



|                  |  |
|------------------|--|
| 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について  |
| Author(s)        | 金子, 知生   |
| Citation         | 北海道大学. 博士(歯学) 甲第3030号  |
| Issue Date       | 1992-03-25   |
| DOI              | 10.11501/3088403   |
| Doc URL          | <a href="http://hdl.handle.net/2115/30209">http://hdl.handle.net/2115/30209</a>  |
| Type             | theses (doctoral)  |
| Note             | 歯科基礎医学会, 金子 知生 = Tomoo Kaneko, 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 = Three-dimensional situation of periodontal tissue at pressure side incident to orthodontic tooth movement, 歯科基礎医学会雑誌, 36(2), APR 1994, pp.170-186 |
| File Information | tkaneko.pdf  |



[Instructions for use](#)

原 著

## 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

金子 知 生

北海道大学歯学部歯科矯正学講座 (主任・指導：中村進治教授)  
北海道大学歯学部口腔解剖学第2講座 (指導：脇田 稔教授)

(受付：平成5年12月3日)

Three-dimensional situation of periodontal tissue at pressure side  
incident to orthodontic tooth movement

Tomoo Kaneko

*Department of Orthodontics, School of Dentistry, Hokkaido University*  
(Chief and Director : Prof. Shinji Nakamura)

*The second Department of Anatomy, School of Dentistry, Hokkaido University*  
(Director : Prof. Minoru Wakita)

*Kita 13, Nishi 7, Kita-ku, Sapporo 060, Japan*

[Accepted for publication : December 3, 1993]

**Key words :** three-dimensional reconstruction/cell free zone/intra-degeneration zone/osteoclast/  
tooth movement

**Abstract :** In the present investigation adult cats were used. The left upper canine was used as test side, while the other served side as control. Continuous orthodontic forces of 100 g or 200 g produced by the closed coil spring was applied for 4 or 7 days. After the tooth movement, the cat was perfused with Bouin, and tissues were embedded in celloidin. 30  $\mu$ m thickness of serial sections were prepared, stained with H-E and AZAN, and examined under a light microscope. The serial sections were photographed. The surface of alveolar bone and tooth, distribution zone of osteoclasts, and cell free zone were then traced. These elements were reconstructed three-dimensionally reconstructed using a three-dimensional graphic analytic system (COSMOZONE 2SA Nikon).

On the slide where pressure was applied, there was a cell free zone and an intra-degeneration zone. The pyknotic nuclei and disappearance of cell elements were observed in the intra-degeneration zone by light microscopy.

At the cervical region of the teeth, on the slide where pressure was applied, when reconstructed three-dimensionally, the intra-degeneration zone surrounded by the cell free zone was observed. In the 100 g-7 day case, osteoclasts were distributed widely from the distocervical region through the buccal region to the mesioapical region. In the 200 g-7 day case, the distribution of osteoclasts were isolated in the distocervical region and mesioapical region, and at the rear, more bone resorption was observed in the deeper marrow than in 100 g-7 day case.

The present investigation made clear the three-dimensional situation of bone resorption on the pressured side of the alveolar bone caused by orthodontic force.

抄録：成ネコの上顎左側犬歯を遠心に傾斜移動し、セロイジン連続切片により、歯根、歯槽骨の表面、無細胞帯、内変性帯、破骨細胞の分布領域を、コンピュータにより三次元再構築し、圧迫側歯周組織の変性帯と破骨細胞の分布について立体的に観察した。

歯頸部圧迫側歯根膜において、変性組織はエオジン好性の均質無構造な領域としてみられる無細胞帯と H-E 染色において線維芽細胞の核濃縮がみられる内変性帯の二種類に区別され、無細胞帯は内変性帯を囲むように環状に観察された。

圧迫側歯根膜において、穿下性骨吸収をしている破骨細胞は無細胞帯に接した歯槽骨のまわりの側面に存在していた。直接性骨吸収をしている破骨細胞は無細胞帯の外側の圧迫側歯根膜に接した歯槽骨に沿って存在していた。背部骨吸収をしている破骨細胞は内変性帯に接した歯槽骨の骨髄内から歯根膜に向かって存在していた。

## 緒 言

矯正力による歯の移動を行った際に生じる歯周組織の変化について、Sandstedt<sup>1)</sup>、Schwarz<sup>2)</sup>、Reitan<sup>3~8)</sup>、Waldo<sup>9)</sup>、Macapanpan<sup>10)</sup>らにより、破骨細胞や骨芽細胞の出現の時期や、骨の吸収と添加の進行についての報告がなされてきた。Azuma<sup>11)</sup>は、ラットの歯の移動の初期から晩期にいたる長期間の観察を行い、歯根膜の修復と歯槽骨の改造の過程をさらに詳細に報告している。その後、多くの研究者によって、光学顕微鏡ならびに電子顕微鏡を用いてその組織学的構造の変化について詳細な報告がされている。

矯正力による歯の移動に伴う歯周組織の変化は歯根と歯槽壁との間に生じる応力に対応する、あるいは適応しようとする組織の変化である。したがってその変化はこれらの中で三次元的な広がりをもっているということは当然推測される。しかし、従来の報告の多くは、組織切片による一断面の観察をもとにしており、吸収を面としてとらえた報告は見あたらない。そこで、中村<sup>12)</sup>は血管内墨汁注入透明標本で圧迫側歯根膜の血管の立体像を観察し、さらに、同部位の組織像を観察して検討を行った。一方、これまで組織を立体的に観察する方法としては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て、それを重ね合わせて立体構築する方法が行われてきた<sup>13,14)</sup>。また、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るようになった<sup>15~17)</sup>。しかし、従来の重ね合わせ法では観察方向や観察範囲に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標本の表面に限られるという欠点がある。最近、連続組織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ックスにより三次元構築像で

表示する方法<sup>18~20)</sup>を用いた研究が多くなされ、優れた三次元観察法であることが示されている<sup>21,22)</sup>。

そこで今回の研究は、矯正力による歯の移動の初期反応を光学顕微鏡で観察し、その連続組織切片をコンピュータを用いて三次元再構築して、圧迫側歯根膜の変性組織の状態およびその分布領域、さらに骨吸収を行っている破骨細胞の分布の状態について明らかにすることを目的に行った。

## 材料ならびに方法

### 1. 実験動物および実験装置

実験には全身的ならびに歯周組織の健康な雄の成ネコ(3.0~6.0 kg)を用いた。ネコは、1週間一般飼育してから実験を開始し、1日に2回、飼料(CANET ペットライ社製)および水(水道水)をそれぞれ自由摂取させた。上顎左側犬歯を実験歯とし、右側同名歯を対照歯として使用した。

実験前後に、X線写真を撮影して歯根の状態を確認した。実験装置装着前後および実験終了時に口腔内写真を撮影した。また、実験装置装着前および灌流固定完了時に、歯列模型を作製した。

装置装着には、ネコを固定し、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。Fig. 1で示すように上顎左側第3前臼歯を固定源とし、矯正用クロズドコイルスプリングで実験歯を初期荷重 100 g および 200 g になるように遠心に牽引した。その際に、実験歯の移動が妨げられないように対合歯を削合した。また、それぞれの力に対して作用期間は、4日および7日とした。

実験の所定期間終了後、Pentobarbital系麻酔剤(ネンブタール ダイナボット社製)で全身麻酔を施し、Bouin固定液で灌流固定を行った。その後、両側の上顎犬歯を上顎骨ごと切り出して、トリミングしてから、Plank-

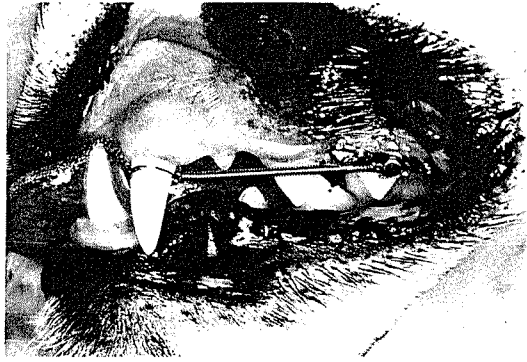


Fig. 1 Experimental appliance applied to the cat.

Rychlo 液<sup>23)</sup>にて5日間脱灰を行い、通法に従ってパラフィンおよびセロイジンに包埋した。パラフィンブロックは、5 $\mu$ mで薄切し、ヘマトキシリン-エオジン染色およびアザン染色を施した。また、セロイジンブロックは、ボーリングマシンで2カ所に直径0.8mmの穴を薄切面に対して垂直にあけて、三次元再構築のための基準点とした。その後、厚さ30 $\mu$ mの横断連続切片を作製し、ヘマトキシリン-エオジン染色を施した。

## 2. 三次元再構築法

5枚おきの横断連続組織切片を顕微鏡写真( $\times 2.5$ )撮影し、さらに4.5倍にプリントし、歯根、歯槽骨表面、無細胞帯、破骨細胞の分布領域、および2つの基準点をトレースした。

トレースデータを三次元再構築するために、基準点、歯根、歯槽骨表面、無細胞帯および破骨細胞の分布領域を独立した4つのデータとして入力し、三次元画像構築ソフト(Cosmozone 2SA Nikon社製)で処理を行った。三次元画像における透視像は、歯槽骨を緑色、歯根を紫色、無細胞帯を黄色、破骨細胞を赤色で表示した。その際に、像がそれぞれ重なることによりその像の表示色に変化した。例えば、歯根と歯槽骨が重なった場合には歯根が青色に、また、破骨細胞については歯槽骨内部に分布している場合には重なりがないので赤色のまま表示されるが、歯槽壁表面に分布している場合には歯槽骨と重なってピンク色に表示された。

なお、この三次元再構築像は、各組織像の分布状態および相互関係を任意の方向から連続表示して、観察することができるが、今回は解剖学的位置関係の把握を容易にするために、遠心面観、近心面観、頬側面観、舌側面観の四方向からの三次元再構築像を用いて検討した。

## 結 果

### 1. 組織学的観察

#### 1) 対照歯の所見

対照歯の横断面組織切片像では、歯頸部から根尖部まで歯根膜腔はほぼ一様な幅であった(Fig. 2)が、線維骨は近心に比べて遠心の方がかなり厚かった。また、対照歯では歯根膜の線維に走向の乱れや、特別な弛緩、緊張などはみられず、線維間に介在する歯根膜細胞も一様に分布していた。歯槽骨表面には骨芽細胞が、また歯根表面にはセメント芽細胞が配列していた。

