

## イントネーションを制御できる人工喉頭の実用化研究

上見憲弘 伊福部達 \*泉隆 高橋誠

北海道大学 電子科学研究所

\*北海道東海大学 工学部

北海道札幌市北区北12条西6丁目

\*北海道札幌市南区南沢5条1丁目1-1

本報告では、喉頭摘出者が用いる電気人工喉頭の音声をより自然なものとするため、そのイントネーションを喉頭摘出者自身の呼気で制御する方式を提案し、実用化に向けてその評価を行った。イントネーションの制御には呼気圧を利用し、圧力を生じさせるための抵抗値およびその圧を声の高さに変換するときの変換関数を色々と変えて、音声の自然さを評価した。被験者は喉頭摘出者2名である。実験結果から、両者ともに抵抗値と関数の違いによって評価値の傾向に差が生じた。以上から、呼気制御型電気人工喉頭の最適設計のための指針を得た。

## Study for a Practical Use of an Electrolarynx having a Function of Intonation Control

Norihiro UEMI, Tohru IFUKUBE, \*Takashi IZUMI, Makoto TAKAHASHI

Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University

\*Department of Technology, Hokkaido Tokai University

N12 W6 Kita-ku, Sapporo 060, Japan.

\*5-1-1 Minamisawa, Minami-ku, Sapporo 005, Japan.

In order to improve a naturality of electrolarynx voice, we have proposed a new device which can control the intonation of the voice by laryngectomees using their respiration. Furthermore, this new method was evaluated based on psychophysical experiments regarding the voice naturality. There are two parameters which concern with the voice naturality. One is an airflow resistance which produce the pressure from the respiration flow. The other is a transform function which can convert the pressure into the pitch frequency. The subjects were two laryngectomees. From the experimental results, the naturality was found to depend on both the airflow resistance and the transfer function. A guiding principle was obtained for the optimal design of our electrolarynx.

## 1. はじめに

喉頭を摘出した人達の人工喉頭の使いやすさや音声の自然性を向上させる研究は、円滑なヒューマンコミュニケーションを実現する上で極めて重要な課題である。我々は、より健常者に近い音声を生成できるような人工喉頭の開発を行い、実用に向けてその評価を行っている。

何らかの疾病により喉頭を摘出してしまうと、声帯が除去されるため音声生成に最も重要な音源を失ってしまう。しかし、このような喉頭摘出者は発声に寄与する口腔や舌などの音声器官は残されていることが多い。したがって、この残された音声器官に何らかの音源を与えることにより音声を疑似的に生成できるようになる。

このような代用発声は、器具を使わない方法と使う方法に大別される<sup>1)</sup>。前者の例として、「げっぶ」のような音源を用いて話す食道発声法や、気管-食道間に開けた穴から食道内に呼気を送り込んで話すT-ショット法等がある。後者の例として、呼気を用いてリードを震わせその音を口に送り込んで話す笛式や、振動音を経皮的に声道内に伝えて音声器官の音源にする電気式などの人工喉頭があげられる。

しかし、現在用いられているこれらの代用発声法は、それぞれに習得のしやすさ、使い勝手などに一長一短がある。また、音声器官への音源が健常者の声帯音源と大きく異なるため、その音声は不自然に聞こえてしまう。本報告では、これらの代用発声法のうち、比較的習得が容易である電気人工喉頭をとりあげ、その音声の自然性を向上させるためにイントネーションを付加できるように工夫し、最適な制御方法を求めている。

## 2. 呼気圧によるピッチ制御について

音声によるコミュニケーションにおいて、話者の感情や意志を伝える上でピッチの変化すなわちイントネーションや、音圧の変化すなわちアクセントが極めて重要な役割を果たす<sup>2)</sup>。しかし、現在一般に使用されている電気人工喉頭には、これらのことを積極的に考慮に入れているものは無い。

