

口腔単純モデルの舌運動を考慮した歯茎摩擦音/s/の空力音響シミュレーション Aeroacoustic simulation on sibilant /s/ using a simplified model with tongue movement

- 吉永 司, 豊橋技科大, 愛知県豊橋市天伯町雲雀ケ丘 1-1, E-mail: yoshinaga@me.tut.ac.jp
- 野崎一徳, 阪大歯学部病院, 大阪府吹田市山田丘-1-8, E-mail: knozaki@dent.osaka-u.ac.jp
- 横山博史, 豊橋技科大, 愛知県豊橋市天伯町雲雀ケ丘 1-1, E-mail: h-yokoyama@me.tut.ac.jp
- 飯田明由, 豊橋技科大, 愛知県豊橋市天伯町雲雀ケ丘 1-1, E-mail: iida@me.tut.ac.jp
- Tsukasa Yoshinaga, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tempaku, Toyohashi, Japan
- Kazunori Nozaki, Osaka University Dental Hospital, 1-8 Yamadaoka, Suita, Osaka, Japan
- Hiroshi Yokoyama, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tempaku, Toyohashi, Japan
- Akiyoshi Iida, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tempaku, Toyohashi, Japan

The aeroacoustic simulation for the simplified vocal tract model was conducted to analyze the production mechanisms of sound in the articulation of /s/. The simplified model consists of a moving tongue model, and the wall condition of the tongue was simulated with the volume penalization method. The results showed that the velocity fluctuations downstream from the constriction were increased and decreased by the tongue ascent and descent, respectively. Although the far-field sound spectrum was reproduced by the simulation, some discrepancies with the experiment remained due to the initial condition of the simulation.

1. 緒 言

歯茎摩擦音/s/は日本語のサ行 ([シ]を除く)を発音する際に用いる音であり、口腔内のジェット流により空力音として発音することが知られている⁽¹⁾。/s/発音の際には、舌尖端と歯茎部により狭窄流路を形成し、ジェット流を発生させる。ジェット流から発生した/s/の音響特性は約 4 kHz 以上のブロードバンドノイズとなり、/s/を単語の中で発音する際には、母音の前後において約 100 ms から 200 ms の間に音が発生することが知られている^(2,3)。摩擦音/s/の調音メカニズムは、舌尖端の動きを医療画像や、磁気センサを用いて計測することにより調べられてきた。磁気センサを用いた Hamlet ⁽³⁾の研究では、舌尖端の口蓋への接触と音声の同時計測が行われ、摩擦音の発生のタイミングに比べて舌尖端の接触が遅れることが明らかとなった。しかし、この際口腔内の気流及び空力音の音源がどのようにコントロールされているかは明らかでない。

これまで、摩擦音の気流及び音源の特性は口腔単純モデルを用いて調べられてきた。Howe ⁽⁴⁾は口腔形状を準二次元に単純化し、上下前歯の隙間に点音源を設置することで、/s/の音響特性を再現した。また我々のグループでは⁽⁵⁾、矩形流路により構築した口腔単純モデルを用いて空力音響シミュレーションを行うことにより、上下前歯の後流で主な空力音源が発生することを明らかにした。さらに、/usui/と発音する際の舌尖端の上下運動と流量の変化を再現する口腔単純モデルを構築し、流れ場と音場の同時計測を行うことで、/s/発音時の口腔内の空力音制御メカニズムについて調べてきた⁽⁶⁾。しかしこの実験では、流れ場について熱線流速計による 1 点の流速計測のみ行っており、舌の上下運動がどのように口腔内の空力音源を形成しているのかは明らかでなかった。

そこで本研究では、口腔単純モデルに対して、埋め込み境界法を用いた空力音響シミュレーションを行うことで、舌の動きが/s/発音時の口腔内の乱流と空力音の発生にどのように関わっているのかを調査する。

2. 方 法

口腔単純形状モデルは被験者が/s/を発音する MR 画像を元に構築した⁽⁶⁾。Fig. 1 に口腔モデルの断面図を示す。モデルは、被験者の咽頭、狭窄流路、歯茎、上下前歯、口唇の 5 断面の断面積を矩形流路で再現しており、2 kHz から 15 kHz まで被験者の発音の音

響特性を再現することを確認している。舌モデルの中央には、 $x_2 \times x_3 = 1 \times 8 \text{ mm}$ の狭窄流路がある。実験の際、舌モデルはラックギアとピニオンギアにより 40 mm/s で上下させ、/u/発音時の舌の位置から $h = 3 \text{ mm}$ 上昇することにより/s/発音時の舌位置に移動する。同様の計算を実現するため、Fig. 2 のようにモデルを形成し、解析に用いた。

