



Title	歯に矯正力を加えた際の圧迫側歯周組織の三次元的様相 : 初期変化に続く経時的な修復機転について
Author(s)	佐藤, 嘉晃
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(歯学)
Dissertation Number	甲第3184号
Issue Date	1993-03-25
DOI	https://doi.org/10.11501/3092963
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/49868
Type	doctoral thesis
File Information	000000265322.pdf



歯に矯正力を加えた際の圧迫側歯周組織の 三次元的様相

—初期変化に続く経時的な修復機転について—

北海道大学大学院歯学研究科博士課程歯学臨床系専攻

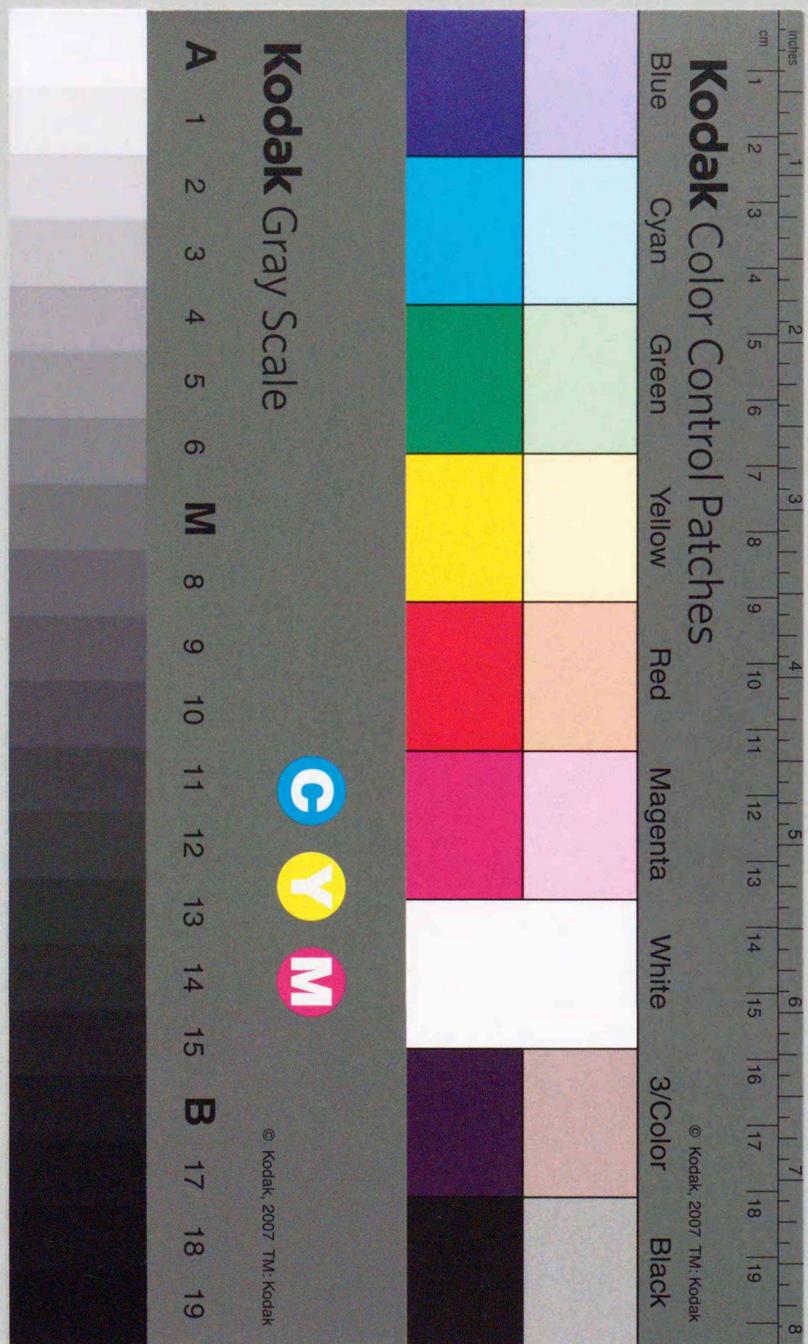
佐藤 嘉晃

主任指導：北海道大学歯学部歯科矯正学講座

中村進治教授

指導：北海道大学歯学部口腔解剖学第二講座

脇田 稔教授



①

歯に矯正力を加えた際の圧迫側歯周組織の 三次元的様相

—初期変化に続く経時的な修復機転について—

北海道大学大学院歯学研究科博士課程歯学臨床系専攻

佐藤 嘉晃

主任指導：北海道大学歯学部歯科矯正学講座

中村進治教授

指導：北海道大学歯学部口腔解剖学第二講座

脇田 稔教授

目次

【1】緒言

【2】材料および方法

- 1) 実験動物
- 2) 歯の移動装置
- 3) 実験条件
- 4) 模型計測法
- 5) 試料作製法
- 6) 組織切片作製法および三次元再構築法

【3】結果

- 1) 模型計測
- 2) 組織切片による顕微鏡像および三次元再構築像からの観察

【4】考察

- 1) 実験方法について
- 2) 歯周組織の修復機転と歯の移動について
- 3) 破骨細胞の出現とその吸収形態について
- 4) 歯根膜変性領域と破骨細胞の出現部位について
- 5) 歯槽骨への応力分布と深部での背部骨吸収を行う破骨細胞の分布について
- 6) 歯根吸収について

【5】結論

謝辞

参考文献

図表

【1】 緒言

矯正歯の移動を行った際に生じる歯周組織の変化については、従来より数多くの報告がある。Sandstedt¹⁾はイヌを用いた動物実験で、圧迫側歯周組織中に均質無構造の組織を生じる硬化症 (sclerosis) が出現し、同時に歯槽骨で穿下性骨吸収が行われることを初めて報告した。その後、Schwarz²⁾, Oppenheim³⁾, Waldo⁴⁾, Macapanpan⁵⁾, Reitan⁶⁻¹¹⁾ 等により、破骨細胞や骨芽細胞の出現時期あるいは骨の吸収、添加の進行についての報告がなされてきた。また Reitan⁶⁻¹¹⁾, Azuma¹²⁾ は、圧迫側歯周組織に生じた硝子様変性の修復と歯の移動との間には密接な関係があり、硝子様変性の存在する時に歯の移動はおこりにくく、歯は2相性の移動を行うことを報告している。一方、硝子様変性領域の経時的变化については、穿下性骨吸収が進むとともに縮小して消失することが報告されている⁶⁻¹⁶⁾。特に Reitan⁹⁾ は、硝子様変性の消失は歯槽骨の解剖学的形態と密接に関係していることを認め、歯槽骨に骨髓腔が多い場合や、歯槽骨中の裂隙 (layer separated by open cleft) が存在する場合には、硝子様変性の改造が早期に進むと報告している。

このような矯正歯の移動に伴う歯周組織の変化は、歯根と歯槽骨との間に生じる圧力に対応する、あるいは適応しようとする組織の変化であり、歯および歯周組織の解剖学的構造あるいは荷重の条件等により、三次元的に様々な様相を呈することが推測される。しかし従来報告の多くは、標本の一断面の観察をもとにしているのが現状である。この組織切片像による観察は、特定部位の詳細な形態変化を検討するには適しているが、歯の移動にともなう歯周組織の変化を三次元的に把握することは困難である。

一方、最近の三次元画像処理技術の進歩とともに、連続切片像から得

られたデータをコンピュータに入力し、コンピュータグラフィクスにより表示された三次元再構築像を用いた研究¹⁷⁻¹⁹⁾が数多く行われており、またこの方法は優れた観察法であることが示されている^{20,21)}。さらに金子²²⁾はこの三次元観察法を利用し、ネコの上顎犬歯に荷重を加え、4日後あるいは7日後における圧迫側歯周組織の変化の三次元的様相、特に圧縮した歯根膜に生じる変性領域の分布と破骨細胞の出現部位について詳細な検討を行っている。またこの中で変性領域は、ヘマトキシリン-エオジン染色を施した組織切片で、エオジン好性の均質で無構造な領域 (無細胞帯) とその間にはさまれた線維芽細胞の核の濃縮した領域 (内変性帯) にわけられることを報告した。

そこで本研究では、金子の用いた方法に準じて実験を行い、歯に加える荷重の作用期間を2週間、4週間と延長し、初期変化からさらに進行した過程における歯周組織の変化について、特に組織の修復機転の観点から三次元的かつ経時的に検討することを目的とした。

【2】 材料および方法

【2】-1) 実験動物

実験動物として、全身状態および歯周組織の健康な雄の成ネコ6匹(4.0~6.0kg)を用いた。搬入したネコを1週間一般飼育した後、実験を開始した。実験期間中は可及的に同一条件で飼育し、1日に2回飼料(CANET® ペットライン社製)および水道水を自由摂取させた。また、実験期間中7日毎にウォータージェットにより、口腔内の洗浄を行った。

【2】-2) 歯の移動装置

歯の移動装置を図1-a,bに示す。実験歯には上顎犬歯を用い、上顎第3前臼歯を固定源として矯正用クローズドコイルスプリング(ロッキーマウンテン社製)により、遠心に牽引した。

装置装着に際しては、ネコを固定器に固定後、塩酸ケタミン(ケタラール® 三共製)の筋注で全身麻酔を施した。固定源の第三前臼歯に帯環(band material 0.08, 3.8mm トミー社製)を調整し、リンガルボタン(トミー社製)を溶接した。さらにエッチングの後、帯環を接着性レジジン(オルソマイトスーパーボンド® サンメディカル社製)にて合着した。荷重の負荷に用いた矯正用クローズドコイルスプリングは、所定の初期荷重になるよう調整し、矯正用結紮線で第三前臼歯のリンガルボタンと犬歯の歯頸部に設けた溝とに両端を固定した。

【2】-3) 実験条件

実験条件について表1に示す。金子²²⁾は、初期荷重に100gと200gを用いた場合の初期変化の観察から、100gの方がより至適な矯正力であるこ

とを述べている。そこで今回の荷重の条件は100gを中心として前後に50g, 200gを設定した。これより、実験条件はネコAに対しては右側を対照歯とし左側を100g14日間、ネコBに対しては左側を100g7日間、右側を100g14日間、ネコC,Dに対しては左側を100g14日間、右側を50gまたは200g14日間、ネコE,Fに対しては左側を100g28日間、右側を50gまたは200g28日間とした。なお荷重は初期荷重として加え、実験期間中荷重の調整は行わなかった。

【2】-4) 模型計測法

実験前後において歯列模型を作製し、これらを用いて実験歯の尖頭および歯頸部の移動量を図2に示す方法で測定した。

【2】-5) 試料作製法

所定の実験期間終了後、Pentobarbital系麻酔剤(ネンブタール® ダイナボット社製)の腹腔内注射で全身麻酔を施し、Bouin固定液で30分間灌流固定を行い、さらに両側の上顎犬歯を切りだしトリミングした後、3日間浸漬固定を行った。

ついで試料をPlank-Rychlo液²³⁾にて7日間脱灰した。脱灰の程度については、前後に軟放射線を用いて確認を行った。脱灰終了後、十分に流水水洗を行いアルコール系列で脱水し、通法に従いセロイジン(CEDUKOL® MERCK社製)に包埋した。

【2】-6) 組織切片作製法および三次元再構築法

十分に硬化したセロイジブロックに三次元再構築のための基準点として、ボーリングマシンで直径0.8mmの小孔を薄切面に対して垂直にあけた。次いでセロイジブロックを厚さ30 μ mで連続横断薄切しヘマトキシリン-エオジン染色を施した。さらに、染色された薄切片を5枚おき150 μ m間隔で選び、顕微鏡写真撮影を2.5倍で行い、これらを4.5倍にプリント(キャビネサイズ)した。その結果、全体倍率11.25倍の組織写真像が得られ、この上で歯根、歯槽骨、無細胞帯、破骨細胞の分布領域、および基準点をトレースした。また、ネコB,C,Dの薄切片の特定の部位については、2枚おき60 μ m間隔で、顕微鏡写真撮影7.5倍、プリント4倍の全体倍率30倍にて同様の操作を行った。

得られたトレースデータを三次元再構築するため、パーソナルコンピュータ(PC9801VM NEC社製)にデジタイザを用いて入力した。入力に際しては、まず基準点を2点入力し、次いで歯根、歯槽骨、無細胞帯、破骨細胞の分布領域を独立したデータとして入力し、三次元画像解析ソフト(Cosmozone2SA Nikon社製)で処理を行った。三次元画像における透視像は、歯根を紫色、歯槽骨を緑色、無細胞帯を黄緑色、破骨細胞を赤色で表示した。画像上でそれぞれの分布が重なる場合には、歯槽骨と重なる歯根は青色、歯槽骨と重なる破骨細胞はピンク色というように合成色で表示された。

なお、この三次元再構築像は任意の方向からの表示が可能であるが、今回は、頬舌的方向と近遠心的方向の三次元再構築像を用いて、検討を行った。

【3】 結果

【3】-1) 模型計測

実験歯の移動量を測定した結果を表2に示す。14日間4例における犬歯歯頸部と尖頭の移動量は、それぞれ0.45~0.55mmおよび1.10~1.15mmの範囲にあり、また4例での明らかな差異は認められなかった。28日間4例における犬歯歯頸部と尖頭の移動量は、0.65~0.80mmおよび1.70~2.20mmの範囲にあり、14日間例に比して歯頸部、尖頭ともに大きな値を示しており、特に尖頭でその傾向が強かった。さらに歯頸部においては4例で明らかな差異は認められなかったが、尖頭においては同一個体内で初期荷重の小さいものが移動量が大きかった。

【3】-2) 組織切片による顕微鏡像および三次元再構築像からの観察

a. 対照歯との比較(対照歯と100g, 14日間例—ネコA)

顕微鏡像の弱拡大での観察から、対照歯は歯根膜腔の幅が均一か、もしくは近心側で遠心側よりやや狭い傾向を示した。線維の走行に大きな乱れはなく、線維間に介在する歯根膜細胞もほぼ一様に分布していた。線維骨の幅は遠心側で最も厚く、舌側や頬側に向かうにつれて徐々に薄くなり、近心側で最も薄く、しばしば線維骨を欠いている部位があった(図3)。これらの所見はネコの犬歯が生理的に近心移動していることを示すものである^{24,25)}。これに対して、実験歯では歯根膜腔の幅が遠心側で近心側より狭くなっており、さらに遠心側では一部に吸収像が、近心側では歯槽骨の形成が認められた(図4)。

中拡大で遠心側を観察すると、対照歯では歯槽骨頂付近における歯根

膜線維は一樣で、歯槽壁と歯根表面にはそれぞれ骨芽細胞、セメント芽細胞の配列が認められた。歯槽骨内にはハバース管を認めるのみで広い骨髓腔はみられず、骨髓腔から歯根膜腔に向かう開口部もほとんど認められなかった(図5)。しかし、これよりやや根尖側の歯槽骨内には広い骨髓腔がみられ、ここから遠心側の歯根膜腔へ向かう開口部が認められた。しかし頬側と舌側にはほとんど認められなかった(図6)。一方実験歯では、遠心側の歯槽骨頂付近の圧縮された歯根膜腔内に内変性帯が観察され、この両側に無細胞帯が認められた。この様な歯根膜変性領域における歯槽壁と歯根表面には、対照歯でみられたような骨芽細胞およびセメント芽細胞の配列は認められなかった。この無細胞帯の外側の歯根膜腔に面する歯槽壁には吸収像が認められた。この吸収は舌側(頬側)に向かうとともに遠心に向かう傾向を示しており、いわゆる穿下性骨吸収の様相を呈していた。吸収窩内にはいくつかの破骨細胞が存在していた。また内変性帯と無細胞帯の内部には正常な血管は観察されなかった(図7、8)。この歯槽骨吸収形態はいわゆる穿下性骨吸収であった。それよりやや根尖側では、変性領域に面した歯槽骨内に吸収像が認められた(図9)。これは対照歯で観察された歯槽骨骨髓腔の開口部に相当しており、歯根膜の変性領域に続く変性組織像が、骨髓腔内にわずかに拡大していた。さらにこの変性組織像に近接して、数個の破骨細胞の存在する吸収窩が歯根膜腔への開口部よりやや内方に観察された(図10)。この吸収部位は連続切片で観察しても、穿下性骨吸収あるいは歯槽骨内深部の骨髓腔にみられる背部骨吸収とは連絡していなかった。すなわち、他の吸収部位とを結ぶ歯槽壁あるいは骨髓腔壁上に破骨細胞は存在せず、独立して生じた吸収像であった。この様な部位の吸収形態は穿下性骨吸収に類似していたが、吸収が歯根膜腔から始まる穿下性骨吸収とは異なり、歯根膜変性領域に面した骨髓腔開口部付近から開始していた。これ

らのことから背部骨吸収をさらに再分類して、浅部での背部骨吸収と深部での背部骨吸収に分けることにした。

b. 7日間と14日間での経時的な比較(100g,7日間例と100g,14日間例—ネコB)

顕微鏡像での観察から、遠心側の歯槽骨頂付近では、両例ともに内変性帯および無細胞帯が観察された。このうち7日間例では、正常歯根膜部位との境界付近に穿下性骨吸収または直接性骨吸収が認められた。また14日間例では、7日間例より進行した穿下性骨吸収が観察され、その外側に直接性骨吸収が認められた。両例とも変性領域に面する歯槽骨内に広い骨髓腔はみられず、浅部での背部骨吸収はほとんど認められなかった(図11,12)。これよりやや根尖側では、両例とも変性領域に面する歯槽骨内に広い骨髓腔がみられ、穿下性骨吸収と直接性骨吸収の他に浅部での背部骨吸収が観察された。この吸収は7日間例に比して14日間例ではより広範であった(図13,14)。一方、近心側根尖部では、7日間例で幅広い無細胞帯と、その周囲の穿下性骨吸収が認められた(図15)。14日間例では無細胞帯の幅が狭く、周囲の歯根膜は正常像に近い状態を示していた。また穿下性骨吸収は7日間例に比して進行していた(図16)。

次に三次元再構築像での観察からは、両例ともに遠心側歯頸部では環状に分布する無細胞帯が認められ、これに囲まれるように内変性帯が分布していた。また近心側根尖部では、無細胞帯のみが分布していた。これらの変性領域は、7日間例に比して14日間例では遠心側歯頸部および近心側根尖部ともに分布が狭かった。また、破骨細胞は両部位で無細胞帯を取り囲むように分布していたが、14日間例ではその範囲が狭かった。この部位は、顕微鏡像では、主に直接性骨吸収を行う部位であった。一方、変性領域に面した歯槽骨内深部の骨髓腔にみられる破骨細胞の分布

は、7日間例の方がより深部にまで及んでいた(図17,18)。

さらに浅部での背部骨吸収による吸収部位を詳細に検討するため、切片を2枚おき60 μ m間隔で選んだ三次元再構築像を用いた(図19)。図中で、変性領域に面した歯槽壁は緑色、浅部での背部骨吸収により吸収された歯槽骨は赤色で示されている。これより、7日間例に比して14日間例で広範に歯槽骨が吸収されていることがわかった。また、両例とも歯槽骨頂付近での吸収はほとんどみられなかった。

c. 初期荷重の違いによる14日間での比較(100g,14日間例と200g,14日間例—ネコC)

この個体の特徴として、全体に骨髓腔は少なく、セメント質も厚かった。

顕微鏡像からは、遠心側の歯槽骨頂付近では、両例ともに内変性帯および無細胞帯が観察され、無細胞帯の外側には穿下性骨吸収が、さらにその外側には直接性骨吸収が認められた。しかし初期荷重のより小さい100g例では、この穿下性骨吸収はわずかであった。両例とも歯槽骨内に広い骨髓腔はみられず、浅部での背部骨吸収も認められなかった(図20,21)。これよりやや根尖側でも、なお両例とも歯槽骨は緻密で広い骨髓腔はみられなかったが、浅部での背部骨吸収が一部に認められた(図22,23)。また両例ともに、歯槽骨内深部の骨髓腔には背部骨吸収を行う破骨細胞が観察され、特に初期荷重のより大きい200g例では、全実験例の中で最も歯槽骨内の深部にまで認められた(図24,歯槽壁から約900 μ m)。一方近心側根尖部では、100g例で変性領域はみられず直接性骨吸収のみが認められたが、200g例で無細胞帯がわずかに存在し、この外側に穿下性骨吸収が、さらにその外側に直接性骨吸収が認められた(図25,26)。

次に三次元再構築像での観察から、遠心側歯頸部の変性領域は、200g例では100g例に比して頬舌的により広く分布していた。近心側根尖部の変性領域は、200g例でのみ根尖付近に認められたが、分布の範囲は狭かった。破骨細胞は遠心側歯頸部で両例とも無細胞帯を囲むように分布していたが、100g例でより広い範囲に認められた。近心側根尖部での破骨細胞も100g例でより広く分布していた。また歯槽骨内深部の骨髓腔にみられる破骨細胞の分布は、200g例でより深部にまでおよんでいた(図27,28)。

d. 初期荷重の違いによる14日間での比較(50g,14日間例と100g,14日間例—ネコD)

顕微鏡像での観察からは、遠心側の歯槽骨頂付近では、両例ともに内変性帯および無細胞帯が観察され、無細胞帯の外側では穿下性骨吸収が、さらにその外側に直接性骨吸収が認められた。一部で無細胞帯の外側ですぐに直接性骨吸収が認められる部位があったが、これは初期荷重のより小さい50g例で顕著であった。両例とも変性領域に面する歯槽骨内には広い骨髓腔はみられなかった(図29,30)。これよりやや根尖側では、両例とも広い骨髓腔がみられ浅部での背部骨吸収が広範に認められた(図31,32)。一方近心側根尖部では、両例ともに無細胞帯が観察された。この無細胞帯の外側には穿下性骨吸収が、さらにその外側には直接性骨吸収が認められた。穿下性骨吸収は100g例でより進行していた。また100g例には浅部での背部骨吸収が認められた(図33,34)。

次に三次元再構築像での観察から、変性領域は、50g例に比して100g例で、遠心側歯頸部では頬舌的に、また近心側根尖部では特に長軸方向に広く分布していた。破骨細胞は、50g例で遠心側歯頸部で無細胞帯周囲から、さらに頬側をへて近心側根尖部にまで帯状に分布していた。

一方、100g例では遠心側歯頸部と近心側根尖部とにわかれて分布していた。また、歯槽骨内深くの骨髓腔にみられる破骨細胞は、50g例ではほとんど認められなかった。(図35,36)。

e. 初期荷重の違いによる28日間での比較(100g,28日間例と200g,28日間例—ネコE)

顕微鏡像からは、遠心側の歯槽骨頂付近では、両例とも一部に変性領域の残存が観察され、この領域の外側に穿下性骨吸収がわずかに認められた(図37,38)。しかしながら、ここからやや離れた歯槽壁では破骨細胞はみられず骨芽細胞が認められた。また両例ともに、変性領域の外側の歯根膜はほぼ正常と思われる組織で満たされていた(図39,40)。さらに変性領域は、初期荷重のより小さい100g例で歯槽骨頂付近にのみ認められたが、初期荷重のより大きい200g例ではこれよりやや根尖側でも認められた(図41)。この部位では変性領域が遠心側と舌側とにわかれており、それぞれの両側には穿下性骨吸収もしくは、浅部での背部骨吸収が認められた。この2ヵ所の変性領域には含まれた部位の歯槽壁は歯根表面からかなり離れており、歯根膜は正常と思われる組織で満たされていた。この様な領域の歯槽壁には骨芽細胞が認められた(図42)。また舌側の変性領域の外側では歯根象牙質におよぶ吸収が認められ歯根吸収窩内には破骨細胞が存在していた。(図41,43)。

一方近心側根尖部では、100g例に変性領域はみられず直接性骨吸収が認められ、また歯根膜が広い骨髓腔に連絡している部位があった。さらに歯根表面には破骨細胞が認められた(図44)。これに対し200g例では狭い変性領域が残存しており、この外側に穿下性骨吸収がわずかにみられたが、ここからはなれた部位では破骨細胞はほとんど認められなかった。また、歯根セメント質表面には破骨細胞が認められた(図45)。

次に三次元再構築像での観察からは、遠心側歯頸部の変性領域は、100g例で歯槽骨頂付近に小さい領域として分布していたが、200g例では歯槽骨頂付近に分布する他に、やや根尖側よりに数ヵ所、島状に分布していることがわかった。さらに200g例では近心側根尖部にもわずかに変性領域が分布していた。また破骨細胞は、遠心側歯頸部で両例ともに広い分布は示さず、主に変性領域の近くに認められた。また、両例とも歯槽骨内深部の骨髓腔では、わずかな分布であった。一方近心側根尖部の破骨細胞は、100g例で近心側根尖部から近心側歯頸部にまで幅広く分布していたが、200g例では変性領域を囲むようにわずかに分布するのみであった(図46,47)。

f. 初期荷重の違いによる28日間での比較(50g,28日間例と100g,28日間例—ネコF)

顕微鏡像での観察から、遠心側の歯槽骨頂付近では、両例とも一部に変性領域が観察され、この外側にわずかに穿下性骨吸収が認められた(図48,49)。しかし、ここからやや離れた歯槽壁には破骨細胞はほとんどみられず骨芽細胞が認められた。この変性領域の外側の歯根膜は幅が広く、正常と思われる組織で満たされていた(図50,51)。また変性領域は、初期荷重のより小さい50g例で歯槽骨頂付近にのみ認められたが、初期荷重のより大きい100g例ではこれよりやや根尖側でも認められた(図52)。この部位では変性領域が遠心側と舌側とにわかれてみられた。それぞれの変性領域の両側には、穿下性骨吸収あるいは、浅部での背部骨吸収が認められた。また2ヵ所の変性領域には含まれた部位の歯根膜は、ほぼ正常と思われる組織で満たされていた(図52)。この様な領域の歯槽壁には破骨細胞がほとんど認められなかった。一方近心側根尖部

では、50g例で変性領域はみられず直接性骨吸収が認められた。また歯根膜が広い骨髓腔に連絡している部位があった。さらに歯根セメント質表面には破歯細胞が少数認められた(図53)。これに対し100g例では狭い変性領域が残存しており、この外側に穿下性骨吸収がわずかに認められた。またここからはなれた部位では破骨細胞はほとんどみられなかったが(図54)、さらにこれよりやや根尖側では歯根セメント質表面に破歯細胞が認められた(図55)。

次に三次元再構築像での観察からは、遠心側歯頸部の変性領域は、50g例で歯槽骨頂付近に小さい領域として分布しているのみであったが、100g例では歯槽骨頂付近の他に、やや根尖側よりの舌側にも島状に分布していることがわかった。さらに100g例では近心側根尖部にもわずかに変性領域が分布していた。また破骨細胞は、遠心側歯頸部で両例とも主に変性領域の近くに認められ、歯槽骨内深部の骨髓腔にはあまり分布していなかった。一方近心側根尖部の破骨細胞は、50g例で近心側根尖部から近心側歯頸部付近にまで幅広く分布していたが、100g例では変性領域を囲むようにわずかに分布するのみであった(図56,57)。

【4】 考察

【4】-1) 実験方法について

実験的歯の移動について、Waldo⁴⁾がラットの上顎臼歯間にゴム片を挿入して歯を移動させる方法を考案して以来、この方法または変法による多くの報告がなされてきた。この方法は装着が簡便であり、ある範囲では恒常的に力を発生し、また多根歯であるため歯周組織の様々な変化を同時に観察できるという利点がある反面、荷重の大きさの調整が困難であり、ゴム片挿入部位に炎症を誘発するなどの欠点を有している。また、Rygh等^{15,26-29)}はラットの上顎切歯を固定源とし、スプリングによって上顎第一臼歯を移動させるという方法を用いているが、常生歯である齧歯類の切歯に矯正装置を装着するため、装置の脱落や矯正力の変動等の問題がある。一方、ネコやイヌはラット等の小動物に比べて口腔が大きく、装置の作製や装着が容易で、矯正力の調整や力系の設定も行いやすい等の利点があるため、従来から歯の移動実験に数多く使われてきた。特にネコについては、取り扱いが比較的容易であり³⁰⁾、上顎が下顎をおおっているため上顎犬歯の移動に際して干渉が少なく³¹⁾、さらに上顎犬歯は単根歯であるため歯周組織に生じる反応を単純な力系としてとらえることができるなどの利点がある。

今回の実験に用いた装置は、中村³²⁾の矯正用バンドとコイルスプリングによるネコ犬歯の移動装置を金子²²⁾が改良したものである。この方法では、バンドの固定に矯正用接着性レジンを使用することで、装置の中途脱落を防止している。また実験歯への装置の固定については、歯肉縁上の歯頸部に浅い溝を作り、ここに矯正用結紮線をかけ、それを矯正用接着性レジンで覆って保持を補強している。これにより装置が簡便とな

