



歯根膜受容器の選択的刺激にむけた口腔感覚情報の調査

Investigation of Oral Sensory Information for Selective Stimulation of
Periodontal Ligament Receptors

金佑相¹⁾, 岩濱汐里²⁾, 櫻井翔²⁾, 広田光一²⁾, 野嶋琢也²⁾

Woosang KIM, Shiori IWAHAMA, Sho SAKURAI, Koichi HIROTA and Takuya NOJIMA

1) 電気通信大学 情報理工学域 I 類 (〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1 woosang_kim@vogue.is.uec.ac.jp)

2) 電気通信大学 大学院情報理工学研究科情報学専攻 (〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1 {i_shiori, sho,hirota}@vogue.is.uec.ac.jp, tnojima@nojilab.org)

概要: 食感とは豊かな食事体験に欠かせない感覚であり、咀嚼筋と歯根膜からの感覚情報により生成される。古くから着目されてきた咀嚼筋の場合、感覚情報についての調査が活発に行われ、また、その情報を用いたインタフェースの提案も多く存在する。しかし、咀嚼筋と比べ、歯根膜に関する研究や提案は少ない。本研究では経皮電気刺激による歯根膜の触覚受容器の選択的な活動を誘発し、歯ごたえ感覚の生成を目指す。本報告ではその準備として、電極の位置調整によって生成される感覚の種類とともに、その感覚の位置分布について報告する。

キーワード: 触覚, 電気刺激, 歯根膜

1. はじめに

歯ごたえとは、物を噛んだ時、歯に生じる感覚であり、その中、食物を噛んだ時に生じる感覚を食感という。食感とは食事において、硬度を把握する重要な情報となり、この情報をもとに歯の保護や食物をより美味しく味わうことができる。歯ごたえは歯根膜の感覚と咀嚼筋の感覚から成り立っている。咀嚼筋は物を噛む際に下顎骨を持ち上げる動作と下げる動作に使われる。歯根膜とは、歯と歯槽骨を繋ぐ繊維性の結合組織であり、食物の破碎時に歯にかかる圧力を知覚・分散する [1]。

食物を咀嚼する際、咀嚼筋により、口を開ける開口運動と閉じる閉口運動が行われ、その感覚は筋紡錘から脳に伝達される。この時、歯にかかる圧力情報は歯根膜に存在する感覚受容器によって感知される。歯根膜中の感覚受容器には、痛覚を受容する自由神経終末と機械感覚・歯の位置感覚を受容する特殊神経終末が存在が確認されている [2]。特殊神経終末はルフィニ終末、コイル状神経終末、紡錘形神経終末の 3 種類の感覚受容器の存在が確認されている。これらによって感知された情報は、下歯槽神経、三叉神経を通じて脳へ触覚情報として伝達され、その情報をもとにした閉口筋運動神経への応答により咬合の制御が行われる。このように、歯ごたえの知覚には、咀嚼筋の運動と歯根膜の感覚が関与する。

VR 分野では、歯ごたえのような口腔内の感覚と関連して、食感提示技術に関する研究が行われてきた。食感提示技術とは、感覚受容器を刺激して人工的に食感を生成・拡張・変化させる技術である。食感提示の分野において、咀

嚼筋への刺激に着目した食感提示の研究やデバイス提案は多く存在するが、歯根膜への刺激に注目した研究は少ない [3][6]。また、圧力センサなどを用いて物理的に口腔へ食感を提示する手法は多数存在するものの、電気刺激を用いた食感提示の事例は少ない [10]。

歯根膜受容器による感覚情報と食べ物の食感および硬度に適した咀嚼運動との間には関係があると示唆されている [7][8][9]。しかし、これらの研究では歯根膜感覚の制御として麻酔注射が主に用いられ、この手法では感覚の遮断の有無という 2 パターンの制御だけが行われている。また、歯根膜感覚の増強という視点から行った研究の事例は少ない。このことより、歯根膜感覚の遮断による有無の 2 パターンだけではなく、電気刺激のパラメータの制御による量的評価が可能になると、歯根膜感覚情報を考慮した食感と咀嚼機能変化の評価をより詳細に調査することができると考えた。また、歯根膜中に分布する受容器ごとへ、選択的刺激による感覚の提示ができると、各々の感覚が咀嚼運動や食感などの主観の評価へ与える影響の解明につながると考える。本論文では、多様な食感提示を目標とした歯根膜感覚の自在な生成を目的とした本研究の準備として、歯肉への経皮電気刺激による感覚生成を行い、電極の位置調整によって生成される感覚の種類と、その感覚の位置分布について報告する。

