

リアルタイムMRIを用いたソプラノ歌手の高音発声に関する研究*

☆戸田菜月, 竹本浩典 (千葉工大), 高橋純 (大阪芸大)

1. はじめに

オペラ歌唱は高音でも厚みのある歌声が特徴である[1]。これを実現するために、歌手は訓練によって声道形状を高い精度で制御する技術を身に付ける。例えば、ソプラノ歌手は、高音域で声帯の張力を大きくするだけではなく、声帯を安定して振動させるために、基本周波数 (f_0) \leq 声道の第 1 共鳴周波数 (f_{R1}) を保つように、 f_{R1} を上昇させる声道形状の特殊な制御を行っていることが知られている[1,2]が、その詳細は明らかではない。

近年、磁気共鳴画像法 (MRI: Magnetic Resonance Imaging) による実時間動画撮像法 (rtMRI) が発展し、歌唱時の声道形状の運動を観測することが可能となった[3]。そこで本研究では、ソプラノ歌手が高音で音高を変化させて発声する際、声道形状をどのように制御しているのかを検討したので報告する。

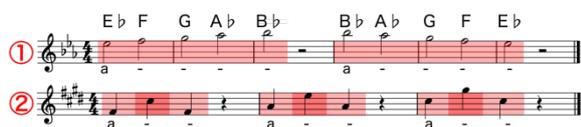


Fig. 1 課題① (上段) と課題② (下段)

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ソプラノ 1 名である。実験参加者は Fig. 1 で示した 2 つの歌唱課題を行った。歌唱課題①は順次進行の課題である。E \flat 5 (622 Hz), F5 (698 Hz), G5 (783 Hz), A \flat 5 (830 Hz), B \flat 5 (932 Hz) の順で上行した後、折り返して下行を行う。歌唱課題②は 5 度跳躍進行の課題である。3 つの音型を順に歌唱する。どちらも発声は全て母音/a/とした。これは、高音では母音の声道形状は全て/a/となるためである[1]。

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 1×1 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

動画の各フレームから、発話器官などの 10 部位の輪郭を機械学習によって抽出する抽出器を生成した[4]。これを用いて、2 つの歌唱課題の動画から輪郭を点群データとしてそれぞれ抽出し、点群を等間隔に再配置した後、主成分分析を行った[4]。なお分析は、Fig. 1 の網掛けで示した歌唱部分でのみ行った。

3. 結果と考察

Fig. 2 は、課題①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 が正のスコアでは、顔を上に向け、咽頭を広げ、頸椎を後弯させ、喉頭を上昇させる。一方、PC2 が正のスコアでは口を開く。

Fig. 3 は、Fig. 2 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す。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。これは、音の上行と下行で声道の制御が異なることを示す。上行では上を向いて口が開き、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。

これが順次進行の下行にだけ見られることなのを確認するため、跳躍進行の課題②を同様の方法で分析した。Fig. 4 はその結果である。PC1 が正のスコアでは課題①同様、顔

*Research on singing at high pitches for a soprano using real-time MRI, by TODA, Natsuki, TAKEMOTO, Hironori (Chiba Institute of Technology), and TAKAHASHI, Jun (Osaka University of Arts).

