



Title	レジン複合型MTAと高周波電流の直接覆髄への応用
Author(s)	伴, 眞吾
Citation	北海道大学. 博士(歯学) 甲第14532号
Issue Date	2021-03-25
DOI	10.14943/doctoral.k14532
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/84701">http://hdl.handle.net/2115/84701</a>
Type	theses (doctoral)
File Information	Shingo_Ban.pdf



[Instructions for use](#)

博士論文

---

レジン複合型 MTA と高周波電流の  
直接覆髄への応用

---

令和3年3月申請

北海道大学  
大学院歯学院口腔医学専攻

伴 眞 吾

## 抄録

直接覆髄材として mineral trioxide aggregate (MTA) が広く使用されているが、歯質接着性がなく硬化時に血液汚染があると強度が低下したり封鎖性が低下したりするなどの問題がある。近年、歯質への接着性を有するレジン複合型 MTA が開発されたこと、高周波電流を露髄面に通電することで殺菌や止血の効果が期待できることから、本研究は直接覆髄にレジン複合型 MTA と高周波電流を併用することの有効性を明らかにする目的で行った。

5 週齢 Wistar 雄性ラットの上顎左右第一臼歯近心咬合面を露髄させ、周波数 520 kHz、デューティ比 70 %、電圧 90 V の高周波電流を 0.2 秒通電し直接覆髄した。実験は、直接覆髄日：露髄当日／2 日後、覆髄材：MTA／レジン複合型 MTA、高周波電流の通電：有／無、を組み合わせ合計 8 群で行った。1, 3 週の観察期間後に、マイクロ CT 撮影を行い、脱灰薄切標本を作製して H-E 染色し、光学顕微鏡観察により組織学的に分類を行った。組織学的分類は、①近心髄角部、②髄腔近心部、③髄腔中央部、④髄腔遠心部、⑤歯根部に分けて、炎症性細胞浸潤の面積および象牙質様硬組織形成面積の割合でそれぞれ 4 つに分類した。さらに、新生象牙質様組織が髄腔壁と連続して形成されている部位で、最も露髄部に近い部位をデンチンブリッジ形成部位とした。統計学的分析は尤度比検定を行った。

レジン複合型 MTA では MTA より炎症が軽減され、デンチンブリッジがより露髄部に近い位置で形成され、象牙質様疎域の形成量も増加した。また、高周波電流を露髄部に通電してから直接覆髄することで、歯髄の炎症は減少し、象牙質様組織の形成量も増加した。さらに、露髄 2 日後に直接覆髄しても、高周波電流を露髄部に通電して直接覆髄することで、歯髄の炎症は大きく抑制された。

以上より、レジン複合型 MTA と高周波電流通電を併用することは、直接覆髄に有効なことが明らかとなった。

キーワード：レジン複合型 MTA, MTA, 高周波電流, 直接覆髄, デンチンブリッジ

## 緒言

直接覆髄は、深在性のう蝕除去後や窩洞形成中における偶発性の露髄、外傷による露髄に対する歯髄保存療法の一つである。直接覆髄を成功させるためには、歯髄への感染を防止して露髄部に修復象牙質を形成させることが必要であり、覆髄材には封鎖性と抗菌性、生体親和性に加えて硬組織誘導性も求められる。直接覆髄材として、古くから水酸化カルシウム製剤が用いられてきたが、現在はポルトランドセメントを主成分とする mineral trioxide aggregate (MTA) が広く使用されている<sup>1-4)</sup>。MTA は硬化後の強度が高く、強アルカリ性<sup>5,6)</sup>による抗菌性<sup>7-10)</sup>に加え、硬組織形成を早期に誘導して<sup>11,12)</sup>優れた臨床成績が得られると報告<sup>2-4)</sup>されているが、その一方で歯質接着性がなく<sup>13,14)</sup>、硬化に長時間を要すること<sup>5,15-17)</sup>や養生に水が必要であること<sup>15,16,18)</sup>、硬化時に血液汚染があると強度が低下したり硬化膨張が阻害されて封鎖性が低下したりする<sup>18-24)</sup>などの欠点も指摘されており、操作性に課題を残している。

近年、ポルトランドセメントにメタクリル酸エステルを組み合わせ、トリ-n-ブチルボラン (TBB) を重合開始剤としたレジン複合型 MTA が開発された。これは、MTA と同様に水酸化カルシウムの溶出や強アルカリ性が持続し、良好な細胞親和性を示すとともに<sup>25)</sup>、歯質接着性を有して高い封鎖性<sup>26)</sup>があることも報告されている。しかし、直接覆髄に用いた場合に MTA とどのような差があるのかについては明らかにされていない。

一方、高周波電流は古くから電気メスとして使用されている。高周波電流で軟組織が切開されるのは、通電すると電極近傍では組織に流れる電流密度が高いため、組織内でジュール熱が発生して水分が瞬間的に気化し、組織が破壊され蒸散するためである<sup>27)</sup>。さらに、軟組織と電極との接触部位では接触抵抗によりジュール熱が生じ、軟組織を熱変成させる<sup>27,28)</sup>。高周波電流はこれらの作用から、切開だけでなく、止血<sup>27,28)</sup>や殺菌<sup>29)</sup>にも用いられている。直接覆髄を成功させるためには無菌的な処置や止血が重要とされていることから、高周波電流を露髄部の殺菌や止血に用いることで、直接覆髄の成功率の向上が期待される。また、露髄部に高周波電流を通電して直接覆髄した Handa ら<sup>30)</sup>の実験では、修復象牙質の形成が促進されたと報告しているが、高周波電流の出力など詳細な通電条件が不明であり、高周波電流のどのような作用が成績向上につながったのかも明らかにされていない。

一方、高周波電流には硬組織形成の促進効果も報告されている。湯本ら<sup>31)</sup>は 500~1000kHz の高周波で骨芽細胞を 5 秒間刺激すると、細胞の増殖促進や成長因子に関連する遺伝子が発現したことを報告している。佐藤ら<sup>32)</sup>はラット頭蓋骨に作製した骨欠損に 520kHz の高周波電流刺激を加えると、骨形成が著しく促進され、母床骨の辺縁部からだけでなく、骨欠損の中央部からも骨形成が生じることを報告している。歯髄内で象牙質形成を促進できるかは不明であるが、高周波電流は短時間の通電で止血、殺菌と同時に歯髄内でも硬組織形成を促進し、直接覆髄の成功率が向上したり適応範囲が拡大できたりする可能性がある。

そこで本研究の目的は、直接覆髄にレジン複合型 MTA と高周波電流を併用することの有効性を明らかにすることである。

## 材料と方法

### 1. 露髄と高周波電流通電および直接覆髄方法

実験には 5 週齢の Wistar 雄性ラット 36 匹を用いた。塩酸メドミジン (ドミツール<sup>®</sup>, 日本全薬工業) 0.75 mg, ミダゾラム (ドルミカム<sup>®</sup>, アステラス製薬) 10.0 mg, 酒石酸ブトルファノール (ベトルファール<sup>®</sup>, Meiji Seika ファルマ) 12.5 mg を混合、注射用水を加え全量を 50 ml とした三種混合麻酔薬を、0.01 ml/g 腹腔内投与して全身麻酔を施した後、ラバーダム防湿し (図 1)、上顎左右第一臼歯近心咬合面を生理食塩液注水下でラウンドバー (ベルデンタ MG バー、ベルデンタ サプライ) を用いて切削、歯髄腔に穿孔、出血を確認した。

直接覆髄は覆髄日と高周波電流の通電の有無、使用覆髄材により次の 8 群で行った (表 1)。A 群: 露髄日に高周波電流を通電せずに mineral trioxide aggregate (ProRoot<sup>®</sup> MTA, Dentsply Sirona, 以下 MTA) で覆髄。B 群: 露髄日に高周波電流を通電せずにレジン複合型 MTA (スーパー MTA ペースト, サンメディカル, 以下 SMTA) で覆髄。C 群: 露髄日に高周波電流を通電して MTA で覆髄。D 群: 露髄日に高周波電流を通電して SMTA で覆髄。E 群: 露髄 2 日後に高周波電流を通電せずに MTA で覆髄。F 群: 露髄 2 日後に高周波電流を通電せずに SMTA で覆髄。G 群: 露髄 2 日後に高周波電流を通電し MTA で覆髄。H 群: 露髄 2 日後

に高周波電流を通電しSMTAで覆髓。

高周波電流は、周波数520 kHz、デューティ比70 %とし、対極を通電する被験歯と反対側の頬粘膜に接触させ、能動電極には#10Kファイルを用いて露髓部に接触させ、90 Vで0.2秒間通電した。通電後に露髓面を10 %次亜塩素酸ナトリウム（ネオクリナー「セキネ」、ネオ製薬工業）と生理食塩液で洗浄し、直接覆髓を行った。露髓2日後に直接覆髓した群では、付着しているプラークを生理食塩水注水下でスチールバーを用いて除去してから通電、洗浄、覆髓を行った。各群とも覆髓後ただちに4-META/MMA-TBBレジン（スーパーボンド<sup>®</sup>、サンメディカル）で仮封した。

本実験は国立大学法人北海道大学動物実験委員会の承認を受け、同指針に従って行った（承認番号19-0091）。

## 2. 評価方法

観察期間はA～D群が1週と3週、E～H群が3週とし、観察期間終了後にペントバルビタールナトリウム（ソムノペンチル注射液、共立製薬）の過量投与により安楽死させ上顎骨を採取、10 %リン酸緩衝ホルマリン溶液にて浸漬固定を行った。固定後マイクロCT（CosmoScan FX, Rigaku）撮影を行い、試料を水洗、5 %ギ酸で脱灰し、通法に従ってパラフィン包埋して正中に対する矢状断面で厚さ 5  $\mu\text{m}$  の連続切片を作製した。その後ヘマトキシリン・エオジン重染色を行い、光学顕微鏡観察し、3週後の試料については組織学的に分類を行った。

組織学的分類はShinkaiら<sup>33)</sup>、Trongkijら<sup>34)</sup>の方法を参考に、①近心髓角部、②髓腔近心部、③髓腔中央部、④髓腔遠心部、⑤歯根部に分けて各部位ごとに炎症性細胞浸潤の面積の割合で次のように行った。①炎症なし：ほとんどない。②軽度炎症：1/2以下。③重度炎症：1/2以上。④変性・壊死：1/2以上で組織や細胞が消失。また、各部位の象牙質様硬組織形成状態を面積の割合で次の4群に分類した。①なし、②1/2以下、③1/2以上、④全面。さらに、新生象牙質様組織が髓腔壁と連続して形成されている部位で、最も露髓部に近い部位をデンチンブリッジ形成部位とした。

統計学的分析は、SPSS（IBM）を用いて尤度比検定を行った。

## 結果

### 1. 光学顕微鏡観察結果

#### (1) 直接覆髓1週後

A群（露髓直後に覆髓・通電なし・MTA）は冠部歯髓の中央から遠心部、根部の歯髓は概ね正常であった（図2A）。露髓部ではMTAとの界面に無構造な層がわずかにみられたが（図2B→）、その下方から冠部歯髓近心の上部にまで炎症細胞浸潤が認められた（図2B⇒）。冠部歯髓近心部では髓腔壁と連続するエオジン好性で一部に細胞を含む象牙質様組織がみられ（図2C\*）、その周囲には立方形から円形の象牙芽細胞様細胞が多数観察された（図2C↓）。

B群（露髓直後に覆髓・通電なし・SMTA）ではA群と同様に冠部歯髓中央から遠心部、根部歯髓は概ね正常であったが（図3A）、SMTAとの界面から髓角部までは細胞が消失して空胞化していた（図3B→）。その下方の冠部歯髓近心部では、髓腔壁に連続する象牙質様組織がデンチンブリッジを形成し（図3C⇒）、その表面には象牙芽細胞様細胞が多数配列していた（図3C↓）。

C群（露髓直後に覆髓・通電あり・MTA）では冠部歯髓や根部歯髓には炎症性細胞はほとんどみられず、概ね正常であった（図4A）。露髓部直下では歯髓組織の一部が消失し、その下方から髓角部まで炎症細胞が浸潤していた（図4B→）。冠部歯髓の近心側では髓腔壁に連続する象牙質様組織がみられ、細管様構造も認められた（図4C⇒）。象牙質様組織表面には象牙芽細胞様細胞がみられた（図4↓）。

D群（露髓直後に覆髓・通電あり・SMTA）は冠部歯髓や根部歯髓は概ね正常であったが（図5A）、露髓部直下では歯髓が消失し、わずかに炎症性細胞がみられた（図5B→）。その下方では円形や立方形の細胞が多数観察され（図5B\*）、髓腔近心部から上部では髓腔壁に連続する象牙質様組織がみられた（図5C⇒）。

#### (2) 直接覆髓3週後

A 群（露髄直後に覆髄・通電なし・MTA 覆髄）では1週間と同様に冠部歯髄の中央部から遠心部、根部歯髄は概ね正常であった（図 6A）。露髄部から髄腔近心上部まで細胞は消失し（図 6B→）、その周囲には象牙質様組織が形成され（図 6C\*）、細管構造も観察された（図 6C⇒）。象牙質様組織は髄腔中央部付近まで広く形成され、髄腔は狭窄していた。

B 群（露髄直後に覆髄・通電なし・SMTA 覆髄）は冠部歯髄中央部から遠心部、根部歯髄は概ね正常であった（図 7A）。露髄部直下では細胞が消失していたが、髄角部に象牙質様組織の形成がみられ（図 7B→）、髄腔近心部では髄腔壁と連続しない不整形の象牙質様組織が多数認められた（図 7C⇒）。

C 群（露髄直後に覆髄・通電あり・MTA 覆髄）は1週間と同様に冠部歯髄と根部歯髄はいずれも概ね正常であった（図 8A）。露髄部直下から隅角部は細胞が消失し空胞化している部分がわずかにみられたが（図 8B→）、その周囲には象牙質様組織がみられ（図 8B, C\*）、象牙細管様構造も多数観察された（図 8C⇒）。

