歯の移動に伴う歯と歯周組織の神経線維の 消長に関する実験的研究

九州歯科大学大学院歯学研究科歯科矯正学専攻 (指導: 佐藤通泰教授)

九州歯科大学口腔病理学講座 (指導: 上野正康教授)

夕 田 勉

昭和56年3月25日受付

本論文の要旨の一部は, 昭和54年6月10日第39回九州歯科学会総会, 昭和54年9月27日第38回日本矯正歯科学会大会, 昭和55年6月14日第40回九州歯科学会総会, 昭和55年10月4日第39回日本矯正歯科学会大会にて口演発表した。

An Experimental Study on Changes in Nerve Fibers in Tooth and Its Periodontal Tissue during Tooth Movement

Tsutomu Yuda

Department of Orthodontics (Director : Prof. Michiyasu Sato)

Department of Oral Pathology (Director : Prof. Masayasu Ueno)

Kyushu Dental College, Kitakyushu, Japan.

With regard to distribution of and changes in nerve fibers during tooth movement artificially caused, observations were made of tooth and its supporting tissue of which periodontal ligament in particular.

For the experiment a total of 25 adult rhesus monkeys, 22 in the experiment group and 3 in the control were selected. The lower left central incisor tooth in each subject in the experiment group was moved bodily and distally using a sectional arch. The arch was applied from a minimum of 1 day to a maximum of 70 days. Tooth movement was commenced 90 days after extraction of the lower left lateral incisor. Changes on the prefixed days were measured on models and examined pathohistologically and neurohistologically.

The results were as follows :

I. Overall findings

1. The bodily tooth movement resulted was not necessarily simple in nature. Four cases involved slight distal crown tipping and three cases involved intrusion and rotation. Nearly no movement of the experimental teeth occurred until the 7th to 21st days.

2. As to root resorption, a resorption fossa was seen extending into the dentine because of organizing of hyalinized periodontal ligament in the cases after the 20th

day. A large resorption fossa detrimental to stability and functioning of the tooth was observed in the cases on the 70th day.

3. In the dental pulp, hyperemia and enlargement were observed in some blood vessels in nearly all cases after the 6th day. In the cases involving intrusion and rotation and in those involving greater movement in the early period, circulatory disturbances were observed extending over a vast range in the dental pulp. No significant changes were observed in odontoblasts.

II. Findings in nerve tissue

1. In the pressure side on the 1st day, various regressive changes occurred and in particular many nerve fibers manifesting laceration and granular decomposition were observed. A fair number of healthy small nerve fibers also remained.

In the tension side, slight degenerative findings such as swelling and hypochromatosis were observed in the nerve fibers accompanying some blood vessels with hyperemia and enlargement.

2. In the pressure side on the 3rd to 7th days, small nerve fibers were observed still remaining healthy in very limited areas in the slightly hyalinized periodontal ligament.

In the tension side, many nerve fibers degenerated slightly with time.

3. In the pressure side on the 14th day, nerve fibers manifesting autolysis and close to disappearance were observed in the hyalinized periodontal ligament. In the young granulation tissue in the inferior border of the hyalinized periodontal ligament, minute regenerated nerve fibers running very close to immature blood vessels were seen.

In the tension side, nearly all nerve fibers showed slight degenerative findings. Nerve fibers with laceration of axon were observed in part.

4. In the pressure side on the 21st day, no nerve fibers were recognized in the hyalinized periodontal ligament. In the young granulation tissue in the inferior border of ligament, the cut end of axon was broom-like and so called amputation neuroma was formed.

In the tension side, findings similar to those on the 14th day were observed. Nerve fibers considered to be regenerated nerve fibers were seen very sporadically.

5. In the pressure side on the 28th day, minute regenerated nerve fibers were seen in the periodontal ligament, the tissue of which was completely replaced by young granulation tissue.

In the tension side, nearly all nerve fibers remained degenerated, but minute regenerated nerve fibers were observed in part.

6. In the pressure side from the 42nd to 70th days, distribution of nerve fibers decreased accompanying tooth moving to a point of near non-existence. Very minute vegetative nerve fibers running close to immature blood vessels proliferated in the young granulation tissue were seen.

In the tension side, the nerve fibers became finer and their distribution decreased greatly. Slight degenerative findings were seen in some of the nerve fibers.

7. Slight degenerative findings were observed in some nerve fibers in the dental pulp in nearly all cases after the 6th day. Most nerve fibers however were composed of healthy ones.

In the cases involving intrusion and rotation and in those with greater movement in the early period, the whole dental pulp was composed mostly of nerve fibers manifesting beaded changes, laceration, or granular decomposition.

結 言

実験材料および方法

歯科矯正学にとって、歯の移動は極めて重要な研究課題の一つである。したがって歯の移動に伴う組織変化については、Sandsted (1904)¹⁾ がイヌを用いた実験的研究を行って以来、Schwarz (1932)²⁾, Orban (1936)³⁾, Stuteville (1937)⁴⁾, Oppenheim (1942⁵⁾, 1944⁶⁾), Reitan (1947⁷⁾, 1960⁸⁾, 1964⁹⁾, 1967¹⁰⁾, 1975¹¹⁾), Macapanpan, *et al.* (1954)¹²⁾ らにより、また我が国では、木暮ら (1932)¹³⁾, 太田 (1937)¹⁴⁾, 斉藤 (1941¹⁵⁾, 1942¹⁶⁾), 滝口 (1958)¹⁷⁾ らの多くの人により、多数報告されている。近年、組織化学レベルから Utley (1968)¹⁸⁾, Murphey (1970)¹⁹⁾, Heller and Nanda (1979)²⁰⁾ らの、また電子顕微鏡レベルから Kvam (1972)²¹⁾, Rygh (1977)²²⁾ らの報告がある。

これらはおもに圧迫側と牽引側の歯槽骨および歯根膜線維の改造機転に関する研究であり、人為的な歯の移動に伴う歯と歯周組織の神経線維の動態に関する組織学的見地からの報告は皆無に等しい。ただ、僅少ではあるが、神経生理学的立場から河村ら (1965)²³⁾, 清水 (1968)²⁴⁾, Kizior, *et al.* (1968)²⁵⁾ らの人為的な歯の移動に関する短時間の経時的な変化についての研究がある。

歯科矯正の治療においては、長期間の歯の移動を行うことが多く、したがって長期間にわたる観察が必要であるが、神経生理学的に歯と歯周組織の神経順応様相を、日単位以上長期間にわたり検索することは困難であり、推測の域を出ることができない。したがって、今日の段階では、歯の移動に伴う歯と歯周組織の神経線維に関しては、形態学的あるいは組織学的な研究にたよらざるを得ない状況である。

そこで著者は、歯の移動に伴う歯と歯周組織の神経線維、とくに歯根膜神経線維の経日的変化について病理組織学的、神経組織学的に観察し、知見を得たので報告する。

A. 実験方法

1. 実験動物と実験部位

実験には、下顎第3大臼歯が萌出完了し、完全な永久歯列弓を有する (伊谷ら (1964)²⁶⁾ によるニホンザルの歯牙年齢6.5~9.5才に相当) カニクイザル25頭 (平均体重2.5kg, ♂) を使用した。このうち対照群として3頭、歯の遠心移動群として22頭を用い、実験部位には単根歯で比較的に根長が短い下顎左側中切歯を選んだ。

実験操作は、すべてケタミン系麻酔薬 (ケタラル 50) 1~2 mg/kg の筋肉注射による全身麻酔下にて行った。

実験動物は、歯の移動期間中、自家製モンキーチェアを用いて飼育した。なお、実験期間中には著しい体重の変化はみられなかった。

2. 抜歯

実験歯を遠心側に移動するために、実験に先立って実験歯に接する下顎左側側切歯の抜歯を行った。

抜歯は、入手後約2週間飼育した後、全身麻酔下で通法に従って行った。感染防止のために油性結晶プロカインペニシリン G5000単位/kg を3日連日筋肉注射した。なお抜歯窩は、開放創とした。

3. 対照群

実験の前準備として、隣在歯の抜歯が実験相当歯およびその歯周組織に与える影響を観察するために、抜歯後、歯を移動することなく、30日、60日、90日の各1例について観察を行った。なお抜歯後90日の組織所見から、抜歯による組織変化はほぼ完全に回復し、安定した像を呈していたので対照として使用可能と考え、さらに2頭を加え計3例を対照群とした。

4. 遠心移動の方法と期間

実験には、下顎左側側切歯の抜歯後90日以上経過した健康なものを選び、下顎左側中切歯を遠心側に歯体移動

した。移動期間は、1日、3日、7日、14日、21日、28日、42日、70日と設定し、1日から28日では各3頭、42日と70日は各2頭の計22頭を実験に用いた。

装置の作製に先立ち、bandの厚みによる影響を避けるために実験歯に接する下顎右側中切歯の接触点部を削合した。

装置は、下顎左側中切歯に0.018×0.025インチの slot を有する edgewise bracket を、下顎左側犬歯に 0.018×0.025インチの buccal tube を点熔接した band を装着し、下顎左側犬歯の加強固定のため、下顎右側犬歯と下顎左側第3大臼歯に band を作製し、これらの歯と下顎左側犬歯を lingual arch wire (φ0.9mm) で連結した(写真1)。実験歯を遠心側へ歯体移動するため、0.016×0.022インチの rectangular wire に helix closing loop を組み入れた sectional arch を作製し(写真2)、60gの矯正力を作用させた。なお、移動期間中、28日と56日に新たに実験歯に60gの矯正力が作用するように arch wire の調節を行った。

B. 観察方法

1. 模型計測による移動様相の観察

実験歯の移動様相を観察するために、移動前に下顎左側中切歯と下顎左側犬歯の歯冠部と歯頸部にダイヤモンドで印をつけ計測部位とした(図1)。

図1 計測部位

A: 歯冠部間距離

(中切歯と犬歯の歯冠部につけた小孔間の距離)

B: 歯頸部間距離

(中切歯と犬歯の歯頸部につけた小孔間の距離)

I₁: 下顎左側中切歯

C: 下顎左側犬歯

移動前および実験終了時にアルギン酸系印象材による印象採得を行い、硬石膏にて石膏模型を作製した。移動前および移動後の石膏模型上で、歯冠部間距離と歯頸部間距離を1/20mmの副尺つき sliding calipers を用いて計測を行った。

2. 組織学的検索

実験終了時、実験動物は全身麻酔下で放血致死させ、断頭後、直ちに、神経染色用固定液(飽和ピクリン酸: 75.0cc, 35%中性ホルマリン: 25.0cc, 三塩化酢酸: 1.0g)中に投入した。固定完了後、鏡検の便宜を十分に考慮しつつ下顎前歯部の採取を行い、蟻酸とクエン酸ナトリウムの等量混合液にて脱灰したのち、通法に従いパラフィン包埋後、実験歯の近遠心方向に15μの連続切片標本を作製した。

標本には、Ungewitter (1951)²⁷⁾の尿素・硝酸銀法の Powers (1952)²⁸⁾の変法をさらに改良した本学口腔病理学教室独自の神経染色と、必要に応じて Hematoxylin-Eosin 重染色と Azan-Mallory 染色を施した。

計測結果

A. 実験歯の移動量

移動距離の経日的変化と移動様相を明らかにするために、移動前、移動終了時の歯冠部間距離および歯頸部間距離の計測を行った。表1に示すように、歯間部間距離

表1 実験歯の移動量

	1日	3日	7日	14日	21日	28日	42日	70日
No. 1	0.2▼	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0.7▼	1.3▼
No. 2	0.1	0.2▼	0.3	0.3	0.3	0.3	0.6	1.1
No. 3	0.1	0.1	0.3	0.2	0.3	0.3		

単位: mm

▼ 歯冠部移動量に比較して歯頸部移動量 0.1mm 減少

の移動量と歯頸部間距離の移動量に差がみられないもの、すなわち、歯体移動が22例中18例にみられた。なお、残りの4例では、歯頸部間距離の移動量が歯冠部間距離の移動量に比較して、0.1mm 少なく、わずかな歯軸の遠心傾斜がみられ、とくに移動初期の2例ならびに arch wire の調節後14日(42日、70日)の2例に生じていた。なお、歯の移動様相を明らかにするために、歯

図2 歯冠部の移動量

冠部の移動量をグラフで表わしたのが図2である。遠心移動を開始してから1～3日では、急な移動がみられるが、7～28日では、著しい移動量の増減はみられない。移動70日は、移動42日に比較して、移動量が著しく増大していた。

組 織 所 見

A. 対照群の組織所見

1. 抜歯後90日の抜歯窩所見

抜歯窩を覆う歯肉上皮は、二次乳頭の形成が著明にみられ、上皮下は疎性結合組織が両隣在歯間を横走している。

新生骨梁で補填された抜歯窩は、骨髓が形成され、幅の広い骨梁で占められ、周囲歯槽骨との境界がやや不明瞭となり、抜歯窩の底部と思われる部位では、骨髓の一部に脂肪髄が認められる。

抜歯窩縁ならびに槽間中隔先端においては、骨吸収の所見はみられず、実験相当歯、すなわち下顎左側中切歯は安定した歯槽頂縁部の像を示している。それらの歯槽頂縁付近の歯根膜線維は、再配列され、機能的な走行状態を呈している、なお、実験相当歯の歯根膜、歯槽骨、セメント質ならびに歯髄には、顕著な組織変化は認められない(写真3)。

2. 対照群の一般組織所見

歯肉は、上皮と固有層とからなり、上皮は重層扁平上皮で、内縁上皮と外縁上皮に区別される。内縁上皮直下の固有層は限局性のリンパ球を主体とする炎症性細胞の浸潤が認められる(写真3)。

歯根膜は線維性結合組織からなり、歯槽頂縁部における歯根膜は、歯肉の固有層に移行している。また、歯根膜は歯槽窩壁の歯槽管を介して骨髓、あるいは根尖孔を通して歯髄とも連絡している。歯根膜血管の多くは歯槽骨壁側に近接して走行し、歯根膜上半部では血管の分布量が極めて少ない。なお全ての血管はやや拡張性で充血調を呈している。歯根膜の線維成分は、ほとんど膠原線維からなり、大半の膠原線維束は、規則的な配列を示し、一端はセメント質、他端は歯槽骨あるいは隣接歯のセメント質に深く進入している。これらの線維束は機能的な走行状態により歯槽頂線維、水平線維、斜走線維、根尖線維および歯間水平線維に大別され、斜走線維がその大部分を占めている(写真3)。

セメント質は無細胞セメント質と有細胞セメント質に大別され、無細胞セメント質は歯根の全周を被覆し、有細胞セメント質の表面には一層の幼若な類セメント質が

認められ、その表面では、セメント芽細胞が整然と配列されている。なお、歯根に近接して多数の Malassez の上皮遺残が認められる(写真3)。

歯槽骨は、固有歯槽骨と支持骨に区別され、固有歯槽骨は歯根膜に面する薄い骨板で歯槽窩壁を形成し、支持骨は歯肉に面する緻密骨と、それと固有歯槽骨との間を占める海綿骨質とからなり、両者は歯槽骨縁で互に移行し、境界は不明瞭である。また歯槽骨は基質線維の配列の規則性により層板骨と線維骨に大別され、固有歯槽骨の歯根膜側は主に線維骨から、骨髓側は層板骨からなり、支持骨もほとんど層板骨からなっている。なお歯槽側壁は、ほぼ平坦で、大きな骨髓腔や歯槽管を有するものはほとんどみられない(写真3)。

