

音声分析と体内運動の観測に基づく歌唱指導の可能性*

◎高橋純（大阪芸大），戸田菜月，竹本浩典（千葉工大）

1 はじめに

クラシック音楽において、聴き手を魅了する優れた歌手の歌声とはどのようなものかという問いに対して明確な答えはない。しかし、劇場をその「響き」で満たして聴衆を感動に導く「声」は実際に存在する。優れた歌手は熟達した歌唱技術によって発声器官を制御し、自由自在にその歌声を用いて今日に至るまで私たちを魅了し続けている。そして、これを実現するために、歌手を目指す学習者たちは日々鍛錬を続けている。

スポーツの分野では、卓越した身体技能のメカニズムを探求するためにスポーツ科学が発達し、怪我や故障のリスクを避けながら効率のよい訓練方法が提案され、今なお様々な種目で世界的な記録が伸び続けている。しかしながら、音楽において演奏技能の解明は遅れていると言わざるを得ない。「音」は目に見えないものであり、さらに「歌唱」は他の楽器に比べて発声器官を外部から観察できないために、そのメカニズムを調査することは困難である。

近年、科学技術の発展により歌声の音響的特徴の解析や、歌唱時における体内運動の観測が可能となった。そして、音声分析処理や生体計測技術の導入により「歌唱行動」を多角的に研究し、その実態を少しずつ明らかにすることが可能となってきている。諸外国では、すでに科学的な知見に基づく指導の導入が模索されており、単に歌声の基本周波数や振幅だけでなく、歌声特有の周波数成分の計測や、それを可視化して用いた指導法の提案などが検討されている[1]。日本においては、歌声の分析に加えて磁気共鳴画像法（MRI:Magnetic Resonance Imaging）を用いた研究が発展し、歌唱時の体内運動を可視化することが検討されている[2]。

本招待講演では、今日の歌唱指導の現状を踏まえ、これまで筆者らが行ってきた研究について概説し、音声の分析とリアルタイムMRI動画を用いた体内運動の観測による客観的な資料に基づく歌唱指導の可能性について検討する。

2 歌唱指導の現状

今日の音楽教育における歌唱指導は、主に指導者の経験と主観的な感性によって行われている。指導者がそれまで習得してきた歌唱技術や演奏の経験を基にして指導法が考えられ、身体や歌声に関する感覚やイメージを指導者と学習者が共有することによって指導が行われる。指導者は学習者の発する歌声の良し悪しを判別し、学習者は良いと判断された際の感覚やイメージを覚え、このプロセスの繰り返しによって歌唱技術を習得する。

しかし、同じ指導を受けても、全ての学習者が等しく歌唱技術を習得できるわけではない。日本の音楽大学では、毎年多くの卒業生を送り出している。しかしながら、卓越した演奏技術を習得し、プロの演奏者として卒業後に演奏活動を続けることができる者はほんの一握りであると言わざるを得ない。その要因として、指導者や学習者の能力による「個人差」が第一義的に考えられるが、さらに指導者と学習者の相性や、流派や訓練法に対する向き不向きなどの要因も加味すると、プロの演奏者として確立するための演奏技術を習得することは大変困難である。中でも歌唱は、技術の習得のために感覚やイメージに頼らざるを得ない要素が多いため、さらに難しい。

3 音声生成の仕組み

Fig. 1 に示すように人間が音声を発する為には、呼吸器官、声帯、声道という3つの器官が大きな役割を果たしている。呼吸器官には、空気を体内に取り込むための肺があり、肺を

* Possibility of singing instruction based on voice analysis and observation of internal body movements, by TAKAHASHI, Jun(Osaka University of Arts), TODA, Natsuki, and TAKEMOTO, Hironori(Chiba Institute of Technology).

囲む胸郭と底部にある横隔膜の動きによって受動的に呼気と吸気を繰り返す。声帯はその弾性や張力を変化させることが可能であり、厚みや長さの形状を変えることによって声の高さを決定する。声帯を長くして張力を上げることにより音高は高くなり、短くして張力を下げると音高は低くなる。声道は、主に喉頭腔、咽頭腔、口腔の3つの空間を示す(鼻腔も声道に含まれる場合がある)。肺から出た呼気によって声帯が開閉運動を繰り返す。これは喉頭音源と呼ばれ、ブザーの様な音であるが、声道で共鳴することによって声の音色が決定され、個人性や音韻性、そして声楽的に言うところの「響き」をもった歌声となる。声道の形状は顎の開閉、舌の形状、喉頭の上下運動などによって変化し、それに伴って声の音色も変化する[3]。

