

## 胸骨舌骨筋の筋電位制御による 電気人工喉頭の性能

○ 関 惠 貞 \*, 高 橋 誠 \*, 西 澤 典 子 \*\*, 西 澤 伸 志 \*\*\*,  
上 見 憲 弘 \*, 伊 福 部 達 \*, 犬 山 征 夫 \*\*

\*北海道大学 電子科学研究所   \*\*北海道大学 医学部 耳鼻咽喉科  
\*\*\*美唄労災病院 耳鼻咽喉科

理想的な代用発声法とは、意図した時に自由に声を出せ、音声持続とピッチを変えることができ、良い音質をもち、しかも両手が使えるなど日常生活に支障がないものである。したがって、我々は筋電位によって制御する埋込み型電気人工喉頭の開発を目指し、胸骨舌骨筋の筋電位によって制御する電気人工喉頭を試作した。試作した人工喉頭の性能を評価するために、従来の電気人工喉頭と試作した人工喉頭の特性を比較した。その結果、以下の結論を得た。

1. 両方の人工喉頭で音源のON/OFF制御ができた。
2. 両方の人工喉頭で少なくとも4段階のピッチ制御ができた。
3. 両方の人工喉頭で有声/無声音を出し分けできる可能性を確かめた。
4. 以上から、試作人工喉頭は性能が電気人工喉頭と同等であり、更には手を使用しないという利点がある。

## Performance of an electrolarynx controlled by the sternohyoid muscle

Heajung MIN\*, Makoto TAKAHASHI\*,  
Noriko NISHIZAWA\*\*, Shinji NISHIZAWA\*\*\*, Norihiro UEMI\*  
Tohru IFUKUBE\* and Yukio INUYAMA\*\*

\* Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University  
\*\* School of Medicine, Hokkaido University  
\*\*\* Department of Otolaryngology, Bibai Rosai Hospital

We are developing an electrolarynx of implant type controlled by the activity of EMG of the sternohyoid muscle (SH). In this paper, we mention characteristics of an electrolarynx controlled by the SH EMG. Also, we describe results of the comparison with one of the conventional electrolarynges. For this purpose, we performed six experiments about three items in various condition as follows: firstly, on/off control of the sound; secondly, pitch control of electrolarynges; thirdly, the possibility of the voiced/voiceless control. From the result of the experiments, we found that the developed electrolarynx have a good property of the on/off vibrator control, the pitch control and the possibility of the voiced/voiceless control of electrolarynx .

## 1. はじめに

喉頭摘出者には喉頭が存在しないが、調音器官はほぼ正常な状態で残っているため、ここへ何らかの音を導入すれば、話すことが可能となる。特に電気人工喉頭を用いる場合には、電氣的に振動を生じさせ、それを口腔に送り込むことで、話すことができるようになる。現在、広く使われている電気人工喉頭は直接前頸部に人工喉頭を接触させ振動を口腔に直接伝える方式のものである。一般的に電気人工喉頭による発声では電気エネルギーを利用するので音声持続や音量の点で有利である。一方、ピッチと音量の調節は困難であり、機械的な音に近いことなど解決すべき問題が多い<sup>1)</sup>。また、電気人工喉頭を片手で持つために、日常生活で両手が使えない不便がある。

よって、理想的な電気人工喉頭とは、意図した時に自由に声が出せて、しかも声の強さ、音声持続とピッチを変えられることができ、良好な音質を持ち、しかも両手が使えるなど日常生活に支障がないものであると考えられる。これらの観点から我々は筋電位によって制御できる埋め込み型電気人工喉頭の開発を目指してきた。そのための制御信号を得る筋としては、埋め込みを行うことを考えれば場所が頸部に近いこと、できれば発声に関係がある筋であることおよび他の動作から影響を受けず、またその筋が他の筋に影響を与えないことが好ましいと考えられる。本研究では胸骨から舌骨に付着している胸骨舌骨筋 (M. sternohyoideus, 以下SHとする) を利用した。SHは舌骨を引き下げる筋であり、とくに発声においては通常より低い声を出すときに活動すると言われている<sup>2)</sup>。SHは通常の喉頭摘出手術では全部摘出されるが、この筋を舌骨付着部で切断したまま保存して喉頭摘出を行うことは可能である。このように保存すれば、電気人工喉頭の制御にも利用することが可能である。

