

声楽の習熟度に関連する音響特徴量に基づく 歌声の評価方法に関する研究

Study on Metrics for Women Singing Voice based on Frequency Features
Related to Skill-Development of Singing Voice

吉田 祥¹ 香山 瑞恵² 池田 京子³ 山下 泰樹⁴ 山口 道子⁵

小畑 朱美⁵ 谷 友博⁵ 浅沼 和志⁶ 伊東 一典²

Sho Yoshida¹, Mizue Kayama², Kyoko Ikeda³, Yasuki Yamashita⁴, Michiko Yamaguchi⁵

Akemi Obata⁵, Tomohiro Tani⁵, Kazushi Asanuma⁶, Kazunori Itoh²

¹ 信州大学大学院総合理工学研究科

¹ Graduate School of Science & Technology, Shinshu University

² 信州大学工学部

² Faculty of Engineering, Shinshu University

³ 信州大学教育学部

³ Faculty of Education, Shinshu University

⁴ 長野県工科短期大学校

⁴ Nagano Prefectural Institute of Technology

⁵ 武蔵野音楽大学

⁵ Musashino Academia Musicae

⁶ 国立高専機構長野高専

⁶ NIT Nagano College

Abstract: In this research, we aim to develop quantitative metrics for singing voice based on frequency features related to skill-development of singing voices. Our metrics represent quantitative strength and proportion of 'singer's formant' related frequency components in singing voice. In this paper, we discuss the relation between singing skill and our metrics.

1 はじめに

歌声研究分野において、歌唱力と音響特徴量の関係について長年にわたって検討がなされている。ここでの音響特徴量とは、歌唱データを分析することにより出現する特徴量のことである。声楽歌唱の習熟度と音響特徴量との関連については、J.Sundberg [1-2]など、これまでに100件を超える研究論文が上梓されている。しかし、これらの研究は声楽のプロ歌手の歌声を対象としたものが多く、声楽初学者の歌唱指導と各音響特徴量の関係についてはまだ議論が十分にされていない。

また、声楽の指導は指導者の主観による評価をなされることが多い。このことには以下の課題がある。

- 同じ歌声に対して指導者ごとに評価が異なる
 - 同じ歌声の特徴に対して、指導者ごとに指導の表現が異なる
 - 指導語に曖昧な表現（例えば、として、「頭の後ろから声を出す」や「横隔膜に浮き袋を持つ」）が用いられる
- すなわち、学習者に指導内容が伝わりづらく、学習の効率性と適切性が損なわれる可能性がある。

2 歌声評価に関する先行研究

我々は、これまでに声楽初学者を対象とした歌声の習熟度と音響特徴量の関係を研究してきた。山辺らは、声楽での歌唱指導で用いられる評価語を整理し、それらの用語を用いた歌唱指導前後の歌声のパワーとピッチに関連する音響特徴量を比較した。その結果、複数の音響特徴量が歌唱指導により変化することが確認され、それらの特徴量が歌声に対する心理的印象に影響を与えることを明らかにした[3]。

また、野田らは、声楽の習熟度に関係するとされる周波数帯域の強度と割合の定量化を行い、声楽初学者に特化した歌声評価指標として整理した。そして、初学者とプロ歌手の歌声分析から、これらの評価指標値の上昇が習熟度を上げるために必要であることを示した[4]。

3 研究目的

本研究の目的は、声楽の習熟度に関連する音響特徴量による歌声評価方法を開発し、客観的な歌声評価を実現することである。この目的に対して、ここでは以下の2つの研究課題を設定した。

- I. 歌声評価指標を用いて、声楽の習熟度を区別可能であるか。
- II. 指導者の印象評価と提案指標との関係はどのようなのか。

これらの研究課題に基づき、先行研究で提案された歌声評価指標の妥当性を検証し、歌声評価指標としての汎用性を明らかにする。

4 歌声評価指標

歌声は特異なスペクトル形状を持つことが知られている。その1つが3kHz付近のスペクトルピークであり、一般に Singer's formant と称される[1,5]。この特徴は母音の違いに依存せず、特に男声の「響く声」「艶のある声」を特徴付けるといわれる。また、典型的な良い歌声の条件として、ヴィブラートや Singer's formant の存在が指摘されている。これらの特徴を有することは「(良い) 歌声らしい」という聴感的印象となるという[6]。

