

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2015

課題番号：24687030

研究課題名(和文) 音声生成運動能力のサルモデルの創出と話しことばの霊長類的基盤に関する総合的研究

研究課題名(英文) Studies on the primate model and the primate origins of voice physiology in human speech

研究代表者

西村 剛(Nishimura, Takeshi)

京都大学・霊長類研究所・准教授

研究者番号：80452308

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：言語の音声コミュニケーションである「話しことば」の生物学的基盤の進化プロセスを解明するため、サル類での音声生成運動能力を検証した。マカクザルとマーモセットを対象にヘリウム音声実験を実施し、サル類にもヒトと同様の音声フィルター理論があり、発声と構音が生理学的に独立していることを示した。また、マカクザルでは、音声の発声に関するオペラント条件付けに成功し、その訓練過程の分析から、彼らは、マニュアル操作に比して音声の随意的制御が不完全であることを実証した。さらに、ウィーン大学と共同で、マカクザルでは音声の種類に対応した声帯振動モードの使い分けがあることを示した。

研究成果の概要(英文)：This project examined the voice physiology in non-human primates. to explore the evolutionary process of the speech physiology. The helium voice experiments in macaques and marmosets were performed to show the Source-Filter Theory and source-filter independence in non-human primates. We were successful in operant conditioning of voice production in macaques, and analyzed its training process to show the lower regulation in vocalization compared to manual movements. The phonation was examined to show macaques have different modes in vocal vibration to produce varied vocalizations.

研究分野：自然人類学

キーワード：音声 霊長類 ヘリウム音声 話しことば 音声シミュレーション 国際研究者交流

1. 研究開始当初の背景

言語の音声コミュニケーションである「話しことば」の生物学的基盤は、人類系統で一つのパッケージとして、言語へ適応して形成されたと考えられてきた。しかし、観察分析技術の進歩にともなうヒト以外の動物における実証的比較研究の展開は、それら生物学的基盤の霊長類的起源を続々と明らかにし、ヒトの「話しことば」とサル類の音声という二項対立の伝統的な視点から、「話しことば」の相対化を進めた。それは、それぞれの研究者が、それぞれの対象のサルで、さまざまな生物学的基盤を見出したからである。ところが、「話しことば」の生物学的基盤の体系的な進化プロセスを描くにはいたっていない。なぜなら、これまでの研究成果は、対象としたサル種も生物学的基盤もばらばらで、系統樹の上に散発的に事実が載っているだけだからである。一つの種で音声生成の運動学的、形態学的、認知科学的特性が相対照でき、ヒトと体系的に比較参照できるスタンダードなサルモデルが求められていた。

2. 研究の目的

言語の音声コミュニケーションである「話しことば」の生物学的基盤の進化プロセスを解明するため、音声生成の運動能力に関してヒトと体系的に比較参照できるサルモデルを創出する。ヒトは、話者の意図する種類の音を意図する系列で連ねるために、音声生成の運動を随意に制御する能力をもつ。本研究では、生物音響学的実験と機能形態学的分析とを融合した生物・工学連携アプローチで、サル類の音声生成の運動能力を正確かつ詳細に評価し、それに対する解剖学的、認知科学的制約等を総合的に解析することで、ヒトとの体系的な比較を可能にし、「話しことば」の霊長類学的基盤を明らかにする。それらの知見をもとに、サル類の音声生成の随意運動制御に関する、ヒトと比較、参照可能なサルモデルを創出し、進化プロセスの理解を目指す。

3. 研究の方法

ヒトとの系統的位置関係を考慮して、ヒト上科のテナガザル、オナガザル科のマカクザルと広鼻猿類のマーモセットを対象とした。まず、ヘリウム音声実験を行った。ヘリウム-酸素混合気体空間内に対象個体を置き、ヘリウム濃度の増減で声道の共鳴特性を操作し、サル類での音声生理メカニズムを明らかにする。発せられた音声の音響学的分析により、ヘリウムの影響による音響学的特徴の変化を見出し、声帯振動と声道共鳴の独立性を検証するとともに、聞こえの変化に対する運動変化の有無を検証する。また、同時に、線テレビによる音声生成運動の動画データを得て、音声器官の運動を分析する。つぎに、生体二ホンザルおよび摘出喉頭を用いた声帯振動の声門電図(EGG)による実験を行った。