SHの筋電位を利用した電気人工喉頭の制御条件として発話の開始、停止を考慮した比較的長

時間の音源のON/OFF制御、有声/無声音の出し分けを考慮した短時間の音源のON/OFF制御およびピッチ制御を提案する。このようすを図1に示す。

人工喉頭の音源のON/OFF制御は、EMGの発火の始めて人工喉頭の音源の振動を開始し、EMGの発火の終わりで音源の振動を停止する。人工喉頭のピッチ制御は、筋電位の振幅が小さくなるのにしたがってピッチを高くする。

我々はこのような制御指針に基づいて、SHの筋電位制御による電気人工喉頭を試作した。

本研究は、音源のON/OFF制御、ピッチ制御および有声/無声音の出し分け制御に対して、SHで制御する人工喉頭と指で制御する一般的な電気人工喉頭との性能を比較し、SHで制御する試作人工喉頭の有用性を検討した。

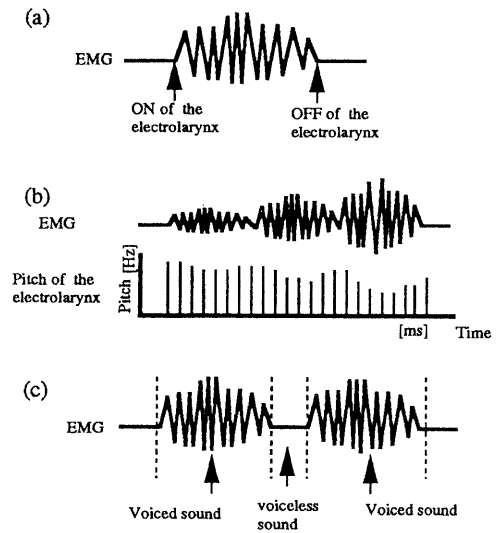


図1 SHの筋電位を利用した電気人工喉頭の制御のための概念図  
(a)人工喉頭の音源の振動のON/OFF制御、  
(b)人工喉頭のピッチ制御、  
(c)有声/無声音の出し分けの制御

Fig.1 Controls of electrolynx using the SH  
(a) ON/OFF control of vibrator by leading/trailing edges of the EMG,  
(b) Pitch control by amplitude of the EMG,  
(c) Voiced/voiceless sound control by instantaneous lack of the EMG,

## 2. 実験方法

SHの筋電位によって制御する試作人工喉頭のシステム構成を図2に示す。表面電極から導出したSH筋電位を前置増幅器を通し、全波整流して包絡線を検出する。検出された包絡線をシュミットトリガ回路に通し、人工喉頭の音源をON/OFF制御させる。また、人工喉頭のピッチ周波数制御のため、その包絡線によりPPM（パルス位置変調器）で振動子の駆動周波数（周波数帯域：57Hz～167Hz）を決める。この振動子の駆動周波数はSH筋電位が低くなるにしたがって高くなるようにした。また、包絡線を反転増幅器に通し振動子駆動回路にいれ、ピッチ周波数が高くなるにしたがって駆動電圧も高くなる回路も試作した。

実験手順としては、まず、試作人工喉頭を用いて発声・発話を行いながら人工喉頭の音源のON/OFF、ピッチ制御および無声/有声音の生成を想定した実験を行った。次に、市販電気人工喉頭（アンプリコード社：55X）を用いて、同じ条件の実験を行った。今回の実験に利用した市販電気人工喉頭で（アンプリコード社：55X）は音源のON/OFF制御のためにボタンスイッチを指で押し、またピッチ制御のためにはポテンショメータを指で回すようになっている。2つの人工喉頭の振動子は同じものである。

両実験ともコンピュータ制御による時間呈示信号にしたがって発声を行った。時間呈示信号は、時間パルスをコンピュータで発生させ、ディスプレイに呈示した（以下視覚刺激とする）。また、各人工喉頭のピッチを4段階に分けることを指示する信号として、電子ピアノのド（C3）、レ、ミ、ファの音を用いた（以下呈示音とする）。

