

床衝撃音データベースの構築に関する研究

関西大学 環境都市工学部 建築学科
建築環境工学第 研究室
建 21-0019 奥平 琢斗
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. 研究方法.....	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 研究の主な流れ.....	14
2.5 研究対象と結果.....	14
2.5.1 基準室.....	14
2.5.2 基準より大きい室.....	25
2.5.3 基準より小さい室.....	29
2.5.4 コンクリート厚 150mm.....	33
2.5.5 コンクリート厚 250mm.....	35
2.5.6 コンクリートヤング率増加.....	37
2.5.7 コンクリートヤング率現象.....	39
2.5.8 コンクリート密度増加.....	41
2.5.9 コンクリート密度減少.....	43
2.5.10 梁あり.....	45
3. 考察.....	47
3.1 衝撃源による違い.....	47
3.2 室の種類による違い.....	47
4. 結論.....	50
参考文献.....	51

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くても、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指標を表す遮音等級（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（L_r 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、床の厚さや種類を変化させて、床衝撃音の音データを予測、収集しておくことで、実務経験の少ない設計者でも、床材や床仕様を考える際に、音の大きさ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

「VA-FDTD」[1]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、様々な床仕様に対して床衝撃音を予測する。設計者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床衝撃音のデータベースを構築することを本研究の目的とする。

2 . 研究方法

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[2]。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。Fig. 2.1 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 Fig. 2.1 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。これをリープ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。

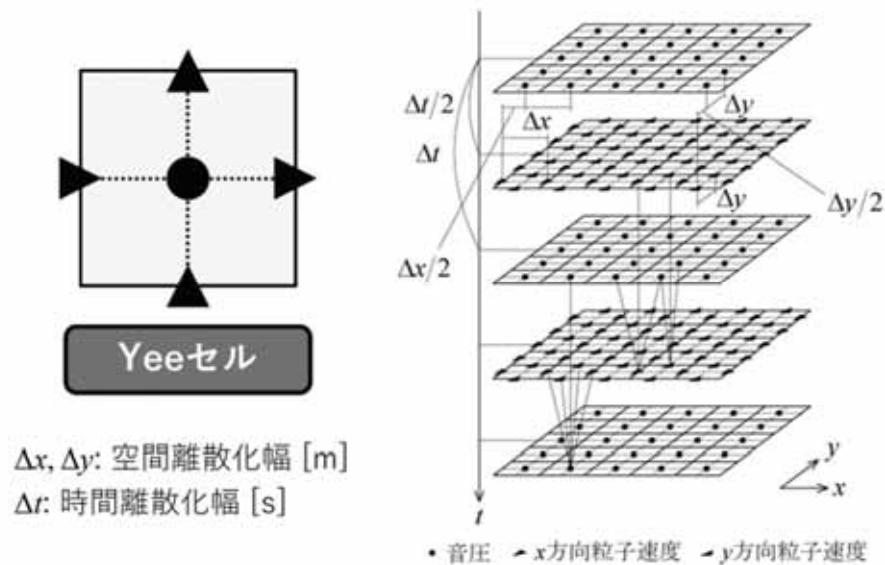


Fig. 2.1 Yee セルとスタガードグリッド

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 Fig. 2.2[4]のように配置する。

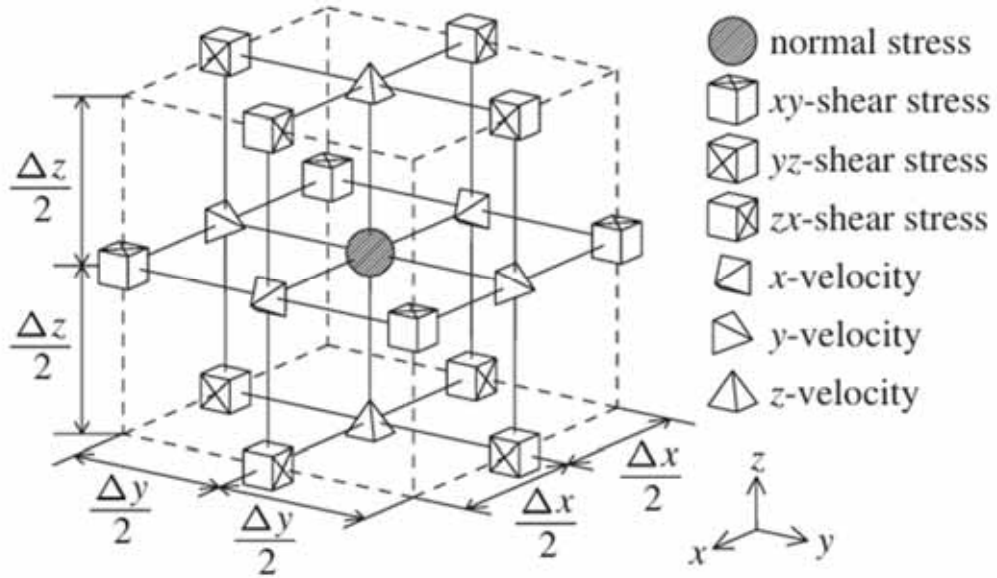


Fig. 2.2 3次元グリッドでの配置

(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

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、空間や時間のある単位で区切り、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、

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

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

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

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

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

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

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。

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

$$\left(\frac{\rho_0+\rho_1}{2}\right)\frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{T_{xy1}-T_{xy0}}{\Delta x} + \frac{T_{yy1}-T_{yy0}}{\Delta y} + \frac{T_{yz1}-T_{yz0}}{\Delta z} \quad (2.37)$$

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

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、 $v_{x0,y1,z0}$ 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

(1) ボールが落ちる音



Fig. 2.3 ボールの衝撃力を測定する様子

Fig. 2.3 に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 RION YI-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 Fig. 2.4 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。

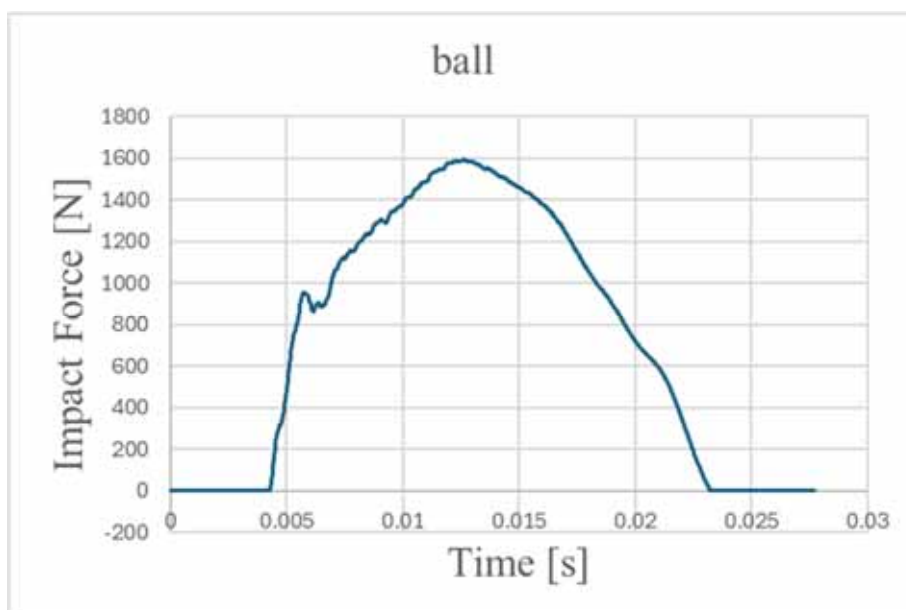


Fig. 2.4 ボールの加振力波形

(2)人の歩く音



Fig. 2.5 足音を測定する様子

Fig. 2.5 に足音の衝撃力を測定する様子を示す。およそ 85 kg の人物が歩きながら測定器の上を通過した際の力を測定した。足音の加振力波形を Fig. 2.6 に示す。

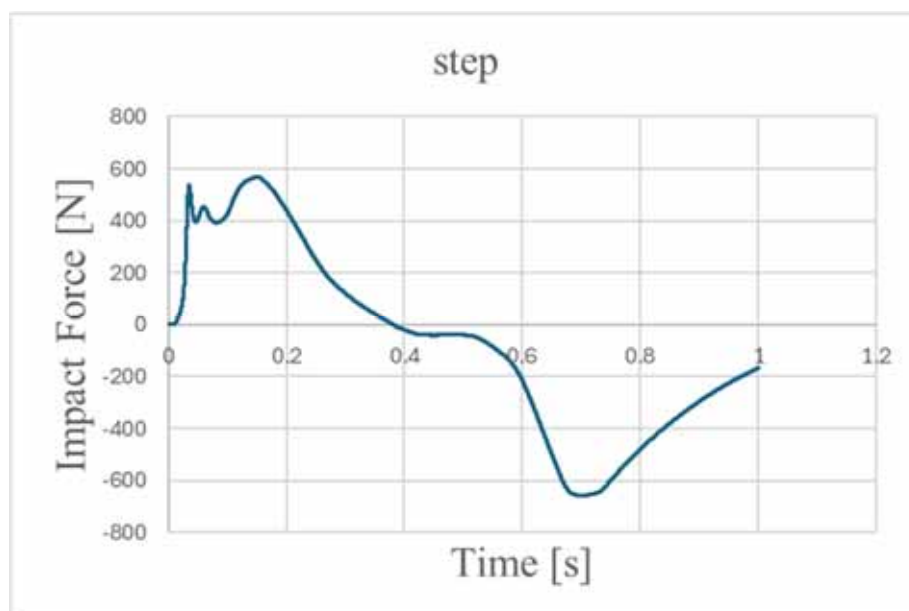


Fig. 2.6 足音の加振力波形

(3) 椅子を引きずる音



Fig. 2.7 椅子の衝撃力を測定する様子

Fig. 2.7 に椅子を引きずった際の衝撃力を測定する様子を示す。測定にはパイプ椅子を使用した。椅子の加振力波形を Fig. 2.8 に示す。

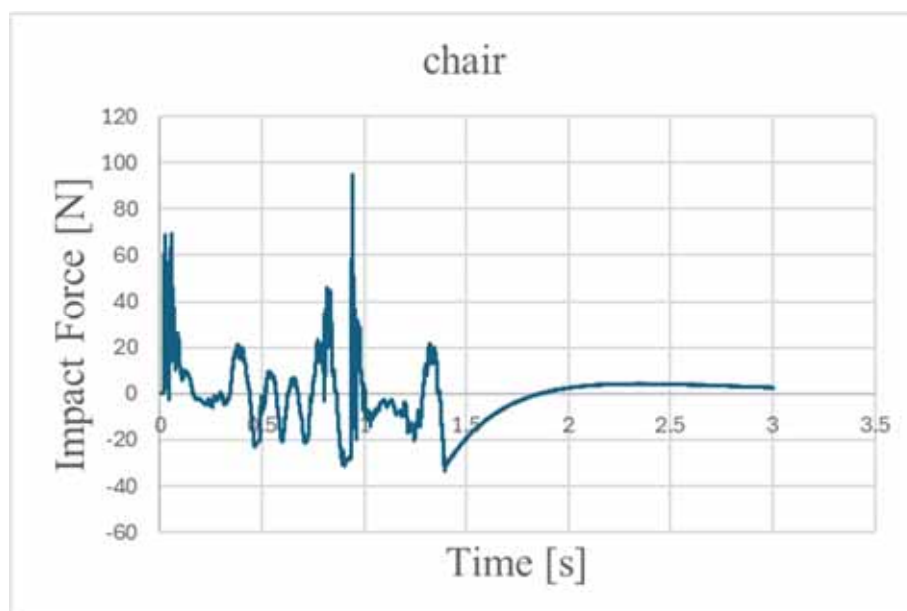


Fig. 2.8 椅子の加振力波形

(4) スプーンが落ちる音

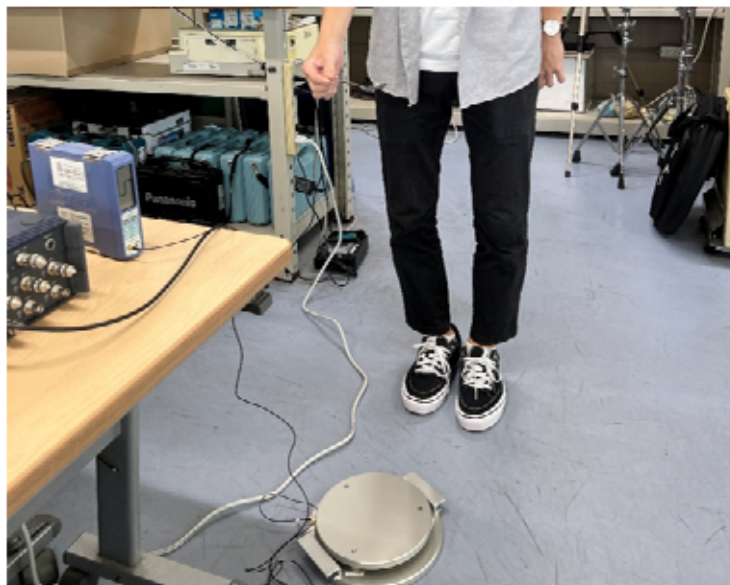


Fig. 2.9 スプーンの衝撃力を測定する様子

Fig. 2.9 にスプーンの衝撃力を測定する様子を示す。測定には、およそ 17 cm のステンレス製のスプーンを使用した。落とす高さは測定器から 100 cm とした。また、スプーンに加振力波形を Fig. 2.10 に示す。

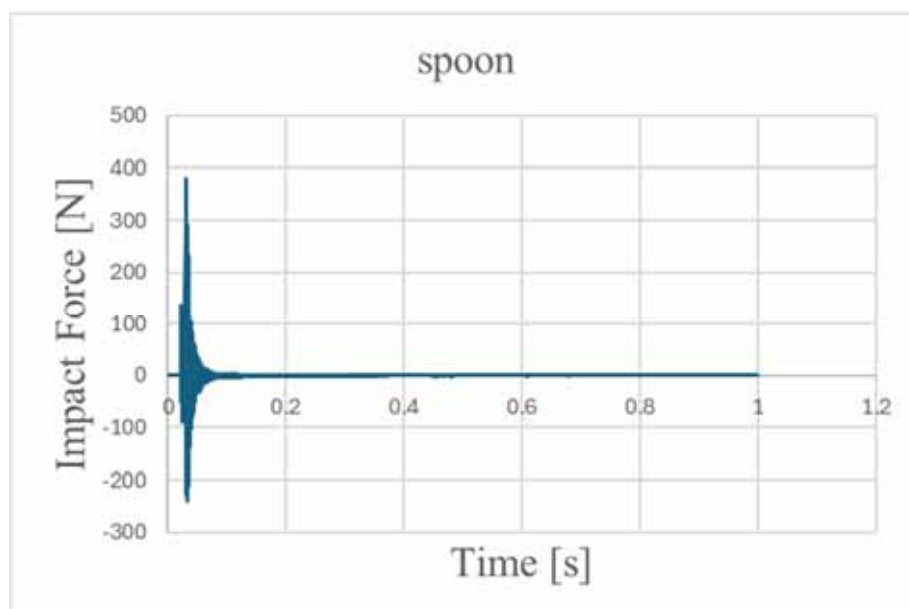


Fig. 2.10 スプーンに加振力波形

2.4 研究の主な流れ

初めに「Shade3D」という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」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。ただし、室形状を変更しているものに関しては、ボールを落とした音のみで評価を行う。