歯髄は、未分化な疎性結合組織で、結合組織細胞、線維および基質から構成され、歯髄は歯冠部歯髄と根部歯髄に分けられる。象牙質に接する歯髄では、表層から象牙芽細胞層、細胞稀薄層、細胞稠密層の3層に区別される。なお、歯髄の血管は、やや拡張した充血調の所見が一般的にみられる。

3. 対照群の神経組織所見

歯肉に分布する神経線維には、歯槽頂縁部歯根膜より歯肉に進入した神経線維束と、歯槽粘膜下を歯槽骨の外側縁に沿って上昇する大きな神経束が遊離歯肉縁に向って走行しているものとがある。それらの経過中に分岐を重ねつつ遊離歯肉上皮下の乳頭層内および上皮内に終末をなして終わり、その分布は外縁上皮部に多く内縁上皮部には少ない。歯肉における神経終末は、分岐性あるいは非分岐性の単純性遊離終末が多く、少数ではあるが小体様終末もみられる。

歯根膜に分布する神経線維は、根尖下方の歯槽底、歯槽側壁の歯槽管、歯肉および歯槽頂縁付近の3方向より進入するものに大別される。それらの多くは歯根膜内に進入する血管に大体随伴しているが、末梢に行くに従って集合離散、あるいは分岐吻合して、各所に大小の神経叢を形成している。歯根膜内では、根尖周囲にもっとも神経線維の分布が多く、上昇するに従って少なくなっているが、歯槽頂縁付近では歯肉より進入する2～3条の小さな神経束あるいは単一の神経線維が分布するために、再びわずかながらに増加している。根尖周囲では、歯槽底部の多くの歯槽管より歯根膜に進入した10数条の有髓線維を有する比較的大きな神経線維束が、縦横に交錯し、歯根膜内最大の神経叢を形成した後、歯髄に進むものと、歯根膜それ自体に分布するものに分かれ、後者は次第に分岐を重ね、歯槽側壁の歯槽管より進入してき

た神経線維束と合流し歯槽頂縁付近の歯根膜に向って進んでいるが、あるものは歯根膜内において終ることなく、歯槽頂縁部歯根膜より歯肉に進んでいるものもある。以上の神経線維の走行は、大部分が歯根に対して平行、歯根膜線維の走行に対して直角に走っているが、一部の単一神経線維は歯根膜線維の走行に一致して歯根に対して直角の走行を呈している（写真4）。

歯根膜内の知覚神経終末の分布状態は歯根膜中部で豊富であり、かつ複雑型が多く存在し（写真5）、歯槽頂縁付近の歯根膜ならびに歯根尖端部歯根膜においては少量でかつ単純型の終末が多量にみられる。それらの神経終末の形態は非分岐性および分岐性の2形態に分けられ、非分岐性終末は少量存在し、有髄神経線維が髓鞘を失った後に尖鋭状に終っている（写真5）。なお、極く稀れに棍棒状に終るものが認められる。また分岐性終末は、単に2叉状、および3叉状に分岐する単純な終末型と、長い迂曲走行をとって終る数条の分岐からなる複雑な終末型の2型に分けることができ、後者における各分岐には極めて不規則な走行がみられ、これら分岐性終末の尖端も非分岐性終末同様、尖鋭性に終っている（写真5）。ときには、極く一部に棍棒状に終っているものが認められる。

切歯の歯髓内に分布する神経線維は、根尖孔直下の神経叢より出た多数の小径神経束が血管に随伴して根管内に進入し、根管のほぼ中央部を歯冠に向って歯軸に平行に上行している。これらの神経束は、根管内で分岐することは少なく、根管口付近で血管の分岐に沿って多数の小神経束および神経線維に分岐して歯冠部歯髓に分布する。歯冠部では、血管に随伴せず独自に走行する微小神経束や単一神経線維が増し、象牙芽細胞層直下の細胞稠密層付近では複雑な Raschkow 神経叢を形成し、これらの神経線維は、分岐性・非分岐性の尖鋭状遊離終末として終るものが多い（写真6）。

B. 実験群の組織所見

本実験では下顎左側中切歯を遠心へ移動したので、遠心側が圧迫側、近心側が牽引側となる。

1. 移動1日

a. 一般組織所見

1) 圧迫側では、歯根膜腔は対照群と比較して約1/3幅まで圧縮され、とくに固有歯槽骨上部から中部の突出した歯槽壁部で著しく狭くなっている（写真7）。歯根膜上半部から中部にいたる歯槽骨側の歯根膜では、線維芽細胞の数の減少と毛細血管の圧縮閉鎖がみられ、歯根膜中部から下半部では、一部の血管に充血拡張が認められ

る。

歯槽骨壁突出部の歯槽骨内では、骨細胞の消失、拡大した骨小腔および骨細胞の核濃縮などの変性所見がみられ、歯槽骨上半部の突出した歯槽骨壁付近では、少数の破骨細胞が出現しているが、骨吸収はあまり著明ではない（写真7）。歯槽側壁ならびに歯槽底部の骨髄あるいは歯槽管では、充血拡張している血管が対照群と比較するとやや増大している。

歯頸部歯肉には著明な変化はみられず、歯槽頂縁部歯根膜でループ状にはみだした歯根膜線維束が認められ、歯根膜上半部から下半部にいたる歯根膜線維は、傾斜が急になり小波状を呈して走行し、なおかつ、線維はやや太く束状となり不規則な配列を呈している。

2) 牽引側では、歯根膜腔は対照群と比較して約4/3幅まで拡大され、歯根膜上半部から中部では、歯根膜線維の走行に沿って細長い紡錘形ないし扁平な線維芽細胞がみられ、歯根膜中部から下部の歯槽骨側では、脈管神経隙が拡張し、それらの隙部の血管においては、充血拡張をきたしたものが一部にみられる。なお、槽間中隔頂縁部歯根膜の歯槽骨側では、極く一部に線維芽細胞の消失が認められる。

歯槽骨壁は、ほぼ平坦で、骨芽細胞は対照群と比べてやや増殖し、固有歯槽骨中部から下部の骨髄および歯槽管では、一部に血管の充血拡張をきたしたものが認められる。

歯根膜線維は、対照群と比較してやや緊張し、傾斜が僅かにゆるやかになっている。

両側中切歯間の歯間乳頭には著明な変化は認められないが、歯間水平線維は緊張し、両側の歯頸部付近で細く、線維束間に僅かに炎症性細胞の浸潤が認められる。

3) 歯髓およびセメント質に著明な変化は認められない。

b. 神経組織所見

1) 圧迫側では、歯頸部歯肉の神経線維には著変はみられないが、ループ状に突出した歯槽頂縁部歯根膜では、膨化ならびに染色性の低下を示す神経線維が一部に認められる。

歯槽骨上半部から中部にいたる歯槽骨側で、血管の圧縮閉鎖および細胞成分の減少をきたしている歯根膜では、染色性の低下、膨化、念珠状変化、断裂および顆粒状崩壊などの種々の変性所見を呈する神経線維が多数存在しているが、健全な神経線維もかなり散在して認められる。とくに、大径の神経線維は小径の神経線維に比べて分布量が減少し、断裂、顆粒状崩壊を示すものが多い

（写真8）。

歯根膜中部から下半部の歯根膜では、血管の充血拡張を伴って、念珠状変化、染色性の低下を示す神経線維が一部に認められる。歯槽側壁の歯槽管から進入する神経線維束では、膨化、断裂、顆粒状崩壊の像を示す線維がみられ、それらの間には、Schwann 細胞、神経線維の残遺物と思われる黒色顆粒あるいは貪食細胞の出現が認められる（写真9）。

血管の充血拡張を伴った骨髄では、初期の変性像を呈する神経線維がみられ、根尖歯根膜ならびに歯槽底部の歯槽管においては、膨化、染色性の低下などの変性所見を呈する神経線維が混在している（写真10）。

2) 牽引側では、両側中切歯間の歯間乳頭および歯間水平線維には、変性所見を示す神経線維は認められない。歯根膜上半部では、毛細血管に随伴する微細な神経線維の一部に染色性の低下がみられるのみで、他の大部分は健全な神経線維で占められている。歯根膜中部から下半部の拡張した脈管神経隙部で、拡張した血管に随伴する神経束には、部分的狭窄による念珠状変化、膨大による染色性の低下および離開傾向を示す線維がみられる。しかしながら、健全なまま残存する小径の神経線維も多数認められる（写真11）。なお、充血拡張をきたした血管から離れた所に位置する神経線維には著明な変化は認められない。歯槽骨中部から下半部の骨髄ならびに歯槽管の神経束には、初期の変性像を呈する神経線維が一部に認められる。

3) 歯髄の神経線維には、著明な変化は認められない。

2. 移動3日

a. 一般組織所見

1) 圧迫側では、歯根膜腔は1日に比べてさらに狭くなり、対照群の約 $\frac{1}{2}$ 幅まで圧縮され、歯根膜上半部から中部にいたる歯槽骨側の歯根膜では1日と比較して、線維芽細胞の核濃縮あるいは消失、血管の圧縮閉鎖あるいは出血の所見が増加し、小範囲に散在して無細胞帯が出現し、いわゆるやや硝子様化をきたした歯根膜が散見される。

歯槽骨上半部、歯槽骨壁の陥凹部および歯槽骨中部の一部では、破骨細胞による穿下性骨吸収がみられ、歯槽骨中部から下半部の歯槽骨壁には破骨細胞による直接性骨吸収が認められ、これらの歯槽骨壁に近接して腔部が出現し、その付近の歯根膜では血管が豊富に存在している。やや硝子様化をきたした歯根膜に接する固有歯槽骨の骨髄には、幼若結合組織が増殖し、破骨細胞が認められるが、穿下性骨吸収は著明ではない。また歯槽骨中

部から歯槽底部の骨髄ならびに歯槽管では、血管の充血拡張の像がさらに増している。

歯根膜線維の走行は、1日とほぼ同様の所見を呈しているが、歯槽骨壁に対してほぼ平行になるくらいまで傾斜が強く、ゆるやかな波状を呈し走行している。なお、骨吸収付近の歯根膜線維は、歯槽骨壁付近で融解され、歯槽骨中に進入する線維が減少している。

2) 牽引側では、歯根膜腔はさらに広くなり、対照群の約 $\frac{3}{2}$ 幅まで拡大され、歯根膜上半部から中部では、歯根膜腔の中央部で線維芽細胞の増殖が認められる。歯根膜中部から下半部にかけて脈管神経隙では、水腫あるいは血管の充血拡張をきたしたものが1日に比べて増加している。

歯槽壁面には造骨細胞が連鎖状に配列し、一層の薄い骨様組織が認められ、充血拡張をきたした血管を有する骨髄や歯槽管が固有歯槽骨の広範囲に散見される。

歯根膜線維は1日に比べてさらに緊張し、線維は細く傾斜はゆるやかで、とくに歯槽頂縁付近から歯根膜上半部にかけて水平に近く走行する線維が多数認められ、歯槽骨側とセメント質側では直線的に走行し、歯根膜腔の中央部では、断裂あるいは蛇行しながら走行している。

両側中切歯間の歯間乳頭には著変はみられず、歯間水平線維は1日とほぼ同様の所見を呈しているが両側歯頸部付近でさらに細くなり、槽間中隔頂縁付近では破骨細胞が出現し、骨吸収が認められる（写真12）。

3) 歯髄やセメント質には、1日と同様に著明な変化は認められない。

4) 移動大なる1例では、他の3日例に比べて、圧迫側において軽度の硝子様化をきたした歯根膜が広範囲を占め、骨吸収の所見が著しく、牽引側では、脈管神経隙の水腫ならびに血管の充血拡張の像が歯根膜全体を通じてみられる。なお、歯槽骨壁では骨様組織の添加量は他の3日例とほぼ同様である。

歯髄では、血管の充血拡張の所見が著しいが、象牙芽細胞には顕著な変化は認められない。

b. 神経組織所見

1) 圧迫側では、歯頸部歯肉の神経線維には著変はみられないが、歯槽頂縁付近の歯根膜では1日と同様に初期の変性像を呈する神経線維が認められる。

歯根膜上半部から中部にいたるやや硝子様化をきたした歯根膜では、1日と比較して変性が進行し、断裂、顆粒状崩壊および消失寸前の神経線維が多数みられるが、いまだに健全なまま残存する小径神経線維が認められる（写真13）。

穿下性あるいは直接性骨吸収を生じている歯槽骨壁付近の歯根膜では、膨化、断裂を示す神経線維がさらに増加している（写真14）。

歯槽側壁および歯槽底部の歯槽管あるいは骨髄では、1日に比べて変性所見を示す神経線維が若干増している。

2) 牽引側では、歯間乳頭および歯間水平線維の神経線維束には、断裂、顆粒状崩壊などの変性所見を示す線維が認められる（写真15）。

歯根膜上半部では、膨化、念珠状変化を示す神経線維と健全な神経線維が混在している。歯根膜中部から下半部では、脈管神経隙の拡大、血管の充血拡張の増加に伴って、膨化と念珠状変化を呈する神経線維束が増加している。また脈管神経隙より離れた場所に位置する小径の神経束、非分岐あるいは分岐性終末では、初期の変性像を示す線維が一部に認められる（写真16）。

歯槽側壁の骨髄、歯槽管では、染色性の低下、念珠状変化を示す神経線維が若干増加している。

3) 歯髄の神経線維は、1日と同様に著明な変化は認められない。

4) 移動大なる1例では、圧迫側において神経線維はほとんど消失しており、強い変性所見を示す小径の神経線維が僅かに残存しているのみである。歯槽底部の神経線維は、数の減少がみられ、残存した神経線維は膨化ならびに染色性の低下をきたしたもので占められている。

牽引側では、歯根膜全体を通じて微細な神経線維はほとんど消失し、念珠状変化、断裂を示す神経線維が大部分を占め、健全な線維は全く認められない。（写真17）。

歯間乳頭および歯間水平線維の神経線維は、他の3日例に比べて変性所見を示すものが増している。

歯髄では断裂、顆粒状崩壊をきたし消失寸前の変性神経線維あるいは神経線維の残遺と思われるものが散見され、ほとんどの神経線維は消失しているが、歯髄中央部、象牙芽細胞層付近に、健全に近い微細な神経線維が極く一部に残存している。なお、断裂、顆粒状崩壊を呈する神経線維の間に、Schwann細胞、黒色の顆粒が存在している（写真18）。

3. 移動7日

a. 一般組織所見

1) 圧迫側では、歯根膜腔は僅かに狭くなり、3日に比較して、硝子様変性に陥った歯根膜が、歯根膜上半部から中部にかけて広範囲を占めている。それらはセメント質に接するまで伸展し、Malassezの上皮遺残ならびにセメント芽細胞では消失や核濃縮の所見が多数みら

れ、同部の歯根膜線維は走行が不明瞭になり、一部に線維の融解、消失が認められる（写真19）。

固有歯槽骨壁では、穿下性骨吸収、直接性骨吸収が3日に比べて亢進し、硝子様化をきたした歯根膜に接する歯槽骨の骨髄では、破骨細胞による穿下性骨吸収がさらに進行し、その腔内では幼若結合組織の増殖が認められる（写真19）。

歯槽骨中部から下半部でみられる直接性骨吸収部の骨髄腔内では血管の充血拡張の像が著明であるが、歯槽底部の歯槽管あるいは骨髄の血管は3日とほぼ同様の所見を呈している。

