯髄を壊死させることは難しく、歯周組織に対する腐食性、毒性、局所刺激性、発がん性、催奇形性、突然変異誘導性等から否定的な報告が多い<sup>24-28)</sup>

一方高周波電流はファイル先端に発生するジュール熱によって、歯髄を焼灼し壊死させることが可能で、古くから根管治療への応用が行われており<sup>29-31)</sup>、近年は治療成績の向上が報告されている<sup>32,33)</sup>。さらに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、シミュレーションモデルを用いた数値解析で、根尖狭窄部では根管が狭くなっているとインピーダンスが大きくなり、ジュール熱が生じて大きな温度上昇が得られると報告されている<sup>34)</sup>。熊谷ら<sup>35)</sup>は、根尖狭窄部をシミュレートした模擬根管模型に通電すると、根管壁の有機質を蒸散させたり象牙質を溶融凝固させたりすることが可能なことを報告している。

したがって、有髄歯の根管に高周波電流を通電すると、電極周囲で歯髄が焼灼されて蒸散や変性を起こすだけでなく、根尖狭窄部や側枝、根尖分枝でも歯髄を蒸散させたり壊死させたりすることができるのではないかと考えられる。戸村ら<sup>36)</sup>はビーグル犬の根管内に高周波電流を応用して歯髄の状態などを観察しているが、この報告では高周波電流の周波数や出力、通電時のファイル先端位置などが不明確で、抜髄に応用した場合への有効性や根尖周囲組織への影響を評価することは難しい。すなわち高周波電流の通電により、根管や側枝の歯髄がどのような変化を起こすのか、不明な点が多いと言える。また通電時の出力が大きくなりすぎたり、ファイル先端が歯根膜に接していたりすると、歯根膜や歯槽骨にも傷害を及ぼす危険性があるため、通電時のファイル先端位置や出力を慎重に検討する必要がある。

そこで本研究はファイル先端位置と出力、通電時間が歯髄の焼灼範囲や歯根膜、歯槽骨に及ぼす影響を組織学的に評価することを目的に行った。

## 【材料および方法】

### 1. 抜髄および高周波電流の通電方法

#### 実験1. 通電時のファイル先端位置、電圧、通電時間の検討

10ヶ月齢ビーグル犬3匹の前臼歯32歯54歯根を用いた。塩酸メデトミジン(0.1 m/kg, ドミツール<sup>®</sup>, 日本全薬工業)、酒石酸ブトルファノール(0.1 m/kg, ベトルファール<sup>®</sup>, MeijiSeika ファルマ)、ミタゾラム(0.1 m/kg, ドルミカム<sup>®</sup>, アステラス製薬)による全身麻酔を行った後、エピネフリン(1/80,000)含有2%塩酸リドカイン(歯科用キシロカインカートリッジ, NIPRO)で浸潤麻酔を行った。

通法にて髓腔開拓、ラバーダム防湿、上部根管形成を行った後、根尖孔は穿通せず、高周波電流を通電した。通電は高周波発生装置(モリタ製作所)を用いて、周波数520 kHz、duty 70%、150 Vまたは225 Vの定電圧で通電を行った。能動電極には#10Kファイル(マニー)を用い、通電時のファイル先端位置は、根管内に挿入してデンタルエックス線写真撮影(コードレスデジタルX線装置デキシコ ADX4000W<sup>®</sup>, 10DRJapan)を行って決定した。対極は対象歯と反対側の頬粘膜に設定した。

Group 1は根尖から1 mm 歯冠側までファイルを挿入したが通電は行わなかった。Group 2~8のファイル先端の位置は根尖から1~4 mm、電圧150または225 V、通電時間0.2または1秒として、表1の組み合わせで通電を行った。いずれの群も根管拡大形成は行わず、

Group 1～7は通電後直ちにペントバルビタールナトリウム(0.5 ml/kg,ソムノペンチル、共立製薬)とドミトール、ベトルファール、ドルミカムによる全身麻酔下で、10%リン酸緩衝ホルマリン溶液を使用して灌流固定を行った。

Group 8は、10%次亜塩素酸ナトリウム(ネオクリーナー「セキネ」、ネオ製薬)で根管洗浄を行い、ペーパーポイント(JMペーパーポイント®、モリタ)で乾燥して、水酸化カルシウム製剤(ウルトラカルXSJ®、ULTRANET)を貼薬してガラスアイオノマーセメント(FujiIXGPエクストラ®、ジーシー)で仮封し、7日後にGroup 1～7と同様に還流固定を行った。

### 実験2、ファイル先端が歯根膜に触れた状態で通電した場合の障害性

前臼歯6歯12歯根を用い、実験1と同様に髓腔開拡、ラバーダム防湿、上部根管形成を行った後、根尖孔を穿通した。根尖孔の穿通にはトライオートZX2(モリタ製作所)と#10マニースーパーファイル(マニー)を用いた。#10Kファイルを根尖まで挿入してデンタルエックス線写真撮影を行ってファイル先端位置を確認し、実験1と同様に高周波電流の通電を行った。

Group 9は225Vで1秒、group 10は225Vで0.2秒、group 11は150Vで0.2秒とした(表2)。3群とも実験1のgroup 8と同様に根管洗浄、貼薬、仮封を行い、7日後に全身麻酔下で還流固定を行った。

### 実験3. 予備拡大(グライドパス)後の通電効果

12歯21歯根を用い、実験1と同様に髓腔開拡、ラバーダム防湿、上部根管形成を行った後、根尖孔を穿通し歯根長で#20まで予備拡大を行った。根尖孔の穿通と予備拡大(グライドパス)にはトライオートZX2と#10, 15, 20マニースーパーファイルを用いた。

#20Kファイル先端を根尖から1mm歯冠側まで挿入してデンタルエックス線写真撮影を行ってファイル先端位置を確認し、実験1、2と同様に高周波電流の通電を行った。group 12と13は150Vで1秒、group 14は225Vで1秒とした(表3)。Group 12は直ちに全身麻酔下で還流固定を行い、group 13と14は根管洗浄、貼薬、仮封を行って、7日後に全身麻酔下で還流固定を行った。

## 2. 評価方法

還流固定後、歯と歯周組織を一塊として摘出し、10%リン酸緩衝ホルマリン溶液で7日間の浸漬固定を行った後、22.5%ギ酸・10%クエン酸ナトリウム溶液で脱灰、パラフィン包埋して厚さ6 $\mu$ mの薄切切片を作製した。H-E染色を行い、光学顕微鏡にて組織学的評価を行った。

組織学的評価は、根尖部0.5mmの主根管、根尖分枝、根尖歯周組織の3部位に対して行った。主根管と根尖分枝の歯髓の状態は戸村らの報告<sup>36)</sup>を参考にして次の5つに分類した。

Grade 1: 正常、Grade 2: 血管に赤血球が増加、Grade 3: 一部空洞化し歯髄は血管に赤血球が増加、Grade 4: 一部空洞化し細胞の染色性低下し細胞構造が消失、Grade 5: ほぼ空洞化。

根尖歯周組織の状態は同様に戸村らの報告<sup>36)</sup>を参考に次の4つに分類した。Grade 1: 正常な歯根膜と歯槽骨、Grade 2: 歯根膜線維の断裂や出血、Grade 3: 炎症性細胞の浸潤、Grade 4: 骨細胞の染色性低下や骨吸収。

統計処理はIBM SPSS 10.0 J<sup>®</sup> (日本アイ・ビー・エム, 東京) を用い、Kruskal-Wallis 検定および Mann-Whitney U 検定を行い Dunnett または Bonferroni 法による補正を行った。

## 【結果】

### 実験1. 通電時のファイル位置、電圧、通電時間の検討

#### 1. 組織学的観察

ファイルを根尖から1 mm 歯冠側まで挿入するのみで通電しなかった group 1 では、主根管の一部に空洞がみられたが、歯髄は多量に残存し (図1 A)、歯髄内には紡錘形の線維芽細胞様細胞が見られた。残存歯髄の表層は象牙芽細胞様細胞が配列し、歯髄内には還流固定で空洞化した血管が多数観察された。(図1 B)。根尖分枝内はすべて結合組織で満たされていたが (図1 C)、太い根尖分枝では一部空洞化し凝血していた。歯根膜や歯槽骨に障害は認められなかった。

ファイル先端の位置を根尖から1 mm 歯冠側として、150 V、1秒の通電を行った group 2 では、すべての標本で主根管内の歯髄がほとんど消失していたが、根尖部0.5~1 mmには歯髄の残存がみられた (図2 A)。残存歯髄の最歯冠側部はヘマトキシリン好性で無構造になっていた。残存歯髄内には紡錘形の線維芽細胞様細胞が見られたが、血管は観察されず、ヘマトキシリン好性の繊維状の構造が観察された (図2 B)。この構造物はヘマトキシリン好性で無構造であり、赤血球を思わせる円形の細胞がみられたがヘマトキシリン好性であった (図2 C)。歯髄表面と根管壁には細胞はみられずヘマトキシリン好性の無構造物が付着していた (図2 D)。根尖分枝内は多くが空洞化しており、わずかにヘマトキシリン好性で無構造あるいはヘマトキシリン好性の円形の細胞が散在する程度であった (図2 E)。これらの所見は主根管に近い部位でも歯根膜に近い部位 (図2 F) でも概ね同様であった。根尖分枝は歯根膜への開口部付近でも空洞で、開口部周囲の歯根膜では線維芽細胞や線維の構造は維持されていた (図2 F)。歯槽骨の骨細胞も染色性の低下はみられず、歯根膜と歯槽骨は概ね正常であった。

ファイル先端を根尖から2 mm 歯冠側の位置として、150 V、1秒の通電を行った group 3 は、主根管および根尖分枝内の残存歯髄は group 2 よりやや多かったが (図3 A)、他はほぼ同様の所見であった。残存歯髄には group 2 と同様の繊維状構造物のほか、ヘマトキシリン好性あるいは黒色の無構造物が観察された (図3 B)。根尖分枝は太いものと細いものが混



在していたが、いずれも1~2層の結合組織が象牙質壁に付着していたり、細胞のない茶褐色の構造物がみられる程度で、大部分は空洞化していた(図3C)。歯根膜や歯槽骨はgroup 2と同様に正常であった。

ファイル先端を根尖から1mm歯冠側の位置として、225V、1秒の通電を行ったgroup 4では、group 2と同様に根尖部0.5mm程度に歯髓の残存が見られ(図4A)、歯髓内にはヘマトキシリン好性の繊維状構造がみられた。一方、血管を思わせる空洞も多く観察されたが、血管内皮細胞は消失しているものが多かった(図4B)。根尖分枝内も概ね空洞化しており、象牙質壁に数層の結合組織がみられる部位もあったが、細胞は紡錘形を維持しているものではなく顆粒状となっていた。根尖分枝の開口部が大きいものでは、歯根膜の一部が欠損したり、線維芽細胞が消失している部位がみられたが、その範囲は50 $\mu$ m程度ときわめて限局的であった(図4C)。歯槽骨には骨細胞がみられ染色性や形態に異常所見はなかった。

ファイル先端を根尖から2mm歯冠側の位置として、225V、1秒の通電を行ったgroup 5は、主根管の残存歯髓はgroup 4よりやや長かったが、ほぼ同様の所見であった(図5A)。また根尖分枝内はgroup 4より空洞化は少なかったが、線維芽細胞や血管内皮細胞は消失しており、一部にエオジン好性の赤血球の凝集を思わせる部位でも細胞形態は維持されていなかった(図5B)。根尖分枝の開口部は、group 4と同様に歯根膜の損傷がみられたが、その範囲はきわめて限局的で(図5C)、骨細胞に異常はみられなかった。

ファイル先端を根尖から2mm歯冠側の位置として、225V、0.2秒の通電を行ったgroup 6では、主根管の歯髓残存量は少なく、残存歯髓の最歯冠側ではgroup 2~5でみられたヘマトキシリン好性の無構造物は見られなかった(図6A)。根尖分枝内は、主根管に近い部位では無構造化したり褐色化していたが(図6B)、歯根膜に近い部分では紡錘形の細胞と線維で満たされているものが多数観察された(図6C)。歯根膜と歯槽骨は正常であった。

ファイル先端を根尖から4mm歯冠側の位置として、225V、1秒の通電を行い、直ちに試料を採取したgroup 7では、主根管に残存する歯髓表面や根管壁には萎縮した細胞がみられヘマトキシリン好性の顆粒状となっており(図7A)、歯髓内の線維芽細胞は消失し、血管内はヘマトキシリン好性または黒色で無構造になっているものが多く(図7B黒矢印)、空洞化しているものも血管内皮細胞は消失していた(図7B赤矢印)。根尖分枝内は一部空洞化したりヘマトキシリン好性あるいは黒色の無構造物が観察されたが(図7C矢印)、紡錘形の線維芽細胞様細胞や線維も多くみられた。歯根膜や歯槽骨は正常であった。

ファイル先端を根尖から4mm歯冠側の位置として、225V、1秒の通電を行い、根管貼薬して7日後に試料を採取したgroup 8では、主根管の残存歯髓は長く血管内はヘマトキ



シン好性または黒色で無構造になっているものが多かった (図 8 A)。残存歯髓の最歯冠側表層はヘマトキシリンに濃染し無構造であった (図 8 B)。太い根尖分枝ではほぼ空洞化していたが (図 8 C 赤矢印)、細い根尖分枝は概ね正常な結合組織で満たされていた (図 8 C 黒矢印)。歯根膜や歯槽骨は正常であった。

## 2. 組織学的分類

主根管の状態は、group 1 はすべて grade 3 「一部空洞化し歯髓は血管に赤血球が増加」であった。Group 2~7 はすべて grade 4 「一部空洞化し細胞の染色性低下し細胞構造が消失」で、group 8 では grade 3 と 5 が各 18%、他は grade 4 であった (図 9)。Kruskal-Wallis 検定の結果、有意差 ( $p < 0.001$ ) が認められた。

