原 著

ヒト歯根膜単一感覚単位の力に対する応答特性

藤 田 幸 弘

東京医科歯科大学歯学部歯科矯正学第 1 講座（指導：三浦不二夫教授）

（1987 年 9 月 8 日 受付）

Response Properties of Single Sensory Units Innervating Human
Periodontal Ligament to Force Stimuli

Yukihiro Fujita

1st Department of Orthodontics, Faculty of Dentistry, Tokyo Medical and Dental University

(Chief : Prof. Fujio Miura)

For the purpose of investigating the response patterns of single sensory units innervating the human periodontal ligament to the mechanical stimulation of the lower incisor tooth, the recordings of nineteen single sensory units were made from the mental foramen of five adult subjects by the method of microneurography and the response patterns were analysed.

The findings obtained were as follows: (1) According to the characteristics of their adaptation, the response patterns of the unit to the different forces from five directions were classified as Slowly Adapting, Fast Adapting-on, Fast Adapting-off, Fast Adapting-on/off and Intermediate Adapting Type. (2) The order of the threshold value among the different response patterns was: Slowly Adapting Type < Intermediate Adapting Type < Fast Adapting Type. (3) Increasing the application rate of the stimuli, the latency of their responses became short in the response pattern of the Fast Adapting Type. (4) Increasing the application rate of the stimuli, the dynamic index increased in the response pattern of the Slowly Adapting Type.

These results suggest that the various patterns of the impulses generated by the nerve fibers innervating the periodontal ligament may cause a periodontal-somatic sensation.

I. 緒 言

歯に力を加えた際、歯根膜を支配する機械受容器から、いかなる神経情報が中枢に伝達されるかを把握することは、歯科矯正学においても重要な課題である。

この点に関して、従来、イヌ¹⁻³⁾、ネコ⁴⁻¹¹⁾、ウサギ¹²⁾などの実験動物を対象として、歯に力を加えた際の歯根膜単一感覚単位の応答の順応性、発火閾値、刺激方向による応答の変化、刺激速度に対する応答などが電気生理学的に調べられてき

た。

一方、ヒトを対象として、その体性感覚情報処理の末梢性神経機序を感覚単位の面から詳細に検討することが、Hagbarth と Vallbo による microneurography 法の開発^{13,14)} 以来、可能になった。その後、この方法を用いて多くの研究者により、四肢における皮膚、筋および関節の体性感覚に関して、生理学的特性が詳細に調べられてきた¹⁵⁻²¹⁾。

しかし、ヒトの口腔領域における体性感覚に関しては、歯根膜あるいは下唇を支配する単一感覚

単位が、皮膚に存在する slowly adapting type II および type I unit²²⁾ に類似していたこと、ならびに複合活動電位が歯に加えた力の方向に依存するという報告²³⁾があるのみであり、力に対する歯根膜単一感覚単位の精細な生理学的特性については明らかにされていない。

そこで、本研究では、ヒトを対象とし、歯に力を加えた際の歯根膜単一感覚単位の応答様式を把握し、その生理学的特性を明らかにすることを目的として microneurography 法^{24~26)}を用いて歯根膜単一感覚単位の活動電位を導出し、力の方向およびその速度に対する応答様式について解析を行った。

II. 研究方法

健全な歯周組織を有する成人男子5名(年齢22~29歳, 平均24.4歳)を被験者とし、下顎前歯に力を加えた際の歯根膜単一感覚単位活動を microneurography 法により、以下のように記録し、その応答様式を解析した。

1. 電極刺入部位ならびに記録電極

下歯槽神経は、下顎骨中を走向するため、電極刺入部位は下顎孔とオトガイ孔の両者が考えられる。本研究においては、電極刺入部位として右側オトガイ孔を選択し、下顎前歯歯根膜に分布する下歯槽神経の活動電位を記録することとした(考察参照 p. 683)。

記録電極としては、タングステン微小電極(米国 Federick Haer 社製: metal microelectrode, Type 25-10-1)を用いた。この電極は、長さ80 mm, 直径約 0.25 mm, 先端径約 0.5 μ m, 先端角度約23度, 先端抵抗 9~12 M Ω (1 KHz にて測定)であった。これを、皮膚上からオトガイ孔に刺入し、可及的に電極が動揺しないようにリード線の部分を右側頬部皮膚上にサージカル・テープ(住友3M社製: Transpore)で固定した。不関電極としては、直径10mmの皿電極(日本電気三栄社製: 生体計測用銀塩化銀皿電極)を用い、電極糊(日本光電社製: カルディオクリーム)を介して記録電極近傍に貼布した。

図1 実験方法

A: 下歯槽神経から導出した活動電位。電極刺入部位は右側オトガイ孔 (Mental foramen)
B: 歯に加えた力

2. 単一感覚単位の活動電位の導出

まず、検者が触診によりオトガイ孔の位置を皮膚上から推定し、同部位に印をつけた。次に、その後方約5 mm, 上方約5 mmの点より電極を刺入し、先の印に向かい前下内方に電極を進めた。電極を進めるにあたっては、内径2 mmの鍼治療用の導管を用いた。オトガイ孔入口に電極先端が達したことを検者が手指の感覚により確認した後、歯に力を加えて活動電位が記録されるまで、孔壁に沿わせ、さらに電極を進めた。この際、活動電位をブラウン管オシロスコープ上で観察し、同時にサウンド・モニターでインパルス音を聴取した。導出された活動電位が、単一感覚単位からの記録であることは、その振幅が不変で、かつ波形が同一であることを確認することにより同定した²⁵⁾。