2. 関連研究

本章では研究に関連する先行研究として、食感提示に関する研究、歯根膜感覚と咀嚼運動の関係性に関する研究に

ついて述べる。

新島ら [3] は食感を人工的に生成する”Electric Food Texture System”と呼ばれるシステムを開発した。咀嚼筋へ電氣的筋刺激 (EMS) を与え、刺激強度・刺激時間を調整することで食物の硬度・弾力性を提示し、バーチャルな食感を生成するシステムである。本システムを利用した実験の結果、刺激強度が高いほど硬い食感が得られ、刺激時間が長いほど弾力のある食感が得られることが分かった。このように、咀嚼時に刺激強度や時間を調整して咀嚼筋へ刺激提示することにより、多様な硬度・弾力をもった食感の再現が出来ることが示唆された。

また、笹川ら [6] は、ジャミング転移を利用した食感提示手法を提案している。ジャミング転移とは、密度によって粉粒体が異なるふるまいをする現象を指す。本研究では袋内の粉流体をジャミング転移によって密度を変えることで食物の硬度を、袋内部の気圧を制御することで食物の形状を再現している。その結果、4つの異なる硬度が提示可能であることを示した。

これらの研究では、咀嚼筋へ着目した食感提示技術の確立や、外部の機構を用いた咀嚼による食感提示が行われてきた。しかしながら、咀嚼筋とともに感覚入力系となる歯根膜に着目した食感提示手法の確立を目指した研究事例は少ない。

歯根膜の感覚情報の有無が適切な咀嚼運動に影響することは、多くの研究で示されてきた。岡らは [7]、歯肉・歯根膜・頬粘膜に由来する感覚が、食物の粉碎能力に与える影響を調査した。著者らは被験者の口腔粘膜を麻酔し、ピーナッツを咀嚼させた。麻酔パターンを8つに分け、咀嚼後、異なる大きさの網目のふるい上でのピーナッツの残留量から、麻酔部位ごとに咀嚼能力を評価した。その結果、細かい粒子の場合、歯根膜の麻酔によって残留量が増加し、歯根膜を麻酔することで咀嚼機能が低下することが示唆された。

森本ら [8] は、正常マウスと大理石骨病を持つマウスの咀嚼能力を比較して、歯根膜感覚が咀嚼能力に与える影響について調査した。大理石骨病を持つマウスとは、先天的に歯が萌出せず、歯根膜が殆ど形成されていないマウスである。実験では両マウスへ飼料を与え、その咀嚼活動について調べた。実験結果から、正常マウスに比べ、大理石骨病マウスは咀嚼リズムが早く閉口筋活動が小さい相に対して、咀嚼リズムが遅く閉口筋活動が大きい相の全体に占める割合が有意に低下した。このことから、歯根膜感覚の遮断が、咀嚼時の閉口筋活動と咀嚼機能を低下させることが示唆された。

加野 [9] は、ヒトを対象として歯根膜感覚が咀嚼運動の調節に果たす役割を調査した。被験者の上下顎の第一大臼歯に麻酔を行った上で、硬度の異なるガム（硬いものからハードガム、ミドルガム、ソフトガム）を噛ませ、歯根膜感覚が咀嚼運動へどれほど影響を及ぼすのかを検証した。ミドルガムでは開口相時間、咬合相時間、咀嚼周期において麻酔による有意な減少が見られたが、それ以外のガムでは麻酔による影響の有意な変化がなかった。筋放電間隔はソフ



図 1: デバイスの外見

トガム・ミドルガムの咀嚼において有意な減少が見られた。この結果から、硬い食品は歯根膜感覚よりもそれ以外（咀嚼筋感覚など）が咀嚼運動の調節にかかわっているが、やわらかい食品は歯根膜感覚が咀嚼運動の調整に重要な役割を果たす可能性が示唆された。

このように、歯根膜から得られる感覚情報を遮断することによる咀嚼機能の低下が、多くの研究で報告されてきた。これらの研究は麻酔注射のような侵襲の手段を用いた事例がほとんどであり、非侵襲の機構を用いた評価の数は少ない。また、感覚の遮断による評価は多く存在する一方、歯根膜の刺激による感覚提示を行った研究事例はほとんど存在しない。

