

論文

## 歌い手のフォルマントについての一考察

—ベル・カント唱法と科学的研究を比較して—

高橋 純 津崎 実

Study of the Singer's formant:  
Compare the Bel Canto singing and scientific research

TAKAHASHI, Jun and TSUZAKI, Minoru

Many singers want to improve their own singing techniques. The Bel canto is one of the singing techniques in the classic singing, and it is an ideal voice quality. However it is difficult to evaluate their own voices by themselves. According to Sundberg (2007), Singer's formant, or SF, is appeared in analysis of the excellent singers who uses the Bel Canto as common acoustic properties. Although some studies have focused on SF, it is still incompletely understood by researchers. The purpose of this study is to discuss the historical origins of Bel canto singing, basic theory on SF, the fact from recent studies and suggestions for future research.

Keywords Bel canto, Singer's formant, singing, Vowel, Spectral Analysis

## 1. 音声

## 1.1. 音声の定義

本論文において、「音声」というものを定義するならば、どのように言えるだろうか？ スンドベリが自身の著書で「音声」を、肺からおくられた空気流が声帯による作用を受け、咽頭、口腔、場合によっては鼻腔により変化させられ、作られた音を音声とする（2007:1）と述べているように、声帯を音源、それに繋がる声道を共鳴管としてモデル化するという捉え方が一般になされている。また人間が音声を生成する時に用いる様々な身体の構造物のことを「発声器官」と呼ぶ。これらの発声器官が相互に関連することで日常耳にするような様々な音声が生まれる。その中には人間が言語によってコミュニケーションを取るための「話声」や歌唱における「歌声」が含まれている。

## 1.2. 「話声」と個人差の要因

「話声」とは、人間が言語によってコミュニケーションを取るために発せられる音声の意味

を指す。また、音声言語とは音響的な符号のひとつであり、人間がある一定の集団の中で、思想、感情、意思などを伝達するために用いるものである。話声には様々な要因により、個別の音声信号の差異が存在する。その要因の一つが、発話習慣の違いである。例えば、言語の中にある母音をとってみても、日本語の母音と、他の外国語における母音では違いがある。あるいは同じ国の種族であっても、その個人の地理的および社会的に育った環境によって異なるのである。

また、もう一つの違いを生む要因が、その個人のもつ「発声器官」の特徴である。「発声器官」は、その個人の発する音声の「音色」を決定させる重要な器官であり、その個人の持つ「発声器官」の特徴の違いが、「音色」の違いをもたらす。

例えば、我々は声を聞くことで多くの場合、その話者が男性か女性かを判断することができる。一般的に女性の方が「高い」声であり、男性の方が「低い」声である。これは男性と女性では発声器官である喉頭や、声道の大きさが異なるためであり、その違いにより発せられた声は異なるのである。声の高さは喉頭の大きさの違いに起因する基本周波数の違いで、音色の違いは声道長の違いに起因する共鳴周波数の違いに由来する。

一方で同じ性別であっても、個々人の発声器官の細部の違い（形状的な差）によって、異なる音声が生産される。例えば母音の違いは舌の位置や口唇の開口度の違いにより作られる。歌唱の際のピッチの違いは喉頭音源の基本周波数を変えることで実現される。

これら二つの性質において、学習によって獲得可能な後天的な側面が発話習慣と呼ばれ、発声器官の大きさなど先天的な要因による違いとは区別される。具体的に発声器官の男女差は、身体の発達段階に従って徐々に現れ、第2次性徴を経ることによって顕著に発現する。

### 1.3. 「歌声」とは

「歌声」とはなんだろうか。それを論じるには、まず「話声」と「歌声」の違いは何なのかということを考えなければならない。「話声」と「歌声」はそれぞれ別のものとして研究されてきた。しかし、その間に明確な一線を引くことができるのであろうか。フースラーは「話すこと」と「歌うこと」という二つの現象には、はっきりした一線を画しておくべきである(1987:121)としている。

近年では、歌声特有の音響特徴量について様々な研究がなされている。例えば、歌声にしか存在しないヴィブラート、また歌声に顕著に現れる特有の周波数群などである。また「話声」と「歌声」と言う線引きは、人間の心理的な要素にも依存している。私たちは日常生活において、その音声の話声なのか、歌声なのかを聞き分けることが出来る。斎藤(2008)らの研究では、歌声らしさの心理的特徴として、音声の「揺れ」「響き」「明瞭さ」の知覚が、歌声として知覚することに大きな影響を与えていることが分かっている。もちろん、オペラにおけるレチタティーヴォなどの例外はあるが、私たちは知覚的な特徴によって、その音声がいずれかであ

るのかを判別しているのである。

#### 1.4. 「歌声」とその起源

「歌声」は人類の長い歴史の中で、いつ生まれたのか。フースラーは、言語を話すことは人間の第1の本性に対して設えられた創造物であると唱え、言語の根源は、人間が目で知覚したことの語源的な構造に由来し、大脳の聴覚領域よりも視覚領域においてはるかに多く成立したと考えた。そして、話をするために設けられた機構よりも、はるか以前に歌うための機構があり、それはことばを作ろうという意思に占領されてしまった可能性が大いにある(1987:121)と述べている。つまり人間は、言葉を持つ以前から歌声を持っており、人間が言語を使って言葉を発するようになるにつれて、それは衰退していったのではないかというのである。

もちろん、ここでいう歌声は、今日私たちが耳にしている歌詞や旋律を伴った歌唱の歌声ではなく、幼児が話し始める前に旋律的な、あるいは歌唱的ともいえるような声の放出、純叙情的な気分の発散(フースラー 1987:121)を意味している。つまり人間の歌声を、その内なる感情や意思の表現と捉えるならば、言葉よりも先に「歌声」というものが存在したと考える方が、自然であるというのである。

たしかに、泣きすぎて声を枯らした、あるいは声を痛めた幼児は聞いたこともない。また、自然界における他の生物に目を向けるとどうだろうか。鳴き声を発する動物は、その発声の方法が悪く、声を痛めたり失ったりすることがあるだろうか。もちろん例外は存在すると思うが、概ねそのような自然の摂理の中で、行われている生物の動作には、今日私たちが声を発することによって起こされる諸問題は存在しないと言える。