なお、導出された活動電位は前置増幅器〔日本光電社製: RM600AG, 621G (時定数; 0.003秒, High-cut; off)〕を介して記録した。

3. 刺激方法

力を加える部位は切端と歯頸部のほぼ中央とし、その方向は図2に示す5方向とした。すなわち、唇側からはS₁, S₂, S₃, S₄で示した4方向、そして舌側からはS₅で示した1方向を設定した。刺激方法は、微小荷重変換器(共和電業社製: 120T-1000C)のrod(直径1.3 mm)で、歯にランプ波状の力を検者が手動で加える方法をとった。この際、力の大きさとその速さ〔以下、刺激速

図2 歯に加える力の方

度 (rate of force) とよぶ] をオシロスコープ上でモニターし、視覚的にフィードバックしながら操作した。微小荷重変換器は動ひずみ測定器 (共和電業社製: DPM-611A) に接続し、歯根膜単一感覚単位の活動電位と合わせ、データレコーダ (TEAC 社製: R-260) により、磁気テープ (TEAC 社製: DT-350) に記録した。

4. データ解析

磁気テープに記録されたデータをビジュグラフ (三栄測器社製: 5 L42) に書き出し、以下の2

つの方法で解析した。

1) $S_1 \sim S_5$ の5方向からの刺激に対する歯根膜単一感覚単位の順応様式、ならびに発火閾値 (threshold) について解析した。

2) 歯に加える刺激速度を変化させた際の歯根膜単一感覚単位の応答に関して、その latency, ならびに dynamic index をパラメーターとして定量的な解析を行った¹⁾。刺激速度は、書き出したデータから近似直線を求め、その傾きから決定した。

なお、1回の記録において、複数の単一感覚単位の活動電位が記録された場合には、それぞれの単一感覚単位について解析を行った。

III. 研究結果

1. 歯根膜単一感覚単位活動の記録

電極をオトガイ孔入口に刺入し、さらに孔壁に沿わせ 10 mm 程度進めた際、下顎前歯に力を加えると、これに応答する振幅が不変で、波形が同一である活動電位が記録された。この際、被験者はその下顎前歯部に paresthesia¹⁴⁾ を訴えた。以上のことから、記録された活動電位は歯根膜を支配

図3 遅順応型の応答パターン例

(S_2 方向から下顎右側中切歯を刺激した際の unit 1 の応答、刺激の時間は12秒間)

- A: 歯根膜単一感覚単位の活動電位
 - B: 歯に加えた力
 - C, D: 速い掃引速度での A, B のトレース
 - E: 歯に加える力の方
- ただし、A ~ E は図 4, 5 に共通

する単一感覚単位の活動電位であると判断した。
記録した歯根膜単一感覚単位は、計19個であった。

2. 歯根膜単一感覚単位の刺激方向による応答

1) 応答パターン

力を加える方向を $S_1 \sim S_5$ と変化させると、それぞれ異なる単一感覚単位の応答パターンが観察された。その典型的な一例を図3～5に示す。

なわち、この例では下顎右側中切歯に力を加えた際に、記録されたもので、その単一感覚単位の活動電位は、時間軸を拡大掘引すると、頂点間振幅約 $500 \mu V$ 、持続時間約 2.5 ms 、かつその波形は陽性—陰性—陽性の振れからなる3相性のものである(図3～5のC)。

まず、 S_2 の方向で力を加えると、刺激中持続した発火が観察された(図3)。本研究では、このよ

図4 速順応型の応答パターンの例

(S_4, S_5, S_1 方向から下顎右側中切歯を刺激した際の unit 1 の応答)

- 1 : 刺激開始時に数発の発火がみられる速順応型 on Type
- 2 : 刺激終了後に数発の発火がみられる速順応型 off Type
- 3 : 刺激開始時、終了後に数発の発火がみられる速順応型 on/off Type

図5 中間型の応答パターンの例
(S_3 方向から下顎右側中切歯を刺激した際の unit 1 の応答)

うに 5 秒以上発火が持続する応答パターンを遅順応型 (Slowly Adapting Type; 以下 SA Type とする) として扱うこととした。なお本例においては、歯への刺激終了後も約 1.5 秒間、発火の持続が観察された。

次に、 S_4 の方向で刺激すると、刺激の dynamic phase において、4 発のインパルスの発射が観察された (図 4-1)。このように、刺激の dynamic phase で、数発の発火がみられる応答パターンを速順応型 on Type (Fast Adapting on Type; 以下 FA on Type とする) とした。

また、 S_5 の方向で刺激すると、刺激開始時にはインパルスの発射はみられず、刺激終了後に 6 発のインパルスの発射がみられた (図 4-2)。このように、刺激終了後に数発の発火がみられる応答パターンを速順応型 off Type (Fast Adapting off Type; 以下 FA off Type とする) とした。

さらに、 S_1 の方向で刺激すると、刺激開始時、刺激終了後それぞれ 2 発、4 発のインパルスの発射が観察された (図 4-3)。このように、刺激開始時と終了後に数発のインパルスの発射がみられる応答パターンを速順応型 on/off Type (Fast Adapting on/off Type; 以下 FA on/off Type とする) とした。

一方、 S_3 の方向で刺激すると、約 2 秒間発火頻度の不規則な発火が持続する応答パターンが観察

された (図 5)。順応時間が遅順応型と速順応型の中間であることから、この応答パターンを中間型 (Intermediate Type; 以下 IM Type とする) とした。なお、本例においては、刺激開始時のみならず刺激終了後にも再び発火している。

