

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23770287

研究課題名(和文)無声歯茎摩擦音発音時の舌尖端の機敏な動作が音源発生に及ぼす影響

研究課題名(英文)Effect of quick motion of tongue tip on production of sound source for sibilant

研究代表者

野崎 一徳 (Nozaki, Kazunori)

大阪大学・歯学部附属病院・助教

研究者番号：40379110

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：/s/構音は音韻の獲得においても遅延が生じやすい音素である。本研究では、/s/発音シミュレータを構築し、これを用いて、/s/発音時に気道内の上顎前歯の上流付近で流速が高まることにより、流れが乱流となることを確かめた。さらに舌尖端の位置が気道内の流れを変化させ、上顎前方部と舌尖端の気道の高さや断面面積の間にある二乗関係が、流速の非線形な高まりとレイノルズ数の上昇を決定付けていることが示唆された。舌尖端の上下動により非線形な流れの変化が生じ、それにより空力音が発生すると考えられた。結果より、/s/を含む音韻の構音を実現出来た要因の一つに、舌下神経の発達等から微細な舌尖端の運動制御の獲得が挙げられた。

研究成果の概要(英文)：Articulation of sibilant /s/ is the phoneme acquired with delay on rare occasions. First, the sibilant /s/ simulator was developed in this study. Turbulence occurred while sibilant /s/ uttered due to the increase of flow velocity measured behind the upper incisors by using the simulator. Next, the nonlinear increase of flow velocity and succeeding the increase of Reynolds number were determined by the morphological relationship that the height of vocal tract at the sibilant groove was proportional to the cross-section area as square. The up and down motion of the tip of tongue produced nonlinear change of the flow, which occurred aeroacoustic sound. It was speculated that development of hypoglossal nerve in human being enabled the motion control of the tip of the tongue, which achieved the articulation of the phoneme including sibilant /s/.

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：人類学・応用人類学

キーワード：舌運動 発音 乱流 空力音 人間工学

1. 研究開始当初の背景

ヒトは他の類人猿とは異なり、複雑な音声言語を話す。ヒトの喉頭は他の哺乳類と比較すると、口腔から離れ下降している。喉頭が下降しているため、ヒトは鼻でも口でも呼吸できる。従って口と鼻でさまざまな音を出すことができる。また音を出している間、任意に吸気を止めることができることにより、複雑な言語を話すことが出来る。どのようにしてヒトは、このような能力を獲得したかについては諸説ある。最近になって、遺伝子に関する研究が進展し、ヒトの言語関わる遺伝子についても明らかになってきた。その中でも特に FOXP2 の発見は、ヒトの舌の運動機能の獲得に関して重要である。FOXP2 は、脊椎動物の神経系を制御する蛋白質として機能している CNTNAP2 という遺伝子の発現を増やす転写因子である。一般的に、転写因子は通常特定の生理現象に関与する遺伝子を一手に制御しており、FOXP2 は言語関係を司る神経系を制御している可能性が高い。ヒトの舌運動は、母音ではなく子音の発音において必須である。子音の発音を獲得したことにより、ヒトの言語は様々な音素からなる単語や接続詞等の品詞を持つことが出来た。特に、歯茎摩擦音/s/は、あらゆる世界の子音を持つ言語中で唯一全ての言語に含まれている音素であると言われている。すなわち、他の音素と比較して原始的な音素であると考えられる。FOXP2 は、オランウータンやチンパンジーには発見されなかった。したがって、CNTNAP2 の発現を調節する FOXP2 がいないため、オランウータンやチンパンジーは舌の運動機能を十分に制御できないと予想されている。そのため、無声歯茎摩擦音/s/等の調音が出来ないと考えられる。また、一部の鳥類には、FOXP2 が見つかっている。これは、ヒトより以前に音声言語でコミュニケーションしていたことを裏付けている。すなわち、FOXP2 によって、舌の運動機能を賦活化されたヒトや鳥類は、子音を発音出来るようになり、音声言語を用いたコミュニケーションを発達させたと考えられる。

