

歌唱指導前後の声道立体形状と歌声の比較

Comparison of three-dimensional shape of vocal tract and singing voice before and after singing lesson

志々目 樹[†] 戸田 菜月[‡] 竹本 浩典[†] 高橋 純^{††}

Itsuki Shishime[†] Natsuki Toda[‡] Hironori Takemoto[†] and Jun Takahashi^{††}

[†] 千葉工業大学先進工学研究科 〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

[‡] 千葉工業大学工学研究科 〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

^{††} 大阪芸術大学短期大学部 〒546-8550 大阪府南河内郡河南町東山 469

[†] Advanced Engineering, Chiba Institute of Technology 2-17-1 Tsudanuma,
Narashino, Chiba 275-0016, Japan

[‡] Engineering, Chiba Institute of Technology 2-17-1 Tsudanuma
Narashino, Chiba 275-0016, Japan

^{††} Osaka University of Arts Junior College 469 Higashiyama,
Kanan-cho, Osaka 546-8550, Japan

E-mail: [†] hironori.takemoto@p.chibakoudai.jp, ^{††} jun_takahashi@osaka-geidai.ac.jp

あらまし 本研究では、声楽未経験の一般大学生 1 名にオペラの歌唱指導を 2 年間行い、その前後の声道立体形状と歌声の変化を検討した。声道立体形状は MRI で計測して声道伝達関数を求めた。また、歌唱中の音声を収録し、音声スペクトルを抽出した。その結果、歌唱指導後は口の開きが増大して口腔容積が増加し、喉頭が下降して喉頭腔上部が狭まるなど下咽頭腔の形状が変化した。これらの変化により、第 2 フォルマント周波数が下降し、第 3, 4 フォルマントがクラスター化して歌い手のフォルマントを形成した。また、梨状窩に由来する 4~5 kHz の帯域のディップが深くなり、高域のスペクトルのレベルが減少した。

キーワード 声道立体形状 歌唱指導 音響分析 調音運動 歌い手のフォルマント

1. はじめに

男性オペラ歌手の歌声のスペクトルには 2.8 kHz 付近に歌い手のフォルマント (Singer's Formant, 以下 SF) と呼ばれる非常に大きな高まりが見られる[1]。これは第 3~5 フォルマントがクラスター化し

たものであり、その生成には下咽頭腔、すなわち喉頭や梨状窩が関与することが知られている[2]。しかし、長期間にわたる歌唱指導において学習者の歌声や体内運動がどのように変化して SF を獲得していくか十分には検討されていない。

そこで本研究では、声楽未経験の男子大学生 1 名に対して 2 年間歌唱指導を行い、歌唱指導開始前、1 年後、2 年後に歌唱中の声道形状を MRI で撮像してその変化を計測した。また、計測した声道形状から伝達関数を計算して歌声のスペクトルと比較し、声道の音響特性がどのように変化したのか検討したので報告する。

2. 材料と方法

2.1. 声道モデル

実験参加者は声楽の経験がない一般大学生 1 名である。実験参加者は音楽大学で教鞭を執るプロの声楽家に隔週 1 回の歌唱指導を 2 年間受けた。指導前、指導開始 1 年後、2 年後に (株) ATR-Promotions に設置された MRI 装置 (Siemens 製 MAGNETOM Prisma fit 3T) で母音/a/を約 10 秒間歌唱中の頭頸部を撮像した。音高は実験参加者が発声しやすい A#3 (233 Hz) とした。なお、空間解像度は $1.0 \times 1.0 \times 2.5$ mm とし、歌唱中の音声は光マイクロホン (optimic1140) で収録し、撮像時の装置ノイズが含まれていない部分から音声スペクトルを抽出した。

MRI では歯列と口腔が同じ輝度値 (黒) となり、口腔形状を正確には計測できない。そこでまず、口を閉じて MRI で高い輝度値 (白) となる口唇、頬、舌を歯列に密着させて頭頸部を MRI で撮像した。次に、白い軟組織に囲まれた黒い歯列を抽出して輝度値を反転し、母音発声中の MRI データに補填[3]した。そして、声門から口唇までの声道形状を抽出し、声道の周囲に厚さ 3 mm の壁を形成して声道モデルを作成した。

2.2. 音響シミュレーション

FDTD 法 (Finite-Difference Time-Domain method) により、母音/a/発声時の声道モデルの声門から口唇までの声道伝達関数を計算した。なお、シミュレーションの空間離散化間隔は 0.5 mm、時間離散化間隔は $0.5 \mu\text{s}$ とした。

