



Title	歯に矯正力を負荷した際の歯根膜受容器の応答特性の変化について
Author(s)	岡崎, 恵一郎
Description	北海道歯学会, 岡崎 恵一郎 = Keiichiro Okazaki, 歯に矯正力を負荷した際の歯根膜受容器の応答特性の変化について = Responses of periodontal mechanoreceptors before and after loading the orthodontic force, 北海道歯学雑誌, 15(2), DEC 1994, pp.291-303
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(歯学)
Dissertation Number	甲第3592号
Issue Date	1995-03-24
DOI	https://doi.org/10.11501/3106729
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/51282
Type	doctoral thesis
File Information	thesis_1994.pdf



歯に矯正力を負荷した際の歯根膜受容器の応答特性の変化について

岡崎 恵一郎

Responses of periodontal mechanoreceptors before and
after loading the orthodontic force

Keiichiro Okazaki

北海道歯学雑誌
Hokkaido Journal of
Dental Science
(Vol. 15, No. 2, 1994)

別 刷

原 著

歯に矯正力を負荷した際の歯根膜受容器の応答特性の変化について

岡崎 恵一郎

抄 録：歯に矯正力を負荷した際の歯根膜感覚の変化を解明することを目的に，矯正力負荷と歯根膜機械受容器の応答特性の変化との関連について検討した。

実験には，ネコの下顎犬歯に2日間および7日間，遠心方向へ100 gの矯正力を負荷した。その後，下歯槽神経を剖出し0.01 N から0.80 N の近心または遠心方向の力刺激を歯冠に加えることにより歯根膜受容器の機能的単一神経線維の応答を検出した。

出現頻度の高かった遅順応性ユニットの応答（59ユニット中54）について検討を行った。応答開始までの潜時と，最大に応答する方向特性は，対照群，実験群間に変化は認められなかった。2日間，7日間実験群とも近心方向への力刺激に対する応答閾値は対照群に対して有意に上昇したのに対し，遠心方向への力刺激では両実験群とも差が認められなかった。dynamic index は，2日間実験群の近心方向への力刺激で対照群より高い値を示し，7日間実験群の遠心方向への力刺激ではやや低下した。また，7日間実験群の近心方向への力刺激において著しく高い値を示すユニットが記録された。

これらの結果から，歯根膜機械受容器の応答特性は2日間，7日間の矯正力負荷により特に圧迫側に位置する受容器が変化を受けていることが示され，その要因には，機械受容複合体におけるコラーゲン線維の変化であることが示唆された。

キーワード：歯根膜機械受容器，遅順応性ユニット，矯正歯の移動，応答閾値，ダイナミックインデックス

緒 言

歯に矯正力が加えられたとき，患者は歯が浮いたような感じや，自発痛，咀嚼痛などのさまざまな感覚の変化を経験する¹⁾。その感覚の変化は矯正装置調整後約2日でピークを迎え，特に咀嚼時に変化の程度が増すこと²⁾が知られている。これらの痛みや，歯の動揺に関与する感覚は，歯根膜に存在する受容器で感受される。

歯根膜受容器の単一神経線維の応答は，1939年にPfaffmann^{3,4)}により初めて記録されて以来，さまざまな動物において数多くの報告がなされている⁵⁻¹⁷⁾。歯

に力刺激を加えた際の歯根膜の受容器の基本的な性質には次のようなものがあげられる。①高い閾値の速順応性の応答，低い閾値の遅順応性の応答の2種類がある⁶⁾。②受容器は，力刺激に対し牽引側に位置する場合に応答するいわゆる伸展受容器であるとされている^{8,9)}。③これらの応答は，ルフィニ神経終末などの特殊神経終末に由来しているとされている^{13,18)}。④それぞれの受容器で，力刺激に対して最大に応答する一定の方向（directional sensitivity）がある^{3,6,8)}。⑤受容器は，主に触圧覚を感受する機械受容器であると考えられているが，侵害刺激に対しても応答し，侵害受容にも関与していることが示唆されている¹⁹⁾。

〒060 北海道札幌市北区北13条西7丁目

北海道大学大学院歯学研究科博士課程歯学臨床系専攻（歯科矯正学講座）

指導：中村 進治 教授（北海道大学歯学部歯科矯正学講座）

指導：亀田 和夫 教授（北海道大学歯学部口腔生理学講座）

[受付：平成6年9月13日]

また、組織学的研究により、歯根膜受容器は根尖側3分の1に多く分布していることが確認されている^{8,20,21)}。さらに、前田らの一連の研究により、歯根膜受容器の種類別分布は動物の種により異なること²¹⁻²³⁾、これまで光学顕微鏡像で自由神経終末とされてきたものの中にも、電子顕微鏡像では特殊神経終末に類似しているものが存在することなどが報告されている²⁴⁾。

このように生理的状态における歯根膜の神経生理学的研究や組織学的研究は数多く行われているが、矯正装置によって歯根膜に矯正力を負荷させた場合の歯根膜受容器の応答特性の変化を調べた研究は非常に少ない¹⁷⁾。しかも、矯正力の負荷方向と歯根膜受容器の応答特性との関連についての研究は全くない。

そこで本研究の目的は、歯根膜受容器の求心性単一神経線維からの応答を末梢神経から導出記録し、歯に矯正力を一定期間負荷した後の受容器の応答特性の変化を明らかにすること、および矯正力の負荷による感覚変化を患者が認識する過程を考察することである。

材 料 と 方 法

1. 実験動物

実験には全身ならびに歯周組織の健康な成ネコ47匹(2.5~4.8kg)を用いた。ネコの飼育には、1日1回、飼料(ペットライン社製、CANET)と水(水道水)を与え、自由摂取させた。

2. 矯正力負荷条件

下顎犬歯を実験歯とし、金子²⁵⁾に準じた矯正力負荷方法を用いた。Fig. 1に示すように下顎第一前臼歯を固定源とし、矯正用クローズドコイルスプリングで実験歯を遠心方向に牽引した。



Fig 1. Appliance used for orthodontic tooth movement.

