

各咀嚼筋筋力が顎関節負荷に与える影響 — 3次元剛体顎モデルを用いた数値シミュレーション —

阿部 誠⁺, 林 豊彦^{**}, 中村康雄^{**}, 伊藤建一⁺⁺⁺

⁺新潟大学大学院自然科学研究科 ^{**}新潟大学工学部福祉人間工学科
⁺⁺⁺新潟工科大学情報電子工学科

〒950-2181 新潟県新潟市五十嵐2の町8050番地 新潟大学工学部福祉人間工学科 林研究室
TEL: 025-262-7339, FAX: 025-262-7778, E-mail: hayashi@bc.niigata-u.ac.jp
URL: <http://www.jkl.bc.niigata-u.ac.jp/>

あらまし これまで著者らは、かみしめ時における咀嚼系の制御メカニズムを明らかにするために、2次元静力学的モデルを用いて、顎関節負荷を解析してきた。本論文は、解析を3次的に拡張するために、簡単な3次元剛体顎モデルを構築した。そこで、各咀嚼筋筋力が咬合力と顎関節負荷にどのように影響を与えるのかを明らかにするために、片側かみしめ時における顎関節負荷を解析した。その結果を以下のように要約した：1)咬筋の側頭筋前部の活動は、両側とも咬合力を発現し、非作業側咬筋の活動は作業側の関節負荷を軽減する機能がある；2)外側翼突筋の活動は、咬合力発現の機能がない；3)内側翼突筋の活動は、両側とも咬合力を発現し、非作業側の活動は作業側の負荷ベクトルを外側後方に偏位する。

キーワード 顎関節負荷, 咬合力, 静力学解析, 咀嚼筋, 片側かみしめ

Effects of Masticatory-Muscle Forces on the Temporomandibular Joint Loading

- Numerical simulation using a 3-D rigid-body jaw model -

Makoto ABE⁺, Toyohiko HAYASHI^{**}, Yasuo NAKAMURA^{**}, Ken-ichi ITOH⁺⁺⁺

⁺Graduate School of Science and Technology, Niigata University

^{**}Department of Biocybernetics, Faculty of Engineering, Niigata University

⁺⁺⁺Department of Information and Electronics Engineering, Niigata Institute of University

Department of Biocybernetics, Faculty of Engineering, Niigata University, Hayashi Laboratory
2-8050 Ikarashi, Niigata 950-2181, Japan

TEL: +81-25-262-7339, FAX: +81-25-262-7778, E-mail: hayashi@bc.niigata-u.ac.jp

URL: <http://www.jkl.bc.niigata-u.ac.jp/>

Abstract In attempt to clarify the control mechanism of the stomatognathic system during biting, we have been analyzing TMJ loading, employing a 2-D static model of the jaw. To expand the analysis into a three-dimensional one, we developed a simple 3-D rigid body model of the jaws, and then analyzed the loading during unilateral biting, in order to elucidate how each masticatory-muscle force affects the bite force and TMJ loading on both the working and non-working sides. The results were summarized as follows: 1) the activation of the masseter and anterior temporalis muscles on both sides generates the bite force, and that on the non-working side has a function of reducing TMJ loading on the working side, as already recognized; 2) the activation of the lateral pterygoid muscle on both sides does not function in the generation of the bite force, as expected from our previous 2-D analysis; and 3) the activation of the medial pterygoid muscle on both sides also generates the bite force, and that on the non-working side deviates the direction of the TMJ-loading vector on the working side latero-posteriorly.

