

タイトル	簡素化した口唇形状モデル周辺のFDTD法による音場計算
著者	佐藤, 千畝; SATO, Chiune; 元木, 邦俊; MOTOKI, Kunitoshi
引用	北海学園大学工学部研究報告(53): 35-49
発行日	2026-01-09

簡素化した口唇形状モデル周辺のFDTD法による音場計算

佐藤 千 畝・元 木 邦 俊

Computation of Acoustic Field in the Vicinity of the Simplified Geometrical Model of the Lips

Chiune SATO and Kunitoshi MOTOKI

要 旨

口唇部分は、声道の終端境界となり声道伝達特性に大きく影響を及ぼし、自由空間への音声の放射に関する指向特性を定めるなど、音声生成に関して重要な部分である。本報告では、音声生成モデルの高度化のために、2種類の口唇形状モデルを作成し、開口部周辺の音場を、FDTD法を用いて計算する。始めに3Dモデリングソフトウェアを用いて円筒音響管の端部を楔形に切除した形状モデルを構成する。次に実際の口唇形状から口角間の距離など5つのパラメータを測定し、これらのパラメータに基づいて多数の球、円筒による単純な幾何学的形状を組み合わせた形状モデルを構成する。これらの口唇モデルの中心に点音源を設定して音波伝搬シミュレーションを行い、放射方向の違いによる受音点での周波数特性を示す。

1 はじめに

MRIなどの観測技術の進展により、声道の3次元的形状を考慮にいった数値計算が行われている。周波数域ではFEM（有限要素法）が、また、時間域ではFDTD法（時間領域有限差分法）が用いられることが多い。一方、従来から用いられている1次元音響管によるソース・フィルタモデルは、簡便な計算で比較的良好な音韻性を得られることから、音声生成の標準的なモデルとして現在も用いられている。1次元音響管モデルでは、出力は口唇放射部とするが、口唇部分は3次元的に複雑な形状となるため、明確な放射位置を定めることが困難となる。1次元的なモデルを構成する際に重要なパラメータとなる声道長の定義も曖昧となる。口

唇形状の音響特性に関する先行研究では、音響計測実験の結果より等価的な放射面を設定することが検討されている¹⁾。物理モデルを利用した計測は有用であるものの、モデルの作成や実験の実施は必ずしも容易ではない。

本報告では、口唇部分の3次元形状の音響特性を検討するために、2つの簡素化した口唇形状モデルを構成して、FDTD法を用いて音波伝搬の数値シミュレーションを行う。始めに3Dモデリングソフトウェアを用いて、文献¹⁾と同様な円筒音響管の端部を楔形に切除した形状モデルを構成する。次に実際の口唇形状から口角間の距離など5つのパラメータを測定し、これらのパラメータに基づいて多数の球、円筒による単純な幾何学的形状を組み合わせた形状モデルを構成する方法を示す。幾何学的形状を組み合わせたモデルは、口唇形状のパラメータのみから作成することができるので、2つの母音に対する口唇形状パラメータを補間することで、時間的な形状変化に応じた多くの口唇モデルを得ることも可能となる。

これらの口唇モデルの中心に点音源を設定してFDTD法により開口部周辺の受音点での応答を求める。口唇形状の違いや放射方向の違いによる受音点での周波数特性について検討する。

2 基礎方程式とFDTD法の適用

2.1 基礎方程式

x , y , z の直交座標空間において、音圧を p 、空気密度を ρ 、空気粒子の各方向の変位をそれぞれ u_x , u_y , u_z とする。 x 方向の運動方程式は

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

が成り立つ。また、 y 方向、 z 方向についても同様に表すと式(2)、(3)のようになる。

$$\rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial y} \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

また、体積弾性率 κ を用いて、連続の方程式は式(4)となる。

$$p = -\kappa \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad (4)$$

体積弾性率 κ は、密度 ρ および音速 c [m/s] と $\kappa = \rho c^2$ の関係にある。式(1)、(2)、(3)の運動方程式と、式(4)の連続の方程式が音波伝搬に関わる支配方程式となる。

2.2 FDTD法適用と離散化

FDTD法 (Finite-Difference Time-Domain method, 時間領域有限差分法) は、微分方程式中

の微分係数を有限個の離散値を用いた差分の商で近似する解析手法である。FDTD法では、前節の式 (1), (2), (3), (4) を支配式として音波の解析を行う。まず、これらの式を1階の偏微分方程式とするために、式 (4) の両辺を時間微分し、変位の時間微分を粒子速度に置き換える。x, y, z方向の粒子速度をそれぞれ v_x , v_y , v_z とすれば、式 (1) ~ (4) は粒子速度を用いて次のように表される。

$$\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial v_y}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial y} \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\kappa \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (8)$$

x, y, z方向の空間離散化幅を Δx , Δy , Δz , 時間離散化幅を Δt とすると、式 (5) ~ (8) を差分で近似して、整理すると次に示す更新式が得られる。

$$v_x^{n+0.5}(i+0.5, j, k) = v_x^{n-0.5}(i+0.5, j, k) - \frac{\Delta t}{\rho \Delta x} \{p^n(i+1, j, k) - p^n(i, j, k)\} \quad (9)$$

$$v_y^{n+0.5}(i, j+0.5, k) = v_y^{n-0.5}(i, j+0.5, k) - \frac{\Delta t}{\rho \Delta y} \{p^n(i, j+1, k) - p^n(i, j, k)\} \quad (10)$$