D 群（露髄直後に覆髄・通電あり・SMTA 覆髄）は1週間と同様に冠部歯髄の中央部から遠心部、根部歯髄は概ね正常であった（図 9A）。露髄部から髄角部の歯髄は空胞化し（図 9B\*）、その下方では幼弱な象牙質様組織がみられた（図 9B⇒）。歯髄腔中央部では髄腔壁を連続するように象牙質様組織の形成がみられた（図 9C⇒）。マイクロ CT 画像では、歯髄腔近心部を満たすように不透過像（図 9D←）が認められた。

E 群（露髄2日後に覆髄・通電なし・MTA 覆髄）では冠部歯髄は近心から中央部まで歯髄が消失したり壊死したりしており（図 10A）、髄腔中央部でも出血（図 10B→）や空胞化（図 10B⇒）がみられた。冠部歯髄遠心部や根部歯髄根尖近くでも炎症性細胞が多数浸潤していた（図 10C\*）。マイクロ CT では歯髄腔に不透過像はほとんどみられず、根尖周囲には骨欠損も認められた（図 10D←）。

F 群（露髄2日後に覆髄・通電なし・SMTA 覆髄）は冠部歯髄中央部から遠心部、根部歯髄は概ね正常であった（図 11A）。髄腔近心側上部では歯髄細胞が消失し壊死している部分が一部にみられたが（図 11B→）、不整形の象牙質様組織（図 11B⇒）が広く形成され、その下方にはわずかに炎症性細胞浸潤がみられた（図 11B\*）。冠部歯髄中央部では炎症性細胞はほとんど観察されなかった（図 11C←）。

G 群（露髄2日後に覆髄・通電あり・MTA 覆髄）では冠部歯髄遠心部や根部歯髄は概ね正常であった（図 12A）。髄角部から冠部歯髄近心部は細胞が消失して空胞化がみられた（図 12B\*）。その下方では象牙質様組織の形成が認められた（図 12B, C⇒）。象牙質様組織表面には象牙芽細胞様細胞も認められた（図 12C→）。

H 群（露髄2日後に覆髄・通電あり・SMTA 覆髄）では、冠部歯髄中央部や遠心部、根部歯髄は概ね正常であったが（図 13A）、冠部歯髄近心部では空胞化した組織（図 13B\*）と象牙質様組織（図 13B, C⇒）が混在していた。冠部歯髄中央部では炎症性細胞はほとんどみられなかった（図 13C）。

## 2. 組織学的分類結果

### (1) 炎症状態

#### 1) 髄角部（図 14）

露髄直後に高周波電流を通電せずに覆髄した A, B 群より、通電した C, D 群の方が炎症は少なく有意差 ( $p=0.000$ ) が認められた。また高周波電流を通電せずに覆髄した場合は、MTA を使用した A 群より SMTA を使用した B 群の方が変性・壊死が多かったが、重度炎症は少なく有意差 ( $p=0.022$ ) が認められた。通電した C 群と D 群の間には有意差はなかった。

露髄2日後に通電せずに覆髄した E 群と F 群、および高周波電流を通電した G 群と H 群の炎症状態は同等であったが、G, H 群は炎症がなく変性・壊死のみで、E, F 群との間には有意差 ( $p=0.023$ ) がみられた。

露髄直後の覆髄した群では健康歯髄がみられたが、2日後に覆髄した群ではみられなかった。

#### 2) 髄腔近心部（図 15）

A 群と C 群、B 群と D 群はそれぞれ類似の傾向を示した。A 群と B 群、C 群と D 群を比較すると A, C 群では軽度や重度炎症がみられたのに対して、高周波電流を通電した B, D 群では変性・壊死と健康歯髄のみで炎症は見られず、A 群と B 群の間 ( $p=0.000$ ) および C 群と D 群の間 ( $p=0.022$ ) には有意差が認められた。

露髄2日後に覆髄したE群とF群およびG群とH群はそれぞれ類似の傾向を示したが、E、F群では強い炎症が生じていたのに対し、高周波電流を通電したG、H群では変性・壊死が多くを占め、E群とG群の間には有意差がみられた ( $p=0.023$ )。

露髄直後にSMTAを使用したB、D群では炎症のない標本がみられたが、2日後に覆髄した場合はF、H群ともみられなかった。

### 3) 髄腔中央部 (図16)

露髄直後にMTAで覆髄したA群とC群は、SMTAを用いたB群とD群より重度炎症が多く、変性・壊死は少ない傾向であったが有意差はなかった。露髄2日後に覆髄したE、F、G群は重度または軽度炎症が多かったが、高周波電流を通電しSMTAを用いたH群では変性・壊死が多く重度炎症はみられなかった。

露髄直後に覆髄した場合には、A~D群のいずれにも炎症のない標本がみられたが、2日後に覆髄した場合はH群のみであった。

### 4) 髄腔遠心部 (図17)

露髄直後に覆髄したA~D群では炎症は少なく、とくに通電後にSMTAを用いたD群ではすべての標本で炎症はなかった。露髄2日後に覆髄したE~H群では、通電しなかったE、F群で重度炎症が多かったが、通電したG、H群では炎症は減少して変性・壊死がやや増加した。

露髄直後の覆髄では炎症のない標本が多かったが、2日後に覆髄した群ではわずかであった。

### 5) 冠部歯髄全体 (図18)

髄角部および冠部歯髄近心、中央、遠心部を合計すると、露髄直後に覆髄した場合にはA群とC群、B群とD群に大きな差はなかったが、露髄2日後に覆髄した場合には、高周波電流を通電したG、H群は通電しなかったE、F群より変性・壊死が増加して重度炎症が減少しており、E群とG群 ( $p=0.048$ )、F群とH群 ( $p=0.01$ )の間には有意差が認められた。

### 6) 歯根部 (図19)

歯根部では露髄直後に覆髄したA~D群も、2日後に覆髄したE~H群も、変性・壊死や重度、軽度の炎症は少なかった。

## (2) 象牙質様組織形成状態

### 1) 髄角部 (図20)

露髄直後に高周波電流を通電せずに覆髄したA、B群では、象牙質様組織がほとんど見られなかったが、通電後に覆髄したC、D群では多く観察され、A群とC群の間には有意差 ( $p=0.000$ ) がみられた。しかし、露髄2日後に覆髄した場合は、いずれの群も象牙質様組織は少なくなった。

### 2) 髄腔近心部 (図21)

露髄直後に覆髄したA、B、D群では、1/2以上の象牙質様組織形成が多数観察されたが、通電後にMTAを用いたC群では1/2以下の標本も多くみられ、C群とD群の間には有意差 ( $p=0.022$ ) がみられた。露髄2日後に覆髄したE~H群はいずれも同様の傾向で、象牙質様組織の形成がみられないものが多かった。

### 3) 髄腔中央部 (図22)

いずれの群も類似の傾向で、象牙質様組織の形成がみられないものが多かったが、高周波電流を通電してSMTAで覆髄したD群とH群では他に比べて少ない傾向であった。

### 4) 髄腔遠心部 (図23)

いずれの群も象牙質様組織の形成がみられない標本が多かった。

### 5) 歯根部 (図24)

歯根部も髓腔遠心部と同様に、象牙質様組織の形成がみられたのはわずかであり、いずれの群でも類似の傾向を示した。

### (3) デンチンブリッジ形成部位 (図 25)

露髄直後に通電せずに MTA で覆髄した A 群と SMTA を用いた B 群を比較すると、A 群は髓腔近心部での形成が多かったのに対して、B 群では髓角部が多く、有意差 ( $p=0.046$ ) がみられた。一方、露髄直後に覆髄した群に比べると、2 日後に覆髄した群では髓角部での形成は少なく髓腔近心部で多くなり、象牙質様組織の形成がみられないものも多くなった。

## 結果

### 1. 光学顕微鏡観察結果

#### (1) 直接覆髄 1 週後

A 群 (露髄直後に覆髄・通電なし・MTA) は冠部歯髄の中央から遠心部、根部の歯髄は概ね正常であった (図 2A)。露髄部では MTA との界面に無構造な層がわずかにみられたが (図 2B→)、その下方から冠部歯髄近心の上部にまで炎症細胞浸潤が認められた (図 2B⇒)。冠部歯髄近心部では髓腔壁と連続するエオジン好性で一部に細胞を含む象牙質様組織がみられ (図 2C\*)、その周囲には立方形から円形の象牙芽細胞様細胞が多数観察された (図 2C↓)。

B 群 (露髄直後に覆髄・通電なし・SMTA) では A 群と同様に冠部歯髄中央から遠心部、根部歯髄は概ね正常であったが (図 3A)、SMTA との界面から髓角部までは細胞が消失して空胞化していた (図 3B→)。その下方の冠部歯髄近心部では、髓腔壁に連続する象牙質様組織がデンチンブリッジを形成し (図 3C⇒)、その表面には象牙芽細胞様細胞が多数配列していた (図 3C↓)。

C 群 (露髄直後に覆髄・通電あり・MTA) では冠部歯髄や根部歯髄には炎症性細胞はほとんどみられず、概ね正常であった (図 4A)。露髄部直下では歯髄組織の一部が消失し、その下方から髓角部まで炎症細胞が浸潤していた (図 4B→)。冠部歯髄の近心側では髓腔壁に連続する象牙質様組織がみられ、細管様構造も認められた (図 4C⇒)。象牙質様組織表面には象牙芽細胞様細胞がみられた (図 4↓)。

D 群 (露髄直後に覆髄・通電あり・SMTA) は冠部歯髄や根部歯髄は概ね正常であったが (図 5A)、露髄部直下では歯髄が消失し、わずかに炎症性細胞がみられた (図 5B→)。その下方では円形や立方形の細胞が多数観察され (図 5B\*)、髓腔近心部から上部では髓腔壁に連続する象牙質様組織がみられた (図 5C⇒)。

#### (2) 直接覆髄 3 週後

A 群 (露髄直後に覆髄・通電なし・MTA 覆髄) では 1 週後と同様に冠部歯髄の中央部から遠心部、根部歯髄は概ね正常であった (図 6A)。露髄部から髓腔近心上部まで細胞は消失し (図 6B→)、その周囲には象牙質様組織が形成され (図 6C\*)、細管構造も観察された (図 6C⇒)。象牙質様組織は髓腔中央部付近まで広く形成され、髓腔は狭窄していた。

B 群 (露髄直後に覆髄・通電なし・SMTA 覆髄) は冠部歯髄中央部から遠心部、根部歯髄は概ね正常であった (図 7A)。露髄部直下では細胞が消失していたが、髓角部に象牙質様組織の形成がみられ (図 7B→)、髓腔近心部では髓腔壁と連続しない不整形の象牙質様組織が多数認められた (図 7C⇒)。

C 群 (露髄直後に覆髄・通電あり・MTA 覆髄) は 1 週後と同様に冠部歯髄と根部歯髄はいずれも概ね正常であった (図 8A)。露髄部直下から隅角部は細胞が消失し空胞化している部分がわずかにみられたが (図 8B→)、その周囲には象牙質様組織がみられ (図 8B, C\*)、象牙細管様構造も多数観察された (図 8C⇒)。

D 群 (露髄直後に覆髄・通電あり・SMTA 覆髄) は 1 週後と同様に冠部歯髄の中央部から遠心部、根部歯髄は概ね正常であった (図 9A)。露髄部から髓角部の歯髄は空胞化し (図 9B\*)、その下方では幼弱な象牙質様組織がみられた (図 9B→)。歯髄腔中央部では髓腔壁を連続するように象牙質様組織の形成がみられた (図 9C→)。マイクロ CT 画像では、歯髄腔近心部を満たすように不透過像 (図 9D←) が認められた。

E 群 (露髄 2 日後に覆髄・通電なし・MTA 覆髄) では冠部歯髄は近心から中央部まで歯髄が消失したり壊死したりしており (図 10A)、髓腔中央部でも出血 (図 10B→) や空胞化 (図 10B⇒) がみられた。



冠部歯髄遠心部や根部歯髄根尖近くでも炎症性細胞が多数浸潤していた (図 10C\*) . マイクロ CT では歯髄腔に不透過像はほとんどみられず, 根尖周囲には骨欠損も認められた (図 10D←) .

F 群 (露髄 2 日後に覆髄・通電なし・SMTA 覆髄) は冠部歯髄中央部から遠心部, 根部歯髄は概ね正常であった (図 11A) . 髄腔近心側上部では歯髄細胞が消失し壊死している部分が一部にみられたが (図 11B→) , 不整形の象牙質様組織 (図 11B⇒) が広く形成され, その下方にはわずかに炎症性細胞浸潤がみられた (図 11B\*) . 冠部歯髄中央部では炎症性細胞はほとんど観察されなかった (図 11C←) .

G 群 (露髄 2 日後に覆髄・通電あり・MTA 覆髄) では冠部歯髄遠心部や根部歯髄は概ね正常であった (図 12A) . 髄角部から冠部歯髄近心部は細胞が消失して空胞化がみられた (図 12B\*) . その下方では象牙質様組織の形成が認められた (図 12B, C⇒) . 象牙質様組織表面には象牙芽細胞様細胞も認められた (図 12C→) .

H 群 (露髄 2 日後に覆髄・通電あり・SMTA 覆髄) では, 冠部歯髄中央部や遠心部, 根部歯髄は概ね正常であったが (図 13A) , 冠部歯髄近心部では空胞化した組織 (図 13B\*) と象牙質様組織 (図 13B, C⇒) が混在していた. 冠部歯髄中央部では炎症性細胞はほとんどみられなかった (図 13C) .

