

# 博士論文

## 声区転換部を含むオペラ歌唱の音響的特性

スペクトル変動を題材として

2014 年 3 月

京都市立芸術大学大学院

音楽研究科 博士（後期）課程 音楽専攻 声楽領域

大谷 圭介.



# **Title**

## **Acoustical characteristics of the register transition in operatic singing**

**Sub title**

**Acoustic indicator evaluated spectral deviation of several notes**

### **Abstract**

It has been argued that controlling voices in different vocal registrations (passaggio ; Italian) is one of the important techniques in the operatic singing. However, critical acoustic features in evaluation of skillfulness of the passaggio has remained unclear. In this study spectral variations between voices in scale sequences were calculated based on recordings of 20 graduate level students majoring in vocal music. Perception evaluation was carried out for these recordings with 15 graduate students in vocal music as evaluators. A general linear regression analysis- the average R errors between the smoothed spectra of consecutive tones was a significant factor to predict the perceptual evaluation. It was also found that the relative duration of the initial note in each scale singing against the remaining notes could affect the perceptual evaluation. This factor significantly interacted with a spectral deviation from the average spectrum of each singer, i.e., a group of singers with shorter durations tended to be evaluated better when the degree of spectral deviation was small.

**key words** : vocal music, passaggio, spectral rate of change,  
spectral deviation , the length of time of the first tone



## 目 次

図一覧.....	iv
表一覧.....	vi
<b>序論.....</b>	<b>1</b>
はじめに .....	2
本研究の目的.....	4
<b>第1章 音声生成に関わる基礎的事項.....</b>	<b>7</b>
1.1 発声に関与する器官.....	8
呼吸システムに関する基本構造.....	8
喉頭内の基本構造.....	10
声帯.....	14
1.2 声帯振動.....	17
1.3 喉頭音源のスペクトル.....	20
1.4 声道で生成されるその他の音.....	22
<b>第2章 本研究に関連する重要な項目の詳細な説明.....</b>	<b>24</b>
2.1 声区転換問題.....	24
声区転換の概念.....	25
声区転換と声種との関連性.....	27
声区転換の音響学的問題提起.....	32
2.2 レガート唱法.....	32
2.3 フォルマント.....	34
フォルマント生成の原理.....	34
音響管の反射.....	35
1/4 波長共鳴管.....	39
シンガーズ・フォルマント.....	42

## 目次

2.4	音声のソース・フィルタ理論.....	44
2.5	母音の音韻性.....	46
2.6	まとめ.....	50
<b>第 3 章</b>	<b>高調波次数に着目したフォルマントピーク.....</b>	<b>52</b>
3.1	歌唱録音方法.....	54
	実験参加者.....	54
	音素材の選択について.....	55
	録音方法.....	55
3.2	高調波次数に着目したフォルマントピークの観察.....	57
3.3	分析.....	57
	基本周波数とフォルマント周波数.....	57
3.4	結果.....	58
	分析結果.....	61
3.5	考察.....	67
3.6	まとめ.....	68
<b>第 4 章</b>	<b>声区転換部のスペクトル変動に見る音響的指標.....</b>	<b>70</b>
4.1.1	歌唱録音.....	71
	参加者 (歌唱音源サンプル提供者).....	71
	録音内容.....	72
4.1.2	2 種類の評価尺度.....	74
	分析の背景.....	74
4.1.3	2 種類の特徴量の計算方法・計算結果.....	75
4.1.4	第 1 音の安定区間までにかかる時間と、その他の音の安定区間までにかかる 時間の割合「音階開始音相対持続時間 (A/B 比)」 .....	77

## 目次

4.2.1 知覚評価実験.....	79
実験方法.....	79
参加者.....	79
4.2.2 結果.....	80
知覚評価実験分析方法・結果.....	80
4.3 相関結果.....	80
4.4 考察.....	86
4.5 まとめ.....	87
<b>第5章 総合考察.....</b>	<b>94</b>
今後の課題.....	102
<b>結論.....</b>	<b>105</b>
<b>おわりに.....</b>	<b>108</b>
参考文献.....	112
本研究に関する研究業績.....	115
謝辞.....	116
付録.....	118

## 図一覧

図 I	論文の構成.....	vii
図 1.1	頭部・頸部・胸部の呼吸に関わる器官.....	9
図 1.2	喉頭の構造.....	11
図 1.3	喉頭内筋.....	12
図 1.4	喉頭外筋と頸部の関係.....	13
図 1.5	声帯 上部から見た図.....	15
図 1.6	声帯断面図.....	15
図 1.7	声帯振動の様子.....	19
図 1.8	対数表示による振幅スペクトル.....	21
図 1.9	喉頭音源の対数表示による振幅スペクトル.....	21
図 2.1	パッサッジョが生じる平均的な音高.....	28
図 2.2	バス・プロフォンドのパッサッジョ域.....	29
図 2.3	男声歌手のパッサッジョ域と声種の関係.....	30
図 2.4	女性歌手のパッサッジョ域と声種の関係.....	31
図 2.5	声道の音響管近似モデル図.....	37
図 2.6	断面積の異なる音響管の境界で起こる反射の様子.....	38
図 2.7	1/4 波長音響管の音圧分布.....	40
図 2.8	声とオーケストラの長時間平均スペクトル.....	43
図 2.9	シンガーズ・フォルマントを作るための声道モデル理論図.....	43
図 2.10	ソース・フィルタ理論のモデル図.....	45
図 2.11	母音の島。第 1 フォルマントと第 2 フォルマントの関係.....	47
図 2.12	a, i, u 母音の構音の断面図及び, 対応するスペクトル包絡.....	49
図 3.1	歌唱音階例.....	56
図 3.2	2 人の歌手のア母音のスペクトル包絡.....	59

## 目次

図 3.3 同一歌手の複数音のスペクトル包絡.....	60
図 3.4 基本周波数とフォルマントピークの関係 1.....	61
図 3.5 基本周波数とフォルマントピークの関係 2.....	62
図 3.6 基本周波数とフォルマントピークの関係 3.....	63
図 3.7 基本周波数とフォルマントピークの関係 4.....	64
図 3.8 基本周波数とフォルマントピークの関係 5.....	64
図 3.9 基本周波数とフォルマントピークの関係 6.....	65
図 3.10 基本周波数とフォルマントピークの関係 7.....	65
図 3.11 基本周波数とフォルマントピークの関係 8.....	66
図 4.1 歌唱音階例.....	73
図 4.2 各音階, 各歌唱音の冒頭部.....	78
図 4.3 隣接スペクトル変動と平均評価値の相関図.....	83
図 4.4 音階開始音相対持続時間と平均評価値との相関図.....	83
図 4.5 歌唱された各音の $F_0$ の安定度を, 各音の平均からの逸脱をセント値として求めた ヒストグラム.....	79
図 4.6 全体スペクトル変動及び音階開始音相対持続時間と平均評価値の相関図.....	79

**表一覧**

表 1	声帯の層構造の呼称対応表.....	16
表 2	一般線形回帰分析.....	81
表 3	線形回帰分析結果表.....	81
表 4	隣接スペクトル変動(CDS)計算結果一覧表.....	88
表 5	全体スペクトル変動(GSV)計算結果表.....	89
表 6	音階開始音相対持続時間(A/B 比)計算結果表.....	90
表 7	平均評価値計算結果一覧表.....	91

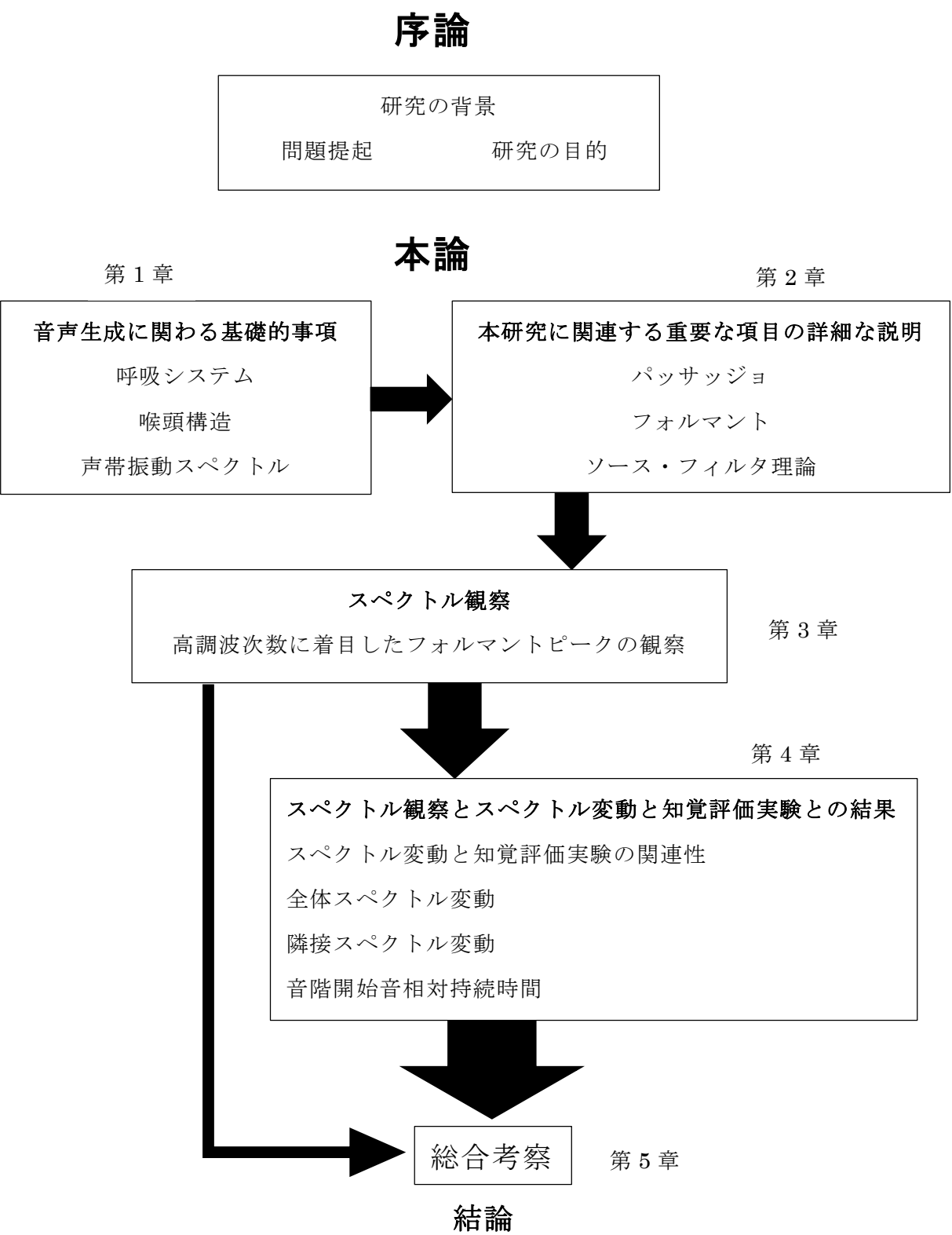


図 I 論文の構成



## 序論

## はじめに

オペラや歌曲などの芸術歌唱<sup>1</sup>において、その長い歴史の中で現代は歌手に多様な声の技術を求める時代になってきた (Mizutani, 2006)。これはひとえに近年急速にグローバル化が進み、様々な国でオペラや歌曲、その他の舞台芸術のための楽曲が創られるようになってきていることにより、作曲される楽曲が多様化されていることによるものである。時代が求める様々なニーズに応え、作曲家は新しい楽曲を生み出し、それに対応するべく歌手の幅広いそして高度な歌唱技術も求められる時代となってきたのである。歌手は、伝統的なクラシック歌唱の発声法や歌唱法の「型」を体得した上で、現代のニーズに応えるべく新しい技術を体得していかななくてはならない所に、求められるものの質の高さや技術の広範さが見え隠れするのである。芸術歌唱において様々な様式観が混在する現代、歌手にとってはその歌唱法において技術的に克服しなければならない数多くの問題が存在する。第 1 に、オペラ歌唱法を体得するためにはオーケストラの音をバックにしても、マイク拡声無しにその声が客席に届く発声法を身につけなくてはならない。この技術がなければ、オペラの舞台上で歌唱することはまず不可能である。そしてもう一つ、歌手が克服しなければならない大きな問題に、本論文のテーマである声区転換 (passaggio; 伊, パッサッジョ) 問題がある。これは芸術歌唱においてどの楽曲を歌唱する際でも、特に、声楽を学ぶ初期の段階の者でも、熟練した歌手であっても常に付きまとう悩み深い問題である。この声区転換とは、声区と声区の転換点で起こる現象で、広い音域を歌唱する際には男声女声や声域、声種を問わず、どの歌手にも存在する問題である。声区とは、詳しくは本論を待つこととして「発声時にある域内での全ての音が同様に生成されて同様の性質を持つと知覚される、その発声基本周波数<sup>2</sup>域 (Sundberg, 2007)」のことで、「地

声」や「裏声」などとして一般には知られている。歌手は、広い音域を歌唱する際はこの声区を切り替える必要が生じ、この声区を「聴衆に悟られることなく」

「音質の極端な差を少なくして」転換しなければならない技術が求められる。歌唱時の発声法において声区転換問題を克服できるかどうかは歌手にとって非常に重大な問題であるにもかかわらず、現在においてもその直接の技術的解決方法や、そもそも声区転換問題の存在すらも知らずに歌唱指導されているケースなども日本では未だによく見かける。また、音声生成理論や音響理論が発達した現代でも、声区そのものの発生原因や生理機能などは科学的には明らかになっていないのが実情で、この問題の奥深さを物語っている。生理学的見地からは、喉頭内の筋電図<sup>3</sup> 測定などによって声区転換の際の筋活動の様子を測定したり、実際の声帯振動の様子をファイバースコープ<sup>4</sup> で撮影したりするなど幾つかの報告が見られる一方で、音響学的には、声区転換のような複数の音が関与する場合の音響的データは、探した限り見つけられなかった。優れた声楽教師は声区転換部分の歌唱について、「それが正しいパッサッジョだ！」ということをレッスンの中で明確に指摘することができる。それは、呼吸に関わるボディの筋肉の使い方や音声生成に関わる喉頭内の正しい筋肉の使い方を指示しているというよりはむしろ、聞こえてくる音が「正しい響き」を持っているかどうかを第一義的に判断している。聞こえてくる音が正しい響きを持っていれば、結果的にボディや喉頭の筋肉が正しく機能している証明になり、逆にボディや喉頭の機能やフォームがある一部分でも正しくなければ、正しい声区転換部の歌唱は決してできないのである。全ての身体的機能が結びつき高度にかつ総合的に制御された時に初めて、歌手は正しい発声法での歌唱が可能になるのである。優れた声楽教師が「聴いて」正しい発声法を判断しているという事実から、その音声信号には声区転換部分に対応する

一定の特徴量が存在している筈である。それにも関わらず、声楽家の視点から見ても十分に納得するような音響特徴量の説明は今現在十分ではない。

この両者の乖離を埋めるべく本研究では、声区転換部において音響的特徴があるのではないかという予測を立て、その音響的指標を探ることを方法論として選択した。具体的には、歌手にとって最も大きな問題となる声区転換部を含む音階歌唱時における声のスペクトル<sup>5</sup>を声の移行に着目して音響的に分析し、その特徴量を探っていくこととした。

## 本研究の目的

声楽教師はレッスンの中で、聴いて正しい声区転換部分の発声法を判断しているという事実から、声区転換部における声のスペクトルの音響の特徴量を探り、その指標を提示し、声楽教育の一助にもなるような基礎的で実用的な尺度を得ようとするのが本研究の目的である。声区転換は、人によりある特別な音域で発生する事が知られている。最も基本的な2つの音を歌唱することでさえ、的確な発声法をもって正確に歌唱することはプロの声楽家にとっても非常に難しい技術の一つである事が知られている。移行する複数の音における基本周波数の高い安定度、音が移行する際の音量の制御、シンガーズ・フォルマント(後述)を含む発声法、ビブラートの問題など様々な問題のそれぞれを全て解決する必要がある。そこで本研究では、音の移行に着目し、実際に声楽家及び声楽学習者の声を録音採取し、その音源資料からその音響的特徴を観察・分析した。具体的には、1オクターブでのスペクトル変動のまとまり具合と、隣接する2音間でのスペクトル変動<sup>6</sup>に着目してこの問題を解く手がかりを得る。さらに音響分析と平行して、知覚評価実験を実施し、知覚評価結果をうまく予測可能な音響尺度を相関分析することによ

って探索した。このことにより、良い声区転換部分の発声法とスペクトル変動の相関性が客観的なデータとして得られるはずである。

本研究によって、音声から得られるスペクトル概形と知覚評価の関係性が明らかになることは、歌手が歌唱する上での評価の指針を提示することとなり非常に有意義な情報となり得る事であろう。また、従来の徒弟制度の延長で行われてきた声楽レッスンに科学的アプローチを取り入れることで、声楽教育の在り方について新たな可能性を示唆することを期待したい。



# 第 1 章

## 音声生成に関わる基礎的事項

## 1.1 発声に関与する器官

### 呼吸システムに関する基本構造

声区転換部における声のスペクトルの音響的特徴量を探り、その指標を提示し、歌唱の質の評価に対する基礎的で実用的な尺度を得ようとするのが本研究の第一義的目的である。そのためにまずは、音声生成<sup>7</sup>のための基本的生理学的メカニズムについて述べる。

音声生成に関係する重要な器官は、頭部、頸部、胸部などの多くの部分に存在する。肺、気管支、気管、喉頭、咽頭、口腔、鼻腔などの器官の様々な筋肉や靱帯、粘膜が発声には関与している（図 1.1）。音声生成の源である空気流は肺から生まれる。肺はスポンジ状の構造を持ち、その側横部を胸骨や肋間筋がとり囲み、下部に横隔膜がある。肺のみを取りだし空中に放置するとゴム風船のように急激に収縮してしまうが、胸骨や肋間筋が肺膜との隙間に真空状態を作りその形状を維持している。肺自体には肺を動かす骨格筋等はない。呼吸は横隔膜や肋間筋、頸部、腹部の筋肉収縮によってなされることになる。横隔膜はお碗を逆さまにしたような形の筋肉の薄い膜でできていて、肺と腹部を隔てており、吸気時に働く最も重要な筋肉である。横隔膜は、胸骨と肋骨、脊椎から形成される骨の「枠組み」の底部に位置している。吸気においては横隔膜が収縮することにより胸腔が広がり、その結果、肺が膨らむことになる。肋間筋は肋骨の動きを円滑にし、呼吸の補助をする役割を担っている。呼気における特別な筋肉は存在せず、横隔膜を始め、吸気の際の筋収縮が解放されることと、肺の復元力（受動的反跳）により行われる。努力呼吸には肺周辺の様々な筋肉が補助的に使われる。歌唱においては言うまでもなく呼吸のコントロールが重要となるが、とりわけ呼気の制御が重要である。なぜなら、言うまでもなく声帯に気流を流しこみ喉頭音源<sup>8</sup>を生成するのは、

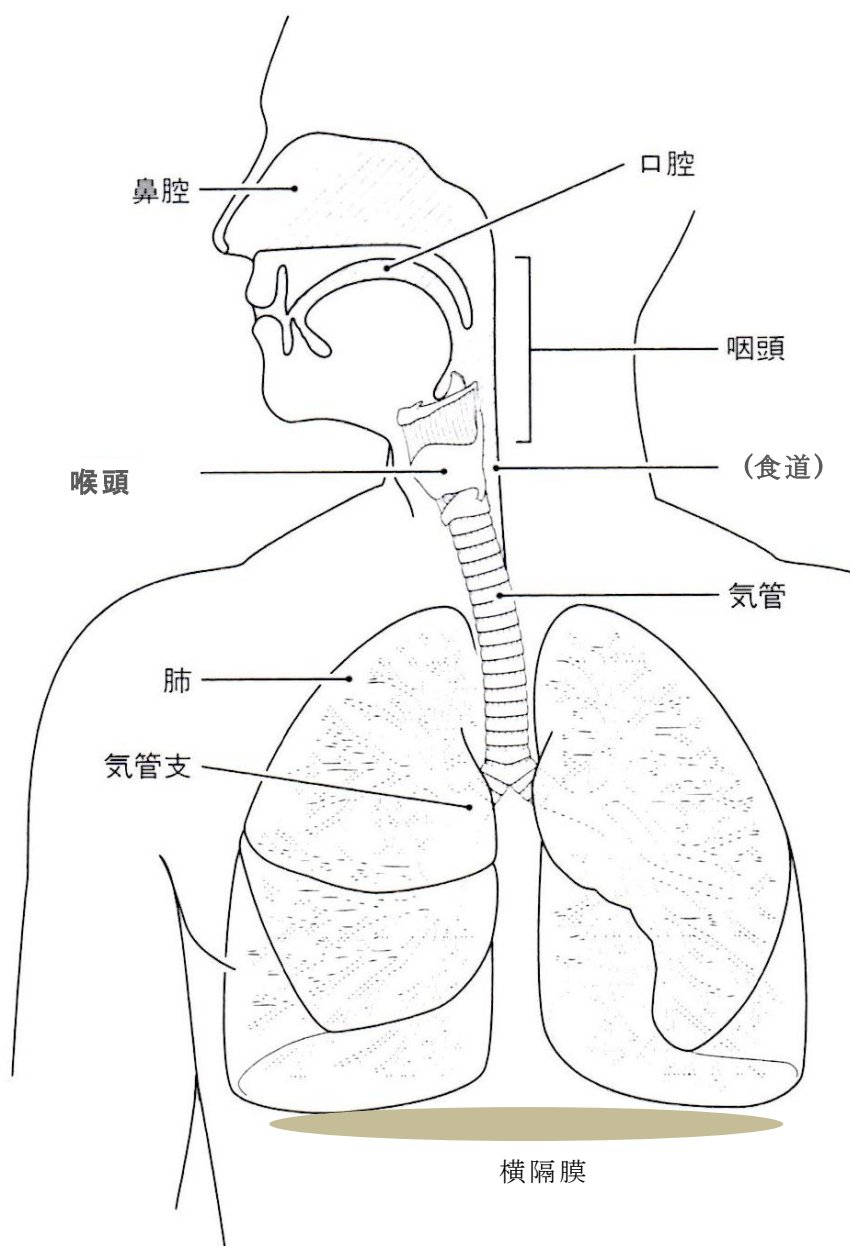


図 1.1 頭部・頸部・胸部の呼吸に関わる器官

( 図 1.1～1.6 出典：I.Titze『音声生成の科学』1993 )

呼吸時<sup>※(注)</sup>においてであるからである。その難しさは、通常の呼吸では補助的に用いられる努力呼吸筋の制御、吸気の筋収縮解放の制御、そして胸郭の無意識的かつ生理的な復元力を意識的に制御しなければならないなど総合的にバランスよくコントロールすることが求められることにある。人は生まれ出たその瞬間から誰でも意識することなく呼吸をすることが出来る。しかしながら、歌唱をする際にはそれに見合った呼吸を意識的に制御できる技術を身に着けなければならないところにその難しさがある。

### 喉頭内の基本構造

音声生成の最も重要な器官は、喉頭内に多く存在している。喉頭の構造は極めて複雑で、様々な軟骨、膜、靱帯の組み合わせで構成されている（図 1.2）。喉頭内に存在する筋肉は、大きく内喉頭筋群と外喉頭筋群の 2 群に分けられる。内喉頭筋群には直接的に声帯動作を司る幾つかの重要な筋肉が存在する（図 1.3）。基本周波数の上昇に関与しているのは輪状甲状筋と甲状披裂筋で、音量の調節には外側輪状披裂筋と披裂間筋が関与していることが EMG（筋電図）測定など様々な研究により判明している。外喉頭筋群には歌唱に係る喉頭の上下前後動に関与する筋肉がいくつか存在する（図 1.4）。胸骨舌骨筋と胸骨甲状筋は間接的、もしくは直接的に喉頭を下げる働きをする。甲状舌骨筋は、左右一対の動きで喉頭の上下動を司る。肩甲舌骨筋は、舌骨を引き下げ後方に引く働きがある。その他にも頸部周囲や内部にはたくさんの筋肉群が存在し、その構造は極めて複雑である。

---

（※注）実際には、吸気時に声帯振動を生じさせることも可能であるが、動物の大半がその方略を行わないのは、肺を雑菌から保護するためと考えるのが合理的である。

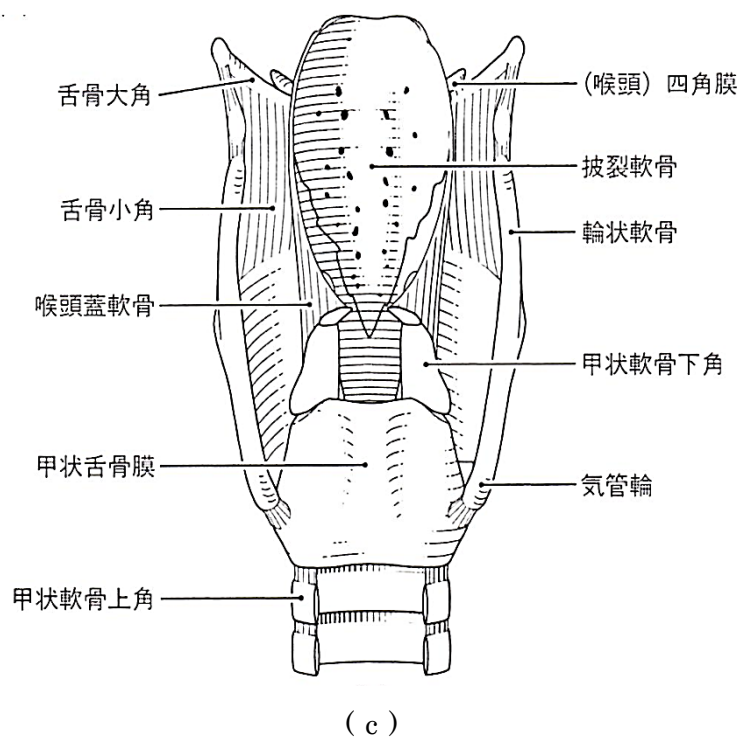
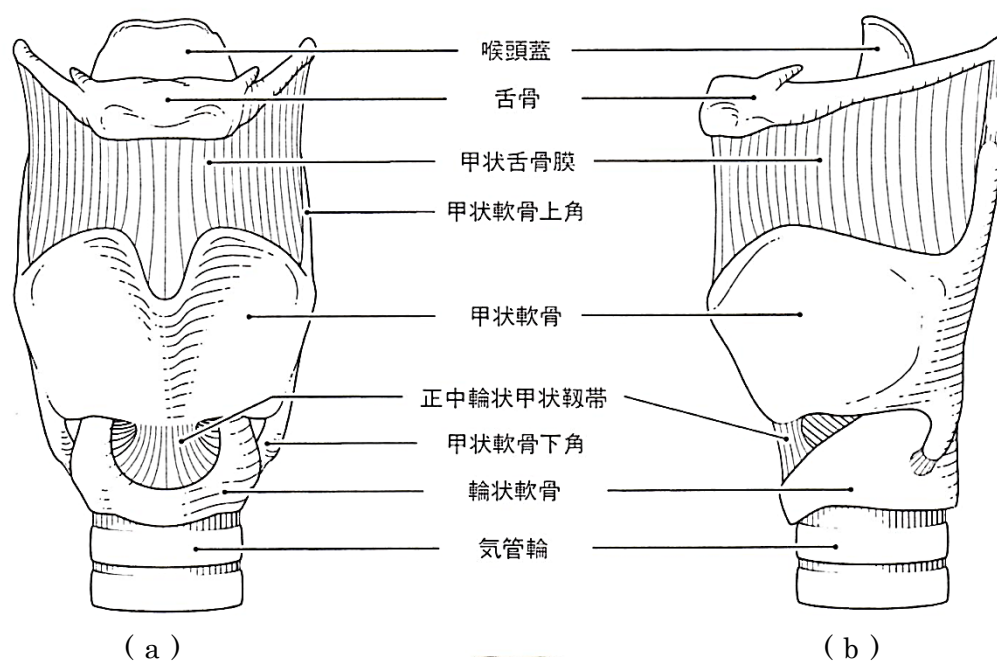


