

オペラ歌唱の音高変化にともなう声道各部の変位の検討*

©戸田菜月, 竹本浩典 (千葉工大), 高橋純 (大阪芸大)

1. はじめに

優れたオペラ歌手は声道形状や横隔膜を緻密に制御し, 広い音域にわたり豊かな響きを持つ声で歌唱することが可能である[1]。しかし, 制御の詳細については未解明な点が多い。

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になった[2]。そこでわれわれは rtMRI を用いて, 音高を変化させる際にオペラ歌手は声道形状をどのように制御しているのか検討した。その結果, 頸椎, 軟口蓋, 口唇, 喉頭などを制御していることが明らかになった[3]。そこで, 音高と各部位の制御をより詳細に分析するために, まず音高と頸椎の制御を分析した。すると, 音高の上昇につれて頸椎の後弯の度合いを大きくしていることが明らかになった[4]。これは声帯の張力の制御と関係する可能性がある。しかし, 音高と他の部位の制御の関係は未解明である。そこで本研究では, 次に音高と軟口蓋の制御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

実験参加者はプロとして活躍中のオペラ歌手4名 (テノール1・テノール2・バリトン・ソプラノ) である。実験参加者は, Fig. 1 の楽譜で示す1オクターブ跳躍進行の歌唱課題を母音/a/で歌唱した。なお, Fig. 1 はテノール, ソプラノ用の譜面であり, テノールの実音はオクターブ下である。また, バリトンは Fig. 1 より減4度低い譜面を用いた。



Fig. 1 歌唱課題 (テノール・ソプラノ)

2.2. rtMRI 撮像

ATR-Promotions に設置されている 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, 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。

2.3. 輪郭の抽出と分析

rtMRI 動画すべてのフレームから, 機械学習を用いて軟口蓋の輪郭を点群として抽出した[2, 5]。このとき, 部位ごとの輪郭の始点と終点は解剖学的に相同とした。その後, 部位ごとに点群を等間隔に再配置し[5], 歌唱時の軟口蓋の動きを主成分分析した。

3. 結果と考察

Fig. 2 は, 軟口蓋の第1主成分 (PC1) 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・最小値による軟口蓋の形状である。実験参加者ごとに寄与率に違いが見られるが, 全実験参加者でそもそも軟口蓋の動きは小さく, PC1 以外では動きが極めて小さかった。そのため本研究では, PC1 の結果について述べる。正のスコアでは全実験参加者で軟口蓋を挙上させる動きが見られた。一方で, 挙上による形状の変化, 挙上の度合いには違いが見られた。

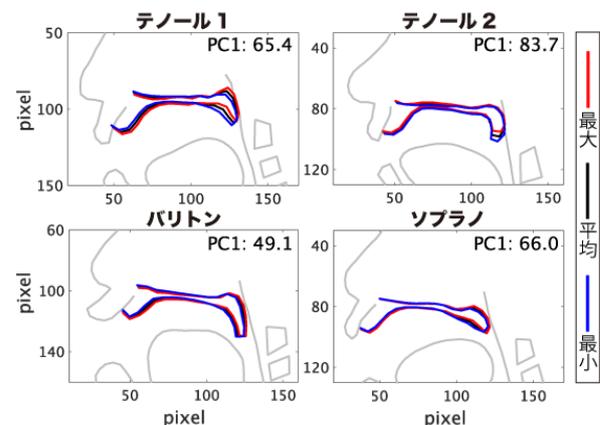


Fig. 2 軟口蓋の主成分分析結果

*Examination of displacement of various parts of the vocal tract according to pitch changes during opera singing, by TODA, Natsuki, TAKEMOTO, Hironori (Chiba Institute of Technology), and TAKAHASHI, Jun (Osaka University of Arts).