また、声道伝達関数のピークやディップの周波数でモデルを励振して定常状態に達した後の瞬時音圧分布を可視化し、ピークやディップの成因を検討した。

2.3. 声道形状の比較

歌唱指導開始前、1 年後、2 年後に MRI で撮像した頭頸部の形状は、MRI 装置に仰臥する際の実験参加者の首の角度や撮像時の断面位置の設定で変化しているため、直接比較することはできない。そこで、3 つの頭頸部の形状を首の角度の影響を受けない脳頭蓋で位置合わせした。まず、指導開始 1 年後、2 年後の脳頭蓋を指導開始前の脳頭蓋に位置合わせする剛体変換行列を画像の強度に基づく勾配降下法でそれぞれ求めた。次に、指導開始 1 年後、2 年後の頭頸部の MRI データを剛体変換行列で指導開始前の MRI データの座標系に写像した。そして、各 MRI データの正中矢状断面を抽出し、頸椎や声道形状などをトレースして比較した (Fig. 1)。

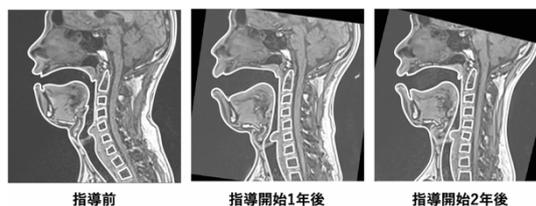


Fig. 1 位置合わせした MRI データから抽出した正中矢状断面とトレース

3. 結果と考察

3.1. 声道伝達関数の比較

Fig. 2 は音声スペクトルと声道伝達関数である。以下、指導開始前、指導開始1年後、指導開始2年後の音声スペクトルをそれぞれ SPC0, SPC1, SPC2, そのフォーマントを周波数の低い方から F1, F2, ... とする。また、声道伝達関数をそれぞれ TF0, TF1, TF2, そのピークを fR1, fR2 ... とする。SPC0 と TF0 は F1~F3 と fR1~fR3 が一致したが、3.0 kHz 以上の帯域では概形が一致せず、SPC0 より TF0 のレベルが高かった。一方、SPC1 と TF1, SPC2 と TF2 は、全帯域にわたって概形やレベルは一致したが、F2 と F3 より fR2 と fR3 はそれぞれ低域に現れた。また、SPC2 では 2.8 kHz 付近に顕著な SF が見られたが、TF2 ではピークのクラスタは見られなかった。これらの相違は音声スペクトルは約 10 秒間の発声からノイズを含まないごく一部の区間を切り出したものであるのに対して、伝達関数を計算した声道形状は約 10 秒間の平均であることが要因だと考えられる。すなわち、声道形状は常に微細に変動しているため、瞬間的な音声スペクトルと、変動が平均化された声道から計算した伝達関数の比較が必ずしも適当ではないのかもしれない。しかし、これらの相違を考慮しても、SF と fR3 と fR4 は周波数が近いことから、SF は fR3 と fR4 が近接することによって生成されていると考えられ、SPC2 の SF は F3 と F4 がほぼ重畳して形成されたと考えられる。

Fig. 3 は音声スペクトルの比較である。2.8 kHz 付近の SF のピークは、SPC0, SPC1, SPC2 の順でより顕著になった。これは、

歌唱訓練によって SF が顕著になったことを示している。そしてこれは、Fig. 2 の結果に基づけば、F3 と F4 の近接の程度が大きくなったためと考えられる。

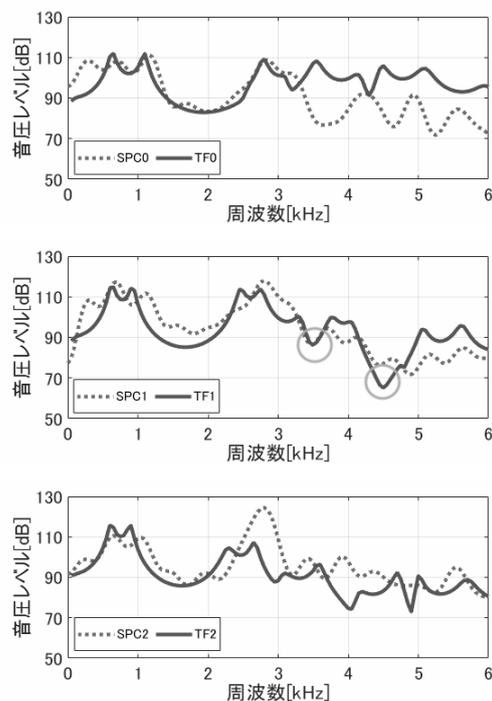


Fig. 2 声道伝達関数と音声スペクトル (上段：指導開始前，中段：指導開始1年後，下段：指導開始2年後)