装置装着時に、塩酸クロロプロマジン10ml、硫酸アトロピン0.1ml、塩酸ケタミン57.6mlの筋肉内注射で全身麻酔した。固定源の第一前臼歯には帯環を調整し、それにリングボタンを溶接した。さらに歯を酸処理しMMA系接着性レジン、オルソマイトスーパーボンド(サンメディカル社製)にて帯冠を合着した。歯の移動には、0.007"×0.030"の矯正用クローズドコイルスプリング(ロッキーマウンテン社製)を初期荷重100gになるように活性化し、矯正用結紮線で第一前臼歯のリングボタンと犬歯の臨床的歯頸線の約2mm歯頂側よりにつけた溝とに両端を固定した。

矯正力の作用期間は、2日間(以下2日間実験群)および7日間(以下7日間実験群)とし、他に対照として矯正力を負荷しないグループ(以下対照群)を設けた。

3. 歯根膜受容器からの機能的単一神経線維の応答の記録方法

麻酔には、軽度短時間の処置を可能にするために装置装着時と同じく塩酸クロロプロマジン10mg、硫酸アトロピン0.1mg、塩酸ケタミン57.6mgを筋肉内注射を行った。これは体重測定前であるのですべての動物に一律の投与量で行った。その後、実験当日の体重を測定し、ペントバルビタールナトリウム12mg・kg⁻¹を腹腔内注射した。脳定位固定装置(成茂科学器械研究所社製、SN-2)にネコを背臥位に固定し、アクリル棒で最大開口位に保持した。電気パッドで動物の体温を保ちながら記録を行った。皮膚切開後、後オトガイ孔の約2mm近心から下顎下縁部の骨を幅約3mm長さ約15mmにわたって削除し、下歯槽神経を剖出し、中枢側を切断した。さらに手術用実体顕微鏡(オリンパス社製、OCS-PS-3)下で、神経を機能的単一神経線維に分離した。神経の露出後は、ビニルシリコーン印象材、エクザファインパテタイプ(ジーシー社製)でボクシングし、加温した流動パラフィンを満たし、適宜交換することにより神経を保護した。

本実験系の受容器からの応答信号の記録のプロックダイヤグラムをFig. 2に示す。

応答の記録に使用した電極には直径0.3mmの単極白金電極を用い、陰極電極は同側の顎二腹筋に、不関電極は同側の上腕部に刺入した。電極からの信号は前置増幅装置(自製)と、オシロスコープ内蔵生体電気増幅装置(日本光電社製、VC-9, AVM-9S)で増幅後、音に変換しスピーカでモニタしながらテープ速度

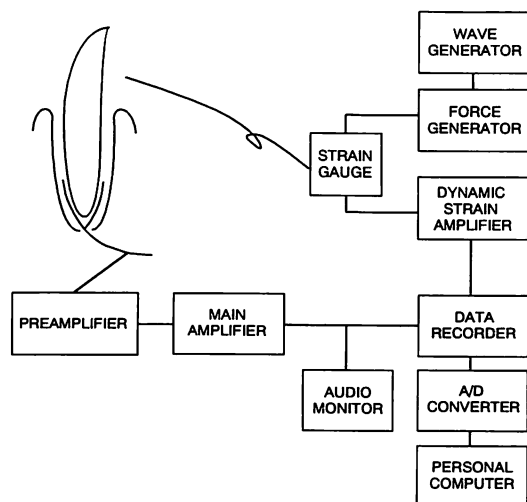


Fig 2. Block diagram of physiological experiment.

9.52cm・min⁻¹ で力刺激とともにデータレコーダ (TEAC 社製, XR-50) に記録した。実験は、銅メッシュで囲まれた簡易シールドルーム内で行った。歯根膜からの応答が機能的単一神経線維からのものか否かの判別は、記録時にスピーカからのモニタ音によって判別し、さらにパーソナルコンピュータの波形解析用画面上の波形を観察して確認した。

応答信号の解析は AD コンバータで精度12ビット、サンプリング周波数20kHz で量子化し、パーソナルコンピュータ (日本電気社製, PC-9801FA) に取り込み、波形解析用ソフトウェア (カノーブス社製, Wave master Ver.2.06) を用いて解析した。

矯正力の除去直後に、実験歯の矯正力を負荷した溝に力刺激を加えた。力刺激の方向は近心、遠心の2方向とし、立ち上がり時間100ms、力が平衡に達している持続時間3sの力刺激を0.01N から0.80N までの範囲で加えた。力刺激装置は X-Y プロッタを改造したもので、刺激装置に波形発生装置 (Biomation 社製, 2411A) から台形波を与えて力を発生させた。刺激装置にはひずみゲージ (共和電業社製, LVS-100GA) を介在させ、動ひずみ測定器 (共和電業社製, DPT-700B) で刺激力を測定した。

歯根膜からの神経線維の応答の有無は、0.30N の初期力刺激を用い、それに応答が認められない場合には、さらに0.80N を加え判定した。

方向特性の判定には木片の先に矯正用ワイヤ (オームコ社製, 0.175" Respond wire) を固定し、簡易型

von Frey の刺激毛を製作し、これを用いた。刺激毛は歯面に垂直にゆっくりと当てたときに約0.30N になる様に調整されたものであるが、これを用いて判別がつかなかった場合には、随時細い木片を歯面に直接当てて判別した。

力刺激に対する応答信号の計測は、潜時の測定、最大応答方向の同定、応答閾値の測定、dynamic index の算出を行った。得られた計測値の統計処理には、Mann-Whitney の分散分析と χ^2 検定を適宜用いた。

結 果

1. 神経応答の種類

矯正力の負荷前後での単一神経線維 (ユニット) の応答は、総計59ユニットの受容器の応答が観測された。その内訳は、速順応性が5ユニット、遅順応性が54ユニットであった。速順応性には on type (Fig. 3-a), off type (Fig. 3-b), on-off type の3型がみられ、対照群に3ユニット、2日間実験群に1ユニット、7日間実験群に1ユニット記録された。遅順応性 (Fig. 4) は、対照群で19ユニット (近心方向への力刺激に応答8, 遠心方向への力刺激に応答6, 近心遠心両方向への力刺激に応答5), 2日間実験群で21ユニット (近心方向への力刺激に応答9, 遠心方向への力刺激に応答8, 近心遠心両方向への力刺激に応答4), 7日間実験群で14ユニット (近心方向への力刺激に応答4, 遠心方向への力刺激に応答4, 近心遠心両方向への力刺激に応答6) 記録された。遅順応性の応答を示したものの中に自発放電型 (Fig. 5) が、対照群で2ユニット、2日間実験群で1ユニット、7日間実験群で1ユニット、合計4ユニット記録された。

2. 神経応答の特徴

出現頻度の高かった遅順応性の応答を対象として以下の計測を行った。

1) 潜時

刺激開始から応答開始までの潜時は、力刺激の近心方向、遠心方向にかかわらず、加圧速度が増加するにしたがって短くなった。さらに、対照群、2日間実験群、7日間実験群の3群間での差は認められず、矯正力の負荷による潜時の変化は認められなかった (Fig. 6-a, b)。