Key words temporomandibular joint loading, bite force, static analysis, masticatory muscles, unilateral biting

1. まえがき

咀嚼やかみしめ動作では、上下歯列間やその間に介在する食片にかみしめ力（咬合力）が加わる。それと同時に、顎関節にも荷重（顎関節負荷）が加わることが知られている[1-3]。この負荷の役割には、顎関節の正常な機能と構造の維持にあるとされている。しかし他方、顎関節内障の原因の1つともされている[1]。そのため正常な顎関節では、負荷は何らかの方法により、制御・調節されているものと考えられている。

顎関節負荷に関する研究の方法論の1つに、静力学モデルを用いた数値解析法がある[2, 4-19]。しかし、そのほとんどは負荷の大きさの議論に留まっており、その調節性にまで言及している報告は少ない[9]。

そこで著者らは、2次元静力学的モデルを用いて、「顎関節負荷の調節性」について解析してきた[5-8]。先行研究では、咬筋と側頭筋前部の活動比による顎関節負荷の最小化[5-7]、側頭筋後部活動による顎関節負荷の軽減[7]、両側かみしめ実験データを用いた顎関節負荷の調節性[8]について明らかにしてきた。今回、これらの成果を2次元的に拡張することを目的として、新たに3次元静力学的モデルを構築した。本研究では、第1ステップとして、片側かみしめ時における咀嚼筋の各筋力が顎関節負荷に与える影響について解析する。

2. ヒトの上下顎の解剖学的構造

2.1 咀嚼筋

図1に、上下顎骨と咀嚼筋を示す。上顎骨は頭蓋骨と一体となっている。下顎骨は顔面頭蓋の下部を占め、顎関節を介して頭蓋と結合する。咀嚼筋は、頭蓋骨と下顎骨の間に付着している一筋群である。咀嚼筋は咬筋、側頭筋、内側翼突筋、外側翼突筋の4つの筋からなる。それらの筋の活動は、下顎を挙上し、咀嚼、嚥下、発音の機能に深く関与する。

2.2 顎関節

顎関節は、側頭骨の下顎窩と下顎骨の間につくられる関節である（図1）。下顎窩と下顎骨は、粘弾性をもつ関節軟骨で覆われ、受圧に適した構造となっている（図2）。関節全体は軟組織の関節包に覆われている。関節包の機能には、1)潤滑液の分泌による摩擦の軽減；2)下顎頭の運動範囲の制限などがある。下顎窩と下顎骨の間には、繊維性結合組織の関節円板が介在する。関節円板の機能には、1)下顎頭の運

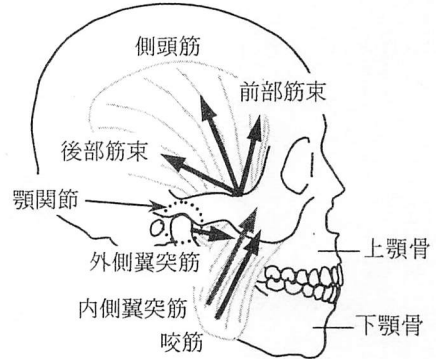


図1 顎骨と咀嚼筋

Fig.1 Jaw bones and masticatory muscles

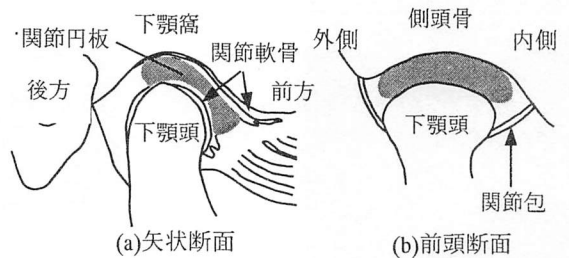


図2 顎関節の解剖学的構造

Fig.2 Anatomical structure of the temporomandibular joint: (a) sagittal cross-section and (b) frontal cross-section.

