

声道内の狭窄と気流がリード式人工声帯の母音生成に及ぼす影響*

○吉永司（豊橋技科大），荒井隆行（上智大），横山博史，飯田明由（豊橋技科大）

1 はじめに

声帯とは喉頭部にある左右一対のひだであり，肺からの気流によって振動を起こすことにより音が発生する．Von Kempelen[1]はリードを用いた人工声帯と，形状を手で調整する声道部を有する発声機構を構築した．このとき人工声帯部では，気流の流入によりリードの自励振動を発生させ，喉頭の音源発生を表現した．

また，Arai[2]はリード式人工声帯に母音発音時の声道形状を模擬した円管を設置し，円管内の狭窄流路を移動させることにより，母音の音の違いが生まれる要因を可視化して，音声の教育システムとして提案している．この時，声道内に狭窄流路がある場合，狭窄流路内の流速が大きくなり，声道内の音響特性が非線形となることで，一般的に知られている音源・フィルタ理論が成り立たないと言われている[3]．しかし，リード式人工声帯に対しては，どのような影響があるのか明らかでない．

そこで本研究では，狭窄のある声道を付したリード式人工声帯に対して，空力音響シミュレーションを行うことにより，狭窄流路内の気流が人工声帯の音発生に与える影響を明らかにする．

2 方法

2.1 リード式人工声帯と円筒型声道

リード式人工声帯は，リードとリード支持部から成り，円管流路の中に設置して，リードが支持部に沿って振動することで音が発生する．Fig. 1(a)に人工声帯の外形を示す．リードには厚さ 0.2 mm の PET 材を用い，振動部の長さは 22 mm である．リード支持部の全長は 30 mm で，先端には曲率半径 30 mm の曲面を有する．支持部内側には，流路として幅 6 mm の溝があり，出口部の断面積は，24 mm²（深さ 4 mm）である．この人工声帯に対して，実験及びシミュレーションともに一般的な大声を出す際の呼気流量 40 L/min[4]を入口部よ

り流入して音を発生させる．また，声道での音の共鳴を表現するため，人工声帯の出口に直径 34 mm，長さ 175 mm の円管を設置する．長さ 175 mm の声道は，一般的な成人男性をモデルとしており，円管狭窄部のない場合，母音/a/の発音を模擬することになる[5]．一方，狭窄流路を設定する位置は，声道先端から 50 mm までとし，狭窄流路の直径を $d = 10$ mm 及び 8 mm と変化させる．この位置に狭窄流路を設置することで，母音/u/の円唇を模擬し，/u/に近い音が作られる[2]．

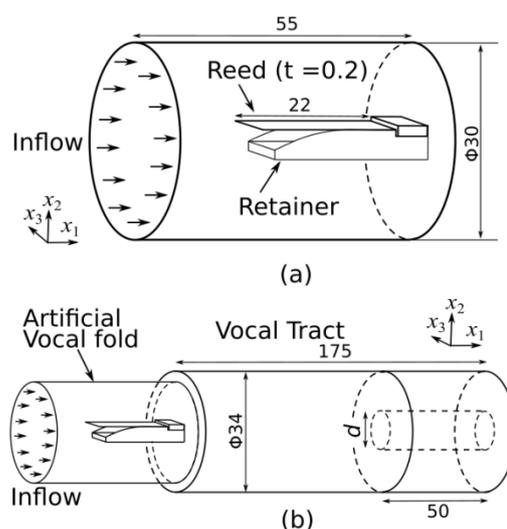


Fig. 1. Artificial vocal fold and vocal tract. Dimensions of vocal fold (a) and vocal tract (b).

2.2 シミュレーション手法

動く物体の中で，流れと音の相互作用を表現するため，埋め込み境界法を取り入れた 3次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式を支配方程式とするシミュレーションを行う．埋め込み境界法では，気流のない壁を音響反射率 99%の多孔材として表現する．リードの振動に関しては，1次元梁の運動方程式を計算することにより，流れとリード振動の相互作用をモデル化する．リードに働く外力には，流体力とリード保持部の接触力を計算して入力している．シミュレーション手法の詳細は，文献[6]を参照されたい．

* Effects of airflow in constricted vocal tracts on vowel productions of the reed-type artificial vocal fold, by Tsukasa YOSHINAGA, Takayuki Arai, Hiroshi YOKOYAMA and Akiyoshi IIDA.

3 結果と考察

Fig. 2 に狭窄流路なしの声道と狭窄流路の径を $d = 10 \text{ mm}$ 及び 8 mm に設定した声道から出た音のスペクトルを示す. この時, 音は声道出口より遠方 100 mm にてサンプルした. 狭窄流路なしの声道では, フォルマントが 400 Hz , 1351 Hz , 2151 Hz に現れ, 開口端補正を考慮した片側閉管の共鳴周波数とほとんど一致した. また, 母音/a/のフォルマントとも整合性がとれる[5]. 一方, 狭窄を付すことで音量は 20 dB 以上減少し, フォルマントも 134 Hz , 1334 Hz , 2668 Hz に変化した. このフォルマントは母音/u/の範囲に入る[5]. 狭窄を付けない場合から 10 mm 及び 8 mm の狭窄を付すことで, 声帯の基本周波数 f_0 は 135 Hz , 133 Hz , 131 Hz と変化した.