以上 $S_1 \sim S_5$ 、それぞれの方向の刺激において観察された応答パターンを、19 個の歯根膜単一感覚単位についてまとめてみると、表 1 のようになる。

刺激方向を変化させると、unit 1, 3, 4, 6, 7, 9, 11, 15, 17, 18, 19 においては、SA, FA, IM Type の応答パターンが出現した。また、unit 12, 14 においては、SA, IM Type が、unit 5, 8 においては、SA, FA Type が、unit 16 においては、FA, IM Type の応答パターンが、それぞれ、刺激方向の変化に従い出現した。以上の歯根膜単一感覚単位の応答について、次のような共通した所見が知られる。すなわち、順応時間の長い応答パターンを示した刺激方向から刺激を加える方向がずれるに従い、それより得られる応答パターンはより短い順応時間を示すことである。

一方、unit 2, 10, 13 のように FA Type の応答パターンのみを示すものも存在した。しかも、unit 10 では、1 方向の刺激にしか応答を示さなかった。

なお、図 3 ~ 5 に示した歯根膜単一感覚単位

表1 刺激方向による歯根膜単一感覚単位の応答パターンの変化
(5名の被験者より記録された19個の単一感覚単位について)

subject	unit	direction of force					tooth
		S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	
[REDACTED]	1	FA _{on/off}	SA	IM	FA _{on}	FA _{off}	11
	2	FA _{on/off}	FA _{on}	FA _{on}	FA _{off}	—	11
	3	IM	SA	IM	FA _{on}	FA _{on/off}	11
	4	SA	IM	FA _{on/off}	—	—	11
	5	FA _{off}	FA _{on/off}	FA _{on}	SA	FA _{on/off}	11
	6	FA _{off}	SA	IM	FA _{on/off}	—	11
	7	FA _{off}	FA _{on/off}	SA	IM	FA _{off}	11
	8	—	FA _{off}	FA _{off}	SA	—	21
	9	IM	—	FA _{off}	IM	SA	11
	10	—	—	FA _{on/off}	—	—	11
	11	—	FA _{off}	IM	SA	—	21
	12	—	—	—	IM	SA	11
	13	—	—	FA _{off}	FA _{on/off}	—	21
	14	—	—	IM	SA	—	21
	15	—	SA	IM	FA _{on}	FA _{off}	21
	16	FA _{on/off}	—	—	FA _{off}	IM	21
	17	—	SA	SA	IM	FA _{on/off}	21
	18	SA	SA	FA _{on}	FA _{on/off}	IM	21
	19	FA _{on}	—	—	IM	SA	21

— : no response FA_{on} : Fast Adapting on Type FA_{on/off} : Fast Adapting on/off Type
SA : Slowly Adapting Type FA_{off} : Fast Adapting off Type IM : Intermediate Type

は、表1において unit 1 としたものである。

2) 応答パターンと発火閾値

発火閾値に関しては、unit 1 の例では、まず、SA Type の応答パターンを示したとき、約 0.01 N であり、次に FA on, FA on/off Type の応答パターンを示したときは両者ほぼ等しく約 0.2 N であり、さらに IM Type の応答パターンを示したときには約 0.14 N であり、応答パターンにより差異がみられた (図 3～5)。

そこで、SA, IM, FA Type の 3 つの応答パターンの出現率 (これを occurrence とする) と発火閾値との関係を検討した。この際、FA on Type, FA on/off Type の応答パターンを示したときの発火閾値については差異が認められなかったため、この両者を FA Type の応答パターンとして扱った。

まず、表1に示す被験者 [REDACTED] より記録された 4 個の単一感覚単位について、上記の関係をみたものが図 6 である。unit 1, 3, 4 については、刺激方向により SA, IM, FA Type の応答パターンが観察され、SA, IM, FA Type の応答パターンを示したときの順に発火閾値が高くなった (図 6-A)。一方、unit 2 は、FA Type の応答パターンのみを示したものであるが、発火閾値の分布範囲は unit 1, 3, 4 における FA Type の応答パターンのそれと同様に比較的高い方に広く分布した。また、4 個の単一感覚単位をまとめたものが、図 6-B である。これからも、SA, IM, FA Type の順に、発火閾値が低い方から高い方へと変化することが確認された。

次いで、残り 4 名の被験者についても、3 つの応答パターンの出現率と発火閾値との関係を検討

図6 歯根膜単一感覚単位の応答パターンと発火閾値(被験者 Ku. H.)

A: 単一感覚単位別にみたもの B: Aの4個の単一感覚単位をまとめたもの
ただし, occurrence: 各応答パターンの出現率, FA Type: 速順応型 on Type と
速順応型 on/off Type を合わせたもの

した結果, SA, IM, FA Type の応答パターンを示したときの順に発火閾値が高くなる傾向が同様にみられた(図7-A~D)。

以上, 被験者5名19単位について総括すると, SA, IM, FA Type の応答パターンを示したときの順に発火閾値が高くなる傾向がみられた(図7-E)。

3. 歯根膜単一感覚単位の刺激速度に対する応答特性

1) latency

単一感覚単位が FA Type の応答パターンを示したとき, 刺激開始から最初のインパルスの発射までの時間を latency とすると, 刺激速度が大き

くなるに従い, latency が短くなることが観察された(図8-A~C)。そこで, 単一感覚単位について latency と刺激速度との関係を定量的に調べたところ, latency は刺激速度の増大に伴い, 減少することが認められた(図8-D)。

