

特別研究報告書

境界積分方程式法による音場の  
数値解析と移動する受音点における  
リアルタイム可聴化について

指導教員      吉川仁 准教授

京都大学工学部情報学科  
数理工学コース  
平成 26 年 4 月入学

石床 竜一

平成 30 年 1 月 26 日提出

## 摘要

本研究では、一つの音源に対し、このモデルを用いて効率的に卒業論文を作成するためのアルゴリズムを開発した。また、このアルゴリズムを用いて、実際に本報告を作成した。その結果、従来の自分で執筆する方法に比べて、5000 兆倍効率的に卒業論文を作成することが可能であることが確認された。

## 目次

1	序論	1
2	時間域境界積分方程式による音場解析	1
2.1	対象とする問題	1
2.2	解の積分表現	2
2.3	時間域境界積分方程式法	2
3	近似手法について	3
3.1	境界積分方程式の近似	3
3.2	境界値の取得	7
3.3	解析的手法と近似手法との比較	8
4	リアルタイム可聴化のにむけたシステム概要	11
4.1	リアルタイム可聴化の定義	11
4.2	開発環境と本論文におけるシステムについて	11
4.3	システムの実用例	14
4.4	システムの問題点	14
	参考文献	15
	付録 A 意味のない付録	15

# 1 序論

近年、道路交通量の増加や都市開発に伴う建設現場での作業音などにより、環境騒音は深刻な社会問題となっている。企業の社会的責任が問われる現代において、周辺に対する環境保全は無視できない重要な課題である。法令でも規制に関する騒音の基準が設けられており、建設においては事前の企画段階における騒音レベルの予測が不可欠となる。そのため、各企業では低騒音化のための様々な試みがなされており、近年のハードウェアの進歩から数値シミュレーションを用いた様々な評価手法が存在する。

その中でも、視覚や聴覚情報を用いて騒音を再現する VR(バーチャル リアリティ) 技術による評価手法が注目されている。本研究では、まず最初に支配方程式を非定常波動方程式とし、境界要素法を用いて領域における境界値を求める。そして本論文では領域の境界値を用いた波動方程式の解析手法である境界積分方程式を用いて領域内での音圧の計算を行った。なお、ここで取り扱う境界値は点音源が発生する音圧から計算することとした。

本論文の構成は次の通りである。まず、第 2 章で 対象とする問題の時間域境界積分方程式による音場解析について述べる。第 3 章では第 2 章で導いた積分表現に適用した近似について述べる。第 4 章では最後に第 4 章で結論を述べる。

## 2 時間域境界積分方程式による音場解析

### 2.1 対象とする問題

ある閉じた三次元領域の外部  $D$  における、位置  $\mathbf{x}$ 、時刻  $t$  での音圧を  $u(\mathbf{x}, t)$  について次の初期値境界値問題を考える。

$$\ddot{u}(\mathbf{x}, t) - c^2 u_{,ii}(\mathbf{x}, t) = 0, \quad \mathbf{x} \in D, \quad t > 0 \quad (1)$$

$$u(\mathbf{x}, 0) = 0, \quad \mathbf{x} \in D \quad (2)$$

$$\dot{u}(\mathbf{x}, 0) = 0, \quad \mathbf{x} \in D \quad (3)$$

$$u(\mathbf{x}, t) = \bar{u}(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} \text{ on } S_D, \quad t > 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t) = \bar{q}(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} \text{ on } S_N, \quad t > 0 \quad (5)$$

$$u(\mathbf{x}, t) = \bar{q}(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} \text{ on } S_N, \quad t > 0 \quad (6)$$

ここに  $(\cdot)_{,i}$  は  $\frac{\partial}{\partial x_i}$ ,  $(\dot{\cdot})$  は  $\frac{\partial}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial}{\partial n}$  は法線微分で  $n_i(\mathbf{x}) \frac{\partial}{\partial x_i}$ ,  $n(\mathbf{x})$  は境界上の点  $x$  における領域の外向き単位法線ベクトル,  $S$  は領域  $D$  の境界で  $S = S_D \cup S_N$ ,  $c$  は波速である。

## 2.2 解の積分表現

初期値境界値問題の解は、三次元波動方程式の基本解

$$\Gamma(\mathbf{x}, t) = \frac{\delta(t - \frac{|\mathbf{x}|}{c})}{4\pi|\mathbf{x}|} \quad (7)$$

を用いて

$$u(\mathbf{x}, t) = u^{\text{in}}(\mathbf{x}, t) + \int_S \int_0^t \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{y}, s) - \int_S \int_0^t \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) \bar{u}(\mathbf{y}, s) ds dS \quad (8)$$

