

音声の自然性を備えた電気人工喉頭の開発研究（第2報）

橋場 参生 ， 山本 寧
山口 悦範* ， 須貝 保徳*
上見 憲弘**， 伊福部 達**

Development of An Electro — larynx with Naturality of Voice (Part II)

Mitsuo HASHIBA, Yasushi YAMAMOTO ,
Yoshinori YAMAGUCHI*, Yasunori SUGAI*
Norihiko UEMI**, Tohru IFUKUBE**

抄 録

喉頭摘出者の発声補助機器である電気人工喉頭は、発声した音声は極めて不自然になるという深刻な問題を抱えており、その改善が望まれている。北海道大学電子科学研究所では、この問題を解決するために、電気人工喉頭音声の改善に関する基礎研究に取り組み、自然性の向上に有効となる知見を明らかにしてきた。

本研究では、この基礎研究の成果に基づいた電気人工喉頭の製品化を実現するため、2種類の電気人工喉頭の機能的試作を行い、さらに、呼気圧制御型押しあて式電気人工喉頭の実用化試作を行った。試作した電気人工喉頭は、呼気圧によるピッチ周波数制御機能を備えており、イントネーションのついた自然な音声を生成することが可能になっている。このような機能を有する電気人工喉頭の開発は過去に例がない。

1. はじめに

我々の音声の多くは、喉頭にある声帯が振動することによって作り出されている。この喉頭を、喉頭癌などの理由によって摘出した人々は、同時に声帯も失うため、音声の喪失という重大な障害を負って生きることになる。このような喉頭摘出者は、国内で約3万人、全世界では約70万人に達するといわれている。

手術後の喉頭摘出者は、食道発声法という特殊な方法を訓練したり、笛式人工喉頭や電気人工喉頭などの発声補助機器を使用して音声の再獲得を図っている¹⁾。このうち、電気人工喉頭による方法は、何よりも修得・操作が容易であることから、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。しかし、現在の電気人工喉頭には、発声した音声は極めて不自然になる等の深刻な問題が多く、その改善が切望され続けている。

北海道大学電子科学研究所感覚情報研究分野では、この電

気人工喉頭の問題に早くから取り組み、自然性の向上に有効となる様々な知見を明らかにしてきた。本研究は、この基礎研究の成果を基にして進められており、自然な音声の生成機能を備えた電気人工喉頭の製品化を最終的な目標としている。本報では、第1報で得られた音声波形のゆらぎに関する知見^{2,3)}、及び、北海道大学で進められている呼気圧によるピッチ制御に関する知見^{4,5)}を基に、民間企業と共同で行った、電気人工喉頭の開発に関して報告する。

2. 喉頭摘出者及び電気人工喉頭の現状

2.1 喉頭摘出者の現状

喉頭は、気管と咽頭の境界に位置しており、その内面に左右一対の粘膜のひだ、即ち声帯がある。健常者が発声を行う場合には、肺からの呼気でこの声帯が振動し、音声のもとになる声帯音源が生成される。声帯音源は、口腔などの声道を通り、舌や唇などの調音器官によって変化を加えられ、音声を作り出される⁶⁾。

