

リアルタイムMRIを用いたオペラ歌唱における 音高と頸椎後弯の度合いの分析*

◎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は、声区融合と呼ばれる、地声と裏声の声区が交差する音域を意図的に融合させる技術[2]などが重要である。しかし、実際にどのような声道形状の制御が行われているか明らかでない。

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) 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]。これまでに我々は、オペラ歌唱における歌唱法や音高を変化させた際の声道形状の制御について、rtMRI を用いて研究を行ってきた[4,5]。その過程で、高音での歌唱時に頸椎が後弯する傾向が見られてきたが、その度合いと音高の関係を詳細に検討していなかった。そこで本研究では、テノール歌手1名が音高を変化させて歌唱する際、声道形状をどのように制御しているのか、また頸椎の後弯の度合いが音高の変化とどのように関係しているのかを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

実験参加者はプロのテノール1名である。実験参加者は、1 オクターブ跳躍進行の歌唱課題を行った (Fig. 1)。本研究では音高による声道形状の変化や頸椎の後弯を検討するため、発声は全て/a/とした。また③・④の高音部分は、声区の転換点より高い音に設定した。

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。



Fig. 1 歌唱課題

2.3. 輪郭の抽出と分析

動画の各フレームから、声道などの輪郭を抽出する抽出器を生成した[4]。この抽出器は部位ごとに輪郭を抽出するが、各輪郭の両端は解剖学的に同定可能な点とした。これを用いて、頭頸部の動画から声道などの輪郭を点群データとして抽出し、点群を等間隔に再配置した[4]。そして、歌唱部分における声道形状の変化と頸椎の動きを主成分分析した。

3. 結果と考察

3.1. 音高変化に伴う声道形状の変化

Fig. 2 は声道形状の第 1-3 主成分 (PC1-PC3) 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。正のスコアは、PC1 では下顎を下げつつ上顎を持ち上げて口を開く動き、軟口蓋を挙上させる動き、喉頭を下降させる動き、頸椎を後弯させる動きを示す。PC2 では、舌根を後ろに引く動きと喉頭を下降させる動きを示す。PC3 では軟口蓋を下降させる動きを示す。

Fig. 3 は、主成分スコアのフレームによる変動を示す。①-④および赤の網掛けは Fig. 1 の各小節の歌唱部分と最高音に対応する。PC1 は①ではほぼ変化がないが、②・③では高音に移行した際にスコアが増大し、その後緩やかに減少した。そして④では高音に移行した際にスコアが大きく増大し、その後低音に移行した際に減少した。PC2 は①で高音に移行する際、スコアが僅かに増大し、その後も緩やかに増大した。②・③では歌い出しから徐々にスコアが増大し、高音に移行した時点からは一定に保たれた。④では、高音に移行した際にスコアが減少し、その後低音に移行した際に再びスコアは上昇した。PC3 は、

* Analysis of relationship between pitches and bending of cervical spines in operatic singing using real-time MRI, by TODA, Natsuki, TAKEMOTO, Hironori (Chiba Institute of Technology), and TAKAHASHI, Jun (Osaka University of Arts).