動時における摩擦の軽減；2)負荷の負担がある。

3. 下顎の三次元静力学モデル

3.1 筋力ベクトルの設定

図3に下顎の静力学モデルを示す。基準直交座標系O-XYZは次のように設定した。その原点Oは、両側の「関節負荷の作用点」を結ぶ線分の中点とした。この線分の方向にX軸をとり、Y軸は眼耳平面に平行とした。モデルに含めた咀嚼筋は、咬筋、側頭筋前部、外側翼突筋、内側翼突筋とした。咬合力ベクトルは左側第一大臼歯の1点に加わるものとし、その方向は咬合平面に垂直かつ下向きとした。矢状面投影における咬合平面の前方傾斜角は、眼耳平面に対して $10[^\circ]$ とした。

Nelsonの報告[13]を参考にして、咀嚼筋筋力ベクトルと咬合力ベクトルの作用点および方向余弦、さらに顎関節負荷ベクトルの作用点を設定した。それぞれ表1と表2に、各ベクトルの作用点の座標と方向

余弦を示す。

咀嚼筋筋力の大きさは、Koriath の報告[16]に準じて設定した。筋力は、積分筋電図 E 、筋の断面積 $A[\text{cm}^2]$ 、骨格筋定数 $K[\text{N}/\text{cm}^2]$ から推定する。筋の最大随意かみしめ時における積分筋電図を E_{MVC} とすれば、そのときの筋力 $f[\text{N}]$ は、

$$f = (E/E_{MVC}) \cdot A \cdot K \quad (1)$$

で与えられる。式(1)から、筋の最大筋力 $f_{\max}[\text{N}]$ は、

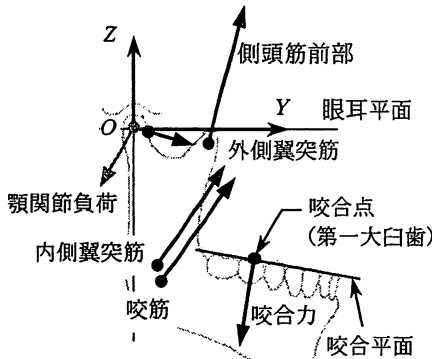
$$f_{\max} = A \cdot K \quad (2)$$

で与えられる。骨格筋定数 K の値は Koriath の報告[16]に準じた。表3に筋断面積 A と最大筋力 f_{\max} を示し、表4に左側かみしめ時における (E/E_{MVC}) と咀嚼筋筋力 f の値を示す。この筋力推定値 f を以後、各筋の筋力の基準値と呼ぶ。

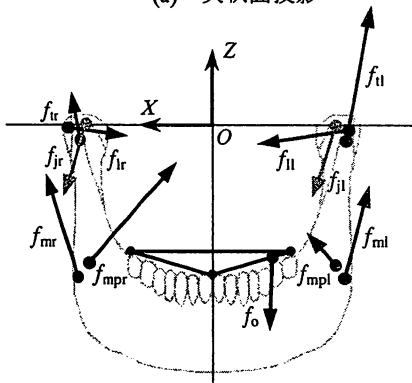
3.2 静力学平衡条件

まず、モデルのパラメータを以下に示す：

F_x =各咀嚼筋筋力の x 成分の総和 $[\text{N}]$, F_y =各咀嚼筋筋力の y 成分の総和 $[\text{N}]$, F_z =各咀嚼筋筋力の z 成分の



(a) 矢状面投影



(b) 前頭面投影

図3 下顎の3次元静力学モデル
Fig.3 A three-dimensional model of the jaw: (a) sagittal projection and (b) frontal projection.

総和 $[\text{N}]$, M_x =各咀嚼筋筋力の X 軸に関するモーメントの総和 $[\text{N}\cdot\text{mm}]$, M_y =咀嚼筋筋力の Y 軸に関するモーメントの総和 $[\text{N}\cdot\text{mm}]$, M_z =各咀嚼筋筋力の Z 軸に関するモーメントの総和 $[\text{N}\cdot\text{mm}]$, f_{jx} =両側の顎関節負荷の x 成分 $[\text{N}]$, f_{jx} =非作業側(右側)の顎関節負荷

表1 筋力, 顎関節負荷, 咬合力の作用点の座標
Table 1 Coordinates of the point of application of muscle-force, TMJ-loading on right side (non-working) and bite-force on left side (working).