## 2. 組織学的分類結果

### (1) 炎症状態

#### 1) 髄角部 (図 14)

露髄直後に高周波電流を通電せずに覆髄した A, B 群より, 通電した C, D 群の方が炎症は少なく有意差 ( $p=0.000$ ) が認められた. また高周波電流を通電せずに覆髄した場合は, MTA を使用した A 群より SMTA を使用した B 群の方が変性・壊死が多かったが, 重度炎症は少なく有意差 ( $p=0.022$ ) が認められた. 通電した C 群と D 群の間には有意差はなかった.

露髄 2 日後に通電せずに覆髄した E 群と F 群, および高周波電流を通電した G 群と H 群の炎症状態は同等であったが, G, H 群は炎症がなく変性・壊死のみで, E, F 群との間には有意差 ( $p=0.023$ ) がみられた.

露髄直後の覆髄した群では健康歯髄がみられたが, 2 日後に覆髄した群ではみられなかった.

#### 2) 髄腔近心部 (図 15)

A 群と C 群, B 群と D 群はそれぞれ類似の傾向を示した. A 群と B 群, C 群と D 群を比較すると A, C 群では軽度や重度炎症がみられたのに対して, 高周波電流を通電した B, D 群では変性・壊死と健康歯髄のみで炎症は見られず, A 群と B 群の間 ( $p=0.000$ ) および C 群と D 群の間 ( $p=0.022$ ) には有意差が認められた.

露髄 2 日後に覆髄した E 群と F 群および G 群と H 群はそれぞれ類似の傾向を示したが, E, F 群では強い炎症が生じていたのに対し, 高周波電流を通電した G, H 群では変性・壊死が多くを占め, E 群と G 群の間には有意差がみられた ( $p=0.023$ ).

露髄直後に SMTA を使用した B, D 群では炎症のない標本がみられたが, 2 日後に覆髄した場合は F, H 群ともみられなかった.

#### 3) 髄腔中央部 (図 16)

露髄直後に MTA で覆髄した A 群と C 群は, SMTA を用いた B 群と D 群より重度炎症が多く, 変性・壊死は少ない傾向であったが有意差はなかった. 露髄 2 日後に覆髄した E, F, G 群は重度または軽度炎症が多かったが, 高周波電流を通電し SMTA を用いた H 群では変性・壊死が多く重度炎症はみられなかった.

露髄直後に覆髄した場合には, A~D 群のいずれにも炎症のない標本がみられたが, 2 日後に覆髄した場合は H 群のみであった.

#### 4) 髄腔遠心部 (図 17)

露髄直後に覆髄した A~D 群では炎症は少なく, とくに通電後に SMTA を用いた D 群ではすべての標本で炎症はなかった. 露髄 2 日後に覆髄した E~H 群では, 通電しなかった E, F 群で重度炎症が多かったが, 通電した G, H 群では炎症は減少して変性・壊死がやや増加した.

露髄直後の覆髄では炎症のない標本が多かったが, 2 日後に覆髄した群ではわずかであった.

#### 5) 冠部歯髄全体 (図 18)

髄角部および冠部歯髄近心, 中央, 遠心部を合計すると, 露髄直後に覆髄した場合には A 群と C 群, B 群と D 群に大きな差はなかったが, 露髄 2 日後に覆髄した場合には, 高周波電流を通電した G, H 群は通電しなかった E, F 群より変性・壊死が増加して重度炎症が減少しており, E 群と G 群 ( $p=0.048$ ), F 群と H 群 ( $p=0.01$ ) の間には有意差が認められた。

#### 6) 歯根部 (図 19)

歯根部では露髄直後に覆髄した A~D 群も, 2 日後に覆髄した E~H 群も, 変性・壊死や重度, 軽度の炎症は少なかった。

### (2) 象牙質様組織形成状態

#### 1) 髄角部 (図 20)

露髄直後に高周波電流を通電せずに覆髄した A, B 群では, 象牙質様組織がほとんど見られなかったが, 通電後に覆髄した C, D 群では多く観察され, A 群と C 群の間には有意差 ( $p=0.000$ ) がみられた。しかし, 露髄 2 日後に覆髄した場合は, いずれの群も象牙質様組織は少なくなった。

#### 2) 髄腔近心部 (図 21)

露髄直後に覆髄した A, B, D 群では, 1/2 以上の象牙質様組織形成が多数観察されたが, 通電後に MTA を用いた C 群では 1/2 以下の標本も多くみられ, C 群と D 群の間には有意差 ( $p=0.022$ ) がみられた。露髄 2 日後に覆髄した E~H 群はいずれも同様の傾向で, 象牙質様組織の形成がみられないものが多かった。

#### 3) 髄腔中央部 (図 22)

いずれの群も類似の傾向で, 象牙質様組織の形成がみられないものが多かったが, 高周波電流を通電して SMTA で覆髄した D 群と H 群では他に比べて少ない傾向であった。

#### 4) 髄腔遠心部 (図 23)

いずれの群も象牙質様組織の形成がみられない標本が多かった。

#### 5) 歯根部 (図 24)

歯根部も髄腔遠心部と同様に, 象牙質様組織の形成がみられたのはわずかであり, いずれの群でも類似の傾向を示した。

### (3) デンチンブリッジ形成部位 (図 25)

露髄直後に通電せずに MTA で覆髄した A 群と SMTA を用いた B 群を比較すると, A 群は髄腔近心部での形成が多かったのに対して, B 群では髄角部が多く, 有意差 ( $p=0.046$ ) がみられた。一方, 露髄直後に覆髄した群に比べると, 2 日後に覆髄した群では髄角部での形成は少なく髄腔近心部で多くなり, 象牙質様組織の形成がみられないものも多くなった。

## 考察

本実験は, 直接封髄にレジン複合型 MTA と高周波電流を併用することで, 歯髄の炎症が軽減し象牙質様組織の形成が向上するかを検討した。

### 1. MTA と SMTA の違いについて

露髄直後に高周波電流を通電せずに MTA で覆髄した A 群と, SMTA で覆髄した B 群を比較すると, 1 週後, MTA 直下には変性した組織はほとんどみられず炎症性細胞が浸潤していた。MTA による直接覆髄では, 露髄後短期間は炎症が生じるとされ, また水酸化カルシウムより変性が生じにくいとされており<sup>35-37)</sup>, 本実験でもこれまでの研究と同様の結果であった。一方, SMTA では髄角部の歯髄は細胞が消失して空胞化しており, 変性していると考えられた。

変性を生じる原因としては SMTA からの溶出物や高アルカリ性が関連すると考えられる。SMTA は MTA の他にメタクリル酸エステル系レジンと造影剤として酸化ジルコニウム、重合開始剤としてトリ-n-ブチルホウ素部分酸化物 (TBB) を含むが、重合時間が 24 時間と長いことから、重合過程で未重合のレジンや TBB が溶出して変性に影響した可能性がある。しかし、レジンに対する組織反応をみた多くの実験で、未重合のレジンによる変性は報告がなく、リンパ球を中心とした炎症が生じたり<sup>38-41)</sup>、軟組織とレジンがハイブリッド層を形成した場合には、マクロファージが出現したりすると報告されている<sup>42, 43)</sup>。これらのことから、SMTA から未重合レジンや TBB が溶出して変性を生じた可能性は低いと考えられる。一方、3 週間には SMTA を使用した B 群では、髄角部や冠部髄近心部の炎症性細胞浸潤が MTA を使用した A 群より有意に少なかったことと、SMTA での変性が MTA より広範囲に生じていたことから (図 14, 15)、SMTA では MTA より強アルカリ性であったため、抗菌性が強く発揮されて、炎症が抑制されていたのではないかと考えられた。MTA も SMTA も pH は 11~12 程度と報告されているが<sup>5, 6)</sup>、これは硬化体を蒸留水に浸漬して計測した結果であり、とくに SMTA は水を含まないため、髄中の水分を吸水して MTA が硬化するには長時間を要すると考えられ<sup>15)</sup>、未硬化の材料が髄に接している初期には、硬化体を水中に浸漬した場合とは異なる挙動を示して、SMTA は MTA より生体内において強アルカリ性が持続していたのではないかと考えられた。

また、空胞化して変性した髄と象牙質様組織とが混在している部分が多数みられたことから、髄が変性することは象牙質様組織の形成を阻害しないと考えられた。さらに、マイクロ CT ではエオジンに染色する部位が不透過像となっていたことから (図 9)、象牙質様組織はすでに石灰化を伴っていると考えられた。直接覆髄で誘導される修復象牙質は、象牙質様組織は細管構造が見られる tubular dentin と、細管構造が未発達な osteodentin があるが、本実験では両者が混在しており (図 8)、MTA の方が SMTA より osteodentin が少ない傾向は見られたものの、明らかな差はみられなかった。

既存象牙質と連続するデンチンブリッジの形成は、MTA を用いた A 群は髄角部でほとんど生じることがなく、冠部髄近心部で生じることが多数であったのに対して、SMTA を用いた B 群ではほとんどが髄角部で生じており、両群間に有意差が認められた (図 25)。すなわち、SMTA の方が露髄部に近いところでデンチンブリッジが形成されており、この点で SMTA の方が MTA より効果が高いと考えられる。この理由としては、MTA と SMTA のカルシウム溶出量は同程度とされていることから<sup>25)</sup>、SMTA の方が炎症抑制効果は高かったことが象牙質様組織の形成にも有利に働いたものと思われる。

MTA と SMTA の生体親和性や抗菌性、硬組織誘導能についての差異については不明な点が多く、今後さらに研究が必要であろう。

## 2. 高周波電流の殺菌効果について

直接覆髄直前に高周波電流の通電を行った C, D 群では、髄の消失はわずかで変性範囲も髄角部に限局し、冠部髄近心部では通電しない A, B 群と同程度であった。このことから、本実験で用いた 90 V, 0.2 秒の条件では、髄の蒸散や熱変性はきわめて狭い範囲にのみ生じると考えられた。

MTA で直接覆髄する前に高周波電流の通電をしなかった A 群と通電した C 群を比較すると、髄角部では C 群の方が変性・壊死がわずかに多く炎症は減少して、両群間には有意差が認められた (図 14)。また、SMTA を用いた場合では、通電しなかった B 群は通電した D 群に比べて、髄角部では変性・壊死や重度炎症が多く両群間に有意差が見られたが (図 14)、冠部髄近心部では著しい差はみられなかった。一方、露髄 2 日後では、E 群と G 群あるいは F 群と H 群を比較すると、髄角部では通電により炎症が消失し変性・壊死が 100 % となって有意差がみられ (図 14)、冠部髄近心部でも E 群は G 群に比べて有意に変性・壊死が少なく炎症が多かった (図 15)。すなわち、露髄直後では通電による蒸散や熱変性で露髄部近傍が殺菌、止血されて炎症が軽減したが、露髄 2 日後では、細菌感染によって髄が壊死したり炎症が生じたりして、健全な髄より電流が流れやすく、熱変性や殺菌効果が広範囲に生じたのではないかと考えられた。そこで冠部髄全体で炎症状態を評価したところ (図 18)、高周波電流を通電した G 群や H 群は、通電しなかった E 群や F 群に比べて重度炎症が有意に少なかった。したがって、露髄後髄に感染した症例でも、高周波電流を通電してから直接覆髄することで、成功の機会を増やせる可能性があると思われた。しかし実際の臨床では、髄の炎症状態は出血により判断することが多く、通電により髄は蒸散したり変性したりして止血するため、感染範囲をすべて殺菌できたかを肉眼的に判断することは難しい。また、電圧を上げたり通電時間を長くしたりすると電極周囲の発熱量が増加して髄の熱変性や殺菌範囲を拡大するだけでなく、根管の細い部分で電流密度が高くなってジュール熱が発生し、歯根部で髄を熱変性させる危険性もある。とくに

根尖狭窄部では高温になると考えられることから、歯根完成歯の直接覆髄に高周波電流を用いることは慎重になるべきである。今後、炎症で導電性が向上している歯髄を選択的に焼灼でき、過剰な電流が通電されない周波数や電圧、通電時間を検討することが課題と思われる。

### 3. 高周波電流の硬組織形成効果について

高周波電流を通電せずに MTA で覆髄した A 群と、通電して覆髄した C 群を比較すると、髄角部では C 群の方が有意に象牙質様組織は増加していた (図 20)。また SMTA を使用した B 群と D 群を比較しても D 群の方が増加傾向はみられた。このことから高周波電流を通電することは象牙質様組織の形成を促進する効果があると考えられた。高周波電流が硬組織形成を促進することについては、これまでに佐藤ら<sup>32,44)</sup>、前田らがラット頭蓋骨の骨欠損で有効性を報告<sup>45)</sup>していることから、高周波電流が歯髄細胞を分化させた可能性が考えられる。しかしその一方で、電流は歯髄に広く流れていたにもかかわらず、象牙質様組織の形成が促進されたのは髄角部に限局しており、他の部位では効果がほとんどみられなかった。したがって、電流が歯髄細胞に直接作用したのではなく、止血効果と考えるのが妥当であろう。すなわち、直接覆髄の成功のためには止血が重要とされており、実際に露髄部に通電することですべての歯で止血が十分に行えたことから、その効果は高かったのではないかと考えられる。また、高周波電流による骨形成促進効果が得られたのは、本実験で使用した出力よりはるかに低く、しかも外科的損傷後数日経過して治癒過程に入ってからからの通電が効果的と報告<sup>44)</sup>されていることから、高周波電流の通電により修復象牙質の形成促進と殺菌効果を同時に得ることは困難であろうと思われる。

### 4. 今後の課題

今回の実験では、高周波電流の影響や歯髄の SMTA に対する反応性を評価するために、観察期間を 1 週および 3 週としたが、形成された象牙質様組織は幼弱であり、今後、数ヶ月の観察期間を設定して露髄部の象牙質形成状態や歯髄の健康状態を評価することが必用と考えている。

