

FDTD 法における通気性素材への対応について

関西大学
環境都市工学部 建築学科
建築環境工学第 研究室
音環境ゼミ
建 11-0097 元岡 潤哉
指導教官 豊田 政弘 准教授

目次

| | |
|----------------|----|
| 1. 序論 | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 研究目的 | 2 |
| 2. 1次元音場における検討 | 3 |
| 2.1 解析解法 | 3 |
| 2.2 数値解法 | 5 |
| 2.2.1 パターン | 5 |
| 2.2.2 パターン | 6 |
| 2.2.3 パターン | 7 |
| 2.3 安定条件 | 8 |
| 2.3.1 パターン | 10 |
| 2.3.2 パターン | 11 |
| 2.3.3 パターン | 12 |
| 2.4 解析結果 | 13 |
| 2.4.1 計算精度 | 13 |
| 2.4.2 安定条件 | 16 |
| 2.5 評価と考察 | 18 |
| 3. 3次元音場における検討 | 19 |
| 3.1 数値解法 | 19 |
| 3.2 安定条件 | 21 |
| 3.2.1 パターン | 24 |
| 3.2.2 パターン | 25 |
| 3.2.3 パターン | 26 |
| 3.3 解析結果 | 27 |
| 3.3.1 計算精度 | 27 |
| 3.3.2 安定条件 | 29 |
| 3.4 評価と考察 | 31 |
| 4. 結論 | 32 |
| 参考文献 | 33 |
| 謝辞 | 34 |

1. 序論

1.1 研究背景

FDTD 法とは時空間を分割（離散化）し、微分方程式の微分の部分を差分商に置き換えて数値的に計算する差分法の 1 手法である。元は電磁波問題における解析手法である[1]が、様々な伝搬問題に展開することが可能なため建築音響問題にも用いられている[2]。さらに、この方法を用いた汎用ソフトの開発も進んでいる[3]。

また、建築音響では通気性素材（以下、布とする）について検討することがある[4]が、現時点では FDTD 法により布について解析した例は見受けられない。

1.2 研究目的

本研究では、FDTD 法を用いた解析において布が設置された場合に関して、その布の音響特性を解析に考慮するための手法を提案し、1 次元音場において解析解法（数学的解法）と数値解法（FDTD 法）の比較から提案手法の妥当性を検討するとともに、解の安定条件を導出する。さらに、3 次元音場に適用した際の安定条件についても検討を行い、提案手法の有効性の検証をすることで、FDTD 法による布についての解析を可能にする。

2. 1次元音場における検討

2.1 解析解法

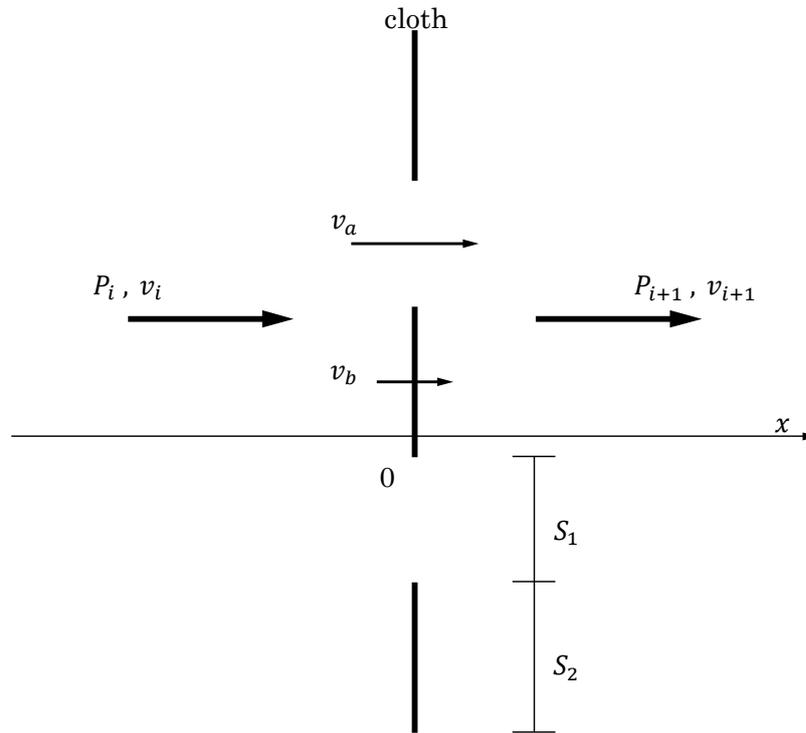


図 2-1 1次元音場

1次元音場において、布に対して垂直に単位振幅の平面波が入射する場を図 2-1 に示す。入射波の音圧を P_i 、粒子速度を v_i 、境界において布部分の振動速度を v_b 、開口部分を通過する粒子の v_b に対する相対速度を v_a 、透過波の音圧を P_{i+1} 、粒子速度を v_{i+1} とする。また、布の開口部分の面積を S_1 、布部分の面積を S_2 とすると、開口率を $\sigma = \frac{S_1}{S_1+S_2}$ と表すことができ、反射波に関する係数を R （複素音圧反射係数）、透過波に関する係数を T （複素音圧透過係数）と置くと、 P_i 、 v_i 、 P_{i+1} 、 v_{i+1} について、

$$P_i = e^{ikx} + Re^{-ikx} \quad (2-1)$$

$$v_i = \frac{1}{Z_0}(e^{ikx} - Re^{-ikx}) \quad (2-2)$$

$$P_{i+1} = Te^{ikx} \quad (2-3)$$

$$v_{i+1} = \frac{1}{Z_0}Te^{ikx} \quad (2-4)$$

が得られる。ここでは波数を $k = \frac{\omega}{c}$ 、インピーダンスを $Z_0 = \rho c$ とする。ただし、 ω は角周波数、 ρ は空気の密度、 c は空気の音速である。

また、境界条件について、布の厚さを考慮しないとすると、体積速度の連続性より、

$$v_i = v_{i+1} = v'_a + v_b \quad (2-5)$$

(ただし、 $\sigma v_a = v'_a$ とする)となり、布の流れ抵抗を r 、面密度を m とすると v'_a および v_b は、

$$v'_a = \frac{P_i - P_{i+1}}{r} \quad (\text{注}) \quad (2-6)$$

$$v_b = -\frac{P_i - P_{i+1}}{i\omega m} \quad (2-7)$$

と表され、(2-5)式に代入すると、

$$v_i = v_{i+1} = \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{i\omega m} \right) (P_i - P_{i+1}) \quad (2-8)$$

となる。以下、 $\frac{1}{Z} = \frac{1}{r} - \frac{1}{i\omega m}$ とする。

(2-1)~(2-4)、(2-8)式より、 $x = 0$ の位置では、

$$\frac{1}{Z_0}(1 - R) = \frac{1}{Z_0}T = \frac{1}{Z}(1 + R - T) \quad (2-9)$$

が得られ、(2-9)式は、

$$Z(1 - R) = ZT = Z_0(1 + R - T) \quad (2-10)$$

と変形でき、

$$T = 1 - R \quad (2-11)$$

$$ZT = Z_0(1 + R - T) \quad (2-12)$$

の連立方程式となる。

(2-11)、(2-12)式より、係数 R および T は、

$$R = \frac{Z}{Z + 2Z_0} \quad (2-13)$$

$$T = \frac{2Z_0}{Z + 2Z_0} \quad (2-14)$$

となり、吸音率 α 、透過率 τ を

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (2-15)$$

$$\tau = |T|^2 \quad (2-16)$$

により求めることができる。

(注)流れ抵抗 r は直流($v_b = 0$)の状態において、 $v_i = v_{i+1}$ 、 P_i 、 P_{i+1} を測定することで求められ、 $v_i = v_{i+1} = \frac{P_i - P_{i+1}}{r}$ と表される。 $v_b = 0$ であるので、(2-5)式より、 $v_i = v_{i+1} = \sigma v_a$ となるため、(2-6)式が成り立つ。

2.2 数値解法

FDTD 法を用いた数値解法について 3 つのパターンを考える。

2.2.1 パターン

解析解法と同様に図 2-1 において、流れ抵抗 r と粒子速度 v については、(2-5)、(2-6)式が成り立ち、また、面密度 m については、境界面における運動方程式より、

$$P_i - P_{i+1} = m \frac{\partial v_b}{\partial t} \quad (\text{注}) \quad (2-17)$$

が得られる。

ここで、(2-6)式の v'_a に関しては差分ではなく、時間ステップを $1/2$ 前後にずらしたときの平均をとり、(2-5)、(2-17)式については FDTD 法に基づいて離散化すると、

$$(2-6) \quad P_i^n - P_{i+1}^n = r v'_a{}^n = r \frac{v'_a{}^{n+\frac{1}{2}} + v'_a{}^{n-\frac{1}{2}}}{2} \quad (2-18)$$

$$(2-17) \quad P_i^n - P_{i+1}^n = m \frac{v_b^{n+\frac{1}{2}} - v_b^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} \quad (2-19)$$

$$(2-5) \quad v^{n+\frac{1}{2}} = v'_a{}^{n+\frac{1}{2}} + v_b^{n+\frac{1}{2}} \quad (2-20)$$

が得られる。ここで、 n を時間ステップ、 i を空間ステップとする。これらより v'_a 、 v_b 、布の近傍における v の更新式は、

$$v'_a{}^{n+\frac{1}{2}} = -v'_a{}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{2}{r}(P_i^n - P_{i+1}^n) \quad (2-21)$$

$$v_b^{n+\frac{1}{2}} = v_b^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{m}(P_i^n - P_{i+1}^n) \quad (2-22)$$

および、(2-20)式となる。これらと布に接する空気中の音波伝搬に関する FDTD 法の更新式を連成することで、任意の受音点の音圧時間波形を求めることができる。また、入射音圧波形、反射音圧波形、透過音圧波形から吸音率・透過率を求めることができる。

(注)(2-7)式の前になる式である。時間項 $e^{-i\omega t}$ の定常状態を考えれば $\frac{\partial v_b}{\partial t} = -i\omega v_b$ となり、(2-7)式が導かれる。

2.2.2 パターン

2.2.1 節と同条件で(2-6)式の v'_a について、時間ステップが 1/2 後の粒子速度の値のみを用いれば、

$$P_i^n - P_{i+1}^n = r v_a'^{n+\frac{1}{2}} \quad (2-23)$$

が得られ、 v'_a についての更新式は、

$$v_a'^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{r} (P_i^n - P_{i+1}^n) \quad (2-24)$$

