口輪筋活動のコンピュータによる筋電図解析に関する研究

米 沢 功 至

北海道大学歯学部口腔生理学講座 (主任: 亀田和夫教授)

現所属: 北海道大学歯学部歯科補綴学第二講座

[受付: 昭和57年12月20日]

EMG analysis of orbicularis oris muscle activity with a computer

Noriyuki Yonezawa

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

Present address: Second Department of Prosthetic Dentistry,
Hokkaido University School of Dentistry
North 13 West 7, Kita-Ku, Sapporo 060

[Accepted for publication: December 20, 1982]

Key words : orbicularis oris muscle/EMG activity/computer analysis/lip displacement/intraoral air pressure

Abstract: To investigate performance of M. orbicularis oris, one of the articulatory muscles, computer processed measurements of EMG activity were examined. This muscle can protrude lips and also can tighten lips to prevent air escape. Subjects could monitor the displacement of upper lips or intraoral air pressure levels and they were requested to maintain their lip position or oral pressure at either one of six or five predetermined levels.

EMG data were recorded. Records of stationary activity period of 4.1 seconds were processed with a computer, which could detect occurrence of peaks, peak amplitude, and duration of activity beyond a certain level, to calculate following two indices. Index A takes into account both amplitudes and duration of peaks, and is related to integrated EMG values. Index B reflects peak amplitude only, and is similar to "amplitude" proposed by Fitch.

Comparing these two indices with displacement and oral pressure, the following findings were obtained.

(1) Both two indices were almost proportional to displacements of upper lips.

(2) Values of both indices increased steeply as intraoral air pressure increased at lower pressure levels, but increments were less steep if pressure was increased more. The rate of increment was different between Index A and B.

These results suggest that both indices well reflect the muscular works, and that synchronization and interference of motor unit activities occurred if high air pressure was produced, although they were rare or absent when protruding of lips or low pressure levels. Possible clinical applications of these indices were also discussed.

緒 言

筋活動の解析には筋電図が多く用いられるが、その客観性を高めるためには筋電図積分値¹⁻⁸⁾、FitchとWillisonによる自動解析装置を用いた計数値⁹⁻¹³⁾などが用いられているが、近年コンピュータによる定量化も試みられている^{14,15)}。

札幌市北区北13条西7丁目 (〒060)

顔面の筋について筋電図を用いた研究は、Moyers¹⁶⁾によって行なわれて以来、その多くは咀嚼筋についてであり^{4,5,17,18)}、表情筋についての報告は少ない。表情筋の一つである口輪筋は発声、嚥下、咀嚼などにおいて、口唇の複雑かつ精巧な運動を行ない、またそれに伴う口腔内圧の生起、調節にも大きく関与しているが、その筋電図による研究の多くは、口唇の変位あるいは口腔内圧を測

定していない^{20,21)}。また筋電図についてもその定性的な観察によるものが多く、コンピュータによる解析を行なった報告は見られない。

本研究は筋電図を定量的に解析するために二つの指標 (Index A, Index B) を求めるコンピュータプログラムを作成し、これによって筋電図より口唇の変位、口腔内圧に対応する口輪筋の機能を定量的に解析することを目的としたものである。

方 法

1. 被験者および EMG 導出筋

21才から26才までの、発音、咀嚼、嚥下に特に異常を認めない6名の健康な男子を被験者とした。筋電図信号 (Fig. 1) は口輪筋から、上唇の右側中央部に貼付した Ag-AgCl 電極によって導出した (Photo 1)。

2. 実験装置 (Fig. 3)

外部からの電氣的雑音を遮蔽して筋電図活動を記録するために銅網によるスクリーンを吊り下げ、これをシールドネットと呼んだ (Photo 2)。これは被験者が自己の口唇の変位ないし口腔内圧測定の結果を直視し、コントロールすることを容易にした。被験者はシールドネットの中に楽な姿勢で座し、モニター CRO 上の輝線を所定の位置に静止させることによって、変位あるいは口腔内圧をコントロールした。タイマーとアナログスイッチとによって4.1秒間の長さになった筋電図信号は、データレコーダーに記録され、その後マイクロプロセッサを搭載したデータ処理装置 (日本光電: ATAC-450) によって処理され、ヒストグラム、パワースペクトル、および Index A, Index B が求められた。

変位計は Abbs ら^{22,23)} に準じて製作したもので、 $0.1 \times 15 \times 35$ mm のステンレス板を2枚直角

Fig. 1 Samples of EMG records in various experimental conditions. Left three traces are from protrusion experiments, and right three are from intraoral air pressure experiments. Levels of protrusion or pressure are indicated by percentage. Note the difference in activity between protrusion and pressure experiment in each levels.

Fig. 2 View of facial muscles. EMG was introduced from the upper right side of orbicularis oris muscle.

Fig. 3 Diagram of recording and analysis of EMG data. Subjects, sitting inside shield net, monitored the displacement of upper lip or intraoral air pressure with CRO. EMG signals were recorded on the magnet tape and reproduced for further analysis by the computer (ATAC-450).

