

流体力学的に見た構音時の鼻咽腔閉鎖機能

野崎 一徳¹⁾、畠中 耕平²⁾、中川 真智子²⁾、杉山 千尋³⁾、玉川 裕夫¹⁾、野原 幹司⁴⁾、荻安 誠⁵⁾、佐藤 耕一⁶⁾、阪井 丘芳⁴⁾、山城 隆⁷⁾、古郷 幹彦⁸⁾

1)大阪大学 歯学部附属病院 医療情報室、2)富士通株式会社、3)大阪大学 歯学部附属病院 顎口腔機能治療部、4)大阪大学 大学院歯学研究科 高次脳口腔機能学講座、5)京都学園大学、6)済生会松阪総合病院、7)大阪大学 大学院歯学研究科 分子病態口腔科学、8)大阪大学 大学院歯学研究科 顎口腔病因病態制御学講座

概要

ヒトは高次脳機能として複雑な言語を符号化し、それに従って神経刺激を上咽頭・口腔の様々な運動器官に伝達することで、肺からの呼気による流れ場を制御することにより音声を生じることが出来る。更にヒトは構音の際、舌や軟口蓋を自在に制御することにより鼻腔や口腔を流路や共鳴管として用いることが出来る。本研究では、軟口蓋が挙上することによって生じる鼻腔と口腔を含む声道（気道）のトポロジー変化が流れ場に及ぼす影響について調査した。構音時の気道形状を三次元的に取得するため、低被ばく線量により時系列での気道形状が計測可能な Aquillion ONE（東芝メディカル）を用いた。計測情報から有限要素法を用いて気道部分を抽出した。サイバーメディアセンターに導入されている OpenFOAM を用いてラージエディシミュレーション（LES）解析を行った。その結果、僅かな咽頭部の（咽頭後壁と口蓋垂の）隙間であっても、鼻腔に流れが生じ、それにより口腔内での速度の最大値が減少することが示された。つまり鼻咽腔閉鎖が不完全な場合、声道のトポロジーが変化し、構音に必要な前歯付近での流速が得られない可能性が示唆された。

1. はじめに

1.1 鼻咽腔閉鎖機能とは

「ん」を発音する際に、鼻から空気が流れることは容易に確認できる。鼻炎などにより鼻腔が狭められると「ん」が聞き取りにくい音に変化する。「ふ」と発音する際には、口から空気が流れる。その時、

鼻から空気が流れない。実は、「ん」と発音する際には口が閉じられ、鼻腔だけに空気が流れる。「ふ」のときには、鼻腔には一切空気が流れず、口腔にだけ空気が流れる。その理由は、口蓋垂（「あ」と発音した際に喉の奥にみられる上舌）が咽頭周囲筋の収縮と連動して挙上し気道を閉塞させるからである。このような気道を閉塞させることを、鼻咽腔閉鎖機能[1]と呼称している。

1.2 構音とは

言葉は意味を持つ。その意味を伝える最小単位は単語である。単語は音素から構成されている。音素には母音と子音がある。日本語では「ん」や「-」、 「っ」を除いて子音は単独では用いられることはなく、母音と組み合わせしてモーラ（音節）を構成する。例えば、「うすい」は「ウ」「ス」「イ」の3モーラで3音節とカウントされる。この時、「ス」の音素は/s/ /w/となるが、1拍で発音される。母音は喉頭部にある声帯が肺からの気流によって振動し流れに周期的な渦を発生させることで基本周波数が決定され、また声道（気道）の形状や長さによって共鳴周波数が決定される[2]。一方で子音は、肺からの気流が咽頭から鼻腔や口腔に流れる際に発生し、気道の形状に起因する流れの急激な変化から渦が放出され、それが音の要因となる。