部位	座標		
	x[mm]	y[mm]	z[mm]
咬筋	43.75	12.19	-49.47
側頭筋前部	41.72	34.20	-5.15
外側翼突筋	43.36	3.30	-1.29
内側翼突筋	39.47	4.79	-45.70
顎関節負荷	45.42	0.00	0.00
第一大臼歯(左側)	-19.58	58.78	-43.97

表2 筋力ベクトルと咬合力ベクトルの方向余弦
Table 2 Direction cosines of muscle-force and bite-force vectors.

部位	λ	方向余弦	
		μ	ν
咬筋	0.207	0.566	0.798
側頭筋前部	0.149	0.254	0.956
外側翼突筋	-0.894	0.691	0.180
内側翼突筋	0.485	0.504	0.714
第一大臼歯(左側)	-0.172	-0.171	-0.970

表3 咀嚼筋の断面積と最大筋力
Table 3 Cross-sectional area and maximum muscle-force of masticatory muscles.

部位	断面積 $A[\text{cm}^2]$	最大筋力 $f_{\max}[\text{N}]$
咬筋	6.80	272.0
側頭筋前部	3.95	158.0
外側翼突筋	2.39	95.6
内側翼突筋	4.37	174.8

表4 左側かみしめ時における E/E_{MVC} と筋力推定値 f

Table 4 E/E_{MVC} and estimated muscle-force f during left group function biting.

部位	非作業側(右側)		作業側(左側)	
	E/E_{MVC}	筋力 f [N]	E/E_{MVC}	筋力 f [N]
咬筋	0.267	76.62	0.234	63.65
側頭筋前部	0.070	11.06	0.660	104.28
外側翼突筋	0.122	11.66	0.473	45.21
内側翼突筋	0.760	132.85	0.070	12.24

の x 成分[N], f_{jx} =作業側 (左側) の顎関節負荷の x 成分[N], f_{jy} =非作業側の顎関節負荷の y 成分[N], f_{jz} =作業側の顎関節負荷の y 成分[N], f_{jz} =非作業側の顎関節負荷の z 成分[N], f_{jz} =作業側の顎関節負荷の z 成分[N], M_{jy} =非作業側の顎関節負荷の Y 軸に関するモーメント[N·mm], M_{jy} =非作業側の顎関節負荷の Y 軸に関するモーメント[N·mm], M_{jz} =非作業側の顎関節負荷の Z 軸に関するモーメント[N·mm], M_{jz} =非作業側の顎関節負荷の Z 軸に関するモーメント[N·mm], $f_{\alpha x}$ =咬合力の x 成分[N], $f_{\alpha y}$ =咬合力の y 成分[N], $f_{\alpha z}$ =咬合力の z 成分[N], $M_{\alpha x}$ =咬合力の X 軸に関するモーメント[N·mm], $M_{\alpha y}$ =咬合力の Y 軸に関するモーメント[N·mm], $M_{\alpha z}$ =咬合力の Z 軸に関するモーメント[N·mm]. これらのパラメータに関して、静力学平衡条件から、

$$F_x + f_{jx} + f_{jx} + f_{\alpha x} = 0, \quad (3)$$

$$F_y + f_{jy} + f_{jy} + f_{\alpha y} = 0, \quad (4)$$

$$F_z + f_{jz} + f_{jz} + f_{\alpha z} = 0, \quad (5)$$

$$M_x + 0 + 0 + M_{\alpha x} = 0, \quad (6)$$

$$M_y + M_{jy} + M_{jy} + M_{\alpha y} = 0, \quad (7)$$

$$M_z + M_{jz} + M_{jz} + M_{\alpha z} = 0, \quad (8)$$

が成立する[17].

