

音声の自然性を備えた電気人工喉頭の開発研究 (第 1 報)

橋場 参生, 山本 寧
上見 憲弘*, 伊福部 達*

Development of An Electoro-larynx with Naturality of Voice (Part I)

Mitsuo HASHIBA, Yasushi YAMAMOTO
Norihiro UEMI*, Tohru IFUKUBE*

抄 録

喉頭摘出者の代用発声装置である電気人工喉頭の改善を目的として、マイクロコンピュータを利用した電気人工喉頭システムの研究・試作を行った。試作システムは、健常者の母音の解析結果に基づいて自然性の向上が図られており、さらに、呼気などを利用したピッチ制御が可能となっている。喉頭摘出者による発声試験の結果、従来の電気人工喉頭に比べて、自然な声を容易に発声できるという結果が得られた。

1. はじめに

我々の生活において欠かすことのできない「声」は、喉頭にある声帯が振動することによって生成されている。この喉頭を喉頭癌等の理由によって摘出した患者は、手術を受けたその日から自分の「声」を失い、決定的なハンディキャップを背負って生きることになる。このような喉頭摘出者は、道内で約七百人、全国では数万人に達するといわれている。

喉頭摘出後に、「声」を出すためにとられる代用発声法としては、食道からの空気を利用して発声を行う食道発声法や、笛式人工喉頭・電気人工喉頭等の器具を用いる発声法が代表的である。これらの代用発声法のうち、電気人工喉頭による方法は、何よりも修得・操作が容易であるという特徴を持つため、高齢者や病弱者のための代用発声法として欠かせないものになっている。しかし、現在の電気人工喉頭は、単純な振動音を利用して声を出すという極めて簡素な装置であるため、非常に不自然な

声しか発声出来ず、アクセントやイントネーションを付けることもできない等、数多くの問題を抱えており、その改善が切望されている。

このような背景から本研究では、より自然な、人間らしい「声」を実現する電気人工喉頭の実現に向けて、マイクロコンピュータを中心とする電気人工喉頭システムの研究・開発を行っている。本報告では、自然な電気人工喉頭音声の実現のために、健常者の音声を解析し、音声の自然性（人の声らしさ）を決める要因を探った実験について、また、その結果に基づいて試作を行った電気人工喉頭システムとその評価試験についての報告を行う。

2. 喉頭の摘出と代用発声法

2.1 喉頭の役割¹⁾

音声の生成に寄与する器官を図 1 に示す。喉頭は、気管と咽頭の境界に位置しており、この内面に左右一対の粘膜のひだ、すなわち声帯がある。この声帯が肺からの空気流で振動することによって、音声の元となる声帯音源が作り出される (図 2)。声帯で生成された声帯音源

* 北海道大学電子科学研究所

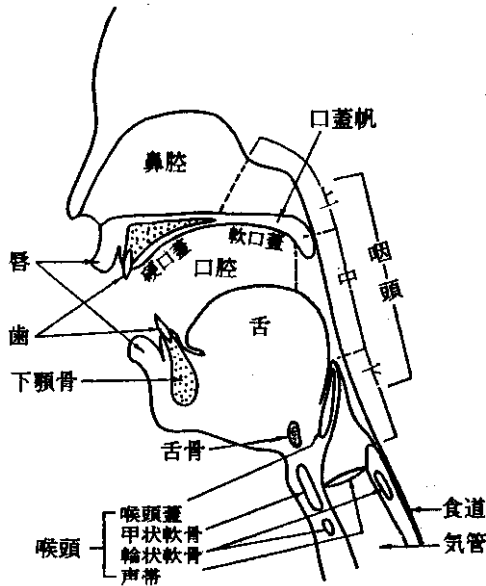


図1 音声器官¹⁾

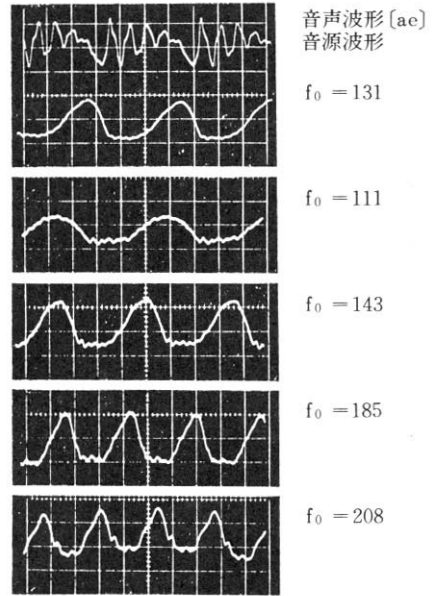


図2 声帯音源波形¹⁾

は、咽頭・口腔・鼻腔からなる声道を通り、舌・唇などの調音器官の動作によって周波数特性に変化を加えられた後、口腔から放射されて音声となる。

このように、喉頭は、声帯音源の生成という重要な役割を果たす器官であるため、喉頭癌などの理由によって摘出を行った場合には、音声の喪失という重大な障害を生じることになる。喉頭摘出後は、気管への食物等の流入を避けるため、気管から咽頭への通路は閉鎖し、気管を首に設けた孔（気管孔）に導いて呼吸を行うように手術が行われる（図3参照）。

2.2 喉頭摘出者の代用発声法^{2),3),4)}

喉頭摘出手術によって、声帯音源を生成する声帯の機能は失われても、舌や唇などの調音器官は残存している。このため、何らかの方法で声帯音源の代わりとなる音源を作り出すことができれば、不完全ながらも発声は可能となる。このような原理による代用発声法には次のようなものがある（図3）。

