

## セルオートマトン法を用いた 2 次元騒音伝搬モデルの開発

Development of Two-dimensional Noise Propagation Model using Cellular Automata

富樫 孝介\*・宮木 康幸\*\*

Kosuke TOGASHI and Yasuyuki MIYAKI

\*学生会員 工修 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 材料工学専攻 (〒 940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

\*\*正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 環境・建設系 (〒 940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

We developed the noise propagation model using Cellular Automata (CA) method. CA method can catch phenomena microscopically and discretely. And the analysis using CA method can be calculated on local connection from time to time. For this, we catch a change of microscopically phenomena while we can express macroscopically phenomena in view of all the analysis area. T.KOMATSUZAKI *et al.* have studied the noise propagation analysis using CA method. They have shown that the propagation form of the calculated solutions of CA method is as same as that of the wave equation solutions. However, they haven't concretely compared the solutions of CA method and the another method. Therefore, we study to compare the solutions of CA model with that of the theory, the experiment about the sound phenomenas, and consider their results.

**Key Words :** noise propagation, cellular automata, finite difference method

## 1. 序論

騒音は日常生活に密接な関係があり、関心の高い環境問題の 1 つである。騒音問題を解決するため、個々の騒音発生源に対する騒音伝搬解析や騒音制御技術の研究が数多く研究されている。しかし、汎用性をもった騒音伝搬解析はあまり多くなされていない。また、騒音伝搬解析によく使われる境界要素法 (BEM)、有限要素法 (FEM)、差分法などの解析手法は、微分方程式を解くための定式化作業および解析に膨大な労力を要する。BEM および FEM はその計算手法の性質上、定常状態は容易に求めることができるが、伝搬過程を求めるのは非常に困難である。

これらの問題を解決する方法として、本研究ではセルオートマトン法 (以下 CA 法) を用いて騒音伝搬解析を行う。CA 法は、ミクロの視点で現象を見たときの関係 (局所近傍則) を時間を追って離散的に解析することで、マクロの現象を得ることが出来る手法である。CA 法を利用することで、容易でかつ短時間で時間を追った解析を行うことができると考えられる。他の手法に対して CA 法の計算速度が有利であることは、松本ら<sup>1)</sup>の研究で明らかにされている。CA 法と高速多重極法を用いた境界要素法 (FMM+BEM) の計算時間を比較すると、要素幅を等しく、要素数は CA 法が FMM+BEM の約 3 倍になるように解析領域を設定した場合、CA 法の計算時間が FMM+BEM の約 1/3 程度になるという結果が報告されている。

CA 法による波動伝搬解析は小松崎ら<sup>2)</sup>によって行われ、CA 法による計算解と波動方程式の解を比較した

場合、伝搬形状に関しては整合性がとれることが示された。また、局所近傍則を差分方程式との整合性を考慮して導くことで波動伝搬解析へ適用できることがわかっていく。しかし、この研究では CA 法で得られる音圧値と各解析解によって得られる音圧値との厳密な比較は行っておらず、さまざまな騒音問題へ適用できるかという点で疑問が残る。また、建設分野では自由音場における騒音解析が一般的だが、その際必要となる解析境界に関する検討が行われていない。

そこで、本研究は CA 法を用いた 2 次元騒音伝搬モデル (以下、CA モデル) の開発及び検証を目的とする。具体的には、2 次元自由音場における距離 (幾何) 減衰、回折減衰、干渉およびドップラー効果について理論解や実験式、差分法による 2 次元騒音伝搬モデル (以下、差分モデル) の計算解と比較し検討を行う。また、解析の安定性について CA モデルの解析結果を基にして、周波数とセル幅の関係から検討を行う。

## 2. 音波の基本式

## 2.1 距離減衰

点音源からの距離減衰は、3 次元自由空間中において距離  $d_1$  の点で音圧レベル  $L_1$  [dB] であれば、距離  $d_2 = n \cdot d_1$  の点での音圧レベル  $L_2$  [dB] は、

$$L_2 = L_1 - 10 \log_{10} \frac{d_2^2}{d_1^2} = L_1 - 20 \log_{10} n \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

となり、 $d$  が 2 倍になると約 6dB 減衰する<sup>3)</sup>。

線音源からの距離減衰は、距離  $d$  の点での音圧レベル  $L$  [dB] は、単位長さ当たりの音響出力をパワーレベ

ル  $L_w$  として,

$$L = L_w - 8 - 10 \log_{10} d \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

と表され,  $d$  が 2 倍になるごとに約 3dB 減衰する<sup>3)</sup>.

## 2.2 半無限障壁による回折減衰

野外において音源と受音点の間に十分大きい塀を立てると, 音源側は壁による反射で音圧が上がるが, 受音点側では影となって遮音効果が期待できる. この影の中の音圧レベルは, 光の回折に関する Fresnel-Kirchhoff の光の近似理論 (以下, Kirchhoff の近似理論) やそれをもとに前川が実験的に修正した図 (通称前川チャート, 図-1) によって求めることができる<sup>3),4),5)</sup>.

光の回折に関する Fresnel-Kirchhoff の近似理論において半無限障壁をとりまく空間は完全な自由音場を仮定して, 2次元平面上で点音源を仮定している. これは, 3次元空間で1つの線音源を仮定し, それを単位長さで平面に切り取ったものに等しい. 前川の実験は, 3次元空間に点音源を配置したものであり, 実験の制約上, 完全な自由音場ではないと思われる. そのため地面からの反射も実験値に含まれている.

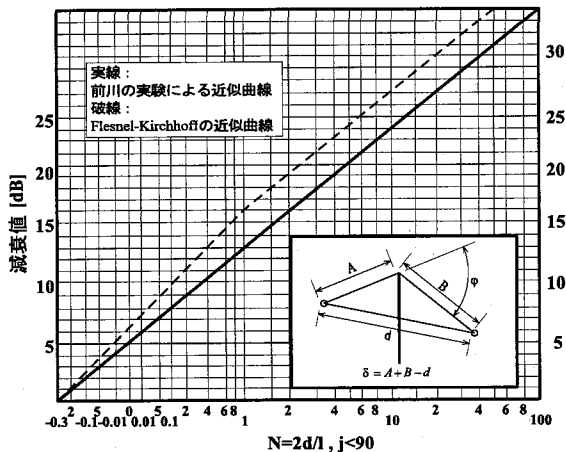


図-1 自由空間の薄い半無限障壁による減衰値<sup>3)</sup>

本研究では回折減衰値を求める際に前川チャートを直接使わずに, 渡辺<sup>6)</sup>の提唱した前川チャートの近似式を用いた. 前川チャートの近似式は, 前川の近似曲線をいくつかの数式に表して使いやすくしたもので, 多くの研究者が前川チャートの近似式を提唱している. 渡辺による前川チャートの近似式は以下の6式で表される.

