特集

代用発声法とその声質

今 泉 敏

要 約 : 代用発声法とその声質について調べた。まず、16名の無喉頭者と4名の正常者から録音した単母音 /e/ の声質を、非計量的多次元尺度構成法 SMACOF を使って解析した。つぎに5種の音響的パラメータと21種の聴覚心理的評価尺度を用いて、SMACOF 解を解釈した。その結果、代用音声の声質を記述するためには、少なくとも2種類の次元を要することが示された。ひとつは音声に対する聴取者の嗜好度に関連し、正常音声から代用音声を区別する。この次元上で食道音声は発声者に応じて幅広く評価される。もう一方の次元は、人工喉頭の音声に固有な非正常性を示し、それらを正常音声と食道音声から分離する。これらの次元は音響的にもよく説明でき、各代用発声法に固かな声質をよく表現する。

索引用語 : 代用発声法, 声質, 多次元尺度構成法

Alaryngeal Voicing Methods and Their Inherent Voice Quality

Satoshi Imaizumi

Abstract : This study investigates the alaryngeal voicing methods and their inherent voice quality. The voice quality of vowel /e/, recorded from sixteen alaryngeal speakers and four normal ones, was analyzed using a nonmetric multidimensional scaling method called SMACOF. A SMACOF solution was interpreted by using five acoustical measures and twenty one psychoacoustical ratings. The results indicated that at least two dimensions are necessary to describe the alaryngeal voice quality. One is connected with the listeners' preferences for the voices and differentiates the alaryngeal voices from the normal ones. The esophageal voices have a wide spread on this dimension. Another dimension indicates the abnormality peculiar to the voices produced with the artificial larynges and differentiates them from the normal voices and the esophageal ones. These dimensions could be acoustically well interpreted, and could describe the inherent voice quality for each voicing method.

Key words : alaryngeal voicing method, voice quality, multidimensional scaling

1. はじめに

理想的な代用発声法は、正常話者と同じ位の音圧や声

質、自然な抑揚、高い発語明瞭度などの音声学的要求と、発声の容易さや他の動作を妨げないとか、健康を害さないなどの喉摘者の日常生活や社会活動の面からくる

近畿大学医学部耳鼻咽喉科（主任：太田文彦教授）：〒589 大阪府南河内郡狭山町西山380

Kinki University School of Medicine Department of Otolaryngology : 380 Nishiyama, Sayama, Minami-Kawachi, Osaka 589, Japan

要求の双方を満たす発声法である。

これらのうち声質は、聴取者の主観的印象に依存する要因であり、定量的な評価が、必ずしも容易でない。本論文では、非計量的多次元尺度構成法の手法を用いて、種々の代用発声法の得失を、声質の面から実験的に考察した。

2. 対象とした代用発声法

本論文で声質解析の対象とした代用発声法は、食道発声、笛式人工喉頭1型(型の説明は後述する)による発声、電動式人工喉頭1型による発声である。これらは、現在日本で使用されている代表的な方法である。まず、これらの方法の特徴を、他の種々の方法との関連において考察してみる。

代用発声の方法には、発声に使用するエネルギーによって、空気力学的な発声法と、電動式の人工喉頭にわけることができる。前者はさらに肺からの呼気を利用する笛式人工喉頭や、声帯を代行する振動体を手術的に再建する方法、食道から吐き出す気流を利用する食道発声法にわけることができる。

これらのうち、食道発声は、器具を使用せず、他の動作を妨げることがないので、日常生活や社会活動の面で有利な点が多い。また後述のように、声質の面からも発声者によっては大きな可能性を持っている。現在、最も普及している方法である。今回の実験対象とした。

手術的喉頭再建法にも、器具を使用しない方法がある。肺機能を利用するため、食道発声より、韻律的情報の表現能力が高いと期待されている。しかし、現在のところ、必ずしも広く普及するには至っておらず、今回の実験対象には採用しなかった。

笛式人工喉頭と電動式人工喉頭にも、様々の型がある。音源の位置に応じて分類し、整理してみる。

図1は、笛式人工喉頭の発声方式を、概念的に示したものである。1型のものは、発声時に笛を内蔵したパイプを気管口につけ、肺からの呼気によって笛を鳴らし、その音を中咽頭部付近に導く方式である。今回の実験対象とした。この型のものは、抑揚が比較的豊かであり、操作が容易で、かつ安価である。しかし、パイプを口で保持するために構音運動が制約され、また発声のために手を使う必要があるので、活動性の面で不利な点が残る。