しかしこの説は、動物の鳴き声について考えると矛盾が生じる。「歌声」の最大の特徴は音声の高さである基本周波数の自然な下降がないという特徴を持っており、そのような鳴き声を持つ動物は稀である。詳しくは後述するが、基本周波数を一定に保つという行為には、声帯の緊張も一定に保ちながら一定の呼気圧を保つというきめ細かい制御が必要である。話声の自然な呼気圧制御では発話開始から終了までその基本周波数が緩やかに下降する。それは呼気圧が『自然に』低下していくからである。歌声では通常一定の高さを保つことが要求される。つまり話声とは異なる制御が必要なのである。

そう考えると、「鳴き声」＝「歌声」という考え方には、矛盾が生じるのではないだろうか。確かに私たちは時として、「話声」からでは得ることのできない感動を「歌声」から得ることができる。その理由の一つとして「歌声」が、本来「鳴き声」の果たしていた役割(制限なしに感情や意思を表現すること)を果たしているからなのかもしれない。

北村(2009)らの研究によって、発声器官の中で、声の音質や音色を決定させる声道は、人間の情動によっても変化するということが分かっている。つまり、人間の声と感情には大きな関わりがあるということなのである。このようなことから筆者は「歌声」とは、本来「鳴き声」

が持っていた要素を兼ね備えた、「話声」以上に人工的なものと考えている。

## 2. ベル・カント唱法と「理想」

### 2.1. ベル・カント唱法とは

ベル・カント (Bel Canto) とはイタリア語で、美しい歌唱という意味で、一般的には、17世紀や18世紀にオペラにおける歌唱様式そのもの、あるいはその様式を支えた発声の手法のことを指す。特に、イタリア的な歌唱法や歌声（明るく輝かしい声など）に対して使われることが多く、賛賞の言葉として用いられる。また G.A. ロッシーニ (1792-1868) や G. ドニゼッティ (1797-1848)、V. ベッリーニ (1801-1835) が作曲したオペラは、ベル・カントオペラと呼ばれ、ベル・カント唱法によって歌われるべき作品であるとされている。

17世紀にオペラが創案されると、声楽的な表現と歌手たちの妙技を発揮させる場と機会が提供された。それ以前の声楽音楽はポリフォニー様式であり、厳格な音楽の決まりがあった。しかしオペラによってその決まりから解放された歌手たちは、発声のテクニックや、声の魅力を競い合うようになり、A-B-A形式のダ・カーポアリアが導入されると、歌手の持つ声楽的な技量をいかんなく発揮させ、即興演奏によって音楽的な趣味の良さを表現させる（リード1987:16）ために、第3部分は歌手の自由な装飾歌唱が行われるようになった。その過程の中で、ベル・カント唱法が確立されていったのである。このことからベル・カントの時代は装飾歌唱の時代と言い換えてもよく、ベル・カントの本質は装飾的歌唱法そのものである（水谷2006:7）とも言われている。

しかしその一方で、ベル・カントはイタリア的、イタリア性といった意味でも用いられ、19世紀以降の G. ヴェルディ (1813-1901) や G. プッチーニ (1858-1924) などのオペラ作品に対しても、ベル・カントという「理想」としての考え方は生き延びている。今日でも声楽発声における理想的な歌唱法、またはその歌声自体を指す言葉として用いられている。

しかしながら、以上のようにベル・カントは様々な解釈や意味を含んだ言葉であり、厳密な定義は存在しないにも関わらず、確かにベル・カントと言われる「理想」、あるいは歌手や聴衆における共通の認識は存在すると多くの歌唱現場では認識されている。だが、それが本来どのようなものであったのかということは、現代では録音資料の残らない時代の産物であるため、文献や書簡を基に類推することしかできない。第1筆者自身は声楽を専門とする演奏家であるが、筆者が知る中でも、様々な歌唱法やその流派が存在し、実際に多種多様な歌声を、今日の演奏会で聞くことができる。その中で、どれが一番理想的なものであるか、第1筆者自身の主観的見地では述べることは可能であるが、それはあくまでも筆者自身の主観的な思考や好みによるものであり、客観性を帯びることはできない。それと同じことはすべての演奏家に言うことができ、すべての演奏家は、その発声の技能や歌声について「理想的である」と断言することはできない。しかし、そうであるにもかかわらず、現代の音楽界において「ベル・カン

ト」という概念は、その理想的形態として定義が不確定なまま放置されている。

## 2.2. 「理想」とは

歌声の「理想」像の実態を、直接観察ができないまでも、その「理想」が生まれるに至った背景を見ることで実像に多少とも迫れるかもしれない。

オペラという「見世物」が流行し、歌い手は頻繁に大観衆に対して、オーケストラをバックにして歌うことが要求されていった。おそらく、当時は（現在もそうであるが）、様々な発声法や歌唱法で歌唱する歌手が存在したに違いない。しかし、全ての歌手が、その声の質を長期にわたって維持できたわけではなく、医学が進歩した現在では、ある程度の治療が可能であろう声の故障や、疲弊も、当時の歌手たちにとっては致命的なものであったと思われる。その為、歌手に求められるものは、芸術的、技巧的な発声や歌唱のテクニックだけではなく、なるべく発声器官にかかる負荷を軽減しながら、より効率的に、それらを行うということが求められたのである。その過程でより問題を起こしにくいものが自然淘汰されてゆき、それらの歌手たちの持つ発声法や歌唱法がベル・カントと呼ばれ、「理想」とされていったと考えることには一定の合理性がある。

また、聴衆もベル・カントという「理想」をつくりだすために大きな役割を果たしてきた。なぜなら、先に述べた芸術的、技巧的な歌手のテクニックを評価するのは、歌手本人ではなく、むしろ聴衆だからである。何を「美しい」と感じるかは時代による変遷も大きいですが、少なくとも言えることは、他の歌唱者では達成できない声の質を（当時としては）備え、際だった存在としての地位を得なければならなかったことであろう。「普通の人には出せない高い声を出すことができる」「大きな声である」「長いフレーズを一息で歌うことができる」などの指標によって、歌声を評価することは特に専門家でなくても判断のできる分かりやすい知覚的特性である。そして、その様々な「指標」において、それらをクリアした歌い手の声は理想的であり、その歌い手は理想的な歌唱法を行なっていると言えるのかもしれない。

