

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11875

研究課題名(和文) 実体模型および摘出喉頭による仮声帯振動機構の解明と歌唱、医療、言語進化への展開

研究課題名(英文) Physical modeling and excised larynx experiment of vocal-ventricular fold co-oscillations and their implication for singing, medicine, and language evolution

研究代表者

徳田 功 (Tokuda, Isao)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：00261389

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：発声時に声帯と仮声帯が同時に振動する「声帯-仮声帯振動」について、実体模型吹鳴実験、動物摘出喉頭吹鳴実験、数理モデリングを基軸に調査した。ヒト仮声帯の生理構造を模擬した物理モデルを新規に作成して吹鳴実験を行い、仮声帯間距離および喉頭室の大きさを変更したところ、声帯と仮声帯が多様な周波数比で同期振動する発声や、非同期にカオス振動する様子を再現できた。アカゲザルの摘出喉頭吹鳴実験でも、仮声帯間距離を近づけると、仮声帯と声帯が同期振動し、条件によって、非同期のカオス的発振が起こることが分かった。アカゲザルの *in vivo* 実験から、実際の動物も、声帯-仮声帯振動を頻繁に用いている可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

有声音の発声時に、声帯だけでなく仮声帯も振動する「声帯-仮声帯振動」は、発声障害の一種として長年知られてきたが、近年の歌声研究で、喉歌などの特殊な歌唱でも重要な役割を果たしていることが分かり、ホットな話題となっている。本研究で明らかとなった、声帯と仮声帯の同期振動および非同期振動と、その生成条件は、アンダートーンや、スクリーミング、デスヴォイスなどの歌唱テクニック、さらにはマカクザルの発声を支える共通の物理機構を明らかにしたものであり、音声コミュニケーション分野だけでなく、音楽や生物音響にも新しい知見をもたらした意義深い研究と思われる。

研究成果の概要(英文)：Co-oscillations of the vocal and ventricular folds were investigated based on the physical modeling of the ventricular folds. The physical model was newly created to imitate physiological features of the human ventricular folds and used for experiments on flow-induced oscillations of the vocal and ventricular folds. Depending upon the conditions set for the distance between the left and right ventricular folds as well as the ventricle size, the vocal and ventricular folds gave rise to synchronized oscillations with various frequency ratios as well as to chaotic desynchronized oscillations. In excised larynx experiments of rhesus macaques, it was again found that the vocal and ventricular folds co-oscillated in synchrony, while, depending upon the experimental condition, chaotic desynchronized oscillations took place. *In-vivo* experiments of rhesus macaques further suggested that real animals may frequently use the vocal-ventricular fold co-oscillations in their communications.

研究分野：非線形動力学

キーワード：仮声帯 声帯 実体模型 摘出喉頭吹鳴実験 声帯振動数理モデル 歌唱 生物音響

1. 研究開始当初の背景

仮声帯は、喉頭蓋の付着部のすぐ下、声帯突起のすぐ上に位置し、声帯からの呼気流を塞ぐように配置された2つの深い粘膜のヒダを形成する繊維状の組織である。呼吸や発声時に食物や飲料が気道に入ることを防ぐのが、仮声帯の主要な機能である。通常発声時において、仮声帯は大きな役割を果たさないが、発声障害や特殊な歌唱では、発声時に仮声帯も振動する仮声帯発声が起こることが知られている。Czermak(1863)の喉頭鏡による観察に端を発する仮声帯発声の研究は、発声障害の一種として一世紀以上の歴史を持つ。仮声帯発声は喉に力が入った低いピッチの嗄声で、ガラガラ声の様相を有する。ピッチ変化が少ない、単調な調子で、聞き手には唸り声のように聴こえる。ただし、仮声帯発声の希少性(発声障害臨床例の4%以下)のためにそのメカニズムの理解はあまり進んで来なかった経緯がある。近年では、Fuksら(1998)および榊原ら(2001)による民族音楽の研究で、仮声帯発声が歌声でも重要な役割を果たしていることが分かり、発声における仮声帯の機能について、歌声の科学でも非常にホットな話題となっている。例えば、トッパのフーメイ、モンゴルのフーミーなどの喉歌では、アンダートーン(倍音)を用いて効果的に低音を生成する。ヘヴィメタルなどで用いるスクリーミング唱法やデスヴォイス唱法、ダミ声(がなり声)を出すのにも同様のテクニックが用いられる。声帯に負荷を掛けることなく、低音を出す歌唱テクニックとして大きな驚きをもって受け入れられた。