$$v_z^{n+0.5}(i, j, k+0.5) = v_z^{n-0.5}(i, j, k+0.5) - \frac{\Delta t}{\rho \Delta z} \{p^n(i, j, k+1) - p^n(i, j, k)\} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} p^{n+1}(i, j, k) = & p^n(i, j, k) - \kappa \frac{\Delta t}{\Delta x} \{v_x^{n+0.5}(i+0.5, j, k) - v_x^{n+0.5}(i-0.5, j, k)\} \\ & - \kappa \frac{\Delta t}{\Delta y} \{v_y^{n+0.5}(i, j+0.5, k) - v_y^{n+0.5}(i, j-0.5, k)\} \\ & - \kappa \frac{\Delta t}{\Delta z} \{v_z^{n+0.5}(i, j, k+0.5) - v_z^{n+0.5}(i, j, k-0.5)\} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 i, j, k はそれぞれx, y, z方向に関して何番目の音圧点であるかを表しており、空間ステップと呼ばれる。粒子速度点は音圧点からそれぞれ空間離散化幅の半分ずつずれた位置にあるため、音圧の空間ステップに ± 0.5 を付して表現している。 n は時間ステップで、粒子速度と音圧を計算する時刻を表している。初期時刻の粒子速度分布と音圧分布を与え、式 (9) から式 (12) を用いて粒子速度と音圧を交互に次々と計算することで、音波伝搬シミュ

レーションが可能となる。

3 楔形開口部形状モデル

3.1 楔形開口形状の作成

シミュレーションの形状モデルとして、口唇を模した3Dモデルを作成した。3Dデータを扱うためのソフトウェアとしてフリーソフトのBlenderを用いた。Blenderは3Dモデリングに加え、3DCG制作、2Dアニメーション制作、動画編集など幅広く利用できるオープンソースソフトウェアである。本研究では楔形開口円筒管の3Dデータをシミュレーションプログラムに組み込むために、表面データを数値化し、出力する必要がある。BlenderにはPythonベースのScript機能があり、これによってこの操作を簡単に行うことができる。

楔形開口円筒管モデルは次のように作成した。本研究では過去の実験で利用した物理モデル¹⁾の形状を参考にして、モデルの形状を以下のように設定した。

円筒管プロトモデルは、外径30 mm、内径24 mm、厚さ3 mm、楔形の切り込み角度45度とした。FDTD法において、円筒管形状に沿った壁を境界条件として設定する必要がある。壁は x 、 y 、 z 軸方向にそれぞれ垂直なものである必要があるため、モデルを細かな階段状の壁の集合で表現する必要がある。Blenderでメッシュ化の操作により、立方体ブロックの集合体になると、モデルの幅のブロック数が必ず奇数になってしまう。今回、プログラム上ではブロック幅は空間離散化幅と同様の1 mmで考えているため、外径幅、内径幅を奇数値に設定しなければならない。そこで、円筒管のプロトモデルに近い2種類のモデルを用いてシミュレーションを行うことで、モデルの形状の僅かな差異の影響について検討する。

プロトモデルより外径及び、内径を1 mmずつ増減した2つのモデルを用意した。改めて作成したモデルのサイズは以下の通りである。

モデル①外径31 mm、内径25 mm、厚さ3 mm

モデル②外径29 mm、内径23 mm、厚さ3 mm

このとき、楔形の切り込み角度はどちらもプロトモデルと同じ45度である。

Blenderでのモデル作成の手順は次の通りである。

1. 円柱を生成
2. 円柱から円筒を作成
3. 編集機能から円筒を楔形になるように切除
4. モディファイアからリメッシュ化機能を追加し、ブロック化処理

以上の4工程からシミュレーション用の形状モデルの作成が可能である。1つのモデルの作成にかかる時間は、Blenderの操作に慣れていれば30分程度である。

図1は音響計測実験で用いられた楔形開口円筒管のモデルである。実際の円筒管の長さはモ

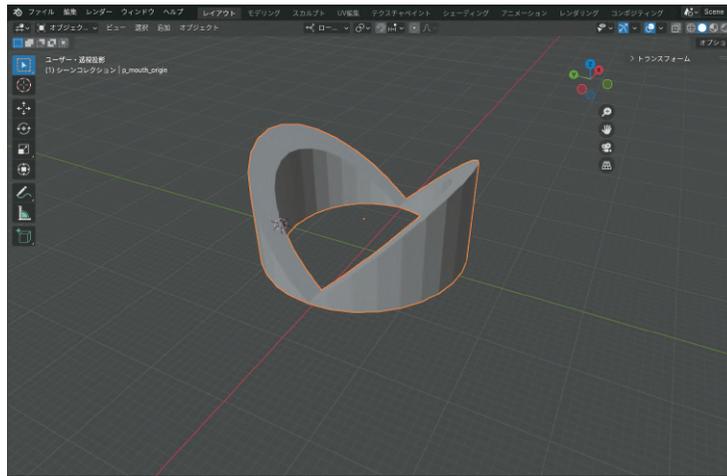


図1 作成した楔形開口円筒管.

