

# 可変グリッド CIP 法による屋外波動音響解析の効率的解法

石塚 崇

(技術研究所)

## Efficient wave-based analysis for outdoor sound field using the constrained interpolation profile method with a variable-grid technique

by Takashi Ishizuka

### Abstract

The present report proposes a variable-grid technique for wave-based analyses using the CIP (constrained interpolation profile) method to calculate sound propagation in an outdoor field with high accuracy and low computational costs. This technique is based on the sub-grid technique for the CIP method and provides a procedure for dynamic setting of subgridded areas according to wave propagation. An examination in the two-dimensional outdoor field reveals that proposed technique has almost the same accuracy with that the normal CIP method with finer uniform-grid system has. The analysis applying the variable-grid system requires one-fifth of computer memory and computational time relative to those the normal finer analysis requires. Additionally, implementation of the perfectly matched layer-absorbing boundary condition for sound field analyses using the CIP method is shown. This technique is applied to suppress reflection waves from outer boundaries of the finite simulation domain.

### 概要

屋外における音響伝搬を高精度かつ効率的に予測する手法として、可変グリッド CIP 法を提案する。この手法は、解析空間の一部領域を周辺領域より細かいサブグリッドで離散化し、音波の伝搬に合わせてサブグリッド領域を動的に設定しつつ解析を行う。屋外音場を対象に提案手法の計算精度および計算効率を検証した結果、可変グリッド CIP 法による解析は、音場全体を詳細に離散化した従来の CIP 法による解析と同程度の計算精度を保ちつつ、計算コストを 1/5 程度に低減可能であることを確認した。また、屋外音場解析において解析領域を有限で打ち切った外周境界で生じる反射波を低減する手法として、PML 吸収境界を CIP 法音響解析に実装する方法を示す。

### §1.はじめに

室内の音の響きや屋外の騒音伝搬の予測においては、実務レベルでは統計的手法やエネルギーベースの予測手法が主に用いられている。これらの手法は比較的簡便ではあるが、回折、散乱、干渉といった空気の振動現象である音の波動性を考慮しておらず、予測精度に限界がある。

高精度の音響伝搬予測には波動音響解析が有効であり、計算機の性能向上に伴い機械分野などでは実用的な予測手法として利用され始めている。しかし、建築分野においては、数 10 m から数 100 m オーダーの空間の波動音響解析に膨大な計算コストを要することから、現状ではスーパーコンピュータなどの大型計算機

が必要となる。そこで、本研究では、建築空間の波動音響解析をデスクトップ PC 程度で実行できることを目標とし、解析手法の効率化と高速化に取り組んでいる。

本報では、屋外音響伝搬を対象とした波動解析を効率化する手法として、可変グリッド CIP 法を提案し、その計算精度と計算効率を検証する。

CIP (Constrained Interpolation Profile) 法は、特性曲線法の一つとして流体力学の分野で開発された手法であり<sup>1-3)</sup>、最近では音場の波動解析にも適用されている<sup>4-7)</sup>。解析空間を離散化した各グリッド点において、音圧や粒子速度に加えその空間微分値を保持し計算に組み込むことで、高精度な解析を実現することの特徴とする。しかし、CIP 法においては、計算の進捗に伴

い実際の物理現象以上に音波の振幅が減衰する数値拡散の問題が知られており、現状では屋外などの大規模空間の音響伝搬解析への適用には課題がある。小さい空間離散化幅で解析空間を細かく離散化すれば数値拡散の影響は低減できるが、空間グリッド数の増大は必要な計算メモリや計算時間の大幅な増大を招く。

本報では、上記の課題を解決する手段として、可変グリッド手法を CIP 法音響解析に導入する。この手法は、解析空間の一部領域を周辺領域より細かく離散化するサブグリッド手法<sup>8)</sup>を応用し、音波の伝搬に合わせてサブグリッド領域を動的に設定しつつ解析を行う。以下では、提案する解析手法の概要を述べた後、自由音場を対象とした基礎検討結果、およびより実際の屋外音場の解析に提案手法を適用した例を示す。

屋外音場の解析にあたっては、解析領域を有限で打ち切った外周境界で生じる反射波を低減する工夫が必要になる。本報では、反射波の低減効果の高い PML (Perfectly Matched Layer) 吸収境界<sup>9)</sup>を CIP 法音響解析に実装する方法を併せて示す。

## §2.提案手法

### 2.1 CIP 法

CIP 法は、音波の伝搬を波動的に表す支配方程式から導かれる移流方程式を解析対象とする。空気による吸収などを無視した損失の無い場における音響伝搬は、以下に示す質量保存式と運動方程式で記述される。但し、ここでは  $x$  軸方向の 1 次元的な伝搬を考える。

$$\partial_t p = -\rho c^2 \partial_x v_x, \quad \partial_t v_x = -\frac{1}{\rho} \partial_x p \quad (1)$$

