

複数人歌唱・同一音高での「声を合わせること」に関する
音響特徴量の振る舞いと聴感の関係

2319909 上原崇寛

目次

第1章 序論.....	5
1.1. 本論文の背景	5
1.2. 音声生成の音響学的な基礎知識.....	10
1.2.1. 呼吸システム (respiratory system)	11
1.2.2. 発声音源 (voice source)	13
1.2.3. 声道 (vocal tract)	17
1.3. 歌唱に関する音響学的な基礎知識、並びに先行研究	19
1.3.1. 第 1,2 声道共鳴周波数.....	20
1.3.2. ピッチの知覚と制御.....	27
1.3.3. 声部 (発声分類 / 声種 / パート)	33
1.3.4. 声区 (vocal register)	34
1.3.5. 声帯音源の強さ	38
1.3.6. Singer's formant (第 3,4,5 声道共鳴の調節)	39
1.3.7. 発声の大きさ.....	44
1.3.8. 発声スタイル.....	46
1.4. 本論文の目的・展望	47
1.5. 本論文の構成	50
第2章 小規模な歌唱測定実験を通じた分析の初期検討	51
2.1. はじめに.....	51
2.2. 実験設定.....	52
2.3. 分析 1 - 第 1,2 声道共鳴周波数の比較.....	53
2.3.1. 分析 1 の結果	53
2.3.2. 分析 1 の検討	55
2.4. 分析 2 - 歌手間における第 1,2 声道共鳴と声帯基本周波数の比較.....	56
2.4.1. 分析 2 の結果	56
2.4.2. 分析 2 の検討	58
2.5. 第 2 章のまとめ	59
第3章 同時発声による歌唱測定実験を通じた第 1,2 声道共鳴周波数の比較.....	60
3.1. はじめに.....	60
3.2. 実験設定.....	60
3.3. 分析 1 - 第 1,2 声道共鳴周波数の比較.....	61
3.3.1. 測定データの全体比較 - 分析 1	61
3.3.2. 発声条件による影響を把握するための統計比較 - 分析 1.....	63
3.3.3. 声道共鳴周波数差の全体比較 - 分析 1	65

3.3.4.	「発声形式」「母音」による比較 - 分析 1.....	66
3.3.5.	第 1,2 声道共鳴周波数同士における影響の比較 - 分析 1.....	68
3.3.6.	分析 1 の検討	69
3.4.	分析 2 - 第 1,2 声道共鳴周波数と歌手評価の比較	70
3.4.1.	分析 2 の結果	70
3.4.2.	分析 2 の検討	72
3.5.	分析 3 - 第 1,2 声道共鳴周波数と声帯基本周波数の比較	73
3.6.	第 3 章のまとめ	74
第 4 章	大規模な歌唱測定実験を通じた音響特徴量と歌手評価の比較.....	75
4.1.	はじめに.....	75
4.2.	実験設定.....	77
4.3.	分析 1 - 探索的因子分析による音響特徴量間の検討	80
4.3.1.	方法 - 分析 1.....	80
4.3.2.	探索的因子分析の事前分析 - 分析 1	83
4.3.3.	探索的因子分析の結果 - 分析 1	85
4.3.4.	分析 1 の検討	89
4.4.	分析 2 - 発声方法間における第 1,2 声道共鳴と歌手評価の比較.....	90
4.4.1.	第 1,2 声道共鳴と「歌手同士の相性」の比較 - 分析 2	91
4.4.2.	第 1,2 声道共鳴と「歌手の発声評価」の比較 - 分析 2	93
4.4.3.	分析 2 の検討	94
4.5.	分析 3 - 被験者 1 人に着目した第 1,2 声道共鳴周波数の比較.....	95
4.6.	第 4 章のまとめ	96
第 5 章	聴取実験による音響特徴量と聴感の比較	97
5.1.	はじめに.....	97
5.2.	評価語の作成について.....	97
5.3.	聴取用音源の雑音除去アルゴリズムについて	103
5.4.	聴取実験の実験設定	105
5.5.	分析 1 - 発声方法、歌手評価ごとにおける聴取評価の比較	108
5.5.1.	発声形式ごとにおける聴取評価の比較 - 分析 1.....	110
5.5.2.	「歌手の発声評価」と発声形式（独唱／重唱）における聴取評価の比較 - 分析 1	111
5.5.3.	「歌手同士の相性」と発声形式（独唱／重唱）における聴取評価の比較 - 分析 1	112
5.5.4.	「母音の合わせやすさ」と発声形式（独唱／重唱）における聴取評価の比較 - 分析 1.....	113

5.5.5.	「発声スタイル」と発声形式（独唱／重唱）における聴取評価の比較 - 分析 1	114
5.5.6.	分析 1 のまとめ	115
5.6.	分析 2 - 第 1,2 声道共鳴、LSF と聴取評価との比較	116
5.7.	分析 3 - 全ての音響特徴量と各聴取評価との比較	119
5.7.1.	「まとまり」の聴取評価との比較- 分析 3	120
5.7.2.	「ピッチ」の聴取評価との比較- 分析 3	121
5.7.3.	「呼吸」の聴取評価との比較- 分析 3	122
5.7.4.	「響き」の聴取評価との比較- 分析 3	123
5.7.5.	「声質」の聴取評価との比較- 分析 3	124
5.7.6.	「母音」の聴取評価との比較- 分析 3	125
5.7.7.	分析 3 のまとめ	126
5.8.	分析 4 - 聴取評価の潜在因子「声合っているか」と音響特徴量の比較	128
5.9.	第 5 章のまとめ	129
第 6 章	総括	131
6.1.	実験の全体のまとめ	131
6.2.	声を合わせることに作用する音響特徴量の振る舞い	134
6.3.	ピッチの判断に作用する音響特徴量の振る舞い	134
6.4.	既存研究に対する本研究の新規性、並びに実務的貢献	135
6.5.	研究の限界と今後の課題	136
	参考文献	137
	謝辞	147
付録 A.	合唱技術と発声補助器具の関係に関するアンケート調査	148
A.1.	アンケートの概要	148
A.2.	アンケートの設問内容	149
A.3.	発声技術に関する質問の結果	150
A.4.	発声補助器具に関する設問の結果	152
A.5.	「歌手同士の音響的な相互作用」の有無を尋ねる設問の結果	154
A.6.	発声補助器具に関する潜在的ニーズの検討	155
A.7.	コロナ蔓延下の自信を尋ねる設問	156
A.8.	付録 A のまとめ	157
付録 B.	第 4 章の歌唱評価実験における参加被験者向けの依頼文章	159
付録 C.	第 4 章の歌唱評価実験における参加被験者の第 1,2 声道共鳴周波数	161
付録 D.	第 5 章の聴取実験における YouTube 紹介動画の文章全文	166
付録 E.	第 5 章の聴取実験における google フォーム内の教示文	167

第 1 章 序論

1.1. 本論文の背景

音楽は先史時代から人類の楽しみとして存在し[1]、さまざまな文化に根ざしている[2,3]。本論では、その中でも世界的に親しまれている主流な形態「合唱」に焦点を当てる。合唱は多くの人々が趣味として楽しんでいる。例えば、全日本合唱連盟には約 4500 の合唱団が存在し、加盟していない団体も含めると数万に上る[4]。欧州合唱協会（European Choral Association）では、欧州 40 カ国以上で 3700 万人以上が歌唱活動に参加している[5]。

合唱を楽しむ動機は個々人や団体ごとに異なるが、一般的には団員間のコミュニケーション、歌詞との親しみ、音楽の聴感を味わうことなどが挙げられる。楽器を購入する必要がなく身体だけで演奏できるという側面も、器楽などと比べると参加への敷居を下げているのかもしれない[6]。一方、歌声の魅力を最大限に引き出すためにはさまざまな感覚や知識が必要で、心に描く通りの自在な表現で歌えることは熟練歌手に限定される。高レベルな合唱団の演奏は多くの関心を集め、例えば日本のプロ合唱団「東京混声合唱団」では年間 150 回の公演やレコーディング、テレビ出演を行っている。アマチュア団体の主要イベント「全日本合唱コンクール」も同様に注目を集め、SNS を通じて盛り上がりを見せる。大抵の合唱活動では、体の制御やハーモニーの生成を誰もが簡単に行えるわけではなく、理想通りの演奏ができないことも多々ある。その理由には以下の要因が考えられる。

第 1 に、歌唱の発声法は理解しにくい技術が多く、器楽と比べて演奏動作が目に見えないため、上手とされる歌手が何をしているのかが分かりにくい。また、歌手自身と周囲が聴く音が異なるため、耳で確認することも難しい。この理解しにくさは、楽しみの一部と捉える人もいるが、苦痛の要因と捉える人も多い。時には、発声技術の問題が合唱団の人間関係を悪化させ、指導者や指揮者が悩むこともある。優れた指導者／指揮者であれば、発声法を理解できる多様なアプローチを提案できるかもしれないが、そのような指導者／指揮者のノウハウも同じく理解しにくい技術である。

第 2 に、発声技術は感覚として習得する必要がある。経験豊かな指導者／指揮者／歌手は、歌声を聴くだけで筋肉の動きや息の使い方を推測し、効果的なフィードバックを提供できる。これは、好ましい理想の感覚を思い浮かべることができているためである。異なる指導アプローチでも、伝えたい発声技術が感覚的に共通していることがある。そのため、知識を詰め込むだけでは十分でなく、実践を重ねて感覚を養おうとすることで初めて身につくことができる。ここでいう実践とは、楽譜を読み込んでどんな演奏が理想的かを考えたり、良い演奏をたくさん聴くことを指す。この実践も一筋縄ではいかない。

第 3 に、正しい発声を表現するための感覚や知識は多岐にわたる。先行文献[6]をもとにして書き出すだけでも、「良い声」を感覚的に理解すること[6 (1 章)]、身体をコントロールできるようにすること[6 (2 章)]、息の流れをマスターすること[6 (3 章)]、母音や子音を柔軟に使い分けること[6 (4.5 章)]、美しい言葉感覚を身につけること[9]、表現力

を高めること[6 (6 章)]、そして合唱では声を合わせる感覚 (blend) の習得[6 (7 章)]が挙げられる。このような感覚と知識を網羅的に理解していなければ、2~4.5 オクターブのピッチ、約 80 dB のダイナミックレンジ、さまざまな音色やスタイルを表現できない[7]。

このように、発声技術は十分な理解が困難なため、歌声を物理的に捉える「歌唱音響学」という学問が盛んに行われてきた[10]。本分野では、歌声をマイクロフォンで計測したり、プログラミングによる発声シミュレーションで発声状態を数値化することなどが取り組まれている。数値とは物理的パラメータで、音響学・生理学的な要素を潜む「音響特徴量」として扱われる[11]。本分野の技術を用いると、声帯振動や声道共鳴の仕組みの調査、音響解析ソフトによる歌声のスペクトルや音量、音色の分析ができる。取り組みは約 1 世紀にわたり、歌声の生成や知覚に関する知見が整理されてきた。知見の例としては、良い声の感覚的な要素、身体の使い方と発声の関連性、声部ごとによる発声メカニズムの違いなどが含まれる。本分野は音声学、音声医学、音楽学、教育学などとも関連し、扱う対象も広いため、合唱含めて未解明な事象もまだ多い。2022 年現在でも、声区の音響的な分けなどの重要な発見が続いている[13]。学術誌「Journal of Voice」は、本分野の意義 1 つ目に「教育の促進 (promoting public education)」を位置付けており[10,12]、熟練歌手や指導者の経験を現場に還元しやすくする基盤を目指している。例えば、研究成果を読んで発声原理を理解できると、アプローチの幅が広がり、コミュニケーションがスムーズになることが期待される。理論が指導の助けとなったりコミュニケーションのきっかけとなれば、発声技術や演奏クオリティが向上できる。すなわち本分野の情報が、発声の客観評価や、課題の特定・改善の手助けとなれる可能性がある。

また歌唱音響学は、学術成果の情報共有だけが目的とされているわけではない。現場で良い発声を行えるよう、学術成果を応用してフィードバックできるようにする「発声補助器具」の検討も求められる。ここでいう「発声補助器具」とは、既存機器では補えないような人間同等のフィードバックを提供できるように目指す。フィードバックを伴う訓練は発声技術の確認に不可欠である[14]。フィードバックの例には、姿勢を確認する鏡、ピッチを確認するピアノ/キーボード/チューナー、リズムを確認するメトロノーム、発声を客観的に聴くための録音機がある。また、指導者からのアドバイスもフィードバックとなる。指導者からのフィードバックが常に得られると、発声を都度確認できて技術向上に繋げやすい。優れた指導者/ボイストレーナーは、技術や表現を高いレベルで維持するためのフィードバックが的確であるため、時には高額な謝礼により教えを請うこともある。実情、金銭面や時間面、モチベーションなどの制約から誰もが指導を受けることは厳しいため、このギャップを埋めるための打開策として「発声補助器具」が検討される。

筆者は、この「発声補助器具」に関する日本国内の意見を調査するため、2019 年全日本合唱コンクール全国大会に出場した合唱エキスパート 175 人に対し、発声技術と「発声補助器具の使用意欲」に関するアンケートを実施した[17]。アンケートの詳細は付録 A に掲載している。付録 A の通り、発声補助器具は現場のニーズに応え得ることが判明した。

発声補助器具の作成には、発声音を物理的パラメータとして取り出し、人間がフィードバックするような特定の要素を見つけ出す必要がある。例として[15]では、特定の歌唱部分を自動検出して追跡するメディアアプリに取り組んだ。「AMPACT」というプロジェクトは、複数マイクロフォンの音かぶりを Matlab で対処した上でアンサンブル評価システムを作成している[16]。

一方[18]は、音響特徴量を無作為に調査して発声補助器具を実装しても、実用的なシステムが得られないと示唆する。歌手が改善したい発声技術を明確に捉えることが重要なためである。特に合唱用の発声補助器具を考慮するような場合、合唱の重要な要素である「声を合わせること (blend)」に着目することが必要となる[19]。「声を合わせること (blend)」とは、各パート内やパート間で声を調和させ、ハーモニーを生み出すことである[19,20]。パート内では複数人で歌ってもユニゾンになるようにし、パート間では和声を作り、自然に溶け込むようにする[21]。上手に合わせた発声では歌詞がはっきりと聞こえて違和感がなくなるが、優れた歌手や指導者が集まる合唱団でも、曲全体で理想的な合わせを実現するのは困難とされる[22]。そのため、「声を合わせること (blend)」の検討が良い合唱の追求に欠かせない。合唱におけるこの調和感覚は、オーケストラや吹奏楽の演奏体験とも異なる、より強烈な感覚とされる[19]。そのため、器楽と合唱のブレンドは同じ現象として取り扱うことができない。意識する要素としては、ピッチ、響き、息の使い方、母音や言葉のニュアンスなど複数あり、関連する音響特徴量を十分に整理する必要がある。「声を合わせること (blend)」についても、学術的な知識が十分に整理されていない。いくつかの先行研究では、歌手が意識的に声を合わせること[23]、無意識的な影響も受けること[24]、似た特徴（テンポや癖）を持つ歌手が合わせやすいこと[25,26] が分かっている。しかし、これらの知見はまだ体系的に整理されておらず、議論の余地がある。

将来的に合唱現場で役立つ発声補助器具を開発するためには、必要となる音響特徴量や物理的パラメータを整理して、発声情報（聴感など）の知覚的パラメータと関連づけて自動評価できるようにすることが必要である。というのも、人は判断に必要な証拠を無意識下で集めてモデル構築する[27]。そのモデルが判断プロセスの中心で、最終判断や確信度合いの決定に作用し、歌唱認知においても同様に適用されると思われる。例えば[28]は、人の知覚や判断を模倣することによってより良い評価結果を得ている。合唱の「声が合っているか」という印象に対応する物理パラメータを特定できれば、現場共有が容易になる。

また、「声を合わせること (blend)」の参考材料としては、全国歌唱教師協会 (NATS) に所属する声楽教師約 1000 人の大規模調査が有用と思われる[29]。この調査によると、発声の重要な要因は「イントネーションの正確さ」「音色」「音楽性」の順とされる。

まず、「イントネーションの正確さ」はキーボードやチューナーで確認でき、認識しやすい要素である。発声の自動評価に関する先行研究も「イントネーションの正確さ」に焦点を当てたものが多い。一方「音色」は、母音や声区、響きなど多くの要因が関与し、「イントネーションの正確さ」よりも認識しづらいとされている。「イントネーションの

正確さ」と共通する点は、指導者／熟練者歌手である程度統一した見解があり、聴き分けられることとなる。「音色」を整える指導は、合唱現場において重要である。[30]の測定実験では、クラシック歌唱における聴感と物理パラメータ 12 種（ビブラート／イントネーション／ダイナミックレンジ／ブレス制御／インテンシティなど）の関係性を調べ、「イントネーションの正確さ」以外のパラメータも特定基準に達しないと、評価全体を下げるという相関関係を突き止めている。つまり、イントネーションだけでなく、音色に関する要素も歌唱スキルの評価に大きく影響することがわかる。「音色」に関する自動評価は、音響パラメータと知覚パラメータの整理によって進められており、特に独唱で研究が進んでいる。合唱を扱う研究でも同様の試みは有益と思われ、その基礎として、複数人歌唱における音響特徴量の整理が重要となる。[18]は、知覚された歌唱品質の自動評価を試み、YouTube 動画から音響特徴量（イントネーション／MFCC）を取り出して、主観評価実験による聴感のラベル付けを利用して機械学習モデルを作成した。機械学習モデルの精度はユーザー評価ベースの精度を超えなかったものの、[18]は、歌声に関連する指標を多く検討することが歌唱品質評価で必要だと示唆した。別の歌唱評価の取り組みでは、音響パラメータのセット[31]と知覚パラメータ 6 つ（イントネーション／リズム／ビブラート／音色／ダイナミックレンジ／声の明瞭性）をリンクさせて知覚パラメータを予測し[30,32]、そこから歌唱力という総合評価を判定して、人間の判定と 96 %で合致したそうである[28]。また[33]は、イントネーションとビブラートから得られる特徴量からプロの音源の聴感を分類し、最大 87 %の精度で自動評価を達成している。

最後に「音楽性」は、ダイナミクス、言葉の言い回し、曲に応じた細かな歌いまわしなどが該当し、先の 2 つ以上に複雑で、解釈が指導者／歌手によって異なる可能性がある。この「音楽性」に関する自動評価についても、前段となる「音色」に関する音響特徴量の整理が不可欠となる。「音楽性」の自動評価としても、試みが一部取り組まれている。[34]は、聴感に基づいて歌唱パフォーマンスを分析し、隠れマルコフモデルを用いるモデルを作成することで、音楽表現をフィードバックするカラオケシステムの手法を開発した。[35]では、声部ごとの音量バランスを指揮者好みになるようサポートする試験的なシステムを提案しており、東京混声合唱団の指揮者である大谷研二先生も関与した。ただいずれも限定的で、評価の基礎に楽譜を必要とし、知らない楽曲にはシステムを汎化させられない。

以上を踏まえると、[28]のように「音色」の発声スキルの自動評価を目指して、現場の歌手のニーズに貢献できる研究全体の枠組みを検討する必要がある。本論では発声補助器具の実装を行わないが、特にまだ課題が多い「音高が同じ場合」の「声を合わせる」ことについて、音響的観点から体系的に記述できるよう試みる。Journal of Voice[12]の掲げる研究意義「教育の促進 (promoting public education)」に繋がる、現場にとって実用的な知見として整理することを目指す。

ただし、本論の目的を説明する節（1.4 節）の前に、研究テーマに必要な知識や検討事項を順番に説明する。すなわち、序論の流れとしては図 1.1 のようになる。まず、発声のメカニズムを外観し、音声生成の基礎知識に触れる（1.2 節）。これにより、普段人間がどのように声を出しているのか、通常発話と歌唱で音声生成メカニズムがどのように異なっているのかを順番に見ていく。次に、独唱や複数人歌唱における音響学的要素、とりわけ本論で重要となるものを中心に取り上げる（1.3 節）。記載は、1.2 節における音声生成の知見を踏まえつつ、どのような特徴を有しているか、まだわかっていない知見はあるのか、該当する音響特徴量の検討方法についても併せて記載する。さらに、その 1.3 節を交えて本論の目的を説明する（1.4 節）。1.4 節は、本論が現場にとって実用的な知見となるよう、本論を見据えた将来的展望も踏まえる。最後に、本論の構成を説明する（1.5 節）。

序論を記述する際は、歌唱音響学の先行文献に従って、現場の歌手や指導者にも読みやすいよう配慮する。歌唱音響学の先行文献では、発行年や海外／日本問わず、声楽や合唱の演奏に対して一般向けの解説記事のような表現を用いてしばしば序論が記されており、本論も同様に記載している。また、本稿では記述全般も既存の歌唱文献に倣う。

具体的には、著者本人が歌唱のプロではないため、信頼性を担保するために歌唱指導者や音楽雑誌を参考文献として引用し、それらの記述を元に検討を構成している。また、同様の理由により、横断的な領域の知見を必要とする情報（統計学的手法など）の記載は最小限に抑えている。数式については、式を提示した後、その中に含まれる変数の説明を行っている。その他、結果の傾向を整理する目的で、統計検定を用いていない箇所があるが（表 5.3 など）、その場合は注意事項を記載している。

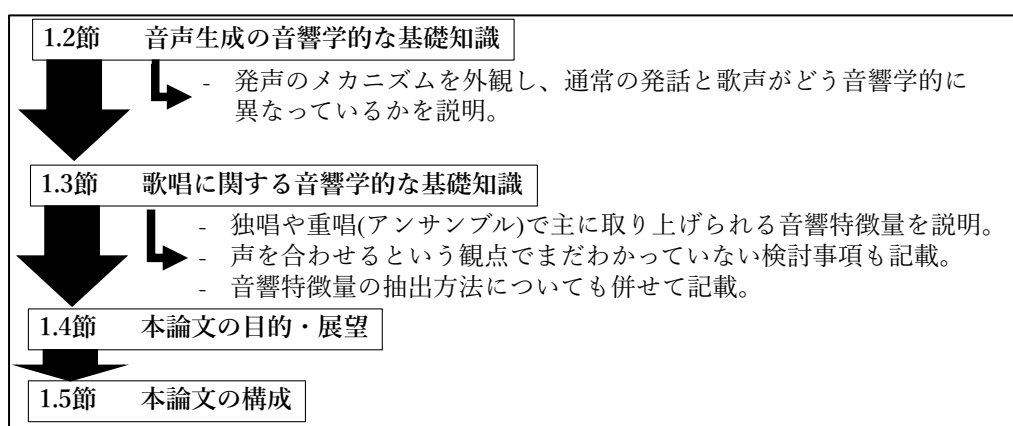


図 1.1 序論の流れ

1.2. 音声生成の音響学的な基礎知識

本節では音声生成の音響学的な基礎知識へ触れ、通常発話と歌唱がどのように生成されるのか、通常発話と歌唱がどのような点で異なるのかを整理する。発声メカニズムは、解剖学と生理学的観点による身体機構、そして音響学的な振る舞いから、主に下記 3 つの要素で構成される (図 1.2) [36,37] :

- (i) 呼吸システム (respiratory system) エネルギー源である空気流を生み出す。
- (ii) 発声音源 (voice source) 空気流を音エネルギーとして変換する。
- (iii) 声道 (vocal tract) 発声音源の特定成分を増幅・減衰させる。

発声音は、3つの要素を意識的に制御することで変化する。一般に、(i) 呼吸システムの変化は「音の大きさ」、(ii) 発声音源の変化は「ピッチ」や「声質」、(iii) 声道の変化は「母音」「共鳴 (resonance)」「発声の伝達力」などとして表れる。しかし、これらの要素がお互いに干渉し合うこともある。このような干渉が生じると、発声の柔軟性が損なわれ、意図しない動きが起こる。初心者には特に顕著だが、適切な指導と練習により、各要素を個別に鍛え、意識的に制御することができるようになる。したがって、3つの要素を理解することは、本節以降に書いている発声技術の理解、並びに本論の理解を行えると考えられる。そこで本節では、これらの要素を順番に説明する。また、通常発話と歌唱で共通する特徴、歌唱に特有の特徴、および歌唱において重要な特徴についても説明する。最後に、「Singer's formant」と呼ばれる歌唱特有の現象についても触れる。

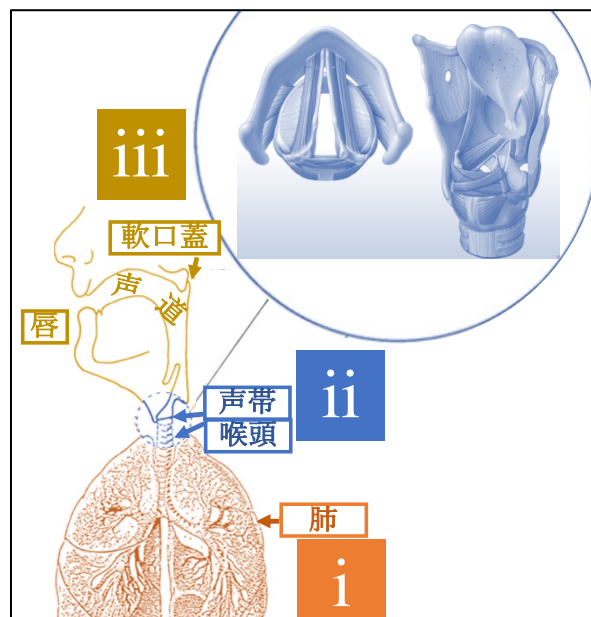


図 1.2: 発声器官の概略図。発声メカニズムは、(i) 呼吸システム (ii) 発声音源 (iii) 声道の 3 つから構成される。[36,37]

1.2.1. 呼吸システム (respiratory system)

呼吸システムは、喉頭側へ空気流を生み出す一連の要素である。呼吸システムを制御できると、大量の空気流を長時間生み出すことができる。この制御は、先述したように「声の大きさ」と密接に関係している。また、ピッチの生成や発声の安定性、発声表現の基盤にもなる。熟練者は、呼吸システムを上手に制御するための感覚を獲得している。例えば、熟練のクラシック歌手が練習などで同じフレーズを何度も歌うと、非常に一貫性のある呼吸パターンを繰り返す傾向がある[36]。しかし、熟練していない人は呼吸パターンが安定せず、長時間歌っていると息切れして十分な空気流を生み出せなくなったり、他の筋肉が収縮してしまうことがある。こうした障害が生じる原因は、呼吸システムの制御が不十分であることが多い。図 1.3 に、呼吸システムと関連する器官を示す。肺が呼吸システムの中心的な器官である一方で、肺の減圧や収縮を制御する周辺の筋肉群も、呼吸システムの制御に欠かせない器官となる。呼吸システムで特に関連する筋肉として知られているものは以下の3つである：

- (i) 横隔膜筋 息を吸う動作（吸気）で特に収縮する。
- (ii) お腹の筋肉 息を吐く動作（呼気）で特に収縮する。
- (iii) 肋間筋 (i) 横隔膜筋と (ii) お腹の筋肉を補助する。

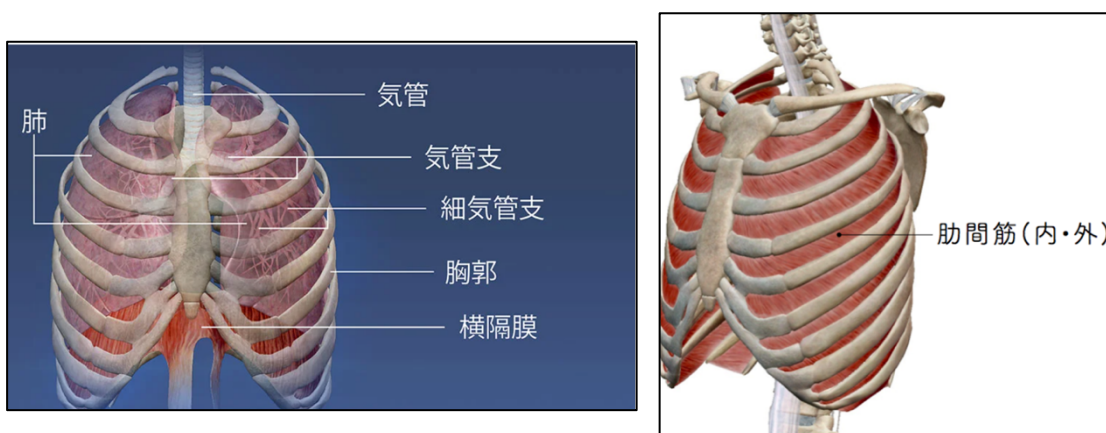


図 1.3: 呼吸システム

(i) の横隔膜筋は、空気を肺に取り入れるために必要となる。お椀を逆さまにしたような薄い膜で、胸骨／肋骨／脊椎から形成される胸郭の底にあり、肺と腹部を隔てている。横隔膜筋を収縮すると、胸郭が広がり、肺が膨らんで声門下の圧力が下がり、そして気道を確保することができ、空気を肺に流すことができる。

(ii) のお腹の筋肉は、空気を肺から出すために重要となる。お腹の筋肉を収縮すると、お腹の中が胸郭側へ後上方に押され、それにより横隔膜が上方へと動き、肺から空気が出るようになる。そのため、お腹の筋肉は肺の復元力（受動的反跳）とも解釈される。(i)

横隔膜筋と (ii) お腹の筋肉は独立しておらず、互いに連動し合う関係にある。例えば、横隔膜の収縮を解放すると、お腹の筋肉は意識しなくとも収縮する。

(iii) の肋間筋は、(i) 横隔膜筋と (ii) お腹の筋肉を補助し、呼吸しやすくするために重要となる。胸骨と共に肺の側横部を囲んでいる筋肉である。肋間筋と胸骨は肺との隙間に真空状態を作っており、そのおかげで、スポンジ状の構造である肺が形状を維持できる。肋間筋が肋骨の動きを円滑にすることで、(i) 横隔膜筋と (ii) お腹の筋肉を補助し、呼吸をしやすくする。

なお、歌唱の激しい要求に対応できるような空気流を扱うためには、前述の3つの中心的な筋肉に加えて肺の周りにある他の補助的な筋肉（努力呼吸筋）も制御できた方が良くとされている。例えば、胸郭外筋は肋骨の上昇を助け、内部間隔筋は肋骨の下降を促進する。背中の筋肉群も呼吸に関与し、胸椎や脊椎を伸展させて肺の拡張を促す。これらの補助的な筋肉を制御することにより、空気流をより精密に調整し、発声表現や息継ぎのタイミング、息継ぎの長さを調整することができる。ただし、個人の身体的な特徴や状態によっては、特定の筋肉を過剰に使いすぎることもあるため、適切なトレーニングや指導が必要となる。

1.2.2. 発声音源 (voice source)

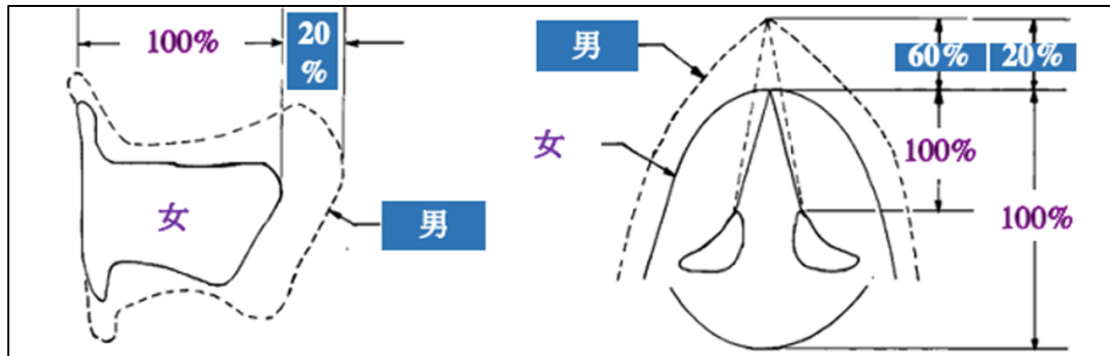


図 1.4： 矢状面から見た喉頭（左）、水平面から見た喉頭と声帯（右）

発声音源は、空気流を発声音のエネルギーへと変換する要素である。最も想像しやすい部位は声帯だが、声帯周りの骨や筋肉も要素に含まれる。声帯は気道の最も狭い部分である声門にあり、喉頭の軟骨や膜、靭帯によって支えられている。そのため、発声音源は声帯の大きさや質だけでなく、支えている部位の大きさなども影響する。例えば、男女で声帯や喉頭の大きさが異なるため、性差による発声音の違いが生じる。成人男女の喉頭と声帯の模式図を図 1.4 に記す[38]。図 1.4 は矢状面と水平面から見たもので、性差の違いが明らかである。声帯の全長は、成人女性で約 10 mm、成人男性で約 16 mm と言われている[38]。また、声帯の全長については、性差以外でも影響の有無が研究されており、首周りの長さや加齢、健康状態の影響が示唆されるが、身長との相関は大きくないとされる[39,40]。傾向として、声帯の全長が長いほど、1 秒間あたりの振動回数が小さくなる。

発声音源を作り出すには、声帯を意識的に動かしていく必要がある。発声前の声帯は、図 1.4 のように外側へ開かれている（= 披裂軟骨が外転している）。喉頭の筋肉（声門閉鎖筋）によって声帯同士が近づき（= 披裂軟骨を内転させ）、肺からの圧力が一定以上かかると振動し始める。振動して発声音が作られるまでの振動サイクルは以下で、模式図として図 1.5 に記す通りとなる[10]：

- (i) 左右の声帯を一定の距離まで近づける。
- (ii) 肺からの空気圧が一定値を超えると、「ベルヌーイ力（= 空気流が声帯を閉じる方向へ引き寄せる力）」が生まれ、声帯の両ヒダが声門中央部に引き寄せられて、声門が下の方から閉じ始める。
- (iii) 声帯が完全に閉鎖し、それによって声門下圧が上昇する。
- (iv) 声門下圧が声門上圧より大きくなることで、声帯が下方から押し広げられる。
- (v) 声帯が完全に開放され、それによって肺の空気が流れる。
- (vi) 声門下圧が低下し、ベルヌーイ力、並びに声帯弾性の復元力によって、再び声帯が下方より閉じ始める（→ 再び (iii) に戻る）。

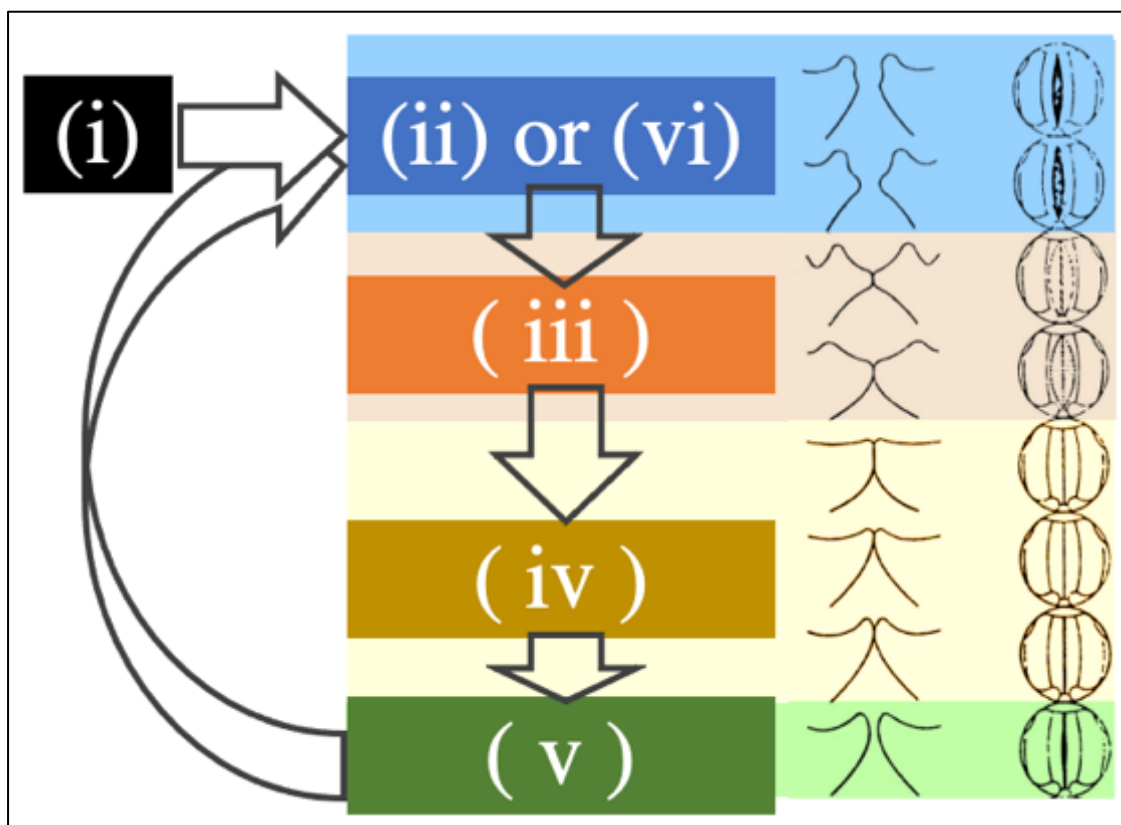


図 1.5：声帯の振動サイクルの模式図。(i) ~ (vi) の番号は、前ページに記載している振動する過程に沿ったものとなっている。[10]

ここで「声門下圧」とは、声門下である肺側における圧力を指す。また「声門上圧」とは、声門より上の声道側での圧力を指す。記載の通り、声帯振動のサイクルが始まると、慣性に基づく復元力が加わるため、発声中は発声開始時よりも小さな声門下圧で振動を継続させることができる。

声帯の振動は、本来一定で流れていた空気流を刻んで、空気密度を変化させる。発声音源の質に影響するのは、とりわけ閉じる瞬間においてとなる。声帯が閉じる瞬間には空気密度の高い波（疎密波、気流パルス）が生まれ、この空気振動が続くと音高として知覚されるようになる。例えば、チューナーなどに記載される発声の音高周波数とは、1 秒間あたりの声帯振動回数である。1 秒間に 440 回の声帯振動が行われると、440 Hz の音高 A4 が知覚される。また、880 回の声帯振動で 880 Hz の音高 A5 が知覚される。本論では、知覚される周波数を以降「声帯基本周波数」として記述する。

ただし、声帯基本周波数の調節には数多くの要素が関連しており、音響学的な知見ベースで正確なモデル化が 2022 年においても実現できていない。声区に関わる 1.3.4 節などとも関連し、周波数帯域に応じて声帯の振る舞いが大きく変わり、厳密なモデル化は困難なものとなっている。声帯は、音高を変えるための調整パラメータを豊富に含んでいる。具体的には、加える呼気圧、声門閉鎖の強度、声帯の形状・大きさ・伸縮度合い・振動する部位（振動モード）などがある。これらのパラメータはお互いに関連しているため、調整

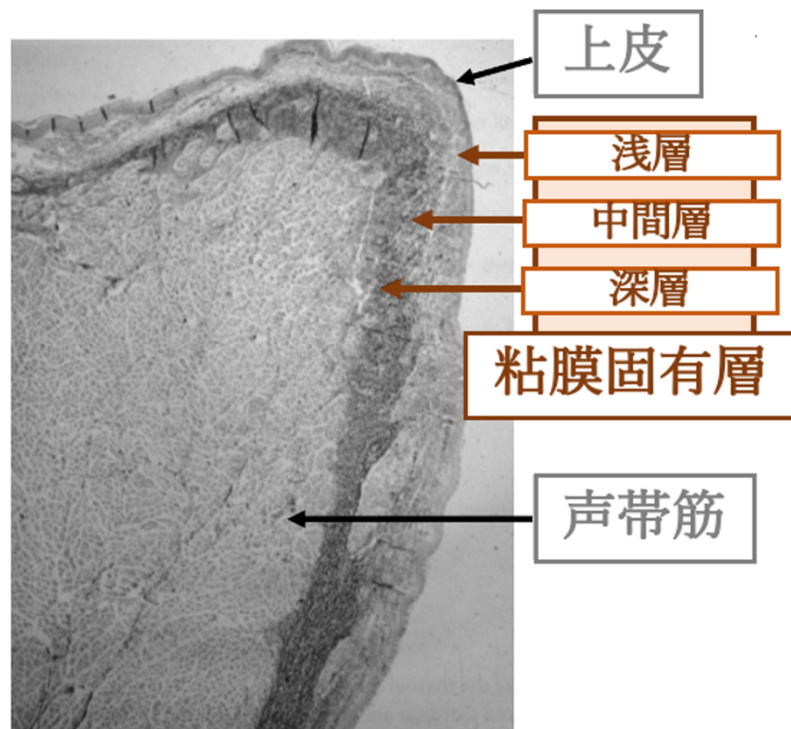


図 1.6：声帯断面図

が厄介なものとなる。例えば、ピッチを保ちつつクレッシェンドをする場合を考えると、一般にクレッシェンドをするには声門下圧を高くする必要があるが、その場合には喉頭筋の活性化も副次的に発生してしまうため、喉頭筋の活性化を抑えなければ声帯基本周波数が調節できないこともある。また、声帯の振動部位（振動モード）の変化は広い音域をカバーするための特徴だが、このモード変化も同様に相互作用する。声帯は、軟らかい粘性の上皮の中にある「粘膜固有層」という非筋肉性の層が主に振動する。声帯には大きく 3 つの層があり、構成成分である弾性線維とコラーゲンの配合が異なる。これらは音域によって振動する層や振動パターンが変わり、振動する質量も異なってくる（図 1.6）。そのため、質量の異なる性質を持つ弦を使い分けたり、併せ持っているかのような振る舞いになる。もし声帯と付随筋肉を「ただの弦」に置き換えると、固有振動数に基づく特定の周波数しか作れなくなる。声帯と付随筋肉を使い分けるパターンは幅が広い上、それぞれの物性値を連続的にしか変化できないこともあり、ピアノや金管・木管などと異なる。このように、ピッチ変化は直感的で簡単そうなイメージとは裏腹に複雑な制御を必要とする。望んだ声帯基本周波数に対応する声帯の状態を作り出すことは、歌唱で最優先の感覚となるにも関わらず一定の難易度がある。

なお声帯振動は、基本音だけでなく、その整数倍の音（=倍音）も一緒に生成している。これは、声帯振動が楕円を描く運動を取るためである。具体的には、水平方向だけでなく上下方向にも動くことがあり、「時間軸状で歪んでいる疎密波（最も密となる瞬間が急に訪れ、その後なだらかに減少する疎密波）」を生みだしている[41-43]。この構造は調波構造とも記述され、声帯音源は声道を通さないとブザーのように聴こえる。この倍音は周波

数が高くなる（高次になる）につれて大きさが小さくなる。周波数が高い（高次の）倍音の強さは、声帯が閉じる速度と関連している。例えば、声帯がより速く閉じて声門気流の減少がより急になると、発生する音源スペクトルは高次倍音が増える。逆に、声帯の閉じる速度が遅くなり、開く速度と変わらなくなると、音源スペクトルは第 1 倍音がより強くなり、スペクトル勾配が急峻になる。このような特徴が、後節で記載するさまざまな歌唱独特の聴感を形作る元となる。声帯が閉じる速度は声帯が閉じるタイミング（正確には声門を通る気流が減る瞬間）に影響し、このタイミングは発声におけるほとんどのエネルギーを有している[44,45]。

1.2.3. 声道 (vocal tract)

声道は、発声音源の特定の部分音を強調したり抑制したりして、出力音を整形する機関である (図 1.7)。声道の形状は、特定の周波数帯の音響エネルギーを強化・抑制する共鳴特性を持つ。共鳴特性は、複数の山 (フォルマント) を持つ連続スペクトルとして表れる (図 1.8)。声帯音源が声道を通過すると、声道は共鳴管としての役割を果たし、特定の周波数帯の音響エネルギーを強化した上で、外に放射する。声道共鳴のピーク周波数は、聴感として特に敏感に反応する点であり、この周波数は「声道共鳴周波数」または「フォルマント周波数」と呼ばれ、特に着目される。本論では、声道共鳴周波数と一律で記載する。周波数が小さい (すなわち低次の) 方から順に、「第 1 声道共鳴周波数」、「第 2 声道共鳴周波数」と記述する。特に最初の 2 つの声道共鳴周波数は、声道形状によって敏感に変動し、第 1 声道共鳴周波数は顎の開き、第 2 声道共鳴周波数は舌の調節に大きく影響を受ける [10]。この第 1,2 声道共鳴周波数は、母音として認識や識別に関わる [10,46,47]。例えば、第 1 声道共鳴周波数が 0.7 kHz で第 2 声道共鳴周波数が 1.1 kHz なら、/a/母音となる。/a/母音から/i/母音にかけて口を変化させると、第 1,2 声道共鳴周波数が変動する (図 1.9)。図 1.9 のように、/a/母音は舌の位置が比較的奥で下方に位置するのに対し、/i/母音は舌の位置が前で上方、/u/母音は舌の位置が奥で上方に位置する。声道共鳴は、有声子音 (/d/ など) や無声子音 (/t/ など) も特徴付けるが、本論では深く着目しない。

声帯音源 (= source) と声道の共鳴特性 (= filter) は、通常の発話では干渉しないことが一般的に知られている。これは音源フィルタ理論 (source-filter theory) と呼ばれる [48]。しかし、歌唱では、声帯音源と声道の共鳴特性がお互いに干渉し合い、多くの歌唱特有の現象が生まれる。これを音源フィルタ相互作用 (source-filter interaction) と呼ぶ [7,49-54]。こ

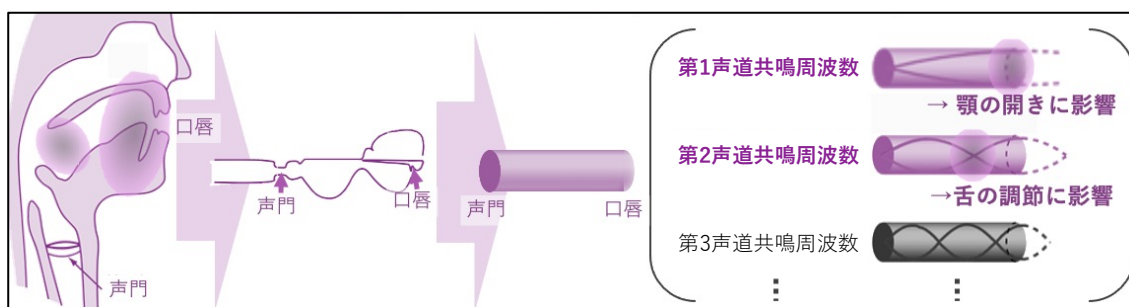


図 1.7: 声道、並びに第 1,2 声道共鳴周波数

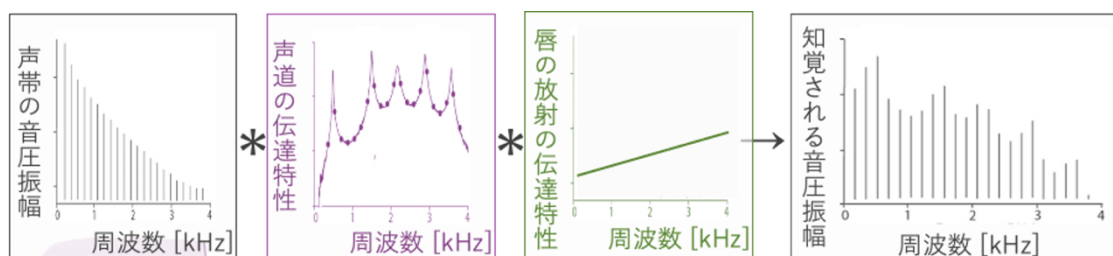


図 1.8: 声帯の音圧振幅を声道や唇放射の伝達特性が畳み込む模式図

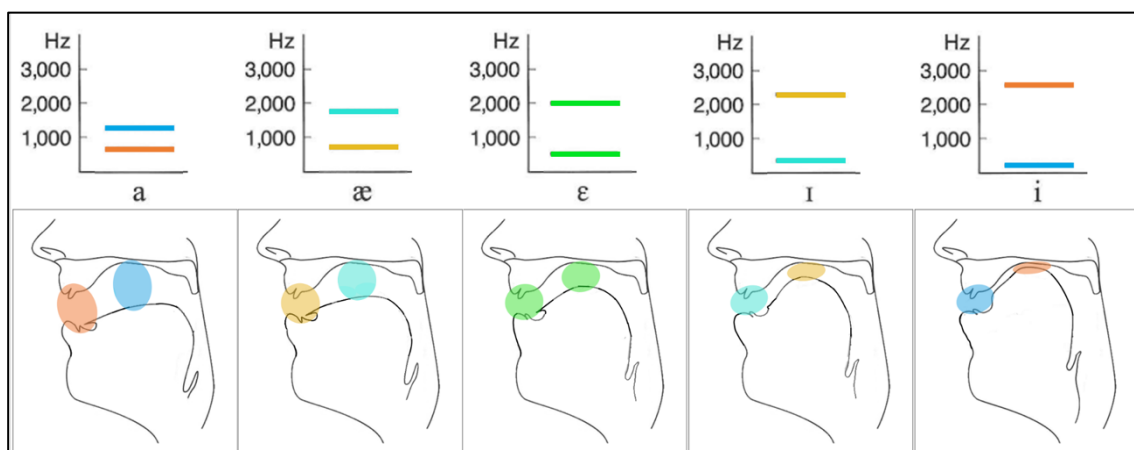


図 1.9： /a/母音から/i/母音にかけて声道内の形、並びにスペクトルのイメージ図

これらの用語は、歌唱現場で使用される用語ではないが、音響学的に歌唱を体系化する上で基礎となる。[55,56]では、これらの理論的証明や実測的証明が提供されている。後述する「Singer's formant」や女声特有の現象である「Formant tuning」、また歌唱が上手くいかなかったときの現象（声区転換の失敗に伴う声の裏返りなど）や、1.3節で説明する発声形式（クラシック歌唱とミュージカル歌唱の違いなど）や声区といった歌唱独特の振る舞いの生成に関与している。

1.3. 歌唱に関する音響学的な基礎知識、並びに先行研究

前節では音声生成の音響学的な基礎知識を説明した。ここからは、その知識を踏まえて、歌唱に関する音響学的な基礎知識を順に説明していく。本節で述べる基礎知識は、通常の発話では現れない、歌唱独特の現象である。また、本論は複数人歌唱（合唱、重唱）に焦点を当てた研究であるため、基本となる1人（独唱）での特徴を記載した後に、複数人歌唱の場合における特徴を説明する。複数人歌唱を学ぶために意識しなければいけないことは、複数人歌唱が一貫して「blend（各要素が統一／均質化された音）」を達成するための振る舞いをするということである[57]。また、音響特微量について説明する際は、複数人歌唱において最も基本的な「声を合わせる」「blendする」という視点でわからないことも併せて記載し、整理する。さらに、整理する際には、常に「物理現象と聴感の関係」について検討を加える。物理的なパラメータは、現場で使用される表現と異なる場合があり、実用的な知見として十分でなく、心理的／知覚的なパラメータや経験との深い対応づけが必要となる。

それぞれの音響特微量や関係している要素、そして説明している節を以下に一覧化する。

音響特微量	関係している要素	説明している節
第1声道共鳴周波数(R1)	母音	1.3.1節
第2声道共鳴周波数(R2)		
声帯基本周波数(f0)	ピッチ ・レガート	1.3.2節
メロディ音程誤差(Melodic Interval Error, MIE)		
音高変動率(Note Variability, NV)[初期]		
音高変動率(Note Variability, NV)[中期]		
音高変動率(Note Variability, NV)[後期]	声部 (発声分類 / 声種 / パート)	1.3.3節
Singer's Formantの中心周波数		
声門開放率(Open quotient, Oq)[中央値]	声区 (vocal register)	1.3.4節
声門開放率(Open quotient, Oq)[四分位偏差]		
声帯接触速度率(Contact speed quotient, Csq)[中央値]	声帯音源の強さ	1.3.5節
声帯接触速度率(Contact speed quotient, Csq)[四分位偏差]		
Singing Power Ratio (SPR)	Singer's formant の聴感	1.3.6節
Level of the Singer's Formant (LSF)	Singer's formant (第3,4,5声道共鳴のクラスター)	
統合ラウドネス(Integrated loudness)	発声の大きさ	1.3.7節
ラウドネス範囲		
ラウドネスのピークタイミング		

表 1.1： 主な音響特微量、並びに関係している要素、説明している節

1.3.1. 第 1,2 声道共鳴周波数

■ 特徴 - 第 1,2 声道共鳴周波数

第 1,2 声道共鳴周波数が何かについては 1.2.3 節で既に説明しているが、本節では特に、歌唱において見られる特徴に着目する。前述の通り、本論で最も確認したい音響特徴量は第 1,2 声道共鳴周波数である。歌唱では、女声と男声で、歌唱特有に異なる振る舞いが見られる。

女声の場合、第 1,2 声道共鳴周波数を声帯倍音へ近接させる「Formant tuning」という現象がある。この現象により、近接した倍音の音圧レベルが強くなり、振動エネルギーや安定性が向上し、音量が増加し、発声効率が上がる[58,59]。最も広く見られるのは第 1 声道共鳴周波数と第 1 倍音の組み合わせのチューニングであり、発声域や声部、声区によって複数の組み合わせのチューニングが行われる。このような動きは母音の明瞭性を損なうことがあるが、女声の特徴を反映している。女声の第 1,2 声道共鳴周波数の振る舞いについては、独唱と重唱の違いに関する言及が先行研究で特になされていない。

男声の場合、独唱か重唱かによって、また重唱では音高が同じ場合と異なる場合とで振る舞いが異なる。独唱の男声では、第 1,2 声道共鳴周波数を一貫して不用意に変化させないことで、明瞭な母音を発声できる[60,61]。一方、重唱の男声では、音高が同じ場合と違う場合で、第 1,2 声道共鳴周波数を相手歌手に合わせるように変動させる。まず、音高が異なる歌手同士で合わせる際には、声道共鳴周波数が声帯基本周波数の精度を補助することがある[62]。例えば、複数の歌手が完全 5 度で発声する際、共通倍音がある周波数帯に声道共鳴周波数を置くと、声帯基本周波数の差がより正確になる。また、音高が同じ歌手同士で合わせる場合は、第 1,2 声道共鳴周波数が歌手間で近接すると報告されている[63-65]。[64]は、3つの年齢層の合唱団が歌った3つの母音を録音し、専門家に発声 blend と母音明瞭度を評価してもらった。その結果、「良い」と評価されたサンプルは、母音形成の周波数帯に集中するスペクトル分布を持っていたと報告している。また、Soprano 歌手が同パートセクションの録音を聴きながら同一音高で発声する測定実験でも[65]、（詳しい挙動はわからないものの）声道共鳴周波数が一部変動することが報告されている。これらの知見から、母音の統一性が良い発声 blend の達成に起因していると考えられる。

音高が同じ場合における別の視点として、独唱よりも重唱の方が、声道共鳴のエネルギーの強さ（intensity）が下降するとされている[65]。また、聴感と音響分析を比較した研究[66]によると、重唱では声道共鳴周波数の間の intensity が独唱よりも強くなるため、このことが独唱と重唱の聴感上の差異を説明する要因であるとして指摘している。この差異は、重唱で発声する際の声道が、共鳴管として持つ固有周波数以外の帯域も多く通過させていることに起因すると考えられる。音高が同じ状況におけるこれらの示唆は、合唱指導者の見解と一致すると思われる。合唱現場では明瞭性という観点から、一般に統一された母音の発音（articulation）を重要視することは周知の知見である[63]。

■ 「声を合わせること」に関する未検討事項 - 第 1,2 声道共鳴周波数

「声を合わせること」という観点から、第 1,2 声道共鳴周波数を捉えようとする、上に述べたような知見には不明瞭な点が多くある。いずれの文献でも、同時発声した歌手の声道共鳴周波数を個別比較している訳ではなく、声道共鳴の近接に関する詳細な振る舞いはまだ解明されていない。検討すべき事項としては以下のようなになる：

- 1) 声道共鳴周波数は、声道長などの違いに起因する個人差があること。
- 2) プロの男声独唱時には、（少なくとも地声声区にて）第 1,2 声道共鳴周波数が変動しないことが好ましいとの示唆もあること[60,61,67]。このことは、重唱時の先行研究におけるアプローチと相反する。
- 3) 重唱をどの程度親しんでいるかといった歌手の属性によっても、第 1,2 声道共鳴周波数に影響を受ける可能性があること。
- 4) 重唱時における第 1,2 声道共鳴周波数の変動が、必ずしも良いものかどうか不明であること。もしかしたら、第 1,2 声道共鳴周波数の山が大きくなると母音の知覚に悪影響を与えるものかもしれないが、現時点では定かではない。
- 5) 重唱時における第 1,2 声道共鳴周波数の変動が、「声を合わせる」という聴感に対してどのような影響を及ぼすのかが不明であること。言い換えると、第 1,2 声道共鳴周波数の音響学的な違いが、歌手や聴衆にどう反映されているのかよくわからないこと。
- 6) 1.3.1 節[66]から、声道共鳴の間の帯域の強度が独唱／重唱間の聴感に影響することがわかっているが、なぜそのような現象が起こるのか、なぜ良い聴感と関係するのか定かではないこと。
- 7) 第 1,2 声道共鳴周波数を司る脳の活動領域が異なることから[68]、聴覚心理学的な影響によって第 1 と第 2 の振る舞いが異なっている可能性があること。
- 8) 発声に関する細かな条件で整理できていないこと。母音ごとの違いや発声する内容（メロディかベースラインか）の違い、参照音を直接聴いているのかスピーカー／ヘッドフォンで聴いているのか、参照音をどの程度意識しているのかで結果が変わる可能性がある。

このような第 1,2 声道共鳴周波数の近接に関する未解決の疑問は、「声を合わせる」という活動において、いずれも検討すべきこととなる。

■ 本論における抽出方法 - 第 1,2 声道共鳴周波数

上に述べたような疑問を分析するためには、第 1,2 声道共鳴周波数を正確に測定する必要がある。第 1,2 声道共鳴周波数の音声学における一般的な抽出法は、「線形予測分析」と呼ばれるもので、音声成分から抽出するが、重唱の場合は共鳴のピークが他の歌手のものと混同されるため、厳密な抽出や比較が困難になる。一方、個別抽出が可能な手法として、「外部音響励振法」がある[7, 69-71]。この方法では、歌手の声道をホワイトノイズで駆動して周波数特性を取得する。実験中には、歌手の発声音と声道からのホワイトノイズの応答信号の両方を収録する。分析では、収録音から音声成分を除去し、声道音響特性のみを抽出してからピーク点を声道共鳴周波数として抽出する。この方法は、線形予測分析よりも精度が高く、声帯基本周波数の高さにも影響されない。発声音を取り除くため、重唱でも同じ音高であれば分析に利用できる。そのため、本論では第 2 章, 第 3 章, 第 4 章の実験でこの手法を使用して、第 1,2 声道共鳴周波数を抽出する方法として採用した。



図 1.10：エクスポネンシャルホーン
(左は第 2 章と第 3 章で使用。右は第 4 章で使用。)

本論で用いた励振用のホーンを図 1.10 に示す。図 1.10 左の白色のホーンは第 2 章と第 3 章で使用したものであり、[72]で用いられたものである。右の黒色のホーンは第 4 章で使用したもので、第 4 章の実験設定に沿うよう作り直している。これらのホーンは、スピーカーから放射されたホワイトノイズの周波数特性がホーンによって変調されないように、指数関数的に変化するような内径を持ち、エクスポネンシャルホーンと呼ばれる。ホーンによって駆動された口からの反射信号は、声道の周波数特性を持ち、実験中は近くに配置したマイクロフォンで収録される。収録後の処理では、まず収録音の最大振幅を正規化し、フーリエ変換を用いて周波数に変換する (図 1.11)。その後、周波数軸上の声帯基本周波数成分と倍音成分を取り除き、補間や平滑化を行うことで声道音響特性のみを取り出す (図 1.12)。この平滑化処理には、「Savitzky-Golay フィルタ」を用いる。Savitzky-Golay フィルタは信号の高周波成分を維持しながら平滑化できる多項式近似で、matlab 関数として実装されている。声道音響特性のみを取り出した後は、その曲線をもとに、第 1,2 声道共鳴周波数を手動で把握する。なお、第 1,2 声道共鳴周波数を自動で抽出できなかった理

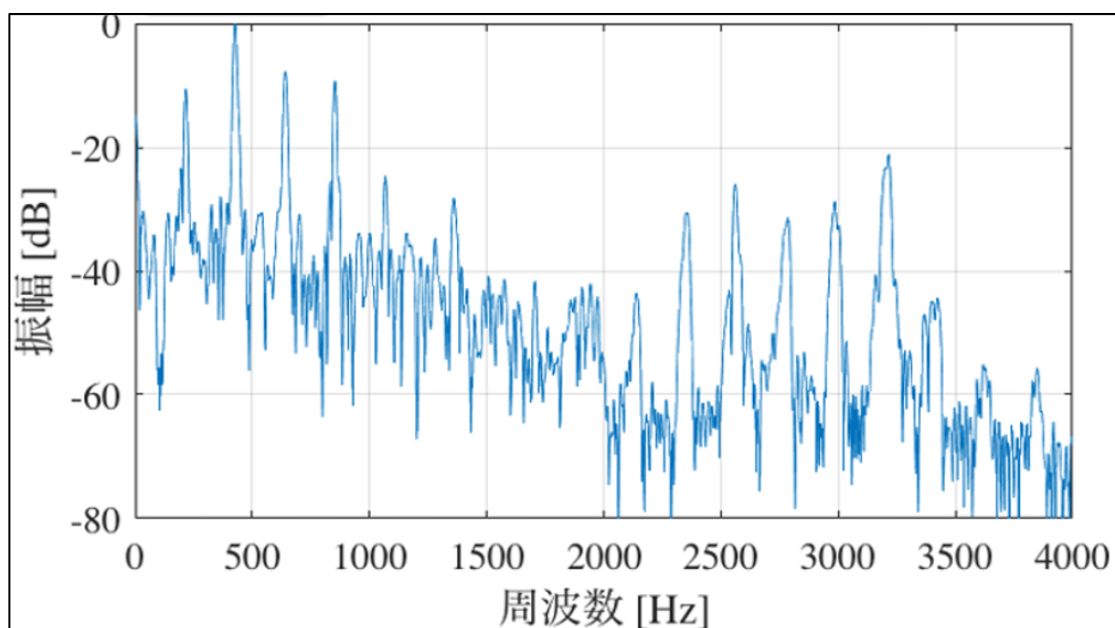


図 1.11：外部音響励振法による収録音の例

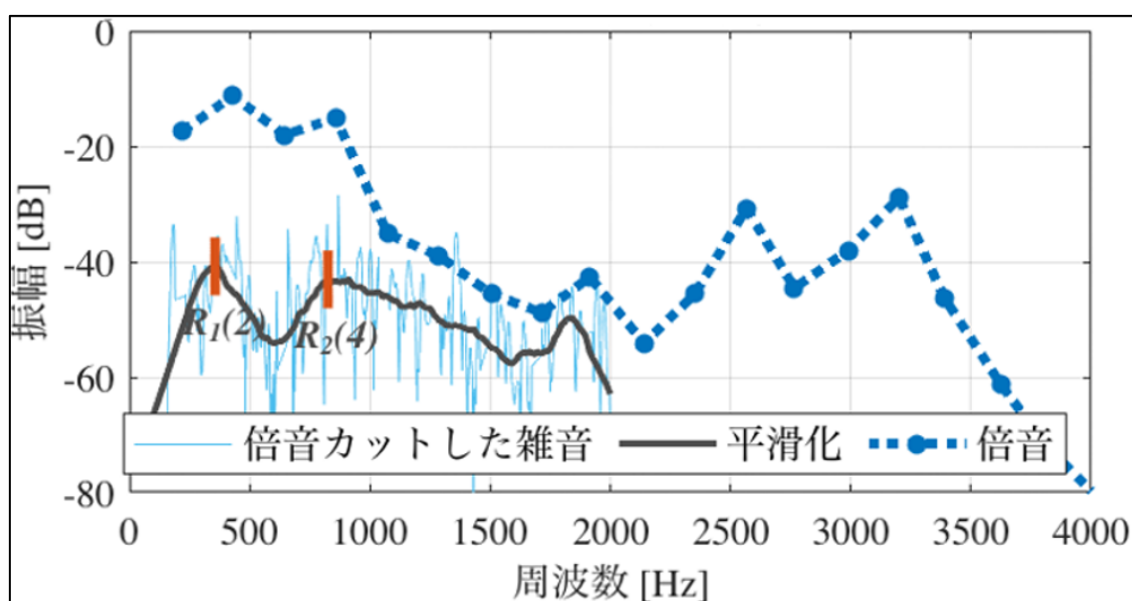


図 1.12：倍音を除去して平滑化した後の雑音成分、並びに元々の倍音スペクトルの例。第 1,2 声道共鳴周波数を赤線で示している。

由として、追加の声道共鳴の問題があったことが挙げられる。合唱歌手は、声門閉鎖が不完全な息の多い発声の時折見られるため、気管の影響を受けた追加の声道共鳴が発生することがある。そのため、独唱の時のように声道共鳴の山が単純でない場合があり[73]、声道共鳴を自動抽出しようとする時追加の声道共鳴を取り出してしまいう可能性があるため、手動で把握する必要がある。

