

rtMRI動画を用いたオペラ歌唱における呼気の制御に関する研究*

☆戸田菜月, △工藤理佐子, 竹本浩典 (千葉工大), 高橋純 (大阪芸大)

1. はじめに

オペラ歌唱に特有の安定した豊かな声量[1]は、横隔膜などの呼吸に関する部位の制御を高度化することにより獲得されると考えられる。しかし、これらの部位は直接観測することが困難であるため、歌唱中にどのような制御を行っているか明らかではない。

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でリアルタイムの動画として撮像する技術 (rtMRI) が発展した。そして、これを用いて発話時や歌唱時の声道や横隔膜の運動を観測することが可能となった[2, 3]。

前報では、主に横隔膜の上下動を表すカイモグラフに基づいて、歌唱中の呼気の制御を検討した[3, 4]。しかし、この検討は横隔膜の上下方向の変位のみに基づいており、あまり高い精度とは言えないかもしれない。

そこで本研究では、より高い精度で呼気の制御を検討するため、3人のオペラ歌手を被験者として、歌唱中の動画の全フレームから肺の矢状断面の輪郭を抽出し、肺の形状の時間変化を分析した。まず、横隔膜の上下方向の変位と肺の面積の変化を比較検討した。次に、肺の面積から呼気流を推定可能か検討した。そして、肺の形状変化を主成分分析し、個人差や歌唱技術との関係を検討した。



Fig.1 音高と母音の変化を含む歌唱課題

2. 方法

2.1. 被験者と歌唱課題

プロとして活躍中のオペラ歌手3名 (テノール, バリトン, ソプラノ) を被験者とした。

Fig. 1 は7つの小課題で構成される歌唱課題を示す。音高の変化は完全5度跳躍進行 (①~③) と1オクターブの跳躍進行 (④~⑦) とした。5度跳躍進行においては母音を

/a/-/a/-/a/, /a/-/i/-/a/, /a/-/u/-/a/と変化させた。

2.2. rtMRI 撮像

ATR-Promotions に設置されている装置 (Siemens MAGNETOM Prisma fit 3T) を撮像に用いた。被験者はMRI装置内で仰臥して歌唱課題を行い、その間10フレーム毎秒の速度で約50秒間の動画 (512フレーム) を撮像した。なお、スライス厚は10mm、ピクセルサイズは1.2153×1.2153mmとした。

2.3. 分析

Fig. 2左は胸腹部の右側矢状断面である。水色の線は、横隔膜の歌唱に伴う変位をカイモグラフで分析した位置である。断面の位置や角度は目視で決定したが、多少変化してもカイモグラフに現れる変動のタイミングは、同一であることを確認した[4]。Fig. 2右は肺を輪郭抽出した図である。被験者ごとに12フレームから肺の輪郭を手動で抽出して学習機を生成した[2]。この学習器を用いて全フレームから肺の輪郭を等間隔の点群データとして抽出し、面積の計算と形状変化の主成分分析を行った。

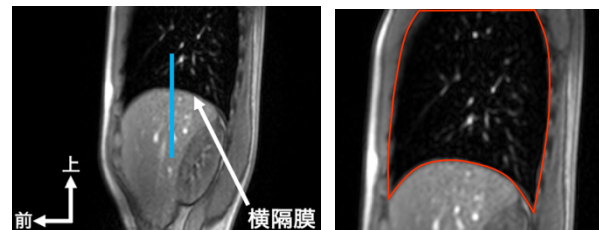


Fig.2 胸腹部におけるカイモグラフの位置 (左) 肺を輪郭抽出した図 (右)

3. 結果と考察

Fig. 3は肺の面積とカイモグラフ (横隔膜の上下動) を比較した図である。①~⑦は各小課題を示す。網掛けの部分は歌唱中の区間、やや濃い網掛けの部分は最高音の区間である。肺の面積の変化と横隔膜の上下動のパターンはほぼ一致していた。肺の断面積と横隔膜の上下動の相関係数は、テノールで0.96, バリトンで0.98, ソプラノで0.99であった。この結

*Research on the control of exhalation in opera singing using rtMRI, by TODA, Natsuki, KUDO, Risako, TAKEMOTO, Hironori (Chiba Institute of Technology), and TAKAHASHI, Jun (Osaka University of Arts).

