

質点系境界の自動最適化

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 11-35 賢谷 俊樹
指導教官 豊田 政弘 准教授

目次

1 はじめに

- 1.1 研究背景
- 1.2 研究目的

2 研究手法

- 2.1 シャッフル
- 2.2 第1世代生成
- 2.3 交叉
- 2.4 突然変異
- 2.5 デコード
- 2.6 吸音率、透過率
- 2.7 評価方法
- 2.8 評価値の並び替え
- 2.9 子世代を親世代に変換

3 結果、考察

- 3.1 質点系の範囲による解析結果の変化
- 3.2 様々な目的関数を用いた解析結果
- 3.3 異なる評価方法による解析結果

4 おわりに

参考文献

1 はじめに

1.1 研究背景

音響設計には予測が必要である。だが、模型実験はコストがかかるといった問題がある。そこで、数値解析手法のひとつである FDTD 法を用いて音場の予測がされる場合がある。FDTD 法を用いて音の解析をする際、ある境界に到達した音の反射特性を再現するために導入する条件として境界条件が挙げられる。その境界条件のひとつにインピーダンス境界があるが、FDTD 法では吸音材が持つ周波数特性を再現することが難しい、複素数を扱えない等の問題点がある。そこで坂本ら[1]の提案を基にバネ・マス・ダッシュポットの質点系を用いて吸音材が持つ吸音、および透過の周波数特性を再現する方法を石川が報告している[2]。この質点系の7つのパラメータ(設計変数)を調整することで様々な吸音、および透過構造を想定できる。しかしながら、そのパラメータの値は試行錯誤で決めており、手軽にわかりやすく値を見つけることができないのが現状である。

1.2 研究目的

本研究では、バネ・マス・ダッシュポットを用いてモデル化された質点系のパラメータの値を手軽にわかりやすく見つける手法を提案する。

一般に、最適化の手法として逐次2次計画法、遺伝的アルゴリズム、多目的最適化手法、逐次近似最適化手法などがあるが、今回は遺伝的アルゴリズムを採用する。遺伝的アルゴリズム（以下、GA）は、自然界において環境に適合した個体が生き残り進化していく過程を工学的にモデル化したアルゴリズムであり、交叉、突然変異、選択などの操作を行いながら最適な解を求める手法である。

GAの特徴として、以下のことがあげられる。

- ・ 目的関数値のみを用いる直接探索法である。
- ・ 一点探索ではなく、多点探索である。
- ・ 多くの制約条件下での最適化にも対応できる。
- ・ 一般的に多数のパラメータを設定する必要があり、これらの値を試行錯誤しなければならない。
- ・ 決定論的規則（絶対的に個体の生死が決まる操作）ではなく、確率的オペレータ（個体に良い部分があれば生き残る可能性をもたせ、確率的に個体の生死を決める操作）を用いる。

2 研究手法

2.1 概要

遺伝的アルゴリズムを用いた質点系の自動最適化のプログラムの要素は [第一世代生成] [シャッフル] [交叉] [突然変異] [デコーディング] [吸音率・透過率の算出] [評価] [評価値の並び替え] [終了判定] [子世代を次の親世代に変換] の 10 つの要素から構成されている。プログラムのフローチャートを図 2.1 に示す。

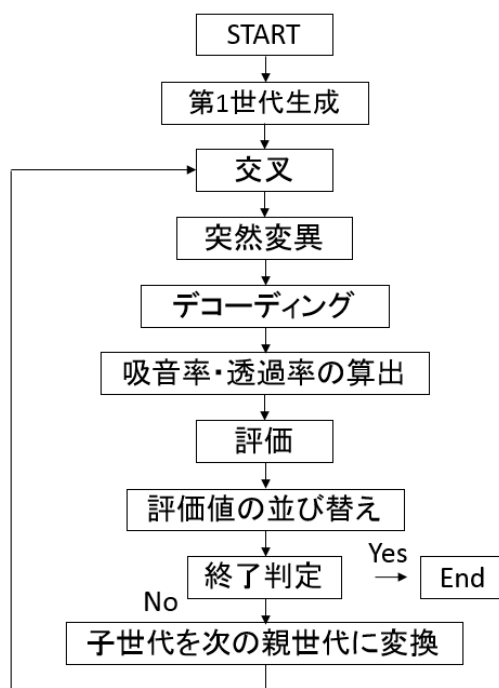


図 2.1

プログラムでは乱数を使用する。乱数の種の設定はデフォルト値、システム時間などあるが本研究ではシステム時間を使用する。システム時間とは乱数を使用したときのパソコンの時刻を種として読み込む方法である。そのため時刻により発生する乱数が増えるようになっている。

2.2 第一世代生成

GA では設定された解空間内における解の探索を行うために解候補となる個体を生成しなければならない。そのため、複数の個体を第一世代(親世代)として生成する。ここで生成された個体を親個体とする。またビットを用いる GA の最小構成要素は 0 または 1 の 1 ビットで表現される遺伝子であり、遺伝子の配列を染色体と呼ぶ。生物においては染色体の情報より個体が生成されるが、GA では 1 つの染色体で 1 つの個体を表現する。図 2.2 に染色体の例を示す。

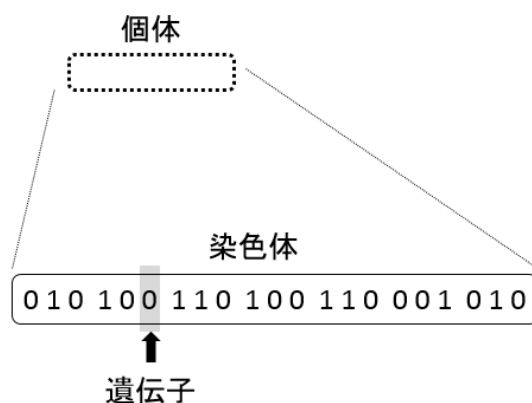


図 2.2 個体と染色体

遺伝子数、個体数は任意の数を設定して良いがここではパラメータが 7 つあるため、1 パラメータあたりの遺伝子を 30 ビット、7 つのパラメータ、すなわち 1 個体あたりの遺伝子を 210 ビットとする。また、親個体数は 30 とし、第一世代を生成した。各ビットの遺伝子の生成は乱数を用いた。すなわち、0~1 の乱数を発生させ 0.5 を基準に 0.5 より大きければ 1 に、0.5 以下であれば 0 に振り分けることで個体を生成した。

図 2.3 に 1 パラメータあたり 3 ビット用いて 1 個体を生成した様子を示す。7 つのパラメータは $m_1, m_2, m_3, c_1, c_2, k_1, k_2$ とする。

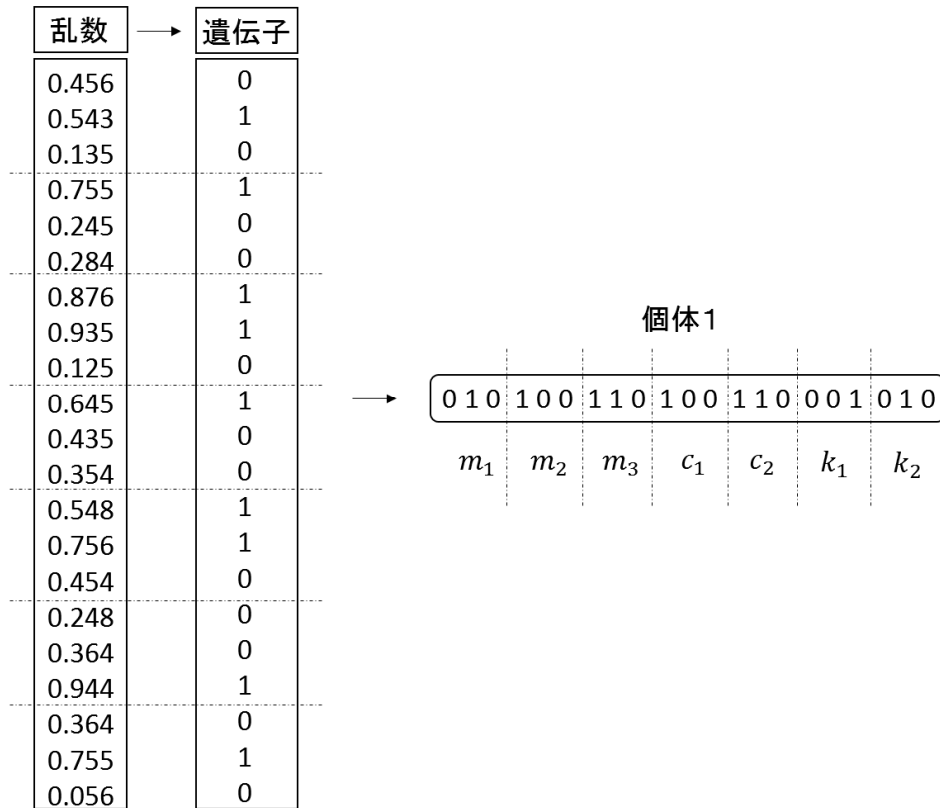


図 2.3 個体の生成

2.3 シャッフル

次に行うのは交叉でランダムな個体のペアを決めるためのランダムな個体の番号を得る操作である。これをここではシャッフルと呼ぶこととし、親世代の個体数の乱数を発生させ、各乱数を番付する。その乱数を昇順に並び替えることで番付されていた番号が不順な配列となり、ランダムな個体の番号列を得る。

図 2.4 に 10 の乱数を発生し、番付、昇順並び替えを行った様子を示す。

番号	乱数		番号	乱数
1	0.234	昇順 並び替え →	10	0.094
2	0.892		3	0.183
3	0.183		1	0.234
4	0.437		9	0.259
5	0.973		6	0.358
6	0.358		4	0.437
7	0.689		8	0.529
8	0.529		7	0.689
9	0.259		2	0.892
10	0.094		5	0.973