EGG 信号は、声帯振動の様態を示す波形データであり、非侵襲的に声帯振動を観測する方法である。先のヘリウム実験で用いた個体で、多様な音声を発声させ、音声の種類と声帯振動モードとの対応関係を分析する。その振動モードを、摘出喉頭を用いた風洞実験で再現し、振動モードを変化させる運動パラメータを明らかにする。さらに、マカクザルでは、音声発声のオペラント条件付け訓練を実施し、その訓練過程での音響学的特徴や運動特徴の変化、および訓練完了後のテストを通じて、音声生成運動の随意的制御のメカニズムを検討する。

4. 研究成果

テナガザル、マカクザルとマーモセットを対象にヘリウム音声実験では、ヘリウム濃度の増減に応じて、フォルマントの変動が観測されたが、ピッチの変動は期待値を大きく下回った。これは、声道の共鳴特性が、声帯振動と独立に制御されていることを示している。つまり、サル類にもヒトと同様の音声フィルター理論があり、かつ、発声と構音が生理学的に独立していることを明らかにした。

その中で、テナガザルは、ピッチと声道共鳴の第一フォルマントを精密に一致させて、大音量の純音的な音声を作っていることを示した。これは、ヒトでのソプラノ歌唱のメカニズムに類似している。高度な声帯振動と共鳴特性の制御能力を示唆するが、ヒトの話しことばにみられる制御とはまったく異なることを示した。つまり、ヒトの話しことばでは、単一周波数成分の音量の最大化ではなく、複数の共鳴周波数をバランス良く強調する。また、マーモセットでは、フォルマント上昇にともなうピッチの若干の上昇がみられた。音声音響シミュレーション分析を実施したところ、発声と構音の独立性は確かであるが、声門周辺の形態学的制約から、両者の弱い相互作用が働いた可能性を示唆した。サル類では、基本的にはヒトと同様に声帯振動と声道共鳴が独立にはたらいっているが、その運動制御的、解剖学的制約から、発せられる音声の特徴やその可変自由度が異なることが示された。

これら、ヘリウム音声実験から、ヒトの話しことばの生理学的基盤である音源-フィルター理論がサル類に共通してみられることを示した。音声生成の表面的な多様性は、その共通する基盤をどう使うかという運用によっていることを示した。

さらに、ウィーン大学認知生物学部と共同で、二ホンザルの音声発声中における声帯振動モードと音声データの同期観測に成功した。また、その様態を摘出喉頭を用いた風洞実験で再現し、詳細な分析を行った。まず、二ホンザルで知られている3種の音声での音声と声帯振動データの同期収集に成功した。その結果、二ホンザルでも、音声の種類に対応した声帯振動モードの使い分けがあることを

示した。これは、ヒトの声区に対応する使い分けであり、音声の多様性には、声道共鳴のみならず、声帯振動の制御によっても実現されていることを示した。さらに、摘出喉頭での実験で生体で得られた声帯振動を再現し、高速度カメラで観測した。再現にあたり、喉頭の各種運動単位を操作したところ、声帯弾性的変化により、3つの“声区”を再現できることを示した。多様な声帯振動が、声帯弾性的制御というシンプルな機構で実現されていることを示すとともに、ヒトと共通する基盤の存在を示した。