根尖分枝は (図 10)、group 1 ではすべて grade 1 「正常歯髓」であった。根尖から 1 mm 歯冠側の位置で 150 V、1 秒通電した group 2 と 2 mm 歯冠側の位置で 1 秒通電した group 3 は、いずれも grade 4 「一部空洞化し細胞の染色性低下し細胞構造が消失」と grade 5 「ほぼ空洞化」の状態が多く、両群とも同様の傾向であった。根尖から 1 mm 歯冠側の位置で 225 V、1 秒通電した group 4 は grade 4 「一部空洞化し歯髓は血管に赤血球が増加」あるいは grade 5 「ほぼ空洞化」で、根尖から 2 mm 歯冠側の位置で通電した group 5 も grade 4 と 5 であった。根尖から 2 mm 歯冠側の位置で 225 V、0.2 秒通電した group 6 も同様であった。根尖から 4 mm 歯冠側の位置で 225 V、1 秒通電した group 7 はすべて grade 4 であった。group 7 と同条件で通電し、1 週後に試料を採取した group 8 では grade 4 と 5 であった。Kruskal-Wallis 検定の結果、有意差 ( $p < 0.001$ ) が認められた。さらに、group 4 は group 1 ( $p = 0.008$ )、group 2 ( $p = 0.02$ )、group 3 ( $p = 0.02$ )、group 7 ( $p = 0.035$ ) に対して有意差が認められ (Mann-Whitney U 検定、Dunnett 補正)、根尖分枝への焼灼が最も効果的であった。

根尖歯周組織は 8 グループともすべての試料でほぼ正常であったが、ファイル位置を根尖から 1 mm あるいは 2 mm 歯冠側として 225V で通電した group 4 と 5、6 では、根尖分枝の歯根膜への開口部で歯根膜の線維や細胞が消失しているものがあつた (図 11)。

Kruskal-Wallis 検定の結果、有意差 ( $p > 0.05$ ) は認められなかった。

## 実験 2、ファイルが歯根膜に触れた状態で通電した場合の障害性

### 1. 組織学的観察

#10K ファイルを根尖まで挿入し、225 V で 1 秒通電した group 9、225 V で 0.2 秒通電した group 10、150 V で 0.2 秒通電した group 11 はいずれも類似の所見で、歯根膜にはリンパ球を主体とする炎症性細胞浸潤が広範囲に生じており (図 12A)、とくに穿通した根尖孔部周囲で炎症が強く認められた (図 12B 矢印)。根尖分枝は太いものではほぼ空洞化していたが (図 12C 赤矢印)、細い根尖分枝はヘマトキシリン好染の無構造物で満たされている

部位が多数観察された (図 12C、D 黒矢印)。骨表面に炎症性細胞が浸潤している部位は少なかったが、歯槽骨表面には破骨細胞様の多核巨細胞や穿下性の骨吸収がみられた(図 12E)。

## 2. 組織学的分類

主根管には、225 V で 1 秒通電した group 9 では grade 3 「一部空洞化し歯髄は血管に赤血球が凝集」がみられたが、大部分は grade 5 「ほぼ空洞化」であった。group 10 は grade 4 と 5 で、group 11 はすべて grade 5 であった(図 13)。

根尖分枝は、3 群とも grade 4 と 5 が半数ずつであった(図 14)。

根尖歯周組織は group 1 と 2 は grade 4 「骨細胞の染色性低下や骨吸収」が多く、25 % が grade 3 「炎症性細胞の浸潤」であったが、group 4 はすべて grade 3 であった(図 15)。

Kruskal-Wallis 検定の結果、いずれも有意差 ( $p > 0.05$ ) は認められなかった。

## 実験 3. 予備拡大 (グライドパス) 後の通電効果

### 1. 組織学的観察

根尖孔を穿通して #20 まで予備拡大を行い、ファイル先端の位置を根尖から 1 mm 歯冠側とし、150 V、1 秒の通電を行った直後に試料を採取した group 12 では、主根管に歯髄はみられず、血餅や根管壁の削片を思われる硬組織片が観察された (図 16A)。根尖分枝内は紡錘形細胞や血管を伴う結合組織で満たされており (図 16B)、空洞化しているものはわずかであった。根尖孔周囲にはセメント質の破折片を思わせる硬組織片がみられた(図 16C)。

group 12 と同条件で通電し、根管洗浄、貼薬、仮封して 7 日後に試料を採取した group 13 では、概ね group 12 と同様の所見であった。

根尖孔を穿通して #20 まで予備拡大を行い、ファイル先端の位置を根尖から 1 mm 歯冠側とし、225 V、1 秒の通電を行って根管洗浄、貼薬、仮封し、7 日後に試料を採取した group 14 では、主根管はほぼ空洞で一部にヘマトキシリン好性で細胞のない無構造なものがみられた (図 17A)。根尖分枝は概ね空洞であったが、わずかにヘマトキシリン好性の無構造なものが観察された (図 17B)。根尖孔付近の歯根膜内にはセメント質の破折片と思われる硬組織片がみられ、その周囲にはリンパ球を中心とする炎症性細胞浸潤がみられ (図 17C)、わずかに歯槽骨吸収も観察された。

### 2. 組織学的分類

主根管の状態は、group 12 と 13 では grade 4 「一部空洞化し細胞の染色性低下し細胞構造消失」と grade 5 「ほぼ空洞化」で、group 14 では grade 3 「一部空洞化し歯髄は血管に赤血球が増加」と grade 4 が一部にみられたが、他は grade 5 であった(図 18)。

根尖分枝は、group 12 では grade 4 が多く、grade 3 と 5 もみられた。group 13 では grade

4 と 5 で、group 14 では grade 5 が大部分であったが grade 3 と 4 もみられた (図 19)。Kruskal-Wallis 検定の結果、主根管と根尖分枝では有意差 ( $p > 0.05$ ) は認められなかった。

根尖歯周組織は group 12 では grade 1「正常な歯根膜と歯槽骨」もみられたが、多くは grade 2「歯根膜線維の断裂や出血」であった。group 13 は grade 3「炎症性細胞の浸潤」と grade 4「骨細胞の染色性低下と骨吸収」であった。group 14 は grade 3 が最も多く、grade 2 と 4 もみられた (図 20)。

Kruskal-Wallis 検定の結果、根尖歯周組織では有意差 ( $p = 0.001$ ) がみられた。さらに group 12 と group 13 ( $p = 0.006$ )、group 12 と group 14 ( $p = 0.018$ ) の間に有意差が認められ (Mann-Whitney U 検定、Bonferroni 補正)、1 週間の水酸化カルシウム貼薬後でも強い炎症が生じていることが明らかとなった。

### 【考察】

根管に挿入したファイルを電極として高周波電流を通電すると、ファイル周囲だけでなく、根尖狭窄部や側枝など根管が狭窄している部位で発熱することを、抜髄に応用する目的で本研究を行った。

まず実験 1 として高周波電流の電圧、通電時間、通電時の能動電極であるファイル先端の位置について検討を行った。実験動物にはビーグル犬を用いた。ビーグル犬の永久歯は根尖分枝が多く、ファイルにより機械的に歯髄が除去できない部位に対する通電の影響を検討するには適した形態であったと考えられる。

高周波電流の電圧は熊谷らの報告<sup>35)</sup>を参考に決定した。この報告によると、直径 0.1mm 長さ 1 mm の模擬根管に高周波電流を 1 秒通電した場合、150 V より 225 V の方が根管壁象牙質の溶融が多くなったとしている。しかし、150 V でも根管壁の有機質が 80 % 程度は消失したとされており、抜髄では根管内の歯髄を蒸散、変性させることが目的となるため、150 V で 1 秒通電することで十分な効果が得られる可能性があった。一方、上記の熊谷らの実験での結果は、根管内は NaClO であり、歯髄は NaClO より導電性が低く発生するジュール熱は小さいと考えられること、さらに根尖分枝の直径は 0.1mm よりも小さいことを考慮して、225 V の電圧でも検討を行った。通電時間は 1 秒と 0.2 秒で検討した。これは、熊谷らはファイル先端が象牙質表面に触れた状態で 1 秒の通電を行うと、象牙質が溶融することを報告しているため、歯髄を蒸散、熱変性させる目的であれば、0.2 秒の通電でも十分な可能性があると考えたためである。

また、ファイル先端の位置はファイルを根管に試適してエックス線写真を撮影することで確認した。ヒトでは根尖孔と根尖とは一致しないことが多いため<sup>37)</sup>、エックス線写真で根尖孔の位置を知ることは難しいが、イヌの歯根は多数の根尖分枝が根尖部に集中しており、根尖と根尖孔は一致すると考えられる。したがって、電氣的根管長測定の誤差を考える

と、ファイルを入れたエックス線写真でファイル先端位置を決定した方が精度は高いと考えられたため、電氣的根管長測定は用いなかった。

主根管の歯髄は、通電を行った group 2~8 では、いずれも概ねファイル先端部付近まで消失していた。残存した歯髄の表面や根管壁には、150 V で通電した場合には熱変性を思わせるヘマトキシリン好性で無構造の層がわずかにみられたが (図 2D)、225 V ではそのような層はみられなかった。高周波電流を電極に通電すると、電極近傍の軟組織では電流密度が高くなって、組織中の水分が瞬間的に蒸発することで組織が断裂し切開されるが、電圧が高い方が電流値は高く蒸散が起こりやすくなり、電圧が低いと電流値も下がって熱変成が生じやすくなるのではないかと思われた。また、残存した歯髄では、線維芽細胞は形態を維持していたが、血管内では赤血球が形態を失ってヘマトキシリン好性となっていたり、さらには赤血球周囲もヘマトキシリン好性で無構造となっていた (図 2C)。これらは、赤血球や血漿が熱によって変性したもので、歯髄の結合組織より血管内の方が通電の影響が強かったと考えられる。これは、血液の方が結合組織より導電性が高く<sup>38)</sup>、狭い血管内に多量の電流が流れて電流密度が高くなり、発熱量が大きくなったためと思われる。このことは、歯髄の血流を遮断して止血性が向上するとともに、残存した歯髄を壊死させるのにも有効に作用すると考えられる。一方、ファイル先端を根尖から 1 mm あるいは 2 mm 歯冠側の位置として 225 V の通電を行った場合には、残存歯髄に空洞が散見され血管は少なくなっていた (図 4 B)。これは、通電時のファイル位置が根尖に近くなってインピーダンスが小さくなったことによって電流量が増加し、血管内の電流密度も高くなって発熱量が大きくなり、血管内容物と血管壁が熱によって蒸散した結果ではないかと考えられた。

一方、根管壁に付着していたヘマトキシリン好性の無構造なものは (図 2D)、象牙芽細胞が熱変成したものと考えられる。歯髄を電流が流れる導体と考えると、高周波電流は導体表面で電流密度が高くなる特徴があるため、歯髄表面でより温度が上昇し、象牙芽細胞は歯髄内部の線維芽細胞より強く熱変成を受けたのではないかと思われた。

主根管に残存する歯髄は、通電時間が 1 秒より 0.2 秒の方が少なく、残存歯髄の最歯冠側は熱変成を思わせるヘマトキシリン好性の無構造物がほとんど見られなかった (図 6A)。これは、短時間の通電では発熱が不十分となり、歯髄がファイル先端で切断されず、熱変成した歯髄がファイルに付着して、ファイルを根管から引き抜く際に機械的に切断、除去された可能性がある。しかし、根管内に出血は見られず、残存歯髄に正常な血管もみられなかったことから、group 3~6 で見られたような血管内容物の熱変成は 0.2 秒でも生じていたのではないかと思われた。しかし、通電時間を短くしてファイルに歯髄を付着させて引き抜くのは、主根管の最根尖側で切断されているとは限らないので、確実性に劣る方法と思われた。

225 V の電圧で根尖から 4mm 歯冠側の位置で通電した場合には、歯髄は変性していたが、水酸化カルシウム製剤を 1 週間根管貼薬した group 8 でも、歯髄が溶解して空洞化したのは 2 割にも満たず、歯髄充血を思わせる例もあった。すなわち、通電により残存した歯髄を水酸化カルシウム貼薬により溶解、壊死させることはできないと思われた。

根尖分枝の歯髄は、通電しなかった group 1 ではほぼ正常な状態であったが、太い根尖分枝内は一部空洞化したり凝血が見られたりするなど、すべてが正常とは言えず、主根管の歯髄のみを除去して根尖分枝に正常な歯髄を長期間残すことは困難と考えられた。実際の臨床で抜髄が必要な症例では、主根管の歯髄の炎症が根尖狭窄部や側枝などに波及している可能性も疑わなければならないことから、根尖分枝や側枝の歯髄を健全な状態で保存することはさらに難しいと思われる。したがって、これらの部位の歯髄はすべて壊死させた方が術後疼痛や根尖性歯周炎の危険性は低下すると考えられる。

通電した group 2~8 では根尖分枝内は grade 4 か 5、すなわち一部空洞化かほぼ空洞化している状態であった。150 V で通電した group 2 と 3 は同様の結果で、根尖分枝内の多くが空洞化し、歯冠側でも根尖側でも同様の傾向であった (図 2E,F)。このことから、根尖分枝の焼灼はファイル先端の発熱が伝わったのではなく、狭くインピーダンスの大きい根管を電流が流れることで発熱し、歯髄が蒸散したり変性したものと考えられる。しかし、group 2 に比べると group 3 の方が形態を維持している線維芽細胞は多かったことから、根尖から 2 mm 歯冠側より 1 mm 歯冠側の位置で通電した方が、根尖分枝内の歯髄の焼灼効果は高いと思われた。一方、太い根尖分枝と細い根尖分枝が混在している歯根では、太いものは歯髄が蒸散していたが、細い根尖分枝内には線維芽細胞が形態を維持している傾向がみられたことから、太い根尖分枝に電流が多く流れて発熱し、細い分枝では電流量が低くなると考えられる。

一方 225 V で通電した group 4 と 5 では、根尖分枝内が空洞化したり、一部に残存している歯髄も細胞が構造を失っているものがほとんどであった。とくに根尖から 1 mm 歯冠側で通電した group 4 では空洞化しているものが多く、太い分枝と細い分枝が混在していても、細い分枝内の歯髄も蒸散していたり、無構造になっているものが多かったことから (図 4A)、225 V で根尖から 1 mm 歯冠側の位置で通電することは、より確実に分枝内の歯髄を蒸散、壊死させると考えられた。通電時間は 0.2 秒でも、根尖分枝内の状態は 1 秒と大差なかったことから、ファイルが根尖から 1 mm 歯冠側の位置まで挿入できた場合には、0.2 秒の通電でも十分に効果があると考えられた。また、根尖から 4 mm 歯冠側の位置で 225 V の通電を行った group 7 は、根尖分枝内の多くは変性していたが正常な歯髄もわずかにみられ、ファイル先端が根尖から離れることで電流量が不十分になったと考えられた。さらに 1 週間水酸化カルシウムを根管貼薬しても、根尖分枝内は十分に壊死させることができなかったことから、根尖から 4 mm 歯冠側の位置で通電を行うことは、主根管の所見も併せて考えると、術後の疼痛などにつながる危険性があると思われた。

