

リアルタイムMRIを用いたオペラ歌唱における
声量を調節した際の身体制御*

◎戸田菜月, 竹本浩典 (千葉工大), 高橋純 (大阪芸大)

1 はじめに

オペラ歌手の歌声は豊かな響きが特徴であり[1], 優れた歌手はこの響きを保って声量を調節する。声量は第一義的には声門下圧によって制御されるため, 声量と呼気の関係が検討されてきた[1]。しかし, 呼気を生成する横隔膜や肺をどのように制御しているのかは明らかになっていない。また, 声量は呼気だけではなく, 声帯の状態[2]や声道の形状によっても変化するが[3], 歌唱中にどのようにこれらを制御しているのか明らかではない。

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, 歌唱時の体内運動を観測することが可能となった[4]。そこで本研究では, テノールとバリトンが声量を調節して歌唱した際の胸腹部と頭頸部を rtMRI で撮像してこの問題にアプローチした。胸腹部の動画からは肺圧を推定し, 頭頸部の動画からは声道形状の輪郭を抽出した。そして肺圧の変化や, 声道形状の変化が声量とどのような関係があるのか検討した。

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テノールとバリトン各1名である。実験参加者は, クレッシェンド, デクレッシェンドを含む歌唱課題を行った。Fig. 1 はテノールの歌唱課題を示す。①②と③④はそれぞれ同じ音高であり, ①③ではデクレッシェンド, ③④ではクレッシェンドを行う。なお, バリトンはテノールよりも4度低い表記とした。

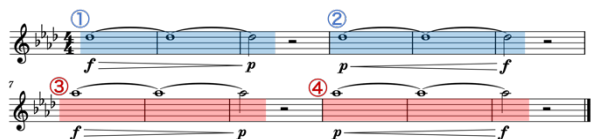


Fig. 1 歌唱課題 (テノール)

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胸腹部と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, ピクセルサイズは胸腹部では 1.22 × 1.22 mm, 頭頸部では 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。

また, 撮像の際に実験参加者の口元に光マイクを設置して音声も収録した。

2.3 音声分析

収録した音声からスペクトル減算で装置ノイズを除去した後[5], Praat [6]を用いて声量を音圧レベルとして求めた。

2.4 輪郭の抽出と分析

動画の各フレームから, 肺と声道の輪郭を抽出する抽出器を生成した[7]。これを用いて, 胸腹部の動画から肺の輪郭, 頭頸部の動画から声道の輪郭を点群データとしてそれぞれ抽出し, 点群を等間隔に再配置した[7]。肺の輪郭から矢状面における肺の面積を計算した後, 最大吸気時の肺の容積を 5000 cm³ と仮定してフレームごとに肺の容積を推定した。また, 平均声門面積を Fig. 1 の①②で示した低音部分では 0.032 cm², ③④で示した高音部分では 0.048 cm², とし肺圧を推定した[8]。一方, Fig. 1 の網掛けで示した歌唱部分における声道形状の変化の主成分分析を行った。

3 結果と考察

3.1 肺圧の変化

Fig. 2 は, バリトンの③④における声量 (音圧レベル) と推定した肺圧を示す。

上段の声量は, ③で徐々に小さくなり, ④で徐々に大きくなった。これは, 実験参加者は指示通りクレッシェンド・デクレッシェンドを行っていたことを示す。

* Examination of the body control for changing voice volume in operatic singing using real-time MRI, by TODA, Natsuki, TAKEMOTO, Hironori (Chiba Institute of Technology) and TAKAHASHI, Jun (Osaka University of Arts).