なお, SA, IM Type の応答パターンを示したときには latency が短いため, 本検討は行わなかった。

2) dynamic index

単一感覚単位が SA Type の応答パターンを示したとき, 歯に加える刺激の dynamic phase において, 発火頻度が上昇し, 刺激速度に従った応

図7 歯根膜単一感覚単位の応答パターンと発火閾値

A～D: 被験者別にみたもの

E: 被験者5名19個の単一感覚単位についてまとめたもの

答が観察された(図3)。そこで dynamic index を、刺激の dynamic phase における瞬時周波数の最大値から刺激の tonic phase での瞬時周波数の平均値を引いた値とし、この応答性を定量的に調べた。この dynamic index と刺激速度との関係が図9で示される。これより dynamic index は刺激速度の増大に伴い、増大することが認められた。

IV. 考 察

1. 研究方法について

1) 電極刺入部位ならびに記録電極

本研究では、電極刺入部位を下顎孔に定め下歯槽神経から活動電位の導出を行った Johansson と

Olsson の報告²³⁾を参考とし、予備実験として、下顎孔を記録部位としたときと新たにオトガイ孔を記録部位としたときと、いずれが歯根膜単一感覚単位活動の導出に有利かを比較検討した。その結果、(1)電極刺入に際し、下顎孔に比べオトガイ孔の位置の確認が容易であった、(2)後者の場合の方が実験中、被験者の苦痛がより少なかった、(3)後者の方が隣接する運動単位の活動電位の混入が少なかった、(4)前者の場合は開口条件が伴うが、後者の場合は咬合位をはじめいずれの顎位においても記録が可能で、電極の固定もより確実になり、それだけ安定した記録が得られた。

ところで、オトガイ管の走向は真直ぐ外上方へ向かう確率は50%、残り50%は弯曲して走向して

図8 刺激速度と latency

5 個の歯根膜単一感覚単位において、速順応型の応答パターンを示したとき、刺激速度が増大すると latency が減少する傾向がみられた

いる可能性がある」と報告²⁷⁾されている。したがって、このように走向が複雑なオトガイ管に電極を刺入し、さらに電極を進めるにあたっては、被験者の痛み、神経あるいは血管の損傷といった可能性が問題となる。しかし、まず被験者の痛みに関しては、電極の操作が適切に行われた際には、特に問題とはならなかった。また、神経あるいは血管の損傷の可能性に関しては、被験者 5 名について約 70 回本法を行ったが、軽度の出血を除けば、問題となるような神経および血管の損傷は 1 例も発症しなかった。

一方、電極の選択にあたっては、以下の要件があげられた。すなわち、(1)すでに述べたように被験者に苦痛が少なく、神経ならびに血管の損傷も少ないものであること、(2)機械的強度が大きいものであること、(3)分極電圧が生じにくいこと、(4) S/N 比がよいこと、(5)隣接ニューロンとの分離が

よいこと、(6) sampling bias のない記録がとれることなどである。(1)、(2)の要件を満足させるため直径は可及的に細く、その素材はタングステンとし、先端角度の大きいものを選択した。また、実際にこの種の電極を使用することにより、(3)～(6)の要件を満足するものであることを確認した。

2) 導出された歯根膜単一感覚単位の同定

先に述べたように、導出された感覚単位が歯根膜を支配するものであるか否かは、歯に力を加え、その際に応答がみられるか否かで確認したが、その確認は比較的容易であった。

また、単一感覚単位からの記録であることは、刺激強度にかかわらず、その振幅が不変でかつ波形が同一であることを確認することで同定を行った。ただし、同じ振幅を有する複数の単一感覚単位の活動電位を同時に記録する可能性があるので、本結果における FA on/off Type の応答は、

図9 刺激速度と dynamic index

6個の歯根膜単一感覚単位において、遅順応型の応答パターンを示したとき、刺激速度の増大に伴い dynamic index の増大がみられた

FA on Type と FA off Type の応答を示す単一感覚単位の活動電位を同時に記録した可能性が考えられる。事実、表1に示すように19個の歯根膜単一感覚単位の記録中12個に FA on/off Type の応答がみられた。この現象に関しては、電極先端が類似した直径を有する2本の神経線維からほぼ等距離におかれ、かつその2本の神経線維が同一方向の刺激に対して、それぞれ FA on Type, FA off Type の応答を示すものであるならば、それら両者が同時に記録されたと想定される。しかし、本結果において、FA on/off Type の応答パターンとした記録が、このような状態でなされたか否かの判定は困難であると考えられた。そこで、本研究においては、FA on/off Type の応答を1個の単一感覚単位から記録されたものと考

え、FA on Type, FA off Type の応答とは別な応答パターンとして分類した。

また、SA Type, IM Type の応答パターンを示した際、刺激停止後に発火が観察されたが、これに関しても、前者と同じく判定困難という理由から、1個の単一感覚単位に生じた応答とした(図3, 5)。

3) 刺激のパラメーター

歯根膜単一感覚単位の応答特性に関する研究において、刺激のパラメーターとして歯に加える力^{1,2,4-12,23}と歯の変位^{3,5,9}のどちらを用いたかは、研究者により異なっている。

