

リアルタイム MRI に基づくオペラ歌唱の音量の制御 に関する研究

A study on control of vocal volume in operatic singing based on real-time MRI

高橋 純[†] 幸 実優[‡] 佐々木 香諒[‡] 戸田 菜月[‡] 竹本 浩典[‡]

Jun TAKAHASHI[†] Miyu YUKI[‡] and Kagari SASAKI[‡] and Natsuki TODA[‡]
and Hironori TAKEMOTO[‡]

[†] 大阪芸術大学短期大学部 〒585-8550 大阪府南河内郡河南町東山 469

[‡] 千葉工業大学先進工学部 〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

[†] Osaka University of Arts Junior College 469 Higashiyama, Kanan-cho,
Minamikawachi-gun, Osaka 585-8550 Japan

[‡] Faculty of Advanced Engineering, Chiba Institute of Technology
2-17-1 Tsudanuma, Narashino, Chiba, 275-0016, Japan

E-mail: [†] jun_takahashi@osaka-geidai.ac.jp, [‡] hironori.takemoto@p.chibakoudai.jp

あらまし 豊かな音量は、優れたオペラ歌手の歌声に共通する音響的特徴である。しかし、音量の変化において発声器官がどのように制御されているのかは明らかになっていない。本研究では、プロと学生の歌唱時の発声器官の運動をリアルタイム MRI で観測し、音量の減少に伴う横隔膜の変位と声道形状の変化を検討した。その結果、プロは横隔膜の上昇度合いを徐々に抑制させることで呼気流量を制御し、さらに鼻咽腔の開閉を制御して副鼻腔の消音効果を用いることにより音量を減少させていた。一方、学生は横隔膜の上昇度合いは一定のまま、口唇と舌によって口腔を狭めて呼気流量を制御して音量を減少させていた。

キーワード rtMRI, オペラ, 歌唱, 歌声, 音量

1. はじめに

優れたオペラ歌手の歌声には、共通する音響的特徴が存在する。中でも豊かな音量は、マイクなどの拡声機を用いないオペラ歌手の歌声には必要不可欠であり、十分に訓練された歌唱技術によるものである。しかし、音量の変化において発声器官がどのように制御されているのかは明らかになっていない。

歌声は、肺からの呼気流が声帯を振動させることにより発生した喉頭音源が、声道(喉頭・咽頭・口腔)に共鳴することによって生成される。呼気流は主に肺の底部にある横隔膜の上昇によって発生し、その量は横隔膜の上昇速度によって決定される

(Fig. 1)。そして、喉頭音源の音量は呼気流量に応じて増大する。したがって、歌唱時の音量は第一義的には横隔膜の変位に

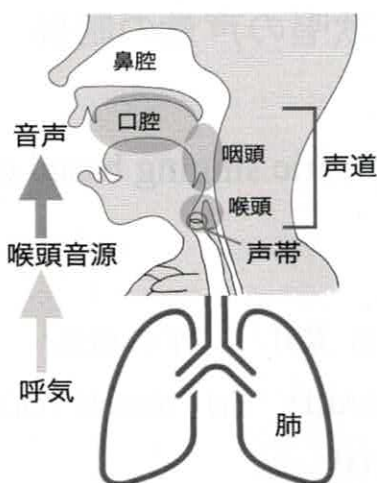


Fig. 1 音声生成の仕組み

よって決定される。しかし、呼気流を阻害する要因となる声門閉鎖の程度や声道の形状(主に口腔の形状)によっても変化すると考えられている[1]。しかし、歌唱中の横隔膜や声道は直接観測することができないため、声量を変化させる生理的な機構について詳細は明らかではない。

近年、磁気共鳴画像法 (MRI: Magnetic Resonance Imaging) を用いてリアルタイムで体内運動を撮像する技術 (rtMRI) が発展し、これを用いて歌唱時の発話器官の運動を観測することが可能となった [2][3]。そこで本研究では、プロのオペラ歌手と音楽大学で声楽を学んでいる学生が歌唱時に声量を変化させたときの発話器官の制御を rtMRI で観測し、声量を変化させるメカニズムについて検討する。そして、個人差や歌唱技術の熟達による差についても考察する。

2. 方法

2.1. 実験参加者

プロとして活躍しているオペラ歌手1名(プロ)と、京都市立芸術大学で声楽を学ぶ学生1名(学生)が実験に参加した。いずれも声種はテノールであった。なお、プ

ロの歌唱歴は15年、学生の歌唱歴は3年であった。

2.2. 歌唱課題

Fig. 2で示す声量の変化を含む歌唱課題を作成した。母音は/a/のみとし、音高は中音域・高音域の二種類をロングトーンで歌唱する。音楽記号である「*f*(強く)」「*p*(弱く)」「*decrescendo*(だんだん弱く)」を用いて、声量の変化とそのタイミングを示した。