また、マガクザルでは、音声の発声に関するオペラント条件付けに成功した。その条件付け訓練過程における音声の音響学的特徴の分析は、これまで困難とされてきたサル類の音声条件付けが確実に成功したことを証明した。また、音声生成と手によるマニュアル操作の条件付けとの間で、それらのパフォーマンスと自由度を比較したところ、サル類における音声発声の制御は、手のマニュアル操作とは異なるメカニズムでおこなわれていることを示した。つまり、ヒトとは異なり、音声の随意的制御が不完全であることを実証した。これは、サル類では音声の条件付けが極めて困難であるとの従来からの印象を、初めて実証的に裏付けたものである。

以上の成果をまとめると、音声フィルター理論に代表されるヒトの話しことばの基本的な生理学的メカニズムは、サル類に共通していることを示した。特に、声道共鳴のみならず、声帯振動制御にも共通性を見出したことは特筆される。しかし、その共通する基盤をどう制御し、運用するのかという点では、相違点が見られる。発声と構音操作や、音声器官の運動制御といった点である。特に、ヒトでは、後者に高度な随意性がみられるが、サル類には乏しいのかもしれない。音声器官の生理学的、形態学的基盤については、ヒトに見られる特徴はサル類一般に見られ、霊長類系統では進化的変化が乏しい。一方、それを運用する認知科学的、神経科学的基盤には、サル類との相違がみられ、霊長類系統における進化的変化が大きい。話しことばを含む音声の多様性の進化プロセスは、特に後者の進化的変化によっていることが示された

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)

Nishimura T, Mori F, Hanida S, Kumahata K, Ishikawa S, Samarat K, Miyabe-Nishiwaki T, Hayashi M, Tomonaga M, Suzuki J et al. 2016. Impaired Air Conditioning within the Nasal Cavity in Flat-Faced Homo. *PLoS Comput Biol* 12(3):e1004807. 10.1371/journal.pcbi.1004807

Koda H, Tokuda IT, Wakita M, Ito T, and

Nishimura T*. 2015. The source-filter theory of whistle-like calls in marmosets: Acoustic analysis and simulation of helium-modulated voices. *J Acoust Soc Am* 137(6):3068-3076. 10.1121/1.4921607

Reber SA, Nishimura T, Janisch J, Robertson M, and Fitch WT. 2015. A Chinese alligator in heliox: formant frequencies in a crocodylian. *J Exp Biol* 218(Pt 15):2442-2447.

西村剛. 2014. 化石から探る話しことばの起源. *生物科学* 65:236-244.

Koda H, Nishimura T*, Tokuda IT, Oyakawa C, Nihonmatsu T, and Masataka N. 2012. Soprano singing in gibbons. *Am J Phys Anthropol* 149(3):347-355. 10.1002/ajpa.22124

〔学会発表〕(計 12 件)

Nishimura T. 2016. Primate voice physiology: similarities and differences between humans and non-human primates. Workshop "The Evolution of Speech", The 11th Evolution of Language International Conference. Tulane University, New Orleans, LA, USA. 2016/3/20

Koda H, Kunieda T, and Nishimura T. 2016. Vocal inhibition enhances to decouple the vocalizations from emotion. Workshop "The Evolution of Speech", The 11th Evolution of Language International Conference. Tulane University, New Orleans, LA, USA. 2016/3/20

Herbst CT, Koda H, Kunieda T, Suzuki J, Garcia M, Fitch T, and Nishimura T. 2016. Electroglottographic assessment of in vivo Japanese Macaque sound production. The 10th International Conference on Voice Physiology and Biomechanics. Viña del Mar, Chile. 2016/3/14-17

西村剛. 2016. 嚙下と話しことばの進化. バイオインテグレーション学会第6回学術大会. 大阪医科大学, 大阪市中央区. 2016/3/13

西村剛, 今井宏彦, 松田哲也. 2015. 高解像度MRIによるテナガザル類の声門形態の比較分析. 第69回日本人類学会大会. 産業技術総合研究所臨海副都心センター, 東京: *Anthropological Science*. p 210. 2015/10/11