続いて、各章で設定した外部音響励振法の関連パラメータ、外部音響励振法の関連処理、並びにホーンの各種設定について述べる。第 2 章における Savitzky-Golay 平滑化処理の窓

長は、母音/a, u, e/において 240 Hz、母音/i/において 520 Hz、母音/o/において 340 Hz で、平滑化次数を 3 としている。平滑化後は声道共鳴のピークを見つけ、第 1,2 声道共鳴周波数を算出するが、検出する際には日本人の声道共鳴周波数の実測範囲を参考にしている[130]。

第 2 章と第 3 章で用いられた[72]のホーンは、ホワイトノイズの周波数特性に影響するため、実験前に雑音の校正を行っている。この校正は、ホーンから唇までの周波数特性を実験直前に測定し、逆特性を持つ信号をスピーカーから作成することで行われる。一方、第 4 章で作り直したホーンは、ホーン自体の自励振動による雑音の可変性を抑え、前処理の逆フィルタを必要とせずに測定できるようにしている。この改善は、第 4 章の収録音源を第 5 章の聴取評価で利用するためのものであり、聴取評価用マイクロフォンに入る雑音を最小限にするためである。新しく作成したスピーカーの密閉型エンクロージャーは、MDF 集成材を加工して作成した。スピーカーの容積は $V = 300 \times 210 \times 192 \text{ (mm}^3\text{)}$ 、板厚は 12 mm、開口部直径は 167.4 mm であり、[72]に準拠している。スピーカユニット内には吸音材を敷き詰め、不要な共振を防ぐために板と板の接合部を塞いで密閉した。スピーカユニットはキャビネット外部からネジで固定しており、スピーカー上部にターミナルを設置した。エクスポネンシャルホーンは、AutoCAD と fusion360 を用いて 3D データから作成した(図 1.13)。まず、ホーンそのもののモデリングを行い、縦 1095 mm、厚さ 1 mm (第 2 章と第 3 章のホーンは 5 mm)、上部開口部内径 7 mm、下部開口部直内径 167.4 mm、上部内径と下部内径の比率を 1 : 24 にした。ホーン上部には歌手の口へ繋がるチューブを挿入するため、チューブの内径に合うように上部開口部内径を設定した。ホーン下部にもスピーカユニットを接続するため、スピーカーの直径に合うように開口部内径を設定した。次に、ホーンのモデリングに、チューブを挿入するための円柱空洞とスピーカーと連結す

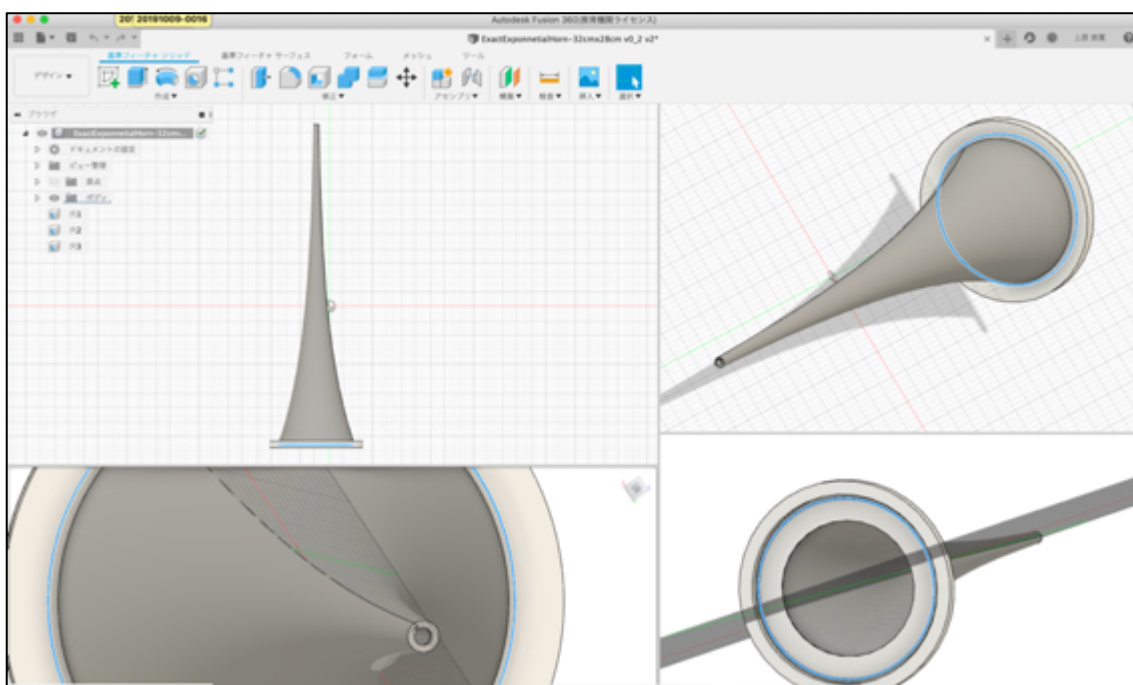


図 1.13：モデリングしたエクスポネンシャルホーン

るための円柱形土台を連結した。円柱空洞は内径が変化せず、長さ 10 mm、厚さ 5 mm、開口部内径 10 mm と設定した。円柱形土台は、下部開口部の外側に接続され、長さ約 40 mm、厚さ 1 mm となっている。胴体を全て連結した際の全長は 1105~1115 mm（ホーン 1095 mm + 円柱空洞 10 ~ 20 mm）となる。ホーンユニット全体をモデリングする際は、胴体を 9 つに分割している。また、3D プリンタの問題により、出力した 2 台のうち 1 台は 140 × 140 × 130 mm の範囲でしか出力できず、比較的大きな下部 5 つをさらに 4 分割した（図 1.14）。これらは出力後、プラスチック用の瞬間接着剤で固定した。9 分割した胴体は分解しやすいよう各々をマジックテープで着け外しできるようにした。また、雑音を励振する際には、胴体部分も振動しないように、伸縮性のマジックバンドで胴体全体を固定した。

測定では、ホーンから雑音を歌手の口に放射して声道を励振させ、各章のいずれの実験でも連続的に再生している。第 2 章と第 3 章における駆動ホワイトノイズの帯域は 0.15~7 kHz だが、第 4 章では聴取評価の音源とするため、駆動ノイズの帯域を 0.15~2 kHz に変更した。この変更は、収録音源が雑音除去を前提としているため、および 2.5 kHz 以上の高域において雑音除去が困難であることがわかったためです。これは、2.5 kHz 以上にある Singer's formant の帯域で声帯倍音がより大きく変動するためである。その他、第 4 章の実験ではホーン内部からの雑音漏れを最小限に抑えるため、ホーン本体と口元とを接続する



図 1.14：分割したエクスポネンシャルホーン

外付けチューブも新たに 3D プリントで作成した。また、身長異なる歌手に対応するため、スピーカーユニットの下に板を挟んで高さを調節した。

収集後の分析作業は基本的にどの章も同じだが、第 4 章では刺激数が多いため、作業を簡便化するために分析用の GUI を新たに作成した (図 1.15)。分析用の GUI によって、第 1,2 声道共鳴周波数を抽出する際に必要なパラメータ「取り除く倍音の幅」「取り除く倍音の中心」「平滑化フィルタの次数」を調整しやすくなり、膨大な数がある本実験のサンプルにも対応できるようになった。このアプリは Matlab App Designer R2021a によって作成している。分析の際には、第 1,2 声道共鳴周波数そのものの他、第 1,2 声道共鳴周波数の近接倍音の番号を記録する目的で「resonance tuning」も参考にする。resonance tuning は声道共鳴周波数がどの倍音に最も近接しているか判断するもので、第 1,2 声道共鳴周波数の周波数軸上における位置を大まかに確認できる[74]。例えば、第 1 声道共鳴周波数 (R_1) の近接倍音が第 3 倍音だった場合、 $R_1 : 3f_0$ と記載する。



図 1.15 : 第 4 章で用いた第 1,2 声道共鳴周波数の抽出用 GUI

1.3.2. ピッチの知覚と制御

■ 特徴 - ピッチの知覚と制御

歌手にとって、楽譜上のピッチを正確に発声することは非常に重要である。最も特定しやすい音響特徴量の 1 つであるため、ピッチを特定する発声補助器具としての試みも多い。

「In Tune」[75]は、歌唱時に与えられた基準からのピッチのずれを視覚化している。[76]は、楽曲がもたらすイントネーションの傾向を、楽曲の音楽的背景に基づく機械学習で自動推定している。[77]は、イントネーションに基づく評価システムを発表した。「Songs2See」[78]は、演奏音の正確さについてフィードバックを得る音楽演奏ゲームである。

このような調整には、1.2.2 節で説明した「声帯基本周波数」の調節能力が必要となる。楽曲の音楽表現のためには、単なるピッチ合わせ以上の調整が必要であり、そのためには指導者や仲間内でコミュニケーションするための用語も必要となる。ピッチの知覚や制御に関連する用語としては「レガート (legato)」がある。レガートは、滑らかな連続した音のつながりを意味し、音楽や曲想に応じてつなぎ方を変化させるため、高い声帯基本周波数の安定性が不可欠である[61]。また、同じく関連した振る舞いとして「ビブラート (vibrato)」もある。ビブラートは、声帯基本周波数のうねりを特徴とする準周期的な小さい変動で、5.5 ~ 7.5 Hz の速度で 1 半音の範囲にわたって局所的に変動し、知覚される[10,79,80]。クラシック歌唱では発声技術を習得すると、ビブラートが半ば自動的に発達する[80]。

ピッチの知覚には、声帯基本周波数だけでなく音色と関わりのある音響特徴量も関係している。スペクトル重心や intensity、持続時間など、周波数/強度/時間に関する情報が異なると、同じ声帯基本周波数の発声でも、異なるピッチで知覚されることが報告されている[81,82]。特に、声帯音源は複合音であるため、声道共鳴周波数の振る舞いや、声帯振動の程度がピッチ知覚に影響を与えることがある。複数人で歌唱する場合、これらの音色要因がピッチ知覚にどのように影響するかが注目されるべき点となる。実際、「どの程度聴けているか (知覚認知能力: perceptual-cognitive skills)」や「何に着目するか (音楽への資源配分: resource allocation to music)」によって音合わせの精度が変化するということが知られている[83]。

同じ音高で歌う場合、歌手間の声帯基本周波数の周波数差 Δf_0 が、ピッチ知覚に影響する可能性があることがわかっている。声帯基本周波数差 Δf_0 が 0 ~ 2% 以下であれば、スペクトル重心という音響特徴量の変化が、ピッチ変化の主要な予測因子となる可能性が示されている[84]。ただし、[84]はサイン音を用いた聴覚心理学の測定実験であることを留意しておく必要がある。また、声帯基本周波数のばらつきは、あくまで 0 に近い方がより好まれるとされているが、声帯基本周波数の標準偏差は ± 14 cent まで許容されることが、先行研究によって示されている[85,86]。歌手間での近接度合いは、歌手の技術レベルや歌唱内容によって異なる。例えば、定常発声の場合、指揮者の満足のいく歌唱演奏時で、一般的には 13 cent[87]、特定の発声形式であるバーバリー・ジョップカルテットでは 4.3 ~ 16.9 cent[88]と

いう声帯基本周波数の差が報告されている。また、曲発声時の声帯基本周波数の差は、遅いテンポのアマチュア歌手だと 15 ~ 18 cent [87]、普通のテンポのセミプロ歌手で 16 ~ 30 cent [89]、普通のテンポのアマチュア歌手で 25 ~ 30cent [87]とされている。曲の難易度が難しくなるほど声帯基本周波数の分散が大きくなる傾向がある [89]。また、楽譜や和音次第で、異なる音高間のイントネーションのみの調節になり、同じパートの blend がなくなることがある [90]。

歌手同士で音高が異なる場合、すなわち和音を歌っている場面やメロディを重ねるような場面の際、ピッチ知覚は純正律と平均律を組み合わせるルールを適用する [91]。つまり、楽譜で指定される周波数と実際に歌われる周波数は異なる [92]。例えば、長3度や完全5度のような周波数差では、歌手同士の共通倍音を合わせるために、自然と純正律が適用される [63]。共通倍音が支配的でない短3度のような周波数差では、平均律に近いものが適用される [63,92]。ローランドの VT-12 [93] は、このような合唱時の特性を利用して合唱用チューナーとして製品化している。このようなルールは、一緒に歌う歌手の属性にも影響を受ける。例えば、ベースのいるアンサンブルでは、和声がより純正律に近づく [94]。相手歌手の1人が録音音源になっている場合、および他の歌手に合わせない態度をとる場合には、和声が純正律から外れる可能性がある [94]。そういった意味でも、歌手はお互いによく聴き合ってフィードバックすることが求められる。練習回数にもピッチ知覚のルールは影響を受ける。メロディの変動に着目した場合、練習回数によって、その調整は純正律から平均律へと変化する。初合わせの際は、音高間の差が純正律で段々全体のピッチがずれてしまうのに対し [95]、練習を繰り返していくと平均律に近づいていく [91,92,95]。発声スタイルの観点で見ると、バーバーストップでは、正確に声帯基本周波数の差を調整するため、純正律でも平均律でもない合わせ方をすると [88]。その他、歌手同士の視覚的な接触やリーダー／フォロワーの関係、発声の一貫性、先行／後続の関係によっても、ピッチの知覚や制御が変化する [96-98]。参照音の音色的要因によるピッチ知覚の変化としては、自分自身が録音した音源を参照すると正確に歌える場合がある一方で、女声や非発声複合音を参照する場合は不正確になることが報告されている [99]。このような知覚現象は、ピッチの調整力にも影響することが報告される [100,101]。

ビブラートは、知覚されるピッチ全体には影響を与えないが、強度や音色を含む周期的な拍動として知覚され、心地よい柔軟性、まろやかさ、豊かさを生み出す [79]。音響学的には、周波数や速度は Hz 単位で、振幅や範囲は cent 単位で特徴付けられる。複数人で歌唱する場合、独唱の場合よりもビブラートの振幅が抑えられることがある [65,102,103]。また、ビブラートの同期現象が観測されることがある。この同期は、アンサンブルの開始タイミングでも観測され、知覚や運動制御の観点では困難なレベルで同期される [65,87,102]。そのような同期は、聴衆にビブラートを不快にさせない効果があることが示唆されている [87]。

■ 「声を合わせること」に関する未検討事項 - ピッチの知覚と制御

ピッチ知覚は、歌唱において真っ先に注目される感覚の1つであり、声を合わせるためにも重要であるが、その関連性には不明な点がある。先述の通り、先行研究[84]によると声帯基本周波数以外の音色要因もピッチ知覚に関係することが示唆されているが、歌唱音を使用した測定実験で検証されているわけではない。[84]の研究は、聴覚心理学的な測定実験によるサイン音の比較であり、実際に歌手同士が歌った場合を比較して分析していない。ピッチ知覚は心理的な聴感として感じるものであるため、音色要因が実際にどの程度ピッチ知覚へ影響するのか、そして声帯基本周波数の影響よりも音色要因の影響が[84]の示唆通りに上回るのかは未知数である。つまり、聴取実験による知覚情報と物理的な声帯基本周波数との関係を比較することが、声を合わせるための要因を検討する上で必要となる。

また、先述の先行研究[87-90]で述べられている「発声条件ごとにおける声帯基本周波数の合わせの精度」に関する情報は断片的であり、関係性を整理することが重要だと考えられる。更に、発声に関する細かな条件についても整理が必要である。ビブラートに関連する振る舞いについては、先述の通り、歌手間でビブラートの同期現象が起こるという報告がある[65,87,102]。この同期現象も、「声を合わせる」という目的と関係している可能性がある。この微細な調整は、知覚や運動制御の観点からは難しく、歌手がどのようにして同期を行っているかについての音響学的な考察がまだ十分に行われていない。

■ 本論における抽出方法 - ピッチの知覚と制御

歌唱の音声成分による声帯基本周波数の代表的な抽出法は6種が紹介される[104]。PRAAT[105]（PRAAT パッケージのデフォルト手法）、RAPT[106]（ESPS パッケージ[107,108]）、SRH[109]（GLOAT パッケージ[110]）、SSH（SRHの変形[109]）、STRAIGHT[111,112]、YIN[113,114]であり、測定したい歌唱シーンによって使い分けることができる。6種の最適なパラメータ設定や比較のレビューは[104]に記されている。これらの抽出は主にオンセット／オフセットの識別精度が焦点となり、歌声の特性（ビブラート／声のゆらぎ／音色の特徴／歌いまわし）に起因するオンセットの包絡や時間の変化に対応している。一方、合唱アンサンブルでは歌手ごとで声が混ざり合うため、近接マイクロフォンを各歌手に用意しても、ブリード（音のカブリ）を完全に排除することができない[115]。

声帯基本周波数を個別に抽出するためには、「EGG（Electro-GlottoGraphy）」や「ELG（Electro-LarynxGography）」などの器具を使用することができる（図 1. 16, 図 1. 17）[116-121]。本論文では、EGGを使用している。EGGは、首に電極を装着し、微弱な電流を流して、声帯周辺の電気抵抗の逆数（電気アドミタンス）を測定して、声帯振動をデジタル化する。この値は声帯の接触状態に応じて変化するため、声帯同士の接触面積が増えるとEGG信号も増加し、反対に声帯同士が離れるほどEGG信号も減少する。その様子は、図 1. 18 に示す EGG 波形とハイスピードカメラによる声帯振動パターンの比較からも確認できる。EGGを使用することで、被験者は首に電極を装着するだけで済むため、測定が簡単

で非侵襲的である。また、音声成分を分析に使用しないため、被験者ごとに声帯基本周波数を抽出することができる。更に、DECOM 法[122]を使用することで、EGG の微分信号を元にしてリアルタイムに高い精度で声帯基本周波数を抽出することができる。

本論の第 2 章や第 3 章で使用している EGG は、先行研究[72]で使用された Glottal Enterprises 社製と同じものを使用しており（図 1.16）、DECOM 法の処理も[72]に沿っている。ただし、第 2 章で参照音用に収録した被験者や、第 3 章で重唱を歌う歌手のペアのうち 1 人は、音声成分から抽出された。この設定は、機材の都合によるものであり、やむを得なかったため実験設定を慎重に検討した。



図 1.16：第 2 章と第 3 章で使用した EGG 本体（上）、電極（下）

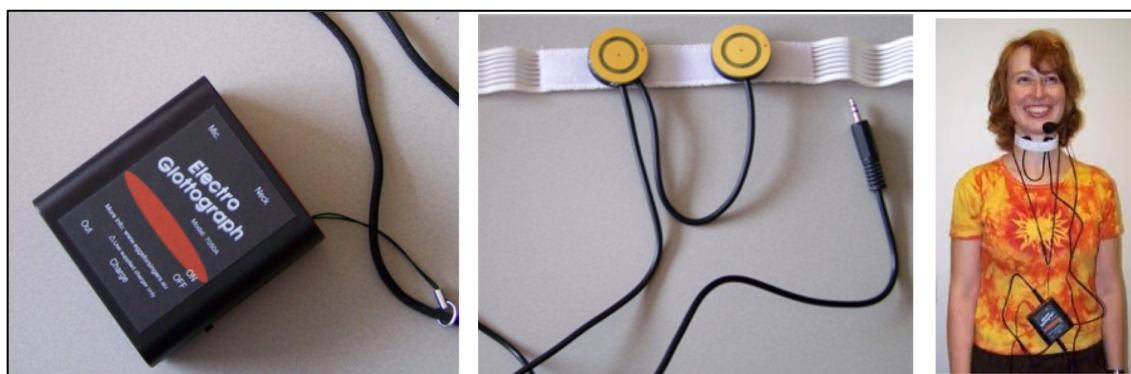


図 1.17：第 4 章で使用した EGG 本体（左）、電極（真ん中）、着用例（右）

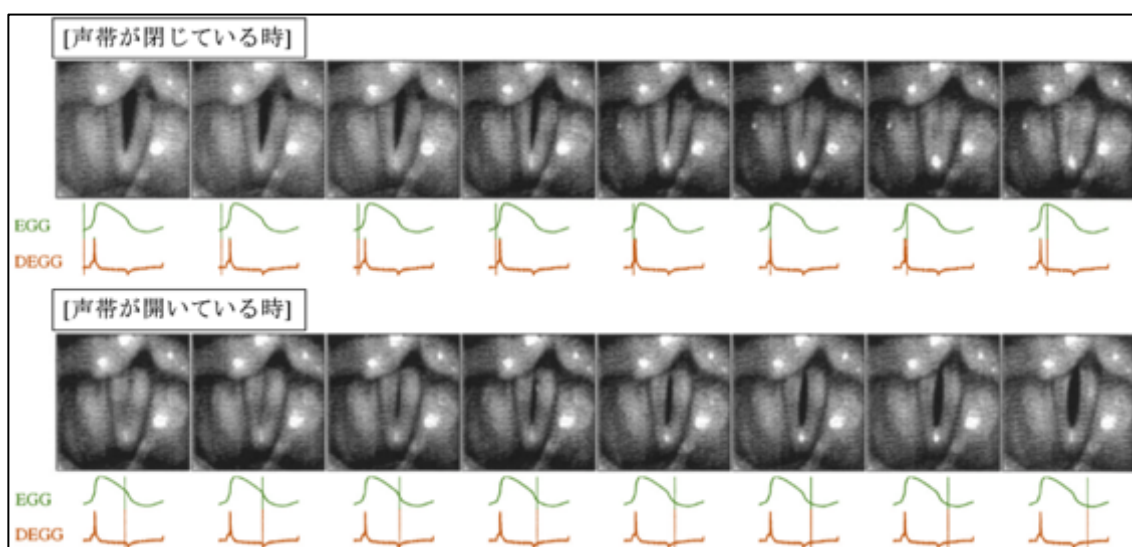


図 1.18： EGG 波形とハイスピードカメラによる声帯波形の比較。DEGG 信号（赤色）は EGG 信号（緑）を微分したもの。垂直線は画像時点を示す。この例は、地声声区による男声発話 ($f_0 = 110\text{Hz}$)。

一方、第 4 章で使用した EGG は、第 2 章や第 3 章の使用品よりも年式が新しい VOCE VISTA 社製で、ノイズが少なく安定した抽出が可能だった（図 1.17）。そのようなこともあり、EGG 波形の前処理による変形をより少なくするため、先行研究[72]で設定されていた 100 Hz の低域カットオフ周波数を、先行研究[123]に従って 20 Hz に変更し、正規化は行わずに処理した。これにより、1.3.3 節で説明する声門開放率や 1.3.4 節で説明する声帯接触速度率など、音色に関わる重要な音響特徴量を抽出することができた。第 4 章では、EGG の DECOM 法においてフレーム長を 40 ms、フレームシフト長を 5 ms に設定し、先行研究[122]に従った。ただし、それでも電池残量不足や不適切な装着によって EGG 信号が不安定になる場合もあったため、その場合は SRH 法によって音声成分から声帯基本周波数を抽出した。SRH 法のパラメータについては、先行研究[124]を参考にし、窓長を 125 ms、シフト長を 93 ms ($= 125 \times 3 / 4$ ms) に設定し、信号-倍音比 (hr) が 0.4 以上の場合を有声として外れ値を除外した。また、有声中における一部データの欠損値は、前後のデータで埋め合わせた。発声中は、前の音高に影響して声帯基本周波数がシフトするため、音高の算出指標を平均律にせず純正律とした。これは、前の音高の周波数との相対差から算出される。

更に、第 4 章では声帯基本周波数の関連指標として、「メロディ音程誤差 (Melodic Interval Error, MIE)」と「音高変動率 (Note Variability, NV)」も併せて抽出している [94,125]。これらの指標は、声帯基本周波数の安定性に関する音響特徴量であり、レガートの知覚的な要因となる。まず、メロディ音程誤差 (MIE) は、直後の音高との声帯基本周波数の差を楽譜上の周波数差と比較する指標である。歌手は、相対音高を基準として次の音高を認識するとされるため、知覚に沿う指標とみなすことができる。また、さまざまな技術を持つ歌手の定量分析に利用することができる。具体的には、ある音高で歌われた

声帯基本周波数の中央値を \bar{p}_i 、楽譜上の周波数を p_i^s 、その直後に歌われた声帯基本周波数の中央値を \bar{p}_{i+1} 、楽譜上の周波数を p_{i+1}^s とすると、メロディ音程誤差 MIE は以下のような式で表される：

$$\text{MIE} = (\bar{p}_{i+1} - \bar{p}_i) - (p_{i+1}^s - p_i^s) \quad (1)$$

ここで、 $(p_{i+1}^s - p_i^s)$ は連続した 2 音の楽譜上の周波数差である。また、 $(\bar{p}_{i+1} - \bar{p}_i)$ は観測された声帯基本周波数の周波数差である。次に、音高変動率 (NV) は、1 音高内における声帯基本周波数誤差の 2 乗平均で表される。この指標が大きいほど、1 つの音高内で声帯基本周波数が変動していることを示す[62,125]。具体的には、 i 番目の音高は N 個のフレームで構成され、フレーム n 番目のピッチを $p_{i,n}^f$ 、中央値を \bar{p}_i とすると、音高変動性 NV_i は次式で与えられる：

$$NV_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |p_{i,n}^f - \bar{p}_i|^2 \quad (2)$$

その他に第 4 章では、音高変動率 (NV) が歌い始め／途中／歌い終わりで大きく変化することを想定し、抽出する音高を 3 分割して、「初期／中期／後期」と 3 つに分けて比較している。例えば、初期では相手の歌手の発声を十分に認知できていないため、想像しながら合わせようとするかもしれない。中期では、段々と相手の発声を認知し、相手歌手を捉えた発声になると思われる。そして最後に後期では発声を終えるため、中期における発声パターンとはまた異なるものになるかもしれない。このような変化が、音高変動率にどう表れるのかを検討する。

1.3.3. 声部（発声分類 / 声種 / パート）

■ 特徴 - 声部

女声では「Soprano, Mezzo, Alto」、男声では「Tenor, Baritone, Bass」といった名称がある。歌唱可能な音域とは基本的に関連がないとされるが[126]、本分類に沿うパートに所属することが推奨される。歌手の声の個性とすることができ、指導者は聴くことで歌手の声部を経験的に判断できる。一般に声部が同じ歌手同士で同じ音高を発声すると歌いやすいと感じ、反対に異なる声部の歌手同士で同じ音高を歌うと歌いづらいつ感じたりする。

■ 「声を合わせること」に関する未検討事項 - 声部

声を合わせる際、声部の違いがどのような音響的特徴として反映されるのかについては、十分に検討できていない。上述した「歌いやすい／歌いにくい」という指標は経験則に基づくものである。歌手自身が発声する際に感じる評価と声部に関する音響特徴量とで、聴感にどう因果関係があるのかも検討事項である。

■ 本論における抽出方法 - 声部

第4章で初めて抽出し、分析に用いる。声部の違いがはっきりと現れる音響学的な要因は、声区転換領域（パッセージ）の周波数区間と「Singer's formantの中心周波数[127]」であり、本論では測定の簡易化のため、Singer's formantの中心周波数によって声部を把握する。男声のSinger's formantの中心周波数は、Tenorで約2.8kHz、Baritoneで約2.6kHz、Bassで約2.4kHzである[128]。算出は、独唱時の発声全体における長時間平均スペクトル（LTAS）[129]を求めることで割り出す（図1.19）。

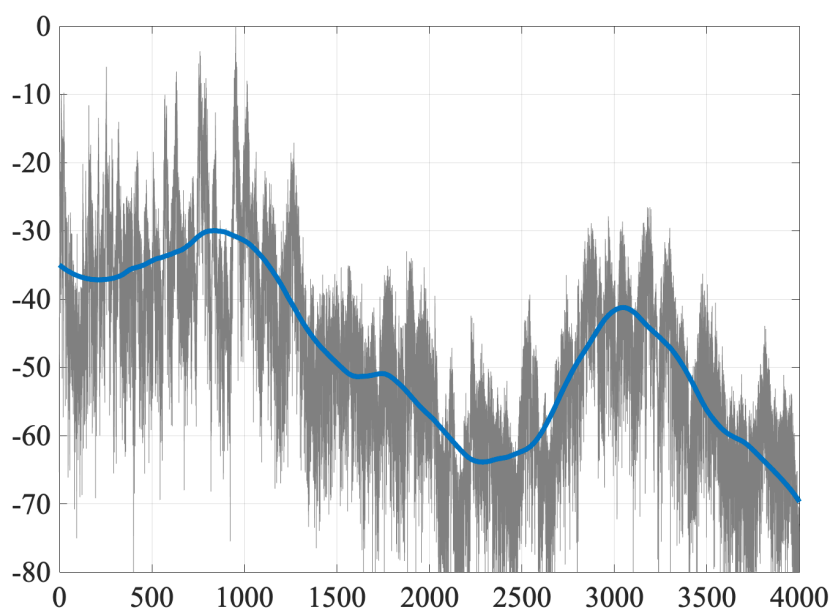


図 1.19：長時間平均スペクトル（LTAS）から
Singer's formant の中心周波数を算出する例

1.3.4. 声区 (vocal register)

■ 特徴 - 声区

1.2.2 節の通り、声帯は広い音域を補えるように、複数の方法で振動する。方法が異なる振動は音の生成過程も異なり、聴感も違ったものとなる。このため、異なる振動方法を区別するために「声区 (vocal register)」という用語が存在する。声区は、「全ての音が同じメカニズムで生成され、同じような性質を持つと知覚される声帯基本周波数の音域」として定義される[10,13,130]。英語名で使用されている「register」は元々オルガンの用語であり、ストップ (音栓) を組み合わせて音質変化を作り出すオルガンの機構に由来している。最も代表的な声区は「地声声区 (胸声/chest/mechanism 1/M1)」と「裏声声区 (ファルセット/頭声/head/mechanism 2/M2)」である。また、より広い発声音域に着目すると、男声が最低音域を歌う際に用いる「フライ声区 (シュトロロー声区/パルス声区/mechanism 0 / M0)」、女声が最高音域を歌う際に用いる「whistle 声区 (flageolet/flute 声区/mechanism 3 / M3)」も存在する。図 1.20 に、地声声区 (M1)、裏声声区 (M2)、whistle 声区 (M3) と音域の関係を示している[131]。

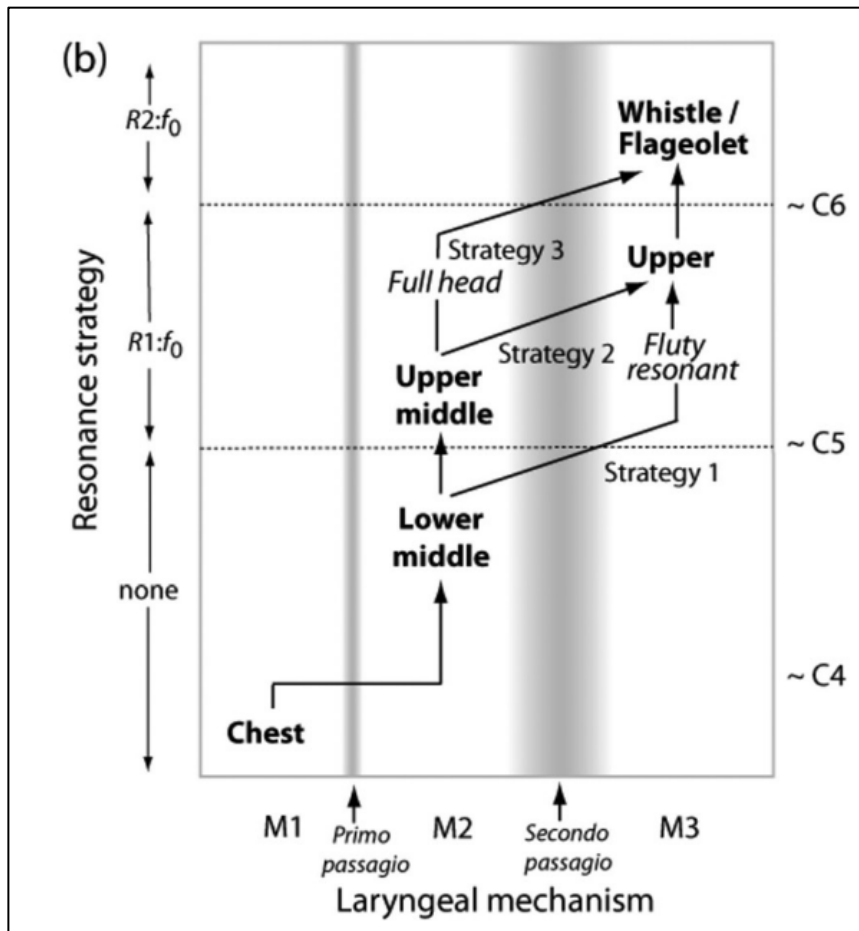


図 1.20：地声声区 (M1)、裏声声区 (M2)、whistle 声区 (M3) と音域の関係 [131]

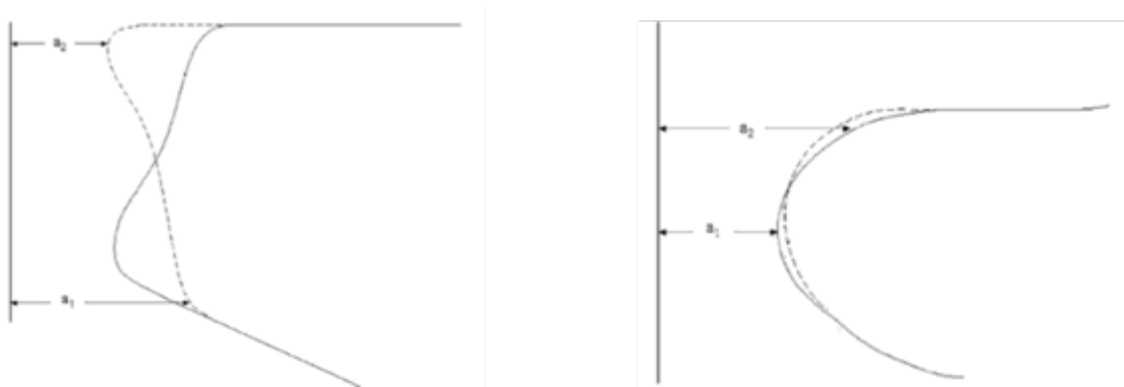


図 1.21：声帯断面における地声声区の振動（左）、裏声声区の振動（右）

これらの声区は音質が異なるため、曲やメロディに合わせて発生するために、声区間を滑らかに繋ぐことが必要である。中間領域を示す用語としては「mix（中声区）」があり、地声と裏声の間の領域を示す。mix は、地声や裏声のように特定の発声メカニズムを指すわけではなく、地声に近い mix や裏声に近い mix が存在する。また、裏声と whistle 声区との間にも同様に、中間の領域が存在する[131]。声区の転換では振動する声帯部分が変わる。例えば、地声から裏声に転換する場合、声帯のカバー層／深層の張力を不均質にして脱結合し、深層が振動せず声帯が薄くなって振動質量が急激に減少する[132]。（図 1.21、声帯に関する基礎情報は 1.2.2 節を参照。）

声区は声帯基本周波数などよりも説明しづらい特徴であるため、外部装置を使用すると、はっきりとその違いを区別することができる（図 1.22）。この感覚的な動作を自在に制御することは難しく、技術習得には個人差がある。

■ 「声を合わせること」に関する未検討事項 - 声区

声区に関する重唱での歌手の振る舞いについては、まだ十分に研究されていない。各歌手が用いる声区や声区転換のタイミングが、声道共鳴の振る舞いとどのように相互作用するのかを調べることは有用である。また、歌手評価や聴感にどのように影響するのかも整理すべきであると考えられる。更に、声道共鳴の振る舞いとの関係性を把握するために、声帯音源の強度など、類似した音響特徴量についても検討する必要があると思われる。

■ 本論における抽出方法 - 声区

本論では第 3 章まで声区を分析に用いておらず、第 4 章で初めて声区を抽出し、分析に使用している。声区を判断するための指標は「声門開放率（Open quotient/Oq）」であり、外部の機器を利用することで算出することができる。声門開放率は「声門が開いている割合」という定義だが、算出法が大きく 3 つ存在し、少なくとも男声では地声/mix/裏声で値が体系的に異なる。

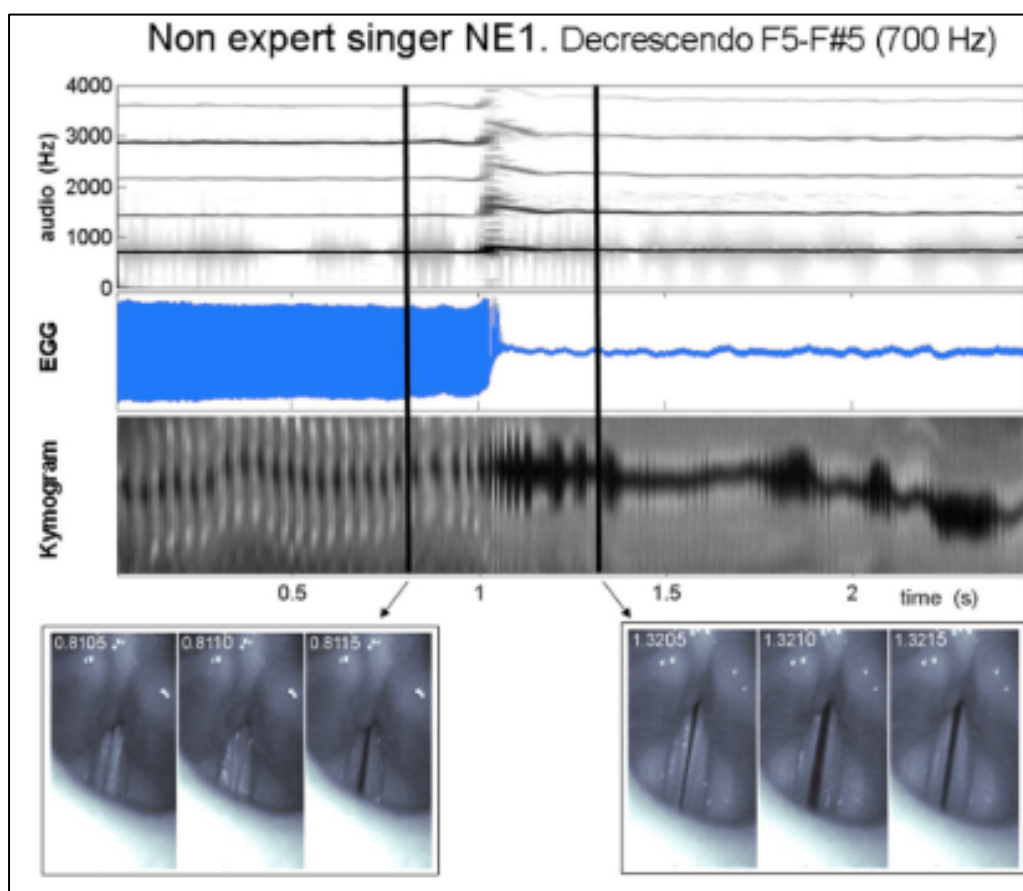


図 1.22：異なる声区を EGG、Kymogram、ハイスピードカメラで記録した例 [131]

1 つ目の算出法は、声門が開いている総時間を開放フェーズとし、声帯周期で割って算出するというものである。声帯周期は、ハイスピードカメラによる声帯振動の撮影から求めることができ、声門面積を測定することによって計算することができる[13]。この方法による声区ごとの指標は以下のように得られている：

- | | |
|--------|-------------|
| 1) 地声 | 0.40 ~ 0.60 |
| 2) Mix | 0.60 ~ 0.70 |
| 3) 裏声 | 0.80 ~ 1.00 |

なお、裏声の指標で見られる「1」という値は閉鎖がないことを示しており、声帯の完全な閉鎖が観察されていない。

2 つ目の算出法は、声門が開く瞬間から閉じる瞬間までを開放フェーズとし、声帯周期で割って算出するというものである。この算出法では、測定や分析に手間のかかるハイスピードカメラを使用する代わりに、EGG を利用して手軽に実施することができる (DECOM 法[122]、図 1.22)。ただし、EGG 使用時は、開放フェーズが厳密な「声門が開いている全時間」よりも短くなるため、声帯の開放を完全に検出できないことに注意する必要がある

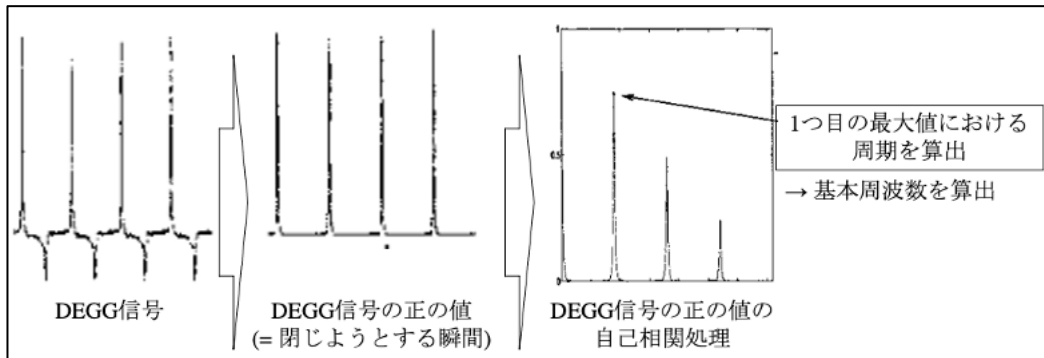


図 1.23： DECOM 法による基本周波数の導出過程。DEGG 信号の正の値 (=声帯が閉じようとする瞬間) に自己相関処理を行い、最初の最大ピーク点における周期から基本周波数を算出する。

る。先行研究を参考にした場合[13,130,133,134]、この方法による声区ごとの指標は以下のように得られている：

- | | | |
|--------|-------------|----------------------|
| 1) 地声 | 0.40 ~ 0.60 | |
| 2) Mix | 0.60 ~ 0.70 | ※ 先ほどの定義値より少し小さい値をとる |
| 3) 裏声 | 0.75 ~ 0.80 | |

3 つ目の算出法は、声門流量が増加し始める瞬間から完全に減少する瞬間までを開放フェーズとし、声帯周期で割って算出するというものである[135]。この算出法は、声門流量を測定する機器を利用することで得ることができる。この方法による声区ごとの指標として、地声と裏声の推定値は 2 つ目の算出法に近い値を取り、mix を測定した先行文献がない。

第 4 章では、これらの測定上の性質を踏まえた上で、2 つ目に紹介した EGG で算出する声門開放率を、声区 (地声 / mix / 裏声) の判断指標として使用する。

1.3.5. 声帯音源の強さ

■ 特徴 - 声帯音源の強さ

「声帯音源の強さ」とは、声帯が閉じる速度を示すもので、これまで歌唱音響学の研究であまり詳しく述べられていない音響特徴量である。声帯が閉じる速度は、声帯が閉じるタイミング（正確には、声門を通る気流が減る瞬間）に影響し、このタイミングが発声のエネルギーの大部分を持っている[44,45]。したがって、声帯が速く閉じるほど、高次の声帯倍音の強さに直接関連する。1.2.2 節で触れた声帯振動サイクルとの関連としては、声帯が速く閉じて声門気流の減少が急になると、高次倍音の強い音源スペクトルが生成される。逆に、声帯が遅く閉じて開く速度と変わらなくなると、音源スペクトルでは第 1 倍音が強まり、スペクトル勾配が急峻になる。このような振る舞いから、声帯音源の強さが歌唱の独特な音質を生み出す要因となっていると考えられる。

■ 本論における抽出方法 - 声帯音源の強さ

本論では、第 5 章で初めて声帯音源の強さを抽出し、分析に使用している。声帯音源の強さを評価する指標としては「声帯接触速度率 (Contact speed quotient/Csq)」がある。この指標は、「声帯が閉じる速度」と「声帯が開く速度」の比であり[131,136]、「声帯が開く速度」はあまり変わらないため、実質的に「声帯が閉じる速度」の変化を見ることができ。例えば、地声声区や mix 声区の領域では、「声帯が閉じる速度」が「声帯が開く速度」より大きくなり、声帯接触速度率が 1 より大きい値を示す。一方、裏声声区では、「声帯が閉じる速度」と「声帯が開く速度」がほとんど変わらず、声帯接触速度率が 1 前後、または 1 未満の値を示す。声帯の開閉速度は、EGG 波形を微分することで求めることができる (DECOM 法[122])。なお、声帯接触速度率は音響成分の振る舞いや聴感に関連する一方で、1.3.4 節で述べた声門開放率は聴感と必ずしも結びつかない (歌手の感覚には結びつく) 指標であることを留意する必要がある。

1.3.6. Singer's formant (第 3,4,5 声道共鳴の調節)

■ 特徴 - Singer's formant

「Singer's formant (第 3,4,5 声道共鳴の調節)」は、Soprano よりも低い音域の声部 (Alto や男声パート) で見られる歌唱独特の現象である。一般的には合唱練習で使われる用語ではないため、多くの歌手には馴染みがないと思われる。具体的には、2.4 ~ 3.2 kHz の範囲に大きな共鳴ピークが現れる現象を指す[137,138]。このピークは、訓練された独唱歌手ほど顕著であり、声楽的な発声ほど音圧振幅の上昇が高くなる。Singer's formant の存在により、声に張りが生まれ、オペラ歌手の歌声がオーケストラ伴奏上でも埋もれなくなる[10] (図 1.24)。Singer's formant が生じる原因は、喉頭の下降によって声道下部の咽頭領域 (hypo-pharyngeal) が広がり、さらにその下の喉頭上管 (epi-laryngeal) との段面積比/体積比も広がることによる[139]。そのような変化が生じると、喉頭上管が有する共鳴の影響

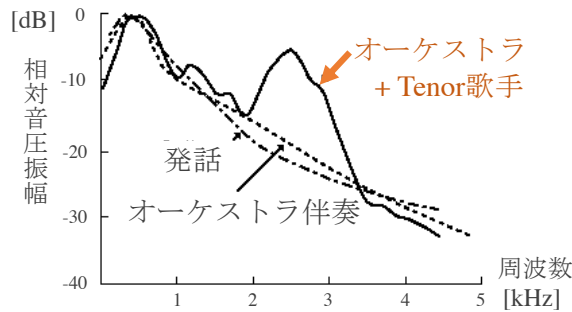


図 1.24 : 複数の音源 (発話・オーケストラ伴奏・Tenor 歌手) における長時間平均スペクトル

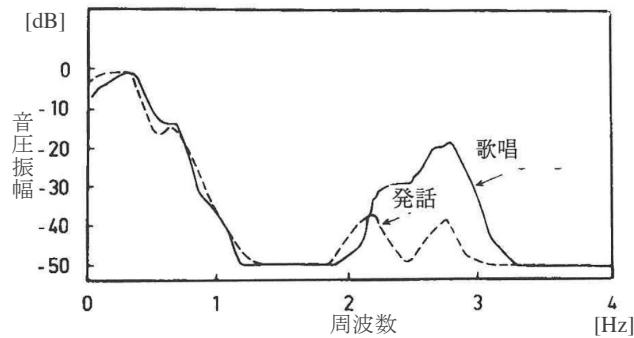


図 1.25 : /u/母音の歌唱時と発話時における bass 歌手の長時間平均スペクトル包絡[140]。歌唱時には、第 3,4 (,5) 声道共鳴周波数がクラスターとなっている。

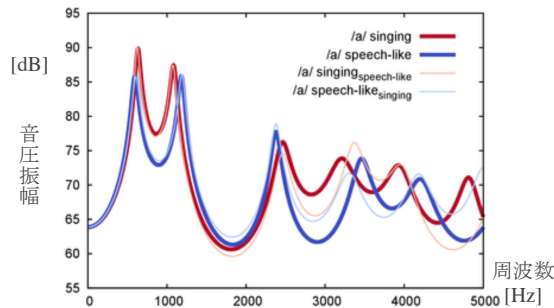


図 1.26 : MRI で得た声道断面積に基づく周波数スペクトルのシミュレーション。発話時は青線、歌唱時は赤線。歌唱時の第 3,4,5 声道共鳴が発話時よりも低下している。

力が増し、近くにある第 3,4,5 声道共鳴周波数が第 3 声道共鳴周波数のあった方向に近づき、クラスターを形成し、通常の発話時とは異なる状態になる[140]。図 1.25 は、発話時の第 3,4,5 声道共鳴周波数と、歌唱時にクラスターとなる第 3,4,5 声道共鳴周波数を示している。ただし、聴感としては、第 3,4,5 声道共鳴周波数があまり近くなくても Singer's formant が感じられる場合があったり、逆に第 3,4,5 声道共鳴周波数が近いのに Singer's formant が感じられない場合がある。理由としては、この周波数帯のエネルギーレベルが、母音の種類に伴う第 1,2 声道共鳴周波数の変動や声帯基本周波数の変動、発声の大きさにも影響するためである。また、歌手の声道内の構造にも条件があり、喉頭管開口部の断面積が咽頭の断面積より相対的に 1/6 以上狭い場合に特に発生しやすいとされている。そのため、Soprano ではあまり見られず、Alto や男声パートにおいて特に顕著である。更に、上昇する帯域も声部によって異なる[127,128,141]。

■ 「声を合わせること」に関する未検討事項 - Singer's formant

合唱における Singer's formant は、顕著であることが望ましいのか明確ではない。合唱の観点から見ると、経験豊富な独唱歌手は、独唱から合唱への切り替え時に、Singer's formant 領域のエネルギーレベルが低下することが知られている[10,142]。これは、他の要因への注意が影響しているかもしれないし、声を合わせるために意図的にエネルギーを抑えている可能性もある。また、合唱における Singer's formant の強弱と聴感的な好ましさを比較した測定実験では[143]、Singer's formant 領域の弱い演奏がより良い聴感を持っていることが示されている。これにより、合唱においては Singer's formant が小さい方が良いと考えられるかもしれないが、[143]の研究では慎重な立場を取っており、実験設定による他の音響特性（発声バランスや blend）の制御が不十分であることが理由だとしている。実際、先行文献には実験設定に関する懸念があり、[142]では被験者が 1 人で参照音がヘッドフォンであったこと、[143]では無響室での測定であることや、被験者が声楽科の学生であったことなどが挙げられる。更に、[143]の考察では、「Singer's formant が影響する聴感」よりも「発声バランスや blend が影響する聴感」の方が、合唱においてより大きな影響を与える可能性が示唆されている。従って、先行研究では合唱における Singer's formant の役割や、他の音響指標との関連性について十分に検討されていない。もし、本論で抽出する音響特徴量間の相互作用に焦点を当てることができれば、Singer's formant に関する先行研究の示唆に沿った新しい知見が得られるかもしれない。

■ 本論における抽出方法 - Singer's formant

本論では、第 4 章において初めて Singer's formant を抽出し、分析に用いている。Singer's formant の大きさを評価する指標は主に 2 つある。1 つ目は「Singing Power Ratio (SPR)」で、0 ~ 2 kHz (= 第 1,2 声道共鳴の範囲) の最大倍音と 2 ~ 4 kHz (= Singer's formant の範囲) の最大倍音のレベル差として定義される[144]。SPR は Singer's formant の聴感的な存在

を安直に比較できるほか、独唱歌手の技量を判断する際の人間の感覚に沿った指標でもある。2つ目の指標は「Level of the Singer's Formant (LSF)」で、Singer's formant の生成原因である「第 3,4,5 声道共鳴のクラスター化度合い」をより厳密に評価するための指標である。算出方法は、歌唱中の第 1 声道共鳴 (= 最もエネルギーの大きい発声領域) と第 3 声道共鳴 (= Singer's formant 領域) のレベル差を計算し、通常の話時と比較することで求める[138] (図 1.27)。この算出は、「母音の種類/声帯基本周波数/発声の大きさ」が Singer's formant のレベルに与える影響を除外するために行われる。LSF の算出手順は以下の通りである。

- ① 歌唱中の第 1,2 声道共鳴周波数を測定し、これを基に通常話時の声道共鳴スペクトルをシミュレーションする。計算には、[48] p56 に記載されている 1.3-11 式を使用する。シミュレーションの結果得られる声道共鳴スペクトルの様子を、図 1.27 に示している。式は以下の通りである：

$$20 \log_{10}|P(f)| = 20 \log_{10} k_{r4}(f) P_k \frac{\frac{f}{100}}{1 + \left(\frac{f}{100}\right)^2} - \sum_{n=1}^4 10 \log_{10} \left[\left(1 - \frac{f^2}{F_n^2}\right)^2 + \frac{f^2}{F_n^2 Q_n^2} \right] \quad (3)$$

$20 \log_{10}|P(f)|$ は音圧波形、 $20 \log_{10} k_{r4}(f) P_k \frac{\frac{f}{100}}{1 + \left(\frac{f}{100}\right)^2}$ は声帯特性と放射特性・第 5 声道共鳴以上の影響の合算値、 $(-\sum_{n=1}^4 10 \log_{10} \left[\left(1 - \frac{f^2}{F_n^2}\right)^2 + \frac{f^2}{F_n^2 Q_n^2} \right])$ は第 1 声道共鳴から第 4 声道共鳴までの共鳴特性の合算値である。 $k_{r4}(f)$ は第 5 声道共鳴以上の影響を考慮する係数で、式は以下の通りである：

$$k_{r4}(f) = 10^{\frac{0.54 \times \left(\frac{f}{F_1}\right)^2 + 0.00143 \times \left(\frac{f}{F_1}\right)^4}{20}} \quad (4)$$

P_k は特定の音圧レベルを決定する定数 (本論では 10 に設定)、 $\frac{\frac{f}{100}}{1 + \left(\frac{f}{100}\right)^2}$ は音源特性と放射特性の組み合わせで 6 dB/octave で減衰するスペクトル、 F_n は第 n 次声道共鳴周波数、 Q_n は第 n 次声道共鳴の鋭さ $F_n/100$ 、 f は周波数、声道共鳴の帯域幅は 100 としている。また、第 3 声道共鳴周波数は 2.5 kHz、第 4 声道共鳴周波数は 3.5 kHz で固定としている。

- ② シミュレートされた通常話時の声道共鳴スペクトルから、第 3 声道共鳴周波数の音圧レベルを確認する。

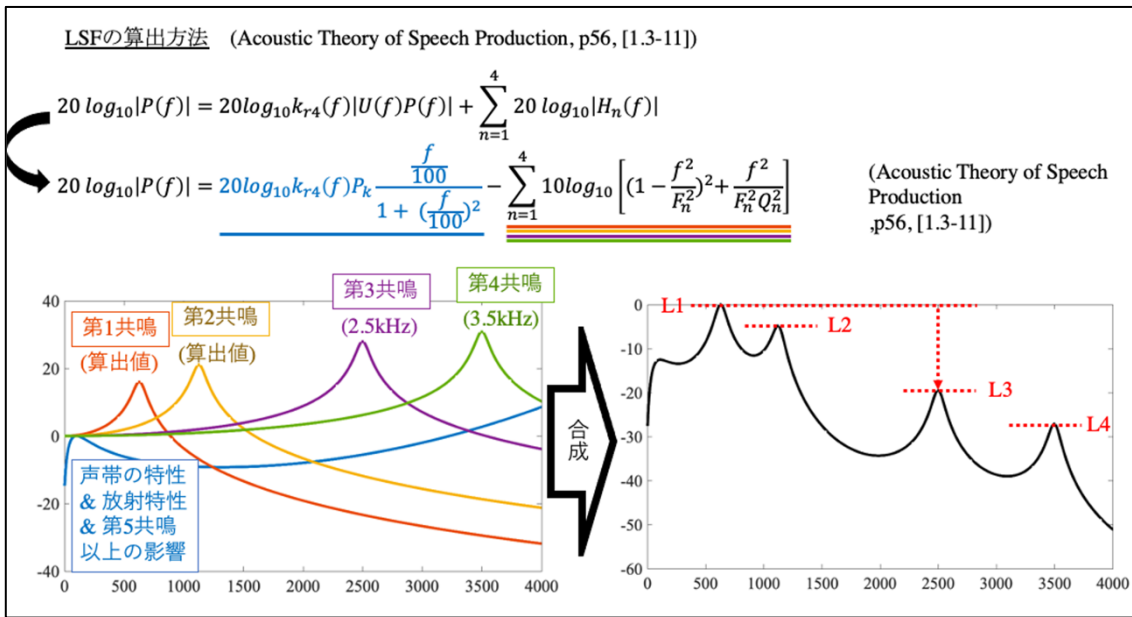


図 1.27： LSF の算出過程を示した図。

抽出した第 1,2 声道共鳴周波数から第 3 声道共鳴周波数の相対音圧レベルを算出する。

- ③ マイクロフォンと歌手の距離に伴う誤差を補正するため、測定音の音圧レベルを調整する。これは、式 3 で仮定されている通常発話時のマイクroフォン距離が 0.3 m と固定であるのに対し、実際に行う歌唱音の測定ではマイクroフォン距離が異なると想定されるためである。本論では、第 4 章で行われた測定実験におけるマイクroフォン距離が 0.2 m であったため、音圧レベルを 0.3 m 相当に換算する。式は以下の通りである：

$$\text{SPL}_{0.3 \text{ m}} = \text{SPL}_{0.2 \text{ m}} - 20 \log_{10} \left(\frac{0.3}{0.2} \right) \quad (5)$$

- ④ 次に、音量の違いがもたらす誤差を考慮して、Singer's formant の補正值を計算する。具体的には、測定された歌唱時の音圧レベル ($\text{SPL}_{0.3 \text{ m}}$) から、シミュレートされる通常発話時の音圧レベル (75 dB) を引いて差分を求め、その差分に基づいて Singer's formant 帯域の誤差を計算する。これは、発声音全体における音圧レベルの変化に伴う、Singer's formant の帯域の体系的な変動に基づいている[127]。例えば、全体の音圧レベルが 10 dB 増加した場合、Singer's formant は 16 dB 増加する。このような関係に基づいて、発声音全体の増減 1 dB あたり、Singer's formant 帯域が 0.6 dB 増減する係数を適用する。式は以下の通りである：

$$\Delta \text{SPL}_{\text{Singer's Formant}} = (\text{SPL}_{0.3 \text{ m}} - 75) \times 0.6 \quad (6)$$

これによって、シミュレートされた通常発話と測定された歌唱が同じ音量になった場合の Singer's formant 帯域を比較できるようにする。

- ⑤ シミュレートされた通常発話時の声道共鳴スペクトルによって求められる第 3 声道共鳴と第 1 声道共鳴のレベル差 ($L3 - L1$) に対し、先ほど求めた Singer's formant の補正值 $\Delta SPL_{\text{Singer's formant}}$ を加え、通常発話時の期待値 SPR_{speech} を求める。

$$SPR_{\text{speech}} = L3 - L1 + \Delta SPL_{\text{Singer's formant}} \quad (7)$$

- ⑥ 測定された歌唱音の音圧レベル SPR_{singing} とシミュレートされた通常発話の音圧レベル SPR_{speech} の差を求めて、LSF を算出する。

$$LSF = SPR_{\text{singing}} - SPR_{\text{speech}} \quad (8)$$

この LSF の値が 0 に近い場合、声道共鳴が歌唱特有の Singer's formant として十分に機能していないことが示唆される。これは、歌手が特有の響きを出すために、声道共鳴の調整が必要であることを示している。第 3,4,5 声道共鳴がお互いに近接せず、例えば咽頭領域が拡大しないなどの理由で、喉頭管の共鳴が Singer's formant に影響を与えない場合、通常発話時と歌唱時で Singer's formant 領域のレベルや SPR が大きく変動しないため、LSF は 0 に近い値を取る。

1.3.7. 発声の大きさ

■ 特徴 - 発声の大きさ

発声の大きさは、声門下圧の 3~4 乗に比例して変化する[47]。そのため、音響学分野では、dB SPL 単位である音圧レベルとして表現することが一般的である。以下では、dB SPL で歌手の発声の大きさを説明する。声楽歌手は、一般的に歌手でない話者よりも大きい音量で発声する。soft な発声では、話者が 60 dB SPL であるのに対して、独唱歌手は 75 dB SPL となり、その差は 20~40 dB SPL とされる（無響室 0.5 m 地点での比較の場合）[10]。しかし、最大音量では歌手と話者の違いはそれほど大きくなく、話者は 90 dB SPL、独唱歌手は 93 dB SPL である。合唱歌手のダイナミックレンジは 11~33 dB SPL であり、どれほど soft に歌えるかによって差が現れる[86,145]。合唱セクション全体では、60~110 dB SPL の範囲で歌われることが一般的で、通常 80~100dB SPL である。合唱団間や合唱団内の位置による大きさの違いはあまりないものの[62]、Soprano セクションでは 115 dB SPL に達することもある[10]。周波数帯域を比較すると、高域と低域の差が顕著で、10~20 dB SPL 異なる[10]。歌手は、さまざまな発声手法を用いて、発声音域に関係なく安定した大きさで発声できる。また、合唱歌手が他の歌手を参照しながら発声できる音量幅はかなり大きく、同じ音高で歌う場合、自身の発声より-5~-30 dB SPL 低い参照音の音量で、声帯基本周波数の精度が保たれたまま発声できる[10,62]。

音圧レベルよりも、より知覚属性に沿う指標として「ラウドネス (Loudness)」が存在する[146-148]。ラウドネスは、周波数ごとの音量知覚の違いや、聴覚マスキング効果を含めた音量の評価法で、人間の聴覚特性を考慮した指標である。

■ 「声を合わせること」に関する未検討事項 - 発声の大きさ

複数人歌唱において、発声の大きさに関する知見はまだ不確かなものも多い。例えば、「soft に歌えるか」は、第 1,2 声道共鳴/声区/声帯音源の強さなどの音響特微量にどのように反映されているのかが明らかになっていない。また、先ほど記載した参照歌手の音量幅に関する検討[10,62]は、ヘッドフォン提示で行われたものであり、同時発声の場合における検討が十分に理解されていない。「soft に歌えるか」が blend の感覚にどのように関与するかも、さらなる検討が必要である。