① 食道発声法

食道に空気を飲み込み、それを吐き出す時に、食道入口部付近を振動させて音源を生成する（いわゆるゲップを利用する）方法で、最も代表的な代用発声法である。器具を必要としないために生活の上で有利な点が多いが、習熟にはかなりの訓練が必要であり、高齢者や病弱

者の修得は困難である。

② 笛式人工喉頭

笛を内蔵したパイプを気管孔につけ、肺からの呼気で笛を鳴らし、この音を口腔内に導くことによって発声を行う方法である。呼気を利用することから抑揚が比較的豊かであり、操作も容易であるが、常にパイプをくわえたままで発声を行わなければならないという欠点を持つ。

③ 電気人工喉頭

電气的エネルギーで生成した音源を利用して発声を行う方法である。頸部に振動板を押しあてて、皮膚を通して振動音を導く方式（a. 押しあて式）や、パイプを用いて口腔内に導く方式（b. パイプ挿入式）がある。電気人工喉頭は習熟・操作が極めて容易なため、食道発声法を修得するまでの代用発声法として、あるいは、体力が弱まった高齢者や病弱者のための代用発声法として欠かせないものになっているが、自然性等の点で多くの問題を有しており、改善が強く望まれている。

④ 手術的音声言語保存法

声帯を代行する振動体を手術的に再建する方法である。発声時に気管孔を指で閉じて、気管と下咽頭を結ぶ皮膚管へ呼気を送り、皮膚管の一部を振動させて発声を行う方法等があるが、手術が必ずしも全ての患者に施せない、成功率が100%でない等の理由から広く普及はし

ていない。

3. 電気人工喉頭の現状とその高機能化

3.1 電気人工喉頭の現状と問題点

現在使用されている電気人工喉頭の例を図4に示す。この電気人工喉頭は、先端の振動板を頸部に接触させて振動音を伝えるものである。振動音の生成は、押しボタン式スイッチの操作で行う。このような電気人工喉頭の

問題点としては、次のようなものがあげられる。

- ・声帯音源と異なる単調な振動音を用いるため、機械的印象の強い、不自然な声しか発声できない。
- ・ピッチ周波数等のコントロールが十分に出来ないため、アクセントやイントネーションを表現できない。
- ・個人差は勿論のこと、男女の区別もつけられない。
- ・本体からの音漏れにより、明瞭度の低下が生じる。
- ・皮膚を介して振動音を伝えるため、波形に歪みを生じ、適切な音源を送ることが難しい。

