

伝送系データベースの構築に関する研究

－床衝撃音と室内吸音について－

関西大学 環境都市工学部 建築学科
建築環境工学第 I 研究室
建 22-0032 坂本 夏音
指導教員 豊田 政弘

目次

1. 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	1
2. 床衝撃音.....	2
2.1 FDTD 法の概要.....	2
2.2 S-FDTD 法.....	3
2.3 計算に使用する衝撃源.....	10
2.4 研究方法.....	11
2.5 研究対象と結果.....	11
2.5.1 基準室.....	11
2.5.2 梁せい 200mm.....	20
2.5.3 梁せい 400mm	22
2.5.4 梁せい 600mm.....	24
2.5.5 梁せい 800mm.....	26
2.5.6 木材.....	28
2.6 考察.....	30
3. 室内吸音.....	33
3.1 虚像法の考え方.....	33
3.2 計算に使用する室.....	34
3.3 研究方法.....	35
3.4 研究対象と結果.....	35
3.4.1 基準の音源.....	35
3.4.2 ワンルーム 吸音率 0.1.....	36
3.4.3 ワンルーム 吸音率 0.3.....	36
3.4.4 ワンルーム 吸音率 0.5.....	37
3.4.5 ワンルーム 吸音率 0.7.....	37
3.4.6 ワンルーム 吸音率 0.9.....	38
3.4.7 教室 吸音率 0.1.....	38
3.4.8 教室 吸音率 0.3.....	39
3.4.9 教室 吸音率 0.5.....	39
3.4.10 教室 吸音率 0.7.....	40
3.4.11 教室 吸音率 0.9.....	40
3.4.12 ホール 吸音率 0.1.....	41
3.4.13 ホール 吸音率 0.3.....	41

3.4.14 ホール 吸音率 0.5.....	42
3.4.15 ホール 吸音率 0.7.....	42
3.4.16 ホール 吸音率 0.9.....	43
3.4.17 スタジアム 吸音率 0.1.....	43
3.4.18 スタジアム 吸音率 0.3.....	44
3.4.19 スタジアム 吸音率 0.5.....	44
3.4.20 スタジアム 吸音率 0.7.....	45
3.4.21 スタジアム 吸音率 0.9.....	45
3.5 考察.....	46
4. 結論.....	47
参考文献	49

1. 序論

1.1 研究背景

建築空間において、床や壁の衝撃音はその空間の快適性と切り離すことはできない事象である。例として、人が歩く音や物が落ちる音、人や物が壁にぶつかる音などが挙げられ、日常生活では特に意識されていないけれども、実は数多くの音が発生している。また、発生する音が大きすぎる場合には、隣人とのトラブルに発展してしまう原因にもなりうる。

現在、遮音性能に関しては、建築空間の設計者が数値的に理解しやすい指標が多く提案されているが、一方で、具体的な音の大きさ（ラウドネス）を想像できるような指標は多くない。前者の例としては、扉や窓などのサッシの遮音性能を表す遮音等級（T 等級）や、床衝撃音を評価する指標として床衝撃音レベル等級（Lr 等級）などが挙げられ、出来上がった空間で音が何 dB 減衰するか、もしくは、聞こえる音が何 dB 程度かを示すことが多い。そのため、床や壁の仕様の変更に対し、ラウドネスがどのように変化するかを表す指標がなく、その変更で十分に音が小さく感じるかどうかを直感的に把握できていない設計者も存在するであろう。そこで本研究では、奥平[1]によって行われた床衝撃音に関する研究を引き継ぎつつ、新たな検討対象として室内吸音に着目する。具体的には、室内の大きさや吸音特性の違いが音の感じ方に与える影響について検討を行い、床衝撃音の検討に加えて室内音環境全体を考慮した音データの予測および収集を行う。これにより、実務経験の少ない設計者や音に詳しくない人であっても、床材や床仕様、さらには室内の仕上げ計画を検討する際に、音の大きさや響きを想像しながら設計ができるような情報を提供したいと考え、本研究に取り組むこととした。

1.2 研究目的

床衝撃音については「VA-FDTD」[2]というソフトウェアを使用することで、ある想定した空間での固体伝搬音をシミュレーションすることが出来る。本研究ではこれを利用し、先行研究でされていたものの梁せいの種類を追加し、床仕様に対して床衝撃音を予測する。

室内吸音については幾何学理論の中の虚像法をもとに MATRAB で計算を行う。これにより、反射や境界条件のある空間を、仮想的な像（虚像）を導入することで簡単に解くことができる。本研究ではこれを利用し、音源に対して室内吸音を予測する。

設計者や一般の人がそれらを聞きながら設計の直感的な参考にできるよう、予測結果をまとめたデータベースを構築することを本研究の目的とする。

2. 床衝撃音

2.1 FDTD法の概要

有限差分時間領域 (Finite-difference time-domain、FDTD) 法とは、Yeeによって提案された、数値解析手法の一つである[3]。これは、音場を空間的、時間的に離散化し、支配式となる微分方程式の微分係数を差分商で近似し、得た更新式から空間すべての位置の物理量を逐次的に算出する手法である。図1の左図に示すように、空間的に離散化された一つの格子には音圧と粒子速度を互い違いに配置している。この格子のことを Yee セルと呼ぶ。また図1の右図は、スタガードグリッドと呼ばれ、Yeeセルをいくつも並べた格子状の層を、互い違いに配置しており、更新式を用いて、グリッド上に離散的に定義された物理量を時間が発展するように交互に計算する。これをリーブブロックアルゴリズムと呼び、これにより空間全体の物理量を逐次的に求めることができる。

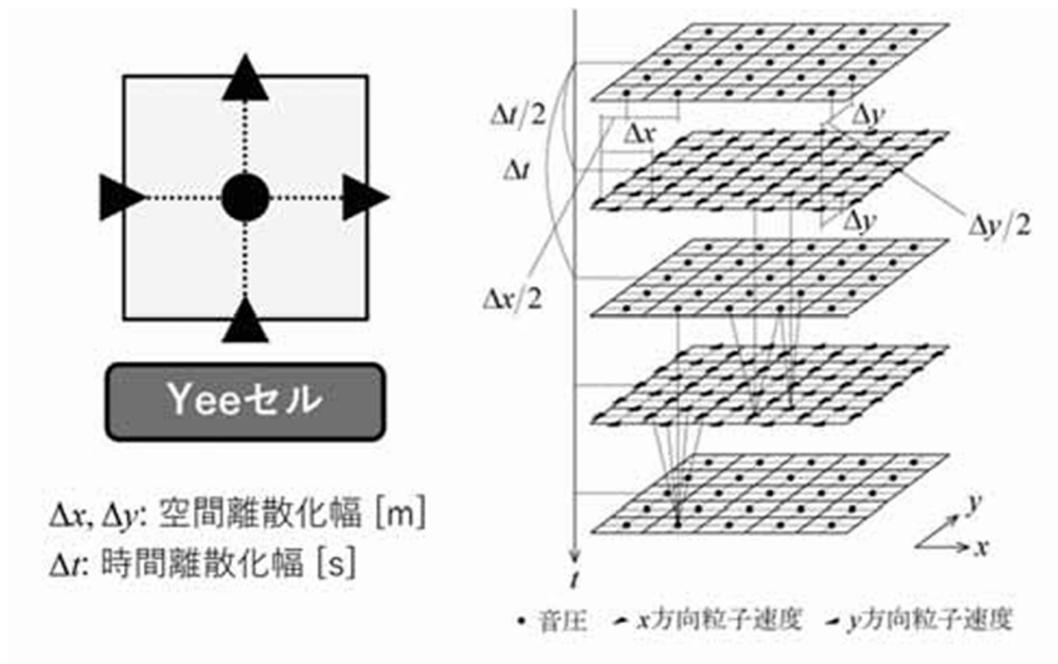


図1 Yeeセルとスタガードグリッド

2.2 S-FDTD 法

FDTD 法の解析方法のひとつとして S-FDTD (Standard FDTD) 法[3]があり、本研究ではこれを使用し、計算を行う。固体の S-FDTD 法は運動方程式と Hooke の法則から更新式を導出する。グリッドは図 2[4]のように配置する。

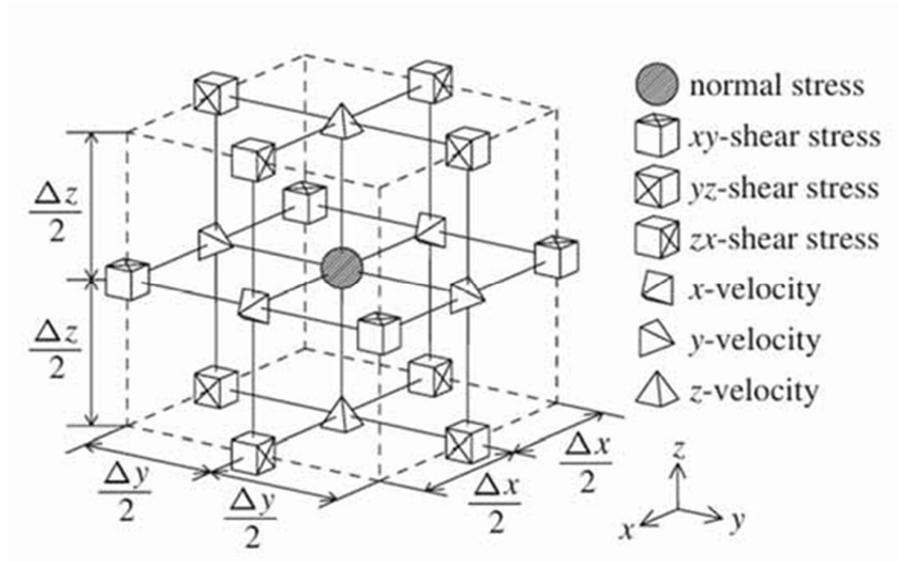


図 2 3次元グリッドでの配置

(1) 支配式

前提として微小変形、断熱変化を仮定し、さらに簡単のために等方性を仮定する。このとき、固体の運動方程式は

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} \quad (2.1)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial z} \quad (2.2)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} \quad (2.3)$$

である。ここで、 ρ は密度、 $u_{x,y,z}$ は変位、 $T_{xx,yy,zz}$ は垂直応力、 $T_{xy,xz,yx,yz,zx,zy}$ はせん断応力を表す。また、Hooke の法則によれば、

$$T_{xx} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial u_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (2.4)$$

$$T_{yy} = \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (2.5)$$

$$T_{zz} = \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial u_y}{\partial y} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (2.6)$$

$$T_{yz} = T_{zy} = \mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \quad (2.7)$$

$$T_{zx} = T_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \quad (2.8)$$

$$T_{xy} = T_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \quad (2.9)$$

が成り立つ。ここで μ は Lamé の第 1 定数 (=せん断弾性係数)、 λ は Lamé の第 2 定数である。なお、体積弾性係数 κ は Lamé の定数を用いて、 $\kappa = \lambda + (2/3)\mu$ と表される。ここで、減衰の一要因として粘性を考慮する場合、(2.4)~(2.9)式の Hooke の法則には粘性項が追加され、

$$T_{xx} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial u_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial u_z}{\partial z} + (\chi + 2\gamma) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial t} + \chi \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial t} + \chi \frac{\partial^2 u_z}{\partial z \partial t} \quad (2.10)$$

$$T_{yy} = \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial u_z}{\partial z} + \chi \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial t} + (\chi + 2\gamma) \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial t} + \chi \frac{\partial^2 u_z}{\partial z \partial t} \quad (2.11)$$

$$T_{zz} = \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial u_y}{\partial y} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_z}{\partial z} + \chi \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial t} + \chi \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial t} + (\chi + 2\gamma) \frac{\partial^2 u_z}{\partial z \partial t} \quad (2.12)$$

$$T_{yz} = T_{zy} = \mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) + \gamma \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial z \partial t} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y \partial t} \right) \quad (2.13)$$

$$T_{zx} = T_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) + \gamma \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z \partial t} \right) \quad (2.14)$$

$$T_{xy} = T_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) + \gamma \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial y \partial t} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial t} \right) \quad (2.15)$$

と表される。ここで、 γ は第 1 粘性係数 (=せん断粘性係数)、 χ は第 2 粘性係数である。なお、体積粘性係数 θ は第 1、2 粘性係数を用いて、 $\theta = \chi + (2/3)\gamma$ と表される。

(2) 更新式

まず上記の式を一階の偏微分方程式とするために、(2.10)～(2.15)式の両辺を時間微分し、変位の時間微分を粒子速度に置き換える。 x, y, z 方向の粒子速度をそれぞれ v_x, v_y, v_z [m/s]とすれば、解くべき支配式は、

$$\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} \quad (2.16)$$

$$\rho \frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{\partial T_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial z} \quad (2.17)$$

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{\partial T_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} \quad (2.18)$$

$$\frac{T_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial v_z}{\partial z} + (\chi + 2\gamma) \frac{\partial v_x}{\partial x \partial t} + \chi \frac{\partial v_y}{\partial y \partial t} + \chi \frac{\partial v_z}{\partial z \partial t} \quad (2.19)$$

$$\frac{T_{yy}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial v_z}{\partial z} + \chi \frac{\partial v_x}{\partial x \partial t} + (\chi + 2\gamma) \frac{\partial v_y}{\partial y \partial t} + \chi \frac{\partial v_z}{\partial z \partial t} \quad (2.20)$$

$$\frac{T_{zz}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_y}{\partial y} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_z}{\partial z} + \chi \frac{\partial v_x}{\partial x \partial t} + \chi \frac{\partial v_y}{\partial y \partial t} + (\chi + 2\gamma) \frac{\partial v_z}{\partial z \partial t} \quad (2.21)$$

$$\frac{T_{yz}}{\partial t} = \frac{T_{zy}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) + \gamma \left(\frac{\partial v_y}{\partial z \partial t} + \frac{\partial v_z}{\partial y \partial t} \right) \quad (2.22)$$

$$\frac{T_{zx}}{\partial t} = \frac{T_{xz}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + \gamma \left(\frac{\partial v_z}{\partial x \partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial z \partial t} \right) \quad (2.23)$$

$$\frac{T_{xy}}{\partial t} = \frac{T_{yx}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \gamma \left(\frac{\partial v_x}{\partial y \partial t} + \frac{\partial v_y}{\partial x \partial t} \right) \quad (2.24)$$

となる。

応力や粒子速度は空間や時間に対して連続的に変化するが、計算機を用いて計算を行う場合、連続な関数を扱うことが出来ない。そのため、空間や時間をある単位で区切り、その区切りごとに離散的な値を用いて、連続的な関数を近似する。このように、空間や時間を単位で区切ることを離散化と呼び、空間、時間に関する区切り幅をそれぞれ空間離散化幅、時間離散化幅、区切りごとの離散的な値を定めた点を参照点と呼ぶ。Fig 2.1 の右図を 3次元に当てはめて、応力と空間離散化幅の半ステップごとに互い違いに配置する。ここで、空間ステップを i, j, k 、時間ステップを n とし、この時の応力の値を $T^n(i, j, k)$ [N/m²]、空間ステップが $i+0.5, j, k$ 、時間ステップが $n+0.5$ であるときの x 方向の粒子速度を $v_x^{n+0.5}(i+0.5, j, k)$ [m/s]などと表記する。上記の支配式を

$$f'(x) = \frac{f(x+\frac{h}{2}) - f(x-\frac{h}{2})}{h} \quad (2.25)$$

という中心差分近似で近似する。これを(2.16)～(2.24)式に適用し、更新式を得る。 x, y, z 方向それぞれの粒子速度更新式は、

$$\begin{aligned}
v_x^{n+0.5}(i+0.5, j, k) &= v_x^{n-0.5}(i+0.5, j, k) + \frac{\Delta t}{\rho \Delta x} \{T_{xx}^n(i+1, j, k) - T_{xx}^n(i, j, k)\} \\
&+ \frac{\Delta t}{\rho \Delta y} \{T_{xy}^n(i+0.5, j+0.5, k) - T_{xy}^n(i+0.5, j-0.5, k)\} \\
&+ \frac{\Delta t}{\rho \Delta z} \{T_{xz}^n(i+0.5, j, k+0.5) - T_{xz}^n(i+0.5, j, k-0.5)\} \quad (2.26)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_y^{n+0.5}(i, j+0.5, k) &= v_y^{n-0.5}(i, j+0.5, k) \\
&+ \frac{\Delta t}{\rho \Delta x} \{T_{yx}^n(i+0.5, j+0.5, k) - T_{yx}^n(i-0.5, j+0.5, k)\} \\
&+ \frac{\Delta t}{\rho \Delta y} \{T_{yy}^n(i, j+1, k) - T_{yy}^n(i, j, k)\} \\
&+ \frac{\Delta t}{\rho \Delta z} \{T_{yz}^n(i, j+0.5, k+0.5) - T_{yz}^n(i, j+0.5, k-0.5)\} \quad (2.27)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_z^{n+0.5}(i, j, k+0.5) &= v_z^{n-0.5}(i, j, k+0.5) \\
&+ \frac{\Delta t}{\rho \Delta x} \{T_{zx}^n(i+0.5, j, k+0.5) - T_{zx}^n(i-0.5, j, k+0.5)\} \\
&+ \frac{\Delta t}{\rho \Delta y} \{T_{zy}^n(i, j+0.5, k+0.5) - T_{zy}^n(i, j-0.5, k+0.5)\} \\
&+ \frac{\Delta t}{\rho \Delta z} \{T_{zz}^n(i, j, k+1) - T_{zz}^n(i, j, k)\} \quad (2.28)
\end{aligned}$$