となり、(2-20)および(2-22)式とともに 2.2.1 節と同様にして吸音率・透過率を求めることができる。

2.2.3 パターン

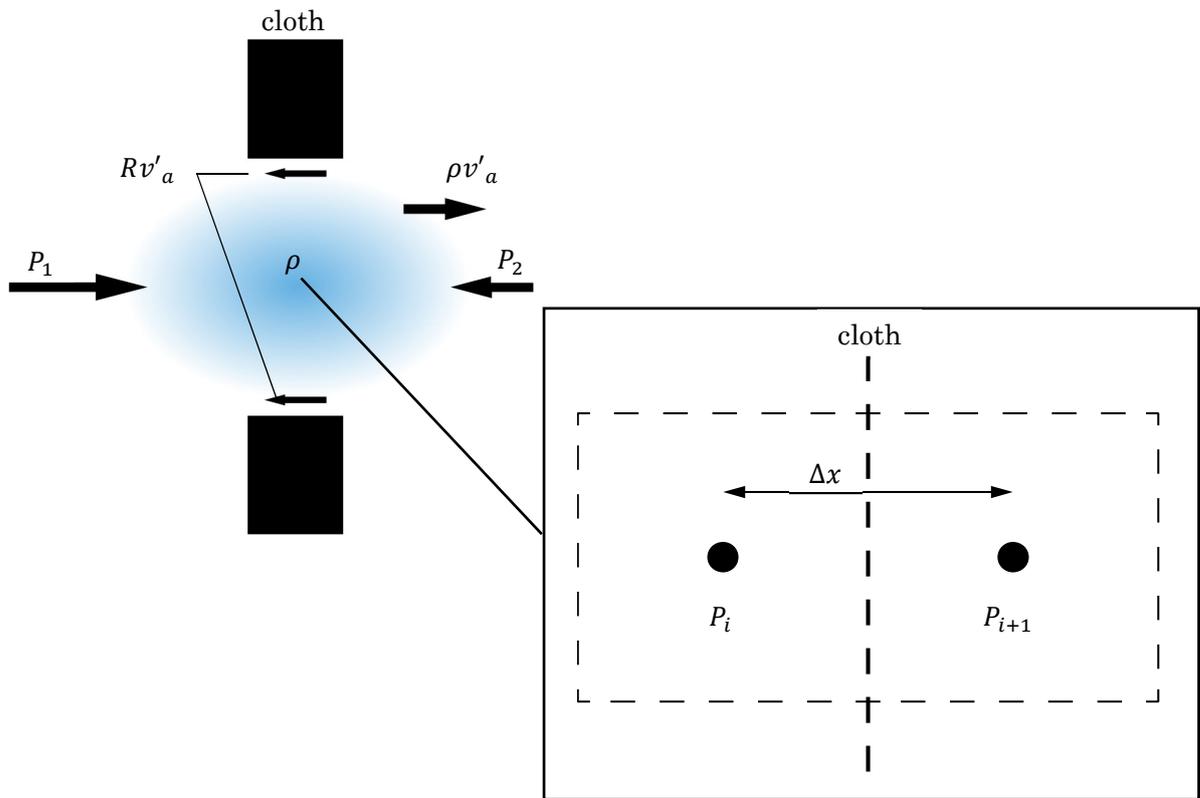


図 2-2 1次元音場（摩擦抵抗を考慮）

図 2-1 と同様な 1 次元音場において、布を透過する空気に摩擦抵抗がはたらくものとし、その関係を図 2-2 に示す。ここで、離散化を行った際の P_i と P_{i+1} の参照点間の距離を Δx 、摩擦抵抗を Rv'_a とすると v'_a について、

$$\rho \frac{\partial v'_a}{\partial t} + Rv'_a = -\frac{\partial P}{\partial x} \quad (2-25)$$

と表すことができる。ここで、 $R = \frac{r}{\Delta x}$ である。(2-25)式を離散化すると、

$$\rho \frac{v'_a{}^{n+\frac{1}{2}} - v'_a{}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} + \frac{r}{\Delta x} \frac{v'_a{}^{n+\frac{1}{2}} + v'_a{}^{n-\frac{1}{2}}}{2} = -\frac{P_{i+1}^n - P_i^n}{\Delta x} \quad (2-26)$$

が得られ、 v'_a についての更新式は、

$$v'_a{}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{2\rho\Delta x - r\Delta t}{2\rho\Delta x + r\Delta t} v'_a{}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{2\Delta t}{2\rho\Delta x + r\Delta t} (P_{i+1}^n - P_i^n) \quad (2-27)$$

となり、(2-20)および(2-22)とともに 2.2.1 節と同様にして吸音率・透過率を求めることができる。

2.3 安定条件

FDTD 法は微分を差分商に置き換えるだけなので、非常に簡明である半面、条件の設定によっては解が発散したり、波形が乱れたりすることがあるので、実際の運用上は注意が必要である。また、1次元音場においては、波動伝搬の安定条件 $c\Delta t \leq \Delta x$ を満たさなければならないが、ここでは、状態遷移方程式を利用して1次元場に布を設置した境界の安定条件を導出する。

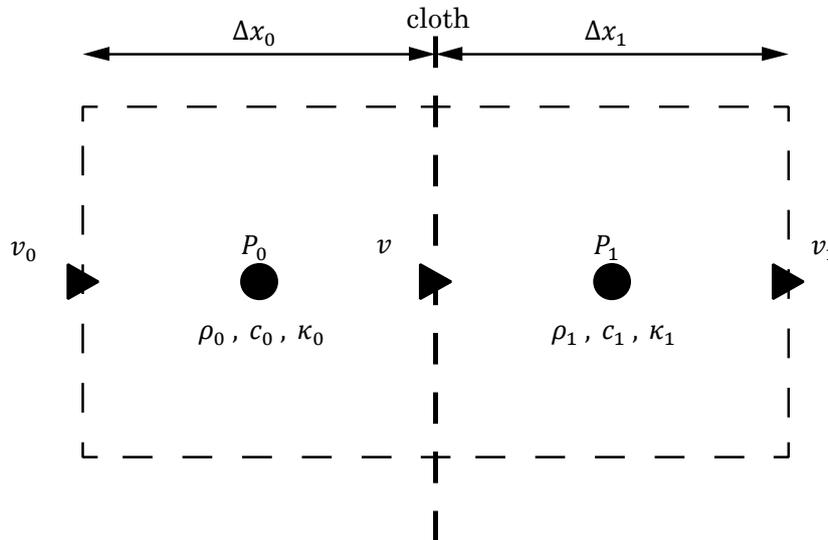


図 2-3 1次元音場

1次元音場の境界に隣接するセルとそのセル内の物理量の参照点の関係を図 2-3 に示す。入射側の音圧を P_0 、粒子速度を v_0 、空間離散化幅を Δx_0 、密度を ρ_0 、音速を c_0 、体積弾性率を $\kappa_0 (= \rho_0 c_0^2)$ 、境界における粒子速度を v 、透過側の音圧を P_1 、粒子速度を v_1 、空間離散化幅を Δx_1 、密度を ρ_1 、音速を c_1 、体積弾性率を $\kappa_1 (= \rho_1 c_1^2)$ とする。2つのセルの両端を完全吸音のインピーダンス境界とすると、それぞれの境界条件は、

$$-\frac{P_0}{v_0} = \rho_0 c_0 \quad (2-28)$$

$$\frac{P_1}{v_1} = \rho_1 c_1 \quad (2-29)$$

と表すことができ、これらを離散化すると、

$$P_0^n = -Z_0 v_0^{n+\frac{1}{2}} \quad (2-30)$$

$$P_1^n = Z_1 v_1^{n+\frac{1}{2}} \quad (2-31)$$

が得られる。ここで、 $Z_0 = \rho_0 c_0$ 、 $Z_1 = \rho_1 c_1$ とする。

また、連続方程式より、

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\kappa_0 \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2-32)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\kappa_1 \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2-33)$$

が得られ、これらを離散化すると、

$$\frac{P_0^{n+1} - P_0^n}{\Delta t} = -\kappa_0 \frac{v^{n+\frac{1}{2}} - v_0^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x_0} \quad (2-34)$$

$$\frac{P_1^{n+1} - P_1^n}{\Delta t} = -\kappa_1 \frac{v_1^{n+\frac{1}{2}} - v^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x_1} \quad (2-35)$$

となり、更新式は、

$$P_0^{n+1} = P_0^n - \frac{\kappa_0 \Delta t}{\Delta x_0} \left(v^{n+\frac{1}{2}} - v_0^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (2-36)$$

$$P_1^{n+1} = P_1^n - \frac{\kappa_1 \Delta t}{\Delta x_1} \left(v_1^{n+\frac{1}{2}} - v^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (2-37)$$

と表すことができる。 $v^{n+\frac{1}{2}}$ 、 $v_0^{n+\frac{1}{2}}$ 、 $v_1^{n+\frac{1}{2}}$ にそれぞれ(2-20)、(2-30)、(2-31)式を代入すると、

$$P_0^{n+1} = P_0^n - \frac{\kappa_0 \Delta t}{\Delta x_0} \left(v_a^{n+\frac{1}{2}} + v_b^{n+\frac{1}{2}} + \frac{P_0^n}{Z_0} \right) \quad (2-38)$$

$$P_1^{n+1} = P_1^n - \frac{\kappa_1 \Delta t}{\Delta x_1} \left(\frac{P_1^n}{Z_1} - v_a^{n+\frac{1}{2}} - v_b^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (2-39)$$

となり、 $v_b^{n+\frac{1}{2}}$ に(2-22)式を代入すると、

$$P_0^{n+1} = P_0^n - \frac{\kappa_0 \Delta t}{\Delta x_0} \left(v_a^{n+\frac{1}{2}} + v_b^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{m} (P_0^n - P_1^n) + \frac{P_0^n}{Z_0} \right) \quad (2-40)$$

$$P_1^{n+1} = P_1^n - \frac{\kappa_1 \Delta t}{\Delta x_1} \left(\frac{P_1^n}{Z_1} - v_a^{n+\frac{1}{2}} - v_b^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{m} (P_0^n - P_1^n) \right) \quad (2-41)$$

が得られる。(2-40)、(2-41)式と 2.2 節で用いた v_a に関する各パターンそれぞれの更新式を用いて、状態遷移方程式による安定条件を導出する。

2.3.1 パターン

(2-40)、(2-41)式に 2.2.1 節で用いた v'_a に関する更新式(2-21)式を代入すると、

$$P_0^{n+1} = P_0^n - \frac{\kappa_0 \Delta t}{\Delta x_0} \left(-v_a'^{n-\frac{1}{2}} + \frac{2}{r} (P_0^n - P_1^n) + v_b^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{m} (P_0^n - P_1^n) + \frac{P_0^n}{Z_0} \right) \quad (2-42)$$

$$P_1^{n+1} = P_1^n - \frac{\kappa_1 \Delta t}{\Delta x_1} \left(\frac{P_1^n}{Z_1} + v_a'^{n-\frac{1}{2}} - \frac{2}{r} (P_0^n - P_1^n) - v_b^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{m} (P_0^n - P_1^n) \right) \quad (2-43)$$