また、ラウドネスの指標を扱った歌唱に関する先行研究は見つかっていない。測定法の煩雑さが原因かもしれないが、検討することの重要性については指摘されている[10]。そのため、本論では、聴感と音響特微量を比較する音響特微量としてラウドネスを考慮する。

■ 本論における抽出方法 - 発声の大きさ

本論では、第 4 章で初めて発声の大きさを分析している。発声の大きさを抽出するために、まず音圧レベル (dB SPL) を測定し、それによって先行研究の測定値と比較する。音圧レベルの測定は、周波数重み付け (A 特性と呼ばれる暗騒音に対する聴感曲線の近似など)

や時間軸の重み付けを行わずにマイクロフォンや騒音計によって計測できる。第4章の実験では、ラウドネスも発声の大きさを検討する。人間が感じる音の大きさは、音圧だけでなく、周波数や持続時間によっても異なる。ITU-R BS.1770-4に基づくラウドネス指標の算出を matlab の既成関数で実施した場合[149,150]、瞬時ラウドネス (Momentarily loudness, 単位 LUFS)、区間全体の統合ラウドネス (Integrated loudness, 単位 LUFS)、ラウドネス範囲 (単位 LU) を取得できる。瞬時ラウドネスは、400 ms の時定数特性をもつ音の大きさの瞬時レベルとして定義される (ITU-R BS.1771[151])。ラウドネス範囲は、-20 LU の相対閾値以上のラウドネス分布の下位 10% ~ 上位 95% 推定値の差として定義される[152]。下位 10% の設定はフェードアウトの影響を防ぐため、上位 95% の設定は突発的な音の影響を防ぐためである。

第4章では、ラウドネス範囲と統合ラウドネスをラウドネスの値として抽出する他、音高内における瞬時ラウドネスのピークタイミングも併せて抽出し、歌手同士で比較する。これによって、声の大きさ全体、および発声のタイミングに関する歌手同士での調節を観察する。

1.3.8. 発声スタイル

■ 特徴 - 発声スタイル

本論ではクラシック歌唱に焦点を当てているが、もともとミュージカル、ポップス、ジャズ、ブルースなど、さまざまな発声スタイルが存在する。これらの発声形式の間には、声門下圧の管理や喉頭の動作に関する明確な違いがあり、周波数特性、音圧レベル、および聴感に影響を与える[50, 153–157]。さらに、クラシック歌唱でも、オペラのような独唱スタイルと、複数人で歌うスタイルとは、聴き手に最適な聴感を追求するために全く異なる発声戦略が使われている。これは、両スタイルの目的や表現力が異なるためである。オペラのような独唱スタイルでは、歌手の個々の技巧や感情表現を最大限に活かすことが求められ、そのための発声戦略が重要になる。一方、複数人で歌うスタイルでは調和やバランスが特に重要であり、歌手同士が協調しながら、全体の響きや美しさを追求する発声戦略が必要とされる。

■ 本論における抽出方法 - 発声スタイル（「オペラの／opera」「合唱的／coral」のみ）

本論では、オペラの独唱のような声楽の発声スタイルと、合唱アンサンブルのような発声スタイルを比較対象としている。この指標は第4章で初めて取り上げ、google フォームで収集した被験者属性と口頭でのヒアリングをもとに分類している。「オペラの／opera」は、声楽的な発声を普段研鑽し、独唱で発声する意識を持つ歌手の属性として定義している。一方、「合唱的／coral」は、声楽経験がほとんどないか全くなく、合唱アンサンブルを意識して発声する歌手の属性として定義している。ただし、声楽と合唱の両方の経験があり、どちらにも分類しにくい歌手に対しては、チェックをつけていない。このようなヒアリングに基づく分類は一見恣意的に見えるかもしれないが、先行研究でも度々類似の分類が行われているため、注意深く考慮して実施している[86]。本指標を利用した分析は、第5章で実施している。

1.4. 本論文の目的・展望

1.3 節に述べたように、同一音高で複数人が歌唱する際の発声には、第 1.2 声道共鳴周波数の振る舞いを中心として、未解明の事象や疑問点が多く存在する。これらの未検討事項に対する音響特徴量の比較は、重唱における発声生成メカニズムをまとめる上で重要と考えられる。本論では、さまざまな音響特徴量の中から、第 1.2 声道共鳴周波数に焦点を当てるとともに、声部や声区などの現場の感覚に沿う音響特徴量にも重点を置いて探求する。また、より詳細な歌手評価に基づく分析が不可欠であると考えられる。合唱アンサンブルを嗜む大多数はアマチュア歌手であり、さまざまな要因で個々の発声調整能力が十分に発揮できない場合も考慮しなければならない。そこで、本論における歌唱測定実験では、より多くの被験者を対象に実施し、1.3 節で述べた音響特徴量を抽出するとともに、オープンクエスチョンによる被験者へのヒアリングおよび複数回の収録を通じて、詳細な歌手評価に基づく分析を行うこととする。

ただし、注意すべき点として、大規模で複雑な実験設定の検討は、一般に失敗やリスクを伴うことがある。主な懸念点は以下の 3 つである：

- 1) 外部音響励振法への適応が必要である。外部音響励振法で歌手の口に放射する雑音は、母音の形によっては入りにくい場合がある。雑音が口を効果的に励振できない場合、実験サンプルの取り直しが必要となり、実験時間が伸びてしまう。サンプルの収録漏れがあった場合は、被験者に後日来てもらう必要が出てくる。また、外部音響励振法で歌手の口に放射する雑音の音量によって、重唱の発声試行に支障が生じる可能性もある。
- 2) 測定人数の制約がある。個人のみでの収録ではなく、複数人数をセットとして収録しなければならないため、上記の 1) で述べたような収録ミスの手戻りを行う余裕は基本的にはない。また、複数の属性を持つ歌手の組み合わせで可能な限り均等に収録を行うことを考慮すると、本論の目的を調査するために必要な被験者人数も多くなる。そのため、段取りについて計画的に決定していく必要がある。
- 3) 複数人歌唱の実験設定は、独唱における実験よりも一般的に自由度が高いため、重要度が低い実験設定の実施や分析に労力を消耗する可能性がある。1.3 節で述べた課題を把握できるような実験設定を検討する必要がある。

これらの懸念点を考慮し、対策を講じた歌唱測定実験を実施するために、本論では、目標とする歌唱測定実験をすぐに行わず、規模の小さな予備的検証から始めてスケールアップさせ、3 段階に分けて歌唱測定実験を実施していくこととした。第 4 章で行う 3 段階目の実験は、扱う音響特徴量、指定する条件の数、被験者数ともに、歌唱音響学の先行研究の

中でもかなり大規模なものであり、第 4 章の結果によれば、得られた知見も多いものとなっている。

続いて、重唱における発声の聴感を検討する上で、克服しなければならない課題も存在する。主な懸念点は以下の 2 つである：

- 1) 聴取評価の方法を検討する必要がある。印象評価実験で用いられる評価語を使用した研究では、得られる知見が合唱現場や歌手の意見と一致しているかどうかは明確でないことが問題である。
- 2) 聴取音源の準備方法に課題がある。外部音響励振法で得られる音源には、雑音が含まれることが避けられない。そのため、本論では、ホーンから雑音を発生させない工夫や、雑音が入りにくいマイクロフォン配置を検討することが重要である。また、聴取用音源の雑音除去も実施する必要がある。

このような背景から、本論では現場に適した評価語の選定のために、別途アンケート調査を実施し、聴取評価の評価語として利用している。さらに、聴取用音源のための工夫として、1.3.1 節で述べているようなエキスポネンシャルホーンに対する設計を丁寧に行なっている。また、第 4 章の実験では聴取用マイクロフォンを設置し、できる限り雑音が入らないよう気をつけながら、雑音消音アルゴリズムを実装して前処理に利用している。これらの工夫により、本研究で提案する 3 段階の実験設定が可能となった。

注意点として、本論では「声が合っているか」という観点に焦点を当てているが、他の合唱品質に関する評価は行っていない。理由は、「声が合っているか」以外の観点も多く存在し、それを表現するための評価語が膨大になるためである。実際に、合唱経験者にすべてのフィードバックや指導を思い出してリストアップしてもらうと、合唱品質全体に関する問題は取り上げられるだろうが、焦点が絞られず、回答数が非常に多くなると予想される。発声指導は楽器のように直接教えることができず、自分と他人の聴こえが異なるため（1.1 節参照）、意思疎通のためにさまざまな表現が必要となる。また、指導の感性や用語は、多くの合唱団に共通するものあれば、特定の合唱コミュニティ固有のものもあり、それらの表現が明確に重要かどうかを確認する手順が必要である。このため、調査対象者や評価語をさらに増やす必要があるが、現実的には大規模な調査を実施することは困難である。そのような理由から、本論では「声が合っているか」に焦点を絞り、他の観点については今回検討しない。

「声を合わせること」は、1.1 節の通り合唱において最も重要な感覚の 1 つであり、適切な焦点として取り上げる。本論では、この「声を合わせること」に関する評価語を集め、多くの合唱団員からの同意を得られるものを抽出し、音響特徴量や聴感と比較していくこ

ととする。ただし、これらの評価語の潜在的な因子（つまり声を合わせること）は1つであることを前提としている。以上を踏まえると、本論の流れとしては次のようになる。

まず、測定実験1つ目では、限定した被験者のみに対して繰り返し歌唱課題を実施し、歌手の属性以外の実験設定に関する再現性に焦点を当てる。この実験では、歌手2人による同時発声を行わず、被験者1人に対して参照歌手の音源をスピーカー／ヘッドフォンから提示する。この段階での分析は、第1,2声道共鳴の比較と、第1,2声道共鳴と声帯基本周波数の関係の比較に限定し、得られる結果は参考程度とする。

次に、測定実験1つ目で得られた知見をもとに、実験設定を改善し、同じ目的の測定実験2つ目を実施する。この段階では、同一音高・同時発声の歌唱を想定し、実験参加者を増やして歌手同士の第1,2声道共鳴周波数の振る舞いを主に比較する。無響室での実験を選択し、分析では、測定実験1つ目との比較、被験者間差異の比較、実験設定による比較を行い、第1,2声道共鳴周波数が声を合わせる上でどのような振る舞いをするのかを検討する。また、簡易的な歌手評価も調査する。歌手は実験中に「声を合わせられたか」について4段階尺度で回答を得て、次の測定実験の参考とする。

続いて、測定実験3つ目では、より多くの被験者に対して実施し、第1,2声道共鳴以外にも1.3節で述べた広範な音響特徴量を抽出し、オープンクエスチョンによるヒアリングや複数回の収録、細かな歌手評価による分析も行う。特に、外部音響励振法のエクスポネンシャルホーンを改良して静音化し、通常のレコーディングスタジオで収録できるようにする。この実験により、第1,2声道共鳴周波数と他音響特徴量同士の関係、および第1,2声道共鳴周波数と歌手評価との関連を検討する。

最後に、測定実験3つ目で得た音源を使用して、聴取評価実験を行い、音響特徴量と「声が合っているか」に関する聴感の対応関係を調べる。評価に用いる評価語は、現場に即したものとなるよう、アンケート調査による評価語の選別を別途実施する。また、聴取用音源は、外部音響励振法による雑音の消音アルゴリズムを実装して使用する。これにより、音響特徴量、発声方法、歌手評価と聴取結果を参照し、最終的に聴取評価の潜在因子「声が合っているか」と音響特徴量の比較を実施する。

これらの新たな検討によって、1.1節に述べたような発声補助器具の開発が現実的なものとなることを、本論文の展望として掲げる。

1.5. 本論文の構成

第2章では、初期検討として、1人の合唱歌手が別の歌手の参照歌唱音を聴きながら発声する予備的な測定実験を行う。この実験は、後の実験や分析が円滑に進められるよう、実験設定を検証することを目的としている。被験者要因は後の章で分析されるため、ここでは男声の Tenor 歌手 1 人のみによって類似の実験セットが繰り返される。参照歌唱音は、別の被験者による収録済みの音声を使用し、参照音を聴かない独唱発声と重唱で、主に第1,2声道共鳴周波数の振る舞いを比較する。この実施を通じて、外部音響励振法で安定して抽出できる母音の確認や、後の章でも検討すべき実験設定が何か、適切な分析法について検討する。次に、第3章では、第2章で得られた実験設定や分析結果に関する知見を基に、実験設定を改良した同じ目的の測定実験を行う。実際の発声シーンに近い同一音高・同時発声の歌唱を想定し、実験被験者を4人まで増して、主に第1,2声道共鳴周波数に関する振る舞いを比較する。さらに、簡易的な歌手向けの評価実験も実施し、歌手は実験中に「声を合わせられたか」について4段階尺度で発声ごとに回答する。その上で、第4章では、第3章の実験設定を基本として、39人の被験者に対して歌唱測定実験を実施する。第1,2声道共鳴周波数以外にも、1.3節に説明した広範な音響特徴量を抽出し、オープンクエスションによる被験者へのヒアリングや、それに伴う複数回の収録により、より詳細な歌手評価に基づく分析を行う。その後、第5章では、第4章で得た音響特徴量と「声が合っているか」に関する聴感との対応関係を調べるため、全国の合唱歌手を対象に聴取実験への参加を募集し、第4章で得た音源の一部に関する聴取評価を行う。ただし、評価に用いる評価語は現場に即したものとなるよう、アンケート調査による評価語の選別を別途実施する。また聴取用音源は、外部音響励振法の影響で含まれている雑音の消音アルゴリズムを実装し、使用した上で用いる。分析では、発声方法や歌手評価ごとの聴取因子の比較、第1,2声道共鳴周波数をはじめとする音響特徴量と聴取評価との比較を実施し、最終的に聴取評価の潜在因子「声が合っているか」と音響特徴量の比較まで行う。第2章から第5章までの構成は、以下の表1.2のようになる。最後に第6章で、本論の総括を行う。

章	内容	扱う音響特徴量	歌手評価	被験者数	目的
2	歌唱測定実験	主に第1,2声道共鳴、 声帯基本周波数	無	1	<ul style="list-style-type: none"> ■ 実験設定の検証 ■ 抽出母音の確認 ■ 重唱時の第1,2声道共鳴に関する大まかな傾向の把握
3	歌唱測定実験	主に第1,2声道共鳴、 声帯基本周波数	有(簡易)	4	<ul style="list-style-type: none"> ■ 重唱時の第1,2声道共鳴に関する振る舞いの把握
4	歌唱測定実験	1.3節に記載する 全ての音響特徴量	有	39	<ul style="list-style-type: none"> ■ 第1,2声道共鳴と他音響特徴量との関係性の比較 ■ 第1,2声道共鳴と歌手評価との関係比較
5	聴取実験	1.3節に記載する 全ての音響特徴量	-	60 (評価語彙抽出 のための調査: 55)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 重唱時における第1,2声道共鳴以外で主要な音響特徴量の把握 ■ 全音響特徴量と聴取評価との関係比較

表 1.2 : 第2章から第5章までにおける構成

第 2 章 小規模な歌唱測定実験を通じた分析の初期検討

2.1. はじめに

本章では、同じ音高で複数人が歌唱する際の第 1,2 声道共鳴周波数の分析について初期検討するため、1 人の合唱歌手が他の歌手の参照歌唱音を聴きながら発声する測定実験を実施する。この実験は、複数の被験者を対象とした測定を行う前の予備実験として、後の実験や分析を円滑に進められるよう、実験設定の検証を目的として実施する。具体的には、被験者要因は後の章での分析に委ね、男声の Tenor 歌手 1 人を被験者とし、類似の実験セットを繰り返し行う。また、参照歌唱音として別の被験者による収録済みの音声を使用し、参照音を聴かない独唱発声と重唱で、音響特徴量（声帯基本周波数および第 1,2 声道共鳴周波数）の振る舞いを比較する。これらの実施を通じて、外部音響励振法で安定して抽出できる母音、本実験で想定した実験設定のうち後の章でも検討すべき事項、および適切な分析法について検討する。

2.2. 実験設定

本実験で用いた実験ダイアグラムを図 3.6 に示す。外部音響励振法を使用したため、被験者の口にホーンを置き、応答信号をコンデンサー型マイクロフォンで収録するために口唇から 300 mm 離れたところに配置した。また、声帯基本周波数の抽出に EGG を利用するため、実験中喉頭下部に電極対を装着している。収録音と EGG のサンプリング周波数はどちらも 16kHz とした。EGG から出力される電気信号は、オーディオインターフェイスを通してコンピュータに取り込まれた。実験被験者はテナーのアマチュア合唱歌手 1 名（合唱歴 10 年以上）である。提示する参照音は別のアマチュア歌手 1 名（合唱歴 10 年以上）による録音音源とした。実験被験者が自身の発声と参照音を「共に聴こえる」と判断できる音量で参照音を再生した。提示方法は 2 種（スピーカー提示とヘッドフォン提示）とした。発声内容は 2 種類、音高が変化しない場合（定常発声）と変化する場合（曲発声）とした。発声音域は地声声区内の C3-E4（10 音高）とした。母音は 5 母音/a,i,u,e,o/を測定し、そこから声道共鳴周波数の抽出がスムーズに行える母音を検討した上、分析に移行する。ビブラートは意図してかけないよう被験者に指示した。すなわち、「10 音高 [C3-E4] × 5 母音/a,i,u,e,o/ × 音高の変化パターン 2 種 [定常 / 曲] = 100 パターン」を 1 セットとして測定した。原則 1 セット通して行い、セット間に休憩を設けた。1 日につき 3 セット（セットごとに参照音の有無を変更）、4 日間で合計 12 セット測定した。（すなわち、1 日の内の 1 セット目が「参照音なし」、2 セット目が「参照音あり」、3 セット目が再び「参照音なし」となる。）「参照音あり」の条件のみ、スピーカーもしくはヘッドフォンから参照音を提示した。参照音の無い条件では、発声の前に、キーボードなどで歌うべき音高を平均律（基準ピッチ：440 Hz）で提示した。歌唱する母音は、/a/から順番に/i/,/u/…と続いた。

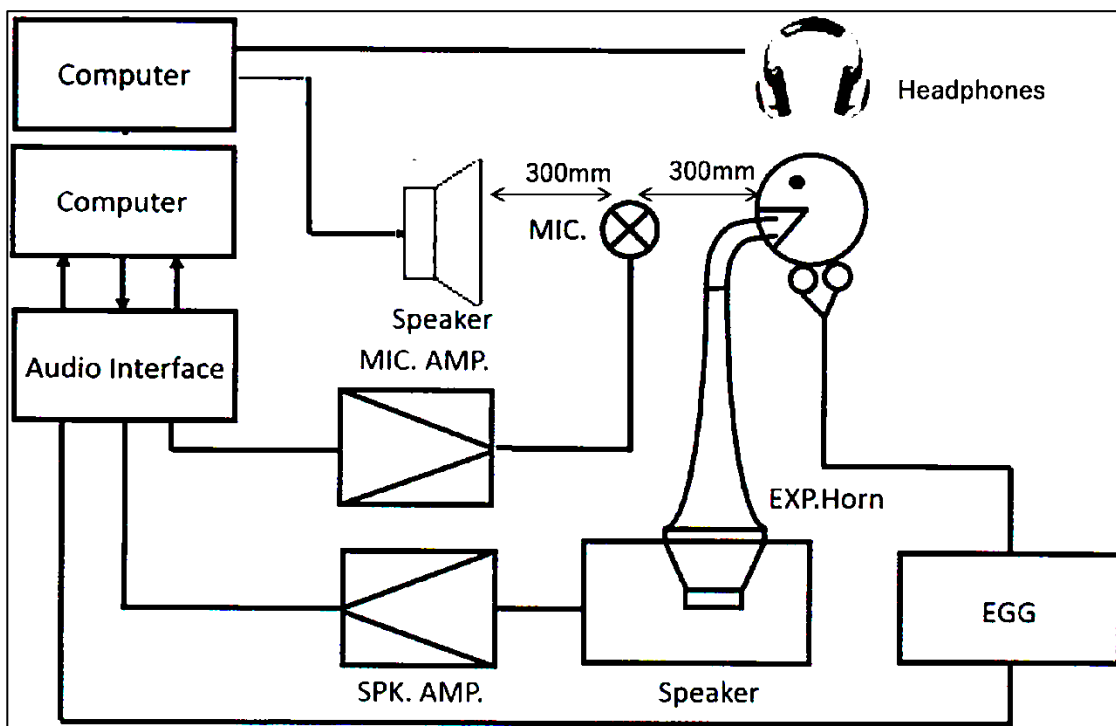


図 2.1：本章における実験ダイアグラム

なお、声帯基本周波数が一定な部分のみ分析し、プログラム上それ以外を自動でカットした。分析音声の時間長は 67~207 ms (平均 125 ms) だった。

2.3. 分析 1 - 第 1,2 声道共鳴周波数の比較

1 つ目の分析は、歌手間における第 1,2 声道共鳴周波数の比較である。参照音の有無が実験被験者の声道共鳴周波数へ与える影響を定量的に分析し、結果を今後の章に繋げるための参考とする。

なお、本実験で得られた第 1,2 声道共鳴周波数は、口へ十分に雑音が入っていない、または励振しきっていないことにより声道特性が不自然な事例が見られ、母音によってその差がある程度見られた。そのため本章では、声道特性が不自然でないものを目視で選択して母音と声道共鳴周波数の組み合わせを選別した。それによって、第 1 声道共鳴周波数では母音/a, e, o/, 第 2 声道共鳴周波数では母音/a, i, o/の測定データを分析することとした。その後、実験被験者と参照音の声道共鳴周波数について、実験条件ごとでの違いを比べた。その結果、「提示方法 (2 種)」「音高変化パターン (2 種)」「音高 (10 音)」の条件間による明確な差を判断できなかつたため、それらの実験条件を考慮せず、「母音」「参照音の有無 (3 条件)」のみの条件による声道共鳴周波数の変動を箱ひげ図として比較した。ただし、各音高で得られた測定データ (提示方法 2 種×音高変化パターン 2 種×反復回数 2 回 = 計 8 個) から、各々の中央値に近い 4 個のみを用いる。これによって結果の偶然性を抑え、アマチュアでも声道共鳴周波数の差異を比較できるよう考慮した。プロでない被験者の声道共鳴周波数は安定せず、再現性が十分でないためである。

すなわち、それぞれの条件群 (「母音」「参照音の有無 (3 条件)」) の収録音数は 40 個 ([1 音あたり 4 個] × 10 音高) である。また、「参照音の有無 (3 条件)」3 群の変動を定量的に比較するため、第 1,2 声道共鳴周波数それぞれで、ノンパラメトリックでも分析可能な Kruskal-Wallis 検定を用いた。多重比較検定は 3 群以上の比較で有意な場合に群間差を検定できる方法である。本分析では、ノンパラメトリックでも可能な bonferroni 法で p 値を補正した後、Wilcoxon の符号付順位和検定を実施した。いずれも有意水準は 5% である。ノンパラメトリック法を用いた理由は、各条件の声道共鳴周波数の母集団について 1 標本 Kolmogorov-Smirnov 検定を行った所、全 18 群の有意確率が 0 に近く ($p=1.08e-36$)、分布が正規性を満たさなかつたためである。Kruskal-Wallis 検定と多重比較検定は、いずれも matlab の組み込みプログラムを使用した。

2.3.1. 分析 1 の結果

「参照音の有無 (3 条件)」の違いによる実験被験者の声道共鳴周波数について、箱ひげ図として示す (図 2.2 と図 2.3)。グラフ上には参照音の声道共鳴周波数も合わせて記載する。

まず、図 2.2 の第 1 声道共鳴周波数について検討する。第 1 声道共鳴周波数は、どの母音においても、「参照音あり」が「参照音なし (1 回目)」より低下した。母音による変動の差異は見られなかつた。各母音の収録群において「参照音の有無 (3 条件)」を比較するために Kruskal-Wallis 検定を行った所、3 母音とも 5% の有意水準で有意となった。多重比較検定では、「参照音あり」「参照音なし (2 回目)」の第 1 声道共鳴周波数が「参照

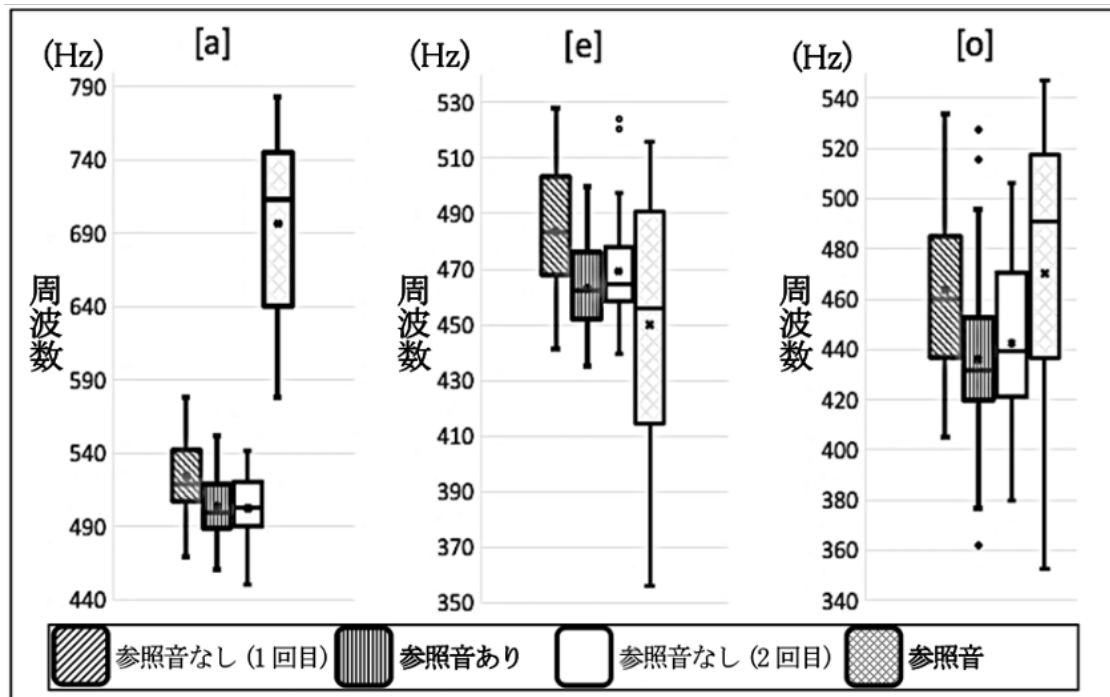


図 2.2：発声形式ごとにおける第 1 声道共鳴周波数

音なし (1 回目)」より有意に小さいことがわかった。また、有意差はないものの「参照音なし (2 回目)」は「参照音なし (1 回目)」より小さく、「参照音あり」より大きい。いずれの変動も全母音で共通している為、統一的な変動である可能性があるが、参照音の声道共鳴周波数と相関しているようには見えない。特に母音/a/では、実験被験者と参照音で第 1 声道共鳴周波数が大きく異なっている。「参照音なし (2 回目)」は、参照音の影響を受けて「参照音なし (1 回目)」と異なった可能性があるが、統計的に有意でないため確証がない。

一方、図 2.3 の第 2 声道共鳴周波数は母音によって変動の傾向が変化した。母音/a/は「参照音あり」で「参照音なし (1 回目)」より減少し、「参照音なし (2 回目)」で再び「参照音なし (1 回目)」に近い値をとった。Kruskal-Wallis 検定では 5%有意水準で有意となり、多重比較検定を行った所「参照音あり」の第 2 声道共鳴周波数が「参照音なし (1 回目)」と「参照音なし (2 回目)」より有意に減少していることがわかった。母音/i/は「参照音あり」で「参照音なし (1 回目)」より値が上昇し、更に「参照音なし (2 回目)」も「参照音あり」と同じような分布だった。Kruskal-Wallis 検定では 5%有意水準を満たし、多重比較検定を行った所「参照音あり」と「参照音なし (2 回目)」の第 2 声道共鳴周波数が「参照音なし (1 回目)」より有意に大きかった。母音/o/は 3 群間であまり変動せず、Kruskal-Wallis 検定では 5%有意水準で有意でなかった ($p=0.1$)。

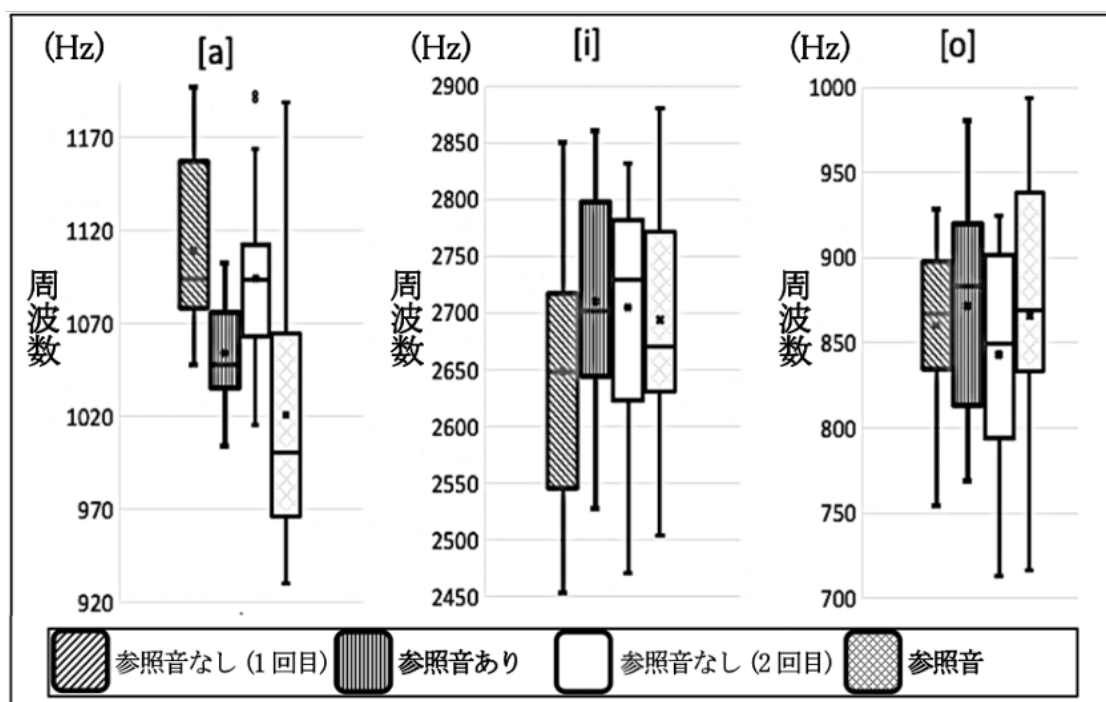


図 2.3：発声形式ごとにおける第 2 声道共鳴周波数

2.3.2. 分析 1 の検討

今回の実験では、第 2 声道共鳴周波数のみ、参照歌手の方へ変動していた。すなわち、第 2 声道共鳴周波数のみ先行仮説を支持する結果となった。また、母音/o/での比較から、歌手間の第 2 声道共鳴周波数が元々より近い場合、変動として現れないことも示唆された。独唱時の声道共鳴周波数が近い場合は調節する必要がない可能性がある。第 1 声道共鳴周波数は参照音の声道共鳴周波数に調節していなかったが、参照音によって統一的な変動が発生した。第 2 声道共鳴周波数を変動させる影響で変化した可能性もあるが、実験被験者固有の特徴である可能性もあり、本分析の結果からは不明瞭である。

2.4. 分析 2 - 歌手間における第 1,2 声道共鳴と声帯基本周波数の比較

主要な特徴量（第 1,2 声道共鳴周波数と声帯基本周波数）について、実験被験者が参照歌手へどのように調節しているかを把握する。前述の通り、同一音高では「ピッチの正確さ」を判断する音響特徴量が、声帯基本周波数でなく「スペクトルの情報」との示唆があり、本分析によって、同一音高でのピッチ知覚の手がかりを掴む。なお、この示唆の検討のため、スペクトルに関連する代表的指標であるスペクトル重心も併せて検討する。スペクトル重心は音声成分から抽出するためスピーカー提示で厳密に比較できないが、マイクロフォンが実験被験者の口に近いことからある程度考慮できるとみなして分析する。母音は分析 1 と同様、声道特性が第 1,2 声道共鳴周波数共により安定して抽出できているものを選択し、/a, o/の測定データのみを分析した。また、曲発声は、実験被験者と参照歌手の声道共鳴周波数を十分に同期できていないため断念した。分析手順としてはまず、比較する測定データの声帯基本周波数について、実験被験者と参照歌手の周波数差を cent で算出する。次に、第 1,2 声道共鳴周波数と音源の倍音成分番号の組み合わせ（resonances tuning, RT）を確認し、実験被験者と参照歌手で一致する場合に「第 1,2 声道共鳴周波数が近接している」と判断する。これにより、「参照音の有無」「（参照音がある場合は）RT 一致／不一致」という区分で、声帯基本周波数差の平均と標準偏差をそれぞれ算出し、比較した。

2.4.1. 分析 2 の結果

実験被験者と参照音における声帯基本周波数差の平均について、結果を図 3.9 に示す。「参照音の有無 3 条件・提示方法（スピーカー／ヘッドフォン）」、「RT 一致の有無 3 条件」で場合分けしている。比較のため、「参照音なし」でも参照音との RT を確認する。参照音なし（1 回目）の値は、提示方法によらず値を平均させている。図 5 について「参照音あり」に着目すると、RT 一致があるかで、声帯基本周波数差の平均が異なる。RT 一致した条件群では「参照音なし（1 回目）」と比較的変わらないが、RT が一致していない条件群は、提示方法によらず大きく下降している。この傾向は、標準偏差の比較でも同様となった。RT 一致の有無が声帯基本周波数の調節に影響を与えた可能性がある。図 2.4 では、参照音ありにおける「第 1 声道共鳴周波数 RT の一致群」が「第 2 声道共鳴周波数 RT の一致群」と同程度の値を取っているが、分析 1 から、参照音へ変動していないデータが多かったことがわかっている。すなわち、RT の一致が意図的な調節ではないものの、結果的に声帯基本周波数の調節へ影響を与えていることになる。なお、「参照音あり」における RT 一致群の声帯基本周波数差は、ヘッドフォン提示の方がスピーカー提示よりも差が大きくなっている。これは、ヘッドフォン提示がスピーカー提示に比べて通常の複数人歌唱に即した形でなく、自身の発声と参照歌唱音を比較しづらいことに起因し得る。

図 2.4 について、「参照音あり」における「RT 一致の有無」により着目するため、実験条件を統合して再度まとめた（図 2.5）。基本周波数差の平均を見ると、「参照音なし」「参照音あり・RT 一致」は基本周波数差が約 20 cent だが、「参照音あり・RT 一致なし」では半分ほどに低下した。標準偏差も「参照音あり・RT 一致なし」でのみ低下した。3 条件間で基本周波数差の平均に関する Kruskal-Wallis 検定を行った所、絶対値比較（図 3.10 右）にて 5% 有意水準を下回った。Holm 法による多重比較検定では、「参照音あり・RT 一致なし」の基本周波数差の平均が、「参照音なし」「参照音あり・RT 一致」よりも有意に

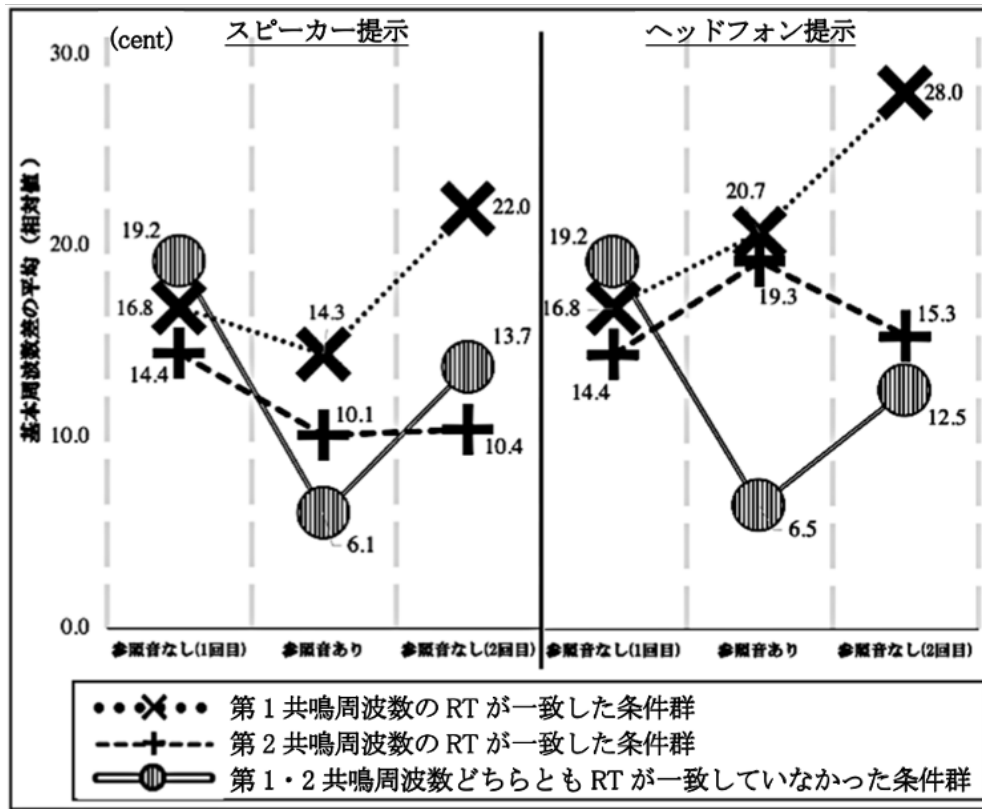


図 2.4： 実験被験者と参照歌唱音間の基本周波数差の平均

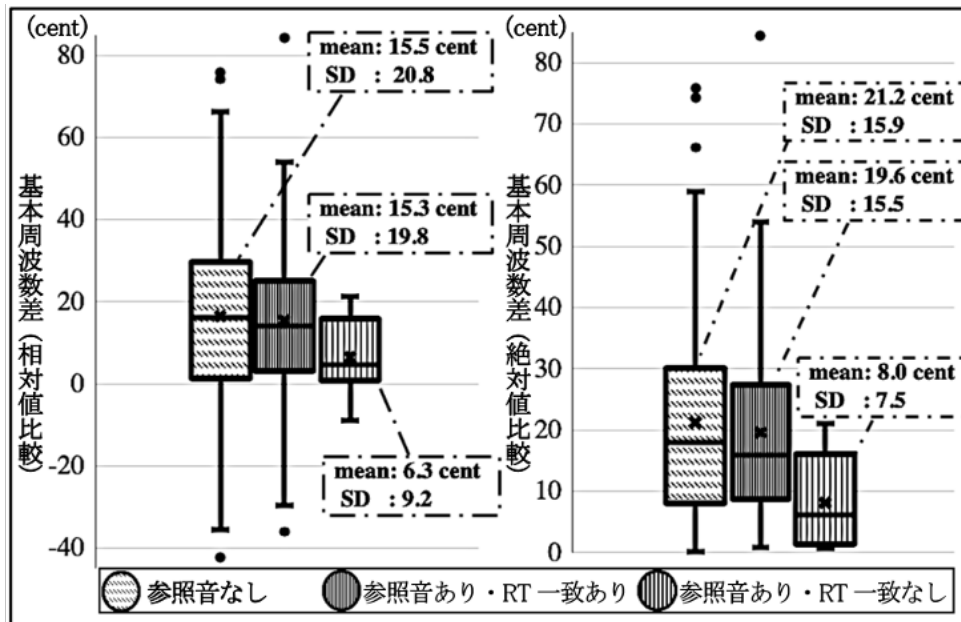


図 2.5： 実験被験者と参照歌唱音間の基本周波数差の平均（実験条件を統合）

小さかった（それぞれ $p = .01$, $p = .04$ ）。すなわち、参照音があっても、RT が一致している場合は基本周波数差がほとんど変化していなかった。被験者と参照音の声道共鳴周波数が近い場合、声帯基本周波数の調節が見られないことになる。

図2.5の結果をイメージできるように、実際の測定群から2つの発声データの例を引用して参考にする(表2.1)。表2.1に、2つの発声データにおける主な音響特徴量を記載している。2つの発声データは実験条件が同じだが、第2声道共鳴周波数のRTが参照音に一致したか否かで異なったものである。8セット目の測定は第2声道共鳴周波数のRTが参照音と同じ6(=近接する倍音が第6次倍音)だが、5セット目の測定はRTが5で一致していない。周波数特性を比較しても判断できる(図2.6)。この2つの測定の基本周波数差を表2.1より確認すると、8セット目の測定は-8.3 centだが、5セット目の測定は-1.4 centとより小さい。これは、の結果に即したものとなっている。

2.4.2. 分析2の検討

「参照音あり」の条件でRT一致が無い場合、基本周波数差の平均と標準偏差が有意に減少した。「参照音なし」と「参照音あり(RT一致あり)」で声帯基本周波数に差が無いことは、実験被験者が声帯基本周波数を調節していないと解釈できる。実験被験者は「参照音あり」の際、第1,2声道共鳴周波数と声帯基本周波数のどちらかを参照音の方へ調節している可能性もある。なお、先行研究によると、800 Hzまでの通常歌唱の周波数範囲では、±14 centで許容され[85]、大抵17 cent未満の差異だと聴衆にとって知覚不可能と言われる[10]。今回の差異はおおよそ17 centであり、上述の見解と合致する。また、音楽的に訓練された聴取者は、発声周波数5 centの違いを聴き取れるとも言われる[10]。本実験で共鳴周波数が一致しなかった群の基本周波数差はそれに近い値であり、被験者が意識して基本周波数を合わせていたとしたら、この差は妥当である。なお、ヘッドフォン提示でもスピーカー提示と同様の振る舞いが見られることから、「音響的な相互作用」による変動ではなく意識的な近接であると考えられる。

セット	音程	母音	サンプル時間[s]	基本周波数 [Hz]	第1共鳴周波数 [Hz]	第1 RT	第2共鳴周波数 [Hz]	第2 RT	基本周波数差 [cent]	スペクトル重心 [Hz]
8th_aG3	G3	'a'	0.1	196.5	470.3	2	1099.3	6	-8.3	587.3
5th_aG3			0.2	197.3	574.8	3	1037.1	5	-1.4	639.4
N_aG3			3.2	197.4	739.7	4	1105.0	6		546.7

表 2.1: 発声データ2つにおける音響特徴量の比較。どちらも音高 G3 をヘッドフォン提示の参照音(N_aG3)に合わせた発声だが、第2声道共鳴周波数のRTが参照音に一致したかが異なる。8セット目(8th_aG3)は第2声道共鳴周波数のRTが参照音と同じ6(=近接倍音が第6次倍音)だが、5セット目(5th_aG3)はRTが5で一致していない。

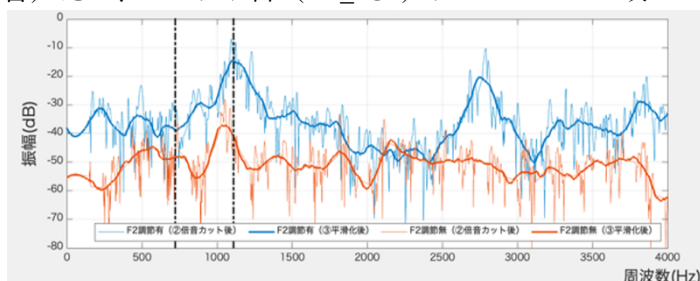


図 2.6: 発声データ2つの比較例(周波数特性の比較、平滑化)。声帯基本周波数差を表2.1より確認すると、8セット目の測定(8th_aG3)は-8.3 centであるのに対し、5セット目の測定(5th_aG3)は-1.4 centとより小さい。これは、図2.1の結果に即したものとなっている。

2.5. 第2章のまとめ

同一音高の複数人歌唱における、個々の歌手の音響特徴量を厳密に抽出する実験手法を検討、実施した。複数回にわたる外部音響励振法の抽出の結果、安定して第1,2声道共鳴周波数を抽出できた母音は/a, o/であった。2.3節の分析1で発声形式間における第1,2声道共鳴周波数の変動を調べた所、実験被験者は、第2声道共鳴周波数のみを参照音の歌手へ変動させていた。また、2.4節の分析2より、第1,2声道共鳴周波数と声帯基本周波数の関係を調べた所、第1,2声道共鳴周波数の調節がない場合、声帯基本周波数差が有意に小さくなることもわかった。これらの結果は、「声を合わせる」という目的において、声帯基本周波数よりも第1,2声道共鳴周波数の調整が重視される可能性を示唆する。これらの予測はまだ参考に過ぎないが、今回の実験設定を踏まえてより規模の大きい実験へ移るとともに、引き続き結果について検証していく。

第3章 同時発声による歌唱測定実験を通じた第1,2声道

道共鳴周波数の比較

3.1. はじめに

本章は、第2章で得られた実験設定や分析結果に関わる知見を踏まえた上で、実験設定を改良した同じ趣旨の測定実験を実施する。具体的には実際の発声シーンに近い同一音高・同時発声の歌唱を想定し、実験参加者を4人まで増やした上で、歌手同士の第1,2声道共鳴周波数に関する振る舞いを主に比較する。

3.2. 実験設定

本実験の実験ダイアグラムを図3.1に示す。測定は全て無響室で実施し、独唱を始めに収録し、その後2人での同時発声を収録した。同じく外部音響励振法のため、被験者の口にホーンが置かれた。応答信号の収録はコンデンサー型指向性マイクロフォンを用い、口唇から100 mm離れたところに配置した。また、基本周波数の抽出にEGGを利用するため、1人の被験者の喉頭下部へ電極対を装着した。実験器具の配置写真や実験イメージを図4.2に記載する。被験者は4人（Baritoneのプロ独唱歌手1人、Tenorのアマチュア合唱歌手3名）で、プロ歌手は「被験者2」に相当する。発声方法は、音高が変化しない場合（定常発声）と変化する場合（曲発声）とした。発声音域は地声声区C3-E4内の6音高とした。以下を1セットとし、指定する母音・音程で順番に収録した。

- 定常発声：C3, D3, E3, A3, C4, E4（6音）×2母音（/a, o/）、12試行
- 曲発声：コンコーネ Op.1 冒頭8小節2母音（/a, o/）、2試行

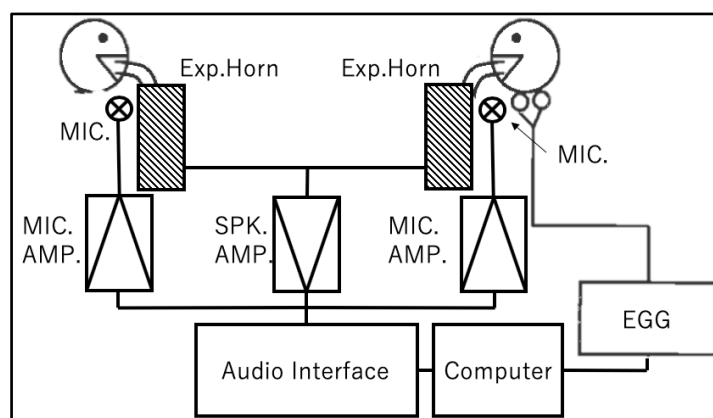


図3.1：本章における実験ダイアグラム



図 3.2：実験イメージ。独唱を始めに収録し、その後 2 人による同時発声を収録する。

3.3. 分析 1 - 第 1,2 声道共鳴周波数の比較

3.3.1. 測定データの全体比較 - 分析 1

実験被験者の第 1,2 声道共鳴周波数について、独唱時と同時発声（重唱）時とを比較する。横軸に声帯基本周波数、縦軸に声道共鳴周波数とし、被験者の組み合わせ（6 組）、第 1,2 声道共鳴周波数の 2 種、母音 2 種/a, o/で合計 24 のグラフとして表示し、全体的な傾向を俯瞰する。4 群（=被験者 2 人×独唱／重唱 2 種）の変動を定量的に比較するため、第 1,2 声道共鳴周波数それぞれでノンパラメトリック法による一元配置分散分析（Kruskal-Wallis 検定）と等分散性の検定を行う。Kruskal-Wallis 検定は、「各群の標本データが同じ母集団から派生する」という帰無仮説を検定する。有意水準 5%で棄却された場合、各群のいずれかで平均が異なるペアが存在し、多重比較検定でペアを把握する。等分散性の検定は「各群の標本データが同分散である」という帰無仮説を検定する。有意水準 5%で棄却された場合、各群いずれかの分散分布が異なる。Kruskal-Wallis 検定・等分散性で有意差が生じた組み合わせのうち、独唱時と同時発声時の関係に差異が生じた場合のみ着目する。結果を図 3.3 に記載する。発声方法の有無（定常／曲）、被験者の組み合わせで区別して表示している。また、第 1,2 声道共鳴周波数について Kruskal-Wallis 検定・等分散性の検定を行った結果を表 3.1 に記載する。図 3.3 や表 3.1 より、同時発声時に第 2 声道共鳴周波数が変動する組み合わせが多い。Kruskal-Wallis 検定でも、多くの第 2 声道共鳴周波数が近接している。なお、第 1 声道共鳴周波数も一部の組み合わせで変動している。（例：定常発声・曲発声、被験者 1 と被験者 2）第 1 声道共鳴周波数は第 2 声道共鳴周波数が変動している場合に変動している。また、等分散性の検定より、一部の組み合わせで、同時発声時に第 2 声道共鳴周波数の分散が小さくなっている。これらの組み合わせでは分散や標準偏差が小さくなっており、第 2 声道共鳴周波数が音高によらず同値（1 kHz 前後）となっている。曲発声も定常発声と同じ傾向となっているが、定常発声よりも変動やばらつきが大きく、音高の変動に応じて声道共鳴周波数がより変動している。

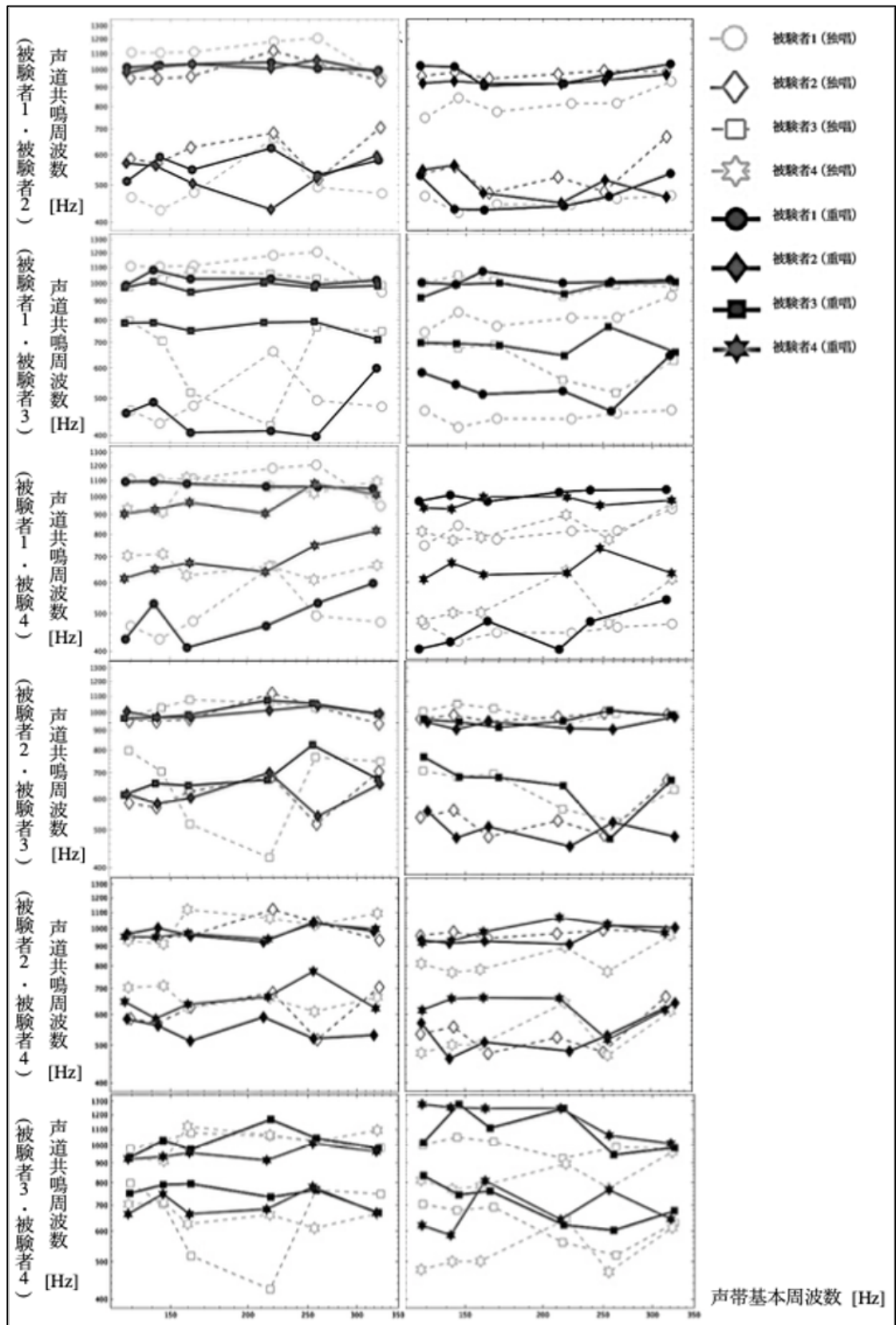


図 3.3 : 実験被験者 2 人ごとの声帯基本周波数と第 1,2 声道共鳴周波数の関係

Kruskal-Wallis 検定 (多重比較検定)	定常発声: 被験者1・2 (第1共鳴周波数, p=0.039), 被験者2・4 (第1共鳴周波数, p=0.013) 曲発声: 被験者1・2 (第1・2共鳴周波数, p=0.025, 0.004), 被験者1・3 (第2共鳴周波数, p=0.003), 被験者1・4 (第2共鳴周波数, p=0.001), 被験者2・4 (第2共鳴周波数, p=0.015), 被験者3・4 (第2共鳴周波数, p=0.001)
等分散性の検定	定常発声: 被験者1・2 (第2共鳴周波数, p=0.006), 被験者1・3 (第2共鳴周波数, p=0.02), 被験者1・4 (第2共鳴周波数, p=0.030) 曲発声: 被験者1・2 (第2共鳴周波数, p=0.017), 被験者2・4 (第2共鳴周波数, p=0.045)

表 3.1: Kruskal-Wallis 検定と等分散性の検定で有意水準 ($p=.05$) を下回った被験者の組み合わせ

3.3.2. 発声条件による影響を把握するための統計比較 – 分析 1

声道共鳴周波数の特徴量をより細分化させ、それらの特徴量に複数の統計検定を実施し、独唱時と同時発声時の各被験者の変動を比較する。それにより、声道共鳴周波数の変動について、被験者に実験条件や変位量に体系的な違いが発生するか比較する。なお、本分析では母音/a/のみを実施する。比較する声道共鳴周波数の特徴量は下記とする。

- 独唱／重唱における声道共鳴周波数の平均
- 独唱／重唱における他被験者との声道共鳴周波数の差分
- 独唱／重唱における他被験者との声道共鳴周波数の標準偏差

それぞれ、声道共鳴周波数の平均、変動の相対変位、絶対変位を比較する。周波数差と標準偏差は、計算時に対象被験者の声道共鳴周波数を除算し、周波数の増減による影響を受けないようにする。使用する統計検定は「Wilcoxon の符号順位検定」「等分散の検定」「2 標本コルモゴロフ・スミルノフ検定 (2 標本 KS 検定)」の 3 つとする。それぞれ、対象となる特徴量の標本差異・分散の差異・分布の差異を確認する。Wilcoxon の符号順位検定は、「独唱時と同時発声時の各標本差が、中央値ゼロの分布から派生する」という帰無仮説を検定する。有意水準 5% で棄却された場合、2 標本の中央値に差異が生じる。ただし、標本に対応がある必要があるため、声道共鳴周波数の平均を比較する際のみ「Wilcoxon の順位和検定」を使用する。2 標本 KS 検定は、「独唱時と複数歌唱時の標本データにおいて、それぞれの母集団の確率分布が等しい」とする帰無仮説を検定する。有意水準 5% を下回った場合、2 標本が同じ分布でない。「Wilcoxon の符号順位検定 (Wilcoxon の順位和検定)」で有意でない場合に 2 標本 KS 検定が有意となった場合、分布形状に差が生じることとなる。

結果を表 3.3、表 3.2 にまとめて記載する。表 3.3、表 3.2 は、統計検定と比較する声道共鳴周波数の特徴量ごとで各被験者に対する検定結果を記載し、有意確率 (p 値) のみを記している。表 3.2 より、特に変動に影響をうけている体系的因子として、曲発声での第 2 声道共鳴周波数がある。この条件では、3 種類の統計検定、3 つの比較特徴量・被験者の内、有意確率が有意水準を下回っている検定結果が多い。曲発声での第 2 声道共鳴周波数は 4.2 節でも変動が確認されたため、今回の実験条件の中で、特に声道共鳴周波数が変動しやすい条件であることが示唆される。2 つの声道共鳴周波数同士を見比べると、第 1

統計検定		第1共鳴周波数							
		定常発声				曲発声			
		被験者1	被験者2	被験者3	被験者4	被験者1	被験者2	被験者3	被験者4
Wilcoxonの順位和検定	平均(①)	0.816	0.152	0.443	0.617	0.271	0.301	0.301	0.007
Wilcoxonの 符合順位検定	歌手間の差分(②)	0.912	0.079	0.420	0.984	0.008	0.056	0.537	0.028
	歌手間の標準偏差(③)	0.71	0.031	0.215	0.586	0.012	0.012	0.420	0.003
等分散性の検定	平均(①)	0.719	0.555	0.006	0.313	0.007	0.297	0.993	0.665
	歌手間の差分(②)	0.243	0.240	0.024	0.714	0.977	0.474	0.495	0.999
	歌手間の標準偏差(③)	0.166	0.465	0.953	0.980	0.786	0.185	0.856	0.851
2標本KS検定	平均(①)	0.404	0.404	0.603	0.812	0.078	0.603	0.603	0.019
	歌手間の差分(②)	0.709	0.039	0.425	0.979	0.014	0.218	0.709	0.098
	歌手間の標準偏差(③)	0.709	0.039	0.098	1.000	0.039	0.218	0.709	0.218

表 3.3：被験者ごとにおける第 1 声道共鳴周波数の特徴量比較結果
(検定結果の有意確率のみ記載)

統計検定		第2共鳴周波数							
		定常発声				曲発声			
		被験者1	被験者2	被験者3	被験者4	被験者1	被験者2	被験者3	被験者4
Wilcoxonの順位和検定	平均(①)	0.018	0.271	0.152	0.152	0.001	0.015	0.714	0.001
Wilcoxonの 符合順位検定	歌手間の差分(②)	0.103	0.060	0.537	0.420	0.000	0.000	0.000	0.005
	歌手間の標準偏差(③)	0.157	0.018	0.349	0.145	0.000	0.002	0.002	0.018
等分散性の検定	平均(①)	0.002	0.014	0.449	0.058	0.205	0.149	0.057	0.312
	歌手間の差分(②)	0.161	0.000	0.323	0.354	0.000	0.016	0.335	0.023
	歌手間の標準偏差(③)	0.913	0.000	0.844	0.498	0.000	0.047	0.110	0.003
2標本KS検定	平均(①)	0.001	0.039	0.404	0.078	0.000	0.003	0.812	0.001
	歌手間の差分(②)	0.098	0.014	0.709	0.425	0.000	0.000	0.000	0.039
	歌手間の標準偏差(③)	0.039	0.004	0.098	0.218	0.001	0.039	0.098	0.098

表 3.2：被験者ごとにおける第 2 声道共鳴周波数の特徴量比較結果
(検定結果の有意確率のみ記載)

声道共鳴周波数よりも第 2 声道共鳴周波数の方が有意水準を下回っている。また、発声形式では、曲発声の方が有意水準を下回っている。ただし、声道共鳴周波数の近接自体は発声方法によらず見られることに留意する必要がある、声道共鳴周波数の変動と実際の近接が一概に比例していない。すなわち、被験者の声道共鳴周波数の変動が必ずしも相手歌手へ調節することを意図しているわけではなく、音高・メロディの変化などに伴って偶発的に声道共鳴周波数も変位している可能性も考えられる。その他の比較した特徴量や統計検定では体系的な差異が見えず、被験者によって結果が大きく異なっている。例として、定常発声での第 2 声道共鳴周波数を着目した場合、被験者 2 は、等分散性の検定や 2 標本 KS 検定で比較した特徴量に差異が発生しており、「声道共鳴周波数の平均・変動の相対/絶対変位」という指標で分散や分布形状が変化しているが、被験者 3 や被験者 4 はこれらの指標が有意でない。また、結果の解釈は物理指標の把握のみに留まる。

3.3.3. 声道共鳴周波数差の全体比較 - 分析 1

第 1,2 声道共鳴周波数の近接が引き込み現象に近いのか、ただ近接させているだけか、声を合わせようとした結果生じるのか、どんな音響的要因に影響され得るか分析するため、本節では測定データをより細分化する。具体的には、被験者の組み合わせごとで、独唱時 (= 別々の発声) と重唱時の発声における第 1,2 声道共鳴周波数の「差異」を比較する。第 1 声道共鳴周波数、もしくは第 2 声道共鳴周波数での差異 (相手の被験者に対する、対象被験者の周波数差) を cent として計算し、結果を図 3.4、図 3.5 として記載する。横軸は独唱時、縦軸は重唱時の差異であり、第 1,2 声道共鳴周波数・被験者ごとで区別して表示し、また被験者ごとにおける分布形状がわかるよう、縦軸・横軸にヒストグラムも合わせて記載する。まず第 1 声道共鳴周波数 (図 3.4) に着目すると、縦軸のヒストグラムでは、被験者間差が大きい範囲の形状 (厚み) が被験者ごとで違うことから、近接した測定データ数が被験者によって異なっていることがわかる。具体的に見ると、被験者 1 や被験者 4 では近接していないデータも多い一方、被験者 2 はそのようなデータが少ない。また、散布図で第 1 象限と第 3 象限が多い傾向から、元々の声道共鳴周波数が離れている被験者が、重唱時もそのままの周波数差を維持しているように見える。一方、第 2 声道共鳴周波数 (図 3.5) は被験者に寄らず全体的に近接しており、象限の偏りもないため、第 1 声道共鳴周波数の振る舞いと大きく異なる。重唱時の第 2 声道共鳴周波数における被験者間のばらつきが独唱時より有意に小さいことは 4.3.2 節で実施した等分散性の検定にて示されていたが、その様子が実際に図 3.5 から把握できる。

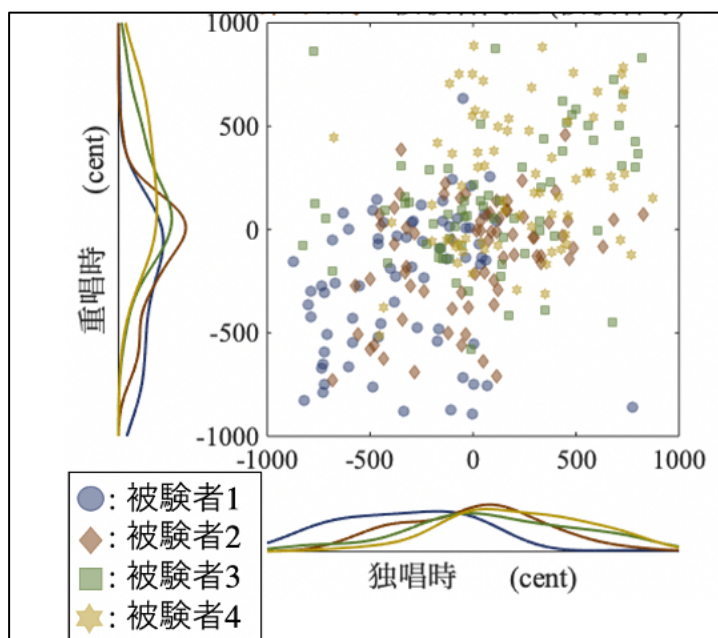


図 3.4: 発声方法 (独唱/重唱) ごとにおける第 1 声道共鳴周波数の被験者間差。縦軸のヒストグラムを見ると、被験者間差が大きい範囲の形状 (厚み) が被験者ごとに違い、近接した測定データ数が被験者によって異なっている。