歯頸部歯根には、破歯細胞によるセメント質の吸収が認められるが、その吸収窩は小さく象牙質に達していない。

2) 牽引側では、歯根膜腔は僅かに広くなり、歯根膜腔の中央部では、線維芽細胞がさらに増殖し、歯根膜線維は3日とほぼ同様な走行状態を示しているが、歯根膜全体を通じて線維はやや太くなり、歯槽骨側から歯根膜腔の中央付近まで小波状を呈して走行している線維が広範囲を占めている。

歯根膜線維の走行に一致して形成された線維骨表面には、2～3重の造骨細胞が配列され、層板状あるいは櫛歯状を呈する新生骨梁は3日に比較してやや厚みを増し、歯槽側壁の歯槽管および骨髄腔内の血管は3日と同様の所見が認められる。

両側中切歯間の歯間乳頭ならびに歯間水平線維は3日とほぼ同様の所見を呈しているが、槽間中隔頂縁には骨吸収の所見は認められない。

3) 歯髄では、血管の一部に充血拡張を伴ったものが認められる。

4) 圧下を伴った1例では、根尖部歯槽骨で破骨細胞による直接性骨吸収がみられ、根尖周囲の歯根膜では器質化が進行しているが、根尖孔付近には一部に出血あるいは壊死をきたした歯根膜が残存している。歯槽底部の歯槽管ならびに歯槽骨下半部の骨髄では充血拡張を伴った血管が大部分を占めている。

歯髄では、血管の充血拡張、血管の蛇行および水腫がみられるが、象牙芽細胞には著明な変化は認められない。

b. 神経組織所見

1) 圧迫側では、歯頸部歯肉ならびに歯槽頂縁部歯根膜の神経線維に部分的膨化による念珠状変化が認められる。

歯根膜上半部から中部にかけて、多数の神経線維が消失しているが、極く稀れに健全なまま残存する小径の神

神経線維が散見され、それらの線維は硝子様化が進行している歯根膜中に遊離した状態で走行している（写真20）。

直接性骨吸収部の歯根膜では、変性神経線維中に染色性の亢進した神経線維が僅かに認められる。歯槽側壁や歯槽底部の歯槽管および骨髓では健全あるいは変性に陥った神経線維が混在している。

2) 牽引側では、歯間乳頭、歯間水平線維の神経線維は3日と同様に変性所見が一部に認められる。

歯根膜上半部から中部では、膨化などの初期の変性所見を示す線維と、いまだに変性所見のみられない小径の線維が混在して認められるが、変性神経線維の分布量の増加は顕著である。ときには、染色性の低下をきたした神経線維は、末梢に行くに従って健全と思われる部分が残存している像がみられる（写真21）。歯根膜中部から下半部の脈管神経隙付近では、初期の変性像を呈する神経線維が大部分を占め、血管に随伴せずセメント質に近接して上昇する小径の有髄線維は、髄鞘が部分的に膨化し念珠状を呈し、かつ軸索は染色性の低下ならびに念珠状変化が認められ、これらの変性神経線維には多数のSchwann細胞が出現している（写真22）。しかし脈管神経隙から離れて位置する単一あるいは分岐性の神経線維には、いまだに変性に陥っていないものが一部に認められる。歯槽骨壁の歯槽管、骨髓の神経線維は3日と同様に、変性あるいは健全な線維が混在している。

3) 歯髄では、健全な神経線維が大部分を占めているが、一部に染色性の低下ならびに膨化をきたした神経線維あるいは分散傾向を示す神経束が散見される（写真23）。

4) 圧下を伴った1例では、7日の他例に比較して圧迫側、牽引側ともに、断裂、顆粒状崩壊をきたし消失寸前の神経線維が多く認められる（写真24）。また歯槽底部の歯槽管あるいは骨髓の神経線維は大部分が消失しているが、健全なまま残存する微細な神経線維は変性神経線維に随伴し（写真25）、根尖孔に向かってL字状に走行している。

根管内歯髄では、断裂、顆粒状崩壊をきたした神経線維の残遺が散見されるのみである。歯冠歯髄を直上する神経束には、染色性の低下、断裂などの軽度の変性所見を示すものと強度の変性をきたし消失寸前のものとが混在し、かつそれらの神経束では分散の傾向を示すものや分散をきたしているものが認められる。しかし、いまだに変性所見を呈していない微細な神経線維が歯髄中央部、象牙質側壁付近および変性神経束内に残存している（写真26）。髄角部やRaschkow神経叢では叢状構造

が疎あるいは線維に分布量の減少をきたし、かつ初期の変性像が豊富にみられる。

4. 移動14日

a. 一般組織所見

1) 圧迫側では、歯根膜腔は7日とほぼ同様の幅を呈しているが、硝子様化してエオジンに無構造に染色された無細胞帯が、歯根膜上半部から中部にいたる歯根膜を満し、その歯根膜では線維が融合した状態を呈している。硝子様変性に陥った歯根膜両端では、幼若結合組織による器質化が一部に認められる。

歯槽骨上部から中部にかけて骨吸収量は7日に比べて増加し、とくに骨髓での穿下性骨吸収が顕著で、その腔内は新生毛細血管ならびに幼若結合組織で占められている。しかし硝子様化をきたした歯根膜に接する固有歯槽骨の壁面では骨吸収像はみられず、広範囲に変性所見が認められる。歯槽中部から下半部の直接性骨吸収は著しく減少し歯槽骨下半部から歯槽底部の歯槽管あるいは骨髓では充血拡張をきたした血管が減少傾向を呈している。

2) 牽引側では、歯根膜腔は対照群と比べて広いが、層板状の新生骨がさらに厚く形成され歯根膜腔は7日より狭く、歯根表面では僅かにセメント質細胞の増殖が認められる。

歯根膜線維は7日とほぼ同様の走行を呈しているが、歯槽骨側では太い線維が新生骨中に深く進入し、歯根膜腔中央部では微細線維、線維芽細胞の増殖が著しく、線維は密に配列し極く一部に蛇行走行がみられる。また水腫をきたした脈管神経隙に微細線維が増殖している。

歯槽骨壁全体を通じて、新生歯槽管および骨髓の形成が一部にみられ、新生骨の添加量は歯槽骨上部から中部に比較して歯槽骨下半部では僅かに少ない。歯間乳頭では著変は認められないが、両側中切歯の歯間水平線維はやや太さを増し、僅かに小波状を呈し走行している。

3) 歯髄では、7日と同様に血管の充血拡張をきたしたものが一部に認められる。

b. 神経組織所見

1) 圧迫側では、歯頸部歯肉ならびに歯槽頂縁付近の歯根膜の神経線維は7日と同様の所見を呈している。

歯根膜上半部から中部にいたる硝子様化をきたした歯根膜では、全体的に膨化、染色性の低下をきたし、自己融解の様相を呈している消失寸前の神経線維が、極く一部に遊離してみられるのみで、健全な神経線維はほとんど残存していない。なお、それらの変性神経線維付近ではSchwann細胞、貧食細胞は全く認められない（写真27）。

硝子様化をきたした歯根膜の下端部では、器質化した

歯根膜中に染色性に富み棍棒状を呈する神経線維あるいは4～5条の微細神経線維からなる神経束が新生血管付近に認められ、いわゆる断端神経腫と思われる像を呈している(写真28)。また、先端が迂曲走行を呈している大径の変性神経線維では、微細な線維が上方に向って伸長している。しかし変性に陥った神経線維も一部に残存して認められる。

歯根膜下半部では染色性の亢進したものが一部に存在し、歯槽骨中部から下半部および歯槽底部の骨髓、歯槽管でも同様に染色性の亢進したものが認められる。なお穿下性骨吸収をきたしている骨髓ではほとんど神経線維は認められない。

2) 牽引側では、歯間乳頭および歯間水平線維の神経線維は7日と同様に変性に陥ったものが一部にみられる。

歯根膜上部から中部にかけては、膨化ないし念珠状変化を示す神経線維でほとんど占められている。なお歯槽骨壁の歯槽管および骨髓の神経線維も同様の像を示している(写真29)。

歯根膜中部から下半部では、7日に比べて断裂、顆粒状崩壊などの強度の変性神経線維が大量に認められ、血管に随伴しない単一あるいは分岐性の小径神経線維では、健全な線維は認められず、分布量の減少が顕著である(写真30)。

3) 歯髓神経線維は、7日と同様に染色性の低下、膨化したものが一部に認められる。

5. 移動21日

a. 一般組織所見

1) 圧迫側では、歯根膜腔の幅には変化は認められない。硝子様変性に陥った歯根膜の一部は穿下性骨吸収により歯槽骨の支持をなくし、幼若結合組織に置換されている。また、硝子様化をきたした歯根膜では歯根膜線維は完全に消失し、骨吸収窩の幼若結合組織では、微細な線維が僅かに網目を形成し、歯根膜中部から下半部では細く疎であるが、一部に規則的な走行を呈するものが認められる。

歯槽骨上半部から中部では、骨吸収が著明で、一層の薄い骨ならびに小島状の骨片が一部に形成され、これらの歯槽骨片には変性所見が認められる。歯槽骨中部から下半部にかけて、直接性骨吸収は極く一部にみられ、歯槽骨中部から歯槽底部の歯槽管および骨髓では14日と同様の像を呈している。

硝子様化をきたした歯根膜の上端ならびに下端の幼若結合組織に接する歯根では、破歯細胞が出現し、象牙質

に達する歯根吸収が認められる。なお、歯頸部歯根のセメント質吸収窩では一部にセメント質の添加が認められる。

2) 牽引側では、歯根膜腔の幅は、歯槽骨壁に新生骨梁がさらに厚く形成され、14日に比較してやや狭くなっている。

歯根膜線維は、歯根膜上部から中部において、歯槽骨側で線維は太く、直接的あるいは小波状に走行し、歯根膜腔中央部で密に配列し、強く蛇行を呈しセメント質側では一部に小波状を呈して走行している。歯根膜下半部では、線維は太く規則的な走行を示すものが豊富であるが、小範囲に小波状を呈し走行するものが認められる。

歯槽骨上半部から中部にかけて、新生骨梁の形成が著しく増大し、歯槽骨下半部に比べて明らかに差異が認められる。新生骨梁では骨髓および歯槽管の形成がさかんで、それらは幼若な線維や充血拡張した血管で満ちされている。

両側中切歯間の歯間乳頭には著明な変化は認められず、歯間水平線維は、両側中切歯の歯頸部付近で波状を呈し、弛緩した像を示している。

3) 歯髓では、14日と同様に充血拡張をきたした血管が一部に認められる。

4) 圧下および回転を伴った一例では、歯槽底部の骨面には、破骨細胞はあまりみられず、遠心側の歯槽骨下部では、一部に櫛歯状の新生骨が形成されている。根尖周囲の歯根膜では、血管や幼若結合組織が増殖し、根尖部歯根では破歯細胞による吸収が認められる(写真31)。

歯髓では、7日の圧下を伴った例と比較して充血や出血の所見が歯髓の広範囲に認められるが象牙芽細胞には著明な変化はみられない。

b. 神経組織所見

1) 圧迫側では、歯頸部歯肉に、ほとんど変性神経線維は認められず、歯根膜上半部の器質化の進んでいる歯根膜では、歯槽頂縁部より進入する神経線維に初期の変性所見を呈するものがいまだに残存している。

上半部から中部にいたる硝子様化をきたした歯根膜では、全く神経線維は確認できず、極く稀に神経線維の残遺物や痕跡と思われるものが認められるのみである(写真32)。

硝子様化をきたした歯根膜下端の穿下性骨吸収部の幼若結合組織中に、微細な単一神経線維あるいは染色性の増した10数条の微細な神経線維からなる再生神経束が歯槽骨壁に近接して上昇し、先端がホウキ状すなわち断端神経腫の様相を呈している、また再生神経束は、さらに

太く、伸長し、神経線維は数を増しているが、それらの再生神経線維の付近では、極く一部に変性神経線維が散見される(写真33)。歯槽底部より上昇する大径の神経線維に断裂などの変性所見がいまだに残存しているが、これらの神経線維に随伴する細い健全な神経線維が認められる。

歯槽骨中部から歯槽底部にいたる骨髓あるいは歯槽管では、変性神経線維と健全な神経線維とが混在している。

2) 牽引側では、歯間乳頭および歯間水平線維では変性像を示す神経線維が僅かに残存しているのみで、他は健全な神経線維で占められている。

歯根膜上半部から中部にかけては、14日と同様に変性に陥った神経線維で占められているが、僅かに分布量の減少が認められる。歯根膜中部から下半部にかけて、いまだに変性所見を示す神経線維が多く認められるが、染色性の亢進ないし再生神経線維と思われる微細な線維が僅かに散見される。また、新生歯槽管および新生骨髓の神経線維も変性像を示す線維が多数占めているが、健全な線維も一部に認められる(写真34)。

3) 歯髓の神経線維では、14日と同様に一部に変性所見が認められる。

4) 圧下および回転を伴った一例では、根尖側歯根膜ではほとんど大径神経線維はみられず、再生神経線維と思われる細い線維が遠心側の歯槽管から進入し、S字状に圧縮され根尖孔に達している。それらの神経線維には染色性の低下を示すものが一部にみられる(写真35)。

歯髓全体を通じて、変性所見を示す神経線維がいまだに多量に残存し、かつ神経束が分散している。なお、健全な神経線維はほとんど認められない(写真36)。

6. 移動28日

a. 一般組織所見

1) 圧迫側では、歯根膜腔は、21日と比較して広いが、対照群と比べると僅かに狭い。硝子様化をきたした歯根膜は完全に幼若結合組織に置換され、その幼若結合組織中の細い歯根膜線維は僅かに網目を形成している(写真37)。

歯槽骨上部から下部にいたる歯槽骨壁には、破骨細胞による直接性骨吸収がみられる。なお、骨髓側よりの穿下性骨吸収による小島状の歯槽骨片が歯根膜中に孤立して一部に認められる。

象牙質に達した歯根吸収窩は21日と比較して拡大しているが、一部にセメント芽細胞によるセメント質の添加が見られ、歯根吸収窩は歯槽骨の吸収窩と同様に幼若結合組織で満されている。なお歯頸部あるいは歯根中央部

の小さな吸収窩はセメント質の添加による修復が認められる(写真37)。

歯槽側壁ならびに歯槽底部の歯槽管・骨髓では血管の充血拡張が21日に比較して若干増加している。

2) 牽引側では、歯根膜腔は対照群と比べて僅かに広く、新生骨梁の形成は21日に比較してさらに増加しているが、歯槽骨壁に沿ってみられる造骨細胞に数の減少が認められる。

歯根表面では、21日とほぼ同様の所見を呈しているが、薄い一層の類セメント質の添加が認められる。

歯根膜の歯槽骨側の線維は細くなっているが、配列はほぼ規則的で、直線的に斜走するものが大部分を占め、ときには新生骨梁突出部で小波状を呈し走行している線維が一部に認められる。歯根膜の脈管神経隙ないし新生歯槽管、新生骨髓では、幼若な細い線維や充血拡張をきたした小血管で満されている。