#### 2) 実験歯の所見

実験歯の遠心歯頸部では、圧迫側の歯根膜腔は幅が狭く(Fig. 3)、ヘマトキシリン-エオジン染色でエオジン好性の均質で細胞成分のみみられない無構造な領域と、その間にはさまれた線維芽細胞の核の濃縮した変性領域の2つが区別された。そこで前者を無細胞帯、後者を内変性帯と呼ぶことにした(Fig. 4)。また、このような所見は縦断切片においても同様に観察された(Fig. 5)。

#### (1) 100g 4日間例

内変性帯をはさんで無細胞帯が観察され、内変性帯の血管は圧平され閉塞していた(Fig. 6)。この時期では、破骨細胞は歯頸部の無細胞帯の外縁に接して少数存在しており、わずかに穿下性骨吸収を行っていた(Fig. 7)。

一方、歯の傾斜によって生じる近心根尖部の圧迫側歯根膜には、無細胞帯がわずかに観察されたが内変性帯は観察されなかった(Fig. 8)。

#### (2) 100g 7日間例

100g 7日間例では、遠心歯頸部の圧迫側歯根膜には、内変性帯およびそれをはさむ無細胞帯が存在し、歯根膜の幅は100g 4日間例よりさらに狭くなっていた(Fig. 9)。内変性帯はアザン染色で橙黄色に染色され(Fig. 10)、血管が圧平され閉塞しているのが観察された。しかし、この染色のみでは、無細胞帯と内変性帯を区別することはできなかった。また、破骨細胞は歯頸部の無細胞帯の外縁に接して穿下性骨吸収を行っている領域でみられた(Fig. 11)。さらに、歯槽骨の表面に沿って直接性骨吸収を行っている領域でも破骨細胞が観察されたが(Fig. 12)、この破骨細胞は根尖部まで連続して分布していた。

また、歯頸部の内変性帯に接した歯槽骨内の骨髓にも、歯根膜に向かって骨吸収(以後背部骨吸収と呼ぶ)を行っている破骨細胞が観察された(Fig. 13)。

一方、近心根尖部の圧迫側歯根膜には、無細胞帯がわずかにみられたが、内変性帯は存在しなかった。歯槽骨

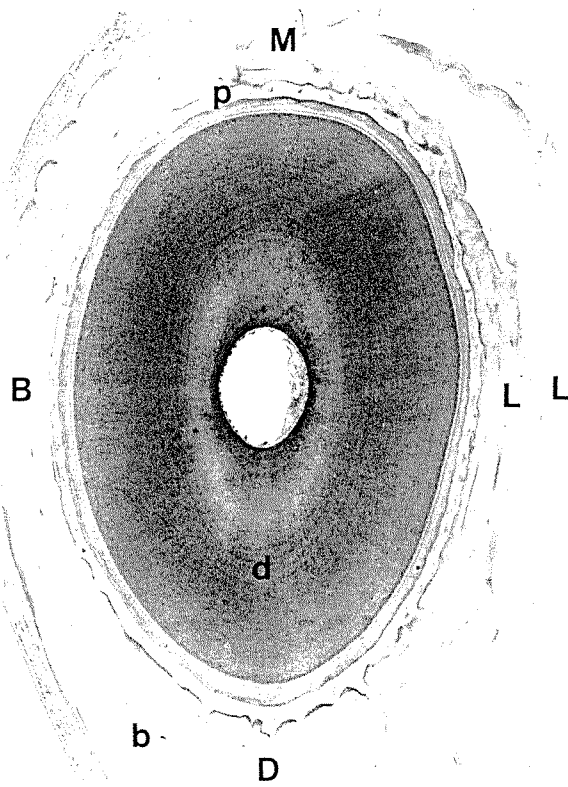


Fig. 2 Micrograph of control side. Periodontal space was uniform in width. B : buccal side, L : lingual side, M : mesial side, D : distal side, b : alveolar bone, d : dentin, p : periodontium ( $\times 5$  H. E. stain)

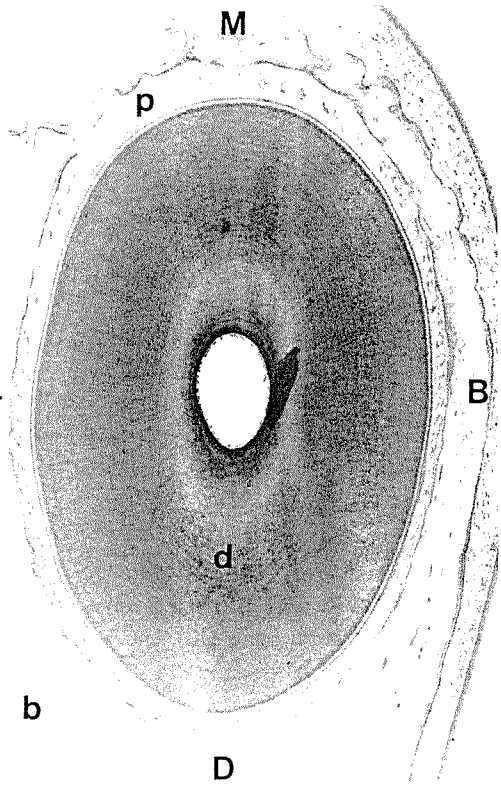


Fig. 3 Micrograph of test side. A width of mesial periodontal space was wide, that of distal periodontal space was narrow. B : buccal side, L : lingual side, M : mesial side, D : distal side, b : alveolar bone, d : dentin, p : periodontium ( $\times 5$  H. E. stain)

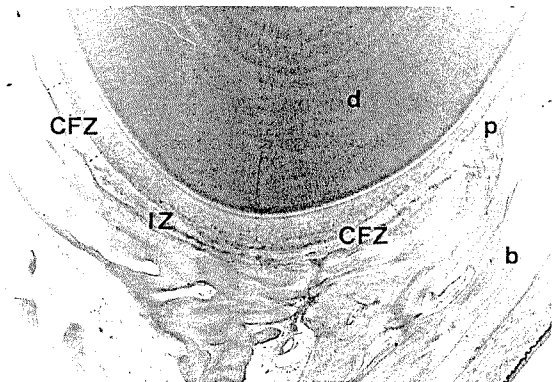


Fig. 4 Cross section of distocervical region of the tested tooth. Two parts of homogeneous cell free zone (CFZ) stained by eosin were observed, and between them intra-degeneration zone (IZ) included pyknotic nucleus of fibroblasts was observed. b : alveolar bone, d : dentin, p : periodontium ( $\times 10$  H. E. stain)

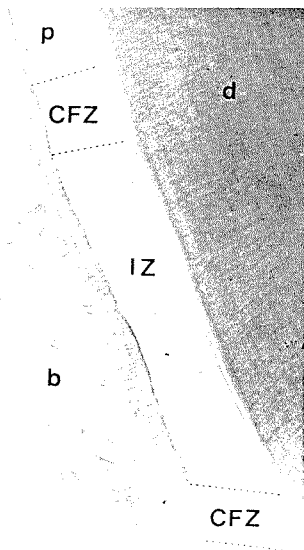


Fig. 5 Longitudinal section of distocervical region of tested tooth. Two parts of homogeneous cell free zone (CFZ) stained by eosin were observed, and between them intra-degeneration zone (IZ) included pyknotic nucleus of fibroblasts were observed. b : alveolar bone, d : dentin, p : periodontium ( $\sim 10$  H. E. stain)

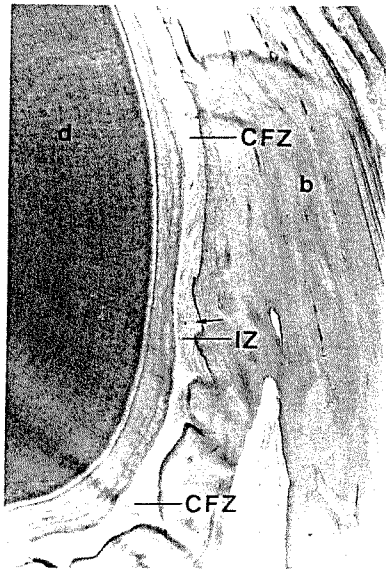


Fig. 6 Distocervical region of 100 g 4 days case. Intra-degeneration zone (IZ) between cell free zone (CFZ) was observed. Capillaries (arrow) in the intra-degeneration zone (IZ) were compressed and blocked. b : alveolar bone, d : dentin ( $\times 15$  H. E. stain)

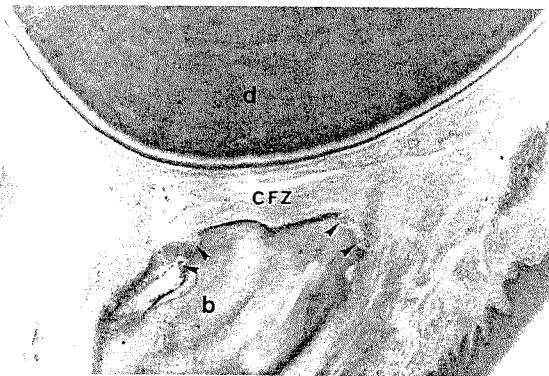


Fig. 7 Distocervical region of 100 g 4 days case. A few osteoclasts (arrow head) and undermining resorption were observed in the outer cell free zone (CFZ). b : alveolar bone, d : dentin ( $\times 20$  H.E. stain)

Fig. 10 Distocervical region of 100 g 7 days case. Intra-degeneration zone (arrow) was stained into orange by AZAN. b : alveolar bone, d : dentin, bm : marrow space ( $\times 10$ )

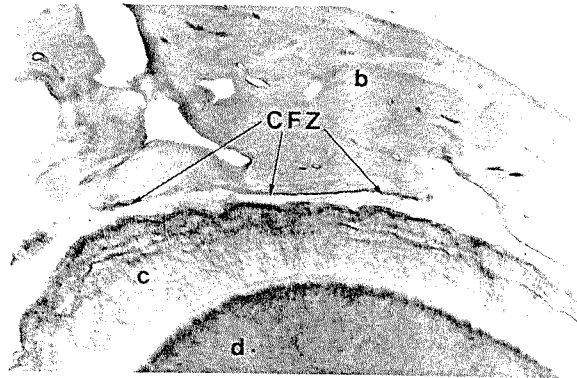


Fig. 8 Mesioapical region of 100 g 4 days case. Cell free zone (CFZ) was observed, but intra-degeneration zone was not. b : alveolar bone, d : dentin, c : cement ( $\times 20$  H. E. stain)