2.5 研究対象と結果

2.5.1 基準室

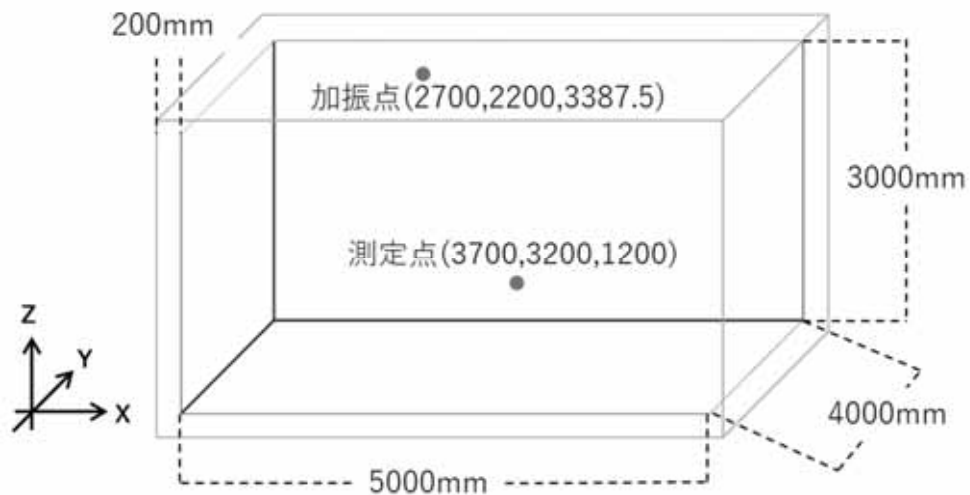


Fig. 2.11 基準室

Fig 2.11 に基準とする室と条件を示す。基準となる室は横 5000 mm、奥行き 4000 mm、高さ 3000 mm 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 500 mm 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。

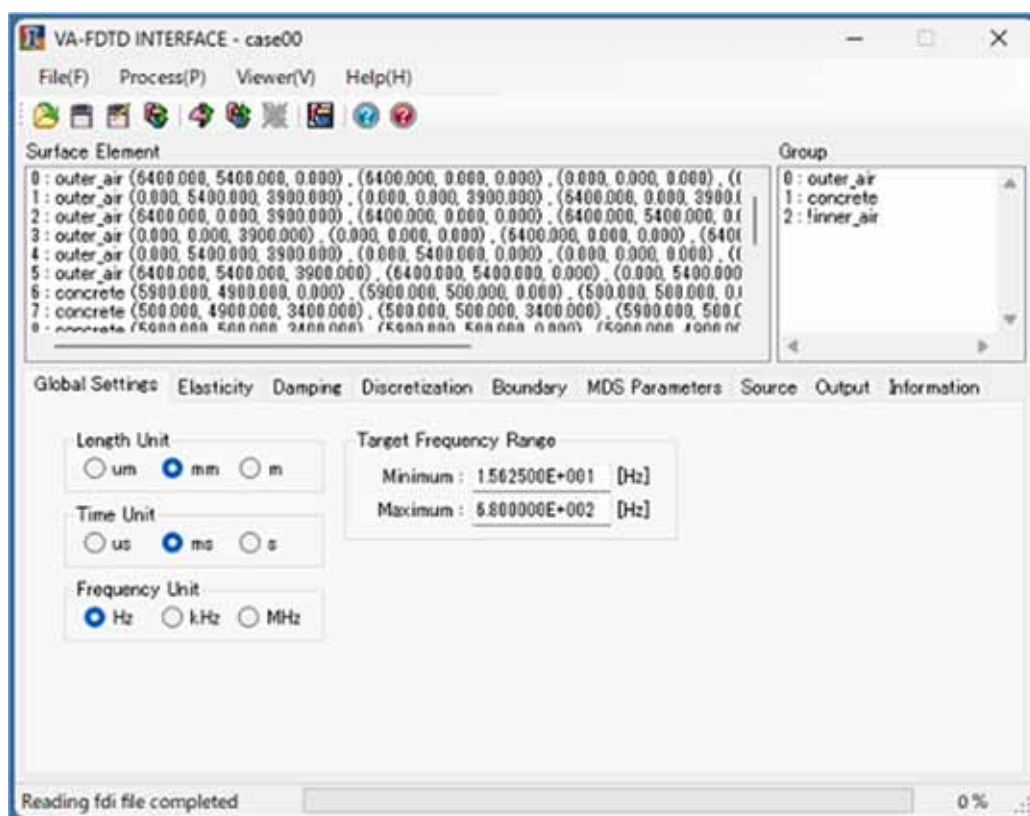


Fig. 2.12 VA-FDTD の設定画面 (Global Settings)

Fig. 2.12 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。

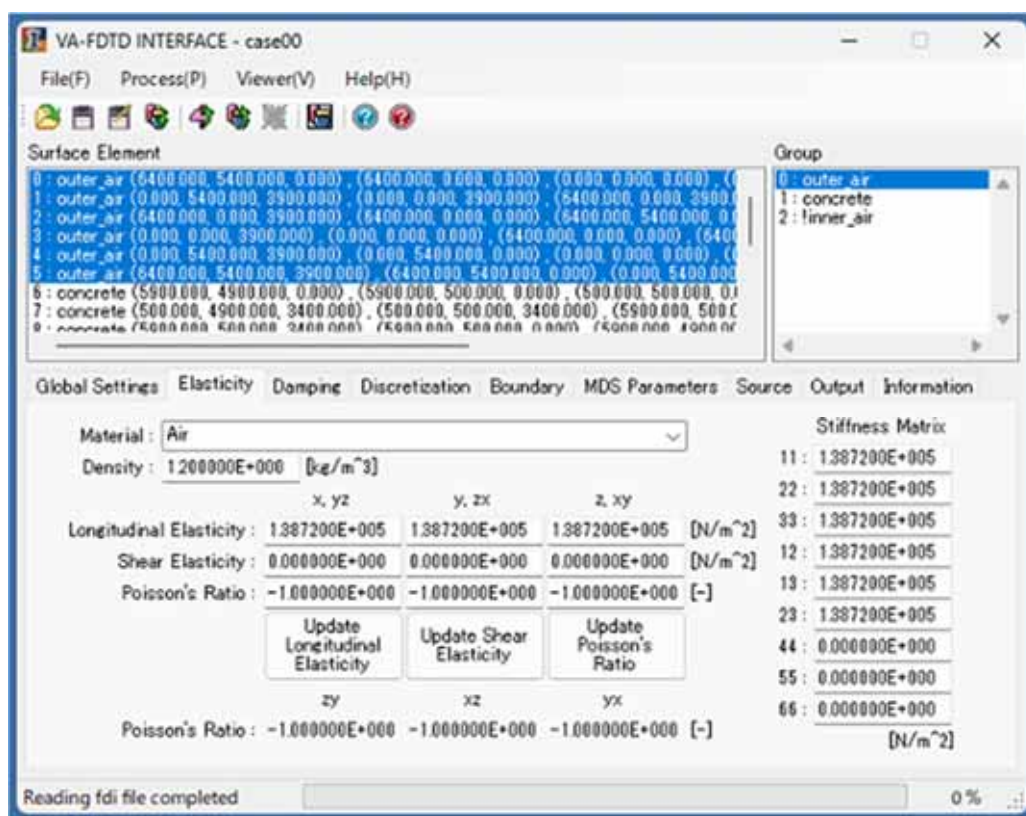


Fig. 2.13 VA-FDTD の設定画面 (Elasticity)

Fig. 2.13 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 $1.2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ 、ヤング率を $1.3872 \times 10^5 \text{ [N/m}^2\text{]}$ 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、基準室では、密度を $2.4 \times 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ 、ヤング率を $2.4 \times 10^{10} \text{ [N/m}^2\text{]}$ と設定した。

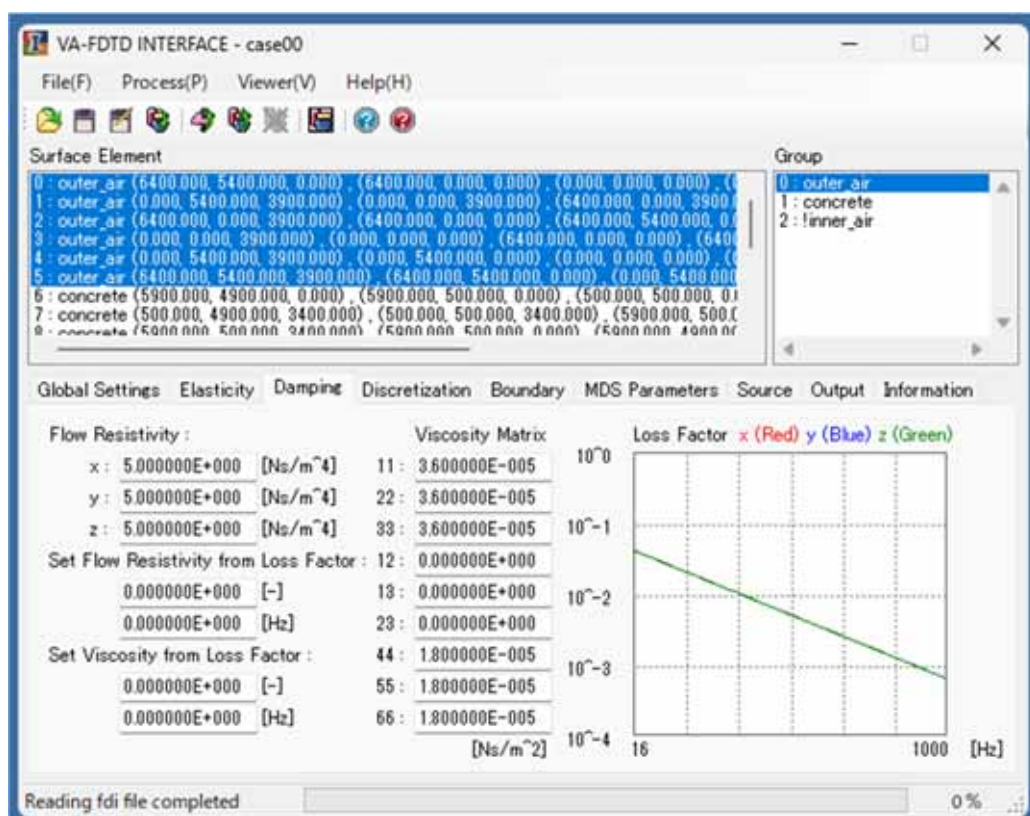


Fig. 2.14 VA-FDTD の設定画面 (Damping)

Fig. 2.14 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 $5.0 \text{ [Ns/m}^4\text{]}$ 、せん断粘性係数をそれぞれ $1.8 \times 10^{-5} \text{ [Ns/m}^2\text{]}$ 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 $2.5 \times 10^4 \text{ [Ns/m}^4\text{]}$ 、Set Viscosity from Loss Factor(損失係数)をそれぞれ $5.0 \times 10^{-3} \text{ [-]}$ 、 32 [Hz] とした。

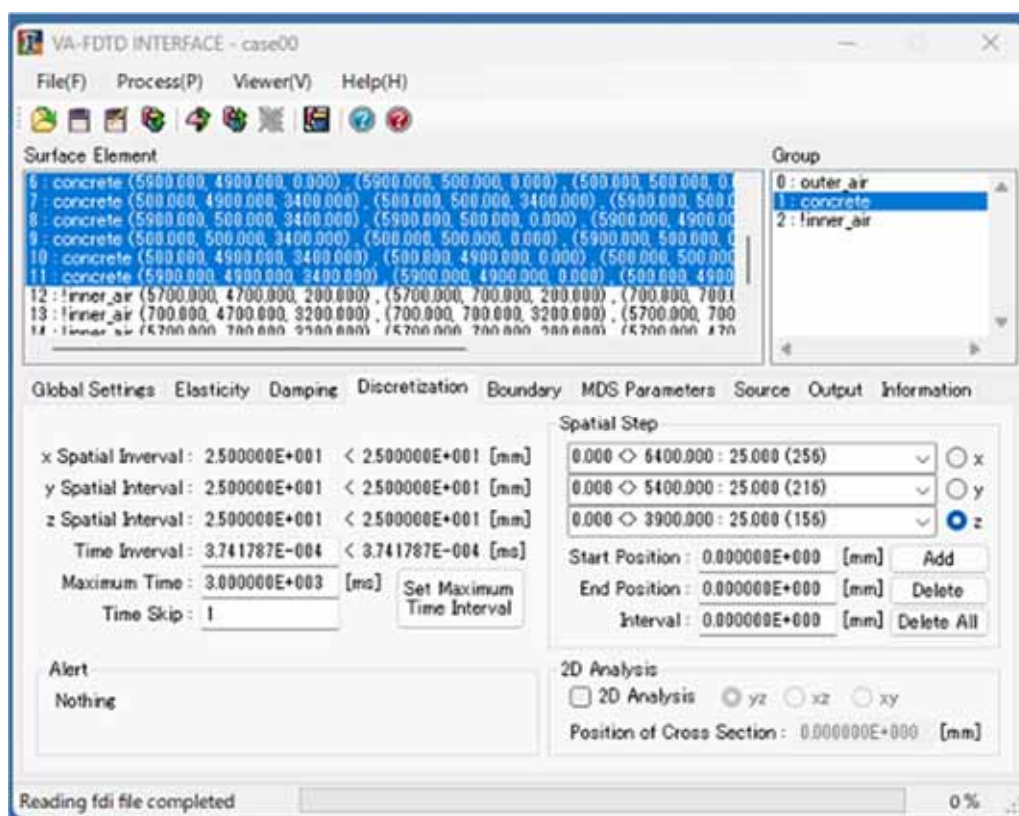


Fig. 2.15 VA-FDTD の設定画面 (Discretization)