両側中切歯間の歯間乳頭には著明な変化はみられず、歯間水平線維は、一定した太さを示し、やや緊張した像を呈している。

3) 歯髓では、21日とほぼ同様に血管の充血拡張をきたしたものが、いまだに残存している。

4) 圧下をきたした1例では、根尖部の歯根膜では器質化がさらに進み、幼若結合組織に全て置換されていて、歯槽底部歯槽骨や根尖部歯根の吸収所見もいまだに認められる。歯髓組織には、血管や歯髓細胞の増殖がみられ、血管の拡張や水腫などの障害性変化は消退している。

b. 神経組織所見

1) 圧迫側では、歯頸部歯肉ならびに歯槽頂縁部歯根膜には、変性に陥った神経線維はほとんどみられず、新生毛細血管に伴走しながら歯根膜上半部付近にまで下降している健全な神経線維が一部に認められる。

器質化により幼若結合組織に全て置換された歯根膜では、小島状に残存している歯槽骨片に近接している3～4条の微細な再生神経線維からなる神経束や、単独線維からなる再生神経線維がみられる。

歯根膜中部から下半部で、穿下性骨吸収部ならびに直接性骨吸収部の歯根膜では、21日に比較して、再生神経線維束は伸展し、かつ再生神経線維は非常に微細で数の増加が著しく、また時には10数条からなる染色性に富んだ神経束が散見される(写真38)。

歯槽側壁の歯槽管、骨髓では健全な神経線維が多く認められ、歯槽底部の歯槽管では変性像を示す線維が僅かに認められるのみで、他は健全な線維で占められている。

2) 牽引側では、歯間乳頭および歯間水平線維の神経線維には著明な変化は認められない。歯根膜上部では、変性神経線維に随伴する健全に近い線維が一部にみられ、歯根膜の上半部から中部では、膨化による染色性の低下、念珠状変化を呈する神経線維がいまだに多く残存しているが、新生血管に伴走する10数条の微細な神経線維からなる小径神経束が少量認められる。

歯根膜中部から下部では、微細な再生神経線維が多く存在し、歯根面に直行する線維ないし歯根膜を上昇する線維がみられるが、複雑に分岐したものは認められない(写真39)。なお変性に陥った神経線維は極く一部に散見されるのみである。

歯槽側壁の新生歯槽管および新生骨髄では健全な神経線維と変性神経線維が混在しているが、健全な線維がやや多く認められる。

3) 歯髄では、21日とほぼ同様に変性に陥った神経線維がいまだに存在している。

4) 圧下を伴った例では、歯槽底部歯根膜の神経線維は21日に比べて細い健全な線維がみられ、根尖孔に向けて走行している。

歯髄では、21日の所見の延長として念珠状変化や断裂、顆粒化をきたした段階の神経束が残存していて、染色性の亢進した微細な神経線維が神経鞘や Schwann 細胞の残存部に隣接しながら上昇している(写真40)。

7. 移動42日(1回目の arch wire 調節14日後)

a. 一般組織所見

1) 圧迫側では、歯根膜腔は28日と比較して非常に狭窄され、とくに28日の所見の延長として、骨髄側よりの穿下性骨吸収により生じた島状あるいは半島状の歯槽骨が近接し、ときには歯根に癒着したものが認められる。これらの島状あるいは半島状を呈している歯槽骨では、変性像を呈しているが、骨吸収所見は著明に認められない。歯槽骨中部から下半部では一部に直接性骨吸収がみられる。

歯頸部歯肉では炎症性細胞の浸潤がさらにび漫性に拡大している。狭窄した歯根膜では、壊死あるいは硝子様化をきたした部が小範囲に局限してみられるが歯根膜全体を通じて線維化の進んでいない幼若結合組織ならびに小血管で満されている。しかし、セメント質側の極く一部に進入する歯根膜線維はいまだに残存している。

歯槽側壁の歯槽管ないし骨髄では、小血管および幼若結合組織で占められ、歯槽底部では血管の充血拡張が認められる。

2) 牽引側では、歯根膜腔は対照群と比較してやや広

く、歯根膜では血管、線維芽細胞が増殖し、歯根表面では28日と同様にセメント芽細胞が増殖し、一層の類セメント質が僅かに添加されている。

歯槽骨壁には骨芽細胞が多くみられ、新生骨梁は28日に比べてさらに厚みを増し、新生歯槽管および新生骨髄の形成が著しい。

歯根膜の上部から中部にいたる歯槽骨側では、線維は太く、蛇行を呈しながら、歯根膜腔中央部付近まで走行し、セメント質側では、規則的な走行を示し、歯根膜中部以降では、ゆるやかな波状を呈し斜走している。

厚く形成された新生骨中に深く歯根膜線維が進入し、新生骨髄腔内まで達し、その腔内は水平に直線的な走行を呈する線維束で占められているものが、歯槽骨上部から中部にかけて一部に認められ、ときには充血拡張をきたした血管が認められる。

両側中切歯間の歯間乳頭は圧迫側の歯頸部歯肉と同様に炎症性細胞の浸潤が増大している。

歯間水平線維はやや太く小波状を呈し走行し、僅かに線維の弛緩が認められる。

3) 歯髄では、28日に比べて僅かに充血拡張を呈する血管が増加している。

b. 神経組織所見

1) 圧迫側では14日に比較して、移動量が増しているため、歯頸部歯肉、歯槽頂縁部歯根膜では変性神経線維がやや増加している。

歯根膜上半部から中部では、幼若結合組織中に再生神経線維と思われる微細な単一線維、ときには分岐した線維が散在し、規則的な走行を呈するものは認められない。なお、微細な神経線維は染色性の低下をきたしたものが極く一部に認められるが、他は健全なまま存在する(写真41)。

歯根膜中部から下部ではセメント質に近接し、わずかに蛇行を呈し上昇している5～6条の神経線維が認められ、健全な線維と初期の変性像を示す線維とが混在し、ほぼ平均している(写真42)。なお、歯根膜全体を通じて神経線維の分布量は28日に比べてさらに減少している。

歯槽側壁の骨髄ないし歯槽管の神経線維はさらに疎になり、歯槽底部の歯槽管あるいは骨髄の神経線維は、28日に比べ変性所見を呈するものが僅かに増加している。

2) 牽引側では、歯間乳頭および歯間水平線維の神経線維は、14日に比べて染色性の低下、膨化をきたした線維が増加している。歯根膜上部から中部では、変性に陥った神経線維は28日より増しているが、健全なまま残存

している少数の神経線維が認められる。なお新生骨梁突出部に近接して走行する神経線維は、ほとんど軽度の変性に陥っているが、断裂や顆粒状崩壊を呈すものはみられない (写真43)。

歯根膜中部から下部では、細い10数条からなる神経束がみられ、健全な線維ならびに変性をきたした線維が混在して認められる。新生骨髄および新生歯槽管の神経束は対照群と比較して細い神経線維が豊富で、神経束中の大径の神経線維に変性をきたしたものが多くみられる (写真44)。

歯髄では、28日に比べて変性神経線維が僅かに増大し、かつ分散の傾向を呈している。

8. 移動70日 (2回目の arch wire 調節14日後)

a. 一般組織所見

1) 圧迫側では、歯根膜腔は歯槽頂縁付近および歯根膜中部の一部で僅かに狭く、歯根吸収窩付近では広く、それらを除いた部分では、対照群とほぼ同様の幅を呈している (写真45)。

歯槽骨壁の上部から中部にかけて、骨新生および骨吸収の像が混在し、僅かながら破骨細胞による骨吸収所見が多く認められ、歯根吸収窩付近の歯根膜中には遊離した幼若な線維性歯槽骨片が残存している (写真45)。

歯槽骨の中部から下半部にいたる歯槽骨壁では破骨細胞による直接性骨吸収が42日に比べて増加し、広範囲を占めている。なお上部から中部にいたる歯槽骨では、穿下性骨吸収はほとんどみられず、直接性骨吸収が大部分を占めている (写真45)。

歯根膜上半部では線維の増殖が極く一部にみられるのみで、歯根膜全体を通じて線維化の進んでいない幼若結合組織が大部分を占め、新生毛細血管の増殖が顕著である。

歯根の吸収窩はさらに拡大し、破骨細胞による歯根吸収が盛んであるが、吸収窩の極く一部にセメント質の添加がみられる。なお象牙質に達しない小さな吸収窩はセメント質による修復が認められる。 (写真45)。

歯頸部歯肉には炎症性細胞の浸潤が42日に比べて高度でかつ広範囲に認められ、中切歯・犬歯間の歯間水平線維ないし歯槽頂縁付近の線維は圧縮され、僅かに波状を呈し走行している。

歯槽側壁あるいは歯槽底部の歯槽管および骨髄では血管の充血拡張が42日と同様に認められる。

2) 牽引側では、歯根膜腔は対照群と比較して狭く、新生骨梁の突出部でさらに狭くなっている (写真45)。

新生骨梁は歯根膜線維の牽引方向に一致して半島状に

伸び出た像を示し、歯槽骨側壁は凹凸不整を呈し、とくに上半部から中部にかけて著明で、また、新生骨では骨髄や歯槽管の形成が42日に比較して多くみられ、それらの腔内では、充血拡張をきたした血管や歯根膜線維が認められる (写真45)。

歯根表面には、さらに類セメント質が層状に添加し、歯根中央部から下部で著しい。

歯根膜線維は、歯根膜全体を通じて減少が明らかで、新生骨梁の突出部付近では、線維が強く蛇行し、セメント質側では小波状を呈し走行している。しかし歯根膜中部から下半部にかけて、歯根膜線維の走行は不明瞭である。

両側中切歯間の歯間乳頭および歯間水平線維では炎症性細胞の浸潤が顕著で、歯間水平線維は緊張し、疎で細く、一部に断裂が認められる。槽間中隔頂縁では一面に破骨細胞が出現し、骨吸収像を呈し、かつ、右側中切歯、右側側切歯間の歯間水平線維や槽間中隔頂縁でもほぼ同様の所見が認められるが、やや軽度である (写真45)。

3) 歯根中央部に大きな吸収窩を生じた例の歯髄では、広範囲にやや充血調の血管がみられ、歯根吸収直下部に薄い一層の修復象牙質の形成が認められ、象牙芽細胞に近接して、毛細血管、歯髄細胞の増殖が僅かに認められる。

b. 神経組織所見

1) 圧迫側では歯頸部歯肉、抜歯窩口部相当部の歯肉および歯間水平線維に、膨化、染色性の低下をきたした神経線維、あるいは健全な神経線維が混在している。

歯槽頂縁部から歯根膜上半部にかけて、極めて稀に、歯槽頂縁部から下降する毛細血管に伴って伸長している微細な再生神経線維がみられ、かつその線維に随伴する Schwann 細胞が僅かに認められる。

歯根膜上半部から中部にいたる幼若結合組織中の微細な再生神経線維は、42日に比べてさらに分布密度は疎になっている。なお増殖した血管に随伴し、2～3条の非常に微細な植物神経線維が散在して認められる (写真46)。

歯根膜中部から下半部では、染色性に富んだ大径の神経線維は全く認められず、5～6条の微細な線維から成る小径神経束が血管に随伴し、器質化した歯根膜に向けて上昇しているが、その数は極めて少なく、変性像を示す線維が一部に認められる。なお、血管に随伴せず増殖した Schwann 細胞内を走行する所見はみられず、Büngner 氏索の形成は認められない。

歯槽側壁の歯槽管および骨髄では神経線維はほとんど

認められず、歯槽底部の歯槽管、骨髓では神経線維の分布量が減少し、変性像を呈する線維に比べて健全な線維が僅かに多くみられる。

2) 牽引側では、両側中切歯間ならびに右側中切歯、右側側切歯間の歯間乳頭および歯間水平線維の神経線維は疎で、変性所見を示す線維で占められている。

歯根膜全体を通じて、神経線維は42日に比べて細く、かつ分布量の減少が認められる。

さらに詳細に観察すると、歯根膜上部から中部にかけて、上昇する血管に伴走する小径神経線維に膨化、断裂などの変性像がみられるが、一部に健全な線維も存在する。歯根膜中部から下部で新生歯槽管や新生骨髓から歯根膜に進入する神経線維は、歯根膜腔の中央部を上昇し、直線的な走行を呈するものが多く、複雑に分岐した神経線維はほとんど認められず、染色性の低下をきたしたものが多数を占めている（写真47）。

歯槽管や骨髓の神経線維は全体的に細く、初期の変性像を示す線維と健全な線維が混在している。

なお、右側中切歯が近心側へ移動の様相を呈しているため、近心歯根膜では、膨化や念珠状変化を示す神経線維が一部に認められる。

3) 歯根中央部に大きな吸収窩をきたした例の歯髄では、象牙質壁に平行に直上する神経線維束は対照群と比べて分散の傾向を示し、染色性の低下に陥った線維が一部に見られ、かつ分布量の減少をきたしている。修復象牙質部では、再生神経と思われる微細な線維がみられ、それらは神経束より分岐し象牙質壁に近接して平行に走行するか、ときには分岐した終末枝が修復象牙質へ向って走行している（写真48）。

総括および考察

矯正装置により歯の移動を行って、歯の移動様相を模型計測と組織学的検索を併せて明確にし、さらに歯の位置の変化に伴う、歯とその支持組織の神経線維の経日的変化を神経組織学的検索により明らかにした。著者は、本実験結果の検討を行うにあたり、便宜上、模型計測、一般組織所見、および神経組織所見に分け考察することにする。

A. 模型計測および一般組織所見について

1. 歯の移動に関して

a. 矯正力の力学的要素について

適正な矯正力に関して Schwarz²⁾ は、人為的な歯の移動に生物学的な適正力の概念を初めて導入し、矯正力が歯に加わる際の歯根膜血管の圧縮に応じて4段階に分

類し、最も有効な矯正力として15～20g/cm²（毛細血管圧以下）の値を挙げている。また、斉藤^{15,16)} は、イヌを用いた実験において、適正な矯正力として11gの値を示し、その時には歯槽骨の改善が最も円滑に行われると述べている。一方、Burstone (1962)²⁹⁾ はヒトの前歯で sectional arch を用いて歯体移動の実験を行い、適正な矯正力は50～75gであると記載している。これに対して Storey and Smith (1952)³⁰⁾ は、適正な矯正力の概念に差動矯正力（differential force）の概念を取り入れる必要があると強調している。

本実験で用いた60gの矯正力は Schwarz²⁾、斉藤^{15,16)} らが挙げている最も有効に働く矯正力より大きなものであるが、Burstone²⁹⁾ の適正な矯正力の範囲であり、また現在の矯正臨床においても通常使用されている強さである。しかし広範囲にわたる硝子様化をきたした歯根膜の出現により、また歯槽骨に広範囲の穿下性骨吸収、歯根吸収などの所見が認められたことから、用いた矯正力が大きなものであったと推察される。なお本実験に用いた sectional arch による持続的な矯正力は経日的に必ずその減衰を伴い、また歯が移動を始めるとさらに力の強さが大幅に減衰するために、加えられた矯正力に対する歯根膜および歯槽骨の反応は急激かつ短期間に強く現われるものと考えられる。

また Reitan⁸⁾ は、矯正力を力学的に考察する場合には、力の強さと共に常にその作用方向を十分に考慮しなければならないと指摘している。一般に力の作用方向により、傾斜、歯体、挺出、圧下、回転などの移動に分けられる。歯体移動を組織学的に検索した Reitan¹¹⁾ は、歯体移動の初期には力学的に言えば歯体移動でなく、わずかな傾斜が生じた結果、歯根膜上半部から中部にかけて硝子様化をきたした歯根膜が生じ、その傾斜の程度は arch wire の形や bracket の幅により差がみられると述べている。