となり、これらの 2 式と(2-21)、(2-22)式を変形すると、

$$P_0^{n+1} = (1 - 2K_0R - K_0M - K_0Q_0)P_0^n + (2K_0R + K_0M)P_1^n + K_0v_a'^{n-\frac{1}{2}} - K_0v_b^{n-\frac{1}{2}} \quad (2-44)$$

$$P_1^{n+1} = (2K_1R + K_1M)P_0^n + (1 - K_1Q_1 - 2K_1R - K_1M)P_1^n - K_1v_a'^{n-\frac{1}{2}} + K_1v_b^{n-\frac{1}{2}} \quad (2-45)$$

$$v_a'^{n+\frac{1}{2}} = 2RP_0^n - 2RP_1^n - v_a'^{n-\frac{1}{2}} \quad (2-46)$$

$$v_b^{n+\frac{1}{2}} = MP_0^n - MP_1^n + v_b^{n-\frac{1}{2}} \quad (2-47)$$

が得られ、まとめると、

$$\begin{bmatrix} P_0^{n+1} \\ P_1^{n+1} \\ v_a'^{n+\frac{1}{2}} \\ v_b^{n+\frac{1}{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - K_0(2R + M + Q_0) & K_0(2R + M) & K_0 & -K_0 \\ K_1(2R + M) & 1 - K_1(Q_1 + 2R + M) & -K_1 & K_1 \\ 2R & -2R & -1 & 0 \\ M & -M & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^n \\ P_1^n \\ v_a'^{n-\frac{1}{2}} \\ v_b^{n-\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (2-48)$$

と表すことができる。ここで、 $K_0 = \frac{\kappa_0 \Delta t}{\Delta x_0}$ 、 $K_1 = \frac{\kappa_1 \Delta t}{\Delta x_1}$ 、 $Q_0 = \frac{1}{Z_0}$ 、 $Q_1 = \frac{1}{Z_1}$ 、 $R = \frac{1}{r}$ 、 $M = \frac{\Delta t}{m}$ とする。

(2-48)式の左辺は右辺のベクトルの時間ステップが 1 つ後の値を表しており、この式を状態遷移方程式と呼ぶ。右辺の行列内のすべての固有値の絶対値が 1 以下であれば解が安定する。その Δt と波動伝搬の安定条件による Δt とを比較して、より小さい方を採用すればよい。

2.3.2 パターン

(2-40)、(2-41)式に 2.2.2 節で用いた v'_a に関する更新式(2-24)式を代入すると、

$$P_0^{n+1} = P_0^n - \frac{\kappa_0 \Delta t}{\Delta x_0} \left(\frac{1}{r} (P_0^n - P_1^n) + v_b^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{m} (P_0^n - P_1^n) + \frac{P_0^n}{Z_0} \right) \quad (2-49)$$

$$P_1^{n+1} = P_1^n - \frac{\kappa_1 \Delta t}{\Delta x_1} \left(\frac{P_1^n}{Z_1} - \frac{1}{r} (P_0^n - P_1^n) - v_b^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{m} (P_0^n - P_1^n) \right) \quad (2-50)$$

となり、これらの 2 式と(2-24)式を変形すると、

$$P_0^{n+1} = (1 - K_0 R - K_0 M - K_0 Q_0) P_0^n + (K_0 R + K_0 M) P_1^n - K_0 v_b^{n-\frac{1}{2}} \quad (2-51)$$

$$P_1^{n+1} = (K_1 R + K_1 M) P_0^n + (1 - K_1 Q_1 - K_1 R - K_1 M) P_1^n + K_1 v_b^{n-\frac{1}{2}} \quad (2-52)$$

$$v_a^{n+\frac{1}{2}} = R P_0^n - R P_1^n \quad (2-53)$$

が得られ、(2-47)式とともにまとめると、

$$\begin{bmatrix} P_0^{n+1} \\ P_1^{n+1} \\ v_a^{n+\frac{1}{2}} \\ v_b^{n+\frac{1}{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - K_0(R + M + Q_0) & K_0(R + M) & 0 & -K_0 \\ K_1(R + M) & 1 - K_1(Q_1 + R + M) & 0 & K_1 \\ R & -R & 0 & 0 \\ M & -M & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^n \\ P_1^n \\ v_a^{n-\frac{1}{2}} \\ v_b^{n-\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (2-54)$$

と表すことができ、2.3.1 節と同様に安定条件を決定する。

2.3.3 パターン

(2-42)、(2-43)式に 2.2.3 節で用いた v'_a に関する更新式(2-27)式を代入すると、

$$P_0^{n+1} = P_0^n - \frac{\kappa_0 \Delta t}{\Delta x_0} \left(\frac{2\rho \Delta x - r \Delta t}{2\rho \Delta x + r \Delta t} v_a'^{n-\frac{1}{2}} - \frac{2\Delta t}{2\rho \Delta x + r \Delta t} (P_1^n - P_0^n) + v_b^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{m} (P_0^n - P_1^n) + \frac{P_0^n}{Z_0} \right) \quad (2-55)$$

$$P_1^{n+1} = P_1^n - \frac{\kappa_1 \Delta t}{\Delta x_1} \left(\frac{P_1^n}{Z_1} - \frac{2\rho \Delta x - r \Delta t}{2\rho \Delta x + r \Delta t} v_a'^{n-\frac{1}{2}} + (P_1^n - P_0^n) - v_b^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{m} (P_0^n - P_1^n) \right) \quad (2-56)$$

となり、これらの 2 式と(2-27)式を変形すると、

$$P_0^{n+1} = (1 - BK_0 - K_0M - K_0Q_0)P_0^n + (BK_0 + K_0M)P_1^n - AK_0v_a'^{n-\frac{1}{2}} - K_0v_b^{n-\frac{1}{2}} \quad (2-57)$$

$$P_1^{n+1} = (BK_1 + K_1M)P_0^n + (1 - K_1Q_1 - BK_1 - K_1M)P_1^n + AK_1v_a'^{n-\frac{1}{2}} + K_1v_b^{n-\frac{1}{2}} \quad (2-58)$$

$$v_a'^{n+\frac{1}{2}} = BP_0^n - BP_1^n + Av_a'^{n-\frac{1}{2}} \quad (2-59)$$

が得られ、(2-47)式とともにまとめると、

$$\begin{bmatrix} P_0^{n+1} \\ P_1^{n+1} \\ v_a'^{n+\frac{1}{2}} \\ v_b^{n+\frac{1}{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - K_0(B + M + Q_0) & K_0(B + M) & -AK_0 & -K_0 \\ K_1(B + M) & 1 - K_1(Q_1 + B + M) & AK_0 & K_1 \\ B & -B & A & 0 \\ M & -M & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^n \\ P_1^n \\ v_a'^{n-\frac{1}{2}} \\ v_b^{n-\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (2-60)$$

と表すことができ、2.3.1 節と同様に安定条件を決定する。ここで、 $A = \frac{2\rho \Delta x - r \Delta t}{2\rho \Delta x + r \Delta t}$ 、 $B = \frac{2\Delta t}{2\rho \Delta x + r \Delta t}$ とする。

2.4 解析結果

2.4.1 計算精度

FDTD 法による数値解法について各パターンの解析結果を以下に示す。ここで、面密度 $m = 0.4$ [kg/m²]、境界に接しているセルの媒質は空気とする。

・パターン では、面密度と流れ抵抗の値に関係なく解が発散し、結果を得ることができなかった。

・パターン では、安定性に面密度の値は関係なかったが、流れ抵抗の値が小さいときは解が発散した。流れ抵抗の値が大きいたときは安定し、以下に示すように解析解と一致した。なお、解析が可能な最小の流れ抵抗は $r = 806$ [Ns/m³]であった。いくつかの流れ抵抗における透過率・吸音率について数値解法と解析解法の比較を図 2-4、2-5 に示す。

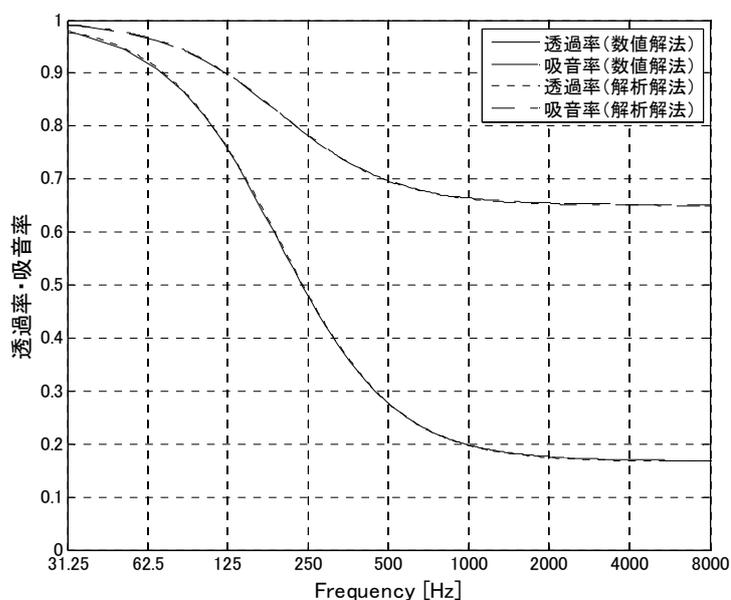


図 2-4 $r = 1200$ [Ns/m³]における透過率・吸音率 (パターン)

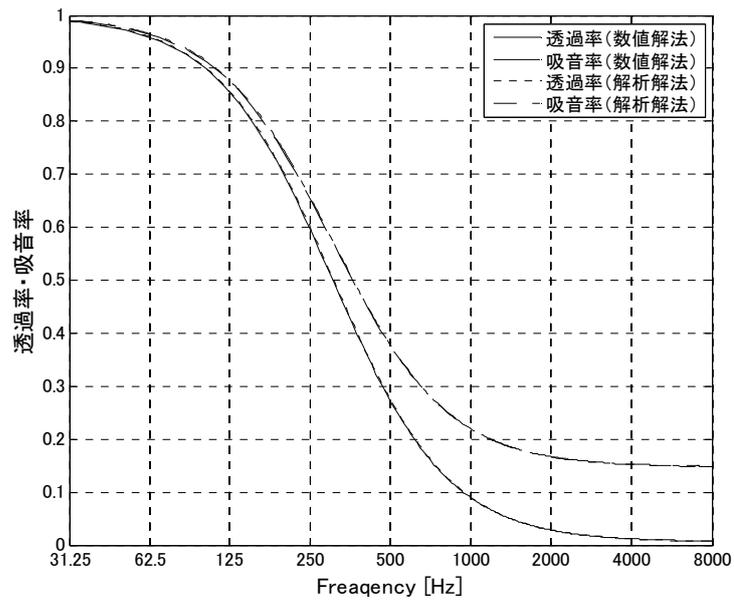


図 2-5 $r = 10000$ [Ns/m³]における透過率・吸音率 (パターン)