である。垂直応力、せん断応力の更新式は、

$$\begin{aligned}
T_{xx}^{n+1}(i, j, k) &= T_{xx}^n(i, j, k) + \frac{(\lambda + 2\mu)\Delta t}{\Delta x} \{v_x^{n+0.5}(i + 0.5, j, k) - v_x^{n+0.5}(i - 0.5, j, k)\} \\
&+ \frac{\lambda\Delta t}{\Delta y} \{v_y^{n+0.5}(i, j + 0.5, k) - v_y^{n+0.5}(i, j - 0.5, k)\} \\
&+ \frac{\lambda\Delta t}{\Delta z} \{v_z^{n+0.5}(i, j, k + 0.5) - v_z^{n+0.5}(i, j, k - 0.5)\} \\
&+ \frac{\chi + 2\gamma}{\Delta x} \{v_x^{n+0.5}(i + 0.5, j, k) - v_x^{n+0.5}(i - 0.5, j, k)\} \\
&+ \frac{\chi}{\Delta y} \{v_y^{n+0.5}(i, j + 0.5, k) - v_y^{n+0.5}(i, j - 0.5, k)\} \\
&+ \frac{\chi}{\Delta z} \{v_z^{n+0.5}(i, j, k + 0.5) - v_z^{n+0.5}(i, j, k - 0.5)\} \quad (2.29)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_{yy}^{n+1}(i, j, k) &= T_{yy}^n(i, j, k) + \frac{\lambda\Delta t}{\Delta y} \{v_x^{n+0.5}(i + 0.5, j, k) - v_x^{n+0.5}(i - 0.5, j, k)\} \\
&+ \frac{(\lambda + 2\mu)\Delta t}{\Delta x} \{v_y^{n+0.5}(i, j + 0.5, k) - v_y^{n+0.5}(i, j - 0.5, k)\} \\
&+ \frac{\lambda\Delta t}{\Delta z} \{v_z^{n+0.5}(i, j, k + 0.5) - v_z^{n+0.5}(i, j, k - 0.5)\} \\
&+ \frac{\chi}{\Delta y} \{v_x^{n+0.5}(i + 0.5, j, k) - v_x^{n+0.5}(i - 0.5, j, k)\} \\
&+ \frac{\chi + 2\gamma}{\Delta x} \{v_y^{n+0.5}(i, j + 0.5, k) - v_y^{n+0.5}(i, j - 0.5, k)\} \\
&+ \frac{\chi}{\Delta z} \{v_z^{n+0.5}(i, j, k + 0.5) - v_z^{n+0.5}(i, j, k - 0.5)\} \quad (2.30)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_{zz}^{n+1}(i, j, k) &= T_{zz}^n(i, j, k) + \frac{\lambda\Delta t}{\Delta z} \{v_x^{n+0.5}(i + 0.5, j, k) - v_x^{n+0.5}(i - 0.5, j, k)\} \\
&+ \frac{\lambda\Delta t}{\Delta y} \{v_y^{n+0.5}(i, j + 0.5, k) - v_y^{n+0.5}(i, j - 0.5, k)\} \\
&+ \frac{(\lambda + 2\mu)\Delta t}{\Delta x} \{v_z^{n+0.5}(i, j, k + 0.5) - v_z^{n+0.5}(i, j, k - 0.5)\} \\
&+ \frac{\chi}{\Delta z} \{v_x^{n+0.5}(i + 0.5, j, k) - v_x^{n+0.5}(i - 0.5, j, k)\} \\
&+ \frac{\chi}{\Delta y} \{v_y^{n+0.5}(i, j + 0.5, k) - v_y^{n+0.5}(i, j - 0.5, k)\} \\
&+ \frac{\chi + 2\gamma}{\Delta x} \{v_z^{n+0.5}(i, j, k + 0.5) - v_z^{n+0.5}(i, j, k - 0.5)\} \quad (2.31)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_{yz}^{n+1}(i, j + 0.5, k + 0.5) &= T_{yz}^n(i, j + 0.5, k + 0.5) \\
&+ \mu\Delta t\{v_y^{n+0.5}(i, j + 0.5, k + 1) - v_y^{n+0.5}(i, j + 0.5, k)\} \\
&+ \mu\Delta t\{v_z^{n+0.5}(i, j + 1, k + 0.5) - v_z^{n+0.5}(i, j, k + 0.5)\} \\
&+ \gamma\{v_y^{n+0.5}(i, j + 0.5, k + 1) - v_y^{n+0.5}(i, j + 0.5, k)\} \\
&+ \gamma\{v_z^{n+0.5}(i, j + 1, k + 0.5) - v_z^{n+0.5}(i, j, k + 0.5)\} \quad (2.32)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_{zx}^{n+1}(i + 0.5, j, k + 0.5) &= T_{zx}^n(i + 0.5, j, k + 0.5) \\
&+ \mu\Delta t\{v_z^{n+0.5}(i + 1, j, k + 0.5) - v_z^{n+0.5}(i, j, k + 0.5)\} \\
&+ \mu\Delta t\{v_x^{n+0.5}(i + 0.5, j, k + 1) - v_x^{n+0.5}(i + 0.5, j, k)\} \\
&+ \gamma\{v_z^{n+0.5}(i + 1, j, k + 0.5) - v_z^{n+0.5}(i, j, k + 0.5)\} \\
&+ \gamma\{v_x^{n+0.5}(i + 0.5, j, k + 1) - v_x^{n+0.5}(i + 0.5, j, k)\} \quad (2.33)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_{xy}^{n+1}(i + 0.5, j + 0.5, k) &= T_{xy}^n(i + 0.5, j + 0.5, k) \\
&+ \mu\Delta t\{v_x^{n+0.5}(i + 0.5, j + 1, k) - v_x^{n+0.5}(i + 0.5, j, k)\} \\
&+ \mu\Delta t\{v_y^{n+0.5}(i + 1, j + 0.5, k) - v_y^{n+0.5}(i, j + 0.5, k)\} \\
&+ \gamma\{v_x^{n+0.5}(i + 0.5, j + 1, k) - v_x^{n+0.5}(i + 0.5, j, k)\} \\
&+ \gamma\{v_y^{n+0.5}(i + 1, j + 0.5, k) - v_y^{n+0.5}(i, j + 0.5, k)\} \quad (2.34)
\end{aligned}$$

となる。上記の式により、初期条件が分かれば、空間中のすべての粒子速度、垂直応力、せん断応力の値を計算で求めることが可能となる。

(3) 境界条件

空間を離散化して計算を行うため、解析対象空間の大きさを決める。このとき、(2.26)～(2.34)式では更新の対象とする参照点から半ステップずれた点の値が必要となるため、解析対象領域の端を計算することが不可能となる。そのため、境界条件を設定する必要がある。主な考え方は文献[3]を参考にするため、詳しい説明は省略する。

任意の2つの媒質間の境界においては、次の式を粒子速度更新式として用いる。

$$\left(\frac{\rho_0+\rho_1}{2}\right)\frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{T_{xx1}-T_{xx0}}{\Delta x} + \frac{T_{xy1}-T_{xy0}}{\Delta y} + \frac{T_{zx1}-T_{zx0}}{\Delta z} \quad (2.35)$$

$$\left(\frac{\rho_0+\rho_1}{2}\right)\frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{T_{xy1}-T_{yx0}}{\Delta x} + \frac{T_{yy1}-T_{yy0}}{\Delta y} + \frac{T_{yz1}-T_{yz0}}{\Delta z} \quad (2.37)$$

$$\left(\frac{\rho_0+\rho_1}{2}\right)\frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{T_{zx1}-T_{zx0}}{\Delta x} + \frac{T_{yz1}-T_{yz0}}{\Delta y} + \frac{T_{zz1}-T_{zz0}}{\Delta z} \quad (2.36)$$

ここで、 ρ_0, ρ_1 はそれぞれの媒質の密度、 $T_{xx0,yy0,zz0,xy0,yz0,zx0}$ は媒質の下端の参照点、 $T_{xx1,yy1,zz1,xy1,yz1,zx1}$ は媒質の端から空間ステップが1進んだ参照点を表す。

また、任意の4つの媒質間の境界において、せん断応力更新式は

$$\frac{1}{4}\left(\frac{1}{\mu_{00}} + \frac{1}{\mu_{01}} + \frac{1}{\mu_{10}} + \frac{1}{\mu_{11}}\right)\frac{\partial T_{xy}}{\partial t} = \frac{v_{x1}-v_{x0}}{\Delta y} + \frac{v_{y1}-v_{y0}}{\Delta x} \quad (2.37)$$

$$\frac{1}{4}\left(\frac{1}{\mu_{00}} + \frac{1}{\mu_{01}} + \frac{1}{\mu_{10}} + \frac{1}{\mu_{11}}\right)\frac{\partial T_{zx}}{\partial t} = \frac{v_{z1}-v_{z0}}{\Delta x} + \frac{v_{x1}-v_{x0}}{\Delta z} \quad (2.38)$$

$$\frac{1}{4}\left(\frac{1}{\mu_{00}} + \frac{1}{\mu_{01}} + \frac{1}{\mu_{10}} + \frac{1}{\mu_{11}}\right)\frac{\partial T_{yz}}{\partial t} = \frac{v_{y1}-v_{y0}}{\Delta z} + \frac{v_{z1}-v_{z0}}{\Delta y} \quad (2.39)$$

となる。ここで、 $\mu_{00,01,10,11}$ はそれぞれの媒質のせん断弾性係数、 $v_{x0,y0,z0}$ は媒質の下端の参照点、 $v_{x0,y0,z0}$ は媒質の端から空間ステップが1進んだ参照点を表す。これらの更新式を用いることで、離散化されたすべてのセルについて、物理量を更新することが出来る。

2.3 計算に使用する衝撃源

先行研究[1]と同様、ゴムボール（標準重量衝撃源）を落とした音で評価を行う。以下のボールが落ちる音は先行研究のデータである。

- ・ボールが落ちる音

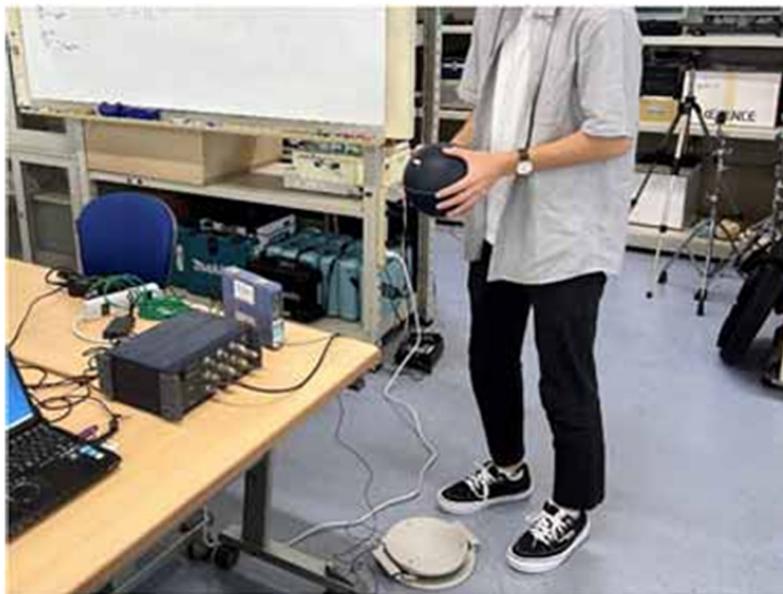


図3 ボールの衝撃力を測定する様子

図3は先行研究で使われたボールの衝撃力を測定する様子を示す。測定にはインパクトボール RIONYI-01 を使用した。落とす高さは、測定器からボールの底面までを 100 cm とした。ボールの加振力波形を図4に示す。加振力波形は横軸が時間 [s]、縦軸が 衝撃力 [N] を示している。

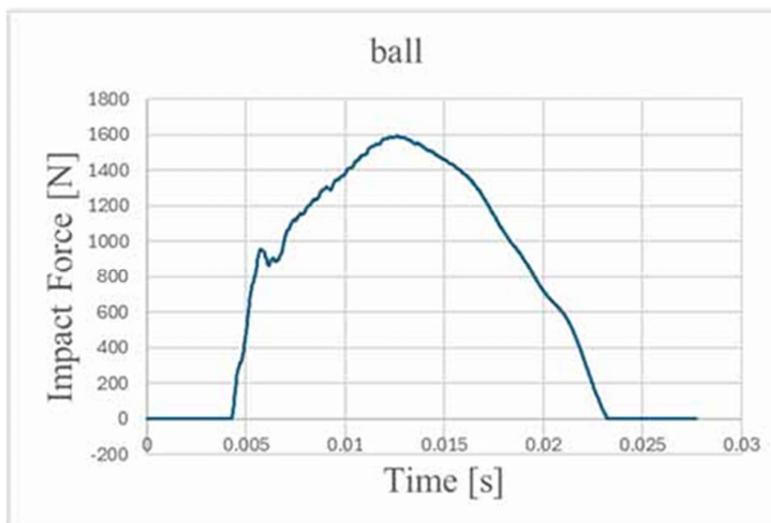


図4 ボールの加振力波形

2.4 研究方法

はじめに「Shade3D」という市販のソフトウェアを使用し、研究の対象となる室を作成する。その形状を「VA-FDTD」というオープンソースソフトウェアで読み込み、空間や加振、受音点の条件を設定する。その後、計算を行い、計算結果から受音点における衝撃音のグラフと、音データを作成し、様々な条件においてこれらを収集する。

2.5 研究対象と結果

2.5.1 基準室

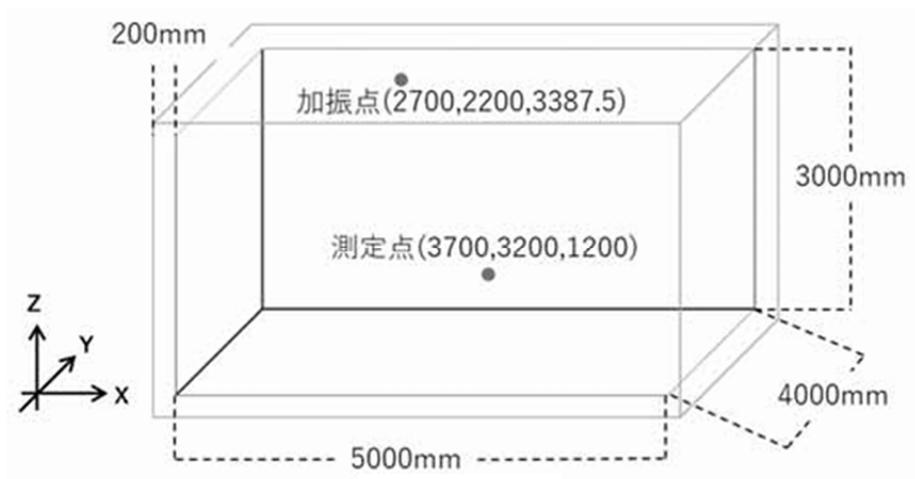


図5 基準室

図5に基準とする室と条件を示す。基準となる室は横5000mm、奥行き4000mm、高さ3000mmとし、加振点を $X=2700$ mm、 $Y=2200$ mm、 $Z=3387.5$ mmの位置、測定点を $X=3700$ mm、 $Y=3200$ mm、 $Z=1200$ mmの位置に設定している。

「Shade3D」ではこの室の周りの面から500mmだけ外側を空気の層とし、さらにその外側に完全吸収層（Perfectly Matched Layer、PML）を設定する。したがって、全体では $X=6400$ mm、 $Y=5400$ mm、 $Z=3900$ mmの直方体を作成している。以降は「VA-FDTD」での設定を記載する。

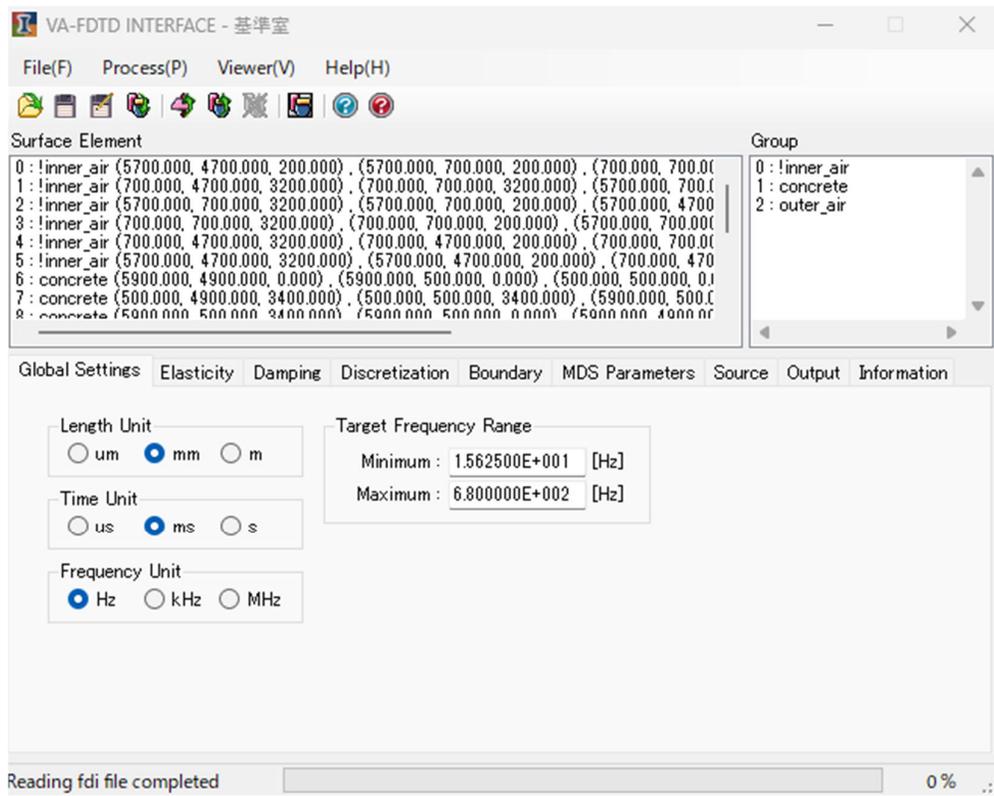


図6 VA-FDTD の設定画面 (Global Setting)

