

rtMRIを用いたオペラ歌唱における喉頭と横隔膜の制御の観察*

◎高橋純（神戸学院大），竹本浩典（千葉工大），榊原健一（北医療大）

1 はじめに

クラシック音楽における優れた歌手の歌声には特有の音響的特徴があり[1]，舞台上でオーケストラを伴い拡声機器を用いないで歌っても歌声がマスクされることはない。これを実現するために，歌手は喉頭や横隔膜など直接目には見えない器官を精緻に制御する身体技術を長い時間をかけて習得する。

近年，磁気共鳴画像法（Magnetic Resonance Imaging: MRI）を用いてリアルタイムで動画を撮像する技術（rtMRI）が発展し，体内運動を観測できるようになった。この技術を用いて発話時や歌唱時の体内運動を分析する研究が行われるようになった[2]

本研究の目的は，プロのオペラ歌手と声楽を学ぶ学生の歌唱における身体技術を比較検討することである。そのために，歌唱中の喉頭と横隔膜を rtMRI で撮像して分析する。

2 方法

2.1 被験者

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）を用いた。いずれも声種はテノールであった。

2.2 歌唱課題

被験者は音高の変化と母音の変化を含む歌唱課題（Fig. 1）を行った。音高の変化は完全 5 度跳躍進行と 1 オクターブの跳躍進行とした。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。（①～⑦）



Fig. 1 Singing tasks involving pitch and vowel

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。被験者は MRI 装置内

で仰臥し，2.2 節の歌唱課題を横隔膜と喉頭の撮像のためコイルを交換して 2 回ずつ行った。

横隔膜，喉頭とも動画をスライス厚 10 mm，10 フレーム毎秒の速度で 50 秒間撮像した。しかし，横隔膜はピクセルサイズ 1.2153×1.2153 mm，喉頭はピクセルサイズ 1×1 mm とした。

2.4 分析

プロと学生を比較しながら発声時の横隔膜と喉頭の様子を観察した。Fig. 2 で示すように，横隔膜（水色），胸部（紫色），下腹部（緑色）軟口蓋（赤），咽頭（黄色），の断面をカイモグラフで示した。断面の位置と角度は目視で決定したが，これらは多少変化しても，カイモグラフに現れる各部位の変動パターンには同一であることを予備実験で確認した。

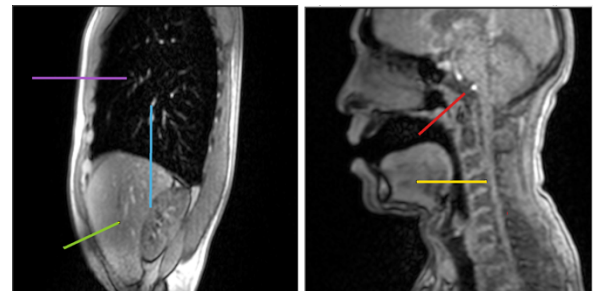


Fig. 2 Kymograph positions for diaphragm, chest, lower abdomen, soft palate, and lower pharynx

3 結果と考察

Fig. 3 は横隔膜の上下動を示す。横隔膜では，学生とプロで呼気による上昇パターンに差異が見られた。横隔膜は吸気で下降し呼気で上昇する。学生では歌唱中は滑らかに上昇したが，プロでは各音に対して異なる上昇パターンを示した。これは，プロでは音高ごとに異なる横隔膜の制御を行っていることを示し，各音に対して適切な呼気量を供給していると思われる。また，歌唱終了時に学生ではほぼ最初の位置に戻ったが，プロではまだ低い位置にあった。これは，プロではまだ呼気に余

* Observation of larynx and diaphragm control in opera singing using rtMRI, by TAKAHASHI, Jun (Kobe Gakuin University) and TAKEMOTO, Hironori (Chiba Institute of Technology) and SAKAKIBARA Kenichi (Health Sciences University of Hokkaido).