2) 応答方向特性

最大応答方向の分布を調べるため、近心から遠心まで舌側に関しては45° 間隔で5方向に、また近心頬側、

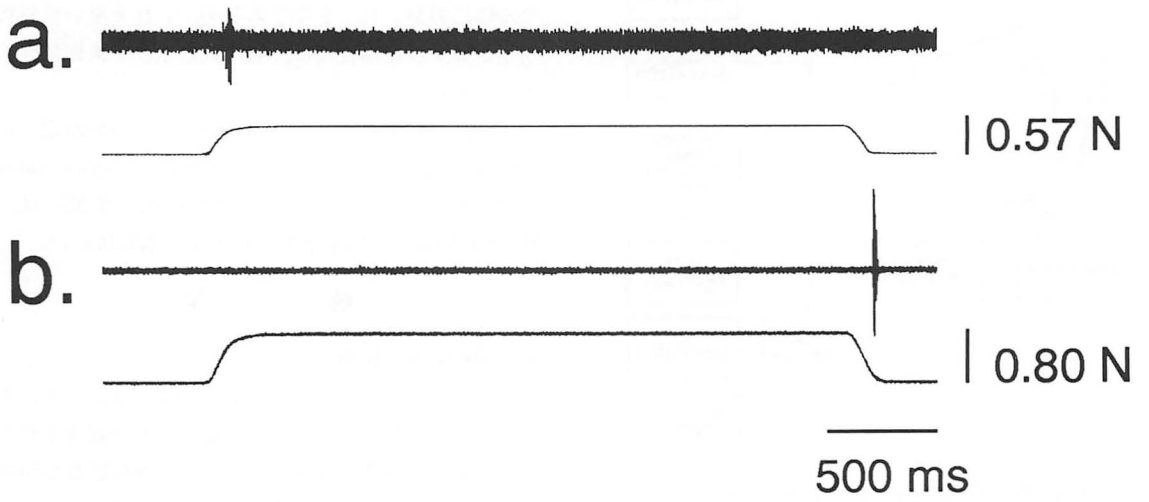


Fig 3. Responses of rapidly adapting units.
a. On type, b. Off type.

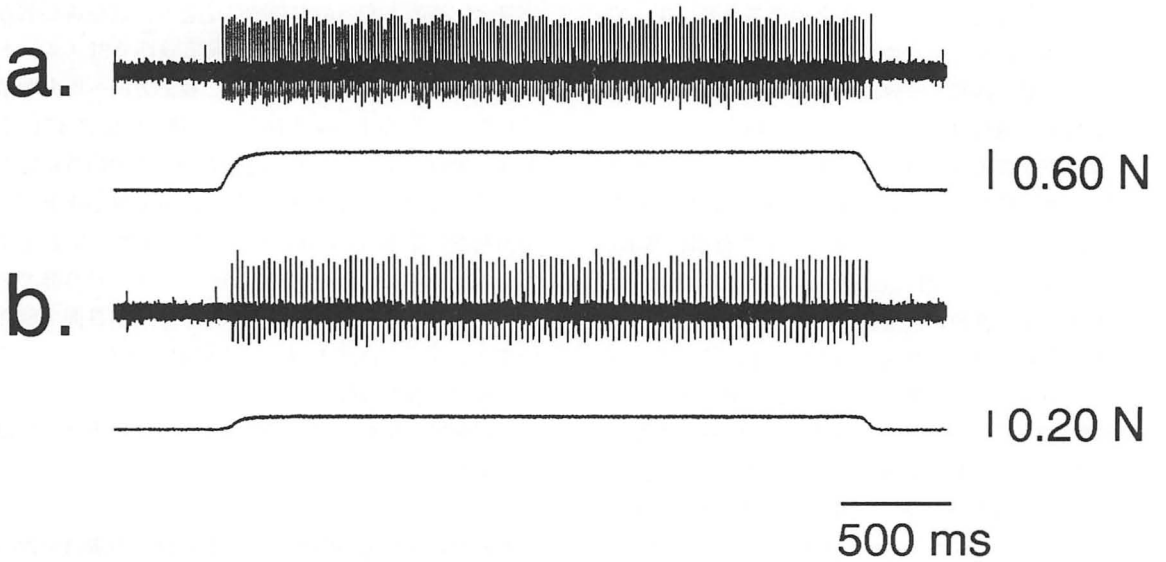


Fig 4. Responses of a slowly adapting unit.
Magnitude of the loads were 0.60 N above, 0.20 N below. Higher frequency of discharge was observed in 0.60 N application.

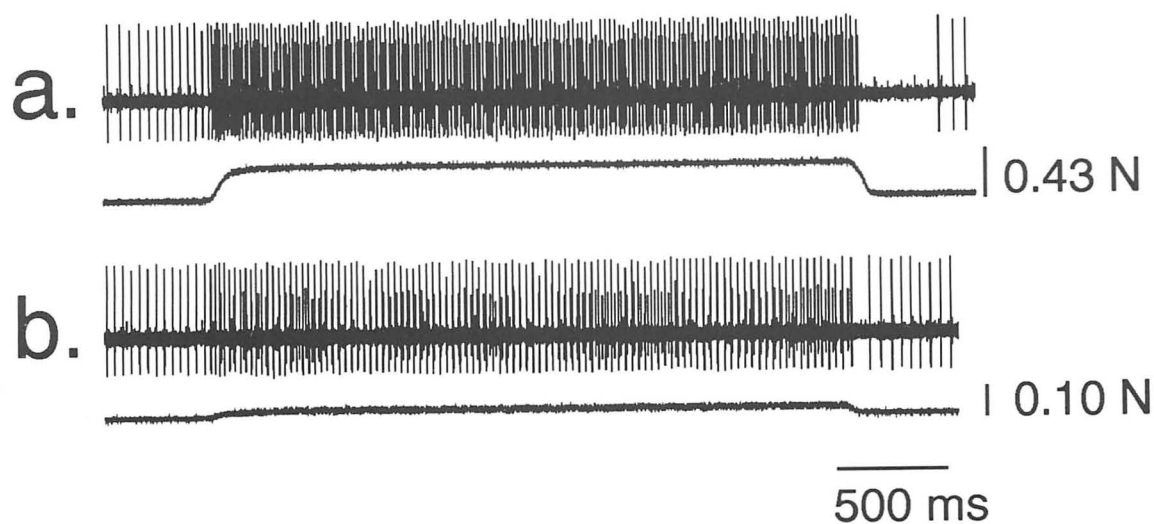


Fig 5. Responses of the spontaneously active unit.

Silent periods of spontaneous active units were observed both in 0.43 N (above) and in 0.10 N application (below).