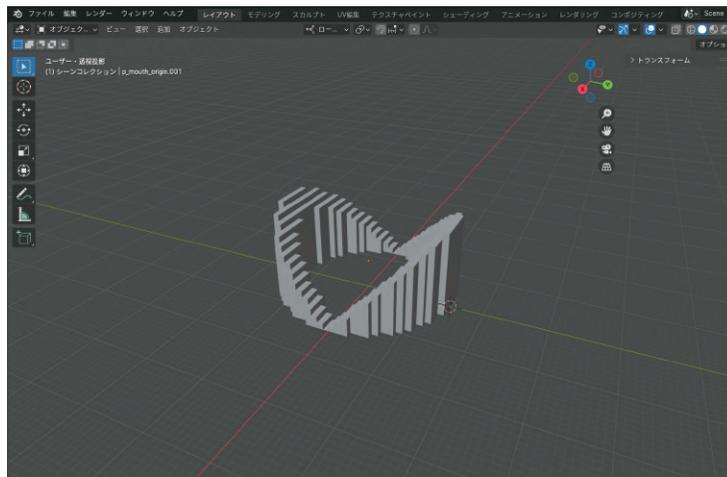


図2 図1の状態から、1 mm分解能でリメッシュ操作によるブロック化.

デルより長いが、吸収境界の設定やパソコンである程度の速さで計算できる空間の設定を考えて、このような形とした。

この状態から、1辺が1 mmの立方体の集合になるようにメッシュ化すると図2のようなになる。メッシュ化の分解能については、空間離散化幅と同じ値（1 mm）としている。さらになめらかにするには、分解能をより小さな値に設定する必要がある。

次に、メッシュ化した円筒管モデルの境界を構成する面（円筒管の内面、外面、および開口部の端面で、以下境界面と呼ぶ）のデータを抽出する。境界面の数が数個であれば、座標を手入力してもよいのだが、本研究でメッシュ化したモデルは分解能も細かく、境界面の数はおよそ2400以上になっている。これらの面のデータを前述のScript機能を用いてCSVファイルに出

力した。データは、次の2つである。

1. 境界面を構成するすべての面の4つの頂点の相対位置
2. 境界面の法線方向

こうして出力されたCSVファイルをFDTD法のシミュレーションプログラム（Matlabで記述）で開き、すべての境界面で反射する更新式を記述することで、楔形に切り込みを入れた円筒管モデルに対してシミュレーションを行った。

3.2 シミュレーションのパラメータ

格子状に配置したそれぞれの点の距離である空間離散化幅が x , y , z 方向すべて同じ値と考え Δh とし、時間離散化幅を Δt とする。FDTD法において、 Δh は音源の波長の1/10以下にすることが安定条件として知られている。また、3次元音場の場合において時間離散化幅 Δt は式(13)を満たすことが望ましいとされている²⁾。

$$c \frac{\Delta t}{\Delta h} \leq \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

音速 c を340 m/sとし、式(13)の条件を満たすように、 $\Delta h = 1 \text{ mm}$, $\Delta t = 1 \mu\text{s}$ としてシミュレーションを行った。計算空間は一辺200 mmの立方体とし、口唇形状を模擬した楔形開口円筒管を立方体の1面の中央に配置した。格子点数は 1.6×10^7 個である。音源はガウスパルスを用いて、音源位置はモデルの管軸近傍で切り込みが最も深い部分（図3における緑軸線）に設定した。音圧の観測位置はこの音源から約100 mmの位置とした。図4のようにモデルに対して正面を0度と考えて、水平方向に0度、45度、90度、-45度、-90度の5点とした。

今回のシミュレーションでは、計算空間の端面では無反射境界となるように定めた。完全に音波を吸収することは困難であり、現在様々な方法によって無反射境界のための境界条件が開発されている。今回は基本的な境界条件として、垂直入射表面インピーダンスを与える手法を

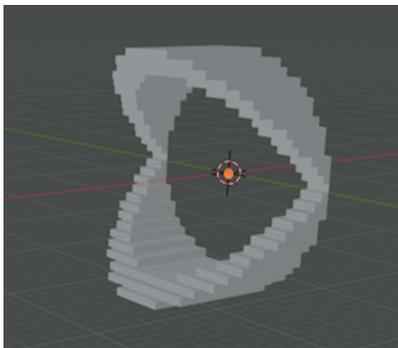


図3 楔形開口円筒管での点音源の位置。オレンジで図示。

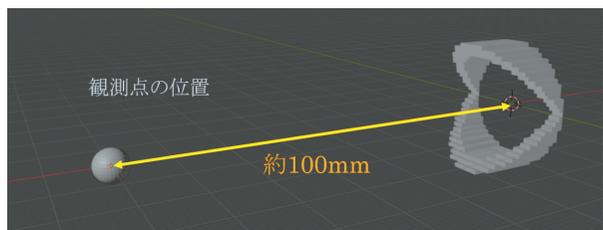


図4 観測点 ($\theta = 0$ 度) と点音源の位置関係。

用いた. この表面インピーダンス Z_n [Ns/m³] は境界面上の音圧を, その面に垂直に入射する方向の粒子速度で割った値として定義され, 垂直入射吸音率 α_n と式 (14) のような関係がある.

$$Z_n = \rho c \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha_n}}{1 - \sqrt{1 - \alpha_n}} \quad (14)$$

この表面インピーダンスを用いることで境界上での垂直入射吸音率 α_n を0 (剛な境界として完全反射) ~ 1 (吸収境界) の間で設定可能となる. 今回のシミュレーションにおける自由空間での境界面では1とし, 円筒管の境界面 (管壁) では0とした. シミュレーションのステップ数は1023として, 1.023 ms間のシミュレーションを行った.

本研究では以下の計算環境でシミュレーションを行った. シミュレーションに要する時間は10分程度である.

OS : Windows 11 Pro (ver. 22H 2)

CPU : Intel Corei7-10510U (1.80 GHz)

RAM : 8 GB

実行ソフトウェア : Matlab R2023b (MathWorks, Inc.)

