

リアルタイム MRI 動画を用いた オペラ歌唱における「支え直す」技術の検討

戸田 菜月[†] 竹本 浩典[†] 高橋 純[‡] 足立 整治^{††}

[†] 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

[‡] 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

^{††} 帝塚山大学全学教育開発センター 〒631-8501 奈良県奈良市帝塚山 7-1-1

E-mail: [†] s17c3087mt@s.chibakoudai.jp, [†] hironori.takemoto@p.chibakoudai.jp

[‡] jun_takahashi@osaka-geidai.ac.jp, ^{††} sadachi@tezukayama-u.ac.jp

あらまし オペラ歌唱の豊かな声量は、横隔膜などの制御を高度化することで獲得されると思われる。しかし、実際にどのような制御が行われているか明らかではない。オペラ歌手によれば、高音から低音へ急激に移行する際に横隔膜による「支え直す」技術を用いるとのことである。本研究ではこの「支え直す」技術を検討するために、リアルタイム MRI を用いて歌唱中の横隔膜や肺の動きを分析した。その結果、高音から低音への移行時に横隔膜は一時的に下降し、肺の容積は増大した。空気を圧縮性流体として肺圧を検討したところ、この横隔膜の下降は、低音に必要な低い肺圧を得るために急激に肺圧を低下させる動作であることが明らかになった。

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

1. はじめに

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ホールに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) [1] やフォルマント同調 (Formant Tuning) [2] などの声道共鳴を制御する技術が検討されてきた。しかし、声量は第一義的に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 [3, 4]。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。また、呼気流の生成には横隔膜だけではなく、内肋間筋による胸部の収縮も関与しているが [1]、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になっておらず、またその個人差についても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における実時間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 によって発話中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 [5-9]。

そこで本研究では、rtMRI を用いてオペラ歌唱における横隔膜による「支え直す」技術を検討する。オペラ歌手によれば、「支え直す」技術は高音から低音へ移行する際に用いられる横隔膜を制御する歌唱技術であるが、その運動動態や機能は知られていない。そこで

まず、オペラ歌手が音高の上下動を含む歌唱課題を行っている際の胸腹部を rtMRI で撮像した。次に、横隔膜の上下方向の変位をカイモグラフ [10] で分析し、高音から低音に移行する際の横隔膜の上下動を検討した。そして、rtMRI 動画の全フレームから肺の輪郭を抽出し、肺の形状変化の主成分分析を行うことで、横隔膜や内肋間筋などの作用や個人差などを検討した。さらに、矢状断面と冠状断面における動画の全フレームから肺の断面積を計算し、高音から低音へ移行する際の変化を検討した。最後に、断面積から肺の容積を推定し、空気を圧縮性流体として肺圧の変化を推定して「支え直す」技術の物理的な意味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 2 名で、テノール、バリトン各 1 名である。図-1 は 7 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。