このようなことから我々はピッチを制御できる電気人工喉頭を目指し、その制御量として呼気を用いる方法について検討してきた。健常者の場合、呼気は音声のリズムやアクセントなどを作り出す上で重要な役割を果たしており、呼気量の制御に慣れている。したがって、喉頭摘出後でも呼気量をピッチの制御に利用した場合、その制御の習得も比較的容易であることが予想される。

これまでの我々の研究結果から、喉頭摘出者の呼気の制御能力は健常者に比べて劣ることが分かっているが、実際に呼気圧によってピッチを制御させる方法で発声してもらおうと、ほかの制御方法に比べて人工喉頭音声の自然性が高くなることが分かっている<sup>3)</sup>。

ここでは、呼気圧からピッチ周波数へ変換するときの変換関数として色々な関数を設定して発声させ、どの変換関数が自然性や使いやすさの上で最も有利であるかを考察した。試作した人工喉頭の外観を図1に示した。

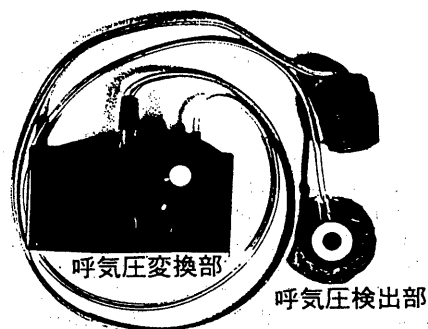


図1 呼気制御型人工喉頭概観図

これは以下の3つの部分で構成されている。

### ① 呼吸圧検出部

喉頭摘出者の喉の所に開いている気管孔に、図1の装置を押し当て息を吹き込む部分である。気流抵抗があるため呼吸により圧力が生じそれを圧センサで検出する。このような抵抗を用いるのは呼吸のし易さも考慮にいれ、ある程度呼吸が漏れるようにするためである。また吸気時には弁が開くようになっている。

### ② 呼吸圧変換部

検出した呼吸圧の大きさをピッチ周波数に変換する部分である。この変換関数のとりかたで音声の自然性や装置の使いやすさなどに違いが出てくるものと予想される。

### ③ 振動子

呼吸圧変換部の信号を振動に変える部分である。この振動子を頸部にあてることにより、口腔内に音が送り込まれ、残された音声器官への音源となる。

## 3. 実験方法

本実験では呼吸圧による最適なピッチ制御方式を探すために、次の2つをパラメータとして用いた。すなわち、(a)呼吸圧検出部の抵抗値の値、および(b)呼吸圧をピッチ周波数に変換するときの関数である。評価では、(イ)使用者自身が答えた主観的な制御のしやすさと、(ロ)聴取者が答えた音声の自然性の二つを尺度とした。

### 3.1 パラメータの設定

#### A : 気流抵抗値

気流抵抗としては図2に示すような抵抗大と抵抗小の2種類を用いた。

呼吸圧を検出する際に、完全に気管孔を塞いでしまうと呼吸の妨げになるのでこのよう

な抵抗で呼吸を逃がすようにしている。また、気流抵抗値の違いは同じ息を吐いたときに生じる呼吸圧の大きさに影響を与える。このことから、人工喉頭の使いやすさに影響を与える可能性がある。非線形なものを用いた理由は、実際に気管孔の部分にこの抵抗を取り付けることを想定した場合、線形気流抵抗に比べ非線形の方が制作が容易で、形状を小さくできるなどである。

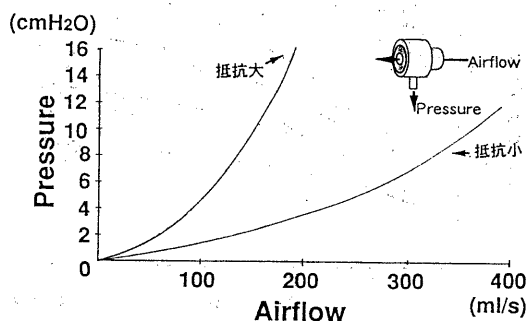


図2 使用した気流抵抗の特性

#### B : 呼吸圧からピッチ周波数への変換関数

成人男子の生理的声域は60 - 500 Hzといわれている<sup>4)</sup>。また、呼吸による声のオン・オフの制御も行うため、呼吸圧がある程度高まるまで人工喉頭音源から音が発生しないようにしなければならない。そのため変換関数に不感帯をもうけた。

