

ラット根未完成臼歯の咬合性外傷における歯周組織障害および歯根形成に  
関する実験的研究

福岡歯科大学 生体構造学講座 病態構造学分野

船越知行

An Experimental Study of Periodontal Tissue Injury and Root Formation in  
Immature Rat Molar after Occlusal Trauma

Tomoyuki FUNAKOSHI

Department of Morphological Biology, Division of Pathology, Fukuoka Dental College

Key word : occlusal trauma、immature rat molar、periodontal tissue、root formation

Abstract : The damage of periodontal tissue and root formation were examined in immature rat molar roots histopathologically and with scanning electron microscopy. Occlusal trauma tended to occur more frequently in immature tooth roots than in mature root counterparts. Periodontal tissues under compression showed the proximity of the root and alveolar bone, and were followed by the curvature of the periapical Hertwig's epithelial sheath or root contour and sigmoid or other deformation of the tooth root. Consequently elaborate care against occlusal trauma was speculated to be clinically necessary toward an immature tooth root.

ランニングタイトル :

ラット根未完成臼歯の咬合性外傷における歯周組織障害、歯根形成について

## 緒 言

外傷性咬合は歯周組織障害の原因の一つに挙げられている。外傷性咬合による歯周組織への影響に関する研究は、これまで基礎的および臨床的研究が多数報告<sup>1-24)</sup>され、咬合性外傷として歯根膜には圧迫側と牽引側が生じ、圧迫側では歯根膜の狭窄、硝子変性、壊死、水腫、出血、歯槽骨の垂直性吸収、歯根吸収などの障害的变化が生じること、牽引側では歯根膜の伸張、出血、歯槽骨の新生骨添加などが惹起されることが知られている。実験病理学的研究においても、サル<sup>1, 4, 6, 11-13, 16, 18, 22-24)</sup>、ラット<sup>2, 7, 14, 15, 19-21)</sup>、イヌ<sup>3, 5, 8-10, 17)</sup>などを用い、人為的に咬合を高くして外傷性咬合を起こさせ、その際の歯周組織の破壊性変化や修復性変化あるいはそのメカニズムに関する多くの報告がみられる。また、咬合性外傷については、過剰な咬合力により惹起される一次性咬合性外傷と、歯周炎などで歯周組織の負担力の低下が生じているため生理的咬合力で惹起される二次性咬合性外傷に分類され、すでに成書にも記載されている<sup>25-28)</sup>。

これまでの咬合性外傷に関する研究は、歯根が完成した歯に対する咬合性外傷について研究したものがほとんどである。一方、根未完成歯については、咬合、咀嚼に対する支持力は十分でなく、生理的な咬合圧や過剰な咬合圧により咬合性外傷が生じ易いことが十分に考えられるものの、咬合性外傷に関する病理学的研究はほとんどみられない。一般に永久歯の根未完成歯は小児学童期の6歳から12歳の混合歯列の中でみられ、萌出した永久歯は比較的長く歯根未完成歯の状態で存在する。小児においては咬合力、咀嚼力はそれほど強いものではなく、根未完成であっても徐々に萌出することでそれほど強い負担過重を受けず、咬合性外傷はほとんど生じないと思われる。しかしながら、永久歯の中でも萌出時期が遅い小臼歯(10~12歳に萌出)や第二大臼歯(12~15歳に萌出)は萌出する時期にはすでに隣接する第一大臼歯の歯根がほとんど完成し、咬合・咀嚼機能を中心的に営んでおり、このような状況下で混在する根未完成永久歯は、歯根が完成するまでの期間は生理的な咬合力、咀嚼力でも負担加重となり、咬合性外傷が出現する可能性も考えられる。したがって、根未完成歯の咬合性外傷の有無や外傷性咬合における歯周組織あるいは歯根形成

への影響については十分に検証する必要があると思われる。

そこで、幼仔ラットの根未完成臼歯を用いて、萌出直後の第一臼歯の咬合を実験的に高くしていわゆる外傷性咬合状態とし、歯周組織および歯根形成への影響について病理組織学的検索を行った。

### 実験材料並びに実験方法

実験には Wistar 系ラット計 48 匹の第一臼歯を用い、歯冠の萌出初期の生後 3 週に、上顎左側第一臼歯 (M1) の咬合面に光重合型レジン(クリアフィル®AP-X(クラレノリタケデンタル社製))を盛り上げて咬合面を約 1mm 高くし、咬合性外傷実験モデルを作成した(Fig. 1-a, b)。実験期間は術後 1 日、3 日、5 日、1 週、2 週、4 週とし、各 8 匹について咬合挙上実験を行い、対合歯の下顎左側第一臼歯 (M1) の歯周組織と歯根について病理組織学および走査電顕的微小構造レベルで検索した。対照群として、非実験側の下顎右側第一臼歯を用いた。尚、実験終了時に咬合面レジンが脱落消失していたものは検索対象から除外した。

病理組織切片標本の作製は、実験期間終了後麻酔死させ、直ちに顎骨を摘出し、通法により 10% 中性ホルマリン溶液に 1 週間浸漬固定した。その後、下顎臼歯部を切り出し、10% ギ酸にて脱灰を行い、上昇アルコールにて脱水、通法によりパラフィン包埋した。下顎第一臼歯部について矢状断あるいは前頭断による連続切片標本を作製し、ヘマトキシリン・エオジン(H・E)染色を施し、鏡検した。また、走査電顕試料は、屠殺後、下顎骨を摘出し、直ちに 10% タンパク分解酵素溶液(プロテアーゼ P「アマノ」3 G、天野エンザイム社製)に約 2～3 週間浸漬し、途中、37°C 温水で洗浄しながら軟組織を溶解除去し、さらに、下顎第一臼歯を下顎骨より分離し、歯肉および歯根膜組織などを溶解除去した。軟組織を除去した下顎第一臼歯はカコジル酸 buffer にて洗浄後、通法に従い上昇アルコール脱水、イソアミルで置換し臨界点乾燥を行い、白金蒸着を施し、走査電顕試料とした。歯根の形態について、JSM-6330 走査型電子顕微鏡にて観察した。尚、下顎第一臼歯は太く、長い近心根

と遠心根および比較的細く、短い中央根（頬側と舌側）の計4根が存在する<sup>29)</sup>。歯根の形態的变化については、矢状断標本では近心根と遠心根、前頭断では4根のうち最も大きな近心根について詳細に検索した。また、生後3週齢の歯根形成状態は完成時期の1/2が形成されている状態である<sup>30)</sup>。

動物実験については、福岡歯科大学動物実験委員会の認可（審査番号 98010）を受け、本学の動物実験指針に従って行った。

## 実験結果

### 1. 病理組織学的所見

<術後1日>

a) 対照群 (Fig. 2-a、Fig 3.-a)

下顎左側第一臼歯の歯冠はすでに萌出しているが、歯根は短く、根尖が広く開大し根未完成の状態を呈していた。歯周組織では、歯肉部の付着上皮は3～4層の上皮細胞からなり、上皮基底層は平坦で、付着上皮の底部はエナメル-セメント境界に位置していた。上皮下での炎症性細胞浸潤はほとんど認められず、付着上皮や歯肉線維も健全で、歯肉炎の状態はみられなかった。歯根膜腔は均等な幅を有し、歯根膜の主線維はやや細いが線維芽細胞とともに機能的走行を示していた。歯槽骨では歯根の遠心側面に一部で軽度の吸収がみられるものの、病的吸収はみられなかった。この時期は全体的に象牙質の形成が未だ薄く、歯髓腔は広く認められた。根尖側に移行するにしたがい象牙質が薄くなっており、根尖付近では石灰化の弱い幼若な象牙質がみられた。さらに、根端部では Hertwig 上皮鞘が歯髓と歯根膜の境界部で索状に認められた。Hertwig 上皮鞘の歯髓側では誘導された短円柱形の象牙芽細胞様細胞が規則的に配列していた。(Fig. 4-a、c)

b) 実験群：(Fig. 2-b)

下顎左側第一臼歯は対照群と同様、歯冠がすでに萌出しているが、歯根は短く、根尖が広く開大した根未完成歯の状態であった。歯肉部の付着上皮は対照群と同様に3～4層の

上皮細胞からなり、上皮基底層は平坦で、付着上皮の底部もエナメル-セメント境界に位置していた。上皮下での炎症性細胞浸潤はほとんど認められず、付着上皮や歯肉線維も健全で、歯肉炎の状態はみられなかった。歯槽骨においては、対照群と類似して歯根の遠心側面に一部で軽度の吸収がみられたが、異常な骨吸収など障害的变化はみられなかった。しかしながら、歯根膜では対照群と異なり、圧迫側が主として根分岐部と根尖側の頬側面および根尖部に出現し、歯根膜腔の狭小化が生じており、牽引側が根尖側の主に舌側面領域に出現し、歯根膜腔の拡大が生じていた。根分岐部では、全ての例において歯根膜腔の狭小化が出現し、歯根膜の一部が無構造となり、歯根膜線維は不明瞭で、硝子変性、壊死が生じていた。同様に根尖側の圧迫側では歯根頬側面と歯槽骨が異常に近接し、歯根膜の狭窄が生じ、その部の歯根膜には細胞の圧平や核濃縮がみられ、歯根膜線維も不明瞭となり、硝子変性や壊死などがみられた。また根尖部においても根端部と歯槽骨が近接し、歯根膜には血管の拡張、うっ血および根尖口部歯髄には歯髄細胞が圧平され、萎縮性変化もみられた。(Fig. 3-b,c,d)。歯根の象牙質は対照群に比較して波状にやや変形してみられた。さらに、とくに前頭断の観察において、根端部の Hertwig 上皮鞘とともに薄い幼若な象牙質がしばしば舌側あるいは歯髄側に軽度に屈曲している状態がみられ、同部の象牙芽細胞の配列もやや不整となっていた (Fig. 4-b,d)。根尖側舌側面の牽引側では、歯根膜腔が対照群に比べて広くなり、歯根膜線維がやや伸張しているが、著しい障害的变化はみられなかった。

<術後 3 日>

a) 対照群 (Fig. 5-a, Fig. 6-a, Fig. 7-a)

歯肉部では、付着上皮は 3～4 層の上皮細胞からなり、上皮基底層は平坦で、付着上皮の底部はエナメル-セメント境界に位置し、術後 1 日対照群と同様の所見であった。上皮下での炎症性細胞浸潤もほとんど認められず、付着上皮や歯肉線維も健全で、歯肉炎の状態はみられなかった。矢状断における観察で上皮付着位置の高さは下顎左側第一臼歯と下顎

左側第二臼歯はほぼ同等であった。象牙質の形成は進行しており、歯根の長さもやや長くなっているが、根尖部は術後 1 日対照群と同様、いまだ大きく開大し根未完成歯の状態を呈していた。根尖部の象牙質、歯髓や根端部の Hertwig 上皮鞘は術後 1 日の対照群ととくに差異はみられなかった。歯根膜では主線維がやや密となり線維芽細胞とともに機能的に配列し、発達していた。歯槽骨は、術後 1 日対照群とほとんど同様の所見を呈していた。

#### b) 実験群 (Fig. 5 -b、Fig. 6 -b、Fig. 7 -b, c)

歯肉部では、付着上皮は 3～4 層の上皮細胞からなり、上皮基底層は平坦で、付着上皮の底部はエナメル-セメント境界に位置し、術後 3 日の対照群と同様であった。上皮下での炎症性細胞浸潤はほとんど認められず、付着上皮や歯肉線維などは対照群と同様で健全な状態を示していた。ただし、下顎左側第一臼歯の上皮付着位置の高さが下顎左側第二臼歯に比べやや低位にあり、外傷性咬合により下顎左側第一臼歯が圧下されたことが窺われた。歯根膜では、術後 1 日に生じた咬合性外傷の変化はより顕著となっていた。根分岐部および根尖側の頬側面領域では、歯根と歯槽骨が近接しており、歯根膜腔の狭小化と歯根膜の硝子変性、壊死が顕著にみられた。圧迫側の歯槽骨では骨髄側より破骨細胞による穿下性吸収が生じており、隣接した領域では歯槽骨表面にも破骨細胞による骨吸収もみられた。歯根の吸収はとくにみられなかった。根尖部の薄い象牙質は、Hertwig 上皮鞘とともに術後 1 日実験群と同様に明らかに舌側あるいは歯髓側に彎曲した形態を呈していた。彎曲した領域の象牙芽細胞は配列がやや不整で、術後に形成された根尖部象牙質はエオジンに淡く染色され、幼若で、不規則な象牙質の状態を示し、外傷性咬合による根尖部象牙質形成への影響がみられた。根尖側舌側面では術後 1 日と同様牽引側が惹起され、歯根膜腔が広く、歯根膜線維はやや伸長していた。歯根膜の細胞成分は比較的豊富で、歯根膜線維も密に規則的な走行を示していた。その他、根部歯髓などにとくに障害的变化はみられなかった。