に交差させて上下前後方向に可動にしており、先端の鋼線を介して上唇の赤唇中央部に付着した。ステンレス板上のひずみゲージは固定抵抗器とブリッジ回路を形成した。変位計および固定抵抗器を入れた小金属箱はヘルメットと一体をなして頭部に固定されている (Photo 1)。

口腔内圧は圧トランスデューサー (東洋ボール

ドウィン: MP-0.5-290-0-3) と口腔内とを水で満たした内径 1 mm のポリエチレンチューブで連結して計測された (Fig. 4)。

3. 実験条件

5名の被験者は5回、1名は3回の実験を行ない、計28回の実験が行なわれた。1回の実験において、口唇の変位 (突き出し) と口腔内圧を高め

Fig. 4 Schematic illustration for measurement of intraoral air pressure. Pressure transducer was connected with a polyethylene tubing, which was led to oral cavity. The tubing was filled with water through a 3-way stopcock. The tip of tubing was made wide and had several pores opened in the various directions.

Photo. 1 Experimental set up of lip protrusion experiment. Displacement transducer connect to the upper lip.

る二種類の動作が行なわれた。口唇の安静時の位置、大気圧をそれぞれ変位、口腔内圧ゼロとし、最大の変位および口腔内圧を 100% の変位、内圧とした。変位の測定は $25\mu\text{m}$ 測定可能な精度をもち、15mm まで直線性をもっていたが、口唇の突き出しは最大で 13 mm であった。口腔内圧は $0.3\text{ cm H}_2\text{O}$ まで測定可能で、最大の口腔内圧 $144\text{ cm H}_2\text{O}$ まで十分にリニアに測定された。変位の実験では 10, 20, 40, 60, 80, 100% の 6 通り、口腔内圧の実験では 10, 20, 40, 60, 100% の 5 通りのレベルの動作を行なわせた。いずれのレベルの動作においても、それぞれ 6 回ずつの試行がなされた。Index A, B は 6 回の試行のそれぞれの筋電図処理値の平均値である。

4. 筋電図処理

Photo. 2 Recording apparatus and shield net suspended from the ceiling. The size is $110 \times 90\text{ cm}$ in horizontal plane and 2 m in height.

筋電図信号はコンピュータ (ATAC-450) によって 1 m sec ごとにサンプリング、A/D 変換され、 $2^{12} = 4096$ の数値から以下の処理が行なわれた。図 5 の A に示すように、信号の基線から正の側のピークまでの値はパルスハイト (Pulse Height) といわれ、波形が上向きに基線を横切り、次に基線に復帰するまでの時間をドウェルタイム (dwell time) といわれる。コンピュータに内蔵されたプログラムによって、統計的分布を示すヒストグラムが求められた。また同様にコンピュータに内蔵されたプログラムによってフーリエ解析を

A : raw surface EMG

DT(dwel time) = $\sum a_i$ PH(pulse height) = $\sum b_i$ PC(pulse count) = n

$$\text{Index A} = \frac{\text{DT} \times \text{PH}}{\text{PC}}$$

$$\text{Index B} = \text{PH}$$

B : uniform sinusoids with mean amplitude & duration

$$a = \overline{\text{DT}} = \frac{\text{DT}}{\text{PC}}$$

$$b = \overline{\text{PH}} = \frac{\text{PH}}{\text{PC}}$$

$$\text{Index A} = \frac{\text{DT} \times \text{PH}}{\text{PC}}$$

$$= a \times b \times n$$

$$= \text{shaded area}$$

$$\text{Index B} = \text{PH} = n \times b$$

Fig. 5 Calculation of Index A and Index B. From raw surface EMG(A), DT, PH and PC were obtained with a provided programme tape of the computer with a little modification. Index A and Index B were calculated with a programme written for this analysis. In a idealized situation, meanings of these Indices were explained in(B) in which raw surface EMG waveforms were replaced with the uniform sinusoids with mean amplitudes and duration.

行ない、周波数のパワースペクトルを求めた。

筋電図積分値 (integrated EMG, IEMG) は、モジュール式筋電計 (三栄測器: Medelec MS 6) の積分モジュール (I 6) を用い、オートリセットモードでリセット数を計数した。

上述の分析、検討に基いて自作のプログラムに

よってコンピュータに二つのパラメータ Index A, Index B を計算させた。Fig. 5(A)に示すように、パルスハイト b_1 から b_n までの和を DT, 基線を横切った上向きの波形の総数をパルス カウント (PC) とした時, Index A は $\text{PH} \times \text{DT} / \text{PC}$, Index B は PH として定義される。これら二つの Index を Fig. 5(B)で模式化したように, a_1 から a_n までの平均値 a , b_1 から b_n までの平均値 b , そして上向きの波数 n をもつ単純な正弦波によって筋電図波形を置き換えてみると, その意味は理解できる。すなわち Fig. 5(A)における DT, PH, PC と a , b との関係は, $a = \text{DT} / \text{PC}$, $b = \text{PH} / \text{PC}$, $n = \text{PC}$ であることから, 斜線部の面積 $a \times b \times n$ は Index A に相当する。また筋電図信号と b , n との関係は $b = \text{PH} / \text{PC}$, $n = \text{PC}$ であるが, この正弦波における PH は $n \times b$ であるから, 筋電図信号の PH, すなわち Index B に等しい。以上のことから Fig. 5(B)における正弦波は筋電図波形を平均値 a , b によって近似したものであり, Index A は波形と基線との間の面積の近似値, Index B は波形の振幅の和の $1/2$ に対する近似値であると考えられる。