図 2.4 シャッフル

2.4 交叉

交叉とは親世代として生成された個体の中から 2 つの個体のペアをランダムに選択し、選択された個体間(親)で遺伝子の入れ換えを行い新たな個体(子)を生成する操作である。ここで生成された個体を子個体とする。交叉方法は一点交叉、二点交叉、多点交叉や一様交叉などがあるが、今回は一様交叉を用いた。一様交叉とはマスクパターンと呼ばれる染色体と同じ大きさの 0 と 1 からなるビット列をランダムに生成し、2 つの親個体(親個体 1, 2)に対しそのマスクパターンのビットが 1 なら親個体 1 の遺伝子を、ビットが 0 なら親個体 2 の遺伝子を子が遺伝子として各ビットに受け継ぐ交叉方法である。

ここでは、1 ペアの親個体に対し 50 の子個体を生成する。また、1 つの子個体を生成するのに、1 つのマスクパターンを用いる。ランダムなマスクパターンを生成するためマスクパターンの各ビットに対し 0~1 の乱数を発生させ、その数が 0.5 より大きければ 1 を、0.5 以下であれば 0 を設定するようにし、マスクパターンを生成した。

図 2.5 に 21 ビットの遺伝子を持つ 2 つの親個体からマスクパターンを用いて 1 つの子個体を生成する様子を示す。

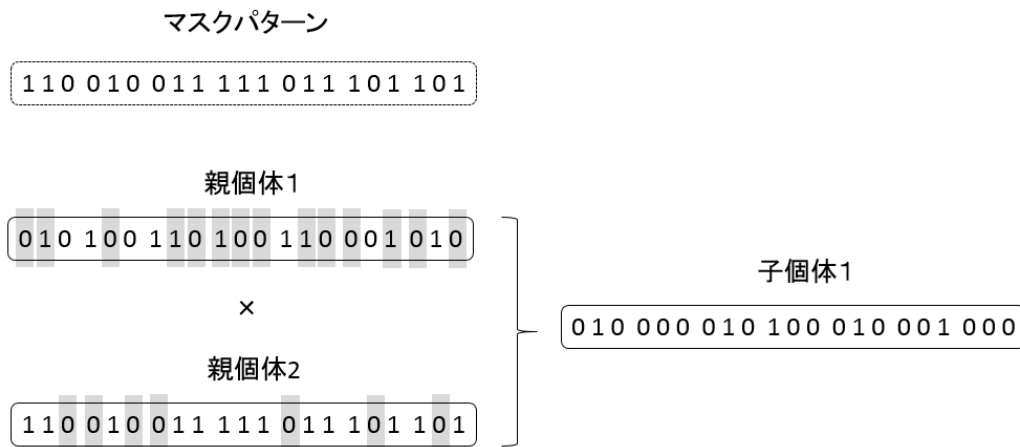


図 2.5 交叉

2.5 突然変異

次に行うのは生起確率を基準に各個体の遺伝子を、0 を 1 に、あるいは 1 を 0 に変更する操作であり、これを突然変異と呼ぶ。個体中の遺伝子を強制的に操作することによって、交叉だけでは生じない遺伝子を持つ個体が生成されることになり、解が局所的になりそうなとき、そこから脱する働きがある。

子個体の各遺伝子に対して、乱数を発生させる。乱数が生起確率より小さければ子個体の遺伝子 0 を 1 に、あるいは 1 を 0 に変更する。本研究では、生起確率を 0.005 とする。図 2.6 に 21 ビットの遺伝子を持つ個体 1 において 6 ビット目と 16 ビット目に突然変異が生じた様子を示す。

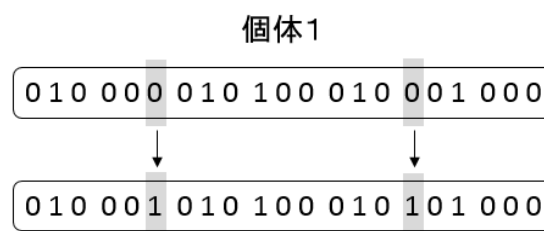


図 2.6 突然変異

2.6 デコーディング

0, 1 の遺伝子の配列で表現されていたものをパラメータに変換する。ここでは7つのパラメータが必要であり、1パラメータにあたる30ビットの遺伝子ごとに変換を行う。また $m_{1,2,3}$, $c_{1,2}$, $k_{1,2}$ にはそれぞれ最大値、最小値により範囲が設定され、その範囲内で遺伝子に従いパラメータの値を決める。これをデコーディングと呼ぶ。1パラメータにおけるビット数を n 、染色体である遺伝子の配列を $a(n)$ とすると、1パラメータの遺伝子の配列をデコーディングした値 t は

$$t = \sum_{m=1}^n a(m) \times 2^{(m-1)} \quad (2-1)$$

となる。パラメータの最大値を Mx 、パラメータの最小値を Mn とするとパラメータのとりうる値の間隔 Δ は

$$\Delta = \frac{(Mx - Mn)}{2^n} \quad (2-2)$$

となり、パラメータ p は

$$p = t \times \Delta + Mn \quad (2-3)$$

となる。

2.7 吸音率・透過率の算出

7つのパラメータ ($m_1, c_1, k_1, m_2, c_2, k_2, m_3$) から吸音率と透過率が求まる。ここでは、周波数 f は 31.25 Hz ~ 8000 Hz での 1/48 オクターブごとの値となっている。そのため、7つのパラメータから計算される吸音率と透過率の総数はそれぞれ 385 となる。図 2.7 に7つのパラメータを持つ質点系に平面波が入射したときのモデルを示す[2]。

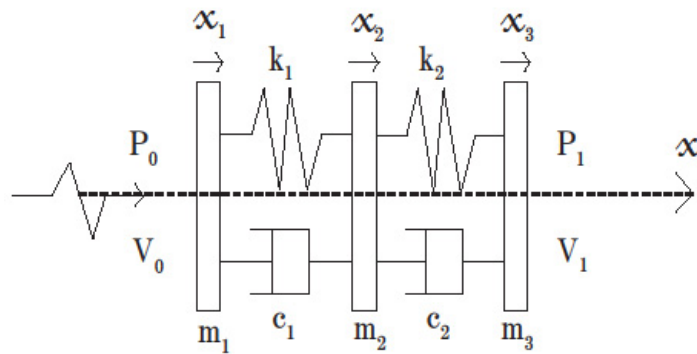


図 2.7 7つのパラメータに平面波が入射したときのモデル

入射側の音圧、粒子速度を P_0 、 V_0 とし、透過側の音圧、粒子速度を P_1 、 V_1 とする。また角周波数を ω 、空気密度を ρ_0 、空気の音速を c_0 、質点 $m_{1,2,3}$ の x 軸方向の変位を $x_{1,2,3}$ 、複素音圧反射係数を P_0^- 、透過係数を P_1^+ 、入射平面波の振幅を 1 とすると入射側の音圧、粒子速度、透過側の音圧、粒子速度は

$$P_0(x) = e^{ikx} + P_0^- e^{-ikx} \quad (2-4)$$

$$V_0(x) = \frac{1}{\rho_0 c_0} (e^{ikx} - P_0^- e^{-ikx}) \quad (2-5)$$

$$P_1(x) = P_1^+ e^{ikx} \quad (2-6)$$

$$V_1(x) = \frac{1}{\rho_0 c_0} P_1^+ e^{ikx} \quad (2-7)$$

と表せる。また吸音率 α 、透過率 τ 、透過損失 TL は

$$\alpha = 1 - |P_0^-|^2 \quad (2-8)$$

$$\tau = |P_1^+|^2 \quad (2-9)$$

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (2-10)$$

となり、境界条件は

$$V_0(0) = \frac{\partial x_1}{\partial t} = -i\omega x_1 \quad (2-11)$$

$$V_1(0) = \frac{\partial x_3}{\partial t} = -i\omega x_3 \quad (2-12)$$

である。図 2.7 における x 軸方向の運動方程式は

$$P_0(0) = m_1 \frac{\partial^2 x_1}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial(x_1 - x_2)}{\partial t} + k_1(x_1 - x_2) \quad (2-13)$$

$$c_1 \frac{\partial(x_1 - x_2)}{\partial t} + k_1(x_1 - x_2) = m_2 \frac{\partial^2 x_2}{\partial t^2} + c_2 \frac{\partial(x_2 - x_3)}{\partial t} + k_2(x_2 - x_3) \quad (2-14)$$

$$c_2 \frac{\partial(x_2 - x_3)}{\partial t} + k_2(x_2 - x_3) = m_3 \frac{\partial^2 x_3}{\partial t^2} + P_1(0) \quad (2-15)$$

となる。ここで A, B, C, D, E, F, G を

$$A = \frac{i\omega c_1 - k_1}{i\omega c_1 - k_1 + m_2 \omega^2 + i\omega c_2 - k_2} \quad (2-16)$$

$$B = m_1 \omega^2 + i\omega c_1 - k_1 \quad (2-17)$$

$$C = i\omega c_1 - k_1 \quad (2-18)$$

$$D = \rho_0 c_0 i\omega \quad (2-19)$$

$$E = i\omega c_2 - k_2 \quad (2-20)$$

$$F = -i\omega c_2 + k_2 - m_3 \omega^2 \quad (2-21)$$

$$G = \frac{i\omega c_1 - k_1}{-i\omega c_2 + k_2} \quad (2-22)$$

とおくと P_0^- 、 P_1^+ は(2-4)、(2-5)、(2-6)、(2-7)、(2-11)、(2-12)、(2-13)、(2-14)、(2-15)式により、

$$P_0^- = \frac{\frac{(1 + \frac{B}{D})(\frac{AE}{D})}{G(1 + \frac{F}{D})} - (\frac{B-AC}{D} + 1)}{\frac{(\frac{B}{D} - 1)(\frac{AE}{D})}{G(1 + \frac{F}{D})} - (\frac{B-AC}{D} - 1)} \quad (2-23)$$

$$P_1^+ = \frac{D \left(\frac{B-AC}{D} + 1 - P_0^- \left(\frac{B-AC}{D} - 1 \right) \right)}{AE} \quad (2-24)$$

