

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500233

研究課題名(和文) ソプラノ歌唱における声道形状と声帯振動の制御に関する研究

研究課題名(英文) Study on control of vocal-tract shape and vocal-fold vibration during soprano singing

研究代表者

竹本 浩典 (TAKEMOTO, Hironori)

独立行政法人情報通信研究機構・多感覚・評価研究室・研究員

研究者番号：40374102

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：歌唱中のソプラノ歌手の声道を磁気共鳴画像法で計測し、声道の第1、第2共鳴の周波数(R1、R2)を、声帯振動の第1、第2倍音の周波数に一致させるフォルマント同調において、声道のどの部分を制御しているかを検討した。その結果、R1は咽頭腔と喉頭腔の接合する角度を調整することで、R2は口腔前部の大きさと口唇での狭めで調整していることが明らかになった。さらに、高音域では、R1を上昇させる声道形状の制御によって、喉頭腔の音響的な独立性が低下して歌唱フォルマントが生成されなくなることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Changes of the vocal tract of sopranos during singing were measured by Magnetic Resonance Imaging to examine so-called formant tuning, in which the first and second resonances (R1 and R2) of the vocal tract are tuned to the first and second harmonics of vocal fold vibration. Results revealed that the sopranos changed the angle between the larynx and pharynx for R1 tuning, while they changed the frontal size of the oral cavity and the degree of lip constriction for R2 tuning. Furthermore, at high pitches, the changes of the vocal tract to increase R1 implied that the sopranos could not generate the singing formant, because those changes tended to reduce the acoustic independence of the larynx from other parts of the vocal tract, which is indispensable for generating the formant.

研究分野：音声生成

キーワード：ソプラノ 声道形状 声道共鳴 声帯振動 相互作用

### 1. 研究開始当初の背景

声帯振動と声道共鳴とは互いに独立していると仮定するいわゆる線形のソース・フィルタ理論は、男性の話声などの低い声では有効である。しかし、この理論は女性や子供の高い声には有効ではない。それは、声が高くなり声帯振動の基本周波数 ( $F_0$ ) が声道の第1共鳴周波数 ( $R_1$ ) に近づくと、声帯振動が声道共鳴に影響を受ける相互作用が無視できなくなるからである。しかし、近年、女性や子供の音声の生成過程をより詳しく検討するために、この相互作用に着目した研究が行われるようになってきた[1,2]。

声帯振動と声道共鳴との相互作用が最も強く現れるのは、ソプラノの高音域での歌唱である。 $F_0$  と  $R_1$  とが一致すると、スペクトル上では  $F_0$  の成分が  $R_1$  により増幅されて声が大きくなる一方、声帯振動が不安定になったり、停止したりするという危険性がある[1,2]。つまり、ソプラノは相互作用の大きな音域で、声道形状と声帯振動を巧みに制御して歌唱している。そのため、欧米では芸術的な興味とあいまって、ソプラノ歌唱の生成面における研究が古くからなされてきた[3,4]。しかし、ソプラノ歌唱における未解明の問題は少なくない。これらの問題のいくつかは、磁気共鳴画像法 (Magnetic Resonance Imaging: MRI) を用いて歌唱中のソプラノ歌手の声道形状の変化を観測することで解決できるのではないかと期待されている。

### 2. 研究の目的

本科研費による一連の研究の目的は、ソプラノ歌唱における以下の3つの問題を解明することである。

#### (1) フォルマント同調の生理的機構

ソプラノは、声帯振動の安定のために  $R_1$  を  $F_0$  より高く保ち、発声効率を高めるために声道の第2共鳴周波数 ( $R_2$ ) を声帯振動の第2倍音 ( $2F_0$ ) と一致させようとする[4]。これは、フォルマント同調と呼ばれているが、どのような声道形状の制御により実現されているのか明らかになっていない。

#### (2) 高音域でのまろやかな発声のメカニズム

特に高音域では、ソプラノはフォルマント同調を行って音声効率を高める一方、まろやかな発声を行おうとする。この発声はイタリア語では *girare* (ジラーレ) と呼ばれ、英語で *cover* と呼ばれる発声と類似したものと言われる。しかし、この発声でどのような声道形状の制御が行われているのか明らかになっていない。

#### (3) 歌唱フォルマント生成の可否

男性歌手では、約 3 kHz 付近に歌唱フォルマントと呼ばれるスペクトルのピークを生成する。そして、このフォルマントがオペラ歌唱特有の響きを与えるといわれている[3]。このフォルマントは喉頭腔を音響的に独立させることによって生成さ