以上のことを考慮して、図3に示したように、変換関数は60 Hz - 1 cmH<sub>2</sub>Oから始まり、次式で表される線形な関数4種と、非線形な関数4種の合計8種類とした。

すなわち、線形関数として

$$F(\text{Hz}) = a * (X(\text{cmH}_2\text{O}) - 1) + 60 \quad (1)$$

$$a : 12.5, 25, 50, 100 (\text{Hz/cmH}_2\text{O})$$

また、非線形関数として

$$F(\text{Hz}) = b * \log_e (X(\text{cmH}_2\text{O}) + 60) \quad (2)$$

$$b : 25, 50, 75, 100$$

$\log_e$ で変化する非線形関数を利用したのは、

予備実験で、線形変化時の傾きを大きめに設定したとき、「声の高さが高くなりすぎて使えない」との被験者の内観報告が得られたこと、垣田・平間らが健常者による実験において、呼気圧を用いて関数をlogに設定するのが人工喉頭の制御に望ましいと報告<sup>6)</sup>していることによる。

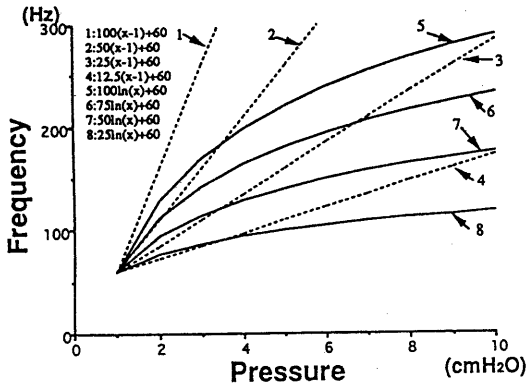


図3 呼気圧から声の高さへの変換関数

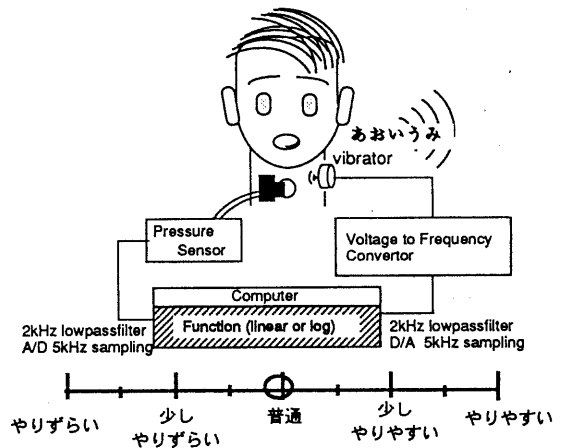
#### C: 被験者

被験者は喉頭摘出者2名で、そのうち1名は過去に呼気制御型人工喉頭の訓練を行ったことがある被験者(A)で、他の1名はほとんど訓練を行っていない被験者(B)である。被験者A: 48才男性で喉頭摘出後7年を経ている。代用発声法として食道発声法使用しているが、電気人工喉頭も扱える。本呼気制御型人工喉頭の訓練は8カ月前に1日15分ずつ5日間行っている。被験者B: 62才男性で喉頭摘出後5年を経ている。代用発声法として電気人工喉頭を使用しており、その指導員でもある。本呼気制御型人工喉頭の訓練はデータ記録直前15分間のみで装置の扱い方の指導はしなかった。