図6 に示すように、Global Settings タブにおいて、Length Unit (長さ単位) は mm、Time Unit (時間単位) は ms、Frequency Unit (周波数単位) は Hz と設定し、Target Frequency Range (対象周波数範囲) の Minimum (最小) は 15.625 Hz、Maximum (最大) は 680 Hz と設定した。

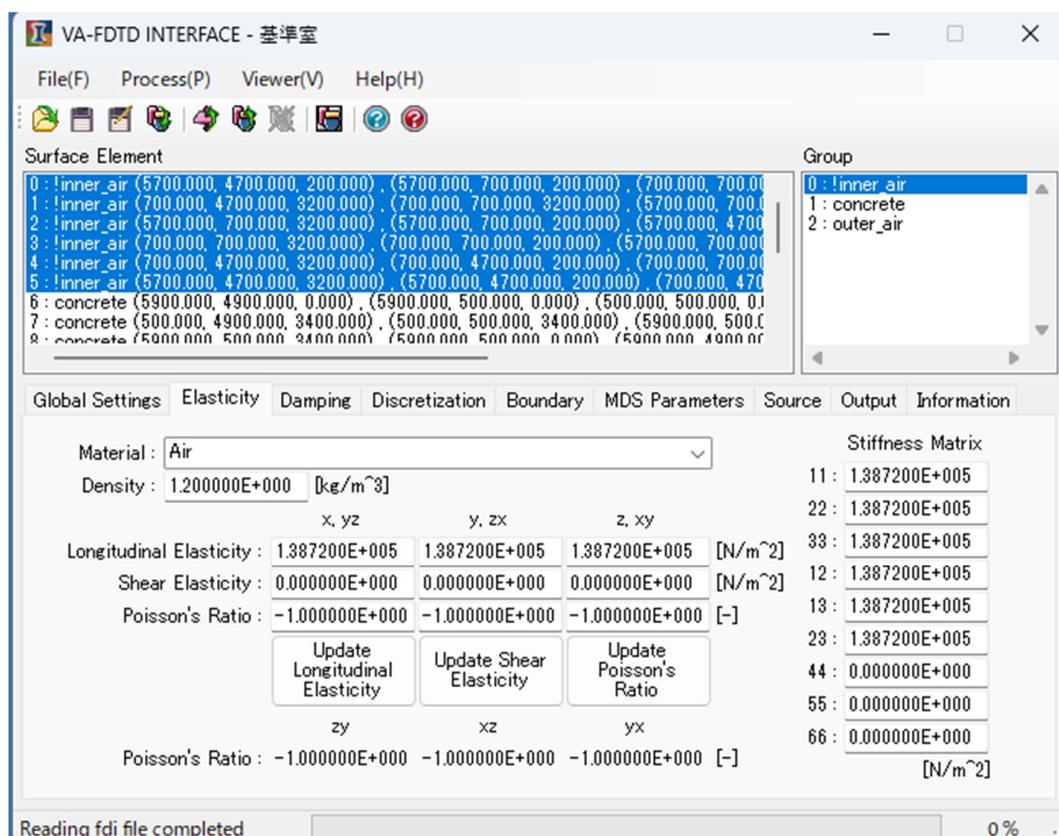


図7 VA-FDTD の設定画面 (Elasticity)

図7に示すように、Elasticityタブにおいて、0: outer airと2: !inner airは室の外と内の空気を意味し、密度を1.2 [kg/m³]、ヤング率を1.3872×10⁵ [N/m²]とし、これらは以下でも同じ条件である。1: concreteは室を形成する壁面のコンクリートを意味し、密度を2.4×10³ [kg/m³]、ヤング率を2.4×10¹⁰ [N/m²]と設定した。

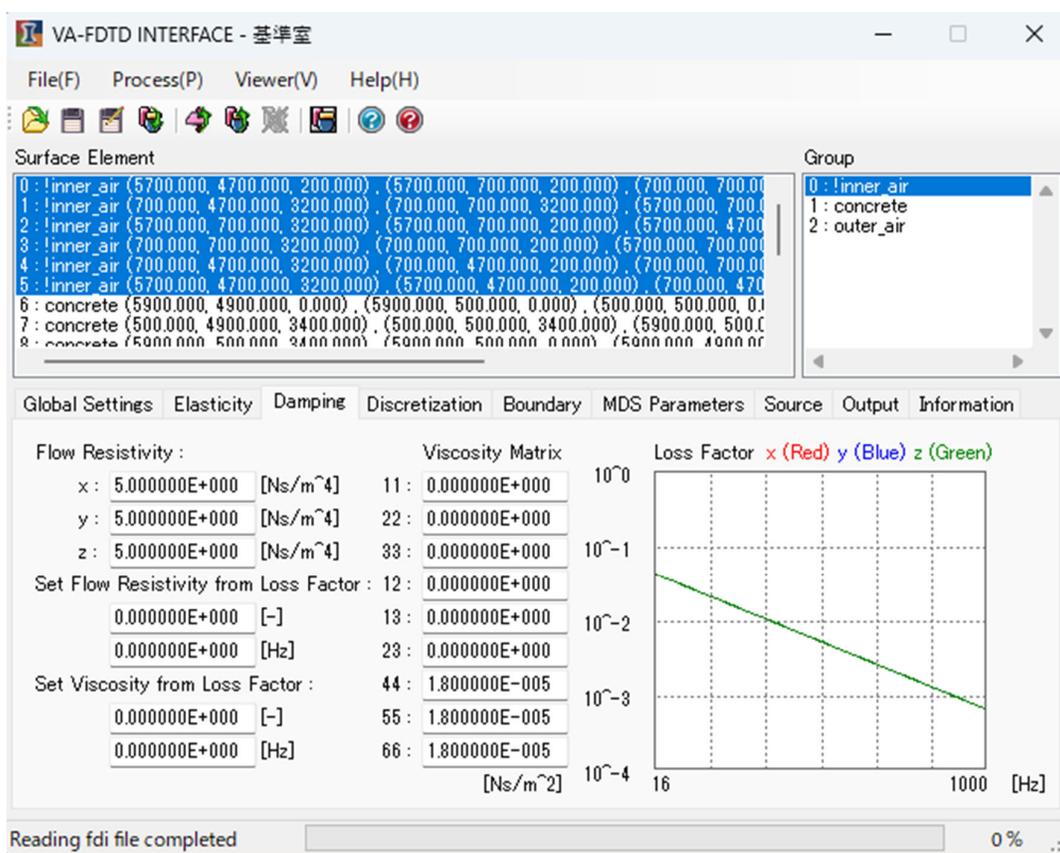


図8 VA-FDTD の設定画面 (Damping)

図8 に示すように、Damping タブにおいて、空気は Flow Resistivity (流れ抵抗) を X、Y、Z 方向それぞれ 5.0 [Ns/m⁴]、せん断粘性係数をそれぞれ 1.8×10^{-5} [Ns/m²] とした。コンクリートでは Flow Resistivity (流れ抵抗) を X、Y、Z 方向それぞれ 2.5×10^4 [Ns/m⁴]、Set Viscosity from Loss Factor (損失係数) をそれぞれ 5.0×10^{-3} [-]、32 [Hz] とした。

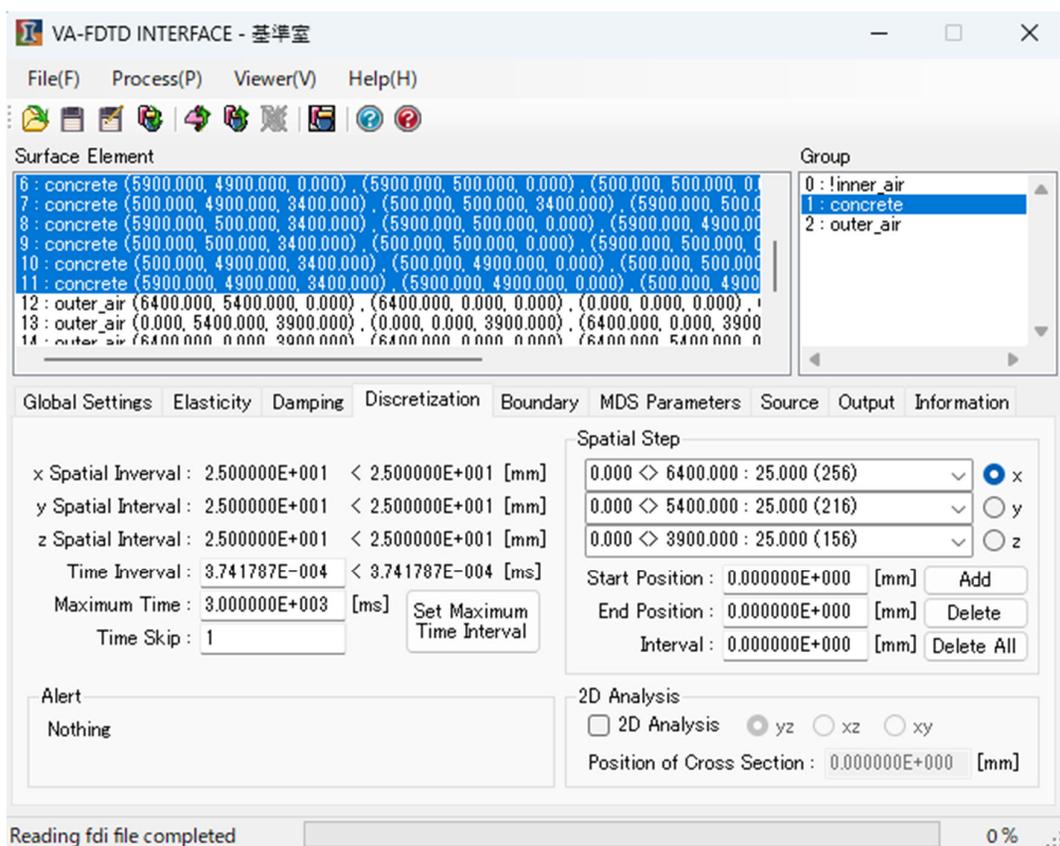


図9 VA-FDTD の設定画面 (Discretization)

図9に示すように、Discretization タブにおいて、Spatial Step で空間の大きさと空間離散化幅を設定する。Start Position は 0 [mm]、End Position は作成した空気層を含む直方体のそれぞれの方向についての大きさである X=6400 mm、Y=5400 mm、Z=3900 mm を入力し、Interval (空間離散化幅) を 25 mm、Maximum Time を 3.0×10^3 [ms] とし、時間離散化幅は安定条件を満たす最大の値となるように設定した。

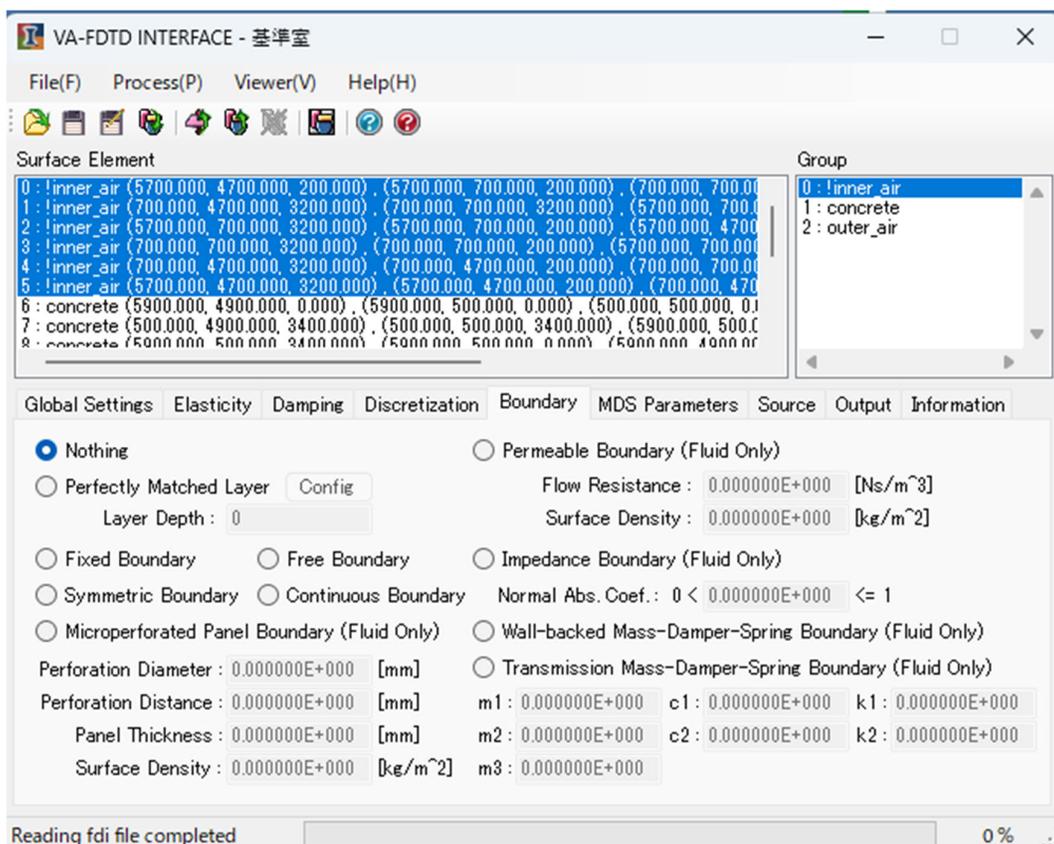


図 10 VA-FDTD の設定画面 (Boundary)

図 10 に示すように、Boundary タブにおいて、境界条件を決めて設定する。0:inner_air は Nothing に設定する。1:concrete は底の部分は Fixed Boundary (固定) にし、それ以外は Nothing に設定する。2:outer_air は底の部分は Fixed Boundary (固定) にし、それ以外の部分は Perfectly Matched Layer に設定する。Layer Depth は 32 にする。

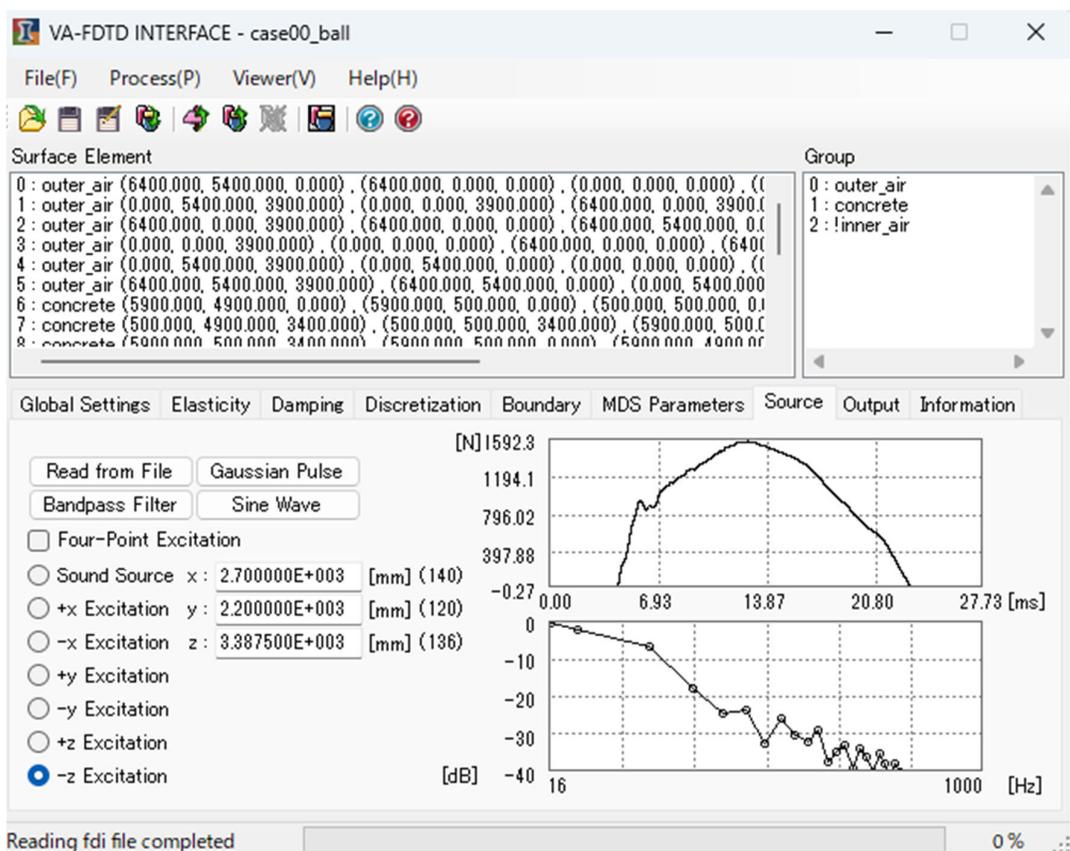


図 11 VA-FDTD の設定画面 (Source)

図 11 に示すように、Source タブにおいて、加振点の位置を X=2700 mm、Y=2200 mm、Z=3387.5 mm に設定し、2.3 節で得たボールの衝撃源の加振力波形を読み込んだ。