$$\Delta L = -10.0 \log_{10} \left( \frac{N}{5} \right) - 20.0 \quad (1.0 \leq N) \quad (3)$$

$$\Delta L = -4.97 \log_{10}(N) - 13.01 \quad (0.1 \leq N < 1.0) \quad (4)$$

$$\Delta L = -2.09 \log_{10}(N) - 10.12 \quad (0.01 \leq N < 0.1) \quad (5)$$

$$\Delta L = -77.0 \cdot N - 5.17 \quad (|N| < 0.01) \quad (6)$$

$$\Delta L = 10.0 \cdot \log_{10} \left( \frac{0.33}{\sqrt[3]{N} + 1.0} \right) \quad (-0.3 < N \leq -0.01) \quad (7)$$

$$\Delta L = 0.0 \quad (N \leq -0.3) \quad (8)$$

ここで,  $N$  はフレネル数を表し,  $N = 2\delta/\lambda$  で求めることができる. また,  $\lambda$  は波長,  $\delta$  は経路差であり,  $\delta = A + B - d$  で表される. 経路差の模式図は図-1の右下部に示す.

## 2.3 音の干渉

2系以上の音波が重畳して振幅が変化する現象を干渉という. 2つの音波が同時に伝搬するとき, 媒質の各点の振動は重ね合わせの原理により, それぞれの音波が単独で伝わってきたときの振幅の和をとればよい<sup>3)</sup>.

## 2.4 ドップラー効果

音源と観測者の間で相対運動があるとき, 両者が静止しているときとは異なる周波数の音が観測される. この現象のことをドップラー効果という. 音源が移動しない場合の波長  $\lambda$  は音速  $c$  および周波数  $f$  を用いて次式で表す.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [\text{m}] \quad (9)$$

音源が移動する場合は, 進行方向の音波の波長は短く, 進行方向に正対する方向の音波は長くなる. このとき音源の前方の波長  $\lambda_f$  および後方の波長  $\lambda_b$  は, 周波数  $f$ , 音速  $c$ , 音源の移動速度  $v$  で示すと,

$$\lambda_f = \frac{c-v}{f}, \quad \lambda_b = \frac{c+v}{f} \quad [\text{m}] \quad (10)$$

と表すことが出来る<sup>3)</sup>.

## 2.5 実効値

音場の解析によって得られた音圧は時間的に変動している. そのため, 音圧の瞬時値のみで音場の状態を評価することはできない. そこで, 交流電流の計算で行われるように実効値 (r.m.s.) を用いて評価をする必要がある. 実効値はある時間  $t_1$  と  $t_2$  の間の瞬時値を2乗して総和をとり, 時間平均をしたものの平方根をとることで求めることができる. 上記の計算方法を式で表すと以下のような形になる.

$$\text{r.m.s.} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2 dt} \quad [\text{Pa}] \quad (11)$$

ここで、 $p$  は音圧、 $t_1$  は抽出時間の始め、 $t_2$  は抽出時間の終わりを表している。

### 3. セルオートマトン法

CA 法は解析対象をセルと称する均一な大きさの区分領域に分割し、各セル上に定義された離散の状態量をごく近傍のセル間に設けた局所近傍則によって、離散の時間を追って状態量を推移させる、現象のモデル化手法である<sup>2),7)</sup>。

CA 法による解析モデルは、解析領域の分割方法、セルがもつ状態量の種類、局所近傍則、境界条件、物理量との対応の5つが決まればよい。

#### 3.1 解析領域

解析領域はセルと呼ばれる要素に分割する。CA 法において、セルの形状は同じ大きさでかつ均一に敷き詰められている必要がある<sup>7)</sup>。本研究では、方向によって音の伝搬速度が変わらないようにセルの形状を正方形に分割することとした(図-2)。

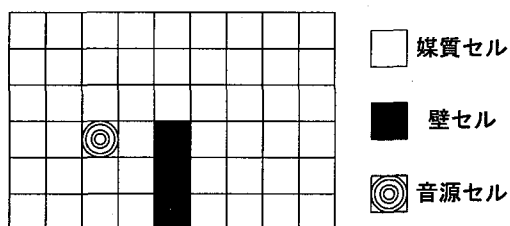


図-2 CA モデルの解析領域

#### 3.2 セルの状態量

一般に各セルは  $k$  種類の状態を持つことができる<sup>7)</sup>。本研究では、1つのセルに対して、セルの種類  $S$ 、音圧値  $P$ 、音圧の時間変化量  $G$  の3種類の状態を定義する。セルの種類を表す状態量  $S$  は、媒質(空気)、壁、音源の3種類のいずれかの状態量をとる整数の固定値とする。壁のセルについては計算を行わず音圧の更新を行わない。ただし、近傍セルとしては壁のセルを計算に考慮する。音源は最大音圧レベルを設定し、それを余弦波として音圧値に変換した実数値を直接代入する。この  $S$  が局所近傍則を適用する際にセルの状態を判断する材料となる。音圧値  $P$  と音圧の時間変化量  $G$  に関しては、実数の音圧 [Pa] として表す。

#### 3.3 局所近傍則

局所近傍則の定義に用いる近傍セルは、ノイマン近傍(注目するセルの上下左右の4セル)を用いることとする(図-3)。

音の伝搬を微視的に考えた場合、ある注目点における音圧の時間変化量は、注目点と周囲との音圧差およ

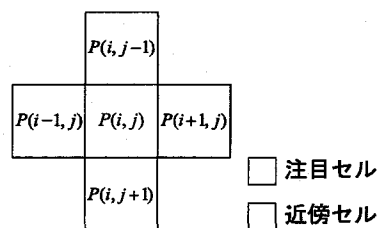


図-3 近傍セルの定義(ノイマン近傍)

び注目点における直前の音圧の時間変化量の影響を受けて変化すると考えられる。この考え方を局所近傍則として表現すると以下の3つの条件を考えることができる。

1. 次の時間ステップにおける音圧の時間変化量  $G^{t+1}$  は、注目セルと近傍セルとの音圧値の差および現在の音圧の時間変化量  $G^t$  より直接決定する。
2. 次の時間ステップにおける音圧値  $P^{t+1}$  は、そのセルの現在の音圧値  $P^t$  に1.で求めた時間変化量  $G^{t+1}$  を加算することで決定する。
3. 近傍セルが壁の場合の音圧値  $P_{\text{wall}}$  は、注目セルと同じ音圧値  $P_{\text{notice}}$  を用いる。