<術後 5 日>

a) 対照群 (Fig. 8-a, c)、

歯肉部では、術後 3 日対照群と同様に付着上皮は 3～4 層の上皮細胞からなり、上皮基底層は平坦で、付着上皮の底部はエナメル-セメント境界に位置しとくに差異はみられなかった。上皮下での炎症性細胞浸潤も術後 3 日対照群と同様ほとんど認められず、付着上皮や歯肉線維などは健全な状態を示していた。以後、術後 1 週、2 週、4 週の対照群の歯肉部でもほとんど同様の所見であり、歯肉炎は認められなかった。象牙質は術後 1 日、3 日の対照群に比べ全体的にやや厚くなり、歯根も発育して、真っ直ぐに長くなっていたが、根尖部はいまだ開大して根未完成歯の状態であった。根尖部の象牙質、歯髄および根端部の Hertwig 上皮鞘には術後 1 日、3 日の対照群と同様で、差異はみられなかった。根尖部の歯根膜面にはわずかにセメント質の形成が開始されていた。歯根膜は全体的に均等な幅を有し、主線維が機能的に配列し、やや発達していた。歯槽骨については、術後 1 日、3 日対照群と同様でほとんど変化はみられなかった。

b) 実験群 : (Fig. 8-b, d, e)

歯肉部では、付着上皮は術後 5 日対照群と同様で、付着上皮は 3～4 層の上皮細胞からなり、上皮基底層は平坦で、付着上皮の底部はエナメル-セメント境界に位置し、とくに変化はみられなかった。上皮下での炎症性細胞浸潤も術後 5 日対照群と同様ほとんど認められず、付着上皮や歯肉線維などは健全な状態を示していた。ただし、矢状断による観察において、術後 3 日実験群と同様上皮付着位置の高さは下顎左側第二臼歯に比べ下顎左側第一臼歯の方がやや低位であり、外傷性咬合による下顎左側第一臼歯の圧下が窺われた。このような歯肉の状態は以後、術後 1 週、2 週、4 週にも同様であった。象牙質は術後 5 日対照群と同様やや厚みを増し、歯髄腔が徐々に狭くなってきているが、根尖部では根未完成の状態であった。根分岐部および根尖側頬側面の圧迫側では歯根膜腔が狭小化しており、歯根膜線維の走行がやや不明瞭であったが、歯根と歯槽骨が近接し、歯根膜が著しく狭窄した領域を除いて硝子変性や壊死はほとんどみられなくなっており、歯根膜の修復性変化が生じていることが窺われた。根尖側の頬側部では歯根と歯槽骨が近接しており、歯根膜

が著しく狭窄した部では歯根膜の変性、壊死が生じ、一部の例ででは歯根膜に融解壊死も生じ、歯根膜の消失を伴うなど顕著な咬合性外傷がみられた。歯根膜の狭窄部では歯槽骨が骨髓側から吸収されるいわゆる穿下性骨吸収が進行し、骨梁が細くあるいは一部消失していた。根尖部の象牙質は、術前に形成されていた規則的な象牙質と術後に形成された不規則な象牙質が区別され、不規則象牙質は、明らかにエオジンに淡染し、幼若な象牙質として形成されていた。その領域の象牙芽細胞の配列も他の領域に比較して不規則にみられた。さらに、ほとんどの例で根尖部の幼若な象牙質は根端部の Hertwig 上皮鞘とともに舌側あるいは歯髓側に弯曲しており、また、近心根や遠心根の根尖部がやや近心側に弯曲しているものも生じていた (Fig. 9-a, b, c)。Hertwig 上皮鞘の歯髓側では対照群と同様に象牙芽細胞が分化、誘導され、立方形～円柱状の象牙芽細胞が薄い幼若な象牙質を形成していた。実験群ではいずれも歯根の伸長がみられ、Hertwig 上皮鞘の硬組織形成能を著しく障害するほどの咬合性外傷はみられなかった。根尖側舌側面の牽引側では、歯根膜腔が広く、歯根膜の主線維の走行が明瞭で、機能的配列を示していた。その他、根部歯髓などにとくに障害的变化はみられなかった。

#### <術後 1 週>

##### a) 対照群 : (Fig. 10-a, c)

歯肉部では術後 5 日対照群と同様、歯肉炎などはみられず、健全な状態であった。象牙質はさらに形成が進み、厚みを増し、歯髓腔はさらに狭くなってきていた。歯根膜は全体的に均等な幅で、歯根膜線維は発達し、機能的な配列を示していた。歯根は成長しさらに長くなっているものの、根尖部は未だやや開大し、根未完成歯の状態であった。根端部には歯髓と歯根膜の境界部に Hertwig 上皮鞘が存在し、歯髓側には誘導された象牙芽細胞様細胞が規則的に配列していた。歯槽骨および歯髓は術後 5 日対照群と類似し、とくに差異はみられなかった。

##### b) 実験群 (Fig. 10-b, d, e)

歯肉部では対照群と同様、歯肉炎などはみられず、健全な状態であった。歯根膜では圧迫側と牽引側がみられるが、差異が明らかなでない例も少数みられた。圧迫側の歯根分岐部では一部で歯槽骨の吸収が生じている例もみられたが、全体的に歯槽骨の吸収は軽度となっていた。歯根膜腔は正常の幅に近い状態に回復しているものが多く、この時期には術後5日までにみられた変性、壊死など障害的変化がほぼ消失し、修復される傾向にあった。根尖側の頬側面では一部にまだ歯根膜の狭窄が顕著にみられたり、術後5日にみられた歯根膜の融解壊死も存在していた。この領域の歯槽骨梁は薄くなり、歯槽骨の吸収もみられた。歯根膜狭窄部周辺では、歯槽骨吸収により歯根膜腔の幅がやや広くなり、歯根膜の硝子変性・壊死も消失し、細胞成分も多く、歯根膜の再生が窺われた。根尖部に生じた舌側への彎曲はほぼ全例にみられたが、その程度はさまざまであった。彎曲部の象牙質は、術後5日と同様石灰化の弱い幼若な不規則象牙質が形成されており、象牙芽細胞もやや萎縮性で、配列も不規則であった。さらに、根端部の象牙質は Hertwig 上皮鞘とともに彎曲しながら伸長し、歯根を形成していた。この時期は、歯根の彎曲が舌側方向からやや長軸方向に伸長し、軽度に S 字状を呈していた。また、一部の例では歯根の形態が不整で、歯髓側に彎曲した部から、さらに Hertwig 上皮鞘とともに薄い象牙質が伸長して比較的狭い根尖孔を形成するなどの形態異常もみられた (Fig. 11-a, b)。この時期の根尖部には第二セメント質が薄く形成されていたが、圧迫側では薄く、牽引側では比較的厚く形成されており、差異がみられた。牽引側では歯根膜の主線維が機能的配列を示し、発達していた。さらに歯槽骨面に新生骨の添加もみられ、歯根膜腔は正常に近くなっている例もみられた。その他、根部歯髓などにはとくに障害的変化はみられなかった。

#### < 術後 2 週 >

##### a) 対照群 : (Fig. 12-a, c, e, Fig. 13-a)

歯肉部では術後1週対照群と同様、歯肉炎などみられず、健全な状態であった。象牙質は術後1週対照群よりさらに形成が進み、厚みを増し、歯根も長くなっていた。さらに根

尖付近の歯根表面には第2セメント質も形成されてきており、歯根先端付近の硬組織はかなり厚くなっていた。根端部の歯髓と歯根膜との境界部には細く Hertwig 上皮鞘がみられ、根尖孔は狭くなってきているもののいまだ根未完成の状態を示していた。歯根膜は全体的に均等な幅を有し、発達した歯根膜線維が機能的な配列を示していた。歯槽骨や歯髓には術後2週と同様とくに変化はみられなかった。

b) 実験群：(Fig. 12-b, d, f, Fig. 13-b, c, d, e)

歯肉部では術後1週と同様、付着上皮の異常や歯肉炎などみられず、健全な状態であった。また、下顎左側第一臼歯の圧下した状態も同様にみられた。この時期になると、圧迫側の歯根膜では、歯槽骨の吸収により術後1週に比べて歯根膜腔が広くなり、対照群と同様の幅を回復してきており、圧迫側や牽引側の差異が不明瞭となっていた。歯の成長により象牙質の厚さが増しているが、根尖側では歯根の弯曲や歯根の形態異常が生じ、歯根の吸収も散在性に認められた。すなわち、圧迫側では術後1週までにみられた根尖部付近の弯曲およびその部の不規則象牙質の形成などはほとんどの症例でみられたが、徐々に規則的な象牙質形成を回復していた。歯根面は圧迫側の頬側面で種々の程度の吸収も伴い、根面が波状面を呈したり、Hawship 小窩も複数観察された。術後1週にみられた根尖部の舌側あるいは歯髓側への弯曲は、徐々に長軸方向への歯根の伸長がみられ、しばしばS字状に弯曲していた。一部の例では、根尖部の象牙質がJ字状に歯髓側に強く弯曲しているものや、弯曲した部からさらに Hertwig 上皮鞘とともに薄い象牙質が伸長して比較的狭い根尖孔を形成するなど形態異常がみられるなど、咬合性外傷の影響がみられた。また、根尖部外表面では第2セメント質の形成が術後1週に比べ厚く形成され、弯曲した歯根を咬合平面に垂直方向に補正するようなセメント質肥厚も観察された。このように、圧迫側の歯根膜、歯槽骨や歯根には多少とも咬合性外傷がみられ、歯根膜への強い咬合圧が未だ解消されていない状況が窺われた。

牽引側は術後1週に比べ歯根膜腔は正常に近くなっており、歯根膜線維は密に規則的に

配列し、術後 1 週と大きな差異はみられなかった。また、歯根表面に第 2 セメント質が比較的厚く形成されていた。さらに歯槽骨面には新生骨の添加もみられ、歯根膜腔は正常に近くなっている例もみられた。その他、根部歯髄などにはとくに障害的变化はみられなかった。

#### <術後 4 週>

##### a) 対照群 (Fig. 14-a)

歯肉部では術後 2 週の対照群と同様、歯肉炎などみられず、健全な状態であった。象牙質は術後 2 週対照群よりさらに象牙質が厚く形成され、歯根も真っ直ぐに伸長し、歯根は完成に近い状態となってきた。根尖部付近の歯根面には第 2 セメント質が厚く形成され、根尖部の硬組織は厚くなっている。歯髄や歯根膜、歯槽骨の状態も術後 2 週と類似し、とくに変化はみられなかった。

##### b) 実験群 (Fig. 14-b, c, Fig. 15-a, b, c)

歯肉部では術後 4 週の対照群と類似の所見を呈し、付着上皮の異常や歯肉炎などみられず、健全な状態であった。また、下顎左側第一臼歯の圧下した状態も同様にみられた。この時期の歯根膜は外傷性変化がかなり回復してきており、圧迫側と牽引側の差がほとんどないものもみられた。象牙質はさらに厚くなり、歯髄腔や根尖孔は術後 2 週に比べさらに狭くなっているもののわずかに根未完成の状態を呈していた。歯根膜腔は一部でやや狭いところがみられるが、全体的に対照群に近いほぼ均等な幅を回復していた。術後 2 週までに根尖側の頰側面にみられた歯根膜の狭窄は軽度となり、歯根膜線維は密で規則的な配列がみられた。歯槽骨も術後 2 週にみられた吸収窩はほとんどみられず、比較的平坦な状態を呈していた。歯根の吸収は術後 2 週までに吸収した部は波状に陥凹していたが、著しい歯根吸収はとくにみられなかった。前頭断の観察において、歯根の形態は対照群と異なり多くの例で根尖側 1/3 付近から象牙質が S 字状に弯曲した状態がみられ、ときに弯曲が強くとくに歯根の形態異常を呈するものもみられた (Fig. 16-a, b, c)。術後 2 週までに根端部にみら

れた Hertwig 上皮鞘はこの時期には不明瞭となっていた。根尖周囲にはセメント質が厚く形成されており、とくに牽引側で比較的厚く形成され、彎曲した歯根形態を補正するようなセメント質肥大が生じていた。また 1 例であるが、齒槽骨と第二セメント質の癒着を思わせる様な所見もみられた。

## 2. 走査電顕所見

### a) 対照群 (Fig. 17-a, b, c)

ラットの下顎第一臼歯 ( $M_1$ ) の歯根数は 4 根が観察され、太く、長い近心根と遠心根、および比較的細く、短い中央頬側根と中央舌側根から成っていた。光顕所見と同様、生後 3 週は根未完成の状態であり、いずれの歯根も短く、根尖孔は大きく開大していた。根尖孔部の象牙質は光顕所見と同様ナイフエッジ様に薄く、根尖孔の形態はほぼ類円形を呈していた。歯根の外表面は全体的に平滑な面を有していた。術後 3 日、5 日、1 週の対照群はそれぞれ経日的に歯根の成長がみられ、歯根は徐々に長くなり、象牙質も厚みを増し、開大していた根尖孔は徐々に狭くなっていた。根尖孔付近では歯根外表面にセメント質の添加が徐々に増加して粗造感を呈し、根尖部も次第に厚く、丸みを帯びた形態となっていた。術後 2 週および 4 週の対照群では、歯根は発育して真っ直ぐに長くなり、根尖側 1/3 の領域には明瞭にセメント質が形成され、粗造感を呈し、それに伴って根尖孔もかなり狭くなっていた。

