

残響時間に着目した完全拡散性の評価

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
音環境ゼミ
建 11-0017 江東 大貴
指導教官 豊田 政弘 准教授

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
第2章	理論式	3
2.1	Sabine の残響式	3
2.2	波動方程式	5
2.3	FDTD 法 (時間領域差分法)	9
2.4	シュレーダー法	11
第3章	室の大きさの変化	12
3.1	条件	12
3.2	解析結果・考察	エラー! ブックマークが定義されていません。
第4章	吸音率の変化	17
4.1	条件	17
4.2	解析結果・考察	エラー! ブックマークが定義されていません。
第5章	正多角柱	27
5.1	条件	27
5.2	解析結果・考察	エラー! ブックマークが定義されていません。
第6章	正多面体	57
6.1	条件	57
6.2	解析結果・考察	エラー! ブックマークが定義されていません。
第7章	吸音面の変化	81
7.1	条件	81
7.2	解析結果・考察	エラー! ブックマークが定義されていません。
第8章	まとめ	エラー! ブックマークが定義されていません。

参考文献

謝辞

第1章 はじめに

1.1 研究背景

近年、住宅や会議室といった建築空間における音環境をより良くすることは重要になっている。通常、室内における音環境を左右するのは、壁や床に張る吸音材や遮音材といった製品の性能である。そのため、このような製品の性能を正確に評価することがより良い音空間に繋がるとされる。

吸音材や遮音材などといった製品の性能評価のために、残響室と呼ばれる拡散音場の条件を近似的に実現するために壁・天井・床のすべてを反射性に仕上げた室が用いられる[1]。

拡散音場の定義は、1.音響エネルギーが室内全体に均一に分布している、2.室内のどの点においても、音の進行方向はあらゆる方向に一様である。という二つである[2]。つまり、完全な拡散音場の中では、音波がある壁にあらゆる方向からランダムに入射することである。その拡散音場を仮定して導かれた第2章の2.1 (P3) に記述する Sabine の残響式によって表される残響時間は室内音場を評価するための最も基本的な概念である。

通常残響室は、音の入射をランダムにするために不整形の形状にすることが多い。また ISO[3] による残響室の設計指針は(1)測定対象周波数と関連した適切な容積、(2)拡散音場を近似的に実現するための、適切な室形状と拡散装置、(3)低い平均吸音率 (壁、床、天井は基本的に反射面)、(4)十分に低い暗騒音レベルとされている。

今回用いる FDTD 法 (有限差分法) は、FEM (有限要素法)、BEM (境界要素法) と並ぶ音響分野における主要な数値解析手法である。数値解析手法の利点は、①実際に実験する設備が必要ではない、②容易にさまざまな条件を与えることが可能などである。

現状として、拡散音場に近づけている残響室でさえ完全な拡散音場を形成することが難しい。そのために、残響室ごとの音の拡散度合いが異なり、残響室ごとに吸音材や遮音材といった性能評価に誤差が生じるという問題がある。そのため、より精度の高い性能評価のために完全な拡散音場な室が望まれる。

1.2 研究目的

本研究では室内における完全拡散性の傾向を明らかにすることを目的とする。まず、完全拡散性を拡散音場を仮定として求められた Sabine の残響式の残響時間と数値解析による残響時間が一致する程度と定義する。

そこで、①室の大きさの変化、②吸音率の変化、③正多角柱、④正多面体、⑤吸音面の偏り、という 5 種類の条件のもとで数値解析による残響時間と Sabine の残響式による残響時間の比較を行い完全拡散性の評価を行う。評価を行うことで、室内における完全拡散音場の傾向が見出せ、またその傾向をもとにより完全拡散音場に近づく残響室の音響設計支援が行える。また、完全な拡散音場では正確な性能評価を行うことができるため、更により良い音空間を形成することができると思われる。

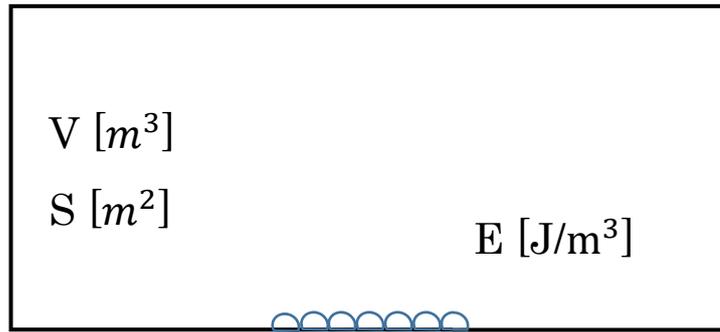


図 2.1 : ある室内における残響式の導出

第 2 章 理論式

2.1 Sabine の残響式

この Sabine の残響式は、Sabine によって提案された概念で、音の波動性は考慮せずエネルギー的に導かれる理論式である[2]。

図 2.1 に示すような、室容積 V 、平均吸音率 $\bar{\alpha}$ 、音源の出力 P における室内の残響時間について考える。拡散音場のエネルギー密度を E とすれば、室の周壁の全表面積 S へ入射する音のエネルギーは $IS=cES/4$ である。ここで c は音速、 I は音響エネルギーである。したがって周壁表面の平均吸音率 $\bar{\alpha}$ とすれば、一秒間で周壁に吸収されるエネルギーは $\bar{\alpha}cES/4$ である。室内の全エネルギーの変化 VdE/dt は、

$$V \frac{d}{dt} E = P - \frac{cE}{4} S \bar{\alpha} \quad (2.1)$$

が得られる。ここで、

$$A = S \bar{\alpha} \quad (2.2)$$

と置く。 A は等価吸音面積、または吸音力とよばれる。

式(2.1)で、定常状態では $dE/dt=0$ 、すなわち、 $P = cEA/4$ である。一方、式(2.1)で音源を停止した場合は、 $VdE/dt = -cEA/4$ すなわち、

$$dEdt + \frac{cA}{4V} E = 0 \quad (2.3)$$

となる。時刻 t_0 のエネルギー密度を E_0 として、式 (2.3) を積分すれば、

$$\log_e E - \log_e E_0 = -\frac{cA}{4V} (t - t_0) \quad (2.4)$$

変形すると、

$$\log_e \frac{E}{E_0} = \log_e e^{-\frac{cA}{4V}(t-t_0)} \quad (2.5)$$

となる。

次に、エネルギー密度が 60dB すなわち 10^6 分の 1 に減衰するのに要する時間を残響時間 $RT[s]$ という。ここで $E/E_0 = 10^{-6}$ 、 $RT = t - t_0$ と定義すると、

$$\log_e \frac{E}{E_0} = \log_e e^{-\frac{cA}{4V}RT} = 10^{-6} \quad (2.6)$$

となり、両辺の \log_e をとると

$$\log_e e^{-\frac{cA}{4V}RT} = \log_e 10^{-6} \quad (2.7)$$

となる。よって

$$-\frac{cA}{4V}RT = -6\log_e 10 \quad (2.8)$$

となり、 RT について整理すると

$$RT = \frac{24V\log_e 10}{cA} \quad (2.9)$$

となる。ここで

$$K = \frac{24\log_e 10}{c} \quad (K \doteq 0.161) \quad (2.10)$$

とおくと、

$$RT = \frac{KV}{S\bar{\alpha}} = \frac{0.161 \times V}{A} \quad (2.11)$$

となり、室容積に比例し、吸音力に反比例する残響式が得られる。

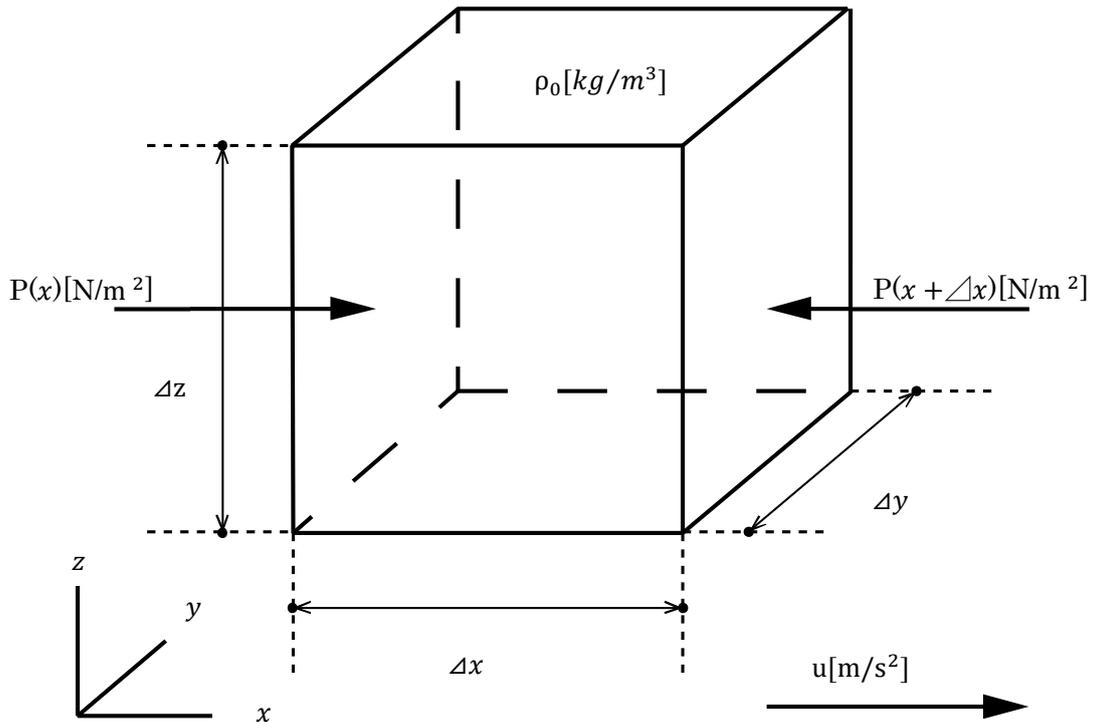


図 2.2 微小体積のx軸方向の運動

2.2 波動方程式

ここでは FDTD 法を導くための波動方程式について説明する[4]。

いま、図 2.2 のように、空気の密度を ρ_0 、変位を u 、音圧を $P(x)$ とする、各辺が座標軸に沿った媒質中の直方体の微小体積 $\Delta x \Delta y \Delta z$ を考える。運動方程式は、微小体積内の媒質の運動に対して、ニュートンの運動方程式

$$F = ma \quad (2.12)$$

(外力) = (質量) × (加速度)

を適用したものである。このとき、x 軸方向の運動に着目すると、運動方程式は

$$\{P(x) - P(x + \Delta x)\} \Delta y \Delta z = \rho_0 \Delta x \Delta y \Delta z \times \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.13)$$

となる。さらに変形をすると

$$\left[P(x) - \left\{ P(x) + \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \Delta x \right\} \right] \Delta y \Delta z = \rho_0 \Delta x \Delta y \Delta z \times \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.14)$$

となり、変形、消去をすると

$$-\frac{\partial P}{\partial x} \cdot \Delta x \Delta y \Delta z = \rho_0 \cdot \Delta x \Delta y \Delta z \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.15)$$

となる。両辺の $\Delta x \Delta y \Delta z$ 消去すると、次式が表される。

$$\rho_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x} \text{ (x 軸方向の運動方程式)} \quad (2.16)$$

y 軸, z 軸方向も同様に求められるので、

$$\rho_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x} \text{ (x 軸方向の運動方程式)} \quad (2.17)$$

$$\rho_0 \cdot \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial y} \text{ (y 軸方向の運動方程式)} \quad (2.18)$$

$$\rho_0 \cdot \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial z} \text{ (z 軸方向の運動方程式)} \quad (2.19)$$

という、x軸、y軸、z軸についての運動方程式が得られる。v、w は y 軸、z 軸方向の変位である。

連続の式とは、ある体積内を流出入する媒質質量の収支に関する方程式であり、質量収支に関する保存を表すことから、質量保存式とも呼ばれる。

次に図 2.3 のように、媒質中に各辺が座標軸に沿った直方体の微小体積 $\Delta x \Delta y \Delta z$ を考える。このとき、時刻 t から t+ Δt の間に $\Delta y \Delta z$ 面に通じて微小体積へ流入する媒質の質量は

$$\text{(媒質密度)} \times \text{(時刻 t における } \Delta y \Delta z \text{ 面での体積流量)} \times \Delta t$$

である。よって、

$$\begin{aligned} & \{\rho_0 u(x) \Delta y \Delta z - \rho_0 u(x + \Delta x) \Delta y \Delta z\} \Delta t \\ & + \{\rho_0 v(y) \Delta z \Delta x - \rho_0 v(y + \Delta y) \Delta z \Delta x\} \Delta t \\ & + \{\rho_0 w(z) \Delta x \Delta y - \rho_0 w(z + \Delta z) \Delta x \Delta y\} \Delta t = \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot \Delta t \cdot \Delta x \Delta y \Delta z \end{aligned} \quad (2.20)$$

となる。ここで、 ρ を時空間変動も含めた密度とし、まとめると

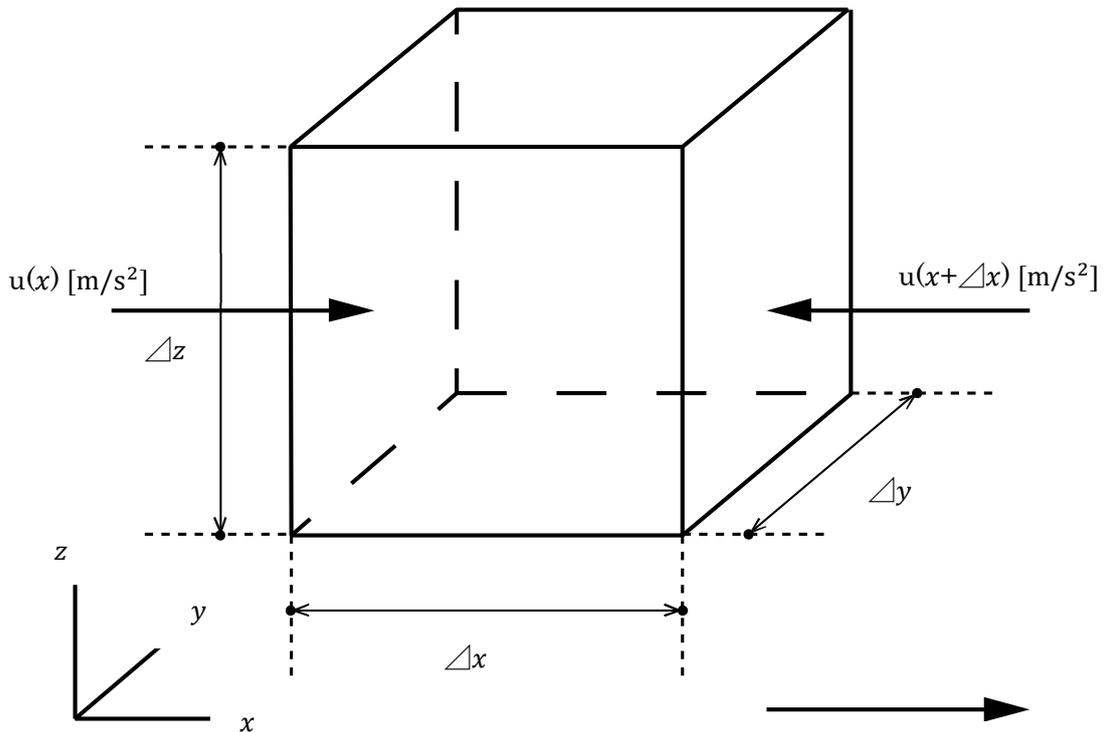


図 2.3 微小体積内の質量収支

$$\begin{aligned}
& \rho_0 \cdot \Delta t \left[\Delta y \Delta z \left\{ u(x) - \left(u(x) + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x \right) \right\} \right. \\
& \quad + \Delta z \Delta x \left\{ v(y) - \left(v(y) + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \right) \right\} \\
& \quad \left. + \Delta x \Delta y \left\{ w(z) - \left(w(z) + \frac{\partial w}{\partial z} \Delta z \right) \right\} \right] = \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot \Delta t \cdot \Delta x \Delta y \Delta z
\end{aligned} \tag{2.21}$$

なり、更にまとめると、

$$\rho_0 \Delta t \left(-\frac{\partial u}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial v}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial w}{\partial z} \Delta x \Delta y \Delta z \right) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta t \cdot \Delta x \Delta y \Delta z \tag{2.22}$$

となる。式 (2.22) の両辺の Δt と $\Delta x \Delta y \Delta z$ を消去すると、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho_0 \nabla \cdot \mathbf{u} \tag{2.23}$$

という質量保存則が得られる。

次に、

$$P = \mathcal{K} \frac{\rho}{\rho_0} \quad (\mathcal{K} = \rho_0 c^2 \text{ 体積弾性率}) \tag{2.24}$$

とおく。 ρ について整理すると、

$$\rho = \frac{\rho_0 P}{\mathcal{K}} \tag{2.25}$$

となる。式 (2.25) を式 (2.23) に代入すると

$$\frac{\rho_0}{\mathcal{K}} \frac{\partial P}{\partial t} = -\rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \tag{2.26}$$

となり、変形すると

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\kappa \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (\text{圧力に関する連続の式}) \tag{2.27}$$

が得られる。

次に、式 (2.27) を時間微分すると、

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = -\kappa \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial t} + \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial t} \right) \tag{2.28}$$

となり、式 (2.17)、式 (2.18)、式 (2.19) を式 (2.28) に代入すると、

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = -\kappa \left(-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) \tag{2.29}$$

となり、式 (2.29) に $\mathcal{K} = \rho_0 c^2$ を代入すると、

$$\frac{1}{c^2} \times \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \nabla^2 P = \Delta P \tag{2.30}$$

となり、まとめると、

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \nabla^2 P \tag{2.31}$$

という波動方程式が得られる。

また、単振動（各周波数 ω ）を考えると、

$$P(x, y, z, t) = P(x, y, z)e^{-i\omega t} \quad (2.32)$$

なので、式 (2.32) を式 (2.31) に代入すれば

$$\frac{(-\omega t)^2}{c^2} P \cdot e^{-i\omega t} = e^{-i\omega t} \nabla^2 P \quad (2.33)$$

ここで

$$k = \frac{\omega}{c} : \text{波数} \quad (2.34)$$

とおくと、式 (2.33) は

$$-k^2 P = \nabla^2 P \quad (2.35)$$

となり、変形すると、

$$\nabla^2 P + k^2 P = 0 \quad (2.36)$$

が得られる。これが Helmholtz の波動方程式である。

2.3 FDTD 法（時間領域差分法）

FDTD 法（Finite-Difference Time-Domain method）とは、偏微分方程式の微分項を差分に置き換え、逐次時間積分を行うことで、対象となる方程式の時間発展を計算していく手法である[4]。

いま、 x 軸方向の運動方程式を考える。式(2.18)より、 x 軸方向の運動方程式は

$$\rho_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.37)$$

である。粒子速度の時間微分項と音圧の空間微分項を中心差分で近似すると、

$$\frac{p_i^n - p_{i-1}^n}{\Delta x} + \rho_0 \frac{u_{i-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i-\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = 0 \quad (2.38)$$

という差分式が得られる。 i は空間ステップ数、 n は時間ステップ数を表す。全体に Δt を掛けて変形すると、

$$u_{i-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = u_{i-\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{1}{\rho_0} \times \frac{\Delta t}{\Delta x} (p_i^n - p_{i-1}^n) \quad (2.39)$$

という更新式が得られる。また、連続の式についても同様に考える。式(2.27)より、 x 軸方向の連続の式は

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \mathcal{K} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2.40)$$

なので、粒子速度の空間微分項と音圧の時間微分項を中心差分で近似すると、

$$\frac{p_i^{n+1} - p_i^n}{\Delta t} + \mathcal{K} \left(\frac{u_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + u_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - u_{j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + u_{k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - u_{k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} \right) = 0 \quad (2.41)$$

という差分式が得られる。先ほどと同様に全体に Δt を掛けて変形すると、

$$p_i^{n+1} = p_i^n - \mathcal{K} \frac{\Delta t}{\Delta x} (u_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}) \quad (2.42)$$

という差分式が得られる。これらは、3次元式に拡張することができ、運動方程式について

$$u_{i-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = u_{i-\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{1}{\rho_0} \times \frac{\Delta t}{\Delta x} (p_i^n - p_{i-1}^n) \quad (x \text{ 軸}) \quad (2.43)$$

$$u_{j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = u_{j-\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{1}{\rho_0} \times \frac{\Delta t}{\Delta y} (p_j^n - p_{j-1}^n) \quad (y \text{ 軸}) \quad (2.44)$$

$$u_{k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = u_{k-\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{1}{\rho_0} \times \frac{\Delta t}{\Delta z} (p_k^n - p_{k-1}^n) \quad (z \text{ 軸}) \quad (2.45)$$

が得られる。ここで、 j, k は y 軸、 z 軸方向の空間ステップ数を表す。連続の式についても同様に三次元に拡張すると、

$$p_{i,j,k}^{n+1} = p_{i,j,k}^n - \mathcal{K} \left\{ \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(u_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) \right\} \quad (2.46)$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\Delta t}{\Delta y} \left(u_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - u_{j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) \\
& + \frac{\Delta t}{\Delta z} \left(u_{k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - u_{k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) \}
\end{aligned}$$

が得られる。

2.4 シュレーダー法

Schroder は、バンドノイズを定常に出した後、音源を切って得られる減衰波形が一定せず、多数回の平均をとらねばならないのに対し、唯一回のインパルス応答を測定して二乗すればよいことを示した[5]。

まず‘定常白色雑音’ $n(t)$ の自己共分散関数 $\langle n(t_1) \cdot n(t_2) \rangle$ は、‘定常’ ゆえに時間差 $(t_2 - t_1)$ のみに依存しており、‘白色’ ゆえに $t_2 = t_1$ 以外は 0 と考えられるから、

$$\langle n(t_1) \cdot n(t_2) \rangle = N \cdot \delta(t_2 - t_1) \quad (2.47)$$

ここで、 $\langle \quad \rangle$ は集合平均を表し、 N : 単位帯域幅当たりの雑音電力、 $\delta(t_2 - t_1)$: デルタ関数、と表すことができる。いまバンドノイズレベル $n(t)$ が定常になったとき、 $\tau = 0$ で音源を切ると、受音点での信号は次のたたみ込み積分で表される。

$$S(t) = \int_{-\infty}^0 n(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau \quad (2.48)$$

ここで、 $h(t)$ は音源・受音点間のインパルス応答、 $-\infty$ は定常になるまでの十分な時間を表す。ここでエネルギー減衰を考えるため受音信号の二乗をとると、式(2.56)で表され

$$S^2(t) = \int_{-\infty}^0 d\tau \int_{-\infty}^0 d\theta n(\tau) \cdot n(\theta) \cdot h(t - \tau) \cdot h(t - \theta) \quad (2.49)$$

式 (2.49) を集合平均式(2.54)を適用すれば

$$\begin{aligned} \langle S^2(t) \rangle &= \int_{-\infty}^0 d\tau \int_{-\infty}^0 d\theta \langle n(\tau) \cdot n(\theta) \rangle \cdot h(t - \tau) \cdot h(t - \theta) \\ &= \int_{-\infty}^0 d\tau \int_{-\infty}^0 d\theta N \cdot \delta(\theta - \tau) \cdot h(t - \tau) \cdot h(t - \theta) \end{aligned} \quad (2.50)$$

ここで $\delta(\theta - \tau)$ は積分すれば 1 となり、 $\theta = \tau$ 以外では消滅するから、 θ に関する積分をすると

$$\langle S^2(t) \rangle = N \int_{-\infty}^0 h^2(t - \tau) d\tau \quad (2.51)$$

または新しい積分変数 $x = t - \tau$ を用いて

$$\langle S^2(t) \rangle = N \int_{\infty}^t h^2(x) dx = -N \int_t^{\infty} h^2(x) dx \quad (2.52)$$

となる。

第3章 室の大きさの変化

本章では、図 3.1 のような一般的な室形状である立方体について FDTD 法による残響時間と理論式の残響時間について比較し、同じ室形状、吸音率で一辺あたりの長さのみが変化した場合の完全拡散性の評価を行う。ここで用いる理論式は 2.1 Sabine の残響式より

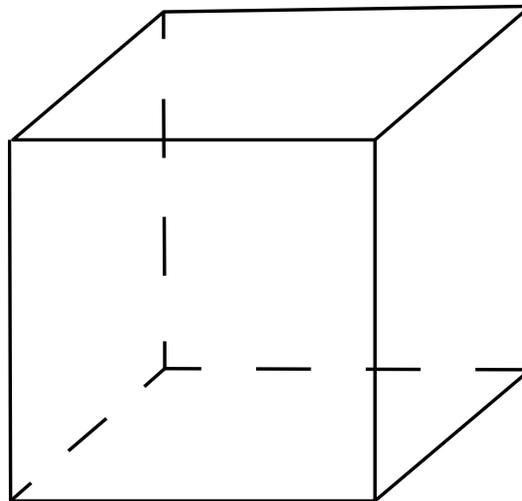
$$RT = \frac{KV}{S\bar{\alpha}}$$

である。ここで $K=0.161$ とする。ただし、 V は室容積、 S は吸音面積、 $\bar{\alpha}$ は平均吸音率を表す。

3.1 条件

- ・ 室形状：立方体
- ・ 吸音率：0.1[-]
- ・ 一辺あたりの長さ：1[m]～10[m]
- ・ 最大周波数：300[Hz]
- ・ 最大解析時間：0.5[s]
- ・ 媒質：空気
- ・ 入力波形：ガウシアンパルス。(受信波形は逆フィルタによりインパルス応答に変換)
- ・ 音源と受信点：表 3.1 に示す

とし、FDTD 法による残響曲線は 2.4 シュレーダー法により計算し、残響時間を残響時間の-5～-35[dB]の範囲から求める。



立方体
平行壁面数 3組

図 3.1 解析対象

表 3.1 各条件設定

Case	一辺あ たりの 長さ[m]	音源	音源	音源	受信点	受信点	受信点	表面 積:S	容積 :V	V/S
		:x	:y	:z	:x	:y	:z			
Case1	1	0.05	0.05	0.05	0.95	0.95	0.95	6	1	0.1667
Case2	2	0.10	0.10	0.10	1.9	1.9	1.9	24	8	0.3333
Case3	3	0.15	0.15	0.15	2.85	2.85	2.85	54	27	0.5000
Case4	4	0.20	0.20	0.20	3.8	3.8	3.8	96	64	0.6667
Case5	5	0.25	0.25	0.25	4.75	4.75	4.75	150	125	0.8333
Case6	6	0.30	0.30	0.30	5.7	5.7	5.7	216	216	1.0000
Case7	7	0.35	0.35	0.35	6.65	6.65	6.65	343	294	1.1667
Case8	8	0.40	0.40	0.40	7.6	7.6	7.6	512	384	1.3333
Case9	9	0.45	0.45	0.45	8.55	8.55	8.55	729	486	1.5000
Case10	10	0.50	0.50	0.50	9.5	9.5	9.5	1000	600	1.6667

3.2 解析結果・考察

表 3.2 の上表は吸音率 0.1 における各周波数の残響時間、表 3.2 の下表には吸音率 0.1 における各周波数の残響時間から Sabine の残響式の残響時間を引いた時間を示す。

図 3.1 に吸音率 0.1 における各周波数の残響時間の差を示す。周波数 62.5[Hz]における Case1 が大きな値になっているのがわかる。

次に図 3.2 の縦軸は 62.5[Hz]、125[Hz]、250[Hz]、500[Hz]の残響時間の差の平均をとったものである。一辺あたりの長さが大きくなるにつれて右肩下がり、つまり、残響時間の差が 0 より離れているのがわかる。これから、立方体においては室が大きくなるにつれて完全拡散性が悪くなるという傾向がわかる。

表 3.2 立方体：吸音率 0.1

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.9883	0.1925	0.1634	0.1459	0.1530
	2	0.3873	0.3266	0.2883	0.2449	0.3060
	3	0.5215	0.4547	0.3889	0.3610	0.4590
	4	0.6432	0.5747	0.5059	0.5684	0.6119
	5	0.7501	0.6535	0.5819	0.6989	0.7649
	6	0.7305	0.6698	0.5992	0.6521	0.9179
	7	0.7263	0.6095	0.6379	0.6369	1.0709
	8	0.6859	0.5237	0.6342	0.6631	1.2239
	9	0.6027	0.4647	0.5683	0.7574	1.3769
	10	0.5674	0.4642	0.5503	0.8883	1.5298

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.8353	0.0395	0.0104	-0.0071	0.2195
	2	0.0813	0.0206	-0.0177	-0.0611	0.0058
	3	0.0625	-0.0043	-0.0701	-0.0980	-0.0274
	4	0.0313	-0.0372	-0.1060	-0.0435	-0.0389
	5	-0.0148	-0.1114	-0.1830	-0.0660	-0.0938
	6	-0.1874	-0.2481	-0.3187	-0.2658	-0.2550
	7	-0.3446	-0.4614	-0.4330	-0.4340	-0.4182
	8	-0.5380	-0.7002	-0.5897	-0.5608	-0.5971
	9	-0.7742	-0.9122	-0.8086	-0.6195	-0.7786
	10	-0.9624	-1.0656	-0.9795	-0.6415	-0.9123

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

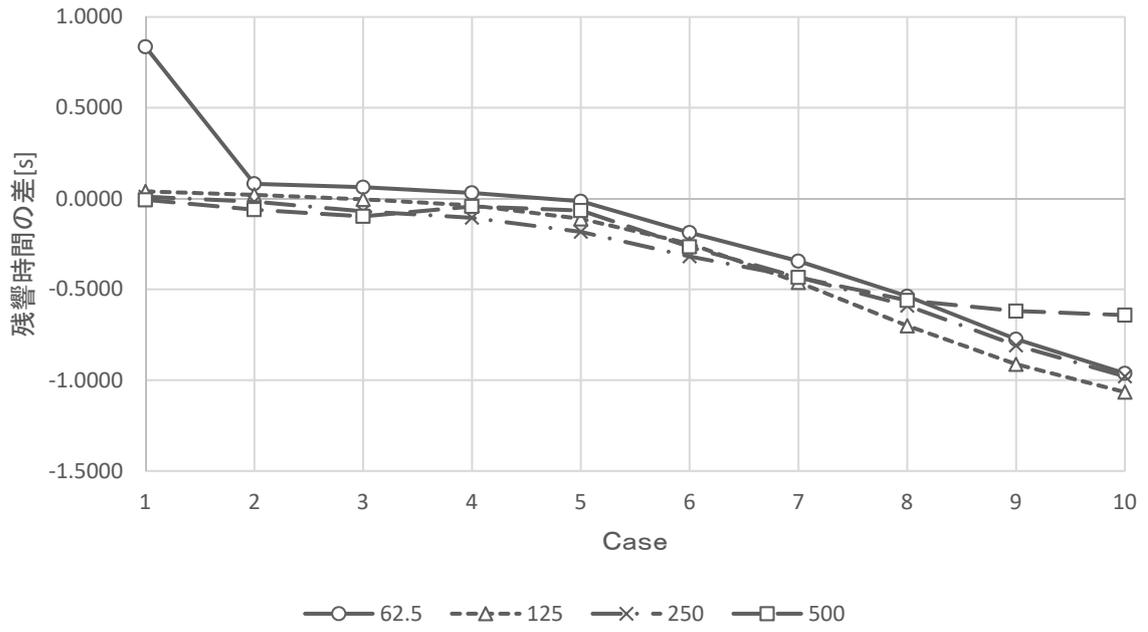


図 3.1 立方体：吸音率 0.1

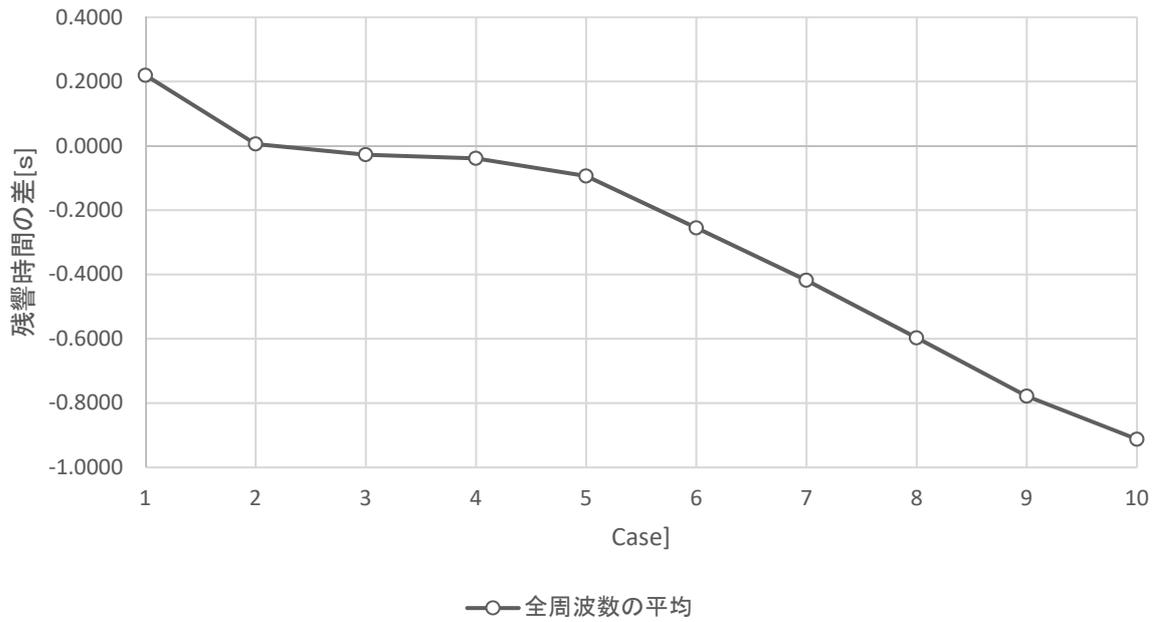


図 3.2 立方体：吸音率 0.1：全周波数の平均

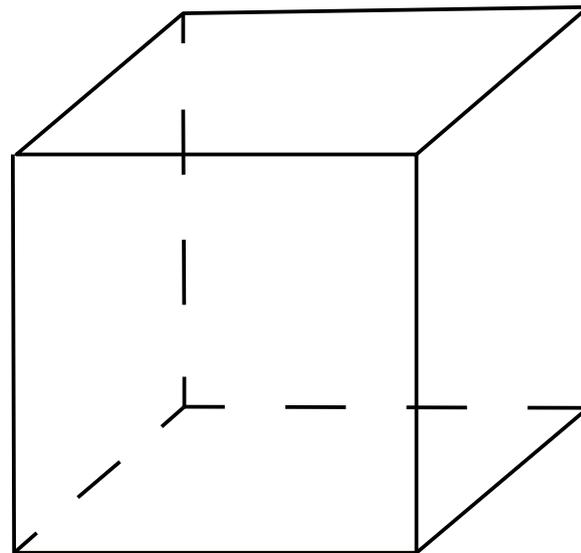
第4章 吸音率の変化

通常の残響室では音の反射性を上げるために吸音率が低く設定されている。本章では、図 4.1 のような立方体について吸音率を変化させた場合の拡散性の評価を行う。理論値の導出は第 3 章と同様である。

