口蓋裂術後鼻咽腔閉鎖不全症例における発音時の 口蓋帆挙筋の疲労に関する研究

—— 健常者との相違 ——

野原 幹司・舘村 卓*・和田 健*
尾島 麻希*・小谷 泰子*・佐々生康宏*

Levator muscle fatigue during phonation in patients with velopharyngeal incompetence after surgery for cleft palate

—— Differences from normal subjects ——

NOHARA Kanji · TACHIMURA Takashi * · WADA Takeshi *
OJIMA Maki * · KOTANI Yasuko * · SASAO Yasuhiro *

Abstract: The purpose of this study was to examine whether the levator veli palatini muscle (LVP) in patients with velopharyngeal incompetence who have undergone surgery for cleft palate is more easily fatigued than that of normal subjects during speech. Five patients with postsurgical cleft palate who were identified to have borderline velopharyngeal incompetence on nasopharyngeal fiberoscopy were studied. Five normal subjects served as control. Each subject was asked to pronounce /pu/ more than 50 times at a rate of one time per second. Electromyograms (EMG) of the LVP were recorded at a sampling rate of 2000/sec. The mean power frequency (MPF) of one syllable was obtained by power spectral analysis with an analytic window 1 second in width. In all normal subjects, the slopes of the regression line relating the MPF of the LVP EMG to the syllable number were slightly, but not significantly negative. However, in all patients with borderline velopharyngeal incompetence, the slopes of the regression line were significantly negative. These findings revealed that the LVP of speakers with borderline velopharyngeal incompetence was more easily fatigued than that of normal speakers during repetition of syllables. This study suggests that the fatigability of the LVP might be one cause of borderline velopharyngeal incompetence after surgery in patients with cleft palate.

Key words: fatigue (疲労), levator veli palatini muscle (口蓋帆挙筋), velopharyngeal incompetence (鼻咽腔閉鎖不全症), cleft palate (口蓋裂), mean power frequency (mean power frequency)

緒 言

近年、口蓋形成術の進歩・改善によって鼻咽腔閉鎖機能に関する術後成績は良好となり、開鼻声を呈する症例は減

少した^{1, 2)}。しかしながら一方で、単音節では正常な音声表出が可能であるものの、連続音表出時に鼻雑音が生じるために会話の明瞭度が低下し、日常での会話が障害される症例が増加している²⁾。これらの症例の鼻咽腔閉鎖機能は、単音節の表出では完全閉鎖を示すものの、連続音の表出では鼻咽腔閉鎖平面に bubbling を呈するような、いわゆる境界型の閉鎖を示す。これら境界型の症例は、器質的には完全閉鎖が可能な組織量を有するため、咽頭弁移植術などの鼻咽腔閉鎖機能改善のための手術の適応かどうかの判断に苦慮することがある。

Kuehn ら^{3, 4)} は、このような症状を呈する境界型の鼻咽腔閉鎖不全症例と健常者を対象に、鼻咽腔閉鎖の主たる役割を担う口蓋帆挙筋活動について検討した。その結果、境界型の鼻咽腔閉鎖不全症例では健常者と比べて、発揮しう

大阪大学歯学部附属病院顎口腔機能治療部
(主任：和田 健教授)

* 大阪大学大学院歯学研究科高次脳口腔機能学講座顎口腔機能治療学教室
(主任：和田 健教授)

Division for Oral-Facial Disorders, Osaka University Dental Hospital (Chief: Prof. WADA Takeshi)

* Division for Oral and Facial Disorders, Department of Functional Oral Neuroscience, Osaka University Graduate School of Dentistry (Chief: Prof. WADA Takeshi)

受付日：2003 年 7 月 24 日

採択日：2004 年 5 月 18 日

Fig. 1 Block diagram

る筋活動のなかで発音時の筋活動値が相対的に大きいことを示した。このことから、Kuehn ら^{3, 4)}は、境界型鼻咽腔閉鎖不全症例では、発音時に必要とされる筋活動値が大きいために、会話のような連続音の表出が必要となるときには口蓋帆挙筋の疲労が生じる可能性を示し、口蓋帆挙筋の疲労を軽減させることが症状改善の治療につながるのではないかと考察した。しかしながら、Kuehn ら^{3, 4)}は、疲労の可能性を示唆したものの、実際に鼻咽腔閉鎖不全症例の疲労は検討していない。