### b) 実験群 : (Fig. 18-a, b, c)

術後 1 日の  $M_1$  の歯根は、長さや根尖孔部のナイフエッジ様に薄い象牙質、根尖孔の類円形などの形態は対照群とほぼ同様であった。根尖部での彎曲はやや不明瞭で、対照群とは大きな差異はみられなかった。歯根の外表面は全体に平滑な面を有していた。術後 3 日、5 日では歯根の成長がみられ、やや伸長し、根尖部の形態は軽度に舌側方向に彎曲してみられた。根尖部の彎曲は術後 1 週では明瞭となり、舌側に彎曲していたものが、さらに歯

根長軸方向にやや方向を変えて成長しており、根尖側の形態は軽度に S 字状に彎曲を呈するものが多くみられた。また、術後 3 日から術後 1 週までに形成された歯根面は対照群に比べて表面が粗造で、一部の歯根ではやや根尖孔が狭く形成されているものもみられた。

術後 2 週および 4 週では硬組織の形成が進み、歯根が長くなっていた。この時期には根尖側では術後 1 週でみられた S 字状の彎曲が明瞭にみられた。術後 4 週では S 字状の彎曲がさらに顕著となっていた。一部の例では歯根面にセメント質が厚く形成され、彎曲の形態がやや軽度なものもみられた。

## 考 察

咬合性外傷については、これまでの臨床的および基礎的研究に多く報告され、歯周組織には圧迫側と牽引側で様々な変化が生じることが知られており、成書にも詳細に記載されている<sup>25-28)</sup>。これまでの咬合性外傷に関する研究は歯根が完成した歯における検索がほとんどであり、根未完成歯においては、ほとんど研究がみられない。しかしながら、緒言でも述べたように学童期 6～12 歳では、歯根完成歯と根未完成歯が長期にわたり混在しており、その場合、根未完成歯には通常の咬合・咀嚼力でも歯周組織には負担過重となり、二次性咬合性外傷と似た状況が生じることとも推察される。ことに第一大臼歯に近接している小臼歯や犬歯、第二・第三大臼歯など萌出時期が遅い歯は、このような咬合性外傷が生じる可能性が高いと思われる。さらに、近年、臨床的に歯の移植や再植が行われているが、その際は歯根完成歯よりも根未完成歯の予後の生着率が良いとされ、智歯や埋伏歯などの根未完成歯を利用することも多い。そのような根未完成の移植歯あるいは再植歯においても予後に咬合性外傷が生じる可能性が考慮される。このような点から、根未完成歯の咬合性外傷において、歯周組織や歯根形成にどのような障害的变化が生じるかについては興味ある点であるが、未だ不明な点が多い。

咬合性外傷の成因には、過剰な咬合・咀嚼力、歯ぎしり、少数の残存歯、高い充填物、義歯クランプのかかった歯やブリッジの支台歯に強い力が集中している場合などが挙げら

れており、実験的研究においても、サル、イヌ、ラットなど種々の動物を用いて、主に歯の咬合面にアマルガムやレジン充填あるいは金属ピンなどにより咬合を高くして外傷性咬合モデルでの研究が多くみられる<sup>1-24)</sup>。そこで、本実験でもラットを用い、利便性の高い光重合型レジンで咬合を高くする方法で行った。ラットの下顎第一臼歯の歯冠が萌出する時期は生後 19~20 日であることから、生後 3 週齢ラット(生後 21 日)の下顎第一臼歯の根未完成歯を用いた。

本実験結果において、実験群の歯肉では、上皮付着の底部は実験期間を通して対照群と同様にエナメル-セメント境界に位置しており、付着上皮の基底層も平坦で、上皮下に顕著な炎症細胞浸潤など歯肉炎はとくにみられなかった。歯肉に対する咬合性外傷の障害的影響は基本的にないものと思われた。しかし、実験側の第一臼歯の上皮付着位置の高さが第二臼歯と比べてやや低位にあり、外傷性咬合の影響として強い咬合圧による圧下が生じていることが明らかであった。歯根膜では実験群の圧迫側でとくに障害的变化が生じた。すなわち、術後 1 日には圧迫側は根分岐部および根尖側のとくに頬側面に歯根膜腔の狭小化と歯根膜の硝子変性、壊死が生じた。この変化は術後 3 日より顕著になり、さらに、術後 1 週では歯根膜の障害的变化が生じた領域で歯槽骨の歯根膜面からの骨吸収や骨髄側からの穿下性骨吸収も出現した。根尖孔部においても術後 1 日に歯根端と歯槽骨が近接し、根尖部歯根膜には圧迫によるうっ血などが生じ、根尖口部歯髓細胞にも軽度の圧迫性萎縮がみられるなど、咬合性外傷の影響がみられたが、根尖部歯根膜の変化は術後 3 日以降に硝子変性、壊死などの変化を生じることなく、歯髓の変化も明らかでなかった。諸岡(1998)<sup>31)</sup>は成熟ラットを用いて歯根完成歯に金属ピンによる咬合挙上実験における類似の実験病理学的研究を行っており、圧迫側では障害的变化として、とくに根分岐部や歯根部側面の圧迫側で歯根膜の狭小化や硝子化が生じること、歯根膜の硝子変性領域で経日的に歯槽骨の穿下性吸収が生じること、狭小化した歯根膜はやがて歯槽骨吸収により拡大し、修復性変化が生じることを報告している。このような圧迫側での歯根膜の硝子変性、壊死や歯槽骨吸収などの障害的变化は、過去にラットやサル、イヌなどを用い同様に咬合を高

くした歯根完成歯の実験的研究でも報告されている<sup>1-24)</sup>。本実験結果の障害的变化も程度差はあれほぼ同様の所見がみられ、根未完成歯における咬合性外傷においても基本的に圧迫側の歯根膜や歯槽骨への影響は類似していた。一方、牽引側においては、歯根膜腔の拡大、歯根膜線維の伸長などが同様に出現していたが、これまでの研究報告と類似した変化であるものの、歯根膜の断裂や出血などは本実験ではみられず、根未完成歯の牽引側の変化は根完成歯の場合に比べて軽度であった。

根未完成歯の咬合性外傷では歯根の形成にどのような影響が出現するかは興味ある点である。本実験結果では、歯根の特徴的变化が生じ、外傷性咬合の影響がみられた。すなわち、術後1日には、圧迫側で根尖側頬側面が歯槽骨に近接した状態が出現し、歯根膜の狭小化、硝子変性や壊死が生じるとともに、術後3日、5日、1週と経日的に歯根先端のHertwig上皮鞘が舌側方向や歯髓側への彎曲が生じ、彎曲した歯根が形成された。このような根尖部に生じた歯根彎曲の一連の変化は、外傷性咬合により根尖側頬側面あるいは根尖部に持続的な圧迫が生じ、頬側の歯槽骨との接触を回避する現象としてHertwig上皮鞘や歯根象牙質の舌側ないし歯髓側への彎曲が生じたものと考えられる。Hertwig上皮鞘は根端部にあつて、歯根の形成に深く関与し、象牙芽細胞の分化、誘導、象牙質の形成に関わっていることは周知の事実である<sup>32)</sup>。本実験の術後1日から1週の根尖側の象牙質は光顕的、走査型電顕的観察でも非常に薄く、幼若な状態であり、加重負担により根端部のHertwig上皮鞘とともに容易に彎曲しやすい状況にある。ときに歯髓側にJ字状の強い彎曲が生じたのも根尖部への強い圧迫作用により引き起こされたものと考えられた。また、根尖側で術後5日、1週には不規則な幼若象牙質が形成されたが、根端部領域の象牙芽細胞の配列不整が生じていたことから、根端部での強い圧迫や彎曲に影響され、象牙芽細胞の障害とともに不規則象牙質や石灰化不全が生じたものと思われる。根未完成歯の咬合性外傷では根尖部には咬合性外傷により早期に歯根彎曲とともに硬組織形成障害が惹起される可能性が示唆される。

術後2週、4週には歯根の成長により硬組織が比較的厚く形成されるとともに、一旦舌

側方向に弯曲した歯根がこの時期には長軸方向に伸長しており、その結果として、歯根はS字状弯曲を呈していた。ときに根尖部の歯根の形態異常を伴うものもみられた。歯根の形態異常は、ことに根端部のJ字状弯曲など強い象牙質の弯曲の際に Hertwig 上皮鞘も比較的強く障害されたために形態異常につながったことが窺われる。根未完成歯の咬合性外傷では圧迫側における歯根膜の障害的变化に加えて、歯根の弯曲やときに形態異常も惹起されることが示唆された。一方で、経時的に歯根の伸長、発育がみられたことから、根未完成歯の咬合性外傷では Hertwig 上皮鞘に著しい障害は起こりにくいことも考えられた。本実験において、Hertwig 上皮鞘を強く損傷して、歯根形成を著しく障害するものはみられなかった。

#### 歯根の弯曲について

ヒトの歯根弯曲については、臨床的に多く経験され、成書にも切歯、犬歯、小臼歯、大臼歯、智歯などに様々な程度の歯根弯曲が報告されている<sup>33)</sup>。本実験において出現した歯根の弯曲は前頭断の観察では根尖側が舌側あるいはS字状に弯曲し、矢状断の観察では主に近心側への弯曲が生じた。ヒト歯根弯曲の原因について、歯根発育期の隣接組織の影響、例えば上顎洞底における圧あるいは外傷が考えられるとし、Hertwig 上皮鞘の外形形成の一時的変化とみなす報告もある<sup>34)</sup>。切歯の場合は頬側面に弯曲するものや頬舌的に弯曲するものがあり、必ずしも一方向に弯曲するものではないが、根尖部の環境要因が大きく作用することが考えられる。ラットの下顎臼歯の場合を考えると、前頭断標本での検索では、歯根先端部は咬合性外傷において、初期において舌側方向や歯髓側への弯曲や経日的にS字状の弯曲を示したり、ときに歯髓側へJ字状弯曲や根尖側の形態異常を示した。また、矢状断標本による検索では主に根尖部の近心方向への弯曲がみられた。走査電顕的観察においても、対照群では経日的に歯根が真っ直ぐに伸長しているのに対し、実験群では徐々に根尖側が舌側方向へ弯曲し、やがてS字状弯曲を呈する様子が明瞭に観察された。このような歯根の弯曲は、外傷性咬合による根尖部への圧迫により根端部の Hertwig 上皮鞘に

変形が生じたことによると考えられる。その中で、主に舌側方向に彎曲していたことについては、ラットの下顎臼歯の長軸が生理的に下顎骨齒槽に対しわずかに舌側に傾斜しており、そのため、外傷性咬合で下顎臼歯が圧下されると根尖部の頬側面が齒槽骨と接触しやすく、根尖部から頬側面の圧迫側領域の組織圧がより高まる状況が出現する。そのため、根尖部と齒槽骨の関係や組織圧を回避するような現象として根端部の Hertwig 上皮鞘や幼若な象牙質が舌側に彎曲したものと考えられた。また、S 字状彎曲については、経日的に顎骨の成長が進むことや圧迫側の齒槽骨吸収が進むこと、咬合性外傷による負担加重も弱まることなどで、根尖部周囲の負担加重が弱まり、高い組織圧が徐々に解消されることで彎曲現象が緩やかになり、一方で、障害された組織、細胞の修復も促進され健常になるに伴い、齒根形成が齒の長軸方向へ向かい、結果として S 字状の齒根彎曲を呈したものとされる。矢状断による検索による齒根の近心側への彎曲についても、近心根はその長軸がやや近心方向にあること、遠心根には第二臼歯が存在することなどが関係しているものと思われ、齒根の彎曲は齒の形態的因子や齒と顎骨の構造的、環境的因子に影響されることが示唆される。

Andreasen (1990)<sup>35)</sup> は臨床的研究で根未完成の第二小臼歯の自家移植を行い、移植齒の術後 1 週から最大 10 年の変化を X 線学的に検索している。移植 1 年後の X 線検査で齒根が彎曲した症例や、移植 3 年後の齒根の形態異常および齒根の異常吸収などの症例を報告している。ことに移植齒の X 線画像において、形成された齒根が近遠心的に S 字状の彎曲を呈しており、本実験でみられた齒根の S 字状彎曲の形態と酷似していた。根未完成齒の移植齒は、移植後より通常の咬合圧でも負担加重となり一次性咬合性外傷を惹起しやすいことは十分に考えられる。長期的に移植齒が良好に経過した場合は齒根も成長し、完成するが、この移植齒の症例においては齒根形成途中ことに移植後早い段階で齒根の彎曲を惹起するような咬合性外傷が生じたことが十分に窺われる。また、本実験結果やこれまでの研究において、しばしば顕著な齒根吸収が惹起されることなどを考え合わせると、根未完成齒の移植、再植などの予後の障害的变化は咬合性外傷と密接に関連することが示唆され