実験結果

1. 筋電図波形の分析

波形の性状をあらわすための統計的処理の結果の全体の傾向は共通していたので, 典型的な試行例についてのグラフを示す。

パルスハイトヒストグラムは Fig. 6 に示したが, これは前述の pulse height の統計的分布を示している。口唇の変位の実験は Fig. 6 (A), 口腔内圧の実験は Fig. 6 (B) である。縦軸は例数, 横軸は pulse height の電圧値である。変位実験では $0.05 \sim 0.07 \text{ mV}$ の小さな振幅の波形がいずれの変位においても最も多く, 全体が三角形をなしている。これに対して内圧実験では, 圧が増大するにつれてより大きな振幅のものが増加しているため, 最大頻度を示すピークは明瞭でなくなり, 全体の形も台形状となった。

同一例のドウェルタイムヒストグラムを Fig. 7 に示し, A は変位実験, B は内圧実験である。これは前述の dwell time の分布を示したもので, 縦軸が例数, 横軸がドウェルタイム値を示す時間

Fig. 6 Pulse height histogram in lip protrusion experiment (A) and intraoral air pressure experiment (B). "Pulse height" is the voltage between the baseline and the peak value for a given upward deflection. Abscissa shows the range of pulse height, from -1 mV at the left end to $+1$ mV at the right end, the center of abscissa 0 V. Ordinate shows the frequency of occurrence and maximum of it indicates 32 cases of the identical pulse height.

である。変位実験ではいずれの変位量においても $1 \sim 2$ msec の dwell time が最も多いが、変位が大きくなるにつれて長い dwell time をもつ波形が多くなった。口腔内圧の実験では最大頻度の dwell time は圧が増すにつれて長くなり、図では100%の圧で約 3 msec にピークの一つがある。変位実験に較べて、長い dwell time をもつ波形の割合はいずれのレベルについても大きく、かつ全体の形状も平坦となった。

さらにこの例のパワースペクトルは Fig. 8 に示した。(A)は変位実験、(B)は内圧実験の場合である。横軸は周波数、縦軸は各周波数におけるパワ

ー値、すなわちそれぞれの周期的成分波のもつエネルギー値を表している。(A)の変位実験では小さな変位では約 50 Hz 前後の成分が優勢であるのに対して、変位の増大につれて高い周波数成分が現れ、これは筋電図波形が変位の増大につれて鋭くなっていることを示している。(B)の内圧実験では、弱い内圧においては 50 Hz 前後の周波数成分が優勢であるが、内圧が増大しても最大パワーを示す周波数はほとんど変わらず、変位実験よりも低周波成分が優勢であった。

2. Index A および Index B による解析(1)

口唇の変位についての実験

Fig. 7 Dwell time histogram in lip protrusion experiment (A) and intraoral air pressure experiment (B). Dwell time is the duration of one upward deflection. Abscissa shows the range of dwell time, from 0 msec at left end to 12.8 msec at right end. Ordinate shows the frequency of occurrence and maximum of it indicates 32 cases of the identical pulse height.

被験者 6 名による 28 回の実験を通して得られた口唇を突き出した時の変位量と Index A, Index B との関係は Fig. 9 に示した。横軸は最大の変位量を 100% とした時の変位量、縦軸は Index A, Index B 値である。Index A はその処理方法 (Fig. 5-A) から明らかなように、Index B よりも常に大きな値をとった。Index A, Index B はそれぞれ変位量にほぼ比例して増大しており、グラフの直線性からのずれは Index A, Index B 共にほぼ同じ傾向をもっていた。Index A は 10~60% の変位量において、グラフの傾きは Index B のグラフのほぼ 2 倍であったが、60~100% の変位量では 2 倍以上の傾きをもっていた。

3. Index A および Index B による解析 (2)

口腔内圧についての実験

変位実験と同じ 28 回の実験から得られた、口腔内圧と Index A, Index B との関係は Fig. 10 に示す。横軸は最大を 100% とした時の口腔内圧のレベル、縦軸はその時の Index A, Index B の値である。Index A, Index B 共に弱い圧の時には大きな増大を示すが、圧が大きくなるにつれてその増加傾向は減弱した。Index A は 40% の圧で、Index B は 20% の圧でそれぞれの Index の最大値の 70% の値に達した。しかしながら Index B が中等度以上の圧ではほとんど増大しないのに対して、Index A はその傾きを減じながらも増大を続

Fig. 8 Powerspectrum in lip protrusion experiment (A) and intraoral air pressure experiment (B). Abscissa shows the frequency from 0 Hz to 500 Hz as a periodical component of EMG signal wave. Ordinate shows the power of each frequency component in arbitrary units.

