

rtMRIを用いたオペラ歌唱における 演奏技法や音高が異なる際の体内運動の分析*

◎戸田菜月，竹本浩典（千葉工大），高橋純（大阪芸大）

1. はじめに

オペラ歌唱は特有の響きと豊かな声量の特徴である[1]。優れた歌手は演奏技法や音高を変化させた場合でも響きや声量を維持することが可能である。これは演奏技法や音高の変化に合わせて、声道形状や横隔膜を精緻に制御することで実現していると考えられるが、詳細は明らかでない。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）の発展により、体内運動を観測することが可能となった[2]。

そこでわれわれは、rtMRIを用いてオペラ歌手の声道形状や横隔膜の制御について研究してきた。これまでに肺の形状変化から肺圧を推定する手法を考案し[3]、演奏技法に合わせて肺圧を制御することや[4]、音高の変化に合わせて声道形状と肺圧を制御すること[3,5]を明らかにした。しかし、演奏技法の変化に伴う声道形状と肺圧の制御は未検討である。

そこで本研究では、バリトン1名の演奏技法と音高の変化に伴う声道形状と肺圧の制御を検討する。そして、その制御をこれまで数名の歌手で得られている知見と比較検討する。

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バリトン1名である。実験参加者は、Fig. 1で示す9つの小課題で構成される歌唱課題を行った。音高の変化は完全5度跳躍進行とし、3つの音型を各3回歌唱する。各音型に対して演奏技法の指示なし（①④⑦）、跳躍時に強く演奏するアクセント（②⑤⑧）、滑らかに演奏するポルタメント（③⑥⑨）の順で歌唱する。また、実験参加者の肺の容積を推定するために、深呼吸を繰り返す課題も行った。

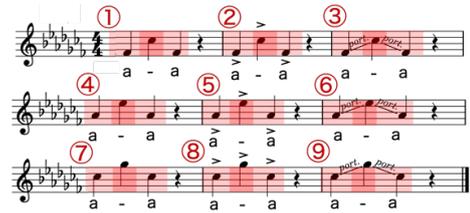


Fig. 1 演奏技法の変化を含む歌唱課題

2.2. rtMRI 撮像

実験参加者は、MRI装置内で仰臥して歌唱課題と深呼吸の課題を行い、10フレーム毎秒の速度で胸腹部の矢状断面における50秒間の動画を撮像した。歌唱課題では頭頸部も同様に撮像した。スライス厚は10mm、ピクセルサイズは胸腹部で1.22×1.22mm、頭頸部で1×1mmとした。また撮像の際に実験参加者の口元に光マイクを設置して音声も収録した。なお、撮像にはATR-Promotionsに設置されているSiemens MAGNETOM Prisma fit 3Tを用いた。

2.3. 輪郭の抽出と分析

動画の各フレームから肺と声道の輪郭を抽出する抽出器を生成し、点群データとして輪郭を抽出した後、等間隔に点群を再配置した[3,5]。肺の輪郭から面積を計算し、肺の容積は面積の3/2乗に比例すること、肺容積の最大値（深呼吸の最大吸気時）は7000cm³、最小値（深呼吸の最大呼気時）は2000cm³と仮定してフレームごとに肺の容積を推定した。そして、平均声門面積を0.065cm²と仮定して肺圧を推定した[3]。また、Fig. 1の網掛けで示した歌唱部分における声道形状の変化を分析するため、主成分分析を行った。

3. 結果と考察

3.1. 声道形状の主成分分析結果

Fig. 2は、声道形状の第1,2主成分（PC1, PC2）とその寄与率である。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、最小値による形状を示す。そしてFig. 3はFig. 2の主成分スコアの変動で、黒の縦線は

*Analysis of internal body movements in different performance techniques and pitches in opera singing using rtMRI, by TODA, Natsuki, TAKEMOTO, Hironori (Chiba Institute of Technology), and TAKAHASHI, Jun (Osaka University of Arts).

