

令和元年6月20日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K00263

研究課題名(和文) ビブラートの生成メカニズムに関する研究

研究課題名(英文) Research on mechanism for generating vibrato in operatic singing

研究代表者

竹本 浩典 (TAKEMOTO, Hironori)

千葉工業大学・先進工学部・教授

研究者番号：40374102

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：通常の発話における声の高さは、主に輪状甲状筋と甲状披裂筋によって制御されており、輪状甲状筋は声を高く、甲状披裂筋は声を低くすると考えられている。ビブラートも同じメカニズムで制御されているかどうかを検討するために、歌唱中のオペラ歌手の声道をリアルタイムMRIで撮像して声道壁の振動を分析した。その結果、舌、咽頭、喉頭が大きく振動していた。これは、通常の発話では活動が小さい下咽頭収縮筋が活動したためと考えられる。そして、筋の走行によれば、ビブラートは輪状甲状筋と下咽頭収縮筋の甲状咽頭部(甲状咽頭筋)によって制御されている可能性があることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ビブラートは様々なジャンルの歌で用いられる歌唱技術であるが、その生成メカニズムははっきりしていない。そこで本研究では、体内の運動を可視化できるリアルタイムMRIという技術を用いて、オペラ歌唱におけるビブラートにともなう発声器官の振動パターンを分析した。その結果、話声における声の高さの制御にはほとんど用いられない下咽頭収縮筋が活動していることが明らかになった。すなわち、オペラ歌唱のビブラートでは、話声と異なる方法で声の高さの制御をしていることが明らかになった。この知見はビブラートの習得に貢献すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In normal speech, it is believed that the pitch is controlled mainly by the cricothyroid and thyroarytenoid muscles: the activity of the cricothyroid muscle increases the pitch, while that of the thyroarytenoid muscle decreases. To examine whether the vibrato is generated in the same mechanism, the vocal tracts of operatic singers were imaged by real-time MRI during singing, and the vibration patterns were analyzed on the vocal tract wall. As a result, the larynx, pharynx, and tongue were vibrating to a large extent. This fact indicated that the hypopharyngeal constrictor muscle activated. The muscle fiber arrangement, furthermore, implied that the vibrato could be controlled by the cricothyroid and thyropharyngeal muscles.

研究分野：音声生成

キーワード：音声生成 声道 ビブラート オペラ歌唱 MRI シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ビブラートは声の高さ、すなわち声帯振動の基本周波数 (F_0) に揺らぎを与える歌唱技術である[1]。ビブラートにより、 F_0 は約 5 Hz の速度で周期的に変動し、その振幅は F_0 の 0~3% 程度である[2]。先行研究により、このような F_0 の変化は、主に喉頭の筋肉である輪状甲状筋 (CT 筋: 図 1(a)参照) と甲状披裂筋 (TA 筋: 図 1(b)参照) が拮抗的に働き、声帯の張力を変化させることによって生じると言われている[例えば 3]。Titze は、これら 2 つの筋の活動と、それを制御する負のフィードバックによってビブラート生成を説明できるとした[4]。言い換えれば、ビブラートは喉頭のみによって作り出されているという学説である。

しかし、声道形状と声帯振動の制御について検討するために、実時間で体内の運動を動画として記録できるリアルタイム MRI で歌唱中のソプラノの声道を観測したところ、Titze の学説に反する現象を確認した。すなわち、喉頭だけでなく、舌と咽頭壁もビブラートにともなって大きく振動していた。また、振動している部分、広さ、振幅は、被験者によっても、発声条件によっても異なっていた。これらの結果から、ビブラートは喉頭のみによって作られているのではなく、舌や咽頭壁の振動も関与している、という着想を得た。なお、Titze の学説が出された 2002 年当時は、MRI 装置の性能が低く、喉頭の周囲の発声器官の振動を実時間で観測することはできなかった。そのため、舌や咽頭壁の振動は考慮されなかったと思われる。そこで、Titze の学説を見直すために、ビブラート生成時の声道をリアルタイム MRI で撮像し、その生成メカニズムを検討する。