1.3 空力音響とは

空気の流れから音が発生する仕組みに関する研究分野があり、重工分野で特に盛んである。身近な問題としては、自動車サイドミラーの風切り音や新

幹線のパンタグラフから発生するエオルス音、掃除機から発生するブロアノイズ、歯科用タービンから発生するタービン音等がある。空力音は空力音源として考えられている流体音響テンソル（ライトヒルテンソル）の二階の空間微分から発生される音として理解できる。例えば手でまな板上の豆腐の上側表面を適度な圧力を保ちつつ下面と平行にずらすと、豆腐にはせん断応力が発生する。流体音響テンソルはこの状態で値を持つ。ずらしていた手を離すと、豆腐は元の形に戻ろうとする。この時、流体音響テンソルは急激に変化するので、二階の空間微分値は高い値を持つ。流体力学において用いられている流れ場を予測するための方法として、圧縮性ナビエ・ストークスの式がある。この式を省略無く変形し、左辺を音の伝播を表す線形波動方程式の形とすると、右辺は流体音響テンソルの二階の空間微分の項となる。このことから、流体音響テンソルが高い値を示せば、音響粒子速度の速い（圧力の高い）音が伝播することが分かる。

1.4 摩擦音とは

歯科治療や構音治療においてしばしば問題となる「さ」行の音は、口腔前方部、すなわち、前歯の辺りで構音される音節である。特に前歯の歯並びが悪いと、「さ」行の発音に不自由する場合がある。入歯などでも前歯付近やかみ合わせに問題があると、同じく「さ」行の発音に問題があることが多い。「さ」行の音素は/s/と/a/、/u/、/e/、/o/の組み合わせで音節を構成しており、「し」だけは構音時の舌の位置が異なるため、子音の音素が/s/ではない。/s/の音素はこれまでの研究から、乱流から生じる空力音であることが報告されている[3,4]。口腔内で乱流を生じさせるために、ヒトは幾つかの特徴的な運動を行っている。具体的には

1. 呼気体積流量の増大
 2. 鼻咽腔閉鎖
 3. 舌前方部の口蓋（上顎）前方部への挙上
- を行っている。これらにより前歯付近での流速を増大させていると考えられている。

1.5 音素と音素を繋ぐ調音結合

「す」のような音節は、/s/と/u/を1拍で発音する。どこからが/s/でどこからが/u/なのかということに関しては、連続音声スカログラムで確認することが出来る。同様に、「うすい」などの単語に関しても、少々強引ではあるが/u/ /s/ /u/ /i/の4つの音素の調音結合であると考えることが出来る。ただし、調音結合時に気道内の流れがどのように遷移するのかに関しては十分な知見が得られていない。

1.6 母音と摩擦音への遷移時の流れ変化を流体シミュレーションで調査

本研究の目的は、「うすい」という単語を対象とし、その時の気道内の気流動態を明らかにし、調音結合時の流れの変化に関して、乱流を生じさせる際の3つの特徴的な運動がどのように関係しているのかについて調査した。

2. 材料と方法

2.1 構音時の気道形状抽出を実現

済生会松阪総合病院には構音時の気道形状変化を時系列で計測するための高性能 X 線断層写真撮影装置 (Aquillion ONE (東芝メディカル)) が導入されている。この装置を用いると低被ばく線量下[5]でも秒間20コマ程度で三次元の気道形状が計測出来る。今回は大阪大学大学院歯学研究科・歯学部附属病院倫理委員会の承認を得た上で、筆者本人が被験者となり、被検音「うすいみそしる」を発話した際の気道形状を計測した。その結果を図1に示す。

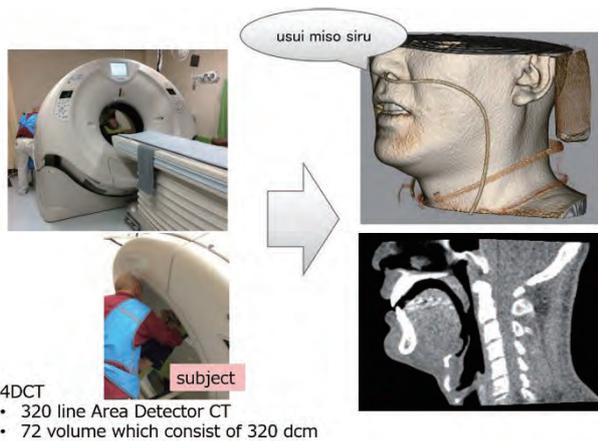


図1 ガントリーが傾斜され、CT 本体後方に設置されたリクライニング型チェアに座した被験者の顎顔面領域をスキャン領域に捉えている。4DCT と呼称される X 線照射型断層像撮影装置により「うすいみそしる」と発音している被験者の気道を 72 コマで計測した[6]。