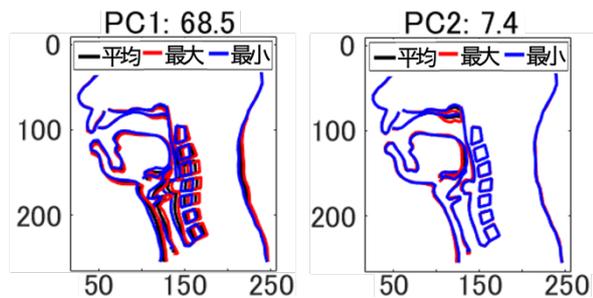


Fig. 2 声道形状の主成分分析結果

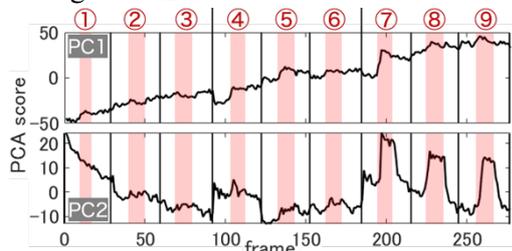


Fig. 3 Fig. 2 における主成分スコア待機区間を示す。

PC1 は頸椎の後弯や喉頭の下降などの動きであった。音高の上昇に伴ってスコアが上昇していることから、これまで検討してきた実験参加者[5]と同様に、本研究の実験参加者でもこの制御は音高と関係すると言える。また、どの音型でもスコアは指示なし、アクセント、ポルタメントの順で増加した。

PC2 は主に軟口蓋の挙上であった。スコアは低音域の指示なしの歌唱中 (①) に大きく減少し、その他の低音域と中音域 (④⑤⑥) では低くなった。ところが、高音域 (⑦⑧⑨) では全ての演奏技法で2音目においてスコアが増大した。これらの事実から、この実験参加者は非常に高い音高では、軟口蓋を少し下げて歌唱していることを示す。また、どの音型でもスコアは指示なし、アクセント、ポルタメントの順で減少した。

3.2. 推定した肺の容積変化と肺圧

Fig. 4 はバリトンの高音域における肺の容積変化 (上) と肺圧の変化 (下) を示す。肺の容積変化では、この実験参加者では高音から低音への移行時における肺容積の一時的な増大[3]は明確には見られなかった。しかし肺圧の変化では、指示なしとアクセントで高音から低音に移行した後、肺圧の一時的な減少と再増加が見られた。これは、この実験参加者も高音から低音に移行する際に用いられる「支え直し」の技術を用いている可能性を示唆している。なお、ポルタメントでは、歌い出しから肺圧を徐々に上げ、下行するタイミングから徐々に下げており、音高の変化が滑

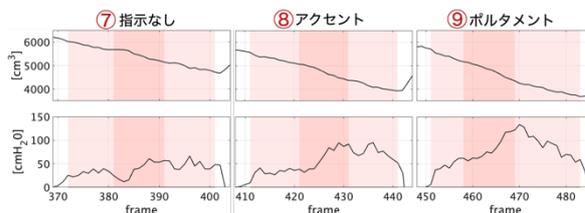


Fig. 4 バリトンの容積と肺圧 (⑦-⑨)

らかであることと一致した。

演奏技法ごとにみると、指示なし、アクセント、ポルタメントの順で肺圧は全体的に高くなった。これは、低・中音域でも同様であった。さらに、音域ごとにみると、音高が上昇するにつれて肺圧は全体的に高くなった。すなわち、①, ②, ...⑨の順で全体的な肺圧が上昇した。これは、声道形状のPC1のスコアの上昇と一致した。これは肺圧と口の構えの度合いが相関することを示唆する。

その一方、歌手の内観報告によると、指示なし、アクセント、ポルタメントの順で技術的に難易度の高くなること、また連続して同じ音型を歌唱することで「構える」意識が強まるとのことであった。つまり、演奏技法の難易度によっても音高の上昇に伴う制御が大きくなる可能性と、同じ音型を繰り返し歌唱することで声道形状の構えや横隔膜の支えが過剰になる可能性の両方が示唆された。

まとめ

本研究では、演奏技法と音高の変化に伴う声道形状と肺圧の制御を検討した。その結果、音高の変化に伴う制御はこれまでに得られた知見と一致した。また、演奏技法の難易度が高くなるほど肺圧は高く、音高の上昇に伴う声道の制御は大きくなることが明らかとなった。しかし、同じ音型を繰り返すことで声道形状の構えや横隔膜の支えが過剰になっている可能性もあり、演奏技法の順番を変更した課題での実験を行い、検討する必要がある。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 23K11172 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] Takemoto *et al.*, Proc. Interspeech 2019, 904–908, 2019.
- [3] Toda *et al*, Proc. ICVPB 2024, 52–53, 2024.
- [4] 戸田ら, 音講論 (秋), 1033–1034, 2022.
- [5] 戸田ら, 信学技報, 123 (88), 26–29, 2023.