本章では、本研究で提案する歌声評価指標について述べる。ここでは Singer's formant に相当する周波数帯域 (2.4~4.0 kHz) の成分に着目する。この帯域の周波数成分の割合と強さを定量化した。

4.1 周波数成分の割合

歌声データに対する高速フーリエ変換 (Fast

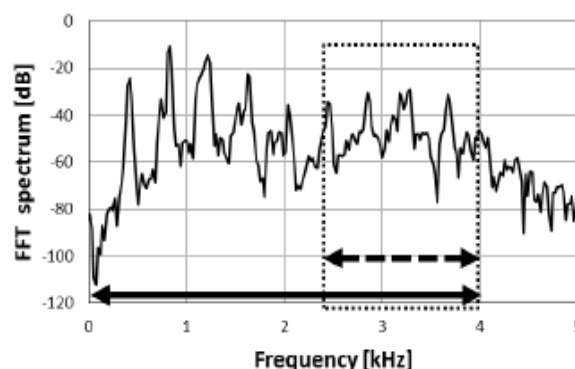


図1 SFR の定義

$$\text{RMS} = 10^{\left(\frac{d+80}{20}\right)} \quad (1)$$

$$\text{SFR} = \frac{2.4 \sim 4.0 \text{ kHz の RMS 値の合計}}{4.0 \text{ kHz までの RMS 値の合計}} \times 100 \quad (2)$$

Fourier Transform : FFT) の結果に基づき、高次倍音成分の割合を算出する。歌声データの FFT により基本周波数と倍音がピークとして現れる。FFT の分析条件は窓関数:ハミング窓, フレーム周期:10 ms, 窓長:30 ms である。

FFT 後のデータにおける振幅スペクトル特性の大きさを d とすると、RMS 値は式(1)により求められる。RMS から歌声の Singer's formant が含まれるとされる 4.0 kHz までの帯域成分のうち、2.4~4.0 kHz の帯域の合計値の割合を SFR とし、式(2)で算出する。この値が大きいほど Singer's formant 相当の周波数領域に倍音成分が集中していることを表す。

4.2 周波数成分の強さ

4.2.1 LPC 包絡線の算出方法

歌声に対する LPC 包絡線から高次倍音成分の強さを算出する。LPC 包絡線は以下の手順で求める。

1. 音声データを読み込む
2. 音声波形の中心部分を切り出し波形 x とする
3. プリエンファシスフィルタをかける
4. ハミング窓をかける
5. LPC 次数 12 として、FFT のサンプル数 N 、自己相関関数のサイズを τ として、波形 x の自己相関 r を以下の式(3)で求める
6. 自己相関 r を用いて、LevinsonDurbin アルゴリズムから LPC 係数を算出する

手順 3.ではプリエンファシスフィルタを用いる。このフィルタは、音声のスペクトルを平坦化しダイナミックレンジを圧縮することで実効的な SNR を

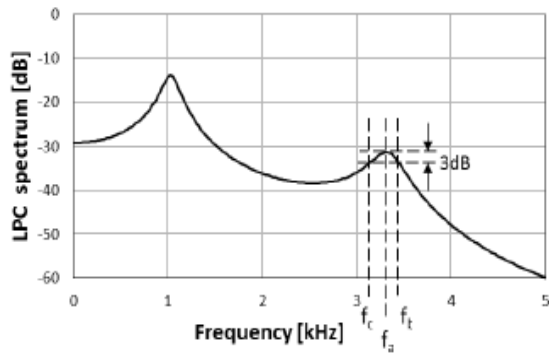


図2 Q値の定義

$$Q = \frac{f_a}{f_b - f_c} \quad (4)$$

高める。また、手順5.の自己相関関数は先行研究[4]での分析時の計算式とは異なり、サンプル数から自己相関関数のサイズを減じた値で除算する。

4.2.2 Q値

4.2.1項に示した手順で求められたLPC包絡線を用いて、倍音成分の強さとしてのSinger's formant相当の周波数成分の鋭さを算出する。LPC包絡線におけるSinger's formant相当の周波数領域の鋭さをQ値とする。2.4~4.0 kHzの帯域において、最大ピークの周波数をfa、ピークの両側に-3dBとなる周波数をfb、fc (fb > fc)として、Q値を式(4)から算出する。Q値が大きいほど周波数成分が狭い範囲に集中していることを表す。