Fig. 4 は声道伝達関数の比較である。TF1 および TF2 では TF0 に比べて fR2 の周波数が低かった。この傾向は Fig. 3 の音声スペクトルでも見られた。fR4 は TF0, TF1, TF2 の順に周波数が下降しており、fR3 と近接する要因と考えられる。また、TF0 に比べ、TF1, TF2 では 4 kHz 以上の周波数帯域で音圧レベルが低下した。この要因として梨状窩のディップの影響が考えられる。瞬時音圧分布の可視化により、TF0 では、2.8 kHz と 4.3 kHz, TF1 では 3.5 kHz と 4.5 kHz, TF2 では 2.95 kHz と 4.05 kHz のそれぞれ 2 つのディップが

梨状窩に由来していた。TF0 では 2 つのディップが 1.5 kHz ほど隔たっているが、TF1, TF2 ではそれぞれ 1.0 kHz と 1.1 kHz に近接していた。また、TF0 に比べて TF1, TF2 では 2 つのディップが深くなっていた。これらが TF0 に対して TF1, TF2 の 4.0 kHz 以上の帯域で音圧レベルが低下した要因と考えられる。

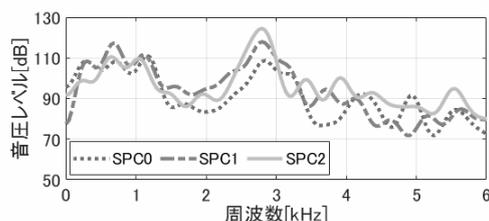


Fig. 3 音声スペクトルの比較

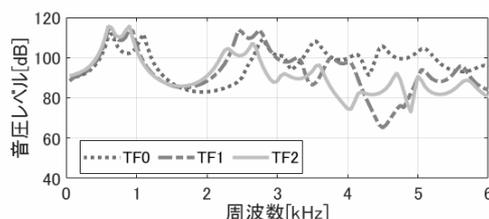


Fig. 4 声道伝達関数の比較

3.2. 声道形状の比較

Fig. 5 は指導前, 指導開始 1 年後, 指導開始 2 年後の声道形状の比較である。以降, それぞれ VT0, VT1, VT2 とする。なお, 図中の C2~C7 は第 2~7 頸椎, T1, T2 は第 1, 2 胸椎である。

まず, VT0, VT1, VT2 の順で頸椎と胸椎が脳頭蓋に対して前方に大きく移動した。これは, 喉の広がった感覚を身につけるため, 下顎を首に押し付けるようにできるだけ後ろに引かせる歌唱指導の結果であると考えられる[4]が, それに対する音響的な影響は明確にできなかった。

次に, VT0 に比べて VT1 と VT2 は口が開いて口腔が拡大した。Fig. 6 の上段は VT0 の声道断面積関数, 下段は声道断面

積関数に位置的に対応する $fR2$ における音響感度関数 (Sensitivity Function) [5] である。音響感度関数とは, 対応する声道の部分の断面積が増加した場合の $fR2$ 周波数の増減の程度を示す関数である。例えば, Fig. 6 の破線で示す声門から 8.6~13.6 cm の口腔に該当する区間で音響感度関数は負となっている。これは, この区間の声道断面積が増加すれば $fR2$ 周波数が低下することを意味する。これより, 前述した TF0 より TF1 および TF2 で $fR2$ の周波数が低かった原因は, 口腔の容積が増大したためと考えられる。

さらに, VT0 では C5, VT1 と VT2 では C6 付近に喉頭が位置していた。すなわち, 歌唱指導により, 喉頭は頸椎約 1 つ分下降したといえる。これによって, 咽頭腔が伸長し, 喉頭室, 梨状窩などの下咽頭腔の形状が変化して音声スペクトルが変化したと考えられる。

喉頭の下降とどのような関係があるか明確ではないが, Fig. 5 では喉頭腔の上部が VT0 より VT1 や VT2 で狭まっているように見えるがはっきりしない。そこで, 喉頭腔上部で咽頭との境界の断面積を計測した。その結果, 指導開始前, 指導 1 年後, 指導 2 年後の断面積はそれぞれ 1.090, 0.185, 0.107 cm^2 であり, 指導によって喉頭上部が狭くなった。この部分が狭くなると, 喉頭腔が声道のその他の部分に対して音響的に独立する程度が高くなるということが知られている[6]。そのため, $fR3$ と独立して $fR4$ を制御して 2 つのピークを重畳させることが可能になり, 音声スペクトルでは顕著な SF を生成すると考えられる。