3. 実験

3.1 実験目的

歯肉への経皮電気刺激をする際に、電極の位置調整によって生成される感覚の種類とその感覚の位置分布を明らかにするため、歯肉の表面上に電極を当て、経皮電気刺激を行った。口腔内へ安定した刺激を与えるために、以下のようにマウスピース型の電気刺激装置を作成した。

3.2 デバイス

歯根膜にむけて歯肉部からの経皮電気刺激を行うために、図 1 に示すような刺激デバイスを作成した。用いた材料は導電ゲル (G-CR グレードゲル、積水化成工業会社)・マウスピース・フレキシブルフラットケーブル (以下、FFC)・食品衛生法適合接着剤・梶本ら [4] の電気刺激デバイスであった。刺激電極として用いた FFC 先端の金属 (以下、電極) は 0.7×4.0mm の長方形で、電極中心間隔は 1mm であった。この値は、歯肉に近い環境と考えられる舌の 2 点弁別能の値を参照した [5]。導電ゲルは電流の集中による痛覚を防ぎ、歯肉表面上に電極を密着させるために使用した。導電ゲルが FFC 刺激部の下にくるように貼り合わせ、それらを歯間乳頭上を結ぶ線と平行となるようにマウスピースへ貼り付けた。また、密着のために歯肉との接触面となる刺激部の上に同サイズのゲルを貼り合わせた。FFC は電極が歯肉に接するようにマウスピースの中に貼り付けた。この時、FFC の位置の基準点は左中切歯と左側切歯の境界とした。

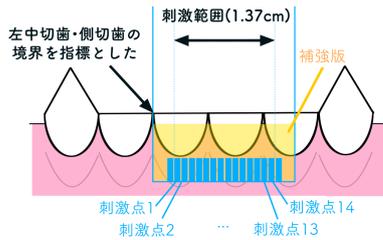


図 2: 刺激範囲

3.3 実験手順

10~50代の男性1名と女性2名の計3名の被験者に対して実験を行った。実験の前、お湯でマウスピースをやわらかくし、被験者の歯形をとり、FFCを張り付けて個別にマウスピース型の刺激デバイスを作成した。また、実験直前には被験者に歯を磨かせた。刺激は図2に示す下顎左中切歯から右側切歯までの刺激範囲1.37cm内の下顎歯肉計14点に対して行った。パルス幅は約49.98us、周期は約13ms（周波数は約77Hz）に固定した。その次に、陽極刺激において被験者ごとに1つの刺激点にてプログラム上のパルスの高さを10V（ゲル上の電流は約0.45-0.47mA）ずつ増加させていき、痛みを感じる1段階前の値（以下、痛覚知覚前電流値）を決定した。この時、体に悪い影響がないように、プログラム上のパルスの高さの最大値を250とし、最大値であっても感覚が感じない、または、痛覚を感じない場合は最大値での電流値を痛覚知覚前電流値として用いた。この作業をFFCの電極14点に対して行い、同様に陰極刺激に対しても電極14点にて痛覚知覚前電流値を求め、全ての点にてキャリブレーションを行った。その後、全刺激点にて測定した痛覚知覚前電流値の平均値を次式のように求め、四捨五入をした値のパルス高さを本実験で刺激として用いた。

$$\text{平均値 (mA)} = \frac{\text{痛覚知覚前電流値の和 (mA)}}{28(\text{全刺激パターン数})} \quad (1)$$

次に、本実験を行った。各刺激点において約5秒間刺激を行った後、約20秒間の休憩をとった。刺激中、被験者は「感覚なし」、「痛覚」、「痛覚ではなくよく分からない感覚（以下、触覚様感覚）」の3つの状態を回答してもらった。全ての刺激点に対してランダムな順番で刺激提示を行うサイクルを1セットとし、陽極刺激と陰極刺激を4セットずつ行った。実験の様子を図3に示す。

4. 結果と考察

被験者3人の実験結果を図4, 5, 6に示した。被験者全員、鋭い痛覚と触覚様感覚の2つの感覚が感じられた。また、触覚様感覚としては被験者の自由記載で「ぶるぶる震える感じがした」、「何か太いもので押されている感じがした」という意見も挙げられた。これらの感覚は振動や圧覚を司る機械受容器を刺激できている可能性を示唆する。

