# 声帯振動に着目した
# オペラと合唱歌唱の特性比較

筑波大学
図書館情報メディア研究科
2019年3月
若狭　健太

# 目次


第 1 章　はじめに　1
1.1　背景と目的 . . . . . 1
1.2　本論文の構成 . . . . . 2

第 2 章　関連研究　3
2.1　発声の仕組み . . . . . 3
2.2　喉頭音源に関する研究 . . . . . 3
2.3　声帯振動に関する研究 . . . . . 5
2.4　声道による共鳴特性 . . . . . 7
2.5　ソロ歌唱と合唱歌唱の比較 . . . . . 8
2.6　本研究の位置付け . . . . . 8

第 3 章　歌唱実験　10
3.1　実験のねらい . . . . . 10
3.2　実験参加者 . . . . . 10
3.3　機材と環境 . . . . . 10
3.4　課題内容 . . . . . 11
3.5　実験手続き . . . . . 11

第 4 章　結果と考察　13
4.1　特徴量の抽出 . . . . . 13
4.2　$O_q$ の比較分析 . . . . . 13
4.3　SPR の比較分析 . . . . . 16
4.4　「夢みたものは」の比較 . . . . . 19

第 5 章　まとめと今後の課題　32
5.1　まとめ . . . . . 32
5.2　今後の課題 . . . . . 32

謝辞　33

参考文献　34

# 表目次

2.1 発声モードの比較 . . . . . 5

3.1 実験に使用した課題曲 . . . . . 11

4.1 $O_q$ の楽曲間の多重比較 . . . . . 14
4.2 SPR の楽曲間の多重比較 . . . . . 17

# 図目次


2.1 気流グロトグラムの概要図 . . . . . 4
2.2 EGG 波形の概要図 . . . . . 6
2.3 singer's formant . . . . . 7
2.4 ソロ歌唱と合唱歌唱のスペクトル包絡 . . . . . 8

4.1 楽曲ごとの $O_q$ の平均値と標準偏差 . . . . . 14
4.2 参加者 × 楽曲 ごとの $O_q$ 平均値 . . . . . 15
4.3 SPR の算出例 . . . . . 16
4.4 楽曲ごとの SPR の平均値と標準偏差 . . . . . 17
4.5 参加者 × 楽曲 ごとの SPR の平均値 . . . . . 18
4.6 VRP の例 . . . . . 19
4.7 $O_q$-valued VRP の例 . . . . . 20
4.8 回帰平面の例 . . . . . 21
4.9 最大傾斜ベクトルの例 . . . . . 21
4.10 回帰平面と最大傾斜ベクトルの対応のイメージ図 . . . . . 22
4.11 参加者 No.02 の $O_q$-valued VRP . . . . . 23
4.12 参加者 No.02 の最大傾斜ベクトル . . . . . 23
4.13 参加者 No.03 の $O_q$-valued VRP . . . . . 24
4.14 参加者 No.03 の最大傾斜ベクトル . . . . . 24
4.15 参加者 No.05 の $O_q$-valued VRP . . . . . 25
4.16 参加者 No.05 の最大傾斜ベクトル . . . . . 25
4.17 参加者 No.01 の $O_q$-valued VRP . . . . . 26
4.18 参加者 No.01 の最大傾斜ベクトル . . . . . 26
4.19 参加者 No.04 の $O_q$-valued VRP . . . . . 27
4.20 参加者 No.04 の最大傾斜ベクトル . . . . . 27
4.21 参加者 No.06 の $O_q$-valued VRP . . . . . 28
4.22 参加者 No.06 の最大傾斜ベクトル . . . . . 28
4.23 参加者 No.08 の $O_q$-valued VRP . . . . . 29
4.24 参加者 No.08 の最大傾斜ベクトル . . . . . 29
4.25 参加者 No.07 の $O_q$-valued VRP . . . . . 30
4.26 参加者 No.07 の最大傾斜ベクトル . . . . . 30

# 第 1 章

# はじめに

## 1.1　背景と目的

世界には様々な歌唱法が存在する [1]. 歌手はそれぞれの歌唱法において, 強弱の付け方や音色などを変化させることで, 音楽的表情付けをおこなう. そのため, 同一の曲を異なる歌唱法で歌えば, その曲が与える印象も異なる. このような歌唱法の特性を調査することは, 特定の歌唱法の習得や, 歌唱法の文化的背景の解明に役立つ. 本研究では, 多様な歌唱法のなかでも, 特に合唱歌唱に焦点を当て, その特性を明らかにすることを目的とする.

合唱歌唱は複数人で歌唱する点において, 他の歌唱法と大きく異なる. 歌手が独りで歌唱する場合, 歌手自身が持つ楽曲の解釈や音楽性に基づいた, 独創的な表現をおこなえる. しかし複数人で歌唱する合唱歌唱では, 歌手はときに個性を抑え, 全体としてのまとまりや, 指揮者の指示を優先する.

個ではなく, 全体としての表現を重視する合唱歌唱において, 指導者は複数人の声をまとめるように努める. このとき指導者は「もっと柔らかい声で」や「喉に力が入らないようリラックスして」などと指示する場合がある. これは指導者が, 固い声よりも柔らかい声の方が, より声がまとまりやすいことを, 経験的に知っているからだと考えられる.

これは指導者だけでなく, 歌手も経験的に理解しており, 歌手の中には合唱歌唱において, 柔らかい声を積極的に用いる者もいる. しかし実際に合唱歌唱において, 歌手が柔らかい声を用いているかについての科学的調査は, あまりおこなわれていない.

そこで本研究では, 合唱歌唱の声質に着目し, 他の歌唱法と比較したとき, 合唱歌唱がより柔らかい声を用いているかについて調査する. さらに, 声の高さや大きさの変化にともなって, 歌手が声質の柔らかさをどのように変化させているかについても調べる.

合唱歌唱の比較対象として, 本研究ではオペラ歌唱[*1]を用いる. オペラ歌唱は声楽家が音楽大学で学ぶ, 基本的な歌唱スタイルであり, その歌唱スタイルは声楽家たちの間で, 広く共通した認識が形成されている. オペラ歌唱は, ピアノやオーケストラなどとともに, 独りで歌唱することが多い. オーケストラの演奏にも埋もれないよう, 独りでホール全体に声を響かせるためには, 豊かな響きの発声が求められる.

独りでホール全体を響かせるオペラ歌唱と, 複数人でひとつの大きなまとまりやハーモニーを表現する合唱

[*1] 独りでおこなう歌唱法には演歌やベルカント歌唱など, オペラ歌唱の他にも数多く存在している. そのため, どの歌唱法が合唱歌唱の比較対象として適切か検討する必要がある. 本研究で着目したいのは「独り」での歌唱を想定するか, 「複数」での歌唱を想定するかの違いであるから, その他の要素では, できるだけ合唱歌唱に近い歌唱法を選ぶのが適切であると考えられる. オペラ歌唱は, 合唱歌唱と同じ西洋音楽の流れを汲んでおり, 基本的な要素は共通しているため, 本研究の比較対象として適切であると判断した.

歌唱では, その表現の特性はどのように異なるのだろうか. この両歌唱法を, プロの声楽家に歌い分けてもらい, その違いを明らかにしていきたい.

ここまでに述べた声質の「柔らかい — 固い」の評価軸は, 声質の研究で用いられる「弛緩 (lax) — 緊張 (tense)」の評価軸にほぼ対応していると考えられる [1]. 本稿では先行研究との関連を考慮し, 以後「弛緩 — 緊張」に表記を統一し議論する. これを踏まえ, 改めて本研究の目的をまとめると以下のようになる.

本研究の目的はオペラ歌唱との比較により, 合唱歌唱の特性を明らかにすることである. 特に声の緊張度に着目し, 合唱歌唱はオペラ歌唱に比べ, より緊張度の低い声質であるかを調査する.

## 1.2 本論文の構成

ここまで, 研究の背景と目的について述べた. 第 2 章では発声の仕組みを簡単に紹介した後, 喉頭音源と共鳴特性について, 関連研究を紹介する. その上で, 本研究と直接関係の深いソロ歌唱と合唱歌唱を比較した研究を紹介した後, 本研究の位置付けを述べる.

第 3 章ではプロのバリトン歌手を対象にした歌唱実験の内容を述べる. 実験に使用した楽曲や機材, 実験手続きについて述べる.

第 4 章では分析結果とその考察を述べる. 各特徴量の平均値を統計手法を用いて比較した後, 楽曲「夢みたものは」について詳細な比較をおこなう.

第 5 章では第 4 章で得られた結果をもとに総合的なまとめをおこなう. その後, 本研究では扱うことのできなかった課題について述べる.

# 第 2 章

# 関連研究

## 2.1　発声の仕組み

歌声に関する研究を紹介する前に, そもそも, 人の声がどのように生まれるかについて述べたい. 声は肺から空気が送られ, その空気が声帯を通って振動し, さらにその振動が声道[*1]を通り共鳴することで生み出される. 歌声に関する数多くの研究を残している Sundberg は, 著書「歌声の科学」[2] において, 音声を次のように定義した.

> 肺から送られた空気流が声帯による作用を受け, 咽頭, 口腔, 場合によっては鼻腔により変化させられ, 作られた音を, 音声とする. （Sundberg, 2007, p.1 より引用）

この定義は, 音声が声帯と声道の 2 つの器官に関連づけられることを意味している.

音声を研究対象とする場合, 声帯と声道の 2 つの器官に注目することが重要である. 観測されたある音声の特性が, 声帯と声道のどちらに起因する特性であるかを分離して考察することで, より正確にその音声の特性を捉えることができる.

## 2.2　喉頭音源に関する研究

音声波形から声道による共鳴特性を分離して観察するために, 喉頭音源[*2]を調査したいくつかの研究がある. 喉頭音源は声の高さや大きさはもちろん, 声質においても重要な役割を果たしている. 本節では喉頭音源に関するいくつかの研究を紹介する.

### 2.2.1　気流グロトグラム

私たちが普段耳にする音声は, 喉頭音源に声道による共鳴が付与されたものである. そのため, マイクロフォンなどにより音声を測定しても, 得られるのは音声波形であり, 喉頭音源を観測することはできない.

この喉頭音源を計測する手法のひとつに, 逆フィルタ法がある [3]. この手法により得られた波形を気流グロトグラムとよぶ. 気流グロトグラムは縦軸に声門通過流[*3] （リットル / 秒）, 横軸に時間をとる波形である.

気流グロトグラムは, 声門通過流が時間につれてどのように変化するかを表している. 声門が閉鎖している

---

[*1] 声道：声帯で生じた振動が, 体外に放出するまでに通る空間. 主に口腔や鼻腔によって構成される.

[*2] 喉頭音源：肺からの気流によって声帯が振動し生成された音. この時点では声道による共鳴特性が付与されていない.

[*3] 声門通過流：単位時間あたりに声門を通過する空気の流量.

とき, 声門の間に空気は流れない. そのため, 声門通過流は 0 を示す（閉鎖期）. 声門が開いていくにつれ, 空気が流れはじめ, 声門通過流は増加していく. 声門が最大まで開いたとき, 声門通過流は最大になり, その後, 声門が閉じ始めると減少する. そして再び声門が完全に閉鎖するとき, 声門通過流は 0 に戻る（開放期）.

ここまでに述べた気流グロトグラムの概要図を図 2.1 に示す.

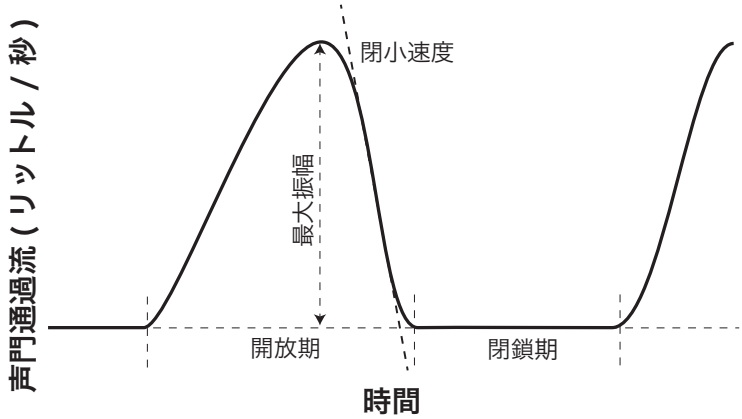


図 2.1: 気流グロトグラムの概要図（Sundberg, 2007, p.78 を参考に作成）.