と表すことができる。ここに  $\delta(\mathbf{x})$  は Dirac のデルタ関数である。

境界条件 (式 (4)、(5)) より、 $S_0$  上の  $u(\mathbf{x}, t)$  と  $S_N$  上の  $\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t)$  は与えられているが、 $S_N$  上の  $u(\mathbf{x}, t)$ 、 $S_0$  上の  $\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t)$  は未知である。これらの境界量を求めるために、 $\mathbf{x} \in D$  を境界  $S$  に極限移行し、次の境界積分方程式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}u(\mathbf{x}, t) &= u^{\text{in}}(\mathbf{x}, t) + \int_S \int_0^t \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{y}, s) ds dS \\ &\quad - \int_S \int_0^t \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) u(\mathbf{y}, s) ds dS, \quad \mathbf{x} \in S, t > 0 \end{aligned} \quad (9)$$

まず、式 (8) を  $u(\mathbf{x}, t)$ ,  $\mathbf{x} \in S_N$ 、 $\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t)$ ,  $\mathbf{x} \in S_0$  について解く。

次に、得られた境界量を用いて式 (7) により領域  $D$  の内点での解  $u(\mathbf{x}, t)$  を得る。

## 2.3 時間域境界積分方程式法

この節では選点法による境界要素法の数値解法について述べます。境界積分方程式 (??) を数値的に解くために、境界  $S$  を境界要素  $S_j, j = 1, \dots, N$  に分割し、さらに境界量  $u(\mathbf{x}, t)$ ,  $\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t)$  を空間内挿関数  $M_S^j(\mathbf{x})$  と時間内挿関数  $M_T^m(t)$  を用いて離散化します。

$$u(\mathbf{x}, t) \simeq \sum_{m=1}^{N_T} \sum_{j=1}^N u(\mathbf{x}^j, m\Delta t) M_S^j(\mathbf{x}) M_T^m(t), \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t) \simeq \sum_{m=1}^{N_T} \sum_{j=1}^N \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}^j, m\Delta t) M_S^j(\mathbf{x}) M_T^m(t), \quad (11)$$

ここに、点  $\mathbf{x}^j$  は境界要素  $S_j$  の代表点で、 $\Delta t$  は時間増分、 $N_T$  は時間ステップ数です。このとき、ある時刻  $t = n\Delta t$ ,  $n = 1, \dots, N_T$  における離散化された境界積分方程式は次式で

得られます。

$$-\mathbf{u}_n^{\text{in}} = \sum_{m=1}^n \mathbf{U}_{n-m+1} \mathbf{q}_m - \sum_{m=1}^n \mathbf{W}_{n-m+1} \mathbf{u}_m, \quad (12)$$

$$\{\mathbf{u}_n^{\text{in}}\}_i := u^{\text{in}}(\mathbf{x}^i, n\Delta t), \quad (13)$$

$$\{\mathbf{u}_m\}_i := u(\mathbf{x}^i, m\Delta t), \quad (14)$$

$$\{\mathbf{q}_m\}_i := \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}^i, m\Delta t), \quad (15)$$

$$\{\mathbf{U}_{n-m+1}\}_{ij} := \int_S \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(\mathbf{x}^i - \mathbf{y}, n\Delta t - s) M_S^j(\mathbf{y}) M_T^m(s) ds dS, \quad (16)$$

$$\{\mathbf{W}_{n-m+1}\}_{ij} := \int_S \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial \Gamma}{\partial n_y}(\mathbf{x}^i - \mathbf{y}, n\Delta t - s) M_S^j(\mathbf{y}) M_T^m(s) ds dS. \quad (17)$$

この代数方程式を各時間ステップにおいて逐次的に解いていきます。

式 (1.22) を解き、境界量  $\mathbf{u}_m, \mathbf{q}_m, m = 1, \dots, N_T$  が得られたならば、領域  $D$  内の任意の点  $\mathbf{x}$  での時刻  $n\Delta t$  での値が次式で得られる。

$$\begin{aligned} u(\mathbf{x}, n\Delta t) &= u^{\text{in}}(\mathbf{x}, n\Delta t) \\ &+ \sum_{m=1}^n \sum_{j=1}^N \left\{ \int_S \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, n\Delta t - s) M_S^j(\mathbf{y}) M_T^m(s) ds dS \right\} \{\mathbf{q}_m\}_j \\ &- \sum_{m=1}^n \sum_{j=1}^N \left\{ \int_S \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, n\Delta t - s) M_S^j(\mathbf{y}) M_T^m(s) ds dS \right\} \{\mathbf{u}_m\}_j \end{aligned} \quad (18)$$

### 3 近似手法について

#### 3.1 境界積分方程式の近似

本研究では、受音点の各時刻での数値を境界積分方程式法を用いてリアルタイムに計算するが、決められた時間内に特定の処理を終えなければならない制約ができる。そのため式 (8) を近似することを考える。