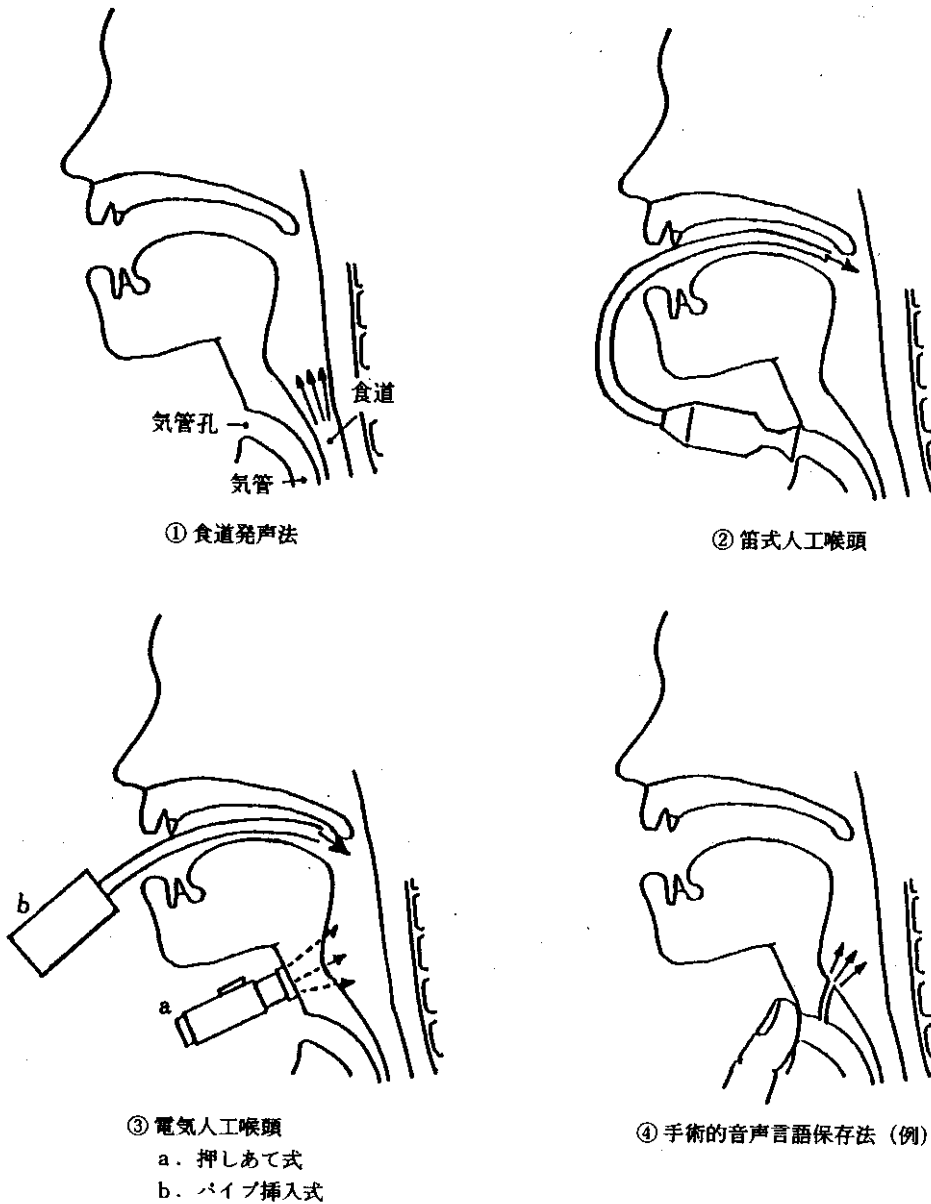


図3 喉頭摘出者の代用発声法 (各図の矢印は生成される音源を表す)

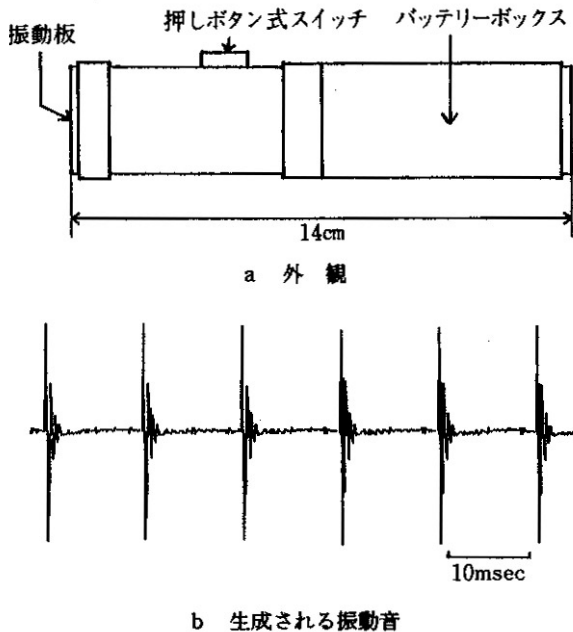


図4 現在使用されている電気人工喉頭 (例)

3.2 電気人工喉頭の高機能化

3.1 で述べたように、現在の電気人工喉頭の問題点は何よりも電気人工喉頭を用いて発声した音声の不自然さにあるといつてよい。そのため、本研究では自然な発声が可能で電気人工喉頭の開発を第一の目標として、次のような考えのもとに電気人工喉頭システムの試作を行った。

『現在の電気人工喉頭の音声の不自然になる原因は、音源に単調な振動音を使用していることに起因する。そこでまず、健常者の音声を解析することによって、「音声の自然性」を決定する要因を明らかにする。次に、「音声の自然性」を決定する要因を含んだ音源を作成し、この音源を口腔内に送り込むための電気人工喉頭を製作する。さらに、ピッチ周波数等のコントロールを可能とすることによって、アクセントやイントネーションの実現を図る。また、パーソナルコンピュータを支援機器とすることによって、音源データの修正・変更や、個人データの管理を容易に行えるようにする。』

以下、本報告では「音声の自然性」を決める要因を調べた結果について述べ、続いて、試作した電気人工喉頭システムの概要とその評価試験についての報告を行う。

4. 母音の自然性と波形ゆらぎの役割

4.1 ピッチゆらぎと波形ゆらぎ

音声の重要な要素である母音は、ピッチ周期毎に特徴的な波形が繰り返される構造を持っているが(図5)、繰り返される波形は全く同一のものではなく、微妙なゆらぎを含んでおり、このゆらぎが自然性に重要であるとされている。音声合成等の分野では、このゆらぎのうち、繰り返し周期の時間的変化(以後「ピッチゆらぎ」と呼ぶ)が自然性に重要であるとされており、古くから様々

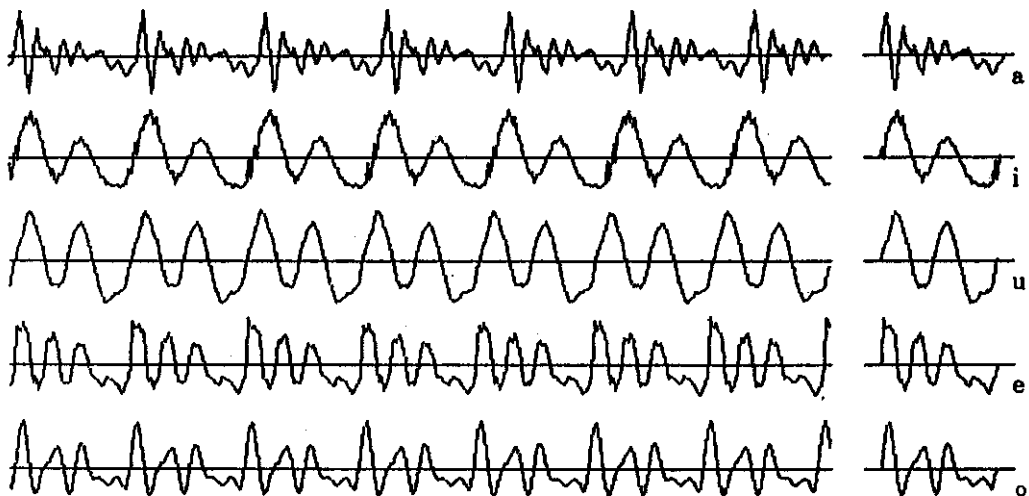


図5 日本語5母音の波形 (例)