本実験で生じた歯体移動は必ずしも単純なものではなく、僅かな歯軸の遠心傾斜を伴ったもの4例、圧下や回転を伴ったもの3例が認められた。なお wiggling や jiggling による歯体移動が認められなかったのは、歯の移動距離が短いこと、あるいは中切歯の歯根が短くさらに側切歯の抜歯により歯槽頂縁が吸収して低下していること、などによるものと考えられる。なお移動70日において、圧迫側の歯槽骨上半部の骨壁に骨吸収および骨添加が混在している所見が認められる。これは歯槽骨壁ならびに歯根の過剰吸収により、歯根膜腔が拡大され骨添加が生じたものと考えられる。

b. 歯の移動距離について

矯正臨床において治療目標に向って最も有効に歯の移動を行うためには、歯槽骨の旺盛な骨改造を生じさせ円滑な歯の移動を行う必要がある。一般組織学の分野において骨改造は血管が直接ないし間接的に関与していることは、よく知られている。また、矯正学の分野においては、歯槽骨の吸収・添加と、歯根膜および歯槽骨の血管との関連性について、Schwarz²⁾、Stuteville⁴⁾、Oppenheim⁶⁾、Reitan⁹⁾、中村 (1967)³¹⁾、藍原 (1969)³²⁾ らがそれぞれ組織学的立場から追求し、報告している。

本実験では、歯槽骨の穿下性骨吸収部および直接性骨吸収部では、歯根膜の血管から著しく増殖した新生血管が拡張して叢状をなして走行し、骨髓側からの穿下性骨吸収部では、骨髓中の血管が著しく拡張し、これらの血管の近くに破骨細胞が出現し、Stuteville⁴⁾、中村³¹⁾、藍原³²⁾ らの報告とほぼ同様の所見が認められた。

歯の移動に伴う圧迫側の歯根膜では、生活力が減退あるいは消失し、無細胞帯いわゆる硝子様変性に陥った歯根膜が出現することは、すでにSandsted¹⁾、Schwarz²⁾、Oppenheim⁶⁾、Macapanpan, *et al.*¹²⁾ らにより報告されている。歯の移動に際して、硝子様変化をきたした歯根膜が出現する範囲および期間についてReitan¹¹⁾ は、硝子様変性の生じている期間を決定するものは本質的には力の大きさであるが、サルやイヌなどの実験動物では、ヒトと比べて歯槽骨が緻密で大きな骨髓腔や裂目が少なく、硝子様化をきたした歯根膜が広範囲に出現し、その器質化が遅延するため、長時間残存すると述べている。なお歯体移動は傾斜移動に比較して、その期間が短いのが特徴であると指摘している。

本実験の歯体移動において、歯根膜上半部から中部にかけて、移動3日では小範囲の無細胞帯が散在し、いわゆるやや硝子様化をきたした歯根膜がみられ、その後漸次増加し、移動14日で歯根膜上半部から中部にかけて硝子様変性に陥った歯根膜で満され、移動28日でそれらは器質化され、全て幼若結合組織で占められている。また移動42日では、歯根上半部から中部にいたる歯根膜の極く一部に硝子様化をきたした歯根膜がみられ、移動70日ではそれらは全く認められない。なお硝子様化をきたした歯根膜に接する歯槽骨は、Oppenheim⁶⁾、Macapanpan, *et al.*¹²⁾ らの報告と同様に骨細胞が変性および消失をきたし、歯槽骨の骨壊死がみられ、同部では骨の吸収機能の停止が認められた。またReitan¹¹⁾ は広範囲に出現する硝子様化をきたした歯根膜は、歯の移

動の停止を導くと指摘しているように、本実験でも移動7日から21日までほとんど歯の移動は認められない。移動28日では、硝子様化をきたした歯根膜は全て吸収され、両側中切歯間の歯間水平線維は緊張し、圧迫側では歯槽骨側壁ではほとんど直接性骨吸収がみられ、歯の移動の様相を呈している。なお移動42日、70日では漸次、硝子様変性に陥った歯根膜が減少するにつれて、歯の移動距離の増加が認められる。

歯の移動距離が変化する要因に関して、Reitan⁹⁾ は、個体間変異、歯の移動様式、および歯の移動に伴う歯周組織の解剖学的環境の差を挙げているが、矯正力の大きさについてはふれていない。これらの中で、とくに歯周組織の解剖学的環境の重要性すなわち歯槽骨の成熟度合を説き、多孔性で大きな骨髓腔を有する歯槽骨が吸収しやすいと述べている。さらに中村³¹⁾ は、Reitan⁹⁾ の主張を一步前進させ、歯の移動に伴う歯槽骨の血管分布様相が、歯の移動に極めて重要な因子であると主張している。また、歯頸部歯根膜では血管分布密度が疎で歯肉より進入する動脈はみられず硝子様化をきたした歯根膜が出現しやすいと述べている。すなわち歯根膜血管走行の解剖学的特殊性も歯の移動距離に関与していると指摘している。本実験でも歯根の長さや大きさ、歯根膜および歯槽骨の反応の違いにより、同一実験群において硝子様変性に陥った歯根膜の出現する範囲や部位に差異がみられ、歯の移動量に差が認められる。これらのことから歯根膜血管の分布、あるいは歯槽骨の形態などの因子が移動量に強い影響を与えることを示唆している。

また、歯の移動距離を左右する因子と考えられる抜歯後の歯の移動開始時期に関して、佐野 (1968)³³⁾ は、抜歯後15日以降に歯の移動を行うのが望ましいと述べている。また、Murphey¹⁹⁾ はサルを用い、抜歯後7週目の治療抜歯窩と抜歯直後の抜歯窩に下顎第2小臼歯の遠心移動を行い、抜歯直後の移動に比較して治療後の移動は、圧迫側で骨吸収量および牽引側の骨添加量が多く、移動距離が増大する。すなわち移動に抵抗を示す新生骨の消失および歯間水平線維の再生と収縮により、第2小臼歯が遠心側に移動するため、移動距離が増大すると報告している。さらに藤井 (1972)³⁴⁾ は、抵抗性を有する抜歯窩の網状を示す新生骨梁が骨髓腔の拡大により消失する時期、すなわち歯肉上皮が抜歯窩口を被覆後4週間以内に開始するのが望ましいと指摘している。

本実験においては、Erikson and Kaplan (1945)³⁵⁾、Reitan^{8, 9)}、Murphey¹⁹⁾ らが報告しているように、抜歯窩口の歯間水平線維の再配列と収縮による両隣在歯

の移動は、対照群の実験相当歯では全くみられなかった。しかし移動初期に圧迫側に骨吸収、牽引側に骨添加が認められたことは、抵抗性を有する抜歯窩の新生骨の消失や抜歯窩口の歯間水平線維の再生と収縮による力が作用し、破骨細胞、造骨細胞の出現に適した環境となっていることなどが、深く関与していると考えられる。

2. 歯根吸収について

一般に矯正治療に際して、歯根吸収は避けられないものであることはよく知られている。これらの歯根吸収の問題点は、移動歯の機能と安定性にとって有害である象牙質に達する広範囲の歯根吸収である。一方小さな吸収窩は、本実験でも認められるように、それらは早期に第2セメント質により修復される。移動歯の機能と安定性にとって有害な歯根吸収について Ketcham (1927)³⁶⁾ が歯牙 X-ray 写真により観察を行って以来、坂本 (1958)³⁷⁾、DeShields (1969)³⁸⁾、Goldson and Henriksen (1975)³⁹⁾ らにより多数報告されている。

組織学的立場から、歯の移動に伴う歯根吸収について、Macapanpan, *et al.*¹²⁾ は硝子様変性に陥った歯根膜が、歯根吸収に関与していると報告し、Reitan (1974)⁴¹⁾ は歯根吸収は硝子様化をきたした歯根膜の隣接部から始まると述べている。近年 Kvam²¹⁾ は走査型電顕による観察から、硝子様組織の除去は硝子様化をきたした歯根膜の形成後直ちに始まり、これらが除去される間に歯根は吸収され、歯根吸収は10日に始まり21日に広範囲の吸収窩が出現すると述べている。また、Rygh²²⁾ は透過型電顕より、歯根吸収は硝子様化をきたした歯根膜の除去と同時におよびその後起こることを観察し、歯根膜線維が障壁であり、障壁がなくなった歯根は容易に破歯細胞の攻撃を受け歯根吸収が生じると報告している。これに対して Gianelly and Goldman (1971)⁴⁰⁾ は、歯根吸収と、硝子様化をきたした歯根膜との関連性には疑問があると述べている。なお本実験において硝子様化をきたした歯根膜では、器質化により、移動21日以後に象牙質に達する吸収窩がみられ、さらに移動28日、56日に新たに矯正力が加えられたため歯根吸収は進み、移動70日では大きな吸収窩が認められる。以上の所見から Kvam²¹⁾、Reitan⁴¹⁾、Rygh²²⁾ の見解を支持するものである。

なお歯根吸収に関与する因子について Reitan¹¹⁾ は、作用した力の大きさ、移動の時間と方向、存在する咬合圧、年齢、歯槽骨とセメント質の性質などを挙げている。

1947年⁷⁾ には、歯根吸収と用いる矯正力についてイヌ前歯の歯体移動を行い、68～85 g では根吸収がみられ、

40～55 g では根吸収はみられず、使用した力の強さと歯根吸収現象の間に密接な関連性があるといい、傾斜移動より歯体移動の方が歯根吸収の発現頻度は低下すると述べている。また1967年¹⁰⁾ には、無咬合状態で40～50 g の力を用いて歯体移動を行った時、硝子様化組織の形成が認められないことから、Stuteville⁴⁾ と同様に、咬合力による抵抗性が歯根吸収に重要な因子となると指摘している。さらに1974年⁴¹⁾ には、ヒト小臼歯で25～240 g の力を用いて、圧下、挺出、傾斜移動の実験を行い、全実験例に歯根吸収を認め、歯根尖の短小化をきたしたものの以外は第2セメント質により修復されると述べている。

また歯槽骨の成熟度合すなわち歯の移動時に、新しく形成された骨様組織について Schwarz²⁾ は、正常骨に比べて吸収が困難で、歯根の吸収をきたすと述べ、Murphey¹⁹⁾、藤井³⁴⁾ らは、抜歯窩が治癒した後に行った歯の移動に比べて、抜歯直後に抜歯窩に移動したものに歯根吸収が多く出現するのは、抜歯窩内の抵抗性を有する網状の新生骨梁が存在するためであると指摘している。

またセメント質は、歯槽骨に比べて刺激に対する反応性が低く、変化の開始も遅延することは従来の報告からよく知られている。骨とセメント質のこのような反応の差異については、Macapanpan, *et al.*¹²⁾ は生物学的な反応の差と述べている。また Reitan¹¹⁾ は、セメント質側の歯根膜はコラーゲンの産生や置換が歯槽骨表面より少ないと記載している。本実験では、歯根吸収時に歯槽骨側よりもセメント質側の歯根膜の器質化が遅延する。すなわち、セメント質と歯槽骨の反応性の差が歯根膜に起因する所見が認められる。なお、前述の歯根吸収の諸因子のほとんどは、硝子様化をきたした歯根膜の出現範囲および残存期間を決定する重要な要素であり、硝子様化をきたした歯根膜の周囲は硬組織吸収性の幼若結合組織で占められ、これらが長期残存する場合、歯の安定と機能に有害な歯根吸収が生じるものと考えられる。

3. 歯の移動に伴う歯髓の組織変化について

人為的な歯の移動が歯根完成歯の歯髓および象牙質におよぼす影響に関して、木暮ら¹³⁾、Stuteville⁴⁾、Anstendig and Kronman (1972)⁴²⁾ が報告しているように、歯髓細胞の変性、ときには歯髓壊死などが知られている。一方、歯根未完成歯の歯髓についても、太田¹⁴⁾、Butcher and Taylor (1952)⁴³⁾、Stenvik and Mjör (1970)⁴⁴⁾、植木 (1979)⁴⁵⁾ らは、歯根完成歯とはほぼ同様な所見を認め、さらにこれらの障害変性に起因する象牙質の形成異常がみられると述べている。これに反し

て、Orban³⁾は人為的な歯の移動による歯髄への影響は認められないと簡単に報告し、Huettner and Whitman (1958)⁴⁶⁾は、カニクイザルの歯を4 mm圧下した実験において、歯髄への血液供給に大きな影響を及ぼす圧下においても歯髄の活性は損われないと述べている。

根未完成歯と歯根完成歯の歯髄の組織反応の差について、Butcher and Taylor⁴³⁾はサルの根未完成歯の移動を行い、根未完成歯よりも根完成歯の方が歯髄内血管の閉鎖は生じにくいのではないかと推論している。Stenvik and Mjör⁴⁴⁾は、ヒトの小白歯を歯根の完成状態に応じて3段階に分類し、90 gの力を作用させて圧下を行った結果、循環障害、象牙芽細胞の空胞変性、象牙質の形成機能の異常などを観察し、歯根未完成歯よりむしろ歯根完成歯の方が、歯髄の障害変性を受けにくいものではないかと報告している。これに反して、Hamer-sky, et al. (1980)⁴⁷⁾は歯の移動に伴う歯髄の呼吸に関する実験で、歯の移動時あるいは年齢の増加により歯髄の呼吸率が低下することから、矯正治療開始時の患者の年齢が高いほど、有害な生物学的反応が生じると推測している。

矯正力の大きさや移動様式などによる歯髄の組織反応の差に関して、Stenvik (1971)⁴⁸⁾はヒトの歯を用いた圧下および挺出の実験を行い、挺出に比較して圧下は歯髄に障害性変化をきたしやすいと述べている。また、Anstendig and Kronman⁴²⁾は、歯体移動およびtorquingを行った実験で、歯体移動は象牙芽細胞層の破壊が広範囲に存在し、torquingは歯根 $\frac{1}{3}$ 相当部の象牙芽細胞層に局限して破壊がみられると指摘している。さらにReitan¹¹⁾は、持続的な力を用いた歯の移動において、とくに歯根完成歯では著しい歯髄組織の反応が観察できず、弱い矯正力を断続的に用いて圧下や挺出を行った場合、歯髄には不可逆性の傷害 (irreversible damage) が生じると報告している。

本実験では、ほとんどの例で7日以後に歯髄血管の一部に充血拡張を呈するものがみられ、移動初期に移動大なる1例、圧下および回転を伴った3例、計4例では、歯髄全体に著明な障害性変化が認められる。しかし、象牙質の形成異常や象牙芽細胞には顕著な変化は認められない。また、歯根中央部に大きな吸収窩を生じた移動70日では、歯根吸収直下部に薄い一層の修復象牙質の形成がみられる。このような実験結果から圧下をきたした例では、Stenvik⁴⁸⁾、Reitan¹¹⁾らの報告と同様に、根完成歯の歯髄全体に障害性変化が著明に認められる。

以上のことから圧下、挺出および移動による咬合性外

傷には十分注意を払う必要があると考えられる。なお、根完成歯の歯髄は根未完成歯に比べると移動による障害性変化を受けにくいというButcher and Taylor⁴³⁾、Stenvik and Mjör⁴⁴⁾、Reitan¹¹⁾らの見解を支持する所見が、本実験の圧下ならびに回転を伴わないほとんどの例で認められる。