上式で、 $\partial_a$  は微分演算子  $\partial/\partial a$  を表し、 $p$ 、 $v_x$ 、 $c$  および  $\rho$  はそれぞれ音圧、 $x$  方向粒子速度、音速および媒質である空気の密度を表す。ここで空気の固有音響抵抗  $Z = \rho c$  を導入して上式を次のように変形する。

$$\partial_t p + c Z \partial_x v_x = 0, \quad Z \partial_t v_x + c \partial_x p = 0 \quad (1')$$

この 2 式の和と差から次の移流方程式が得られる。

$$\partial_t f_{x\pm} \pm c \partial_x f_{x\pm} = 0, \quad f_{x\pm} = p \pm Z v_x \quad (2)$$

$f_{x\pm}$  は、 $\pm x$  方向へ速度  $c$  で移流する音波の成分を表す。特性曲線法では、式 (2) の移流方程式で表される音響伝搬の時間発展を、図 - 1 に示すように  $f_{x\pm}$  を移流させて計算する。即ち、図示したように、あるグリッド点から  $c\Delta t$  離れた点 (以下、移流原点) における  $f_{x\pm}$  を次

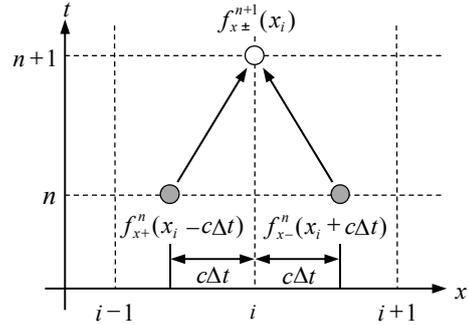


図 - 1 特性曲線法による移流計算

の時間ステップのそのグリッド点における値とする。

$$f_{x\pm}^{n+1}(x_i) = f_{x\pm}^n(x_i \mp c\Delta t) \quad (3)$$

ここで、 $x_i$  はグリッド点、 $\Delta t$  は時間離散化幅、上付き添字  $n$  及び  $n+1$  は時間ステップを表す。移流原点がグリッド点上に無い場合は、式 (3) の右辺は補間計算により求められる。

特性曲線法の一つである CIP 法では、移流原点における値を Hermite 補間により求める。通常は 3 次 Hermite 補間を用いるが、その計算には各グリッド点における  $f_{x\pm}$  の移流方向 (ここでは  $x$  方向) への空間微分値が必要になる。また、その空間微分値に関しては、式 (2) を  $x$  で偏微分すると  $f_{x\pm}$  に関するものと同様の移流方程式が導かれる。

$$\partial_t g_{x\pm} \pm c \partial_x g_{x\pm} = 0, \quad g_{x\pm} = \partial_x p \pm Z \partial_x v_x \quad (4)$$

CIP 法は、音圧および粒子速度とその空間微分値を各グリッド点で陽に保持し、式 (2) および (4) に従い  $f_{x\pm}$  および  $g_{x\pm}$  の移流計算を同時に行う。微分値を考慮することにより、高精度で補間計算を行うことを特徴とする。

2 次元以上の音場に対しては、CIP 法を含む特性曲線法では方向分離手法が用いられる<sup>2,4)</sup>。即ち、上記で述べた 1 次元の移流計算を各軸方向に順に実行することで多次元の音響伝搬を解析する。2 次元音場解析を例とすると、まず  $x$  軸方向の移流計算を行い、その結果を中間ステップの値として保持する。次に、その中間ステップの値を  $y$  方向に移流させてその結果を次の時間ステップの値とする。この手法では、場の値とその移流方向への空間微分値に加え、それらの移流方向と直交する方向への空間微分値についても移流計算を行う必要がある。例えば、2 次元音場における  $x$  軸方向への移流については、式 (2) および (4) を  $y$  方向に微分すると以下に示す  $f_{x\pm}$ 、 $g_{x\pm}$  の  $y$  方向微分値  $\eta_{x\pm}$ 、 $\mu_{x\pm}$  についての移流方程式が導かれる。

$$\partial_t \eta_{x\pm} \pm c \partial_x \eta_{x\pm} = 0, \quad \eta_{x\pm} = \partial_y p \pm Z \partial_y v_x \quad (5)$$

$$\partial_t \mu_{x\pm} \pm c \partial_x \mu_{x\pm} = 0, \quad \mu_{x\pm} = \partial_x \partial_y p \pm Z \partial_x \partial_y v_x \quad (6)$$

本報で用いる C 型 CIP 法<sup>3-5)</sup>では、上式による  $\eta_{x\pm}$ 、 $\mu_{x\pm}$  についての移流計算も、Hermite 補間を用いて高精度に行う。

ここまで x 軸方向への移流計算について述べたが、y 軸方向への移流計算は、上記において x と y を入れ替えて同様の手順で実行できる。

## 2.2 可変グリッド手法

本報で提案する可変グリッド手法は、解析音場の一部領域を周辺領域より細かく離散化するサブグリッド手法を応用し、解析の高精度化と効率化を両立する。サブグリッド手法では、音場の基本の空間離散化幅  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ (粗いグリッド)に対し、一部領域をその  $1/N$  の離散化幅  $\Delta x_s$ 、 $\Delta y_s$ (サブグリッド)で離散化し空間分解能を上げて計算を行う。適用例として、形状が複雑な境界をその付近だけサブグリッドで精度良く離散化するモデル化手法等があげられる。