図 1.2 喉頭の構造  
(a) 前から見た図  
(b) 左から見た図  
(c) 後ろから見た図

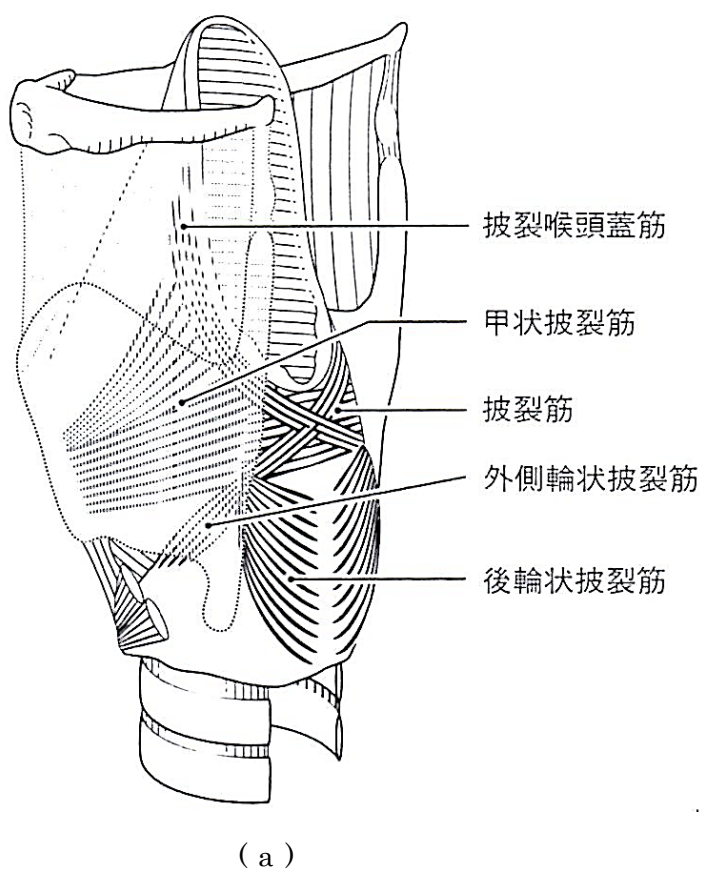
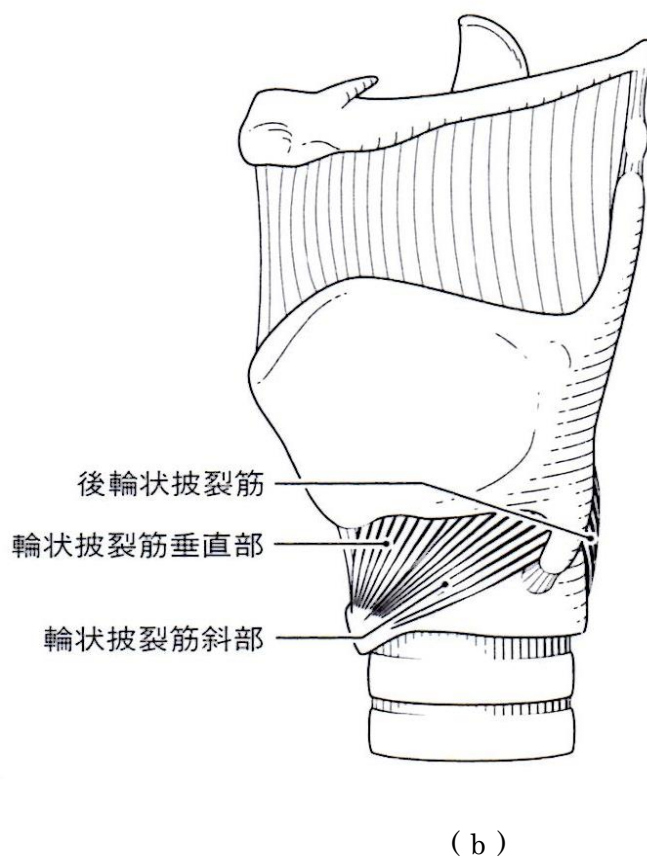


図 1.3 喉頭内筋  
 (a) 左後ろから見た図  
 (b) 左前から見た図



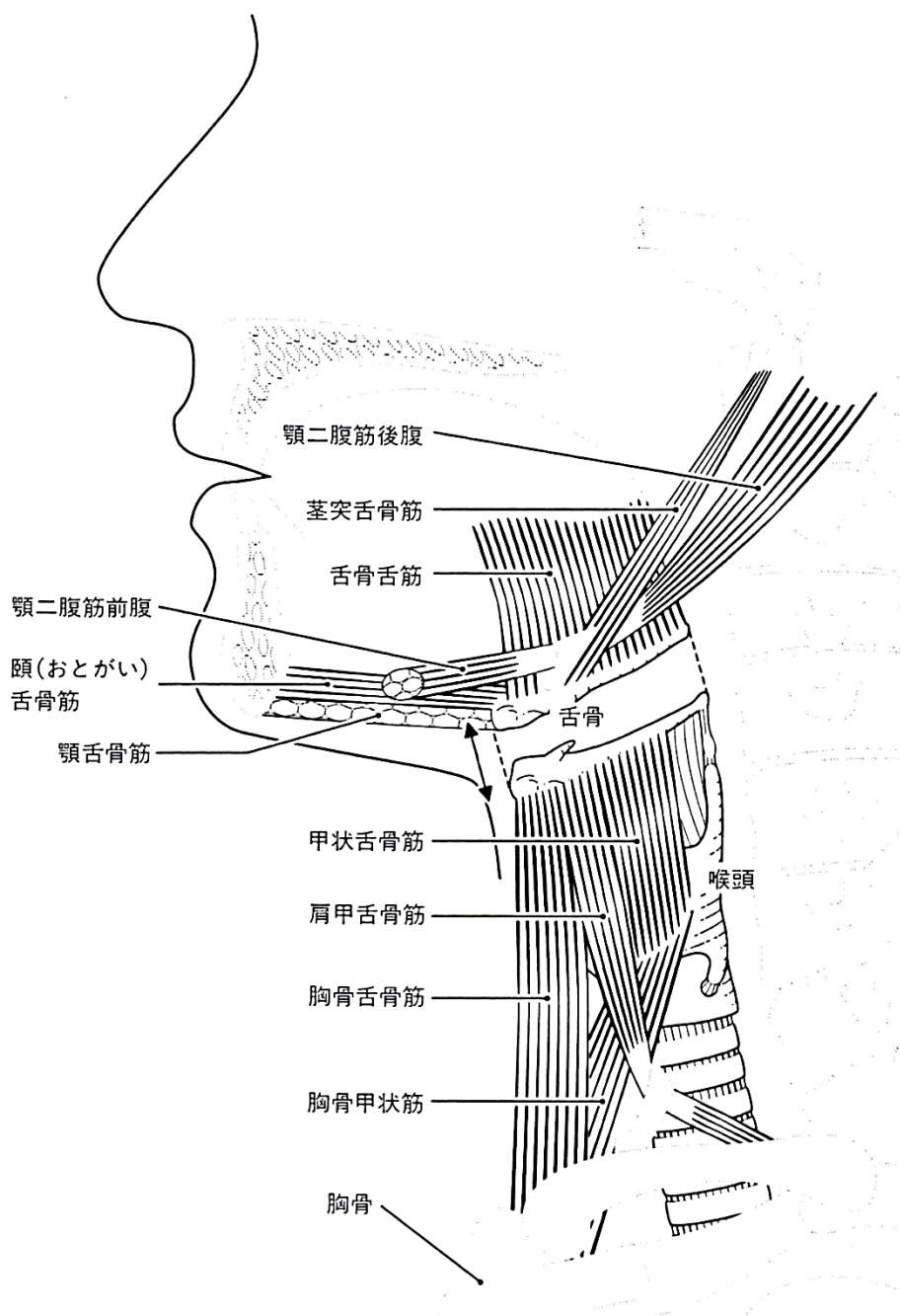


図 1.4 喉頭外筋と頸部の関係

## 声帯

音声を発する最初の直接的な器官は声帯である。発声とは声帯振動による音の生成のことを意味する。声帯の全長は、成人女性で平均約 9mm～13mm、成人男性で約 15mm～20mm 程度で、軟骨と筋肉によって支えられ、気道上もっとも狭い部分にある。声帯の間の最も狭い部分は声門と呼ばれている。その周辺に声帯靭帯、声帯突起、披裂軟骨、甲状披裂筋、輪状軟骨が図の様に位置し、全体を甲状軟骨（喉ぼとけ）が覆っている（図 1.5）。声帯長が音声には大きく関与しており、声帯が長いほど声域がより低くなることが分かっている。また、声帯長と身長には有意な相関はなく、首周りの長さとの相関があることも判明している。声帯より上方には喉頭室と仮声帯が存在し、仮声帯の上に四角膜と披裂喉頭蓋ヒダがある。声帯、喉頭室、披裂喉頭蓋ヒダ、四角膜が主に喉頭の気道を閉鎖する働きをする（Fink, 1975）。音高は声帯形状や大きさ、伸縮の度合い、声門閉鎖強度、呼気圧及び速さ、振動モードなどの複合的な要素により変化する。

声帯の構造は、上皮、粘膜固有層、筋肉などからなる（図 1.6）。最も外側の上皮は厚さ 0.05mm～0.1mm で軟らかく液状の組織を包み粘性を持つ。粘膜固有層は浅層、中間層、深層の 3 つの非筋肉性の層構造である。浅層は主に弾性線維よりなり、厚さは 0.5mm 程度である。中間層は主に弾性線維より成り、一部コラーゲンも含まれている。深層は主にコラーゲンより成り、中間層と深層の厚さは合わせておよそ 1～2mm 程度である。その外側に甲状披裂筋が位置し、厚さは 7mm～8mm 程度で声帯の大部分を占める。様々な生理学的な説明を行うために、場合により呼称が変化する場合がある（表 1）。声帯を 5 層構造で述べる場合は上述の通り、上皮、固有層（浅層、中間層、深層）、筋肉とされ、3 層構造で説明される場合は上皮と浅層を合わせて粘膜、中間層と深層を合わせて靭帯、そして筋肉と

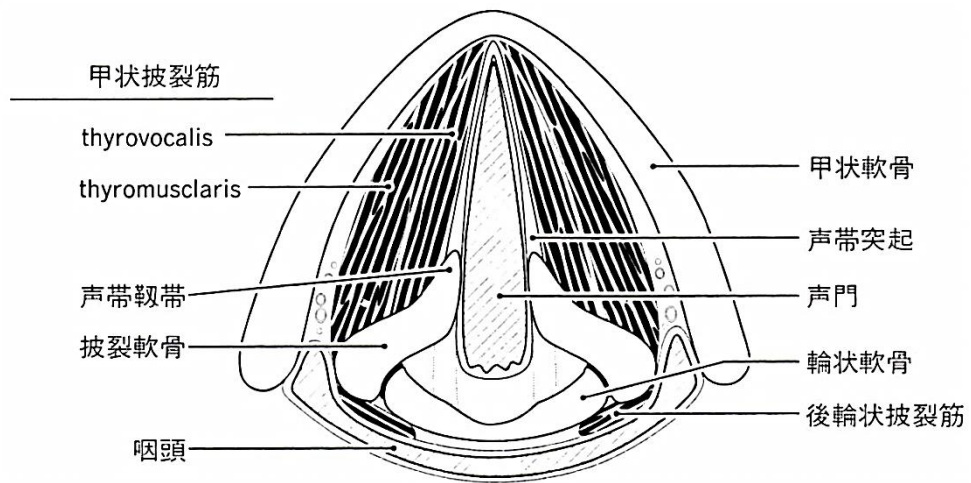


図 1.5 声帯 上部から見た図

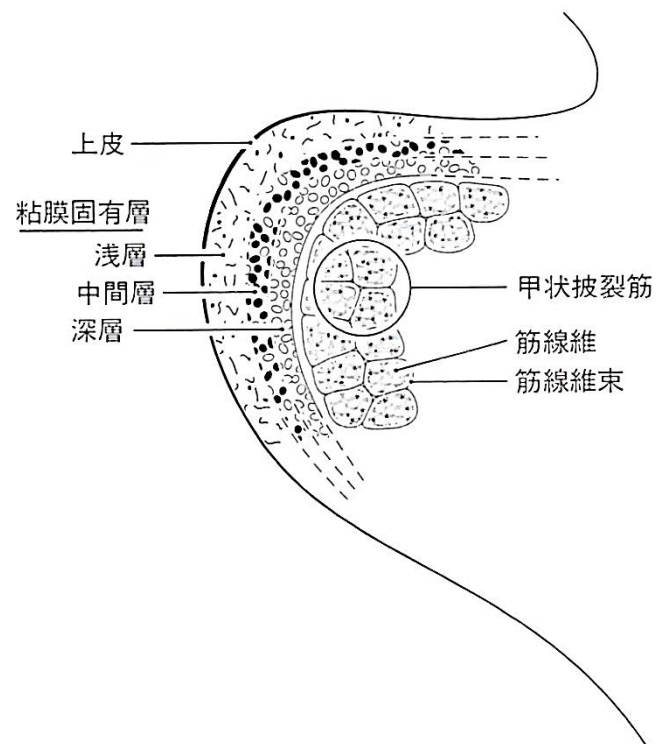


図 1.6 声帯断面図

される。2層構造で述べる場合は、上皮、浅層、中間層を合わせてカヴァー、深層と筋肉を合わせてボディなどと呼ばれることがある。呼称の変化は概念の違いであり、声帯そのものの構造の違いではない。また、声帯の第1義的機能は発声ではない。声帯の粘膜組織は人類の進化の過程で現在の様に発声に適したように変化してきたとされる（Hast, 1983）が、ここでは音声生成に直接関与しないので詳しくは触れない。

3層構造	粘膜		靱帯		筋肉
5層構造	上皮	浅層	中間層	深層	筋肉
2層構造	カヴァー			ボディ	

表1 声帯の層構造の呼称対応表

## 1.2 声帯振動

声帯が開閉運動（振動）することにより呼気流が断続され、その結果空気の疎密波が発生し、音声の源（喉頭音源）が生成される。声帯振動のメカニズムには、ベルヌーイ力<sup>9</sup>が大きく関係しているとされる（Berg. v. d. 1958）。

声帯振動のメカニズムを詳しく見てみる。

声門の開閉動作は披裂軟骨に付着する内喉頭筋の働きにより起こる。安静呼吸時には両声帯が外側に開き（外転）、発声時には両声帯が正中に近づく（内転）。唯一の声門開大筋は後輪状披裂筋である。発声時には、声門閉鎖筋が披裂軟骨を内転させ、左右の声帯をある一定の振動可能な距離まで近づける。次に肺からの空気流でベルヌーイ力が生まれ両壁が声門中央部に引き寄せられ、それにより声門は下方より閉じられる。声門上方も閉じられ、声門下圧が上昇し肺からの更なる空気流により声門上圧よりも声門下圧が大きくなり声帯は下方より連続的に押し広げられる。閉鎖された声門は、空気が流出することにより再び開く。声門下圧が低下し、声帯弾性による復元力及びベルヌーイ力が働き声帯は下方より閉じられる（図 1.7）。これが声帯振動による喉頭音源の生成メカニズムである。声の高さ、すなわち声帯振動の基本周波数の変化は主として声帯張力の変化によってもたらされる。声帯張力の変化は声帯が引き伸ばされる事により生じ、張力が増大すると声帯が薄く引き伸ばされ、振動数の増大、すなわち基本周波数が上がることになる。このことにより、様々なアクセントやイントネーション、メロディ的要素を生成することが可能となる。声帯張力を調節する筋肉群については、輪状甲状筋の収縮のみではなく輪状甲状関節の回転を引き起こす全ての筋肉群の調節がその要因となり、これが安定した音の高さを維持しながら発声する事の難しさの原因となっている。喉頭音源そのものは音韻性を持たないブザーの様な音で

ある。喉頭音源の生成過程がある時間間隔の中で周期的に行われれば、この喉頭音源により生成された音にはある周波数が生まれる。この周波数は声帯振動の周波数と等しく、音の基本周波数と等しくなる。例えば A3（弦楽器のチューニング時と同じ）音を発声した場合、1 秒間に 440 回この声帯振動のプロセスが行われていることになる。A4 音（ソプラノ高音の A）であれば 1 秒間に 880 回この振動が行われているということになる。一方、声帯振動は水平方向と上下方向の複合運動である事が明らかになっていて、声帯周辺の運動方向は水平方向の直線的なものではなく、斜上外方に向う楕円形である事が明らかになっている。また、胸声発声において、声帯粘膜の移動性があることも分かっている。つまり、声帯振動時に上唇と下唇との間に位相のずれがあり、また声門閉鎖は下唇より始まる事が分かっている。

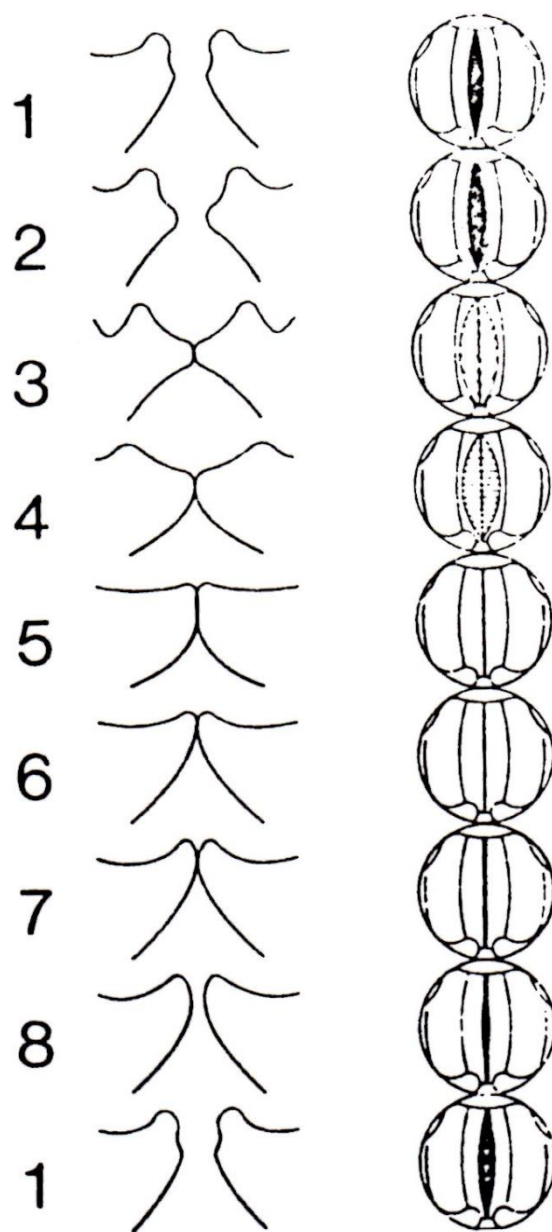


図 1.7 声帯振動の様子。(Sundberg, 2007)

1 番から 8 番までで 1 振動サイクルとなる。

前述のとおり，EMG（筋電図測定）などで基本周波数の上昇に関与しているのは輪状甲状筋と甲状披裂筋が関与している事が明らかになっている一方で，基本周波数を下げるためにどの筋肉が関与しているかは，未だにはっきりしていない（Sundberg, 2007）。

声帯振動についてはベルヌーイ力の負の圧力が働き，両声帯が引き寄せられ振動モードを創り出す事に大きく関与している事が分かってきた一方で，近年の研究では，ベルヌーイ力だけでは声帯振動モードを説明することが出来ないとする説も現れてきた（Sundberg, Titze, 他）。ベルヌーイ力による声帯陰圧がどの程度声門閉鎖に関与しているのか，声帯振動のメカニズムについてベルヌーイ力以外の要因を考慮する必要性が近年，認知され始めてきた。

### 1.3 喉頭音源のスペクトル

音のスペクトルとは，正確には周波数スペクトルと呼ばれ，音に含まれる周波数成分を正弦成分に分解して表したものである。正弦波<sup>10</sup>で生成される純音<sup>11</sup>は，それ自体が部分音となる単一のスペクトルであり，その他の複合音<sup>12</sup>においては多様なスペクトル構造が現れる。周期を持つ波形のスペクトルは線スペクトル<sup>13</sup>となる。この場合は隣り合う成分の周波数差は，基本周波数の整数倍になる。周波数成分は音波の種類により幾つかの減衰特性を見せる。1 オクターブごとに6dB減衰する振幅特性を $-6\text{dB/octave}$ のスペクトル傾斜もつ，という様に表現する。図1.8は $-12\text{dB}$ のスペクトル傾斜と， $-18\text{dB}$ のスペクトル傾斜を提示してみた。人の音声の場合，声帯の開閉により断続された空気流は疎密波を生み喉頭音源が生成されることはすでに述べた。ピッチがあるような周期的に空気の断続を繰り返し生成される音には，調波構造<sup>14</sup>が存在する（図1.9）。

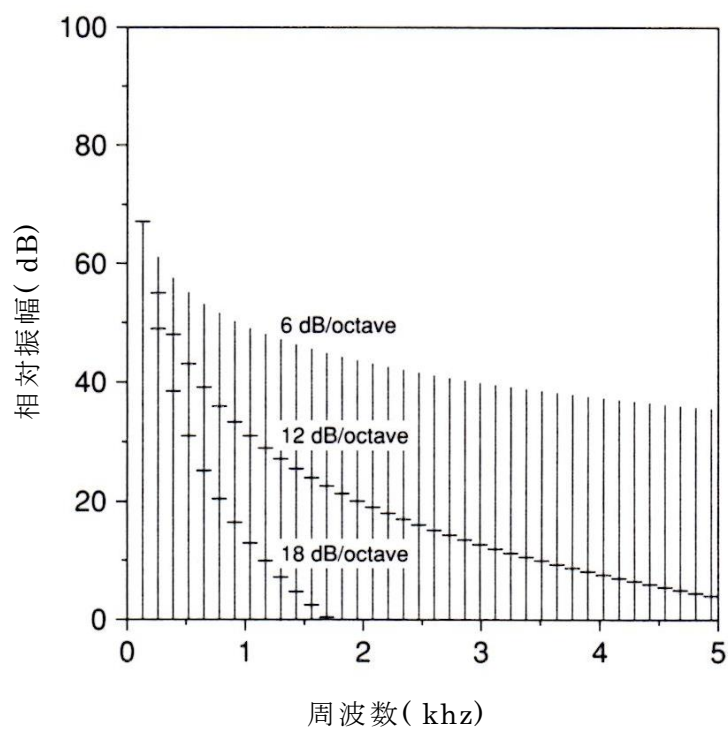


図 1.8 対数表示による振幅スペクトル。  
3 種類のスペクトル傾斜を表してある。

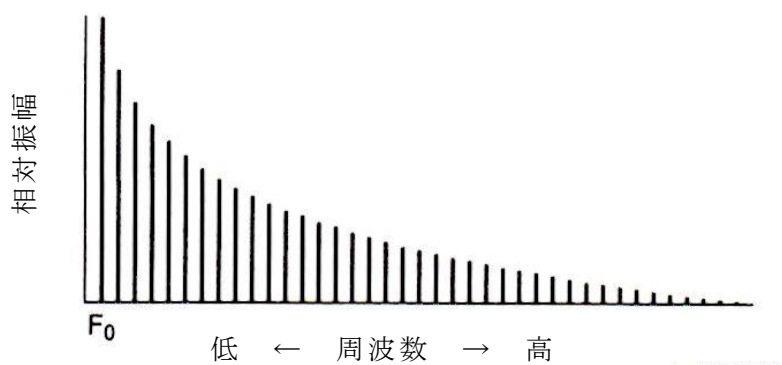


図 1.9 喉頭音源の対数表示による振幅スペクトル。

#### 1.4 声道で生成されるその他の音

人の音声の主要な音源は、声帯振動によって生成される喉頭音源である。しかしながら、声道内のある種の空間的狭めを作って気流を攪乱させたり、ある場所の閉鎖を作って空気圧を上げ瞬間的に解き放ったりすることでも音は作り得る。また、声道内の軟性組織、口唇や口蓋垂や舌のある部分を声帯の様に振動させることでも音は生成できる。喉頭内では声帯振動により生成される音以外にも、様々な音が生成可能で、子音成分や特殊な信号音として通常のコミュニケーションや歌唱以外にも幅広く用いられる。