このように仮声帯は特殊な条件下で発声に影響を及ぼすことが知られているが、その振動機構を理解するための研究例は限られている。特に筋組織を持たない仮声帯を制御する仕組みについては不明の点が多い。これまでは、患者や歌手の行う仮声帯発声を内視鏡を通して高速撮像する実験や、音声分析をするなどの研究がなされてきたが、ヒトの *in vivo* 発声の高速撮影では、内視鏡を挿入する必要があるため自然な発声が妨げられる問題がある。詳細の発声条件に対する依存性を調査することに困難が付き纏い、再現性の問題もあり、仮声帯振動機構の包括的な物理的理解には至っていない現状がある。

2. 研究の目的

本研究では、仮声帯の実体模型実験を中心軸に、摘出喉頭吹鳴実験、解剖学データ、計算論的なアプローチの多面的な方法論に基づいて、仮声帯の発声機能を究明する。これによって、仮声帯の振動する物理メカニズムを明確にし、その制御機構を解明する。また、サル類を用いた実験を通して、動物がコミュニケーションで、仮声帯振動を用いている可能性を追究することを目的とする。

3. 研究の方法

ヒトの *in vivo* 計測実験の問題を解決する方法として、実体模型を用いた物理計測実験や、*ex vivo* 条件での動物摘出喉頭吹鳴実験のアプローチが存在する。実体模型は喉頭の生理学的特性を忠実に再現した物理モデルであり、空気流を流して吹鳴実験を行うことで、発声の様子を詳細に観察することができる。動物から摘出された喉頭に対しても同様の吹鳴実験ができる。この様な実体模型及び摘出喉頭では、条件を詳細に変えることで、発声への依存性を調査することも可能である。また、非侵襲で再現性にも優れている。本研究では、実体模型実験に加え、サル類の摘出喉頭吹鳴実験を行う。さらに、実験結果を説明する声帯-仮声帯振動の数理モデルを立てることにより、仮声帯振動を引き起こす機序を明らかにする。このために、次の3つのアプローチを同時並行的に進める。

(1) 仮声帯及び声帯の実体模型の吹鳴実験：

ヒトの解剖学データおよび仮声帯組織の生理特性データを元に、シリコンを用いた仮声帯の実体模型を構築し、人工的に気流を流して仮声帯振動を起こす吹鳴実験を行う。声帯と仮声帯の間の距離、左右仮声帯の間の距離、仮声帯の張力などをコントロールパラメータとして、仮声帯振動の起こる条件を詳細に調査する。また、高速撮像データから、声帯と仮声帯の位相関係、発声閾圧、音高、音量、流速などを計測し、音質や発声効率を調べる。

(2) 摘出喉頭の吹鳴実験：

マカクザルの摘出喉頭に対して吹鳴実験を行う。呼気流量、仮声帯の開閉度合い、声帯の緊張度、仮声門の有無などの要因を変数として、声帯および仮声帯振動パターンの変化を、EGGによる解析とハイスピードカメラによる振動観測を組み合わせる。これにより、仮声帯振動の特性とその制御機序を解明する。得られた結果をヒトのものと比較する。

(3) 仮声帯の数理モデル解析：

仮声帯の実体模型および摘出喉頭の吹鳴実験の成果をもとに、仮声帯振動の数理モデルを

創出する。榊原ら(2001)による 2×2 質量モデルをベースに拡張を行い、仮声帯の内転および仮声帯組織の張力に関して、仮声帯振動の起こる条件を調べ、実験結果との整合性を確認する。

4. 研究成果

(1) 仮声帯および声帯の実体模型の吹鳴実験：

シリコンを用いた実体模型の第一段階の研究として、M5 モデル（声帯用に開発されてきた標準の実体模型）を仮声帯に、MRI モデルを声帯に用いて吹鳴実験を行った。左右の仮声帯間距離を十分に近づけたところ、声帯振動と同時に仮声帯振動が起こることが分かった。特に、仮声帯と声帯は 1 対 1 の周波数比で、反相の関係で同期し、発声効率、仮声帯がない場合に比べて向上することが分かった。これより、仮声帯発声が通常の発声よりも効率的に発声できる場合があることを確認した。

第二段階の研究では、CT データからヒトの仮声帯の構造について体系的に調査した Agarwal(2004)の X 線断層撮影による調査研究を参考に、新規のシリコン型仮声帯物理モデルを作成し、MRI 声帯モデルの上に重ねて吹鳴実験を行った。左右の仮声帯間距離を十分に近づけたところ、声帯振動と同時に仮声帯振動が起こることが分かった。特に、仮声帯間距離に依存して、仮声帯と声帯は 1 対 1 および 2 対 1 の周波数比で同期し、条件によっては、非同期のカオスの発振が起こることが分かった。仮声帯と声帯の同期的発振は、喉歌などの歌唱でみられる特殊発声に対応すると捉えることができるのに対して、カオスの発振は、病的な仮声帯発声（嗄声）に相当すると考えられる。さらに、喉頭室の大きさを制御パラメータとして変更したところ、喉頭室が大きい場合には仮声帯と声帯の周波数比が 1 対 1 の同期振動が見られたのに対して、喉頭室が小さくなると、1 対 2 の同期振動が起こることが分かった。これは仮声帯が 1 回振動する間に、声帯が 2 回振動する状態を表しており、「アンダートーン」と呼ばれる歌唱法に対応している。仮声帯および声帯の張力を変えずに、喉頭室のサイズの変化のみでこのような音高の調整が行えることが分かり、新しい知見を得ることができた。