本報における可変グリッド手法では、音圧など場の値やその変化の大きい領域にサブグリッド領域を設定し、計算コストの増大を抑えつつ CIP 法音響解析における主要な誤差要因である数値拡散誤差を低減する。ただし、その領域は音波の伝搬に伴い位置が変わるため、以下の手順により計算中にサブグリッド領域を動的に設定して音波の伝搬に追従する。

1. 計算開始前に計算対象領域を複数の粗いグリッド点を内包する矩形領域(ブロック)に分割する。
2. 計算過程において、あるブロック内の音圧等の場の値(あるいはその空間微分値)が設定した閾値を超えた場合、そのブロックをサブグリッドで離散化する。図-2に示すように、新たに設定されたグリッド点(図中の○印)における音圧、粒子速度、およびそれらの空間微分値は、粗いグリッド(図中のグレーの●印)における値から Hermite 補間による求める。
3. 一方、あるサブグリッド内の場の値が閾値を下回った場合、そのブロック内を粗いグリッドに戻す。この際、粗いグリッドに一致するグリッド点の値を抽出し、その他は破棄する。

粗いグリッドのブロックやサブグリッドブロック内では、それぞれの空間離散化幅を用いて 2.1 節に示した通常の CIP 法により移流計算を行う。但し、図-3に示すようなそれらの境界部分では、次の処理が必要になる<sup>8)</sup>。以下では+x 方向への移流計算を例として示す。

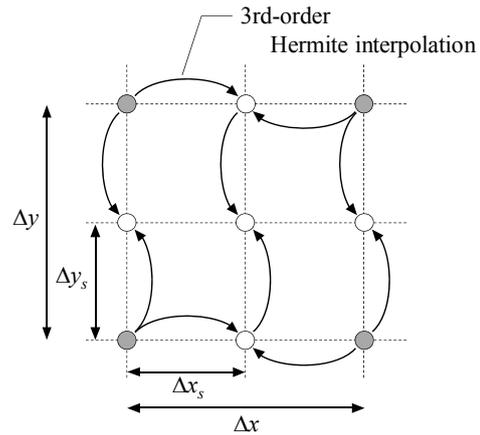


図-2 計算過程におけるサブグリッドの生成

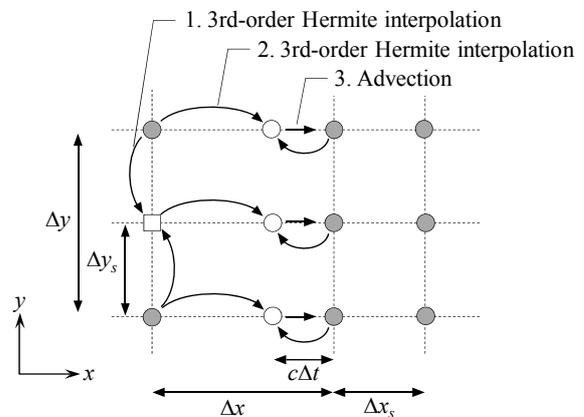


図-3 粗いグリッドとサブグリッドの境界部分における移流計算

1. 図-3中に□で示す点はグリッド点として定義されていないため、サブグリッド領域の端における移流計算に必要な値が不足している。そこで、粗いグリッド点(図中左端のグレーの●印)の値を用いて、□で示す点における  $f_{x+}$ 、 $g_{x+}$ 、 $\eta_{x+}$ 、および  $\mu_{x+}$  を Hermite 補間により補う。
2. 粗いグリッドの空間離散化幅 ( $\Delta x$ 、 $\Delta y$ ) を用いて  $c\Delta t$  上流の点(図中の○印)における値を補間計算により求める。
3. その値を次の時間ステップにおけるサブグリッド領域の端の値として移流させる。

## §3.基礎検討

2次元自由音場を対象として、提案する可変グリッド CIP 法の計算精度および計算効率について基礎検討を行った。

解析条件は次の通りである。粗いグリッドの空間離散化幅は  $\Delta x = \Delta y = 0.09$  m、サブグリッドの空間離散

化幅は $\Delta x_s = \Delta y_s = 0.03$  m ( $N=3$ )、時間ステップ幅は $\Delta t = 0.4 \times 10^{-4}$  s、音速は $c=343.4$  m/s とした。解析対象領域は $21.51 \times 21.51$  m ( $239\Delta x \times 239\Delta y$ )の範囲とし、その領域を $16 \times 16$ の粗いグリッドを含む $15 \times 15$ のブロックに分割した。ブロック内の音圧 $0.02$  Pa以上を、そのブロックをサブグリッドで離散化する条件とした。なお、本報における解析では、計算プログラムの都合上、解析領域端に隣接するブロックはサブグリッドで離散化しないものとした。初期音圧分布として、以下に示す解析領域中央付近を中心とする単位振幅のガウシアン分布を与えた。

$$p(x, y) = \exp\left\{-\frac{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}{2 \cdot 0.2^2}\right\} \quad (7)$$

