

平成 21 年 5 月 12 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18500134

研究課題名（和文） ヴォーカル・パフォーマンスにおける芸術表現と生体音響学

研究課題名（英文） Vocal performance as a way of artistic expression and its biological acoustics

研究代表者

鎌木 時彦 (KABURAGI TOKIHIKO)

九州大学・大学院芸術工学研究院・准教授

研究者番号：30325568

研究成果の概要：本課題では、音による人間の言語・感性コミュニケーションをヴォーカル・パフォーマンスと呼び、芸術工学の視点からその機能を特定し、さらに人間の生体音響学的な原理を明らかにするための研究を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,700,000	0	1,700,000
2007 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	510,000	3,910,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：ヴォーカル・パフォーマンス、言語、音声、感性、生体音響学

## 1. 研究開始当初の背景

人工知能や情報処理工学は、言語的対象を出発点として、さらに感性のようにより複合的なものの理解・表現へと対象を拡大してきた。同時に、工学的設計においても、人間の感覚特性に立脚したユーザー・サイエンスの重要性が認識されている。人間は、言語情報を受容するとともに外部へ発信する。感性に

についても同様に、感覚的な側面とともに、芸術のように美意識に基づいて能動表現する側面がある。しかしながら、受動的な感覚特性が心理学・生理学的手法によって多面的に研究されているのに対して、感性の能動的な側面が研究対象として十分に認知されているとはいえない。そこで我々は、発声、歌唱、楽器の演奏といった音によるパフォーマン

スを対象として、その中に発見される人間の感性表現の問題に取り組むこととした。問題を定量的に扱うため、我々が特に注目するのは、これらの感性表現における身体、すなわち生物学的システムの機能や制約についてである。

## 2. 研究の目的

生体の機能研究は、従来、医学ないし人間工学的観点からなされてきた。近年では、音声対話、感情表現、楽器演奏などの機能を表層的に模擬するヒューマノイド研究が盛んであるが、人間の生体機能や感性表現との関連は間接的である。その意味で、音声や音楽など、情動的観点からの生体機能の解明は、まだ十分に進んでいるとはいえない。ここでは、発声や歌唱のように、呼吸系(肺、声帯、口)によって実現される人間の情報発信行為を、「ヴォーカル・パフォーマンス」と呼ぶ。本研究の目的は、この「ヴォーカル・パフォーマンス」と生体とのかかわりを、芸術表現の実践と科学的な機能解明の両面から協調的に明らかにすることである。

もともと、歌唱というヴォーカル・パフォーマンスは音声言語から派生したものであるが、そのとき、さまざまな民族が固有にもつ身体性や継承された文化的な文脈のなかで、その生体機能が最大限に活用されている。すなわち、「声」がもつ固有性や言語活動に関わるさまざまな発語行為が、ダイレクトに歌唱のスタイルに反映されているのである。そのなかでも、モンゴルにおける「ホーメイ」や日本における「声明」は、際立った歌唱のスタイルを確立しているが、まさに、このような独特な歌唱法のなかに、われわれの日常的な言語活動を超えた生体学的な機能を見出すことができる。

このような「ホーメイ」や「声明」を特異なヴォーカル・パフォーマンスとして位置づけ、それらの発声のメカニズムを明らかにすることによって、生体機能のあらたな可能性を探るとともに、芸術的な表現法を提案することができる。つまり、異なる民族や文化圏のなかで、これまで継承されてきた「声の力」を科学的な視点から解明しながら、身体的な表現を統合しているともいえるこのような「声」がもつ感性的な側面を取り入れた発声モデルを構築し、さらに、この発声モデルを大胆に組み入れたあらたな芸術的アプロ

チを試みる。このように、人間が本来もっている情報発信行為としての「声」という存在に対して、科学的な観点・方法論と実験的な芸術表現とを融合させることによって、人間の感性や身体に潜在する創造力・創出力が明らかにされると期待される。

## 3. 研究の方法

音声、歌唱、楽器演奏を含む発声メカニズムの科学的解明には、声帯の発振・発音メカニズムや、声道(喉頭腔、咽頭腔、口腔、鼻腔の総称)の共鳴作用を明らかにすることが必要である。声道の共鳴作用は、音声はいうまでもなく、管楽器の演奏で唇やリードの発振を得る上で必須である。また、ホーメイや声明では、声道のダイナミックな共鳴特性の変化がその固有な歌唱技法に応用されている。そこで、ヴォーカル・パフォーマンスにおける発声器官のダイナミックな状態変化を観測し、その音響的な効果を定量的に明らかにする必要がある。ここでは、この問題に対して、人間の発声状態の観測や、発声ダイナミクスの計算機シミュレーションにより、総合的に研究をおこなう。

