

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 10 月 18 日現在

機関番号：32716

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25370117

研究課題名(和文)歌唱時の身体感覚の解明：MRIによる発声器官の可視化と音響分析を中心とした試み

研究課題名(英文) Singers' physical perception of singing: Visualization of the organs by Magnetic Resonance Imaging (MRI) and acoustic analyses

研究代表者

羽石 英里 (HANEISHI, ERI)

昭和音楽大学・音楽学部・教授

研究者番号：70350684

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：歌手は自らの身体が楽器であるため、歌唱にかかわる諸器官の動きを視認することができない。本研究では、歌手の身体感覚と実際の現象との対応関係を検証することを目的として、歌手へのインタビューを行い、歌唱技術の要とされる横隔膜の動きを実時間での磁気共鳴画像法(MRI動画)を用いて可視化した。その結果、プロ歌手の制御された横隔膜の動きが観察され、その現象が歌手の主観的な身体感覚の説明とも一致することが明らかになった。また、声道や舌の形状、ヴィブラートにも歌唱技術を反映すると思われる特性がみられた。本研究で提案されたMRIによる撮像法と分析法は、歌唱技術を解明する上で有用な手段のひとつとなりうるであろう。

研究成果の概要(英文)：Singers cannot look at their own organs responsible for singing. Based on the interviews for singers, the diaphragm was identified as one of the important organs for singing techniques. The motions of the diaphragm were visualized by real-time magnetic resonance imaging (MRI) and acoustic analyses were performed. In our cases, MRI movies of the professional singers, compared with those of beginners, indicated more controlled diaphragm motions, which reflected their own subjective descriptions of physical perception during singing. The shapes of the vocal tract and the tongue as well as stable vibratos also suggested professional singing techniques. The MRI motion imaging techniques and its analyses that we proposed in this study may be one of the useful methods to elucidate singing techniques.

研究分野：音楽療法、発声学(Vocology)

キーワード：歌唱 身体感覚 横隔膜 MRI 音響特性 声道 可視化 発声学

### 1. 研究開始当初の背景

身体そのものが楽器である歌手は、自らの発声器官を視認できない。そのため、歌唱時の身体感覚を説明する場合、主観的な、時には比喩的な言語表現を用いざるを得ない(例「からだがあく・あいていない」「息がまわる・まわっていない」等)。

歌手の身体感覚を裏付ける客観的な指標を知ることができれば、望ましい歌唱技術を安定的に再現することや、技術に問題がある場合に修正する手がかりが得られるかもしれない。また、そのような視点は、歌唱技術を後進に指導する場合にも生かされると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、歌唱時の身体感覚と、その解剖学的・生理学的現象、歌唱音声の音響学的特徴との対応関係を探る。それによって歌唱のメカニズムの解明と演奏技術向上への貢献を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 歌手へのインタビュー

まず、歌手自身が演奏上重要と考えている身体器官と、その身体器官の状態を歌手が歌唱時にどのような身体感覚でとらえているかを知るために、プロ歌手および経験の浅い歌手を対象としてインタビュー調査を行った。なお、当初は対象をソプラノ歌手だけに絞っていたが、今後の研究の広がりの可能性も視野にいれ、他の声種の歌手も参考として加えた。プロ歌手は声楽の大学教育を受けたのち、プロとしての演奏経験を有する者とした。演奏経験の浅い歌手は声楽専攻またはクラシックの発声を基本としたミュージカル専攻の学生で、プロとしての演奏経験はない。

インタビューでは「望ましい歌唱ができていると思うとき、MRI 等を用いて可視化してみたい身体部位はどこですか?」「望ましい歌唱ができていると感じるときの身体感覚を言葉で表現すると、どのようになりますか?」という2点を中心に質問した。

その結果、可視化してみたい身体部位として多かったのが、歌唱時に呼吸に関与すると考えられている器官(背中・腰などの筋肉、横隔膜) および歌声の響きに関与していると思われる器官(鼻腔、頬の裏、舌、軟口蓋など)であった。横隔膜については身体感覚が具体的にイメージされていた(「吸気時の横隔膜の」広がった状態が保たれている」、「歌い終わりまで使っている」等)。その他、響きに関連する器官については「舌、あご、のどの力が抜けている」、「首の後ろ側があく感じ」等のコメントも多かった。