口腔治療医療分野において、申請者は以前、義歯による治療やマウスガードの製作と普及を行っていた。その際、義歯やマウスガードを装着時に、無声歯茎摩擦音発音時の違和感について相談された。また、このような問題に関して申請者が研究を行っていたところ、海外からも人工歯根(インプラント)治療後に、無声歯茎摩擦音の発音が困難になった事について相談を受けた。このような口腔内補綴物装着後の発音、とくに無声歯茎摩擦音発音時の違和感に関する報告が多いことが論文上でも報告されている。このような/s/発音の違和感は、口腔内の解剖学的形状に変化が加わったことによって生じていると考えられる。例えば、上顎前歯の前後方向の傾斜角変化によって、歯茎摩擦音/s/のスペクトル特性に変化が生じたという報告がある。し

かし、口腔内形状変化と/s/声変化との間には、無声歯茎摩擦音の発生現象が存在するが、その現象に関しては明らかにされていなかった。申請者は、マウスガードによる/s/発音変化を低減するデザインを決定する際に、無声歯茎摩擦音の発生するメカニズムを明らかにすること無しには決定できないという結論に至った。そこで、無声歯茎摩擦音の発生するメカニズムについて、物理的に明らかにする手法として、数値流体計算と音響計算を採用した。/s/発音時の口腔内実形状について、口腔内の気流や音源を解析した結果、複雑な乱流を含む三次元流れにより空力音源が生成されていることが明らかになった。しかし、現在まで明らかに出来たのは、舌や上下顎を固定した際の/s/音発生のメカニズムに関してのみである。先に述べたように、ヒトは、舌尖端の機敏な動作を獲得した事により、無声歯茎摩擦音の発音が可能になったと考えられる。発音には調音結合と呼ばれる音素間を結合する部分が存在する。すなわち、母音-母音、母音-子音等のつながりを担う部分である。この部分に今回、本研究で取り組む課題が存在する。無声歯茎摩擦音を含む母音-子音の調音結合時には、我々の実験によって、舌尖端の機敏な動作が存在することが分かっている。このような機敏な舌尖端の動きが存在する場合の口腔内の流れ場や音場はどのようになるのかについて調べる必要がある。なぜならば、人間はこの調音結合部分を主に認識することで、流れ場が卓越した際に発せられる音は聞き取れなかったとしても、無声歯茎摩擦音と聞き取れる可能性が示唆されているからである。すなわち、無声歯茎摩擦音発音のために舌を口腔前庭に押し当てるための運動を舌が行っている最中に発生している音を認識することになる。これまで我々は、流れ場が卓越した際に発せられる無声歯茎摩擦音について、発音の呼気流量が及ぼす影響について調べてきた。その結果、呼気流量と音源パワーとの間には指数関数的な関係が存在することが分かった。この結果から、無声歯茎摩擦音の音量は、流れが乱流である場合には微量の呼気流量変化によって音源パワーのコントロールが可能であることが示唆された。このような呼気流量と音量との指数関数的な関係は、素早い音の発生やその制御が、流れが乱流である場合には、少しの呼気流量の調整で可能であることを示唆している。これは、未だ明らかにされていない、無声歯茎摩擦音が具備している重要な特徴である可能性がある。

2. 研究の目的

申請者は、形態素中の無声歯茎摩擦音の音源発生の主要因は、発音時の呼気流量と舌尖端の動きの速度であるという立場をとる。その上で、無声歯茎摩擦音を含む母音-子音-母音(VCV)という配列の形態素発音時に観察される、舌尖端を口腔前庭部に瞬時に接触さ

せる機敏な動作が、音源発生に及ぼす影響について明らかにする。この舌尖端の動きの速度と、発音時の呼気流量、そして音源の特性との間にどのような関係が存在するかについて調べる。この関係を明らかにすることで、言語獲得に関する研究分野に対して、物理に立脚した一考証として、次の仮説を導き出し提示出来ると考えられる(図1)、『ヒトが母音と子音を様々に組み合わせ多様な形態素を生み出せる理由は、舌尖端の機敏な動作や発音時の呼気流量と音源パワーとの間の物理学的な因果関係を利用することが出来るためである。』

3. 研究の方法

3.1 歯茎摩擦音/s/発音シミュレータ

本研究では、まず/s/発音シミュレータの構築を行った。その目的は、/s/発音時における気道内部の流れの流速を計測するためである。また、構築したシミュレータは流量を変化させることにより、静かな/s/、大きな/s/等を再現することが出来る。さらに、上下顎、舌、口唇、咽頭部が分離されており、例えば、口唇のみ取り外した場合の/s/音をシミュレート可能である。また、上下顎は歯科診療で一般的に行われている歯列模型と同様の石膏模型を用いており、シミュレータの可用性を高めた。舌部や口唇部は軟組織のみで構成されているため、歯や上顎等の硬組織、もしくは硬組織に裏打ちされた構造物とは異なる。そこで、舌部と口唇部にはシリコン材料を用いた。上下顎、舌、口唇、咽頭部の三次元形状は歯科用コーンビームX線断層撮影装置を用いて/s/と発音継続中の形状情報を元に、三次元プリンタにより気道部を実体化した。

