

## 音高変化におけるオペラ歌唱技術の検討\*

☆戸田菜月, 竹本浩典 (千葉工大), 高橋純 (大阪芸大), 足立整治 (帝塚山大)

## 1. はじめに

オペラ歌唱に特有の豊かな声量[1]は、声道や横隔膜など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なため、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、これを用いて歌唱時の声道や横隔膜の制御を観測することが可能となった[2]。

前報では、オペラ歌手が歌唱中の rtMRI 動画から肺の矢状断面の輪郭を抽出し、肺の断面積の時間変化を分析した[3]。その結果、高音から低音への移行時に、歌唱中であるにも関わらず、吸気の際に見られるような面積の一時的な増大が見られた。歌手の内観報告によれば、高音から低音への移行時には「支え直す」技術を用いているとのことであるが、詳細を明らかにすることはできなかった。

そこで本研究では、「支え直す」技術をより詳細に検討するために、まず、冠状断面でも肺の断面積の変化を分析した。次に、対応する音声波形の変化を分析した。そして、容積変化から肺圧を推定し、この技術の物理的な検討も行ったので報告する。

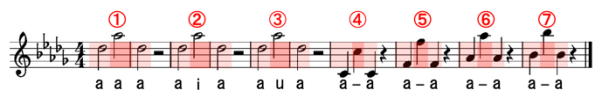


Fig.1 音高と母音の変化を含む歌唱課題

## 2. 方法

## 2.1. 実験参加者と歌唱課題

プロとして活躍中のオペラ歌手2名 (テノール, バリトン) を実験参加者とした。

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。実験参加者は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秒間の胸腹部の動画 (500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. 肺の断面積の抽出

Fig. 2 は右肺における中央の矢状断面と前後方向における中央の冠状断面における肺の輪郭を抽出した図である。実験参加者ごとに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、面積の計算を行った。

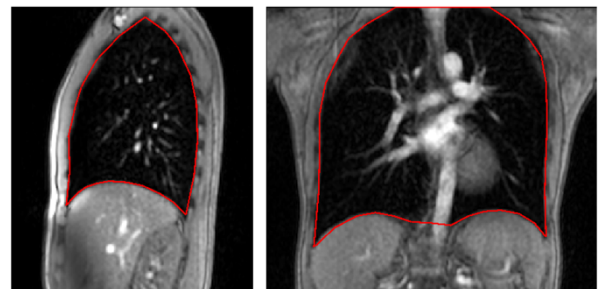


Fig.2 右側矢状断面 (左) と冠状断面 (右) における肺の輪郭 (赤線)

## 3. 結果と考察

Fig. 3 は矢状断面と冠状断面の肺の面積変化を示したグラフである。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。テノールもバリトンも、低音への移行時に矢状断面でも冠状断面でも肺の面積が一時的に増大した。これらの結果より、「支え直す」技術では、肺の容積は一時的に増大することが明らかになった。

次に、肺の面積が増大した際の音声波形の変化を分析した。撮像時に録音した音声には大きな装置ノイズが含まれるため、分析には

\*Examination of opera singing technique in pitch changes, by TODA, Natsuki, TAKEMOTO, Hironori (Chiba Institute of Technology), TAKAHASHI, Jun (Osaka University of Arts), and ADACHI, Seiji (Tezukayama University).