5 初学者とプロ歌手との比較

本章では、4章で示した歌声評価指標を用いて、習熟度の異なる声楽初学者群とプロ歌手群を比較する。その結果に基づき、提案指標の妥当性を男声・女声それぞれについて検証、考察する。

5.1 分析環境

分析対象とした被験者の歌声データ数を表1、2に示す。男声の声楽初学者は、教育学部音楽教育コースの2~4年生(以下、教育学部生)9名と音楽大学声楽科の1名(以下、音大生)である。教育学部生の声種はバリトンが6名、テノールが3名である。音大生の声種は、バリトンである。また、男声プロ歌手のプロフィールを表3に示す。女声被験者の声種は全員がソプラノである。教育学部音楽教育コースの2~4年生52名と音楽大学声楽科の1、2年生7名である。また、女声プロ歌手のプロフィールを表4に示す。

分析で使用する楽曲は、声楽指導者の意見からイタリア歌曲「Caro mio ben」(作詞：不明、作曲：Tommaso Giordani)とした。被験者は、曲全体を独唱する。各被験者につき1回の収録で2回ずつの歌

表1 各収録時期の歌声データ数(男声)

	教育学部生	音大生	プロ歌手
2015年度	0	0	0
2016年度	26	0	12
2017年度	24	4	0
2018年度	24	8	0

計 98 データ

表2 各収録時期の歌声データ数(女声)

	教育学部生	音大生	プロ歌手
2015年度	120	0	0
2016年度	70	0	8
2017年度	143	50	0
2018年度	92	56	0

計 539 データ

表3 男声プロ歌手の情報

収録時期	所属 演奏キャリア	指導歴	声種
2016年	藤原歌劇団・28年	26年	Bs. Br.
	藤原歌劇団・29年	6年	Br.
	東京二期会・38年	29年	Bs. Br.
	藤原歌劇団・26年	15年	Br.
	藤原歌劇団・18年	17年	Br.
	東京二期会・20年	14年	Ten.

表4 女声プロ歌手の情報

収録時期	所属 演奏キャリア	指導歴
2016年	関西二期会・21年	12年
	東京二期会・34年	22年
	東京二期会・36年	30年
	東京二期会・33年	29年

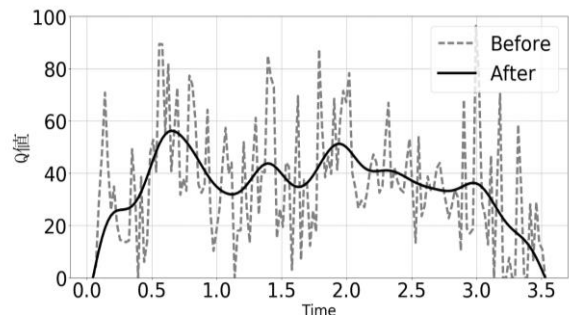


図3 平滑化例

唱をさせた。收音は音の反響しない静かな部屋で行い、レコーダは LS-P2 (OLYMPUS) を使用した。被験者にはレコーダから 2 m 離れた正面立位で歌唱させた。音声はサンプリング周波数 44.1 kHz, 量子化ビット数 16 bit で收音した。分析対象とするデータは、声楽指導者が録音した 2 つの歌声データとした。特に、「Caro mio ben」内の歌詞「cessa」と「tanto」のワンフレーズを評価対象区間とし、SFR と Q 値を適用する。これらの歌声の收音時期と取得データ数を表 1, 2 に示す。

また、分析結果の傾向を明確化するためにローパスフィルタ (以下、LPF) を用いる。本手法では、グラフの急な立ち上がりや立ち下りの整形に適しているベッセルフィルタを適用する。実際の平滑化例を図 3 に示す。グラフの横軸は時間軸、縦軸は Q 値である。また、グラフの破線が平滑化前、グラフの実線が平滑化後を表す。

5.2 可視化方法の妥当性

本分析では、分析結果の可視化を簡略化するため各データの中央値のみをグラフ上にプロットし、可視化を行う。ここでは、各被験者の習熟度を分析結果の中央値のみで表現することの妥当性を検証する。