歯根膜や歯槽骨には、group 1~3, 6~8 で正常であったが、group 4~5 の根尖分枝が太いものでは、根尖分枝の開口部ではわずかに歯根膜線維や細胞が消失しているものがあつた。しかし、その範囲は開口部から 100  $\mu\text{m}$  以下であり、骨細胞への影響もみられなかつた。

たことから、根尖分枝内での発熱が歯根膜に与える障害はきわめて軽微と考えられた。これは、根尖分枝が太いものでも  $100\mu\text{m}$  程度ときわめて細いため、温度は高くても全体の熱量としては小さいこと、血液の熱伝導率は水と同程度で低い<sup>39)</sup> ため熱の影響が拡散しにくいこと、歯根膜の血流速度は  $0.3\text{mm}\sim 0.7\text{mm}/\text{秒}$  と早く<sup>40,41)</sup>、豊富な血流による冷却効果が大きく働いていたことなどが考えられるが、詳しくは今後の解明を待たなければならない。

一方、根尖孔にファイル先端が到達している状態で通電し、ファイルを発熱させて歯髄を変性、蒸散させた方が確実に歯髄に熱を伝えることが可能となる上に、ファイルへの電流量が大きくなって発熱量も増加して、より確実に歯髄が壊死できると考えられる。しかし、同時に歯根膜には傷害も強く波及する危険性があることから、実験2ではファイルが歯根膜に触れた状態で通電した場合の影響を検討した。

その結果、主根管の歯髄は  $150\text{V}$ 、 $0.2$  秒の通電でも空洞化するものが多く、実験1の結果と比較すると、 $1\text{mm}$  歯冠側の位置で通電するより、根尖孔の位置で通電する方がファイルの発熱による歯髄の蒸散効果は高くなると考えられた。また、根尖分枝内は半数が空洞化し半数は一部細胞の残存はあっても壊死していたことから、根尖孔の位置で通電することは根尖分枝の焼灼にも効果があると考えられた。この根尖分枝の所見は、主根管に近いものほど空洞化していたことから、ファイルの発熱が伝導したという可能性と、主根管の歯髄が喪失したために、根管貼薬した水酸化カルシウムの浸透性が高くなった可能性が考えられた。

一方、group 10 と 11 では  $0.2$  秒の通電であったが、1 週後には歯根膜にリンパ球を中心とした炎症が生じており、骨吸収もみられた。炎症性細胞は歯根側に多く骨面まで浸潤しているものは少なかったが、このことは骨の方が歯根膜より熱の影響を受けやすいことを示している。すなわち、骨は  $47^\circ\text{C}$  程度になると壊死すると言われており<sup>42)</sup>、結合組織より熱の影響は大きいため、歯根膜の炎症が骨面に達していなくても熱による骨の損傷があったものと考えられる。また、これらの影響は1 週では回復せず、歯根膜の炎症は打診痛を誘発することから、根尖孔までファイルを挿入して通電することは避けなければならないと言えよう。

次に実験3として通電前に根尖孔を穿通し予備拡大（グライドパス）した場合の影響について検討を行った。これは、根尖孔を穿通して予備拡大を行うことでインピーダンスが減少して、予備拡大された根管への電流量が大きくなり、細い根尖分枝ではむしろ発熱量が不十分になる可能性が考えられたことと、予備拡大された根管の歯根膜への開口部では、温度上昇に伴い歯根膜への障害も大きくなる可能性が考えられたためである。

予備拡大後に根尖から  $1\text{mm}$  歯冠側の位置で  $150\text{V}$  の通電を行い、直ちに還流固定した group 12 では、根尖孔を穿通せず同条件で通電した実験1の group 2 に比較して、主根管に歯髄の残存がみられないものが多くなった。これは予備拡大によりインピーダンスが低



下したため電流量が増加し、ファイルの発熱量も増えた可能性も考えられるが、主根管内に象牙質の切削片がみられたことから、予備拡大によって歯髄が機械的に除去されたと考えるのが妥当であろう。また、空洞化した主根管には赤血球がみられるものが多く、通電後も歯根膜や根尖分枝から出血が続いていたと思われた。

根尖分枝は主根管とは逆に、根尖孔の穿通と予備拡大を行わなかった場合より、空洞化は少なくなった(図 16B)。これは予備拡大して太くなった根管への電流量が増加して、細い根尖分枝への電流量が減少したためと考えられる。しかし、1 週間水酸化カルシウムを貼薬した group 13 と 14 では、根尖分枝内の細胞は空洞化しているものが多くなった(図 17B)。これは、根尖を穿通しない場合より主根管内の残存歯髄が減少し、根尖分枝への貼薬効果が高まったためと思われる。

一方、歯根膜内にはセメント質の破折片が多数みられ、その周囲には赤血球や炎症性細胞浸潤、骨吸収が観察され、健康な歯根膜はほとんどみられなかった(図 17C)。これは、根尖孔を穿通した時に破壊されたセメント質片が異物となっていることと、予備拡大によって太くなった根管で発熱量が増加し、熱の障害が大きくなったことの2つの可能性が考えられる。とくにイヌの根尖部は細い根尖分枝が多く、#06 のファイルでも穿通できない歯根が多いため、根尖孔を穿通し予備拡大を行うと、ある程度の歯質の損傷は避けられない。セメント質が割れると、セメント質に結合している歯根膜もわずかながら断裂することになり、出血や炎症を生じることになる。このような根尖部歯質の破損はヒトの根管治療でも生じていて、術後の症状の一因になっている可能性が指摘されている<sup>13,43)</sup>。その一方で、歯質のわずかな損傷は予後に影響しないとの報告もあるが<sup>44-47)</sup>、これらの歯根膜への損傷が臨床的に術後の痛みの発現につながっている症例も存在する可能性は十分考えられ、根尖孔の穿通は慎重に行うべきと思われた。

セメント質の破折片がみられない標本では、歯根膜の損傷は発熱の影響と考えられるが、歯根膜の線維や線維芽細胞が構造を失っていてもその範囲はきわめて限局的で、骨に影響は及んでいなかったことから、根尖孔を穿通して予備拡大を行っても#20 程度であれば発熱による傷害は小さいと思われた。したがって、実験3での歯根膜、歯槽骨の障害は、穿通することでファイルによる機械的な損傷や、破損した根尖部歯質が異物となったためと考えられる。

以上から、抜髄時には根尖孔を穿通せず、225V で根尖から1~2mm 歯冠側までファイルを挿入して1秒の通電を行うことによって、根尖分枝内の蒸散や壊死が起こり、主根管にはわずかに残存した歯髄も壊死して、歯根膜に傷害を与えることもほとんどなく、抜髄後の疼痛はほとんど生じないのではないかと考えられた。一方、電圧を下げたり、通電時間を0.2秒にしたり、通電時のファイル先端位置を根尖から4mmまで歯冠側にしたりしても、歯髄を壊死させる効果は高いが、電氣的根管長測定には誤差を伴うため通電位置がよりこれより歯冠側になる危険性は避けられないことを考慮すると、根尖から1~2mm 歯冠側までファ



イルを挿入して 225 V で 1 秒の通電を行うことが最良と思われた。しかし、根管の著しい湾曲などでファイルの到達が根尖まで 4 mm 程度の距離があったとしても、通電することによって残髄炎を生じる危険性は相当に軽減することが期待できる。

また、電氣的根管長測定の精度を向上させるためには根尖孔までファイルを挿入することが必要であり、根管内の歯髄が壊死してもこれを除去しなければ細菌増殖につながったり根管充填の封鎖性低下の原因になったりするため、根尖孔を穿通して予備拡大を行い、根管充填可能な形態に拡大形成を行うことは必要である。しかし、根尖孔を穿通する前に通電しておくことで、側枝や根尖分枝、根尖狭窄部の歯髄壊死がより確実になると考えられる。

本実験ではイヌを用いたため、多数の根尖分枝が観察されているがヒトではこれほどの根尖分枝はなく、側枝は根尖から 3 mm 程度歯冠側にあったり、副根管があたりと、解剖学的形態はイヌとは異なっている<sup>48)</sup>。これらの部位で歯髄を失活させることが可能であるかは今後の課題である。また、本実験は健全歯の正常歯髄で行っており、炎症があり抜髄が必要な症例では歯髄の導電性は様々であると考えられることから、高周波電流の通電効果は臨床研究により検討を行うことも今後必要であろう。さらに、根未完成歯や乳歯など根尖孔が大きい場合には、ファイルの発熱で歯髄を壊死させることになるが、電氣的根管長測定が不確実で根尖孔の位置を正確に把握するのが難しいことと、歯根膜にファイルが接した状態での通電は歯周組織に障害を与えることを考慮すると、通電する際のファイル先端位置の決定には慎重になる必要がある。また、乳歯では後継永久歯へも電流が流れるため、形成不全が生じないかも検討しなければならない。

## 【結論】

ビーグル犬前臼歯の生活歯髄根管に 520 kHz、duty 70 % の高周波電流の通電を行い、歯髄と歯周組織に与える影響を組織学的に検討した結果、以下の結論を得た。

1. 根尖孔を穿通せずに根尖から 1~2 mm 歯冠側までファイルを挿入して 225 V で 1 秒間通電することにより、歯周組織に障害を誘発せずに主根管の歯髄を切断し、わずかに残存した歯髄を変性させて血流も遮断し、根尖分枝内の歯髄を蒸散、変性させることが可能であった。
2. #20 まで根尖孔を穿通し予備拡大を行った後に高周波電流を通電すると、歯根膜や歯槽骨には穿通による機械的損傷が生じるとともに、根尖分枝内の歯髄の焼灼が不確実になった。

## 【参考文献】

- 1) Sjogren U, Hagglund B, Sundqvist G, Wing K: Factors affecting the long-term results of endodontic treatment. *J Endod* 16: 498-504,1990.
- 2) Holland GR: Periapical neural changes after pulpectomy. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 80:726-734 1995.
- 3) Barbizam JVB, Fariniuk LF, Marchesan MA, Pecora JD, Sousa-Neto MD: Effectiveness of manual and rotary instrumentation techniques for cleaning flattened root canals, *J Endod* 28: 365-366, 2002.
- 4) Sarraf P, Kiomarsi N, Taheri FH, Moghaddamzade B, Dibaji F, Kharazifard MJ: Apical transportation of mesiobuccal canals of maxillary molars following root canal preparation with two rotary systems and hand files:acone-beam computed tomographic assessment. *Front Dent* 16: 272-278, 2019.
- 5) 砂田今男：根管長の新しい測定法について。口病誌、25：65-75，1958.
- 6) 小林千尋，砂田今男:電氣的根管長測定法。日齒保存誌，32：811-832，1989.
- 7) 小林千尋，須田英明，砂田今男:電氣的根管長測定法に関する基礎的研究（第2報）インピーダンスアナライザーによる測定。日齒保存誌，34：1208-1221，1991.
- 8) Ebrahim AK, Yoshioka T, Kobayashi C, Suda H: The effects of file size, sodium hypochlorite and blood on the accuracy of Root ZX apex locator in enlarged root canals an in vitro study. *Aust Dent J* 51:153-157,2006.
- 9) Erdemir A, Eldeniz AU, Ari H, Belli S ,Esener T: The influence of irrigating solutions on the accuracy of the electronic apex locator facility in the Tri Auto ZX handpiece. *Int Endod J* 40:391-397,2007.
- 10) Kobayashi C, Suda H : New electronic canal measuring device based on the ratio method.*J Endod* 20:111-114,1994.
- 11) Gutiérrez JH, Brizuela C, Villota E: Human teeth with periapical pathosis after overinstrumentation and overfilling of the root canals:a scanning electron microscopic study. *Int Endod J* 32:40-48, 1999.
- 12) Lambrianidis T, Tosounidow E, Tzoanopoulou M: The effect of maintaining apical patency on periapical extrusion. *J Endod* 27:696-698,2001.
- 13) Holland R, Sant'Anna JA, Souza Vd, Dezan JE, Otoboni FJA, Bernabé PF, Nery MJ, Murata SS: Influence of apical patency and filling material on healing process of dogs' teeth with vital pulp after root canal therapy. *Braz Dent J* 16: 9-16, 2005.
- 14) Kandaswamy D, Venkateshbabu N: Root canal irrigants. *J Conserv Dent* 13: 256-264, 2010.

- 15) Siqueira J, Rocas I, Favieri A, Lima K: Chemomechanical reduction of the bacterial population in the root canal after instrumentation and irrigation with 1 %, 2.5 %, and 5.25 % sodium hypochlorite. *J Endod* 26:331-334, 2000.
- 16) Harrison JW, Hand RE: The effect of dilution and organic matter on the antibacterial property of 5.25 % sodium hypochlorite. *J Endod* 7: 128-132, 1981.
- 17) Ricucci D, Siqueira JF: Fate of the tissue in lateral canals and apical ramifications in response to pathologic conditions and treatment procedures. *J Endod* 36: 1-15, 2010.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) Chong BS, Pitt FTR: The role of intracanal medication in root canal treatment. *Int Endod J* 25: 97-106, 1992.
- 21) Karim EI, Kennedy J, Hussey D: The antimicrobial effects of root canal irrigation and medication. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 103: 560-569, 2007.
- 22) Smail-Faugeron V, Courson F, Durieux P, Muller-Bolla M, Glenny AM, Fron Chabouis H: Pulp treatment for extensive decay in primary teeth. *Cochrane Database Syst Rev*. 6: CD003220, 2014.
- 23) 枝 重夫, 中村千仁, 林 俊子, 川上敏行: 根管治療剤ホルマリン・グアヤコールに対する歯髄および根端歯周組織の反応についての実験病理学的研究. *松本歯学* 5: 150-160, 1979.
- 24) 黒木賀代子, 村上雄次, 大住伴子, 木村 環: 根管治療剤 ホルマリン・グアヤコールの急性毒性. *九州歯会誌* 36: 932-939, 1982.
- 25) 荒木孝二: 根管消毒剤 Formocresol の根管壁象牙質浸透性と歯周組織に及ぼす影響について. *口病誌* 50:588-601, 1983.
- 26) van Mullem P J, Simon M, Lamers A C: Formocresol: a root canal disinfectant provoking allergic skin reactions in presensitized guinea pigs. *J Endod* 9:25-29, 1983.
- 27) Friedberg B H, Gartner L P : Embryotoxicity and teratogenicity of formocresol on developing chick embryos. *J Endod* 16: 434-437, 1990.
- 28) Srinivasan V, Patchett C L, Waterhouse P J: Is there life after buckleys formocresol part I -A narrative review of alternative interventions and materials. *International Journal of Paediatric Dentistry* 16:117-127, 2006.
- 29) Klein W: Einige mitteilungen über die anwendung des diathermiestromes in der zahnheilkunde, *Z. f. Stomat* 27: 443, 1929.
- 30) 戸村二郎: 高周波電流による歯髄処置並びに根管治療に関する実験的研究. *口病誌* 23:44-64 1956.