2型については少数の報告がある¹⁾。一般に普及しているとは必ずしもいえない。

3型の一種として、Panje の方式²⁾がある。これは気管と食道に手術的に通路を作り、気管から食道方向にしか空気のいかない特殊な笛を挿入する方法である。この

図1 各種の笛式人工喉頭

型では、音源が生得の喉頭の位置に近く、構音運動も妨げられない。しかし、誤嚥や笛からの感染などの問題点が残されている。なお、類似の方法として、笛ではなく、チューブを挿入して、食道入口部付近の粘膜を振動させる方法もある³⁾。

Dayal ら⁴⁾の人工喉頭も、発声方式からみれば、3型に分類できる。ただし、彼らの人工喉頭は、単に発声機能の代行を目的としたものではなく、呼吸機能や呼吸器系の防御機能まで代行しており、本来の意味での人工喉頭に一步近づいたものだ。彼らの人工喉頭は、まだ試験的段階で、広く普及するには至っていない。

つぎに電動式人工喉頭を図2のように分類し整理してみる。

この型の人工喉頭で、現在もっとも一般的なのは、顎下部または頸部前方に発振器を押しあてて発声する1型である。今回の実験対象とした。この方法は発声法の修得が容易であること、楽に発声できることなどの利点があるものの、発声のために片手を専有されるなどの欠点もある。この型のものには基本周波数や強さの制御が可能な型もある。

2型は、発振音をパイプで口腔内に導く方法で、図のように1型の電動式人工喉頭を流用する型や、発振器を小型にして眼鏡の枠に組み込む型のものがある。

3型は、発振器自体を、奥歯や人工口蓋、下咽頭部の

図2 各種の電動式人工喉頭

組織内部に植め込む方式であり、種々の方式が研究されている。この方法には電力供給や修理の方法、感染の危険性などの未解決な問題があり、普及するに至っている装置は少ない。

3. 解析の方法

対象とした音声は、食道発声者8名と笛式人工喉頭1型の使用者4名、電動式人工喉頭1型の使用者4名、および比較の対象として正常な声帯を持つ発声者4名の合計20名の発声した単母音 /e/ である。笛式人工喉頭は奥村の開発した大阪式のもの、電動式人工喉頭は AUREX の ELECTRO-LARYNX である。対象とした音声や録音方法は先の報告⁵⁾ と同一である。

まず、非計量的多次元尺度構成法で解析する非類似度を、以下の方法で測定した。

最初に、声質以外の要因が結果に影響するのを防ぐため、各音声波形の中央部0.5秒間を、コンピュータ PDP 11/40 を使って切り出した。つぎに、これらの音声波形の、自分自身との組み合わせを除く、すべての組み合わせを作成した。対内の間隔を0.5秒、対間の間隔を4秒とし、対内、対間とも順序を乱数化し、カセットテープに録音した。これをオーディオメータ (RION AA-34) を通し、50dB SL で20名の正常な聴力を持つ聴取者に提示した。

各聴取者は図3に示す尺度を使って、各対を構成する音声間の声質の非類似度を評定した。つまり声質が似ていると感じれば、その程度に合わせて尺度の下方に、逆の場合には上方に「一」印をつけた。下端から「一」印までの長さを測定し、非類似度とした。

以上の手順で、測定された各音声対の非類似度の聴取者に関する中央値を、非計量的多次元尺度構成法 SMA-COF⁶⁾ で解析し、声質の非類似性の判断にとって、重要な聴覚心理的要因を抽出した。