ワンフレーズの歌唱を分析した結果と中央値とを比較するために動的時間伸縮法 (以下、DTW) を用

いる。DTW では、波形同士のアライメントと差分計算を同時に行い、両者の類似度が求められる。

今回は、表 2 に示した歌声データからランダムに選んだ 2 データに対して、時系列データの DTW と中央値のみの DTW を算出する。取得歌声データに対する総当たり組数 72631 回 (cessa 区間 ${}_{269}C_2$ 回 + tanto 区間 ${}_{270}C_2$ 回) の比較の結果、相関係数が 0.70~0.80 となった。このことから、各被験者の習熟度を分析結果の中央値のみで表現することの妥当性が示唆された。以下、本稿では全ての被験者の分析結果を中央値のみで表す。

5.3 分析結果

図 4 は男声 cessa 区間、図 5 は男声 tanto 区間、図 6 は女声 cessa 区間、図 7 は女声 tanto 区間に対する分析結果を表す。いずれのグラフも横軸が SFR であり、縦軸は Q 値である。グラフ内の赤点は教育学部生、青点が音大生、緑点がプロ歌手を示す。

これらの図では、評価対象区間に関わらず、赤点で示される教育学部生のデータが SFR, Q 値ともに女声は 10 以下、男声は 20 以下に集中していた。

5.4 考察

本節では、研究課題 I に対して SFR と Q 値を用いることによって異なる習熟度群同士を区別できる可

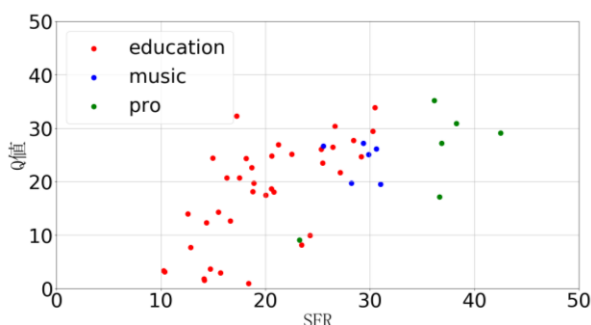


図 4 男声 cessa 区間

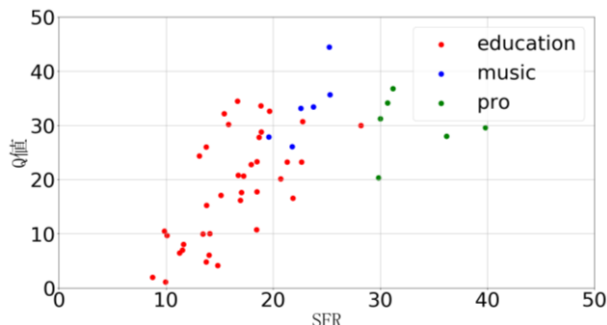


図 5 男声 tanto 区間

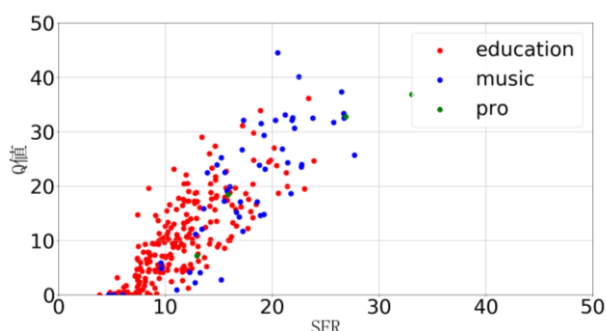


図 6 女声 cessa 区間

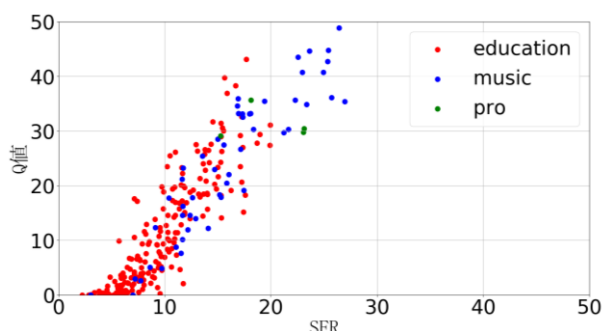


図 7 女声 tanto 区間

表5 男声 t検定の結果

	cessa 区間		tanto 区間	
	SFR	Q 値	SFR	Q 値
プロ歌手群 vs. 教育学部生群	***	n.s. p=0.11	***	***

* : p<.05 , ** : p<.01, *** : p<.001, n.s.: p>.05

表6 女声 t検定の結果

	cessa 区間		tanto 区間	
	SFR	Q 値	SFR	Q 値
音楽大学生群 vs. 教育学部生群	***	***	***	***
プロ歌手群 vs. 音楽大学生群	n.s. p=0.12	n.s. p=0.55	n.s. p=0.20	n.s. p=0.29
プロ歌手群 vs. 教育学部生群	***	**	***	***

* : p<.05 , ** : p<.01, *** : p<.001, n.s.: p>.05

能性について性別ごとに考察する。