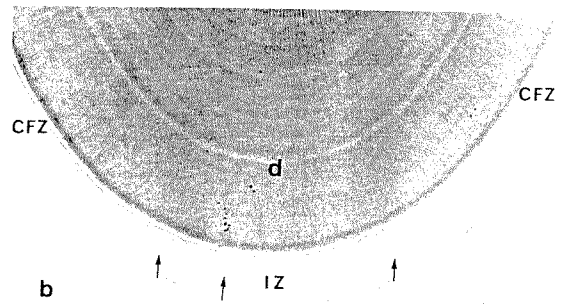
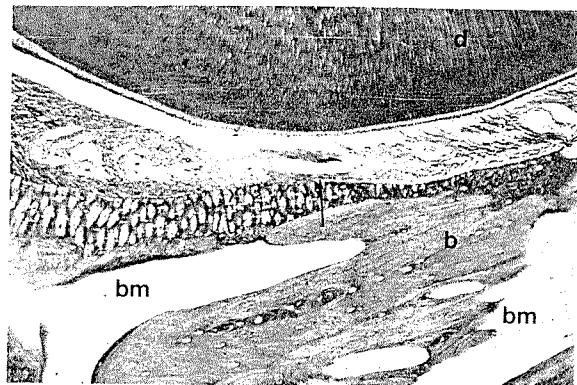


Fig. 9 Distocervical region of 100 g 7 days case. Intra-degeneration zone (IZ) between cell free zone (CFZ) was observed. Capillaries (arrow) in the intra-degeneration zone (IZ) were compressed and blocked. b : alveolar bone, d : dentin ( $\times 12.5$  H. E. stain)



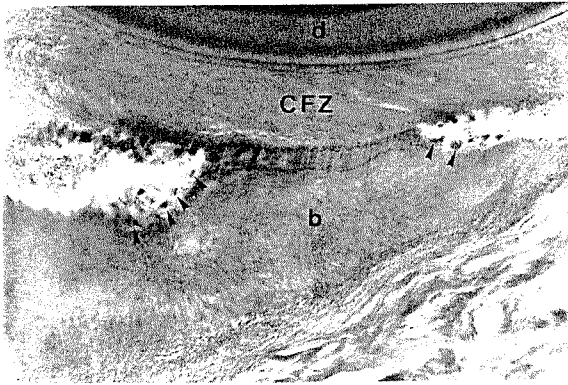


Fig. 11 Distocervical region of 100 g 7 days case. Osteoclasts (arrow head) and undermining resorption were observed in the outer cell free zone (CFZ). b : alveolar bone, d : dentin ( $\times 25$  H. E. stain)

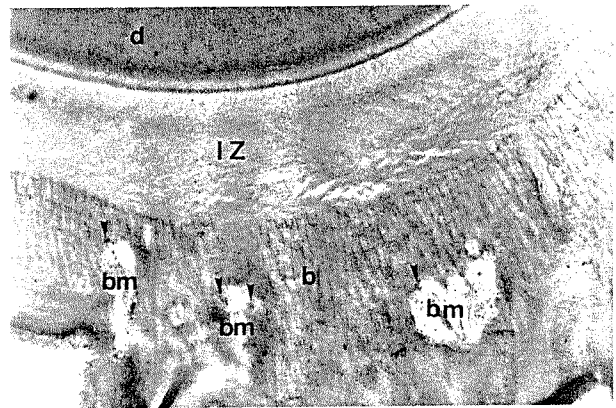


Fig. 13 Distocervical region of 100 g 7 days case. Rear bone resorption (arrow head) was observed in the marrow space of alveolar bone adjacent to the intra-degeneration zone (IZ). b : alveolar bone, d : dentin, bm : marrow space ( $\times 25$  H. E. stain)

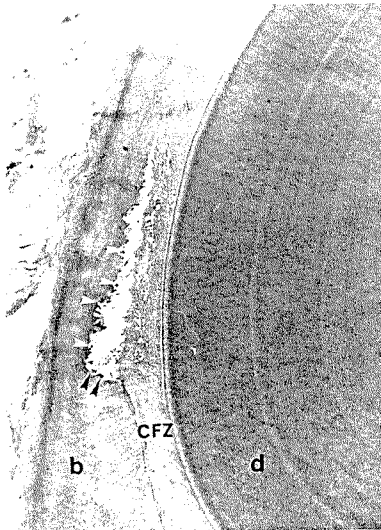


Fig. 12 Distocervical region of 100 g 7 days case. Osteoclasts (arrow head) and undermining resorption were observed in the outer cell free zone (CFZ). Direct resorption (white arrow head) was observed along the periodontium adjacent to undermining resorption. b : alveolar bone, d : dentin ( $\times 12.5$  H. E. stain)

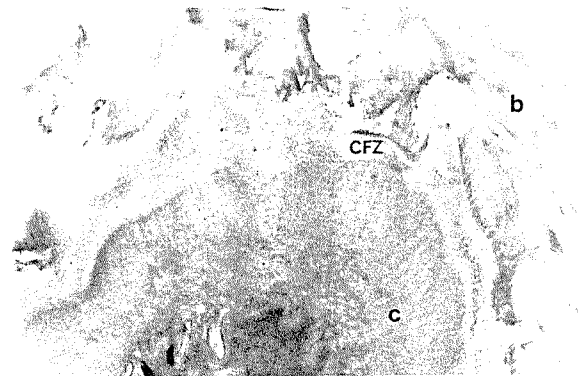


Fig. 14 Mesioapical region of 100 g 7 days case. The cell free zone (CFZ) was observed, and a direct resorption (white arrow head) was observed around it. b : alveolar bone, c : cement ( $\times 20$  H. E. stain)

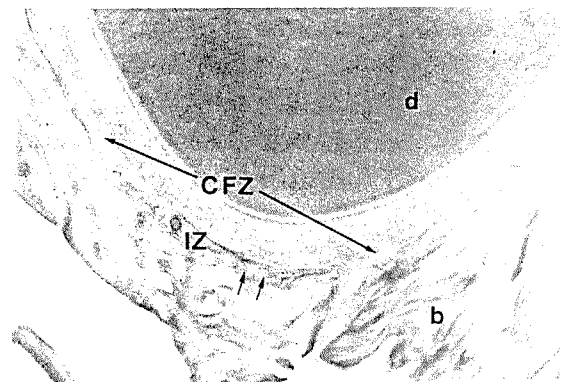


Fig. 15 Distocervical region of 200 g 4 days case. Intra-degeneration zone (IZ) between cell free zone (CFZ) was observed. Capillaries (arrow) in the intra-degeneration zone (IZ) were compressed and blocked. b : alveolar bone, d : dentin ( $\times 12.5$  H. E. stain)

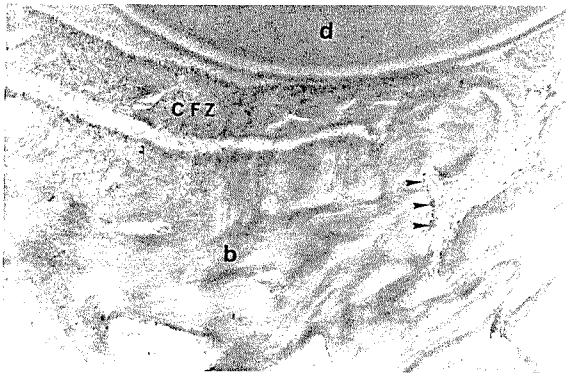


Fig. 16 Distocervical region of 200 g 4 days case. A few osteoclasts (arrow head) and undermining resorption were observed in the outer cell free zone (CFZ). b : alveolar bone, d : dentin ( $\times 25$  H. E. stain)

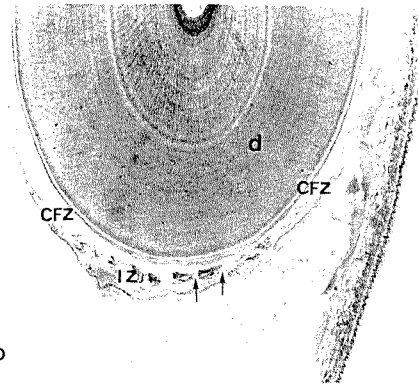


Fig. 18 Distocervical region of 200 g 7 days case. Intra-degeneration zone (IZ) between cell free zone (CFZ) was observed. Capillaries (arrow) in the intra-degeneration zone (IZ) were compressed and blocked. b : alveolar bone, d : dentin ( $\times 12.5$  H. E. stain)

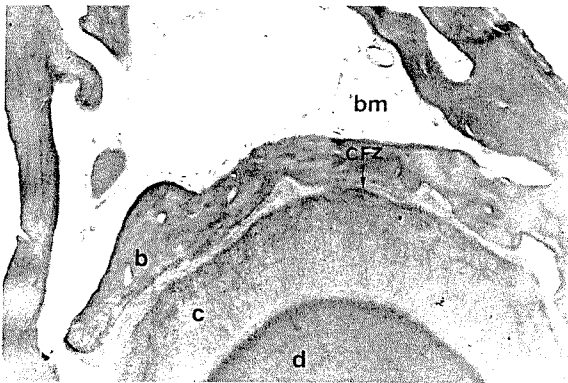


Fig. 17 Mesioapical region of 200 g 4 days case. Cell free zone (CFZ) was observed, but intra-degeneration zone was not. b : alveolar bone, bm : marrow space, d : dentin, c : cement ( $\times 15$  H. E. stain)

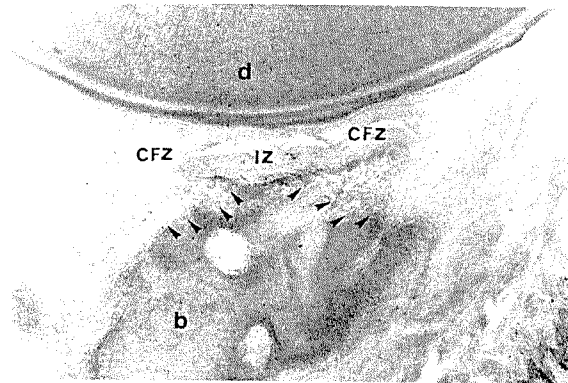


Fig. 19 Distocervical region of 200 g 7 days case. Many osteoclasts (arrow head) and an undermining resorption were observed in the outer cell free zone (CFZ). IZ : Intra-degeneration zone, b : alveolar bone, d : dentin ( $\times 25$  H. E. stain)

表面には、破骨細胞がかなり広く分布しているのが観察された (Fig. 14)。

### (3) 200 g 4 日間例

遠心歯頸部の圧迫側歯根膜は、100 g 4 日間例とほぼ同様で、歯根膜腔の幅は狭まり、内変性帯とその両側に無細胞帯が存在していた (Fig. 15)。破骨細胞は、歯槽縁付近の無細胞帯に接してわずかに存在し穿下性骨吸収を行っているのがみられた (Fig. 16)。