## 第 2 章

本研究に関連する重要な項目の詳細な説明

## 2.1 声区転換問題

歌手が広い音域を歌唱する際にどうしても克服しなければならない声区転換(パッサジヨ)の存在については、過去の著名な声楽教師が一様に指摘し、その問題点の克服に当たってきた。古くは歌唱指導本としては現存する最古のものとして知られるトージの「古今の歌手たちの見解」に声区論として現れ、マンチーニの「装飾の施された歌唱に関する実践的省察」には2声区論として姿を見せけている。その後も、ウィリアム・シェイクスピアや、マニユエル・ガルシア、F. フースラーと Y. ロッド＝マーリング、近年ではリードやミラーなどここには書ききれない著名な多くの声楽教師が声区転換問題については言及している。それらの文献の中では、2声区論、3声区論、5声区論などとして唱えられることもあれば、様々な技術的解決方法を提示しているものもあり、このことから時代を経た現代においても歌手にとって声区転換問題の大きさをうかがい知ることが出来る。歌手を悩ます声区転換とは一体どのようなものなのであろうか。

### 声区転換の概念

声区(register)とは「発声時にある域内での全ての音が同様に生成されて同様の性質を持つと知覚される、その発声基本周波数域 (Sundberg, 2007)」のことをいう。声区については、「地声」や「裏声」として直感的に理解できるが、正確には「胸声区」「頭声区」ということになる。resister(レジスター)とはもともとオルガン用語でストップ(音栓)を組み合わせることで作りだすいろいろな音質の変化を表す語で、これを声にあてはめ、同じ音質を作りだす音域を vocal register (声区)と呼ぶことが一般的である。クラシック歌唱の場合、この「胸声区」と「頭声区」を滑らかに繋ぐための技術「声区融合」(Miller, 2009)が行われる「中声区」を

含めた3つの声区として考えられることもある。声区を表現する言葉の種類としては上記の胸声区、中声区、頭声区の他に、バス歌手などが低い音域を歌唱する際に用いられる「シュトロース声区」や「パルス声区」「フライ声区」、男声の裏声の軽い声を表現する「ファルセット声区」、女声の高音部を表す「フラジョレット声区」「ホイッスル声区」なども用いられることがある。人は広い音域を歌唱する際、2つ以上の声区にまたがる時があり、この声区と声区を通過する際に声区転換問題（passaggio, 伊；ブレイク, break 英）が生じる。イタリア語でパッサッジョは、音楽的な意味としては「経過句、楽節、歌手が自由に用いる装飾音」であるが、とりわけ声楽家や声楽教師、研究家の間では「声区の転換点（もしくは区間）」、更にそれに伴う技術的な「問題点」や、それを解決する「声楽的技術」までをすべて含めた意味としても用いられている（Reid, 2005）。広い音域を歌唱する際には、声区を切り替える必要があるが、その一方で歌唱の際には声区による発声法の切り替えにより音質の極端な差を起こさないことも同時に求められる。声区の切り替えには、体質や発声器官のサイズ・形態・状態、ピッチや母音や強弱のさまざまな変化に対応する発声器官のメカニズム、心理的な影響などが考えられている。生理学的に、声区変換のメカニズムを甲状披裂筋の最大活動によるものとする仮説が提唱されている事や（Titze, 1993）、基本周波数を司る2つの筋肉、輪状甲状筋と甲状披裂筋の活動形態の違いが声区変換を生み出すなどという説も提唱されているが、現在においても不明な点が多く未だに全容の解明には至っていないというのが現状である。現代の最先端の研究をもってしても声区転換のはっきりとした生理的メカニズムは未だに明らかにされていないのである。歌手はこの声区転換部において、聴衆に気づかれることのないよう非常に滑らかに曲想に応じて声を変化させ使い分けることが求められる。これは声楽技術的に

は非常に高度なもので、声区転換の技術を習得することに多大な労力を裂かれ、不幸にも習得できずにプロのオペラ歌手になれない人もいる。運良く技術的に習得できたとしても、歌手活動の中で曲想やメロディラインなど様々な条件下で常につきまとい苦勞を伴う問題となっている。「良い」パッサッジョ、すなわち「顕著な声質の変化を抑えた」声区転換を技術的に解決することが重要で、この技術を体得して初めて全ての音域をむらなく歌唱する事を可能にするのである。

### 声区転換と声種との関連性

R. Miller(1926-2009)によれば、声区転換は概ね E4～F4 の辺りで存在するとされる(図 2.1)。ただし個人差も多く存在し、人によっては数個の半音にまたがる場合もある。声区転換が継続している音域のことを「パッサッジョ域」と呼ぶ。現代の声楽教育においては、パッサッジョ域は歌手の声種やキャラクターを決定づける重要な判断材料として用いられている。例えばバス歌手の場合、パッサッジョ域が G3～D♭4 にある場合、その歌手はバス・プロフォンド (bass profundo, 深いバス) ということになる(図 2.2)。特筆すべきは、その歌手の持つ歌唱可能音域と、パッサッジョ域により決定される声種のキャラクターとは基本的には関連性がないということである。つまり高い声が出る事や、低い声が出ることは声種決定には関係しないのである。仮にこの歌手がバリトンと同域程度の高音域の歌唱が可能だとしても、パッサッジョ域がこの位置にあれば基本的にはバス・プロフォンドのキャラクターを歌唱することが最も自然であるということになる(ただし、現実的には低い声が出ないのにバス・プロフォンドを歌唱することは事実上不可能であるし、高い声が出ればバリトンの楽曲を歌唱する可能性も当然出てくる)。同様に、A3～D4 にパッサッジョ域がある場合、この歌手はバス・カン

タンテ（リリコ）（*bass cantante, lirico*, 抒情的なバス）である。以下同様に、 $B\flat 3 \sim E\flat 4$  は、バリトン・ドラマティコ（*baritono drammatico*, ドラマティック・バリトン）、 $B3 \sim E4$  は、バリトン・リリコ（*baritono lirico*, 抒情的バリトン）、テノールの場合、 $C\sharp 4 \sim F\sharp 4$  ではテノール・スピント（*tenore spinto*）、 $E\flat 4 \sim A\flat 4$  ではテノール・レッジェーロ（*tenore leggero*）などということになる（図 2.3）。女声の場合は少し事情が異なる。胸声区と中声区のためのパッサッジョを第 1 パッサッジョ、中声区と頭声区のためのパッサッジョを第 2 パッサッジョと呼ぶ。パッサッジョ域と各声種は図の通りである（図 2.4）。女声についても同様に、歌唱可能な音域と声種とは直接関連性はないことを付け加えておく（Miller, 2009）。



図 2.1 パッサッジョが生じる平均的な音高

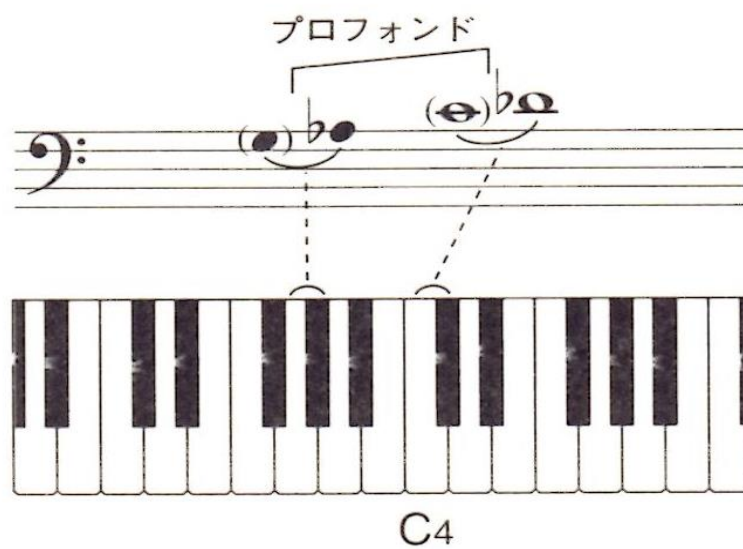
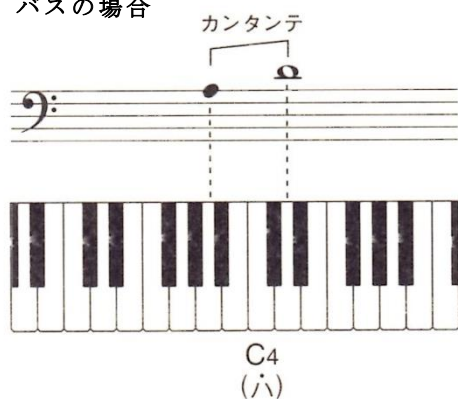


図 2.2 バス・プロフォンドのPASSAジョ域

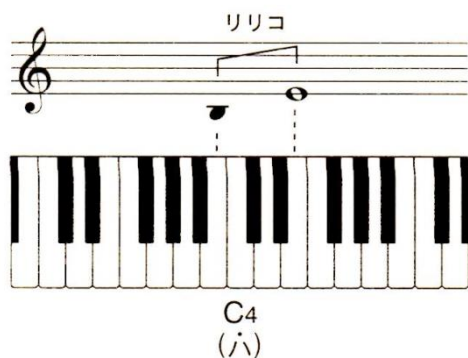
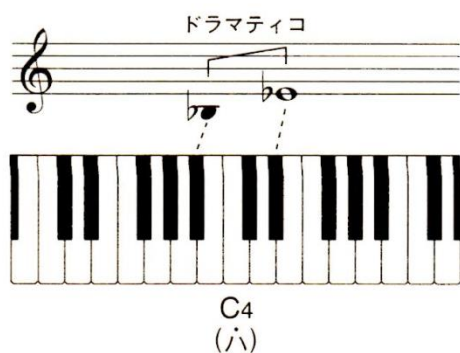
以下，バリトン，テノール，アルト，メゾ・ソプラノ  
ソプラノのPASSAジョ域と声種の関係を示す。

(図 2.2～2.4 出典：R.Miller『上手に歌うための Q&A』2009)

## バスの場合



## バリトンの場合



## テノールの場合

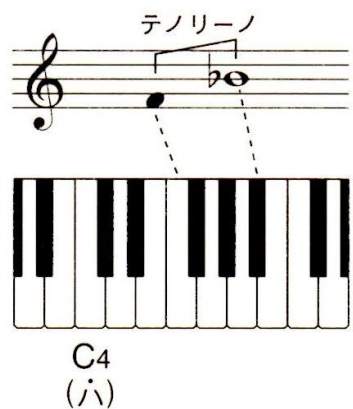
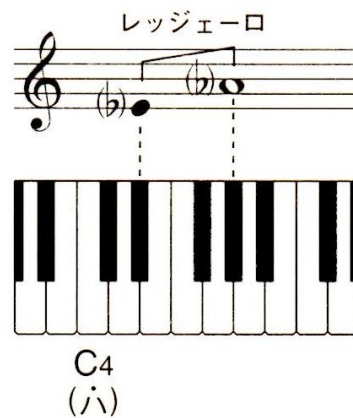
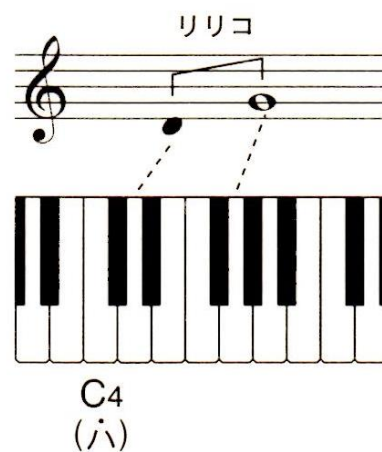
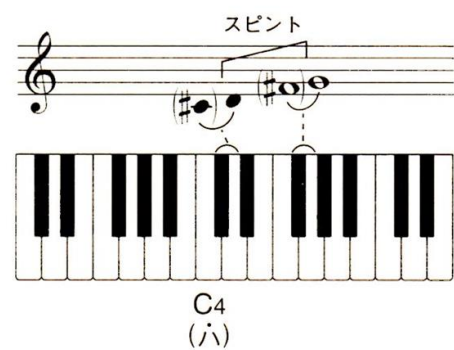
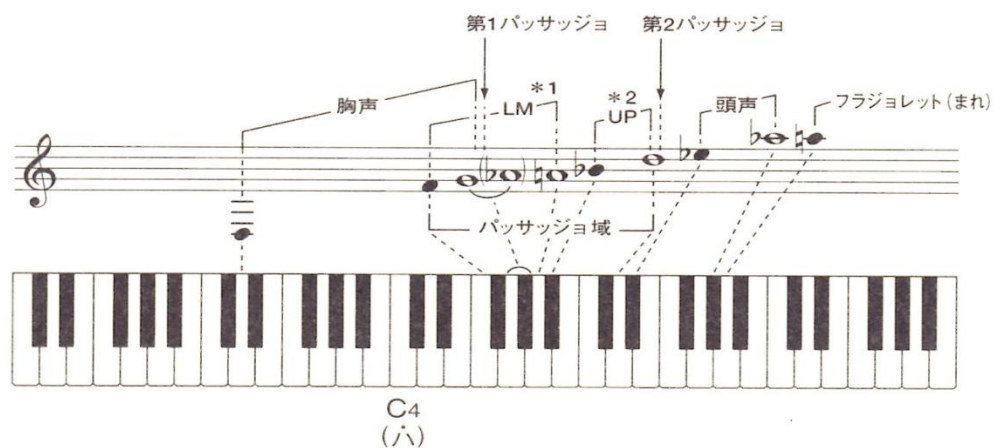
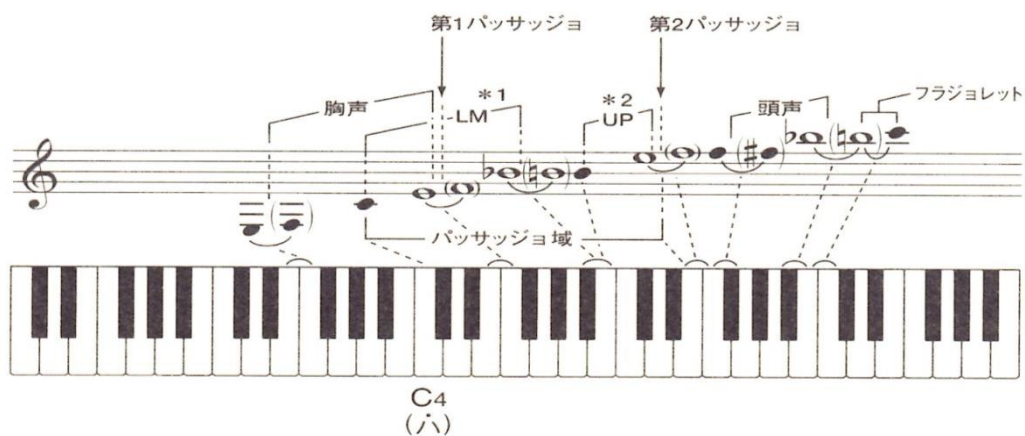


図 2.3 男声歌手のパスサッジョ域と声種の関係

## アルトの場合



## メゾ・ソプラノの場合



## ソプラノの場合

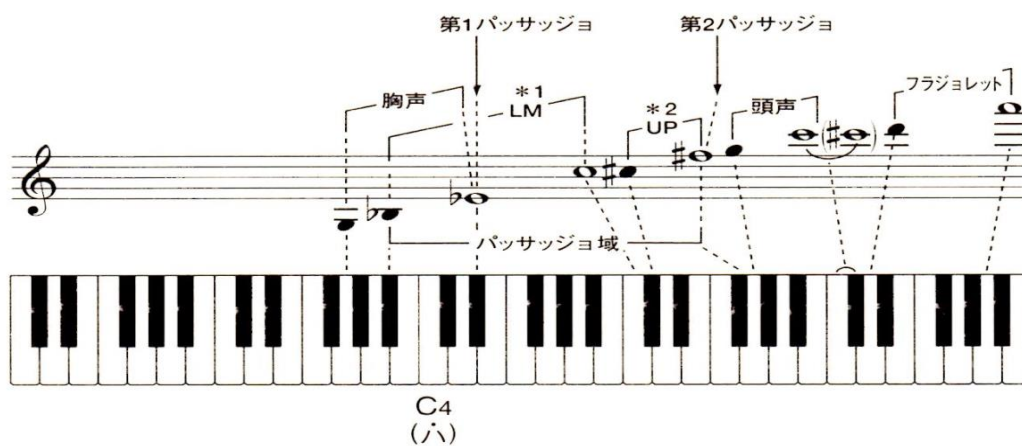


図 2.4 女性歌手のパッサッジョ域と声種の関係

### 声区転換の音響学的問題提起

声区転換問題について音響学的見地からアプローチされた研究例は、調べた限り存在しない。オペラ歌唱の音響的な特徴として研究が重ねられてきたものには後述の歌手のフォルマント (singer's formant) に関するものがある (Sundberg, 2007)。これは典型的には男性歌手の 3 kHz 付近に現れる共振のピークである。このピークが高いほど、いわゆる声に張りがあり、オーケストラをバックにしても声の存在が分かりやすい歌唱になると言われている。しかしながら、この特徴はひとつの発声、あるいは複数の発声間に共通する特徴で、声区転換部の発声法のように複数の連続的な音のつながりにおける音響学的先行研究は見つけられなかった。このため、何が「良い」声区転換であるかについての音響的指標は、現在において確定していないと言える。優れた声楽教師や研究家は声を聴いて「適切な」声区転換部分の発声法を判断し現場で指導を行っていることから、声区転換部における声の音響信号中にその何らかの判断の手がかりが存在すると考えるのが妥当である。また、指導者にとっては、その音響的特徴が客観的に明らかになることは、指導において極めて重要な指標になる筈である。

### 2.2 レガート唱法

声区転換部の歌唱に関連する事項として、レガート唱法について述べる。

レガート (legato; 伊) とは、「滑らかに連続した」(イタリア語辞書; 小学館) 音のつながりの事で、どの楽器においても最も基本的技術として理解されている。他の楽器と同様に、声楽においてレガートとは、もちろん「滑らかに繋がる」と言う意味もあるが、それ以上の意味を込めてこの言葉を用いることがある。声楽におけるレガートとは、上記の意味の他に音楽や曲想に応じて、その「繋ぎ方」を自

在に変化させる技術が必要で、非常に高い技術が要求されるものとして理解されている。繋ぎ方を自在に変化させる技術を完成させることが出来て初めてレガート唱法を体得したことになる。当然、声楽学習者が最初に習得しなければならない技術でありかつ、熟練者においても、どの楽曲であっても常に高い意識を必要とする大きな問題である。

複数音でのレガート唱法を可能にするためには、それぞれの音の基本周波数の高い安定性が必要である。基本周波数を調節する喉頭内の筋肉活動を明らかにするために、生理学的見地からは、筋電図で測定する方法（EMG 検査）などが近年様々な方法で行われ、多くのデータが得られている。内喉頭筋と外喉頭筋の EMG の結果を Atkinson は総合的にまとめ、筋活動のデータを示している（Atkinson, 1978）。また、基本周波数を調節するために主に輪状甲状筋と甲状披裂筋が共同的に働くが、輪状甲状筋が第一次で甲状披裂筋が第二次的に働くことなども明らかになってきた（Shipp & Mcglone, 1971）。しかしながら、前述のとおり音高が下降する際の声帯振動の変化の詳しい様子や、音高調節を司る筋肉のメカニズム全てが明らかになっている訳ではない。

さて、ピアノのように一つ一つの音が独立した発音体によって供給される楽器の場合は、レガートを奏でることは極めて難しい。声のように一つの音源帯と一つの共鳴体がある状態を変化させて音を変化させる場合は、それよりはむしろ滑らかになりやすいと考えられる。ところが、歌う場合におけるレガートの難しさとは、つまり音階という離散的な音の群を、声帯と声道という連続的な変化しかできないもので作り出すということが挙げられる。その上で、上述の通り、求められる複数の音（場合によっては同じ音高の時もあるが）の音高の明確さ、つまり発声される幾つかの音の基本周波数の極めて高い安定度が必要で、同時にシンガ

ーズ・フォルマントを初めとする声楽的な声を作り出す声道の安定的な構え、もしくはその技術が絶対的な必要条件になる。どちらかが欠けても声楽的なレガート唱法は完成しないところにその難しさがあり、声楽家が特別な意味を込めてレガート唱法という言葉を用いる理由がここにある。また、異なる音高の2音の連続的な音量の適切さ、音質の著しい変化を起こさせない技術（場合によっては敢えて変化させる場合もあるが、それは例外として）、つまり広い音域を歌唱する際のパッサジョの問題、ビブラートの問題など多くの要素も関わっていて、全てが解決されて初めて完璧なレガート唱法を可能にするのである。

### 2.3 フォルマント

人が発する音声の音質を決定するのに、フォルマント(共鳴<sup>15</sup>)周波数<sup>16</sup>が大きく関係していることが知られている。また、母音の音韻性を決定づける事についてもフォルマントは非常に重要であることが分かっている。また、オペラ歌唱においてはシンガーズ・フォルマントと呼ばれる3kHz付近に現れる共振のピークを持つ発声が大切であり、その生成過程についても理論的には明らかになっている。フォルマント周波数の発生原因が分かればすぐさま歌唱の上達に繋がるということではないが、フォルマント周波数の概念と生成の理論的メカニズムを知ることには、歌唱上達に繋がる一助となることこそあっても、その妨げになることはない。

#### フォルマント生成の原理

フォルマント生成の原理について簡単に述べる。

それには、音響管の音の伝搬特性を理解する必要がある。

## 音響管の反射

まず、断面積の異なる音響管の境界で起こる現象を見てみる。なぜなら、人の声道は断面積の変化する円筒管を繋いだものに近似できるからである（図 2.5）。断面積の異なる音響管の境目で起こる反射現象が、フォルマント生成原理を理解する第1段階である。

まず、音は媒質の音響インピーダンス<sup>17</sup>が変化するときには常に音の伝搬は変化することが知られている。そして、断面積の異なる円筒間の境界では、音波の反射が起こる。音の反射についての複雑な理論についての説明はここでは省略させてもらうが、声道内の空気の密度と音速が一定であると仮定するならば、その反射係数は、

$$r = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2}$$

と表される。

$A_1$  は図 2.6（上）（下）共に左の音響管の断面積で  $A_2$  は右の音響管の断面積、 $r$  が反射係数である。この式の意味は「反射係数は、隣り合う音響管の断面積の和に対する差の比によって表される」ということを意味している。例えば、図 2.6 に示すような断面積をもつ 2 つの音響管での境界では、どのような現象が起こるか見てみよう。図 2.6(上) では管の断面積が減少している。この場合、 $A_1 > A_2$  であるから、反射係数  $r$  は正の値になり、反射波  $P_r$  は正の極性になる。通過した波  $P_t$  は矢印が長くなっていることから分かるように、入射波よりも圧が高まっている。つまり、通過した後は音圧が上がり、この音響管は圧縮器のような役割を果たすことになる。一方、下の図では、 $A_1 < A_2$  であるので、(上) とは反対に反射係数  $r$  は負の極性をもち、この音響管は減圧器のような役割を果たす。 $A_2$  が 0 の場合は端が閉じた管で、 $A_2$  が無限大の場合は端が開いた管の反射係数が得られる。つ

まり  $A_2$  が 0 の場合は反射係数が 1 となり完全反射で、入射音圧の 2 倍になり、 $A_2$  が無限大の時は反射係数が  $-1$  となり、入射音圧は負の完全反射が起こり大気圧に等しくなる。この様に断面先の異なる音響管を音が通過する際には、その断面積にの違いにより加圧・減圧が起こり、音が伝搬されていくことになる。