各習熟度群同士の対応がないため、等分散性を調べる F 検定を行った後、t 検定を行った。有意水準 1% で t 検定を行った結果を表 5, 6 に示す。ただし、男声の音大生は被験者が 1 名のため、t 検定の対象外とする。まず、男声では教育学部生群とプロ歌手群を比較すると cessa 区間の Q 値を除いて、有意水準 1% で有意差が確認された。Singer's formant は母音の違いに依存せず、特に男声の「響く声」「艶のある声」を特徴付けるといわれる。これらのことから、SFR を用いることによって、声楽の習熟度の異なる被験者同士を区別できることが示唆される。また、評価指標の SFR を用いることによって、教育学部生とプロ歌手との習熟度の差をより明確に区別できることが示唆される。

一方、女声では評価対象区間、評価指標に関わらず、教育学部生群と音大生群、プロ歌手群を比較すると有意な差となった。このことから、SFR と Q 値

を用いることによって、教育学部生より専門的に声楽を学んでいる音大生、プロ歌手との習熟度の差を区別できることが示唆される。

しかし、プロ歌手群と音大生群においては、評価対象区間、評価指標に関わらず、評価指標の数値差が有意とはならなかった。プロ歌手群と音大生群には習熟度の差はあるが、その差を今回使用した歌唱データに対する SFR と Q 値では表現できない可能性がある。さらに、野田らの研究では SFR が 9.9 以下の場合、指導者の聴感的印象は良くはないことが分かっている [4]。音大生とプロ歌手の過半数は SFR が 9.9 以上のため、どちらの群も聴感的印象が悪い評価とはならず、評価指標に差が表れなかったと考える。

6 聴取実験

本章では 5 章を踏まえ、研究課題 II に対して、実際の歌唱指導現場における歌声評価項目と本研究の歌声評価指標との相関係数に基づき検証する。また、本研究の歌声評価指標における歌声の客観的評価の基準となるよう閾値を検討する。これらから、声楽の習熟度を評価可能な新たな評価方法を議論する。なお、本章では女声声楽データのみを対象とする。

6.1 被験者選定

指導者に聴取させる被験者の歌声を、表 2 の被験者データから選定する。選定基準として用いたグラフを図 8, 9 に示す。SFR と Q 値の数値が異なる被験者 A-L までの 12 データを選定した。cessa 区間と tanto 区間の同じアルファベットの被験者は同一の被験者である。

また、野田らの研究によって SFR が 9.9 以下の場合、指導者の聴感的印象は良くはないことが分かっている [4]。図 8, 9 中の青色の縦線は SFR が 9.9 を表し、橙色の横線は Q 値が 5.6 を表す。また、被験者 A は SFR9.9 以下 Q 値 5.6 以下、被験者 B は SFR9.9 以下 Q 値 5.6 以上、被験者 C は SFR9.9 以上 Q 値 5.6 以下、被験者 D は SFR9.9 以上 Q 値 5.6 以上となる。