#### (2) 磁気共鳴画像(MRI)の撮像と歌唱音声の録音

インタビューを受けて、歌唱時の呼吸コントロールの要であり、比較的動きがとらえや

すい横隔膜の可視化をまず試みた。MRI では横隔膜そのものを撮像することはできないが、肺と肝臓の境界線としてとらえることができる。MRI 動画では毎秒10フレームの撮像が50秒間可能であり、これは一定の音楽的タスクの中で比較的ゆっくりとした横隔膜の動きをとらえるには十分な速度である。撮像断面については予備実験を行い、複数のプロ歌手に供覧して意見をきいたのち、横隔膜の動きがわかりやすい矢状面(体を左右に分けた面)を選択した。ただし、心臓を避けるため、正中矢状面(体の中央を左右に分けた面)ではなく、右側中央の矢状面にて撮像を行った。なお、横隔膜の撮像と同じタスクを用いて、声道(声帯より上の咽頭腔、口腔、鼻腔)の状態とらえた正中矢状断面のMRI動画も参考のために撮像した。横隔膜と声道はMRI装置の制約によって同時に撮像できないため、同日のうちに別々に行った。

被験者は仰臥位にてヘッドホンから流れるガイド音に従って歌唱し、光マイクロフォンにて撮像時の歌唱音声を録音した。ただし、MRI稼働時の騒音が大きいので、音響分析用として無響室での録音を同日のうちに同じタスクと仰臥位にて行った。歌唱タスクは、本研究を通じて異なる音域でのオクターブの上下行を用いた(図1)。ガイド音を聴き、それに続いて同じ音型を繰り返すことで複数の被験者が同じタイミング・音高で歌えるように配慮した。息継ぎはガイド音のみの部分で行い、それぞれのオクターブ(A3-A4-A3、C4-C5-C4、G4-G5-G4、Bb4-Bb5-Bb4)は一息で歌った。



図1. ガイド音とタスク

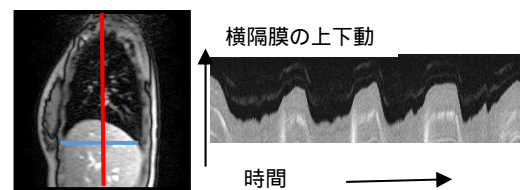


図2. 横隔膜矢状面の分析位置(左、赤線)と上下動を時間軸に沿って示したもの(右)

画像分析にあたっては、1フレームにつき10枚、50秒で500枚の画像を分析ソフトに読み込み、図2の縦の赤線で示すように、横隔膜の最前部と最後部の中央部の位置で切り取り、上下動を時間軸に沿って示した。

### 4. 研究成果

#### (1) 横隔膜の上下動のMRI画像分析

横隔膜に関しては肺と肝臓の境目に沿っ

た線（図2右では黒と灰色の部分の境界線）を取り出し、カイモグラフにすることができた。図3の例はプロのソプラノ（上）と経験の浅いソプラノ（下）の横隔膜の上下動を示すカイモグラフである。縦軸は横隔膜の上下動の位置変化を示す。横軸は時間で、図1で示した4つのオクターブ・フレーズの区間が矢印で示されている。吸気前は上方に位置する横隔膜が吸気と同時に下降し、矢印で示してある各オクターブ・フレーズ開始と同時に呼気・発声が始まり上昇していく。

この例について上下のカイモグラフを比較すると、プロ歌手においては発声直前の吸気時の位置、すなわち発声区間の矢印左先端のA3、C4、G4、Bb4直前の位置がほぼ一定であるのに対し、経験の浅い歌手では最初のオクターブ・タスクの直前（A3の前）の位置が高く、横隔膜の動きが小さい。言い換えれば、プロ歌手は、次に来る歌いはじめの音の高さにかかわらず横隔膜を一定の位置まで下降させて発声に備えるのに対し、経験の浅い歌手の場合は、吸気時の横隔膜の動きを制御できていない可能性がある。