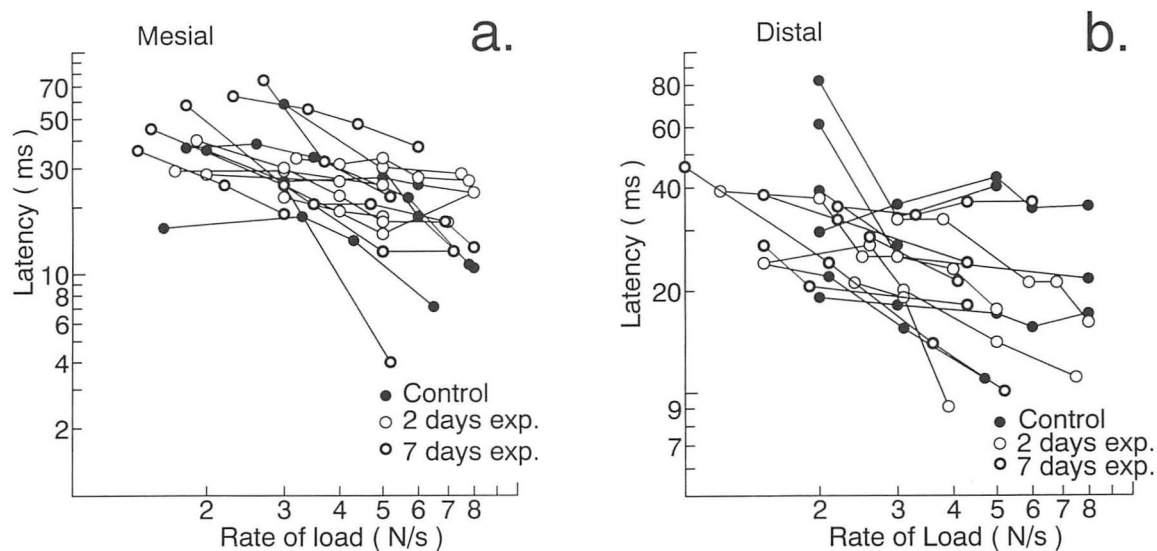


Fig 6. Latency

Latency both in mesial and distal stimulus decreased with the increase in rate of load.

a. Mesial stimulus. b. Distal stimulus.

Table 1. Distributions of maximum sensitivities for slowly adapting units.

"Others" includes the sum of numbers for misiolabial, labial, and distolabial directions.

Directions	Control	2days exp.	7days exp.	Total
Mesial	2	3	2	7
Mesiolingual	4	3	2	9
Lingual	2	5	4	11
Distolingual	2	0	1	3
Distal	4	5	1	10
Others	5	5	4	14
Total	19	21	14	54

(Number of unit)

Table 2. Means of load thresholds.

Means and the 1st and 3rd quartile values of thresholds for slowly adapting units.

Stimulations were made toward mesial and distal directions. Mean difference between control and experimental groups were assessed by Mann-Whitney U test, $P < 0.01$.

Direction	Control	2 days exp.	7 days exp.
Mesial	8.8 5.8–11.9	20.8** 10.3–25.8	18.7** 9.8–26.0
Distal	9.7 4.8–13.4	10.5 7.5–12.0	11.9 6.5–16.5

Mean
1st–3rd quartile ($10^{-2}N$)

頬側, 遠心頬側の3方向は一つにまとめ“その他”として分類し, その結果を Table. 1 に示す.

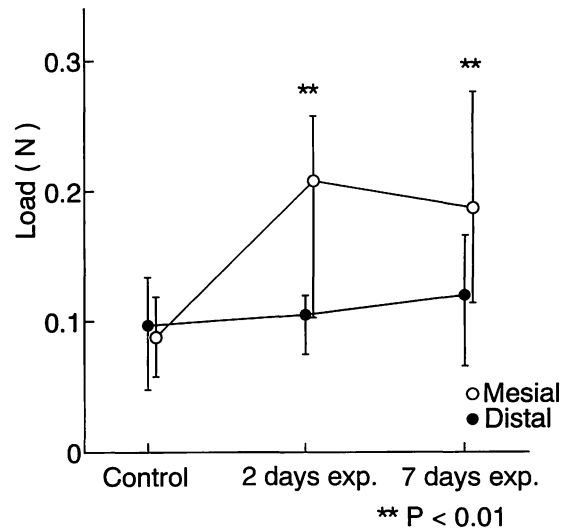
対照群, 2日間実験群, 7日間実験群との間に方向特性の差は認められなかった. また, 対照群内, 両実験群内と3群間のそれぞれで方向別の検討を行ったが差は認められなかった. したがって, 歯の横断面において歯根膜に存在する受容器の分布はほぼ一様で, また矯正力の負荷による分布の変化は認められなかった.

3) 応答閾値

対照群, 2日間実験群, 7日間実験群での力刺激に対する応答閾値の計測結果を Fig. 7 と Table. 2 に示す.

近心方向に力刺激を加えた場合, 応答閾値の平均値は2日間実験群で $20.8 \times 10^{-2} N$, 7日間実験群で $18.7 \times 10^{-2} N$ であったのに対し, 対照群では $8.8 \times 10^{-2} N$ と実験群のほう有意に高い値を示した ($P < 0.01$).

遠心方向に力刺激を加えた場合の応答閾値の平均値は, 対照群で $9.7 \times 10^{-2} N$, 2日間実験群で $10.5 \times 10^{-2} N$, 7日間実験群で $11.9 \times 10^{-2} N$ と, 3群間に差は認

**Fig 7.** Means of load thresholds.

In mesial stimulations, significant increases in thresholds were observed both in 2 day exp. group and in 7 days exp. group compared with control group, while thresholds did not significantly change with distal stimulations between experimental group and the control. Bars show 1st and 3rd quartile values.

められなかった.

4) dynamic index

3群の dynamic index, すなわち加圧初期の放電頻度と2秒後の放電頻度との差の計測結果を Fig. 8 に示す.

対照群, 2日間, 7日間実験群の3群の近心, 遠心方向への力刺激に共通した傾向として, 加圧速度が増加するに従って dynamic index が増加していた.

対照群と2日間実験群の dynamic index を比較すると, 近心方向への力刺激では, 対照群より2日間実験群のほうやや高い値を示すユニットが多かったが, 遠心方向への力刺激では, 対照群と2日間実験群との間に差は認められなかった.

7日間実験群では, 近心方向へ力刺激を加えた場合の dynamic index は, ほぼ対照群と一致していたが, 非常に高い値を示したものが2ユニット観察された. この2つのユニットの方向特性は, 近心と近心舌側であった. また遠心方向への力刺激では, 対照群よりもやや低い値を示していた.