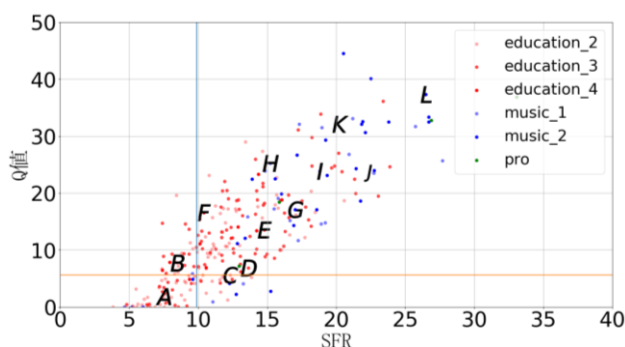


図8 cessa 区間の被験者選定

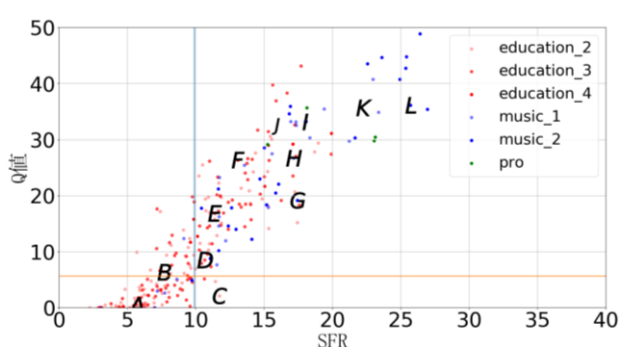


図9 tanto 区間の被験者選定

表 7 選定された被験者のメタデータ

被験者 ID	所属	学年	收音時期
A	教育学部	2	2016_04
B	教育学部	2	2017_10
C	教育学部	2	2016_02
D	教育学部	3	2018_04
E	教育学部	3	2018_02
F	教育学部	4	2016_04
G	音大	2	2018_10
H	音大	1	2017_10
I	音大	1	2018_10
J	音大	2	2018_10
K	音大	1	2017_10
L	音大	2	2018_04

選定された被験者データのメタデータを表 7 に示す。

6.2 印象評価項目と評価指標との相関

本節では、指導者の印象評価と歌声評価指標との関係を分析するため、聴取実験によって得られた歌声評価シートの点数と図 8, 9 との相関係数を算出する。相関係数を算出する際に、歌声評価シートの点数は全指導者の評価点の最大値と最小値を除いた平均値を用いることとする。

6.2.1 実験環境

本項では、6.1 節で選定した被験者を用いて行った聴取実験とその分析方法について述べる。聴取実験を行う声楽指導者は演奏キャリア、指導歴ともに十分にあり女性 3 名と男性 1 名である(以下、指導者)。指導者は、各被験者の歌唱全体を CD 音源から聴取し、評価対象区間についての習熟度の評価を行う。使用楽曲、評価対象区間は 5 章と同様である。印象評価に影響を及ぼさないよう指導者に被験者の情報を伏せている。また、実験の公平性の観点から、指導者には事前に習熟度評価を相対評価ではなく絶対評価で行うよう指示した。

6.2.2 歌声評価シート

指導者は歌声評価を行う際に声楽指導者とともに独自作成した歌声評価シートを使用する。指導者が行う歌声評価の観点を声帯・発音・音程・抑揚・ブレス・響き・声質・ヴィブラートの主要 8 項目に絞った。そして、各項目に対して 10 点刻みの 100 点満点で採点を行わせる。その後、評価対象区間の歌声全体の完成度を 100 点満点で評価を行う。さらに、採点を行った 8 項目以外にも良い点や気になる点がある場合には自由記述させた。

6.2.3 実験結果

聴取実験から得られた歌声評価シートの点数と図

表 8 相関係数の算出結果

	SFR		Q 値	
	cessa	tanto	cessa	tanto
声帯	0.71	0.67	0.62	0.65
発音	0.33	0.56	0.28	0.69
音程	0.19	0.23	0.28	0.49
抑揚	0.46	0.30	0.40	0.39
ブレス	0.55	0.62	0.54	0.67
響き	0.52	0.49	0.44	0.56
声質	0.65	0.54	0.62	0.65
ヴィブラート	0.42	0.39	0.45	0.49

8, 9 との相関係数を算出した結果を表 8 に示す。表 8 の結果から、歌声評価の 8 項目の中で最も相関が高かったのは、cessa 区間の SFR が声帯、cessa 区間の Q 値が声帯と声質、tanto 区間の SFR が声帯、tanto 区間の Q 値が発音となった。