な報告がなされている⁵⁾。これに対し、伊福部らは、母音のピッチ変化を抑えてもその自然性には大きな変化がなく、むしろピッチ毎に繰り返される波形の形の微妙な変化（以後「波形ゆらぎ」と呼ぶ）が重要であると報告している⁶⁾。この報告では、母音の定常部分をもとにして、

(A) 原音声
 (B) 波形ゆらぎは保存し、ピッチゆらぎを除去した母音
 (C) ピッチゆらぎは保存し、波形ゆらぎを除去した母音
 (D) 両方のゆらぎを除去した母音

を作成し、人の声らしさ（自然性）の評価実験を行っている。この結果を図6に示す。横軸は試験母音の種類A～Dであり、縦軸は各母音が他の母音との比較においてより人の声らしいと答えられた割合である。グラフから、ピッチゆらぎを除いた(B)よりも、波形ゆらぎを除いた(C)の方が自然性の低下が大きいことがわかる。逆に、ピッチゆらぎも波形ゆらぎもない(D)を基準として見ると、ピッチゆらぎを与えた(C)よりも、波形ゆらぎを与えた(B)の方が自然性が高まっていることがわかる。

この結果から、電気人工喉頭音声の自然性を向上させるためには、波形ゆらぎやピッチゆらぎを有する音源を

使用することが重要であり、特に波形ゆらぎの付加が効果的であると考えられる。今回は、この「波形ゆらぎ」と自然性の関係を調べる次のような実験を行い、電気人工喉頭によって生成する音源の改良を行った。

4.2 実験方法

実験で使用した音声は、成人男性が発声したピッチ周波数140Hz前後の日本語5母音である（カットオフ周波数10kHz、サンプリング周波数30kHz、分解能12bitでA/D変換）。まず、計算機内に取り込んだ母音の定常部分から、視察によってピッチ周期毎に波形を連続して切り出し、128個の波形を得た（図7）。この1ピッチ周期内の波形のことを、以後「ピッチ波形」と呼ぶことにする。次に、各ピッチ波形の長さが一定になるように加工を行い、さらに全ての実効値を等しくした。

以上の方法で作成したピッチ波形を用いて、母音に含まれる波形ゆらぎの構造を変化させたときに、自然性がどのように変化するかを調べた。行った実験は①～③の3種類で、実験毎に次に述べる方法で、8つの試験音を作成した。これらを図8～10のaに示す。なお、図中で用いているピッチ波形の番号は、母音から切り出した順につけたものである。

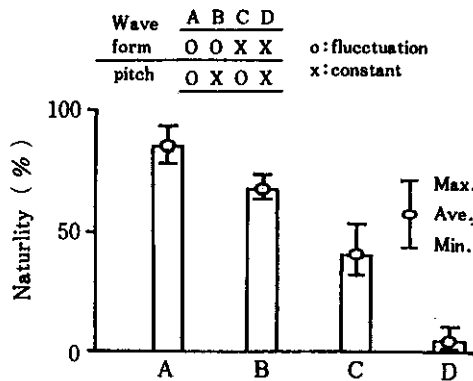


図6 ピッチゆらぎ、波形ゆらぎと自然性の関係を調べた結果⁶⁾

実験①：同一のピッチ波形を繰り返してつなげたブロックが、ブロックを構成するピッチ波形の番号順に並ぶように接続し、試験音1番から8番にいくに従って、試験音内に含まれるピッチ波形の種類が減っていくようにした（図8a）。この方法で、波形ゆらぎを少しずつ取り除いていった場合の自然性の変化を調べた。

実験②：ピッチ波形をその番号順に数個のブロックに分けた後、各ブロック内でランダムに並び替えを行い、試験音1番から8番にいくに従って、試験音内のピッチ波形の並び方が乱れていくようにした（図9a）。この方

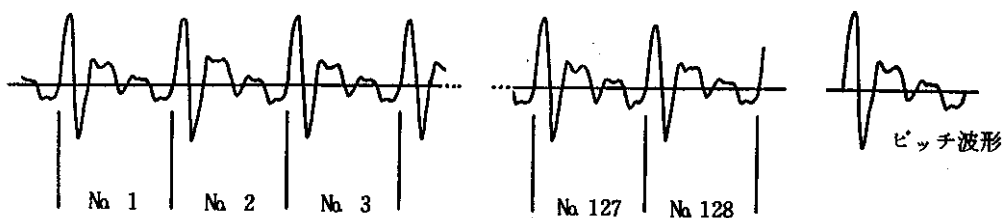


図7 ピッチ波形の切り出し

法で、波形の時間的推移を少しずつ崩していった場合の自然性の変化を調べた。

実験③：番号順に並んだ数個のピッチ波形からなるブロックを繰り返して接続し、試験音1番から8番にいくに従って、繰り返されるブロックの長さが短くなっていくようにした(図10a)。この方法で、もとの母音と同じ順序のピッチ波形がどの程度あれば、自然性が保たれるのかを調べた。