次に、口腔内気流の流速を計測するために、小型風洞で校正済の熱線流速計を気道内に挿入した。その際、上顎模型を3つ用意し、それぞれ、挿入孔を矢状断面における口蓋中央付近、舌尖端と上顎前方部との最狭窄部付近、上顎切歯舌側近傍に設けた。挿入孔に熱線流速計を挿入することによる音への影響についても調べた。その他、上顎切歯先端付近と下顎口唇最豊隆部より切歯側寄りでの流速を計測した。

/s/発音シミュレータの舌部を、シリコンより弾性率が低いウレタン素材に置き換え、舌尖端部、中央部、根部にそれぞれ金属棒を埋め込んだ。次に、ウレタン製舌を/s/発音シミュレータに戻し、埋め込んだ金属棒を上下させることで、口腔における舌の高さを調節した。具体的な方法としては、まず核磁気共鳴装置を用いて、/s/発音シミュレータと同一被験者の口腔領域の断層撮像を実施した。被験者は撮像中、「うすい」と発音した。その際の、舌尖端部、中央部、根部における気道高径を時系列パラメタとして測定し、それらのパラメタに合わせて、/s/発音シミュレータの舌の高さを調節した。最後に、口腔

内気流の計測と、その時の遠方場での音を計測した。

3.2 /s/音の空力音響シミュレーション

ある体積領域 V 、理想気体において運動量流束密度、すなわち V を通過する流体の運動量の時間変化は、二階のテンソルである運動量流束密度テンソルの空間変化と等しい。一方で、音場としての V には単純に静圧による応力が加わり、その変化は密度変化に比例する。上述の運動量流束密度テンソルと静圧による応力の間に差が生じると、音波が発生する。この差は Lighthill テンソルと呼ばれている。運動量流束密度テンソルの変動は、レイノルズ応力に時間的な変動が生じることで生じる。本研究では、音源を生み出す流れ場から遠方場での音圧を求めるために、変動レイノルズ応力を流れ場から求め、静止している音場にそのエネルギーを与えた。

Lighthill テンソルの算出には、乱流の統計的物理モデルとしてダイナミック・スマゴリンスキーモデルを用いた。さらに Lighthill テンソル勾配の時系列データをフーリエ変換により周波数領域での Lighthill テンソルを求めた。周波数毎に Lighthill テンソルの実部と虚部を非斉次ヘルムホルツ方程式の右辺に与え、時間空間とも二次の有限要素法によって近似解を求めた。

4. 研究成果

/s/発音シミュレータに生理的呼気流量と同等の流量を与えた結果、遠方場での音のスペクトル密度は、同一被験者間で 100-15000Hz においてほぼ差のない事を確認した。次に、気道内の流速を計測した結果、流速は上顎前方部と舌尖端部による狭窄で最も速い値を示した。次に上顎切歯の上流付近、上顎切歯先端付近と徐々に流速は減速した。さらに、流速の RMS 値を求めた結果、上顎切歯の上流付近が最も高い値を示し、次に上顎切歯先端付近、口唇付近の順で高い値を示したが、狭窄付近では最も低い値を示した。その結果、/s/発音シミュレータで/s/音を生み出させるために必要なレイノルズ数は約 2800 と見積もられた。すなわち、/s/発音時は流れが乱流となることが確かめられた。

数値計算の結果を Fig.1 に示す。口腔内流れは、上顎前歯後方面と舌前方部分との狭窄付近と上下前歯間隙付近で流速が増し、下口唇と衝突後、口腔外に出ていた。高周波音源は障害物より下流側に見られた。音響スペクトルから、高周波音源から伝播した音のパワーが低周波と比較すると強いことが分かった。口唇から放射された音波は、多重極性を示した。遠方場でのパワースペクトル密度を実験値と比較した結果、傾向が一致した。