る。したがって、臨床における根未完成歯の対応については、咬合性外傷に十分留意する必要があるものと思われる。

ヒトとラットの歯や顎骨の構造あるいはその相互関係は種々異なるが、本実験結果から、ヒトにおいても根未完成歯では咬合性外傷とともに歯と顎骨の解剖学的位置関係から歯根の彎曲や形態異常が出現するものと思われる。翻って臨床的に歯根の彎曲や形態異常などが生じている歯では、その原因の1つとして根未完成時期の咬合性外傷との関連を考慮する必要があるものと思われる。

### 結 論

ラットの根未完成臼歯を用い、人為的に咬合を高くして咬合性外傷を起こし、歯周組織の障害および歯根形成について病理学および走査電顕的に健常群と比較検索した。その結果、根未完成歯は咬合性外傷を早期より惹起しやすく、圧迫側で根尖部と歯槽骨が近接し、そのために根尖部 Hertwig 上皮鞘や根尖部に彎曲が生じること、根尖部の象牙質に一時的に形成障害を起こすこと、また、経日的に歯根はS字状彎曲や歯根の形態異常が生じることなどが明らかとなった。したがって、臨床的にも根未完成歯については、咬合性外傷に対する十分な配慮が必要であると考えられた。

## 引用文献

- 1) Bharskar SN, Orban B: Experimental occlusal trauma. J Periodont 1955; 26: 270-284.
- 2) Stahl SS, Miller SC, Goldsmith ED: The effects of vertical occlusal trauma on the periodontium of protein deprived young adult rats. J Periodont 1957; 28: 87-97.
- 3) 谷口 勉 : 補綴学上からみた外傷性咬合の実験的研究. 歯科医学 1965 ; 28 : 330-367.
- 4) Glickman I, Smulow JB: Adaptive alterations in the periodontium of the rhesus monkey in chronic trauma from occlusion. J Periodontol 1968; 39: 101-105
- 5) 村山陽一 : 実験的な外傷性咬合による歯槽骨石灰化像の変化. 歯基礎誌 1969 ; 11 : 80-105.
- 6) Comar MD, Kollar JA, Gargiulo AW: Local irritation and occlusal trauma as co-factors in the periodontal disease process. J Periodont 1969; 40: 193-200.
- 7) 増田 豊 : 実験的な外傷性咬合と対合歯の喪失による歯根膜線維の変化について. 歯学 1971 ; 58 : 794-829.
- 8) 浦井照彦 : 実験的な外傷性咬合による歯周組織の変化に関する X 線学的研究. 日歯周誌 1973 ; 15 : 173-208.
- 9) Lindhe J, Svanberg G: Influence of trauma from occlusion on progression of experimental periodontitis in the beagle dog. J Clin Periodontol 1974; 1: 3-14.
- 10) Lindhe J, Ericsson I: The influence of trauma from occlusion on reduced but healthy periodontal tissues in dogs. Clin Periodontol 1976; 3: 110-122.
- 11) Kantor M, Polson AM, Zander HA: Alveolar bone regeneration after removal of inflammatory and traumatic factors. J Periodont 1976; 47: 687-695.
- 12) 本間 博, 池野直人, 石川 純 : 実験的な咬合性外傷と歯周炎のサル歯周組織破壊に及ぼす影響について ( I ) . 日歯周誌 1977 ; 19 : 220-230.
- 13) 本間 博 : 実験的な咬合性外傷のサル歯周組織に及ぼす影響に関する研究. 日歯周誌

- 1977 ; 19 : 289-302.
- 14) 鈴木設矢 : 実験的な咬合異常による歯周組織の変化に関する研究—外傷性咬合と対合歯の喪失による咬合—. 歯学 1978 ; 65 : 817-851.
- 15) 高木勇蔵 : 外傷性咬合による歯の支持組織の変化に関する実験的研究. 広大歯誌 1978 ; 10 : 70-88.
- 16) Jørgensen EB: Bruxism and trauma from occlusion. An experimental model in macaca monkeys. J. Clin. Periodontol 1980; 7: 149 - 162.
- 17) Lindhe J, Ericsson I: The effect of elimination of jiggling forces on periodontally exposed teeth in the dog. J Periodontol 1982; 53: 562-567.
- 18) 寺坂 章 : 咬合性外傷の治癒経過に関する実験的研究. 日歯周誌 1984 ; 26 : 650-666.
- 19) 今村 実 : 咬合性外傷の発現から修復までの病理組織学的ならびに組織化学的研究—骨吸収における科学的仲介物質の役割について. 九州歯会誌 1985 ; 39 : 131-150.
- 20) 中村良行 : 実験的咬合性外傷が炎症性歯周組織に及ぼす影響について. 日歯保誌 1987 ; 30 : 680-697.
- 21) 比留間正俊, 鴨井久一, 本田 忍 : ラットにおける実験的咬合性外傷の治癒過程について. 日歯周誌 1988 ; 30 : 344-367.
- 22) 北村 秀和 : サルにおける咬合性外傷に関する実験的研究. 日歯周誌 1990 ; 32 : 554-586.
- 23) 住井 浩剛 : 咬合性外傷がサルの実験的歯周炎の炎症波及におよぼす影響に関する研究. 日歯周誌 1997 ; 39 : 31-45.
- 24) 伊藤 太一 : 咬合性外傷におけるサル歯周組織の変化とその修復過程に関する免疫組織化学的研究. 日歯周誌 1999 ; 41 : 1-15.
- 25) 石川梧郎, 秋吉正豊 : 口腔病理学 I. 永末書店, 京都, 1989, pp519-pp524.
- 26) Schuluger S: シュルーガー 最新歯周治療学, 医歯薬出版, 東京, 1981, pp107-pp133.
- 27) 和泉雄一 : ザ・ペリオドントロジー, 永末書店, 京都, 2009, pp53-pp60.

- 28) 加藤熙：新版 最新歯周病学，医歯薬出版，東京，2011，pp73-pp77.
- 29) 須賀昭一，田熊庄三郎，佐々木哲：歯の研究法，医歯薬出版，東京，1973，pp743.
- 30) 澁江 拓：ラット根未完成歯の不完全脱臼における歯根形成度と予後に関する病理組織学的研究．福岡歯大誌 1995；22：289-310.
- 31) 諸岡 基：Streptozotocin 誘発糖尿病ラットにおける咬合性外傷が歯周組織におよぼす影響．福岡歯大誌 1998；25：283-302.
- 32) Ten Cate AR: Ten Cate 口腔組織学（第4版），医歯薬出版，東京，1997，pp85-pp88.
- 33) 石川梧郎，秋吉正豊：口腔病理学 I. 永末書店，京都，1989，pp7-pp13.
- 34) Meyer W: Pathologie der Zähne und des Gebisses Die Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde BD. 1. Urban & Schwarzenberg, München Berlin, 1958, pp467-pp753.
- 35) Andreasen JO, Paulsen HU, Yu Z, Bayer T: A long-term study of 370 autotransplanted premolars Part IV Root development subsequent to transplantation. Eur J Orthod 1990; 12: 38-50.

# 船越論文

写真 Fig1～Fig18

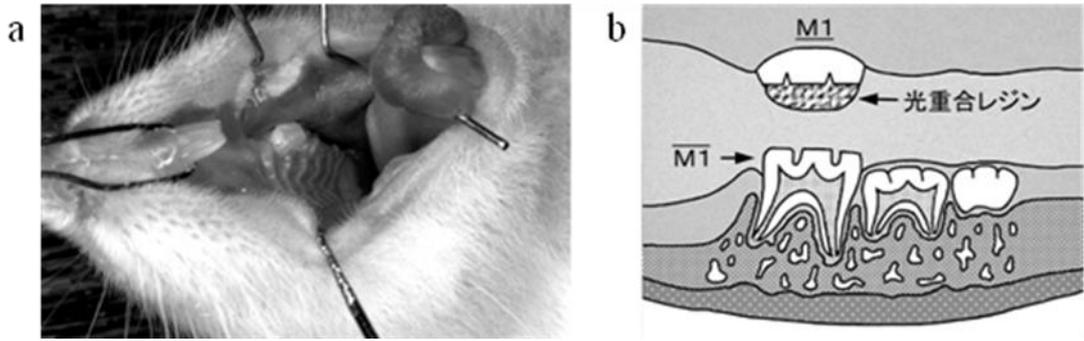


Fig.1 ラット根未完成臼歯の咬合性外傷実験モデル

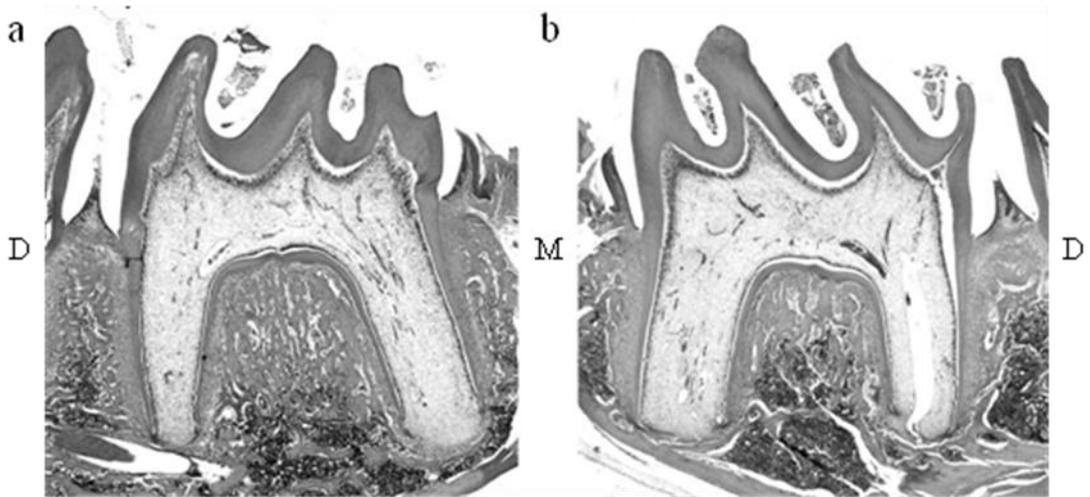


Fig.2 術後1日：下顎第1臼歯 (M1) (矢状断)、M：近心側 D：遠心側

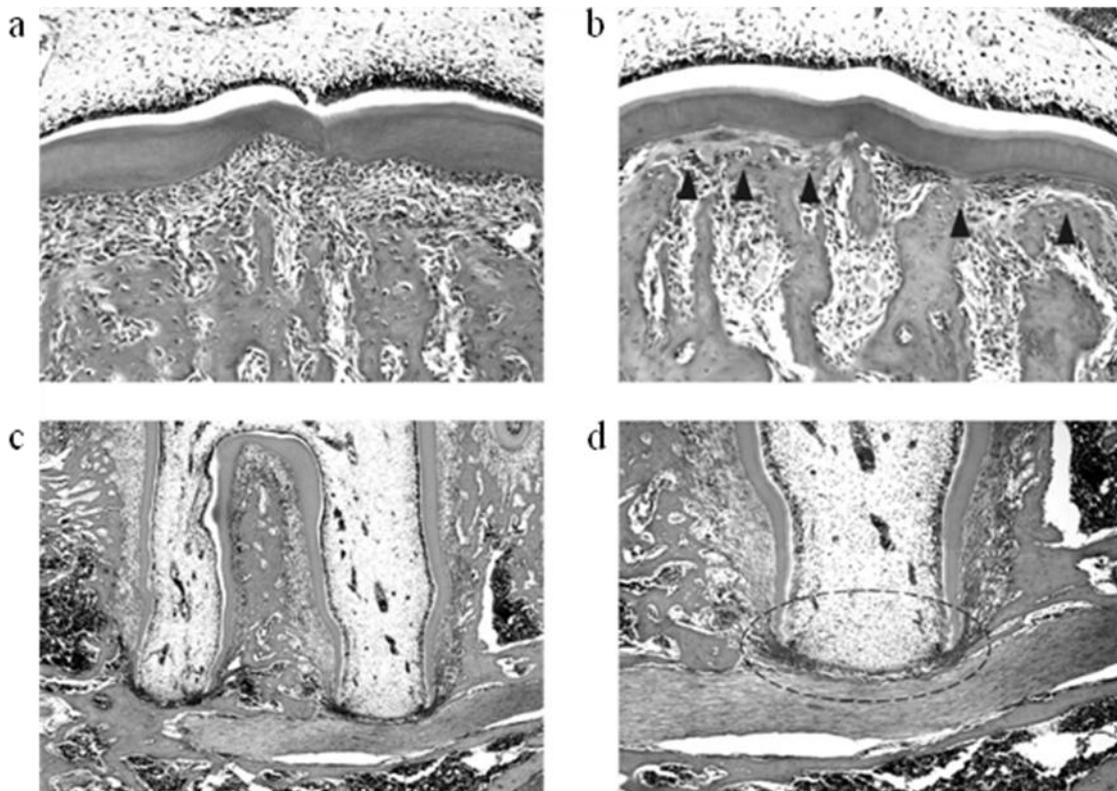


Fig.3 術後1日：M1の根分岐部 (a, b) と歯根部 (c, d) (矢状断)

