歌唱表現における歌声の明暗と声道形状の分析*

○高橋純（大阪芸大），戸田菜月，竹本浩典（千葉工大）

1　はじめに

優れた歌手は，楽曲で求められる「表現」にあわせて，同じ母音・音高であっても，「明るく」あるいは「暗く」など，歌声の音色を変化させることができる。しかし，そのメカニズムは知られていない。近年，磁気共鳴画像法（MRI: Magnetic Resonance Imaging）を用いて体内運動を任意の断面でリアルタイムの動画として撮像する技術（rtMRI）が発展し，歌唱時の発声器官の運動を観測することが可能となった[1]。前報では，3 名のオペラ歌手が同じ母音と音高で「普通」，「明るい」，「暗い」声を歌い分けた際，歌声の音響的特徴や声道形状に変化が生じることを報告した[2]。本研究では，より多くの歌手で検証を行い，歌唱表現と声道形状の関係について検討する。

2　方法

2.1 実験参加者と歌唱課題

実験参加者（以下歌手）はプロとして活躍するソプラノ（Sop），テノール（Ten），バリトン（Bar），各1名の合計3名である。Fig. 1 は歌唱課題で，音高の変化は完全 5 度跳躍進行とし，3 つの歌声の表現（普通，明るい，暗い）を母音/a/で歌唱した。開始音は声種ごとに設定した（Sop: C♯5，Ten:C♯4，Bar:B♭3）。なお，本研究では 1 音目のみを分析対象とする。
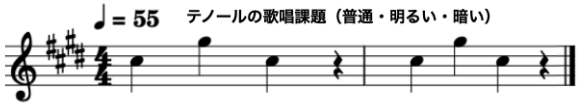
Fig. 1 音高と明・暗の変化を含む歌唱課題

2.2 rtMRI 撮像

ATR-Promotions に設置されている装置(Siemens，MAGNETOM Prisma fit 3T)を用いた。歌手は MRI 装置内で仰臥して歌唱し，スライス厚 10 mm，10 フレーム毎秒の速度で正中矢状断面における声道の動画を撮像した。なお，ピクセルサイズは 1×1 mm とした。

2.3 声道形状の分析

歌唱中の声道の輪郭をトレースした。上唇と下唇が最短となる線分 1，軟口蓋と咽頭後壁の接触点から舌までが最短となる線分 2，披裂部上部と喉頭蓋谷下端を結ぶ線分 3 を目視で引いた。線分 1 の長さを口唇の開閉の長さ，線分 1 と 2 で囲まれた声道を口腔の広さ，線分 2 と 3 で囲まれた声道を咽頭腔の広さとしてピクセル数で求めた（Fig. 2）。

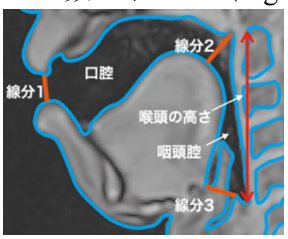

Fig. 2　声道のトレースと各部位

2.4 音声分析

MRI撮像中に光マイクロホンを使用し，歌手の口元で音声をサンプリング周波数 44.1 kHz で録音した。その後，録音した音声に対してノイズリダクション処理[3]を施し，LPC 分析（ハニング窓，フレーム長 23.2 ms，フレーム周期 10 ms，LPC 次数 46）によりフォルマント周波数を求めた。

2.5 評価実験

歌声の明・暗を評価する実験を行った。評価者はプロの歌手と声楽の伴奏経験が豊富なプロのピアニスト計 5 名とした（明るい声 5，暗い声 1 の 5 段階評価）。

3　結果と考察

Table 1 は，歌声の評価結果で，数値は 5 人の評価者による歌声の平均評価値である。どの歌手も「普通」に比べて「明るい」では点数が高く，「暗い」では低いことから，明確に 3 つの表現を歌い分けたといえる。

Table 1 各歌手・表現の平均評価値

表現	Bar	Ten	Sop
明るい	4.1	4.1	4.1
普通	2.7	3.2	3
暗い	1.8	1.6	2.1

* Analysis of bright and dark timbre and vocal tract shape in singing expression, by TAKAHASHI, Jun (Osaka University of Arts), TODA, Natsuki, and TAKEMOTO, Hironori (Chiba Institute of Technology).