### 2.2.2　気流グロトグラムと音源スペクトル

近年, 気流グロトグラムと音源スペクトル[*4]との関係が, 少しずつ明らかになってきている.

Sundberg と Gauffin は, 歌手と歌手でない人の気流グロトグラムについて調べた [4]. この研究により, 気流グロトグラムの最大振幅が大きいとき, 音源スペクトルの基本周波数成分も強くなることが示された.

また Fant は, 典型的な気流グロトグラムを, 直線と正弦波の組み合わせで生成し, それらの音源スペクトルを調査した [5]. この研究により, 音源スペクトルの倍音の振幅が, 気流グロトグラムの閉小速度[*5]と関連があることが明らかになった. 閉小速度が速まると, 音源スペクトルの高い周波数成分が, 低い周波数成分より支配的になる. つまり, 音源スペクトルの傾斜が緩やかになることを明らかにした.

### 2.2.3　気流グロトグラムと発声モード

Gauffin と Sundberg は, 気流グロトグラムと様々な発声モードとの関連を調べた [6]. その結果, 高い声門下圧[*6]と高い内転力[*7]のもとに発声された声は, 気流グロトグラムの振幅が小さくなり, 低い声門下圧と低い内転力のもとに発声された声は, 気流グロトグラムの振幅が大きくなることが示された. さらに前者の発声モードを喉詰め発声, 後者を気流発声と名付けた.

発声モードと各特徴量との関係性を表 2.1 にまとめる. ここでの発声モードは, 声質の緊張度とも関連している [2]. 喉詰め発声のとき, 喉頭の緊張度は高まっており, 声質もより緊張したように感じられ, 逆に気流発声では喉頭は適度に弛緩しており, 声質の緊張度も低く感じられる.

---

*4 音源スペクトル：喉頭音源より得られるスペクトル.
*5 閉小速度：気流グロトグラムの 1 周期における気流変化の最大速度. 図 2.1 における傾きに相当する.
*6 声門下圧：肺からの空気の過圧.
*7 内転力：披裂軟骨が回転運動により両声帯を接近させる力.

表 2.1: 発声モードの比較

| | 喉詰め発声 | 気流発声 |
|---|---|---|
| 声門下圧 | 高い | 低い |
| 内転力 | 高い | 低い |
| 声質の緊張度 | 高い | 低い |
| 気流グロトグラムの最大振幅 | 小さい | 大きい |
| 音源スペクトルの基本周波数の振幅 | 小さい | 大きい |

## 2.3 声帯振動に関する研究

ここまで喉頭音源に関する研究を紹介したが, 音源に着目した研究には, 声帯の運動を直接, または間接的に観測したものもある. 本節では, 声帯振動の状態を間接的に観測する手法である Electroglottography（以下, EGG）の原理について述べる. さらに EGG を用いた研究について紹介する.

### 2.3.1 EGG

EGG は声帯振動の状態を間接的に調べる方法のひとつである. 声帯振動の計測には, 他にも, 喉頭ストロボスコープやハイスピードカメラを用いる方法がある [7].

ハイスピードカメラを用いれば, 声帯の開閉の様子を直接観測できるが, カメラを口から喉に向けて挿入する必要があり, 被験者への負担が大きい. EGG は非侵襲的であり, 喉頭に 2 つの電極を押し当てることで計測するため, 被験者への負担が少なく, 取り扱いも容易であることが特徴である.

EGG は両側の甲状軟骨翼に 2 つの電極を押し当て, 高周波の電流を流すことにより, 声門の開閉によるインピーダンスの変化を記録する. 一般に, 生体組織は電流を通しやすいため, 声門が閉じ密着するとインピーダンスが小さくなる. 一方で, 声帯が離れ, 間に空気が挟まると, インピーダンスは大きくなる. このインピーダンスの変化を測定することで, 間接的に声帯振動を観測できる.

EGG 波形を用いることで, 比較的正確な GCI[*8]（Glottal Closure Instance）と, GOI[*9]（Glottal Opening Instance）を求めることが可能である. これらの時刻情報を用いることで, 次節で挙げる 2 つの特徴量を算出できる.

### 2.3.2 $f_{\mathrm{o}}$ と $O_q$

EGG 波形によって求められる代表的な特徴量に $f_{\mathrm{o}}$[*10]と, Open quotient （以下, $O_q$[*11]）がある. $f_{\mathrm{o}}$ とは声帯振動 1 周期の長さ $T$ の逆数をとることで得られる基本周波数を表す. ここで周期 $T$ は GCI から次の GCI まで（もしくは GOI から次の GOI まで）の時間で求められる. 聴感において $f_{\mathrm{o}}$ は, 声の高さに相当する. $O_q$ は声門開放時間率を意味し, 声帯振動 1 周期における, 声門が開いている時間の割合を表す.

声門が開いている時間を $T_{\mathrm{o}}$, 声門が閉じている時間を $T_c$ と表記すると, 声帯振動 1 周期の時間 $T$ は式 (2.1)

[*8] GCI: Glottal Closure Instance. 声門が閉じ始めた時刻.
[*9] GOI: Glottal Opening Instance. 声門が開き始めた時刻.
[*10] $f_{\mathrm{o}}$ : 基本周波数. 声帯振動 1 周期の逆数をとることで求められる. 声の高さに相当する.
[*11] $O_q$ : 声門開放時間率. 声帯振動 1 周期における声門が開いている時間の割合. 声の緊張度と関連する.

によって求められる.

$$T = T_c + T_\mathrm{o} \tag{2.1}$$

このとき, 周期と周波数の関係から基本周波数 $f_\mathrm{o}$ は式 (2.2) で求められる.

$$f_\mathrm{o} = \frac{1}{T} \tag{2.2}$$

また, $O_q$ は式 (2.3) によって求められる.

$$O_q = \frac{T_\mathrm{o}}{T} \tag{2.3}$$

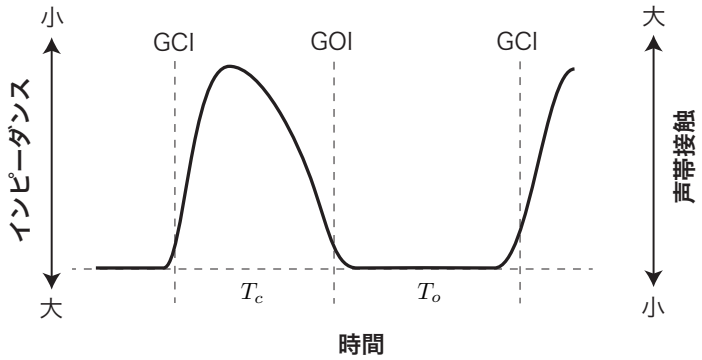


図 2.2: EGG 波形の概要図.

ここまでをまとめた EGG 波形の概要図を図 2.2 に示す. インピーダンスの軸の大小が逆転していることに注意されたい.

### 2.3.3 $O_q$ に関する研究

Yokonishi らは 4 つの異なる発声モード（喉詰め発声, 通常発声, 気流発声, ファルセット）と $O_q$ の関連について調査した [8]. その結果, 喉詰め発声, 通常発声, 気流発声, ファルセットの順に $O_q$ が高まることが明らかになった.

これらの発声モードは, 声質における「緊張 — 弛緩」の評価軸において, 喉詰め発声がもっとも緊張した声質であり, 次いで, 通常発声, 気流発声, ファルセットの順に弛緩した声質となる. つまりこの研究結果は, $O_q$ が高まるほど, より弛緩した声質になることを示している.

また Yokonishi らは同一の研究において, $O_q$ と声の高さおよび声の大きさとの関連についても調査した [8]. その結果, $O_q$ は声の大きさと負の相関があったが, 声の高さとの相関は認められなかった. Henrich らが訓練を受けた歌手を対象におこなった研究においても, Yokonishi らの研究によって得られた結果と, 同様の結果が得られている [9].

## 2.4　声道による共鳴特性

ここまで, 声帯の振動により生じる喉頭音源に関する研究をいくつか紹介してきた. 以降では, 声道による共鳴特性に関する研究を紹介する.

### 2.4.1　フォルマント

喉頭音源が声道を通ることで特定の周波数が強調される. この声道の特性によって強調される周波数帯をフォルマントとよぶ. このフォルマントは, 周波数が低いものから順に, 第 1 フォルマント（F1）, 第 2 フォルマント（F2）, 第 3 フォルマント（F3）, 第 4 フォルマント（F4）と名付けられている.

人は声道の空間を口の開き方や舌の位置によって調整することができ, これを調音とよぶ. 人は調音によりフォルマントを変化させ, 様々な母音を発声することができる. 母音の知覚には F1 と F2 が重要であると言われている [10].

### 2.4.2　singer's formant

Sundberg はプロの男性オペラ歌手のスペクトル包絡[*12]を調査した [11]. 実験では母音/u:/を通常発話した場合と, 歌唱した場合との 2 種類を計測した. この実験で得られたスペクトル包絡を図 2.3 に示す. 歌唱した場合のスペクトル包絡には 3 kHz 近傍にピークが見られた.

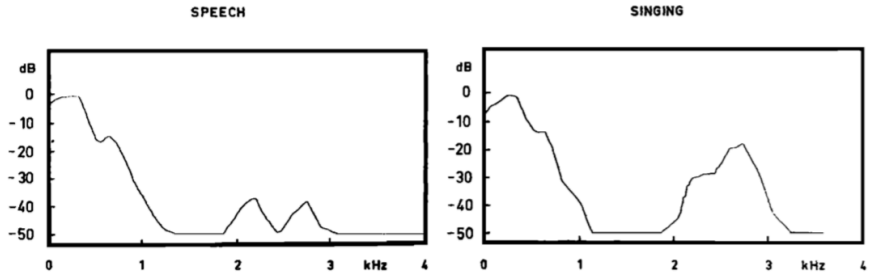


図 2.3: singer's formant の典型例（Sundberg, 1974 より引用）.

この 3 kHz 近傍のピークは, 西洋音楽文化圏の男性オペラ歌手によって発話される, すべての有声音に典型的なものであり, 一般にこのピークを singer's formant とよぶ [2]. singer's formant は歌手が複数ののフォルマントを近接させることで形成している. また, singer's formant のある声はよく響くことが知られている.

### 2.4.3　合唱歌唱とフォルマント

Ternström と Sundberg は同一の合唱団に所属するバス歌手 8 名のフォルマントについて調べた [12]. 実験参加者はある曲の歌詞を, 通常発話と歌唱の 2 種類で発声し, それらの音声が計測された. 実験の結果, 歌唱における F1 と F2 の分散が, 通常発話より小さくなることが示された. F1 と F2 の分散が小さいことは, 母音の音色がそれだけ似ていることを表す. つまり, この実験の参加者らは, 合唱歌唱において, 音色的により近い母音で

[*12] スペクトル包絡：音声スペクトルの概形.

歌っていたのである.

## 2.5　ソロ歌唱と合唱歌唱の比較

Godwin はソプラノ歌手 30 名を対象に, ソロとして歌う場合と, 合唱の中に声を混ぜて歌う場合で, 歌手がどのように声を用いるかについて調べた [13]. 合唱歌唱では事前に録音したアンサンブル音源をヘッドフォンから流し, その音源を聞きながら歌唱した. この研究により, ソリストとして歌唱したとき, 歌手はより大きな声を用い, さらに, 高い周波数成分が強くなることが示された.

Rossing らはソロ歌手と合唱歌手の両方の経験のある男性歌手を対象に, ソロと合唱の平均スペクトル包絡の違いを調べた [14]. ソロ条件ではピアノ伴奏をヘッドフォンから流し, 合唱条件では事前に合唱団の中で録音した音源をヘッドフォンから流した. 歌手はそれらの音源を聞きながら歌唱した.