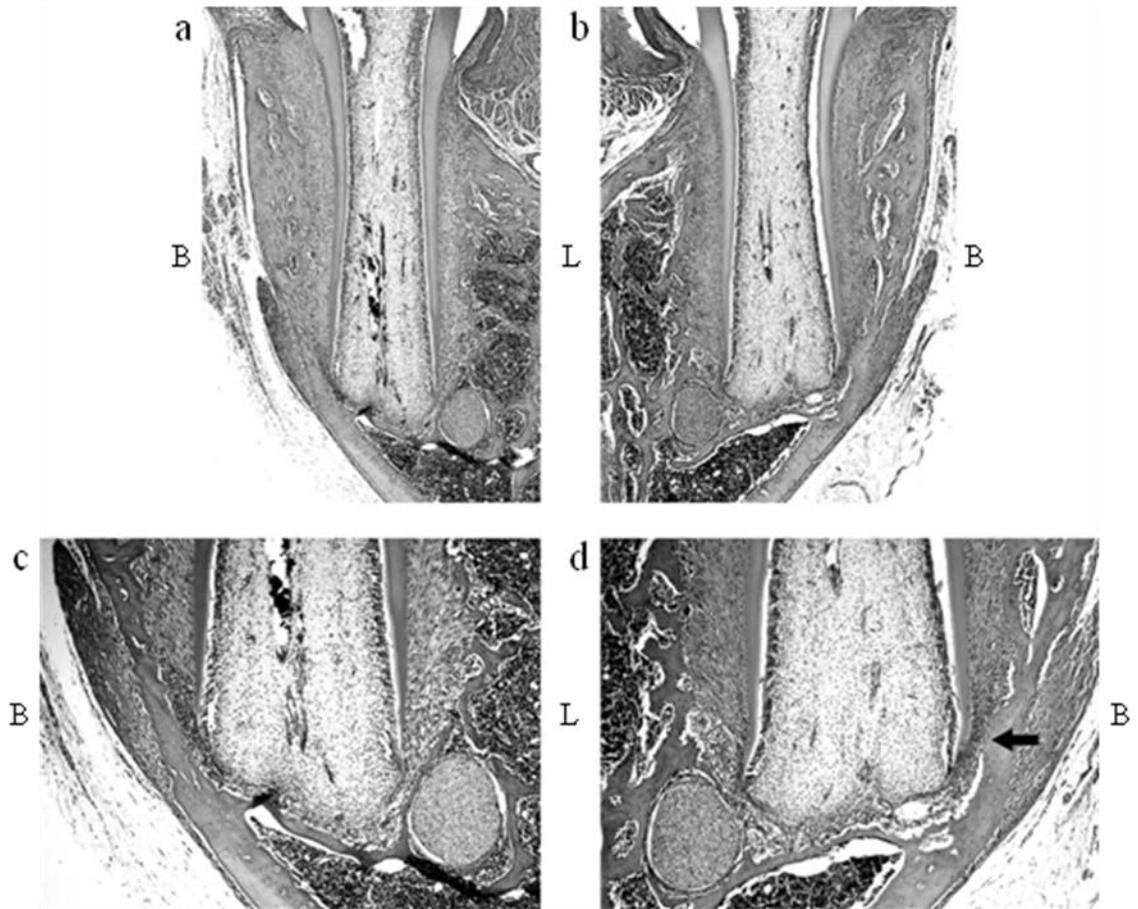


Fig. 4 術後1日：近心根(前頭断), L: 舌側 B: 頬側

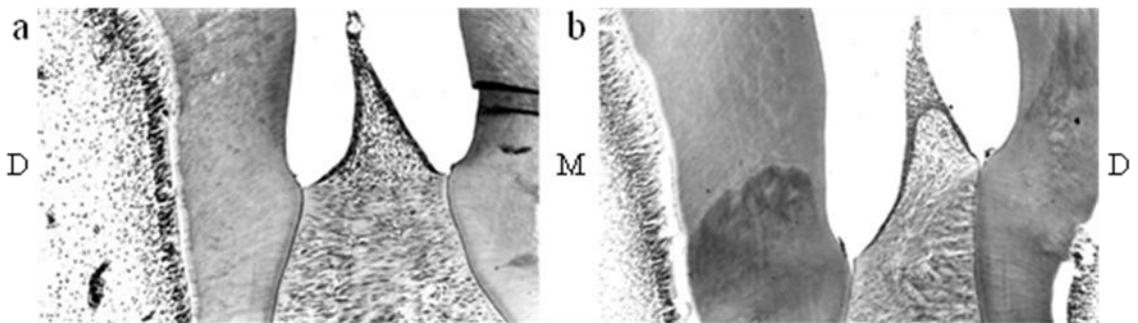


Fig. 5: 術後3日：コル部歯肉(矢状断)、M: 近心側 D: 遠心側

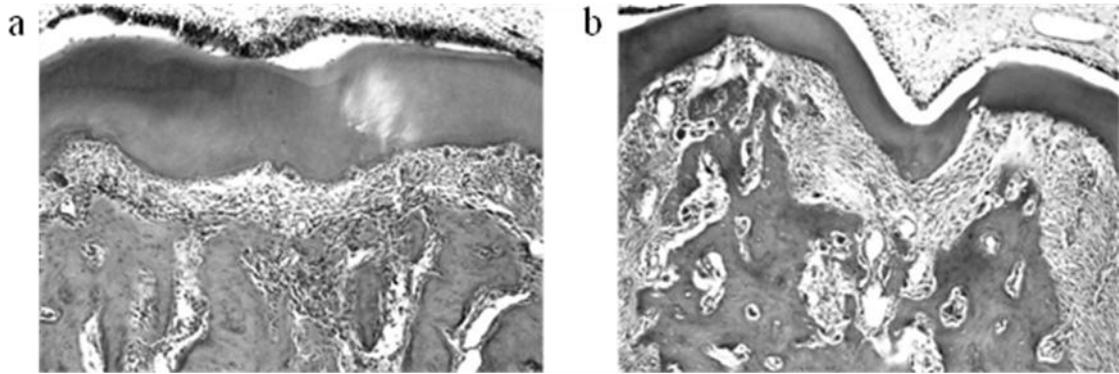


Fig. 6: 術後 3 日 : 根分岐部 (矢状断)