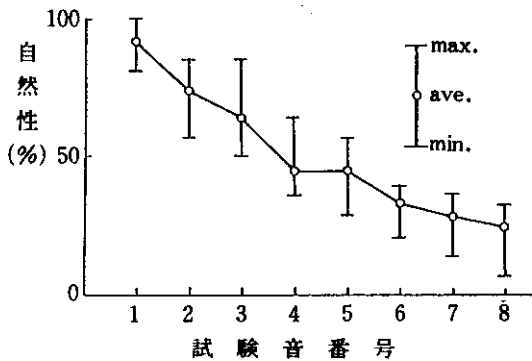
自然性の評価は8つの試験音を用いた一対比較法によって行った。各実験では8種類の試験音の全ての組合せ

ピッチ波形の並び方(数字はピッチ波形の番号)

試験音番号	1	2	3	4	5	6	7	8
並び方	1	1,1	1,1,1	1,1,1,1	2	2,2	2,2,2	2,2,2,2
並び方	3	3,3	3,3,3	3,3,3,3	4	4,4	4,4,4,4	4,4,4,4,4
並び方	5	5,5	5,5,5	5,5,5,5	6	6,6	6,6,6,6	6,6,6,6,6
並び方	7	7,7	7,7,7	7,7,7,7	8	8,8	8,8,8,8	8,8,8,8,8

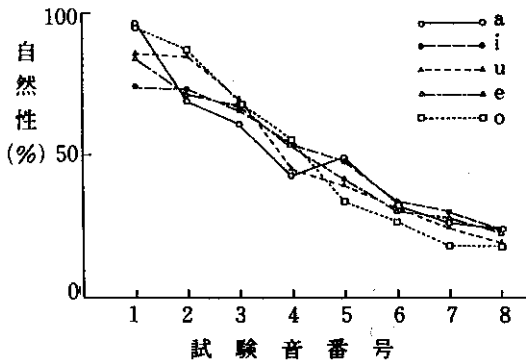
a. 実験①で使用した試験音

(同一ピッチ波形の繰り返しからなるブロックを、構成するピッチ波形の番号順に接続)



b. 三人の被験者が/a/の場合について行った実験結果

(一人3回、計9回の平均値)



c. 一人の被験者が5母音について行った実験結果

(各母音とも3回の平均値)

図8 実験①で使用した試験音と実験結果

(56通り)をランダムに被験者に呈示し、2つの試験音の内どちらがより人の声らしいか(どちらの自然性が高いか)を応答させた。試験音の呈示はヘッドホンを用いて両耳に行い、持続時間約0.85secの2つの試験音を1.0secの間隔で呈示するようにした。評価の方法は、ある試験音が他の試験音よりも自然性が高いと応答され

た時には1点を、差異はないと応答された時には両方に0.5点を与え、最後に各試験音が得た総得点によって自然性を評価した。

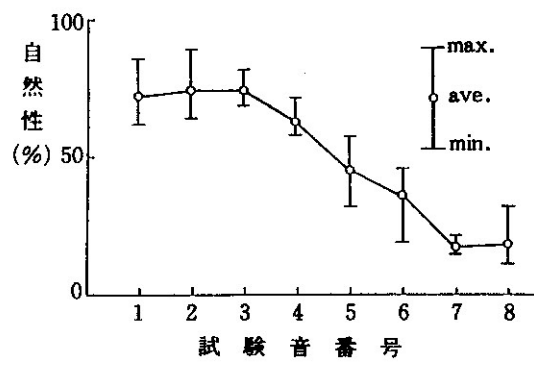
4.3 結果と考察

各実験の結果を図8~10 b, cに示す。横軸は試験音

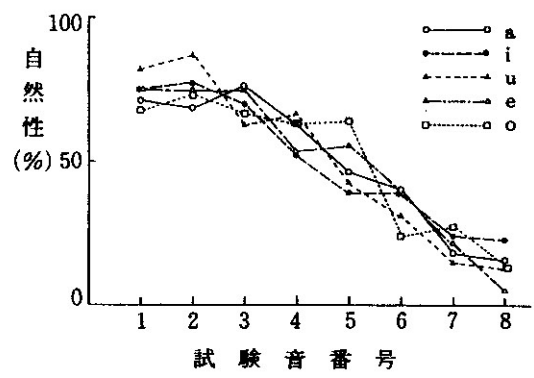
ピッチ波形の並び方(数字はピッチ波形の番号)

試験音番号	1	2	3	4	5	6	7	8
並び方	1 128	2.1 128, 127	2.4, 1.3 127, 125, 128, 126	7, ... 3 113, ... 117 127, ... 123	15, ... 2 111, ... 99 115, ... 121	7, 31, ... 2 88, 90, ... 69 105, 99, ... 120	18, 4, 54, ... 48 97, 113, 88, ... 85	54, 22, 128, 3, ... 78, 102

a. 実験②で使用した試験音
(ピッチ波形を番号順に数個のブロックに分け、各ブロック内でランダムに並びかえた)



b. 三人の被験者が/a/の場合について行った実験結果
(一人3回、計9回の平均値)



c. 一人の被験者が5母音について行った実験結果
(各母音とも3回の平均値)

図9 実験②で使用した試験音と実験結果

の番号を、縦軸は各試験音が自然であると判断された割合（各試験音が得た総得点の割合）を表す。bは/a/の場合について3人の被験者がそれぞれ3回ずつ一対比較を行った場合の平均値、cは1人の被験者が5母音について各3回の一対比較を行った場合の平均値である。