6.2.4 考察

相関係数 0.4 以上となった歌声評価項目は、声帯、ブレス、響き、声質の 4 項目であった。これらの項目については相関があると判断される。また、評価指標別では SFR において声帯、Q 値において声帯と声質が 0.6 以上の高い相関があった。このことから、研究課題 II に対して、本研究の歌声評価指標の SFR は声帯、Q 値は声帯と声質との関係性が示唆される。

6.3 女声の歌声評価指標の閾値設定

6.3.1 閾値設定

6.2 節から、本研究で用いている歌声評価指標と相関の高い歌声評価項目が明らかとなった。そこで本節では、これらの項目を用いて女声での歌声の客観的評価を実現できるような閾値の設定を試みる。

閾値には、声帯、ブレス、響き、声質の 4 項目全ての点数が 50 点以上となると印象評価は良くなると仮定し、cessa 区間、tanto 区間ともに被験者 G, H, I, J, K の分布する範囲を「良い声」とする。また、先行研究^[4]の閾値設定から SFR が 9.9 または Q 値が 5.6 に一番近い被験者同士の平均値を良い印象評価とはならない「良くない声」となる閾値とする。さらに、被験者が存在しない、または被験者 D のような歌声印象評価の点数と歌声評価指標の数値とのズレが確認できる場合、本研究の評価方法では歌声習熟度が判定困難な「グレーゾーン」とする。

6.3.2 閾値と評価指標値との関連

閾値設定の結果を図 10, 11 に示す。図 10 は cessa 区間、図 11 は tanto 区間の結果であり、青色が「良

い声」の範囲、赤色が「良くない声」の範囲、灰色が「グレーゾーン」の範囲を示す。聴取実験の被験者をそれぞれ緑字で示す。

cessa 区間の「良くない声」の閾値は SFR が 9.4 以下、Q 値が 6.2 以下、「良い声」の閾値は SFR が 14.2 以上 24.4 以下、Q 値が 15.0 以上 34.7 以下となった。また、tanto 区間の「良くない声」の閾値は SFR が 9.2 以下、Q 値が 7.4 以下、「良い声」の閾値は SFR が 14.4 以上 24.0 以下、Q 値が 18.0 以上 35.9 以下となった。それ以外の範囲は全て「グレーゾーン」である。

6.3.3 考察

図 10, 11 の結果より、歌声評価指標の閾値設定が本研究の歌声評価指標における歌声の習熟度の客観的評価ができるかについて考察を行う。

考察を行う際、5 章で用いた「良い声」の基準となるプロ歌手の分析結果を図 10, 11 の結果に当てはめる。その結果、cessa 区間は 4 名中 1 名のプロ歌手が図 10 の「良い声」の範囲に該当した。また、tanto 区間では 4 名中全員のプロ歌手が図 11 の「良い声」の範囲に該当した。評価対象区間によって結果に差が出た原因として、評価対象区間の母音の影響が考えられる。これらのことから評価対象区間である tanto 区間においては、閾値の妥当性が示唆された。

7 おわりに

本研究の背景には、声楽初学者の歌唱指導と各音響特徴量の関係の議論が十分でないことや、声楽指導は、指導者の主観による評価を用いて行われることが多く、学習者に指示や指導内容が伝わりづらく、効率の良い学習とは言えないという問題があった。そのため、本研究ではこれまでに、声楽の習熟度に関連する周波数特性の強度と割合の定量化を検討してきた。そして、本稿ではこれまでの研究成果をふまえ、2 つの研究課題から声楽の習熟度に関連する

音響特徴量による歌声評価方法を開発し、客観的な歌声評価を実現することを目的とした。

5 章では、研究課題 I に対して、過去に提案されてきた歌声評価指標を異なる習熟度の被験者に適用することによって、歌声評価指標の妥当性とその汎用性について分析した。その結果、これらの歌声評価指標を用いることによって、異なる習熟度の被験者を区別できることが明らかになった。

6 章では、研究課題 II に対して、指導者の印象評価と歌声評価指標との関係を分析するため、独自の歌声評価シートを用いた聴取実験を行い、指導者の印象評価を得た。聴取データはすべて女声歌唱である。その結果、歌声評価指標と実際の声楽指導現場の指導者が行う歌声評価の観点との相関が高い歌声評価項目が明らかとなった。また、これらの項目に関する評価値に基づき、本研究の歌声評価指標の閾値を設定し、歌声の客観評価が可能であるかについて分析した。このことから、評価対象区間の母音の影響は受けるが、閾値の妥当性が示唆された。