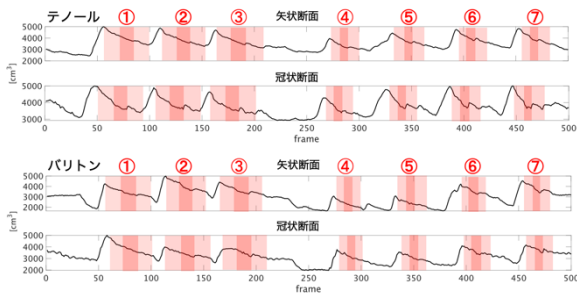


Fig.3 矢状断面と冠状断面における肺の面積変化（上：テノール，下：バリトン）

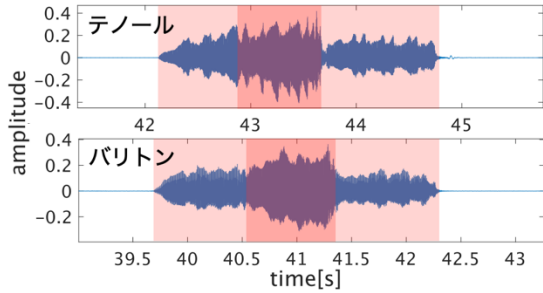


Fig.4 ⑥における音声波形

撮像後に静穏な部屋で録音した音声も用いた。Fig. 4は⑥の小課題における音声波形である。歌手の内観報告によれば、高音から低音への移行時には、音が途切れないよう滑らかに移行したとのことであったが、音声波形の振幅は一時的に非常に小さくなった。これは⑥の小課題だけではなく、④から⑦の全ての小課題で共通して見られた。これは、撮像時の音声波形でも同様であった。

肺の面積変化から肺圧を推定した。まず、肺の容積は、矢状断面積の 3/2 乗に比例し、最大吸気時の肺の容積は  $5000 \text{ cm}^3$  と仮定する。これらの仮定により、歌唱中の肺の容積の変化が 0.1 秒間隔で推定できる。次に、吸気から呼気に移行する直前の肺圧が大気圧と等しいとする。そして、肺の容積変化により肺圧が変化し、その後の 0.1 秒間に発声による呼気流で減圧するとする。つまり、あるフレームに移行した瞬間に容積変化により圧力が変化（断熱変化）し、その後の 0.1 秒間に肺の容積は一定で発声により減圧する過程が繰り返されるとする。このとき、単位時間に流出する空気の質量  $\dot{m}$  は以下の式で表される[4]。

$$\dot{m} = \frac{Ap}{\sqrt{RT}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left\{ \left( \frac{p_a}{p} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{p_a}{p} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}} \quad [\text{kg/s}].$$

ここで  $A$  は平均の声門の面積で  $0.05 \text{ cm}^2$ 、 $p$  は肺圧、 $R$  は空気の気体定数で  $287.1 \text{ J/(kgK)}$ 、 $T$

は空気の温度で  $310 \text{ K}$ 、 $\gamma$  は空気の比熱比で  $1.4$ 、 $p_a$  は大気圧で  $100 \text{ kPa}$  とした。

Fig. 5 は、テノールの肺の容積変化から⑥の小課題における肺圧（大気圧との差圧）を推定した結果である。高音から低音に移行した 415 フレーム近傍で肺の容積は一時的に増加し、肺圧が減少して 0 に近くなったが、その後再び肺の容積は減少して肺圧が上昇した。これは音声波形の変動パターンと一致する。また、バリトンでも同様の結果が得られた。

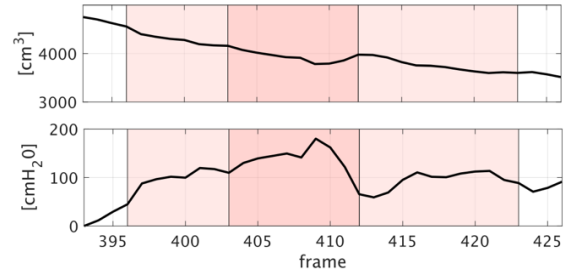


Fig. 5 テノールの⑥における肺の容積（上）と肺圧（下）

#### 4. まとめ

本研究では、テノールとバリトンの歌唱において高音から低音への移行時に用いられる「支え直す」技術について詳細に検討した。矢状断面と冠状断面における肺の断面積変化から、この技術を用いると肺の容積が一時的に増大することが明らかになった。また、このときの音声波形は一時的に振幅が小さくなった。計測した肺の断面積の変化から肺圧の変化を推定したところ、一時的な肺の容積の増大は、吸気を起こすほどではないが肺圧を大きく減少させることが明らかになった。すなわち、「支え直す」技術とは、高音から低音へ移行する際に意図的に肺の容積を増加させて肺圧を下げた後、再び肺圧を上げ直す操作であると結論できる。

#### 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 (春), 735-736, 2021.
- [4] 松尾一泰, 圧縮性流体力学, 2020.