声道の音響管近似モデル図

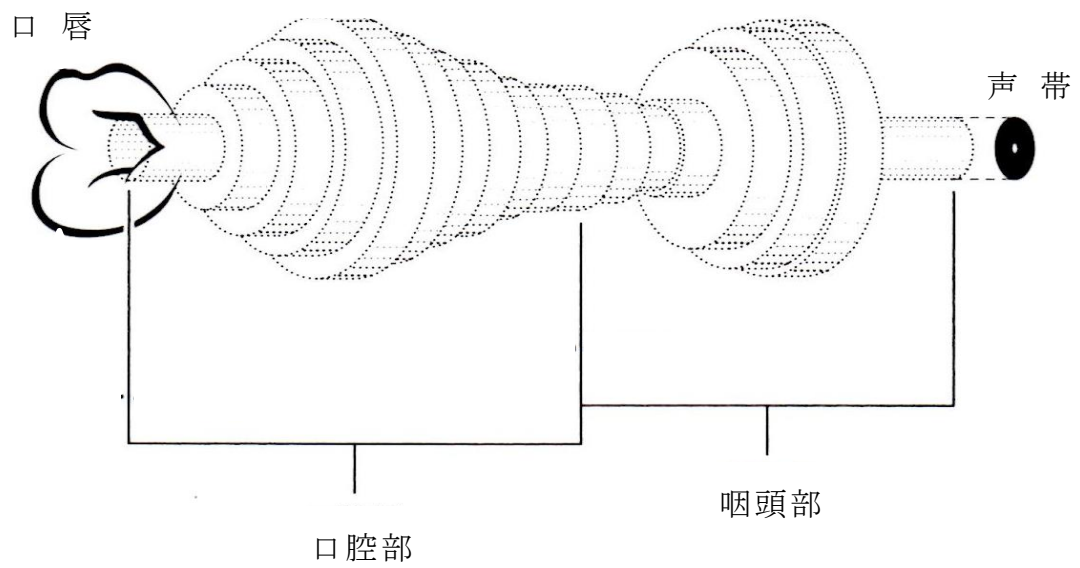


図 2.5 声道の音響管近似モデル図

右端が声帯で左端が口唇。  
声道の様子を断面積の異なる音響管で近似している。

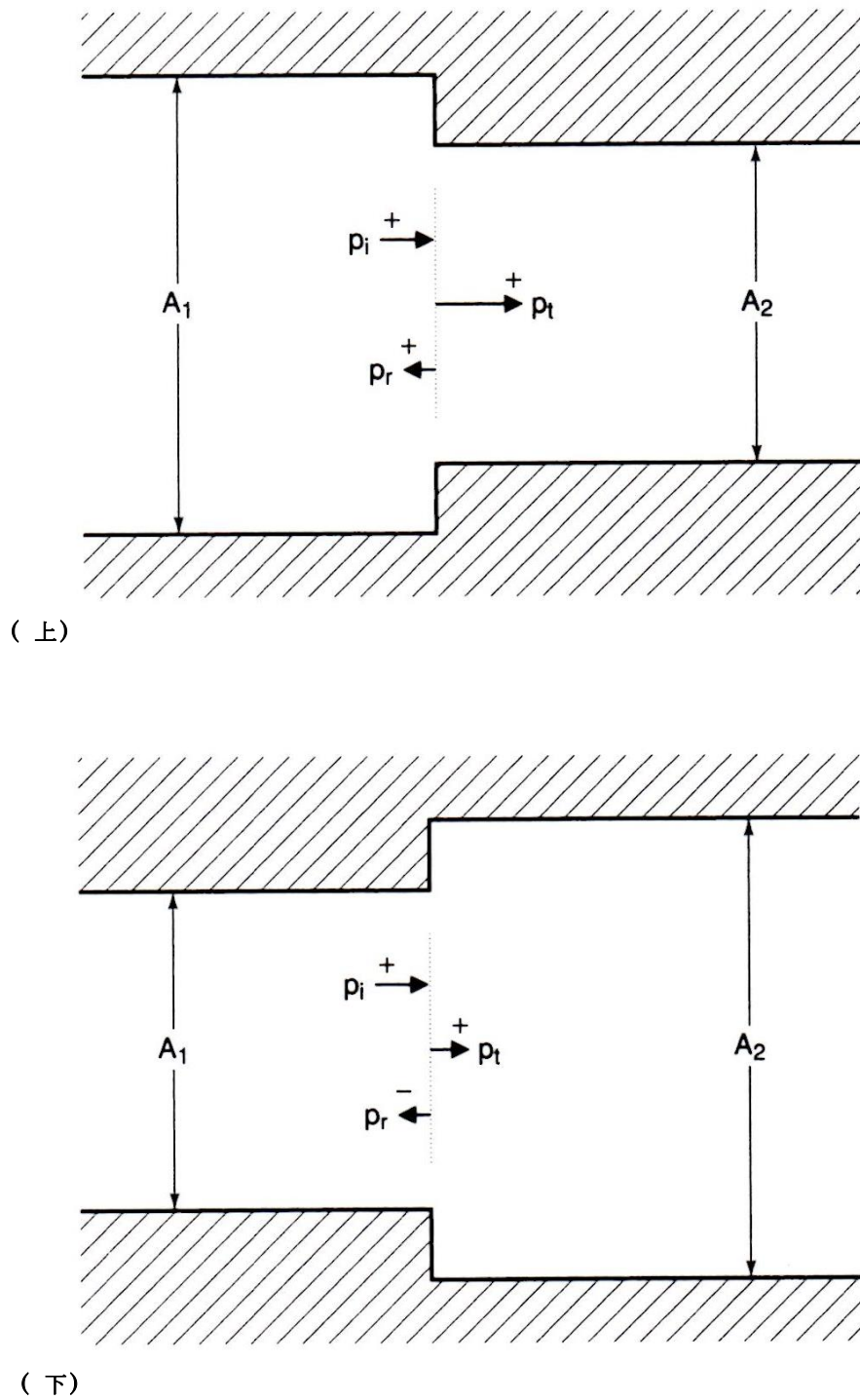


図 2.6 断面積の異なる音響管の境界で起こる反射の様子

上図が断面積の大きい管から小さい管のモデル。音圧の圧縮が起こる。

下図が断面積の小さな管から大きな管のモデル。音圧の減圧が起こる。

(+)は圧縮化で, (-)は希薄化を表している。

### 1/4 波長共鳴管

一端が閉じて片側が開いている音響管について、その共鳴現象を考えてみたい。

なぜなら、声道は声帯付近で小さな穴（声門）が開いているものの、その音響特性は片側が開いている音響管と近似できるからである。

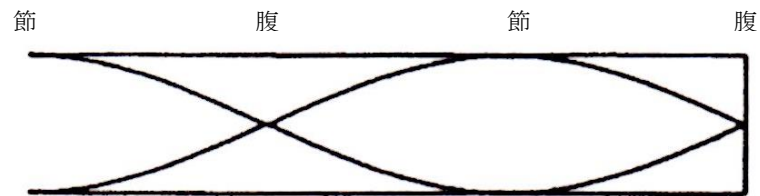
図は、音響管の内部の音圧状態を示したものである（図 2.7）。管の右側が閉じていて音圧が最大、管の左側が開いていて音圧が 0 の状態を示している。管の右側の閉口部分では、前述のとおり音圧の極性が変わらず反射されるために、入射音圧を反射音圧が重なり入射音圧の約 2 倍の状態になり、管の開口部分では音圧の極性が反転して反射されるために、常に音圧はほぼ 0 になる。このように音響管内部の音圧は、閉口部分で最大となり、開口部分で最小になる。常に音圧が 0 になるところを、音圧の節と呼び、常に音圧が最大になるところは音圧の腹と呼ばれている。音響管内部には、これ以外にも幾つかの腹と節を持つ音圧状態が同時に存在可能である（図 2.7 (b), (c)）。また、図の様に音圧が（正負ともに）最大に変化する場所が一定であるような状態にある時、この現象を定在波と呼ぶ。

フォルマント周波数はこの定在波と大きく関係している。例えば、音響管の長さが 17cm（仮想声道長）の場合、定在波の波長は  $17\text{cm} \times 4 = 68\text{cm}$  となり、音速を 340m/s とすると、 $34000\text{cm/s} \div 68\text{cm} = 500\text{Hz}$  が第 1 フォルマント周波数になる。第 2 フォルマントは、定在波の波長が  $17\text{cm} \times 4/3$  で、同様に計算して、1500Hz、第 3 フォルマントは定在波の波長が  $17\text{cm} \times 4/5$  で、2500Hz となる。更に高次のフォルマントも同様に生成されている。

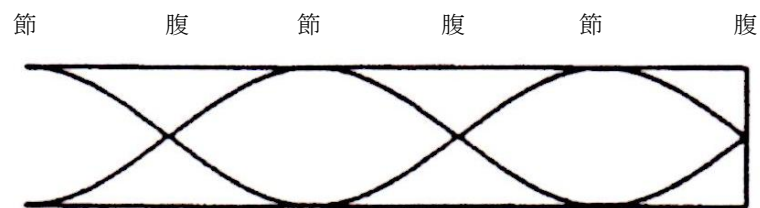
歌手が自分の得意な音高を持つ原因の一つに、このフォルマント周波数が関係していると考えられている。すなわち、自らの持つ声道長によりフォルマント周波数が決まっており（喉頭の上下があり多少の誤差があるが）、その周波数帯に重



(a)  $1/4$  波長共鳴。最低次共鳴周波数となる。



(b)  $3/4$  波長共鳴。第2次共鳴周波数となる。



(c)  $5/4$  波長共鳴。第3次共鳴周波数となる。

図 2.7  $1/4$  波長音響管の音圧分布。

なる倍音<sup>18</sup>を持つ音を歌唱する場合は、他の音よりも響き易くなるのである。

この一端が閉じ、一端が開いている音響管のことを、音響管の長さが最も低い共鳴周波数の波長の4分の1になることから「1/4波長音響管」と呼ぶ。音響管により生成されるフォルマント周波数のピークは、低い方から第1フォルマント( $F_1$ )、第2フォルマント( $F_2$ )、といった具合に名前が付けられている。因みに基本周波数の事を「 $F_0$ 」とする理由がここにある。音響管の共鳴は、数度の反射が起こった音波の加算的な干渉であり、声道音響学の最も重要な部分となっている。

## シンガーズ・フォルマント

歌手とオーケストラの長時間平均スペクトルを測定すると、オーケストラと話し声ではエネルギーは 500Hz 辺りでそのピークを迎え、その後は下降をたどる。ところが、オーケストラとオペラ歌唱の長時間平均スペクトルでは、2000 ~3000Hz 付近に 2 つ目のピークが存在する事が発見された。これは、現在では歌手のフォルマント（シンガーズ・フォルマント, singer's formant）として一般に知られている（Sundberg, 1972）（図 2.8）。このシンガーズ・フォルマントを含む発声することで、オペラ歌手は初めてオーケストラの音を超えて客席に声を届かせることが可能になるのである。

Sundberg は更に声道モデルを用いた測定を行い、シンガーズ・フォルマントを発生させる最適の共鳴器の状態を理論的に導いた。それが、

$$\frac{A_1}{A_2} < \frac{1}{6}$$

である。

$A_1$  は喉頭出口の断面積で、 $A_2$  はそれより上部の咽頭の断面積である（図 2.9）。このことが示唆するところは、シンガーズ・フォルマントを生成するためには、声帯上の音響管における断面積の比率が存在するということである。逆に言えば、断面積の比率が上記のような条件を満たせば、シンガーズ・フォルマントはおのずと（物理的に）生成されるということである。オペラ歌唱においてはしばしば「響きのある声」という言葉が用いられるが、このシンガーズ・フォルマントが明瞭に観察される音声と考えてよい。オペラ歌唱における発声の大きな目標の一つは、このシンガーズ・フォルマントを含む声を常に生み出す事で、この声を肉体的な活動により生み出す事に、歌手を目指すものは相当量の努力が必要である

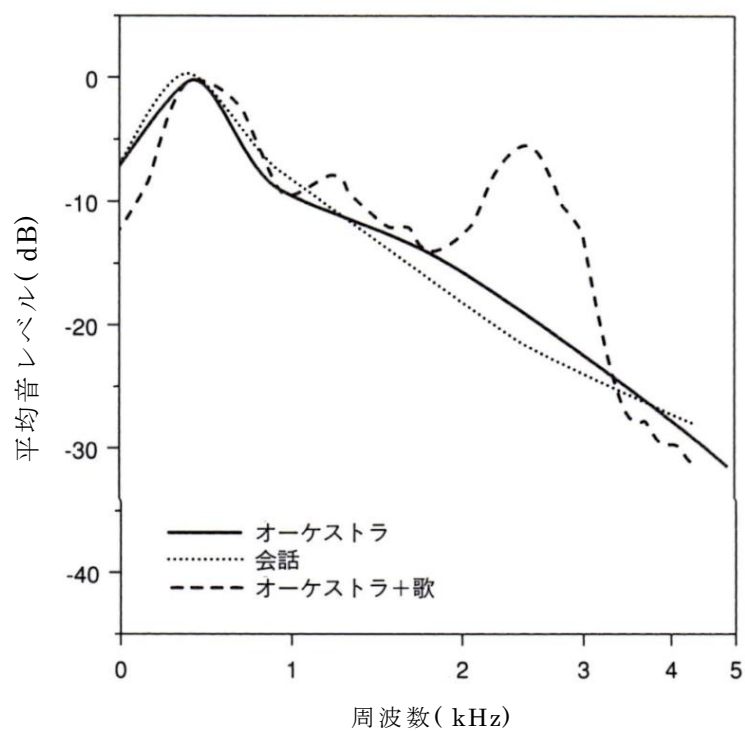
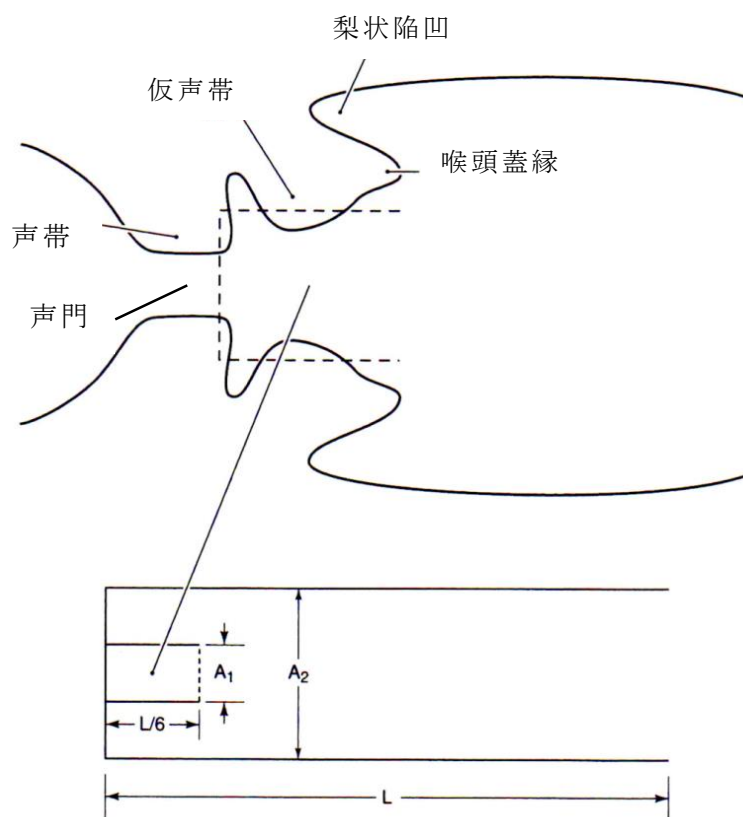


図 2.8 声とオーケストラの長時間平均スペクトル(Sundberg, 2007)

図 2.9 シンガーズ・フォルマントを作るための声道モデル理論図。  
1/4 波長共鳴管の中の小さな 1/4 波長共鳴管。

ことは言うまでもない。一方で、ある声道形状を物理的に（架空のイメージや摩訶不思議な魔法などではなく）生み出す事が、その「響きのある声」を持つという大きな目標に繋がることも容易に理解できる。

## 2.4 音声のソース・フィルタ理論

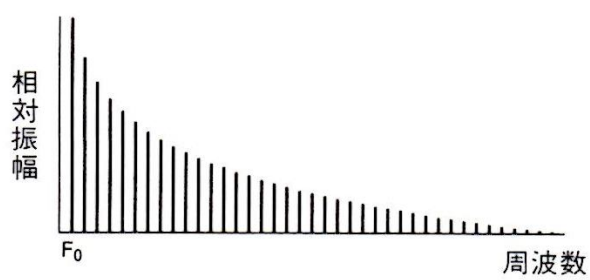
ソースとは「源、源流」の意味で音声のソースとは、喉頭音源のことを意味する。

フィルタは「濾過機」の意味で、音響学の分野において一般的には、周波数成分を選択的に伝達もしくは除去する装置のことである。声道形状における声道伝達関数が音声においてはフィルタ的役割をすることからこの名前が付けられている。

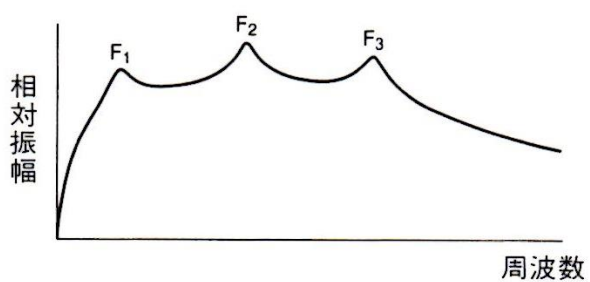
音声のソース・フィルタ理論とは、喉頭音源のスペクトルが声道伝達関数によりフィルタリングされ、母音のスペクトルが生成されるというものを示したものである。

音声の生成過程を以下に示す。

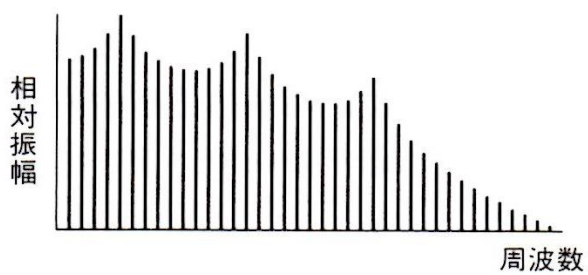
喉頭音源が前述のとおり(a)の様に生成されると仮定する。喉頭音源は線スペクトルとなり、高調波次数はその整数倍で、喉頭音源そのものの音はブザーのような音である。声道伝達関数は(b)のように複数のフォルマント構造を持つ連続スペクトルである。各々の周波数でこの2つのスペクトルが掛け合わさり、これに口腔からの放射特性が加わり、高調波がやや盛り上がるようなスペクトル包絡<sup>19</sup>を形成し、(c)の母音のスペクトルができる(図2.10)。



(a)



(b)



(c)

図 2.10 ソース・フィルタ理論のモデル図。

(a) の喉頭音源スペクトルが (b) の声道伝達特性を持つフォルマントにフィルタリングされ, (c) の音声スペクトルが生成される。

## 2.5 母音の音韻性

人が発する母音とフォルマント周波数とは何の関係しているのでしょうか。ここでは、母音の音韻性を決定している要因とフォルマント周波数との関係性について述べる。

母音の音韻性には低い 2 つのフォルマントが関係していることが知られている。(Peterson&Barney, 1952)。つまり第 1 フォルマントと第 2 フォルマントの関係性により、母音の音韻性が決定されているのである(図 2.11)。例えば、第 1 フォルマントが 0.8kHz で第 2 フォルマントが 1.0kHz のである場合は、この母音は a ということになる。第 1 フォルマントが 0.5kHz, 第 2 フォルマントが 2.5kHz であればこの母音は i, 第 1 フォルマントが 0.5kHz, 第 2 フォルマントが 0.7Khz であればこの母音は u ということになる。母音の構音については、口腔内の舌の位置、前後や高低、によって多数論じられてきた (Wolfram & Johnson, 1982 etc.)。3 つの母音 a, i, u の舌の位置と第 1 フォルマントと第 2 フォルマントのスペクトル包絡を対にして示してみる(図 2.12)。a 母音は舌の位置が比較的奥で下方に位置しているのが見て取れる。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している。これらは全ての母音と比較すると舌の位置が極端を取り、口腔内で三角形を形成していることから母音三角形(構音三角形)と呼ばれてきた。先ほどの母音図においてもこの 3 つの母音は三角形を形成し、他の全ての母音がこの三角形の内部に含まれている様子がわかる。

このフォルマント構造の生成過程は、音響管の音響特性により説明できることが知られている。a 母音の場合であれば、舌が奥まって下方に位置していることから、断面積小の管と大の管の 2 管の音響特性と近似できる。i 母音の場合であれば、断面積大の管と小の管の 2 管の特性と言う具合になる。u 母音は少し事情が

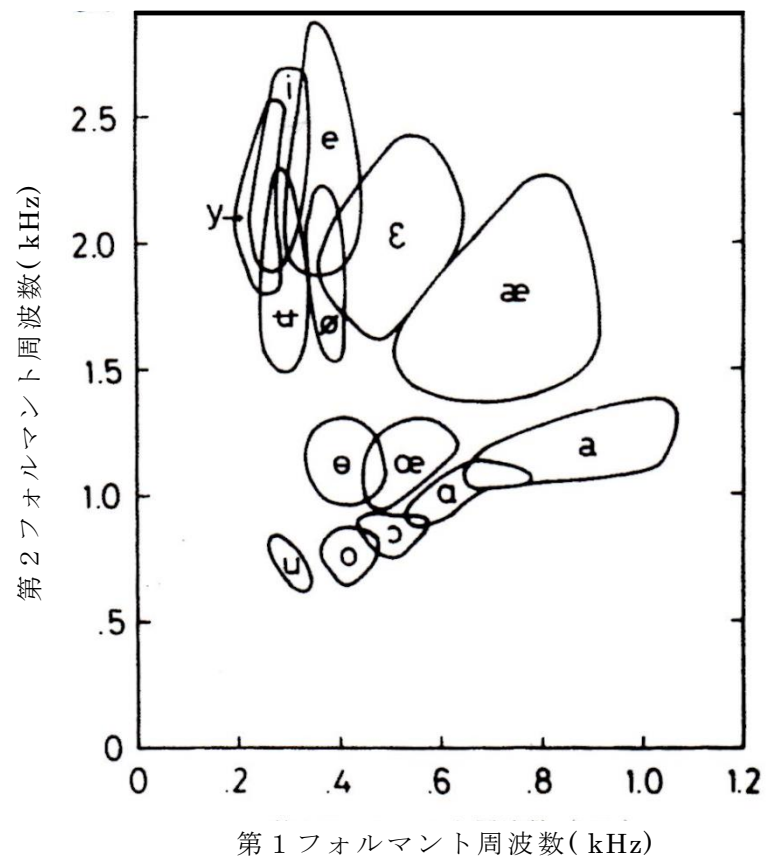


図 2.11 母音の島。第1フォルマントと第2フォルマントの関係。  
図はスウェーデン語の長母音を発音記号で示したもの。  
(Sundberg, 2007)

異なり、断面積小の管と大の管の音響特性に加えて、くちびるの「すぼめ」による3音響管モデルとして概ね説明できることが分かっているが、u についてはどの特性が優位なのか、どのくらいの割合でどの特性が変化するかなどはまだはっきりしない (Titze, 1993)。図 2.12 (a) の a 母音のフォルマント構造を見れば、第1フォルマントと第2フォルマントの位置が、点線から変化していることが分かる。点線は声道と同じ長さを持つ単一断面積の音響管の場合の第1フォルマントと第2フォルマントの位置である（上述のとおり声道長が 17cm の場合、 $F1=500\text{Hz}$ ,  $F2=1500\text{Hz}$ ）。a 母音の場合、声道は狭い音響管と広い音響管で近似できるが、狭い音響管と広い音響管の境界では減圧が生じ、断面積が一樣な管と比較すると管の全体長がある割合だけ短いものと近似でき、第1フォルマントが上昇することになる。第2フォルマントについては、狭い音響管の部分（声門に近い側）で加圧され、音圧の節が口唇に近い側にずれ、結果的に下がることになる。i 母音、u 母音についても同様に、断面積の異なる音響管の組み合わせにより、加圧・減圧が生じ、音圧の腹や節が移動することにより第1フォルマントや第2フォルマントのピークも移動する。人が音声を発する場合、口腔内形状の変化（主に舌の移動）を行うことにより母音の構音を行っていることになる。

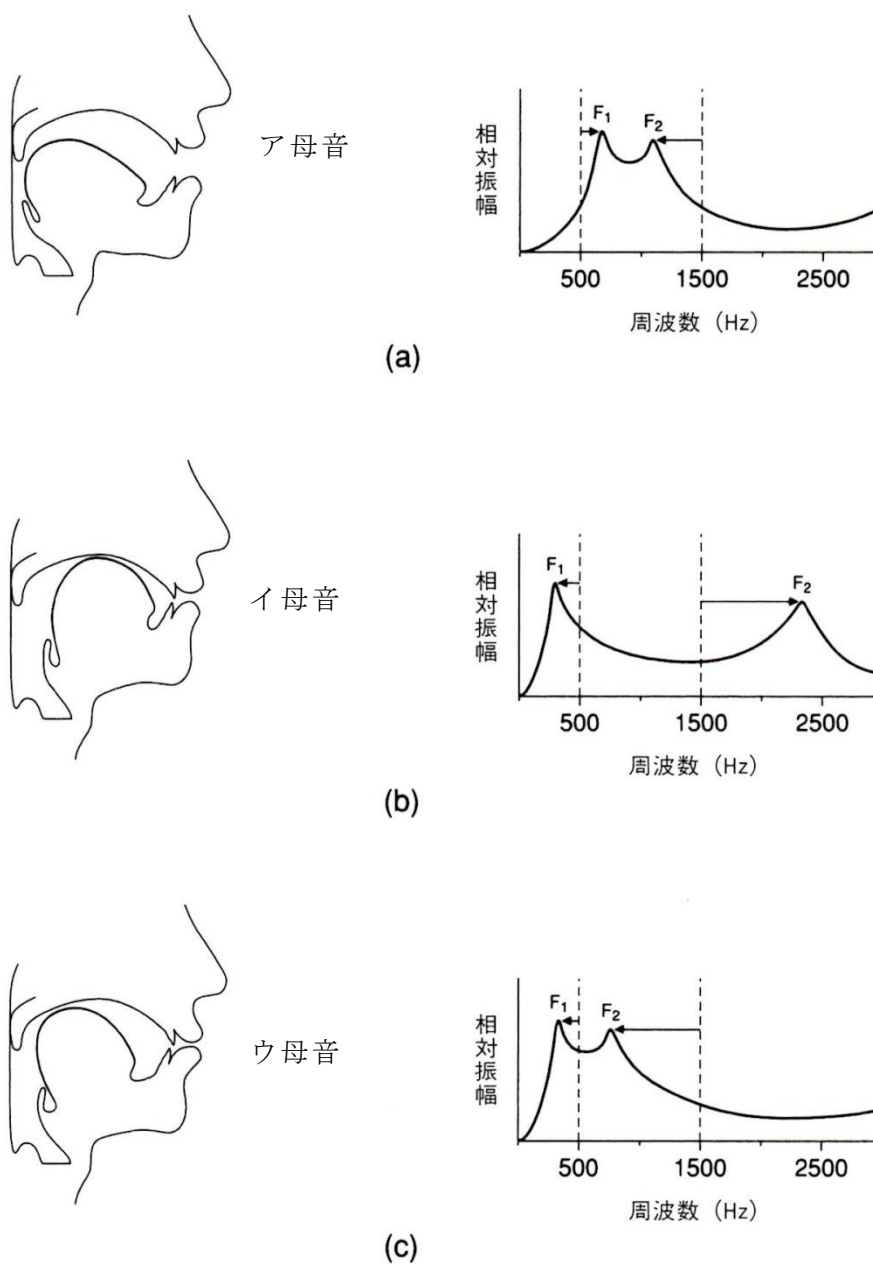


図 2.12 a, i, u 母音の構音の断面図及び、対応するスペクトル包絡。

点線は声道と同一長の断面積一定の音響管における、フォルマント。  
 低い方が、第 1 フォルマント、高い方が第 2 フォルマント周波数。  
 構音状態によりフォルマント周波数が移動し、この F1 と F2 の周波数  
 帯により、母音の音韻性が決まる。

### まとめ

本研究に関わる重要な事項及び声区転換問題についての子細な事項を紹介し、基本的な問題点等を指摘した。音声生成には物理的な現象が多く関わり歌唱を行う際や指導する際に有意義な情報が多数あることが分かる。音声生成に関する様々な物理的現象を理解する事が直接的に歌唱技術を飛躍的に伸ばすというものではないとしても、知識があるのとないのとでは実際の歌唱や指導現場での取り組み方に大きな差が出てくる。音声生成の理論が全て明らかになっている訳ではないので全てを鵜呑みにするわけにはいかないが、技術の伸長や歌唱指導の際に助けになる理論なども多数存在し、これらを理解して取り上げることでこれからの新たな歌唱法・指導法の在り方を変えていくのではないかと考えている。



## 第3章

### 高調波次数に着目したフォルマントピーク

本研究の焦点である声区転換については、声区と声区の転換点が問題となることは前述のとおりである。声区転換部における何がしかの音響的指標を確立するためには、やはり単音の音響的特徴量を分析するだけで正確な判断はできず、声区転換部分を含む歌唱音域の複数の音による声質の差を見るべきと考える。既に述べたとおり、訓練した歌手がレガート唱法で行うような複数の音を歌唱する場合や、声区の切り替わりなどでどのように声を制御するかについての音響学的データは探した限り見当たらない。先行研究の方法論も結果もない中での未知への探求と言う作業に、本研究の難しさと興味深さが共存している。