一方、近心根尖部の圧迫側歯根膜には、歯槽壁の突出部と歯根表面の間に無細胞帯がわずかに認められたが、

内変性帯は全くみられなかった (Fig. 17)。

### (4) 200 g 7 日間例

遠心歯頸部の圧迫側歯根膜は、無細胞帯とその間に内変性帯が存在し、内変性帯の血管は圧平され閉塞していた (Fig. 18)。歯槽縁付近には、無細胞帯を取り囲むようになり多くの破骨細胞が存在し、穿下性骨吸収を行っていた (Fig. 19)。また、内変性帯に接した歯槽骨髄内には、背部骨吸収を行っている破骨細胞が多く観察された (Fig. 20)。無細胞帯の外縁では、これに接して穿下性骨吸収を行っている破骨細胞が、さらにその外側の歯槽骨表面では直接性骨吸収を行っている破骨細胞が観察さ



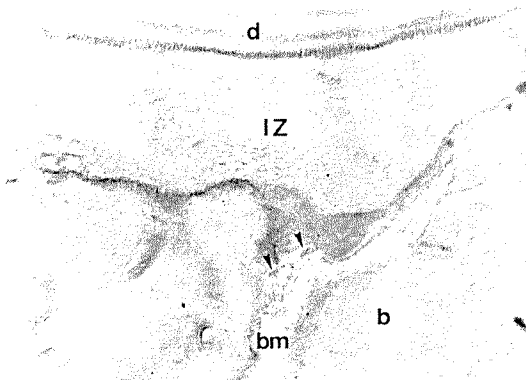


Fig. 20 Distocervical region of 200 g 7 days case. Rear bone resorption (arrow head) was observed in the marrow space of alveolar bone adjacent to the intra-degeneration zone (IZ). b : alveolar bone, d : dentin, bm : marrow space (×37.5 H. E. stain)

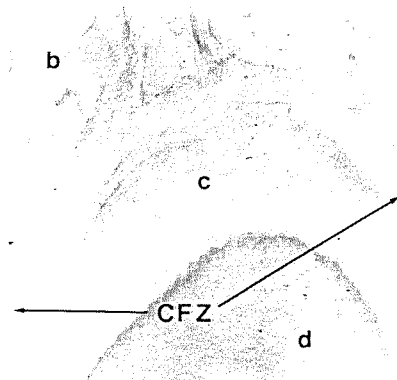


Fig. 22 Mesioapical region of 200 g 7 days case. Cell free zone (CFZ) was observed, but intra-degeneration zone was not. b : alveolar bone, d : dentin, c : cement (×15 H. E. stain)

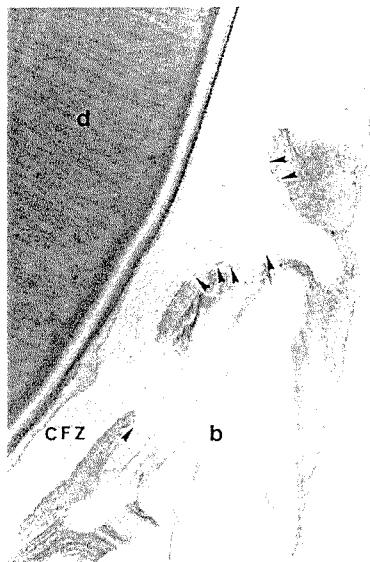


Fig. 21 Distocervical region of 200 g 7 days case. Osteoclasts (arrow head) and an undermining resorption were observed in the outer cell free zone (CFZ), and direct resorption (white arrow head) was observed along periodontium in the outer undermining resorption. b : alveolar bone, d : dentin (×25 H. E. stain)

れた (Fig. 21)。

近心歯頸部の圧迫側歯根膜では、無細胞帯は幅狭く歯根膜に分散して存在し、破骨細胞はその周囲に多く分布していた (Fig. 22)。

## 2. 三次元再構築像の観察

今回の実験において、歯根、歯槽骨表面、無細胞帯、破骨細胞などが三次元再構築像内に多色表示され、内変性帯との相互関係が明確になった。

### 1) 対照歯と実験歯の比較

頬側面観および舌側面観により、実験歯は対照歯に比べると、歯が歯槽に対して遠心傾斜していることが確認できた。しかしながら、遠心面観および近心面観では、このような偏位はみられなかった (Fig. 23-a, b, c, d)。

### 2) 実験歯の観察

#### (1) 100 g 4日間例

遠心面観により、歯頸部の圧迫側歯根膜においては、無細胞帯は歯頸側約 1/3 にやや頬側に偏位して環状に存在し、内変性帯は環状の無細胞帯に取り囲まれていた。また破骨細胞は無細胞帯の周囲および歯槽縁付近にわずかにみられるにすぎなかった (Fig. 24-a)。

一方、近心面観より、近心根尖部の無細胞帯は長く帯状に分布しており、破骨細胞は無細胞帯の周囲に散在している様子が観察された (Fig. 24-b, c, d)。

#### (2) 100 g 7日間例

遠心面観 (Fig. 25-a) より、無細胞帯および内変性帯は 100 g 4日間例と同様に、遠心歯頸部約 1/3 に環状に分布しているが、その形は歯頸側が広い尖った卵円形をなして、根尖側に向かうにつれて内変性帯と比べ無細胞帯の領域が大きくなる傾向がみられた。一方、破骨細胞は無細胞帯を取り囲むように存在し、さらに、頬側面観 (Fig. 25-c) から観察すると、その分布領域は遠心歯頸部の圧迫側歯根膜から頬側面を経て、近心根尖部の圧迫側歯根膜まで広く帯状に連続しているのが認められた。ま

た、遠心面観で内変性帯と重なってみえる破骨細胞の分布領域は、頬側面観および舌側面観では内変性帯に面した歯槽骨の浅い部分の骨髓内にあり、背部骨吸収を行っている破骨細胞であることが明白に認められた (Fig. 25-a, c, d)。

一方、近心面観から、根尖部の無細胞帯はわずかに限局して存在し、破骨細胞はその周囲にかなり多く分布していた (Fig. 25-b)。

### (3) 200 g 4日間例

歯頸部の圧迫側歯根膜において、無細胞帯は 100 g 4日間例とほぼ同様な分布を示していた。遠心面観より、歯頸部の無細胞帯は 100 g 例に比べ根尖方向にさらに延びた環状を呈しており、その内部には内変性帯が存在していた。また破骨細胞は無細胞帯の外側にわずかにみられるだけであった (Fig. 26-a, b, c, d)。

### (4) 200 g 7日間例

遠心面観より、無細胞帯は他の条件のものに比べて歯頸部に限局しており、扁平な環状構造を示し、無細胞帯に囲まれた内変性帯もかなり狭くなっていた (Fig. 27-a)。また無細胞帯を囲んで存在する破骨細胞は、100 g 7日間例に比べるとその分布領域は狭くなっていたが、逆に内変性帯に接する歯槽骨の骨髓内で背部骨吸収を行っている破骨細胞の分布は非常に広く、歯槽骨のより内深くにまで達していることが認められた (Fig. 27-c, d)。

一方、近心面観から近心根尖部の無細胞帯は帯状であり、破骨細胞も、歯頸部に比べて広い範囲に分布しているものの、100 g 7日間例に比べて散在している様子が観察された (Fig. 27-b)。

## 考 察

### 1. 実験方法

歯の移動方法には、中村<sup>12)</sup>の矯正用バンドとコイル・スプリングを用いたネコ犬歯の移動方法を改良し、正確な強さの矯正力が働き、しかも実験歯の歯周組織を障害しない装置とした。

組織像の三次元再構築法は、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<sup>24-27)</sup>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ポーリングマシンで穴をあけた。この処置により各切片には小孔が設定され、これらを構築の重ね合わせのための基準点として用いた。ただし、この方法では薄切から封入までの間にセロイジンが伸縮する等の歪が生じ、それらを完全に防止することが困難である。このため三次元再構築

のための原画上で基準孔の位置が若干ずれることがあった。これは復構された三次元像辺縁の輪郭の凹凸として現れるが、これは今後解決すべき問題である。

## 2. 圧迫側歯周組織についての考察

### 1) 組織学的考察

実験的歯の移動に伴う歯周組織とくに圧迫側歯根膜に出現する変性組織については、過去に多くの報告がある。

Sandstedt<sup>1)</sup>は、強い力では圧迫側歯根膜が挫滅し、核の消失、核の濃縮、主線維と間質組織の消失などの変化が生じ、この組織は不活性であるが壊死組織ではないと報告した。同様に、種々の動物で、歯にさまざまな矯正力を加えて圧迫側歯根膜を観察して、その無構造な領域を硝子様変性と考えている報告<sup>10-12,28-33)</sup>と、壊死組織と考えている報告<sup>2,34-36)</sup>がある。Reitan<sup>6)</sup>は、硝子様変性領域の隣接組織に散在的に細胞がみられる領域を観察し、これを半硝子様変性と表現している。同時に彼は、この半硝子様変性組織は再機能化される、あるいは再生能をもつものであるとも述べている。硝子様変性組織や壊死組織はいずれにしても単なる同じ変性組織の呼び方の差にすぎないが、Reitanのように再生能と関連して変性組織を分類報告した例は少なく、意義深い。最近、電子顕微鏡による歯根膜の変化の観察実験もいくつか報告されている。Rygh<sup>31-33)</sup>は、歯根膜の実験的圧迫の結果生じた硝子様変性組織は、電子密度の高い線維群の凝集であって、コラーゲン線維の縞構造を全く失った無構造な形態であると述べている。さらに、古賀<sup>37)</sup>は、圧迫側歯根膜を観察した結果、光学顕微鏡でエオジンに均一無構造に染ってみられる部位を歯根膜細胞の壊死と判定した。また、風間<sup>38)</sup>は Reitan の述べた半硝子様変性領域に着目し、電子顕微鏡で観察した。彼は Reitan が述べている再生能を有する細胞を貪食能を有する線維芽細胞とみなし、半硝子様変性を正常組織の硝子様変性化への過程の一コマと考えた。このような圧迫側歯根膜に生じた変化を時間的要因との関連において観察した報告も多い<sup>11,33,35-40)</sup>。

上記のように、圧迫側に生じる歯根膜の組織学的変化は硝子様変性や壊死などと呼ばれてきたが、いずれも同一の変性組織として観察しているという共通点がある。今回の実験では、この圧迫側歯根膜の硝子様変性を組織学的な所見、特に破骨細胞の出現部位との関連から、次の2種類の変性帯に区別して観察した。

① 無細胞帯：圧迫側歯根膜においてエオジンに均質に染色され、歯根膜細胞の核が見られることがほとんどなく、また、線維構造やこれらの間に存在する脈管神経

**Fig. 23** Three-dimensional reconstruction of the control.

a. Distal view, b. Mesial view, c. Buccal view, d. Lingual view  
purple (permeability) : root, green (permeability) : alveolar bone, L : lingual side, B : buccal side, M : mesial side, D : distal side