上式においては、座標原点は解析領域左下に設定し、 $(x_c, y_c) = (119\Delta x, 119\Delta y)$ とした。音圧の空間微分値については、式(7)の微分形から初期分布を与えた。また、比較対象として、解析領域全体を粗いグリッドの離散化幅 $0.09$  m (Coarse グリッド)あるいはサブグリッドの離散化幅 $0.03$  m (Fine グリッド)で離散化した計算を行った。

図-4に、Fine グリッドおよび可変グリッドにより計算された $t=100\Delta t$ ,  $300\Delta t$ ,  $600\Delta t$ における音圧分布を示す。図-4(b)中の□はサブグリッドで離散化されたブロックを示す。可変グリッド手法により、音波の伝搬に追従してサブグリッド領域を動的に設定できていること、可変グリッドによる音圧分布は Fine グリッドによる分布と良く一致していることが確認できる。

図-5に点 $(x_c - 64\Delta x, y_c)$ における音圧波形を示す。図示されているように、Fine グリッドと可変グリッドによる音圧波形はほぼ一致している。一方、Coarse グリッドによる計算では、空間を粗く離散化したことによる数値拡散の影響で波形のピーク値が小さくなっている。この結果は、可変グリッド手法により数値拡散誤差を低減し、解析領域全体を細かく離散化した場合と同程度の精度で計算できていることを意味する。

図-6に Fine グリッド、Coarse グリッド、および可変グリッドによる計算コストを比較する。図には $t=0$  から $1200\Delta t$ までの計算時間と必要メモリ量に比例する空間グリッド数の最大値を、Fine グリッドを基準とした比率で示す。また、可変グリッドについては、複数のブロックサイズについて評価を行った。なお、計算用CPUにはIntel Core i7-920 (2.67 GHz)を用い、計算プログラムは並列化していない。ブロックサイズ、即ち1つのブロックに内包される粗いグリッド数を $16 \times 16$ とした可変グリッドでは、Fine グリッドと比較して、最大グリッド数を約40%、計算時間を約20%に低減できることが確認された。また、ブロックサイ

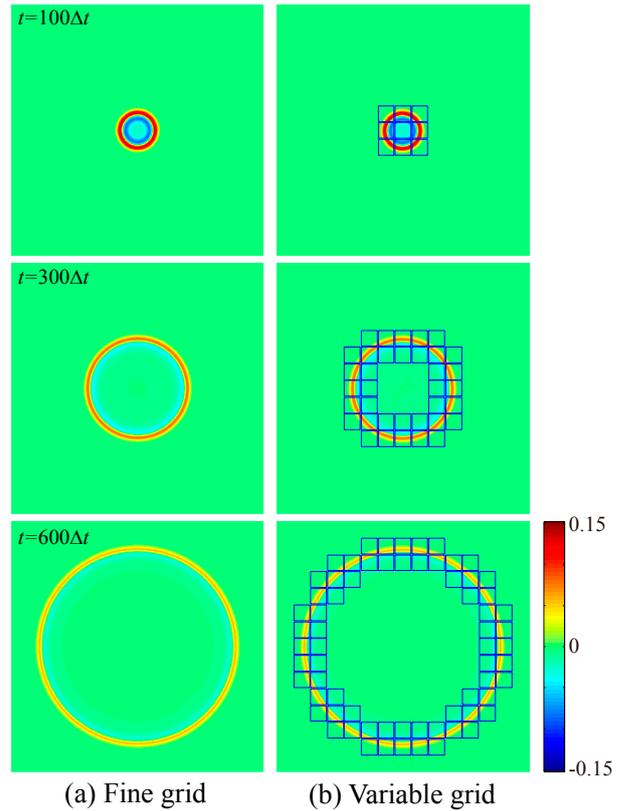


図-4 2次元自由音場の解析結果：音圧分布

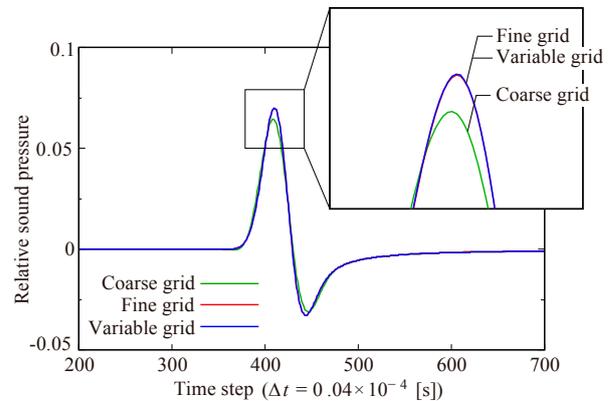


図-5 2次元自由音場の解析結果：音圧波形

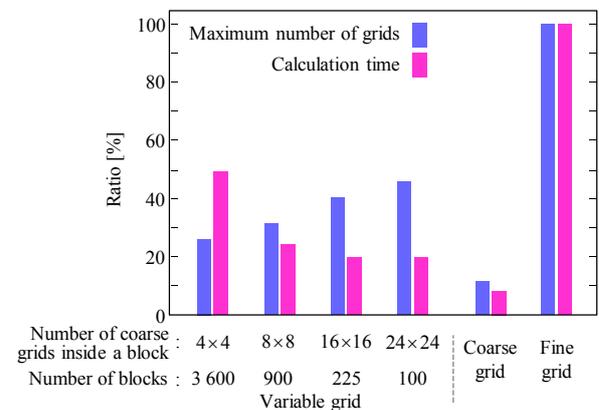


図-6 2次元自由音場解析における計算コストの比較

ズを小さくすると、サブグリッドで離散化する領域を最小限に抑えられ、最大グリッド数が更に低減される。一方で、解析領域を分割するブロック数は増えるため、計算時間は増加する傾向にある。

