

歯茎摩擦音発音の空力音響シミュレーション：被験者の違いに関する解析

Aeroacoustic simulation on the sibilant fricative production: analysis on differences among several subjects

- 吉永司, 阪大基礎工, 大阪府豊中市待兼山町 1-3, E-mail: t.yoshinaga@me.es.osaka-u.ac.jp
野崎一徳, 阪大歯病, 大阪府吹田市山田丘 1-8, E-mail: knozaki@dent.osaka-u.ac.jp
和田成生, 阪大基礎工, 大阪府豊中市待兼山町 1-3, E-mail: shigeo@me.es.osaka-u.ac.jp
Tsukasa Yoshinaga, Graduate School of Engineering Science, Osaka University, 1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, Japan
Kazunori Nozaki, Osaka University Dental Hospital, 1-8 Yamadaoka, Suita, Osaka, Japan
Shigeo Wada, Graduate School of Engineering Science, Osaka University, 1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, Japan

The sound generation mechanisms of sibilant fricatives were investigated by large-eddy simulations of compressible flow. The vocal tract geometries of sibilant fricatives /s/ and /sh/ were extracted from medical images of three Japanese subjects. The results of flow fields showed that the jet in the vocal tract of /s/ directly impinged on the lip cavity, whereas the jet in the vocal tract of /sh/ recirculated in the cavity between the tongue tip and lower teeth. The differences of flow fields among three subjects were observed only in the magnitude of flow fluctuation and flow direction in the lip cavity. With the simulation of this study, we found that the difference of production mechanisms between /s/ and /sh/ reported in the previous studies can be observed in the vocal tract of three subjects.

1. 背景と目的

摩擦音とは、日本語のサ行 (/s/, /sh/) やハ行 (/h/, /f/)等を発音する際に発生する子音の一種であり、口腔内に形成される狭窄流路のジェット流から空力音として音が発生する⁽¹⁾。声帯から発生する母音と違い、空力音として音が発生するため、口腔形状の異常やダウン症等による舌機能の障害のため、狭窄流路を上手く形成できずに構音障害となることが知られている^(2,3)。特に、舌尖の微妙な前後の位置の違いにより発音し分ける歯茎摩擦音/s/と後部歯茎摩擦音/sh/は区別が難しく、発音障害になりやすいと言われている。そのため、口腔内でどのように狭窄流路を形成し、ジェット流から歯茎摩擦音の音響特性が発生するのかを明らかにすることで、構音障害のリハビリ治療支援等に役立つことが期待されている。

これまで摩擦音の発生メカニズムについて、口腔単純モデルを用いることにより調べられてきた。Shadle⁽⁴⁾は円管内に狭窄流路と前歯を模した半円板を設置し、それらの位置を変化させることにより、摩擦音/s/, /sh/, /f/等の音響特性の違いを説明した。Howeら⁽⁴⁾は口腔形状を5つの区間に分け、それぞれの区間の断面積より準一次元モデルを構築して音響解析を行うことにより、摩擦音/s/の音響特性を再現した。また我々のグループでは、口腔内の5つの区間に関して、CT画像により計測した口腔断面形状を考慮することにより、被験者の/s/及び/sh/の音響特性の違いを再現した^(5,6)。しかし、これらモデルが実際に発音するヒトの口腔内の流れ場及び音場を、どの程度表現出来ているのかは明らかでない。

実際のヒト発音時の口腔内の気流について、Nozaki⁽⁷⁾はCT画像から抽出した/s/発音時の口腔実形状流路を用いてラージエディシミュレーション (Large Eddy Simulation, LES) を行うことにより、ジェット流の乱流渦から発生する音源を可視化した。しかし、この音源から発生する音の特性については調べられていない。また我々のグループでは、構音障害で問題となる/s/と/sh/の狭窄流路形状の違いについて、日本人被験者が/misoshiru/と発話する際のCT画像から形状を抽出し、圧縮性流体を考慮したLESを行うことにより、/s/と/sh/の音の違いが生まれる要因について議論した⁽⁸⁾。しかしこの時の、被験者は一名だけであり、その被験者の口腔内