2.2 複雑な気道形状の構造格子生成を実現

工業デザインでも同様であるが、生体を構成する様々な臓器の形状はトポロジーの発見が困難であり、一般的な CAD 技術をそのまま適用することが困難である。そのため、トポロジーに依存しない、Building-Cube Method(BCM)を用いた生体形状のメッシュ分割が有効な選択肢となる。BCM は計算領域を直交等間隔格子にブロック分割する。さらに、物体近傍で格子解像度が必要な箇所では Cube サイズを詳細化する。流体計算用アプリケーション OpenFOAM のプレ処理アプリケーションである snappyHexMesh は、BCM で用いられる方法に加えて物体近傍では物体形状に応じた多面体セルを用いることにより、非構造格子を生成する。本研究では snappyHexMesh によって生成された気道の非構造格子を OpenFOAM の入力データとして用いた(図 2)。メッシュサイズは約 500 万要素であった(最大要素サイズ: 0.137mm) [7]。

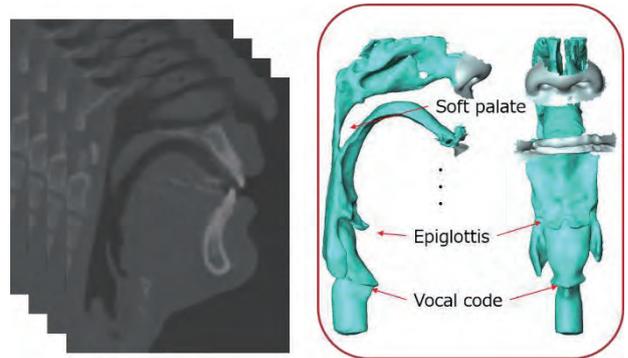


図2 360 枚の DICOM 画像から気道領域のみ抽出した。

2.3 乱流モデルの利用

乱流は大小様々な渦運動からなる。これらの動きは一見予測不可能なものに感じられるが、乱流の種類によっては確率統計的なモデルとして表現することが可能である。その中でも、ロシアの数学者コルモゴロフは、コルモゴロフスケールと呼ばれる法則性を見つけ出した。コルモゴロフが中心となってまとめた確率論の入門書には、物理実験における観測の意味を数学(確率)的にとらえる方法について詳細に記載されており、大数の法則で観測の確かさが保証されていることにより、確率論的に乱流のモデル化がなされていることが理解できる。ラージエディシミュレーション(LES)は、数値シミュレーション分野で特に空力音響解析に必要な渦の時間変化を精度良く計算するために有効な手法として多くのアプリケーションにおいて用いられている。LESの本質は、空間をある大きさ(スケール)で分割し、そのスケール以上の流れについて計算し、それ以下の流れの影響については様々な乱流モデルを用いて見積もる方法である。原理的に分割するスケールを細かくするほど渦を直接計算している状態に近づくという単純な考え方である。ただし、乱流モデルは非常に複雑な工夫がなされており、実験値と最小二乗法で合わせ込んだもの等が主流である。

3. 結果と考察

3.1 LES による数値流体計算結果

LES 解析は OpenFOAM3.0 の pisoFOAM パッケージを用い、乱流モデルに関してはダイナミック・ラグラジアン・モデルにて実行した。レイノルズ数は約 1583 した。壁面境界は滑りなし条件とした。図 3 は、音節「す」(/s/ /u/) 調音時の気道内流れの LES 解析結果を示している。上段は「す」調音時の気道三次元形状を、下段はその形状に関する LES 解析結果を示しており、コンター（色）は流れの絶対値を示している。9 から 10 にかけて口蓋垂が挙上し鼻咽腔閉鎖がなされている。それに伴い徐々に口腔前歯後方付近の流速が速くなっていることが分かる。