り、バンドによる歯周組織への影響を最小限にすることができた。さらに、ウォータージェットにて口腔内の清掃を行ったため、実験終了後も実験歯にあきらかな炎症等は見られなかった。荷重用のコイルスプリングは、所定の初期荷重を生じる伸びの量を計測し、それと等しくなるよう調整した後に装着した。

実験条件については、まず初期荷重に関して、金子²²⁾は100g例と200g例を検討した結果、7日間例では100g例の方がより至適矯正力に近いと報告している。そこで今回は、100gを中心に前後に50g,200gを加え荷重条件を設定した。また、長期にわたる実験では個体差によって様々な変化が生じることが予想されたため、すべての実験例で、同一個体の左右側実験歯に異なる初期荷重を加えて比較検討した。さらに荷重は初期荷重として加え、実験中の調整は行わなかった。コイルスプリングは歯の移動とともに減衰するが、本実験では14日間例で約20~30%、28日間例で約40~50%の減衰がおこった。一方、作用期間に関しては、2週間に加え、通常矯正臨床において矯正力の再調整が必要となる4週間を設定し、この期間における歯周組織の修復機転を経時的に検討した。

また、組織を立体的に観察する方法としては、これまで連続切片から組織構造をトレースし、その像をもとにワックス板あるいはプラスチック板などを作製し、それらを重ね合せて立体構築する方法が行われてきた^{33,34)}。さらに、走査型電子顕微鏡により表面形態の立体的観察法も行われてきた³⁵⁻³⁷⁾。しかし、従来の重ね合せ法では観察方向や観察範囲が、限られるという欠点があり、また走査型電子顕微鏡による方法では、その観察部位が表面に限られるという欠点がある。最近、連続切片像から得られたデータをコンピュータに入力し、コンピュータグラフィクスにより三次元構築像で表示する方法を用いた研究が多くなされており、この方法は優れた三次元観察法であることが示されている²⁰⁻²¹⁾。今回この

方法を用いた金子²²⁾に従って実験を行った。また、三次元再構築のための組織切片作製法として、従来から様々な方法が報告されている。今回の実験では、大江の方法³⁸⁻⁴¹⁾を用いた。すなわち、試料をセロイジンで包埋し、作製したセロイジンブロックに薄切方向と垂直になるようにボーリングマシンで小孔をあけ、これらを再構築の重ね合せのための基準点として用いた。ただしこの方法では包埋から切片の封入までの間にセロイジンが伸縮するため歪が生じ、それらを完全防止することは困難であった。そのため三次元再構築像では、辺縁の輪郭に凹凸が現われた。今後ブロックの硬化状態ならびに染色の条件等の検討を行い、解決する必要があるものと思われる。

【4】-2) 歯周組織の修復機転と歯の移動について

歯に矯正力を加えた場合、圧縮された歯根膜に変性領域が出現し、またこの周囲に破骨細胞が分布することは、一般に認められている(1-16,26-29)。また、経時的な歯槽骨の吸収と変性組織の修復に関する報告も多い(12-16,29,42)。さらに金子²²⁾は、このような歯周組織の変化を初めて三次元的に検討し、100gと200gの初期荷重を加えた際に生じる歯根膜変性領域の分布を、顕微鏡像および三次元再構築像で観察した。その結果、4日間例では変性領域の分布はみられるが破骨細胞の分布はわずかであり、また7日間例では破骨細胞の分布が広範となることを報告している。さらに100g7日間例では200g例より破骨細胞の分布が広く、200g例では歯槽骨内の骨髓腔にも破骨細胞がみられると述べている。

そこで今回、まず金子がより至適矯正力に近いと考えた100g例について、7日から14日に至る過程を検討し、次いで50g,100g,200gの初期荷重を用いて14日間例と28日間例の比較を行い、組織の修復機転についての検討を行った。

7日から14日に至る過程について、100gの初期荷重を加えたネコBを用いて検討すると、遠心側歯頸部および近心側根尖部の変性領域は、三次元的に縮小する傾向を示していた(図17,18)。これは、この期間に変性領域の一部の修復がしだいに進行しているものと考えられる。また図15,16にみられるように無細胞帯の両外側の歯根膜は、正常に近い像を呈しており、歯根膜の新生がおこったものと思われる。さらに14日間例の遠心側歯頸部では、穿下性骨吸収はますます活発であったが、直接性骨吸収を行う破骨細胞の分布は狭くなっていた(図11,12,17,18)。これは歯槽骨の吸収にともなう圧の解放により破骨細胞の減少がおこったものと思われる。一方、14日間例で変性領域に面した歯槽骨には、浅

部での広範な背部骨吸収が生じており(図14,19)、ここからも今後変性領域の修復は進むものと思われる。

次にこのような14日間例での組織学的変化について、初期荷重の違いから検討すると、図27,28,35,36にみられるように遠心側歯頸部における変性領域の分布は、それぞれの個体で初期荷重の大きい例ほど頬舌的に広く分布していた。また破骨細胞の分布は50g例と100g例に比べ、初期荷重の最も大きい200g例では狭く、しかも歯槽骨内深くにまで及んでおり、14日間でもなお深部での背部骨吸収が活発であった。さらに浅部での背部骨吸収はすべての例で認められたが、これは変性領域の歯槽骨の骨髓側からの修復を示唆するものである。また、近心側根尖部の変性領域は3例でみられたが、残りの100g1例では認められなかった。この例については、変性領域の修復が進み、すでに消失していたものと考えられる。

28日間例では図46,47,56,57にみられるように変性領域と破骨細胞の分布が14日間例と比して著しく異なっており、どの例においても変性領域は顕著に縮小していた。また歯槽骨頂付近に残存することが特徴的であり、これは荷重の多少にかかわらず認められた。これに加えて、それぞれの個体で初期荷重が大きいと、三次元再構築像より歯根膜腔内に変性領域が島状に点在するように残存していた。以上のことは、初期荷重が大きい例では、もともとの変性領域が頬舌的に広範であったため、変性領域の修復に時間を要し、28日間経過後も変性領域は改造されずに残存する傾向が強いものと考えられる。また残存変性組織が島状に点在することより、変性領域の修復は外側からばかりではなく歯槽骨の骨髓側からもおこることが、あらためて示唆された。さらに破骨細胞も14日間例と分布が異なり、遠心側歯頸部では、深部での破骨細胞も含め分布は減少していた。また、近心側根尖部では、それぞれの個体で初期荷重の

大きい例では、残存する変性領域を囲む部位に破骨細胞が分布していたが、変性領域のみられない初期荷重の小さい例では、近心側に幅広い破骨細胞の分布を認めた。これより、この時期で14日間例にみられた破骨細胞の多くは、歯槽骨が大きく吸収されて歯周組織の歪が解放されることで消失していた。しかし近心側根尖部で幅広い分布が見られた例では、歯根膜組織が修復されたのちに傾斜移動により新たに圧が加わり、新しい破骨細胞が出現したものと考えられる。

以上のことを総合的に解釈すると、7日から14日に至る過程で変性領域と破骨細胞の分布は減少し、そのあとおもに浅部での背部骨吸収や穿下性骨吸収が進行するとともに、変性領域は修復され28日間例でみられたようなわずかな残存に至るものと考えられる。また、遠心側歯頸部では、初期荷重が大きい場合にはもともとの変性領域の分布が頬舌方向に広いため、浅部での背部骨吸収がうまく行われなかったものと考えられる（【4】-3）参照）。

これらのことを模型計測の結果とあわせて検討すると、14日間例および28日間例ともに犬歯歯頸部に比して尖頭での移動量は明らかに大きく、傾斜移動の様相を呈していることが確認された。しかし、14日間例では28日間例に比して歯頸部および尖頭での移動量は小さく、おもに歯根膜腔内での移動であったと考えられる。一方、28日間例では14日間例に比して歯頸部および尖頭ともに移動量の増加がみられたが、歯頸部での増加はわずかで4例の間に大きな差はなかった。さらに尖頭については、それぞれの個体で初期荷重の小さい方で移動量が大きかった。これらのことを組織学的に考えると、まず遠心側歯槽骨頂付近では28日間例のどの例においても、変性領域とこれに面する歯槽骨が修復や吸収を受けずに残存していたため、実際の歯頸部での移動量としては大きな変化となつてあらわれなかったと考えられる。しかし、どちらの個体も初期荷重

が小さい方では変性組織の分布は少なく、今後すみやかに歯槽骨が吸収されて歯の移動がおこるものと推察される。つぎに近心側根尖部では、28日間例のそれぞれの個体において初期荷重の大きい方では、変性領域とこれに面する歯槽骨の残存の状態に応じて、破骨細胞の分布はその周囲に限局していた。一方、初期荷重の小さい方では、すでに変性領域は修復され広範に破骨細胞が分布していた。すなわち、この部位での移動量が大きくなるため傾斜の度合いが強くなり、尖頭での移動量が大きくなったものと考えられる。

一方、Reitan⁶⁻⁸⁾は歯の移動に際して変性領域が生じる場合には、Initial periodとSecondary periodという2相があると述べている。この間の移動を行わない時期は、変性領域の修復が行われている時期である。

今回の14日間例では、表2に示すように犬歯の尖頭と歯頸部での移動量に大きな差は認められないが、28日間例では、特に初期荷重の小さい方で大きな差となって現われている。このことは、14日間例ではほとんどの例で、Initial periodとSecondary periodの移行期にあるため、大きな移動が行われていなかったと考えられる。一方、28日間例でも遠心側歯頸部ではどの例についてもまだSecondary periodには至っていないが、近心側根尖部ではそれぞれの個体で初期荷重の小さい方において、すでにSecondary periodに移行していたと考えられる。すなわち同じ歯によっても部位が異なればSecondary periodに移行する時期が異なることを意味する。さらに、すみやかなSecondary periodへの移行を考えると、変性領域の修復が早期に行われる初期荷重の小さい方において、より効率的な歯の移動が行われる可能性のあることが示唆された。また28日間例の遠心側歯頸部において破骨細胞の分布が減少し、わずかに変性領域付近のみになっていたことは、歯槽骨の吸収と歯根膜の新生がおこって、荷重による歯周組織の歪がほとんど解放されたことを意味すると考えら

れる。したがって、矯正力の再荷重の時期については、一般に行われている4週間付近が目安になるとと思われる。

【4】-3) 破骨細胞の出現とその吸収形態について

従来より破骨細胞は歯根膜側からの穿下性骨吸収、これよりさらに外側に出現する直接性骨吸収、および骨髄側からの背部骨吸収が行われる部位に出現するといわれてきた^{1,15,16,43)}。しかし穿下性骨吸収と背部骨吸収に関しては、これらが連続しているときには明確な分類が困難であった。そこで金子は以下に示すようにこれらを分類した。

- (1) 破骨細胞が無細胞帯の外側に接する歯根膜腔内に出現し、穿下性骨吸収を行う部位
- (2) 破骨細胞が(1)の穿下性骨吸収部位よりさらに外側に出現し、直接性骨吸収を行う部位
- (3) 破骨細胞が歯根膜の変性領域に面する歯槽骨内の骨髄腔に出現し、背部骨吸収を行う部位

本実験ではこれらに加えて、すべての14日間の実験例において、歯根膜変性領域に面した骨髄腔の歯根膜開口部で生じると考えられる特徴的な吸収像を認めた。すなわち連続切片の観察からこの部位は、穿下性骨吸収や歯槽骨内深部での背部骨吸収との直接的な連絡はなく、これらの領域と明確に独立して存在していた。Reitan⁹⁾は歯槽骨表面に存在する陥入部をlayer separated by open cleftとして観察し、この部位から歯槽骨の吸収が生じやすいと述べている。また中村³²⁾はこの部位に、歯槽動脈の分枝を認めている。本実験による連続切片の観察から、このような部位は、ネコではそのほとんどが骨髄腔の開口部であることがわかった。さらに、このような骨髄腔開口部付近に生じる吸収は、同一個体で7日間例に比べ14日間例でより広範であった(図13,14)。三次元再構築像においても、歯根膜の変性領域に面する歯槽骨の吸収は7日間例に比べ14日間例ではより広い範囲に及んでいることがわかった(図19)。さらに

歯槽頂付近を見ると、ほとんどの部位で骨髓腔開口部が存在せずこの吸収形態が認められなかった(図11,12,19)。本研究ではこのような歯根膜腔から直接開始しない吸収形態を穿下性骨吸収や深部での背部骨吸収とは区別して、浅部での背部骨吸収と呼ぶことにした。この吸収形態によって、前節の【4】-2)で述べた様な歯根膜の変性領域およびそれに面する歯槽骨の残存を説明することができる。すなわち本実験の28日間例では、すべての荷重条件において、歯槽骨頂付近に変性領域および歯槽骨が残存していたが、この部位では骨髓腔開口部がほとんど認められないことより浅部での背部骨吸収が起こらず、歯槽骨の吸収は、変性領域の外側から生じる穿下性骨吸収によってのみ行われたことが考えられる。また初期荷重の大きい28日間例において、歯槽骨頂付近以外に、やや舌側よりに残存していた変性領域および歯槽骨についても同じように説明することができる。すなわち、初期荷重が大きい場合に変性領域は頬舌的に拡大するが、その周辺部ではそれほど骨髓腔開口部が多くないことより、浅部での背部骨吸収が起こりにくかったことが考えられる(図58-a,b)。

この吸収形態は変性領域とそれに面する歯槽骨の吸収およびその部の歯根膜の修復機転を考える上で、きわめて重要なものであると考えられる。しかしながら、この吸収形態は骨髓腔開口部が存在するかどうかといった解剖学的な特性に大きく依存するため、個体によりさらには同一個体によっても部位により出現の様相に差異が生じやすいものと推察される。したがって、歯の移動における個体差を生じる一つの大きな要因になるものと考えられる。

以上のことより破骨細胞の出現部位とこれによっておきる吸収形態には、金子の報告による分類をさらに検討した結果、以下の4種類があると考え(図59)。

- (1) 破骨細胞が無細胞帯の外側に接する歯根膜腔内に出現し、穿下性骨吸収を行う部位
- (2) 破骨細胞が(1)の穿下性骨吸収部位よりさらに外側に出現し、直接性骨吸収を行う部位
- (3) 破骨細胞が歯根膜の変性領域に面する歯槽骨内で骨髓腔開口部に近接して出現し、浅部での背部骨吸収を行う部位
- (4) 破骨細胞が歯根膜の変性領域に面する歯槽骨内深くの骨髓腔に出現し、深部での背部骨吸収を行う部位

【4】-4) 歯根膜変性領域と破骨細胞の出現部位について

破骨細胞の起源については間葉系細胞由来説^{44,45)}、造血幹細胞由来説⁴⁶⁻⁵⁰⁾がある。現在一般的にひろく認められているものは、後者の造血幹細胞由来説であるが、前駆細胞から破骨細胞への分化過程に関しては、単球やマクロファージの融合による⁵¹⁾、あるいは他の系の幹細胞が前駆細胞である⁵²⁾などの説があって確定的なものはない。しかし、いずれにしろ血中に破骨細胞へ分化する能力を有する細胞が存在するという考えに基づけば、吸収の開始部位と血管の分布との関連を考えることは重要である。一般に歯根膜が圧縮されると血流が途絶えることが報告されている^{32,53,54)}。中村³²⁾はネコを使って、血管内墨汁注入標本により圧迫側歯根膜内に貧血帯を認め、その同一部位をヘマトキシリン-エオジン染色で観察し、この領域に血管の血栓や圧縮閉鎖が生じていると述べている。これらより歯槽骨吸収に際して出現する破骨細胞については、歯根膜の圧縮にともない血管が閉鎖している部位と変性領域の分布との関係を考えることが重要になる。

本研究では、破骨細胞の出現部位と歯槽骨の吸収形態を前節の【4】-3)に論じたように4種類に分類した。このうち穿下性骨吸収、直接性骨吸収を行う破骨細胞は、すでに金子²²⁾が報告したように無細胞帯に隣接した歯根膜中で見られる。この部位は、血管が閉鎖されておらず、なおかつ適度な圧が組織に加わっている部位と考えられる。歯の移動に伴って、歯根が歯槽骨に押しつけられる時、歯根膜の圧縮は一様ではないと推測される。すなわち図60-aに示すように、歯根膜内での圧が、最も大きいと考えられる領域は内変性帯であり、これより少し外側では圧がやや小さくなることが推察され、この部位が無細胞帯に一致するものと考えられる。この時両領域では、圧が大きいために血管は圧縮閉鎖され

血流がとだえており、破骨細胞が歯根膜内に出現することはない。しかしこれよりもさらに外側では加わる圧が弱くなり、血流が維持される。そして、この部位における圧は、前駆細胞が破骨細胞に分化するための刺激として働くことが推察される。一方、歯槽骨内浅部での背部骨吸収を行う破骨細胞については以下のように説明することができる。内変性帯の存在する領域での骨髓腔開口部(図10)では、正常な骨髓組織と内変性帯との間に狭い無細胞帯が認められた。そして、この狭い無細胞帯に近接して骨髓腔内側部に破骨細胞が出現していた。この領域では図60-bに示すように、歯根膜腔内での内変性帯、無細胞帯、正常歯根膜という圧の減少にともなう組織の配列と同様に、内変性帯、無細胞帯、正常骨髓組織という配列があるものと推察される。すなわちこの領域では、内変性帯から骨髓腔内へ向かうに従って、圧が急激に減少しているものと考えられる。そのため内変性帯から少し離れた開口部付近で、血管は閉鎖されずに、なおかつ適度な圧刺激を受ける部位が存在し、この部位で破骨細胞の出現が認められたものと思われる。つまり、この浅部での背部骨吸収を行う破骨細胞は、穿下性骨吸収を行う破骨細胞と同様に、歯根膜に生じる圧に応じて出現したものと考えられる。

【4】-5) 歯槽骨への応力分布と深部での背部骨吸収を行う破骨細胞の分布について

以上のことより、穿下性骨吸収、直接性骨吸収および歯槽骨内浅部での背部骨吸収を行う破骨細胞の出現については、いずれも変性領域に隣接する歯根膜または骨髓組織の状態、特にその部位で血管が閉鎖されず、破骨細胞の分化に必要な適度の刺激が維持されているかどうかによるものと考えられる。しかし、深部での背部骨吸収を行う破骨細胞については、出現部位が歯根膜変性領域から遠く離れた骨髓腔内であるため、状況が全く異なるものと考えられる。そこでまず深部での背部骨吸収を行う破骨細胞の三次元的な分布に関して、これらが比較的明瞭に観察されしかも初期変化に近い様相を呈する14日間例の三次元再構築像を用いて検討した。図61-a,bは同一個体における50g例と100g例、ならびに100g例と200g例の遠心側歯頸部の変性領域に面する歯槽壁（緑色）と背部骨吸収を行う破骨細胞（赤色）の分布を示したものである。また、図62-a,bはこれを説明したものである。これより、どちらの個体においても、初期荷重の大きいものほど背部骨吸収を行う破骨細胞の分布は、より深部にまで及んでいることが認められた。

一方、歯に加えた矯正力の伝達に関して、歯根膜においては、組織学的にその圧縮に伴う種々の所見が観察されるが、歯槽骨内においては圧の分布を直接的に示す所見は得られない。これについては近年矯正力により歯および歯周組織に生じる応力の分布を有限要素法を用いて解析する試みがなされている⁵⁵⁻⁵⁷⁾。そこで、深部での背部骨吸収を行う破骨細胞の出現について、その三次元的な分布と三次元有限要素法による初期応力分布との関連につき検討を行った。

三次元有限要素法解析に必要なモデルの構築にあたっては、対照歯で

ある上顎犬歯の組織切片から図63-aに示すようなトレース図を作成し、これをもとに図63-bに示すような二次元的な要素分割を行い、さらにこれらを長軸方向に沿って三次元的に構築した。その結果、解析モデルは、総節点数1354個、総要素数1083個の個体要素から構成された。なお物性定数は、表3に示すように丹根⁵⁷⁾の値を参考に設定し、また境界条件として、モデルの根尖付近の歯槽骨を139点で完全拘束した。さらに荷重条件として、50g、100g、200gの荷重を歯冠遠心中央から遠心方向に負荷し、生じる応力の分布の検討を行った。なお、解析にあたっては、プログラムCOSMOS/M(SRA社)を用いた。

図64に、それぞれ50g、100g、200gの荷重条件により解析を行った結果を示す。いずれも歯頸部から2.4mm根尖側よりの部位を表示したものである。応力は最小主応力分布で示しており、赤色の分布になるほど、大きな圧縮応力が生じていることをあらわす。これより50g以上の荷重で遠心側歯頸部歯槽骨に $9E-4\text{kgf/mm}^2$ の圧縮応力が生じたことが示され、さらに比較的大きな応力の分布は、50、100、200gと荷重条件が大きくなるにつれて、歯槽骨内深部にまで及んでいることがわかった。

以上より、歯に加えられた荷重は歯根膜から歯槽骨へと広く伝達していることが確認され、また背部骨吸収を行う破骨細胞の分布は、初期荷重が大きいものほど、遠心側で深部にまで分布しており圧縮応力の分布と同様の傾向を示すことがわかった。

従来より、骨内に生じた応力は骨のたわみ、あるいは変形として表現されており⁵⁸⁾、また圧刺激を受けた骨組織の改造の機序については、piezo電気あるいは流動電位の発生⁵⁹⁻⁶¹⁾、組織内酸素供給の変化⁶²⁾、Caイオンの活性の変化⁶³⁾などに基づいた説明がみられる。今回の結果からは深部での背部骨吸収を行う破骨細胞の出現は、歯槽骨に生じる応力に、深く依存しているものと考えられる。すなわち歯に荷重を加えた際生じ

る生体の歪を解放するための一連の組織学的反応が、歯根膜領域ばかりでなく、歯槽骨内深部の領域にも活発に行われていると考えられる。

今後さらに詳細な検討のためには、骨髓腔を含んだ解剖学的形態の基礎データを十分に蓄積し、また経時的な生体の変化に対応したネコおよびヒトの物性定数についても検討を行い、生体により高い等価性を持つ解析モデルの作成を行う必要があるものと考えられる。

【4】 -6) 歯根吸収について

歯根吸収については、古くから報告があり³⁾、一般に大きな荷重を加えたものほど⁶⁴⁻⁶⁶⁾また作用期間が長期間のものほど⁶⁷⁾おこりやすいとされている。また、歯根の吸収は歯根膜の変性部位の周囲で活発に認められると言われている^{8,68,69)}。

本研究の実験期間中に生じた歯根の吸収は、28日間の200g例で、遠心側歯頸部の舌側よりに島状に残存する変性領域に外接して、穿下性骨吸収に相対するように歯根象牙質におよぶ吸収がみられた。したがって、変性領域が残存しやすい初期荷重の大きい例では、歯根吸収も起こりやすいものと考えられる。一方近心側根尖部について検討を行うと、28日間の50g例と100g例においても、近心側根尖部で直接性骨吸収が活発に行われている部位に相対して、セメント質に破歯細胞が出現していた。このことより荷重が小さい例でも作用期間が長くなると歯根吸収が生じるものと考えられる。ただし、200g例の遠心側歯頸部で見られたような深い吸収窩は認められなかったことより、吸収の開始時期は遅れるものと思われる。一般に歯根の側面に生じる歯根吸収は、セメント質の沈着などにより修復されると言われているが^{70,71)}、歯の移動に際して組織の侵襲を少なくすることを考えれば、深い吸収窩を認めた200g例では歯の移動の荷重が大きすぎたと考えられる。

【5】 結 論

本研究では、ネコの上顎犬歯を用いた矯正的歯の移動実験において、矯正力の作用期間を14日間、28日間と延長し、圧迫側歯周組織の変化について、特に組織の修復の観点から三次元的かつ経時的にとらえることを目的して実験を行った。その結果、以下の知見を得た。

1. 7日から14日に至る過程において、変性領域の分布は三次元的に縮小しており、すでに修復機転が進行しているものと思われた。14日間例では、変性領域に面する歯槽骨に活発な吸収を認め、また一部で歯根膜の新生がみられた。
2. 14日から28日に至る過程において、変性領域の分布はさらに縮小していたが、遠心側歯頸部歯槽骨頂付近には依然残存していた。
 - (1) それぞれの個体において、初期荷重の大きい例では、変性領域は、歯槽骨頂付近よりやや根尖側よりの舌側面にも島状に点在して残存しており、さらに近心側根尖部にも残存していた。破骨細胞はこれらの変性領域付近にのみ認められた。
 - (2) それぞれの個体において初期荷重の小さい例では、変性領域は遠心側歯頸部歯槽骨頂付近にのみ認められた。破骨細胞は、近心側根尖部から近心側歯頸部まで幅広く分布し、傾斜移動が開始しているものと思われた。
3. 破骨細胞の出現部位とこれによっておきる吸収形態には、金子の報告による分類をさらに検討した結果、以下の4種類があると考えられた。

- (1) 破骨細胞が無細胞帯の外側に接する歯根膜腔内に出現し、穿下性骨吸収を行う部位
- (2) 破骨細胞が(1)の穿下性骨吸収部位よりさらに外側に出現し、直接性骨吸収を行う部位
- (3) 破骨細胞が歯根膜の変性領域に面する歯槽骨内で骨髓腔開口部に近接して出現し、浅部での背部骨吸収を行う部位
- (4) 破骨細胞が歯根膜の変性領域に面する歯槽骨内深くの骨髓腔に出現し、深部での背部骨吸収を行う部位

4. 歯槽骨内浅部での背部骨吸収を行う破骨細胞は、穿下性骨吸収を行う破骨細胞と同様に、歯根膜に生じる圧に対応して出現したものと考えられた。

5. 三次元有限要素法を用いた解析から、歯槽骨内深部での背部骨吸収を行う破骨細胞の出現は、歯槽骨に分布する応力に深く依存しているものと考えられた。

謝 辞

稿を終えるに臨み、終始、ご懇篤なるご指導、ご校閲を賜りました北海道大学歯学部歯科矯正学講座中村進治教授ならびに多大なるご指導とご教示を賜りました口腔解剖学第二講座脇田稔教授に深甚なる感謝の意を表します。また、終始、ご助言、ご指導を賜りました工学部生体システム工学講座山本克之教授ならびにX線写真撮影に際し快く協力して下さった歯科放射線学講座山崎岐男教授をはじめ、歯科放射線学講座の教室員各位に心から感謝いたします。さらに、本研究の遂行に際し、種々のご指導をいただきました金子知生助手ならびに友近晃助手に深く感謝いたします。さらに、種々のご協力をいただいた大学院上野拓郎氏、高橋直行氏ならびに山方秀一氏に深く感謝をいたしますと共に歯科矯正学講座および口腔解剖学第二講座の教室員各位に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) Sandstedt, C.: Einige Beiträge zur Theorie der Zahnregulierung, Nord. Tandiläkere Tidssker, Ht. 1,2,4, 1904.
- 2) Schwarz, A. M.: Tissue changes incident to tooth movement, Int. Orthod. Cong. 18: 331, 1932.
- 3) Oppenheima, A.: A possibility for physiologic orthodontic movement, Am. J. Orthod. and Oral Surg. 30: 277-345, 1944.
- 4) Waldo, C. M.: Method for the study of tissue response to tooth movement, J. D. Res. 32: 690-691, 1953.
- 5) Macapanpan, L. C., Weinemann, J. P. and Brondie, A. G.: Early tissue changes following tooth movement in rats, Angle Orthod. 24: 79-95, 1954.
- 6) Reitan, K.: Some factors determining the evaluation of forces in orthodontics, Am. J. Orthod. 43: 32-45, 1957.
- 7) Reitan, K.: Tissue behavior during orthodontic tooth movement, Am. J. Orthod. 46: 881-900, 1960.
- 8) Reitan, K.: Bone formation and resorption during reversed tooth movement, In vistas in Orthodontics, ed. by Kraus B. S. and Riedel R. A. Philadelphia, Lea and Febiger, 69-84, 1962.
- 9) Reitan, K.: Effects of force magnitude and direction of tooth movement on different alveolar bone types, Angle Orthod. 34: 244-255, 1964.
- 10) Reitan, K.: Clinical and histologic observations on tooth movement during and after orthodontic treatment, Am. J. Orthod. 53: 721-745, 1967.
- 11) Reitan, K. and Kvam, E.: Comparative behavior of human and animal tissue during experimental tooth movement, Angle Orthod.