(2) 摘出喉頭の吹鳴実験：

摘出喉頭研究の第一段階の研究として、ブタの摘出喉頭を用いて吹鳴実験を行ったところ、仮声帯と声帯が不規則に振動する状況が多く観測された。この状況は嗄声に対応するものと考えられる。仮声帯が声帯の真上に位置するブタでは、仮声帯が恒常的に振動しており、雑音を多く含むブタの発声の特徴を裏付けていることが判明した。

第二段階の研究では、ヒトに近い仮声帯を有するアカゲザルの摘出喉頭を用いて吹鳴実験を行った。仮声帯間距離を近づけると、仮声帯と声帯が 1 対 1 および 1 対 2 の周波数比で同期振動し、条件によっては、非同期のカオスの発振が起こることが分かった。これは、ヒトに比べて喉頭室が狭いアカゲザルでは、より頻繁に仮声帯振動が起こることを示唆している。次に、摘出喉頭実験の再現性を確認するため、アカゲザルの摘出喉頭を撮像した CT データに基づき、シリコン製の实体模型を作成し、吹鳴実験を行った。流量および喉頭室の大きさを調整することにより、仮声帯と声帯の 1 対 1 および 1 対 2 の同期振動が起こり、条件によってはカオスの発振が起こることが分かった。これはアカゲザル摘出喉頭の吹鳴実験結果をよく再現しており、シリコンモデルが動物のモデルとして妥当であることを示している。

第三段階の研究では、アカゲザルの発声の *in vivo* 実験を行った。麻酔下のアカゲザルにボアスコープを口から挿入し、発声中の声門の様子をハイスピードカメラで撮影した。水道周囲灰白質(PAG)とその周辺を電気刺激することで発声を誘起した。*in vivo* 実験で撮像された高速動画を分析したところ、実際の動物でも、仮声帯が声帯と同期的に振動する場合があることが分かり、アカゲザルが低音を発声するために、声帯-仮声帯振動を頻繁に用いている可能性が示唆された。また、アカゲザルには声帯膜があり、膜が振動することで高音を出すことが可能であることも分かった。