そこで本研究では、同一歌手による異なる複数の基本周波数の声を観察材料とする。音声に対するソース・フィルタ理論では、音声の物理的な性質は喉頭音源（ソース）と声道伝達関数（フィルタ）の特性に分離して考えられる。旋律を歌唱する場合に変化させるのは喉頭音源の基本周波数  $F_0$  である。この場合、声道の形を一定に保つことができれば、得られた音声の振幅スペクトルはその概形を保ったまま、包含される調波成分のみが変化する。上述の「シンガーズ・フォルマント」は言うまでもなくこのスペクトル概形に見られる特徴である。人間が声の高さを変化させる場合、つまり基本周波数  $F_0$  を変化させる場合には、喉頭を支える筋肉群の調整が必要である。工学的なモデル上は、ソースとフィルタは独立したモジュールであり、一方の特性を完全に固定した状態でもう一方の特性を変化させることが可能である。しかしながら実際の音声器官では喉頭自身の位置が変化したり、声道形状の変化に繋がる筋組織も随意、不随意的に変化し、声道伝達関数の変化を全く伴わずに喉頭音源波の基本周波数のみを変化することは事実上ない。

また、 $F_0$  を変化させる場合に声帯自体の物理特性、例えば声帯の硬さ、長さ、場

所、振動する幅、などが変化することもある。これによって喉頭音源波の波形が変化し、これも観察されるスペクトル概形に影響を与える可能性がある。広い音域を歌唱する際、声区転換がうまくいかないなどレガート唱法が成し遂げられない場合とは、基本周波数を変化させる場合に筋組織の連動がうまくいかず、結果的にスペクトル概形が大きく変化してしまい、2つの音の間の音色が極端に変化する場合であることが予想される。

そこでまず本研究での音声分析の視点は、基本周波数  $F_0$  の変化に伴うスペクトル概形の変化の観察にある。それに当たっては単に発声間のフーリエ・スペクトルの変化を見るのでは妥当な観察が困難となる。基本周波数を変えれば、それに伴い高調波成分の周波数も変わるわけであるから、フーリエ・スペクトルの比較ではその違いがソースの違いによるものか、フィルタの違いによるものかが峻別できない。本研究では後述するように STRAIGHT 分析合成系による平滑化スペクトル<sup>20</sup>を用いることにより本実験での分析を行った。

### 3.1 歌唱録音方法

#### 実験参加者

京都市立芸術大学大学院声楽教員及び声楽科大学院生の学生 8 人（テノール：5 人、バリトン：3 人、全て男性）に、「ア」母音で、任意の主音から始まる長調、その 5 度上の音から始まる長調、最初的主音の 1 オクターブ上の音から始まる長調の 2 オクターブ内の 3 つの長調を音階で歌唱することを課した。2 オクターブ内の調性は歌唱する 3 つのオクターブを総合的に鑑みて、各自の歌いやすい調性を自己申告で選択してもらった。基音は C3, B2, B $\flat$ 2, A2, G2 の各種であった。

これを上昇音階と下降音階の2通りで行った。全てアカペラ歌唱とした(図3.1)。各音階ごとに数秒の間隔をあげ、各音階の最初の音はピアノで提示した。調律はA4音が440Hzで調整されたものであった。

### 音素材の選択について

図のサンプルは教員2名(テノール1名, バリトン1名)と, 声楽科大学院学生3名(テノール2名, バリトン1名)のものを選択し表示した。図3.5, 3.6, 3.7がプロのオペラ歌手としても活躍している教員2名のサンプルで, 図3.4, 3.8~3.11は大学院生の3名のサンプルである。この選択の理由は, 今回の実験の結論の特徴を最も顕著に示しているためである。つまり, 洗練された教員の声のグラフと, ある意味未完成の学生の声のグラフを対比して観察してみると, その特徴を明らかにしたい。

### 録音方法

録音は京都市立芸術大学内の静寂な部屋で実施した。コンデンサーマイク(SCHOEPS, CMC-- No.24576)をマイクアンプ(Shure, FP-23)に接続し, A/Dコンバーター(EDIROL FIREWIRE Audio Capture FA -101)を経由し PC(MacBook Pro)に接続した。サンプリング周波数 44.1 kHz, 量子化ビット数<sup>21</sup> 16 bit, 圧縮なしでデジタル収録した。

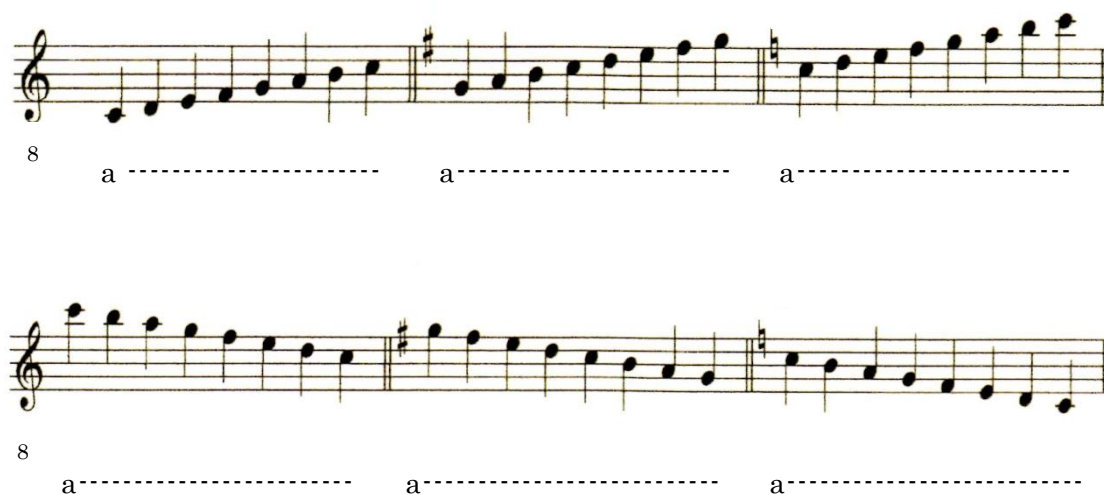


図 3.1 歌唱音階例

主調，腫脹の度上の長調，主調のオクターブ  
の長調。上昇と下降の音階歌唱を課した。

基音は C3, B2, B $\flat$ 2, A2, G2 の各種であった。

### 3.2 高調波次数に着目したフォルマントピークの観察

卓越した歌手とそうでない比較的未熟な歌手とではパッサッジョに関わる音のスペクトルの概形にどのような違いが存在するのか、またその違いとはどんなものなのか、この点を明らかにすることが本研究の大きな目的の一つである。そこでその前段としてまずは、第1フォルマントのピークを中心に観察を進めてみた。この抽出についてはプロと学生の比較を念頭に置いた。なぜなら、ここには得られる観察結果に明らかな差が生じるであろうと期待してのものである。結果としては、はっきりした違いが観察する事ができた。

### 3.3 分析

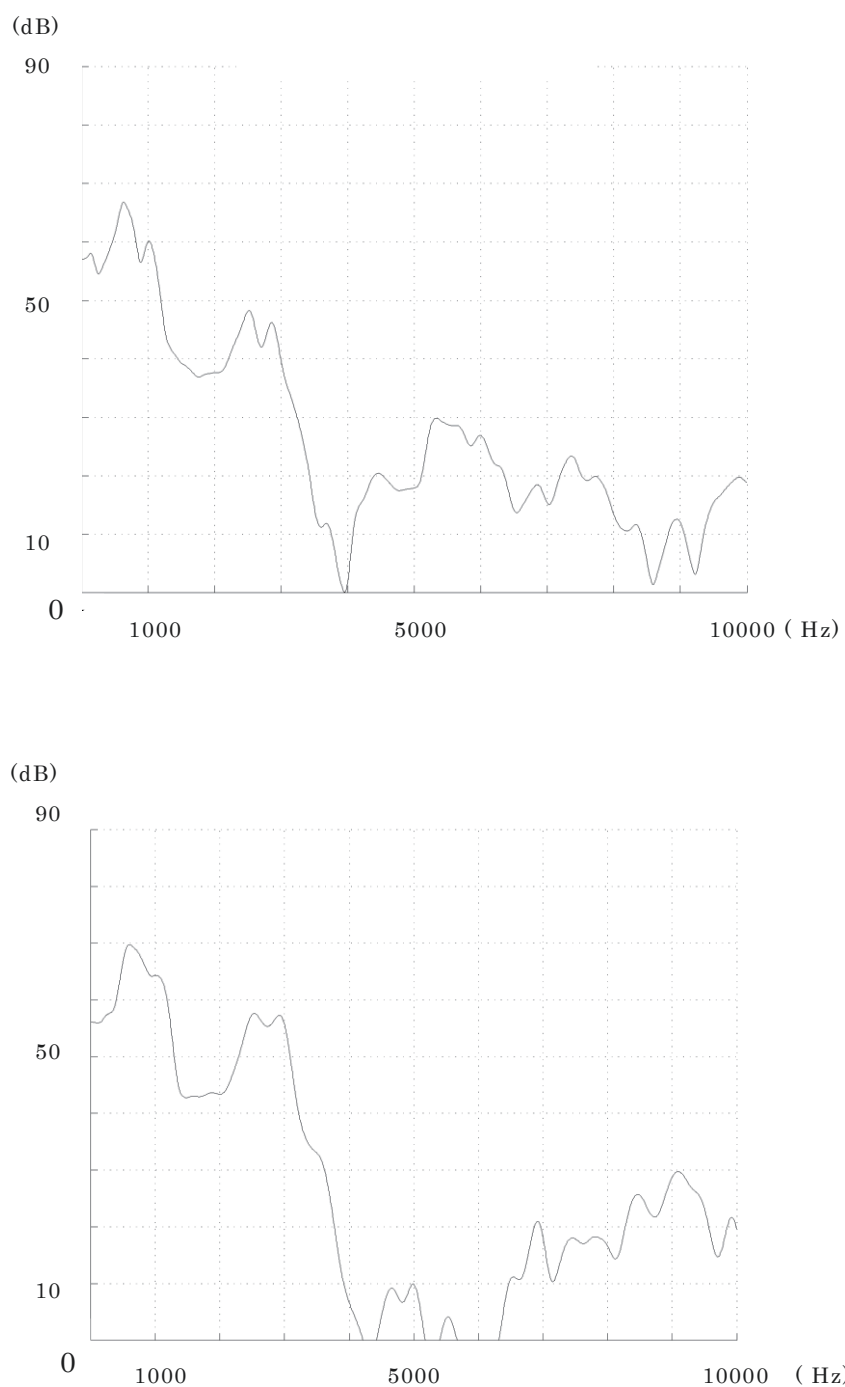
歌声のようにピッチの明確な音刺激は周期性を持っているため、サンプリングした刺激をフーリエ変換して得られるパワースペクトルには調波構造が存在することになる。この時、声の響きを規定する要因のひとつには声道のもつ共振特性、すなわち前述の声道伝達関数がある。音声とは、いわば声道伝達関数を周波数軸上で調波成分の各点でサンプリングしたものであり、声道伝達関数を推定するには基本周波数に適応的な平滑化を適用する必要がある。平滑化スペクトルは音声分析変換合成システム **STRAIGHT** を用いて算出した。このシステムは、声をこの方法によって分析する際に基本周波数・非周期成分(ノイズ等)・スペクトルの3つに分離して、それぞれを分析したり、また操作や合成を行ったりすることが出来る (Kawahara, 1999)。**STRAIGHT** の分析手法はこの推定を可能にするもので、今回のこの手法を適用して声道伝達関数を推定した。ただし、**STRAIGHT** の分析手法は正確には声道伝達関数そのものではなく、喉頭音源波のもつスペクトル傾斜や放射特性によるスペクトル形成も反映している。

### 基本周波数とフォルマント周波数

以下のグラフの横軸は歌手が発した声の基本周波数 ( $F_0$ )、縦軸は  $0 \sim 1000\text{Hz}$  までの間で最大のピークを迎えるフォルマント周波数を表している。グラフ中の破線は第 1 ハーモニクス、一点鎖線は第 2 ハーモニクス、点線は第 3 ハーモニクスである。

### 3.4 結果

ここでの観察における着目点は、基本周波数とフォルマント周波数との関係にある。ある歌手のスペクトル包絡を見してみる。別の歌手と比較するとその概形に差があることが分かる (図 3.2)。これは同じ母音「ア」を発音していても、前述のソース・フィルタ理論によりスペクトル包絡に違いが生じているわけだが、この違いにより声質の差が規定される。次に同じ歌手の同じ母音であっても、音階が上昇するにつれてスペクトル包絡の概形が変化している様子が見て取れる (図 3.3)。これは、歌手が基本周波数を上昇させることに伴い喉頭音源スペクトルが変化していることと、声道の形を変化させている結果、声道伝達関数を変化しているためである。ここで着目したのは、音声知覚において重要なファクターである第 1 フォルマントのピークと基本周波数の高調波次数の関係である。経験豊富なオペラ歌手や学生の中でも技術的に卓越している者は、基本周波数の変化に対してフォルマント周波数の変動幅が狭く、なるべくフォルマントピーク域を保つように歌唱していることが予想される。その際、音声信号中で最大のフォルマントピークを持つ高調波次数は、基本周波数の変化に伴ってどのような転移をするのか。この点を観察の主眼とした。



**図 3.2** 2 人の歌手のア母音のスペクトル包絡。  
 上下でスペクトル包絡の違いが見て取れる。いずれも第 1 フォルマントが 600~700Hz, 第 2 フォルマントが 1000~1200Hz 付近でア母音を発していることが分かる。

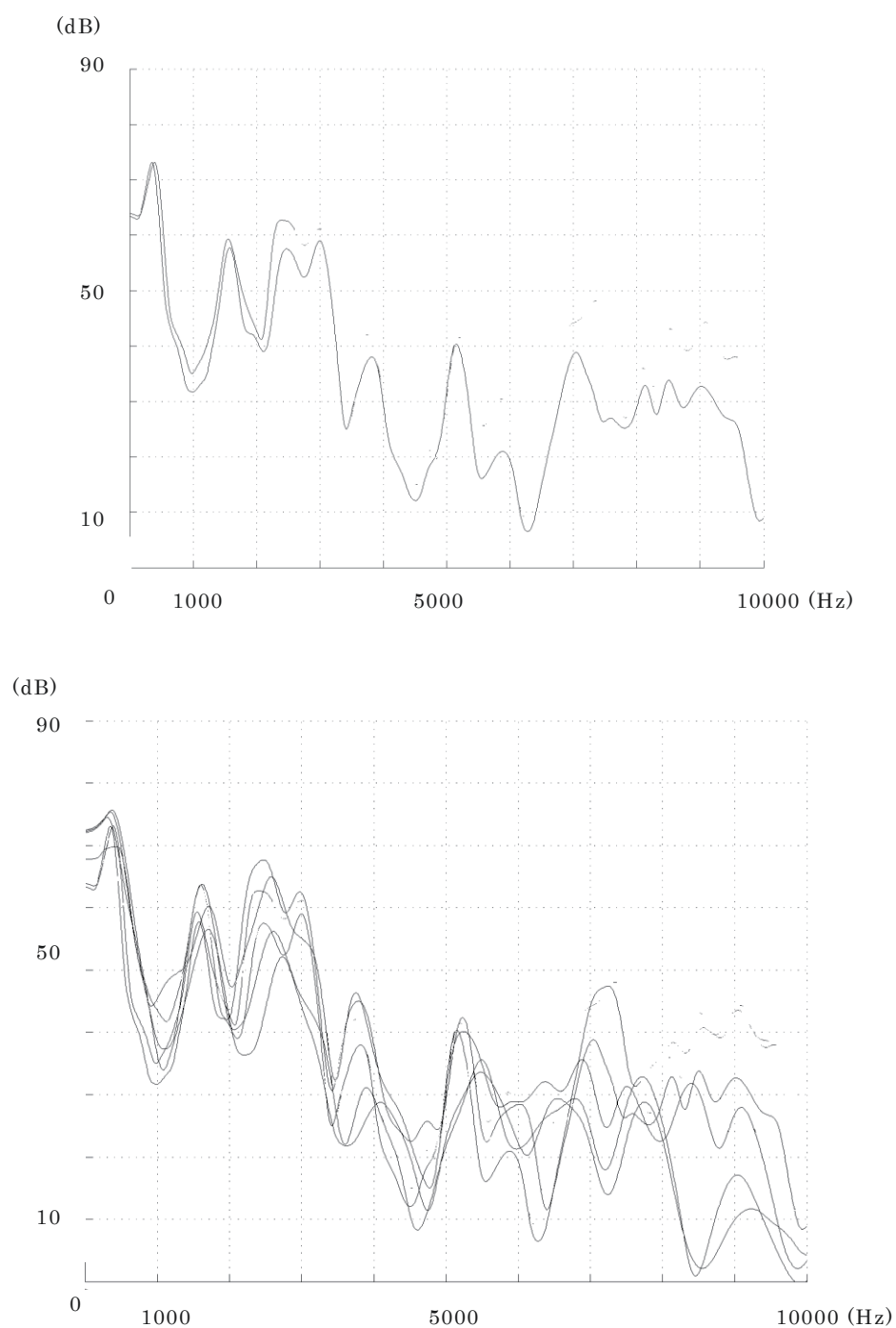


図 3.3 同一歌手の複数音のスペクトル包絡。

上) 同じ歌手でも基本周波数の異なる音を発した場合、スペクトル包絡が変化する。下) 幾つかの基本周波数の異なる音のスペクトル包絡を重ねてみたもの。概形の違いが見て取れる。

## 分析結果

図 3.4 は、低音域（図中+）、中音域（\*）、高音域（○）の 3 種類の音階における基本周波数と第 1 フォルマントのピーク値の関係を表している。直線は高調波の次数を補助的に示した。基本周波数が 250Hz の点（矢印の 2 音）では低音域の音階音（+）と、中音域の音階音（\*）が同一音高にもかかわらず、高調波の次数が異なっている様子がうかがえる。+（250Hz）は第 1 スケールの最後の音で、そのスケールは終了するが、\*（250Hz）は第 2 スケールの中盤の音であり、まだ半分音階が残っていることになる。また、全ての音のフォルマントピーク域は 400Hz～800Hz の範囲内に収まっている。

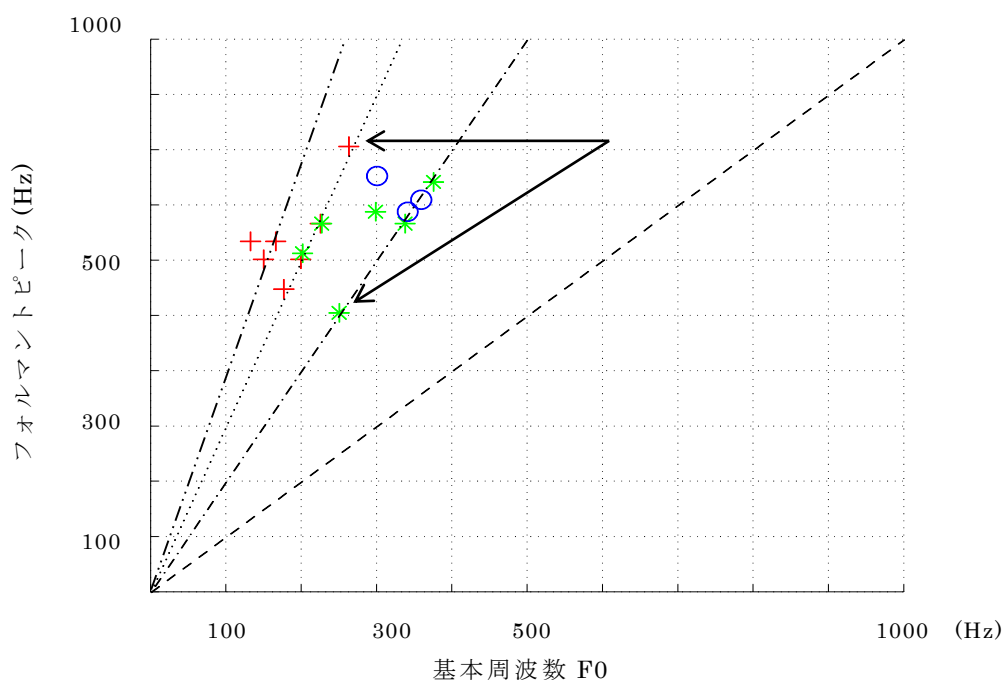


図 3.4 基本周波数とフォルマントピークの関係 1

矢印の 2 音は歌唱順の異なる同じピッチの音。  
ハーモニクスが変化している様子がわかる。  
図は学生テノール歌手のもの。

図 3.5 においては，ピーク域は 500 - 700Hz で，図 3.4 よりも更に狭い範囲に抑えられている様子が分かる。

図 3.6 においても，基本周波数が 250Hz 付近で図 3.5 と同様の現象がみられる。また，基本周波数 100 - 200Hz においては，ピーク域の周波数が 600Hz とほぼ一定していて，音高の変化があるにもかかわらず，ピーク域に変化がないことが分かる。○ のように高い音域においてもピーク域の変化幅は 100Hz 程度に抑えられている。

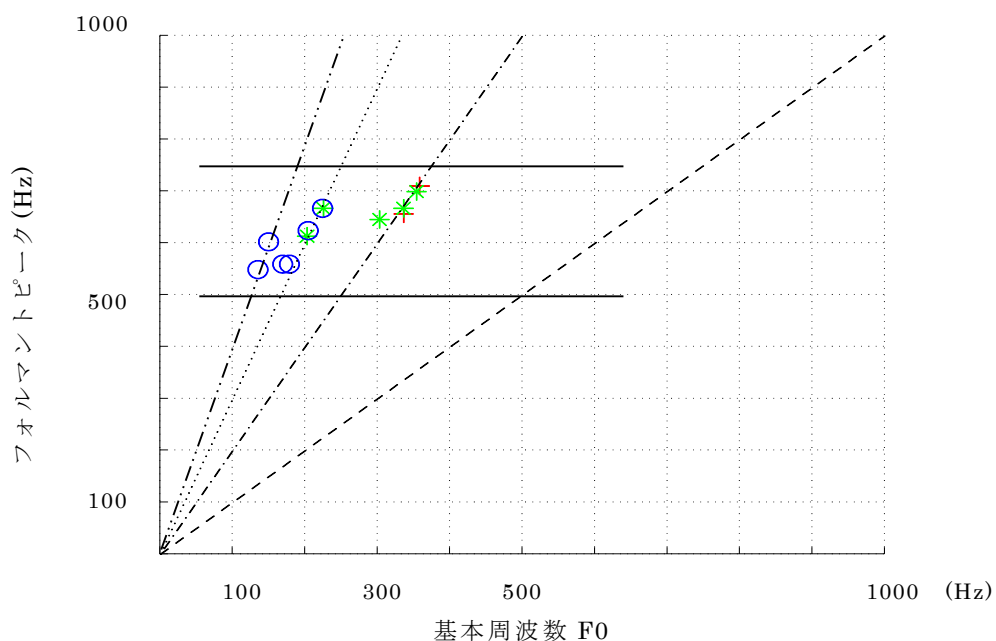


図 3.5 基本周波数とフォルマントピークの関係 2

図はプロテノール歌手のもの。

狭い周波数帯にピークがあつまっている様子が見て取れる。

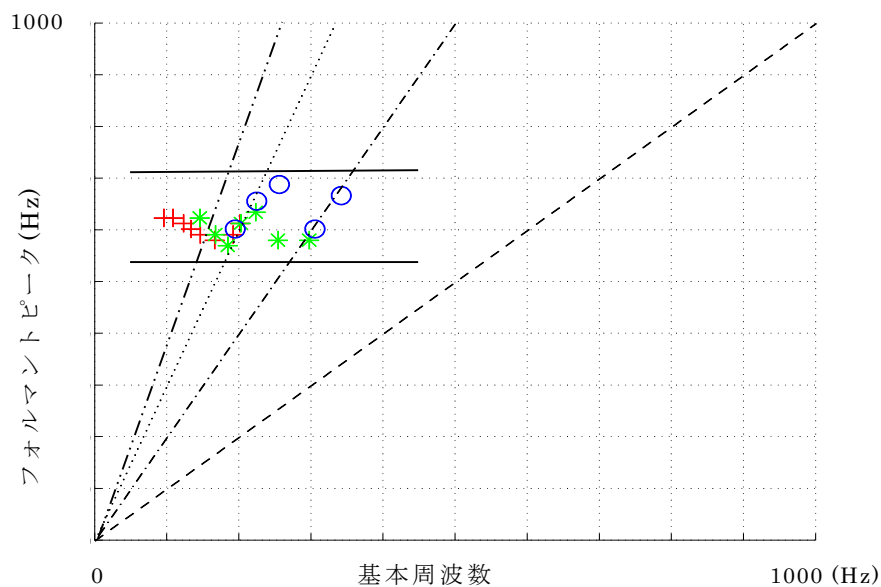


図 3.6 基本周波数とフォルマントピークの関係 3

図はプロバリトン歌手のもの。

極めて狭い範囲にピーク域を持ち、ピーク値が変動していない  
様子がはっきりと見て取れる。

図 3.7 は下降音階であるが、すべてのスケールの変化幅が 650Hz 付近で極めて狭いフォルマントピーク域で一定している様子が伺える。

一方、図 3.8, 図 3.9 においては、音階の上昇・下降とともにピーク域も大幅に変化していて、また、○のように高音域になってもハーモニクスが切り替わっていない様子が見える。