#### §4.外周境界における吸収境界条件

CIP 法等の空間離散化型解法で屋外音場を解析する場合、解析領域を有限で打ち切る必要があり、外周境界面では本来発生しない反射波が生じ誤差要因となる。CIP 法では、音波を伝搬方向毎の成分に分離して解析を行うため、外周境界面において解析領域内に向かう成分を 0 と置くことで簡単に反射波が低減できる。但し、この方法は音波が外周境界に垂直に入射する場合は有効であるが、斜め入射に対しては反射波を生じる。

CIP 法と同様に空間離散化型解法である FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法では、斜め入射に対しても有効な手法として、PML (Perfectly Matched Layer) 吸収境界<sup>9)</sup>が広く用いられている。ここでは、CIP 法音響解析において PML 吸収境界を実装することとし、必要な定式化と簡単な検証結果を示す。

##### 4.1 PML 吸収境界

PML 吸収境界は、図 - 7 に示すように、解析領域を有限で打ち切る外周境界の内側に配置される。PML 内部では、非 0 の減衰パラメータにより内部を伝搬する音波は減衰し、その結果外周境界で反射して解析領域に向かう反射波が低減される。解析領域に接する PML 表面で減衰パラメータを不連続に変化させると、その境界で反射波が生じる。そのため、減衰パラメータは PML 内部に向けて徐々に増加するように、PML 表面からの距離の関数として以下のように与えられる。

$$R = R_{\max} \left( \frac{d}{L} \right)^m \quad (8)$$

ここで、 $R_{\max}$  は減衰パラメータの最大値、 $L$  は PML の厚さである。 $d$  は PML 表面からの距離であり、図示したように座標で表される。また、減衰パラメータの分布は次数  $m$  により決定される。

##### 4.2 PML 内部における CIP 法音響解析

以下では、 $\pm x$  方向への移流計算を例として、CIP 法による PML 内部の音響解析手法を示す。

式(8)のように、非 0 の減衰パラメータ  $R_x$  が与えられた PML 内部では、式(1')に相当する音響伝搬の支配方程式は下式で与えられる。

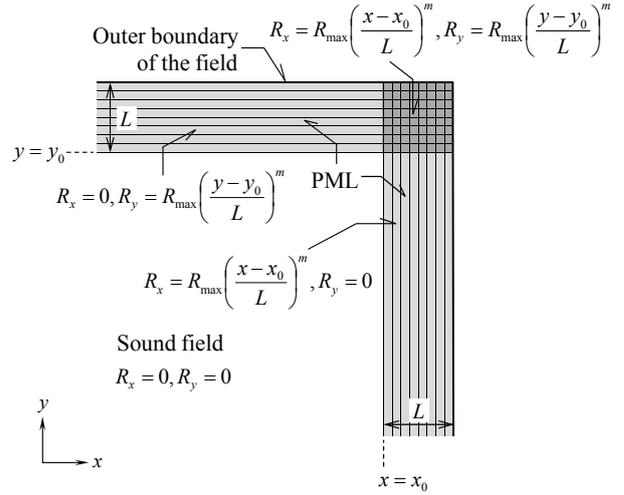


図 - 7 PML 吸収境界条件

$$\begin{aligned} \partial_t p + cZ \partial_x v_x &= -\frac{R_x}{\rho} p, \\ Z \partial_t v_x + c \partial_x p &= -\frac{R_x}{\rho} Z v_x \end{aligned} \quad (9)$$

上式の和と差から、 $r_x = R_x / \rho$  として下式が導かれる。

$$\partial_t f_{x\pm} \pm c \partial_x f_{x\pm} = -r_x f_{x\pm} \quad (10)$$

式(10)は、右辺に減衰を表す非移流項を持ちこのままでは CIP 法を適用できないが、次のように移流相と非移流相を時間分離することで計算可能となる<sup>2)</sup>。

$$\partial_t f_{x\pm} \pm c \partial_x f_{x\pm} = 0 \quad (11)$$

$$\partial_t f_{x\pm} = -r_x f_{x\pm} \quad (12)$$

まず、式(11)の移流相が計算される。式(11)は通常の移流方程式であるので、2.1 節に示した減衰の無い音場における CIP 法を適用して計算を行う。ここでは、時間ステップ  $n$  における移流相の計算結果を中間ステップの値、 $f_{x\pm}^{n*}$ 、 $g_{x\pm}^{n*}$ 、 $\eta_{x\pm}^{n*}$ 、および  $\mu_{x\pm}^{n*}$  とする。