小松崎ら<sup>2)</sup>は局所近傍則を上記の2つ目までで定義し、壁のセルに関しては、1つ目の局所近傍則の中で計算から除外する形で定義していた。しかし、この方法ではセルの状態量として近傍セルに存在する壁の数を定義する必要があり、定式化および解析プログラムに無駄が生じていた。また、壁のセルを計算から除外するという形は、物理法則を考えた場合意味が不明確であり、さらには今後壁の反射(吸収)率を導入する際に定式化ができないという問題が生じる。そこで、本研究では3つ目の局所近傍則を導入することで、式の簡略化を行うと同時に、壁のセルに注目セルと同じ音圧値を代入することで、完全反射するという物理的な意味を加えた。

この局所近傍則に従い定式化を行うと、以下の3式が得られる。

$$P(x, t+1) = P(x, t) + G(x, t+1) \quad [\text{Pa}] \quad (12)$$

$$G(x, t+1) = G(x, t) + N \cdot c_{\text{CA}}^2 \left\{ \sum_a \frac{P(x + dx_a, t) - P(x, t)}{N} \right\} \quad [\text{Pa}] \quad (13)$$

$$P(x + dx_a, t) = P_{\text{wall}} = P_{\text{notice}} = P(x, t) \quad [\text{Pa}] \quad (14)$$

ここで、 $P$  は音圧、 $t$  は時間、 $G$  は音圧の時間変化量、 $N$  は近傍数 ( $N=4$ ) を表している。 $c_{\text{CA}}$  は CA における伝搬速度を表したものである。添字  $a$  は各近傍セル、 $\text{wall}$  は壁の状態量をもつ近傍セル、 $\text{notice}$  は注目セルを表している。

### 3.4 境界条件

近傍セルに壁が存在する場合の境界条件については3.3小節にて述べた。ここでは解析境界における境界条件について述べる。2次元開放空間内の波動問題における解析境界は、波動の反射によって解析結果に影響が及ばないようにするため、本来無限（半無限）境界を使用すべきである。BEM および FEM においては、減衰型無限要素、外部有限要素、ハイブリッド型無限要素などの手法によって仮想的に表現することが可能である<sup>8)</sup>。しかし、CA 法においては無限境界を表現できる境界条件は未だ説明されていない。

本研究においては、解析に必要な領域（以下、抽出領域）の10倍に解析領域を設定し、解析境界で発生する反射波が抽出領域に影響が及ばない範囲で解析を行った。図-4は解析領域と抽出領域の例を示したものである。解析領域中央部に抽出領域を配置することで、解析境界で起こる反射に全方向から対応できるようにした。

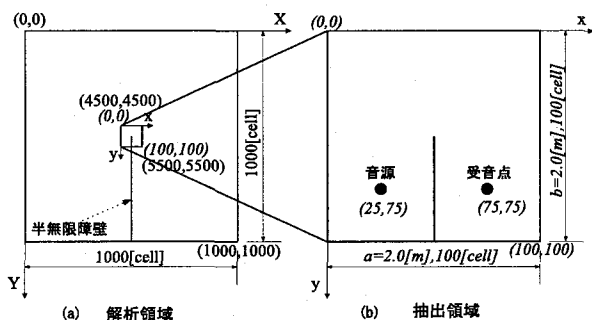


図-4 解析領域と抽出領域の例（回折減衰）

### 3.5 物理量との対応

CA モデルの計算において空間及び時間は離散的な整数値として扱うため、物理量との対応づけを行う必要がある<sup>2)</sup>。本研究では単位セル幅  $dx = 0.02[m]$  とし、空気中での音速を  $c = 344[m/s]$  と定義する。単位時間ステップ  $dt$  については、差分法における差分スキームの安定条件（フォン・ノイマンの条件）を用い、解析の安定性を保てる形で導出する必要がある<sup>2)</sup>。

CA 法を用いた解析は局所近傍則によって状態量の更新が制限される。本研究において近傍セルは隣り合う上下左右の4セル（注目セルとの中心距離は  $dx$ ）であるため、計算上の単位時間ステップは  $dt = dx/c[sec]$  となる。しかし、2次元解析という拘束条件を考えた場合、音圧の波がすべての方向へ等方的に（つまり同心円状に）伝搬するという仮定の下では、注目セルの斜めに存在するセル（注目セルとの中心距離は  $\sqrt{2}dx$ ）にも音圧波が伝搬するといえる（図-5）。

ここで、CA 法の基本ルールである「単位時間ステップにおける移動距離は1セル以内」を差分法における

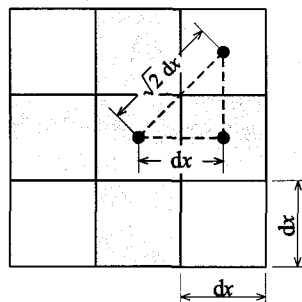


図-5 音波の伝搬方向と距離

解の安定性を示す CFL 条件として考える必要がある。これらを踏まえてフォン・ノイマンの条件を適用することで、2次元 CA 法による波動伝搬解析の安定判別式が導かれる。

$$c_{CA} = c \frac{dt}{dx} \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

式(15)より、2次元 CA モデルにおける単位時間ステップは  $dt = dx/\sqrt{2}c[sec]$  とする必要がある。また、CA モデル上の音の伝搬速度は  $c_{CA} = 1/\sqrt{2}[cell/step]$  とすることで、解の安定性が得られる。

## 4. 差分法

差分法は偏微分方程式の数値解法の一つである。その基本原理は未知関数の微分係数を差分商で置き換えることにより、偏微分方程式を差分方程式に変換し、それを代数的に解くことにある<sup>9)</sup>。

### 4.1 解析領域

差分モデルにおける解析領域の設定は、CA モデルとの比較が行いやすいように定義する。

CA モデルの解析領域分割は、正方形のセルを敷き詰める形で行った。そこで、差分モデルは CA モデルのセルの中心に格子点を配置することで、CA モデルとの比較を行いやすくする（図-6）。

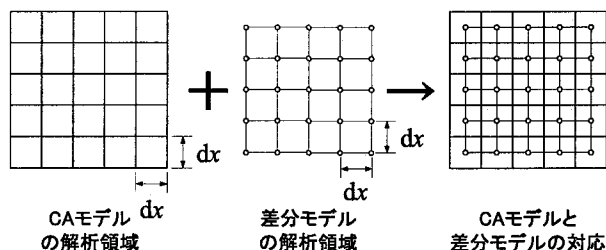


図-6 セルと格子点の対応

縦・横の格子点間の距離（単位幅） $dx, dy$  は CA モデルとの対応を考慮して、 $dx = dy = 0.02[m]$  と定義した。

## 4.2 格子点のもつ情報

格子点は音圧値と状態を表す2種類の情報をもつ。音圧値を格納する変数は音圧値の実数値を保持する。格子点の状態はCAモデルと同様に媒質（空気）、壁、音源の3種類のうちいずれかの状態を整数値かつ固定値で定義する。壁の格子点に関しては計算を行わず音圧の更新を行わない。音源の格子点は入力する最大音圧レベルを設定し、それを余弦波として音圧値に変換した実数値を直接代入する。