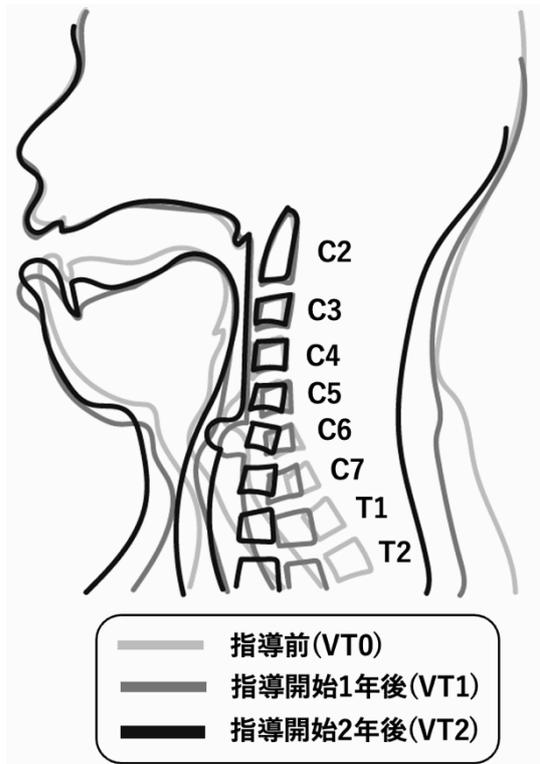


Fig. 5 声道形状の比較

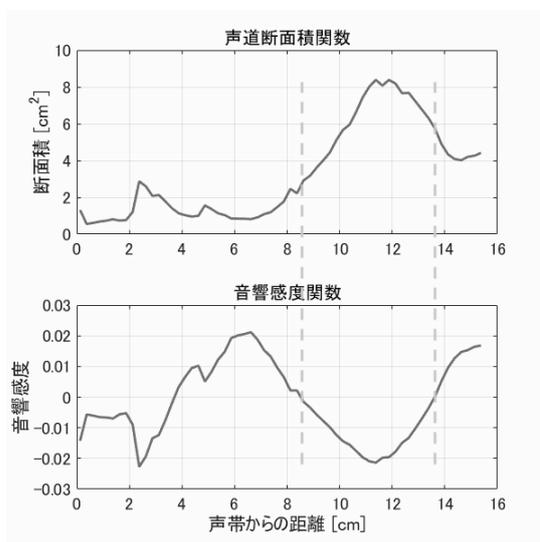


Fig. 6 VT0 の声道断面積関数（上段）と $fR2$ における音響感度関数（下段）

4. まとめ

本研究では声楽未経験の男子大学生 1 名の歌唱指導開始前, 1 年後, 2 年後の歌唱中の体内運動を MRI で撮像し, 声道形状と音響特性を分析した. その結果, 音声スペクトルの比較では $F3$, $F4$ の近接による SF の形成が見られ, $SPC0$, $SPC1$, $SPC2$ の順に SF の大きな高まりが見られた. これらは喉頭の下降と喉頭腔上部の断面積の減少が要因であると考えられる. 声道伝達関数の比較では, $TF0$ に対して, $TF1$, $TF2$ では $fR2$ が下降した. 音響感度関数による分析の結果, これは口腔容積が増大したことが要因であると考えられる. また, $TF0$ に対して $TF1$, $TF2$ では 4.0 kHz 以上の周波数帯域で音圧レベルが減少した. この減少はこの帯域にディップを生成する梨状窩が関与している可能性があるが, 本研究では明確にできなかった.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 23K11172 の支援を受けた. また, 実験に協力していただいたすべてのの方々に感謝する.

参考文献

- [1] Sundberg, J, *The Science of The Singing Voice*, Northern Illinois University Press, 1987.
- [2] 志々目ら, 音講論(秋), 969-970, 2023.
- [3] 加地ら, 音講論(春), 801-802, 2022.
- [4] 荻野仁志, 後野仁彦, 発声のメカニズム, 音楽之友社, 2004.
- [5] Story, JASA, 119(2), 715-718, 2006.
- [6] Takemoto *et al.*, JASA, 120, 2228-2238, 2006.