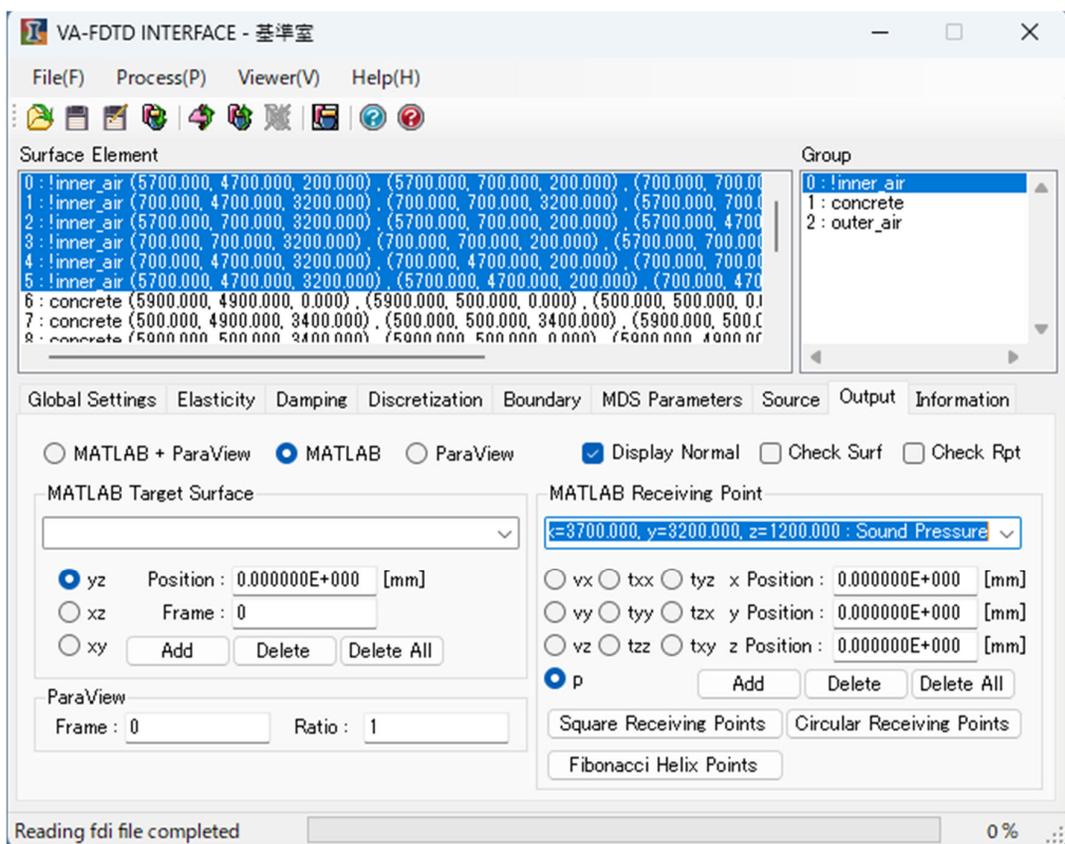


図 12 VA-FDTD の設定画面 (Output)

図 12 に示すように、Output タブにおいて、MATLAB Target Surface (可視化断面) には XZ 面の Y=2700 mm を設定した。さらに、MATLAB Receiving Point (測定点) は、X=3700 mm、Y=3200 mm、Z=1200 mm に設定した。

計算結果を以下に示す。グラフは上側が音圧波形、下側が床衝撃音レベルを表している。音圧波形は横軸が時間、縦軸が音圧を示しており、床衝撃音レベルは横軸が周波数、縦軸が床衝撃音レベルを示している。

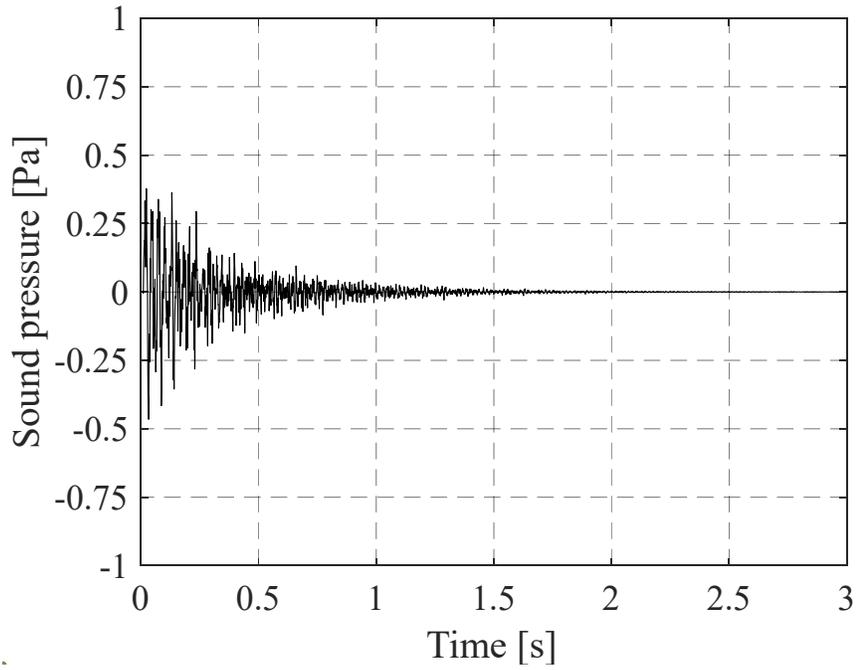


図 13 ボールの加振力時間波形

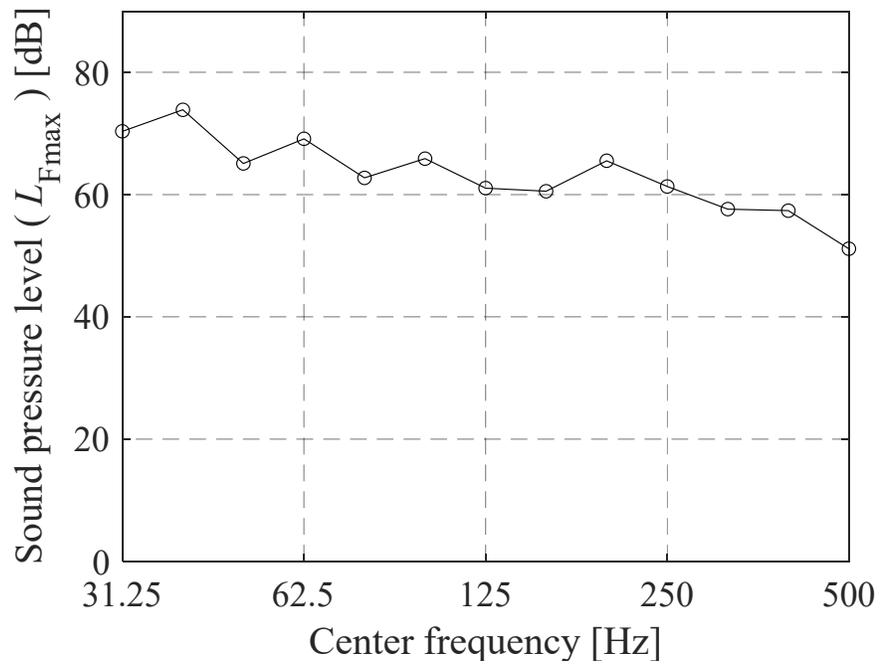


図 14 ボールが落ちる音

2.5.2 梁せい 200mm

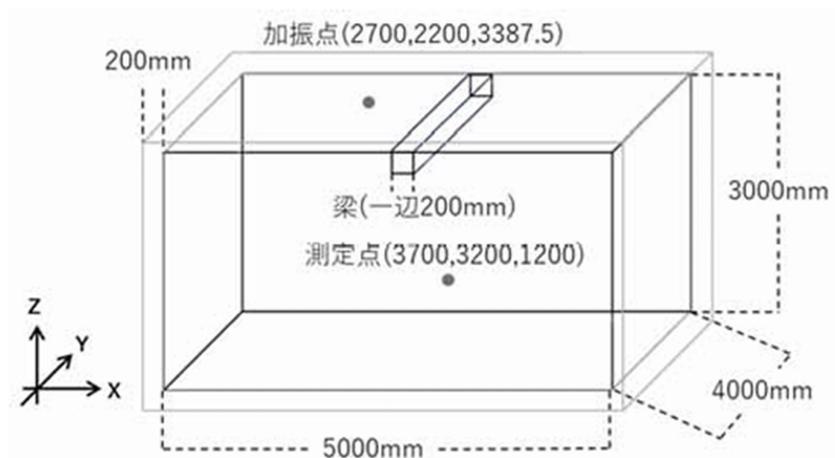


図 15 梁せい 200 mm

図 15 に示すように、室の大きさとコンクリート厚さは基準室と同じに設定し、一辺 200 mm とした梁（梁せいも 200 mm）を室の中心に配置した。室の大きさが変化していないため、加振点、測定点は共に基準室と同じ位置に設定した。また、「VA-FDTD」での設定において、梁は壁や床と同じコンクリートとした。計算結果を以下に示す。

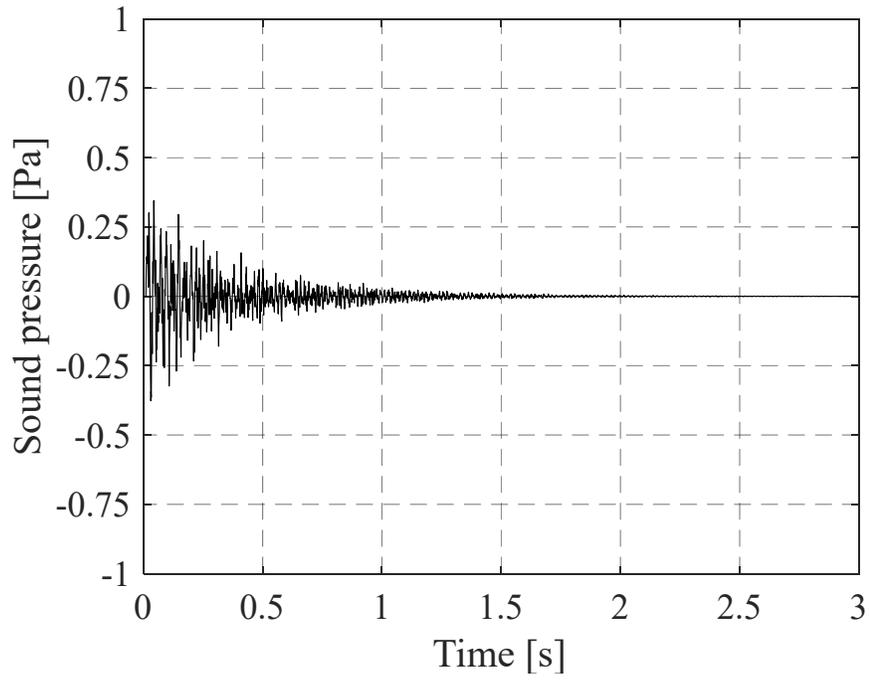


図 16 梁せい 200 mm (加振力時間波形)

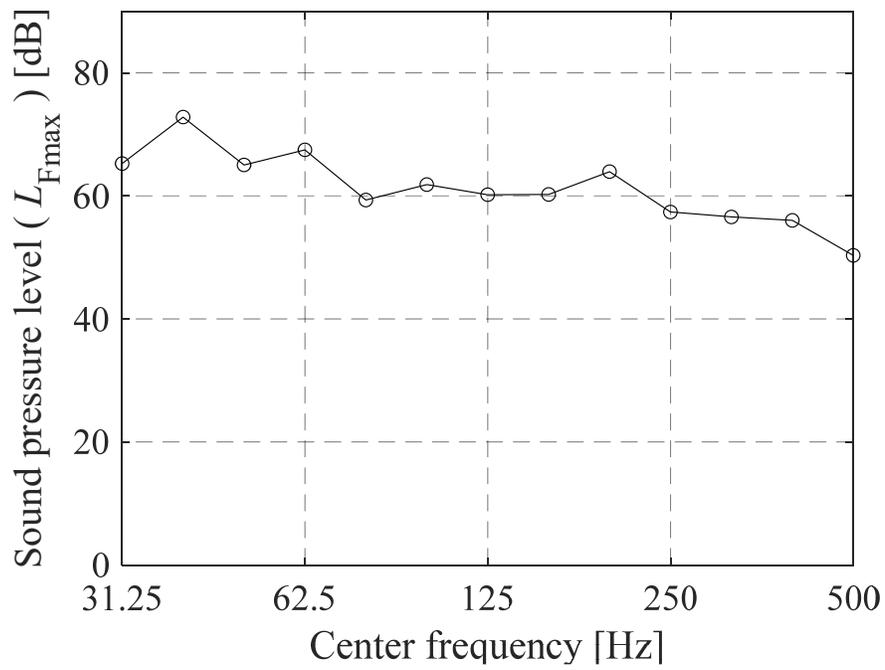


図 17 梁せい 200 mm

2.5. 梁せい 400mm

図 15 と同様に、室の大きさとコンクリート厚さは基準室と同じに設定し、一辺 200 mm とした梁を室の中心に配置した。ただし、梁せいは 400 mm に変える。室の大きさが変化していないため、加振点、測定点は共に基準室と同じ位置に設定した。また、「VA-FDTD」での設定において、梁は壁や床と同じコンクリートとした。計算結果を以下に示す。

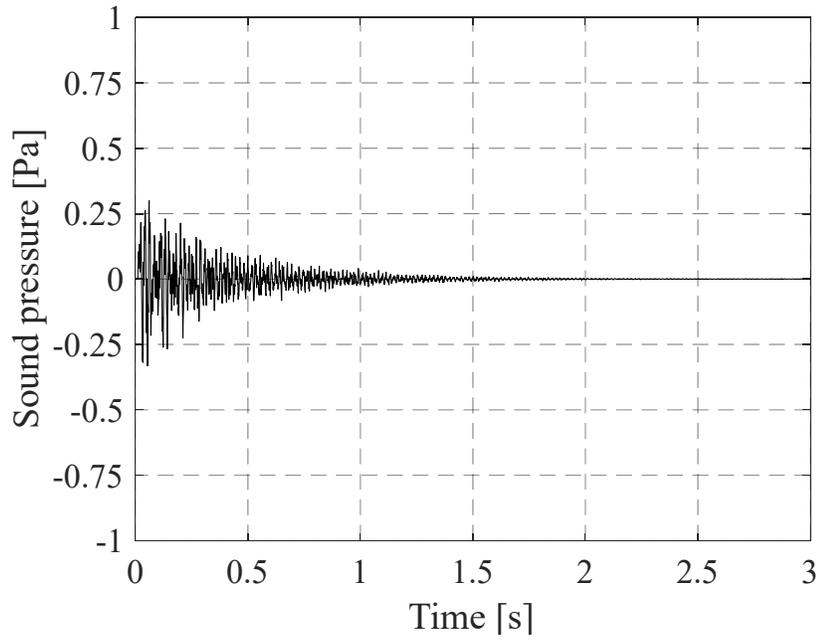


図 18 梁せい、400 mm (加振力時間波形)

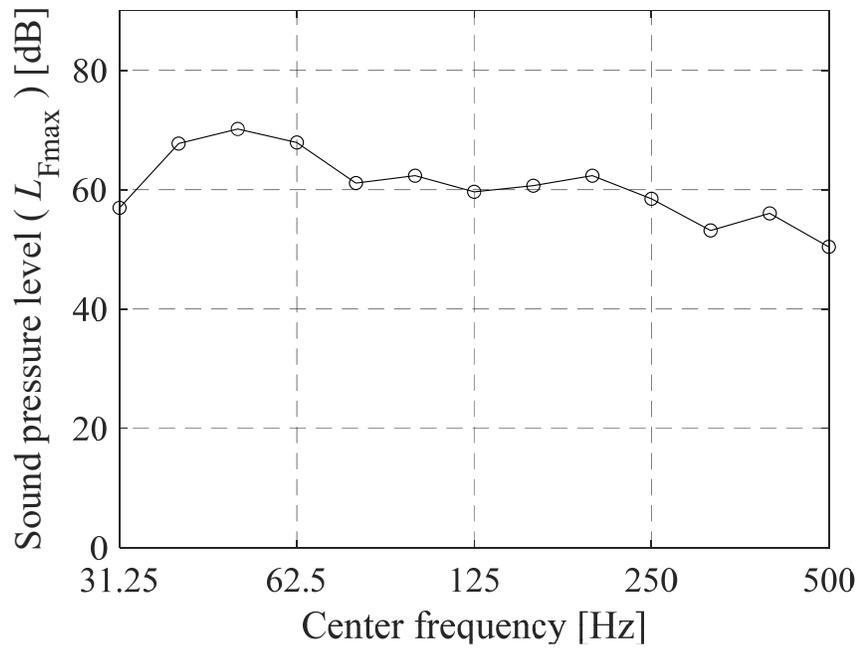


図 19 梁せい、400 mm

2.5.4 梁せい 600mm

図 15 と同様に、室の大きさとコンクリート厚さは基準室と同じに設定し、一辺 200 mm とした梁を室の中心に配置した。ただし、梁せいは 600 mm に変える。室の大きさが変化していないため、加振点、測定点は共に基準室と同じ位置に設定した。また、「VA-FDTD」での設定において、梁は壁や床と同じコンクリートとした。計算結果を以下に示す。