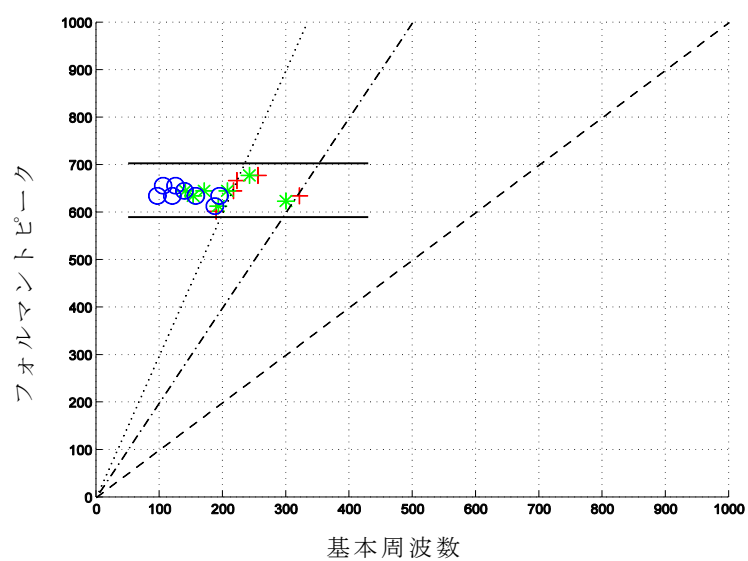


図 3.7 基本周波数とフォルマントピークの関係 4

図はプロバリトン歌手のもの。

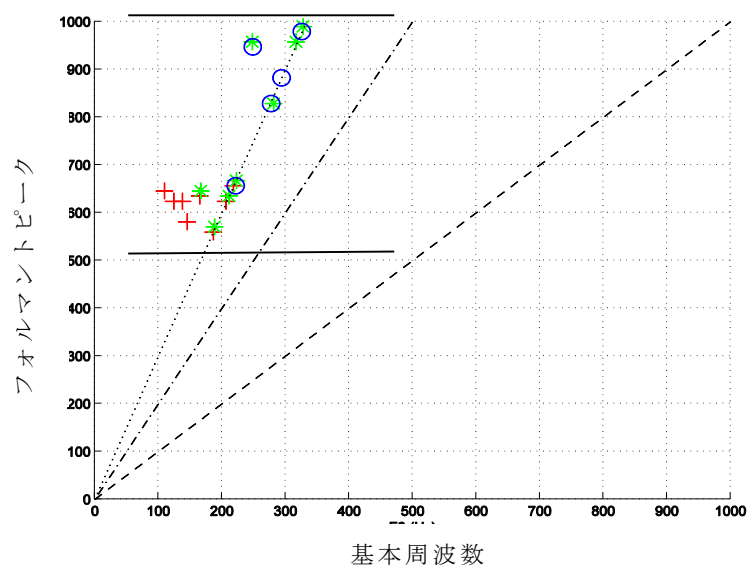


図 3.8 基本周波数とフォルマントピークの関係 5

図は学生テノール歌手のもの。

ピーク域が広がっている様子が分かる。

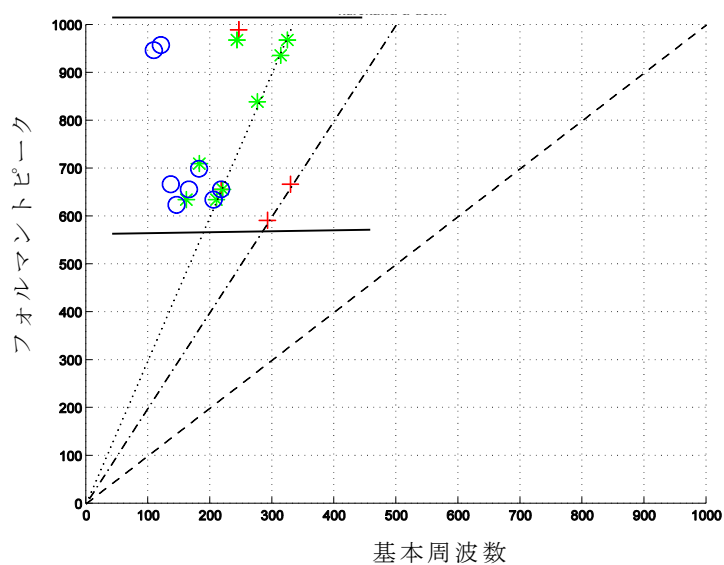


図 3.9 基本周波数とフォルマントピークの関係 6

図は学生テノール歌手のもの。

図 3.10 では, 上昇音階の最後の 2 音でやや突出したものが見受けられるものの,

ピーク域が 550Hz - 700Hz までの間で抑えられている。

図 3.11 でも同様にピーク域が 550Hz - 700Hz に抑えられている。

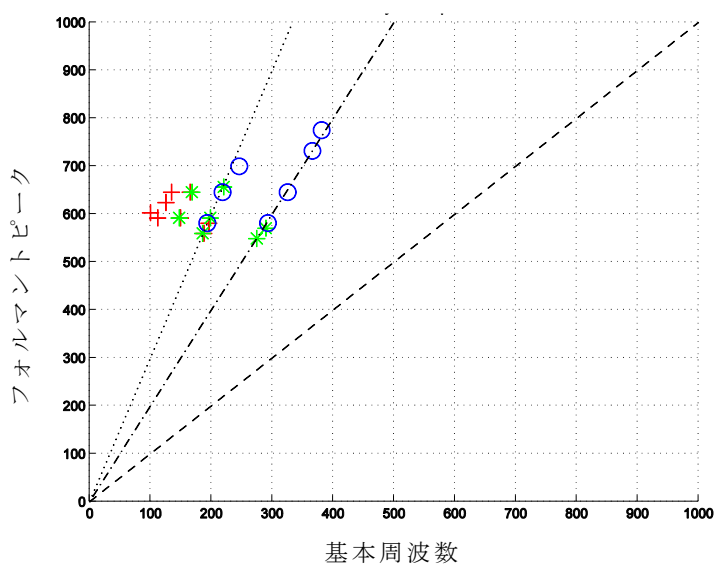


図 3.10 基本周波数とフォルマントピークの関係 7

図は学生バリトン歌手のもの。

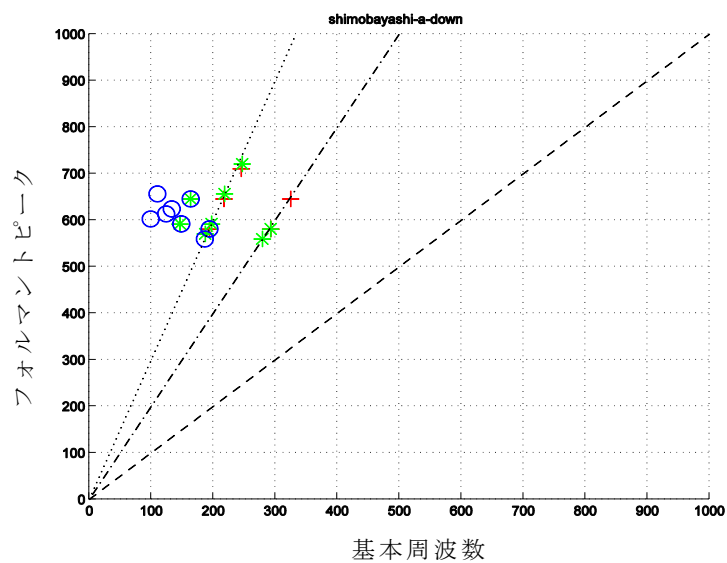


図 3.11 基本周波数とフォルマントピークの関係 8  
図は学生バリトン歌手のもの。

### 3.5 考察

STRAIGHT の分析手法を採る以上、フォルマントピーク値は原則的に高調波の位置に出てくる。つまり、それぞれの図の直線のいずれかの上に各点が載ってくるのは分析の手法上不思議ではない。ところが図 3.4 の様に、 $F_0$  が変化すると、 $F_0$  の高い内は第 2 次高調波のところに来ていたピークが、 $F_0$  が下がるにつれて第 3 次高調波の上に移動する、ということが図から見て取れる。そしてそれは、フォルマント周波数としてはおよそ 500 - 700 Hz の領域に相当する。このことが示唆するのは、共振点がおおよそこの周波数帯にあって、歌い手はこの声道の形状（喉頭の構え）をあまり変えることなく、基本周波数を変えているということである。つまり、 $F_0$  を下げたときに第 2 次高調波よりも第 3 次高調波が強くなるように意識して歌っているのではなく、むしろ声道の形状をなるべく保つように発声しているため、結果的に第 2 次から第 3 次への転換が生じている、という方が真実に近いと思われる。

図 4~7, 10, 11 も同様に、それぞれの歌手の共振点がある周波数帯にあって、歌手はなるべく声道の形を変えずに基本周波数を変えているのである。そしてその結果、フォルマントのピークを上昇音階の場合は第 3 次高調波から第 2 次へと、下降音階の場合は第 2 次高調波から第 3 次高調波へと転換している。ところが図 8, 9 においては、共振点の周波数帯が幅広く一定しない様子がうかがえる。恐らく基本周波数の変化に対して声道の形が大きく変化し、共振点の周波数帯が捉えきれいていないのである。オペラ歌手としての筆者の主観的な印象ではあるが、図 8, 9 の音声資料を聴取した場合、低い音域と高い音域で響きにムラがあり、一様の響きには聞き取りにくかった。一方、図 4~7, 10, 11 では響きとして、まとまりがあり、技術的に高度な発声である印象を受けた。

### 3.6 まとめ

この実験では、基本周波数とフォルマントピークの関係を見てきた。一般的に基本周波数が変化すれば、人は無意識の内に声道形状が変化してしまいその結果、フォルマントピークが大きく変化することが予想される。しかしながら、優れた歌手はそれに反して、声道の形状をフォルマントピークの周波数帯を安定化させるように制御しながら、基本周波数を変えている実態が明らかになった。この結果は重大である。なぜなら、この結果が示唆する事は、優れた歌手は基本周波数の高度な制御を行いながら同時に、フォルマントのピーク域の制御を行っているということ、更に、ピーク域を変化させないことを重要なファクターとして喉頭形状の制御を行っていることを意味するからである。基本周波数が変化した際にフォルマントピークの周波数域が安定するという事は、音高が変化したとしても聴衆には大きな音質の変化が感じられることはなく、安定感のある響きを持つ歌唱と認識されることになる。これは「卓越した歌手はどの音・どの言葉でも安定的な響きをもって歌いつづけている」という当たり前の感覚にも整合してくる。この優れた歌手の求める安定感のある響きというものの一端を音響的データとして示すことが出来たことは、一つ大きな意味合いをもつのである。



## 第 4 章

### 声区転換部のスペクトル変動に見る音響的指標

高調波次数に着目したフォルマントピークの観察結果から、優れた歌手は声道の形状をフォルマントピークの周波数帯を安定化させるように制御しながら、基本周波数を変えている実態が明らかになった。しかしながら、上記の実験で「優れた歌手」と認定した理由は、それらの方が現在一般のプロの演奏活動をしているという事実、もしくは教鞭を取られ指導活動を行っているという事実、更には声楽家である筆者の主観が拠り所となっていて、客観的なデータとしては説得力に欠ける。そこで本章では、スペクトル変動と知覚評価と相関性について更に詳細な考察を行う。具体的には、歌唱録音及びそのサンプルから幾つかのスペクトル変動率を求め、一方で別の被験者に対して知覚評価実験を行いその相関性を調べた。フォルマントピークの観察から、卓越した歌手は第1フォルマントの周波数帯を安定させるために、なるべく声道の形状を変化させないようにしていることが見て取れた。とするならば、卓越した歌手は声道形状の高い安定性を確保しながら歌唱していることが予測され、その結果、喉頭音源と声道伝達関数により規定されるスペクトルの概形にも変化が少ないのではないかと推測できる。それに伴い、歌唱音域が変化した場合にスペクトルの外形に変化が少ない歌手ほど、安定した歌唱を行えると言えるのではないか。先の観察では筆者一人の印象であったが、多数の人が聞いたとしても滑らかさや安定性が同様に感じられるのか、このことを確かめるべく知覚評価実験結果も併せて行うことで、パッサッジョを含む音域のスペクトル変動と評価の客観的指標を得ることが本章の目的である。

#### 4.1.1 歌唱録音

##### 参加者（歌唱音源サンプル提供者）

京都市立芸術大学大学院声楽教員及び声楽科大学院生、並びにメゾ・ソプラノの

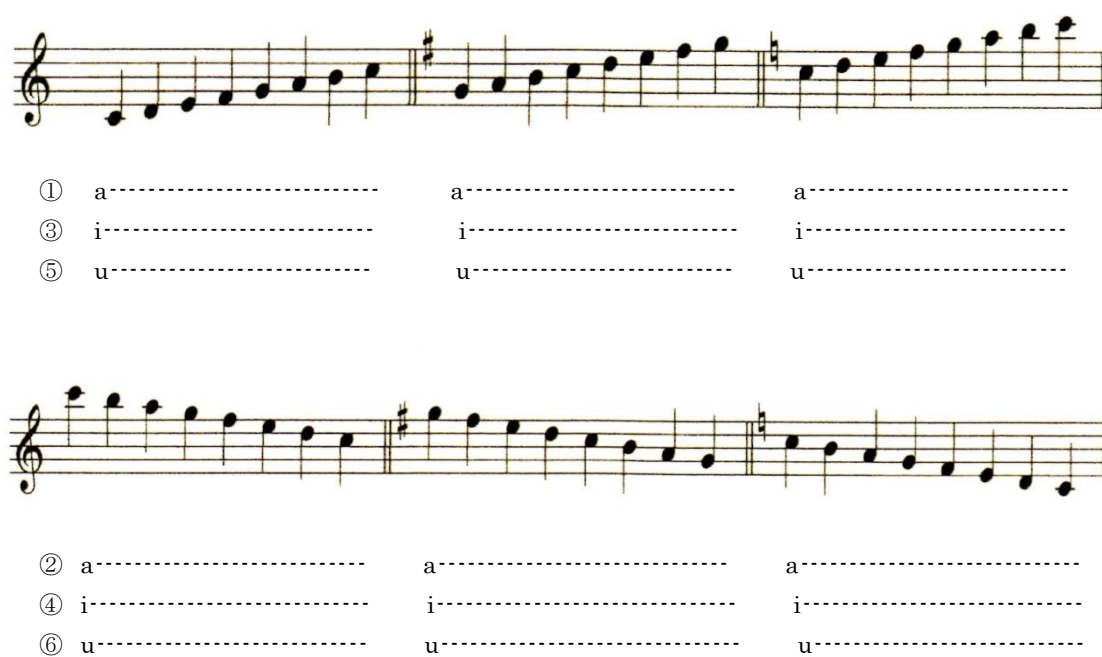
学部4年生2名を含む20名。その内訳は、ソプラノ9名、メゾ・ソプラノ3名、テノール5名、バス3名であった。学部生2名を含めた理由は、女声のサンプルに可能な限り多様性を持たせたかったことがあげられる。因みに、メゾ・ソプラノ2名のうち1名は学生コンクールで入賞相当の実力があり、もう1名は録音の次年度に同大学院に入学することのできる程度の実力がある。このことから、両名とも本研究の録音サンプルとしての適性があると判断した。

### 録音内容

各歌唱提供者に「ア」「イ」「ウ」の各母音で、任意の主音から始まる長調、その主音の5度上の音から始まる長調、最初の主音の1オクターブ上の音を主音とする長調の2オクターブ内の3つの長調を音階で歌唱することを課した。調性は歌唱する3つのオクターブを総合的に鑑みて、各自の歌いやすい調性を自己申告で選択してもらった。これを上昇音階と下降音階の2通りで行い、全てアカペラ歌唱で行ってもらった(図4.1)。それぞれの音階ごとに数秒の間隔をあげ、各音階の最初の音はピアノで提示した。調律はA4音が440Hzで調整されたものであった。

### 録音方法

録音は京都市立芸術大学内の静寂な部屋で実施した。コンデンサーマイク(SCHOEPS, CMC-- No.24576)をマイクアンプ(Shure, FP-23)に接続し、A/Dコンバーター(EDIROL FIREWIRE Audio Capture FA -101)を経由しPC(MacBook Pro)に接続した。サンプリング周波数44.1 kHz, 量子化ビット数16 bit, 圧縮なしでデジタル収録した。



① a----- a----- a-----

③ i----- i----- i-----

⑤ u----- u----- u-----

② a----- a----- a-----

④ i----- i----- i-----

⑥ u----- u----- u-----

図 4.1 歌唱音階例

歌唱録音の際は①から⑥の順で歌唱した。

#### 4.1.2 2種類の評価尺度

##### 分析の背景

声区転換部分を歌唱する際において聴取者に不連続感を与えない為には、声の質のばらつきが小さいことが求められる。声質が揃っているということを観察するために、異なる高さの音を歌唱している場合に、平滑化スペクトルのばらつきが少ないことで観察できる可能性を見出した。そこで本実験では、その声の質を捉える指標として、まず平滑化スペクトルを求めた。平滑化スペクトルは第3章の実験同様、音声分析変換合成システム「STRAIGHT(Tandem STRAIGHT V009ad)」を用いて算出した。

声区転換とは声の基本周波数(知覚上のピッチ)が変わる場合に生じる現象であり、その時になんらかの発声法の違いが生じれば音色の変化につながる可能性が考えられる。表層的な音響信号としては、既に基本周波数の変化があるわけであるが、これは起こるべくして起きている変化であり、その際にそれとは異なる側面の変化が許容範囲内にとどまるか、否かが声区転換の巧みさとして捉えられていると考えられる。

今回サンプルを取った歌唱者は一定以上の訓練を積んだ歌唱者であり、声区転換点を他者が歌唱音声を聞いただけで明確に判断できるほどの技量レベルよりは上の技量を獲得している者たちばかりであった。また、各歌唱者も「ここで自分は声区転換をしている」というような明確な意識もしていない者が多かった。

以上のことから、例えば声区転換点の前後でスペクトルを比較するというような直截な検討をすることは困難であった。それにも関わらず、この上級者の中でも歌唱技術に精通した者の聴覚上では歌唱の質の優劣がつけられ、それはこのような刺激条件であれば非常に高い確率で声区転換技量の優劣に基づくものと考えら

れる。

以上のような評価の根拠となる特徴量は、ひとつの歌唱(今回の場合、評価の対象の単位とした 1 オクターブの音階歌唱)全体を通した特徴量であると仮定し、以下に説明する「全体スペクトル変動」と「隣接スペクトル変動」の 2 種類の特徴量を算出した。

#### 4.1.3 2 種類の特徴量の計算方法・計算結果

各歌唱者から得られた録音データに対して、一つの単位(各母音、音階順、昇降)である 8 音からなる 1 オクターブの歌唱ごとに特徴量を算出した。その前段階としてまず、STRAIGHT 分析法による平滑化スペクトルを求めた。

次に各音の安定部について分析を行うための切り出し作業を実施した。この各音の歌い出しから安定部までは、スペクトログラム、F0 の軌跡などを目視しつつ、切り出した部分を試聴しつつ決定した。この切り出し作業については数値的な基準は与えず、まず F0 の軌跡が直前の音からの遷移部が終了したとみなせ、またその点以降にスペクトル構造に乱れがないことを F0 軌跡と STRAIGHT スペクトログラムから目視によって定め、念の為にその区間を試聴して確認しつつ実施した。作業者は著者ともう 1 名の京都市立芸術大学大学院生であり、切り出し作業を実施した分析初期の段階では分析対象とする特徴量について規定されていない状態であった為、作業時に恣意的な操作が加わった可能性はない。1 オクターブを構成する各音について安定部の各分析フレームのパワースペクトルを求め、それを対数軸上で平均した平均パワースペクトル  $H_i(f)$  を求め、それを基盤に 2 種類のスペクトル変動特徴量を算出した。ここで添字  $i$  は 8 音のいずれかに対応する。

全体スペクトル変動 GSV は(1)式で与えられる。

$$\text{GSV} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R(H_i(n), \bar{H}(n)) \quad (1)$$

ここで $\bar{H}(n)$ はそれぞれの音階歌唱の8音間の平均スペクトルであり、(2)式で与えられる。

$$\bar{H}(n) = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 H_i(n) \quad (2)$$

ここで  $n$  は真数値上で離散化した周波数ポイントに対応する。

また、 $R$  は 2 つのスペクトルパターン間で二乗平均平方根誤差(RMS 誤差<sup>22)</sup>を求める関数であり、その内容は(3)式となる。

$$R(H_i(n), H_j(n)) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (H_i(n) - H_j(n))^2} \quad (3)$$

ここで  $N$  は STRAIGHT 分析内でのフーリエ分析のポイント数の 2 分の 1 であり、実際には 1024 であった。つまり、全体スペクトル変動はその歌唱単位の代表的なスペクトルパターンからの各音のスペクトルパターンの偏差平均に対応する。

これに対して、隣接スペクトル変動 CSD は(4)式で与えられる。

$$\text{CSD} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 R(H_i(n), H_{i+1}(n)) \quad (4)$$

GSVが全体を通した代表的なスペクトルを基準とするのに対して、CDSは隣接する2音間での二乗平均平方誤差を求めて、それを全体にわたって平均するという特徴量となる（CDS, GSVの計算結果は表4, 5に示す）。

#### 4.1.4 第1音の安定区間までにかかる時間と、その他の音の安定区間までにかかる時間の割合「音階開始音相対持続時間（A/B比）」

歌唱の開始点、つまり今回の実験の場合は各音階の最初はいったん静止状態から歌い始め、前の音階の歌唱を止めてから再度開始することになる。数例の特徴的な歌唱を観察すると、この各音階の第1音が安定するまでに要する時間の違いがあり、それが歌唱の評価に影響している可能性が考えられた。そこでは第1音の安定区間に至るまでの時間（A）とその他の7つの音の安定区間に至るまでの時間の平均（B）を測定し、その間の比、A/Bを算出して説明変数とした。この各音の歌い出しから安定部までは、スペクトログラム、F0の軌跡などを目視しつつ、切り出した部分を試聴しつつ決定した（図4.2, 計算結果は表6）。

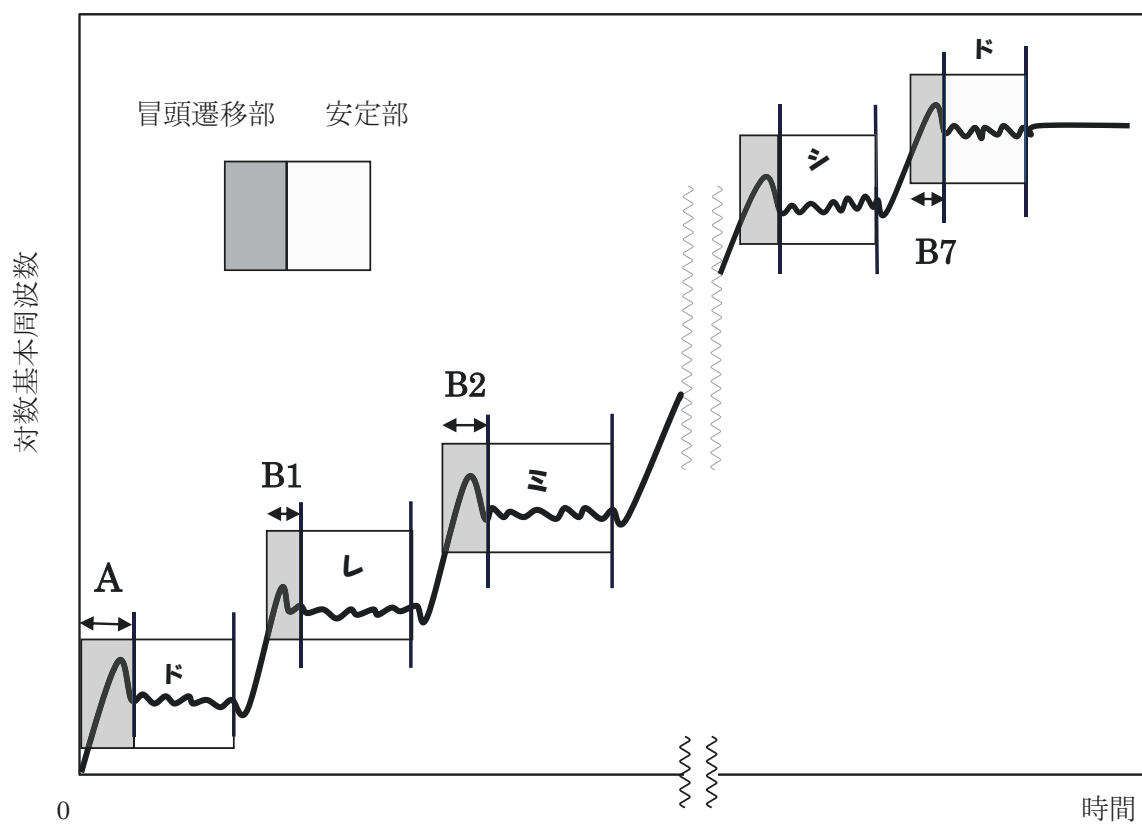


図 4.2 各音階、各歌唱音の冒頭部

図はハ長調の音階歌唱。歌いだしから第 1 音の安定部までにかかった時間を A (冒頭遷移部) とする。第 2 音の開始点から安定部までの時間を B1 (冒頭遷移部), 第 3 音の開始音から安定部までの時間を B2 とし、同様に B7 までを計算し, B1 から B7 までの平均時間を B とする。これらの値から A/B 比を算出する。

### 4.2.1 知覚評価実験

#### 実験方法

音刺激は歌唱録音実験で採取された録音サンプルを各母音、各音階、上昇下降それぞれに分けて、1 オクターブ（8 音）を一つの単位としてランダムに提示した。

実験参加者はコンピューターのディスプレイ（Apple iMac）に表示された点数ボタンをクリックすることで回答を行った。刺激提示数は 360 通り（歌唱者 20 名、母音 3 種類、上向下向 2 種類、3 つのオクターブ音階）であった。知覚評価実験参加者には各刺激に対して、1 オクターブの音階を「自然で滑らか」に歌唱できているものを 5 点として 1 点から 5 点までの 5 段階評価で判断してもらった。特に、提示される声そのものの「好き」「嫌い」は評価の対象としないことを指示した。

1 サンプル提示時間は平均約 10 秒で、実験所要時間は約 90 分であった。実験は防音室（Yamaha AVITECS）の中で行われ、刺激計算機（Apple iMac G5）制御される DPS ボックス（Symbolic Sounds, Capybara 320）により、その出力をヘッドホンアンプ（LuxmanP-1）に繋がれたヘッドホン（Sennheiser HD600）を介して両耳に呈示された。

#### 参加者

京都市立芸術大学声楽専攻 3 回生と 4 回生及び大学院生 15 名（女：12 名，男：3 名）である。参加者全員、過去の聴力検査によって聴力の問題がないと報告している。実験参加者には報酬が支払われた。