B. 神経組織所見

1. 歯根膜神経線維および神経終末の分布について

歯根膜内への神経線維の進入経路に関してはDepend-dorf (1913)⁴⁹⁾、Lewinsky and Stewart (1936)⁵⁰⁾、(1937)⁵¹⁾、藤田 (1957)⁵²⁾、伊東ら (1978)⁵³⁾により、歯槽底部の歯槽管、歯槽骨側壁の歯槽管の2方向から進入すると述べている。一方、正木 (1934)⁵⁴⁾、上野ら (1960)⁵⁵⁾、司城 (1974)⁵⁶⁾らは前記の2方向に加えて、歯肉から進入する神経線維が存在すると報告している。

本実験では、歯槽底部の歯槽管、歯槽骨側壁の歯槽管、歯肉および歯槽頂縁付近の3方向より進入を認め、正木⁵⁴⁾、上野⁵⁵⁾ら、司城⁵⁶⁾らの報告と一致している。しかし、歯肉および歯槽頂縁付近より進入する神経線維は量的に少ない。また、進入する神経線維と血管に関しては、先人の報告と同様に本実験でも、進入した神経線維はほとんど血管に随伴しているが、末梢に行くに従って血管と神経線維の間には相関関係はなくなり、独自に網状分布している。また神経線維の分布は、下顎中切歯の近心歯根膜と遠心歯根膜ではほとんど差異はみられないが、根尖側では多く、上昇するにしたがって少なくなっている。

歯根膜に分布する神経線維の終末に関しては、古くからヒトおよび動物について多数の研究者により検索が行われ、現在に至るまで種々の報告がなされている。これらの主なものを挙げると、正木⁵⁴⁾、藤田⁵²⁾の著書によれば、歯根膜の神経終末は遊離終末で、特殊な終末はみられないと記載し、Depend-dorf⁴⁹⁾は、ヒトでは神経線維が粗大かもしくは微細な網状態をなすか、微細な尖った突起で、いわゆる遊離終末をなしていると述べている。またSprenkel (1936)⁵⁷⁾はネズミにおいて、網状環、網状終末、無髄神経叢の微細な終末環の3種類の特殊な終末装置を認め、これらは圧刺激に応答すると推測している。これに反してBradlaw (1936)⁵⁸⁾は、Sprenkel⁵⁷⁾のいう網状環を否定し、サル・ネコの歯根膜において糸球状終末を認めたと報告している。さらにLewinsky and Stewart^{50, 51)}は、ヒトおよび各種動物の歯根膜神経線維の検索を行い、歯根膜には太い神

神経線維と細い神経線維が存在し太い有髄線維は歯槽骨側壁に近い歯根膜で紡錘形の終末を形成し、細い神経線維は自由神経終末としてセメント質側の歯根膜に近接して分布することを観察し、Sprenkel⁵⁷⁾、Bradlaw⁵⁸⁾の終末環の存在を否定している。なお、紡錘形の終末は触覚や圧覚に、自由神経終末は痛覚に関するものと推察している。

また、山崎 (1948)⁵⁹⁾、瀬戸 (1957)⁶⁰⁾らは、ヒト歯根膜に分布する神経終末は、非分岐性および分岐性あるいは非被膜性の糸球状終末からなり、その尖端の形態は尖鋭状、棍棒状などを呈していると報告し、Bernick (1952)⁶¹⁾は、サルにおいて特殊な終末装置は認められないと述べている。一方、池田 (1953)⁶²⁾はヒトの歯根膜を検索し、神経終末を遊離終末と終末装置を有するものに大別し、さらに前者を2型、後者を7型に分類している。また、徳光 (1956)⁶³⁾によればおおむね山崎⁵⁹⁾の報告と一致するが、イヌではヒトにみられる糸球状終末や特殊な終末のような高度の分化を示す終末はみられないといい、上野ら⁵⁵⁾は、イヌおよび各種動物において、山崎⁵⁹⁾、瀬戸⁶⁰⁾らの報告と同様に非分岐性、分岐性および糸球状終末の3型を認め、イヌ・ネコの神経終末は齧歯動物に比較して複雑性終末が多数見られると報告している。最近、伊東ら⁵³⁾は、カニクイザルの歯根膜神経線維の分布に関する研究で、非分岐性、分岐性および糸球状終末が認められると述べている。また、Griffin and Harris (1974)⁶⁴⁾、Berkovitz and Shore (1978)⁶⁵⁾は、電子顕微鏡を用いて歯根膜神経線維の研究を行い、Griffin and Harris⁶⁴⁾はヒト歯根膜で1本あるいは1本以上の有髄線維が、無髄線維に囲まれて存在し、それらはさらにさや状の細胞により囲まれている特殊な終末を認めたといい、Berkovitz and Shore⁶⁵⁾はネズミにおいて多数のミトコンドリアが存在する神経終末は、特殊な終末装置であると述べている。このように実験動物の種類、あるいは神経染色の技術上の難点などにより、いまだ意見の一致を見ていないようである。

本実験の神経終末に関しては、分岐性と非分岐性終末の2種類が存在し、これらの終末は、瀬戸⁶⁰⁾の所見と同様に歯根膜中部で密に分布している。これらの終末の尖端は尖鋭状、ときには棍棒状に終っているものが認められた。しかし、Bradlaw⁵⁸⁾、伊東ら⁵³⁾が報告している糸球状終末は確認できず、正木⁵⁴⁾、藤田⁵²⁾、Lewinsky and Stewart^{50, 51)}、Bernick⁶¹⁾の所見にほぼ一致するものである。

2. 神経線維の変性について

神経線維に障害をきたした場合、障害の種類、程度、部位により神経線維に多様な変化が起これり、その組織像も複雑多岐である。そのために、これらの組織変化を単純化し、かつ根本的に追求するために、従来から、種々の動物で末梢神経の切断実験が多数行われている。末梢神経の切断により、その断端の中核側では一次性変性（傷害性変性）、末梢側では一次性変性および二次性変性（Waller 変性）が起こることは、先人の一致をみている。

断端の中核側神経線維に生ずる一次性変性は、Cajal (1959)⁶⁶⁾により報告され、一次性変性がおこる範囲はいくつかの Schmidt-Lanterman 切痕の範囲に限られ、普通は一つの輪間節をこえないと述べている。一方、二次性変性に関しては、Waller (1850)⁶⁷⁾がその変性過程を報告して以来、Büngner (1891)⁶⁸⁾、Young (1942)⁶⁹⁾、渡部ら (1956)⁷⁰⁾、竹内 (1956)⁷¹⁾、福山 (1958)⁷²⁾らにより詳細に報告されている。なお、神経障害には種々の型があり、切断だけが神経障害ではもちろんないので、その点について触れてみる。

Seddon (1972)⁷³⁾は神経障害を臨床的組織学的観点より、neurapraxia（神経機能が形態学的変化なしに一過性不全となる。たとえば強打。）、axonotmesis 軸索断裂（髄鞘は健全で軸索のみが断れた場合で、Waller 変性をみる。たとえば圧迫。）、neurotmesis 神経断裂（軸索、髄鞘とも完全に断裂し、中核側の傷害端はハウキ状に軸索が分離し、neuroma（断端神経腫）を形成、もちろん Waller 変性となる。）の3項目に分類し、これが今日広く用いられている。本実験の歯の移動においては、歯および歯周組織の神経線維には、切断に相当する所見のみではなく、圧迫、牽引およびそれらに起因する循環障害などによる神経障害が引き起こされる。このことから著者は、Seddon⁷³⁾が報告しているように、臨床的組織学的観点より、歯の移動に伴う歯と歯周組織の神経障害を検討する必要があると考えた。

神経切断後の中核側に起こる一次性変性に関しては、松下 (1959)⁷⁴⁾、本多 (1967)⁷⁵⁾、迫田 (1976)⁷⁶⁾、町田 (1977)⁷⁷⁾、星島 (1977)⁷⁸⁾らによりさらに詳細に報告され、一次性変性がおこる範囲は、松下⁷⁴⁾は3～6 mm、本多⁷⁵⁾は0.5～1.5 mm、町田⁷⁷⁾は3～5 mmと記載しているように、末梢神経線維では非常に狭い範囲に限られている。その変性期間について、星島⁷⁸⁾は術後4日目で退行性変性が完了すると述べ、また迫田⁷⁶⁾は、術後1日で変性を認め、術後5日には変性神経

線維の残遺物は吸収、消失したと記載している。一方、町田⁷⁷⁾は、術後6～7日に最大変性像を示し、徐々に消退して4週目には完全消失すると述べている。

本実験では、一次性変性のおこる範囲を正確に把握することはできなかったが、移動1日の圧迫側では、すでに歯根膜中部から下半部にいたる歯根膜、歯槽側壁の骨髓および歯槽管、歯槽底部の歯槽管で変性所見を呈する神経線維が認められる。移動14日の硝子様化をきたした歯根膜の下端で微細な再生神経線維が認められる。移動21日では、断端の軸索はホウキ状となり、断端神経腫の様相を呈し、変性神経線維の残遺物は吸収消失している。一方、牽引側では、移動14日に断裂や顆粒状崩壊が一部に起こり、28日で微細な再生神経線維が認められる。これらの結果から末梢神経線維の一次性変性は、圧迫側では非常に急激に出現するが、牽引側ではかなり長期間を要することが認められる。なお、本実験では1～7日まで歯の移動が認められることから、迫田⁷⁶⁾、町田⁷⁷⁾の切断による所見との間に差が認められるのではないかと推測される。

Waller変性の開始時期については、Büngner⁶⁸⁾、司城⁵⁶⁾、星島⁷⁸⁾らは術後1日、Bucy (1928)⁷⁹⁾は術後2日、Howell and Huber (1892)⁸⁰⁾は術後4日頃と記載しているように、いまだに種々の意見がある。しかし渡部⁷⁰⁾は、変性の開始時期は神経線維の種類ならびに神経線維の径の違いを無視して一律に規定することは問題があると述べている。要するにYoung⁶⁹⁾の報告と同様に同種類の線維でも変性の速度は必ずしも一様でなく、総体的に平均すると小径・中径線維は切断後1日から変性を起こすが、大径・最大径の太い線維は術後2日から変性をきたす。つまり髄鞘の薄い線維は厚いものに比べて早く変性をきたすと述べている、ところがその後の変性の進み方は逆となり、中径・大径線維は変性速度をはやめ、小径線維は遅くなると報告している。これらの変性機序に関して、福山⁷²⁾は、小径、中径神経線維は、髄鞘壁が軸索の太さに比べて薄いため早く髄壁が形成されるが、軸索への影響力は弱く、変性の進行が遅延するとし、大径、最大径は、髄鞘壁が肥厚しているため髄壁を形成しにくい、一旦形成されると変性の進行は急速であるとしている。

無髄神経の変性について北村 (1965)⁸¹⁾は、渡部⁷⁹⁾、福山⁷²⁾らが述べているように、有髄線維の変性の場合、その径の大小により変性の過程に相当の遅速があるように、無髄線維の場合においても、その大きさによって、変性過程に当然差異が生じると述べている。また、Ran-

son (1912)⁸²⁾は、有髄線維に比べて無髄線維は早く変性するものが多いが、なかにはいかなる有髄線維よりも強い抵抗を示す線維が存在すると報告している。さらにCajal⁶⁶⁾は、無髄線維の軸索は切断後48～56時間までも健在し、4～7日に至って顆粒状変性を起こすと述べている。

本実験では、圧迫側において移動1日に、膨化による染色性の低下、念珠状変化、断裂および顆粒状崩壊などの多様な変性所見を呈する大径、小径の神経線維が多数存在しているが、小径の健全な神経線維もかなり散在して認められる。特に、大径の神経線維は分布量が減少し、断裂、顆粒状崩壊を示すものが多く認められる。移動3～7日では、やや硝子様をきたした歯根膜中において、いまだに健全なまま存在する小径神経線維がみられ、経日的に分布量が減少している。移動14日の硝子様変性に陥った歯根膜では、北村⁸¹⁾が報告しているように、全体的に膨化、染色性の低下をきたし、自己融解の様相を呈し、消失寸前の神経線維が認められるのみである。移動21日の硝子様化をきたした歯根膜では、全く神経線維は認められない。

また牽引側では、移動1日に、充血拡張した血管に随伴する神経線維の一部に、膨化や染色性の低下がみられる。日時の経過とともに変性に陥る神経線維が多く出現し、歯根膜中部や下半部と比べて上半部では、変性をきたした神経線維は少ない。なお軸索のみが断裂を示す神経線維が大部分を占めている。

Waller 変性の進行過程について、過去において、(1)切断部より末梢の線維は全長にわたって同時にかつ同程度に変性をきたす。(2)切断部より末梢側に向って漸次遠心に進行する。(3)末梢より求心性に進行する。などの諸説があったが、Ranvier (1893)⁸³⁾、渡部⁷⁰⁾、福山⁷²⁾、北村⁸¹⁾、司城⁵⁶⁾らは、断端遠心末梢側において変性が強く、かつ早く進行すると述べ、現在ではこの(3)が通説とされているようである。またこのような事実が如何なる理由により生ずるのかについて、北村⁸¹⁾は神経液学説によって解釈することが妥当であると述べている。すなわち、末梢部の微細な神経線維ほど神経液の消費が早く、その補給も行われ難いからであり、中枢に近いものほど長い期間補給が続けられ、消費が遅いと推測している。

本実験では、圧迫側において移動初期に歯根膜中央部で断裂した線維が多く出現し、歯根膜上半部では染色性の低下、顆粒状崩壊を示す神経線維あるいは健全な神経線維が混在して認められる。また長期に健全なまま存在

する神経線維には、硝子様化をきたした歯根膜中において、全体的に膨化し、自己融解の様相を呈する像が認められる。

牽引側では、歯根膜中部から下部では軸索のみが断裂を生ずる神経線維が多く、歯根膜上半部の神経線維は、歯根膜中部から下部の線維に比較して変性が遅延している。

以上の結果から、髄鞘、軸索とともに、断裂をきたした神経線維の変性は、渡部ら⁷⁰⁾、福山⁷²⁾、Ranvier⁸³⁾と同様な所見、すなわち遠心末梢側において強くかつ早く、漸次求心性に進行するものと考えられ、また、軸索のみが断裂したものは、断裂部より末梢に向って漸次遠心性に軸索が変性をきたすものとする。なお、圧迫側での歯根膜上部で健全なまま遊離した状態で散在する神経線維は、圧迫により軸索のみが断裂をきたした結果生じたものであると推測している。このことから、歯の移動においては、Seddon⁷³⁾が述べているように、種々の神経障害の出現で、多様な変性の進行を呈するものと考えられる。

神経線維が変性をきたした際の崩壊産物の吸収消失に関しては、食細胞による整理吸収と、染色性の低下を生じ無染色性となった断片が、漸次自家融解によって周囲組織に吸収されてその形態が消失するものとの2通りがある。なお食細胞による整理吸収には種々の説が存在し、Büngner⁶⁸⁾、竹内⁷¹⁾、松下⁷⁴⁾らは、変性神経線維内で食作用をおこなうものは、ほとんどすべて増殖した Schwann 細胞であると述べている。また、Mönckeberg and Bethe (1899)⁸⁴⁾は Schwann 細胞と外部より進入した白血球とし、さらに、Cajal⁶⁶⁾は食作用の主役は白血球であると報告している。しかし、竹内⁷¹⁾は位相差顕微鏡で観察し、白血球の食作用を否定している。霜野 (1956)⁸⁵⁾は分解産物は種々の遊走細胞によって摂取、処理されるが、その貪食能は組織球が最も活発であって、単球がこれに次ぎ、Schwann 細胞、結合組織被膜の細胞の貪食能はさほど積極的なものとは認められないと述べている。一方、福山⁷²⁾は自己の所見と Young⁶⁹⁾ならびに竹内⁷¹⁾の所見から、主体は Schwann 細胞であり、遊走細胞は変性神経線維から遊出した顆粒を貪食するとともに、老廃した Schwann 細胞の処置にあたっているのではないかと推察している。

