歯の実験的往復移動による歯周組織の変化について

佐 藤 桂 一

九州歯科大学歯科矯正学講座 (指導: 山口和憲教授)

平成 12 年 12 月 25 日受理

Histological Study on Reversed Tooth Movement in Dogs

Keiichi Satoh

Department of Orthodontics (Director: Prof. Kazunori Yamaguchi)

Kyushu Dental College, Kitakyushu, Japan

The purpose of this study is to examine how newly formed bone and degenerated periodontal ligament will react to orthodontic force in reversed tooth movement. After moving the maxillary first premolars in ten adult dogs with a continuous force of 100 grams in a distal direction for three weeks, the teeth were subsequently moved in a mesial direction for five days. Light and fluorescence microscopes, and microradiography were used for histological investigation.

On the pressure side, new bone created during distal movement was cancellous and not well calcified. In five days, the new bone was undermined from the numerous marrow spaces and was more readily resorbed than old one when it was subjected to pressure. On the tension side, there were extensive bone resorption on the periodontal surface and marrow space of old bone by osteoclasts, whereas hyalinized area still remained. When subjected to tension, the hyalinized tissue was extended and osteoclasts migrated away from Howships lacunae. However, resorptive process persisted in the marrow space up to five days. Mineralization was found on the stretched periodontal ligament at one and three days, and it disappeared at five days.

From these findings, we concluded that newly formed bone during distal movement will not resist against orthodontic force, because the reversed tooth movement will bring about comprehensive bone remodeling within the periodontal tissue. We must take into consideration that reversed tooth movement is likely to result in calcification or mineralization of the periodontal ligament.

Key words: Reversed tooth movement / Hyalinized tissue / Mineralization / Bone remodeling

緒 言

Sandstedt (1904)¹⁾ がイヌを用いた実験的歯の移動において、圧迫側された歯根膜に変性(硝子様変性)組織が出現し、歯槽骨とともに穿下性に吸収されることを報告して以来、Schwartz (1932)²⁾、Oppenheim (1930)³⁾、Waldo (1953)⁴⁾、Macapanpan ら (1954)⁵⁾、Reitan (1957, 1960, 1962, 1964, 1967, 1971)⁶⁻¹¹⁾ らにより歯の移動に伴う骨吸収と骨添加に関する報告がみられる。なかでも Reitan (1960)⁷⁾ は、歯の移動における変性組織の消長の重要性を指摘し、変性組織を回復可能な半硝子様化部と壊死して回復不可能な硝子様化部に分類している。Rygh (1974)¹²⁾ はラットの歯根膜に出現した硝子様変性が、移動開始6~12時間後に出現し、5~7日後には単核球やマクロファージなどが増殖して歯根膜組織の修復が開始したと報告している。また、中村 (1967)¹³⁾ はインク血管注入法を用い、血管が消失した変性組織を修復するためには、破骨細胞の前駆細胞の侵入を助ける血管路が必要だと指摘している。さらに、土屋ら (1989)¹⁴⁾ は蛍光顕微鏡とコンタクトマイクロラジオグラムを併用して変性組織に出現する石灰化を報告している。

しかし、これらの報告は歯を単一方向に移動させたものが殆どである。治療によっては目標の変更や装置の力系、あるいは歯の移動時に生じる咬頭干渉などにより、移動方向が逆転し歯周組織の改造過程の反転を求めねばならない可能性がある。このような歯の移動は通常ジグリング (jiggling)、あるいは往復移動 (reversed tooth movement) と呼ばれ、歯に為害作用を及ぼすと考えられている¹⁵⁻¹⁸⁾。Melsen (1986)¹⁹⁾ は歯周病により挺出したラットの切歯を圧下(往復移動)し、スプリットマウス法を併用して組織学的観察を行った結果、口腔清掃状態が良好であれば、歯周組織への為害性は少ないと述べている。また、Reitan (1962)⁸⁾ はヒトの歯を往復移動した時に生じる新生骨、特に頬骨は吸収に対抗する組織にはなり得ないとして、Tweed 法の Anchorage preparation を否定している。また、中村 (1981)²⁰⁾ も、ラットの歯を用いて同様の実験を行い、牽引側に形成された石灰化の低い新生骨(頬骨)は、圧迫により穿下性に歯槽骨側から容易に吸収されたことを報告し、Reitan (1962)⁸⁾ と同様に頬骨形成が固定源を強化することを否定している。しかし、彼らの研究の問題点は歯の往復移動が頬舌の移動で、移動距離と期間が短い(4~8日間)ため、歯周組織の改造 (remodeling) の反転過程を

経時的に観察していないことである。そこで、本研究では、往復移動を近遠心的に行い、往路の移動期間を延長して、1) 往復移動における新生骨の消長、2) 往復移動における変性組織の消長、3) 往復移動が歯周組織に及ぼす為害性などを検討するため、非脱灰切片を用いて、光学顕微鏡観察に加えて、蛍光顕微鏡とマイクロラジオグラムによる観察を行った。

実験材料と方法

I. 実験動物および実験歯

実験動物には、中型雑種成犬(推定年齢1.5~2.5歳、体重9~16 kg) 10頭を一定条件下で飼育し(九州歯科大学動物実験施設)、実験に供した。被験歯は上顎左側第一前臼歯(P1L)とし、上顎左側第二前臼歯(P2L)を固定源に遠心移動(往路)を行い、その後上顎左側犬歯(CL)を固定源に近心移動(復路)を行った。