4.1 条件

- ・室形状：立方体
- ・吸音率：0.2, 0.4, 0.6, 0.8 の 4 種類
- ・一辺あたりの長さ：1[m]~10[m]
- ・最大周波数：300[Hz]
- ・最大解析時間：0.5[s]
- ・媒質：空気
- ・入力波形：ガウシアンパルス（受音波形は逆フィルタによりインパルス応答に変換）
- ・音源と受音点は第 3 章と同じ位置で行う。（表 3.1）

とし、FDTD 法による残響曲線は 2.4 シュレーダー法により計算し、残響時間を残響時間の-5~-35[dB]の範囲から求める。



立方体

平行壁面数 3 組

図 4.1 解析対象

4.2 解析結果・考察

表 4.1～表 4.4 の上表に吸音率別、各周波数別の残響時間、表 4.1～表 4.4 の下表に吸音率別、各周波数別の残響時間から Sabine の残響式の残響時間を引いた時間を示す。表 4.5 に吸音率別に全周波数の平均の残響時間を示す。図 4.2～図 4.5 には各周波数における吸音率別の残響時間の差のグラフを示す。

例えば、図 4.4 に見られるように一辺あたりの長さが短いときは吸音率の違いでの値はさほど大きく変わらないが、長さが大きくなるにつれてそれぞれの差が大きくなり、Case10 において吸音率 0.2 と吸音率 0.4 の差が最大で 0.18[s]となった。

次に、図 4.6 に吸音率別における全周波数の残響時間の差の平均を示す。どの吸音率においても右肩下がりとなっており、一辺あたりが長くなるにつれて完全拡散性が悪くなっていることがわかる。

そして、図 4.7 は全周波数の残響時間の平均の全吸音率の平均を示す。グラフは右肩下がりとなっており、第 3 章の図 3.2 と同様一辺あたりの長さが大きくなるにつれて完全拡散性が悪いことがわかる。これは、吸音率より、室容積が完全拡散性に与える影響がおおきいためと考えられる。

表 4.1 立方体：吸音率 0.2

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0977	0.0958	0.0775	0.063	0.1530
	2	0.1955	0.1553	0.1298	0.1239	0.3060
	3	0.2484	0.1886	0.1652	0.2079	0.4590
	4	0.3109	0.2588	0.2489	0.2824	0.6119
	5	0.3236	0.3146	0.3373	0.3760	0.7649
	6	0.3775	0.3278	0.4155	0.4968	0.9179
	7	0.4486	0.3915	0.4847	0.5113	1.0709
	8	0.5152	0.4977	0.5577	0.6486	1.2239
	9	0.4772	0.5990	0.6362	0.6668	1.3769
	10	0.4826	0.6718	0.6170	0.7308	1.5298

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0147	0.0128	-0.0055	-0.0200	0.0005
	2	0.0295	-0.0107	-0.0362	-0.0421	-0.0149
	3	-0.0007	-0.0605	-0.0839	-0.0412	-0.0465
	4	-0.0212	-0.0733	-0.0832	-0.0497	-0.0568
	5	-0.0915	-0.1005	-0.0778	-0.0391	-0.0772
	6	-0.0617	-0.0727	-0.1095	-0.0529	-0.0742
	7	-0.1326	-0.1897	-0.0965	-0.0699	-0.1221
	8	-0.1490	-0.1665	-0.1065	-0.0156	-0.1094
	9	-0.2700	-0.1482	-0.1110	-0.0804	-0.1524
	10	-0.3476	-0.1584	-0.2132	-0.0994	-0.2047

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 4.2 立方体：吸音率 0.4

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0958	0.0567	0.0374	0.0330	0.0473
	2	0.1138	0.0642	0.0617	0.0761	0.0946
	3	0.0975	0.0882	0.1129	0.1010	0.1420
	4	0.1284	0.1229	0.1563	0.1494	0.1892
	5	0.1074	0.1849	0.1672	0.2291	0.2365
	6	0.1763	0.2266	0.2024	0.2427	0.2839
	7	0.2067	0.2748	0.2657	0.2622	0.3312
	8	0.2454	0.3135	0.2867	0.3444	0.3785
	9	0.3086	0.3072	0.4012	0.2911	0.4259
	10	0.3701	0.3343	0.4446	0.3294	0.4732

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0485	0.0094	-0.0099	-0.0143	0.0084
	2	0.0192	-0.0304	-0.0329	-0.0185	-0.0157
	3	-0.0445	-0.0538	-0.0291	-0.0410	-0.0421
	4	-0.0608	-0.0663	-0.0329	-0.0398	-0.0500
	5	-0.1291	-0.0516	-0.0693	-0.0074	-0.0644
	6	-0.0507	-0.0934	-0.0750	-0.0330	-0.0630
	7	-0.1245	-0.0564	-0.0655	-0.0690	-0.0789
	8	-0.1331	-0.0650	-0.0918	-0.0341	-0.0810
	9	-0.1173	-0.1187	-0.0247	-0.1348	-0.0988
	10	-0.1031	-0.1389	-0.0286	-0.1438	-0.1036

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 4.3 立方体：吸音率 0.6

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0926	0.0506	0.0247	0.0213	0.0354
	2	0.1012	0.0498	0.0424	0.0415	0.0707
	3	0.0750	0.0602	0.0578	0.0597	0.1061
	4	0.0995	0.0847	0.0827	0.1234	0.1415
	5	0.1118	0.1062	0.1030	0.1183	0.1769
	6	0.1208	0.1156	0.1180	0.1407	0.2058
	7	0.1377	0.1400	0.1486	0.1649	0.2477
	8	0.1698	0.1654	0.2407	0.1709	0.2831
	9	0.1938	0.1869	0.2098	0.1893	0.3185
	10	0.2123	0.2064	0.2323	0.2158	0.3539

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0572	0.0152	-0.0107	-0.0141	0.0119
	2	0.0305	-0.0209	-0.0283	-0.0292	-0.0120
	3	-0.0311	-0.0459	-0.0483	-0.0464	-0.0429
	4	-0.0420	-0.0568	-0.0588	-0.0181	-0.0439
	5	-0.0651	-0.0707	-0.0739	-0.0586	-0.0671
	6	-0.0726	-0.0901	-0.0972	-0.0393	-0.0748
	7	-0.1100	-0.1077	-0.0991	-0.0828	-0.0999
	8	-0.1133	-0.1177	-0.0424	-0.1122	-0.0964
	9	-0.1247	-0.1316	-0.1087	-0.1292	-0.1236
	10	-0.1416	-0.1475	-0.1216	-0.1381	-0.1372

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 4.4 立方体：吸音率 0.8

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0923	0.0455	0.0252	0.0113	0.0299
	2	0.0914	0.0503	0.0225	0.0217	0.0597
	3	0.0800	0.0455	0.0341	0.0329	0.0895
	4	0.1008	0.0450	0.0430	0.0803	0.1194
	5	0.1044	0.0593	0.0534	0.0644	0.1493
	6	0.0914	0.0682	0.0647	0.0741	0.1791
	7	0.0990	0.0768	0.0773	0.1452	0.2091
	8	0.0901	0.0856	0.1561	0.1637	0.2389
	9	0.1032	0.0965	0.1888	0.1835	0.2688
	10	0.1190	0.1076	0.1251	0.2119	0.2986

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0624	0.0156	-0.0047	-0.0186	0.0137
	2	0.0317	-0.0094	-0.0372	-0.0380	-0.0132
	3	-0.0095	-0.0440	-0.0554	-0.0566	-0.0414
	4	-0.0186	-0.0744	-0.0764	-0.0391	-0.0521
	5	-0.0449	-0.0900	-0.0959	-0.0849	-0.0789
	6	-0.0787	-0.1055	-0.1100	-0.0994	-0.0984
	7	-0.1101	-0.1323	-0.1318	-0.0639	-0.1095
	8	-0.1488	-0.1533	-0.0828	-0.0752	-0.1150
	9	-0.1656	-0.1723	-0.0800	-0.0853	-0.1258
	10	-0.1796	-0.1910	-0.1735	-0.0867	-0.1577

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 4.5 立方体：吸音率別：全周波数の平均

残響時間の差[s]		吸音率				平均[s]
		0.2	0.4	0.6	0.8	
Case	1	0.0005	0.0084	0.0119	0.0137	0.1530
	2	-0.0149	-0.0157	-0.0120	-0.0132	0.3060
	3	-0.0465	-0.0421	-0.0429	-0.0414	0.4590
	4	-0.0568	-0.0500	-0.0439	-0.0521	0.6119
	5	-0.0772	-0.0644	-0.0671	-0.0789	0.7649
	6	-0.0742	-0.0630	-0.0748	-0.0984	0.9179
	7	-0.1221	-0.0789	-0.0999	-0.1095	1.0709
	8	-0.1094	-0.0810	-0.0964	-0.1150	1.2239
	9	-0.1524	-0.0988	-0.1236	-0.1258	1.3769
	10	-0.2047	-0.1036	-0.1372	-0.1577	1.5298

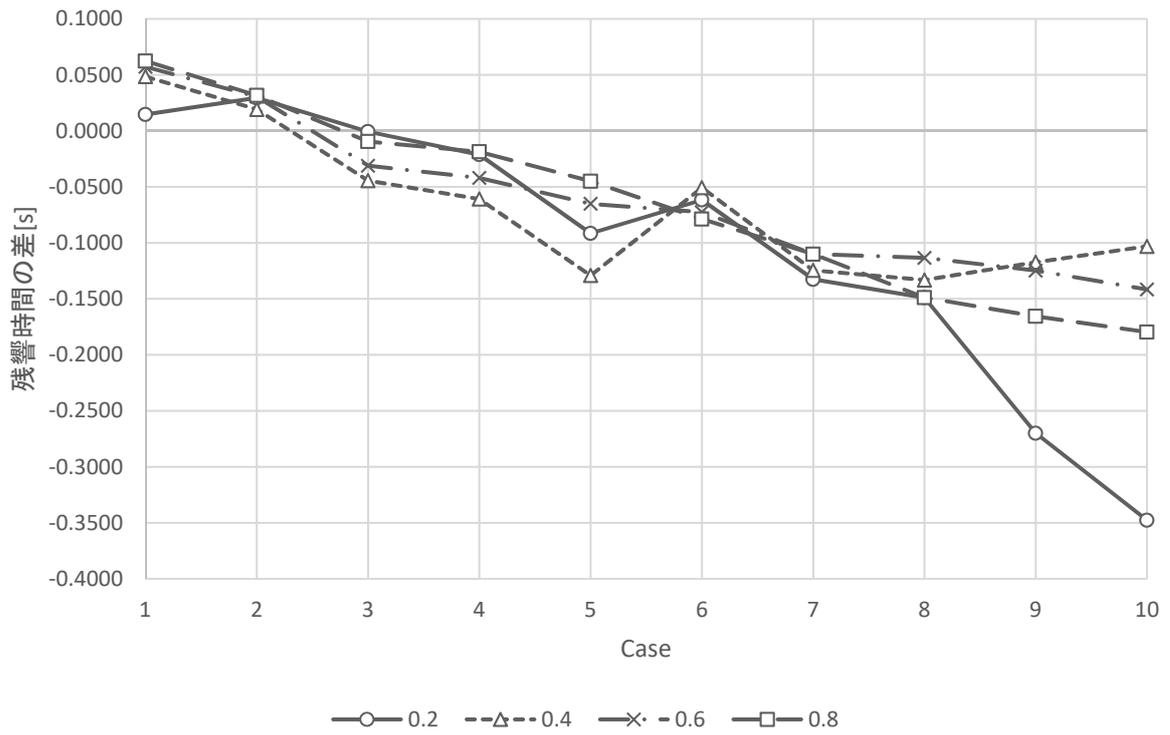


図 4.2 立方体：周波数 62.5[Hz]

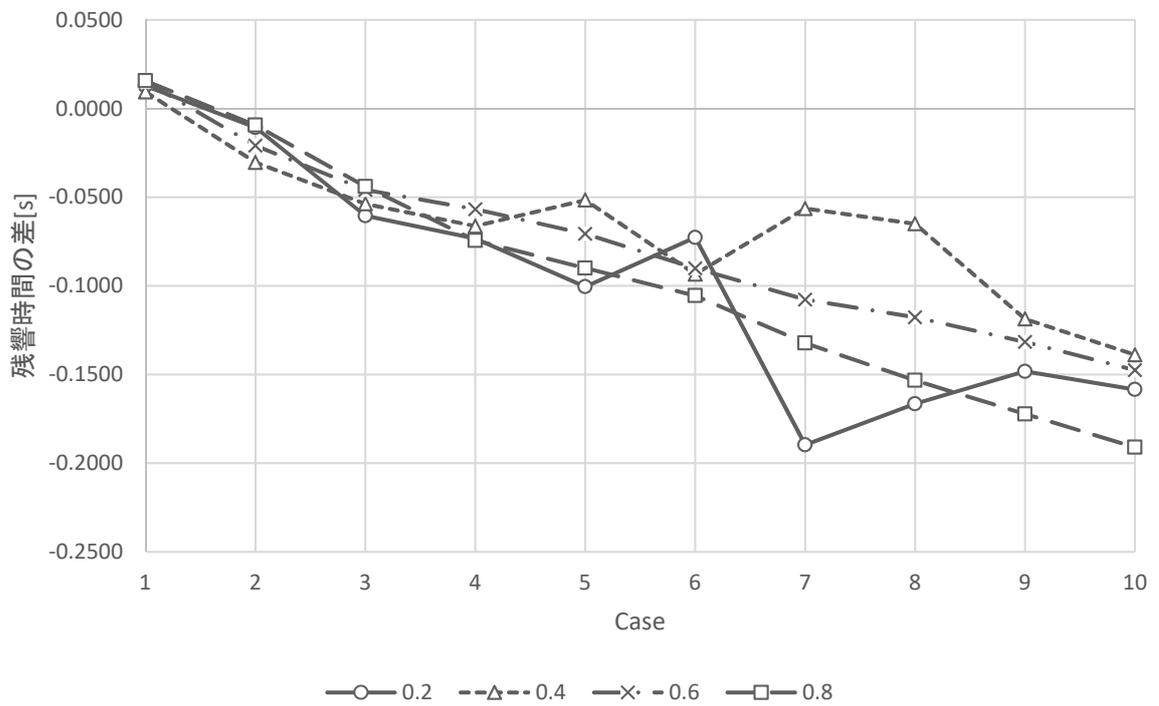


図 4.3 立方体：周波数 125[Hz]

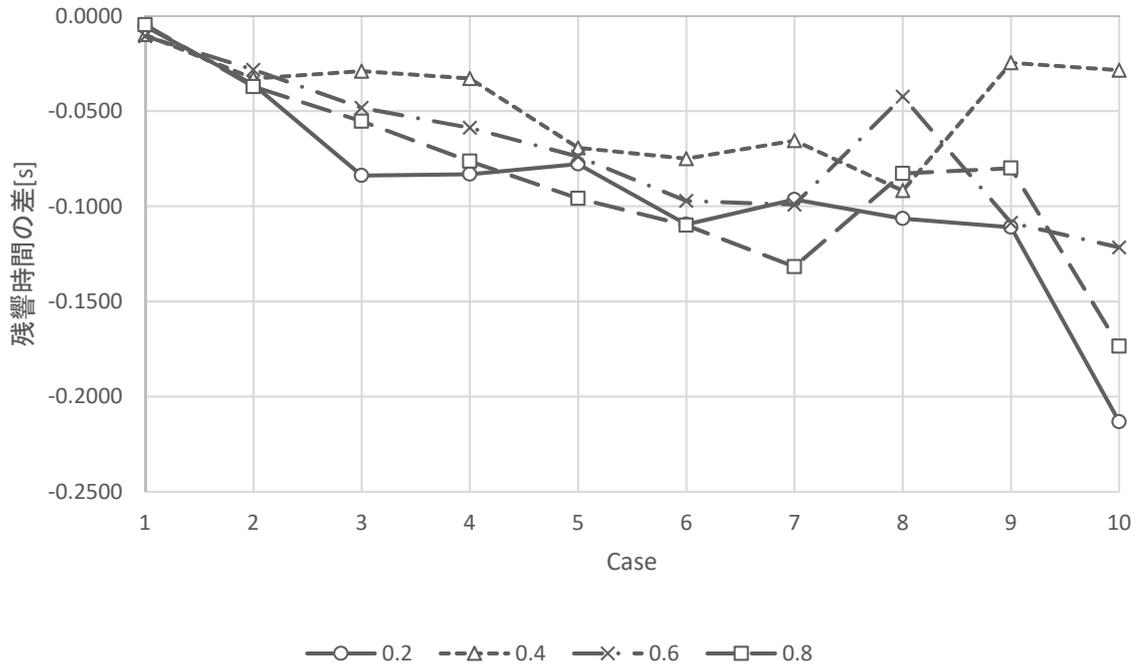


図 4.4 立方体：周波数 250[Hz]

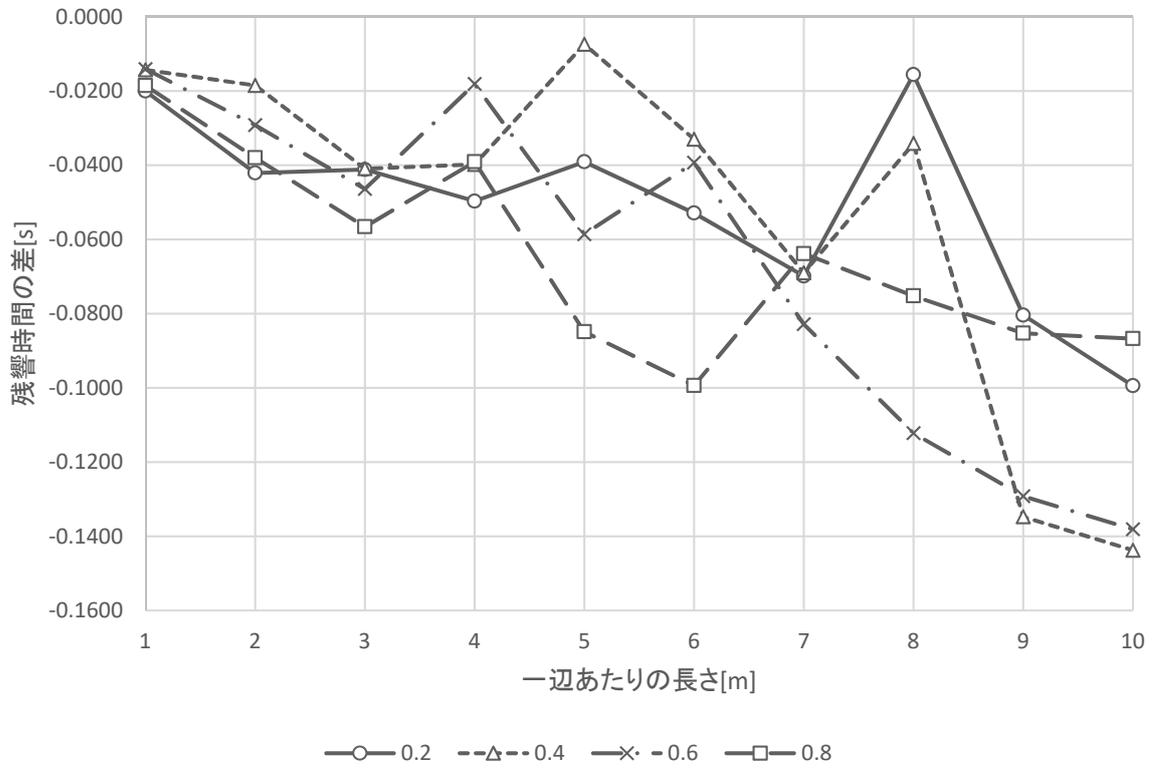


図 4.5 立方体：周波数 500[Hz]

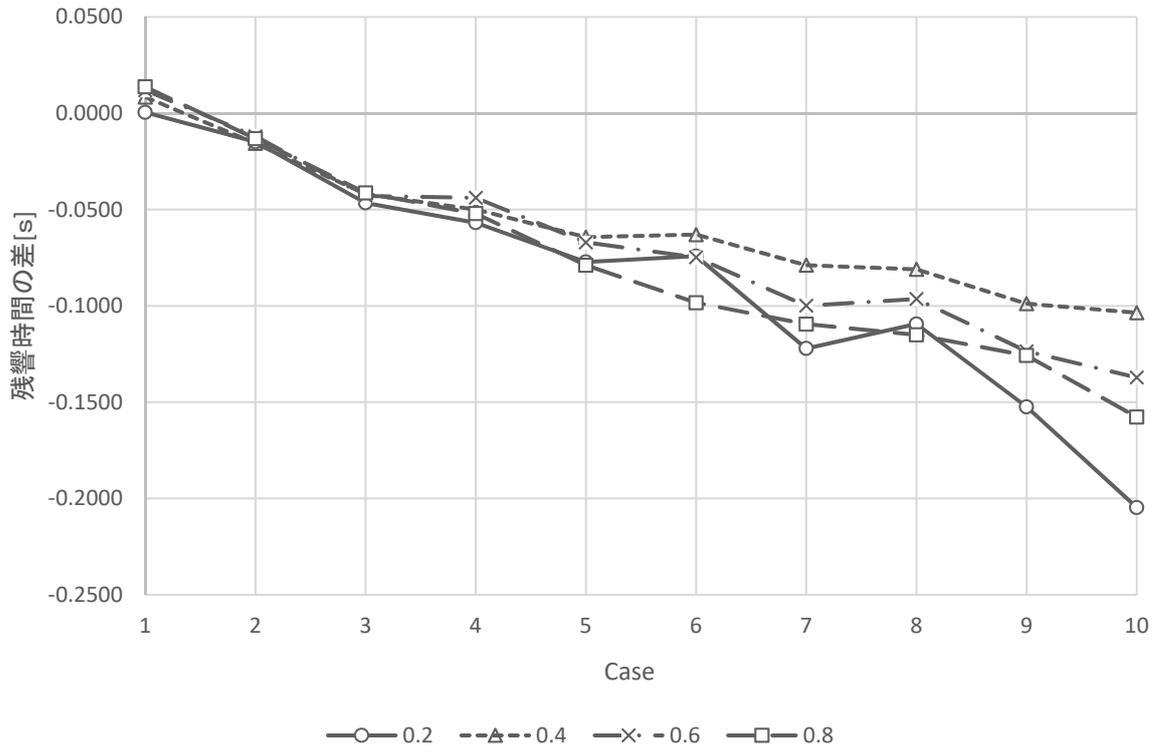


図 4.6 立方体：全周波数の平均

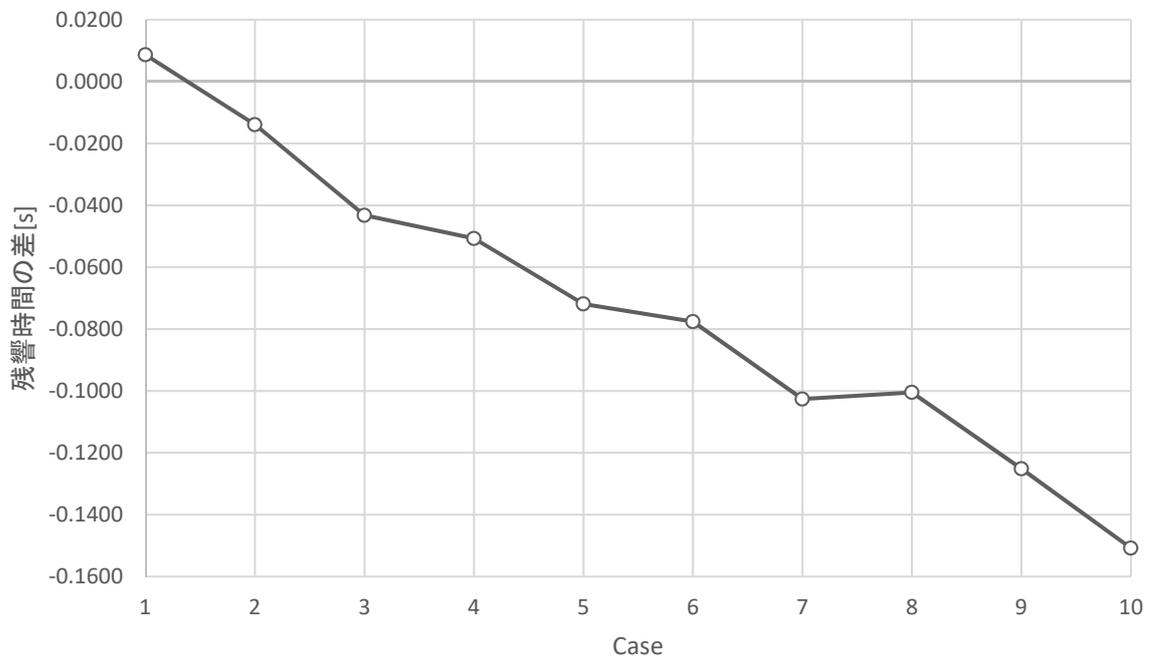


図 4.7 立方体：全周波数の平均：全吸音率の平均

第5章 正多角柱

通常の残響室は不整形の形状にすることが多い。それは、室内のどの点においても、音の進行方向をあらゆる方向に一樣にするという拡散音場の条件に近づけるためである。そこで、本章では室形状を多角柱にした場合の完全拡散性の評価を行う。解析対象として、図 5.1 のような正三角柱、正五角柱、正六角柱について検討する。理論値の導出は第 3 章と同様である。

5.1 条件

- ・室形状：正三角柱、正五角柱、正六角柱
- ・吸音率：0.2, 0.4, 0.6, 0.8
- ・吸音面：全面
- ・一辺あたりの長さ：立方体の V/S と同じ一辺あたりの長さとする
- ・最大周波数：300[Hz]
- ・最大解析時間：0.5[s]
- ・媒質：空気
- ・入力波形：ガウシアンパルス（受音波形は逆フィルタによりインパルス応答に変換）
- ・音源と受音点：表 5.1 に三角柱、表 5.2 に五角柱、表 5.3 に六角柱にそれぞれ示す。

とし、FDTD 法による残響曲線は 2.4 シュレーダー法により計算し、残響時間を残響時間の-5~-35[dB]の範囲から求める。

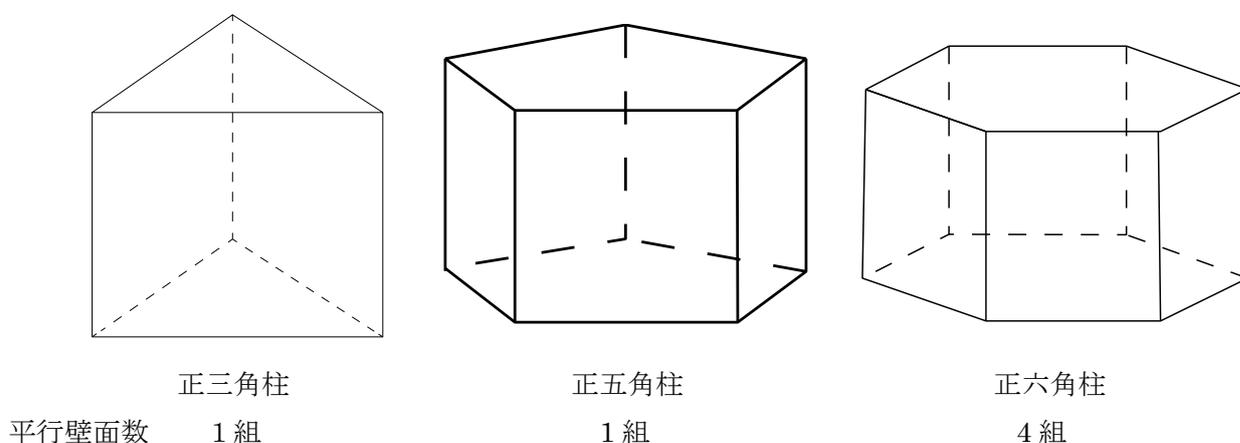


図 5.1 解析対象

表 5.1 三角柱 各条件設定

Case	一辺 あたりの長さ [m]	音源 :x	音源 :y	音源 :z	受音点 :x	受音点 :y	受音点 :z	表面 積:S	容積 :V	V/S
Case1	1.49	0.074	0.064	0.074	0.744	1.224	1.414	5.77	0.96	0.1667
Case2	2.98	0.149	0.129	0.149	1.488	2.449	2.827	23.10	7.70	0.3333
Case3	4.47	0.223	0.193	0.223	2.233	3.674	4.242	51.98	25.99	0.5000
Case4	5.95	0.298	0.258	0.298	2.976	4.897	5.654	92.41	61.60	0.6667
Case5	7.44	0.372	0.322	0.372	3.720	6.121	7.068	144.39	120.32	0.8333
Case6	8.93	0.446	0.387	0.446	4.464	7.346	8.482	207.92	207.92	1.0000
Case7	10.42	0.521	0.451	0.521	5.208	8.570	9.895	283.00	330.17	1.1667
Case8	11.90	0.595	0.515	0.595	5.952	9.794	11.309	369.65	492.86	1.3333
Case9	13.39	0.670	0.580	0.670	6.697	11.019	12.723	467.83	701.74	1.5000
Case10	14.88	0.744	0.644	0.744	7.440	12.243	14.136	577.56	962.59	1.6667

表 5.2 五角柱 各条件設定

Case	一辺 あたりの長さ [m]	音源 :x	音源 :y	音源 :z	受音点 :x	受音点 :y	受音点 :z	表面 積:S	容積 :V	V/S
Case1	0.8180	0.294	0.065	0.041	0.654	1.194	0.777	5.648	0.94	0.1667
Case2	1.6400	0.590	0.131	0.082	1.312	2.394	1.558	22.703	7.59	0.3333
Case3	2.4550	0.884	0.196	0.123	1.964	3.584	2.332	50.874	25.46	0.5000
Case4	3.2700	1.177	0.262	0.164	2.616	4.774	3.107	90.258	60.16	0.6667
Case5	4.0900	1.472	0.327	0.205	3.272	5.972	3.886	141.2	117.71	0.8333
Case6	4.9050	1.766	0.392	0.245	3.924	7.161	4.660	203.08	203.03	1.0000
Case7	5.7250	2.061	0.458	0.286	4.580	8.359	5.439	276.66	322.83	1.1667
Case8	6.5400	2.354	0.523	0.327	5.232	9.549	6.213	361.03	481.26	1.3333
Case9	7.3600	2.650	0.589	0.368	5.888	10.746	6.992	457.24	685.93	1.5000
Case10	8.1750	2.943	0.654	0.409	6.540	11.936	7.766	564.11	939.97	1.6667