で観察された現象が一般的に現れる現象かは明らかでない。そこで本研究では、日本人話者3名の医療画像より抽出した/s/と/sh/の口腔形状に対して圧縮性流体のLESを行うことにより、発音時の口腔内の流れ場及び音場に関して、被験者間の違いを議論し、一般的な発音メカニズムを明らかにすることを目的とする。

2. 方法

摩擦音/s/及び/sh/発音時の口腔形状を3名の構音障害のない男性日本語話者の医療画像より抽出した。被験者A(42歳)の口腔形状はCT画像より抽出した。摩擦音/s/はコーンビームCT (CB MercuRay, 日立メディコテクノロジ), /sh/は320-row Area Detector CT (Aquilion one, 東芝メディカル)により撮像し、口腔領域を含む被験者頭部の画像を取得した。この時、/s/は9.6秒間持続して発音している間に撮像し、/sh/は「みそしる(/misoshiru/)」と発音する際の1コマ(0.05秒間)として撮像した。

その他の二名の被験者B及びC(26歳及び24歳)はMR装置 (MAGNETOM Prisma fit 3T, Siemens)を用いて計測した。この時、被験者は装置内で約30秒間/s/及び/sh/の発音状態を保ち、口腔形状の計測を行った。また、MR装置では前歯形状を計測できないため、Takemotoら⁽⁹⁾の手法を参考に、前歯に舌及び口唇を押し当てることにより前歯形状を抽出し、声道形状から差し引くことで発音時の口腔流路を形成した。Fig. 1にMR画像および抽出した前歯と声道形状を示す。

得られた口腔形状に対して、計算格子を構築することにより、空力音響シミュレーションを行った。摩擦音/s/及び/sh/発音時の被験者Aの口腔流路壁面の計算格子をFig. 2に示す。計算コスト削減のため、咽頭部(口唇から後方に約64mm)より後方の流路は計算領域から除いた。また、ジェット流による乱流の渦と音源の発生を計算格子で解像するため、狭窄から口唇にかけて格子幅を細かくした。

LESでは、圧縮性流体の連続の式、運動方程式、エネルギー式、状態方程式

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{q}_j}{\partial x_j} \quad (1)$$

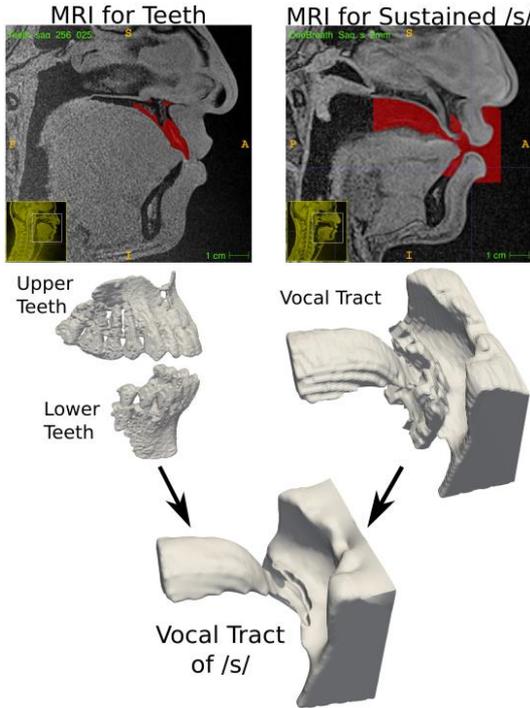


Fig. 1 Vocal tract, upper and lower teeth geometries extracted from magnetic resonance images. The MR images and vocal tract geometries are shown for subject B.

$$\frac{\partial \bar{\varphi}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\varphi}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{E}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\varphi}_j \bar{E}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p} \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \sigma_{ij} \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j}, \quad (3)$$

$$\bar{p} = (\gamma - 1) \bar{\rho} \bar{e}, \quad \bar{e} = C_v \bar{T} \quad (4)$$