### 結論

露髄部に高周波電流の通電とスーパーMTA ペーストを併用した直接覆髄の有効性を病理組織学的に検討した結果、次の結論を得た。

1. スーパーMTA ペーストは ProRoot® MTA より炎症を抑制した。
2. スーパーMTA ペーストは ProRoot® MTA より露髄部に近い位置でデンチンブリッジを形成した。
3. 高周波電流を露髄部に通電することで炎症が減少し、象牙質様組織の形成量が増加した。
4. 露髄 2 日後でも、高周波電流を露髄部に通電して直接覆髄することで、冠部歯髄の炎症は大きく抑制された。

### 謝辞

本稿を終えるにあたり、菅谷勉教授、大歳祐生博士、山田慧太氏をはじめとする北海道大学大学院歯学研究院口腔健康科学分野歯周・歯内療法学教室の教室員各位ならびに、高周波電流装置を作製していただいた株式会社モリタ製作所、的場一成氏に心より御礼申し上げます。

## 参考文献

1. Hilton TJ. Keys to clinical success with pulp capping: a review of the literature. *Oper dent* 2009 34: 615-625.
2. Zhu C, Ju B, Ni R. Clinical outcome of direct pulp capping with MTA or calcium hydroxide: a systematic review and meta-analysis. *Int J Clin Exp Med*. 2015 8:17055-17060.
3. Matsuura T, Kawata-Matsuura V, Yamada S. Long-term clinical and radiographic evaluation of the effectiveness of direct pulp-capping materials. *J Oral Sci*. 2019 61:1-12.
4. Hosoya N, Takigawa T, Horie T, Maeda H, Yamamoto Y, Momoi Y, Yamamoto K, Okiji T. A review of the literature on the efficacy of mineral trioxide aggregate in conservative dentistry. *Dent Mater J*. 2019 38:693-700.
5. Torabinejad M, Hong CU, McDonald F, Pitt Ford TR. Physical and chemical properties of a new root-end filling material. *J Endod*. 1995 21:349-353.
6. Poggio C, Lombardini M, Colombo M, Beltrami R, Rindi S. Solubility and pH of direct pulp capping materials: a comparative study. *J Appl Biomater Funct Mater*. 2015 13: e181-5.
7. Al-Hezaimi K, Naghshbandi J, Oglesby S, Simon JHS, Rotstein I. Comparison of antifungal activity of white-colored and gray-colored mineral trioxide aggregate (MTA) at similar concentrations against *Candida albicans*. *J Endod*. 2006 32:365-367.
8. Al-Hezaimi K, Al-Shalan T, Naghshbandi J, Oglesby S, Simon JHS, Rotstein I. Antibacterial effect of two mineral trioxide aggregate (MTA) preparations against *Enterococcus faecalis* and *Streptococcus sanguis* in vitro. *J Endod*. 2006 32:1053-1056.
9. Yang Y, Huang L, Dong Y, Zhang H, Zhou W, Ban J, Wei J, Liu Y, Gao J, Chen J. In vitro antibacterial activity of a novel resin-based pulp capping material containing the quaternary ammonium salt MAE-DB and Portland cement. *PLoS One*. 2014 9: e112549.
10. El Sayed M, Saeed M. In vitro comparative study of sealing ability of Diadent BioAggregate and other root-end filling materials. *J Conserv Dent*. 2012 15:249-252.
11. Kramer PR, Woodmansey KF, White R, Primus CM, Opperman LA. Capping a pulpotomy with calcium aluminosilicate cement: comparison to mineral trioxide aggregates. *J Endod*. 2014 40:1429-1434.
12. 中村 裕子, 井出 祐樹, 鈴木 瑛子, 上田 堯之, 日下 洋平, 横瀬 敏志. Mineral trioxide aggregate による象牙質-歯髓複合体再生の組織学的評価. *日歯保存誌* 2016 59:370-380.
13. Torabinejad M, Parirokh M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review-Part II: Leakage and biocompatibility investigations. *J Endod*. 2010 36:190-202.
14. Cervino G, Fiorillo L, Spagnuolo G, Bramanti E, Laino L, Lauritano F, Cicciù M. Interface between MTA and dental bonding agents: scanning electron microscope evaluation. *J Int Soc Prev Community Dent*. 2017 7:64-68.
15. Budig CG, Eleazer PD. J In vitro comparison of the setting of dry ProRoot MTA by moisture absorbed through the root. *Endod*. 2008 34:712-714.
16. Gandolfi MG, Iacono F, Agee K, Siboni F, Tay F, Pashley DH, Prati C. Setting time and expansion in different soaking media of experimental accelerated calcium-silicate cements and ProRoot MTA. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2009 108: e39-45.
17. Parirokh M, Torabinejad M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review--Part III: Clinical applications, drawbacks, and mechanism of action. *Endod*. 2010 36:400-413.
18. Shokouhinejad N, Jafargholizadeh L, Khoshkhounejad M, Nekoofar MH, Raouf M. Surface microhardness of three thicknesses of mineral trioxide aggregate in different setting conditions. *Restor Dent Endod*. 2014 39:253-257.
19. Nekoofar MH, Stone DF, Dummer PMH. The effect of blood contamination on the compressive strength and surface microstructure of mineral trioxide aggregate. *Int Endod J*. 2010 43:782-791.

20. Oloomi K, Saberi E, Mokhtari H, Mokhtari Zonouzi HR, Nosrat A, Nekoofar MH, Dummer PM. Evaluation of the effect of blood contamination on the compressive strength of MTA modified with hydration accelerators. *Restor Dent Endod.* 2013 38:128-133.
21. Hasheminia SM, Nejad SL, Dianat O, Modaresi J, Mahjour F. Comparing the sealing properties of mineral trioxide aggregate and an experimental ceramic based root end filling material in different environments. *Indian J Dent Res.* 2013 24:474-477.
22. Salem Milani A, Rahimi S, Froughreyhani M, Pakdel MV. Effect of Blood Contamination on marginal adaptation and surface microstructure of mineral trioxide aggregate: A SEM study. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects.* 2013 7:157-163.
23. Akcay H, Arslan H, Akcay M, Mese, Sahin NN. Evaluation of the bond strength of root-end placed mineral trioxide aggregate and Biodentine in the absence/presence of blood contamination. *Eur J Dent.* 2016. 10:370-375.
24. Pandey R, Dixit N, Dixit KK, Roy S, Gaba C, Goyal C. Comparative evaluation of microleakage of mineral trioxide aggregate and Geristore root-end filling materials in different environments: An in vitro study. *J Conserv Dent.* 2018 21:328-332.
25. 星加知宏, 勝俣愛一郎, 丁 群展, 西谷登美子, 高 裕子, 勝俣 環, 根本 章, 伊藤誠之, 岩田知幸, 林 宏昌, 永山雅大, 永山祥子, 西谷佳浩. 新規覆髄剤の細胞増殖ならびに象牙質剪断接着強さへの影響について. *日歯保存誌.* 2019 62:208-214.
26. 井波智鶴, 岩崎小百合, 西谷佳浩, 伊津野真一. トリブチルボランを重合開始剤とする新規レジン複合型 mineral trioxide aggregate (MTA)系材料の辺縁封鎖性に関する検討. *日歯保存誌.* 2020 63:52-60.
27. 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.
28. 田中翔太, 黒田嘉宏, 井村誠孝, 鍵山善之, 大城 理. 電気メスによるジュール熱の発生-伝達モデリング. 第52回自動制御連合講演会 2009 H1-1:1-6.
29. 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. 磁波照射の歯内療法への応用. *日歯内誌.* 2011 32:184-200.
30. Handa K, Koike T, Hayashi K, Saito T. Application of high-frequency radio waves to direct pulp capping. *J Endod.* 2013 39:1147-1150.
31. Yumoto H, Hirao K, Tominaga T, Bando N, Takahashi K, Matsuo T. Electromagnetic wave irradiation promotes osteoblastic cell proliferation and up-regulates growth factors via activation of the ERK1/2 and p38 MAPK pathways. *Cell Physiol Biochem.* 2015 35:601-615.
32. Sato T, Sugaya T, Kawanami M. Effect of high-frequency electromagnetic wave stimulation on bone repair in rat calvaria defects. *J Oral Tissue Engin,* 2016 14:59-64.
33. Shinkai K, Taira Y, Kawashima S, Suzuki S, Suzuki M. Histological evaluation of direct pulp capping with all-in-one adhesives in rat teeth. *Dent Mater J.* 2017 36:348-356.
34. Trongkij P, Sutimuntanakul S, Laphanasupkul P, Chaimanakarn C, Wong RH, Banomyong D. Pulpal responses after direct pulp capping with two calcium-silicate cements in a rat model. *Dent Mater J.* 2019 38:584-590.
35. Negm AM, Hassanien EE, Abu-Seida AM, Nagy MM. Biological evaluation of a new pulp capping material developed from Portland cement. *Exp Toxicol Pathol.* 2017 69:115-122.
36. Tziafas D, Pantelidou O, Alvanou A, Belibasakis G, Papadimitriou S. The dentinogenic effect of mineral trioxide aggregate (MTA) in short-term capping experiments. *Int Endod J.* 2002 35:245-254.
37. Parolia A, Kundabala M, Rao NN, Acharya SR, Agrawal P, Mohan M, Thomas M. A comparative histological analysis of human pulp following direct pulp capping with Propolis, mineral trioxide aggregate and Dycal. *Aust Dent J.* 2010 55:59-64.
38. 川村直人, 菅谷 勉, 宮治裕史, 川浪雅光. 4-META/MMA-TBB レジンの硬化条件が組織反応に及ぼす影響. *日歯保存誌.* 2003 46 : 853-859.
39. 高輪泰弘, 川村直人, 菅谷 勉, 川浪雅光. 4-META/MMA-TBB レジンに止血剤を併用した場合の組織反応. *北海道歯誌.* 2010 31 : 35-43.

40. Morishita T, Sugaya T, Nakatsuka M, Sunosaki M, Kawanami M. Connective tissue reaction and bone-cement contact after implantation of PMMA resin cements. J Oral Tissue Engin. 2012 10:1-12.
41. 洲崎真希、菅谷 勉、川浪雅光. 4-META/MMA-TBB レジンの硬化条件がレジン表面への骨形成に及ぼす影響. 北海道歯誌. 2014 34:65-76.
42. 細矢由美子, 一瀬暢宏, 井上 孝, 福本 敏, 後藤讓治. 4-META/MMA-TBB レジンによる直接歯髄覆罩後の歯髄の病理組織学的変化(第1報). 小児歯誌. 1997 35:401-409.
43. 山本俊樹、菅谷 勉、加藤 熙. 髓床底穿孔の処置に 4-META/MMA-TBB レジンを応用した場合の歯周組織反応に関する病理組織学的検討. 日歯保存誌. 2000 43 : 1269-1248.
44. 佐藤賢人, 菅谷 勉, 中谷充宣, 前田良子, 川浪雅光, 富永敏彦. 高周波電流刺激の電流値と通電期間が骨再生に及ぼす影響. 日歯保存誌. 2016 第 144 回講演抄録集 : 54.
45. 前田良子. 高周波電流刺激による骨形成への対極とデューティ比の影響. 北海道歯誌. 2018 38:257. ■

図表

実験群	覆髓日	高周波電流	覆髓材
A	露髓直後	なし	MTA
B			SMTA
C		あり	MTA
D			SMTA
-----			
E	露髓2日後	なし	MTA
F			SMTA
G		あり	MTA
H			SMTA

