

# リアルタイム MRI を用いたオペラ歌唱における 音高変化時の声道形状の制御

戸田 菜月<sup>†</sup> 竹本 浩典<sup>‡</sup> 高橋 純<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 千葉工業大学工学専攻 〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

<sup>‡</sup> 千葉工業大学先進工学部 〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

<sup>††</sup> 大阪芸術大学短期大学部 〒585-8550 大阪府南河内郡河南町東山 469

E-mail: <sup>†</sup> s17c3087mt@s.chibakoudai.jp, <sup>‡</sup> hironori.takemoto@p.chibakoudai.jp

<sup>††</sup> jun\_takahashi@osaka-geidai.ac.jp

**あらまし** オペラ歌唱における音高の調節にともなう声道形状の制御や声種による違いは明らかとなっていない。そこで本研究では、テノールとソプラノ各 1 名が音高を変化させて歌唱する際の声道形状をリアルタイム MRI で撮像し、どのような制御を行っているのか検討した。その結果、テノールでは開口と頸椎の後弯の度合いを共に変化させて音高の調節を行っていた。しかしソプラノでは、上行時はテノールと同様の制御であったが、下行時には開口度合いのみを小さくすることで制御を行っていた。これは、ソプラノでは声帯張力だけでなく、声帯を安定して振動させるために声道の第 1 共鳴の周波数も制御する必要があることを示すと考えられる。

**キーワード** オペラ歌唱, リアルタイム MRI, 声道形状, 音高変化

## 1. はじめに

優れたオペラ歌手は、オーケストラを伴った舞台上で拡声機器を用いずに歌声を響かせることが可能である。この歌声には、歌唱フォルマント (Singer's Formant) [1] やフォルマント同調 (Formant Tuning) [2] と呼ばれる特徴が見られる。しかしどのような声道形状の制御を歌唱中に行っているかは未解明な点が多い。これは、歌唱時の体内運動を観測するための技術が発達していなかったためである。

近年、磁気共鳴画像法 (MRI: Magnetic Resonance Imaging) を用いて体内運動を任意の断面における実時間の動画として撮像するリアルタイム MRI (rtMRI) の技術が発展した。これを用いて、歌唱中の体内運動を観察することが可能となった[3-7]。

そこで我々はこれまでに、テノールを声種とするオペラ歌手が、熟達した歌唱法を用いて発声したとき(声楽的発声)とその歌唱法を用いずに発声(非声楽的発声)したときの声道形状を rtMRI で撮像し、分析を行った。その結果、声楽的発声と非声楽的発声では声道形状の制御が大きく異なることや、歌唱の音域が変化することで、口の開口や喉頭の位置、頸椎の後弯度合いが変化することが明らかとなった[8,9]。しかし、音高の調節にともなってどのように声道形状を制御しているのか、また他の声種ではどのような制御を用いているのか明らかにすることはできなかった。

そこで本研究では、テノールとソプラノ各 1 名が、音高変化させて歌唱する際の声道形状を rtMRI で撮像し、どのような制御を行っているのか検討したので報

告する。

## 2. 方法

### 2.1. 実験参加者と歌唱課題

実験参加者はプロとして活躍中のオペラ歌手 2 名で、ソプラノとテノール 1 名ずつである。図 1, 2 は 3 つの音型を順に歌唱する課題を示す。音高の変化は完全 5 度跳躍進行とし、発声は全て/a/とした。テノールは図 1 の譜面、ソプラノは図 2 の譜面で歌唱を行った。また、ソプラノは順次進行の課題も行った。図 3 はその譜面である。E $\flat$ 5 (622 Hz), F5 (698 Hz), G5 (783 Hz), A $\flat$ 5 (830 Hz), B $\flat$ 5 (932Hz) の順で上行した後、折り返して下行を行った。順次進行の課題でも発声は全て/a/とした。

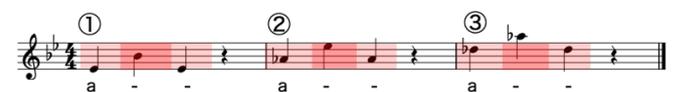


図 1. 5 度跳躍進行の歌唱課題 (テノール)

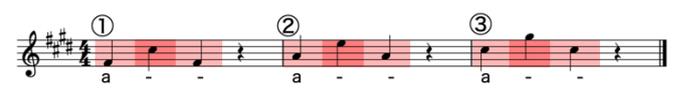


図 2. 5 度跳躍進行の歌唱課題 (ソプラノ)