を支配方程式とし、離散的に解いた。ここで、 t は時刻、 $\bar{\rho}$ は密度、 \bar{u}_i は x_i 軸($i=1, 2, 3$)方向の速度、 $\bar{\varphi}_i = \bar{\rho} \bar{u}_i$ は流束、 \bar{p} は圧力、 $\bar{E} = 1/2 |\bar{u}_i|^2 + \bar{e}$ は全エネルギー、 \bar{e} は内部エネルギー、 \bar{T} は温度である。 σ_{ij} 及び q_j は粘性応力テンソルと熱流束であり、

$$\sigma_{ij} = 2\bar{\rho}(\nu + \nu_{SGS}) \left(s_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} s_{ll} \right), \quad (5)$$

$$q_j = -\bar{\rho} \gamma C_v (\alpha + \alpha_{SGS}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \quad (6)$$

と計算する。この時、動粘度 ν_{SGS} と熱拡散率 α_{SGS} はLESのサブグリッドスケール (Sub Grid Scale, SGS) での渦粘性と熱拡散を表しており、本研究では、Fureby⁽¹⁰⁾の一方程式モデルを用いて決定した。 s_{ij} は変形速度テンソルであり、 $s_{ij} = 1/2 (\partial \bar{u}_i / \partial x_j + \partial \bar{u}_j / \partial x_i)$ と計算する。また、気体に関する定数である動粘度 ν 、比熱 C_v 、比熱比 γ 、熱拡散率 α は、摂氏 20 度の空気の値を用いた。さらに、空力音源の大きさについて、Lighthillの音源⁽¹¹⁾

$$\varphi = \frac{\partial^2 \rho u_i u_j}{\partial x_i \partial x_j}, \quad (5)$$

の時間変動のRMS値を計算した。

以上の式を有限体積法数値計算ソフトウェアOpenFOAM 2.3.1を用いて口腔流路内の格子上で計算を行った。計算の境界条件としては、入口部に一樣流速、出口部に無反射境界、口腔壁面に断熱ノンスリップ条件を課した。入口流量は被験者Aに対して 400 cm³/s、被験者B,Cに対して250 cm³/sと設定した。

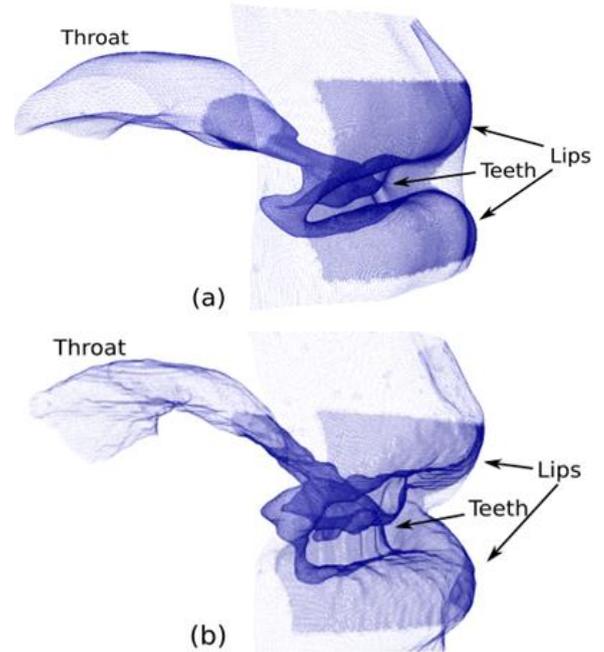


Fig. 2 Computational grids of vocal tract walls of /s/ (a) and /sh/ (b) for subject A.