この実験で得られたスペクトル包絡を図 2.4 に示す. この図は, 歌手が合唱歌唱として歌ったとき, 低い領域の周波数成分が強く, 高い領域の周波数成分が弱いことを示している.

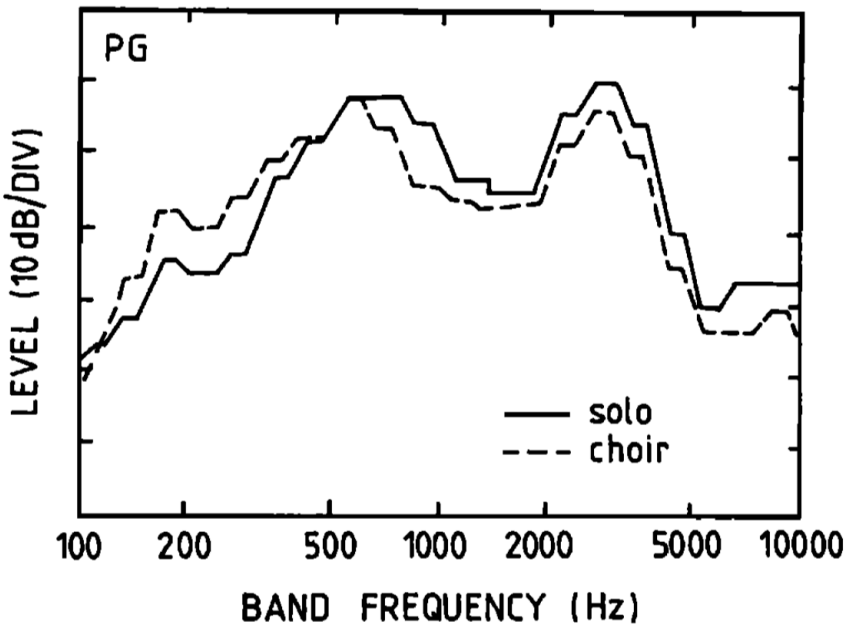


図 2.4: ソロ歌唱と合唱歌唱のスペクトル包絡（Rossing, 1985 より引用）.

## 2.6　本研究の位置付け

ソロ歌唱と合唱歌唱を比較した先行研究では, 主に音声波形に着目している. 本研究では, 声帯振動にも着目する.

先行研究 [14] によれば, 合唱歌唱は低い帯域の周波数成分が強い. さらに, 高い帯域の周波数成分は弱くなっている. この章で述べてきたように, より緊張度の低い声質は, 音源スペクトルの基本周波数成分が強く, 音源スペクトルの傾斜は急になっている. これは合唱歌唱におけるスペクトル包絡の特徴と一致しており, 合唱歌

唱はソロ歌唱に比べ, より緊張度の低い声質で歌唱しているとも捉えられる.

しかし今まで述べてきたように, スペクトル包絡には音源の特性と, 声道による共鳴の特性の両方が含まれているため, 実際に緊張度の低い声を用いていたかは断定できない. 本研究では, 声帯振動を観測することで, 音源特性の観点から合唱歌唱の緊張度について調査する.

また今まで分析対象とされていたスペクトル包絡は, 母音変化による影響を受ける. 曲に含まれる母音の種類は異なるため, 別々の曲を比較することが困難であった. 声帯振動は母音の変化による影響を受けにくい. そのため, 母音変化による影響を分離した上で, 異なる楽曲を比較できる. 本研究では複数の楽曲間の比較をおこなっていく.

# 第 3 章

# 歌唱実験

## 3.1　実験のねらい

本実験のねらいは, プロのバリトン歌手が歌唱した際の, 音響信号と EGG 波形を計測することである. オペラ歌唱と合唱歌唱の 2 つの歌唱法を計測し, それらを比較することで, 両歌唱法の特性を明らかにすることを目指す.

## 3.2　実験参加者

声の性質は, 性別や, テノールやバスなどの声種[*1]によって異なる. この性差や声種による声質変化の影響を小さくするため, 本実験の対象はバリトン歌手に限定した. さらにバリトン歌手においても, 音楽大学等で 3 年以上の声楽の訓練を積み, プロとして活動する声楽家を対象とした.

実験参加者を, 規定の謝金を提示した上で募集し, 8 名のプロのバリトン歌手が集まった. 参加者は全員, 音楽大学でオペラ歌唱を学んでおり, 年に数回, オペラや合唱の出演経験があった. また, 参加者の平均年齢は 32.4 歳（24 歳から 51 歳まで）であった.

## 3.3　機材と環境

実験は防音のスタジオで実施した. 計測機材として, コンデンサマイクロフォンは ECM8000 を, EGG 計測器は EG2-PCX2 を用いた. マイクロフォンは参加者の口元から 50cm かつ, 口元と同じ高さの位置に設置した. 音響信号と EGG 波形はどちらもサンプリング周波数 44100 Hz, 量子化ビット 16 bit として収録した. 収録データのモニタリングと保存には Audacity を用いた.

歌唱測定の前に 1 kHz の基準音をスピーカーから出力し, 騒音計 (LA-1440) を用いて音圧レベルを測定することで, 簡易的な音圧較正をおこなった.

[*1] 声種：声楽家が扱う音域による分類. 男性の声楽家は, 扱う音域の低い方から, バス, バリトン, テノールなどに分類される.

## 3.4 課題内容

### 3.4.1 歌唱課題

実験参加者は課題曲として選定された 5 つの楽曲を, それぞれ 5 回ずつ歌唱する課題をおこなった. 実験者はこのときの音響信号と EGG 波形を同時に測定した.

課題曲にはオペラ歌唱で歌う楽曲と, 合唱歌唱で歌う楽曲の 2 種類を用意した. 参加者は歌唱の前に, どちらの歌唱法で歌う楽曲であるかを教示され, その条件にあった歌唱をおこなった.

### 3.4.2 課題曲

課題曲はイタリア歌曲などの特定の分野に偏らないよう, 複数の分野から代表的な楽曲を選定した. オペラ歌唱は独りでおこなう歌唱であるため, 独りで歌うことを想定して作らた楽曲は, オペラ歌唱として歌うよう指示し, 合唱曲として作られた楽曲は, 合唱歌唱として歌うよう指示した.

表 3.1: 実験に使用した課題曲.

| 曲名 | 作曲者 | 作曲年 | 歌唱法 | 伴奏 | 略称 | 用いた小節 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Libera me | Fauré | 1888 | オペラ | 有り | Lib | 全体 |
| Caro mio ben | T. Giordani | 1783 | オペラ | 有り | Car | 5 − 13 |
| 夢みたものは | 木下牧子 | 1993 | オペラ | 無し | YuO | 1 − 9 |
| 夢みたものは | 木下牧子 | 1993 | 合唱 | 無し | YuC | 1 − 9 |
| Ave verum corpus | Mozart | 1791 | 合唱 | 有り | Ave | 全体 |

課題曲に関する事項を表 3.1 にまとめる. オペラ歌唱で歌う曲として, Fauré 作曲レクイエムより “Libera me” (以下, Lib), イタリア歌曲である T. Giordani 作曲 “Caro mio ben” (以下, Car) の 2 曲を用いた. 合唱歌唱で歌う曲としては, 讃美歌である Mozart 作曲 “Ave verum corpus” (以下, Ave) の Bass パートを用いた.

さらに両方の歌唱法で歌う曲として, 木下牧子の「夢みたものは」を用いた. この楽曲は歌曲として独りで歌唱されることもあれば, 合唱曲として複数人で歌われるころもある楽曲である. そのため, 本実験では「夢みたものは」の主旋律を, オペラおよび合唱の両歌唱法で参加者に歌い分けさせた. 本稿では参加者がオペラ歌唱として歌ったものを YuO, 合唱歌唱として歌ったものを YuC と表記し, 別々の曲として区別する.

Lib, Ave は一曲すべてを, その他の楽曲は一部を抜粋して用いた. Car は 5 小節 – 13 小節まで, YuO, YoC は合唱曲の楽譜における 1 小節 – 9 小節までを抜粋した.

Lib, Car, Ave についてはピアノ伴奏を事前に録音し, 参加者は歌唱の際にヘッドホンで伴奏を参照した. 伴奏の音量は, 歌唱に快適な音量となるように, 参加者が自由に調節をおこなった. YuO と YuC は無伴奏で歌唱し, テンポは参加者が自由に選択した.

## 3.5 実験手続き

参加者はまず EGG の電極を喉頭に当て, その後, 適当な声を発声した. このとき実験者が EGG 波形をモニタリングし, 正常な値が観測できる位置に電極を調整した.

その後, 参加者は 5 つの楽曲のなかから自由に 1 つを選択し, 繰り返し 5 回, 続けて歌唱した. このとき選んだ楽曲に伴奏がある場合, 参加者は歌唱の前に伴奏を確認し, ヘッドホンの音量が適切になるよう調節した. 音量はいつでも再調整できた. 参加者はすべての楽曲を歌唱するまで, 同様の手順を繰り返した. 参加者は実験中, いつでも自由に休憩を取ることができた.

# 第 4 章

# 結果と考察

## 4.1　特徴量の抽出

本研究では, 計測した音声波形と EGG 波形から 3 つの特徴量を抽出し, 分析に用いる. 音声波形からは SPL[*1] (Sound Pressure Level) を抽出し, EGG 波形からは 2.3.2 小節で紹介した, $O_q$ と $f_o$ を抽出する.

SPL は音圧レベルを意味し, 聴感としては声の大きさに相当する. 音圧の実効値を $p$, 基準値 $p_0$ を人間の最小可聴音圧である 20 $\mu$Pa としたとき, 式 (4.1) で求められる.

$$\mathrm{SPL} = 20 \times \log_{10} \frac{p}{p_0} \ \mathrm{dB} \tag{4.1}$$

$O_q$ と $f_o$ を抽出するためには, GOI と GCI を求める必要がある. これら時刻情報の算出には Kawahara らの手法を用いた [15]. 一時的なノイズなどにより, GOI と GCI のどちらかが検出できなかった箇所は, 分析データから除外した.

上記の 3 つの特徴量は, 歌唱中に生じた声帯振動 1 周期ごとに抽出した. 音声波形と EGG 波形の位相のずれを補正することで, これら 3 つの特徴量は, 時間的な同期がとれた状態で抽出できる. これにより, ある時刻での声の高さ, 大きさ, 緊張度の関係性を調べられる. この関係性は 4.4 節での分析で用いる.

## 4.2　$O_q$ の比較分析

### 4.2.1　分析のねらい

歌手がオペラ歌唱と合唱歌唱において, 異なる緊張度を用いているか調査したい. そのために, 緊張度に関連した $O_q$ の平均値を比較を試みる. $O_q$ は声質において, 喉頭調節と関連する印象語である緊張 ― 弛緩の尺度にほぼ対応している.$O_q$ が 0 に近いほど緊張した声であり, 1 に近いほど弛緩した声となる [8].

楽曲から抽出したすべての $O_q$ の平均値を算出し, 比較することで, その歌唱の緊張度を調べる. 合唱歌唱で歌唱した楽曲が, オペラ歌唱よりも低い緊張度であるならば, 合唱歌唱で歌われた楽曲の $O_q$ は, より高い値を示すことが予想される.

[*1] SPL: Sound Pressure Level. 日本語では音圧レベルと表記される. 声の大きさに相当する.

### 4.2.2　分散分析と多重比較

各楽曲は 5 回繰り返し歌唱されたため, 5 つの $O_q$ 平均値が得られる. 本研究では, この 5 つの値の平均をとり, その楽曲の代表値とした. これにより, 40 個 (参加者 8 人 × 5 楽曲) の代表値が得られた.

求めた $O_q$ の代表値を用いて, 対応のある 1 要因の分散分析をおこなう. ここでの要因は楽曲である. 分散分析の結果, $p = 0.0000102$ で楽曲の要因に主効果が認められた. この結果は, 歌手が楽曲によって異なる緊張度の声を用いて歌唱していることを示している.

次に, どの楽曲間に有意差があるかを調べるため, 多重比較をおこなった. 各楽曲の比較には対応のある t 検定を用いて, $p$ 値を BH 法 [16] により補正した. 得られた $p$ 値を表 4.1 に示す.