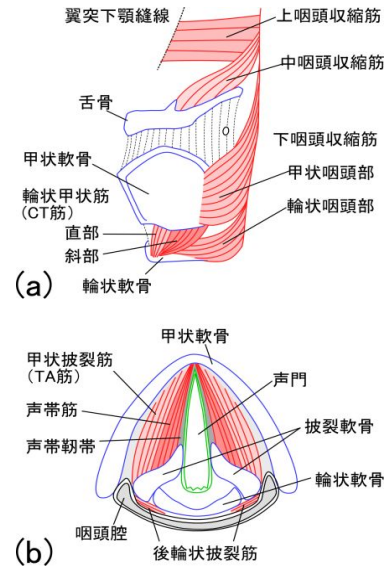


図 1 (a) 外喉頭筋 (一部)
(b) 内喉頭筋 (一部)

2. 研究の目的

ビブラートは声の高さに揺らぎを与える歌唱技術で、様々なジャンルの歌で用いられている。しかし、その生成メカニズムは完全には解明されていない。そこで本研究では、オペラ歌手を被験者として、まずビブラートを用いたときの発声をリアルタイム MRI で撮像し、ビブラートにともなって振動している発声器官の部位を特定する。次に、特定した部位の振動を位置センサーで計測し、振動の位相と音高の上下動の関係を検討する。すなわち、振動部位の変位と声の高さの関係を明らかにする。これらを踏まえて、振動している部位が声の高さを直接的に制御している喉頭の軟骨や筋肉にどのような影響を及ぼすのかについて解剖学的な知見に基づいて考察し、ビブラート生成の生理的・音響的なメカニズムの解明に取り組む。

3. 研究の方法

リアルタイム MRI を用いて、プロのオペラ歌手がビブラートを用いて発声しているときの発声器官を撮像した。撮像に当たっては、声種、音高、母音、ビブラートの速さや深さなどの組み合わせを考慮した。なお、リアルタイム MRI の撮像速度は 10 Hz、ビブラートの速度は約 5 Hz である。そのため、得られた動画の隣接するフレーム間で差分を取ることにより、ビブラートで振動している部位を特定し、その大きさや振動する方向を分析することが可能である。そして、解剖学的な知見に基づき、振動している部位の変位が、声の高さに直接関係している喉頭の軟骨や筋肉にどのような影響を与えるのかについて考察し、ビブラートの生成メカニズムを検討する。

4. 研究成果

図 2 はビブラート生成時に撮像されたリアルタイム MRI 動画の隣接する 2 つのフレーム間の輪郭を赤と青でトレースし、重ねてプロットしたものである。(a) がテノール歌手、(b) がソプラノ歌手である。矢印は振動方向を示している。テノール歌手もソプラノ歌手も、喉頭は上下に、舌根部は後上方 - 前下方に、咽頭壁は前後に振動していることが観測された。また、これらの振動の振幅は音高が下がると小さくなり、低い音高ではほとんど観測できなかった。

しかし、被験者による振動パタンの違いも見られた。テノールでは舌は全体として前後に振動したが、ソプラノでは舌は前後に回転するように振動した。また、テノールでは咽頭壁と舌

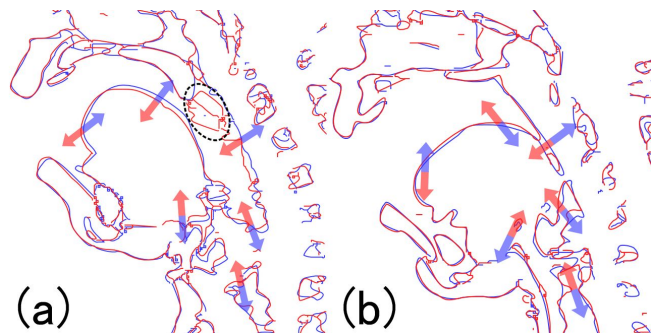


図 2 ビブラートによる声道壁の振動方向

が前方に移動すると同時に、咽頭の側壁が画像上に現れた（図 2(a)の黒い点線）。

これらの結果は、ビブラートの生成に中・下咽頭収縮筋が関与していることを示唆している（図 1(a)参照）。筋の走行によれば、下咽頭収縮筋の甲状咽頭部の活動は、咽頭腔を狭窄するだけでなく、甲状軟骨を後方に回転させる可能性がある（図 1(a)参照）。もしこの運動が生じれば、声帯が短縮して声が低くなると推測できる。すなわち、ビブラートの生成において、下咽頭収縮筋の甲状咽頭部は CT 筋と拮抗している可能性があることが明らかになった。すなわち、ビブラートは話声の F0 調整で見られる TA 筋と CT 筋の拮抗作用により生ずるのではなく、下咽頭収縮筋の甲状咽頭部と CT 筋の拮抗作用により生成され、これがビブラート生成時に舌や咽頭壁の大きな動きとして観測されていると推測される。

