

壁面における音響反射シミュレーション

生野裕†

豊谷純‡

日本大学

日本大学‡

1. はじめに

コンサートホールなどの音楽や歌劇が行なわれる建物以外にも、音響設計は様々な分野で利用されている。音響を考えた設計を行なうことにより声の明瞭度が増し、会議や授業がスムーズに進んだり、レストランなどでは他人のしゃべり声を気にせず快適に過ごすことが出来たりする。設計の段階で効率よく音響を考慮するためには、小さな模型を作って実際に実験をするという手法が一般的であるが、この手法は時間と費用がかかるため、コンピューターによる音響のシミュレーションを行なうことが有効である。

2. 目的

音響の数値シミュレーション分野では、建物の壁の材質によって反射した音の計算手法が確立されておらず、本研究では、反射壁面の境界条件のモデル化を行なう事を目的とする。

3. 基礎方程式

本研究では連続の式と運動量保存則を適用して、差分法を時空間領域に適用して離散化を行なう。その中でも、アルゴリズムがシンプルでプログラミングが容易な、FDTD(Finite-Difference Time-Domain method)法を適用する。

これはこの問題の代表的解法であり、一般的なグリッドを使った、時間領域数値解析モデル化手法の一つに属する。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ここで、 p : 音圧 [Pa], u : 粒子速度 [m/s],
 ρ : 空気の密度 [kg/m^3], c : 空気中の音速である。

4. 境界条件

コンピューターによる音響のシミュレーションを行なう上で最も困難な問題は、境界条件の設定であると言える。本研究では、後述のようにインピーダンス境界条件を設定して、計算手法の正当性を検討することにする。

5. インピーダンス境界条件

インピーダンスとは音響系と等価な電気系のアナロジーから導かれるもので、音圧と粒子速度の比で定義される。

境界面においてローカルリアクティブ (局所作用) を仮定すると、境界外向きの法線方向の粒子速度 u_n は

$$u_n = \frac{p}{Z_n} \quad (3)$$

で表される。

ローカルリアクティブの仮定とは、吸音材中に侵入した音は、材料内を伝搬し、材料表面の別の場所へ影響を及ぼすが、そういった伝搬を無視し、ある点での音圧と粒子速度が一意的に結びつくことと仮定することである^[7]。

ここで p は境界面における音圧、 Z_n は境界面のノーマルインピーダンスを表す。FDTD法ではスタガード格子を用いるため u_n と p の定義点は時間的にも空間的にも半グリッドずれており、ローカルリアクティブの仮定を厳密に成立させることは難しい。本来は何らかの対策が必要であるが、無視して式(1)から境界面近傍の圧力 p より境界面上の粒子速度 u_n を求めることが多い。

一般的にノーマルインピーダンス Z_n は位相特性も含まれた複素数の物理量であるため、エネルギーベースの評価量である実数の垂直入射吸音率とは次元が違い多対1の関係にある。すなわちある垂直入射吸音率に対応する複素数のノーマルインピーダンスは無限に存在する。ただし、

Reflectometer simulation of sound wave at wall

†Yutaka SHONO · Nihon University

‡Jun TOYOTANI · Nihon University

ノーマルインピーダンスの虚数成分を0とおき実数で与えることが多い。この場合 Z_n と垂直入射吸音率 α_n は以下のように1対1の関係になる。

$$Z_n = \rho c \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha_n}}{1 - \sqrt{1 - \alpha_n}} \quad (4)$$

6. 初期値及び境界条件

本計算結果の妥当性を検証するために文献[1]と同じ条件で計算し、計算結果を比較した。長さ 1m の 1 次元音場を考え、音源・受音点を中心に設置^[1]した。 z_n (ノーマルインピーダンス) は(4)式で求められ、 α の数値を変えることにより吸音率を変えることが出来る。

また(2)式にFDTD法を適用した次式によって境界壁面における音圧 p を計算する。ここで $pn[0]$ と $po[0]$ は左側壁面の新、旧の音圧である。また $pn[nx]$, $po[nx]$ は右側壁面における新、旧の音圧である。

$$pn[i] = po[i] - \frac{\kappa \times dt}{dx(uo[i] - uo[i-1])} \quad (5)$$

$$pn[0] = po[1] + \frac{(-dt \times c + dx)}{(dt \times c + dx)(pn[1] - po[0])} \quad (6)$$

$$pn[nx] = po[nx-1] + \frac{(-dt \times c + dx)}{(dt \times c + dx)(po[nx] - pn[nx-1])} \quad (7)$$

ここで、 $\kappa = \rho \times c \times c$ である。また次の式によって粒子速度 u を計算する。

$$un[i] = uo[i] - \frac{dt}{\rho} \times (pn[i+1] - po[i]) \quad (8)$$

$$un[0] = - \frac{pn[0] + pn[1]}{2.0} \quad (9)$$

$$un[nx-1] = \frac{pn[nx-1] + pn[nx]}{2.0} \quad (10)$$

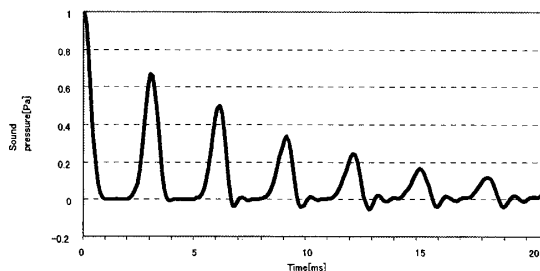


図 1 吸音率 0.5 の音圧の計算結果

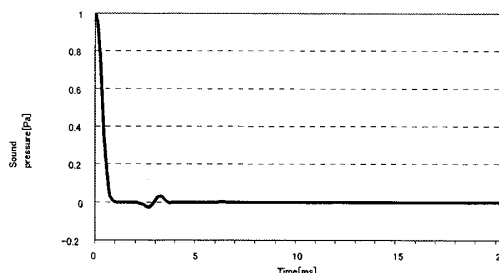


図 2 吸音率 1.0 の音圧の計算結果

7. 数値計算結果

図 1 の計算結果を見ると、音が徐々に減衰していく様子が見える。吸音率を変えて 1.0 にした場合、図 2 に示されるように音が完全吸音している様子が見える。

8. 考察

図 1 の 10[ms]~20[ms] 辺りに若干の振動がある。これは、本研究では FDTD 法を使っているために生じた数値振動であり、その結果は文献[1]と一致しており、妥当性を確認することができた。

今回は、1 次元のシミュレーションを行なったが、更に反射率の異なる場合を行い、モデル化してゆく予定である。

9. 参考文献

- [1] 太刀岡勇気他, CIP 法による音場解析, 建音研資料 AA2007-28, 2007, p. 7.
- [2] 太刀岡勇気, CIP 法による時間領域音場解析に関する研究, 東京大学 2007 年度修士論文, 2008.
- [3] 太刀岡勇気他, CIP 法による時間領域音場解析—FDTD 法との比較—, 日本音響学会講演論文集, 2007.9, p. 979-982.
- [4] 子安勝, 吸音の基礎事項, 1990.
- [5] 斉藤亮平他, CIP 法と FDTD 法による球面音波伝搬解析の性能比較, 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J89-A No. 6, 2006. 6, p. 576-580.
- [6] 斉藤亮平他, CIP 法による球面音波伝搬解析, 電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ大会, 2005, A-10-4, p. 205.
- [7] 堀之内吉成他, 音響数値解析における局所作用の仮定による誤差に関する検討, 日本建築学会近畿支部研究報告集 4004, 2008, p. 13-16.