・パターン では、面密度と流れ抵抗の値に関係なく安定し、以下に示すように解析解と一致した。いくつかの流れ抵抗における透過率・吸音率について数値解法と解析解法の比較を図 2-6、2-7、2-8 に示す。

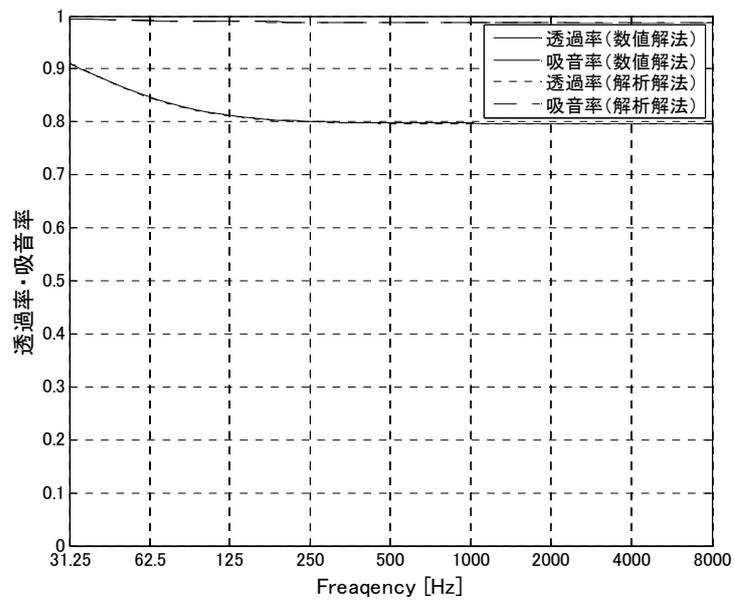


図 2-6 $r = 100$ [Ns/m³]における透過率・吸音率 (パターン)

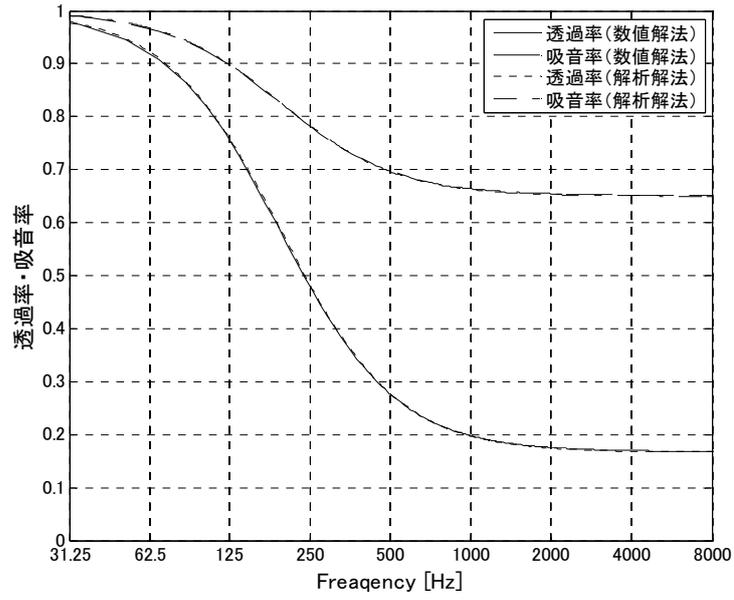


図 2-7 $r = 1200$ [Ns/m³]における透過率・吸音率 (パターン)

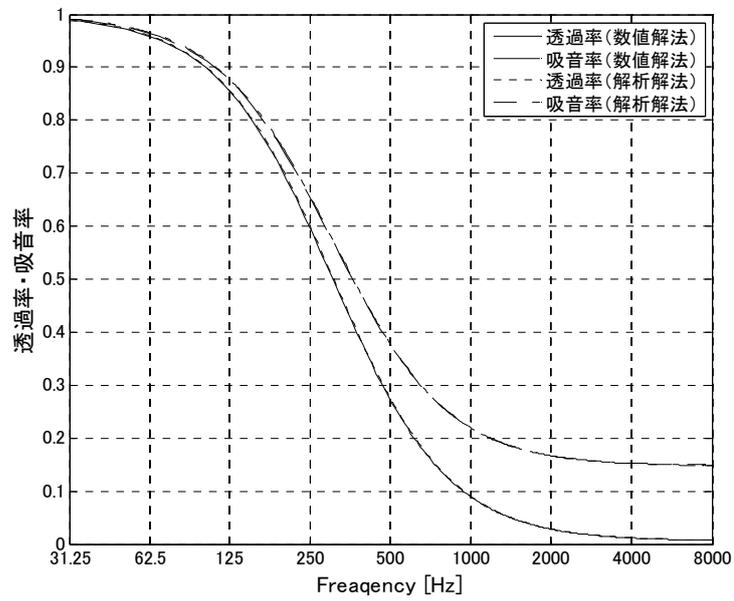


図 2-8 $r = 10000$ [Ns/m³]における透過率・吸音率 (パターン)

2.4.2 安定条件

いくつかの流れ抵抗における波動伝搬、および、各パターンの境界の安定条件（安定に解析が行える最大の時間離散化幅）を図 2-9、2-10、2-11 に示す。これらの結果より以下のことがわかる。なお、前節の結果からも推察されるとおり、面密度と安定条件には依存関係が認められなかった。ここで、面密度 $m = 0.4$ [kg/m²]、境界に接しているセルの媒質は空気とする。

- ・ 流れ抵抗の大小に関係なく、パターン の優位性は最も低い。
- ・ 流れ抵抗が小さいときは、パターン が圧倒的に優位であると考えられる。
- ・ 流れ抵抗が大きいたときは、パターン が最も優位に見られるが、パターン との差はごく微小であった。

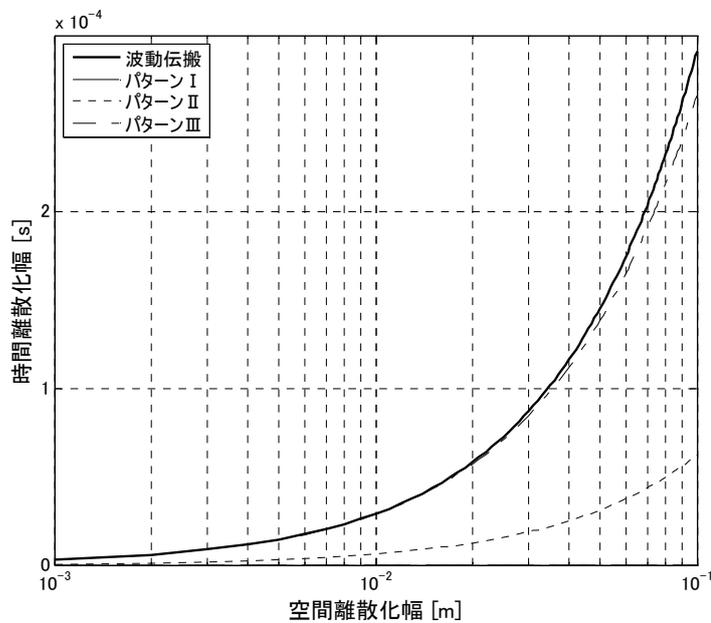


図 2-9 $r = 100$ [Ns/m³]における安定条件

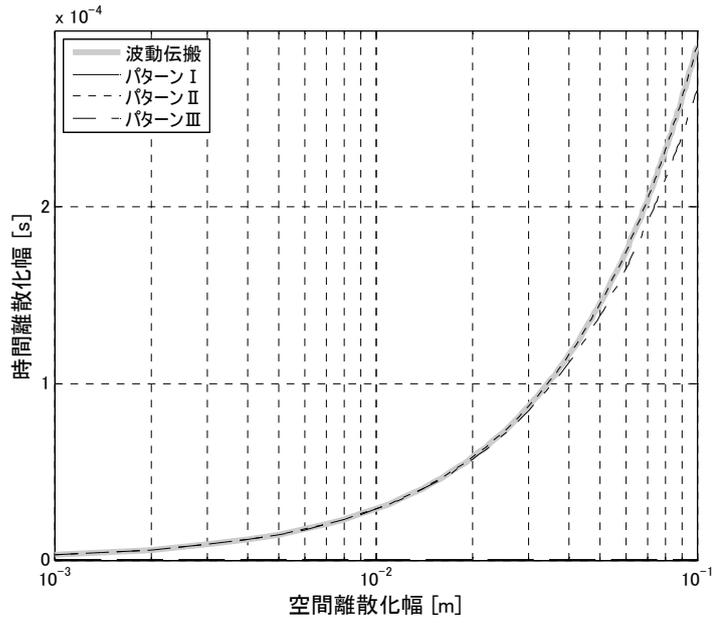


図 2-10 $r = 1200$ [Ns/m³]における安定条件

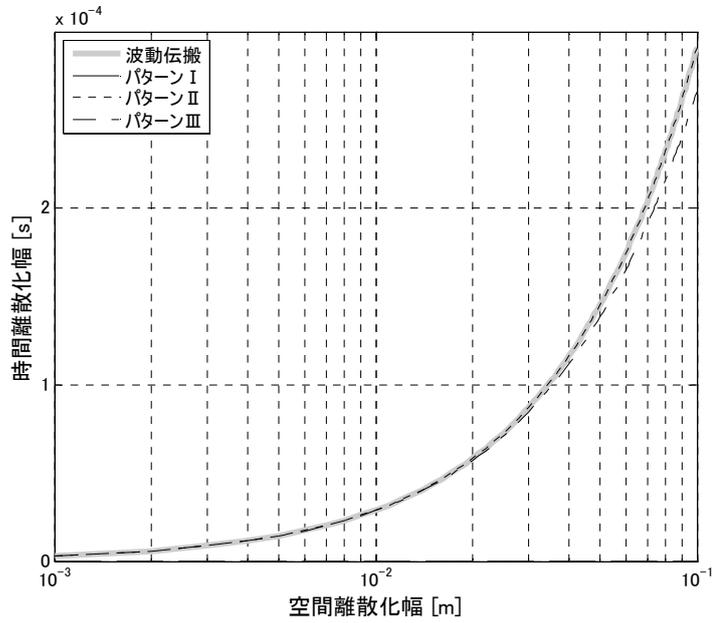


図 2-11 $r = 10000$ [Ns/m³]における安定条件

2.5 評価と考察

2.4.1 節より、3 パターンの手法の中では、パターン が最適であると考えられる。

また、2.4.2 節より、安定条件に関して、流れ抵抗が大きいときはパターン が優位であるが、それとパターン との差、および、流れ抵抗が小さいときのパターン の優位性を総合的に考慮すると、パターン が最適であると考えられる。