鼻咽腔閉鎖不全症例の口蓋帆挙筋の疲労に関しては、すでに著者ら^{5, 6)}が最強 blowing 時の口蓋帆挙筋の疲労を、筋電図信号の周波数解析により得られ四肢の筋疲労の評価に用いられている Mean Power Frequency (MPF) の経時変化を調べることににより評価している。その結果、健常者では blowing の経過にともなう MPF の有意な変化が認められなかったものの、鼻咽腔閉鎖不全症例では有意な低下が認められた。このことは、鼻咽腔閉鎖不全症例の口蓋帆挙筋は、最強 blowing を行った時に健常者より疲労しやすいことを示している。しかしながら、blowing 活動は、日常生活で連続して日々行われる活動ではなく、疲労が生じてでもその不利益は少ない。境界型鼻咽腔閉鎖不全症例の訴えは会話などの連続音の表出にともなう鼻雑音であることが多いため、blowing 時ではなく、発音時の口蓋帆挙筋の疲労を評価することが必要である。そこで本研究では、境界型鼻咽腔閉鎖不全症例と健常者を対象に、筋電図を用いて単音節の連続表出時における口蓋帆挙筋の疲労の程度の違いを検討した。

研究方法

被験者

被験者は、1歳から2歳の間に粘膜骨膜弁後方移動術によって口蓋形成術を受けた後に、鼻咽腔閉鎖不全症と診断された片側性唇顎口蓋裂患者のなかから、以下の条件を満たす患者を選択した。すなわち、鼻咽腔内視鏡所見において、実質的な閉鎖不全部分は認められないものの、連続音表出時に鼻咽腔閉鎖平面に bubbling が観察された症例 (Borderline Velopharyngeal Incompetence: BVP 例) 5 例 (BVP-1 ~ BVP-5 : 男 2 人, 女 3 人, 平均年齢 15.8 ± 2.7 歳) を選択した。いずれの症例も鼻雑音が聴取されたものの、口蓋裂異常構音は認められなかった。これら BVP 例において、口蓋帆挙筋に疲労が認められた場合、その程度が鼻咽腔閉鎖機能に問題のない健常者でも認められる程度であるのかを検討する必要がある。そこで、対照として鼻咽腔内視鏡検査で鼻咽腔閉鎖運動に異常を認めなかった健常者 5 名 (N-1 ~ N-5 : 男 3 人, 女 2 人, 平均年齢 22.8 ± 2.1 歳) を対象とし、BVP 例と同じ実験を行った。

口蓋帆挙筋筋電図 (Fig. 1)

口蓋帆挙筋の筋電図は、これまでのわれわれの報告^{7~9)}に準じて以下の方法で採取した。電極は、直径 $90 \mu\text{m}$ のエナメル被覆ステンレス線 (BELDEN Co., U.S.A.) のエナメル被覆を除去してステンレス線を 2mm 露出させ、先端から 3 mm の部位を折り返した有鉤針金電極を用いた。[a] 表出時に軟口蓋の口腔側に生じる levator dimple に、電極を挿入した皮内注射用注射針 ($26\text{G} \times 1/2 \text{ in.}$) を外、後、上方に向かって 10mm の深さで刺入した後、注射針のみを抜去し電極を口蓋帆挙筋に留置した。2本の電極間距離が

Fig. 2 Scatter plots of MPF in relation to the sequence of the phonation in BVP subjects

Table 1 Regression slopes in BVP subjects

subject	n	slope	MPF-intercept
BVP-1	60	-0.485	302.0
BVP-2	60	-0.300	254.5
BVP-3	54	-0.334	295.7
BVP-4	60	-0.410	327.6
BVP-5	58	-0.346	300.5

Table 2 t-test for significance of the regression in BVP subjects

subject	slope	t-value	(degree of freedom)
BVP-1	-0.485	-7.691**	(58)
BVP-2	-0.300	-4.000**	(58)
BVP-3	-0.334	-8.863**	(52)
BVP-4	-0.410	-12.25**	(58)
BVP-5	-0.346	-7.194**	(56)