次に、当初は位置センサを用いて発話器官の振動とビブラートの位相を検討する予定であったが、リアルタイム MRI で十分なデータが得られたため、ハミング（鼻歌）ではビブラートがかかり難いという歌手の内観報告に基づき、鼻腔・副鼻腔の音響特性についても検討することにした。これは、鼻腔・副鼻腔の音響特性を分析することによって、ビブラートがかかるために必要な条件を検討することができると考えたからである。そこで、安静呼吸時の声門から喉頭腔、咽頭腔、鼻腔・副鼻腔を経て鼻孔までの系の形状をコーンビーム CT で計測し、その音響特性を時間領域差分法 [5] で計算した。

図 3 は男性 3 名（M1～M3）、女性 3 名（F1～F3）の声門から鼻孔までの系の伝達関数である。男女とも第 1 ピークは 200～250 Hz であり、第 2 ピークの周波数は男性で 1133 Hz、女性で 1483 Hz であった。これはいずれも声門から鼻孔への長軸に沿った第 1・第 2 共鳴であり、第 1・第 2 フォルマントに相当する。また、男女とも 500 Hz 付近に副鼻腔による極零対が見られた。

オペラ歌手は通常、フォルマント同調と呼ばれる第 1・第 2 フォルマント周波数を声帯振動の基本周波数あるいはその倍音に一致させる技術を用いて、効率の良い発声を行っている [1]。フォルマント周波数を制御するためには声道形状を変化させる必要があり、例えば、母音の第 1 フォルマントを上昇させるには、口を開いて舌を後下方に移動させ、全体的に声道の前方を広げる必要がある。しかし、声門から鼻孔へ向かう系では鼻腔・副鼻腔に可動要素がないため、咽頭腔と喉頭腔の形状変化による第 1・第 2 ピークの周波数の変動は限定的である。さらに、副鼻腔の形状は制御できないため、副鼻腔による極零対は 500 Hz 付近から移動できない。そのため、この帯域にフォルマントを生成できない。つまり、ハミングでは、歌手にとって自然な発声であるフォルマント同調をとまなう発声が可能帯域が極めて限定されているため、ビブラートがかかりにくいと考えられる。すなわち、オペラ歌唱におけるビブラート生成の前提条件として、フォルマント同調が必要であることが示唆された。

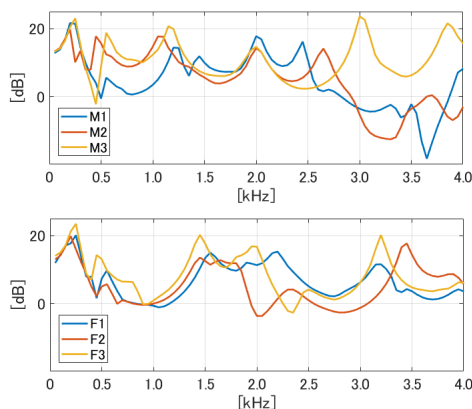


図 3 上：男性 下：女性

< 引用文献 >

- [1] Sundberg, J. (1987). "The science of the singing voice," Northern Illinois University Press, Dekalb, IL.
- [2] Titze, I. R., (1994). "Principles of Voice Production," Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- [3] Nimi, S., Horiguchi, S., Kobayashi, N., and Yamada, M. (1988). "Electromyographic study of vibrato and tremolo in singing." In O. Fujimura (Ed.), *Voice production, mechanisms and functions*, New York: Raven Press.
- [4] Titze, I. R., Story, B., Smith, M., and Long, R. (2002). "A reflex resonance model of vocal vibrato," *J. Acoust. Soc. Am.*, 111 (5), pp.2272-2282.
- [5] Takemoto, H., Mokhtari, P, Kitamura, T. (2010). "Acoustic analysis of the vocal tract during vowel production by finite-difference time-domain method," *J. Acoust. Soc. Am.* 128 (6), pp. 3724–3738.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