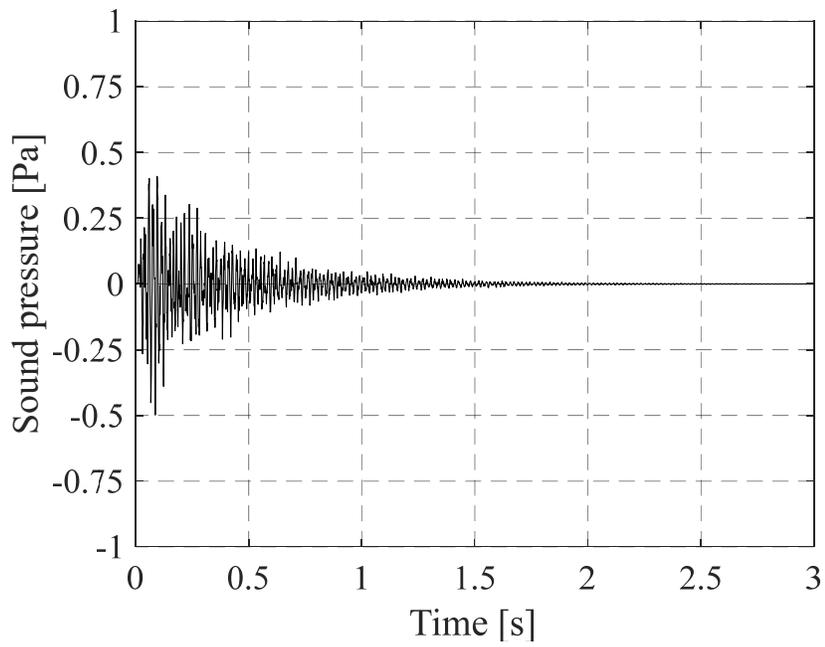


図 20 梁せい 600 mm (加振力時間波形)

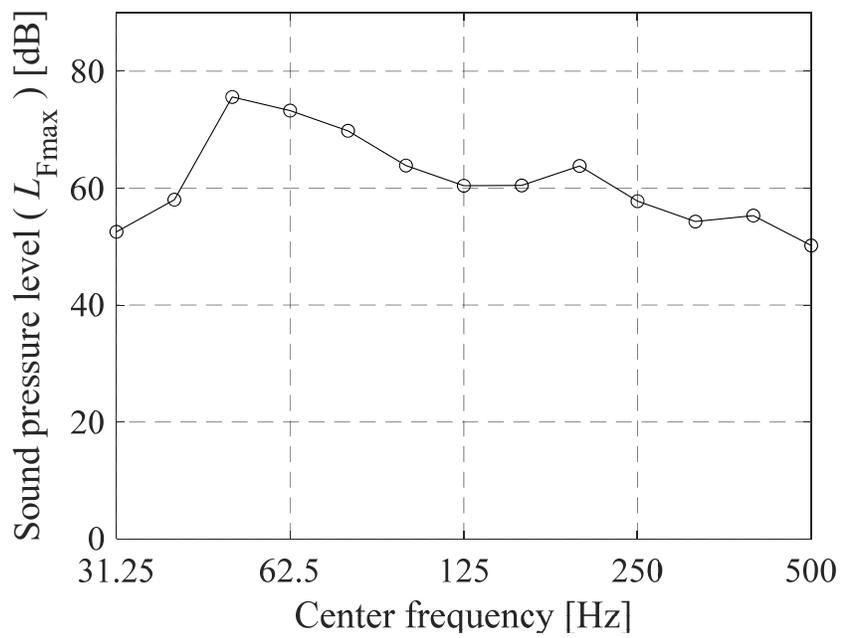


図 21 梁せい 600 mm

2.5.5 梁せい 800mm

図 15 と同様に、室の大きさとコンクリート厚さは基準室と同じに設定し、一辺 200 mm とした梁を室の中心に配置した。ただし、梁せいは 800 mm に変える。室の大きさが変化していないため、加振点、測定点は共に基準室と同じ位置に設定した。また、「VA-FDTD」での設定において、梁は壁や床と同じコンクリートとした。計算結果を以下に示す。

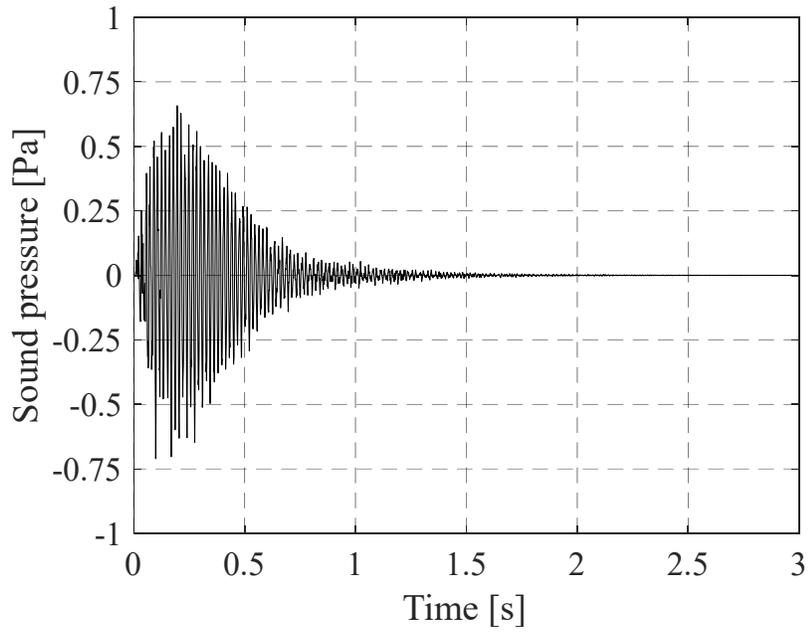


図 22 梁せい 800 mm (加振力時間波形)

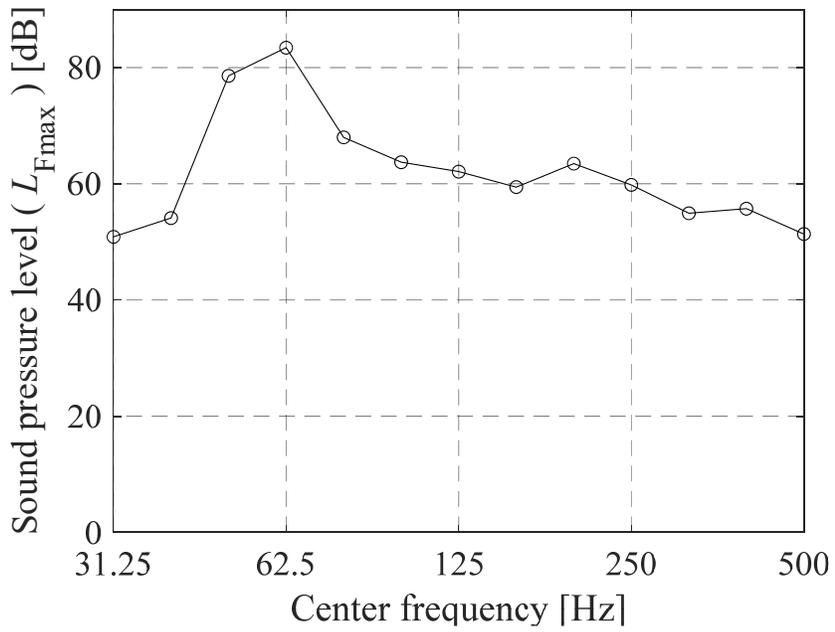


図 23 梁せい 800 mm

2.5.6 木材

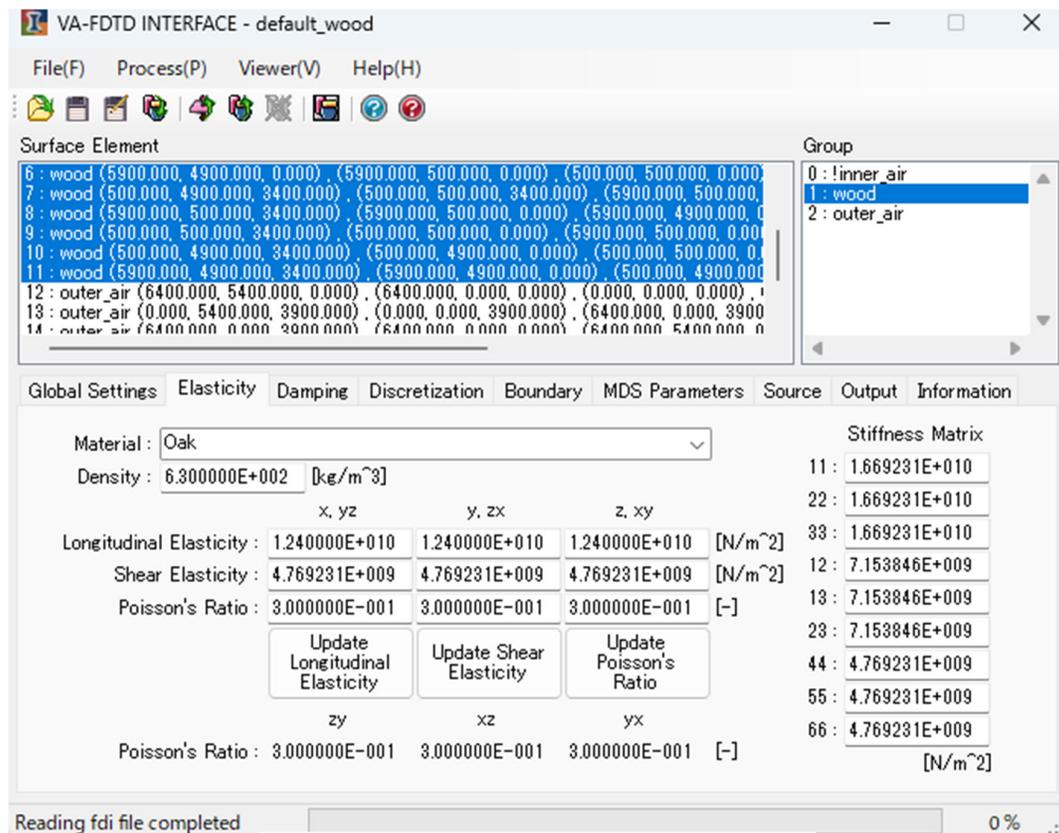


図 24 VA-FDTD の設定画面(Elasticity)

図 15 と同様に、室の大きさとコンクリート厚さは基準室と同じに設定した。変更点は Elasticity タブにおいて、Material を「Oak (ナラ)」に変えた。室の大きさが変化していないため、加振点、測定点は共に基準室と同じ位置に設定した。計算結果を以下に示す。

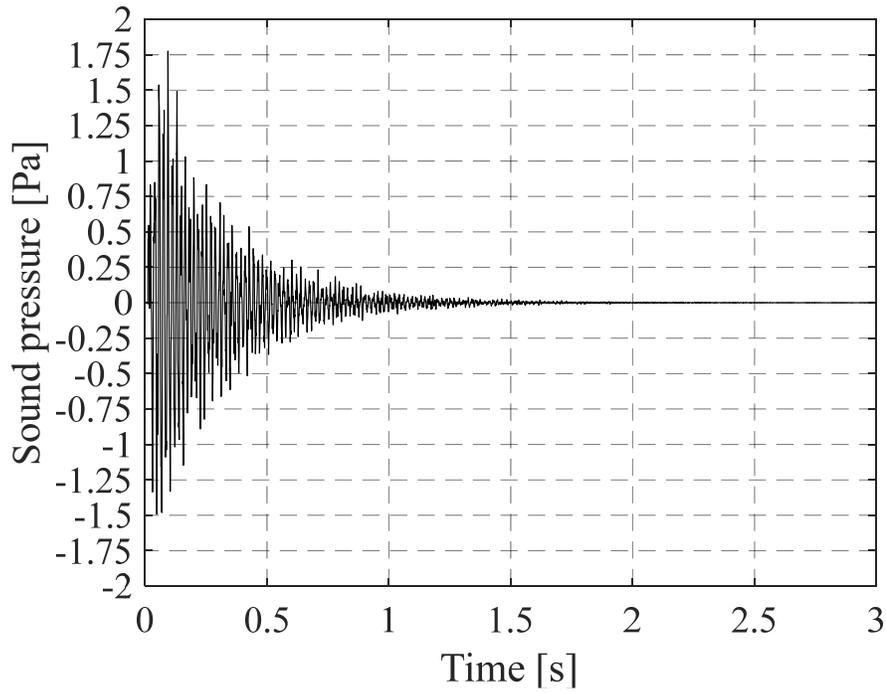


図 25 木材(加振力時間波形)

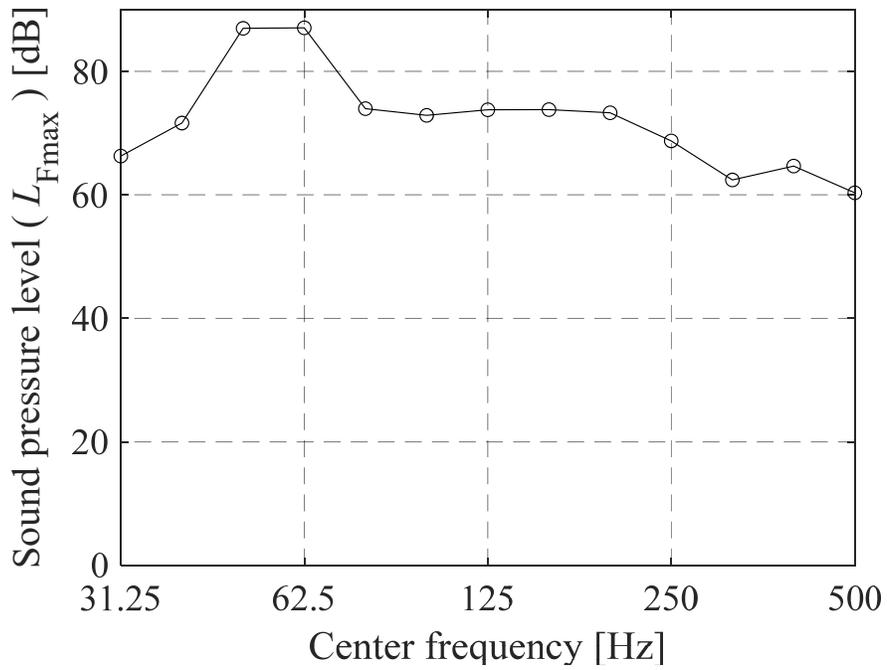


図 26 木材

2.6 考察

比較として基準室と梁の大きさがそれぞれ床衝撃音レベルで比較した（図 27）。

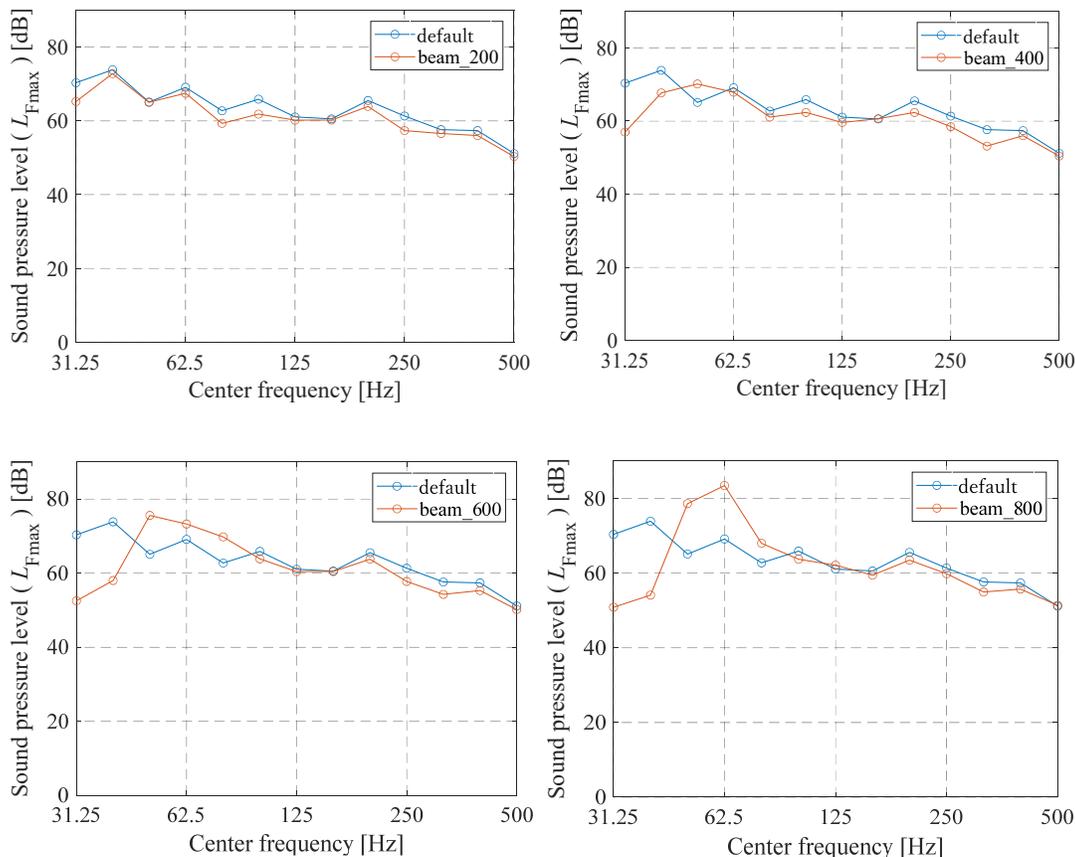


図 27 結果をまとめたもの（基準室との比較）

まず、基準室と梁せい 200 mm では、そこまで明確な違いは得られなかった。周波数が 50 Hz が重なっており、40 Hz あたりと 125 Hz と 150 Hz あたりと 500 Hz が限りなく近くなっている。表全体を通して基準室の方が少し床衝撃音レベルが高いといえる。

基準室と梁せい 400 mm では、150 Hz あたりの床衝撃音レベルが重なっている。500 Hz もかなり近い値となっている。一番離れているのは、31.25 Hz である。表全体を通して 40 Hz あたりは梁せい 400 mm の方が床衝撃音レベルは高いが、それ意外は基準室の方が高い。

基準室と梁せい 600 mm では、150 Hz あたりの床衝撃音レベルが重なっている。125 Hz と 500 Hz もかなり近い値となっている。一番離れているのは、31.25 Hz である。表全体を通して 50 Hz あたりから 80 Hz あたりは梁せい 600 mm の方が床衝撃音レベルは高いが、それ意外は基準室の方が高い。