- 41: 1-14, 1971.
- 12) Azuma, M.: Study on histologic changes of periodontal membrane incident to experimental tooth movement, *Bull. Tokyo Med. Dent. Univ.* 17: 149-178, 1970.
 - 13) 古賀正忠: 人為的歯牙移動時の組織変化に関する研究, 光顕微鏡および電子顕微鏡による観察, *歯科学報* 74: 498-557, 1974.
 - 14) 市之川正孝: 人為的歯牙移動時の組織変化に関する研究, 酢酸鉛時刻描記法による光顕および電顕的観察, *歯科学報* 75: 1435-1472, 1975.
 - 15) 奥村英治: 硝子様変性組織の吸収過程に出現する多核性巨細胞の光学顕微鏡的および電子顕微鏡的研究, *日矯歯誌* 41: 531-555, 1982.
 - 16) 風間富雄: 間歇的な矯正力による圧迫側歯根膜の電子顕微鏡的研究, *鶴見大学* 15: 87-108, 1989.
 - 17) 馬場則男, 金谷光一: コンピュータグラフィックスによる連続切片像からの立体像再構築, *細胞* 20: 24-29, 1988.
 - 18) 南郷脩史, 三次元モデル構築システム「TRI」, *細胞* 20: 36-39, 1988.
 - 19) 今村雅郎: 人為的歯牙移動時の組織変化に関する研究, コンピュータ・グラフィックスを応用した連続切片像3次元再構築法による検討, *歯科学報* 86: 1319-1353, 1986.
 - 20) Domon, T., Wakita, M.: Electron microscope study of osteoclasts with special reference to the three-dimensional structure of the ruffled border, *Arch. Histol. Jap.* 49: 593-602, 1986.
 - 21) Domon, T., Wakita, M.: Electron microscopic and histochemical studies of the mononuclear osteoclast of the mouse, *Am. J. Anat.* 192: 35-44, 1991.
 - 22) 金子知生: 歯に矯正力を加えた際の圧迫側歯周組織の三次元的様相について
 - 23) Rychlo, P. U.: *Zb. Path.* 98: 252, 1952.
 - 24) Zwarych, P. D., Quigley, M.B.: The intermediate plexus of the periodontal ligament; history and further observations, *J. Dent. Res.*, 44: 383-391, 1965.
 - 25) Epker, B. S., Frost, H. M.: Correlation of bone resorption and formation with the physical behavior of loaded bone, *J. Dent. Res.* 44: 33-41, 1965.
 - 26) Rygh, P.: Ultrastructural cellular reactions in pressure zone of rat molar periodontium incident to orthodontic tooth movement, *Acta Odontol. Scand.* 30: 575-593, 1972.
 - 27) Rygh, P.: Ultrastructural changes of the periodontal fibers and their attachment in rat molar periodontium incident to orthodontic tooth movement, *Scand. J. Dent. Res.* 81: 467-480, 1973.
 - 28) Rygh, P.: Elimination of hyalinized periodontal tissues associated with orthodontic tooth movement, *Scand. J. Dent. Res.* 82: 57-73, 1974.
 - 29) 戒田清和: 間歇的な矯正力による歯の移動を行った際の歯根膜組織における組織学的変化, *鶴見歯学* 14: 207-226, 1988.
 - 30) Debbane, E. F.: A cephalometric and histologic study of the effect of orthodontic expansion of the midpalatal suture of the cat, *Am. J. Orthod.* 44: 187, 1958.
 - 31) Uteley, R. K.: The activity of alveolar bone incident to orthodontic tooth movement as studied by oxytetracycline-induced fluorescence, *Am. J. Orthod.* 54: 167-201, 1968.
 - 32) 中村進治: 歯根膜血管走向の矯正学的研究, 第2報 矯正装置の圧力に対する圧迫側歯根膜血管の反応, *口病誌* 34: 64-80, 1967.
 - 33) Noda, K., et al.: Three dimensional structure multinucleated giant

- cell "osteoclast", *Jpn. J. Oral Biol.* 25: 814-818, 1983.
- 34) Hirashita, A., et al.: Reconstruction of the three-dimensional structure of multinucleated giant cells incidental to experimental tooth movement, *Tsurumi Univ. Dent.* 12: 1-13, 1986.
- 35) 中村芳樹, 平下斐雄, 桑原洋助: 正常歯根膜および実験的歯の移動の際の歯根膜の走査型電子顕微鏡的研究, *日矯歯誌* 39: 194-207, 1980.
- 36) 松尾雅斗, 岸好彰, 高橋和人: 歯の移動時における骨吸収と血管像, 血管鑄型と走査電顕による研究, *日矯正歯誌* 46: 217-229, 1987.
- 37) 細山勝道: 歯の移動時における歯根膜の血管変化に関する研究, *日矯歯誌* 48: 425-442, 1989.
- 38) Ooë T.: On the development of position of the tooth germs in the human deciduous front teeth, *Folia Anat. Jpn.*, 28: 317-370, 1956.
- 39) Ooë T.: On the early development of human dental laminadeciduous front teeth, *Folia Anat. Jpn.* 30: 197-210, 1957.
- 40) Ooë T.: On the development of position of the tooth germs in the human deciduous molar teeth, *Folia Anat. Jpn.* 32: 98-108, 1959.
- 41) Ooë T.: A study of the ontogenetic origin of human permanent tooth germs, *Folia Anat. Jpn.* 40: 429-437, 1965.
- 42) 武内真利: 歯の移動に関する実験的研究, 単相刺激による歯周組織の組織学的研究, *口病誌* 46: 293-305, 1979.
- 43) Anthony, A.: Force-induced changes in the vascularity of the periodontal ligament, *Am. J. Orthod.* 55: 5-11, 1969.
- 44) Tonna, E. A.: *Anat. Rec.*, 137: 251-270, 1960.
- 45) Rasmussen, H., Bordier, P.: The physiological and cellular basis of metabolic bone disease. Williams & Wilkins, Baltimore, 1974.
- 46) Fischman, D. A., Hay, E. D.: *Anat. Rec.*, 143: 329-337, 1962.
- 47) Walker, D. G.: *J. Exp. Med.*, 142: 651-663, 1975.
- 48) Buring, K.: *Clin. Orthop. Relat. Res.*, 110:293-302, 1975.
- 49) Chambers, T. J. and Mangus, C. J.: Calcitonin alters behavior of isolated osteoclasts, *J. Pathol.* 136: 27-39, 1982.
- 50) Kurihara, N. et al.: *Calcif. Tissue Int.*, 42: (abstr. 27), 1988.
- 51) Nijweide, P. J., Burger, E. H., Feyen, J. H. M.: *Physiol. Rev.*, 66:855-886, 1986.
- 52) Horton, M. A., Rimmer, E. F., Moore, A. and Chambers, T. J.: On the origin of osteoclast: the cell surface phenotype of rodent osteoclasts, *Calcif. Tiss. Int.* 37: 46-50, 1985.
- 53) 倉島晃一: 歯周組織の力学的性状に関する研究 (特に歯根膜および歯槽骨について), *口病誌* 30: 361-385, 1963.
- 54) 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.
- 55) 丹根一夫, 作田 守, 堤 定美: 歯に外力を加えた場合の歯牙・歯根膜・歯槽骨の応力分布について—有限要素法による2次元弾性解析— *日矯歯誌* 37:103, 1978.
- 56) 丹根一夫, 作田 守: 歯に外力を加えた場合の歯・歯根膜・歯槽骨に生ずる応力・変位に関する数値解析—アイソパラメトリック有限要素法による3次元弾性解析 *日矯歯誌* 38: 91,1979.
- 57) 丹根一夫, 作田 守: 歯および歯周組織に生ずる応力の力学的解析—数値解析法としての有限要素法の利用について— *日矯歯誌* 38: 372-382, 1979.
- 58) 日本機械学会編, バイオメカニクスシリーズ 生体力学 1991.
- 59) Erikson, C.: Electrical properties of bone.: The biochemistry and physiology of bone IV, ed. Bourne, G. H., New York, Academic

Press, 329-384, 1971.

- 60) 鈴木弘之：微小電流による骨誘導に関する実験的研究，九州歯会誌 29:399-416, 1976.
- 61) Fukada, E.: Electrical phenomena in biorheology, *Biorheology* 19: 15-27, 1982.
- 62) Bassett, C. A. L. and Herrmann, I.: Influence of oxygen concentration and mechanical factors on differentiation of connective tissues in vitro, *Nature (Lond.)* 193: 460-461, 1961.
- 63) Justus, R. and Luft, J. H.: A mechanochemical hypothesis for bone remodeling induced by mechanical stress, *Calcif Tiss Res* 5: 222-235, 1970.
- 64) King, G. J. and Fischlschweiger, W.: The effect of force magnitude on extractable bone resorptive activity and cemental cratering in orthodontic tooth movement, *J. Dent. Res.* 61: 775-779, 1982.
- 65) 脇本康雄：実験的歯の移動を行ったラット臼歯歯根吸収の走査型電子顕微鏡による観察，日矯歯誌 45: 618-637, 1986.
- 66) 桐野靖子：超弾性力による歯の移動実験，日矯歯誌 50: 315-324, 1991.
- 67) Henry, J. L. and Weinmann, J. P.: The pattern of resorption and repair of human cementum, *J. Am. Dent. Assoc.* 42: 270-290, 1951.
- 68) Kvam, E.: A study of the cell-free zone following experimental tooth movement in the rat, *Trans. Eur. Orthod. Soc.* 45: 419-434, 1969.
- 69) Rygh, P.: Orthodontic root resorption studied by electron microscopy, *Angle Orthod.* 47: 1-16, 1977.
- 70) Langford, S. R. and Sims, M. R.: Root surface resorption, repair, and periodontal attachment following rapid maxillary expansion in

man, *Am. J. Orthod.* 81: 108-115, 1982.

- 71) Reitan, K.: Root resorption: Orthodontics, current principles and techniques, ed. Graber, T. M. and Swain, B. F., St. Louis, C. V. Mosby Co., 170-182, 1985.

図 表

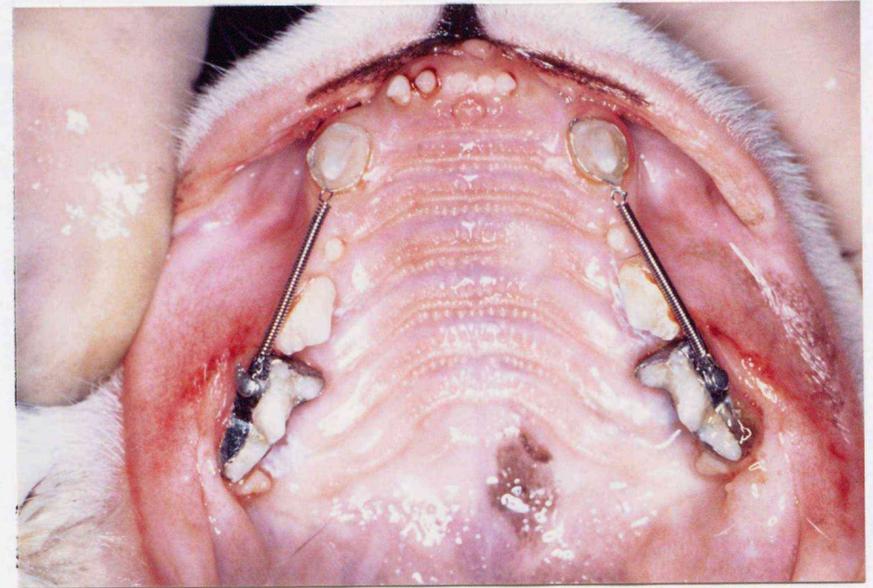


図1-a 実験装置（咬合面観）

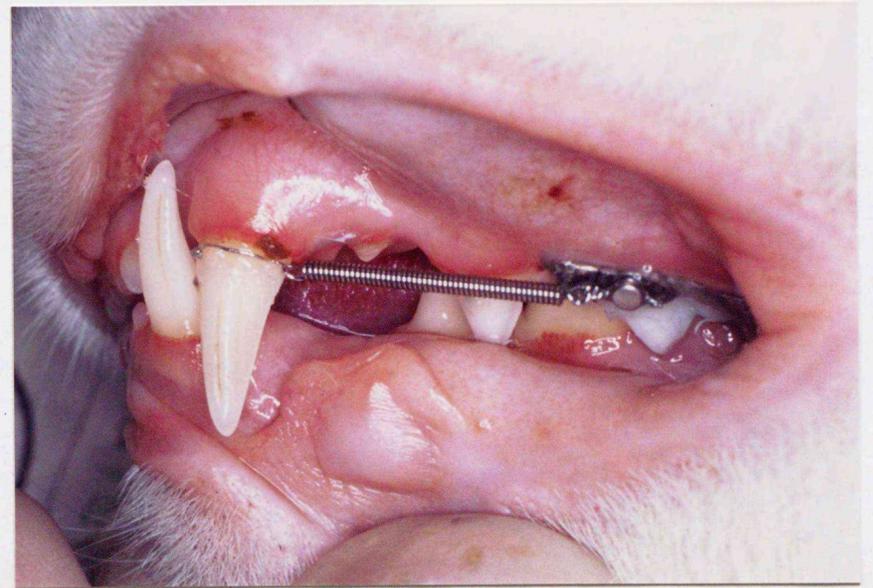
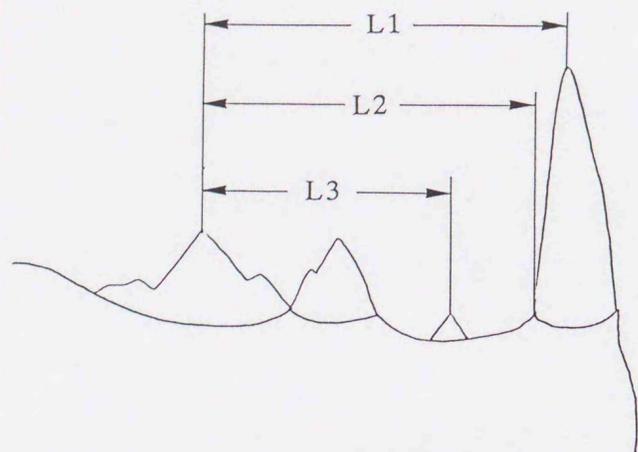


図1-b 実験装置（側面観）



L1, L2, L3 : 実験前
L1', L2', L3' : 実験後

荷重が加わっていない第一前臼歯を基準とし犬歯の尖頭および歯頸部における移動量を計測した。この場合、犬歯-第一前臼歯間の距離は小さく計測が困難であるため、犬歯尖頭-第三前臼歯咬頭頂間距離 (L1)、解剖学的歯頸部最遠心点-第三前臼歯咬頭頂間距離 (L2)、第一前臼歯咬頭頂-第三前臼歯咬頭頂間距離 (L3) の三者を用いて算出した。

$$\text{犬歯尖頭移動量} = (L1 - L3) - (L1' - L3')$$

$$\text{犬歯歯頸部移動量} = (L2 - L3) - (L2' - L3')$$

図2 実験前後の実験歯の移動距離の測定法



図3 ネコA 対照歯：歯頸部横断切片顕微鏡像 (×3.75)



図4 ネコA 実験歯 100g14日間例：歯頸部横断切片顕微鏡像 (×3.75)

対照歯では、歯根膜腔の幅は均一かもしくは近心側が遠心側よりやや狭い傾向を示した。実験歯では、遠心側で狭くなっており近心側では歯槽骨の形成がみられた。
B：頬側、L：舌側、M：近心側、D：遠心側、b：歯槽骨、r：歯根、P：歯根膜腔
bm：骨髓腔