けている。

4. Index A および Index B による解析 (3)

統計的処理と個人差

上述の実験を統計的に解析するために分散分析を行ない (Table 1), 変動個人差 (variation between subjects), 変動の Index A, Index B の処理による差 (variation between Indices) および変動の変位差 (variation between protruding levels) ないし内圧レベル差 (variation between pressure levels) の三つの要因について, その変動を解析した。

(A) の変位実験では, 変位量, 処理法共に 0.5 % 水準で有意差が認められた。個人差は 5 % 水準

で有意であり, また個人差と変位量あるいは処理法との交互作用は, 共に 0.5 % 水準で有意であった。(B) の内圧実験では, 内圧のレベル, 処理法共に 0.5 % 水準で有意差が認められた。しかしながら個人差にも, 個人差と内圧レベルあるいは処理法との交互作用にも有意差は認められなかった。

5. 筋電図積分値

筋活動の指標としてしばしば用いられる筋電図積分値を求め, この時の Index A, Index B と対応させたが, その典型的な一例を Fig. 11 に示す。(A) の変位実験では, 積分値は変位量が大きくなるに従ってその曲線の傾きを増して指数関数様に増加した。(B) の内圧実験では, 積分値は 10~60%

Fig. 9 Index A and Index B in lip protrusion experiment. Abscissa is the levels of lip protrusion in percentage, 100% level being the degree of maximal displacement for each subjects. Ordinate is the values of Index A and Index B in arbitrary units.

Fig. 10 Index A and Index B in intraoral air pressure experiment. Abscissa shows the levels of intraoral air pressure, 100% level being the degree of maximal displacement for each subjects. Ordinate is the values of Index A and Index B in arbitrary units.

Table 1 Analysis of variance in lip protrusion experiment (A) and intraoral air pressure experiment (B). In both experiments variation between subjects (B), variation between protruding or pressure levels (D) and variation between Index A and Index B (P) were estimated together with each interaction between these variations.

(A) LIP PROTRUSION EXPERIMENT

Variation		Degrees of freedom	Sum of squares	Variance	Test
Between subjects	B	5	228990.75	45798.15	$V_B/(V_{P \times B} + V_{B \times D} - V_E) = 5.250^*$
Between protruding levels	D	5	2236251.93	447250.39	$V_D/V_{B \times D} = 212.3^{***}$
Between Indices	P	1	1400763.85	1400763.85	$V_P/V_{D \times P} = 207.7^{***}$
Interaction	B $\times$ D	5 $\times$ 5	52672.65	2106.91	$V_{B \times D}/V_E = 7.125^{***}$
Interaction	D $\times$ P	5 $\times$ 1	510460.53	102092.11	$V_{D \times P}/V_E = 345.3^{***}$
Interaction	P $\times$ B	1 $\times$ 5	34560.69	6912.14	$V_{P \times B}/V_E = 23.38^{***}$
E = B $\times$ D $\times$ P		5 $\times$ 5 $\times$ 1	7392.44	295.70	
Total		71	4471092.84		

(B) INTRAORAL AIR PRESSURE EXPERIMENT

Variation		Degrees of freedom	Sum of squares	Variance	Test
Between subjects	B	5	40399.02	8079.80	$V_B/(V_{P \times B} + V_{B \times D} - V_E) = 3.748$
Between pressure levels	D	4	1038130.63	259532.66	$V_D/V_{B \times D} = 204.0^{***}$
Between Indices	P	1	3244747.85	3244747.85	$V_P/V_{D \times P} = 1711^{***}$
Interaction	B $\times$ D	5 $\times$ 4	25439.66	1271.98	$V_{B \times D}/V_E = 1.257$
Interaction	D $\times$ P	4 $\times$ 1	519660.00	129915.00	$V_{D \times P}/V_E = 128.3^{***}$
Interaction	P $\times$ B	1 $\times$ 5	9479.88	1895.98	$V_{P \times B}/V_E = 1.873$
E = B $\times$ D $\times$ P		5 $\times$ 4 $\times$ 1	20244.45	1012.22	
Total		59	4998101.49		

levels of significance * 5% ** 1% *** 0.5%

Fig. 11 Integrated EMG (IEMG), Index A and Index B in lip protrusion experiment (A) and intraoral air pressure experiment (B). Abscissa is the levels of lip protrusion (A) and intraoral air pressure experiment (B). Ordinate shows the values of Integrated EMG, Index A and Index B in arbitrary units.