表1



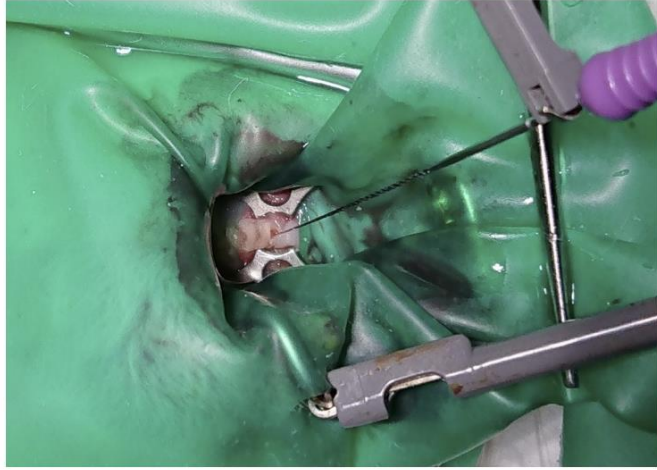


图 1

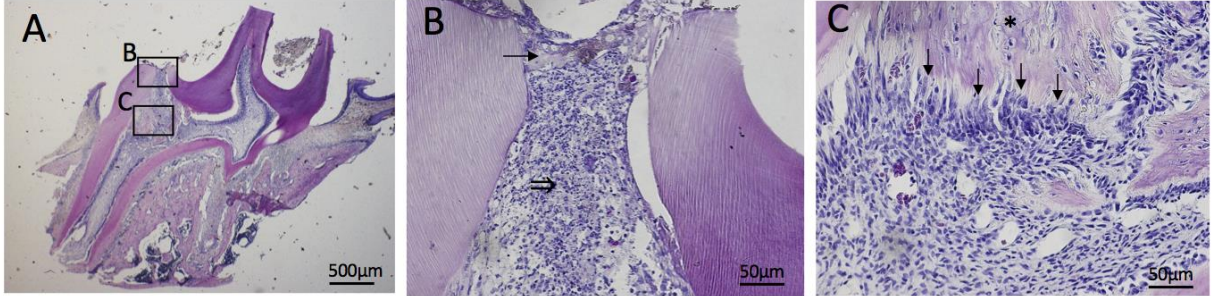


图2

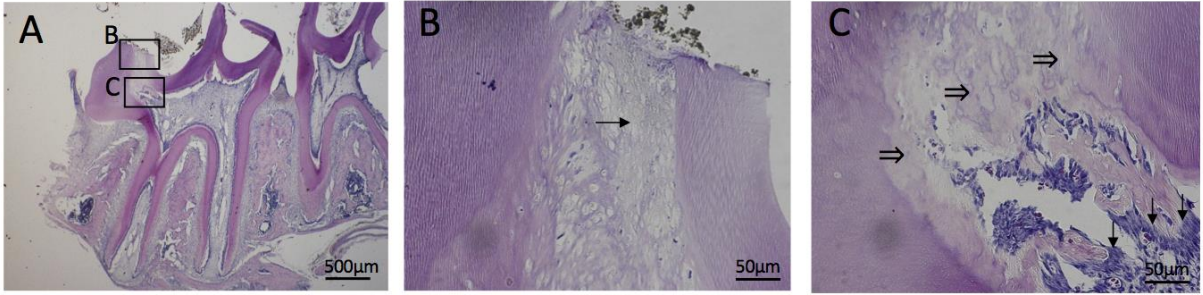


图3

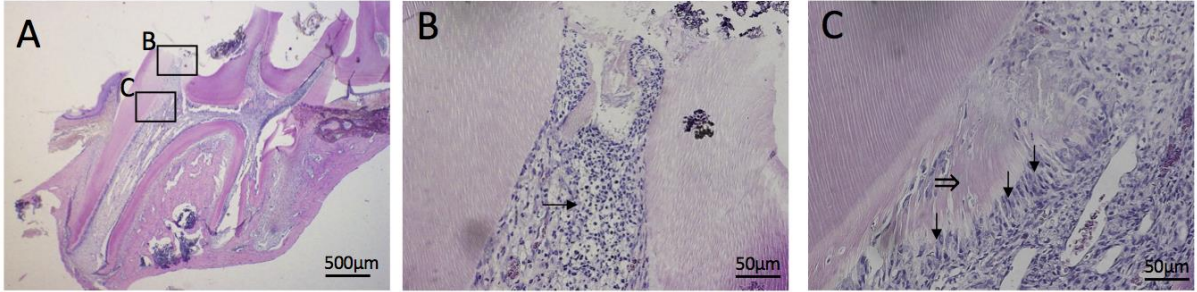


图4

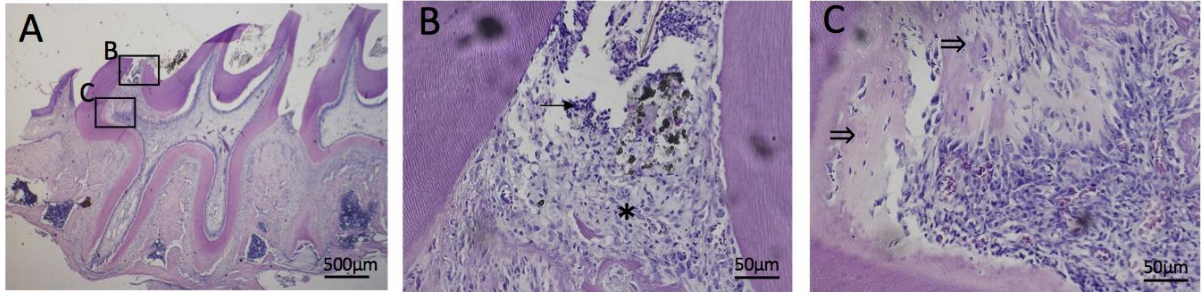


图5

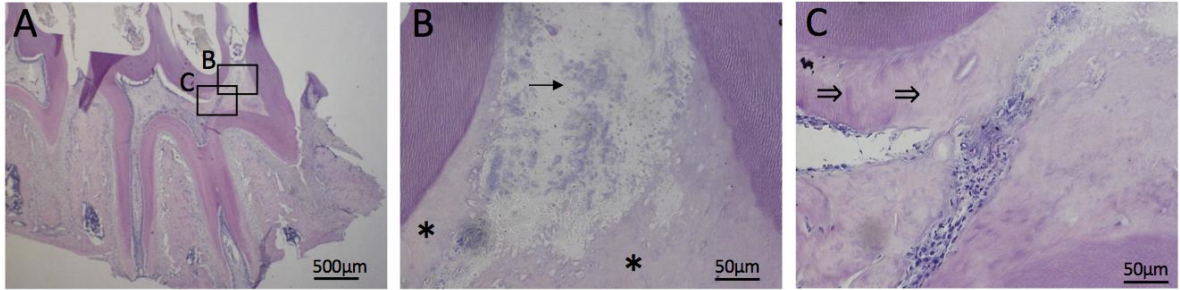


图6

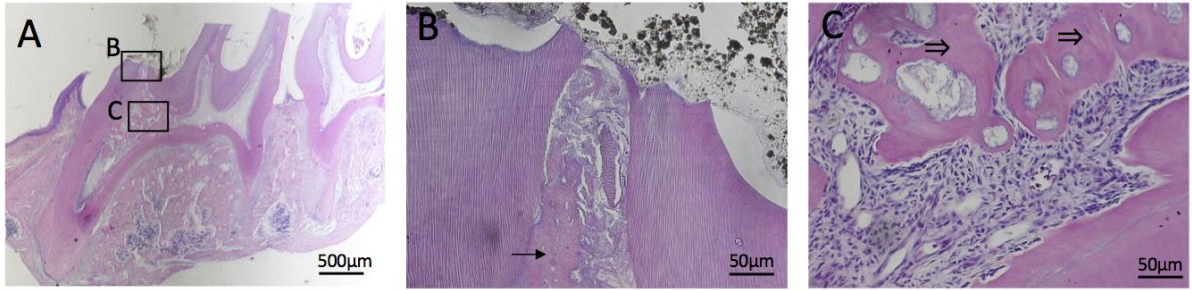


图7

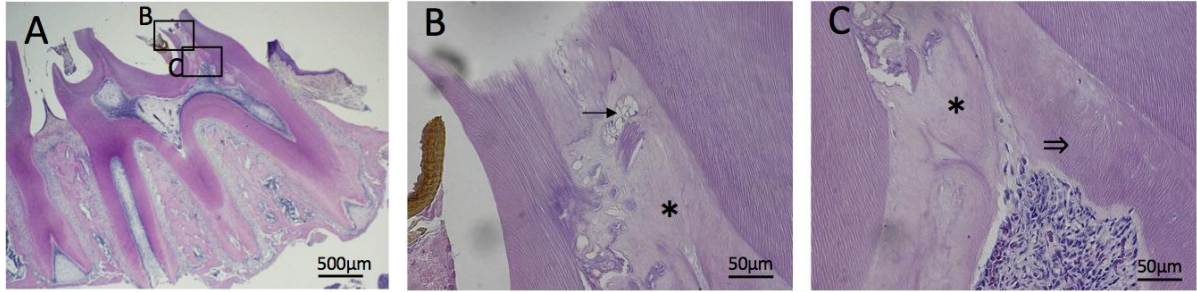


图8



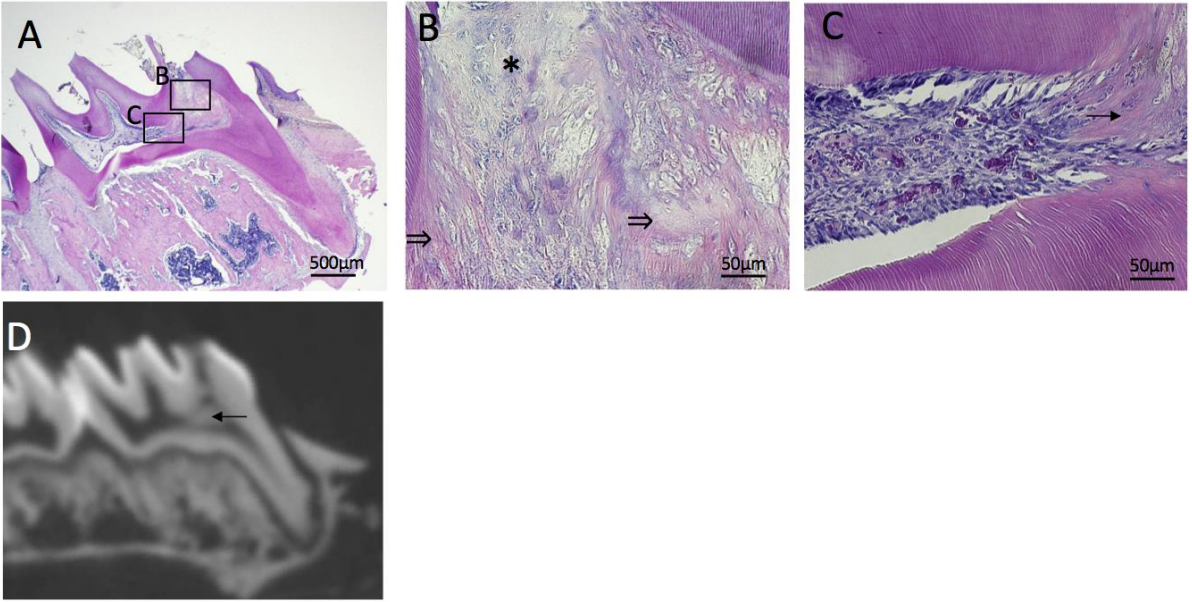


图9

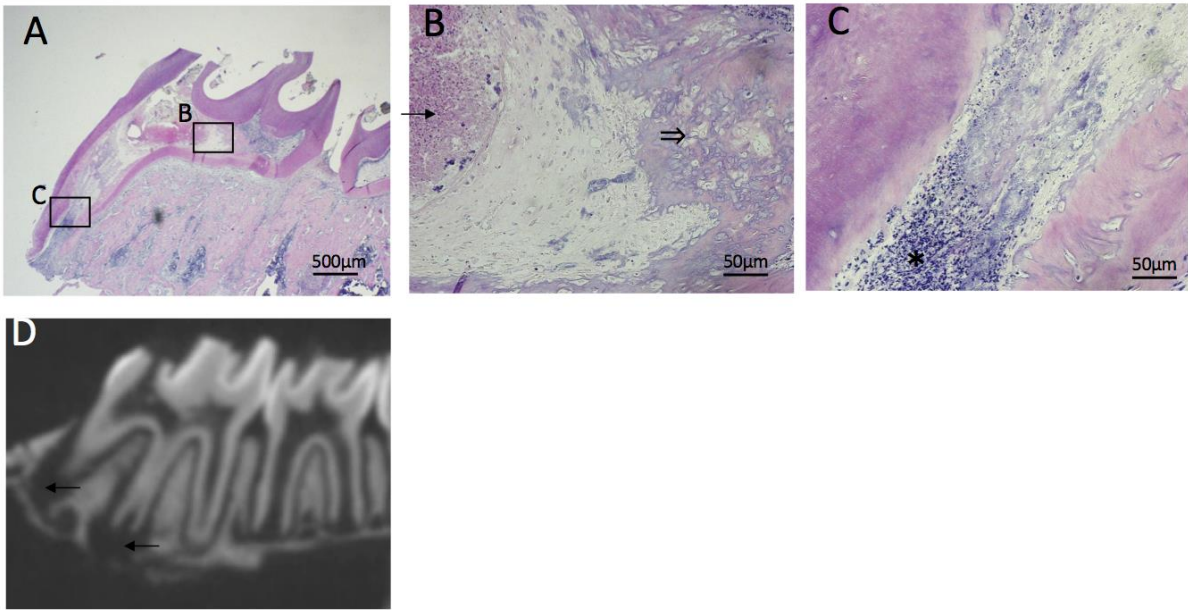


图10

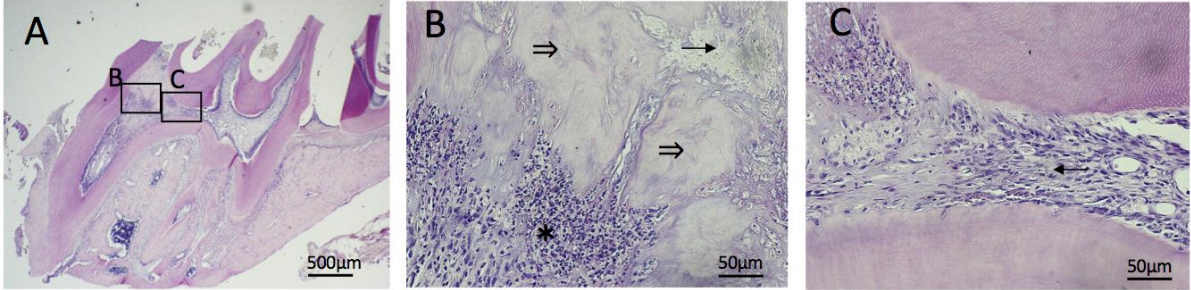