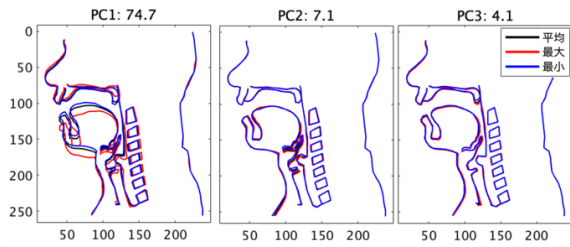


Fig. 2 声道形状の主成分分析の結果

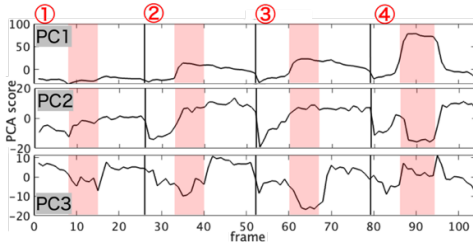


Fig. 3 Fig. 2 における主成分スコア

④以外では高音に移行する際にスコアが減少し、低音に移行した際にスコアが上昇したが、④では、高音に移行した際にスコアが上昇し、低音に移行した際にスコアが減少した。

3. 2. 音高変化に伴う頸椎の動き

Fig. 4 (左) は、音高変化に伴う頸椎の動きの PC1 とその寄与率である。PC1 の正のスコアは、第 4・第 5 頸椎を中心とした後弯の動きであった。Fig. 4 (右) は PC1 の主成分スコアの変動である。①・②ではスコアの変化がほぼ見られなかった。③では、高音の発声時にスコアが僅かに増大した。そして④では、高音の発声時にスコアが大きく増大した。

これは、頸椎の後弯が特に高音域で音高を上昇させる可能性を示唆している。音高の制御は通常、輪状甲状筋 (CT 筋) が声帯を伸長させ、甲状披裂筋 (TA 筋) が声帯を短縮させることで行われる。さらに、頸椎の前弯を利用して甲状軟骨と輪状軟骨の角度を変え、声帯を短縮させて声を低くするメカニズムも知られている[6]。その逆に、頸椎の後弯を利用して甲状軟骨と輪状軟骨の角度を変化させ、さらに口を大きく開いて舌骨で甲状軟骨を下方に圧迫して声帯を伸長し、声を高くするメカニズムも想定できる。

3. 3. 音高制御のメカニズム

頸椎の後弯の度合いと声道形状の第 3 主成分までを用いて再合成した声道形状を用いて音域ごとに音高制御を考察した。①の低音域では音高によらず声道形状がほぼ一定であった。これは、低音域では CT 筋と TA 筋で音高を制御していることを示唆する。②, ③の中音域の 1 音目から 2 音目への移行では、口が

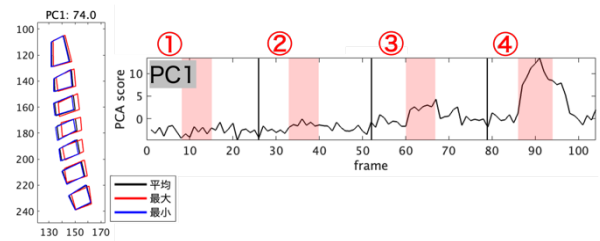


Fig. 4 頸椎の主成分分析の結果 (左) とその主成分スコア (右)

開いて軟口蓋が挙上し、喉頭が下降して頸椎が後弯した。2 音目から 3 音目の移行では軟口蓋は下降したが、頸椎と声道形状はほぼ一定であった。これは、上行では頸椎の後弯による音高制御を使用したがる、下行では使用しなかったことを示唆する。④の高音域では、1 音目から 2 音目の移行で中音域と同じ動きがより大きい程度で見られたが、2 音目から 3 音目の移行では、声道形状は喉頭の高さを除いて大きく変化し、3 音目と 1 音目の声道形状はほぼ一致した。これは、高音域では上行・下行ともに頸椎後弯による音高制御を行っていることを示唆する。なお、他のテノール歌手やソプラノ歌手でも、高音域で音高を変化させた際に頸椎の後弯が見られた[5]ことから、頸椎の後弯を利用した音高の制御は声種を問わずに用いられている可能性がある。

まとめ

本研究では 1 名のテノール歌手が、音高を変化させて歌唱する際の声道形状と頸椎の後弯の度合いを分析した。その結果、頸椎の後弯の度合いは音高と相関し、頸椎の後弯を利用して音高を制御するメカニズムが想定された。そしてこのメカニズムは、この歌手では中音域の上行、高音域の上行・下行の双方で用いていると推定された。

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] コーネリウス・L・リード, *ベル・カント 唱法 その原理と実践*, 1987.
- [3] Takemoto *et al.*, Proc. Interspeech 2019, 904–908, 2019.
- [4] 戸田ら, 音講論 (秋), 821–822, 2021.
- [5] 戸田ら, 信学技報, 123 (88), 26–29, 2023.
- [6] 本多清志, 喉頭, 8 (2), 109–115, 1996.