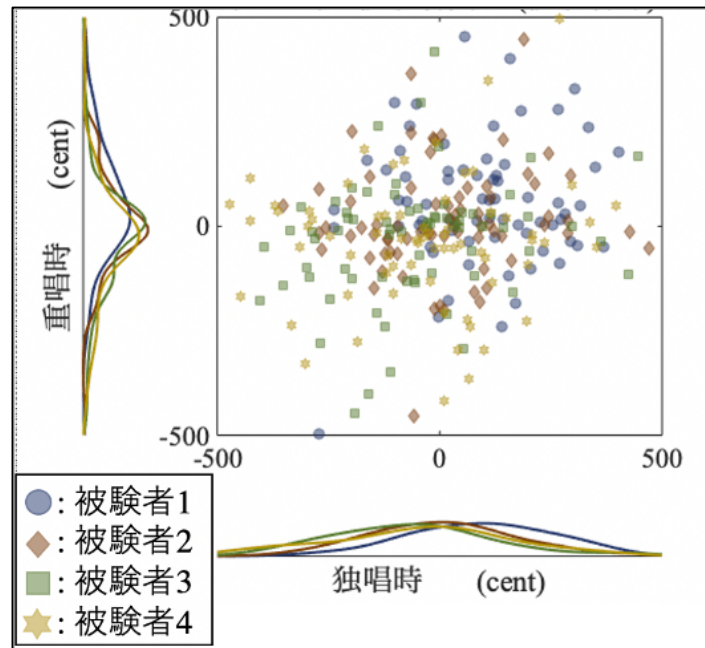


図 3.5：発声方法（独唱／重唱）ごとにおける第 2 声道共鳴周波数の被験者間差。第 1 声道共鳴と異なり、被験者に寄らず全体的に重唱時近接している。また、象限の偏りが無い。

3.3.4. 「発声形式」「母音」による比較－分析 1

本節では、発声形式（定常／曲）と母音（/a, o/）ごとで更に細分化して比較する。図 3.6 は発声形式で区分した結果、図 3.7 は母音で区分した結果をまとめている。図 3.6 より、発声形式ごとの結果はわずかに異なるものの、図 3.4 や図 3.5 で見られたような傾向と大きな差がない。細かく見るなら、第 1 声道共鳴周波数では、定常発声の方が曲発声よりもより近接しているデータが多く、特に、独唱時の周波数差が大きい場合で差がある。第 2 声道共鳴周波数では重唱時の近接データの数にあまり差がなさそうである。なお 3.3.2 節では、「曲発声時の第 2 声道共鳴周波数」において、独唱時と重唱時で最も異なる振る舞い（標本差異・分散差異・分布差異）を取ることを示唆されたが、この結果を検討するため図 3.6 を実際に見ると、独唱時の被験者間差が定常発声時より曲発声時で大きいことがわかる。このことから、曲発声では独唱時で歌手間の声道共鳴がより多様な値を持つため、重唱時における独唱時との差がより大きくなっていると考えられる。

図 3.7 も全体的に図 3.4 や図 3.5 と同様の傾向だが、母音によって近接傾向に差がある。/a/母音では第 2 声道共鳴周波数、/o/母音では第 1 声道共鳴周波数がより近接している傾向にある。

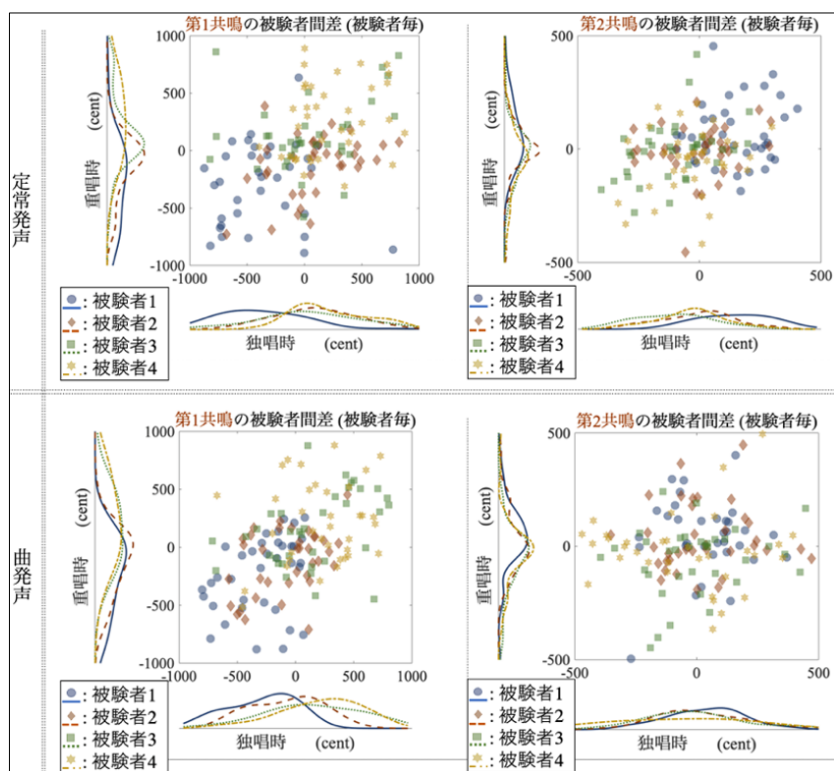


図 3.6：発声形式（定常／曲）ごとにおける第 1,2 声道共鳴周波数の被験者間差。定常発声では、第 1,2 声道共鳴周波数のどちらか、近い方に近接している場合が多かった。

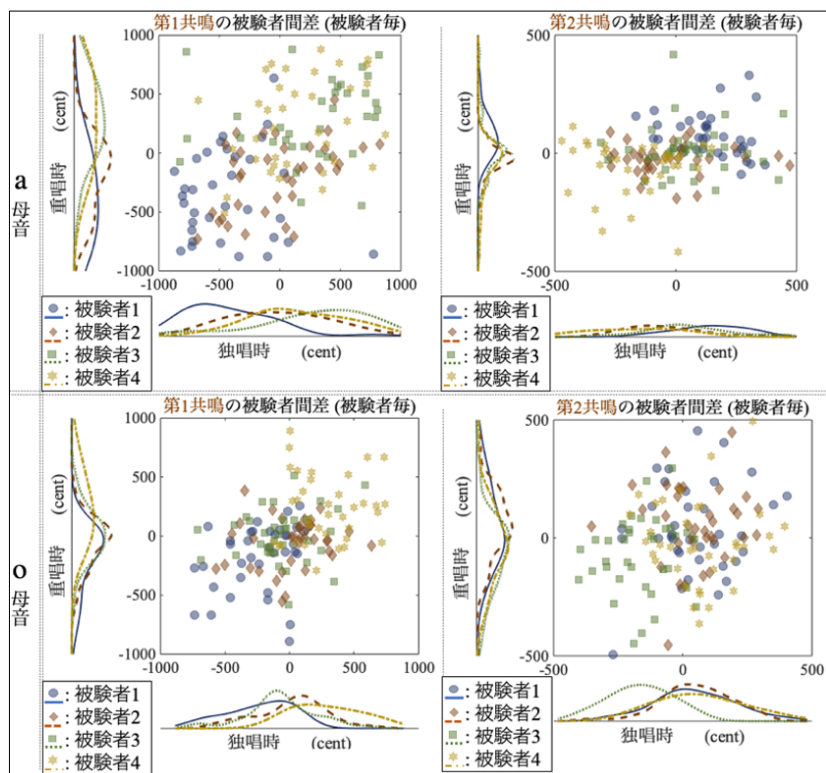


図 3.7：母音（/a, o/）ごとにおける第 1,2 声道共鳴周波数の被験者間差。/a/母音では第 2 声道共鳴周波数、/o/母音では第 1 声道共鳴周波数がより近接している傾向にあった。

3.3.5. 第1,2声道共鳴周波数同士における影響の比較 - 分析1

第1,2声道共鳴周波数が相互に及ぼす影響を把握するため、他方の声道共鳴周波数が近接しているかで細分化し、絶対値換算で比較する。まず、定常発声における結果を図3.8に記載する。図3.8より、定常発声では、どちらか一方の声道共鳴周波数が近接しない場合、他方の声道共鳴周波数が近接している傾向にある。具体的に見ると、重唱時第1声道共鳴周波数が近接しない場合第2声道共鳴周波数が近接しやすく、第2声道共鳴周波数が近接しない場合第1声道共鳴周波数が近接しやすい。このことから、定常発声ではどちらかの声道共鳴が近接しやすいと考えられる。次に、曲発声における結果を図3.9に記載する。図3.9では、図3.8で見られたような統一的な差異が見られず、定常発声と異なる振る舞いをとっている。すなわち、曲発声の場合、片方の声道共鳴がもう片方へ影響しているわけでは無いようである。

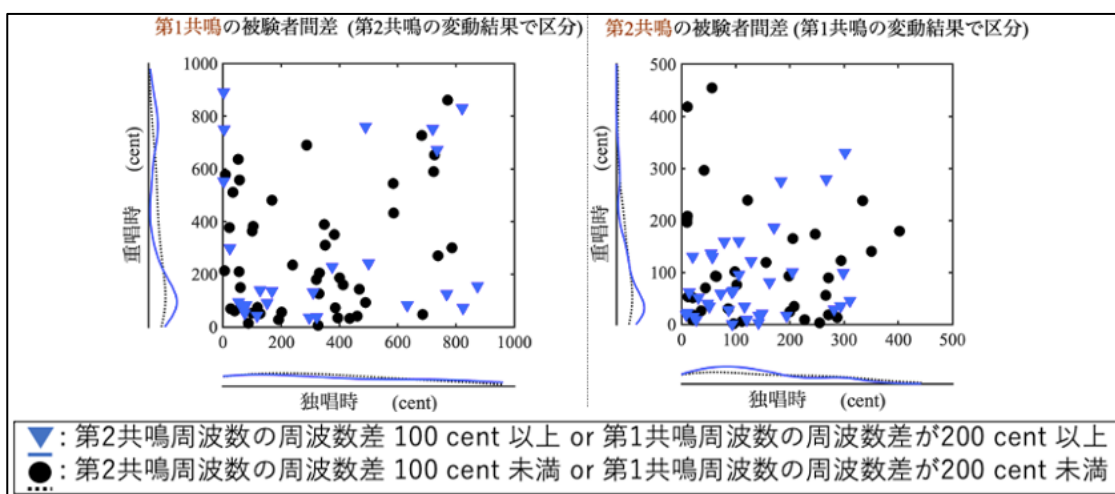


図3.8：双方の声道共鳴の変動で区分した図3.4と図3.5の結果 [定常発声・絶対値比較]。重唱時第1声道共鳴周波数が近接しない場合第2声道共鳴周波数が近接しやすく、第2声道共鳴周波数が近接しない場合第1声道共鳴周波数が近接しやすい。

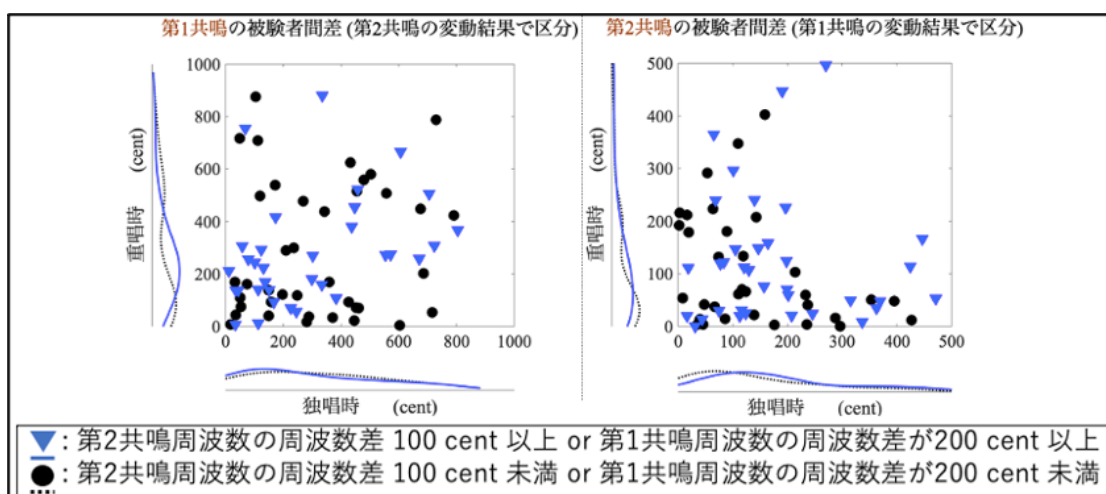


図3.9：双方の声道共鳴の変動で区分した図3.4と図3.5の結果 [曲発声・絶対値比較]。定常発声で見られたような統一的な差異がない。

3.3.6. 分析1の検討

3.3節や3.3.2節から、第1,2声道共鳴周波数の近接程度は被験者によって差があり、第1,2声道共鳴共に変動する場合、第2声道共鳴のみ変動する場合、両方共に変動しないなどパターンがわかれていることがわかった。次に3.3.3節の結果から、第1声道共鳴周波数は元々の声道共鳴周波数が離れている被験者が重唱時もそのままの周波数差を維持している一方、第2声道共鳴周波数は被験者に寄らず全体的に近接し、象限の偏りもなかった。第1声道共鳴と第2声道共鳴における結果の違いは調節箇所起因する可能性がある。第1声道共鳴は口の開きに起因するのに対し、第2声道共鳴は舌の調節に起因し、舌の調節の方が柔軟に調節しやすい可能性がある。もしくは、単純に高い周波数帯域の方が近接しやすい可能性も考えられる。

3.3.4節の結果からは、発声形式と母音に関する振る舞いについても検討した。発声形式の比較からは、独唱時の周波数差が大きい場合、定常発声の方が曲発声よりも第1声道共鳴周波数の近接データが多かった。母音の比較では、母音が持つ元々の周波数帯域も影響しており、取り得る周波数範囲が小さい声道共鳴周波数がより近接しやすいことがわかった。例えば、第1声道共鳴だと/o/母音の方がより狭い周波数帯域を持つ。また、第2声道共鳴は/a/母音の方が高い周波数帯域を持つ。

3.4. 分析2 - 第1,2声道共鳴周波数と歌手評価の比較

定常発声において発生していた第1声道共鳴と第2声道共鳴の相互作用の結果（図3.8）をより探るため、定常発声時のみ実施した歌手評価の区分によって図3.8を細分化する。評価の高低で場合分けし、結果がどのように変動するかを確認する。定常発声における毎回の試行後、「声を合わせられたか」を被験者に4段階尺度で評価してもらい、その結果を「歌手評価」として本分析にて用いる。「声を合わせる」という表現は合唱現場において指導者が広く用いており、同じパート内で最も目標とする用語であると判断したため評価尺度に用いた。声の「何」を合わせるか（ピッチ、音程、母音、響き、音色など）を指定していないため多義的な解釈となる一方、これらを指定しないことで、歌手同士が発声をポジティブに捉えたか、ネガティブに捉えたか検討できるとみなす。評価は、毎回の発声後、被験者が無響室内のアシスタントへ指番号で伝えた。被験者2人の一方が評価を報告する間は、他の被験者が目を瞑った。分析時は評価を標準化（平均=0、分散=1）した上、値が平均を上回る場合に「ポジティブな評価」、平均を下回る場合に「ネガティブな評価」として判断した。

3.4.1. 分析2の結果

ポジティブな歌手評価の結果を図3.10、ネガティブな歌手評価の結果を図3.11に記載する。ポジティブな歌手評価の結果（図3.10）は傾向が図3.4、図3.5に似ている一方、ネガティブな歌手評価における結果（図3.11）は、第1,2声道共鳴の周波数差がより小さくなっている。図3.8の結果も踏まえて考慮すると、ネガティブな評価となった発声では、第1声道共鳴周波数か第2声道共鳴周波数のどちらかが被験者間で大きく近接している可能性がある。

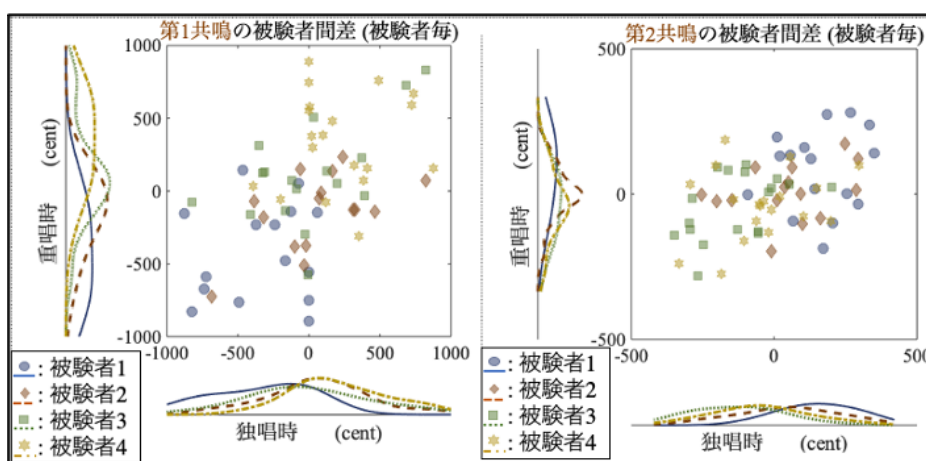


図3.10：発声方法（独唱／重唱）ごとにおける第1,2声道共鳴周波数の被験者間差
[歌手評価 - ポジティブ]

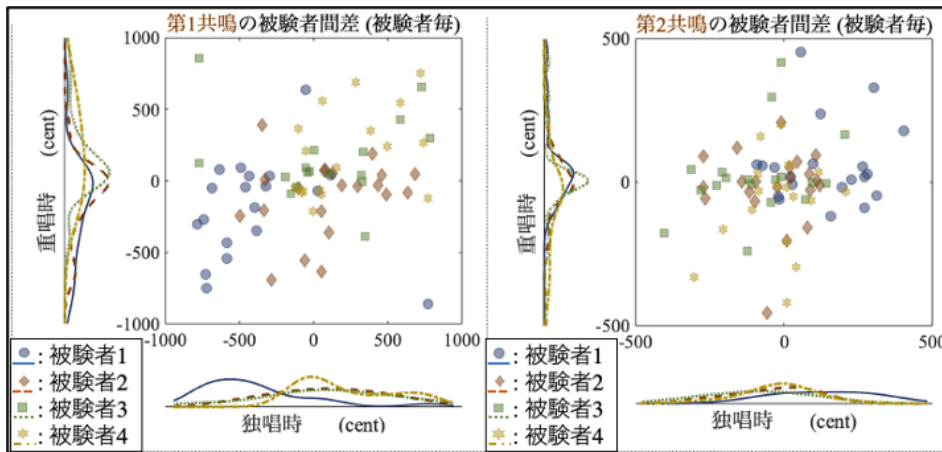


図 3.11： 発声方法（独唱／重唱）ごとにおける第 1,2 声道共鳴周波数の被験者間差 [歌手評価 - ネガティブ]。歌手評価がポジティブな場合よりも第 1,2 声道共鳴の周波数差がより小さい。

この知見をより検討するため、今度は、第 1,2 声道共鳴周波数のうちより近接している方のみを抽出して比較する。例えば、第 1 声道共鳴の差異が 100 cent、第 2 声道共鳴の差異が 200 cent の場合、より差異が小さい第 1 声道共鳴の値（100 cent）を比較に用いる。また、第 1 声道共鳴の差異が 300 cent、第 2 声道共鳴の差異が 50 cent の場合、より差異が小さい第 2 声道共鳴の値（50 cent）を比較に用いる。これにより、分析 3 で見られた第 1,2 声道共鳴同士の影響が、歌手評価と関連しているか確かめる。本結果を図 3.12 に記載する。図 3.12 より、ネガティブな評価時における重唱時の声道共鳴周波数差は、全音分よりも小さい 150 cent 以内までになり、図 3.10 や図 3.11 の結果よりコンパクトな近接となる。一方、ポジティブな評価での結果はネガティブ評価時のような傾向が見られず、どちらか一方の声道共鳴周波数が近接しているように見えない。このことから、第 1,2 声道共鳴どちらかが大きく近接した発声はネガティブな評価が多いと考えられる。

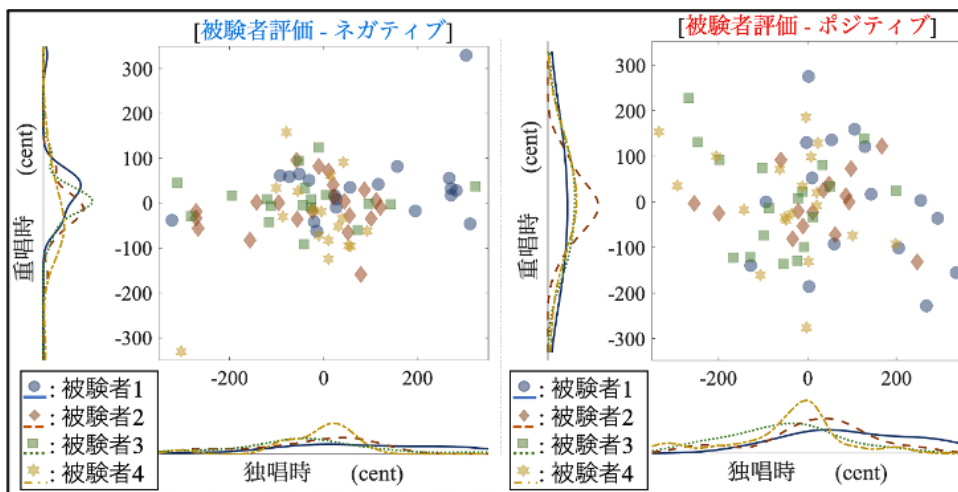


図 3.12： 第 1,2 声道共鳴周波数（より近接している方）での図 3.10 と図 3.11 の結果

3.4.2. 分析2の検討

ネガティブな評価における結果は、第1声道共鳴周波数と第2声道共鳴周波数のどちらかが過度に近接することで発生していた。この結果は、第1,2声道共鳴周波数の近接が必ずしも良い効果をもたらす訳ではないことを表す。このような結果が発生する理由を考えるならば、声道共鳴が近づくと声道共鳴周波数帯域に過度なピークが発生し、母音の明瞭性に悪影響を及ぼしていることが予想される。先行研究[33,79]では「同一音高時に第1,2声道共鳴周波数同士が近接する」とされるため、本結果が一見矛盾しているようにも思えるが、図4.10のポジティブ評価時もある程度の近接が見られていることから、被験者同士の声道共鳴周波数は引き込まれ過ぎない適度な距離にあることが、母音の明瞭性を保って歌手の望む聴感となるため必要なのかもしれない。もしくは、第1,2声道共鳴周波数以外の、今回抽出していなかった音響特徴量に結果を把握する手がかりがある可能性もある。

3.5. 分析 3 - 第 1,2 声道共鳴周波数と声帯基本周波数の比較

2.4 節と全く同様の分析を行い、第 1,2 声道共鳴周波数と声帯基本周波数との関係について比較する。再度手順を記載すると、まず実験被験者ごとの声帯基本周波数差を算出（単位：cent）した後、「resonances tuning (RT)」の一致度で区分して比較する。具体的には「参照音の有無」「（参照音がある場合）RT 一致／不一致」という区分であり、声帯基本周波数差の平均と標準偏差をそれぞれ算出する。なお、今回は定常発声の結果のみ記載する。

結果を図 3.13 に記載する。図 3.13 は、被験者・条件間における基本周波数差の絶対値であり、左から順に、「参照音なし」「参照音あり・RT が一致した場合」「参照音あり・RT が一致しなかった場合」の結果を記載している。図 3.13 より、被験者全員が「参照音あり・RT が一致しなかった場合」で基本周波数差の平均・標準偏差が低下した。こちら、全被験者の結果（3 条件間）で基本周波数差の平均に関する Kruskal-Wallis 検定を行った所、5%有意水準を下回った（ $p = .045$ ）。また、Holm 法での多重比較検定では、「参照音あり・RT 一致なし」の基本周波数差の平均が、「参照音なし」「参照音あり・RT 一致」より有意に小さかった。また、被験者によって変動の程度も異なっている。「参照音あり・RT が一致しなかった場合」の条件が全く見られなかった被験者 2 は今回の実験において唯一のプロ独唱歌手であり、被験者の属性が結果に関係する可能性もある。このことから、声道共鳴周波数が離れている場合、声帯基本周波数の平均・標準偏差が低下していると判断される。

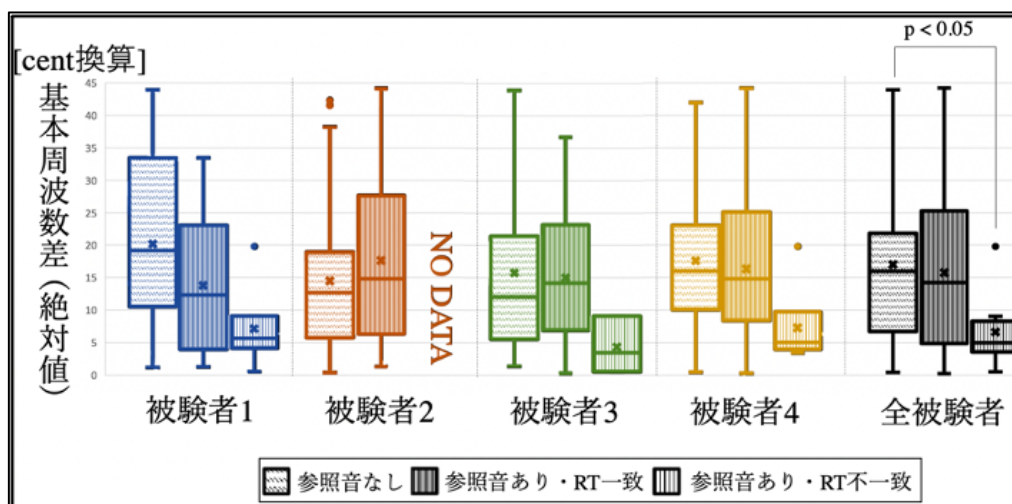


図 3.13：被験者ごとにおける基本周波数差と参照音の関係 [絶対値比較]

3.6. 第3章のまとめ

本章は、第2章で絞った実験設定を元に、第1,2声道共鳴周波数の振る舞いを把握する測定実験を男声4人の被験者で実施し、合唱歌手が別歌手の参照歌唱音を聴きながら同時発声した場合における第1,2声道共鳴周波数の振る舞い、並びに声帯基本周波数と第1,2声道共鳴周波数の関係を比較した。歌手は地声声区の音域内(C3 - E4)を歌唱し、無響室内で参照歌唱音と声の質を合わせるよう指示した。その結果、全体比較では第1,2声道共鳴周波数の両方が近接し、第2声道共鳴周波数はばらつきも影響を受けていた。歌手同士の第1,2声道共鳴周波数がそれぞれ近接しているという結果は先行的知見[33,79]に即している一方で、第2声道共鳴周波数の方が第1声道共鳴周波数より近接している傾向だった。第2章の測定実験とは、第1声道共鳴周波数も近接している点で大きく異なっている。また、第2声道共鳴周波数の変動についても、本測定実験の方が第2章の測定実験よりも近接しているデータの割合が多い。第2章では参照音が実際の歌手ではないことが、第1声道共鳴周波数を合わせづらくしている要因となった可能性がある。

また、得られた測定データをより細分化した結果、「ポジティブな歌手評価の定常発声」と曲発声における変動は類似しており、第1,2声道声道共鳴周波数それぞれで特徴的な振る舞いが見られた。本条件における第1声道共鳴周波数は、歌手同士が持つ元々の周波数差に影響を受け、周波数差が大きい歌手間で近接が見られないのに対し、第2声道共鳴周波数は被験者間による結果の差異が見られなかった。これらの振る舞いは、母音に由来する周波数差にも影響を受けていた。一方、「ネガティブな歌手評価の定常発声」では第1,2声道共鳴周波数のどちらかが強く引き込まれており、他と異なる振る舞いだった。ネガティブな評価であるため強制的な引き込みが発生している可能性がある。これらを踏まえると、歌手同士の声道共鳴周波数が強制的に引き込まれないよう注意しながら適度に第1,2声道共鳴周波数を調節させている可能性がある。第1,2声道共鳴周波数と声帯基本周波数の比較では、3.5節より、第1,2声道共鳴周波数同士の近接倍音が同じ組み合わせでない場合のみ声帯基本周波数の近接が見られた。この傾向は第2章の2.4節と完全に整合し、母音/a, o/, 被験者4人によらず一律だった。この結果から、声帯基本周波数よりも声道共鳴周波数の調整が重視される可能性がより示唆される。

第4章 大規模な歌唱測定実験を通じた音響特徴量と

歌手評価の比較

4.1. はじめに

本章は、第3章の歌唱測定実験における懸念点を洗い出し、それらを踏まえたより大規模な歌唱測定実験を実施することで、重唱における第1.2声道共鳴の近接現象について深掘りする。初めに、第3章の懸念点を順番に記す。

(i) 被験者数が少ないこと：

まず、第3章の歌唱測定実験も、第2章と比較しても依然被験者数が少ない。本結果は被験者4人の技量によって結果が左右され得る上、同じ歌手・発声条件の組み合わせでも発声する度に「良かった／イマイチ」といった精度の差が起り得る。そのような被験者内要因／被験者間要因を最小限なものにすることができれば、より客観性の高い比較を行える。そのためには、より大人数での被験者で同様の実験を実施することが不可欠と考えられる。

(ii) 歌手評価が曖昧であること：

「歌手評価」として収集した指標が4段階の指番号のみで、曖昧なままであることも検討点である。「歌手評価」を具体的に掘り下げると、よりさまざまな観点から検討することができる。例えば、声を合わせやすい歌手同士、もしくは合わせにくい歌手同士といった「歌手同士の相性」に結果が影響されて得る。

(iii) 第1.2声道共鳴周波数や声帯基本周波数以外の音響特徴量を考慮していないこと：
今までは第1.2声道共鳴周波数に絞って分析をしていたが、3.3.5節から、それ以外の潜在的な音響特徴量も聴感に深く関わっている可能性が示唆されている。実際、1.3節を見れば分かるとおり、普段歌手がアンサンブルを作る上で意識していること、あるいは発声制御において「声を合わせる」ために知覚することは、母音の感覚以外にも複数あることが予想される。そのため、第1.2声道共鳴周波数の振る舞いが他の音響特徴量へ与える影響についても検討していくことは重要である。

このような背景を踏まえた上で、本章では、第3章の実験設定の枠組みを用いた歌唱測定実験をより大人数の被験者に対して実施し、第1.2声道共鳴以外にも1.3節に記載した広範な音響特徴量を抽出して、更にオープンクエスションによる実験被験者へのヒアリングやそれに伴う複数回の収録により、より細かな歌手評価による分析を実施することとする。音響特徴量は、外部機器による個別抽出を「第1.2声道共鳴、声帯基本周波数、ピッチ関連指標、声区、声帯音源の強さ」の分析のために実施し、歌手同士の声が混ざり合う条件

下でも十分に検討できるようにする他、「発声分類、Singer's formant、発声の大きさ」については音声成分から抽出する。Singer's formant と発声の大きさについては重唱でも音声からの抽出となる分外部機器による個別抽出法と比べると厳密でないが、これらの指標は周波数変化ではなく振幅変化であるため、第 1,2 声道共鳴周波数のような周波数変化に関わる特徴量と比べるとカブリによる干渉が比較的少なく、歌手付近の収録マイクロフォンからであれば大まかな傾向を把握できると判断している。なお、音響特徴量の抽出法については 1.3 節で順番に記載している。すなわち、本実験で主に分析する音響特徴量は表 4.1 の通りとなる。なお、音高変動率 (NV) に関しては、歌い始め、途中、歌い終わりで大きく変化することを想定し、抽出する音高を 3 分割して、「初期／中期／後期」と 3 つに分けた上で比較を行っている。

音響特徴量	関係している要素	説明している節
第1声道共鳴周波数(R1)	母音	1.3.1節
第2声道共鳴周波数(R2)		
声帯基本周波数(f0)	ピッチ ・レガート	1.3.2節
メロディ音程誤差(Melodic Interval Error, MIE)		
音高変動率(Note Variability, NV)[初期]		
音高変動率(Note Variability, NV)[中期]		
音高変動率(Note Variability, NV)[後期]	声部 (発声分類 / 声種 / パート)	1.3.3節
Singer's Formantの中心周波数		
声門開放率(Open quotient, Oq)[中央値]	声区 (vocal register)	1.3.4節
声門開放率(Open quotient, Oq)[四分位偏差]		
声帯接触速度率(Contact speed quotient, Csq)[中央値]	声帯音源の強さ	1.3.5節
声帯接触速度率(Contact speed quotient, Csq)[四分位偏差]		
Singing Power Ratio (SPR)	Singer's formant の聴感	
Level of the Singer's Formant (LSF)	Singer's formant (第3,4,5声道共鳴のクラスター)	1.3.6節
統合ラウドネス(Integrated loudness)	発声の大きさ	1.3.7節
ラウドネス範囲		
ラウドネスのピークタイミング		

表 4.1：本実験で主に分析する音響特徴量、並びに関係している要素、説明している節
(表 1.1 の再掲載)

4.2. 実験設定

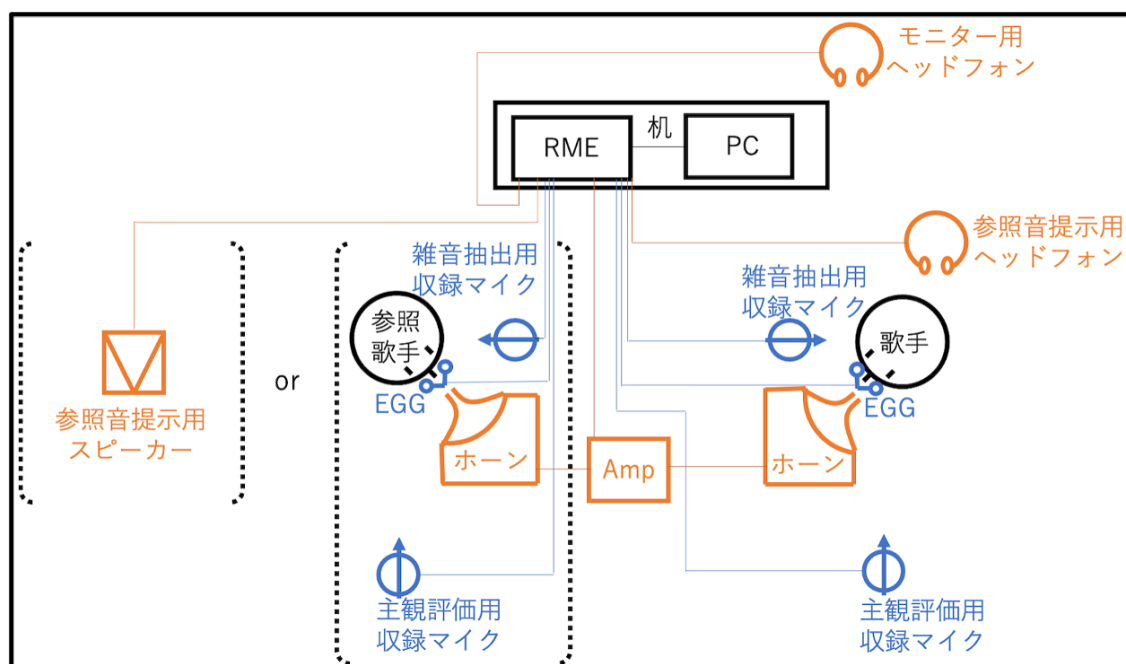


図 4.1：本章における実験ダイアグラム

本実験の実験ダイアグラムを図 4.1 に示す。外部音響励振法による応答信号の収録はコンデンサー型指向性マイクロフォンを用い、口唇から約 0.2 m 離れた位置に配置した。また、発声音を聴取実験にも利用する関係で、被験者から約 3.0 m 離れた位置に聴取音源用のコンデンサー型指向性マイクロフォンも配置した。更に EGG を利用するため、被験者 2 人の喉頭下部へ電極対を装着した。被験者は合計 39 人であり、その中から 4 人 1 組のグループを 10 組作って第 3 章とほぼ同様の試行をしてもらった。39 人の被験者属性を表 4.2 に、年齢・声学歴・合唱歴の統計情報を図 4.2 に記載する。被験者は、本大学で声楽を先行する学生とアマチュア団体の合唱歌手で構成される。発声方法も第 3 章と概ね同じで、音高が変化しない場合（定常発声）と変化する場合（曲発声）を 2 母音/a, o/で歌唱して頂いた。定常発声は、地声声区 C3-E4 内の 6 音高を 2~3 秒ほどとし、曲発声はテンポ 100、楽譜なしでコンコーネ Op.1 冒頭 8 小節としている。なお、重唱の際は声を合わせられたかについて感想をオープンクエスチョンで尋ね、その感想次第で発声をもう一度やり直しても良いとした。更に、各被験者に対し手後はほど「最も声を合わせやすかった人」を尋ねた。得た歌手評価は後の分析に利用した。これらのセットを、独唱と 2 人での同時発声（重唱）とで収録した。2 人の歌手の間隔は 2.0 m で、新型コロナ対策として対面ならないよう 45° 斜めを向くようにして発声してもらった。4 人 1 組であるため、重唱ではこの手順を 1 人辺り他 3 名の歌手と行ってもらふこととなる。更に、時間的に余裕がある一部の被験者にも、スピーカー提示やヘッドフォン提示でも実施した。これらの実施時間は 1 人辺り約 70 分である。

実験場所はレコーディングスタジオにて数日にわたり実施した。第 3 章と異なり響きのある空間で実施した理由は、初期反射が歌いやすさに起因し得ることを懸念したためだった

No.	参加グループ	声部	年齢	合唱歴	声楽歴	所属
1		Bass	21~30歳	5~10年	1~3年	本大学音楽学部声楽科
2		Tenor	21~30歳	1~3年	5~10年	Canticum Sincерum
3	1	Bass	21~30歳	5~10年	5~10年	あい混声合唱団、国立音楽大学声楽科卒業
4		Tenor	21~30歳	3~5年	1~3年	本大学音楽学部声楽科
5		Tenor	21~30歳	無	10年以上	混声合唱団鈴優会
6	2	Bass	21~30歳	無	5~10年	無所属
7		Bass	21~30歳	3~5年	3~5年	Canticum Sincерum
8		Bass	21~30歳	無	10年以上	Canticum Sincерum
9		Tenor	~20歳	無	1~3年	あい混声合唱団
10	3	Bass	~20歳	無	5~10年	東京外国語大学混声合唱団コール・ソレイユ
11		Bass	~20歳	無	1~3年	東京外国語大学混声合唱団コール・ソレイユ
12		Tenor	~20歳	3~5年	5~10年	ChoirIDEA
13		Bass	~20歳	無	1~3年	東京外国語大学混声合唱団コールソレイユ
14	4	Tenor	21~30歳	3~5年	3~5年	無所属
15		Bass	21~30歳	5~10年	10年以上	本大学音楽学部声楽科、合唱団葉桜
16		Tenor	21~30歳	無	1~3年	早稲田大学混声合唱団
17		Bass	21~30歳	無	10年以上	カaramel混声合唱団、東京医科歯科混声合唱団
18	5	Tenor	21~30歳	3~5年	3~5年	本大学音楽学部声楽科
19		Tenor	21~30歳	無	3~5年	東京外国語大学混声合唱団コール・ソレイユ
20	5, 10	Tenor	31~40歳	無	10年以上	Combinir di Corista
21		Tenor	21~30歳	5~10年	1~3年	本大学音楽学部声楽科、大学院音楽研究科修士2年
22	6	Tenor	~20歳	無	3~5年	中央大学混声合唱こだま会
23		Bass	~20歳	無	3~5年	中央大学混声合唱こだま会
24		Tenor	21~30歳	無	1~3年	横浜市立大学混声合唱団
25		Bass	51~60歳	無	10年以上	Nekko Male Choir, Ensemble PVD
26	7	Tenor	21~30歳	5~10年	3~5年	無所属
27		Tenor	21~30歳	3~5年	1~3年	scatola di voce
28		Tenor	21~30歳	3~5年	1~3年	本大学音楽学部声楽科
29		Bass	21~30歳	5~10年	1~3年	本大学音楽学部声楽科、大学院音楽研究科修士1年
30	8	Tenor	~20歳	1~3年	3~5年	本大学音楽学部声楽科
31		Tenor	~20歳	3~5年	1~3年	本大学音楽学部声楽科、合唱団葉桜
32		Bass	21~30歳	3~5年	5~10年	本大学音楽学部声楽科、合唱団葉桜
33		Tenor	31~40歳	10年以上	10年以上	樹の会、音楽大学声楽科卒業
34	9	Bass	21~30歳	5~10年	3~5年	本大学音楽学部声楽科、大学院音楽研究科オペラ専攻
35		Tenor	21~30歳	無	1~3年	東京大学混声合唱団コール・ユリゼン
36		Bass	21~30歳	無	10年以上	NovaAnima 粹声 Lux Voluntatis
37		Bass	31~40歳	1~3年	10年以上	合唱団歌の葉
38	10	Bass	21~30歳	3~5年	1~3年	本大学音楽学部声楽科、バッハカンタータクラブ
39		Bass	21~30歳	3~5年	5~10年	無所属

表 4.2： 個別の被験者属性

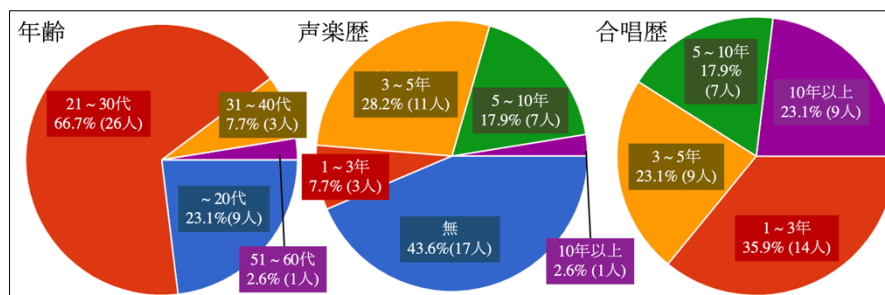


図 4.2： 歌手の年齢・声学歴・合唱歴

[158]。第 3 章のような無響室は直接音を正確に把握できる一方、普段の合唱現場に沿う場

所ではない特殊な環境で、実際に第 3 章の参加者から「歌いづらい」という意見も受けていた。また、2.6 ~ 6.0 m 距離の反射に対応する 15 ~ 35 ms の初期反射が好まれるという先行研究結果も考慮している。[86,159]。本実験の実験イメージは図 4.3 である。実験後は実験器具を消毒した。音源の収集にあたっては、matlab app designer によって GUI を作成した(図 4.4)。限られた時間で多くの実験条件を取り組めるよう、図 4.4 は音源の自動分割や自動保存、被験者や条件に応じたラベリングなどの機能とした。また、I/O 設定の自動読み込み、実験条件ごとに I/O の自動切り替えができるようにも設定している。

被験者へは自由記述式のアンケートも待機時間に回答してもらった。今回分析に用いた質問は「声が合っているときの発声についてどう思うか」というものである。これらは第 5 章で整理しており、聴感を尋ねるための評価項目として主観評価実験に利用している。



図 4.3: 実験器具の配置写真、実験の様子

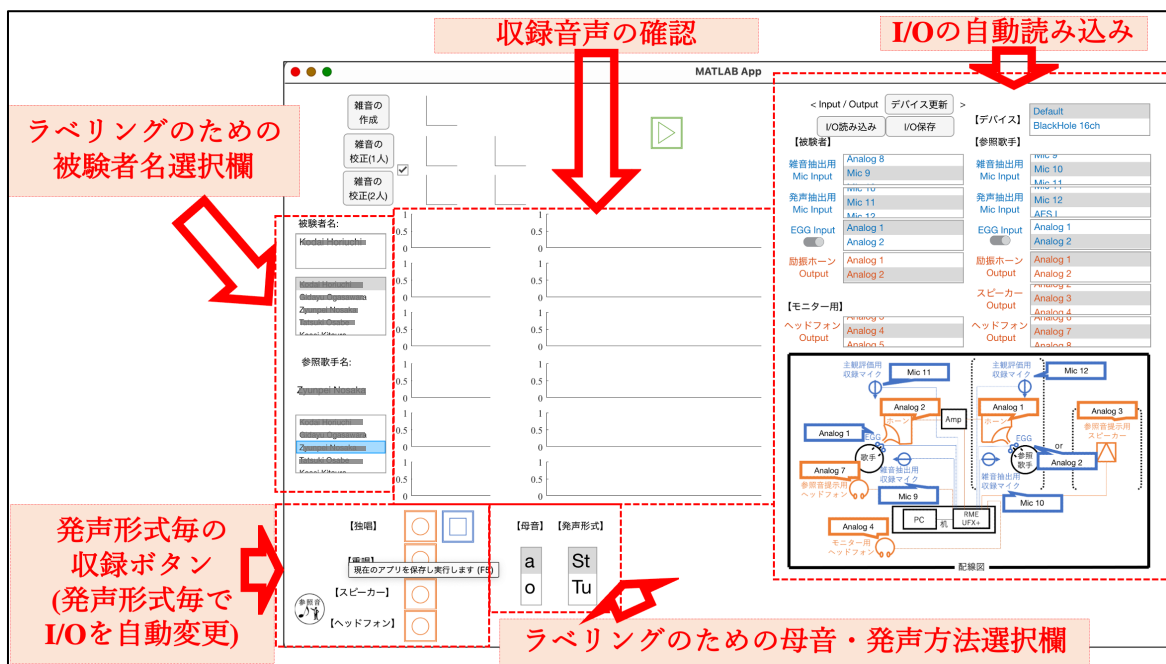


図 4.4: 測定に用いたアプリ

4.3. 分析 1 - 探索的因子分析による音響特徴量間の検討

はじめに、本測定実験における歌手・発声形式（独唱／重唱）ごとの第 1,2 声道共鳴周波数の変動を付録 C に記載する。図 C.1～図 C.9 ではさまざまなパターンがあるものの、概して重唱時における歌手同士の第 1,2 声道共鳴周波数はより近接しているように見られる。本節の分析は、第 3 章のように声道共鳴の振る舞いのみを個別に見ることが趣旨ではなく、実験設定である「歌手の属性（声部, 声区）」「発声情報（声帯音源の強さ、第 3,4,5 声道共鳴のクラスター度合）」「ピッチに関わるより多くの音響特徴量（メロディ音程誤差、音高変動率）」の調節と第 1,2 声道共鳴周波数の関係を探る。分析手法としては探索的因子分析（exploratory factor analysis, EFA）を用いる。探索的因子分析は、多くの変数の中から共通している要因（共通因子）を抽出する統計的手法である。本節では、重唱における音響特徴量の振る舞いにどのような共通因子が含まれているのか、並びに重唱の調節において第 1,2 声道共鳴周波数以外にどのような共通因子が重要なのかを把握することとする。なお、探索的因子分析の算出には JASP と R を用いた。

4.3.1. 方法 - 分析 1

始めに、検証データにおける音響特徴量の内訳を以下に示す。なお、本分析でのみ表 4.1 の特徴量だけでなく「スペクトル重心」も交えて分析に用いている。

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1) 第 1 声道共鳴 (R1) の差異 | ※ 以後 R1Diff という略記でも記載 |
| 2) 第 2 声道共鳴 (R2) の差異 | ※ 以後 R2Diff という略記でも記載 |
| 3) Singer's formant の中心周波数の差異 | ※ 以後 SF_CenterDiff という略記でも記載
※ 声部に関係 |
| 4) 声門開放率 (中央値) の差異 | ※ 以後 Oq_medDiff という略記でも記載
※ 声区に関係 |
| 5) 声門開放率 (四分位範囲) の差異 | ※ 以後 Oq_iqrDiff という略記でも記載
※ 声区に関係 |
| 6) 声帯接触速度率 (中央値) の差異 | ※ 以後 Csq_medDiff という略記でも記載
※ 声帯音源の強さに関係 |
| 7) 声帯接触速度率 (四分位範囲) の差異 | ※ 以後 Csq_iqrDiff という略記でも記載
※ 声帯音源の強さに関係 |
| 8) LSF の差異 | ※ 以後 LSFDiff_mean という略記でも記載
※ 第 3,4,5 声道共鳴のクラスター度合に関係 |
| 9) SPR の差異 | ※ 以後 SPRDiff_mean という略記でも記載
※ Singer's formant の聴感に関係 |
| 10) Loudness の差異 | ※ 以後 LoudnessDiff_mea という略記でも記載 |
| 11) Loudness Range (LU) の差異 | ※ 以後 LUrangDiff_mean という略記でも記載 |
| 12) Loudness のピークタイミングの差異 | ※ 以後 LpeakPerDiff_mean という略記でも記載 |
| 13) 基本周波数 (f0) の差異 | ※ 以後 f0Diff_mean という略記でも記載 |
| 14) 「メロディ音程誤差 (MIE)」の差異 | ※ 以後 MIEDiff という略記でも記載
※ 音高間での基本周波数差の誤差 |

- | | |
|------------------------|---|
| 15) 序盤の「音高変動率 (NV)」の差異 | ※ 以後 NV_BeginDiff という略記でも記載
※ 1 音高内での f0 の 2 乗平均 |
| 16) 中盤の「音高変動率 (NV)」の差異 | ※ 以後 NV_MidDiff という略記でも記載
※ 1 音高内での f0 の 2 乗平均 |
| 17) 終盤の「音高変動率 (NV)」の差異 | ※ 以後 NV_EndDiff という略記でも記載
※ 1 音高内での f0 の 2 乗平均 |
| 18) スペクトル重心 | ※ 以後 CentroidDiff という略記でも記載 |

探索的因子分析の手順を記す。まず前段階として、測定変数のサンプルサイズが適切か検証するために「Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) の標本妥当性」、変数間に相関が存在しているかを検定するために「Bartlett の球面性検定」を 4.3.3 節で実施する。Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) の標本妥当性は、変数間における偏相関係数の 2 乗和が 0 に近いほど共通因子が存在し得ることを利用する分析で、算出される KMO 指数が 1 に近いほど、因子分析の相関関係が適切に算出されることとなる。基準値は 0.50 未満で「不十分」、0.50 ~ 0.70 で「中程度」、0.70 ~ 0.80 で「良い」、0.80 ~ 0.90 で「非常に良い」、0.90 以上で「優秀」とされる。Bartlett の球面性検定は、測定変数の相関行列が単位行列と同じであることを検定する。単位行列は対角線成分が 1 で他の要素が 0 であるため、もし相関行列と同じであれば、測定変数間の相関が存在しないことを示す。これらの分析に続いて、共通因子の数を判断するための「平行分析 (Parallel analysis)」を 4.3.3 節で実施する。平行分析は、観測データと同じサイズの乱数データを作り、「観測データの固有値 (≡抽出した因子の情報量)」と「乱数データの固有値」の大きさを比較する手法である。平行分析によって、共通因子が意味のある情報を持っているのか誤差なのかを判別し、因子数を決定するための参考とする。

その後は、探索的因子分析の結果を 4.3.3 節に表示する。初めに、有意な因子を特定するための分析評価として、因子の要約である「負荷量 2 乗和」「寄与率」「累積寄与率 (%)」を算出する。「負荷量 2 乗和」は因子負荷量の 2 乗値の合計で、その因子で説明できる情報量とされ、各測定変数に対してどの程度の影響を与えているのかを示す。「寄与率」は、全体の分散のうちその因子で説明される情報量の割合を示す。「累積寄与率 (%)」は、その因子までの寄与率の合計である。これらによって、どの因子が重要であるか、どの程度影響を与えているかを考える。続いて、「因子構造行列」「因子パターン行列」「パス図」を作成し、共通因子の意味を解釈していく。因子構造行列は、因子分析で得られた共通因子と測定変数の相関行列を表す行列で、共通因子と測定変数の関連性を示す。因子パターン行列は、測定変数がどの共通因子に寄与しているかを表す行列である。相関が必ずしも寄与に結びついている訳ではないため、因子パターン行列により、寄与という観点で明確な関係を示す。この因子パターン行列は「因子負荷量」によって示し、本節での算出においては「最小残差法 (Minimum residuals)」を行った上、「斜交回転 (Oblimin 法)」を実施する。最小残差法は、測定変数と共通因子の差の絶対値が最小となるように算出する方法である。測定変数が共通因子と似た傾向にあるほど寄与しており、その測定変数がその共通因子によって高い割合で説明できるという解釈になる。斜交回転は、測定変数と共通因子の関連性をより明確にするために用いられる方法である。具体的には、因子間の相関を最小限に抑えるよう原点を中心に縦軸・横軸を回転させ、因子負荷

量を最大化することで、各因子が測定変数に対してより影響力を持つことができるようにする。

4.3.2. 探索的因子分析の事前分析 - 分析 1

探索的因子分析を用いる上でサンプルサイズが適切か検証するために実施した「Kaiser-Meyer-Olkin の標本妥当性」の結果を















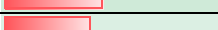




表 4.3 に示す。

表 4.3 では、実験で収集した音響特徴量ごとによる KMO 指数の算出値と、参考として棒グラフも併せて記載している。

表 4.3 より、音響特徴量ごとにおける KMO 指数のばらつきは大きいものの、全体が .50 を上回っていることが確認できた。そのため、妥当な因子分析を行うためのサンプルサイズとしては問題ないと判断する。次に変数間に相関が存在しているかを検定するために実施した「Bartlett の球面性検定」では有意水準を下回り ($p = .002$)、観測変数間に高い相関が存在することがわかった。これについては、類似する音響特徴量がいくつか存在することが原因と考えられるが、音響特徴量同士の関係性を探るために特徴量の選別は行わないこととする。

最後に、因子の数を判断するために実施した「平行分析 (Parallel analysis)」の結果である Scree plot を図 4.5 に記載する。この Scree plot では、潜在因子 (Factor) の数を横軸に、各因子に対応する固有値 (Eigenvalue) を縦軸にプロットしている。この固有値は、潜在因子が説明するデータのバリエーション (= データのばらついている度合い、標準偏差の平方) を示し、値が大きい潜在因子ほど重要度が高いものと考えられる。2 つの棒グラフは観測データ (Data)、並びに観測データと同構造を取る模擬データ (Simulated) を比較している。平行分析では、観測データと模擬データの Eigenvalue が近いような因子の数がどの程度かを判断する。図 4.5 より、模擬データの固有値を上回っている潜在因子は 3 因子で、4 因子目における観測データの固有値は模擬データとほぼ同程度であることがわかった。そのため、因子分析を行う上での因子数としては 3 か 4 のどちらかが妥当のように思われる。

表 4.3: Kaiser-Meyer-Olkin の標本妥当性

全体		0.54
第1声道共鳴周波数(R1)		0.59
第2声道共鳴周波数(R2)		0.75
声帯基本周波数(f0)		0.60
メロディ音程誤差(Melodic Interval Error, MIE)		0.43
音高変動率(Note Variability, NV)[初期]		0.53
音高変動率(Note Variability, NV)[中期]		0.47
音高変動率(Note Variability, NV)[後期]		0.55
Singer's Formantの中心周波数		0.38
声門開放率(Open quotient, Oq)[中央値]		0.59
声門開放率(Open quotient, Oq)[四分位偏差]		0.22
声帯接触速度率(Contact speed quotient, Csq)[中央値]		0.71
声帯接触速度率(Contact speed quotient, Csq)[四分位偏差]		0.56
Singing Power Ratio (SPR)		0.51
Level of the Singer's Formant (LSF)		0.83
統合ラウドネス(Integrated loudness)		0.43
ラウドネス範囲		0.40
ラウドネスのピークタイミング		0.35
スペクトル重心		0.70

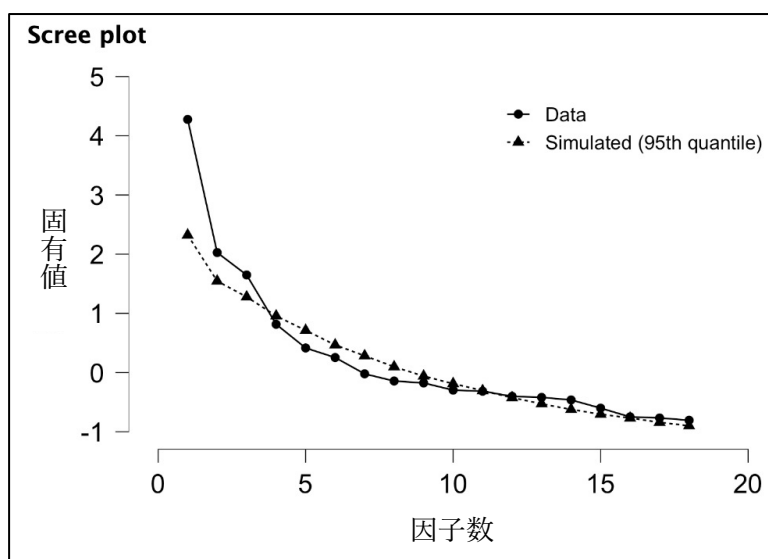


図 4. 5: 平行分析による Scree plot

なお、本分析における因子の数は、別の参考値であるモデル適合度指標（RMSEA）も鑑みた上で考慮する。RMSEA は値が小さいほど因子モデルと観測データの残差が小さく、0.05 以下で適合度が良好とみなされる。今回は 4 因子だと RMSEA=0.07 でおおよそ適合と判断される一方、3 因子では RMSEA=0.115 と少々大きい値をとった。そのため、以降の節では潜在因子の数を 4 つとした上で分析を行うこととしている。

4.3.3. 探索的因子分析の結果 - 分析 1

本節では、探索的因子分析の結果を表示する。まず初めに、有意な因子を特定するための分析評価として、因子の要約である「負荷量 2 乗和」「寄与率」「累積寄与率 (%)」を算出する。「負荷量 2 乗和」は因子負荷量の 2 乗値の合計で、その因子で説明できる情報量とされ、各測定変数に対してどの程度の影響を与えているのかを示す。「寄与率」は、全体の分散のうちその因子で説明される情報量の割合を示す。「累積寄与率 (%)」は、その因子までの寄与率の合計である。これらによって、どの因子が重要であるか、どの程度影響を与えているかを考える。この結果を表 4.4 に示す。表 4.4 より、4 つのどの共通因子も一定程度 (1 割以上, 11.3~15.8%) の寄与率であり、影響を与える割合が大きい順番として因子 2,1,3,4 であることがわかるものの、突出して影響が大きい因子はないようであり、4 因子共に重要であると考えられる。そして寄与率の合計は 57.5% であることから、分析に用いている多くの測定変数がこれら 4 因子の影響を大きく受けていることとなる。

続いて、斜交回転の影響で発生している因子間の相関を比較するために表 4.5 として示す。表 4.5 より、どの潜在因子もあまり相関が発生していないことがわかる。弱い相関が見られる因子の組み合わせは「因子 2 と因子 3」「因子 2 と因子 4」の 2 種である。

因子	負荷量2乗和	寄与率	累積寄与率(%)
Factor 1	2.841	0.158	0.158
Factor 2	2.947	0.164	0.322
Factor 3	2.535	0.141	0.462
Factor 4	2.033	0.113	0.575

表 4.4: 因子の要約

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Factor 1	-	-0.159	-0.129	-0.094
Factor 2		-	0.219	0.260
Factor 3			-	-0.018
Factor 4				-

表 4.5: 斜交回転に伴う因子間の相関

今度は、測定変数と共通因子との相関係数を因子構造行列として、因子負荷量を因子パターン行列としてそれぞれ表 4.6、表 4.7 に記載した上、パス図を図 4.6 に記載する。なお、因子構造行列と因子負荷量では、相関が 0.4 より大きい場合太字で表示、0.3 より大きく 0.4 以下の場合細字で表示している。因子構造行列と因子負荷量の解釈としては、元々の相関を示す（共通因子との相関分析結果をした場合と同じ）結果が因子構造行列であるのに対し、斜交回転によって抽出された結果が因子負荷量で、絶対値が大きい程その因子の影響が大きいこととなる。例えば「第 1 声道共鳴の差異」は第 2 因子と第 3 因子の両方で相関があるため、因子負荷量として算出した場合はより低く算出されている。一方「ラウドネスの差異」と相関のある潜在因子は第 1 因子だったため、因子負荷量として算出した場合はより高く算出されている。また、パス図は表 4.7 の因子負荷量を元に記載している。表 4.6、表 4.7、図 4.6 の因子に含まれている音響特徴量を順番に見ていくと、以下のように記すことができる。

- (i) 第 1 因子：1 音高内における声帯基本周波数の変動に関わる因子
大きく影響している音響特徴量は、「序盤・中盤・後半における音高変動率 (NV) の差異」と「Loudness の大きさの差異」だった。このことから、第 1 因子は「1 音高内における声帯基本周波数の変動に関わる因子」となる。1 音高内における声帯変動が、「Loudness の大きさ」という聴感にも影響を及ぼしていることとなる。
- (ii) 第 2 因子：第 2 声道共鳴に関わる因子
大きく影響している音響特徴量は、「第 2 声道共鳴」「LSF (=第 3,4,5 声道共鳴のクラスター度合)」「SPR (=Singer's formant の聴感)」「スペクトル重心」だった。このことから、第 2 因子は「第 2 声道共鳴に関わる因子」となる。第 2 声道共鳴の近接が、Singer's formant の大きさに関わる特徴量 (LSF, SPR) へ特に影響を及ぼしていることとなる。
- (iii) 第 3 因子：第 1 声道共鳴に関わる因子
大きく影響している音響特徴量は、「第 1 声道共鳴」「SF の中心周波数」「声門解放率 (med)」「声帯接触速度率 (med)」「Loudness のピークタイミング」だった。このことから、第 3 因子は「第 1 声道共鳴に関わる因子」となる。第 1 声道共鳴の近接は、声部・声区や声帯音源の強さが被験者間で異なるかに影響を受けている他、「Loudness のピークタイミング」という聴感に影響を及ぼしている解釈になる。
- (iv) 第 4 因子：音高間における声帯基本周波数の変動に関わる因子
大きく影響している音響特徴量は、「音高間における基本周波数差の誤差 (MIE)」「基本周波数 (f0)」「声帯接触速度率の四分位範囲 (iqr)」だった。このことから、第 4 因子は「音高間における声帯基本周波数の変動に関わる因

子」となる。音高間における基本周波数差の誤差（MIE）や基本周波数の調節は、「声帯接触速度率のばらつき（= 声帯音源の強さのばらつき）」に影響を受けているため、声帯音源の強さが同程度のばらつきである場合、異なるメロディをより正確なピッチで歌えることとなる。

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
R1Diff		0.538	0.706	
R2Diff		0.758	0.441	
SF_CenterDiff			0.695	-0.440
Oq_medDiff			0.476	
Oq_iqrDiff				
Csq_medDiff	0.393	-0.413	-0.842	
Csq_iqrDiff				0.590
LSFDiff_mean		0.756	0.342	
SPRDiff_mean		0.980		0.301
LoudnessDiff_mean	0.393			
LURangeDiff_mean				0.401
LpeakPerDiff_mean	-0.303		0.546	
f0Diff_mean		0.384		0.569
MIEDiff				0.848
NV_BeginDiff	0.698			
NV_MidDiff	0.906			
NV_EndDiff	0.909			
CentroidDiff		0.603	0.393	0.439