多次元尺度構成法では意味微分法と異なり、声質のど

図3 声質の非類似度の測定に用いた尺度

表1 系列範疇法による声質評定に用いた形容詞対

Rating scale	Adjectives (Japanese)	Translated adjectives (English)
A 1	Kirei -kitanai	Clean -dirty
A 2	Sunda -nigotta	Clear -dim
A 3	Kikiyasui -kikinikui	Pleasing -annoying
A 4	Karui -omoi	Light -heavy
A 5	Surudo -nibui	Sharp -dull
A 6	Hosoi -futoi	Thin -thick
A 7	Akarui -kurai	Bright -dark
A 8	Kawaita -shimetta	Dry -wet
A 9	Takai -hikui	High -low
A 10	Okii -chiisai	Large -small
A 11	Tsuyoi -yowai	Strong -weak
A 12	Yawarakai -katai	Soft -hard

表2 系列範疇法による声質評定に用いた用語

Ratingscale	Terminology
B 1	Grade of hoarseness
B 2	Rough
B 3	Asthenic
B 4	Breathy
B 5	Strained
B 6	Hypernasal
B 7	Denasal
B 8	Monotonous
B 9	Mechanical

のような側面について評価するかなにも指示しない。聴取者の自由な判断に任せられる。したがって、その解析結果を解釈するためには、別の基準、つまり外的基準がある。

そこで以下の聴覚心理的実験と音響分析を行った。

まず、上記の実験と同一の聴取者に対して、各音声を単独に10回くり返し提示し、表1に示す形容詞対に対する7段階評定を行った。各形容詞対に対する20名の聴取者の評定結果を系列範疇法⁷⁾で距離尺度上の尺度値に変換した。

さらに、表2に示す GRABS 尺度⁸⁾を含む9種の用語を用いて、同様の聴取実験を、声質評定に比較的熟練した5名の医師、言語治療士を対象に行った。実験は、各聴取者が1日に1回、4日間行い、各音声あたり、各項目について合計20の評定をし、系列範疇法で尺度値を決定した。

つぎに、5種の音響的パラメータを、線形予測法⁹⁾を用いて抽出した。

まず各音声波形を線形予測分析し、残差波形を求め、その自己相関関数の原点以外の最大値(MA)と、その位置から基本周波数(Fo)を求めた。つぎに、残差波形から基本周期系列と各基本周期系列内の最大振幅の系列を求め、小池の方法¹⁰⁾で基本周期変動率(PPQ)と振幅変動率(APQ)を求めた。

また、線形予測分析で得られたスペクトル包絡の2.5~5.0 kHzの平均値から0~2.5 kHzの平均値を引いて、高周波成分の相対スペクトルレベル(RSL)を求めた。

MAは声道の駆動信号の周期性を表し、調波成分に対して非調波成分が増大すると値が小さくなる。RSLは高周波成分の増大に伴って大きな値をとり、PPQとAPQは基本周期および振幅のゆらぎの増大とともに大きな値をとる。

以上の外的基準を用いて、重回帰分析の手法によって、非計量的多次元尺度構成法の解を解釈した。方法の詳細はすでに報告した¹¹⁾。

4. 結 果

図4はSMACOFの解の次元数とストレスの関係を示す。図5は二次元解を示す。多次元尺度構成法の解は、図5のように各音声間の非類似度を、平面上の距離によって表現する。つまり図5の二次元平面上で、声質の類似している音声は互いに近く、逆の場合は互いに遠く位置している。もちろん二次元平面上の距離によって表現される非類似度は、近似(この場合は最小自乗法による近似)であり誤差を含む。ストレスはこの誤差の大

図4 SMACOF 解の次元数とストレスの関係

図5 SMACOF の二次元解

○：正常音声，▲：食道音声，■：笛式人工喉頭による音声，●：電動式人工喉頭による音声

きさを、N次元解で表現された非類似度の自乗和に対する割合で表す。0.1ぐらいい「まあまあ適合(fair)」といわれている⁹⁾。図4では、ストレスが二次元解で約0.14となり、それ以上次元数を増加させてもあまり減少しない。

図5の二次元解で、次元 D_1 と D_2 は、声質の非類似度の判断において、主要であった聴覚心理的要因を示す。 D_1 、 D_2 の具体的内容は後で考察する。

図5で、 D_1 は主として正常音声と代用音声を、 D_2 は主として人工喉頭による音声と他とを対比させている。

また、各音声は発声方式毎に群を作っている。食道音声は比較的広い範囲に分布し、発声者によって、代用音声の中で最も正常音声に近いものから、もっとも遠いものまで存在する。これに対して、電動式人工喉頭による