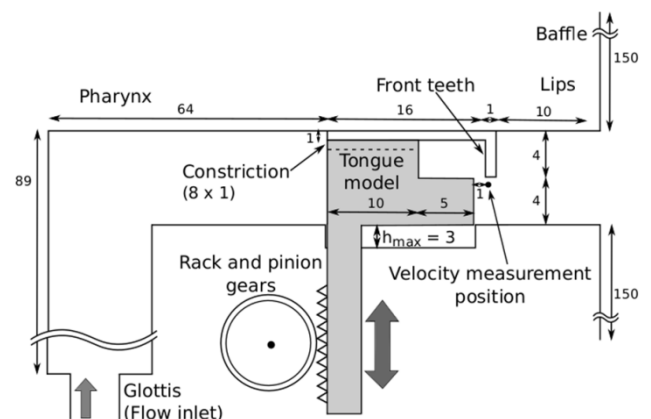


Fig. 1 Simplified vocal tract model for the articulation of /s/ in the experimental setup.

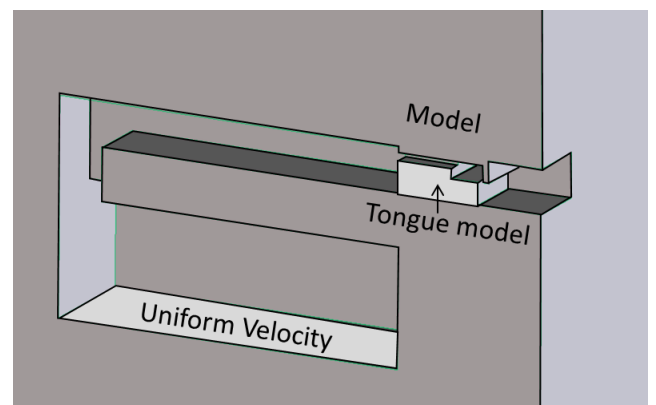


Fig. 2 Simplified model geometry for the simulation. The main dimensions of the model are same as those in Fig. 1.

動く物体の中で、流れと音の相互作用を表現するため、3次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式

$$\mathbf{Q}_t + (\mathbf{E} - \mathbf{E}_v)_{x_1} + (\mathbf{F} - \mathbf{F}_v)_{x_2} + (\mathbf{G} - \mathbf{G}_v)_{x_3} = \mathbf{V}, \quad (1)$$

$$\mathbf{V} = -\left(\frac{1}{\phi} - 1\right)\chi \begin{pmatrix} \partial \rho u_i / \partial x_i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\chi = \begin{cases} \min(1, |d/\Delta y|) & \text{(inside object)} \\ 0 & \text{(outside object)} \end{cases} \quad (3)$$

を支配方程式とするシミュレーションを行った。ここで、 \mathbf{Q} は保存量ベクトル、 $\mathbf{E}, \mathbf{F}, \mathbf{G}$ は非粘性流束ベクトル、 $\mathbf{E}_v, \mathbf{F}_v, \mathbf{G}_v$ は粘性流束ベクトル、 \mathbf{V} は外力項 (Volume Penalization 項)、 ϕ は多孔質媒体の空隙率、 χ はマスク関数である。空隙率は音の反射率が 99%となるよう、 $\phi = 0.25$ とした⁷⁾。マスク関数は流体部では 0、舌運動部を除いた物体領域では 1 とし、舌運動部の物体表面は計算格子間を滑らかに移動させるため、格子点と物体表面の距離 d と格子幅 Δy を用いて定義する。

空間差分は 6 次精度のコンパクトスキーム (境界面では 4 次精度)、時間積分は 3 次精度ルンゲクッタ法を使用する。時刻刻み Δt は CFL が 0.4 以下となるよう、 $\Delta t = 4.5 \times 10^{-8}$ とした。また、ラージエディシミュレーションとして 10 次精度のフィルタリングにより、陰的なサブグリッドスケールモデルを用いた。

計算の境界条件を Fig. 3 に示す。モデルの狭窄流路から口唇出口までは乱流による渦を解像するため、最小メッシュ幅を 0.04 mm とした。また、モデル外側は音の伝播を計算するため、 $/s/$ の特徴となるピーク周波数 4 kHz の波長に対して最低 10 点の格子で解像するよう設定した。そして、 x_1 及び x_2 方向の外側境界には無反射境界条件、 x_3 方向には周期境界条件を課し、音量が最大となる 10 kHz の音の波長の 5 波長分のバッファ領域で変動成分を減衰させた。また、モデル入口面において一様流速を、実験時の流量 18 L/min を再現するよう設定した。