3.3 結果

図5に楔形形状モデル①に対する音源を含む水平面 (xy 面) 上の音圧分布のスナップショットを示す. 口唇前方に波面が広がっていく様子が確認できる.

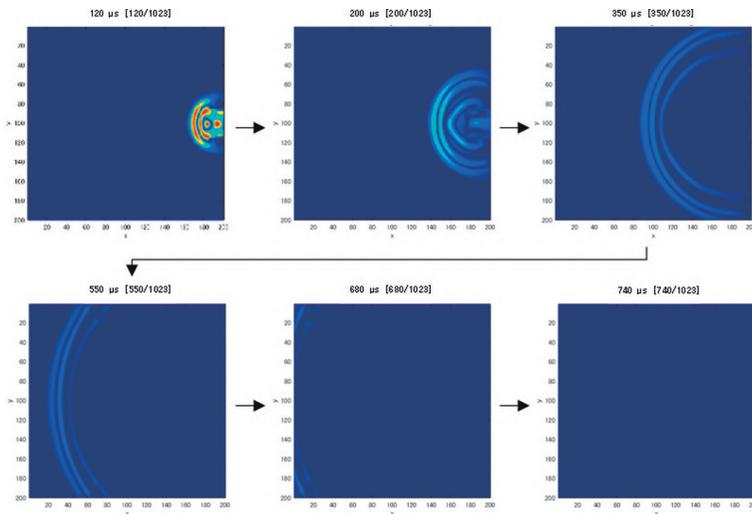


図5 水平面上の音圧分布のスナップショット (楔形形状).
左上から順に120, 200, 350, 550, 680, 740 μ sでの値.

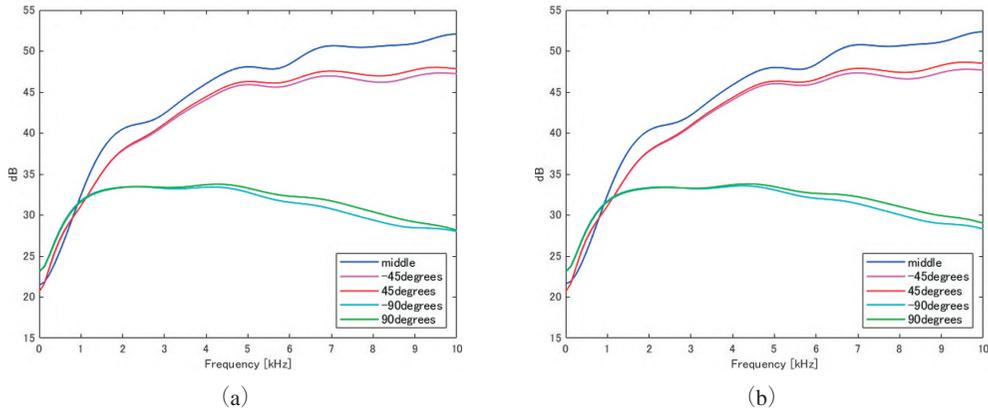


図6 水平方向の観測位置による周波数特性の変化。(a)モデル①, (b)モデル②.

観測点における音圧波形をFFTし、10 kHzまでの周波数スペクトルを求めた。図6 (a), (b)にモデル①, モデル②の結果を示す。モデルは対称形状であるので、 ± 45 度方向もしくは、 ± 90 度方向のそれぞれの結果は本来、同一の特性となる。本シミュレーションでは、完全に中心となる位置に音源を設定することができず、本来の中心から0.5 mm程度ずれた位置に音源を設定したことにより、僅かな差異が生じている。また、2つのモデルの結果を比較すると大きな差は現れていない。プロトモデルのサイズは、モデル①と②の中間となる外径30 mmであるが、このサイズの違いによる影響は大きくないものと考えられる。

1 kHzまでの特性は、観測位置により2 dB程度の差となっているが、1 kHzより高い周波数では、基準である0度方向と比べると、 ± 45 度の場合、最大で5 dB程度の変化があり、 ± 90 度の場合には最大で20 dB程度の差となっている。これは、周波数が高いほど、直進性が高く、回折しにくいという性質に加えて、モデルの形状が寄与していると考えられる。特に ± 90 度方向は音が遮られる形状をしているため、このような結果になったと考えられる。

4 幾何学的形状を用いた口唇部モデル

3節のモデル作成では、3Dソフトウェアを使用しているため、多数の形状の異なるモデルを作成するのは容易ではない。本節では、円、球、円筒などの単純な幾何学的形状を用いて口唇の近似モデルを構成する。このモデルからFDTDシミュレーションに適した格子点を抽出する。

4.1 口唇形状のパラメータの定義

図7のように正中矢状面と口角を結ぶ直線の交点を原点とし、前後方向を x 、横方向を y 、上下方向を z とする右手系の xyz 直交座標上で考える。口唇形状のパラメータは、実際の口唇