表 5.3 六角柱 各条件設定

Case	一辺 あたりの長さ [m]	音源 :x	音源 :y	音源 :z	受信点 :x	受信点 :y	受信点 :z	表面 積:S	容積 :V	V/S
Case1	0.7181	0.395	0.0359	0.0359	1.0412	1.2064	0.6822	5.773	0.962	0.1667
Case2	1.4365	0.7901	0.0718	0.0718	2.0829	2.4133	1.3647	23.1	7.701	0.3333
Case3	2.1547	1.1851	0.1077	0.1077	3.1243	3.6199	2.047	51.98	25.99	0.5000
Case4	2.8729	1.5801	0.1436	0.1436	4.1657	4.8265	2.7293	92.41	61.6	0.6667
Case5	3.5911	1.9751	0.1796	0.1796	5.2071	6.033	3.4115	144.4	120.3	0.8333
Case6	4.3094	2.3702	0.2155	0.2155	6.2486	7.2398	4.0939	207.9	207.9	1.0000
Case7	5.0276	2.7652	0.2514	0.2514	7.29	8.4464	4.7762	283	330.2	1.1667
Case8	5.7459	3.1602	0.2873	0.2873	8.3316	9.6531	5.4586	369.6	492.9	1.3333
Case9	6.4641	3.5553	0.3232	0.3232	9.3729	10.86	6.1409	467.8	701.7	1.5000
Case10	7.1823	3.9503	0.3591	0.3591	10.414	12.066	6.8232	577.6	962.6	1.6667

5.2 解析結果・考察

表 5.3～表 5.7 の上表には三角柱における吸音率別の残響時間、表 5.3～表 5.7 の下表には三角柱における解析結果から Sabine の残響式の残響時間を引いた値を示す。

また、表 5.9～表 5.12 の上表には五角柱における吸音率別の残響時間、表 5.9～表 5.12 の下表には五角柱における解析結果から Sabine の残響式の残響時間を引いた値を示す。

そして、表 5.14～表 5.17 の上表には六角柱における吸音率別の残響時間、表 5.14～表 5.17 の下表には六角柱における解析結果から Sabine の残響式の残響時間を引いた値を示す。表 5.8、表 5.13、表 5.18 にはそれぞれ多角柱の全周波数における残響時間の差の平均を吸音率別に示す。

図 5.2～図 5.5 に吸音率 0.2 における周波数別の残響時間の差、また、図 5.6 には吸音率 0.2 における全周波数の残響時間の平均を示す。図 5.6 を見れば Case1～Case6 においては立方体より六角柱の方が拡散性が良い。Case7 では、三角柱、五角柱、六角柱ともに数値が上がっており完全拡散性が良いことがわかる。

図 5.7～図 5.10 に吸音率 0.4 における周波数別の残響時間の差、また、図 5.11 には吸音率 0.4 における全周波数の残響時間の平均を示す。図 5.11 を見ると、Case7 では五角柱、Case8 では立方体、Case9 では三角柱が完全拡散性がよいことがわかる。

図 5.12～図 5.15 に吸音率 0.6 における周波数別の残響時間の差、また、図 5.16 には吸音率 0.6 における全周波数の残響時間の平均を示す。図 5.16 を見れば、吸音率 0.2 と比べて容積が小さい時は、4 種類ともほぼ同じ値となった。

図 5.17～図 5.20 に吸音率 0.8 における周波数別の残響時間の差、また、図 5.21 には吸音率 0.8 における全周波数の残響時間の平均を示す。図 5.21 を見れば、四種類ともほぼ同じ結果であることがわかる。これより、吸音率が高い場合室形状に関係がなく残響時間がほぼ同等になると考えられる。これは、どの形状においても壁の反射による影響よりも、壁の吸音による影響が大きいため、完全拡散性がどの形状でも変化しなかったと考えられる。

そして、図 5.22 には全周波数、及び全吸音率の平均を示す。正五角柱の Case7 と Case10 を除き、すべての室形状において室容積が大きくなるにつれて拡散性が悪くなることがわかる。また、容積が小さい Case1～Case5 では六角柱、容積の大きい Case6～Case10 では三角柱が立方体に比べて完全拡散性が良いことがわかる。

表 5.4 三角柱：吸音率 0.2

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0955	0.0929	0.0575	0.0672	0.1530
	2	0.1830	0.1185	0.1346	0.1240	0.3060
	3	0.2156	0.1736	0.1903	0.2207	0.4590
	4	0.2345	0.2689	0.2548	0.3503	0.6119
	5	0.3140	0.3049	0.3494	0.3583	0.7649
	6	0.4084	0.3788	0.4562	0.5024	0.9179
	7	0.4738	0.4417	0.6054	0.6000	1.0709
	8	0.5330	0.5315	0.6841	0.6338	1.2239
	9	0.5506	0.5985	0.6313	0.6369	1.3769
	10	0.6056	0.6374	0.6819	0.6328	1.5298

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0125	0.0099	-0.0255	-0.0158	-0.0047
	2	0.0170	-0.0475	-0.0314	-0.0420	-0.0260
	3	-0.0335	-0.0755	-0.0588	-0.0284	-0.0490
	4	-0.0976	-0.0632	-0.0773	0.0182	-0.0550
	5	-0.1011	-0.1102	-0.0657	-0.0568	-0.0835
	6	-0.0897	-0.1193	-0.0419	0.0043	-0.0617
	7	-0.1074	-0.1395	0.0242	0.0188	-0.0509
	8	-0.1312	-0.1327	0.0199	-0.0304	-0.0686
	9	-0.1966	-0.1487	-0.1159	-0.1103	-0.1429
	10	-0.2246	-0.1928	-0.1483	-0.1974	-0.1908

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 5.5 三角柱：吸音率 0.4

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0938	0.0424	0.0249	0.0303	0.0473
	2	0.0852	0.0575	0.0622	0.0669	0.0946
	3	0.0904	0.0899	0.0951	0.1061	0.1420
	4	0.1173	0.1234	0.1363	0.1440	0.1892
	5	0.1224	0.1487	0.1546	0.1876	0.2365
	6	0.1805	0.1940	0.2193	0.2227	0.2839
	7	0.2193	0.2325	0.2435	0.2477	0.3312
	8	0.2610	0.2733	0.2819	0.2943	0.3785
	9	0.2997	0.3143	0.4315	0.4162	0.4259
	10	0.2995	0.3657	0.4846	0.4103	0.4732

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0465	-0.0049	-0.0224	-0.0170	0.0005
	2	-0.0094	-0.0371	-0.0324	-0.0277	-0.0267
	3	-0.0516	-0.0521	-0.0469	-0.0359	-0.0466
	4	-0.0719	-0.0658	-0.0529	-0.0452	-0.0590
	5	-0.1141	-0.0878	-0.0819	-0.0489	-0.0832
	6	-0.1034	-0.0899	-0.0646	-0.0612	-0.0798
	7	-0.1119	-0.0987	-0.0877	-0.0835	-0.0955
	8	-0.1175	-0.1052	-0.0966	-0.0842	-0.1009
	9	-0.1262	-0.1116	0.0056	-0.0097	-0.0604
	10	-0.1737	-0.1075	0.0114	-0.0629	-0.0831

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 5.6 三角柱：吸音率 0.6

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0928	0.0403	0.0192	0.0171	0.0354
	2	0.0891	0.0385	0.0340	0.0417	0.0707
	3	0.0935	0.0597	0.0593	0.0709	0.1061
	4	0.0777	0.0677	0.0820	0.1306	0.1415
	5	0.0797	0.0975	0.1099	0.1114	0.1769
	6	0.1195	0.1230	0.1272	0.1335	0.2058
	7	0.1324	0.1397	0.2190	0.1530	0.2477
	8	0.1358	0.1639	0.2551	0.1835	0.2831
	9	0.1751	0.1869	0.2486	0.2925	0.3185
	10	0.1951	0.2177	0.2267	0.3269	0.3539

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0574	0.0049	-0.0162	-0.0183	0.0070
	2	0.0184	-0.0322	-0.0367	-0.0290	-0.0199
	3	-0.0126	-0.0464	-0.0468	-0.0352	-0.0353
	4	-0.0638	-0.0738	-0.0595	-0.0109	-0.0520
	5	-0.0972	-0.0794	-0.0670	-0.0655	-0.0773
	6	-0.0863	-0.0828	-0.0786	-0.0723	-0.0800
	7	-0.1153	-0.1080	-0.0287	-0.0947	-0.0867
	8	-0.1473	-0.1192	-0.0280	-0.0996	-0.0986
	9	-0.1434	-0.1316	-0.0699	-0.0260	-0.0927
	10	-0.1588	-0.1362	-0.1272	-0.0270	-0.1123

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 5.7 三角柱：吸音率 0.8

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0923	0.0459	0.0215	0.0136	0.0299
	2	0.0923	0.0439	0.0272	0.0257	0.0597
	3	0.0929	0.0526	0.0385	0.0491	0.0895
	4	0.0889	0.0541	0.0491	0.0708	0.1194
	5	0.0898	0.0669	0.0708	0.0795	0.1493
	6	0.1056	0.0731	0.0971	0.0977	0.1791
	7	0.0874	0.0856	0.1205	0.1163	0.2091
	8	0.1087	0.0977	0.1343	0.1363	0.2389
	9	0.1202	0.1163	0.1474	0.1857	0.2688
	10	0.1335	0.1318	0.159	0.2062	0.2986

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0624	0.0160	-0.0084	-0.0163	0.0135
	2	0.0326	-0.0158	-0.0325	-0.0340	-0.0124
	3	0.0034	-0.0369	-0.0510	-0.0404	-0.0312
	4	-0.0305	-0.0653	-0.0703	-0.0486	-0.0537
	5	-0.0595	-0.0824	-0.0785	-0.0698	-0.0726
	6	-0.0735	-0.1060	-0.0820	-0.0814	-0.0857
	7	-0.1217	-0.1235	-0.0886	-0.0928	-0.1066
	8	-0.1302	-0.1412	-0.1046	-0.1026	-0.1197
	9	-0.1486	-0.1525	-0.1214	-0.0831	-0.1264
	10	-0.1651	-0.1668	-0.1396	-0.0924	-0.1410

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 5.8 三角柱：吸音率別：全周波数の平均

残響時間の差[s]		吸音率				平均[s]
		0.2	0.4	0.6	0.8	
Case	1	-0.0047	0.0005	0.0070	0.0135	0.0086
	2	-0.0260	-0.0267	-0.0199	-0.0124	-0.0139
	3	-0.0490	-0.0466	-0.0353	-0.0312	-0.0432
	4	-0.0550	-0.0590	-0.0520	-0.0537	-0.0507
	5	-0.0835	-0.0832	-0.0773	-0.0726	-0.0719
	6	-0.0617	-0.0798	-0.0800	-0.0857	-0.0776
	7	-0.0509	-0.0955	-0.0867	-0.1066	-0.1026
	8	-0.0686	-0.1009	-0.0986	-0.1197	-0.1005
	9	-0.1429	-0.0604	-0.0927	-0.1264	-0.1251
	10	-0.1908	-0.0831	-0.1123	-0.1410	-0.1508

表 5.9 五角柱：吸音率 0.2

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0983	0.0978	0.0792	0.0637	0.1530
	2	0.2061	0.1577	0.1350	0.1256	0.3060
	3	0.2605	0.2288	0.1901	0.1940	0.4590
	4	0.3022	0.2635	0.2587	0.2656	0.6119
	5	0.4002	0.3062	0.3120	0.3573	0.7649
	6	0.4145	0.3723	0.3546	0.4659	0.9179
	7	0.6553	0.6321	0.5908	0.6190	1.0709
	8	0.4973	0.4800	0.6007	0.6044	1.2239
	9	0.5333	0.5363	0.6762	0.6763	1.3769
	10	0.7374	0.7446	0.6654	0.8448	1.5298

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0153	0.0148	-0.0038	-0.0193	0.0017
	2	0.0401	-0.0083	-0.0310	-0.0404	-0.0099
	3	0.0114	-0.0203	-0.0590	-0.0551	-0.0307
	4	-0.0299	-0.0686	-0.0734	-0.0665	-0.0596
	5	-0.0149	-0.1089	-0.1031	-0.0578	-0.0712
	6	-0.0836	-0.1258	-0.1435	-0.0322	-0.0963
	7	0.0741	0.0509	0.0096	0.0378	0.0431
	8	-0.1669	-0.1842	-0.0635	-0.0598	-0.1186
	9	-0.2139	-0.2109	-0.0710	-0.0709	-0.1417
	10	-0.0928	-0.0856	-0.1648	0.0146	-0.0822

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 5.10 五角柱：吸音率 0.4

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0936	0.0531	0.0321	0.0249	0.0473
	2	0.1062	0.0777	0.0538	0.0590	0.0946
	3	0.1200	0.1045	0.0822	0.0753	0.1420
	4	0.1550	0.1074	0.1059	0.1588	0.1892
	5	0.2103	0.1366	0.1378	0.2271	0.2365
	6	0.2099	0.1694	0.1578	0.2362	0.2839
	7	0.2820	0.2363	0.2519	0.3562	0.3312
	8	0.2185	0.2412	0.3044	0.3261	0.3785
	9	0.2415	0.2562	0.3392	0.3893	0.4259
	10	0.3046	0.3437	0.4636	0.4827	0.4732

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0463	0.0058	-0.0152	-0.0224	0.0036
	2	0.0116	-0.0169	-0.0408	-0.0356	-0.0204
	3	-0.0220	-0.0375	-0.0598	-0.0667	-0.0465
	4	-0.0342	-0.0818	-0.0833	-0.0304	-0.0574
	5	-0.0262	-0.0999	-0.0987	-0.0094	-0.0586
	6	-0.0740	-0.1145	-0.1261	-0.0477	-0.0906
	7	-0.0492	-0.0949	-0.0793	0.0250	-0.0496
	8	-0.1600	-0.1373	-0.0741	-0.0524	-0.1060
	9	-0.1844	-0.1697	-0.0867	-0.0366	-0.1193
	10	-0.1686	-0.1295	-0.0096	0.0095	-0.0745

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 5.11 五角柱：吸音率 0.6

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0926	0.0452	0.0249	0.0148	0.0354
	2	0.0911	0.0492	0.0291	0.0329	0.0707
	3	0.0830	0.0598	0.0477	0.0481	0.1061
	4	0.0988	0.0568	0.0637	0.1113	0.1415
	5	0.1052	0.0756	0.0795	0.1393	0.1769
	6	0.1212	0.0971	0.0977	0.1647	0.2058
	7	0.1570	0.1637	0.1751	0.2647	0.2477
	8	0.1148	0.1324	0.2209	0.2338	0.2831
	9	0.1350	0.1454	0.2476	0.2469	0.3185
	10	0.2367	0.2217	0.3506	0.3437	0.3539

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0572	0.0098	-0.0105	-0.0206	0.0090
	2	0.0204	-0.0215	-0.0416	-0.0378	-0.0201
	3	-0.0231	-0.0463	-0.0584	-0.0580	-0.0465
	4	-0.0427	-0.0847	-0.0778	-0.0302	-0.0589
	5	-0.0717	-0.1013	-0.0974	-0.0376	-0.0770
	6	-0.0846	-0.1087	-0.1081	-0.0411	-0.0856
	7	-0.0907	-0.0840	-0.0726	0.0170	-0.0576
	8	-0.1683	-0.1507	-0.0622	-0.0493	-0.1077
	9	-0.1835	-0.1731	-0.0709	-0.0716	-0.1248
	10	-0.1172	-0.1322	-0.0033	-0.0102	-0.0657

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 5.12 五角柱：吸音率 0.8

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0924	0.0454	0.0250	0.0101	0.0299
	2	0.0913	0.0499	0.0187	0.0193	0.0597
	3	0.0892	0.0491	0.0291	0.0255	0.0895
	4	0.1000	0.0380	0.0424	0.0545	0.1194
	5	0.1005	0.0577	0.0402	0.0758	0.1493
	6	0.1015	0.0577	0.0516	0.1005	0.1791
	7	0.1118	0.0847	0.1148	0.1412	0.2091
	8	0.0750	0.0850	0.1266	0.1338	0.2389
	9	0.0948	0.0931	0.1375	0.1481	0.2688
	10	0.1538	0.1266	0.2281	0.2553	0.2986

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0625	0.0155	-0.0049	-0.0198	0.0134
	2	0.0316	-0.0098	-0.0410	-0.0404	-0.0149
	3	-0.0003	-0.0404	-0.0604	-0.0640	-0.0413
	4	-0.0194	-0.0814	-0.0770	-0.0649	-0.0607
	5	-0.0488	-0.0916	-0.1091	-0.0735	-0.0808
	6	-0.0776	-0.1214	-0.1275	-0.0786	-0.1013
	7	-0.0973	-0.1244	-0.0943	-0.0679	-0.0959
	8	-0.1639	-0.1539	-0.1123	-0.1051	-0.1338
	9	-0.1740	-0.1757	-0.1313	-0.1207	-0.1504
	10	-0.1448	-0.1720	-0.0705	-0.0433	-0.1077

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 5.13 五角柱：吸音率別：全周波数の平均

残響時間の差[s]		吸音率				平均[s]
		0.2	0.4	0.6	0.8	
Case	1	0.0017	0.0036	0.0090	0.0134	0.0086
	2	-0.0099	-0.0204	-0.0201	-0.0149	-0.0139
	3	-0.0307	-0.0465	-0.0465	-0.0413	-0.0432
	4	-0.0596	-0.0574	-0.0589	-0.0607	-0.0507
	5	-0.0712	-0.0586	-0.0770	-0.0808	-0.0719
	6	-0.0963	-0.0906	-0.0856	-0.1013	-0.0776
	7	0.0431	-0.0496	-0.0576	-0.0959	-0.1026
	8	-0.1186	-0.1060	-0.1077	-0.1338	-0.1005
	9	-0.1417	-0.1193	-0.1248	-0.1504	-0.1251
	10	-0.0822	-0.0745	-0.0657	-0.1077	-0.1508

表 5.14 六角柱：吸音率 0.2

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0971	0.0923	0.0802	0.0750	0.1530
	2	0.1889	0.1790	0.1756	0.1287	0.3060
	3	0.2993	0.2851	0.1935	0.2019	0.4590
	4	0.3704	0.3689	0.2683	0.2750	0.6119
	5	0.4162	0.3469	0.3326	0.3493	0.7649
	6	0.5689	0.3699	0.4106	0.4284	0.9179
	7	0.6352	0.4587	0.4784	0.4873	1.0709
	8	0.6974	0.5278	0.581	0.5116	1.2239
	9	0.6133	0.6034	0.6135	0.6404	1.3769
	10	0.6686	0.6616	0.6369	0.6100	1.5298

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0141	0.0093	-0.0028	-0.0080	-0.0047
	2	0.0229	0.0130	0.0096	-0.0373	-0.0260
	3	0.0502	0.0360	-0.0556	-0.0472	-0.0490
	4	0.0383	0.0368	-0.0638	-0.0571	-0.0550
	5	0.0011	-0.0682	-0.0825	-0.0658	-0.0835
	6	0.0708	-0.1282	-0.0875	-0.0697	-0.0617
	7	0.0540	-0.1225	-0.1028	-0.0939	-0.0509
	8	0.0332	-0.1364	-0.0832	-0.1526	-0.0686
	9	-0.1339	-0.1438	-0.1337	-0.1068	-0.1429
	10	-0.1616	-0.1686	-0.1933	-0.2202	-0.1908

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 5.15 六角柱：吸音率 0.4

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0936	0.0363	0.0373	0.0345	0.0473
	2	0.0778	0.0771	0.0738	0.0556	0.0946
	3	0.1331	0.1155	0.0862	0.0950	0.1420
	4	0.1487	0.1477	0.1251	0.1276	0.1892
	5	0.1842	0.144	0.1679	0.1862	0.2365
	6	0.2319	0.1723	0.2076	0.1798	0.2839
	7	0.2632	0.1943	0.2491	0.235	0.3312
	8	0.2988	0.2504	0.2735	0.2414	0.3785
	9	0.2876	0.3088	0.297	0.2983	0.4259
	10	0.2903	0.3394	0.3615	0.3316	0.4732

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0463	-0.0110	-0.0100	-0.0128	0.0031
	2	-0.0168	-0.0175	-0.0208	-0.0390	-0.0235
	3	-0.0089	-0.0265	-0.0558	-0.0470	-0.0345
	4	-0.0405	-0.0415	-0.0641	-0.0616	-0.0519
	5	-0.0523	-0.0925	-0.0686	-0.0503	-0.0659
	6	-0.0520	-0.1116	-0.0763	-0.1041	-0.0860
	7	-0.0680	-0.1369	-0.0821	-0.0962	-0.0958
	8	-0.0797	-0.1281	-0.1050	-0.1371	-0.1125
	9	-0.1383	-0.1171	-0.1289	-0.1276	-0.1279
	10	-0.1829	-0.1338	-0.1117	-0.1416	-0.1425

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 5.16 六角柱：吸音率 0.6

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0928	0.0382	0.0264	0.0166	0.0354
	2	0.0765	0.0523	0.0378	0.0373	0.0707
	3	0.1032	0.0644	0.0573	0.0558	0.1061
	4	0.1050	0.0770	0.0822	0.0766	0.1415
	5	0.1086	0.0948	0.1108	0.1309	0.1769
	6	0.1287	0.1151	0.1183	0.1588	0.2058
	7	0.1314	0.1274	0.1336	0.1965	0.2477
	8	0.1595	0.1667	0.1466	0.2156	0.2831
	9	0.1788	0.2145	0.1785	0.2435	0.3185
	10	0.1911	0.2185	0.2585	0.2303	0.3539

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0574	0.0028	-0.0090	-0.0188	0.0081
	2	0.0058	-0.0184	-0.0329	-0.0334	-0.0197
	3	-0.0029	-0.0417	-0.0488	-0.0503	-0.0359
	4	-0.0365	-0.0645	-0.0593	-0.0649	-0.0563
	5	-0.0683	-0.0821	-0.0661	-0.0460	-0.0656
	6	-0.0771	-0.0907	-0.0875	-0.0470	-0.0756
	7	-0.1163	-0.1203	-0.1141	-0.0512	-0.1005
	8	-0.1236	-0.1164	-0.1365	-0.0675	-0.1110
	9	-0.1397	-0.1040	-0.1400	-0.0750	-0.1147
	10	-0.1628	-0.1354	-0.0954	-0.1236	-0.1293

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 5.17 六角柱：吸音率 0.8

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0923	0.0449	0.0240	0.0119	0.0299
	2	0.0903	0.0471	0.0242	0.0284	0.0597
	3	0.0923	0.0388	0.0397	0.0415	0.0895
	4	0.0948	0.0486	0.0563	0.0555	0.1194
	5	0.1017	0.0666	0.0709	0.0914	0.1493
	6	0.0778	0.0795	0.0849	0.1128	0.1791
	7	0.1101	0.0936	0.0938	0.1319	0.2091
	8	0.0978	0.1124	0.1111	0.1506	0.2389
	9	0.1237	0.1261	0.1264	0.1686	0.2688
	10	0.1333	0.1407	0.1862	0.1867	0.2986

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0624	0.0150	-0.0059	-0.0180	0.0134
	2	0.0306	-0.0126	-0.0355	-0.0313	-0.0122
	3	0.0028	-0.0507	-0.0498	-0.0480	-0.0364
	4	-0.0246	-0.0708	-0.0631	-0.0639	-0.0556
	5	-0.0476	-0.0827	-0.0784	-0.0579	-0.0667
	6	-0.1013	-0.0996	-0.0942	-0.0663	-0.0904
	7	-0.0990	-0.1155	-0.1153	-0.0772	-0.1017
	8	-0.1411	-0.1265	-0.1278	-0.0883	-0.1209
	9	-0.1451	-0.1427	-0.1424	-0.1002	-0.1326
	10	-0.1653	-0.1579	-0.1124	-0.1119	-0.1369

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 5.18 六角柱：吸音率別：全周波数の平均

残響時間の差[s]		吸音率				平均[s]
		0.2	0.4	0.6	0.8	
Case	1	0.0031	0.0031	0.0081	0.0134	0.0086
	2	0.0021	-0.0235	-0.0197	-0.0122	-0.0139
	3	-0.0041	-0.0345	-0.0359	-0.0364	-0.0432
	4	-0.0114	-0.0519	-0.0563	-0.0556	-0.0507
	5	-0.0539	-0.0659	-0.0656	-0.0667	-0.0719
	6	-0.0537	-0.0860	-0.0756	-0.0904	-0.0776
	7	-0.0663	-0.0958	-0.1005	-0.1017	-0.1026
	8	-0.0847	-0.1125	-0.1110	-0.1209	-0.1005
	9	-0.1296	-0.1279	-0.1147	-0.1326	-0.1251
	10	-0.1860	-0.1425	-0.1293	-0.1369	-0.1508

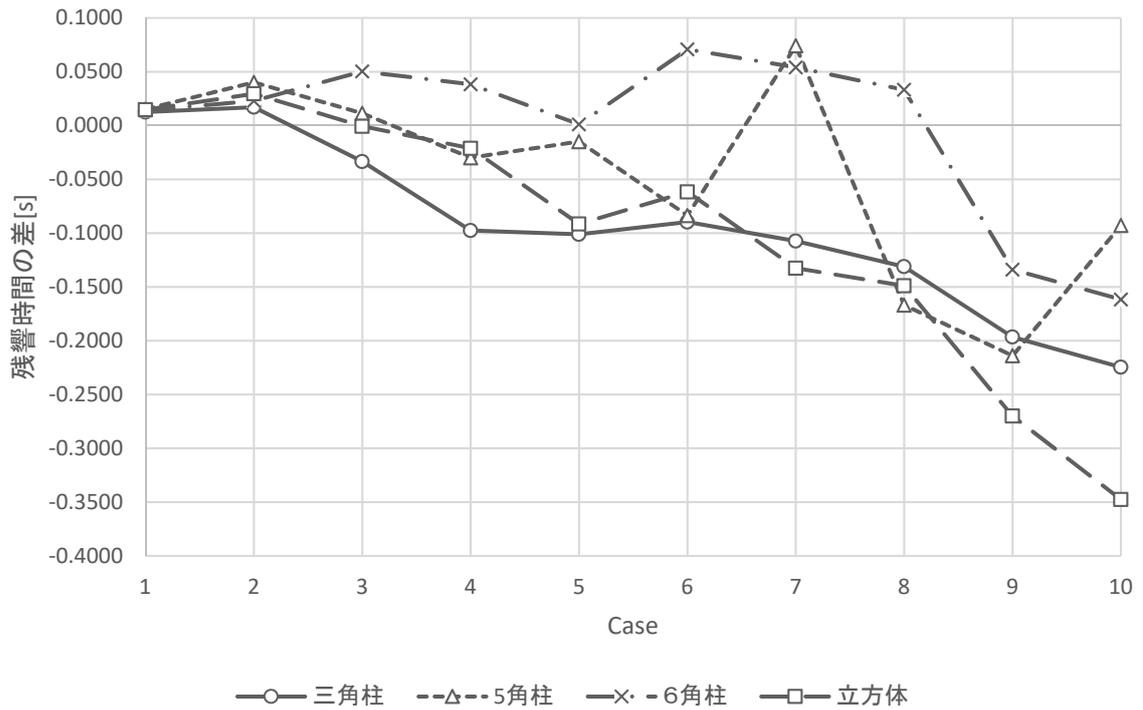


図 5.2 吸音率 0.2 周波数 62.5[Hz]

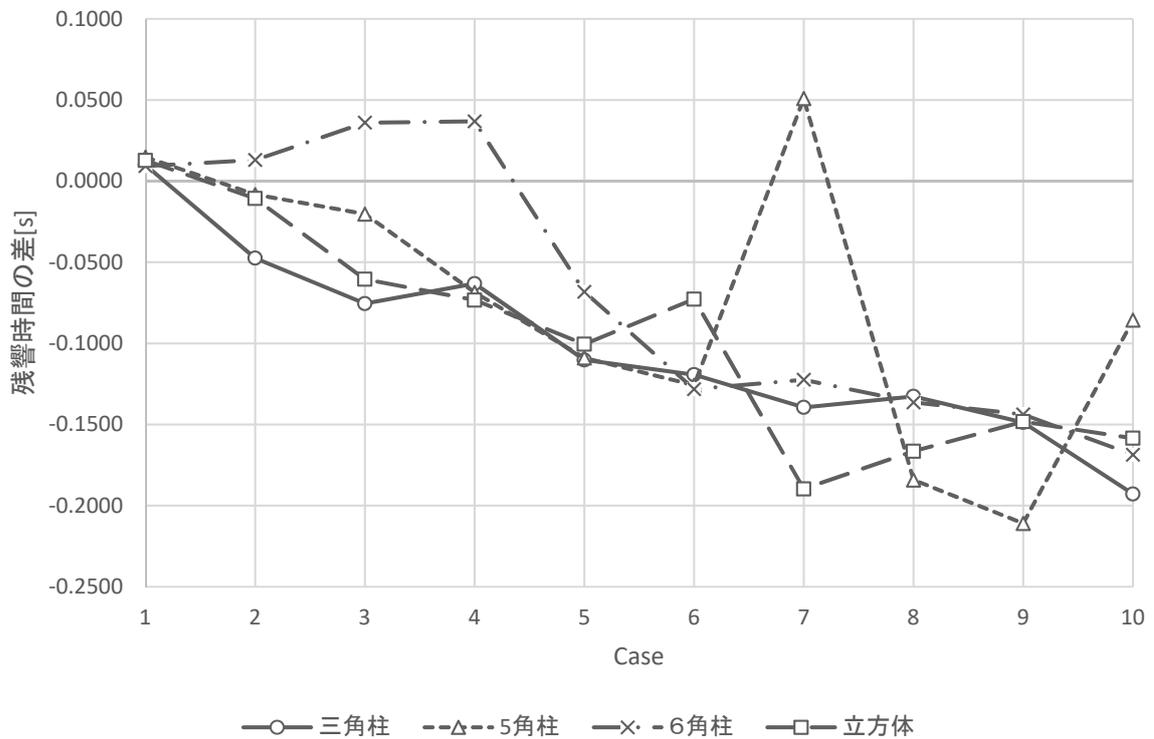


図 5.3 吸音率 0.2 周波数 125[Hz]

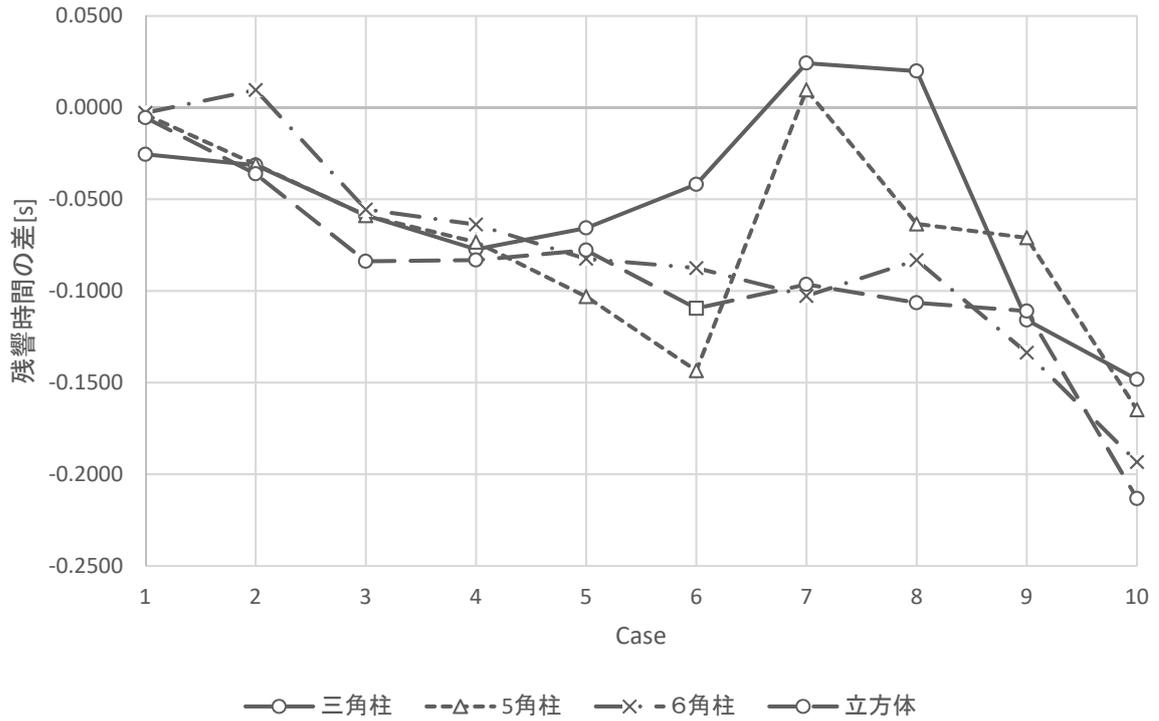


図 5.4 吸音率 0.2 : 周波数 250[Hz]