表 4.6: 因子構造行列

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Uniqueness
R1Diff		0.400	0.578		0.316
R2Diff		0.712			0.351
SF_CenterDiff			0.744	-0.367	0.264
Oq_medDiff			0.462		0.647
Oq_iqrDiff					0.952
Csq_medDiff			-0.786		0.145
Csq_iqrDiff				0.616	0.533
LSFDiff_mean		0.707			0.382
SPRDiff_mean		1.001			0.010
LoudnessDiff_mean	0.475				0.655
LURangeDiff_mean				0.343	0.758
LpeakPerDiff_mean			0.579	0.313	0.538
f0Diff_mean				0.492	0.582
MIEDiff				0.848	0.221
NV_BeginDiff	0.674				0.491
NV_MidDiff	0.902				0.178
NV_EndDiff	0.896				0.154
CentroidDiff		0.442		0.339	0.467

表 4. 7: 因子パターン行列

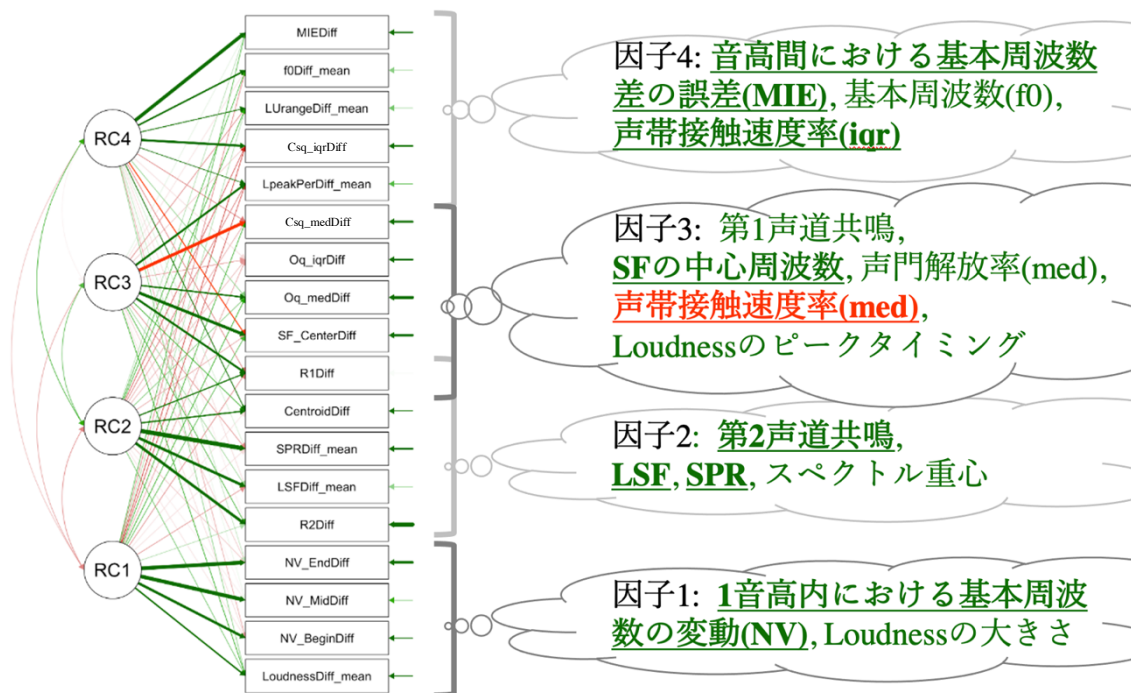


図 4. 6: 探索的因子分析の結果

4.3.4. 分析1の検討

4.3.3節の探索的因子分析から、重唱における音響特徴量の振る舞いの共通因子は大きく4つあり、「1音高内における声帯基本周波数の変動に関わる因子」、「第2声道共鳴に関わる因子」、「第1声道共鳴に関わる因子」「音高間における声帯基本周波数の変動に関わる因子」であることがわかった。これらの結果から、第1,2声道共鳴周波数の調節は重唱における主要な振る舞いであるだけでなく、他の音響特徴量とも作用し合っていることがわかった。具体的に見ると、第1声道共鳴の近接は、声部・声区や声帯音源の強さが被験者間で異なるかに影響を受けていた他、第2声道共鳴の近接は Singer's formant の大きさに関わる特徴量 (LSF, SPR) と影響を受けていた。

また、4つの因子の内訳から、重唱において第1,2声道共鳴周波数以外の主な因子は声帯基本周波数に関連していることがわかった。発声における重要要因[29]の最大要素が「ピッチの正確さ (intonation)」であることを考えるとピッチに関わりの深い声帯基本周波数が入ることは当然かもしれないが、「1音高内の調節」と「音高間の調節」とで共通因子がはっきり2つ含まれていることは注目すべきである。音高間の変動の特徴量はピッチ変動に関わるのに対し、1音高内の変動の特徴量である「音高変動率」はレガートの聴感に関わる点である観点から異なっている。更に加えて、声帯接触速度率の四分位範囲 (iqr) の歌手間における相関が、「音高間における声帯基本周波数の変動に関わる因子」へ含まれていることも特筆すべきである。この結果を解釈すると、「声帯接触速度率の四分位範囲 (iqr) が歌手間で近接しているほど、メロディ・旋律をより正確な基本周波数でお互いに発声できる」ということとなる。合唱を嗜む歌手は、独唱時におけるメロディの不安定性が声を合わせることによって目立たなくなることが多いが、そのようなメロディを合わせやすくする生理学的観点での調節として「声帯接触速度率の四分位範囲 (iqr)」の調節があるのかもしれない。

ただし、分析1の結果はあくまで関わりの深い音響特徴量が何かを把握しただけであり、これらの音響特徴量が聴感にどう影響を与えているのかは定かでないことに留意する必要がある。

4.4. 分析 2 - 発声方法間における第 1,2 声道共鳴と歌手評価の比較

4.3 節からは第 1,2 声道共鳴の調節が重唱における大きな要素となっていることがわかったが、第 1,2 声道共鳴の振る舞いが歌手評価に影響しているのかはまだ定かでない。そこで本節では、歌唱測定実験の中で得た歌手評価の内の「歌手同士の相性」と「歌手の発声評価」が、第 1,2 声道共鳴周波数の振る舞いとどう影響しているのかを調べる。すなわち、歌手評価は「歌手同士の相性」「歌手の発声評価」という 2 つの指標で捉える。

ここで「歌手同士の相性」とは、「誰が最も声を合わせやすかったか」という実験主催者からの質問に対する回答を用いる。尺度は 3 とし、合わせた歌手両方がお互いを指名し合った被験者の組み合わせを「合わせやすい歌手同士」、一方のみが指名した被験者の組み合わせを「一方だけ合わせやすい歌手同士」、お互いが指名し合わなかった被験者の組み合わせを「合わせやすすくない歌手同士」として分析に用いた。また、「歌手の発声評価」は、歌手に対するオープンクエスションのヒアリングの回答結果から 2 尺度で抽出する。内訳としては、複数回の試行の中で双方共に「声を合わせられた」と感じていた場合「歌手の発声評価が高い」、双方共に「声を合わせられた」と感じていなかった場合「歌手の発声評価が低い」として分析に用いている。

なお、第 3 章と同様に、第 1,2 声道共鳴周波数の被験者間差は cent として計算する。また本分析では、1 セット辺りにある 6 音の声道共鳴周波数の平均を取った上で、収録できた母音と被験者同士の全組み合わせ（計 190 セット）の独唱と重唱とを比較する。

4.4.1. 第1,2声道共鳴と「歌手同士の相性」の比較 - 分析2

まず、「歌手同士の相性」に関する結果を図4.7として記載する。発声方法2条件（独唱／重唱）ごとで、歌手同士の相性3条件（合わせやすい歌手同士／一方だけ合わせやすい歌手同士／合わせやすすくない歌手同士）における第1,2声道共鳴周波数の被験者間差を箱ひげ図と平均値にてそれぞれ表示している。箱ひげ図の中にあるくびれのような灰色の幅は中央値の変動性、並びに中央値の信頼区間を示し、重なっていない箱同士の中央値は有意水準5%で異なる。図4.7より、第1,2声道共鳴周波数共に、「合わせやすい歌手同士」は「一方だけ合わせやすい歌手同士」や「合わせやすすくない歌手同士」よりも重唱で被験者間差が小さくなっている。発声方法（独唱／重唱）間で第1,2声道共鳴周波数の被験者間差に対するMann-WhitneyのU検定を行った所、「合わせやすい歌手同士」や「一方だけ合わせやすい歌手同士」では第1,2声道共鳴周波数共に5%有意水準を下回った（合わせやすい歌手同士： $p=.003, p=.002$, 一方だけ合わせやすい歌手同士： $p=.001, p=.041$ ）のに対し、「合わせやすすくない歌手同士」では第1,2声道共鳴周波数共に下回らなかった（ $p=.066, p=.107$ ）。

第1,2声道共鳴周波数共に、歌手同士が合わせやすいかで発声方法ごとの差がはっきり表れている。第3章で行った音高ごとの個別比較では第1,2声道共鳴周波数のどちらか、もしくは両方共に近接していない場合もあったが、それらは歌手同士の相性が関係していた可能性がある。この図4.7の結果を別の視点から見ると、元々の第1声道共鳴周波数の差

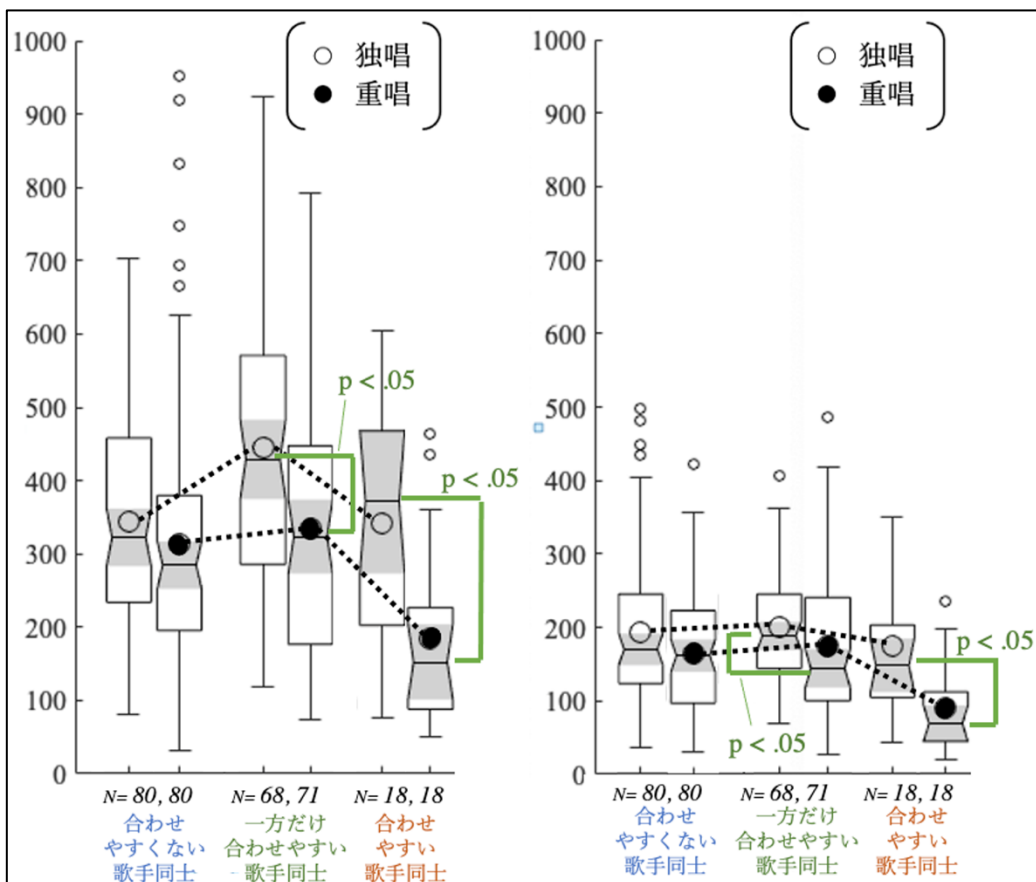


図4.7: 第1,2声道共鳴と「歌手同士の相性」の比較

は、各歌手が認識した歌手同士の相性に影響していないことにもなる。すなわち、重唱時にどの程度近接しているかが合わせやすさに影響するという解釈になる。

4.4.2. 第1,2声道共鳴と「歌手の発声評価」の比較 - 分析2

今度は、「歌手の発声評価」に関する結果を図4.8として記載する。発声方法2条件（独唱／重唱）、並びに重唱での「歌手の発声評価（高／低）」ごとにおける第1,2声道共鳴周波数の被験者間差を箱ひげ図と平均値にてそれぞれ表示している。図4.8より、第1,2声道共鳴周波数の被験者間差は共に、歌手評価の高い重唱における条件で最も被験者間の差が小さくなっている。この3条件間で第1,2声道共鳴周波数の被験者間差に対するKruskal-Wallis検定を行った所、それぞれ5%有意水準を下回った（ $p = .001$, $p = .021$ ）。また、Bonferroni法の多重比較検定では、第1,2声道共鳴周波数の両方とも「重唱（歌手の発声評価 - 高）」の方が「独唱」より有意に小さかった（ $p = .001$, $p = .016$ ）。このことから、第1,2声道共鳴周波数が歌手の発声評価とも大きく関係していると考えられる。

「歌手の発声評価」の比較でも、第1,2声道共鳴周波数両方の被験者間差が大きく関係していた。第3章で実施した分析では、第1声道共鳴周波数で一部の被験者（第3章の被験者1,4）の近接していない様子が目立ち、第2声道共鳴周波数は差があることがわかっていなかった。これは、第2声道共鳴周波数における元々の被験者間差が比較的小さいことに起因しているように思われる。centで比較すると、独唱における第1声道共鳴周波数の被験者間差は平均400centの差があるのに対し、第2声道共鳴周波数の被験者間差は平均200

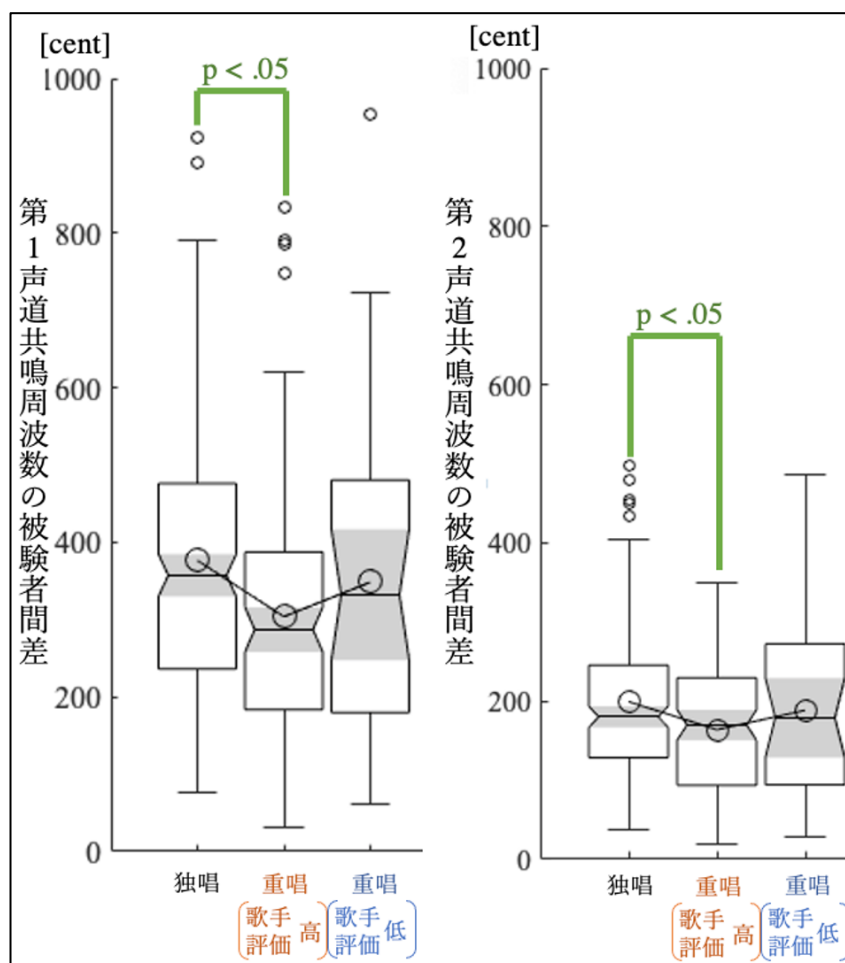


図4.8: 第1,2声道共鳴と「歌手の発声評価」の比較

cent で約 2 倍の差となっている。これは、元々の声道共鳴周波数が離れている被験者が、重唱時もそのままの周波数差を維持していたこととなる。また、このような振る舞いは、「歌手の発声に対する評価が低い」、もしくは「相手と声を合わせやすいと思わない」といった歌手自身の感覚につながっていることとなる。

4.4.3. 分析 2 の検討

「歌手同士の相性」の比較では、「合わせやすい歌手同士」では「合わせやすすくない歌手同士」よりも第 1,2 声道共鳴周波数がより近接していた。すなわち、相性が悪いと思いつ込む理由において「声質の違いや独唱時の声道共鳴周波数の差」が主な原因ではなく、お互いの第 1,2 声道共鳴周波数の調節が十分に行われていないからであることとなる。

次に「歌手の発声評価」の比較では、歌手の発声評価が高い重唱でも、そうでない場合（発声評価が低い場合や独唱の場合）より第 1,2 声道共鳴周波数が歌手同士で近接していた。第 1 声道共鳴と第 2 声道共鳴の間では振る舞いの差が見られなかった。これらの結果から、歌手が自身の発声の評価しようとする際の音響的要因として、第 1,2 声道共鳴周波数が共に関係していると思われる。4.3 節の結果も踏まえると、第 1,2 声道共鳴周波数の調節が歌手評価の違いとして現れたことは、第 1,2 声道共鳴周波数の調節が母音の調節に留まらず、ラウドネスの調節などの他要素にも影響する特徴であるためであると解釈することもできる。

4.5. 分析 3 - 被験者 1 人に着目した第 1,2 声道共鳴周波数の比較

4.4 節からは、重唱における大きな要素となっている第 1,2 声道共鳴の近接が歌手評価にも良い方向に作用していることがわかった。ただ、第 3 章の 3.4 節からは一概に近接をすることが必ずしも良い訳ではないことを示唆している。この検討は後の聴取評価との比較（第 5 章）で掘り下げるものの、本節では、その検討の参考材料として、検証的に 1 人の被験者における第 1,2 声道共鳴の変動を比較することとする。この分析を実施する理由は、1 人の被験者に着目した第 2 章のような分析を第 3 章よりも多人数で比較したかったため、第 1,2 声道共鳴周波数がどう参照歌手と近接しているのかを見る。本実験において、被験者 20 は 6 人の被験者と重唱の試行を行ったため、図 2.2 や図 2.3 のような箱ひげ図の比較となるよう意識した上で図 4.9 として結果を記載する。図 4.9 は、濃い色のプロット（ないし左方向に記載しているプロット）が被験者 20 の第 1,2 声道共鳴周波数、薄い色のプロット（ないし右方向に記載しているプロット）が被験者 20 と重唱している歌手の第 1,2 声道共鳴周波数となっている。図 4.9 から、被験者 20 はさまざまな歌手の第 1,2 声道共鳴周波数に調節しているものの、その調節は完全に重なるようなものではなく、少しずつらしたような調節になっている。（そのような傾向は、図 C.1~図 C.9 でも少々煩雑だが確認できる。）すなわち、重唱だからといって完全に第 1,2 声道共鳴周波数が一致している訳ではなく、一定の間隔を空けている、ないしは他の音響特徴量との兼ね合いがなされていると考えられる。

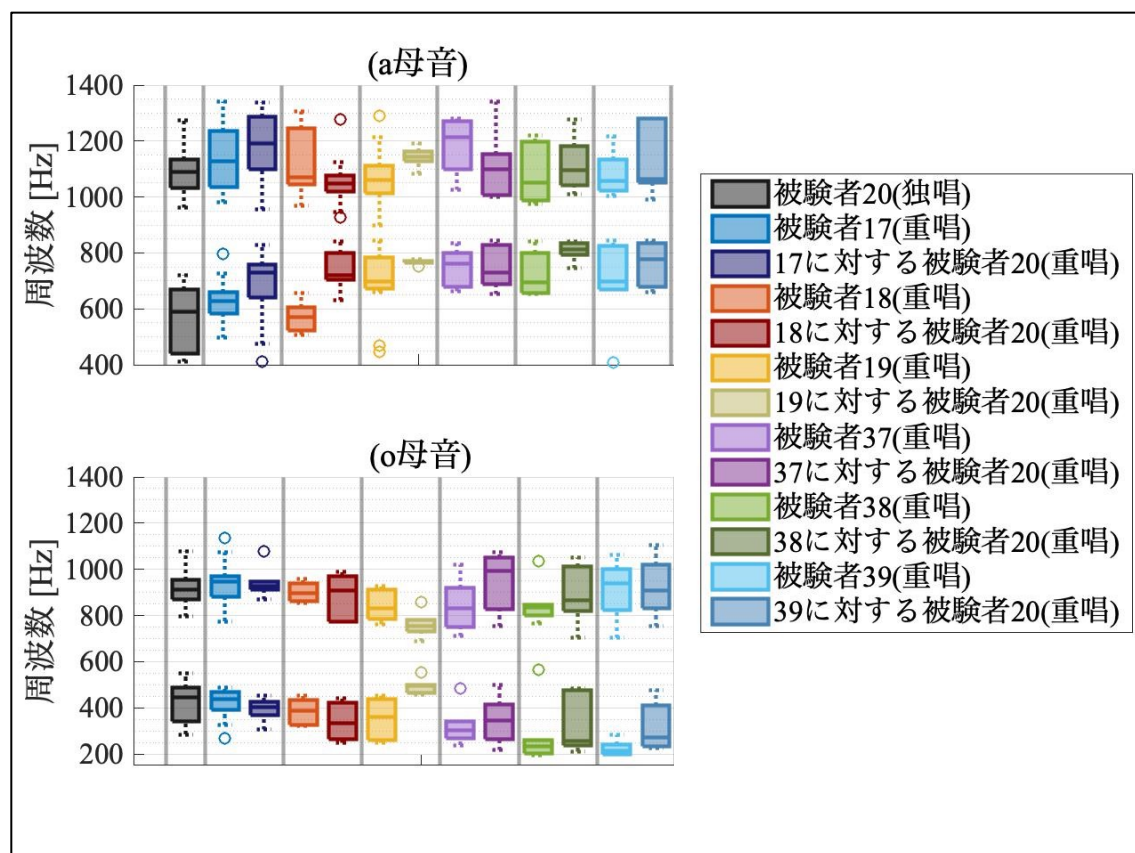


図 4.9: 発声方法（独唱／重唱）ごとにおける、被験者 20 と被験者 17,18,19,37,38,39 の第 1,2 声道共鳴周波数

4.6. 第4章のまとめ

本章では、第3章の実験設定の枠組みを用いて大人数の被験者に対する歌唱測定実験を実施した。分析では、1.3節で説明した幅広い音響特徴量とヒアリングなどによる詳細な歌手評価を抽出し、重唱時の主要な音響特徴量の振る舞いを理解するとともに、第1.2声道共鳴周波数がどれだけ影響し、他の音響特徴量や歌手評価とどう関連しているかを調べた。

まず、4.3節では探索的因子分析を使用して、重唱時の音響特徴量の振る舞いに含まれる共通因子と、第1.2声道共鳴周波数以外の調節要素を調査した。その結果、重唱時の音響特徴量の振る舞いには4つの共通因子が存在し、それらは「1音高内における声帯基本周波数の変動に関連する因子」「音高間における声帯基本周波数の変動に関連する因子」「第1声道共鳴に関連する因子」「第2声道共鳴に関連する因子」となった。これらの結果から、第1.2声道共鳴周波数の調整が重唱の主要な振る舞いであるだけでなく、他の音響特徴量とも相互作用していることが明らかになった。

具体的には、第1声道共鳴の近接は、声部や声区、声帯音源の強さが被験者間で異なるかどうかの影響を受けていた。また、第2声道共鳴の近接は、Singer's formantの大きさに関連する特徴量(LSF, SPR)に影響を受けていた。さらに、4つの因子の中で、第1.2声道共鳴周波数以外の主要な要素は、声帯基本周波数に関連していた。また、「声帯接触速度率の四分位範囲(iqr)」の歌手間における相関が、「音高間における声帯基本周波数の変動に関わる因子」へ含まれており、この結果を解釈すると「声帯接触速度率の四分位範囲(iqr)が歌手間で近接しているほど、メロディ・旋律をより正確な基本周波数でお互いに発声できる」ということとなる。なお、後の聴取評価では実験設定の問題でこの因子に含まれる音響特徴量(MIE)を分析に用いないため、今回新しく出てきた「声帯接触速度率の四分位範囲(iqr)」の振る舞いについては特に注視していくこととする。

次に4.4節では、歌手評価(「歌手同士の相性」と「歌手の発声評価」)が第1.2声道共鳴周波数の振る舞いにどのように影響しているかを調査した。その結果、「合わせやすい歌手同士」では「合わせやすすくない歌手同士」よりも第1.2声道共鳴周波数がより近接していた。また、歌手の発声評価が高い重唱の場合でも、発声評価が低い場合や独唱の場合よりも、第1.2声道共鳴周波数が歌手同士で近接していた。第1声道共鳴と第2声道共鳴の間では、振る舞いの違いが見られなかった。これらの結果から、歌手が自身の発声の評価する際の音響的要因として、第1.2声道共鳴周波数が両方とも関係していると考えられる。4.3節の結果を考慮すると、第1.2声道共鳴周波数の調整が歌手評価の違いとして現れるのは、第1.2声道共鳴周波数の調整が母音の調整だけでなく、ラウドネスの調節などの他の要素にも影響する特徴であるためと解釈できる。

最後に、4.5節では、第1.2声道共鳴周波数の近接に関する第3章の補足的分析として、1人の被験者に焦点を当てた比較を行い、第1.2声道共鳴周波数が単に近接するだけでは十分でないこと、また、別の要因が潜在的に存在する可能性を検討した。

第5章 聴取実験による音響特徴量と聴感の比較

5.1. はじめに

本章では、第4章で得た音響特徴量と「声が合っているか」に関する聴感との対応関係を調べるため、全国の合唱歌手に対して聴取実験の参加を募り、第4章で得た音源の一部に関する聴取評価を実施した。ただし、評価に用いる評価語は現場に即したものとなるよう、アンケート調査による評価語の選別を別途実施した。また聴取用音源は、外部音響励振法の影響で含まれている雑音の消音アルゴリズムを実装、使用した上で用いた。そのため、はじめに5.2節で評価語の作成手順について記載し、5.3節で聴取用音源の雑音除去アルゴリズムを記載した上で、聴取実験の実験設定を5.4節に記し、分析へ移ることとする。分析手順としては、まず発声方法や歌手評価ごとにおける聴取因子の変動を参照することで、聴取因子ごとの特徴を整理する(5.5節)。続いて、第1.2声道共鳴周波数と聴取評価との比較を行った後に(0節)、1.3節に記載した広範な音響特徴量と聴取評価の因果関係を調べ(5.6節)、最終的に聴取評価の潜在因子「声が合っているか」と音響特徴量の比較を実施する(5.7節)。

5.2. 評価語の作成について

第4章の歌唱測定実験の際に実験被験者から収集した「声が合っているとき」を記す語彙リストを表示した上で、「『声が合っているときの聴感』を表す言葉として相応しいか」を全国の合唱歌手に対し伺った。このようなアンケート調査を実施した理由は、語彙リストがさまざまな立場の歌手から集めたものをそのまま記載しており、歌手やコミュニティの中にはあまり使われないものや、伝わりづらいもの、不相応と思われ得るものもあると考えられるためだった。そこで本アンケートによって、より現場の歌手に同意を得られるよう語彙を選別し、それによって、後に実施する聴取実験結果をより意義のあるものとする。実験主催者はスクリーニングを一切行っていない。回答する歌手はgoogleフォームより、最も相応しいと思う語彙、並びに明らかに相応しくない語彙に対し「相応」「不相応」へチェックをつけてもらっている。1つで無いと判断される場合は、複数にチェックを入れてもらっている。より厳密な語彙とするため、全日本合唱コンクール全国大会に出場しているエキスパートの団員に呼びかけて協力頂いた。回答頂いた歌手の年齢・経験歴・パートを図5.1に、アンケート回答団体の内訳を図5.2に、googleフォームの例を図5.3に、6つの評価語指標(まとめり、ピッチ、呼吸、響き、声質、母音)ごとの回答結果を図5.4~図5.9に記載する。

なお、本論では初めから「声が合っているか」のみに焦点を絞り、合唱全体の品質評価は検討しない。理由は「声が合っているか」以外の観点もたくさんあり、それに伴う評価語もより膨大なためだった。具体例として、「今までの合唱経験全てで言われてきたこと／言ってきたことを全て思い出してほしい」という設問にすれば合唱品質全体への問いを伺えるかもしれないが、より人数・収集する語彙共に増やさなければならず、作業負担の問題上厳しい。また発声指導現場の背景として、楽器演奏のように弾いて教えるような実践を行っても自他の聴こえが異なるため、結果としてさまざまな言い回しや表現で相手に伝えなければ意思疎通すら取れないことがある。また、指導の感覚や使われる語彙は、多

くの合唱団員に通じるものあれば少数の合唱コミュニティ特有のものもあり、明らかに重要と思われるかを収集すべきだと考えた。その点、「声を合わせること」という着眼点は合唱における重要な感覚の1つと位置付けられており、その共通認識も合唱界にあると考える。そのため、本アンケートは、私自身が研究の枠組みのために得たい「声を合わせることの評価語」を抽出するため、多くの合唱団員から同意を確認し、またそれらの潜在因子が1つであることを前提する。また、実際に人間が判断する際はこの「声がかっているか」を複数の観点から無意識的に比較していると思われるため、歌唱測定実験で収集した語彙リストは内容の類似性と先行研究から大きく6つの聴取評価語指標（まとめり、ピッチ、呼吸、響き、声質、母音）に分類している。

なお、評価語指標の決定方法に探索的因子分析を使用しなかった理由は、「声を合わせることの評価語」に関する大まかな分岐が、既に合唱現場の知見、並びに書籍として充実しているためだった。あくまで合唱現場の実際の経験は否定しないスタンスとしたかったため、最初の語彙収集の後、現場の感覚として細分化される6指標に分けてアンケートを実施した。

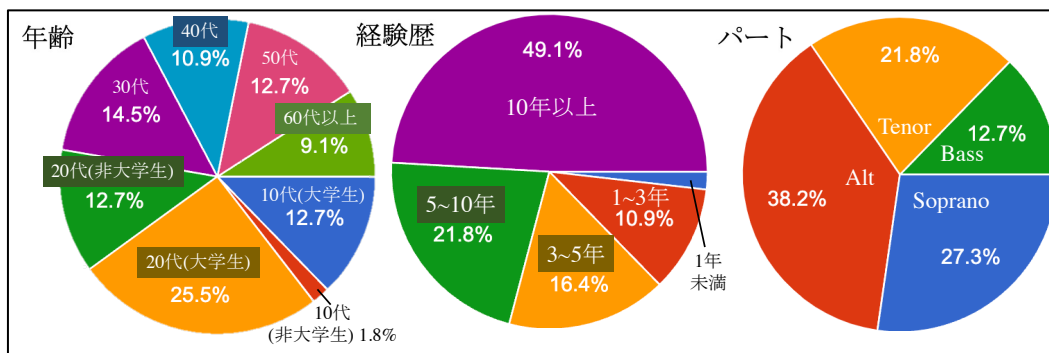


図 5.1: 回答した歌手の年齢・経験歴・パート

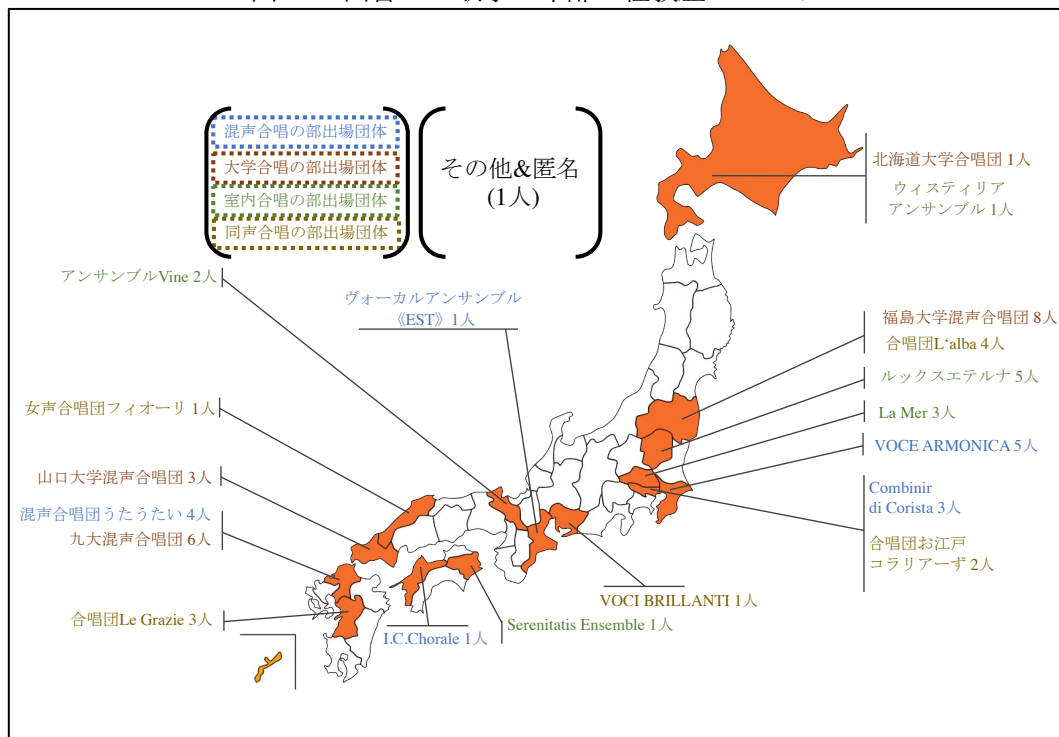


図 5.2: アンケート回答団体の内訳。なお、重複して参加されている方もいる。

[Q1] 「声が合っている時の聴感」を表す言葉として相応しい(ふさわしい)でしょうか？

最も相応しいと思う言葉へ、「相応しい」にチェックをつけてください。
1つで無いと判断される場合は、複数チェックされてください。
また、明らかに相応しくないと思う場合は「不相応」にチェックをつけてください。

まとまりに関する言葉

	相応しい・同意する	不相応
全体がまとまって聴こえる	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
声同士が一つになっている	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
ハーモニーが心地よく聴こえる	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
溶け合っている	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2人の音が重なっている	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
相手の声を聴き合える音になっている	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
併せやすいと思う音になっている	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

ハーモニーが心地よく聴こえる	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
溶け合っている	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2人の音が重なっている	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
相手の声を聴き合える音になっている	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
併せやすいと思う音になっている	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
音量が小さくても何を歌っているか聞き取れる	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
歌詞が聞き取りやすい	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

回答を中断する場合、下記ボタンをチェックした上で「次へ」を押してください。

(※ 再開の際は、回答確認メール内の「回答を編集」ボタンを押してください。)

戻る 次へ 2/12 ページ フォームをクリア

Google フォームでパスワードを送信しないでください。

図 5.3: アンケート回答フォームの例

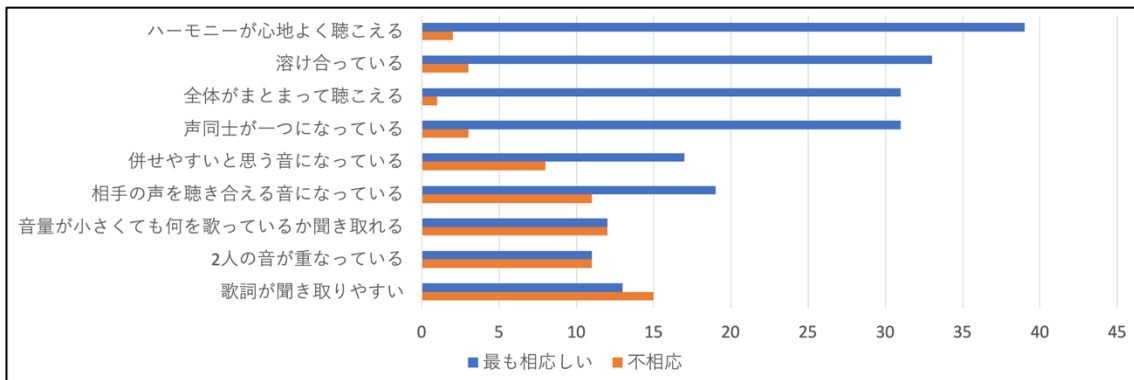


図 5.4: 「まとまり」の説明用語として相応しいかに対する回答結果

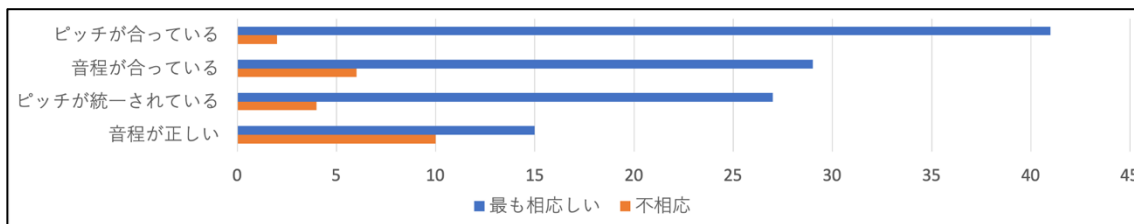


図 5.6: 「ピッチ」の説明用語として相応しいかに対する回答結果

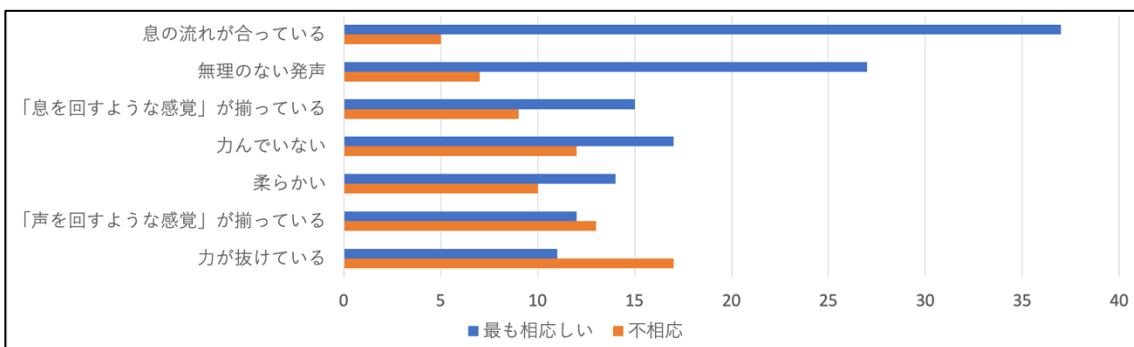


図 5.5: 「呼吸」の説明用語として相応しいかに対する回答結果

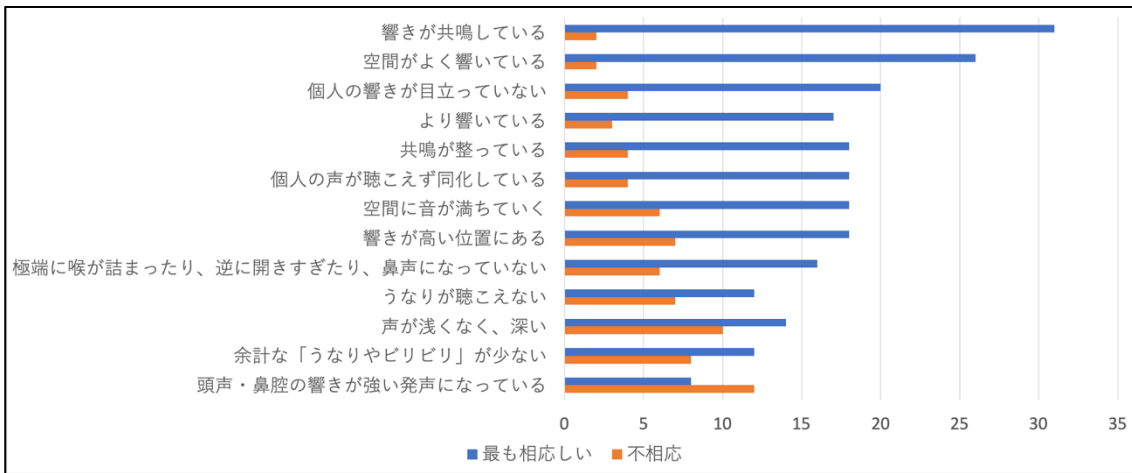


図 5.7: 「響き」の説明用語として相応しいかに対する回答結果

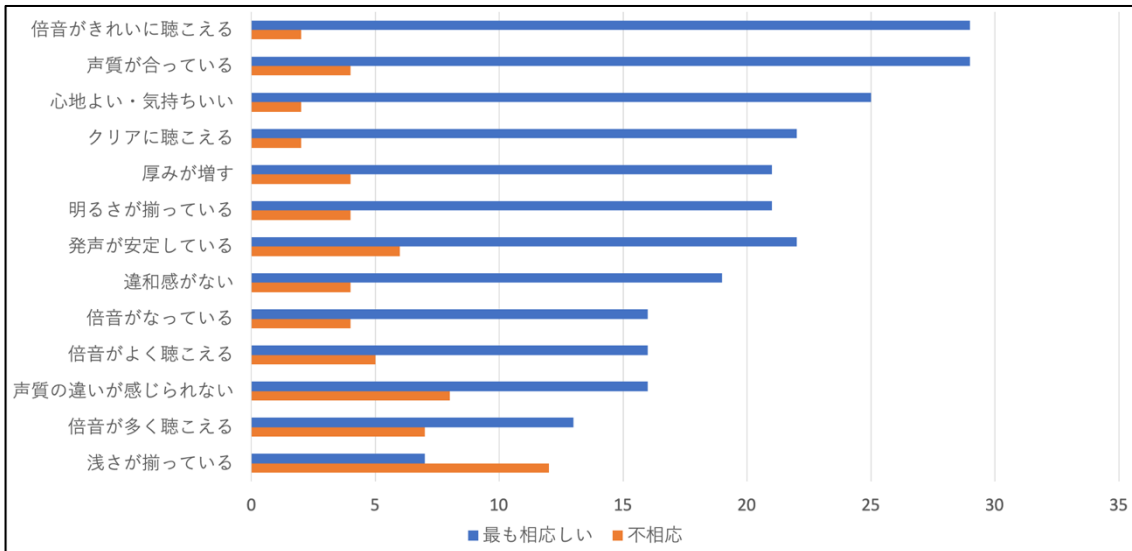


図 5.8: 「声質」の説明用語として相応しいかに対する回答結果

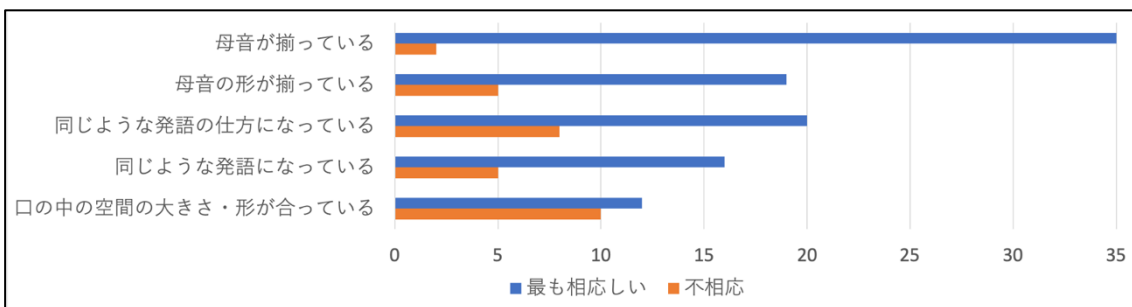


図 5.9: 「母音」の説明用語として相応しいかに対する回答結果

図 5.4 から図 5.9 までの回答結果をもとに、聴取評価に使用する評価語指標の説明用語を選び出す。それぞれの評価語指標について、「最も相応しい」と「不相応」の回答割合を考慮し、比較的高い合意が得られた説明用語だけを以下のように選択した。聴取評価実験では、これらの説明用語を実験参加者に提示し、評価語の印象について尋ねることになる。

- (i) まとまり：
 - ハーモニーが心地よく聴こえる (相応しい： 39, 不相応： 2)
 - 全体がまとまって聴こえる (相応しい： 31, 不相応： 1)
 - 溶け合っている (相応しい： 33, 不相応： 2)
 - 声同士が 1 つになっている (相応しい： 31, 不相応： 2)

- (ii) ピッチ：
 - ピッチが合っている (相応しい： 41, 不相応： 2)

- (iii) 呼吸：
 - 息の流れが合っている (相応しい： 37, 不相応： 5)
 - 無理のない発声 (相応しい： 27, 不相応： 7)

- (iv) 響き：
 - 響きが共鳴している (相応しい： 31, 不相応： 2)
 - 空間がよく響いている (相応しい： 26, 不相応： 2)

- (v) 声質：
 - 声質が合っている (相応しい： 29, 不相応： 4)
 - 倍音が綺麗に聴こえる (相応しい： 29, 不相応： 2)

- (vi) 母音：
 - 母音が揃っている (相応しい： 35, 不相応： 2)

5.3. 聴取用音源の雑音除去アルゴリズムについて

本節では、第4章で取得した収録音源を聴取用音源として使用できるようにするための前処理について説明する。第4章で述べた通り、収録音源には外部音響励振法で使用する雑音成分が含まれている。聴取用音源とするためには、雑音を取り除き、発声成分を明確に聴こえるようにする必要がある。しかし、発声成分の音質を維持しながら雑音のみを除去する最適な市販プラグインを見つけられなかったため、独自の雑音除去アルゴリズムを開発した。このアルゴリズムは、時間軸で変化する調波構造の各倍音を追跡し、倍音間の周波数距離を特定し、その区間を帯域フィルタで除去する方法を採用している。雑音除去アルゴリズムの手順は以下の通りである。

- (i) ハミング窓を使用して、発声区間から音声成分を時間軸上で抽出する。窓の長さは音高によって異なり、音高 D3 では 300 ms、音高 E3 では 270 ms、音高 A3 と C4 では 250 ms、音高 E4 では 200 ms とし、シフト長は 20 ms としている。
- (ii) DECOM 法または SRH で得られる声帯基本周波数に基づいて倍音の周波数を計算し、切り出した窓のフーリエ変換によって得られる周波数成分から、各倍音のより正確な周波数を求める (図 5.10)。
- (iii) 2 kHz 以下の周波数帯域で、倍音間の一定範囲の成分を FIR バンドストップフィルタ (matlab の bandstop 関数) で除去する。

バンドストップフィルタのインパルス応答が FIR であることにより、除去に伴う音声の歪みを抑えられる。また、bandstop 関数のプロパティ「遷移帯域の急峻さ (Steepness)」を最大 (0.5) に設定することで、狭い帯域でも除去できるようにしている。なお、

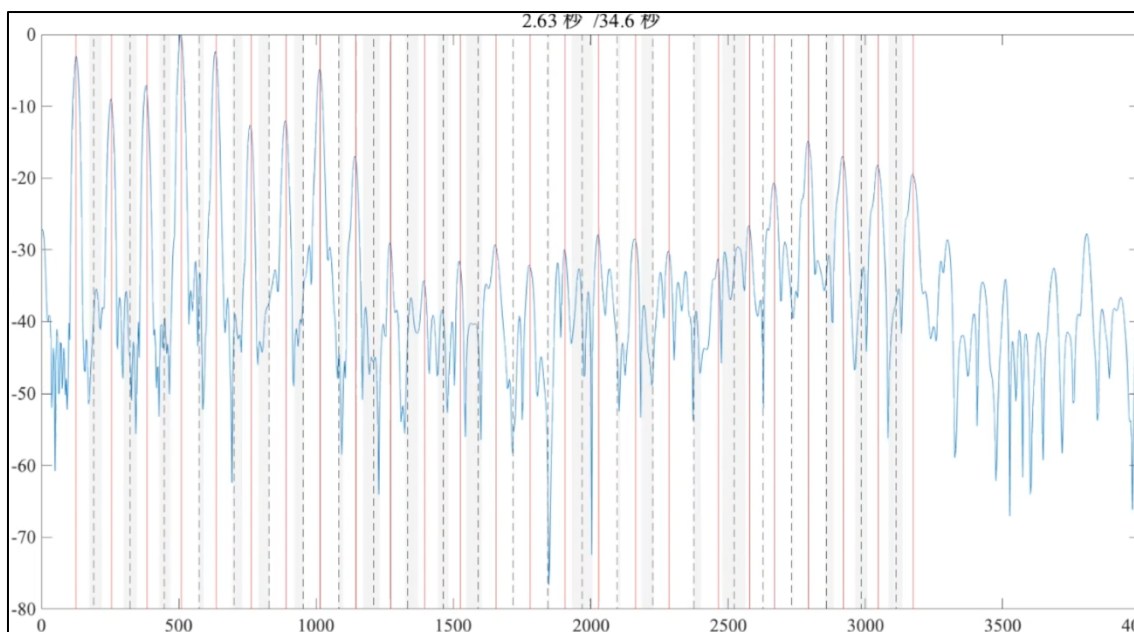


図 5.10: 各倍音成分を抽出している様子

bandstop 関数は除去区間が短いと自動で IIR に切り替わる仕様があるため、FIR フィルタ生成に必要な限界サンプル数を bandstop 関数の Matlab スクリプトを参照して算出し、倍音間距離が FIR を適用できる場合のみ除去できるように設定している。帯域減衰量（プロパティ名：StopbandAttenuation）は 10 dB に設定した。

雑音除去アルゴリズムによって雑音が除去された音源は、その後統合ラウドネスが -14 LUFS となるよう調整し、Accusonus の「ERA 5 BUNDLE」の VST プラグイン「Noise Remover」を使用して、雑音が最小限となるようにさらに調整する。最後に、音声区間に 200 ms のフェードインとフェードアウトを適用し、聴取用音源として使用できるようにする。200 ms のフェードインとフェードアウトは、雑音除去に伴って副次的に発生したエコーを排除するためでもある。

5.4. 聴取実験の実験設定

本節では、聴取実験の実験設定について説明する。この聴取実験では、実験参加者に手持ちの再生機器で音源を聴いてもらい、主観評価を行ってもらう。使用される音源は、第4章で得た同じ音高で歌われる歌唱音の中から、表5.1に示す実験設定に基づく67種類の定常発声音源の組み合わせである。実験参加者は、この67種類の音源から、実験設定別でランダムに選ばれた10種類を聴く。10種類の実験設定は、発声パターン2種（独唱／重唱）、母音2種（/a, o/）、「歌手同士の相性」2種（併せやすい歌手同士／併せにくい歌手同士）の8種類に加え、スピーカー試行とヘッドフォン試行である。この組み合わせは、歌手の被験者属性による影響を最小限に抑えるように選定されている。

表5.1では、聴取用音源の詳細な内訳も示している。表5.1の最も左に記載している番号は音源刺激の番号で、次に記載している番号は表4.2に記載していた被験者番号である。その後続く情報には、発声パターン（独唱／重唱／スピーカー提示／ヘッドフォン提示）、母音（/a, o/）、歌手評価（歌手同士の相性、発声スタイル、併せやすい母音がどちらか、歌手の発声評価）といった要素が含まれている。音源の選定では、これらの要素が均等に含まれるように考慮している。なお、「独唱」と記載された音源を聴く際には、表5.1に示される2人の被験者の独唱音源が同時に再生される。また、スピーカー提示やヘッドフォン提示の音源を重ね合わせた際は、測定実験中に歌手へ提示している独唱音源と実際の発声音との間で時間差が生じているため、それら2つの音源の相互相関係数から時間差を調整した上で、2chのステレオ音源としている。「発声スタイル（合唱的か、オペラ的か）」という区分は、第4章の実験時に記録した被験者のフィードバックや被験者属性をもとに採用している。どちらともいえない可能性のある場合は区分しておらず、表5.1には空欄で記載している。音源を提示する際には、5.3節で説明した雑音除去を各音高で行った後、500msの無音区間を設けて、C3を除く5つの音高をランダムな順序でYouTube動画として再生する。

実験参加者は、10段階で評価する6つの指標（まとめ、ピッチ、呼吸、響き、声質、母音）を用いて、音源に対する評価を行う。聴取実験の手順としては、まず説明用動画と教示を提供し、練習試行を1回設けた後、ランダムに抽出された10音源を聴いてもらい、これを本試行とする。回答時間は約5~10分である。実験参加者の募集は全日本合唱連盟に依頼し、各都道府県の合唱連盟を通じて全国の加盟団体から回答を得た。回答者属性を図5.11に示す。図5.11の通り、60人の幅広い年齢から回答が得られた。特に10年以上の合唱経験歴を持つ回答者が多く、パートは女声が少し多かったもののある程度均等に分かれていた。

聴取実験の紹介動画の例や回答用googleフォームの例は図5.12に示しており、紹介動画の文章は付録Dに、googleフォームの教示文は付録Eに記載している。

No.	被験者1人目	被験者2人目	発声パターン	母音	歌手同士の相性 (合唱的/オペラの)	併せやすい母音	発声評価
1	9	12	独唱	/a/	併せやすい歌手同士	合唱的	-
2	9	12	独唱	/o/	併せやすい歌手同士	合唱的	-
3	9	12	重唱	/a/	併せやすい歌手同士	合唱的	高
4	9	12	重唱	/o/	併せやすい歌手同士	合唱的	高
5	9	12	スピーカー	/a/	併せやすい歌手同士	合唱的	-
6	9	12	スピーカー	/o/	併せやすい歌手同士	合唱的	-
7	9	12	ヘッドフォン	/a/	併せやすい歌手同士	合唱的	-
8	9	12	ヘッドフォン	/o/	併せやすい歌手同士	合唱的	-
9	33	36	独唱	/a/	併せやすい歌手同士	合唱的	-
10	33	36	独唱	/o/	併せやすい歌手同士	合唱的	-
11	33	36	重唱	/a/	併せやすい歌手同士	合唱的	高
12	33	36	重唱	/o/	併せやすい歌手同士	合唱的	高
13	33	36	重唱	/a/	併せやすい歌手同士	合唱的	低
14	21	24	独唱	/a/	併せやすい歌手同士	オペラの	-
15	21	24	独唱	/o/	併せやすい歌手同士	オペラの	-
16	21	24	重唱	/a/	併せやすい歌手同士	オペラの	/o/ 高
17	21	24	重唱	/o/	併せやすい歌手同士	オペラの	/o/ 高
18	21	24	重唱	/a/	併せやすい歌手同士	オペラの	/o/ 低
19	1	4	独唱	/a/	併せやすい歌手同士	オペラの	/a/ -
20	1	4	独唱	/o/	併せやすい歌手同士	オペラの	/a/ -
21	1	4	重唱	/a/	併せやすい歌手同士	オペラの	/a/ 高
22	1	4	重唱	/o/	併せやすい歌手同士	オペラの	/a/ 高
23	18	20	独唱	/a/	併せやすい歌手同士	合唱的	/o/ -
24	18	20	独唱	/o/	併せやすい歌手同士	合唱的	/o/ -
25	18	20	重唱	/a/	併せやすい歌手同士	合唱的	/o/ 高
26	18	20	重唱	/o/	併せやすい歌手同士	合唱的	/o/ 高
27	31	32	独唱	/a/	併せやすい歌手同士	オペラの	/o/ -
28	31	32	独唱	/o/	併せやすい歌手同士	オペラの	/o/ -
29	31	32	重唱	/a/	併せやすい歌手同士	オペラの	/o/ 高
30	31	32	重唱	/o/	併せやすい歌手同士	オペラの	/o/ 高
31	9	11	独唱	/a/	併せにくい歌手同士	-	-
32	9	11	独唱	/o/	併せにくい歌手同士	-	-
33	9	11	重唱	/a/	併せにくい歌手同士	-	低
34	9	11	重唱	/o/	併せにくい歌手同士	-	低
35	26	27	独唱	/a/	併せにくい歌手同士	-	-
36	26	27	独唱	/o/	併せにくい歌手同士	-	-
37	26	27	重唱	/a/	併せにくい歌手同士	-	高
38	26	27	重唱	/o/	併せにくい歌手同士	-	高
39	26	27	重唱	/a/	併せにくい歌手同士	-	低
40	26	27	スピーカー	/a/	併せにくい歌手同士	-	-
41	26	27	スピーカー	/o/	併せにくい歌手同士	-	-
42	26	27	ヘッドフォン	/a/	併せにくい歌手同士	-	-
43	26	27	ヘッドフォン	/o/	併せにくい歌手同士	-	-
44	5	6	独唱	/a/	併せにくい歌手同士	-	-
45	5	6	独唱	/o/	併せにくい歌手同士	-	-
46	5	6	重唱	/a/	併せにくい歌手同士	-	高
47	5	6	重唱	/o/	併せにくい歌手同士	-	高
48	5	6	重唱	/a/	併せにくい歌手同士	-	低
49	25	27	独唱	/a/	併せにくい歌手同士	-	/a/ -
50	25	27	独唱	/o/	併せにくい歌手同士	-	/a/ -
51	25	27	重唱	/a/	併せにくい歌手同士	-	/a/ 高
52	25	27	重唱	/o/	併せにくい歌手同士	-	/a/ 高
53	25	27	重唱	/a/	併せにくい歌手同士	-	/a/ 低
54	15	16	独唱	/a/	併せにくい歌手同士	-	/o/ -
55	15	16	独唱	/o/	併せにくい歌手同士	-	/o/ -
56	15	16	重唱	/a/	併せにくい歌手同士	-	/o/ 高
57	15	16	重唱	/a/	併せにくい歌手同士	-	/o/ 低
58	15	16	重唱	/o/	併せにくい歌手同士	-	/o/ 高
59	17	20	独唱	/a/	-	-	/a/ -
60	17	20	独唱	/o/	-	-	/a/ -
61	17	20	重唱	/a/	-	-	/a/ 高
62	17	20	重唱	/o/	-	-	/a/ 高
63	17	20	重唱	/a/	-	-	/a/ 低
64	17	20	スピーカー	/a/	-	-	/o/ -
65	17	20	スピーカー	/o/	-	-	/o/ -
66	17	20	ヘッドフォン	/a/	-	-	/o/ -
67	17	20	ヘッドフォン	/o/	-	-	/o/ -

表 5.1: 聴取用音源の内訳

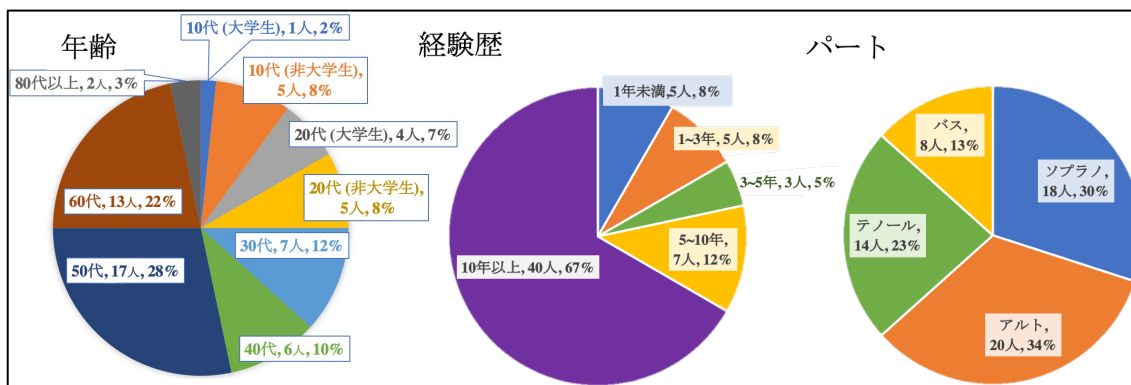


図 5.11: 聴取実験に回答した歌手の年齢・経験歴・パート

この一環として、今回皆様に「発声の印象に関するアンケート調査」を御依頼させていただきます

- フォームでは、様々な立場の歌手の収録音源が Youtube動画に格納されています。
- Youtube動画は、5つの発声音が繰り返し再生されます。
- この2人の歌手の発声について、6つの視点(まとめり、ピッチ、呼吸、響き、声質、母音)から10段階で評価してください。
- 6つの視点は、記載している赤枠の情報を参考にしてください。発声音1つ1つの特徴は異なりますが、全体的な聴感に着目して考慮頂けますと幸いです。

東京芸術大学 Tokyo University of the Arts

この一環として、今回皆様に「発声の印象に関するアンケート調査」を御依頼させていただきます

- フォームでは、様々な立場の歌手の収録音源が Youtube動画に格納されています。
- Youtube動画は、5つの発声音が繰り返し再生されます。
- この2人の歌手の発声について、6つの視点(まとめり、ピッチ、呼吸、響き、声質、母音)から10段階で評価してください。
- 6つの視点は、記載している赤枠の情報を参考にしてください。発声音1つ1つの特徴は異なりますが、全体的な聴感に着目して考慮頂けますと幸いです。
- 音源は、実際に一緒に歌っていない発音もあります。中には違和感を感じるかもしれません。
- 測定実験によって得られており聴取環境も悪くなっております、予めご了承ください。
- 初めに練習試行を1回設けた後、10回の本試行を行います。回答時間は約5~10分です。

東京芸術大学 Tokyo University of the Arts

図 5.12: 聴取実験の紹介動画の例、並びに回答用 google フォームの例

5.5. 分析 1 - 発声方法、歌手評価ごとにおける聴取評価の比較

聴取してもらった67音源のうち、3人以上の聴取評価がある音源を分析対象とした結果、56音源となった。1音源あたりの平均回答数は10.7で、中央値は8だった。各音源における聴取評価語指標6つの回答値について、平均を算出したものを表5.2に記す。表5.2の縦軸は音源番号で、表5.1に示していたものと同じである。横軸は聴取評価語指標6つ、および全聴取評価語指標の平均値である。各セルには値と棒グラフを記している。また、聴取評価語指標における音源全体の平均値も、薄い点線で示している。その他、各セルには回答値の結果によって色分けしており、平均値を上回っているほど青色、下回っているほど赤色になるようグラデーションしている。

この表5.2の結果は、本節の分析の基礎データとなる。表5.2と5.4節の音源設定を見るとわかるように、表5.2には歌手評価による複数の外的要因が影響しており、すぐに何か判断できるものではない。そこで本節の分析では、発声方法（独唱／重唱／スピーカー／ヘッドフォン）と歌手評価で聴取因子の変動を区別してグラフ化し、発声条件が聴取者の聴感にどのような影響を与えるかを比較する。前節で説明した通り、「独唱」は「独唱で歌った2人の発声を重ねた音源」を指し、「重唱」は「一緒に重唱で歌った2人の発声を収録した音源」を指す。この分析により、独唱（を重ねた音源）と重唱が聴感に与える影響の違いや、それらがどのように歌手評価と関連しているかを検討する。さらに、スピーカーとヘッドフォンを用いた聴取環境の違いも考慮に入れ、声を合わせる際の認知的な影響を検討する。これらの要素を踏まえて、発声条件が聴感にどのように影響を与えるのかを整理する。