音声は比較的にかたまって分布し、笛式人工喉頭による音声よりも正常音声から遠くに分布する。

図6は、表1の形容詞対による評価結果と図5に示した二次元解の関係を、重回帰分析によって調べた結果を示す。各形容詞対に対応するベクトル（複雑さを防ぐため先端部だけを単純化して表示してある）の方向は、その方向に進むほど、先端の形容詞が示す声質が強くなることを示す。つまり、その方向をもつ直線上での、各音声の座標が、該当する形容詞対を用いた評価結果と最大の相関を持つことを示す。また各ベクトルの原点から測った長さ（複雑になるのを防ぐため2倍して表示してある）は、最大の相関つまり重相関係数の大きさを示す。

いい換えれば、たとえば「湿った(wet)」のベクトル上で大きな座標を持つ音声、つまり食道音声の一部は、原点に対して反対側にある笛式人工喉頭による音声と比較して、「湿った」と評価される傾向があり、この傾向は非類似度の判断結果とも0.80(ベクトルの長さ)の重相関係数を持つのである。非類似度の判断に際して、「湿った」といった形容詞は使われなかったにもかかわらず、この形容詞で記述された声質の差異が、非類似度の判断結果にも現れることを示している。

図6は以下のことを示している。電動式人工喉頭による音声と食道音声の一部は、正常音声と比較して、「聞きにくい(annoying)」「暗い(dark)」「きたない(dirty)」「太い(thick)」「鈍い(dull)」「にぎった(dim)」「重い(heavy)」「低い(low)」「硬い(hard)」と評価される傾向がある。またこれらに対応するベクトルの方向は D_1 の正の方向にほぼ集中しており、これらの声質は主として D_1 に関連している。また一部の食道音声は笛式人工喉頭による音声と比較して「湿った(wet)」と評

図6 二次元解と形容詞対の関係

○：正常音声，▲：食道音声，■：笛式人工喉頭による音声，●：電動式人工喉頭による音声

図7 二次元解と9種の用語の関係

○：正常音声，▲：食道音声，■：笛式人工喉頭による音声，●：電動式人工喉頭による音声

価され、正常音声と食道音声の一部は、人工喉頭による音声より、「弱い(weak)」「小さい(small)」と評価されている。これらの声質は主として D_2 に関連している。

つぎに GRABS 尺度を含む9種の用語を用いた評価結果と、二次元解の関係を図7に示した。この図は以下のことを示す。

食道音声の一部と電動式人工喉頭による音声は、他より「粗糙性(rough)」と「嚙声度(grade of hoarseness)」が強いと評価される。また食道音声の一部は、他より「努力性(strained)」と「氣息性(breathy)」が強いと評価される。また、正常音声と食道音声の一部は、人工喉頭による音声より「無力性(asthenic)」が強いと聴取されている。これらの声質は程度の差はあるものの、 D_1 と D_2 の双方に関連している。

一方、人工喉頭による音声は他より「単調(monotonous)」で、「機械的(mechanical)」「閉鼻的(hyponasal)」でかつ「閉鼻的(denasal)」と評価される。これらの声質は D_2 と関連し、 D_1 にはほとんど無関係である。

図8は音響的パラメータと二次元解の関係を示す。同図からわかるように、代用音声は正常音声と比較して基本周波数(F_0)が低い。またほとんどの食道音声は基本周期と振幅の変動率(PPQ, APQ)が大きい。人工喉頭による音声では周期性が高く(MAが大きく)、非調波成分が少ない。また、代用音声の一部は、正常音声より高周波成分の相対スペクトルレベル(RSL)が高い傾向がある。