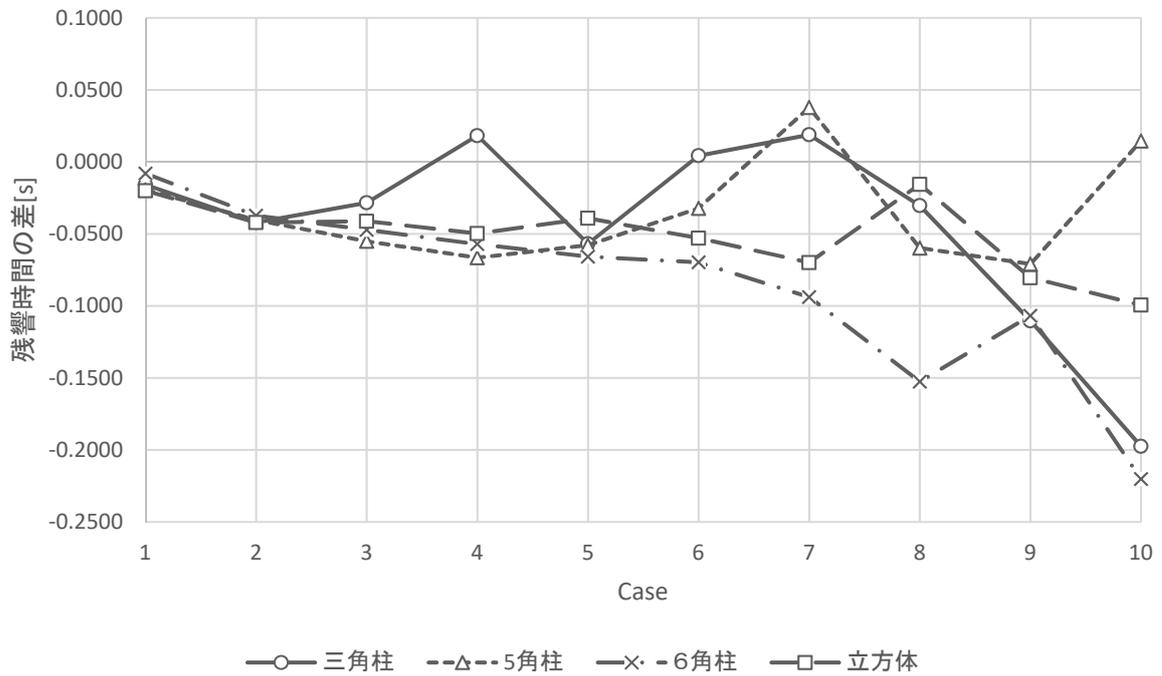


図 5.5 吸音率 0.2 : 周波数 500[Hz]

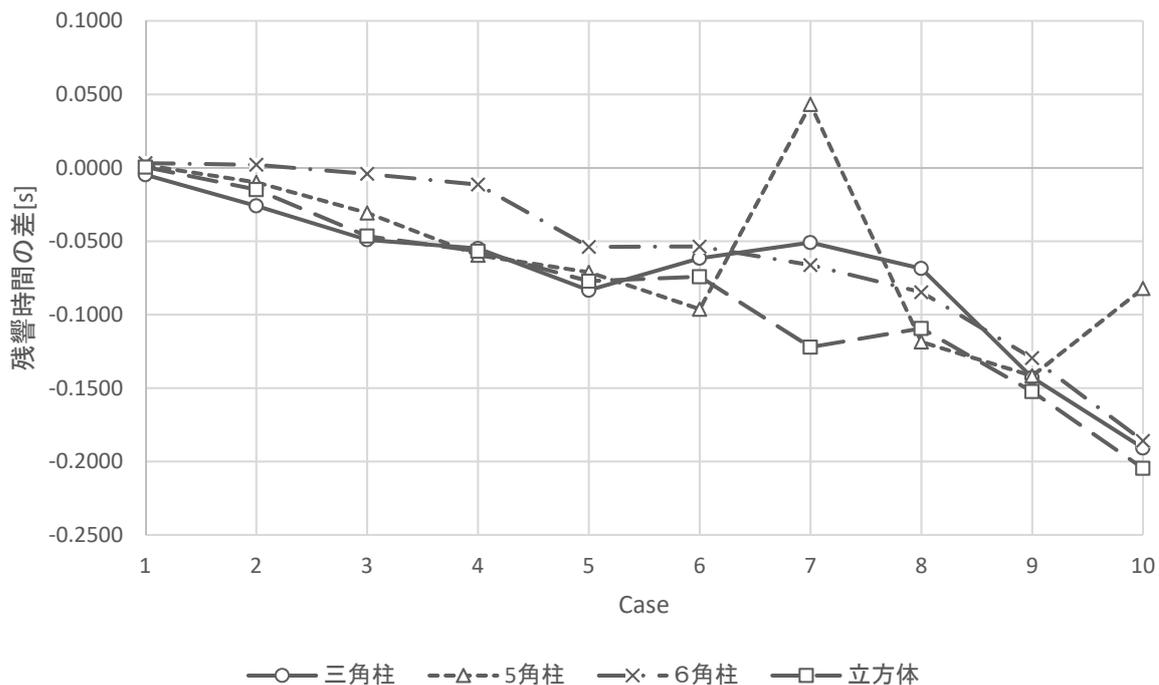


図 5.6 吸音率 0.2 : 全周波数の平均

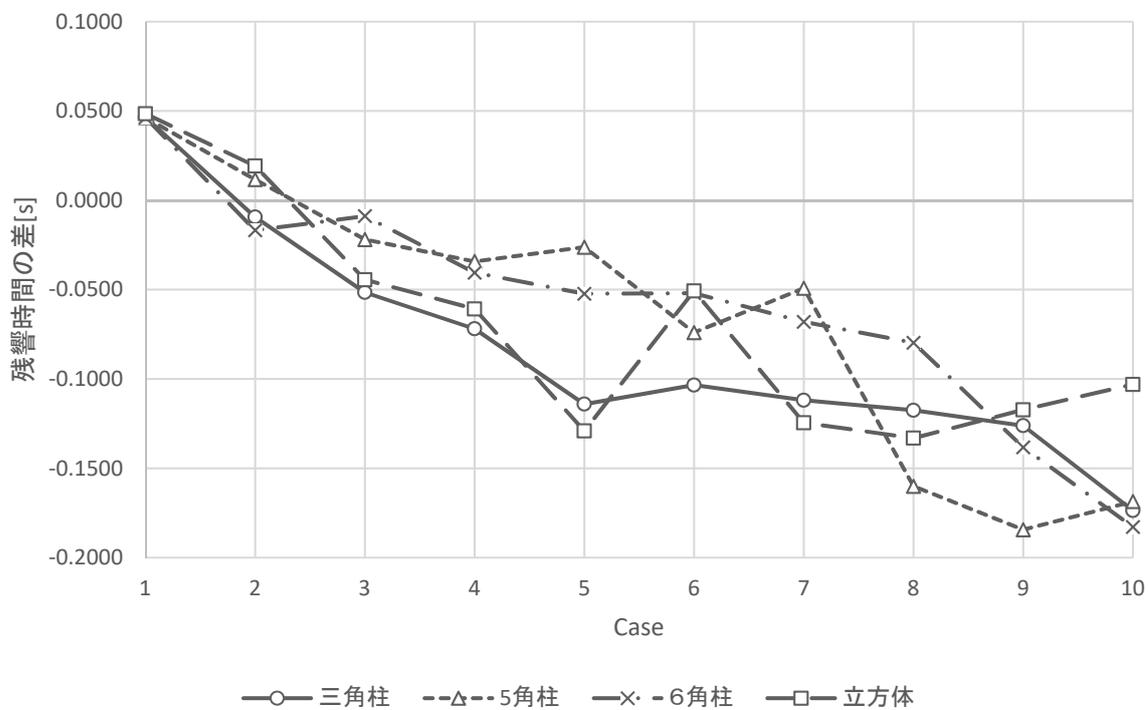


図 5.7 吸音率 0.4 : 周波数 62.5[Hz]

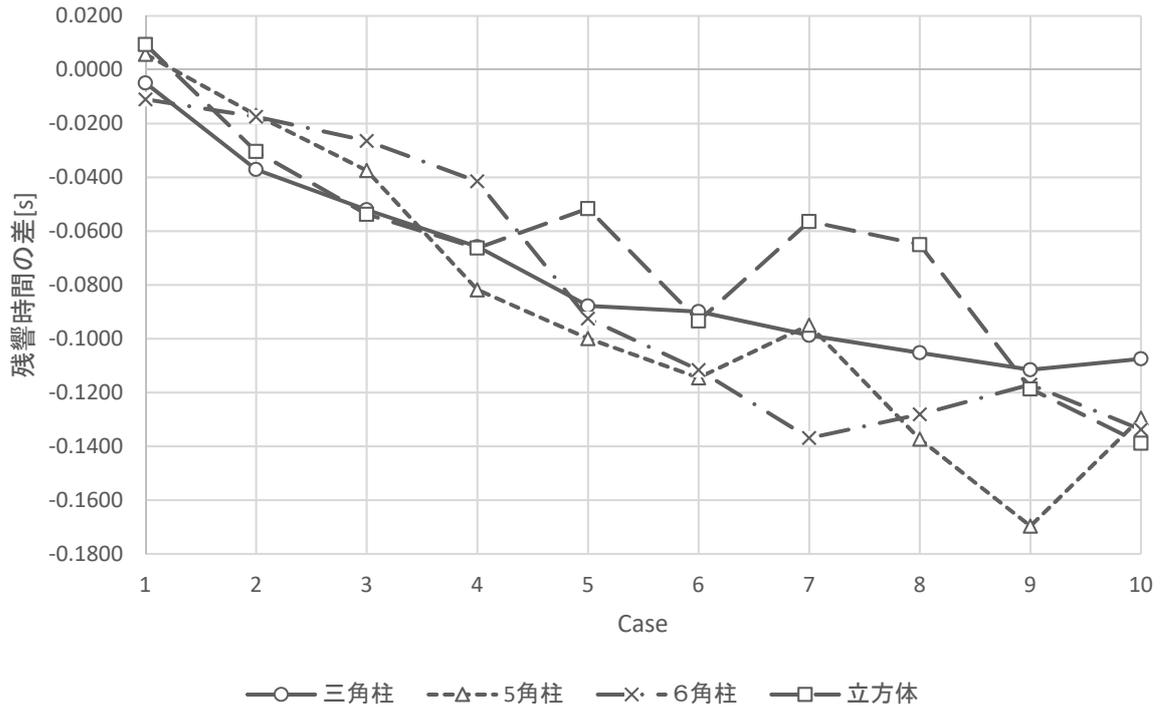


図 5.8 吸音率 0.4 : 周波数 125[Hz]

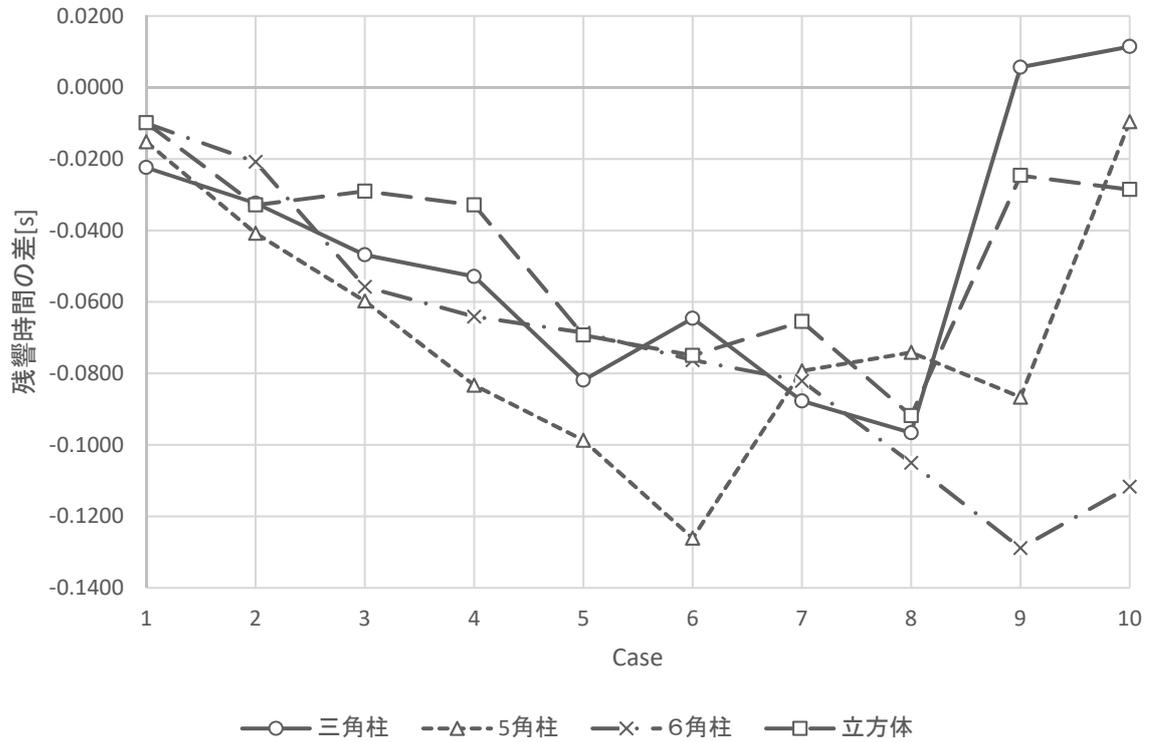


図 5.9 吸音率 0.4 : 周波数 250[Hz]

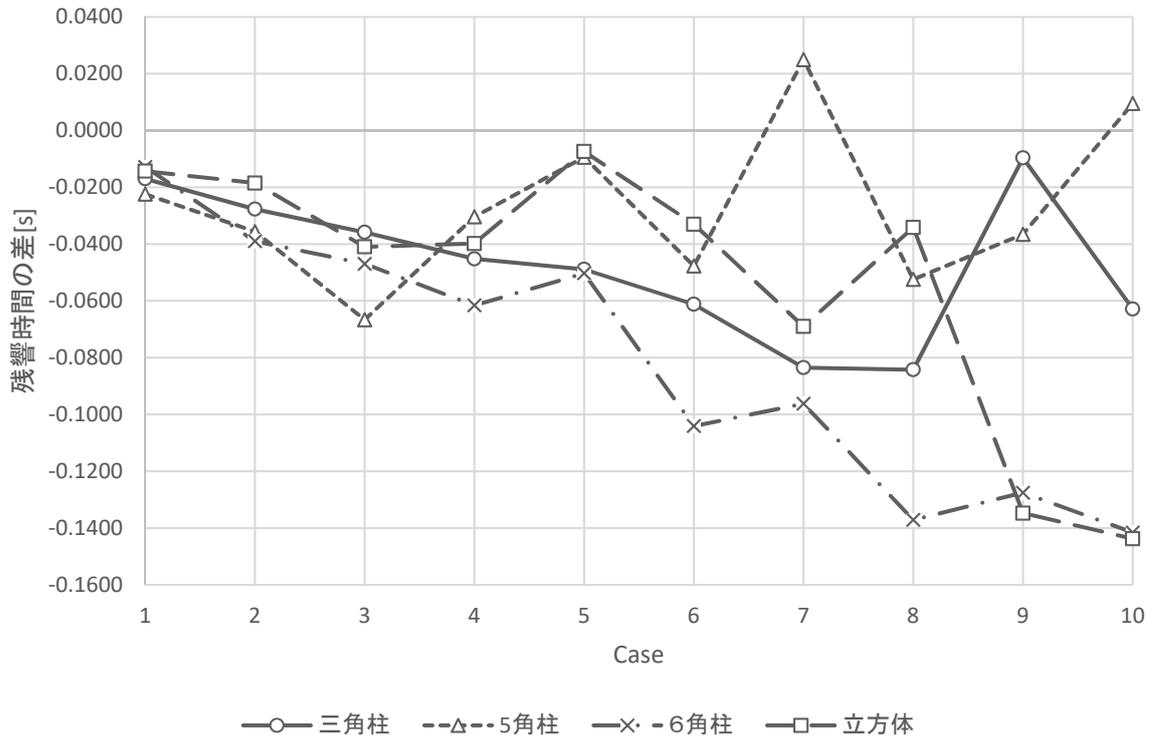


図 5.10 吸音率 0.4 : 周波数 500[Hz]

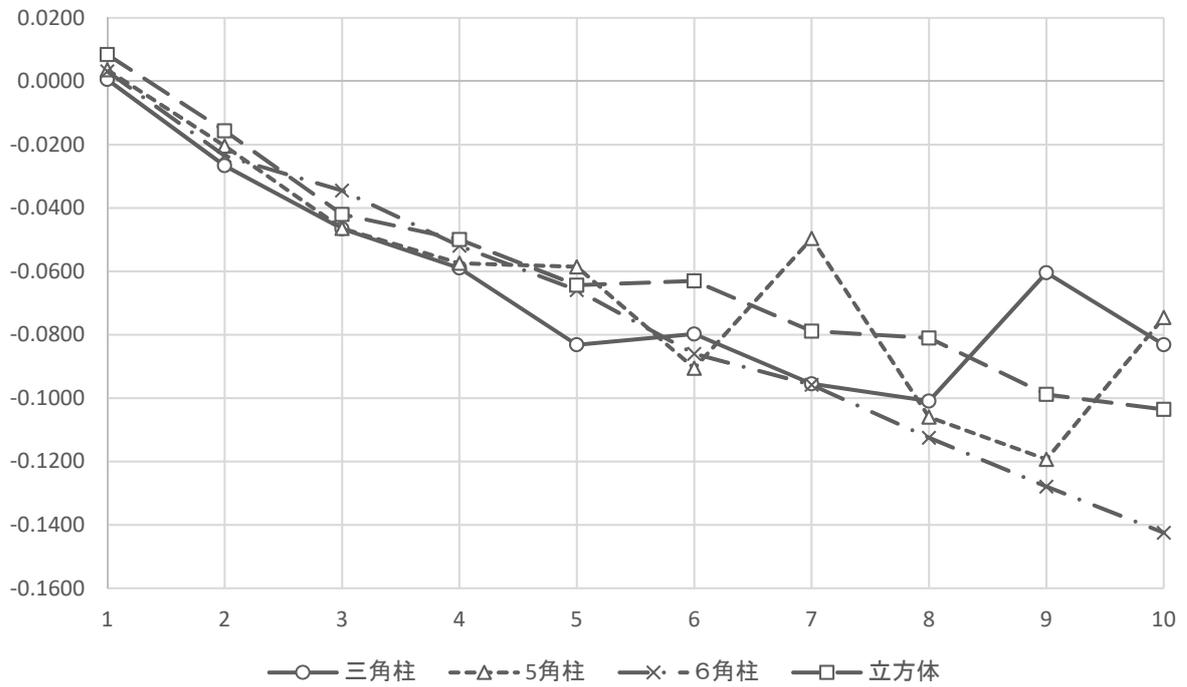


図 5.11 吸音率 0.4 : 全周波数の平均

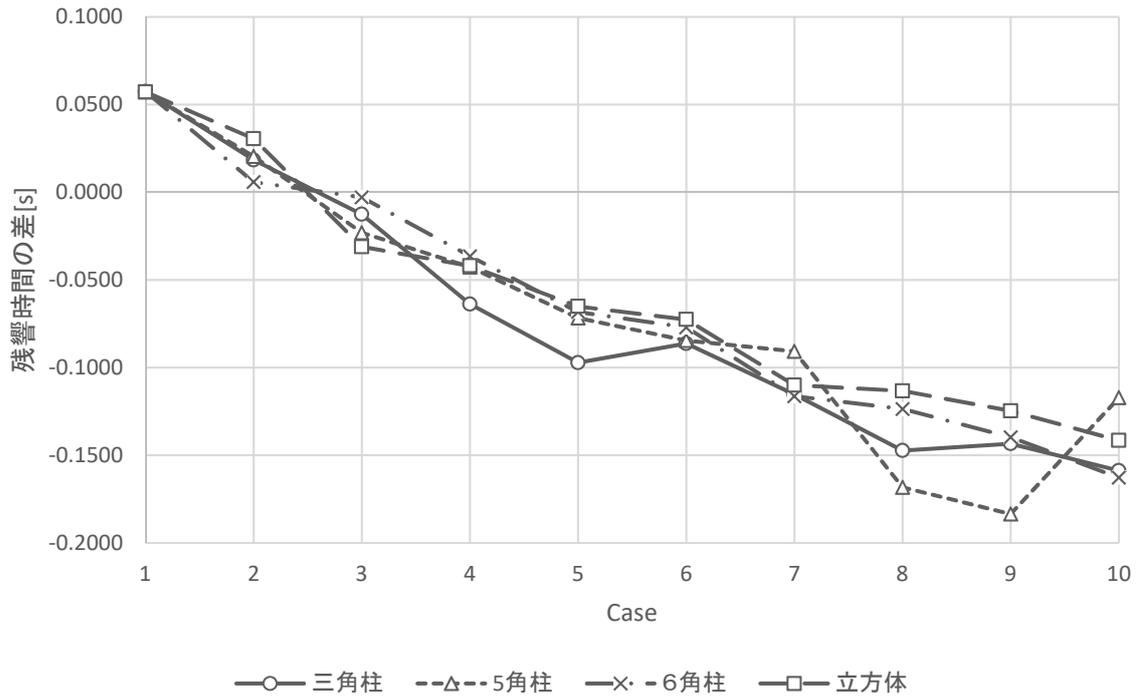


図 5.12 吸音率 0.6 : 周波数 62.5[Hz]

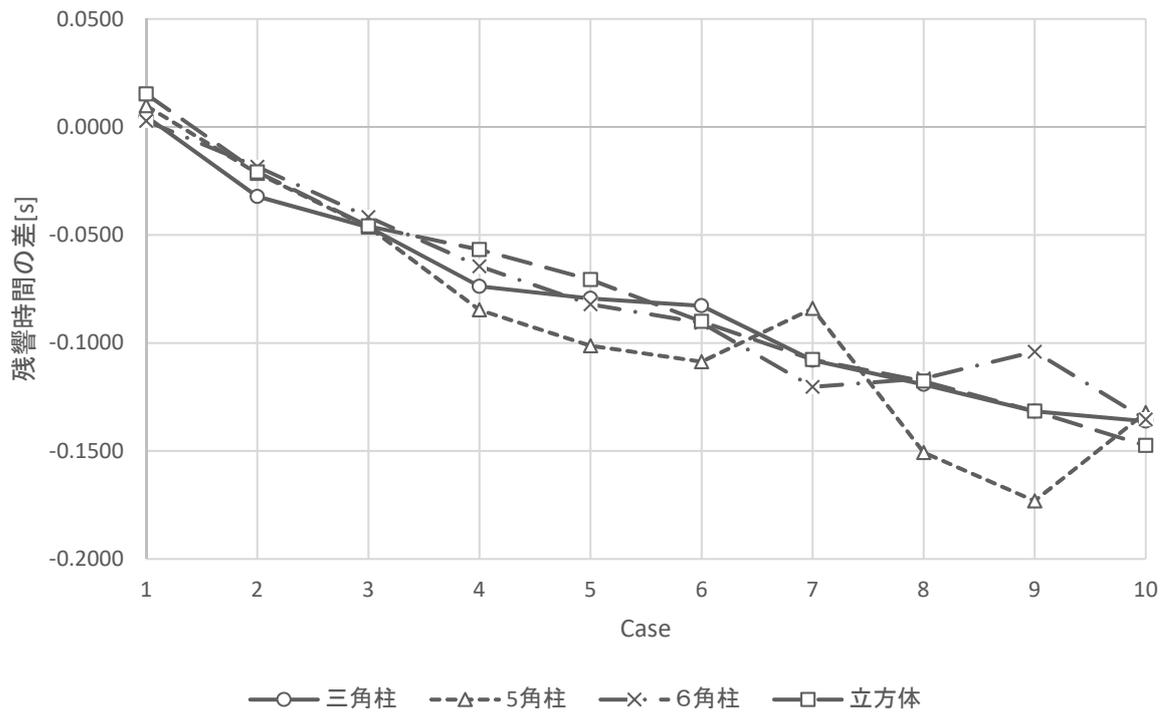


図 5.13 吸音率 0.6 : 周波数 125[Hz]

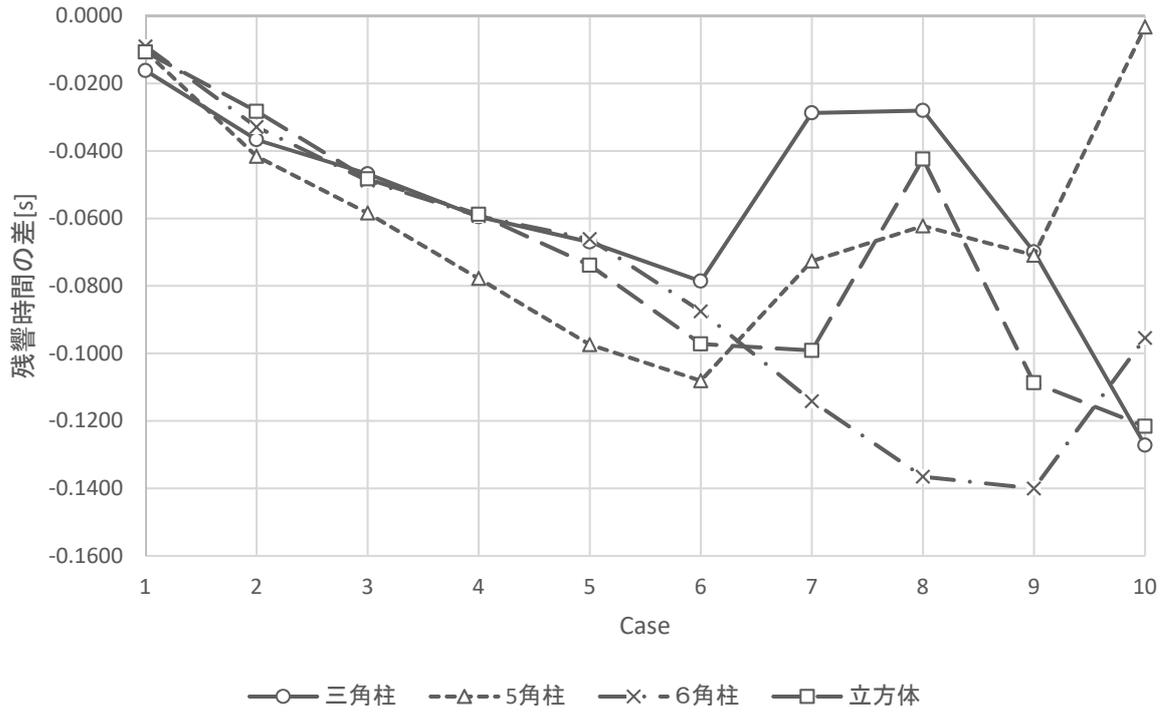


図 5.14 吸音率 0.6 : 周波数 250[Hz]

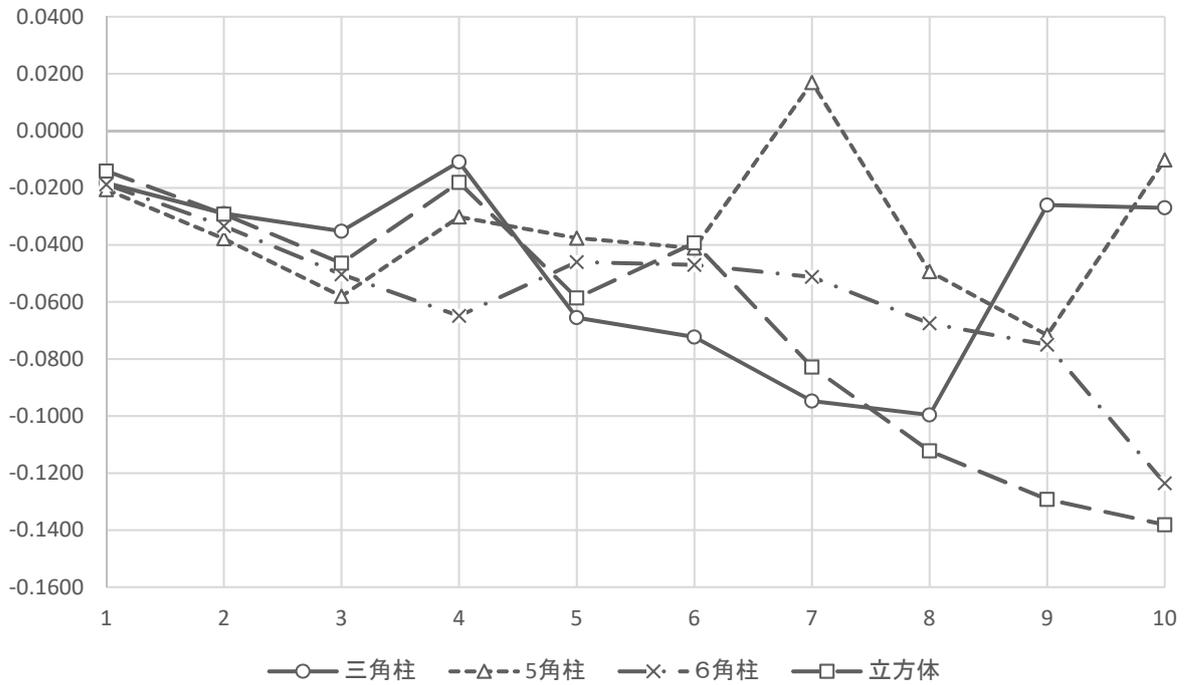


図 5.15 吸音率 0.6 : 周波数 500[Hz]

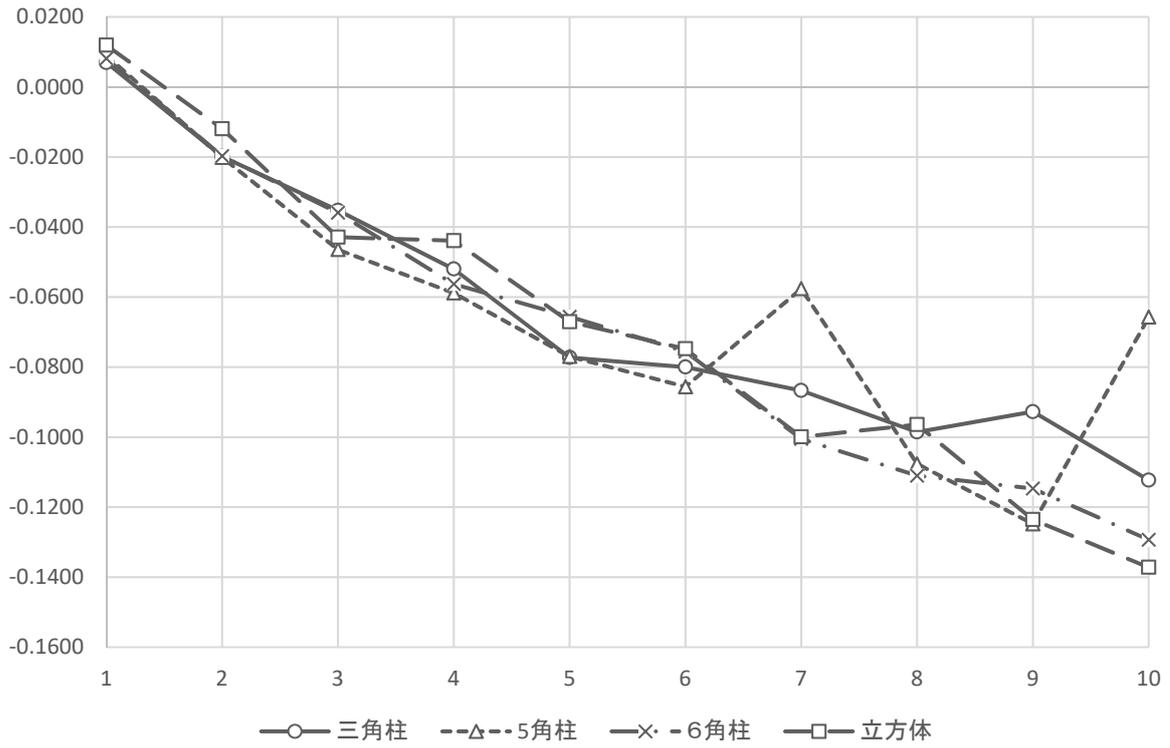


図 5.16 吸音率 0.6 : 全周波数の平均

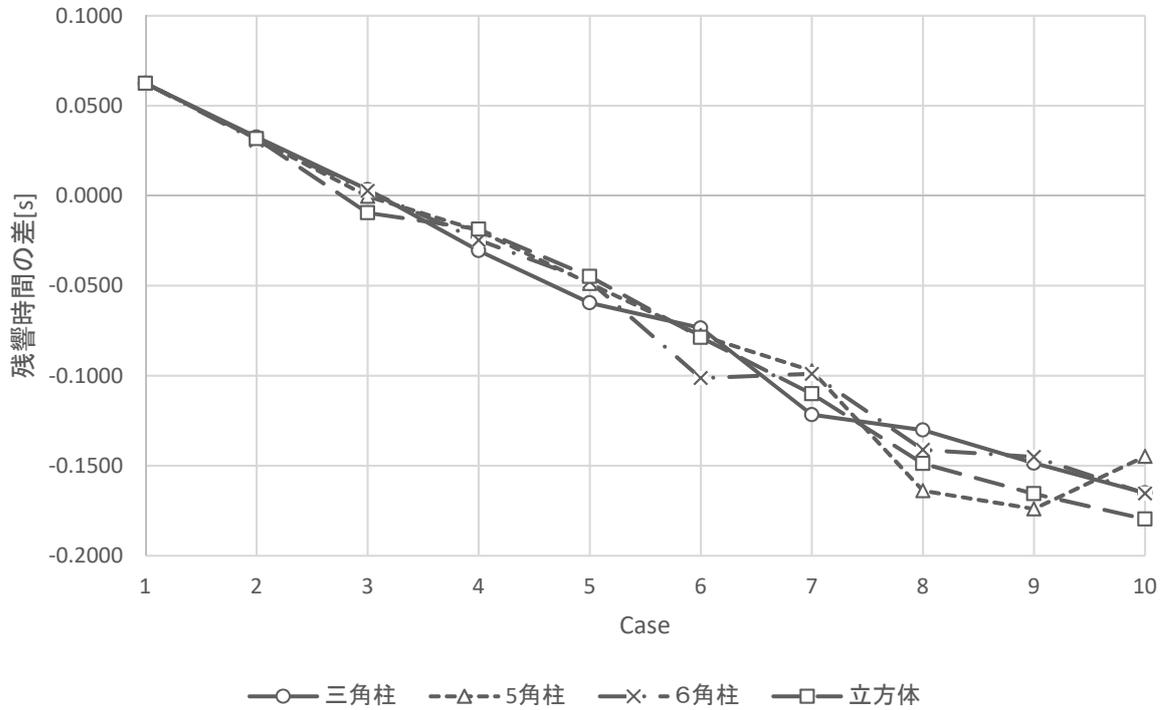


図 5.17 吸音率 0.8 : 周波数 62.5[Hz]