Fig. 2.15 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。

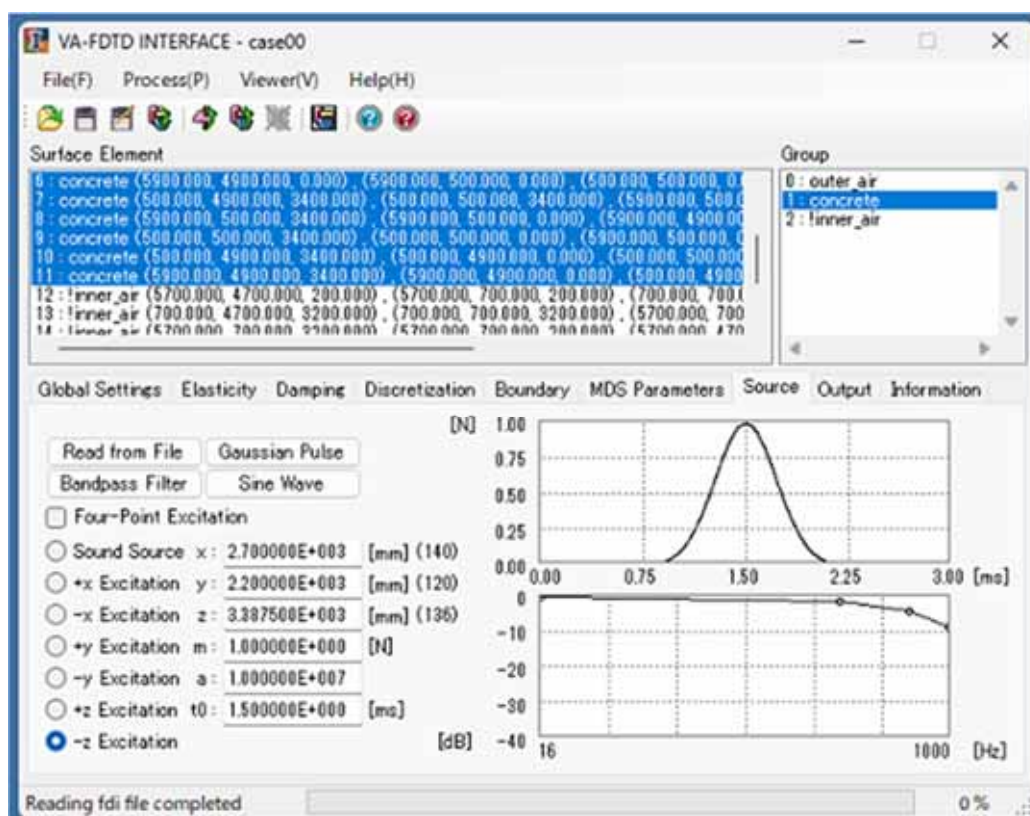


Fig. 2.16 VA-FDTD の設定画面 (Source)

Fig. 2.16 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 節で得た衝撃源の加振力波形を読み込んだ。

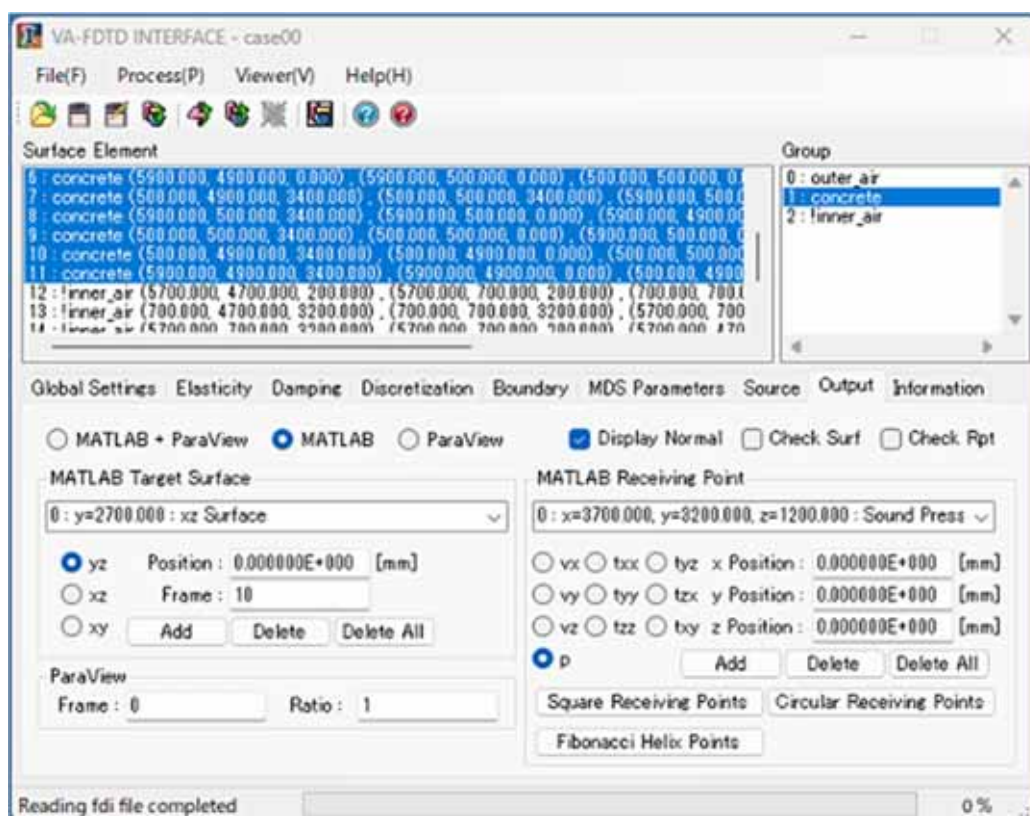


Fig. 2.17 VA-FDTD の設定画面 (Output)