次に、プロ歌手と経験の浅い歌手について発声が始まってからのカイモグラフ（各タスクの矢印の部分）を比較してみる。プロ歌手においては、各オクターブ・フレーズ歌唱中の横隔膜の上昇の角度が緩やかであるのに対し、経験の浅い歌手の場合は、角度が鋭角で、横隔膜が発声開始と同時に急激に上昇していることがわかる。すなわち、プロ歌手の場合は横隔膜をできるだけ下方に保ちながら上昇のスピードをゆっくりと一定に保っているのに対し、経験の浅い歌手の場合は、いったん発声が始まると横隔膜の上昇を抑えることが難しいと思われる。

さらに、歌い終わりの横隔膜の位置（各矢印右先端）を比べてみると、経験の浅い歌手に比べ、プロ歌手のほうが横隔膜の位置が低くなっている。歌いはじめの吸気のために横隔膜が下降した距離のうち、横隔膜が歌い終わりまでに何パーセント上昇したかを計算した。図3の例では、プロ歌手は歌い終わりまでに4つのオクターブ・フレーズの平均で全体の51.6%の位置まで横隔膜が上昇したのに対し、経験の浅い歌手では77.9%まで上昇していた。このことは、プロ歌手が経験の浅い歌手に比べ、横隔膜の動きを比較的強く保ちつつ、歌い終わりまでコントロールしていることをうかがわせる。その結果、歌い終わってもなお、呼気に余裕を持たせることが可能となっているのだろう。

上記の例の結果は、歌手へのインタビューにある「（吸気時の横隔膜の）広がった状態が保たれている」、「歌い終わりまで使っている」というプロ歌手身体感覚に沿うものであり、歌手がこれまで主観的に説明してきた横隔膜の動きを裏付ける結果となった。

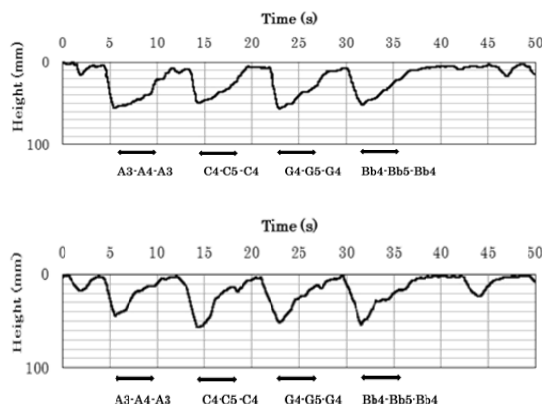


図3. プロ歌手（上）と経験の浅い歌手（下）の横隔膜の上下動の例

## （2）声道・構音器官のMRI画像分析

喉頭については構造が複雑で、MRI動画によりその動きを横隔膜のように明確に可視化することは難しかった。そこで今回は、声道（声帯から上の咽頭、口腔、鼻腔）の形状と喉頭、構音器官（舌、口唇、軟口蓋など）の位置をMRIで質的に観察することとした。

図4にプロのソプラノ歌手（上段）と経験の浅いソプラノ歌手（下段）の例を示す。各段左側がBb4の高さでの発声時、右側はそのオクターブ上のBb5発声時の状態である。プロ歌手は経験の浅い歌手に比べ、高音に跳躍したとき咽頭腔（舌の後ろ側の空間）が広がっており、それを助けるように頸椎もやや後湾している（図4右上）。また、プロ歌手では口腔（舌と上顎に挟まれた空間）も高音のBb5で広がっているのに対し、経験の浅い歌手では狭いままである（図4右下）。さらに、プロ歌手では舌は音高にかかわらず比較的丸く保たれているのに対し、経験の浅い歌手の舌は、どちらの音高でも部分的に隆起しており、舌の筋肉に力が入っていることがうかがわれる。