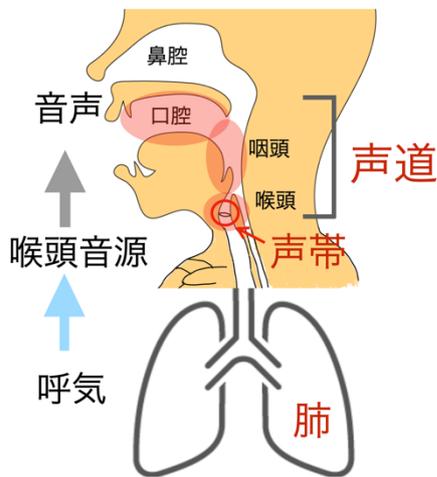


Fig. 1 音声生成の仕組み

4 歌い手のフォルマント

優れた歌手の歌声には、共通する音響的特性として「歌い手のフォルマント Singer's formant (以下 SF)」と呼ばれる 3 kHz 付近の周波数群の高まりが存在する。SF は主に第 3、第 4、そして第 5 フォルマントが融合し、そのエネルギーが 3 kHz 付近に集約されることで生成される[3]。3 kHz 付近は人間の聴覚感が最も高い帯域であり、SF はオーケストラ等の楽音のパワーに卓越しているのでマスクされにくい特性があり、聴き手に「響き」や「豊かさ」といった聴覚印象を与える[4]。

これまでの研究において、プロの歌手(以下プロ)と音楽大学で声楽を学ぶ学生(以下学生)の歌声に含まれる SF の占有率を比較検討した結果、プロの歌手の歌声の方が

SF 占有率(周波数スペクトルのうち 2-4 kHz の占める割合)が高いことが明らかとなった。また、単に高いだけでなく、プロの歌手は母音と音高の変化を伴う 2 音間において、SF 占有率の変化が少ないことも確認された。これは、プロの歌手は出来るだけ歌声の音色や響きを変えずに歌唱しているということである。また、主観評価実験を行い、SF 占有率が高くその変化が少ない歌声は、聴き手に高い評価を得るということも確認している[5]。

5 歌唱時の体内運動

5.1 rtMRI 撮像

プロと学生の歌唱時の体内運動を ATR-Promotions に設置されている MRI (Siemens 製 MAGNETOM Prisma fit 3T) を用いて観測した。歌手は MRI 装置内で仰臥し、横隔膜と喉頭の撮影のためコイルを交換して指定された歌唱課題を 2 回ずつ歌唱した。横隔膜、喉頭とも動画をスライス厚 10 mm、10 フレーム毎秒の速度で 50 秒間撮像した。横隔膜はピクセルサイズ 1.22×1.22 mm、喉頭はピクセルサイズ 1×1 mm とした。

5.2 声道形状の制御

Fig. 2 は、プロと学生の歌唱時の声道の様子を示したものである。プロでは、喉頭が下降し咽頭が拡大しているのに対して、学生は、喉頭の位置が高く咽頭が狭い。Fig. 2 は最も歌唱技術の差が出やすい高音域の歌唱時であるが、この傾向はその他の音域でも観察された[6]。Fig. 3 は、プロが熟達した歌唱法を用いて発声(以下、声楽的発声)した際と、その歌唱法を用いずに発声(以下、非声楽的発声)した際の声道形状の違いを示したものである。声楽的発声では、喉頭が下降し咽頭が拡大しているのに対して、非声楽的発声では、声楽的発声に比べて喉頭の位置が高く、咽頭が狭い。これらは他のプロの歌手でも見られたことから、熟達した歌唱技法には喉頭の下