の圧ではほぼ直線をなして増加し、60~100%の圧ではその傾きをやや減じていた。

考 察

1. 筋電図波形の性状と Index B

表面電極による筋電図は、筋の機能的構成単位である運動単位 (MU) の活動電位が重なりあって記録されるために、複雑な波形を呈する。しかし Milner-Brown ら⁷⁾は、表面電極と針電極とを同時に用い、表面筋電図を平均加算することによって、針電極で記録したと同一の MU の電位のみを表面筋電図から抽出、記録した。また Moore²⁴⁾は、MU の活動電位を模した二相性の波形を重ねるシュミレート実験を行ない、表面筋電図波形に類似の波形を得ている。このようなことから MU の活動と表面筋電図との間には、相関関係のあることが考えられる。先に著者ら²⁵⁾は、口輪筋を含む口唇周囲の表情筋より針電極、表面電極を同時に用

いて筋電図を記録し、今回用いたと同じコンピュータプログラムによって PC, DT, PH を求めたところ、表面筋電図の DT および PH は、それぞれ針電極による筋電図の PH および PC との間に、それぞれ $r=0.58$ から $r=0.78$ までのかなり良い相関を持っていた。表面筋電図の振幅は、発火する MU の数およびその発火頻度がさほど大きくない時には、MU の活動電位間の干渉は少ないから、MU の活動すなわち筋活動のよい指標となることが考えられる。事実パルスハイトヒストグラムを見ると (Fig. 6), 筋活動の増大につれて振幅が増大している。Fitch と Willison^{9,10)} は、筋電図の電位変化を $100\mu V$ ごとに計測して電位累積値 (Amplitude 値) を求めたが、この値は筋張力と比例関係にあるといわれている¹¹⁻¹³⁾。本研究における Index B, すなわち PH は基線から上の振幅の総和値であることから、amplitude 値の $1/4$ にほぼ等しい値をとる。Index B は口唇の変位の実験においては (Fig. 9), ほぼ変位と比例する関係をもっていたが、口腔内圧に比例しなかった。このことは、内圧実験では後述する口輪筋の活動様式の違いと筋張力が高いことのために、recruit する MU の数の増大あるいはその発火頻度の増大が、MU 活動電位間の干渉 (interference) を起こした結果であると考えられた。しかしながらこのことは逆に、Index B が成分 MU の活動様式を表しているものであり、口唇を前に突き出す動作と口腔内圧を高める動作とでは、口輪筋の活動に違いのあることを示唆している。

一方、表面筋電図の持続時間 (dwell time) も成分 MU の発火様式に影響されると考えられる。しかしながら変位実験についての Fig. 7 (A) と Fig. 8 (A) とにおいて、最大の変位では短い持続時間をもつ波形が多く、長い持続時間のものは少ない。ところがパワースペクトルは約 80 Hz と約 120 Hz にピークが見られ、長波長と短波長の波形の二つの成分を持つことになり、持続時間の結果と一致しない。これは短波長の波長が長波長の波形に重なり、長波長波形の活動を覆いかくしていることを示唆しており、持続時間は単独で筋活動の指標として用いるには疑問があると考えられた。

2. 筋電図積分値と Index A

筋活動の指標として多く用いられている筋電図積分値は、波形と基線との間の面積の総和であるから、筋電図の振幅 (pulse height) と持続時間 (dwell time) の双方に関係した値である。積分値が筋張力と比例関係にあるという報告は多くなされているが^{2,3,5,6)}、本実験では口腔内圧の増加と積分値とはかなりよく対応した。しかし口唇の変位とは必ずしもそうではなかった (Fig. 11)。口腔内圧は変位に較べて、より筋張力に対応していることが考えられるが、口輪筋のように複雑な走向をもつ筋の張力の計測は困難であり、計測方法の開発が必要である。

本実験で求めた Index A は、積分値と同じく振幅と持続時間を考慮した指標である。これは一定周期の波形については積分値と対応する値をとるが (Fig. 5-B)、一般的には必ずしもそうではなく筋電図波形については違いが見られた (Fig. 11)。この指標は変位実験においては、積分値よりもよく変位と対応した (Fig. 11-A)。また内圧実験においては、Index A に較べて積分値のほうがよい対応をしているが (Fig. 11-B)、これは Index A の値が MU の活動様式、すなわち後述するように活動電位の干渉、あるいは同期化が増大することを反映しているものであり、指標としての有効性を支持するものと考えられる。

3. 口輪筋の活動について

口唇の変位の実験では、二つの Index 値は変位とほぼ比例関係にあったが、口腔内圧の実験では圧の増大につれグラフの傾きは減弱した。この二つの Index 値間の相違について、以下のことが考えられた。

口唇の突き出しを維持するのに必要な力は、口裂周囲の前方に突き出された組織が、その粘弾性によって元の位置に戻ろうとする力に等しい。これは口腔内圧を高めた時に生ずる最大で 100 cm H₂O 前後の圧に抗して口裂を閉鎖し、かつ口唇を内側へ抑えるために必要な力よりもはるかに小さいものであり、この時の口輪筋全体の活動量も小さいと考えられる。このため低い口腔内圧を得るにも口輪筋の活動量はかなり大きいことが必要であり、その低い圧のレベルで急激に Index 値が