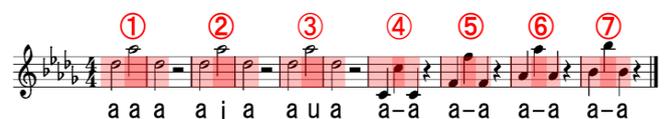


図-1 音高と母音の変化を含む歌唱課題

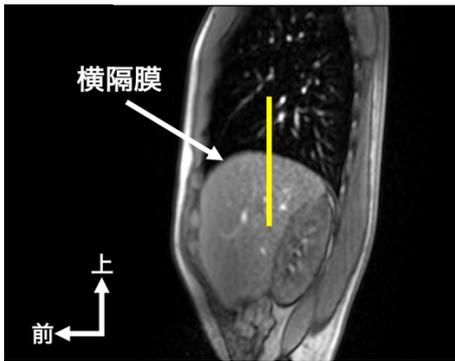


図-2 胸腹部におけるカイモグラフの位置

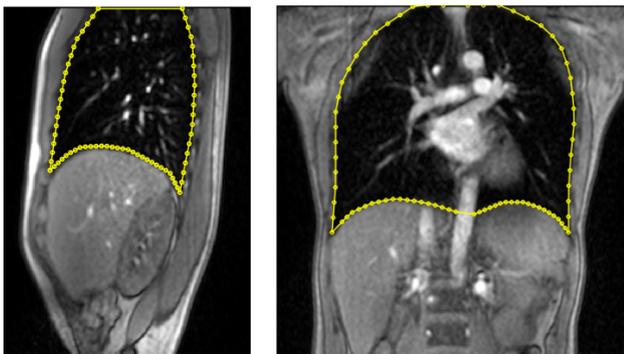


図-3 矢状断面 (左) と冠状断面 (右) における肺の輪郭

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 装置内で仰臥して図-1 の歌唱課題を 2 回行った。1 回目の撮像では、右肺の左右方向の中央で胸腹部の矢状断面の動画を撮像した。2 回目の撮像では、肺の前後方向の中央で胸腹部の冠状断面の動画を撮像した。いずれの撮像も、10 フレーム毎秒の速度で約 50 秒間 (500 フレーム) 行い、スライス厚は 10 mm、ピクセルサイズは 1.2×1.2 mm とした。なお、撮像中の音声は、口元に設置した光マイクロホンで録音した。

2.3. 分析

図-2 は胸腹部の右側矢状断面で、横隔膜は肺と肝臓の境界に位置する。上下方向の線分は、歌唱に伴う横隔膜の変位をカイモグラフで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[11]。

図-3 左は矢状断面、右は冠状断面における機械学習で抽出した肺の輪郭である。矢状断面においてはまず、

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機を生成し、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[9]。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。冠状断面においても同様の手法で輪郭抽出を行った。

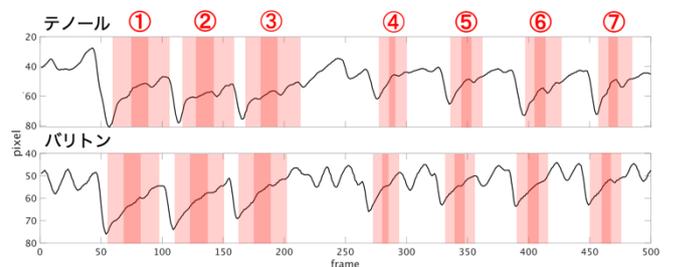


図-4 横隔膜の上下動

3. 結果と考察

3.1. カイモグラフによる分析

図-4 はテノールとバリトンの横隔膜の上下動を示す。①～⑦は図-1 の各小課題を示し、網掛けは撮像中に録音した音声を参照して決定した歌唱中の区間である。やや濃い網掛けは小課題における最高音の区間で、網がかかっていない区間は吸気または待機である。横隔膜は歌唱直前の吸気で下降し、歌唱による呼気で上昇した。テノール、バリトン共に、音高によって横隔膜の上下動のパターンは異なっていたが、「支え直す」技術が用いられる高音から低音への移行時には一時的に横隔膜が下降した。

3.2. 肺の形状の主成分分析結果

図-5 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収縮・膨張、バリトンでは横隔膜の上下動のみであった。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 の寄与率も個人差が大きく、テノー

ルでは 87.9%，バリトンでは 64.9%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収縮・膨張であった．つまり PC2 はテノールもバリトンも共通して，内・外肋間筋による胸部の小さな収縮・膨張であり，横隔膜の部分的な小さな上下動も見られた．