したがって、FDTD 法による 1 次元音場での布の解析においては、パターン を採用することが最も有効であると考えられる。

3. 3次元音場における検討

3.1 数値解法

1次元場において最適だったパターンを用いて、10 m × 7 m × 5 mの室が布により仕切られている場合と同室で布が設置されていない場合のx軸に対する傾きが0°、45°について、それぞれの透過損失を求め、それらより得られる挿入損失と解析解による透過損失の比較から3次元場に布の条件を適用できるか、検討・評価する。このとき、45°について検討するのは、FDTD法において空間を離散化する軸に対して布を45°傾けたときに次項に示す階段近似による誤差が最も大きくなると考えられるからである。ここで、布により仕切られている場合をCase1、布が設置されていない場合をCase2とし、図3-1、3-2に示す。

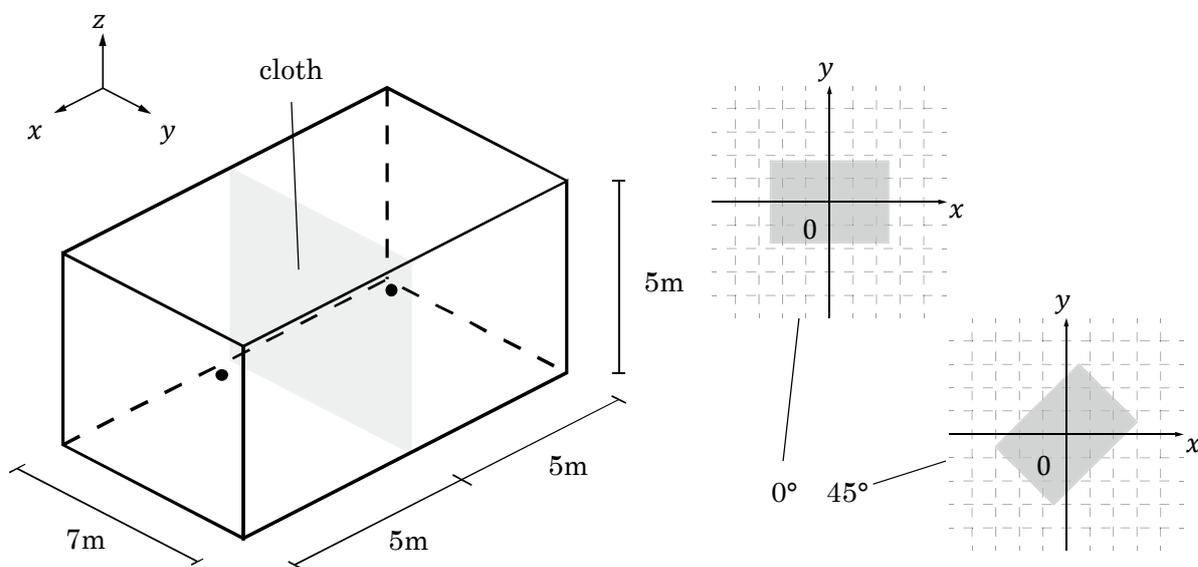


図 3-1 Case1

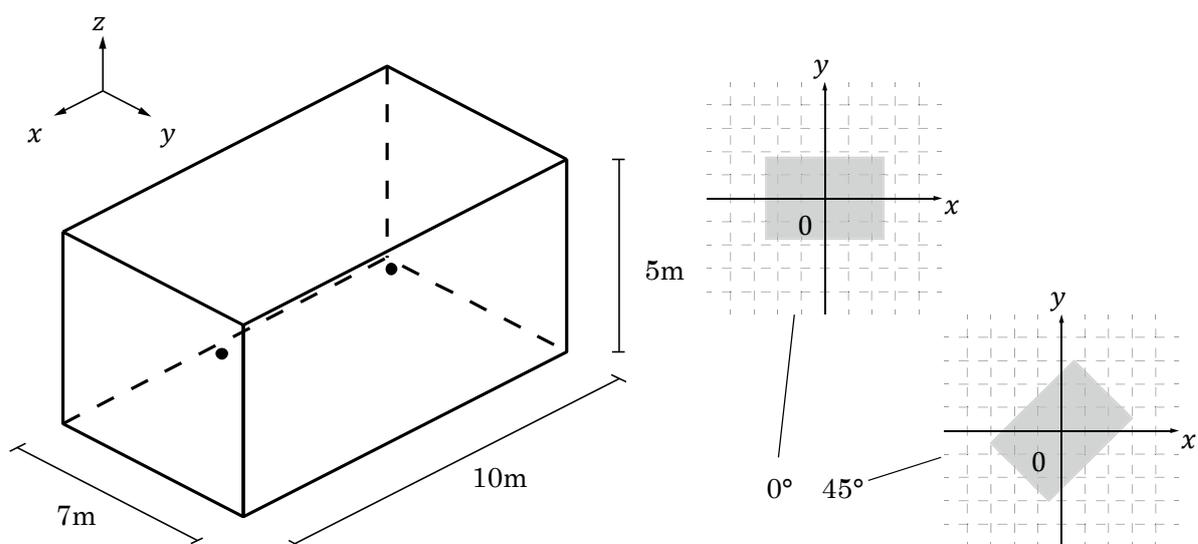


図 3-2 Case2

また、3次元場においては、図3-3に示すように離散化のグリッドに対して、斜めに設定された面について考慮しなければならない。

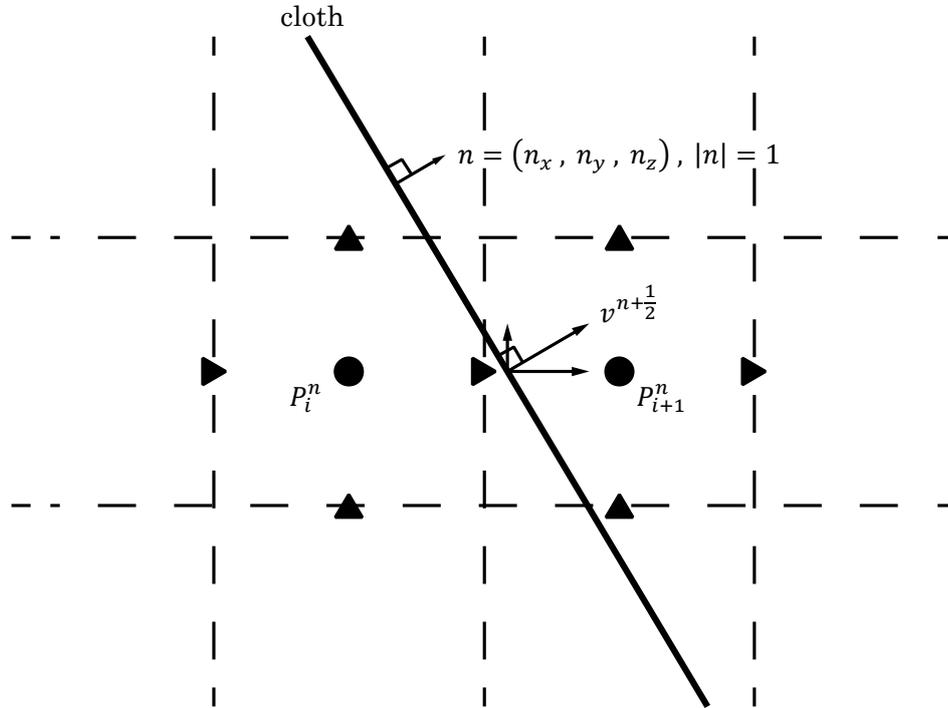


図 3-3 斜めの面がある場合

図 3-3 において、 P_i^n 、 P_{i+1}^n の音圧差から、(2-20)、(2-22)、(2-27)式により、境界面における法線方向の粒子速度 $v^{n+1/2}$ を求め、 $v^{n+1/2}$ を x 、 y 、 z 方向に分解すると、

$$v_x^{n+1/2} = n_x v^{n+1/2} \quad (3-1)$$

$$v_y^{n+1/2} = n_y v^{n+1/2} \quad (3-2)$$

$$v_z^{n+1/2} = n_z v^{n+1/2} \quad (3-3)$$

となる。ここで、 n_x 、 n_y 、 n_z は法線方向単位ベクトル n の x 、 y 、 z 方向の成分を表す。 P_i^n と P_{i+1}^n の間に位置する x 方向粒子速度が $v_x^{n+1/2}$ であるとし、次ステップの P_i^n 、 P_{i+1}^n の更新に使用する。以上の処理を行うことで、斜めに設定された面についても、対応することができる[5]。

3.2 安定条件

前章での議論より、1次元場においては布を考慮することが可能となったが、同様の手法を3次元場に適用した際に解が発散する場合が見られた。したがって、安定性に関しては、3次元場を対象とした条件を導く必要がある。

3次元場においては、安定条件 $c\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{(\frac{1}{\Delta x})^2 + (\frac{1}{\Delta y})^2 + (\frac{1}{\Delta z})^2}}$ を満たさなければならないが、ここでは、状態遷移方程式を利用して3次元場に布を設置した境界の安定条件を導出する。