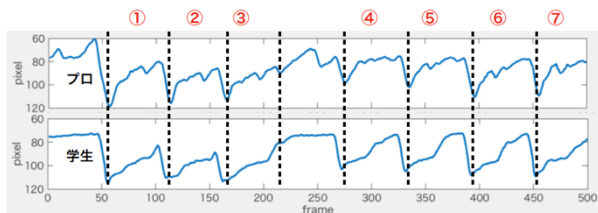


Fig. 3 Displacement of the Diaphragm

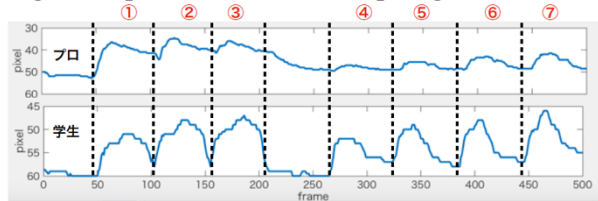


Fig. 4 Displacement of the chest

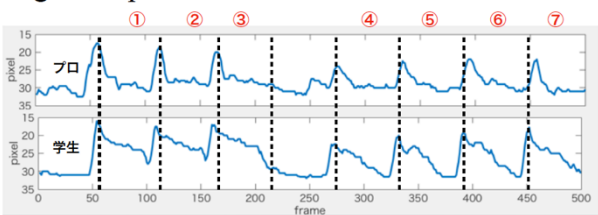


Fig. 5 Displacement of the lower abdomen

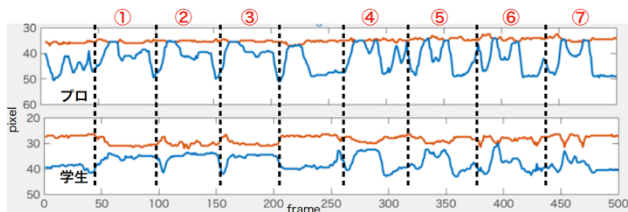


Fig. 6 Displacement of the soft palate

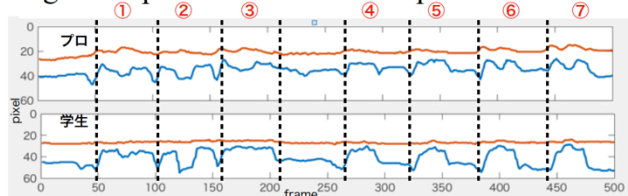


Fig. 7 Displacement of the pharynx

裕があることを示し、効率の良い発声を行っていることを示唆している。

Fig. 4 は胸部の水平方向への膨張を示し、グラフの上方が胸部の前方への変位である。吸気による横隔膜の下降から少し遅れて学生もプロも胸部は膨張した。そして、歌唱中は、学生では胸部は音高に応じて膨張・収縮するが、プロでは単調に収縮していた。これは、呼気流を学生は胸部で制御し、プロは横隔膜で制御しようとしていることを示すと考えられる。つまり、プロでは胸部を膨張させたらその状態を維持し、横隔膜で制御する呼気によって受動的に収縮させていると考えられる。

Fig. 5 は下腹部の膨張を示し、グラフの上方は下腹部の前下方への変位である。学生では吸気時に膨張した後、歌唱中に徐々に収縮した。しかしプロでは、吸気時に膨張した下

腹部は歌う直前に一旦急激に収縮し、その後ほとんど変化しなかった。これは、呼気の制御を横隔膜で行うために、胸部と同様に下腹部も受動的に収縮していると考えられる。

Fig. 6 は鼻咽腔の開閉を示し、赤線が咽頭壁、青線が軟口蓋を示す。歌唱時にはプロも学生も軟口蓋は挙上し、咽頭壁が前方にせり出して鼻咽腔を閉鎖しようとする。学生では音高と開閉に特定のパターンは見られなかったが、プロでは高音で鼻咽腔を開く傾向が見られた。

Fig. 7 は下咽頭の前後方向の幅を示しており、赤が咽頭後壁、青が舌根部を示している。学生では、咽頭後壁はほとんど変位しないが、プロでは高音で舌根部の前方への変位と同期して咽頭後壁が後方へ変位し、下咽頭を広げる傾向が見られた。

4 まとめ

プロでは歌唱時に胸部は膨張した状態、下腹部は収縮した状態、横隔膜は低い位置をできるだけ維持しながら、音高によって横隔膜の変位を細かく制御していた。すなわち、呼気流の制御を横隔膜で一元管理していると考えられる。これが、安定した呼気流を声帯に供給する「声の支え」と呼ばれる歌唱技術の一端であると考えられる。しかし、この技術にも個人差があると考えられ、今後の実験でその追及も必要である。

また、プロでは高音で鼻咽腔をやや開き、下咽頭腔を拡大していた。高音では声道共鳴と声帯振動の相互作用が大きくなるため、これらの動作は声帯振動へ何らかの影響を及ぼすと考えられるが、本研究では明らかにすることはできなかった。その影響を検討するためには声帯振動モデルなどを用いたシミュレーションが必要である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 19K12048 支援を受けた。実験に参加して頂いた歌手の皆様に感謝する。

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