Fig. 2.17 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。

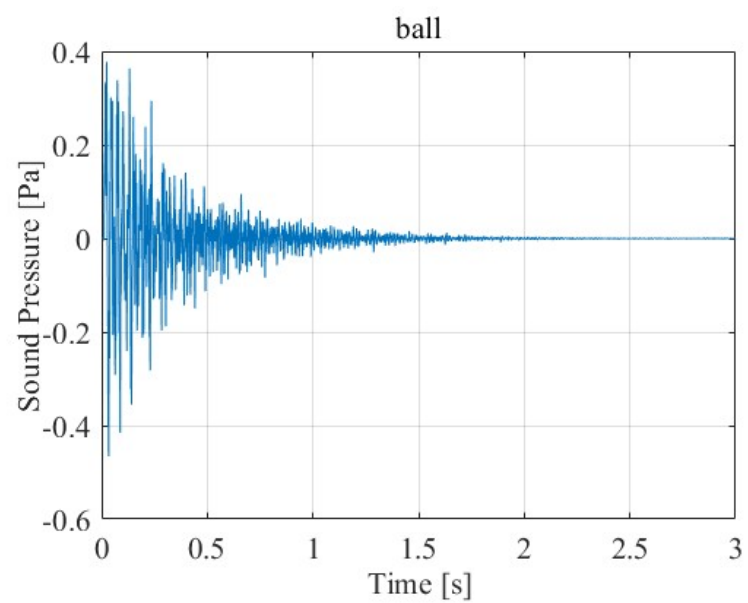


Fig. 2.18 ボールの加振力時間波形

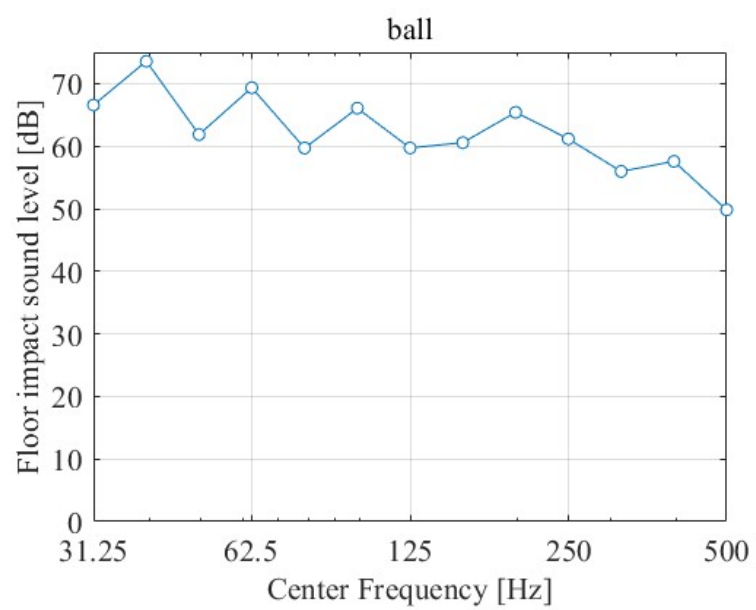


Fig. 2.19 ボールが落ちる音

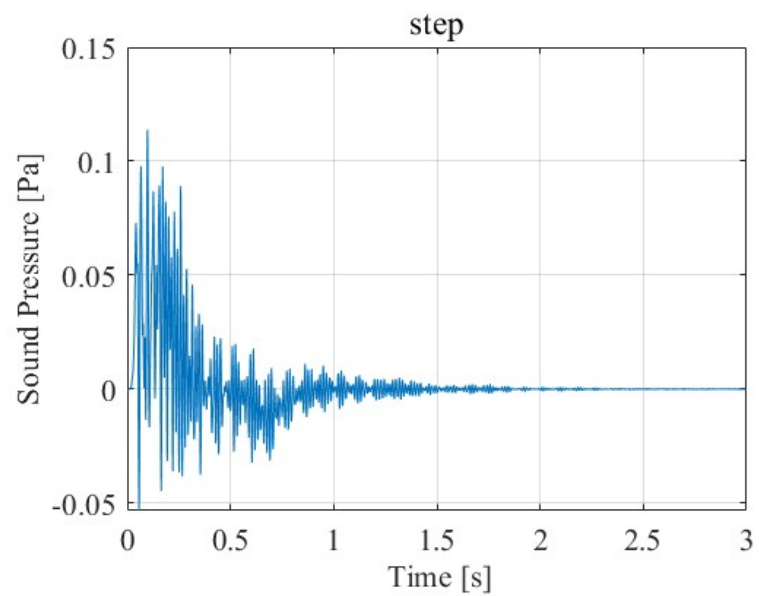


Fig.2. 20 足音の加振力時間波形

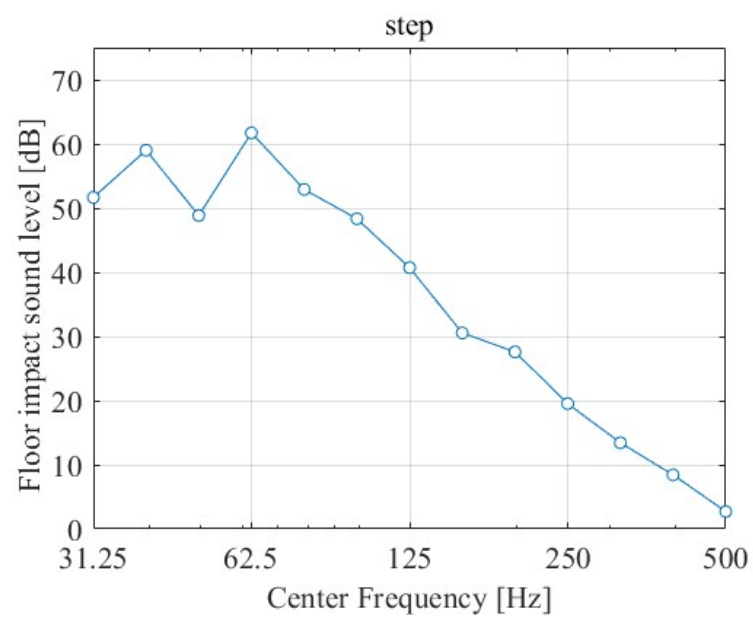


Fig. 2.21 人の歩く音

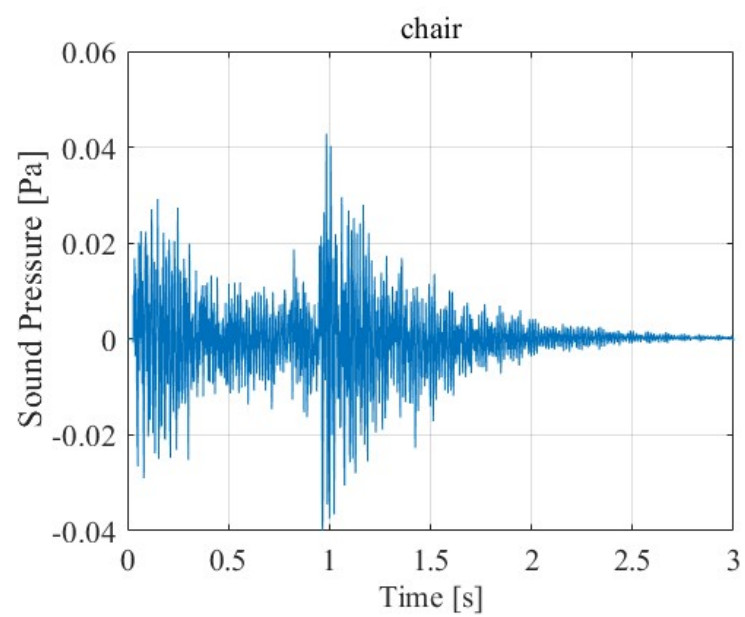


Fig.2. 22 椅子の加振力時間波形

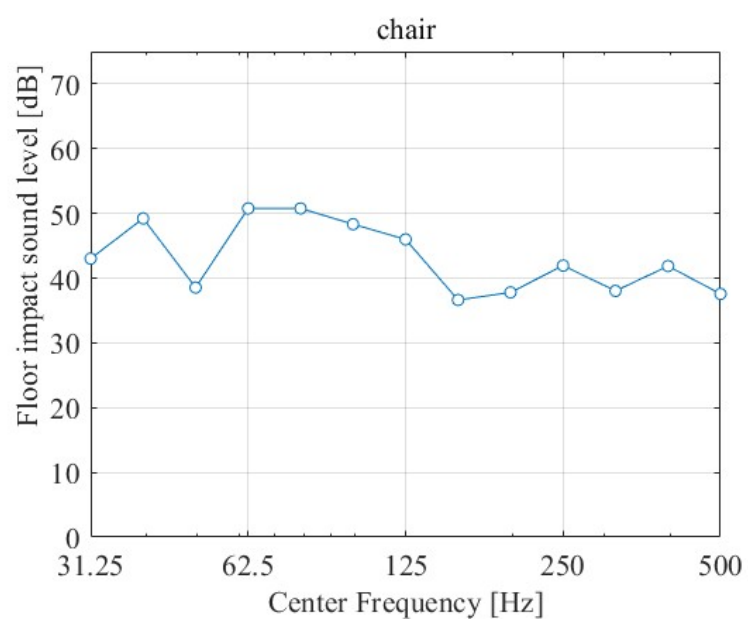


Fig. 2.23 椅子を引きずる音

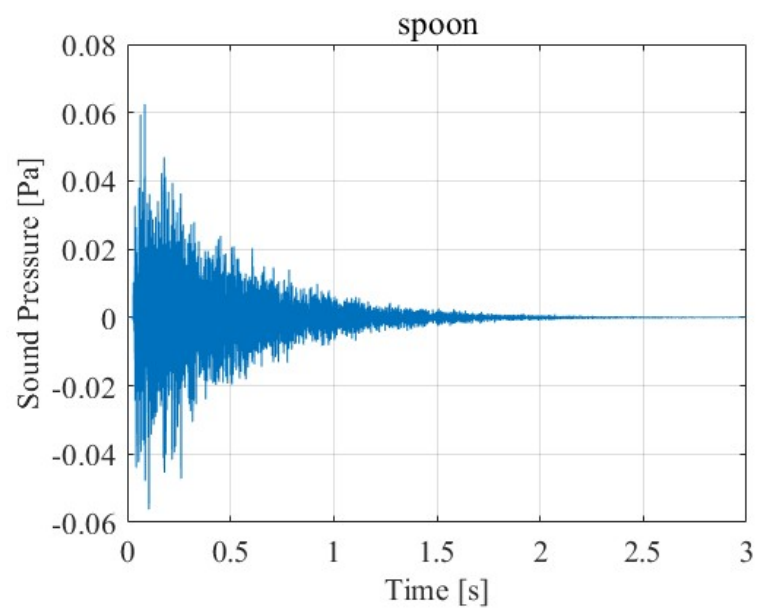


Fig.2. 24 スプーンに加振力時間波形

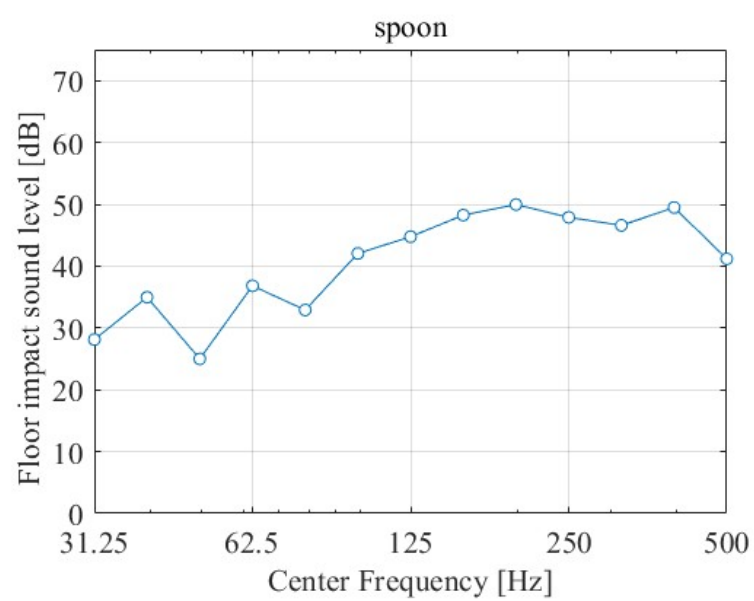


Fig. 2.25 スプーンが落ちる音

2.5.2 基準より大きい室

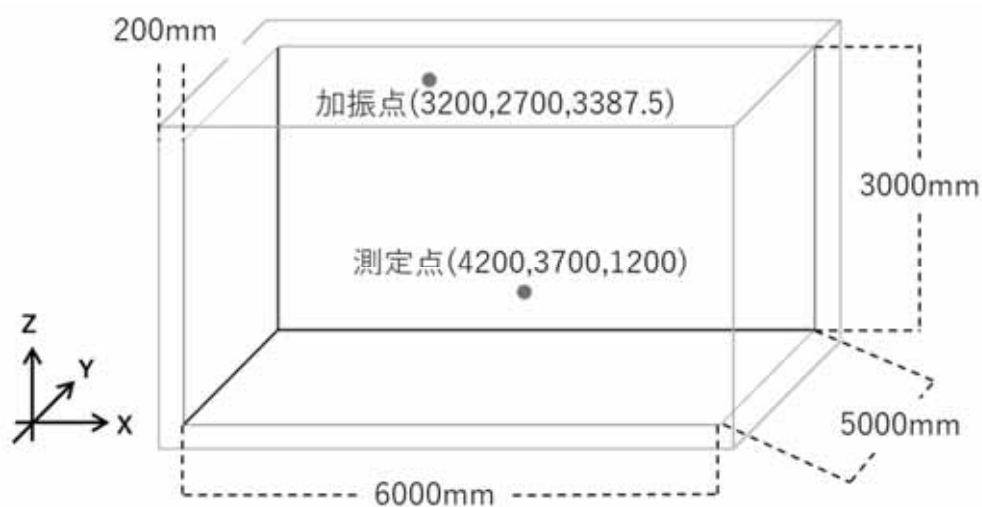


Fig. 2.26 基準より大きい室

Fig 2.26 に示すように、基準より大きい室として横 6000 mm、奥行き 5000 mm、高さ 3000 mm と基準室よりも高さ以外を 1m大きくした室を考えた。それに合わせて、室の中心からの距離が同じになるように、加振点を $X=3200$ mm、 $Y=2700$ mm、 $Z=3387.5$ mm の位置、測定点を $X=4200$ mm、 $Y=3700$ mm、 $Z=1200$ mm の位置に設定した。以降は「VA-FDTD」で基準室の場合から変更した設定を記載する。

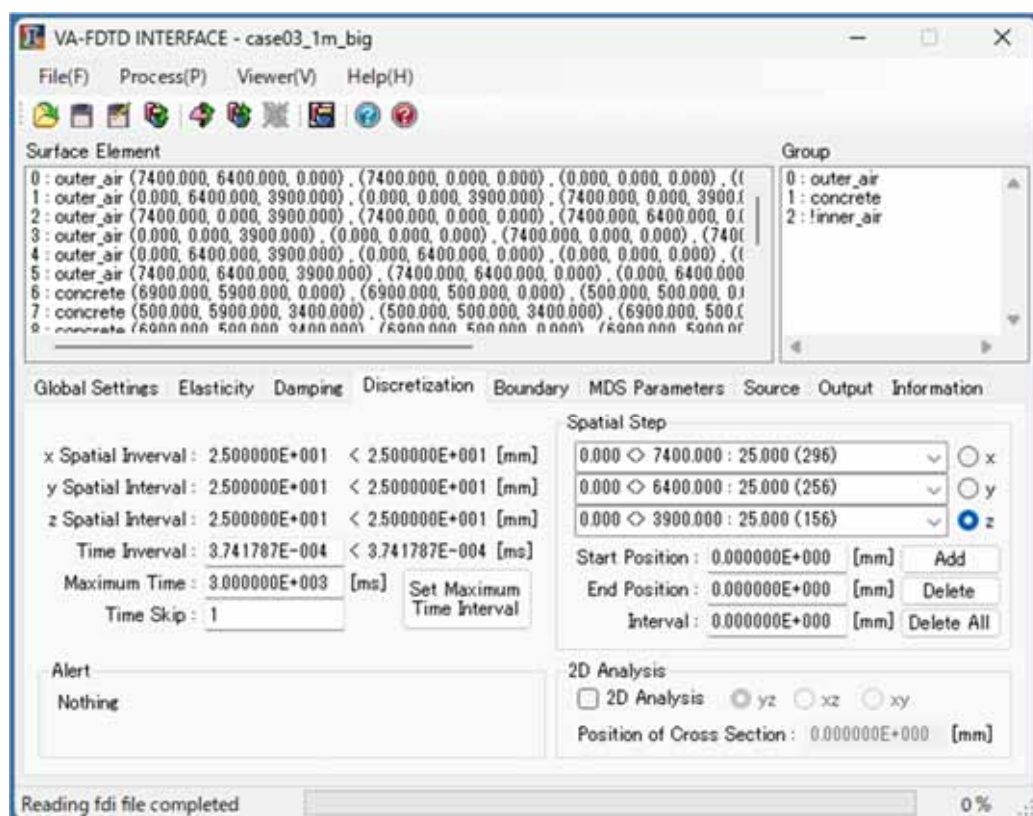


Fig. 2.27 VA-FDTD の設定画面 (Discretization)

Fig. 2.27 に示すように、Discretization タブにおいて、Spatial Step について、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軸についての大きさである X=7400 mm、Y=6400 mm、Z=3900 mm を入力した。

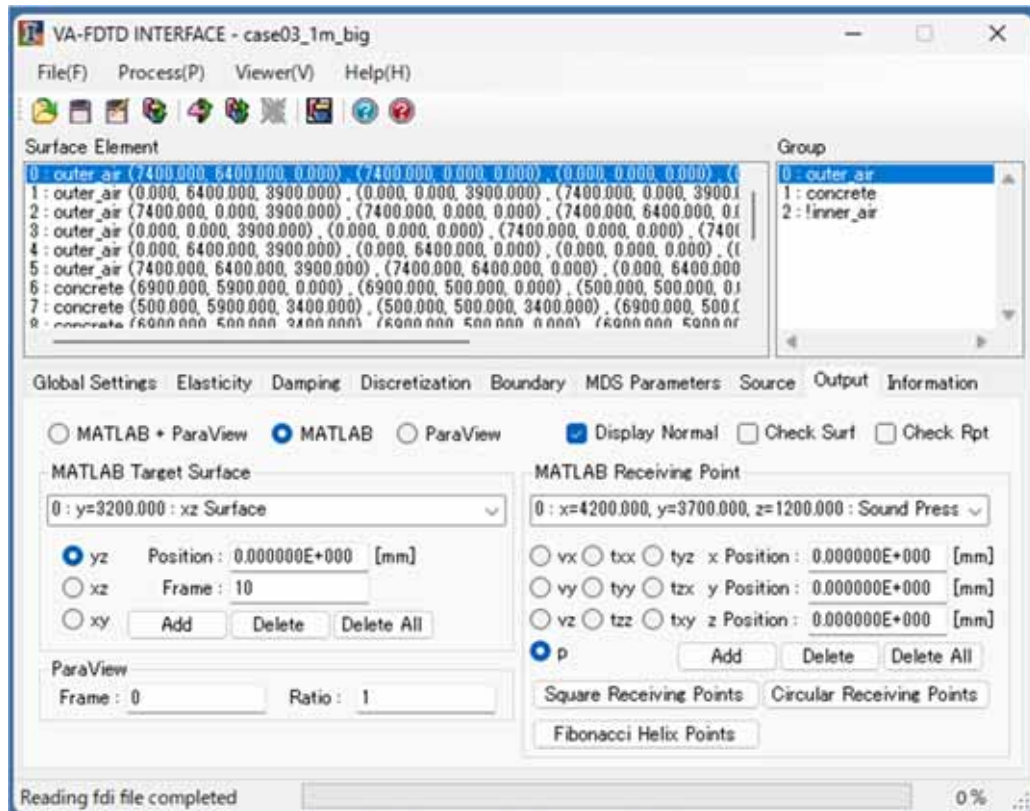


Fig. 2.28 VA-FDTD の設定画面 (Output)

Fig. 2.28 に示すように、Output タブにおいて、MATLAB Target Surface (可視化断面) は、XZ 面で $Y=3200\text{mm}$ に設定した。さらに、MATLAB Receiving Point (測定点) は、 $X=4200\text{mm}$ 、 $Y=3700\text{mm}$ 、 $Z=1200\text{mm}$ に設定した。計算結果を以下に示す。

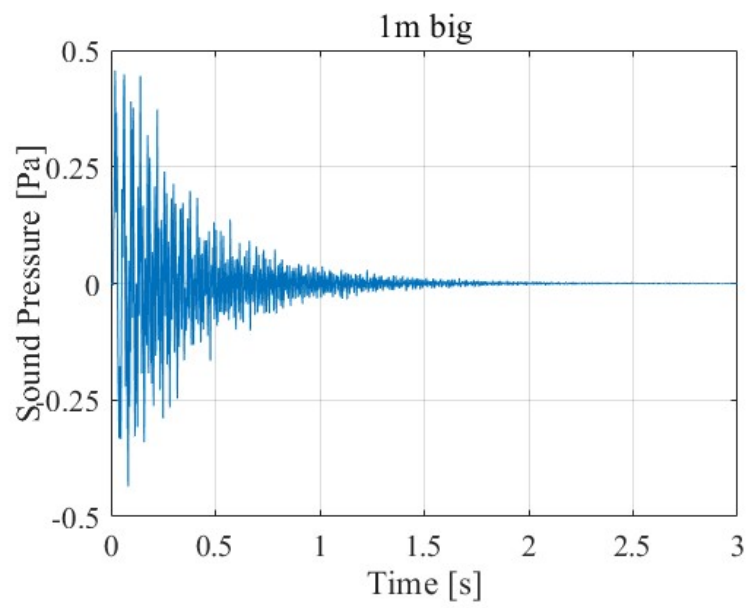


Fig.2. 29 基準より 1m 大きい室 (加振力時間波形)

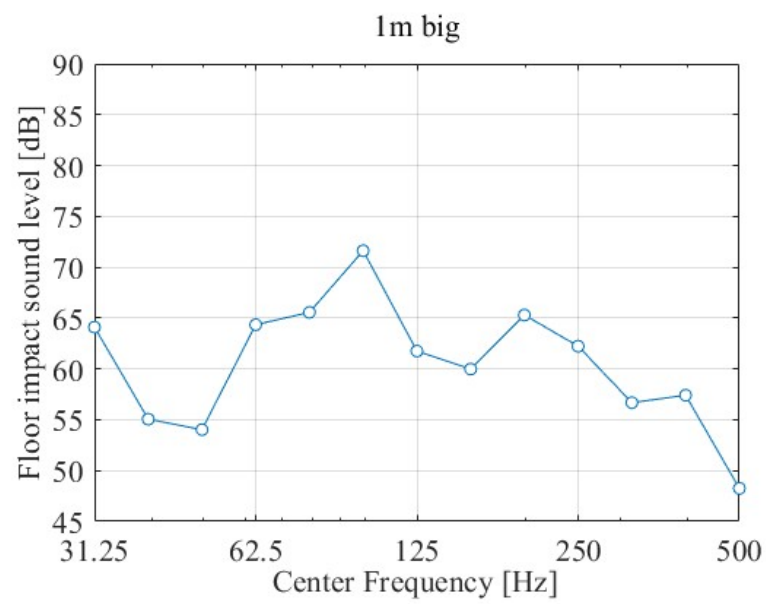


Fig. 2.30 基準より 1m 大きい室

2.5.3 基準より小さい室

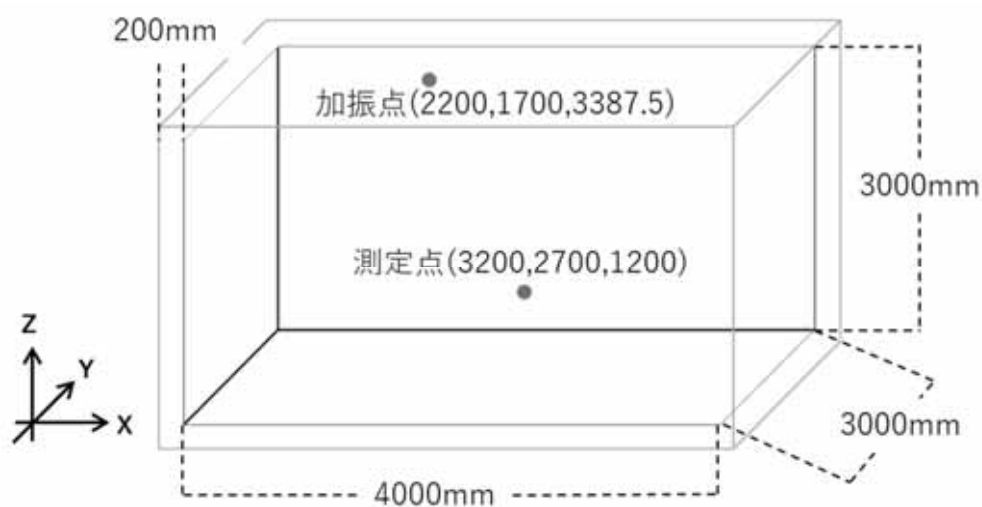


Fig. 2.31 基準より小さい室

Fig 2.31 に示すように、基準より小さい室として横 4000 mm、奥行き 3000 mm、高さ 3000 mm と基準室よりも高さ以外を 1m小さくした室を考えた。それに合わせて、室の中心からの距離が同じになるように、加振点を $X=2200$ mm、 $Y=1700$ mm、 $Z=3387.5$ mm の位置、測定点を $X=3200$ mm、 $Y=2700$ mm、 $Z=1200$ mm の位置に設定した。以降は「VA-FDTD」で基準室の場合から変更した設定を記載する。