形状の画像から測定できるように、**図7**に示す次の5つとする。

正面像から測った口角間の距離 D

側面像から測った口角から上唇端までの距離 L_U

側面像から測った口角から下唇端までの距離 L_L

側面像から測った口角から上唇端を結ぶ直線の水平

面からの角度（正の値） θ_U

側面像から測った口角から下唇端を結ぶ直線の水平面からの角度（負の値） θ_L

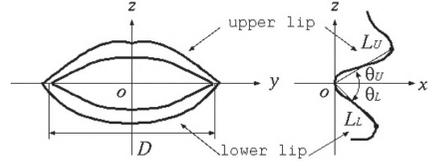


図7 口唇画像から測定するパラメータ。

4.2 球と円筒による口唇形状モデルの構成

上唇の形状モデルは次のように作成する。 xy 面上で弦の長さが D 、弦の中点から円弧の中央までの長さが L_U となる大円 C_U を描く。 C_U の半径 R_U 、中心座標 $O_U(X_U, Y_U)$ （ただし $Y_U = 0$ ）は、次のように求めることができる。

$$R_U = \frac{L_U}{2} \left(1 + \left(\frac{D}{2L_U} \right)^2 \right) \quad (15)$$

$$X_U = \frac{L_U}{2} \left(1 - \left(\frac{D}{2L_U} \right)^2 \right) \quad (16)$$

$$Y_U = 0 \quad (17)$$

円弧の両端点を P_L, P_R 、円弧の中央を P_C として、 P_L, P_R を口角に、 P_C を口唇の先端に対応させる。この円弧を以下では基準円弧と呼ぶ。

基準円弧を n 等分（ n は偶数とする）して円弧上の座標 (x_i, y_i) $i=0, 1, \dots, n$ に $n+1$ 個の球 s_i を配置する。 φ を大円の中心 O_U から P_L を結ぶ直線の x 軸からの偏角、 α_i を同様に O_U から s_i の中心 (x_i, y_i) を結ぶ直線の x 軸からの偏角とすると、 $\Delta\varphi = \frac{2\varphi}{n}$ として、 $\alpha_i = -\varphi + i\Delta\varphi$ となるので s_i の座標は次のようになる。

$$x_i = R_U(\cos \alpha_i - 1) + L_U \quad (18)$$

$$y_i = R_U \sin \alpha_i \quad (19)$$

$i=0$ は P_R を、 $i=n/2$ は P_C を、 $i=n$ は P_L の位置を表すものとする。 n は大きな値として隣接球と大部分が重なるようにする。基準円弧の中央 P_C に最大半径 r_{max} の球が、両端の口角 P_L, P_R に最小半径 r_{min} の球があるものとして、各球の半径 r_i を次のように線形補間する。

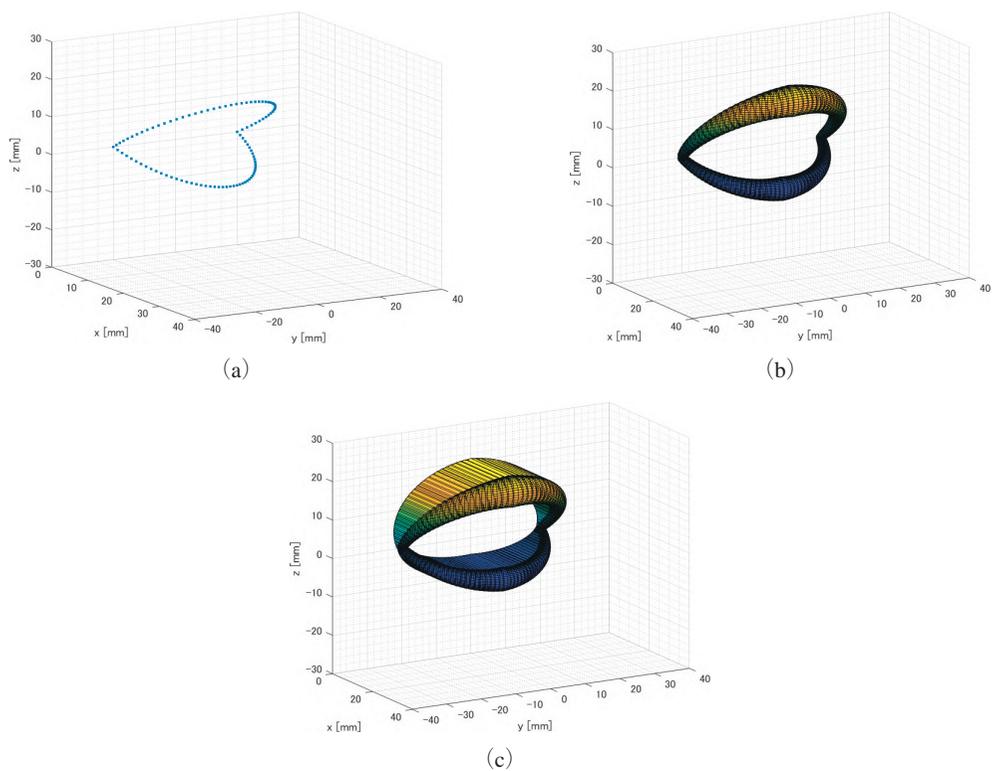


図8 (a)球の中心座標. (b) (a)の座標に配置した球. (c)各球の後方に円筒を配置.

$$r_i = r_{min} + \frac{r_{max} - r_{min}}{n/2} i, \quad (i=0, \dots, n/2) \quad (20)$$

$$r_i = r_{max} - \frac{r_{max} - r_{min}}{n/2} (i - n/2), \quad (i=n/2, \dots, n) \quad (21)$$