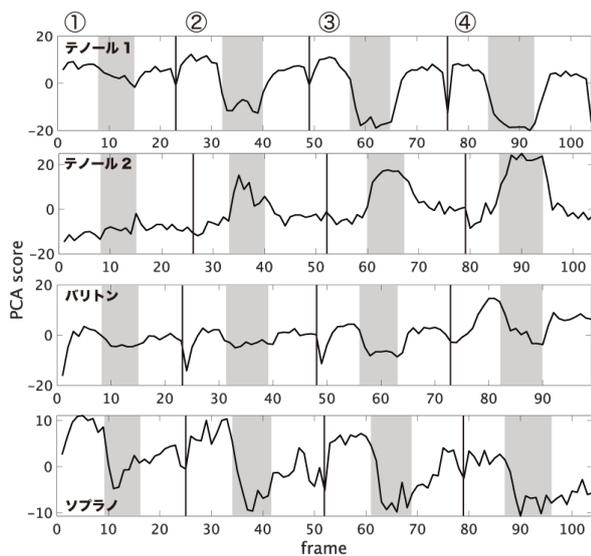


Fig. 3 Fig. 2 の主成分スコア

テノール 1 は挙上に伴い、上咽頭側の部分を持ち上げているが、テノール 2 では中咽頭側の部分を持ち上げている。バリトンとソプラノは咽頭後壁側へ引くような動きであった。そしてテノール 1、テノール 2 はバリトン、ソプラノよりも挙上の度合いが大きかった。

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。①-④および網掛けは Fig. 1 の各小節の歌唱部分と最高音、黒の縦線は待機区間を示す。テノール 1 とソプラノは音高の上昇に伴い、全体的にスコアが減少した。各小節内の最高音である 2 音目では、特にスコアが減少し、音域が高くなるほどその度合いは高かった。1 音目と 3 音目は同じ音高であるが、3 音目より 1 音目がスコアは大きく、これはソプラノで顕著に見られた。ソプラノでは声道形状の制御が上行と下行で異なることが確認されており[3]、これはその影響が反映されていると考えられる。テノール 2 とバリトンは音高の上昇に伴い、全体的なスコアが増加した。しかし各小節内のスコアの変化パターンは異なった。テノール 2 では音域が高くなるにつれ、2 音目でスコアが増加しており、1 音目より 3 音目のスコアが僅かに大きい、バリトンでは 2 音目でスコアが減少し、1 音目より 3 音目のスコアが小さかった。

すなわち、テノール 1 とソプラノは音高の上昇に伴って軟口蓋が下降し、テノール 2 では挙上していた。バリトンにおいては音域が高くなるほど、歌い出しの際に軟口蓋が挙上していたが、1 つの音型内では音高の上昇に

伴い、軟口蓋が下降していた。そして 1 つの音型内の 3 音目の軟口蓋の位置は、同じ音高の 1 音目よりも音高の高い 2 音目の軟口蓋の位置に影響を受けていた。これは全実験参加者に共通していた。

軟口蓋の制御の影響について考察する。バリトン、ソプラノでは、軟口蓋の制御によってどの音域でも鼻咽腔が開いており、テノール 1 では高音で鼻咽腔が開いていた。/a/の歌唱における鼻咽腔の開きでは、歌唱に重要な 2-3 kHz 帯域でエネルギーを増加させることが確認されている[6]。このことから 3 名の実験参加者は、軟口蓋の下降によってこれを実現していたと推測される。しかし、音高変化に伴う軟口蓋の変位パターンや PC1 の寄与率には、個人差が大きかった。また、テノール 2 は他 3 名の実験参加者と異なり、鼻咽腔が閉鎖していた。これは高音でより顕著であった。テノール 2 の内観報告によると、鼻咽腔を閉じることで鼻腔にエネルギーが抜けないように意識しているとのことであった。これらのことから、軟口蓋の制御は、形状の個人差や、流派や個人による鼻咽腔開閉の是非の違いによって、個人差が現れると推測される。

まとめ

本研究では、オペラ歌唱における音高変化時の軟口蓋の制御を検討した。その結果、3 名の歌手では鼻咽腔の開きが確認されたが、1 名では閉鎖していた。また音高変化に伴う軟口蓋の変位パターンには個人差が見られた。今後は、軟口蓋の下降が声帯振動や声道共鳴にどのような影響をもたらしているか、また他の声道各部も分析を行うことで、その制御との相互作用を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*, Northern Illinois University Press, 1987.
- [2] Takemoto *et al.*, Proc. Interspeech 2019, 904-908, 2019.
- [3] 戸田ら, 信学技報, 123 (88), 26-29, 2023.
- [4] 戸田ら, 音講論 (春), 681-682, 2024.
- [5] 戸田ら, 音講論 (秋), 821-822, 2021.
- [6] Sundberg, J, *J. Voice*, 21 (2), 127-137, 2007.