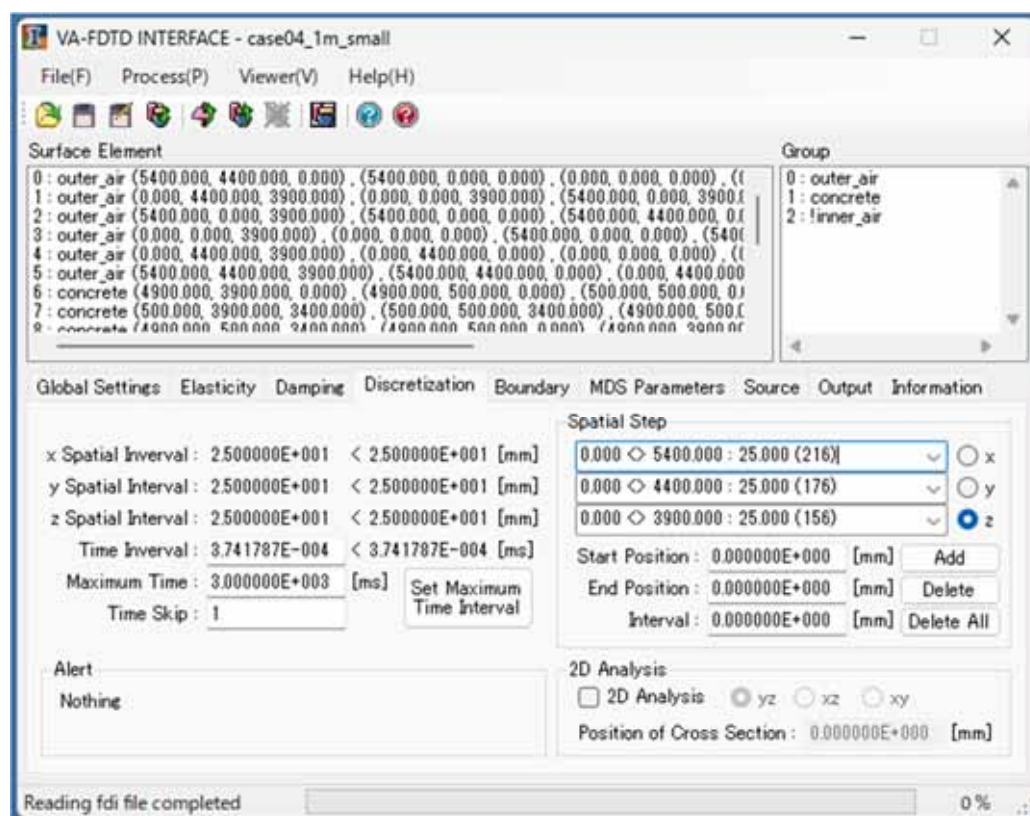


Fig. 2.32 VA-FDTD の設定画面 (Discretization)

Fig. 2.32 に示すように、Discretization タブにおいて、Spatial Step について、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軸についての大きさである X=5400 mm、Y=4400 mm、Z=3900 mm を入力した。

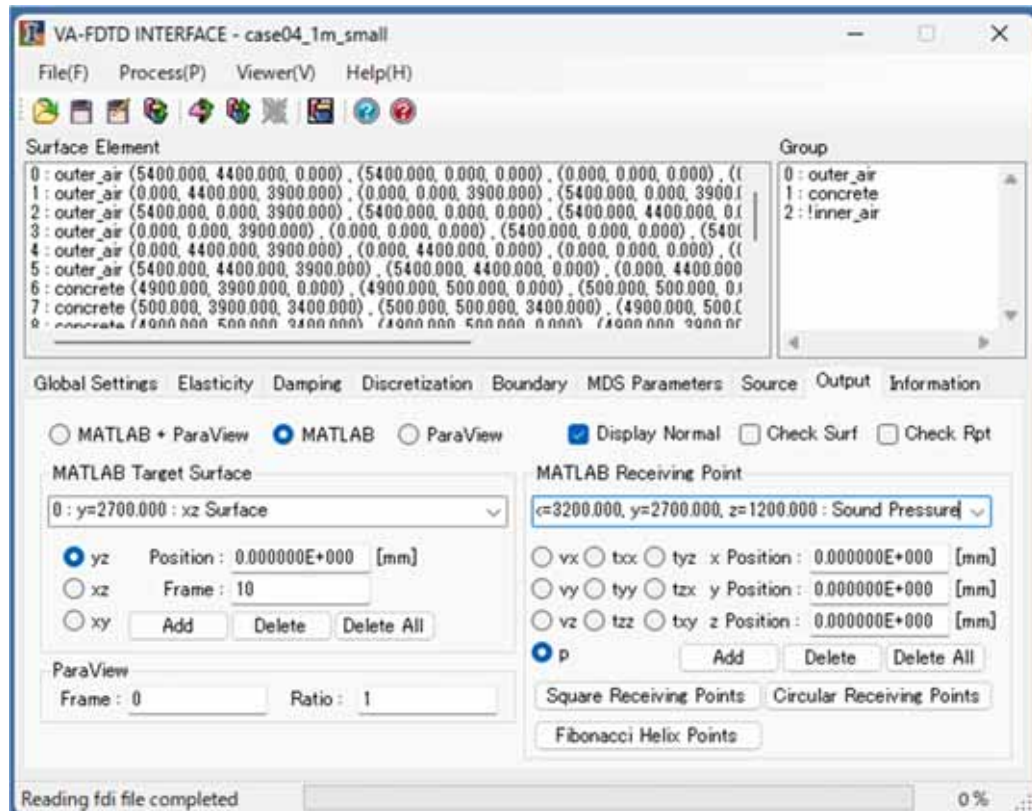


Fig. 2.33 VA-FDTD の設定画面 (Output)

Fig. 2.33 に示すように, Output タブにおいて, MATLAB Target Surface (可視化断面) は, XZ 面で Y=2700 mm に設定した。さらに, MATLAB Receiving Point(測定点) は, X=3200 mm、Y=2700 mm、Z=1200 mm に設定した。計算結果を以下に示す。

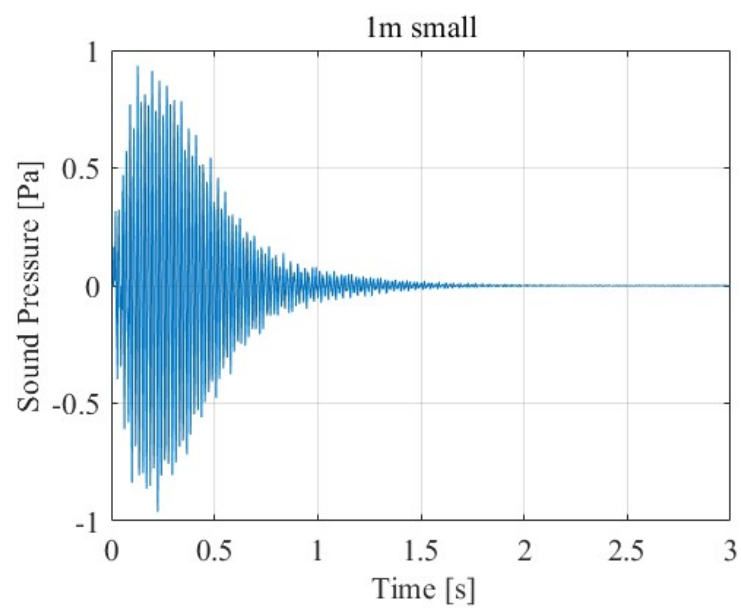


Fig.2. 34 基準より 1m 小さい室（加振力時間波形）

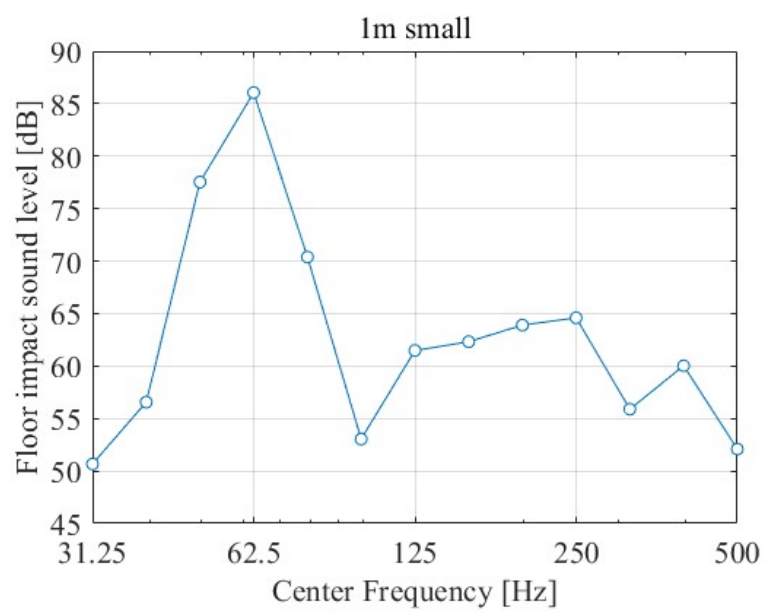


Fig.2. 35 基準より 1 m 小さい室

2.5.4 コンクリート厚 150 mm

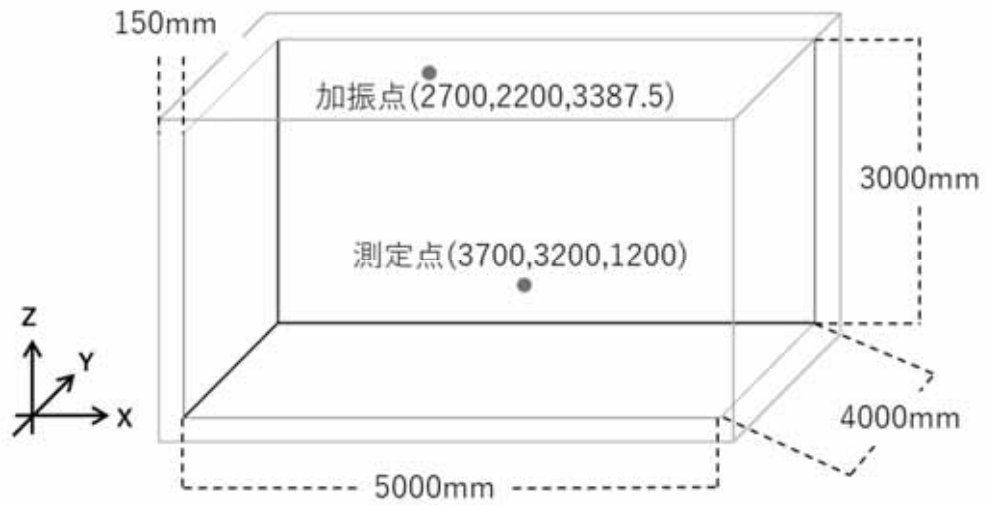


Fig. 2.36 コンクリート厚 150 mm の室

Fig. 2.36 に示すように、室の大きさは基準室と同じに設定し、コンクリート厚を 200 mm から、150 mm に変更した室を考えた。室の大きさは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」での設定も基準室と変わらないため、設定方法は省略する。計算結果を以下に示す。

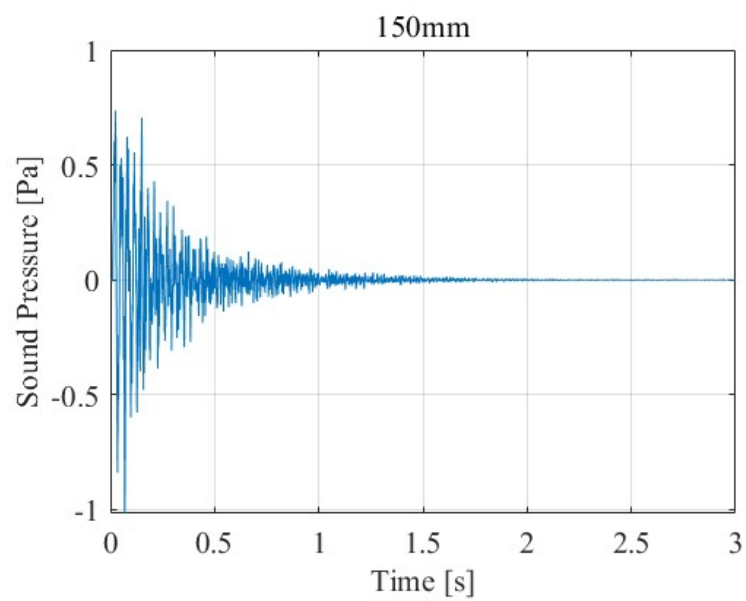


Fig.2. 37 コンクリート厚 150mm (加振力時間波形)

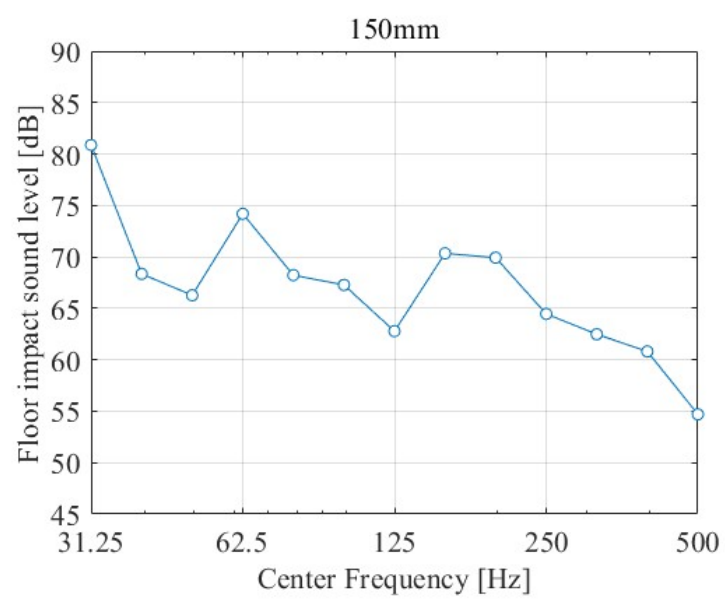


Fig. 2.38 コンクリート厚 150mm

2.5.5 コンクリート厚 250 mm

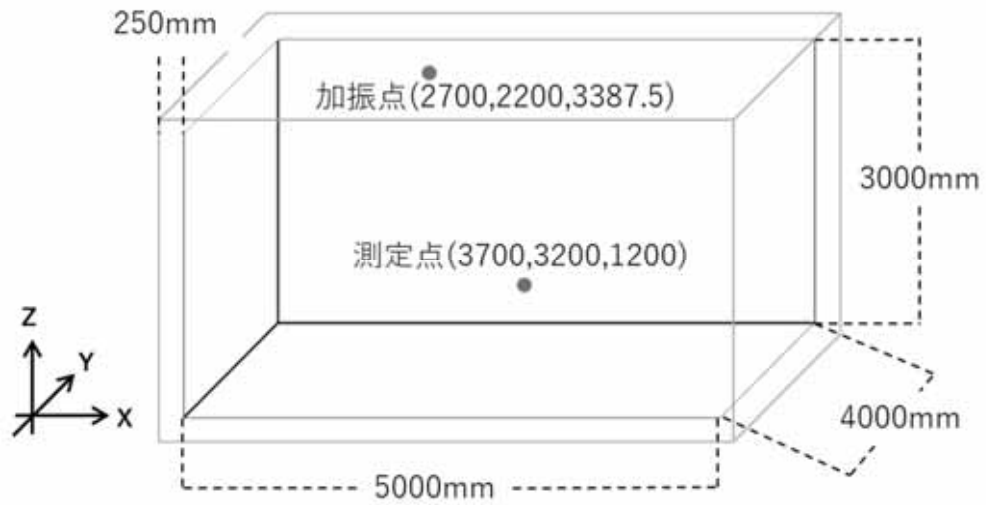


Fig. 2.39 コンクリート厚 250 mm の室

Fig. 2.39 に示すように、室の大きさは基準室と同じに設定し、コンクリート厚を 200 mm から、250 mm に変更した。室の大きさは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」での設定も基準室と変わらないため、設定方法は省略する。計算結果を以下に示す。