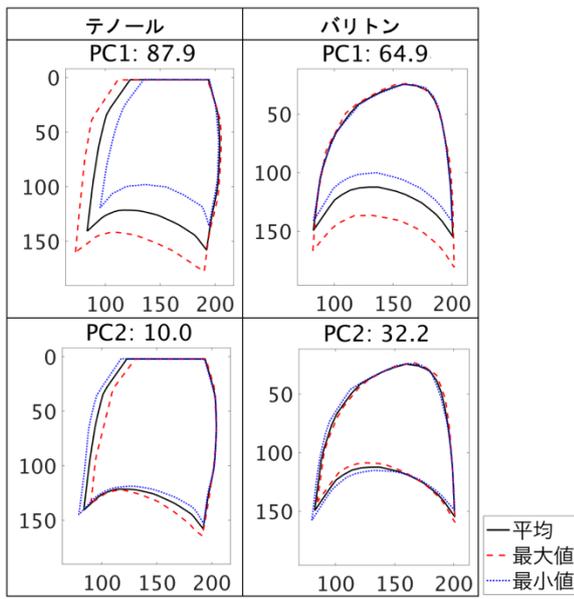


図-5 肺の形状の主成分分析

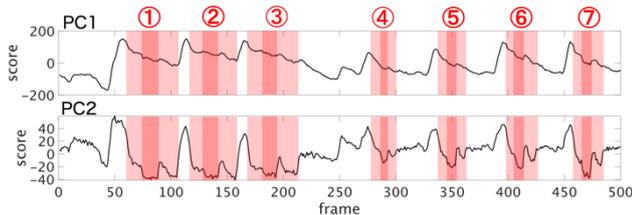


図-6 テノールの主成分分析スコア

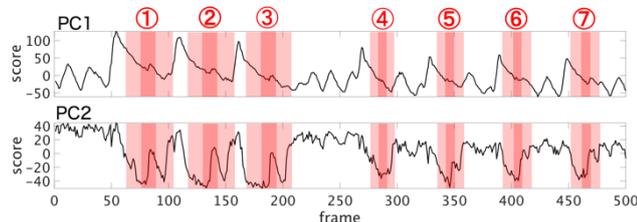


図-7 バリトンの主成分分析スコア

図-6・7はそれぞれテノール，バリトンの主成分スコアの時間変動を示す．テノール，バリトン共に，PC1 のスコアは発声直前の吸気時に増加し，発声時に減少した．一方，PC2 のスコアは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，特に PC2 では大きく増加した．図-8 は⑦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重ねたものである．テノール，バリトン共に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．実験参加者の内観報告によると，このとき「支え直す」技術を用いたとのことであり，この動作が「支え直す」技術を表していると考えられる．

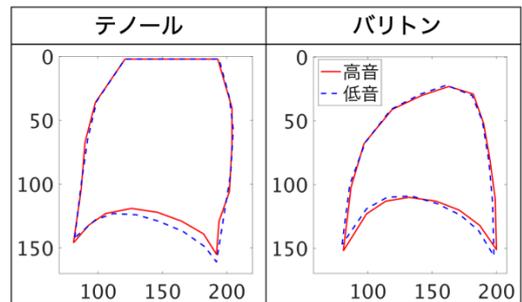


図-8 高音から低音への移行時の肺の形状変化

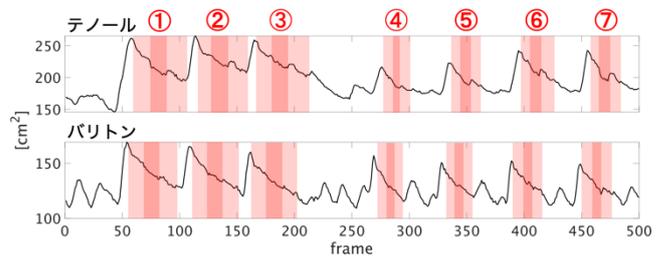


図-9 矢状断面における肺の断面積の時間変化

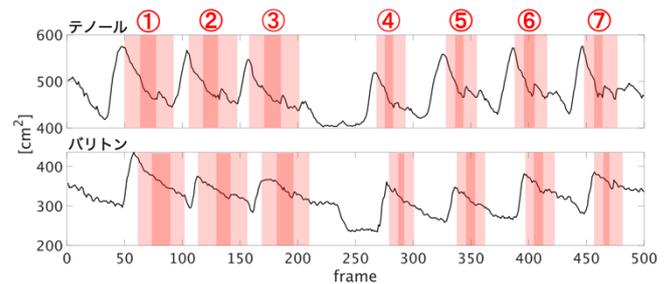


図-10 冠状断面における肺の断面積の時間変化

3.3. 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-9 は，テノールとバリトンの矢状断面における肺の断面積の時間変化である．テノール，バリトン共に，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が，バリトンでは

テノールほど顕著ではなかった．一般に，歌唱中は呼気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．したがって，高音から低音へ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している可能性がある．

図-10 はテノールとバリトンが同じ歌唱課題を行っている際の冠状断面における肺の断面積の時間変化である．矢状断面と同様に，テノールもバリトンも高音から低音への移行時に断面積が増加し，その傾向はテノールで顕著であった．これらの結果は，高音から低音への移行時に，横隔膜を下降させることによって肺の体積が一時的に増加したことを示している．そしてこの肺の体積の増加は，主に横隔膜の背側を下降させることによって生じた（図-8）と考えられる．