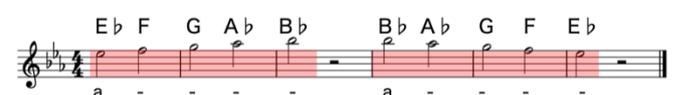


図 3. 順次進行の歌唱課題 (ソプラノ)



図 4. 頭頸部の正中矢状断面画像 (左)  
抽出した発話器官の輪郭 (右)

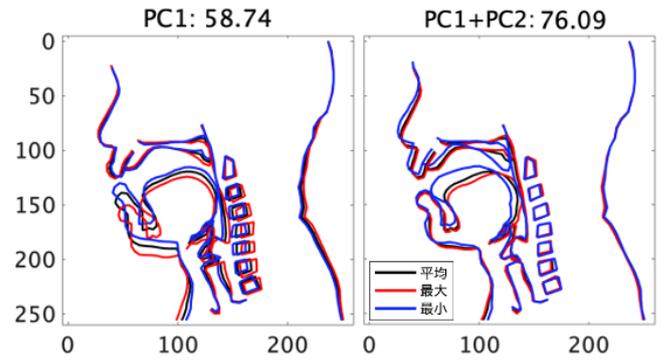


図 5. テノールの声道形状の主成分分析結果

## 2.2. rtMRI 撮像

実験参加者は MRI 装置内で仰臥して歌唱課題を行い、10 フレーム毎秒の速度で頭頸部の矢状断面における 50 秒間の動画 (500 フレーム) を撮像した。スライス厚は 10 mm、ピクセルサイズは  $1 \times 1$  mm とした。なお、装置は ATR-Promotions に設置されている Siemens MAGNETOM Prisma fit 3T を用いた。

## 2.3. 輪郭の分析

まず、矢状断面における発話器官などの輪郭を 10 の部位に分け、それぞれ 5 から 17 のフレームにおいて点群としてトレースした。次にこれを教師データとして抽出器を生成し、全フレームから発話器官の輪郭を抽出した [7]。図 4 はその 1 例である。そして、全フレームで各部位の輪郭の終点と始点は解剖学的に相同で、輪郭を構成する点数は等しいので、フレームごと、部位ごとに輪郭を構成する点群を等間隔に再配置すれば、フレーム間で各点を対応させて輪郭の変動を分析可能となる。よって、等間隔化した後、主成分分析を行った。なお分析は、図 1 の網掛けで示した歌唱中のフレームでのみ行った。

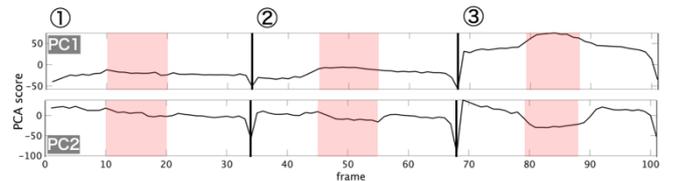


図 6. 図 5 の主成分分析のスコア

## 3. 結果と考察

### 3.1. テノールとソプラノの 5 度跳躍進行

図 5 は、テノールの歌唱部分における声道形状変化の第 1・2 主成分 (PC1, PC2) とその累積寄与率である。黒線は平均形状、赤線・青線はそれぞれ各主成分スコアの最大値・最小値による形状である。PC1 は主に口を開く動き、軟口蓋を下げる動き、喉頭を下降させる動き、頸椎を後弯させる動きをもたらす。PC2 は主に口を少し閉じる動き、舌を後方へ引く動き、軟口蓋を挙上させる動きをもたらす。

図 6 は、図 5 の主成分スコアのフレームによる変動を示す。黒の縦線は 3 つの音型間の休止である。また網掛け部分は、それぞれの音型の中での最高音の区間を示す。PC1 のスコアは、①ではほとんど変化がないが、②では最高音の部分で僅かにスコアが上昇した。

また③では全体的にスコアが上昇し、特に最高音の発声時には顕著に上昇が見られた。PC2 のスコアは PC1 同様、①ではほとんど変化がないが、②では最高音の発声時に僅かにスコアが低下した。そして③では最高音ではない箇所でも僅かにスコアが上昇し、最高音ではスコアが低下した。また、それぞれの音型の同じ音高である 1 音目と 3 音目で PC1 と PC2 のどちらもスコアは同程度であった。