II. 実験方法

1. 移動方法

ペントバルビタール系麻酔薬(ネブタール、ダイナボット) 25 mg/kg 投与による全身麻酔下で、まず、歯科用タービンにてP1Lと固定歯のP2Lの歯頸部に歯冠を一周する溝を形成し、この溝を利用して結紮線を用いてNi-Ti系クローズドコイルスプリング(ナイテノルクローズコイルLT12MM, 3M ユニテック)を初期荷重約100 gの矯正力(図1)を発揮するように伸展させて結紮し、歯科用ボンディング剤(スーパーボンド、サンメディカル)にて固定することによりP1Lの遠心移動方向を開始した(図2)。3週間後装置を撤去し、上顎左右犬歯(CL, CR)と上顎右側第一前臼歯(P1R)に溝を形成し、P1L, P1Rとの間に同様のNi-Ti系クローズドコイルスプリング(初期荷重が約100 g)を各々装着してP1L, P1Rの近心移動を行った。

図1 Ni-Ti系クローズドコイルスプリングの荷重—伸び曲線。

図2 装置（遠心移動）。
上：咬合面観，下：側面観，P1：上顎第一前臼歯，P2：上顎第二前臼歯

表1 実験動物のグループ分け

	個体
対照群	1 2
3週間遠心移動群	3 4
近心移動群	5～10
3週間遠心移動（往復移動）群	
1日目	5 6
3日目	7 8
5日目	9 10

図3 歯の移動とラベリングのタイムテーブル。
○：Oxytetracycline, ○：Alizarin complexone, □：Calcein

2. 実験動物のグループ分け

動物は以下の4群に分類した。

- 1) 対照群
- 2) 遠心移動群：遠心移動を3週間行なった。
- 3) 近心移動群：上顎右側第一前臼歯（P1R）の近心移動を1, 3, 5日間行なった。
- 4) 往復移動群：上顎左側第一前臼歯（P1L）の遠心移動を3週間行なった後に近心移動を1, 3, 5日間行なった。

近心移動と往復移動には同一の個体の左右の歯群を用い、1群に各2頭の計10頭を使用した（表1）。

実験に伴う歯槽骨の改造機転を観察するために、実験開始1日前にOxytetracycline（筋注：30 mg/kg 体重），実験期間中にAlizarin Complexone（皮下注：30 mg/kg 体重），実験終了1日前にCalcein（皮下注：10 mg/kg 体重）を硬組織ラベリング剤として各々投与した（図3）。また，実験期間中の歯の移動量を計測するため，実験開始時と3週間遠心移動後，および実験終了

図4 観察部位と切片の薄切方向.

時に印象採得を行い、石膏模型を作製した。

実験終了後、実験動物にペントバルビタール系麻酔薬を過剰投与(75 mg/kg)して安楽死させ、直ちに実験歯を含む歯周組織を一塊として切り出し、10%中性ホルマリンで2週間浸漬固定した。その後、アセトン系列で脱水し、ポリエステル樹脂(リゴラック、日新EM)に包埋して、硬組織薄切切断機(ゼーゲ ミクロトーム 1600, ライカ)を用いて近遠心的に薄切後研磨し、非脱灰標本(150 μ m)を作製した(図4)。

3. 検索方法

1) P1の移動量の計測

実験期間中に作製した石膏模型上で、上顎第三切歯

図5 NIH image による黒化度解析方法 (×40).

左: マイクロラジオグラム像, 右: 黒化度解析 NIH image を用いて矢印部の黒化度を解析した。歯槽骨 (B) と新生骨 (NB), および歯根膜 (PL) の黒化度の相違による曲線の相違を示す。D: 象牙質。③は①と②の合成図。

(I3) と P1 の切縁先端部間距離を 1/20 mm の副尺つきスライディングキャリパスを用いて計測し、この長さの変化量を移動量とした。

2) マイクロラジオグラム

須賀 (1978)^{21,22)} や原 (1977)²³⁾ の報告をもとに、軟 X 線装置 (CSM 型, 日本ソフテックス) を用いてマイクロラジオグラムの撮影を行った。撮影条件は、管球の Cu ターゲットから、フィルム面までの距離を 460 mm とし、加速電圧 3 kV、管電流 3 mA で、露出時間は 15 ~ 20 秒間とした。用いたフィルムは FUJIFILM の Industrial X-RAY FILM で、現像液にて現像を行った。フィルム上の画像はイメージスキャナ (HEWLETT PACKARD ScanJet 4c/T) にてパーソナルコンピューター (Power Macintosh 8500/180, アップルコンピューター) に入力し、画像解析ソフト (NIH image, National Institutes of Health, Bethesda, Maryland) を用いて、既存の骨、新生骨、および歯根膜中に見られる石灰化物の黒化度の解析を行なった (図 5)。まず、歯の移動を行っていない対照群の画像上で歯槽骨と歯根膜を含み歯の長軸におおよそ垂直に 0.1 mm の長さの黒化度を解析し標準形を作製した。次いで実験歯の近心、あるいは遠心側についても同様の方法で黒化度を解析し、両者を重ね合わせることによって歯槽骨部と、歯根膜部の石灰化度についての評価比較を行なった。

3) 蛍光顕微鏡観察

同じ切片を蛍光顕微鏡で観察し、ラベリング像から骨の新生と吸収を確認した。

4) 光学顕微鏡観察

以上の観察の後、すべての切片はメチレンブルー・フクシン重染色 (M・F 染色) を施し、光学顕微鏡にて組織学的検索を行った。観察部位は P1 の近遠心側の歯根中央部より咬合面側の歯周組織とした (図 4)。

結 果

全実験期間を通じて、実験動物に著しい体重の変化は認められなかった。

I. 歯の移動量について

3 週間の遠心移動により、P1 は遠心側へ平均 0.80 mm 移動した。その後、近心移動開始後 1 日目で平均 0.47 mm、2 日目から 3 日目で、平均 0.18 mm、3 日目から 5 日目では平均 0.25 mm 各々近心移動し、もとの (実験開始時) の位置に戻った (図 6)。