舌モデルを 40 mm/s で移動させた際の現象を再現するため、舌の上昇と下降に分けてシミュレーションを行った。舌上昇時には、まず $/s/$ 発音時の舌位置から 3 mm 下方に舌モデルを設定し、60000 ステップ計算して気流が定常になった事を確認した後に、舌モデルを上昇させた。舌下降時には、舌モデルを $/s/$ 発音位置に設定し、767000 ステップ計算して $/s/$ の音響特性が再現できた事を確認した後に、舌モデルを下降させた。

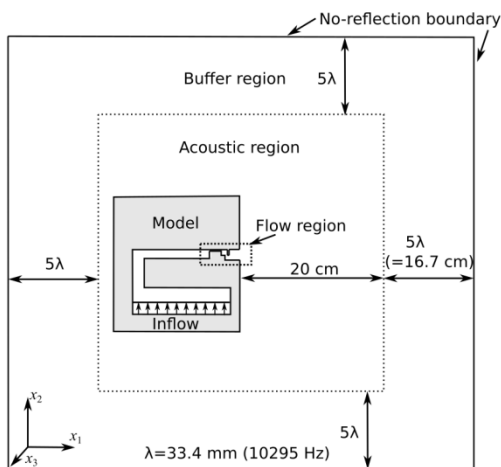


Fig. 3 Boundary conditions.

3. 結果と考察

口腔単純モデルの舌モデル挙上時及び下降時の、狭窄流路から口唇領域にかけての正中矢状面の流速分布及び、第 2 不変量 Q の等値面を可視化した様子を Fig. 4 及び Fig. 5 に示す。舌モデル挙上初期には、狭窄流路内の気流は大きく乱れておらず、舌の上面が口蓋部に到達した際に狭窄が急激に狭くなった際に流速が高くなり、大きく乱れている様子がわかる。

一方、舌モデルが下降する際には、 $/s/$ 発音位置に固定して気流が完全に発達するまで計算した後に下降させたため、 $/s/$ 発音時の狭窄流路の気流は乱れていない。それに対し、前歯付近の気流は、 $/s/$ 発音位置から、下降させている間も大きく乱れていた。

第 2 不変量 Q の等値面の可視化により、狭窄流路が形成された際に、ジェット流が衝突した前歯付近で 3 次元的な乱れが発生している様子がわかる。一方、 $/s/$ の舌位置で流れを発達させると、大きな渦構造は上前歯先端付近に多数発生し、舌が口蓋に到達してすぐの流れ場と構造が大きく異なることがわかった。

舌モデルを $/s/$ 発音位置に設定した際の、モデル遠方 10 cm での発生音のスペクトルと実験での音圧の計測値を Fig. 6 に示す。両者のスペクトルとも、モデル被験者の歯茎摩擦音 $/s/$ の特徴である、4 kHz 以上の広帯域ノイズ音であった。この結果より、移動壁面を含む埋め込み境界法を用いた本研究の手法でも、十分な精度で遠方音を予測できることが示された。

舌挙上時と下降時のモデル内の流れ場の変遷を調べるため、狭窄流路中心と、狭窄流路下流の点 (上前歯より上流に 1 mm の位置) の流速の時間経過を Fig. 7 と Fig. 8 に示す。この時、時間は舌運動時間 $t_a = 75$ ms で正規化し、Fig. 7 の上昇時は舌運動開始時を $t/t_a = 0$ 、舌運動終了時 ($/s/$ 発音位置) を $t/t_a = 1$ とした。また下降時も同様に、舌運動開始時 ($/s/$ 発音位置) を $t/t_a = 0$ 、舌運動終了時を $t/t_a = 1$ とした。