**Fig. 24** Three-dimensional reconstruction of 100 g 4 days case.

a. Distal view, b. Mesial view, c. Buccal view, d. Lingual view  
purple (permeability) : root, green (permeability) : alveolar bone, yellow : cell free zone, red : distribution area of osteoclasts, IZ : intra-degeneration zone, L : lingual side, B : buccal side, M : mesial side, D : distal side

**Fig. 25** Three-dimensional reconstruction of 100 g 7 days case.

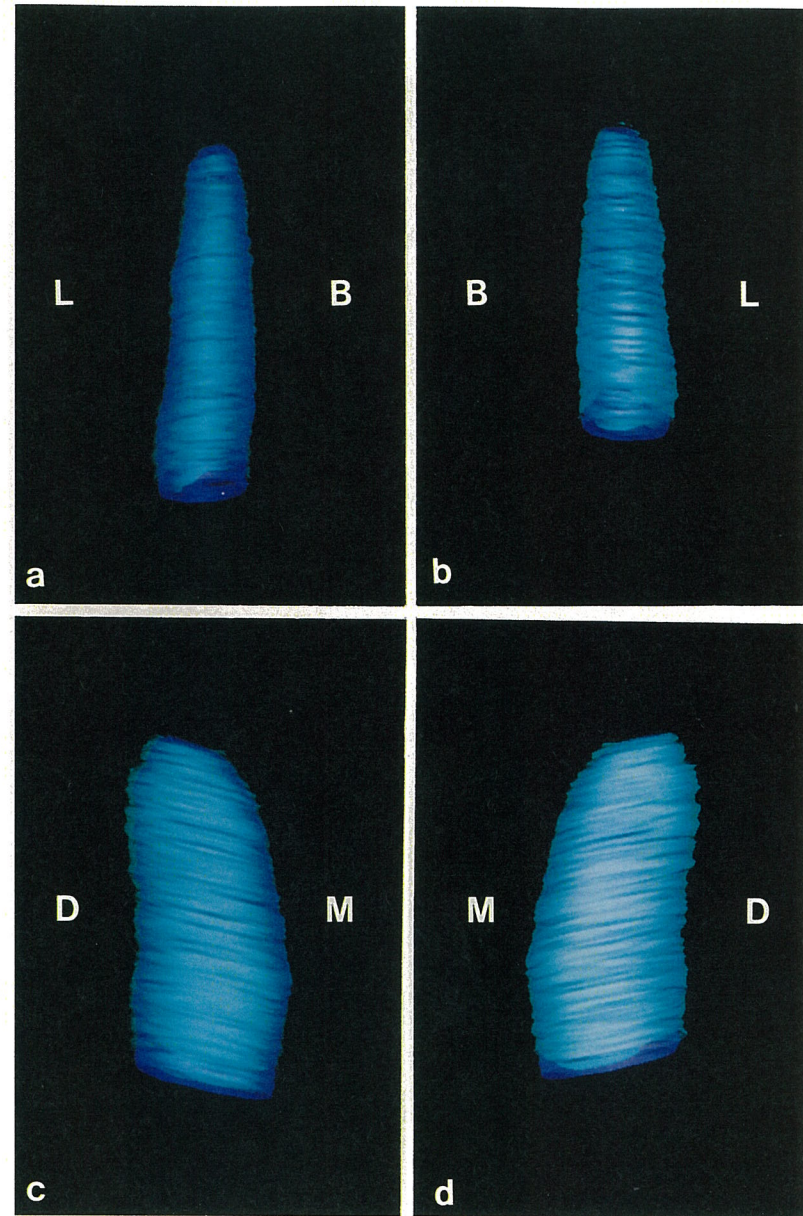
a. Distal view, b. Mesial view, c. Buccal view, d. Lingual view  
purple (permeability) : root, green (permeability) : alveolar bone, yellow : cell free zone, red : distribution area of osteoclasts, IZ : intra-degeneration zone, L : lingual side, B : buccal side, M : mesial side, D : distal side

**Fig. 26** Three-dimensional reconstruction of 200 g 4 days case.

a. Distal view, b. Mesial view, c. Buccal view, d. Lingual view  
purple (permeability) : root, green (permeability) : alveolar bone, yellow : cell free zone, red : distribution area of osteoclasts, IZ : intra-degeneration zone, L : lingual side, B : buccal side, M : mesial side, D : distal side

**Fig. 27** Three-dimensional reconstruction of 200 g 7 days case.

a. Distal view, b. Mesial view, c. Buccal view, d. Lingual view  
purple (permeability) : root, green (permeability) : alveolar bone, yellow : cell free zone, red : distribution area of osteoclasts, IZ : intra-degeneration zone, L : lingual side, B : buccal side, M : mesial side, D : distal side