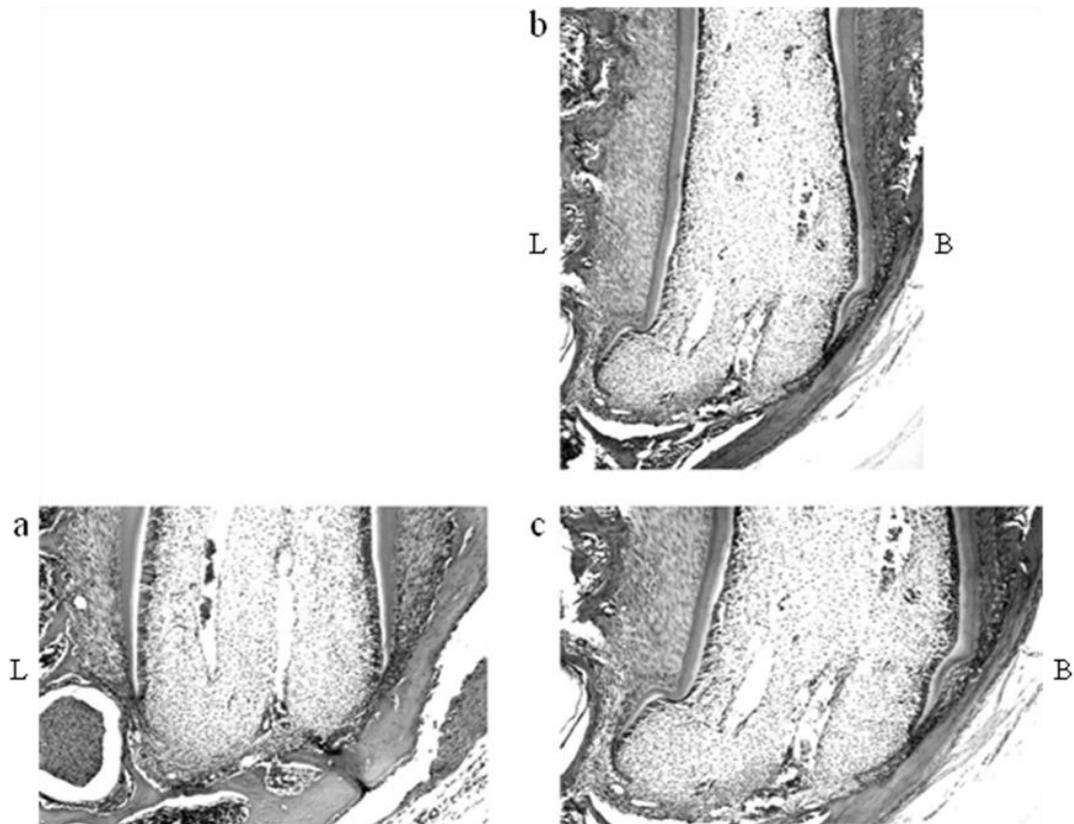


Fig. 7: 術後 3 日 : 近心根 (前頭断)、L : 舌側 B : 頰側

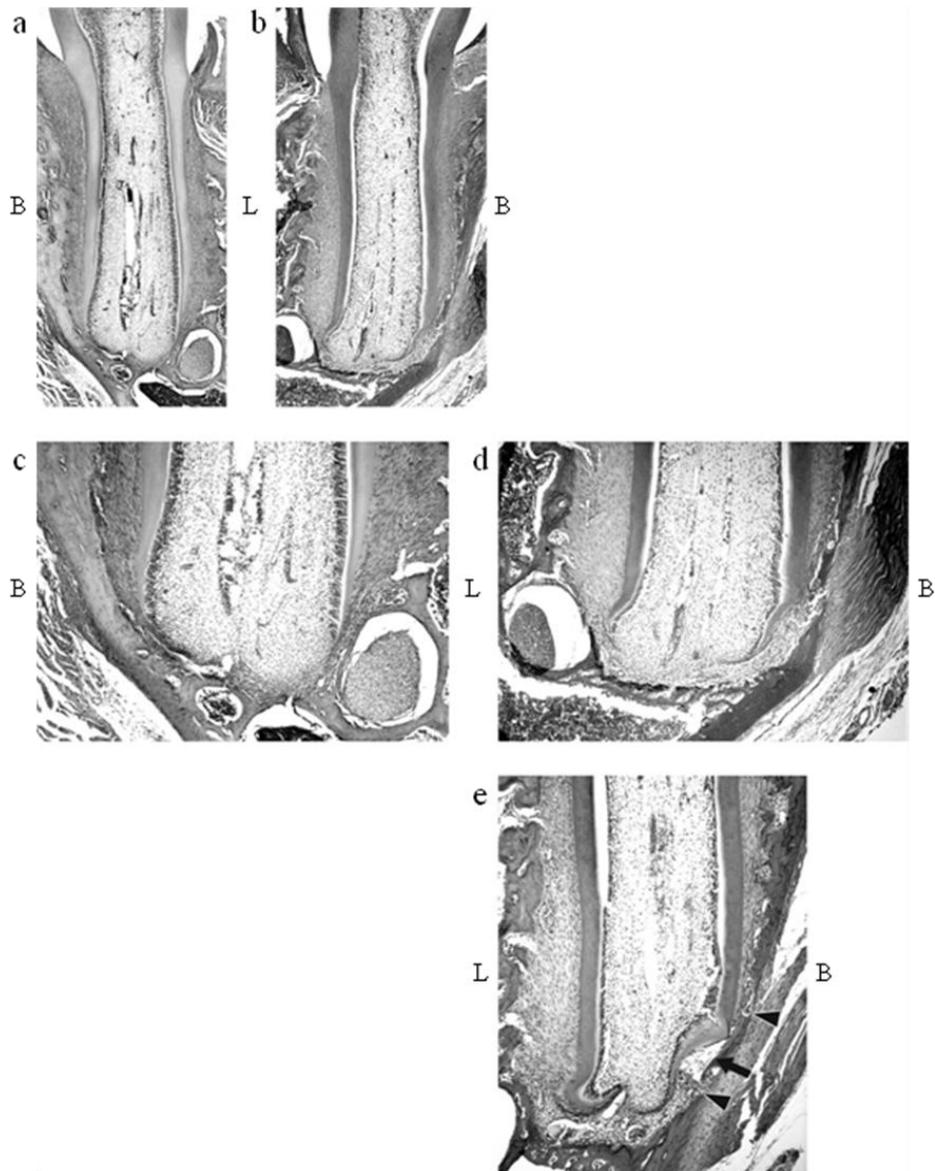


Fig. 8 : 術後 5 日の対照群 :  $\overline{M1}$  近心根 (前頭断)、L : 舌側 B : 頬側

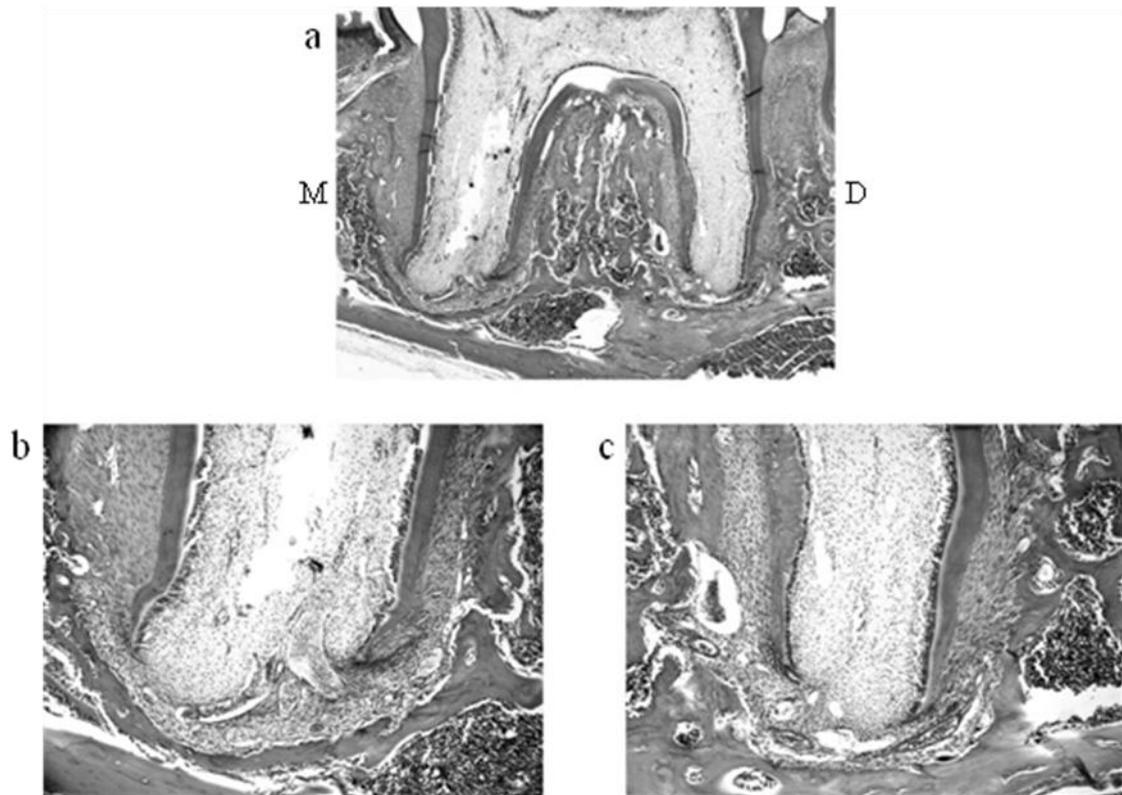


Fig. 9 : 術後 5 日の実験群 : M1 の歯根 (矢状断)、M : 近心側 D : 遠心側

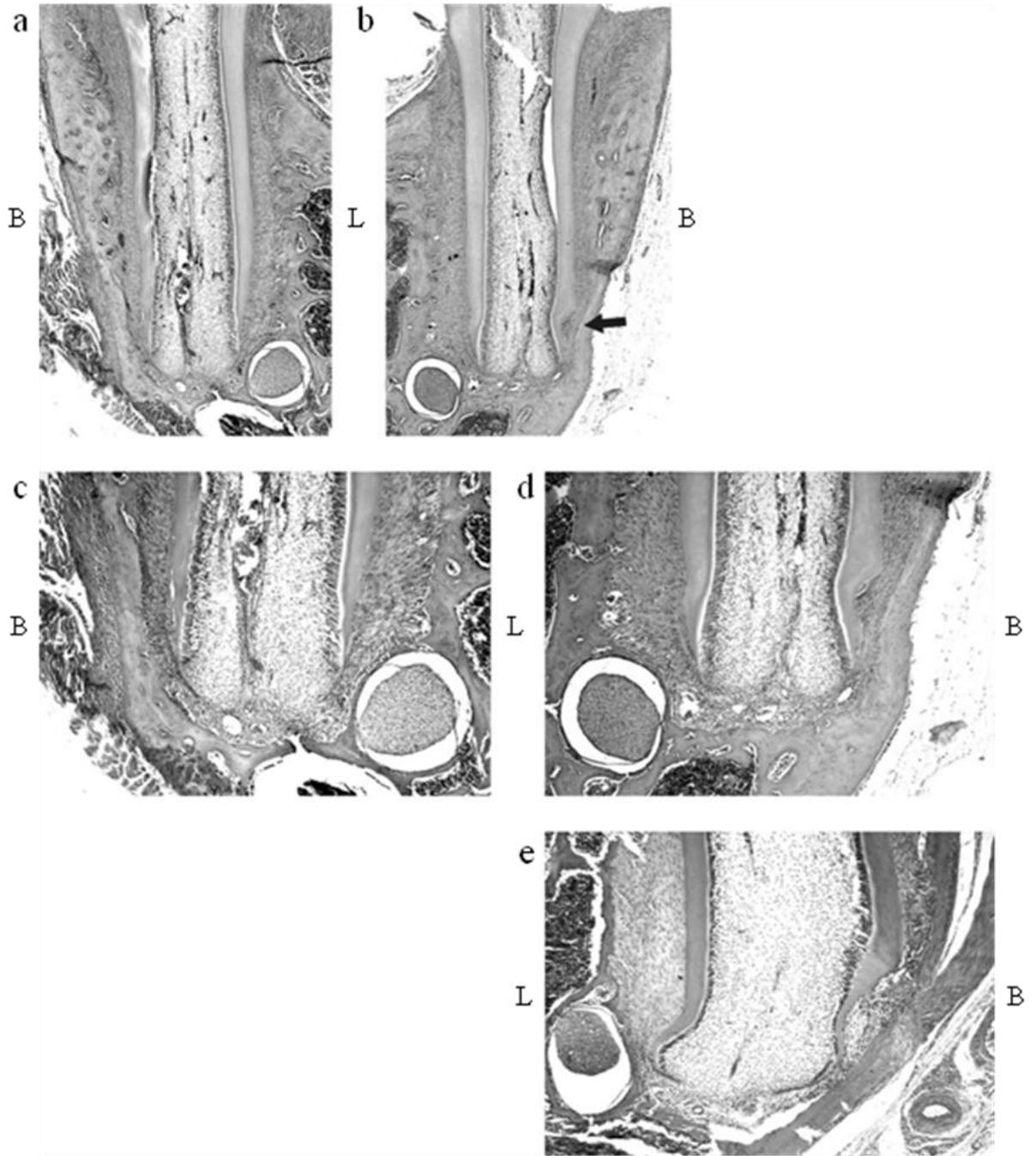


Fig. 10 : 術後 1 週 : 近心根 (前額断)、L : 舌側 B : 頬側

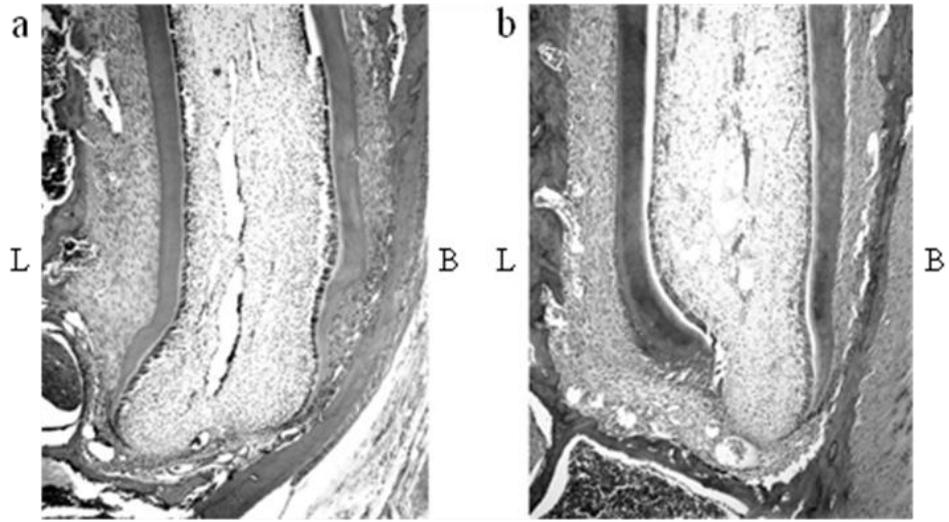


Fig. 11 : 術後1週の実験群 : 近心根 (前額断)、L : 舌側 B : 頬側

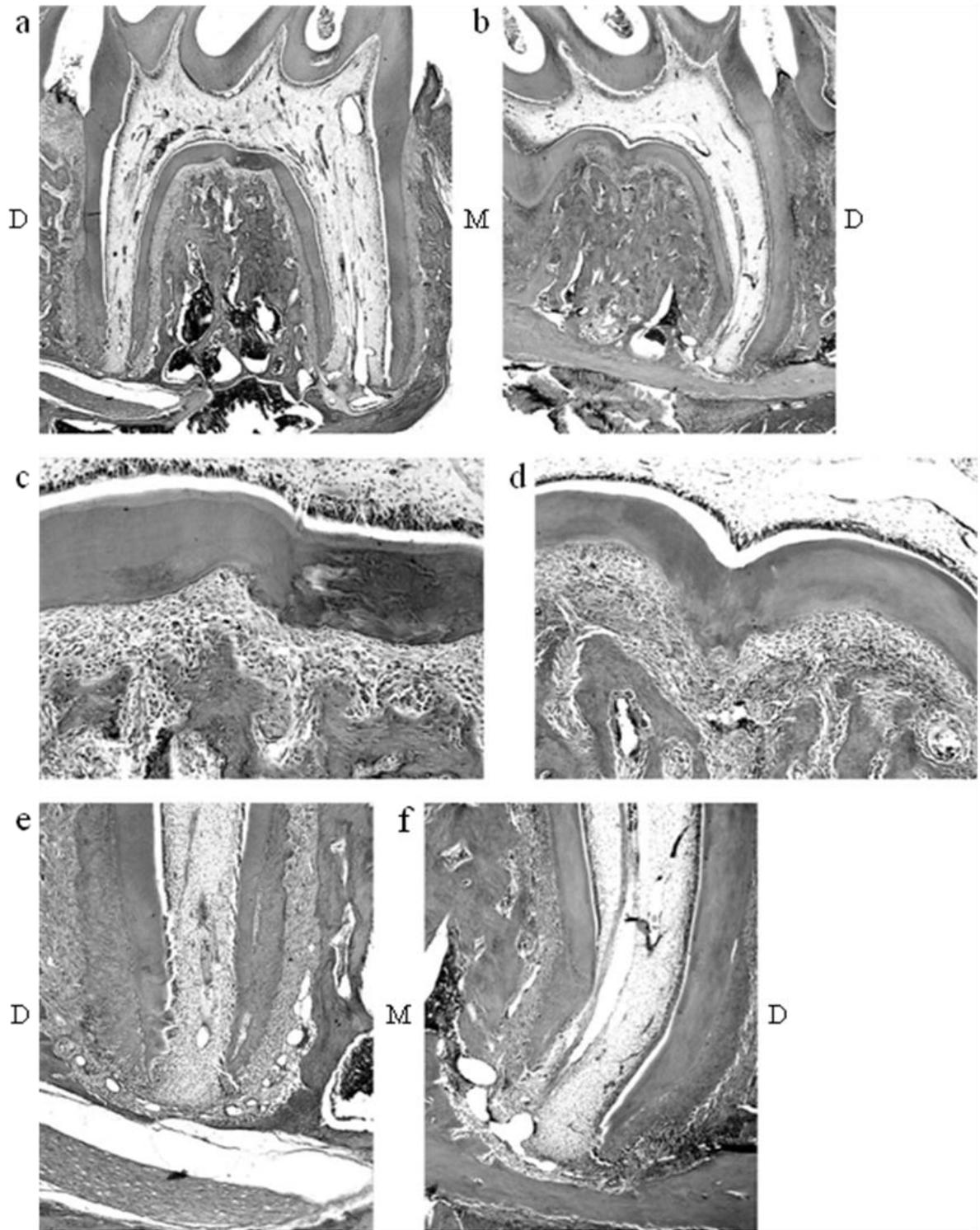


Fig. 12: 術後2週:  $\overline{M1}$  (矢状断)、M: 近心側 D: 遠心側 (a, b)、根分岐部:  $\overline{M1}$  (矢状断) (c, d) 遠心根 (矢状断)、M: 近心側 D: 遠心側 (e, f)