しかし、ではその「指標」は本当に正しいのだろうか。あるいはその「指標」をどのように定めるべきなのであろうか。「高い声」とはどのくらい高い音を指すのか。歌い手が出すことができる最高音は、性別や声種によって異なる。また同じ声種であれ、その歌い手の持つ音域はそれぞれに異なるはずである。その中で最も高い声を出したものが最も優れているのだろうか。あるいは「大きい声」といっても、それはどのような建物の中で、どれくらいの距離で聞いている時の声なのだろうか。あるいはピアノ伴奏、オーケストラ伴奏の違いによっても、歌声の聞こえ方は変わってくる。また「長いフレーズ」といっても、歌われているピッチや、その歌声の音量、声質によって変動するものである。

また、「理想」という言葉に疑問を抱かせるもう一つの要因は、その伝承のされ方にある。先に述べたが、現代には様々な歌唱法やその流派が存在する。ベル・カントが確立されて以来、

その伝承は指導者自身の経験と主観的な印象に基づいて行われてきた。リードは自身の著書中で「昔の教師たちは、このような共鳴に関する音響学的な法則については何も知りませんでした。しかし、彼らはその音が間違いなく共鳴した音質であるかどうかを耳で聴き分けて、的確に判断していたに違いありません。」(1950:42)と述べている。確かに、優れた演奏家、あるいは音楽教師は共鳴の程度を聞き分ける力を持っており、それによって声の良し悪しの判断をすることは可能であったと思われる。歌声の音質は、発声器官のその時々の状態を示す、あるいは状態そのものであると考えられ、教師は聴覚的に捉えた歌声に対する主観的な判断に従って指導を行っていた。そして、その構図は、今日の歌唱指導や音楽教育の現場においても同じである。やはり教師自身の経験と主観的な印象によってつくられた曖昧な「理想」を、学習者は追い求めなければならないのである。リードもこの構図については、

演奏家として名をなすような歌手たちで、発声訓練のメソッドの歴史や発展についての精密な研究をする時間や精力を持てるという人は、めったにいるものではありません。レパトリーを準備し、公演し、社会的な責任を果たすという多忙な生活には、普通、こうした特殊な研究をする余裕などないものです。そのため、第一線で活躍してきた歌手たちであった人たちが、人に教えるということに就く時がやってくると、<自分たちの>先生から教わった発声の原理だけを教え、自分たちが生徒として経験した指導手順をそのまま繰り返すことになり、誤りはとめどなく犯され続けられることとなります。・・・演奏家としてはいくら偉大であっても、このような恵まれた条件のもとで訓練された歌手たちに、はたして発声のメカニズムについて何を教えることができたでしょうか。(リード 1950:176)

と述べ、理想像を曖昧なままに放置している現状を危惧しているのである。

### 3. 歌い手のフォルマント

科学者や研究者などによって、歌声に関する様々な研究がなされてきた。発声器官やその機能、そして発せられた歌声を生理学、音響学的に研究し、その演奏技能の解明や、歌声の分析がなされてきたのである。そして近代においては、科学技術の発展によって、人間の発声器官や音声、また音を聞くための聴覚などの研究が益々盛んになり、より正確で精密な研究がなされるに至っている。その研究の中でも、歌声について「理想的な声」の一つの指標となりうる音響的特徴が発見された。それは、歌い手のフォルマント (Singers formant) という音響的特徴である。

歌声に限らず「音声」は有声音と無声音に大別できる。無声音とは、フ・ク・チ・ブ・シュ・ス (f/k/ch/p/sh/s (ce)) などの、声帯の振動を伴わない子音のことを指し、音響信号として周期性のない音である。反対に有声音は、全ての母音と声帯の振動を伴う子音 (b/d/g のような

破裂音、v/zのような摩擦音、m/nのような鼻音、そしてl/rのような流音)を指す。有声音のうち、母音と鼻音は周期性を保てる。この周期性に対して我々はピッチを知覚する。旋律とはそのピッチの変化によって表現されるため、歌唱音声を考える上でまず周期的な母音を対象とした研究がなされた。先述したように、優れた歌い手の歌声をスペクトル分析すると、共通する音響特性として歌い手のフォルマント(以下SF)が存在する。母音という範疇に入る音にはフォルマント(Formant)と呼ばれる周波数群が存在する。それらを低い方から第1フォルマント、第2フォルマントと呼んでいく。SFは主に第3、第4、第5フォルマントが融合することで成り、そのエネルギーが3kHz付近に集約されることで生成されていると考えられている。3kHz付近は、人間が最も可聴しやすい周波数域であるため、人間の耳にはより聞こえやすい声になる。

斎藤(2008)の研究における歌声特有の音響特徴量の分析では、3kHzの周波数帯における強い高周波成分が「響き」の聴覚印象に寄与することが確認されている。また、優れた歌い手の声がオーケストラと共に歌っても聞こえる理由もこのSFの存在があるからと考えられている。図1は歌手の歌声、その歌手の話し声、ならびにオーケストラの音の長時間スペクトルを比較したものである。

オーケストラの音には3kHz付近に共振がそれほど顕著に現れないため、その付近の周波数帯域にパワーの盛り上がりが存在することはオーケストラの音以外の音が存在すること、つまりこの場合はベル・カント唱法による歌声が存在することの「証拠」として働く。その結果、歌声はオーケストラの音にマスクされにくいという傾向を生む。同じ人間の話し声ではこの3kHz付近のピークが出現していないことから、この特性はその個人の普段の状態から出現するものではなく、歌唱時に特異的に出現するものであると考えられる。