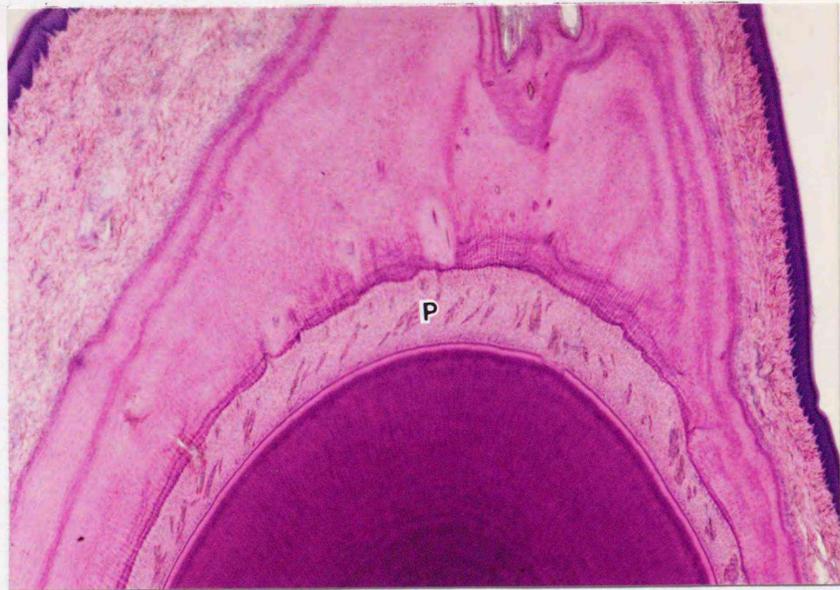


図5 ネコA 対照歯：遠心側歯頸部歯槽骨頂付近の顕微鏡像（×10）

歯槽骨内にはハバース管を認めるのみで広い骨髓腔はみられず、骨髓腔から歯根膜腔に向かう開口部もほとんど認められなかった。

P：歯根膜腔

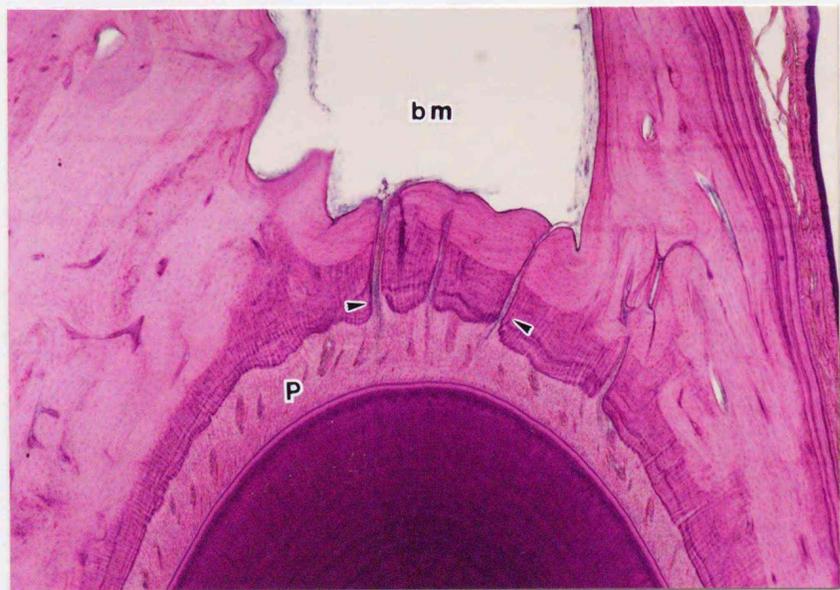


図6 ネコA 対照歯：図5よりやや根尖側よりの顕微鏡像（×10）

歯槽骨内に広い骨髓腔がみられ、ここから歯根膜腔へ向かう開口部が認められた。しかし頬側と舌側にはほとんど認められなかった。

P：歯根膜腔、bm：骨髓腔、▲：骨髓腔開口部

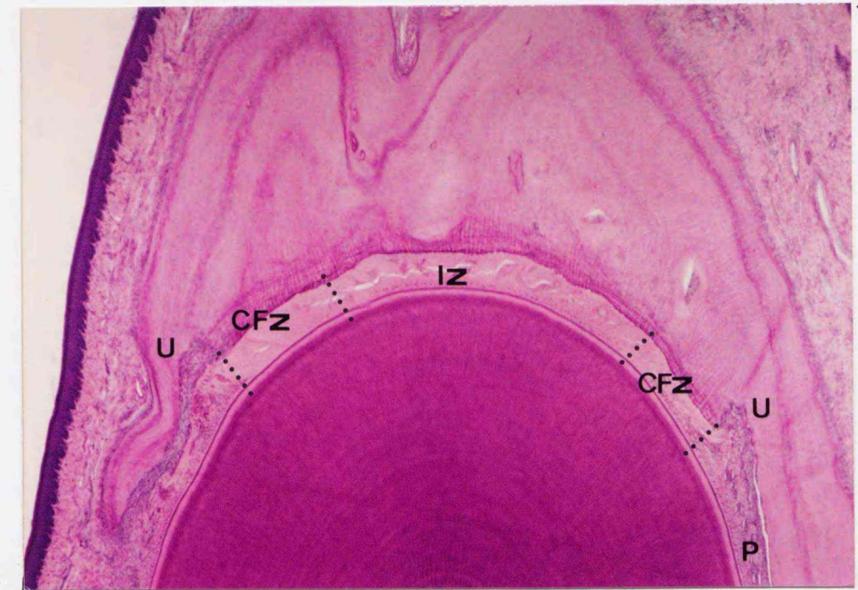


図7 ネコA 実験歯 100g14日間例：遠心側歯頸部歯槽骨頂付近の顕微鏡像（×10）

圧縮された歯根膜腔内に内変性帯がみられ、これをはさむように無細胞帯が認められた。この無細胞帯の外側には穿下性骨吸収が認められた。骨髓腔開口部は観察されなかった。

P：歯根膜腔、IZ：内変性帯、CFZ：無細胞帯、U：穿下性骨吸収

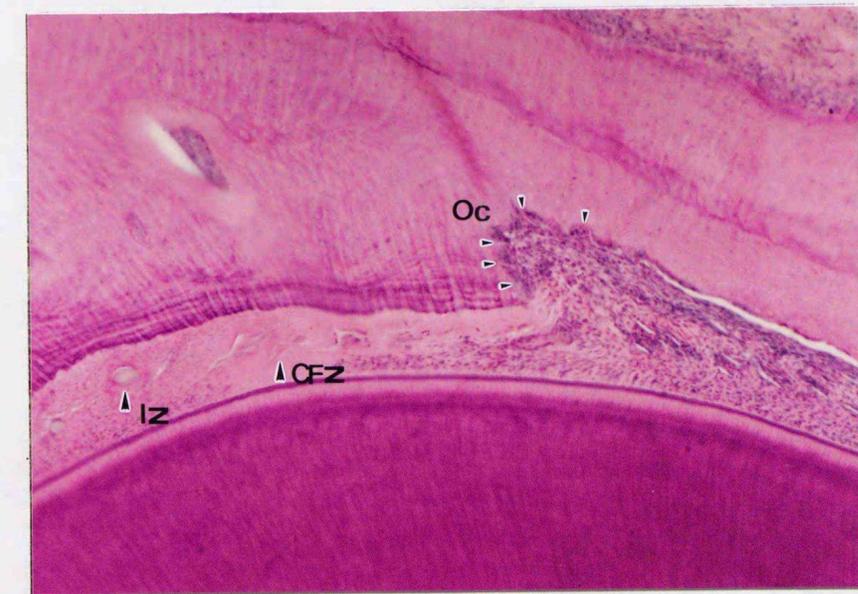


図8 ネコA 実験歯 100g14日間例：穿下性骨吸収を示す顕微鏡像（×25）

無細胞帯の外側に穿下性骨吸収がみられ、吸収窩内にはいくつかの破骨細胞が存在していた。また内変性帯と無細胞帯にみられる血管は閉塞していた。

IZ：内変性帯、CFZ：無細胞帯、Oc：破骨細胞、▲：閉塞した血管

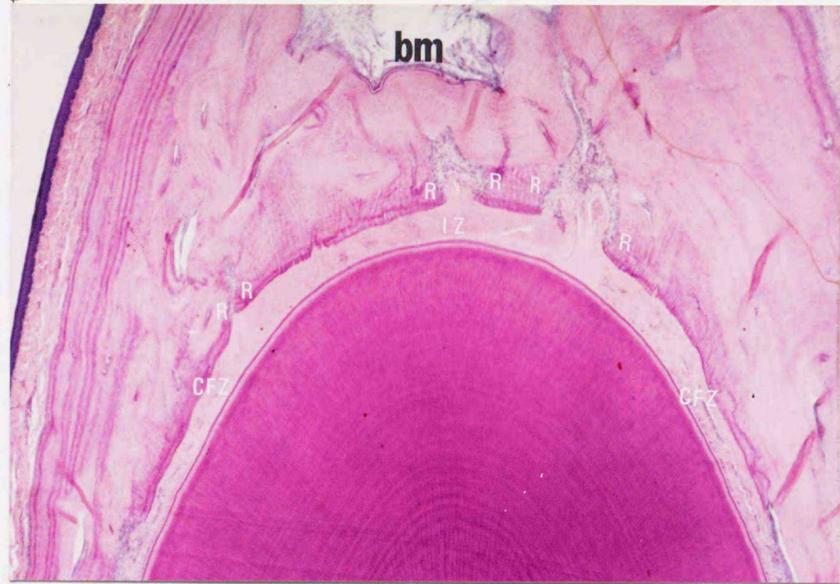


図9 ネコA 実験歯 100g14日間例：図7よりやや根尖側よりの顕微鏡像（×10）

歯槽骨内に広い骨髓腔がみられ、内変性帯と無細胞帯からなる変性領域に面した歯槽骨に浅部での背部骨吸収が認められた。

bm：骨髓腔、IZ：内変性帯、CFZ：無細胞帯、R：浅部での背部骨吸収

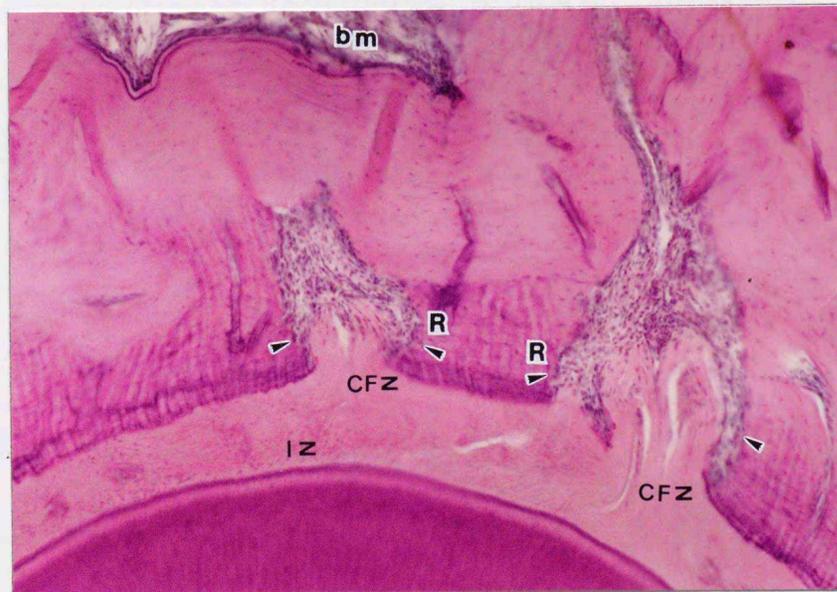


図10 ネコA 実験歯 100g14日間例：浅部での背部骨吸収を示す顕微鏡像（×25）

内変性帯に隣接して無細胞帯がみられた。さらに無細胞帯に近接して数個の破骨細胞の存在する吸収窩が観察された。

bm：骨髓腔、IZ：内変性帯、CFZ：無細胞帯、R：浅部での背部骨吸収、▲：破骨細胞

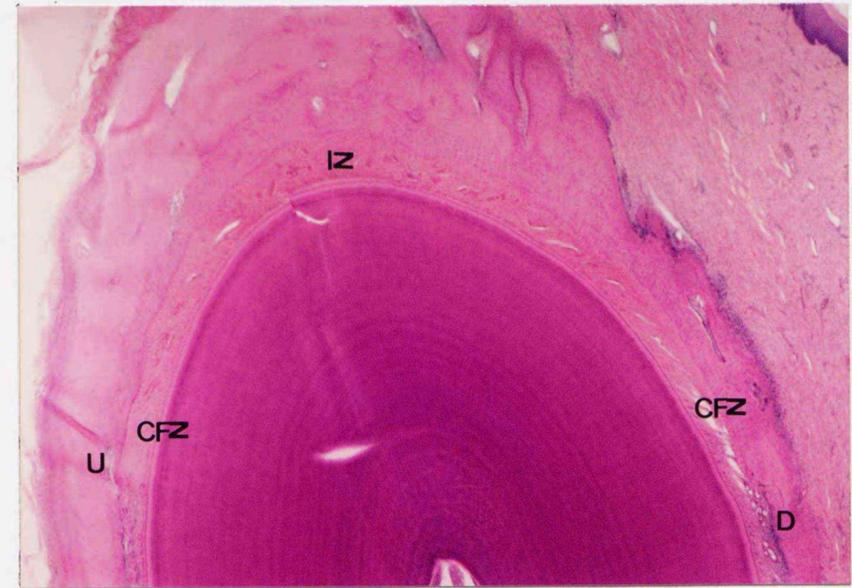


図11 ネコB 100g7日間例：遠心側歯頸部歯槽骨頂付近の顕微鏡像（×10）

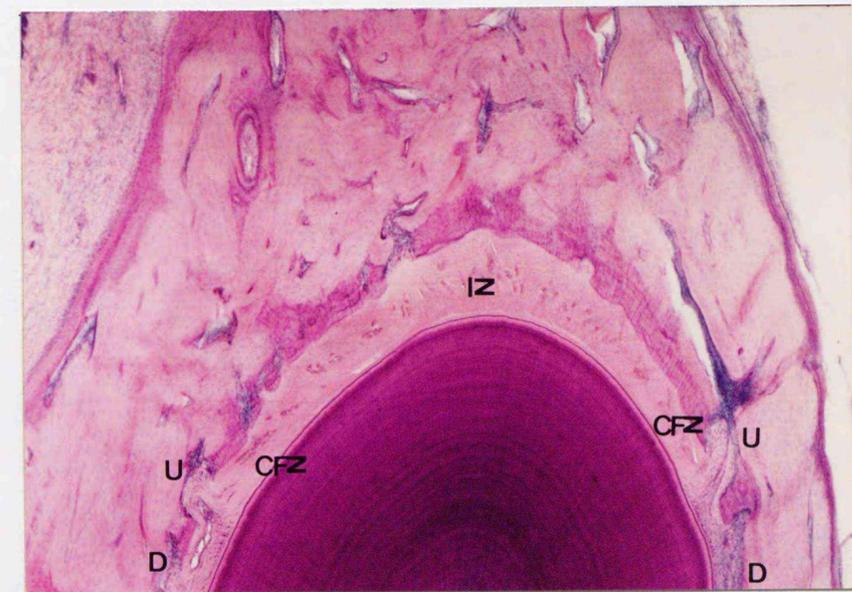


図12 ネコB 100g14日間例：遠心側歯頸部歯槽骨頂付近の顕微鏡像（×10）

両例ともに内変性帯および無細胞帯が認められた。正常歯根膜部位との境界付近に穿下性骨吸収または直接性骨吸収が認められた。歯槽骨内に広い骨髓腔はみられなかった。

IZ：内変性帯、CFZ：無細胞帯、D：直接性骨吸収、U：穿下性骨吸収

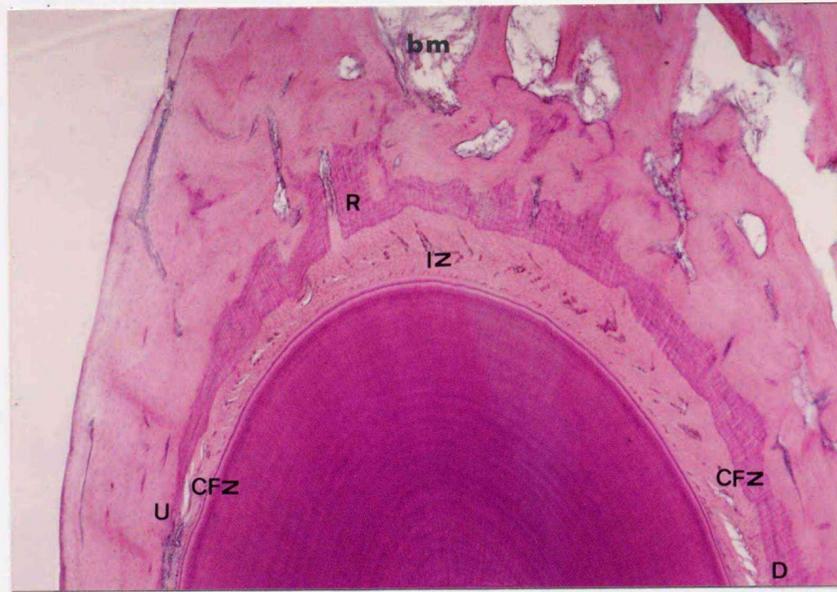


図13 ネコB 100g7日間例：図11よりやや根尖側よりの顕微鏡像（×10）

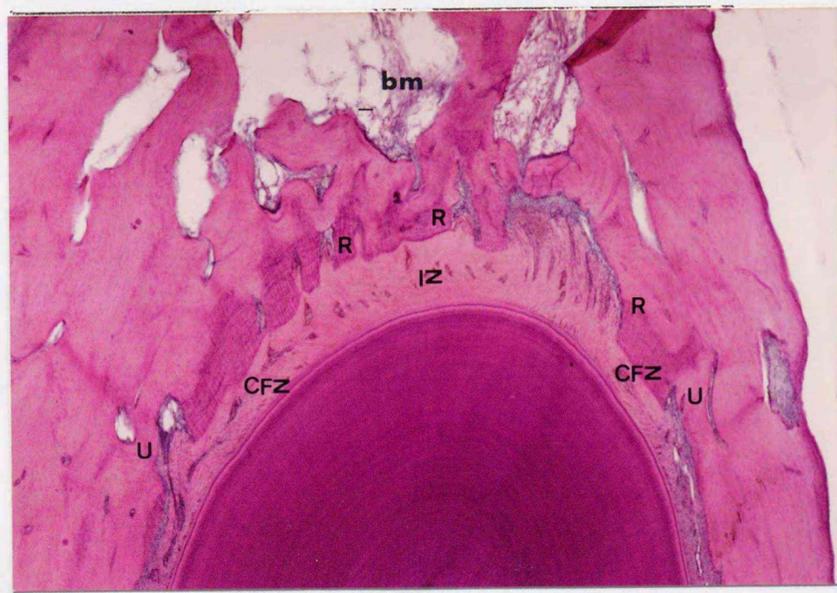


図14 ネコB 100g14日間例：図12よりやや根尖側よりの顕微鏡像（×10）

両例とも歯槽骨内に広い骨髓腔がみられ、変性領域に面した歯槽骨に浅部での背部骨吸収が認められた。この吸収は7日間例に比して14日間例ではより広範であった。

bm：骨髓腔、IZ：内変性帯、CFZ：無細胞帯、R：浅部での背部骨吸収
D：直接性骨吸収、U：穿下性骨吸収



図15 ネコB 100g7日間例：近心側根尖部の顕微鏡像（×20）

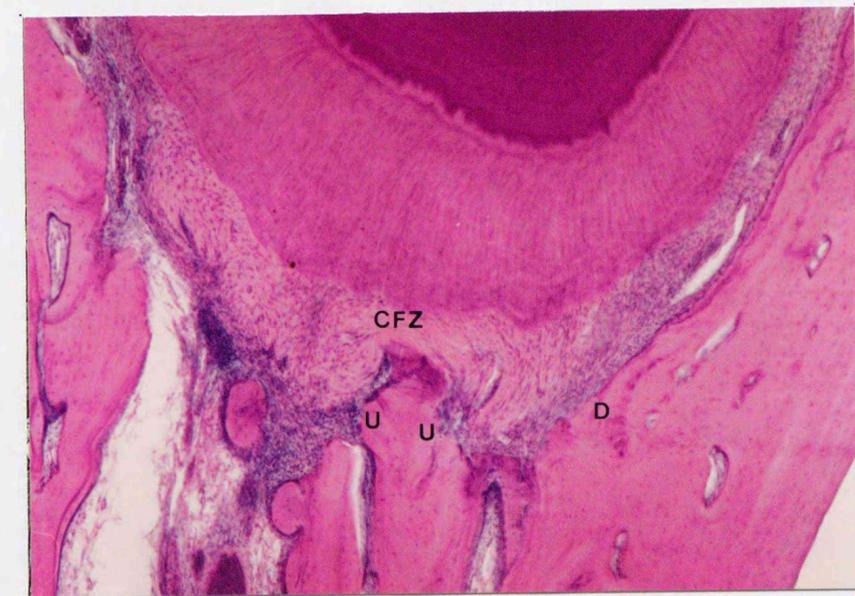
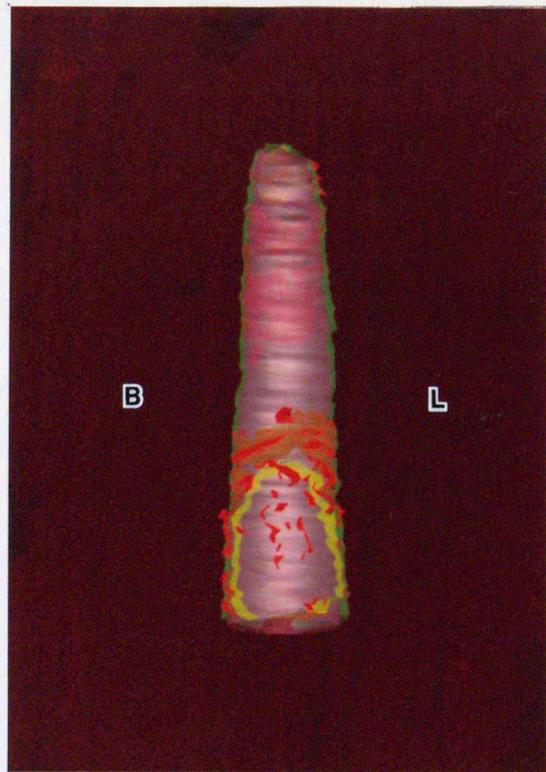


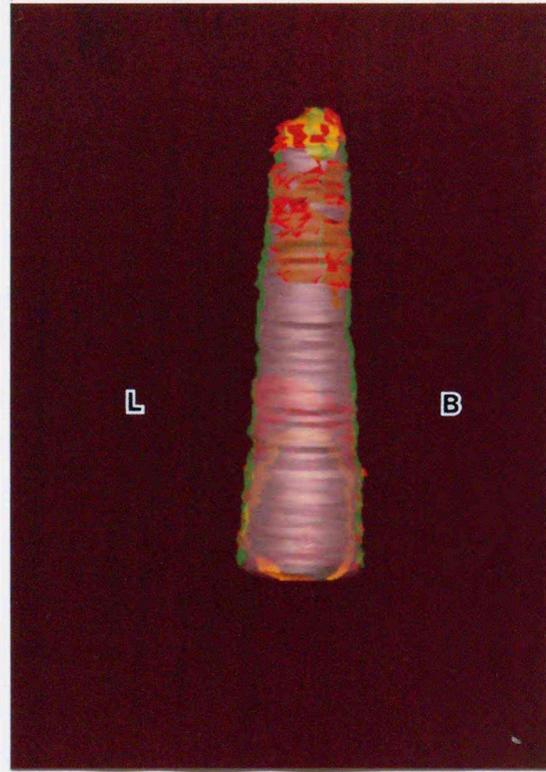
図16 ネコB 100g14日間例：近心側根尖部の顕微鏡像（×20）

7日間例で幅広い無細胞帯がみられ、その周囲の穿下性骨吸収が認められた。14日間例では無細胞帯の幅が狭く、周囲の歯根膜は正常像に近い状態を示していた。

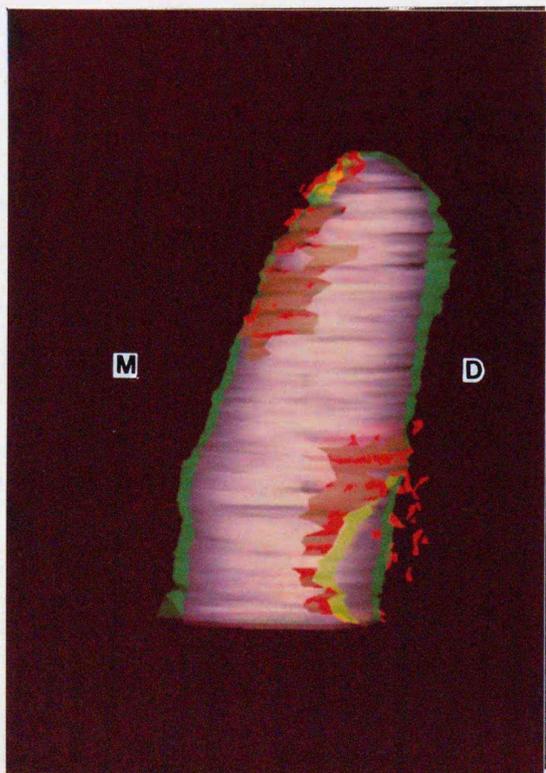
CFZ：無細胞帯、D：直接性骨吸収、U：穿下性骨吸収



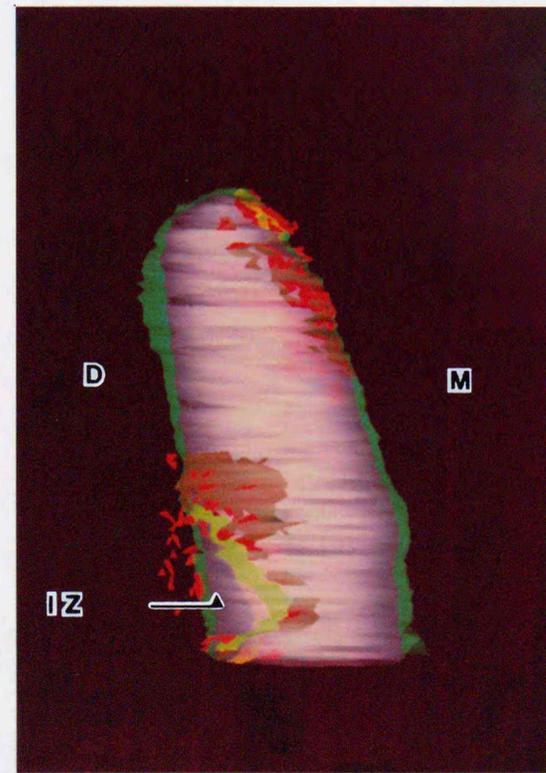
遠心側面観



近心側面観

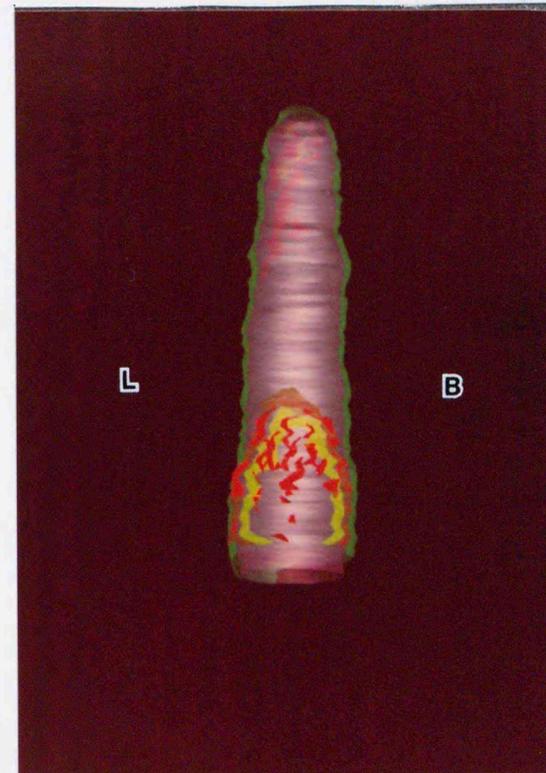


頬側面観

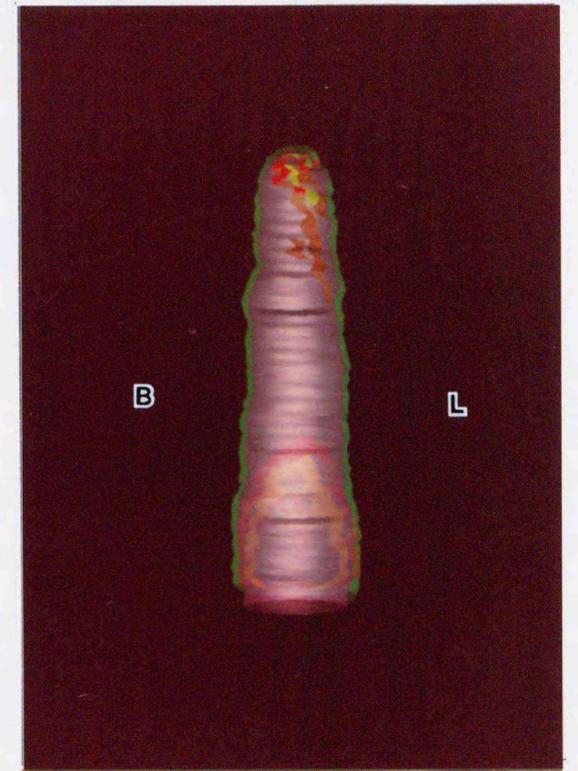


舌側面観

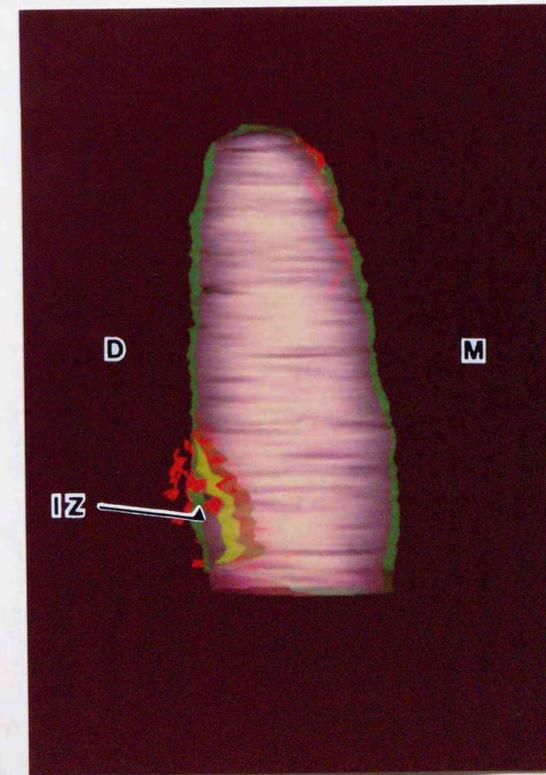
図17 ネコB: 100g 7日間例の三次元再構築像
 紫(半透明): 歯根 緑(半透明): 歯槽骨
 黄緑: 無細胞帯 赤: 破骨細胞の分布領域
 IZ: 無細胞帯に囲まれた内変性帯
 B: 頬側, L: 舌側, M: 近心側, D: 遠心側



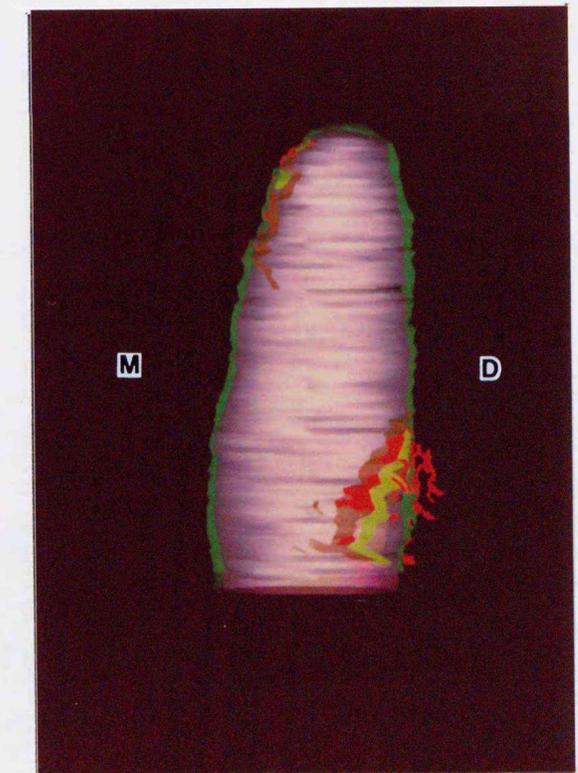
遠心側面観



近心側面観

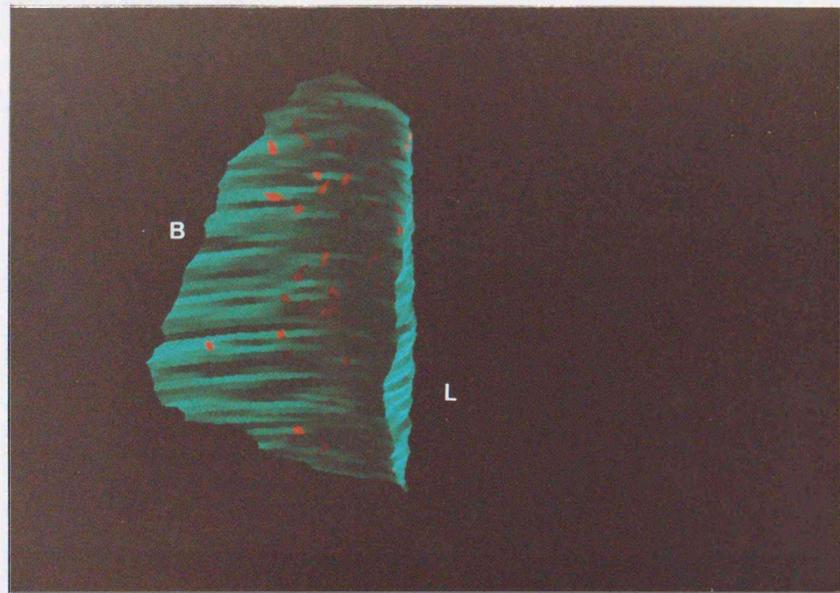


頬側面観

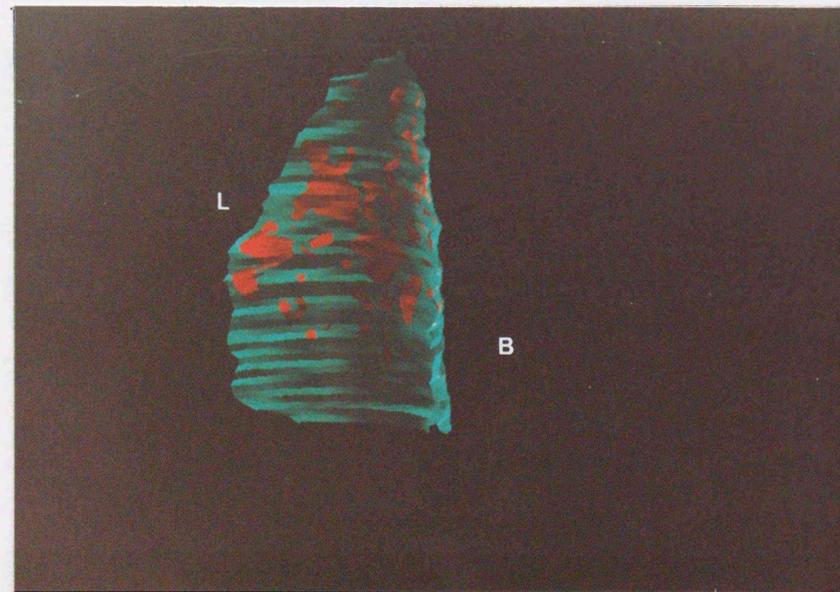


舌側面観

図18 ネコB: 100g 14日間例の三次元再構築像
 紫(半透明): 歯根 緑(半透明): 歯槽骨
 黄緑: 無細胞帯 赤: 破骨細胞の分布領域
 IZ: 無細胞帯に囲まれた内変性帯
 B: 頬側, L: 舌側, M: 近心側, D: 遠心側



100g7日間例



100g14日間例

図19 ネコB：遠心側歯頸部で、変性領域に面した歯槽壁と浅部での背部骨吸収により吸収された領域の三次元再構築像
 上図：100g 7日間例
 下図：100g 14日間例
 緑：変性領域に面した歯槽壁 赤：浅部での背部骨吸収により吸収された領域
 7日間例に比して14日間例では広範に歯槽骨が吸収されていたが、歯槽骨頂付近での吸収はほとんどみられなかった。

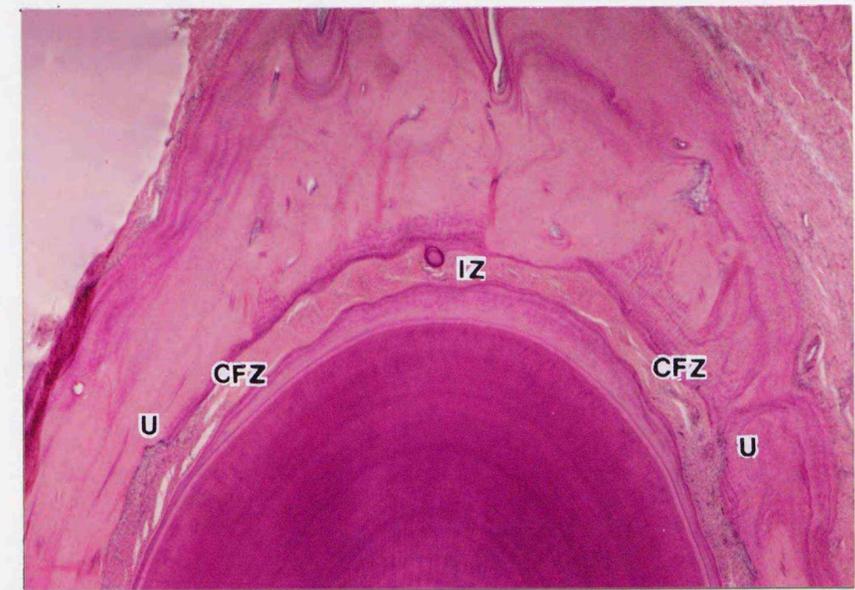


図20 ネコC 100g14日間例：遠心側歯頸部歯槽骨頂付近の顕微鏡像（×10）

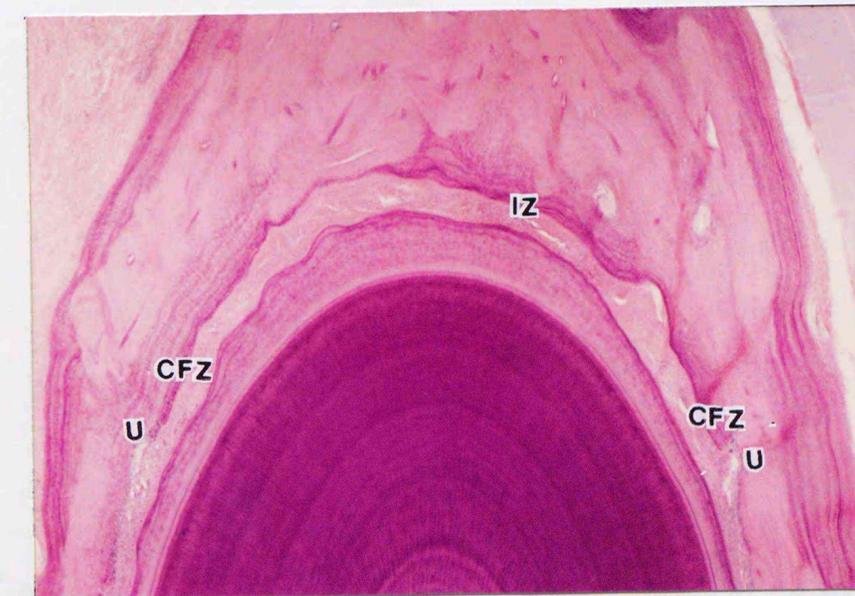


図21 ネコC 200g14日間例：遠心側歯頸部歯槽骨頂付近の顕微鏡像（×10）

両例ともに内変性帯および無細胞帯が認められた。正常歯根膜部位との境界付近に穿下性骨吸収が認められた。歯槽骨内に広い骨髓腔はみられなかった。
 IZ：内変性帯、CFZ：無細胞帯、U：穿下性骨吸収