表 4.1: $O_q$ の楽曲間の多重比較.

| | Ave | Car | Lib | YuC |
|---|---|---|---|---|
| Car | 0.0086 | - | - | - |
| Lib | 0.0021 | 0.0300 | - | - |
| YuC | 0.9533 | 0.0782 | 0.0086 | - |
| YuO | 0.0086 | 0.9533 | 0.0021 | 0.0508 |

図 4.1 に楽曲ごとの平均値と標準偏差を示す. 図 4.1 は, 楽曲ごとの $O_q$ が異なっていることを示している. さらに, 合唱歌唱で歌われた楽曲は, オペラ歌唱として歌われた楽曲より, $O_q$ が高い傾向にあった. つまり, 歌手は合唱歌唱において, より緊張度の低い, 柔らかい声で歌唱することが示された.

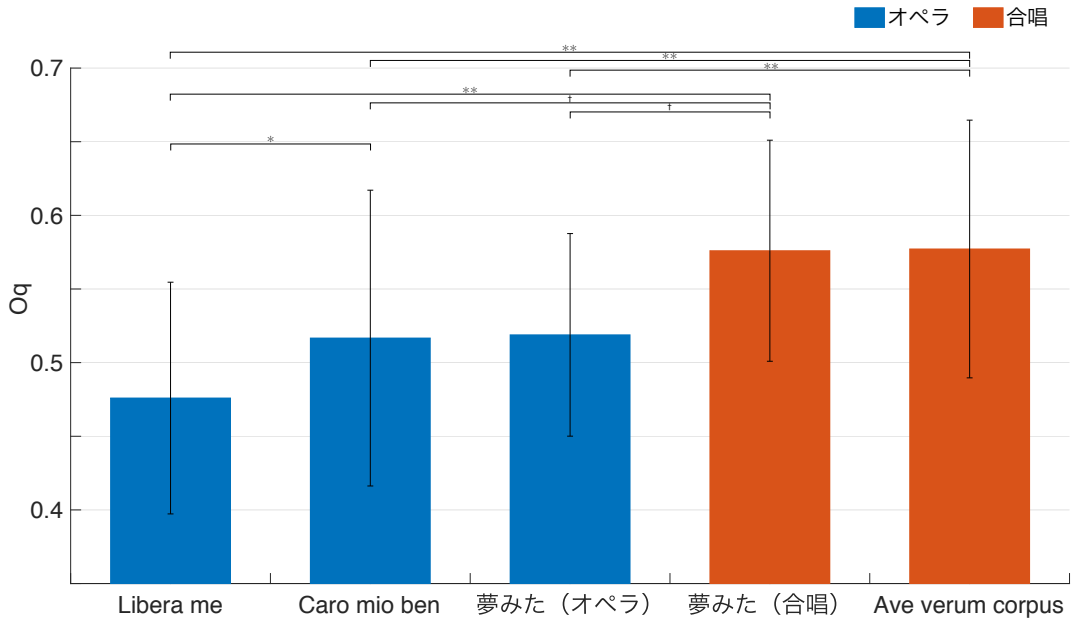


図 4.1: 楽曲ごとの $O_q$ の平均値と標準偏差. † は $p < 0.1$ で有意傾向あり.* は $p < 0.05$, ** は $p < 0.01$ で有意差あり.

### 4.2.3　参加者 × 楽曲 ごとの $O_q$

$O_q$ の値は参加者ごとにばらついていた. 図 4.2 に, $O_q$ の 40 個の代表値を, 参加者ごとにまとめ, 棒グラフで示す. すべての楽曲で $O_q$ があまり変化しない者（No.01 や No.07）や, 逆に大きく変化する者（No.02 や No.03）がいた.

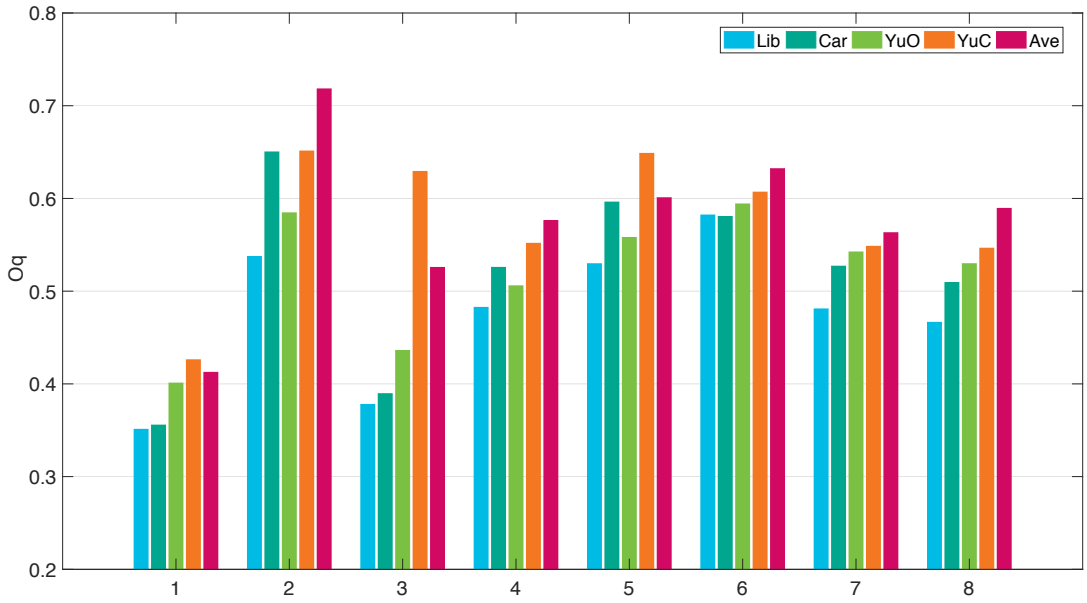


図 4.2: 参加者 × 楽曲　ごとの $O_q$ の平均値.

### 4.2.4　考察

分析の結果, 楽曲ごとに $O_q$ の平均値が異なることが示された. この結果は, 歌手が楽曲を表現するとき, その楽曲に適した緊張度を制御可能であることを示唆している.

さらに, 各楽曲間の平均値を比較すると, 合唱歌唱で歌われた楽曲は, より高い $O_q$ をとる傾向にあった. つまり, 歌手は合唱歌唱でより緊張度の低い声を用いる傾向にあった. しかし, ここで得られた結果は, 楽曲の要因に依存している可能性もある.

「夢みたものは」は歌曲としても合唱曲としても歌われており, 本研究においても, オペラ歌唱と合唱歌唱の両方の歌唱法で歌っている. そのため, 「夢みたものは」の分析をおこなえば, 楽曲の要因を除いたうえで, より厳密に歌唱法の要因を比較可能である. しかし「夢みたものは」のオペラ歌唱と合唱歌唱間での多重比較の結果は $p = 0.0508$ であり, 有意傾向にはあったが, 有意差は認められていない. われわれの興味は, 歌唱法による特性の違いにあるため, 4.4 節では, この「夢みたものは」について, より詳細な分析をおこなう.

本節では楽曲ごとに $O_q$ の平均値を代表値とし, それらを比較した. しかし, 歌唱において, $O_q$ は声の高さや大きさの変化にともない, 変動する. 平均値の比較では $O_q$ の変動を観測できない. 声の高さや大きさが変化したとき, $O_q$ にどのような変動が生じるかに関しては, 4.4 節で分析する.

## 4.3 SPR の比較分析

### 4.3.1 分析のねらい

本節では SPR (Singing Power Ratio) を用いて, 各歌唱の singer's formant の強さを分析する. Rossing によれば, 合唱歌唱では高い帯域の周波数成分が弱くなる傾向にあった [14]. また, オペラ歌唱には singer's formant が 3 kHz 周辺にみられることも知られている [11]. これらの事実を踏まえると, 歌手は合唱歌唱において, singer's formant を弱めている可能性があり, 本節ではこれを検証する.

### 4.3.2 SPR の抽出

SPR は Omori らによって提案された声の鳴り（ringing）に関する指標である [17]. SPR の算出では, まず, 歌唱全体の平均スペクトルを求める. このとき得られたスペクトルの 0 Hz — 2 kHz の最大値と, 2 kHz – 4 kHz の最大値の比が SPR である. スペクトルのパワー値は対数で示されることが多いため, その場合, 比は単に差をとることで求められる. SPR が大きいほど, singer's formant が強く現れていることを示すと考えられている. Omori らの論文中に挙げられている例を図 4.3 に示す.

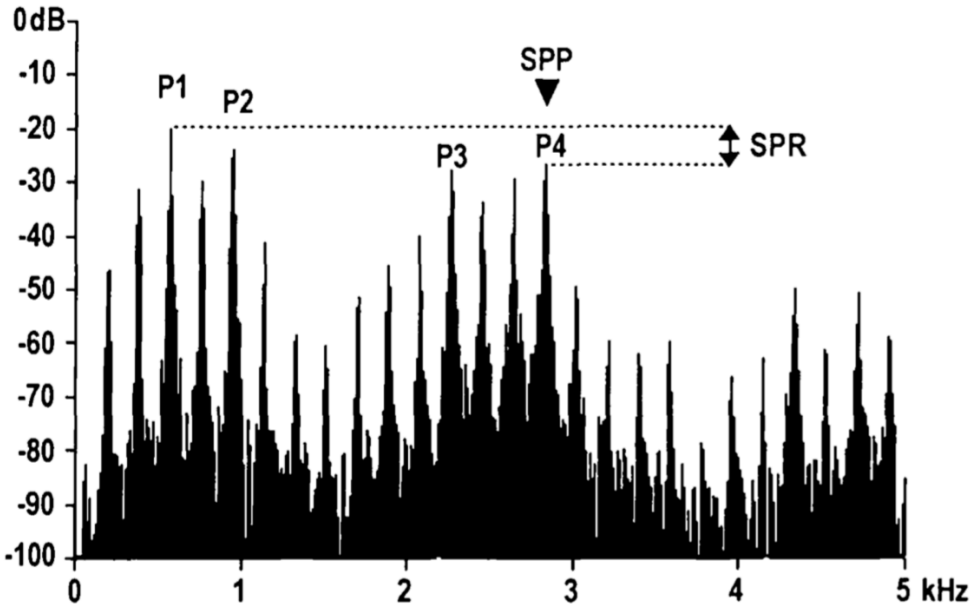


図 4.3: SPR の算出例 (Omori, 1996 より引用).

本研究では歌唱 1 回ごとに, 歌唱全体の平均スペクトルを求め, その平均スペクトルをもとに, SPR を抽出した. 得られたサンプル数は 200 (参加者 8 人 × 5 楽曲 × 繰り返し 5 回) であった.

### 4.3.3　分散分析と多重比較

4.2 節で $O_q$ を対象におこなった分析と同様に, 5 回の繰り返し歌唱で得られた値は, さらにその平均値を算出し, 楽曲の代表値とした. これにより, 40 個 (参加者 8 人 × 5 楽曲) の代表値が得られた.

得られたデータを用いて, 対応のある 1 要因の分散分析をおこなった. ここでの要因は楽曲である. その結果 $p = 0.000826$ で楽曲の要因に主効果が認められた. これは, 歌手が楽曲によって, singer's formant の強さを変化させていることを示している.

次に, どの楽曲間に有意差があるか調べるため, 多重比較をおこなった. 各楽曲の比較には対応のある t 検定を用いて, $p$ 値を BH 法 [16] により補正した. 得られた $p$ 値を表 4.2 に示す.