これに対して、喉頭摘出者の場合には、喉頭と共に声帯も失っているため、声帯音源の生成が不可能になる。このため、

* (株)電制 ** 北海道大学電子科学研究所

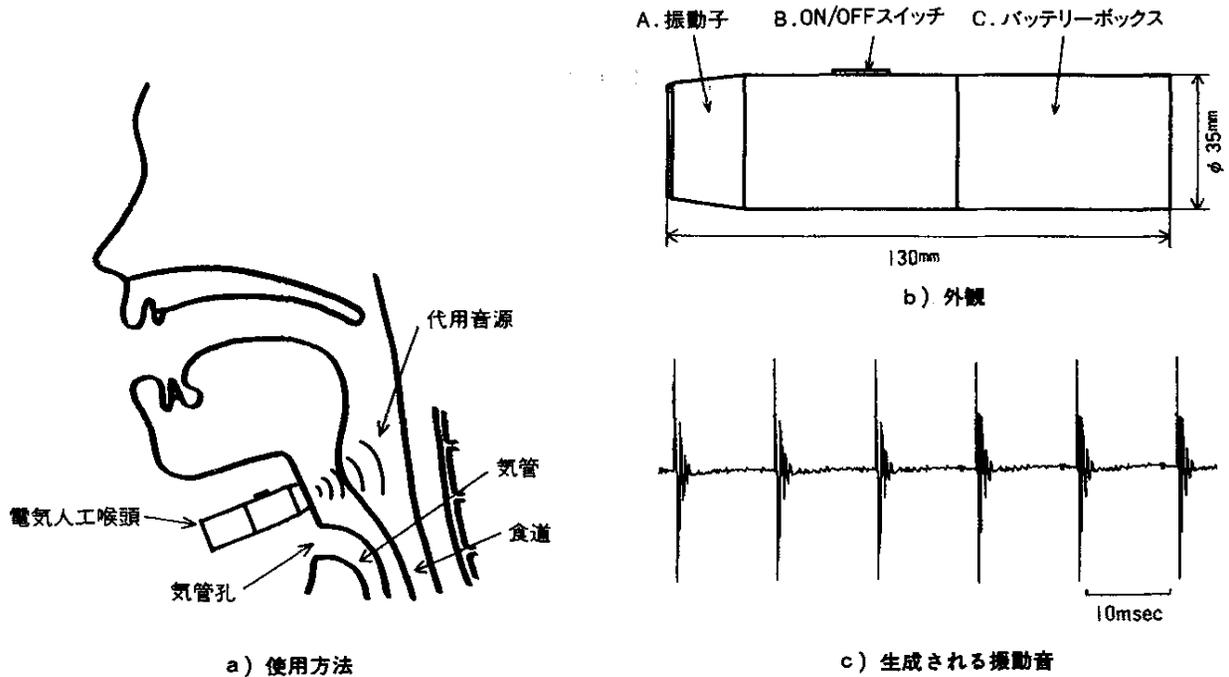


図1 現在使用されている電気人工喉頭

声道や調音器官は無事であっても、音声を作り出すことはできなくなる。また、気管は喉に開けられた気管孔と呼ばれる呼吸用の孔に導かれ、気管から咽頭への通路は閉鎖されてしまうため(図1a)、声道や調音器官に呼気を送り込むこともできなくなる¹⁾。

2.2 電気人工喉頭の現状

電気人工喉頭は、喉頭摘出者にとって欠かせない発声補助機器であるにも関わらず、国産の製品は1例もなく、アメリカ、ドイツ、イタリアなどから輸入された製品が8~14万円程度の価格で販売され、使用されている。

そのほとんどは、押しあて式と呼ばれる方式のものであり、外形は図1bにあるような円筒形で、直径は約35mm、長さは約130mm、重量は約150~300gである。同図において、Aが代用音源を発生する振動子、Bが操作のための押しボタン式ON/OFFスイッチ、Cがバッテリーボックスである。

使用方法は簡単で、まず、ON/OFFスイッチを押して振動子を振動させ、図1cにあるような振動音を発生させる。

そして、図1aのように振動子を喉に押しあて、皮膚を通して振動音を声道内に送り込む。あとは、通常の発声を行うように、口や舌を動かし、声道の形状を変化させるだけで良い。即ち、声帯音源の代わりに振動音を利用し、これを代用音源として発声を行うわけである。

このように、電気人工喉頭は、修得や操作が容易であるという特長を持っているが、一方で、発声した音声極めて不自然になる、男女の区別や個人差を表現できない、ささやき

声や大声が出せないなど、様々な問題を抱えている。特に、音声の不自然になるという問題は最も深刻であり、会話に支障をきたすばかりでなく、意志や感情の伝達にも影響を及ぼすことから、喉頭摘出者の大きな精神的負担となっている。

