原著論文

振動刺激と下顎の空間的垂直的位置感覚

吉田 清彦 兼平 治和

Influence of Vibratory Stimuli on the Perception of Mandibular Vertical Position

Kiyohiko Yoshida and Harukazu Kanehira

Abstract: An investigation was carried out on the influence of vibratory stimuli on mandibular position sense during opening and closing movements. Eight subjects were instructed to memorized 4 reference positions that were 5, 10, 15 and 20 mm from the intercuspal position (ICP) using mandibular kinesiograph. Then they were required to open and close their mouths 20 times, and this was repeated from superior or inferior to reference position to reproduce memorized position with their eyes closed. Then a 100 Hz vibratory stimulus was applied for 20 seconds to the mentalis and the above jaw movements were repeated. After application of stimulus from above (closing approach), the perceived mandibular position became lower than the reference position. On the other hand, from below (opening approach), it became significantly higher. Twenty experimental sequences were significantly changed. During movement, the vibratory stimulus effect disappeared in the early stage. It was found that the mandibular position sense was affected by vibratory stimuli. It was suggested that the muscle spindle played an important role as the neuronal mechanism controlling mandibular position.

Key words: mandibular position, perception, sensation, vibratory stimulus, TVR

I. 緒 言

咀嚼運動の調節機構には、顎口腔系に存在する種々なる感覚受容器からの情報が、末梢からの感覚入力として総合的に関与していると考えられている^{1,2)}。著者の兼平らは、連続開閉口運動時、下顎位と運動方向の変化に対応して、調節性に相違が認められることを垂直的下顎の位置感覚の面より報告した³⁾。そのなかで末梢からの情報として、筋の感覚受容器である筋紡錘からの感覚入力が空間的な下顎の位置感覚に大きく関与している可能性を示唆した。

従来、筋の感覚受容器である筋紡錘は振動刺激にきわめて鋭敏であり、振動を加えると筋は収縮するとされている^{4,5)}。さらに筋を振動している間、持続的に収縮することは、緊張性振動反射 Tonic Vibration Reflex (TVR)

といわれている⁴⁾。

そこで本研究は下顎の位置感覚における筋紡錘の関与を明らかにする目的で、振動刺激による TVR^{4~6)} を利用して連続開閉口運動に与える影響を検討した。

II. 実験方法

被験者は顎口腔系に異常を認めない健常有歯顎者男子 8 名 (平均 25.8 歳) である。設定した基準位は咬頭嵌合位より垂直的に切歯点で 5, 10, 15, 20 mm (それぞれ O1, O2, O3, O4) 開口した 4 つの下顎位とした。被験者には直立座位にて、設定した 4 つの基準位を Mandibular kinesiograph (MKG K-6) のブラウン管上で、各試行ごとに視覚的に確認、記憶した後閉眼状態で被験運動を行うよう指示した。振動刺激は振動刺激装置 (平和電子工業社製 TMT-18) にて 100 Hz, 20 秒間オトガイ正中部に前方より加えた。なお振動刺激負荷時の下顎位は、歯の接触がなく最大開口とならない範囲で任意とした。さらに振動負荷後の筋収縮増強による閉口によって歯が接触しないよう

大阪歯科大学歯科補綴学第III講座 (主任: 井上 宏教授)
The Third Department of Prosthodontics, Osaka Dental University (Chief: Prof. Hiroshi Inoue)
平成 7 年 12 月 1 日受付

に随意的に抵抗することを、特に被験者に指示した。振動刺激の負荷は基準位を記憶する前に行った場合 (V 1)、記憶した後に行った場合 (V 2) の 2 条件とした。また刺激負荷と基準位の記憶のインターバルは、V 1, V 2 にかかわらず可及的すみやかに行った。被験運動は図 1 上段に示した基準位より開口位 (closing approach, D 1) からと下段に示した閉口位 (opening approach, D 2) からで、2 方向からそれぞれの基準位へ 20 回 (S 1~S 20) の連続開閉口運動とした。ゆえに上段 closing approach では運動曲線の上の peak が、下段 opening approach では逆に下の peak が被験者が認知再現した基準位となる。被験者には、開閉口距離は歯の接触がなく最大開口にならない範囲と指示した以外、ブラウン管上で基準位を視覚的に確認記憶する記憶時間、運動速度、開閉口量などは任意とした。16 種類 (4 基準位×2 方向×2 振動刺激) の試行は random な順序で行い、被験者の疲労、振動刺激の残留などないように、実験試行間隔を十分にあげた。MKG からのアナログデータはデータレコーダ (SR-51, TEAC, 東京) に収録した後、シグナルプロセッサ 7 T 17 (NEC San-ei, 東京) にてサンプリングタイム 1 msec で AD 変換した。被験者が認知再現した下顎位は基準位からの変位量 (基準位-被験者が認知した下顎位) として計測した。したがって変位量は、被験者が認知再現した下顎位が基準位より咬頭嵌合位に近い場合 (図 1, 上段) はプラスとして、逆に基準位より咬頭嵌合位から遠い場合 (図 1, 下段) はマイナスとして計算される。得られたデータは [被