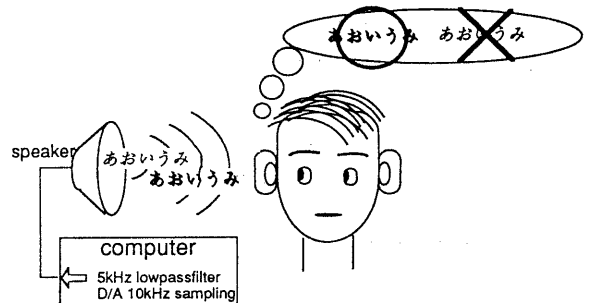
### 3. 2 実験手順

#### 3. 2. 1 音声データの記録と制御のしやすさの評価法

まず、呼気検出部の抵抗の値を選び、図4(A)に示したように、この部分を気管孔に当てた。呼気圧は抵抗の手前から圧センサにより検出し、LPF(カットオフ2kHzのベッセルフィルタ)を通したのちA/Dによりサンプリング(5kHz)した。前述の図3の関数に基づきコンピュータで変換した信号をD/Aにより出力(5kHz)し、さらに電圧-周波数変換器により人工喉頭音源の音のピッチ周波数に変換した。



(A) 音声サンプルの取得



(B) 一対比較による声の自然さの評価

図4 実験装置図

試験語には/aouiumi/(あおいうみ)という言葉を発声させた。イントネーションのパターンは指定しなかった。各パラメータごとに5回ずつDATに記録した。

制御のしやすさの評価では、まず、

関数  $F(\text{Hz}) = 50(X(\text{cmH}_2\text{O}) - 1) + 60$  の時の値を「普通」とし、それぞれの関数において図4(A)の下のような表に丸をつけてもらった。ただし、上記の関数において「普通」だと思えないときは別なところに丸をつけることを認めた。

### 3. 2. 2 発声された声の自然性の評価

図3で示した関数ごとに、それぞれ5回ずつ発声された人工喉頭音声のうち、その中で典型的なイントネーションの変化をしていると思われる波形を選び出し聴取実験を行った。

このようにして選ばれた8つの人工喉頭音声からランダムに2つ選び出し、より自然に聞こえた方に1点を与えすべての組み合わせについて行い、加算していく対比較を用いた。聴取被験者は9名、各被験者に対して3回ずつ計27回の平均と分散を求めた。

また、それぞれのグラフでいちばん自然であると評価された関数で対比較を行い、抵抗値、被験者間の音声の自然さの違いを調べた。この場合の聴取被験者は5名、各4回、計20回で行った。

## 4. 実験結果

図5に被験者A、Bがそれぞれの関数ごとに5回発声を行ったときの平均ピッチと標準偏差を示す。パラメータは図2の抵抗値、縦軸は周波数、横軸は関数である。

また、被験者自身の制御の容易さとそのとき発せられた音声の自然さの結果を図6、図7に示す。

制御の容易さの表の数字は1を「制御しづらい」、3を「普通」、5を「制御しやすい」としたときの値である。またグラフの縦軸は得点すなわち自然性で、横軸は使用した関数を示す。

### A : 制御の容易さと音声の自然さ

被験者Aについては制御が容易であれば音声が自然に聞こえるという対応関係がほぼ見受けられた。しかし、被験者Bでは、制御の容易さと自然性には被験者Aほど明確な対応は見られなかった。

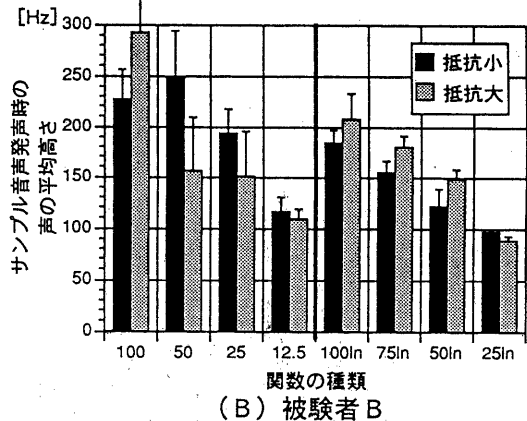
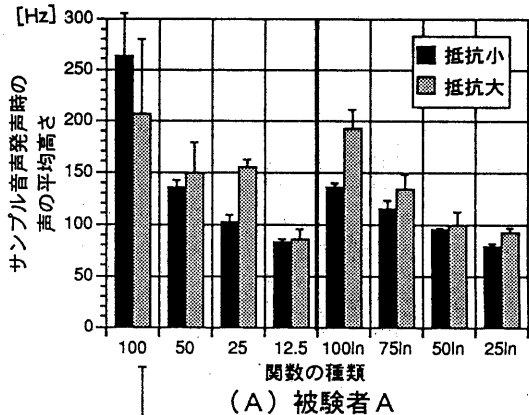