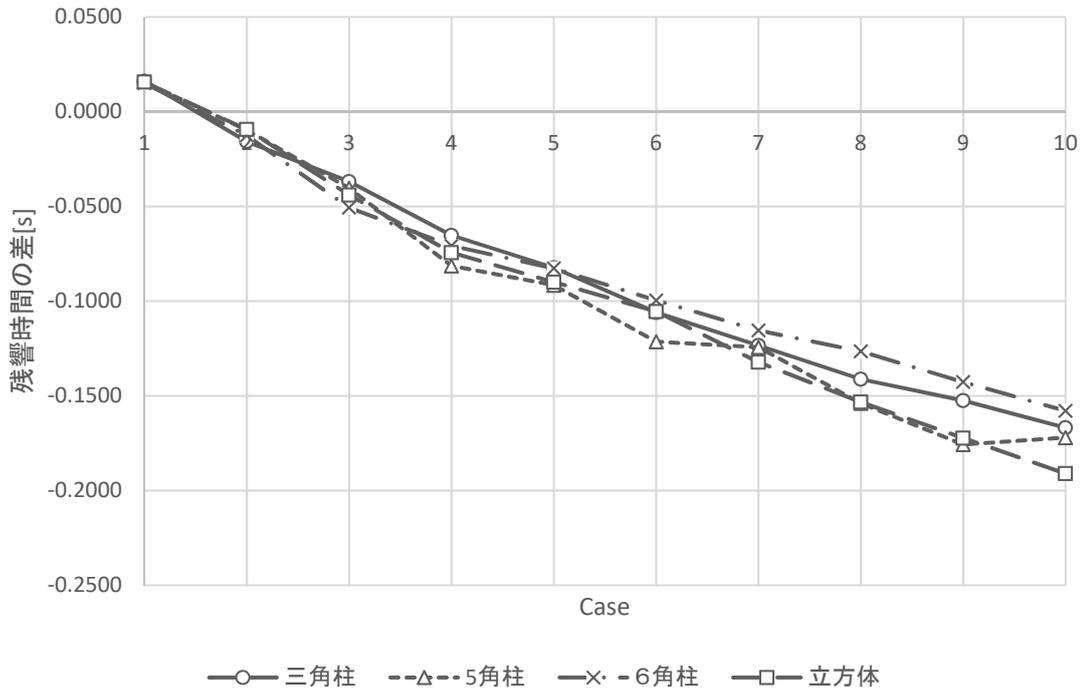


図 5.18 吸音率 0.8 : 周波数 125[Hz]

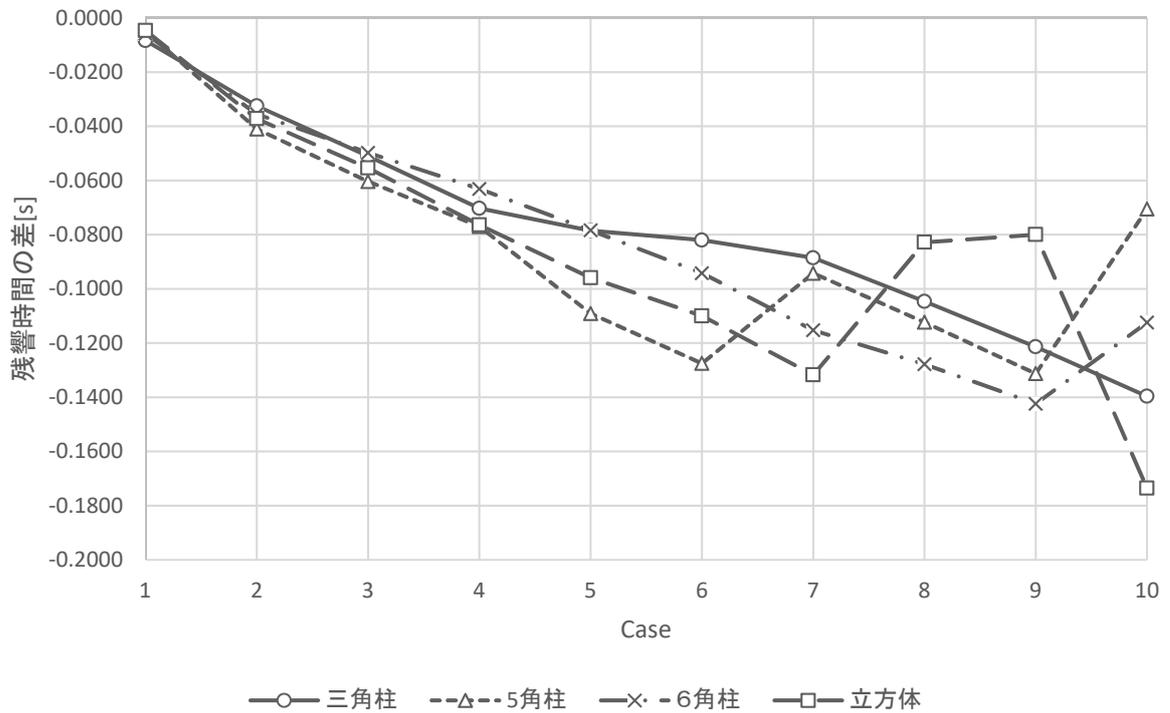


図 5.19 吸音率 0.8 : 周波数 250[Hz]

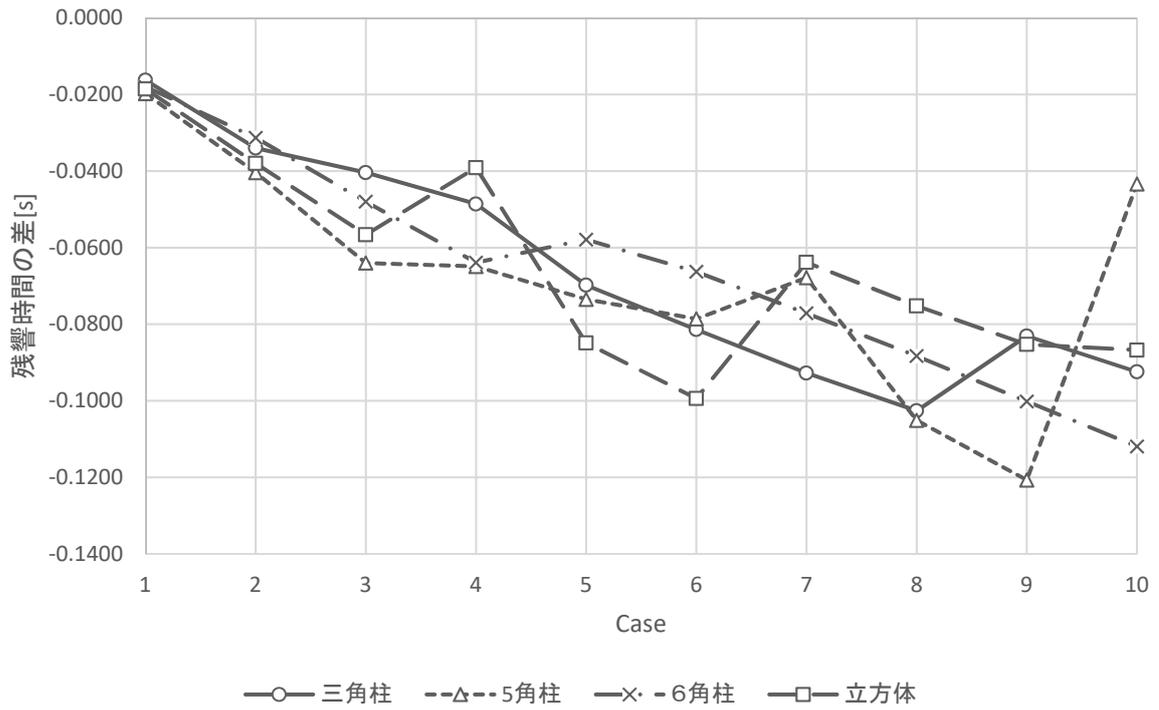


図 5.20 吸音率 0.8 : 周波数 500[Hz]

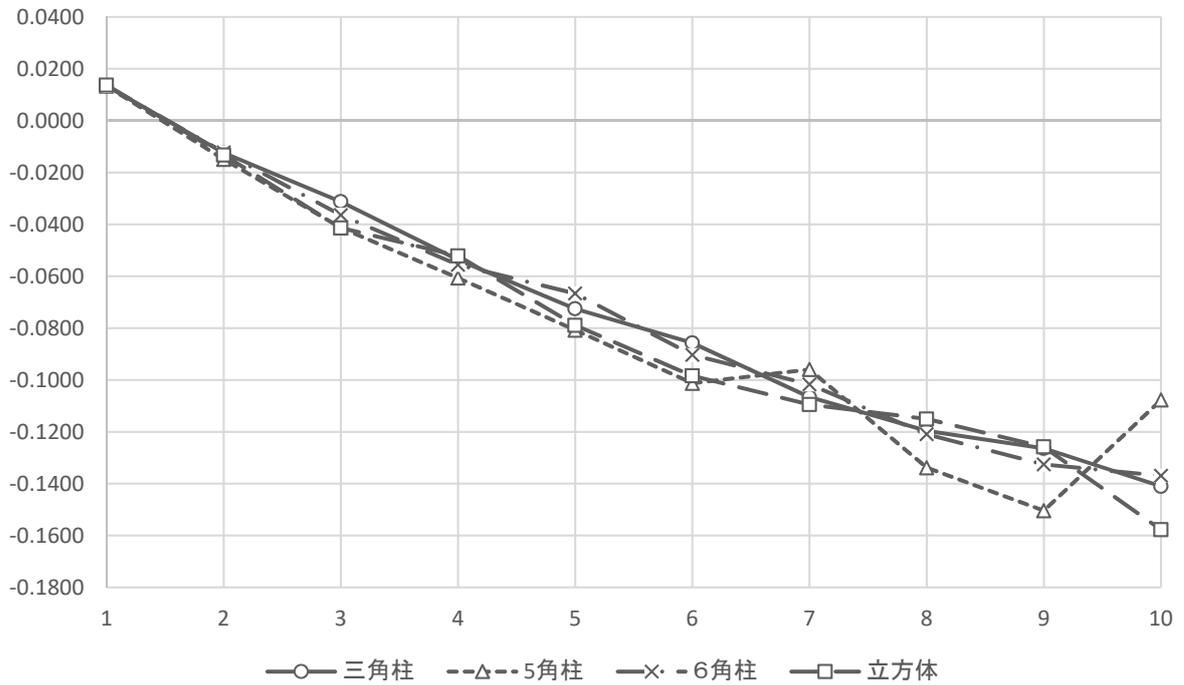


図 5.21 吸音率 0.8 : 全周波数の平均

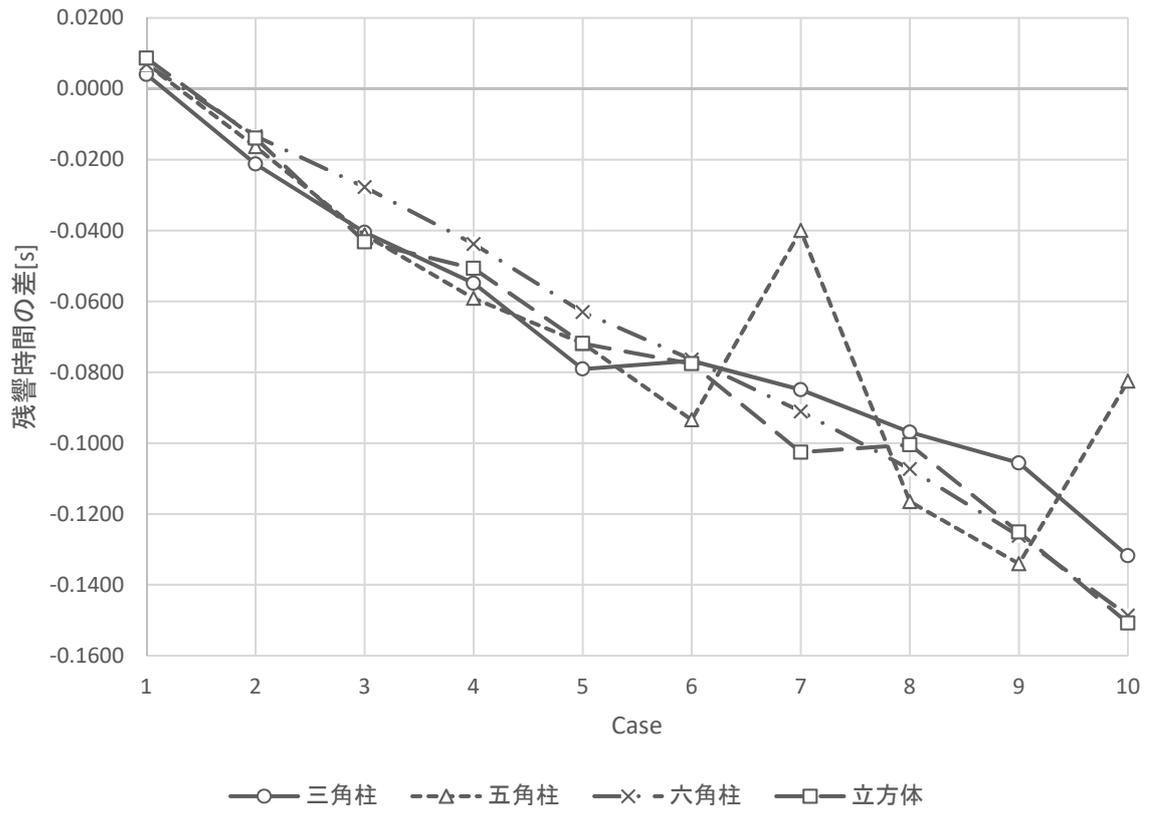


図 5.22 室形状別：全周波数の全吸音率の平均

第6章 正多面体

本章では、通常の室形状では見られない正多面体について完全拡散性の評価を行う。解析対象として、図 6.1 のような正八面体、正二十面体について検討する。理論値の導出は第 3 章と同様である。

6.1 条件

- ・室形状：正八面体、正二十面体
 - ・吸音率：0.2, 0.4, 0.6, 0.8 の 4 種類
 - ・吸音面：全面
 - ・一辺あたりの長さ：立方体の V/S と同じ一辺あたりの長さとする。(表 6.1 に正八面体、表 6.2 に正二十面体を示す。)
 - ・最大周波数：300[Hz]
 - ・最大時間：0.5[s]
 - ・媒質：空気
 - ・入力波形：ガウシアンパルス (受信波形は逆フィルタによりインパルス応答に変換)
 - ・音源と受信点の位置：表 6.1 に正八面体、表 6.2 に正二十面体を示す
- とし、FDTD 法による残響曲線は 2.4 シュレーダー法により計算し、残響時間を残響時間の-5~-35[dB]の範囲から求める。

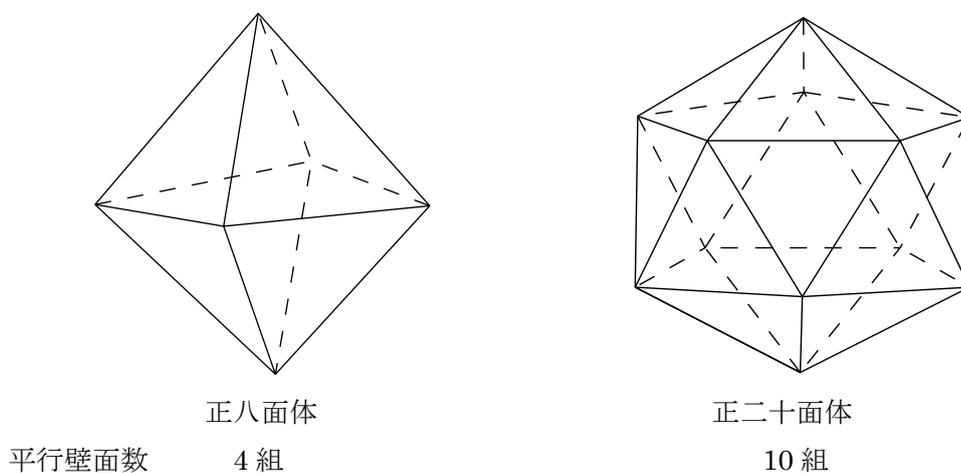


図 6.1 解析対象

表 6.1 正八面体:各条件設定

Case	一辺あ たりの 長さ [m]	音源	音源	音源	受音点	受音点	受音点	表面積 :S	容積 :V	V/S
		:x	:y	:z	:x	:y	:z			
Case1	0.0866	0.0866	0.866	0.866	1.654	0.866	0.866	5.1958	0.8659	0.1667
Case2	0.1732	0.17321	1.7321	1.7321	3.2908	1.7321	1.7321	20.784	6.9223	0.3333
Case3	0.2598	0.25981	2.5981	2.5981	4.9362	2.5981	2.5981	46.764	23.382	0.5000
Case4	0.3464	0.34641	3.4641	3.4641	6.5816	3.4641	3.4641	83.139	55.426	0.6667
Case5	0.4330	0.43301	4.3301	4.3301	8.227	4.3301	4.3301	129.9	108.25	0.8333
Case6	0.5196	0.51962	5.1962	5.1962	9.8724	5.1962	5.1962	187.06	187.06	1.0000
Case7	0.6062	0.60622	6.0622	6.0622	11.5178	6.0622	6.0622	254.61	297.05	1.1667
Case8	0.6928	0.69283	6.9283	6.9283	13.1632	6.9283	6.9283	332.56	443.41	1.3333
Case9	0.7794	0.77943	7.7943	7.7943	15.086	7.7943	7.7943	420.89	631.33	1.5000
Case10	0.8660	0.86603	8.6603	8.6603	8.6603	8.6603	8.6603	519.61	866.02	1.6667

表 6.2 正二十面体:各条件設定

Case	一辺あ たりの 長さ[m]	音源	音源	音源	受音点	受音点	受音点	表面 積:S	容積 :V	V/S
		:x	:y	:z	:x	:y	:z			
Case1	0.6615	0.5358	0.5623	0.0628	0.5358	0.5623	1.1947	3.7896	0.6316	0.1667
Case2	1.3230	1.0716	1.1246	0.1257	1.0716	1.1246	2.3893	15.158	5.0528	0.3333
Case3	1.9845	1.6074	1.6868	0.1885	1.6074	1.6868	3.5840	34.106	17.053	0.5000
Case4	2.6460	2.1433	2.2491	0.2514	2.1433	2.2491	4.7787	60.633	40.423	0.6667
Case5	3.3075	2.6791	2.8114	0.3142	2.6791	2.8114	5.9733	94.739	78.95	0.8333
Case6	3.9690	3.2149	3.3737	0.3771	3.2149	3.3737	7.1680	136.42	136.43	1.0000
Case7	4.6305	3.7507	3.9359	0.4399	3.7507	3.9359	8.3627	185.69	216.64	1.1667
Case8	5.2920	4.2865	4.4982	0.5027	4.2865	4.4982	9.5574	242.53	323.38	1.3333
Case9	5.9534	4.8223	5.0604	0.5656	4.8223	5.0604	10.751	306.95	460.42	1.5000
Case10	6.6149	5.3581	5.6227	0.6284	5.3581	5.6227	11.946	378.95	631.57	1.6667

6.2 解析結果・考察

正八面体の Case10 に関してはパソコンのメモリ不足のため解析を行うことができなかったの
で残響時間は記載していない。

表 6.3～表 6.6 の上表に正八面体の吸音率別、周波数別の数値解析による残響時間、表 6.3～表
6.6 に解析結果から Sabine の残響式の残響時間を引いた値を示す。表 6.8～表 6.11 の上表に正二
十面体の吸音率別、周波数別の数値解析による残響時間、表 6.8～表 6.11 に解析結果から Sabine
の残響式の残響時間を引いた値を示す。表 6.7 と表 6.12 には各多面体における吸音率別の全周波
数の平均と全吸音率の平均を示す。

図 6.2～図 6.5 に吸音率 0.2 における周波数別の残響時間の差、図 6.6 には吸音率 0.2 におけ
る全周波数の残響時間の平均を示す。図 6.6 よりより、正八面体は立方体に比べて完全拡散性が
悪く、正二十面体は立方体より完全拡散性が良いことがわかる。

次に、図 6.7～図 6.10 に吸音率 0.4 における周波数別の残響時間の差、図 6.11 には吸音率 0.4
における全周波数の残響時間の平均を示す。図 6.10 より正二十面体において周波数 500[Hz]で
は Case 全体を通して拡散性が良いことがわかる。また図 6.11 より、吸音率 0.2 の場合とは違
い、3 種類とも大きな差はなく、若干正二十面体は Case7～Case10 に関しては完全拡散性がよ
いことがわかる。

また、図 6.12～図 6.15 に吸音率 0.6 における周波数別の残響時間の差、図 6.16 には吸音率
0.6 における全周波数の残響時間の平均を示す。図 6.14 より、周波数 250[Hz]において、Case6
～Case10 で正二十面体の落ち込みが小さいことがわかる。また、図 6.16 より吸音率 0.4 の場合
と同じく立方体より正二十面体のほうが完全拡散性が良いことがわかる。

次に、図 6.17～図 6.20 に吸音率 0.8 における周波数別の残響時間の差、また、図 6.21 には吸
音率 0.8 における全周波数の残響時間の平均を示す。3 種類ともほぼ同じ曲線となることがわか
る。これは、正多角柱と同様で、どの形状においても壁の反射による影響よりも、壁の吸音によ
る影響が大きいため、完全拡散性がどの形状でも変化しなかったと考えられる。

そして、図 6.22 には全周波数の残響時間の平均の全吸音率の平均を示す。3 種類とも右肩下
がりとなっている。これは吸音率に関係なく、室が大きくなるにつれて拡散性が悪くなる傾向が
ある。また、完全拡散性が良いのは順に正二十面体、立方体、正八面体となる。平行壁面数の組
の少ない時ほど完全拡散性が良くなるとは限らないと考えられる。

表 6.3 正八面体：吸音率 0.2

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0977	0.0914	0.0731	0.0613	0.1530
	2	0.1926	0.1548	0.1311	0.1124	0.3060
	3	0.2351	0.2350	0.2123	0.2049	0.4590
	4	0.3086	0.2777	0.2672	0.2178	0.6119
	5	0.4039	0.3684	0.3239	0.2476	0.7649
	6	0.4696	0.4567	0.3846	0.2632	0.9179
	7	0.5094	0.4989	0.4037	0.3046	1.0709
	8	0.5858	0.5402	0.4385	0.3817	1.2239
	9	0.6626	0.5942	0.5856	0.4718	1.3769
	10					1.5298

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0147	0.0084	-0.0099	-0.0217	-0.0021
	2	0.0266	-0.0112	-0.0349	-0.0536	-0.0183
	3	-0.0140	-0.0141	-0.0368	-0.0442	-0.0272
	4	-0.0235	-0.0544	-0.0649	-0.1143	-0.0643
	5	-0.0112	-0.0467	-0.0912	-0.1675	-0.0792
	6	-0.0285	-0.0414	-0.1135	-0.2349	-0.1046
	7	-0.0718	-0.0823	-0.1775	-0.2766	-0.1520
	8	-0.0784	-0.1240	-0.2257	-0.2825	-0.1776
	9	-0.0846	-0.1530	-0.1616	-0.2754	-0.1686
	10	-	-	-	-	

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 6.4 正八面体：吸音率 0.4

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0936	0.0556	0.0341	0.0334	0.0473
	2	0.1158	0.0691	0.0672	0.0741	0.0946
	3	0.1012	0.0924	0.1207	0.1054	0.1420
	4	0.1385	0.1380	0.1568	0.1390	0.1892
	5	0.1523	0.1800	0.1936	0.1481	0.2365
	6	0.1837	0.2393	0.2185	0.1773	0.2839
	7	0.2432	0.2782	0.2610	0.2084	0.3312
	8	0.2767	0.3153	0.3002	0.2857	0.3785
	9	0.3067	0.3563	0.2728	0.2694	0.4259
	10	-	-	-	-	0.4732

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0463	0.0083	-0.0132	-0.0139	0.0069
	2	0.0212	-0.0255	-0.0274	-0.0205	-0.0131
	3	-0.0408	-0.0496	-0.0213	-0.0366	-0.0370
	4	-0.0507	-0.0512	-0.0324	-0.0502	-0.0461
	5	-0.0842	-0.0565	-0.0429	-0.0884	-0.0680
	6	-0.1002	-0.0446	-0.0654	-0.1066	-0.0792
	7	-0.0880	-0.0530	-0.0702	-0.1228	-0.0835
	8	-0.1018	-0.0632	-0.0783	-0.0928	-0.0841
	9	-0.1192	-0.0696	-0.1531	-0.1565	-0.1246
	10	-	-	-	-	

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 6.5 正八面体：吸音率 0.6

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0926	0.0511	0.0259	0.0208	0.0354
	2	0.1025	0.0516	0.0417	0.0424	0.0707
	3	0.0671	0.0625	0.0654	0.0639	0.1061
	4	0.1030	0.0864	0.0849	0.0800	0.1415
	5	0.1045	0.1091	0.1062	0.0998	0.1769
	6	0.1252	0.1296	0.1269	0.1203	0.2058
	7	0.1435	0.1482	0.1397	0.0227	0.2477
	8	0.1728	0.1693	0.158	0.1555	0.2831
	9	0.1935	0.1911	0.1792	0.1866	0.3185
	10	-	-	-	-	0.3539

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0572	0.0157	-0.0095	-0.0146	0.0122
	2	0.0318	-0.0191	-0.0290	-0.0283	-0.0112
	3	-0.0390	-0.0436	-0.0407	-0.0422	-0.0414
	4	-0.0385	-0.0551	-0.0566	-0.0615	-0.0529
	5	-0.0724	-0.0678	-0.0707	-0.0771	-0.0720
	6	-0.0806	-0.0762	-0.0789	-0.0855	-0.0803
	7	-0.1042	-0.0995	-0.1080	-0.2250	-0.1342
	8	-0.1103	-0.1138	-0.1251	-0.1276	-0.1192
	9	-0.1250	-0.1274	-0.1393	-0.1319	-0.1309
	10	-	-	-	-	

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 6.6 正八面体：吸音率 0.8

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0923	0.0457	0.0250	0.0121	0.0299
	2	0.0919	0.0498	0.0222	0.0225	0.0597
	3	0.0777	0.0417	0.0350	0.0336	0.0895
	4	0.0997	0.0444	0.0449	0.0422	0.1194
	5	0.1032	0.0704	0.0556	0.0898	0.1493
	6	0.0832	0.0698	0.0664	0.1124	0.1791
	7	0.1061	0.0800	0.0751	0.1318	0.2091
	8	0.0887	0.0894	0.0842	0.1501	0.2389
	9	0.1405	0.1000	0.1627	0.1704	0.2688
	10	-	-	-	-	0.2986

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0624	0.0158	-0.0049	-0.0178	0.0139
	2	0.0322	-0.0099	-0.0375	-0.0372	-0.0131
	3	-0.0118	-0.0478	-0.0545	-0.0559	-0.0425
	4	-0.0197	-0.0750	-0.0745	-0.0772	-0.0616
	5	-0.0461	-0.0789	-0.0937	-0.0595	-0.0696
	6	-0.0959	-0.1093	-0.1127	-0.0667	-0.0962
	7	-0.1030	-0.1291	-0.1340	-0.0773	-0.1108
	8	-0.1502	-0.1495	-0.1547	-0.0888	-0.1358
	9	-0.1283	-0.1688	-0.1061	-0.0984	-0.1254
	10	-	-	-	-	

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 6.7 正八面体：吸音率別：全周波数の平均

残響時間の差[s]		吸音率				平均[s]
		0.2	0.4	0.6	0.8	
Case	1	-0.002	0.007	0.012	0.014	0.0077
	2	-0.018	-0.013	-0.011	-0.013	-0.0139
	3	-0.027	-0.037	-0.041	-0.043	-0.0370
	4	-0.064	-0.046	-0.053	-0.062	-0.0562
	5	-0.079	-0.068	-0.072	-0.070	-0.0722
	6	-0.105	-0.079	-0.080	-0.096	-0.0901
	7	-0.152	-0.084	-0.134	-0.111	-0.1201
	8	-0.1776	-0.0841	-0.1192	-0.1358	-0.1292
	9	-0.1687	-0.1246	-0.1309	-0.1254	-0.1374
	10					

表 6.8 正二十面体：吸音率 0.2

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.1074	0.0476	0.0856	0.0699	0.1530
	2	0.1008	0.1755	0.1498	0.1212	0.3060
	3	0.2846	0.2514	0.2247	0.1973	0.4590
	4	0.3471	0.3281	0.2837	0.3014	0.6119
	5	0.3862	0.3968	0.3543	0.3886	0.7649
	6	0.5015	0.5096	0.4647	0.4780	0.9179
	7	0.5735	0.5311	0.5521	0.5985	1.0709
	8	0.6409	0.5937	0.6185	0.6863	1.2239
	9	0.7006	0.6426	0.6636	0.7690	1.3769
	10	0.6532	0.6920	0.7530	0.8086	1.5298

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0244	-0.0354	0.0026	-0.0131	-0.0054
	2	0.0178	0.0095	-0.0162	-0.0448	-0.0084
	3	0.0355	0.0023	-0.0244	-0.0518	-0.0096
	4	0.0150	-0.0040	-0.0484	-0.0307	-0.0170
	5	-0.0289	-0.0183	-0.0608	-0.0265	-0.0336
	6	0.0034	0.0115	-0.0334	-0.0201	-0.0096
	7	-0.0077	-0.0501	-0.0291	0.0173	-0.0174
	8	-0.0233	-0.0705	-0.0457	0.0221	-0.0293
	9	-0.0466	-0.1046	-0.0836	0.0218	-0.0533
	10	-0.1770	-0.1382	-0.0772	-0.0216	-0.1035

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 6.9 正二十面体：吸音率 0.4

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0941	0.0481	0.0366	0.0382	0.0473
	2	0.0963	0.0738	0.0788	0.0482	0.0946
	3	0.1145	0.1091	0.1064	0.0854	0.1420
	4	0.1575	0.1620	0.1140	0.1516	0.1892
	5	0.1592	0.1874	0.1402	0.2269	0.2365
	6	0.2182	0.2192	0.1901	0.2620	0.2839
	7	0.2782	0.2568	0.2388	0.3210	0.3312
	8	0.3271	0.2627	0.3047	0.3565	0.3785
	9	0.3792	0.2704	0.3930	0.4024	0.4259
	10	0.3787	0.3027	0.4572	0.4377	0.4732

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0468	0.0008	-0.0107	-0.0091	0.0069
	2	0.0490	-0.0208	-0.0158	-0.0464	-0.0085
	3	-0.0275	-0.0329	-0.0356	-0.0566	-0.0381
	4	-0.0317	-0.0272	-0.0752	-0.0376	-0.0429
	5	-0.0773	-0.0491	-0.0963	-0.0096	-0.0581
	6	-0.0657	-0.0647	-0.0938	-0.0219	-0.0615
	7	-0.0530	-0.0744	-0.0924	-0.0102	-0.0575
	8	-0.0514	-0.1158	-0.0738	-0.0220	-0.0658
	9	-0.0467	-0.1555	-0.0329	-0.0235	-0.0646
	10	-0.0945	-0.1705	-0.0160	-0.0355	-0.0791