すなわち楽器にはないフォルマントのピークを歌声に与えることにより、オーケストラと共に歌っても聴衆が歌声を聞き取りやすい条件を作っていることになる。

このようにクラシック歌唱の

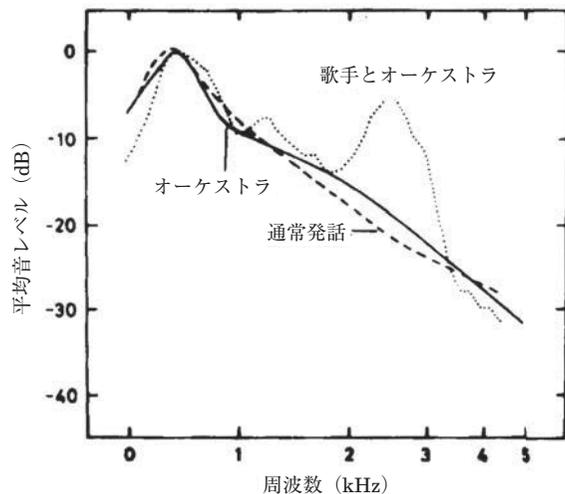


図1 交響楽でソリストがいるとき(実践)といないとき(点線)、及び通常発話(破線)での長時間スペクトル。SFが、オーケストラにソリストがいるときといない時の大きな違いを示している。(スンドベリ, 2007)

訓練をしっかりと受けた歌唱者の歌声の音響的な特性としてSFの存在があることは分かっている一方で、その発生の生理学的な機序についてはまだ未解明の部分が多く残っている。

### 3. 発声器官と発声の理論

この項では、過去に行われた研究の中からスンドベリ (2007)、ボーデンら (2004)、そして今泉 (2007) の著書を基にし、声楽教育や発声指導において行われてきた指導法や筆者の考察を交えて、発声器官とその働きについてまとめた。

#### 3.1. 呼吸器官

人間が音声を発する際には、肺から出た空気が声帯を通過する必要となる。これを呼気という。呼吸は生命の維持に必要な動作があり、それは肺に大気を取り入れる吸気の相と、肺で酸素を摂取して不要となったガスを排出する呼気の相が存在する。原理的には吸気流を使って声帯を振動させることも可能であるものの、大半の場合の発声はこの呼気相で生じる呼気流が使われる。この項では、一連の動作である「呼吸」を「呼気」と「吸気」に分けて考える。それは「呼気」と「吸気」には、それぞれ使われている身体の筋肉群や機構が異なり、動作における物理的な作用も異なるからである。

呼吸器官は、酸素を体内に取り込む肺があり、その周りを囲むように胸郭がある。肺そのものは筋肉もなく、スポンジのような構造であり、肺の動きや形の変動は、その外枠の胸郭と横隔膜によって受動的に決定される。ただし、風船と同様に肺自体に弾性があり、ある一定以上に膨らませると自然と収縮する。胸郭は肋骨柄、胸骨、肋骨、肋軟骨とからなり、肋骨の間にある筋肉によって、全体が拡大したり、縮小したりすれば、肺の容量もそれに比例して変化する (図2)。

また、横隔膜とは、肺の下に位置するドーム型の筋で、上下に動くことによって、肺の形状を変化させている。

まず、「吸気」時には声門が開いて外気を肺の中に流入させる。肋骨の間の筋肉や、横隔膜などの吸気のための筋肉である吸気筋の活動によって肺の中の圧力が大気圧と等しくなり平衡状態となると「吸気」が完了する。「吸気」時には、肋骨の間にある軟骨にあたるものが収縮し、肋

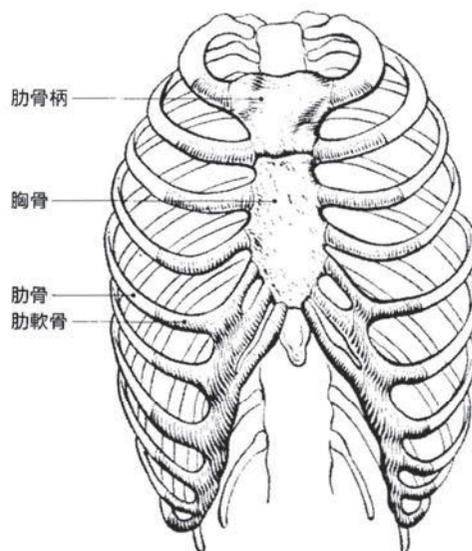


図2 胸郭 (グロリア J. ボーデン, 2004)

骨を持ち上げるように働く（軟骨には動力はなく、動力源はあくまでも肋間筋などの筋肉であり、筋肉は収縮することでしか力を出すことができない）。そうすると、胸郭は前後方向にも、側方向にも拡大する。胸郭が拡がると、肺の内部が相対的に陰圧となり、外気が肺に流入していく。そして、肺の容量が一定より大きくなると、その量を維持するために、吸気筋の緊張を持続させる必要がある。

そして「呼気」時には、先に述べた吸気筋の緊張を緩めると、肺と胸郭の「弾性復元力」のため、肺内の空気は急速に呼出される。またそのほかにも、肋軟骨のよじれが戻ろうとする「ねじれの復元」と、拳上した肋骨を下げようとする「重力」の作用も働く。人間が無意識の呼吸で行っている安静呼気では、出て行く空気の量は少なく、一回の呼吸において全肺気量の約7%しか出入りしていない。

また、発話時においては、安静呼気とは異なり、より吸気筋の作用を強め、そして無意識のうちに行っていた呼吸を、意識的にコントロールする。また、吸気に使う時間もより短くなり、呼気の時間的な割合を増やす。また、歌唱時においては、呼気における能動的な力だけでは不十分であり、持続的で能動的な呼気調節が必要となる。最初のうちは吸気筋を使い、一定以上の呼気を使うと、呼気筋の力を使う。吸気筋は、呼気を歌唱に必要な容量をゆっくりと呼出するために作用し、呼気筋は、弾性復元力によって胸郭の容量がもとに戻ったあとも、さらに容量を縮めて呼気を続けるために働くのである。呼気と吸気の力が等しくなる肺気量のことを機能的残気量 FRC (functional residual capacity) と呼び、肺がこの FRC から外れて拡大または縮小をすると、先に述べた作用によって元の状態に戻ろうとする受動的な力が働く。