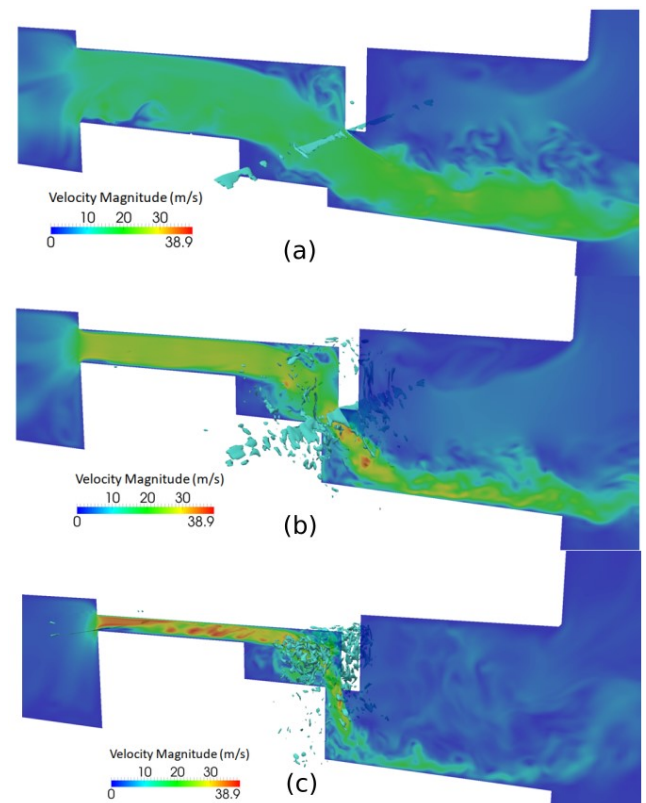


Fig. 4 Velocity distribution on the mid-sagittal plane of the simplified vocal tract model and iso-surface of Q during tongue ascent (a) $h = 0$ mm, (b) $h = 2.16$ mm, (c) $h = 3$ mm.

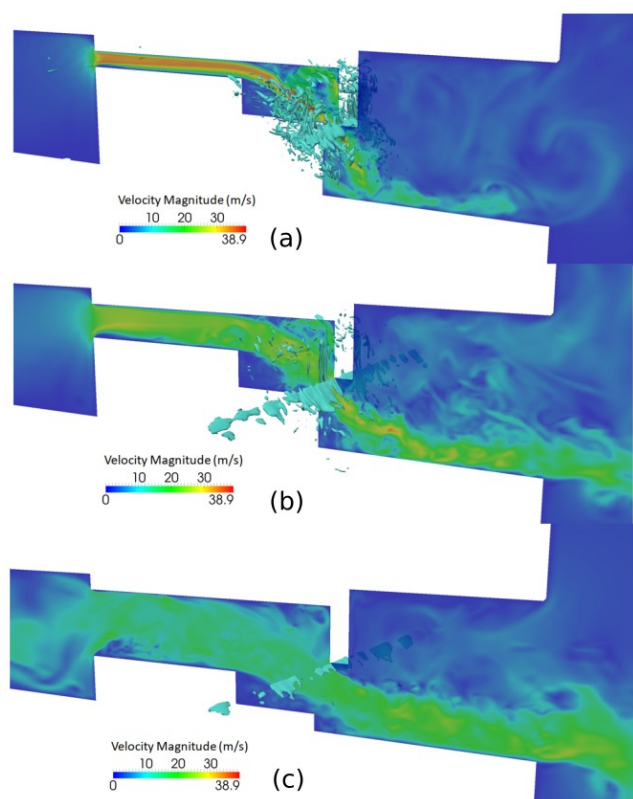


Fig. 5 Velocity distribution on the mid-sagittal plane of the simplified vocal tract model and iso-surface of Q during the tongue descent (a) $h = 3$ mm, (b) $h = 1.92$ mm, (c) $h = 0$ mm.

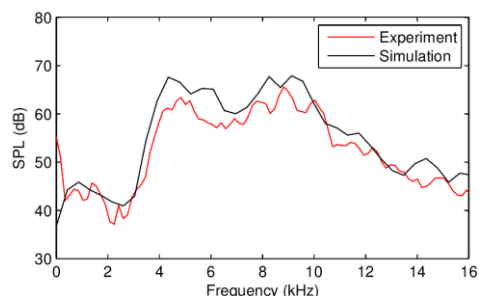


Fig. 6 Spectra of sound measured in the experiment and predicted in the simulation 10 cm from the lip cavity of the model.

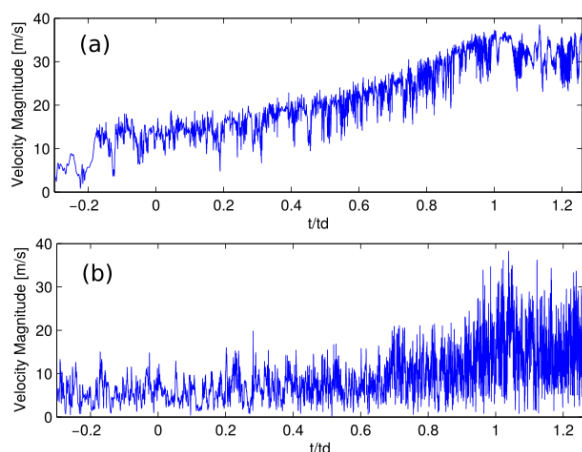


Fig. 7 Velocity magnitude at the constriction (a) and cavity between the constriction and upper teeth (b). The tongue height was increased from $h = 0$ mm at $t/td = 0$ to $h = 3$ mm at $t/td = 1$.