被験者として23～26才の5名の喉頭機能が正常である男性を選び、すべての実験の計測は20回以上繰り返して行った。

### 2・1 試作人工喉頭の特性

実験装置の概要を図3に示す。表面電極から導出したSHの筋電位を増幅器を通してコンピ

ュータおよびデータレコーダに記録すると同時に、試作人工喉頭の音もマイクを通し増幅してデータレコーダに記録した。

また、発声意図と試作人工喉頭の音が一致していると被験者が言うところまでに、シュミットトリガ回路の閾値レベルを被験者ごとに調節した。

筋電位の導出方法は、被験者の前頸部の甲状

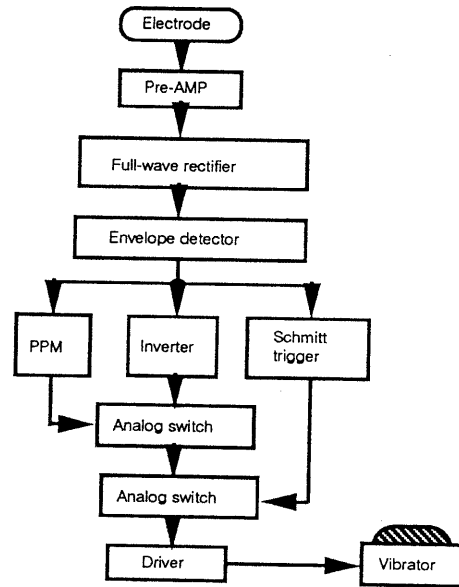


図2 試作人工喉頭のシステム  
Fig. 2 System of an electrolynx controlled by the M. sternohyoideus

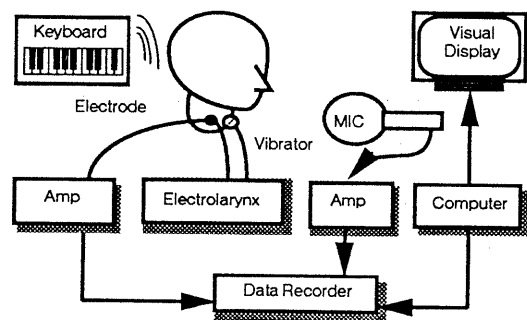


図3 試作人工喉頭の特性を調べるための実験装置  
Fig. 3 Block diagram of test systems of the electrolynx

軟骨の高さにディスプレイ双極表面電極（東京衛材研究所：TE-6135）を筋線維の方向に沿って装着して、SHの筋電位を導出した。ただし、不関電極は乳突部に付着し、2つの関電極の間隔は1cm離れて装着した。

### 1) 試作人工喉頭の音源のON/OFF制御の実験（実験1）

視覚呈示信号の開始/停止から試作人工喉頭の音の開始/停止までの時間ずれを調べた。被験者は視覚的な指示に合わせて、調音器官を/i/の発声と同じ構えにして試作人工喉頭を開始/停止する。

### 2) 試作人工喉頭のピッチ制御の実験（実験2）

筋電位の振幅と試作人工喉頭の音のピッチを調べた。また、呈示音と試作人工喉頭の音のピッチのずれを調べた。呈示音を被験者に聞かせた後、その呈示音が指示しているピッチに合わせて、調音器官を/i/の発声と同じ構えにして試作人工喉頭を用いて音を出すように指示した。

### 3) 試作人工喉頭の有声/無声音の出し分けを想定した実験（実験3）

無声音などにおける比較的短時間の発声の停止を想定し、試作人工喉頭の音源のON/OFFの速い繰り返しを行わせた。3秒間の視覚刺激に合わせて、調音器官を/i/の発声と同じ構えにして試作人工喉頭を用いて音を出し、その時の/i/の音源の開始/停止をできるだけ速く繰り返すように指示した。各被験者において試作人工喉頭の音源がONしている時間およびOFFしている時間を調べた。また、そのときのSH筋電位のON/OFFの時間に関しても調べた。

## 2. 市販電気人工喉頭の特性

実験装置の概要を図4に示す。被験者はコンピュータ制御による視覚呈示信号にしたがって発声を行い、その時の電気人工喉頭による音声をデータレコーダに記録した。

市販電気人工喉頭を頸部に固定した後、実験1～3と同様の実験を行った。各実験の内容と

実験番号を以下に示す。

- 1) 電気人工喉頭の音源のON/OFF制御の実験（実験4）
- 2) 電気人工喉頭のピッチ制御の実験（実験5）
- 3) 電気人工喉頭の有声音/無声音の出し分けを想定した実験（実験6）