## 4.3 差分方程式

2次元波動方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) \quad (16)$$

式(16)より、時間 $t$ および空間 $x, y$ に関して2階の中心差分近似を行い、以下の差分近似式を導いた。

$$p_{i,j}^1 = (1 - r_x^2 - r_y^2)p_{i,j}^0 + \Delta x \phi(i\Delta x, j\Delta x) + \frac{r_x^2}{2}(p_{i+1,j}^0 + p_{i-1,j}^0) + \frac{r_y^2}{2}(p_{i,j+1}^0 + p_{i,j-1}^0) \quad (17)$$

$$p_{i,j}^{k+1} = 2(1 - r_x^2 - r_y^2)p_{i,j}^k + r_x^2(p_{i+1,j}^k + p_{i-1,j}^k) + r_y^2(p_{i,j+1}^k + p_{i,j-1}^k) - p_{i,j}^{k-1} \quad (18)$$

$$r_x = c \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad r_y = c \frac{\Delta t}{\Delta y} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

ここで、式(17)を簡略化するため、 $\phi(i\Delta x, j\Delta x) = 0$  ( $\phi$ : 差分近似による誤差を表す記号) として、

$$p_{i,j}^1 = (1 - r_x^2 - r_y^2)p_{i,j}^0 + \frac{r_x^2}{2}(p_{i+1,j}^0 + p_{i-1,j}^0) + \frac{r_y^2}{2}(p_{i,j+1}^0 + p_{i,j-1}^0) \quad (19)$$

を得た。ここで、 $p$ は音圧、 $c$ は定数である。また、添字 $i, j$ は空間 $x, y$ 上にある任意の格子点を表す。

## 4.4 境界条件

解析領域に壁がある場合、壁が存在する格子点の音圧は、注目する格子点と音圧が等しいとして計算を行う。これにより、音波が壁で完全反射を行う形で解析を行うことができる。例えば、注目する格子点の右側が壁の場合、 $p_{i+1,j} = p_{i,j}$ と定義することができ、式(19)は次式のように変形して用いることとなる。

$$p_{i,j}^1 = (1 - r_x^2 - r_y^2)p_{i,j}^0 + \frac{r_x^2}{2}(p_{i,j}^0 + p_{i-1,j}^0) + \frac{r_y^2}{2}(p_{i,j+1}^0 + p_{i,j-1}^0) \quad (20)$$

解析境界については、CAモデルの境界条件(3.4小節)と同様の問題が発生する。そのため、3.4小節で述べた方法を用いて、解析境界から発生する反射波が抽出領域へ影響を及ぼさない形で解析を行った。

## 5. 解析および考察

ここでは、先に述べたCAモデルを用いて解析を行い、2次元自由音場における距離（幾何）減衰、回折減衰、干渉およびドップラー効果について理論解や実験式、差分モデルによる計算解と比較し検討を行う。

### 5.1 解析条件

CAモデルおよび差分モデルで用いる共通の解析条件は表-1の通りである。表-1の条件を外れる際はその都度明記する。

表-1 解析条件

|            |         |                       |
|------------|---------|-----------------------|
| 解析領域の一辺の長さ | X[m]    | 20.0                  |
| 抽出領域の一辺の長さ | x[m]    | 2.0                   |
| 分割数(解析領域)  | N       | 1000                  |
| 分割数(抽出領域)  | n       | 100                   |
| 音速         | c[m/s]  | 344                   |
| 単位セル幅      | dx[m]   | 0.02                  |
| 単位時間ステップ   | dt[sec] | $4.11 \times 10^{-5}$ |
| 入力音源       | PWL[dB] | 100                   |

### 5.2 距離減衰

解析モデルは平面2次元で作成しているが、ここでは、空間3次元における点および線音源の距離減衰(2.1小節)との比較を行った。

解析領域の一辺の長さ $X = 200$ [m]、抽出領域の一辺の長さ $x = 20$ [m]、解析領域の分割数 $N = 10000$ 、抽出領域の分割数 $n = 1000$ 、計算時間ステップ数は1000[step]として計算を行った。その他の条件は、表-1に準ずる。音源を抽出領域中央 $(x, y) = 500, 500$ [cell]に配置し、受音点は音源の右手方向に $l = 120$ [cell]、 $2l = 240$ [cell]離れた位置に設定して解析を行った。各要素の具体的な配置と抽出領域は図-7に示すとおりである。

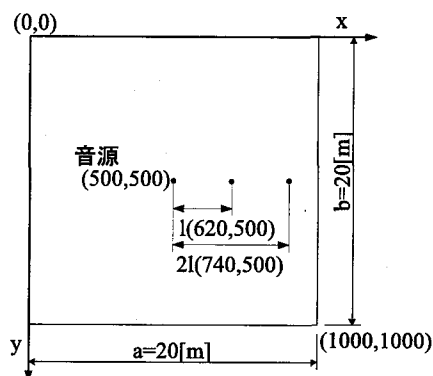


図-7 距離減衰の検討に用いた抽出領域

音源の周波数を100[Hz]から2400[Hz]まで100[Hz]刻みの24種類の解析を行い、 $l$ 地点と $2l$ 地点の距離減

衰による音圧レベル差をプロットしたものが図-8である。計算解の音圧レベル差は、CA および差分モデルより得られた1地点および2l地点の音圧値を各地点ごとに実効値(2.5小節参照)を求め、それぞれを音圧レベルへ変換してからその差をとることで求めた。ここで、500[Hz]以上の周波数帯に関しては、時間ステップ後方から10波を抽出して実効値を求めた。400[Hz]以下の周波数帯に関しては解析時間が短かったため、2~8波の間で可能な限り多くの波数を抽出して実効値を求めた。

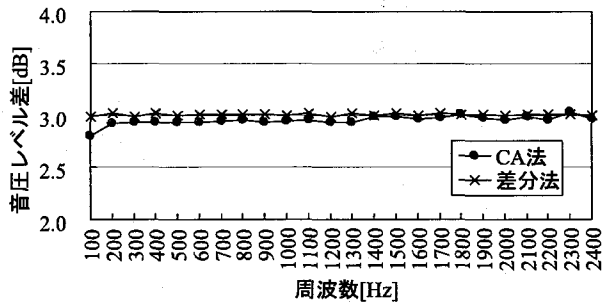


図-8 距離1と2lの2点間で生じる距離減衰量

図-8より、CAモデルおよび差分モデルで約3dB減衰していることがわかる。これは空間3次元における線音源の距離減衰量に相当する。このような結果が得られた理由として、両モデルは2次元で点音源を配置(図-7)しているが、これを空間3次元の視点から両モデルを見た場合、音源と受信点が奥行き方向に単位幅の線状に伸びる形となり、見かけ上、両モデルが空間3次元に線音源を配置したように見えることが挙げられる(図-9)。