** : $p < 0.01$

7mm になるように刺入し、双極誘導とした。

口蓋帆挙筋疲労の評価

口蓋帆挙筋疲労の評価には、筋が疲労すると値が低下することが知られている MPF を用いた。入力箱 (JB-101J, 日本光電 (株)) を介して、生体電気用アンプ (AB-651J, 日本光電 (株)) に、低域遮断周波数 50Hz, 高域遮断周波数 1kHz, 時定数 3msec. で導出した筋電図信号をデータコーダ (KS-616, ソニー (株)) に保存した後、パーソナルコンピュータ (Power Macintosh 7200/90, アップル (株)) に取り込み、波形分析ソフト (MacLab, バイオリサーチセンター (株)) を使用して周波数分析を行った。分析は sampling rate 2000/sec., 周波数領域 0-1000Hz, 分解能 0.98Hz にて行った。分析結果をテキストデータに変換し、あらかじめ以下の式をプログラムしておいた表計算ソフト (Microsoft Excel, マイクロソフト社 (株)) を用いて MPF を求めた。

$$\text{MPF} = \sum f p / \sum p$$

f は周波数, p はパワースペクトラムを表す。

実験方法

実験時の姿勢は、眼耳平面が床と平行になるように座位を指示した。被験活動は、ストップウォッチの秒カウントに合わせて口唇破裂音 [pu] を 1 秒 1 回のリズムで 50-60

回表出することを指示した。息継ぎは、表出リズムを乱さずに表出活動の合間に行うように指示した。息継ぎの回数は被験者の自由意志に依存した。被験活動中に表出のリズムの乱れが同時モニターしている記録紙上で確認された場合には、実験を中止し、5 分の休憩の後、再度実験を初めから行った。

被験活動開始から表出順にそれぞれの [pu] 表出時の MPF を求め、表出順に対する MPF の回帰直線を求めた。求めた回帰直線の傾きを疲労の程度を表す指標とした。すなわち、MPF の低下の程度が大きく、傾きの絶対値が大きい場合を疲労の程度が大きいとした。

研究結果

BVP 例の回帰直線の傾きは -0.485 から -0.300 と全例を通じて負の値を示した。被験者それぞれでの傾きの有意性の検定の結果、5 例とも有意水準 0.01 で有意性が認められた。BVP 例において、口蓋帆挙筋の MPF は、表出度数の増加に伴い有意に低下する傾向があることが示された (Fig. 2, Table 1, 2)。

Fig. 3 Scatter plots of MPF in relation to the sequence of the phonation in normal subjects

Table 3 Regression slopes in normal subjects

subject	n	slope	MPF-intercept
N-1	60	-0.091	339.3
N-2	57	-0.069	268.6
N-3	60	-0.057	299.6
N-4	60	-0.083	303.2
N-5	60	-0.052	268.7

Table 4 t-test for significance of the regression in normal subjects

subject	slope	t-value	(degree of freedom)
N-1	-0.091	-1.663	(58)
N-2	-0.069	-0.945	(55)
N-3	-0.057	-1.082	(58)
N-4	-0.083	-1.997	(58)
N-5	-0.052	-1.091	(58)

健常者では回帰直線の傾きは -0.091 から -0.052 であり、5例に共通して負の値を示したものの、傾きの絶対値は、BVP例と比べて小さい値を示した。各被験者の回帰直線の傾きの有意性の検定の結果、BVP例と異なり、健常者では傾きに有意性が認められなかった。健常者では、表出度数の増加に伴うMPFの有意な変化が認められなかった (Fig. 3, Table 3, 4)。

以上の結果から、単音節の連続表出における口蓋帆挙筋の疲労の程度は、健常者よりも鼻咽喉閉鎖不全症例において著明であることが示された。

考 察

筋疲労を生理学的に評価するには、四肢の筋では、運動量の低下や筋力の低下を評価する方法、筋電図を用いて筋活動量の変化や筋電図信号の周波数帯の変化を観察する方法が知られている¹⁰⁾。これまで鼻咽喉腔においても閉鎖力¹¹⁾や筋活動量⁸⁾の変化をもとに疲労の検討が行われてきた。しかしながら、筋力の低下や運動量の低下は筋疲労の結果に付随して生じることがあるものの、疲労を生じていても

