

声道立体形状の分析に基づく 歌手のフォルマントの生成メカニズムの検討*

☆志々目樹, △相葉まこ, 戸田菜月, 竹本浩典 (千葉工大), 高橋純 (大阪芸大)

1 はじめに

男性オペラ歌手の歌声のスペクトルには、2.8 kHz 付近に歌手のフォルマント (Singer's Formant, 以下 SF) と呼ばれる非常に大きな高まりが見られる[1]。これは第1~5フォルマント (F1~F5) のうち、F3, F4, F5を集約させたものとされている[1]。

しかし、この説には疑問がある。F3 はほぼ喉頭腔以外の声道 (主声道) の共鳴に由来し、F4 はほぼ喉頭腔の共鳴のみに由来する[2]。これより、喉頭腔の形状のみを制御して F4 周波数を下降させて F3 に近接させることは可能である。しかし、F4 と F5 の間には梨状窩に由来する大きな極零対が生成されるため、この極零対の極の周波数を F5 より下降させて F3, F4 に近接させる方が合理的であると考えられる。つまり、SF は、主声道の共鳴に由来する F3、喉頭腔共鳴に由来する F4、梨状窩に由来する極が近接したものであるという仮説が得られる。

そこで本研究では、MRI を用いてオペラ歌手が声楽的な発声を用いたとき (声楽的発声) と用いなかったとき (非声楽的発声) の声道形状とその音響特性を比較・分析して上記の仮説を検証した。

2 材料と方法

2.1 声道モデル

実験参加者はプロのバスバリトン1名である。実験参加者は発声しやすい音高 (ファ: 174 Hz) において声楽的・非声楽的な発声で母音/a/を10秒程度発声し、その間にMRIで頭頸部を空間解像度 $1.0 \times 1.0 \times 2.5$ mm で撮像して音声も録音した。MRIでは歯列と口腔が同じ輝度値 (黒) となるため、口腔形状が不正確である。そこでまず、口を閉じて口唇、頬の内側、舌を歯列に密着させた頭頸部を空間解像度 $0.3 \times 0.3 \times 1.0$ mm で撮像した。次に、輝度値を反転して歯列を抽出し、母音発声中

の声道に補填[3]した。そして、声門から口唇までの声道形状を領域拡大法により抽出し、声道の周囲に厚さ 3 mm の壁を生成して声道モデルを作成した。なお、MRI装置はATR-Promotionsに設置されているSiemens製MAGNETOM Prisma fit3Tを用いた。

2.2 声道伝達関数の計算と計測

声楽的・非声楽的発声時の母音/a/の声道モデルを用いて、時間領域差分法による音響シミュレーションを行い、声門から口唇端までの声道伝達関数を計算した[4]。シミュレーションの空間離散化間隔は 0.5 mm、時間離散化間隔は 0.5 μ s である。

また、声楽的発声の/a/の声道モデルをナイロン12粉末で積層造形して声道模型を作成し、声門から口唇端までの声道伝達関数を計測した。これは、無響室内で計測系の特性を補正したフラットな周波数特性を持つホワイトノイズを声道模型の口唇端から入力して声門に設置したマイクロホンで録音して分析することによって得られた。

2.3 音圧分布の可視化

伝達関数のピークやディップの成因を検討するために、その周波数で声道モデルを励振したときの瞬時音圧分布を音響シミュレーションで計算して可視化した。

3 結果と考察

3.1 声道伝達関数の比較

Fig. 1は声楽的・非声楽的発声時の音声スペクトルと声道伝達関数である。音声スペクトルでは、声楽的発声時に2.8 kHzを中心とした帯域にフォルマントが集約してSFを生じ、F1, F2の周波数とレベルは共に低下した。同様の傾向がシミュレーションで再現された。

Fig. 2は声楽的発声時の母音/a/の計測した伝達関数と計算した伝達関数である。全体的な概形は一致し、計算した伝達関数の4 kHz以下の▼で示すピークは計測した伝達関数の

* Examination of mechanism for generating singer's formant based on three-dimensional acoustic analysis of the vocal tract, by SHISHIME, Itsuki, AIBA, Mako, TODA, Natsuki, TAKEMOTO, Hironori (Chiba Institute of Technology), and TAKAHASHI, Jun (Osaka University of Arts).

