

リード式人工声帯と口腔モデルを用いた調音様式が 飛沫生成に及ぼす影響の調査*

☆南智哉 (豊橋技科大), 吉永司 (大阪大学), 荒井隆行 (上智大),
飯田明由, (豊橋技科大)

1 諸言

呼吸器系のエアロゾルの発生源は、声帯に付着した粘液ブリッジが声帯振動により破裂して生成する喉頭エアロゾル、咳などにより気管支内に強いせん断流れが生じ、管壁の体液が飛散する気管支エアロゾル、呼吸等による細気管支の収縮に伴い細管内の液膜が破裂する細気管支エアロゾルが主であると言われている[1]。また、エアロゾルより大きいサイズの飛沫は発声や咳によって、口腔内より生成される[2]。

人間の声は、声帯の自励振動とそれに伴う声門を通過する脈動噴流によって生成される。母音は、声帯振動による生成音が、口腔の音響特性の変化によりフォルマントピークと呼ばれる共鳴周波数を変化させることで生成される。この時、声道の狭窄は声帯振動にも強く影響を与えることから、喉頭エアロゾルの生成にも影響を与えると考えられる。また、有声子音の発音は口腔内からの大きい飛沫の生成に影響すると考えられる。

本研究の目的は、人工声帯と単純円筒口腔モデルを組み合わせた母音発生装置と有声子音を再現できる BMW-DN モデルを用いて、声帯振動や口腔形状が飛沫生成量に与える影響を調べることである。

2 実験

2.1 母音発生装置

Arai[3]による簡単な機構で数種類の母音の音響特性を再現できる 3 音響管モデルをもとに、3D プリンタ(Foam3, Foamlabs)を用いてアクリル樹脂による円筒型の声道モデルを制作した。声帯にはリード式人工声帯を使用した[3]。

図1に声道の各パラメータを示す。 D は声道外管直径で 34 mm, d は狭窄部直径 10 mm 全長 L は 175 mm, l_1 は声帯から狭窄部までの距離, l_2 は狭窄部長さで 50 mm に固定し, l_3 は狭窄部から声道出口までの距離である。人工声帯に用いたリードの厚さは $188 \mu\text{m}$ とした。狭窄部を移動させ、各声道形状において発声する母音の特性を調べるため、コンプレッサからサイレンサーを介して人工声帯に空気を流入させ、無響室にてマイクロフォン(NL-52, RION)により音の計測を行った。

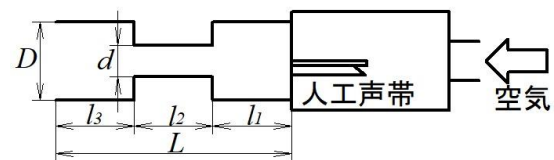


Fig. 1 Simplified vocal tract and vocal folds.

2.2 BMW-DN モデル

BMW-DN モデルは/b/,/m/,/w/,/d/,/n/の発音が可能なように、文献[4]をベース改良された声道モデルである。モデル断面の模式図を図2に示す。モデルは喉頭蓋から口唇までの口腔形状を模しており、赤色が唇、緑が歯槽提、黄色が軟口蓋、灰色が舌を示している。下唇及び軟口蓋の開閉、舌の角度はそれぞれ手動で操作する。ポンプから空気を送り、モデル声門に設置したリード式人工声帯が振動する。

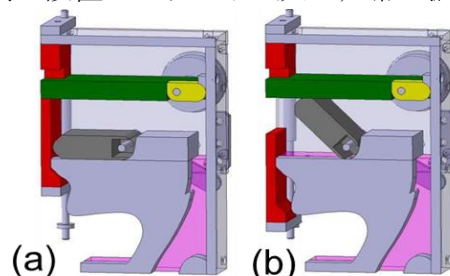


Fig. 2 Vocal tract models for (a):/b/. (b): /d/ [5].

Investigation of the effects of articulation style on droplet generation using reed-type artificial vocal folds and vocal tract models, by MINAMI, Tomoya (Toyohashi University of Technology), YOSHINAGA, Tsukasa, (Osaka University), ARAI, Takayuki, (Sophia University), IIDA, Akiyoshi, (Toyohashi University of Technology).

