

## 研究速報

## リアルタイム MRI を用いたオペラ歌唱における呼気の制御に関する研究\*

戸田 菜月\*<sup>1</sup> 工藤理佐子\*<sup>2</sup> 竹本浩典\*<sup>2</sup> 高橋 純\*<sup>3</sup>

キーワード オペラ歌唱, リアルタイム MRI, 横隔膜, 肺, カイモグラフ

Opera singing, real-time MRI, Diaphragm, Lung, Kymograph

## 1. はじめに

クラシック音楽における優れたオペラ歌手は、オーケストラを伴った舞台上、拡声機器を使わなくても豊かな声量の歌声を響かせることが可能である。従来、その要因として歌唱フォルマント (Singer's Formant) やフォルマント同調 (Formant Tuning) [1] などの歌唱技術が検討されてきた。しかし、第一義的には声量は呼気によって制御される。そして、呼気は主に横隔膜の挙上による肺の容積の減少によって生成されているので、歌手は歌声の高低・強弱に応じて横隔膜の変位を空間的・時間的に高い精度で制御していると考えられる [2, 3]。しかし、横隔膜は直接観測できないため、その制御については明らかになっていない。

近年、磁気共鳴画像法 (MRI: Magnetic Resonance Imaging) を用いて体内運動を任意の断面でリアルタイムの動画として撮像するリアルタイム MRI (rtMRI) の技術が発展した。その結果、rtMRI によって連続した発話や歌唱中の声道形状や横隔膜の運動、肺の形状変化などの体内運動を観測することが可能となった [4-7]。そこでわれわれは、歌唱中の胸腹部を rtMRI で撮像し、横隔膜の上下方向の変位をカイモグラフによって分析した [8-10]。カイモグラフとは、着目している組織のある線上における時間変位を示すもので [11]、これらの研究では横隔膜の前後方向における中央部分に着目し、この部分の上下方向の変位の時間変化を分析した。その結果、プロの歌手が非声楽的な歌唱を模

擬すると、横隔膜の変位幅が小さくなるが、声楽を学ぶ学生ではそのような変化が見られないことなどが明らかになった [10]。

しかし、呼気流の生成には横隔膜の挙上だけでなく、内肋間筋による胸部の収縮も関与していると考えられる。そして、それぞれが呼気流の生成にどの程度関与しているか明らかでなく、またその個人差についても明らかになっていない。これらは肺の断面形状の分析を行うことによって明らかになると思われる。

そこで、3 人のプロのオペラ歌手が歌唱中の胸腹部を rtMRI で撮像し、その全フレームから肺の輪郭を抽出して分析した。まず、肺の形状変化を主成分分析し、横隔膜や内肋間筋などの作用や個人差などを検討した。次に、音高変化に伴う呼気の制御について検討した。最後に、横隔膜の上下の変位と肺の断面積の変化の相関について検討した。本稿では、これらの検討結果について報告する。

## 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 3 名で、テノール、バリトン、ソプラノ各 1 名である。図-1 は七つの小課題で構成される歌唱課題を示す。音高の変化は完全 5 度跳躍進行 (①~③) と 1 オクターブの跳躍進行 (④~⑦) 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。また、バリトンは図-1 より短 3 度低い表記の歌唱課題とした。

## 2.2 rtMRI 撮像

撮像は ATR-Promotions に設置されている装置 (Siemens MAGNETOM Prisma fit 3T) を用いた。実験参加者は MRI 装置内で仰臥して歌唱課題を行い、

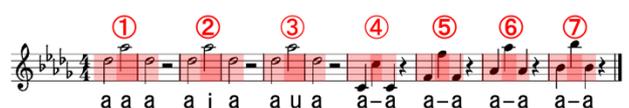


図-1 音高と母音の変化を含む歌唱課題

\* Examination of exhalation control in opera singing using real-time MRI, by Natsuki Toda, Risako Kudo, Hironori Takemoto and Jun Takahashi.