球を配置した基準円弧を、球を乗せたまま y 軸を中心にして、角度 θ_U だけ回転させる。回転後の各球 s_i' の中心座標 (x_i', y_i', z_i') は、次のようになる。

$$x_i' = x_i \cos \theta_U \quad (22)$$

$$y_i' = y_i \quad (23)$$

$$z_i' = x_i \sin \theta_U \quad (24)$$

これにより、3次元的に基準円弧上へ配置された球 s_i' は最初の xyz 直交座標上において次式で表すことができる。

$$(x - x_i')^2 + (y - y_i')^2 + (z - z_i')^2 = r_i^2 \quad (25)$$

なお、 y 軸を中心にした回転なので P_L 、 P_R の位置は変わらない。また、基準円弧に配置する球の最大半径 r_{max} による値を考慮して、 $L_U - r_{max}$ をモデル作成時のパラメータ値 L_U として代入することで、唇の突き出しの距離を画像からの測定値に一致させる。下唇についてもパラメータを入れ替えて同様に作成する。図8 (a)に $n=50$ とした場合の球の中心座標を、図8 (b)に球を配置した例を示す。

次に各小球 s_i' の前方の半球を残して、後方(x 軸の負方向)に長さ L_T の円筒 t_i' を配置する。この円筒は口唇より内側の壁を表すために配置する。全ての円筒の後端を同じ x 座標 $-L_T$ とすると、 s_i' に接続する円筒の長さは $L_T + x_i'$ となる。円筒 t_i' の断面は y 面に平行な面上の円 $(y - y_i')^2 + (z - z_i')^2 \leq r_i^2$ で、中心軸は s_i' の中心を通る x 軸に平行な直線なので、円筒 t_i' は次のように表される。

$$(y - y_i')^2 + (z - z_i')^2 \leq r_i^2, \quad -L_T \leq x \leq x_i' \quad (26)$$

以上の手順で作成された口唇モデルの外形を図8 (c)に示す。

4.3 格子点と境界となる輪郭面の抽出

FDTD法で用いる口唇モデル全体を含む空間の格子点 $G_{par}(p, q, r)$ (p, q, r は格子点の x, y, z 方向のインデックス)のうち、口唇モデル内部となる点(解析空間から除外する点)は、球と円筒を表す式に基づいて判定できる。空間離散化幅を Δh として、内部点として判定された位置に一边が Δh のボクセルを配置することでモデル全体を表現することができる。輪郭とならない内部のボクセルを削除することで、境界として用いるモデルの輪郭となる面を抽出できる。図9に空間的に離散化して抽出された輪郭面の例を示す。

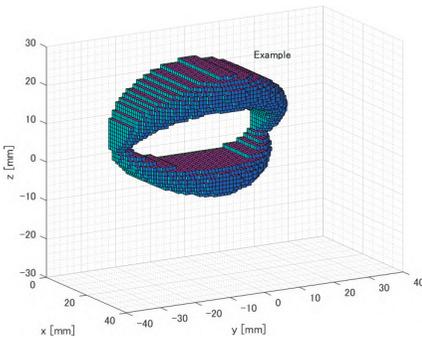


図9 抽出された輪郭となる面。

表1 母音ごとの測定したパラメータ (D, L_U, L_L の単位は [mm], θ_U, θ_L の単位は [度])

	D	L_U	L_L	θ_U	θ_L
/a/	56.0	31.0	19.0	47	-35
/i/	64.5	23.0	21.5	33	-28
/u/	15.5	18.5	14.0	40	-25
/e/	63.0	28.0	21.0	39	-33
/o/	38.0	22.0	14.5	49	-37