しかし、歌声の評価に際して、4 名の指導者の声の嗜好や指導方針の影響は否めない。良い声の評価する観点は多様であり、評価方法を一意に決めるのは難しい。そのため、これらの歌声評価指標では歌声の良し悪しを判断できない「グレーゾーン」の存在も明らかとなった。

今後の方針として、この「グレーゾーン」を歌声評価可能な範囲としていくために、さらに多くの被験者に対して、この閾値を適用し分析する必要がある。また、この歌声評価手法を実際の声楽指導現場で用いていくことを考慮し、歌声の自動評価システムの実現も検討していく。

謝辞

本研究は科学研究費補助金基盤研究(C) 18K02817 の助成を受けた。

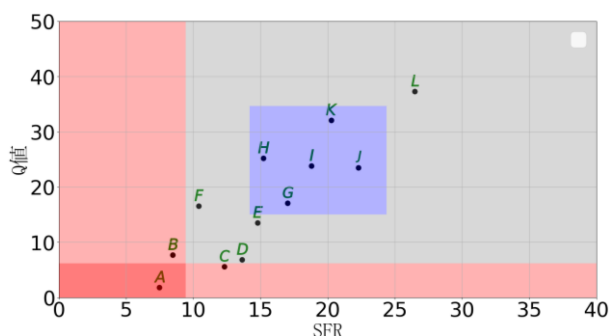


図 10 cessa 区間の閾値設定

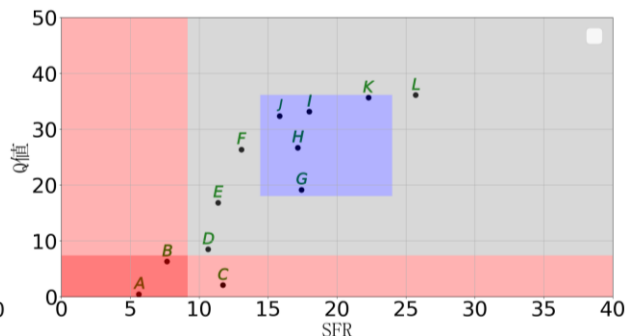


図 11 tanto 区間の閾値設定

参考文献

- [1] W.T.Bartholomew, “A Physical Definition of Good Voice – Quality in the Male Voice” J. Acoust. Soc. Am, Vol.55, pp.838-844, 1934.
- [2] J.Sundberg, “The KTH synthesis singing” Advances in Cognitive Psychology . Special issue on Music Performance, Vol.2, Nos.2-3, pp.131-143, 2006.
- [3] 山辺大貴他, “歌声の心理的印象と音響特徴量との対応付けによる歌唱の習熟度評価に関する基礎的検討,” 信学技報応用音響, Vol.112, No.266, pp.61-66, 2012.
- [4] 野田美春他, “歌唱の習熟度に関連する周波数特性に基づく音響特徴量を用いた初学者とプロ歌手の歌声評価”, 信学技報教育工学, Vol.115, No.444, pp.35-40, 2016.
- [5] J. Sundberg. Articulatory interpretation of the ‘singing formant’. J. Acoust. Soc. Am, Vol.55, No.4, pp.838-844, 1974.
- [6] 齋藤毅他, “歌声らしさの知覚モデルに基づいた歌声特有の音響特徴量の分析,” 日本音響学会誌, Vol.64, No.5, pp.267-277, 2008.
- [7] 佐久間雄輝他, “歌声の習熟度に関連する周波数特性からみた音響特徴量,” 信学技報教育工学, Vol.114, No.441, pp. 45-50, 2015.
- [8] 齋藤毅, 後藤真孝, “歌唱指導による音響特徴量の変化とその歌唱力への影響”, 信学技報応用音響, Vol.109, No.100, pp.1-6, 2009.
- [9] 山下泰樹他, “歌声の習熟度に関連する音響特徴量の母音分布”, 情処研報音楽情報科学, Vol.118, No.26, pp.1-6, 2018.