本実験では、圧迫側において、変性神経線維の残遺物の消失と共に、貪食細胞と思われる細胞も消失している。また牽引側において、貪食細胞と思われる細胞は認められず、Schwann 細胞の増殖が認められる。この結

果から、福山⁷²⁾の見解に賛同するものである。しかしながら、無細胞帯である硝子様化をきたした歯根膜中に遊離した状態で残存している神経線維は、全体的に膨化し、染色性の低下をきたし、自己融解する線維、すなわち北村⁸¹⁾の報告と同様な所見が認められるが、著者も同様にそれが如何なる理由により、どのようにして起こるかについては詮索できなかった。

3. 神経線維の再生について

末梢神経では、線維の再生能力が旺盛であることは一般によく知られている。神経の変性、再生に関する実験的研究は多く、神経組織学的立場から、渡部ら⁷⁰⁾、北村^{81), 88)}、司城⁵⁶⁾、迫田⁷⁶⁾、位相差顕微鏡的にみた竹内⁷¹⁾、電子顕微鏡的立場から松下⁷⁴⁾、電気生理学的にみた町田⁷⁷⁾らにより、それぞれ形態学的、あるいは機能的な面より追求がなされている。

末梢神経線維の再生様式について、鈴江ら (1967)⁸⁶⁾、今井ら (1971)⁸⁷⁾の著書によれば2通りの説がある。その一つは、切断された末梢側神経線維は Waller 変性に陥り崩壊するが、切断端から増殖した Schwann 細胞、すなわち Büngner 氏索が誘導路となり、中枢側から芽出延長してくる軸索が終末装置にまで達する。しかしこれらの新生軸索原線維のうち、好適な Schwann 細胞索を見出せなかったものはやがて崩壊死滅する(連続的再生)という説である。他の一説は、Schwann 細胞の分裂により、一種の神経芽細胞を形成し、既存の神経線維の崩壊産物を吸収した後に、索状に配列し、末梢側の軸索原線維は、最初中枢側とは無関係にその中に独自に軸索を形成し、そのうち、後に中枢側から延長再生してくる軸索と連絡し得たものだけが伝導能性の軸索として完成される(非連続的再生)という説である。連続再生の場合、1~3 cm 位の断端の間隔ならば再生が可能であり、新生線維はもとの位置を辿って再生するが、Schwann 鞘が近くに残存しない場合には、無秩序に延びて断端神経腫を形成する。なお、いずれの再生においても、健全な神経細胞軸索と連絡する。すなわち、中枢端と連絡して神経的刺激を受けることが必要条件となると記載している。

なお、末梢神経線維の再生は神経障害に深く関与しており、Seddon⁷³⁾は neurapraxia (Waller 変性もなく機能は完全に回復する)、axonotmesis (軸索再生はそれぞれもとの神経髄鞘に誘導されて終末器管に達するので機能回復は速い)、neurotmesis 神経断裂(傷害端はホウキ状に軸索が分離し、断端神経腫を形成する)の3つに分け記載している。また、部分的に神経線維が

障害され、変性に陥いると、隣接する健全神経線維から側芽の発生することは、Murray and Thompson (1957)⁸⁹⁾, Cöers and Woolf (1959)⁹⁰⁾ により報告され、側芽の発生は障害後24時間以内に始まると述べている。

一方、北村ら⁸⁸⁾ は、口唇裂術後性瘢痕の神経組織学的研究で、再生神経線維は術後3日からすでに、血餅内および幼若結合組織中の幼若血管の新生とともに、植物性神経線維の進入がみられるといい、植物神経線維が創傷治癒の過程において血管とともに重要な役割を演じていると推察している。さらに創傷部の神経線維は、術後、日時の経過とともに漸次減少し、知覚神経線維が多くなると述べている。それに対して、迫田⁷⁶⁾ は、イヌ舌の創傷治癒過程において植物性神経線維の存在をわずかに認めたが、血管の存在が必須条件とはいえないと報告している。

本実験において実験歯は、1～7日では急激な移動を生じるため、圧迫側および牽引側では7日以前に神経線維の再生は認められない。圧迫側の中枢側では、移動14日において硝子様化をきたした歯根膜の下端の幼若結合組織中に、棍棒状を呈する神経線維や数条の微細神経線維からなる神経束が新生血管付近に出現している。移動21日では、さらに再生神経線維は増殖し、断端の軸索はホウキ状となり、いわゆる断端神経腫を形成している。移動28日において、中枢側ではさらに再生神経線維が増殖し、また歯肉側から血管に随伴しながら下降する再生神経線維が出現している。なお器質化により幼若結合組織に全て置換された歯根膜では、非常に微細な再生神経線維がみられる。以上の所見から、中枢側における神経の再生は、連続的再生がなされたものと考えられる。また、移動42～70日では新生血管の増殖に伴って血管に近接して走行する植物神経線維が認められる。また、移動70日では、移動28日と同様に歯肉側から進入する神経線維が認められる。

牽引側においては、移動21日で歯根膜中部から下半部にかけて僅かに微細な再生神経線維がみられる。移動28日では、変性神経線維がいまだに多く存在するが、21日に比べて再生神経線維はさらに増殖し、新生血管や変性神経線維に伴走するように走行している。また新生歯槽管および新生骨髄では、変性神経と再生神経が混在して認められる。移動42日では、28日に比べて変性を呈しているものが増しているが、新生骨髄や新生歯槽管内に大部分の歯根膜神経がとりこまれるため神経線維の分布が減少している。なお、新生骨髄や新生歯槽管内には再生

神経と変性神経が混在しているが、細い再生神経が多く認められ、これらの再生神経が僅かに歯根膜中に進入しているのが認められる。移動70日では、移動42日に比べて、神経線維はほとんど新生骨髄や歯槽管に取りこまれる。これらの歯槽管から細い再生神経線維が歯根膜中に長く伸展しているが、複雑に分岐するものは認められない。しかし一部に、変性に陥ったものが認められる。

本実験の結果から、圧迫側において、移動14日以後には神経の切断に相当する再生所見が認められる。移動42日および70日では、北村ら⁸⁸⁾ が報告しているように、新生血管の増殖に伴って、植物神経線維が多く出現している。なお、歯の移動がさらに行われると、微細再生神経線維や残存している神経線維もほとんど消失している。牽引側では、歯の移動に伴って、Murray and Thompson⁸⁹⁾, Cöers and Woolf⁹⁰⁾ が述べているように、歯根膜神経線維が障害され変性に陥ると、隣接する健全な神経線維から側芽が発生し、牽引方向に向ってさらに伸展している所見が、移動42、70日で著明に認められる。また、牽引側においては、軸索のみが断裂した神経線維が大部分を占めているため、Seddon⁷³⁾ の報告と同種の再生、すなわち軸索再生は、それぞれもとの神経髄鞘に誘導されて終末器管に達し、再生がなされていると考えられる。

4. 歯髄の神経線維について

歯の移動に伴う歯髄神経線維の経日的変化、すなわち変性および再生に関する研究は皆無である。しかし、本実験の圧下および回転をきたした例では、根尖部歯根膜の神経線維に断裂が生じていることから、下歯槽神経切断後の歯髄の影響を神経組織学的に検索した司城⁵⁶⁾ の研究は大いに関連性がある。

本実験ではほとんどの例で、移動7日以後に歯髄の一部に血管の充血拡張が生じている。これらの循環障害に起因して、歯髄の神経線維はその一部に染色性の低下ならびに膨化をきたしたもので、あるいは分散、分散傾向を示す神経束が散見されるが、大部分は健全な神経線維で占められている。また、変性所見は移動28日においてもいまだに一部に残存してみられる。なお、圧下や回転をきたした例では、歯髄全体に水腫、血管の充血拡張などの障害性変化が出現し、歯髄の神経線維はほとんど膨化、断裂、顆粒状崩壊などのWaller変性を示すもので占められている。これらは歯髄の循環障害、ならびに移動、圧下および回転により、根尖部の神経線維に障害をきたした結果生じたものである。なお、圧下ならび回転を伴った21日、28日では、根尖孔部に再生神経線維と

思われるものが出現し、28日の歯髄では、断裂、顆粒状崩壊をきたし消失過程にある神経線維が多く、神経鞘やSchwann細胞の残存部に隣接しながら上昇する染色性の亢進した微細な神経線維がみられる。このように歯髄で、変性所見が長く残存するのは、根完成歯であるため、根尖孔が狭く、歯髄内の充血や水腫などの障害性変化が消退するのが困難なためであると考えた。また、Schwann細胞や神経鞘の残存部に隣接して上昇する神経線維は、司城^{5,6)}が報告している健全なまま残存する神経線維ではないかと推測している。一方歯根中央部に大きな吸収窩を生じた移動70日例において、修復象牙質部では、再生神経線維と思われる微細な線維が多く出現し、他の部では染色性の低下および分散傾向を示す神経線維が一部にみられる。

要約ならびに結論

人為的な歯の移動に伴う歯と歯周組織の神経線維、とくに歯根膜神経線維の分布およびそれらの消長について検索するために、カニクイザルの成猿25頭を用い、下顎左側中切歯を、同側側切歯の抜歯90日以後より、1日から70日にわたって遠心側へ歯体移動を行い、それらの経日的変化について模型計測、病理組織学的ならびに神経組織学的に検索し、次の結果を得た。

A. 一般組織所見

1. 本実験で生じた歯体移動は、必ずしも単純なものではなく、僅かに歯軸の遠心傾斜を伴ったもの4例、圧下ならびに回転を伴ったもの3例が認められた。実験歯の移動は7～21日まで、ほとんど認められなかった。

2. 歯根吸収は、移動21日以後の例では象牙質に達する吸収窩が生じ、移動70日では、歯の機能と安定に有害な大きな吸収窩が認められた。

3. 歯髄では、ほとんどの例で7日以後に血管の一部に充血拡張がみられた。なお、圧下や回転を伴った例および初期に移動大なる例では、歯髄の広範囲に循環障害がみられたが、象牙芽細胞には顕著な変化は認められなかった。

B. 神経組織所見

1. 移動1日の圧迫側では、多様な退行性変化、特に断裂および顆粒状崩壊を呈する神経線維が多数みられ、小径の健全な神経線維もかなり残存していた。

牽引側では、一部の充血拡張した血管に随伴する神経線維に、膨化、染色性の低下などの軽度の変性所見が認められた。

2. 移動3～7日の圧迫側では、やや硝子様化をきた

した歯根膜中に、いまだに健全なまま存在する小径神経線維が極く一部に認められた。

牽引側では、日時の経過と共に軽度の変性に陥る神経線維が多く認められた。

3. 移動14日の圧迫側において、硝子様変性に陥った歯根膜内では自己融解の様相を呈する消失寸前の神経線維が認められた。また同部の下端の幼若結合組織中には、新生血管に近接して走行する微細な再生神経線維が認められた。

牽引側では、神経線維はほとんど軽度の変性所見を示しているが、一部に軸索の断裂をきたした神経線維が認められた。

4. 移動21日の圧迫側において、硝子様化をきたした歯根膜内には、全く神経線維は認められず、同部の下端の幼若結合組織中では、断端の軸索はホウキ状となり、いわゆる断端神経腫の形成が認められた。

牽引側では、14日とほぼ同様の所見が認められたが、再生神経線維と思われる神経線維が僅かに散見された。

5. 移動28日の圧迫側では、器質化により全て幼若結合組織に置換された歯根膜内では、微細な再生神経線維が認められた。

牽引側では、ほとんどの神経線維は変性所見を呈したまま存在するが、一部に微細な再生神経が認められた。

6. 移動42～70日の圧迫側において、神経線維の分布は、歯の移動に伴ってほとんど認められない位までに減少し、幼若結合組織中の増殖した新生血管に近接して走行する非常に微細な植物神経線維が認められた。

牽引側では、神経線維は細くなり、分布量が非常に減少し、一部に軽度の変性所見を示すものが認められた。

7. 移動7日以後のほとんどの例の歯髄では、神経線維の一部に軽度の変性所見がみられるが、大部分は健全な神経線維で占められていた。圧下や回転を伴った例、および初期の移動大なる例では、歯髄全体はほとんど念珠状変化、断裂、顆粒状崩壊を示す神経線維で占められていた。

稿を終るに臨み、本研究に終始御懇切なる御指導御鞭撻、御校閲を賜った恩師佐藤通泰教授ならびに口腔病理学講座上野正康教授に深甚の謝意を捧げます。また、終始変らぬ御教示と御鞭撻を戴きました矯正学講座藤田邦彦助教授ならびに口腔病理学講座福山宏助教授に深謝します。併せて、種々の御協力下さった矯正学講座および口腔病理学講座の諸兄に御礼申し上げます。

引用文献

- 1) Sandsted, C. : 15), 16) より引用
- 2) Schwarz, A.M. : Tissue changes incidental to orthodontic tooth movement, *Int. J. Orthod.* 18 : 331—352, 1932.
- 3) Orban, B. : Biologic problems in orthodontia, *J. Amer. Dent. Asso.* 23 : 1849—1870, 1936.
- 4) Stuteville, O. H. : Injuries to the teeth and supporting structures caused by various orthodontic appliances, and methods of preventing these injuries, *J. Amer. Dent. Ass. and Dent. Cos.* 24 : 1494—1507, 1937.
- 5) Oppenheim, A. : Human tissue response to orthodontic intervention of short and long duration, *Amer. J. Orthod. and Oral Surg.* 28 : 263—301, 1942.
- 6) Oppenheim, A. : A possibility for physiologic orthodontic movement, *Amer. J. Orthod. and Oral Surg.* 30 : 277—328, 1944.
- 7) Reitan, K. : Continuous bodily tooth movement and its histological significance, *Acta. Odont. Scand.* 7 : 115—144, 1947.
- 8) Reitan, K. : Tissue behavior during orthodontic tooth movement, *Amer. J. Orthod.* 46 : 881—900, 1960.
- 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, *Amer. J. Orthod.* 53 : 721—745, 1967.
- 11) Reitan, K. : Biomechanical principles and reactions. In, Ed, Graber, T. M., *Current Orthodontic Concepts and Techniques*, Sanders, Philadelphia, 1975, 111—229.
- 12) Macapanpan, L.C., Weinmann, J.P., *et al.* : Early tissue changes following tooth movement in rats, *Angle Orthod.* 24 : 79—95, 1954.
- 13) 木暮篤太郎・山田 茂・他 : 人体歯牙に与えられたる各種矯正力と之が病理組織学的変化との関係に就て, *日本之歯界* 115 : 953—986, 1932.
- 14) 太田 実 : 歯科矯正施術に伴う組織の変化に関する実験的研究, *口病誌* 11 : 240—259, 310—313, 1937.
- 15) 斉藤 久 : 歯牙の移動に伴う支持組織の変化に関する実験的研究, *歯科学報* 46 : 503—521, 671—694, 767—783, 945—963, 1941.
- 16) 斉藤 久 : 歯牙の移動に伴う支持組織の変化に関する実験的研究, *歯科学報* 47 : 1—18, 83—107, 1942.
- 17) 滝口弘毅 : 矯正歯牙移動に伴う歯槽骨の改造機転に関する実験的研究, *日矯歯誌* 17 : 141—156, 1958.
- 18) Utley, R.K. : The activity of alveolar bone incident to orthodontic tooth movement as studied by oxytetracycline-induced fluorescent, *Amer. J. Orthod.* 54 : 167—201, 1968.
- 19) Murphey, W.H. : Oxytetracycline microfluorescent comparison of orthodontic retraction into recent and healed extraction sites, *Amer. J. Orthod.* 58 : 215—239, 1970.
- 20) Heller, I. J. and Nanda, R. : Effect of metabolic alteration of periodontal fibers on orthodontic tooth movement, an experimental study, *Amer. J. Orthod.* 75 : 239—258, 1979.
- 21) Kvam, E. : Scanning electron microscopy of tissue changes on the pressure surface of human premolars following tooth movement, *Scand. J. dent. Res.* 80 : 357—368, 1972.
- 22) Rygh, P. : Orthodontic root resorption studied by electron microscopy, *Angle Orthod.* 47 : 1—16, 1977.
- 23) 河村洋二郎・西山 亨・他 : 歯牙に加える圧と歯神経反応の関係について, *阪大歯学誌* 10 : 65—72, 1965.
- 24) 清水賢二 : 歯に圧刺激を与えた際の歯周組織の神経生理学的観察, *口病誌* 34 : 310—329, 1967.