図5 「あおいうみ」5回発声時の平均ピッチ

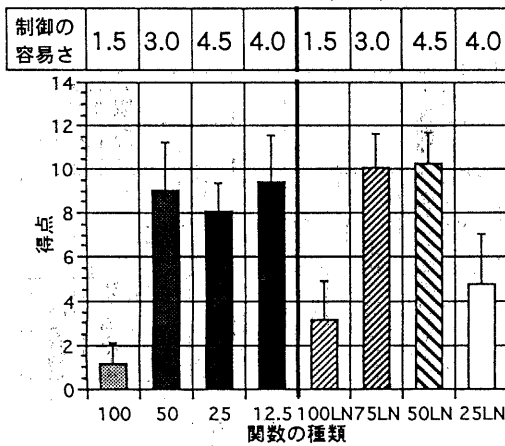
$$F(\text{Hz}) = A \cdot (X(\text{cmH}_2\text{O}) - 1) + 60 \quad | \quad F(\text{Hz}) = B \cdot (\log_e(X(\text{cmH}_2\text{O}))) + 60$$

A: 100, 50, 25, 12.5      B: 100, 75, 50, 25

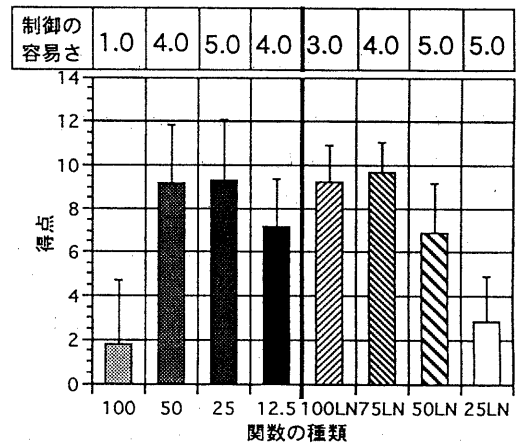
B: 変換関数について

被験者 A: 抵抗小のときは、関数が  $F=100(X-1)+60$ 、 $F=100\log_e X+60$ 、 $F=25\log_e X+60$  の場合で評価が低く、その他の関数の場合にはほぼ同程度の得点となった。抵抗大のときには関数が  $F=100(X-1)+60$ 、 $F=100\log_e X+60$ 、以外ではほぼ同程度の得点となった。制御の容易さと声の自然さどちらについても、線形な関数を用いた場合と対数関数を用いた場合で特徴的な差異は見られなかった。

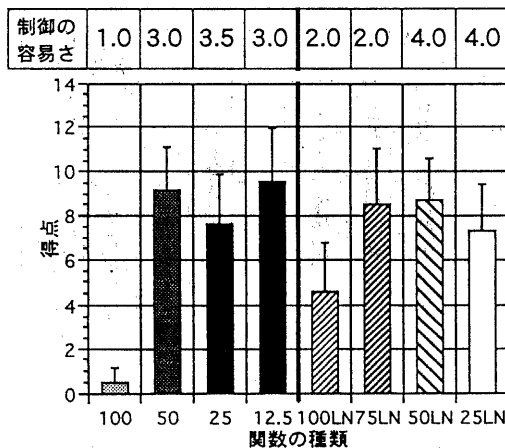
被験者 B: 抵抗小のときは、図 8 下図に示したように、インドネーションの変化のパターンがピークを一つだけ持った山形のパターンになりがちであった。また、被験者 A と同様に関数が  $F=100(X-1)+60$  と  $F=25\log_e X+60$  のときで評価が低くなった。前者の評価の低い理由は小さい呼気圧でもピッチ周波数が過大に変化してしまうためである。図 5 に示したように、関数の種類と平均ピッチ周波数の関係を見ると、平均ピッチも 200Hz 以上と高くなっている。また、抵抗大のときも同じ理由に



