

## 複数の声道立体形状の分析に基づく 歌手のフォルマンの生成メカニズムの検討

☆志々目樹, 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 (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 (F1~F5) のうち, F3, F4, F5 を集約させたものとされている[1]。

われわれは, オペラ歌手 1 名の母音/a/の声道形状の分析から, SF は「主声道 (喉頭腔を除く声道) に由来する F3, 喉頭腔に由来する F4, 梨状窩に由来するピークが集約したものである」という仮説を立てた[2]。この仮説を検証するためには, 他の母音や複数の歌手の声道形状を分析する必要がある。

そこで本研究では, テノール歌手 1 名の 5 母音と他の 3 名の男性歌手の/a/の歌唱発声時の声道立体形状を分析し, SF の成因について検討したので報告する。

### 2 材料と方法

#### 2.1 声道モデル

実験参加者はプロのオペラ歌手 4 名で, バスバリトン 1 名 (bBar), バリトン 1 名 (Bar), テノール 2 名 (Ten1, Ten2) であった。実験参加者は発声しやすい音高 (bBar : 174 Hz, Bar : 261 Hz, Ten1 : 233 Hz, Ten2 : 246 Hz) で日本語 5 母音を 10 秒程度歌唱発声し, その間に頭頸部を空間解像度  $1.0 \times 1.0 \times 2.5$  mm で MRI 撮像して音声も収録した。なお, MRI 装置は ATR-Promotions の Siemens 製 MAGNETOM Prisma fit3T を用いた。MRI では歯列と口腔が同じ輝度値 (黒) となり, 口腔形状が不正確である。そこで, まず口を閉じ, 口唇, 頬, 舌を歯列に密着させて頭頸部を MRI 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 MRI データに補填[3]した。そして, 声門から口唇までの声道形状を抽出し, 声道の周囲に厚さ 3 mm の壁を形成して声道モデルを作成した。

### 2.2 音響シミュレーション

FDTD 法 (Finite-Difference Time-Domain method) により, 5 母音の声道モデルの声門から口唇までの伝達関数 (VT) を計算した。また, 喉頭腔を除去した声道モデル (主声道モデル) の喉頭腔から口唇までの伝達関数 (VTp) も計算した。なお, 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  $0.5 \mu\text{s}$  とした。

また, 声道伝達関数のピークやディップの周波数でモデルを励振して定常状態に達した後の瞬時音圧分布を可視化し, そのピークやディップの成因を検討した。

### 3 結果と考察

#### 3.1 個人差の検討

Fig. 1 は実験参加者 4 名の母音/a/の音声スペクトル (SPC), VT, VTp である。以下, SPC のフォルマンを周波数の低い方から F1, F2, ... とし, VT と VTp のピークを fR1, fR2, ..., fR1p, fR2p, ... とする。

SPC と VT の概形は 4 kHz 以下で一致したことから, SF を構成するピークを VT から検討した。bBar, Bar は 3 kHz 付近に fR3, fR4, fR5 が集約して SF を形成していた。しかし, Ten1 はこれら 3 つのピークはそれほど集約せず, Ten2 は fR3 と fR4 が 2.6 kHz 付近に集約した。よって, SF は歌手によって周波数や構成するピークの種類や数が異なっているといえる。

VT と VTp は, fR4 近傍以外の概形が類似する。これは, 声道モデルの fR4 が喉頭腔に由来することを示し, 先行研究の結果と一致した[4]。一方, VT の fR4 以外のピークやディップは, 周波数とレベルが変化しても VTp に対応するピークやディップが存在することから, これらは主として主声道に由来するといえる[4]。

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

fR4pはbBar, Bar, Ten1でそれぞれ2.9 kHz, 3.1 kHz, 3.8 kHzであった。これらの周波数における瞬時音圧分布を可視化した結果、これらのピークは主声道の第4共鳴ではなく、梨状窩が生成する極零対の極であった。一方、3.3 kHzに存在するTen2のfR4pは、梨状窩ではなく、咽頭腔の横モードに由来する極零対の極であった。