表 4.2: SPR の楽曲間の多重比較.

| | Ave | Car | Lib | YuC |
|---|---|---|---|---|
| Car | 0.031 | - | - | - |
| Lib | 0.027 | 0.868 | - | - |
| YuC | 0.303 | 0.082 | 0.027 | - |
| YuO | 0.082 | 0.894 | 0.868 | 0.054 |

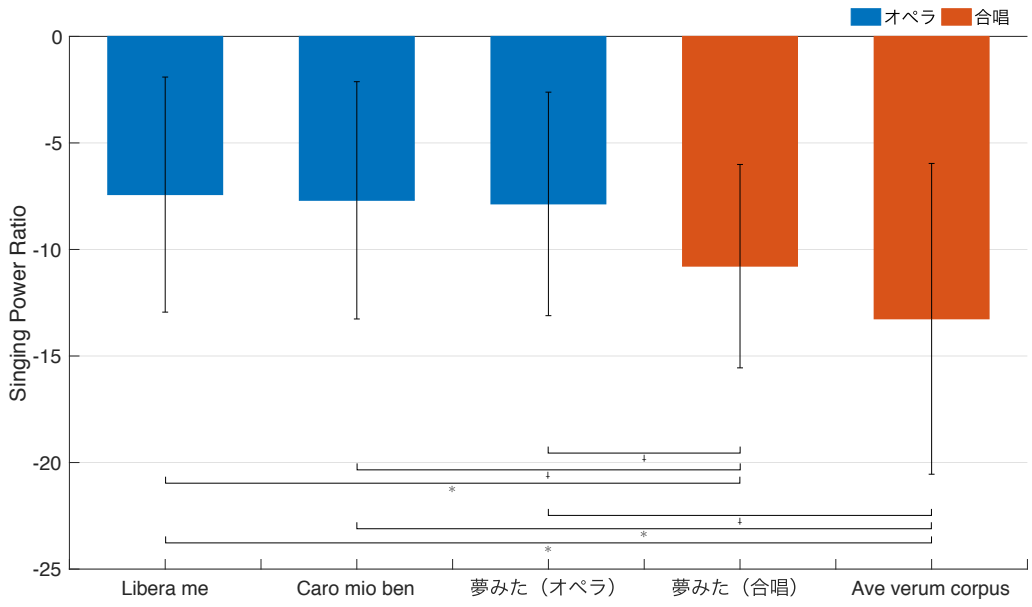


図 4.4: 楽曲ごとの SPR の平均値と標準偏差. † は $p < 0.1$ で有意傾向あり.*は $p < 0.05$ で有意差あり.

図 4.4 に, 楽曲ごとの平均値と標準偏差を示す. オペラ歌唱と合唱歌唱の間には有意傾向や, 有意差があった. このことから, 歌手は合唱歌唱において, singer's formant を弱めた声質を用いていることが示唆された.

### 4.3.4　参加者 × 楽曲 ごとの SPR

図 4.5 に, 参加者 × 楽曲ごとの平均値を示す . SPR も $O_q$ と同様, 個人差が大きい. No.01 は, すべての楽曲で SPR がほぼ変化していない. No.02 や No.05 は “Ave verum corpus” の SPR が他の楽曲と比べとても小さくなっている.

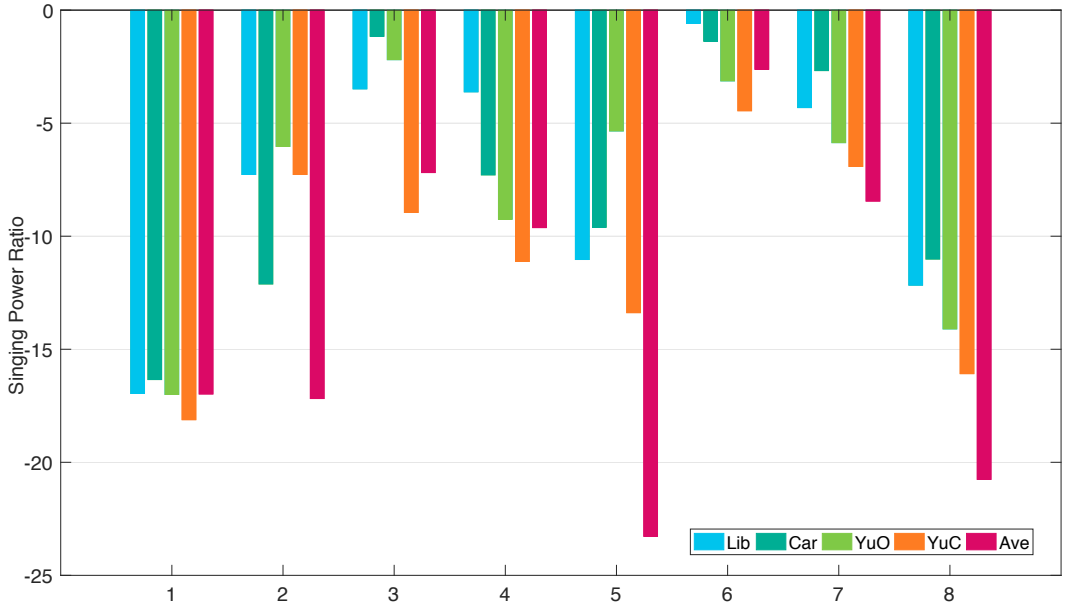


図 4.5: 参加者 × 楽曲 ごとの SPR 平均値.

### 4.3.5　考察

分析の結果, 楽曲ごとに SPR が異なることが示された. これは歌手がどのような楽曲に対しても, 一様な singer’s formant を用いるわけではなく, 楽曲によって singer’ formant の強さを変化させていることを示している.

さらに多重比較の結果, 合唱歌唱で歌われた楽曲は, オペラ歌唱で歌われたほぼすべての曲に対して, SPR が有意に小さいことが示された. これは, 合唱歌唱ではオペラ歌唱に比べ, singer’s formant を弱めて歌唱していることを示唆している.

以上の結果を踏まえると, 複数人で声を合わせることを目指す合唱歌唱においては, singer’s formant による響きを抑えた声質が適しているようである.

## 4.4 「夢みたものは」の比較

### 4.4.1 分析のねらい

ここまでの分析により, 歌手が楽曲に合わせて, 声質の緊張度や singer's formant の強さを変化させていることが示された. 合唱歌唱はオペラ歌唱に比べ緊張度が低く, 弱い singer's formant の声が用いられていた. しかし, ここで得られた結果は, 楽曲の要因に依存している可能性もある.

本研究の目的は, 歌唱法の違いによる特性比較である. 楽曲の要因を除いたうえで, より厳密に歌唱法の要因を比較するのであれば, 異なる歌唱法で歌った同一の楽曲を分析すればよい.

本節では, 合唱歌唱とオペラ歌唱の両方で歌唱した, 歌曲としても合唱曲としても歌われる「夢みたものは」を分析する. 本節ではまず, $O_q$ の変動を捉える可視化手法として, $O_q$-valued VRP と最大傾斜ベクトルを提案する. これらの手法により得られた図を用いて, 参加者ごとの特性を分析する.

### 4.4.2 $O_q$-valued VRP の提案

歌唱においては, 声質の緊張度（$O_q$）は声の高さ（$f_o$）や声の大きさ（SPL）の影響を受け変化する. ここで特に, $O_q$ は SPL と負の相関があることが知られている [8]. これはつまり, 声が大きくなるほど, より緊張度の高い声質になりやすいということである.

「夢みたものは」の歌唱においても, 声の高さや大きさの変化に応じて, 声質の緊張度が変化していると考えられる. その変化の様相が, オペラ歌唱と合唱歌唱で, どのように異なるかについて分析したい.

この分析をおこなうために, 本研究では $O_q$-valued VRP（Voice Range Profile）による可視化を提案する. $O_q$-valued VRP（以下, $O_q$VRP）は VRP を拡張した可視化手法である. そのため, $O_q$VRP の説明に入る前に, まず VRP について簡単に述べる.

VRP は横軸に $f_o$, 縦軸に SPL をとり, 歌手が歌唱で扱える声の高さや大きさの範囲を表す可視化手法である [18]. 歌唱データからは時間的な同期がとれた $f_o$ と SPL が得られる. それらのデータに対応する箇所を VRP 上に記録していくことで, 歌唱データ全体における SPL と $f_o$ の分布傾向を可視化することができる. VRP の例を図 4.6 に示す.

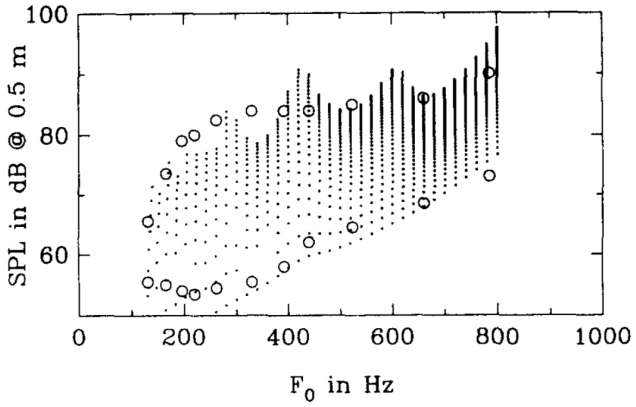


図 4.6: VRP の例（Titze, 1992 より引用）.

VRP に声の高さと大きさ以外の情報を追加し, 拡張しようとする提案が, Pabon によってなされている [19]. 本研究では, VRP に $O_q$ の情報を加えた $O_q$VRP を提案する. $O_q$VRP は VRP と同様に, 横軸に $f_o$, 縦軸に SPL をとる.

ここで $f_o$ を人間の聴感に則した尺度とするために, MIDI Note Number に変換する. MIDI Note Number は 69 が 440 Hz を表し, そこから 12 音階における 1 半音上昇するごとに 1 増加し, 1 半音下降するごとに 1 減少していく. MIDI Note Number は $f_o$ を用いて, 式 (4.2) で表される.

$$\text{MIDI Note Number} = 69 + 12 \times \log_2 \frac{f_o}{440} \tag{4.2}$$

$O_q$VRP は, 次に示す手順によって作成される. まず, VRP 上での $f_o$ を 1 MIDI Note Number ごとに, SPL を 1 dB ごとに区切る. ここで格子状に区切られた一つ一つの区間を, セルとよぶこととする. 4.1 節で示したように, $f_o$, SPL, $O_q$ は時系列の対応がとれた状態で, 声帯振動 1 周期ごとに 3 ずつ得られている. 得られた $f_o$, SPL を対応するセルに当てはめていく. すると, 同一のセルに 0 個以上の観測値が対応することとなる. 最後に, 同一セルに対応している $O_q$ の平均値を, セルごとに求め, 対応した色でセルを塗りつぶす.

色と値の対応は, 声が緊張し $O_q$ が 0 に近づくほど赤くなり, 反対に声が弛緩し $O_q$ が 1 に近づくほど青くなるよう指定した. 作成した $O_q$VRP の例を図 4.7 に示す. これにより, 異なる $f_o$ と SPL とにおいて, それぞれの $O_q$ の平均値を視覚的に把握可能になる.

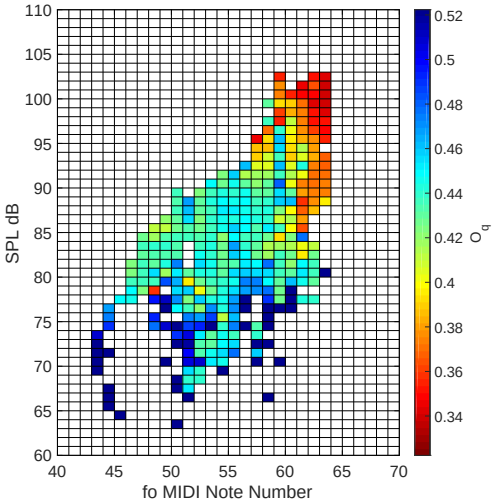


図 4.7: $O_q$-valued VRP の例.

### 4.4.3 最大傾斜ベクトルの提案

次に, 声の緊張度が, 声の高さや大きさの影響をどの程度受けているかを分析する手法として, 回帰平面における最大傾斜ベクトル (以下, 傾斜ベクトル) を提案する.