II. 光学および蛍光顕微鏡所見

(1) 対照群

図 6 上顎左側第一前臼歯 (P1L) の移動。

棒グラフは近心移動 1 日目、3 日目、5 日目の変化量を示す。3 週間間の遠心移動により、P1 は遠心側へ平均 0.80 mm 移動した。その後、近心移動開始後 1 日目で平均 0.47 mm、2 日目から 3 日目で、平均 0.18 mm、3 日目から 5 日目では平均 0.25 mm 各々近心移動し、もとの (実験開始時) の位置に戻った。

近心側、遠心側はほぼ同様の所見であった。すなわち歯根膜幅径の幅は、歯頸部でやや広く、歯根中央部でわずかに狭窄していた。歯根膜線維は線維束を形成して、歯槽骨からセメント質に向かい、歯頸部ではほぼ水平に、歯根中央部では斜下方に走行していた。歯槽骨壁は滑らかで、ハバース層板は比較的鮮明に認められた。

(2) 遠心移動群

1) 圧迫側

歯頸部では、歯根膜が圧迫されて歯根膜の細胞が壊死を示し、メチレンブルーに濃染する変性組織が依然として存在していた。しかし、その他の部位では歯槽骨壁面から骨髓腔、およびセメント質 (C) に及ぶ吸収窩がみられ、多核巨細胞 (OCL) による穿下性骨吸収が進行していた (図 7 上)。

蛍光顕微鏡所見では骨髓腔内壁、根接触部の根尖側の歯槽骨吸収窩表面の一部に Alizarin complexone と Calcein によるラベリング像が認められた。

2) 牽引側

歯頸部から歯根中央部にかけて広範囲に及び多数の骨髓腔を有する骨 (新生骨) の添加があり、その部はメチレンブルーに染まっていた (図 7 下)。また、蛍光顕微鏡所見でも歯槽骨側から Oxytetracycline, Alizarin complexone, Calcein の順に並ぶラベリング像が認められた。歯の移動によって新生骨が経時的に形成されていることが分かった。歯根膜中には細胞成分が増加して

図7 3週間遠心移動群 M.F. 染色 (×50).
上: 圧迫側, 下: 牽引側, 右: 強拡大 (×250) 圧迫側では, 変性組織が残存し, 歯槽骨壁面から骨髓腔, およびセメント質 (C) に及ぶ吸収窩が認められ, 穿下性骨吸収が進行していた (矢印). 牽引側では, 歯根膜線維の伸張が認められ, 歯槽骨表面には新生骨の添加が認められた. D: 象牙質, C: セメント質, B: 歯槽骨, NB: 新生骨

おり, 歯根膜線維の伸張が認められた.

(3) 近心移動群

1日目

1) 圧迫側

歯頸部から歯根中央部にかけて歯根膜の幅径は狭窄していた. 歯根膜線維は蛇行しており, 広範囲で歯根膜中の細胞の核消失が認められた. 歯槽骨と歯根が近接している部位の歯根膜は圧迫されメチレンブルーに濃染し, 歯根膜中の細胞の核濃縮や圧平された血管像が認められた. (図8上段左列).

2) 牽引側

歯根膜幅径は拡大しており, 歯根膜線維の伸張が認められた (図8上段右列). 蛍光顕微鏡所見でラベリング像は認められなかった.

3日目

1) 圧迫側

歯頸部から歯根中央部にかけて広範囲で歯根と歯槽骨が近接し, 圧迫された歯根膜はメチレンブルーに濃染し, 細胞の核濃縮や血管の狭窄による扁平化が認められた. 歯槽骨側では血管と細胞成分の増加が認められ骨髓腔では, 穿下性骨吸収が一部に認められた (図8中段左列).

2) 牽引側

1日目と同様に歯根膜幅径が拡大し, 歯根膜線維の伸張が認められ歯根膜腔には細胞成分の増加が認められた. しかし, 歯槽骨表面に新生骨の著明な添加は認められなかった (図8中段右列). 蛍光顕微鏡所見でも著明なラベリング像は認められなかった

5日目

1) 圧迫側

図8 近心移動群 M.F. 染色 (×50).

上段: 1日目, 中段: 3日目, 下段: 5日目, 左列: 圧迫側, 右列: 牽引側 圧迫側では1日目に歯根膜の変性が認められた。3, 5日目になると変性部周囲に穿下性吸収が認められた。牽引側では, 5日目まで著明な新生骨の添加は認められなかった。D: 象牙質, B: 歯槽骨

図9 往復移動群 M.F. 染色 (×50).

上段: 1日目, 中段: 3日目, 下段: 5日目, 左列: 圧迫側, 右列: 牽引側 圧迫側では1日目に一部変性組織が出現しているが, 歯頸部より根尖側では遠心移動によって形成された骨(新生骨)の骨髓腔が歯根膜との交通を大きくしている. 5日目には新生骨は孤島状となり活発な骨吸収が認められた. 牽引側では歯根膜中に粒子状変性物が認められ, 3日目にはセメント質と歯槽骨を連結している. しかし, 5日目にはそのほとんどが消失していた. D: 象牙質, B: 歯槽骨, NB: 新生骨

図 10 往復移動群 ラベリング像。

上段：1日目，中段：3日目，下段：5日目，左列：圧迫側（×50），中央：牽引側（×50），右列：牽引側 強拡大（×250）圧迫側では，5日目まで，新生骨部にラベリング像が認められた。牽引側では，3日目まで歯根膜中に粒子状のラベリング像が認められ，5日目にはその殆どが消失していた。D：象牙質，B：歯槽骨，NB：新生骨，M：小石灰化物

3日目と同様に広範囲に歯槽骨と歯根が近接しており、圧迫された歯根膜はメチレンブルーに濃染し、細胞の核濃縮と血管の圧平化が認められた。骨髓腔では穿下性骨吸収が認められるが、歯根膜に面した歯槽骨の吸収像は見られなかった（図8下段左列）。