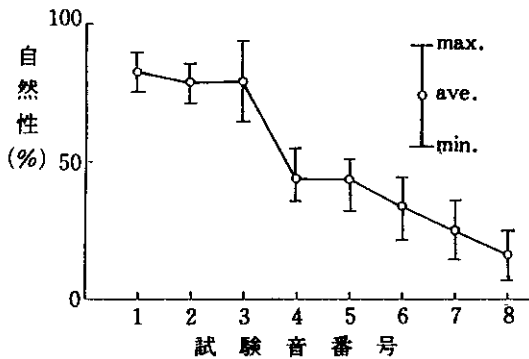
実験①の結果より、波形ゆらぎを除いていくに従い、

自然性が低下していくことがわかった。また、実験②の結果より、波形ゆらぎの時間的推移が崩れても自然性が低下することがわかった。さらに、実験③の結果から、32ピッチ程度の長さ（試験音3に相当、32ピッチ分の長さは約200msec）の波形ゆらぎがあれば、自然性が保たれることがわかった。母音の違いによる差は3種類

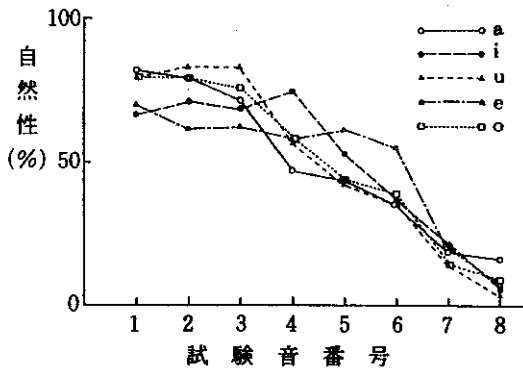
ピッチ波形の並び方（数字はピッチ波形の番号）

試験音番号	1	1, 2, 3, ...	127, 128
2	1, 2, 3, ...	63, 64	1, 2, 3, ... 63, 64
3	1, 2, ...	32	1, 2, ... 32 1, 2, ... 32 1, 2, ... 32
4	1...16	1...16	1...16 1...16 1...16 1...16 1...16 1...16 1...16 1...16
5	1...8	1...8	1...8 1...8 1...8 1...8 1...8 1...8 1...8 1...8
6	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4
7	1, 2	1, 2	1, 2
8	1	1	1

a. 実験③で使用した試験音
 (番号順に並んだ数個のピッチ波形から成るブロックを繰り返して接続)



b. 三人の被験者が/a/の場合について行った実験結果
 (一人3回、計9回の平均値)



c. 一人の被験者が5母音について行った実験結果
 (各母音とも3回の平均値)

図10 実験③で使用した試験音と実験結果

の実験とも特にみられなかった。

以上の実験結果をまとめると、母音の自然性には波形ゆらぎの程度や時間的推移が密接に関与しており、32ピッチ程度の長さの波形ゆらぎが重要であると言える。このことから、電気人工喉頭の自然性を向上させるためには、最低でも32ピッチ分の波形ゆらぎを持つ音源を使用することが有効であると考えられる。試作した電気人工喉頭システムは、この知見に基づいて自然性の向上が図られている。

5. パイプ挿入式電気人工喉頭システムの開発

本研究で試作した電気人工喉頭システムを図11に示す。本システムはパイプ挿入式電気人工喉頭及び、そのコントロールユニット、そして、開発支援の為のホストコンピュータより構成される。以下に各部の説明を行う。

5.1 パイプ挿入式電気人工喉頭

本システムでは、音源をパイプによって口腔内に導く方式を採用した。これは、歪みの少ない波形を送り込める可能性がある、音漏れによる明瞭度の低下を抑えられる等の理由による。ただし、発声時には常に音源を導くパイプが口腔内に存在することになる。

パイプ挿入式人工喉頭及びその周波数特性を図12に示す。パイプ挿入式電気人工喉頭は、小型のスピーカを円筒形の筒に納め、筒に開けた穴からパイプを通して音源を導く構造になっている。その構造上、図12の周波数特性にあるように多数の共振点が生じているが、聴覚的印象としては自然性に及ばず影響は認められなかった。

5.2 コントロールユニット

コントロールユニットは、中央処理部、メモリ部、声帯音源出力部から成る。各部の機能について順に述べる。

(1) 中央処理部

中央処理部では、CPUとして日立のH8 / 532（北斗電子製HSB8/532-1ボードを使用）を用いている。ここでは、声帯音源の送出や、各種制御信号の処理等、電気人工喉頭の動作全体のコントロールを受け持つ。また、ホストコンピュータとの間で、RS-232Cを通じてプログラムやデータの送受信を行う。

(2) メモリ部

メモリ部は、基本動作プログラム、モニタプログラム、

標準声帯音源データ等を格納したROMと、一時的な動作プログラム・声帯音源データ・各種パラメータ等を格納するRAMによって構成される。試作システムではCPUとメモリが分離しているが、これらのワンチップ化も可能である。

(3) 声帯音源出力部

声帯音源出力部は、D / Aコンバータ、ローパスフィルタ、パワーアンプより構成される。ここでは、CPUを介して受け取った声帯音源データをアナログ信号に変換し、パワーアンプで増幅してパイプ挿入式電気人工喉頭内のスピーカを駆動する。D / Aコンバータの分解能は8bit、ローパスフィルタは8次のバターワース型でカットオフ周波数は5kHzとした。

5.3 ホストコンピュータ

本システムでは、ホストコンピュータとしてPC-9801(NEC製)を使用している。ここでは声帯音源データの作成、電気人工喉頭の動作プログラムの開発、個人データの管理などを行う。その主な機能について以下に述べる。