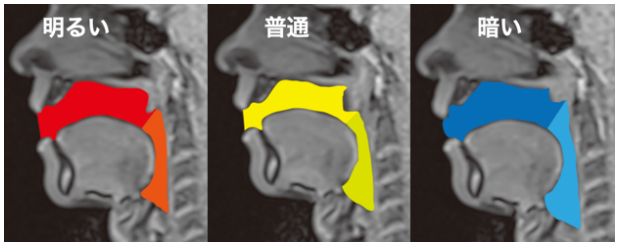

Fig. 3 Ten の 3 つの表現における声道形状

Fig. 3 は Ten の 3 つの表現における声道形状，Table 2 は全歌手の咽頭腔と口腔の広さと口唇の開閉の長さを示す。全ての歌手で咽頭腔，特にその下部の広さは「普通」に比べて「明るい」では小さくなり，「暗い」では大きくなった。一方，口腔の広さと口唇の開閉の長さには表現に合わせた規則的な変化が見られなかった。すなわち，「明るい」，「暗い」の歌い分けは，咽頭腔，特にその下部で行っていると推定される。

Table 2 全歌手の声道各部位のピクセル数

歌手	表現	口唇	口腔	咽頭腔
Ten	明るい	19↑	1720↑	769↓
	普通	15	1357	812
	暗い	11↓	1750↑	1194↑
Bar	明るい	7	1337↓	594↓
	普通	7	1756	610
	暗い	8↑	2406↑	724↑
Sop	明るい	22↑	1935↑	433↓
	普通	17	1448	524
	暗い	20↑	1534↑	721↑

Table 3 は，3 つの表現における全歌手の歌声の第 1～3 フォルマント周波数（F1～F3）である。共通した変化は，「明るい」では，F1，F2 が上昇し，「暗い」では Sop の F1（同値）を除いた F1，F2 の下降であった。

Table 3 全歌手のフォルマント周波数の変化

歌手	表現	F1	F2	F3
Ten	明るい	820↑	1330↑	2690↓
	普通	780	1200	2820
	暗い	560↓	1070↓	2790↓
Bar	明るい	710↑	1120↑	2690↑
	普通	670	1100	2630
	暗い	640↓	920↓	2540↓
Sop	明るい	1090↑	1700↑	3330
	普通	940	1200	3330
	暗い	940	1070↓	3220↓

[Hz]

口唇の開閉や口腔・咽頭腔の拡大がフォルマントに与える影響を検討するために，母音/a/で歌唱中の各歌手の声道を MRI で 1×1×2.5 mm の解像度で 3 次元撮像し，歯列を補填[4]して抽出した声道断面積関数[5]から F1～F3 の音響感度関数[6]を算出した。

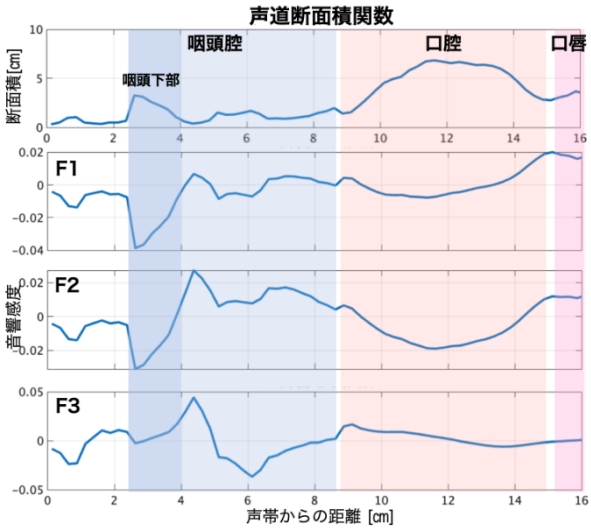

Fig. 4 Ten の声道断面関数と F1～3 の音響感度

Fig.4 は，Ten の声道断面関数と F1～F3 の音響感度関数である。咽頭腔の下部において F1，F2 の音響感度が負で絶対値が大きいので，この部位を拡大すると F1，F2 が下降し，縮小すると上昇することを示す。この結果は，Table 3 の F1，F2 の変化とよく一致した。

4　まとめ

本研究では，歌唱表現と声道形状の関係について検討した。咽頭腔の下部は「明るい」では縮小し，「暗い」では拡大した。F1，F2 は「明るい」では上昇し，「暗い」では下降した。これらは声道断面積関数から計算した音響感度関数の結果と一致した。すなわち，歌唱表現における明暗は主に咽頭腔の容積制御で行われることが明らかとなった。口腔や口唇は付随的役割と考えられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 22K13773，23K11172 の支援を受けた。

参考文献

[1] Takemoto *et al.*, Proc. Interspeech, 2019,904-908,2019.
[2] 高橋他，音講論（秋），1035-1036，2022.
[3] S. F. Boll，IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process., 27, 113–120, 1979.
[4] 加地他，音講論（春），801-802，2022.
[5] T. Kitamura *et al.*, *Acoust. Sci. & Tech.*, 30, 288–296, (2009).
[6] Story, JASA119(2),715-718,2006.