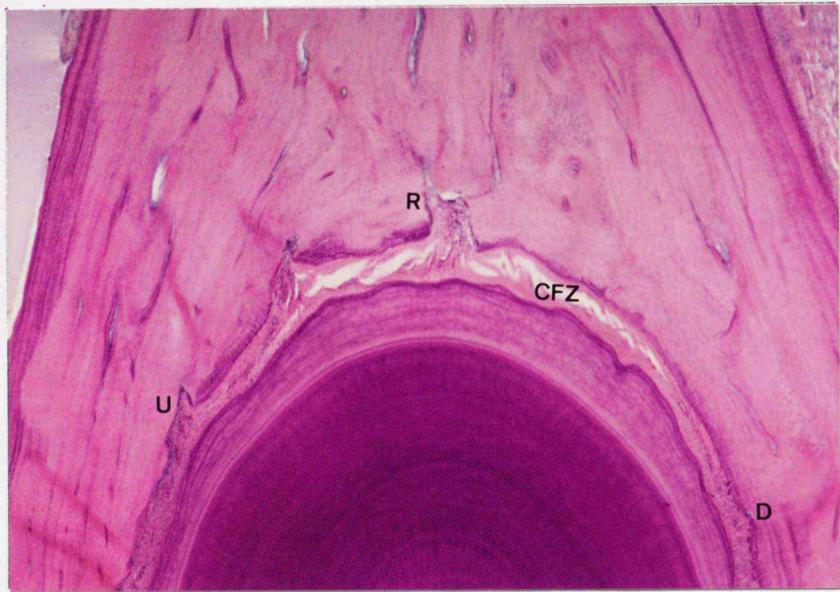


図22 ネコC 100g14日間例：図20よりやや根尖側よりの顕微鏡像（×10）

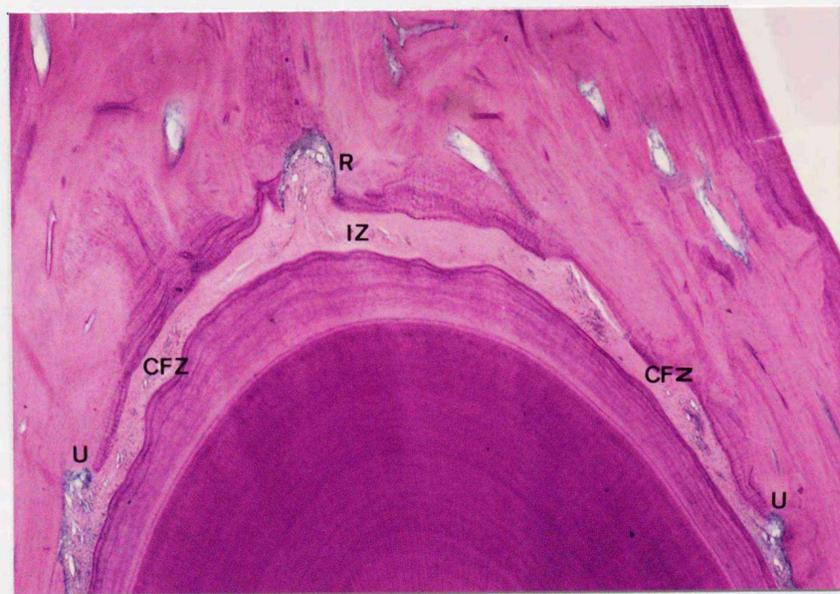


図23 ネコC 200g14日間例：図21よりやや根尖側よりの顕微鏡像（×10）

両例とも歯槽骨は緻密で広い骨髓腔はみられなかった。変性領域に面した歯槽骨の一部に浅部での背部骨吸収が認められた。

IZ：内変性帯、CFZ：無細胞帯、R：浅部での背部骨吸収、D：直接性骨吸収

U：穿下性骨吸収

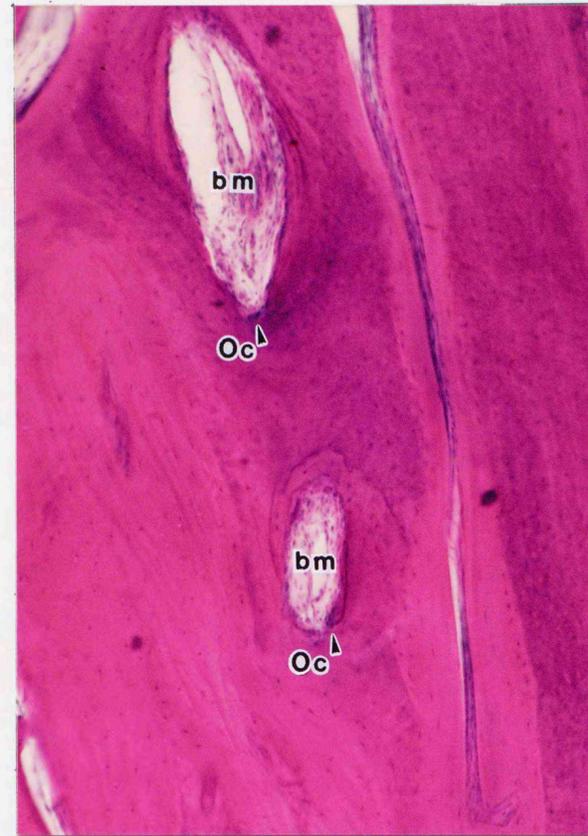


図24 ネコC 200g14日間例
深部での背部骨吸収を行う破骨細胞（×30）

歯槽壁から約900 μ mの部位に深部での背部骨吸収を行う破骨細胞がみられた。

bm：骨髓腔、Oc▲：破骨細胞



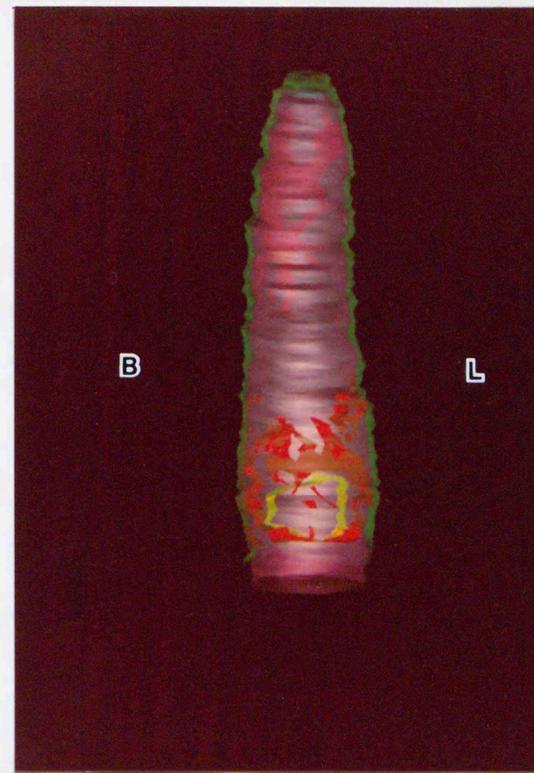
図25 ネコC 100g14日間例：近心側根尖部の顕微鏡像（×20）



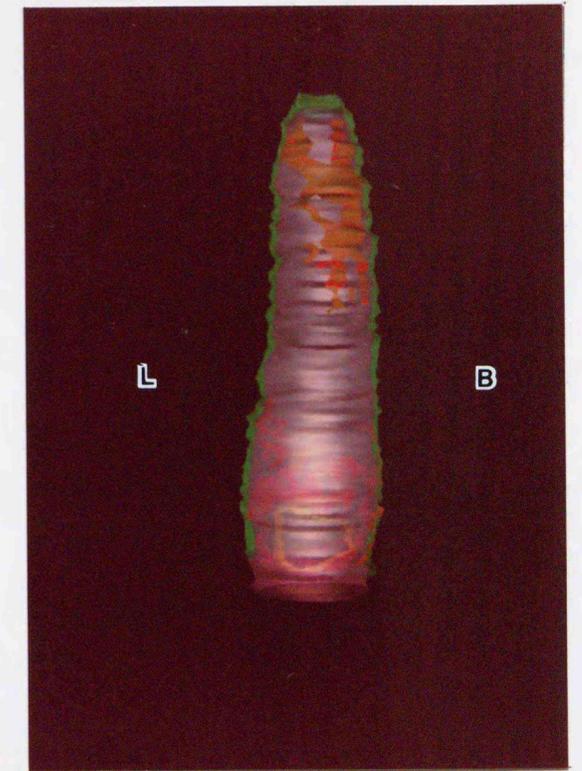
図26 ネコC 200g14日間例：近心側根尖部の顕微鏡像（×20）

100g例には変性領域はみられず直接性骨吸収が認められた。200g例には無細胞帯が認められ、その外側に穿下性骨吸収が認められた。

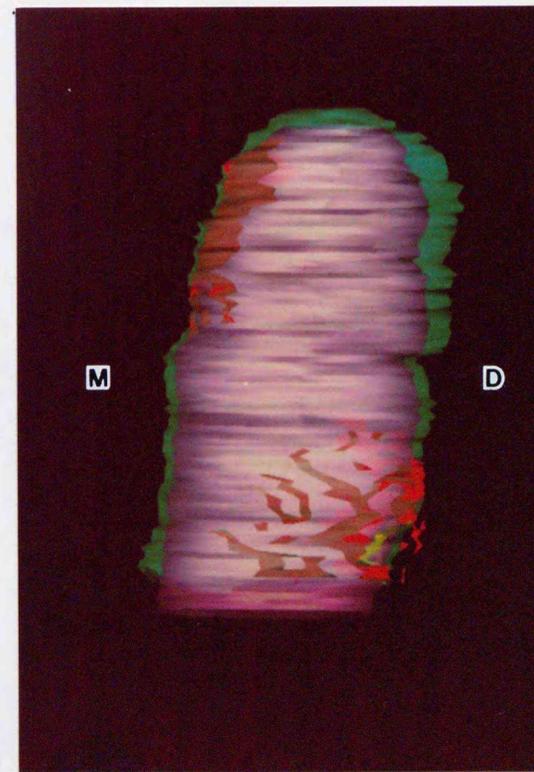
CFZ：無細胞帯、D：直接性骨吸収、U：穿下性骨吸収



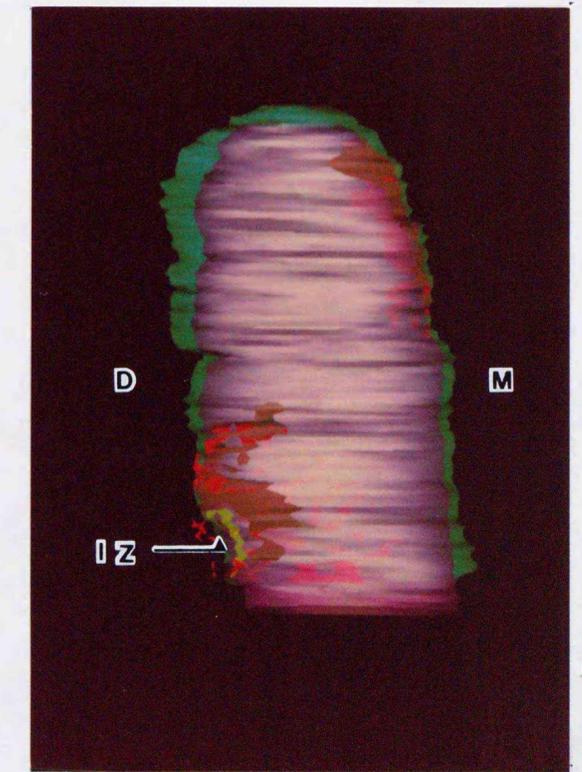
遠心側面観



近心側面観

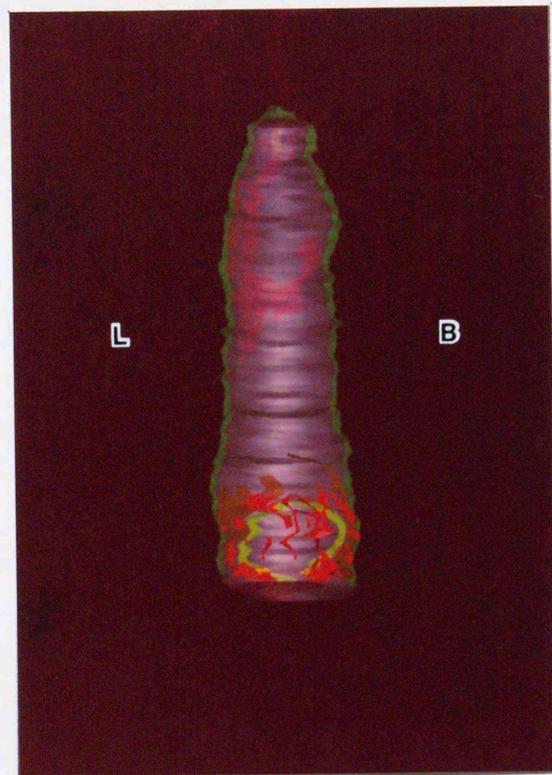


頬側面観

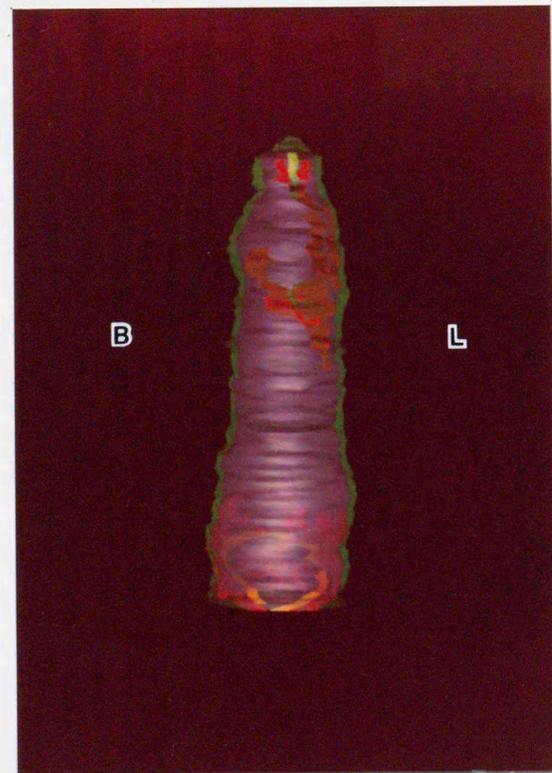


舌側面観

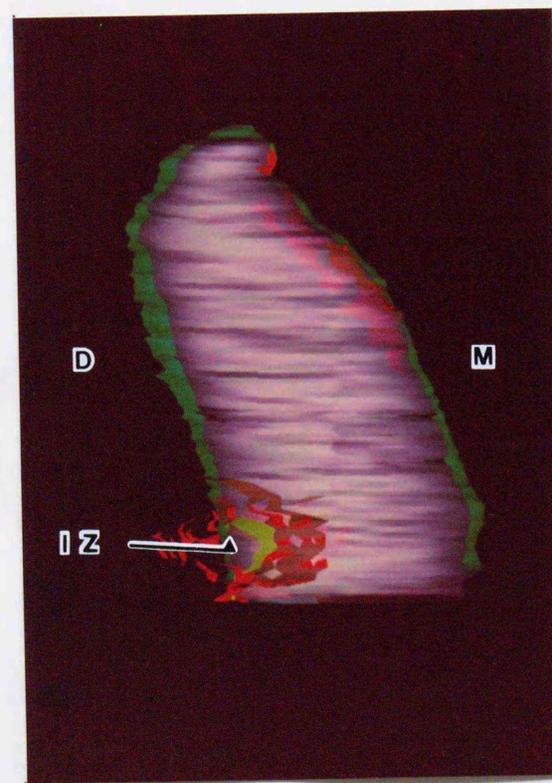
図27 ネコC：100g 14日間例の三次元再構築像
 紫（半透明）：歯根
 黄緑：無細胞帯
 IZ：無細胞帯に囲まれた内変性帯
 赤：破骨細胞の分布領域
 緑（半透明）：歯槽骨
 赤：破骨細胞の分布領域
 B：頬側、L：舌側、M：近心側、D：遠心側



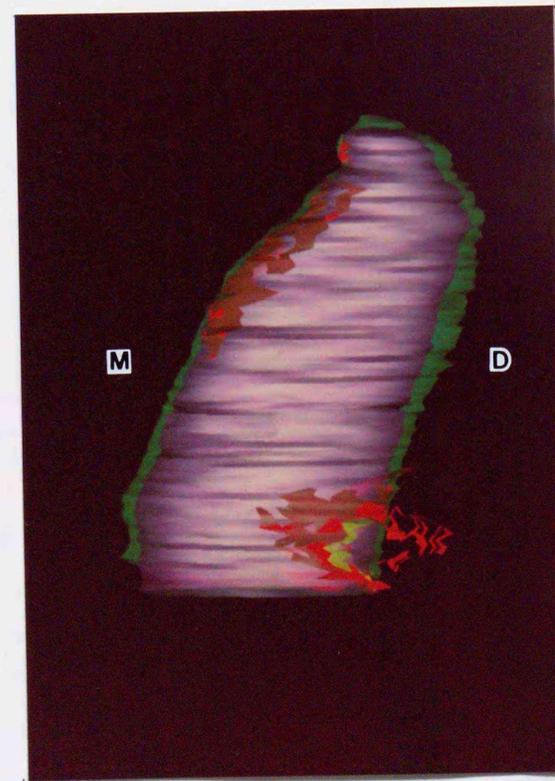
遠心側面観



近心側面観



頬側面観



舌側面観

図28 ネコC：200g 14日間例の三次元再構築像
 紫（半透明）：歯根 緑（半透明）：歯槽骨
 黄緑：無細胞帯 赤：破骨細胞の分布領域
 IZ：無細胞帯に囲まれた内変性帯
 B：頬側，L：舌側，M：近心側，D：遠心側



図29 ネコD 50g14日間例：遠心側歯頸部歯槽骨頂付近の顕微鏡像（×10）

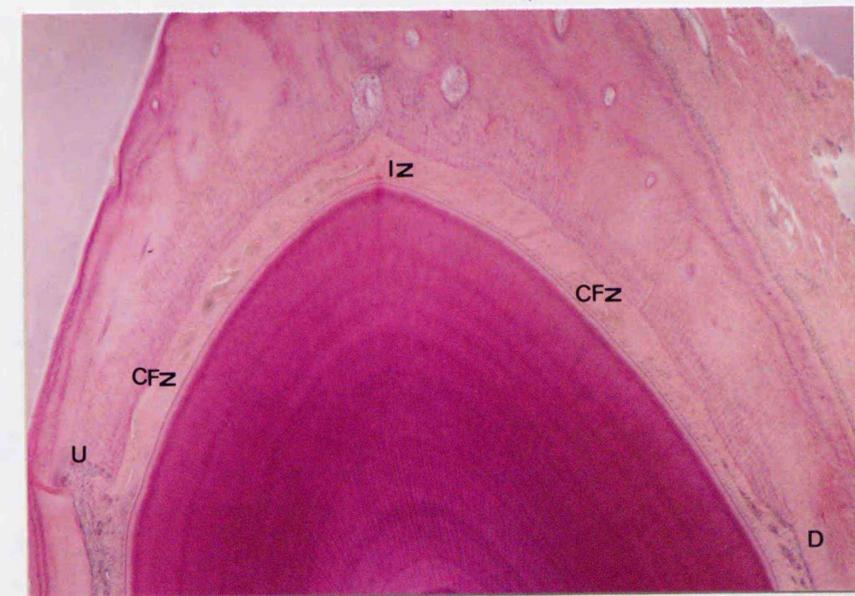


図30 ネコD 100g14日間例：遠心側歯頸部歯槽骨頂付近の顕微鏡像（×10）

両例ともに内変性帯および無細胞帯が認められた。穿下性骨吸収または直接性骨吸収が認められた。歯槽骨内に広い骨髓腔はみられなかった。
 IZ：内変性帯、CFZ：無細胞帯、D：直接性骨吸収、U：穿下性骨吸収

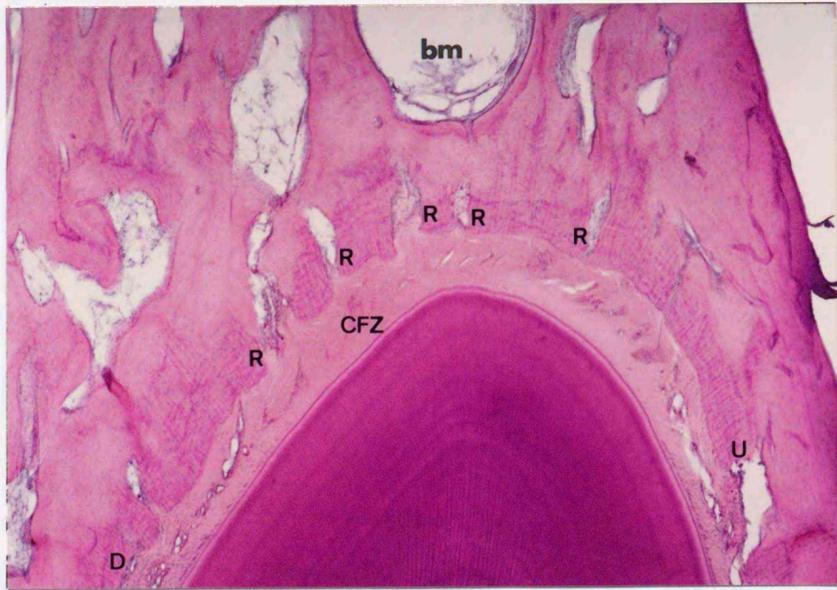


図31 ネコD 50g14日間例：図29よりやや根尖側よりの顕微鏡像（×10）

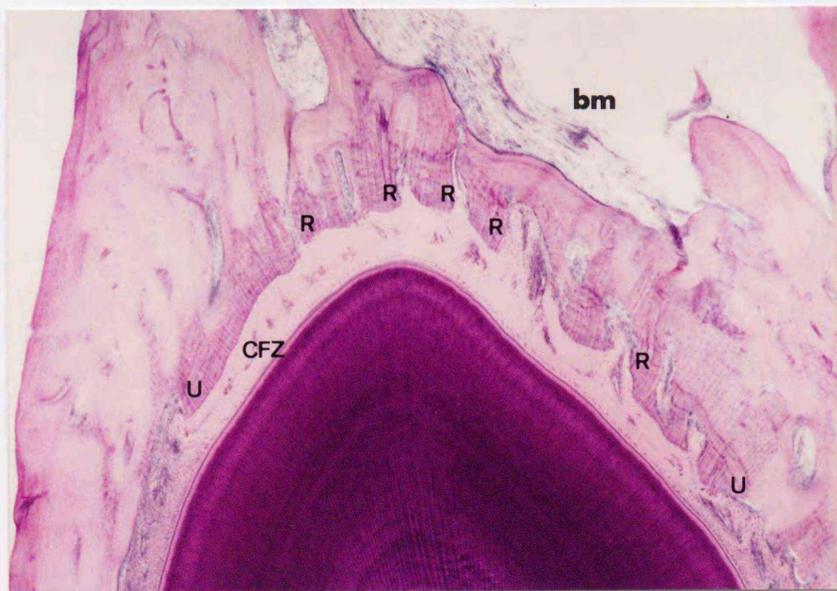


図32 ネコD 100g14日間例：図30よりやや根尖側よりの顕微鏡像（×10）

両例とも歯槽骨内に広い骨髓腔がみられ、変性領域に面した歯槽骨に浅部での背部骨吸収が認められた。

IZ：内変性帯、CFZ：無細胞帯、R：浅部での背部骨吸収、D：直接性骨吸収
U：穿下性骨吸収



図33 ネコD 50g14日間例：近心側根尖部の顕微鏡像（×20）

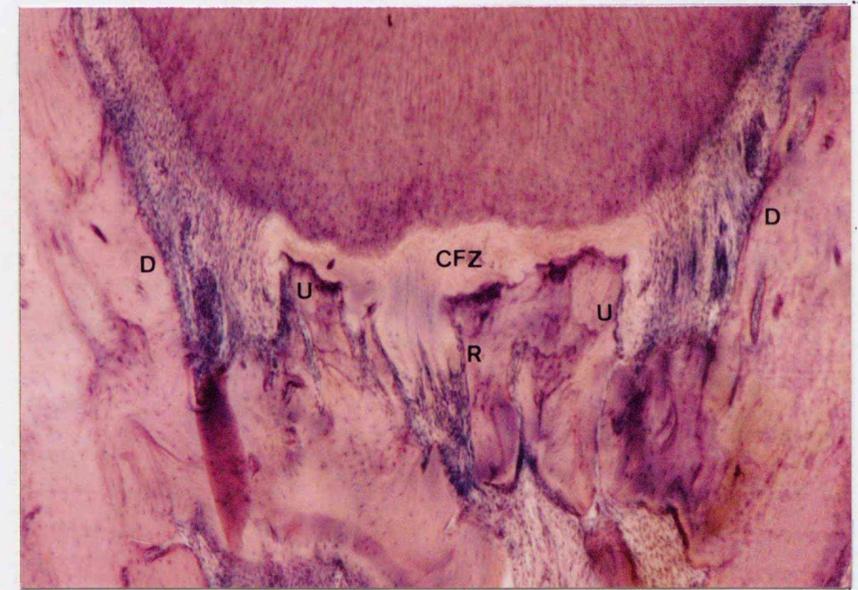
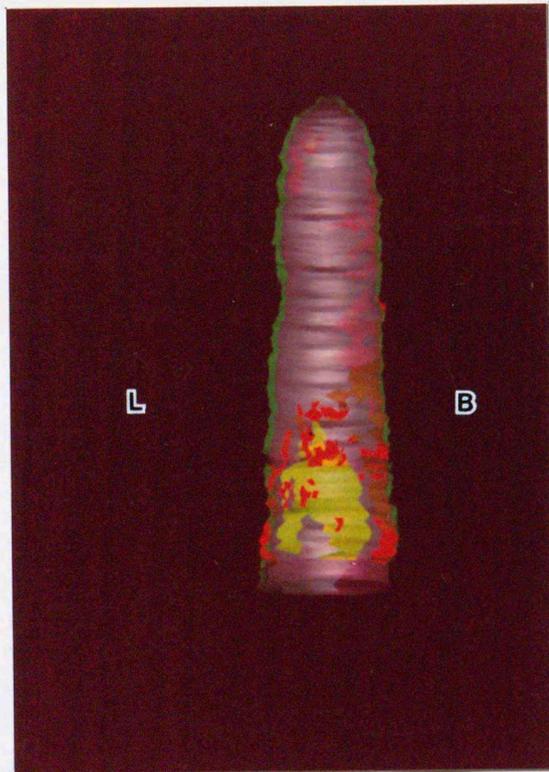