### 3.2. 歌唱における呼吸

現在の声楽教育や発声指導においては、「腹式呼吸」という言葉を代表に、呼吸の方法が大きく歌声に関わっているとされている。「歌唱時に側腹部を広げたまま維持するべきである」「横隔膜を上方に押し上げるように歌唱すべきである」反対に「横隔膜を下方に押し下げて歌うべきである」など、人間の生理的な作用と、イメージがかけ合わさった表現を用いられることが多く、いずれの表現も、歌唱時におけるブレスコントロールの重要性を指摘している。

しかし一方で、リードのベル・カントの研究によると、当時の声楽教師たちの見解は「呼吸作法というのは、根本的な発声の原理が確立されると、自然にそれと活動を共にするものだ。」(1984:168)と考えられていた。そのため、当時の声楽教師たちは呼吸の仕方に特別な追及をしていなかったのである。また歌唱時における呼吸法の研究では、腹壁を外側に広げる方法を「ベリアアウト」、内側にへこます方法を「ベリアイン」と呼び、両方の場合における呼吸器官の動作を観測することによって、どちらが歌唱にとって適切な方法であるかを検証する実験がされている。

「腹式呼吸」に対して、悪い意味で使われて来た「胸式呼吸」という言葉がある。「胸で息は

吸ってはいけない」などという指導はよく耳にするが、実際は歌唱において胸郭は積極的に参加している。このように歌唱における呼吸法には、様々な見解があり、さらなる研究の必要性が窺えるが、本論文において、呼吸法の是非をこれ以上言及することはしない。しかし少なくとも、先述したように歌唱には安定した呼気の供給が必要であり、それを可能にするためには、受動的な安静呼吸とは異なり、持続的で能動的な呼吸調節が必要となる。

実際に、歌い手の一回の呼吸における歌唱時間は長く、最近の研究ではFRC値の5～10%の肺気までを使用していることが判明している。つまり、歌い手はより肺を縮ませて呼気圧を保つ必要に迫られるのである。また安定した呼吸を実現するためには、呼気時において呼気筋と同時に吸気筋を使わなくてはならないと述べたが、その点については声楽教師であるフースラーも横隔膜は歌唱呼吸のときも、その固有の傾向、すなわち吸気傾向を捨てない(1984:48)と述べており、歌唱には呼気筋と吸気筋の協力が必要であり、高度な呼吸調節が必要であるということが窺える。

### 3.3. 声帯

声帯は人間の喉頭の中にある甲状軟骨の内部にあり、前後方向に走る弾力に富んだ組織で、筋肉、靭帯および粘膜からできている(図3)。

声帯自体の弾性や張力は変化させることが可能であり、その厚みや長さの形状も変化させることができる。二枚の声帯は左右方向に開閉し、その度合いも調整することが可能であり、甲状軟骨自体を上下に動かすことによって、声帯も上下方向に移動させることができる。この声帯の様々な動きによって、声の大きさ、高さ、そしてその音色などを変化させることができるのである。呼吸時には、声帯は左右方向に開いており、呼気と吸気が通過するだけである。この左右に開いた声帯の隙間を声門と呼ぶ。声門が中心に向かって閉じている時に、肺から出た呼気が声帯を通過すると、声帯は呼気圧の空気力学的な要因によって開き、次に声帯そのものの弾性と、声門を空気が通過する時の吸引力によって閉じることを繰り返し振動する。この振動を声帯振動と呼ぶ。先に述べた声門を空気が通過する時の吸引力はベルヌーイ現象と呼ばれる。ベルヌーイ現象とは、ある物質が狭いところを通過すると、その物質の速さは増し、また周りの物質との圧力の変化により吸引力が働くのである。運転している自動車の横を、大

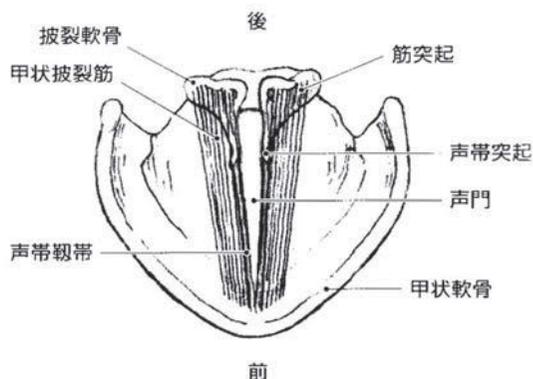


図3 上方から見た声帯  
(グロリアJ. ボーデン, 2004)

きなトラックが追い越してゆくと、トラックの方向へ自動車が吸い寄せられるのもこの原理と同じである。しかし、最近の研究では、声帯振動がこのベルヌーイ現象だけではなく、別の力も作用しているのではないかという見解もある。

また、物質が振動すると音になることは周知の事実だが、先に述べた声帯振動が声を生み出すのである。声帯は、開いて呼気が流れる相と声帯が閉じて呼气流が堰き止められる相が交互に訪れることで、声門の上に気圧の疎密の状態が交互に存在し、この疎密波こそが音の物理的実態である。これを「喉頭音源」と呼ぶ。喉頭で生じた疎密波はその後声道を伝わり、この過程で必ず声道の共鳴を反映した変形を受け、大気中に放射される。この大気中に放射された音が我々の耳に到達し、音声として知覚される。

### 3.4. 声門下圧

歌唱時における呼吸の重要性と、声帯振動について先述したが、ではなぜ歌唱には安定した呼気が必要なのであろうか。それは呼気によって生まれる声帯の下部の圧力、すなわち声門下圧が、声帯振動に大きく関わっているからである。まず、呼気によって声門下圧が上昇すると、声門が押し開かれる。その瞬間にまた声門は吸引力によって閉じ、気流は止まる。

この繰り返しにより、声帯振動が起こるのだが、この必要条件として声門下圧が声門上圧よりも高くなければならない。声門下圧と声門上圧が平衡に達すると、声帯振動は止まってしまうのである。発声の周波数は喉頭筋と声門下圧の両方によって決定される。また、声門下圧は声の大きさに関係し、一般的に声門下圧が高まると、声の大きさは大きくなる。また、声門下圧は、歌声のピッチにも大きく関係している。ピッチ自体は、声帯の長さ、張力に依存するが、一般的には声が高くなるにつれて声門下圧も上昇するとされている。しかし訓練された歌い手では、その差が少なく、声門下圧を制御することによって、歌声の大きさやピッチをコントロールしていると思われる。