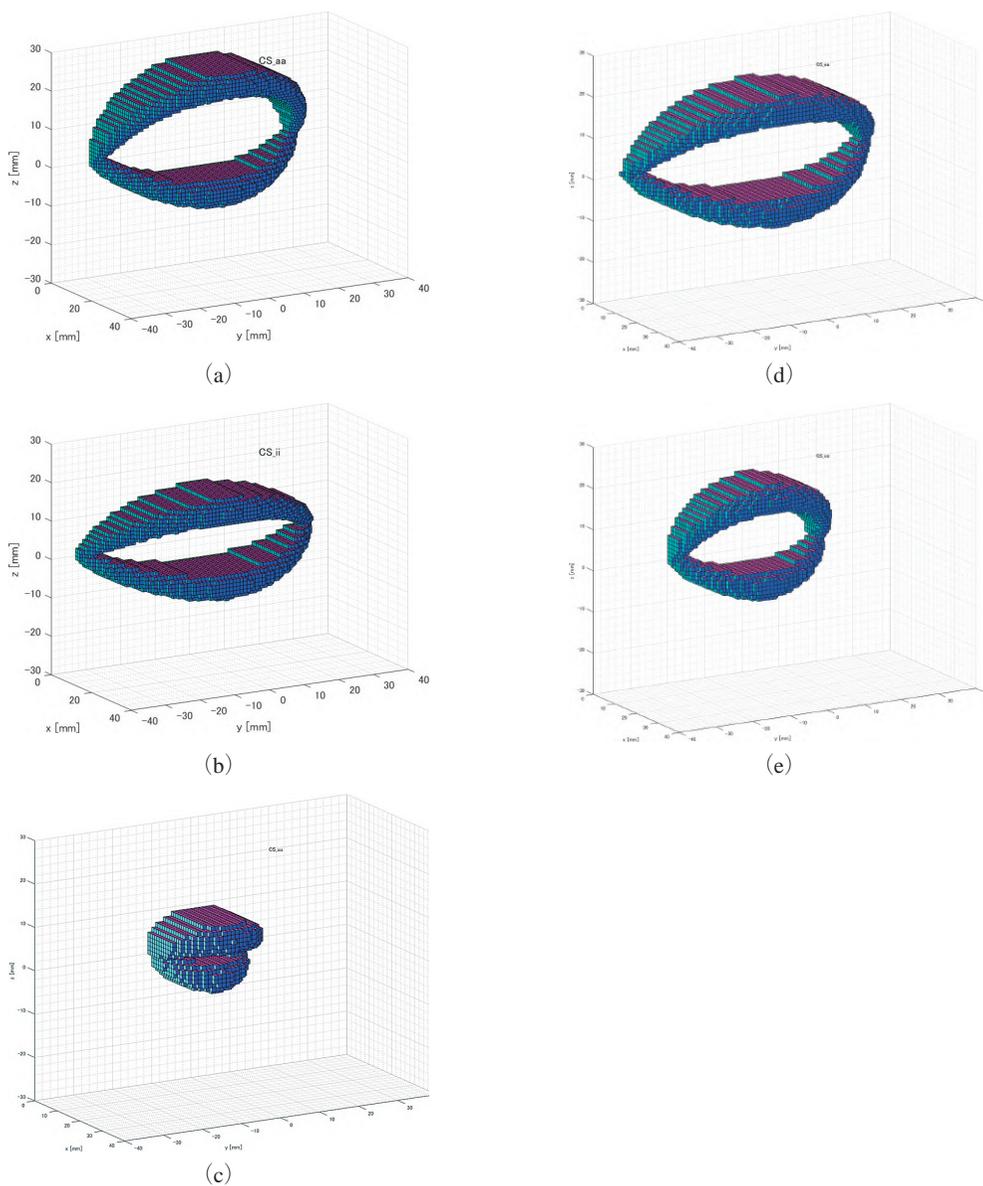


図10 口唇モデルの形状。(a), (b), (c), (d), (e) は/a/, /i/, /u/, /e/, /o/に対応。

口唇形状を表す5つのパラメータから上記の処理を行うプログラムをMatlabで作成した。母音毎にこれらのパラメータを指定することで最終的な口唇モデルを得ることができる。成人男性1名について実際に得た各母音のパラメータを表1に、パラメータから作成したモデルを図10に示す。

2つの母音に対する口唇形状パラメータを補間することで、時間的な形状変化に応じた口唇

モデルを得ることも可能となる。

4.4 シミュレーションのパラメータ

音速 c を340 m/sとし、式(13)の条件を満たすように、 $\Delta h = 1 \text{ mm}$ 、 $\Delta t = 1 \mu\text{s}$ としてシミュレーションを行った。計算空間は一辺210 mmの立方体とし、口唇モデルを立方体の1面の中央に配置した。格子点数は約 1.85×10^7 個である。音源はガウスパルスを用いて、音源位置はモデルの原点近傍に設定した。音圧の観測位置はこの音源から約100 mmの位置とした。モデルに対して正面を0度と考えると、水平方向に0, 15, 30, 45, 60, 75, 90度の7点とした。計算空間の端面は3節と同様に設定した。シミュレーションのステップ数は1100として、1.100 ms間のシミュレーションを行った。

本研究では以下の計算環境でシミュレーションを行った。シミュレーションに要する時間は8～9分程度である。

OS : Windows 11 Home (ver. 24H 2)

CPU : Intel Core i5-14500 (2.60 GHz)

RAM : 16 GB

実行ソフトウェア : Matlab R2023b (MathWorks, Inc.)