- 31) 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.日歯保誌 16: 66-78, 1972.
- 32) 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.
- 33) 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.
- 34) 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.
- 35) 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回保存学会プログラム抄録集 127, 2019.
- 36) 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)口病誌 24 : 24-39,1957.
- 37) Stein T J,Corcoran J F:Anatomy of the root apex and its histologic changes with age. Oral Surg Oral Med Oral Pathol 69:238-242,1990.
- 38) Geddes L A,Baker L E :The specific resistance of biological material -A compendium of data for the biomedical engineer and physiologist. Med Biol Eng 5:271-293,1967.
- 39) 横山真太郎, 角田直人, 富樫貴子, 濱田靖弘, 中村真人, 落藤 澄：部位別特性を考慮した人体の定常熱移動モデルの開発とその応用. 衛生工学シンポジウム論文集 5: 68-71, 1997/
- 40) 近藤勝義：インピーダンス・プレチスモグラフィによる歯根膜循環動態の研究. 口病誌 36:20-42,1969.
- 41) 笹野高嗣, 庄司憲明, 栗和田しづ子, 三條大助：レーザードプラー血流計を用いた歯髓および歯根膜の血流測定に関する検討. 日本レーザー歯学会誌 4:21-25,1993.
- 42) Eriksson R,Albrektsson T:Temperature threshold levels for heat induced bone tissue injury : A vital-microscopic study in the rabbit. J Prosthet Dent 50:101-107,1983.
- 43) Arias A, Azabal M, Hidalgo JJ, Macorra JC: Relationship between postendodontic pain, tooth diagnostic factors, and apical patency. J Endod 35: 189-192, 2009.
- 44) Lambrianidis T, Tosounidou E, Tzoanopoulou M: The effect of maintaining apical patency on periapical extrusion. J Endod 27: 696-698, 2001.

- 45) Yaylali IE, Demirci GK, Kurnaz S, Celik G, Kaya BU, Tunca YM: Dose maintaining apical patency during instrumentation increase postoperative pain or flareup rate after nonsurgical root canal treatment? A systematic review of randomized controlled trials. *J Endod* 44: 1228-1236, 2018.
- 46) Abdulrab S, Rodrigues JC, Al-Maweri SA, Halboub E, Alqutaibi AY, Alhadainy H: Effect of apical patency on postoperative pain: A meta-analysis. *J Endod* 44: 1467-1473, 2018.
- 47) Arslan H, Doğanay YE, Topçuoğlu HS, Tepecik E, Ayaz N: Success of maintaining apical patency in teeth with periapical lesion: a randomized clinical study. *Quintessence Int* 50: 686-693, 2019.
- 48) Watanabe K, Kikuchi M, Barroga E F, Okumura M, Kadosawa T, Fujiwara T: The formation of apical delta of the permanent teeth in dogs. *J Vet Med Sci* 63:789-795, 2001.

表 1

	ファイル サイズ	根尖孔への 穿通と予備拡大	ファイル先端と 根尖との距離(mm)	電圧 (V)	通 (
Group 1	#10	なし	1	0	
Group 2	#10	なし	1	150	
Group 3	#10	なし	2	150	
Group 4	#10	なし	1	225	
Group 5	#10	なし	2	225	
Group 6	#10	なし	2	225	
Group 7	#10	なし	4	225	
Group 8	#10	なし	4	225	

表 2

	ファイル サイズ	根尖孔への 穿通と予備拡大	ファイル先端と 根尖との距離(mm)	電圧 (V)
Group 9	#10	なし	0	225
Group 10	#10	なし	0	225
Group 11	#10	なし	0	150



表 3

	ファイル サイズ	根尖孔への 穿通と予備拡大	ファイル先端と 根尖との距離(mm)	電圧 (V)
Group 12	#20	あり	1	150
Group 13	#20	あり	1	150
Group 14	#20	あり	1	225

图 1

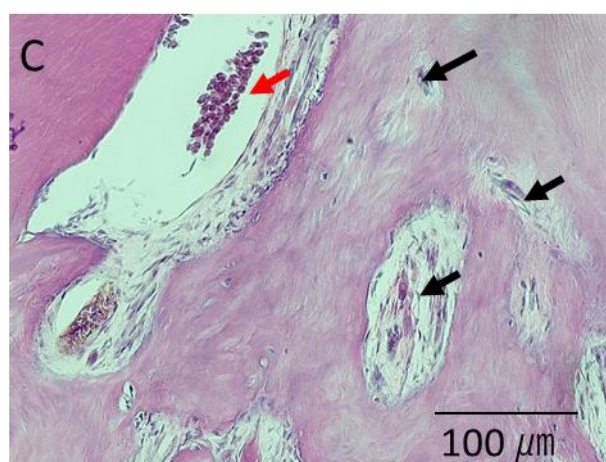
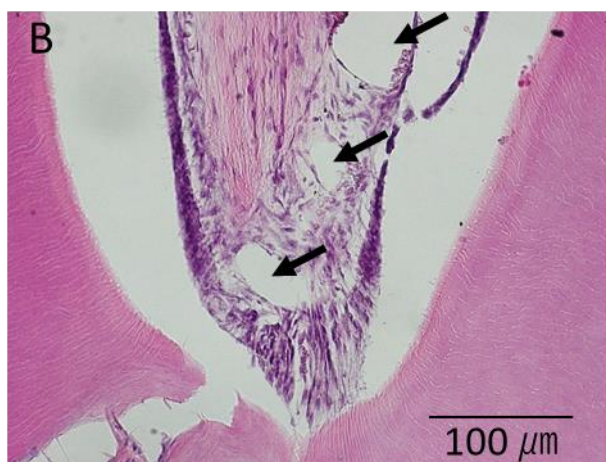
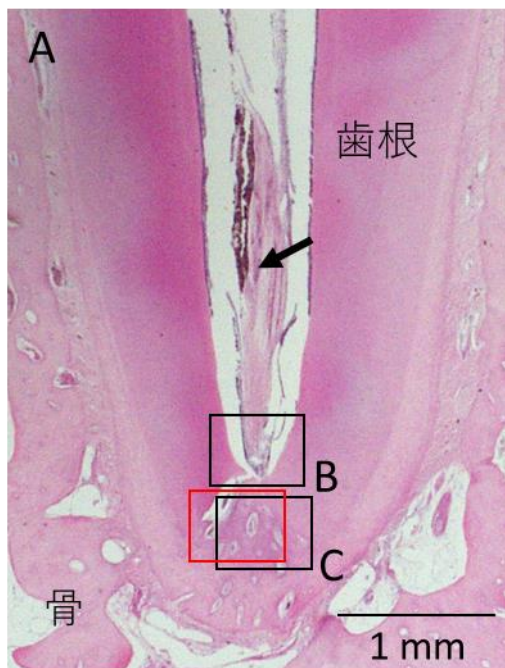


図 2

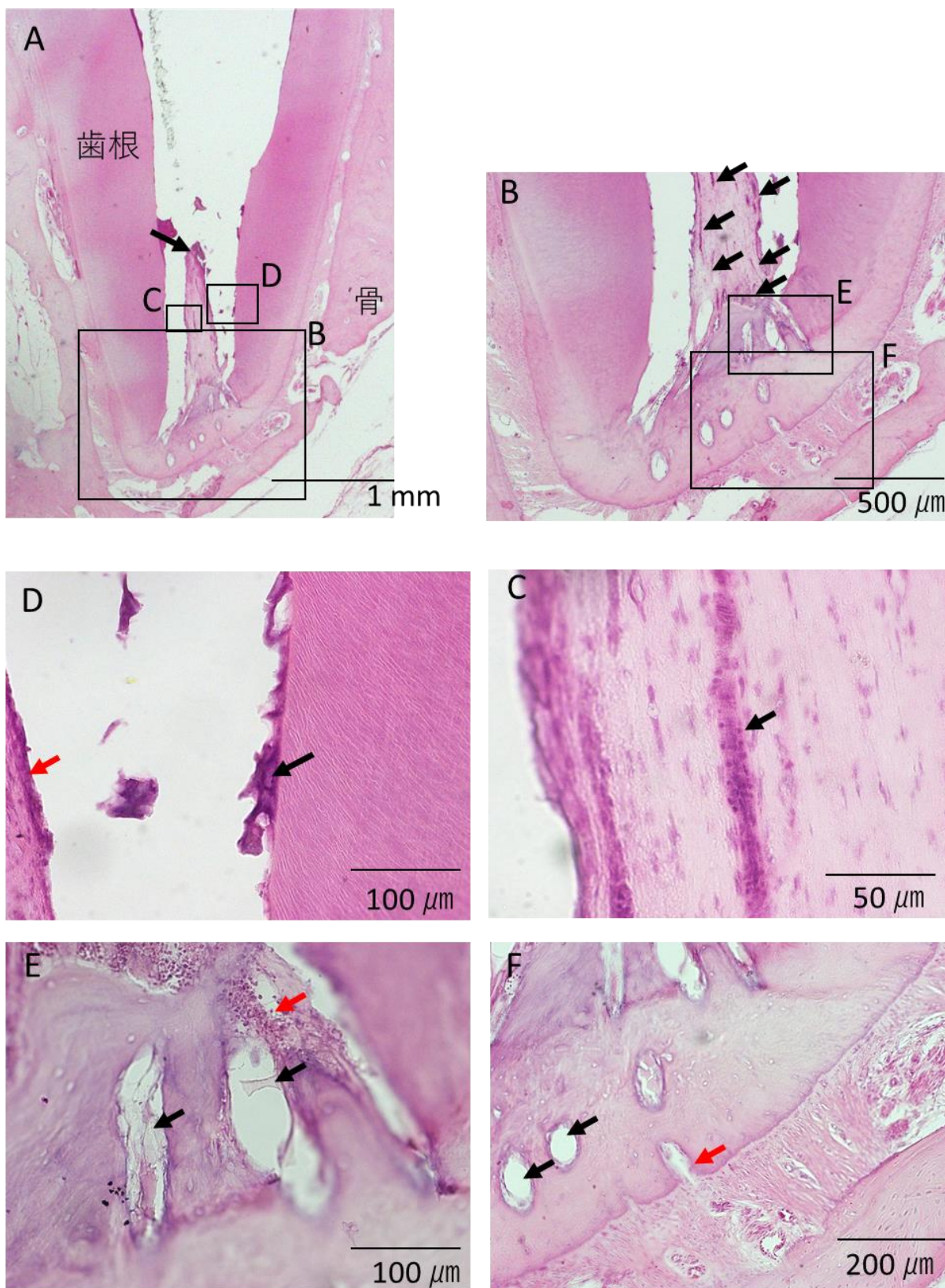




图 3

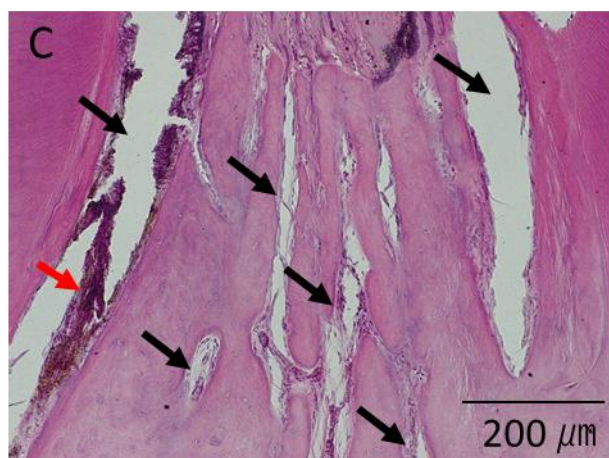
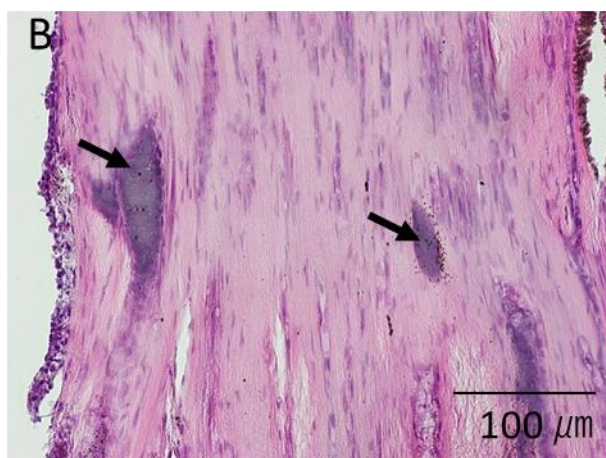
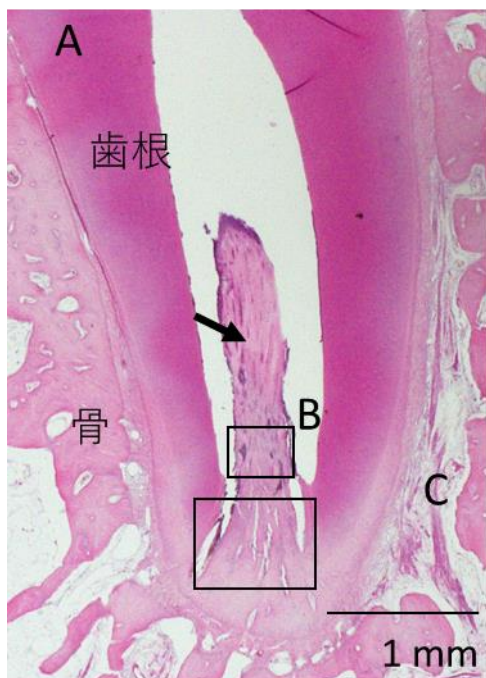


