

平成21年 5 月 1 日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19700382  
 研究課題名(和文) 声帯自励振動のメカニズムの解明とそれに基づいた声帯力学特性評価システムの開発  
 研究課題名(英文) Development of a vocal fold evaluation system based on the self-excitation mechanism  
 研究代表者  
 出口 真次 (SHINJI DEGUCHI)  
 東北大学・大学院医工学研究科・准教授  
 研究者番号：30379713

## 研究成果の概要：

声の音源を成す声帯の振動は、肺からの呼気流と声帯組織の変形とが相互作用した結果生じる複雑な力学現象である。本研究では、まずこの力学現象を定式化して、発声時に起こる力学現象の数値解析を行った。また、理論的取り組みにより、この声帯振動が発生するために必要な力学条件を解析的に導き出した。この導出された発声の力学条件は、声の中でもとりわけ裏声の状態を特に対象としており、裏声が生じるメカニズムを初めて明らかにすることができたと考えられる。続いて、この得られた発声条件の数式を利用した声帯力学特性評価システムを作製した。これは空気圧を外部から声帯に負荷して、その際の圧力変化から声帯の硬さを計測する方法である。発声時には声の高さと共に、声帯の力学特性あるいは硬さが変化していくと考えられるため、試作した本システムを用いて声帯の硬さを調べた。その結果、地声の範囲内で最も声帯が柔らかく、地声よりも低い、あるいは高い周波数領域において声帯が硬くなる傾向が得られた。このように声帯の力学特性を非侵襲的に検査・診断可能な新しい方法の有効性を示すと共に、本システムを用いると、声帯だけでなく、肺を含めた呼吸器系器官の力学特性をも計測可能であることを示唆するデータが得られた。以上のように、声帯の振動メカニズムの解明という基礎的問題から、声帯の力学特性の計測法の開発という応用志向の問題までを扱い、当初の研究目標を達成することができた。さらに、気道系全体を対象とした新しい診断方法の提案につながる成果が得られるなど、新しく、今後さらなる発展へとつながることが期待される知見も得ることができた。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	0	1,800,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	450,000	3,750,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用生体工学・生体材料学

キーワード：バイオメカニクス・生体医工学・流体構造連成問題・自励振動・医療機器

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は「声」の音源となる声帯の自励振動のメカニズムに着目していることが特徴である。生体組織である声帯の自励振動は、柔らかい声帯の変形（生理学・構造力学）と肺からの呼気流（流体力学）が相互作用した結果生じる複雑な非線形力学現象である。この現象の理解には流体・構造連成を考慮するための機械工学に加えて、生理学および解剖学的知識を必要とするバイオメカニクスの視点が不可欠である。申請者は声帯がどのような力学的条件において振動を始めるのかという根本的な問題に関心を持ち、これまで主として数値解析的に研究を行ってきた。本申請課題では (i)この基礎的問題の解決のために実験的かつ解析的に研究に取り組むと共に、(ii)得られた知見を臨床医療応用すべくオリジナルな非侵襲的声帯力学特性評価方法を提案し、その有効性の実証を目指す。特に後者(ii)の研究内容は、従来の耳鼻咽喉科学のアプローチだけでは得られない前者(i)の研究によるバイオメカニクスの声帯自励振動の研究に立脚している。従来の臨床では、病変による声帯の性質（力学特性）変化を検査する際、喉頭刺激反射を避けるために麻酔下で鉗子触診が行われ、患者と検査者にとって負担であった。従って、非接触で声帯検査を行うことができる本方法の開発は大変有意義である。声帯振動に関する研究では、国外では米国 Iowa 大学の Titze 教授が有名である（著書：Principles of voice production, Prentic-Hall, 1994）。しかし実際には高速で振動する流体を定常流と近似した研究内容が中心であり、力学的観点から見て必ずしも声帯自励振動という複雑な現象を十分に掘り下げているとは言えない。国内では、京大一色教授、久留米大平野教授、東大新見教授・廣瀬教授（著書：音声障害の臨床，インテルナ出版，2000）・鳥取大片岡博士が医学的観点を中心にして優れた業績を残してきた。力学的観点からは名大松崎教授（現名誉教授、申請者の元指導教官）が発声の過程に関する数値シミュレーションを行ってきた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は大きく分けて二つある。一つ目は、これまでに我々が行ってきた声帯振動の発生メカニズムに関する研究を発展させて、声帯自励振動の開始と停止のための力学条件を把握すること、また二つ目の目的は、最初の目的に対する研究で得られた知見を基に声帯自励振動の解析手法を考案し、これまでに我々が提案してその有効性を検討中の声帯検査システムに組み込むことである。さらに、この声帯検査システムの有効性と性能に関する評価実験を実施し、臨床応用への可能性を詳細に検討することを目的とする。