まず式 (8) 第一項は基本解を代入して

$$\iint \frac{\delta(t - s - \frac{|x - y|}{c})}{4\pi|x - y|} \frac{\partial u}{\partial n}(y, s) ds dS = \iint \frac{\delta(t - s - \frac{|x - y|}{c})}{4\pi|x - y|} \bar{q}(y, s) ds dS \quad (19)$$

$$= \int \frac{1}{4\pi|x - y|} \bar{q}(y, t - \frac{|x - y|}{c}) dS \quad (20)$$

となる. ここで, 境界の面積分についての用いる. 境界面を三角形で分割し, その各面要素を  $S_j$  とし, その面積を  $S_j$  とする. 面積分における各面積要素の積分値のために要する値が全て重心での値と等しいとし, 面積の大きさ  $S_j$  との積をとることでその面積要素の積分値の近似とする. この近似を用いるとき重心の値を  $()^g$  と表記すれば,

$$\begin{aligned} \int \frac{1}{4\pi|x-y|} \bar{q}(y, t - \frac{|x-y|}{c}) dS &= \sum_j \int \frac{1}{4\pi|x-y_j|} \bar{q}(y_j, t - \frac{|x-y_j|}{c}) dS_j \\ &= \sum_j \frac{1}{4\pi|x-y_j^g|} \bar{q}(y_j^g, t - \frac{|x-y_j^g|}{c}) S_j \end{aligned} \quad (21)$$

次に, 式 (8) 第二項に基本解を代入したものを考える.

$$\begin{aligned} \iint \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{\delta(t-s-\frac{|x-y|}{c})}{4\pi|x-y|} \right) \bar{u}(y, s) ds dS &= \iint \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{\delta(t-s-\frac{|x-y|}{c})}{4\pi|x-y|} \right) \bar{u}(y, s) ds dS \\ &= \iint -n_i \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\delta(t-s-\frac{|x-y|}{c})}{4\pi|x-y|} \right) \bar{u}(y, s) ds dS \end{aligned} \quad (22)$$

式 (8) 第一項と同様に三角形に境界面を分割すれば,

$$\sum_j -n_i \frac{\partial}{\partial x_i} \iint \left( \frac{\delta(t-s-\frac{|x-y_j|}{c})}{4\pi|x-y_j|} \right) \bar{u}(y_j, s) ds dS_j \quad (23)$$

ここで, 時刻  $t$  を時間ステップ  $n$  と時間刻み幅  $\Delta t$  を用いて  $t = n\Delta t$  とする. ここで, 境界量  $\bar{u}(\mathbf{x}, t)$  の近似のため, 区分一定の空間内挿関  $M^m(t)$  を次のように定義する.

$$M^m(t) = \begin{cases} \frac{t}{\Delta t} - m + 1, & (m-1)\Delta t \leq t \leq m\Delta t \\ \frac{-t}{\Delta t} + m + 1, & m\Delta t \leq t \leq (m+1)\Delta t \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (24)$$

これを用いると上式は

$$\sum_j \sum_m -n_i \frac{\partial}{\partial x_i} \iint_{(m-1)\Delta t}^{(m+1)\Delta t} \left( \frac{\delta(n\Delta t - s - \frac{|x-y_j|}{c})}{4\pi|x-y_j|} \right) \bar{u}(y_j, m\Delta t) M^m(s) ds dS_j \quad (25)$$

ここで  $n\Delta t - s = \tau$  とすれば,

$$\begin{aligned} & \sum_j \sum_m -n_i \frac{\partial}{\partial x_i} \iint_{(n-m-1)\Delta t}^{(n-m+1)\Delta t} \left( \frac{\delta(\tau - \frac{|x-y_j|}{c})}{4\pi|x-y_j|} \right) \bar{u}(y_j, m\Delta t) M^m(n\Delta t - \tau) d\tau dS_j \\ &= \sum_j \sum_m -n_i \frac{\partial}{\partial x_i} \iint_{(n-m-1)\Delta t}^{(n-m+1)\Delta t} \left( \frac{\delta(\tau - \frac{|x-y_j|}{c})}{4\pi|x-y_j|} \right) \bar{u}(y_j, m\Delta t) M^{n-m}(\tau) d\tau dS_j \quad (26) \end{aligned}$$

となる. ここで,  $N^m(t)$  を次のように定義する.

$$N^m(t) = \begin{cases} -\frac{t}{\Delta t} + m, & 0 \leq t \leq m\Delta t \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (27)$$