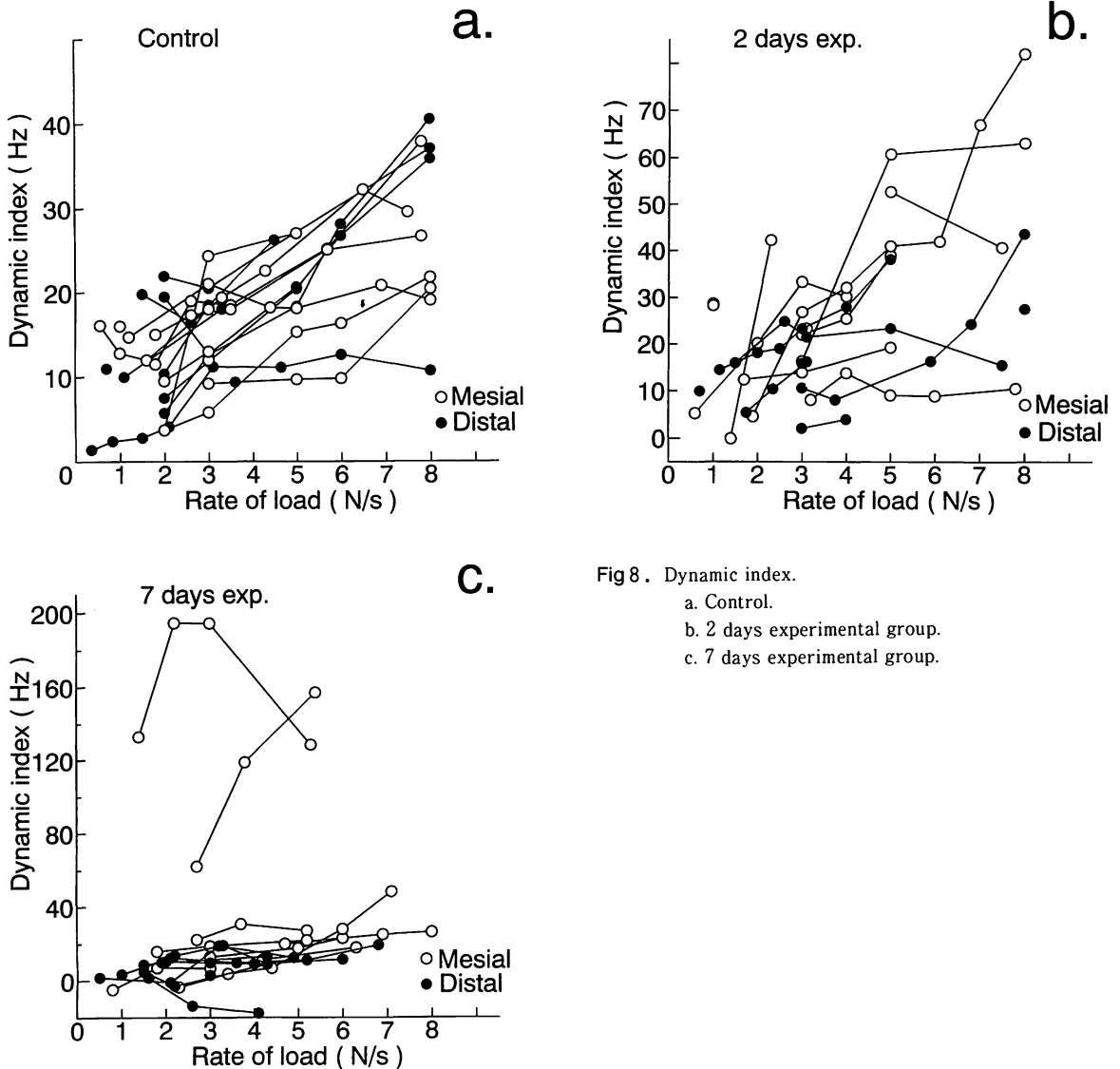


Fig 8. Dynamic index.

- a. Control.
- b. 2 days experimental group.
- c. 7 days experimental group.

考 察

1. 実験方法について

今回の実験では、力刺激を加えた部位を犬歯の臨床的歯頸線の2 mm歯頂側よりとした。これまでの研究では力刺激を加える部位は、犬歯尖頭¹²⁾、尖頭から1 mm歯頸側より^{16, 17)}、歯冠の歯頂側3分の1の部位⁶⁾などがある。また、力刺激に対する歯根膜受容器からの応答閾値は0.01 N前後であると報告されている^{3, 6, 12)}。このことから、矯正力の負荷により受容器の応答閾値が低下し、応答閾値が計測限界に近く力刺激による応

答の変化が検出できない危険性が考えられた。そのため、従来より歯の回転中心に近づけた刺激部位を選んで実験を行ったところ、Table. 2に示すような高い閾値が計測された。

一般に、機械受容器の応答特性を測定するためには、歯の変位量を指標にしたほうがよいとされている⁵⁾。しかし、力の大きさが100 g以下であれば歯の変位は歯根膜の粘弾性の範囲内であるとされており²⁶⁾、歯の変位量と力の大きさは比例関係にあると考えられる。今回の力刺激の最大荷重は0.80 N (約78gf) で粘弾性の範囲内にいることから、力を閾値の指標とすること

にした。ただし、根未完成の成長期のネコは回転中心の位置が変わるため、また年をとった成ネコは歯根膜の粘弾性に変化がみられるため、それぞれ力と変位量の比例関係に影響を及ぼすとされている⁵⁾ことから、実験対象には若い成ネコを選択した。

矯正力を負荷する期間の選択にあたっては矯正力に対する触圧覚の反応に関し臨床的報告が見あたらないため、痛覚を基準に選択した。すなわち患者の痛覚閾値が最低となるとされている矯正力負荷2日後¹⁾と、感覚閾値が回復に向かうとされる矯正力負荷7日後²⁷⁾の2時点を選択した。

2. 受容器の応答様式と方向特性について

今回の実験では、Fig. 3～5に示すように、速順応性 (on type, off type, on-off type)、遅順応性 (自発放電型を含む) の2種類の応答が記録された。特に、遅順応性の応答が59ユニット中54ユニットで92%と圧倒的に多かった。この原因は、力刺激の作用点にあると考えられる。つまり、歯根の回転中心から力刺激の作用点までの距離を従来の研究より短くしたことにより、歯の変位を生じさせるのにより強い力が必要となったために、通常数10グラムと遅順応性よりも閾値が高いとされている速順応性の応答閾値¹⁸⁾がさらに高くなり、相対的に遅順応性の応答頻度が多くなったと推測される。

遅順応性の応答の中には、Fig. 5に示すような自発放電型も記録された。また、54ユニットの遅順応性の応答には含まれていないが、自発放電型の特殊な型として、鈴木がネコで報告した²⁸⁾加圧により自発放電が抑制された型が、今回1ユニット記録された (Fig. 9)。

Cash and Linden⁸⁾は、力刺激に対して歯根膜の牽引

側に存在する受容器が応答していると報告した。しかし、Loescher and Robinson¹⁶⁾は、最大に受容器が応答する方向の範囲はかなりの幅があり、必ずしも牽引側に存在する受容器のみが応答しているのではないとしている。今回の実験でも、Table. 1に示したように頰側方向で最大に応答し、近心や遠心方向でも応答を記録できたものが多数みられた。この現象は、歯根膜線維の走行様式が一様ではなく、さまざまな方向を向いているためであり、少なくとも神経線維の応答時に受容器には圧迫よりも牽引に近い刺激が加わっていると考えられる。