この連立方程式は、未知数が咬合力ベクトルと顎関節負荷ベクトルの 9 個あるために、解を得ることができない。そこで次の 2 つの条件を与えた: 1)咬合力ベクトルの方向は固定; 2)両側の顎関節負荷ベクトルの内外側成分 (x 成分) の和、

$$f_{jx} = f_{jx} + f_{jx} \quad (9)$$

を未知数とする。この条件下では未知数は 6 個となるために、式(3)-(9)から、咬合力の大きさ f_0 と f_{jx} を含む顎関節負荷ベクトルの成分を得る。さらに、Smithらの報告(1986)[11]と同様に、 $f_{jx} = f_{jx}$ と仮定すれば、顎関節負荷ベクトルの x 成分は、

$$f_{jx} = f_{jx} = f_{jx}/2 \quad (10)$$

から得ることができる。

以上の方法を用いて、表 1-4 に示した数値を静力学モデルに代入し、筋力の基準値を与えたときの f_0 、および両側の顎関節負荷ベクトルの大きさ f_{jx} と f_{jz} を求めた。その結果、 $f_0 = 203.53$ [N], $f_{jx} = 157.23$ [N], $f_{jz} = 95.37$ [N]を得た。

4. 実験方法

作業側 (左側) の咀嚼筋筋力 $\{f_{mb}, f_{lb}, f_{ib}, f_{mpl}\}$ をパラメータとし、咬合力ベクトルの大きさ f_0 と両側の顎

関節負荷ベクトル $\{f_{jr}, f_{jl}\}$ との関係求めた。各パラメータ筋力の変化範囲は基準値の 50[%]~150[%](分解能 1[%]) とした。非作業側 (右側) の各咀嚼筋筋力は全て基準値に固定した。

次に、非作業側 (右側) の $\{f_{mr}, f_{lr}, f_{ir}, f_{mpr}\}$ をパラメータとし、 f_0 と $\{f_{jr}, f_{jl}\}$ との関係求めた。 f_{mpr} の変化範囲は基準値の 50[%]~130[%]とし、それ以外の筋力の変化範囲は上記の実験と同じとした。作業側 (左側) の各咀嚼筋筋力は全て基準値に固定した。

5. 実験結果

図 4 に、咬合力ベクトルの大きさ f_0 と作業側顎関節負荷ベクトルの大きさ f_{jz} との関係を示す。図 5 に、作業側の各咀嚼筋筋力と顎関節負荷ベクトルとの関係を示す。負荷ベクトルは全て 1)矢状面投影では、顎関節円板の中央狭窄部方向、2)前頭面投影では、作業側が外側方向、非作業側が内側方向を指した。

図 6 に、 f_0 と非作業側顎関節負荷ベクトルの大きさ f_{jz} との関係を示す。図 7 に、非作業側の各咀嚼筋筋力と顎関節負荷ベクトルとの関係を示す。負荷ベクトルは全て図 5 とほぼ同じ方向を指した。

6. 考察

まず、作業側の咀嚼筋が顎関節負荷と咬合力に与える影響について論じる。咬筋活動は、咬合力と顎関節負荷に深く関わっていた (図 4)。一方、顎関節負荷については、作業側ではその大きさ、非作業側ではその方向に深く関わっていた (図 5(a))。側頭筋前部の活動も、同じように咬合力と顎関節負荷に深く関わっていた (図 4, 図 5(b))。外側翼突筋の活動は、咬合力の大きさにはほとんど関わらなかった (図 4)。顎関節負荷については、作業側では増加させ、非作業側では内外側方向に変化させた (図 5(c))。内側翼突筋の活動は、咬合力には補助的に関わり (図 4)、顎関節負荷にはほとんど関わらなかった (図 5(d))。

以上の結果から、作業側の咀嚼筋には以下に示す機能分担があると考えられる: 1)咬筋と側頭筋は咬合力と負荷に関与; 2)外側翼突筋は負荷の内外側成分を調節; 3)内側翼突筋は咬合力に補助的に関与。この中の 1)-2)は、2次元モデルを用いた先行研究 (伊藤ら, 1996) [5]と同じ結論となった。