となる。従って、(2-16~24)式により、7つのパラメータから吸音率 α 、透過率 τ 、透過損失 TL を求めることができる。

2.8 評価

各個体について目的関数により評価値を計算し、評価を行う。目的関数は2.7節で計算された個体の吸音率、透過率、もしくは透過損失と目標値を用いる。目標値とはそれぞれ周波数での所望の吸音率、透過率もしくは透過損失の値である。目的関数は全385の周波数での残差二乗和と残差が5dB以内かどうかに関する評価値の2つの要素から構成した関数とする。

2.7節において、計算された吸音率、透過率、透過損失の値をそれぞれ配列にして $\alpha(n)$, $\tau(n)$, $TL(n)$ のように表す。これらをここでは解析値と呼ぶ。なお、 n は配列番号とする。同様に総数385の周波数に対応した目標値の吸音率、透過率、透過損失の値をそれぞれ配列にして $X(n)$, $Y(n)$, $Z(n)$ と表すと

全385の周波数での吸音率の目標値と解析値の残差二乗和 A は

$$A = \sum_{n=1}^{385} \{\alpha(n) - X(n)\}^2 \quad (2-25)$$

全385の周波数での透過率の目標値と解析値の残差二乗和 B は

$$B = \sum_{n=1}^{385} \{\tau(n) - Y(n)\}^2 \quad (2-26)$$

全385の周波数での透過損失の目標値と解析値の残差二乗和 C は

$$C = \sum_{n=1}^{385} \{TL(n) - Z(n)\}^2 \quad (2-27)$$

と表せる。また5dB以内か評価するため T_1 , T_2 , T_3 を評価関数とする。全385の周波数で吸音率の解析値が目標値の5dB以内に入っていれば $T_1=0$ 、そうでなければ $T_1=1$ とする。同様に、全385の周波数で透過率の解析値が目標値の5dB以内に入っていれば $T_2=0$ 、そうでなければ $T_2=1$ とし、全385の周波数で透過損失の解析値が目標値の5dB以内に入っていれば $T_3=0$ 、そうでなければ $T_3=1$ とする。(2-25~27)式と評価関数を用いて吸音率・透過率での目的関数を

$$e_v = -A - B - T_1 \times 10000000 - T_2 \times 10000000 \quad (2-28)$$

吸音率・透過損失での目的関数を

$$e_v = -100 \times A - C - T_1 \times 10000000 - T_3 \times 10000000 \quad (2-29)$$

とする。ここで e_v は評価値である残差二乗和の評価より 5dB 評価を重要としているので(2-28~29)式では 5dB 評価の評価関数に極端な重み付けをした。また、吸音率・透過損失での評価では目標値、解析値の透過率が 0 の場合は透過損失の値を 10000 とした。

2.9 評価値の並び替え

2.8 節で評価された個体を評価値により並び替える。ここでは、交叉により子個体が 750 生成されるため、750 の子個体を評価値の高い順に並び替えた。

2.10 子世代を次の親世代に変換

GA では第一世代から次の世代を生成し個体の評価値を良くしていくため、評価された子個体を次の世代の親個体として選択しなければならない。選択方法はトーナメント選択、ランク方式、エリート保存戦略などあるが、ここではエリート保存戦略で行った。エリート保存戦略は評価値が上位の個体を無条件に次世代に残す方法である。また親世代は 30 個体となっているため、評価により並び替えられた子個体 750 の上位 30 を選択し、次の世代の親個体とした。

2.11 終了判定

終了判定では、探索の状態に応じて適切に GA を終了させる必要がある。終了条件には様々なものが考えられるが、一般的な終了条件として以下のものがあげられる。

- ・親世代の個体の最高評価値あるいは平均評価値がある値を超えた場合
- ・最高評価値がある世代経っても更新されない場合
- ・世代交代の数があらかじめ設定された回数を超えた場合

ここでは終了条件として世代交代の数をういて世代交代の回数が 100 回になった場合にプログラムを終了する。

3 結果・考察

3.1 パラメータの範囲による評価値の変化

パラメータの範囲を変えることにより、評価値にどのような影響が現れるのかについて検証する。そのため、異なる 20 パターンのパラメータ範囲を用いて解析を行う。なお、評価は(2-28)式の目的関数で行い、目標値は 31.25 Hz ~ 8000 Hz の 1/48 オクターブごとの周波数に関するベニヤ板 1 cm+グラスウール 8 cm+ベニヤ板 1 cm の吸音率、透過率の値とした。

表 3.1、表 3.2、表 3.3、表 3.4 にその結果を示す。ここでは、

e_v : 100 世代目の最も高い個体の評価値

m_{max} : $m_{1,2,3}$ の最大値

m_{min} : $m_{1,2,3}$ の最小値

c_{max} : $c_{1,2}$ の最大値

c_{min} : $c_{1,2}$ の最小値

k_{max} : $k_{1,2}$ の最大値

k_{min} : $k_{1,2}$ の最小値

$m_1, m_2, m_3, c_1, c_2, k_1, k_2$: 100 世代目の最も評価値の高い個体のパラメータの値とする。

表 3.1 質点系の範囲による評価値の変化

	PATTERN1	PATTERN2	PATTERN3	PATTERN4	PATTERN5
e_v	-20000006.174	-20000003.822	-20000010.150	-20000009.937	-20000010.072
m_{max}	100000000	10000000	100000000	100000000	100000000
m_{min}	0.0001	0.000001	0.000001	0.000001	0.0001
c_{max}	100000000	100000000	1000000000	10000000000	10000000000
c_{min}	0.000001	0.000001	0.0000001	0.00000001	0.000001
k_{max}	100000000000	100000000	10000000000	1000000000000	1000000000000
k_{min}	0.0000001	0.000001	0.00000001	0.0000000001	0.00000001
m_1	44.70	23.841	6121.86	50068.55	63716.43
m_2	99986317.66	190.73	37500850.94	47957921.46	13671019.58
m_3	33584585.04	9999829.28	95572151.89	37613436.95	1562500.00
c_1	2479.46	1112.27	1548.78	18.62	0.00000099
c_2	99390338.92	24414.06	999930651.85	206259721.89	9999999972.06
k_1	19531250.00	910644.03	2448312230.40	21815152838.8	26122569106.51
k_2	3274636426.94	12500000.00	9896354693.91	8649981034770.6	233761.00

表 3.2 質点系の範囲による評価値の変化

	PATTERN6	PATTERN7	PATTERN8	PATTERN9	PATTERN10
e_v	-20000009.941	-20000009.937	-20000009.94	-20000009.983	-20000009.942
m_{max}	100000000	100000000	100000000000	1000000000	1000000000
m_{min}	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.000000001
c_{max}	10000000000	100000000000	100000000	1000000000	1000000000
c_{min}	0.000001	0.00001	0.00001	0.00001	0.000000001
k_{max}	1000000000000	10000000000	10000000000	10000000000	10000000000
k_{min}	0.00001	0.000001	0.00001	0.000001	0.000000001
m_1	4100.24	6222.72	2793.96	8856.87	13336.53
m_2	20310621.33	26122765.52	94032706692.0	9698483031.24	8767351815.47
m_3	1247436.07	92907465.90	878050227649.51	1214130502.19	1095744352.78
c_1	1024.45	931.32	1048.94	1192.09	959.26
c_2	1875139744.95	65949101001.02	86287458.42	135731128.97	7701564002.78
k_1	1840486191.21	2714659101.41	1254254225.64	3753203358.50	5987349096.68
k_2	62183755449.95	9240295076.74	2675738390.53	6398039264.6	5602187030.01

表 3.3 質点系の範囲による評価値の変化

	PATTERN11	PATTERN12	PATTERN13	PATTERN14	PATTERN15
e_v	-20000002.723	-10000001.630	-0.403	-20000005.133	-20000005.348
m_{max}	1000	1000	1000	1000	1000
m_{min}	0.000000001	0.000001	0.0001	0.0001	0.0001
c_{max}	1000000	1000000	100000000	1000	1000000
c_{min}	0.000000001	0.000001	0.000001	0.0001	0.000001
k_{max}	100000000	100000000	100000000000	1000	1000
k_{min}	0.000000001	0.000001	0.0001	0.0001	0.0001
m_1	13.12	10.22	1.89	0.97	5.92
m_2	312.50	78.50	3.52	0.30	0.088
m_3	9999.99	9999.99	5.73	0.000101	250.00
c_1	1190.18	976.56	5000000.00	135.00	6254.58
c_2	31250.00	8806.76	154.87	15.62	39845.54
k_1	5468750.00	3906250.00	97657740.11	195.53	0.5161
k_2	25000000.00	46875500.00	1245737.07	999.99	9.931

表 3.4 質点系の範囲による評価値の変化

	PATTERN16	PATTERN17	PATTERN18	PATTERN19	PATTERN20
e_v	-20000005.346	-10000001.829	-10000002.096	-10000002.240	-20000009.942
m_{max}	1000	1000	1000	1000	1000000
m_{min}	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
c_{max}	100000	100000	100000	100000	100000000
c_{min}	0.000001	0.000001	0.000001	0.0001	0.000001
k_{max}	100000	10000000	10000000	10000000	100000000000
k_{min}	0.000001	0.00000001	0.0001	0.0001	0.0000001
m_1	6.1069	7.8125	12.988	11.71	7922.587
m_2	500.001	93.75	91.79	125.00	859375.20
m_3	0.000942	999.99	999.999	999.99	324226.82
c_1	5716.094	634.76	988.99	1562.50	593.06
c_2	99960.19	7812.49	12512.96	7202.19	4687505.96
k_1	99999.96	3125000.00	5000000.14	4374999.99	3523522261.53
k_2	84872.89	5000000.00	4976805.95	6140139.94	9999916730.44