傾斜ベクトルを求めるためには, まず, 回帰平面を求める必要がある. 回帰平面は, 従属変数 $y$ を $O_q$, 独立変数 $x_1$ を $f_o$ MIDI Note Number, $x_2$ を SPL dB とすると, 式 (4.3) で表される. この式をもとに, 声帯振動 1 周期ごとに得られる特徴量について, 最小二乗法による多重回帰分析をおこなう. これにより, 係数 $\alpha$, $\beta$ と切片 $\gamma$

が得られる.

$$y = \alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma \tag{4.3}$$

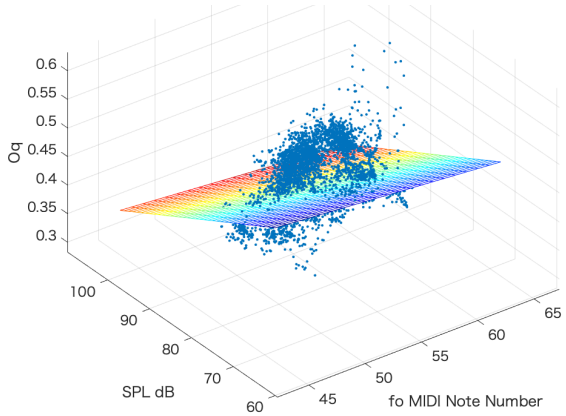


図 4.8: 回帰平面の例. 各点は観測された特徴量を示す.

得られる回帰平面の例を図 4.8 に示す. 最大傾斜ベクトルとは, この回帰平面の傾斜が最大になるベクトルのことであり, 得られた回帰係数を用いて, $(\alpha, \beta)$ で表される.

図 4.8 の例で示した回帰平面から得られる傾斜ベクトルは図 4.9 のようになる.

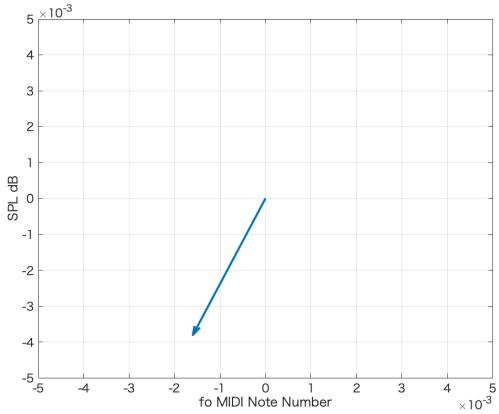


図 4.9: 最大傾斜ベクトルの例. ベクトルの向きは平面が最も傾く方向を示し, 長さは, 傾きの急峻さを示す.

傾斜ベクトルは, 声質の緊張度が声の高さと大きさから受ける影響の強さと, バランスを示している. ベクトルが x 軸と平行な方向（水平方向）を指すとき, 緊張度は, 声の高さに強く影響を受け, y 軸に平行な方向（垂直方向）を指すとき, 緊張度は, 声の大きさに強く影響を受けていることを表す. 高さと大きさの影響を等しく受ける場合には, 傾斜ベクトルは斜め方向を指す. これらの 3 つの例における傾斜ベクトルが, 真上から見た回帰平面とどのように対応するかを, 図 4.10 に示す.

ここまで, $O_q$VRP と傾斜ベクトルの 2 つの可視化手法を提案した. 以降では, $O_q$VRP を用いて, 参加者を A, B, C の 3 タイプに分類し, その上で, 個人ごとの特性に関しても, 考察していきたい. なお, ここで示される

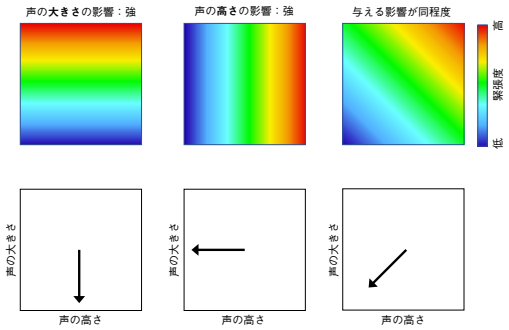


図 4.10: 回帰平面と最大傾斜ベクトルの対応のイメージ図. 最大傾斜ベクトルは声の緊張度が低くなる方向を指している.

$O_q$VRP と傾斜ベクトルは, すべて 5 回繰り返し歌唱したものを合算したデータから作成されている.

### 4.4.4　タイプ A：歌唱法間の緊張度が全体的に異なる

オペラ歌唱と合唱歌唱で $O_q$VRP が全体的に大きく異なっていた者を, タイプ A と分類した. タイプ A には No.02, No.03, No.05 が該当する. これらの参加者は, $O_q$VRP の全域において, 合唱歌唱の $O_q$ が, オペラ歌唱より 0.05 – 0.15 程度高くなっており, 合唱歌唱では歌唱全体を通して低い緊張度の声を用いていた. 以降, このタイプ A に属する参加者の $O_q$VRP と傾斜ベクトルを個別に考察する.

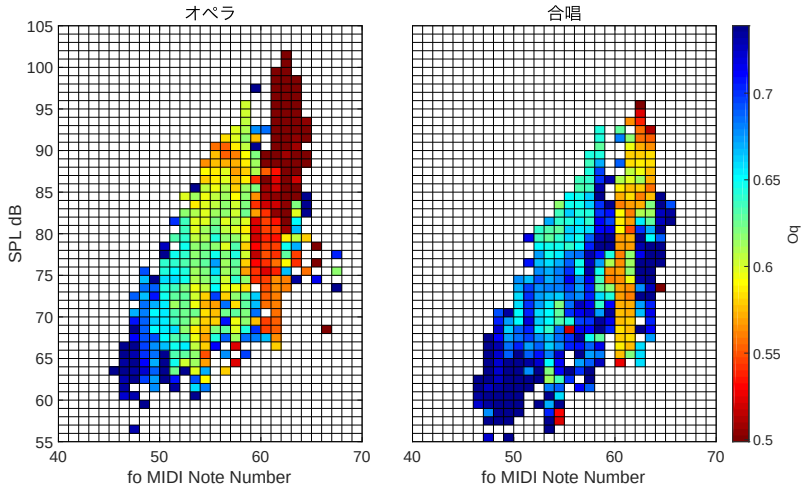


図 4.11: 参加者 No.02 の $O_q$-valued VRP.

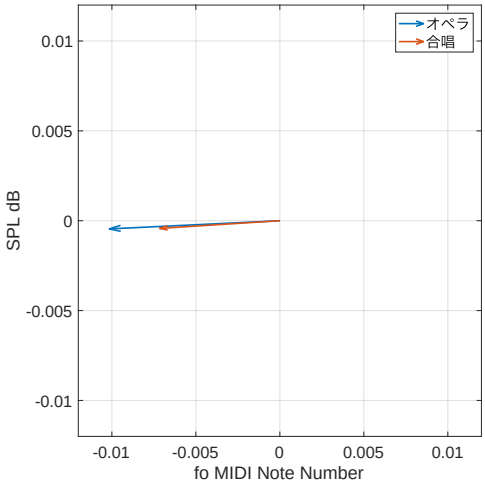


図 4.12: 参加者 No.02 の最大傾斜ベクトル.

No.02 の $O_q$VRP を図 4.11 に示す. この参加者は MIDI Note Number が 60 – 65 の領域で緊張度が高まっており, そのほかの部分では大きな色の変化は見られない. また, 色の変化が声の高さ（水平方向）に強く現れており, 声の大きさ（垂直方向）にはあまり現れていない.

次に, 同一参加者 No.02 の傾斜ベクトルを図 4.12 に示す. 2 つのベクトルはどちらも水平方向を指しており,

$O_q$VRP で色が垂直方向に変化していないという特性が, よく反映されている. また, 合唱歌唱とオペラ歌唱では, 傾斜ベクトルの向きはほぼ変化しないが, 長さは, オペラ歌唱のベクトルの方が長くなっている. ベクトルの長さは, 回帰平面の傾きの急峻さを示しているため, No.02 はオペラ歌唱において, より声の緊張度をダイナミックに変化させているのであろう. 合唱歌唱の視点に立てば, オペラ歌唱よりも緊張度の変化を抑制したとも言える. つまり, 合唱歌唱では, 極端な声質変化を抑制することで, より全体との調和を優先しようとした可能性がある.

No.03 の $O_q$VRP を図 4.13 に示す. オペラ歌唱では, MIDI Note Number が 55 のあたりを境に, 緊張度が大きく変化している. 合唱歌唱はオペラ歌唱に比べ, 色の変化が少なく, 緊張度をあまり変化させていない.No.03 の傾斜ベクトル（図 4.14）は, オペラ歌唱のベクトルが左方向を指しており, 緊張度が声の高さに強い影響を受けていることを示している. また, 合唱歌唱の傾斜ベクトルはオペラ歌唱に比べ短い. つまり, No.03 は合唱歌唱において, 歌唱全体を通して緊張度をあまり変化させていない.

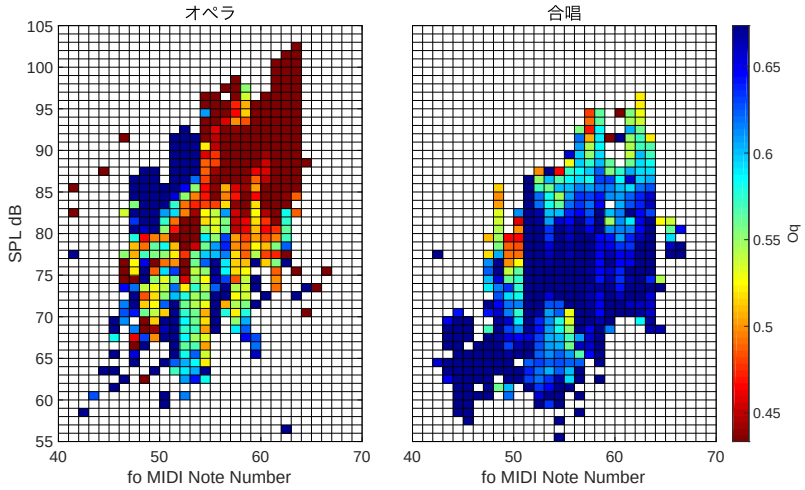


図 4.13: 参加者 No.03 の $O_q$-valued VRP.

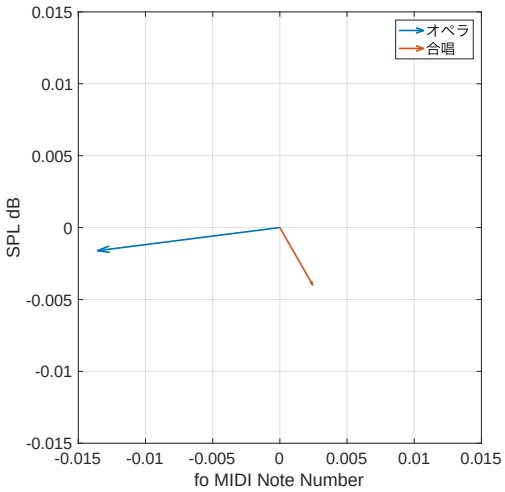


図 4.14: 参加者 No.03 の最大傾斜ベクトル.

No.05 の $O_q$VRP を図 4.15 に示す. 合唱歌唱では, グラフ右側の高音域で, 色が青くなっており, より緊張度の低い声を用いている. No.05 の傾斜ベクトル（図 4.16）では, 合唱歌唱の傾斜ベクトルが右方向を指しており, 先述した $O_q$VRP の特徴（グラフ右側で色が青くなっていること）を的確に捉えている. 高音域で緊張度が低くなっていることから, その部分の歌唱で, ファルセットを用いていた可能性がある.

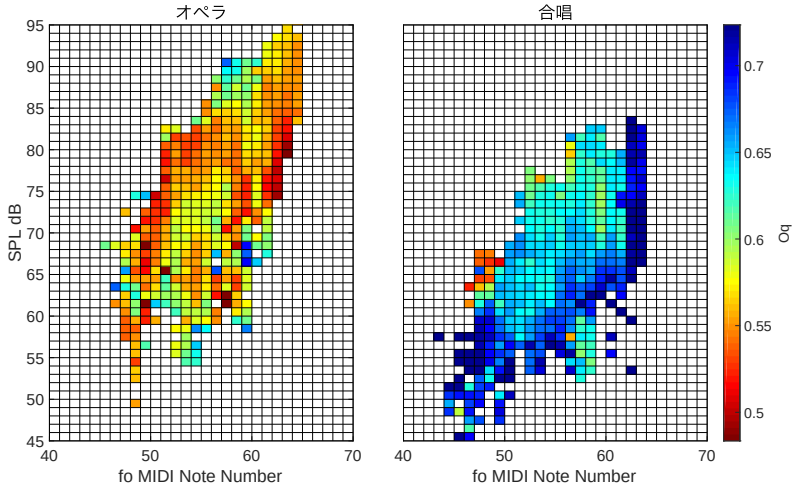


図 4.15: 参加者 No.05 の $O_q$-valued VRP.