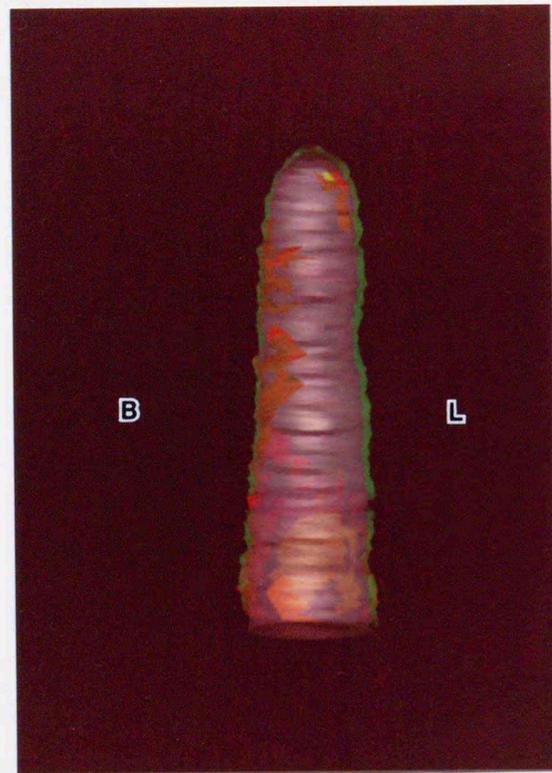
図34 ネコD 100g14日間例：近心側根尖部の顕微鏡像（×20）

両例とも無細胞帯がみられ、その周囲には穿下性骨吸収が認められた。
100g例には浅部での背部骨吸収が認められた。

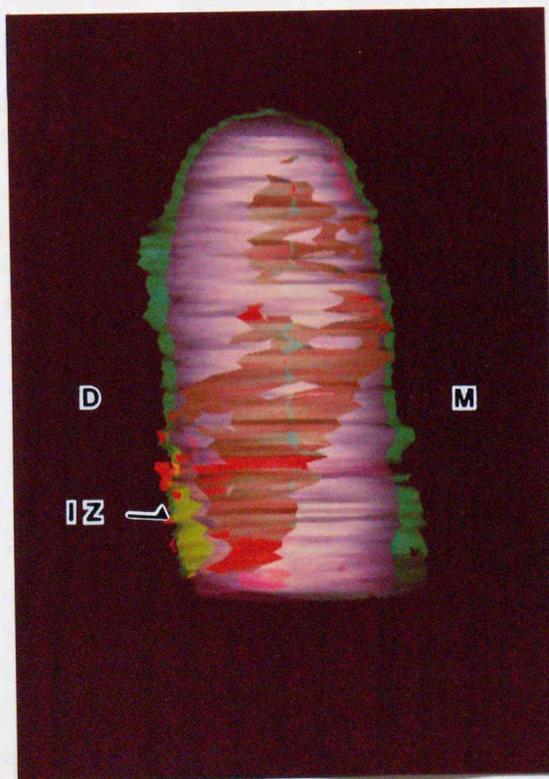
CFZ：無細胞帯、D：直接性骨吸収、U：穿下性骨吸収、R：浅部での背部骨吸収



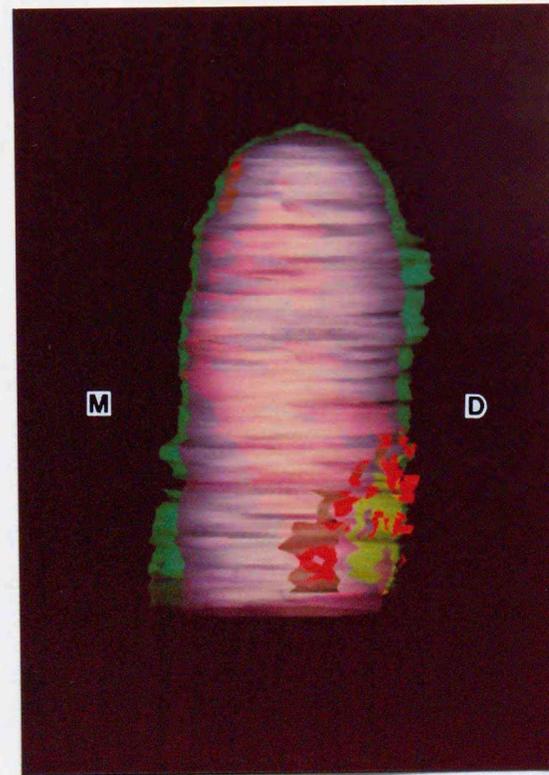
遠心側面観



近心側面観

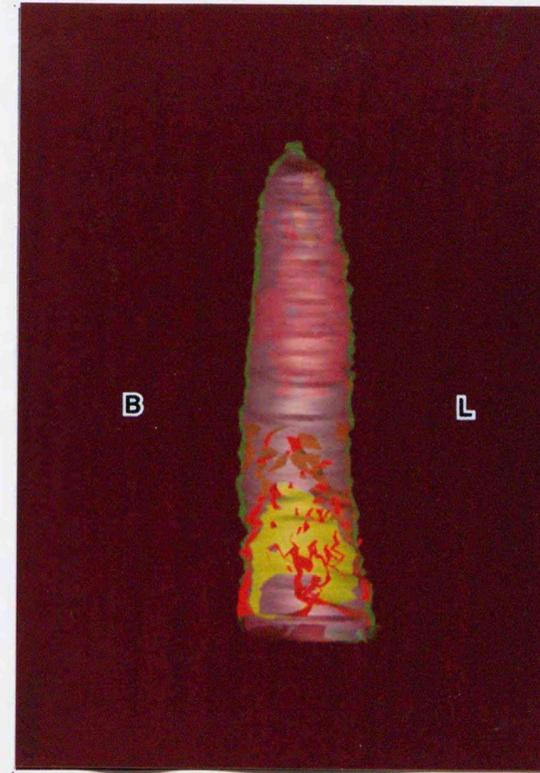


頬側面観

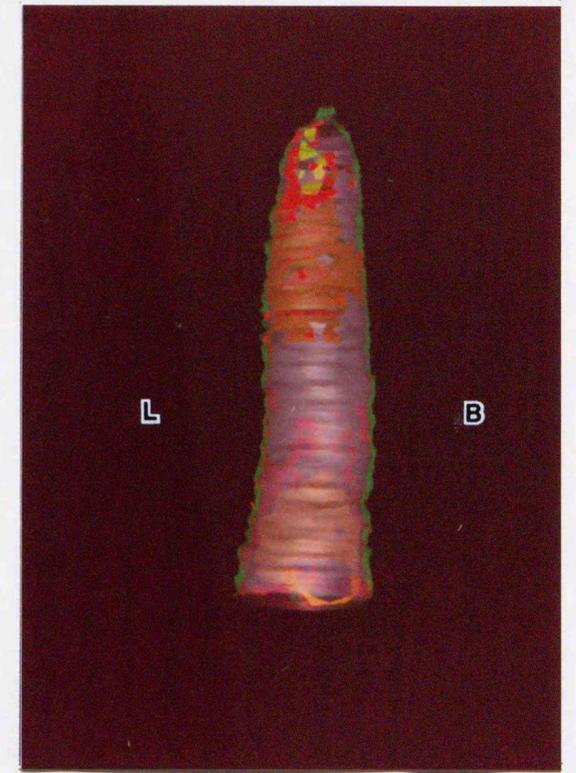


舌側面観

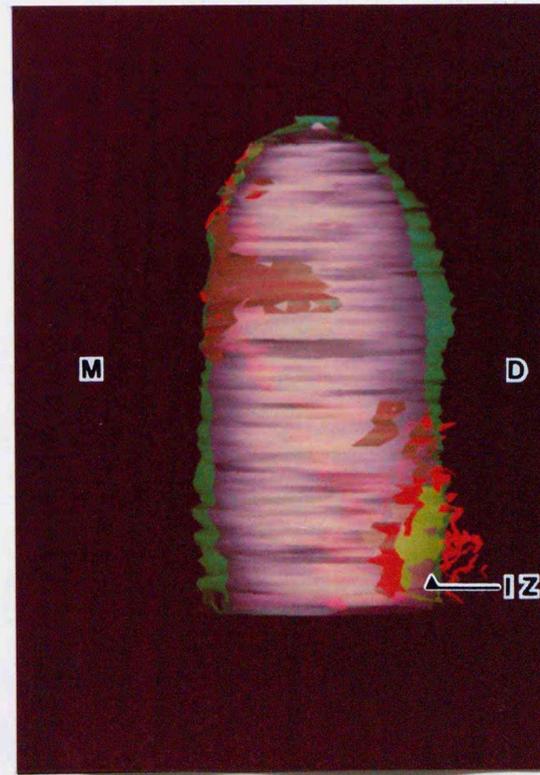
図35 ネコD : 50g 14日間例の三次元再構築像
 紫(半透明) : 歯根 緑(半透明) : 歯槽骨
 黄緑 : 無細胞帯 赤 : 破骨細胞の分布領域
 IZ : 無細胞帯に囲まれた内変性帯
 B : 頬側, L : 舌側, M : 近心側, D : 遠心側



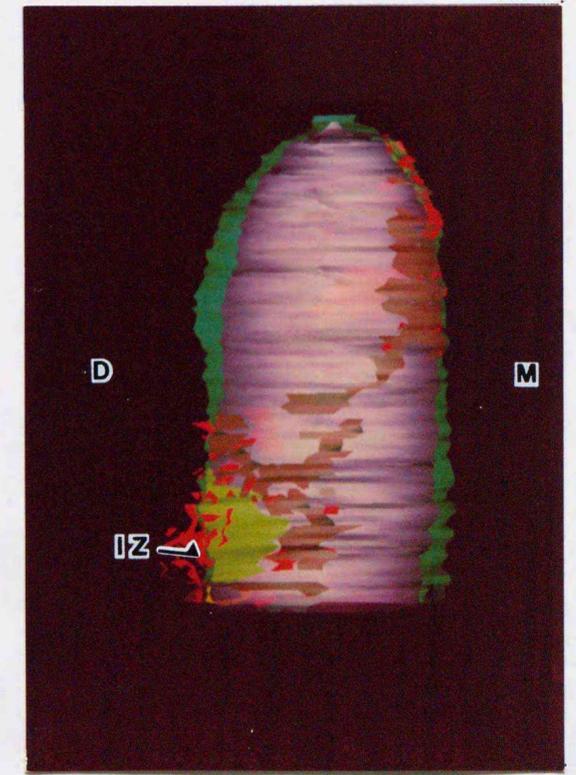
遠心側面観



近心側面観



頬側面観



舌側面観

図36 ネコD : 100g 14日間例の三次元再構築像
 紫(半透明) : 歯根 緑(半透明) : 歯槽骨
 黄緑 : 無細胞帯 赤 : 破骨細胞の分布領域
 IZ : 無細胞帯に囲まれた内変性帯
 B : 頬側, L : 舌側, M : 近心側, D : 遠心側



図37 ネコE 100g28日間例：遠心側歯頸部歯槽骨頂付近の顕微鏡像（×10）

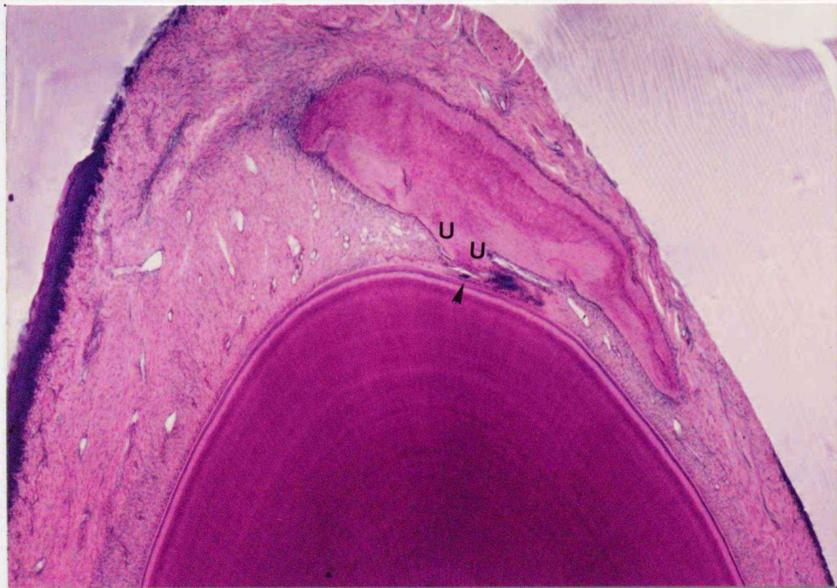


図38 ネコE 200g28日間例：遠心側歯頸部歯槽骨頂付近の顕微鏡像（×10）

両例とも一部に変性領域の残存がみられ、この領域の外側に穿下性骨吸収が認められた。

▲：残存する変性領域、U：穿下性骨吸収



図39 ネコE 100g28日間例：図37の拡大像（×37.5）

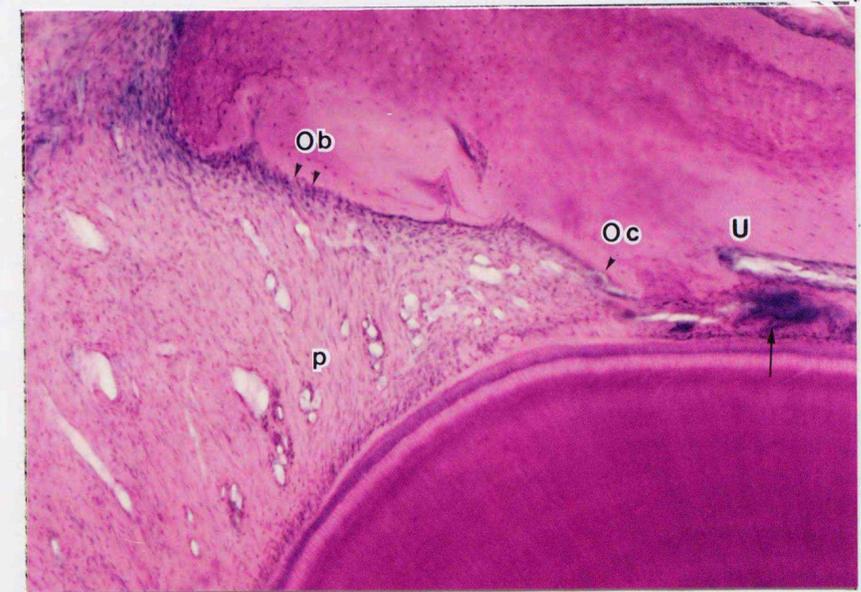


図40 ネコE 200g28日間例：図38の拡大像（×37.5）

両例とも変性領域の外側の歯根膜はほぼ正常と思われ、この部位に面する歯槽壁には破骨細胞はみられず骨芽細胞が認められた。

P：歯根膜腔、↑：残存する変性領域、U：穿下性骨吸収、Oc：破骨細胞、Ob：骨芽細胞、

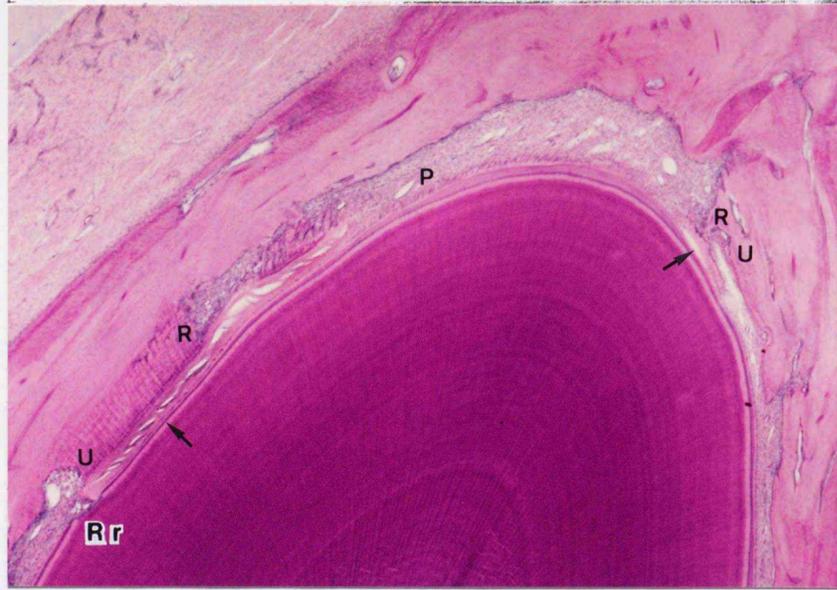


図41 ネコE 200g28日間例：図38よりやや根尖側よりの顕微鏡像（×10）
 変性領域が遠心側と舌側とにわかれて残存しており、この両側に穿下性骨吸収、
 または浅部での背部骨吸収がみられた。一部に歯根象牙質におよぶ吸収像が認められた。
 P：歯根膜腔 ↑：残存する変性領域、U：穿下性骨吸収
 R：浅部での背部骨吸収、Rr：歯根吸収

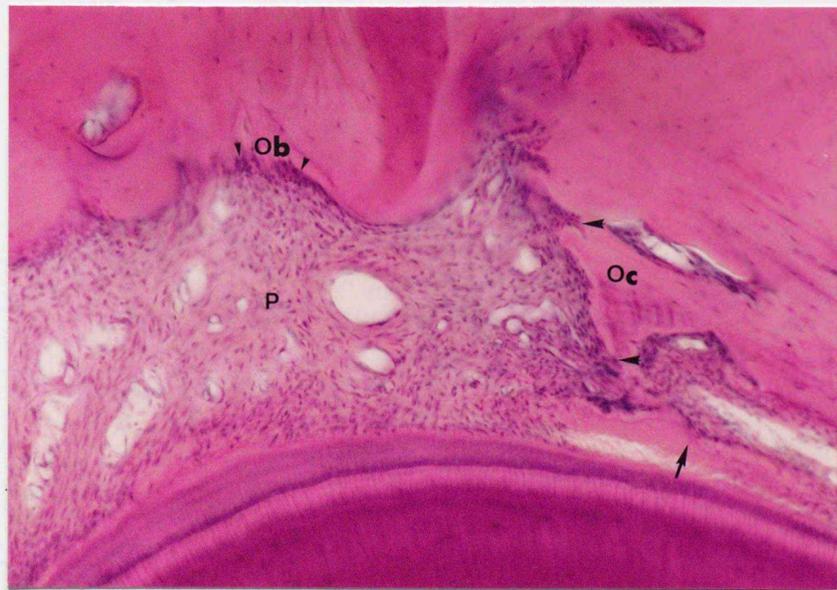


図42 ネコE 200g28日間例：図41の拡大像（×37.5）
 変性領域にはさまれた部位の歯根膜はほぼ正常と思われ、この部位の歯槽壁には骨芽細胞が認められた。
 P：歯根膜腔、↑：残存する変性領域、Oc：破骨細胞、Ob：骨芽細胞

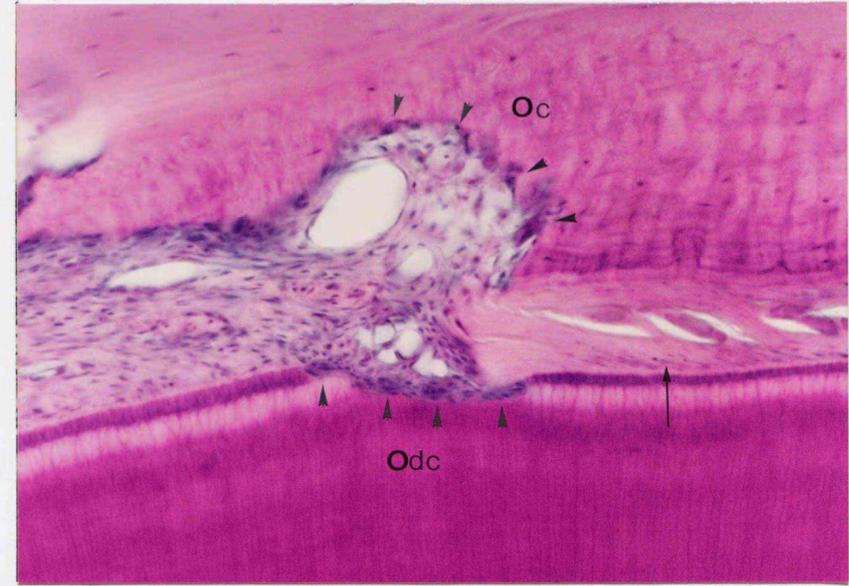


図43 ネコE 200g28日間例：図41の拡大で歯根吸収を示す顕微鏡像（×37.5）

歯根象牙質におよぶ吸収窩には破歯細胞が認められた。
 ↑：残存する変性領域、Odc：破歯細胞、Oc：破骨細胞



図44 ネコE 100g28日間例：近心側根尖部の顕微鏡像（×20）

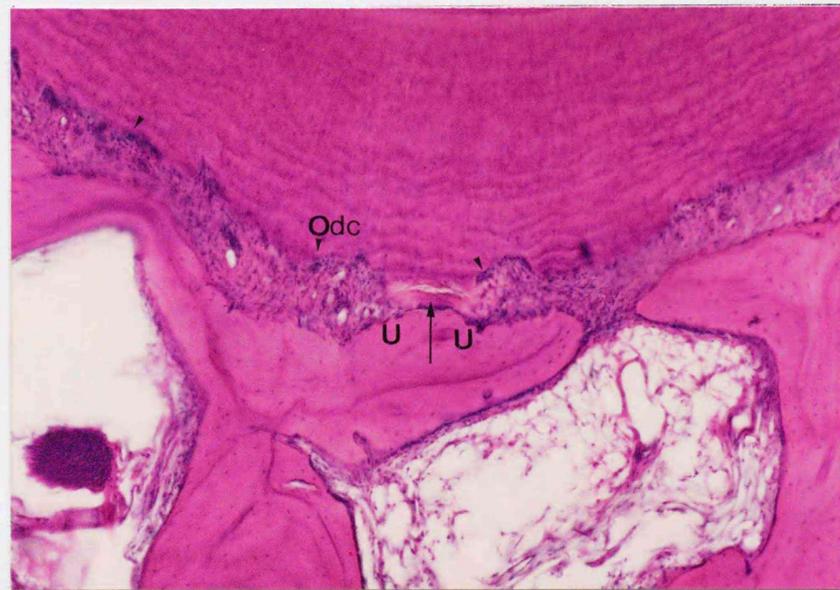
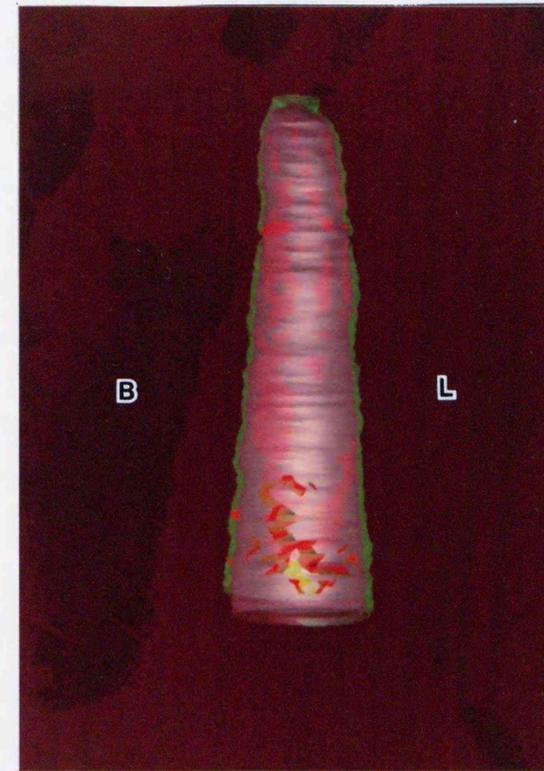


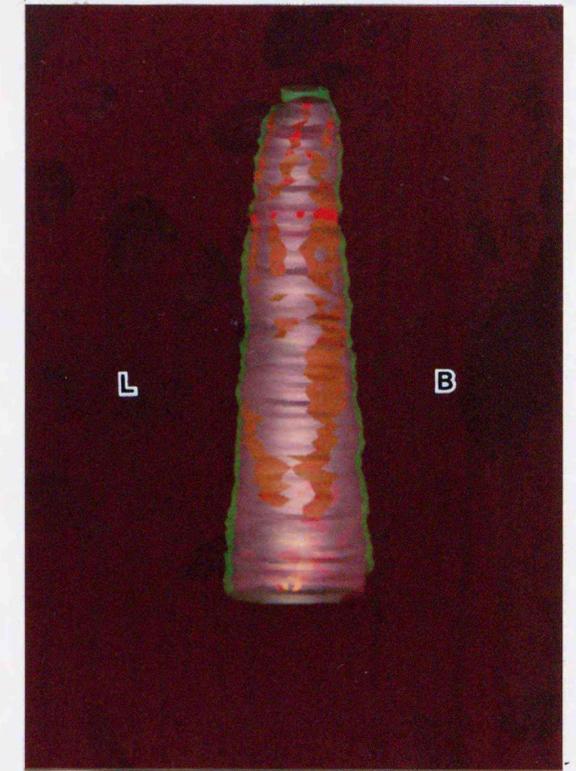
図45 ネコE 200g28日間例：近心側根尖部の顕微鏡像（×20）

100g例には変性領域はみられず直接性骨吸収が認められた。200g例には変性領域が残存しており、その外側に穿下性骨吸収が認められた。両例で破歯細胞が歯根セメント質表面にみられた。

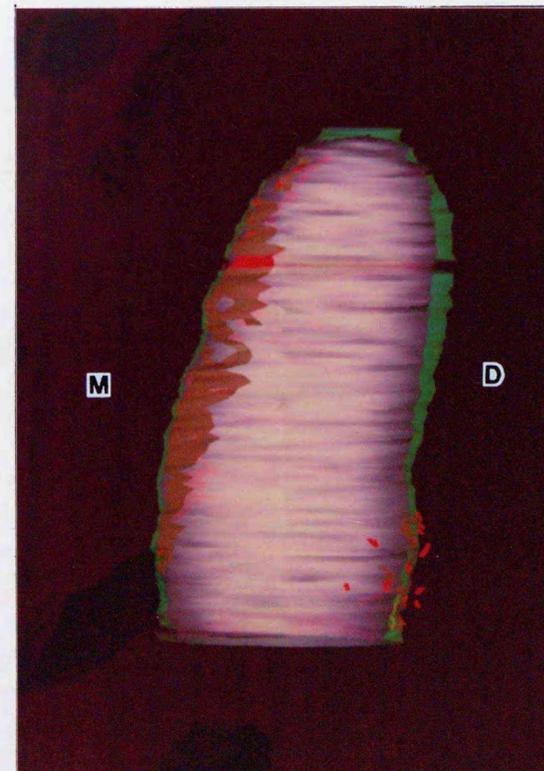
↑：残存する変性領域、Odc: 破歯細胞、D：直接性骨吸収、U：穿下性骨吸収



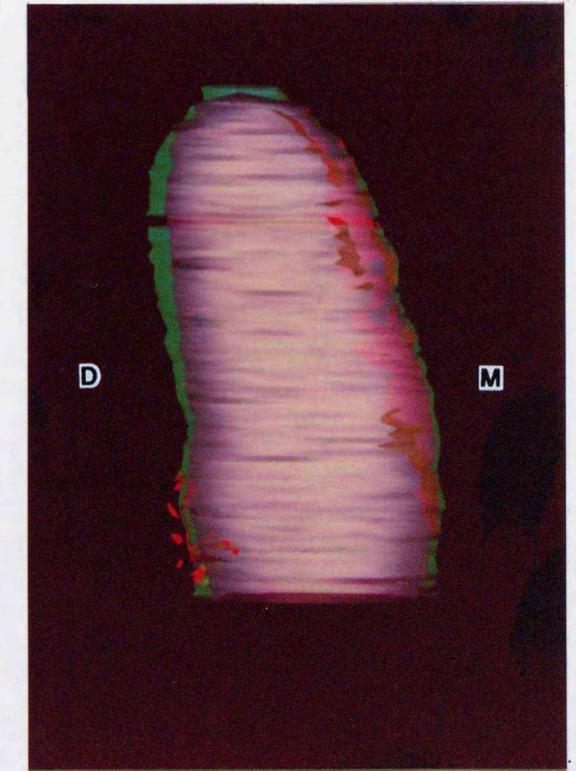
遠心側面観



近心側面観

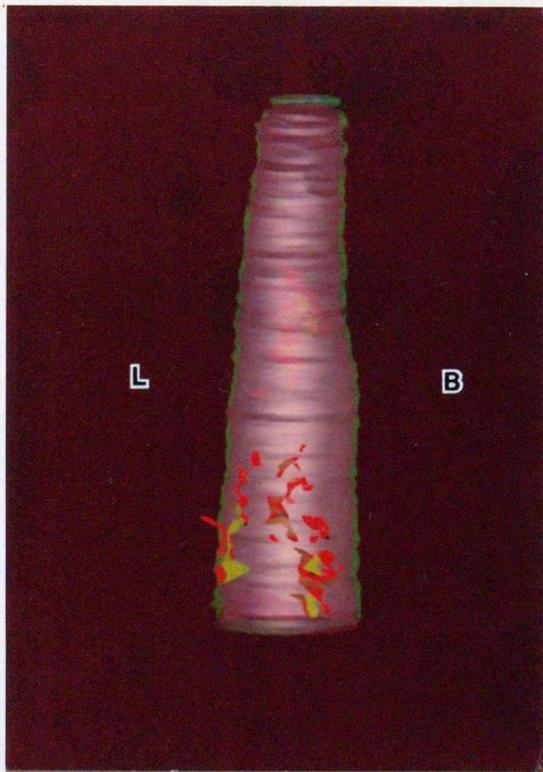


頬側面観

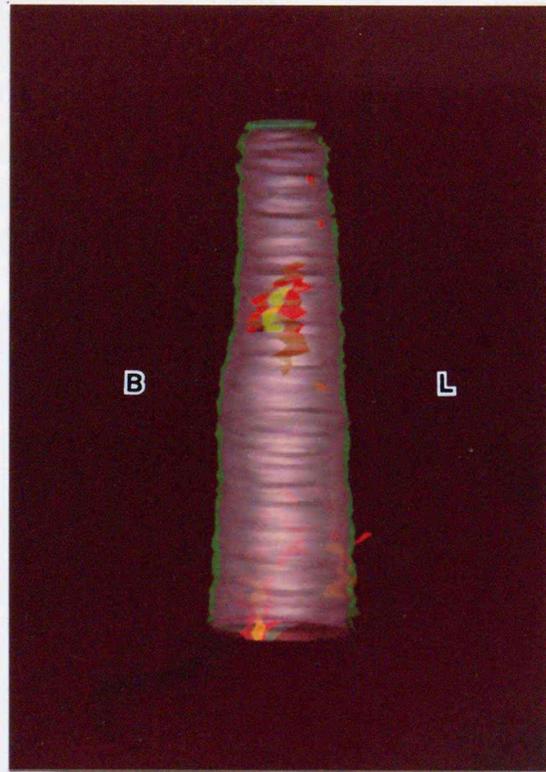


舌側面観

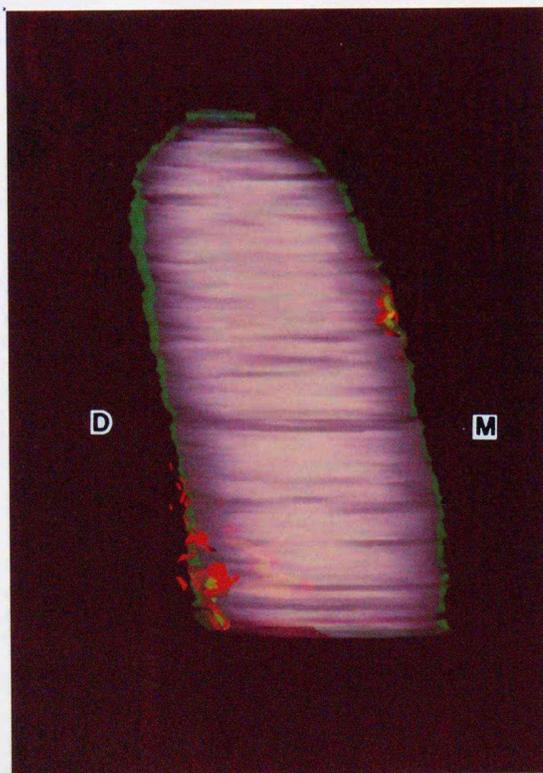
図46 ネコE：100g 28日間例の三次元再構築像
 紫（半透明）：歯根 緑（半透明）：歯槽骨
 黄緑：残存した変性領域 赤：破骨細胞の分布領域
 B：頬側、L：舌側、M：近心側、D：遠心側