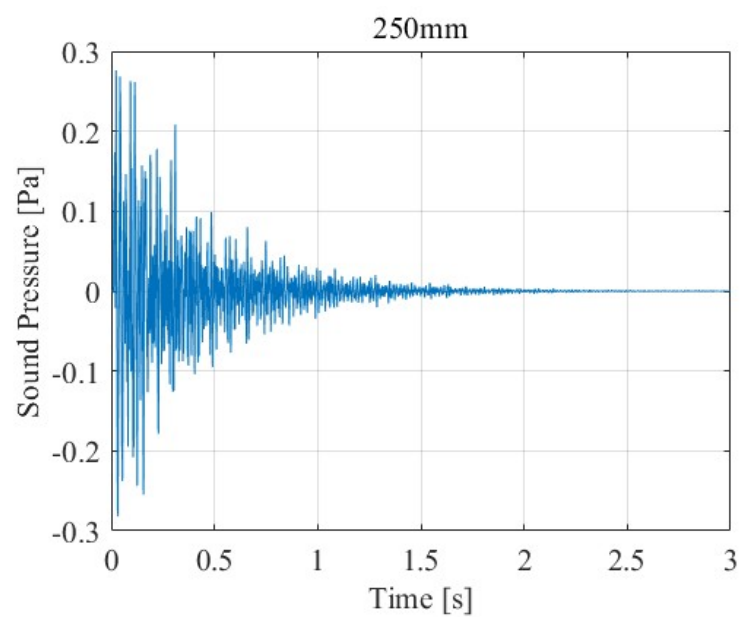


Fig.2. 40 コンクリート厚 250mm (加振力時間波形)

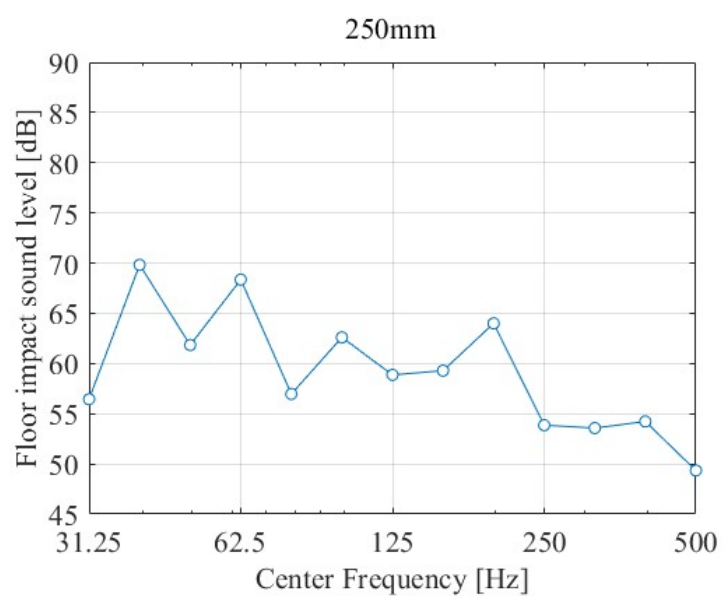


Fig.2. 41 コンクリート厚 250mm

2.5.6 コンクリートヤング率増加

この計算では、基準室とコンクリートのヤング率を増加させて変化を調べるため、室の大きさやコンクリートの厚さ、加振点、測定点は Fig. 2.11 で示す基準室と同じ条件とした。以降は、「VA-FDTD」で基準室の場合から変更した設定を記載する。

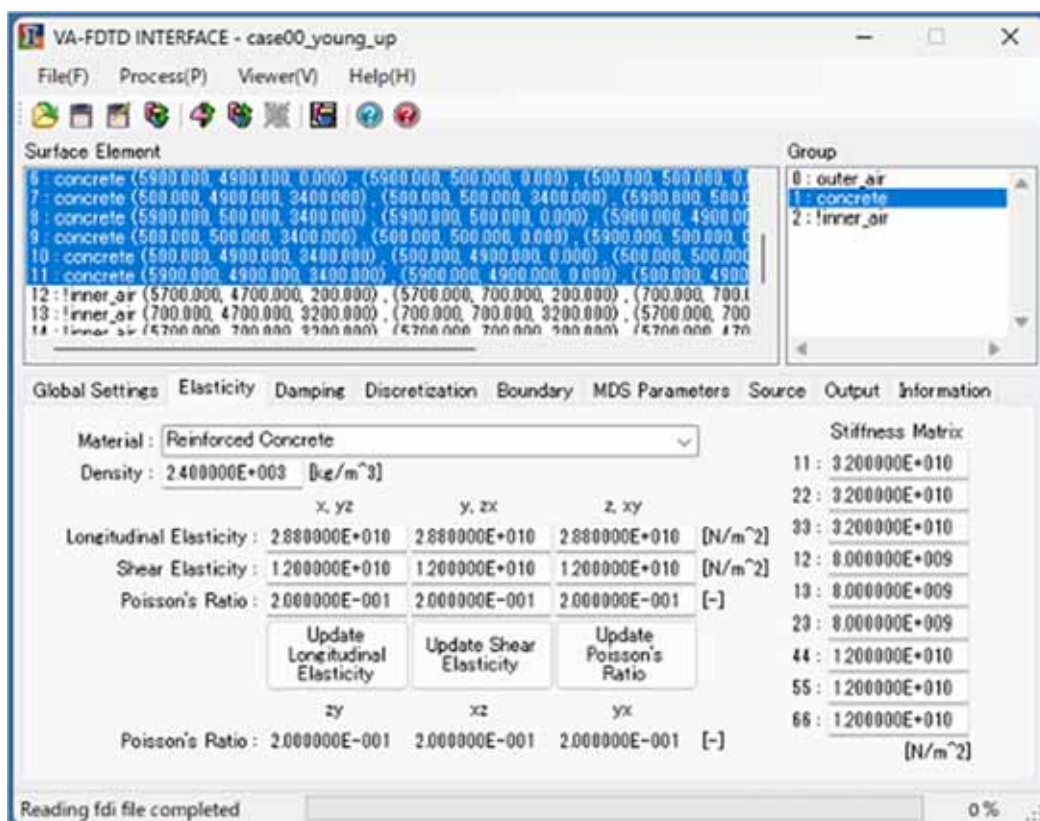


Fig. 2.42 VA-FDTD の設定画面 (Elasticity)

Fig. 2.42 に示すように、Elasticity タブにおいてコンクリートの Longitudinal Elasticity (ヤング率) を 2.88×10^{10} [N/m²] に設定した。計算結果を以下に示す。

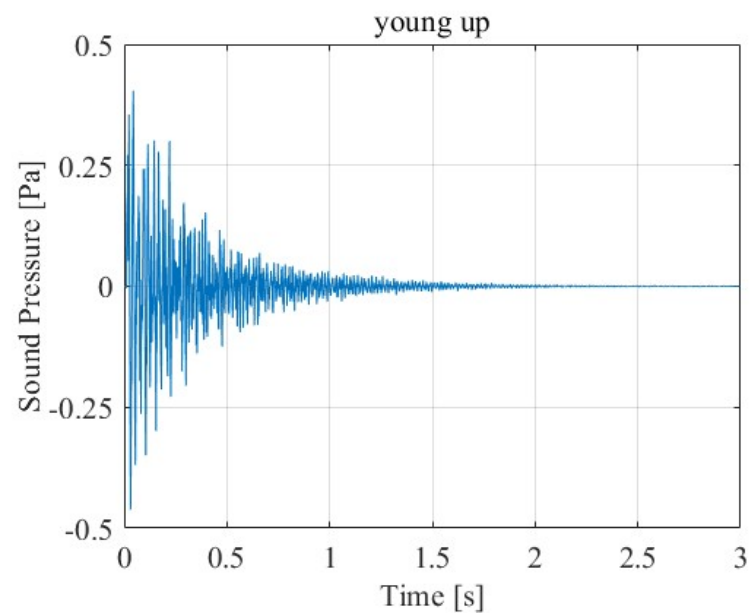


Fig.2. 43 ヤング率増加（加振力時間波形）

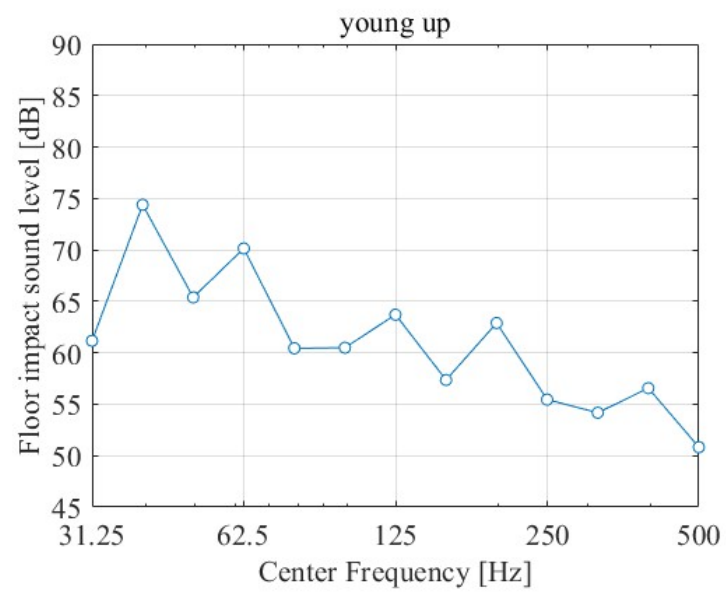


Fig. 2.44 ヤング率増加

2.5.7 コンクリートヤング率減少

この計算では、基準室とコンクリートのヤング率を減少させて変化を調べるため、室の大きさやコンクリートの厚さ、加振点、測定点は Fig. 2.11 で示す基準室と同じ条件とした。以降は、「VA-FDTD」で基準室の場合から変更した設定を記載する。

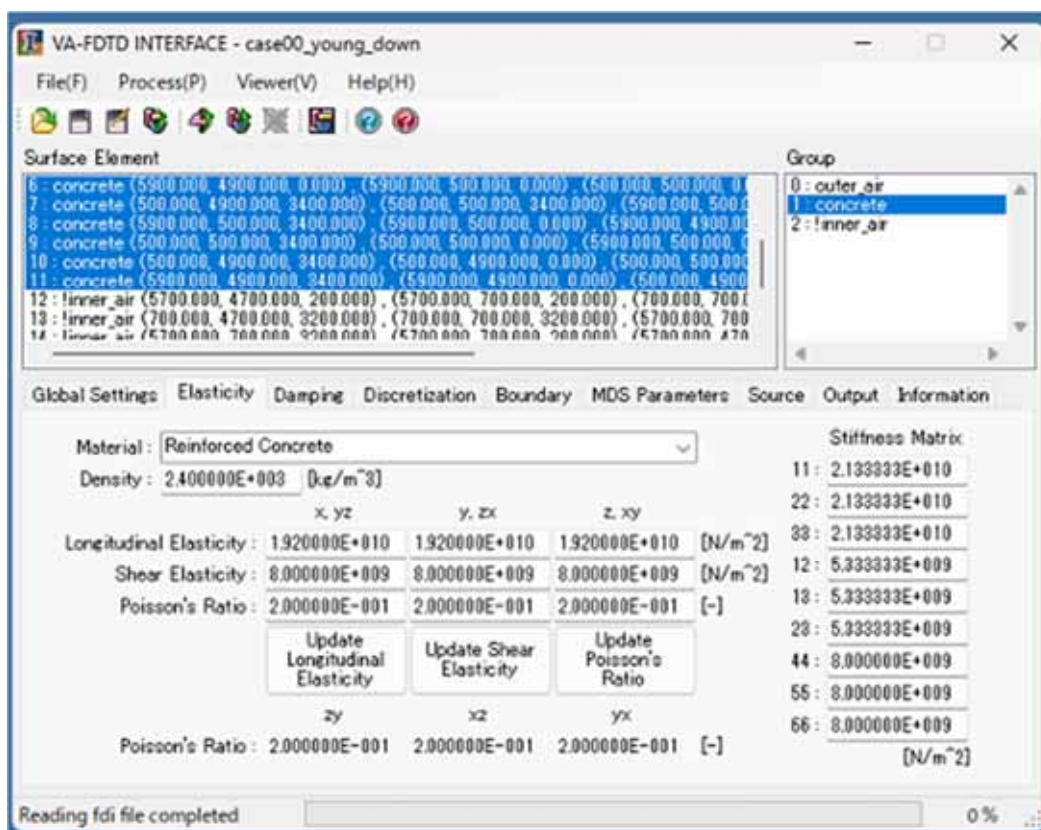


Fig. 2.45 VA-FDTD の設定画面 (Elasticity)

Fig. 2.45 に示すように、Elasticity タブにおいてコンクリートの Longitudinal Elasticity (ヤング率) を 1.92×10^{10} [N/m²] に設定した。計算結果を以下に示す。