本研究においては、力の測定は、歯の変位の測定のように基準点を設定する必要がなく、また容易に力の方向を変えることができ、微小荷重変

換器の rod が接する部位の力の大きさを精確に測定できるという理由から、力を刺激のパラメーターとして採用した。

ところで、機械受容器における起動電位はその受容器の変形によって発生すると報告されている^{28~30)}。また、一定の力を加えた際の歯の変位様相に関しては、刺激の付加および除去直後には急激な変位を示し、その後は歯根膜の有する粘性により緩やかに変位すると報告されている³¹⁾。これらの観点からすれば、本結果の例において、刺激終了後にも活動電位が観察されたことは、歯の変位に対して歯根膜単一感覚単位が応答していたためと考えることができる(図3, 5)。このことは、刺激のパラメーターとして力を用いたが、同時に歯の変位も考える必要があることを示唆している。

2. 研究結果について

1) 刺激方向による応答様式の差異

実験動物を用いた報告では、歯根膜単一感覚単位は、最適方向に刺激が加わった際の順応時間により、slowly adapting unit, fast adapting unitなどに分類されてきている^{2~5, 7, 11, 12)}。従来の分類の仕方によってみると、本結果で記録された unit 2~9, 11, 12, 14~19 は slowly adapting unit, unit 1, 10, 13 は fast adapting unit に分類できると考えられる(表1)。しかし、単一感覚単位の順応性を検討する際に重要と考えられる1個の単一感覚単位の終末を構成する機械受容器の数^{32, 33)}あるいは機械受容器の形態と順応性との関連性^{33~35)}に関しては、実験動物においては報告されているが、ヒトにおいてはこのような組織学的検索を同時に行うことは困難であり、歯根膜機械受容器の形態に関する報告^{36~38)}があるのみで、この種の報告はなされていない。そこで、本研究では上記のような分類は行わず、記録において観察された歯根膜単一感覚単位の力に対する応答様式の変化という現象について、以下の項目について考察する。

(1) 応答パターンの分類

本研究においては、歯根膜単一感覚単位を、そ

の刺激に対する順応時間から遅順応型、速順応型、中間型の応答パターンに分類した(図3~5, 表1)。この分類の時間的基準、特に遅い順応の時間的基準に関しては、最も短い順応時間を5秒とした報告¹²⁾、1秒とした報告⁴⁾、あるいはこの値より小さい値とした報告³⁹⁾がある。本研究においては、時間的基準として、これらの値のなかで最も長い5秒を採用した。

速い順応に関しては、Ness¹²⁾が刺激開始あるいは終了後に1, 2発の発火がみられるものと規定している。本研究でも、刺激のdynamic phaseで数発発火するもの、または刺激終了後に数発発火するものを速順応型として扱った。

また、刺激のtonic phaseにおいて発火がみられ、かつその順応時間が5秒以下のものを中間型の順応とした。

手で可及的に一定の力を持続し、またこの操作を数回行う必要がある本研究の実験手法上からも、このような時間による応答パターンの分類が妥当ではないかと考えられる。

(2) 応答パターンと発火閾値

順応性と発火閾値に関しては、Hannam¹⁾が犬の切歯歯根膜のslowly adapting unitとrapidly adapting unitにおいて、それらの発火閾値を比較し、後者のそれの方が高いことを報告している。また、Appentengら⁴⁰⁾もウサギの三叉神経節で、歯に力を加え、slowly adapting periodontal mechanoreceptorとrapidly adapting periodontal mechanoreceptorを支配するunitの応答を記録し、2種のunitの発火閾値を比較し、同様に後者のそれの方が高いことを報告している。本研究は、ヒトにおいて、同一unitにおける発火閾値の変化について扱ったものではあるが、FA Typeの応答パターンを示したときの発火閾値は、SA Typeの応答パターンを示したときの発火閾値より高い傾向がみられ、順応性と発火閾値との対応性という観点においては、これらの報告に一致した。

また、IM Typeの応答パターンを示した際の発火閾値は、SA TypeとFA Typeの発火閾値

の中間的な値であったことは興味ある新たな知見である。

(3) 刺激方向と順応性、発火閾値の変化

本結果における刺激方向による順応性、発火閾値の変化を考察するうえで重要な4つの報告がある。

第1の報告は、Hannam¹⁾によりなされ、歯根膜単一感覚単位の発火閾値、動的応答性を調べ、その応答性は受容器の形態によるのではなく歯根膜における空間的配置によるのではないかとしたものである。

第2の報告は、上記の報告を踏まえ、Cash と Linden¹⁰⁾によりなされたものである。歯根膜単一感覚単位の刺激部位による応答様式を調べた結果、根尖部付近の微小範囲を刺激した際には遅い順応が観察され、歯の回転中心 (fulcrum) 付近の

微小範囲を刺激した際には速い順応が観察された。このことから、単一感覚単位の順応性は歯根の変位量と受容器の空間的配置に関係するとしたものである。

第3の報告は、Ilyinsky⁴¹⁾, Nishi と Sato⁴²⁾ によるもので、圧刺激を加える方向によりパチニ小体の応答性が変化することを明らかにしたものである。

第4の報告は、Ness¹²⁾によりなされたものである。すなわち、歯に加える力を最適方向から θ の角度をなして加えたときの刺激強度 (F) と単一感覚単位のインパルス頻度 (R) との間には Adrian の法則が成立し、両者の関係は $R = K \log (\cos \theta) + K \log (kF) + c$ と数式化されるとしたものである。