次に、非作業側の咀嚼筋が顎関節負荷と咬合力に与える影響について論じる。咬筋活動は、咬合力と顎関節負荷に深く関わっていた (図 6)。顎関節負荷

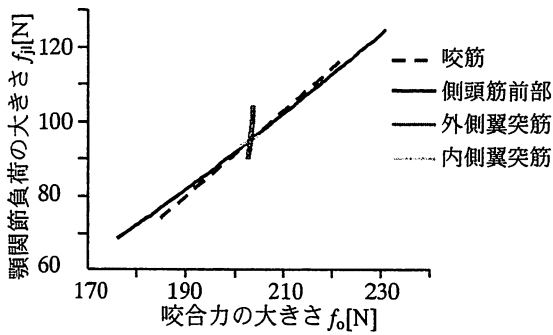


図4 咬合力 f_o と作業側の顎関節負荷 f_{jl} との関係
Fig.4 Relationship between bite-force f_o and TMJ loading f_{jl} on working side.

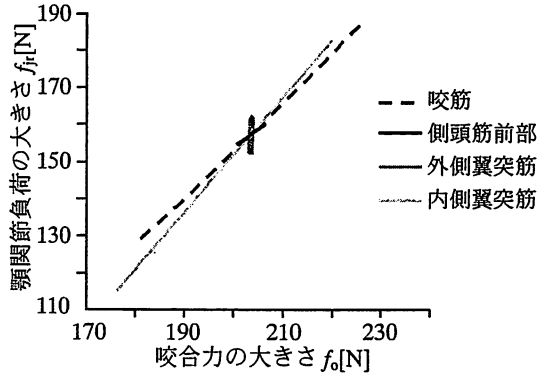


図6 咬合力 f_o と非作業側の顎関節負荷 f_{jr} との関係
Fig.6 Relationship between bite-force f_o and TMJ loading f_{jr} on non-working side.

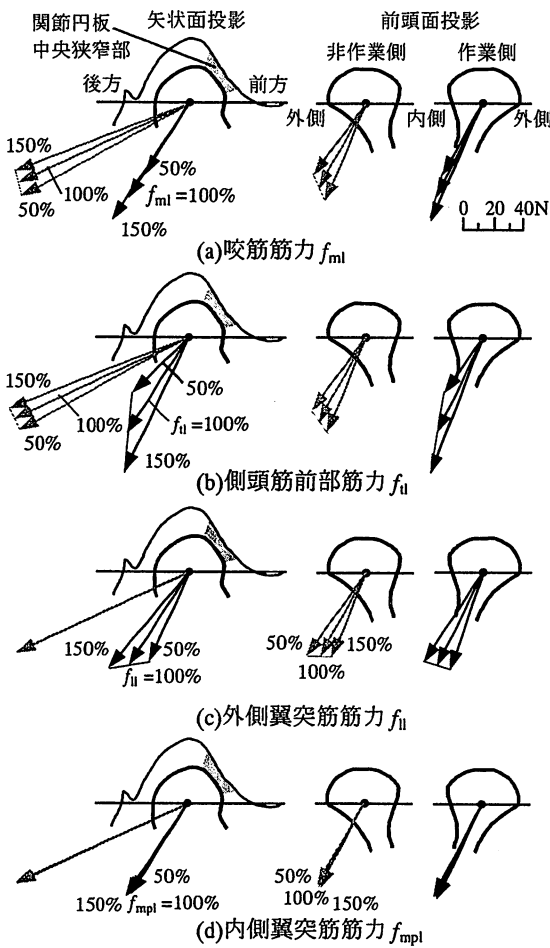


図5 作業側の咀嚼筋筋力と顎関節負荷ベクトルとの関係
Fig.5 Relationship between muscle-force of masticatory muscles on working side and TMJ-loading vector.