れる[3]。ところが、ソプラノ歌唱では、声が高いので声帯振動の倍音成分の間隔が広く、スペクトルからフォルマントを特定できない。そのため、その有無については未だに決着がついていない。

### 3. 研究の方法

被験者はプロのソプラノ歌手である。まず、声の高さを変えて発声し、それに伴う声道形状の変化を MRI で計測した。これによって、声の高さを変えると声道のどの部分が変形するかを特定した。また、ある特定の音程で、ジラーレを用いた発声と用いない発声を行って声道形状を計測した。これによって、ジラーレによって声道のどの部分が変形するかを特定した。なお、いずれの場合も、MRI 実験の直後に無響室内で MRI 実験と同じ条件で発声し、その音声を収録して分析した。

次に、声の高さや発声法の違いによって変形した部分が、音響的にどのような意味があるかを明らかにするために、縦続音響管モデル[5]による音響感度分析[6]を行った。これは、声道のある部分の変形が、 $R_1$  や  $R_2$  にどのような変化をもたらすかを音響エネルギーの分布パターンから推定する手法である。

さらに、声道変形が声帯振動にどのような影響を与え、音声がどのように変化するかを検討するために、音声生成シミュレーションを行った。用いたシミュレータの声道部分は前田モデル[7]、声帯部分は2次元モデル[8]であり、声帯振動と声道共鳴の相互作用を考慮することができる。そして、このシミュレータによって生成された音声のスペクトルを分析した。また、シミュレーションの妥当性を検討するために、1次元の音響解析手法である縦続音響管モデルが有効な上限周波数を、声道模型[9]や3次元の音響解析手法である時間領域差分法 (Finite-Difference Time-Domain method: FDTD 法) [10]を用いて検証した。

### 4. 研究成果

図1は、あるソプラノ被験者が  $D_5$  (535 Hz) と  $G_5$  (784 Hz) で発声したときの正中矢状断面における声道形状のトレースである[11, 雑誌論文]。  $F_0$  が  $D_5$  から  $G_5$  に上昇すると、フォルマント同調によって  $R_1$  も上昇すると考えられる。よって、この図は  $R_1$  を上昇させるために必要な声道形状の変化を示す。従来知られていたように口が大きく開き、口腔の前部が広がるだけでなく[3]、喉頭が後方に、舌の後面が前方に移動して、咽頭腔と喉頭腔の角度が大きく変化した。 $D_5$  では、図の青線で示すように咽頭腔は頸椎の前面に沿っており、喉頭腔は後上方に向かって斜めに開口する。ところが、 $G_5$  では喉頭腔も頸椎の前面に沿うように角度を変え(図の ) この2つの腔はほぼ直線上に結合する。

音響感度分析によると、喉頭腔と咽頭腔の結合する角度は  $R_1$  に大きな影響を与える[11,

12, 雑誌論文 ]。すなわち、2つの腔が直線的になるにしたがってR1周波数は上昇する。一方、従来から知られていた、口を大きく開き、口腔前部を広げる動作は、R1を上昇させるがその効果は小さい。口を開く動作は単純であるので、ある程度までは簡単にR1を上昇させることができる。しかし、口の開きには限界があるので、さらにR1を上昇させるためには、喉頭腔と咽頭腔の角度を変える必要がある。これはどのような筋の作用で実現されているのか不明だが、口を開く動作に比べるとはるかに難しい制御を要する動作であると思われる。すなわち、ソプラノの高音域におけるR1の上昇は、喉頭腔と咽頭腔の角度を変えるという難度の高い動作によって実現されていると思われる。この研究成果 [11, 12, 雑誌論文 ]は、ソプラノのフォルマント同調の生理的な機構を初めて明らかにしたものであり、高音域での歌唱技術の習得に寄与することが期待される。

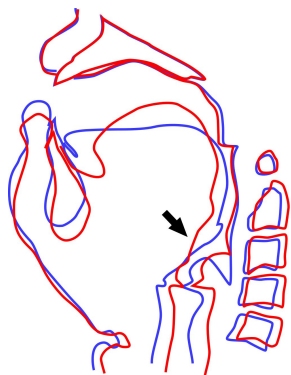


図1 母音/a/発声時の正中矢状断面における発話器官のトレース 青：D5 (535 Hz), 赤：G5 (784 Hz)

図2は、あるソプラノ歌手が高音域でまろやかに発声する技術であるジラーレを用いた場合と用いなかった場合のG5 (784 Hz)における音声スペクトルを比較したものである [雑誌論文 ]。ジラーレを用いると、主に2F0のレベルが約10 dB低下した。これが聴感に影響を与え、まろやかな印象を与える原因であると考えられる。