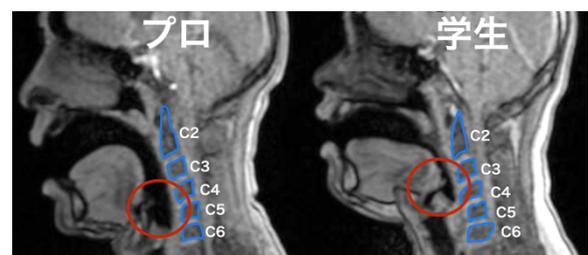


Fig. 2 プロと学生の歌唱時の声道の様子

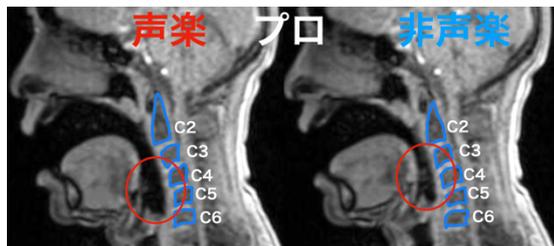


Fig. 3 声楽・非声楽的発声の声道形状の相違

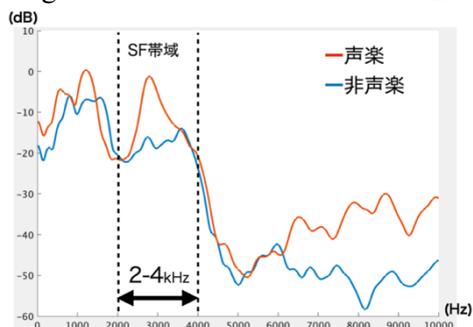


Fig. 4 声楽・非声楽的発声のスペクトル比較

降と咽頭の拡大が重要であることが伺える。さらに、声楽的発声のフォルマントを調べると、Fig. 4に示す通りSFに相当する2-4 kHz帯域のエネルギーが、非声楽的発声よりも増加した[7]。これは、SFの生成には喉頭が下降して咽頭腔が拡大することが必要であることを示唆している。

5.3 横隔膜の制御

プロと学生がFig. 5で示す歌唱課題を行っている際の横隔膜の制御を観測した。Fig. 6は胸腹部の右側矢状断面で、Fig. 7はFig. 6の青線上における横隔膜の位置の時間変化をカイモグラフとして抽出したものである[8]。横隔膜は吸気で下降し呼気で上昇する。プロと学生では上昇パターンに差異が見られた。学生では歌唱中は滑らかに上昇したが、プロでは各音に対して異なる上昇パターンを示した。これは、プロでは音高ごとに異なる横隔膜の制御を行っていることを示し、各音に対して適切な呼気量を供給していると思われる。また、プロにおいて歌唱中に高音から低音に移行する際に、横隔膜が一時的に下降している箇所が見られた。横隔膜が下降することは吸気を意味しており、歌唱中であることと矛盾する。これは、被験者の内観報告から「支え直す」という高音から低音への移行時に用いる歌唱技術であり、本研究で観察したほとんどのプロの歌手に見られる現象であった。そこで、より高い精度で呼気の制御を検



Fig. 5 音高と母音の変化を含む歌唱課題

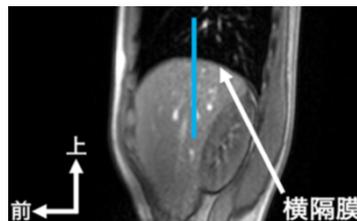


Fig. 6 横隔膜の変位を観測した位置 (青線)

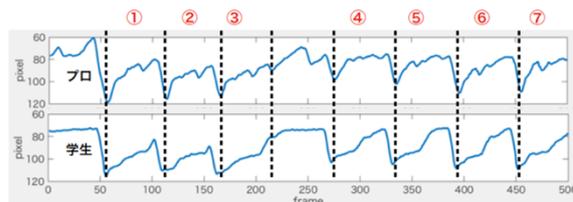


Fig. 7 プロと学生の横隔膜の比較

討するために、歌唱中の動画の全フレームから肺の矢状断面の輪郭を抽出し、肺の形状変化から呼気流量と肺圧を推定した。その結果、高音から低音へ移行する際に、横隔膜の背側を僅かに下降させて肺の容積を一時的に増大させることで急激に肺圧を下げ、低音に必要な低い肺圧を得た後、再び肺圧を上昇させていることが明らかとなった[9]。

6 音楽表現との関係

歌唱において演奏技能とは、単に楽譜に記された音符通りに「良い声」を出すことを意味するわけではない。音楽には必ず「表現」があり、旋律や歌詞の内容、音楽記号によってどのような音楽をつくり、どう表現するのかが歌手に要求される。そこで、このような音楽表現と音響的特徴と歌唱中の体内運動との関係について検討した。