次に、式(12)の非移流相については、その解析解から時間ステップ  $n+1$  における  $f_{x\pm}$  を中間ステップの値を用いて求めることができる。

$$f_{x\pm}^{n+1}(x) = f_{x\pm}^{n*} \exp(-r_x \Delta t) \quad (13)$$

空間微分値に  $g_{x\pm}$  については、式(12)を空間微分した式に差分近似を適用する方法が提案されているが<sup>2,6,10)</sup>、本報では式(13)より解析的に求める手法を提案する。式(13)を  $x$  方向に偏微分すると、

$$g_{x\pm}^{n+1}(x) = \left\{ g_{x\pm}^{n*} - \Delta t (\partial_x r_x) f_{x\pm}^{n*} \right\} \exp(-r_x \Delta t) \quad (14)$$

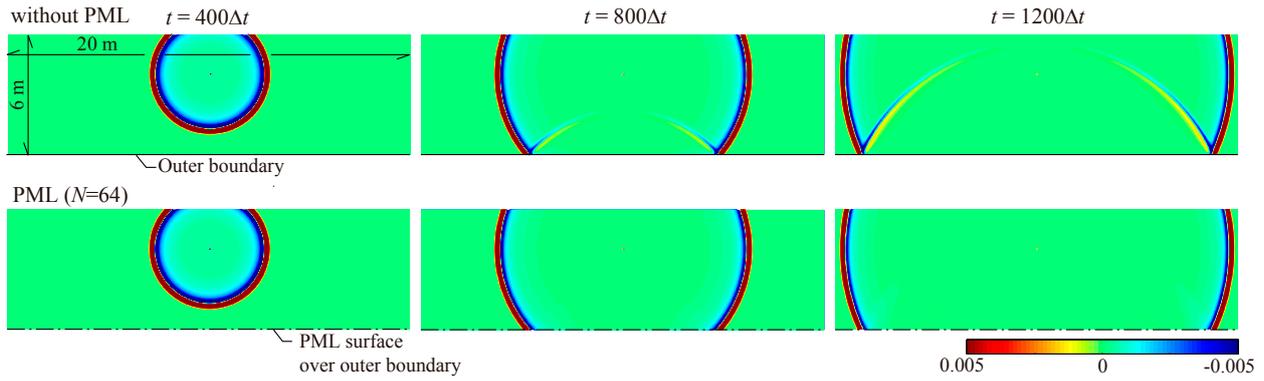


図 - 8 PML 吸収境界の有無による音圧分布の比較

となり、 $f_{x\pm}^{n*}$  および  $g_{x\pm}^{n*}$  から  $g_{x\pm}^{n+1}$  が求まる。ここで、 $r_x$  の微分値  $\partial_x r_x$  は式 (8) より、

$$\partial_x r_x = (\partial_x d) \frac{mR_{\max}}{\rho L} \left( \frac{d}{L} \right)^{m-1} \quad (15)$$

で与えられる。更に式 (13) 及び (14) を  $y$  方向に偏微分すると、直交微分値  $\eta_{x\pm}$  及び  $\mu_{x\pm}$  の解は次式で与えられる。

$$\eta_{x\pm}^{n+1}(x) = \eta_{x\pm}^{n*} \exp(-r_x \Delta t) \quad (16)$$

$$\mu_{x\pm}^{n+1}(x) = \left\{ \mu_{x\pm}^{n*} - \Delta t (\partial_x r_x) \eta_{x\pm}^{n*} \right\} \exp(-r_x \Delta t) \quad (17)$$

以上の提案手法では、時間ステップ  $n+1$  における値、即ち非移流相の計算結果を、移流相の計算結果を用いて比較的簡単な形式で計算することができる。また、PML 内部での  $y$  方向への移流についても上記と同様の手続きで計算できる。

なお、減衰パラメータは外周境界から反射波が解析領域に向かう方向、即ち外周境界に対して直交する方向にのみ設定する。 $x$  方向の反射波が生じる外周境界付近では  $R_x=R$ ,  $R_y=0$  を与え、 $y$  方向の反射波が生じる外周境界付近では  $R_x=0$ ,  $R_y=R$  を与える。また、外周境界の隅角部では  $R_x=R$ ,  $R_y=R$  が与えられる。

#### 4.3 PML 吸収境界の適用例

2次元自由音場を例に、PML 吸収境界の有無による音圧分布の時間発展を比較して図 - 8 に示す。図中において下側の外周境界に 64 層の PML を設定した。なお、上側および左右については、図示した範囲に計算時間内に外周境界の反射波が到達しないように解析領域を広くとっている。解析条件は以下の通りである。空間離散化幅は  $\Delta x = \Delta y = 0.025$  m で固定とし、時間ステップ幅は  $\Delta t = 0.25 \times 10^{-4}$  s、音速は  $c = 340.5$  m/s とした。PML のパラメータは  $R_{\max} = 1.4\rho c$ 、 $m = 1$  とした。音源は、PML 表面から 4 m の位置に点音源を設定した。