基準室と梁せい 800 mmでは、500Hz あたりの床衝撃音レベルが重なっている。125 Hz と 150 Hz あたりもかなり近い値となっている。一番離れているのは、31.25 Hz と 40 Hz あたりである。それに続いて 50 Hz あたりや 62.5 Hz も離れている。表全体を通して 50 Hz あたりから 90 Hz あたりと 125 Hz 前後は梁せい 800 mmの方が床衝撃音レベルは高いが、それ意外は基準室の方が高い。

このことから、梁せいを大きくすると床衝撃音レベルの差が大きくなる場所が出てくる。しかし、125 Hz のようにどの梁せいも差がほぼないところもあった。また、差がよく出ているのが 31.25 Hz だった。

最後に、基準室と梁の大きさすべての床衝撃音レベルをまとめて比較した (図 28)。

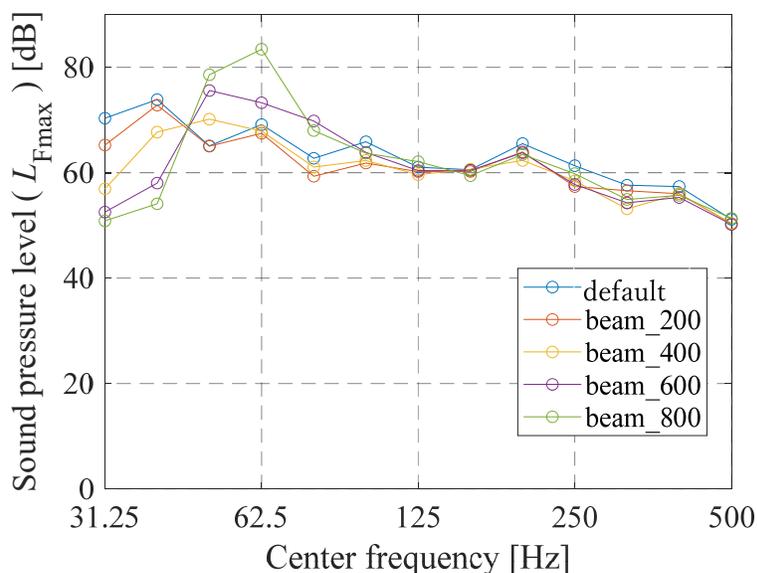


図 28 ひとつのグラフにしたもの

まず、31.25Hz が基準室が一番床衝撃音レベルが高く、順に梁せい 200 mm、400 mm、600 mm、800 mmとなっていた。また、50 Hz あたりは床衝撃音レベルが高いのは梁せい 800 mm、600 mm、400 mm、基準室と梁せい 200 mmのような順になっていた。62.5 Hz も梁せい 800 mm が高く次いで梁せい 600 mmだったが、その次が、基準室となり、梁せい 200 mmと梁せい 400 mmは重なっていた。全体を通して一番差がないところは 150 Hz あたりと 500 Hz だとわかる。また、31.25 Hz から 125 Hz までが変化が大きかったといえる。このことから、31.25 Hz の時が梁せい 800 mmは音が小さく、62.5 Hz の時は梁せい 800 mmは音が大きくなるのがわかる。このため、周波数によって梁がある場合の音の大きさは変わるので、一概に梁の有無や大きさではわからない。

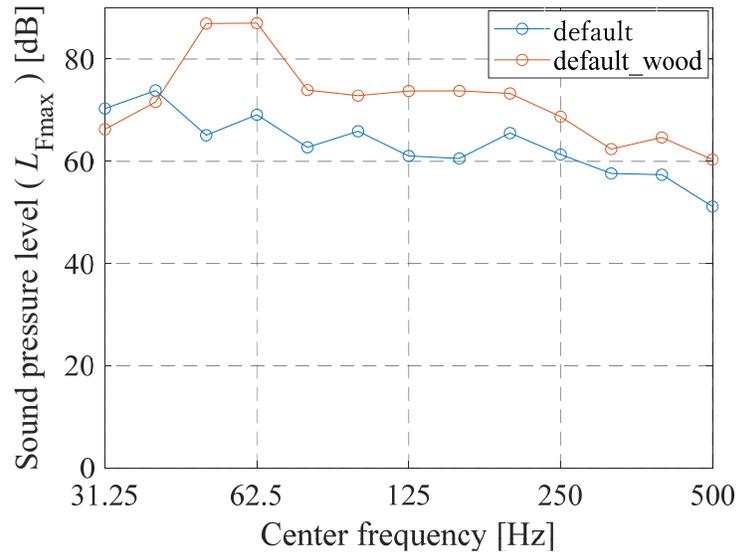


図 29 木材と基準室

木材と基準室の音響特性を比較した結果、測定した周波数範囲において両方の特性が重なり合う周波数帯は確認されなかった(図 29)。音圧レベルが最も近い値を示したのは約 40 Hz 付近であり、この周波数を境に音圧レベルの傾向が変化していることが明らかとなった。40 Hz 未満の低周波域では、木材の音圧レベルが基準室に比べて全体的に低く、木材が低周波音に対して一定の減衰効果を有している可能性がある。

一方、40 Hz を超える周波数帯では、基準室の方が木材よりも音圧レベルが低くなる傾向が確認された。特に、音圧レベルの差が最も大きくなったのは約 50 Hz 付近であり、この周波数帯において木材と基準室の音響特性の違いが最も顕著に表れているといえる。

さらに、200 Hz 付近以降の周波数帯においては、木材および基準室の音圧レベルはいずれもほぼ平行な減衰傾向を示しており、周波数の増加に伴う音圧レベルの低下特性が類似していることが確認された。以上の結果より、木材と基準室では周波数帯域によって音響特性が異なり、特に低周波域において顕著な差が生じることが明らかとなった。

3. 室内吸音

3.1 虚像法の考え方

虚像法により音場解析を考えるうえで最も基本的な概念は次の2つである。

- 1) 音波を直線的なエネルギーの流れで捉え波動性は無視する。
- 2) 音が反封面で反射する際に正反射をすると考え、反射面を正反射の軸として投影される点に音源を移動し、これを虚音源と呼び、この虚音源から実音源と同時に同じ音源パワーで音が放射されると考える。

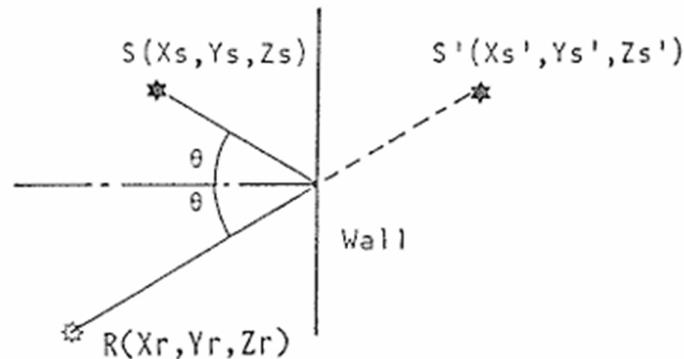


図30 反射

図30[5]に示したように音源 $R(X_r, Y_r, Z_r)$ 、受信点 $S(X_s, Y_s, Z_s)$ があつた場合を考える。音源を出た音が反封面で反射したときの虚音源の位置は $S'(X_s', Y_s', Z_s')$ になる。反射面を簡単のため、 $X-Z$ 平面と考えると、

$$X_s' = -X_s, \quad Y_s' = Y_s, \quad Z_s' = Z_s. \quad (3.1)$$

従つて S' と R の距離 ds' [m] は以下になる。

$$ds' = ((X_r + X_s)^2 + (Y_r - Y_s)^2 + (Z_r - Z_s)^2)^{1/2}. \quad (3.2)$$

反射面の垂直入射吸音率を α [-] とすると、虚音源 S' を出た音を受音点 R に入射した時の音のエネルギーは以下になる[6]。

$$E_{s'} = E_R \left| \frac{(1 + \sqrt{1 - \alpha}) \cos \theta - (1 - \sqrt{1 - \alpha})}{(1 + \sqrt{1 - \alpha}) \cos \theta + (1 - \sqrt{1 - \alpha})} \right|^2 \quad (3.3)$$

ここで E_R は音源パワー[J]である。この考え方にそつて、音が実音源から放射されて、様々な反射を繰り返した後、受信点に入射するまでの行程を一つ一つ追ひ、音場を解析するものである。なお、距離減衰は ds' 、ならびに、各周波数帯の空気吸収率を考慮して与える。

3.2 計算に使用する室

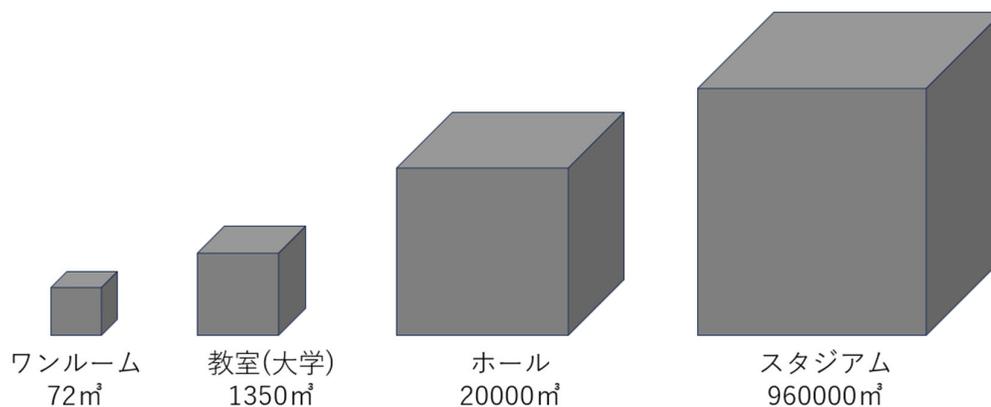


図 31 室の大きさ

室の大きさは図 31 のようにワンルーム (72 m³)、教室 (1350 m³)、ホール (20000 m³)、スタジアム (960000 m³) の 4 つを考える。

	矩形室x方向寸法	矩形室y方向寸法	矩形室z方向寸法	音源x座標	音源y座標	音源z座標	受音点x座標	受音点y座標	受音点z座標	
ワンルーム	6	4	3	2	2	1.5	4	2	1.5	
教室	18	15	5	6.5	7.5	1.5	11.5	7.5	1.5	
ホール	32	25	25	9.5	12.5	1.5	22.5	12.5	1.5	
スタジアム	160	120	50	56.5	60	1.5	103.5	60	1.5	単位 [m]

図 32 室の寸法

また、寸法、音源、受音点は図 32 のように設定する。音源と受音点の z 座標は 1.5 m にし、音源と受音点の x 座標と y 座標に関してはワンルームの大きさを基準に位置を決めた。垂直入射吸音率は 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 で値を変える。

3.3 研究方法

Fortran で作成したプログラムを使用し、研究の対象となる室の情報、吸音率などの情報を与え、虚像法により虚音源の位置、ならびに、虚音源パワーのデータを得る。そのデータを「MATLAB」で読み込み、無響室録音された男声朗読音源を畳み込むことで、様々な条件における音データを収集する。