評価方法に関しては「1と2の間の指標が欲しかった」という声もあった。実験では3状態の回答であったが、将来的

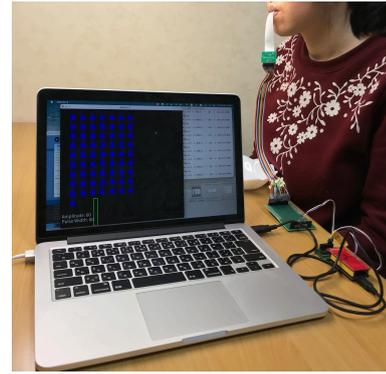


図 3: 実験の様子

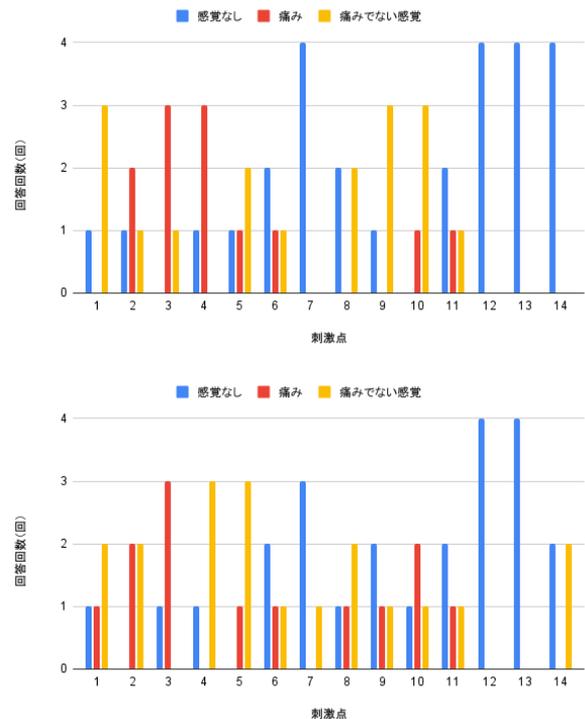


図 4: 被験者1における各刺激点の感覚発生。陽極刺激（上）、陰極刺激（下）

にはより細かい回答での評価実験が必要になる。次に、特定の刺激点にて痛覚を多数知覚した被験者および特定の刺激点において電流が感じられない被験者もいた。

前者の原因としては、キャリブレーション不備および唾液量による皮膚抵抗の変化が考えられる。痛覚知覚前電流値が平均値より低い点が必ず存在し、このような点が多い被験者は痛覚を多数知覚したと考えられる。また、実験中、唾液が溜まりやすかったため、唾液量による歯肉表面の電気抵抗の変動も結果に影響したと考えられる。

後者の原因にも、キャリブレーションの不備が挙げられる。痛覚を多数知覚した場合と反対に、痛覚知覚前電流値が平均値より高い点が存在したため、知覚できる閾値に届かなかったのではないかと考える。歯肉と電極部の密着度が十分でなかった可能性も存在するが、全ての被験者にお

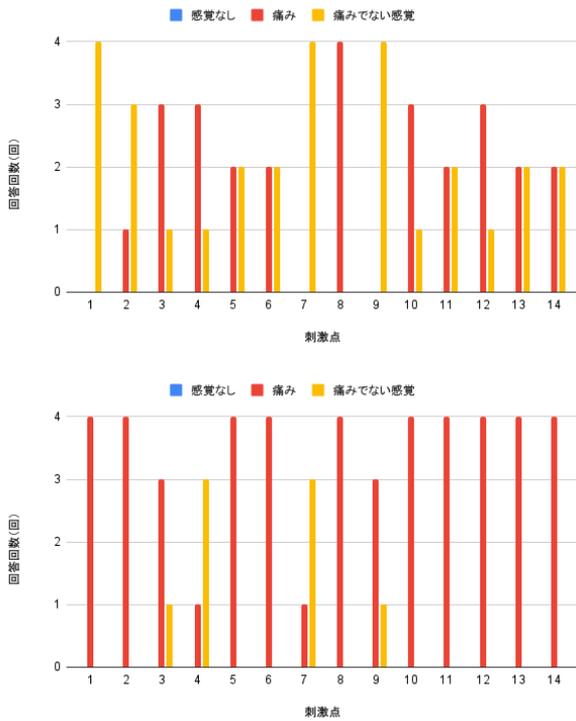


図 5: 被験者 2 における各刺激点の感覚生起。陽極刺激 (上), 陰極刺激 (下)