3.2 利用した計算機

今回、OpenFOAM をインストールし実行した計算機は、サイバーメディアセンターVCC クラスタであった。各ノード 20 コア装備されており、本研究では 1 コマあたり 1 ノードを割り当て、ベストエフォートにジョブを実行した。但し、OpenFOA3.0 に関して、ノードを股がった MPI 並列計算は達成できなかった。今後、サイバーメディアセンターと相談し、より大規模な計算を実現する予定である。

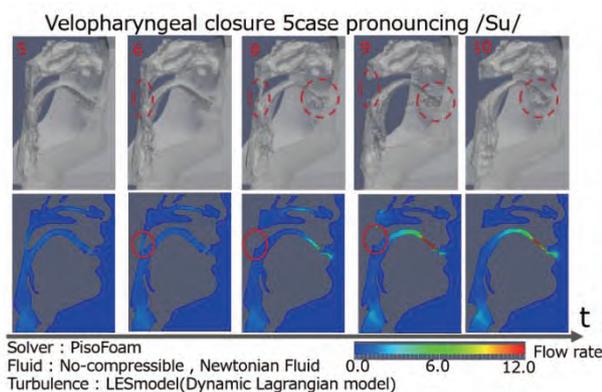


図 3 音節「す」(/s/ /u/) 調音時の気道内流れの LES 解析結果:9 から 10 にかけて口蓋垂が挙上し鼻咽腔閉鎖がなされている。それに伴い徐々に口腔前歯後方付近の流速が速くなっていることが分かる。

3.3 臨床応用

構音機能に問題がある子供や、矯正治療等による音声の変化が気になる方、舌癌等によって通常の構音が困難な方等に、相手に伝えたい事を音にして伝えられるような治療の実現を目指している。例えば、本研究の延長線上には、気道内の形状と流れと音の関係を解き明かすことによって、その人が器質的に実現可能な形のなかから、聞き取り可能な音節を作り出すために、戦略的なトレーニング方法を考案すること等がある。

参考文献

- [1] J. A. Rowlands, "Videofluorography: the role of temporal averaging," *Med Phys*, vol. 11, no. 2, pp. 129-36, 1984 Mar-Apr, 1984.
- [2] G. Fant, "The relations between area functions and the acoustic signal," *Phonetica*, vol. 37, no. 1-2, pp. 55-86, 1980.
- [3] K. Nozaki, T. Yoshinaga, and S. Wada, "Sibilant /s/ simulator based on computed tomography images and dental casts," *J Dent Res*, vol. 93, no. 2, pp. 207-11, Feb, 2014.
- [4] A. Van Hirtum, Y. Fujiso, and K. Nozaki, "The role of initial flow conditions for sibilant fricative production," *J Acoust Soc Am*, vol. 136, no. 6, pp. 2922, Dec, 2014.
- [5] P. C. Shrimpton, J. T. Jansen, and J. D. Harrison, "Updated estimates of typical effective doses for common CT examinations in the UK following the 2011 national review," *Br J Radiol*, vol. 89, no. 1057, pp. 20150346, 2016.
- [6] K. Nozaki, H. Tamagawa, C. Sugiyama, K. Nohara, T. Sakai, K. Hatanaka, M. Nakagawa, K. Satoh, M. Kariyasu, T. Yamashiro, M. Kogo, *Velopharyngeal Closure Function Strategy in Articulation: Mechanical Dynamics Modeling of Air Flow in the Vocal Tract*, 2016 IEEE 16th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE), 198-203, 2016.

- [7] K. Hatanaka, M. Nakagawa, T. Watanabe, K. Nozaki, H. Tamagawa, C. Sugiyama, K. Nohara, T. Sakai, K. Satoh, M. Kariyasu, T. Yamashiro, M. Kogo, Surface Model Construction from 4D-CT for Articulation Simulation, The 12th World Congress on Computational Mechanics, 2016.