努力性の運動や運動単位の代償により、筋疲労が筋力や運動量に反映されないことがある。また、閉鎖力や筋活動量は意識や意図といった中枢性疲労の影響を受ける¹⁰⁾ため、末梢器官である口蓋帆挙筋自体の疲労については直接反映するものではない。

筋電図信号を高速フーリエ変換することにより得られる筋電図周波数帯の変化は、疲労にともなう筋力や運動量の変化は反映しないものの、筋自体の疲労を反映することが知られている^{12~14)}。すなわち、筋が疲労すると、原因は諸説あるが①疲労した運動単位を補償する大きな運動単位の動員、②運動単位間の同期化、③筋線維での活動電位伝導速度の低下が生じるため、周波数帯が低域に変位するとされている。筋電図周波数帯の代表値として平均パワー周波数を示すMPFが知られており、筋疲労時に周波数帯が低域へ変位するときの指標とされている^{12~14)}。著者ら^{5, 6)}は、最強blowingを被験活動としたときに、MPFを用いることにより、口蓋帆挙筋の疲労を評価することが可能であることを報告した。したがって本研究では、MPFを用いて、BVP例で症状が出現する発音時の口蓋帆挙筋疲労の検討を行った。

単音節を自由なペースで連続表出させた場合には、被験者にとって苦痛をとまなわないうペース、すなわち疲労を生じないようなペースで表出してしまう可能性も考えられた。また、MPF は、筋の血流が阻害された場合や筋の収縮が持続した場合には、代謝物質の流出が抑制されるため、低下の程度が大きくなるものの、筋の収縮が連続せず断続的に弛緩した場合は、代謝物質が筋外へ流出し低下しにくくなることが知られている¹⁵⁾。したがって、被験活動には、被験者が表出のリズムを乱さずに息継ぎが可能であり、かつストップウォッチを指標にして容易にリズムをとることが可能である [pu] を 1 秒 1 回表出するようにペースを指示し、弛緩の時間が短くなるようにした。

BVP 例においては、単音節の連続表出における口蓋帆挙筋の MPF が表出度数の増加にともない低下し、口蓋帆挙筋が疲労することが示された。軟口蓋は、1 秒間に 4 音節を表出したときには挙上状態が維持されるものの、1 秒に 2 音節以下のリズムで表出したときは音節表出ごとに下垂・挙上を繰り返すことが知られている¹⁶⁾。一方、日本語の自由発話では 1 秒間に 8 から 15 音節表出される¹⁷⁾。したがって閉鎖性子音の自由発話では、口蓋帆挙筋は持続的に収縮すると考えられる。本研究で指示した 1 秒 1 回の表出リズムでは、口蓋帆挙筋は音節ごとに弛緩・収縮を繰り返していると考えられるにもかかわらず、BVP 例での口蓋帆挙筋は疲労することが示された。したがって、より疲労しやすい持続的な筋収縮を要する日常会話においては、口蓋帆挙筋疲労は増悪する可能性が考えられた。

一方、実験Ⅱでの健常者では、表出度数に対する MPF の回帰直線には有意性は認められなかった。すなわち、単音節の連続表出における口蓋帆挙筋の疲労の程度は、BVP 例では大きく、気密に鼻咽腔が閉鎖されている健常者では小さいことが示された。

Moon ら¹⁸⁾ は口蓋帆挙筋の疲労性について、12 例の口蓋裂を認めない遺体から口蓋帆挙筋を採取し、構成する筋線維の種類別の比率を調べることで検討を行っている。その結果、平均すると健常者においては、活動閾値が低く、疲労性が低い Type I 線維が 59.8 %、活動閾値が高く疲労しやすい Type II 線維が 40.2 %含まれていることを報告した。Moon ら¹⁸⁾ は、健常者の発音時の口蓋帆挙筋活動は各被験者が出すことができる最大筋活動の 50 % 以下であるという Kuehn ら³⁾ の報告と合わせて考えると、健常者においては、会話時に必要な口蓋帆挙筋活動は、主として Type I 線維の活動だけで達成されるのではないかと推察している。したがって、健常者においては発音時に口蓋帆挙筋の疲労を惹起せずに良好な鼻咽腔閉鎖が達成されるのではないかと考察している。今回、健常者の口蓋帆挙筋では有意な MPF の低下が認められなかったことは、Moon