1) 牽引側

3日目と同様に歯根膜腔は拡大し、歯頸部から歯根中央部にかけて歯根膜中に細胞成分の増加が認められるが歯槽骨表面には新生骨の添加は著明ではなかった（図8下段右列）。蛍光顕微鏡では、歯槽骨表面に、Calceinによるわずかなラベリング像が認められた。

(3) 往復移動群

1日目

1) 圧迫側

歯頸部の歯根膜の幅径は狭窄し、圧迫された歯根膜はメチレンブルーに濃染し、歯根膜中の細胞の核消失、血管の圧縮による変形が認められた。歯頸部より根尖側では遠心移動によって形成された骨（新生骨）の骨髓腔が歯根膜との交通を大きくしていた（図9上段左列）。蛍光顕微鏡所見では新生骨部にAlizarin ComplexonとCalceinによるラベリング像が認められた（図10上段左列）。

2) 牽引側

歯根膜幅径は拡大し、歯根表面から歯槽骨表面に走行する線維は断裂し、出血が認められた（図9上段右列）。また、線維の走行に沿って、メチレンブルーに濃染する粒子が認められ（図11）、蛍光顕微鏡所見ではこの粒子が歯頸部の歯根表面から歯槽骨表面にかけて線維の走行に沿ってCalceinによるラベリング像として認められた（図10上段中央、上段右列）。また、歯槽骨表面は鋸歯状を呈し、多核巨細胞が歯根膜中に遊走していた。

3日目

1) 圧迫側

セメント質と歯槽骨間で圧迫された歯根膜はメチレンブルーに濃染し、細胞の核が濃縮し、血管は圧平されていた（図9中段左列）。しかし、圧迫部に隣接する骨髓腔では細胞の核消失の程度は低く、その内方では血管と細胞成分の増加が認められ、開大した骨髓腔の骨壁には破骨細胞による背部骨吸収像が認められた（図12）。蛍光顕微鏡所見では、新生骨部にCalceinによるラベリング像が認められた（図10中段左列）。

2) 牽引側

伸張された線維の走行に沿って、メチレンブルーに濃染する粒子物が認められ（図9中段右列）、蛍光顕微鏡所

図11 往復移動群 1日目 牽引側 M.F.染色 強拡大(×250)。

セメント質表面から歯槽骨表面に走行する線維に沿って、メチレンブルーに濃染する粒子状変性物（矢印）が認められる。
C: セメント質

図12 往復移動群 3日目 圧迫側 M.F.染色 強拡大(×125)。

歯根近接部では、歯根膜の変性壊死が起り、それに近接する骨髓腔壁では、歯槽骨（既存骨）に破骨細胞（矢印）による穿下性骨吸収が認められた。D: 象牙質, B: 歯槽骨, C: セメント質, NB: 新生骨

見でも線維の走行に沿ったCalceinによる粒子状のラベリング像が認められた（図10中段中央、中段右列）。その周囲には遊走する多核巨細胞が認められ、歯槽骨には吸収窩が認められた（図13）。しかし、歯頸部では歯根膜中に細胞成分の増加が認められるものの、歯根膜に接する歯槽骨には骨添加の所見は認められなかった。

5日目

1) 圧迫側

歯頸部ではセメント質と近接する骨の骨髓腔が開大し

図13 往復移動群 3日目 牽引側 M.F. 染色 強拡大 (×250).

歯根膜中にメチレンブルーに濃染する粒子が認められた。その周囲には遊走する多核巨細胞 (矢印) が認められた。B: 歯槽骨, C: セメント質, M: 粒子状変性物

て弧島状を呈し破骨細胞による骨の吸収像が見られた。圧迫された歯根膜は1日目と同様にメチレンブルーに濃染し、歯根膜中の細胞は核濃縮していた (図9下段左列)。歯頸部より根尖側では新生骨の吸収が進み、破骨細胞による骨吸収像が認められた (図14)。また、既存骨でも、骨髓腔からの穿下性骨吸収が進行し歯根膜腔は大きく拡大していた。蛍光顕微鏡所見では新生骨部に Calcein によるラベリング像がわずかに認められた (図10下段左列)。

2) 牽引側

3日目に見られたメチレンブルー濃染する粒子は減少し (図9下段右列)、歯槽骨壁に局限していることが蛍光顕微鏡でも観察された (図10下段中央, 下段右列)。歯根及び歯槽骨表面の粒子に接して多核巨細胞が認められ、そのやや根尖側のセメント質には破骨細胞を伴う吸収窩が認められた (図15)。しかし、歯根膜に沿った歯槽骨には骨形成を示す所見は認められなかった。

Ⅲ. マイクロラジオグラム所見と黒化度解析

(1) 対照群

近心側、遠心側ともに、骨は均一な像を示し、歯根膜 (PL) との境界線も明瞭であり黒化度解析でも骨から歯根膜への立ち上がりが急であった (図16上)。

(2) 3週間遠心移動群

牽引側

歯頸部から歯根中央部にかけて、既存の歯槽骨 (B) と

図14 往復移動群 5日目 圧迫側 M.F. 染色 強拡大 (×250).

破骨細胞による骨髓腔からの新生骨の吸収が進み (矢印), 新生骨は背部の既存骨と分離している。D: 象牙質, B: 歯槽骨, NB: 新生骨

図15 往復移動群 5日目 牽引側 M.F. 染色 強拡大 (×250).

メチレンブルーに濃染する粒子は減少し、歯槽骨壁に局限していた。その粒子に接して多核巨細胞 (矢印) が認められた。B: 歯槽骨, C: セメント質, M: 粒子状変性物

の境が明瞭で透過度の高く石灰化度の低い新生骨 (NB) が認められ歯根膜 (PL) との境界が不明瞭であった。新生骨には骨髓に相当する透過度のさらに高い部位が点在した。黒化度解析図を見ると、対照群の既存骨の立ち上がりに比べて新生骨の立ち上がりが緩やかであった (図16下)。

(3) 往復移動群

1日目

1) 圧迫側

歯根に最も近接する新生骨の透過度が高く、歯根膜と

図16 対照群および遠心移動群 (×40).