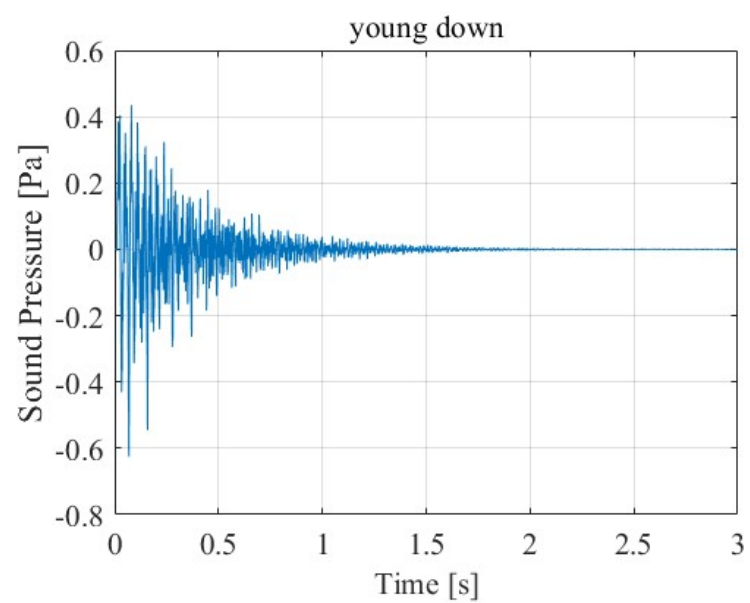


Fig.2. 46 ヤング率減少（加振力時間波形）

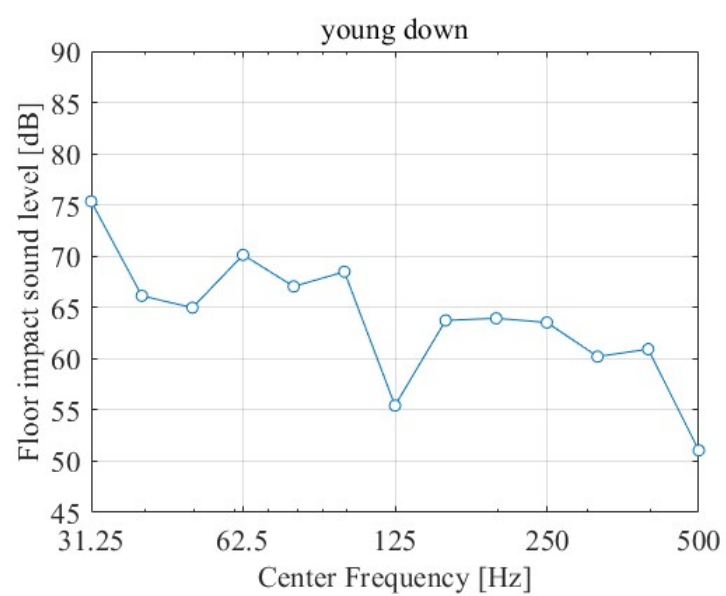


Fig. 2.47 ヤング率減少

2.5.8 コンクリート密度増加

この計算では、基準室とコンクリートの密度を増加させて変化を調べるため、室の大きさやコンクリートの厚さ、加振点、測定点は Fig. 2.11 で示す基準室と同じ条件とした。以降は、「VA-FDTD」で基準室の場合から変更した設定を記載する。

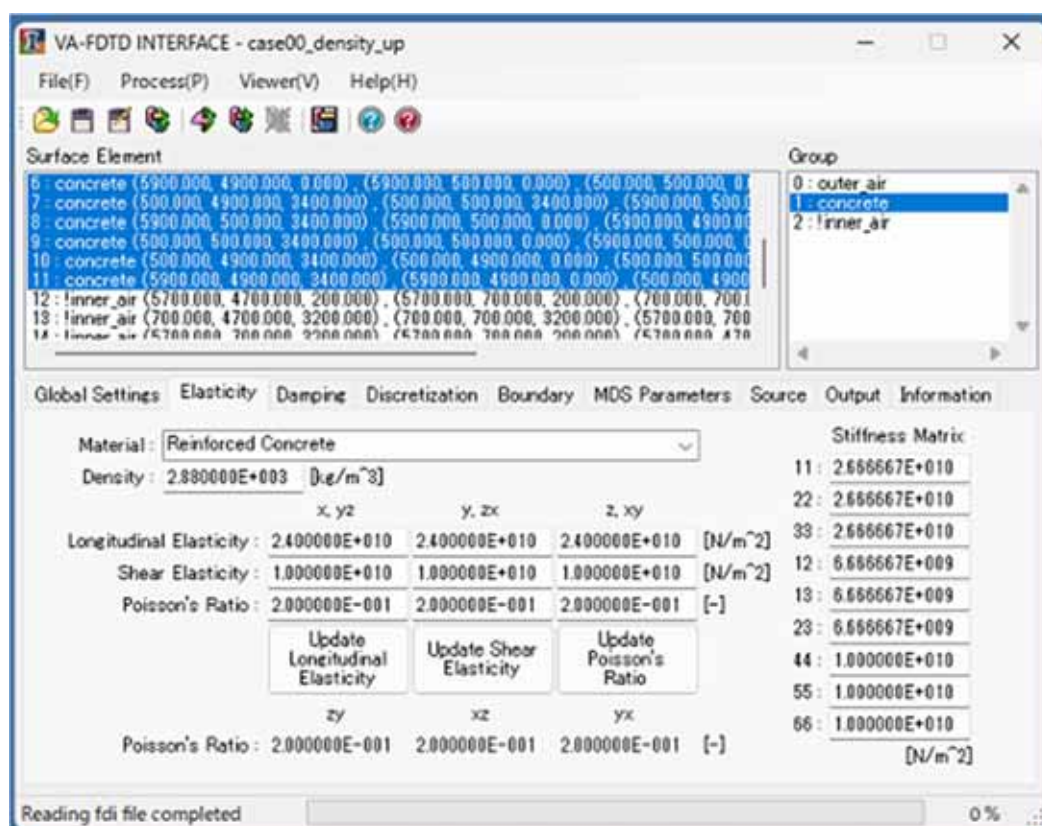


Fig. 2.48 VA-FDTD の設定画面 (Elasticity)

Fig. 2.48 に示すように、Elasticity タブにおいてコンクリートの Density (密度) を 2.88×10^3 [kg/m³] に設定した。計算結果を以下に示す。

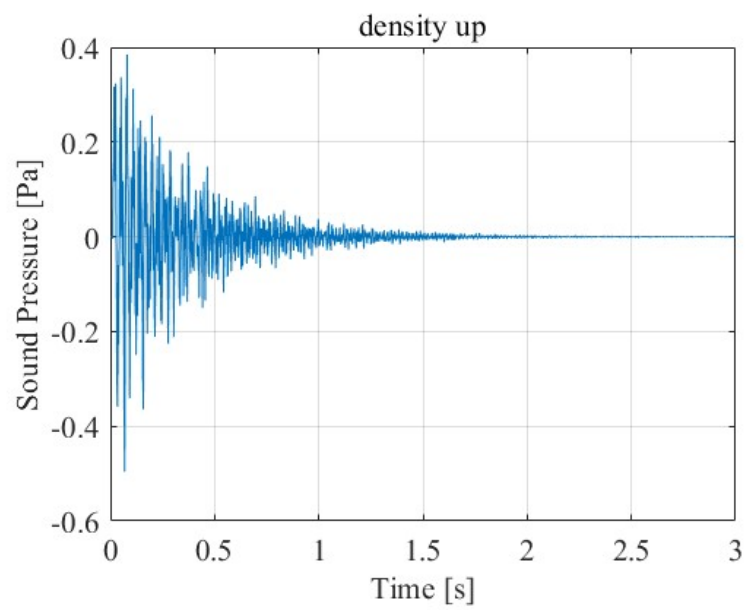


Fig.2. 49 密度増加（加振力時間波形）

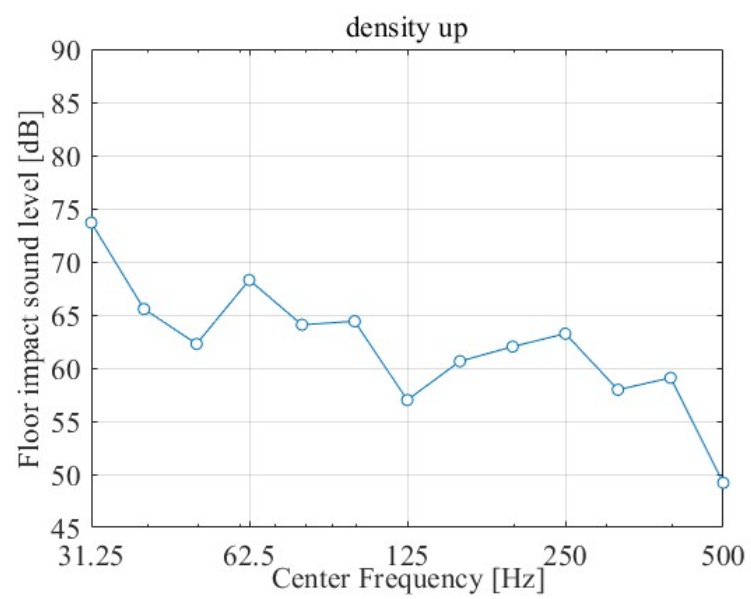


Fig. 2.50 密度増加

2.5.9 コンクリート密度減少

この計算では、基準室とコンクリートの密度を減少させて変化を調べるため、室の大きさやコンクリートの厚さ、加振点、測定点は Fig. 2.11 で示す基準室と同じ条件とした。ここからは、「VA-FDTD」で基準室の場合から変更した設定を記載する。

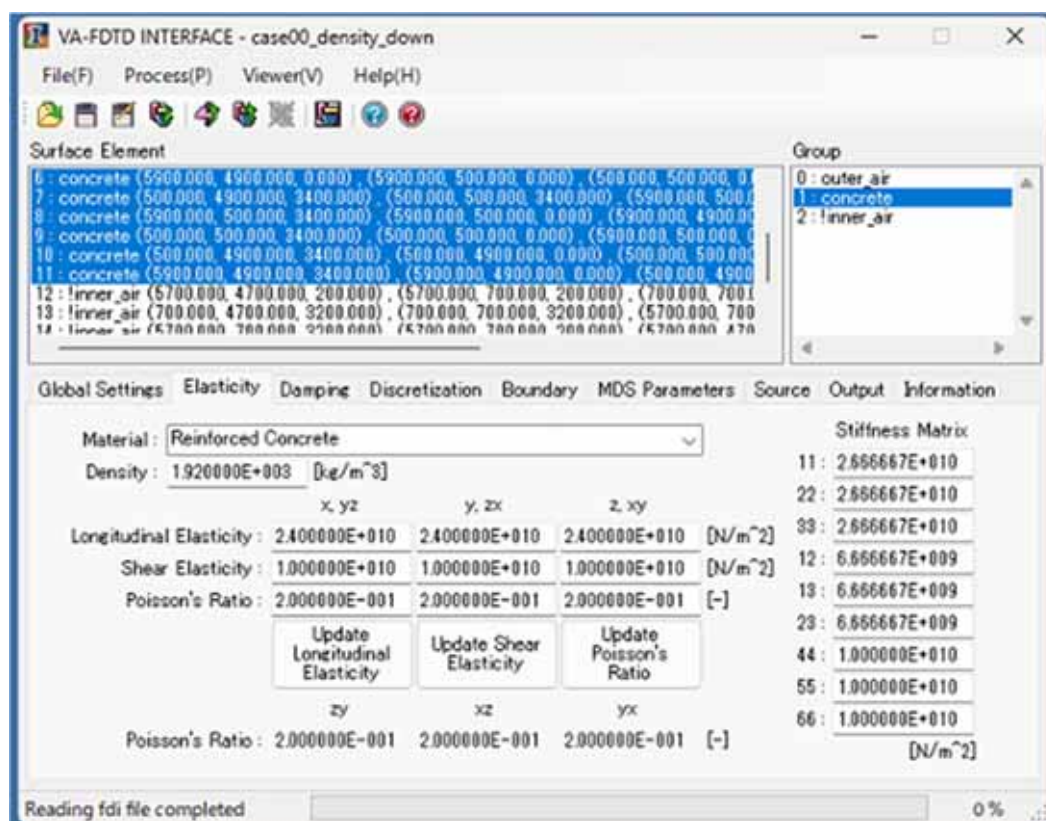


Fig.2. 51 VA-FDTD の設定画面 (Elasticity)

Fig.2.51 に示すように、Elasticity タブにおいてコンクリートの Density (密度) を $1.92 \times 10^3 [kg/m^3]$ に設定した。計算結果を以下に示す。