3. 潜時について

遅順応性の応答開始までの潜時を測定した結果 (Fig. 6-a, b) から、加圧速度に反比例して潜時は減少していた。Hannam⁶⁾と藤田¹⁰⁾は速順応性の応答の潜時が、岩崎¹¹⁾は遅順応性の潜時がそれぞれ、加圧速度が増すと短くなるとしており、今回の遅順応性の応答でも同様の結果が確認できた。また藤田¹⁰⁾は、遅順応性の応答の潜時は短く測定がむずかしいとしているが、今回の実験では波形をデジタル化し拡大することにより約半数において短時間の潜時を求めることができた。計測できた範囲内において対照群、2日間実験群、7日間実験群の間に差は認められず、矯正力の負荷による潜時の変化は観察されなかった。

4. 応答閾値について

今回の実験では、近心方向に力刺激を加えた場合、2日間、7日間実験群ともに有意に応答閾値の上昇が認められた。それに対し、遠心方向へ力刺激を加えた際の実験群の応答閾値は、対照群との間に差は認められなかった。受容器が伸展受容器であること、受容器



Fig 9. A special type of spontaneous response.

Force stimulation decreased the frequency of the unit.

が根尖側3分の1に密に分布していることを考慮すると、これは矯正力により歯根膜の圧迫側に存在する受容器の応答閾値が上昇したことを意味する。本実験と類似した神経生理学的研究としては Loescher et.al.¹⁷⁾の研究のみがあげられる。彼らは、3日間と12週間の矯正力を加えた後に歯根膜受容器の応答閾値の測定を行った。その結果、3日間群では0.25N/sの加圧速度で、12週間群ではすべての加圧速度で有意に閾値が上昇したと報告しており、矯正力の負荷により受容器の応答閾値が上昇したという点では今回の研究結果と一致している。しかし、彼らの実験では応答閾値の測定を最大応答方向で行っており、今回の結果と直接は比較できない。

矯正力の負荷による受容器の応答閾値の上昇の要因には、①受容器の直接的な損傷、②コラーゲン線維の走行の変化の2つが考えられている¹⁷⁾。

第一にあげた受容器の直接的な損傷の根拠としては、応答様式の変化が神経線維の損傷後のもの¹⁴⁾と類似していること、矯正力により神経線維の変性所見が認められていること²⁹⁾の2点があげられる。しかし、根拠とした実験には長期間矯正力を負荷したのものも含まれており、また引用されている組織学的研究では、通常の矯正力によるものよりもさらに強い矯正力が用いられていることから、そのまま矯正力負荷初期の組織変化を想定することは難しい。しかも、金子²⁵⁾は、矯正力を加えた際の圧迫側の歯根膜の様相を3次元的に観察して報告し、圧迫帯の分布は歯頸部に比べ根尖部では狭い範囲であるとしている。今回の実験結果では、近心方向以外の方向特性を持つ受容器においても、近心方向に力刺激を加えた場合の応答閾値が上昇していた。これらのことを考え合わせると、受容器の直接的な損傷のみが原因と考えるのには無理がある。

第二のコラーゲン線維の走行の変化については、Kannari et al.³⁰⁾が電子顕微鏡での観察により、ルフィニ神経終末とコラーゲン線維との接続を確認しており、歯根膜受容器はコラーゲン線維と密接に絡み合い機械受容複合体 (mechanoreceptive complex) を形成していることを示した。高橋³¹⁾は、歯根膜の圧迫帯の周辺部にあるコラーゲン線維の蛇行は矯正力負荷6時間後すでに観察され、歯根膜細胞の核に変形が認められたと報告している。今回の研究では、さまざまな方向特性を持つ受容器のすべてが近心方向の力刺激にのみ応答閾値が上昇し、遠心方向に力刺激を加えた場合では

対照群と同じ値を示した。これらの所見を総合して考えると、機械受容複合体のコラーゲン線維が矯正力によって圧迫され、またはコラーゲン線維が弛緩し、機械受容複合体に機能的な変化が起こり遅順応性の応答閾値に上昇が起こったものと推察される。

また、遠心方向に力刺激を加えた場合には応答閾値に変化は認められなかった。つまり、矯正力によりコラーゲン線維が牽引された場合には、機械受容複合体は機能的な変化は受けにくくその環境に適応しやすいことが推察される。

5. dynamic index について

dynamic index は Jansen and Matthews³²⁾ が muscle spindle において、刺激速度に対する動的応答性を調べるために考案した dynamic response というパラメータを、Hannam⁶⁾ が改変し歯根膜受容器の応答に応用するため定義したパラメータである。dynamic index は加圧初期の放電頻度と2秒後の放電頻度の差で表され、高い値を示すほど受容器の順応が速い。今回得られた対照群の dynamic index は、最大加圧速度の8.0N/sでは40Hz以下であり、Hannam⁶⁾ が犬の犬歯で得た値や藤田¹⁰⁾ が人で得た値に近似していた。

矯正力を負荷した2日間実験群 (Fig. 8-b) では、遠心方向への力刺激では対照群 (Fig. 8-a) との間には差はみられなかったが、近心方向への力刺激では dynamic index が上昇していた。矯正力の負荷による応答閾値の上昇とあわせて考えると、近心根尖部の歯根膜受容器に矯正力負荷後2日目ですでに機能的な変化が起こっていることが推察される。

これに対し、7日間実験群 (Fig. 8-c) の近心方向への力刺激では、dynamic index は10ユニット中8ユニットは対照群と同様の値を示していたが、2ユニットが著しく高い値を示していた。このような100Hzを越える dynamic index は他の2群には観察されなかった。この2つの受容器の方向特性は、近心または近心舌側方向であった。この方向特性は、受容器が圧迫側に位置していたことを示す。金子²⁵⁾によれば、根尖側では強い圧迫帯が一部に限局して現れたとしている。そのため近心、近心舌側に位置する神経終末の一部が圧迫帯内に位置していたために圧迫により直接的損傷を受けたことにより、あるいは機械受容複合体のコラーゲン線維が器質的な変化を受けたことにより、高い値の dynamic index が出現したものと推察される。

7日間実験群 (Fig. 8-c) の遠心方向への力刺激

では、対照群よりも低い dynamic index を示していた。これは、Loescher et al.¹⁷⁾の矯正力負荷12週間後の受容器の dynamic index が低下したという報告と一致していた。

2日間実験群と7日間実験群を総合すると、2日間実験群の近心方向への力刺激において dynamic index は一時的に対照群よりも上昇していたのに対し、7日間実験群においては特殊な2例を除きふたたび対照群と同じか、または、やや小さな値をとった。つまり dynamic index で表される応答特性は、応答閾値に比較して時間的変化が大きく、より環境への適合性が高い応答特性であることが考えられる。