表 3.1、表 3.2、表 3.3、表 3.4 の e_p の値より、パラメータの範囲が大きく評価値に影響することが考えられる。またパラメータ範囲は広いほど良いということではなく適切なパラメータ範囲の組み合わせを与えることにより、評価値の高い個体が生成されることが考えられる。なお、3.2 節では最も評価値の高い PATTERN13 のパラメータ範囲で解析を行う。

3.2 吸音率・透過率での評価

様々な構造の吸音率と透過率を目標値として、2.8 節の(2-28)式で最適化を行い、周波数ごとの目標値と解析値の比較を行う。なお、対象とする構造は

- ・ベニヤ板 1 cm
- ・グラスウール 10 cm
- ・グラスウール 9 cm + ベニヤ板 1 cm
- ・ベニヤ板 1 cm + グラスウール 9 cm
- ・グラスウール 4.5 cm + ベニヤ板 1 cm + グラスウール 4.5 cm
- ・ベニヤ板 1 cm + 空気 8 cm + ベニヤ板 1 cm
- ・ベニヤ板 1 cm + グラスウール 8 cm + ベニヤ板 1 cm
- ・アクリルガラス - 微細穿孔板 (以下、MPP) 0.05 cm + 空気 8.95 cm + ベニヤ板 1 cm
- ・アクリルガラス - MPP0.05 cm + グラスウール 8.95 cm + ベニヤ板 1 cm
- ・アクリルガラス - MPP0.05 cm + 空気 9.9 cm + アクリルガラス - MPP0.05 cm
- ・アクリルガラス - MPP0.05 cm + グラスウール 9.9 cm + アクリルガラス - MPP0.05 cm
- ・完全透過 (目標値は吸音率 = 1、透過率 = 1)
- ・完全反射 (目標値は吸音率 = 0、透過率 = 0)
- ・剛壁完全吸音 (目標値は吸音率 = 1、透過率 = 0)

とする。また、透過率は 2.7 節の(2-10)式により透過損失に変換して比較を行う。

・ベニヤ板 1 cm

吸音率の比較を図 3.1 に、透過損失の比較を図 3.2 に、表 3.4 にパラメータの数値を示す。

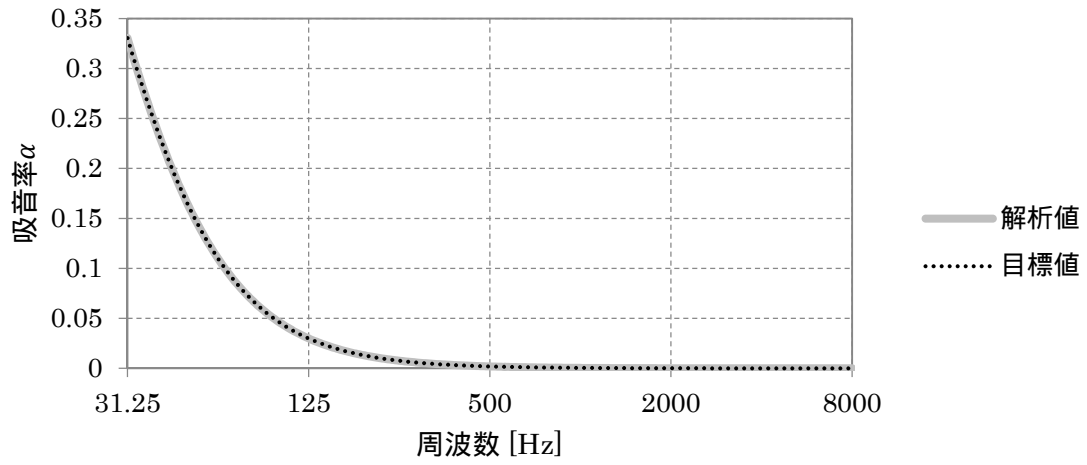


図 3.1 吸音率の比較

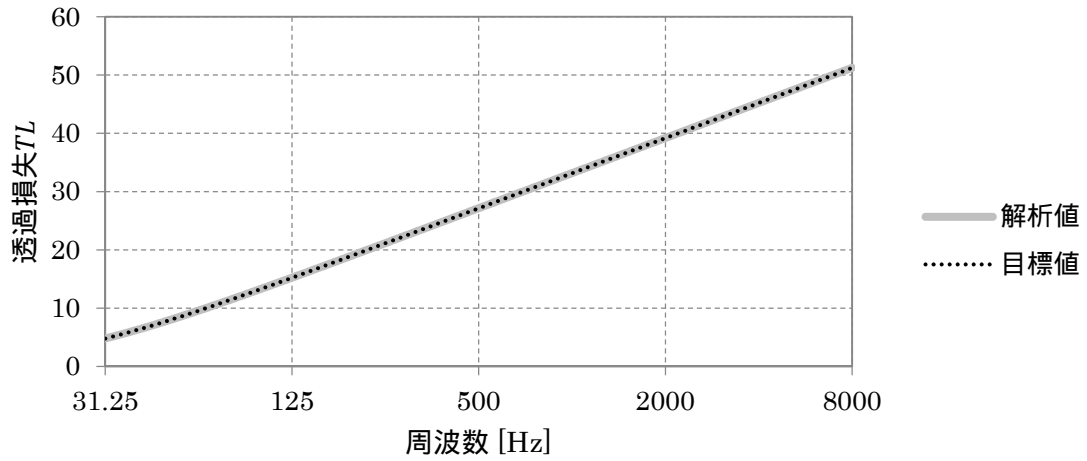


図 3.2 透過損失の比較

表 3.4 パラメータの数値

e_v	-0.0000000000106
m_1	5.3634
m_2	0.5568
m_3	0.0797
c_1	99999966.2861
c_2	49996487.5169
k_1	99999166466.2957
k_2	74996384698.8976

・グラスウール 10 cm

吸音率の比較を図 3.3 に、透過損失の比較を図 3.4 に、表 3.5 にパラメータの数値を示す。

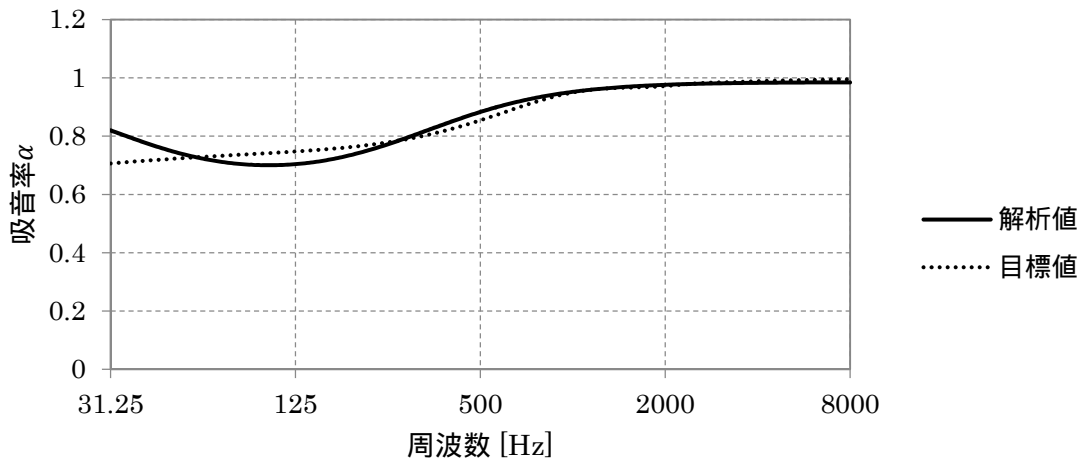


図 3.3 吸音率の比較

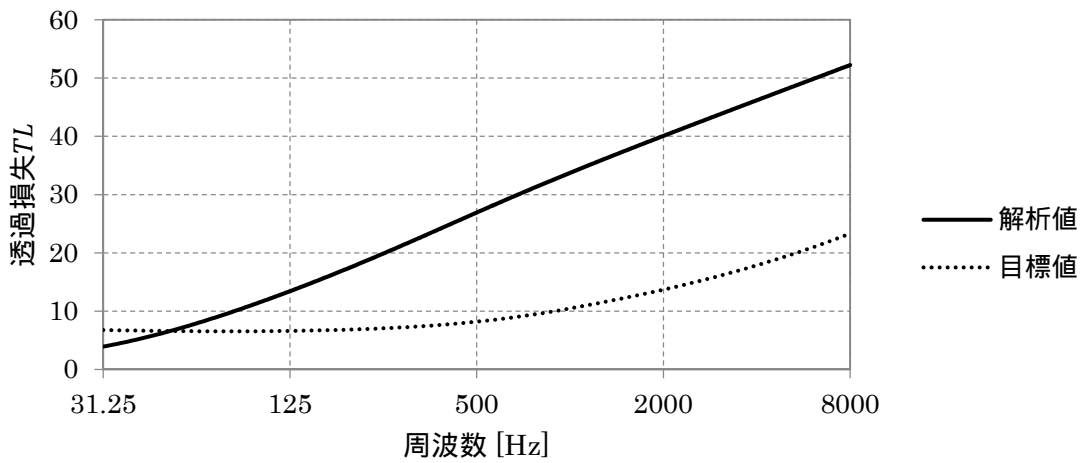


図 3.4 透過損失の比較

表 3.5 パラメータの数値

e_v	-10000006.757
m_1	0.0010
m_2	0.0256
m_3	3.9063
c_1	929.7393
c_2	1573.5626
k_1	333786.0108
k_2	24414062.5