**Fig. 23**

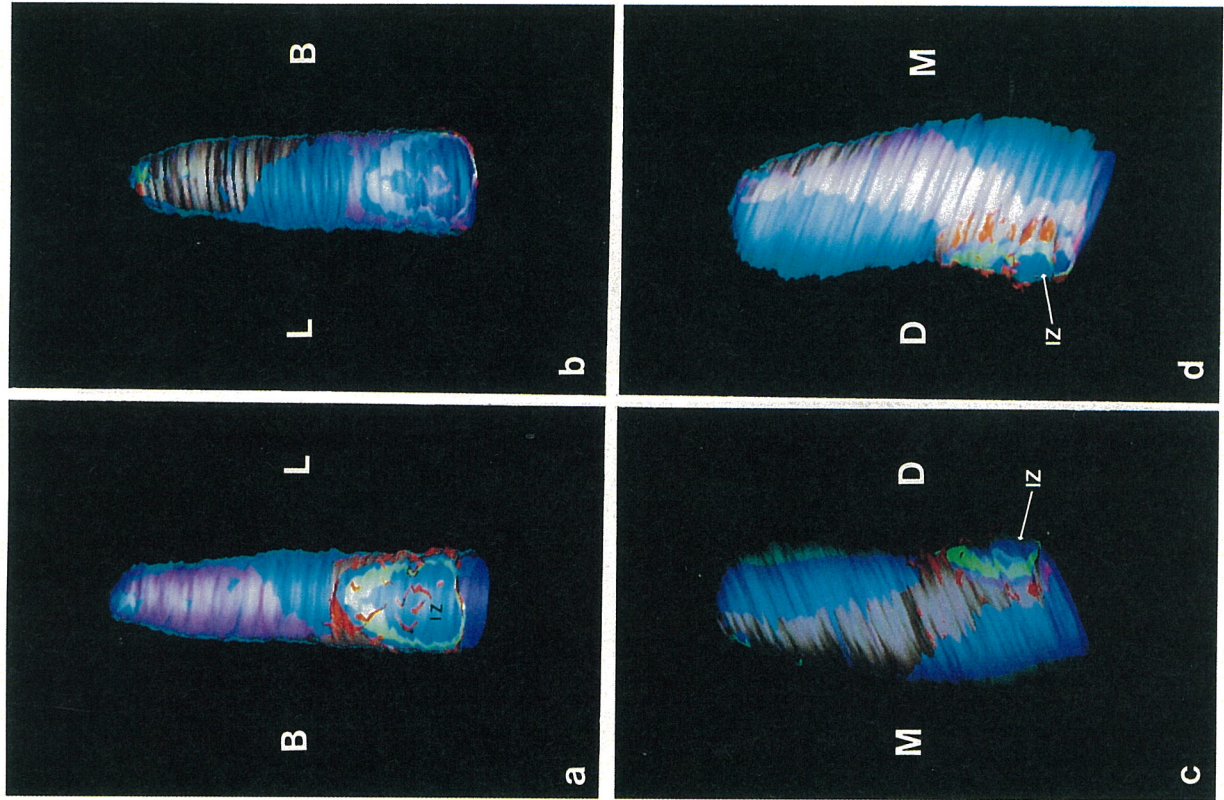


Fig. 24

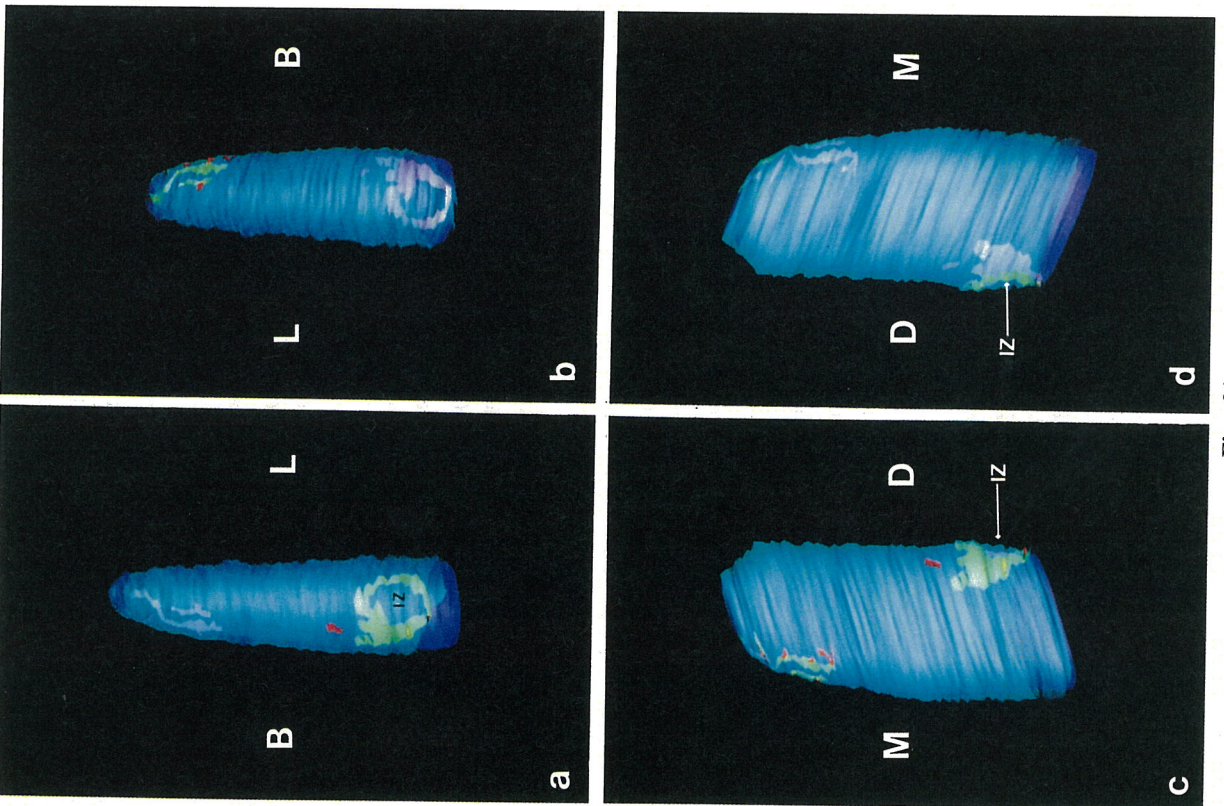


Fig. 25

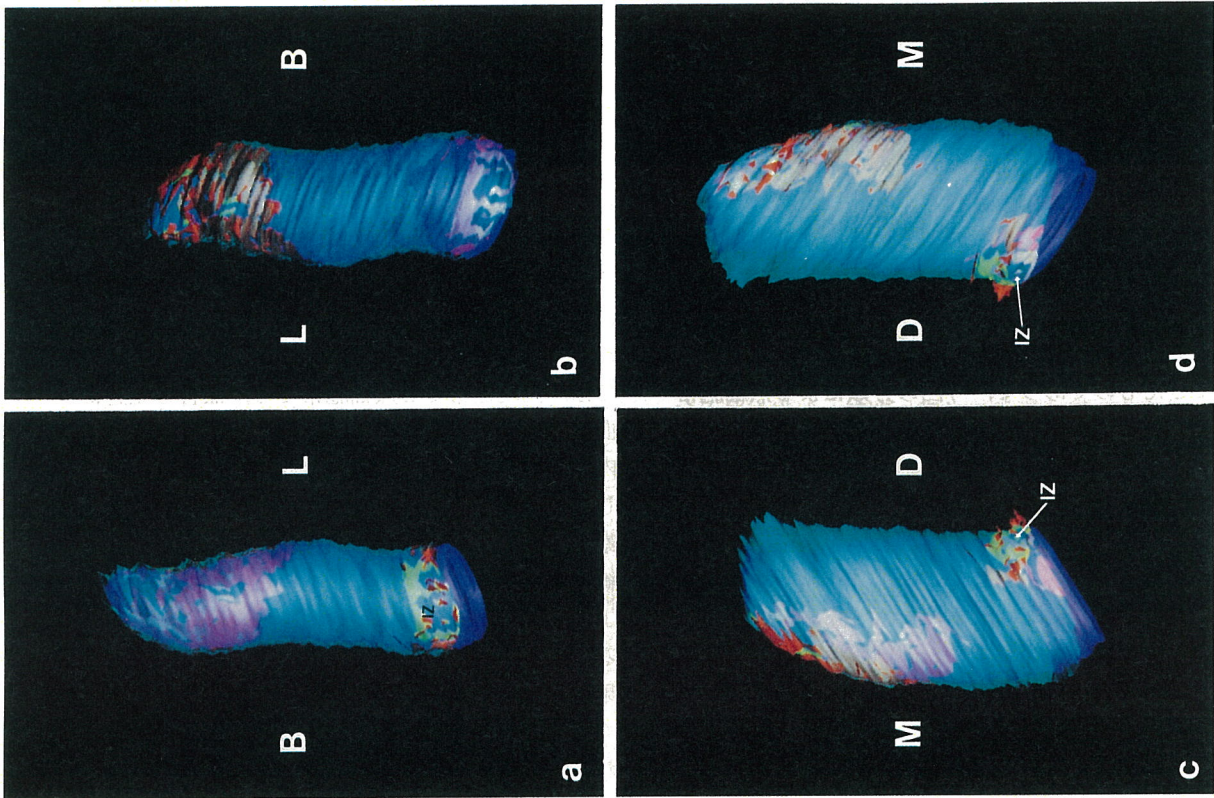


Fig. 27

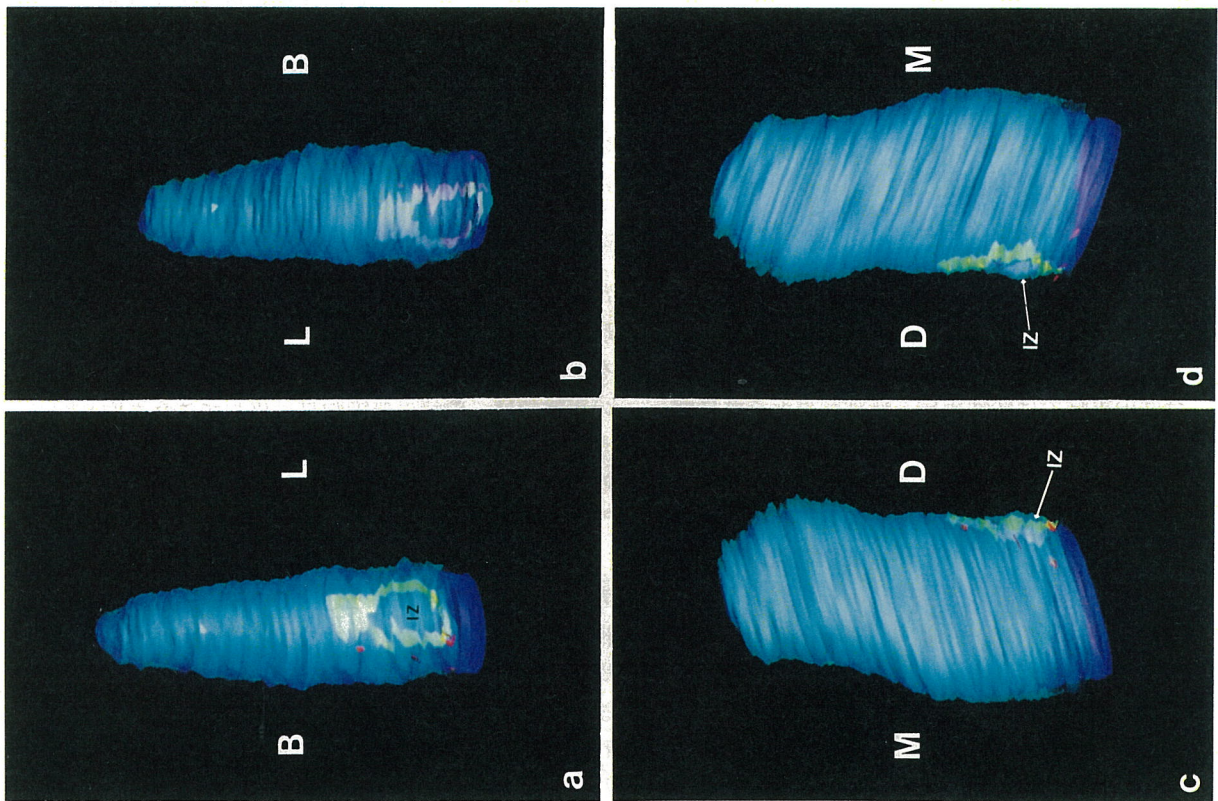


Fig. 26

隙も、ほとんどみることができない光学顕微鏡的に均質無構造な領域。

② 内変性帯：圧迫側歯根膜において無細胞帯に囲まれた領域で、この領域には線維芽細胞の核濃縮像が認められ、同時に圧迫された血管像も認められた。また、アザン染色では橙黄色に染色される。

今回の実験において、上記のように、従来硝子様変性と一括して呼ばれてきた部位を2種類に分類したが、Reitan<sup>6)</sup>が分類している硝子様変性および半硝子様変性とは異なるものである。彼のいう硝子様変性は従来から呼ばれてきたものであって、今回の分類による無細胞帯と内変性帯を含むものである。また、奥村<sup>39)</sup>は、Reitan<sup>6)</sup>のこのような再機能化され得る半硝子様変性はより圧迫の緩徐な領域に相当し、この内側に、Reitan<sup>6)</sup>のいう硝子様変性領域の一部に再機能化されない半硝子様変性領域があると報告している。そしてこの部分を硝子様組織への過程と考えた。風間<sup>38)</sup>は、硝子様変性組織、それに隣接する半硝子様変性組織および一部細胞群を含む領域、さらにそれに隣接する領域の3つの領域について光学顕微鏡および電子顕微鏡で観察している。彼は、これらの領域は硝子様変性化への一連の過程と考えている。これらはいずれにしても今回の実験でみられた無細胞帯に隣接する領域について述べたものである。今回の実験の観察結果と比較すると、Reitan<sup>6)</sup>のいう半硝子様変性は無細胞帯領域から破骨細胞の現れる領域への移行部と考えられる。この領域は変性までは生じない程度に圧迫を受けていて、その刺激に対する反応として細胞成分も密になり、破骨細胞が出現し得る状態になっているものと考えられる。また、この領域は風間<sup>38)</sup>と奥村<sup>39)</sup>の述べている硝子様変性化への過程と異なり、歯根膜内の血流もあり、穿下性骨吸収を行っている破骨細胞や直接性骨吸収を行っている破骨細胞が多くみられた。このことから、この部位の歯根膜は組織代謝が活発で、破骨細胞や線維芽細胞の細胞活性も高いものと考えられる。

一方、今回の実験では変性組織を無細胞帯とそれに囲まれて内側に存在する内変性帯とに分類したが、内変性帯についての報告はこれまでに全くみられない。穿下性骨吸収を行っている破骨細胞は常に無細胞帯の外側にみられ、一方、背部骨吸収を行っている破骨細胞は内変性帯の領域に一致した歯槽骨の骨髓内にみられた。この2つの変性帯の境界は一般に不明瞭で、無細胞帯とその外側の圧迫の弱い領域との間のように明瞭な境界は有していなかった。内変性帯は遠心歯頸部の圧迫側歯根膜にのみみられた。また、近心根尖部の圧迫側歯根膜では、歯槽壁の突出している部位で歯根と歯槽骨との間の歯根膜

が極端に押しつぶされて挫滅している領域もあったが、歯槽骨の形態に凹凸があるため、内変性帯ははっきり区別できなかった。

歯槽骨の吸収が生じることの主体は破骨細胞であるといわれている。すなわち、骨髓内で幹細胞に由来した破骨細胞の前駆細胞が出現し、血流を介して骨吸収部位に運ばれ、歯根膜内に遊走し分化すると考えられている<sup>41-47)</sup>。矯正学的には応力によって受けた歯槽骨の歪によって破骨細胞の出現を誘発し、その応力を解放するために骨吸収を行うと考えられている<sup>48)</sup>。圧迫側歯根膜中では、内変性帯でも無細胞帯でも、血管の圧迫によって血流が途絶えたと考えられている<sup>49)</sup>。また、中村<sup>12)</sup>は血管内墨汁注入標本により圧迫側歯根膜内に貧血帯を観察し、その部位をヘマトキシリン-エオジン染色切片で観察してこの領域に血管の血栓や圧縮閉鎖が生じ歯根膜線維の乱れがみられたと述べている。したがって、矯正による負荷のかかった歯槽骨に破骨細胞による吸収が生じることを、圧迫に対する組織の適応反応あるいはこの結果生じた変性組織の修復反応と考えると、変性組織のすぐ近くで、破骨細胞が出現することは当然である。すなわち無細胞帯に隣接する歯根膜は、血管を圧平しない程度に圧迫を受けており、この適度な圧迫が誘因となって、血管から破骨細胞の前駆細胞が組織中に遊走し、破骨細胞に分化すると考えれば、無細胞帯のすぐ外側で穿下性骨吸収や直接性骨吸収を行う破骨細胞が生じることの説明が可能である。