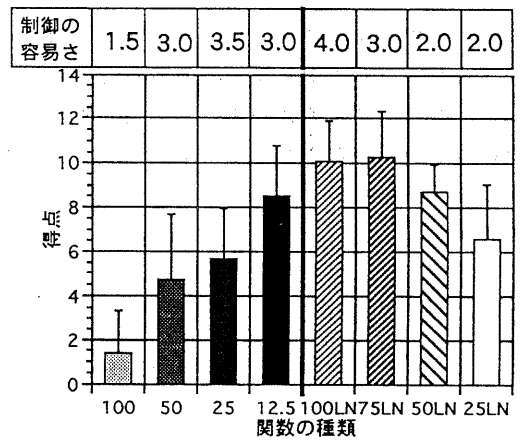
(A) 抵抗小



(A) 抵抗小



(B) 抵抗大



(B) 抵抗大

図 6 制御の容易さと声の自然さ (被験者 A)

$$F(\text{Hz})=A*(X(\text{cmHzO})-1)+60 \quad F(\text{Hz})=B*(\log_e(X(\text{cmHzO}))+60$$

A:100,50,25,12.5      B:100,75,50,25

図 7 制御の容易さと声の自然さ (被験者 B)

$$F(\text{Hz})=A*(X(\text{cmHzO})-1)+60 \quad F(\text{Hz})=B*\log_e(X(\text{cmHzO}))+60$$

A:100,50,25,12.5      B:100,75,50,25

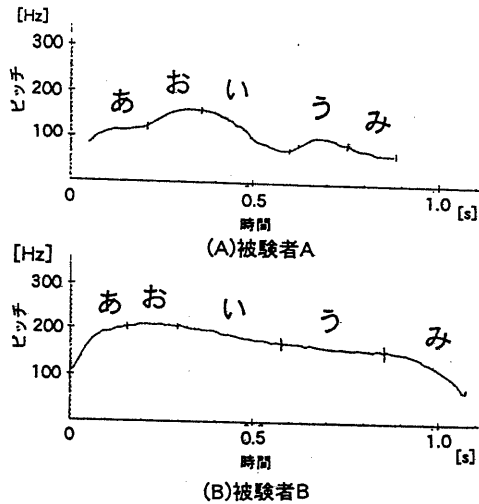


図8人工喉頭音声「あおいうみ」のピッチパターン  
(抵抗小、 $F(\text{Hz})=75(\log_e(X(\text{cmH}_2\text{O}))+60)$ )

より、関数は  $F=100(X-1)+60$  の時の評価が低くなっている。制御の容易さと音声の自然性の対応に関しては、それほど明確な関係は得られなかった。抵抗値の違いにより、音声の自然性の関数に対する分布が違っている。線形関数と対数関数との違いによる差については、抵抗大のときに現れ、対数関数の方がよい評価を得ていた。

#### C：抵抗値と被験者の影響

図9は、被験者Aの抵抗値小で一番評価の高かった音声（A-抵抗小）、抵抗値大の場合の音声（A-抵抗大）および被験者Bにおいて同様に評価の高かった音声（B-抵抗小、B-抵抗大）の4つを用い、それらの間で一対比較を行って自然性を評価した結果である。その結果、被験者Aの音声は明らかに被験者Bより自然性が高いことが分かる。また、今回の設定した抵抗値の間では声の自然さに大きな差は現れなかった。