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 6.10 正二十面体：吸音率 0.6

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0929	0.0476	0.0257	0.0252	0.0354
	2	0.0955	0.0529	0.0501	0.0397	0.0707
	3	0.0672	0.0642	0.0654	0.0711	0.1061
	4	0.1064	0.1040	0.0830	0.1069	0.1415
	5	0.1082	0.1284	0.1087	0.1382	0.1769
	6	0.1289	0.1350	0.1427	0.1516	0.2058
	7	0.1827	0.1466	0.1854	0.1706	0.2477
	8	0.2094	0.1677	0.2192	0.1832	0.2831
	9	0.2397	0.1889	0.2410	0.2234	0.3185
	10	0.2619	0.2271	0.2592	0.2467	0.3539

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0575	0.0122	-0.0097	-0.0102	0.0125
	2	0.0601	-0.0178	-0.0206	-0.0310	-0.0023
	3	-0.0389	-0.0419	-0.0407	-0.0350	-0.0391
	4	-0.0351	-0.0375	-0.0585	-0.0346	-0.0414
	5	-0.0687	-0.0485	-0.0682	-0.0387	-0.0560
	6	-0.0769	-0.0708	-0.0631	-0.0542	-0.0663
	7	-0.0650	-0.1011	-0.0623	-0.0771	-0.0764
	8	-0.0737	-0.1154	-0.0639	-0.0999	-0.0883
	9	-0.0788	-0.1296	-0.0775	-0.0951	-0.0953
	10	-0.0920	-0.1268	-0.0947	-0.1072	-0.1052

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 6.11 正二十面体：吸音率 0.8

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0923	0.0464	0.0195	0.0155	0.0299
	2	0.0931	0.0390	0.0311	0.0309	0.0597
	3	0.0770	0.0492	0.0484	0.0427	0.0895
	4	0.0817	0.0718	0.0627	0.0622	0.1194
	5	0.0898	0.0834	0.0686	0.0961	0.1493
	6	0.0995	0.0971	0.0852	0.0943	0.1791
	7	0.1193	0.1133	0.1040	0.1198	0.2091
	8	0.1472	0.1257	0.1272	0.1679	0.2389
	9	0.1693	0.1244	0.1553	0.1931	0.2688
	10	0.1674	0.1373	0.1535	0.2140	0.2986

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0624	0.0165	-0.0104	-0.0144	0.0136
	2	0.0632	-0.0207	-0.0286	-0.0288	-0.0037
	3	-0.0125	-0.0403	-0.0411	-0.0468	-0.0352
	4	-0.0377	-0.0476	-0.0567	-0.0572	-0.0498
	5	-0.0595	-0.0659	-0.0807	-0.0532	-0.0648
	6	-0.0796	-0.0820	-0.0939	-0.0848	-0.0851
	7	-0.0898	-0.0958	-0.1051	-0.0893	-0.0950
	8	-0.0917	-0.1132	-0.1117	-0.0710	-0.0969
	9	-0.0995	-0.1444	-0.1135	-0.0757	-0.1083
	10	-0.1312	-0.1613	-0.1451	-0.0846	-0.1306

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 6.12 正二十面体：吸音率別：全周波数の平均

残響時間の差[s]		吸音率				平均[s]
		0.2	0.4	0.6	0.8	
Case	1	-0.0054	0.0069	0.0125	0.0136	0.0069
	2	-0.0084	-0.0085	-0.0023	-0.0037	-0.0057
	3	-0.0096	-0.0381	-0.0391	-0.0352	-0.0305
	4	-0.0170	-0.0429	-0.0414	-0.0498	-0.0378
	5	-0.0336	-0.0581	-0.0560	-0.0648	-0.0531
	6	-0.0096	-0.0615	-0.0663	-0.0851	-0.0556
	7	-0.0174	-0.0575	-0.0764	-0.0950	-0.0616
	8	-0.0293	-0.0658	-0.0883	-0.0969	-0.0701
	9	-0.0533	-0.0646	-0.0953	-0.1083	-0.0803
	10	-0.1035	-0.0791	-0.1052	-0.1306	-0.1046

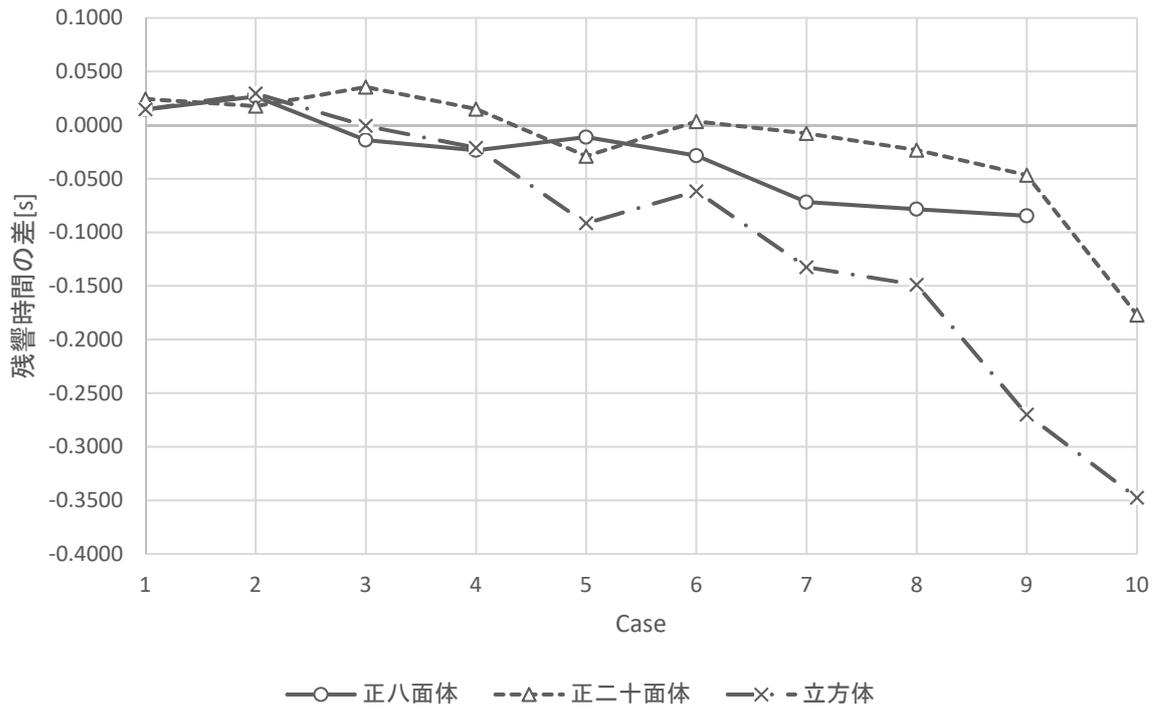


図 6.2 吸音率 0.2 周波数 62.5[Hz]

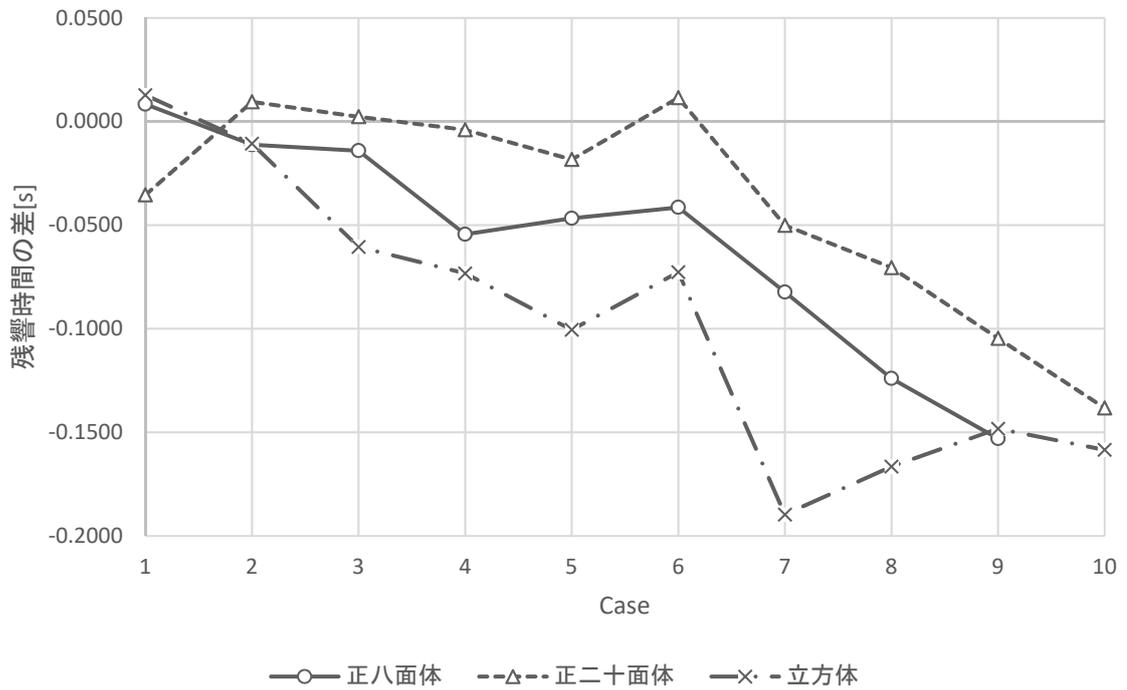


図 6.3 吸音率 0.2 周波数 125[Hz]

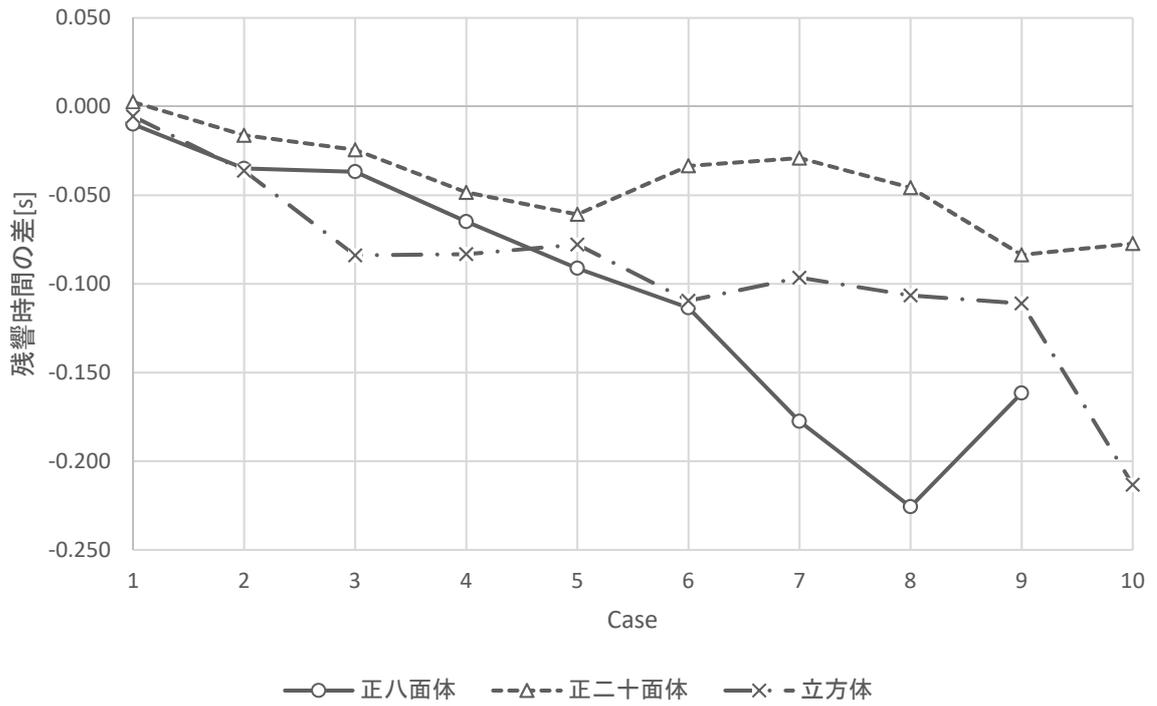


図 6.4 吸音率 0.2 周波数 250[Hz]

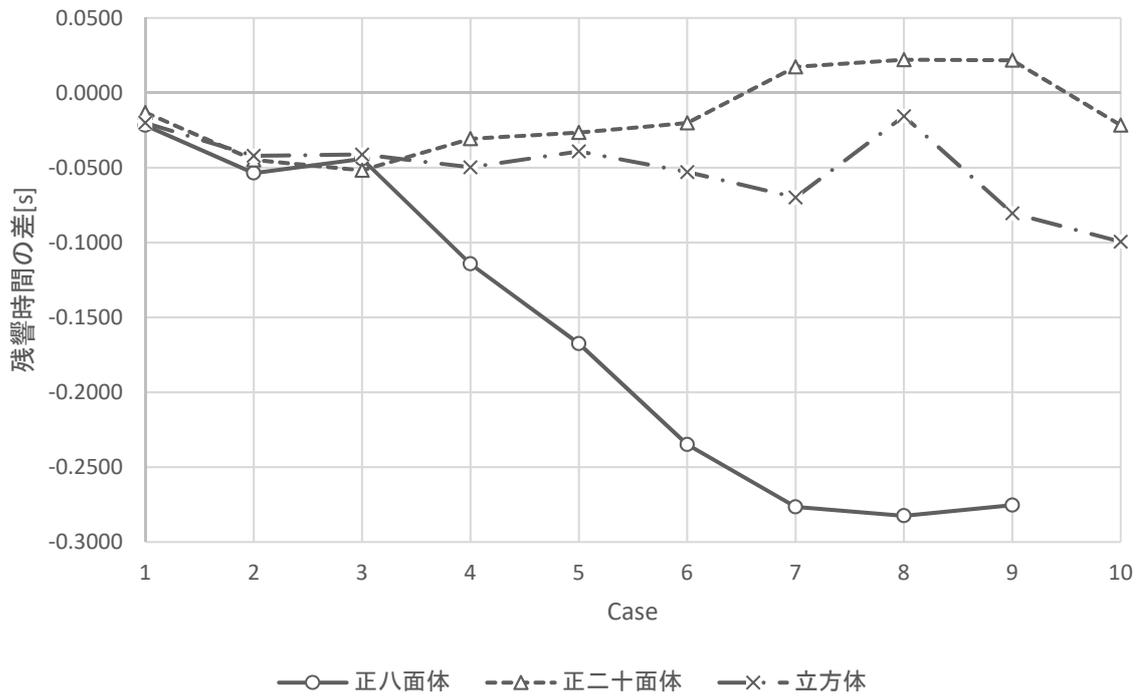


図 6.5 吸音率 0.2 周波数 500[Hz]

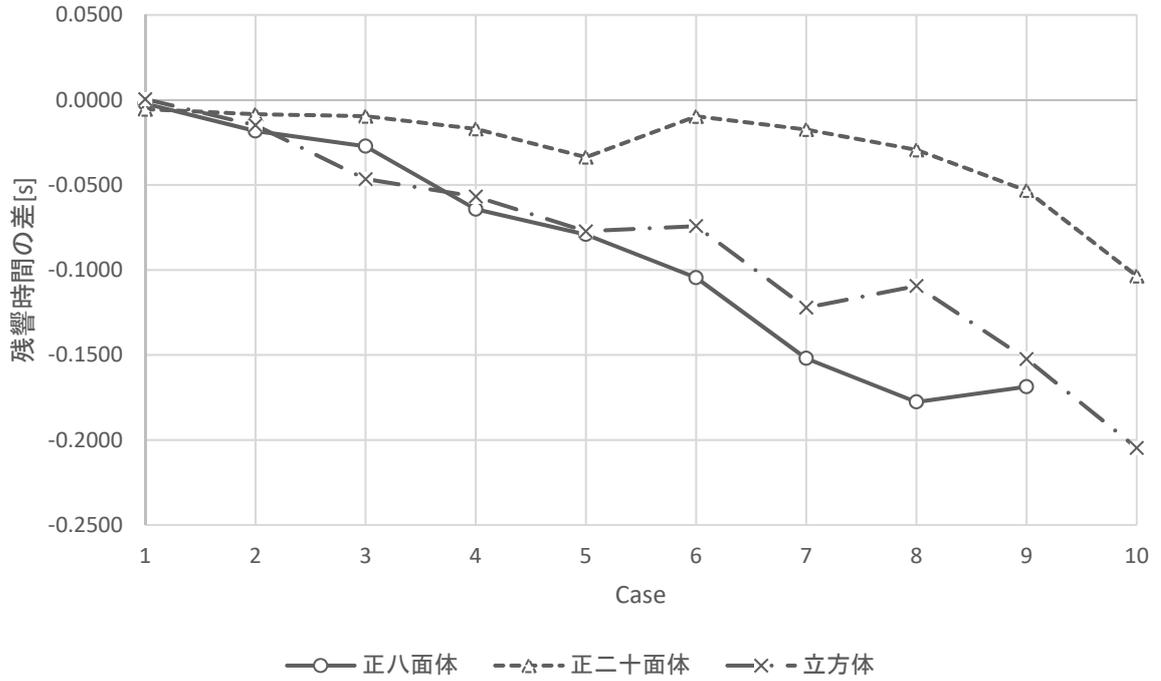


図 6.6 吸音率 0.2 全周波数の平均

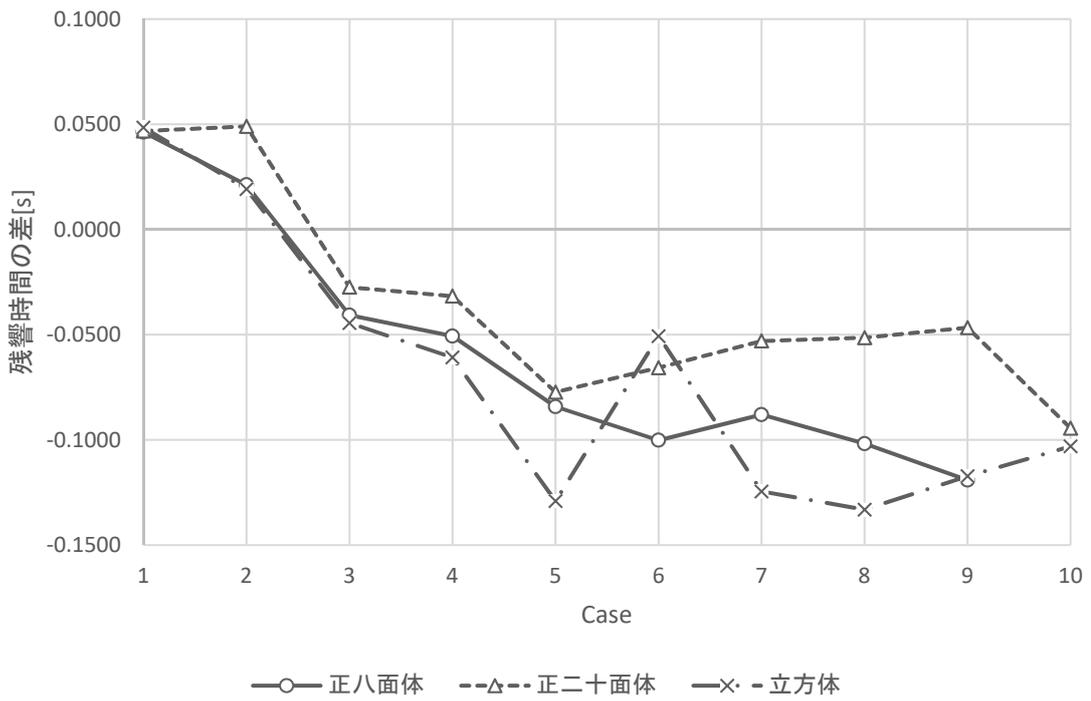


図 6.7 吸音率 0.4 周波数 62.5[Hz]

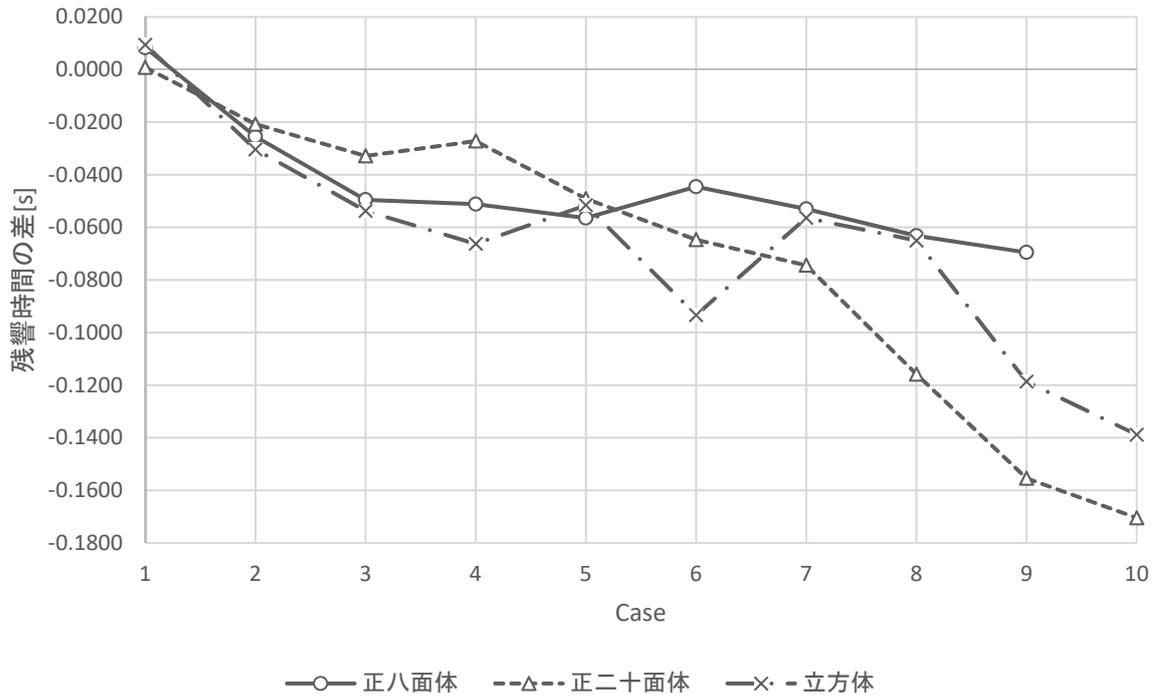


図 6.8 吸音率 0.4 周波数 125[Hz]

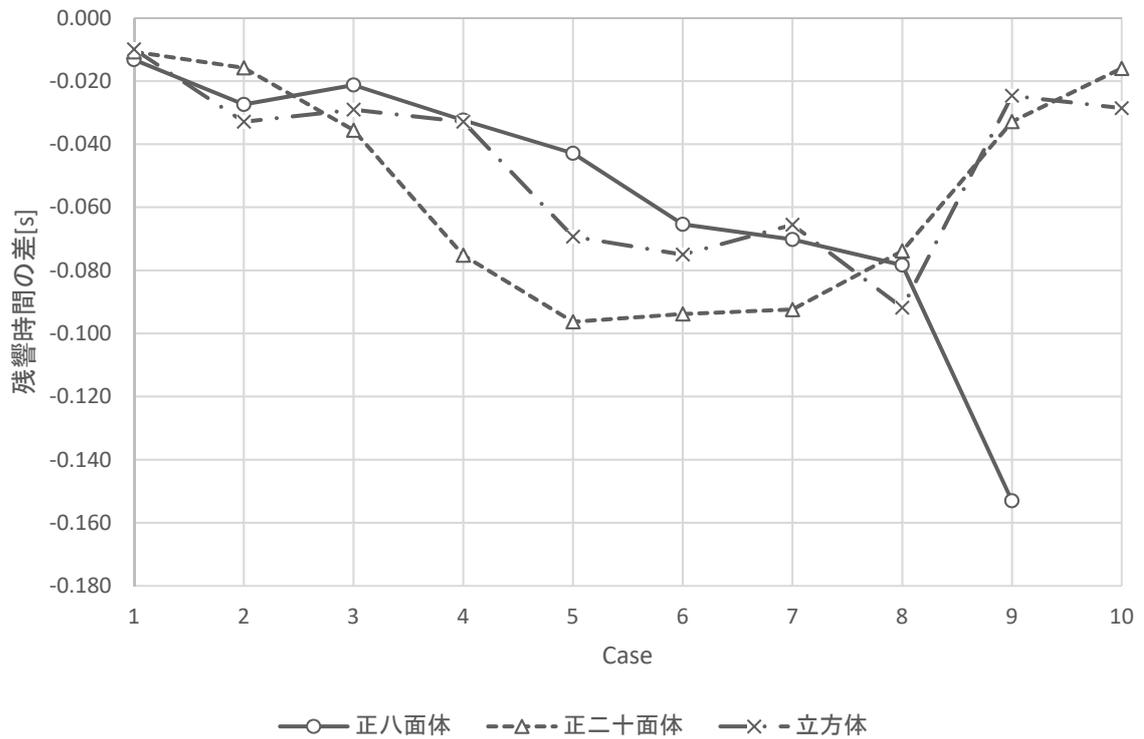


図 6.9 吸音率 0.4 周波数 250[Hz]

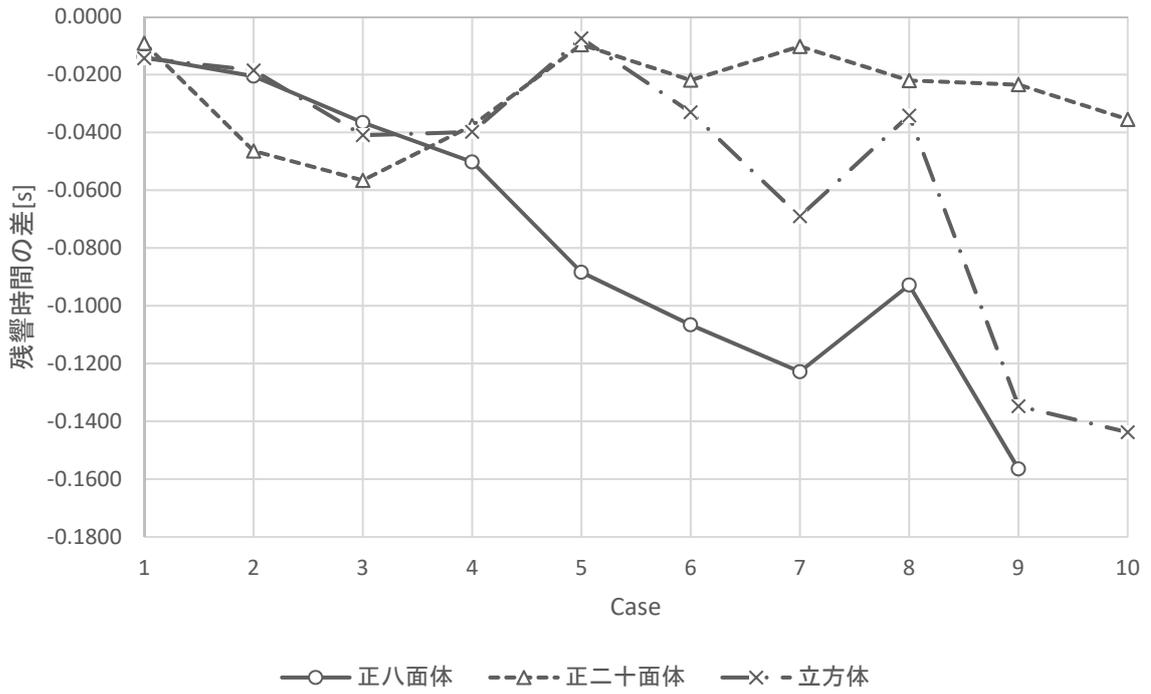


図 6.10 吸音率 0.4 周波数 500[Hz]

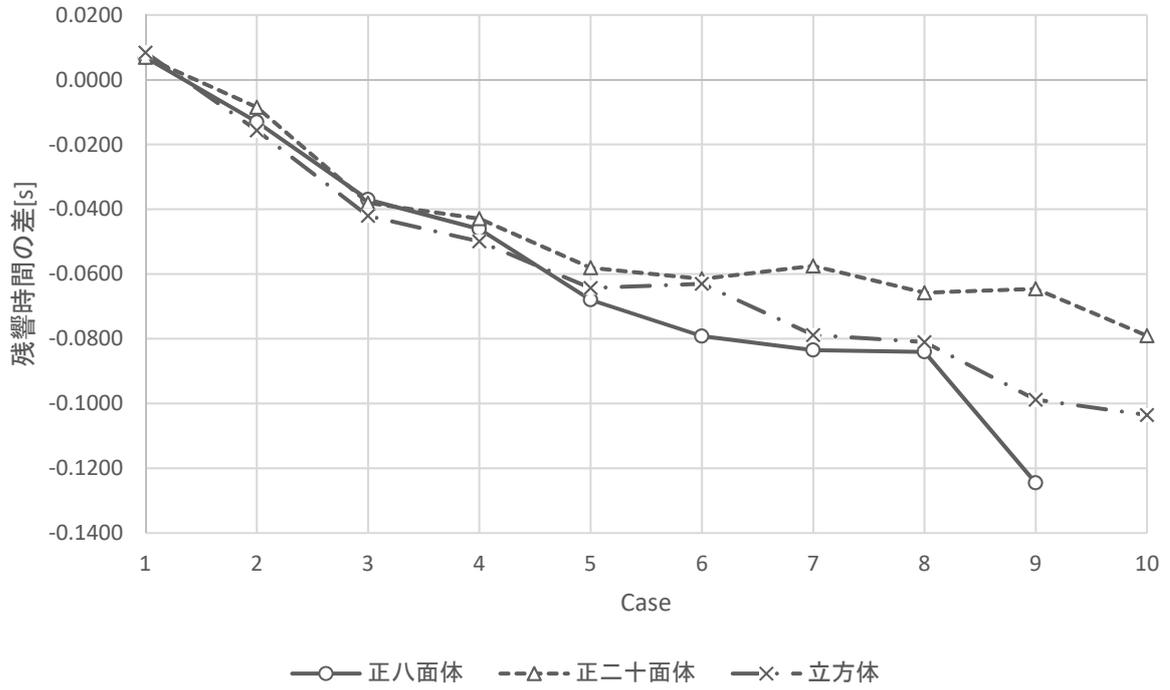


図 6.11 吸音率 0.4 全周波数の平均[Hz]

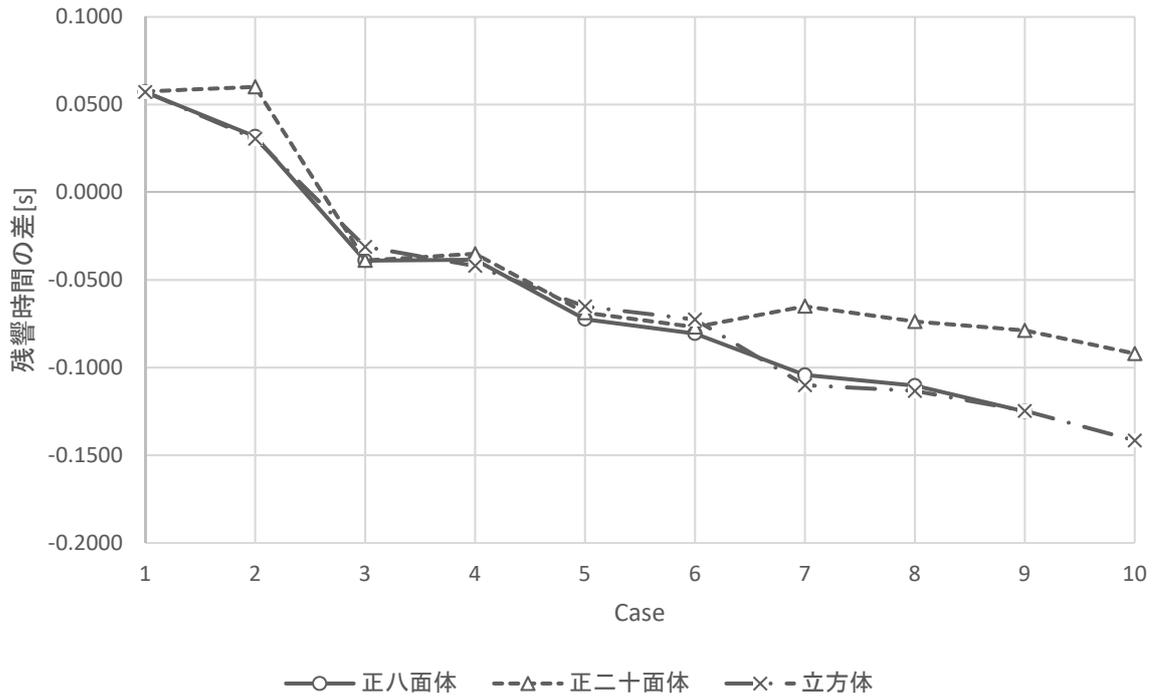


図 6.12 吸音率 0.6 周波数 62.5[Hz]