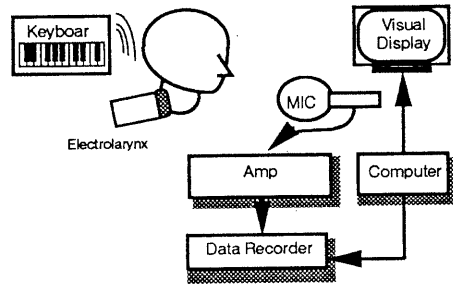


図4 市販電気人工喉頭の特性を調べるための実験装置

Fig. 4 Block diagram of test systems of the electrolynx controlled by finger

## 3. 結果

### 3.1 SHで制御する試作人工喉頭の特性

試作人工喉頭の音源のON/OFFに関する実験1の結果を図5および図6に示す。視覚刺激に対する試作人工喉頭を用いた/i/の音の開始および停止の時間ずれの平均はそれぞれ30.7msおよび31.2msであった（図5）。また、SH筋電位と音声の開始および停止の時間ずれは、それぞれ平均4.1msおよび2.3msであった（図6）。

試作人工喉頭のピッチ制御に関する実験2の結果を図7に示す。今回の試作人工喉頭を用いた発話では平均8.5Hzから14.3Hzまでピッチ周波数を変化させることが可能であった。

無声音の生成を想定した実験3の結果を図8に示す。図8(a)では5人のSH筋電位の放電持続および放電停止時間を示す。SH筋電位の放電持続時間の平均値は16.3msであり、放電停止時間の平均値は13.0msであった。図8(b)ではその時の5人の人工喉頭の音の持続時間および

止時間を示す。人工喉頭の音の持続時間の平均値は114msであり、停止時間の平均値は178msであった。

### 3・2 指で制御する市販電気人工喉頭 の特性

市販電気人工喉頭の音源のON/OFFに関する実験4の結果を図9に示す。市販電気人工喉頭を用いた場合の視覚刺激に対する/i/の音の開始および停止の時間すれの平均はそれぞれ344msおよび213msであった。

市販電気人工喉頭のピッチ制御に関する実験5の結果を図10に示す。市販電気人工喉頭を用いた発話では平均67Hzから78Hzまでピッチ周波数を変化させることが可能であった。

無声音の生成を想定した実験6の結果を図11に示す。この図は電気人工喉頭の音の持続時間および停止時間を表しており、電気人工喉頭の音の持続時間の平均値は108ms、および停止時間の平均値は130msであった。

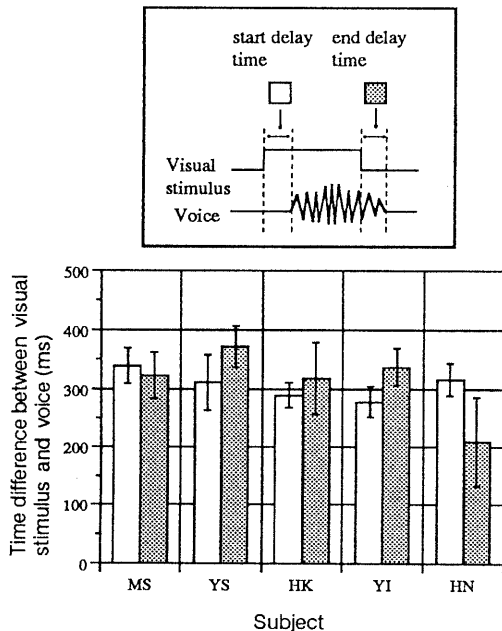


図5 視覚刺激によるSHで制御する人工喉頭の音声の時間追従性

Fig. 5 Time property of the electrolarynx controlled voluntarily according to the visual stimulus

## 4. 考 察

### 4・1 人工喉頭の音源のON/OFF

試作人工喉頭の音源のON/OFFを調べる実験1は視覚刺激と発話の開始/停止との時間すれを検討するためのモデルである。実験1の結果では視覚刺激の開始から試作人工喉頭の音声の開始までの時間は平均307msであった。S.T. Klappが行った実験では視覚刺激から発声するまでの時間は平均393msであり<sup>9)</sup>、実験1の結果から、視覚刺激から音声までの時間が約307msであったことは妥当なものと考えられる。また、試作人工喉頭を用いた発話の開始/停止とSHの活動の開始/停止との時間すれを検討した。図6より、SH筋電位の開始/停止に同期して人工喉頭を用いた発話を開始/停止することができた。また、今回の被験者が発声意図と試作人工喉頭での発音の開始/停止にすれが生じていないと報告した時点で人工喉頭の振動開