最初の課題では独自製作してきた声帯機械モデルを用いた実験を行う。声帯振動と同様の高振動数（100Hz以上）を発生することが可能な柔らかいゴム膜が、空気流と連成して自励振動を開始し、最終的に流量の低下に伴い振動が停止するまでの全過程における、(i)ゴム膜変形量、(ii)空気圧力、(iii)流量を同時に計測し、これらの相互関係を明らかにする。得られた実験結果を説明すべく、ゴム膜運動と空気流をモデル化して自励振動の条件を解析的に導出する。声帯検査方法の詳細は計画・方法欄にて述べるが、基本となる考え方は、あるコントロールされた値の空気圧を、振動中の声帯に与え、その際の声帯の応答を調べることにより声帯の硬さなど力学特性を得ることである。この方法を実現するための装置システムを試作し、性能評価試験を実施して、有効性を検討する。

声帯振動に着目して力学特性を非接触的に検査する方法は、科研費データベース、特許公報、および米国 NIH の PubMed を調査した限り見当たらず、本研究ではその方法を提案して詳細に有効性を研究する点に独創性と新規性がある。これは、我々がこれまで行ってきた声帯自励振動の基礎研究により着想され、実現可能と判断されたものである。声帯振動は流体・構造・生理学等が関与する境界領域問題であり、難しく、そのため振動開始と停止がなぜ起こるかなど基本メカニズムの詳細は十分に説明されていない。声帯振動の開始と停止の機序が分かると、どの程度の少ないエネルギーで自励振動を起こすことができ、かつその振動を持続させることができるのかということと密接な関係があるため、声帯疾患の治療指針や人工声帯の設計に役立てられる。従って声帯自励振動のメカニズムという発声現象における根本的・本質的課題の解決に取り組む点も本研究の特徴である。本研究の具体的に予想される結果として、本声帯力学特性評価システムで実測される物理量は口腔内圧および声帯振動の応答（音の振幅、基本振動数等）であり、これら測定量の関係だけでは声帯の硬さを充分には抽出しづらいものの、本研究前半の基礎実験から導かれた自励振動を表現しうる解析モデルを導入することにより、声帯の力学特性を評価しうる全く新しい本概念の有効性を示すに至ると期待される。以上から本研究は、振動メカニズムの解明という重要な基礎研究に加えて、声帯力学特性評価法の開発という喉頭科学分野における技術シーズとしての応用までを狙っており、バイオメカニクス研究の直接的な社会貢献を目指している。