②は地声の声区、③は最高音では最高音が声区のブレイク [10] を超えた裏声の音域に設定されている。前述の結果は、地声でも裏声でも音高は共通した制御、すなわち、口の開き具合、頸椎の後弯度合い、喉頭や舌骨の位置の調整などの喉頭とその周囲の構造を利用した動きによってなされていることを示す。従って、この制御が地声と裏声の声質の違いを受聴者に感じさせない声区融合の技術と関係する可能性がある。

次に、図 7 はソプラノの歌唱部分における声道形状変化の第 1・2 主成分 (PC1, PC2) とその累積寄与率である。PC1 は主に顔を上に向けて口を開く動き、咽頭を広げる動き、喉頭を上昇させる動き、頸椎を後弯させる動きをもたらす。PC2 は度合いがかなり小さいが、口を開く動きをもたらす。

図 8 は図 7 の主成分スコアのフレームによる変動を示す。PC1 のスコアは音型の平均的な音高が上昇するにつれて全体的に上昇し、それぞれの音型の最高音では一時的に上昇した。PC2 は、それぞれの音型の最高音を歌唱する際に上昇する傾向が見られた。また、PC1 も PC2 も、それぞれの音型の 1 音目と 3 音目は同じ音高であるにもかかわらずスコアは異なっており、しか

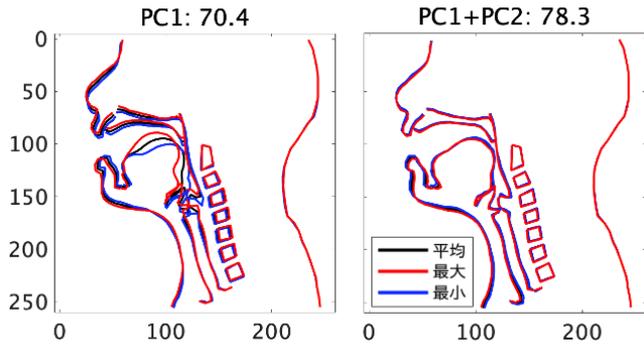


図 7. ソプラノの声道形状の主成分分析結果

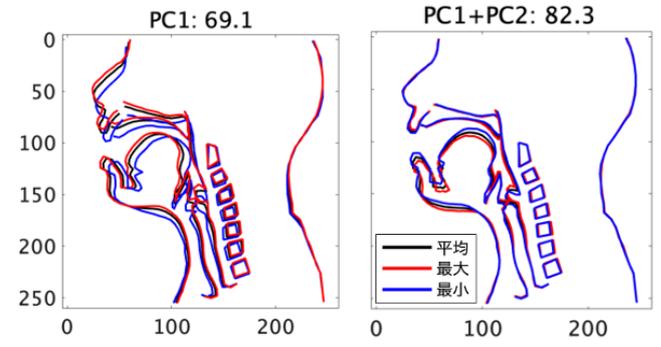


図 9. ソプラノの順次進行の課題における主成分分析結果

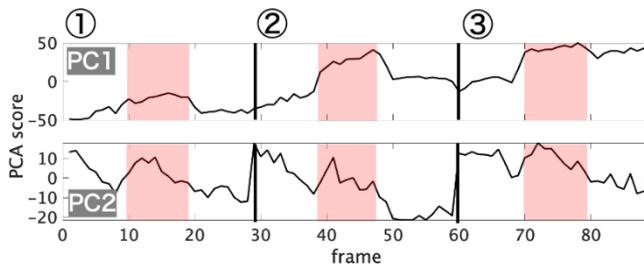


図 8. 図 7 の主成分分析スコア

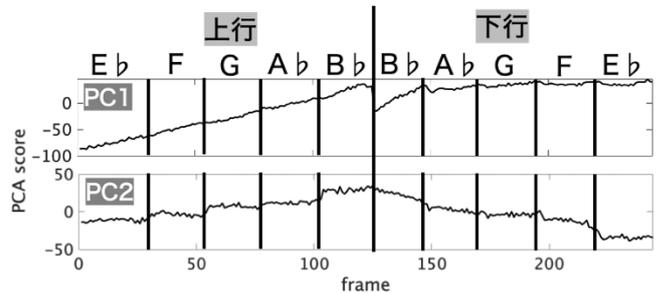


図 10. 図 9 の主成分スコア

も同じ音高内で変動していた。つまり、音域が高くなるにつれて顔を上に向けて口を開き、咽頭を広げ、喉頭を上昇させ、頸椎を後弯させており、上行のときにはその度合いを高くしているが、下行のときには上行の前と同じ音高であるのにも関わらず、その度合いを元に戻してはいない。これらのことから、ソプラノは上行と下行で声道形状の制御が異なることを示す。