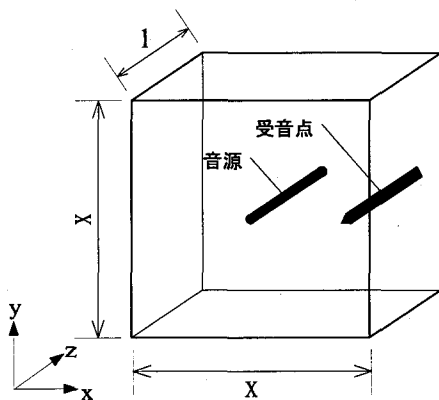


図-9 2次元CAモデルを空間3次元上に投影

結果をさらに具体的にみると、周波数100[Hz]における理論解とCAモデルによる計算解の差は0.2[dB]となっており、他の周波数と比べて差が大きい。これは解析ステップ数が周波数100[Hz]に対して短く、定常状態になっていない可能性があると考えられる。周波数

100[Hz]の解析結果を除いた23種類の周波数において、平均でCAモデル:2.96[dB]、差分モデル:3.14[dB]の減衰が見られた。理論値との差は最大でCAモデル:0.08[dB]、差分モデル:0.03[dB]となり、若干ではあるが差分モデルの方が差が小さいことがわかった。しかし、CAモデルも実用上問題ない程度の差しか発生しておらず、両手法ともに理論値となる3次元空間における“線音源”の距離減衰を表現できるといえる。

### 5.3 回折減衰

ここでは半無限障壁の回折減衰との比較を行った。理論解として2.2小節に示した、前川チャートの近似式(式(3)~(8))およびFresnel-Kirchhoffの回折近似曲線を用いる。CAモデルおよび差分モデルにおいて、壁を壁面で完全反射する半無限障壁と定義して解析を行った。また音源は両モデルとも点音源とみなした。これは、壁がある場合と壁がない場合の音圧値の差をとって回折減衰値を求めているために距離減衰の影響を無視できることと、受信点の奥行き方向からの音の伝搬が存在しないことの2つの理由からである。解析条件は計算時間ステップ数1000[step]とし、その他の条件は表-1に示したものをを用いる。抽出領域を図-10に示す。

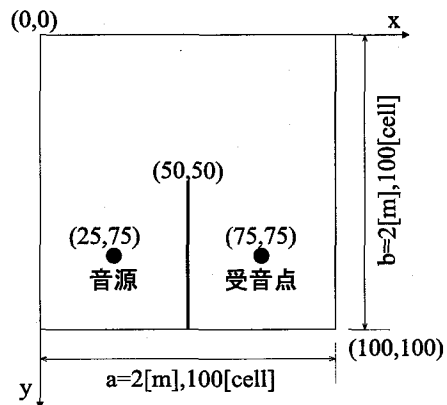


図-10 回折減衰の検討に用いた抽出領域

音源は抽出領域  $(x, y) = (25, 75)[\text{cell}]$  に、受信点は壁を軸に音源と線対称の位置  $(x, y) = (75, 75)[\text{cell}]$  に配置した。そして壁の無い状態で解析を行い、壁が無い場合における受信点での音圧値を取得した。その後、抽出領域中央  $(x, y) = (50, 50)[\text{cell}]$  から下方向に解析領域下端  $(X, Y) = (500, 500)[\text{cell}]$  まで壁セルを配置した。この状態で解析を行い、壁がある場合における受信点での音圧値を取得した。得られた2つの音圧値データを用い、5.2小節で行った方法で音圧差のデータを取得した。解析は5.2小節と同様に、音源の周波数を100[Hz]から2400[Hz]まで100[Hz]刻みの24種類行った。CAモデル及び差分モデルの計算解および理

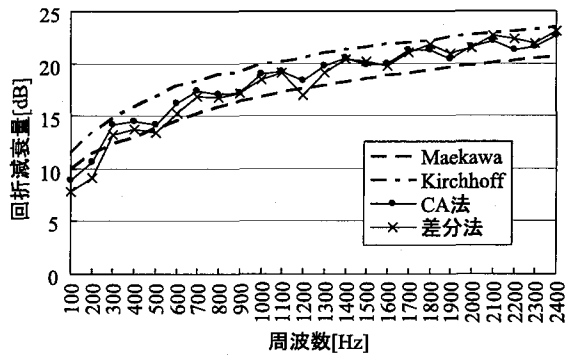


図-11 回折減衰量の比較

論解を図-11 に示す。

図-11 より、両モデルにより得られた計算解は、Kirchhoff の回折理論と前川の実験曲線との間を振動する形で得られていることがわかる。このような結果が得られたのは、CA および差分モデルにおいて、壁面で音波が完全反射すると仮定しており、また、音源および受音点と壁の距離は音源の波長に対して十分に大きいとはいえず、壁面からの反射波が発生して受音点に影響を及ぼしているためと予測できる。音の回折をホイヘンスの原理で考えた場合、まず、壁の先端部が仮の音源になり、そこから受音点へと音波が伝搬していく。そして、壁先端部の仮音源から伝搬した音波が壁面に当たったとき、その点は新たな仮音源となって音波（反射波）が伝搬していくことを繰り返す。そうすると、壁先端部の仮音源から生じた音波と壁面の仮音源から生じた反射波とが受音点で干渉しているといえる。

さらに壁面からの反射波について考察を行う。音源には余弦波の単音を用いているため、音源、壁先端部の仮音源、そして壁面からの反射音の周波数は等しい。そのため、受音点においては、壁先端部から伝わってきた音波と壁面から伝わってきた反射波にはある程度の位相差が生じる。この位相差は音源の周波数および壁と受音点の位置関係によって決まる。また、壁面の仮音源から生じる反射波は複数存在し、受音点での位相差もそれぞれ異なる。この位相差が大きくバラつく場合、反射波の影響は相殺されてなくなる。逆に位相差に一定の偏りがある場合、受音点の音圧値に反射波の影響が及ぶこととなる。

以上のことから、音源の周波数と壁および受音点の配置によって、反射波の影響が大きく出る場合と無視できる場合が存在するといえる。反射波の影響が大きく出る場合、壁がある場合の受音点での音圧値は大きくなるため回折減衰量が小さくなり、地面からの反射波などを考慮した前川の実験曲線に近づく。逆に、反射波の影響が無視できる場合、受音点での音圧値は小さくなるため、回折減衰量は大きくなる。つまり、Kirchhoff