スペクトル形状の比較から、2F0のレベルのみが低下する要因を考察した。ジラーレを用いたときと用いなかったときで、2F0を除く全体的なスペクトル傾斜が変化していないこと、3.5 kHz付近の非調和成分が変化していないことなどから、2F0のレベルの低下は声帯振動ではなく、声道形状の変化にあることが示唆された。

図3は、同じソプラノ歌手がG5でジラーレを用いた場合と用いなかった場合の母音/a/の発声器官をトレースしたものである [雑誌論文 ]。ジラーレにより、口唇が狭められ、下顎と舌は後下方に引かれ、喉頭が下降した。音響感度分析によれば、これらの変化はいずれもR1にはほとんど影響せず、R2を大きく低下させる [雑誌論文 ]。先行研究

によれば、G5はR1をF0に、R2を2F0に近接させるフォルマント同調が行われる音域である [4]。よって、ジラーレとは、あえてR2を2F0より低くしてフォルマント同調を避け、2F0のレベルを下げる歌唱技術であると推測された。

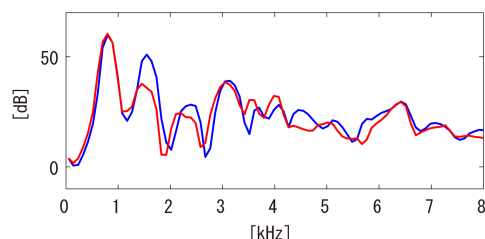


図2 G5 (784 Hz) においてジラーレを用いた場合 (赤) と用いなかった場合 (青) の母音/a/の音声スペクトル

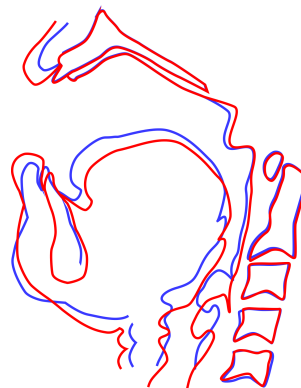


図3 G5 (784 Hz) においてジラーレを用いた場合 (赤) と用いなかった場合 (青) の母音/a/の発声器官のトレース

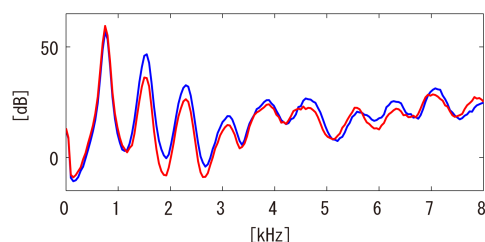


図4 G5 (784 Hz) においてジラーレを用いた場合 (赤) と用いなかった場合 (青) を模擬したシミュレーションによるスペクトル

そこで、図3にならって口腔を少し広げ、口唇部を狭めることでジラーレと類似した効果が得られるか、音声生成シミュレータを用いて検証した。図4はジラーレを用いた場合と用いなかった場合を模擬したシミュレーションの結果である。ジラーレを用いた場合、主に2F0のレベルが約10 dB低下した。これは図2をよく再現している。よって、ジラーレとは、R1をF0に、R2を2F0に同調させることができる音域で、R1をF0に同調させたまま、R2を2F0より低くして同調を行わないように声道形状を制御する技術である

ことがシミュレーションでも示された。この研究成果[雑誌論文, ]も、ソプラノの歌唱技術を生理的・音響的な観点から初めて明らかにしたものであり、同様の手法による様々な歌唱技術の解明が期待される。

R1 を上昇させるために喉頭腔と咽頭腔を直線状にすることは、歌唱フォルマントの生成に必要な喉頭腔の音響的な独立性に大きな影響を与える[11, 12]。この独立性は、喉頭腔に比べて咽頭腔の断面積が急激に大きくなればなるほど高くなる。しかし、喉頭腔と咽頭腔を直線状にすると断面積の急激な変化が抑制され、音響的な独立性が小さくなる。すなわち、ソプラノの高音域の歌唱では、歌唱フォルマントが生成されなくなることを示唆している[11, 12]。これらの先行研究は1次元の音響解析手法である縦続音響管モデルに基づいている。従来、縦続音響管モデルが有効な上限周波数は4 kHz程度とされてきた[13]。しかし、ソプラノの喉頭腔の形状から推定される歌唱フォルマントは4 kHzより高いため、先行研究の結果の妥当性について検証する必要があった。