4.5 結果

図11に/a/の形状に対する音源を含む水平面 (xy 面) 上の音圧分布のスナップショットを示

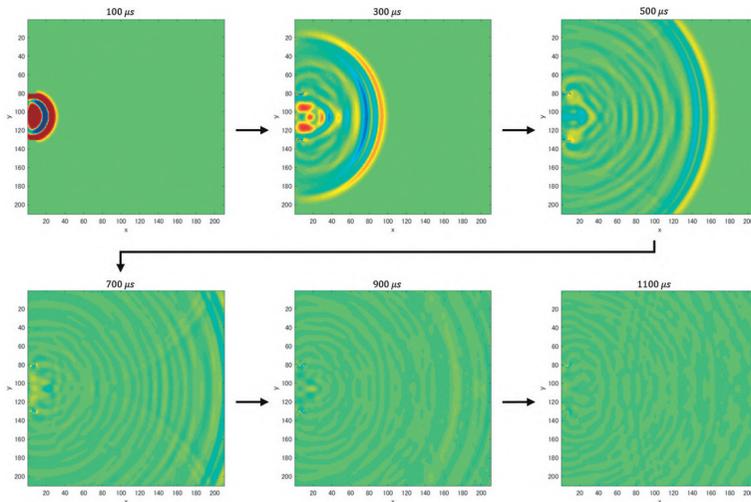


図11 水平面上の音圧分布のスナップショット。口唇形状/a/。
左上から100, 300, 500, 700, 900, 1100 μs での値。

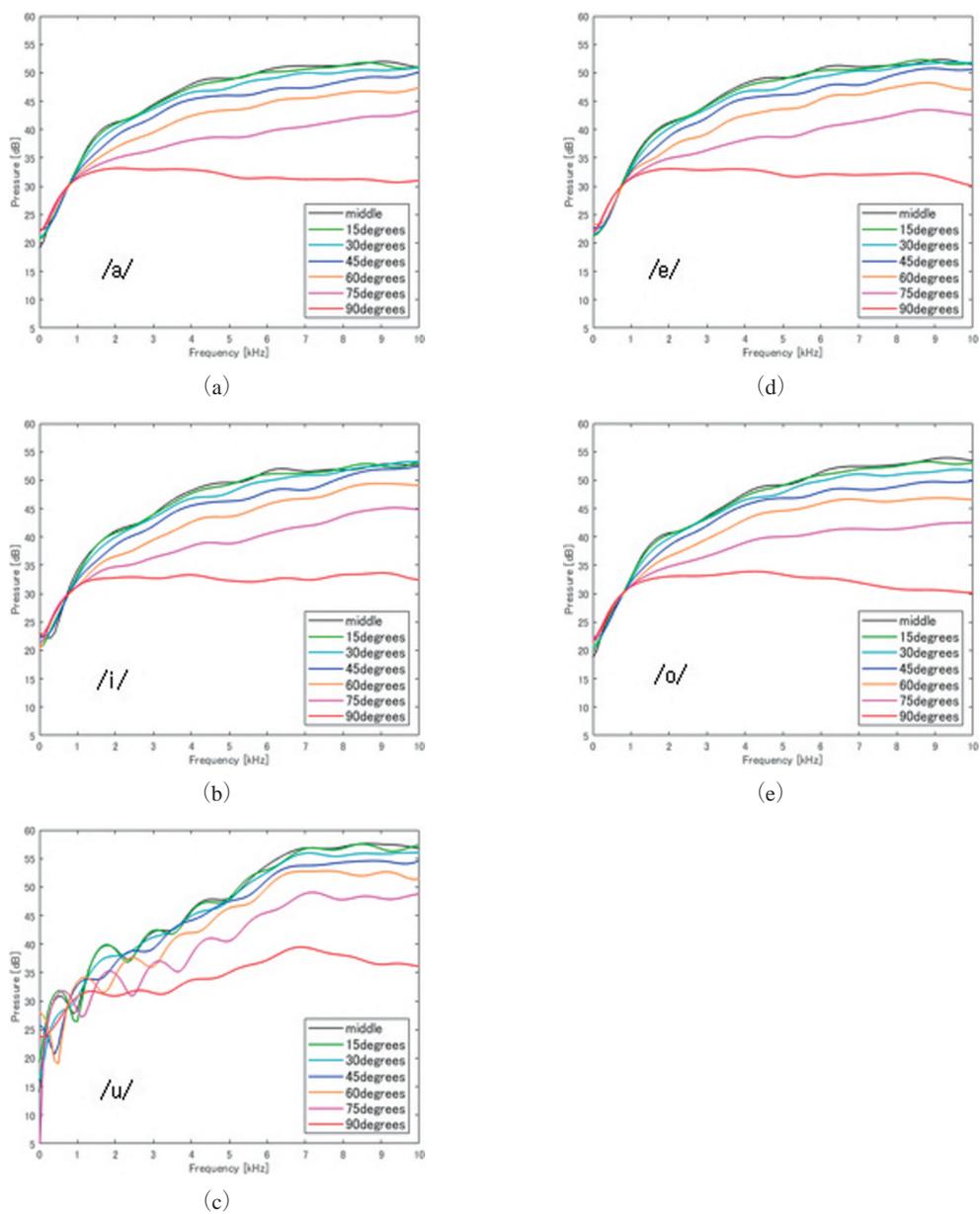


図12 水平方向の観測位置での周波数特性. (a), (b), (c), (d), (e) は/a/, /i/, /u/, /e/, /o/に対応.

す. 口唇前方に波面が広がっていく様子が確認できる.

音源から100 mmの距離にある観測点における音圧波形をFFTし、10 kHzまでの周波数スペクトルを求めた. 図12に/a/, /i/, /u/, /e/, /o/の周波数特性を示す. このモデルは正中面に対して

対称である。観測位置は正面方向を0度として90度方向までを15度刻みで観測した。図12

(a), (b), (d), (e)は楔形開口形状にする図6の結果と周波数特性の概形は類似している。/a/及び/i/では、およそ0.7 kHzまでの周波数特性における音圧は、/a/の場合、最大約2.1 dB、/i/の場合、最大約3.7 dBの差になっている。それよりも高い周波数においては観測位置の角度が大きくなるにつれて、差が大きくなっている。/u/ではスペクトルにほぼ同じ間隔で零点のような特性が見られる。正面から見た/u/の開口面積は/a/、/i/と比較してそれぞれ10%程度と小さいため、口唇モデル内部での多重反射による干渉の影響が現れた可能性があるが、音源と壁の境界条件の設定に関してさらに検討が必要と思われる。

5 おわりに

本稿では、FDTD法を用いて、口唇部分の周辺空間への放射シミュレーションを、口唇を簡素化した形状モデルを用いて行った。モデルの中心に点音源を設定し、放射方向の違いを観察するため、点音源から同一距離にある受音点での周波数特性を示した。

本報告は電子情報通信学会音声研究会において発表した内容^{3),4)}を加筆修正したものである。

参考文献

- 1) 元木邦俊, 三木信弘, 永井信夫, “開口部形状の放射特性に及ぼす影響について”, 日本音響学会秋期研究発表会講演論文集, pp. 151–152, 1985.
- 2) 豊田政弘編著, 音響サイエンスシリーズ14 FDTD法で見る音の世界, 日本音響学会, コロナ社, 2015.
- 3) 佐藤千畝, 元木邦俊, “口唇を模擬した楔形開口周辺のFDTD法による音場計算”, 電子情報通信学会技術研究報告, SP2024–1, pp. 1–4, 2024.
- 4) 佐藤千畝, 元木邦俊, “口唇を簡素化した幾何学的形状モデルによる放射伝達特性の計算について”, 電子情報通信学会技術研究報告, SP2025–7, pp. 32–36, 2025.