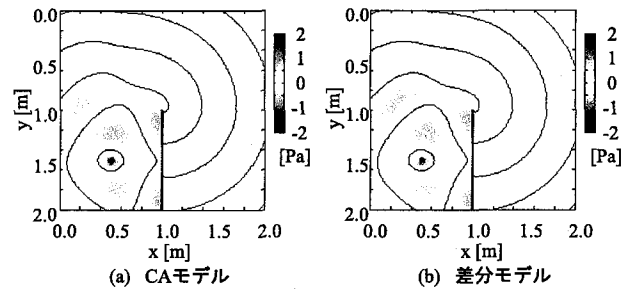


図-12 壁がある場合の伝搬状況

の回折理論に近似した解が得られることとなる。

音源の周波数 500[Hz]、計算ステップ 900[step] としたときの CA モデルおよび差分モデルで解析した伝搬状況を図-12 に示す。これより、コンターを描いた場合 CA モデルの解析結果は差分モデルとほぼ同様の結果が得られた。

以上のことから、CA モデルは両理論解と比べて中間程度の解が得られ、両理論解が回折減衰の計算によく使われていることから、実用には問題ないと考えられる。

#### 5.4 干渉

ここでは CA モデルによって干渉が表現できるかどうかを差分モデルの解析結果および重ね合わせにより求めた理論値と比較し検討する。解析条件は計算時間ステップ数を 1000[step] とし、その他は表-1 に示したものをを用いる。抽出領域の縦方向中央に左右対称に音源 A ( $(x, y) = (25, 50)[\text{cell}]$ ) と音源 B ( $(x, y) = (75, 50)[\text{cell}]$ ) を配置した。抽出領域および音源の配置を図-13 に示す。

音源の周波数を同周波数 1（音源 A:500[Hz]、音源 B:500[Hz]）、同周波数 2（音源 A:1000[Hz]、音源 B:1000[Hz]）、異なる周波数（音源 A:500[Hz]、音源 B:1000[Hz]）の 3 種類について解析を行った。図-14 は異なる周波数の音源を配置した場合の伝搬状況であ

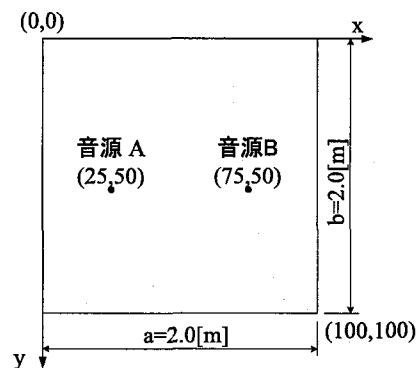


図-13 干渉の検討に用いた抽出領域

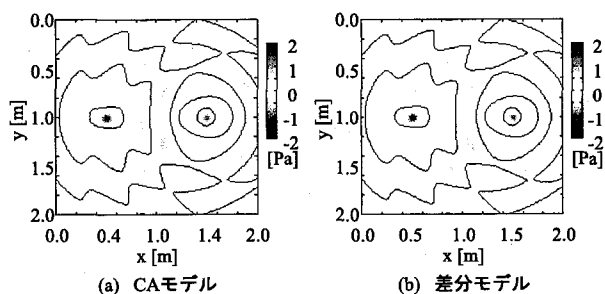


図-14 異なる周波数の音源を配置した場合の伝搬状況

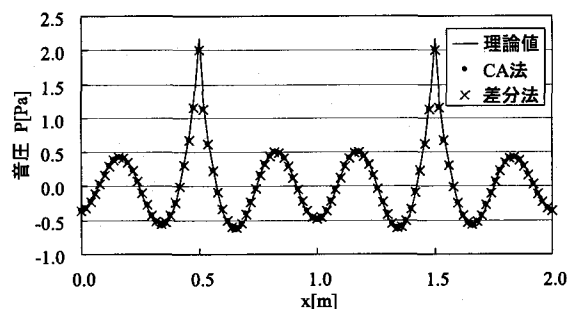


図-16 2音源を軸としたモード形状 (A, B:1000Hz)

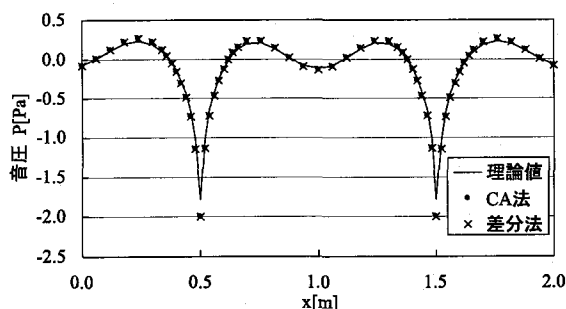


図-15 2音源を軸としたモード形状 (A, B:500Hz)

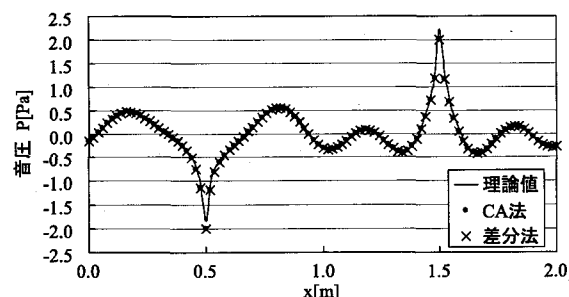


図-17 2音源を軸としたモード形状 (A:500Hz, B:1000Hz)

る。これより、周波数が高い音源 B が周波数の低い音源 A の伝搬状況を乱し大きく変化している状態を CA モデルにて表現できる。また、CA モデルが差分モデルと同様の結果を示している。

計算ステップ 900[step] のとき、音源 A, B を軸とした  $x$  方向における音圧分布を示したものが、図-15, 16, 17 である。ここで用いた音圧値は CA および差分モデルの計算解、重ねあわせで求めた理論解である。

図-15, 16, 17 より、CA モデルの計算結果は差分モデルの計算結果と同様の結果が得られたことがわかる。CA モデルおよび差分モデルによる音圧のモード形状は、音源よりある程度離れると理論解に近似しているが、音源近傍、特に音源位置においては大きく差が出ている。これは理論値と CA および差分モデルとで音源の取り扱い方法が違ふことによって生じたものと考えられる。理論値は音源 A, B をそれぞれ別に計算し、その結果を重ね合わせて求めている。そのため音源 A の位置の音圧値は、音源 A によって発生した音圧と音源 B から伝搬してきた音波を重ねあわせた値になる。それに対して CA および差分モデルは、音源セルおよび格子点には音圧値を直接代入する形で計算を行っている。そのため音源位置のセルでは、別の音源から生じている入射波を無視していることとなり、このような差が生じたと考えられる。これは、図-15, 16, 17 の CA および差分モデルの解において、音源 A, B の位置では入力された音圧値が現れていることから推察できる。つまり、音源近傍の詳細を知るために解析を行う際

は、音源セルに対しても媒質セルと同様の局所近傍則を適用して、その音圧も加算して改良する必要がある。

以上のことから、干渉に関しては、音源から離れた点では問題なく、音源近傍に関しては音源セルの定義を変更することで、CA モデルが適用可能であることが明らかになった。

## 5.5 音源の移動

音源の移動については、2.4 小節に示した音源の前後の波長を理論解とし、CA モデルおよび差分モデルの計算解と比較を行う。解析条件は表-1 に示したものをを用いる。音源が移動する場合におけるモデルの抽出領域を図-18 に示す。音源は抽出領域中央部  $(x, y) = (50, 50)$

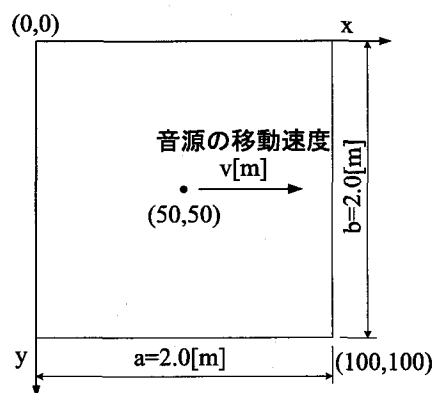


図-18 音源の移動の検討に用いた抽出領域

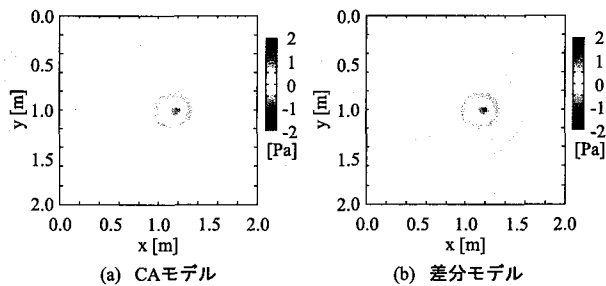


図-19 音源が移動する場合の伝搬状況（移動速度:音速の1/5倍）

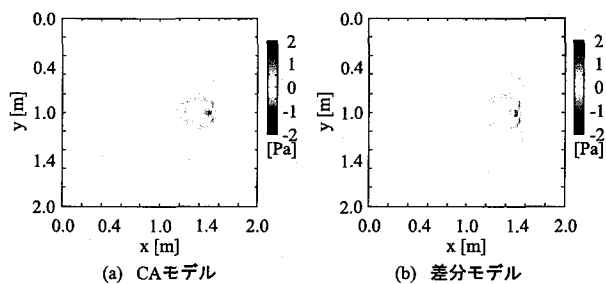


図-20 音源が移動する場合の伝搬状況（移動速度:音速の1/2倍）

に配置し、右方向に音速の1/5, 1/2倍で動く2パターンについて解析を行った。

音源の周波数1000[Hz]、計算ステップ数50[step]におけるCAモデル及び差分モデルの伝搬状況を図-19および図-20に示す。図-19および図-20より、CAモデルが差分モデルと同等の結果を得ていることが分かる。また、移動方向前方の音波は密になっており、移動方向後方の音波が疎になっている状況が見てとれる。

音源が移動する場合の音源の前後の波長は式(10)より求めることができる。これを理論解として、CAおよび差分モデルの計算解と比較して表したものが表-2である。表-2より、CAモデルによる計算解は差分モデルによる計算解および理論解と比較しても $\pm 0.01$ [dB]程度の差であり、非常に高い精度の結果が得られた。以上のことから、CAモデルは音源の移動にも対応できるという。

表-2 移動速度による波長の長さ

| 音源速度   | 計算方法 | 前方波長 [m] | 後方波長 [m] |
|--------|------|----------|----------|
| 音速の1/2 | 理論値  | 0.17     | 0.52     |
|        | CA法  | 0.16     | 0.53     |
|        | 差分法  | 0.16     | 0.54     |
| 音速の1/5 | 理論値  | 0.27     | 0.41     |
|        | CA法  | 0.26     | 0.42     |
|        | 差分法  | 0.26     | 0.42     |

## 5.6 解析の安定性

CAモデルによる解析が安定した解が得られるかどうかを3.5小節において、物理量との対応をはかる過程で確認した。これはセルの単位幅と単位時間ステップの間の安定性を証明したに過ぎない。騒音伝搬解析を行う際には、音の振幅の最大値が埋もれないようにするため音波のモード形状が保たれる必要があり、セルの単位幅と周波数の関係からも解析の安定性を証明する必要がある。

まず、セル幅を一定として解析をおこない、どの程度の周波数で計算が破綻するか検討を行った。静止音源の場合、移動音源（移動速度：音速の1/10, 1/5倍）、単位セル幅0.01[m]（単位時間ステップ $dt = 2.06 \times 10^{-5}$ [sec]）および0.02[m]の6パターンについて、1000[Hz]から500[Hz]刻みで計算ステップ数200[step]とし解析を行った。そして、5.5小節の手法を用いてモード形状を求め、そのモード形状が乱れるかどうかを目視で判定した。その他の解析条件は、表-1に準ずる。ここで、移動音源の場合は移動方向前方の波形を判定基準に用いた。また表中の「○」はモード形状良好、「×」はモード形状不良、「—」は解析を行わなかったことを意味する。解析結果を表-3に示す。表-3より、セル幅が大きくなると計算可能な周波数が低くなることがわかる。また、音源の移動速度に関しては、移動速度が速くなるほど周波数が低くなる傾向が見られる。これは音源が移動した際に、移動方向前方の波長が短くなることに起因している。

次に波長とセル幅の関係を計算結果より求める。縦軸に波長 $\lambda$ の理論値と計算値の比をとり、横軸にセル幅 $dx$ と波長 $\lambda$ の比をとってグラフにしたものが、図-21,22である。図-21,22より、セル幅に関わらず、 $dx/\lambda \leq 1/10$ の場合は6パターンとも確実に解析が安定することがわかる。 $dx/\lambda = 1/10 \sim 1/5$ の範囲については、音源の移動速度が音速の1/10以下であれば安定して解が得られるといえる。 $dx/\lambda$ が1/5程度の場合は、静止音源のみ解析が安定することがわかる。そして、 $dx/\lambda$ が1/5を下回ると完全に解析が破綻することがわかる。これ

表-3 モード形状の判定結果

| 周波数 [Hz] | セル幅 0.01[m] |      |     | セル幅 0.02[m] |      |     |
|----------|-------------|------|-----|-------------|------|-----|
|          | 移動なし        | 1/10 | 1/5 | 移動なし        | 1/10 | 1/5 |
| 1000     | ○           | ○    | ○   | ○           | ○    | ○   |
| 1500     | ○           | ○    | ○   | ○           | ○    | ○   |
| 2000     | ○           | ○    | ○   | ○           | ○    | ○   |
| 2500     | ○           | ○    | ○   | ○           | ○    | ○   |
| 3000     | ○           | ○    | ○   | ○           | ○    | ×   |
| 3500     | ○           | ○    | ○   | ○           | ×    | ×   |
| 4000     | ○           | ○    | ○   | ×           | ×    | —   |
| 4500     | ○           | ○    | ○   | ×           | —    | —   |
| 5000     | ○           | ○    | ×   | —           | —    | —   |
| 5500     | ○           | ○    | ×   | —           | —    | —   |
| 6000     | ○           | ○    | —   | —           | —    | —   |
| 6500     | ○           | ×    | —   | —           | —    | —   |
| 7000     | ×           | ×    | —   | —           | —    | —   |
| 7500     | ×           | —    | —   | —           | —    | —   |

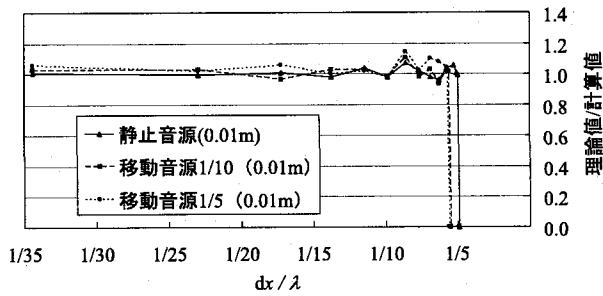


図-21 波長とセル幅の関係 ( $dx = 0.01[m]$ )

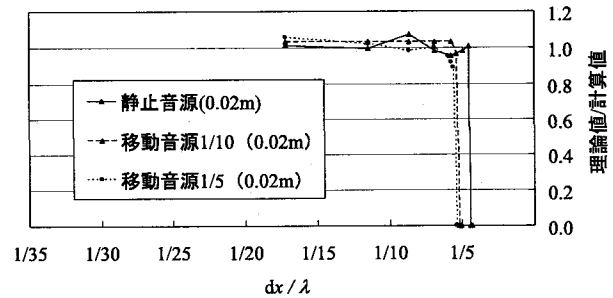


図-22 波長とセル幅の関係  $dx = 0.02[m]$

らのことから、静止音源については  $dx/\lambda = 1/5$  程度、高速道路および列車の設計（移動速度が音速の  $1/10$  倍以下）には  $dx/\lambda = 1/6 \sim 1/7$ 、新幹線の設計（移動速度が音速の  $1/5$  倍以上）の場合は  $dx/\lambda = 1/10 \sim 1/15$  に設定して CA モデルによる解析を行う必要があるといえる。

最後に先ほど求めた波長とセル幅の関係を用いて、周波数とセル幅の関係を求める。 $dx/\lambda \leq \alpha$  と定義して波長と周波数の関係式（式 (9)）に代入すると、周波数とセル幅による CA モデルの安定条件が導かれる。

$$f \leq \alpha \frac{c}{dx} \quad (21)$$

## 6. 結論

本研究は壁による反射を局所近傍則に考慮したセルオートマトン法による 2 次元騒音伝搬モデルを開発した。本解析モデルにおける局所近傍則は、

1. 次の時間ステップにおける音圧の時間変化量  $G^{t+1}$  は、注目セルと近傍セルとの音圧値の差および現在の音圧の時間変化量  $G^t$  より直接決定する。
2. 次の時間ステップにおける音圧値  $P^{t+1}$  は、そのセルの現在の音圧値  $P^t$  に 1. で求めた時間変化量  $G$  を加算することで決定する。
3. 近傍セルが壁の場合の音圧値  $P_{wall}$  は、注目セルと同じ音圧値  $P_{notice}$  を用いる。

という形で定義した。このうち 3 つ目の局所近傍側が壁の反射に寄与する局所近傍側である。今回は近傍セルを壁とした場合の音圧値と注目セルが同じ音圧値をとるという規則を用いて、完全反射を考慮した。ここで壁と注目セルが異なる音圧値を取るように局所近傍則を定義することで、壁での反射（吸収）率を考慮することが可能となる。そして、今回定義した局所近傍則を適用した解析モデルを用いて、2 次元自由空間にお

ける距離減衰、回折減衰、音の干渉、ドップラー効果について、理論解、実験式および差分法を用いた 2 次元騒音伝搬モデルの計算解と具体的に比較を行い、これらの現象が本モデルによって解析可能なことを証明した。さらに、CA モデルによる解析の安定性について、既往の研究ではセルの単位幅と単位時間ステップだけで判断していたが、本研究においては単位セル幅と周波数の関係からも計算解の安定性の検討を行い、CA モデルによる解析の安定性をより確実なものとした。そして、CA モデルが解析可能な周波数を単位セル幅と音速を用いて容易に判定ができる式を導いた。以上のことから、本研究で開発したセルオートマトン法による 2 次元騒音伝搬モデルは、実現象に適用可能であることが示された。

## 参考文献

- 1) 松本浩司, 金光陽一, 雉本信哉, 松田浩一: 大規模音場の音響解析, 日本機械学会九州支部講演論文集, Vol.54, pp. 229-230, 2001.
- 2) 小松崎 俊彦ら: セルオートマトンによる波動伝播解析, Transactions of JSCES, Vol.1999, No.19990017, 1999.
- 3) 前川 純一, 森本 政之, 阪上 公博: 建築・環境音響学, 共立出版, 第 2 版, 2000.
- 4) 前川 純一: 障壁 (塀) の遮音設計に関する実験的研究. 日本音響学会誌, Vol. 18, No. 4, pp. 187-196, 1962.
- 5) 前川 純一: 有限障壁 (衝立) による騒音の回折—障壁 (塀) の遮音設計に関する実験的研究 第 2 報. 日本音響学会誌, Vol.21, No.1, pp. 1-7, 1965.
- 6) 渡辺 義則: 都市鉄道の騒音に関する基礎的研究, 東京大学大学院工学研究科 学位論文, pp. 224-225, 1975.
- 7) 加藤 恭義ら: セルオートマトン法—複雑系の自己組織化と超並列処理—, 森北出版, 1998.
- 8) 加川 幸雄: 開領域問題の有限/境界要素法, FEM+BEM=6, サイエンス社, 1983.
- 9) 高見 頼郎, 河村 哲也: 偏微分方程式の差分解法, 東京大学基礎工学双書, 東京大学出版会, pp.1-74, 1994.

(2006 年 4 月 13 日 受付)