3. 結果と考察

シミュレーションにより得られた、被験者 A, B, C の歯茎摩擦音/s/発音時の矢状断面における流速の瞬時値を Fig. 3 に示す。この時、矢状面の位置は狭窄流路の中央に設定している。全ての被験者において、舌尖端と歯茎部によって形成された狭窄流路からジェット流が発生し、上下前歯付近で大きく乱れて口唇の外へ出て行く様子が観察された。この時、狭窄流路における最大平均流速は被験者 A, B, C でそれぞれ 50.1 m/s, 47.9 m/s, 45.9 m/s となった。また、上下前歯の隙間から出たジェット流は被験者 A, B において上唇面に沿って外へ出て行ったのに対し、被験者 C では下唇面に沿って出て行った。

後部歯茎摩擦音/sh/発音時の矢状断面における流速の瞬時値を Fig. 4 に示す。全ての被験者の口腔形状において、舌尖端が歯茎摩擦音/s/にくらべて後方へ移動しており、狭窄流路の位置が後部へ移っていることが確認できた。狭窄流路における最大平均流速は被験者 A, B, C でそれぞれ 33.4 m/s, 40.1 m/s, 36.5 m/s となり、/s/の最大平均流速と比べて小さくなった。これは、/sh/の狭窄流路の横幅が/s/に比べて広がったことが原因と考えられる。また、狭窄流路から出たジェット流は、まず下前歯と舌尖端の空間で大きく乱れた後、上下前歯の隙間を通して口唇へ流れて行った。上下前歯の隙間から出たジェット流は、全ての被験者の口腔形状において、下唇面に沿って外へ出て行った。

歯茎摩擦音/s/発音時の矢状断面の流速時間変動に関する RMS 値を Fig. 5 に示す。狭窄流路から出たジェット流は、全ての被験者で、上下前歯の前後の空間において大きな流速変動が発生した。後部歯茎摩擦音/sh/の矢状断面の流速変動の RMS 値を Fig. 6 に示す。後部歯茎摩擦音/sh/では歯茎摩擦音/s/と比べ上下前歯の前後だけでなく、狭窄流路の出口付近において大きな流速変動の値が見られた。これは、下前歯と舌尖端による空間において旋回流が発生したことにより、狭窄流路から出たジェット流が乱されたからだと考えられる。また、被験者 A では狭窄流路の出口と上下前歯付近の流速変動の値はほとんど同じ大きさだったのに対し、被験者 B, C では上下前歯の隙間に比べ狭窄流路出口付近の流速変動

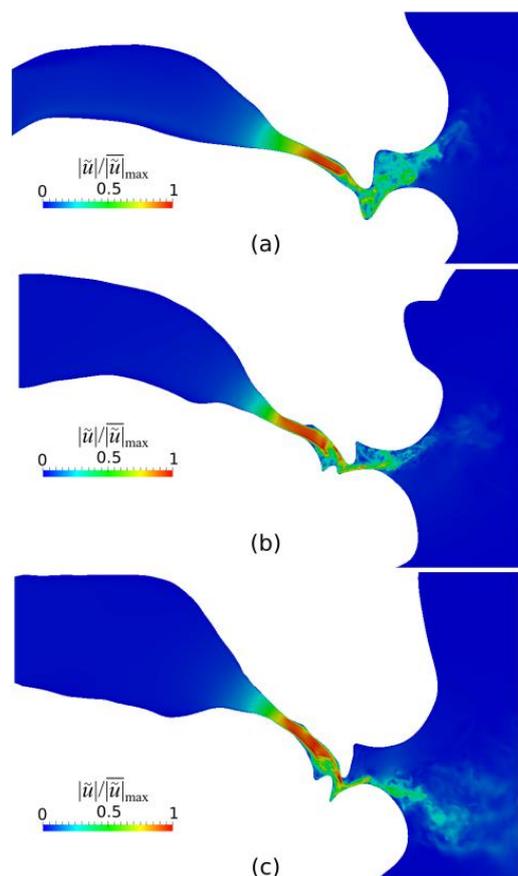


Fig. 3 Midsagittal plane of the instantaneous velocity field in the vocal tract of /s/ for subject A (a), B (b) and C (c).