験者 (I): $i=8$], [運動方向 (D): $j=2$], [基準位 (O): $k=4$], [振動刺激 (V): $l=2$], [運動回数 (S): $m=20$] を主変動因子として下記の statistical linear model を用いて分散分析法により解析した。

$$\text{Mean} = \mu + I + D + e_1 + O + O \times I + O \times D + e_2 + V + \dots + e_3 + S + \dots + e_4$$

μ : General level, I: Individuals (1~8), D: Direction (1~2), O: Reference position (1~4), V: Vibratory stimuli (1~2), S: Session (1~20), N=2560

なお他の主変動因子は同じであるが、S: Session (1~4), N=512 についても同様に解析した。

III. 結 果

運動方向別の 4 基準位における結果 (D×O 交互作用) を図 2 に示す。認知再現された垂直的下顎位は開口位 (closing approach, D 1) からではプラス方向に、逆に閉口位 (opening approach, D 2) からではマイナス方向になった。このことは被験者が認知再現した下顎位は closing approach D 1 では基準位より低く、逆に opening approach D 2 では基準位より高くなった状態を示している。さらにすべての基準位において D 1 ではプラス方向、D 2 ではマイナス方向となる有意な下顎位の傾向は表 1 に示したように、その頻度 (8 人×20 回=160 中の割合) からみても明らかである。またそれぞれの基準位における下顎位は 5 mm で D 1, D 2 とともに最も基準位に近く、20 mm

図 1 Schema of vertical movement of mandible

The ordinate shows the mandibular position. ICP: Inter-cuspal position. The subject was asked twenty successive opening and closing movement: for the approach to the memorized position (in this case, 10 mm open from ICP) from superior position (upper record: closing approach) and from inferior position (lower record: opening approach)

下顎運動の模式図

上下に下顎位を示す。ICP: 咬頭嵌合位、被験者は 20 回の連続開閉口運動を行うよう指示された。基準位 10 mm において、基準位より上方からの運動 (上段: closing approach) と下方からの運動 (下段: opening approach)

図 2 Mean value of perceived vertical mandibular positions on each reference position (D×O interaction)

D 1: closing approach

D 2: opening approach

Vertical bar: 95% confidence limit

4 基準位における運動方向別の下顎位 (D×O 交互作用)

D 1: closing approach

D 2: opening approach

縦線: 95% 信頼限界

図 3 Mean values of perceived vertical mandibular positions during twenty opening and closing movements ($S \times V \times D$ interaction)

V 1 : vibratory stimuli before memorized reference position

V 2 : vibratory stimuli after memorized reference position

S : Session

Vertical bar : 95% confidence limit

left : S 1~S 4, right : S 1~S 20

振動負荷条件と運動方向別の 20 回の下顎位

V 1 : 基準位を記憶する前の振動刺激

V 2 : 基準位を記憶した後の振動刺激

S : 運動回数

縦線 : 95% 信頼限界

左 : S 1~S 4, 右 : S 1~S 20

表 1 Percentages of going across the reference position during twenty opening and closing movements on eight subjects
認知された下顎位の運動方向別による±となる割合 (8 人 × 20 回)

	(%)			
	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm
D 1	89.4	87.5	93.1	100.0
D 2	92.5	100.0	88.8	99.4

へかけて遠ざかる傾向が認められた ($D \times O$, $p < 0.00006$).