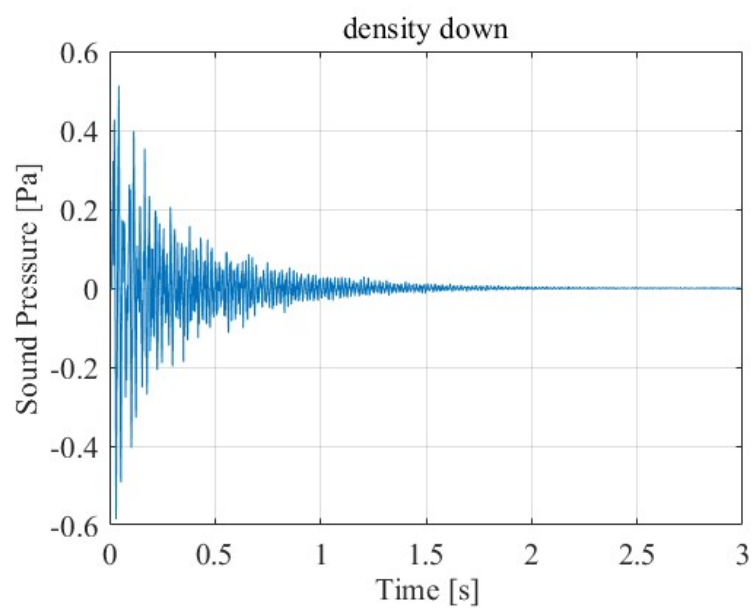


Fig.2. 52 密度減少（加振力時間波形）

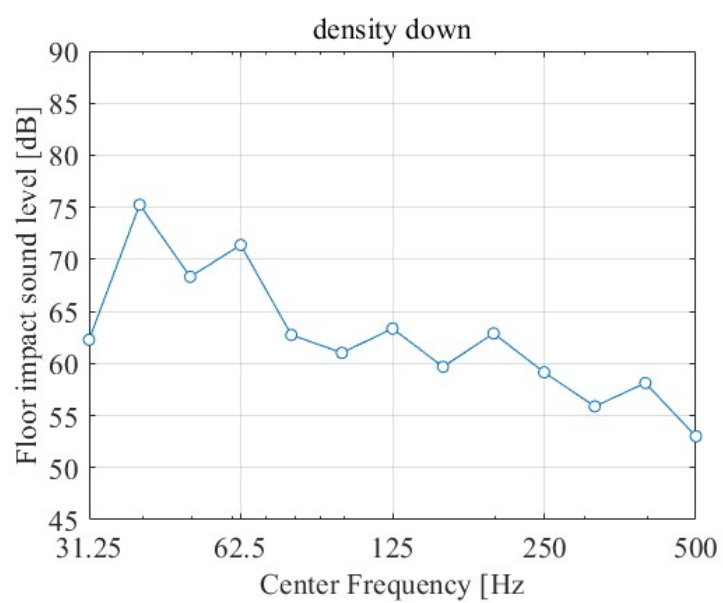


Fig. 2.53 密度減少

2.5.10 梁あり

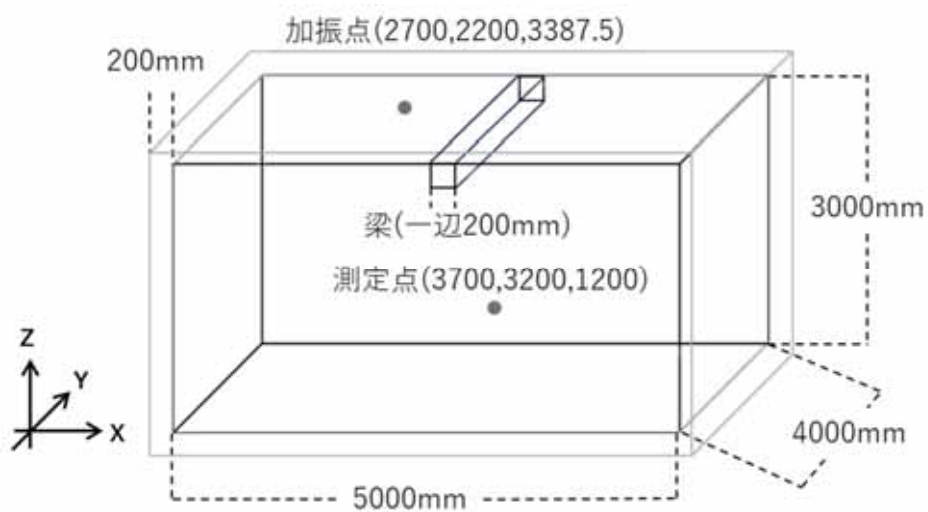


Fig. 2.54 梁ありの室

Fig. 2.54 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。

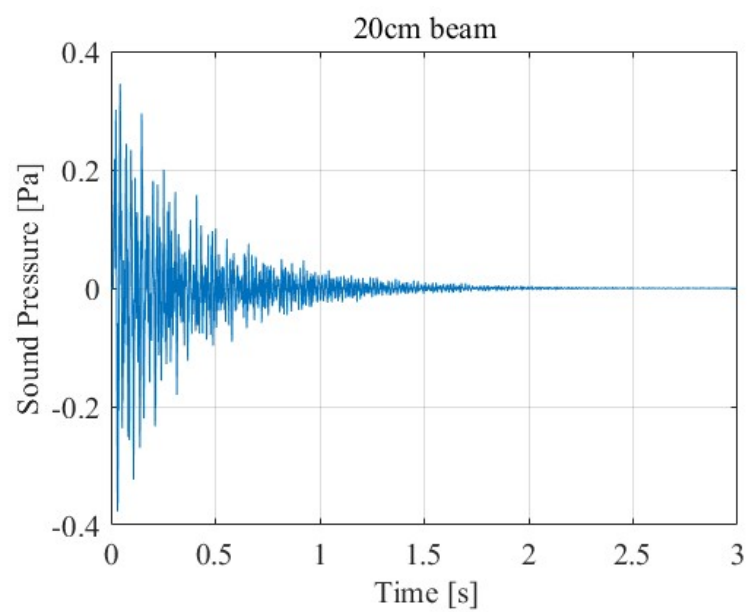


Fig.2. 55 梁あり（加振力時間波形）

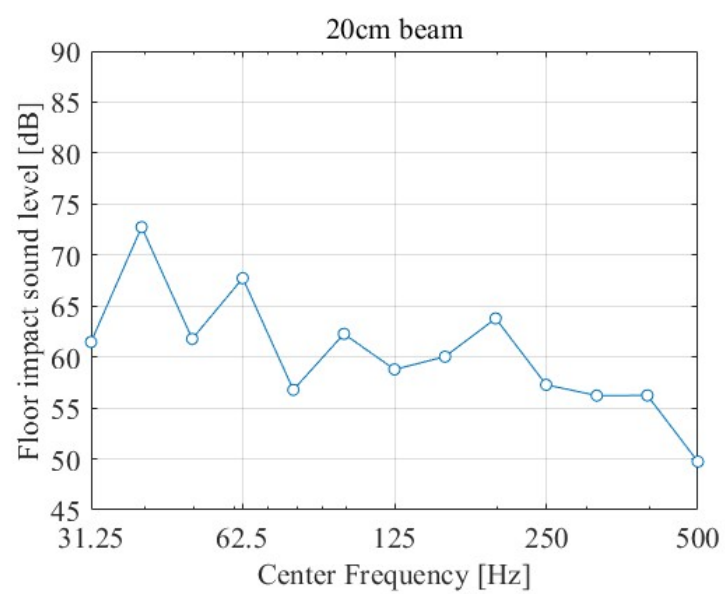


Fig. 2.56 梁あり

3. 考察

3.1 衝撃源による違い

今回測定した衝撃源は重量床衝撃源を中心に扱っており、評価対象となる周波数範囲は 63 ~ 500 Hz としたことを念頭に置き考察を進める。なお、軽量床衝撃源の評価対象となる周波数範囲は 125 ~ 2000 Hz である。また、この考察において、125 Hz 未満を低周波数帯域、125 Hz 以上を高周波数帯域として述べている。

Fig. 2.19, 2.21, 2.23, 2.25 より、それぞれの音の特徴として、ボールを落とした場合は低周波数帯域で大きな音が出ているが、高周波数帯域では少し小さくなっている。人の歩く音は低周波数帯域で特に音が大きくなっており、高周波数帯域においてはかなり音が小さく、低周波数帯域と高周波数帯域について、音の大きさの差が激しい。椅子を引きずる音も低周波数帯域で大きい音が出ている。低周波数帯域に比べて高周波数帯域は小さくなっているが、その差が 10 dB 程度となっており、全体的にばらつきが少ない。スプーンを落とす音は一般的に軽量床衝撃音に当てはまるが、上で述べた評価周波数帯域である 125 Hz 付近から音が大きくなっており、低周波数帯域については音が小さくなっている。

3.2 室の種類による違い

初めに述べたように基準室以外の室ではボールを落とした音のみで予測したことを念頭に置き考察を進める。

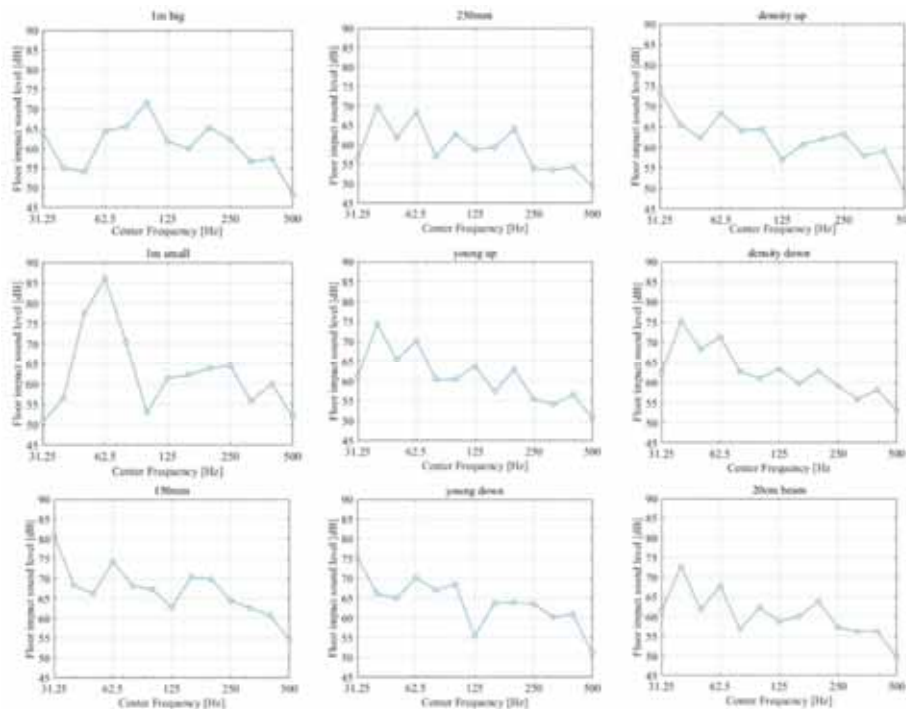


Fig. 3.1 室の変化させた結果

Fig. 3.1 は前章の結果をまとめたものである。これらと Fig. 2.19 を比較する。

室の大きさを変化させた結果を比較する。室を大きくした場合、100 Hz 付近で音が一番大きくなっている。31.25 ~ 62.5 Hz の音の大きさが小さくなっており、62.5 ~ 125 Hz の音の大きさは大きくなっている。また、125 Hz 以上の音は基準室とおおよそ同じ大きさの音となっている。室を小さくした場合、基準室の場合と違って、62.5 Hz 付近の音が基準室よりもかなり大きくなっており、31.25 Hz 付近で音が一番小さくなっている。大きさを変化させた場合、125 Hz 以上の音の大きさについて、あまり変化が表れなかった。そのため、125 Hz 以上の音を小さくすることに対して、室の大きさを変えることはあまり影響がないものと考えられる。しかし、125 Hz 未満の音の大きさの変化は大きい。そのため、低音が多く発生する室において、室を大きくすることは効果があると考えられる。

コンクリートの厚さを変化させた結果を比較する。厚さを 150 mm にした場合、31.25 Hz 付近の音が大きくなっており、そこから 50 Hz 付近までは音が小さくなり、62.5 Hz 付近で再び音が大きくなっている。音が一番小さい 500 Hz 付近でも基準室より少し音が大きくなっており、全体的に約 5 dB ほど大きくなっていることが読み取れる。厚さを 250 mm にした場合、31.25 Hz 付近ではかなり小さくなっている。そして一番音が大きい周波数帯域が基準室と同じであるが、約 5 dB ほど小さくなっている。また、250 ~ 500 Hz の周波数帯域においても、少し小さくなっていることが読み取れる。これらのことから、すべての周波数帯域について、室のコンクリートの厚さが薄くなると音の大きさは大きくなり、厚くなると小さくなる傾向があると分かる。そのため、周波数に関係なく、音を小さくしたい場合には、コンクリートを厚くすることが効果的であると言える。

コンクリートのヤング率を変化させた結果を比較する。ヤング率を大きくした場合、31.25 Hz、100 Hz、250 Hz 付近の音が小さくなっている。ある周波数帯域に対しては小さくなっているが、全体的な音の大きさの変化はあまり大きくない。ヤング率を小さくした場合は、31.25 Hz、125 Hz はかなり変化が大きい。また、他の周波数帯域において、それぞれの周波数について、音の大きさの大小のばらつきが少なくなっている。しかし、ばらつきが少ないものの、基準室に比べて音が大きいことが読み取れる。同じ比率でヤング率を変化させ、このような結果が現れたことから、ヤング率を大きくすることについて、音の大きさはあまり変化がないが、ヤング率を小さくする場合、減少量が小さくても、各周波数帯域について音の大きさのばらつきが少なくなることや音が大きくなる可能性があると考えられる。そのため、周波数によらず室内の音の大きさの均一に保ちたい場合には、ヤング率を小さくすることで効果が見込める可能性がある。

コンクリートの密度を変化させた結果を比較する。一般的に密度が小さくなると、重量が軽くなるため全体的に音は大きくなると予想される。これは、質量則に

より、密度が小さいほど、また、周波数が低いほど、遮音性能が悪くなるからである。さて、密度を大きくした場合、31.25 Hz は音が大きく、40 Hz 付近では小さくなっており、音が大きくなる周波数帯域が基準室と逆になっている。主に低周波数帯域の音の大きさが基準室より比較的小さくなっている。しかし、上で述べたように周波数が高いほど音は小さくなるはずの高周波数帯域では音の大きさについてあまり変化が見られない。密度を小さくした場合は、31.25 Hz 付近は音が小さくなっているが、その他の低周波数帯域について、基準室より少し音が大きくなっている場合が多い。しかし、高周波数帯域において、基準室よりも少し音が小さくなっているように読み取ることができる。そのため、音が大きくなりやすい高周波数帯域については、音の大きさが大きくなっておらず、上で述べている予想と異なっている。すなわち、質量則はあくまで空気伝搬音の遮音性能を評価するものであり、遮音体を直接加振する固体伝搬音には適用できないことがわかる。

コンクリートの梁を設置した結果を比較する。梁を設置した場合、31.25 Hz、250 Hz において音の大きさが小さくなっている。しかし、全体的に見て、各周波数帯域において、基準室より少し小さくなっている程度の変化であり、大きな変化はあまり見られない。そのため、今回の例からは遮音の性能を高くしようとして梁を追加しても、あまり効果がないと言える。

4. 結論

考察で述べたそれぞれの室の特徴をまとめる。室の大きさを変化させると、高周波数帯域についてはあまり変化が表れないが、低周波数帯域においては、大きく変化が表れる。室のコンクリート厚を変化させると、全周波数帯域について音の大きさの変化が表れる。コンクリートのヤング率については、増加をさせても変化はあまり表れないが、減少させると音の周波数間のばらつきが比較的小さくなる。コンクリートの密度については、低周波数帯域について音の大きさに変化が表れるが、高周波数帯域については低周波数帯域よりも密度の変化による影響が少なかった。梁の有無においては、梁があることで少し音が小さくなるが、変化はあまり大きくない。

以上の結果から、全体的に一番音を小さくできたのは、コンクリート厚を厚くすることであった。そのため、遮音性能を向上させる上で一番効果的なのは厚さを変化させることであると、改めて確認できた。しかし、低周波数帯域に対してのみで考えると、室の大きさを大きくすることが一番音を小さくできた。その理由として、室の固有振動モードの影響が考えられる。室が大きくなれば、固有振動モードも大きくなり、それにより、固有周波数は低くなり、固有振動の密度も疎になる。今回の例では、室を大きくすることにより低周波数帯域の固有振動が 31.25 Hz 以下に移動したため、低周波数帯域の音が小さくなったのではないかと推測される。したがって、利用する目的によっては、コンクリートを厚くするより、室を大きくする方が、聞こえる音を小さくすることが出来る場合がある。

これまでの結果を通じて考えれば、高周波数帯域に関しては、音の大きさが変化することはあっても、その変化量は低周波数帯域でのそれに比べると小さい。そのため、高周波数帯域が多く分布する軽量床衝撃音に対して、遮音性能を高くする場合は別の手段を用いた方が効果を見込める可能性が高い。

本研究では、ある程度のデータを収集することが出来た。しかし、変更した条件は室の大きさ、コンクリートの厚さ、密度、ヤング率の増減に加えて、基準空間に梁を設置する合計 9 種類である。そのため、それぞれの値をさらに増減させた場合や別の変更点を考えた場合には、今回とは違う傾向や結果を得られる可能性がある。今後の課題として、データベースを充実させるために、様々な条件を追加し、より多くのデータを収集することが求められる。

参考文献

- [1] VA-FDTD, <https://www2.kansai-u.ac.jp/va-fdtd/> (2025.1.29).
- [2] K. S. Yee, "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media", "IEEE Trans. Antennas Propag., IEEE Trans. AP-148, 302-307, 1966.
- [3] 豊田政弘, "時間領域有限差分法を用いた汎用的な連成解析手法の開発", 音響学会誌 72(11), 697-702, 2016.
- [4] Masahiro Toyoda, & Daiji Takahashi, "Prediction for architectural structure-borne sound by the finite-difference time-domain method", Acoust. Sci. & Tech. 30, 4, 265-276(2009)