

リード式人工声帯の空力音響シミュレーション*

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

1 はじめに

声帯は肺からの気流により，喉頭部のひだ
が振動を起こすことにより音が発生する．こ
の時，ひだの振動は，気流によりひだを開閉
する力と声帯自身が閉じようとする弾性力の
相互作用により自励振動となることが知られ，
音の発生メカニズムについて古くから研究の
対象となってきた^[1]．

Von Kempelen^[2]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
ロボットを構築した．この際，リード式の人
工声帯は，気流の流入によるリードの自励振
動により喉頭の音源発生を再現した．また，
Arai^[3]はリード式人工声帯に母音の発音を模
擬した声道形状を設置することにより，母音
の音の違いが生まれる要因を可視化し，教育
システムとして提案している．この時，人工
声帯に関して，気流とリードの特性が発生音
に与える影響や，Arai らが用いているモデル
形状がどのように声帯の音の再現を可能にし
ているのかは明らかでない．

そこで本研究では，Arai^[3]の提案している
リード式人工声帯に対して，リードの振動，
気流と音の発生を考慮した連成シミュレー
ションを行うことにより，自励振動による音の
発生メカニズムを調査する．

2 方 法

2.1 リード式人工声帯

リード式人工声帯は，リードとリード保持
部及び圧力容器から成り，リードが保持部に
沿って振動することで音が発生する(図 1)．
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．リード保持部の
先端は曲率半径 30 mm の曲面を有する．こ
の人工声帯に対して，実験及びシミュレー
ションにより，一定流量 40 L/min を入口部より
流入し，発生する音を遠方 100 mm でマイク
ロフォン(Type 4939, B&K)により計測した．

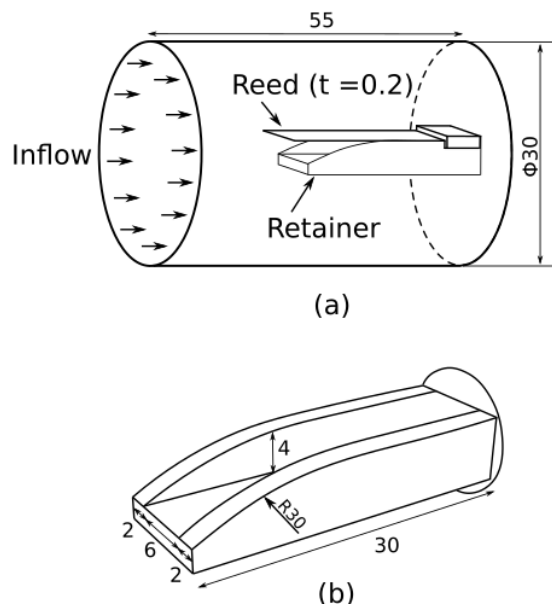


Fig. 1 Schematic of artificial vocal fold. (a) The whole geometry; (b) the geometry of reed retainer. Unit of dimensions is mm.

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

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

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

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

を支配方程式とするシミュレーション^[4]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} は壁面を表現する外力項， 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．マスク関数は流体部では 0，リード表面を除いた物体領域では 1 とし，格子

*Aeroacoustic simulation on reed-type artificial vocal folds, by Tsukasa YOSHINAGA, Rafia INAAM, Takayuki Arai, Hiroshi YOKOYAMA and Akiyoshi IIDA.

点と物体表面の距離 d と格子幅 Δy を用いて定義した。また、リードの厚みを表現するため、振動解析での変位を元に、1 mm の厚み(流体解析格子 10 点で解像)を持たせた。

リードの振動に関しては、1 次元梁の運動方程式^[5]

$$F(x, t) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[YI \left(1 + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} (x, t) \right] + \rho' S \left[\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} (x, t) + \gamma_B \frac{\partial y}{\partial t} (x, t) \right]$$

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した。ここで、 $F(x, t)$ はリードに働く外力であり、 $F(x, t) = F_{lay}(x, t) + F_{fluid}(x, t)$ として流体力とリード保持部の接触力を計算して入力した。また、 Y はヤング率、 ρ' はリード密度、 S は断面積、 I は断面 2 次モーメント、 η は粘性係数、 γ_B は減衰係数である。各係数の値を表 1 に示す。粘性係数及び減衰係数は振動の基本周波数 f_0 が実験と合うように調整した。材料定数(密度・ヤング率)に関しても f_0 が合うように補正を行った。