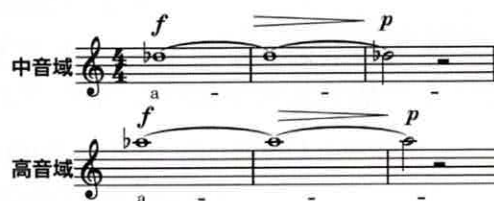


Fig. 2 声量の変化を含む歌唱課題

2.3. rtMRI 撮像

撮像に用いた MRI 装置は ATR-Promotions に設置されている Siemens 製 MAGNETOM Prisma fit 3T であった。実験参加者は MRI 装置内で仰臥し、歌唱課題を2回実施した。1回目は横隔膜の動画撮像、2回目は喉頭の動画撮像のためである。これは、横隔膜と喉頭の動画を同時に撮像できず、コイルの交換が必要なためである。横隔膜の運動は右の肺の矢状断面で、喉頭の運動は正中矢状断面で、それぞれスライス厚 10 mm、10 フレーム毎秒の速度で 50 秒間の動画として記録した。なおピクセルサイズは横隔膜で 1.2153 × 1.2153 mm、喉頭で 1 × 1 mm とした。

2.4. 分析

Fig. 3 左は胸腹部、右は声道の矢状断面である。左右の赤線は、それぞれ横隔膜と軟口蓋周辺の歌唱に伴う変位をカイモグラフで分析した断面の位置を示している。カイモグラフとは、赤線上における横隔膜や

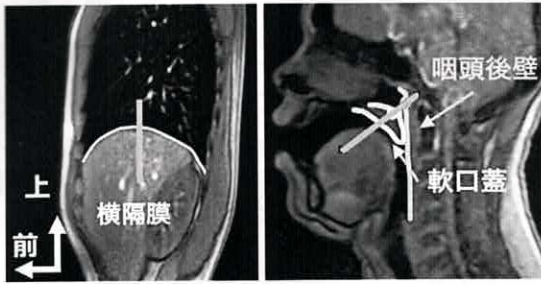


Fig. 3 胸腹部(左)と声道(右)の矢状断面とカイモグラフの位置

軟口蓋の時間的な変位を示したものである。断面の位置や角度は目視で決定したが、これらが多少変化しても、カイモグラフに現れる変動のタイミングや相対的な大きさは同一であることを確認した[4]。また、声量の変化に伴う声道各部の変位を検討するために、声道の輪郭を目視で抽出して重ねて可視化した。声量は、撮像時の音声フリーソフトウェアのPraatを用いて分析し、振幅を求めた。

3. 結果と考察

Fig. 4は声量と横隔膜の上下動の関係、Fig. 5は声量と軟口蓋の開閉の関係を表している。前述したように、横隔膜と喉頭の動画の撮像は同時には行うことができなかったため、分析した音声はそれぞれの撮像時のものとした。

Fig. 4, 5の声量のグラフから、中音域ではdecrecendoさせる際に、プロも学生も比較的緩やかな声量の減少が見られた。しかし、高音域では、プロでは中音域と同様に緩やかな声量の減少が見られたが、学生では一時的な増加や急激な変化が見られた。つまり、中音域ではプロも学生も声量を徐々に減少させることができたが、より歌唱難易度の高い高音域では、学生は声量を徐々に減少させることができなかった。これはプロと学生の歌唱技術の差を示していると考えられる。