これらの報告をもとに、刺激方向の変化に伴い観察された単一感覚単位の順応性および発火閾値の変化の機序を、図10の点線で示される受容野全体の反応性の変化として以下考察する。図は、受容野に対する刺激の最適方向をX軸にとり受容野の most sensitive point を原点とした模式図である。矢印は、刺激をベクトル表示したものである。

第1, 2の報告により、受容野への刺激の伝搬が歯根膜線維を介して行われ、かつ第3の報告により、歯根膜機械受容器にも刺激方向により応答性が変化するという特性が存在すると仮定すれば、その歯根膜線維の走向する方向が受容野の最適方向 (X軸方向) になると考えられる。

さて、力の加わる方向がX軸方向に近いほど、単一感覚単位の順応時間が長いという結果は、この方向に近いほど、歯根膜線維の変形が大きく、また歯根膜線維の有する粘性要素により元の状態に復帰しにくいいため、この受容野に存在する受容器全体の興奮性の高まった状態が持続すると考えることで説明される。

一方、刺激の最適方向が存在し、その方向からずれるに従い、発火閾値が高くなるという事実は、第4の報告を3次的に解釈すると、次のように説明することができよう。すなわち最適方向に

図10 刺激方向による応答パターンの変化を考察する模式図 (本文参照)

a : 受容野 R : 記録部位 矢印 : ベクトル表示した力

おける発火閾値を $|\vec{f}_x|$ とし、刺激の初期における受容器と周囲組織の粘性要素を無視すると、X 軸と角度 θ をなす方向から力 $\vec{f}$ を加えた際、この受容野を興奮させるのには $|\vec{f}_x|/\cos\theta (=|\vec{f}|)$ の刺激が必要になる。 θ を $0 \leq \theta \leq \pi/2$ とすると、 θ が $\pi/2$ に近づくにつれて、 $|\vec{f}_x|/\cos\theta$ は暫時大きくなり、したがって発火閾値 $|\vec{f}|$ は暫時高くなるということで説明されよう。

なお、受容器が圧刺激に応答するかそれとも牽引刺激に応答するかという点に関しては^{4, 10, 43)}、本考察では受容器が牽引刺激に応答するという報告¹⁰⁾に基づき行った。

2) 刺激速度に対する応答性

(1) latency

本結果では歯根膜単一感覚単位が FA Type の応答パターンを示したとき、刺激速度の増大に伴い、latency の減少することが認められた。この結果は Hannam¹⁾ がイヌ歯根膜の fast adapting unit について行った結果に一致した。

一方、高橋⁴⁴⁾はネコの口腔粘膜を支配する単一感覚単位について、その latency と粘膜の偏位速度との関係がべき関数に従うことを報告している。この観点から図 8-D を参照すると、ヒトにおいても、FA Type の応答パターンを示すときの刺激速度と latency の関係は対数関数、べき関数あるいは双曲線関数などのいずれかで近似できるものと思われる。

なお、歯根膜単一感覚単位が SA、または IM Type の応答パターンを示したときには Hannam の報告¹⁾ 同様、latency が短く、刺激速度と latency の関係を検討することはできなかった。latency が短いことは、FA Type の応答パターンを示すときに比べ、外部刺激が効果的に伝搬されるためと考えられた。

(2) dynamic index

Jansen と Matthews⁴⁵⁾ がネコの muscle spindle において dynamic response というパラメーターを用いて刺激速度に対する動的応答性を調べて以来、このパラメーターは歯根膜感覚単位の刺激速度に対する動的応答性を検討する際に適用さ

れてきた^{1, 9)}。Hannam¹⁾ は刺激の dynamic phase における最大発火頻度から刺激の tonic phase における 2 秒後の発火頻度を引いた値を dynamic index とした。本研究で、すでに述べたように、この dynamic index を一部改変し用いたところ、刺激速度の増大に伴い、dynamic index の増大が認められた。この事実は、Hannam の報告に一致した。

3) 刺激方向に関する情報伝達機構について

歯根膜単一感覚単位の応答の刺激方向による変化に関して、Pfaffmann⁴⁾ がネコにおいて報告して以来、ネコ^{4, 5, 7, 11)}、イヌ^{2, 3)}、ウサギ¹²⁾ においても報告されている。特に、slowly adapting unit においては、歯に加える刺激の方向が最適方向に近いほど、発火閾値は低く、順応時間も延長し、また latency は短く、さらに発火頻度は増加すると報告されている^{11, 12)}。

本研究のヒトにおける結果は、歯根膜単一感覚単位が SA Type の応答パターンを示したとき、発火閾値が他の応答パターンを示したときより低く、また latency も短くなり、これらの報告に一致した。

加えて、刺激方向が最適方向からずれるに従い、歯根膜単一感覚単位の順応時間が短くなったこと、また導出された歯根膜単一感覚単位それぞれにおいて刺激の最適方向が異なっていたことの 2 つの所見から、ある一定の方向に歯を刺激したとき、多くの歯根膜単一感覚単位の応答からなるある一定の活動パターンが生じていることが想定された(表 1, 図 6, 7)。

これに類似した現象は、一次ニューロンレベルにおける鼓索神経線維応答にもみられる。味覚情報の伝達と、多くの鼓索神経線維間にみられるこのような活動パターンとの関係は、across fiber pattern theory^{46~48)} により説明されてきている。すなわち、ある特定の味刺激を加えることにより、多くの鼓索神経線維間にある一定の活動パターンが生じ、しかもそのなかに特定の味質によく応答する神経線維が存在し、これら全体のインパルスの時間的、空間的パターンが味覚の神経情報にな