運動回数 (S), $S \times D$ 交互作用 (ともに $p < 0.0000001$) およびに S 1~4 までの $V \times D$ 交互作用に有意差を認めた ($p < 0.035$, 図 3). opening approach D 2 では V 1 で S 1 の -2.9 mm から S 20 の -5.0 mm, V 2 でそれぞれ -2.6 mm から -4.9 mm と運動回数の増加に伴い垂直的下顎位の基準位からの変位量が大きくなった。この変位量の増大は、運動回数の増加とともに基準位から離れてより開口位となった傾向を示している。一方, closing approach D 1 からの基準位を記憶した後の振動刺激 V 2 は運動回数の増加により有意な変化を示さなかった。しかし, 基準位を

記憶する前の振動刺激 V 1 では S 1 から S 4 へ順に 2.3, 3.0, 3.5, 3.8 mm と有意に基準位からの変位量は増大した。このことは、運動開始直後では V 2 よりも開口位をとっていた V 1 が急速に閉口位となり, S 5 以降 V 1, V 2 とともにほぼ同じ傾向で推移したことを示している。

IV. 考 察

1. 実験方法

骨格筋またはその腱上加えた振動刺激によって当該筋中の primary ending が刺激されると、同部に生じた興奮は GI a fiber を経て α -motoneuron へ伝達され当該筋の反射性収縮を誘起し、拮抗筋に対しては抑制的效果を及ぼすことが知られている^{7,8)}。Hagbarth らはこの現象を Tonic Vibration Reflex (TVR) と名付け、TVR が神経-筋系の疾患に対する診断および治療の手段として有効であると報告した⁴⁾。またこの TVR は咬筋においても発現するとされている^{9,10)}。本研究で用いた振動刺激は 100 Hz, 20 秒間オトガイ正中部に加えた。TVR の振動刺激の至適頻度は 100 Hz といわれており¹¹⁾、かつ直接、筋あるいは腱上加えなくても骨を伝導して、その効果を及ぼすとされ

ている⁴⁾。さらに Hagbarth ら⁴⁾は刺激除去後もその効果は数分間残留するとしている。本研究においては筋電図的に電位の上昇は確認していないが、刺激中下顎がより閉口位となったため歯が接触しないように努力を要したと被験者自身が訴えている。このようなことなどから、筋に対する振動刺激の効果は TVR を惹起するに十分であったと考えられる。

基準位と被験運動は著者の兼平らの先の報告³⁾と同様な方法により行った。したがって本研究でも、歯の接触と最大開口の下顎の位置感覚に影響を及ぼす要因¹²⁾を排除する目的で、空間的な連続閉開口運動を行わせた。被験者には歯の接触と最大開口を生じないように指示した以外、速度、閉開口量などは任意性に任せた。データの解析中、歯の接触と最大開口は認められず、被験運動はリズムカルに行われていた。また速度の影響は無視し得ない要因であるが、本研究の被験運動速度 (cycle time 平均約 1.6 sec) は、いわゆる振動刺激に対して感受性の高い筋紡錘 primary ending に dynamic response を生じさせる範疇¹³⁾に属すると思われる。これらのことから本実験方法は、被験者が指示を忠実に遂行し、本研究の下顎の位置感覚における筋紡錘の関与を明らかにする目的に合致した適正な実験条件を付与できたと考ええる。

2. 実験結果

運動方向別の下顎位は closing approach D1 ではプラス方向に、逆に opening approach D2 ではマイナス方向になった。この有意な傾向は 4 基準位すべてに認められた。

兼平らの報告³⁾も 4 基準位すべてに closing approach では基準位より低く、逆に opening approach では基準位より高く認知された同様な結果を得ている。

顎口腔系に存在する感覚受容器として、顎関節からの情報の下顎の位置感覚への関与は無視できない要因である¹⁴⁻¹⁶⁾。

連続運動ではないものの、空間的な下顎位の認知の多くは顎関節によりコントロールされているとする Thilander の報告¹⁷⁾もある。しかしながら、本研究のように歯の感覚を排除し、かつ連続運動中の位置感覚を検討したものではない。

一方、4 基準位すべてに closing approach では基準位より低く、逆に opening approach では基準位より高く認知された結果は、Matthews¹³⁾のいう、筋紡錘はきわめて粘弾性に富む感覚受容器で筋の伸展に対して示される粘弾性体特有の反応によるものと考えられる。この特有の反応は伸展に対して比例せず、カーブを描いて立ち上がり、さらに直線的に筋の伸展以上に立ち上がり、またカーブを描いて減衰して絶対量をとる。つまりこの立ち上がり overshoot 部分の出現が連続閉開口運動中、すなわち dynamic