また、音楽教育や発声指導においては「声帯を鳴らす」「声の鳴り」などという表現で、喉頭筋と声門下圧についての、技術的なアプローチがなされている。フースラーは声の出し始めのことを「アインザッツ (Einsatz)」(1987:98)と呼び、声の出し始めは声帯を傷つけない方法で行われるべきだと述べている。間違った発声指導でよくありがちなものは、声を出し始める前に、ぴったりと寄せ合った声帯の下に、空気をせき止める「声門打撃」という方法や、反対に声門を開きすぎる「気息的」な方法があり、どちらも偏った方法で、推奨すべきではないとしている。科学的な見地から言及するならば、発声には喉頭筋と声門下圧のバランスが重要であると言える。

### 3.5. 声道

声道とは、声門から口唇までの喉頭より上方にある空間のことを示す。その中でも主だった

空間は、咽頭、口腔であり、そして場合によっては鼻腔が含まれる。また喉頭腔や、気管内の空間も声道の一部として考えられている（図4）。

咽頭は声道の奥の方の部分で、筋肉で覆われた管でできている。口腔は私たちが自分の目で観察することができ、口腔の奥の上方に軟口蓋がある。軟口蓋を挙上させると、鼻腔への連絡が閉ざされ、垂下させると口腔と鼻腔が繋がる。また、口腔の中には舌が存在する。舌は筋肉のかたまりで、3次元的な動きをすることかできる。また、舌は外から観察できる部分は、一部分で、実際は舌根と呼ばれる咽頭の奥の部分まで繋がっている。また口唇は、声道の一番外側の部分であり、後述する声道の共鳴特性に重要な役割を担っている。

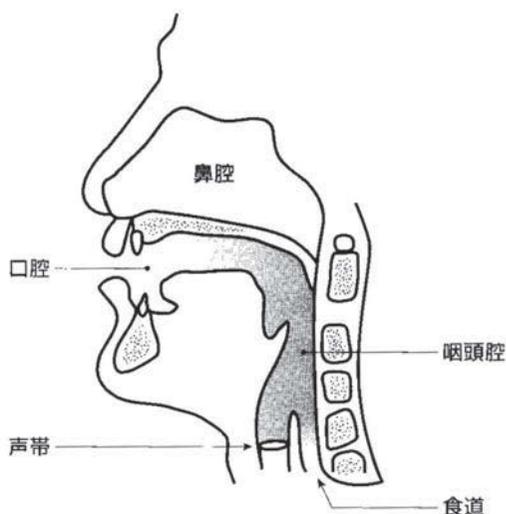


図4 声道の断面  
(グロリア J. ボーデン, 2004)

#### 4. ソース・フィルター理論

(Source-filter Theory)

発声器官は呼吸器官、声帯、声道の3つの単位で構成されている（スンドベリ 2007:9）。呼吸器官である肺から出た空気が、声帯の声門を通過することにより、喉頭音源（voice source）になり、その喉頭音源が声道によって調音され音声となる。スンドベリは呼吸器を圧縮機、声帯を発振器、声道を共鳴機

という工学的な概念に置き換えて、それぞれ独立した器官を、その機能で考えることにより音声の発生の仕組みを説明している。（図5）

このような実体を音源とフィルターの2つの要素によって構成されるとモデル化できるとする理論のことを「ソース・フィルター理

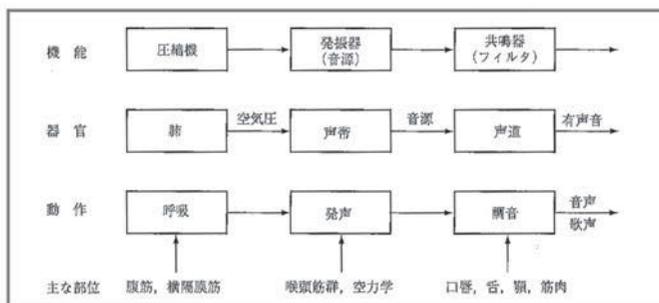


図5 呼吸器官は加圧状態の空気を供給するコンプレッサとして働く。発声器官は声門を通過する空気流を音源となる空気のパルス列へと変換する発振器として動作する声帯からなる。声道は共鳴器として動作する。（スンドベリ, 2007）

論」という。

先述したように、歌声は、声帯で作られる喉頭音源が、声道（喉頭腔と咽頭腔）によるフィルターを通過することによって作られる。声帯の振動によって発生する喉頭音源スペクトルに、声道の断面積から算出された声道伝達関数が掛け合わされることにより、歌声のスペクトルが作られる。簡略化した図を(図6)に示す。

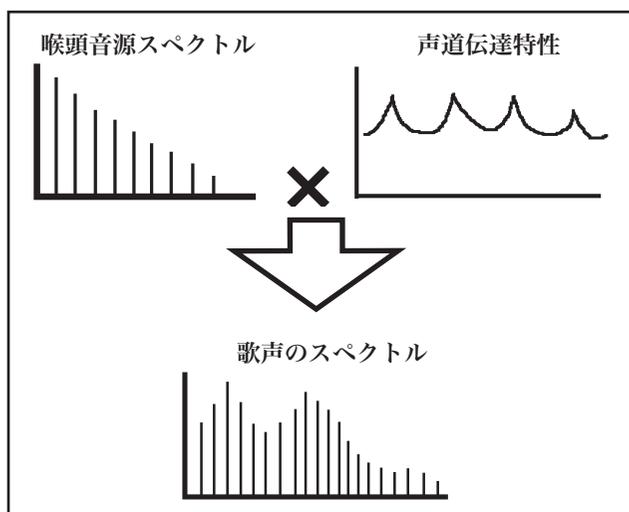


図6 声帯から発信された喉頭音源スペクトルは、声道伝達特性によって調音され、歌声のスペクトルになる。

声道は声門から口唇までの喉頭より上方にある空間のこ

とを指し、一端のみが開口した管として考えられ、その共鳴は閉管の共鳴と考えられている。普通の管とは異なり、表面は粘膜で覆われ、その断面積も口腔の開閉具合や、舌の形によって様々に変化する。声道の形状は、声の音色を決定づけるものであり、声道の形状の変化に伴って、共鳴管の共振特性が変化し、そのために周波数スペクトルが変化する。また実際には、喉頭音源と声道の共鳴という2要素に加えて放射特性が関わる。