3. 電気人工喉頭音声の自然性の向上に関する基礎研究

以上述べたように、現在の電気人工喉頭の最大の問題点は、発声した音声極めて不自然になるという点にある。従って、電気人工喉頭の製品化を進めるにあたっては、この自然性の改善が重要な技術的課題となる。ここでは、本開発の基礎となる、電気人工喉頭音声の自然性を向上させるための2つの研究について述べる。

3.1 波形ゆらぎの付加に関する基礎研究 2.3)

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、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、このゆらぎが音声の自然性に重要であることが知られている。しかし、電気人工喉頭が生成する代用音源には、このようなゆらぎが含まれていないため、発声した音声はブザー音的な印象の強い不自然なものになっている。

第1報では、電気人工喉頭音声の自然性を向上させるためには、電気人工喉頭が生成する代用音源に波形ゆらぎを付加することが効果的であると考え、母音に含まれる波形ゆらぎと自然性の関係を調べる実験を行った。その結果、母音の自然性には波形ゆらぎの程度や時間的推移が極めて重要であ

り、32 ピッチ程度の長さの波形中に含まれる波形ゆらぎが高い自然性を得る上で重要であること、さらに、高調波成分の周りの±18Hz 程度の側波が特に重要であることがわかった。

3.2 呼気圧によるピッチ制御に関する基礎研究^{4,5)}

健常者は、肺からの呼気によって、声帯音源のピッチ周波数を変化させ、これによって、イントネーションを表出している。しかし、現在の電気人工喉頭は、ピッチ周波数が一定の代用音源しか生成できないため、発声した音声はイントネーションの欠如した不自然なものになっている。

この問題に対して上見らは、もともと発声に用いられている呼気を用いて電気人工喉頭音声にイントネーションを付加することが重要であると考え、気管孔からの呼気を利用して代用音源のピッチ周波数を制御する実験を行った。実験の結果、気管孔からの呼気に気流抵抗を与えて呼気圧を生じさせ、この呼気圧を用いて代用音源のピッチ周波数を制御する手法が有効であり、全く経験のない喉頭摘出者であっても短期間の訓練で自然なイントネーションを表出できることや、25Hz/cmH₂O 程度の傾きを持つ呼気圧-ピッチ周波数変換関数が制御に妥当であるなどの結果を得た。

4. 電気人工喉頭の機能的試作

以上の基礎研究は現在も継続中であるが、既に電気人工喉頭の改善に十分有効な知見が得られている。そこで我々は、これらの基礎研究を基にして、実用化に向けた2種類の電気人工喉頭の機能的試作を行った。試作を行ったのは、波形ゆらぎの知見を取り入れたパイプ挿入式電気人工喉頭と、呼気圧制御の知見を取り入れた押しあて式電気人工喉頭である。

4.1 波形ゆらぎの知見に基づいた電気人工喉頭

3.1 で述べた波形ゆらぎの知見を基にして、図 2a に示すパイプ挿入式電気人工喉頭の機能的試作を行った。本器は、代用音源を発生する音源発生部と、波形ゆらぎを備えた代用音源の生成などを行う音源制御部から構成されている。

本器は、微妙な波形ゆらぎを備えた代用音源が効率良く口腔内に送り込まれるように、パイプによって音源を導くパイプ挿入式とした。音源発生部は、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。筒の直径は 60mm、長さは 100mm である。音源制御部は、ROM、RAM、A/D 変換器、D/A 変換器などが一体となったワンチップマイコンや、音源発生部の駆動回路、音量制御回路などを内蔵しており、ROM に格納された波形ゆらぎのデータを読み出すことによって、波形ゆらぎを備えた代用音源の生成が可能になっている。現在音源制御部は、電源回路も含めると 100 (W) × 30 (H) × 60 (D) mm 程度の大きさになるが、専用 IC の開発によってさらに小型化を図ることが可能である。