プロ歌手の声道の形状や構音器官のMRI画像についても、インタビューにあった「舌、あご、のどの力が抜けている」、「首の後ろ側があく感じ」というプロ歌手の身体感覚に関する説明と一致していた。

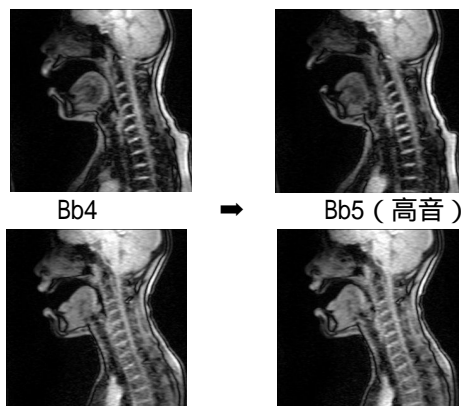


図4. プロ歌手（上）と経験の浅い歌手（下）のオクターブ跳躍時の声道・構音器官の状態

### (3) 音響分析

音響分析について、図5にプロのソプラノ歌手(上段)と経験の浅いソプラノ歌手(下段)の結果を1例ずつ示す。縦軸は基本周波数(声の高さ)、横軸は時間で、各段左側がG4-G5-G4のオクターブ・フレーズ、右側がB4b-B5b-Bb4のオクターブ・フレーズ歌唱時の基本周波数の推移を表している。

プロ歌手においては、どちらのオクターブについても高音(G5, Bb5)での発声時の基本周波数に周期性が見られ、安定したヴィブラートが確認できるのに対し、経験の浅い歌手にはそれが見られない。プロ歌手においては、高音歌唱時にも喉頭や舌などの発声・構音器官が適度にリラックスして振動し、ヴィブラートが生成されている可能性がある。

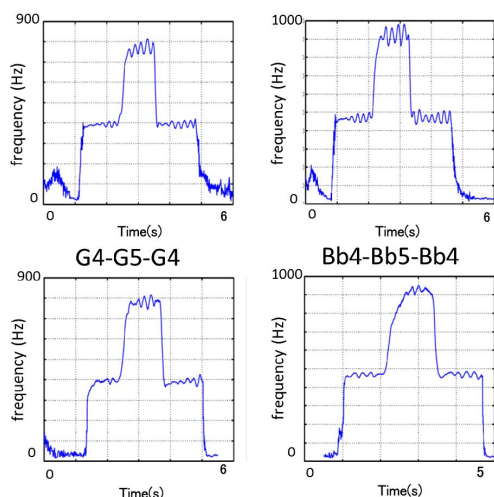


図5. プロ歌手(上)と経験の浅い歌手(下)のオクターブ歌唱時の基本周波数の推移

なお、本研究では音響分析の発展した形として、実時間で音声から発声時の声道形状を逆推定してコンピュータで表示する方法も並行して探求してきた(図6 SparkNG=Speech Production and Auditory perception Research Kernel the Next Generation)<sup>(1)</sup>。

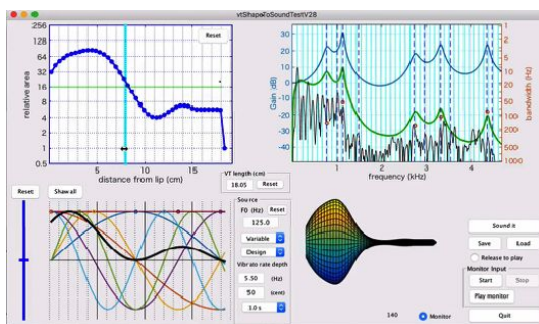


図6. SparkNG

逆推定によって得られた声道形状を、実時間MRI動画で得られた声道形状と比較検討して逆推定の精度を高めれば、声道形状の制御に関する歌唱技術も将来可視化できる可能性がある。

### (4) まとめ

本研究では、実時間MRI動画を用いて横隔膜の上下動を可視化することができた。歌唱時の主観的な身体感覚と実際の現象との対応関係を、MRIを用いて示す方法を提案できたことは、この研究におけるもっとも重要な成果といえよう。これによって、声楽トレーニングの積み重ねによる歌唱技術の特徴を客観的に明らかにする端緒が得られたと考える。今回の結果を、声楽教育や演奏の向上、健康的な発声の指導方法の開発などに生かしていきたい。