増加したと考えられる。

しかしながら Index A の最大値は内圧と変位の最大レベルではほぼ同じ値をとり、Index B の最大値はむしろ変位実験のほうが大きな値をとった。これは口輪筋の線維構成と電極の貼付位置によると考えられる。すなわち口輪筋は内方の赤唇付近の筋束 (縁部 *pars marginalis*) と外方の筋束 (唇部 *pars labialis*) とに分かれており、縁部は口裂を閉鎖する機能を持っている²⁶⁾。このために口唇を突き出す時には、口裂は軽く開いたままであるから唇部の筋線維が主に収縮し、縁部の収縮は小さいと考えられる。これに対して口腔内圧を高める時の口輪筋の主な機能は口裂を閉鎖することであり、唇部よりはむしろ縁部の線維が強い収縮をしていると考えられる。一方、電極の貼付位置は赤唇外方の唇部線維上であるために、筋電図は唇部線維からの信号を主に導出している。このために Index 値としては、変位実験の方が大きいほぼ同じ値をとったと考えられる。

Milner-Brown ら^{27,28)}は、筋張力が大きくなるにつれて大きなサイズの MU の recruitment が生じてくるが、弱い張力のレベルでは MU の recruitment が主に張力の発生にあずかり、中等度以上のレベルでは MU の発火頻度が主に関与すると述べている。今回の変位実験では、その筋張力が比較的小さいこと、二つの Index 値ともに変位に比例しており振幅と持続時間が一定の関係を保っていることなどから、口唇を突き出す運動では MU の recruitment が主に関与するレベルの筋張力であることが示唆された。一方内圧実験では、二つの Index 値は弱い圧のレベルで急激に増大し、中等度以上の圧のレベルではその傾きを減じていること、および大きな筋張力を必要とすることから、弱い圧のレベルでは主に MU の recruitment が主に張力に関与し、中等度以上の圧のレベルでは主に発火頻度の増大によって張力の増大がなされることが考えられる。とくに Index A と Index B の増加傾向の違いは、Buchthal²⁹⁾あるいは Person ら³⁰⁾が報告しているように、MU の同期化 (synchronization) による波長の増大が大きく関与していると考えられる。また内圧実験では、主に活動する縁部の線維と電極との間には約

5 mm の距離があるために、縁部からの信号が生体組織によるフィルター効果を受けることも、波長の増大に関与していると考えられる。さらに本実験では筋収縮の時間は充分短いため、筋疲労による同期化は無視しうると考えられる。

また内圧実験において中等度以上の圧のレベルでは、二つの Index 値共にその傾きを減じており、口輪筋全体の活動量はさほど増大していないことを示唆している。Isley ら²⁰⁾あるいは White ら²¹⁾が息を強く吹く時には口輪筋と共に頬筋の活動が見られるが、弱く吹く時には口輪筋のみ活動が見られると報告している。これらのことから内圧実験の結果は、大きな口腔内圧を得るためには頬筋などの他の口唇周囲の筋の張力の増大が関与していることを示唆している。一方、変位実験では、二つの Index 値はその増加傾向を減ずることなくほぼ変位に比例して増加した。またこの時の口輪筋の張力は比較的小さいことから、口唇の突き出しに必要な張力は口輪筋の収縮のみで得られ、他の口唇周囲の筋は口唇全体の位置の維持などの二義的な関与にとどまると考えられ、これは実際に針電極によって確かめられた²⁵⁾。

分散分析を行なった結果、変位実験で個人差が認められたが、これは表情筋の発達には個人差が大きく、その形状や走向に大きな相違が見られるため²⁶⁾、および口輪筋筋束間の収縮パターンにより多様な口唇の形状をとりうることから、個人によって筋束間の活動に相違があったためであると考えられた。表情筋の活動パターンが個人によって大きく相違することはすでに報告されており³⁸⁾、本実験の結果と一致する。

内圧実験では個人差は有意ではなかったが、これはその動作が口腔内圧に対抗して口唇を閉鎖するという比較的単純なものであるため、個人間の筋束の収縮パターンの相違が小さかったこと、および変位と筋活動量との関係より口腔内圧と筋活動量との関係のほうが、より直接的であるために個人間におけるばらつきが少なかったことによると考えられる。

口輪筋は咀嚼時などに口唇の運動を行なうだけでなく、構音筋の一つとして口唇による調音を行なっていることから、音声学研究者によってもそ

の生理的意義が調べられてきた。

Fromkin³¹⁾、MacNeilage ら³²⁾は表面電極による筋電図を発声時の口輪筋から導出し、口唇による破裂音である /p, b/ や円唇（まるくち）母音である /u, o/ などでも口輪筋の強い活動が見られると報告しており、Sussman⁸⁾ や Leanderson³³⁾らは針電極を用いて口輪筋活動を調べ、同様の結果を得ている。/p, b/ の発音時の口腔内圧は、Bernthal ら³⁴⁾ら、あるいは Warren³⁵⁾によれば、/p/ が 6 ~ 7 cm H₂O 程度であり、/b/ が 3 ~ 5 cm H₂O 程度である。今回の実験で口腔内圧の最大値は個人によって差が見られ約 82 ~ 144 cm H₂O であったが、口唇による破裂音を発音する時にはせいぜい最大口腔内圧の 20% のレベルの筋活動量を越えない。この圧のレベルでの口輪筋の活動は、圧のレベルの変化につれてその活動量も大きく変化する (Fig. 6)。これはこのレベルの圧の調節をし、口唇による破裂音を構音するのに適した機能を持っていると考えられる。また /u, o/ などの円唇母音では口唇の突き出しを伴うから、本研究の変位と筋電図活動量との関係は円唇母音の調音における口輪筋活動解析の基礎となると考えられる。さらに口唇の様々な運動を行なわせた時の口輪筋の活動を筋電図で調べた報告があるが^{20, 21)}、本研究の結果はこのような口唇の様々な運動を解析する基礎となると考えられる。