テノールとソプラノで、音高の上昇では口を開き、頸椎を後弯させる動きは共通していた。しかしテノールは喉頭を下げ、軟口蓋を下げていたが、ソプラノは喉頭を上昇させている点は異なっていた。また、テノールは上行と下行で制御が同じであったが、ソプラノは制御が異なっていた。

### 3.2. ソプラノの順次進行

5度跳躍進行では、ソプラノの上行と下行で声道形状の制御が異なっていたが、これが5度跳躍進行だけで見られることなのかを確認するため、図3で示した順次進行の課題を歌唱中のソプラノの頭頸部を撮像し、同じく主成分分析を行った。図9はその結果である。PC1は5度跳躍進行と同様、顔を上に向けて口を開く動き、咽頭を広げる動き、喉頭を上昇させる動き、頸椎を後弯させる動きをもたらす。しかし5度跳躍進行よりも、顔を上に向けて口を開く動き、頸椎を後弯させる動きの度合いは大きかった。PC2も5度跳躍進行と同様、僅かに口を開く動きをもたらしており、度合いは5度跳躍進行よりも大きかった。

図10は、図9の主成分スコアのフレームによる変

動を示す。黒の縦線は、音高変化の位置を示しており、上行と下行の間には休止を含む。PC1は最低音(E $\flat$ )から最高音(B $\flat$ )までの上行では、音高とともにスコアが上昇した。一方、下行では最高音を除き、音高にかかわらずスコアはほぼ一定だった。最高音でPC1のスコアが上昇したのは、直前に休止があったためと思われる。しかし、PC2は音高とともにスコアが上昇・下降した。つまり、上行では上を向いて口を開き、咽頭が広がり、頸椎が後弯し、喉頭が上昇するが、下行では口は閉じていくがそれ以外の部位はほとんど動かない。これらのことから、順次進行でも上行と下行では声道形状の制御が異なることを示す。

声帯を安定して振動させるためには、声帯振動の基本周波数( $f_0$ )より声道の第1共鳴周波数( $f_{R1}$ )を高く保たねばならない[2]。そのために、声帯張力を増して $f_0$ を上昇させると同時に、声道形状を制御して $f_{R1}$ も上昇させる必要がある。上行時にテノールとソプラノで共通して見られた口を開く動作は、舌骨を介して甲状軟骨の上縁を下方に押し下げることで声帯の張力を高めると考えられる。また、頸椎の後弯は甲状軟骨と輪状軟骨の角度に対して輪状甲状筋の収縮と同様の変化をもたらす。結果として声帯の張力を高めると考えられる。つまり、いずれも $f_0$ を上昇させる効果があると考えられる。その一方、上行時にソプラノのみで見られた喉頭の上昇は、声道長を短縮する効果がある

ので、 $f_{R1}$ を上昇させると考えられる。

すなわちソプラノでは、上行時には口を開いて頸椎を後弯させて $f_0$ を上昇させるとともに、喉頭を上昇させて $f_{R1}$ を上昇させる。ところが上行後の下行時にはすでに $f_0$ より $f_{R1}$ が高い状態で声帯は安定して振動できるので、 $f_0$ のみを下降させればよい。このとき、ソプラノで口を閉じる動作のみ見られるのは、これが頸椎の後弯に比べて喉頭の上昇や咽頭の拡大などの $f_{R1}$ 周波数へ関与する動作への影響が小さいためと推測される。これが、上行と下行で主成分スコアが非対称な要因であると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、テノールとソプラノ各1名が音高を変化させて歌唱する際の声道形状をrtMRIで撮像し、どのような制御を行っているのか検討した。その結果、5度跳躍進行において、テノールは上行で口を開き、軟口蓋を下げ、喉頭を下降させ、頸椎を後弯させていた。そしてこの制御は、上行と下行で同じ度合いで用いられていた。一方ソプラノでは、上行では上を向いて口を開き、咽頭を広げ、頸椎を後弯させ、喉頭を上昇させていたが、下行では口を閉じることで制御を行っていた。つまり、ソプラノは上行と下行で声道形状の制御が異なっていた。