図6～8を比較すると、基本周期や振幅の変動率(PPQ, APQ)が大きく、自己相関関数の最大値(MA)の小さい音声は「氣息性」「努力性」が強い

図8 二次元解と音響的パラメータの関係

○：正常音声，▲：食道音声，■：笛式人工喉頭による音声，●：電動式人工喉頭による音声

いと聴取されている。高周波成分の相対スペクトルレベル (RSL) の大きな音声は「硬い」「聞きにくい」などや、「粗雑性」が強いと聴取される傾向がある。

電動式人工喉頭による音声のように、PPQ や APQ が小さく、MA の大きな音声でも「聞きにくい」とか、他より「硬い」「粗雑性」が強いと聴取される。

5. 考 察

図4に示すように、ストレスは二次元解で0.14程度であり、必ずしも小さくない。しかし、二次元目で一種の屈曲点がみられること、三次元以上次元数を増やしても急速にはストレスが減少しないことから、ここでは二次元解を考察した。このことは、代用音声の声質記述のためには大局的には、2種の聴覚心理的要因が主要ではあるが、しかし、微細な声質の記述には必ずしも十分ではないことを示す。

図6, 7からわかるように、次元 D_1 で正の大きな値をとる音声は、他より、「硬い」「太い」「重い」「にぎった」「聞きにくい」「鈍い」「暗い」「低い」「きたない」と評価される傾向があり、「粗雑性」が強く、「嗄声度」も比較的大きいとされる傾向を持つ。

D_1 上では、正常音声、笛式人工喉頭の音声、電動式人工喉頭の音声の順に配列される。また、食道音声は発声者によっては、正常音声に非常に近いと評価されるものから、代用音声の中で正常音声から最も遠いと評価されるものもある。つまり、食道音声の声質は発声者による個人差が大きい。このような結果は、形容詞対を使ってノンパラメトリックな手法で声質評価を行った結果⁵⁾とよく一致する。

D_1 は、聴取者が代用音声の声質の非類似性を判断す

るときに、まずよりどころとする要因であり、「聞きやすい」「聞きにくい」といった形容詞で表現される嗜好度、受容の容易度、あるいは不快さといった要因に強く関連していると考える。

図7からわかるように、 D_1 は必ずしも「嗄声度」とは一致しない。むしろ「粗雑性」の方が多少近い。 D_1 上で電動式人工喉頭の音声と一部の食道音声が大きく評価されており、これらの音声は「硬い」とか「聞きにくい」といった評価を受ける。図8からわかるように、電動式人工喉頭の音声は、基本周期や振幅の変動率も小さく、周期性が高く、したがって非調波成分も少ない。つまり、いままでに知られてきた嗄声の音響的性質とは、かなり異なるにもかかわらず、比較的「粗雑性」が強く、「にぎって」おり、「聞きにくい」。

このような現象は、「協和性」と「roughness」の関係から説明しようと考える。Helmholtz¹²⁾ や Plompr¹³⁾ の研究によって、複合音を構成する純音の周波数差が、聴覚の臨界帯域幅の約1/4に近づくとき、「協和度」が最低になり、「roughness」が増大し、にぎった、不快な音質になることが知られている。大串¹⁴⁾は、調波成分から成る複合音で、高調波成分が増大すると「ラフネス(濁り感)」が増大すると述べている。

D_1 上の座標の大きな音声は、基本周波数が50Hz程度と低く、高周波成分の相対スペクトルレベルが比較的高い傾向を持つ。したがって、約1.4kHz付近の周波数帯域で、各高調波成分の周波数差は臨界帯域幅の1/4程度となる。この周波数帯域の調波成分が、「粗雑性」を増し、「にぎった」「聞きにくい」声質を作り出していると考えられる。

一方、次元 D_2 上で大きな値をとる音声は、「機械的」「単調」「閉鼻性」でかつ「閉鼻性」が強く、「気息性」が弱く、かつ「大きく」「強い」傾向を多少持っている。この次元は、人工喉頭の音声に固有の声質を表し、それらを正常音声や食道音声の声質から分離している。この対比は音響的には、基本周期と振幅の変動率が大きく、周期性が低く、非調波成分の多い音声と、そうでない音声との対比となっている。人工喉頭の音声が「閉鼻性」と評価されるのは、音源が声道の途中にあることによって生ずる、周波数スペクトル上の零点の影響と考える。「閉鼻性」の音響的関連量や、「閉鼻性」でかつ「閉鼻性」と評価されることの意味については今後検討したい。

図7からわかるように、「嗄声度」や「粗雑性」「努力性」「気息性」など、嗄声の声質の記述のために導入された尺度は、食道音声の声質の記述に有効である。また、図6, 7から、「嗄声度」の大きな音声は、「聞きにくい」音声ではあるが、しかし、「単調」でも「機械