歯周組織において骨吸収を行う破骨細胞の出現の仕方には、従来、さまざまな説があるが、それらは次の3つに整理される。

#### ① 穿下性骨吸収を行う破骨細胞

Reitan<sup>6,11,29,30,33)</sup>は、破骨細胞が硝子様変性に隣接した歯根膜および硝子様変性に接する歯槽骨の骨髓内に出現し、硝子様変性部位に面する歯槽骨を吸収してその圧を軽減すると述べ、これを穿下性骨吸収と呼んだ。今回の実験では、環状の無細胞帯に接してこれを取り囲むように出現し、無細胞帯に接する歯槽骨を穿下性に吸収する破骨細胞をさすことにした。

#### ② 直接性骨吸収を行う破骨細胞

Sandstedt<sup>1)</sup>は、圧迫側歯根膜に弱い力が加わった時に直接性骨吸収が起こると述べている。Reitan<sup>7)</sup>は、破骨細胞が圧迫された歯根膜に接する骨表面に直接出現した場合が直接性骨吸収であり、その時、歯根膜はある程度までしか圧迫されず、硝子様変性は起こしていない。それ故に、硝子様変性組織が穿下性骨吸収によって消失した後でも、圧が弱まり直接性骨吸収が生じると述べてい

る。今回の実験では、直接性骨吸収は穿下性骨吸収を起こしている部位のさらに外側の歯槽骨表面にみられた。この吸収像は実験開始4日目ではほとんどみられなかったが、7日目には多数認められた。

### ③ 背部骨吸収を行う破骨細胞

骨髄内の背後からの歯槽骨吸収で、しばしば、穿下性骨吸収に含めて考えられている<sup>6,11,29,30,34</sup>)。これらの論文ではいずれも骨吸収がある程度進んだ組織切片から判断しているため、穿下性骨吸収と背部骨吸収が連絡しているものを観察し、同一の破骨細胞として扱っている。今回の実験では、7日目の圧迫側歯根膜に生じた背部骨吸収と穿下性骨吸収は吸収開始部位が全く異なることを示した。すなわち、穿下性骨吸収を行う破骨細胞は直接圧迫を受けた歯根膜内に生じるのに対し、背部骨吸収を行う破骨細胞は直接圧迫を受けていない歯槽骨骨髄内に出現し、圧迫側歯根膜に生じた変性組織の修復の必要性から生じたものではないことが明らかである。しかも骨髄内においてすべての破骨細胞は歯根膜に向かって骨吸収を行っていた。したがって、両者をはっきりと区別して呼ぶことにした。

破骨細胞は直接性骨吸収、穿下性骨吸収、あるいは背部骨吸収のいずれにおいても、歯槽骨に加わった力に対する適応として出現する。すなわち、歯槽骨に生じた歪が骨の吸収を誘発すると考えられる。千葉<sup>50</sup>)は、長管骨に負荷した力により、骨梁の変形が起こり、それが、たとえば電気的効果(Piezo電気、流動電位)、局所におけるCaイオン活性の変化、コラーゲン線維等の骨基質の変形、骨構成細胞および骨周囲の細胞(破骨細胞、骨芽細胞、線維芽細胞、骨細胞、血管内皮細胞、およびそれらの前駆細胞)の変化などを惹起すると述べている。さらに、それらが刺激となって、圧迫力負荷部位に密な骨髄細胞の分布と骨梁に沿ったMo-MΦ系細胞の集積を生じ、この一連の過程において、何らかのlocal factorが関与して破骨細胞が分化誘導されるとしている。このことから今回の実験で歯槽骨が圧迫され、その歯槽骨に歪応力が発生しこれに感応して骨髄中に破骨細胞が発生、分化してくるものと推論される。ただ、歯槽骨中の歪応力の解析は未だなされておらず、今後の研究課題である。

### 2) 三次元再構築像からの考察

連続切片像からコンピュータを用いて無細胞帯、内変性帯および破骨細胞の分布の立体復構を行い、これらを三次元的に観察した。これによれば、実験歯は遠心に傾斜移動をしており、歯頸部圧迫側歯根膜では、すべての観察例で、無細胞帯が内変性帯を取り囲むように環状に分布をしていた。一方、根尖部圧迫側歯根膜では歯頸部

と異なり、規則的な無細胞帯の分布がみられず、また、内変性帯の存在は判別できなかった。このような傾斜移動の際に生じた歯頸部および根尖部の圧迫領域の組織像を比較した報告では、歯が短期間の弱い力の場合、硝子様変性が歯頸部のみで起こるが、力が強い場合あるいは力の作用期間が長い場合には、根尖部にも生ずるとしている<sup>4,7,51</sup>)。これは組織切片による一断面からの観察であるためと考えられる。今回の実験で立体的に組織像をとらえることができ、その結果、歯を介して歯槽骨に伝達される応力による組織変化を三次元的に観察することが可能となった。このことは歯の移動の際の矯正力の三次元的伝達様式の解明に際して重要なデータを与えるものとする。

### 3. 力の大きさと作用期間による歯周組織の変化の考察

#### 1) 変性帯について

Mühlemann<sup>52</sup>)は、サルを用いて歯周組織の変化を観察し、100gの力により歯根膜の変形限界に達し、100gを越すと、歯槽骨の変形が新たに始まると報告している。また、倉島<sup>49</sup>)は、ヒトで実験を行い、歯根膜圧縮量が50μm以下では歯根膜のみが粘弾性変形し、50μm以上では歯槽骨の弾性変形もそれに付加され、これを力の強さと関連させると、100g以下の力では歯根膜のみの変形で、100g以上の力では歯槽骨の変形が加わると報告している。

また、作用期間について、Reitan<sup>7</sup>)はヒトで、Kvam<sup>28</sup>)はラットで移動開始1日目には硝子様変性が出現すると報告している。Rygh<sup>31</sup>)はラットで硝子様変性が移動開始後、6~12時間後に出現し、5~7日目では貪食細胞などの増殖による歯根膜組織の修復が開始したことを観察し14日目では硝子様変性組織がほぼ消失したと述べている。

ネコを用いた今回の実験では、100g例、200g例ともに4日目ですでに圧迫側歯頸部歯根膜に無細胞帯が環状に分布するのがみられた。このことから、従来いわれているようにならかなり早い時期に組織の変性が開始していると考えられる。しかし、7日目では破骨細胞の出現はみられたが、線維芽細胞の増殖による歯根膜組織の修復あるいは改造を示す所見は認められなかった。さらに、7日目での100g例と200g例とでは無細胞帯の出現状態が異なり、200g例の場合その無細胞帯は圧迫側歯根膜のかなり限局した領域にのみ分布していた。このことは、100g例に比べ200g例では歯槽内での歯の傾斜の度合いが大きく、圧迫側において歯根膜が限局された範囲内で極端に圧縮されたためと考えられる。また同時に、200

g 例で内変性帯に接する歯槽骨髄内で背部骨吸収が深い部位まで活発であった現象をも説明している。

#### 2) 破骨細胞について

4 日目では 100 g 例および 200 g 例ともに、歯槽縁付近に穿下性骨吸収を行っている破骨細胞がみられるものの、数は少なく分布領域も狭かった。このことは、歯周組織の応力に対する歪を解放するための初期反応として圧迫側歯根膜に破骨細胞が出現し始めたことを示している。

次に、7 日目の 100 g 例と 200 g 例では、破骨細胞の分布ははなはだしく異なっていた。100 g 例では、頰側歯頸部から根尖部まで連続して幅の広い直接性骨吸収を行っている破骨細胞の分布がみられた。一方、200 g 例では歯頸部の直接性骨吸収を行っている破骨細胞は無細胞帯の周辺に限局され、逆に骨髄内に背部骨吸収を行っている破骨細胞が 100 g 例に比べてかなり多くみられ、歯槽壁より離れた深い領域にも多く存在していた。このことは限局された範囲の歯槽骨が深い部分まで不必要に大量に吸収される可能性のあることを示している。この分布形態の違いから考えて、この実験系では 200 g のほうが 100 g より歯頸部に限局して大きな応力がかかり、その部位の歯槽骨の歪が大きいと推測された。しかし、今回の実験のような単一方向の牽引による傾斜移動では、微妙な歯の傾きあるいは、ねじれによって歯根と歯槽壁との間の圧力に変化を生じる可能性も考えられ、今後さらに実験方法の検討が必要である。

#### 4. 臨床的観点からの考察

至適矯正力について、Schwarz<sup>2)</sup> は矯正力の強さを歯根膜血管の圧縮の程度に応じて 4 度の生物学的作用段階の力に分類し、歯の移動に最も有効に働く力として、以下の 2 つをあげている。① 第 2 の生物学的作用段階の力、すなわち毛細血管圧以下の力 (15~20 g/cm<sup>2</sup>) と毛細血管圧よりかなり大きい作用距離の短い力、② 第 3 の生物学的作用段階の力、すなわち毛細血管圧より大きいが圧迫領域の組織が挫滅しない程度の力、の内で間歇的な力である。また、Oppenheim<sup>34)</sup> も至適矯正力を歯根膜の毛細血管圧に等しい力と考え、組織の休養期間を持つことができる間歇的な力と述べている。

Reitan<sup>6)</sup> は、歯根膜の変性を最小限に抑え、直接性骨吸収によって歯の移動を行う力としている。一方、Storey と Smith<sup>51,53)</sup> は differential force の概念に基づいて個々の歯の歯根表面積を考え、個々の歯それぞれに至適矯正力があると述べている。中村<sup>12)</sup> は貧血帯が立体的な場を占めていることから至適矯正力は必ずしも直接性の骨吸収を生ずるような強さの力ではなく、最も、有効

的に歯槽骨を吸収し、歯を移動させる力をさすとしている。すなわち、傾斜移動させたときには弱い力においても歯槽縁付近の歯根膜の毛細血管は貧血帯となり、硝子様変性を生ずると述べている。