喉頭音源は、声帯の厚さや張力などの要因によって変化する。声帯の張力や厚みなどの物理特性が変化することで、呼気圧によって励振する声帯振動の基本周波数が変化し、これが声の高さの変化を引き起こす。声帯が引き伸ばされて薄くなり、張力が高まると喉頭音源の周波数は高くなり、反対に短く分厚くなると、喉頭音源の周波数は低くなる。喉頭音源が高くなると、実際の声も高くなり、低くなると声も低くなるのである。

例えるなら弦と同じ原理であり、細くて張力の高い弦は高い音が鳴り、太くて張力の低い弦は低い音になる。また、声帯は肺から供給される呼気圧を受けて振動する様式が変わり、振動の周期を変えることに繋がる。

声帯は肺から供給された呼気によって声門下圧という力を受ける。呼気の圧力が強まるか、あるいは声門の閉じる力が強まると、声門下圧も上昇する。声門下圧が上昇すると、声の大きさや、高さも上昇する。スンドベリの研究において、声門下圧と声の大きさや高さとの比例関係は証明されている。しかし訓練された歌手では、一定の歌声の大きさで上昇する音階を、呼気の気流量をほとんど増加させることなく歌い、逆にこの状況で、呼気の気流量が減少することも観察されている。

## 5. 母音の生成

異なる母音を発話する際には舌（前舌、後舌、上舌、下舌）の位置が変わる。それは声道の形状が変わることを意味し、その形状の変化は声道断面積関数として記述可能であり、それに従った管を作ることによって母音の区別に必要な音響変化を算出することができる。つまり、母音の音韻性や音質は、声道のフォルマントと周波数によって決定されるのである。先述したように歌声を音響的に分析すると、フォルマント（Formant）と呼ばれる周波数群が存在する。それらを低い方から第1フォルマント、第2フォルマントと呼んでいくのだが、この第1フォルマントと第2フォルマントが、母音を生成するために重要な要因となる。

声道とは声門から口唇までの喉頭より上部にある空間のことであると先述したが、母音の種類に関わる部分は、主に口唇に近い側の声道の断面積と咽頭腔の断面積、つまり口腔内の面積と舌の位置の関係で決定されている。母音が変わるということは、声道断面関数が変わることであり、声道自体の物理的な変化を意味する。このような音響管の形状の変化が声道伝達関数の変化を引き起こし、喉頭音源に対してフォルマントの異なる組合せを生じるわけである。

これらの物理的な変化はお互いに影響を受け、それに伴う喉頭の位置や、声道の形状の変化が、第1フォルマントと第2フォルマントの変化に影響するのである。（図7）

スンドベリの研究から第1フォルマントは、主に顎の開きの変化によって決定され、第2フォルマントは、舌の形状の変化に大きく影響している（2007:99）とされている。例えば、口を縦に開いて舌の形状を低い位置で平らにして声を発すると、「ア」という母音になる。これは、第1フォルマントが800Hz

付近にピークを持ち、第2フォルマントは1000Hzにピークを持つようになることから、「ア」という母音になる。次に、舌を高い位置にし、顎を比較的閉じて、咽頭を広げるように声を発すると、第1フォルマントは300Hz付近にピークを持ち、第2フォルマントのピークは2500Hzまでピークが上昇する。この第1フォルマントと第2フォルマントの関係が「イ」という母音を生成する。具体的なフォルマントのピークの周波

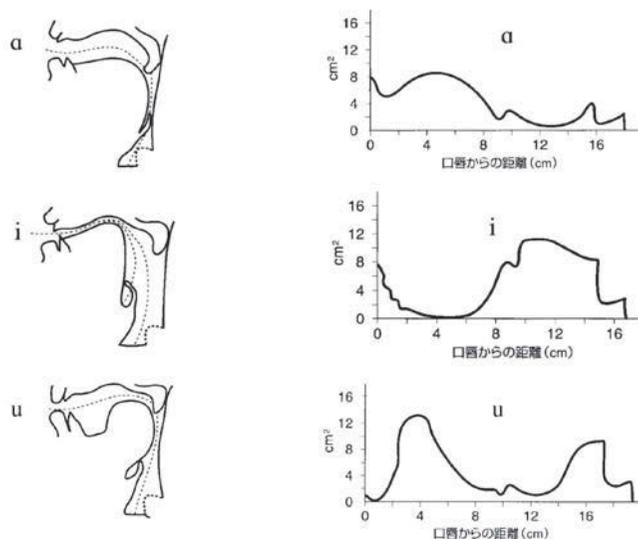


図7 「ア」「イ」「ウ」における声道の形状と声道断面積  
（グロリアJ. ボーデン, 2004）

数域には個人差があるが、概ね（図8）のようなフォルマントの関係性によって母音が決定される。

## 6. 歌い手のフォルマントの研究 と課題

これまで、歌声やSFに関する基礎的な理論について述べ、各項において行われている過去の研究や最近の研究を紹介してきた。この項では、さらに近年盛んに行われている歌声やSFにおける研究について報告し、そこから見えてくる課題について論じる。