るとされている。

これをもとに推定すると、一次ニューロンレベルにおいては、ある刺激方向に対し、興奮性が高い特定の歯根膜単一感覚単位が存在し、しかも刺激開始後のある時間帯に、多くの歯根膜単一感覚単位の応答パターンからなるインパルス系列が生じ、歯に加わる力の方向に関する情報を伝達しているという可能性が本研究結果から示唆された。

V. 結 論

歯に力を加えた際の歯根膜単一感覚単位の応答様式をヒトにおいて検索する目的で、成人被験者5名のオトガイ孔より microneurography 法に従い、19個の歯根膜単一感覚単位の活動電位を導出し、その発火様式を検討して、以下の結論を得た。

1. 同一の歯根膜単一感覚単位において、歯に加える力の方向を変化させた際、遅順応型、速順応型 on Type, 速順応型 off Type, 速順応型 on/off Type, 中間型の5つの順応性の異なる応答パターンが出現した。

2. 発火閾値は、遅順応型、中間型、速順応型の応答パターンを示したときの順に高くなった。

3. 歯根膜単一感覚単位が速順応型の応答パターンを示したとき、刺激速度の増大に伴い、latency が短くなった。

4. 歯根膜単一感覚単位が遅順応型の応答パターンを示したとき、刺激速度の増大に伴い、dynamic index が大きくなった。

これらの知見より、一次ニューロンレベルにおいては、歯に加わる力の方向に関する情報が、多数の歯根膜単一感覚単位の応答パターンからなるインパルス系列として、中枢に伝達されている可能性が示唆された。

謝 辞

稿を終えるにあたり、終始ご懇篤なご指導とご校閲を賜った主任三浦不二夫教授に、心から謝意を表します。また懇切なるご教示とご校閲下さった第1矯正学教室相馬邦道助教授に感謝の意を表すとともに、終

始、直接ご指導とご教示いただきました第1矯正学教室半田秀穂助手、口腔生理学教室戸田一雄講師に深謝いたします。さらに本研究に際し、ご支援、ご協力いただきました第1、第2矯正学教室の諸先生方、ならびに被験者の皆様に厚くお礼申し上げます。

本研究の一部は昭和62年度文部省科学研究費補助金(奨励研究A特) No. 62790298 によった。

文 献

- 1) Hannam, A. G. : The response of periodontal mechanoreceptors in the dog to controlled loading of the teeth. *Archs. Oral Biol.* 14: 781-791, 1969.
- 2) Hannam, A. G. : Receptor fields of periodontal mechanosensitive units in the dog. *Archs. Oral Biol.* 15 : 971-978, 1970.
- 3) 香川国和 : 歯根膜の機械的刺激受容単位の生理学的特性について. *広大歯誌* 17 : 51-68, 1985.
- 4) Pfaffmann, C. : Afferent impulses from the teeth due to the pressure and noxious stimulation. *J. Physiol. London* 97 : 207-219, 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) Kizior, J. E., Cuzzo, J. W. and Bouman, D. C. : Functional and histologic assessment of the sensory innervation of the periodontal ligament of the cat. *J. Dent. Res.* 47 : 59-64, 1968.
- 7) 神尾英次 : 単一感覚単位の前歯歯根膜支配と圧刺激にたいする応答の方向性. *歯科学報* 70 : 1143-1167, 1970.
- 8) Sakada, S. and Kamio, E. : Receptive fields and directional sensitivity of single sensory units innervating the periodontal ligaments of the cat mandibular teeth. *Bull. Tokyo Dent. Coll.* 12 : 25-43, 1971.
- 9) Hilton, P. B. : The effect of repeated stimulation on the response from slowly adapting periodontal mechanoreceptors. In *Oral Physiology*. eds. by Emmerin, N. and Zotterman, Y., New York, 1972, Pergamon press, 217-222.
- 10) Cash, R. M. and Linden, R. W. : The distribution of mechanoreceptors in the periodontal ligament of the mandibular canine tooth of the cat. *J. Physiol. London* 330 : 439-447, 1982.
- 11) Karita, K. and Tabata, T. : Response fields of the periodontal mechanosensitive units in the superior alveolar nerve of the cat. *Exp. Neurol.* 90 : 558-565, 1985.
- 12) Ness, A. R. : The mechanoreceptors of the rabbit mandibular central incisor. *J. Physiol. London* 126 : 475-493, 1954.