上: 対照群, 下: 遠心移動群牽引側, 左: マイクロラジオグラム像, 右: 黒化度解析 対照群では, 歯槽骨は緻密で, 均一な石灰化像を呈していた. 歯根膜との境界は明瞭であった. 歯槽骨から歯根膜, 歯根から歯根膜への立ち上がりは急であった. 遠心移動群では, 既存骨に比べ, 新生骨の石灰化度は低かった. 新生骨部は黒化度が高いことが分かる. D: 象牙質, B: 歯槽骨, PL: 歯根膜, NB: 新生骨

の境界が不明瞭であった (図17上).

2) 牽引側

歯根膜と歯槽骨の境界は明瞭であるが, 歯根膜中に不透過の亢進を示す像が見られた (図18上).

3日目

1) 圧迫側

狭窄された歯根膜に接する新生骨の透過度は高く, 既存の骨, および歯根膜との境界が不明瞭であり, 黒化度解析図においても新生骨の黒化度が高いことが明らかであった (図17中).

2) 牽引側

歯根膜 (PL) には通常の歯根膜より透過度の低い帯状の部位が見られ, 黒化度解析図でも通常の歯根膜より黒化度の低い部位が確認された (図18中).

5日目

1) 圧迫側

狭窄された歯根膜に接する新生骨の透過度が高く, 黒化度解析図においても新生骨の黒化度が高いことが明らかであった (図17下).

2) 牽引側

図 17 往復移動群 圧迫側 (×40).

上: 1 日目, 中: 3 日目, 下: 5 日目, 左: マイクロラジオグラム像, 右: 黒化度解析 既存骨に比べ, 新生骨の石灰化度は低かった. 新生骨部は, 黒化度が高いことが分かる. D: 象牙質, B: 歯槽骨, PL: 歯根膜, NB: 新生骨

図18 往復移動群 牽引側 (×40).

上: 1日目, 中: 3日目, 下: 5日目, 左: マイクロラジオグラム像, 右: 黒化度解析 歯根膜中に石灰化度の低い石灰化物 (矢印) が認められた. 石灰化物は正常歯根膜に比べ, 黒化度が低いことが分る. D: 象牙質, B: 歯槽骨, PL: 歯根膜

歯頸部よりやや根尖側の、歯根表面部と歯槽骨表面部に、通常の歯根膜より透過度の低い部位が認められ、黒化度解析図でも、通常の歯根膜より黒化度の低い部位が確認された（図 18 下）。

考 察

I. 実験方法について

一方向へ移動した後、逆方向へ移動させるといった往復移動を行った実験では、Reitan (1962)⁸⁾ はヒトの上顎小臼歯を被験歯とし、Melsen (1986)¹⁹⁾ はラットの下顎切歯、中村 (1981)²⁰⁾ はラットの上顎第一臼歯を被験歯として用いている。本研究ではイヌの上顎第一前臼歯を被験歯としたが、その理由として、①イヌの歯はラットのそれに比べて生理的な歯の移動が少ないこと、②近心側、遠心側ともに隣接歯との間に移動可能な自然な空隙すなわち槽間縁を有し、移動を行うための空隙を得るために抜歯する必要がないことが挙げられる。したがって、抜歯窩の治癒を待つ必要がなく、治癒過程における合併症を心配することなく、組織学的所見の判読が行なうことができる。

矯正力の大きさについて、村上 (1993)²⁴⁾ は、イヌの骨性癒着歯を固定源にした歯牙移動の実験で 150 g の矯正力を用いているが、広範囲に及ぶ壊死組織などは見られなかったとしている。予備実験において初期荷重 100 g と 150 g の力で 4 週間の歯の移動を行なった結果、100 g では歯根の根尖側 1/3 を中心とした傾斜移動がみられたが、150 g では傾斜移動だけでなく、挺出も伴っていた。所見判読の際、近遠心方向への移動との判別が困難になるため、挺出の少ない 100 g の矯正力を用い 3 週間の移動を行った。また、より持続的な矯正力を加えるため Ni-Ti 系クローズドコイルスプリングを使用し、約 1.2 mm 伸展させ初期荷重が約 100 g になるよう調整した。

実験期間中の歯の移動量の変化をみると 3 週間遠心移動で P1 は約 0.80 mm 移動しており、この時の力の減衰は約 30 %（約 70 g）であり、持続的に力が加ったと考えられる。Ni-Ti 系のスプリングで持続的な力を加えていたために、移動後 3 週間目においても広範囲に及ぶ変性を含む壊死組織が残存していたと考えられる。装置の固定には、歯頸部に溝を形成し、矯正用結紮線にて結紮後、同部を歯科用ボンディング剤で覆い保持の補強を行った。これにより、装置が簡便となり、バンド等による歯周組織への影響が軽減された。

II. 遠心移動について

初期荷重 100 g による 3 週間の歯の移動で、圧迫側では、歯根と歯槽骨が接近し、その間に挟まれた歯根膜は依然として硝子様変性に陥り、変性壊死部に面した歯槽骨は束状骨が吸収されずに残存していた。これは、約 0.85 mm 移動している 3 週間後にも約 70 g の矯正力が加って（持続的矯正力）いたためと考えられる。しかし、その周囲では活発な穿下性骨吸収が認められ、力が減衰すればこの変性壊死帯も吸収されと考えられる。この穿下性骨吸収に伴って隣接する歯根表面にも、吸収が認められた。これは、従来報告されている^{25, 26)}穿下性骨吸収に伴うものと考えられる。