3.4 研究対象と結果

3.4.1 基準の音源

基準の音源は無響室で録音された男声朗読とする。

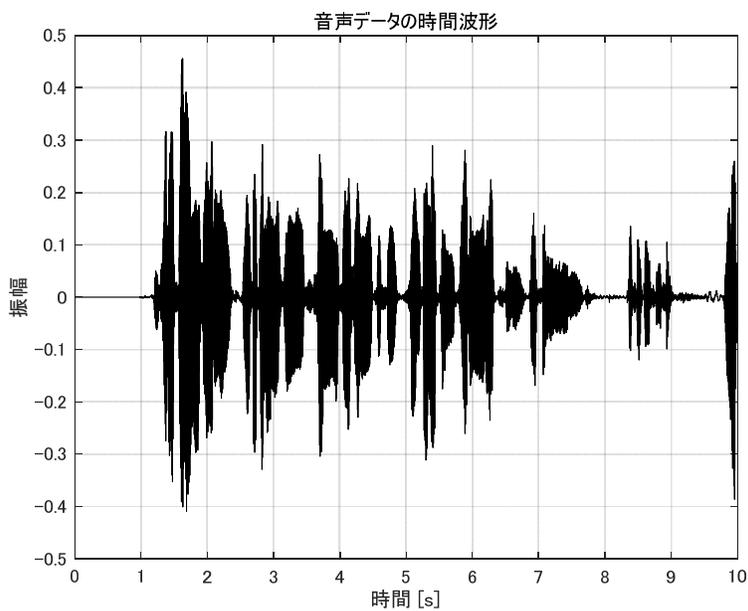


図 33 音声の元データ

3.4.2 ワンルーム 吸音率 0.1

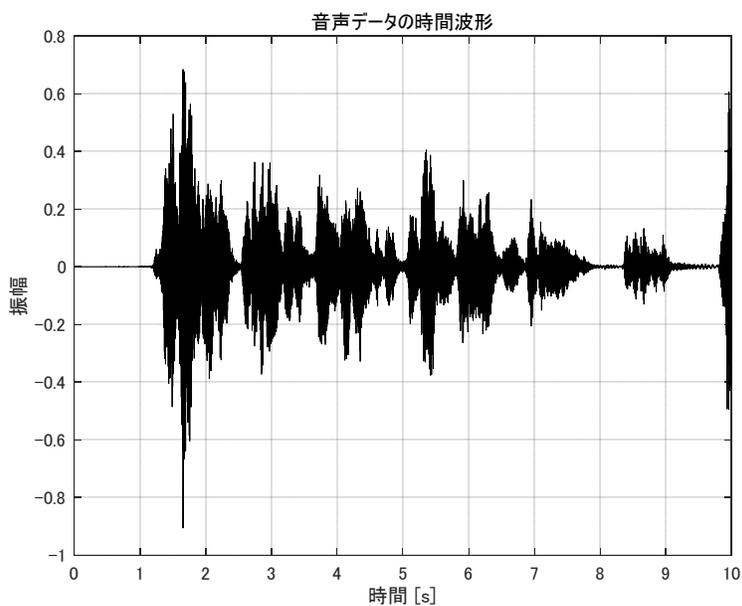


図 34 ワンルーム 吸音率 0.1

3.4.3 ワンルーム 吸音率 0.3

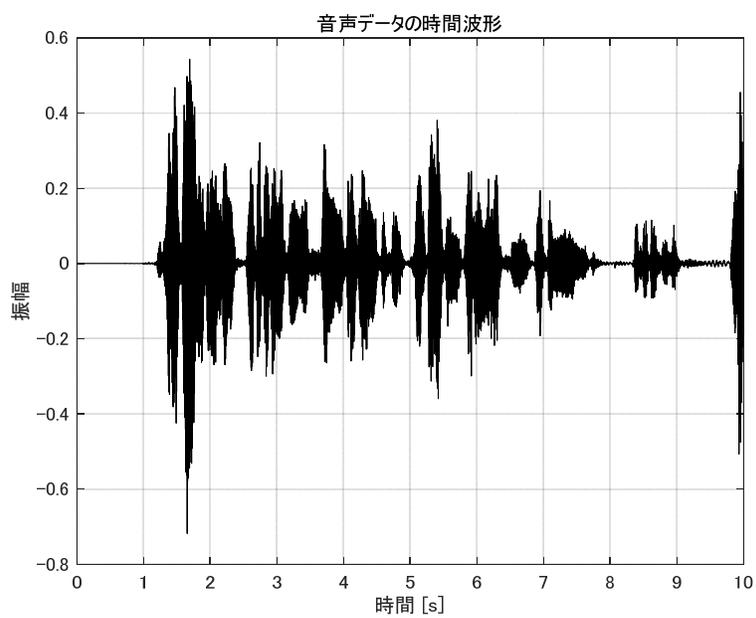


図 35 ワンルーム 吸音率 0.3

3.4.4 ワンルーム 吸音率 0.5

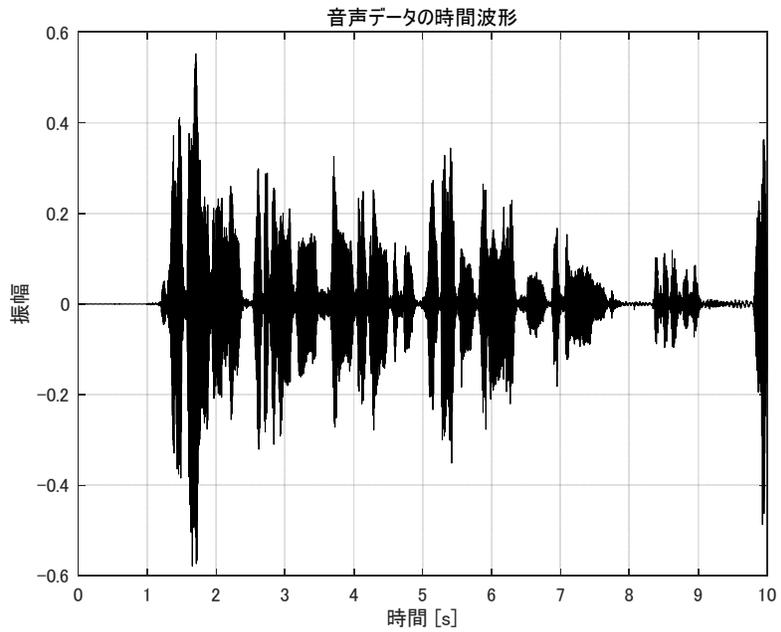


図 36 ワンルーム 吸音率 0.5

3.4.5 ワンルーム 吸音率 0.7

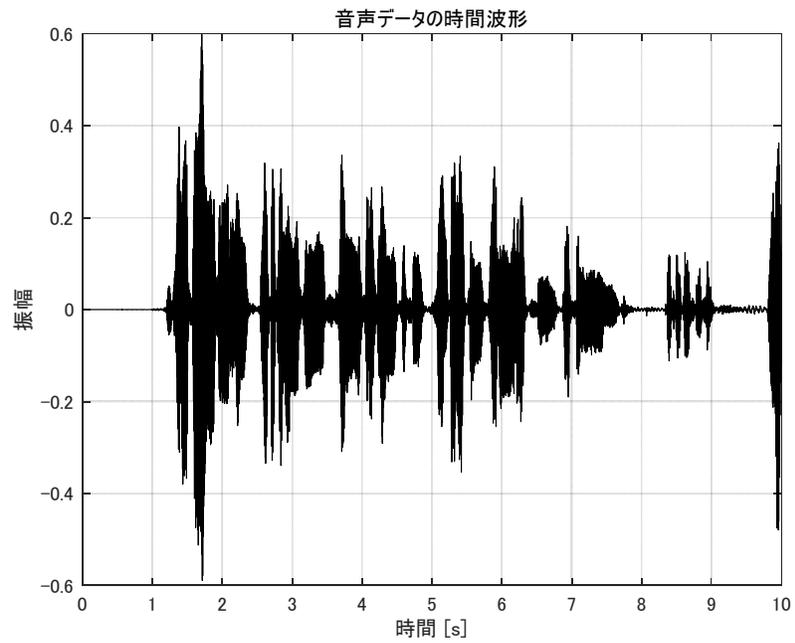


図 37 ワンルーム 吸音率 0.7

3.4.6 ワンルーム 吸音率 0.9

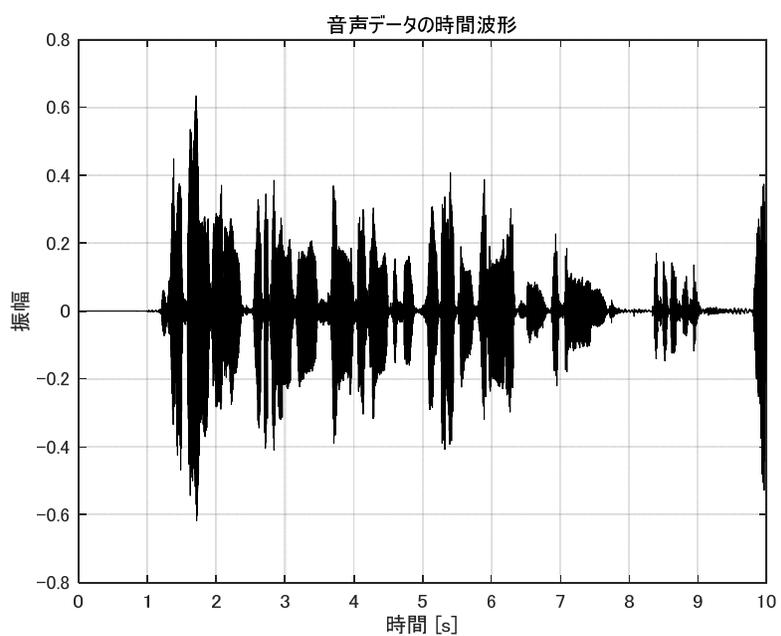


図 38 ワンルーム 吸音率 0.9

3.4.7 教室 吸音率 0.1

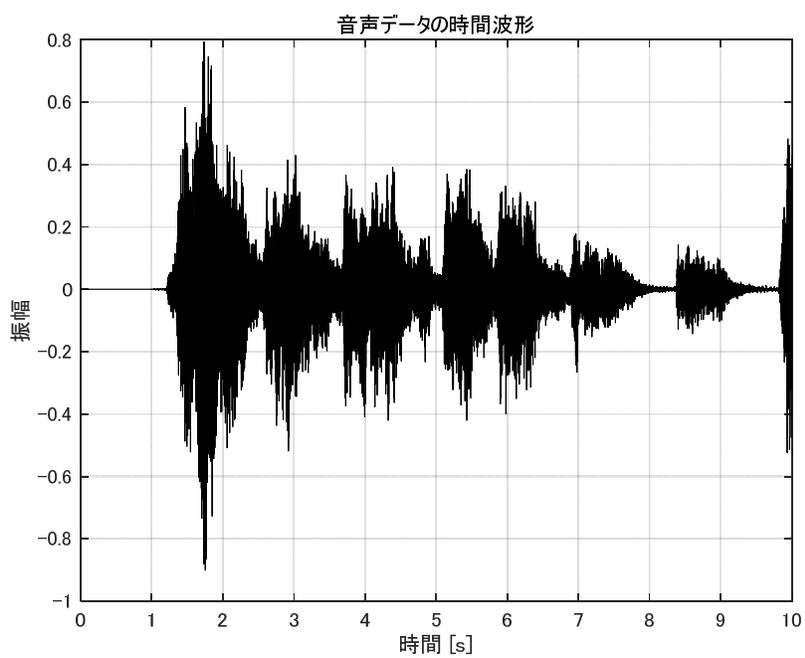


図 39 教室 吸音率 0.1

3.4.8 教室 吸音率 0.3

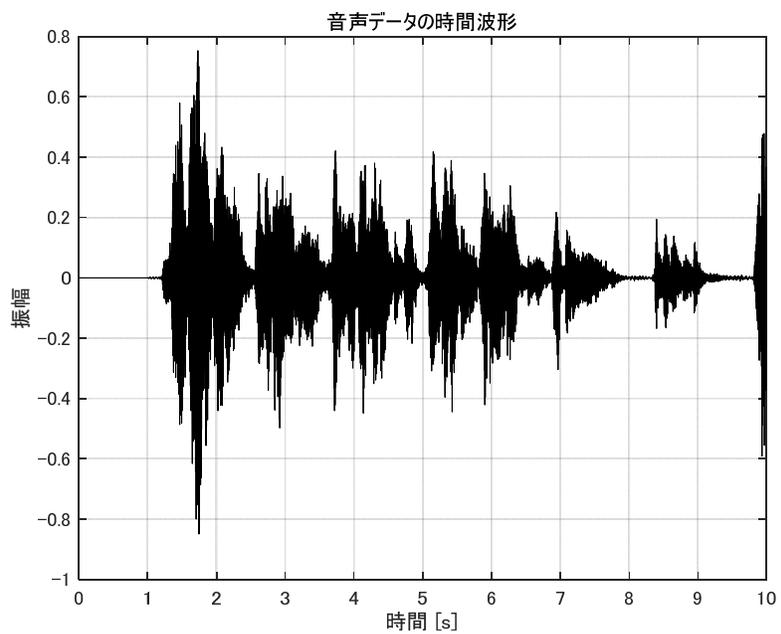


図 40 教室 吸音率 0.3

3.4.9 教室 吸音率 0.5

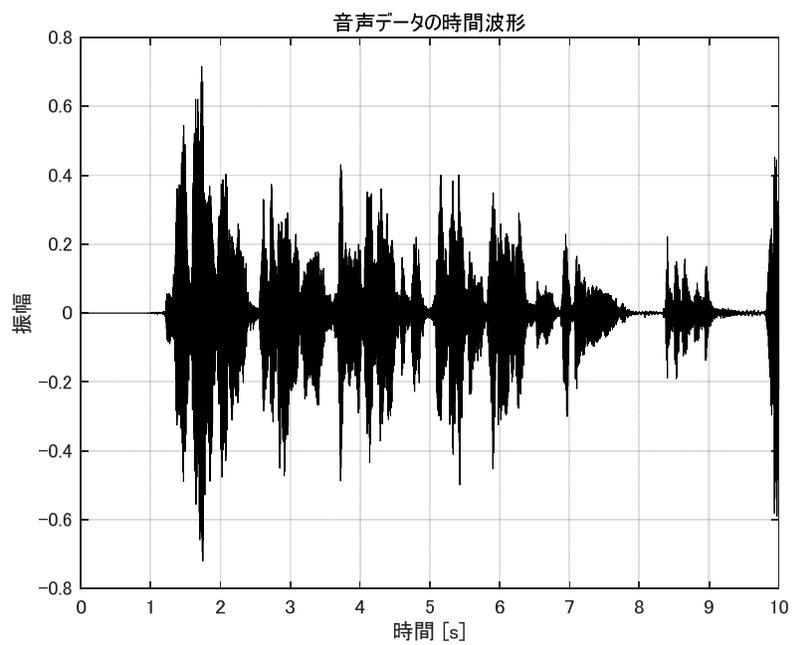


図 41 教室 吸音率 0.5

3.4.10 教室 吸音率 0.7

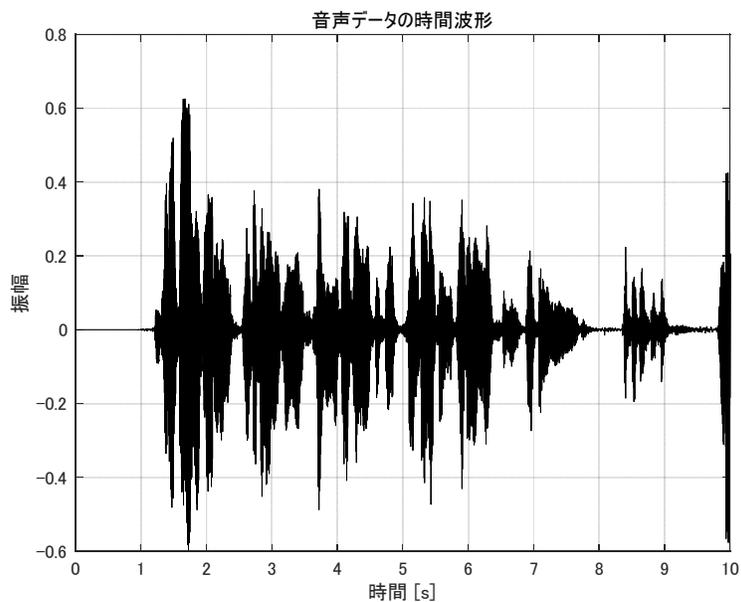


図 42 教室 吸音率 0.7

3.4.11 教室 吸音率 0.9

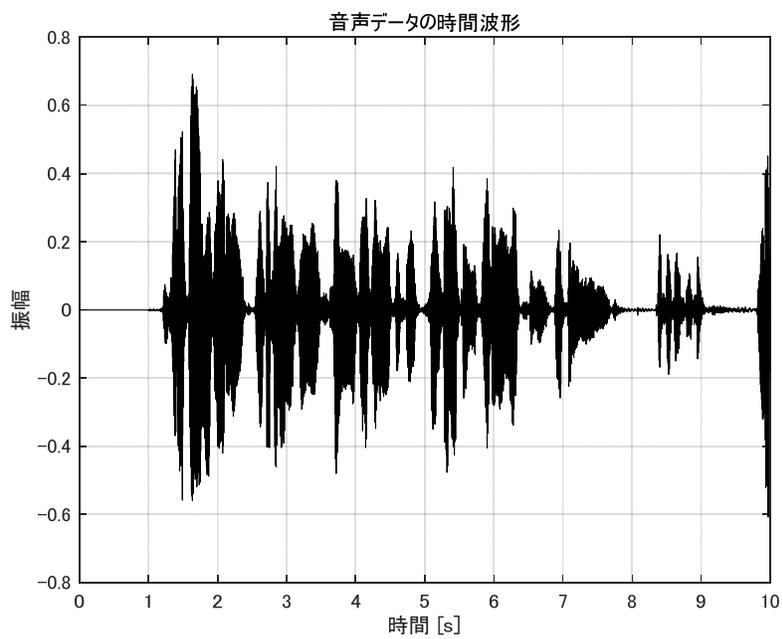


図 43 教室 吸音率 0.9

3.4.12 ホール 吸音率 0.1

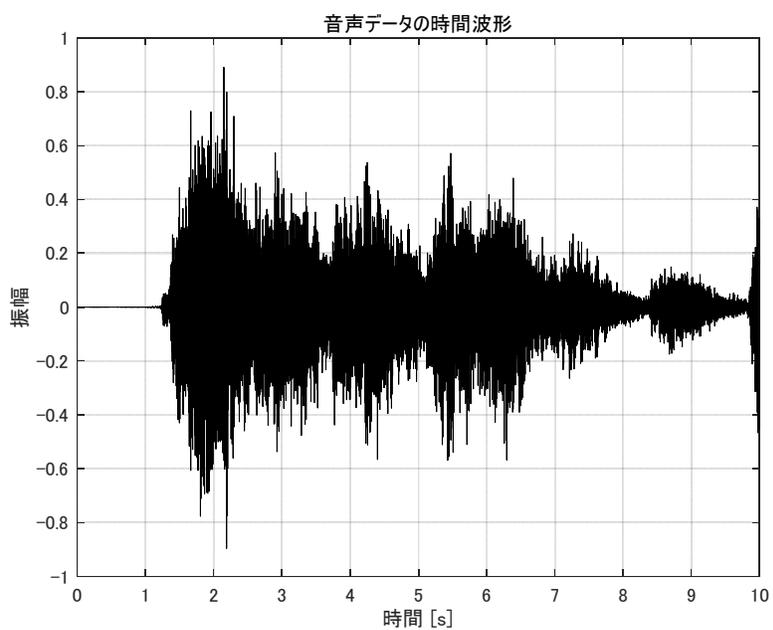


図 44 ホール 吸音率 0.1

3.4.13 ホール 吸音率 0.3

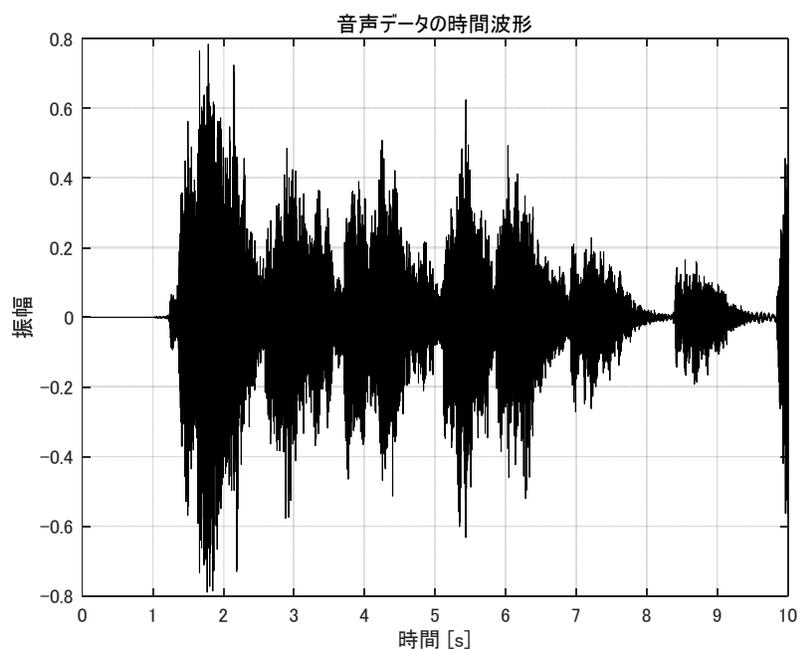


図 45 ホール 吸音率 0.3

3.4.14 ホール 吸音率 0.5

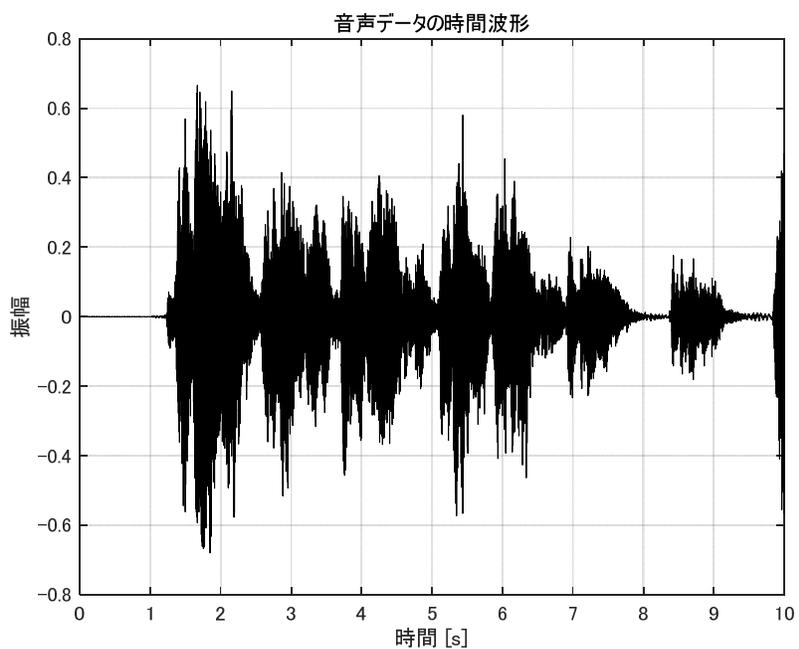


図 46 ホール 吸音率 0.5

3.4.15 ホール 吸音率 0.7

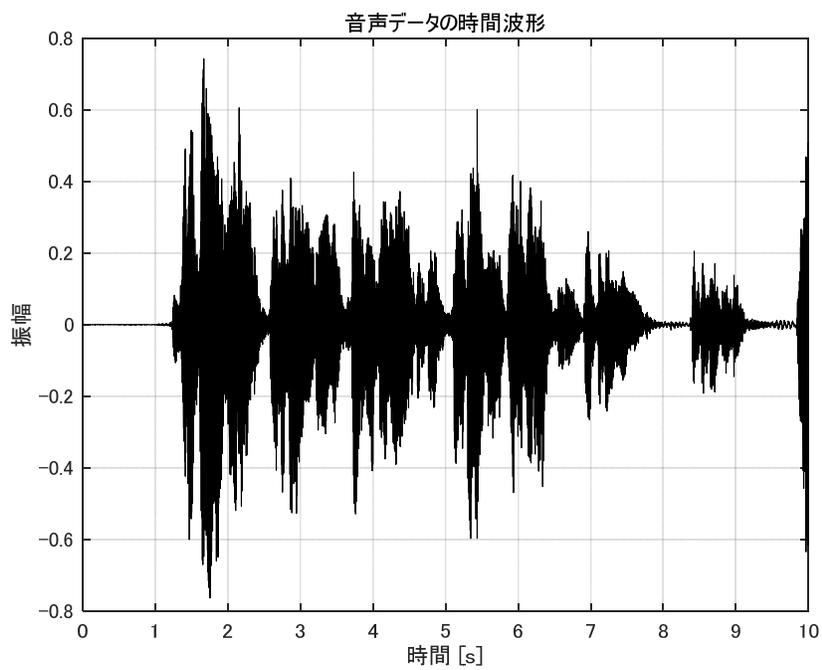


図 47 ホール 吸音率 0.7

3.4.16 ホール 吸音率 0.9

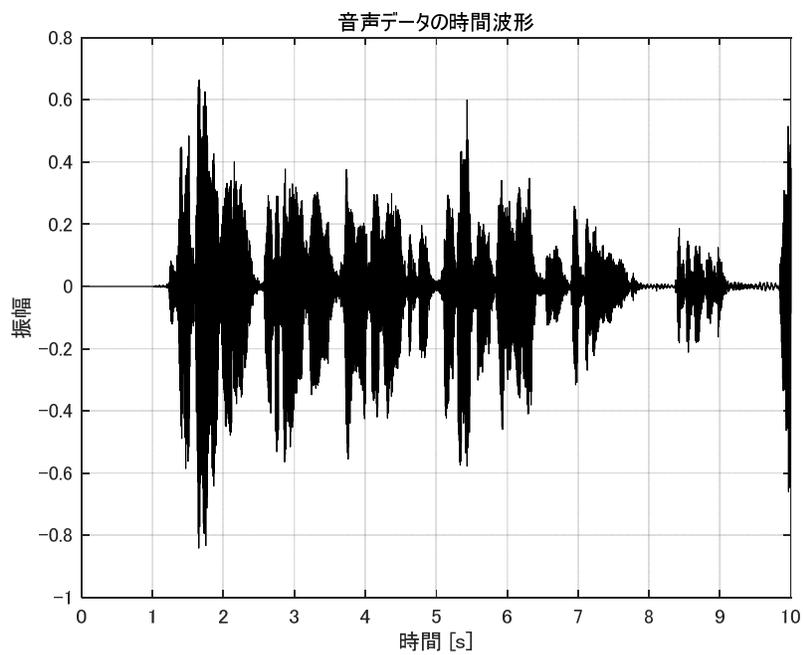


図 48 ホール 吸音率 0.9

3.4.17 スタジアム 吸音率 0.1

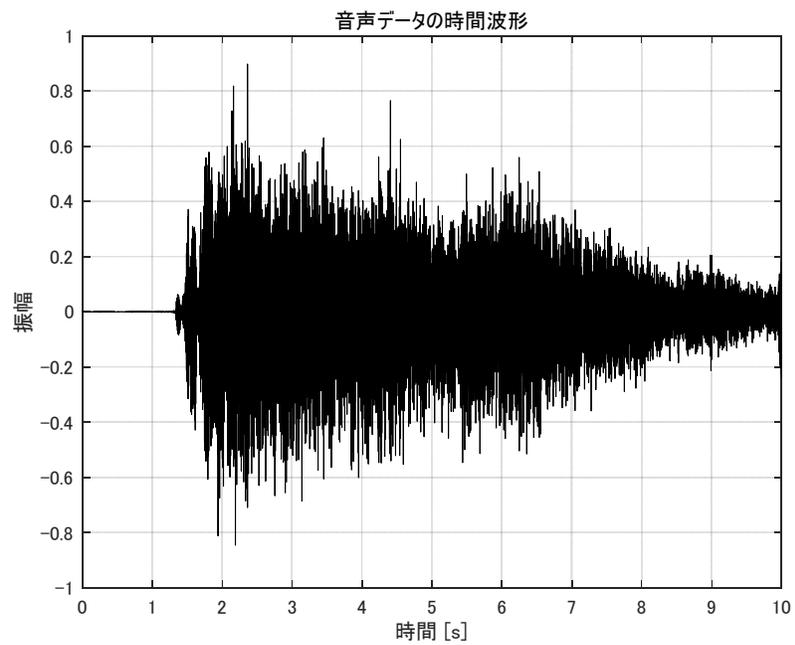


図 49 スタジアム 吸音率 0.1

3.4.18 スタジアム 吸音率 0.3

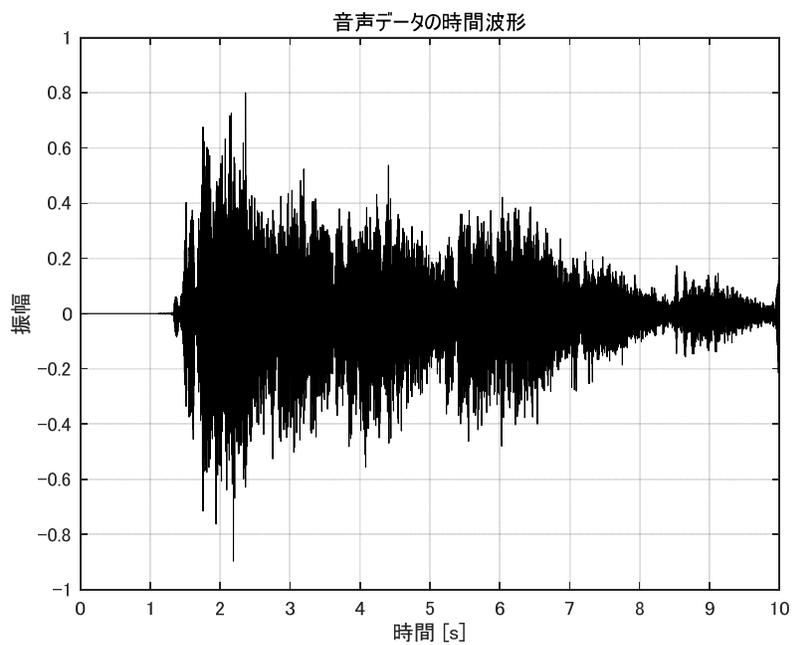


図 50 スタジアム 吸音率 0.3

3.4.19 スタジアム 吸音率 0.5

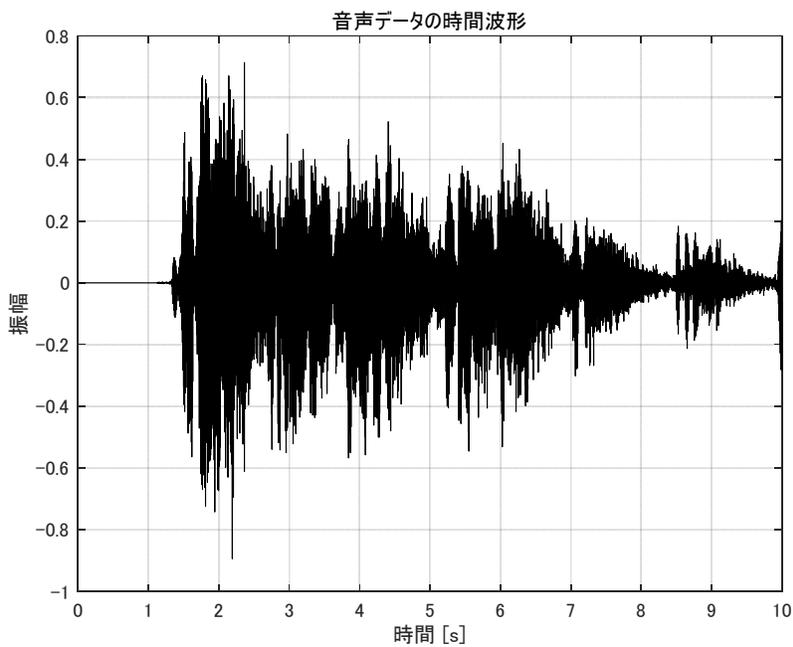


図 51 スタジアム 吸音率 0.5

3.4.20 スタジアム 吸音率 0.7

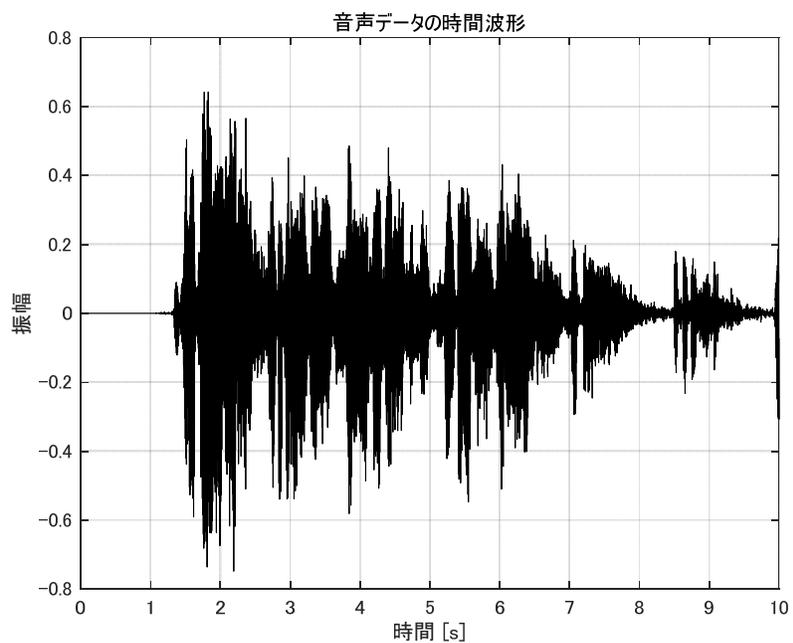


図 52 スタジアム 吸音率 0.7

3.4.21 スタジアム 吸音率 0.9

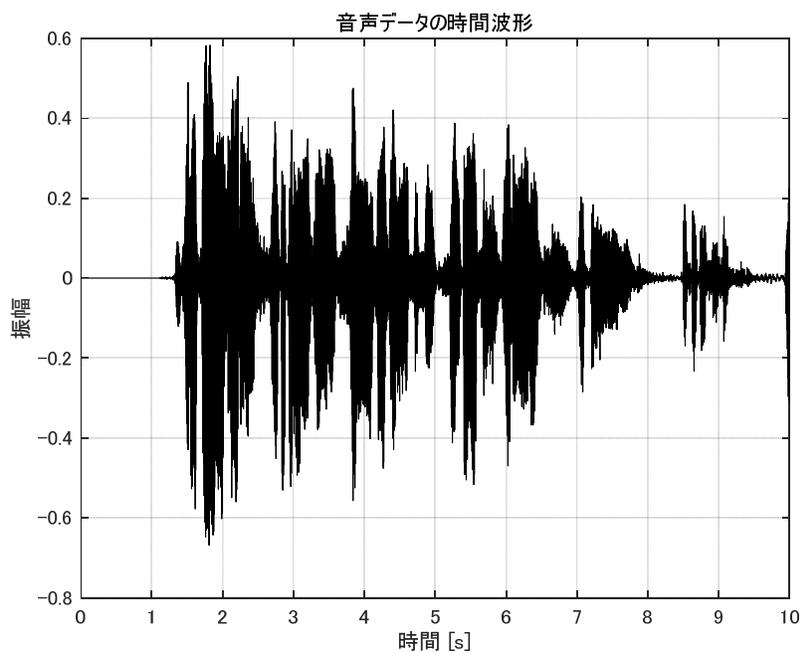


図 53 スタジアム 吸音率 0.9

3.5 考察

元の音声データと比較して考察する。まず、ワンルームでは、吸音率 0.1 から 0.9 までのいずれの場合においても多少の反響は確認されたが、吸音率の違いによる明確な差はあまり見られなかった。これは、空間全体に対する吸音面積の割合が十分でなかった可能性があることから、室内全体の音響特性に与える影響は小さく、吸音率の違いが人の聞こえ方に大きく影響しなかったためであると考えられる。

次に、教室においてはワンルームと比較して反響（ロングバスエコー）が大きくなり、特に吸音率 0.1 では反響の増加が顕著であった。吸音率 0.3 および 0.5 では反響は残るが、音声の聞き取りは可能で吸音率 0.7 および 0.9 では反響はほとんど感じられなかった。このことから、教室程度の空間規模では、吸音率の違いが反響の程度として明確に現れやすいことがわかる。

さらに、ホールでは教室よりも反響が明確に感じられ、吸音率 0.1 において最も反響が大きかった。また、吸音率 0.1 および 0.3 では音声が二重に聞こえる現象が確認され、残響の影響により音声の明瞭度が低下していることが分かった。一方で、吸音率 0.5 および 0.7 では反響と明瞭度のバランスが比較的良好であり、吸音率 0.9 では反響がほとんど感じられなかった。これより、ホール規模の空間では、適度な吸音が音声の聞き取りやすさに関係する可能性があると考えられる。