発声状態の観測については、MRIを用いた発声器官の3次元形状解析や、発声状態のダイナミックな観測を目的とした3次元磁気センサシステムの開発をおこなう。本システムは、発声器官に装着した小型コイルの位置を連続的に高精度観測するものである。発声の計算機シミュレーションにおいては、肺からの呼気流体の挙動、声帯の弾性振動、声道の音響共鳴作用をモデル表現し、地声、ファルセット、だみ声、歌唱などの声質表現における物理的機構を明らかにする。以上のようにして、ヴォーカル・パフォーマンスにおける感性表現について科学的な解釈を与え、さらに新しい表現方法を探究することが、本研究の最終的な目的である。

## 4. 研究成果

### (1) 発声の物理モデルの構築(主担当: 鍋木) ・ 声門流の1次元解析

声質、個人性、年齢差など、有声音の音源波の特性に関連した音声特徴は多種存在する。それらの生起要因を音源波生成の物理的過程を通して理解するためには、声帯の弾性体表現とともに、呼気流の振る舞いに関する精緻な表現を得る必要がある。本研究では、

境界層近似による流れの剥離位置の推定に加え、粘性流である境界層と非粘性で見なすことのできる主流の相互作用を考慮した1次元流れモデルを検討し、流れの数値計算を通して有効性を定量的に検証した。

声門流とは、高レイノルズ数の流れが気道の狭窄において噴流を生じる現象である。従って、その流れは境界層近似に従った一定の構造的性を有する。声門流の解析においては、この構造的性に注目することによって、よりコンパクトで物理的な意味が明確な知見を得ることができる。以下では、声門流に非圧縮、準定常の仮定をおき、粘性領域である境界層の解析法、非粘性と見なされる主流の1次元表現について述べ、さらに境界層と主流の相互作用を考慮した方法を示す。

主流の領域では、流れは基本的に非粘性であると見なすことができる。従って、声門の流量  $Ug$  が与えられれば、流速は流量を声門面積  $S$  で割ることで  $v=Ug/S$  として計算できる。しかし、声門面積の実効的な値は、幾何学的な声門幅から境界層の厚さを排除して求められる。

一方、境界層における流れでは、空気の粘性の影響が顕著に現れ、例えば壁面における流速は粘着条件により零となる。2次元、定常な境界層の支配方程式としてカルマンの運動量方程式が知られており、その数値解析法についても理解が進んでいる。ここでは、流速の相似性を仮定するポールハウゼンの方法を基として、さらに流速分布にハートリー分布を使用する。

しかしながら、カルマンの運動量方程式の境界条件は、境界層外縁の主流速度によって与えられる。以上の考察により、非粘性の主流と粘性流である境界層とは、相互に依存関係にある。従って、主流と境界層の方程式は連成させる必要がある。これは、非線形の連立方程式となるが、ニュートン法などの非線形計画法の利用によって、数値解を得ることができる。本法による声門流の1次元解析結果を、声門模型を使用した流体計測値と比較したところ、流量や圧力分布の予測誤差は数パーセント程度であり、本法の有効性が定量的に示された。

#### 声門流の2次元解析

声門では、気管から声門の狭めによって流路の幅が急速に狭められる。従って、その流

路内の流れは本来2次元である。上記のカルマンの運動量方程式は、もともと2次元の次元性を持っているため、主流のポテンシャル流解析を2次元に行うことができれば、2次元の声門流解析法を確立できると期待できる。そこで本研究では、主流の解析法として等角写像を利用し、この問題について検討した。

2次元のポテンシャル流れについては、座標系や流速を複素数として表すことで、複素解析の方法を利用できる。とくに、流速のポテンシャル関数とともに流れの関数を用いることで、2次元流れに対して複素速度ポテンシャルを定義することができる。等角写像では、任意の声門形状に節点を配置して、これを折れ線で近似する。さらに、一様流の複素速度ポテンシャルが既知である標準領域と、実際の声門を表す物理領域とについて、両者を結ぶ写像関数を求めることで、主流の2次元解析が可能となる。