・グラスウール 9 cm + ベニヤ板 1 cm

吸音率の比較を図 3.5 に、透過損失の比較を図 3.6 に、表 3.6 にパラメータの数値を示す。

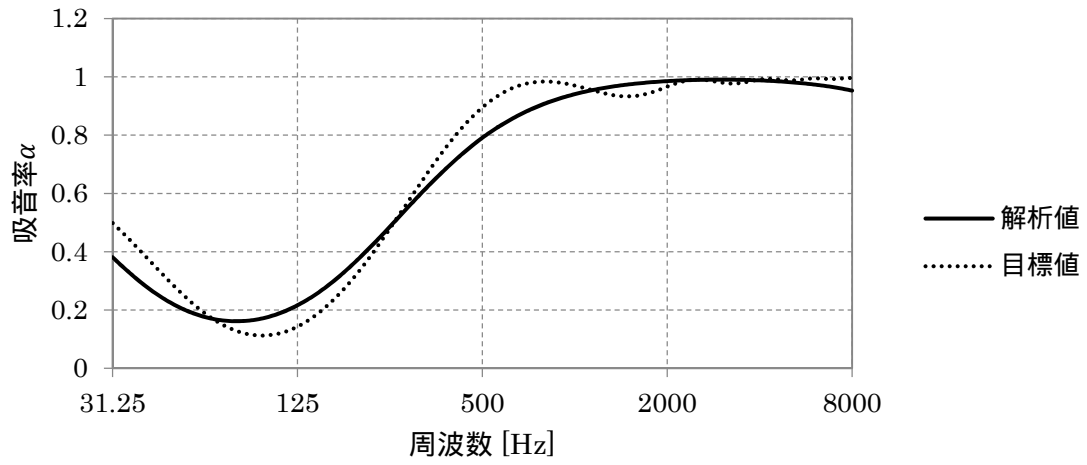


図 3.5 吸音率の比較

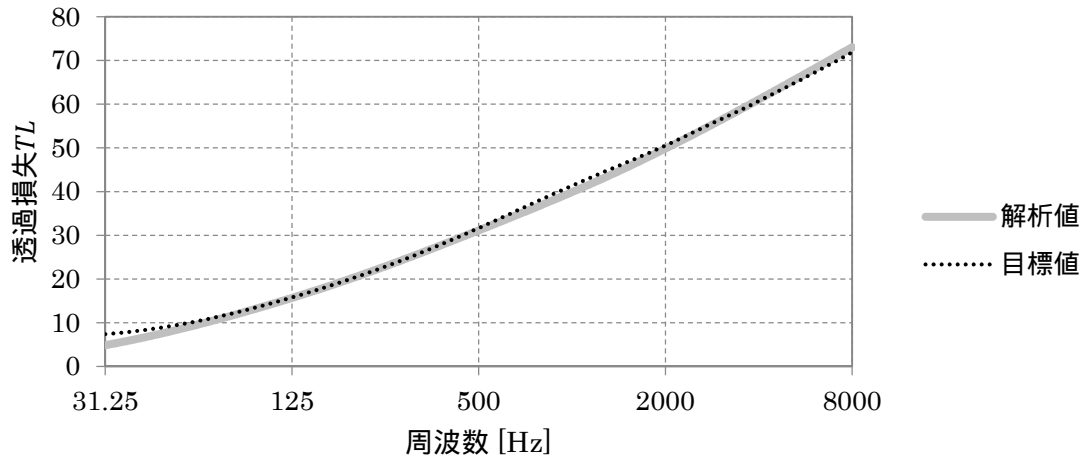


図 3.6 透過損失の比較

表 3.6 パラメータの数値

e_v	-1.558
m_1	0.0042
m_2	4.8829
m_3	0.4483
c_1	504.0317
c_2	3051.75
k_1	78
k_2	1525878.9063

・ベニヤ板 1 cm + グラスウール 9 cm

吸音率の比較を図 3.7 に、透過損失の比較を図 3.8 に、表 3.7 にパラメータの数値を示す。

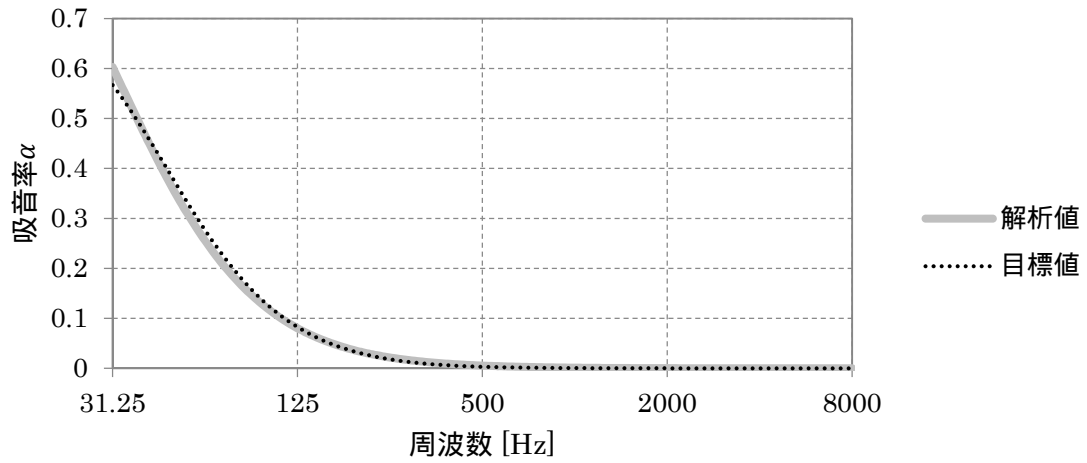


図 3.7 吸音率の比較

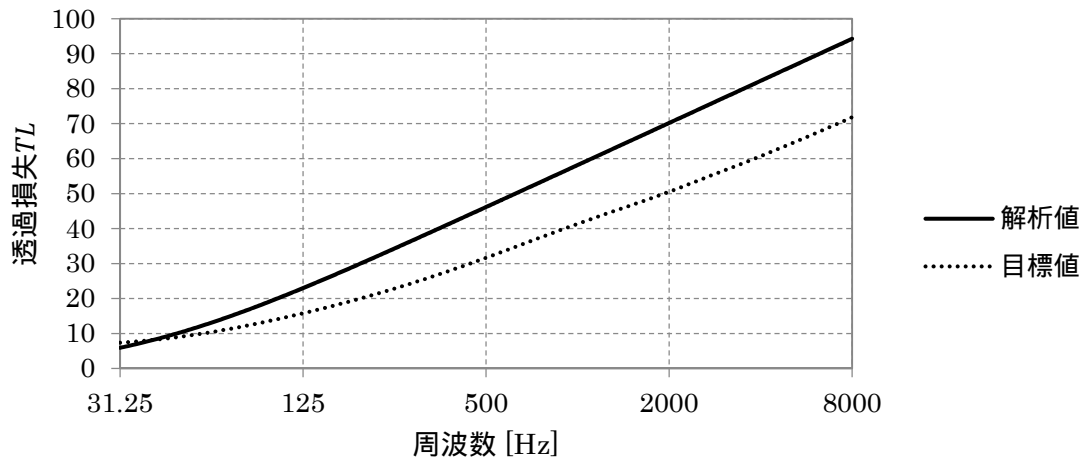


図 3.8 透過損失の比較

表 3.7 パラメータの数値

e_v	-10000000.165
m_1	1.9532
m_2	0.9766
m_3	1.6518
c_1	71308827.4002
c_2	286.0091
k_1	8391256537.288
k_2	47683.7159

・グラスウール 4.5 cm + ベニヤ板 1 cm + グラスウール 4.5 cm

吸音率の比較を図 3.9 に、透過損失の比較を図 3.10 に、表 3.8 にパラメータの数値を示す。

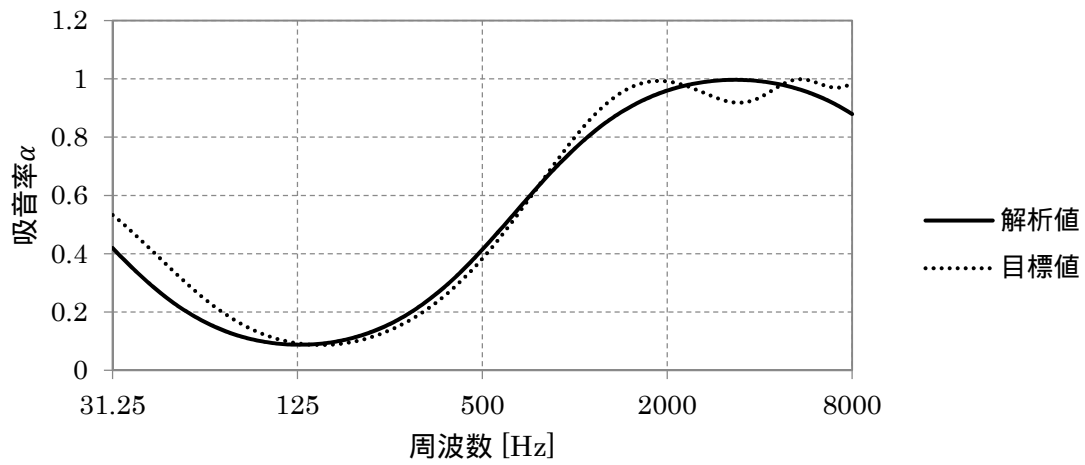


図 3.9 吸音率の比較

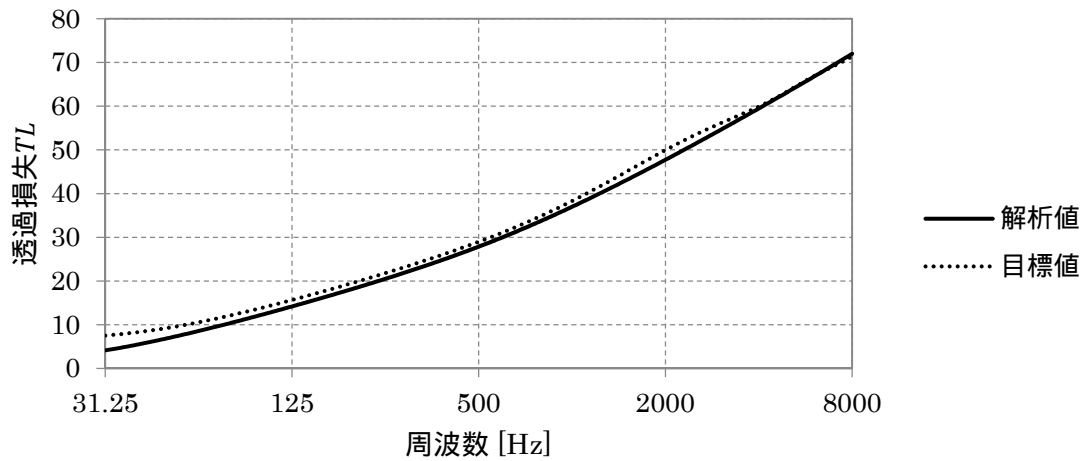


図 3.10 透過損失の比較

表 3.8 パラメータの数値

e_v	-1.986
m_1	0.0077
m_2	4.0284
m_3	0.9766
c_1	464.8230
c_2	6103.5156
k_1	3421213.4779
k_2	0.00009999