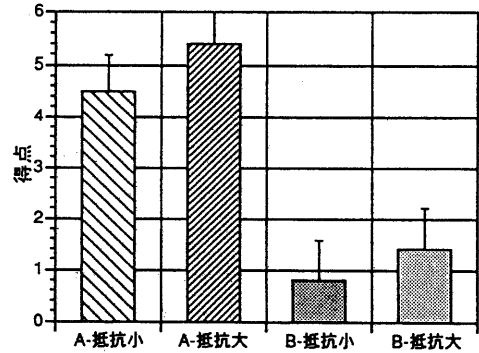


図6、図7のグラフの最良評価値

図9 被験者一抵抗最良評価点で一対比較

#### 5. 考察

最初に抵抗値の自然性に及ぼす影響について述べる。まず、図5をみると、被験者Bの線形関数の場合を除き、抵抗が大きい方が平均ピッチが高くなっている。しかし、先ほどの図9の例のような抵抗値の違いは声の自然さには差ほど影響を与えなかった。このことから抵抗値はどちらの設定値でもよいことになる。しかし、実際の会話のように長いあいだ続けて話をするときには使い勝手に差がでる可能性もある。

次に、被験者の差異による自然性の違いについて述べる。図6、7に示したように、2名の被験者の自然性に関する実験結果を比較すると、被験者間で傾向に差が現れた。その理由としては、被験者Aはこの実験の8カ月ほど前にこのような呼吸制御型人工喉頭の訓練を受けたことが考えられる。

それに対して、被験者Bは測定前15分間程度自由に練習しただけで特に訓練を行っていないかった。そのためにイントネーションをつけるための制御がうまくできていなかった可能性がある。

また、この被験者Bは人工喉頭の熟練者で、人工喉頭発声と同時に腹式呼吸で呼気を吐き出す人工喉頭用の呼吸法を行っていたことも影響しているであろう。さらに、抵抗大の時

の対数変化での音声の評価が高いが、実験の最後の方でこのパラメータを扱ったので訓練の効果が入った可能性がある。この可能性は実験の最初の方で行った線形の抵抗値小の所で抵抗値大より平均ピッチが高くなりがちになった理由とも考えられる。

以上のことから考え、呼気圧から周波数への変換関数に関しては、少なくとも線形なものでは傾きが12.5-50、対数関数を用いた場合には係数が50-70程度であればよいであろう。

## 6. まとめ

本報告では、我々が開発した呼気制御型人工喉頭を評価するために、呼気圧を検出するために用いる気流抵抗の値と、呼気圧から周波数への変換の関数を色々変えて、音声の自然性や制御の容易さを調べた。被験者としては過去に訓練を行った者と、ほとんど訓練を行わなかった喉頭摘出者の2名で行った。

訓練を受けた被験者の場合には、制御の容易さ・音声の自然さの関数の違いによる分布は今回設定した2種の抵抗の影響を受けなかった。関数の設定としては、 $F = A(X-1) + 60$ のAの値が12.5から50(Hz/cmH<sub>2</sub>O)または $F = B \log_e X + 60$ のBの値が50-75の間が妥当であろう。一方、訓練を受けていなかった被験者の場合には、抵抗値の値で自然に聞こえる関数の分布が変化した。この分布の違いが訓練後にどの様に変化するかを今後検討する必要がある。

今後、本方式を喉頭摘出後どの位の訓練期間で利用できるかどうかを調べるために、摘出直後の被験者で呼気制御を行うとともに、また、既に獲得している呼気制御能力がそのまま自然なイントネーションを表出させる要因になるのかどうかを探っていく。

謝辞

本報告において多大なる時間をいただき、実験に協力して下さいました北鈴会および喉頭摘出者福祉団体立声会のみなさまに深く感謝申し上げます。

## 【参考文献】

- 1)大森他”振動部からみた喉頭摘出手術後の代用音声-文献的考察-”、耳鼻咽喉科臨床、83,6, pp.945-952(1990)
- 2)八幡他”音声のピッチパターンを考慮した電気人工喉頭”、音声言語医学、vol.30, pp.309-315(1989)
- 3)上見他”ピッチ制御機能を備えた人工喉頭の試作とその評価”、日本音響学会平成4年度秋季研究発表会予稿集、pp.328-327(1992)
- 4)日本音声言語医学会編：声の検査法、医歯薬出版株式会社(1982)
- 5)垣田、平間”電子式人工喉頭における韻律情報と無声子音の調節”、信学技法、SP88-148:25-30(1989)