#### <引用文献>

(1) <http://w.w.w.wakayama.ac.jp/~kawahara/Matlab RealtimeSpeechTools/>

#### 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 3 件)

岸本宏子、科研費によって開かれた学際的音楽学の可能性 「歌う声の研究」の端緒と展開、昭和音楽大学研究紀要、査読有、35巻、2016、107 - 122

羽石英里、歌唱と呼吸：横隔膜の役割と発声改善への可能性、音楽療法研究、査読有、4巻、2015、17 - 20

羽石英里、望ましい歌唱時の身体感覚 歌手へのインタビューの経過報告、音楽療法研究、査読有、3巻、2014、33 - 36

〔学会発表〕(計 6 件)

羽石英里、竹本浩典、河原英紀、織部玲児、歌唱技術の可視化について、日本音響学会、2016年3月11日、桐蔭横浜大学(神奈川県川崎市)

Haneishi E, Kawahara H, Hagiwara K, Oribe R, Takemoto H, Honda K, A preliminary study on diaphragm motions and vocal tract configurations during singing: Analyses of real time MRI and acoustic data, Pevco 11 (11<sup>th</sup>-Pan-European Voice Conference), September 1<sup>st</sup>, 2015, Firenze, Italy

河原英紀、羽石英里、周期信号の静的表現を用いた歌唱音声の分析について、日本音響学会、2015年3月18日、中央大学理工学部(東京都文京区)

羽石英里、萩原おかり、岸本宏子、織部玲児、竹本浩典、本多清志、歌唱時の身体感覚の解明 歌手へのインタビューを通じた考察、日本音声言語医学会、2014年10月9日、アクロス福岡(福岡県福岡市)

羽石英里、望ましい歌唱とは：歌手が語る身体感覚とMRIによる可視化をめぐる、小文式音声研究会(招待講演) 2014年6月21日、ホテルモントレグラスミア(大阪府大阪市)

Haneishi E, Oribe R, Takemoto H, Kawahara H, Honda K, Saitou T, Hagiwara K, Kishimoto H, Attempts of visualization of singing techniques: MRI motion imaging of diaphragm activities and acoustic features during singing, Voice Foundation, June 1<sup>st</sup>, 2014, Philadelphia (USA)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

羽石 英里 (HANEISHI ERI)  
昭和音楽大学・音楽学部・教授  
研究者番号：70350684

### (2) 研究分担者

河原 英紀 (KAWAHARA HIDEKI)  
和歌山大学・名誉教授  
研究者番号：40294300

岸本 宏子 (KISHIMOTO HIROKO)  
昭和音楽大学・音楽学部・教授  
研究者番号：10107336

### (3) 連携研究者

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  
研究者番号：40374102

細川 久美子 (HOSOKAWA KUMIKO)  
昭和音楽大学・音楽学部・客員教授  
研究者番号：70209237

榊原 健一 (SAKAKIBARA KEN-ICHI)  
北海道医療大学・心理科学部・准教授  
研究者番号：80396168

新美 成二 (NIIMI SEIJI)  
国際医療福祉大学・保険医療学部・教授  
研究者番号：00010273

萩原 かおり (HAGIWARA KAORI)  
昭和音楽大学・音楽学部・教授  
研究者番号：50649449

齋藤 毅 (SAITOU TAKESHI)  
金沢大学・理工学域電子情報学類・助教  
研究者番号：70446962

### (4) 研究協力者

藤村 靖 (アドバイザー)  
オハイオ州立大学・名誉教授

本多清志 (アドバイザー)  
天津大学・教授

城本 修  
県立広島大学・教授

北村 達也  
甲南大学・教授

八尋 久仁代  
昭和音楽大学・非常勤講師

中巻 寛子  
愛知県立芸術大学・教授

エリクソン ドナ  
金沢医科大学・非常勤講師