## 3. 研究の方法

<機械モデルを用いた声帯自励振動の開

#### 始・停止メカニズムの解明>

- 声帯を（柔らかいゴム膜により）模擬した機械モデルを工作機械により製作する。様々なゴム膜形状の影響を見るために、流路幅などを変更した同様モデルを複数個作製して実験を行う。側壁片側は透明アクリル製でカメラ観察とレーザ計測を可能とする。側壁反対側には細いスリットを用意し、ゴム膜内張力を調節できる機構を作る。流路下面にはゴム膜に沿った圧力分布を2mm 間隔程度の高空間分解能で計測するための圧力孔を設ける。また圧力トランスデューサを圧力孔に沿って移動させるためのスライダ機構を作る。
- この声帯機械モデルにおいて、声帯振動と同様の100Hz から700Hz 程度までの高速自励振動が空気流により励起される際の(i)ゴム膜にかかる圧力分布、(ii) ゴム膜の変形、および(iii)流速との対応関係を、それぞれ圧力トランスデューサ、高速度カメラと自動画像解析による同期計測によって明らかにする。
- 振動が開始する瞬間に、高速度カメラへのトリガ信号が発生するように電圧値依存トリガ発生回路を作製する。また予備実験により、この自励振動は非線形現象であり、振動の開始と停止とはメカニズムが異なり、必要エネルギー値が異なるとの予備結果が得られている。これを詳しく調べるため、振動が停止する瞬間の現象を測定することに挑戦する。これを達成するため、まず圧力トランスデューサからの信号電圧から周波数へと変換する回路を作り、振動している際には周波数が100Hz 以上であるのに対して振動停止時には0Hz として出力が得られるため、これにより振動停止の瞬間を検出し、高速度カメラへのトリガ信号とし、停止の瞬間を撮影、かつ圧力と流速の同期計測をする。

#### <声帯力学特性評価システムの有効性評価試験>

- 流路断面積が可変の回転型弁を備えたマウスピースを作製する。被験者がマウスピースをくわえて発声中に、ステッピングモータにより弁がくるくると回転する機構を作る。弁が回転して流路を閉じた場合、口腔内圧が一瞬上昇して、声帯には通常より高い圧力が負荷され、発声が停止される。一方、弁が開くと再び振動が開始する。マウスピースには圧力センサが取り付けられ、口腔内圧と音圧変化を弁の回転タイミングと同期させて測定可能とする。
- 前年度の実験から自励振動の解析モデルを立て、口腔内圧変化から声帯に作用する圧力を評価する。
- LabVIEW プログラミングソフトにより、将

来の臨床応用も視野に入れた以下のユーザフレンドリーインターフェースを作成する。上記実験で得られる振動開始・停止時の圧力値と基本振動数をリアルタイムで抽出する。これらの値から、発声中の声帯に与えた圧力変化  $dP$  が、声帯振動に及ぼす影響（基本振動数の変化に注目して  $dF$  とする）として、 $R=dF/dP$  を計算する。例えば声帯が硬ければ空気圧の影響を受けづらいため  $R$  の値は小さい。従って、 $R$  は声帯の硬さの指標となる。 $R$  を様々な声の高さにおいて、短時間（2,3 分の測定時間となるように信号処理を工夫する）で計測する。また自励振動の解析モデルからも声帯に作用する圧力を評価する。すなわち、圧力（力）と声帯振動の応答（振幅、周波数変化から変位量を得る）の関係から、声帯の硬さ（=力/変位量）を定量評価する。

- ヒトの音声はゆらぎがあるのが特徴である。従って、単にマイクから音声を取り込み周波数解析するだけでは、基本振動数を再現性かつ精度よく抽出することができない。そこで本システムでは、スピーカから純音を出し、その音の高さと同程度になるように被験者に発声してもらい、その純音周辺の周波数範囲内でのピーク周波数を検出することにより、正確にヒトの音声の基本振動数を検出する方法を利用する。また、測定中に声の大きさと基本振動数の変動が一定範囲内に落ち着いてから、マウスピース内の弁が回転する制御機構を上記プログラムに取り入れる。

#### 4. 研究成果

##### <声帯の自励振動メカニズムについて>

呼気流を表す一般的なナビエストークスの式と質量保存式、および集中定数モデル化した声帯の運動方程式に対して摂動法を適用し、安定判別を経て、声帯が自励振動を発生する条件、すなわち発声の力学条件を解析的に導出した。この条件式は微小擾乱が振動発散を導く声門上流総圧の閾値であり、声帯が自励振動を開始する発声開始肺圧に相当する。発声開始肺圧は発声の容易さを示す指標として臨床でも利用されており、本研究においてその力学条件を解析的に導出することができた。臨床での実測および発声過程の数値計算結果では、発声開始肺圧は声帯の硬さあるいは流路幅の増加に伴い上昇することが報告されており、この傾向は得られた式と一致する。