今回の実験の三次元再構築像においても、すべての実験条件で歯頸部の圧迫側歯根膜に無細胞帯と内変性帯が 4 日目にはみられ、破骨細胞はわずかであったことから、必ずしも毛細血管圧だけで至適矯正力を考えることは危険であると考えられる。また、7 日目の 200 g 例では歯槽内で歯根は極端に傾斜し、歯頸部圧迫側の内変性帯および無細胞帯は歯槽縁付近に限局しており、背部骨吸収を行っている破骨細胞の分布領域が内変性帯に接する歯槽骨の内深くまで及んでいた。このことは骨吸収が進んだ時、歯槽縁付近で不必要に大量の骨が吸収される可能性のあることを示唆している。それに対して 100 g 例では、歯頸部圧迫側の内変性帯および無細胞帯は広く分布していたが、背部骨吸収を行っている破骨細胞の分布領域は歯槽壁に近い浅い部分に限局しており、また、直接性骨吸収を行っている破骨細胞の分布領域は歯頸部から根尖部まで連続して広範囲に及んでいた。これらのことから、今回の実験系では至適矯正力を破骨細胞の分布状況から考えれば、100 g は 200 g に比べ、ネコの上顎犬歯のより至適な矯正力であると考えられる。

#### 結 論

今回の実験では、矯正歯の移動に伴う圧迫側歯周組織の組織像を三次元的再構築することにより、その組織変化を三次元的にとらえて、変性帯と破骨細胞の分布について検討した。その結果、以下の結論を得た。

1. 歯頸部圧迫側歯根膜において、変性組織は無細胞帯と内変性帯の二種類に区別して観察された。

1) 無細胞帯は、ヘマトキシリン-エオジン染色でエオジン好性の均質無構造な領域としてみられ、AZAN 染色では鮮やかな青色に染色された。

2) 内変性帯は、ヘマトキシリン-エオジン染色において線維芽細胞の核濃縮がみられ、AZAN 染色では、橙黄色に染色された。

2. 歯頸部圧迫側歯根膜において、無細胞帯は内変性帯を囲むように環状に分散して観察された。

3. 根尖部圧迫側歯根膜では、内変性帯は認められず、無細胞帯は環状ではなく不定形に観察された。

4. 圧迫側歯根膜において、破骨細胞の分布は変性組織と関連して次の三種類がみられた。

1) 穿下性骨吸収を行う破骨細胞は、無細胞帯に接し



た歯槽骨をまわりの側面から吸収していた。

2) 直接性骨吸収を行う破骨細胞は、無細胞帯の外側の圧迫された歯根膜に接した歯槽骨に沿って吸収していた。

3) 背部骨吸収を行う破骨細胞は、内変性帯に接した歯槽骨の骨髓内から歯根膜に向かって吸収していた。

5. ネコ上顎犬歯において、破骨細胞の分布状況より、200 g に比べ、100 g の方がより至適矯正力に近い力であると考えられた。

本稿を終えるにあたり、本研究の機会を与えて下さり懇切なるご指導、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、ならびに口腔解剖学第二講座脇田 稔教授に深甚なる謝意を表します。また、終始ご援助、ご協力いただきました歯科矯正学講座、ならびに口腔解剖学第二講座の諸先生方に心から感謝の意を表します。特に、多大なご助力をいただいた歯科矯正学講座の佐藤嘉晃氏、高橋直行氏に厚くお礼を申し上げます。

本研究の一部は、第 50 回日本矯正歯科学会総会(1991 年 9 月)、第 33 回歯科基礎医学会総会(1991 年 10 月)において発表した。また、本論文は北海道大学審査学位論文であり、この要旨は平成 3 年度北海道歯学会秋季学術大会(1991 年 11 月)において発表した。

## 文 献

- Sandstedt, C. : Einige Beiträge zur Theorie der Zahnregulierung, Nord. Tandiläkere Tidsskr, Ht. 1, 2, 4, 1904.
- Schwarz, A. M. : Tissue changes incident to tooth movement. *Int. Orthod. Cong.* 18 : 331, 1932.
- Reitan, K. : Some factors determining the evaluation of forces in orthodontics. *Am. J. Orthod.* 43 : 32~45, 1957.
- Reitan, K. : Tissue behavior during orthodontic tooth movement. *Am. J. Orthod.* 46 : 881~900, 1960.
- Reitan, K. : Bone formation and resorption during reversed tooth movement. In *Vistas in Orthodontics*, ed. by Kraus B. S. and Riedel R. A. Philadelphia, 1962, Lea and Febiger, 69~84.
- Reitan, K. : Effects of force magnitude and direction of tooth movement on different alveolar bone types. *Angle Orthod.* 34 : 244~255, 1964.
- Reitan, K. : Clinical and histologic observations on tooth movement during and after orthodontic treatment. *Am. J. Orthod.* 53 : 721~745, 1967.
- Reitan, K. and Kvam, E. : Comparative behavior of human and animal tissue during experimental tooth movement. *Angle Orthod.* 41 : 1~14, 1971.
- Waldo, C. M. : Method for the study of tissue response to tooth movement. *J. D. Res.* 32 : 690~691, 1953.
- Macapanpan, L. C., Weinemann, J. P. and Brondie, A. G. : Early tissue changes following tooth movement in rats. *Angle Orthod.* 24 : 79~95, 1954.
- Azuma, M. : Study on histologic changes of periodontal membrane incident to experimental tooth movement. *Bull. Tokyo Med. Dent. Univ.* 17 : 149~178, 1970.
- 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.
- Noda, K., Hiroshita, A. and Kuwabara, Y. : Three dimensional structure multinucleated giant cells "osteoclast". *Jpn. J. Oral. Biol.* 25 : 814~818, 1983.
- Hirashita, A., Noda, K., Kazama, T., Kai, T., Kaida, K., Nakamura, Y. and Kuwabara, Y. : Reconstruction of the three-dimensional structure of multinucleated giant cells incidental to experimental tooth movement. *Tsurumi Univ. Dent.* 12 : 1~13, 1986.
- 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.
- 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。 *日矯歯誌* 46 : 217~229, 1987.
- 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.
- 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.
- 南郷脩史：三次元モデル構築システム「TRI」。 *細胞* 20 : 36~39, 1988.
- 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.
- Domon, T. and 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.
- Domon, T. and Wakita, M. : Electron microscopic and histochemical studies of the mononuclear osteoclast of the mouse. *Am. J. Anat.* 192 :

- 35~44, 1991.
- 23) Rychlo, P. U. : Zb. Path. 98 : 252, 1952.
  - 24) Ooë, T. : On the development of position of the tooth germs in the human deciduous front teeth. Folia Anat. Jpn. 28 : 317~340, 1956.
  - 25) Ooë, T. : On the early development of human dental laminadeciduous front teeth. Folia Anat. Jpn. 30 : 197~210, 1957.
  - 26) Ooë, T. : On the development of position of the tooth germs in the human deciduous molar teeth. Folia Anat. Jpn. 32 : 98~108, 1959.
  - 27) Ooë, T. : A study of the ontogenetic origin of human permanent tooth germs. Folia Anat. Jpn. 40 : 429~437, 1965.
  - 28) Kvam, E. : A study of the cell-free zone following experimental tooth movement in rat. Trans. Europ. Orthodont. Soc. 45 : 419~434, 1969.
  - 29) Anthony, A. : Force-induced changes in the vascularity of the periodontal ligament. Am. J. Orthod. 55 : 5~11, 1969.
  - 30) Furstman, L., Bernick, S. and Aldrich, D. : Differential response incident to tooth movement. Am. J. Orthod. 59 : 600~608, 1971.
  - 31) Rygh, P. : Ultrastructural cellular reactions in pressure zone of rat molar periodontium incident to orthodontic tooth movement. Acta Odontol. Scand. 30 : 575~593, 1972.
  - 32) 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.
  - 33) Rygh, P. : Elimination of hyalinized periodontal tissues associated with orthodontic tooth movement. Scand. J. Dent. Res. 82 : 57~73, 1974.
  - 34) Oppenheim, A. : A possibility for physiologic orthodontic movement. Am. J. Orthod. and Oral Surg. 30 : 277~345, 1944.
  - 35) 武内真利 : 歯の移動に関する実験的研究, 单相刺激による歯周組織の組織学的研究. 口病誌 46 : 293~305, 1979.
  - 36) 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.
  - 37) 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.
  - 38) 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. 鶴見歯学 15 : 87~108, 1989.
  - 39) 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.
  - 40) 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.
  - 41) Ejiri, S. : The preosteoclast and its cytodifferentiation into the osteoclast : ultrastructural and cytochemical studies of rat fetal parietal bone. Arch. Histol. Jap. 46 : 533~557, 1983.
  - 42) Chambers, T. J. and Mangus, C. J. : Calcitonin alters behavior of isolated osteoclasts. J. Pathol. 136 : 27~39, 1982.
  - 43) Burger, E. H., van der Meer, J. W. M. and van de Gevel, J. S. : In vitro formation of osteoclasts from long-term cultures of bone marrow mononuclear phagocytes. J. Exp. Med. 156 : 1604~1614, 1982.
  - 44) Horton, M. A., Rimmer, E. F., Moore, A. and Chambers, T. J. : On the origin of osteoclast : the cell surface phenotype of rodent osteoclasts. Calif. Tiss. Int. 37 : 46~50, 1985.
  - 45) Scott, B. L. : Thymidine-<sup>3</sup>H electron microscope radioautography of osteogenetic cells in the fetal rat. J. Cell Biol. 35 : 115~126, 1967.
  - 46) Burger, E. H., van der Meer, J. W. M. and Nijweide P. J. : Osteoclast formation from mononuclear phagocytes : role of bone-forming cells. J. Cell Biol. 99 : 1901~1906, 1984.
  - 47) Ash, P., Loutit, J. F. and Townsend, K. M. S. : Osteoclasts derived from hematopoietic stem cell. Nature 283 : 669, 1980.
  - 48) Storey, E. : Bone changes associated with tooth movement. A histological study of the effect of force for varying durations in the rabbit, guinea pig and rat. Aust. J. Dent. 59 : 209~219, 1955.
  - 49) 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.
  - 50) 千葉美麗 : Mechanical stress による骨改造機構に関する研究. 日矯歯誌 48 : 585~600, 1989.
  - 51) Storey, E. and Smith, R. : Force in orthodontics and its relation to tooth movement. Aust. J. Dent. 56 : 11~18, 1952.
  - 52) Mühlemann, H. R. : A method for measuring tooth mobility. Oral Surg. Oral Med. Oral Path. 4 : 120, 1951.
  - 53) Smith, R. and Storey, E. : The importance of force in orthodontics. Aust. J. Dent. 56 : 291~304, 1952.