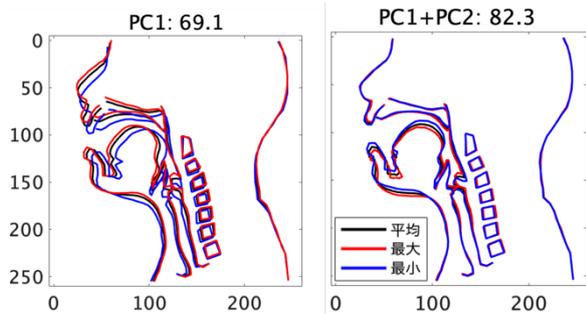


Fig. 2 声道形状の主成分分析結果（課題①）

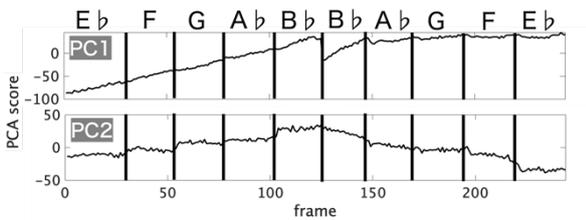


Fig. 3 Fig. 2 の主成分分析のスコア

を上に向け、咽頭を広げ、頸椎を後弯させ、喉頭を上昇させる。しかし課題①よりも、顔を上に向け、頸椎を後弯させる度合いは小さく、咽頭を広げ、喉頭を上昇させる度合いは大きかった。PC2も課題①同様、正のスコアでは口を開く動きであったが、その度合いはかなり小さかった。

Fig. 5はFig. 4の主成分スコアのフレームによる変動を示す。ここでの黒の縦線は、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、しかも同じ音高内で変動していた。これは、3音目の低音が2音目の最高音の影響を受けていることを示唆する。つまり、短い音型でも、上行と下行では制御が異なっていると考えられる。

その要因として $f_0 \leq f_{R1}$ の維持が考えられる。高音の発声のために $f_0 \leq f_{R1}$ を満たす声道形状を形成すれば、後続の低音では声帯の張力を低下させるだけで発声が可能となる。なお、この $f_0 \leq f_{R1}$ を実現するために喉頭を上昇させて声道長を短縮させ、 f_{R1} を上昇させたと考えられる。また、口を閉じることで舌骨を

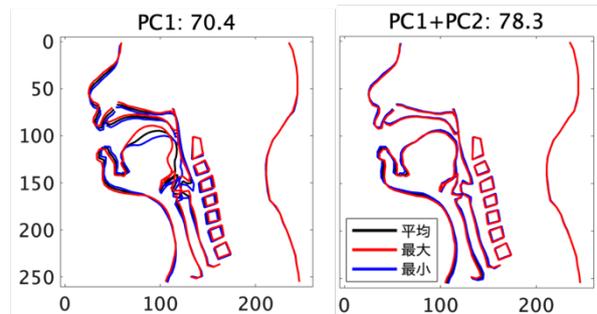


Fig. 4 声道形状の主成分分析結果（課題②）

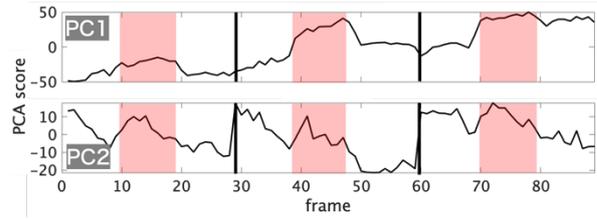


Fig. 5 Fig. 4 の主成分分析のスコア

下方に押し下げる圧力を減少させ、喉頭軟骨を緩めて声帯張力を低下させると推測される。つまり、上行では声道形状と声帯張力の制御が必要だが、下行では声道形状の制御は必ずしも必要なく、声帯張力の制御のみが必要である。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、ソプラノ歌手が高音で音高を変化させて発声する際、声道形状をどのように制御しているのかを検討した。その結果、ソプラノ歌手は音の上行では声道形状と声帯張力を、下行では声帯張力のみを制御している可能性が示唆された。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 19K12048 の支援を受けた。また、実験参加者に感謝する。

参考文献

- [1] Sundberg, J., *THE SCIENCE OF THE SINGING VOICE*, 1987.
- [2] 竹本浩典, 日本音響学会誌, 70 巻, 9 号 (2014), 506–511, 2014.
- [3] Takemoto et al., Proc. Interspeech, 2019, 904–908, 2019.
- [4] 戸田ら, 音講論 (秋), 821–822, 2021.
- [5] Kawahara et al., Speech Communication 1999, 187–207, 1999.