本器の使用方法を図 2b に示す。本器は、音源発生部で発生した代用音源をパイプによって口腔内に導くようにして使用する。代用音源には、自然性に重要な波形ゆらぎが含まれているため、電気人工喉頭で発声した音声も波形ゆらぎを備えたものになる。喉頭摘出者の協力を得て、本器による発声試験を行ったところ、波形ゆらぎの効果によって自然性が向上することが確認された。

4.2 呼気圧制御の知見に基づいた電気人工喉頭

3.2 で述べた呼気圧制御の知見を基にして、図 3a に示す押しあて式電気人工喉頭の機能的試作を行った。本器は、代用音源を生成する音源発生部、気管孔からの呼気圧を検出する呼気圧検出部、呼気圧-ピッチ周波数変換などを行う音



a) 外観



b) 使用方法

図2 パイプ挿入式電気人工喉頭 (機能的試作)

源制御部から構成されている。

本器は、従来の電気人工喉頭と同様に、喉に押しあてた振動子によって音源を送り込む押しあて式とした。音源発生部は、直径 33mm の円板を振動させることによって代用音源を発生する振動子であり、既存の電気人工喉頭とほぼ同等の音量を実現している。呼気圧検出部は、直径 40mm の円錐状の形状をしており、呼気圧の計測を行うための圧力センサを内蔵している。音源制御部は、80 (W) × 30 (H) × 60 (D) mm の大きさで、呼気圧-ピッチ周波数変換回路、音源発生部の駆動回路、音量制御回路、電源回路などを内蔵している。

本器の使用方法を図 3b に示す。本器は、音源発生部を喉に、呼気圧検出部を気管孔に押しあてて使用し、この状態で自然な呼吸を行うと音源発生部から代用音源が発生する仕組みになっている。代用音源のピッチ周波数は、呼気圧検出部で計測される呼気圧の値に応じて変化するため、特殊な操作を必要とせずにイントネーションの表出が可能になる。喉頭摘出者の協力を得て、本器による発声試験を行ったところ、

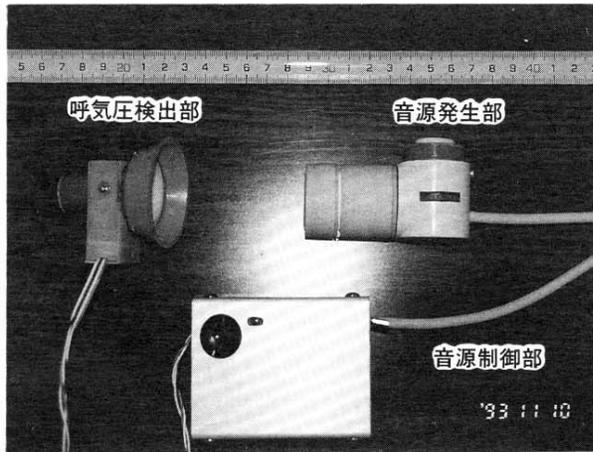
イントネーションの効果によって自然性が著しく向上することが確認された。

5. 呼気圧制御型押しあて式電気人工喉頭の実用化試作

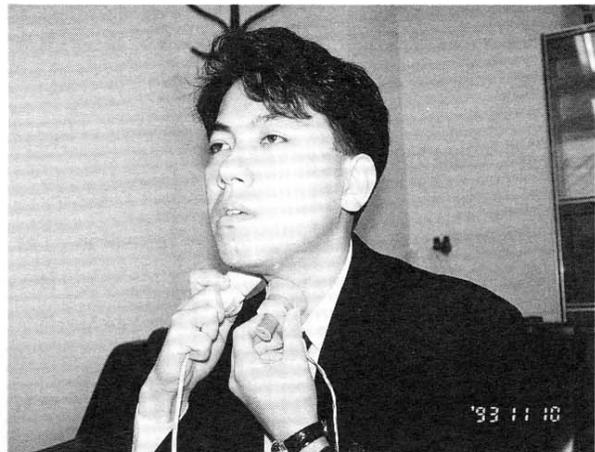
機能的試作を行った2種類の電気人工喉頭を比較検討した結果、イントネーションの効果による自然性の向上の方が、波形ゆらぎの効果による自然性の向上よりも顕著であることがわかった。そこで本研究では、まず呼気圧制御の知見に基づいた電気人工喉頭の実用化から取り組んで行くことが重要であると考え、4.2の結果を基にして呼気圧制御型押しあて式電気人工喉頭の実用化試作を行った。