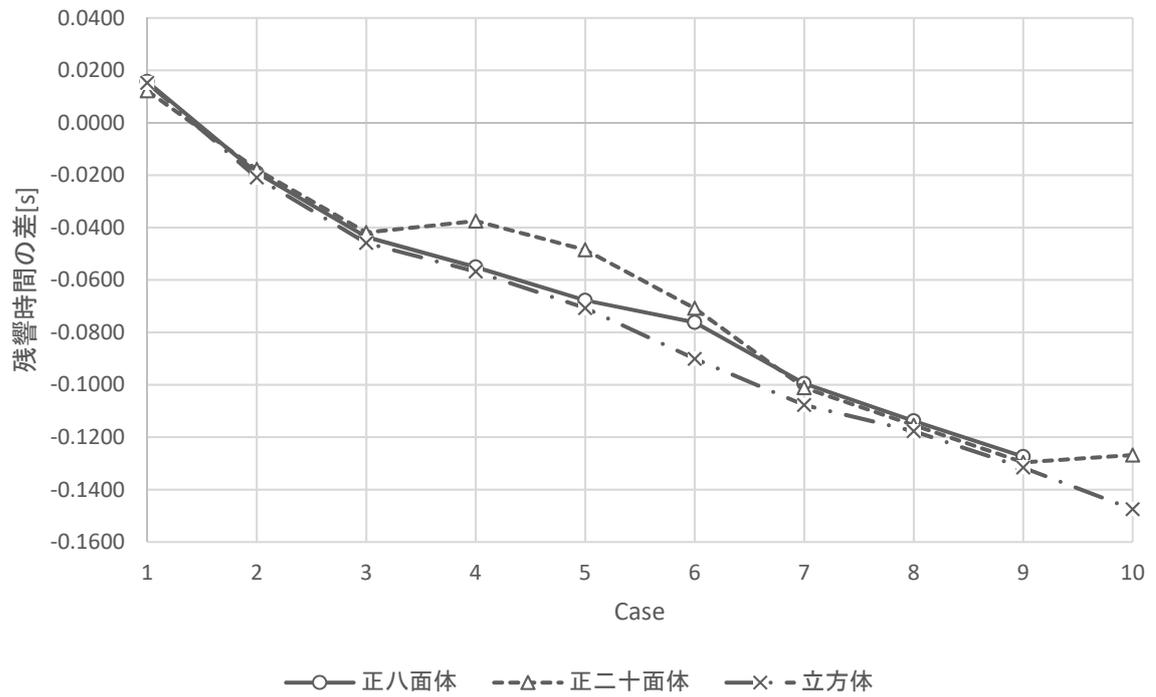


図 6.13 吸音率 0.6 周波数 125[Hz]

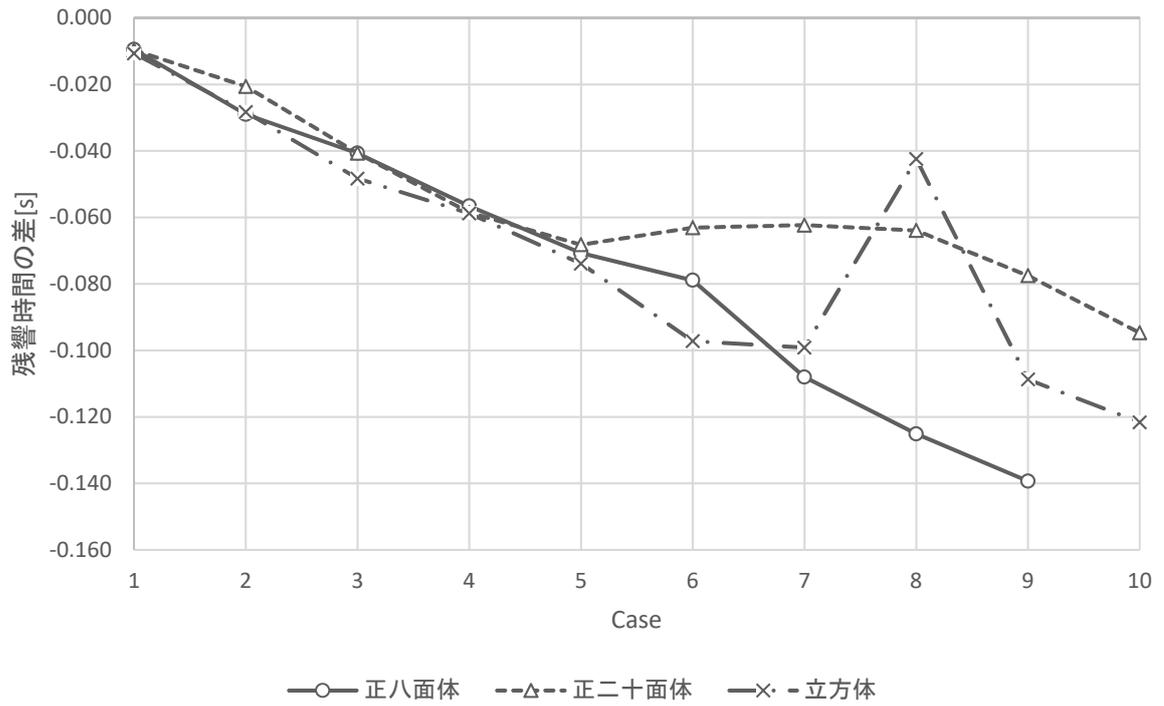


図 6.14 吸音率 0.6 周波数 250[Hz]

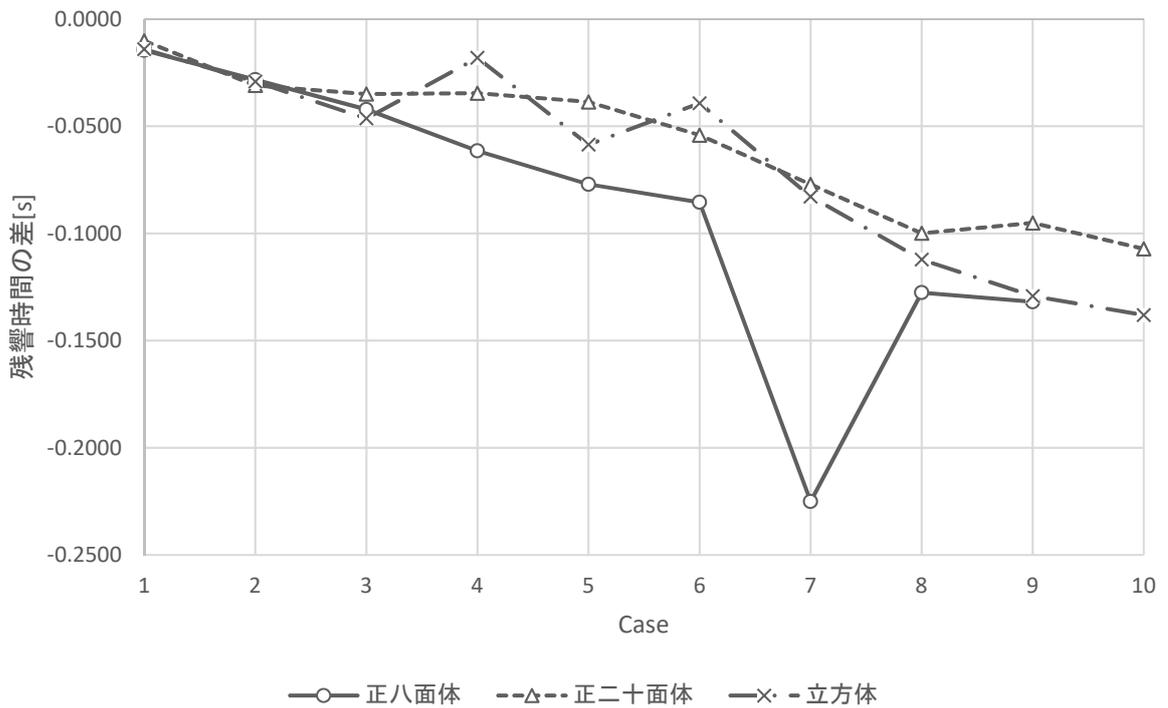


図 6.15 吸音率 0.6 周波数 500[Hz]

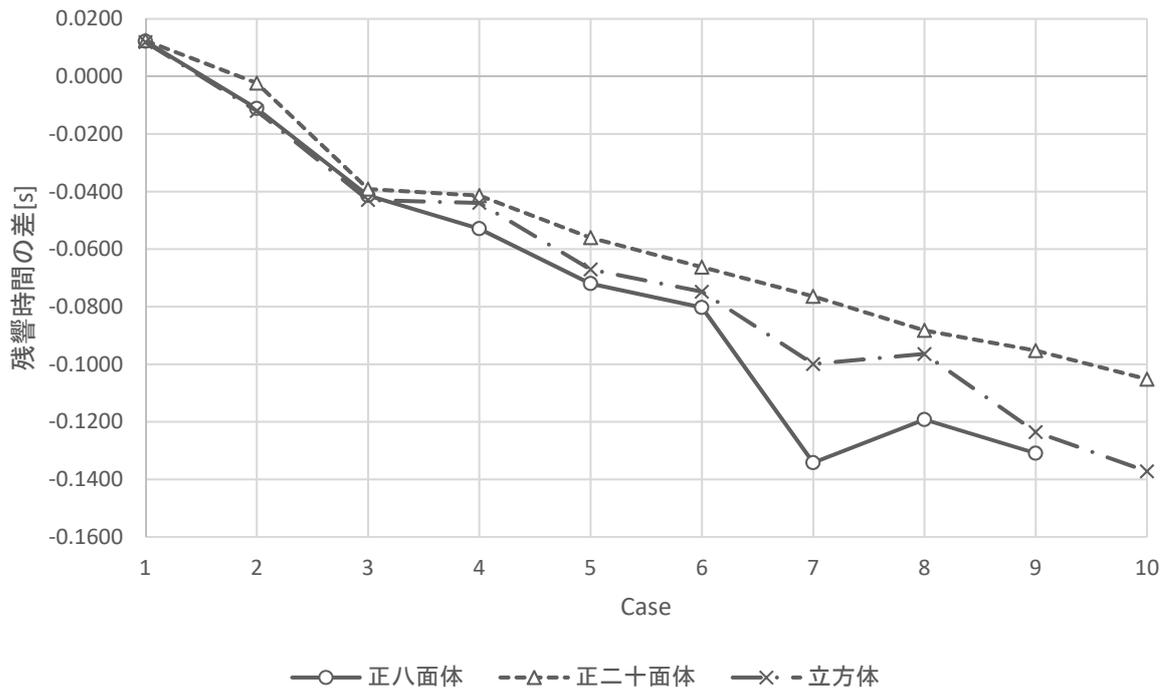


図 6.16 吸音率 0.6 全周波数の平均

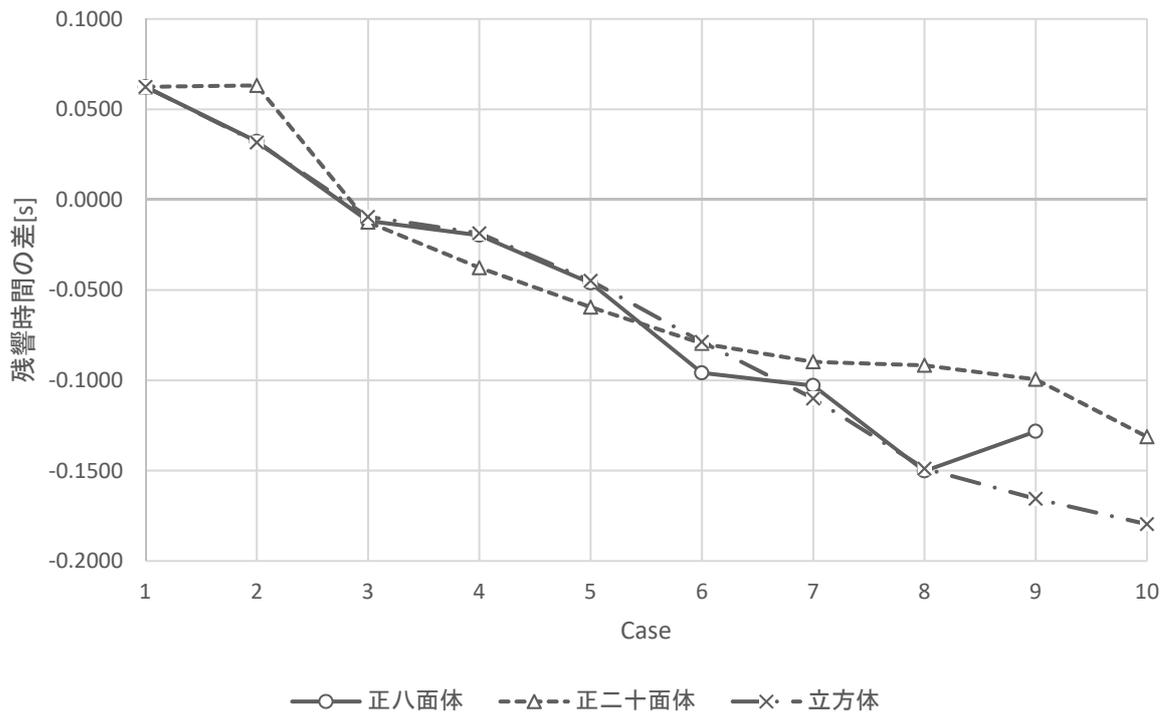


図 6.17 吸音率 0.8 周波数 62.5[Hz]

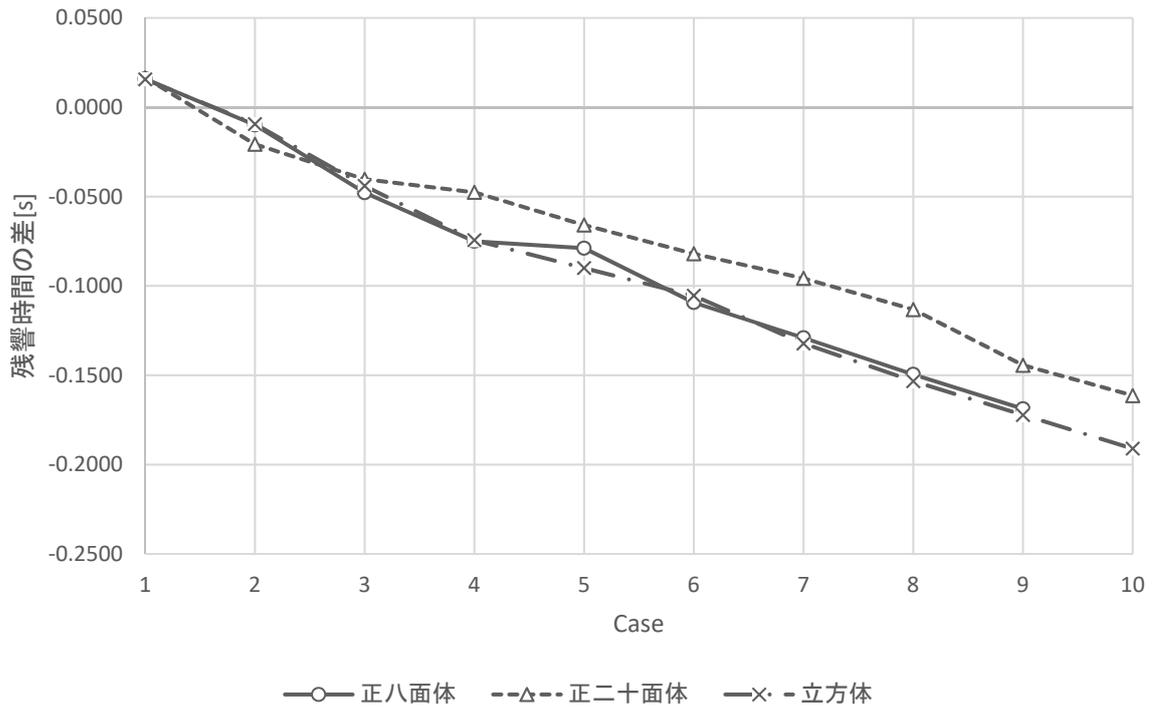


図 6.18 吸音率 0.8 周波数 125[Hz]

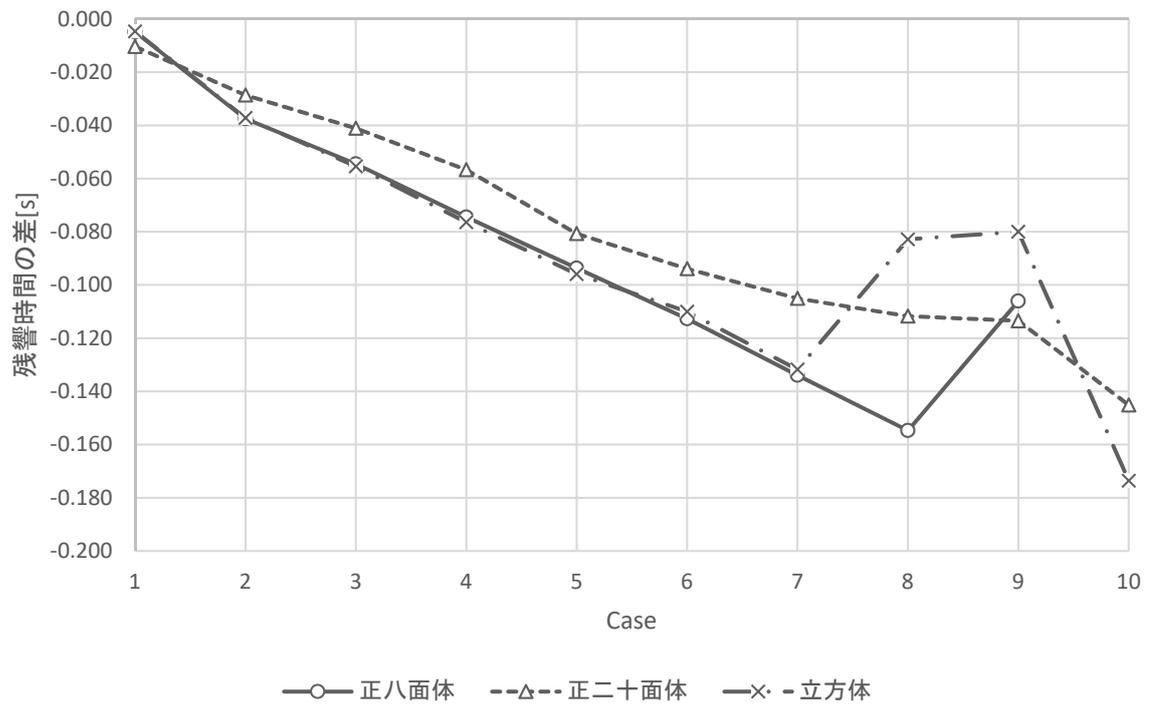


図 6.19 吸音率 0.8 周波数 250[Hz]

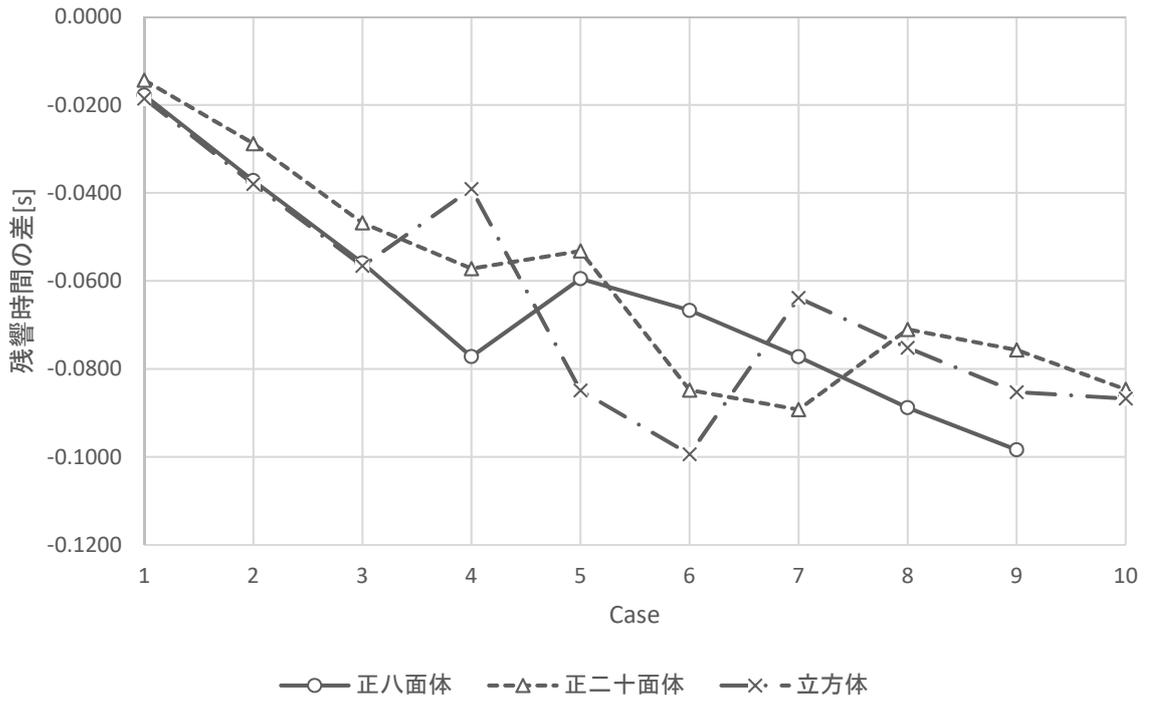


図 6.20 吸音率 0.8 周波数 500[Hz]

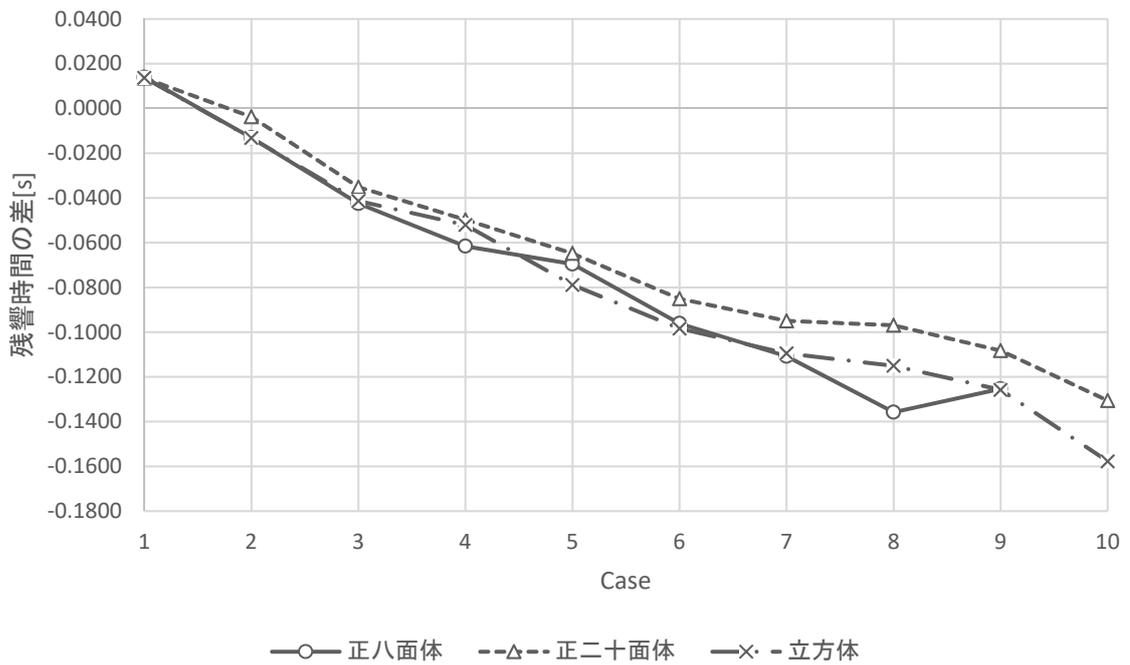


図 6.21 吸音率 0.8 全周波数の平均

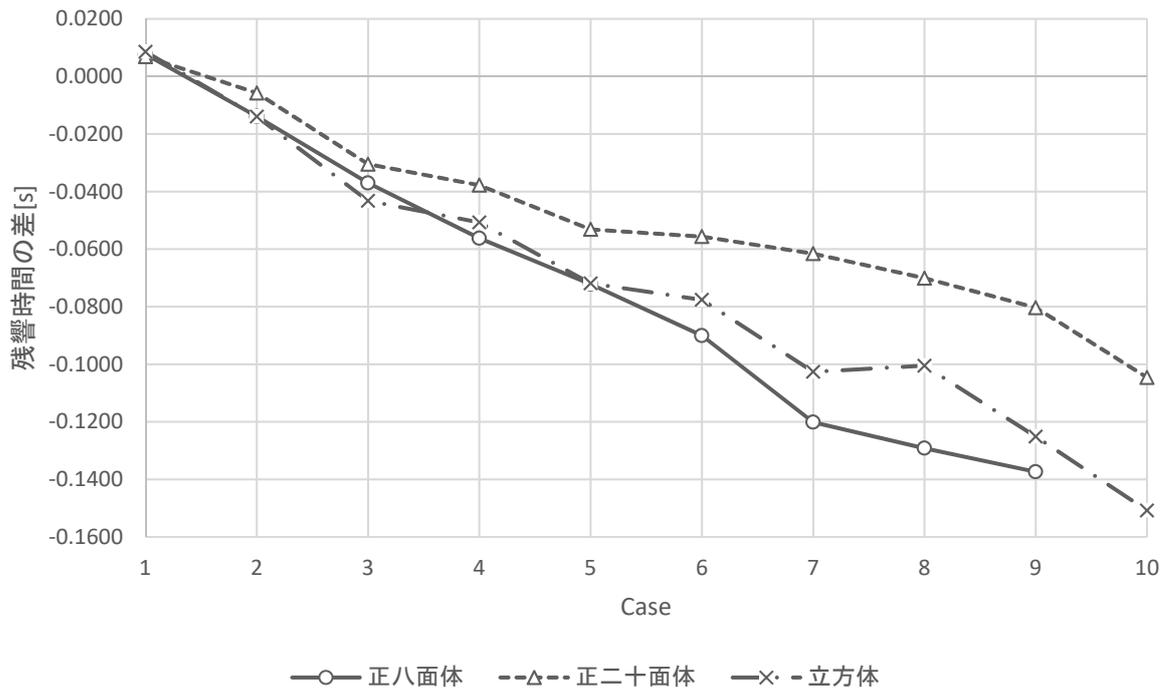


図 6.22 全吸音率の平均：全吸音率の平均

第7章 吸音面の変化

第3章、第4章、第5章、第6章では室内の全面に同じ吸音率でそれぞれ比較を行ってきた。本章では全表面積に対する平均吸音率が同等となるように、吸音面の数を変化させた場合の完全拡散性の評価を行う。本章では図7.1のような立方体で検討する。

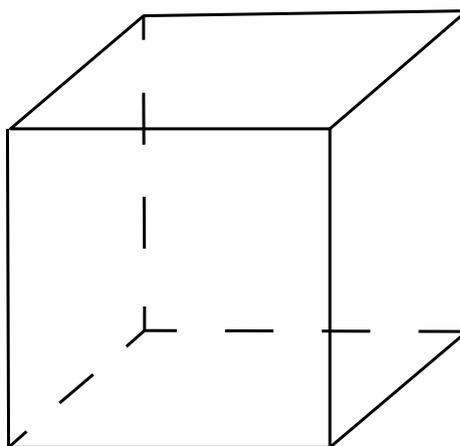
7.1 条件

- ・室形状：立方体
- ・吸音率：表7.1に示す
- ・吸音面：4面吸音の場合は壁面、2面吸音の場合は床・天井とする。
- ・一辺あたりの長さ：1m～10m
- ・最大周波数：300[Hz]
- ・最大時間：0.5[s]
- ・媒質：空気
- ・入力波形：ガウシアンパルス（受音波形は逆フィルタによりインパルス応答に変換）
- ・音源と受音点：表3.1に示す

とし、FDTD法による残響曲線は2.4 シュレーダー法により計算し、残響時間を残響時間の-5～-35[dB]の範囲から求める。

表7.1 吸音率

吸音面	吸音率	吸音面	吸音率
6面	0.1	6面	0.2
4面	0.1576	4面	0.3271
2面	0.3629	2面	-



立方体

図7.1 解析対象

7.2 解析結果・考察

表 7.2 上表には 6 面吸音の吸音率 0.1 と同じ平均吸音率である、4 面吸音の吸音率 0.1576 における各周波数の残響時間、下表にはその各周波数の残響時間から Sabine の残響式の残響時間を引いた時間とその平均を示す。また、表 7.3 上表には 6 面吸音の吸音率 0.1 と同じ平均吸音率である、2 面吸音の吸音率 0.3629 における各周波数の残響時間、下表にはその各周波数の残響時間から Sabine の残響式の残響時間を引いた時間とその平均を示す。また、表 7.4 上表には 6 面吸音の吸音率 0.2 と同じ平均吸音率である、4 面吸音の吸音率 0.3271 における各周波数の残響時間、下表にはその各周波数の残響時間から Sabine の残響式の残響時間を引いた時間とその平均を示す。

図 7.2～7.5 には全面吸音の場合の吸音率 0.1 と同じ平均吸音率の吸音面が 4 面、2 面それぞれの残響時間の差のグラフである。図 7.2～図 7.5 を見ると、62.5、125、250[Hz]ではほぼ変化が見られないのに対し、図 7.5 の周波数 500[Hz]のは時に 2 面吸面の残響時間の差が大きい。

また、図 7.6 は吸音面を変化させた場合の全周波数の平均を示すグラフである。3 種類ともほぼ同じであり、3 種類とも右肩下がりとなっている。

次に、図 7.7～7.10 には全面吸音の場合の吸音率 0.2 と同じ平均吸音率の吸音面が 4 面の残響時間の差のグラフである。図 7.11 は吸音面を変化させた場合の全周波数の平均である。

吸音面の数に関係なく、どれも右肩下がりとなっている。したがって、一辺あたりの長さが長くなるにつれて完全拡散性が悪くなることがわかる。ただし、吸音率が 0.2 の場合は若干完全拡散性が良かった。

表 7.2 立方体：4面吸音：吸音率 0.1576

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.9865	0.1978	0.1607	0.1380	0.1530
	2	0.3978	0.3212	0.2753	0.2356	0.3060
	3	0.5306	0.4479	0.3743	0.3151	0.4590
	4	0.6404	0.5484	0.4854	0.5711	0.6119
	5	0.7185	0.6306	0.5612	0.6727	0.7649
	6	0.6932	0.6483	0.5666	0.6429	0.9179
	7	0.7190	0.6024	0.6421	0.6421	1.0709
	8	0.6888	0.5283	0.6461	0.6641	1.2239
	9	0.6069	0.4985	0.5829	0.7585	1.3769
	10	0.5768	0.5535	0.5592	0.8893	1.5298

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.8335	0.0448	0.0077	-0.0150	0.2178
	2	0.0918	0.0152	-0.0307	-0.0704	0.0015
	3	0.0716	-0.0111	-0.0847	-0.1439	-0.0420
	4	0.0285	-0.0635	-0.1265	-0.0408	-0.0506
	5	-0.0464	-0.1343	-0.2037	-0.0922	-0.1192
	6	-0.2247	-0.2696	-0.3513	-0.2750	-0.2802
	7	-0.3519	-0.4685	-0.4288	-0.4288	-0.4195
	8	-0.5351	-0.6956	-0.5778	-0.5598	-0.5920
	9	-0.7700	-0.8784	-0.7940	-0.6184	-0.7652
	10	-0.9530	-0.9763	-0.9706	-0.6405	-0.8851

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 7.3 立方体：2面吸音：吸音率 0.3629

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.9693	0.1703	0.1582	0.1377	0.1530
	2	0.3464	0.3160	0.2736	0.2709	0.3060
	3	0.4910	0.4264	0.3639	0.3883	0.4590
	4	0.6221	0.5421	0.5365	0.7604	0.6119
	5	0.7007	0.6078	0.5748	0.7710	0.7649
	6	0.6572	0.6453	0.6241	0.7132	0.9179
	7	0.7106	0.6155	0.6970	0.6933	1.0709
	8	0.7014	0.6910	0.6632	0.7454	1.2239
	9	0.6313	0.6417	0.5965	0.8856	1.3769
	10	0.5995	0.6552	0.5762	0.8900	1.5298

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.8163	0.0173	0.0052	-0.0153	0.2059
	2	0.0404	0.0100	-0.0324	-0.0351	-0.0042
	3	0.0320	-0.0326	-0.0951	-0.0707	-0.0416
	4	0.0102	-0.0698	-0.0754	0.1485	0.0033
	5	-0.0642	-0.1571	-0.1901	0.0061	-0.1013
	6	-0.2607	-0.2726	-0.2938	-0.2047	-0.2580
	7	-0.3603	-0.4554	-0.3739	-0.3776	-0.3918
	8	-0.5225	-0.5329	-0.5607	-0.4785	-0.5236
	9	-0.7456	-0.7352	-0.7804	-0.4913	-0.6881
	10	-0.7456	-0.7352	-0.7804	-0.4913	-0.6881