そこで、縦続音響管モデルの上限周波数を検証した。MRIで計測した日本語5母音の声道形状から声道模型を作製して実測した伝達関数と、同じ声道形状から3次元の音響解析手法であるFDTD法で計算した伝達関数と、縦続音響管モデルで計算した伝達関数とを比較した。なお、縦続音響管モデルでは、梨状窩の影響[雑誌論文]を考慮した。

図5はその結果の一部(母音/i/)である。FDTD法で計算した伝達関数(青)は、実測した伝達関数(赤)と非常によく一致した。この2つの伝達関数にはTpで示す深いディップがある。縦続音響管モデルで計算した伝達関数(黒)には対応するディップがないが、このディップより低い周波数では、3つの伝達関数はよく一致した。

声道内の音圧分布の解析によれば、このディップは咽頭腔の横方向に発生した共鳴に由来する。また、その周波数は全ての母音で約8 kHzであった。これは、少なくともこの被験者では、縦続音響管モデルは咽頭腔の横方向に共鳴が生じる8 kHzまでは有効であることを意味している。この被験者は成人男性であり、しかもその声道の寸法は統計分析の結果によると例外的に大きい[雑誌論文]。また、咽頭腔の横方向の共鳴周波数は、咽頭腔が小さいほど高くなると考えられる。よって、ソプラノを含めた多くの人の声道では、咽頭腔の横方向で発生する共鳴は8 kHzより高い周波数で起きると予想される。ゆえに、縦続音響管モデルは一般に8 kHzまでは有効であり、ソプラノが歌唱フォルマントを生成できるかどうかを検討する上で問題がないことが明らかになった。

以上の検証結果から、先行研究の結果[11, 12]は妥当であるといえる。すなわち、ソプラノの高音域の歌唱では、R1を上昇させるた

めに喉頭腔と咽頭腔の角度を変えることにより、喉頭腔の音響的な独立性が失われて歌唱フォルマントが生成されなくなると結論できる。

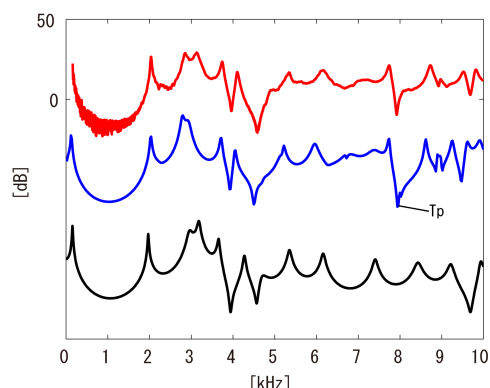


図5 母音/i/の3つの伝達関数の比較 赤：声道模型の実測 青：FDTD法による計算 黒：縦続音響管モデルによる計算

#### <引用文献>

- [1] I. Titze, "Nonlinear source-filter coupling in phonation: Theory," J. Acoust. Soc. Am. 123, pp. 2733-2749, 2008a.
- [2] I. Titze et al., "Nonlinear source-filter coupling in phonation: Vocal exercises," J. Acoust. Soc. Am. 123, pp. 1902-1915, 2008b.
- [3] J. Sundberg, "The science of the singing voice," Northern Illinois University Press, De Kalb, Illinois, 1987.
- [4] M. Garnier et al., "Vocal tract adjustments in the high soprano range," J. Acoust. Soc. Am. 127, pp. 3771-3780, 2010.
- [5] S. Adachi and M. Yamada, "An acoustical study of sound production in biphonic singing, Xöömij," J. Acoust. Soc. Am. 105, pp. 2920-2932, 1999.
- [6] S. Adachi et al., "Vocal tract length perturbation and its application to male-female vocal tract shape conversion," J. Acoust. Soc. Am. 121, pp. 3874-3885, 2007.
- [7] S. Maeda, "A digital simulation method of the vocal-tract system," Speech Comm. 1, pp. 199-229, 1982.
- [8] S. Adachi and J. Yu, "Two-dimensional model of vocal fold vibration for sound synthesis of voice and soprano singing," J. Acoust. Soc. Am. 117, pp. 3213-3224, 2005.
- [9] T. Kitamura et al., "Transfer functions of solid vocal-tract models

constructed from ATR MRI database of Japanese vowel production,” *Acoust. Sci. & Tech.* 30, pp. 288-296, 2009.