5.1 目標仕様

実用化試作においては、呼気圧によるピッチ周波数制御機能の実現に加え、以下の仕様も目標として開発を行った。



a) 外観



b) 使用方法

図3 押しあて式電気人工喉頭（機能的試作）

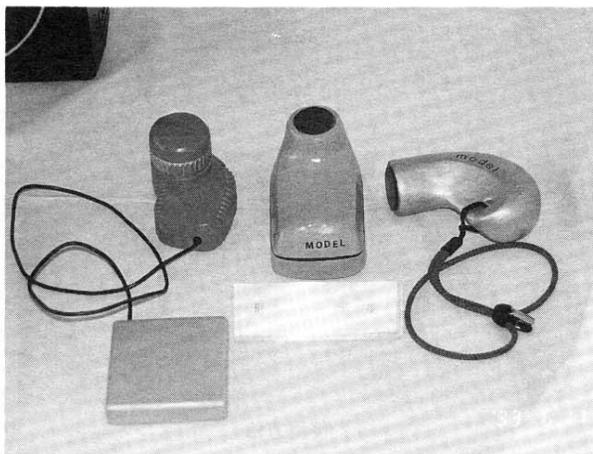


図4 クレイモデルによる検討例

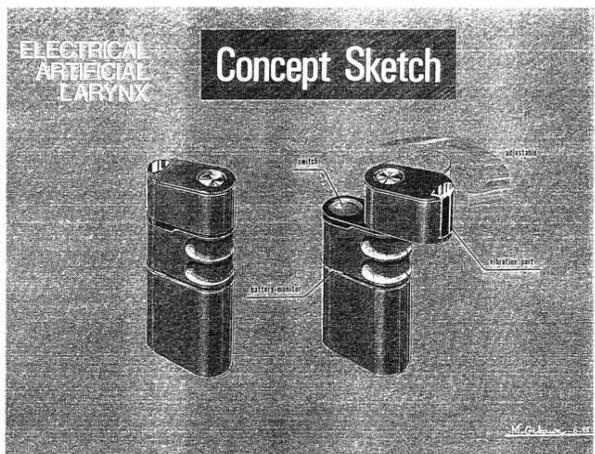


図5 コンセプトスケッチによる検討例

- ・日常生活での携帯を可能にする。
- ・片手で全ての操作を可能にする。
- ・バッテリー駆動とし、1回の電池交換で2時間程度の連続使用を可能にする。
- ・呼気圧だけでなく、指圧によるピッチ周波数の制御も可能にする。
- ・代用音源の音量、呼気圧を感知するセンサの閾値、呼気圧-ピッチ周波数変換関数の傾き等のパラメータを調節可能にする。

5.2 試作器の開発

5.1の目標に従い、音源発声部、呼気圧検出部、音源制御部の開発を進め、併せて、クレイモデルやコンセプトスケッチによる形状、デザインの検討を行った(図4, 5)。最終的に開発した試作器の形状を図6に、外観や使用方法を図7に示す。

図6において、Aが音源発生部(振動子)、Bが呼気圧検出

部、Cが音源制御部及びバッテリーボックスからなる本体、Dが押しボタン式スイッチ、Eが音量調節ダイヤル、Fが呼気圧制御/指圧制御の切り換えスイッチ、Gが電源スイッチである。他に、呼気圧を感知する閾値を調節するためのポリウムが呼気圧検出部に、呼気圧-ピッチ周波数変換関数の傾きを調節するためのポリウムが音源制御部に備わっている。各部の寸法は、図6に示すとおりであり、重量は250gである。