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

表 7.4 立方体：4面吸音：吸音率 0.3271

残響時間[s]		周波数[Hz]				Sabine の残響時間[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0961	0.0931	0.0627	0.0560	0.1530
	2	0.1867	0.1249	0.1118	0.1158	0.3060
	3	0.2395	0.1718	0.1651	0.2019	0.4590
	4	0.2498	0.2234	0.2439	0.2822	0.6119
	5	0.2889	0.2619	0.3209	0.3941	0.7649
	6	0.3439	0.3276	0.4079	0.4963	0.9179
	7	0.3889	0.3967	0.4999	0.5466	1.0709
	8	0.4461	0.4879	0.5565	0.6358	1.2239
	9	0.4730	0.5621	0.6300	0.6552	1.3769
	10	0.4723	0.6493	0.5960	0.6863	1.5298

残響時間の差[s]		周波数[Hz]				平均[s]
		62.5	125	250	500	
Case	1	0.0131	0.0101	-0.0203	-0.0270	-0.0060
	2	0.0207	-0.0411	-0.0542	-0.0502	-0.0312
	3	-0.0096	-0.0773	-0.0840	-0.0472	-0.0545
	4	-0.0823	-0.1087	-0.0882	-0.0499	-0.0823
	5	-0.1262	-0.1532	-0.0942	-0.0210	-0.0987
	6	-0.1542	-0.1705	-0.0902	-0.0018	-0.1042
	7	-0.1923	-0.1845	-0.0813	-0.0346	-0.1231
	8	-0.2181	-0.1763	-0.1077	-0.0284	-0.1326
	9	-0.2742	-0.1851	-0.1172	-0.0920	-0.1671
	10	-0.3579	-0.1809	-0.2342	-0.1439	-0.2293

(※残響時間の差 = FDTD 法による残響時間 - Sabine の残響時間)

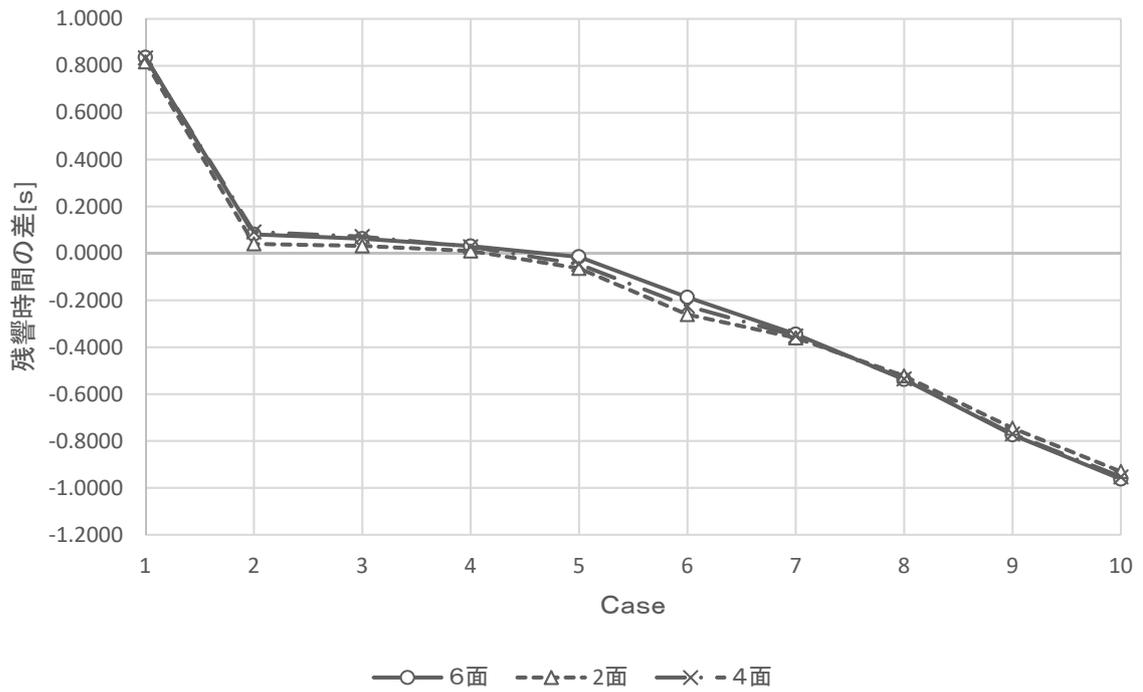


図 7.2 立方体：吸音面別：周波数 62.5[Hz]

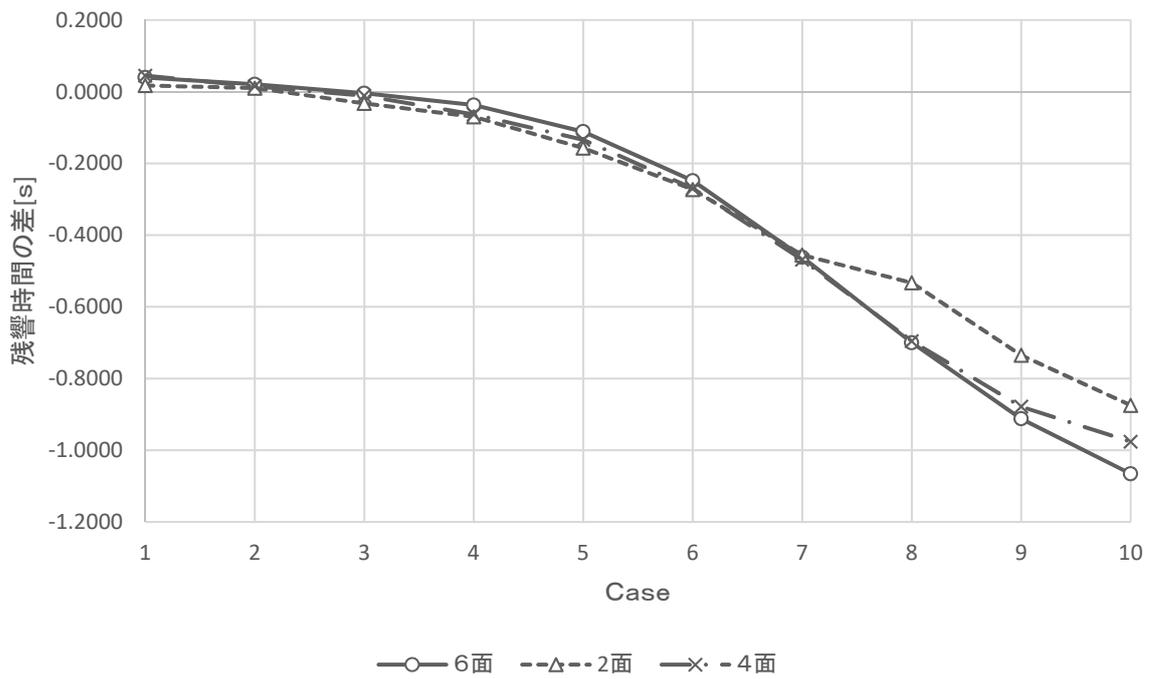


図 7.3 立方体：吸音面別：周波数 125[Hz]

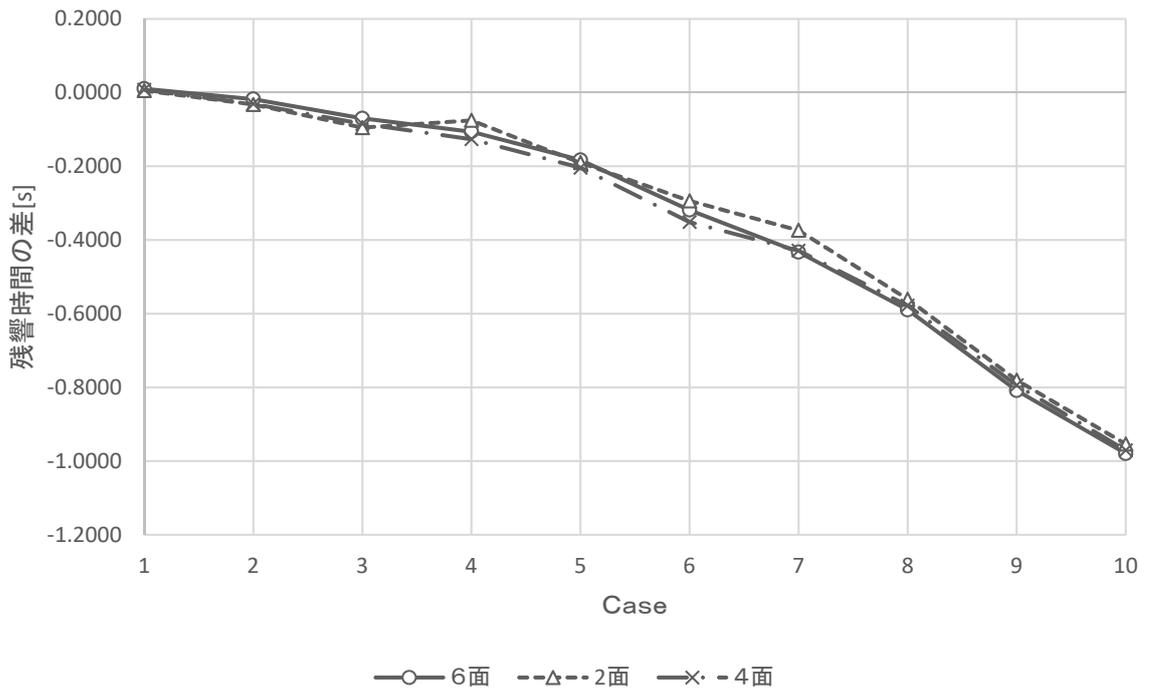


図 7.4 立方体：吸音面別：周波数 250[Hz]

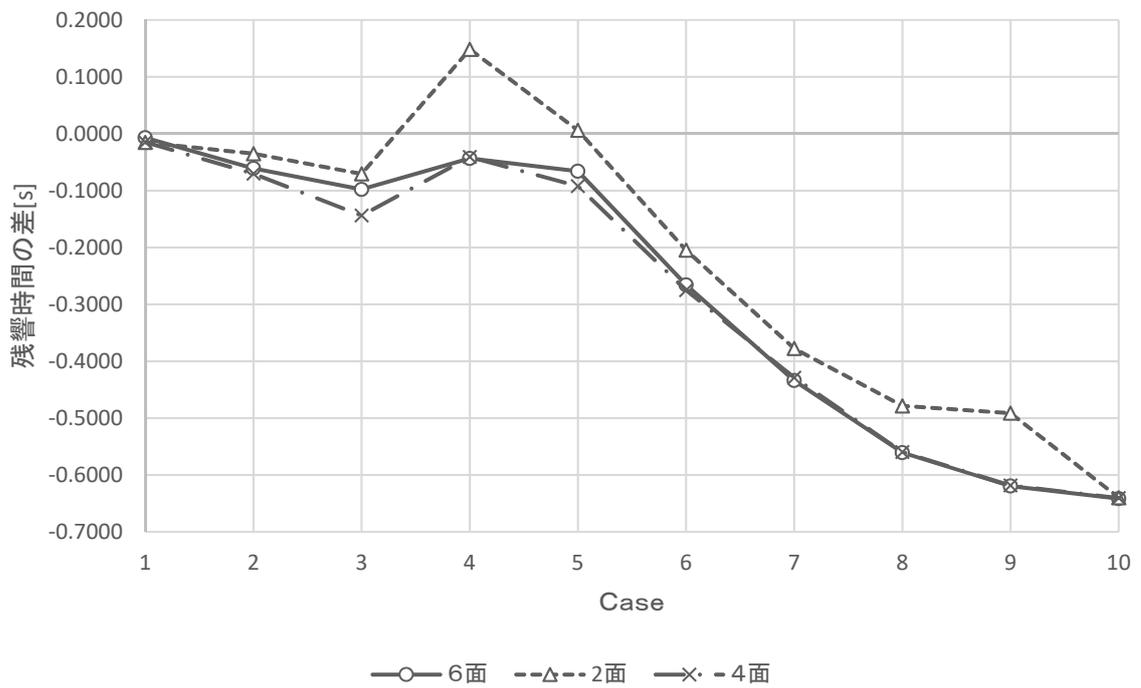


図 7.5 立方体：吸音面別：周波数 500[Hz]

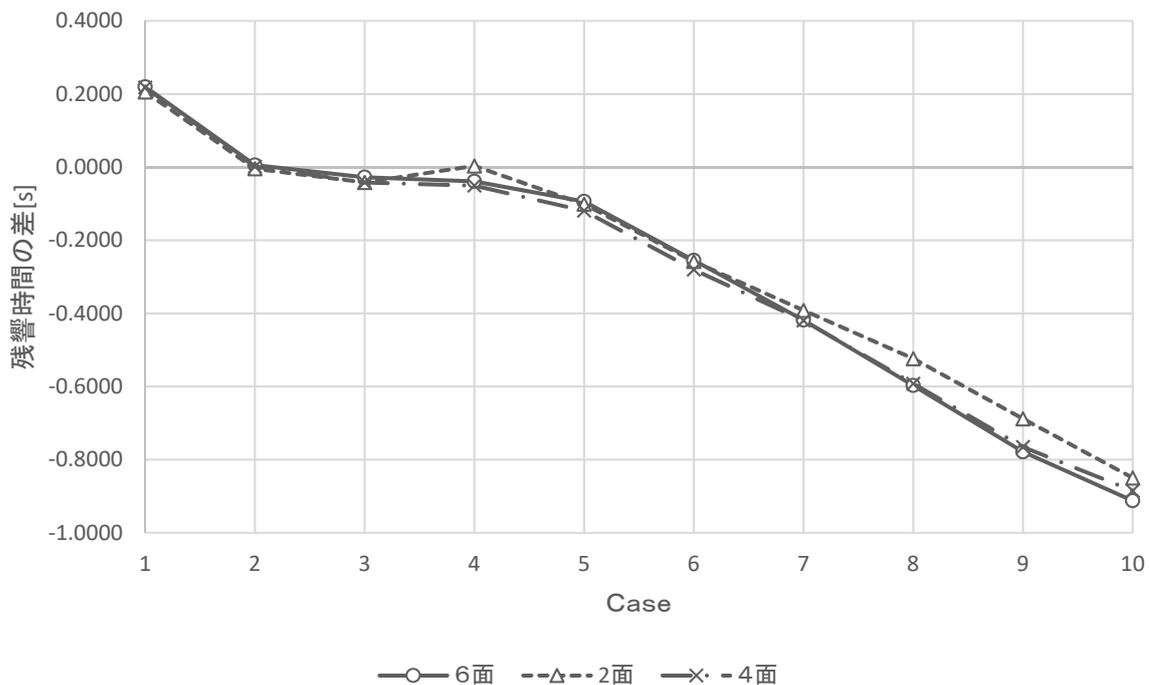


図 7.6 立方体：吸音面別：全周波数の平均

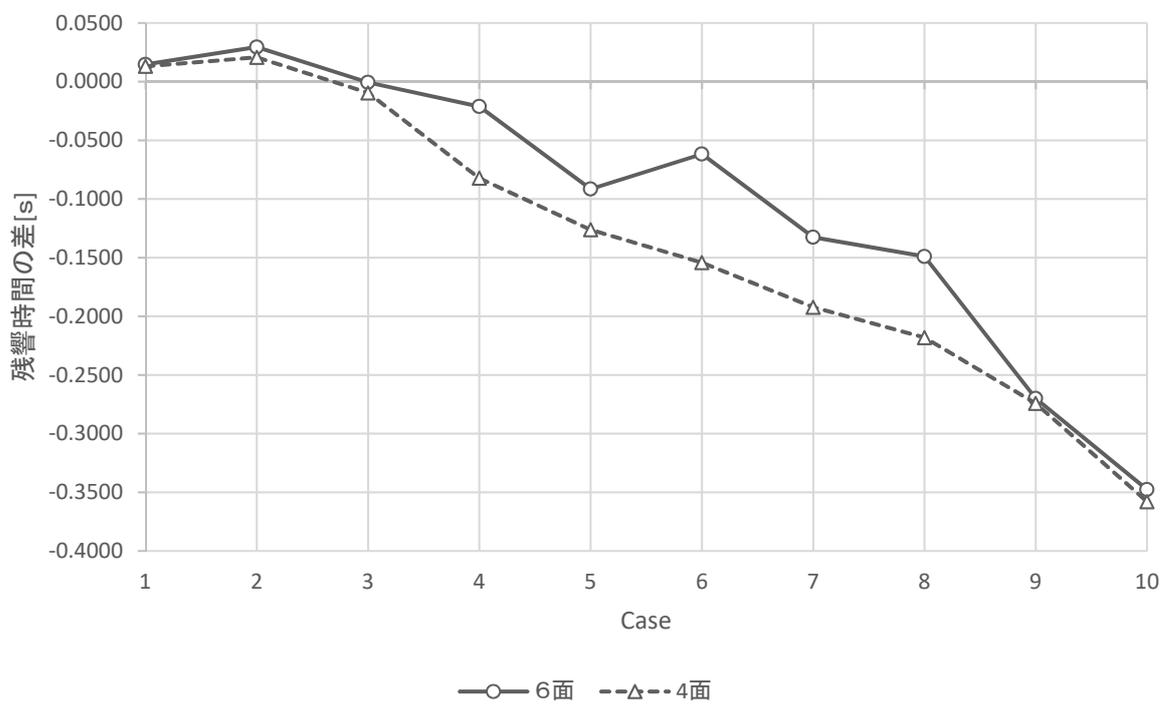


図 7.7 立方体：吸音面別：周波数 62.5[Hz]

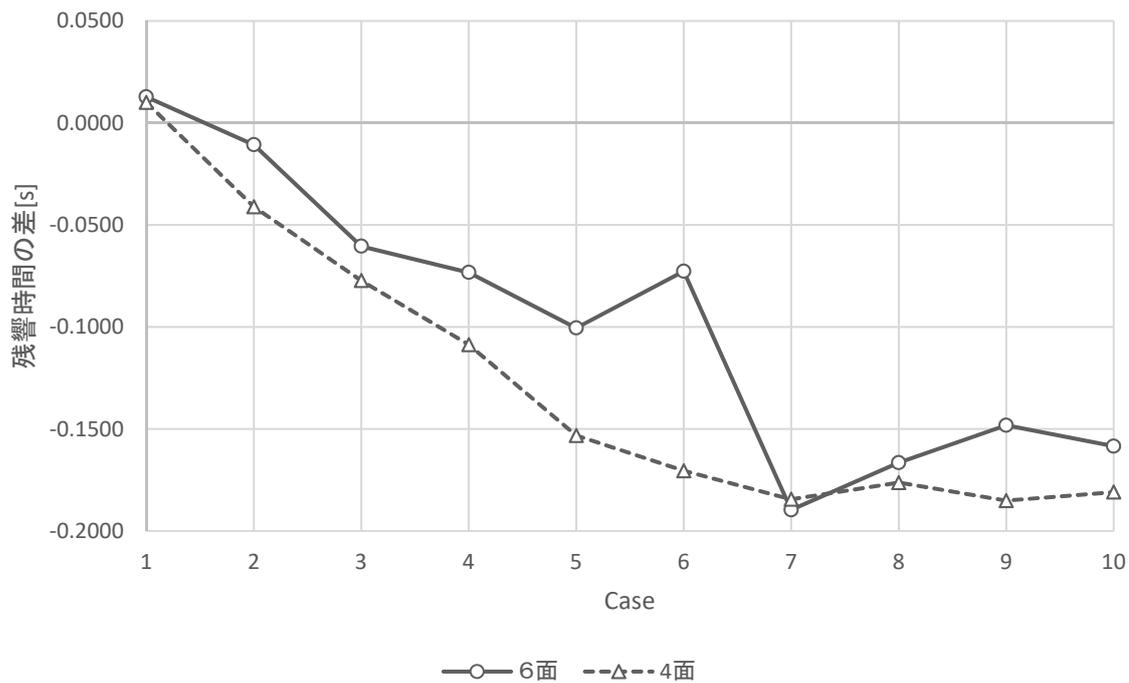


図 7.8 立方体：吸音面別：周波数 125[Hz]

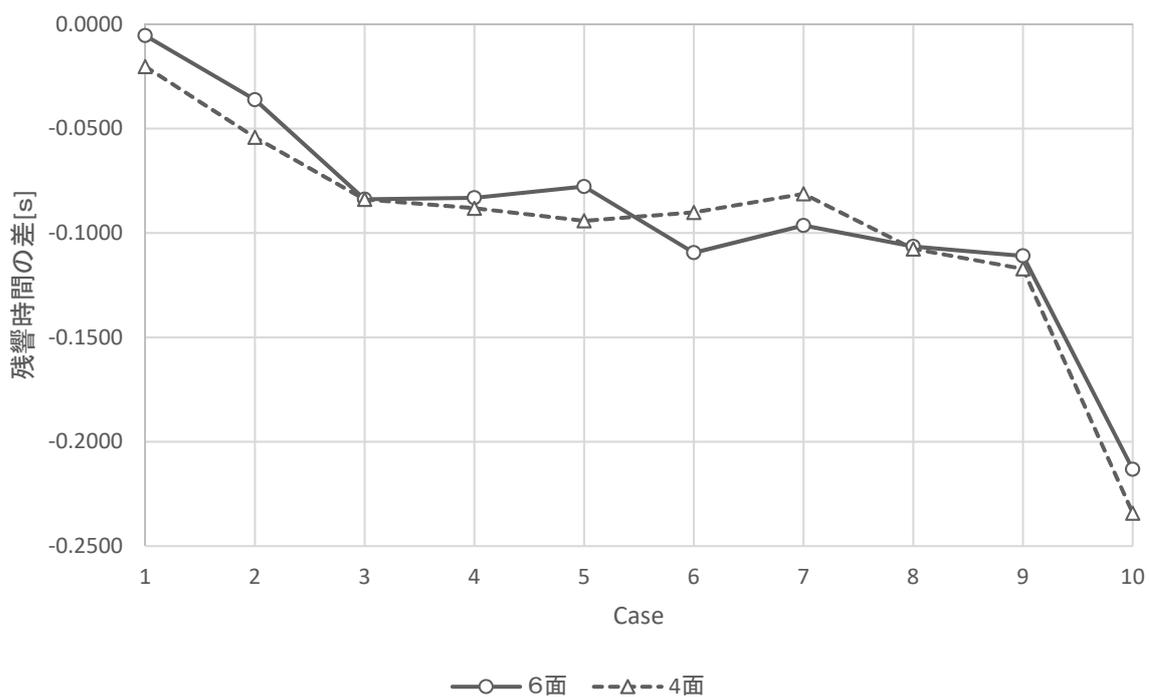


図 7.9 立方体：吸音面別：周波数 250[Hz]

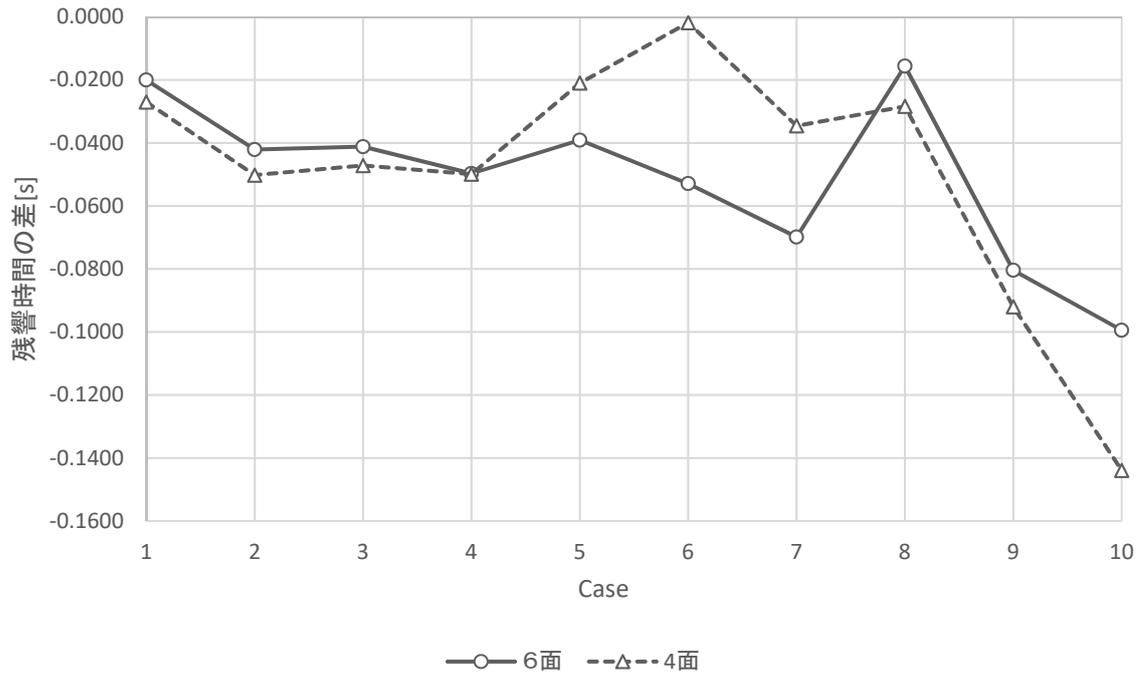


図 7.10 立方体：吸音面別：周波数 500[Hz]

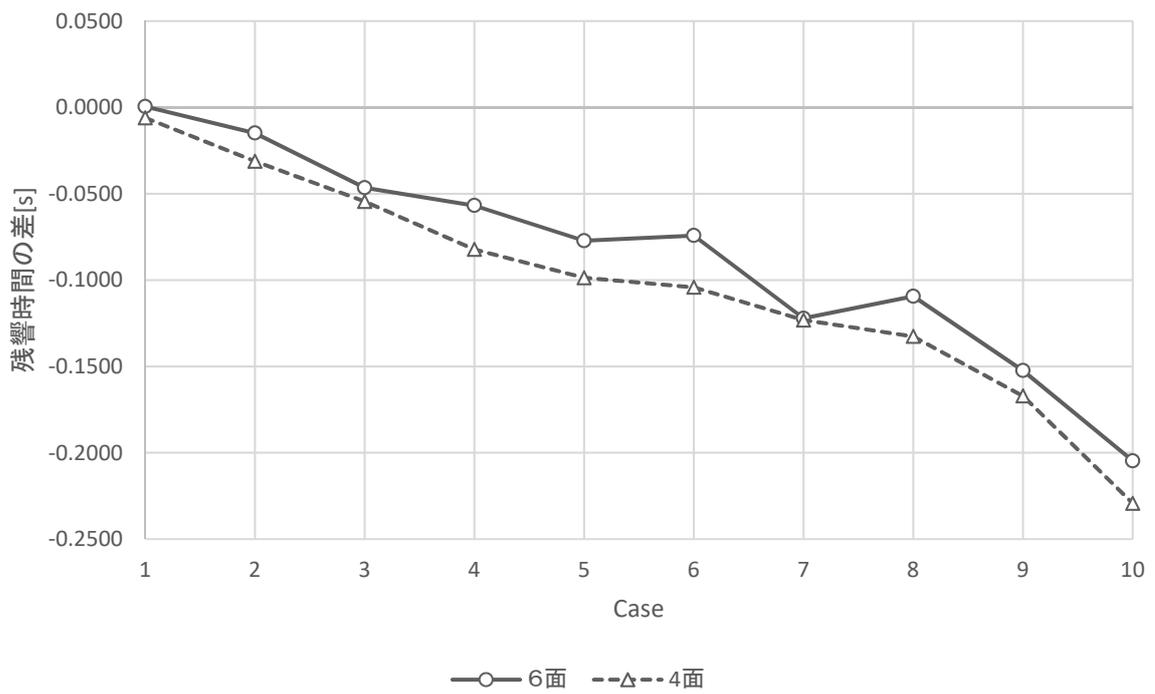


図 7.11 立方体：吸音面別：全周波数の平均

第8章 まとめ

本研究では、第3章、第4章、第5章、第6章、第7章にわたってさまざまな形状における残響時間に着目して FDTD 法による残響時間と Sabine の残響時間を比較し、完全拡散性の評価を行った。そこで、以下のような傾向が見られた。

1. 室容積が大きくなると拡散性が悪くなる。これは、第3章 室の大きさの変化、第4章 吸音率の変化、第5章 正多角柱、第6章 正多面体、第7章 吸音面の偏り のすべてに見られた。通常、室容積が大きくなると拡散性は良くなるとされている[6]。これは、理論式として用いた Sabine の残響式は吸音力の小さな残響時間の長い室では FDTD 法による残響時間に近づくが、吸音力の大きい残響時間の短い室では実際より大きな値となるために差が大きくなったと考えられる。そこで、立方体における吸音率 0.2 の場合の FDTD 法による残響時間から Sabine の残響式とその派生式である Eyring の残響式による残響時間をそれぞれ引いた値を図 8.1 に示す。図 8.1 を見ると、室容積が小さい時は両者の誤差は小さいのに対し、室容積が大きい時は差が大きくなるのがわかる。また、Eyring の残響式による結果だけを見ると、室容積が大きくなるにつれて拡散性が悪くなるという傾向は見られない。なので、Sabine の残響式より Eyring の残響式の方がどの室容積でも精度の高い残響時間が得られると考えられる。したがって、今後は、Eyring の残響式で比較することが望ましいと思われる。

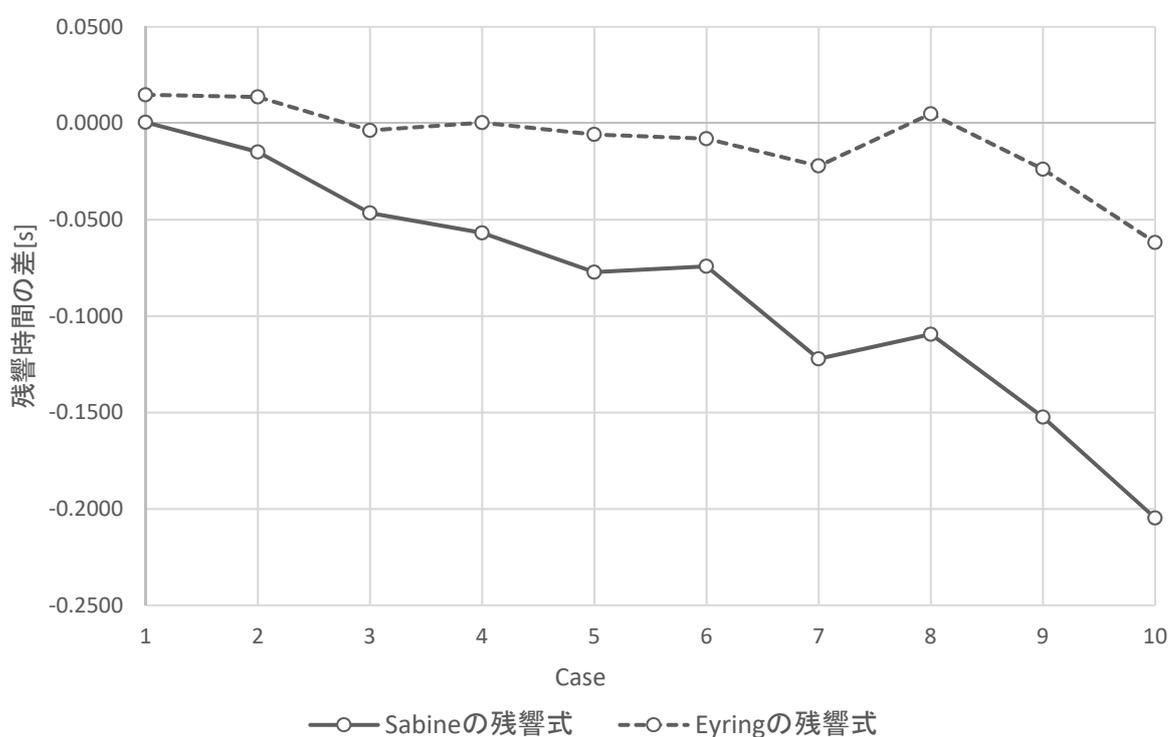


図 8.1 立方体：吸音率 0.2

2.吸音率が低い時はそれぞれの室容積における室形状による完全拡散性の差が大きくなるが、吸音率が高い時はその差は小さい。これは、第5章 正多角柱、第6章 正多面体に見られ、吸音率が低い場合は壁による音の反射が完全拡散性に与える影響が大きく、吸音率が高い場合は、壁の反射による音の拡散に比べて、壁の吸音による音の減衰が完全拡散性に与える影響が大きいためだと考えられる。

3.平行壁面数を変化させた場合には拡散性に違いが生じる。これは、第5章 正多角柱、第6章 正多面体に見られた。これは、平行壁面数を変化させたために、室内のどの点においても、音の進行方向はあらゆる方向に一様である、という程度が変化したためと考えられる。ただし、平行壁面数が少ないときほど完全拡散性が良いとは限らない。以上の点を踏まえて引き続き、精査が必要であると思われる。

今後の課題として、

- ・ Sabine の残響式の派生式である Eyring の残響式を用いて比較。
- ・ より高周波の残響時間についての解析。
- ・ 平行壁面数が 0 となる室形状についての検討。
- ・ 解析対象の辺の比を変えた場合の検討。

が挙げられ、より詳細な検討を行うことが望まれる。