竹本浩典、北村達也、山口徹太郎、槇宏太郎、鼻腔・副鼻腔の音響特性の解析、日本音響

学会講演論文集（春） 査読無、pp.781-782、2019 年
竹本浩典、足立整治、時間領域差分法に基づく分岐管のある場合の 1 次元の声道音響モデル、日本音響学会講演論文集（秋） 査読無、pp. 807-808、2018 年
竹本浩典、足立整治、時間領域差分法に基づく 1 次元の声道音響モデル、日本音響学会講演論文集（春） 査読無、pp. 1253-1256、2018 年
Tatsuya Kitamura, Hironori Takemoto, Hisanori Makinae, Tetsutaro Yamaguchi, Kotaro Maki, Acoustic analysis of detailed three-dimensional shape of the human nasal cavity and paranasal sinuses, Proc. Interspeech2017, 査読有, pp. 3472-3476, 2017 年
竹本浩典、北村達也、山口徹太郎、榎宏太郎、外鼻の音響特性の予備的検討、日本音響学会講演論文集（春） 査読無、pp.1399-1400、2017 年
Tatsuya Kitamura, Hironori Takemoto, Hisanori Makinae, Tetsutaro Yamaguchi, Kotaro Maki, A preliminary acoustic analysis of three-dimensional shape of the human nasal cavity and paranasal sinuses extracted from cone-beam CT, J. Acoust. Soc. Am. 140, 査読有, p. 3223, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1121/1.4970174>
竹本浩典、解剖学と音響学から見た発話器官の進化、日本音響学会講演論文集（秋） 査読無、pp. 1185-1188、2016 年
竹本浩典、舌変形が生み出す音声の共通性と個人性、ディサースリア臨床研究、Vol. 6、査読有、pp. 41-46、2016 年
竹本浩典、羽石英里、実時間 MRI 動画によるビブラートにともなう声道壁の振動の観測、日本音響学会講演論文集（春） 査読無、pp. 1185-1188、2016 年
竹本浩典、北村達也、蒔苗久則、山口徹太郎、榎宏太郎、コーンビーム CT で計測した鼻腔・副鼻腔の 3 次元音響解析、電子情報通信学会技術報告、査読無、pp.45-50、2016 年

[学会発表](計 12 件)

竹本浩典、北村達也、山口徹太郎、榎宏太郎、鼻腔・副鼻腔の音響特性の解析、日本音響学会 2019 年春季研究発表会、2019 年
竹本浩典、足立整治、時間領域差分法に基づく分岐管のある場合の 1 次元の声道音響モデル、日本音響学会 2018 年秋季研究発表会、2018 年
竹本浩典、足立整治、時間領域差分法に基づく 1 次元の声道音響モデル、日本音響学会 2018 年春季研究発表会、2018 年
Hironori Takemoto, Parham Mokhtari, Tatsuya Kitamura, Complementary relationship between 1D and 3D acoustic analyses of the vocal tract, JAIST World Conference 2018 (招待講演), 2018 年
Tatsuya Kitamura, Hironori Takemoto, Hisanori Makinae, Tetsutaro Yamaguchi, Kotaro Maki, Acoustic measurement of the transfer function of a solid model of the nasal and paranasal cavities, The 11th International Seminar on Speech Production (ISSP-2017), 2017 年
Hironori Takemoto, Tatsuya Kitamura, Parham Mokhtari, Tetsutaro Yamaguchi, Kotaro Maki, Three-dimensional acoustic analysis of the nasal and paranasal cavities, The 11th International Seminar on Speech Production (ISSP-2017) (招待講演), 2017 年
Tatsuya Kitamura, Hironori Takemoto, Hisanori Makinae, Tetsutaro Yamaguchi, Kotaro Maki, Acoustic analysis of detailed three-dimensional shape of the human nasal cavity and paranasal sinuses, Interspeech2017, 2017 年
竹本浩典、北村達也、山口徹太郎、榎宏太郎、外鼻の音響特性の予備的検討、日本音響学会 2017 年春季研究発表会、2017 年
Tatsuya Kitamura, Hironori Takemoto, Hisanori Makinae, Tetsutaro Yamaguchi, Kotaro Maki, A preliminary acoustic analysis of three-dimensional shape of the human nasal cavity and paranasal sinuses extracted from cone-beam CT, 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, 2016.
竹本浩典、解剖学と音響学から見た発話器官の進化、日本音響学会 2016 年秋季研究発表会、2016 年
竹本浩典、羽石英里、実時間 MRI 動画によるビブラートにともなう声道壁の振動の観測、日本音響学会 2016 年春季研究発表会、2016 年
竹本浩典、北村達也、蒔苗久則、山口徹太郎、榎宏太郎、コーンビーム CT で計測した鼻腔・副鼻腔の 3 次元音響解析、音声研究会、2016 年

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。