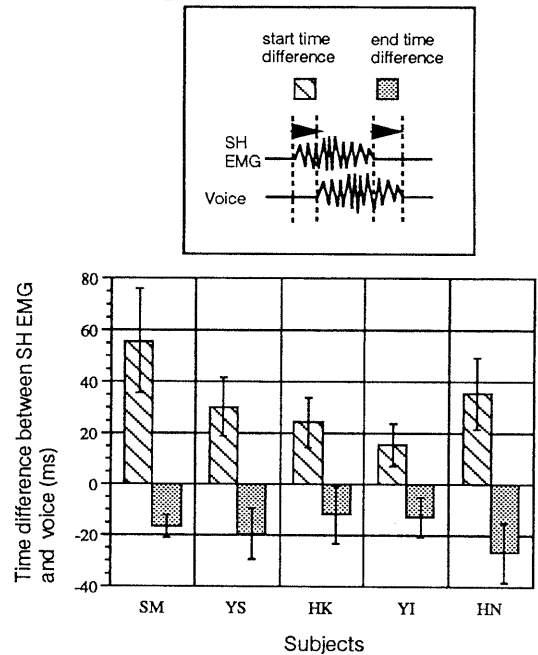


図6 試作人工喉頭を使用した/i/発声に対する筋収縮の開始/停止の時間すれ

Fig. 6 Time difference from the voice to the SH EMG at ON/OFF of the electrolarynx

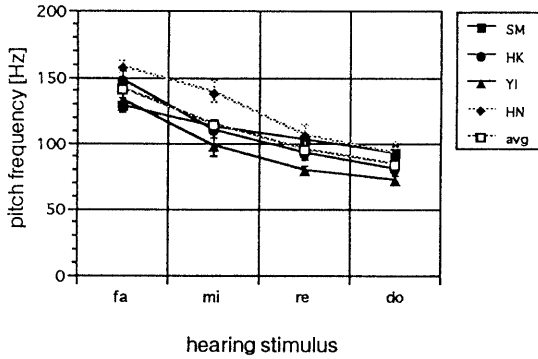


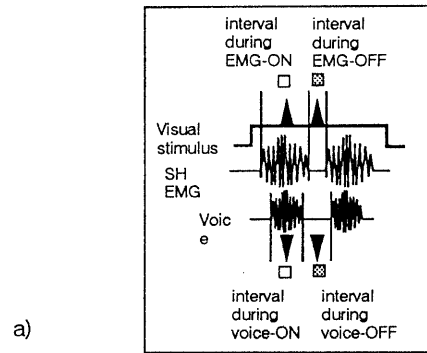
図7 C3 からF3 までのピッチ変化に対する SH で制御する人工喉頭のピッチ変化特性  
Fig. 7 Pitch of the electrolynx controlled by SH according to pitch between C3 and F3

始は、筋収縮の開始より平均41ms遅れ、振動終了に対しては筋収縮終了より平均23ms先立つ傾向があった。

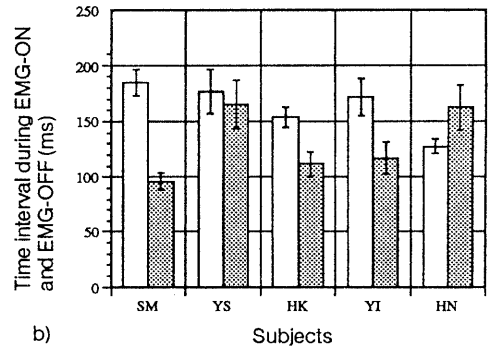
市販電気人工喉頭の音源のON/OFFを調べる実験4では、視覚刺激の開始から筋電位の開始/停止までの時間ずれは平均34.4msおよび21.3msであった。前述のS.T. Klappが報告した平均39.3msと比較すれば、実験4の結果は妥当なものと考えられる。この実験は常に片方の手で電気人工喉頭を頸部に接触させ、指だけでボタンスイッチを押す場合の結果である。しかし、日常生活で常に片方の手を電気人工喉頭のために使用することは困難であるために、人工喉頭の装着動作を含めると発声意図から発声までの時間はより長くなると考えられる。