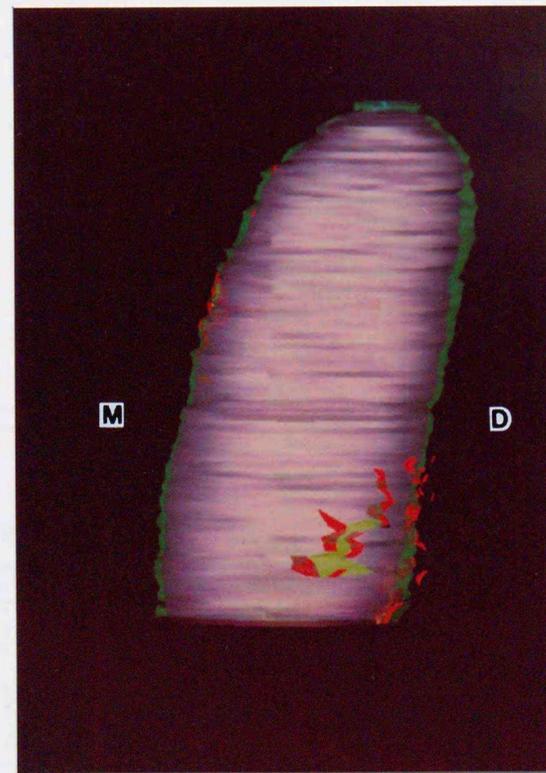
遠心側面観



近心側面観



頬側面観



舌側面観

図47 実験動物E：200g 28日間例の三次元再構築像
 紫（半透明）：歯根 緑（半透明）：歯槽骨
 黄緑：残存した変性領域 赤：破骨細胞の分布領域
 B：頬側，L：舌側，M：近心側，D：遠心側

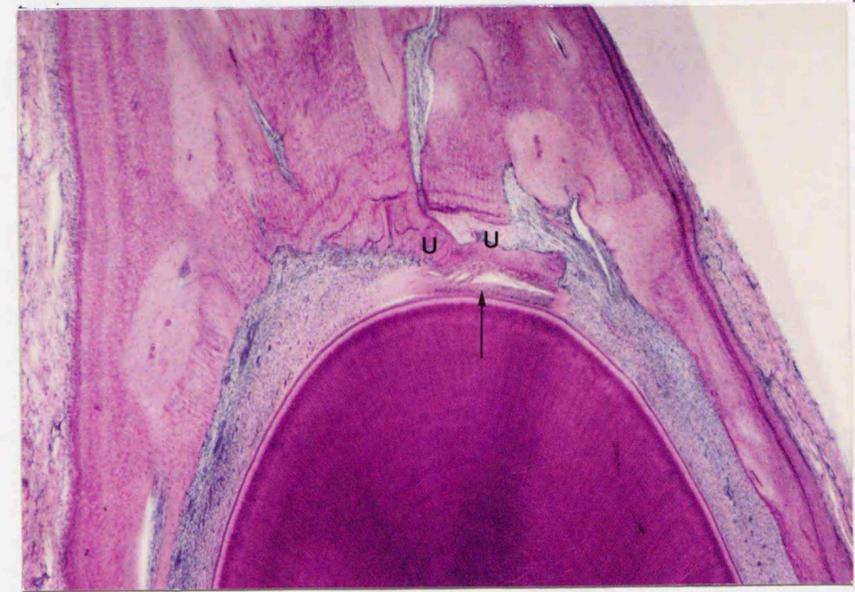


図48 ネコF 50g28日間例：遠心側歯頸部歯槽骨頂付近の顕微鏡像（×10）

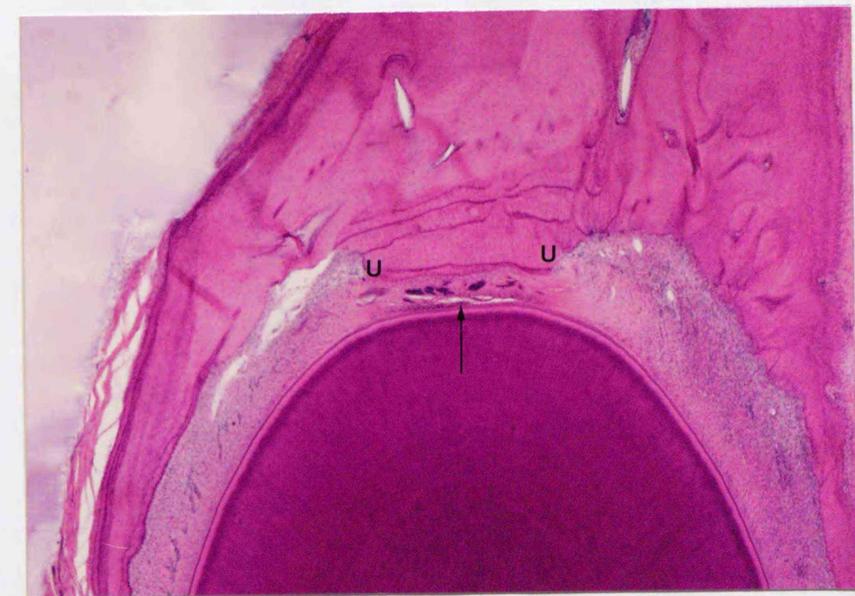


図49 ネコF 100g28日間例：遠心側歯頸部歯槽骨頂付近の顕微鏡像（×10）

両例とも一部に変性領域の残存が観察され、この領域の外側に穿下性骨吸収が認められた。

↑：残存する変性領域、U：穿下性骨吸収

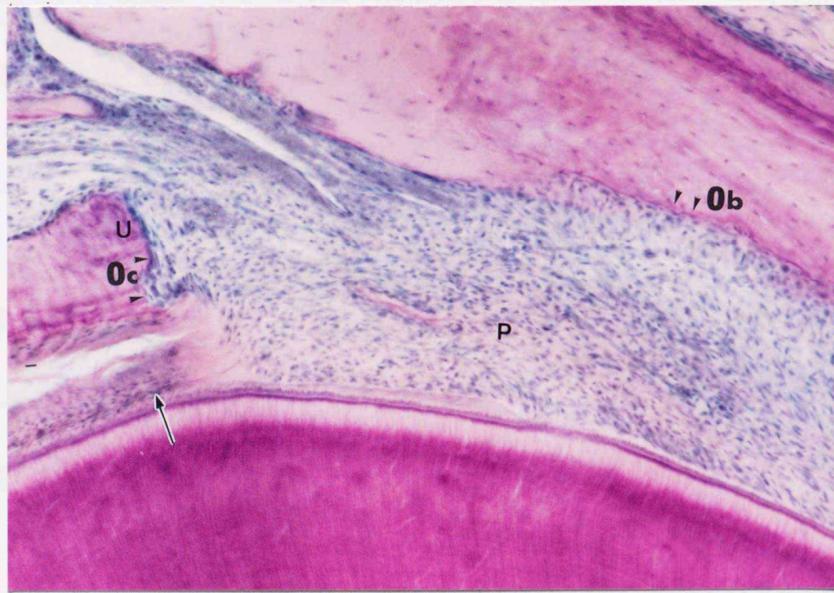


図50 ネコF 50g28日間例：図48の拡大像（×37.5）

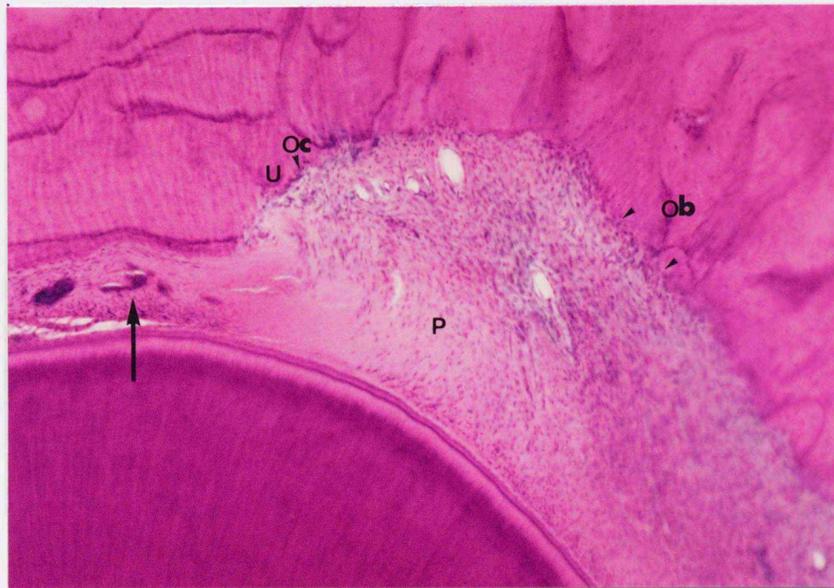


図51 ネコF 100g28日間例：図49の拡大像（×37.5）

両例とも変性領域の外側の歯根膜はほぼ正常と思われ、この部位に面する歯槽壁には破骨細胞はみられず骨芽細胞が認められた。

P：歯根膜腔、↑：残存する変性領域、U：穿下性骨吸収、Oc：破骨細胞
Ob：骨芽細胞

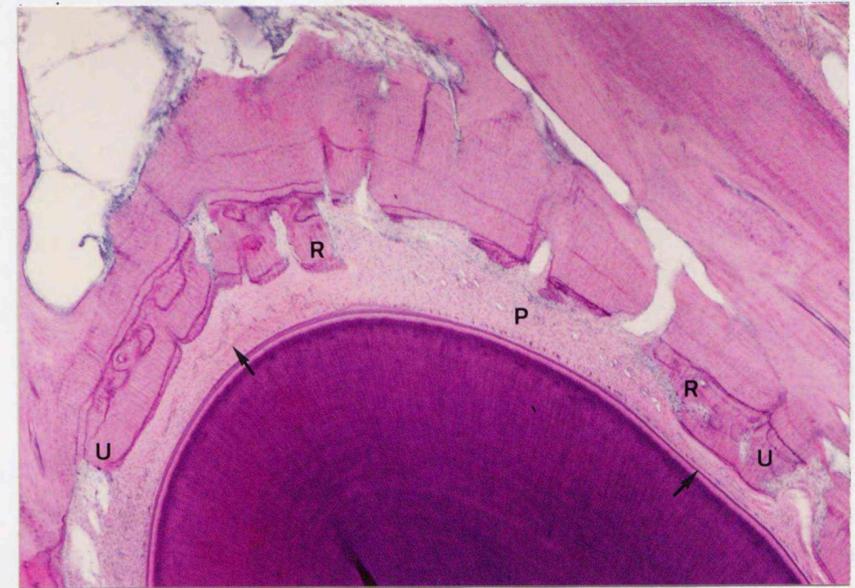


図52 ネコF 100g28日間例：図49よりやや根尖側よりの顕微鏡像（×10）

変性領域が遠心側と舌側とにわかれて残存しており、この両側に穿下性骨吸収、または浅部での背部骨吸収が認められた。変性領域にはさまれた部位の歯根膜はほぼ正常と思われた。

P：歯根膜腔、↑：残存する変性領域、U：穿下性骨吸収
R：浅部での背部骨吸収

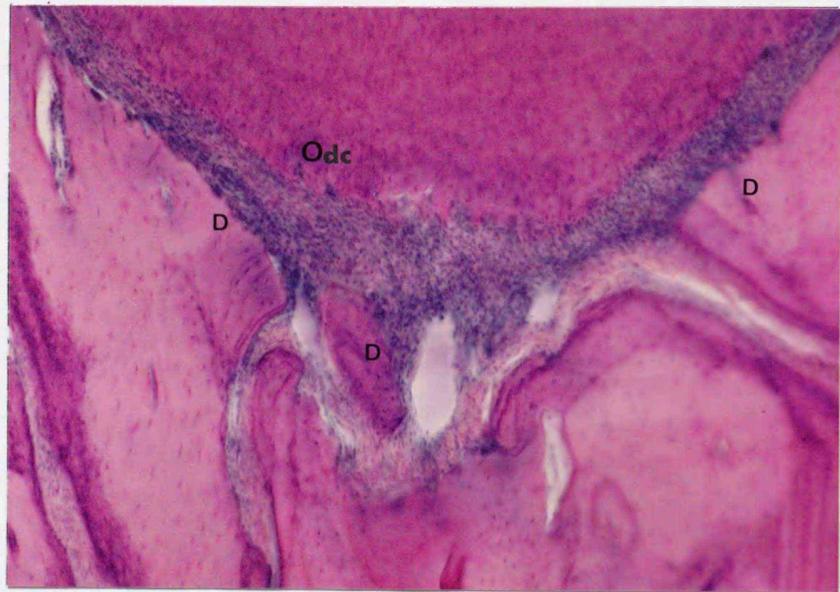


図53 ネコF 50g28日間例：近心側根尖部の顕微鏡像（×20）



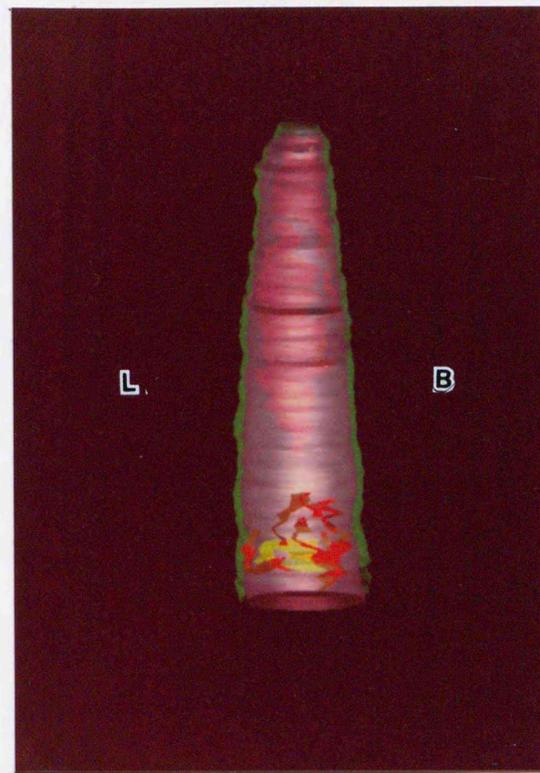
図54 ネコF 100g28日間例：近心側根尖部の顕微鏡像（×20）



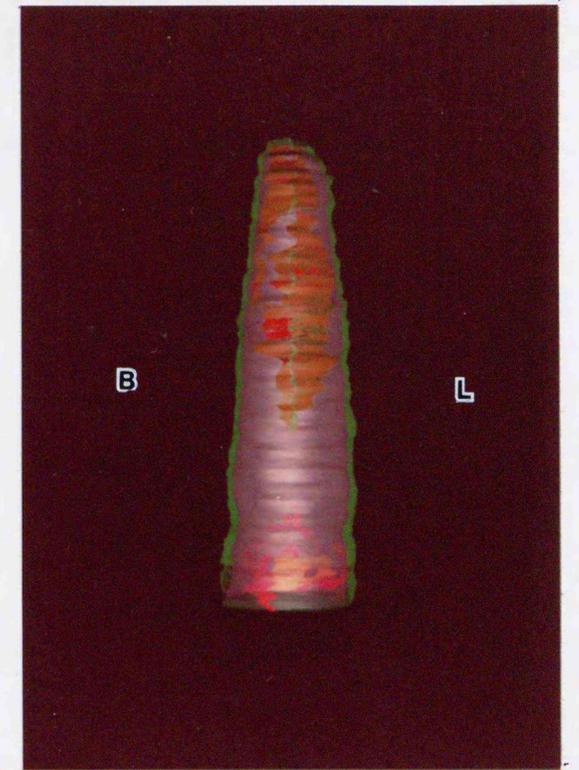
図55 ネコF 100g28日間例
図54のやや根尖側
（×20）

50g例には変性領域はみられず直接性骨吸収が認められた。100g例には変性領域が残存しており、その外側に穿下性骨吸収が認められた。両例で破歯細胞が歯根セメント質表面にわずかにみられた。

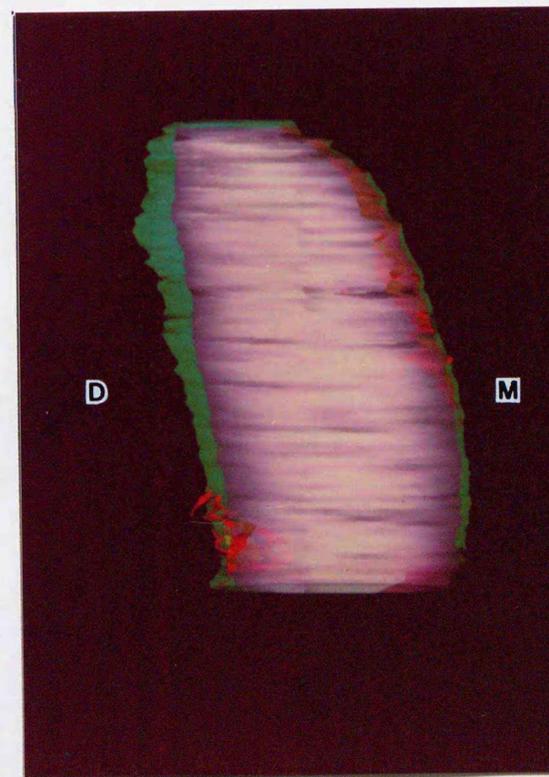
↑：残存する変性領域、Odc：破歯細胞、D：直接性骨吸収、U：穿下性骨吸収



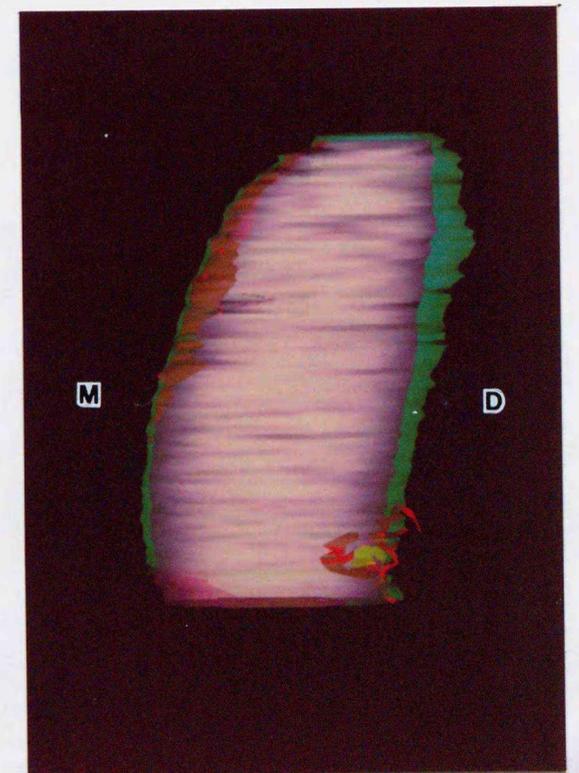
遠心側面観



近心側面観

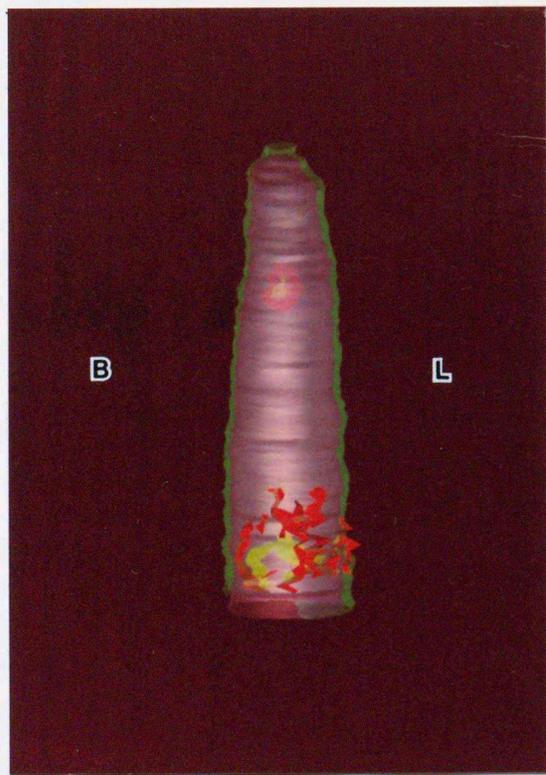


頬側面観

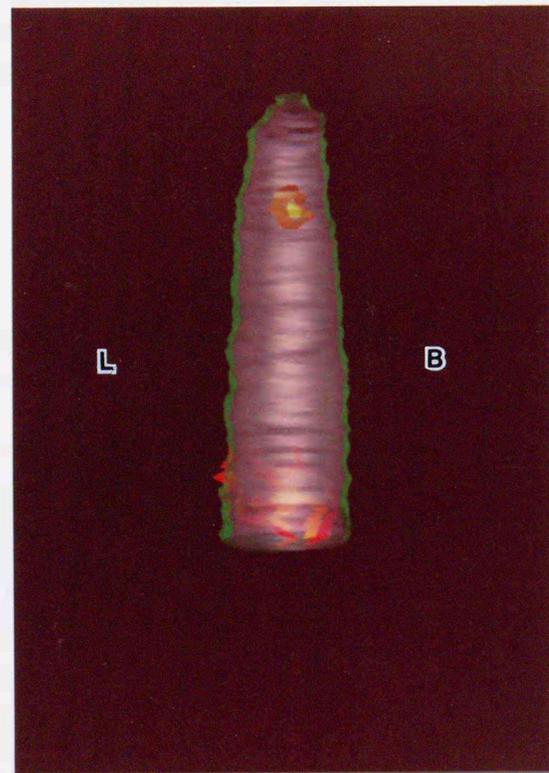


舌側面観

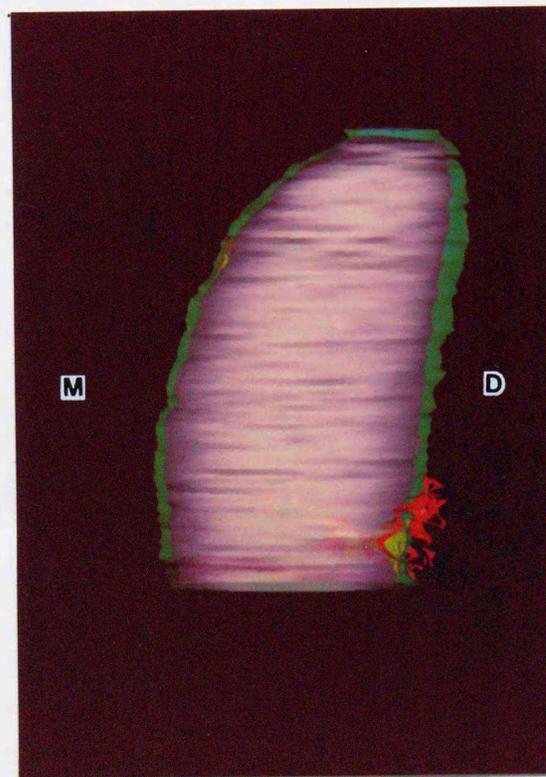
図56 ネコ F：50g 28日間例の三次元再構築像
紫（半透明）：歯根 緑（半透明）：歯槽骨
黄緑：残存した変性領域 赤：破骨細胞の分布領域
B：頬側，L：舌側，M：近心側，D：遠心側



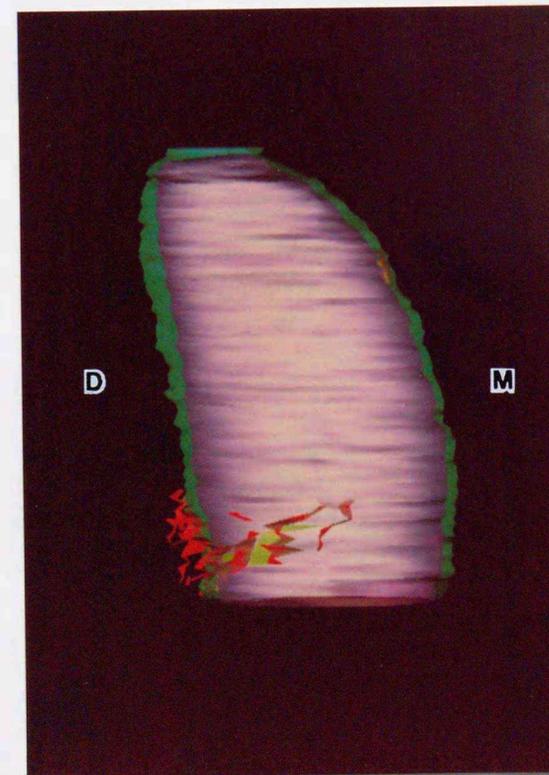
遠心側面観



近心側面観



頬側面観



舌側面観

図57 実験動物F：100g 28日間例の三次元再構築像
 紫（半透明）：歯根 緑（半透明）：歯槽骨
 黄緑：残存した変性領域 赤：破骨細胞の分布領域
 B：頬側，L：舌側，M：近心側，D：遠心側