6.1 声の明暗の表現

表現と歌声の音色には密接な関係があり、優れた歌手は、曲種やその曲で求められる表現にあわせて、同じ母音・音高でも、歌声の音色を変化させることができる。そこで筆者らはプロの歌手が「普通」の声、「明るい」声、「暗い」声を歌い分けた際の歌声を音響分析し、声道形状をMRIで観測した。その結果、喉頭を下降させて咽頭を伸長・拡大し、第1フォルマントを下降させることで

「暗い」声を、口唇を開いて第2フォルマントを上昇させることで「明るい」声を出していることが明らかとなった[10]。さらに声道断面関数[11]を用いたシミュレーションにおいても同様の結果が得られた。

6.2 アクセント，ポルタメントの演奏技法

同じ旋律であっても、アクセント（跳躍時に各音を強く演奏する）やポルタメント（滑らかに演奏する）のような音楽用語が指定してある場合、それぞれ異なった表現として演奏される。この演奏技法の違いにおいて、肺容積と肺圧の制御にどのような差が現れるのかをプロの歌手で検討したところ、高音域での歌唱において、アクセントでは、上行跳躍進行で急激な肺圧の上昇が見られ、ポルタメントでは、音高の変化に対して緩やかな肺圧の変化が見られた。この結果は、それぞれの演奏技法による音の移行の特徴と整合性があり、プロの歌手は、歌声の演奏技法を変化させる際に、肺圧を高度に制御することによって表現していることが明らかとなった[12]。

7 科学的な知見に基づく歌唱指導

歌唱を訓練する上で、歌声に関する音響的な理解と、発声器官のメカニズムに対する正しい知識が必要不可欠である。例えば、「声の響き」とは特定の周波数帯域のエネルギーの高まりであり、「喉を開く」ということが、喉頭の下降と咽頭腔の拡大であるということを経験者と学習者が理解し、同じ体内運動のイメージを共有することができるならば、これまで感覚やイメージを主体としてきた指導から、より具体性を持った指導にシフトすることが可能となる。そして、高音発声などの難易度の高い歌唱技術においても、正しいメカニズムを理解することにより、効率的で安全な練習法を模索することができる。現在、筆者らはリアルタイムでSFを測定し、可視化できるアプリケーションの開発を進めている。これにより、SF帯域に必要なエネルギーがどの程度あるのかを実際に観察しながら訓練することが可能となる。

このように、従来法の歌唱指導に加えて、これまで述べてきたような歌声の音響的特徴や、歌唱時の体内運動を可視化し、指導者と

学習者がそれを共有することにより指導の質が向上し、ヨーロッパやアジア諸国から遅れをとっている日本の歌手の技術水準の底上げに寄与することができるのではないだろうか。また、このような研究が続けられていくことにより、音楽大学が教育機関として演奏家を輩出するだけではなく、研究機関として音楽に関する科学的な研究を発信し、広く周知されることを期待する。

今後は、まず従来の指導法と比べて感覚やイメージを共有することでどの程度効果があるのかを検討する。さらに、プロの歌手や指導者を対象にアンケート調査を行い、「喉を開く」「支える」等の指導用語が、どの程度共通したものなのか、反対に異なる用語が同じ体内運動を示す可能性がないかを模索する。また、重要度や難易度の高い技術的要素を含む歌唱課題を作成してその体内運動を可視化し、得られた動画をデータベースとして公開することにより、各研究機関において、それらの教育的効果が広く検討されるようにしていきたい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 19K12048, 20K2261 そして 22K13773 の支援を受けた。実験に参加して頂いた全ての方々に感謝する。

参考文献

- [1] D.Rossiter *et al.*, The Journal of the Acoustical Society of America 99, 3253-3256,1996
- [2] Takemoto *et al.*, Proc. Interspeech, 2019,904-908,2019.
- [3] Sundberg, J, *THE SCIENCE OF THE SINGING VOICE*, 1987.
- [4] 斎藤他, 日本音響学会誌 64 巻 5 号, 267-277, 2008.
- [5] 高橋他, 音講論 (秋), 795-798, 2019.
- [6] 高橋他, 音講論 (春), 773-774, 2020.
- [7] 高橋他, 音講論 (春), 737-738, 2021.
- [8] 戸田他, 音講論 (春), 677-678, 2020.
- [9] 戸田他, 音講論 (春), 735-736, 2021.
- [10] 高橋他, 音講論 (春), 1035-1036, 2022.
- [11] T. Kitamura *et al.*, Acoust. Sci. & Tech.,30, 288-296, 2009.
- [12] 戸田他, 音講論 (春), 1033-1034, 2022.