対応するピークと 1.2 %以下の周波数の誤差で一致した。よって、SF が含まれる 2.8 kHz 周辺の音響現象はシミュレーションで精度よく再現されているといえる。

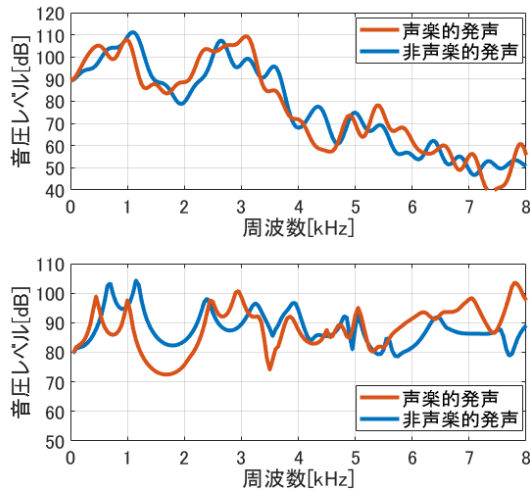


Fig. 1 声楽的・非声楽的発声時の音声スペクトル（上段）と声道伝達関数（下段）

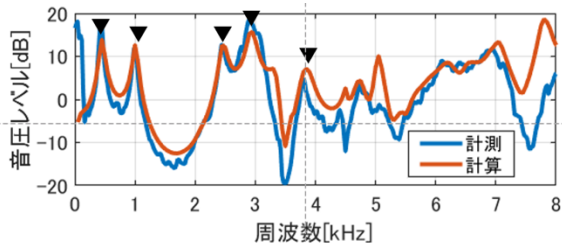


Fig. 2 計測・計算した伝達関数の比較

3.2 梨状窩に由来する極と喉頭腔の共鳴

Fig. 3 は歌唱発声時の声道モデルの伝達関数と、喉頭腔を除去した声道モデル（主声道モデル）の咽頭から口唇までの伝達関数である。先行研究では、喉頭腔が単独で F4 を生成するため、喉頭腔を除去すると F4 のみが消失した[2]。しかし本研究では、喉頭腔を除去しても 2.9 kHz に存在する F4 のレベルは約 14 dB 低下したが消失はしなかった。

Fig. 4 左は主声道モデルの F4 (2.9 kHz) における瞬時音圧分布であり、左右の梨状窩が逆相で振動することにより生成されていることを示す[4]。左右の梨状窩は 2 つの極零対を生成し、高い周波数の極零対では左右が同相、低い周波数の極零対では左右が逆相となることから[5]、これは左右の梨状窩が逆相となる極零対の極である。Fig. 4 右は声道モデルの F4 (2.9 kHz) における瞬時音圧分布であり、主声道モデルと同様に、左右の梨状窩が逆相である。これより、声道モデルの F4 は、左右の梨状窩が逆相で振動することによって

生じる極零対の極に、喉頭腔が単独で生成するフォルマントが完全に重畳していることを示す。すなわち、喉頭腔から口唇への共鳴と、梨状窩から口唇への共鳴が重畳することで、F4 のレベルが飛躍的に増大して SF となったといえる。

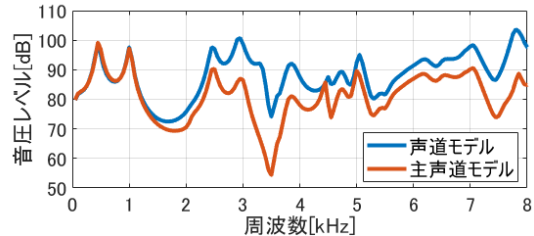


Fig. 3 喉頭腔除去が伝達関数に与える影響

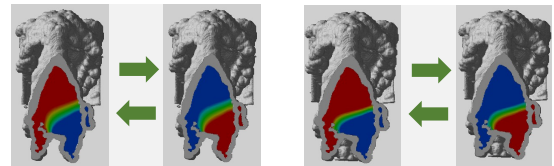


Fig. 4 咽頭後壁を除去して背面から可視化した瞬時音圧分布，左：主声道モデルの 2.9 kHz のピーク，右：声道モデルの 2.9 kHz のピーク

4 まとめ

本研究では、MRI を用いて 1 名のバスバリトンによる声楽的・非声楽的発声時の声道形状を計測し、その音響特性を分析することで、「SF は、主声道の共鳴に由来する F3、喉頭腔共鳴に由来する F4、梨状窩に由来する極が近接したものであるという仮説」を検証した。その結果、声楽的発声時に F3 と F4 は近接し、F4 と梨状窩に由来する極は完全に重畳したことから、少なくともこの歌手では仮説を裏付ける結果が得られた。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 23K11172 の支援を受けた。また、本研究に参加していただいた歌手の方々に感謝する。

参考文献

- [1] Sundberg, J., *The Science of The Singing Voice*, Northern Illinois University Press, 1987.
- [2] Takemoto *et al.*, *JASA*, 120, 2228-2238, 2006.
- [3] 加地ら, *音講論 (春)*, 801-802, 2022.
- [4] 豊田政弘, *FDTD 法で見る音の世界*, コロナ社, 2015.
- [5] Takemoto *et al.*, *JASA*, 134, 2955-2964, 2013.