图11

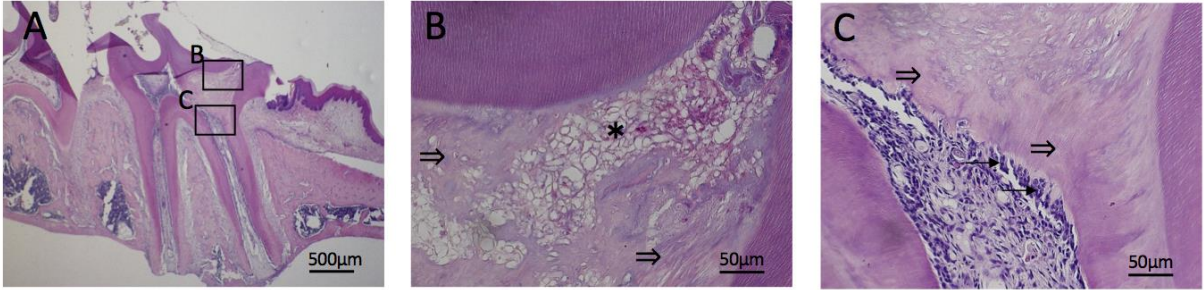


图12

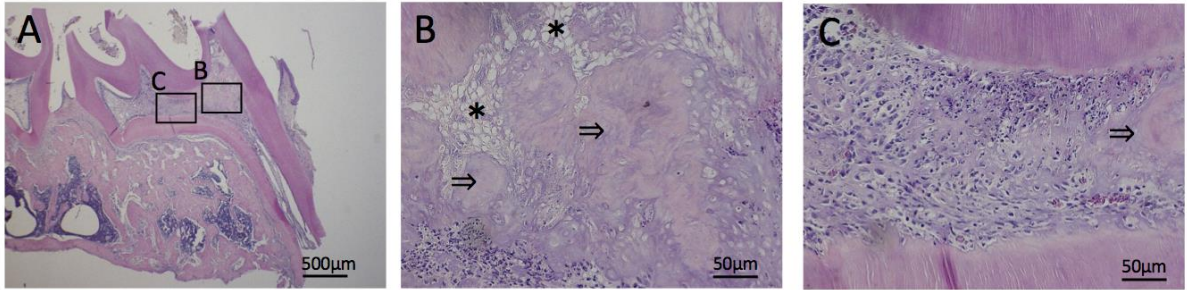


图13

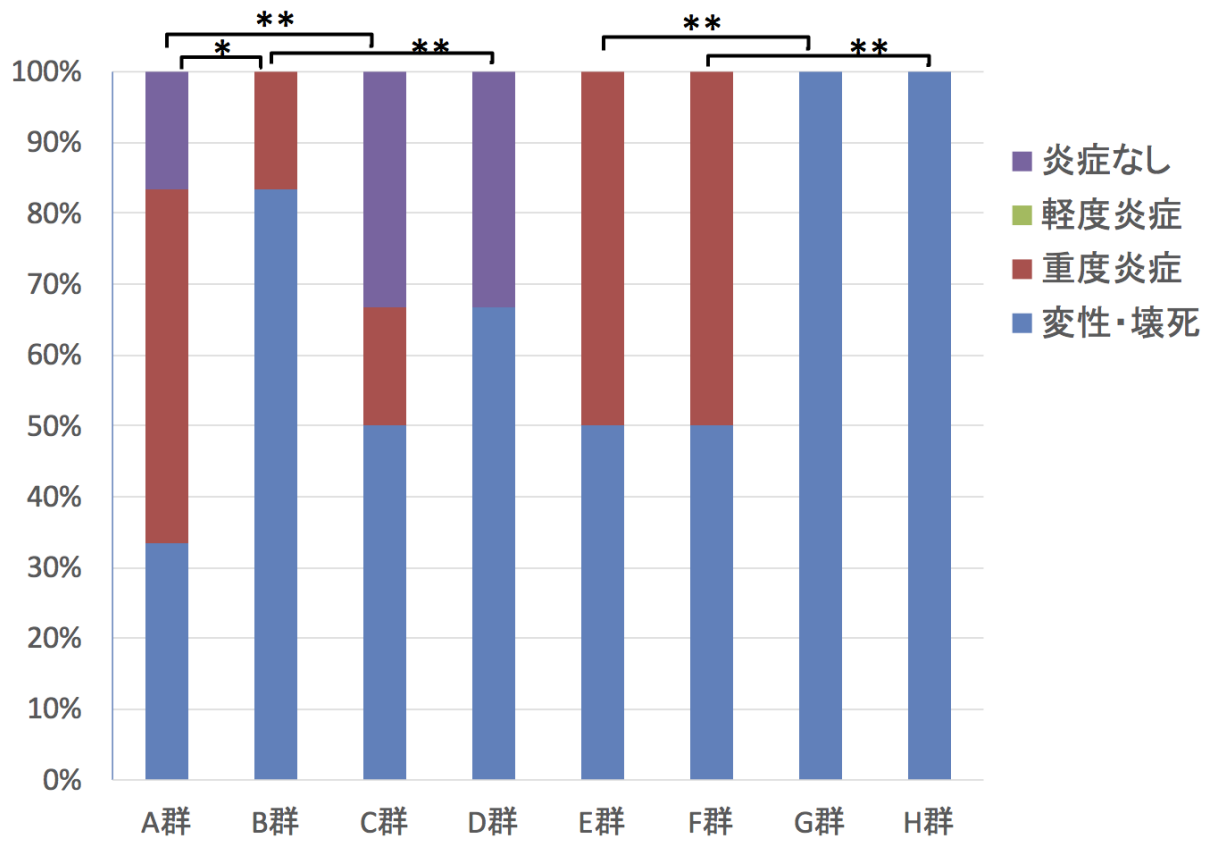


図14

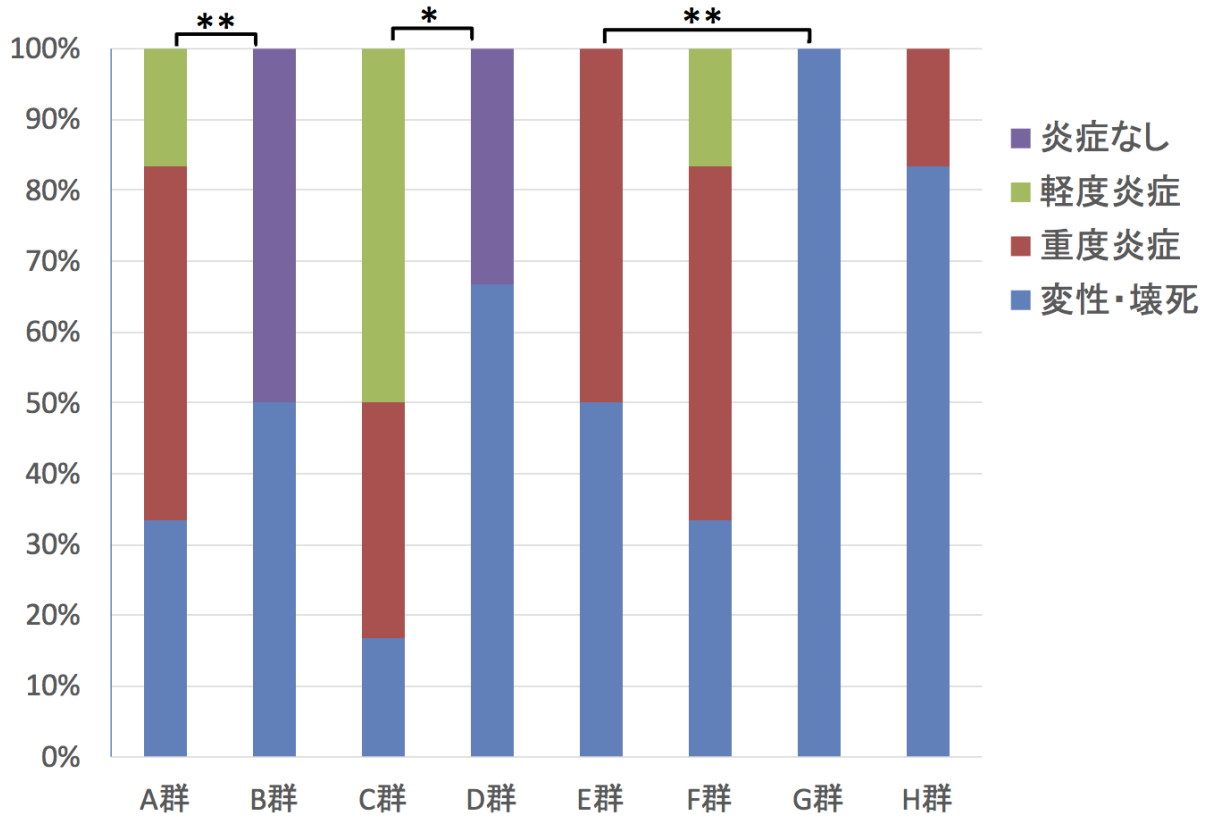


図15

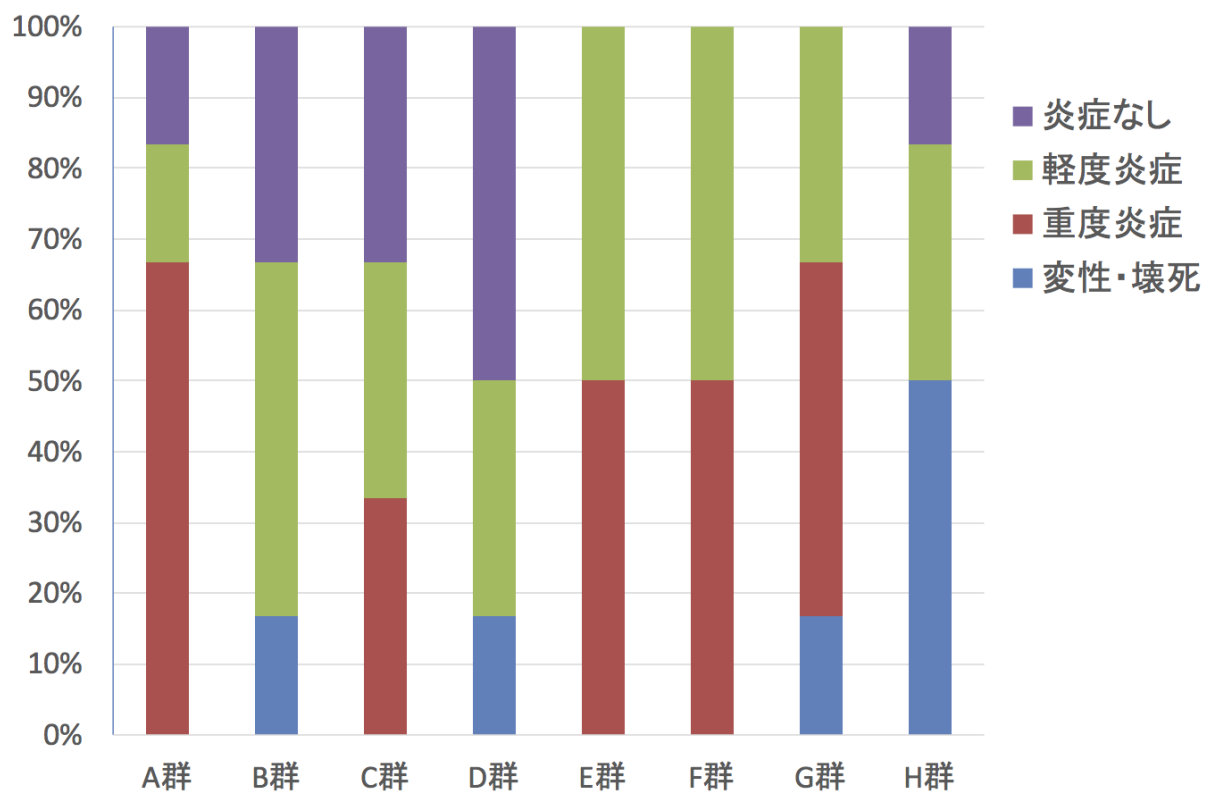


図16



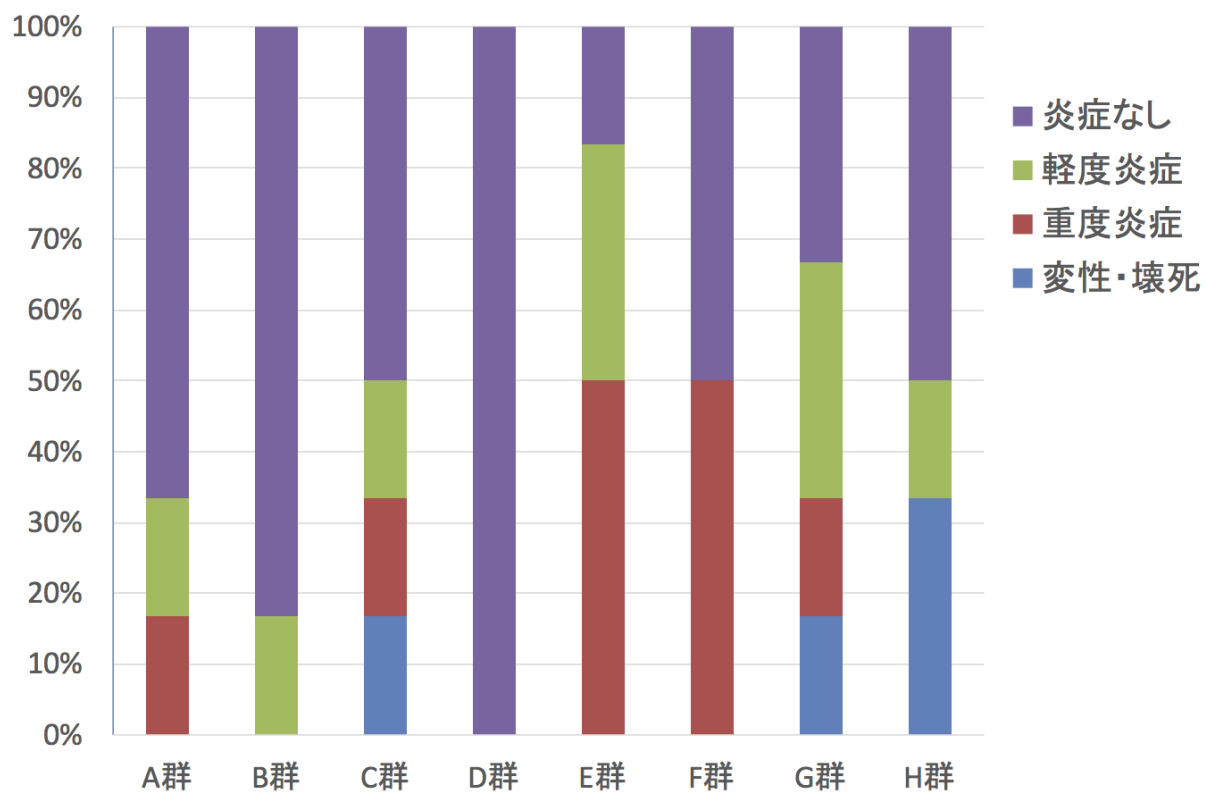


図17

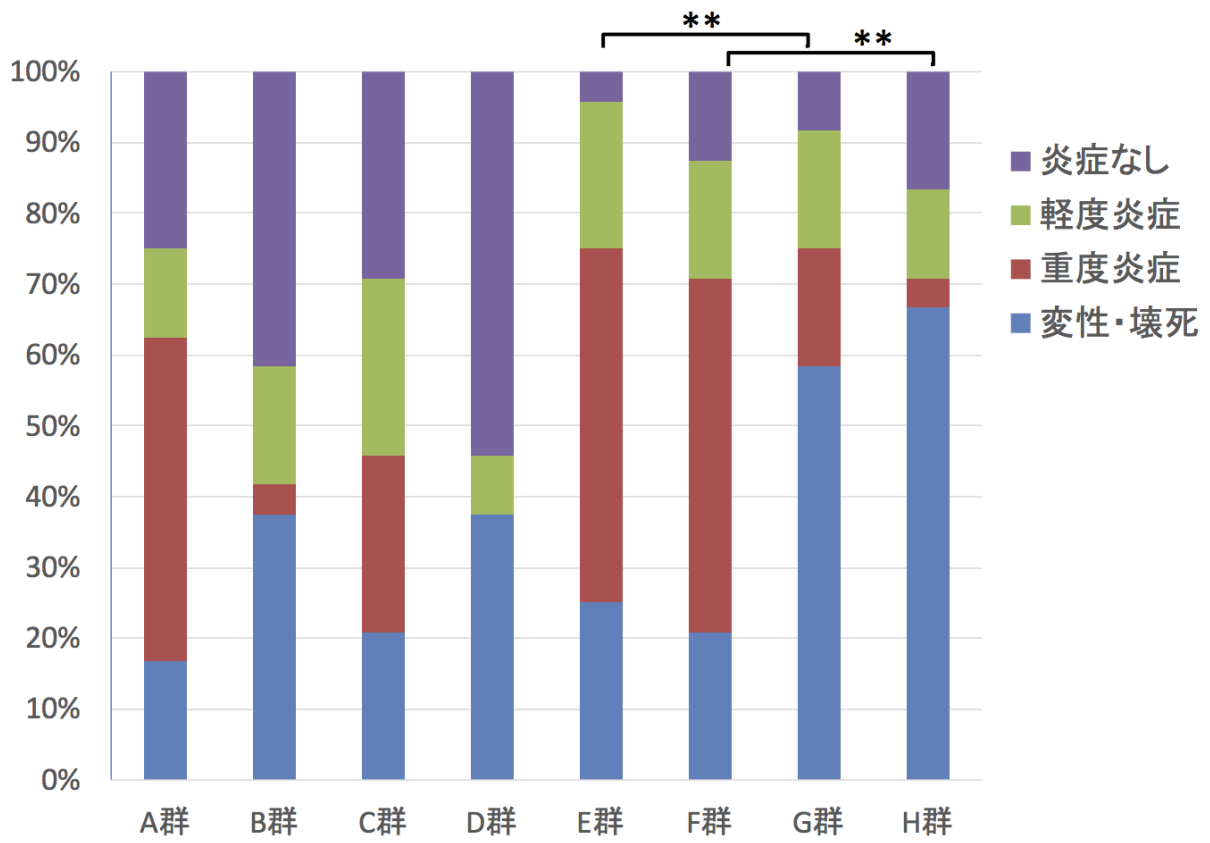


図18

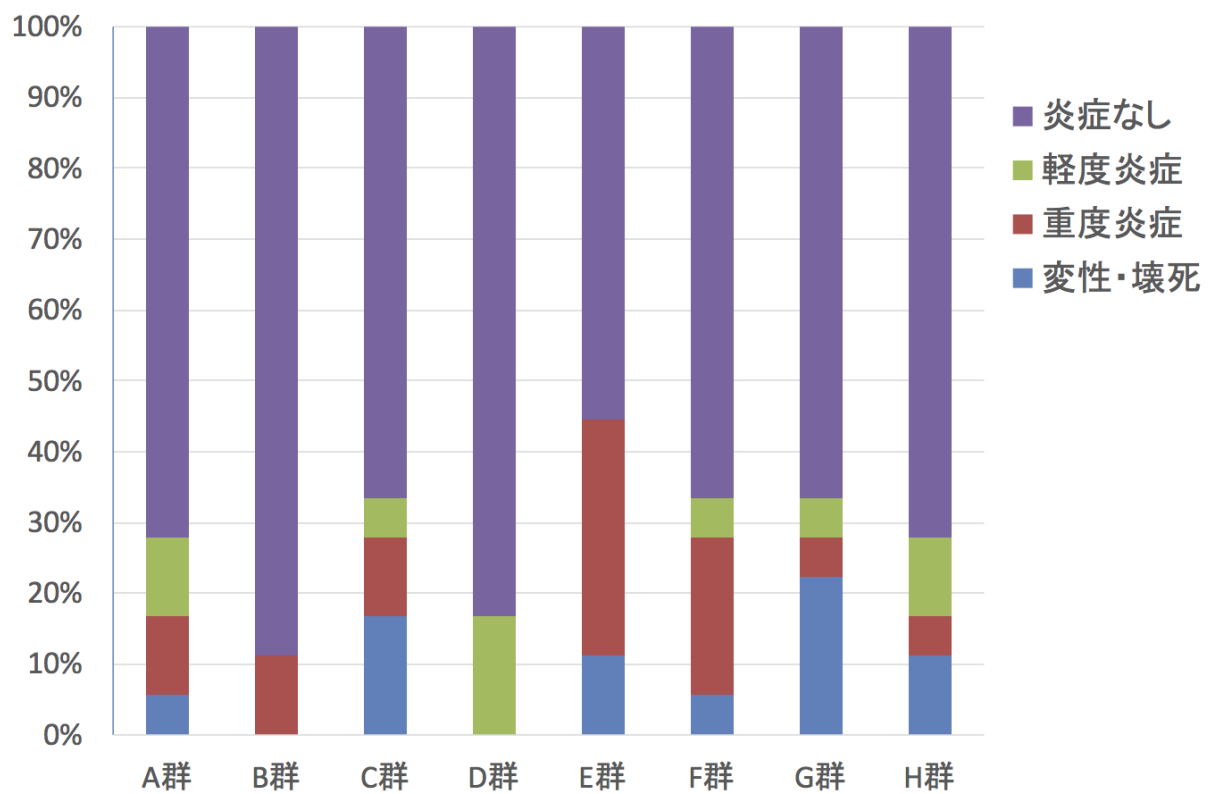


図19

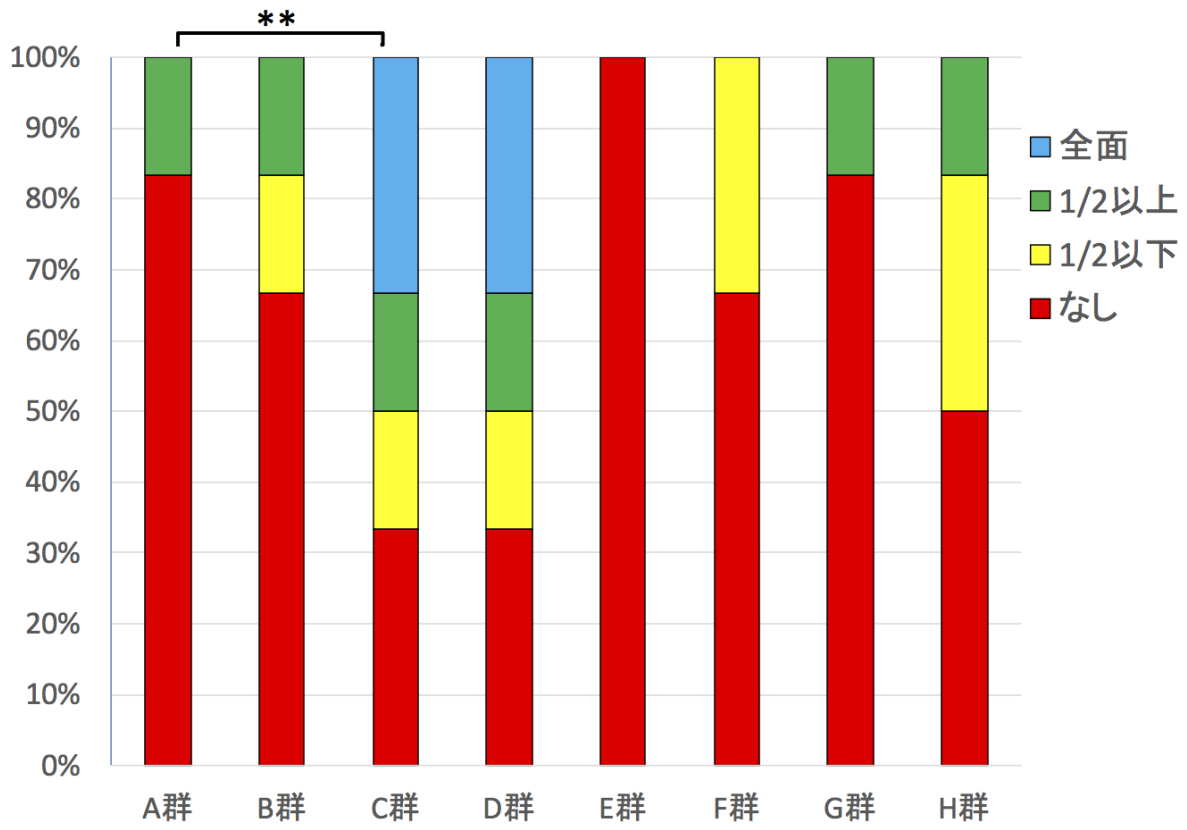


図20

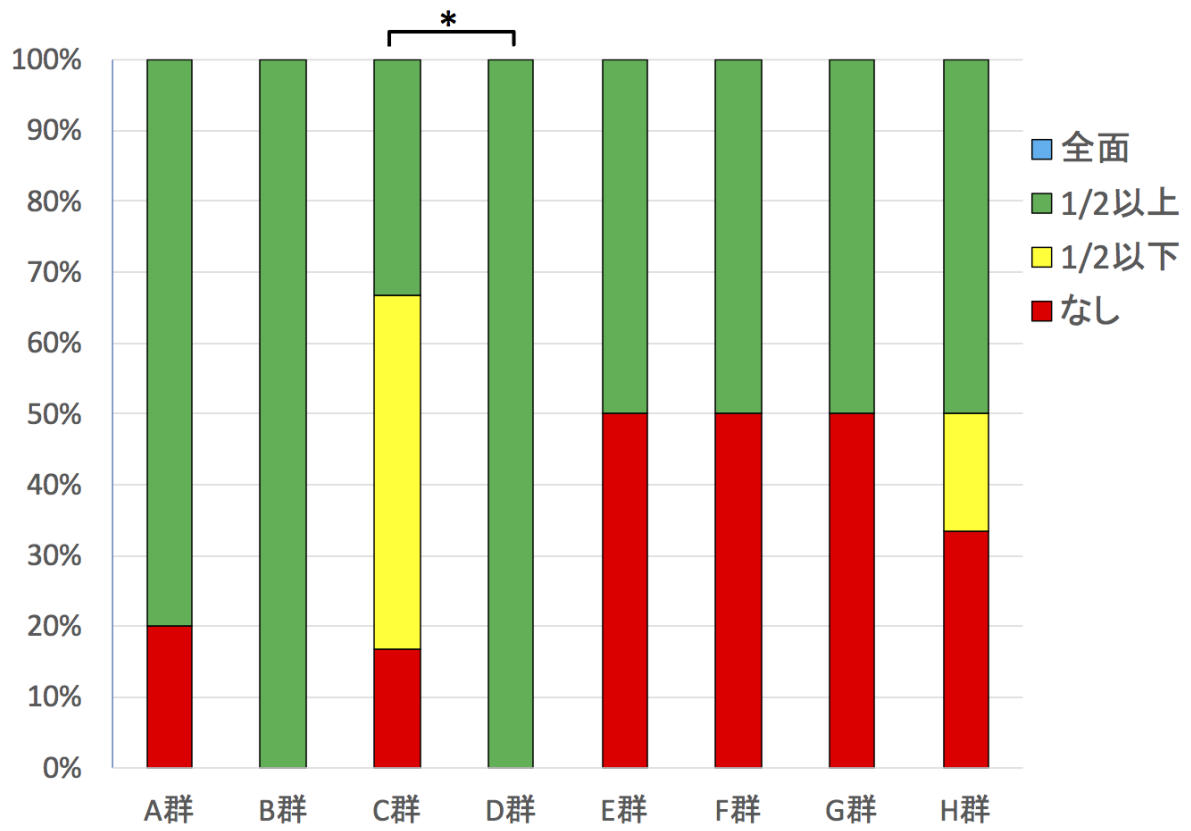


図21

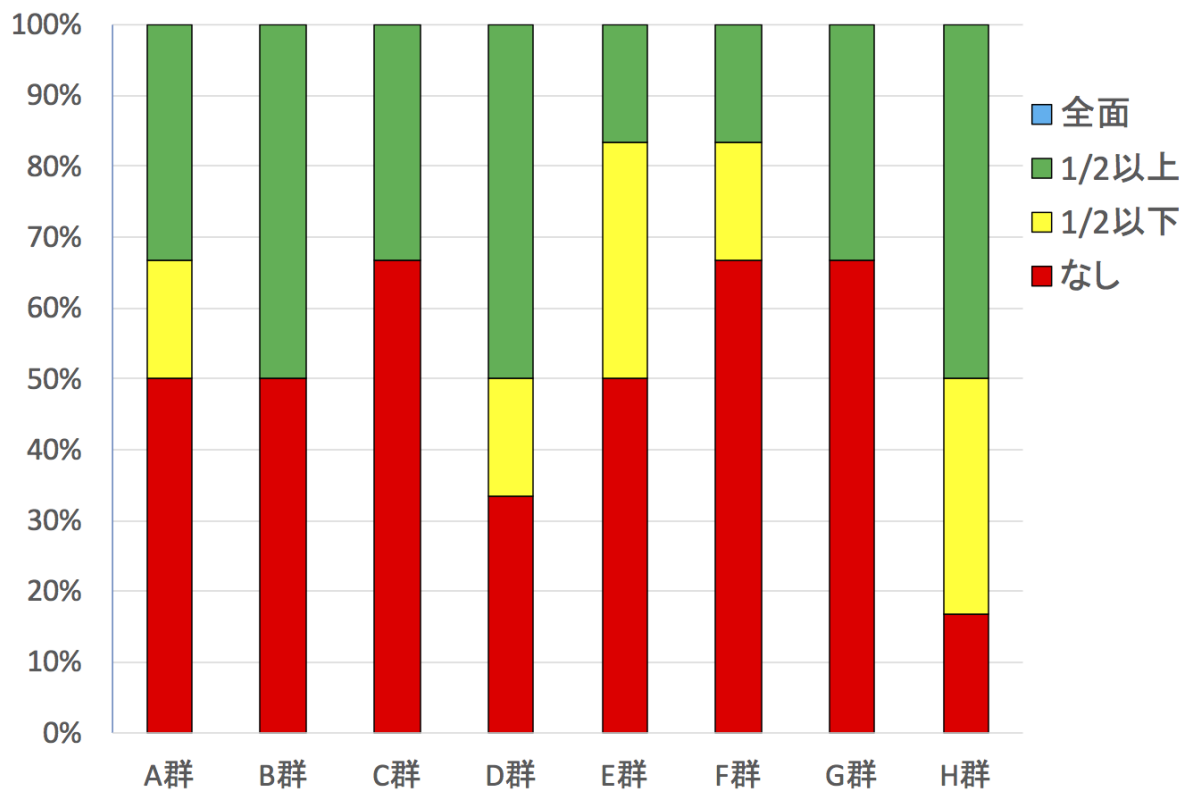