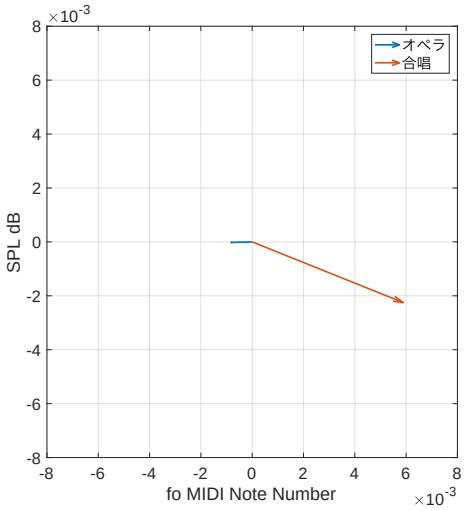


図 4.16: 参加者 No.05 の最大傾斜ベクトル.

### 4.4.5　タイプ B：歌唱法間の緊張度が部分的に異なる

オペラ歌唱と合唱歌唱を比較したとき, $O_q$VRP における色の分布の傾向は概ね同じであったが, 部分的に異なっていた歌手をタイプ B と分類した. タイプ B には No.01, No.04, No.06, No.08 が該当する. 以降, このタイプ B に属する参加者の $O_q$VRP と傾斜ベクトルを個別に考察する.

No.01 の $O_q$VRP を図 4.17 に示す. オペラ歌唱ではグラフ右上（声が高く大きい）領域で, 緊張度が高くなっているが, 合唱歌唱ではあまり緊張度が高くならない. No.01 の傾斜ベクトル（図 4.18）では, オペラ歌唱での傾斜ベクトルが合唱歌唱より長くなっており, No.02（図 4.12）と同様の傾向があった. つまり, No.01 も, オペラ歌唱で, よりダイナミックに緊張度を変化させている.

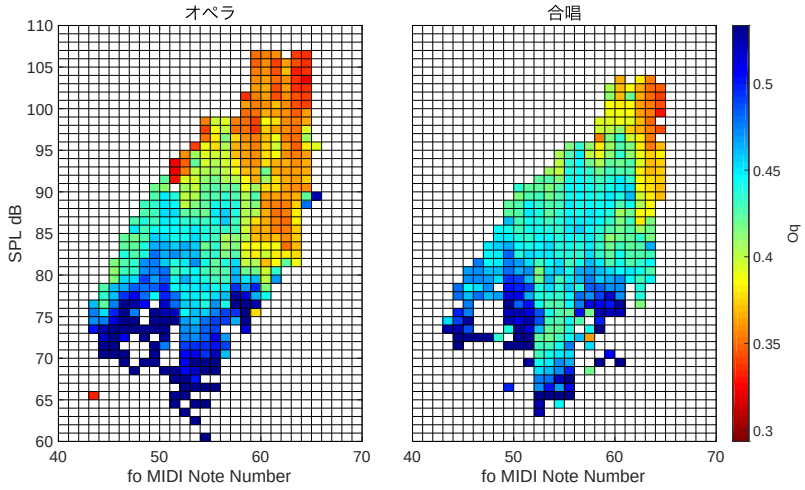


図 4.17: 参加者 No.01 の $O_q$-valued VRP.

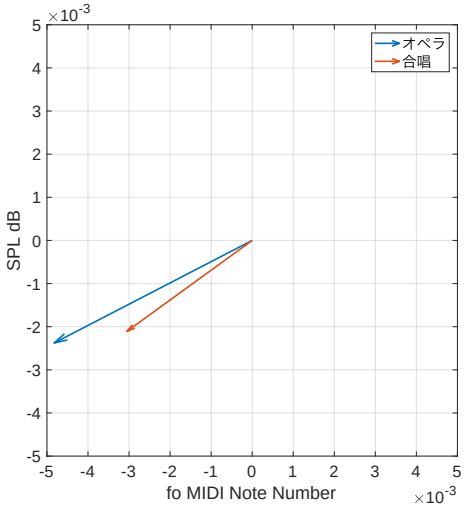


図 4.18: 参加者 No.01 の最大傾斜ベクトル.

No.04 の $O_q$VRP を図 4.19 に示す. 2 つの $O_q$VRP は似ているが, オペラ歌唱では声をより大きく出してお

り, $O_q$VRP の分布領域が, 縦に広がっている. また, 声が大きくなるほど, 緊張度が高くなる傾向にある.

No.04 の傾斜ベクトル（図 4.20）では, 声の大きさを幅広く変化させ, かつ大きい声の緊張度が高かったことにより, オペラ歌唱の傾斜ベクトルが合唱歌唱の傾斜ベクトルより垂直方向を指している. No.04 のオペラ歌唱では, 声の大きさが, 緊張度により強い影響を与えているようである.

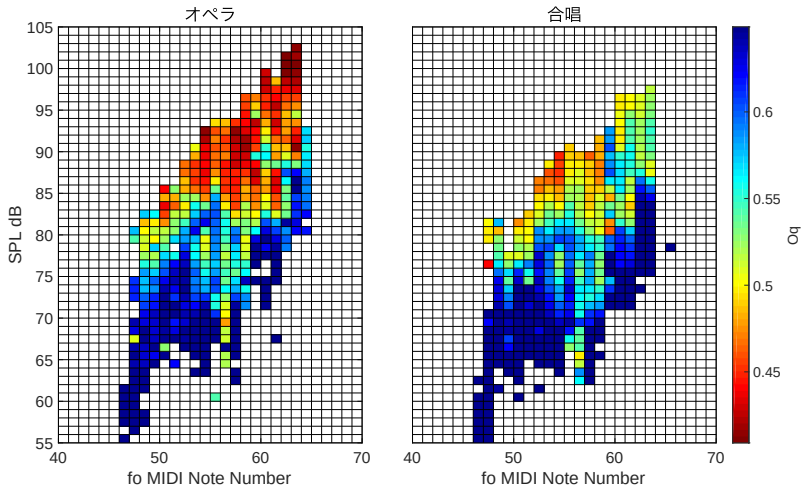


図 4.19: 参加者 No.04 の $O_q$-valued VRP.

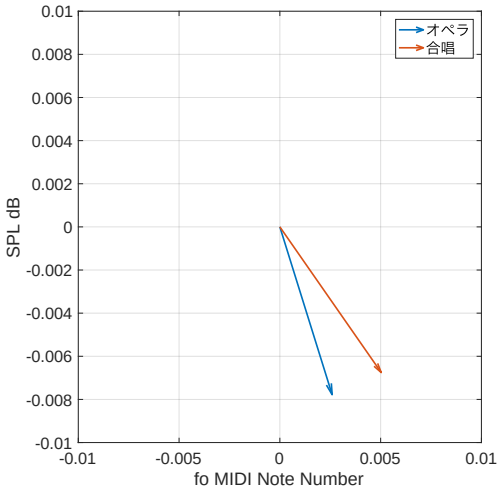


図 4.20: 参加者 No.04 の最大傾斜ベクトル.

No.06 の $O_q$VRP を図 4.21 に示す. No.01（図 4.17）と同様に, グラフ右上の領域で, オペラ歌唱と合唱歌唱の緊張度が異なり, オペラ歌唱の緊張度は高い. No.06 の傾斜ベクトル（図 4.22）では, 合唱歌唱の傾斜ベクトルは, オペラ歌唱の傾斜ベクトルより, 垂直方向を指すように変化している. 合唱歌唱では, 高音域で緊張度を低く保ったために, 声の高さが緊張度に与える影響が比較的弱まったことを表している.

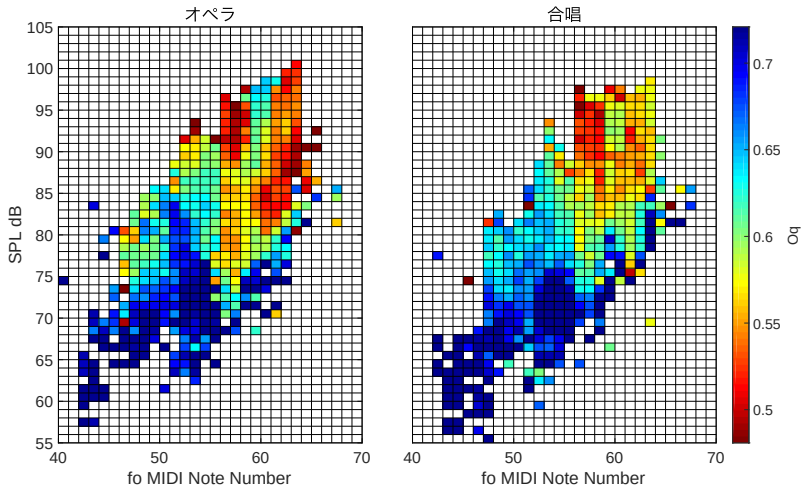


図 4.21: 参加者 No.06 の $O_q$-valued VRP.

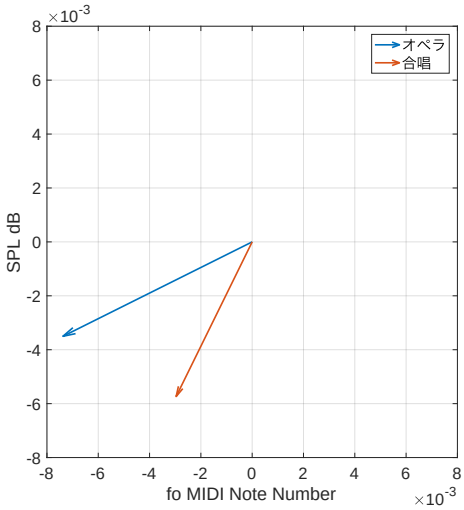


図 4.22: 参加者 No.06 の最大傾斜ベクトル.

No.08 の $O_q$VRP を図 4.23 に示す. No.08 もグラフ右上の領域で, 合唱歌唱はオペラ歌唱より緊張度を低く抑えている. No.08 の傾斜ベクトル図 4.24 においても, オペラ歌唱のベクトルが長く, 平面の傾きが急峻になっていることから, オペラ歌唱ではダイナミックに緊張度を変化させていることが示されている.

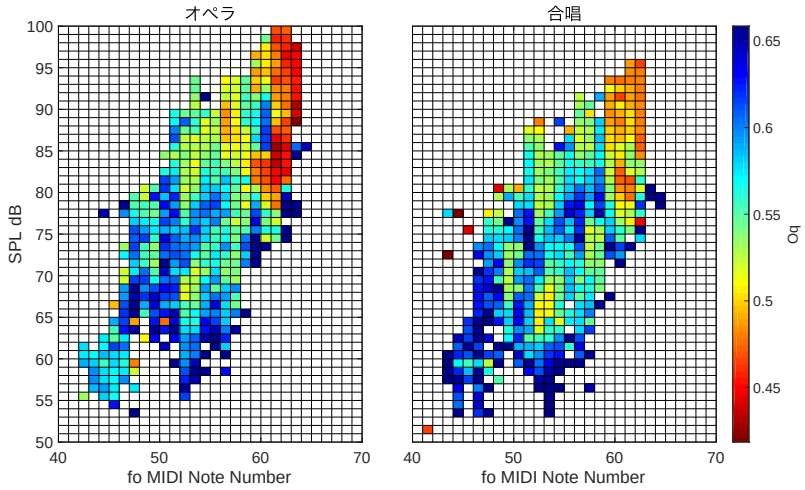


図 4.23: 参加者 No.08 の $O_q$-valued VRP.