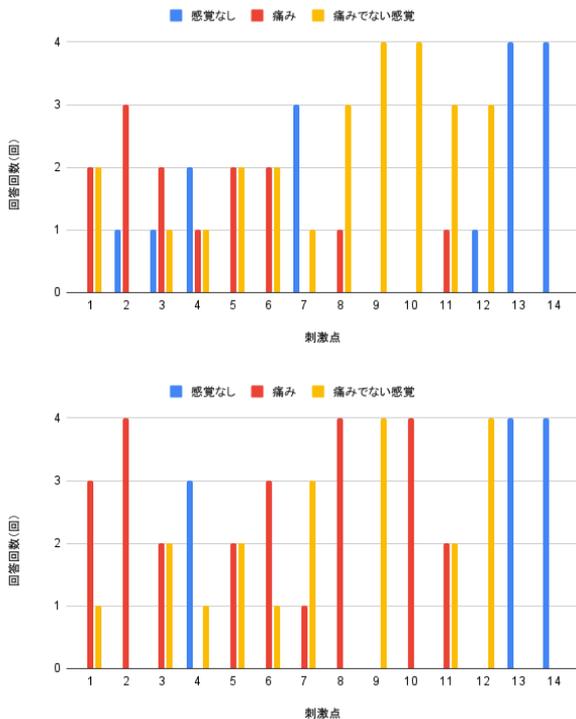


図 6: 被験者 3 における各刺激点の感覚生起。陽極刺激 (上), 陰極刺激 (下)

いてマウスピースが密着している状態を確認したため、この可能性は低いと考える。将来的には、唾液が溜まりづらい環境の設定とデバイスの使用や被験者ごとに各刺激点で固有の痛覚知覚前電流値を設定することが望まれる。

5. まとめと今後の予定

本報告では、歯肉への経皮電気刺激による感覚生起とその安定性について評価を行うため、電気刺激デバイスを作成し、複数人に対して電気刺激を行った。その結果、全ての被験者において痛覚と触覚様感覚、また、それらの感覚が安定して生起する場所とそうでない場所が確認された。今回の実験結果から、電気刺激によって2種類の感覚を生起されることが確認できた。しかし、報告された感覚が、具体的にどの部位を走る神経を刺激したのかは明らかとなっていない。今後の実験は、より多くの被験者での調査に向けた実験・デバイス設計に加え、刺激位置や電極間隔の設定を変えるなど刺激パターンの工夫と歯肉中の神経走行をより明らかにする必要がある。

参考文献

- [1] 脇田稔, 前田健康, 中村浩彰, 網塚憲生: 口腔組織・発生学第2版, 医歯薬出版, p.203, 2015.
- [2] Nanci, A.: Ten Cate's Oral Histology 9th Edition, Elsevier, pp. 206-217, 2018.
- [3] 新島有信, 小川剛史: 電氣的筋肉刺激を用いたバーチャル食感提示手法に関する検討, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 4, pp. 575-583, 2016.
- [4] Kajimoto, H.: "Electro-Tactile Display Kit for Fingertip," IEEE World Haptics Conf. (WHC), p587, 2021.
- [5] Serge, N., Dalibor, V.: "Weber's Compass and Aesthesiometers: History of the technical evolution of devices for tactile discrimination," L'Annee psychologique, Vol. 119, pp. 97-170, 2019.
- [6] 笹川真奈, 新島有信, 青木良輔, 渡部智樹, 山田智広: ジャミング転移を利用した食感提示システム, 情報処理学会インタラクション 2018. pp. 386-388, 2018.
- [7] 岡卓爾: 食物の粉碎能に及ぼす口腔粘膜および歯根膜の感覚の影響について, 歯科基礎医学会雑誌, Vol. 19, No. 4, pp. 524-533, 1977.
- [8] 森本俊文, 小林真之, 増田裕次: 歯・顎の感覚と咀嚼, 日本咀嚼学会雑誌, Vol. 5, No. 1, pp. 9-12, 1995.
- [9] 加野精一: ヒトの咀嚼運動の調節における歯根膜感覚の関与, 日本補綴歯科学会雑誌, Vol. 35, No. 5, pp. 997-1006, 1991.
- [10] Iwata, H., Yano, H., Uemura, T. and Moriya, T.: "Food simulator: a haptic interface for biting," IEEE Virtual Reality 2004, pp. 51-57, 2004.