$N^m(t)$  を用いて式 (26) を書き換えると,

$$\begin{aligned} & \sum_j \sum_m -n_i \frac{\partial}{\partial x_i} \iint_0^{(n-m+1)\Delta t} \left( \frac{\delta(\tau - \frac{|x-y_j|}{c})}{4\pi|x-y_j|} \right) \bar{u}(y_j, m\Delta t) N^{n-m+1}(\tau) d\tau dS_j \\ &+ 2n_i \frac{\partial}{\partial x_i} \iint_0^{(n-m)\Delta t} \left( \frac{\delta(\tau - \frac{|x-y_j|}{c})}{4\pi|x-y_j|} \right) \bar{u}(y_j, m\Delta t) N^{n-m}(\tau) d\tau dS_j \\ &- n_i \frac{\partial}{\partial x_i} \iint_0^{(n-m-1)\Delta t} \left( \frac{\delta(\tau - \frac{|x-y_j|}{c})}{4\pi|x-y_j|} \right) \bar{u}(y_j, m\Delta t) N^{n-m-1}(\tau) d\tau dS_j \\ &= \sum_j \sum_m -n_i \frac{\partial}{\partial x_i} \int \frac{((n-m+1)\Delta t - \frac{|x-y_j|}{c})H((n-m+1)\Delta t - \frac{|x-y_j|}{c})}{4\pi|x-y_j|\Delta t} \bar{u}(y_j, m\Delta t) dS_j \\ &+ 2n_i \frac{\partial}{\partial x_i} \int \frac{((n-m)\Delta t - \frac{|x-y_j|}{c})H((n-m)\Delta t - \frac{|x-y_j|}{c})}{4\pi|x-y_j|\Delta t} \bar{u}(y_j, m\Delta t) dS_j \\ &- n_i \frac{\partial}{\partial x_i} \int \frac{((n-m-1)\Delta t - \frac{|x-y_j|}{c})H((n-m-1)\Delta t - \frac{|x-y_j|}{c})}{4\pi|x-y_j|\Delta t} \bar{u}(y_j, m\Delta t) dS_j \quad (28) \end{aligned}$$

ここに,  $H(x)$  は Heaviside の階段関数である. 式 (28) に対して, 第一項に行ったように重心



の値を代表値として近似を用いれば,

$$\begin{aligned}
& \sum_j \sum_m -n_i \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{((n-m+1)\Delta t - \frac{|x-y_j^g|}{c})H((n-m+1)\Delta t - \frac{|x-y_j^g|}{c})}{4\pi|x-y_j^g|\Delta t} \bar{u}(y_j^g, m\Delta t) S_j \right) \\
& + 2n_i \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{((n-m)\Delta t - \frac{|x-y_j^g|}{c})H((n-m)\Delta t - \frac{|x-y_j^g|}{c})}{4\pi|x-y_j^g|\Delta t} \bar{u}(y_j^g, m\Delta t) S_j \right) \\
& - n_i \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{((n-m-1)\Delta t - \frac{|x-y_j^g|}{c})H((n-m-1)\Delta t - \frac{|x-y_j^g|}{c})}{4\pi|x-y_j^g|\Delta t} \bar{u}(y_j^g, m\Delta t) S_j \right) \\
& = \sum_j \sum_m \frac{n_i(\mathbf{x}_i - y_i^g)}{4\pi\Delta t|x-y_j^g|^3} \bar{u}(y_j^g, m\Delta t) (T^+ H(T^+) - 2TH(T) + T^- H(T^-)) S_j
\end{aligned} \tag{29}$$

となる. ただし  $T^+ = (n-m+1)\Delta t$ ,  $T = (n-m)\Delta t$ ,  $T^- = (n-m-1)\Delta t$  である.  $m$  についての値を陽に表記すると式 (29) は

$$\begin{cases} \sum_j \sum_m \frac{n_i(\mathbf{x}_i - y_i^g)}{4\pi\Delta t|x-y_j^g|^3} \bar{u}(y_j^g, m\Delta t) (n-m+1)\Delta t S_j, & \frac{r}{c} < (n-m+1)\Delta t < \frac{r}{c} + \Delta t \\ \sum_j \sum_m \frac{n_i(\mathbf{x}_i - y_i^g)}{4\pi\Delta t|x-y_j^g|^3} \bar{u}(y_j^g, m\Delta t) (m-n+1)\Delta t S_j, & \frac{r}{c} + \Delta t < (n-m+1)\Delta t < \frac{r}{c} + 2\Delta t \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{30}$$

となり, 式 (30) の上段, 中段の不等式を満たす  $m$  をそれぞれ  $m_1, m_2$  とすれば, 式 (8) 第二項は

$$\sum_j \frac{n_i(\mathbf{x}_i - y_i^g)}{4\pi|x-y_j^g|^3} S_j \{ \bar{u}(y_j^g, m_1\Delta t) (n-m_1+1) - 2\bar{u}(y_j^g, m_2\Delta t) (m_2-n+1) \} \tag{31}$$

となる.

以上の結果をまとめると, 式 (8) は

$$\begin{aligned}
 u(\boldsymbol{x}, t) = & \sum_j \frac{1}{4\pi|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{y}_j^g|} \bar{q}(\boldsymbol{y}_j^g, t - \frac{|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{y}_j^g|}{c}) \\
 & + \frac{n_i(\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{y}_i^g)}{4\pi|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{y}_j^g|^3} S_j \{ -\bar{u}(\boldsymbol{y}_j^g, m_1\Delta t)(n - m_1 + 1) + 2\bar{u}(\boldsymbol{y}_j^g, m_2\Delta t)(m_2 - n + 1) \}
 \end{aligned} \tag{32}$$

となる. 以降この式を用いて, 境界内の各時間ステップ毎の音圧を数値計算した.

### 3.2 境界値の取得

境界積分方程式には境界条件が必要であるが, 本論文では以下のように与えた. 以下数値の単位はメートル [m] とする. 図 1 のように, 中心  $(0.25, 0.25, 0.25)$ ,  $x, y, z$  軸に各面が平行である仮想的な壁を考えた. つぎに, 壁の内部に音源が存在するものとし, その音源 (source) の位置  $\boldsymbol{x}^s$  と音源の発生させる音圧  $f(t)$  を以下のようにする.