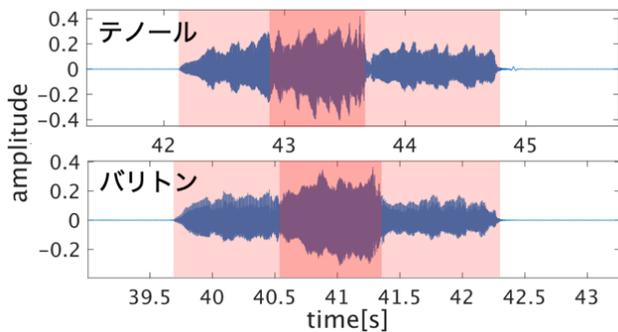


図-11 ⑥における音声波形

3.4. 音声波形の分析

肺の断面積が増大した際の音声波形の変化を分析した．撮像時に録音した音声には大きな装置ノイズが含まれるため，分析には撮像後に静穏な部屋で録音した音声も用いた．図-11 は⑥の小課題における音声波形である．実験参加者の内観報告によれば，高音から低音への移行時には，音が途切れないう滑らかに移行したとのことであったが，テノールでは音声波形の振幅は一時的に非常に小さくなった．これは⑥だけでなく，④から⑦の全ての小課題で共通して見られた．バリトンでは，テノールほど顕著ではなかったが，同様の現象がみられた．これは，高音を歌唱するときには高い肺圧を必要とし，低音を歌唱する際には低い肺圧が必要とされていること[12]を裏付けていると考えられる．

3.5. 肺圧の推定

音声波形の分析結果を踏まえ，肺の断面積変化から肺圧を推定した．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．しかし，実際には歌唱中であることから，肺の体積が増加

しても吸気には至らない程度の肺圧の低下であると推測できる．そこで，空気を圧縮性流体として肺圧を推定する．まず，肺の容積は矢状断面積の 3/2 乗に比例し，最大吸気時の肺の容積は 5000 cm³ と仮定する．これらの仮定から，歌唱中の肺の容積の変化をフレームレートの 0.1 秒間隔で推定できる．次に，吸気から呼気に移行する直前の肺圧が大気圧と等しいとする．そして，肺の容積変化により肺圧が変化し，その後の 0.1 秒間に発声による呼気流で減圧するとする．つまり，あるフレームに移行した瞬間に容積変化により圧力が変化（断熱圧縮）し，その後の 0.1 秒間に肺の容積は一定で発声により減圧する過程が繰り返されるとする．このとき，単位時間に流出する空気の質量 \dot{m} は以下の式で表される[13]．

$$\dot{m} = \frac{Ap}{\sqrt{RT}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left\{ \left(\frac{p_a}{p} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_a}{p} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}} \quad [\text{kg/s}]. \quad (1)$$

ここで A は平均の声門の面積で 0.032 cm²， p は肺圧， R は空気の気体定数で 287.1 J/(kgK)， T は空気の温度で 310 K， γ は空気の比熱比で 1.4， p_a は大気圧で 100 kPa とした．

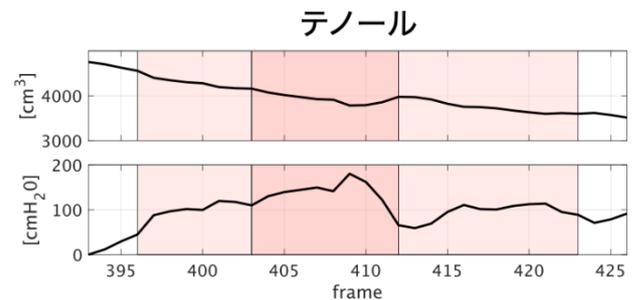


図-12 テノールの⑥における肺の容積(上)と肺圧(下)

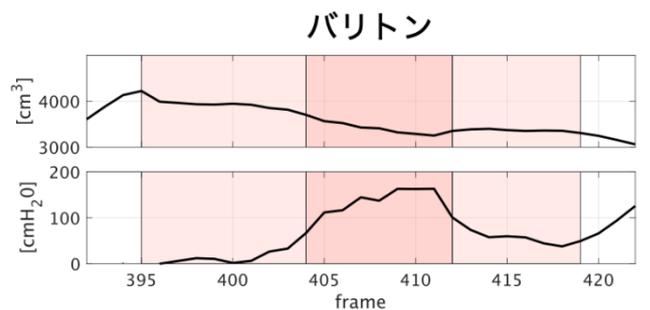


図-13 バリトンの⑥における肺の容積(上)と肺圧(下)

図-12・13 はそれぞれテノール，バリトンの⑥の小課題における肺の容積変化と，容積変化から肺圧（大気圧との差圧）を推定した結果である．高音から低音に移行したフレーム近傍で肺の容積は一時的に増加し，

肺圧が減少して0に近くなったが、その後再び肺の容積は減少して肺圧はテノールでは僅かに上昇し、バリトンでは一定に保っていた。これは音声波形の変動パターンと一致した。よって、推定した肺圧の変化は妥当であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、テノールとバリトンが5度・1オクターブ跳躍進行を含む歌唱課題を行っている際の胸腹部をrtMRIで撮像し、高音から低音に移行する際に用いられる「支え直す」技術に着目して横隔膜の上下動や肺の断面形状の変化を検討した。