次に、このソプラノにおける上行と下行の制御の違いが5度跳躍進行だけに見られることなのか検討するために、順次進行の課題で同様の分析を行い検討した。その結果、程度は異なるが5度跳躍進行と同様の傾向が見られた。よって、ソプラノは上昇と下行で声道形状の制御が異なることが明らかとなった。

テノールとソプラノの結果から、口の開き度合いと頸椎の後弯度合いは共に音高の調節に必要な制御であると思われる。口を開く動作は、舌骨を介して甲状軟骨の上縁を下方に押し下げることで声帯の張力を高め、頸椎の後弯は甲状軟骨と輪状軟骨の角度に対して輪状甲状筋の収縮と同様の変化をもたらす。結果として声帯の張力を高めて $f_0$ を上昇させると考えられる。また、ソプラノではこの制御に加え、喉頭の位置を上昇させて声道長を短縮することで、 $f_{R1}$ を上昇させ、 $f_0$ よりも $f_{R1}$ を高く保つことで声帯を安定して振動させていると考えられる。そして下行では、 $f_{R1}$ はすでに $f_0$ よりも高いので $f_0$ のみを下降させればよい。恐らく頸椎の後弯の度合いは口の開きの度合いに比べて $f_0$ だけでなく $f_{R1}$ の周波数とも強い関係があるため、口の開きのみで $f_0$ を制御していると推測される。これが、ソプラノで上行と下行の制御が異なる要因であると考えられる。

今後は音響分析を行うことで、実際にフォルマント

同調を維持しているのか検討が必要である。また、今回は実験参加者がテノールとソプラノ、それぞれ1名ずつであったため、今回得られた結果が個人差であるのか、声種ごとの特徴であるのかを検討することも必要である。

#### 謝 辞

本研究はJSPS科研費19K12048・23K11172の支援を受けた。また、実験に参加して頂いた全ての方々へ感謝する。

#### 文 献

- [1] J. Sundberg, *THE SCIENCE OF THE SINGING VOICE*, Northern Illinois University Press, State of Illinois, 1987.
- [2] 竹本浩典, "声楽家の声道形状制御," 日本音響学会誌, 70巻, 9号, pp.506-511, Sep.2014.
- [3] O. Engwall, "A Revisit to the Application of MRI to the Analysis of Speech Production-Testing our assumptions," Proceedings of the Sixth International Seminar on Speech Production, Sydney, Australia, December 7 to 10, 2003.
- [4] S. Narayanan, K. Nayak, S. Lee, A. Sethy and D. Byrd, "An approach to real-time magnetic resonance imaging for speech production," The Journal of the Acoustical Society of America, vol.155, no.4, pp.1771-1776, Apr.2004.
- [5] S. Narayanan, A. Toutios, V. Ramanarayanan, A. Lammert, J. Kim, S. Lee, K. Nayak, Y. Kim, Y. Zhu, L. Goldstein, D. Byrd, E. Bresch, P. Ghosh, A. Katsamanis and M. Proctor, "Real-time magnetic resonance imaging and electromagnetic articulography database for speech production research(TC)," The Journal of the Acoustical Society of America, vol.136, no.3, pp.1307-1311, Sep.2014.
- [6] M. Echternach, P. Birkholz, L. Traser, T. V. Flügge, R. Kamberger, F. Burk, M. Burdumy and B. Richter, "Articulation and vocal tract acoustics at soprano subject's high fundamental frequencies," The Journal of the Acoustical Society of America, vol.137, no.5, pp.2586-2595, Mar.2015.
- [7] H. Takemoto, T. Goto, Y. Hagihara, S. Hamanaka, T. Kitamura, Y. Nota and K. Maekawa, "Speech Organ Contour Extraction using Real-Time MRI and Machine Learning Method," Proc. Interspeech 2019, pp.904-908, Graz, Austria, Sep.2019.
- [8] 戸田菜月, 工藤理佐子, 竹本浩典, 高橋純, "オペラ歌手が非声楽的な発声を模擬したときの横隔膜などの制御," 音講論集, pp. 677-678, Sep. 2020.
- [9] 戸田菜月, 竹本浩典, 高橋純, "オペラ歌唱における音高と声道形状に関する検討," 音講論集, pp. 821-822, Sep. 2021.
- [10] コーネリウス・L・リード, 渡部東吾訳, ベル・カント唱法 その原理と実践, 音楽之友社, 東京, 1987.