

種々の条件における音波の伝搬のシミュレーション

雲井みのり (指導教員：河村哲也)

1 はじめに

音は、我々にとって身近な流体現象である。コンサートホールなどにおいては、設計前に数値シミュレーションを行い音の響き方を予測しておく必要がある。騒音問題においては、自動車や工場内で使用される機械など、工業分野で騒音対策は今日では当たり前になっているので、設計時に騒音の予測をしておくことは重要である。本研究では、閉空間内の音場を数値シミュレーションし、伝搬や反射を調べるとともに、視覚的にとらえることを目的とする。

2 格子生成・モデル化

2.1 格子

簡単な室内として直方体領域を考え、x-z 平面を床面、y 方向を鉛直方向とした 3 次元直交座標を用いた。計算領域は床面が 3.4m × 6.8m、鉛直方向が 3.4m とした。格子数は x,y,z それぞれに 200, 100, 100 ととり、等間隔格子を用いている。

2.2 音源

音源のモデルとして 5000Hz に周波数を設定し、一辺 3.4cm の立方体の音源を (x, y, z) = (1.7m, 0.85m, 1.7m) の位置に置き、半波長分の振動をする場合と、振動を続ける場合の音波の観測を行う。

2.3 境界面

境界面は、(a) 全面完全反射の場合、(b) 実際のホールでは柔らかい素材の椅子、一般的な室内では絨毯のような床面が完全吸収境界の場合、(c) 防音室のような全面完全吸収境界の場合、以上の 3 つをシミュレーションし観察した。

3 計算方法

3.1 基礎方程式

基礎方程式として、三次元波動方程式を用いた。3次元の波動方程式は

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

となる。ここで、 ρ は空気の圧力又は密度、 c は波の伝播速度、 t は時間である。

3.2 境界条件

完全吸収境界条件を課すのは困難であるため、本研究では第一近似である次式 [1] を用いた。たとえば、x 軸に垂直な壁では、

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial t} \right) \rho|_{x=0} = 0 \quad (2)$$

となる。ここで、 ρ は空気の圧力又は密度、 t は時間である。

自由端反射、固定端反射の反射条件はそれぞれ、

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (3)$$

$$\rho|_{x=0} = 0 \quad (4)$$

となる。本研究では完全反射条件として全て固定端反射を用いている。

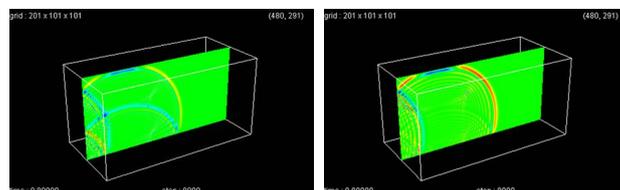
3.3 解法

三次元波動方程式には、時間方向、空間方向ともに二次精度の中心差分を使って解いた。

完全吸収境界条件の近似式には、時間方向には一次精度の前進差分を、境界には一次精度の片側差分を使って解いた。

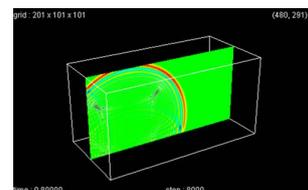
4 計算結果と考察

図 1 は 8000step 目、ここでは 0.008 秒後の $z = 1.7m$ の面の結果である。境界面すべてに完全反射条件を課している (a) では直接音の音波が境界面に当たった後、反射波が生じている様子を観察できる。底面のみ完全吸収条件を課し、他のすべての面が完全反射条件の (b) では、底面以外の境界面では反射波が生じ、底面では、吸収されている。全ての面で完全吸収境界条件を課した (c) では、入射した境界面において吸収している。



(a) 全面完全反射

(b) 床面のみ完全吸収

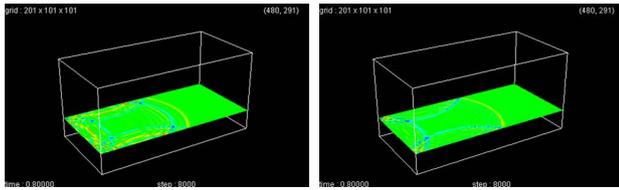


(c) 全面完全吸収

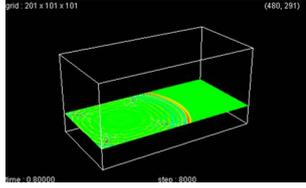
図 1: 約 0.008 秒後の $z = 1.7m$ の面

図 2 は 8000step, 0.008 秒後の $y = 0.85m$ の面の結果である。(a) において、底面の反射波の影響を受け、(b) よりも反射波を多く観察できる。(c) では図 1-(c) と同様、反射波はほとんどみられない。