图 4

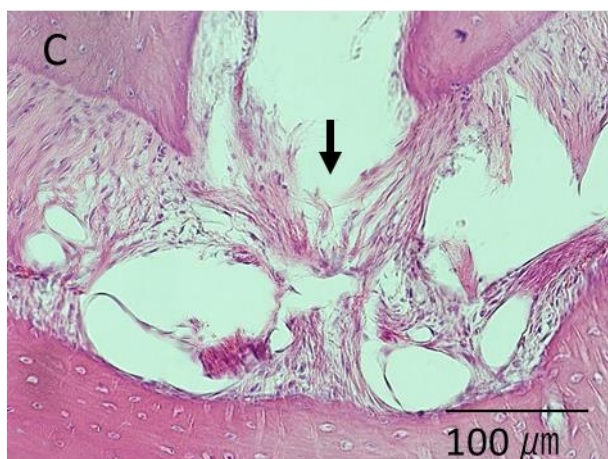
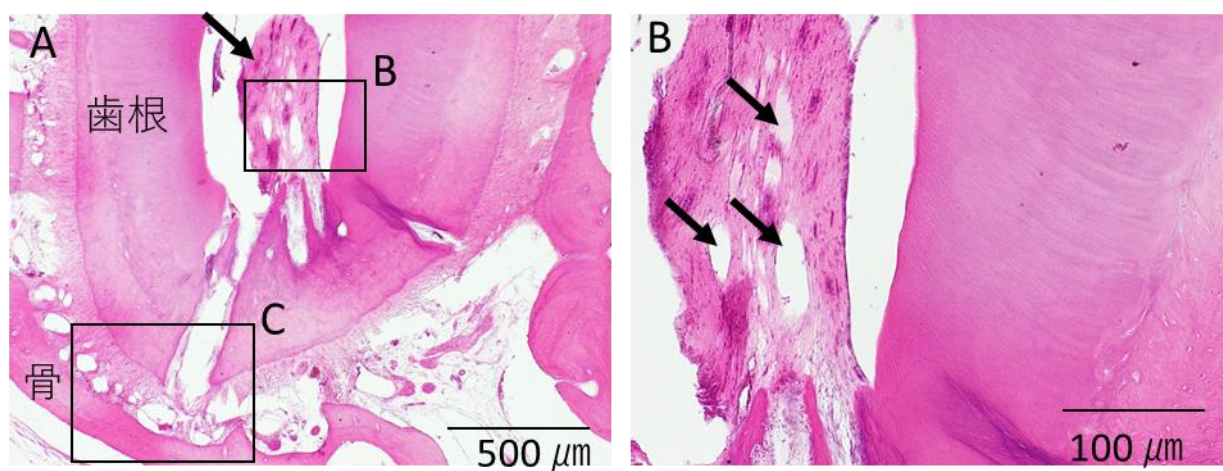


图 5

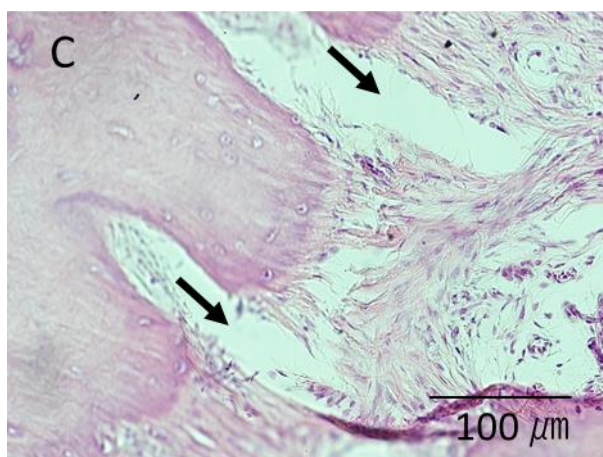
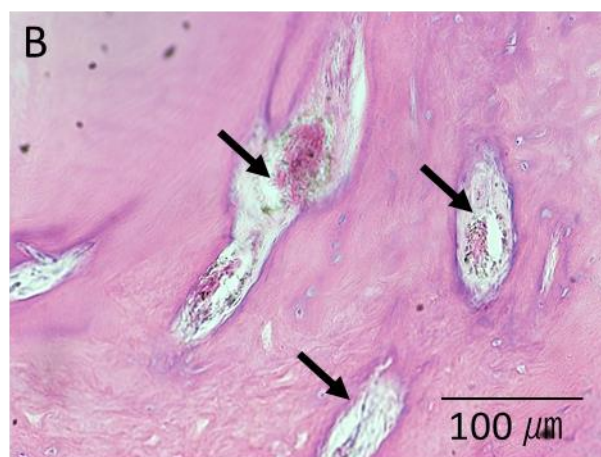
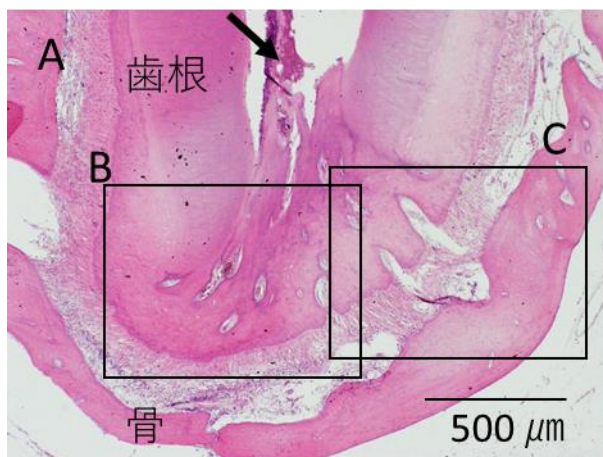




图6

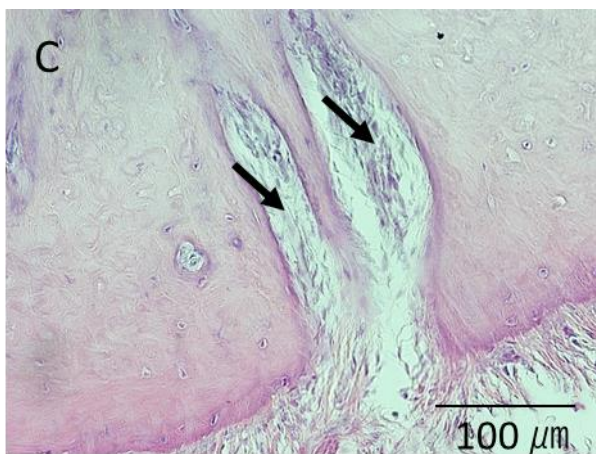
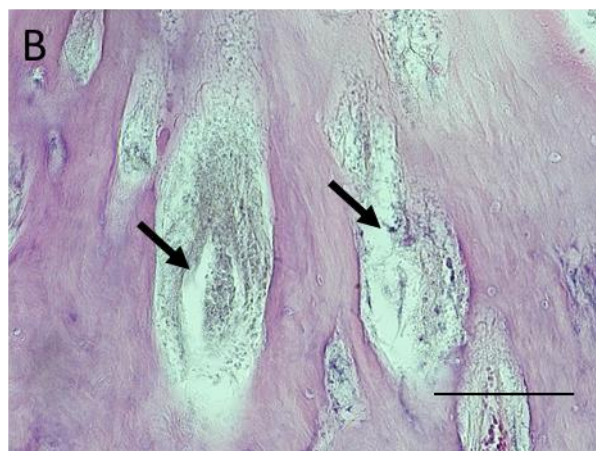
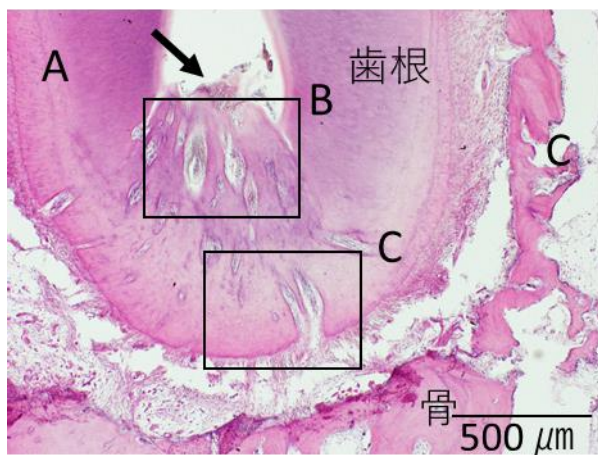




图 7

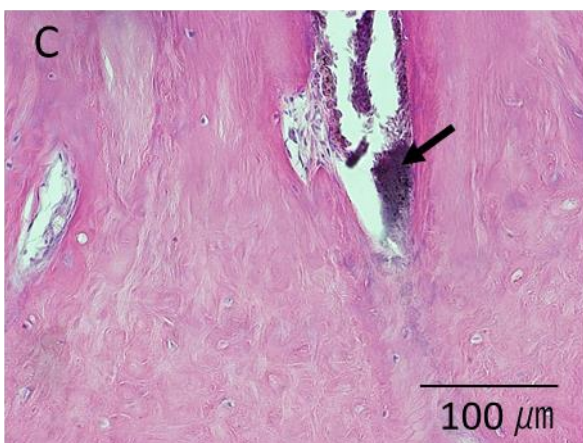
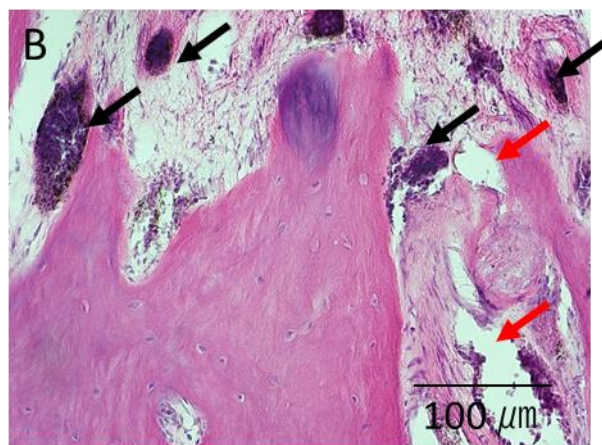
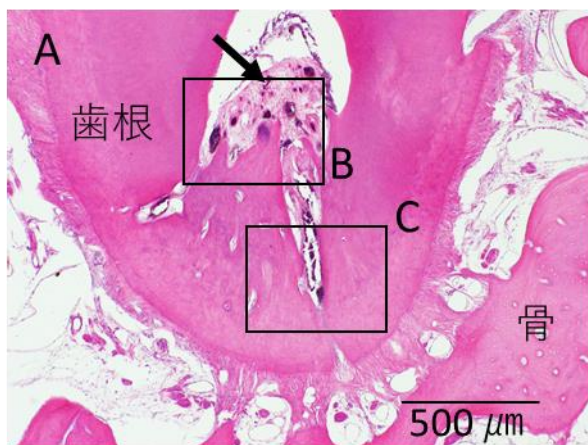
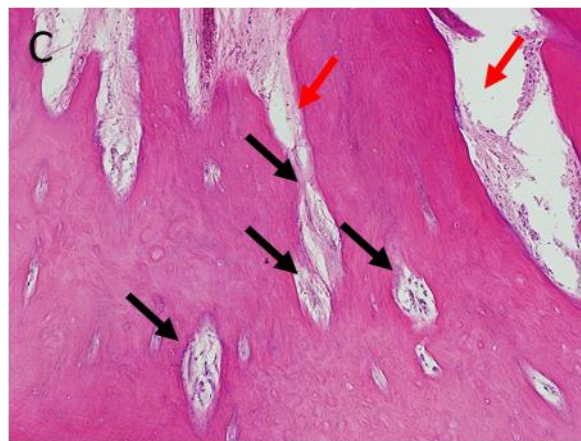
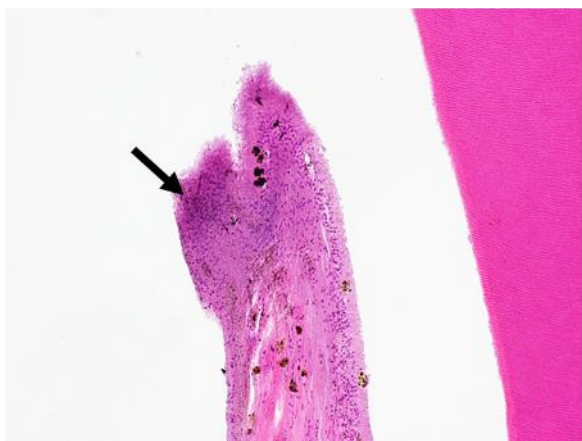
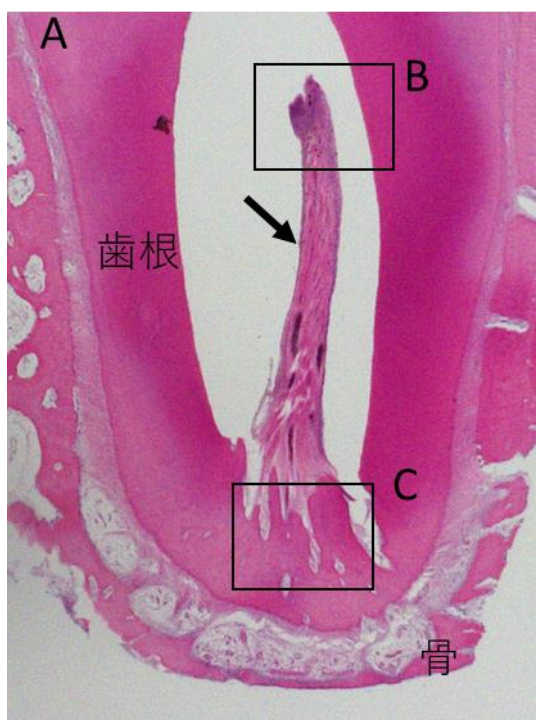
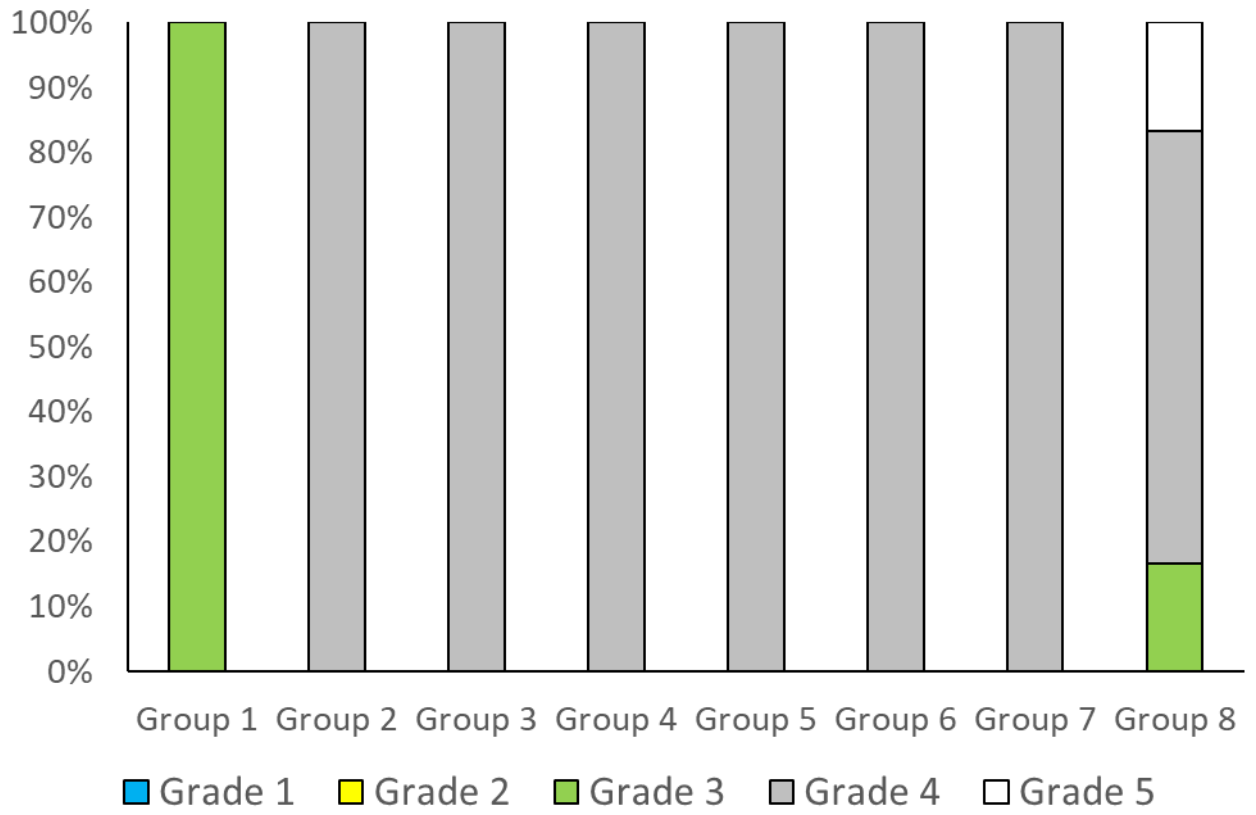