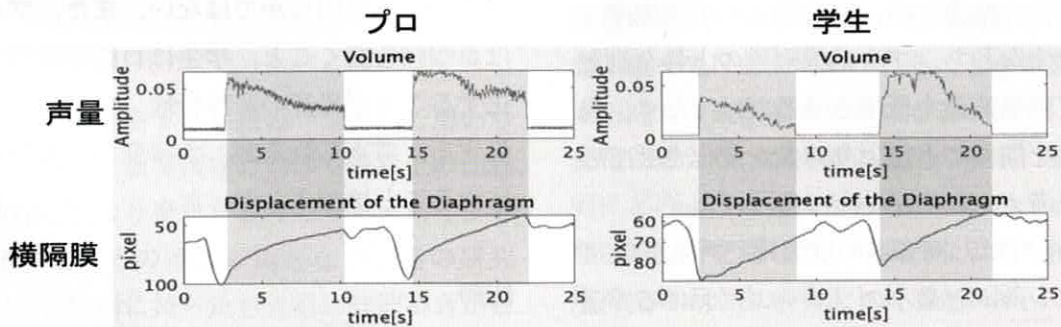


Fig. 4 声量と横隔膜の上下動の関係

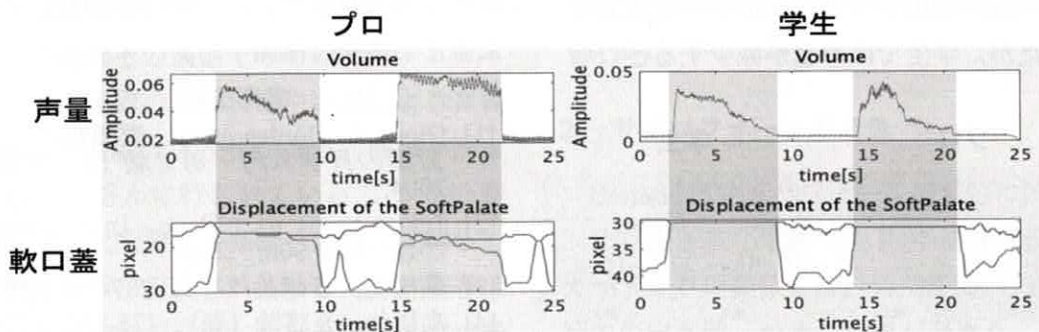


Fig. 5 声量と軟口蓋の開閉の関係

Fig. 4の横隔膜のカイモグラフでは、プロと学生では歌唱に伴う横隔膜の変位が異なり、プロは曲線的に上昇しているのに対して学生は直線的に上昇している。横隔膜の上昇は呼気が、下降は吸気が生じることを意味している。このことから、プロは歌声を decrescendo させるために横隔膜の上昇度合いを徐々に抑制させることで、呼気を制御し、音量を減少させている。それに対して学生では、横隔膜の上昇度合いが一定で、それに伴って呼気流量もほぼ一定であると考えられることから、横隔膜の制御以外の機構を用いて呼気流量を制御し、音量を増減させていると考えられる。

Fig. 5の軟口蓋のカイモグラフでは、音量の減少とともに、プロの軟口蓋は次第に下降して鼻咽腔が開くのにに対して、学生の鼻咽腔は閉じたままである。鼻咽腔が開き副鼻腔に音波が流入すれば、副鼻腔はその共鳴により特定の帯域の音響エネルギーを減少させるため、消音器として機能する。すなわち、プロは横隔膜の上昇を抑制して呼気流量を低下させるだけでなく、鼻咽腔を開くことにより音量を変化させていると考えられる。

Fig. 6は、高音域の歌唱時で音量が最大のフレームと最小のフレームにおける声道の輪郭を抽出して重ねたものである。プロでは音量が変化しても声道形状は変化しなかったが、学生では音量が減少すると口唇

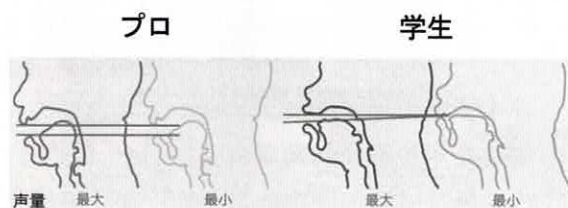


Fig. 6 音量の変化に伴う声道形状の変化

が閉じ、舌が上昇して声道が狭くなった。これは、肺から口唇までの呼気流が通過する経路の出口を絞ることによって呼気流量を低下させることにより喉頭音源の音量を減少させたと考えられる。

4. まとめ

本研究では、プロと学生の歌唱時における decrescendo に伴う横隔膜の変位と声道形状の変化を rtMRI で観測して検討した。その結果、プロは横隔膜の上昇度合いを抑制することで呼気流量を低下させて音量を減少させるとともに、鼻咽腔の開閉度合いを制御して副鼻腔の消音効果を用いることによっても音量を減少させていた。一方、学生は横隔膜の上昇度合いは一定のまま、口唇と舌によって口腔を狭めて呼気流量を低下させて音量を減少させていた。この制御方法の違いが個人差によるものなのか、歌唱技術の熟達度合いによるものなのかについては明らかではない。また、プロは鼻咽腔を開くこと、学生は口腔形状が変化することで母音の音響特性（声質）が変化すると考えられるが、本研究では明らかにすることはできなかった。

謝辞

研究は JSPS 科研費 19K12048, 20K22261 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] Gloria J. Borden et al., 廣瀬肇訳, “新言葉の科学入門 第2版”医学書院, 2004.
- [2] Takemoto et al., Proc. Interspeech, 2019, 904-908, 2019.
- [3] 高橋他, 音講論 (春), 737-738, 2021.
- [4] 高橋他, 音講論 (春), 773-774, 2020.