まず、横隔膜の上下方向の変位をカイモグラフで分析した。その結果、音高によって横隔膜の上下動のパターンは異なっていたが、「支え直す」技術が用いられる高音から低音への移行時には一時的に横隔膜が下降する点で共通してした。

次に、右肺の矢状断面の輪郭をすべての動画フレームから抽出し、形状変動の主成分分析を行った。PC1は主に横隔膜の上下動による肺の収縮・膨張で、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・膨張と横隔膜の部分的な小さな上下動であった。各主成分の寄与率は個人差が大きく、これは声種による差なのか、個人差なのか、明らかにすることはできなかった。また、スコアの時間変動を分析した結果、高音から低音へ移行する際にスコアが増大し、特にPC2では顕著に増大した。このとき、テノール、バリトン共に、胸部の形状はほとんど変化せず、横隔膜の背側が僅かに下降した。この動きが「支え直す」技術と対応する動作であると考えられる。また、この横隔膜の下降は矢状断面だけでなく、冠状断面でも肺の断面積を一時的に増加させていた。すなわち、テノールでもバリトンでも、高音から低音への移行時に肺の容積を一時的に増加させていた。

最後に、音声波形の分析と肺の容積変化から肺圧を推定した。実験参加者の内観報告によると、高音から低音へ移行する際、音が途切れないように滑らかに移行したとのことであったが、音声波形の振幅は一時的に非常に小さくなった。そして肺の断面積の変化から空気を圧縮性流体として肺圧の変化を推定したところ、一時的な肺の容積の増大は、吸気を起こすほどではないが、肺圧を大きく減少させることが明らかとなった。

これらのことから、「支え直す」技術とは、高い肺圧が必要な高音から低い肺圧が必要な低音へ急激に移行する際に、一時的に横隔膜を下降させて肺の容積を増加させることにより肺圧を下げた後、再び肺圧を上げ直す、または保つ技術であると結論できる。

謝 辞

本研究はJSPS 科研費 19K12048 の支援を受けた。また、実験に参加して頂いた全ての方々に感謝する。

文 献

- [1] J. Sundberg, *THE SCIENCE OF THE SINGING VOICE*, Northern Illinois University Press, State of Illinois, 1987.
- [2] 竹本浩典, "声楽家の声道形状制御," 日本音響学会誌, 70 巻, 9 号, pp.506-511, Sep.2014.
- [3] J. Sundberg, "Research on the singing voice in retrospect," *TMH-QPSR*, vol.45, no.1, pp.011-022, Jan.2003.
- [4] 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, 第 6 巻, pp.97-108, Dec.1972.
- [5] O. Engwall, "A Revisit to the Application of MRI to the Analysis of Speech Production-Testing our assumptions," *Proceedings of the Sixth International Seminar on Speech Production*, Sydney, Australia, December 7 to 10, 2003.
- [6] S. Narayanan, K. Nayak, S. Lee, A. Sethy and D. Byrd, "An approach to real-time magnetic resonance imaging for speech production," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol.155, no.4, pp.1771-1776, Apr.2004.
- [7] S. Narayanan, A. Toutios, V. Ramanarayanan, A. Lammert, J. Kim, S. Lee, K. Nayak, Y. Kim, Y. Zhu, L. Goldstein, D. Byrd, E. Bresch, P. Ghosh, A. Katsamanis and M. Proctor, "Real-time magnetic resonance imaging and electromagnetic articulography database for speech production research(TC)," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol.136, no.3, pp.1307-1311, Sep.2014.
- [8] M. Echternach, P. Birkholz, L. Traser, T. V. Flügge, R. Kamberger, F. Burk, M. Burdumy and B. Richter, "Articulation and vocal tract acoustics at soprano subject's high fundamental frequencies," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol.137, no.5, pp.2586-2595, Mar.2015.
- [9] 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, Graz, Austria, Sep.2019.
- [10] M. J. Hirayama and S. Takano, "Kymograph of continuous MRI Images for analyzing speech articulations," *Proc. SPIE 11049, International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT) 2019, 110491X*, Singapore, 22 March 2019.
- [11] 高橋純, 竹本浩典, 榊原健一, "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, March. 2020.
- [12] Cleveland, T, J.Sundberg, "Acoustic analysis of three male voices of different quality," In *Proc. of Stockholm Music Acoustics Conference 1983(SMAC83)*, no.1, pp.143-156, Stockholm, Sweden, Jul.1983.
- [13] 松尾一泰, 圧縮性流体力学, オーム社, 東京, 2020.