<sup>1</sup> 千葉工業大学大学院先進工学研究科

<sup>2</sup> 千葉工業大学先進工学部

<sup>3</sup> 大阪芸術大学短期大学部

(問合先: 戸田菜月 e-mail: S17C3087MT@s.chibakoudai.jp, 竹本浩典 e-mail: hironori.takemoto@p.chibakoudai.jp)

(2022年4月15日受付, 2022年6月28日採録決定)

[doi:10.20697/jasj.78.11.646]

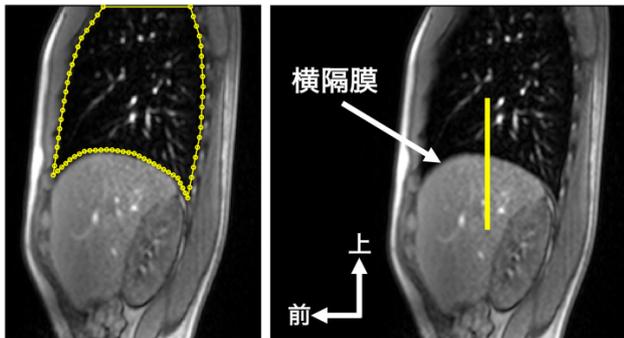


図-2 肺の輪郭 (左), カイモグラフの位置 (右)

その間 10 フレーム毎秒の速度で約 50 秒間の動画 (500 フレーム) を撮像した。なお、スライス厚は 10 mm, ピクセルサイズは 1.2×1.2 mm とした。

### 2.3 分 析

図-2 左は抽出した肺の輪郭である。まず、500 フレームから 12 フレームを選択し、肺の輪郭を点群としてトレースした。次に、これらを教師データとして学習器を生成し、全フレームから横隔膜と肺の輪郭を点群として自動抽出した [7]。そして、横隔膜の前端と後端をランドマークとし、横隔膜と肺の輪郭を表す点数を歌手ごとに一定とし、等間隔な点群となるように全フレームで再配置してセミランドマークとした。なお、テノールの肺の上部は視野外にある (切れている) が、肺の前上端と後上端は全フレームで上下動がなく解剖学的に相同な位置であったため、ランドマークとして用いた。これにより、フレーム間で各点を対応させる分析が可能になり、セミランドマーク法により肺の形状変化を主成分分析した。

図-2 右は胸腹部の右側矢状断面である。上下方向の線分は歌唱に伴う横隔膜の変位を分析した基準線である。動画のフレームごとに基準線の上端から横隔膜までの距離をピクセル単位で計測してカイモグラフを得た。なお、基準線の位置や角度が多少変化してもカイモグラフの変動パターンは同一であった [9]。

## 3. 結果と考察

### 3.1 肺の形状の主成分分析結果

図-3 は、矢状断面における肺の形状変化の第 1, 第 2 主成分 (PC1, PC2) とその寄与率である。実線は平均形状, 破線・点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。PC1 はテノールでは横隔膜と胸部全体の膨張・収縮, バリトンでは横隔膜の上下動のみ, ソプラノでは横隔膜の背側を中心とした大きな上下動と胸部の小さな膨張・収縮であった。つまり, PC1 は横隔膜の上下動が主で, 内・外肋間筋による胸部の収縮・膨張は, テノールでは大きいがソ

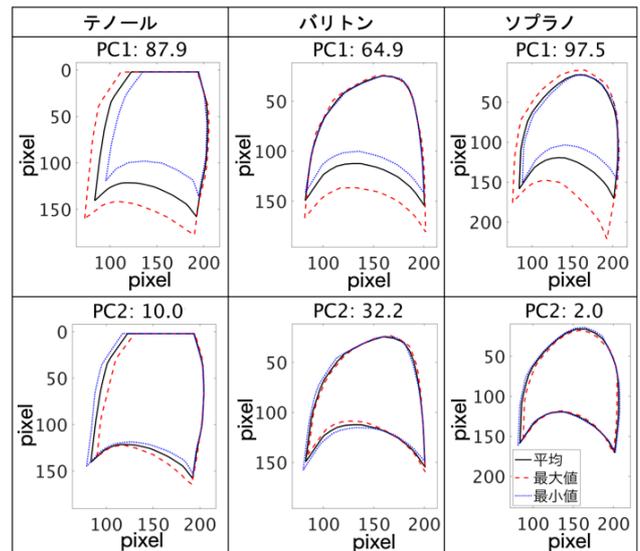


図-3 肺の形状の主成分分析

ラノでは小さく, バリトンではほとんど見られなかった。また, PC1 の寄与率も 3 名の実験参加者で差が大きく, テノールでは 87.9%, バリトンでは 64.9%, ソプラノでは 97.5%であった。PC2 はテノールでは横隔膜の背側の下降・上昇と胸部の収縮・膨張, バリトンでは横隔膜の腹側の下降・上昇と胸部の小さな膨張・収縮, ソプラノでは胸部の小さな収縮・膨張であった。つまり, PC2 はすべての歌手で内・外肋間筋による胸部の小さな収縮・膨張は共通していたが, テノールとバリトンでは横隔膜の部分的な小さな上下動も見られた。