No.	評価(まとまり)	評価(ピッチ)	評価(呼吸)	評価(響き)	評価(声質)	評価(母音)	評価(合計)
1	4.8	4.6	5.9	5.5	5.9	5.8	5.5
2	5.8	5.8	6.5	6.5	6.0	5.8	6.1
3	4.2	4.5	5.5	4.3	4.5	5.7	4.8
5	5.4	5.2	5.2	5.4	5.6	5.2	5.3
7	4.0	3.5	4.5	4.0	4.0	4.5	4.1
8	5.2	5.4	6.0	4.8	5.8	6.6	5.7
9	4.1	5.4	6.6	6.6	6.0	8.4	6.4
10	4.0	3.8	4.4	4.0	3.5	3.4	3.8
11	5.0	4.2	4.9	5.4	4.7	5.9	5.0
12	5.8	5.9	5.3	5.3	5.4	6.4	5.7
14	3.4	4.9	5.3	4.9	3.3	6.2	4.8
15	5.6	5.1	5.7	5.4	6.2	6.7	5.8
16	5.0	5.6	5.9	6.0	5.6	6.3	5.8
17	7.5	8.0	7.8	8.0	8.3	7.3	7.8
18	4.5	4.4	5.5	4.8	5.3	5.4	5.0
19	2.4	1.9	3.4	2.5	3.5	3.4	2.9
20	4.0	4.8	5.0	4.6	4.4	5.4	4.8
21	3.7	4.8	6.5	6.2	6.3	6.3	5.8
22	4.3	4.2	5.6	4.4	4.8	4.9	4.7
23	2.8	2.4	3.2	2.4	2.2	2.8	2.6
24	4.3	4.7	4.3	4.3	4.3	4.3	4.4
25	4.0	3.1	4.1	4.2	5.0	5.6	4.4
26	3.0	3.0	3.8	4.1	3.4	3.5	3.5
27	3.8	4.5	4.5	4.5	4.7	4.7	4.5
28	4.8	4.8	5.8	4.4	5.9	5.3	5.2
31	6.4	6.9	5.3	6.3	5.6	5.1	5.9
32	4.5	4.8	4.9	4.6	5.1	5.3	4.9
33	5.3	3.5	5.2	4.7	5.0	6.0	4.9
34	5.0	5.5	5.3	5.1	5.5	5.3	5.3
35	3.1	3.1	4.1	3.4	3.2	4.6	3.6
36	4.1	3.0	4.0	4.2	4.3	4.4	4.0
37	3.9	3.9	4.1	4.0	4.1	4.0	4.0
38	5.3	5.5	6.0	5.7	5.5	6.2	5.7
40	5.2	5.8	5.9	5.8	5.9	5.9	5.8
41	5.7	6.0	6.5	5.4	5.8	5.9	5.9
42	5.4	6.3	6.2	6.1	5.9	6.4	6.1
46	1.9	1.8	2.4	1.9	2.3	2.3	2.1
47	4.7	6.0	3.5	4.7	4.5	7.8	5.2
48	4.8	4.8	5.6	5.0	4.6	4.6	4.9
49	2.7	2.2	5.0	2.3	4.0	4.0	3.4
50	5.6	6.2	6.2	5.6	6.2	6.2	6.0
51	2.6	2.7	4.0	4.1	4.0	4.3	3.7
52	4.3	4.0	3.3	2.8	5.3	5.5	4.2
53	4.3	4.0	3.3	4.0	3.3	2.7	3.5
56	5.5	5.1	5.9	5.3	5.4	6.4	5.6
57	2.6	2.0	2.4	2.2	2.2	2.0	2.2
58	6.8	7.4	7.2	7.4	7.4	7.0	7.2
59	5.5	5.3	6.2	5.4	5.7	6.2	5.7
60	2.8	3.5	3.3	4.4	3.6	3.7	3.6
61	3.3	2.3	5.8	4.2	3.3	5.7	4.2
62	5.2	4.7	5.5	4.3	4.7	5.2	4.9
64	3.7	4.4	3.9	3.7	3.3	5.6	4.1
65	3.9	3.7	4.4	4.0	3.9	4.6	4.1
66	5.8	6.6	6.0	6.0	6.0	6.2	6.1
67	4.4	5.8	5.0	4.8	5.9	6.9	5.5

表 5.2: 各音源における聴取評価語指標 6 つの回答値の被験者平均

5.5.1. 発声形式ごとにおける聴取評価の比較 - 分析 1

まず、発声形式ごとの聴取評価を比較する。発声形式（独唱／重唱／スピーカー／ヘッドフォン）における聴取結果を折れ線グラフで示したものが図 5.13 である。図 5.13 は歌手評価とは異なり、発声形式によって必ずしも評価に大きな差が見られているわけではないと思われる。少なくとも録音音源を聴く場合において、重唱音源が独唱（を重ねた）音源よりも必ずしも良い聴感をもたらすわけではないこととなる。すなわち、歌手評価の影響が大きく、発声形式を含む複合的な要因が聴感に反映されているようである。

聴取評価語指標の平均は、「重唱 > ヘッドフォン > スピーカー > 独唱」の順に高い値となっている。発声形式間を詳しく見ると、独唱（を重ねた音源）における聴取評価語指標は他の発声形式に比べて低い評価が多いのに対して、重唱では他の発声形式よりも高い評価が多いことがわかる。このことから、参照音を聴きながら発声する対応が、ある程度聴き手の聴感としても反映されていると考えられる。聴取評価ごとに見ると、評価語の種類による影響の差が見られる。特に「まとまり」は、発声形式による差異が最も小さい。また、重唱が必ずしも最も良い評価を得るわけではなく、「ピッチ」についてはヘッドフォン提示が重唱よりも高い評価を受けている。すなわち、ヘッドフォンを使用して参照音を聴くことで、聴き手がより正確にピッチを合わせやすくなっていると思われる。ただし、この結果が声帯基本周波数による影響なのか、それとも声道共鳴による影響なのかについては、この結果から判断することはできない。

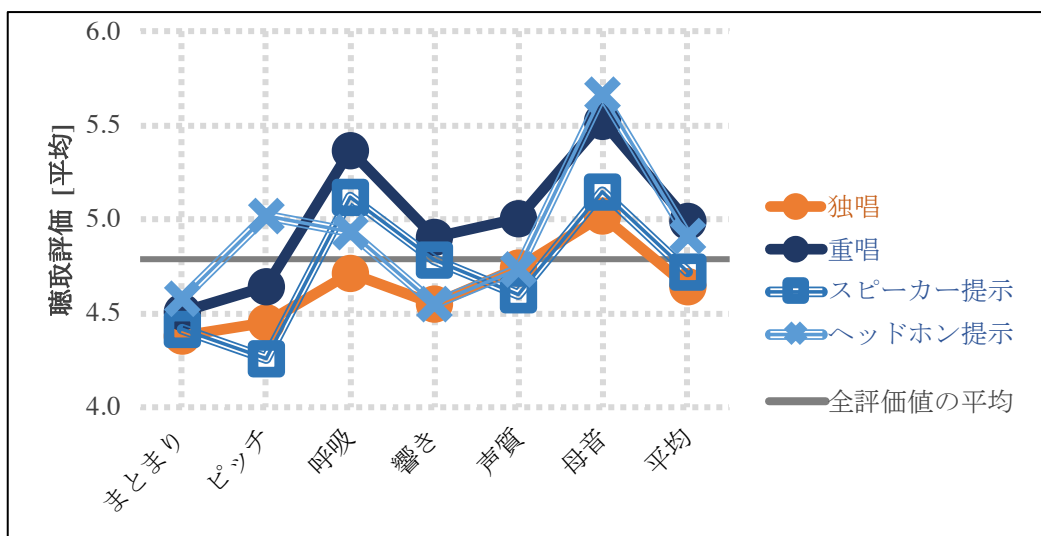


図 5.13: 発声形式ごとの聴取評価の比較

5.5.2. 「歌手の発声評価」と発声形式（独唱／重唱）における聴取評価の比較 - 分析 1

次に、「歌手の発声評価」と発声形式（独唱／重唱）における聴取評価の比較を図 5.14 に示す。図 5.14 より、歌手の発声評価に影響を最も受けていた評価語指標は「響き」で、高い発声評価を持つ歌手の組み合わせに限り、響きの評価も高くなった。すなわち、歌手の発声評価が高い重唱の音源は、独唱（を重ねた音源）、および歌手の発声評価が低い重唱に比べ、「響きが共鳴している」「空間がよく響いている」といった聴取評価が高まる傾向がある。注意すべき点として、本聴取実験は録音音源を比較しているのに対し、歌手のフィードバックはリアルタイムで聴取して評価している。このことから、「響き」という聴取評価は、リアルタイムでの聴取においてより重要な要素である可能性がある。

なお、歌手の発声評価が低い重唱の音源では「声質」の評価が高くなった。これは、第 3 章のように声道共鳴の引き込み現象が発生し、倍音がより統一して聴こえることによる可能性が考えられるが、完全な理由は定かでない。

その他、「呼吸」や「母音」といった評価語指標は、歌手の発声評価との関連性があまり見られず、発声形式（独唱／重唱）の差異のみが主に観察された。すなわち、「息の流れが合っている、無理のない発声」「母音が揃っている」といった聴取評価は、一緒に声を合わせる動作そのものによって良い影響を受けることが示唆される。「まとまり」や「ピッチ」の評価指標に関しては、いずれの区分でも比較的差が見られなかった。

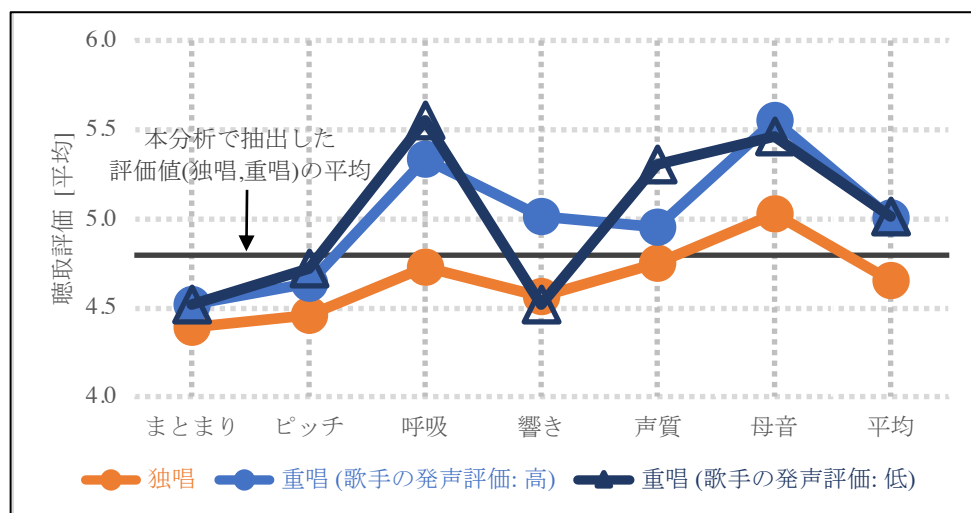


図 5.14: 「歌手の発声評価」と発声形式（独唱／重唱）における聴取評価の比較

5.5.3. 「歌手同士の相性」と発声形式（独唱／重唱）における聴取評価の比較- 分析 1

「歌手同士の相性」と発声形式（独唱／重唱）における聴取結果の比較を図 5.15 に示す。図 5.15 より、重唱の比較では、全体的に先ほどの「歌手の発声評価」に基づく比較と似た傾向が多かった。「まとまり」や「ピッチ」はいずれの区分もそれほど差が見られていない。「呼吸」は、歌手の発声評価による影響がほとんど見られず、発声形式（独唱／重唱）の違いだけが影響している。「響き」は、歌手同士が合わせやすいと感じる場合にのみ評価が高くなっている。

一方、「声質」や「母音」の比較では、「歌手の発声評価」に基づく結果と異なっている。「声質」に関しては区分間の差が小さく、「歌手同士の相性」による影響をあまり受けていないようである。「母音」については、「響き」と同様に、重唱で歌手同士が合わせやすい場合にのみ評価が高くなっている。

独唱を重ねた音源では、「歌手同士の相性」に対する聴取評価の違いが現れないように見える。すなわち、「声を合わせやすい」という歌手評価は、独唱時の発声に対する影響度が低いことが示唆される。互いに声を聞き合っていないため、これは当然の結果かもしれない。このことから、お互いの発声調整能力が「声を合わせやすい」という聴感に影響していることが考えられる。

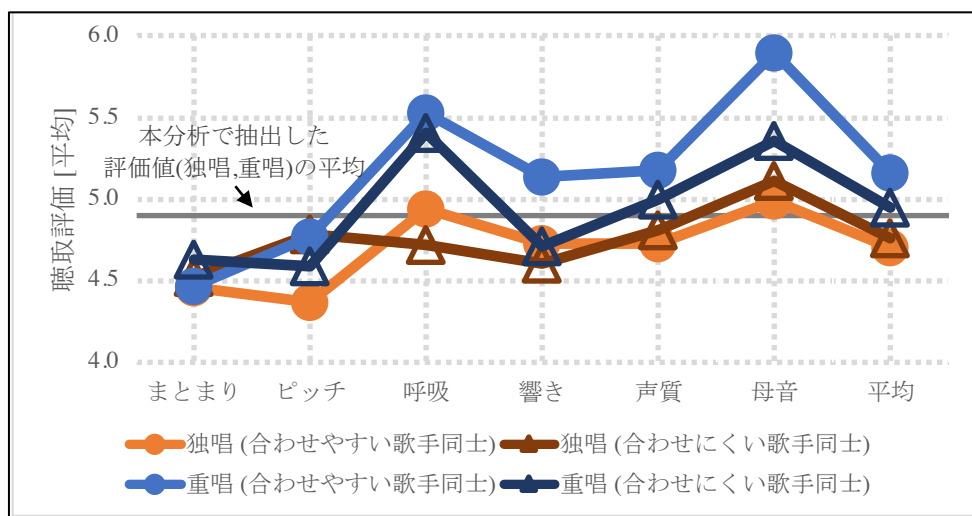


図 5.15: 「歌手同士の相性」と発声形式（独唱／重唱）における聴取評価の比較

5.5.4. 「母音の合わせやすさ」と発声形式（独唱／重唱）における聴取評価の比較 - 分析 1

「母音の合わせやすさ」と発声形式（独唱／重唱）における聴取結果の比較を図 5.16 に示す。図 5.16 からわかるように、先ほどの 5.5.1 節や 5.5.2 節と比較して、発声形式によって大きな違いが見られている。合わせにくい母音においては、独唱（を重ねた音源）の評価が全ての聴取評価語指標で低くなっている。特筆すべきこととして、「まとまり」や「ピッチ」はこれまでの分析で発声形式間の違いが見られなかったが、これらも低くなっている。このことから、元々の声道共鳴周波数差が「母音の合わせやすさ」に直接影響を与えていると考えられる。重唱の中での比較では、「呼吸」と「響き」が特に高い聴取評価となっている。このことから、合わせやすいと感じる母音の重唱では、「母音」だけでなく、「呼吸」と「響き」の面でも良い聴感が得られていることを示している。

また、合わせやすいと感じる母音の独唱（を重ねた音源）や合わせにくいと感じる母音の重唱では、「母音」の評価が特に高いのに対し、合わせやすいと感じる母音の重唱では「母音」の評価が控えめになっている。これは、重唱では過度な第 1,2 声道共鳴周波数の強調をなくし、声道共鳴が一定の間隔を保っているという、以前の分析結果の見解と一致している。

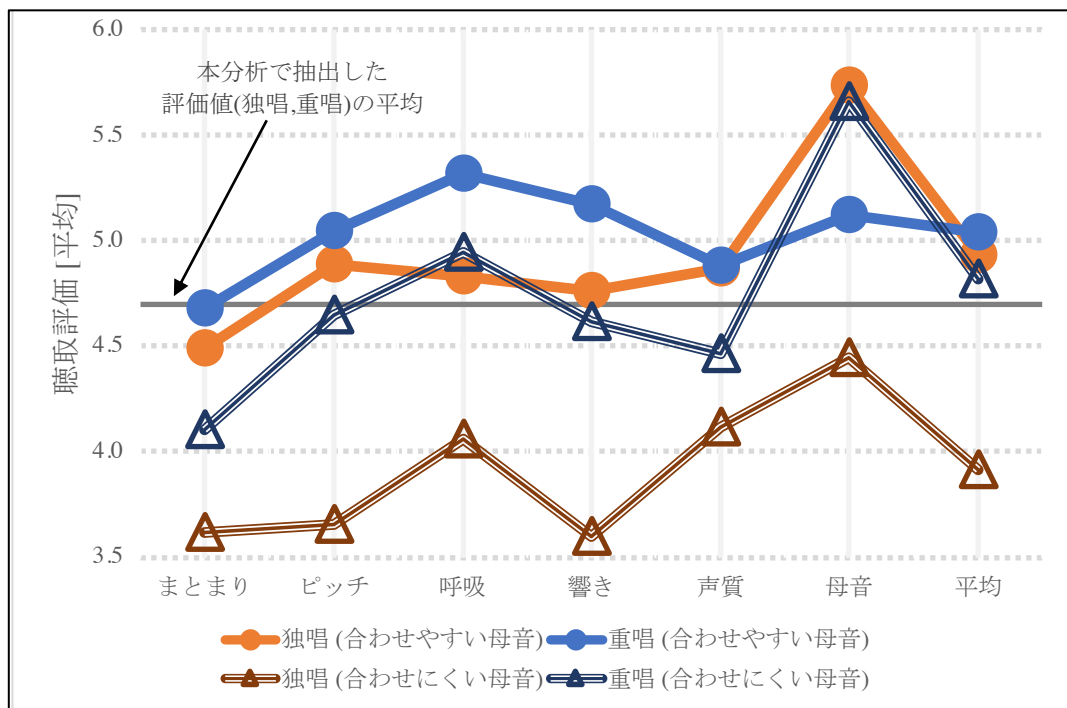


図 5.16: 「母音の合わせやすさ」と発声形式（独唱／重唱）における聴取評価の比較

5.5.5. 「発声スタイル」と発声形式（独唱／重唱）における聴取評価の比較 - 分析 1

「発声スタイル」と発声形式（独唱／重唱）における聴取結果の比較を図 5.17 に示す。図 5.17 からわかるように、独唱時の発声では歌手同士による発声スタイルの違いが聴感としてより大きく影響している。オペラ的な歌手属性を持つペアの発声は、合唱的な歌手属性を持つペアの発声よりも評価が低くなっている。これは、オペラ的な歌手属性を持つ歌手の独唱では、第 1,2 声道共鳴周波数の山が大きく、ピークのスペクトル包絡も比較的とがっていることが原因である可能性がある。オペラ的な発声は独唱に合わせた発声であるため、重ね合わせると評価が悪化することは必然とも言える。

一方、重唱の比較では、発声スタイルごとで評価語指標の配分が異なっているが、平均評価に差はない。合唱的な歌手属性を有するペアの重唱では、「呼吸」と「母音」の聴取評価がやや高くなっている。対して、オペラ的な歌手属性を持つペアの重唱では、それ以外の聴取評価がやや高い。今までの比較結果も加味して考慮すると、「呼吸」「響き」「声質」の聴取評価語指標は、声を合わせることによって、発声スタイルによらず聴感が向上している可能性がある。また、合唱で声を合わせる際には、「呼吸」と「母音」の聴取評価語指標がより良い聴感を生み出す要素と考えられる。

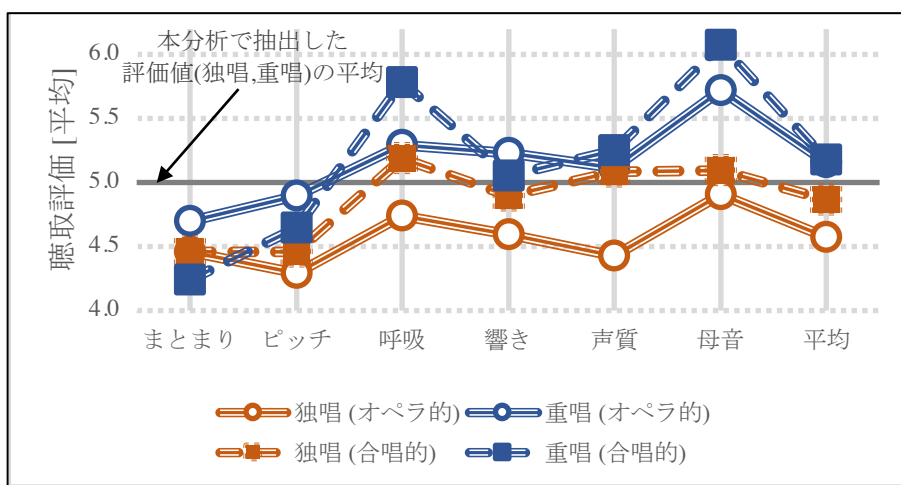


図 5.17: 「発声スタイル」と発声形式（独唱／重唱）における聴取評価の比較

5.5.6. 分析1のまとめ

5.5 節では、発声形式、歌手評価と聴取評価語指標を比較し、歌手の発声条件が聴き手側の聴感にどのような影響を与えるのかを調査した。歌手の発声条件は、「発声形式（独唱／重唱）」「歌手の発声評価」「歌手同士の相性」「母音の合わせやすさ」「発声スタイル」という区分で比較した。ここで、「独唱」は「独唱で歌った2人の発声を重ねた音源」を指し、「重唱」は「一緒に重唱で歌った2人の発声を収録した音源」を指す。

その結果、6つの聴取評価語指標の傾向は表5.3のようにまとめられる。表5.3は、図5.13～図5.17の結果を色分けして整理し、視覚的にわかりやすくまとめたものである。ただし、これはあくまで傾向を示すものであり、絶対的なものではない。表5.3から、発声形式（独唱／重唱）の違いに着目すると、「呼吸」が最も影響の大きい評価指標であることが示唆される。表から分かるように、「呼吸」の評価は発声形式（独唱／重唱）や発声スタイル（合唱的／オペラの）の影響が反映されやすく、一方で歌手評価（「歌手の発声評価」や「歌手同士の相性」）の影響は比較的少ないように見える。これらの結果を考慮して、次の音響特徴量の分析に進む。

比較方法		まとめ	ピッチ	呼吸	響き	声質	母音
歌手評価	歌手の発声評価 (高/低)	影響薄	影響薄	重唱↗独唱↘	重唱↗ ※ 歌手の 発声評価が 高い場合	歌手評価に 影響(複雑)	重唱↗独唱↘
	歌手同士の相性 (合わせやすい/ 合わせにくい)	影響薄	影響薄	重唱↗独唱↘	重唱↗ ※ 歌手同 士が合わせ やすい場合	影響薄	重唱↗ ※ 歌手同 士が合わせ やすい場合
	母音の 合わせやすさ	合わせや すい母音↗ 合わせに くい母音↘	合わせや すい母音↗ 合わせに くい母音↘	重唱↗独唱↘ 、 合わせや すい母音↗ 合わせに くい母音↘	重唱↗独唱↘ 、 合わせや すい母音↗ 合わせに くい母音↘	合わせや すい母音↗ 合わせに くい母音↘	歌手評価に 影響(複雑)
歌手の 属性	影響薄	重唱↗独唱↘ ※ operaの 属性を持つ 歌手のみ	重唱↗独唱↘ 、 coral↗opera↘	独唱↘ ※ operaの 属性を持つ 歌手のみ	独唱↘ ※ operaの 属性を持つ 歌手のみ	重唱↗独唱↘	

表 5.3: 5.5.1 節から 5.5.5 節までの結果のまとめ

分析 2 - 第 1,2 声道共鳴、LSF と聴取評価との比較

今度は、第 1,2 声道共鳴をはじめとする声道共鳴の調節が聴取評価へどのように影響しているのかを調査する。今までの分析結果から、第 1,2 声道共鳴は重唱時に近接する傾向があるが、この近接が聴取評価に良い影響を与える場合、「第 1,2 声道共鳴の被験者間差異」が小さくなるほど聴取評価語指標が増加することが予想される。一方、第 3 章や 4.5 節から、第 1,2 声道共鳴周波数が単に近接するだけが良い聴感を与えるのではなく、別の要因が良い聴感をもたらす特徴であることが示唆されている。また、4.3 節の音響特徴量間に含まれる潜在的な因子も考慮すると、第 1,2 声道共鳴の聴感に影響を与える特徴量として、同じ声道共鳴の調節である Singer's formant 帯域に関する音響特徴量が考えられる。

このため、本分析では、「第 1,2 声道共鳴の近接」と Singer's formant の生成度合いに関する指標「LSF の平均差異」を比較することで、4.3 節では明らかにならなかった第 1,2 声道共鳴と聴感の関係性を検討する。この指標とした見立てとして、LSF が近い歌手同士では、Singer's formant 帯域で過度なエネルギー上昇 (= 歌手同士が Operatic に発声している状態) や過度なエネルギー不足 (= 2 人とも Choral や通常発話に近い発声状態) を及ぼし得るためだった。LSF が異なる歌手同士では、一方が Operatic に Singer's formant がはっきり現れる発声、もう 1 人が Choral に Singer's formant のあまり現れない発声をするなど、互いの発声スタイルが異なっていることになる。さらに、LSF は算出過程から第 1,2 声道共鳴の近接度に大きく影響を受けるため、第 1,2 声道共鳴の近接と組み合わせた分析を行うことで、LSF が聴取評価に与える影響を判断できるかもしれない。また、本分析では、第 3 章で分析した「より近接している方の第 1,2 声道共鳴周波数の差異」についても抽出する。手順としては、横軸を音響特徴量の被験者間差異、縦軸に聴取評価語指標 6 つをプロットした散布図を作成する。5.5 節から、発声形式 (独唱/重唱) が聴取評価に与える影響は支配的でないため、本分析では発声形式 (独唱/重唱) による区分を行わない。

結果を図 5.18 に示す。図 5.18 から、第 1,2 声道共鳴との相関に関しては、どの聴取評価語指標も弱い相関を持っていることがわかる。いずれの相関係数も有意水準に達しない弱いものだったが、「呼吸」の聴取評価指標が最も第 1,2 声道共鳴との相関が見られ、相関係数は約 0.3 だった。LSF と聴取評価との相関関係は、第 1,2 声道共鳴と比較すると微弱であるようである。

次に、第 1,2 声道共鳴と LSF を組み合わせて聴取評価結果と比較するため、第 1,2 声道共鳴に LSF を除算した係数で聴取評価 6 つと相関分析を行う。この計算方法は、第 1,2 声道共鳴の近接以上に LSF が近接する状況を考慮に入れたかったためである。もし LSF が第 1,2 声道共鳴以上に近接する場合、この係数がより小さくなる。この計算結果を図 5.19 に示す。図 5.19 から、LSF と第 1,2 声道共鳴を組み合わせると、比較的多くの聴取評価で相関係数が高くなっていることが確認できる。なお、5%有意水準を満たしている結果については赤色で着色している。特に「第 1,2 声道共鳴どちらか近接している方のみ」の分析でより高い相関が見られたことから、3.4 節で見られた第 1,2 声道共鳴が近接しているにもかかわらず聴感が低くなる原因として LSF の近接が関与している可能性が示唆される。

これらの結果から、第 1,2 声道共鳴と LSF が聴取評価に影響を与えていると考えられる。

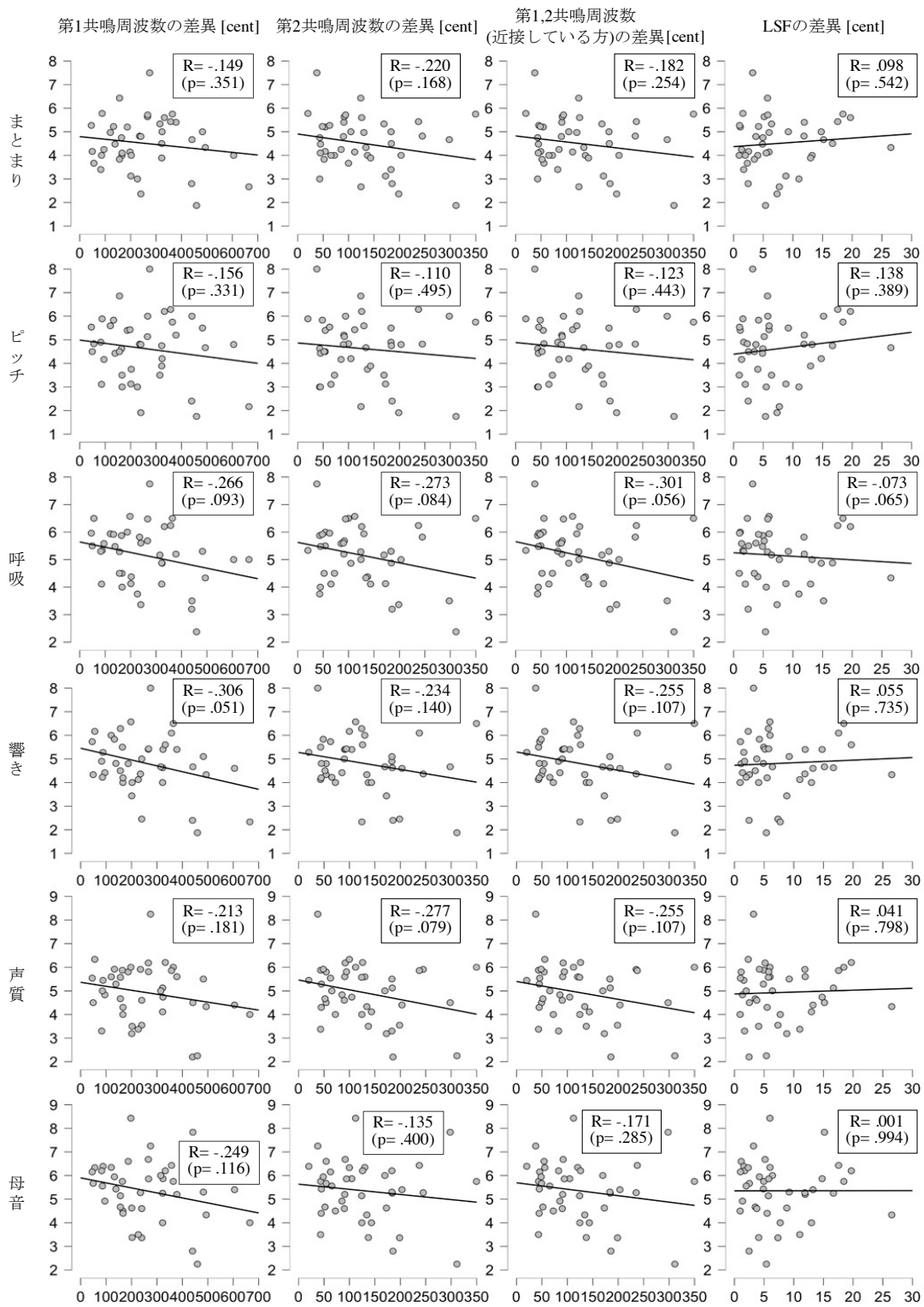


図 5.18: 第 1,2 声道共鳴、LSF と聴取評価を比較した散布図

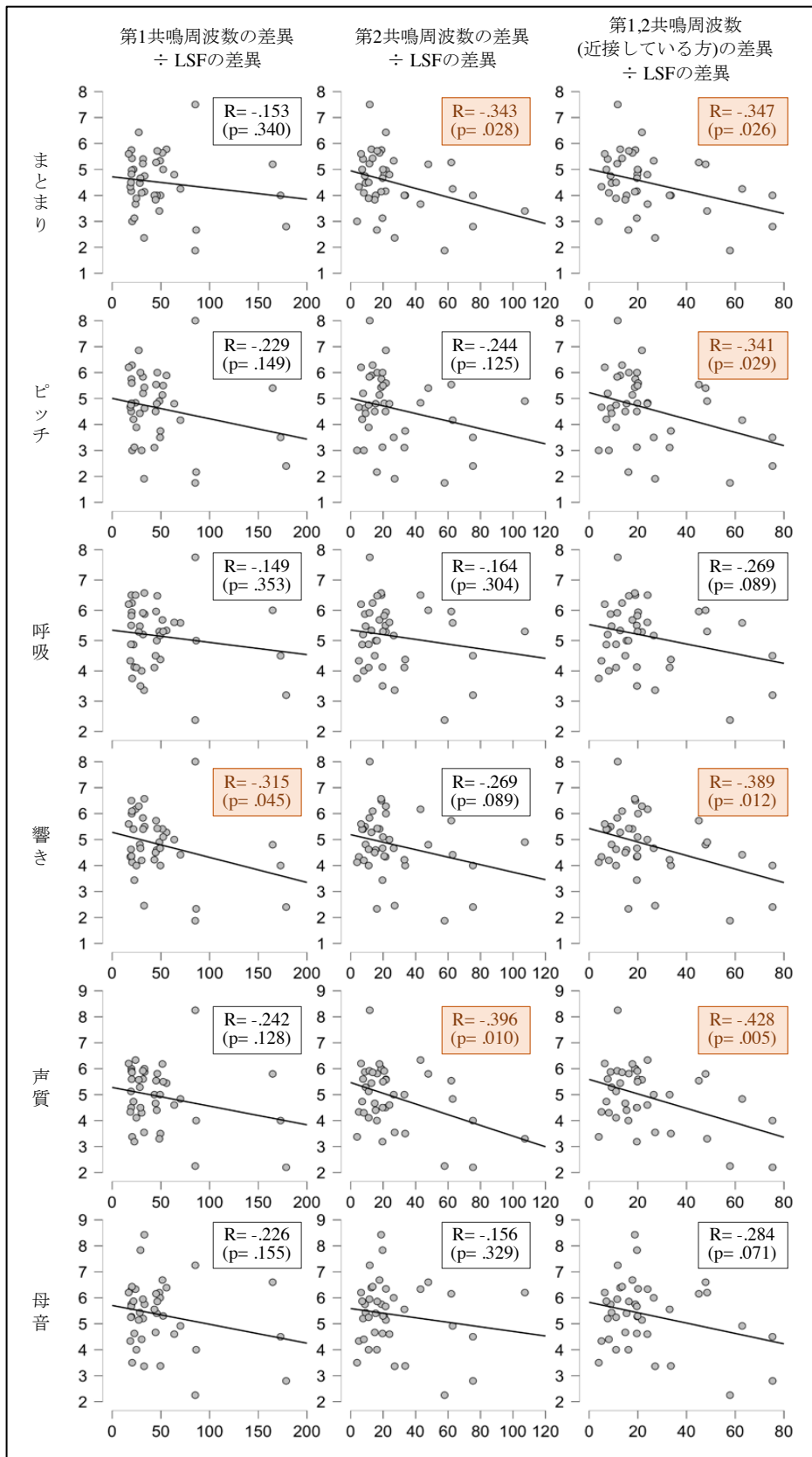


図 5.19: 声道共鳴と聴取評価を比較した散布図 (LSF の影響を考慮)

5.6. 分析 3 - 全ての音響特徴量と各聴取評価との比較

本節では、聴取評価との関係が示唆されていた声道共鳴だけでなく、第 4 章で抽出している全音響特徴量と、聴取評価語指標 6 つを重回帰分析によって比較する。重回帰分析は、目的変数が複数の説明変数からどの程度説明できるかを明らかにする統計手法である。目的変数は各聴取評価語指標、説明変数は各音響特徴量である。これにより、音響特徴量と聴取評価語指標の関係を把握する。

注意点として、重回帰分析で有意水準を満たした説明変数は、目的変数と統計的に関連があることを示すが、因果関係を直接的に示すわけではない。そのため、聴取評価語指標と音響特徴量の関係を整理する際には、1.3 節で整理した各音響特徴量の定義、5.2 節で整理した各聴取評価語指標の定義、および 5.5 節で整理した歌手評価と各聴取評価語指標の特徴をできる限り考慮する。

表 4.1 に記載している通り、この重回帰分析では、各音響特徴量が歌手の感覚や属性と対応しているため、変数削減は行わない。ただし、多重共線性を評価し、必要に応じて対処することが重要となるため、因果関係の検討と同様に先行研究や現場の知見を踏まえつつ慎重に検討する。

その他、特に「ピッチ」に関しては、第 1.2 声道共鳴周波数と声帯基本周波数の関係性が、聴感とどのように影響しているのかも同時に検討する。第 1.2 声道共鳴周波数と声帯基本周波数の関係性は、ピッチの知覚と関連して 2.4 節や 3.5 節により示唆されている。

5.6.1. 「まとまり」の聴取評価との比較-分析 3

まず、「まとまり」という聴取評価語指標に着目する。5.2 節より、「まとまり」という指標の定義は「ハーモニーが心地よく聴こえる、全体がまとまって聴こえる、溶け合っている、声同士が1つになっている」といった言葉を総称したものである。「まとまり」を目的変数とし、各音響特徴量を説明変数とした重回帰分析の結果を図5.20に示す。図5.20から、「まとまり」の聴取評価がどのような要素によってもたらされているかを明らかにする。図5.20の青い矢印は負の相関を示し、2人の特徴の差が小さいほど聴取評価が高くなっている。反対に、図5.20の赤い矢印は正の相関を示し、2人の特徴の差が小さいほど聴取評価が低くなっている。重回帰分析の相関係数 (R^2) は、音響特徴量の括弧の横に併記しているのと、相関係数が大きいかどうかを確認しやすいよう、矢印の長さ、太さ、点線/実線で区別している。

本分析により有意水準 ($p = .05$) を下回った音響特徴量としては、負の相関が「第1,2 声道共鳴周波数、声帯接触速度率の四分位範囲 (iqr) の差異」であり、正の相関が「LSF の差異」となった。第2 声道共鳴周波数の影響は第1 声道共鳴周波数よりも大きいようである。また、「LSF の差異」に関する正の相関関係は、他の全ての聴取評価語指標でも確認された。

なお、図5.13や図5.14、図5.15から、「まとまり」に関する指標では、発声形式(独唱/重唱)や歌手評価による影響がほぼ見られないということが判明している。つまり、「まとまり」との関係性が確認されたこれらの音響特徴量は、声を合わせる際に重要であるものの、リアルタイムで歌うことによる影響なのかは本節からはわからない。

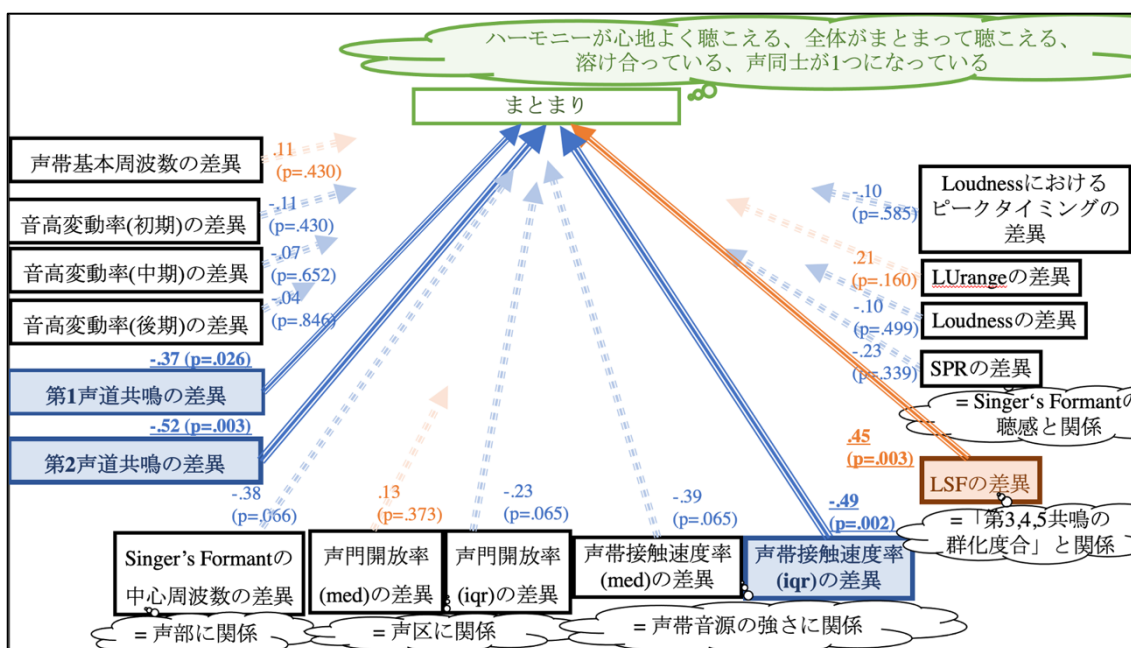


図 5.20: 「まとまり」の聴取評価語指標を目的変数、各音響特徴量を説明変数とした重回帰分析 ($R^2 = .624$)

5.6.2. 「ピッチ」の聴取評価との比較-分析3

次に、「ピッチ」という聴取評価語指標に着目する。「ピッチ」を目的変数とし、各音響特徴量を説明変数とした重回帰分析の結果を図 5.21 に示す。図の記載方法は図 5.20 と同じであり、詳細については5.6.1 節で説明している（以後この説明については省略する）。

図 5.21 の注目すべき点は、声帯の振動を示す指標である「声帯基本周波数の差異」や「音高変動率の差異」の相関が、声道共鳴などの音色に関わる音響特徴量と比較して大きくないことである。「まとめり」の結果と同じく、「第 1,2 声道共鳴周波数、声帯接触速度率の四分位範囲 (iqr) の差異」には負の相関が見られ、「LSF の差異」には正の相関が見られていて、有意水準 ($p = .05$) を下回っている。「まとめり」の時と異なっている点は、第 1 声道共鳴周波数の影響が第 2 声道共鳴周波数よりも大きいことと、「声門開放率 (med) の差異」にも正の関係性が見られていることである。1.3 節で整理している定義にもあるように、これらはいずれも音色に関係する音響特徴量である。すなわち、複数人が同じ音高で歌唱する状況のピッチ知覚は、従来関連すると考えられていた声帯振動に関する音響特徴量よりも、音色に関わる音響特徴量の方が影響を与えていることが示唆される。本節の重回帰分析は、2.4 節や 3.5 節で得られた分析結果の解釈を補完する。第 1,2 声道共鳴周波数が歌手同士で近接している場合に声帯基本周波数が変動していなかった理由は、第 1,2 声道共鳴周波数がピッチ知覚に影響を与えていたためと思われる。従って、歌手同士の第 1,2 声道共鳴周波数が大きく異なっていた場合のみ、歌手同士の声帯基本周波数が高い精度で変動したと考えられる。

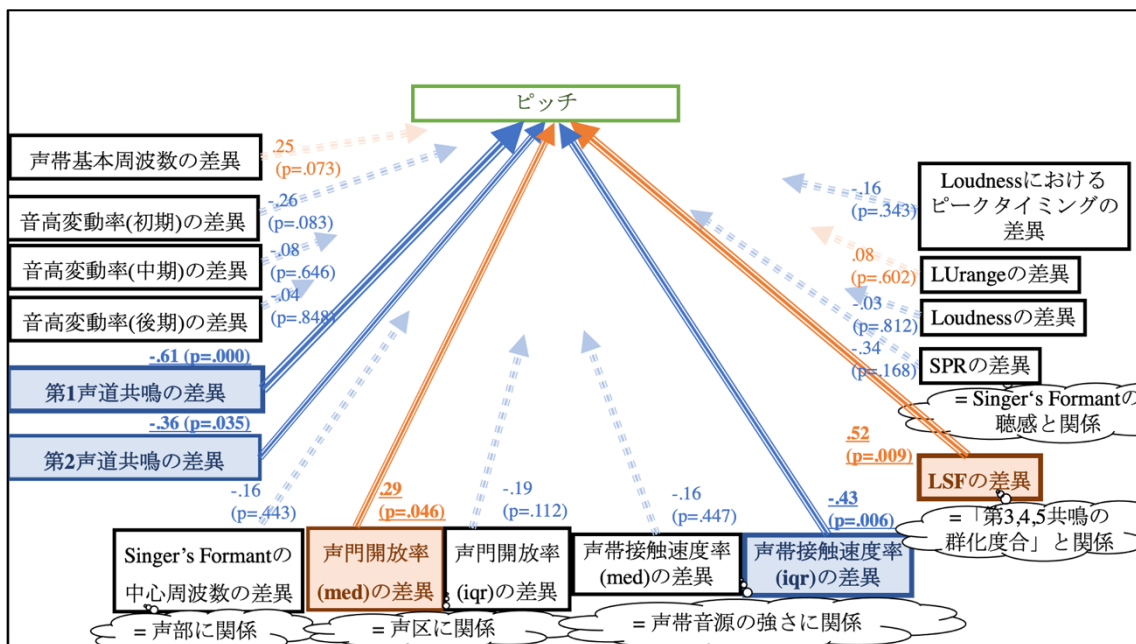


図 5.21: 「ピッチ」の聴取評価語指標を目的変数、各音響特徴量を説明変数とした重回帰分析 ($R^2 = .631$)

5.6.3. 「呼吸」の聴取評価との比較- 分析 3

3 番目は、「呼吸」という聴取評価語指標に着目する。この指標は、「息の流れがあっている、無理のない発声」といった言葉をもとにしている。「呼吸」を目的変数とし、各音響特徴量を説明変数とした重回帰分析の結果を図 5.22 に示す。図 5.22 を見ると、他の聴取評価語指標の分析結果と異なる傾向が複数ある。中期と後期の音高変動率や声門解放率の四分位範囲 (iqr) に相関関係が見られる点である。これらの要素は、他の聴取評価語指標では相関関係が見られなかった。音高変動率 (中期・後期) については、発声の中間部分での声帯振動が相関しているほど、そして発声の終わりでの声帯振動が相関しないほど、聴感が良いということになる。

ここで注目すべきなのは、「呼吸」が最も発声形式 (独唱/重唱) の影響を最も受ける指標であったことである。後半部分の声帯振動がどのように制御されるかという点に関して、歌手が独唱や重唱に応じて異なる呼吸のコントロール方法を用いている可能性がある。例えば、独唱の場合、歌手は自分の発声のみを考慮し、息の流れを一定に保つことが求められる。一方、重唱の場合、他の歌手との調和や協調が重要となるため、それに合わせて呼吸を制御する必要がある。

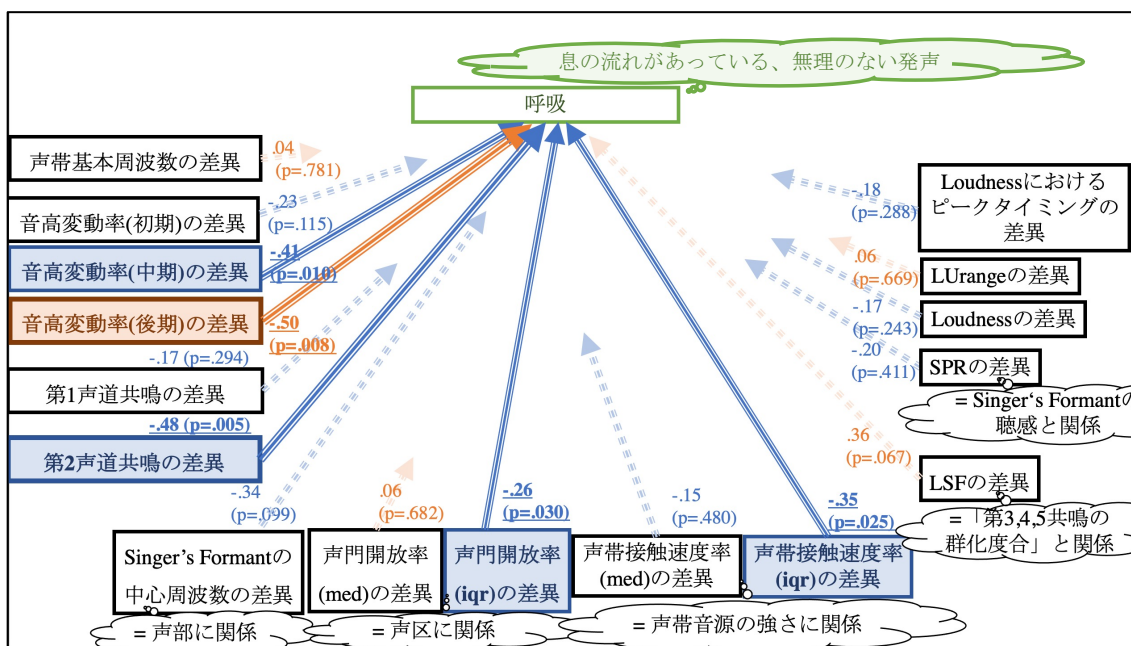


図 5.22: 「呼吸」の聴取評価語指標を目的変数、各音響特徴量を説明変数とした重回帰分析 ($R^2 = .638$)

5.6.4. 「響き」の聴取評価との比較- 分析3

4 番目は、「響き」という聴取評価語指標に着目する。この指標は、「響きが共鳴している、空間がよく響いている」といった言葉をもとにしている。「響き」を目的変数とし、各音響特徴量を説明変数とした重回帰分析の結果を図 5.23 に示す。図 5.23 と他の聴取評価語指標の分析結果全体と比較すると、独自性のある音響特徴量は見当たらない。ただし、先ほどの 5.6.1 節、5.6.2 節、5.6.3 節と異なる傾向は、音高変動率（初期）の相関関係が見られる点がある。また、「ピッチ」の聴取評価結果と同様、第 1 声道共鳴周波数の影響が第 2 声道共鳴周波数よりも大きいようである。すなわち、歌い始めの調整や、顎の開きによって変化する第 1 声道共鳴周波数が特に影響を与えていることがわかる。歌手は、歌い始めの段階で音高の調節を特に意識することで、響きの良い聴取体験を提供できることとなる。

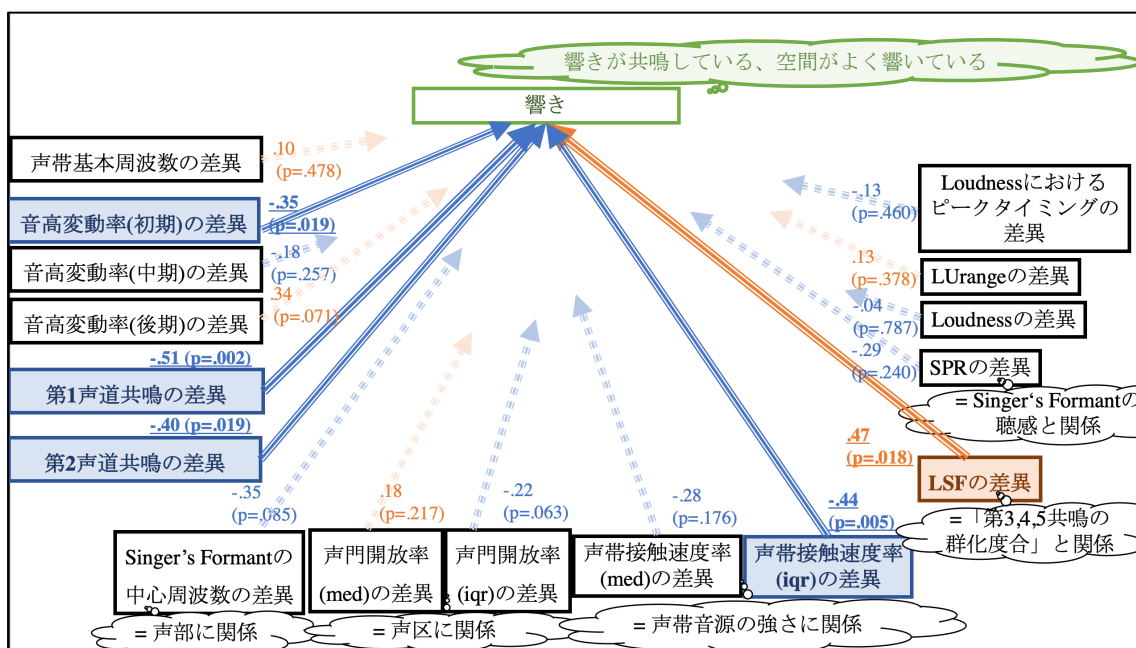


図 5.23: 「響き」の聴取評価語指標を目的変数、各音響特徴量を説明変数とした重回帰分析 ($R^2 = .632$)

5.6.5. 「声質」の聴取評価との比較- 分析3

5 番目は、「声質」という聴取評価語指標に着目する。この指標は、「声質が合っている、倍音が綺麗に聴こえる」といった言葉をもとにしている。「声質」を目的変数とし、各音響特徴量を説明変数とした重回帰分析の結果を図5.24に示す。図5.24を見ると、「Singer's formant の中心周波数の差異」に相関関係が見られている点が、他の聴取評価語指標とは異なる傾向である。これは、声部が近いかどうか、今回扱う「声質」の評価と関連していることを意味する。声部の調節が及ぼす影響については、これまで調べられてこなかった知見となる。

また、先ほどの「呼吸」や「響き」と同様に、声帯振動に関する音響特徴量である「音高変動率（初期・後期）の差異」にも相関関係が見られている。さらに、「まとまり」や「呼吸」の聴取評価結果と同様に、第2声道共鳴周波数の影響が第1声道共鳴周波数よりも大きいことが示唆されている。

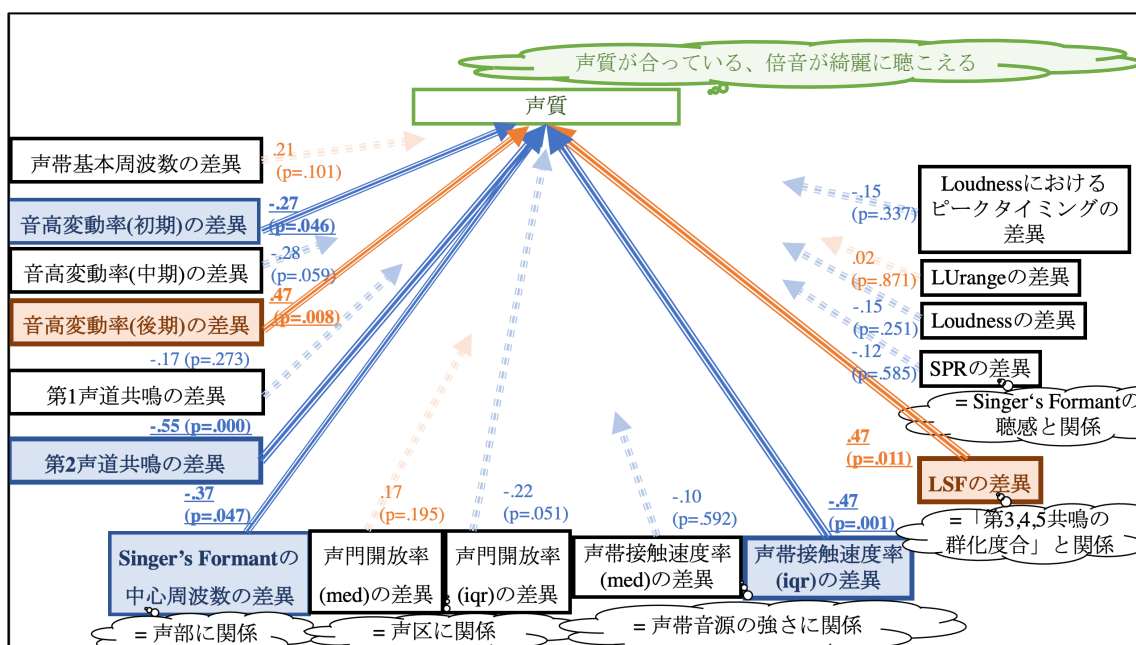


図 5.24: 「声質」の聴取評価語指標を目的変数、各音響特徴量を説明変数とした重回帰分析 ($R^2 = .690$)

5.6.6. 「母音」の聴取評価との比較- 分析3

最後は、「母音」という聴取評価語指標に着目する。この指標は、「母音が揃っている」という言葉をもとにしている。「母音」を目的変数とし、各音響特徴量を説明変数とした重回帰分析の結果を図 5.25 に示す。

図 5.25 で注目すべき点は、声区の違いを示す「声門開放率の中央値 (med)」が有意水準を満たして正の関係性があることと、「声帯接触速度率の中央値 (med)」も有意水準には達しないものの正の関係性が見られることである。声門開放率と声帯接触速度率の解釈としては、歌手間における声門流パルスの速さの違いが「母音が揃っている」と感じさせるということになる。また別の視点では、声道共鳴のピーク形状が歌手間で異なっているほど「母音が揃っている」と解釈できることとなる。ただし、相関関係があるとしても、どの程度の声門開放率の差が適切であるかは明確でなく、単純に差が大きければ良いのかはわからない。

なお、そのほかの結果としては、他の多くの聴取評価語指標と同じく「第 1,2 声道共鳴周波数、音高変動率 (初期)」には負の相関が見られ、「LSF の差異」には正の相関が見られていて、有意水準 ($p = .05$) を下回っている。「声帯接触速度率の四分位範囲 (iqr) の差異」はこの聴取評価語指標でのみ相関があまり見られていない。

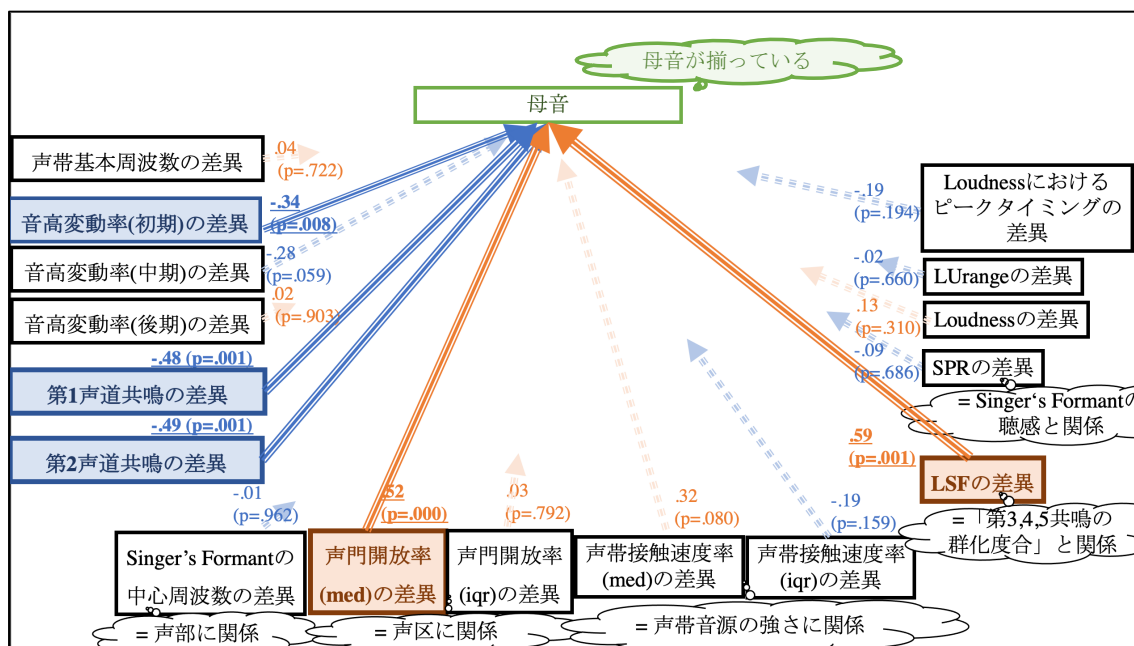


図 5.25: 「母音」の聴取評価語指標を目的変数、各音響特徴量を説明変数とした重回帰分析 ($R^2 = .726$)

5.6.7. 分析3のまとめ

5.6 節の分析3では、歌唱同士における音響特徴量の調整と聴取評価語指標との関連性を比較するため、重回帰分析を実施した。この分析では、各聴取評価語指標を目的変数、各音響特徴量を説明変数とし、聴取評価語指標ごとに相関が見られた音響特徴量を整理しました。5.6.1 節から 5.6.6 節までの結果をまとめると、表 5.4 が得られた。表 5.4 では、聴取評価語指標ごとに相関係数が大きい音響特徴量を順に記載し、有意水準を下回る音響特徴量を正の相関（赤色）と負の相関（青色）で色分けしている。また、特定の聴取評価語指標でのみ関係が見られる音響特徴量は、区別するために太字で表示している。

表 5.4 の通り、多くの聴取評価語指標と強い相関関係のある音響特徴量は第 1,2 声道共鳴周波数であった。これは、歌手の視点だけでなく聴き手の視点からも、声を合わせる上で重要な音響特徴量であることを意味する。また、表 5.4 から、第 1,2 声道共鳴周波数の相関の強さは、聴取評価語指標によって異なることもわかる。具体的には、第 1 声道共鳴周波数は「ピッチ」と「響き」、第 2 声道共鳴周波数は「まとまり」、「呼吸」、および「声質」の聴取評価語指標と比較的強い相関関係がある。これらはそれぞれ異なる聴取感覚に影響を与える可能性がある。さらに、それ以外の音響特徴量として、0 節にて第 1,2 声道共鳴周波数と匹敵する聴取評価への影響が示唆されていた「LSF」、および 4.3 節で聴取評価への影響が示唆されていた「声帯接触速度率の四分位範囲 (iqr)」も、聴取評価語指標全体で相関関係が大きかった。

聴取因子	因果関係のある音響特徴量				
まとまり	第2声道共鳴	声帯接触速度率(iqr)	LSF	第1声道共鳴	
ピッチ	第1声道共鳴	LSF	声帯接触速度率(iqr)	第2声道共鳴	
呼吸	音高変動率(後期)	第2声道共鳴	音高変動率(中期)	声帯接触速度率(iqr)	声門開放率(iqr)
響き	第1声道共鳴	LSF	声帯接触速度率(iqr)	第2声道共鳴	音高変動率(初期)
声質	第2声道共鳴	声帯接触速度率(iqr)	音高変動率(後期)	LSF	Singer's Formantの中心周波数、音高変動率(初期)
母音	LSF	声門開放率(med)	第2声道共鳴	第1声道共鳴	音高変動率(初期)

表 5.4: 有意水準を下回った音響特徴量と各聴取評価との比較のまとめ。相関係数が大きい順に記載しており、正の相関の特徴量を赤色、負の相関の特徴量を青色としている。また、その評価語指標でのみ相関関係が比較的に見られた音響特徴量は太字としている。

また、聴取評価語指標に特有の関連性が見られる音響特徴量は以下の通りである：

- 「呼吸」 → 「音高変動率（中期）」、「声門開放率の四分位範囲（iqr）」
- 「声質」 → 「Singer's formant の中心周波数」
- 「母音」 → 「声門開放率（med）」

これらの結果を踏まえることで、音響特徴量と聴取評価語指標の関連性を理解することができる。これにより、歌唱の音響特徴量がどのように聴取感覚に影響を与えるかについての知見を得ることができる。

5.7. 分析4 - 聴取評価の潜在因子「声が合っているか」と音響特徴量の比較

本節では共分散構造分析 (SEM) を用いて、聴取評価語指標 6 つから「声が合っているか」という潜在因子を作成し、その潜在因子と各音響特徴量との因果関係を調べることで、どの音響特徴量が「声が合っているか」に大きく寄与しているのかを明らかにする。共分散構造分析は、潜在因子を検討しながら、変数間の因果関係をモデル化・検証できる統計手法である。この「声が合っているか」と各音響特徴量との比較を実施することは、本論における最大の目標である。潜在因子が聴取評価語指標 6 つによることから、潜在因子と音響特徴量との関係は、5.6 節 6 つの図の結果を総称したものと扱う。