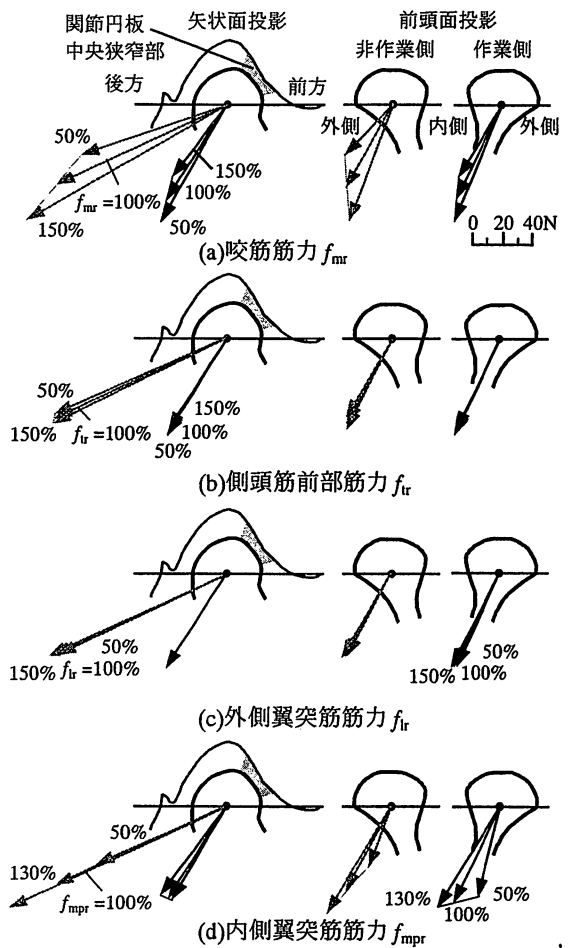


図7 非作業側の咀嚼筋筋力と顎関節負荷ベクトルとの関係
Fig.7 Relationship between muscle-force of masticatory muscles on non-working side and TMJ-loading vector.

については、非作業側では増加し、作業側では軽減した(図7(a))。側頭筋前部の活動は、咬合力には補助的に関わり(図6)、顎関節負荷については、非作業側では増加し、作業側では軽減した(図7(b))。内側翼突筋の活動も咬合力と顎関節負荷に深く関わっていた(図6)。外側翼突筋の活動は、咬合力の大きさにはほとんど関わらなかった(図6)。顎関節負荷については、非作業側では増加し、作業側では内外側方向の調節に関わっていた(図7(c))。内側翼突筋の活動は、咬合力と顎関節負荷に深く関わっていた(図6)。顎関節負荷については、非作業側ではその大きさ、作業側ではその方向(外側後方)に深く関わっていた(図7(d))。

以上の結果から、非作業側の咀嚼筋には以下に示す機能分担があると考えられる:1)咬筋は、咬合力と負荷に関与;2)側頭筋前部は、咬合力に補助的に関与;3)外側翼突筋は、負荷の内外側成分を調節;4)内側翼突筋は、咬合力と負荷に関与。

DuBrul(1995)[3]は、「片側かみしめ時、咬筋と内側翼突筋は、作業側よりも非作業側が活発に活動する」と報告している。これは上記の観点からすれば、効率よく咬合力を発現し、かつ<作業側>の顎関節負荷を軽減する機能があるものと考えられる。また、「側頭筋は非作業側よりも作業側の方が活発に活動する」[3]も報告している。その現象も本研究の結果から、側頭筋は両側とも効率よく咬合力を発現し、かつ非作業側の活動により<作業側>の顎関節負荷を軽減する機能があるものと考えられる。

6. あとがき

咀嚼筋が顎関節負荷に与える影響について、静力学的観点から検討した。その結果、片側かみしめ時における咀嚼筋の機能について、以下の4点が明らかになった:1)咬筋の活動は両側とも咬合力の発現に関与、非作業側咬筋の活動は作業側の関節負荷を軽減;2)側頭筋前部の活動は両側とも咬合力の発現に関与、非作業側側頭筋前部の活動は作業側の関節負荷を軽減;3)外側翼突筋の活動は両側とも咬合力の発現には無関係;4)内側翼突筋の活動は両側とも咬合力の発現に関与、非作業側内側翼突筋の活動は作業側の負荷ベクトルを外側後方に偏位。