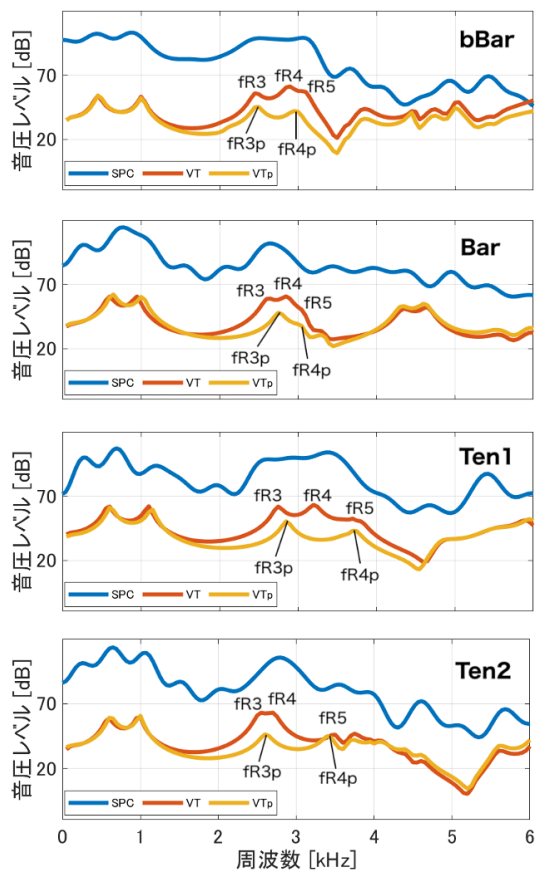


Fig. 1 実験参加者4名の母音/a/の音声スペクトル (SPC) と声道伝達関数 (VT, VTp)

### 3.2 母音差の検討

Fig. 2はTen1の/i/, /u/, /e/, /o/のSPC, VT, VTpである。SPCとVTは4 kHz以下で概形が一致したので、SFを構成するピークをVTから検討する。/i/, /o/のVTではfR3, fR4, fR5が3.0 kHz付近に集約したが、/u/, /e/ではfR4とfR5が集約した。よって、SFは母音によっても周波数や構成するピークの種類や数が異なっているといえる。

瞬時音圧分布を検討した結果、Ten1の/a/以外の母音のfR4pは、梨状窩の極零対の極ではなく、全て主声道の第4共鳴であった。なお、/i/の4 kHz, 母音/u/の4.5 kHz, 母音/e/の4.3 kHz, 母音/o/の4.2 kHzに見られる大きなディップは梨状窩に由来していた。

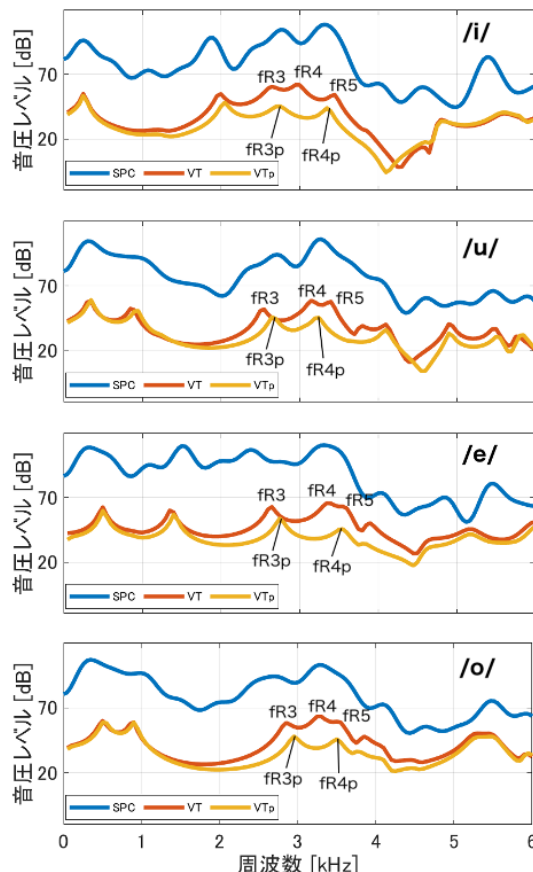


Fig. 2 Ten1の4つの母音の音声スペクトル (SPC) と声道伝達関数 (VT, VTp)

## 4 まとめ

本研究では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4名の歌手の声道形状を分析して検証した。その結果、仮説は必ずしも常に正しくなく、SFは歌手によっても、母音によっても構成するピークの種類と数が異なっていた。ピークの由来は、F3は主声道の共鳴、F4は喉頭腔の共鳴であるが、これらと近接する可能性がある5番目のピークの由来は、主声道、梨状窩、咽頭の横モードの3通りがあった。

### 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に感謝する。

### 参考文献

- [1] Sundberg, J., *The Science of The Singing Voice*, Northern Illinois University Press, 1987.
- [2] 志々目ら, 音講論 (秋), 969-970, 2023.
- [3] 加地ら, 音講論 (春), 801-802, 2022.
- [4] Takemoto *et al.*, *JASA*, 120, 2228-2238, 2006.