な下顎位の認知に D1 では基準位より over-close, D2 では over-open した結果となったと考えられる。しかしながら下顎位を保持するような static な下顎位の認知においても approach の方向別に over-close, over-open するという報告¹²⁾もあり、何か他のメカニズムが関与しているのかもしれない。運動方向別 4 基準位の今回の結果が振動刺激を負荷しなかった兼平らの報告³⁾と一致していたことは、振動刺激は D1 では基準位より over-close, D2 では over-open した結果に影響を及ぼさなかったことを意味する。すなわち振動に対して感受性の高い primary ending からの GI a afferent の増加^{7,8)}の影響が少なかったと推察される。したがって下顎位の調節には振動刺激に対して感受性が低く、筋の長さを中枢に伝えるといわれている¹³⁾ secondary ending がより大きな役割を果たしていると思われる。

基準位別それぞれの認知再現された下顎位は、運動方向にかかわらず基準位 5 mm で有意に基準位に近かった。

振動による顎関節の受容器からの促進経路の関与¹⁸⁾、基準位別に γ bias が違う可能性など考えられるが、下顎位によってその感覚入力に変化した咬頭嵌合位付近の感覚がより鋭敏³⁾であったことは間違いない。

opening approach D2 では V1, V2 ともに運動回数の増加に伴い、下顎位は基準位から離れて有意により開口位となった。一方、closing approach D1 の基準位記憶後の振動刺激 V2 は運動回数の増加により有意な変化を示さなかった。しかし基準位記憶前の振動刺激 V1 では、S1 から S4 へ認知再現された下顎位は、有意に基準位より離れる傾向にあった。このことは、運動開始直後では V2 に対して開口位をとっていた V1 が、急速により閉口位となり S5 以降 V1, V2 ともほぼ同じ傾向で推移したことを示している。

兼平ら³⁾は運動回数の増加とともに運動方向にかかわらず、より閉口位となったとしている。本研究における D2 は逆の傾向となった。この傾向を振動刺激の残留効果とみるならば、V1, V2 にかかわらず被験者がブラウン管上で確認、記憶した基準位より開口位をとらない時、つまり筋が伸展されない時は、振動刺激により収縮された錘内筋が連続運動中に徐々に弛緩していったものと考えればよく理解できる。一方、closing approach D1 では S1 から S4 まで V1 と V2 は違う傾向を示した。基準位記憶前振動刺激 V1 D1 の S1 から S4 までの基準位からの変位量の増大を振動刺激の残留効果とみるならば、基準位記憶後振動刺激 V2 D1 には全くその影響がなかったことになる。振動刺激により収縮した状態での記憶も、基準位より開口位をとることにより筋紡錘は伸展され、数回の連続閉開口運動により残留効果は早期に消失したと考えられる。さらに記憶後の振動刺激は、基準位以上に筋を伸展させると全く残留効果は認められなかったことになる。また時間

的経過だけから本実験条件をみるならば、V2はV1より残留効果は認められるはずである。このことから、基準位記憶前振動刺激V1D1と基準位記憶後振動刺激V2D1に認められた差は、基準位を記憶する時の筋紡錘のコンディションによると思われる。

残留効果に関する報告^{4,8)}は、刺激後新たな負荷をかけないstaticな状態を筋電図などからその消長を観察したもので、本研究のように連続運動を負荷したdynamicなものではない。このことから振動刺激の残留効果の消長は基準位を越える筋伸展に依存しており、非常に早期に消失したと推察された。

したがって本実験の振動刺激条件および振動刺激の残留効果の消長の面からも、下顎の位置感覚における筋紡錘の役割の重要性は十分に示唆された。

V. 結 論

下顎の垂直的位置感覚の調節機構における筋紡錘の関与を明らかにする目的で100 Hzの振動刺激をオトガイ部に加え、空口時の連続開閉口運動を観察した。それぞれの認知再現された下顎位は基準位に対する変位量（基準位－被験者が認知した下顎位）として統計的に解析して、以下の結果を得た。