PML 吸収境界無しの場合、外周境界に垂直に入射する音波は十分に吸収されているが、斜め入射に対しては反射波が生じ、入射角が大きくなるほど反射波の振幅が大きくなるのが分かる。一方で、PML 吸収境界有りの場合、このような反射波が生じておらず、あらゆる入射方向に対して PML 吸収境界が十分な吸収性能を持つことが確認できる。

#### §5. 可変グリッド CIP 法による屋外音場の波動解析

以上では、基本的な自由音場において基礎検討を行ってきた。ここでは、より実際の屋外音場を対象に可変グリッド CIP 法を適用した音響伝搬解析例を示し、その計算精度および計算効率を検証する。

##### 5.1 解析条件

図 - 9 に示す、建屋の一部を含む工場敷地と盛土地形を挟んだ住宅地域を模式化した 2 次元音場を解析対象とした。解析条件は次のとおりである。時間ステップ幅は  $\Delta t = 0.25 \times 10^{-4}$  s、音速は  $c = 340.5$  m/s、粗いグリッドの空間離散化幅は  $\Delta x = \Delta y = 0.06$  m、サブグリッドの空間離散化幅は  $\Delta x_s = \Delta y_s = 0.02$  m とした。解析対象音場は  $16 \times 16$  の粗いグリッドを含む  $55 \times 22$  のブロックに分割し、ブロック内の音圧 0.0015 Pa 以上を、そのブロックをサブグリッドで離散化する条件とした。建物表面および地表面は完全反射性とした。また、図中に破線で示した外周境界には 64 層の PML 吸収境界 ( $R_{\max} = 1.4\rho c$ 、 $m = 1$ ) を設定した。図示した位置に点音源を設定し、音圧入力波形として下式に示すガウシアンパルスを与えた。

$$p(t) = \exp\left\{-\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (18)$$

where  $\tau = 72\Delta t$ ,  $\sigma = \tau/6\sqrt{2}$

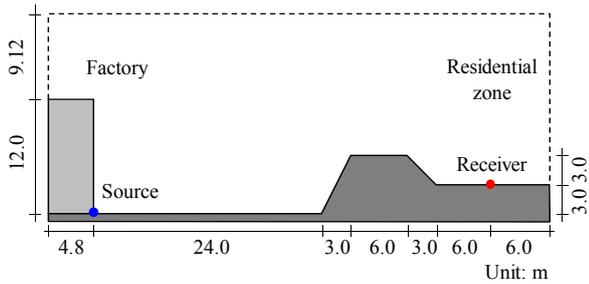


図 - 9 解析対象とした 2次元屋外音場

## 5.2 解析結果

図 - 10 に音圧の空間分布の時間発展を示す。図中の□はサブグリッドで離散化されたブロックを示す。提案手法により、主要な波面の伝搬に追従してサブグリッド領域を動的に設定しながら計算を進めていることが確認できる。

図 - 11 には、図 - 9 に示した点において観測される音圧波形を示す。比較のため、解析領域全体を粗いグリッドの離散化幅 0.06 m (Coarse グリッド) およびサブグリッドの離散化幅 0.02 m (Fine グリッド) で離散化した計算結果を併せて示す。音場全体を粗く離散化した場合、CIP 法の数値拡散誤差の影響により音圧振幅が減衰し、波形が変形している。一方、可変グリッドによる計算結果は、音場全体を詳細に離散化した場合とほぼ一致していることが確認できる。

表 - 1 に、Fine グリッド、Coarse グリッド、および可変グリッドによる、 $t=0$  から  $6000\Delta t$  (190 ms) までの計算時間と空間グリッド数の最大値を比較する。可変グリッドの場合、計算時間、最大グリッド数は共に Fine グリッドと比較して 1/5 程度であることが分かる。

## §6.まとめ

屋外音響伝搬の波動解析を効率化する手法として、可変グリッド CIP 法を提案した。この手法は、解析空間の一部領域を周辺領域より細かく離散化するサブグリッド手法を応用し、音波の伝搬に合わせてサブグリッド領域を動的に設定しつつ解析を行う。また、解析領域を有限で打ち切った外周境界で生じる反射波を低減する手法として、PML 吸収境界を CIP 法音響解析に実装する方法を示した。

提案手法の計算精度および計算効率を検証した結果、可変グリッド CIP 法による解析は、音場全体を詳細に離散化した従来の CIP 法による解析と同程度の計算精度をもちつつ、計算コストの大幅な低減が可能であることが確認された。また、可変グリッド CIP 法にお

表 - 1 2次元屋外音場解析における計算コストの比較

| グリッドタイプ                   | Coarse<br>グリッド | Fine<br>グリッド | 可変<br>グリッド |
|---------------------------|----------------|--------------|------------|
| 計算時間 (s)                  | 431            | 2506         | 568        |
| 最大グリッド数 ( $\times 10^6$ ) | 0.31           | 2.79         | 0.51       |