・ベニヤ板 1 cm + 空気 8 cm + ベニヤ板 1 cm

吸音率の比較を図 3.11 に、透過損失の比較を図 3.12 に、表 3.9 にパラメータの数値を示す。

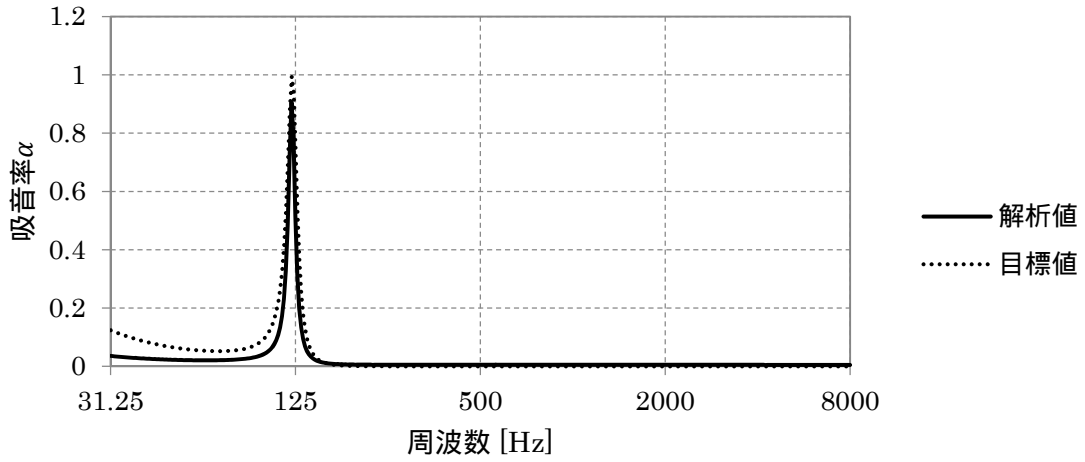


図 3.11 吸音率の比較

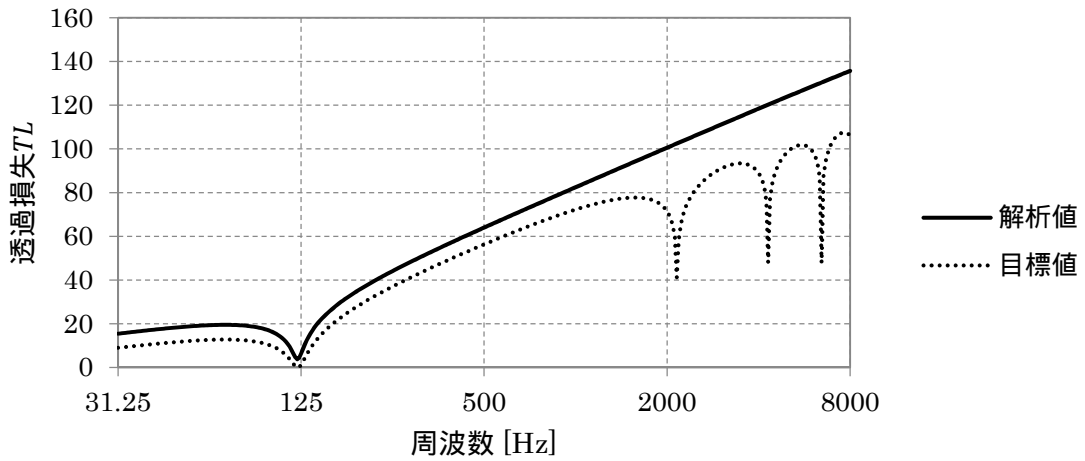


図 3.12 透過損失の比較

表 3.9 パラメータの数値

e_v	-20000003.040
m_1	1.9532
m_2	6.8360
m_3	17.5782
c_1	195312.5000
c_2	47.6837
k_1	3032293.1707
k_2	3436207.7714

・ベニヤ板 1 cm + グラスウール 8 cm + ベニヤ板 1 cm

吸音率の比較を図 3.13 に、透過損失の比較を図 3.14 に、表 3.10 にパラメータの数値を示す。

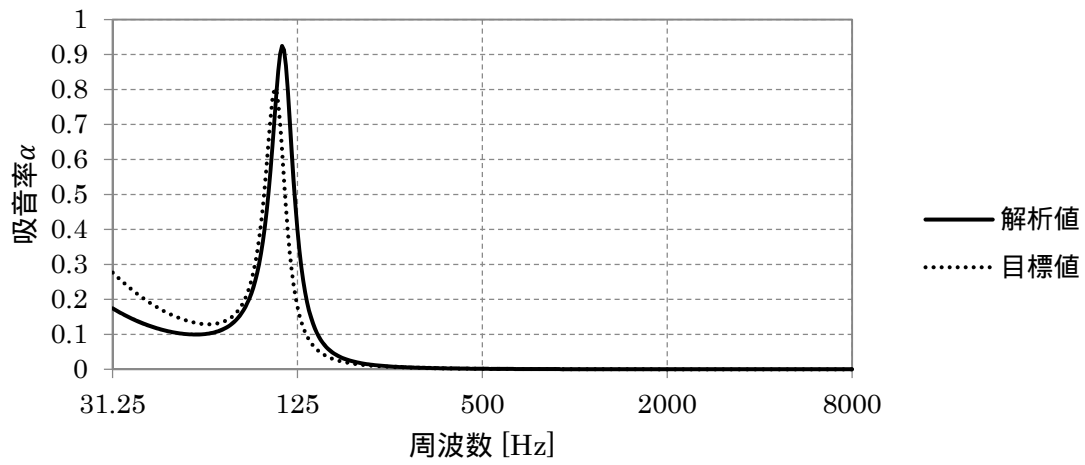


図 3.13 吸音率の比較

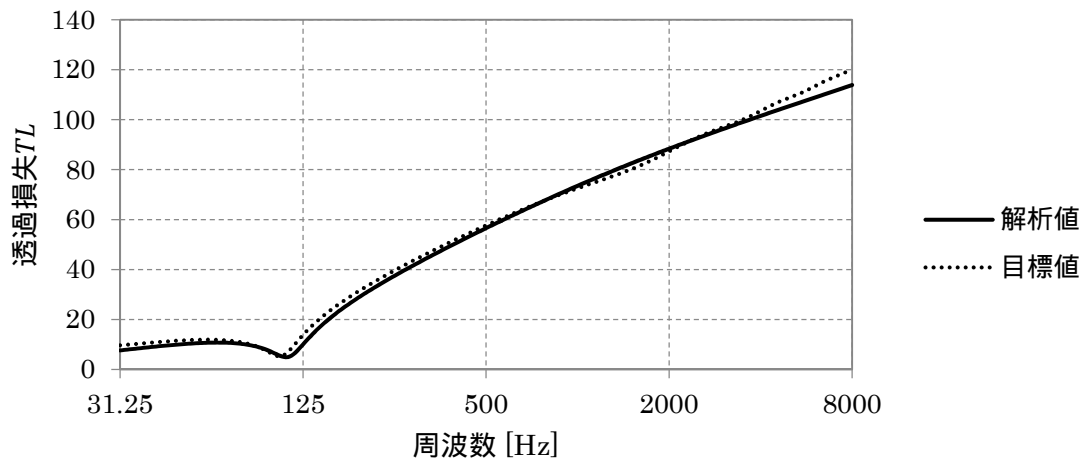


図 3.14 透過損失の比較

表 3.10 パラメータの数値

e_v	-10000000.358
m_1	1.6933
m_2	0.8488
m_3	7.5422
c_1	25000014.2492
c_2	45.2622
k_1	106450.1703
k_2	858213.7526