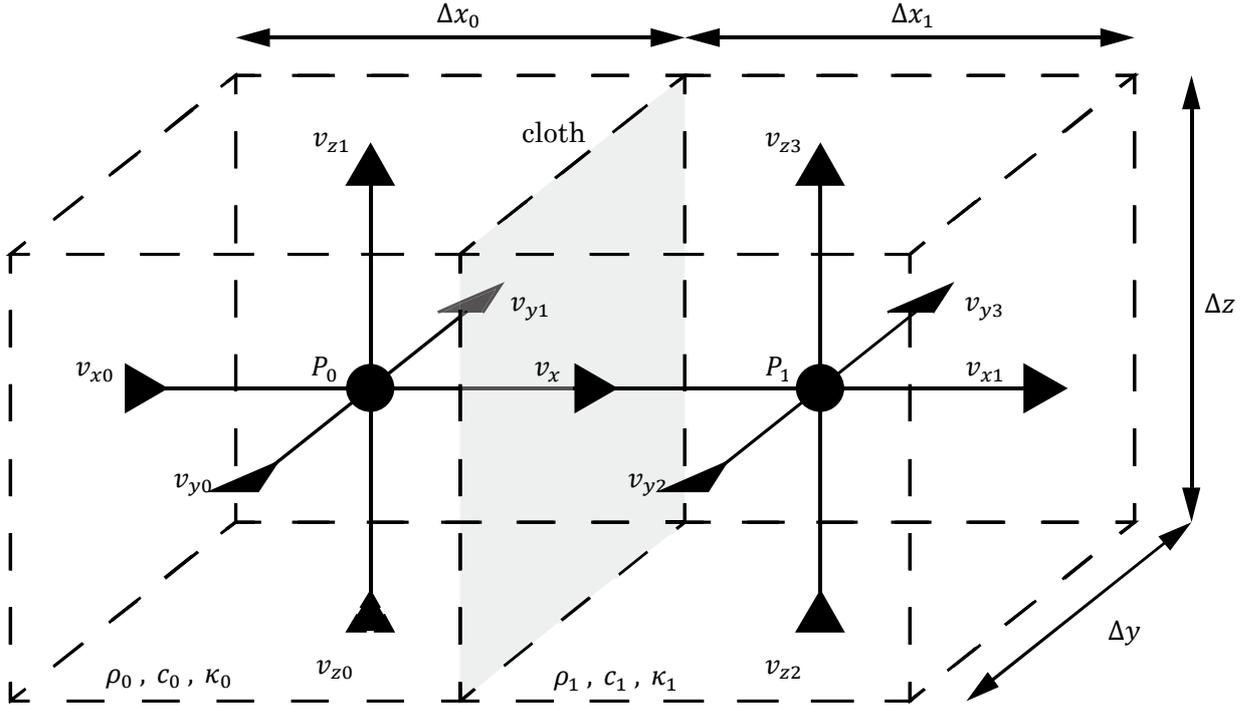


図 3-4 3次元音場

3次元音場の境界に隣接するセルとそのセル内の物理量の参照点の関係を図 3-4 に示す。入射側の音圧を P_0 、 x 、 y 、 z 方向の粒子速度を v_{x0} 、 v_{y0} 、 v_{z0} 、 x 方向の空間離散化幅を Δx_0 、密度を ρ_0 、音速を c_0 、体積弾性率を $\kappa_0 (= \rho_0 c_0^2)$ 、境界における粒子速度を v_x 、透過側の音圧を P_1 、 x 、 y 、 z 方向の粒子速度を v_{x1} 、 v_{y1} 、 v_{z1} 、 x 方向の空間離散化幅を Δx_1 、密度を ρ_1 、音速を c_1 、体積弾性率を $\kappa_1 (= \rho_1 c_1^2)$ 、入射側および透過側の y 、 z 方向の空間離散化幅を Δy 、 Δz とする。2つのセルの布部分以外の境界面を完全吸音のインピーダンス境界とすると、それぞれの境界条件は、

$$v_{y0} = v_{z0} = -\frac{P_0}{Z_0} \quad (3-4)$$

$$v_{y1} = v_{z1} = \frac{P_0}{Z_0} \quad (3-5)$$

$$v_{y2} = v_{z2} = -\frac{P_1}{Z_1} \quad (3-6)$$

$$v_{y3} = v_{z3} = \frac{P_1}{Z_1} \quad (3-7)$$

と表すことができ、これらを離散化すると、

$$v_{y0}^{n+\frac{1}{2}} = v_{z0}^{n+\frac{1}{2}} = -\frac{P_0^n}{Z_0} \quad (3-8)$$

$$v_{y1}^{n+\frac{1}{2}} = v_{z1}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{P_0^n}{Z_0} \quad (3-9)$$

$$v_{y2}^{n+\frac{1}{2}} = v_{z2}^{n+\frac{1}{2}} = -\frac{P_1^n}{Z_1} \quad (3-10)$$

$$v_{y3}^{n+\frac{1}{2}} = v_{z3}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{P_1^n}{Z_1} \quad (3-11)$$

が得られる。

また、連続方程式より、

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\kappa_0 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (3-12)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\kappa_1 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (3-13)$$

が得られ、これらを離散化すると、

$$\frac{P_0^{n+1} - P_0^n}{\Delta t} = -\kappa_0 \left(\frac{v_x^{n+\frac{1}{2}} - v_{x0}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x_0} + \frac{v_{y1}^{n+\frac{1}{2}} - v_{y0}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} + \frac{v_{z1}^{n+\frac{1}{2}} - v_{z0}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} \right) \quad (3-14)$$

$$\frac{P_1^{n+1} - P_1^n}{\Delta t} = -\kappa_1 \left(\frac{v_{x1}^{n+\frac{1}{2}} - v_x^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x_1} + \frac{v_{y3}^{n+\frac{1}{2}} - v_{y2}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} + \frac{v_{z3}^{n+\frac{1}{2}} - v_{z2}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} \right) \quad (3-15)$$

となり、更新式は、

$$P_0^{n+1} = P_0^n - \kappa_0 \Delta t \left(\frac{v_x^{n+\frac{1}{2}} - v_{x0}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x_0} + \frac{v_{y1}^{n+\frac{1}{2}} - v_{y0}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} + \frac{v_{z1}^{n+\frac{1}{2}} - v_{z0}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} \right) \quad (3-16)$$

$$P_1^{n+1} = P_1^n - \kappa_1 \Delta t \left(\frac{v_{x1}^{n+\frac{1}{2}} - v_x^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x_1} + \frac{v_{y3}^{n+\frac{1}{2}} - v_{y2}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} + \frac{v_{z3}^{n+\frac{1}{2}} - v_{z2}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} \right) \quad (3-17)$$

と表すことができる。 $v_x^{n+\frac{1}{2}}$ 、 $v_{x0}^{n+\frac{1}{2}}$ 、 $v_{x1}^{n+\frac{1}{2}}$ 、 $v_{y0}^{n+\frac{1}{2}}$ 、 $v_{y1}^{n+\frac{1}{2}}$ 、 $v_{y2}^{n+\frac{1}{2}}$ 、 $v_{y3}^{n+\frac{1}{2}}$ 、 $v_{z0}^{n+\frac{1}{2}}$ 、 $v_{z1}^{n+\frac{1}{2}}$ 、 $v_{z2}^{n+\frac{1}{2}}$ 、 $v_{z3}^{n+\frac{1}{2}}$

にそれぞれ(2-20)、(2-30)、(2-31)、(3-5)、(3-6)、(3-7)、(3-8)式を代入すると、

$$P_0^{n+1} = P_0^n - \kappa_0 \Delta t \left(\frac{v_a'^{n+\frac{1}{2}} + v_b^{n+\frac{1}{2}} + \frac{P_0^n}{Z_0}}{\Delta x_0} + \frac{\frac{P_0^n}{Z_0} + \frac{P_0^n}{Z_0}}{\Delta y} + \frac{\frac{P_0^n}{Z_0} + \frac{P_0^n}{Z_0}}{\Delta z} \right) \quad (3-18)$$

$$P_1^{n+1} = P_1^n - \kappa_1 \Delta t \left(\frac{\frac{P_1^n}{Z_1} - v_a'^{n+\frac{1}{2}} - v_b^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x_1} + \frac{\frac{P_1^n}{Z_1} + \frac{P_1^n}{Z_1}}{\Delta y} + \frac{\frac{P_1^n}{Z_1} + \frac{P_1^n}{Z_1}}{\Delta z} \right) \quad (3-19)$$

となり、 $v_b^{n+\frac{1}{2}}$ に(2-22)式を代入し、整理すると、

$$P_0^{n+1} = P_0^n - \frac{\kappa_0 \Delta t}{\Delta x_0} \left(v_a'^{n+\frac{1}{2}} + v_b^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{m} (P_0^n - P_1^n) + \frac{P_0^n}{Z_0} \right) - \frac{2\kappa_0 \Delta t}{Z_0} \left(\frac{\Delta y + \Delta z}{\Delta y \Delta z} \right) P_0^n \quad (3-20)$$

$$P_1^{n+1} = P_1^n - \frac{\kappa_1 \Delta t}{\Delta x_1} \left(\frac{P_1^n}{Z_1} - v_a'^{n+\frac{1}{2}} - v_b^{n+\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{m} (P_0^n - P_1^n) \right) - \frac{2\kappa_1 \Delta t}{Z_1} \left(\frac{\Delta y + \Delta z}{\Delta y \Delta z} \right) P_1^n \quad (3-21)$$

が得られる。(3-20)、(3-21)式と 2.2 節で用いた v_a' に関する各パターンそれぞれの更新式を用いて、状態遷移方程式による安定条件を導出する。

3.2.1 パターン

(3-20)、(3-21)式に 2.2.1 節で用いた v'_a に関する更新式(2-21)式を代入すると、

$$P_0^{n+1} = P_0^n - \frac{\kappa_0 \Delta t}{\Delta x_0} \left(-v'_a{}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{2}{r} (P_0^n - P_1^n) + v_b{}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{m} (P_0^n - P_1^n) + \frac{P_0^n}{Z_0} \right) - \frac{2\kappa_0 \Delta t}{Z_0} \left(\frac{\Delta y + \Delta z}{\Delta y \Delta z} \right) P_0^n \quad (3-22)$$

$$P_1^{n+1} = P_1^n - \frac{\kappa_1 \Delta t}{\Delta x_1} \left(\frac{P_1^n}{Z_1} + v'_a{}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{2}{r} (P_0^n - P_1^n) - v_b{}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{m} (P_0^n - P_1^n) \right) - \frac{2\kappa_1 \Delta t}{Z_1} \left(\frac{\Delta y + \Delta z}{\Delta y \Delta z} \right) P_1^n \quad (3-23)$$

となり、これらを変形すると、

$$P_0^{n+1} = (1 - 2K_0R - K_0M - K_0Q_0 - C_0)P_0^n + (2K_0R + K_0M)P_1^n + K_0v'_a{}^{n-\frac{1}{2}} - K_0v_b{}^{n-\frac{1}{2}} \quad (3-24)$$

$$P_1^{n+1} = (2K_1R + K_1M)P_0^n + (1 - K_1Q_1 - 2K_1R - K_1M - C_1)P_1^n - K_1v'_a{}^{n-\frac{1}{2}} + K_1v_b{}^{n-\frac{1}{2}} \quad (3-25)$$

が得られ、(2-46)、(2-47)式とともにまとめると、

$$\begin{bmatrix} P_0^{n+1} \\ P_1^{n+1} \\ v'_a{}^{n+\frac{1}{2}} \\ v_b{}^{n+\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (3-26)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 - K_0(2R + M + Q_0) - C_0 & K_0(2R + M) & K_0 & -K_0 \\ K_1(2R + M) & 1 - K_1(Q_1 + 2R + M) - C_1 & -K_1 & K_1 \\ 2R & -2R & -1 & 0 \\ M & -M & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^n \\ P_1^n \\ v'_a{}^{n-\frac{1}{2}} \\ v_b{}^{n-\frac{1}{2}} \end{bmatrix}$$

と表すことができ、2.3.1 節と同様にして安定条件を決定する。ここで、 $C_0 = \frac{2\kappa_0 \Delta t}{Z_0} \left(\frac{\Delta y + \Delta z}{\Delta y \Delta z} \right)$ 、 $C_1 =$

$\frac{2\kappa_1 \Delta t}{Z_1} \left(\frac{\Delta y + \Delta z}{\Delta y \Delta z} \right)$ とする。