また本研究で用いた二つの Index は実験室用のコンピュータによって簡単かつ高速で処理、計算されるから、これを on-line 処理することによって筋活動を real time で表示すること、あるいは他の装置へ出力することができる。すなわちこれらの Index のコンピュータ処理は、さらに総合的な筋活動とそれに由来する生理機能との研究を進めうるものであり、臨床面においても応用の可能性があると考えられた。

結 論

口輪筋活動を定量的に解析するためにその筋電図を分析処理し、筋活動を反映する二つの Index を自作コンピュータプログラムによって求め、Index の検討および口輪筋活動の解析を行なった。

1. 筋電図波形を振幅および持続時間のヒスト

グラム、パワースペクトル、筋電図積分値を求めて分析し、二つの Index が筋の活動量あるいは運動単位の活動様式を知るうえで有効であることが知られた。

2. 口唇の変位、口腔内圧をコントロールしたうえで口輪筋より筋電図を導出し、これから Index A, Index B を求めた。二つの Index は口唇の変位に対してほぼ比例関係を保ち、良い指標となることが判明した。口腔内圧に対しては中等以上の圧では Index 値の増大の割合は小さくなる結果が得られ、これは口輪筋筋線維の活動様式、および大きな筋張力による運動単位活動電位の干

渉あるいは同期化によると考えられた。

3. 以上の解析から、口輪筋は構音時などにおける口唇の運動に適した性質を持っていることが知られた。

謝辞：稿を終えるに当たり、終始御校閲を賜りました北海道大学歯学部口腔生理学講座、亀田和夫教授ならびに本研究の遂行に際し御協力いただいた同講座の各位に衷心より感謝の意を表します。あわせて本研究の遂行に御便宜と御協力を賜りました本学歯科補綴学第二講座内山洋一教授に深謝いたします。

本論文の要旨は第10回国際脳波・臨床神経生理学会議（1981年9月）において発表した。

抄録：構音筋の一つである口輪筋の機能について、定量的な解析を試みた。被験者に口唇の変位、口腔内圧を一定の値に維持させ、そのうちの4.1秒間の筋電図を導出し、定量化した。定量化については、それぞれ積分値、Fitchによる電位累積値に対応する Index A, Index B をコンピュータによって求めた。

(1)口唇の変位に対して、二つの Index 値はほぼ比例関係を保持していた。(2)口腔内圧に対しては、Index A, Index B 共に弱い圧の範囲では急激に増大し、中等度以上の圧では増大の割合は小さくなったが、二つの Index 値の増大のしかたは異なっていた。

これらことから、二つの Index 値が口唇の変位には良好な指標であること、および中等度以上の口腔内圧での MU 活動電位の干渉および同期化を示唆することが考えられた。

文 献

- 1) Lippold, O. C. J. : The relation between integrated action potentials in a human muscle and its isometric tension. *J. Physiol.* 117 : 492-499, 1952.
- 2) Bigland, B. and Lippold, O. C. J. : The relation between force, velocity and integrated electrical activity in human muscles. *J. Physiol.* 123 : 214-224, 1954.
- 3) Inman, V. T., Ralston, H. J., Saunders, J. B. de C. M., Feinstein, B. and Wright, E. W. Jr. : Relation of human electromyogram to muscular tension. *EEG. Clin. Neurophysiol.* 4 : 187-194, 1952.
- 4) Møller, E. : The chewing apparatus. *Acta Physiol. Scan.* 69, Suppl. 280: 1-299, 1966.
- 5) Kawasoe, Y., Kotani, H. and Hamada, T. : Relation between integrated electromyographic activity and biting force during voluntary isometric contraction in human masticatory muscles. *J. Dent. Res.* 58 : 1440-1449, 1979.
- 6) Edwards, R. G. and Lippold, O. C. J. : The relation between force and integrated electrical activity in fatigued muscle. *J. Physiol.* 132 : 677-681, 1956.
- 7) Milner-Brown, H. S. and Stein, R. B. : The relation between the surface electromyogram and muscular force. *J. Physiol.* 246: 549-569, 1975.
- 8) Sussman, H. M., MacNeilage, P. F. and Hanson, R. J. : Labial and mandibular dynamics during the production of bilabial consonants. *J. Speech & Hearing Res.* 16: 385-396, 1973.
- 9) Fitch, P. and Willison, R. G. : Automatic measurement of the human electromyogram. *J. Physiol.* 178 : 289-299, 1965.
- 10) Fitch, P. : An analysis for use in human electromyography. *Elect. Engin.* 39 : 240-243, 1967.
- 11) Troop, J. D. G. and Chapman, A. E. : Analysis of the waveform of the electromyograph using the analyser described by Fitch. *Electromyography*, 12 : 325-346, 1972.
- 12) 野本種邦, 富田汪助 : 咬合力と咀嚼筋筋電図との関係 (第1報) —— 棘波数計測・電位累積装置による研究 ——. *日本補綴歯科学会雑誌*, 19 : 641-646, 1976.
- 13) Hayward, M. : Automatic analysis of the electromyogram in healthy subjects of different ages. *J. Neurol. Sci.* 33: 397-413, 1977.
- 14) Stålberg, E. and Antoni, L. : Microprocessors in the analysis of the motor unit and the neuromuscular transmission. In: *Recent advances in EEG and EMG data processing.* (Edited by Yamaguchi, E. and Fujisawa, K.)