Titze は定常ベルヌイ式だけでは流路幅の移動方向を区別できず、空気流から声帯へのエネルギーの供給を説明できないとして粘膜波動説を提案したが、実際には特に裏声のように粘膜波動が見られない振動パターンも存在する。本研究では非定常項を考えること

により、同じ流路幅でも移動方向が時間微分項として表せることを示した。ここでは詳細を省くが、得られた条件式に現れる声帯形状等のパラメータに文献で見られる値を代入すると、発声開始肺圧は 1kPa 未満として得られたため、定量性も確認された。

<声帯力学特性評価システムの評価試験について>

測定した口腔内圧力波形の変化を図 1 に示す。マウスピース内空間を圧縮させることによって流路抵抗が増加するため、通常発声時より大きな圧力が得られる。マウスピース内空間を圧縮させた後にも振動波形が見られることから発声は持続されることがわかる。このようにマウスピース内空間を圧縮させて口腔内圧が上昇することにより、気道中央付近にある声帯にも通常より大きな圧力を負荷させて、声帯に何らかの影響を与えることができると思われる。

次に、従来技術である回転バルブを用いた装置と今回作製した電動シリンダを用いた装置で測定した最大圧力値を比較した。同じ声の大きさで各 35 回実験を行い、最大圧力の平均値と標準偏差を調べた。この結果から今回の装置では従来技術である回転バルブを用いた装置の約 5 倍の最大圧力が得られた。圧力上昇量が大きい方が、声帯により大きな変形量を引き起こすことができ、感度良の測定ができると考えられるため、その有効性が確認できたとと言える。また、電動シリンダの方の標準偏差が大きくなるのは声帯への影響がより大きくなるためと考えられる。

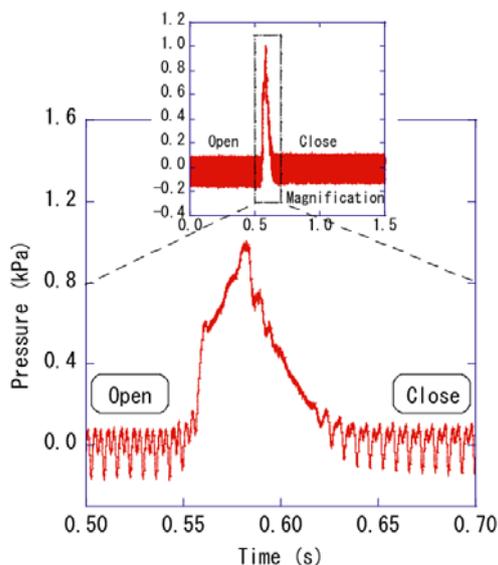


図 1 圧力を負荷した際の声帯の圧力応答

男性健常被験者に対して測定を行った結果を図 2 に示す。プロット点は測定結果であ

り、実線は最小二乗法により得た 4 次の回帰曲線を示す。測定結果から F01 に対して最大圧力は V 字の傾向を有していることが確認された。また 200Hz 弱付近で最小の値を示した。声の大きさを一定にして発声しているにもかかわらず最大圧力が一定にならないということは、声帯の硬さが影響している可能性がある。そして、この 200Hz 弱付近は被験者が普段話している声の高さ付近である。普段話している声の高さは発声者にとって最も負担がかからない状態であり、声帯に対しても最も負担がかかっていない状態にあると言える。声帯は筋肉のヒダでできており、負担がかかっていない状態とは効率的な発声に適した軟らかい状態だと考えられる。つまり、声帯が軟らかいため圧力の影響を受けやすく最大圧力が低くなり、一方、硬い場合には圧力の影響を受けにくく最大圧力が高くなると考えられる。