西村剛, 香田啓貴, 徳田功, 脇田真清, 伊藤毅. 2015. マーモセットの音声生成の生理学的メカニズム. 第31回日本霊長類学会大会. 京都大学, 京都: *霊長類研究*. p 50-51. 2015/7/18

Nishimura T, Koda H, Tokuda IT, Wakita M, and Ito T. 2015. Helium experiment and vocal physiology of the phee calls in

common marmosets. The 84th Annual Meeting of the American Association of Physical Anthropologists. Hilton St. Louis at the Ballpark, St. Louis, MO: American Journal of Physical Anthropology p236-237. 2015/3/25-28

西村剛, 香田啓貴, 徳田功, 脇田真清, 伊藤毅. 2014. マーモセットにおけるホイッスル様音声の生成メカニズム. 第68回日本人類学会大会. アクトシティ浜松, 浜松. 2014/11/2

Nishimura T, Mori F, Hanida S, Kumahata K, Ishikawa S, Miyabe-Nishiwaki T, Hayashi M, Tomonaga M, Suzuki J, Matsuzawa T, Matsuzawa Ter. 2014. Computed fluid dynamics of the air-conditioning through the nasal passage in humans, chimpanzees, and macaques. The 83rd Annual Meeting of the American Association of Physical Anthropologists. Calgary, Canada: American Journal of Physical Anthropology. p 196. 2014/4/14

Koda H, Wakita M, Masataka N, Nishimura T, Tokuda IT, Oyakawa C, and Nihonmatsu T. 2014. Formant tuning technique in vocalizations of non-human primates. The 10th International Conference on the Evolution of Language. Vienna, Austria. 2014/3/21-24

Reber S, Nishimura T, Janisch J, and Fitch MRT. 2014. A Chinese alligator in heliox: investigating the potential of honest acoustic signals in crocodylians. The 9th Topical Meeting of the Ethologische Gesellschaft e V - Function and Mechanisms of Animal Behaviour -. Tutzing, Germany. 2014/2/6-8

西村剛, 森太志, 埴田翔, 熊畑清, 石川滋, 宮部貴子, 林美里, 友永雅己, 鈴木樹理, 松沢哲郎 et al. . 2013. ヒトとサル類における鼻腔の生理学的機能に関する数値流体力学的シミュレーション. 第29回日本霊長類学会・日本哺乳類学会2013年度合同大会. 岡山理科大学, 岡山: 霊長類研究. p 158. 2013/9/13

Nishimura T. 2013. Digital archives of medical imaging scans for non-human primates: contributions to comparative anatomy. Swiss-Kyoto Symposium. Zurich, Switzerland. 2013/11/21-22

Samarat K, Kumahata K, Hanida S, Nishimura T, Mori F, Ishikawa S, and Matsuzawa T. 2013. Application of Computational Fluid Dynamics to Simulate a Steady Airflow in All Regions of Chimpanzee's Nasal Cavity. In: Li K, Smith M, and Vazquez M, editors. The 25th International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics.

Changsha, Hunan, China: Elsevier. p 264-269. 2013/5/24

Nishimura T. 2013. Digital archives of medical imaging scans for non-human primates: contributions to comparative anatomy. Swiss-Kyoto Symposium. Zurich, Switzerland. 2013/11/13

西村剛, 森太志, 埴田翔, 熊畑清, 石川滋, 鈴木樹理, 宮部貴子, 林美里, 友永雅己, 松沢哲郎 et al. . 2012. チンパンジーにおける鼻腔の生理学的機能に関する数値流体力学的研究. 第15回SAGAシンポジウム. 札幌市立大学, 札幌円山動物園, 札幌. 2012/11/12

Nishimura T, Matsui M. 2012. Anatomical variation of the hyo-laryngeal complex in hylobatids and its acoustic implication. International Primatological Society XXV Congress Cancun 2012. Cancun, Mexico. 2012/8/15

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村 剛 (NISHIMURA, Takeshi)
京都大学・霊長類研究所・准教授
研究者番号: 80452308