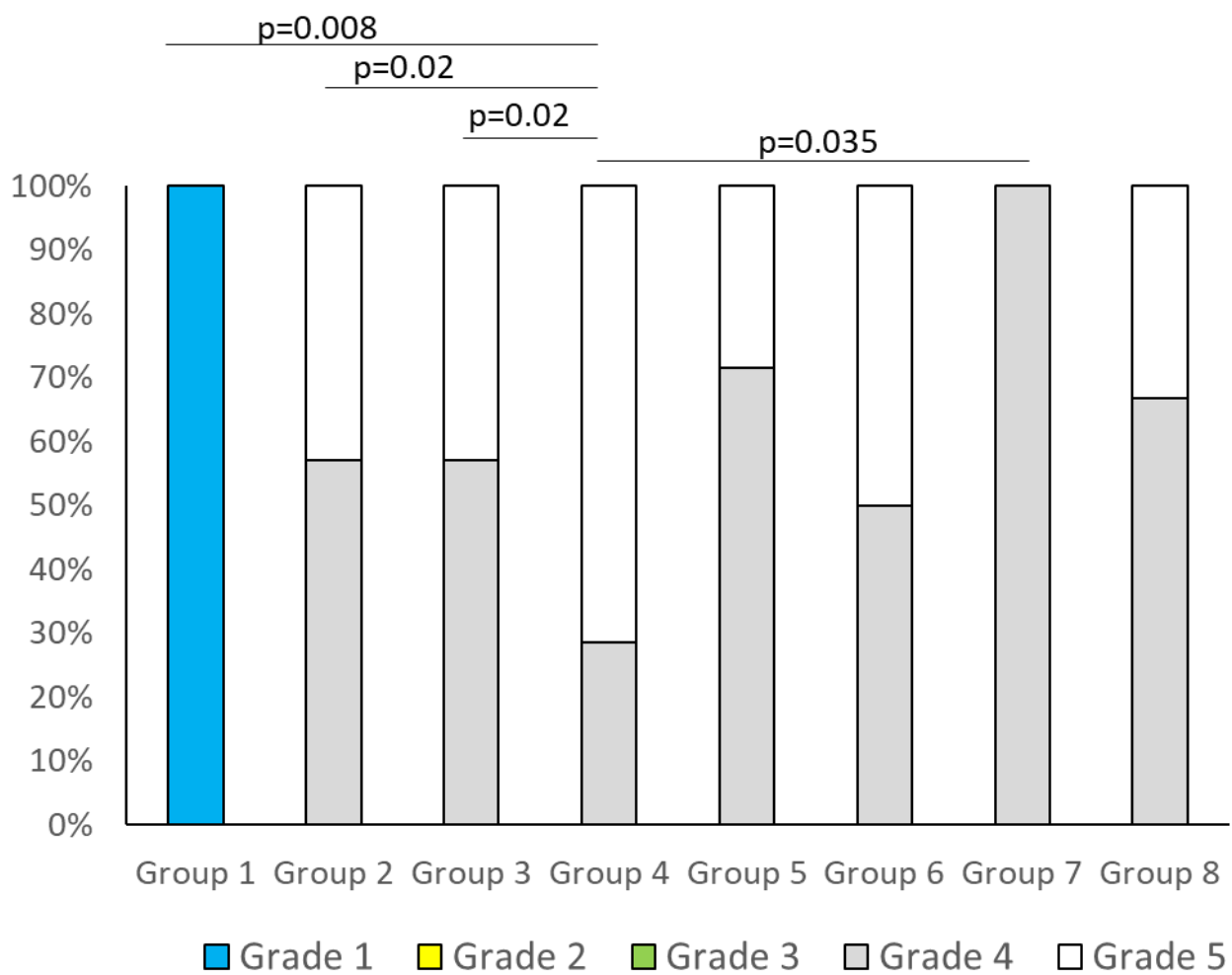
图 8



☒ 9



☒ 1 0



☒ 1 1

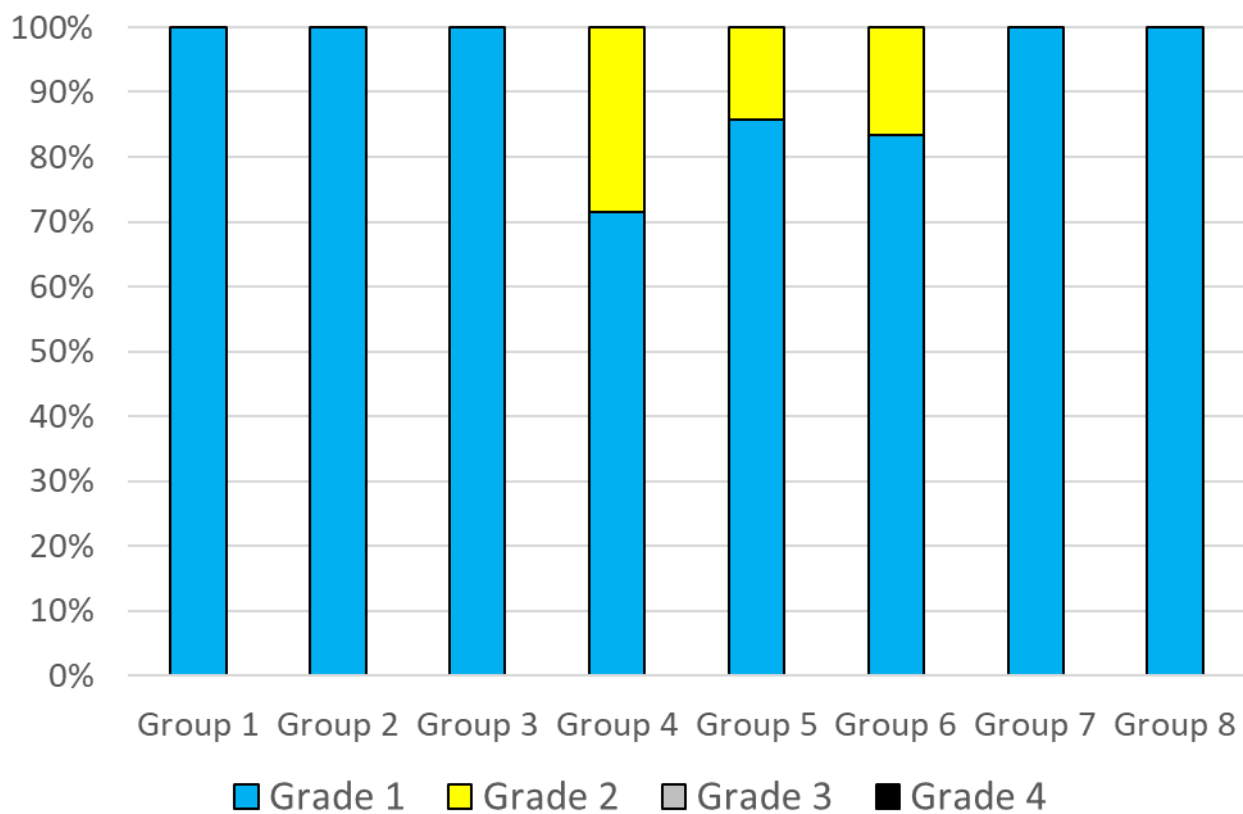
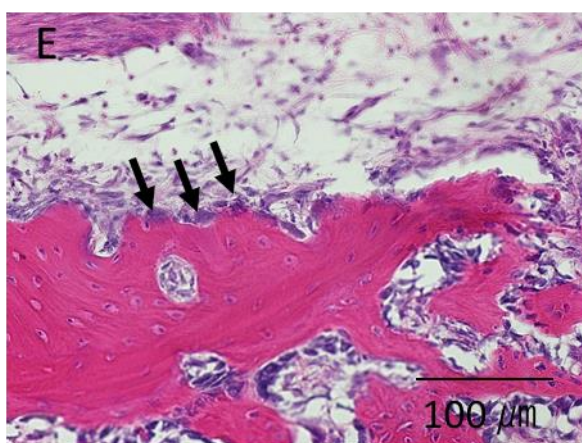
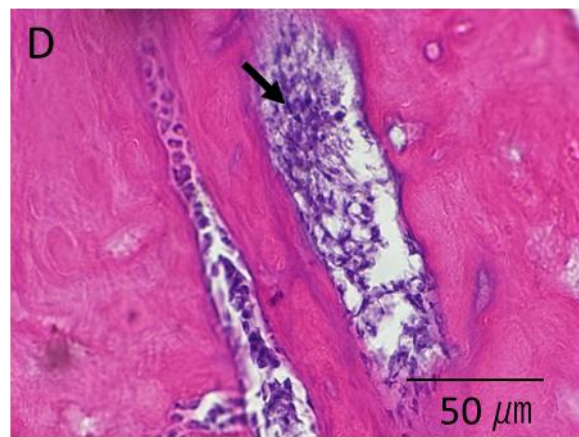
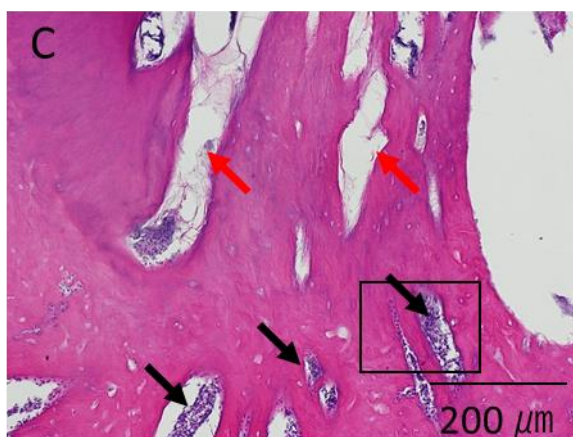
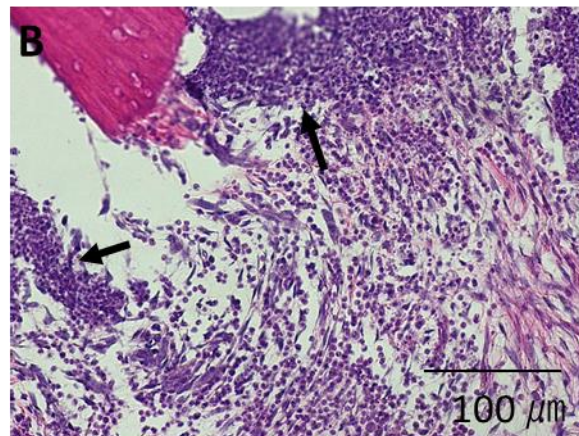
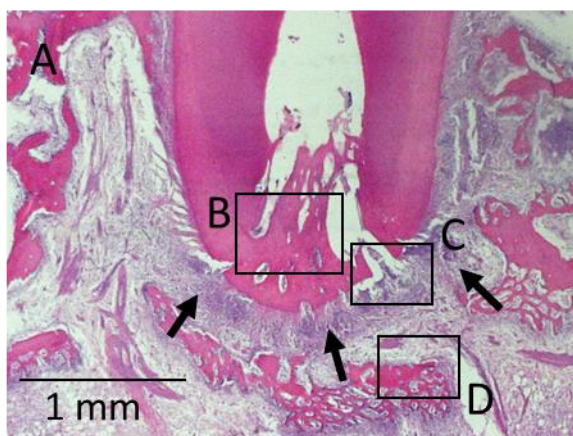
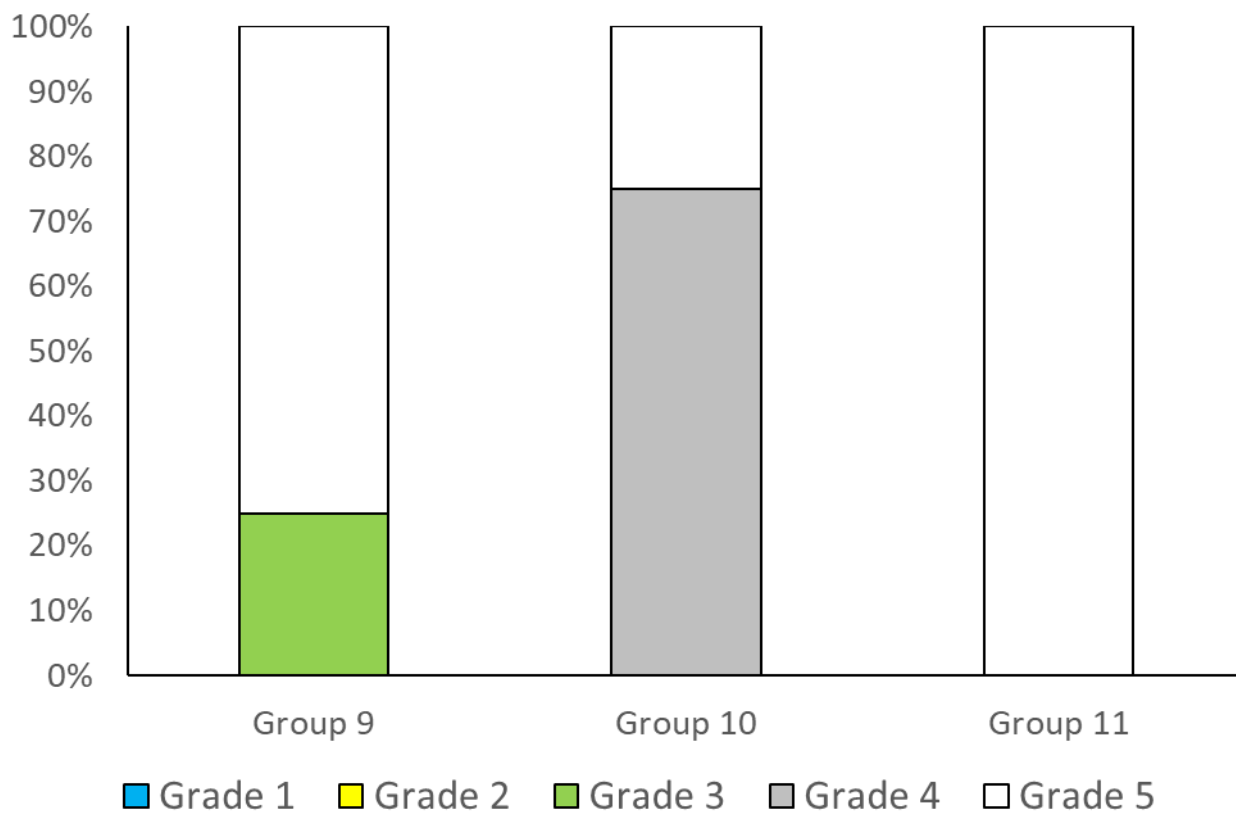