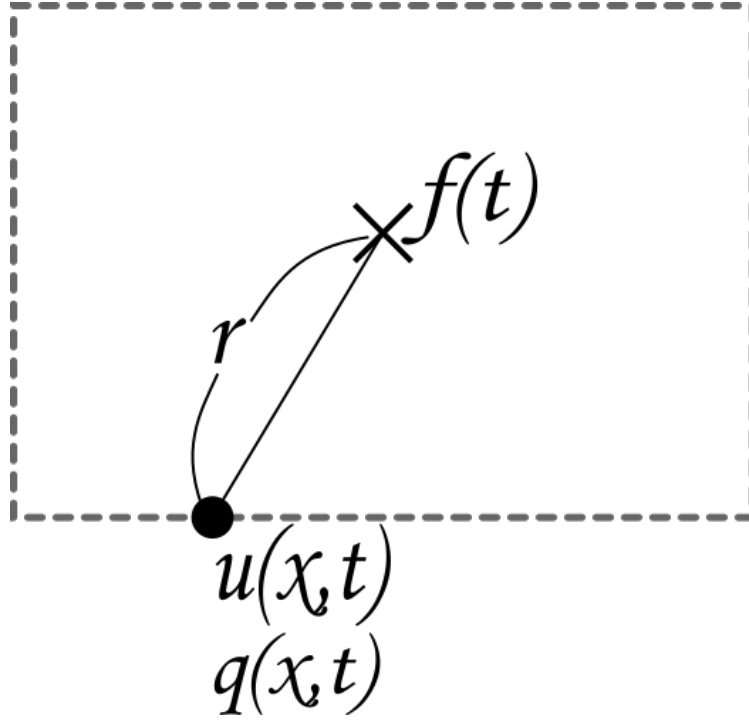


図 1 仮想的な壁と音源  $f(t)$

$$\mathbf{x}^s = (0.25, 0.25, 0.25) \quad (33)$$

$$f(t) = 1 - \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}t\right) \quad (34)$$

ここに,  $\lambda = 1.25 \times 10^{-3}[\text{m}]$  である. また, 境界  $S$  について, 第 3.1 節で行った三角形分割を行い, その三角形の重心を代表点とすれば, 各三角形面  $S_j$  での境界値は次のように与えることができる.

$$\bar{u}(\mathbf{x}_j, t) = \frac{1 - \cos\frac{2\pi}{\lambda}\left(t - \frac{r}{c}\right)}{4\pi|\mathbf{x}_j^g - \mathbf{x}^s|} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \bar{q}(\mathbf{x}_j, t) &= \frac{\partial \bar{u}}{\partial n} \\ &= \frac{-1}{4\pi|\mathbf{x}_j^g - \mathbf{x}^s|^2} ((\mathbf{x}_j)_i - x_i^s) n_i \left\{ \frac{1 - \cos\frac{2\pi}{\lambda}\left(t - \frac{r}{c}\right)}{r} + \frac{2\pi}{\lambda c} \sin\frac{2\pi}{\lambda}\left(t - \frac{r}{c}\right) \right\} \end{aligned} \quad (36)$$

これを次節の境界値  $\bar{u}(\mathbf{x}, t), \bar{q}(\mathbf{x}, t)$  とした.

### 3.3 解析的手法と近似手法との比較

第 2 章で行った近似を用い, 領域内での受音点での数値計算結果をここで述べる. まず, 入力として与えた  $f(t)$  を図 2 に図示する

ここに, x 軸は時刻  $t = n\Delta t$  としたときの  $n$  を表し, y 軸は時刻  $f(n\Delta t)$  の音圧を表す.

$f(t)$  と第 3.2 節で解析的に求めた境界値を用い, 領域内点で, 受音点が観測する音圧を計算させた. その結果と, 音源からの距離減衰と距離遅延を加味した, 次に解析的に定義される波形  $u_{ans}(\mathbf{x}, t)$  と比較する.

$$u_{ans}(\mathbf{x}, t) = \frac{f\left(t - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}^s|}{c}\right)}{4\pi|\mathbf{x} - \mathbf{x}^s|} \quad (37)$$

以下は図 3 は  $u_{ans}(\mathbf{x}, t)$ , 図 4 は近似手法によるものであり図 5 は図 3 と図 4 を重ね合わせたものである., 観測点はともに  $\mathbf{x}^s = (-0.5, 0.5, 0.5)$  である.