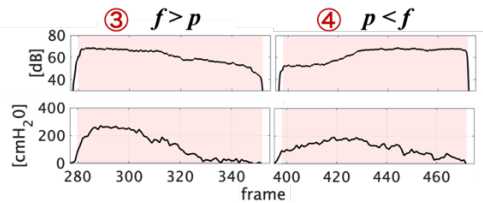


Fig. 2 バリトンの③④における音圧レベルで示した声量（上段），肺圧（下段）

下段の推定した肺圧の変化は，③のデクレッシェンドでは声量の変化パターンと一致したが，④のクレッシェンドでは一致しなかった。すなわち，デクレッシェンドでは声量の減少にともなって肺圧も下降したが，クレッシェンドでは声量の増加にともなって肺圧は上昇しなかった。よって，発声中の声門面積が一定と仮定した場合，必ずしも肺圧で声量を制御しているとは言えない。

3.2 声道形状の主成分分析結果

Fig. 3 はバリトンにおける声道形状の第 1, 2 主成分 (PC1, PC2) 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・最小値による形状を示す。そして Fig. 4 は Fig. 3 の主成分スコアの変動で，黒の縦線は待機区間を示す。

PC1 は口の開きや頸椎の後弯の度合いなどに関する動きであった。先行研究では，これらは音高の制御と関係していた[7]。本研究でも，PC1 は①②ではスコアが低く，③④では高いことから，主に音高の変化に関する制御であり，これはテノールでも同様であった。

PC2 は主に喉頭の上下動であった。そのスコアは①③のデクレッシェンドで増加し，②④のクレッシェンドで減少する傾向があることから，声量に関する制御であることを示唆する。これはテノールでも同様であった。

喉頭の上下動と声量の関係について考察する。PC2 のスコアは，声量が減少するとき喉頭が上昇し，増加するとき下降することを示す。PC2 は主に喉頭の上下動であるが，披裂軟骨の内転の度合いと連動している可能性がある。披裂軟骨の内転の度合いが大きくなれば声帯を閉じる力が大きくなって声量が増加し，小さくなれば声量が減少する[9]。もし，喉頭の上昇にともなって内転の度合いが小さくなれば声量が減少し，下降にともなって内転の度合いが大きくなれば声量が増加して観測結果と一致する。しかし本研究では，正中

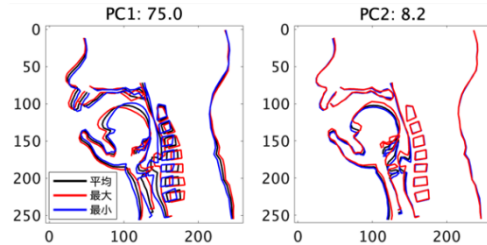


Fig. 3 バリトンにおけるデクレッシェンド・クレッシェンド時の声道形状の PC1 と PC2

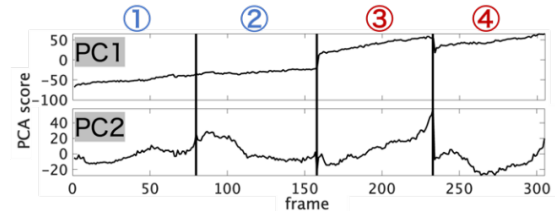


Fig. 4 PC1, PC2 のスコア

矢状断面で動画を撮像しているため，内転の度合いを検査することはできなかった。

4 まとめ

本研究では，オペラ歌手が声量を調節した際の身体制御について検討した。その結果，声量は必ずしも肺圧で制御しているとは言えなかった。しかしこれは，発声中に声門の平均面積が一定と仮定したためである可能性がある。その一方で，声量にともなって喉頭が上下動する傾向が見られた。もし，この上下動が披裂軟骨の内転の度合いと連動していると仮定すれば声量の増減を説明できる。よって，喉頭の上下動と披裂軟骨の内転の連動について追及する必要がある。

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, *THE SCIENCE OF THE SINGING VOICE*, Northern Illinois University Press, 1987.
- [2] 榊原健一，日本音響学会誌，71 (2), 73–79, 2015.
- [3] Tom *et al.*, *JASA*, 109 (2), 742–747, 2001.
- [4] Takemoto *et al.*, *Proc. Interspeech*, 2019, 904–908, 2019.
- [5] 丹治ら，音講論（春），749–750, 2021.
- [6] Boersma and Weenink, “Praat: doing phonetics by computer (Version 6.1.48),” <https://www.fon.hum.uva.nl/praat/> (2021).
- [7] 戸田ら，音講論（秋），821–822, 2021.
- [8] 戸田ら，音講論（春），825–826, 2022.
- [9] 齊田晴仁，*声の科学*，音楽之友社，2016.