6. 侵害受容と感覚中枢との関連について

今回の実験で主に解析した遅順応性の応答はルフィニ神経終末で受容され、太いA β 線維によって伝達されるのに対し、自由神経終末では侵害刺激が感受され、比較的細いA δ 線維とC線維によって伝達される³³⁻³⁶⁾。

神経生理学的に太い感覚神経と細い感覚神経との関係による痛覚の変調作用を説明するものとしてゲートコントロール説^{37, 38)}がある。この説により、矯正力の負荷による歯根膜機械受容器の閾値の上昇と痛覚閾値の低下との関連について考察を加えると以下のようになる。低い閾値の太い神経線維は機械刺激を感受するが、侵害刺激のレベルに達しても周波数を増やしながらか応答を続けており、この応答は、三叉神経核の細胞が侵害刺激を伝達する場合に抑制を加える。しかし、矯正力を負荷した場合には、太い神経線維によって伝達される機械受容器の応答閾値が上昇するために、侵害刺激情報を伝える神経線維に対する抑制が行われず、結果的に痛覚を感受する侵害受容の閾値が低下することになる。つまり、機械受容の応答閾値の上昇は、臨床的な痛覚閾値の低下を引き起こしていると考えることができる。

しかし現在までのところ、歯の触圧覚についての臨床的報告は見あたらないため、矯正力負荷後に認識されるさまざまな感覚情報が、末梢神経から記録された応答と生理学的にどのように関連しているかの実証的所見は、今後の研究を待たなければならない。

結 論

矯正力の負荷による歯根膜受容器の応答の変化を観察するためにネコの下顎犬歯に2日間および7日間、遠心方向に100 gの矯正力を負荷後、下歯槽神経から

機能的単一神経線維の応答を記録し、電気生理学的に検討した結果、以下の結論を得た。

1. 速順応性 (on type, off type, on-off type) 5ユニット、遅順応性 (自発放電型を含む) 54ユニットの受容器の応答が検出され、遅順応性の応答が92%と多かったため、この受容器の特性について詳しく検討した。
2. 応答開始までの潜時は、加圧速度が増加するに従い、短くなった。実験群と対照群との間に差は認められなかった。
3. 最大に応答する方向特性について検討したところ、検討した方向にはほぼ均等に分布していた。対照群、実験群間に差は認められなかった。
4. 矯正力負荷による遅順応性の応答閾値の変化を検討したところ、近心方向に力刺激を加えた場合には、2日間、7日間実験群とも有意に上昇したが、遠心方向へ力刺激を加えた場合では両群とも変化は認められなかった。
5. dynamic index について検討したところ、近心方向への力刺激では、対照群より2日間実験群のほうがやや高い値を示したが、遠心方向への力刺激では、対照群と2日間実験群との間に差は認められなかった。
- 7日間実験群の近心方向への力刺激では、ほぼ対照群と一致していたが、非常に高い値を示したものが2ユニット観察された。また遠心方向への力刺激では、対照群よりもやや低い値を示していた。
6. これらの結果から、2日間、7日間の矯正力負荷により、圧迫側に位置する機械受容器の特性が特に変化していることが示され、感覚認識との関連が推察された。

謝 辞

稿を終えるにあたり、終始、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、ならびにご指導、ご教示を賜りました北海道大学歯学部口腔生理学講座亀田和夫教授に深く感謝いたします。また、多大なるご助言、ご示唆をいただきました北海道大学歯学部歯科矯正学講座今井徹助教授、北海道大学歯学部口腔生理学講座鎌田勉助手に心から感謝いたします。さらに本研究の遂行に際し種々のご援助をいただきました歯科矯正学講座の教職員各位に心から感謝いたします。

また本論文は北海道大学審査学位論文であり、その一部は The Osaka International Oral Physiology Sym-

posium 1994 on Brain and Oral Function (平成 6 年 9 月) において発表した。

文 献

- 1) Soltis, J. E., Nakfoor, P.R. and Bowman, D. C.: Changes in ability of patients to differentiate intensity of forces applied to maxillary central incisors during orthodontic treatment. *J. Dent. Res.*, **50** : 590-596, 1971.
- 2) 坂本敏彦, 坂本朝: 唇側線の装着によって生じる歯の痛みについて. *日矯歯誌*, **48** : 59-65, 1989.
- 3) Pfaffmann, C.: Afferent impulses from the teeth due to pressure and noxious stimulation. *J. Physiol.*, **97** : 207-219, 1939.
- 4) Pfaffmann, C.: Afferent impulses from the teeth resulting from a vibratory stimulus. *J. Physiol.*, **97** : 220-232, 1939.
- 5) 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.
- 6) Hannam, A. G.: The response of periodontal mechanoreceptors in the dog to controlled loading of the teeth. *Archs. oral Biol.*, **14** : 781-791, 1969.
- 7) Hannam, A. G.: Spontaneous activity in dental mechanosensitive units in the dog. *Archs. oral Biol.*, **14** : 793-802, 1969.
- 8) Cash, R. M. and Linden, R. W. A.: The distribution of mechanoreceptors in the periodontal ligament of the mandibular canine tooth of the cat. *J. Physiol.*, **330** : 439-447, 1982.
- 9) Linden, R. W. A.: The relationship between adaptation rate and location of periodontal mechanoreceptors in the cat canine tooth. *J. Physiol.*, **345** : 20, 1983.
- 10) 藤田幸弘: ヒト歯根膜単一感覚単位の力に対する応答特性. *口病誌*, **54** : 52-67, 1987.
- 11) 岩崎友昭: ラット歯根膜の機械的受容器に関する神経生理学的研究. *岐歯学誌*, **14** : 1-15, 1987.
- 12) Linden, R. W. A. and Millar, B. J.: The response characteristics of mechanoreceptors related to their position in the cat canine periodontal ligament. *Archs. oral Biol.*, **33** : 51-56, 1988.
- 13) Millar, B. J., Halata, Z. and Linden, R. W. A.: The structure of physiologically located periodontal ligament mechanoreceptors of the cat canine tooth. *J. Anat.*, **167** : 117-127, 1989.
- 14) Loescher, A. R. and Robinson, P. P.: Properties of reinnervated periodontal mechanoreceptors after inferior alveolar nerve injuries in cats. *J. Neurophysiol.* **62** : 979-983, 1989.
- 15) Linden, R. W. A. and Scott, B. J. J.: Distribution of Mesencephalic nucleus and trigeminal ganglion mechanoreceptors in the periodontal ligament of the cat. *J. Physiol.*, **410** : 35-44, 1989.
- 16) Loescher, A. R. and Robinson, P. P.: Receptor characteristics of periodontal mechanosensitive units supplying the cat's lower canine. *J. Neurophysiol.*, **62** : 971-983, 1989.
- 17) Loescher, A. R., Al-Emran, S., Sullivan, P. G. and Robinson, P. P.: Characteristics of periodontal mechanoreceptors supplying cat canine teeth which have sustained orthodontic forces. *Archs. oral Biol.*, **38** : 663-669, 1993.
- 18) Linden, R. W. A.: Periodontal mehanoreceptors and their functions. edited by Taylor, A., *Neurophysiology of the jaws and teeth*, 52-95, The Macmillan Press, London, 1990.
- 19) Mei, N., Hartmann, F. and Aubert, M.: Periodontal mechanoreceptors involved in pain. edited by Anderson, D. J. and Matthews, B., *Pain in the trigeminal region*, 103-110, Elsevier/North-Holland Biomedical Press, Amsterdam, 1977.
- 20) Byers, M. R. and Dong, W. K.: Comparison of trigeminal receptor location and structure in the periodontal ligament of different types of teeth from the rat, cat, and monkey. *J. Comp. Neurol.*, **279** : 117-127, 1989.
- 21) Maeda, T., Kannari, K., Sato, O. and Iwanaga, T.: Nerve terminals in human periodontal ligament as demonstrated by immunohistochemistry for neurofilament protein (NFP) and S-100 protein. *Arch. Histol. Cytol.*, **53** : 259-265, 1990.
- 22) Maeda, T.: Sensory innervation of the periodontal ligament in the incisor and molar of the monkey. *Macaca fuscata*: An immunohistochemical study for neurofilament protein and glia-specific S-100 protein. *Arch. Histol. Jap.*, **50** : 437-454, 1987.