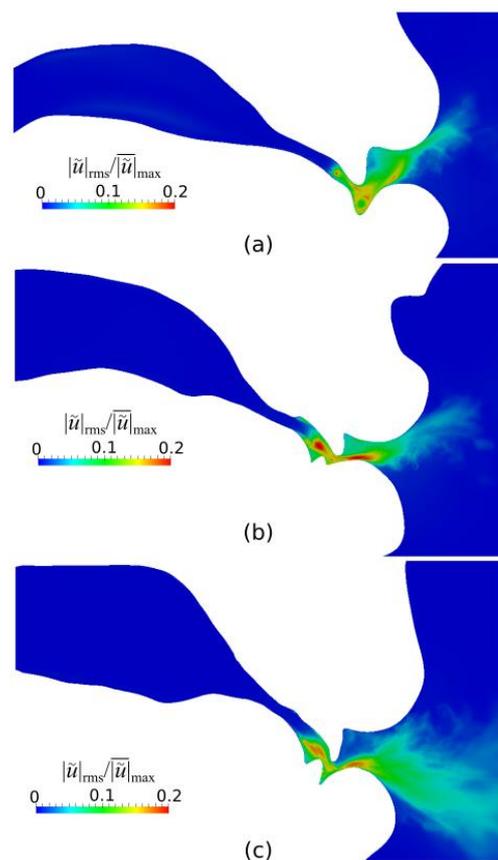


Fig. 5 Midsagittal plane of RMS values of velocity fluctuation in the vocal tract of /s/ for subject A (a), B (b) and C (c).

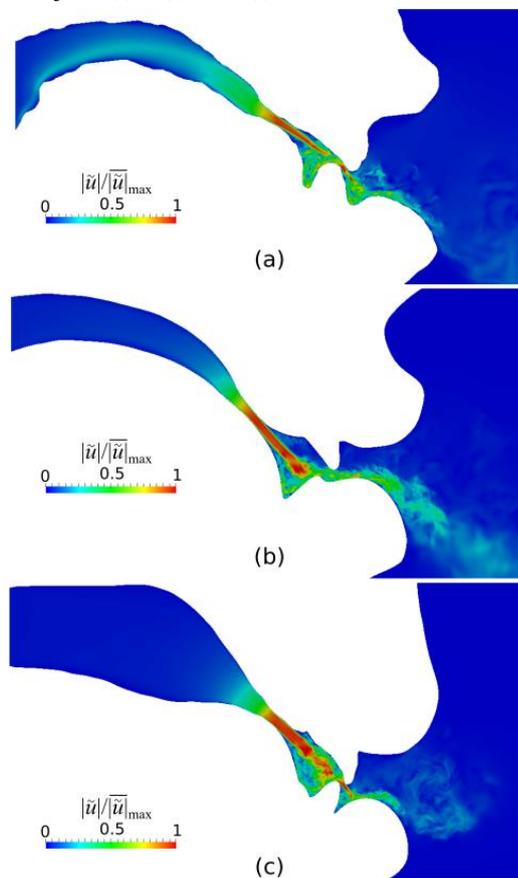


Fig. 4 Midsagittal plane of the instantaneous velocity field in the vocal tract of /sh/ for subject A (a), B (b) and C (c).

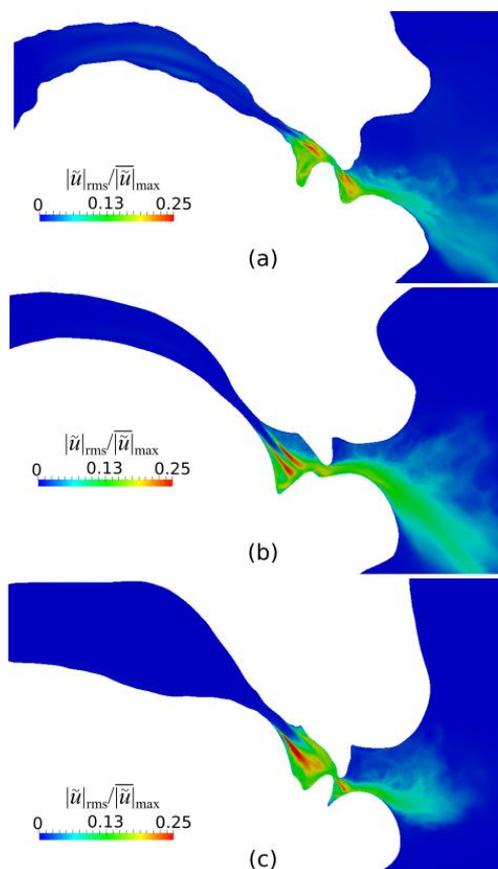


Fig. 6 Midsagittal plane of RMS values of velocity fluctuation in the vocal tract of /sh/ for subject A (a), B (b) and C (c).