3.2.2 パターン

(3-20)、(3-21)式に 2.2.2 節で用いた v'_a に関する更新式(2-24)式を代入すると、

$$P_0^{n+1} = P_0^n - \frac{\kappa_0 \Delta t}{\Delta x_0} \left(\frac{1}{r} (P_0^n - P_1^n) + v_b^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{m} (P_0^n - P_1^n) + \frac{P_0^n}{Z_0} \right) - \frac{2\kappa_0 \Delta t}{Z_0} \left(\frac{\Delta y + \Delta z}{\Delta y \Delta z} \right) P_0^n \quad (3-27)$$

$$P_1^{n+1} = P_1^n - \frac{\kappa_1 \Delta t}{\Delta x_1} \left(\frac{P_1^n}{Z_1} - \frac{1}{r} (P_0^n - P_1^n) - v_b^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{m} (P_0^n - P_1^n) \right) - \frac{2\kappa_1 \Delta t}{Z_1} \left(\frac{\Delta y + \Delta z}{\Delta y \Delta z} \right) P_1^n \quad (3-28)$$

となり、これらを変形すると、

$$P_0^{n+1} = (1 - K_0 R - K_0 M - K_0 Q_0 - C_0) P_0^n + (K_0 R + K_0 M) P_1^n - K_0 v_b^{n-\frac{1}{2}} \quad (3-29)$$

$$P_1^{n+1} = (K_1 R + K_1 M) P_0^n + (1 - K_1 Q_1 - K_1 R - K_1 M - C_1) P_1^n + K_1 v_b^{n-\frac{1}{2}} \quad (3-30)$$

が得られ、(2-47)、(2-53)式とともにまとめると、

$$\begin{bmatrix} P_0^{n+1} \\ P_1^{n+1} \\ v'_a{}^{n+\frac{1}{2}} \\ v_b{}^{n+\frac{1}{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - K_0(R + M + Q_0) - C_0 & K_0(R + M) & 0 & -K_0 \\ K_1(R + M) & 1 - K_1(Q_1 + R + M) - C_1 & 0 & K_1 \\ R & -R & 0 & 0 \\ M & -M & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^n \\ P_1^n \\ v'_a{}^{n-\frac{1}{2}} \\ v_b{}^{n-\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (3-31)$$

と表すことができ、2.3.1 節と同様にして安定条件を決定する。

3.2.3 パターン

(3-20)、(3-21)式に 2.2.3 節で用いた v'_a に関する更新式(2-27)式を代入すると、

$$P_0^{n+1} = P_0^n - \frac{\kappa_0 \Delta t}{\Delta x_0} \left(\frac{2\rho \Delta x - r \Delta t}{2\rho \Delta x + r \Delta t} v_a'^{n-\frac{1}{2}} - \frac{2\Delta t}{2\rho \Delta x + r \Delta t} (P_1^n - P_0^n) + v_b^{n-\frac{1}{2}} \right) + \frac{\Delta t}{m} (P_0^n - P_1^n) + \frac{P_0^n}{Z_0} - \frac{2\kappa_0 \Delta t}{Z_0} \left(\frac{\Delta y + \Delta z}{\Delta y \Delta z} \right) P_0^n \quad (3-32)$$

$$P_1^{n+1} = P_1^n - \frac{\kappa_1 \Delta t}{\Delta x_1} \left(\frac{P_1^n}{Z_1} - \frac{2\rho \Delta x - r \Delta t}{2\rho \Delta x + r \Delta t} v_a'^{n-\frac{1}{2}} + (P_1^n - P_0^n) - v_b^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{m} (P_0^n - P_1^n) \right) - \frac{2\kappa_1 \Delta t}{Z_1} \left(\frac{\Delta y + \Delta z}{\Delta y \Delta z} \right) P_1^n \quad (3-33)$$

となり、これらを変形すると、

$$P_0^{n+1} = (1 - BK_0 - K_0M - K_0Q_0 - C_0)P_0^n + (BK_0 + K_0M)P_1^n - AK_0v_a'^{n-\frac{1}{2}} - K_0v_b^{n-\frac{1}{2}} \quad (3-34)$$

$$P_1^{n+1} = (BK_1 + K_1M)P_0^n + (1 - K_1Q_1 - BK_1 - K_1M - C_1)P_1^n + AK_1v_a'^{n-\frac{1}{2}} + K_1v_b^{n-\frac{1}{2}} \quad (3-35)$$

が得られ、(2-47)、(2-59)式とともにまとめると、

$$\begin{bmatrix} P_0^{n+1} \\ P_1^{n+1} \\ v_a'^{n+\frac{1}{2}} \\ v_b^{n+\frac{1}{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - K_0(B + M + Q_0) - C_0 & K_0(B + M) & -AK_0 & -K_0 \\ K_1(B + M) & 1 - K_1(Q_1 + B + M) - C_1 & AK_0 & K_1 \\ B & -B & A & 0 \\ M & -M & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^n \\ P_1^n \\ v_a'^{n-\frac{1}{2}} \\ v_b^{n-\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (3-36)$$

と表すことができ、2.3.1 節と同様にして安定条件を決定する。

3.3 解析結果

3.3.1 計算精度

図 3-5、3-6 に Case1、2 の時間領域および、周波数領域について解析結果を示す。ここで、面密度 $m = 0.4$ [kg/m²]、流れ抵抗 $r = 1200$ [kg/m³] とする。

・周波数領域のグラフより、0° と 45° の場合の差は、布の有無に関係なく、同程度の大きさであることがわかる。

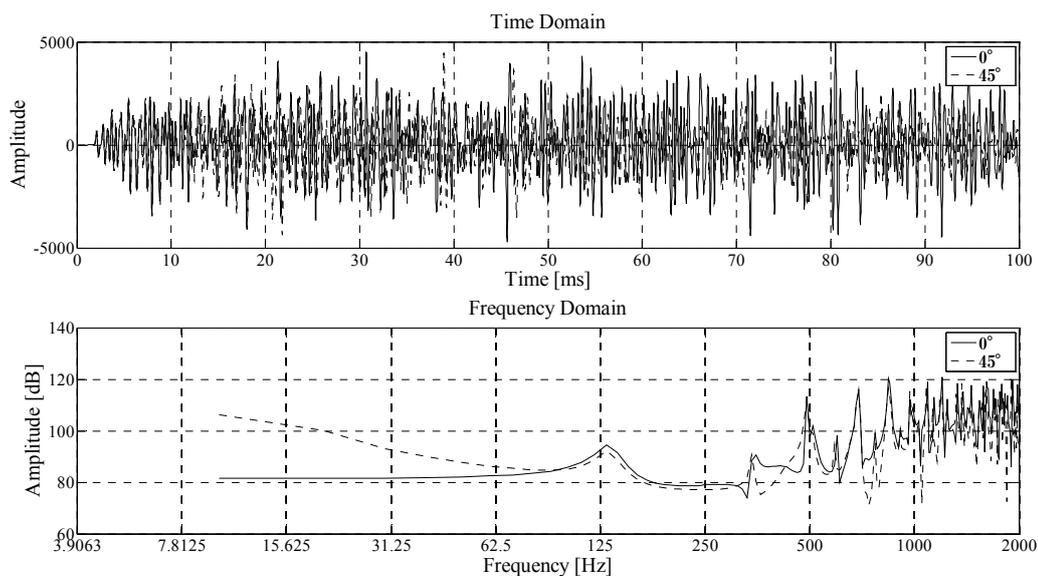


図 3-5 Case1

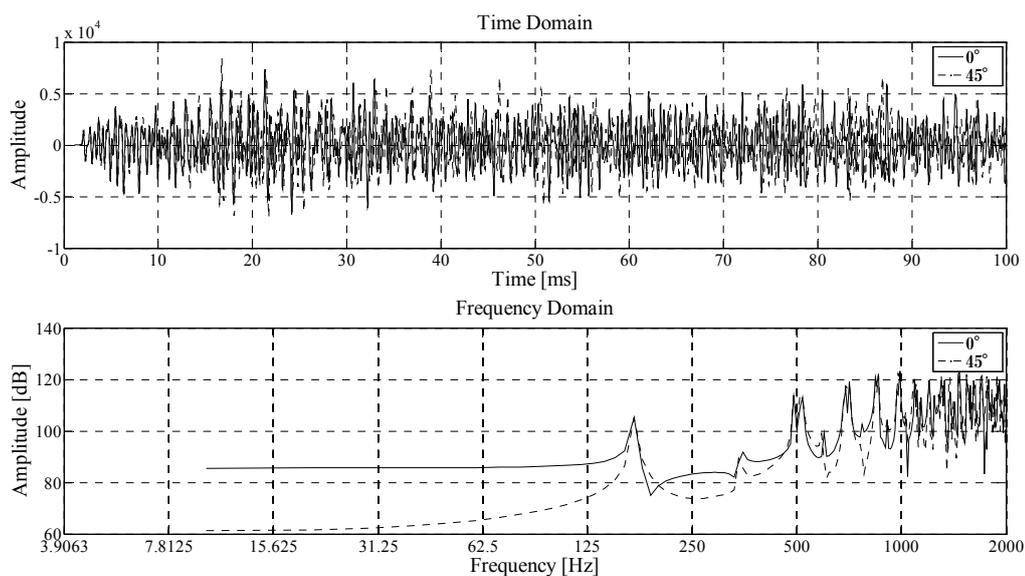


図 3-6 Case2

また、Case1、Case2における 0° 、 45° の場合同士の音圧レベルの差（挿入損失）と解析解による布の透過損失との比較を図3-7に示す。ここで、 0° 、 45° のときにピークディップが生じるのは、3次元場の閉空間に起因する共鳴などが原因であると考えられる。

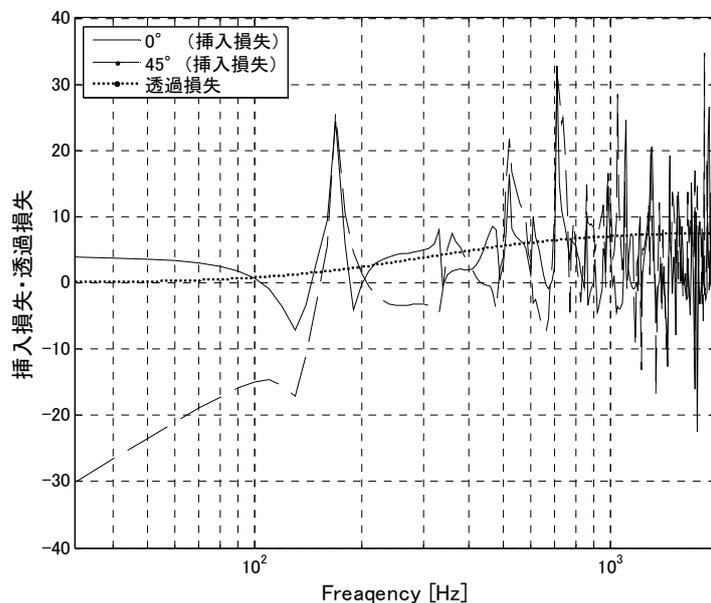


図 3-7 $r = 1200$ [Ns/m³]における損失・透過損失の比較

さらに、流れ抵抗を $r = 1000000$ [Ns/m³]に変えて同様の比較をしたものを図3-8に示す。ここで、挿入損失と透過損失に大きな差が生じたのは、解析対象が閉空間であるため、反射エネルギーと透過エネルギーの比率が、ある程度の値に収束することが原因であると考えられる。この点については、更なる検討の余地があると思われる。