図-4~6 はそれぞれテノール, バリトン, ソプラノの主成分スコアの時間変動を表す。①~⑦は図-1 の各小課題を表し, 網掛けは実際に歌唱中の区間で, やや濃い網掛けは小課題における最高音の区間である。なお, 網がかかっていない区間は吸気または待機である。PC1 のスコアはすべての歌手で発声直前の吸気時と思われるタイミングで増加し, 発声時に減少した。一方, PC2 のスコアはすべての歌手で吸気時または待機時に増加したが, 発声時には必ずしも減少しなかった。これらより, PC1 は吸気と呼気 (発声) に伴う肺の主要な形状変化を表し, PC2 は吸気や音高変化などに伴う形状変化を表していると考えられる。

高音から低音へ移行する際, PC1, PC2 のスコアがともに増加する傾向がみられた。これは特にテノールとバリトンで顕著で, PC2 のスコアが大きく増加した。主成分スコアではなく, 実際の形状変化も検討するために, テノールとバリトンにおいては⑦, ソプラノにおいては⑥の高音と低音の区間の中央における肺の形状をトレースして比較した (図-7)。すべての歌手で, 高音から低音への移行時に胸部の形状はほとんど変化せず, 横隔膜の背側がわずかに下降した。歌手の内観

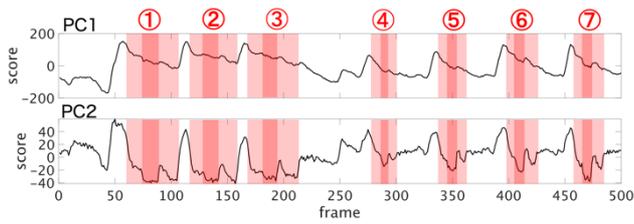


図-4 テノールの主成分分析のスコア

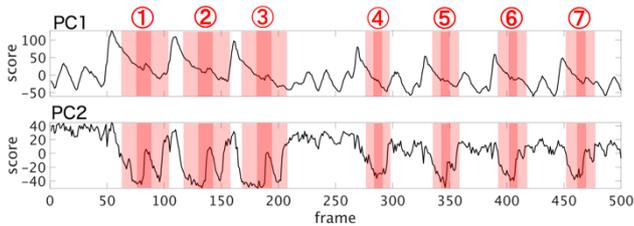


図-5 バリトンの主成分分析のスコア

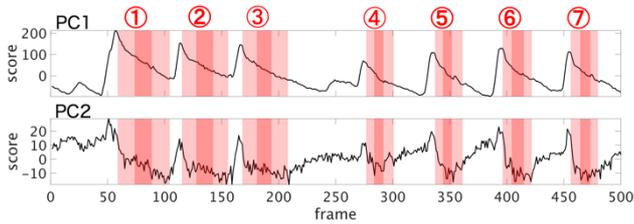


図-6 ソプラノの主成分分析のスコア

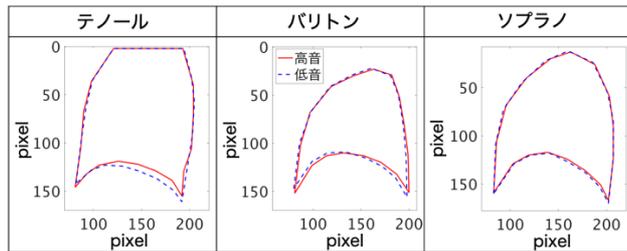


図-7 高音から低音への移行時の肺の形状変化

報告によれば、高音から低音への移行時には「支え直す」技術を用いたとのことであった。これより、高音から低音への移行時にみられる横隔膜背側の下降は、「支え直す」技術と対応すると考えられる。

### 3.2 肺の断面積の時間変化

「支え直す」技術を詳細に検討するため、肺の断面積の時間変化を検討した。図-8 は、上段からテノール、バリトン、ソプラノの矢状断面における肺の断面積の時間変化である。すべての歌手で高音から低音への移行時に肺の断面積が増加する傾向があった。この傾向はテノールでは顕著だがバリトンではテノールほど顕著ではなかった。また、ソプラノでは断面積の増加は5度跳躍の①～③では見られなかったが、1オクターブの跳躍進行の④～⑦ではわずかに見られた。一般に、歌唱中は呼吸で声帯を振動させるため、肺の体積は単調減少すると考えられる。そのため、高音から低音へ