1. 認知再現された下顎位はclosing approach D1では基準位からみて閉口位に、逆にopening approach D2では開口位になった ($p < 0.00006$)。この有意な傾向は4基準位すべてに認められた。

2. 運動回数の増加による下顎位の変化は、運動方向と振動刺激によって違う傾向をとった。すなわち、opening approach D2からの下顎位は、振動刺激条件V1、V2にかかわらず徐々に基準位より開口方向へ変位した ($p < 0.000006$)。一方、closing approach D1からのV1では運動開始後4回目まで急速に閉口方向へ変位したが ($p < 0.035$)、その後は大きな変動を示さなかった。しかし、V2では運動開始直後S1よりS20まで大きな変化を示さず、5回目以降V1とほぼ同じ推移をとった。

3. 振動刺激の残留効果は筋の伸展により早期に消失することがわかった。

4. 以上のことから、下顎の位置感覚における筋紡錘の大きな役割が強く示唆された。

稿を終るにあたり、ご懇篤なるご指導と、ご校閲を賜りました井上 宏教授に深甚の謝意を表します。また本研究にご助言を頂いた歯科補綴学第3講座前田照太講師に厚くお礼申し上げます。さらに終始ご協力頂いた三谷 徹博士ならびに被験者各位に感謝いたします。

本論文の要旨は第445回大阪歯科学会例会(1995年12月9日、大阪市)にて発表した。

文 献

- 1) Lund JP. Oral-facial sensation in the control of mastication and voluntary movement of the jaw. In: Sessle BJ, Hannam AG, editors, Mastication and swallowing 145-156, Toronto: University of Toronto press, 1976.
- 2) Thexton AJ. To what extent is mastication programmed and independent of peripheral feedback. In: Anderson DJ, Matthews B, editors, Mastication 213-220, Bristol: John Wright and Sons, 1976.
- 3) 兼平治和, 前田照太, 井上 宏. 連続開閉口運動時の下顎の垂直的位置感覚について. 補綴誌 33: 1419-1424, 1989.
- 4) Hagbarth K-E, Eklund G. Tonic vibration reflexes (TVR) in spasticity. Brain Res 2: 201-203, 1966.
- 5) 本間三郎. 緊張性振動反射の研究. 臨床脳波 14: 439-446, 1972.
- 6) 前田照太, 三谷春保. 開口および振動刺激が咬筋表面EMGのパワースペクトルにおよぼす影響. 歯科医学 50: 608-614, 1987.
- 7) 本間三郎. 伸展反射とガンマー系. 真島英信, 猪飼道夫, 生体の運動機構とその制御 172-201, 東京: 杏林書院, 1972.
- 8) Granit R (本間三郎, 渡部士郎). The basis of motor control (運動制御の原理 67-112, 東京: 医歯薬出版, 1972), 1970.
- 9) 藤井弘之, 犬伏義臣, 虫本栄子ほか. 咬筋腱部へ加えた機械的振動刺激が咀嚼筋におよぼす影響. 歯科医学 40: 437-449, 1977.
- 10) 高田佳之, 中島民雄, 山田好秋. 咀嚼筋における緊張性振動反射(TVR)の筋電図学的評価. 顎機能誌 2: 33-39, 1995.
- 11) Homma S, Ishikawa K, Watanabe S. Optimal frequency of muscle vibration for motoneuron firing. J Chiba Med Soc 43: 190-196, 1967.
- 12) 兼平治和, 前田照太, 川野 晃ほか. 下顎の空間的位置感覚とその変動要因. 補綴誌 35: 1065-1069, 1991.
- 13) Matthews PBC. Muscle spindles and their motor control. Physiol Rev 44: 219-288, 1964.
- 14) Storey AT. Reflex function of the temporomandibular joint. J Prosthet Dent 30: 830-837, 1973.
- 15) 阿部勝也. 顎関節よりの求心性神経情報に関する研究. 歯基礎誌 16: 117-128, 1974.
- 16) 石川 剛. ヒト顎関節支配の単一感覚単位の応答特性. 口病誌 56: 528-530, 1989.
- 17) Thilander B. Innervation of the temporo-mandibular joint capsule in man. Trans Roy Sch Dent 2: 1-67, 1961.
- 18) Shwaluk S. Initiation of reflex activity from the temporomandibular joint of the cat. J Dent Res 50: 1642-1646, 1971.