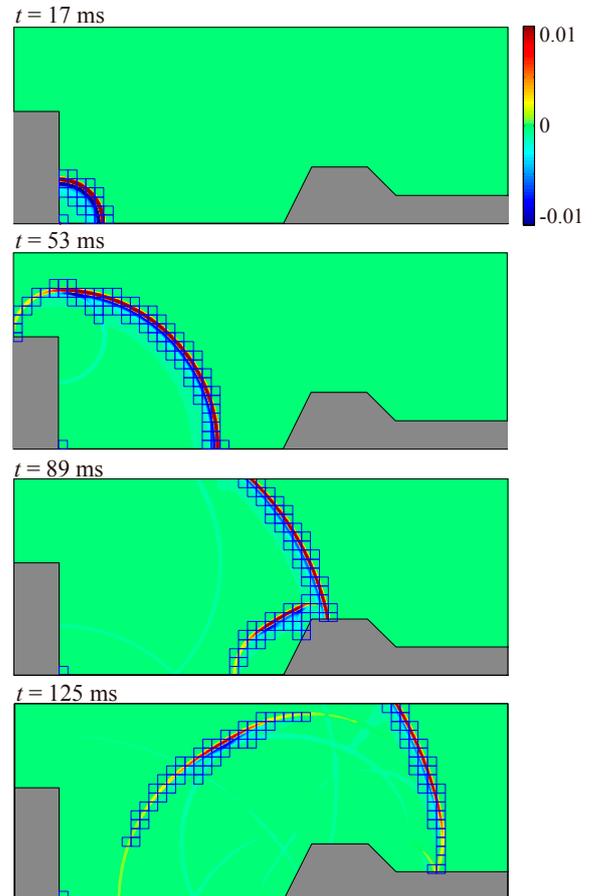


図 - 10 2次元屋外音場の解析結果：音圧分布

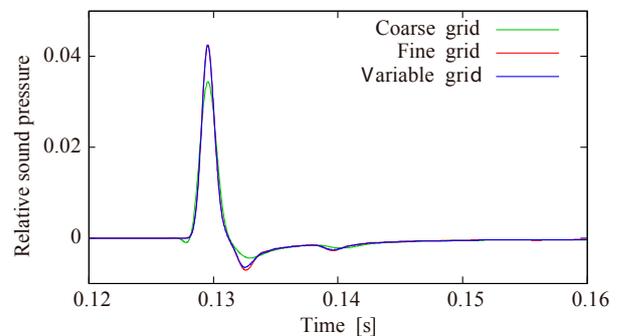


図 - 11 2次元屋外音場の解析結果：音圧波形

いては、解析領域を分割するブロックのサイズにより計算時間と必要メモリ量がトレードオフの関係にあることが明らかになった。ブロックサイズは計算機のスペックを勘案してどちらを優先的に最適化するかによって決定することになる。

なお、本報では、2次元解析を対象に手法の説明と検証を行ったが、提案手法は容易に3次元解析へ拡張可能である。今後、実在街区を対象とした3次元波動音響解析に可変グリッドCIP法を適用し、計算精度および計算効率の検証を行う予定である。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、首都大学東京大久保寛准教授よりご指導、ご助言を頂いた。ここに謝意を表します。

## <参考文献>

- 1) T. Yabe, F. Xiao and T. Utsumi : “Constrained interpolation profile method for multiphase analysis,” J. Comput. Phys., 169, pp. 556–593, 2001.
- 2) 矢部孝, 内海隆行, 尾形陽一, “CIP法”, 森北出版, 2003.
- 3) T. Aoki : “Multi-dimensional advection of CIP (Cubic Interpolated Propagation) scheme,” Comput. Fluid Dynamics J., 4, pp. 279–291, 1995.
- 4) 吳星冠, 大久保寛, 土屋隆生, 竹内伸直 : “C型CIP法を用いた音場解析に関する検討”, 信学技報, US2006-98, pp. 17-22, 2007.
- 5) M. Konno, K. Okubo, T. Tsuchiya and N. Tagawa : “Performance of various types of constrained interpolation profile method for two-dimensional numerical acoustic simulation,” Jpn. J. Appl. Phys., 47, pp. 3962–3963, 2008.
- 6) M. Konno, K. Okubo, T. Tsuchiya and N. Tagawa : “Two-dimensional simulation of nonlinear acoustic wave propagation using constrained interpolation profile method,” Jpn. J. Appl. Phys., 48, 07GN01, 2009.
- 7) Y. Tachioka, Y. Yasuda and T. Sakuma : “Application of the constrained interpolation profile method to room acoustic problems: Examination of boundary modeling and spatial/time discretization,” Acoust. Sci. & Tech., 33, pp. 21–32, 2012.
- 8) Y. Ara, K. Okubo, N. Tagawa, T. Tsuchiya and T. Ishizuka : “Examination of sub-grid technique for simulation of sound wave propagation using constrained interpolation profile method with method of characteristics,” Jpn. J. Appl. Phys., 50, 07HC20, 2011.
- 9) J. P. Berenger : “A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves,” J. Comput. Phys., 114, pp. 185–200, 1994.
- 10) Y. Ando and M. Hayakawa : “Implementation of the perfectly matched layer to the CIP method,” IEICE Trans. Electron., E89-C, pp. 645–648, 2006.