的」でもなく、いわば人間的な音声として聴取されていることがわかる。

次元 D_1 と D_2 を代用音声の声質の評定尺度として使う方法に対して、斜交することを許容すれば「嘎声度」と「単調性」といった、ラベルのより明確な尺度を用いることも可能である。これを図5に D_1' , D_2' として示した。これらの評定尺度を用いると、食道音声は主に「嘎声度」の面で、人工喉頭による音声は「単調性」や「開鼻性」といった尺度で、正常音声から遠いと評価される。このような評価は、代用音声の声質の大局的な側面をよく表しており、ここで用いた声質の評価方法が、われわれの日常的な、主観的な声質評価を、うまく定量化しているといえる。

6. 結 論

3種類の代用発声法による音声と、正常発声者の音声の声質を、非計量的多次元尺度構成法に基づいて解析した。その結果、代用音声の声質は大局的には2種類の尺度によって記述されることが示された。ひとつは、聴取者の嗜好度や不快さに関連する尺度であり、正常音声、笛式人工喉頭の音声、電動式人工喉頭の音声の順に配列する。この尺度上で、食道音声は発声者による個人差が大きく、代用音声の中で最も正常音声から遠いものから、非常に近いものまで、幅広く評定される。もう一方は、「単調性」や「開鼻性」など人工喉頭による音声に固有の声質を記述する尺度である。これらの尺度が記述する声質は、音響的性質からも説明しうる。また、これらの尺度上で、各代用音声は発声方式毎に群を作って分布し、発声方式に固有な声質の差異が明瞭であることも示された。つまり、食道音声は主に「嘎声度」の面で、人工喉頭による音声は「単調性」といった面で、正常音声から遠いと評定される傾向が示された。

最後に、本研究に協力して下さった銀鈴会、阪喉会、近声会に感謝する。本研究の一部は、文部省科学研究費(5689009)の補助による。

文 献

- 1) Weinberg, B., Shedd, D.P., and Horii, Y.: Reed-fistula speech following pharyngolaryngectomy. *J. Speech Hearing Dis.*, XLIII: 401~413, 1978.

- 2) Panje, W. R.: Prosthetic vocal rehabilitation following laryngectomy, the voice button. *Ann. Otol.*, 90: 116~120, 1981.
- 3) Singer, M.I. and Blom, E.D.: An Endoscopic technique for restoration of voice after laryngectomy. *Annual Meeting of the American Laryngologic Assoc.*, Palm Beach, Fl., 1980.
- 4) Dayal, V.S. Joy, M.L.G., Moon, R.E., Lo A., and Jares, A.: Endotracheal artificial larynx. *Ann. Otol.*, 91, Suppl. 95: 1~32, 1982.
- 5) 朴 茂男, 今泉 敏, 太田文彦, 小池靖夫: 代用音声の音質を規定する要因. *音声言語医学*, 24: 1~8, 1983.
- 6) 高根芳雄: 多次元尺度構成法. 東京大学出版会, 1980.
- 7) 日本音響学会編: 聴覚と音響心理. コロナ社, 1978.
- 8) 音声言語医学会編: 声の検査法, 医歯薬出版, 1979.
- 9) Davis, S.: Computer evaluation of laryngeal pathology based on inverse filtering of speech. *SCRL*, 1976.
- 10) Koike, Y.: Application of some acoustical measures for the evaluation of laryngeal dysfunction. *Studia Phonologica*, 7: 17~23, 1973.
- 11) Imaizumi, S., Boku, S., Koike, Y., and Ohta, F.: Multidimensional analysis of alaryngeal voice quality. *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, 4: 139~148, 1983.
- 12) von Helmholtz, V.: On the sensation of tone, Dover Pub., 1954.
- 13) Plomp, R. and Levelt, W.J.: Tonal consonance and critical bandwidth. *J. Acoust. Soc. Am.*, 38: 548, 1965.
- 14) 大串健吾: 複合音の音色の要素と不快さの相互関係. 昭和57年度秋季日本音響学会講演論文集, 213~214, 1982.

別刷請求先: 〒589 大阪府南河内郡狭山町西山380
近畿大学医学部耳鼻咽喉科
今泉 敏