先述したように、科学技術の発展によって、人間の発声器官や音声、また音を聞くための聴覚などの研究が進展し、より正確で精密な研究がなされるに至っている。それに加えて、音声の加工・合成技術についての研究も注目されており、歌声を中心としたメディアコンテンツの普及に大きな発展をもたらしている。では、SFに関する研究はどうだろうか。先行研究において、SFを含む高域スペクトルが、個性に寄与していると言うことは示されている。また、話声と歌声を判別する要因として、3kHzにおけるフォルマントのピークであるSFや、声の揺れであるヴィブラートが、歌声として知覚するための要因になっていると言うことは分かっている。斎藤、後藤（2009）らの研究では、歌唱指導によって、3kHz付近のフォルマントピークが高まり、ヴィブラートが変化するという結果を示した。少なくとも、この二つの要因は歌唱技術に関わっていると言える。しかし、SF自体が歌唱技術にどのように関わっているのかと言う研究はまだ少ない。国内外の先行研究において、SFの存在が理想的な声質、とりわけクラシック音楽におけるベル・カント唱法の豊かな声質に必要な音響特性であるという研究はなされている。しかし、先行研究によって見出されたSFの存在は、歌唱全体の長時間スペクトルの形状から観測されたものだけであり、SFの生起や特性の時間的なふるまいについては、未だ十分に調査されていないのが現状である。例えば、楽曲の中には、歌詞や旋律が存在し、それに伴い歌い手は、母音や音高を変化させてゆく。しかしその瞬間において、SFがどのように存在し、関わっているのかと言うことはわかっていない。つまり、全体を通せばSFと言う存在は確認できるが、具体的な歌唱技術にSFがどのように関係しているのかは、まだ十分に解明されていないのである。さらなる研究によって、このSFの生起や特性の時間的なふるまいが解明されれば、SFが歌唱技術にどのように関わっているのかと言う疑問

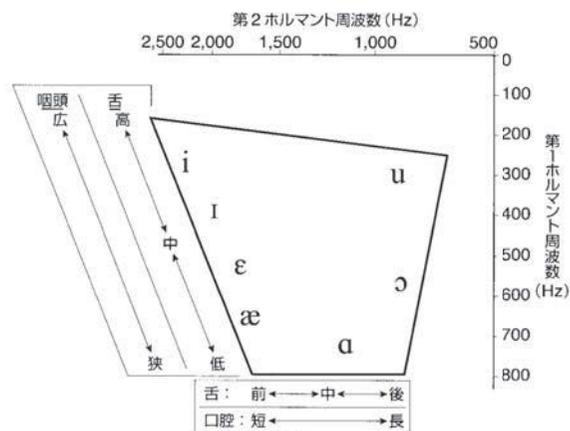


図8 様々な母音についての舌の位置と、声道の大きさ、第1、第2フォルマント周波数との相関関係図  
(グロリアJ. ボーデン, 2004)

に答を見い出すことができ、歌唱における演奏技能の解明にもつながるであろう。

#### 引用文献

- 今泉敏, 2007『言語聴覚士のための音響学』東京: 医歯薬出版株式会社
- 北村達也, 2009「情動による声道形状変化のMRI観察」『日本音声学会全国大会予稿集』45-50.
- 斎藤毅, 辻直也, 鶴木祐史, 赤木正人, 2004「歌声らしさに影響を与える音響特徴を考慮した話声からの歌声合成法」『信学技術』30: 1-6.
- 斎藤毅, 辻直也, 鶴木祐史, 赤木正人, 2008「歌声らしさの知覚モデルに基づいた歌声特有の音響特徴量の分析」『日本音響学会誌』64巻5号: 267-277.
- 斎藤毅, 後藤真孝, 2009「歌唱指導による音響特徴の変化とその歌唱力評価への影響」『信学技術』109巻100号: 2-6.
- スンドベリ, ヨハン 2007『歌声の科学』榊原健一, 伊藤みか, 小西知子, 林良子訳, 東京: 東京電気大学出版局 (Sundberg, J, 1987. *The Science of The Singing Voice*. Illinois: Northern Illinois University Press.)
- フースラー, フレデリック, イヴォンス. ロッド=マーリング 1987『うたうこと』須永義雄, 大熊文子訳, 東京: 音楽之友社 (Husler, F. & Marling, Yvonne R. 1965. *Die physische Natur des Stimmorganes-Anleitung zum Aufschliessen der Singstimme*. Mainz: B. Schott's Söhne.)
- ボーデン, グロリア J., キャサリン S. ハリス, ローレンス J. ラファエル 2004『新 言葉の科学入門 第2版』廣瀬肇訳, 東京: 医学書院 (Borden, Gloria J., Harris, Katherine S. & Raphael, Lawrence J. 2007. *Speech Science Primer-Physiology Acoustics and Perception of Speech 5th ed.* USA: Lippincott Williams & Wilkins Inc.)
- 水谷彰良, 2006「ベル・カントの歴史様式とその解釈」『日本音楽発声学会誌』34号: 33-43.
- リード, コーネリウス・L 1987『ベル・カント唱法その原理と実践』渡辺東吾訳, 東京: 音楽之友社 (Reid, Cornelius L. 1950. *Bel Canto: Principles and Practices*. New York: Joseph Patelson Music House.)

#### 参考文献

- Herbert, Caesari E. 1951. *The Voice of the Mind*. England: Robert Hale Limited (E. ハーバート - チェザリー, 2001『The VOICE of the MIND』森下弓子訳, 東京: 株式会社ワニブックス)
- 河原英紀, 片寄晴弘, 2006「高品質音声分析変換システム STRAIGHT を用いたスキヤット生成研究の提案」『情報処理学会論文誌』43巻2号: 208-218.

- 北村達也, 2007 「物真似タレントによる物真似音声の分析」『信学技術』107 巻 282 号 : 49-54.
- 北村達也, 2014 「歌声の科学にあたって」『日本音響学会誌』70 巻 9 号 : 497-498.
- 北村達也, 斎藤毅, 2007 「単母音の特徴量の変化が個人性知覚に与える影響」『信学技術』106 巻 613 号 : 43-48.
- 北村達也, 斎藤毅, 2007 「3 連続母音に含まれる個人性知覚に寄与する音響特徴量」『信学技術』106 巻 613 号 : 37-42.
- 北村達也, 竹本浩典, 足立整治, パーハム・モクタリ, 本多清志, 2006 「声帯振動に伴う喉頭腔共鳴の周期性」『信学技術』106 巻 178 号 : 43-48.
- 斎藤毅, 鷗木祐史, 赤木正人, 2005 「自然性の高い歌声合成のためのヴィブラート変調周波数の制御法の検討」『電子情報通信学会』105 巻 291 号 : 13-18.
- 竹本浩典, 北村達也, パーハムモクタリ, 足立整治, 本多清志, 2007 「声門開放時の声道共鳴特性」『電子情報通信学会』106 巻 613 号 : 31-36.
- 吉田友敬, 2005 『言語聴覚士の音響学入門』東京 : 海文堂出版株式会社