- pp. 295-313, Elsevier/North-Holland, Netherlands, 1981.
- 15) Hirose, K. and Sobue, I. : Quantitative electromyograph—a method by computer analysis—. EEG Clin. Neurophysiol. 14 : 421-429, 1972.
 - 16) Moyers, R. E. : Temporomandibular muscle contraction patterns in Angle Class II, Division 1 malocclusions. : An electromyography analysis. Amer. J. Orthodont. 35 : 837-857, 1949.
 - 17) Vitti, M. and Basmajian, J. V. : Muscles of mastication in small children : An electromyographic analysis. Amer. J. Orthodont. 68 : 412-419, 1975.
 - 18) Mitani, H., Yamashita, A., Fujii, H., Kato, H., Koizumi, T. and Komuro, S. : On the power-spectra of the surface electromyograms of masticatory muscles. J. Osaka Dent. Univ. 8 : 8-18, 1974.
 - 19) Blanton, P. L., Biggs, N. L. and Perkins, R. C. : Electromyographic analysis of the buccinator muscle. J. Dent. Res. 49 : 389-394, 1974.
 - 20) Isley, C. L. and Basmajian, J. V. : Electromyography of the human cheeks and lips. Anat. Rec. 176 : 143-148, 1973.
 - 21) White, E. R. and Basmajian, J. V. : Electromyography of lip muscles and their role in trumpet playing. J. Appl. Physiol. 35 : 892-897, 1973.
 - 22) Abbs, J. H. and Gilbert, B. N. : A strain gage transduction system for lip and jaw motion in two dimensions: Design criteria and calibration data. J. Speech & Hearing Res. 16 : 248-256, 1973.
 - 23) Abbs, J. H. : Some mechanical properties of lower lip movement during protrusion. Phonetica, 28 : 65-75, 1973.
 - 24) Moore, A. D. : Synthesized EMG waves and their implications. Amer. J. Physic. Med. 46 : 1302-1316, 1967.
 - 25) 米沢功至, 亀田和夫 : コンピュータによる構音筋の筋電図解析。歯基礎誌, 20, 補冊, 104, 1980.
 - 26) Dubrul, E. L. (ed.) : Sicher's Oral Anatomy. 7th ed., pp. 160-171, C. V. Mosby, London, 1980.
 - 27) Milner-Brown, H. S., Stein, R. B. and Yemm, R. : The orderly recruitment of human motor units during voluntary isometric contractions. J. Physiol. 230 : 359-370, 1973.
 - 28) Milner-Brown, H. S., Stein, R. B. and Yemm, R. : Changes in firing rate of human motor units during linearly changing voluntary contractions. J. Physiol. 230 : 371-390, 1973.
 - 29) Buchthal, F. and Madsen, E. E. : Synchronous activity in normal and atrophic muscle. EEG Clin. Neurophysiol. 2 : 425-444, 1950.
 - 30) Person, R. S. and Kudina, L. P. : Cross-correlation of electromyograms showing interference patterns. EEG Clin. Neurophysiol. 25 : 58-68, 1968.
 - 31) Fromkin, V. A. : Neuro-muscular specification of linguistic unit. Language and Speech 9 : 170-199, 1966.
 - 32) MacNeilage, P. F. and DeClerk, J. F. : On the motor control of coarticulation in CVC monosyllables. J. Acoust. Soc. Amer. 36 : 1217-1223, 1968.
 - 33) Leanderson, R. and Lindblom, B. E. F. : Muscle activation for labial speech gestures. Acta Otolaryng. 73 : 362-373, 1972.
 - 34) Bernthal, J. E. : Intraoral air pressure during the protrusion of /p/ and /b/ by children, youth and adults. J. Speech & Hearing Res. 21 : 361-371, 1978.
 - 35) Warren, D. W. : Aerodynamics of speech perception. In : *Contemporary Issues in Experimental Phonetics* (Edited by Lass, N. J.) pp105~137 Academic Press, New York, 1976.