2次元の主流解析と境界層解析を組み合わせ、対称な声門における声門流の数値計算を行った。その結果、得られる流量や圧力分布は、1次元解析による結果とほぼ同じであることがわかった。これは、声門流は、基本的に1次元であることを意味している。その理由としては、気管から声門のせばめにいたる区間では、流路の面積が大きく、流速が小さいため、2次元を1次元で近似しても誤差が無視できること、また、声門の狭めでは、境界層の発達によって流路形状が1次元に近づくことが考えられる。

今後は、病理的発声などにおいて顕著となる、左右の声帯振動の非対称に起因した、非対称な声門流路について、本研究で構築した2次元の流れ解析法を適用し、より幅広い発声のメカニズムについて検討を進める予定である。

#### 声帯の弾性体モデル

以上で述べた境界層解析によって、声門を通過する流れの特性を、流れの剥離位置や境界層の発達を考慮しつつ、きわめて高精度に解析することが可能となった。声帯振動による音波の発生は、本質的に、声門を通過する流量の時間変化によってもたらされる。従って、呼気の圧力によって自励振動する声帯の機械モデルを検討することが必要である。

声帯の機械モデルに関しては、その特性を

数個の質量とバネ、ダンパーから成る線形振動系で表す方法が検討されているが、声帯の組織は本質的に連続体である。そこで、本研究では、連続体の線形な運動方程式を基として、さらに声帯の異方性を考慮した2次元の粘弾性運動方程式を導出し、連続体の数値解析法の一つである粒子法を用いて、声帯振動を計算することを試みた。

声帯を構成している靭帯や筋肉は、声帯の長さ方向に組織が走行している。従って、声帯は等方性弾性体ではなく、声帯の長さ方向に異方性を考慮することが適当である。なお、声帯の長さ方向に直交する断面では、等方性が成り立つと仮定する。さらに、声帯の長さ方向の変位を無視することで2次元運動方程式を得るとともに、声帯内部の粘性損失を表現する項を導入した。

肺圧一定のもとで、前述の流れの境界層解析によって流量と圧力分布を求め、得られた圧力を声帯の駆動力とし、声帯の運動方程式を解いた。運動方程式の数値解法としては、声帯を有限個数の粒子で表す粒子法を適用した。この粒子法では、常微分方程式である運動方程式が、粒子間の依存性を表す差分方程式の集合に置き換えられる。この連立差分方程式の数値計算においては、パソコンのGPUを使用した並列計算が有効であることを確かめた。

以上の声門流解析と声帯機械モデルを組み合わせることによって、適切に与えられた肺圧と声帯組織の物性値より、柔軟でかつ物理的にきわめて正確な発声モデルの構築を達成した。

## (2) 発声過程の高精度観測システムの構築 (主担当：若宮)

ヴォーカル・パフォーマンスにおける発声器官のダイナミックな状態の高精度な観測を行うために、発声器官の位置を連続的に観測可能な3次元磁気センサシステムの位置推定精度の向上と、較正法の検討を行った。

磁気センサシステムにおいて送信コイルにより生成される交流磁界を表現ために、これまで、送信コイルの大きさを無視した遠方場の磁気双極子モデルを用いる方法が使われてきた。このモデルは、送信コイルと受信コイルの間の距離が、送信コイルの大きさに比べて十分に大きいという仮定の下で有効である。また、磁界中の多数の位置に受信コイル

を配置し、それらの磁界強度データをスプライン補間する方法も検討されているが、校正用の磁界データ計測に多大な時間を要するという問題があった。

我々は、この磁気センサシステムの磁界表現の問題に対して、磁界強度の空間的パターンを、送信コイルの大きさを考慮した近接場の磁気双極子モデルを用いて表現する方法を開発した。このモデルでは、送信コイルの軸の両端に、互いに極性の異なる磁荷が配置されると考えることで、送信コイルの大きさを考慮できる。一方、受信コイルは実際に非常に小さいため、大きさを持たない点と見なす。本法の磁界モデルに含まれるパラメータは、スカラ量のゲイン項のみである。従って、スプライン補間によって磁界強度関数を表す方法に比べて、あらかじめ校正すべきパラメータの数が極めて少なくて済む。