共分散構造分析の結果を図 5.26 に示す。図の中央の丸枠が「声が合っているか」という目的変数である。そして、各音響特徴量がどの程度説明するかを相関係数で比較している。有意水準 ($p=.05$) を下回っている音響特徴量は、「LSF の差異」が正の相関を示し、「第 1,2 声道共鳴周波数、声帯接触速度率の四分位範囲 (iqr) の差異、音高変動率 (初期) の差異」が負の相関を示す。正の相関があるということは、2 人の音響特徴量の差が小さいほど聴取評価が低いことを意味し、負の相関があるということは、2 人の音響特徴量の差が小さいほど聴取評価が高いことを意味する。これらの音響特徴量は、5.6 節の比較でも聴取評価語指標の種類によらず相関が見られていたものが多く、「声が合っているか」へ総合的に大きく影響する要因であると考えられる。相関係数の度合で見ると「第 1,2 声道共鳴周波数、声帯接触速度率の四分位範囲 (iqr) の差異、LSF の差異」がほぼ同程度であることが確認できるが、第 4 章で行った探索的因子分析 (図 4.6) で得られた潜在因子の 4 種類に対応している。つまり、これらの音響特徴量 4 種が「声が合っているか」に最も影響を与える要素であり、本稿で調べていた他の音響特徴量は図 4.6 の関係で、この音響特徴量 4 種を中心として連動している可能性がある。

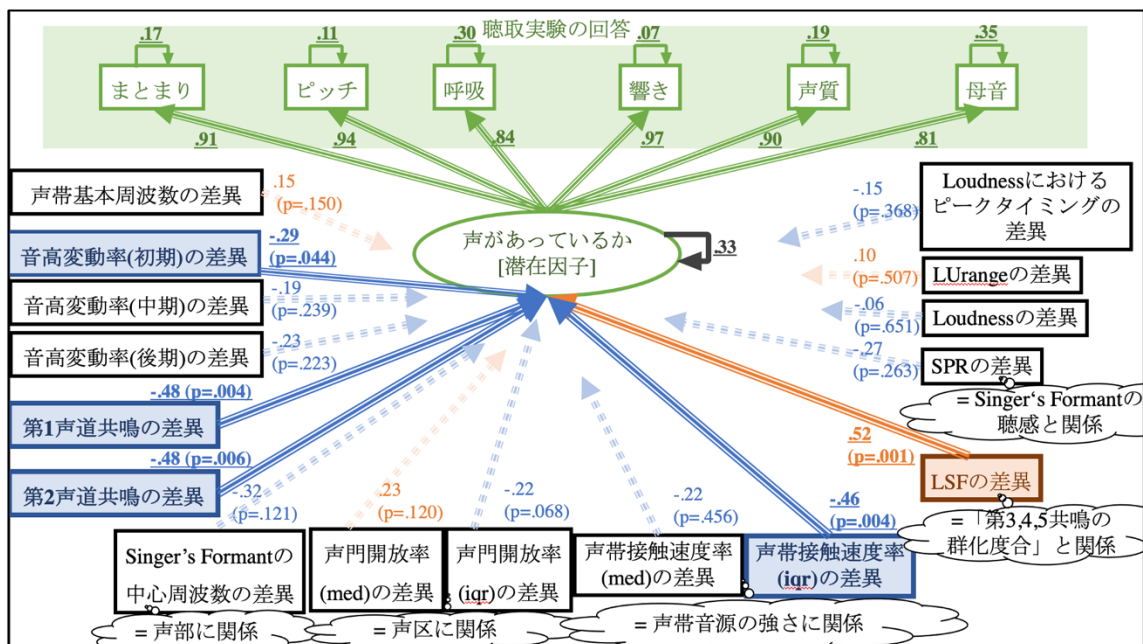


図 5.26: 聴取評価語指標 6 つの潜在因子「声が合っているか」を目的変数、各音響特徴量を説明変数とした共分散構造分析 (SEM)

5.8. 第5章のまとめ

本章では、第4章の歌唱測定実験で得た音響特徴量と「声が合っているか」に関する聴感との対応関係を調べるため、「声が合っているか」に関する評価語彙を整理し(5.2節)、外部音響励振法の影響で含まれる雑音の消音アルゴリズムも実装した上で(5.3節)、全国の合唱歌手に対して第4章の音源を用いて聴取評価実験を実施した。「声が合っているか」に関する評価語彙は、現場に即したものとなるようアンケート調査による選別を実施し、6つの因子に関して1~4個の評価語彙が得られたため、それらを聴取実験の被験者へ提示した。

分析は大きく4つ実施した。まず1つ目の分析では、発声方法や歌手評価ごとにおける聴取因子の変動を参照することで、歌い手側の発声条件が聴き手側の聴感にどのような影響を与えるのか調べるとともに、聴取因子ごとの特徴を整理した(5.5節)。歌い手側の発声条件は、「発声形式(独唱/重唱)」「歌手の発声評価」「歌手同士の相性」「母音の合わせやすさ」「発声スタイル」という区分で比較した。その結果、表5.3より、発声方法(独唱/重唱)による違いの観点から最も影響を受けている評価語指標は「呼吸」で、「歌手評価(歌手の発声評価や歌手同士の相性)」の影響を比較的あまり受けていなかった。

続いて、声道共鳴の調節が聴取評価にどう及ぼしているのかを比較した(0節)。比較の際は、重唱時の近接が見られていた第1,2声道共鳴だけでなく、それ以外で聴感に作用すると疑われた Singer's formant の生成度合に関する指標「LSFの平均差異」も併せて比較した。この指標とした見立てとしては、LSFが近い歌手同士だと、Singer's formant 帯域における過度なエネルギー上昇(=すなわち2人とも Operatic・声楽的に発声している状態)、もしくは過度なエネルギー不足(=すなわち2人とも choral、あるいは通常発話に近い発声状態)を及ぼし得るためだった。LSFが異なる歌手間で異なる場合は、2人のうちどちらかが Opera・声楽的な Singer's formant がはっきり現れるような発声をし、もう1人が choral のような Singer's formant のあまり現れない発声をしているなど、お互いの発声スタイルが異なることとなる。加え、LSFはその算出過程から、第1,2声道共鳴の近接程度に大きく自身の近接が影響を受けるため、第1,2声道共鳴の近接と合わせた分析を行うことができれば、LSFが聴取評価にもたらす影響を判断できるかもしれなかった。その結果、第1,2声道共鳴に LSF を除算した係数で聴取評価6つと相関分析を実施すると、より多くの聴取評価において高い相関係数が得られた。特に「第1,2声道共鳴どちらか近接している方のみ」の分析でより高い相関が見られたことから、3.4節で見られた第1,2声道共鳴が近接しているにもかかわらず聴感が低くなる原因として LSF の近接が関わっている可能性が示唆された。

3つ目の分析では、音響特徴量が聴取結果に及ぼす関係を比較するため、聴取評価語指標を目的変数、各音響特徴量を説明変数とする回帰分析を実施し、聴取評価語指標6つと因果関係のある音響特徴量を個々に確認した(5.6節)。その結果、第1,2声道共鳴周波数は多くの聴取評価語指標と因果関係が大きいだけでなく、それぞれで聴取評価語指標ごとに相関が異なることから、それぞれが異なる聴感因子に影響していた。第1声道共鳴周波数は「ピッチ」「響き」、第2声道共鳴周波数は「まとまり」「呼吸」「声質」の聴取評価語指標とより大きな因果関係にあった。第1,2声道共鳴周波数以外としては、0節で示唆さ

れた「LSF」も全体を通し大きく影響を与える因子だったほか、4.3 節で独立した指標として確認されていた「声帯接触速度率の四分位範囲 (iqr)」も大きく影響を与える因子だった。

最後の分析では共分散構造分析 (SEM) を行い、聴取評価語指標 6 つから潜在因子「声が合っているか」を作成した上で、その潜在因子と各音響特徴量との因果関係を算出し、どの音響特徴量が大きく寄与しているのかについて検討した (5.7 節)。結果、有意水準 ($p=.05$) を下回っている音響特徴量は、正の相関として「第 1,2 声道共鳴周波数、声帯接触速度率の四分位範囲 (iqr) の差異、音高変動率 (初期) の差異」、負の相関として「LSF の差異」が上がり、これらが「声が合っているか」により影響する音響特徴量となる。

第6章 総括

6.1. 実験の全体のまとめ

本論では、同じ音高で複数人が歌う際における発声生成メカニズムの検証を目的として、複数回の段取りを設けた歌唱測定実験を実施することにより、第 1,2 声道共鳴周波数を中心とする音響特徴量の振る舞いを調査した。最終的には多くの被験者を対象とし、1.3 節に記載した音響特徴量の抽出、およびオープンクエスションを用いた被験者へのヒアリング、複数回の収録による詳細な歌手評価を行える実験設定を目指した。さらに、これらの音源を用いて聴覚評価実験を行い、聴感との比較も目指した。

前段階となる予備的な測定実験は、第 2 章と第 3 章で実施した。第 2 章では、外部音響励振法による複数回の測定の結果、安定して第 1,2 声道共鳴周波数を抽出できる母音が/a, o/ であることが判明した。また、発声形式間で第 1,2 声道共鳴周波数の挙動を調査した結果、被験者が第 2 声道共鳴周波数のみを参照歌手に合わせるように変化させていたことが明らかになった。さらに、第 1,2 声道共鳴周波数の調節がない場合、声帯基本周波数の差が有意に小さくなることもわかった。これらの知見をもとに、第 3 章では実験設定を改良し、同時発声を行う歌唱測定実験をより多くの人数で実施した。その結果、第 3 章では第 2 章と異なり、第 1,2 声道共鳴周波数が互いに近接し、特に第 2 声道共鳴周波数が第 1 声道共鳴周波数よりも近接する傾向が見られた。また、「ネガティブな歌手評価の定常発声」では、第 1,2 声道共鳴周波数のどちらかが強く近接し、他と異なる挙動が観察された。ポジティブな歌手評価でも第 1,2 声道共鳴周波数の近接が見られたため、声を合わせる上で重要な音響特徴量として第 1,2 声道共鳴周波数以外にも存在する可能性が示唆された。第 1,2 声道共鳴周波数と声帯基本周波数の比較では、第 2 章と同様の結果が得られた。

第 4 章では、第 2 章と第 3 章の検討を考慮し、本節冒頭に上述した実験設定のような本論で望まれる大規模な歌唱測定実験を実施した。まず、音響特徴量の関係を比較するために探索的因子分析を使用し、重唱時の音響特徴量の振る舞いにどのような共通因子が含まれているのか、また第 1,2 声道共鳴周波数以外の要素がどのように調節されているのかを分析した。分析の結果、重唱時の音響特徴量の振る舞いに関する共通因子は大きく 4 つ見つかった。それらは、「1 音高内における声帯基本周波数の変動に関する因子」、「第 2 声道共鳴に関する因子」、「第 1 声道共鳴に関する因子」、および「音高間における声帯基本周波数の変動に関する因子」だった。これらの結果から、第 1,2 声道共鳴周波数の調節が重唱において主要な振る舞いであるだけでなく、他の音響特徴量にも作用していることが明らかになった。具体的に見ると、第 1 声道共鳴の近接は、声部・声区や声帯音源の強さが被験者間で異なるかに影響を受けていた他、第 2 声道共鳴の近接は Singer's formant の大きさに関わる特徴量 (LSF, SPR) と影響を受けていた。加え、4 つの因子の内訳から、重唱において第 1,2 声道共鳴周波数以外の主な因子は声帯基本周波数に関連していた。また、「声帯接触速度率の四分位範囲 (iqr) (説明は 1.3.5 節に記載)」の歌手間における相関が、「音高間における声帯基本周波数の変動に関わる因子」へ含まれており、新たに確認されたため後の分析において注視することとした。声帯接触速度率の四分位範囲 (iqr)

が歌手間で近接しているほど、メロディ・旋律をより正確な基本周波数でお互いに発声できるという解釈となる。歌手評価（「歌手同士の相性」と「歌手の発声評価」）と第 1,2 声道共鳴周波数の比較では、「合わせやすい歌手同士」では「合わせやすすくない歌手同士」よりも第 1,2 声道共鳴周波数がより近接していた他、歌手の発声評価が高い重唱でも、そうでない場合（発声評価が低い場合や独唱の場合）より第 1,2 声道共鳴周波数が歌手同士で近接していた。歌手評価に関しては、第 1 声道共鳴と第 2 声道共鳴の間で差が見られなかった。これらの結果から、歌手が自身の発声の評価しようとする際の音響的要因として、第 1,2 声道共鳴周波数が両方共に関係していることとなる。これらの検討を総じて踏まえると、第 1,2 声道共鳴周波数の調節が歌手評価の違いとして現れたことは、第 1,2 声道共鳴周波数の調節が母音の感覚の調節に留まらず、LOUDNESS の調節などの他要素にも影響する特徴であるためだと解釈できる。なお、第 1,2 声道共鳴の近接に関する第 3 章の補足的分析として 1 人の被験者に着目した比較を行い、第 1,2 声道共鳴周波数がただ近接すれば良いわけではないこと、並びに何か別の要因が隠れている可能性があることを検討した。

最後に第 5 章では、第 4 章の歌唱測定実験で得た音響特徴量と「声が合っているか」に関する聴感との対応関係を調べるため、「声が合っているか」に関する評価語彙を整理し、外部音響励振法の影響で含まれる雑音の消音アルゴリズムも実装した上で、全国の合唱歌手に対して第 4 章の音源を用いて聴取評価実験を実施した。「声が合っているか」に関する評価語彙は、現場に即したものとなるようアンケート調査による選別を実施し、6 つの因子に関して 1~4 個の評価語彙が得られたため、それらを聴取実験の被験者へ提示した。この分析は大きく 4 つ実施した。まず 1 つ目の分析では、発声方法や歌手評価ごとで歌い手側の発声条件が聴き手側の聴感にどう影響を与えるのか調べ、聴取評価語指標 6 つの特徴を整理した。その結果、発声方法（独唱／重唱）による違いの観点から最も影響を受けている評価語指標は「呼吸」で、「歌手評価（歌手の発声評価や歌手同士の相性）」の影響を比較的あまり受けていないと認識した。続いて 2 つ目の分析としては、声道共鳴の調節が聴取評価にどう及ぼしているのかを比較した。比較の際は、重唱時の近接が見られていた第 1,2 声道共鳴だけでなく、それ以外で聴感に作用すると疑われた Singer's formant の生成度合に関する指標「LSF の平均差異（説明は 1.3.6 節に記載）」も併せて比較した。その結果、第 1,2 声道共鳴に LSF を除算した係数で聴取評価 6 つと相関分析を実施すると、より多くの聴取評価において高い相関係数が得られた。特に「第 1,2 声道共鳴どちらか近接している方のみ」の分析でより高い相関が見られたことから、3.4 節で見られた第 1,2 声道共鳴が近接しているにもかかわらず聴感が低くなる原因として LSF の近接が関わっている可能性が示唆された。

3 つ目の分析では、音響特徴量が聴取結果に及ぼす関係を比較するため、聴取評価語指標を目的変数、各音響特徴量を説明変数とする回帰分析を実施し、聴取評価語指標 6 つと因果関係のある音響特徴量を個々で確認した。その結果、第 1,2 声道共鳴周波数は多くの聴取評価語指標と因果関係が大きいだけでなく、それぞれで聴取評価語指標ごとに相関が異なることから、それぞれが異なる聴感因子に影響していた。第 1 声道共鳴周波数は「ピッチ」「響き」、第 2 声道共鳴周波数は「まとまり」「呼吸」「声質」の聴取評価語指標とより大きな因果関係にあった。第 1,2 声道共鳴周波数以外としては、2 つ目の分析で示唆されていた「LSF」、第 4 章で確認されていた「声帯接触速度率の四分位範囲 (iqr)」が全体を通して大きく影響を与える因子だった。

最後の分析では共分散構造分析（SEM）を行い、聴取評価語指標6つから潜在因子「声が合っているか」を作成した上で、その潜在因子と各音響特徴量との因果関係を算出し、どの音響特徴量が大きく寄与しているのかについて検討した。結果、有意水準（ $p = .05$ ）を下回っている音響特徴量は、負の相関として「第 1,2 声道共鳴周波数、声帯接触速度率の四分位範囲（iqr）の差異、音高変動率（初期）の差異」、正の相関として「LSF の差異」が上がり、これらが「声が合っているか」により影響する音響特徴量であることがわかった。

6.2. 声を合わせることに作用する音響特徴量の振る舞い

本節では、本論の目標だった「声を合わせることに作用する音響特徴量の振る舞い」について検討する。先述の通り、声を合わせることに作用する音響特徴量は、「第 1,2 声道共鳴周波数、声帯接触速度率の四分位範囲 (iqr) の差異、音高変動率 (初期) の差異」だった。[57]では母音形成の周波数帯にスペクトルが集中すると良い blend となっていたが、この周波数帯を集中させる働きに、「第 1,2 声道共鳴周波数」だけでなく「LSF」の調節も加味して行なわれていることとなる。それぞれの音響特徴量には下記のようにまとめることができる。と考える。

- 声が合っていると感じる際における第 1,2 声道共鳴周波数は、共に歌手同士で「ある程度」近接している。第 1,2 声道共鳴周波数が共に近接することによって、母音の明瞭度やまとまり感を始めとする聴感全体へ大きく影響を及ぼす。ただし、第 1,2 声道共鳴周波数はある程度近接していれば良く、近接しすぎると過度な周波数帯のピークによって不明瞭な山ができてしまっている可能性もある。
- 声が合っていると感じる際における歌手同士の LSF は、第 1,2 声道共鳴周波数と同程度の近接割合である。また「LSF」の近接割合が「第 1,2 声道共鳴周波数」を超えない。LSF (= 第 3,4,5 声道共鳴のクラスター度合) が歌手間で近い場合、第 1,2 声道共鳴周波数の知覚に対しても悪影響を及ぼすと思われる。[58]で挙げられていた声道共鳴の intensity の下降現象は、LSF の調節に伴う結果見られた現象であると思われる。(紛らわしいこととして、LSF は第 3,4,5 声道共鳴のクラスター度合を表すが、Singer's formant のピークを表しているわけではない。)
- 良い blend では、「声帯接触速度率のばらつき」が、歌手同士で同程度である：[59]で挙げられていた「重唱時に声道共鳴の間にある部分音がより強くなっていた現象」は、声帯接触速度率の調節に伴うものであると思われる[59]の事例では声帯接触速度率がより高くなっていると解釈できる。[59]と異なる点としては、ただ声帯接触速度率を高めれば良いわけではなく、歌手同士がお互いを聴き合うことで臨機応変に調節する必要があることである。相手歌手の「声帯接触速度のばらつき」に応じて自身も調節することが良い blend にとって重要となる。

6.3. ピッチの判断に作用する音響特徴量の振る舞い

本節では、本論で取り上げてきた「声を合わせること」の検討に派生する内容として、「ピッチの判断に作用する音響特徴量の振る舞い」についてわかったことを記述する。第 5 章より、複数人歌唱では、第 1,2 声道共鳴周波数が声帯基本周波数よりも「ピッチが合っているか」への判断に作用していたことがわかった。この結果は、ピッチ知覚に関わる特徴が声帯基本周波数だけでなく音色要因 (スペクトル重心・intensity・持続時間) も競合していること[60,61]、基本周波数差 Δf_0 が 0 ~ 2 % 以下の場合、スペクトル重心の変化がピッチ変化の主要な予測因子となること[62]、合唱歌手・指揮者が、F0 の標準偏差 ± 14 cent を

許容すること[63,64]と整合する。更に、前述の情報と同じく「LSF」も関係してくることがわかっている。

ただし、声帯基本周波数が完全にピッチ感に作用しない訳ではないと思われる。本研究の被験者は総じて合唱経験や声楽経験を多く有する構成である。また、発声試行も、実際の練習現場で歌われるような曲目よりは比較的難易度の低い。これらは、実験時における基本周波数の過度なずれが生じにくい要因となっていた。特に、声帯基本周波数差 Δf_0 が0~2%以上の場合には聴感に対する影響が大きくなるものと思われる。

また、前述した「声帯接触速度のばらつき」という指標は、旋律（メロディ、異なっていく音高）を譜面通り上手く調節することと大きく関係のある因子であることが判明した。すなわち、良いピッチ感覚に作用する因子としても、「第1,2声道共鳴周波数」と「LSF」「声帯接触速度のばらつき」が作用していくことがわかった。

6.4. 既存研究に対する本研究の新規性、並びに実務的貢献

本論では、従来から取り扱いつらく十分に分析されていなかった特徴量のうち、実際の合唱現場の知見と関わりが深い要因を広く抽出した上で比較している。特に、外部音響励振法に基づく「声道共鳴周波数」の厳密な抽出、EGGの声帯振動に基づき「声部」や「声帯音源の強さ」に関連する「声門解放率」「声帯接触速度率」、Singer's formantの関連指標である「LSF」は、いずれも複数人歌唱において今まで文献として取り上げられていなかった。これらは歌手から個別に抽出しており、独自性の高い測定データである。

また、これらの抽出や分析は専門的技術が必要となり、先行文献を複数レビューしなければならないことから歌唱研究においてハードルが高い特徴量である。具体的に記述すると、声道共鳴周波数の抽出に用いる外部音響励振法は、測定するためのホーンを自作し、且つ分析・抽出手法もレビューする必要があるがあった。分析時にあたっては、声道共鳴周波数に関連する少なくない既存文献を把握・整理することが必要となった。また、EGGに基づく指標の抽出に用いるDECOM法も、文献[122]から用法とアルゴリズムを読み解く必要があったし、そこから取り出される特徴量がどのような性質や振る舞いをするのかについて別途で文献把握する必要があるがあった、EGGそのものは従来の歌唱研究から用いられてきたが、体系的な振る舞いは直近（2022年時点）まで極めて重要な結果が提示されてきており、扱うパラメータの用法については最新の文献までくまなく把握することが必要とされた。更に、LSFは現場の間隔として扱われるようないわゆる「歌手が感じている自身の響き」を把握できる本質的なパラメータと捉えられる一方、抽出の煩雑性から既存のSinger's formantに関連する文献にて調べられてこなかった。すなわち本文献は、抽出法・分析法の難易度が高い（発声の振る舞いを検討する上では重要な）特徴量を一括で説明する初の日本語文献であり、本文献を読むことで、それらの特徴量の扱いを把握しやすくなる。

また、そのような特徴量を抽出するだけでなく、歌唱測定実験の中でも大人数（39人）の発声データを扱っていることも、実務的貢献として述べる。さらにその発声データセットは、発声においてよく指摘される歌手の指摘が付随ラベルとして格納され、複数のセットが存在する。その上、発声歌手の考え方に関連するデータセットと聴感から得られる主観評価のデータセットも併せて付随し、合唱における知見を細かな粒度まで検討できるデータセットとしている。それらのデータセットは、海外の歌唱音響学研究において長年に渡

って提起されてきた発声補助器具の実装に留まらず、真に現場で必要とされる機器としての実現までを見通すことにつながるとも考える。

6.5. 研究の限界と今後の課題

本論における分析は、限定的な実験設定に基づくものであることに留意する。外部音響励振法の制約により母音は閉母音を採用できなかった。また、曲発声における分析を第4章と第5章では行なっていない他、第4章で実施したスピーカー提示、ヘッドフォン提示の測定結果についても本論ではまとめていない。これらの実験設定の検討は、今回記載している分析を優先して本論では記載していないが、今後改めて分析していきたいと考える。

また、本論では時間軸の検討を十分に行えなかったが、今回の結果を鑑みる限り検討が不可欠である。音声知覚における「初め」や「終わり」は、しばしば特別な知覚的優位性を持つ傾向があるとされる。例として、女声の合成音声を用いた自然性を尋ねる主観評価実験では、formant tuning が初めや終わりに発生する刺激と途中にのみ現れる刺激とで聴取評価に大きな差が出た[141]。本論に目を向けると、発声方法（独唱／重唱）ごとの比較で最もはっきり結果に反映されていた聴取評価語指標「呼吸」は、時間軸に関係する因子が多く関係している（5.6.3 節）。そのような結果をより掘り下げるためにも、各特徴量について時間軸でより細かく検討することが重要となる。

また、本論では技術レベルに関する検討を十分に行うことができなかった。今回見られたような歌手同士の振る舞いは、歌手の技量やもともと持っている発声の習慣に起因する可能性もある。例えば、声道共鳴周波数の調節では第1声道共鳴と第2声道共鳴が連動するため、意図せずして調節しない声道共鳴周波数を調節する可能性がある。被験者の技量としては、十分に発声を調節する能力が無いか、調節において不足する能力がある、また安定しない場合、無意識的に基本周波数を認識して調節している場合、意識が他に向くなどで相手の声を聴けてない場合も考えられる。独唱歌唱の声道共鳴周波数の検討でも被験者の技量によって結果が異なり[60,74]、被験者の技量に関する定量的な分析が必要となる。

参考文献

- [1] D. E. Brown, "Human universals, human nature & human culture," *Daedalus*, vol. 133, no. 4, pp. 47–54, 2004.
- [2] S. Pinker, *The blank slate : the modern denial of human nature*. Viking, 2002.
- [3] S. Mithen, "Review Feature The Singing Neanderthals: the Origins of Music, Language, Mind and Body," *Cambridge Archaeol. J.*, vol. 16, no. 1, pp. 97–112, 2006.
- [4] "全日本合唱連盟 (Home Page)." [Online]. Available: <https://jcanet.or.jp/profile/jca-gaiyo.htm>. [Accessed: 21-May-2021].
- [5] "European Choral Association." [Online]. Available: <https://europeanchoralassociation.org/>. [Accessed: 31-Aug-2021].
- [6] 河西秀哉, うたごえの戦後史. 人文書院, 2016.
- [7] M. Kob, N. Henrich, H. Herzel, D. Howard, I. Tokuda, and J. Wolfe, "Analysing and Understanding the Singing Voice: Recent Progress and Open Questions," *Curr. Bioinform.*, vol. 6, no. 3, pp. 362–374, 2011.
- [8] 北條加奈, 相澤直人, 楠山敏行, 必ず役立つ合唱の本 ボイストレーニングと身体の使い方編. ヤマハミュージックメディア, 2017.
- [9] 古橋富士雄, 必ず役立つ合唱の本 日本語作品編. ヤマハミュージックメディア, 2015.
- [10] J. Sundberg, *The science of the singing voice*. Northern Illinois University Press, 1987.
- [11] N. Henrich Bernardoni, J. Smith, and J. Wolfe, "Vocal tract resonances in singing: Variation with laryngeal mechanism for male operatic singers in chest and falsetto registers," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 135, no. 1, pp. 491–501, 2014.
- [12] "Journal of Voice (Home Page)." [Online]. Available: <https://www.jvoice.org/>.
- [13] Y. Lee, M. Oya, T. Kaburagi, S. Hidaka, and T. Nakagawa, "Differences Among Mixed, Chest, and Falsetto Registers: A Multiparametric Study," *J. Voice*, 2021.
- [14] T. Biddlecombe, "Assessing and Enhancing Feedback of Choral Conductors Through Analysis and Training," *Int. J. Res. Choral Sing.*, vol. 4, pp. 2–18, 2012.
- [15] W. Tsai and H. Wang, "Automatic Detection and Tracking of Target Singer," pp. 221–224, 2004.
- [16] J. Devaney, "Estimating Onset and Offset Asynchronies in Polyphonic Score-Audio Alignment," *J. New Music Res.*, vol. 43, no. 3, pp. 266–275, Jul. 2014.
- [17] 上原崇寛, 亀川徹, 丸井淳史, "日本の合唱歌手に対する「発声の補助器具」の意識調査," 音楽音響研究会4月研究会, pp. 1–6, 2021.

- [18] J. Bohm, F. Eyben, M. Schmitt, H. Kosch, and B. Schuller, "Seeking the SuperStar: Automatic assessment of perceived singing quality," *Proc. Int. Jt. Conf. Neural Networks*, vol. 2017-May, pp. 1560–1569, 2017.
- [19] 新実徳英, "合唱っていいな！—作曲・演奏・指揮をめぐって." Kōzuikikaku, 2015.
- [20] S. Zadig, G. Folkestad, and V. Lyberg-Ahlander, "Multi-track recordings of choral singers : Development and validation of a method to identify activities and interaction in the choral voice , based on recordings of the individual singers," *Bull. Empir. Music Educ. Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–20, 2016.
- [21] E. Ekholm, "The Effect of Singing Mode and Seating Arrangement on Choral Blend and Overall Choral Sound," *J. Res. Music Educ.*, vol. 48, no. 2, pp. 123–135, 2000.
- [22] C. Aspaas and C. McCrea, "Select acoustic and perceptual measures of choral formation," ... *Res. Choral ...*, vol. 2, no. January 2004, pp. 11–26, 2004.
- [23] P. E. Keller, "Ensemble performance: Interpersonal alignment of musical expression," *Expressiveness Music Perform. Empir. approaches across styles Cult.*, no. January 2014, pp. 260–282, 2014.
- [24] P. Papiotis, M. Marchini, and E. Maestre, "Computational Analysis of Solo Versus Ensemble Performance in String Quartets : Intonation and Dynamics," *Proc. 12th Int. Conf. Music Percept. Cogn. 8th Trienn. Conf. Eur. Soc. Cogn. Sci. Music*, no. December 2019, pp. 778–784, 2012.
- [25] J. D. Loehr and C. Palmer, "Temporal coordination between performing musicians," *Q. J. Exp. Psychol.*, vol. 64, no. 11, pp. 2153–2167, 2011.
- [26] P. E. Keller, G. Knoblich, and B. H. Repp, "Pianists duet better when they play with themselves: On the possible role of action simulation in synchronization," *Conscious. Cogn.*, vol. 16, no. 1, pp. 102–111, 2007.
- [27] N. Pennington, "Cognitive Approaches to Judgment and Decision Making," *Psychol. Learn. Motiv.*, vol. 32, pp. 1–31, Jan. 1995.
- [28] C. Gupta, H. Li, and Y. Wang, "Perceptual evaluation of singing quality," *Proc. - 9th Asia-Pacific Signal Inf. Process. Assoc. Annu. Summit Conf. APSIPA ASC 2017*, vol. 2018-Febru, pp. 577–586, 2018.
- [29] C. Watts, K. Barnes-Burroughs, M. Andrianopoulos, and M. Carr, "Potential factors related to untrained singing talent: A survey of singing pedagogues," *J. Voice*, vol. 17, no. 3, pp. 298–307, 2003.
- [30] J. Wapnick and E. Ekholm, "Expert consensus in solo voice performance evaluation.," *J. Voice*, vol. 11, no. 4, pp. 429–36, Dec. 1997.
- [31] C. Cao, M. Li, J. Liu, and Y. Yan, "A study on singing performance evaluation criteria for untrained singers," in *2008 9th International Conference on Signal Processing*, 2008, pp. 1475–1478.
- [32] J. M. Oates, B. Bain, P. Davis, J. Chapman, and D. Kenny, "Development of an auditory-perceptual rating instrument for the operatic singing voice.," *J. Voice*, vol. 20, no. 1, pp. 71–81, Mar. 2006.

- [33] P. Upton, A. Maddocks, P. Barnes, and M. Meeuwssen, "The Quality of Life in Care questionnaire: An assessment of feasibility, test-retest reliability and responsiveness in a clinical sample," *Vulnerable Child. Youth Stud.*, vol. 8, no. 1, pp. 10–17, 2013.
- [34] O. Mayor, J. Bonada, and A. Loscos, "Performance analysis and scoring of the singing voice," *Proc. AES Int. Conf.*, no. May 2014, 2009.
- [35] K. Morimura, "A Proposal on a Learning System to Realize Maestro 's Favorite SPL Balance," *ICMPC9 Proc.*, no. July, 2014.
- [36] R. Parncutt and G. McPherson, *The science and psychology of music performance : creative strategies for teaching and learning*. Oxford University Press, 2002.
- [37] J. Sundberg, *The Human Voice | Comprehensive Human Physiology*. 1996.
- [38] I. R. Titze, "Physiologic and acoustic differences between male and female voices," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 85, no. 4, pp. 1699–1707, 1989.
- [39] I. R. Titze, *Principles of Voice Production*. 1994.
- [40] M. Hirano, S. Kurita, and S. Sakaguchi, "Ageing of the vibratory tissue of human vocal folds.," *Acta Otolaryngol.*, vol. 107, no. 5–6, pp. 428–33, 1989.
- [41] T. Koizumi, S. Taniguchi, and S. Hiromitsu, "Glottal source-vocal tract interaction," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 78, no. 5, pp. 1541–1547, 1985.
- [42] G. Fant and Q. Lin, "Glottal source - vocal tract acoustic interaction," no. October, 1987.
- [43] Martin Rothenberg, "Acoustic Interaction Between the Glottal Source and the Vocal Tract," in *Vocal Fold Physiology*, T. K. N. Stevens and M. Hinano (University of Tokyo Press, Ed. 1981, pp. 305–328.
- [44] I. R. Titze, "A FOUR-PARAMETER MODEL OF THE GLOTTIS AND VOCAL FOLD CONTACT AREA," *Speech Commun.*, vol. 8, pp. 191–201, 1989.
- [45] D. Childers and A. Krishnamurthy, "A critical review of electroglottography.," undefined, 1985.
- [46] J. M. Hillenbrand, R. A. Houde, and R. T. Gayvert, "Speech perception based on spectral peaks versus spectral shape," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 119, no. 6, pp. 4041–4054, 2006.
- [47] G. J. Borden, K. S. Harris, and L. J. Raphael, "新ことばの科学入門". 医学書院, 2005.
- [48] G. Fant, *Acoustic Theory of Speech Production*. 1970.
- [49] A. Palaparthi and I. R. Titze, "Analysis of glottal inverse filtering in the presence of source-filter interaction," *Speech Commun.*, vol. 123, no. February, pp. 98–108, 2020.

- [50] I. R. Titze and A. S. Worley, "Modeling source-filter interaction in belting and high-pitched operatic male singing," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 126, no. 3, pp. 1530–1540, 2009.
- [51] T. Kaburagi, "Voice production model integrating boundary-layer analysis of glottal flow and source-filter coupling," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 14, no. 1, pp. 1554–1567, 2011.
- [52] T. Kaburagi, M. Ando, and Y. Uezu, "Source-filter interaction in phonation: A study using vocal-tract data of a soprano singer," *Acoust. Sci. Technol.*, vol. 40, no. 5, pp. 313–324, 2019.
- [53] Z. Bradford, "Vocal resonance : Optimising source- filter interactions in voice training," *fusion J.*, vol. 15, no. 15, pp. 47–70, 2019.
- [54] I. R. Titze, T. Riede, and P. Popolo, "Nonlinear source-filter coupling in phonation: Vocal exercises," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 123, no. 4, pp. 1902–1915, 2008.
- [55] D. G. Childers and Chun-Fan Wong, "Measuring and modeling vocal source-tract interaction," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 41, no. 7, pp. 663–671, Jul. 1994.
- [56] I. R. Titze, "Nonlinear source-filter coupling in phonation: Theory," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 123, no. 5, pp. 2733–2749, 2008.
- [57] Knutson, "Interviews with selected choral conductors concerning rationale and practices regarding choral blend," Ph.D. Diss. Florida State Univ., 1987.
- [58] E. Joliveau, J. Smith, and J. Wolfe, "Tuning of vocal tract resonance by sopranos," *Nature*, vol. 427, no. 6970, p. 116, 2004.
- [59] E. Joliveau, J. Smith, and J. Wolfe, "Vocal tract resonances in singing: The soprano voice," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 116, no. 4, pp. 2434–2439, 2004.
- [60] J. Sundberg, F. M. B. Lã, and B. P. Gill, "Formant tuning strategies in professional male opera singers," *J. Voice*, vol. 27, no. 3, pp. 278–288, 2013.
- [61] 大谷圭介, "博士論文 声区転換部を含むオペラ歌唱の音響的特性," 2014.
- [62] S. Ternström and J. Sundberg, "Intonation precision of choir singers," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 84, no. 1, pp. 59–69, 1988.
- [63] S. Ternström and J. Sundberg, "Formant frequencies in choir singers," *STL-QPSR, R. Inst. Technol.*, pp. 43–55, 1987.
- [64] W. A. Hunt, "Spectrographic Analysis of the Acoustical Properties of Selected Vowels in Choral Sound," 1970.
- [65] A. W. Goodwin, "An Acoustical Study of Individual Voices in Choral Blend," *J. Res. Music Educ.*, vol. 28, no. 2, pp. 119–128, Jun. 1980.

- [66] H. Andrew, "SPECTROGRAPHIC COMPARISON OF CERTAIN VOWELS TO ASCERTAIN DIFFERENCES BETWEEN SOLO AND CHORAL SINGING, REINFORCED BY AURAL COMPARISON," PhD Diss., 1967.
- [67] J. Sundberg, F. M. B. Lã, and B. P. Gill, "Professional male singers' formant tuning strategies for the vowel /a/," *Logop. Phoniatr. Vocology*, vol. 36, no. 4, pp. 156–167, 2011.
- [68] J. J. Sidtis, "Functional connectivity associated with acoustic stability during vowel production: Implications for vocal-motor control," *Brain Connect.*, vol. 5, no. 2, pp. 115–125, 2015.
- [69] J. Epps, J. R. Smith, and J. Wolfe, "A novel instrument to measure acoustic resonances of the vocal tract during phonation," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 10, pp. 1112–1121, 1997.
- [70] A. Dowd, J. Smith, and J. O. E. Wolfe, "Learning to pronounce vowel sounds in a foreign language using acoustic measurements of the vocal tract as feedback in real time . Key words," *Lang. Speech*, vol. 41, pp. 1–20, 1998.
- [71] M. Kob and C. Neuschaefer-Rube, "A method for measurement of the vocal tract impedance at the mouth," *Med. Eng. Phys.*, vol. 24, no. 7–8, 2002.
- [72] 古川貴博, "歌唱音声における音響特徴の分析," 平成27年度九州大学修士卒業論文, 2016.
- [73] M. Jeanneteau, N. Hanna, A. Almeida, J. Smith, and J. Wolfe, "Open-Source Software for Estimating Vocal Tract Resonances Using Broadband Excitation At the Lips," *Int. Conf. Phonetic Sci.*, no. August, 2019.
- [74] N. Henrich, J. Smith, and J. Wolfe, "Vocal tract resonances in singing: Strategies used by sopranos, altos, tenors, and baritones," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 129, no. 2, pp. 1024–1035, 2011.
- [75] K. A. Lim and C. Raphael, "In tune: A system to support an instrumentalist's visualization of intonation," *Comput. Music J.*, vol. 34, no. 3, pp. 45–55, 2010.
- [76] J. Devaney and D. P. W. Ellis, "An Empirical Approach to Studying Intonation Tendencies in Polyphonic Vocal Performances," *J. Interdiscip. Music Stud.* [electronic version], vol. 2, no. 1&2, pp. 141–156, 2008.
- [77] Y. Han, S. Kwon, and K. Lee, "A Musical Performance Evaluation System for Beginner Musician based on Real-time Score Following," *Nime2013.Kaist.Ac.Kr*, no. January, pp. 1–2, 2013.
- [78] S. Grollmisch, E. Cano, and C. Dittmar, "Songs2See: Learn to play by playing," *Proc. AES Int. Conf.*, no. February, 2011.
- [79] C. E. Seashore, "The Natural History of the Vibrato," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 17, no. 12, pp. 623–626, 1931.
- [80] J. Sundberg, "Acoustic and psychoacoustic aspects of vocal vibrato," *StL-QPSR*, vol. 35, pp. 45–68, 1994.
- [81] S. Duvvuru, "The Effect of Timbre and Vibrato on Vocal Pitch Matching Accuracy," 2012.

- [82] S. Duvvuru and M. Erickson, "The Effect of Timbre, Pitch, and Vibrato on Vocal Pitch-Matching Accuracy," in *Journal of Voice*, 2016, vol. 30, no. 3, pp. 378.e1-378.e12.
- [83] M. A. Joy E. Ollen, "A criterion-related validity test of selected indicators of musical sophistication using expert ratings," Degree Dr. Philos. Grad. Sch. Ohio State Univ., 2006.
- [84] P. G. Singh and I. J. Hirsh, "Influence of spectral locus and F₀ changes on the pitch and timbre of complex tones," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 92, no. 5, pp. 2650–2661, 1992.
- [85] S. Ternström, "Perceptual evaluations of voice scatter in unison choir sounds," *STL-QPSR, R. Inst. Technol.*, vol. 32, pp. 041–049, 1991.
- [86] S. Ternström, "Choir acoustics – an overview of scientific research published to date," no. April, 2002.
- [87] H. Jers and S. Ternström, "Intonation analysis of a multi-channel choir recording," no. December, 2005.
- [88] B. Hagerman and J. Sundberg, "Fundamental frequency adjustment in barbershop singing," 1980.
- [89] H. Cuesta, E. Gómez, A. Martorell, and F. Loáiciga, "Analysis of Intonation in Unison Choir Singing," in *15th International Conference on Music Perception and Cognition*, 2018.
- [90] H. von Helmholtz and A. J. Ellis, *On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music*. .
- [91] S. D'Amario and D. M. Howard, "Tuning tendencies in a singing quintet: Evolution across rehearsals," *Proceeding MAVERBA, 17-19 December 2019*, no. December 2019, 2019.
- [92] S. D'Amario, D. M. Howard, H. Daffern, and N. Pennill, "A Longitudinal Study of Intonation in an a cappella Singing Quintet," *J. Voice*, vol. 34, no. 1, pp. 159.e13-159.e27, 2020.
- [93] "VT-12 | Vocal Trainer (Roland)." [Online]. Available: <https://www.roland.com/jp/products/vt-12/>.
- [94] J. Dai and S. Dixon, "Analysis of interactive intonation in unaccompanied SATB ensembles," in *Proceedings of the 18th International Society for Music Information Retrieval Conference, ISMIR 2017*, 2017.
- [95] D. M. Howard, "Intonation Drift in A Capella Soprano, Alto, Tenor, Bass Quartet Singing With Key Modulation," *J. Voice*, vol. 21, no. 3, pp. 300–315, 2007.
- [96] S. D'Amario, H. Daffern, and F. Bailes, "A new method of onset and offset detection in ensemble singing," *Logop. Phoniatr. Vocology*, vol. 44, no. 4, pp. 143–158, 2019.
- [97] S. D'Amario, H. Daffern, and F. Bailes, "Synchronization in singing duo performances: The roles of visual contact and leadership instruction," *Front. Psychol.*, vol. 9, no. JUL, 2018.
- [98] S. D'Amario, "Interpersonal Synchronization in Ensemble Singing: The Roles of Visual Contact and Leadership, and Evolution across Rehearsals (PhD thesis)," no. November, 2018.

- [99] R. E. Moore, J. Estis, S. Gordon-Hickey, and C. Watts, "Pitch Discrimination and Pitch Matching Abilities with Vocal and Nonvocal Stimuli," *J. Voice*, vol. 22, no. 4, pp. 399–407, Jul. 2008.
- [100] M. T. H. Chi, P. J. Feltovich, and R. Glaser, "Categorization and representation of physics problems by experts and novices," *Cogn. Sci.*, vol. 5, no. 2, pp. 121–152, 1981.
- [101] D. Augustin and H. Leder, "Art expertise: a study of concepts and conceptual spaces," *Psychol. Sci.*, vol. 48, no. 2, pp. 135–156, 2006.
- [102] H. Daffern, "Blend in Singing Ensemble Performance: Vibrato Production in a Vocal Quartet," *J. Voice*, vol. 31, no. 3, pp. 385.e23-385.e29, 2017.
- [103] T. D. Rossing and J. Sundberg, "Voice timbre in solo and choir singing: Is there a difference?," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 76, no. S1, pp. S41–S41, 1984.
- [104] O. Babacan, T. Drugman, N. Alessandro, and N. Henrich, "A comparative study of pitch extraction algorithms on a large variety of singing sounds," *IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process.*, 2013.
- [105] P. Boersma, "Acurate short-term analysis of the fundamental frequency and the harmonics-to-noise ratio of a sampled sound.Boersma, P., 1993. Acurate short-term analysis of the fundamental frequency and the harmonics-to-noise ratio of a sampled sound., in: IFA Proceedi," *IFA Proc.* 17, vol. 17, pp. 97–110, 1993.
- [106] W. B. (W. B. Kleijn and K. K. (Kuldip K. . Paliwal, *Speech coding and synthesis*. Elsevier, 1995.
- [107] "ESP Package Manager." [Online]. Available: <https://www.msweet.org/epm/>. [Accessed: 31-Aug-2021].
- [108] "Speech Signal Processing Toolkit (SPTK)." [Online]. Available: <http://sp-tk.sourceforge.net/>. [Accessed: 31-Aug-2021].
- [109] T. Drugman and A. Alwan, "Joint robust voicing detection and pitch estimation based on residual harmonics," *Proc. Annu. Conf. Int. Speech Commun. Assoc. INTERSPEECH*, pp. 1973–1976, 2011.
- [110] "Gloat パッケージ." [Online]. Available: https://github.com/jckane/Voice_Analysis_Toolkit/blob/master/README. [Accessed: 31-Aug-2021].
- [111] H. Kawahara, J. Estill, and O. Fujimura, "Aperiodicity extraction and control using mixed mode excitation and group delay manipulation for a high quality speech analysis, modification and synthesis system STRAIGHT," *undefined*, 2001.
- [112] H. Kawahara, A. De Cheveigné, H. Banno, T. Takahashi, and T. Irino, "Nearly defect-free F0 trajectory extraction for expressive speech modifications based on STRAIGHT," *9th Eur. Conf. Speech Commun. Technol.*, no. September, pp. 537–540, 2005.
- [113] A. de Cheveigné and H. Kawahara, "YIN, a fundamental frequency estimator for speech and music," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 111, no. 4, pp. 1917–1930, 2002.

- [114] “Yin pitch estimator.” [Online]. Available: <http://audition.ens.fr/adc/sw/>. [Accessed: 31-Aug-2021].
- [115] D. M. Howard and J. Brereton, “Testing a new protocol to measure tuning response behaviour in solo voice ensemble singing.,” *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference SMAC*, pp. 231–237, 2013.
- [116] M. Rothenberg and J. J. Mahshie, “Monitoring vocal fold abduction through vocal fold contact area,” *J. Speech Hear. Res.*, vol. 31, no. 3, pp. 338–351, 1988.
- [117] P. Fabre, “Un procédé électrique percutane d’inscription de l’accolement glottique au cours de la phonation: glottographie de haute fréquence; premiers résultats.,” *Bull. Acad. Natl. Med.*, vol. 141, no. 3–4, 1957.
- [118] M. Rothenberg, “A multichannel electroglottograph,” *J. Voice*, vol. 6, no. 1, pp. 36–43, 1992.
- [119] R. Holloway, “Electroglottography / electrolaryngography,” no. January 2009, 2016.
- [120] R. H. Colton and E. G. Conture, “Problems and pitfalls of electroglottography,” *J. Voice*, vol. 4, no. 1, pp. 10–24, 1990.
- [121] S. D’Amario and H. Daffern, “Using electrolaryngography and electroglottography to assess the singing voice: A systematic review.,” *Psychomusicology Music. Mind, Brain*, vol. 27, no. 4, pp. 229–243, Dec. 2017.
- [122] N. Henrich, C. d’Alessandro, B. Doval, and M. Castellengo, “On the use of the derivative of electroglottographic signals for characterization of nonpathological phonation,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 115, no. 3, pp. 1321–1332, 2004.
- [123] S. N. Awan, A. R. Krauss, and C. T. Herbst, “An Examination of the Relationship Between Electroglottographic Contact Quotient, Electroglottographic Decontacting Phase Profile, and Acoustical Spectral Moments,” *J. Voice*, vol. 29, no. 5, pp. 519–529, 2015.
- [124] O. Babacan, T. Drugman, N. d’Alessandro, N. Henrich, and T. Dutoit, “A Comparative Study of Pitch Extraction Algorithms on a Large Variety of Singing Sounds,” Dec. 2019.
- [125] S. Dalla Bella, D. Deutsch, J.-F. Giguère, I. Peretz, and D. Deutsch, “Singing proficiency in the general population,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 121, no. 2, pp. 1182–1189, 2007.
- [126] R. Miller, 上手に歌うためのQ&A -歌い手と教師のための手引書. Ongakunotomoshia, 2009.
- [127] J. Sundberg, “Level and Center Frequency of the Singer’s Formant,” *J. Voice*, vol. 15, no. 2, pp. 176–186, 2001.
- [128] L. Dmitriev and A. Kiselev, “Relationship between the Formant Structure of Different Types of Singing Voices and the Dimensions of Supraglottic Cavities,” *Folia Phoniatr. Logop.*, vol. 31, no. 4, pp. 238–241, 1979.
- [129] A. Löfqvist, “The long-time-average spectrum as a tool in voice research,” *J. Phon.*, vol. 14, no. 3–4, pp. 471–475, 1986.

- [130] B. Roubeau, N. Henrich, and M. Castellengo, "Laryngeal Vibratory Mechanisms: The Notion of Vocal Register Revisited," *J. Voice*, vol. 23, no. 4, pp. 425–438, 2009.
- [131] M. Garnier, N. Henrich, L. Crevier-Buchman, C. Vincent, J. Smith, and J. Wolfe, "Glottal behavior in the high soprano range and the transition to the whistle register," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 131, no. 1, pp. 951–962, 2012.
- [132] M. Hirano, "The Role of the Layer Structure of the Vocal Fold in Register Control," *Vox Humana, Univ. Jyvaskyla*, vol. 50–62, 1982.
- [133] N. Henrich, B. Roubeau, and M. Castellengo, "On the use of electroglottography for characterisation of the laryngeal mechanisms.," *Proc. Stock. Music Acoust. Conf.*, vol. 2003, no. Smac 03, pp. 1–4, 2003.
- [134] N. Henrich, F. Orsay, C. Alessandro, and B. Doval, "Glottal open quotient in singing : Measurements and correlation with laryngeal mechanisms , vocal intensity , and fundamental frequency," *Acoust. Soc. Am.*, vol. 117, no. 3, pp. 1417–1430, 2005.
- [135] F. M. B. La and J. Sundberg, "Contact quotient versus closed quotient: A comparative study on professional male singers," *J. Voice*, vol. 29, no. 2, pp. 148–154, 2015.
- [136] J. Sundberg, F. M. B. Lã, and B. P. Gill, "Voice Source Variation Between Vowels in Male Opera Singers," in *Journal of Voice*, 2016, vol. 30, no. 5.
- [137] W. T. Bartholomew, "A Physical Definition of 'Good Voice-Quality'" in the Male Voice," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 5, no. 3, p. 224, 1934.
- [138] J. Sundberg, "The singer's formant revisited," *Stl-Qpsr*, vol. 36, no. 2–3, pp. 83–96, 1995.
- [139] M. Fleischer, J. Sundberg, A. Mainka, A. Poznyakovskiy, I. Platzek, and M. Fleischer, "Lower Vocal Tract Morphologic Adjustments Are Relevant for Voice Timbre in Singing," no. July, 2015.
- [140] J. Sundberg, "Articulatory interpretation of the 'singing formant,'" *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 55, no. 4, pp. 838–844, 1974.
- [141] G. Berndtsson and J. Sundberg, "Perceptual significance of the center frequency of singer's formant," *Logop. Phoniatr. Vocology*, vol. 20, no. 1, pp. 35–41, 1994.
- [142] T. Rossing, J. Sundberg, and S. Ternstrom, "Acoustic comparison of voice use in solo and choir singing," 1984.
- [143] J. K. Ford, "Preferences for Strong or Weak Singer 's Formant Resonance in Choral Tone Quality," *Int. J. Res. Choral Sing.*, vol. 1, pp. 29–47, 2003.
- [144] K. Omori, A. Kacker, L. M. Carroll, W. D. Riley, and S. M. Blaugrund, "Singing power ratio: quantitative evaluation of singing voice quality.," *J. voice*, vol. 10, no. 3, pp. 228–35, Sep. 1996.

- [145] R. F. Coleman, "Dynamic intensity variations of individual choral singers," *J. Voice*, vol. 8, no. 3, pp. 196–201, Sep. 1994.
- [146] 小野測器, "ラウドネス." [Online]. Available: https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c_support/newreport/noise/souon_13.htm. [Accessed: 01-Sep-2021].
- [147] 日本ポストプロダクション協会, "ラウドネス講座第7回 ラウドネス及び音に関する用語説明と計算式," 2013.
- [148] "ISO - ISO 532-1:2017 - Acoustics — Methods for calculating loudness — Part 1: Zwicker method." [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/63077.html>. [Accessed: 01-Sep-2021].
- [149] "Standard-compliant loudness measurements - MATLAB." [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/audio/ref/loudnessmeter-system-object.html>. [Accessed: 01-Sep-2021].
- [150] "Perceived loudness of acoustic signal - MATLAB acousticLoudness." [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/audio/ref/acousticloudness.html>. [Accessed: 01-Sep-2021].
- [151] "ITU-R BS.1771 : Requirements for loudness and true-peak indicating meters." [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BS.1771/en>. [Accessed: 01-Sep-2021].
- [152] EBU, "Loudness Range: A measure to supplement loudness normalisation in accordance with EBU R 128," 2011.
- [153] J. Sundberg, P. Gramming, and J. Lovetri, "Respiratory and Acoustical Differences Between Belt and Neutral Style of Singing," *Toxicol. Environ. Chem.*, vol. 7, no. 4, pp. 301–310, 1993.
- [154] M. Thalén and J. Sundberg, "Describing different styles of singing: a comparison of a female singer's voice source in "Classical", "Pop", "Jazz" and "Blues"," *Logoped. Phoniatr. Vocol.*, vol. 26, no. 2, pp. 82–93, 2001.
- [155] R. E. Stone, T. F. Cleveland, J. Sundberg, and J. Prokop, "Aerodynamic and acoustical measures of speech, operatic, and Broadway vocal styles in a professional female singer.," *J. Voice*, vol. 17, no. 3, pp. 283–97, Sep. 2003.
- [156] E. Björkner, J. Sundberg, T. Cleveland, and E. Stone, "Voice Source Differences Between Registers in Female Musical Theater Singers," *J. Voice*, vol. 20, no. 2, pp. 187–197, 2006.
- [157] E. Björkner, "Musical Theater and Opera Singing-Why So Different? A Study of Subglottal Pressure, Voice Source, and Formant Frequency Characteristics," *J. Voice*, vol. 22, no. 5, pp. 533–540, 2008.
- [158] D. Gottlob and H. Alrutz, "Acoustical conditions preferred for ensemble," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 64, no. 5, pp. 1437–1442, 1978.
- [159] A. H. Marshall and J. Meyer, "The Directivity and Auditory Impressions of Singers."