图 1 2

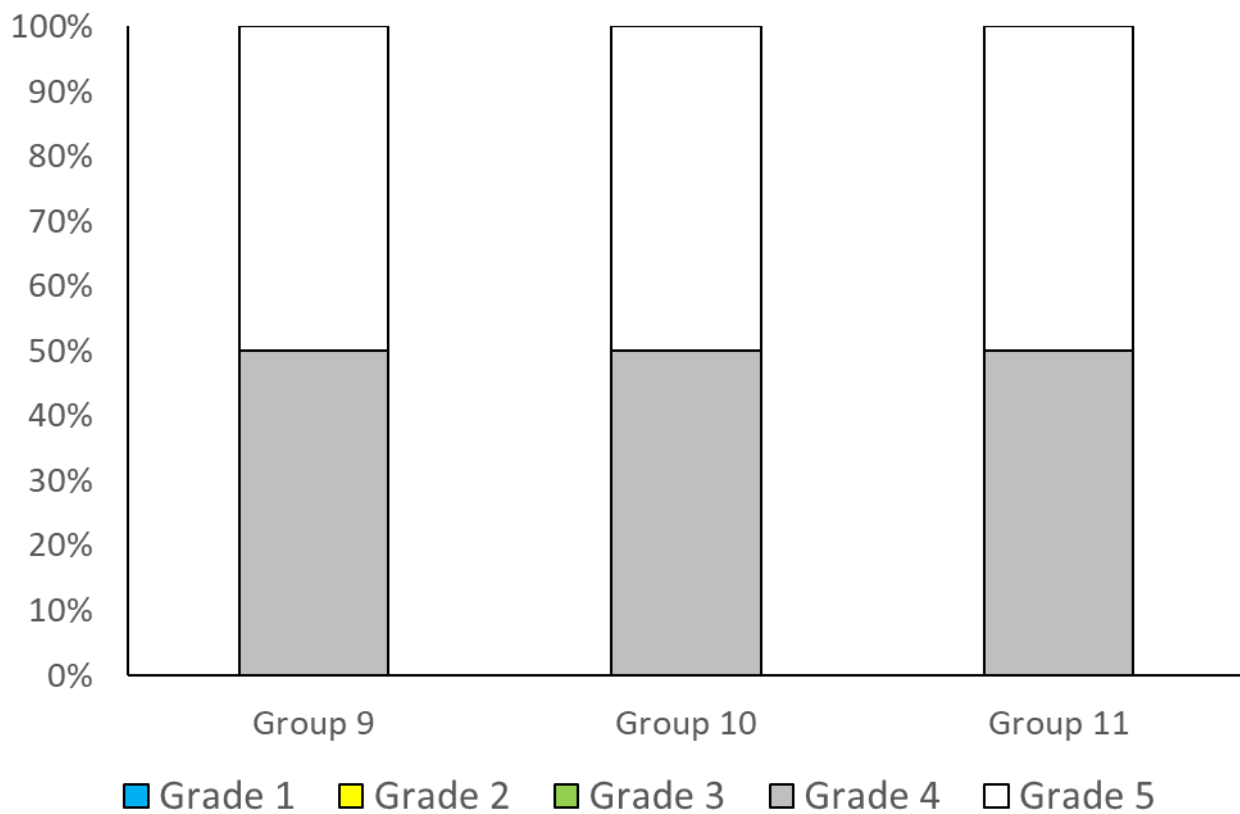


☒ 1 3





☒ 1 4



☒ 1 5

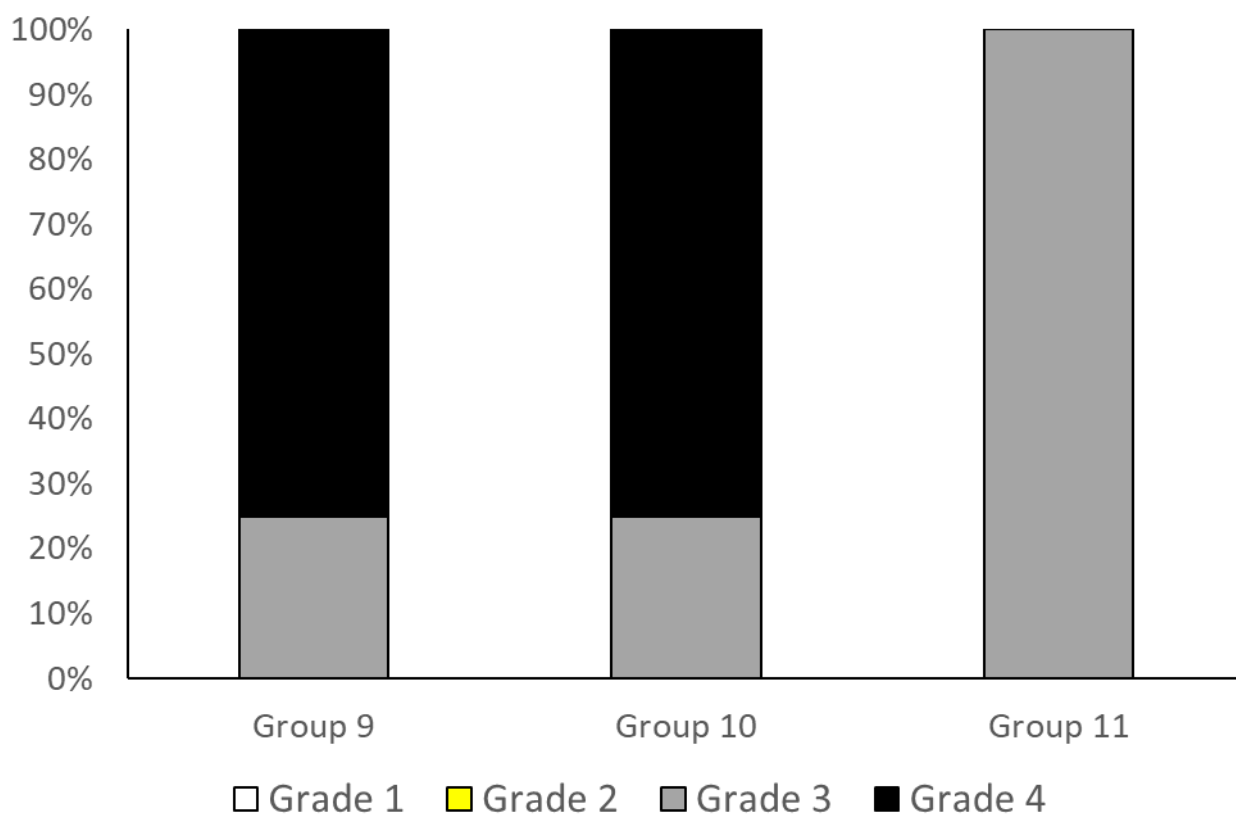


图 16

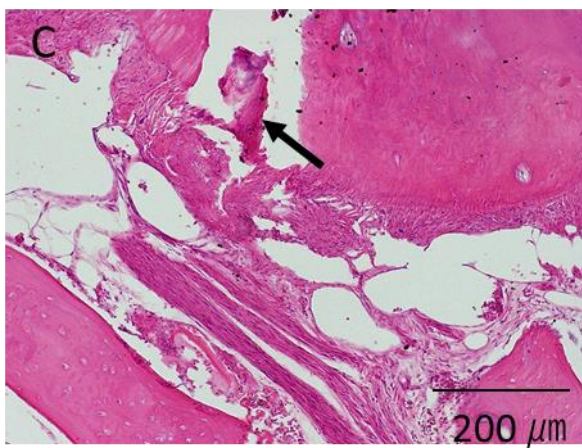
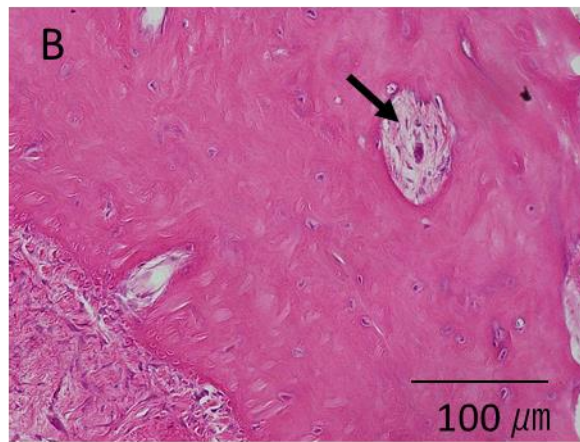
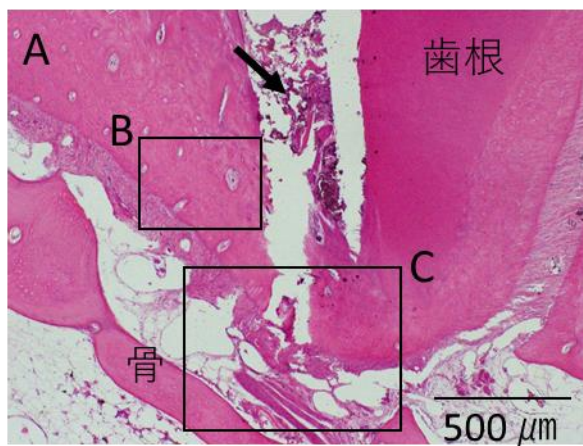
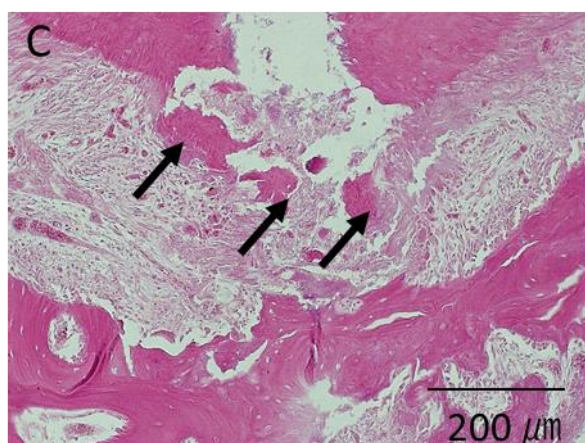
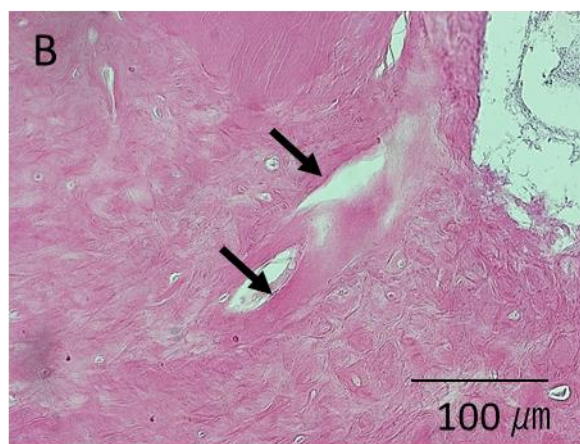
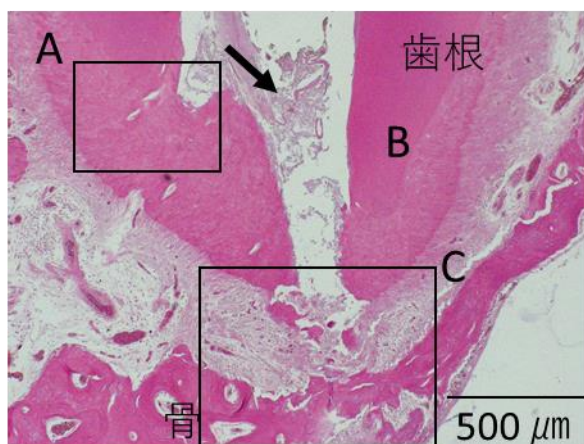
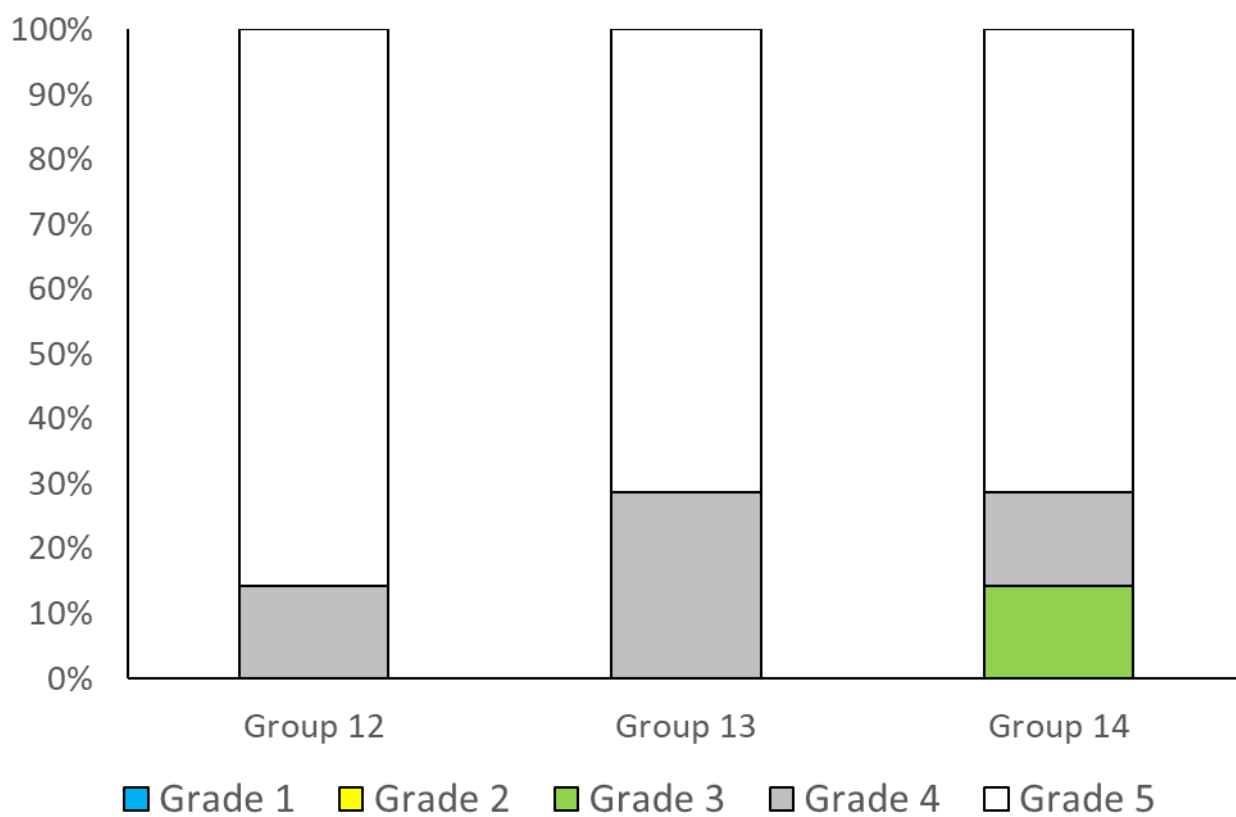