次のステップでは、咬合力と外側翼突筋筋力が一一定のとき、「咬筋、側頭筋前部、内側翼突筋の活動による顎関節負荷の調節性」について理論解析する。

- [1] 藍稔, 顎機能異常と咬合, pp.29-49, 医歯薬出版, 東京, 1999.
- [2] Gaylord S. Throckmorton, "Temporomandibular joint biomechanics," *Oral and Maxillofacial Surgery Clinics of North America*, vol.12, no.1, pp.27-42, 2000.
- [3] E. L. DuBrul, Sicher and DuBrul's Oral Anatomy 8th edition, pp.107-133, Ishiyaku Euro America, Inc. St. Louis, Tokyo, 1988.
- [4] G. J. Pruijm, et al., "Forces acting on the mandible during bilateral static bite at different bite force levels," *Journal of Biomechanics*, vol.13, no.7/8, pp.755-763, 1980.
- [5] 伊藤建一, 他, "咀嚼筋による顎関節負荷の調節性-2次元モデルを用いた静力学的分析-, " *バイオメカニズム学会編 バイオメカニズム 13*, pp.227-236, 東京大学出版会, 東京, 1996.
- [6] K. Itoh, et al., "Controllability of temporomandibular joint loading by coordinative activities of masticatory muscles: a two-dimensional static analysis," *Frontiers Medical and Biological Engineering*, vol.8, no.2, pp.123-138, 1997.
- [7] K. Itoh and T. Hayashi, "Functions of masseter and temporalis muscles in the control of temporomandibular joint loading - a static analysis using a two-dimensional rigid-body spring model," *Frontiers Medical and Biological Engineering*, vol.10, no.2, pp.17-31, 2000.
- [8] 阿部誠, 他, "顎関節負荷の調節における側頭筋後部の機能-両側かみしめ実験データを用いたモデル解析-, " *信学技報, MBE99-156*, March, 2000.
- [9] B. M. May, C. Garabadian, "Reducing condylar compression in clenching patients," *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, vol.28, no.3&4, pp.389-394, 2000.
- [10] P. Baron and T. Debussy, "A biomechanical functional analysis of the masticatory muscles in man," *Archives of Oral Biology*, vol.24, no.7, pp.547-553, 1979.
- [11] D. M. Smith, et al., "A Numerical model of temporomandibular joint loading," *Journal of Dental Research*, vol.65, no.8, pp.1046-1052, 1986.
- [12] D. C. Hatcher, et al., "Development of mechanical and mathematic models to study temporomandibular joint loading," *The Journal of Prosthetic Dentistry*, vol.55, no.3, pp.377-384, 1986.
- [13] G. J. Nelson, "Three dimensional computer modeling of human mandibular mechanics," *Master of Science Thesis, University of British Columbia, Vancouver*, 1986.
- [14] J. H. Koolstra et al., "A three-dimensional mathematical modal of human masticatory system predicting maximum possible bite forces," *Journal of Biomechanics*, vol.21, no.7, pp.563-576, 1988.
- [15] 窪木拓男, "顎関節負荷ならびに顎関節構造の対負荷特性に関する生物力学的研究 第1, 2, 3編," *岡山歯科学会雑誌*, vol.9, no.1, pp.179-227, 1990.
- [16] T. W. P. Koriath and A. G. Hannam, "Effect of bilateral asymmetric tooth chenching on load distribution at the mandibular condyles," *The Journal of Prosthetic Dentistry*, vol.64, no.1, pp.62-73, 1990.
- [17] P. G. S. Trainor and K. R. McLachlan, "A numerical model to predict the force output of the jaw musculature," *Engineering Optimization*, vol.18, no.2, pp.317-328, 1992.
- [18] 細井栄二, 他, "咬合力と積筋電位の実測値を用い静力学的平衡式により試みた顎関節負荷算出法," *日本顎関節学会雑誌*, vol.12, no.1, pp.32-41, 2000.
- [19] B. May, et al., "A three-dimensional model of temporomandibular joint loading," *Clinical Biomechanics*, vol.16, no.2, pp.489-495, 2001.