Table 1 Simulation parameters

Reed length	22 mm
Reed width	0.2 mm
Young's modulus Y	6.2 GPa
density ρ'	3040 kg/m ³
Cross-sectional area S	2 mm ²
Moment of inertia I	0.0067 mm ³
Viscoelastic constant η	6.0×10^{-7} s
Fluid damping coefficient γ_B	50 s^{-1}

3 結果と考察

実験及びシミュレーションにより計測した、人工声帯から遠方 100 mm での音圧スペクトルを図 2 に示す。流量 40 L/min での基本周波数 f_0 は 137 Hz となり、実験とシミュレーションで一致した。また、基本周波数の倍音成分の音圧に関しても、シミュレーションと実験で良好に一致しており、シミュレーションにおいて十分な精度でリードの振動と気流の乱れ、音の伝播を解析できていることを確認した。

図 3 に、人工声帯内の速度場を示す。各時刻は基本周波数の周期 T で正規化している。 $t/T = 0$ から $t/T = 0.5$ にかけて、リードが閉じて流速が低い状態から、リードが大きく開くことによりリード保持部内の気流が乱れなが

ら通過していく様子が観察できた。詳細は研究会にて発表を行う。

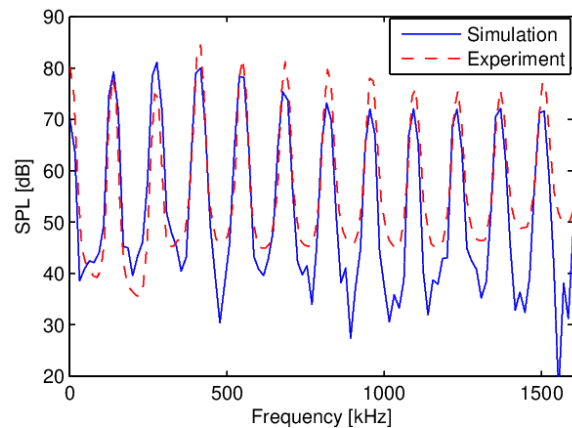


Fig. 2. Spectra of sound measured at 100 mm from the artificial vocal fold.

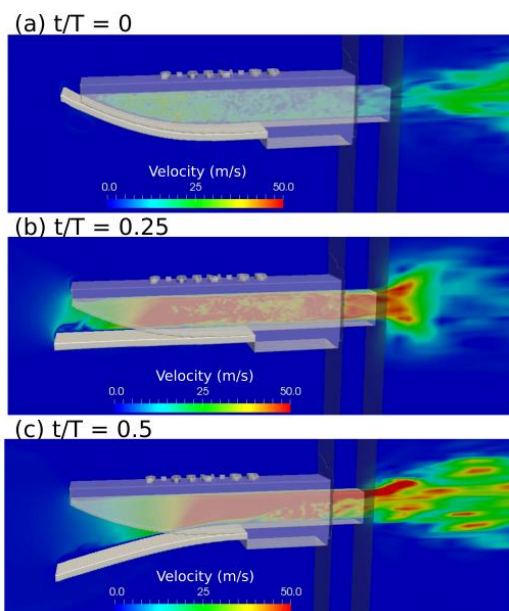


Fig. 3. Velocity magnitude in the artificial vocal fold (a) $t/T = 0$, (b) $t/T = 0.25$, and (c) $t/T = 0.5$.

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP18K02988, JP20H04999 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] I. Titze, *Principles of voice production* (Prentice Hall), 1994.
- [2] H. Dudley and T. Tarnoczy, *J. Acoust. Soc. Am.* **22**, 151-166, 1950.
- [3] T. Arai, *Acoust. Sci. Tech.* **28**(3) 190-201, 2007.
- [4] Tanaka *et al.*, *J. Sound. Vib.* **431**, 248-264.
- [5] F. Avanzini and M. Walstijn, *Acta. Acustica.* **90**, 537-547, 2004.