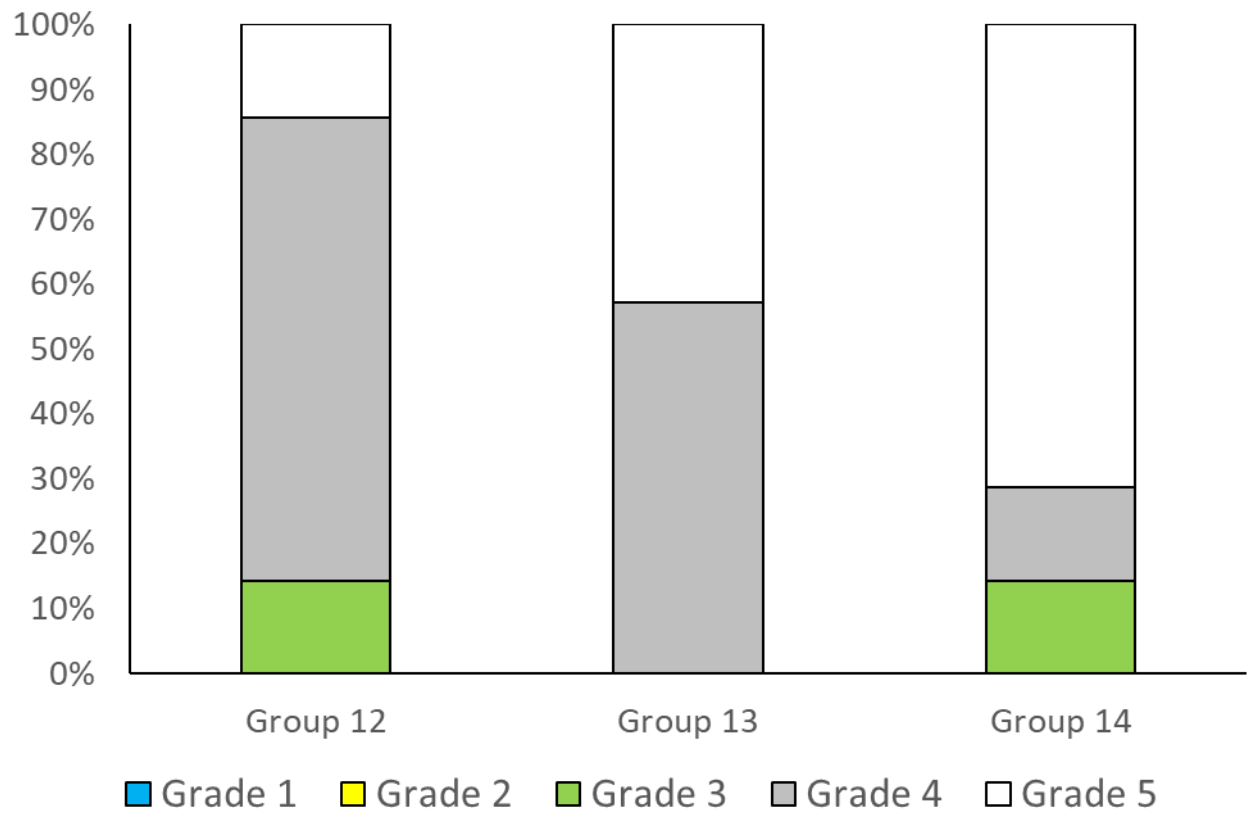
图 17



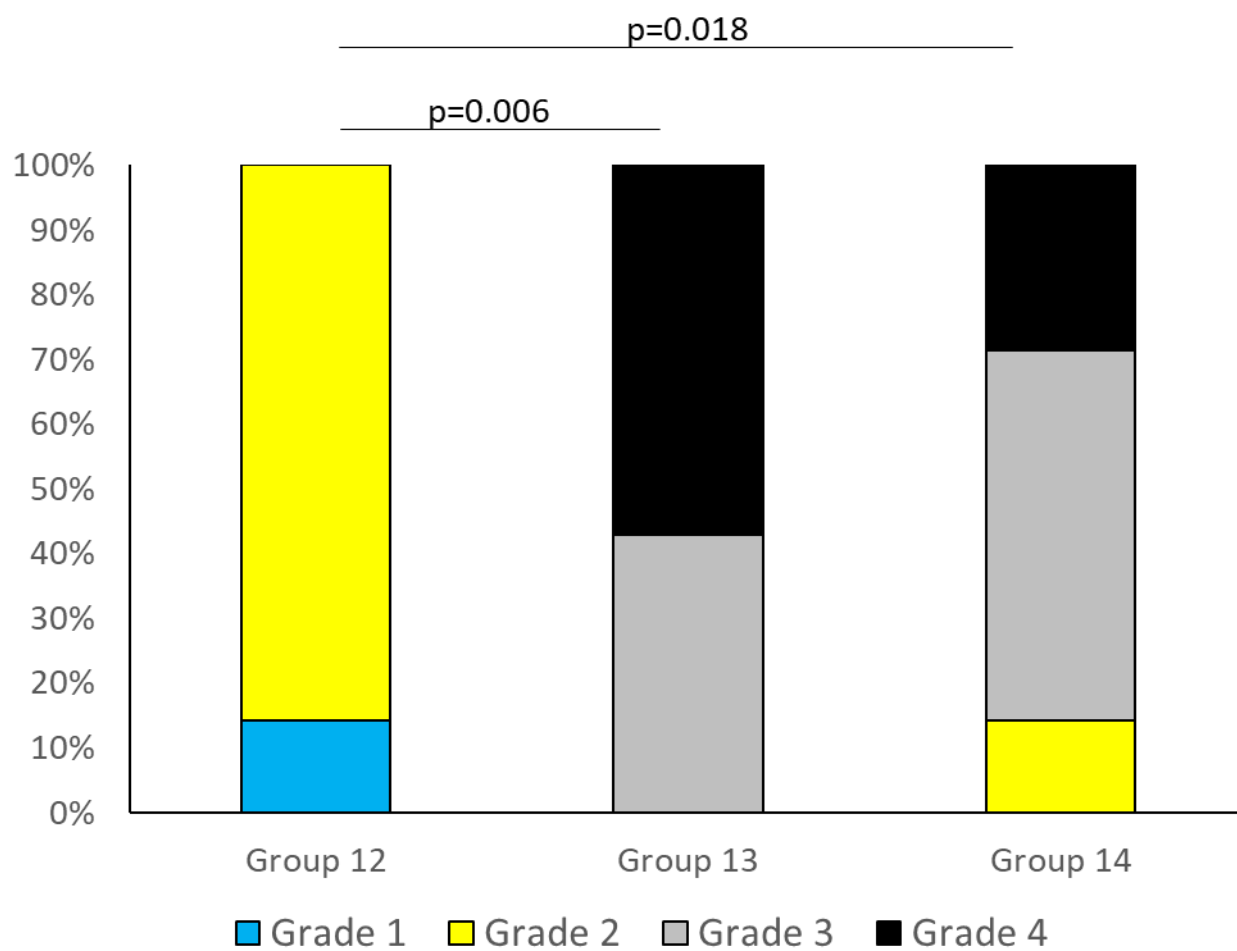
☒ 1 8



☒ 1 9



☒ 20





## 図説

表 1. 実験 1 のファイル先端の位置と電圧、通電時間

表 2. 実験 2 のファイル先端の位置と電圧、通電時間

表 3. 実験 3 のファイル先端の位置と電圧、通電時間

### 図 1. Group 1

A : 主根管に残存した歯髄 (矢印)

B : 残存歯髄内の血管 (矢印)

C : 多数の根尖分枝内の正常な結合組織 (黒矢印) と太い根尖分枝内凝血 (赤矢印)

### 図 2. Group 2

A : 主根管に残存した歯髄 (矢印)

B : 残存歯髄内の繊維状構造 (矢印)

C : 繊維状構造物内の円形構造 (矢印)

D : 歯髄表面 (赤矢印) と根管壁 (黒矢印) の無構造物

E : 根尖部分枝内の無構造 (黒矢印) 物と円形の細胞 (赤矢印)

F : 根尖分枝 (黒矢印) と根尖分枝の歯根膜への開口部 (赤矢印)

### 図 3. Group 3

A : 主根管に残存した歯髄 (矢印)

B : 残存歯髄内の血管 (矢印)

C : 根尖分枝 (黒矢印) と茶褐色の無構造物

### 図 4. Group 4

A : 主根管に残存した歯髄 (矢印)

B : 残存歯髄内の血管様構造 (矢印)

C : 根尖分枝の開口部における歯根膜の損傷 (矢印)

### 図 5. Group 5

A : 主根管に残存した歯髄 (矢印)

B : 根尖分枝 (矢印)

C : 根尖分枝の開口部における歯根膜の損傷 (矢印)

図 6. Group 6

- A : 主根管に残存した歯髄 (矢印)
- B : 主根管近くの根尖分枝 (矢印)
- C : 歯根膜近くの根尖分枝 (矢印)

図 7. Group 7

- A : 主根管に残存した歯髄 (矢印)
- B : 根尖分枝の開口部における歯根膜の損傷 (矢印)
- C : 根尖分枝 (矢印)

図 8. Group 8

- A : 主根管に残存した歯髄 (矢印)
- B : 残存歯髄最歯冠側 (矢印)
- C : 太い根尖分枝 (赤矢印) と細い根尖分枝 (黒矢印)

図 9. 実験 1 主根管内の組織学的分類結果

図 10. 実験 1 根尖分枝内の組織学的分類結果

図 11. 実験 1 歯周組織の組織学的分類結果

図 12. Group 11

- A : 歯根膜へのリンパ球の浸潤 (矢印)
- B : 穿通部周囲
- C : 太い根尖分枝 (赤矢印) と細い根尖分枝 (黒矢印)
- D : 細い根尖分枝
- E : 歯槽骨表面の多核巨細胞 (矢印)

図 13. 実験 2 主根管内の組織学的分類結果

図 14. 実験 2 根尖分枝内の組織学的分類結果

図 15. 実験 2 歯周組織の組織学的分類結果

図 16. Group 12

- A : 根管内の血餅 (矢印)

B : 根尖分枝 (矢印)

C : 根尖孔部の硬組織片 (矢印)

図 17. Group 14

A : 根管内の残存歯髄 (矢印)

B : 根尖分枝 (矢印)

C : 根尖孔部の硬組織片 (矢印)

図 18. 実験 3 主根管内の組織学的分類結果

図 19. 実験 3 根尖分枝内の組織学的分類結果

図 20. 実験 3 歯周組織の組織学的分類結果