一方、牽引側では歯根膜幅径は拡大し、広範囲に骨芽細胞を伴う新生骨の添加が認められ、活発な造骨所見が明らかであった。以上の所見は従来報告されているイヌの歯の移動の標準的な所見である^{25, 26)}。牽引側には十分な骨形成が見られるが、マイクロラジオグラムや NIH image による黒化度解析でも明らかのように新生骨の石灰化が既存の骨より低く、骨髓に富む多孔性であることも確認された。

III. 往復移動について

遠心移動によって新生骨が形成された牽引側、および吸収過程が進行している圧迫側に、反転する矯正力が加った時の変化を近心移動群の変化と比較しながら検討していく。

1) 圧迫側

近心移動群では移動開始 5 日目に至っても、歯根膜は広範囲に亘って圧迫され変性壊死帯を形成し、歯根膜より離れた骨髓腔にわずかな穿下性の吸収が認められるだけであった。一方、往復移動群では移動 1 日目で、歯頸部の歯根膜が圧迫により変性部を形成していたが、5 日目には変性部は多孔性に富む新生骨の骨髓部より穿下性に吸収されていた。また、歯根側では骨髓腔が著明に拡大し、歯根膜腔との交通を大きくしていた。さらに、この骨吸収は既存の骨にまで波及していた。Reitan (1962)⁸⁾ は歯の往復移動を行なった実験で、復路移動によって、歯と新生骨との間に圧迫された歯根膜には変性組織が認められず、新生骨が吸収されて既存の歯槽骨に圧迫されて初めて、変性組織が出現したと報告している。中村 (1981)²⁰⁾ も同様の結果を報告している。この理由として、Reitan (1962)⁸⁾ は新生骨が多孔性であるため圧が緩衝されやすいことと、組織の改造変化がおりやすいことを挙げている。本実験では、歯と新生骨部の間で圧迫された歯根膜は明らかに変性に陥っていた。これには、実験動物、装置、方法の違いなども考慮しな

くてはならない。Reitan (1962)⁸⁾ や中村 (1981)²⁰⁾ の実験では新生骨の形成期間が4~8日と短く、新生骨の形成量はわずかであったと考えられ、そのため、変性組織の出現を見ることなく新生骨は吸収されてしまったのではないかと考えられる。本研究では3週間の遠心移動を行なって牽引側には十分な骨の添加が見られた。そのために、彼らの報告より骨の吸収に時間を必要とし、変性組織が出現したと考えられる。磯野 (1995)²⁷⁾ はオートラジオグラフィーを利用した実験結果から、往路移動で既に細胞の活性が高まった部位に新たな力が加わるため、組織の修復は通常よりも早くなると考察している。以上のことより、新生骨は既存の骨に比べ、圧迫に対する抵抗力は弱く、吸収されやすく、それを起点として組織の改造は速やかに進行すると考えられる。

2) 牽引側

一方、牽引側を見ると、近心移動群では、歯根膜線維は著明に伸展しているが、5日目においても歯根膜線維の伸張に対応した明らかな骨添加は認められなかった。一方、往復移動群では、近心移動1日目に歯根膜線維の伸張が認められ、歯槽骨面には吸収の痕跡を残し、破骨細胞が骨吸収面から離れた遊走像を示し、移動5日目においても同様の所見が認められた。これらの所見は、牽引側では先の圧迫による骨の吸収過程が5日後にも残っていることを示している。遊走する破骨細胞の所見は、Reitan (1962)⁸⁾、中村 (1981)²⁰⁾ の報告とも一致していた。また、移動1日目から伸張した歯根膜線維に沿って粒子が観察され、異栄養性石灰化物であることが蛍光顕微鏡やマイクロラジオグラムでも確認された。その小石灰化物は3日目では歯根膜中に、帯状かつ拍車状に形成され、さらに増大傾向を示していた。しかし、5日目になると、歯根膜中央部にはほとんど認められず、消失しており、歯槽骨壁に残存する石灰化物に接する多核巨細胞が観察された。歯の矯正移動中にみられる歯根膜の石灰化についての報告は少ない。土屋ら (1989)¹⁴⁾ はラットの歯牙移動時に、圧迫側に出現した小石灰化物は実験開始後2日目に出現し、7日目には消失したとしている。土屋ら (1989)¹⁴⁾ はこの歯根膜の石灰化に関して、強い圧迫により変性に陥った組織が壊死し、その膜成分が核となり非常に短期間で石灰化が開始され、加えて、変性したコラーゲン線維上へのカルシウム沈着が進行する非細胞性の無機物の沈着であると推察している。Nakamuraら (1996)²⁸⁾ は圧迫側に見られた石灰化物を電子顕微鏡で観察し、石灰化物周囲に多核性巨細胞を認め、石灰化物内部にはfibrinの堆積を認めたとしている。ま

た、X線マイクロアナライザーの分析により、その組織内に多量のCaが取り込まれていることから、thromboplastinによる血栓の形成との関連を示唆している。両者の報告は、どちらも圧迫側において認められた所見であるが、本研究では牽引側にも石灰化物を認めた。石灰化が起こった部位は、初めの遠心移動による圧迫で歯根膜が変性壊死に陥っていたと考えられるが、その後、直ちに矯正力で牽引することにより、組織の変性壊死は更に進み増大したと考えられ、その結果修復不能となり、異物化し、残存したと考えられる。

異物化した組織の石灰化について赤崎 (1970)²⁹⁾ は、病理学的に見て、融解消失の困難な壊死組織や変性帯および硝子様変性帯は石灰化を起こしやすいとしており、その原因として、局所的な細胞の代謝障害によりCO₂産生が停止し、組織がアルカリ性に傾くこと、およびアルカリフォスファターゼ活性が上昇することなどをあげている。本研究において見られた石灰化物の出現の速さから、土屋の述べた非細胞性の無機物の沈着であったと考えられる。一方、石川ら (1966)³⁰⁾ は慢性的咬合性外傷時に、牽引による歯根膜の石灰化を認め、これを拍車状石灰化とよんでいる。慢性的咬合性外傷時には、歯に対して長期間のジグリングが起こるため、歯根膜の変性が進んでおり、突発的な強い外力により変性組織の石灰化が起こると推察される。