#### 4.2.2 結果

##### 知覚評価実験分析方法・結果

得られた回答を、歌唱者・母音・昇降のそれぞれに分け、15人分の平均値を求めた。以下「平均評価値」とする。結果としてこの平均評価値は120点存在することになる（表7）。

#### 4.3 相関結果

120の平均評価値を目的変数として、下記に示すような物理変数を説明変数とする線形回帰モデルによる分散分析<sup>23</sup>を実施することとした。平均評価値を従属変数に、全体スペクトル変動・隣接スペクトル変動・音階開始音相対持続時間を直交要因として一般線形回帰分析<sup>24</sup>を行った（表2, 3）。

## 分散分析

要因	自由度	平方和	平均平方	F値
モデル	7	16.06	2.29	15.54
誤差	112	16.53	0.14	p値( Prob > F )
全体	119	32.59		< . 0.001

表2 一般線形回帰分析

	平方和	F 値	p 値
隣接	6.11	<b>41.37</b>	0.001
全体	0.2	1.36	0.245
隣接・全体	4.83	3.27	0.073
A/B	2.09	<b>14.21</b>	0.0003
隣接・A/B	0.23	1.58	0.211
全体・A/B	0.58	<b>3.97</b>	0.048
隣接・全体・A/B	0.24	1.65	0.2

表3 線形回帰分析結果表

平均評価値を従属変数にした場合の相関。

隣接スペクトル変動, A/B, 全体スペクトル変動・A/B の値が大きく, 相関があることを示している。

その結果、隣接スペクトル変動の要因と音階開始音相対持続時間の要因が有意となった。[それぞれ、 $F(1, 112) = 41.37, p < .0001$ ;  $F(1, 112) = 14.21, p < .01$ ]。

また、全体スペクトル変動と音階開始音相対持続時間の要因間に有意な交互作用が観察された[ $F(1, 112) = 3.97, p < 0.05$ ] (表 3)。

隣接スペクトル変動は全体スペクトル変動、A/B とは独立に平均評価値に有意な関係性が観測された。

隣接スペクトル変動値、すなわち隣り合う 2 音のスペクトル変動が少ないものほど平均評価値の値が高い結果となった。(図 4.2)

A/B も平均評価値と有意な関係性が観測された。A/B の値が小さなもの、すなわち第 1 音と他の音階途中の音の時間長との割合が小さいものほど高評価が得られる結果となっている (図 4.3)。

全体スペクトル変動は、それ単独では平均評価値に有意な関係性は見られなかった。つまり、音階全体のスペクトル変動具合は直接的に評価には関係しないことを示している。

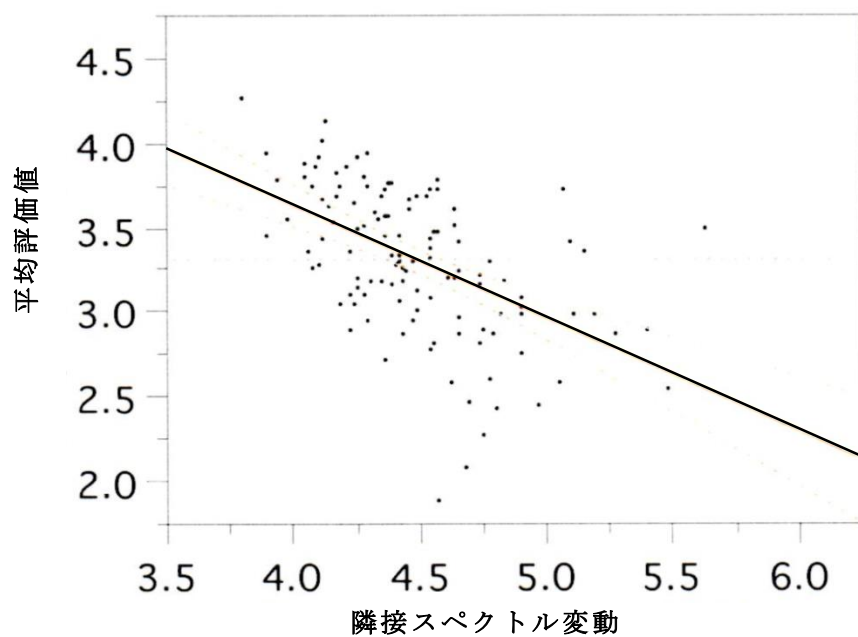


図 4.3 隣接スペクトル変動と平均評価値の相関図  
直線は回帰直線。

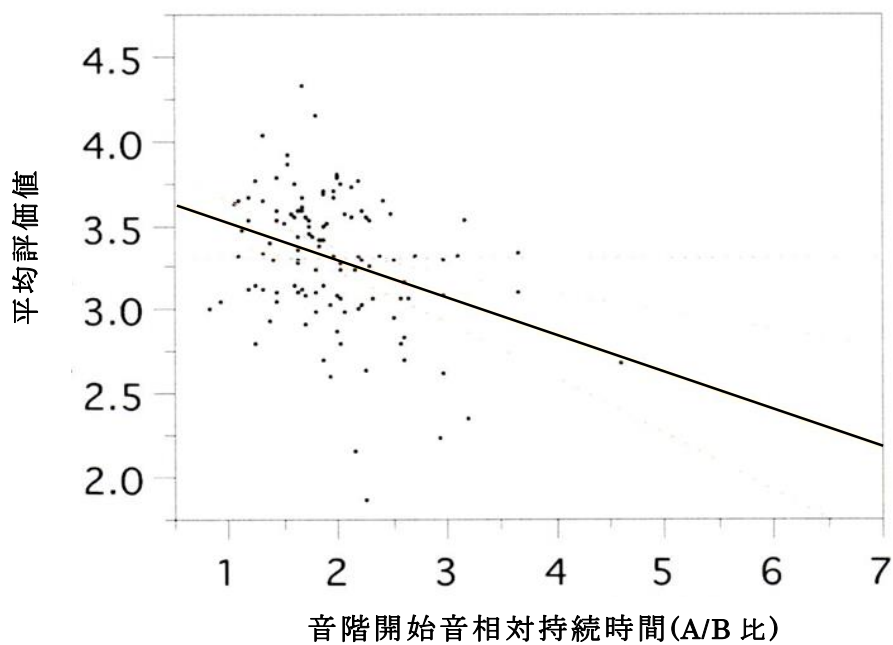


図 4.4 音階開始音相対持続時間と平均評価値との相関図  
直線は回帰直線。

全体スペクトル変動と音階開始音相対持続時間(A/B 比)の 2 つの組み合わせを説明変数とした場合を詳しく観察してみる。

A/B 比の値により, 4 つのグループに分けて分析を施した。A/B 比の分布から 25%, 50%, 75% の分位点を求め, その値を境界として 4 群に分けた。以下は, その値の小さいものから W, X, Y, Z 群とする。

各群において分散分析を施した結果, W と X の要因が有意となり, Y と Z の要因は有意とならなかった。[それぞれ, W:  $F(1, 28) = 20.64, p < .0001$ ; X:  $F(1, 28) = 6.72, p < .0001$ ; Y:  $F(1, 28) = 0.043, p = 0.83$ ; Z:  $F(1, 28) = 0.039, p = 0.84$ ]。

A/B の値が小さな値になるほど全体スペクトル変動と平均評価値には有意な関係が見られ, A/B の値の大きなものほど全体スペクトル変動と平均評価値との有意な関係が見られなくなっている (図 4.6)。つまり, A/B 比の値が小さなものは, 音階全体のスペクトル変動のまとまり具合が評価に反映された結果となる一方で, A/B 比の値が大きな値のものは, スペクトル変動のまとまり具合が評価に関係しない結果となった。

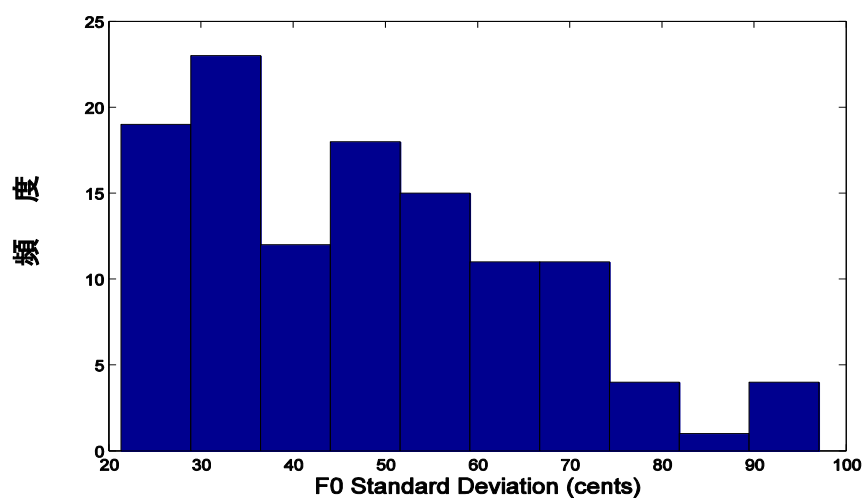


図 4.5 歌唱された各音の F0 の安定度を、各音の平均からの逸脱をセント値として求めたヒストグラム。セント値の小さいものほど、歌いだしの安定度が高いことを示している。

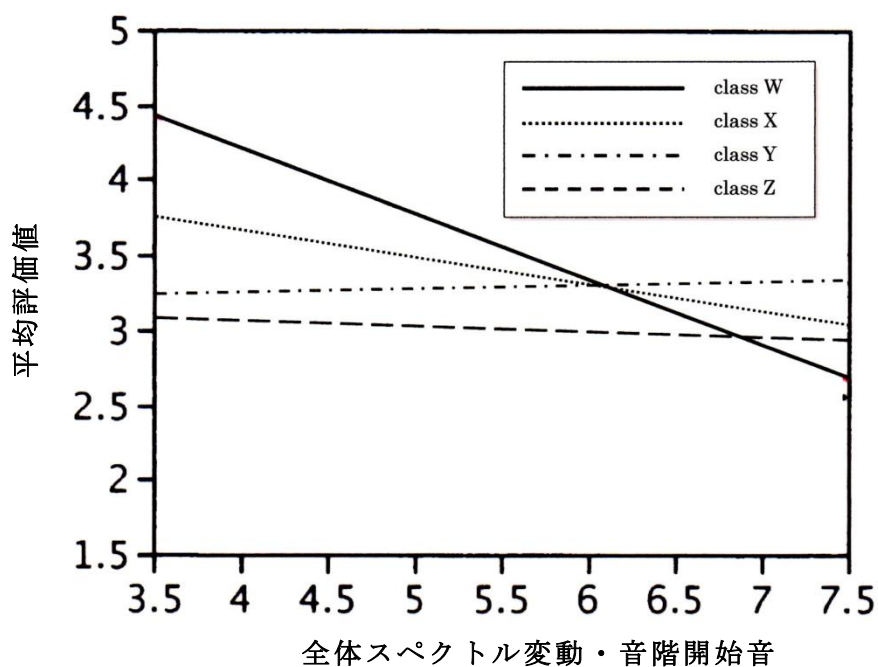


図 4.6 全体スペクトル変動及び音階開始音相対持続時間と平均評価値の相関図  
直線がクラスW，点線がクラスX，一点鎖線がクラスY，破線がクラスZ。

#### 4.4 考察

隣接スペクトル変動値が平均評価値と有意な関係性が見られたことは、すなわち歌唱に対する評価が「隣り合う2音のスペクトル変動の小ささ」によってなされていることを意味する。つまり、音が移行する際、スペクトル変動の少ないものが聴取者には「良い」と感じられるということが本研究で明らかとなった。また、隣接スペクトル変動は全体スペクトル変動や音階開始音相対持続時間とは独立に評価されることが判明した。隣接スペクトル変動は隣接する2音間の差に注目すれば求まるものであり、知覚的にも時間軸上の局所的な手掛かりとなる。これに対して、全体スペクトル変動は歌唱全体を通じて求まる平均スペクトルを基準としたスペクトル変動であり、全体的な処理が必要となる。音階開始音相対持続時間も各音階の第1音が安定するまでの長さそのものではなく、それ以外の音が安定するまでの長さに対しての比を求めるという意味で、全体的な知覚処理を必要とする。その意味で、局所的な処理を要する特徴量と全体的な知覚処理を要する特徴量の間が独立であることは理に適うと同時に興味深い観察結果と考えられる。一方、全体的なまとまり感を数値化した全体スペクトル変動はそれ自体では平均評価値と有意な相関が見られなかった。これは、スペクトルが広い範囲(本研究では1オクターブ)に亘ってまとまっているかどうかについては、それ自体では聴取者の評価には関係しないということである。ところが、音階開始音相対持続時間で小さな値を取るもの、つまり、歌いだしの第1音が他の音に比べて比較的時間のかからないものについては、全体スペクトル変動と平均評価値に相関が出ることが分かった。これは、全体的なスペクトルのまとまり感が聴取者の評価には関係していることを意味する。一方、音階開始音相対持続時間の値の大きなもの、すなわち第1音とその他の音との時間長の割合が大きいものは全体スペクト

ル変動と平均評価値に相関が出なかった。第1音の持続時間が他に比べて長いと言うことも、全体の平均に対するスペクトルの標準偏差<sup>25</sup>にしても、ともに全体に対する個々の発声の特徴を考慮したもので、判断の段階として似通ったところでなされるために、独立した判断結果を与えるのが困難になってしまうと考えられる。

#### 4.5 まとめ

本章では、パッサッジョを含む音域を歌唱した場合のスペクトル変動を知覚評価実験の結果と照らし合わせることで、幾つかのスペクトル変動の評価値を算出した。複数音のスペクトル変動を評価値と照らし合わせることで、スペクトル変動と評価の相関の様子が明らかになり、隣り合う2つの音のスペクトル変動の少ないものが高評価を得られることや、歌いだしの時間長が短いものが高評価を得られることが明らかになった。また、歌いだしの短いものについては一つの全体的なまとまり具合（本研究では1オクターブ）が評価の対象として捉えられることも分かった。1オクターブという一つのまとまりの中で、スペクトル変動と知覚評価の関連性が本章で明らかになったことになる。



母音昇降 歌唱者	a-down	a-up	i-down	i-up	u-down	u-up
A	4.55	4.62	4.63	4.79	4.38	4.43
B	4.68	4.26	4.49	4.32	4.49	4.47
C	4.18	4.46	3.92	3.78	4.36	4.12
D	4.5	4.6	4.71	5.08	4.48	4.63
E	4.8	4.57	5.31	4.97	5.12	5.08
F	3.96	3.82	4.47	4.44	4.31	4.16
G	4.1	4.06	4.01	4.05	4.21	4.07
H	4.91	4.33	4.38	4.35	5	4.62
I	4.55	4.36	4.55	4.14	5.27	4.54
J	3.98	3.63	4.3	3.98	4.41	4.02
K	5.05	5.31	4.87	5.11	5.46	5.41
L	4.59	4.34	4.81	4.44	4.65	4.46
N	4.03	3.61	4.04	3.97	4.51	4
N	4.61	4.18	4.92	4.6	4.99	4.66
O	4.29	4.24	4.15	3.98	4.84	4.22
P	4.67	4.53	5.24	4.81	5.09	5.81
Q	3.8	3.83	4.02	3.96	4.44	4.21
R	3.65	3.64	3.96	3.51	3.99	3.58
S	4.67	4.1	4.2	4.22	5.1	4.53
T	5.09	4.68	5.13	5.44	6.03	5.66

表4 隣接スペクトル変動（CDS）計算結果一覧表

母音昇降 歌唱者	a-down	a-up	i-down	i-up	u-down	u-up
A	6.4	6.73	6.39	6.48	6.69	6.69
B	5.88	5.68	6.04	5.87	6.23	6.32
C	5.64	6.8	5.47	5.74	6.39	6.61
D	5.17	5.53	6.13	6.33	5.67	5.76
E	5.38	5.42	5.8	5.62	6.06	6.54
F	5.84	5.45	6.23	6.02	5.87	6.07
G	5.79	5.47	5.69	5.93	6.39	5.95
H	5.87	5.74	6.32	5.9	7.26	6.53
I	6.07	5.32	5.83	4.95	7.11	6
J	4.92	4.77	5.4	5.41	5.81	5.53
K	6.61	7.05	6.3	6.62	7.2	7.47
L	5.63	5.59	6.12	6.04	5.98	5.91
M	5.32	4.57	5.66	5.25	6.52	5.39
N	6.36	5.87	6.22	5.53	7.1	6.11
O	6.58	5.75	6.3	5.17	7.48	5.23
P	5.83	5.16	6.91	5.8	6.54	6.67
Q	4.94	4.98	5.01	4.95	4.66	5.26
R	4.38	3.87	5.14	4	5.16	4.3
S	7.08	5.45	5.8	5.15	7.72	6.4
T	5.23	5.86	5.7	6.64	6.46	6.76

表5 全体スペクトル変動（GSV）計算結果表

母音昇降 歌唱者	a-down	a-up	i-down	i-up	u-down	u-up
A	3.4101	1.6965	2.429	1.567	3.7857	1.2745
B	1.376	1.0558	2.0992	1.5823	1.8092	1.662
C	2.0432	1.2618	1.5864	1.5111	2.4437	1.5931
D	1.6763	0.9319	1.6224	1.5216	2.3692	1.063
E	2.9334	2.0324	1.9427	2.3344	1.9316	1.4721
F	2.3741	2.8054	1.2859	1.9921	1.8288	1.1984
G	1.3547	1.8328	1.4691	1.2586	1.7762	1.2696
H	2.382	0.9343	1.8979	2.133	1.6002	1.4057
I	3.0351	2.1651	2.0161	1.731	3.7342	1.7986
J	1.7631	1.4064	1.2275	1.958	1.9297	1.3979
K	2.0356	1.0706	3.0298	1.6748	2.4687	1.1711
L	2.4968	1.9945	1.9272	1.6003	1.9919	1.4095
M	2.8251	1.8898	1.3229	2.2585	2.2893	1.4455
N	2.6998	2.4413	1.5695	2.2932	1.7437	1.082
O	1.5974	1.5706	1.1391	1.546	2.0741	1.558
P	4.7388	2.5304	3.422	3.0903	6.7927	3.6744
Q	1.237	1.9781	1.156	1.4548	1.2736	1.4687
R	1.3842	1.2261	0.9483	1.1657	1.251	0.9535
S	2.4821	2.0318	2.7865	2.5204	3.534	2.0648
T	2.0339	1.2456	1.9345	0.7688	1.9638	1.4653

表 6 音階開始音相対持続時間 (A/B 比) 計算結果表

## 第4章 声区転換部のスペクトル変動に見る音響的指標

母音昇降 歌唱者	a-down	a-up	i-down	i-up	u-down	u-up	AVERAGE
A	2.404761905	2.928571429	2.995238095	2.738095238	3.452380952	3.751904762	3.04515873
B	2.761904762	3.404761905	3.523809524	3.357142857	3.69047619	3.476190476	3.369047619
C	3.5	3.052380952	3.785714286	3.538095238	3.695238095	3.761904762	3.555555556
D	3.008095238	2.928571429	3.414285714	3	3.576190476	3.5	3.237857143
E	2.547619048	2.89047619	2.871428571	3.238095238	3.676190476	3.238095238	3.076984127
F	3.452380952	4.095238095	3.357142857	3.228571429	3.585714286	3.880952381	3.6
G	3.238095238	3.142857143	3.823809524	3.523809524	3.633333333	4.214285714	3.596031746
H	2.880952381	3.09047619	3.380952381	3.642857143	3.633333333	3.476190476	3.350793651
I	2.557142857	1.857142857	3.166666667	3.342857143	3.238095238	3.30952381	2.911904762
J	3.428571429	3.714285714	3.233333333	3.585714286	3.666666667	4.126571898	3.625857221
K	2.30952381	1.857142857	2.866666667	2.785714286	3.312589547	2.547619048	2.613209369
L	2.761904762	3.023809524	3.166666667	3.261904762	3.552380952	3.547619048	3.219047619
M	3.642857143	4.071428571	3.538095238	3.652380952	3.571428571	4.042857143	3.753174603
N	3.023809524	2.904761905	3.00952381	3.047619048	3.523809524	3.39047619	3.15
O	3.214285714	3.552380952	3.761904762	3.871428571	3.747619048	3.738095238	3.647619048
P	2.333333333	2.59047619	2.333333333	1.80952381	2.761904762	2.071428571	2.316666667
Q	3.642857143	4.014285714	3.976190476	3.452380952	3.652380952	4.071428571	3.801587301
R	3.523809524	4.580952381	3.80952381	3.976190476	3.857142857	4.49047619	4.03968254
S	2.704761905	3.238095238	3.50952381	3.40952381	3.295238095	3.547619048	3.284126984
T	2.566666667	2.642857143	2.880952381	3.047619048	3.39047619	3.285714286	2.969047619
AVERAGE	2.975166667	3.179047619	3.320238095	3.275476191	3.525629477	3.573447643	3.308167615

表7 平均評価値計算結果一覧表



## 第 5 章

### 総合考察

声区転換部における音響的特性とはどのようなものなのか。男女や経験の差によりその程度問題はあるとしても、声楽家の多くが多かれ少なかれ悩まされ、技術的解決に苦労を要するこの声区転換の実態の一端を解明することを第1義的目的として本研究を進めてきた。この声区転換問題については音響学的には先行研究が存在しない。その原因として考えられることは、オペラ歌唱における音響分析の分野がまだ歴史的に浅いという事の他に、音響解析技術を持っている科学者たちには歌唱専門家が何を重視しているかについてのきめ細かい情報が届いておらず、科学的研究価値を見いだせない状況が続き、その一方で歌唱専門家たちは現在の科学技術動向に対する関心が低いため、現状の技術水準の持つ潜在力を知らずに「科学と音楽は水と油」といったような偏見を根強く持っていることが挙げられるかもしれない。そのため、歌唱専門家と科学者の間の情報共有、価値観共有がなくなってしまい音響学的研究が進まない現状がある。研究が進まないもう一つの大きな原因としては、声楽教師や声楽研究家の関心が「どうすれば声区転換を声楽技術的に解決できるのか」という技術的解決に関心の重心があることも挙げられる。つまり「声区転換部の技術的解決方法」が歌手にとっても歌手を目指す者にとっても、また歌手を指導する教師にとっても当面の最も重要な問題点であり、歌手の肉体的活動やあるいは場合によっては心理的活動に焦点が当てられ声区転換が論じられているからなのである。多くの声楽教本の中の声区転換の項目は方法論こそ異なるが、全てこの視点から論じられている。

科学技術の目覚ましい進歩のおかげで様々な観測録音機器が誕生し、今後声楽教育は大きく変遷していくことが予想される。本研究の視点は、従来の技術的解決方法を見い出すそれとはある意味正反対で、全く逆の角度からアプローチしている研究と言う事になるかもしれない。つまり「どうすれば声区転換部を技術的に

解決できるのか」ではなく、「どのように聞こえれば、正しい声区転換なのか」ということを音響的に指標化している、ということになる。これは方法論として、正しいプロセスを積み上げたその先には正しい結果が存在するという個々のプロセスに焦点を当てているものではなく、正しい結果が出ていればそのプロセスは結果的に正しいものになっている、という逆転の発想を用いている感覚に近い。

正しい声区転換部の歌唱が音響的指標により確認できれば、結果的に技術的に声区転換問題は解決してしまっている、という発想である。自らの肉体的感覚を究極に研ぎ澄まし、卓越した技術を用いて素晴らしい歌唱を行える歌手は世界中に多数存在する。その一方で、現在においても世界中の歌手や声楽教師、研究家の中で、声区転換部の生理学的プロセスについて客観的データを用いて正確に論じられるものはただの一人も存在しない(存在すればこの問題は解決されている)。

優れた声楽教師は正しい声区転換と間違った声区転換を的確に指摘し様々な言葉を用いて指導を行うが、つまるところそれが正しい発声法であるか否かを「聴き分けて」判断し学習者に伝えている。正しい発声法と間違った発声法を声楽教師が的確に指摘することで、学習者が自らの肉体的感覚で認知し、正しい発声法を生み出すプロセスを自ら学び体得するのである。人によっては何度もレッスンを重ねなければ体得できない者もいる。教師も学習者も多大な忍耐を必要とする場合もある。双方の努力鍛錬によって学習者が声区転換を技術的に解決する何がいかなかの感覚を学び取ることが声楽レッスンのプロセスである。この肉体的プロセスはその本人のみの感覚で、奇跡的に一致する人がいれば別だが、基本的には他の誰とも一致しない感覚である(この感覚を次の学習者に押し付けた時に声楽教育における間違いが起こる)。この声楽レッスンのプロセスを俯瞰した時に本研究の視点である、声区転換部の音響的指標が客観的データとなり提示されることは、

「聴いて」主観的に判断している基準を客観化できるという意味で声楽教育においても極めて整合性があり有効かつ、有意義なものであると容易に理解できるものであらうと考える。

本研究では、声区転換部を含む複数音で構成される音階のスペクトルを観察する事で声区転換部における音響的指標を見出すことを目的としてきた。声区転換は声区と声区の切り替わりが重要な要素となり、複数音におけるスペクトル変動の観察・分析を研究の方法論として選択した。方法論としては、声区転換に関わる付近の音域における単音によるスペクトル観察や単音提示による知覚評価実験なども考えられたが、スペクトル観察については単音では2音以上の変化の度合いを見る変動「率」を測定する事は当然不可能で、知覚評価実験については声区の切り替わりの評価が得られない事を理由に単音での実験方法は採択しなかった。知覚評価の単位として本研究では1オクターブの音域を選択した。しかし、この音域選択がスペクトル変動観察についても知覚評価実験についてもサンプル単位として妥当であるどうかは現時点で判断できない。なぜなら声区転換は1オクターブよりはるかに狭い音域で起こるからである。人によっては1半音の違いで発生することもあれば、図2.2で見られるように数半音の範囲に亘って発生する場合もある。厳密にパッサッジョ域でのスペクトル変動を観察する事を目的とするならば、もっと狭い音域での録音採取を行い、スペクトル変動の分析及び知覚評価実験との関連性をみるべきであったかも知れない。しかしながら、先行研究の存在しない実験で全ての作業が手探りの中、どの程度の測度をもって何を基準に実験に臨むことが妥当であるかは、実験開始当初は判断しかねた。ここに実験のある種の粗さを認識しつつも、同時にこの尺度を用いて本論で述べたように非常に有効な結果が得られたことは本当に幸運なことで、また今後の発展も期待でき