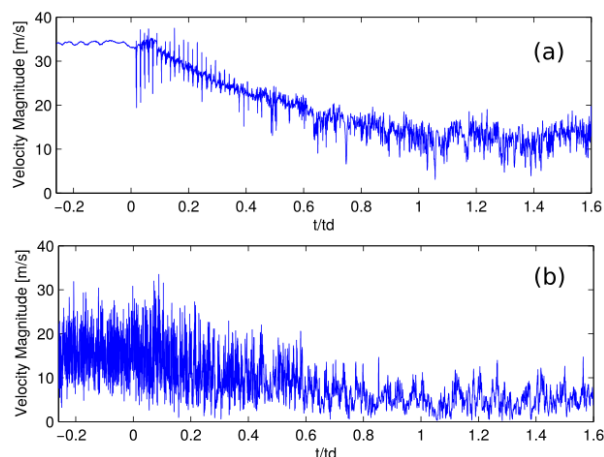


Fig. 8 Velocity magnitude at the constriction (a) and cavity between the constriction and upper teeth (b). The tongue height was increased from $h = 0$ mm at $t/td = 0$ to $h = 3$ mm at $t/td = 1$.

舌挙上時には、狭窄流路の流速が徐々に増加していくとともに、狭窄流路後流の流速も増加し、大きく乱れた。また、狭窄流路内において、 $/s/$ 発音位置に到達後($t/td > 1$)も 5 m/s 程度の流速の乱れが発生した。

一方、舌下降時の舌モデルが $/s/$ 位置の際には、狭窄流路の流速に大きな乱れはなく、舌を下降し始めると、周期的な乱れが発生した。これは、舌モデルの後端の角で周期的な渦が発生し、狭窄流路を通過したためである。また、狭窄流路の流速が徐々に減少するとともに、狭窄流路後流での乱れが徐々に減少した。この時、実験時に観察された舌下降時の乱れの持続^⑥は見られず、舌の下降とともに狭窄流路後流の乱れは減少していった。これは、舌上昇と下降のシミュレーションを別々に行い、舌下降において狭窄流路に乱れが無い状態で下降を始めたため、実験とは異なる結果になったと考えられる。実験の現象を再現するには、舌挙上時のシミュレーション結果から得られる流れ場より、舌下降のシミュレーションを開始する必要があると考えられる。

4. 結 言

本研究では、 $/s/$ 発音時の舌運動が口腔内の気流の発達と空力音源の形成に与える影響を調べるため、埋め込み境界法を用いた空力音響シミュレーションを行った。結果より、舌モデルの壁面を移動させながら乱流と音の発生をシミュレーションにより表現できることを確認できたが、実験で観察された現象を再現するには改善点が残る、さらなる解析が必要である。

参考文献

- (1) Stevens, K. N., *Acoustic Phonetics* (The MIT Press, 1998).
- (2) Jongman, A., Wayland, R., and Wong, S. "Acoustic characteristics of English fricatives," *J. Acous. Soc. Am.*, 108 (2000), 1252-1263.
- (3) Hamlet, S. L., Cullison, B. L., and Stone, M. L. "Physiological control of sibilant duration: insights afforded by speech compensation to dental prostheses," *J. Acous. Soc. Am.*, 65 (1979), 1276-1285.
- (4) Howe, M. S., and McGowan, R. S. "Aeroacoustics of [s]," *Proc. R. Soc. A* 461 (2005), 1005-1028.
- (5) 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," *Phys. Fluid.* 30 (2018), 035104.
- (6) Yoshinaga, T., Nozaki, K., and Wada, S. "A simplified vocal tract model for articulation of [s]: The effect of tongue tip elevation on [s]," *PLoS One* 14 (2019), e0223382.

- (7) Yokoyama, H., Miki, A., Onitsuka, H., and Iida, A. "Direct numerical simulation of fluid-acoustic interactions in a recorder with tone holes," *J. Acous. Soc. Am.*, 138 (2015), 858-873.