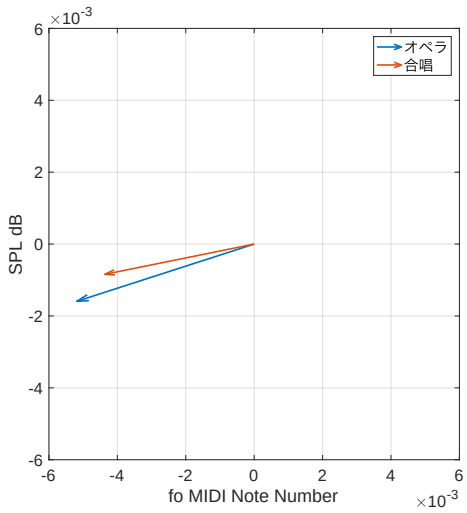


図 4.24: 参加者 No.08 の最大傾斜ベクトル.

### 4.4.6　タイプ C：歌唱法間の緊張度があまり変化しない

最後に, $O_q$VRP の色の様相がほぼ変化しなかった No.07 をタイプ C とした.No.07 の $O_q$VRP と最大傾斜ベクトルを図 4.25, 図 4.26 に示す. $O_q$VRP で, 色の分布傾向に大きな差がないため, 傾斜ベクトルにおいても, 2 つのベクトルの向きと大きさにあまり変化がなく, 傾斜ベクトルは $O_q$VRP の傾向をよく捉えている.

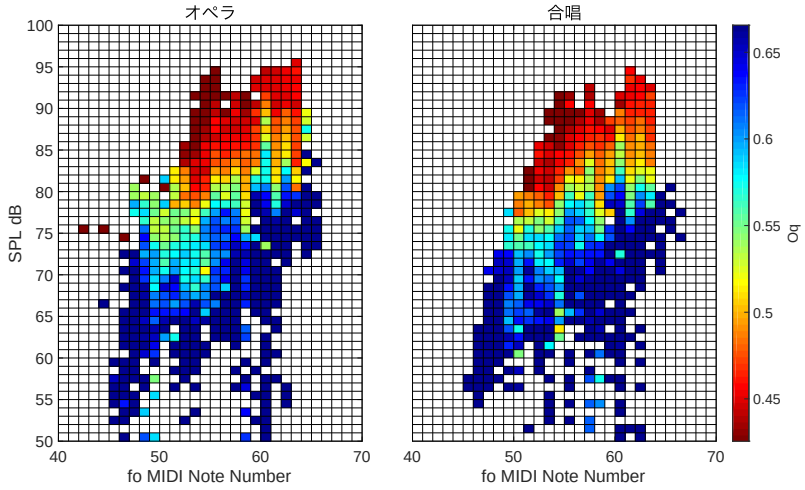


図 4.25: 参加者 No.07 の $O_q$-valued VRP

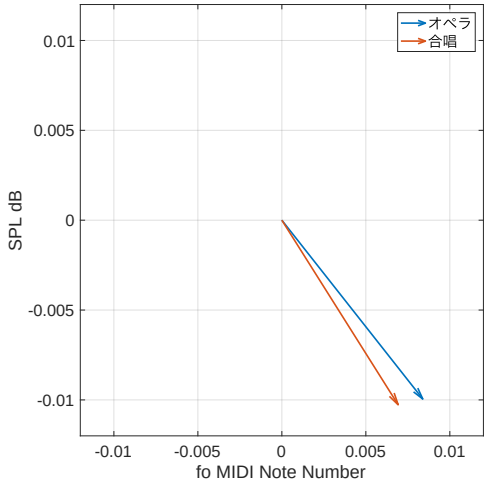


図 4.26: 参加者 No.07 の最大傾斜ベクトル.

### 4.4.7　全タイプを俯瞰した考察

タイプ C の No.07 以外の参加者に共通して言えるのは, $O_q$VRP における右上の領域, つまり, 声が高く大きい領域では, 合唱歌唱はオペラ歌唱よりも低い緊張度で歌唱しているということである. 該当領域は, 楽曲の最

高音を歌唱する区間であり, この楽曲がもっとも盛り上がるフレーズである. 低い音域を扱うバリトン歌手にとっては, 高い音であり, 発声しづらく感じた参加者もいたと思われる. 無理に高音を出そうとすれば, 喉頭に力みが生じてしまう. ここで得られた共通の傾向は, 歌手が合唱歌唱において, 高音を出そうと力んでしまう発声を回避しようとしたことを示しているのかもしれない. もしくは, 合唱歌唱でフレーズの山となる区間を歌唱する際に, 力強く, 緊張度の高い声が求められていないのかもしれない.

No.01（図 4.18）, No.02（図 4.12）, No.08（図 4.24）では, オペラ歌唱と合唱歌唱の傾斜ベクトルの向きはほぼ等しいが, オペラ歌唱の傾斜ベクトルが長くなる傾向にあった. これらの参加者はオペラ歌唱では, よりダイナミックな声質の変化によって音楽的表情付けをおこなうが, 合唱歌唱では, 声質の変動を抑制した歌い方をしているようである. オペラ歌唱における歌唱よりも, 緊張度のダイナミクスを抑えた歌唱表現が, まとまりを重視する合唱歌唱において求められているようだ.

# 第 5 章

# まとめと今後の課題

## 5.1　まとめ

楽曲ごとの $O_q$ の比較により, 歌手は, 楽曲ごとに緊張度の異なる声質で歌唱していることが明らかになった. 歌手は喉頭の緊張度を調節することで, 楽曲に適した音楽的表情付けをおこなっているようである.

また, 歌手が合唱歌唱で歌うときは, オペラ歌唱で歌うときに比べ, 有意に緊張度の低い声を用いていた. まとまりを重視する合唱歌唱では, 緊張度の低い声を用いることで, より自分の声が集団に溶け合うように歌唱することが示唆された.

singer's formant の強さを示す SPR の比較により, 歌手が楽曲によって singer's formant の強さをコントロールしていることが示された. オペラ歌唱においては singer's formant が強く出る傾向にあり, 合唱歌唱においては singer's formant を弱める傾向があった. singer's formant は自分の声を目立たせ, より遠くまで響くようにするためのものであるから, 合唱歌唱においては, 自分の声だけが目立ってしまうのを回避するために, singer's formant を弱めているのであろう.

さらに, $O_q$-valued VRP と回帰平面における最大傾斜ベクトルによる可視化を提案し,「夢みたものは」の詳細な比較分析を試みた. 分析では, 歌手を, 声の高さや大きさに関わらず, 合唱歌唱で緊張度の低い声を用いたタイプ A と, 部分的に緊張度を変化させたタイプ B, ほぼ緊張度を変化させないタイプ C の 3 つに分類した. またタイプ A とタイプ B に共通して, 声が高く大きい領域では, 合唱歌唱の緊張度が低くなる傾向にあった. この領域では, 緊張度が高い声を意識的に用いないことで, 全体としてのまとまりを優先しているようである.

また, 最大傾斜ベクトルは $O_q$-valued VRP の概要を捉え, $O_q$ が声の高さと大きさから受ける影響を比較するために有用な手法であった. $O_q$ 以外の特徴量を用いた VRP の拡張においても, 応用できる可能性がある.

## 5.2　今後の課題

本研究はバリトン歌手を対象におこなったため, バスやテノール, ソプラノなどの他の声種において, 同様の結果が得られるかは検証が必要である.

また本研究の分析では, 時間変動に伴う音楽表現であるアゴーギクやデュナーミク, ビブラートなどを扱えていない. これらの時間変動を考慮した分析は今後の課題である.

# 謝辞

はじめに, 歌声の研究をしたいという私のわがままを受け入れてくださり, 熱心にご指導していただいた寺澤先生に感謝いたします. いつも背中を押していただき, この研究室で過ごした 3 年間で, 大きく成長することができたのは先生のおかげです.

北海道医療大学の榊原先生, 和歌山大学の河原先生に深く感謝いたします. 春の北海道ミーティングと冬のつくばミーティングによって, 研究が大きく前進しました. 榊原先生には分析に関する多くのアイデアをいただき, 河原先生には分析手法の実装で, 大きな支援をいただきました.

実験に協力いただいたバリトン歌手の皆さんに感謝いたします. この研究に興味を持っていただいたこと, 本業の立場から, 興味深いご意見を数多くいただけたこと, とても嬉しく思っています.

平賀先生, 松原先生に感謝いたします. 客観的な視点から鋭い指摘をいただき, 研究の方向を見直す機会を与えていただきました.

最後に研究室のメンバーに感謝いたします. LSPC はとても居心地がよく, 楽しい研究室生活を送ることができました. 後輩の皆さんには, これからも楽しい研究室にしていってほしいです. 応援しています.

# 参考文献


[1] 榊原健一. 世界の歌唱法: 様々な歌唱様式における supranormal な声（〈小特集〉歌声の科学）. 日本音響学会誌, Vol. 70, No. 9, pp. 499–505, 2014.

[2] Johan Sundberg. 歌声の科学. 東京電機大学出版局, 2007.

[3] Martin Rothenberg. A new inverse-filtering technique for deriving the glottal air flow waveform during voicing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 53, No. 6, pp. 1632–1645, 1973.

[4] Johan Sundberg and Jan Gauffin. Waveform and spectrum of the glottal voice source. *Frontiers of speech communication research*, pp. 301–320, 1979.

[5] Gunnar Fant. Glottal source and excitation analysis. *STL-QPSR*, Vol. 1, No. 1979, pp. 85–107, 1979.

[6] Jan Gauffin and Johan Sundberg. Data on the glottal voice source behavior in vowel production. *STL-QPSR*, Vol. 1, No. 1980, pp. 61–70, 1980.

[7] 石毛美代子, 新美成二, 森浩一. 音声外科の現状と将来・検査, 手術, 周辺領域編 electroglottography (EGG). 音声言語医学, Vol. 37, No. 3, pp. 347–354, 1996.

[8] Hisayuki Yokonishi, Hiroshi Imagawa, Ken-Ichi Sakakibara, Akihito Yamauchi, Takaharu Nito, Tatsuya Yamasoba, and Niro Tayama. Relationship of various open quotients with acoustic property, phonation types, fundamental frequency, and intensity. *Journal of Voice*, Vol. 30, No. 2, pp. 145–157, 2016.

[9] Nathalie Henrich, Christophe d'Alessandro, Boris Doval, and Michele Castellengo. Glottal open quotient in singing: Measurements and correlation with laryngeal mechanisms, vocal intensity, and fundamental frequency. In *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 117, pp. 1417–1430. Acoustical Society of America, 2005.

[10] Martin Joos. *Acoustic phonetics*. Linguistic Society of America, 1948.

[11] Johan Sundberg. Articulatory interpretation of the "singing formant". In *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 55, pp. 838–844, 1974.

[12] Sten Ternström and Johan Sundberg. Formant frequencies of choir singers. In *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 86, pp. 517–522. Acoustical Society of America, 1989.

[13] Allen W. Goodwin. An acoustical study of individual voices in choral blend. *Journal of Research in Music Education*, Vol. 28, No. 2, pp. 119–128, 1980.

[14] Thomas D. Rossing, Johan Sundberg, and Sten Ternström. Acoustic comparison of voice use in solo and choir singing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 79, No. 6, pp. 1975–1981, 1986.

[15] Kawahara Hideki and Sakakibara Ken-Ichi. Simple method for detecting GCI and GOI based on complex wavelet analysis with cosine series envelope. 信学技報, Vol. 118, No. 198, pp. 1–5, 2018.

[16] Yoav Benjamini and Yosef Hochberg. Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach

to multiple testing. *Journal of the royal statistical society. Series B (Methodological)*, pp. 289–300, 1995.

[17] Koichi Omori, Ashutosh Kacker, Linda M. Carroll, William D. Riley, and Stanley M. Blaugrund. Singing power ratio: quantitative evaluation of singing voice quality. In *Journal of Voice*, Vol. 10, pp. 228–235. Elsevier, 1996.

[18] Ingo R. Titze. Acoustic interpretation of the voice range profile (phonetogram). *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, Vol. 35, No. 1, pp. 21–34, 1992.

[19] Peter Pabon. *Mapping Individual Voice Quality over the Voice Range: The Measurement Paradigm of the Voice Range Profile*. PhD thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2018.