図 3 は、16000step, 約 0.016 秒後の $z = 1.7m$ の面の結果である。(a) は反射波が多く発生し、他の結果よりも干渉が多く起きていることがわかる。(b) でも、(a) よりも少ないが干渉が起きていることを観察できる。(c)



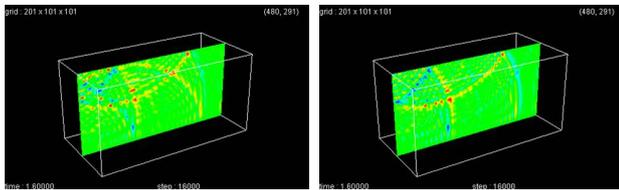
(a) 全面完全反射 (b) 床面のみ完全吸収



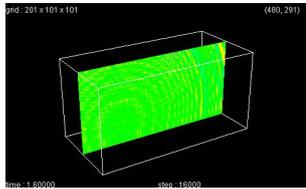
(c) 全面完全吸収

図 1: 約 0.008 秒後の $y = 0.85\text{m}$ の面

においては、直接音の波がほぼ全て境界面で吸収されるので、反射音による干渉があまり見られない。



(a) 全面完全反射 (b) 床面のみ完全吸収



(c) 全面完全吸収

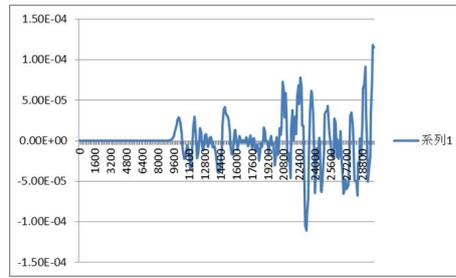
図 3: 約 0.016 秒後の $z = 1.7\text{m}$ の面

観測点を $(x,y,z) = (5.1\text{m}, 0.85\text{m}, 1.7\text{m})$ に置き、空気
の圧力または密度の値をとる。

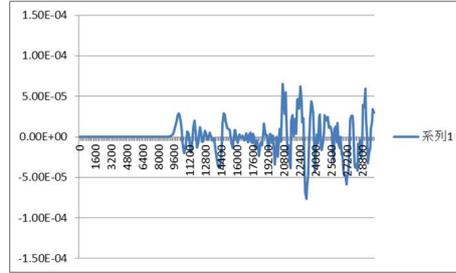
図 5-(a) では、直接音を観測後、大きな値をとっているのが観察できる。図 5-(b) においても (a) よりはやが弱いが、直接音よりもやや強めの値を時間経過後にとっている。図 5-(c) は直接音の到来後、非常に弱い値をとり続けている。図 3-(a) において、より多く、そしてより強い干渉が見られたので、その影響で図 5-(a) のように音源よりも大きな値が時間がある程度経過したあと観測された。反対に図 3-(c) においては、反射波における干渉が弱いものだったので、図 5-(c) のように時間経過後非常に弱い値をとっている。また図 5 において完全吸収条件の境界面が増えるにつれて音が小さくなっている。これは、防音室で声を出した時に自分の声がいづもより小さく聞こえる現象の要因であるといえる。

5 まとめと今後の課題

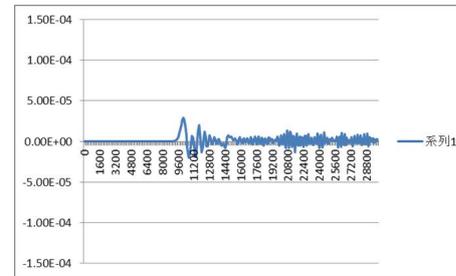
本研究では境界面に吸収条件の面が多いほど音は小さくなることが分かった。このことは、室内の音波の伝



(a) 全面完全反射



(b) 床面のみ完全吸収



(c) 全面完全吸収

図 5: $(x, y, z) = (5.1\text{m}, 0.85\text{m}, 1.7\text{m})$ の空気の圧力, 密度

搬のシミュレーションを行うために、(2) によって完全吸収境界条件の再現ができることを示している。今後は吸収境界にも素材によって程度に差があるので、それを考慮する必要がある。また、波動方程式に減衰項を取り入れる必要もある。これらのことをふまえて、実際のホールでの計算、騒音場の可視化を行っていく予定である。また、音源を楽器が発する音波として再現することも行っていきたい。

参考文献

- [1] B.Engquist and A.majda 「Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves」 (Math. Comp. 31,629-651)
- [2] 上野 佳奈子, 橘 秀樹, 羽入 敏樹, 坂本 慎一 ほか 「コンサートホールの科学：形と音のハーモニー」 (コロナ社)
- [3] 永田 穂, 飯田 一嘉 「建築音響」 (コロナ社)
- [4] 割田 真弓 「閉空間内における音波の伝播の数値シミュレーション」 (平成 16 年度年お茶の水女子大学修士論文 1-38)