の値の方が大きかった。

歯茎摩擦音/s/の各被験者の口腔内の流速分布より式(5)で計算した音源の大きさを Fig. 7 に示す。全ての被験者において、流速変動の RMS 値と同様に、上下前歯の前後の空間において大きな音源の分布が見られた。この時、被験者 A に比べて、最大流速が小さいにもかかわらず、被験者 B、C の口腔内における音源の値の方が大きかった。この原因としては、被験者 A の/s/の口腔内は下前歯や歯茎部に凹凸が少なく、滑らかな流路となっているのに対し、被験者 B、C の口腔内には下前歯の先端や歯茎部の凹凸が見られ、より大きな流速変動と音源の発生につながったと考えられる。

後部歯茎摩擦音/sh/の各被験者の口腔内の音源の大きさを Fig. 8 に示す。歯茎摩擦音/s/と同様に上下前歯の前後の空間で音源が発生するとともに、狭窄流路の出口付近において大きな音源の分布が見られた。流速変動と空力音源の分布を比較すると、大きな流速変動の値が観測された位置において、大きな音源の値が観測されており、口腔内の流速変動と空力音源の大きさに相関があることが示唆された。これまで口腔内に熱線流速計を設置して計測された流速変動⁽²⁾は、空力音源の発生を示していると考えられる。

各被験者の口腔形状に対して行ったシミュレーションにおける遠方場(口唇先端から 10 cm)の圧力のスペクトルを Fig. 9 に示す。被験者 A の/s/と/sh/の音の違いとしては、/s/において約 5.2 kHz 以上のブロードバンドノイズとなったのに対し、/sh/は約 4.3 kHz にピークを持ち、高周波数域の音圧レベルは/s/より/sh/が小さくなった。一方、被験者 B の/s/は 5.5 kHz、/sh/は 4.3 kHz 以上の周波数でブロードバンドノイズとなり、被験者 C の/s/は 5.5 kHz、/sh/は 5.1 kHz 以上の周波数でブロードバンドノイズとなった。全ての被験者において、ピーク周波数は/sh/よりも/s/の方が高く、これまで報告されてきた一般的な/s/と/sh/の音響特性の違い⁽⁴⁾と同様の傾向となった。しかし、一般的に報告されている/sh/のピーク周波数(2-3 kHz)に比べて本研究の/sh/の口腔形状から発生した音は高かった。これは、CT や MRI において被験者が寝た姿勢で口腔形状を撮影したことにより、立位での発音と比べて舌の位置が前方に運動したことが考えられる。今後は、単純モデルと同様に⁽⁶⁾口腔内の音場に対して音響解析を行うことにより、/s/と/sh/の音響特性の違いが生まれる要因を議論する。

4. まとめ

本研究では、3名の被験者の歯茎摩擦音/s/及び後部歯茎摩擦音/sh/の口腔形状に対して圧縮性流体の LES を行うことにより、発音時の各口腔内における流れ場と音場を明らかにするとともに、各被験者の発音の違いについて議論を行った。全ての被験者において、これまで報告されてきたように/s/と/sh/で狭窄流路の位置が前後に異なり、狭窄流路からジェット流が発生することにより上下前歯の前後の空間、/sh/に置いては舌と下前歯の間の空間において大きな流速変動と空力音源が発生した。細かな口腔形状の違いや流速の大きさの違いは見られたものの、音源の分布位置や強さはほとんど変わらず、これまで報告されてきた被験者の歯茎摩擦音の発生メカニズム^(4,5,6,7,8)が、日本人3人の被験者でも見られることが明らかとなった。また、それぞれの口腔形状から発生した音は、一般的な/s/と/sh/の音響特性の違いを示し、ピーク周波数の違いはほとんど見られなかった。今後は、ピーク周波数が大きく異なると言われている男女の歯茎摩擦音の違い等に注目して研究を進めていく。