(1) 声帯音源データの作成

音声データをA / D変換してコンピュータ内に取り込み、波形ゆらぎの解析、LPC分析による声帯音源の抽出、ピッチ・ホルマント等の個人データの抽出を行う。また、各種音声データをD / A変換することによって聴取・評価を行い、これらの結果に基づいてパイプ挿入式電気人工喉頭のための声帯音源データを作成する。作成した声帯音源データは、RS-232Cによりコントロールユニット内のメモリにダウンロードされる。

(2) プログラム開発

電気人工喉頭の動作プログラムの開発・修正を行い、コントロールユニット内のメモリへダウンロードする。

(3) 個人データの管理

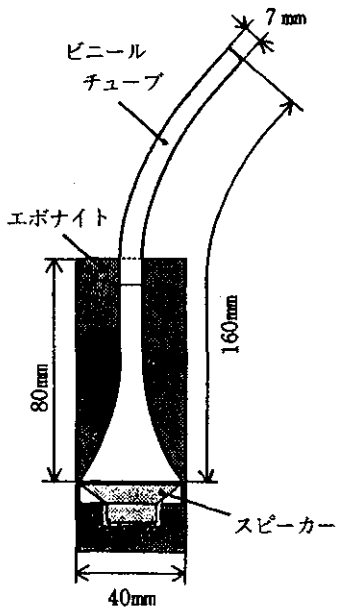
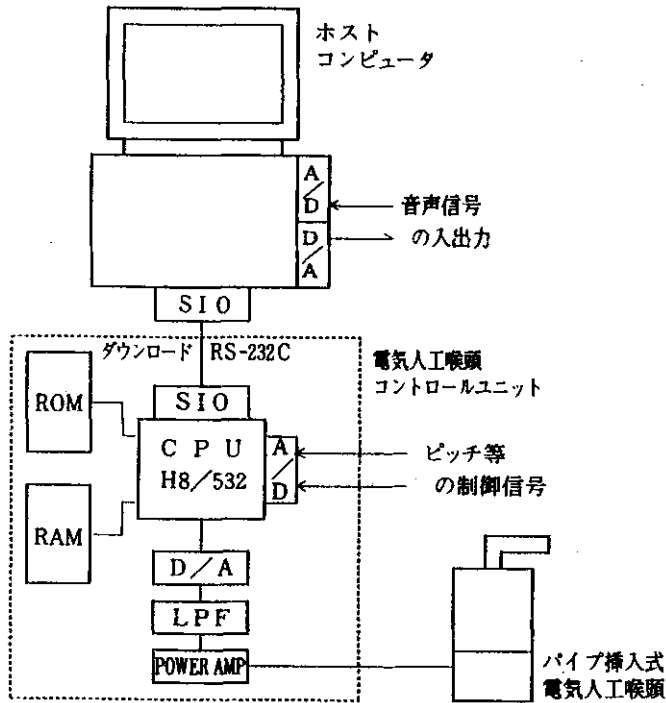
喉頭摘出前の患者の音声やその特徴パラメータを管理し、必要に応じて声帯音源データの作成に使用する。

以上が、試作した電気人工喉頭システムの構成である。

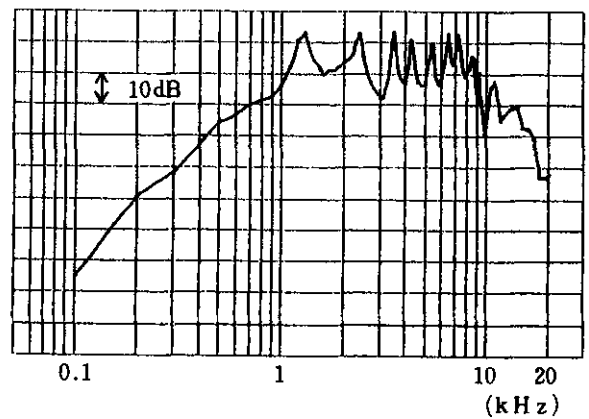
6. 電気人工喉頭の高機能化の試み

6.1 自然性向上のための音源の改良

4節での実験より、電気人工喉頭の自然性を向上させ



(a) 試作したパイプ挿入式電気人工喉頭 (断面図)



(b) 試作した電気人工喉頭の周波数特性 (パイプの先端から10cm離れた地点で測定)

図12 試作した電気人工喉頭とその周波数特性

るためには、最低でも 32 ピッチ分の波形ゆらぎを有する音源を使用すれば良いという考察を行った。

そこで本システムでは、健常者(27歳、男性)の母音/a/から 36 次の LPC 分析法によって声帯音源を導出し、これをコントロールユニット内のメモリに声帯音源データとして格納するようにした。図 13 に、母音/a/の波形と導出した声帯音源の波形を示す。今回は 32 ピッチ分の声帯音源データを格納し、これを繰り返して電気人工喉頭から送出することによって、波形ゆらぎを有する電気人工喉頭音声の実現を図った。

6.2 ピッチ周波数等のコントロール

電気人工喉頭を用いてアクセントやイントネーションを表現するためには、送出する音源の基本周波数、すなわち、ピッチ周波数の制御を行う必要がある。本試作システムでは、アナログ信号によって 2 つのパラメータ T_0 、 T_1 を制御することによってピッチ周波数のコントロールを実現した(図 14)。 T_0 の制御は声帯のインパルス応答を変化させることに相当し、 T_1 の制御は声帯の開閉間隔を変化させることに相当する。このため、実際の使用にあたっては、まず T_0 を適当な値に設定して声帯のインパルス応答を決めた後、気管孔の呼気等をセンシングして、 T_1 を変化させ、ピッチ周波数を変え