・ アクリルガラス - MPP0.05 cm + 空気 8.95 cm + ベニヤ板 1 cm

吸音率の比較を図 3.15 に、透過損失の比較を図 3.16 に、表 3.11 にパラメータの数値を示す。

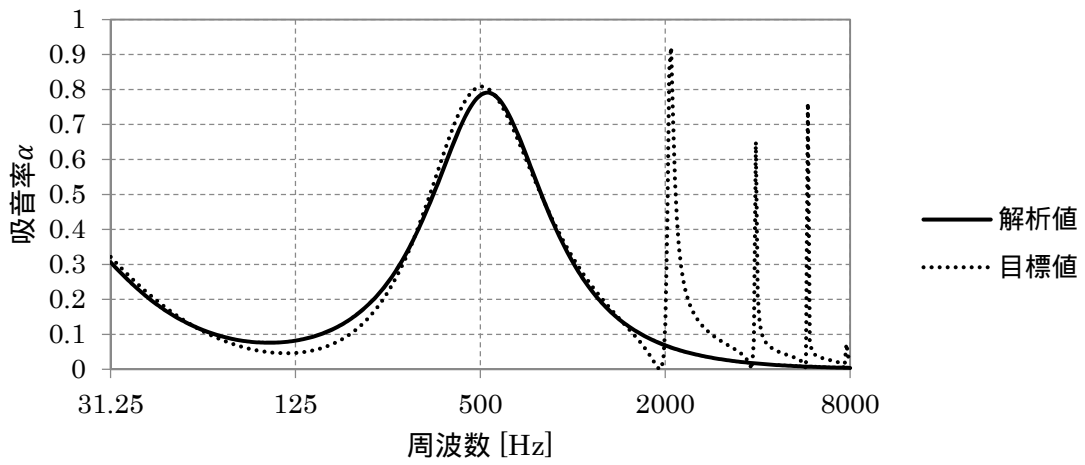


図 3.15 吸音率の比較

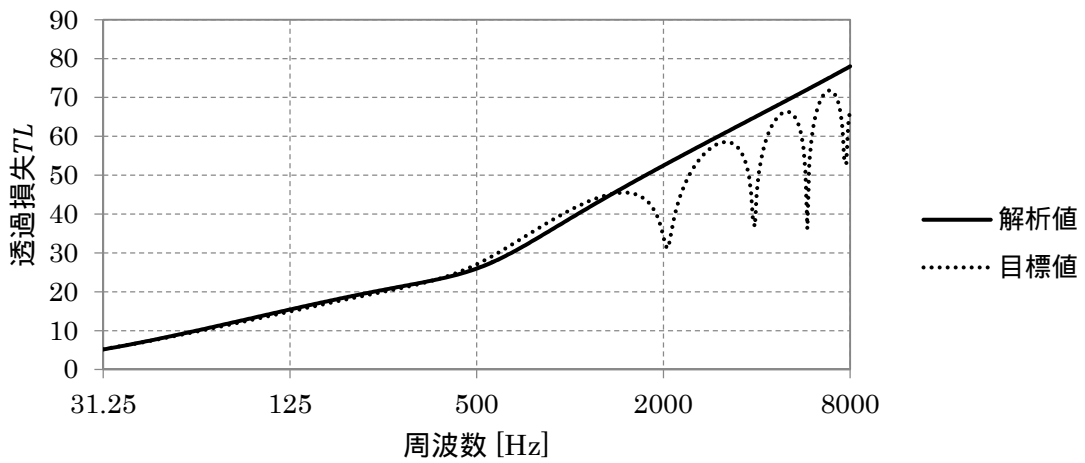


図 3.16 透過損失の比較

表 3.11 パラメータの数値

e_v	-20000004.001
m_1	0.3968
m_2	0.4883
m_3	5.5542
c_1	993.7211
c_2	48853.7363
k_1	4196166.9922
k_2	195337925.1063

・ アクリルガラス - MPP0.05 cm + グラスウール 8.95 cm + ベニヤ板 1 cm

吸音率の比較を図 3.17 に、透過損失の比較を図 3.18 に、表 3.12 にパラメータの数値を示す。

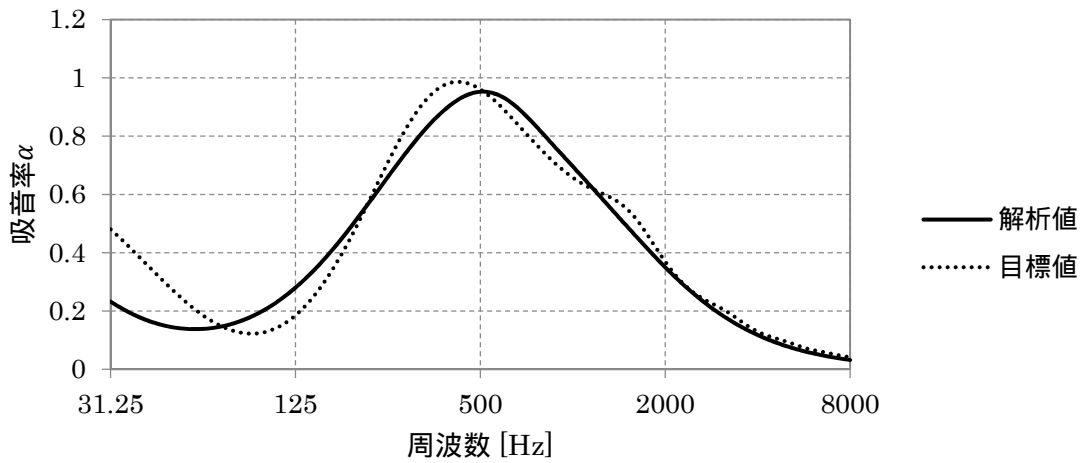


図 3.17 吸音率の比較

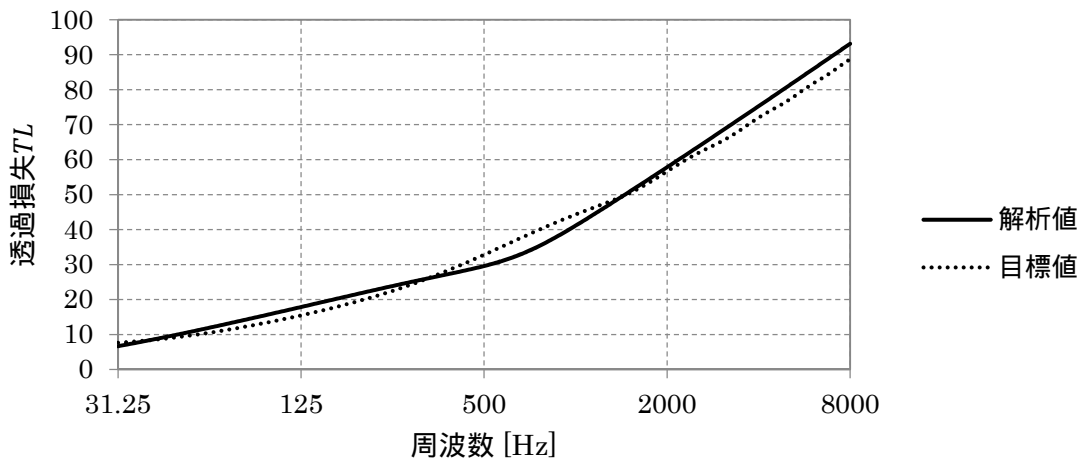


図 3.18 透過損失の比較

表 3.12 パラメータの数値

e_v	-2.347
m_1	0.1226
m_2	0.7123
m_3	7.3243
c_1	762.9394
c_2	2861.0229
k_1	1561455.4287
k_2	12207031.2501

・ アクリルガラス - MPP0.05 cm + 空気 9.9 cm + アクリルガラス - MPP0.05 cm
 吸音率の比較を図 3.19 に、透過損失の比較を図 3.20 に、表 3.13 にパラメータの数値を示す。

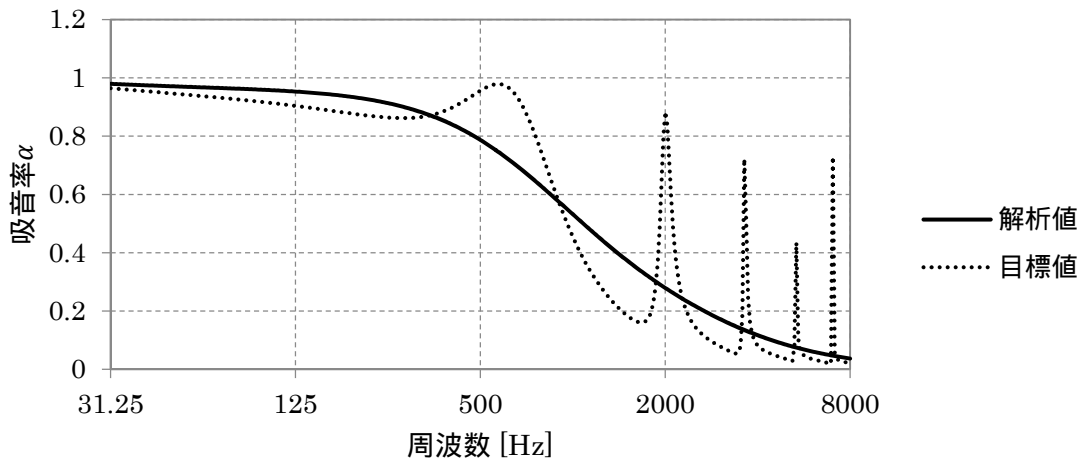


図 3.19 吸音率の比較

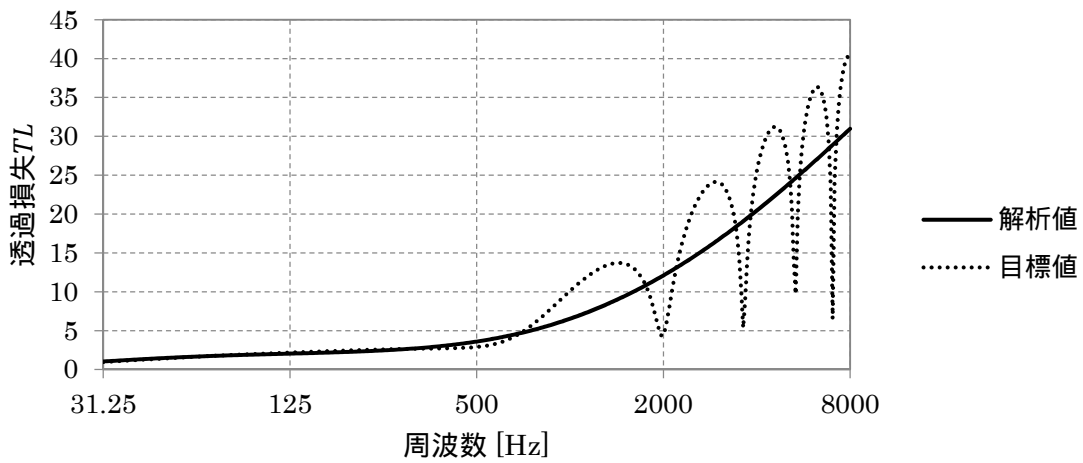


図 3.20 透過損失の比較

表 3.13 パラメータの数値

e_v	-20000007.210
m_1	0.08975
m_2	0.00009999
m_3	0.0611
c_1	762.9394
c_2	1525.8789
k_1	166893.0054
k_2	5340576.1719