ら¹⁸⁾ の仮説を支持するものであった。一方、高田ら¹⁹⁾ は、8 例の口蓋裂術後のスピーチエイド装着症例を対象に、口蓋帆挙筋の筋線維組成について検討を行った。その結果、非装着時の軟口蓋の挙上運動が良好で、鼻咽腔閉鎖様運動が軟口蓋の運動が優位である coronal pattern²⁰⁾ を示した症例においては、筋線維が健常者と類似した分布を呈示することを示した。また、閉鎖様運動が coronal to circular²⁰⁾ および circular to sagittal²⁰⁾ を示した症例においては、Type grouping や筋線維の不規則な走行といった異常所見が認められたと報告した。この所見は、本研究で BVP 例の口蓋帆挙筋に疲労が認められた背景に、筋組織学的な要因が関与している可能性を示している。

Kuehn ら^{3, 4)} は、鼻咽腔閉鎖不全症例と健常者における口蓋帆挙筋活動の相違を明らかにするために、発音時と blowing 時の口蓋帆挙筋筋電図をもとに検討した。その結果、健常者では発音時の筋活動値は、表出する筋活動の最大値の 50 % 以下を示すものの、鼻咽腔閉鎖不全症例では最大値に近似した値を示すことを明らかにした。本研究で、健常者と比べて、口蓋裂術後の鼻咽腔閉鎖不全症例の口蓋帆挙筋の疲労程度が大きかった背景には、筋線維の組成だけでなく、発音活動に要する筋活動が相対的に健常者より大きいことも関与している可能性が考えられた。

本研究の結果より BVP 例の口蓋帆挙筋が健常者より疲労しやすいことが示された。筋疲労は持続運動を障害し、筋力低下の原因となる。したがって、BVP 例の鼻雑音の原因の 1 つとして口蓋帆挙筋の疲労による筋力低下が関与している可能性が考えられた。このことから、臨床においては、BVP 例に対しては、口蓋帆挙筋の疲労を改善することが期待されるスピーチエイドの装着や CPAP 訓練^{21 ~ 23)} を行い、症状の改善が認められない、もしくは治療の効果が認められなくなった時点で手術の適応かどうかを検討する必要があるのではないかと考えられた。

結 語

口蓋裂術後の境界型鼻咽腔閉鎖不全症例における発音時の口蓋帆挙筋の疲労の程度について、健常者を対照として、単音節の連続表出時の筋電図の MPF を指標に検討した。その結果、

1. 健常者においては連続音の表出にともない MPF が低下する傾向があったものの、有意性は認められなかった。
2. 鼻咽腔閉鎖不全症においては連続音の表出にともない MPF が有意に低下することが示された。