Fig. 3 にリード先端の変位を示す. リードの支持部先端を 0 mm とし, 先端からの変位を表している. 円筒型声道に 10 mm の狭窄を付すことで, 先端の最大変位は 9.74 mm から 9.51 mm に減少し, さらに狭窄を 8 mm にすることで, 最大変位は 9.18 mm となった. これらの変化は, これまでに報告されていた声道の非線形現象[3]と同様の傾向であった.

Fig. 4 に各声道内の流速分布を示す. 狭窄がない場合には, 声道先端で 5 m/s 以上の大きい流速はほとんど見られないのに対し, 狭窄流路が 10 mm , 8 mm と狭くなることにより, 狭窄流路内の流速は 13 m/s から 17 m/s まで増加した. この増加した流速より, 狭窄上流の管で圧力が増加し, リード振動を駆動する圧力差が減少することで, f_0 やリード振幅に影響を与えたと考えられる.

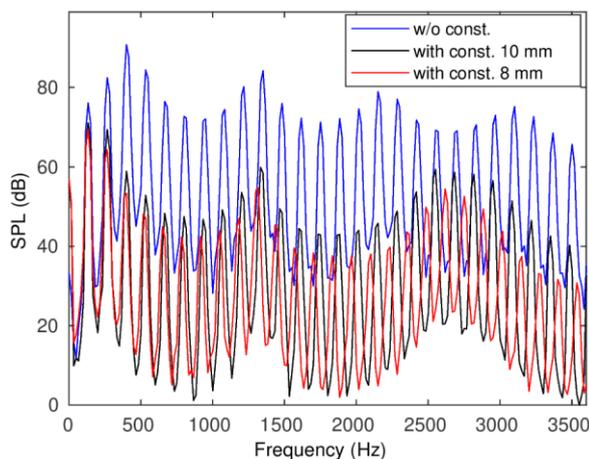


Fig. 2. Spectra of sound measured at 10 mm from the cylindrical vocal tract.

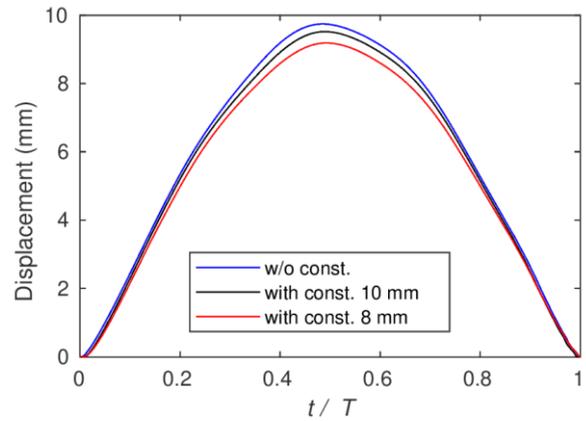


Fig. 3. Reed tip displacement of the artificial vocal fold.

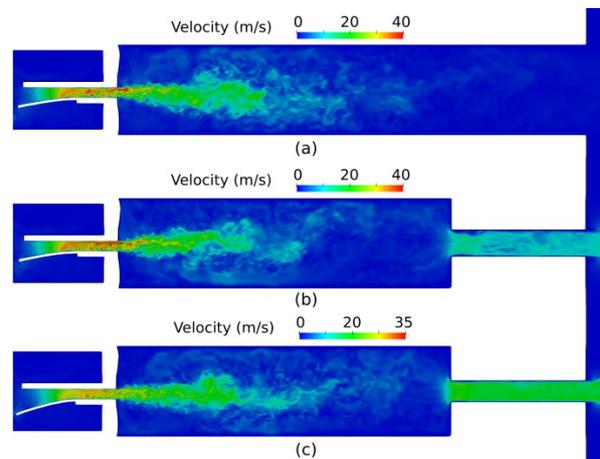


Fig. 4. Velocity magnitudes in the cylindrical vocal tract without constriction (a), with constriction of $d = 10 \text{ mm}$ (b), and 8 mm (c).

謝辞

本研究は, JSPS 科研費 JP20K14648 JP21K02889 の助成を受けるとともに, 文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム (hp200123, hp200134)の一環として実施した.

参考文献

- [1] H. Dudley and T. Tarnoczy, *J. Acoust. Soc. Am.* **22**, 151-166, 1950.
- [2] T. Arai, *Acoust. Sci. Tech.* **28**, 190-201, 2007.
- [3] I. Titze, *J. Acoust. Soc. Am.* **123**, 2733-2749, 2007.
- [4] K. N. Stevens. *Acoustic Phonetics* (MIT Press), 1998.
- [5] R. D. Kent and C. Read, 荒井隆行, 菅原勉 監訳, *音声の音響分析*, 海文堂, 1996.
- [6] 吉永ら, *ながれ*, **40**, 226-233, 2021.