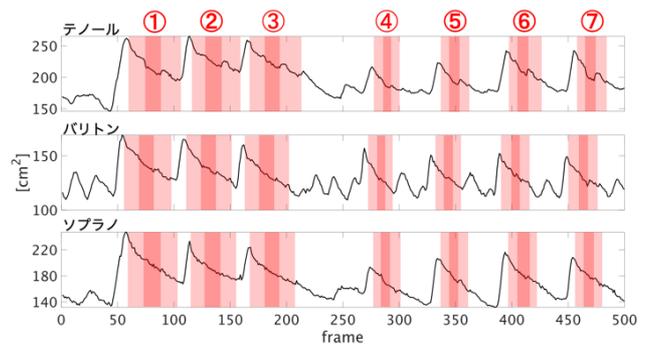


図-8 矢状断面における肺の断面積の時間変化

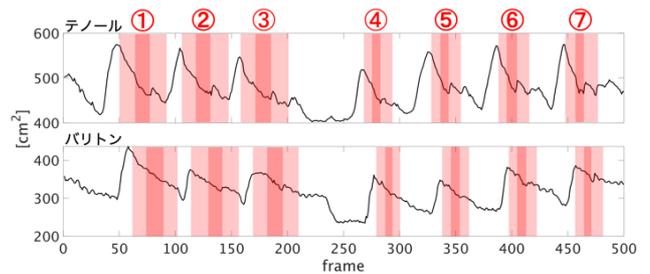


図-9 冠状断面における肺の断面積の時間変化

の移行時に矢状断面における肺の面積が一時的に増加したとしても、肺が左右方向には収縮し、結果として肺の体積は単調減少する可能性がある。

そこで、テノールとバリトンが同じ歌唱課題を行っている際の肺の冠状断面における rtMRI 動画を撮像し、肺の断面積の時間変化を抽出した(図-9)。テノールもバリトンも、高音から低音への移行時に矢状断面と同様に断面積が増加した。そしてその傾向は、テノールの方がより顕著であった。ソプラノでは冠状断面における肺の断面積変化を計測していないため確定的ではないが、これらの結果は、高音から低音への移行時に、肺の体積が一時的に増加していることを示している。そして、この肺の体積の増加は、横隔膜の背側を下降させることによって生じている(図-7)と考えられる。

### 3.3 カイモグラフと肺の断面積の比較

肺の断面積の時間変化の計測には大きな労力が必要なため、横隔膜の上下方向の変位パターンから推定することは可能か検討した。図-10 はテノール、バリトン、ソプラノの矢状断面における肺の断面積の時間変化と横隔膜の上下方向の変位の時間変化を比較した図である。二つのグラフの変化パターンは、どの実験参加者でもよく一致していた。また、両者の相関係数は、テノールで0.96、バリトンで0.98、ソプラノで0.99であり、肺の断面積変化は横隔膜の上下動と高い相関がみられた。この結果から、肺の面積の時間変化は横隔膜の上下方向の変位の時間変化から推定可能であると言える。