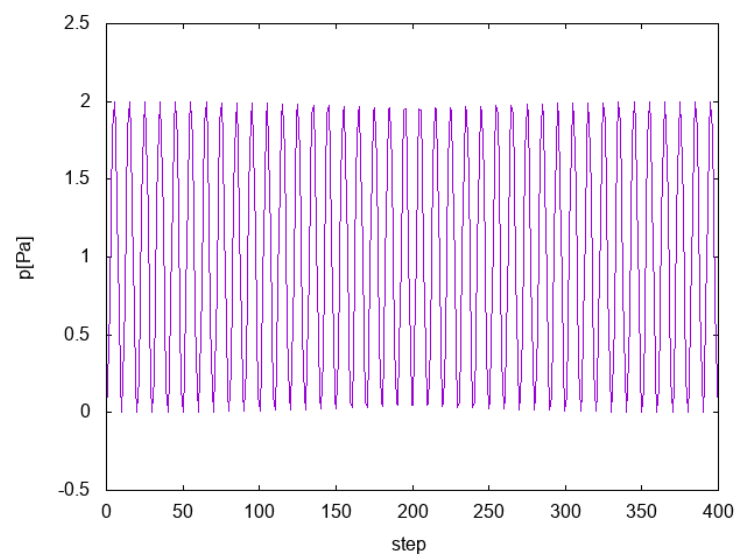


图 2 音源  $f(t)$

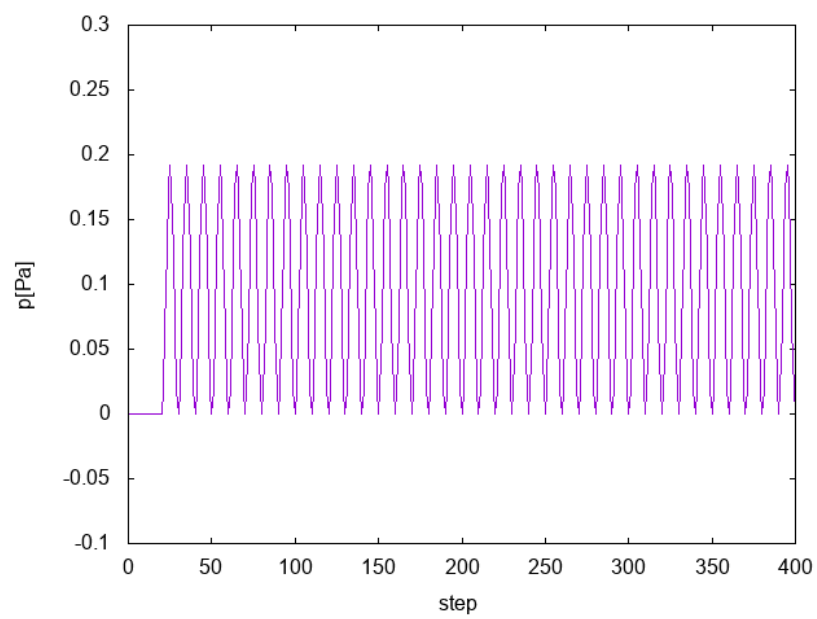


图 3  $u_{ans}(t)$

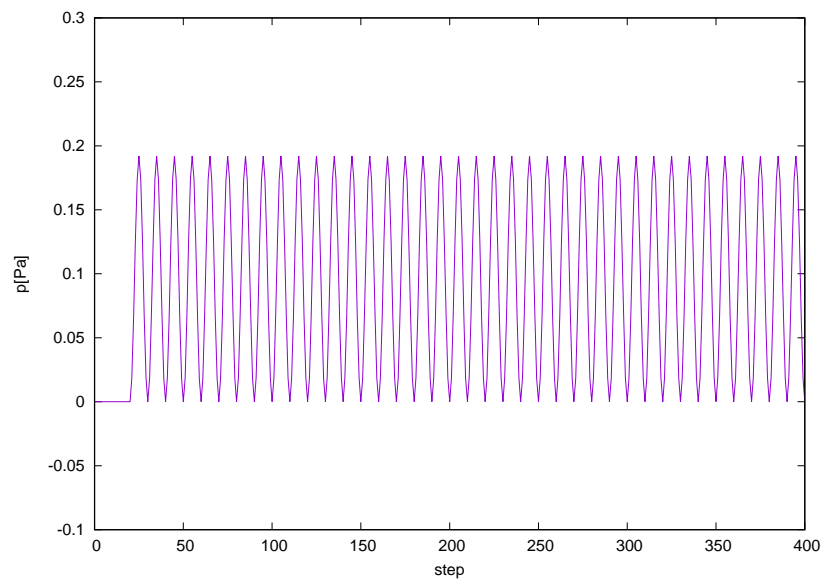


図 4 内点計算による  $u(x, t)$

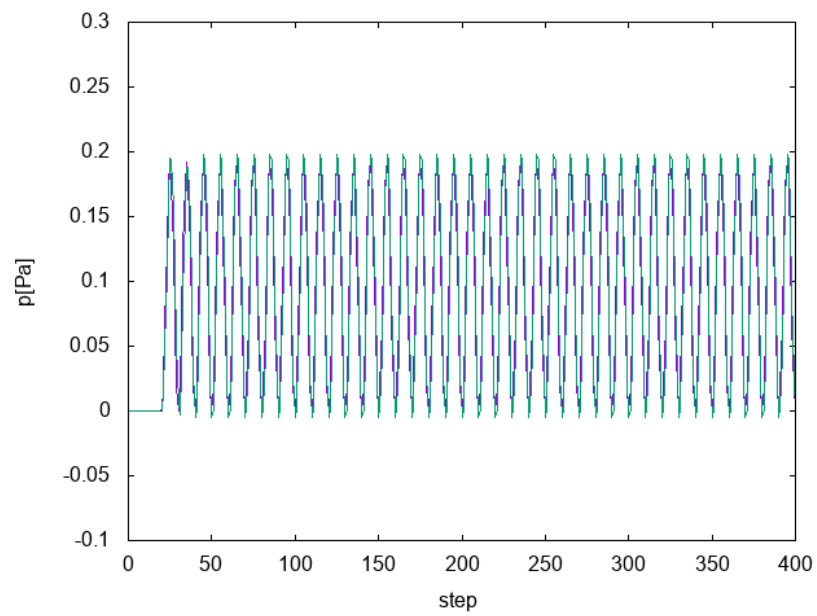


図 5 図 3 と図 4 を重ねたもの

さらに, 数値的な比較をいかに行う. ここでの評価基準は 2 ノルムで, 2 ノルムは

$$\sum_m \frac{\{u_{ans}(\mathbf{x}, m\Delta t) - u(\mathbf{x}, m\Delta t)\}^2}{\{u_{ans}(\mathbf{x}, m\Delta t)\}^2} \quad (38)$$

である. この評価を用いた場合, 計算結果は  $2.4 \times 10^{-3}$  となった. ここに, 総ステップ数は  $f_s = 8000$  つまり 1 秒分のデータである.

## 4 リアルタイム可聴化のにむけたシステム概要

### 4.1 リアルタイム可聴化の定義

第 2.1 節で定式化した問題を第 3.1 節で示した近似を用いて計算するが, ここでリアルタイムの定義について記す. 実用上のリアルタイムとは実時間的, 即時的という言葉である. 音の場合, サンプリングレートを  $f_s[\text{Hz}]$  とすれば, 1 秒間を  $f_s$  個のデータで構成することになる. 本論文では,  $1/f_s$  秒毎に内点計算を行うことで, 時刻  $t$  に対し  $tf_s$  個の計算を終了させることをリアルタイム計算とし, 作成したデータから即時的にデータから音へ変換することで, 可聴化することをリアルタイム可聴化と定義する.

### 4.2 開発環境と本論文におけるシステムについて

リアルタイム可聴化に向け, 移動する受音点の状況確認の補助のために音源, 受音点, 壁を可視化した. 可視化には 'Unity Version 2017 .3.0f3 Personal' を用いた. 三次元空間上の受音点は図 6 のように三次元空間上を移動できる. 音源は点音源であり, 直接波と壁による反射波が受音点の移動によって変化する様を描画した.