音源発生部は、4.2での機能的試作と同一の形状であるが、内部回路の改良によって、従来の電気人工喉頭と同等以上の音量を実現している。また、従来の電気人工喉頭が、単純な円筒型であったのに対し、本器では、喉への押しあて易さを考慮して、音源発生部と本体の間に角度を設けている。

呼気圧検出部は、フレキシブルパイプを用いて本体と接続し、一体化を図っている。フレキシブルパイプは、使いやすいパイプの形状を保持することができるため、図7dのように、音源発生部の喉への押しあてと、呼気圧検出部の気管孔

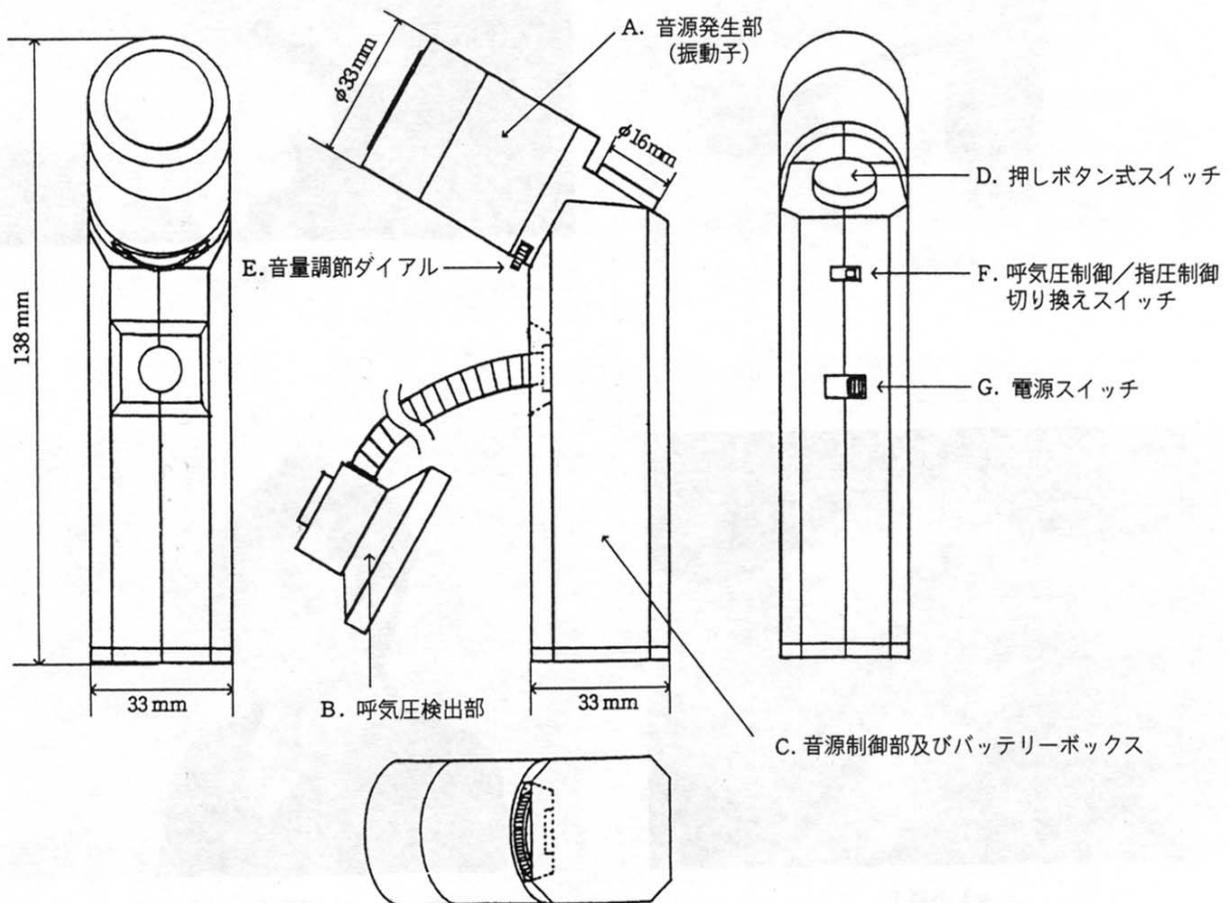


図6 実用化試作を行った電気人工喉頭

への押しあてを片手だけで行うことができる。

バッテリーボックスには、単3形電池4本が格納される。音源発生部の連続動作時間は、ニッカド電池を使用した場合で約2時間である。

次に、本器の動作に関して説明を行う。図7dのように呼気圧検出部を気管孔にあてた状態で、呼気圧が閾値を越えると、音源発生部の振動子が振動し、代用音源が生成される。代用音源のピッチ周波数は、呼気圧の値に応じて60Hz～180Hz程度の幅で変化するため、これによってイントネーションの表出が可能になる。また、本器では、指でON/OFFを制御するための押しボタン式スイッチにも圧力センサが組み込まれているため、この押しボタン式スイッチへの加圧によってもピッチ周波数の制御が可能になっている。従って、呼気圧による制御が困難な場合でも、指圧によってイントネ