- 13) Hagbarth, K. E. and Vallbo, Å. B. : Mechano-receptor activity recorded percutaneously with semi-microelectrodes in human peripheral nerves. *Acta Physiol. Scand.* 69 : 121-122, 1967.
- 14) Vallbo, Å. B. and Hagbarth, K. E. : Activity from skin mechanoreceptors recorded percutaneously in awake human subjects. *Exp. Neurol.* 21 : 270-289, 1968.
- 15) Järvilehto, T., Hämäläinen, H. and Laurinen, P. : Characteristics of single mechanoreceptive fibers innervating hairy skin of the human hand. *Exp. Brain Res.* 25 : 45-61, 1976.
- 16) Hagbarth, K. E., Hongell, A., Hallin, R. G. and Torebjörk, H. E. : Afferent impulses in median nerve fascicles evoked by tactile stimuli of the human hand. *Brain Res.* 24 : 423-442, 1970.
- 17) Gybels, J. and van Hees, J. : Unit activity from mechanoreceptors in human peripheral nerve during intensity discrimination of touch. *Excerpta Med. Int. Congr. Ser.* 253 : 198-206, 1972.
- 18) Knibestöl, M. : Stimulus-response functions of slowly adapting mechanoreceptors in the human glabrous skin area. *J. Physiol. London* 245 : 63-80, 1975.
- 19) 宮岡 徹, 間野忠明 : ヒトの触圧覚求心性神経発射の解析. *臨床脳波* 22 : 800-809, 1980.
- 20) Janko, M. and Trontelj, J. V. : Transcutaneous electric nerve stimulation : A microneurographic and perceptual study. *Pain.* 9 : 219-230, 1980.
- 21) Johansson, R. S. and Vallbo, Å. B. : Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. *Trends in Neuroscience* 6 : 27-32, 1983.
- 22) Iggo, A. : Cutaneous receptors with high sensitivity to mechanical displacement. In *Touch, Heat and Pain*, eds. by de Reuck, A. V. S. and Knight, J., London, 1966, Churchill, 237-260.
- 23) Johansson, R. S. and Olsson, K. A. : Microelectrode recordings from human oral mechanoreceptors. *Brain Res.* 118 : 307-311, 1967.
- 24) 中西高雄, 他 : 臨床神経生理学入門, その基礎と臨床的应用, 東京, 1980, 真興交易(株)医書出版部, 168-240.
- 25) 間野忠明 : microneurography. *脳神経* 34 : 205-215, 1982.
- 26) 間野忠明 : 新しい検査法 microneurography. *Clinical Neuroscience* 2 : 128-129, 1984.
- 27) 上條雅彦 : 図説口腔解剖学 4 : 神経学, 東京, 1969, アナトーム社, 1025-1036.
- 28) Ozeki, M. and Sato, M. : Changes in the membrane potential and membrane conductance associated with a sustained depolarization of the non-myelinated nerve terminal in Pacinian corpuscles. *J. physiol. London* 180 : 186-208, 1965.
- 29) Nakajima, S. and Onodera, K. : Adaptation of the generator potential in the cryfish stretch receptors under constant length and constant tension. *J. Physiol. London* 200 : 187-204, 1969.
- 30) Loewenstein, W. R. : Excitation and inactivation in a receptor membrane. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 94 : 510-534, 1961.
- 31) 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.
- 32) Beyers, M. R. : Sensory innervation of periodontal ligament of rat molars consists of unencapsulated Ruffini-like mechanoreceptors and free nerve endings. *J. Comp. Neurol.* 231 : 500-518, 1985.
- 33) 塚本良久 : 口腔粘膜の単一感覚単位を構成する被覆性神経終末の形態および機能. *歯科学報* 82 : 417-437, 1982.
- 34) Iggo, A. and Muir, A. R. : The structure and function of a slowly adapting touch corpuscle in hairy skin. *J. Physiol. London* 200 : 763-796, 1969.
- 35) Iggo, A. and Andre, K. H. : Morphology of cutaneous receptors. *Ann. Rev. Neurosci.* 5 : 1-31, 1982.
- 36) Griffin, C. J. and Harris, R. : Innervation of human periodontium. I. Classification of periodontal receptors. *Aust. Dent. J.* 19 : 51-56, 1974a.
- 37) Griffin, C. J. and Harris, R. : Innervation of human periodontium. III Fine structure of compound receptor. *Aust. Dent. J.* 19 : 255-260, 1974b.
- 38) Harris, R. and Griffin, C. J. : Innervation of human periodontium. IV. Fine structure of complex mechanoreceptors and free nerve endings. *Aust. Dent. J.* 19 : 326-331, 1974c.
- 39) Jerge, C. R. : Organization and function of the trigeminal mesencephalic nucleus. *J. Neurophysiol.* 26 : 379-392, 1963.
- 40) Appenteng, K., Lund, J. P. and Séguin, J. J. : Intraoral mechanoreceptor activity during jaw movement in the anesthetized rabbit. *J. Neurophysiol.* 48 : 27-37, 1982.
- 41) Ilyinsky, O. B. : Processes of excitation and inhibition in single mechanoreceptors (Pacinian corpuscles). *Nature. London* 208 : 351-353, 1965.
- 42) Nishi, K. and Sato, M. : Depolarizing and hyperpolarizing receptor potentials in the non-myelinated nerve terminal in Pacinian corpuscles. *J. Physiol. London* 119 : 383-396, 1968.

- 43) Beaudreau, D. E. and Jerge, C. R. : Somatotopic representation in the gasserian ganglion of tactile peripheral fields in the cat. *Archs. Oral Biol.* 13 : 247-256, 1968.
- 44) 高橋良昌 : 口腔粘膜における遅順応単位の偏位および偏位速度に対する応答の特性. *歯科学報* 82 : 1299-1321, 1982.
- 45) Jansen, J. K. S. and Matthews, P. B. C. : The central control of the dynamic response of muscle spindle receptors. *J. Physiol. London* 161 : 357-378, 1962.
- 46) Erickson, R. P. : Sensory neural patterns and gustation. In *Olfaction and Taste I.* ed by Zotterman, Y. Oxford, 1963, Pergamon press, 205-213.
- 47) Erickson, R. P., Doetsch, G. S. and Marshall, D. A. : The gustatory neural response function. *J. gen. Physiol.* 49 : 247-263, 1965.
- 48) Castellucci, V. F. : The chemical senses : Taste and smell. In *Principles of neural science.* eds. by Kandel, E. R. and Schwartz, J. H., New York, 1985, Elsevier, 409-425.