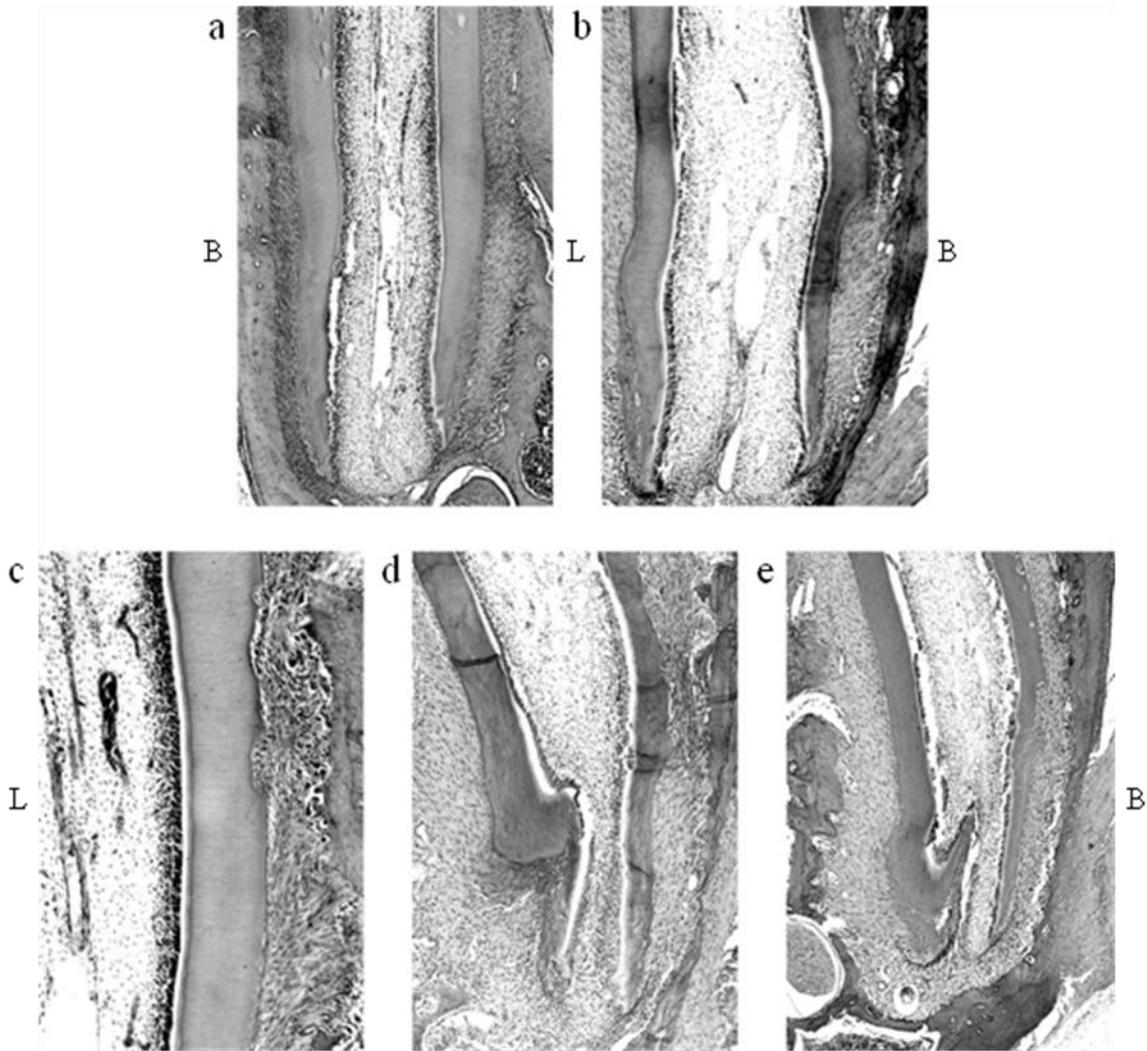


Fig.13: 術後2週: M1の近心側(前額断)、L: 舌側 B: 頬側

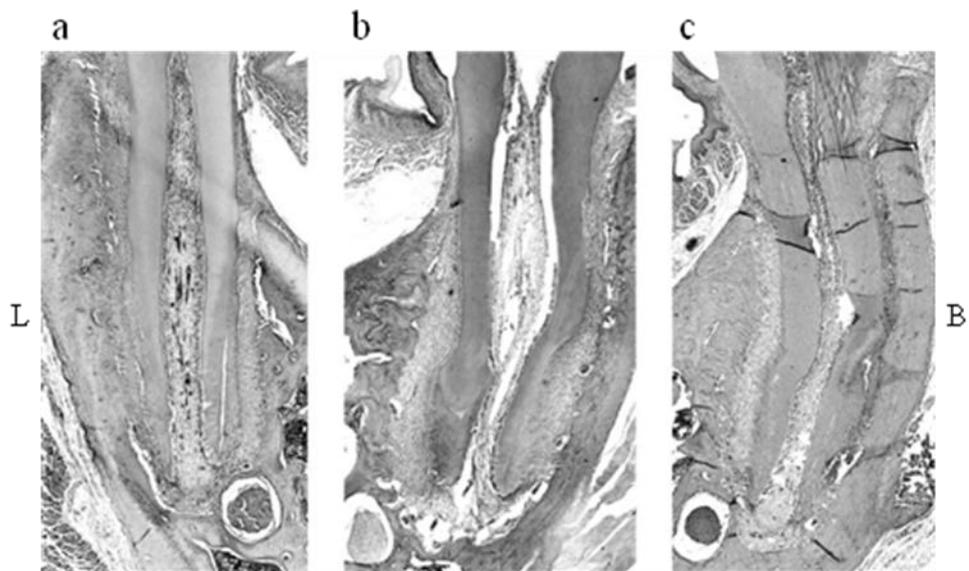


Fig.14: 術後4週: 近心根(前額断)、L: 舌側 B: 頬側

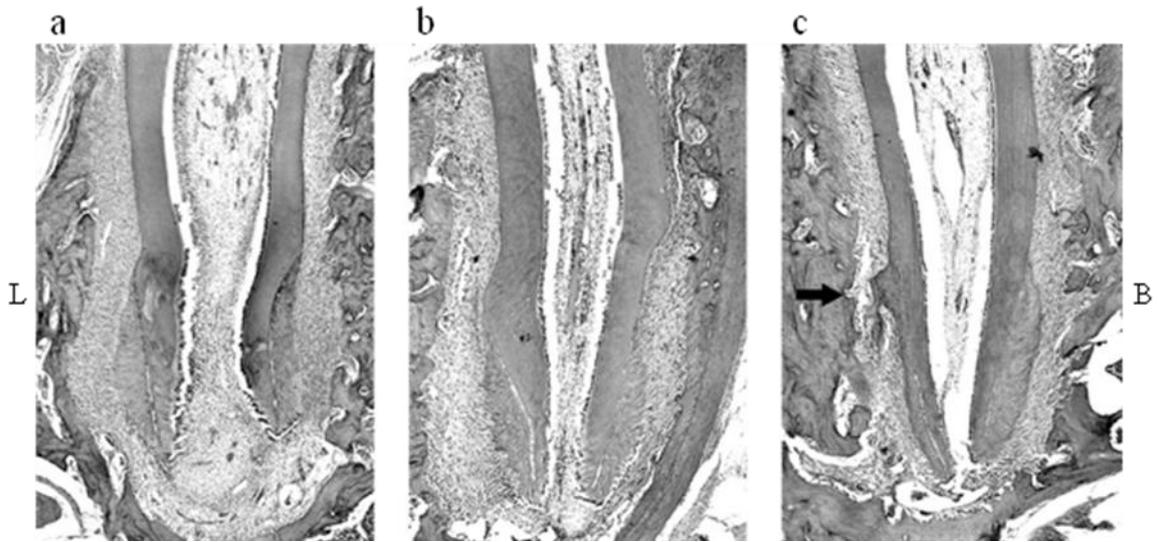


Fig. 15 : 術後 4 週の実験群 : 近心根(前額断)、L : 舌側 B : 頬側

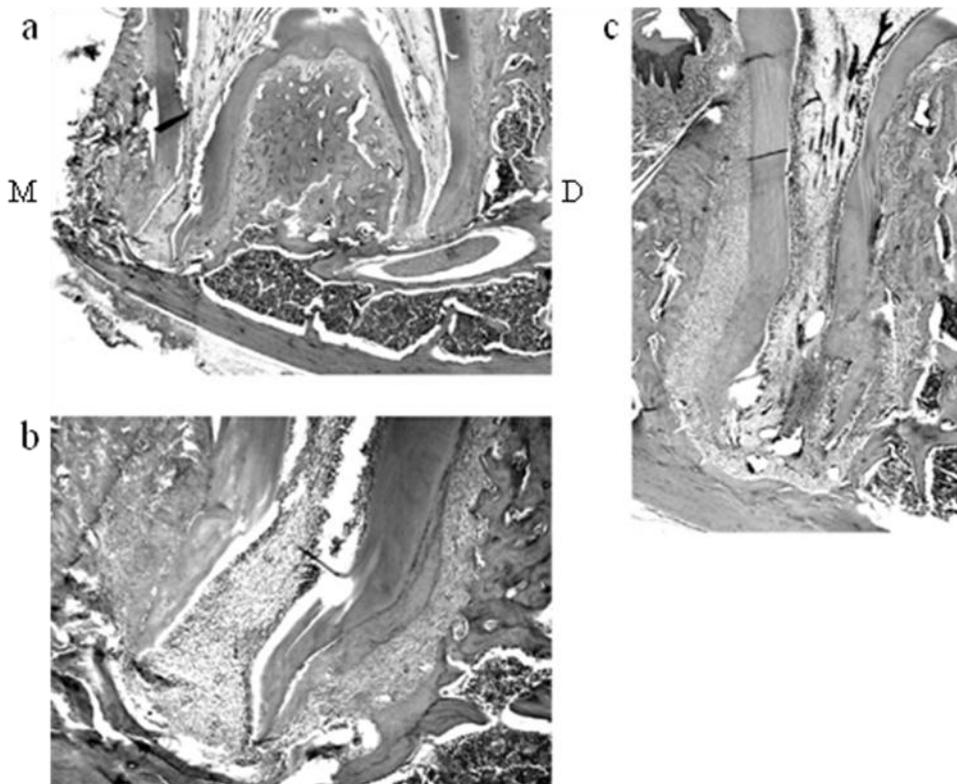


Fig. 16 : 術後 4 週の実験群 : M1 の近心側(矢状断)、M : 近心側 D : 遠心側

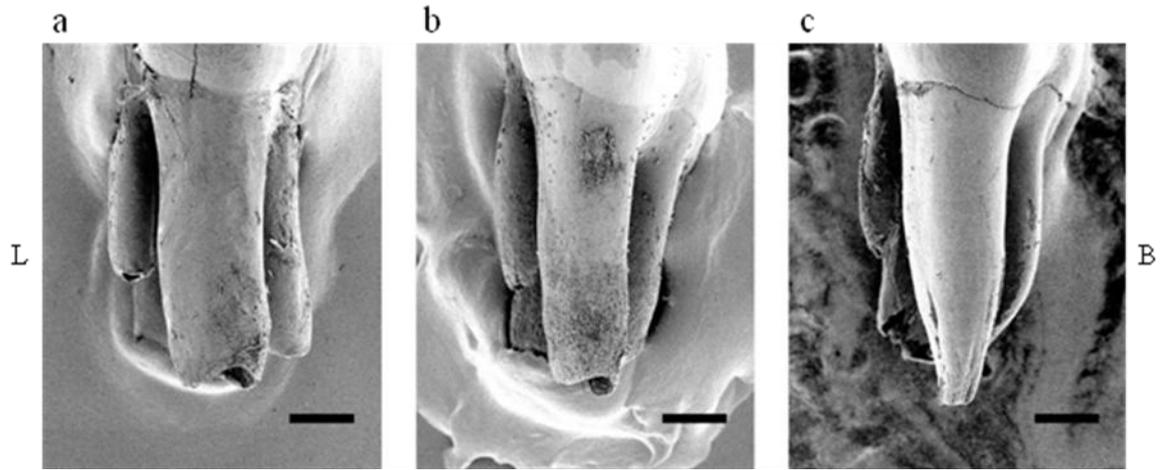


Fig. 17: 術後 1, 2, 4 週の対照群 : 近心根の SEM 像、 L : 舌側 B : 頬側

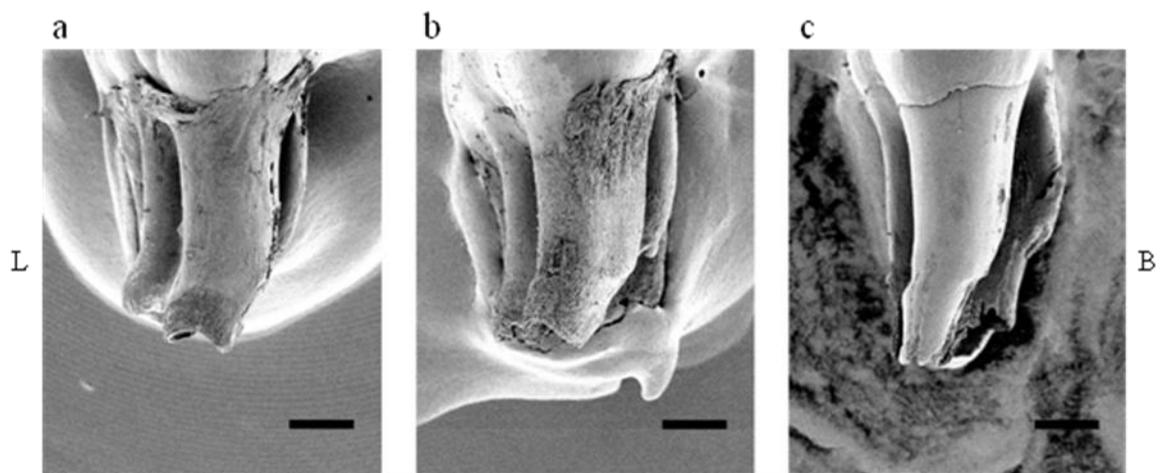


Fig. 18: 術後 1, 2, 4 週の実験群 : 近心根の SEM 像、 L : 舌側 B : 頬側

## Figure legends.

### Fig. 1

- a : Experiment of traumatic occlusion. A 21 day-old rat. The photograph of the mouth with pasted up photo polymerization resin on the occlusal surface of the first molar of the upper jaw, left side.
- b : The Schema of the experimental method of an occlusal trauma

### Fig. 2

- a: The control group on postoperative day 1; The first immature molar root of the lower jaw, right side.
- b: The experimental group on postoperative day 1; The first immature molar root of the lower jaw, right side. H-E staining of the sagittal section; original magnification : x40.