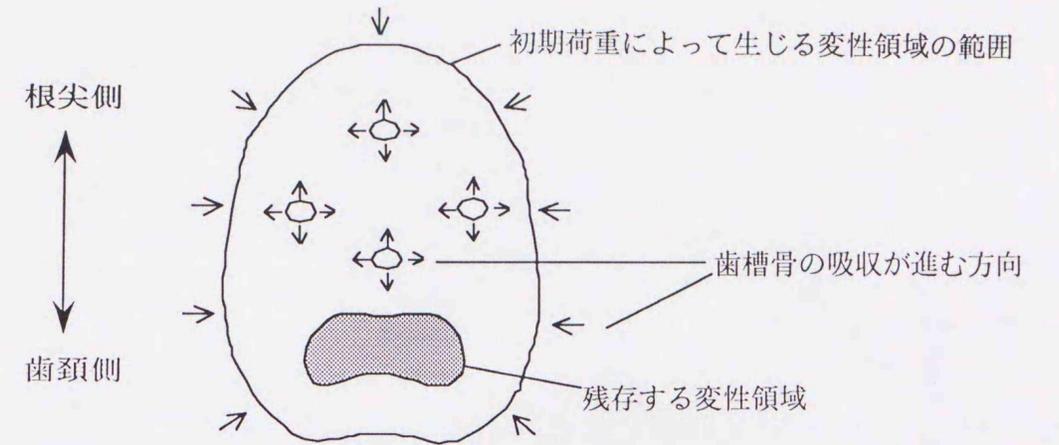


図58-a 初期荷重が小さい場合

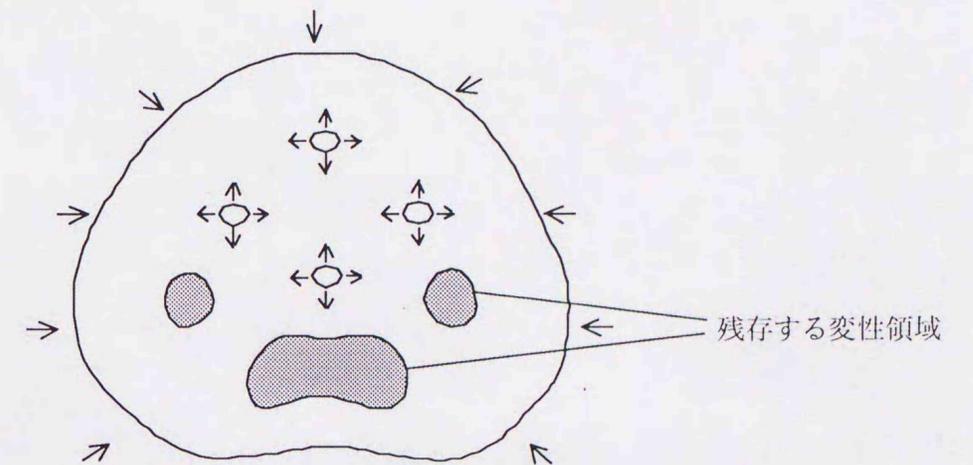


図58-b 初期荷重が大きい場合

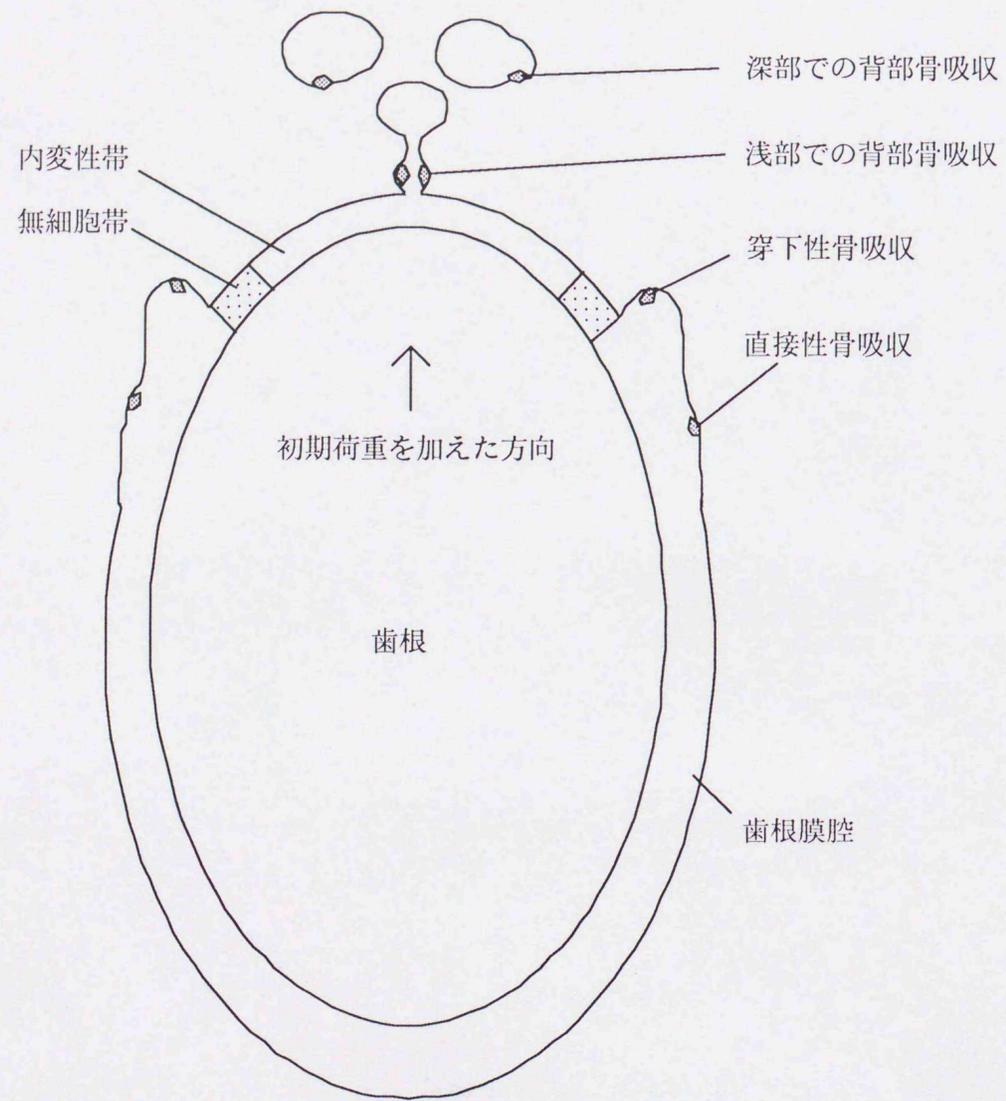


図59 破骨細胞の出現部位と吸収形態

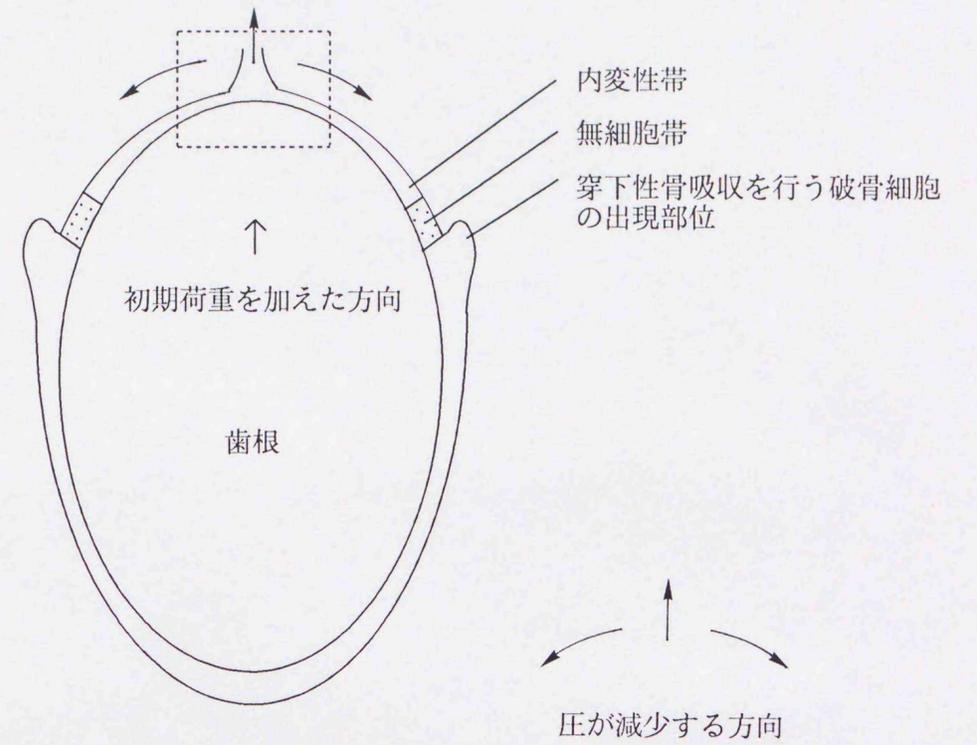
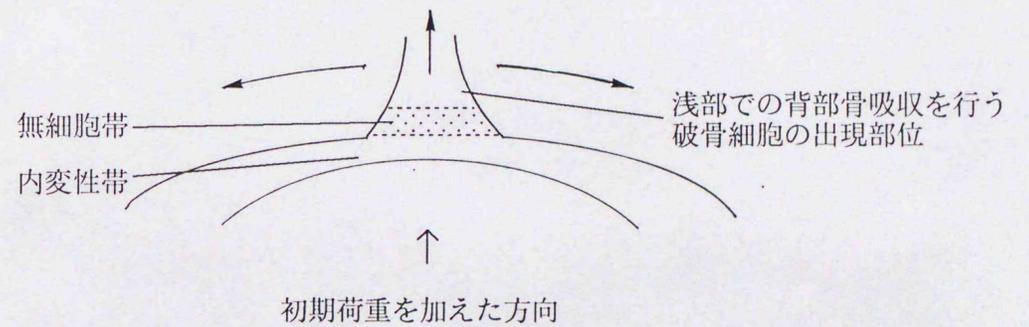
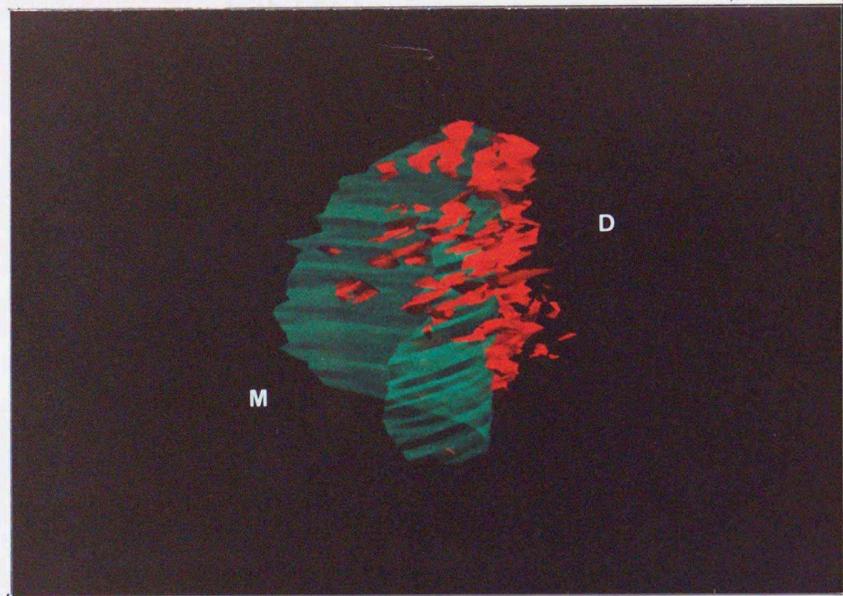


図60-a

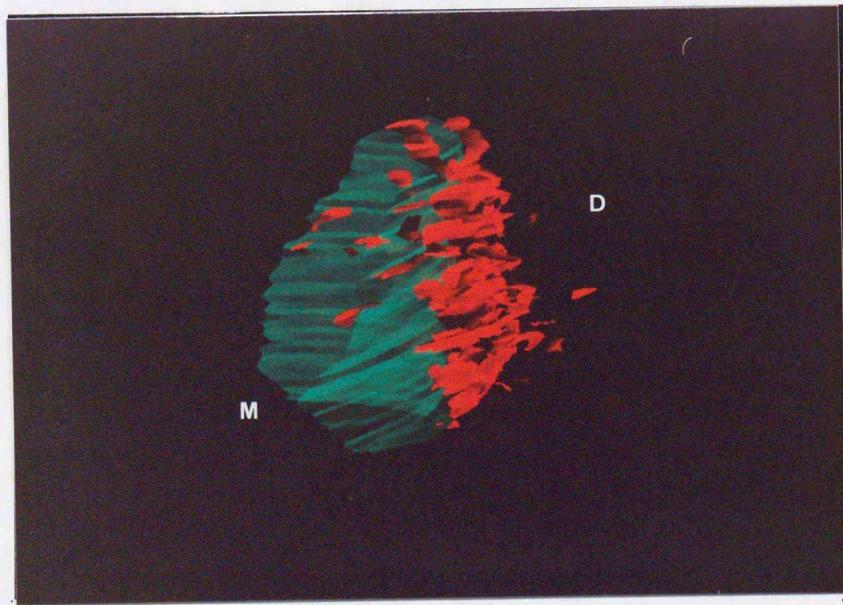


の部分の拡大

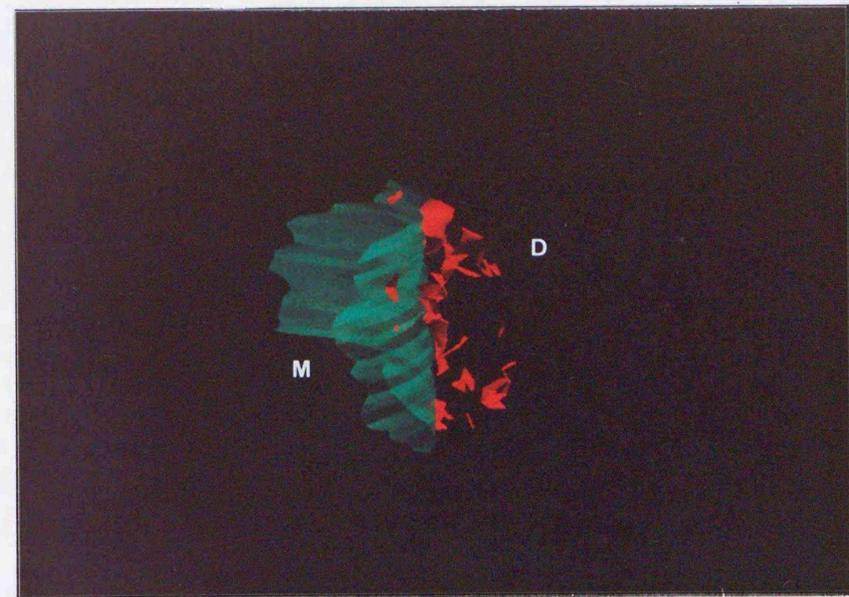
図60-b



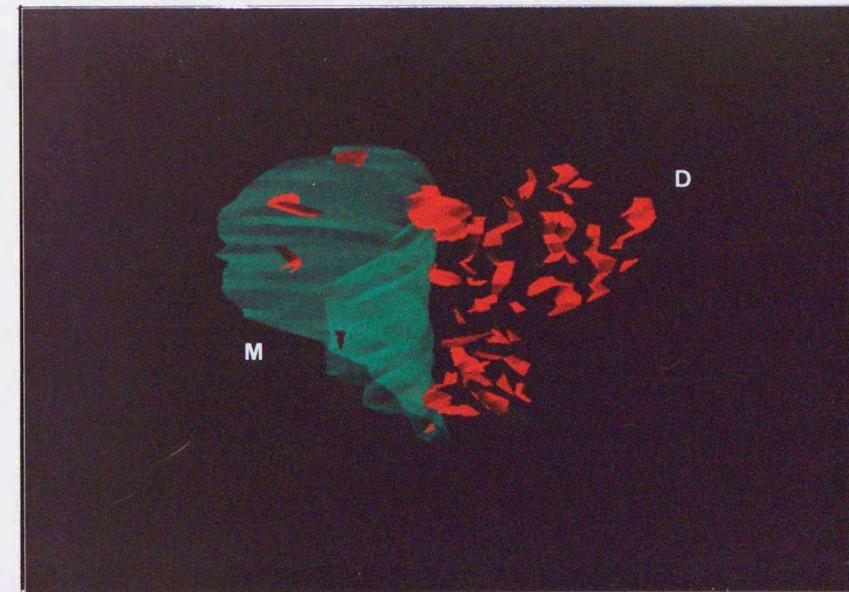
50g 14日間例



100g14日間例



100g 14日間例



200g 14日間例

図61-a ネコD：遠心側歯頸部で、変性領域に面した歯槽壁と背部骨吸収を行う破骨細胞の分布の三次元再構築像
 上図：50g 14日間例
 下図：100g14日間例
 緑：変性領域に面した歯槽骨 赤：背部骨吸収を行う破骨細胞の分布
 初期荷重の大きい100g例で背部骨吸収を行う破骨細胞の分布はより深部にまでおよんでいた。

図61-b ネコC：遠心側歯頸部で、変性領域に面した歯槽骨と背部骨吸収を行う破骨細胞の分布の三次元再構築像
 上図：100g 14日間例
 下図：200g 14日間例
 緑：変性領域に面した歯槽骨 赤：背部骨吸収を行う破骨細胞の分布
 初期荷重の大きい200g例で背部骨吸収を行う破骨細胞の分布はより深部にまでおよんでいた。

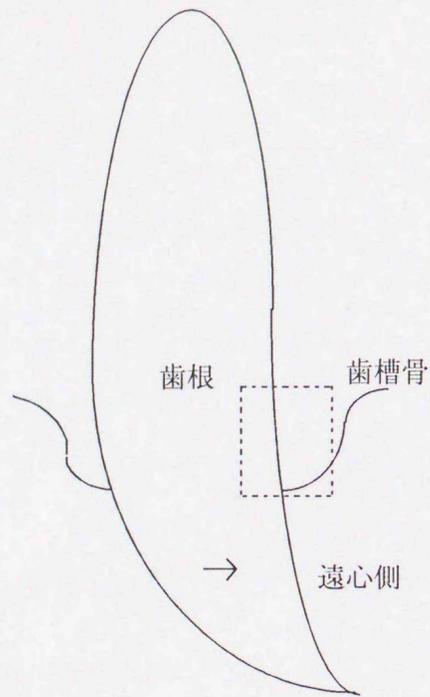


図62-a 遠心側歯頸部において切片を60 μ m間隔で三次元再構築した部位

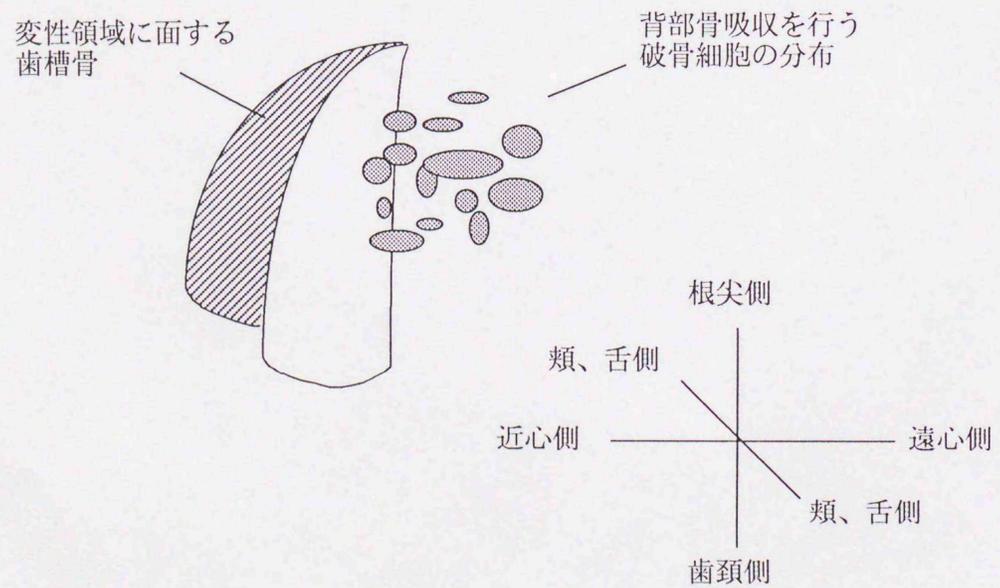


図62-b 変性領域に面する歯槽骨で背部骨吸収を行う破骨細胞の分布

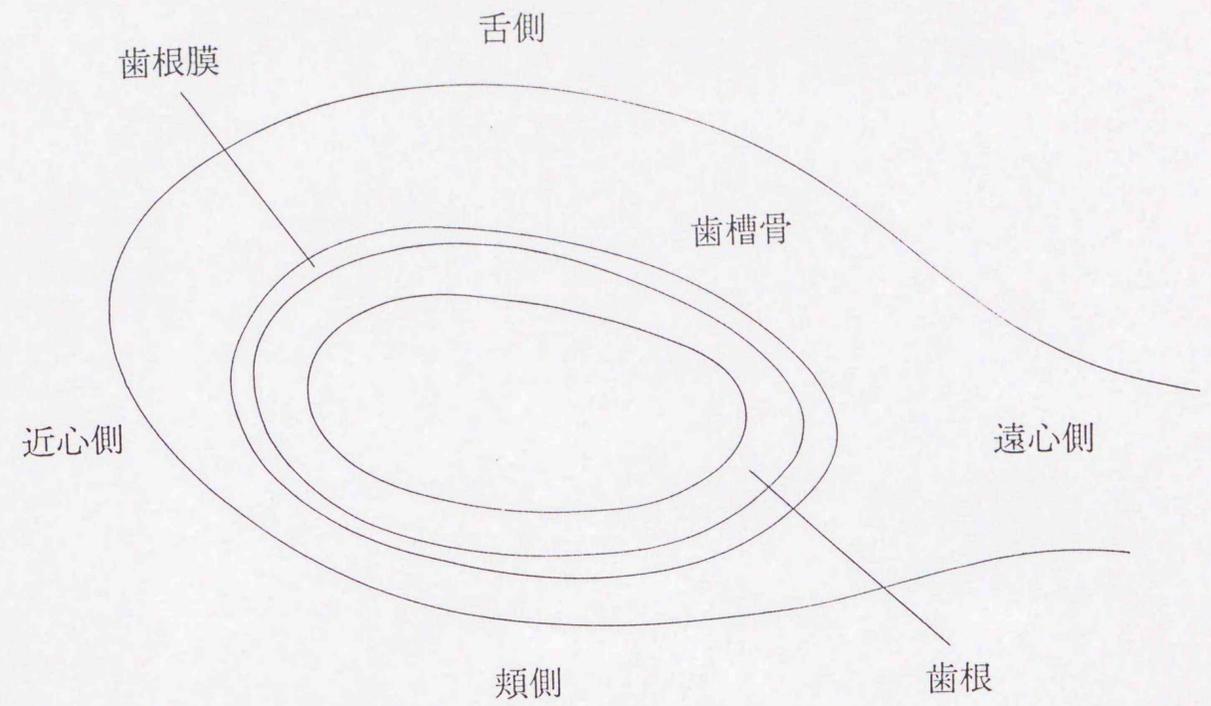


図63-a 横断切片トレース図

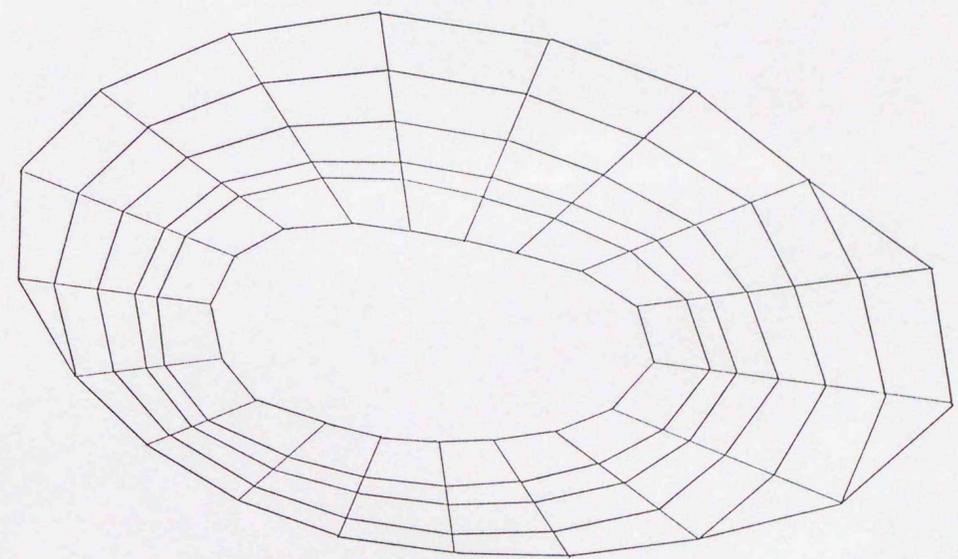
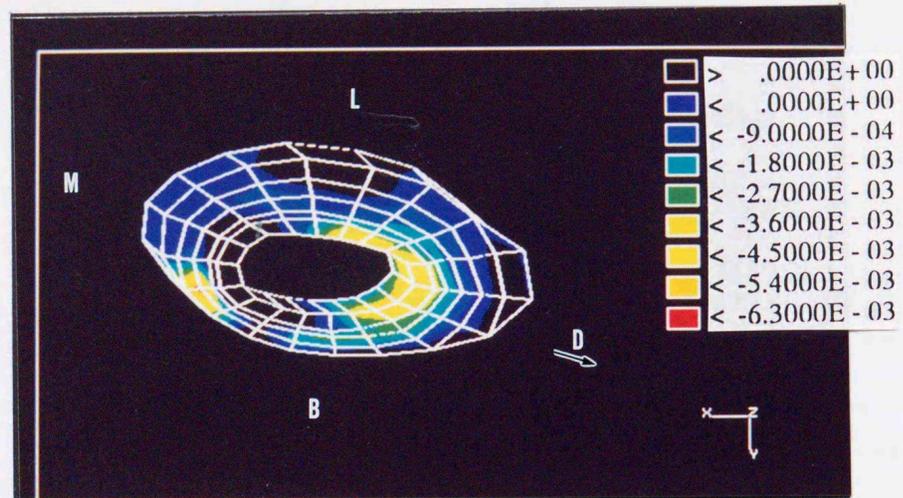
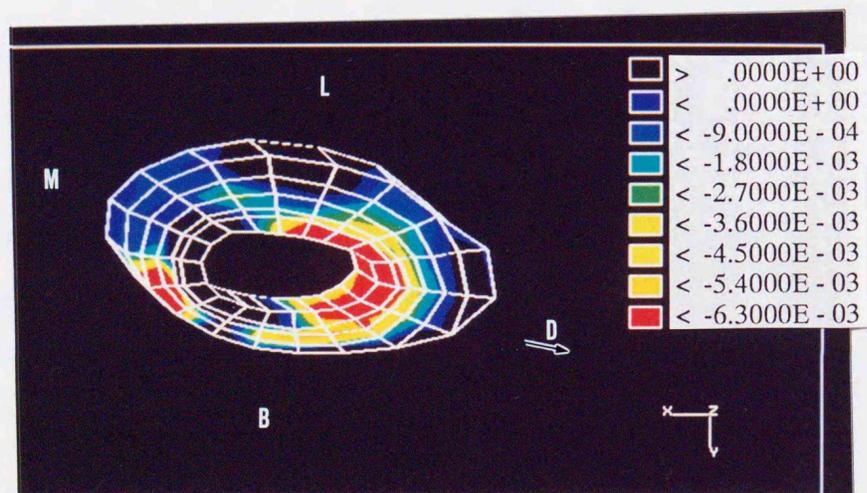


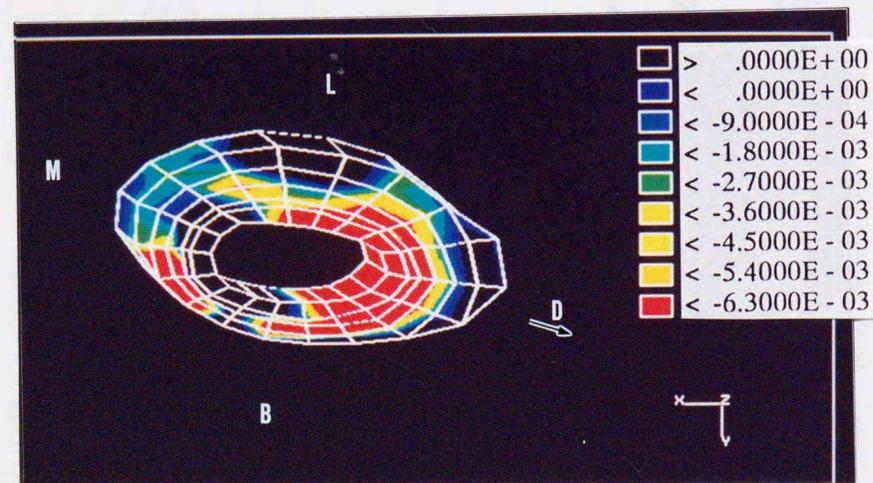
図63-b 二次元的な要素分割を示す図



50g荷重 → 荷重の方向



100g荷重 → 荷重の方向



200g荷重 → 荷重の方向

図64 三次元有限要素法による解析結果

荷重条件が大きくなるにつれて、比較的大きな圧縮応力の分布は歯槽骨内深部にまでおよんでいた。

	左	右
ネコ A	100g/14日間	対照歯
ネコ B	100g/7日間	100g/14日間
ネコ C	100g/14日間	200g/14日間
ネコ D	100g/14日間	50g/14日間
ネコ E	100g/28日間	200g/28日間
ネコ F	100g/28日間	50g/28日間

表1 実験条件

			尖頭の移動量	歯頸部の移動量
14日間	ネコ C	100g	1.00	0.45
		200g	1.10	0.55
	ネコ D	50g	1.15	0.40
		100g	1.10	0.50
28日間	ネコ E	100g	2.00	0.70
		200g	1.70	0.65
	ネコ F	50g	2.20	0.70
		100g	1.90	0.80

単位 mm

表2 実験歯の移動量

組織	弾性係数 (kgf/mm ²)	ポアソン比
歯	2.0×10^3	0.30
歯根膜	6.8×10^{-2}	0.49
歯槽骨	1.4×10^3	0.30

表3 歯、歯根膜および歯槽骨の物性定数値



4 901480 611860
RF-A4NG MADE IN JAPAN