図 2 (a)は/b/発音の直前で、舌は静止しており、軟口蓋は閉じた状態である。下唇を空気流入時に急速に下げることによって発音する。図 2 (b)は/d/発音の直前で下唇が開いた状態であり、軟口蓋が閉じ、舌が歯槽堤に接している状態から急速に下げることによって発音する。

2.3 飛沫計測実験

飛沫計測は HEPA フィルターを備えた簡易クリーンブース (1 × 0.5 × 0.5 m) 内で実施し、装置内の飛沫を除去した状態で実施した (ISO クラス 6)。母音発生装置は人工声帯の出口流路近傍に声道側壁から声帯に通じる直径 2 mm の管を取り付け、そこからシリジポンプを用いて人工粘液を 0.8 mL/min の一定流量注入した。BMW-DN モデルは/b/発音時は下唇、/d/発音時は舌尖に 30 μL 付着させた。人工唾液はグリセリンと水の混合液を使用した。空気を流し声道出口から噴射される飛沫量を、光学式パーティクルカウンター (Model 3330, TSI) を用いて計測した。

3 結果と考察

母音計測実験によって得られた各条件におけるフォルマント分布から狭窄なし及び、 $l_1 = 62.5 \text{ mm}$, $l_1 = 125 \text{ mm}$ で/u/, $l_1 = 6 \text{ mm}$ で/a/, $l_1 = 25 \text{ mm}$ で/o/, $l_1 = 86 \text{ mm}$ で/i/と 4 つの母音を再現できることを確認した。

図 3 に各母音発生時の粒径別飛沫量の測定結果と標準偏差を示す。狭窄部が声帯に近い (l_1 が短い) ほど飛沫量が多く、離れていくほど少なくなっていくことがわかった。可視化実験の結果から、狭窄をつけない場合、声帯からの流れは声道内で半径方向にすぐに広がるため、声道壁面に飛沫が付着するが、一部の飛沫は声道出口まで運ばれ外部に流出した。一方、狭窄部が声帯に近い位置にあると、流れに対向する狭窄壁面に付着する飛沫もあるが、狭窄部を通過した噴流は、出口径が小さいため半径方向に広がりにくく、声道壁面に付着する量が少なくなり、外部に出る飛沫量が多くなる。狭窄部が声帯から遠い場合、狭窄部に到達する前に飛沫が声道壁面に付着するため、狭窄部を通過して外部に流出する飛沫量は少なくなる。これらのことから狭窄部の位置 (母音の種類) により口から流出する飛沫量が変化することが確認された。

図 4 に BMW-DN モデルの/b/および、/d/発音時の粒径別飛沫量を示す。/b/発音時の方が/d/よりも飛沫を多く生成することがわかった。これは、/d/発音時の調音点が/b/よりも後方にあるため、口腔内で拡散して口腔壁面に付着するからだと考えられる。

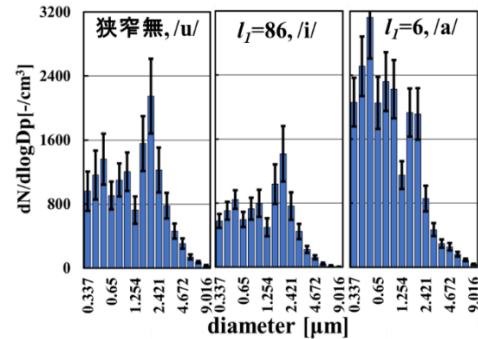


Fig. 3 Droplet concentrations for vowels.

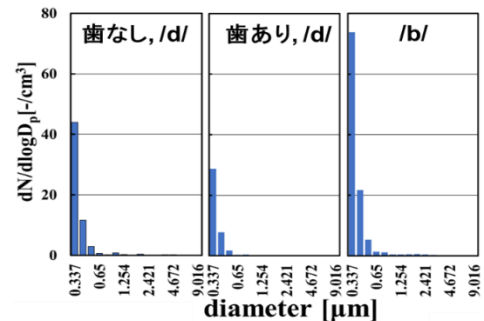


Fig. 4 Droplet concentrations for voiced plosives.

4 結言

円筒型声道と BMW-DN モデルを用いて飛沫生成量を定量的に評価した。その結果、母音発生時は狭窄部の位置により噴流の拡散状態が変化すること、有声子音発生時は調音点により噴流の生成位置が異なることが飛沫生成量に影響することを確認した。

謝辞

本研究は、JST, CREST, JPMJCR20H7 及び JSPS, 科研費, 21K02889 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] B. Pattersona, R. Woodb, Tuberculosis, 117, 31-35, (2019).
- [2] L. Fritzsche, R.Schwarze, F. Junghans Phys. Fluids 34 121904-1, (2022)
- [3] T. Arai, Acoust. Sci & Tech 27,6, (2006).
- [4] T. Arai, INTERSPEECH, 979, (2017).
- [5] T. Arai, et al., INTERSPEECH, (2023).