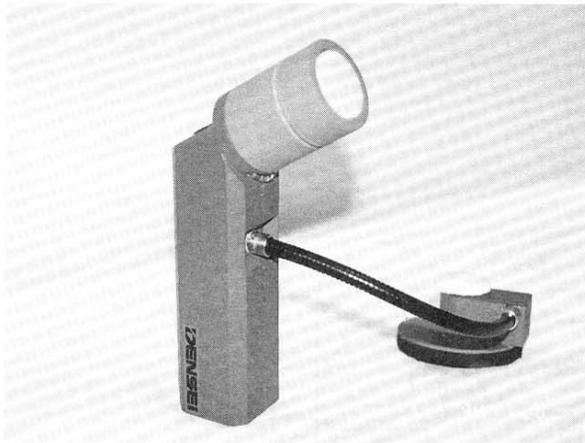
ーションを表出することができるようになっている。

5.3 今後の課題

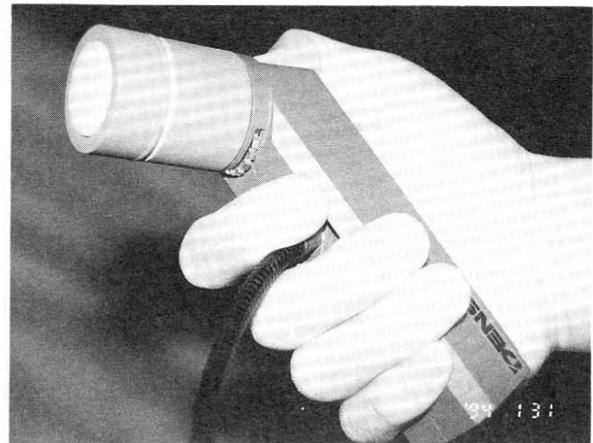
本開発により、音源発生部、呼気圧検出部、音源制御部が一体となった呼気圧制御型押しあて式電気人工喉頭が試作され、呼気圧によるピッチ制御に関する知見を取り入れた電気人工喉頭の実用化が可能であることが示された。

現在、本試作器を基にして、製品化を想定した性能評価と改良点の検討が進められているが、製品化の実現に必要なとされる技術的課題は多く、引き続き次のような研究開発を進めて行かなければならない。

- ・音源発生部の改良
(小型化, 軽量化, 大音量化, 省電力化など)



a) 外観①



b) 外観②



c) 外観③



d) 使用方法

図7 実用化試作の結果

- ・ 呼気圧検出部の改良
(高感度センサの開発, 本体との着脱機能の実現など)
- ・ 音源制御部の高機能化
(呼気圧-ピッチ周波数変換関数の任意設定機能など)
- ・ 電源部の改良
(大容量化, 軽量化, 充電機能の実現など)
- ・ 操作性, 耐久性などを考慮した設計, デザイン