- 25) **Kizior, J. E., Cuozzo, J. W., et al.** : Functional and histologic assessment of the sensory innervation of the periodontal ligament of the cat, *J. Dent. Res.* 47 : 59—64, 1968.
- 26) 伊谷純一・池田次郎・他 : 高崎山の野生ニホンザル, 勁草書房, 東京, 1964, 124—135.
- 27) **Ungewitter, L. H.** : A urea silver nitrate method for nerve fibers and nerve endings, *Stain Technol.* 26 : 73—76, 1951.
- 28) **Powers, M.M.** : The staining of nerve fibers in teeth, *J. Dent. Res.* 31 : 383—392, 1952.
- 29) **Burstone, C. J.** : Rationale of the segmented arch, *Amer. J. Orthod.* 48 : 805—822, 1962.
- 30) **Storey, E. and Smith, R.** : Force in orthodontics and its relation to tooth movement, *Aust. J. Dent.* 56 : 11—18, 1952.
- 31) 中村進治 : 血根膜血管走向の矯正学的研究, *口病誌* 34 : 64—80, 1967.
- 32) 藍原繁樹 : 歯牙移動時における歯周組織の血管の動向に関する実験的研究, *歯科学報* 69 : 1283—1320, 1969.
- 33) 佐野一正 : 抜歯矯正治療における歯牙移動の時期に関する実験的研究, *歯科学報* 68 : 514—538, 1968.
- 34) 藤井正純 : 猿の歯を抜歯窩へ移動した場合の歯周組織の変化に関する実験的研究, *歯科医学* 35 : 184—208, 1972.
- 35) **Erikson, B.E., Kaplan, H., et al.** : Orthodontics and transeptal fibers, *Amer. J. Orthod. and O. Surg.* 31 : 1—20, 1945.
- 36) **Ketcham, A. H.** : A preliminary report of an investigation of apical root resorption of permanent teeth, *Int. J. Orthod.* 97—127, 1927.
- 37) 坂本敏彦 : 矯正治療による歯根吸収の観察, *日矯歯誌* 17 : 54—62, 1958.
- 38) **DeShields, R.W.** : A study of root resorption in treated Class II. Division 1 Malocclusions, *Angle Orthod.* 39 : 231—245, 1969.
- 39) **Goldson, L. and Henrikson, C.O.** : Root resorption during Begg treatment: A longitudinal roentgenologic study, *Amer. J. Orthod.* 68 : 55—66, 1975.
- 40) **Gianelly, A.A. and Goldman, H.M.** : Biologic Basis of Orthodontic, Lea and Febiger. Philadelphia. 1971, 116—204.
- 41) **Reitan, K.** : Initial tissue behavior during apical root resorption, *Angle Orthod.* 44 : 68—82, 1974.
- 42) **Anstendig, H.S. and Kronman, J.H.** : A histologic study of pulpal reaction to orthodontic tooth movement in dogs, *Angle Orthod.* 42 : 50—55, 1972.
- 43) **Butcher, E.O. and Taylor, A. C.** : The vascularity of the incisor pulp of the monkey and its alteration by tooth retraction, *J. Dent. Res.* 31 : 239—247, 1952.
- 44) **Stenvik, A., and Mjör, I.A.** : Pulp and dentine reactions to experimental tooth intrusion: A histologic study of the initial changes, *Amer. J. Orthod.* 57 : 370—385, 1970.
- 45) 植木和弘 : 歯根未完成歯の移動に関する実験的研究, *広歯誌* 11 : 8—29, 1979.
- 46) **Huettnner, R. J., and Whitman, C.L.** : Tissue changes occurring in the macaque rhesus monkey during orthodontic movement, *Amer. J. Orthod.* 44 : 328—345, 1958.
- 47) **Hamersky, P.A., Weimer, A.D. et al.** : The effect of orthodontic force application on the pulpal tissue respiration rate in the human premolar, *Amer. J. Orthod.* 77 : 368—378, 1980.
- 48) **Stenvik, A.** : The effect of extrusive orthodontic forces on human pulp and dentin, *Scand. J. dent. Res.* 79 : 430—435, 1971.
- 49) **Dependorf, T.** : Nervenverteilung in der Zahnwurzelhaut des Menschen, *Dtsch. Mschr. Zahnheilk.* 31 : 853—864, 1913.

- 50) **Lewinsky, W. and Stewart, D.** : The innervation of the periodontal membrane of the cat, with some observations on the function of the end-organs found in that structure, *J. Anat.* 71 : 232—235, 1936.
- 51) **Lewinsky, W. and Stewart, D.** : The innervation of the periodontal membrane, *J. Anat.* 71 : 98—102, 1937.
- 52) 藤田恒太郎 : 歯の組織学, 医歯薬出版, 東京, 1957, 199—207.
- 53) 伊東且裕・土屋 博・他 : カニクイザル歯牙系の神経分布について, [会], 解剖誌, 53 : 470, 1978.
- 54) 正木 正, 62) から引用.
- 55) 上野正康・北村勝也・他 : 各種動物の口腔組織神経分布に関する研究, 九州歯会誌 13 : 880—888, 1960.
- 56) 司城義光 : 下歯槽神経中途切断の歯への影響に関する神経組織学的研究, 九州歯会誌 28 : 222—246, 1974.
- 57) **Van der Sprenkel, H.B.** : Microscopical investigation of the innervation of the tooth and its surroundings, *J. Anat.*, 70 : 233—241, 1936.
- 58) **Bradlaw, R.** : The histology and histopathology of the dental innervation, *Proc. R. Soc. Med.* 32 : 1040—1053, 1939.
- 59) 山崎城之助 : 人間歯根膜に於ける神経分布に就て, 東北医誌 38 : 7—14, 1948.
- 60) 瀬戸八郎 : 人の知覚, 医学書院, 東京, 1957, 102—111.
- 61) **Bernick, S.** : Innervation of primary tooth and surrounding supporting tissues of monkeys, *Anat. Rec.* 113 : 215—237, 1952.
- 62) 池田明治郎 : 圧平法による人類歯根膜の神経分布特にその神経終末に関する組織学的研究, 歯科学報 53 : 423—427, 470—478, 511—518, 1953.
- 63) 徳光義明 : 犬下歯槽の歯根膜, 歯髓及び骨膜の神経特に知覚神経分布に就て, 東北医誌 46 : 123—140, 1956.
- 64) **Griffin, C.J. and Harris, R.** : Innervation of human periodontium, *Aust. Dent. J.* 19 : 51—56, 1974.
- 65) **Berkovitz, B.K.B., and Shore, R. C.** : High mitochondrial density within peripheral nerve fibres of the periodontal ligament of the rat incisor, *Arch. Oral Biol.* 23 : 207—213, 1978.
- 66) **Cajal, S.R.** : Degeneration and regeneration of the nervous system, Hafner Publishing Co., New York, 1959, 66—166.
- 67) **Waller, A.** : Experiments on the section of the glossopharyngeal and hypoglossal nerves of the frog, and observations of the alterations produced thereby in the structure of their primitive fibres, *Trans. R. Soc. Lond.* 140 : 423—429, 1850.
- 68) **Büngner, O.V.** : Ueber die Degenerations- und Regenerationsvorgänge am Nerven nach Verletzungen, *Beitr. Path. Anat.* 10 : 321—393, 1891.
- 69) **Young, J. Z.** : The functional repair of nervous tissue, *Physiol. Rev.* 22 : 318—374, 1942.
- 70) 渡部龍一・佐藤敏夫・他 : 末梢神経線維の髄鞘変性に関する実験的研究, 福島医誌 6 : 131—149, 1956.
- 71) 竹内一郎 : 神経組織の位相差顕微鏡的観察, 京都府医大誌 60 : 243—259, 1956.
- 72) 福山右門 : ウォーラー変性の組織学. 基礎医学最近の進歩. II, 医歯薬出版, 東京, 1958, 93—109.
- 73) **Seddon, H. J.** : Surgical disorders of the peripheral nerves, Churchill Livingstone, Edinburgh, London, 1972, 32—56.
- 74) 松下正義 : 末梢神経の切断による神経線維の変性及び再生に関する病理組織学的並びに電子顕微鏡的研究, 岡山医誌 71 : 8253—8270, 1959.
- 75) 本多 澈 : 末梢神経再生に関する光学顕微鏡的・電子顕微鏡的研究, 福岡医誌 58 : 850—863, 1967.
- 76) 迫田隅男 : 舌の創傷治癒に関する神経組織学的研究, 九州歯会誌 30 : 401—422, 1976.
- 77) 町田和之 : 下歯槽神経切断後における変性と再生に関する実験的研究, 歯科学報 77 : 1661—1682, 1977.

- 78) 星島 昭：実験的迷走神経切断術後の神経線維の変化の電子顕微鏡的研究，岡山医会誌 89：1307—1327，1977.
- 79) Bucy, P. C. : Studies in degeneration of peripheral nerves, J. Comp. Neurol. 45 : 129—159, 1928.
- 80) Howell, W. H. and Huber, G. : A physiological, histological and clinical study of the degeneration and regeneration in peripheral nerve fibres after severance of their connections with the nerve centres, J. Physiol. 13 : 335—406, 1892.
- 81) 北村勝也：味蕾の変性並び再生に関する神経組織学的研究，九州歯会誌 18：1—40, 1965.
- 82) Ranson, S.W. : Degeneration and regeneration of nerve fibers, J. Comp. Neurol. Psycho. 22 : 487—545, 1912.
- 83) Ranvier, M. L. : De la régénération des nerfs sectionnés, C. R. Soc. Biol. 76 : 491—495, 1873.
- 84) Mönckeberg, G. and Bethe, A. : Die Degeneration der markhaltigen Nervenfasern der Wirbelthiere unter hauptsächlichlicher Berücksichtigung des Verhaltens der Primitivfibrillen, Archiv f. mikrosk. Anat. 54 : 135—183, 1899.
- 85) 霜野良男：神経組織の螢光顕微鏡的観察，京都府大医誌 59：887—914, 1956.
- 86) 鈴江 懐・小林忠義：病理学総論，医学書院，東京，1967, 436—438.
- 87) 今井 環・橋本美智雄：病理学，医学書院，東京，1973, 197—207.
- 88) 北村勝也・小田 晋・他：口唇裂術後性瘢痕の神経組織学的研究，九州歯会誌 21：397—405, 1968.
- 89) Murray, J. G. and Thompson, J. W. : Collateral sprouting in response to injury of the autonomic nervous system, and its consequences, Brit. Med. Bull. 13 : 213—219, 1957.
- 90) Cöers, C. and Woolf, A.L. : The Innervation of Muscle, Blackwell, Oxford, 1959, 42—64.

写 真 1

装置装着時の口腔内

写 真 2

装置装着時の口腔内

写 真 3

対照群：抜歯後90日，H・E

写 真 4

対照群：歯根膜神経線維

写 真 5

対照群：歯根膜神経線維の遊離終末

写 真 6

対照群：歯髄神経線維

写真 7
移動 1 日：圧迫側，H・E

写真 8
移動 1 日：圧迫側の歯根膜神経線維

写真 9
移動 1 日：圧迫側の歯根膜神経線維

写真 10
移動 1 日：圧迫側の歯根膜神経線維

写真 11
移動 1 日：牽引側の歯根膜神経線維

写真 12
移動 3 日：牽引側，H・E

写真 13

移動 3 日：圧迫側の歯根膜神経線維

写真 14

移動 3 日：圧迫側の歯根膜神経線維

写真 15

移動 3 日：両側中切歯間の歯間水平
線維中の神経線維

写真 16

移動 3 日：牽引側の歯根膜神経線維

写真 17

移動 3 日（移動大なる例）：牽引側
の歯根膜神経線維

写真 18

移動 3 日（移動大なる例）：歯髄神
経線維

写真 19
移動7日：圧迫側，H・E

写真 20
移動7日：圧迫側の歯根膜神経線維

写真 21
移動7日：牽引側の歯根膜神経線維

写真 22
移動7日：牽引側の歯根膜神経線維

写真 23
移動7日：歯髄神経線維

写真 24
移動7日（圧下を伴った例）：牽引
側の歯根膜神経線維

写真 25

移動7日（圧下を伴った例）：根尖部の歯根膜神経線維

写真 26

移動7日（圧下を伴った例）：歯髄神経線維

写真 27

移動14日：圧迫側の歯根膜神経線維

写真 28

移動14日：圧迫側の歯根膜神経線維

写真 29

移動14日：牽引側の歯根膜神経線維

写真 30

移動14日：牽引側の歯根膜神経線維

写真 31

移動21日（圧下，回転を伴った例）：
根尖部，H.E

写真 32

移動21日：圧迫側の歯根膜，神経
染色

写真 33

移動21日：圧迫側の歯根膜神経線維

写真 34

移動21日：牽引側の歯根膜神経線維

写真 35

移動21日（圧下，回転を伴った例）：
根尖孔部の神経線維

写真 36

移動21日（圧下，回転を伴った例）：
歯髄神経線維

写真 37
移動28日：圧迫側，H・E

写真 38
移動28日：圧迫側の歯根膜神経線維

写真 39
移動28日：牽引側の歯根膜神経線維

写真 40
移動28日（圧下を伴った例）：歯髓
神経線維

写真 41
移動42日：圧迫側の歯根膜神経線維

写真 42
移動42日：圧迫側の歯根膜神経線維

写 真 43

移動42日：牽引側の歯根膜神経線維

写 真 44

移動42日：牽引側の新生骨髄，歯根膜の神経線維

写 真 45

移動70日：H・E

写 真 46

移動70日：圧迫側の歯根膜神経線維

写 真 47

移動70日：牽引側の歯根膜神経線維

写 真 48

移動70日（歯根中央部に大きな吸収窩を生じた例）：歯髓神経線維