「うすい」と発音した際に合わせて舌尖端の位置を変化させた結果、気道内の流れが変化し、上顎前方部と舌尖端の気道の高さと断面積の間にある二乗の関係が、流速の非線形な高まりとレイノルズ数の上昇を決定付けて

いることが示唆された。舌先端の上下動により非線形な流れの変化が生じ、それにより空力音が発生すると考えられた。人類は舌下神経の発達により舌先端の微細な上下運動制御が可能となり、/s/を含む音韻の構音を実現したと考えられる。

本研究では、舌の動きと空力音発生に関する数値シミュレーションの実現段階まで至っていないが、目下、舌筋の走行を考慮した舌運動のシミュレーション研究を実施している。舌運動を含む空力音シミュレーションにより、より詳細に、空間的な音源の評価とその発生要因となる流れの特性が調査できるようになるため、本研究の今後の発展に繋げる予定である。

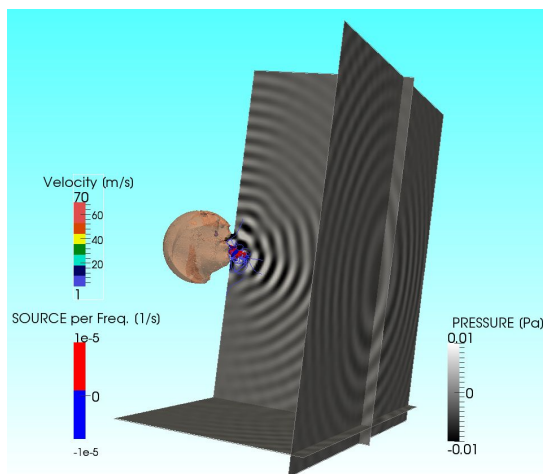


Fig.1 Computational aero-acoustic simulation: blue lines: stream line computed by Euler, Red and bluesurfaces: diversity of diversity of Lighthill tensor , gray scale color map: sound pressure (Pa) at 21L/min, 14062Hz.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

1. Nozaki K., Yoshinaga T., Wada S., 2014, Sibilant /s/ Simulator Based on Computed Tomography Images and Dental Casts, Journal of Dental Research, 93(2), pp.207-211.
2. Cisonni J., Nozaki K., Van Hirtum A., Grandchamp X., Wada S., 2013, Numerical Simulation of the Influence of the Orifice Aperture on the Flow around a Teeth-shaped Obstacle, Fluid Dynamics Research, 45(2), 025505.
3. Nozaki K., Maeda Y., Tamagawa H., 2013, The Effect of Wearing Custom-made Mouthguards on the Aero-acoustic Properties of Japanese Sibilant /s/, Dental Traumatology, 29(2), pp.139-144.

4. Van Hirtum A., Grandchamp X., Cisonni J., Nozaki K., Bailliet H., 2012, Numerical and Experimental Exploration of Flow through a Teeth Shaped Nozzle, Advances and Applications in Fluid Mechanics, 11, pp.87-117.

〔学会発表〕(計 5 件)

1. Yoshinaga T., Nozaki K., Wada S., Effects of the Position of Tongue on the Sound Generation of Sibilant/S/, The 15th International Conference on Biomedical Engineering IFMBE Proceedings 43, pp 364-367, 7 December 2014, Singapore.
2. 吉永司, 野崎一徳, 和田成生, 舌前部の挙上による歯茎摩擦音/s/の空力音発生への影響, 第 24 回バイオフロンティア講演会, 2013 年 11 月 12 日, 京都.
3. Fujiso Y., Van Hirtum A., Nozaki K., Wada S., Experimental and numerical characterization of aerodynamic noise applied to moderate Reynolds number airflow, Proceedings of Meetings on Acoustics 19, 2 June 2013, Montreal, Canada.
4. Fujiso Y., Van Hirtum A., Nozaki K., Wada S., Study of unvoiced fricative speech production: Influence of initial conditions on flow development, Proceedings of Meetings on Acoustics 19, 2 June 2013, Montreal, Canada.
5. 野崎一徳, 玉川裕夫, 下條真司, Fujiso Yo, Annemie Van Hirtum, 和田成生, 無声摩擦子音の Lighthill 音響アナロジーを用いた空力音連成解析, 第 25 回日本機械学会バイオエンジニアリング講演会, 2013 年 1 月 10 日, 筑波.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野崎 一徳・大阪大学歯学部附属病院・助教

研究者番号：40379110