また, イントネーションの付加によって自然性の向上は得られていても, 音声がブザー音的な印象を与えるという問題は依然として残されている。従って, 4.1のパイプ挿入式電気人工喉頭についても実用化試作に取り組む一方で, 波形ゆらぎに関する知見を本試作器に取り入れて行くことも重要な課題と考えられる。

6. まとめ

本研究では, 自然な音声を生成できる電気人工喉頭の製品化を目的に, 波形ゆらぎの知見に基づいたパイプ挿入式電気人工喉頭の機能的試作と, 呼気圧によるピッチ周波数制御の知見に基づいた押しあて式電気人工喉頭の機能的試作を行った。さらに, 機能的試作の結果を基にして, 呼気圧制御型押しあて式電気人工喉頭の実用化試作を行った。その結果, 片手による把持・操作で, イントネーションのついた自然な音声を生成できる, 全く新しい電気人工喉頭の実用化が可能であることが示された。このような機能を備えた電気人工喉頭は, 国内外に例がなかったものである。

本試作器は, '94北海道ビジネス交流会において, 参考出品の形で発表され(図8), 製品化の時期などに関して多くの問い合わせを受けている。しかし, 今回の試作によって明らか

になった技術的課題は多く, 1つ1つの問題の解決に向けて, 開発を継続して行かなければならない。

また, 5.3に記した技術的課題の他にも, 製品カバーを製作するための型コストの問題や, 本器を量産するための機器設備の問題など, 中小企業にとっての難題も多く, これらについても解決の道を探って行かなければならない。

謝 辞

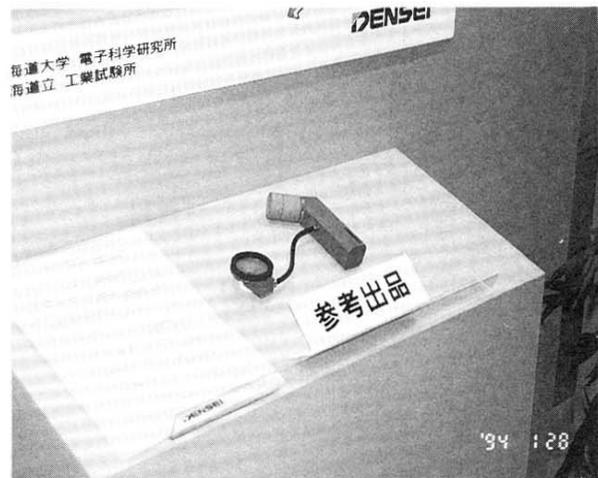
本研究を進めるに当たり, 試作器の樹脂成型等に関して御協力をいただいた, 産業デザイン部 岩越睦郎研究員, クレイモデル・コンセプトスケッチの制作等に関して御協力をいただいた, 同部 安河内義明科長, ならびに, 及川雅稔研究員, そして, パイプ挿入式電気人工喉頭の音源発生部の製作に関して御協力をいただいた, 同部 中村勝男研究員に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤武雄:「喉頭癌—その基礎と臨床—」, 金原出版株式会社, 1986.
- 2) 橋場参生, 山本寧, 上見憲弘, 伊福部達:「音声の自然性を備えた電気人工喉頭の開発研究(第1報)」, 北海道立工業試験場報告, No.291, pp. 95 - 106, 1992.
- 3) 伊福部達, 橋場参生, 松島純一:「母音の自然性における波形ゆらぎの役割」, 日本音響学会誌, 第47巻第12号, pp. 903 - 910, 1991.
- 4) 上見憲弘, 伊福部達, 泉隆, 松島純一:「ピッチ周波数制御型人工喉頭の提案とその評価」, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J78-D-II, pp.571-578, 1995.



a) 展示風景①



b) 展示風景②

図8 '94北海道ビジネス交流会にて

- 5) 上見憲弘, 伊福部達, 泉隆, 松島純一:「呼気圧によるピッチ制御機能のついた人工喉頭の開発」, 医用電子と生体工学, 第 33 巻第 1 号, pp.7-14, 1995.
- 6) 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.