以上の結果から、境界型の鼻咽腔閉鎖不全症例の口蓋帆挙筋は、健常者と比べて、連続音表出時に疲労しやすいことが明らかとなった。

本研究の一部は、文部科学省科学研究費（基盤研究（C）15592048、基盤研究（C）13672029）の援助を得て行われた。

引用文献

- 1) 古郷幹彦, 安井康順, 他: 当科の push-back 法による口蓋形成術後における Nasality 発現について. 阪大歯学誌 47: 34-36 2002.
- 2) Peterson-Falzone, S.J., Hardin-Jones, M.A., et al.: Implications of inadequate velopharyngeal function for articulation, resonance, and voice. Cleft palate speech. 3rd Ed, Mosby, Inc., St. Louis, 2001, p273-288.
- 3) Kuehn, D.P. and Moon, J.B.: Levator veli palatini muscle activity in relation to intraoral air pressure variation. J Speech Hear Res 37: 1260-1270 1994.
- 4) Kuehn, D.P. and Moon, J.B.: Levator veli palatini muscle activity in relation to intraoral air pressure variation in cleft palate subjects. Cleft Palate Craniofac J 32: 376-381 1995.
- 5) 野原幹司, 舘村 卓, 他: Mean power frequency を用いた口蓋帆挙筋疲労の評価—鼻咽腔閉鎖不全症例について—. 日口蓋誌 26: 333-338 2001.
- 6) 野原幹司, 舘村 卓, 他: 健常者における最強 blowing 時の口蓋帆挙筋の疲労—口蓋裂術後の鼻咽腔閉鎖不全症例との相違—. 音声言語医学 43: 302-307 2002.
- 7) Tachimura, T., Nohara, K., et al.: Change in levator veli palatini muscle activity for patients with cleft palate in association with placement of a speech-aid prosthesis. Cleft Palate Craniofac J 39: 503-508 2002.
- 8) Tachimura, T., Nohara, K., et al.: Effect of a speech prosthesis on electromyographic activity levels of the levator veli palatini muscle activity during syllable repetition. Arch Phys Med Rehabil 83: 1450-1454 2002.
- 9) 野原幹司, 舘村 卓, 他: 嚥下時, 発音時, blowing 時における口蓋帆挙筋活動の相違—筋電図信号の周波数解析を用いた検討—. 日摂食嚥下リハ会誌 6: 37-43 2002.
- 10) 室 増男: 筋疲労・筋痛のスポーツ生理学. 森谷敏夫, 根本 勇編集; スポーツ生理学. 朝倉書店, 東京, 1994, 86-100 頁.
- 11) Kuehn, D.P. and Moon, J.P.: Induced fatigue effects on velopharyngeal closure force. J Speech Hear Res 43: 486-500 2000.
- 12) Gardle, B. and Elert, J.: The temporal occurrence of the mean power frequency shift of the electromyogram during maximum prolonged dynamic and static working cycles. Int J Sports Med 15: S32-S37 1994.
- 13) Shi, C.S., Ouyang, G., et al.: Frequency analysis of electromyographic signals in mandibular elevators at maximum clench level. J Oral Rehabil 19: 427-433 1992.
- 14) Moritani, T., Muro, M., et al.: Intramuscular and surface electromyogram changes during muscle fatigue. J Appl Physiol 60: 1179-1185 1986.
- 15) Signorile, J.F., Digel, S., et al.: Effects of partial occlusion of circulation on frequency and amplitude of surface electromyography. J Electromyogr Kinesiol 1: 124-129 1991.
- 16) McWilliams, B.J., Morris, H.L., et al.: The nature of the velopharyngeal mechanism; Cleft palate speech. 2nd Ed., B.D. Decker, Philadelphia, 1990, p163-196.
- 17) 高丸圭一, 鈴木貫太郎, 他: 自然な環境で発話された自由会話音声における局所的話速変化の基礎的検討. 日本音響学会 2-P-15: 315-316 1998.
- 18) Moon, J.B., Thompson, S.A., et al.: Muscle fiber type distribution in the normal human levator veli palatini muscle. Cleft Palate Craniofac J 35: 419-434 1998.
- 19) 高田 訓, 舘村 卓, 他: 鼻咽腔閉鎖機能と口蓋帆挙筋の組織化学的所見との検討. 日口蓋誌 24: 61-69 1999.
- 20) Witzel, M.A. and Posnick, J.C.: Patterns of location of velopharyngeal valving problems: atypical findings on video nasopharyngoscopy. Cleft Palate J 26: 63-67 1989.
- 21) Kuehn, D.P.: New therapy for treating hypernasal speech using continuous positive airway pressure (CPAP). Plastic Reconstr Surg 88: 959-966 1991.
- 22) 原 久永, 舘村 卓, 他: 持続的鼻腔内陽圧負荷装置を用いた鼻咽腔閉鎖機能賦活法 (CPAP 療法) の nasalance による評価. 日口蓋誌 23: 28-35 1998.
- 23) Kuehn, D.P., Imrey, P.B., et al: Efficacy of continuous positive airway pressure for treatment of hypernasality. Cleft Palate-Craniofac J 39: 267-276 2002.