- [10] H. Takemoto et al., “Acoustic analysis of the vocal tract during vowel production by finite-difference time-domain method,” *J. Acoust. Soc. Am.* 128, pp. 3724-3738, 2010.
- [11] 竹本浩典 他, “MRI で計測したソプラノ歌手の声道の音響解析の試み,” *日本音響学会講演論文集*, 2011年9月, pp. 313-316, 2011.
- [12] H. Takemoto et al., “Changes in the vocal tract shape of sopranos at high pitch,” *J. Acoust. Soc. Am.* 131, p.3304, 2012.
- [13] J. L. Flanagan, “Speech Analysis, Synthesis, and Perception,” Springer-Verlag, New York, 1972.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6件)

Hironori Takemoto, Parham Mokhtari, Tatsuya Kitamura, Comparison of vocal tract transfer functions calculated using one-dimensional and three-dimensional acoustic simulation methods, *Proceedings of INTERSPEECH 2014*, pp.408-412, 査読有, 2014.

Hideki Kawahara, Tatsuya Kitamura, Hironori Takemoto, Ryuichi Nisimura, Toshio Irino, Vocal tract length estimation based on vowels using a database consisting of 385 speakers and a database with MRI-based vocal tract shape information, *Proceedings of INTERSPEECH 2014*, pp.870-874, 査読有, 2014.

竹本浩典、声楽家の声道形状制御 - ソプラノの高音域におけるフォルマント同調、*日本音響学会誌*、70巻、pp. 506-511、査読有、2014.

Eri Haneishi, Reiji Oribe, Hironori Takemoto, Hideki Kawahara, Kiyoshi Honda, Takeshi Saitou, Kaori Hagiwara, Hiroko Kishimoto, Attempts of Visualization of Singing Techniques: MRI Motion Imaging of Diaphragm Activities and Acoustic Features during Singing, *Proceedings of the 43rd Annual Symposium of the Voice Foundation*, p.21, 査読有, 2014.

Hironori Takemoto, Seiji Adachi, Takeshi Saitou, Kiyoshi Honda, Eri Haneishi, and Hiroko Kishimoto, Power control for the second harmonic at

high pitches in soprano singing: a case study, *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference 2013 (SMAC 2013)*, pp.311-314, 査読有, 2013.

Hironori Takemoto, Seiji Adachi, Parham Mokhtari, and Tatsuya Kitamura, Acoustic interaction between the right and left piriform fossae in generating spectral dips, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 134, pp.2955-2964, 査読有, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.1121/1.4818744>

[学会発表](計 6件)

Hironori Takemoto, Parham Mokhtari, Tatsuya Kitamura, Comparison of vocal tract transfer functions calculated using one-dimensional and three-dimensional acoustic simulation methods, *INTER SPEECH 2014*, 2014年9月14日~2014年9月18日, Singapore (Singapore).

Hideki Kawahara, Tatsuya Kitamura, Hironori Takemoto, Ryuichi Nisimura, Toshio Irino, Vocal tract length estimation based on vowels using a database consisting of 385 speakers and a database with MRI-based vocal tract shape information, *INTER SPEECH 2014*, 2014年9月14日~2014年9月18日, Singapore (Singapore).

Hironori Takemoto, Acoustic characteristics of the hypopharyngeal cavities, *Adventures in Speech Science*, 2014年7月22日~2014年7月23日, 東京大学本郷キャンパス内 山上会館(東京).

Eri Haneishi, Reiji Oribe, Hironori Takemoto, Hideki Kawahara, Kiyoshi Honda, Takeshi Saitou, Kaori Hagiwara, Hiroko Kishimoto, Attempts of Visualization of Singing Techniques: MRI Motion Imaging of Diaphragm Activities and Acoustic Features during Singing, *43rd Annual Symposium of the Voice Foundation*, 2014年5月28日~2014年6月1日, Philadelphia (USA).

Hironori Takemoto, Seiji Adachi, Takeshi Saitou, Kiyoshi Honda, Eri Haneishi, and Hiroko Kishimoto, Power control for the second harmonic at high pitches in soprano singing: a case study, *Stockholm Music Acoustics Conference 2013*, 2013年7月30日~2013年8月3日, Stockholm (Sweden).  
竹本浩典、足立整治、齋藤毅、本多清志、羽石英里、大前拓哉、岸本宏子、ソプラノ歌唱の高音域における第2高調波のパ

ワー制御に関する予備的検討、日本音響  
学会 2013 年春季研究発表会、2013 年 3  
月 13 日～2013 年 3 月 15 日、東京工科大  
学八王子キャンパス(東京都八王子市)。

〔その他〕

ホームページ等

<http://www2.nict.go.jp/univ-com/mcc/people/takemoto/>

## 6．研究組織

### (1)研究代表者

竹本浩典 (TAKEMOTO, Hironori)

独立行政法人 情報通信研究機構・ユニバー  
サルコミュニケーション研究所 多感覚・評  
価研究室・研究員

竹本 浩典

研究者番号：40374102

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

なし