(3) 仮声帯の数値モデル解析：

実体模型および摘出喉頭における声帯-仮声帯振動のメカニズムを説明するため、榊原ら(2001)の 2×2 質量モデルを構築し、数値シミュレーションを行った。仮声帯と声帯の固有周波数比に近い場合に、1 対 1 の反相同期が起こり、実体模型実験が再現できることを確かめた。次に、声帯および仮声帯の左右方向の振動に加えて、上下方向の動きを考慮に入れた二次元モデルに拡張したところ、声帯および仮声帯の内転レベルや固有周波数を変えることによって、仮声帯と声帯の同期振動および、カオス的な非同期発振を再現することができた。これにより、実体模型および摘出喉頭の吹鳴実験では、仮声帯と声帯の間の空力学が両者の相互作用として働き、個々の固有周波数の比率が、同期時の周波数比を決めることが分かった。また、カオスの振動は、二つの非線形振動子の間に生じる比較的強い相互作用に依って起こることも明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Christian T. Herbst, Takeshi Nishimura, Maxime Garcia, Kishin Migimatsu, Isao T. Tokuda	4. 巻 35
2. 論文標題 Effect of Ventricular Folds on Vocalization Fundamental Frequency in Domestic Pigs (<i>Sus scrofa domestica</i>)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Voice	6. 最初と最後の頁 805
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvoice.2020.01.013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Isao T. Tokuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Source-filter theory of speech	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Oxford Research Encyclopedia of Linguistics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/acrefore/9780199384655.013.894	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takuma Matsumoto, Mayuka Kanaya, Daisuke Matsushima, Cong Han, Isao T. Tokuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Synchronized and desynchronized dynamics observed from physical models of the vocal and ventricular folds	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Voice	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvoice.2021.10.023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hiroto Hasegawa, Tokumi Nakagawa, Kohei Noguchi, Isao T. Tokuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental study on inspiratory phonation using physical model of the vocal folds	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Voice	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvoice.2022.01.023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Annemie Van Hirtum, Anne Bouvet, Isao Tokuda, Xavier Pelorson	4. 巻 516
2. 論文標題 Dynamic vibration mode decomposition of auto-oscillating vocal fold replicas without and with vertical tilting	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Sound and Vibration	6. 最初と最後の頁 116504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jsv.2021.116504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Anne Bouvet, Isao Tokuda, Xavier Pelorson, Annemie Van Hirtum	4. 巻 63
2. 論文標題 Imaging of auto-oscillating vocal folds replicas with left-right level difference due to angular asymmetry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biomedical Signal Processing and Control	6. 最初と最後の頁 102154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bspc.2020.102154	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takuma Matsumoto, Mayuka Kanaya, Kazuyoshi Ishimura, Isao T. Tokuda	4. 巻 149
2. 論文標題 Experimental study of vocal-ventricular fold oscillations in voice production	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 271-284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/10.0003211	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takuto Honda, Mayuka Kanaya, Isao T. Tokuda, Anne Bouvet, Annemie Van Hirtum, Xavier Pelorson	4. 巻 151
2. 論文標題 Experimental study on quasi-steady approximation of glottal flows	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 3129-3139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/10.0010451	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takeshi Nishimura, Isao T. Tokuda, Shigehiro Miyachi, Jacob C. Dunn, Christian T. Herbst, Kazuyoshi Ishimura, Akihisa Kaneko, Yuki Kinoshita, Hiroki Koda, Jaap P. P. Saer, Hirohiko Imai, Tetsuya Matsuda, Ole Naesbye Larsen, Uwe Juergens, Hideki Hirabayashi, Shozo Kojima, W. Tecumseh Fitch	4. 巻 377
2. 論文標題 Evolutionary loss of complexity in human vocal anatomy as an adaptation for speech	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 760-763
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abm1574	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Mayuka Kanaya, Takuma Matsumoto, Taisuke Uemura, Rei Kawabata, Takeshi Nishimura, and Isao T. Tokuda	4. 巻 2
2. 論文標題 Physical modeling of the vocal membranes and their influence on animal voice production	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JASA Express Letters	6. 最初と最後の頁 111201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/10.0015071	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Christian Thomas Herbst, Coen PH Elemans, Isao T Tokuda, Vasileios Chatziioannou, Jan G Svec	4. 巻 -
2. 論文標題 Dynamic system coupling in voice production	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Voice	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvoice.2022.10.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 宮崎琳太郎、金谷麻由佳、野口十夢、吉谷友紀、西村剛、徳田功
2. 発表標題 二ホンザル摘出喉頭における仮声帯発声の観測
3. 学会等名 日本音響学会2021年秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松島大輔、金谷麻由佳、松本拓磨、韓聰、徳田功
2. 発表標題 仮声帯の有無が声帯物理モデルの振動に与える影響について
3. 学会等名 日本音響学会2021年秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松島大輔、金谷麻由佳、韓聰、徳田功、松本拓磨
2. 発表標題 声帯の基本周波数の変化が仮声帯発声に及ぼす影響
3. 学会等名 日本音響学会2022年春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮崎琳太郎、吉谷友紀、野口十夢、金谷麻由佳、宮地重弘、兼子明久、木下勇、中村冠太、西村剛、徳田功
2. 発表標題 In vivoおよびEx vivo実験に基づくアカゲザル仮声帯振動の解析
3. 学会等名 日本音響学会2022年春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本拓磨、金谷麻由佳、長谷川寛人、松島大輔、石村憲意、徳田功
2. 発表標題 生体パラメータを考慮に入れた仮声帯物理モデルの構築
3. 学会等名 日本音響学会2021年春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松島大輔、韓聰、金谷麻由佳、徳田功
2. 発表標題 声帯モデルと仮声帯モデルの固有振動周波数を考慮した片側喉頭吹鳴実験
3. 学会等名 日本音響学会2022年秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉谷友紀、上田可奈子、小畑大樹、西村剛、徳田功
2. 発表標題 アカゲザルのマイクロCT画像を用いた声帯物理モデルの構築
3. 学会等名 日本音響学会2022年秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 韓 聰、松島大輔、鎌田将史、徳田功
2. 発表標題 喉頭室の大きさを考慮した仮声帯発声実験
3. 学会等名 日本音響学会2023年春季研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉谷 友紀、上田 可奈子、小畑 大樹、西村 剛、徳田 功
2. 発表標題 アカゲザルの声帯物理モデルで観測された声帯振動から仮声帯振動への遷移現象
3. 学会等名 日本音響学会2023年春季研究発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	石村 憲意 (Ishimura Kazuyoshi) (50779072)	立命館大学・理工学部・助教 (34315)	
研究 分担者	西村 剛 (Nishimura Takeshi) (80452308)	京都大学・霊長類研究所・准教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フランス	Domaine universitaire de Grenoble	CNRS		
オーストリア	Universitaet Wien			