謝辞

本博士論文の完成に際し、多くの皆様からのご支援を受けたことに心から感謝いたします。

指導教官の亀川徹教授には、本学入学前の大学院修士2年生の頃から今日に至るまで、研究に対する熱心な指導と適切なアドバイスをいただきました。また、社会人博士としての相談にも乗っていただき、研究の進め方を学ぶことができました。

また、同じ研究グループの丸井淳史教授にも丁寧な指導を受け、亀川先生と異なる視点からの検討を重ねることができました。お陰で、客観性を保ちながら研究を進めることができました。

同じく、社会人博士を承諾して勤めさせていただけた某 C 社の寛大な配慮につきましても深く感謝申し上げます。某 C 社におかれましては、素晴らしい環境、人間性の深い社風でありながら、及ばずながら十分貢献できないまま遠のいてしまったことに対し深く反省しております。および、現在所属させていただいている某 O 社の細やかなる配慮につきましても深く感謝申し上げます。本研究で取り組んできたことを活かし、必ずや社業の発展に貢献していきたいと存じております。

本学同学科の後藤英准教授、田村文生准教授、および本学声楽科の萩原潤准教授にも、それぞれの専門分野からの確かな指導と助言をいただきました。また、実験音源の収録に協力いただいた亀川・丸井研究室の皆様、被験者として参加していただいた歌手の皆様、アンケートに協力していただいた合唱エキスパートの皆様、聴取実験に協力していただいた全日本合唱連盟所属の歌手の皆様にも心より感謝申し上げます。

特に、小学生時代に同じ合唱団に所属していた本大学院声楽科の富永果捺子さん、同じく本学声楽科の富永早耶香さん、そして私と小学校・高校の合唱部で一緒に本学楽理科の岡田知理さんには、本学声楽科全域への声掛けや多くの合唱団への参加希望を募ることに協力いただきました。この御恩は忘れません。

そもそも本学で博士課程に取り組めたのは、修士課程まで在籍していた九州大学芸術工学部音響設計学科の先生方、先輩方のお陰でした。鎗木時彦教授、若宮幸平助教、山内勝也准教授、高田正幸准教授、岩宮眞一郎名誉教授、博士の先輩である上江洲安史さん、岡田昌大さんから研究の基盤となる姿を学ばせていただきました。学会発表などの際には、折に触れて励ましと助言をいただき、感謝しております。

および、第 2,3 章の研究を行う上で非常にお手伝いいただいた声楽家の上野目泰之様、および混声合唱団うたうたい、九大混声合唱団の皆様にも感謝いたします。

最後に、長い研究生生活を長崎から支えてくださった両親や親族の皆様にも深く感謝申し上げます。皆様の支援と助けがなければ、本博士論文を完成させることができませんでした。

改めまして、本博士論文を完成させるにあたりご協力いただいた全ての皆様にも心から感謝申し上げます。

付録 A. 合唱技術と発声補助器具の関係に関するアンケート調査

本付録では、日本全国の合唱歌手のエキスパート（全日本合唱コンクール全国大会に出場した大学合唱団と社会人合唱団）を対象にアンケート調査を実施し、合唱技術と発声補助器具に関する共通認識を確認することで、本論のための指針とする。そのためアンケート調査は、回答者属性と発声技術に関する設問、「発声補助器具」について尋ねる設問を中心にする。

A.1. アンケートの概要

2019 年に開催された全日本合唱コンクール全国大会の大学ユース合唱の部（= 大学合唱団）と混声合唱の部（= 社会人合唱団）に出場した合唱団に対し、web 上のアンケートフォームへの回答を依頼・周知した。その結果、計 15 団体（大学合唱団 7 団体・社会人合唱団 8 団体、）の歌手 175 人から回答を得られた。アンケート回答団体の内訳を図 A. 1 に、年齢・経験歴・パートの内訳を図 A. 2 に記載する。



図 A. 1: アンケート回答団体の内訳

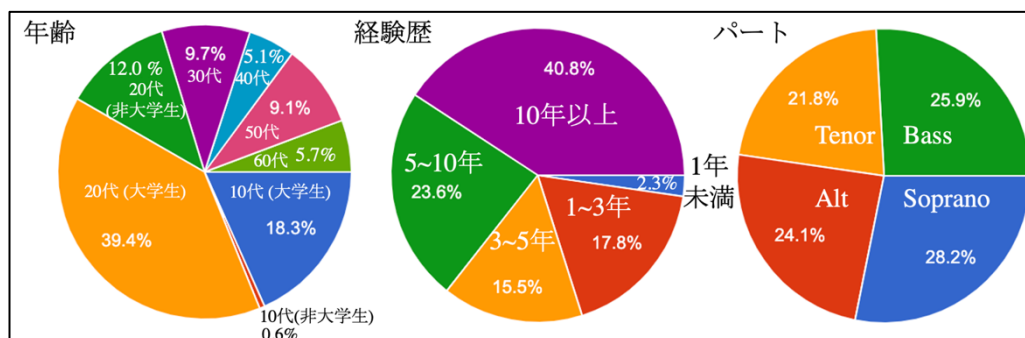


図 A. 2: アンケート回答者の年齢・経験歴・パート

A.2. アンケートの設問内容

設問は、5分での回答を目安に10問とした。アンケートの設問内容を図A.3に示す。内訳は、「回答者の発声技術」に関する問い（設問1,2,3,5）、「発声補助器具への認識」に関する問い（設問6,7,8,9）の他、2020年から新型コロナウイルス（covid-19）が世界中で蔓延したことを考慮した設問（設問4）と、1.5.6節の知見や第4章での結果も踏まえた設問（設問10）を加えている。「発声技術」に関する設問は1.7節を踏まえ、発声の「指摘判断力/自己判断力」の問い（設問1,2）、「発声技術への自信」の問い（設問3）、「重唱への対応力」の問い（設問5）を設けた。また、「発声補助器具」に関する設問は、使用意欲の有無の問い（設問6）、メリット3種（情報交換の促進・指導者負担の軽減・演奏成果）の支持を尋ねる問い（設問7,8,9）を設けた。なお、尺度数は設問に対する回答者の負担を考慮し、7件法と10件法を使い分ける。分析の複雑性や回答時間の短縮・収集率を考慮し、自由記述は検討しなかった。

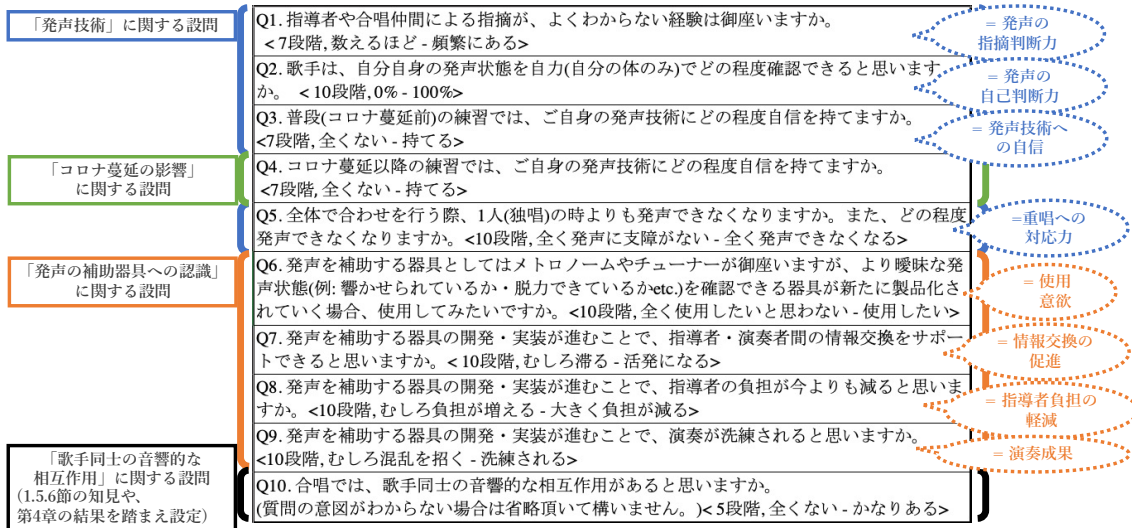


図 A. 3: アンケートの設問内容

A.3. 発声技術に関する質問の結果

「発声技術に関する設問（設問 1, 2, 3, 5）」の結果を図 A. 4 に示す。設問ごとの集計から見ると、「指摘判断力（設問 1）」や「普段の自信（設問 3）」を尋ねる設問では、3 以下を回答するグループと 5 以上を回答するグループの 2 つに分かれた。「発声技術の自己判断力（設問 2）」は、ある程度あると認識している回答者が多い一方、満遍なく評価が分かれた。「重唱への対応力（設問 5）」は、支障なく発声できる回答者が多かった。続いて、これら設問項目間の関係をヒートマップにて比較した（図 A. 5, 図 A. 6）。2 群間の無相関検定も実施して、設問間でどの程度相関があるかを調べ、有意水準 ($p = .05$) を下回っているかも含めて記載している。まず、「指摘判断力（設問 1）」「自己判断力（設問

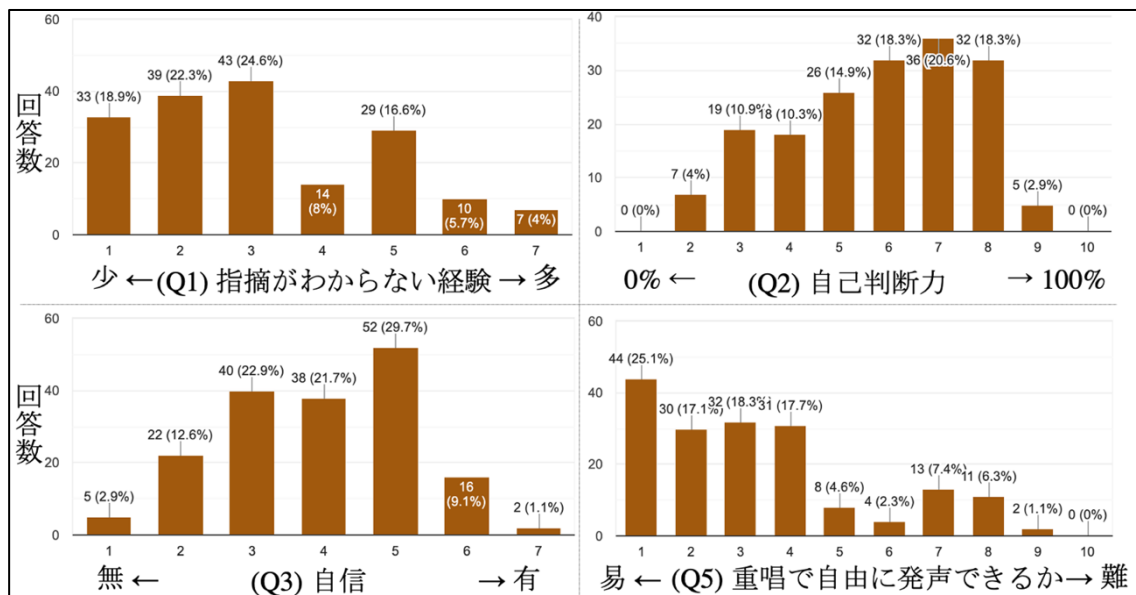


図 A. 4: 「発声技術に関する設問（設問 1, 2, 3, 5）」の回答結果

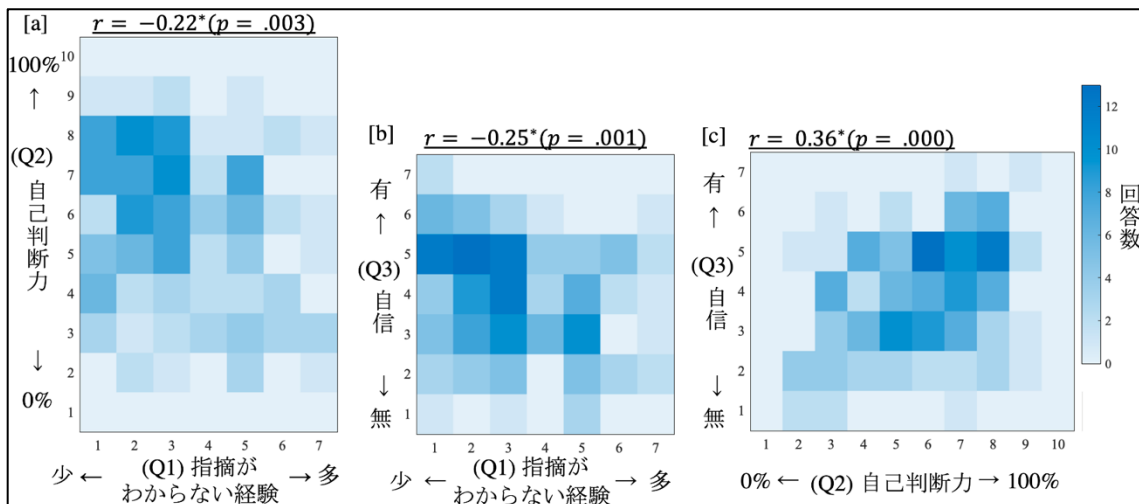


図 A. 5: ヒートマップによる設問間の比較（設問 1, 2, 3）

2)」、「普段の自信（設問3）」同士をヒートマップにして比較すると（図 A. 5a,b,c）、いずれの比較でも有意水準を下回った。発声に関する指摘に対応できる人ほど、自力で発声状態を判断でき、発声技術に自信を持つ傾向となる。

次に、「重唱への対応力（設問5）」と「指摘判断力/普段の自信（設問1,3）」を先ほどと同様ヒートマップにして比較しても（図 A. 6a,b）、有意水準を下回る弱い相関を示した。なお、「重唱への対応力（設問5）」と「自己判断力（設問2）」は相関が見られなかった（無相関検定： $r = -0.12$ ($p = .127$))。重唱へ対応できるために必要な因子としては、指摘判断力が自己判断力以上に優先されることとなる。

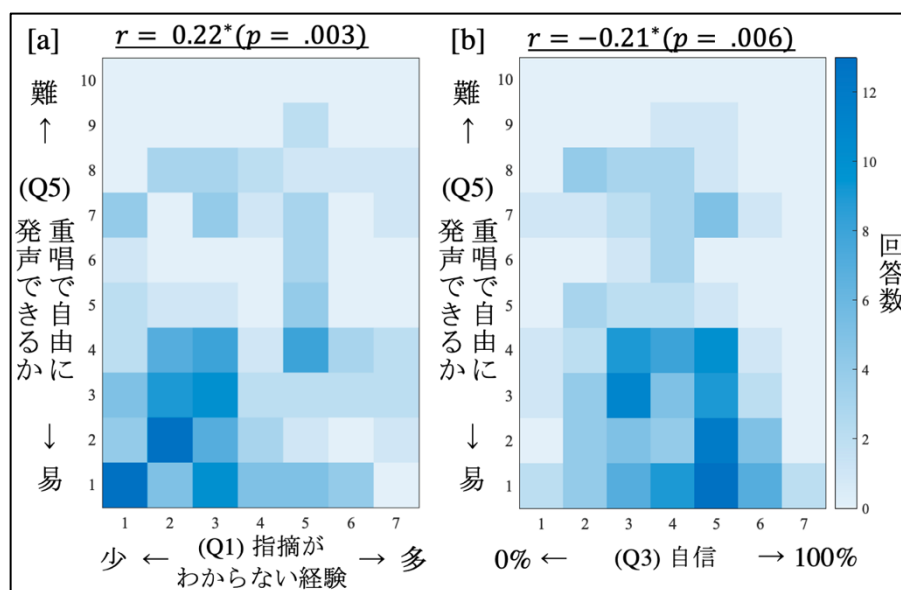


図 A. 6: ヒートマップによる設問間の比較（設問 1, 3, 5）

A.4. 発声補助器具に関する設問の結果

「発声の補助器具に関する設問（設問6,7,8,9）」の回答結果を図A.7に示す。設問ごとの集計から見ると、「発声の補助器具の使用意欲（設問6）」は突出して10の回答が多く、「情報交換の促進に関するメリットの支持（設問7）」も半数以上の回答者が8以上を回答していた。「指導者負担・演奏成果に関するメリットの支持（設問8,9）」は設問6や設問7ほど評価が極端でなく、5～10の中で満遍なく分かれた。設問間の関係をA.3節と同様に比較するため「発声補助器具の使用意欲（設問6）」と「指摘判断力/自己判断力/普段の自信（設問1~3）」とで無相関検定を行った所、「自己判断力（設問2）」のみ有意な相関が見られた（設問1： $r = .04$ ($p = .601$)、設問2： $r = .18$ ($p = .027$)、質問3： $r = .10$ ($p = .180$)、図は割愛）。発声状態の自己判断を不安に捉える人ほど、発声補助器具が開発された場合興味を寄せることになる。なお、「発声補助器具の使用意欲（設問6）」と回答者属性を比較した所、大学合唱団・若者の使用意欲が高かった（図A.8）。

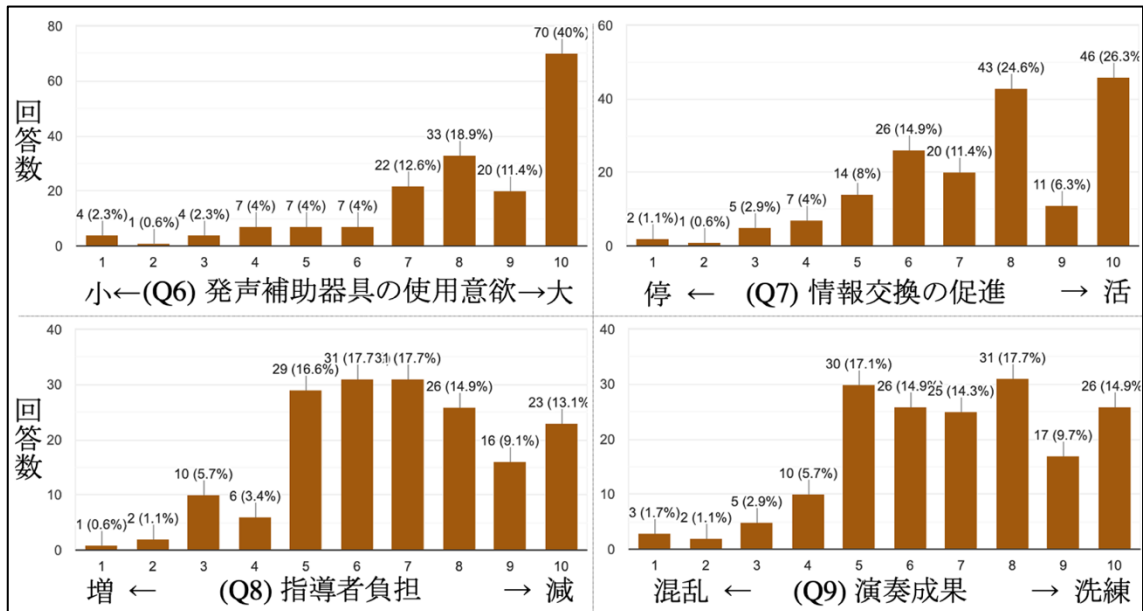


図 A.7: 発声補助器具に関する設問（設問6,7,8,9）の結果

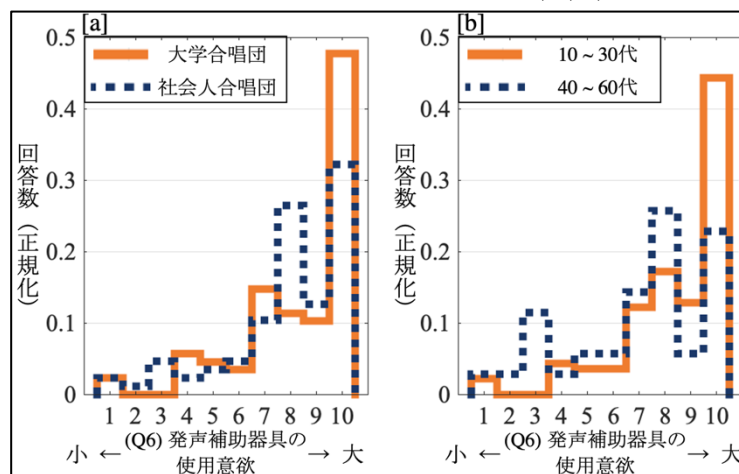


図 A.8: 設問6と回答者属性（所属団体・年齢）の比較

「発声補助器具の使用意欲（設問 6）」とそのメリット（情報交換・指導者負担・演奏成果）に関する問い（設問 7, 8, 9）をヒートマップにすると（図 A. 9a, b, c）、補助器具の使用意欲がある人は、メリット 3 種それぞれを支持していた。メリット同士の相関も高く（図 A. 10a, b, c）、情報交換や指導者負担の点における有用性が演奏成果にがると予想する人が多いようだった。ただし、評価番号 6～10 間でばらつきがあり、回答者によってメリットの認識に差がある。回答者属性として所属団体で指導者負担に関する設問（設問 8）を比較した所、大学合唱団の回答者の方が指導者負担のメリットを支持する傾向にあった（図 A. 11a）。回答者のパート間で指導者負担に関する設問（設問 8）を比較した場合、パート間による極端な差はないものの、女声パートが指導者負担のメリットを支持する傾向にあった（図 A. 11b, c）。

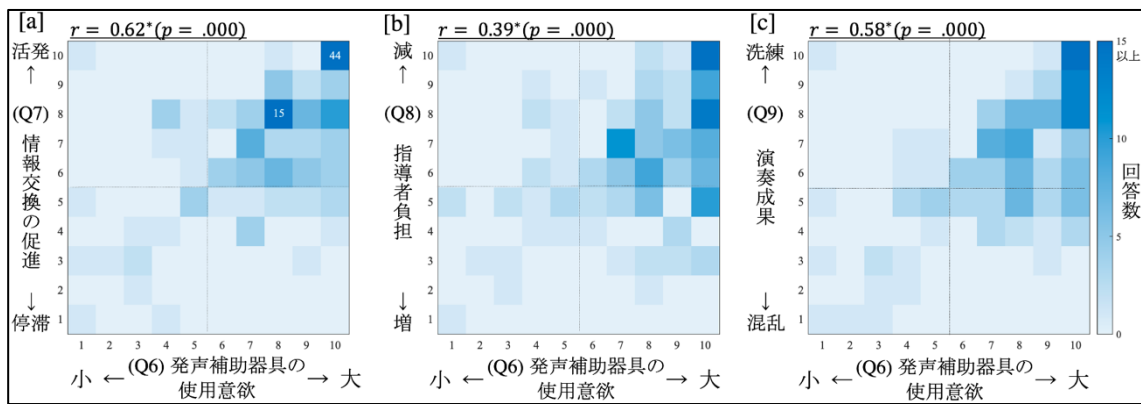


図 A. 9: ヒートマップによる設問間の比較（設問 6, 7, 8, 9）

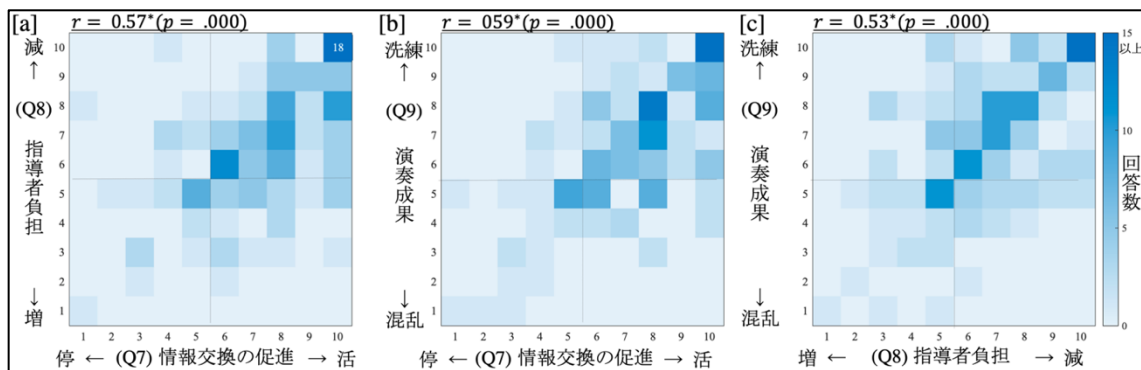


図 A. 10: ヒートマップによる設問間の比較（設問 7, 8, 9）

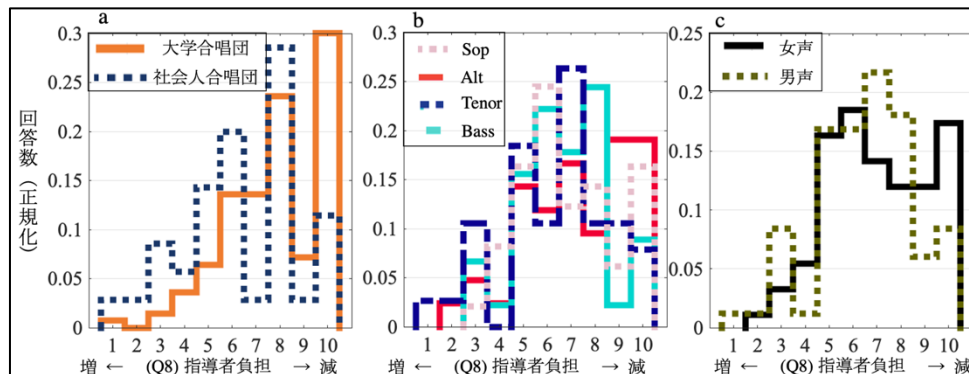


図 A. 11: 「指導者負担のメリットの支持（設問 8）」に関する歌手属性の比較

A.5. 「歌手同士の音響的な相互作用」の有無を尋ねる設問の結果

「歌手同士の音響的な相互作用（設問 10）」の回答結果を図 A.12 に示す。図 A.12 より、合唱において、歌手同士の音響的な相互作用があると考えている回答者が約 9 割に上った。また、設問 10 と他の質問項目との比較を図 A.13 に示す。図 A.13 では、設問 10 で 4 と答えた回答者と 5 と答えた回答者を比較した。図 A.13a, b より、自分の状態を判断できる人や重唱に対応できる人ほど、「歌手同士における音響的な相互作用」の認識を強く持っていた。同様に図 A.13c, d, e, f より、「歌手同士における音響的な相互作用」の認識を強く持つ人ほど発声補助器具の使用意欲があり、情報交換や指導者負担のメリットを支持し、演奏成果にも繋げられると認識していた。6 種の比較それぞれで Mann Whitney の U 検定を実施した所、「重唱への対応力（設問 5）」と「発声補助器具の使用意欲（設問 6）」における比較が有意水準を下回った。

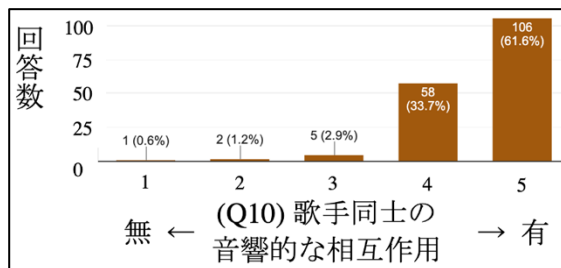


図 A.12: 「歌手同士の音響的な相互作用（設問 10）」の結果

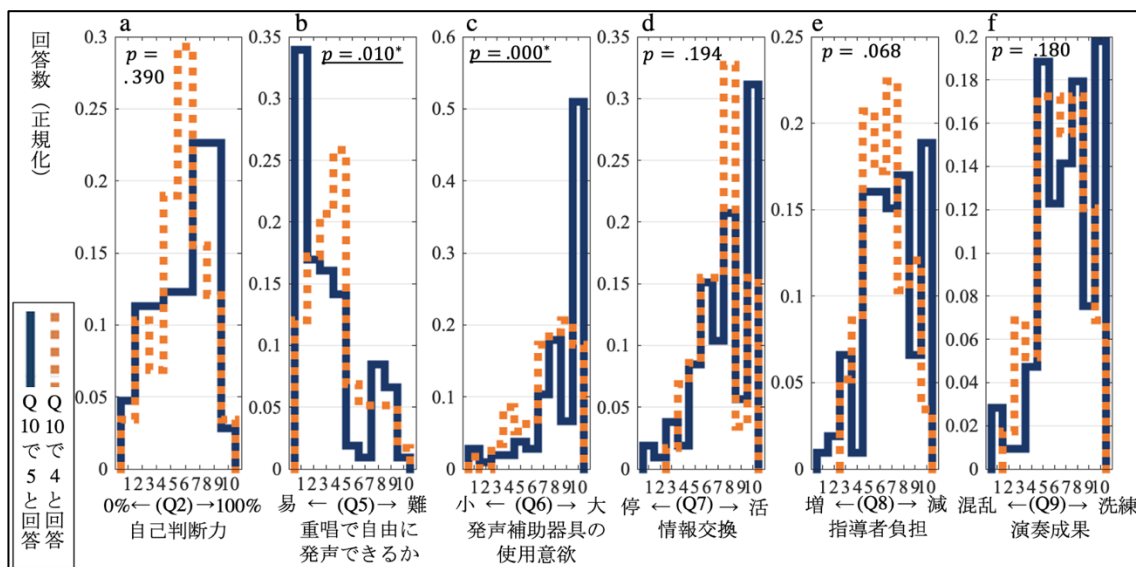


図 A.13: 「歌手同士の音響的な相互作用（設問 10）」と他設問の比較

A.6. 発声補助器具に関する潜在的ニーズの検討

本節は 5.7 節と同じ手法である共分散構造分析により、発声補助器具の潜在的なニーズを検討する。今回は、高い相関が見られる「補助器具のメリット（設問 7～9）」の潜在因子を作成し、全設問間との因果関係を検証した（図 A. 14）。設問 7～9 の潜在変数を「発声補助器具のメリットにおける全体的な支持」とし、「発声補助器具の使用意欲」と併せて他の設問（設問 1～5,10）と比較している。モデルの当てはまり具合を表す適合度指標はいずれも当てはまりが良いとされる適値だった（表 A.1, 各適合度指標の説明は省略）。図 A. 14 ではパス同士の相関係数が±0.4 の範囲だったため、0.2 前後より大きい場合に関係があるとみなして太字で示す。図 A.14 より、「メリットの全体的な支持」は「重唱への対応力」と関係が見られた。また、「発声補助器具の使用意欲（設問 6）」とメリットの関係は情報交換促進と演奏効果（設問 7,9）でのみ見られ、指導者負担軽減（設問 8）は寄与が低かった。「発声補助器具の使用意欲（設問 6）」と関係のある発声技術関連の設問は「自己判断力（設問 2）」と「歌手同士の音響的な相互作用（設問 10）」で、A.4 節や A.5 節の結果が反映されている。

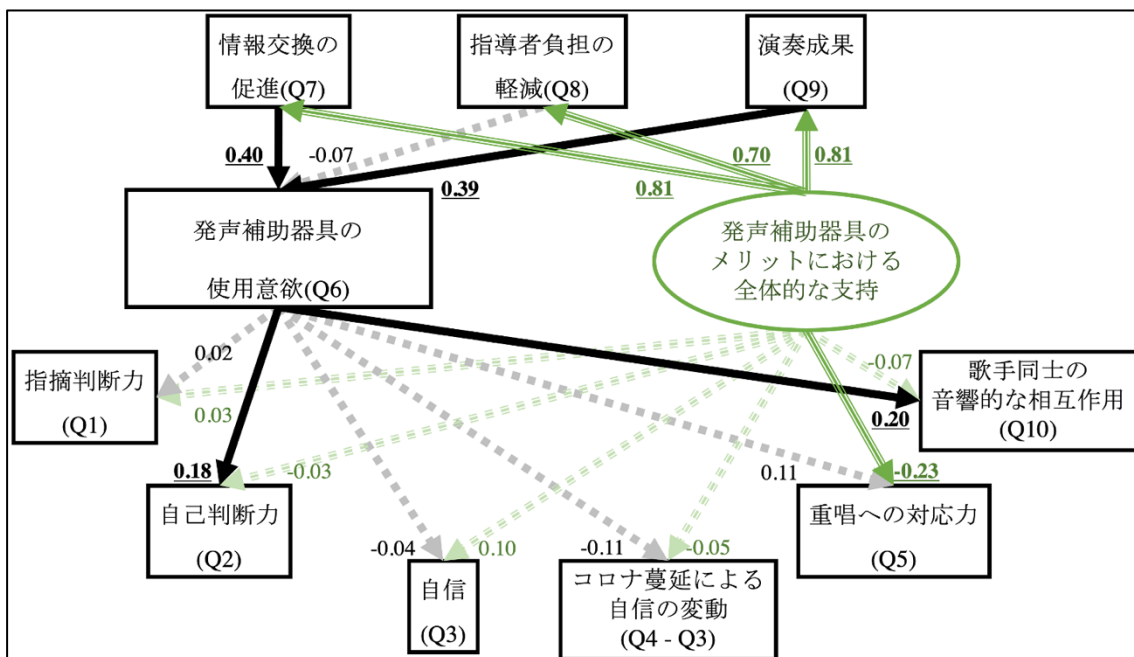


図 A. 14: 全設問間における共分散構造分析の結果

適合度指標	
RMSEA:	0.05
SRMR:	0.03
AGFI:	0.92
CFI:	0.99

表 A. 1: 本モデルの当てはまり具合を表す適合度指標

A.7. コロナ蔓延下の自信を尋ねる設問

最後に、「コロナ蔓延下の自信を尋ねる問い（設問 4）」の回答結果を図 A. 15 に示す。最も大きい値は7段階中3であり、設問3の結果と比較すると全体的に低めの値となった。コロナ蔓延による自信の変動（設問 4 - 設問 3）と自己判断力（設問 2）をヒートマップで比較すると（図 A. 16）、自己判断力がある回答者ほど自信が持てなくなっている傾向にあった。所属団体間の比較では（図 A. 17）、大学合唱団ほど自信がないと回答する傾向にあった。コロナ蔓延による自信の変動（設問 4 - 設問 3）と発声補助器具の使用意欲（設問 6）をヒートマップにすると（図 A. 16）、自信を持てなくなっている人ほど、発声補助器具の使用意欲が高い傾向にあった。ただし、いずれも大きな相関を示しては無い。

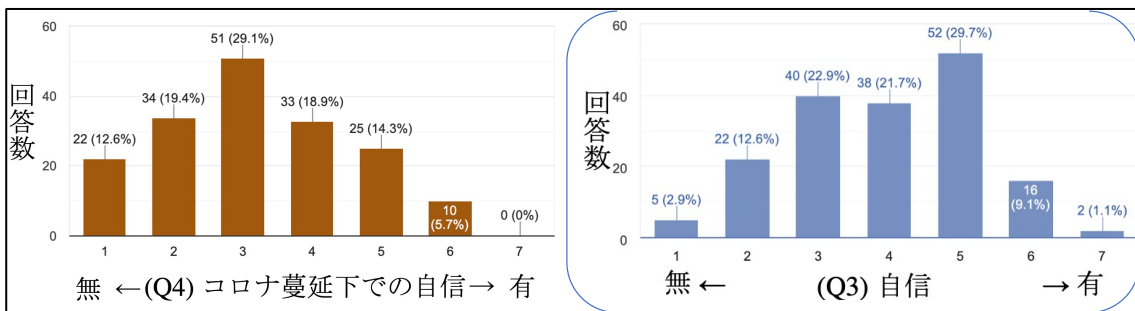


図 A. 15: 「コロナウイルス蔓延下での自信（設問 4）」の結果
（設問 3 の結果を参考として右に再掲載）

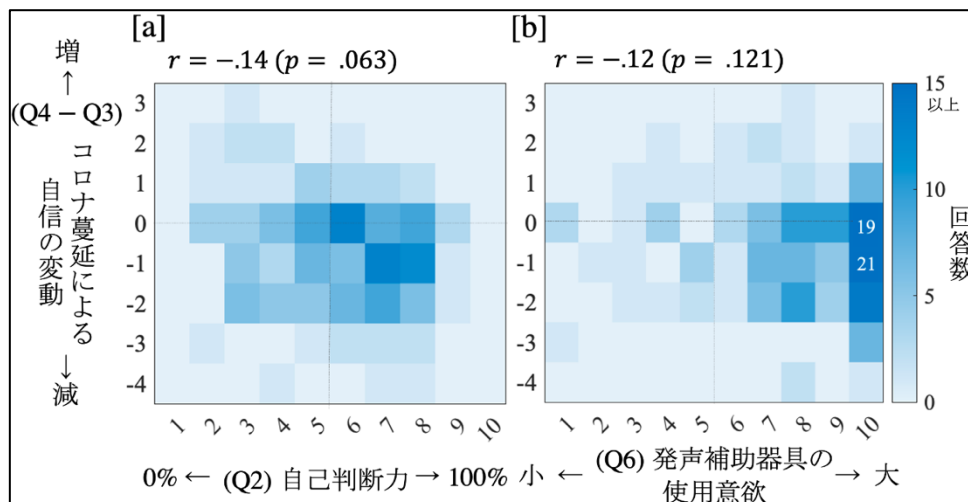


図 A. 16: 「コロナウイルス蔓延下での自信（設問 4）」と他設問との比較

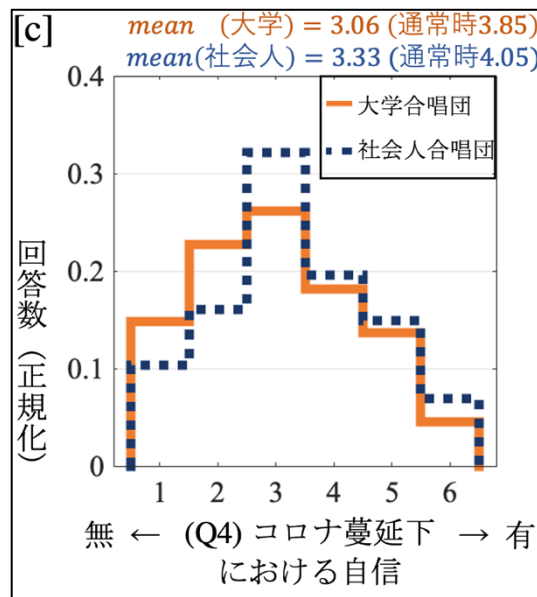


図 A. 17: 「コロナウィルス蔓延下での自信（設問 4）」と歌手属性との比較

A.8. 付録 A のまとめ

発声技術に関する問いでは、指摘判断力と自己判断力、自信の間で有意な相関が見られた（図 A. 4）。一方、「重唱への対応力」という観点では、「指摘判断力」が「自己判断力」よりも相関が大きかった（図 A. 5）。「1 人で発声するための技術」と「重唱に対応できるようにする技術」は異なっており、周囲の変化に応じた柔軟な発声を行えることが重唱において特に求められると考えられる。

「発声補助器具の使用意欲」に関しては（図 A. 7）、10 段階尺度であるにも関わらず 10 を選択する割合が 40 %以上だったことから、高いニーズの存在が考えられる。発声技術に関する問いとの相関を見た場合、「自己判断力」のみ有意水準を下回ったことから、発声状態の自己判断を不安に捉える人ほど、発声補助器具が開発された場合用いてみたいと考えていることとなる。また、「自己判断力（設問 2）」が他の発声技術（設問 1,3 ~ 5）と比べてばらついたことも踏まえると、発声状態を自己判断しやすくなることが、発声補助器具に意欲を感じる動機となるのかもしれない。所属団体や年齢の比較では（図 A. 8）、大学合唱団・若者で使用意欲が高かった。発声補助器具がまだ具体的に製品化されていないにも関わらず、若者の興味を引く要素となっている。使用意欲がある人は、設問内で尋ねたメリット（情報交換・指導者負担・演奏成果）をそれぞれ支持した（図 A. 9）。メリット同士の相関も高く（図 A. 10）、情報交換・指導者負担の有用性が演奏成果に繋がると予想されている。ただし、評価 6 ~ 10 でばらつきがあり、回答者によってメリットの認識には差がある。指導者負担のメリットでは、大学合唱団や女声の支持がより高かった（図 A. 11）。大学合唱団はメンバーが入れ替わって環境が不安定であることが関係する可能性がある。また、女声は男声よりも筋力・状態の維持がシビアな側面があり、指導者の補助的な役割が求められる可能性がある。

「歌手同士の音響的な相互作用」に関する問いでは、有ると考える回答者が約9割に上った（図 A. 12）。他の質問項目との比較では、自力で発声状態を判断できると捉える人や重唱に対応できる人ほど、「歌手同士の音響的な相互作用」という認識を強く持っていた（図 A. 13a, b）。このことは、合唱アンサンブルにおいて上手く合わせるための要因として「歌手同士の音響的な相互作用」と言えるような潜在因子があることを示唆する。また、この認識が強い人ほど発声補助器具の使用意欲があり、情報交換を促進すると判断し、演奏成果にも繋げられると認識していた（図 A. 13c, d, e, f）。本論は「歌手同士の音響的な相互作用」を主体的に取り上げていないが、この要素は複数人歌唱の振る舞いを把握する上で有用だと検討している。

付録 B. 第 4 章の歌唱評価実験における参加被験者向けの依頼文章

歌唱測定実験に関する実験参加のお願い

(名義)

本実験では、男声の合唱経験者複数人で同時発声して頂きます。また、その際にマイクや測定機器にて記録します。

本実験の趣旨を十分理解の上、協力してもよいとお考えの場合には、「同意書にご署名の上、実験への参加を同意する意思表示をしていただきますようお願い申し上げます。

1. この研究の実験計画は以下のとおりです。

評価実験項目：歌唱測定実験

評価実験機関名：国立大学法人東京藝術大学

実験責任者：上原崇寛

実験方法：

(1) 指定された母音 (a/o) と発声形式 (定常/曲) にて、1人で発声して頂きます。定常発声では6つの音のみを、曲発声ではコンコーネ Op.1 冒頭8小節を発声して頂きます。

(2) 他の方と一緒に発声、もしくはスピーカーやヘッドフォンにて他の方の発声を聴きながら発声して頂きます。なお、定常発声では、発声に失敗した(思うように併せられなかった)と感じた場合もう一度やり直すことができます。他の方との発声を行う順番につきましては指定致します。

2. 実験参加への意思確認

実験に協力するかどうかは、自由意志で決めてください。実験に参加する際は、別紙の同意書に署名を頂きます。いったん実験に同意された場合でも、実験担当者に連絡することにより、いつでも取り消すことができます。その場合は、それまでに行われた実験結果及び解析結果は破棄され、いかなる目的のためにも用いられることはありません。また、実験に協力されない場合でも、不利益な対応を受けることは決してありません。

3. 健康被害の危険性

実験参加者の身体の状態には万全の注意を払います。実験には、音響再生装置を用いますが、音量には健康に支障のないよう配慮を行っています。万一この実験に起因した健康被害が発生した場合には、可能な限りの対応をいたします。

4. 実験参加により生じる不利益について

本実験に関して、計画上想定される不利益はありません。また、本実験以外においても、実験参加者に不利益が生じないことを前提としています。気になることがありましたら、どのような小さなことでも結構ですので、実験担当者にご連絡ください。

5. 個人的情報の取り扱い

本実験で取り扱う個人情報には研究目的としてのみ利用し、厳重に管理致します。研究成果が公表される場合、同意の無い個人情報を公開致しません。また、解析には、実験時に得た音声情報、実験課題に関する口頭などによる回答、データ情報以外は使用しません。

6. 研究結果の公表

ご協力によって得られた実験の成果は、学術目的で発表されることがあります。その際、同意の無い個人情報、並びにデータは集計して個人を特定できない形で、もしくは個人を特定できないように匿名化した上で発表します。

7. その他

実験開始後あるいは終了後、万一不利益が生じたのご判断されたときは、下記までご連絡ください。

(連絡先)

なお、何かご不明な点がございましたら、直接担当者にお問い合わせください。

付録 C. 第 4 章の歌唱評価実験における参加被験者の第 1,2 声道共鳴周波数

実験被験者の声道共鳴周波数について、独唱時と重唱時の箱ひげ図を記載している。母音 (/a,o/)、発声方法 2 条件 (独唱/重唱) ごとで区別している。ただし、定常発声のみ、且つ全組み合わせで抽出できている被験者 5~39 を算出している。なお、箱ひげ図の中にあるくびれのような灰色の幅は中央値の変動性、並びに中央値の信頼区間を示し、重なっていない箱同士の中央値は有意水準 5% で異なる。他に第 4 章における測定実験の結果と共通する点としては、第 1 声道共鳴周波数の調節が、被験者によっては見られていないことがより目立っていることである。箱ひげ図に記している中央値の信頼区間を参考にすると、「被験者 9~12 の o 母音 (図 C. 2)」「被験者 13~16 の o 母音 (図 C. 3)」「被験者 25~28 の o 母音 (図 C. 6)」「被験者 29~32 の a 母音 (図 C. 7)」「被験者 37~39, 20 の o 母音 (図 C. 9)」では第 1 声道共鳴周波数があまり変動していない場合が見られる。ただし、第 4 章の結果と異なる点は、その場合の第 1 声道共鳴周波数が必ずしも独唱時の値に沿ったものでは無い場合があることである。第 1 声道共鳴と第 2 声道共鳴は連動するため、意図せず調節しない声道共鳴周波数が調節されている可能性もある。また、第 2 声道共鳴周波数の比較を見ると、第 4 章のように被験者によらず一律に近接している傾向はあるものの、その近接のばらつき (箱ひげ図の縦の大きさ) は被験者の組み合わせによって違いが見られるようである。

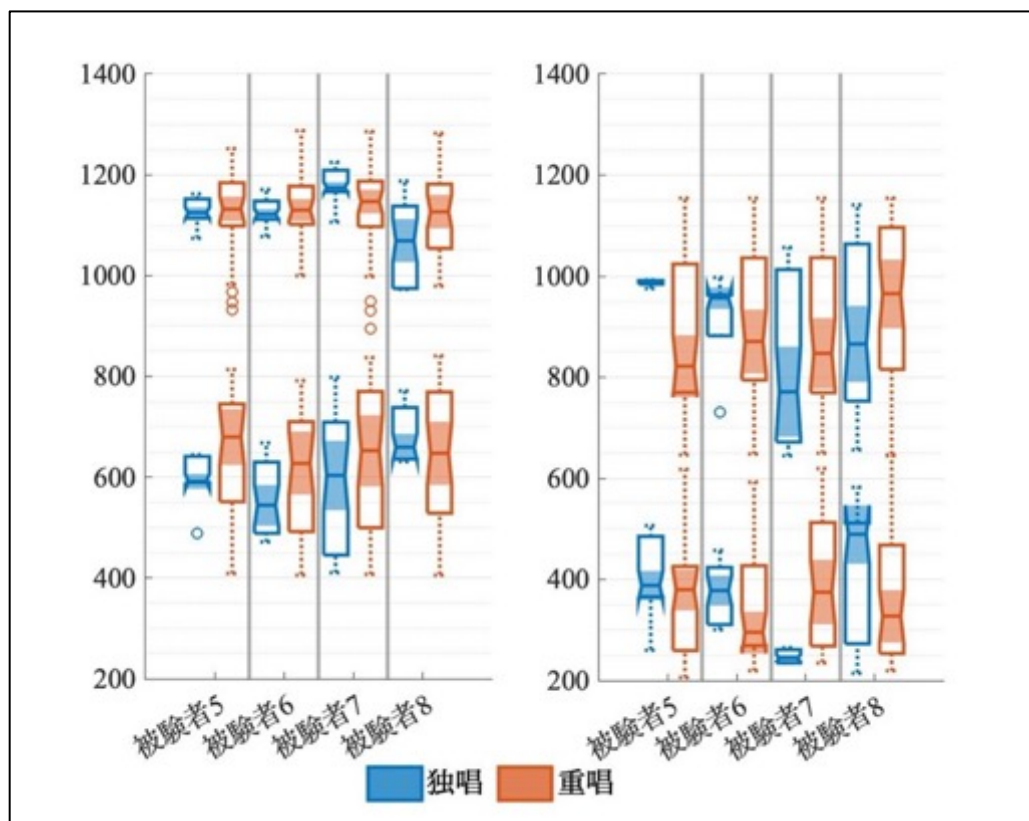


図 C. 1: 2 グループ目の第 1,2 声道共鳴周波数 (左.../a/母音, 右.../o/母音)

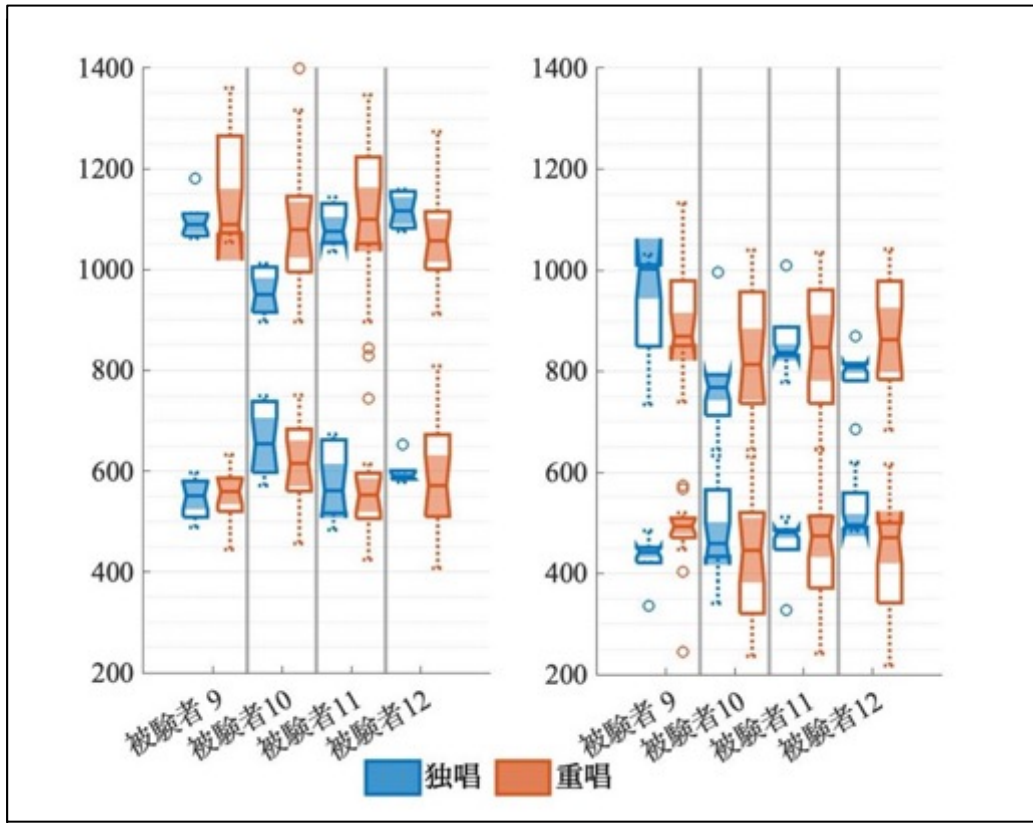


図 C. 2: 3 グループ目の第 1,2 声道共鳴周波数 (左.../a/母音, 右.../o/母音)

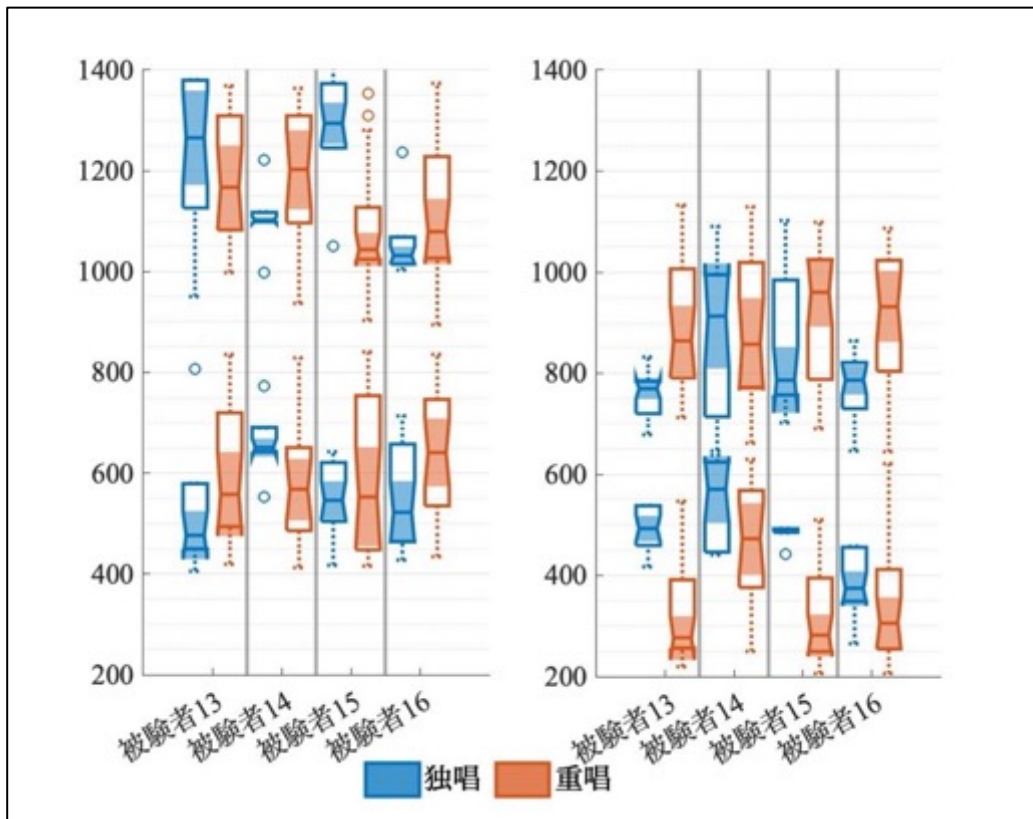


図 C. 3: 4 グループ目の第 1,2 声道共鳴周波数 (左.../a/母音, 右.../o/母音)

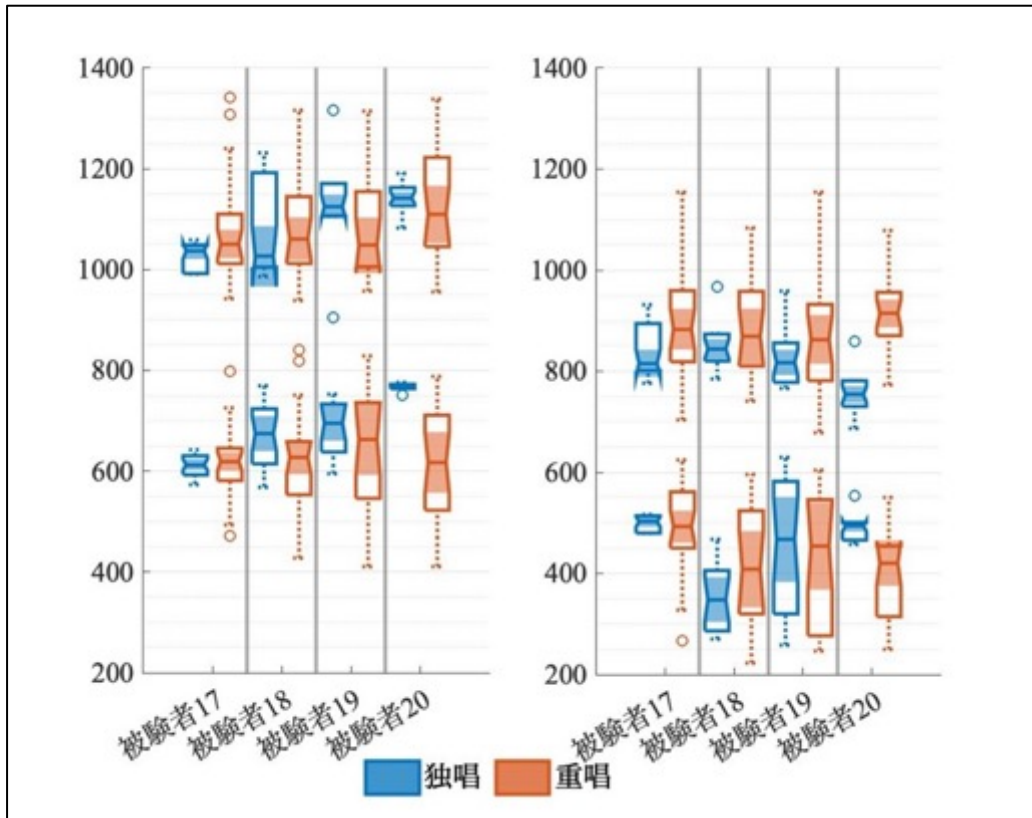


図 C. 4: 5 グループ目の第 1,2 声道共鳴周波数 (左.../a/母音, 右.../o/母音)

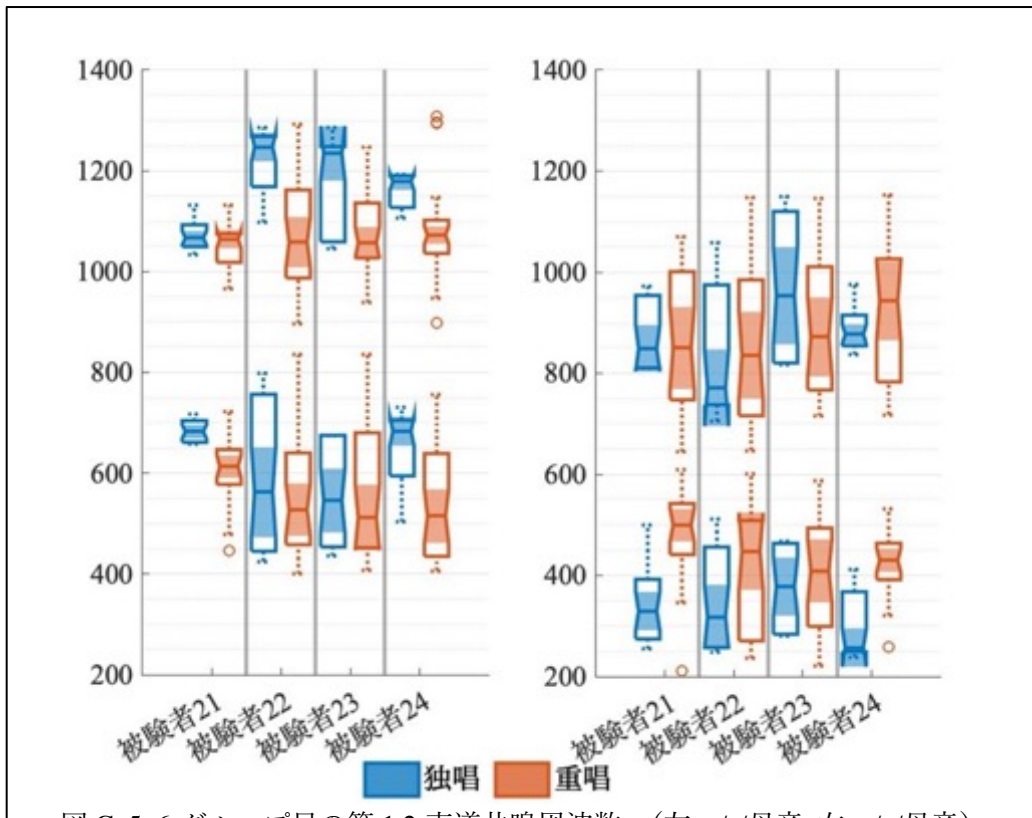


図 C. 5: 6 グループ目の第 1,2 声道共鳴周波数 (左.../a/母音, 右.../o/母音)

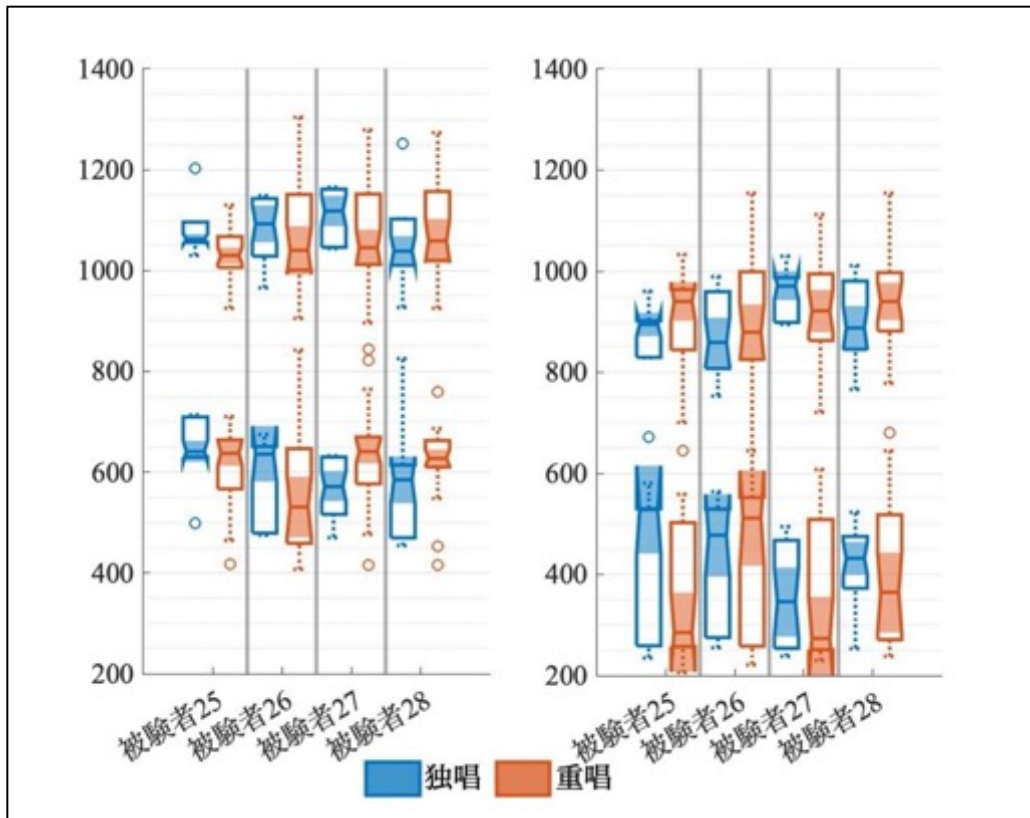


図 C.6: 7 グループ目の第 1,2 声道共鳴周波数 (左.../a/母音, 右.../o/母音)

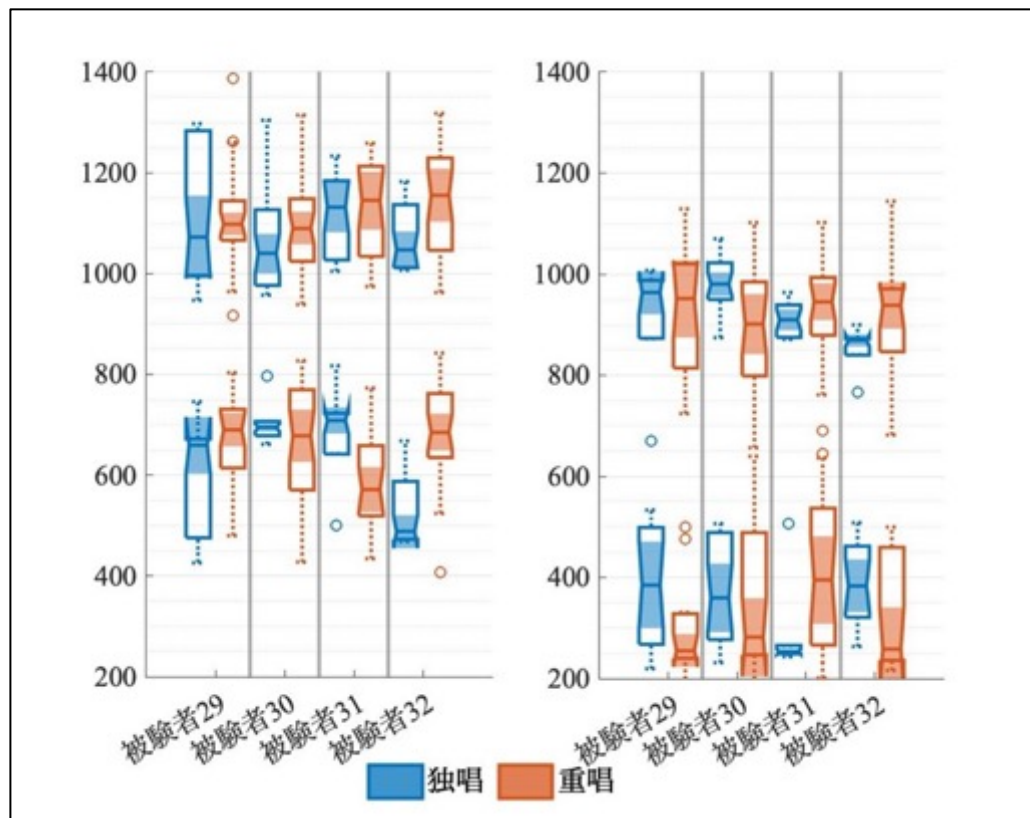


図 C.7: 8 グループ目の第 1,2 声道共鳴周波数 (左.../a/母音, 右.../o/母音)

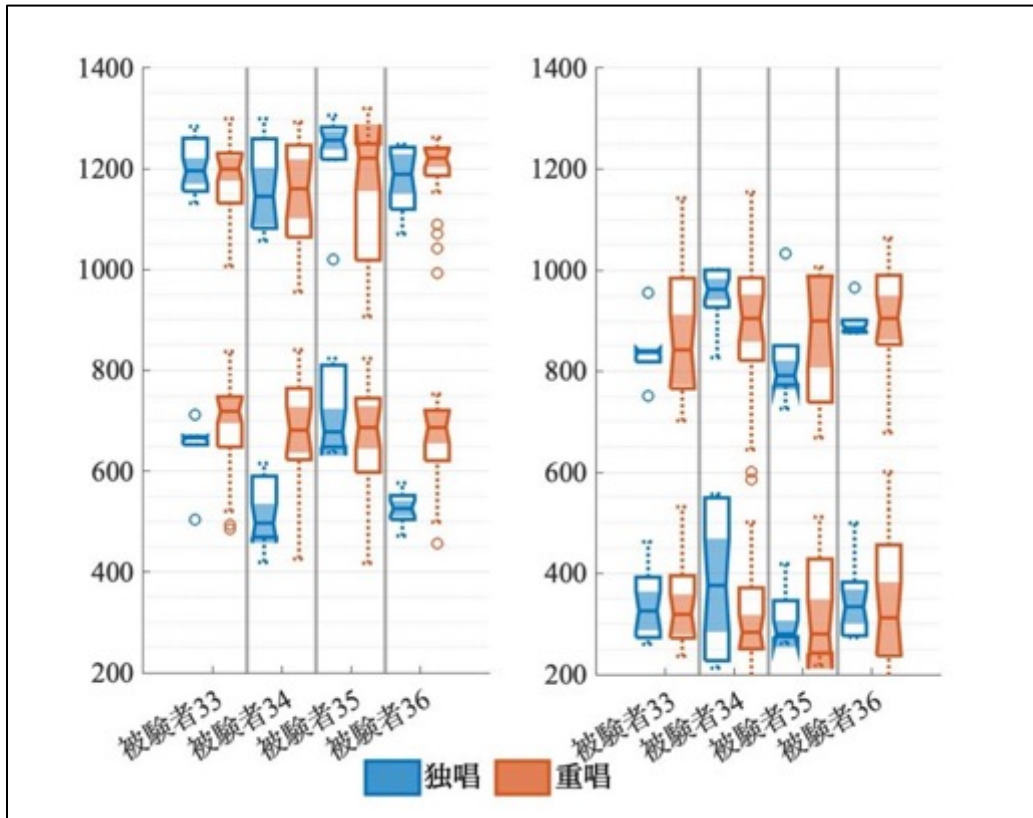


図 C. 8: 9 グループ目の第 1,2 声道共鳴周波数 (左.../a/母音, 右.../o/母音)

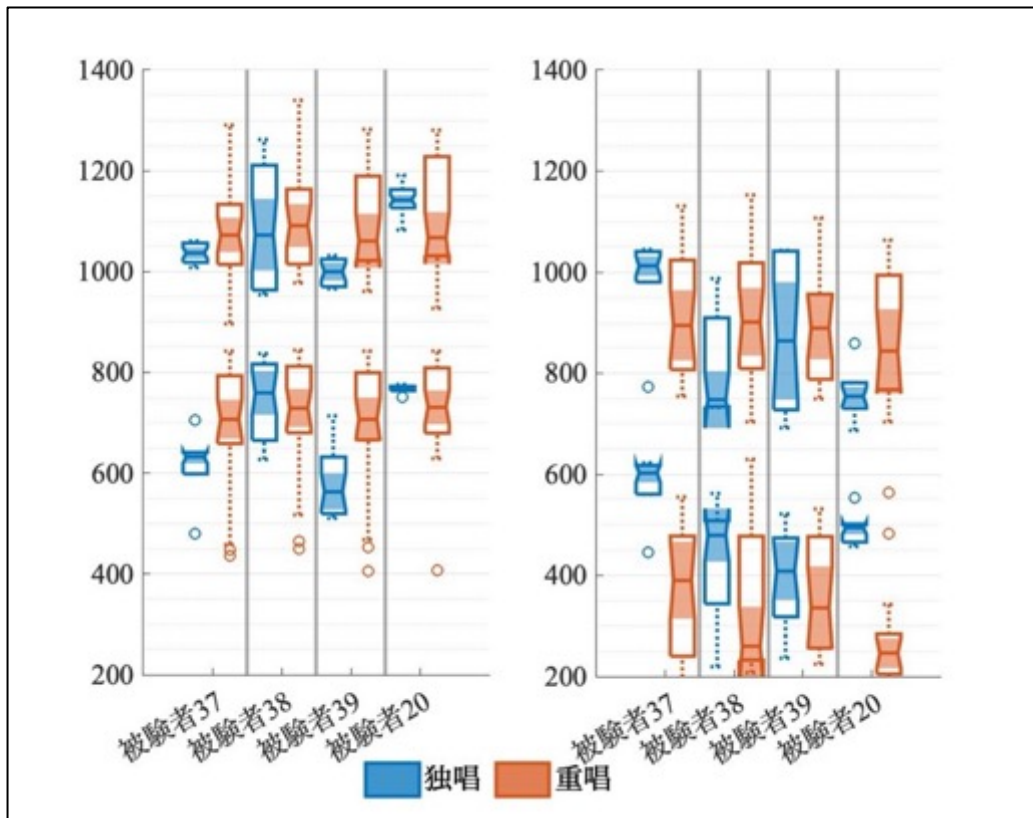


図 C. 9: 10 グループ目の第 1,2 声道共鳴周波数 (左.../a/母音, 右.../o/母音)

付録 D. 第 5 章の聴取実験における YouTube 紹介動画の文章全文

はじめに、この試みを紹介致します。

声を合わせる時、物理的に何が起きているのでしょうか？

このことを音響学的に突き止めるため、私は声を合わせる試行を大人数で収録する歌唱測定実験を実施し、器具を用いてさまざまな音響特徴量を取り出し、それによって独唱と重唱の差や、発声形式、音響特徴量同士の関係性、発声時の評価による違いを分析しています。

また、被験者属性を捉えるアンケートの実施と聴取実験も行うことで、歌い手と聴き手、両方の立場による分析を検討しています。

この一環として、今回皆様に、発声の印象に関するアンケート調査をgoogleフォームにて依頼しております。

フォームでは、さまざまな立場の歌手の収録音源をYouTube動画に格納しています。

YouTube動画は、5つの発声音が繰り返し再生されます。

この2人の歌手の発声について、6つの視点（まとまり、ピッチ、呼吸、響き、声質、母音）から10段階（1~10）で評価してください。

6つの視点は、記載している赤枠の情報を参考にしてください。

発声音1つ1つの特徴は異なりますが、全体的な聴感に着目して考慮頂けますと幸いです。音源は、実際に一緒に歌っていない発声もあります。中には違和感を感じるかもしれません。

また、測定実験によって得られており聴取環境も悪くなっております、予めご了承ください。

初めに練習試行を1回設けた後、10回の本試行を行います。

回答時間は約5~10分です。

もしこの取り組みを行えた場合、私たちが経験的にやりとりしてきた声を合わせるとい物理現象の理解、並びに歌い手や聴き手の聴感、技術レベル、相性と物理現象の関係を把握できます。

更に、合唱現場における真のニーズに沿う発声補助器具の実現に繋がり、歌い手の皆様に対して今までに無いメリットを還元できます。

お忙しい日々を過ごされている中恐縮ですが、もしこの取組みに賛同頂ける方がいらっしゃいましたら、どうか少しでも御協力頂けますと幸いです。

付録 E. 第 5 章の聴取実験における google フォーム内の教示文

-2人の歌手の発声について、6つの視点（まとまり、ピッチ、呼吸、響き、声質、母音）から10段階（1~10）で評価してください。

- YouTube動画は、5つの発声音が繰り返し再生されます。

- 発声音1つ1つの特徴は異なりますが、全体的な聴感に着目して考慮頂けますと幸いです。

- 音源は、実際に一緒に歌っていない発声もあり、中には違和感を感じるかもしれません。

また、測定実験によって得られており聴取環境も悪くなっております、予めご了承ください。

- 初めに練習試行を1回設けた後、10回の本試行を行います。

- 回答時間は約5~10分です。