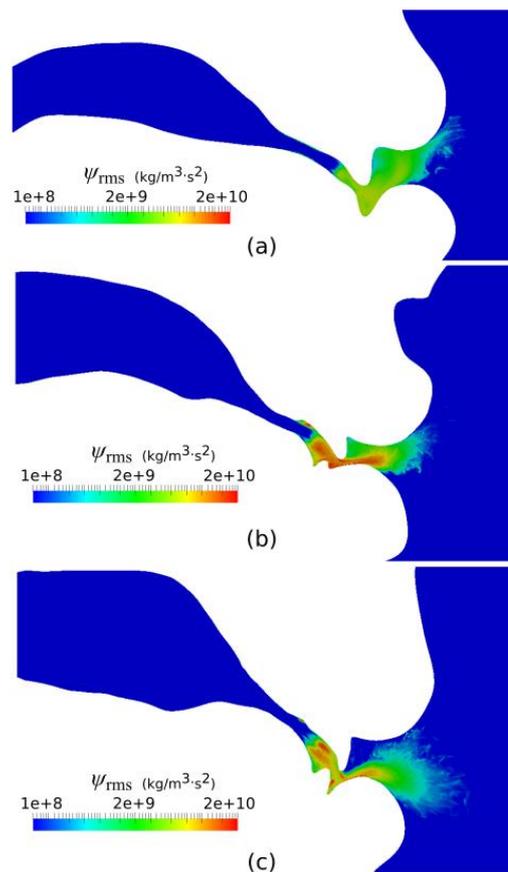


Fig. 7 Midsagittal plane of RMS values of Lighthill sound source in the vocal tract of /s/ for subject A (a), B (b) and C (c).

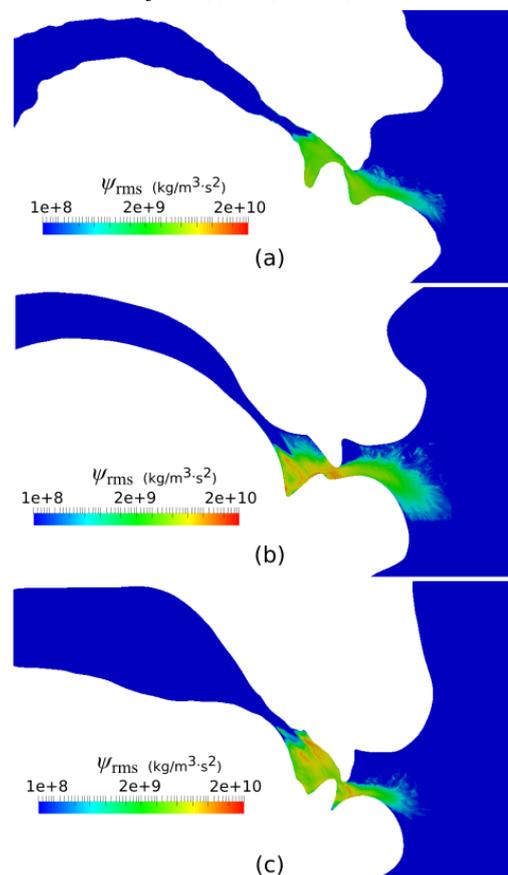


Fig. 8 Midsagittal plane of RMS values of Lighthill sound source in the vocal tract of /sh/ for subject A (a), B (b) and C (c).