#### 4・2 人工喉頭のピッチ制御

試作人工喉頭のピッチ制御の結果である図7では、聴覚刺激にしたがい駆動信号の周波数が変わることがわかる。図7の4人の被験者はともに4段階のピッチ制御ができた。試作人工喉頭の周波数帯域は57Hzから167Hzであるが、実際の発話では85Hzから143Hzであった。この理由としては、今回の試作人工喉頭において筋電位の振幅に合わせたPPMのレベル調節が十分ではなかったことおよび人間はSH筋電位を続けて安定に出すことが困難であることが



a)



b)

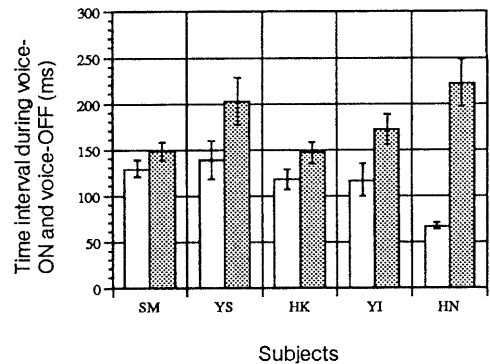


図8 試作電気人工喉頭使用して//発声する場合の3秒間のSHの筋収縮および人工喉頭の音のON/OFFを繰り返した場合の時間特性

a) SHの筋電位, b)人工喉頭の音  
Fig.8 Property of the electrolynx repeating ON/OFF during 3sec  
a) SH EMG, b) The voice of the electrolynx

考えられる。

市販電気人工喉頭のピッチ制御に関する結果を図10に示す。この図では呈示音にしたがい

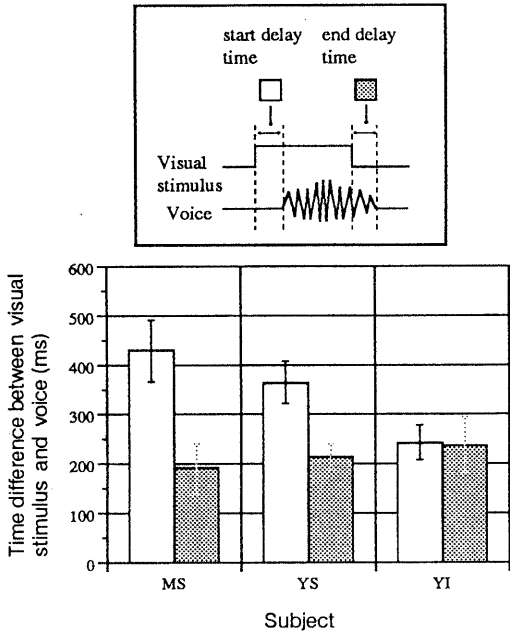


図 9 市販電気人工喉頭の視覚刺激による音声の時間追従性  
 Fig. 9 The time property of the electrolynx controlled by fingers according to the visual stimulus

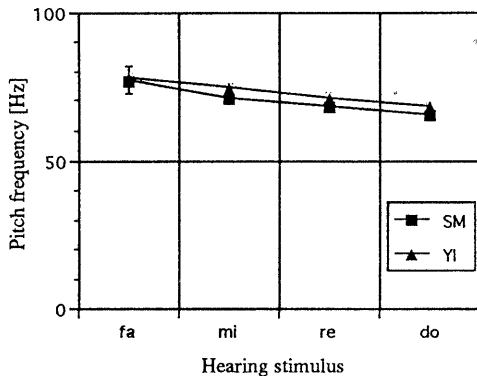


図 10 C3 から F3 までのピッチ変化に対する市販電気人工喉頭のピッチ変化特性  
 Fig. 10 Pitch of the electrolynx controlled by fingers according to pitch between C3 and F3