また、最も空間規模の大きいスタジアムでは、吸音率 0.1 において音声が聞き取れないほど強い反響が生じた。吸音率 0.3 および 0.5 でも反響は大きく、音声明瞭度は低い状態であった。一方、吸音率 0.7 では反響はあるものの音声が認識可能となり、吸音率 0.9 では反響はほとんど感じられなかった。この結果は、空間容積が大きくなるほど残響時間が長くなり、十分な吸音性能を確保しなければ音声の伝達が著しく阻害されることを示している。

4. 結論

本研究では、床衝撃音に及ぼす梁せいと木材の影響および室内における空間規模と吸音率の関係について検討を行った。その結果、いずれの場合においても、単一の要因のみでは音の大きさや聞こえ方を十分に説明することは難しく、周波数特性や空間条件との相互作用が重要であることがわかった。

床衝撃音について、基準室と梁せい 200 mm、400 mm、600 mm、800 mmを比較した結果、梁せいの違いによる床衝撃音レベルの変化は周波数帯によって異なる傾向が確認された。特に 31.25 Hz では、梁せいが大きくなるにつれて床衝撃音レベルが低下しており、梁せいの増加によって床構造の剛性や質量が増し、低周波数帯の振動が抑制された可能性が考えられる。一方で、50~80 Hz や 62.5 Hz 付近では、梁せいが大きい場合に床衝撃音レベルが高くなる傾向が見られた。これは、梁せいの変化により床構造の固有振動数がこれらの周波数帯に近づき、振動が増幅されたためであると推察される。また、125 Hz、250 Hz、500 Hz 付近では、梁せいの違いによる床衝撃音レベルの差が小さく、これらの周波数帯では梁せいの影響が相対的に小さいことが示された。以上より、梁せいを大きくすることが必ずしも床衝撃音の低減につながるとは限らず、対象とする周波数帯を考慮した評価が必要であると考えられる。さらに、木材と基準室を比較した結果、測定した周波数範囲において両方の特性が重なり合う周波数帯は確認されなかった。40 Hz 未満の低周波域では木材の音圧レベルが基準室よりも低く、木材が低周波音に対して一定の減衰効果を持つ可能性がある。一方、40 Hz を超える周波数帯では基準室の方が音圧レベルは低くなり、特に 50 Hz 付近での差が顕著であった。また、200 Hz 以降の周波数帯では両者がほぼ平行な減衰傾向を示し、中高周波域では音響特性の違いが小さくなることが確認された。

室内吸音に関する検討では、同一の吸音率であっても部屋の大きさによって反響の程度が大きく異なることが確認された。ワンルームでは空間規模が小さいため、吸音率の違いによる反響の差は小さく、全体として大きな変化は見られなかった。一方、教室、ホール、スタジアムと空間規模が大きくなるにつれて、吸音率 0.1 では反響が顕著となり、特にスタジアムでは音声の聞き取りが困難となった。これは、空間容積の増大により反射音の経路や回数が増加し、残響時間が長くなったためであると考えられる。これに対し、吸音率 0.9 ではいずれの空間においても反響はほとんど感じられず、吸音性能の高さが空間規模による影響を抑制したといえる。

以上の結果から、床衝撃音に関しては、梁せいを大きくすることで低周波域において床衝撃音レベルが低下する傾向が見られる一方、周波数帯によっては逆に床衝撃音レベルが高くなる場合も確認され、梁の有無や大きさのみで音の大小を一概に判断することは困難であることが示された。また、木材と基準室の比較においても、周波数帯によって音圧レベルの優劣が入れ替わることが確認され、特に低周波域では材料特性の違いが音響特性に大きく影響することが分かった。

さらに、室内吸音に関する検討からは、空間規模が小さい場合には吸音率の違いが音の聞こえ方に与える影響は限定的であるのに対し、空間規模が大きくなるにつれて吸音率の差が反響や音声明瞭度に大きく影響することが明らかとなった。これらの結果より、良好な音環境を実現するためには、構造要素や材料の選択だけでなく、空間の大きさや対象とする周波数帯を考慮した総合的な音響設計が重要であるといえる。

参考文献

- [1] 奥平琢斗, “床衝撃音データベースの構築に関する研究”, 関西大学卒業論文, 2025.
- [2] VA-FDTD, <https://www2.kansai-u.ac.jp/va-fdtd/> (2026.2.7).
- [3] K. S. Yee, “Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell’s Equations in Isotropic Media”, IEEE Trans. Antennas Propag. AP-148, 302-307, 1966.
- [4] Masahiro Toyoda, Daiji Takahashi, “Prediction for architectural structure-borne sound by the finite-difference time-domain method”, Acoust. Sci. & Tech. 30, 265-276, 2009.
- [5] 高木直樹, 山下恭弘, 松井昌幸. “矩形閉空間の虚像法による解析”, Journal of the Faculty of Engineering, Shinshu University 63, 64-65, 1998.
- [6] 小林愛佳, “幾何音響理論の改善”, 関西大学卒業論文, 2020.