受信コイルの位置での磁界強度は、送信コイルの両端位置での磁荷の大きさと、これらの両端位置に対する受信コイルの相対位置によって表される。受信コイルの位置および向きを推定する値は、受信コイルの位置と磁界の向きに対する傾きを未知変数として、受信コイルに誘導される信号強度を予測し、この信号強度の予測値と実測された信号強度間の誤差が最小とすることで得られる。

また、システムの校正においては、受信コイルを既知の位置に配置し、ゲイン項の校正を行う。この際、実際的な問題として、小型の受信コイルを所望の位置と向きに正確に配置することは、非常に困難である。そこで、我々は、ゲインパラメータに加えて較正時の受信コイルの位置と向きを未知変数とし、それらを同時推定する較正法を検討した。摂動実験によって本法の検証を行った結果、従来法では、摂動量約10mmの場合に得られたゲインをもとに位置推定を行った場合、位置推定誤差が平均約5.6mmであったのに対し、本法を用いることで、摂動の影響を受けずにゲインパラメータを正確に求めることができ、位置推定誤差が平均約0.2mmとなった。

## (3) 管楽器吹奏における声道の音響的役割 (主担当：鍋木)

トランペットなどの金管楽器の吹奏においては、音程に応じて声道の形状を調整することが知られている。我々は、このような声道調整の効果が音響レベルにおいて存在す

るものと考え、その意味を客観的に調べる検討を行った。

まず、トランペット吹奏時の声道形状を観測するため、プロ2名、アマチュア2名の奏者に対して、MRI（磁気共鳴画像法）による声道の3次元観測を行った。その結果、音高が上がるに従って、舌の位置が口腔の前方に移動することが確認できた。

次に、MRIによる声道の3次元画像データを利用して、声道の断面積関数を画像処理によって求めた。得られた断面積関数を声道の音響管モデルに適用し、声道の伝達特性や、口唇から見た声道の入力インピーダンスなどを求めた。現在は、唇の振動を表す機械モデル、トランペットの音響管モデルなどを連結させ、声道の音響特性が吹奏音のスペクトルに与える影響を検討している段階である。

この他、ホーミー歌唱の音声データから声道断面積を推定する検討や、口笛を吹奏する際の声道形状のMRI計測などを行った。これらはまだ予備検討の段階にあり、今後、さらに研究を進展させて、倍音唱法における声道形状の制御メカニズムや、口笛における渦輪の発生と発音機構の同定などを行う予定である。

#### (4) ヴォーカル・パフォーマンスとしての「ホーメイ」のワークショップ実践（主担当：藤枝）

人間の音声メカニズムが活性化されて生み出されたさまざまな歌唱法のなかで、ロシア連邦トゥバ共和国に伝わる倍音唱法の「ホーメイ」は、もっとも特異な歌唱法のひとつである。この「ホーメイ」という歌唱法を実際に体験するワークショップがこのヴォーカル・パフォーマンスの研究の一環として、以下のように実施された。

講師：巻上公一（ホーメイ演奏家）

実施日・時間：2009年2月23日（月）

場所：九州大学大橋キャンパス・音響特殊棟録音スタジオ

講師の巻上公一氏は、長年、現地フィールド調査に基づく「ホーメイ」の歌唱研究とともに、日本では数少ない「ホーメイ」演奏家として活動している。今回の4時間あまりのワークショップでは、まず、声のウォーミングアップとして、巻上氏が発するさまざまな

奇異な声を参加者全員が模倣するという演習から始められた。この演習によって、通常の発声とはまったく異なる顔の筋肉や口腔内の活動を活性化させ、この奇異な発声活動がもたらすさまざまな音声の響きやその変容を体験する機会が与えられた。つまり、この奇異な発声を実践することによって、自らの身体に内在された発声メカニズムの多様性を意識し、さらに声をもつ表現の可能性の広がりを実感することができたのである。

このような発声の模倣演習に引き続いて、ホーメイの基本となる倍音唱法が紹介された。この演習では、いくつかの異なる母音を連続的にゆっくりと変化させることによって生じる倍音構成の要素の変容を自らの声のなかに聴き出すことできた。この母音の緩慢な移行のなかで、発音体である声帯からの振動が口腔の内部構造の微細な変容によって、どのような共鳴作用を得ることができるのかを、自らの音声の響きによって把握できるのである。母音の連続的な変化に浮上する倍音の変容がホーメイの歌唱法の初歩的な段階となっているが、この演習では、とくにこの音声メカニズムが実体験として強調された。そして、巻上氏によって、20種類以上にもおよびホーメイの歌唱法が実演された。そして、参加者全員によって、ホーメイの歌唱法の発声練習が反復的に実施された。