ると現時点ではある一定の評価をしている。1 オクターブの音域が実験のサンプル単位として適切であるかどうかは判断できないが、歌手にとってパッサッジョ域が必ずその中に含まれる点、パッサッジョ域以外の「普通の声」が含まれる点、歌手にとって歌いやすい単位である点などを総合して本実験ではこの単位を採択した。今後、より精緻なデータ取得を目的とするための実験の必要性が生じた際には、本研究で得られたデータを基に実験単位は再考したい。

第3章では、第1フォルマントのピーク域をハーモニクスに着目して観察を行った。今回の歌唱サンプルについては、歌唱者は歌唱可能な任意の調性を選択し、その5度上調性、更にオクターブ上調性の歌唱を行ったため、第2音階の導音を除く全ての音は第1音階後半の4音及び第3音階前半の4音と重複することになる。重複音を比較することによりその違いを観察したところ、同一音高、即ち、同一基本周波数を歌唱しているにもかかわらず音階順によりハーモニクスが変化している様子が観察された。これは同一基本周波数を歌唱している際にも僅かに声道形状を変化させ発声している事を意味する。構音上同一基本周波数を歌唱する際は同一声道形状を保ち音質の安定を図ることが予想されるが、歌手は音階に応じて僅かに声道形状を変化させて歌唱している事が見て取れる。ここに歌唱の特徴の一端が現れる。つまり他の楽器であれば同一基本周波数の構音は基本的に全て同じものとなる。ピアノやヴァイオリンであれば指の位置、管楽器であれば唇の振動数などは同じ音高の音を演奏する際は全て同一のものとなる。しかし、声道の様なある種の連続的な変化が可能な音響管は微細な変化をもって構音する事が可能で、発語する事以外にも極めてフレキシブルに変化できる特殊なものであることがこのデータからも分かる。そしてそれ故に、音声では多彩な音色の音を生成する事が可能になる一方で、音階の様な離散的な音を連続的な音響管で生成

しなければならない難しさがある。オペラ歌唱に限らず基本的に旋律の存在する歌唱全て、この意味で声道にとって極めて高度な制御を必要とするものであると言える。オペラ歌唱はそれに加えてシンガーズ・フォルマントを含む音声を求められることから、更に別の制御をして音声生成していることになる。

学生とプロ歌手との違いはフォルマントピーク域の周波数幅に観察する事ができた。学生のフォルマントピーク域はプロに比べて周波数幅が大きく、プロのフォルマントピーク域は学生に比べて極めて狭い。プロの歌唱においては同一基本周波数のハーモニクス変化も観察された。これは、ハーモニクスを変化させて歌唱した結果ピーク域が狭くなるということではなく、優れた歌手はピーク域をなるべく変化させず歌唱し、その結果ハーモニクスがそれに応じて受動的に変化しているという事であると判断できる。なぜなら発声された音声がどの次数のハーモニクスにあるかは純粋に音響管の物理特性であり歌手の制御の範疇ではないからである。つまり、優れた歌手は声道形状を必要以上に変化させずに歌唱した結果、ハーモニクスが移動しピーク域の変動が少なくなり、音質の安定化を図っているという事になる。第3章では、優れた歌手が第1フォルマントのピーク域の変動を少なくし音質の安定化を図っていることを観察できた一方で、第1フォルマントのピーク域に限定して観察を行ったためスペクトル変動全体としてどのような特性が見られるのかはここでは詳細には判別できない。そこでスペクトル変動全体の観察を第4章で行った。第4章では第3章での結果を受け、優れた歌手のスペクトル変動全体の特性が焦点となる。また、第3章では声楽家である筆者一人の主観的評価で良し悪しを判断したが、スペクトル変動と知覚評価実験を総合的に分析することで、知覚評価とスペクトル変動の関係性を客観的指標として導き出した。第4章では、1音階内の変動を指標化するためにスペクトル間のRMS誤

差に基づいて2種類の測度を算出した。まず、各音の平均スペクトルを1歌唱内でさらに平均し、それを基準として標準偏差を算出したものを「全体スペクトル変動」、隣接する2音間での差を取り、それを全体で平均したものを「隣接スペクトル変動」として導きだした。また、歌いだしの第1音の基本周波数が安定する時間が評価に影響を与えている可能性を鑑み、第1音の安定区間に至るまでの時間「A」と、その他の7つの音の安定区間に至るまでの時間の平均「B」を測定し、その間の比、音階開始音相対持続時間を算出した。知覚評価実験結果から得られた評価値を「平均評価値」としてそれを従属変数にとり、全体スペクトル変動・隣接スペクトル変動・音階開始音相対持続時間をそれぞれ直交要因として一般線形回帰分析を行った。その結果、平均評価値と隣接スペクトル変動、平均評価値と音階開始音相対持続時間がそれぞれ独立に相関性があることが判明した。隣接スペクトル変動は隣り合う音の2音間でその差分を取り平均して算出したものであることから、この結果からは隣り合う音のスペクトル変動の差が小さいものであるほど聴取者の評価が高くなるということが分かる。声のスペクトルとは即ち声質の事を意味し、2音間でのスペクトル変動の差が小さい事が意味するところは2音間での音質の差が小さいという事に他ならない。つまり基本周波数が変化したときに音質の差が小さいものほど高評価が得られるという結果を得たことになる。このことが示唆するのは人の評価は近しい2音を聞き分けて判断し、その音質の変化が小さいものほどよく聞こえる、滑らかに繋がっているように知覚されているという事で、これは優れた歌手は、どの旋律や音高、言葉でも同じ音質で歌っているように聞こえるという通常の間感とも整合性がある。次に、平均評価値と音階開始音相対持続時間にも相関性が見られた。音階開始音相対持続時間は第1音がその基本周波数の安定区間に入るまでにかかった時間と、それ以

外の7音が各音の基本周波数の安定区間に入るまでの時間の平均との比を表したものであるが、音階開始音相対持続時間の値の小さいものほど平均評価値が高くなることが判明した。歌いだしの第1音の基本周波数が安定するまでにかかる時間は、一般的には旋律内の他の音の基本周波数に至るまでの安定時間と比較すると長くなることが知られているが音階開始音相対持続時間の値が小さいものとは即ち、第1音の安定区間に入るまでの時間が他の7音の平均と比較して変わらない、つまり第1音が他の7音と同等程度もしくは僅かな時間長の差で安定区間に入ることが出来ている事を意味する。このことが示唆するのは、第1音の安定区間に入るまでの時間長が他の音と同等程度の短い時間長であるほど、より高評価を得られるという事である。第1音がスムーズに歌いだせるという事は高度な技術であると同時に優れた歌手には必要不可欠な技術で、音階開始音相対持続時間の値が小さいものが平均評価値と独立に相関性を認められたことは通常感覚とも整合性があり興味深い結果が得られたことになる。各音の平均スペクトルを1歌唱内でさらに平均し、それを基準として標準偏差を算出した全体スペクトル変動は、それそのものでは平均評価値と相関は得られなかった。全体スペクトル変動で得られる指標とは、歌唱内でのスペクトルのまとまり具合を数値化したものと言い換えることが出来る。全体スペクトル変動と平均評価値の相関性が得られないことが示唆するところは、歌唱全体を通してのスペクトルのまとまり具合はそれそのものでは評価との相関性がないという事になる。しかし全体スペクトル変動は音階開始音相対持続時間の値が小さいものに関しては平均評価値と相関性が得られることが判明した。これは第1音の歌いだしが他の7音に比べて短いもの、即ちスムーズな歌いだしのものは全体的なスペクトルのまとまり具合が評価の対象になることを意味している。歌手にとっては、一般的にスムーズな歌いだ

しは技術的に高度なものであることは間違いないが、一方で聴取者にとってはスムーズな歌いだしには高度さを感じず、むしろ聞いていて自然で、歌いだしが評価の対象から外れると言う方が感覚的には近いのではないかと推測する。音階開始音相対持続時間の値が小さいものになるほど、スムーズな歌いだしであるということになり、この場合に歌いだしが評価基準にはならず、全体的なまとまり具合に聴取者の評価が反映されているのではないか。また、歌いだしがスムーズであるという事は、他の音の遷移についてもスムーズに移行できる技術を身に付けている可能性が高く、音の変化の時間長に対しての評価基準がなく全体的なまとまり具合が評価の対象になった可能性も考えられる。しかしながらこの仮説を検証するだけの精緻な実験は行えず、この点については今後の課題となるが関連する事項として付け加えておく。

スペクトル変動と知覚評価実験の結果としては、隣り合う音のスペクトル変動を小さくして歌唱する事が高評価を得られること、歌いだしの時間長が短ければあるまとまりの全体的なスペクトル変動の小ささが高評価を得られることの2つが判明し、優れた歌手はフォルマントのピーク域を変化させずに歌っている第3章の結果も併せて、これらは全てスペクトル変動の差が少ないものに起因している事がはっきりと結論付けられる。スペクトル変動とは喉頭音源と声道伝達関数により規定されるスペクトルの連続的な変化のことで、言い換えれば異なる連続的な音を歌唱する際の声質の変化とも言える。どのような筋活動や意識活動の中で楽器となる体を制御しているかなどのメカニズムは他の研究結果を待つこととして、本論文で示された、得られる音のスペクトルの連続的な変化が人の評価に係し、その変動の小ささが高評価につながるという結果が得られたことは、大変大きな成果であったと思う。それから、本実験ではもう一つ別の評価基準も見え

てきた。歌いだしの時間長が評価に影響する事が明らかになった。これは、通常歌いだしの時間長は他の音に比べて圧倒的に長いことが演奏者には経験的に知られているが、この時間が他の音と比較してその比が小さければ評価が高くなる傾向が見られた。歌いだしに安定的な発声を行うことは技術的には極めて難しい。しかしまさにここに評価の一端が存在するということが測定の結果、はっきりと示されたのである。本論文では直接実験で確認しなかったものの、関連する事項についても併せて論じておく。

### 今後の課題

今回の実験では複数の音階の、異なる基本周波数におけるスペクトル変動の差分が評価に影響を与えることが分かった。しかしながら厳密に述べるなら声区転換点上の音響特性を全て明らかにするまでには至っていない。1 オクターブという広い音域の中での音響特性を観察したに過ぎない今回の実験をさらに発展させて、声区転換点に焦点を当てて研究を進める事が次の課題となる。例えば、声区転換点と思われる幾つかの音について、スペクトル傾斜を計測・観察することで新たな特徴量を指標として提示することも考えられる。全体スペクトル変動と歌いだしの安定度についての相関性についてもより精緻に観察を進める事も出来るだろう。更に別の着眼点として考えられるのは、母音が異なる際のスペクトル変動による差分とはどのようなものなのか。つまり母音が異なれば仮に基本周波数が一定であるとしても必然的に第1フォルマントと第2フォルマントの位置が移動し、スペクトルの概形に大きな変化をもたらす。本実験では同一母音でのスペクトル変動に着目したが、母音が異なる際の評価基準がどのように現れるのかは大変興味のあるところである。また、本実験ではパッサッジョを含む1 オクターブが単

位になり，そのスペクトル変動を詳細に見た訳だが，パッサッジョ域のみのスペクトル変動に着目することも可能だろう。パッサッジョ域のスペクトル変動に何らかの特徴があるのかないのかなども含めて，更に深めていくことも次の課題として考えられるのではないかと思う。



## 結論

パッサッジョを含む音階音における音響特性を、フォルマントピーク値の観察及び、スペクトル変動を知覚評価実験と相関させることで観察してきた。フォルマントのピーク値の分析から優れた歌手はピーク域を変化させずに歌唱していることが観察され、この結果からスペクトルそのものの変動率が歌唱の評価につながるのではないかという仮説が立った。そこでスペクトル変動と知覚評価実験を行い、その相関を分析する事で、幾つかの新たな結果が得られた。「音響的特徴から見る高評価を得るための歌唱」をまとめると、第 1 音をできるだけ短い時間で安定区間に入らせ、その他の音は隣り合う 2 つの音の極端な音質の差を作らず、全体的にまとまった響きで歌える、ということに集約される。この結果は、優れた歌手はどの音程やどの言葉によってもスムーズに歌い始め、音質の極端な差が無く全体的に滑らかに聞こえるといった実際の感覚とも整合性があり、そのことがスペクトル分析とスペクトル変動の観察、知覚評価実験から導き出されたことになる。これは、感覚的な知覚評価の判断の基準の一つが音響的に客観的データとして示された事を意味し、歌唱の評価を音響的指標で表す事の第一歩となる重大な結果と言える。パッサッジョを含む音階においてこれらの音響的指標が提示できたことは、今後のパッサッジョ域に限定した実験や、母音の異なる際ではどのような指標が現れるのかなどの研究に更に発展できる可能性がでてきたことから考えても本研究の意義は大きいと考える。

パッサッジョにおいてはまだまだ不明な点が沢山存在する。オペラが発展してきた長い歴史の中で数々の著名な歌手や声楽教師、そして研究家が挑んできたこの大きな問題の解決のほんの小さな力にでもなれているとしたらこれほど嬉しいことはないと思う。

**おわりに** 本論文は声区転換部の音響的特性について、音響実験を行うことによりある指標を見出すことを目的としたものである。声区転換についての全ての指標をこの論文一つで提示することは到底できないが、それに関連して、基本的な音声生成のメカニズムやソース・フィルタ理論の説明などを盛り込むことで、実際にオペラや演奏会の舞台上で歌唱する者にとっても、歌唱現場で指導する者にとってもこの論文は十分に生かせるものになったであろうと自負している。

科学技術が目覚ましく発展し、様々な物理的現象が科学的に明らかになってきている現代においても、声楽レッスンの現場には音声学や生理学の基礎的な情報でさえうまく伝わっていないことや、声楽に関わる人々が科学的情報に対して関心が薄いこと、または情報が混沌として場合によっては誤った情報として受け止められてしまうようなことなど残念な状況をよく見かける。

一方、従来多く見られる客観的な指標を採求する自然科学的な研究は、物理学的な視点から行われるものが多かった。ところが、多くの物理学者は現代心理学で確立されてきた主観体験に客観性をもたせて測定する手法に対して疎いか、あるいは主観体験は非科学的なものに見なして心理学的な手法の導入に対して否定的な立場をとることが多かった。そのような研究においてありがちな傾向として、誰もが認める名手や名器の物理音響的な特徴を調べるというものがある。しかし、その手の研究の限界は詳細な分析結果が出た段階で「その歌唱者が本当に上手であるという保証はあるのか？」というごく素朴な疑問に対して客観的に答えることができないというものであった。また、仮にそれが本当に名手の声にとっての特徴であったとしても、その特徴の持つ普遍性については保証するものではなく、むしろ普遍性のない事例研究として留まるということであった。これは例えば野球の投手に例えれば、ダルビッシュが投げるスライダーの特徴を研究してしまう

おわりに

レベルに留まることである。より必要とされているのはダルビッシュとは体格も筋力も柔軟性も異なる他の投手でも、三振や凡打の山を築くために満たすべき要件を知ることである。本研究では声楽を専攻とするある程度多数の学生による平均的な評価を基準にすることによって普遍性の高い評価結果を求め、それを予測可能な物理音響的な特徴量を相関分析から求めるという手法を取ったものである。筆者が属する声楽専門家のコミュニティーでは、このような手法に対して関心が薄い者が大半であったが、今回実験に参加していただいた方々の多大なるご協力のもとでこの手法を円滑に導入できたこと、そしてその結果が非常に説得力に富んだものとなったことに喜びを感じると同時に深く感謝している。

人が歌唱する以上、心理的肉体的な活動は避けられず、現代の科学技術をもってしても全ての声楽技術が科学的物理的に説明できるとは夢にも思わない。しかしながら、本論文中に示したように、音声生成については筋肉のある種の作用が物理的な空気の断絶を起こし喉頭音源を生成し、声道形状がフォルマント周波数を規定しシンガーズ・フォルマントを生み、オペラ歌唱におけるの音声生成されていることは明らかで、そこにどんな魔法も超能力も関与する余地はないのである。そのことを歌唱指導者や学習者が理解して取り組めば、学習者の無用な混乱を避け、教授者はより適切な言葉で指導を行うことができるのではないかと思う。無用な誤解や擦れ違いで声楽の世界から去るような不幸な人が一人でも少なくなるように願いながら本論文を綴った。

プロ野球の並み居るバッターの誰にも打たれないスライダーを投げることのできるダルビッシュが、人々から多くの賞賛を得ることに誰も疑問を呈するものはないだろう。同様に、オペラ歌唱における音声生成を高度な意識制御の下、弛まぬ訓練をもって鍛えられた肉体で生み出される歌唱行為は人が長い歴史の中で発

おわりに

明した奇跡の物理現象で、それを体現し常に観客を魅了する事の出来る声楽家は  
尊敬に値すると思う。自身の肉体を極限まで鍛え上げ、神経を究極に研ぎ澄ませ  
て表現される歌唱芸術は本当に素晴らしいものだと思ふと同時に、歌唱芸  
術に少しでも携われていることを誇りに思う。



## 参考文献

Atkinson, J. E. (1978) .Correlation analysis of the physiological factors controlling fundamental voice frequency. *Journal of the Acoustical Society of America*, 63(1) ,211-222

Berg.V.D. (1958) .Direct and indirect determination of the mean subglottal pressure.

Kawahara, H., Masuda-Katsuse, I., & de Cheveigé, (1999) . Restructuring speech representations using a pitch-adaptive time-frequency smoothing and an instantaneous-frequency-based f0 extraction: Possible role of a repetitive structure in sounds. *Speech Communication*, 27, 187-207.

Kawahara, H., Morise, M., Takahashi, T., Nishimura, R., Irino, T., & Banno, H. (2008) . Tandem-straight: A temporally stable power spectral representation for periodic signals and applications to interference-free spectrum, f0, and aperiodicity estimation. Paper presented at the ICASSP 2008: Acoustics, Speech and Signal Processing, Las Vegas.

Fink, B. R. (1975) *The humanlarynx: A functional study*. A new York: Raven Press

Hast, M.H. (1983) *Comparative anatomy of the larnynx: Evolution and function*.

Shipp&Mcglone (1971) Laryngeal dynamics associated with voice frequency change.

Peterson & Bareney (1952) Control methods used in a study of vowels.

Wolfram&Johnson (1982) Phonological analysis: Focas on American English

Garcia, M 山内すみえ, 今田理枝訳 (2003) .

ベルカント唱法のヒント. 株式会社シンフォニア.

荻野仁志, 後野仁彦 (2004) .

「医師」と「声楽家」が解き明かす発声のメカニズム. 音楽之友社

一色信彦 喉頭の機能外科 (とくに経皮的アプローチについて)

京都大学医学部耳鼻咽喉科学教室(第 78 回日本耳鼻咽喉科学会総会)

今泉敏 (2007). 言語聴覚士のための音響学. 医歯薬出版株式会社.

笠井仁 (1997) 声楽発声の基礎理論に関する考察 武蔵野音楽大学

Miller, R. (2009). 岸本宏子, 長岡英訳 上手に歌うための Q&A. 音楽之友社.

水谷彰良 (2006). イタリア・オペラ史. 音楽の友社.

Reid, C. L. 渡部東吾訳. (1987)

ベルカント唱法,その原理と実践. 音楽之友社.

Reid, C. L. 川村大介訳. (2005). 声楽用語辞典 リードによる解剖と分析. キックオフ.

Sundberg, J. 榊原健一, 伊藤みか, 小西知子, 林良子訳 (2007)

歌声の科学 東京電機大学出版局.

田窪行則, 窪菌晴夫 (2004) 言語の科学 (2) 岩波書店

Titze, I. R. 新美成二, 田山二郎, 今泉敏, 山口宏也訳 (2003)

Principles of voice production (1993) 音声生成の科学～発声とその障害.

医歯薬出版株式会社

**本研究に関する研究業績**

## &lt; 学術論文(査読付き) &gt;

大谷圭介, 津崎実. (2013). 声区転換部を含むオペラ歌唱の音響的特性, 日本音楽知覚認知学会会報,

## &lt; 国内学会発表(査読なし) &gt;

1. 大谷圭介, 津崎実 (2011). オペラ歌唱における声区転換の音響特性, 日本音楽知覚認知学会春季講演会
2. 大谷圭介, 津崎実 (2013). 声区転換部におけるオペラ歌唱の音響的特性, 日本音楽知覚認知学会春季講演会

## 謝辞

本研究の遂行にあたり，終始ご懇篤なるご指導，ご助言ご鞭撻を賜りました本学音楽学研究室 津崎実教授に心より感謝申し上げます。

また，声楽発声法及びパッサッジョの概念について，多大なるご指導を賜りました本学音楽研究科声楽研究室 折江忠道教授に心より感謝申し上げます。

それから，本研究において快く歌声のサンプルを提供してくださった本学大学教員の先生方，並びに大学院生，また知覚評価実験を行ってくださった皆様，声楽専攻 3 回生から大学院生の皆様に深く感謝いたします。また，スペクトル分析に用いた **STRAIGHT** 分析合成ソフトウェアを提供していただいた開発者，河原英紀和歌山大学システム工学部教授にも深く感謝の意を表します。



## 付録

用語集

---

## 1 芸術歌唱 [ げいじゅつかしょう / artistic singing, or operatic singing ]

オペラや歌曲などヨーロッパを起源として発展してきた舞台芸術作品を歌唱する際に必要とされる声楽的技法。基本的にはマイクなどの音響的増幅を用いないことを前提としている。

## 2 基本周波数 [ きほんしゅうはすう / fundamental frequency ]

周期的な複合音を構成する周波数成分中の最も低い周波数成分の周波数。つまり，基音の周波数( 日本音響学会, 2003, p. 88 )。

## 3 筋電図 [ きんでんず / electromyogram, EMG ]

筋活動により発生する活動電位を電氣的に記録するもの。

## 4 ファイバースコープ[ ファイバースコープ / fiberscope ]

多数の細い光ファイバーを規則的に配列し，その一端に対物レンズによる像を投影し，他端から相似の像を取り出して観察する装置。

## 5 スペクトル [ すぺくとる / frequency spectrum ]

周波数スペクトルのこと。信号を構成している周波数成分の振幅や位相の分布を周波数の関数として表したものの一般的呼称(日本音響学会, 2003, p. 190)。

---

## 6 スペクトル変動 [ すぺくとるへんどう / spectral deviation ]

2つの周波数スペクトルの変化の様子またはその度合。

## 7 音声生成 [ おんせいせいせい / generatio of voice ]

人の声を作りだされる状態。

## 8 喉頭音源 [ こうとうおんげん / sound source of larynx ]

肺から供給された空気振動で声帯振動が生まれ、声帯振動により最初に生成される音。

ブザーのような音で音韻性はない。

## 9 ベルヌーイ力 [ べるぬーいりょく / Bernoulli's principle ]

18世紀のスイスの物理学者ベルヌーイが発見した現象。流体がある物体のそばを通過する時、物体との距離の違いにより流体の層が出来、速度の違いが生まれる。この速度の違いが陰圧を生み出し、進行波の流れと垂直方向に最大に働く力。( Sundberg, 2007, p13 )

## 10 正弦波 [ せいげんは / sine wave ]

時間に対する変化が正弦関数であるような波形のことで、純音とも呼ばれる。

## 11 純音 [ じゅんおん / pure tone ]

単一周波数成分の音。純音の波の形は、正弦関数( sin 関数) であらわされる。

音叉の音はきわめて純音に近い。

---

## 12 複合音 [ ふくごうおん / complex tone ]

純音以外の音の総称。2 つ以上の純音から構成される。

複合音のなかで音高感が明瞭な音は狭義の楽音，それ以外の音は非楽音または雑音。

## 13 線スペクトル [ せんすぺくとる / line spectrum ]

スペクトルのパワー分布が周波数軸上で離散的に集中している場合のスペクトルを指す。

## 14 調波構造 [ ちょうはこうぞう / harmonic component ]

スペクトル成分の周波数が互いに整数倍であり，波形が周期的になるような音のスペクトル構造。

## 15 共鳴 [ きょうめい / resonance ]

物体が外部から振動を与えられることによって，固有振動を始めること。特にその振動数が物体の固有振動数に近く，その振動の変位が極大値をとる現象，あるいはその状態をさす。共振に同じ。(日本音響学会, 2003, p. 93)。

## 16 フォルマント周波数 [ ふおるまんとしゅうはすう / formant frequency ]

共鳴周波数のことで，共鳴器が人間の声道の場合，特にフォルマント周波数と呼ぶ。

(Sundberg, 2007, p12)

## 17 インピーダンス [ いんぴーだんす / impedance ]

流体中を運動する物体が，その運動方向と反対の方向に流体から受ける力。抵抗。

---

**18 倍音 [ ばいおん / harmonic ]**

基本周波数の 2 以上の整数倍の波長をもつ周波数成分。

**19 スペクトル包絡 [ すぺくとるほうらく / spectrum envelope ]**

音響波形のスペクトルにおいて、細かく立っている線スペクトルのピークをなめらかな曲線で結んだもの。

**20 平滑化スペクトル [ へいかつかすぺくとる / spectrum smoothing ]**

同一音高のスペクトルの安定部分に亘って平均を求めたもの。

**21 量子化ビット数 [ りょうしかびつとすう / quantization bit rate ]**

量子化とは、連続的な物理量であるアナログデータを、デジタルデータとしてデジタル化する際の丸め操作のことであり、量子化ビット数とは、このデジタル化を何段階の数値で表現するかを示す値のこと。

**22 RMS 誤差 [ あーる・えむ・えす・ごさ / Root Mean Square error ]**

平均二乗偏差。統計値や確率変数の散らばり具合を数値化したもの。元の値を 2 乗して相加平均し平方根をとることにより算出する。

**23 分散分析 [ ぶんさんぶんせき / analysis of variance ]**

要因(本研究においては、スペクトル変動等)が、従属変数(本研究においては平均評価値)に影響を及ぼしているかどうかを検定する統計的分析法。

---

(※)分散 [ ぶんさん/ variance ]

確率変数の分布が，期待値よりどの程度離れているかを示す値。本研究では，各音のばらつき具合が数値化されることになる。

24 一般線形回帰分析 [ いっぱんせんけいかいきぶんせき/General Linear

Regression, GLM ]

従属変数(本論文では平均評価値)が独立変数(本論文では，種々のスペクトル変動)によってどの程度説明できるかを定量的に測定する統計的分析法。

25 標準偏差 [ ひょうじゅんへんさ/ standard deviation ]

複数のデータが存在する際，そのデータ群の平均値とそれぞれのデータのばらつき具合を示したもの。