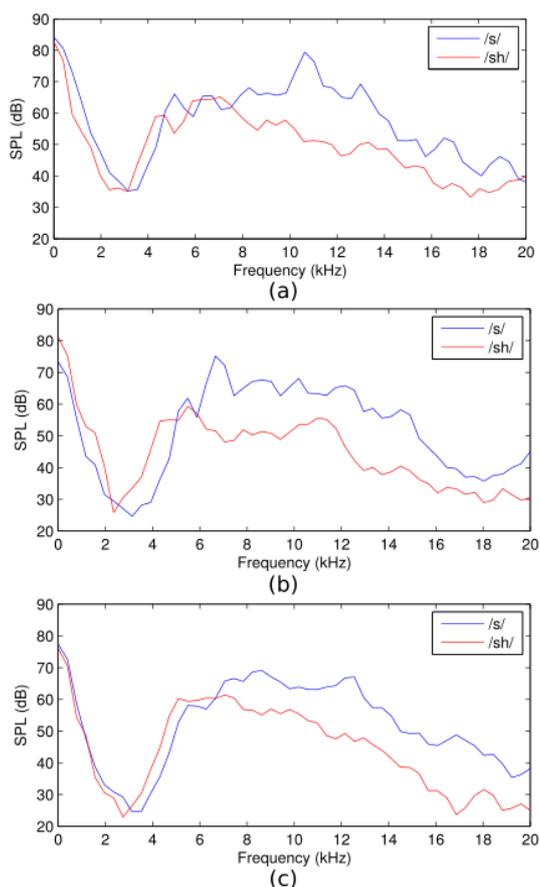


Fig. 9 Spectra of sound generated by the vocal tract of /s/ and /sh/ for subject A (a), B (b) and C (c).

謝 辞

本研究は、文部科学省ポスト「京」重点課題2「個別化・予防医療を支援する統合計算生命科学」(課題番号: hp180202)による助成を受けたものである。また、MRIの撮影にご協力して頂いたATR-Promotionsの脳活動イメージングセンタ ATR-BAIC、島田育廣技術員に感謝申し上げます。

参考文献

- (1) Shadle, C. H. "The acoustics of fricative consonants," Ph. D thesis, MIT, Cambridge, MA, (1985), 194 pp.
- (2) Runte, C., Lawerino, M., Dirksen, D., Bollmann, F., Lamprecht-Dinnesen, A., and Seifert, E. "The influence of maxillary central incisor position in complete dentures on /s/ sound production," *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 85, (2001), 485-495.
- (3) Wood, S., Wishart, J., Hardcastle, W., Cleland, J., and Timmins C. "The use of electropalatography (EPG) in the assessment and treatment of motor speech disorders in children with Down's syndrome: Evidence from two case studies," *Developmental Neurorehabilitation*, 12, (2009), 66-75.
- (4) Howe, M. S. and McGowan, R. S. "Aeroacoustics of [s]," *Proceedings of Royal Society A* 461, (2005), 1005-1028.
- (5) Yoshinaga, T, Nozaki, K., and Wada, S. "Effects of tongue position in the simplified vocal tract model of Japanese sibilant fricatives /s/ and /ʃ/," *Journal of the Acoustical Society of America* 141(3), (2017), EL314-EL318.
- (6) Yoshinaga, T, Nozaki, K., and Wada, S. "Experimental and numerical investigation of the sound generation mechanisms of

sibilant fricatives using a simplified vocal tract model," *Physics of Fluids* 30, (2018), 035104.

- (7) Nozaki, K. "Numerical simulation of sibilant [s] using the real geometry of a human vocal tract," *High Performance Computing on Vector Systems 2010*, Springer, Berlin, Heidelberg, (2010), 137-148.
- (8) Yoshinaga, T. "Experimental and Computational Analysis on Aeroacoustic Mechanisms of Sibilant Fricative," Ph.D. Thesis, Osaka University, 2018
- (9) Takemoto, H., Kitamura, T., Nishimoto, H., and Honda, K. "A method of tooth superimposition on MRI data for accurate measurement of vocal tract shape and dimensions," *Acoust. Sci. & Tech.* 25(6), (2004), 468-474.
- (10) Fureby, C. "On subgrid scale modeling in large eddy simulations of compressible fluid flow," *Physics of Fluids*, 8(5), (1996), 1301-1311.
- (11) Lighthill, M.J. "On sound generated aerodynamically. I. General theory," *Proc. R. Soc. Lond. A* 211, (1952), 564-587.
- (12) Nozaki, K, Yoshinaga, T, and Wada, S. "Sibilant /s/ simulator based on computed tomography images and dental casts," *J. Dent. Res.* 93, (2014), 207-211.