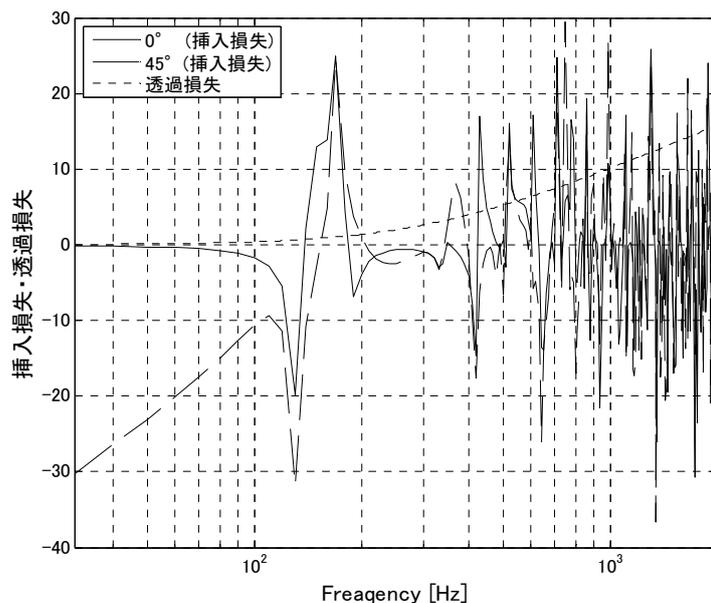


図 3-8 $r = 1000000$ [Ns/m³]における挿入損失・透過損失の比較

3.3.2 安定条件

いくつかの流れ抵抗における波動伝搬、および、各パターンの境界の安定条件（安定に解析が行える最大の時間離散化幅）を図 3-9、3-10、3-11 に示す。これらの結果より以下のことがわかる。なお、前章と同様に、面密度と安定条件には依存関係が認められなかった。ここで、面密度 $m = 0.4$ [kg/m²]、境界に接しているセルの媒質は空気とする。

- ・流れ抵抗の大小に関係なく、パターン の優位性は最も低い。
- ・流れ抵抗が小さいときは、パターン が圧倒的に優位であると考えられる。
- ・流れ抵抗が大きいたときは、パターン が最も優位に見られるが、パターン との差はごく微小であった。

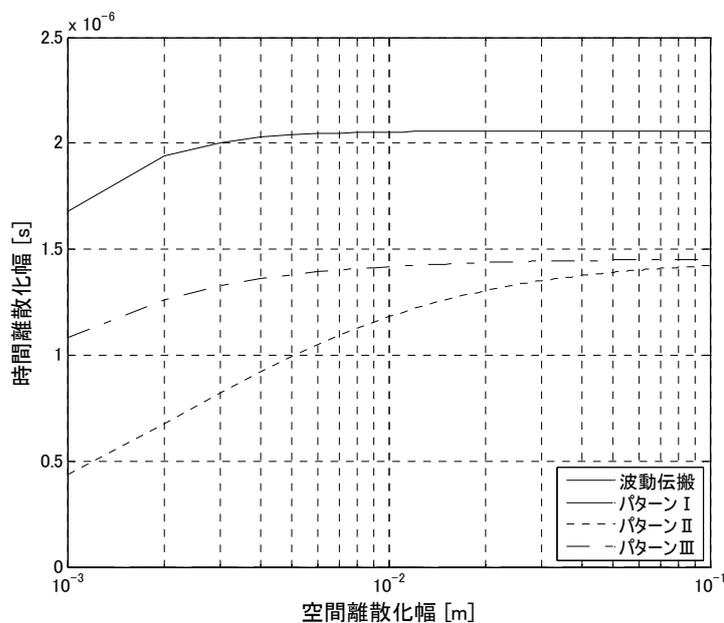


図 3-9 $r = 100$ [Ns/m³]における安定条件

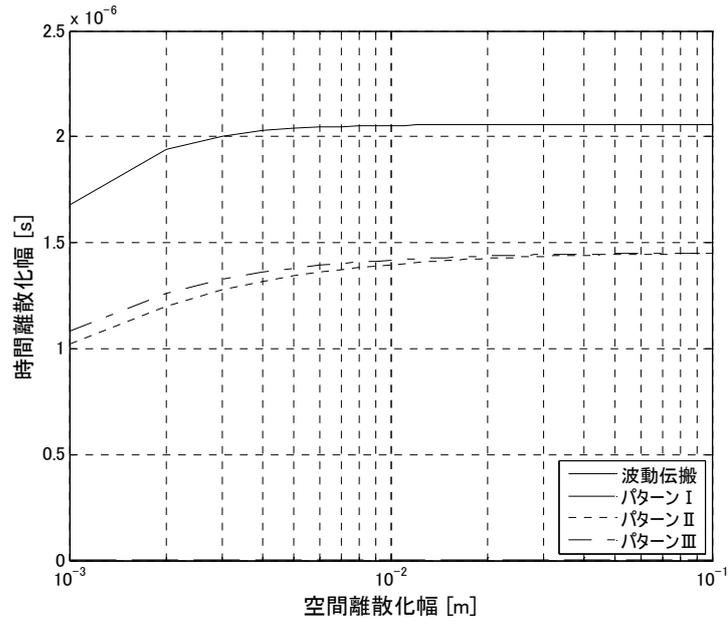


図 3-10 $r = 1200 \text{ [Ns/m}^3\text{]}$ における安定条件

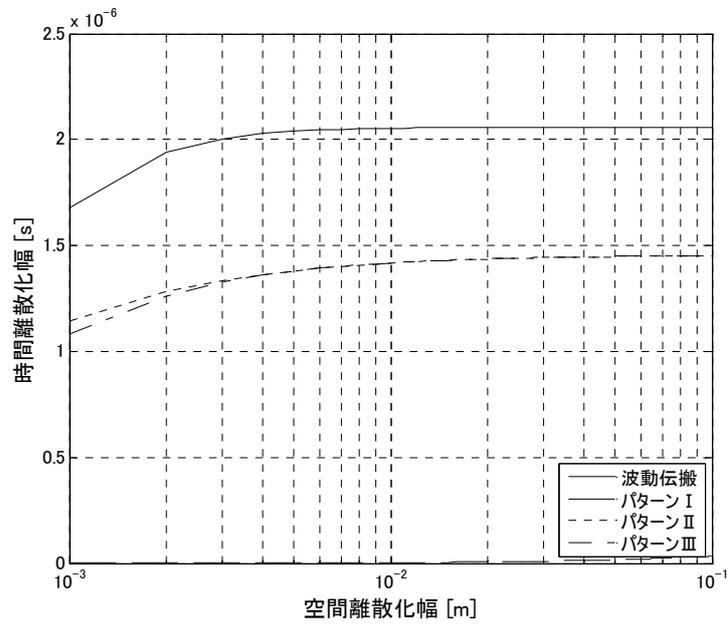


図 3-11 $r = 10000 \text{ [Ns/m}^3\text{]}$ における安定条件

3.4 評価と考察

3.3.1 節より、Case1 と Case2 の結果に生じた差は提案手法によるものではなく、軸に対して 45° 傾けた面を離散化したことによるものであると考えられる。また、挿入損失と透過損失の比較より、ピークディップを含む挿入損失の平均値は透過損失と同程度であった。よって、3次元場に布が設置された場合の解析を FDTD 法で適切に行うことができたと言える。

また、3.3.2 節より、安定条件に関して、流れ抵抗が大きいときはパターン A が優位であるが、それとパターン B との差、および、流れ抵抗が小さいときのパターン B の優位性を総合的に考慮すると、パターン B が最適であると考えられる。

したがって、FDTD 法による 3次元音場での布の解析においても、パターン B を採用することが最も有効であると考えられる。

4. 結論

本研究では、FDTD 法による布の解析について、提案手法の有効性の検証を行い、FDTD 法による布についての解析を可能にすることを目標として、1、3 次元場における数値解法(FDTD 法)の精度および、安定条件に関する検討を行った。その結果、以下に示す成果が得られた。

- ・ 2.4.1 節より、数値解法に関して、3 パターンの手法の中では、パターン が最適であった。
- ・ 2.4.2 節より、安定条件に関して、流れ抵抗の変動により、僅かな差はあるが、パターン が最適であった。

以上より、1 次元音場において、2.2.3 節で用いた摩擦抵抗を考慮する方法(パターン)が、計算精度・安定条件ともに最適であることがわかった。

- ・ 3.3.1 節より、提案手法の有効性が立証されたと言える。
- ・ 3.3.2 節より、安定条件に関して、1 次元場のときと同様の結果が得られた。

以上より、3 次元音場においても、パターン が、計算精度・安定条件ともに最適であることがわかった。

上述の成果により、FDTD 法による布についての解析が可能になったと言える。

今後の課題としては、空気の粘性も考慮することによる精度向上などが挙げられる。

参考文献

- [1] KANE S. YEE, “ Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell’s Equations in Isotropic Media ”, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. AP-14,NO. 3, pp. 302-307, 1966

- [2] 佐藤 雅弘, “ 小特集「音響分野で活用される時間領域有限差分 (FDTD) 法」にあたって ”, 建築音響学会誌, 67(7), pp. 271-272, 2011

- [3] 豊田 政弘, 高橋 大弐, 河井 康人, “ 振動音響連成ソフトウェア開発に向けて ”, 日本音響学会講演論文集, pp. 1483-1486, 2011.9

- [4] Yasuhito Kawai, Masahiro Toyoda, “ Development of edge-effect suppression barriers ”, Acoust. Sci. &Tech, 35, pp. 28-34, 2014

- [5] Shinichi Sakamoto, Hiroshi Nagatomo, Ayumi Ushiyama and Hideki Tachibana, “ Calculation of impulse responses and acoustic parameters in a hall by finite-difference time-domain method ”, Acoust. Sci. &Tech, 29, pp. 256-265, 2008

謝辞

本研究を進めるにあたり、お忙しい中、御指導・御鞭撻頂いた豊田政弘准教授、並びに、院生の石川翔一郎さんに厚く御礼申し上げます。また、研究以外の面でも、建築環境工学第 研究室の先輩や同期の皆様にも大変お世話になりました。心より御礼申し上げます。