このようなホーメイの歌唱体験は、われわれがいかに限定された発声メカニズムのなかで発語活動を行っていたかを明らかにした。そして、人間が獲得した「声」という発信/発語行為の多様性や可能性を自らの身体との相互作用を通じて体験する場を、このホーメイのワークショップが提供したのである。そして、音声メカニズムのあらたな研究によって「ホーメイ」にみられるような固有の音声による芸術的な表現を解明することができるという確信を得た。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計7件)

- ・ Kaburagi Tokihiko、Tanabe Yosuke、Low-dimensional models of the glottal flow incorporating viscous-inviscid interaction、J. Acoust. Soc. Am.、125、391-404、2009、査読有
- ・ 鎭木時彦、正木信夫、元木邦俊、松崎博季、北村達也、音声生成過程の可視化、日本音響学会誌、64、412-417、2008、査読無
- ・ Kaburagi Tokihiko、On the viscous-inviscid interaction of the flow passing through the glottis、Acoustical Science and Technology、29、167-175、2008、査読有
- ・ 曲淵健太郎、田部洋祐、鎭木時彦、声門流における流れの剥離の影響に関する検討、日本音響学会誌、63、130-138、2007、査読有
- ・ Kaburagi Tokihiko、Kawai Kouji、Abe Shinya、Analysis of voice source characteristics using a constrained polynomial representation of voice source signals、J. Acoust. Soc. Am.、121、745-748、2007、査読有
- ・ Kaburagi Tokihiko、Kim Jiji、Generation of the vocal tract spectrum from the underlying articulatory mechanism、J. Acoust. Soc. Am.、121、456-468、2007、査読有
- ・ 田部洋祐、鎭木時彦、曲淵健太郎、声門流における境界層特性量の推定、日本音響学会誌、62、662-671、2006、査読有

### 〔学会発表〕(計7件)

- ・ 鎭木時彦、正木信夫、元木邦俊、松崎博季、北村達也、音声生成機構の可視化(招待講演)日本音響学会秋季研究発表会、2008年9月、福岡
- ・ Kaburagi Tokihiko、Fukutomi Yoshitaka、Physical simulation of phonation: A mesh-free approach、ICVPB2008、2008年8月、Tampere(Finland)
- ・ 鎭木時彦、田部洋祐、境界層近似に基づく声門流れの解析(招待講演)、日本音響学会秋季研究発表会講演論文集、2007年9月、甲府

- ・ Kaburagi Tokihiko、Tanabe Yosuke、A model of glottal flow incorporating viscous-inviscid interaction、Interspeech2007、2007年8月、Antwerp(Belgium)
- ・ Kaburagi Tokihiko、Nakajima Yoshitaka、Temporal structures of articulatory movements: A contrastive study of stop consonants in Japanese, Korean and Chinese、ASA and ASJ joint meeting、2006年12月、Honolulu
- ・ 鎭木時彦、音声の生成における口腔の音響的役割(招待講演)、日本矯正歯科学会、2006年9月、札幌
- ・ Tanabe Yosuke、Momozaki Kenichiro、Kaburagi Tokihiko、Glottal flow representation based on the boundary-layer assumption、ICVPB2006、2006年7月、東京都

### 〔図書〕(計1件)

- ・ 鎭木時彦、“第5章 音声における声門波の生成機構、”音源の流体音響学(音響テクノロジーシリーズ)、コロナ社(東京)、2007

### 〔産業財産権〕

#### 出願状況(計1件)

名称:磁気式3次元位置検出装置

発明者:廣谷定男、持田岳美、鎭木時彦、若宮幸平

権利者:廣谷定男

種類:特願

番号:2007-211804

出願年月日:平19年8月15日

国内外の別:国内

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

鎭木時彦(KABURAGI TOKIHIKO)

九州大学・大学院芸術工学研究院・准教授

研究者番号:30325568

### (2)研究分担者

藤枝 守(FUJIEDA MAMORU)

九州大学・大学院芸術工学研究院・教授

研究者番号:80346858

若宮 幸平(WAKAMIYA KOHEI)

九州大学・大学院芸術工学研究院・助教

研究者番号:70294999