図22

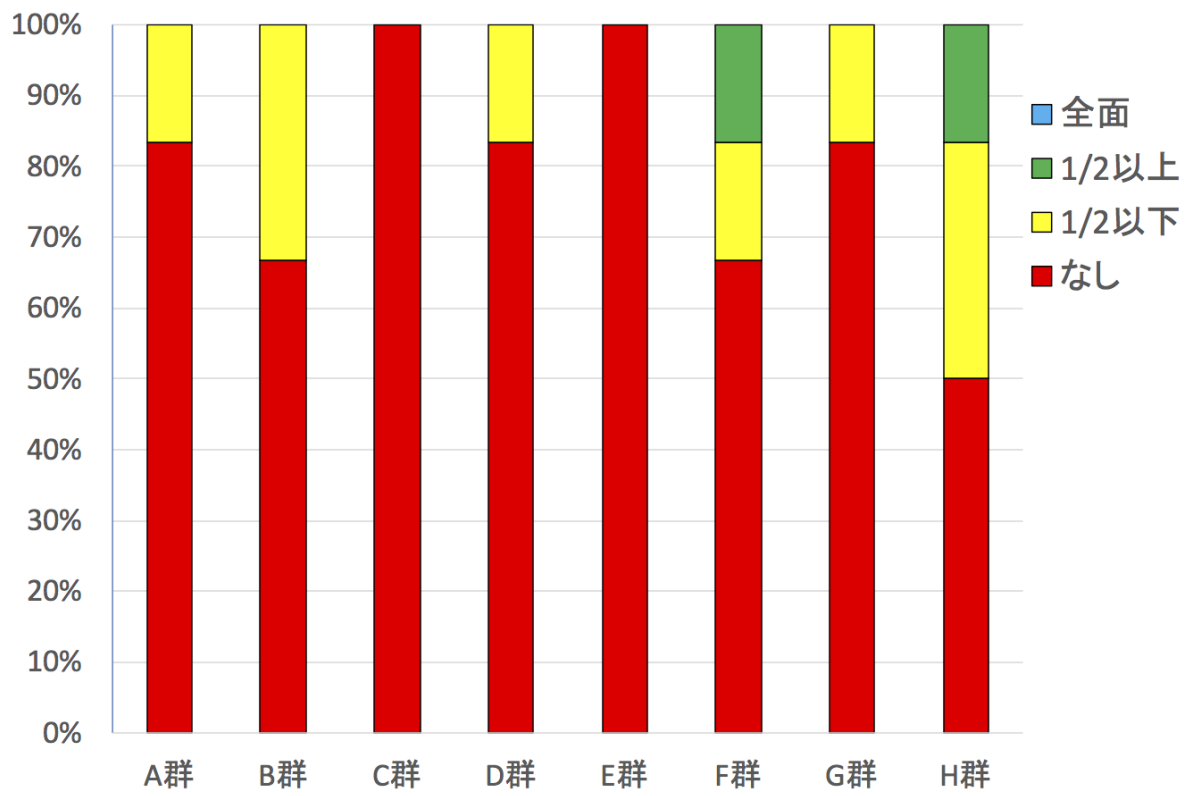


図23

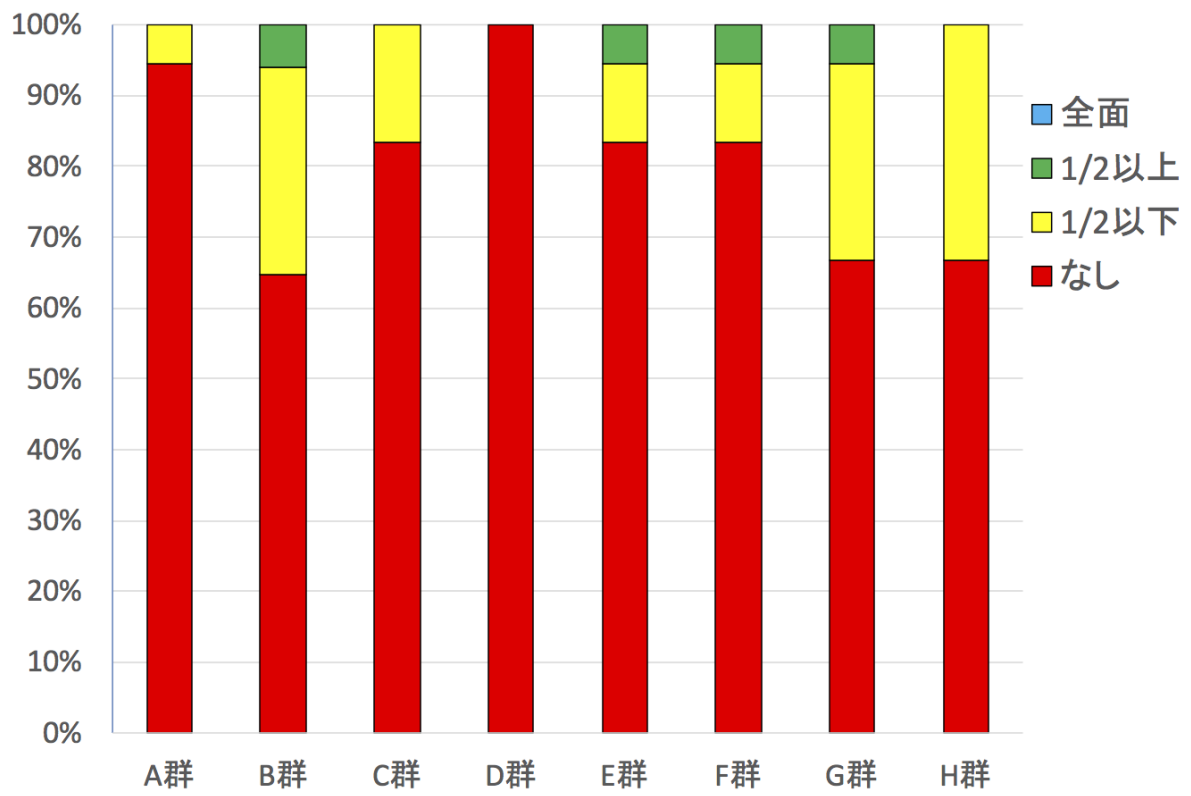


図24



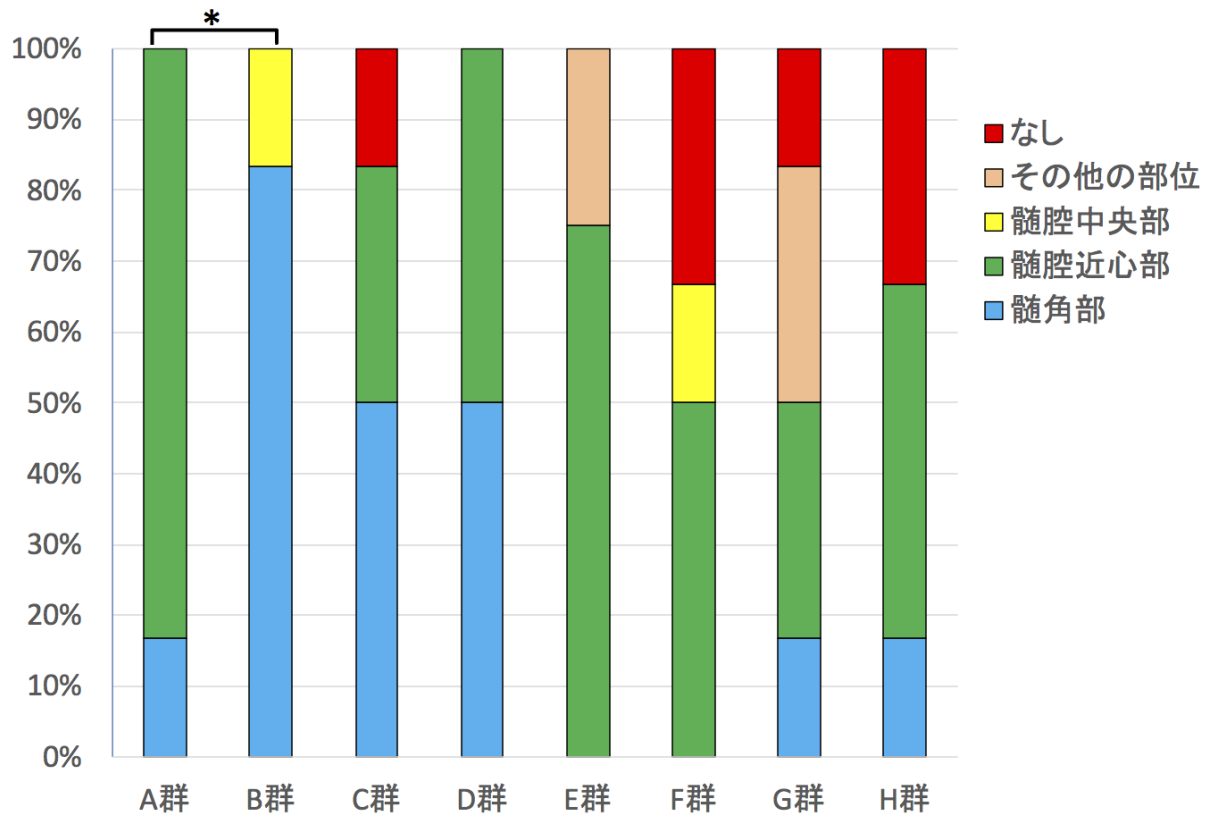


図25

## 図説

### 表 1 実験群の分類

- 図 1 露髄部への高周波電流通電
- 図 2 A 群 (露髄直後の覆髄・通電なし・MTA 覆髄) 1 週後
- 図 3 B 群 (露髄直後の覆髄・通電なし・SMTA 覆髄) 1 週後
- 図 4 C 群 (露髄直後の覆髄・通電あり・MTA 覆髄) 1 週後
- 図 5 D 群 (露髄直後の覆髄・通電あり・SMTA 覆髄) 1 週後
- 図 6 A 群 (露髄直後の覆髄・通電なし・MTA 覆髄) 3 週後
- 図 7 B 群 (露髄直後の覆髄・通電なし・SMTA 覆髄) 3 週後
- 図 8 C 群 (露髄直後の覆髄・通電あり・MTA 覆髄) 3 週後
- 図 9 D 群 (露髄直後の覆髄・通電あり・SMTA 覆髄) 3 週後
- 図 10 E 群 (露髄 2 日後の覆髄・通電なし・SMTA 覆髄) 3 週後
- 図 11 F 群 (露髄 2 日後の覆髄・通電なし・MTA 覆髄) 3 週後
- 図 12 G 群 (露髄 2 日後の覆髄・通電あり・SMTA 覆髄) 3 週後
- 図 13 H 群 (露髄 2 日後の覆髄・通電あり・SMTA 覆髄) 3 週後
- 図 14 髄角部の炎症状態  
\* :  $p < 0.05$ 、\*\* :  $p < 0.01$
- 図 15 髄腔近心部の炎症状態  
\* :  $p < 0.05$ 、\*\* :  $p < 0.01$
- 図 16 髄腔中央部の炎症状態
- 図 17 髄腔遠心部の炎症状態
- 図 18 冠部歯髄全体の炎症状態
- 図 19 歯根部の炎症状態
- 図 20 髄角部の象牙質様組織の形成状態  
\*\* :  $p < 0.01$
- 図 21 髄腔近心部の象牙質様組織の形成状態  
\* :  $p < 0.05$
- 図 22 髄腔中央部の象牙質様組織の形成状態

図 23 髓腔遠心部の象牙質様組織の形成状態

図 24 歯根部の象牙質様組織の形成状態

図 25 デンチンブリッジ形成部位

\* :  $p < 0.05$