石灰化物の吸収に関して、本実験では5日目にはほとんど消失してしまっており、その吸収機転が非常に速やかであったことから、非細胞性の融解消失だけでなく、血液由来の単核細胞やマクロファージ^{31,32)}、滲出細胞や線維芽細胞からのコラーゲナーゼ^{33,34)}、あるいは本研究で観察された多核性巨細胞などによって溶解あるいは吸収、貪食が行われ、積極的にその排除が行われたと考えられる。

IV. 往復移動が歯周組織に及ぼす為害性について

矯正学的歯の移動が歯周組織に与える為害性として圧迫側に起る歯根吸収や骨性癒着が考えられる。歯根吸収の原因として、出口 (1969)³⁵⁾ は、歯根膜中に変性組織が長期間残存することによりセメント質、象牙質の代謝が抑制され、その修復期に異物の一部としてセメント質や象牙質も一緒に吸収されてしまう可能性があるとして述べている。また、Acarら (1999)³⁶⁾ は、持続的矯正力が間欠力よりも歯根吸収をひき起す可能性が高いと報告している。持続的矯正力を用いた本実験の遠心移動群では、3週間後にも吸収されていない変性壊死帯に近接して歯根吸収が観察された。変性部を修復するための穿下性吸

収によってセメント質、象牙質が吸収されたと考えられる。一方、往復移動群の圧迫側では骨の広範囲におよぼす骨吸収にも拘わらず、歯の移動によると考えられるセメント質、象牙質の吸収は認められない。これは、新生骨、あるいは変性壊死に陥った組織の吸収が容易に行なわれたことと関係があると考えられる。

一方、牽引側では牽引された歯根膜にそって石灰化物が認められた。この石灰化物は移動5日目には消失する傾向にあったが、石灰化物が広範囲に長時間存在することは、セメント質あるいは象牙質の吸収のみならず、歯と骨の癒着という危険性を含んでいる。戸村ら(1957)³⁷⁾は外傷により壊死に陥った歯根膜は石灰沈着を起こしやすく、それによりセメント質と歯槽壁が結合される可能性があるとして述べている。その機序として、隣接する骨髄から肉芽組織が増殖し、壊死部の歯槽骨とセメント質、あるいは石灰化した歯根膜などが吸収された後、骨の新生に伴って歯根と歯槽骨の癒着が完成すると述べている。しかし、矯正学的歯の移動時にみられる歯の骨性癒着に関する報告は少ない。Michaeliら(1985)³⁸⁾はラットの歯の移動の実験中に骨性癒着を示したものがあったとしているが、詳細な報告は述べていない。本研究においてみられた歯根膜中の石灰化物は早期に吸収され消失したが、装置の力系の変化、全身の疾患や薬物投与による代謝活性の低下などの因子が加われば、骨性癒着を起こす可能性があると考えられる。

結 論

成犬の上顎左側第一前臼歯に初期荷重 100 g の持続的矯正力を加えて遠心移動(往路)を3週間、近心移動(復路)を5日間行ない、1) 往復移動における新生骨と変性組織の消長、2) 往復移動が歯周組織に及ぼす有害性などを光学顕微鏡と蛍光顕微鏡およびマイクロラジオグラムを用いて検討し、以下の結果を得た。

1. 3週間の平均遠心移動量は 0.80 mm であり、その後の5日間の近心移動ではほぼもとの位置に戻った。

2. 3週間の遠心移動によって形成された新生骨は多孔性で石灰化度が低く、近心移動によって骨髄部から早期に穿下性に吸収した。

3. 3週間の遠心移動の圧迫によって変性壊死に陥った歯根膜組織は近心移動によって牽引され、破骨細胞は歯根膜中に遊走していたが、骨添加は認められなかった。また、牽引された歯根膜線維に沿って石灰化物が確認されたが、5日目には消失する傾向にあった。

4. 遠心移動の圧迫側には骨の穿下性吸収に伴ってセ

メント質、象牙質の吸収が認められた。しかし、往復移動では歯槽骨の活発な吸収過程が進行しているものの、歯根の吸収は見られなかった。

以上のことから、往路移動によって牽引側に形成された新生骨は早期に吸収されやすいため、歯の移動の固定源にはなり得ないこと、また、復路移動によって牽引側の歯根膜線維に石灰化が出現し、歯の支持組織に為害作用を引き起こす可能性があることがわかった。

稿を終るにあたり、終始ご懇篤なるご指導とご校閲を賜りました歯科矯正学講座山口和憲教授ならびに、口腔病理学講座福山宏教授、口腔解剖学第一講座小林繁教授に厚く御礼申し上げます。また、私を本研究に導いて頂いた故山田建二郎教授に感謝の意を表します。さらに、種々ご教示頂いた野代悦生講師、歯科理工学講座柿川宏助教授に厚く御礼申し上げますとともに、本研究にご協力頂いた、歯科矯正学講座教室員諸兄に謝意を表します。