このように、最大圧力は口腔内圧変化が声帯に及ぼす影響の大きさを表す。これは声帯の力学的状態に依存していると考えられる。従って、最大圧力の値を簡易かつ自動的に測定することにより、声帯の力学状態を非接触的に推測あるいは評価しうる。また、声帯の硬さは声帯に作用する筋肉、すなわち甲状披裂筋や輪状甲状筋により変化することが、摘出声帯を用いた実験などにより知られている。従って、今回得られた V 字の傾向から、どの筋肉や神経に異常があるかを判定できる可能性があることも意味している。今後は F01 に対する最大圧力の関係を声帯疾患と対応づけて調べることが課題である。

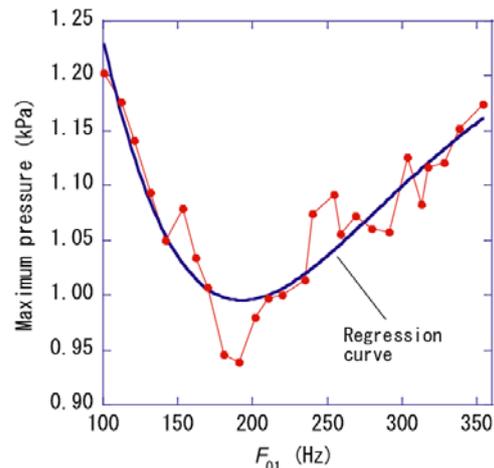


図 2 声帯の圧力応答（硬さに相当：縦軸）と声の高さ（横軸）との関係

<呼吸器系組織力学特性評価システムの評価試験について>

被験者は計測用筒をくわえて呼吸を行った。この筒には、圧縮して空気圧を気道に負荷するためのピストンを取り付けた。被験者への負担を避けるためピストンと筒内壁間に隙間を設けてピストン移動速度を速め、短時間による圧負荷を可能にした。肺を変形させるのに十分な圧力を得るために、ピストン移動部の体積を大きくした。筒と気道を合わせた空間内圧力と体積の関係はボイルの法則より、

$$PaVi = (Pa + P(t))(Vi + V(t)) = (Pa + P(t))[Vi - DApt/T + A2P(t)/K + SP(t) + V1(t)] \quad (1)$$

として表される。左辺は大気圧と初期体積の積を示す。第二辺は空気を圧縮した状態を表し、圧力変化 $P(t)$ は筒内のセンサにより計測される。体積変化 $V(t)$ の内訳は第三辺に示すとおり4つある。まずピストン移動量 $D$ と断面積 $Ap$ に関係した体積変化であり、任意に調節できる。呼吸器系組織のバネ定数 $K$ とその断面積 $A$ を含む項はコンプライアンスに対応しており、負荷圧力 $P(t)$ に比例して変形して体積を増大させる。呼吸器系以外の組織の変形に伴う体積変化は、その部位のコンプライアンス $S$ に比例する。また上記の隙間からの空気漏れ量 $V1(t)$ は、

$$P(t) = RdV1/dt \quad (2)$$

で表され、隙間は簡易な一定形状を有するため流路抵抗 $R$ を別途得ることができる。上記二式を連立すると

$$P(t) = RC(1 - e^{-Bt}) \quad (3)$$

の解が得られ、測定圧力信号の回帰曲線として係数を定める。呼吸に伴って呼吸器系組織の状態は変化するが、それ以外の組織 $S$ は不変のため、異なる呼吸状態時の計測結果の比を取ることによって $S$ の影響を相殺し、呼吸器系コンプライアンスを得る。

正常呼吸者に対して測定を行った。50msの間に圧力負荷を行い、図3の圧力上昇を得て、これに式(3)をフィッティングする。吸気時には気道体積が大きいので、ピストン移動の影響は、体積が小さい呼気時に比べて小さいことが分かる。また呼気時と吸気時の中間の状態と言える安静時に圧力が小さいのはコンプライアンスが大きい、すなわち変形しやすいことを示唆している。このことからコンプライアンス、および同じく臨床で重要な診断項目の肺残気量の非侵襲的評価が可能であることを示唆している。