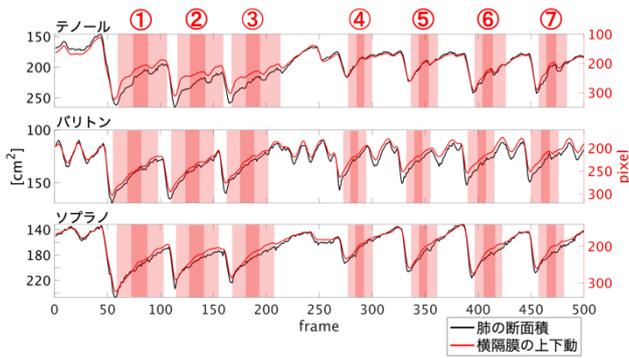


図-10 矢状断面における肺の断面積の変化と横隔膜の上下方向の変位

また、この結果は、主成分分析の結果と同様に、肺の容積変化は主に横隔膜の変位によって生じており、内・外肋間筋の寄与が小さいことを示している。

#### 4. ま と め

本研究では、テノール、バリトン、ソプラノの5度・1オクターブ跳躍進行時における矢状断面のrtMRI動画から肺の輪郭を抽出し、その形状変化を分析した。

まず、主成分分析の結果から、PC1は主に横隔膜の上下動による肺の膨張・収縮であったが、内・外肋間筋による胸部の収縮・膨張の程度には個人差があることが明らかになった。一方、PC2は胸部の小さな収縮・膨張であり、横隔膜の部分的な上下動も含まれていたが個人差が大きかった。また、ソプラノではPC1の寄与率が97%を超えており、歌唱に伴う肺の形状変化は非常に単純化されていると言える。一方、テノールとバリトンでは相対的にPC2以降の寄与率が高く、肺の形状変化はソプラノより複雑であると言える。これは声種による差なのか、個人差なのか、歌唱法による差なのか、明らかにすることはできなかった。

次に、高音から低音への移行時に、すべての歌手で横隔膜の背側を下降させて肺の体積を一時的に増加させていることが明らかになった。歌手による内観報告から、これは「支え直す」技術と関係していると考えられる。肺の体積が一時的に増加する場合、空気を非圧縮性流体と仮定すると吸気が生じることになる。しかし、実際には歌唱中であることから、肺の体積が増加しても吸気は至らない程度の肺圧の低下であると推測できる。しかし、その妥当性を検討するためには空気を圧縮性流体としてシミュレーションする必要がある。

更に、カイモグラフで計測した横隔膜の上下方向の変位の時間変化と、矢状断面における肺の面積の時間

変化は高い相関があることが明らかになった。これにより、肺の輪郭のトレースなどを行わなくても、横隔膜の上下方向の変位パターンから肺の面積の時間変化を推定できる。また、肺の容積は断面積の3/2乗に比例すると考えられるので、容積の時間変化から肺圧や呼気流量などを推定することも可能である。その過程で、空気の圧縮性を考慮すれば、「支え直す」技術の解明が期待できる。

#### 謝 辞

本研究はJSPS科研費19K12048の支援を受けた。また、実験に参加していただいたすべての方々へ感謝する。

#### 文 献

- [1] J. Sundberg, *The Science of the Singing Voice*, (Northern Illinois University Press, DeKalb, IL, 1987).
- [2] J. Sundberg, "Research on the singing voice in retrospect," *TMH-QPSR*, 45, 011-022 (2003).
- [3] 藤井文子, "歌唱における呼吸についての研究," 島根大学教育学部紀要, 6, 97-108 (1972).
- [4] O. Engwall, "A revisit to the application of MRI to the analysis of speech production-testing our assumptions," *Proc. 6th Int. Semin. Speech Production*, Sydney (2003).
- [5] S. Narayanan, K. Nayak, S. Lee, A. Sethy and D. Byrd, "An approach to real-time magnetic resonance imaging for speech production," *J. Acoust. Soc. Am.*, 155, 1771-1776 (2004).
- [6] M. Echternach, P. Birkholz, L. Traser, T. V. Flüge, R. Kamberger, F. Burk, M. Burdumy and B. Richter, "Articulation and vocal tract acoustics at soprano subject's high fundamental frequencies," *J. Acoust. Soc. Am.*, 137, 2586-2595 (2015).
- [7] H. Takemoto, T. Goto, Y. Hagihara, S. Hamanaka, T. Kitamura, Y. Nota and K. Maekawa, "Speech organ contour extraction using real-time MRI and machine learning method," *Proc. Interspeech 2019*, pp.904-908 (2019).
- [8] E. Haneishi, R. Oribe, H. Takemoto, H. Kawahara, K. Honda, T. Saitou, K. Hagiwara and H. Kishimoto, "Attempts of visualization of singing techniques: MRI motion imaging of diaphragm activities and acoustic features during singing," *Proc. Voice Foundation 2014*, p.22 (2014).
- [9] 高橋 純, 竹本浩典, 榎原健一, "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," 音講論集, pp.773-774 (2020.3).
- [10] 戸田菜月, 工藤理佐子, 竹本浩典, 高橋 純, "オペラ歌手が非声楽的な発声を模擬したときの横隔膜などの制御," 音講論集, pp.677-678 (2020.9).
- [11] M. J. Hirayama and S. Takano, "Kymograph of continuous MRI Images for analyzing speech articulations," *Proc. SPIE 11049, Int. Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT) 2019*, 110491X (2019).