- 23) Kannari, K.: Sensory receptors in the periodontal ligament of hamster incisors with special reference to the distribution, ultrastructure and three-dimensional reconstruction of Ruffini endings. *Arch. Histol. Cytol.*, **53** : 559-573, 1990.
- 24) 前田健康, 佐藤修, 高野吉郎: 歯根膜感覚受容器と歯の働き. 歯界展望別冊, 生理的咬合へのアプローチ, 29-42, 医歯薬出版, 東京, 1992.
- 25) 金子知生: 歯に矯正力を加えた際の圧迫側歯周組織の三次元的様相について. 歯基礎誌, **36** : 170-186, 1994.
- 26) 倉島晃一: 歯周組織の力学的性状に関する研究. 口病誌, **30** : 361-385, 1963.
- 27) Yamasaki, K., Shibata, Y., Shibasaki, Y. and Fukuhara, T.: The nature of pain reaction associated with orthodontic tooth movement. 日矯歯誌, **44** : 332-338, 1985.
- 28) 鈴木寿: 各種 mechanoreceptor (periodontal membrane) の vibratory stimulus にたいする応答について. 日本生理誌, **25** : 415-441, 1963.
- 29) 大竹正人: 実験的歯牙移動時における歯根膜神経線維の反応について. 日矯歯誌, **41** : 71-91, 1982.
- 30) Kannari, K., Sato, O., Meda, T., Iwanaga, T. and Fujita, T.: A possible mechanism of mechanoreception in Ruffini endings in the periodontal ligament of hamster incisors. *J. Comp. Neurol.*, **313** : 368-376, 1991.
- 31) 高橋直行: 歯に矯正力を加えた際の圧迫側歯根膜の微細構造に関する研究 — 無細胞帯の発現機構について —. 北海道歯誌, **15** : 108-128, 1994.
- 32) Jansen, J. K. S. and Matthews, P. B. C.: The central control of the dynamic response of muscle spindle receptors. *J. Physiol.*, **161** : 357-378, 1962.
- 33) 横田敏勝, 小山なつ, 西川望, 梅原秀樹: 三叉神経系における痛みの生理. 麻酔, **33** : 1056-1063, 1984.
- 34) 横田敏勝: 口腔および顔面痛の生理学. 歯科ジャーナル, **23** : 315-324, 1986.
- 35) 青木藩: 体性感覚 I. 触・圧覚, 田崎京二, 小川哲朗編, 新生理科学体系 第9巻 感覚の生理学, 290-308, 医学書院, 東京, 1989.
- 36) 横田敏勝: 体性感覚 III. 痛覚, 田崎京二, 小川哲朗編, 新生理科学体系 第9巻 感覚の生理学, 320-332, 医学書院, 東京, 1989.
- 37) Melzack, R. and Wall, P. D.: Pain mechanisms: A new theory. *Science*, **150** : 971-979, 1965.
- 38) Wall, P. D.: The gate control theory of pain mechanisms. *Brain*, **101** : 1-18, 1978.

ORIGINAL

Responses of periodontal mechanoreceptors before and after loading the orthodontic force

Keiichiro Okazaki

ABSTRACT : Effects of orthodontic tooth movement on the periodontal mechanoreceptors were investigated. A distal orthodontic force of 100 g was applied to mandibular canines of the cat for 2 (2 days exp. group) or 7 days (7 days exp. group) using a closed coil spring. At the end of these periods, the alveolar nerve was exposed, cut centrally, and dissected to form a functional single fiber for the physiological experiment. Unitary discharges from the single fiber were recorded using a single platinum electrode. The canine was stimulated toward the mesial and distal directions with stimulative forces from 0.01 N to 0.80 N.

As majority of responses were from slowly adapting units, these units were further investigated. No significant changes in the latency of responses and in the distribution of maximum sensitivities of receptors were observed between experimental groups and the control. When teeth were stimulated mesially, significant increases in thresholds were observed both in the 2 days exp. group and in the 7 days exp. group, compared with the control group. Thresholds did not change significantly with distal stimulation of the experimental groups and the control. Dynamic indexes increased slightly with mesial stimulation of the 2 days exp. group, and decreased slightly with distal stimulation of the 7 days exp. group. Extremely high index values of 2 units were observed with the mesial stimulation of the 7 days exp. group. The directions of maximum sensitivity of these two units were mesial and mesiolingual.

These results suggest that the characteristic changes of the periodontal mechanoreceptors by the orthodontic tooth movement took place especially at the receptor located in the orthodontical pressure side, and these characteristic changes may involve an alteration of collagen fibers in the mechanoreceptive complex.

Key words : Periodontal mechanoreceptor, Tooth movement, Slowly adapting unit, Threshold, Dynamic index

Division of Clinical Dentistry (Department of Orthodontics), Graduate School of Dentistry, Hokkaido University, Nishi 7, Kita 13, Kita-ku, Sapporo 060, Japan

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

Director : Prof. Kazuo Kameda (Department of Oral Physiology, School of Dentistry, Hokkaido University)

[Received : September 13, 1994]