参考文献

- 1) Sandstedt, C.: Einige Beitrage zur Theorie der Zahnreg Lierung, Nord Tandlakare Tidskr, Ht. 1, 2, 4, 1904.
- 2) Schwartz, A. M.: Tissue changes incident to tooth movement. Int. Orthod. Cong. 18: 331, 1932.
- 3) Oppenheim, A.: Bone changes during tooth movement, Int. J. Orthodont. 16: 535-551, 1930.
- 4) Waldo, C. M.: Method for the study of tissue response to tooth movement. J. Dent. Res. 32: 690-691, 1953.
- 5) Macapanpan, L. C., Weinmann, J. P. and Brondie, A. G.: Early tissue changes following tooth movement in rats. Angle Orthod. 24: 79-95, 1954.
- 6) Reitan, K.: Some factors determining the evaluation of forces in orthodontics. Am. J. Orthod. 43: 32-45, 1957.
- 7) Reitan, K.: Tissue behavior during orthodontic tooth movement. Am. J. Orthod. 46: 881-900, 1960.
- 8) Reitan, K.: Bone formation and resorption during reversed tooth movement. In Vistas in Orthodontics, eds. by Kraus B. S. and Riedel R. A. Philadelphia, Lea and Febiger, 1962, 69-84.
- 9) Reitan, K.: Effects of force magnitude and direction of tooth movement on different alveolar bone types. Angle Orthod. 34: 244-255, 1964.
- 10) Reitan, K.: Clinical and histologic observations on tooth movement during and after orthodontic treatment. Am. J. Orthod. 53: 721-745, 1967.
- 11) Reitan, K. and Kvam, E.: Comparative behavior of

- human and animal tissue during experimental tooth movement. *Angle Orthod.* 41: 1-14, 1971.
- 12) Rygh, P.: Elimination of hyalinized periodontal tissues associated with orthodontic tooth movement. *Scand. J. Dent. Res.* 82: 57-73, 1974.
 - 13) 中村進治: 歯根膜血管走行の矯正学的研究, 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.
 - 14) 土屋俊夫, 妻鹿宏子, 佐藤敏仁, 武内真利, 栗原三郎, 三浦不仁夫: 圧迫側歯根膜にみられる壊死組織の石灰化について. *日矯歯誌* 48: 614-622, 1989.
 - 15) Lindhe, J. and Ericsson, I.: The influence of trauma from occlusion on reduced but healthy periodontal tissues in dog. *J. Clin. Periodontol.* 3: 110-122, 1976.
 - 16) Lindhe, J. and Ericsson, I.: The effect of elimination of jiggling forces on periodontally exposed teeth in the dog. *J. Clin. Periodontol.* 53: 562-567, 1982.
 - 17) Ericsson, I. and Lindhe, J.: Effect of longstanding jiggling on experimental marginal periodontitis in the beagle dog. *J. Clin. Periodontol.* 9: 497-503, 1982.
 - 18) Biancu, S., Ericsson, I. and Lindhe, J.: Periodontal ligament tissue reactions to trauma and gingival inflammation. An experimental study in the beagle dog. *J. Clin. Periodontol.* 22: 772-779, 1995.
 - 19) Melsen, B.: Tissue reaction following application of extrusive and intrusive forces to teeth in adult monkeys. *Am. J. Orthod.* 89: 469-475, 1986.
 - 20) 中村芳樹: 歯の往復移動を行なった際に圧迫側歯槽骨表面に出現する細胞の電子顕微鏡的研究. *鶴見歯学* 8: 95-123, 1981.
 - 21) 須賀昭一: 歯の動きに伴う歯槽骨変化の組織化学(上). *歯界展望* 51: 59-69, 1978.
 - 22) 須賀昭一: 歯の動きに伴う歯槽骨変化の組織化学(中). *歯界展望* 51: 251-264, 1978.
 - 23) 原 林作: 抜歯窩への実験的歯牙移動による歯槽骨変化のラベリング法とマイクロラジオグラフィーによる研究. *歯学* 65: 361-408, 1977.
 - 24) 村上明子: 矯正歯牙移動における骨性癒着歯の固定源としての有用性に関する実験的研究. *九州歯会誌* 47: 12-29, 1993.
 - 25) 斉藤 久: 歯牙移動に伴う支持組織の変化に関する実験的研究(その6). *歯科学報* 47: 83-107, 1942.
 - 26) Lefkowitz, W. and Waugh, L. M.: Experiment depression of teeth. *Am. J. Orthod.* 31: 21-36, 1945.
 - 27) 磯野浩昭: 歯の移動後に生じた後戻りにおける歯根膜の応答性. *日矯歯誌* 54: 13-27, 1995.
 - 28) Nakamura, Y., Tanaka, T. and Kuwahara, Y.: New findings in the degenerating tissues of the periodontal ligament during experimental tooth movement. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.* 109: 348-354, 1996.
 - 29) 赤崎兼義: 病理学総論. 南山堂, 東京, 1970, 161-238.
 - 30) 石川悟朗, 秋吉正豊: 口腔病理学. 永末書店, 京都・東京, 1966, 496-504.
 - 31) Mariano, M. and Spector, W. G.: The formation and properties of macrophage polykaryons. *J. Pathol.* 113: 1-18, 1974.
 - 32) Sutton, J. S. and Weiss, L.: Transformation of monocytes in tissue culture into macrophages, epithelioid cells, and multinucleated giant cells. *J. Cell Biol.* 28: 303-332, 1966.
 - 33) Huybrecht-Godin, G., Hauser, P. and Gilbert, V.: Macrophage-fibroblast interactions in collagenase production and cartilage degradation. *Biochem. J.* 184: 643-650, 1979.
 - 34) Robertson, P. B., Ryel, R. B., Taylor, R. E., Shyu, K. W. and Fullmer, H. G.: Collagenase localization in polymorphonuclear leukocyte granules in the rabbit. *Science* 117: 64-65, 1972.
 - 35) 出口敏雄: 歯の移動時に起こる硝子様変性に関する組織化学的研究. *日矯歯誌* 28: 274-277, 1969.
 - 36) Acar, A., Canyurek, U., Kocaaga, M. and Erverdi, N.: Continuous vs. discontinuous force application and root resorption. *Angle Orthod.* 69: 159-163, 1999.
 - 37) 戸村二郎, 長田 保: 高周波電流による歯髄処置に関する実験的研究. *口病誌* 24: 24, 1957.
 - 38) Michaeli, Y., Steigman, S. and Harari, D.: Recovery of the dental and periodontal tissues of the rat incisor following application of continuous intrusive loads—A long-term study. *Am. J. Orthod.* 87: 135-143, 1985.