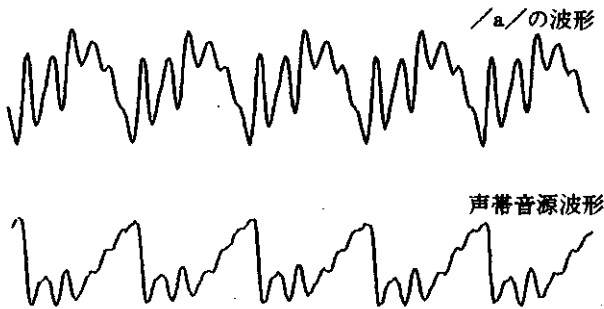


図13 母音/a/の波形と、LPC 分析によって求めた声帯音源波形

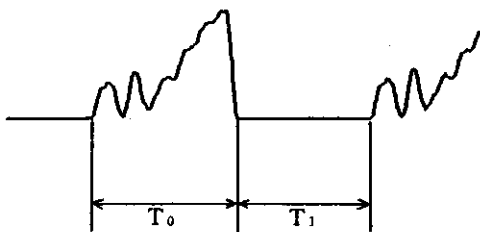


図14 ピッチのコントロール

ることが自然であると思われる。

アクセントやイントネーションは、ピッチ周波数の変化によっても生じて来るが、本システムではさらに、電気人工喉頭から送出する声帯音源の音量を変化させることによって声の強弱も実現できるようにした。

このようなピッチ周波数等のコントロールを、スイッチ・ポリウム等で実現することは容易であるが、より高度な制御を実現するためには、気管孔の呼気や、発声に関わる筋電位等を利用することが必要である。これらについては、今後、臨床試験等を通じて様々な角度から検討して行かなければならない。

6.3 呼気圧を利用した発声試験

最後に、本電気人工喉頭システムを用いて、喉頭摘出者の方に発声を行ってもらった結果について述べる。被験者は、喉頭摘出後 4 年を経過した 56 歳の男性であり、現在笛式人工喉頭を使用している。

今回の試験では、北大で進められている気管孔の呼気圧測定に関する研究⁷⁾を基に、呼気によるピッチ周波数のコントロールを試みた(図 15)。ピッチ周波数の変化幅は、100Hz ~ 200Hz とし、電気人工喉頭の ON/OFF も呼気を感知することによって行った。

発声試験では、日本語 50 音、例文「あおいうみ、み



図15 呼気圧を利用した発声試験

どりのやね」, 童話桃太郎の一節などを発声して頂いた。この結果, いずれの場合も, 従来の振動音を用いる電気人工喉頭に比べて, 声に変化を付け易く, より自然であるとの感想を頂くことができた。

また, 一方で次のような点に関して, 御指摘を頂いた。

- ・音量がまだ小さい
- ・明瞭度がまだ低い
- ・パイプ挿入式以外の方法も検討して欲しい
- ・小型化, 低価格化を実現して欲しい など

音量・明瞭度の点については小型のスピーカを筒内に納めるといった電気人工喉頭の構造が影響していると思われる。筒の構造, スピーカに代わる発音体等についての検討が必要である。また, パイプ挿入式以外の方法としては, 呼気による制御を可能とした押しあて式電気人工喉頭の開発等が必要と思われる。

今回の被験者は, 笛式人工喉頭を使用しているため, 呼気の操作にはある程度習熟しているものと考えられる。今後, 他の喉頭摘出者についても試験を行い, 本システムの検討を進めて行かなければならない。

7. まとめと今後の課題

以上, 喉頭摘出者の代用発声装置である電気人工喉頭の自然性向上を目標とした研究に関して報告を行った。

試作システムは, まだ基本的な機能を実現した段階であり, さらに研究を重ねて改良を行っていかねばならない。これには, 自然性に関する問題の他にも, 破裂音や摩擦音の発声方法, 小型化の検討, DSP による信号処理機能の強化等, 数多くの課題が残されている。

本研究は, 電気人工喉頭システム開発の導入部であったにも関わらず, 喉頭摘出者の方々をはじめ, 新聞社・放送局等から, 様々な反響をいただくことができた。これらの期待に答えられるよう, 今後も製品化に向けた研究を進めて行きたい。

参考文献

- 1) 大泉充郎監修, 藤村 靖編:「音声科学」, pp.1-156, 東京大学出版会, 1972.
- 2) 福田宏之:「人工喉頭を用いた無喉頭発声の現状と将来」音響学会誌, 44 巻, pp.130-134, 1988.
- 3) 今泉 敏:「喉摘者音声言語の音響分析と改善に関

- する会議報告」, 音響学会誌, 37 巻, pp.41-44, 1981,
- 4) 今泉 敏:「代用発声法とその声質」, 音声言語医学, 24: pp.204-210, 1983.
- 5) 橋本新一郎:「モーラ内ピッチパタンの聴覚に及ぼす影響」, 音響学会講論集, 3-3-7, 1973.
- 6) 八幡英子, 伊福部達, 星宮 望:「音声の自然性における位相と波形ゆらぎの役割」, 音響学会聴覚研究会資料, H-87-5, 1987-1.
- 7) 上見憲弘, 伊福部達, 泉隆, 松島純一:「人工喉頭のための音源制御方式の検討」, 信学技報, MBE 91-31, 1991.