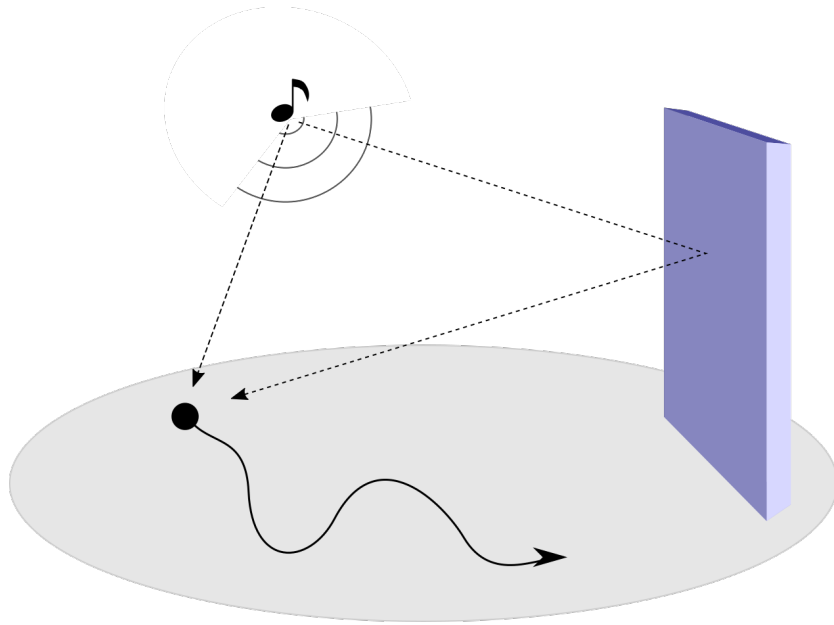


図 6 三次元空間を移動する受音点の様子

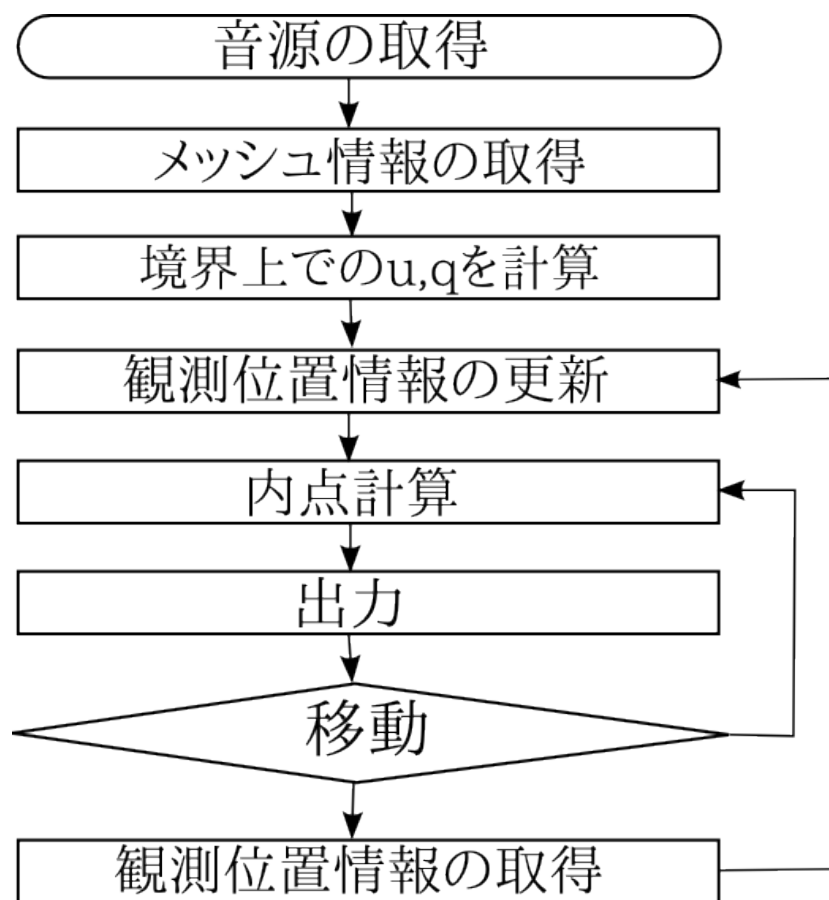


図7 フローチャート

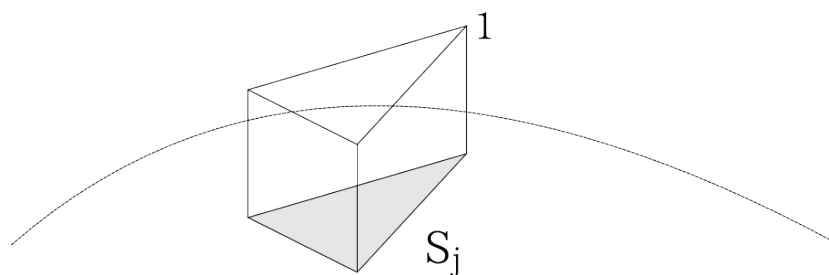


図8 内挿関数  $N$

unity の画像とあわせてを作成フローチャート序論この研究をやります。研究背景、適用  
 こんなことやりまして、結果を乗せるりあるたいむかちょうかにちかづいた  
 結論リアルタイムにどれだけ近づきました



#### 4.3 システムの実用例

ホワイトボードの移動した奇跡と移動した結果の波形の画像をはっつける

#### 4.4 システムの問題点

## 謝辞

本研究に取り組むにあたって助言をいただいた吉川仁准教授, 計算幾科学コース新田泰大氏に深く感謝する.

## 参考文献

- [1] 目黒公郎, et al. バーチャルリアリティの避難行動シミュレータへの応用. 土木学会論文集, 1997, 556: 197-207.
- [2] 藤江正克, et al. バーチャルリアリティを活用した歩行訓練機器. BME, 1998, 12.8: 29-37.
- [3] 田近伸二; 樫山和男; 志村正幸. VR 技術を用いた対話型道路交通騒音評価システムの構築. 応用力学論文集, 土木学会, 2010, 13: 231-240.

## 付録 A 意味のない付録

これは意味のない付録です. これは意味のない引用です [?].

表 1 これは意味のない表です.

	A	B
C	70	80
D	100	0

※線に沿って切り取って下さい。

特別研究報告書

境界積分方程式法による音場の  
数値解析と移動する受音点における  
リアルタイム可聴化について

指導教員 吉川仁 准教授

京都大学工学部情報学科  
数理工学コース  
平成 26 年 4 月入学

石床 竜一

平成 30 年 1 月 26 日提出

境界積分方程式法による音場の数値解析と移動する受音点におけるリアルタイム可聴化について

石床 竜一

平成29年度

# 境界積分方程式法による音場の 数値解析と移動する受音点における リアルタイム可聴化について

石床 竜一

## 摘要

本研究では、一つの音源に対し、このモデルを用いて効率的に卒業論文を作成するためのアルゴリズムを開発した。また、このアルゴリズムを用いて、実際に本報告を作成した。その結果、従来の自分で執筆する方法に比べて、5000 兆倍効率的に卒業論文を作成することが可能であることが確認された。