果は、肺の面積の変化は横隔膜の上下動から推定できることを示す。

次に、肺の面積の変化から呼気流量を推定できるか検討した。歌唱中は呼気で声帯を振動させるため、肺の体積は常に減少すると考えられる。ところが、高音から低音への移行時、肺の面積は一時的に増大するパターンが全ての被験者に見られた。これは、一時的に吸気が発生していることを示し、歌唱中であることと矛盾する。従って、矢状断面の肺の面積や横隔膜の上下動から呼気流を推定することは困難であるといえる。また、この事実は、矢状断面では肺の面積は増大しても、それ以外の断面、例えば冠状断面では肺の面積は減少している可能性を示唆している。

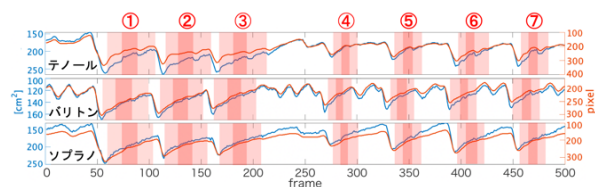


Fig.3 肺の面積の変化（青線）と横隔膜の上下動（赤線）

Fig.4 は、矢状断面における肺の形状変化の第1, 第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・最小値による形状である。テノールの PC1 は横隔膜と胸部全体の膨張・収縮, PC2 は横隔膜の背側の下降・上昇と胸部の収縮・膨張であった。バリトンの PC1 は横隔膜の上下動のみ, PC2 は横隔膜の腹側の下降・上昇と胸部の膨張・収縮であった。ソプラノの PC1 は横隔膜の背側を中心とした大きな上下動と胸部の小さな膨張・収縮, PC2 は胸部の小さな収縮・膨張であった。すなわち, PC1 で共通してみられる横隔膜の上下動を除いて, 各主成分を構成する運動要素は個人差が大きかった。また, 各主成分の寄与率も個人差が大きかったことが明らかになった。

Fig. 5 は、テノールの PC1, PC2 のスコアの時間変動である。全体として吸気時に両方のスコアは上昇し、発声中は全体として下降する。しかし、高音から低音への移行時, PC1, PC2 のスコアは一時的に増大したが, PC2 のスコアの方が増大の程度が大きかった。これらは、胸部の動きを抑えて横隔膜を一時的に下降させると思われる。これにより、肺の面

積は一時的に増大した。同様に、バリトンでは PC1 と PC2 が、ソプラノでは PC1 が、高音から低音への移行時に一時的にスコアが上昇した。これらの運動成分はいずれも胸部をほとんど動かさず、横隔膜を一時的に下降させる作用があると考えられる。被験者の内観報告によれば、高音から低音への移行時に「支え直す」技術を用いているとのことである。従って、横隔膜を一時的に下降させる運動は、「支え直す」技術と対応すると考えられる。

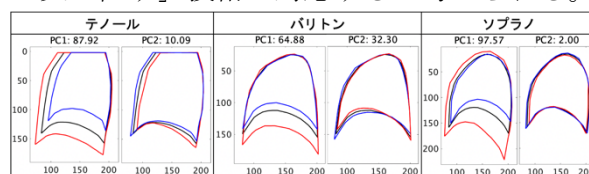


Fig.4 肺の形状の主成分分析結果

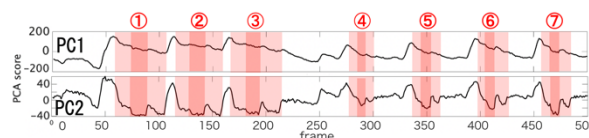


Fig.5 テノール歌手の PC1, PC2 のスコア

4. まとめ

本研究では、テノール、バリトン、ソプラノの歌唱時における肺の矢状断面の形状変化を分析した。その結果、横隔膜の上下動は、肺の面積変化と相関が高く、肺の形状変化の PC1 を構成する主要な要素であることが明らかになった。しかし、横隔膜の上下動や肺の面積の変化から呼気流を推定することは困難で、冠状断面での面積変化を検討する必要あることも明らかになった。また、肺の形状変化の PC1, PC2 を構成する運動要素と寄与率は個人差が大きかった。なお、高音から低音の移行部では全ての被験者で横隔膜が下降する運動が見られた。これは「支え直す」歌唱技術と対応していると考えられる。

謝辞

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

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] 戸田他, 音講論 (秋), 677-678, 2020.
- [4] 高橋他, 音講論 (春), 773-774, 2020.