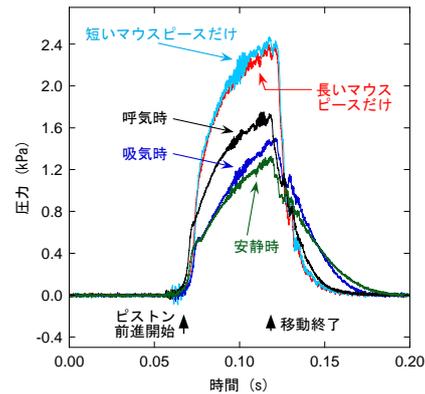


図3 ピストン前進移動に対する圧力上昇

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

1. S. Deguchi, T. Hyakutake, Theoretical consideration of the flow behavior in oscillating vocal fold. *Journal of Biomechanics*, 42, 824-829, 2009 (査読有) .
2. S. Deguchi, K. Kawashima, Development of computer-aided non-invasive assessment of the vocal fold stiffness, *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology*, 117, 876-880, 2008 (査読有) .
3. S. Deguchi, Y. Ishimaru, S. Washio, Preliminary evaluation of stroboscopy system using multiple light sources for observation of pathological vocal fold oscillatory pattern. *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology*, 116, 687-694, 2007 (査読有) .
4. S. Deguchi, Y. Matsuzaki, T. Ikeda, Numerical analysis of effects of transglottal pressure change on fundamental frequency of phonation. *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology*, 116, 128-134, 2007 (査読有) .

[学会発表] (計9件)

1. 出口真次、川島一能、呼吸器系コンプライアンスの非侵襲的計測の試み、第42回日本生体医工学会東北支部大会、2008. 12. 13、東北大学。
2. S. Deguchi, K. Kawashima, Noncontact determination of the mechanical properties of the human vocal folds, *The 6th International Conference of Voice Physiology and Biomechanics*, 2008. 8. 8, University of Tampere.

3. S. Deguchi, K. Kawashima, Noncontact determination of the mechanical properties of the human vocal folds. ASME Summer Bioengineering Conference, 2008. 6. 29, Marco Island.
4. 出口真次、川島一能、声帯の力学特性の非接触的評価方法に関する研究、第 47 回日本生体医工学会大会、2008. 5. 8、神戸国際会議場。
5. 出口真次、河原侑希、声帯結節による発声障害の数値シミュレーション、音声・聴覚共催研究会、2008. 3. 21、東京大学。
6. 岡崎愛、森原陽祐、出口真次、高橋智、鷺尾誠一、機械モデルを用いた声帯自励振動と発生音の関係に関する計測、第 38 回機械学会中国四国支部学生員卒業研究発表講演会、2008. 3. 6、近畿大学。
7. 森原陽祐、岡崎愛、出口真次、百武徹、田村義彦、鷺尾誠一、声帯の振動パターンと音声波形の関係について、第 20 回バイオエンジニアリング講演会、2008. 1. 25、芝浦工業大学。
8. 河原侑希、出口真次、鷺尾誠一、声帯結節が発声に及ぼす影響に関する数値解析、第 20 回バイオエンジニアリング講演会、2008. 1. 25、芝浦工業大学。
9. 村上隆良、百武徹、松倉古寸毛、出口真次、柳瀬眞一郎、声帯を模擬した振動狭さく流れに関する数値解析、第 20 回バイオエンジニアリング講演会、2008. 1. 25、芝浦工業大学。

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 出願年月日：  
 国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 取得年月日：  
 国内外の別：

[その他]  
 ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

出口 真次 (SHINJI DEGUCHI)  
 東北大学・大学院医工学研究科・准教授  
 研究者番号：30379713

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし