

騒音伝搬モデルに用いる解析手法に関する研究

建設設計工学研究室 小野 泰和

指導教官 宮木 康幸

1 はじめに

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。この問題を解決するため、騒音の発生源に対する個別の騒音伝搬解析や騒音制御技術が盛んに行われている。しかし汎用性を持った騒音伝搬予測技術はあまり開発されていない。そこで昨年度は、2次元騒音伝搬モデルの開発を目的とし、複雑系の解析手法として注目されているセルオートマトン法(以下CA)を用いて計算を行った。CA法を用いることで2次元空間における騒音の伝搬予測が可能であることがわかった。

2 研究の目的

音波が伝搬する場合には距離減衰、回折減衰、干渉、音源の移動などさまざまな現象が生じるため十分にそれぞれの現象に対して検証が必要となる。また、これらの現象をCA法で計算することで他の解析手法と比べどの程度の精度を得られるか検討されていない。そこで本年度は新たに解析領域全体を離散化して解く方法の代表的なものである差分法を用いて計算を行いCA法との精度の比較を行いCA法の信頼性を確認する。はじめに昨年度検討した1次元、2次元について評価する。次に、解析条件の変更(壁の形状、音源の位置・個数・移動)を行い両手法の評価を行う。また、計算を行う際に周波数と波長の関係から正確な値を求めることができない場合がある。そのためその条件を確立する。最後に、複雑なモデルや解析領域を拡大する場合に問題となる計算時間の測定を行い検討する。その結果CA法の計算時間が差分法に比べどの程度の結果を得られるか検討する。

3 CA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する。各セル上に定義された離散的な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、離散的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。

4 差分法

差分法は有限要素法とならんで解析領域全体を離散化して解く方法の代表的なものである。具体的には、現象領域内に離散化された格子点に配置する。そして、波動場を記述する波動方程式の変数にテイラー展開を適用し微係数を差分近似することで格子点での値に関する差分方程式を作成する。これを逐次解いていく手法である。

5 1次元モデル

1次元に関して、1次元音響管を用いて開管と閉管の2つの場合について、波動方程式、CA法、差分法による計算解を比較する。図-1のように音響管の境界条件として左側を加振端、右側を固定端および開放端の2種類を考え、強制加振時の管内の音圧分布を求める。ここで、管長 $l=2.0[m]$ 、管路の分割は200とした。また、波動は管の断面積によらず平面波が生じるものとした。

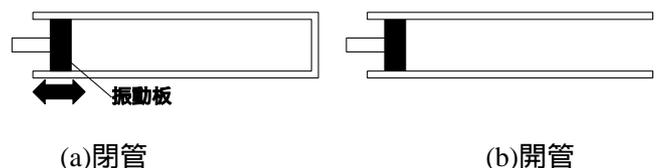


図-1 音響管の形状

開管・閉管の共振周波数におけるモード形状の比較を図-2、図-3に示す。比較を行ったモードは開管・閉管ともに1~3次モードである。開管・閉

管ともに、おおむね正確なモード形状と音圧値が得られており、波動方程式と同様にCA法、差分法によって解が求められる。

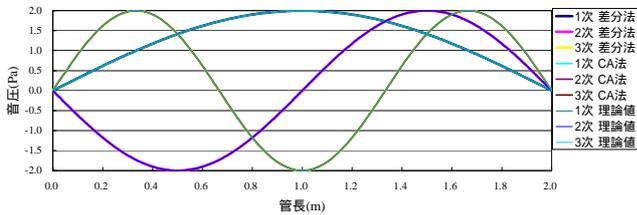


図-2 開管の共振周波数におけるモード形状

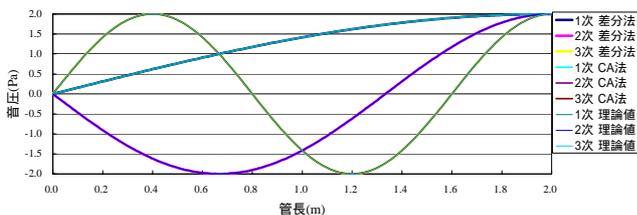


図-3 閉管の共振周波数におけるモード形状

6 2次元モデル

2次元の自由音場に音源が存在する状態を想定して音場のモデル化を行った。両手法の妥当性を評価するために、まず、騒音の伝搬形状の検証、距離減衰・回折減衰の検討を行った。また、壁の形状変化、2つの音源に対する音波の干渉、音源の移動などを考慮し計算し比較検討する。

まず、2次元の自由音場に点音源が1つ存在する状態を想定して音場のモデル化を行った。音源の周波数を500[Hz]したときの伝搬形状を図-4に示す。CA法(a)、差分法(b)とも同心円状に音が伝搬しており、よい結果が得られている。

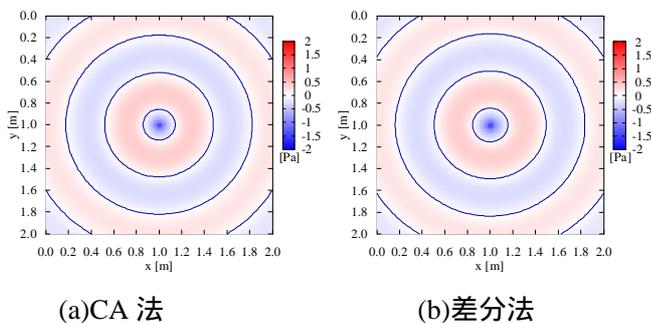


図-4 音の伝搬状況

6-1 距離減衰

3次元空間に線音源が1つある場合、音源からの距離 l の地点と音源から距離 $2l$ の地点の音圧レベルの差をとると、約 $3[dB]$ の差が出る。この距離減衰の法則が得られているかを評価するため計算した。解析領域を縦・横1000、分割幅 $dx, dy = 0.02[m]$ とし、音源をその中央に配置した。受音点は $l=120, 2l=240$ と設定して解析を行った。音源の周波数を100~2400[Hz]まで100[Hz]刻みで l と $2l$ の距離減衰による音圧レベル差を示したものが図-5である。

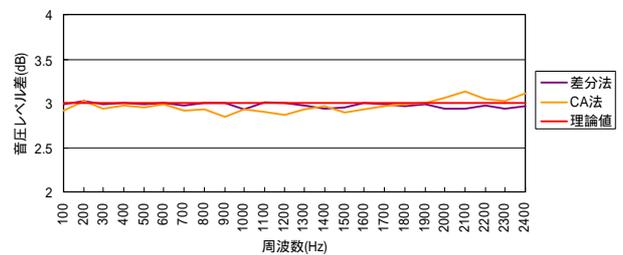


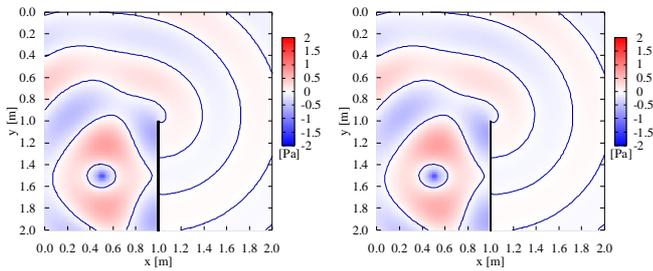
図-5 距離減衰量の比較

各周波数において、平均でCA法： $2.97[dB]$ 、差分法： $2.98[dB]$ の減衰がみられた。理論値との差は最大CA法： $0.17[dB]$ 、差分法： $0.07[dB]$ となり、音の距離減衰は表現できるといえる。

6-2 回折減衰

半無限障壁の回折減衰の検討を行った。前川の実験による回折減衰量は、壁の有無によって変化する受音点の音圧レベルの差を表している。解析領域の右下部 $(x,y)=(25,75)$ に音源を配置し、受音点は壁を軸に音源と線対称 $(x,y)=(75,75)$ に配置した。始めに壁を配置しない状態で計算を行った。次に解析領域の中央部 $(x,y)=(50,50)$ から下方 $(x,y)=(50,100)$ に壁を配置した状態で計算を行った。音源の周波数を500[Hz]としたときの伝搬形状を図-6に示す。受音点の音圧レベルの差と前川の実験式およびKirchhoffの近似理論より算出された音圧レベルの差を音源の周波数

を 100 ~ 2400[Hz]まで 100[Hz]刻みで比較したものが図-7 である。



(a)CA 法 (b)差分法

図-6 壁がある場合の伝搬状況

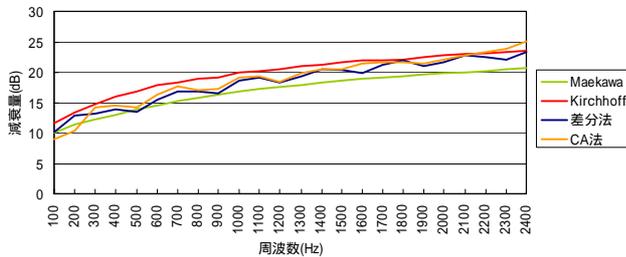


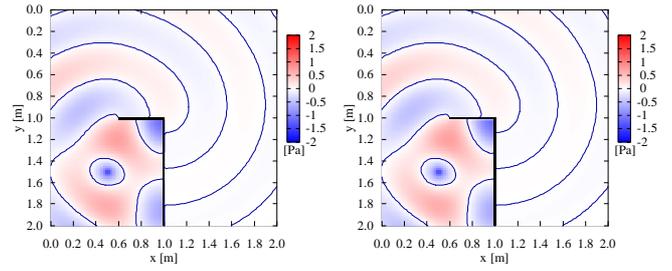
図-7 回折減衰量の比較

両手法による解はおおむね Fresnel-Kirchhoff の光の回折近似理論と前川の実験式との間に挟まれる形で結果が出ている。

6-3 壁の形状変化

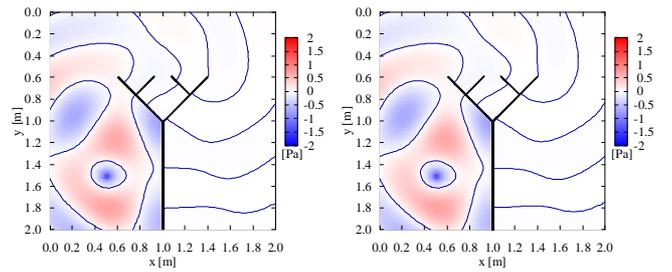
防音対策に実際使用される防音壁は、さまざまな形状でも騒音伝搬予測が可能であることが要求される。そこで騒音伝搬の計算を行う際に壁の形状を変更しても計算が可能であるか汎用性を検討する。そのため壁の形状を変更し計算を行い比較した。図-9、図-10 はそれぞれ逆 L 字型とトナカイ型の伝搬状況を示したものである。

以上のように CA 法による解は、単純な壁の形状から複雑な壁の形状までどのような状況においても差分法による解と同等の結果が現れている。また、伝搬形状も壁の先端より回折の現象がみられる。



(a)CA 法 (b)差分法

図-9 逆 L 字型の伝搬状況



(a)CA 法 (b)差分法

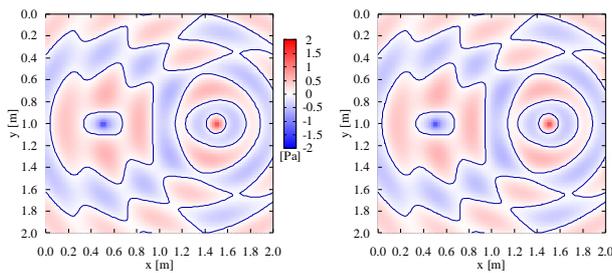
図-10 トナカイ型の伝搬状況

音源の反対側の音圧値をみると、音源周辺の音圧よりも低い値となり壁の形状によって異なっており、複雑な形状ほど減衰効果大きいことがわかった。このことからさまざまな壁の形状による減衰効果が CA 法によって評価できるようになると期待される。しかし、本研究では壁の形状による減衰効果を十分に検討していないため詳しい検討が必要となる。

6-4 音の干渉

複数の音波が同時に伝搬するとき、媒質の各点の振動は、それぞれの音波が単独に伝わる場合振幅の和となる。ここでは干渉について検討を行う。それぞれ CA 法、差分法で計算を行いその結果得られる音圧値と重ねあわせによる音圧値と比較し検討を行う。図-11 は音源の周波数を音源 A : 500[Hz]、音源 B : 1000[Hz]として計算を行ったものである。また、音源 A と音源 B 軸として x 方向音圧のモード形状を示したものが図-12 である。音圧値は重ねあわせ CA 法、

差分法によって求めたものである。



(a)CA 法 (b)差分法

図-11 周波数の違いによる干渉

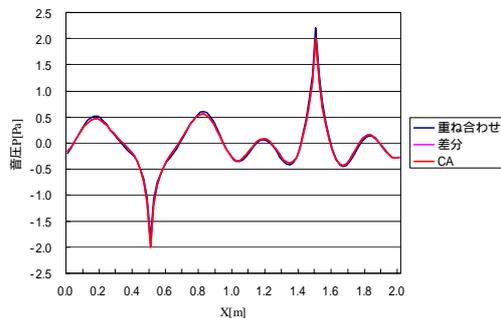
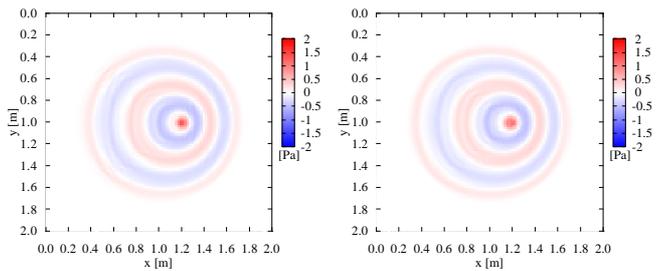


図-12 2音源を軸としたモード形状

計算結果は重ね合わせによる音圧値と等しく違いはみられない。図-11 においては周波数が高い音源 B が音源 A の伝搬形状を乱し大きく変化している。

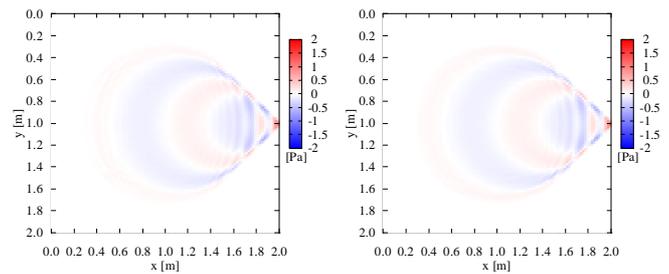
6-5 音源の移動

音源が移動することによりドップラー効果が発生し音源の進行方向に対して前方の周波数が高くなり、波長が短くなる。そして、後方の周波数は低くなり、波長は長くなる。また、音速より音源の移動速度が速くなることにより衝撃波が発生する。ここでは音源が移動した際の計算結果を比較し検討を行う。解析モデルでは音源移動を x 方向のみとし、移動速度を音速 (344[m/s]) の 1/5、等速とした。それぞれの計算結果は図-13、図-14 に示す。



(a)CA 法 (b)差分法

図-13 音速の 1/5 の伝搬状況



(a)CA 法 (b)差分法

図-14 等速の伝搬状況

その結果 CA 法と差分法の音圧分布の差は見られない。また、図-13 の伝搬形状を見ると音源の前方の波長が短く、反対側の後方の波長は長くなりドップラー効果を表現できている。図-14 の音速と移動速度が等速の場合では音源を先端にして円錐形の伝搬形状が現れ衝撃波に相当する波が生じている様子がわかる。また、前方・後方の波長に対して両手法における結果と理論値を比較した結果等しい値を得ることができた。

7 周波数とセル幅

CA 法を用いて騒音伝搬予測を行う場合、周波数が増えると波長が短くなり、波長が短くなる場合セル幅によって正しい計算結果が得られない場合がある。ここでは静止音源の場合、移動音源の場合(移動速度が音速の 1/10、1/5)、セル幅を 0.01[m]、0.02[m] の 2 種類を考え周波数とセル幅の関係を検討する。比較として理論式から求められる波長と計算結果から得られる波

長を比較し検討を行う。また，音圧のモード形状も比較対象とした。

図-15 は各周波数における理論値の波長(実線)と解析値の波長(点)の比較を示したものである。図-15 では波長の 0.1[m]の付近で音圧のモード形状にばらつきがみられ計算結果の波長を読み取ることができなくなり理論値との比較ができない状態となった。また，セル幅 0.01[m]の場合は 0.05[m]付近であることがわかった。この結果から計算可能な条件はセル幅が波長の 1/5 以下でなければならないことがわかる。この結果より周波数とセルの関係は次の式で示すことができる。

$$\lambda \geq 5dx$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\frac{c}{f} \geq 5dx \quad \therefore f \leq \frac{c}{5dx} \quad dx \leq \frac{c}{5f}$$

図-15 は周波数とセル幅の関係を示したものであり，移動の速度が速くなるにつれ計算可能な領域が減少傾向にある。この条件の元に他のセル幅で計算を行った結果この条件が有効であることがわかった。

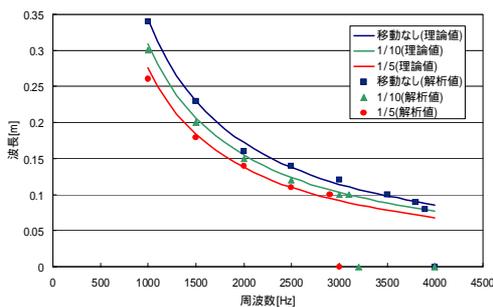


図-15 各周波数における波長の比較(0.02m)

これらの結果は波長と音圧のモード形状を基準にして計算可能な条件を定めたが，モード形状など詳しい結果を必要とする場合または高周波数での計算を行う場合はセル幅を細かくする必要がある。

そのため通常計算する場合は 1/10 ~ 1/20 程度が良いと考えられる。

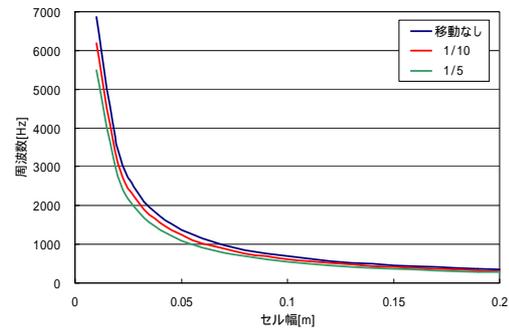


図-16 周波数とセル幅の関係

8 計算時間

最後に両手法による計算時間について測定した。複雑な解析条件や解析領域が大きな規模となる場合計算時間は重要となる。本研究では，解析領域を 500，1000，1600，2000 分割として計算時間を測定した。解析領域を 2000 分割とした場合の測定結果を表-1 に，分割数による測定結果を図-17 に示す。

表-1 計算時間の測定結果(2000 分割)

解析手法	分割幅[m]	分割数	計算時間[sec]
CA法	0.01	2000	4623.328
差分法			5620.078

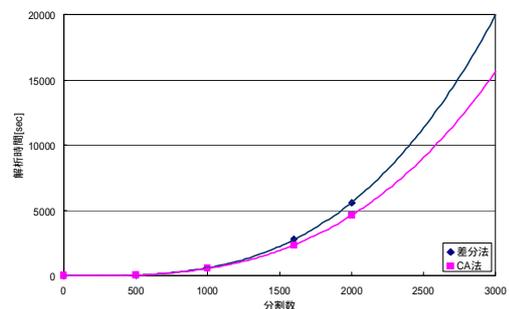


図-17 分割数による計算時間

CA 法を用いることにより差分法よりも計算時間が速いことがわかった。具体的には 2000 分割で差分法の約 18%の低減がみられ，分割数

を多くするにつれて低減効果が増加傾向にある。さらにこの効果は、3次元にすることで大きな差となる。

両手法に計算時間に差が出た理由としては、状態量(音源, 媒質, 壁)の計算に大きな差があるものと見られる。CA法の場合注目セルの隣のセルが、壁であるかないかの2種類で判定を行う。しかし、差分法では注目格子点の隣の格子点に壁がいくつあり、どのように配置されているか判定を行わなければならない。そのため2次元の場合では、16種類も存在しそれに応じた差分近似式を適用しなければならない。その結果計算時間に差が出たのではないかと考えられる。

9 まとめ

CA法による騒音伝搬予測は、差分法による結果と同等の精度であり信頼性も十分にあることがわかった。また、セル幅による正しい計算が可能な条件を設定できるようになった。計算時間においては、CA法が有利になることがわかった。

10 今後の課題

今後の課題としては吸音率, 反射率の導入。また、自由境界の設定を行い3次元化することによってさまざまなモデルを計算することが可能となり汎用性が向上する。

参考文献

- 1) 小松崎俊彦, 佐藤秀紀, 岩田佳雄, 森下信, セルラオートマトンによる波動伝播解析, Transactions of JSCES, No.19990017, 1999.
- 2) 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, ISBN 4-320-07655-9.
- 3) 登坂宣好, 大西和榮, 偏微分方程式の数値シミュレーション, 東京大学出版会, 1991,

ISBN 4-13-062110-6.

- 4) 山崎郭滋, 偏微分方程式の数値解析入門, pp9-92, 森北出版株式会社, 1993, ISBN 4-627-07420-4
- 5) 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, pp187-196, 1962.
- 6) 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, pp1-7, 1965.