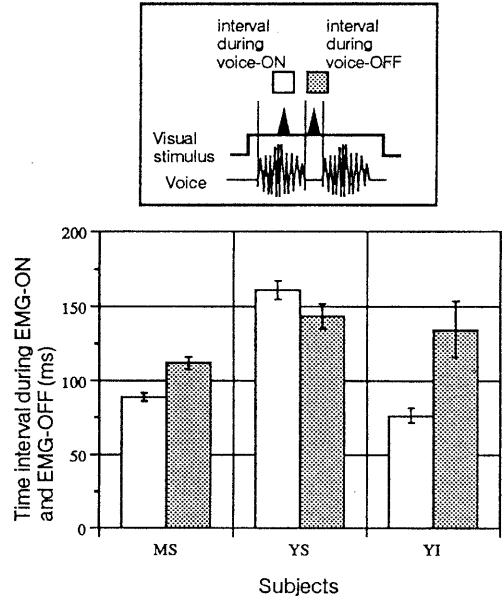


図 11 市販電気人工喉頭を使用して/i/発声する場合の3秒間の人工喉頭の音のON/OFFを繰り返した場合の時間特性  
 Fig. 11 Property of the electrolynx controlled by fingers repeating ON/OFF during 3sec

電気人工喉頭の音声の周波数が変化したことがわかる。市販電気人工喉頭を用いた発話では 6.7 Hz から 7.8 Hz であった。市販電気人工喉頭は周波数帯域は狭いが、発話中にピッチを変化させることは可能である。

#### 4.3 人工喉頭による無声音の生成

試作人工喉頭を用いた場合で無声音の生成を想定した実験の結果である図 8 (a)では、5 人の SH の筋電位の放電停止時間は平均 130 ms であり、人工喉頭の音の停止時間は平均 17.8 ms であった。ただし、子音の継続時間は、最も短い無声破裂音で約 10~50 ms、最も長い無声摩擦音で約 100~180 ms であることが報告されている<sup>9</sup>。実験 3 は筋収縮を開始/停止させる実験をしており、筋収縮を完全に停止させず、シュミットトリガ回路の閾値レベルより筋電位を低く出すことにより、人工喉頭の音の停止時間をより短くすることが可能である。

無声音の生成を想定した実験の結果である図

11では、市販電気人工喉頭の音の停止時間の平均値は130msであった。この結果から、市販電気人工喉頭を用いた発声でも無声音の生成は可能と考えられる。

## 5. 結 論

我々は胸骨舌骨筋の筋電位によって制御する埋め込み型電気人工喉頭の開発を目指して研究を進めている。その人工喉頭の制御条件として発声の開始/停止、有声/無声音の出し分けおよびピッチ制御を提案し、胸骨舌骨筋の制御による電気人工喉頭を試作した。

上記の制御手順で試作電気人工喉頭および市販電気人工喉頭を比較検討し、試作電気人工喉頭の有用性を調べて以下のような結果が得られた。

1. 両方の人工喉頭で音源のON/OFF制御ができた。
2. 両方の人工喉頭で少なくとも4段階のピッチ制御ができた。
3. 両方の人工喉頭で有声/無声音を出し分けできる可能性を確かめた。
4. 以上から、試作人工喉頭は性能が電気人工喉頭と同等であり、更に手を使用しないという利点がある。

## 文 献

- 1) 福田宏之：人工喉頭を用いた無喉頭発声の現状と将来，日本音響学会誌，44：130-134，1988
- 2) 大森孝一，児島久剛：振動部からみた喉摘後の代用音声，耳鼻臨床，83：945-952，1990
- 3) 高橋宏明：無喉頭発声—治療の一環として，音声言語医学，28：132-134，1987
- 4) 福田宏之：人工喉頭を用いた無喉頭発声の現状と将来，日本音響学会誌，44：130-134，1988
- 5) M.S. Weiss & A.G. Basili: Electrolaryngeal speech produced by laryngectomized subjects: perceptual characteristics, J. Speech Hearing Res., 28 : 294-300, 1985
- 6) H. Hirose: Electromyography of articulatory muscles: Current Instrumentation and Technique, Haskins Status Report, SR25: 73-86, 1971
- 7) M. Hirano & J. Ohala: Use of hooked wire electrodes for electromyography of the intrinsic laryngeal muscles, J. Speech and Hearing Research, 12: 362/373 (1969)
- 8) S.T. Klapp: Implicit speech inferred from response latencies in same-different decisions, J. Experimental Psychology, 91: 262-267, 1971
- 9) 電子情報通信学会：聴覚と音声，コロナ社，東京，290-291，1989