実験群 (b) : 咬合性外傷による  $\overline{M1}$  の圧下が生じ、歯根膜には圧迫側が根分岐部や根尖部領域に生じている。

### Fig. 3

- a: The control group on postoperative day 1; High magnification at the furcation area of Fig. 2-a. The periodontal space has equal width. H-E staining of the sagittal section; original magnification: x100.
- b: The experimental group on postoperative day 1; High magnification at the furcation area of Fig. 2-b. Constriction of the periodontal space has arisen in the furcation area. H-E staining of sagittal section; original magnification : x100.
- c: The experimental group on postoperative day 1; The apical area of the root and the alveolar bone has approached and constriction of the periodontal membrane has arisen. H-E staining of the sagittal section; original magnification: x40.
- d: The experimental group on postoperative day 1; High magnification of Fig. 3-c. Atrophic change of a pulp cell is seen in the pulp of an apical area. H-E staining of the sagittal section; original magnification: x60.

対照群 (a) : 根分岐部の歯根膜腔の幅は均等で、健全な状態にある。

実験群 (b) : 根分岐部の歯根膜腔は圧迫により狭小化され、歯根膜には硝子変性、壊死がみられる (矢頭) .

実験群 (c, d) : 咬合性外傷による  $\overline{M1}$  の圧下、根尖部の歯根膜腔の狭小化、根尖側の象牙質の波状の変形などがみられる。また根尖部の組織は狭窄し、うっ血を生じ、根尖口部の点線で囲んだ領域の歯髄には軽度の圧迫性萎縮がみられる。

### Fig. 4

- a, c: The control group on postoperative day 1; The periodontal space of the apical side has an equal width in the buccal and lingual side, and a healthy state is seen in the periodontal membrane.
- b, d: The experimental group on postoperative day 1; In the medial root, pressure arises in the buccal surface, an apical area is approached at an alveolar bone, and apical dentin is curved to the lingual side with the Hertwig' s epithelial sheath. H-E staining of the coronal section; original magnification: x40(a, b), x60(c, d).

実験群 (b) : 圧迫側は根尖側の頬側面に、牽引側は舌側面にが生じている。

実験群(d)：圧迫側では根尖側頬側面が歯槽骨と近接しており、歯根膜は狭窄され、変性に陥っている。

### Fig. 5

a: The control group on postoperative day 3; Gingiva of the col part between teeth and healthy gingiva is present.

b: The experimental group on postoperative day 3; Gingiva of the col part between teeth and healthy gingiva is present. The first molar was depressed by traumatic occlusion, and the difference of the height of a gingival-epithelium adhesion part from the second molar has appeared. H-E staining; original magnification: x100.

対照群(a)：上皮付着の底部はエナメル・セメント境界に位置している。

実験群(b)：上皮付着の底部はエナメル・セメント境界に位置しているが、M1の上皮付着位置の高さはM2に比べて低位である。

### Fig. 6

a: The control group on postoperative day 3; Periodontal space of the furcation area is maintaining equal width.

b: The experimental group on postoperative day 3; Although constriction was seen in part the periodontal space of the furcation area and it was accompanied by hyaline degeneration and necrosis, many osteoclasts appeared in the alveolar bone and undermining absorption has arisen. H-E staining; original magnification: x100.

対照群(a)：歯根膜腔は均等で、歯根膜は健全である。

実験群(b)：歯根膜は一部で狭小化、狭窄した歯根膜は硝子変性、壊死がみられる。根分岐部の歯槽骨には多数の破骨細胞が出現、表面性や穿下性の骨吸収がみられる。

### Fig. 7

a: The control group on postoperative day 3; Root apex is in an immature state, and a periodontal membrane is an equal width on the buccal and lingual side, and periodontal ligament fibers also show functional arrangement.

b, c: The experimental group on postoperative day 3; Although the apical area of the medial root is elongated a little, the buccal surface constriction of aperiodontal space arises and the root is curving irregularly to the lingual side like on the postoperative day 1. H-E staining of the coronal section; original magnification: x60(a,b), x100(c).

実験群(b,c)：根尖側(頬側面)で歯根と歯槽骨が近接し、根尖部の象牙質はHertwig上皮鞘とともに舌側に彎曲している。

### Fig. 8

a, c: The control group on postoperative day 5; A periodontal membrane is an equal width at the buccal and lingual sides, and periodontal ligament fibers also show a functional arrangement.

b, d: The experimental group on postoperative day 5; In the part of the periodontal space that was remarkably constricted, the degeneration of a periodontal membrane and a necrosis are seen and undermining absorption is progressing.

e: The experimental group on postoperative day 5; Dentin and an alveolar bone approached the buccal surface of the apical area, and the liquefactive necrosis, or constriction of a periodontal membrane, is recognized. Dentin is strongly carved to the lingual or dental pulp side with a Hertwig's epithelial sheath, and formation of irregular dentin is also recognized. H-E staining of the coronal section; original magnification: x40(a, b), x60(c), x50(d, e).

実験群(b) : 術後3日と同様、根尖部の象牙質は舌側や歯髄側に弯曲している。

実験群(d, e) : 圧迫側では、根尖部(頬側面)で歯根と歯槽骨が異常に近接し、歯根膜の融解壊死(矢印)、歯根膜狭窄部の歯槽骨の吸収、骨梁の一部消失(矢頭)、根尖部象牙質の舌側や歯髄側への弯曲などが生じている。不規則象牙質の形成もみられる。

### Fig. 9

a: The experimental group on postoperative day 5; The dentin of the apical area of the medial root or distal root is carved a little in the medial direction, and the Hertwig's epithelial sheath is also curved irregularly. H-E staining of the sagittal section; original magnification x40.

b: The experimental group on postoperative day 5; Medial root.

c: The experimental group on postoperative day 5; Distal root. H-E staining; original magnification: x60.

実験群(a, b, c) : 遠心側に圧迫側、近心側に牽引側が出現。根尖部はやや近心側に弯曲。

### Fig. 10

a, c: The control group in postoperative week 1; H-E staining of coronal section; original magnification: x40(a), x50(c).

Fig. 10-b, d, e: The experimental group in postoperative week 1; Medial root. The constriction of a periodontal space, curve of a root to the lingual side and formation of irregular dentin are seen at the buccal surface of the apical area. H-E staining of the coronal section; original magnification: x40(b), x50(d) x60(e).

実験群(b) : 圧迫側で歯根の弯曲(矢印)がみられる。

実験群(d, e) : 根尖部頬側面に圧迫側が出現。狭窄部歯根膜は変性、(融解)壊死がみられるが、修復性変化も生じている。根尖部はS字状に弯曲している。

### Fig. 11

a: The experimental group in postoperative week 1; The dentin of an apical area is curved to the lingual side or in the shape of an "S". The periodontal membrane is also partly constricted.

b: The experimental group in postoperative week 1; By the curve of the root in the apical area, the apical foramen became constricted, and malformation of a root has appeared. On the buccal surface, constriction of the periodontal membrane has been partly recognized. H-E staining of the coronal section; original magnification: x60.

実験群 (a, b) : 根尖部はS字状の弯曲を呈している。また、一部の例では根尖部の形態異常もみられる。

**Fig. 12**

- a: The control group in postoperative week 2; Although the root grows and extent and formation of dentin is advancing, the root is in an immature state.
- b: The experimental group in postoperative weeks 2; The first molar was slightly depressed. In the periodontal membrane of the furcation area, recovery by absorption of the alveolar bone progresses and it has recovered a nearly normal width.
- c: The control group in postoperative week 2; The width of a periodontal membrane is also equal.
- d: The experimental group in postoperative week 2; In the periodontal membrane of the furcation area, recovery by absorption of the alveolar bone progresses and it has recovered a nearly normal width.
- e: The control group in postoperative week 2; The width of a periodontal membrane is also equal.
- f: The experimental group in postoperative week 2; The curve of the root of an apical area is seen, but the periodontal membrane has recovered a nearly normal width by progressing absorption of the alveolar bone. H-E staining; original magnification: x20(a, b), x100(c, d), and x50(e, f).

実験群(b) : 圧迫側の根分岐部や根尖側頬側面の歯根膜は、ほぼ均等な幅を回復。根尖部の近心側への弯曲がみられる。

実験群(d) : 根分岐部の骨吸収は軽度となり、新生骨の添加、歯根膜腔の回復、歯根膜の修復が進み、対照群(c)に類似している。

実験群(f) : 歯根の近心側への弯曲がみられる。

**Fig. 13**

- a: The control group in postoperative week 2; The root grows and the extent and formation of dentin is advancing.
- b: The experimental group in postoperative week 2; The apical area is slightly presenting the shape of an "S" .
- c: The experimental group in postoperative week 2; On the apical area buccal surface, absorption of a root and an alveolar bone progresses and many Hawship' s lacunas and osteoclasts are seen.
- d, e: The experimental group in postoperative week 2; The dentin of an apical area is curved irregularly, and also the malformation of a root and constriction of an apical foramen are seen by formation of dentin or cementum. H-E staining of the coronal section; original magnification: x50(a), x60(b), x100(c), x60(d) and x50(e).

実験群(b) : 歯根の頬側面には部分的に歯槽骨の吸収や歯根面の吸収がみられる。

実験群(c,d,e)では一部で歯根膜の狭窄がみられ、その部の歯槽骨吸収および歯根面の吸収がみられる。また、根尖側の弯曲、形態異常もみられる。

**Fig. 14**

- a: The control group in postoperative week 4; The root is growing straight and a healthy state is seen in the periodontal membrane.

b: The experimental group in postoperative week 4; the root is curved and absorption is partially seen on the side of the root.

c: The experimental group in postoperative week 2; The S-like curve of the root is seen and constriction of a periodontal membrane is still seen on the apical area buccal side. H-E staining of the coronal section; original magnification :x40.

実験群 (b, c) : 根尖側が S 字状に弯曲、弯曲部の根面に第 2 セメント質が厚く (補腔性に) 形成されている。歯根膜腔の一部狭小化、歯槽骨吸収もみられる。

#### Fig. 15

a, b: The experimental group in postoperative week 4; Cementum is formed relatively thickly so that the curve may be rectified to the field of the S-shaped H-E staining of the coronal section; original magnification: x50.

c: The experimental group in postoperative week 4; The finding which makes The adhesion of cementum and an alveolar bone at part of apical area is also seen. H-E staining of the sagittal section; original magnification: x50.

実験群 (a, b, c) : 歯根の象牙質が S 字状に弯曲している。弯曲部には第 2 セメント質が厚く (補腔性に) 形成されている。骨性癒着 (矢印) を思わせる所見もみられる。

#### Fig. 16

a, b, c: The experimental group in postoperative week 4; A remarkable curve to the medial root surface and an irregular shape of the root are seen. The periodontal space has almost an equal width. H-E staining; original magnification: x30(a), x60(b), x40(c).

実験群 (b, c) : 近心根と遠心根は近心側への弯曲を示し、形態異常もみられる。

#### Fig. 17

a: The control group in postoperative week 1; The root is growing straight.

b: The control group in postoperative week 2; The medial root is a little elongated and formation of the secondary cementum is also seen in the apical area surface.

c: The control group in postoperative week 4; The medial root is further elongated. Scanning electron microscope image. Scale bar, 500  $\mu$  m.

対照群 (a, b, c) : 歯根は経日的に真っ直ぐに伸長、發育している。

#### Fig. 18

a: The experimental group in postoperative week 1; The apical area is curving to lingual side. The apical area of the root is wide-open and in an immature state.

b: The experimental group in postoperative week 2; The apical area is curving to the lingual side. The secondary cementum is formed in an apical area and a rough surface is present.

c: The experimental group in postoperative week 4; The apical area is curving and prolonged to the lingual side. The secondary cementum is also formed in an apical area Scanning electron microscope image. Scale bar, 500  $\mu$  m.

実験群 (a, b, c) : 歯根は経日的に伸長、發育するが、根尖側で舌側方向あるいは S 字状に弯曲している。