・アクリルガラス - MPP0.05 cm + グラスウール 9.9 cm + アクリルガラス - MPP0.05 cm
 吸音率の比較を図 3.21 に、透過損失の比較を図 3.22 に、表 3.14 にパラメータの数値を示す。

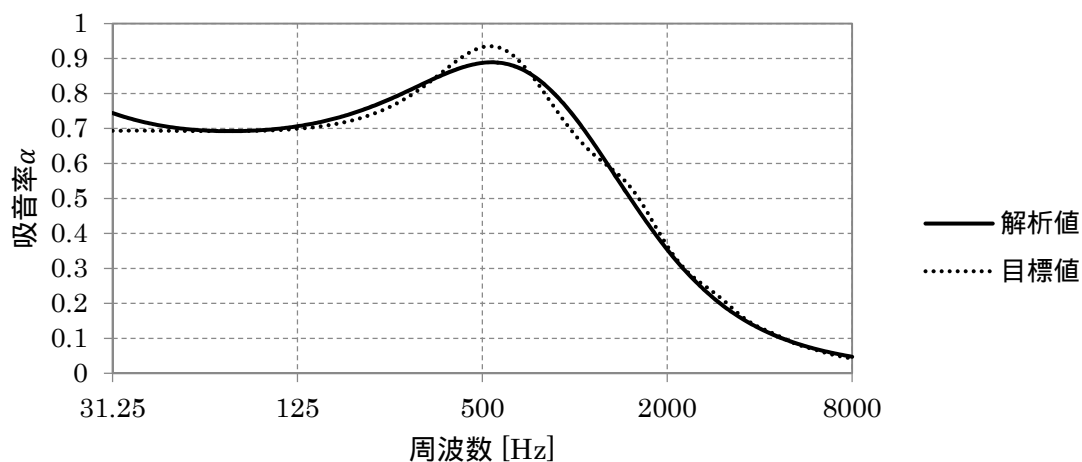


図 3.21 吸音率の比較

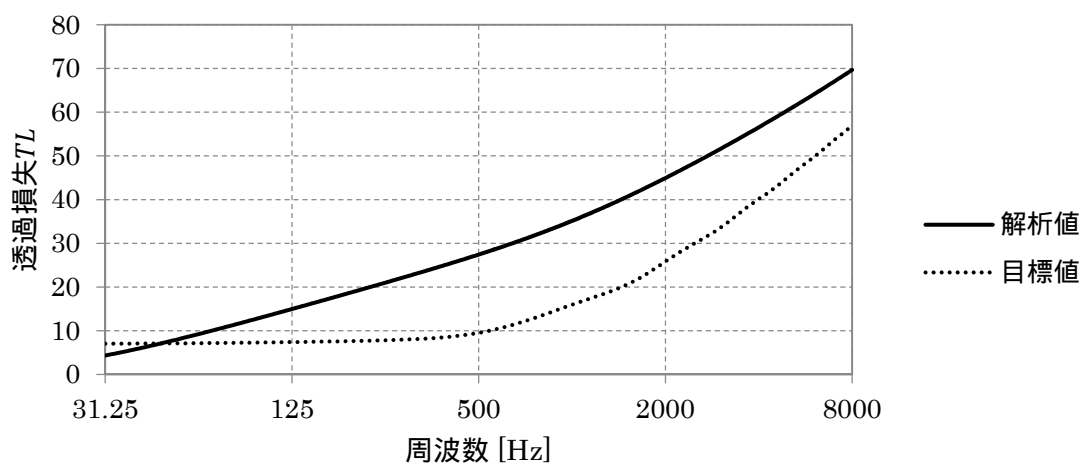


図 3.22 透過損失の比較

表 3.14 パラメータの数値

e_v	-10000003.537
m_1	0.1069
m_2	0.0458
m_3	4.5167
c_1	1525.7857
c_2	1251.8838
k_1	214483.5890
k_2	3802776.3367

・完全透過

吸音率の比較を図 3.23 に、透過損失の比較を図 3.24 に、表 3.15 にパラメータの数値を示す。

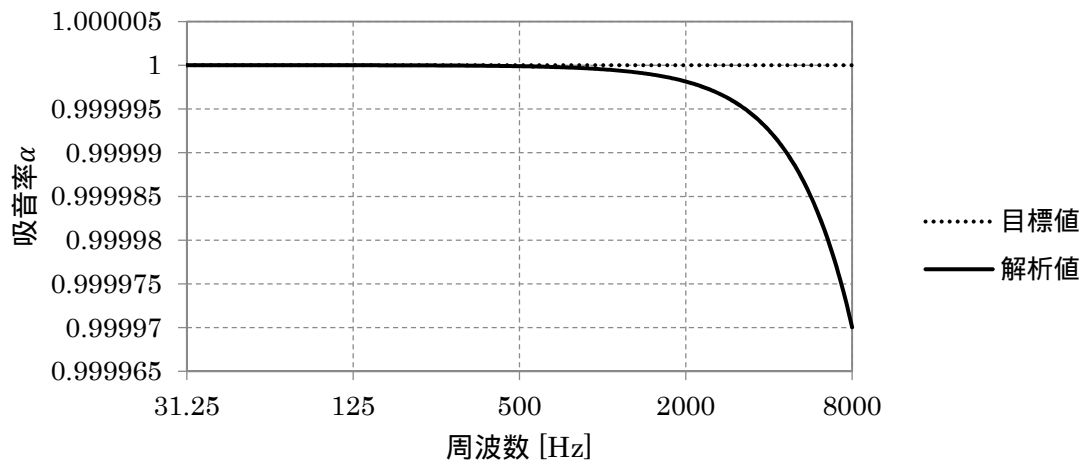


図 3.23 吸音率の比較

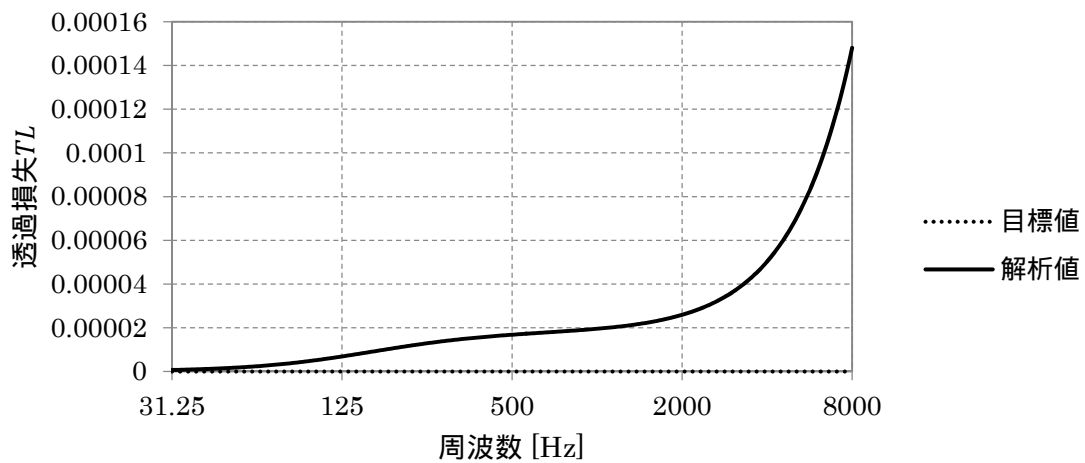


図 3.24 透過損失の比較

表 3.15 パラメータの数値

e_v	-0.00000000406
m_1	0.0002192
m_2	0.0001195
m_3	0.000009999
c_1	0.0000009999
c_2	99999963.305
k_1	390630122.2742
k_2	99999416805.8038

・完全反射

吸音率の比較を図 3.25 に、透過損失の比較を図 3.26 に、表 3.16 にパラメータの数値を示す。ただし図 3.26 の目標値は全周波数で のため省略する。

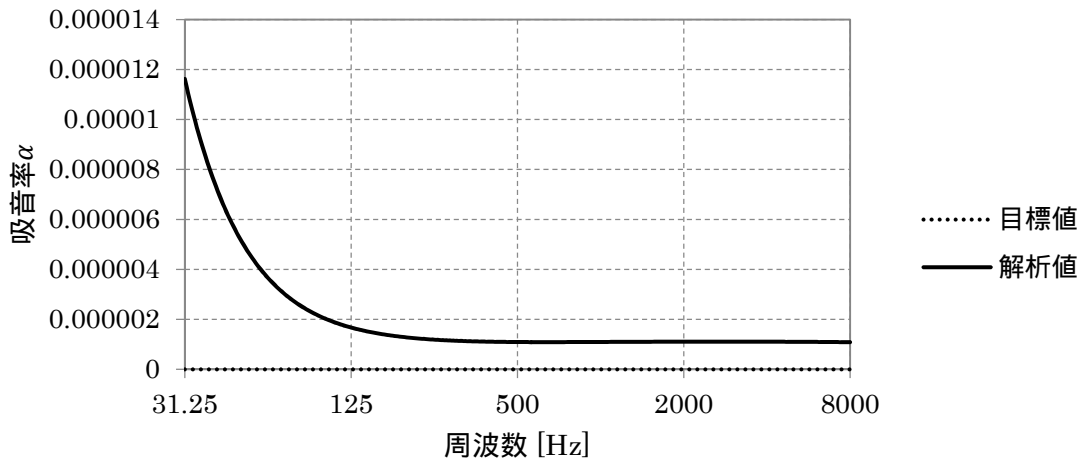


図 3.25 吸音率の比較

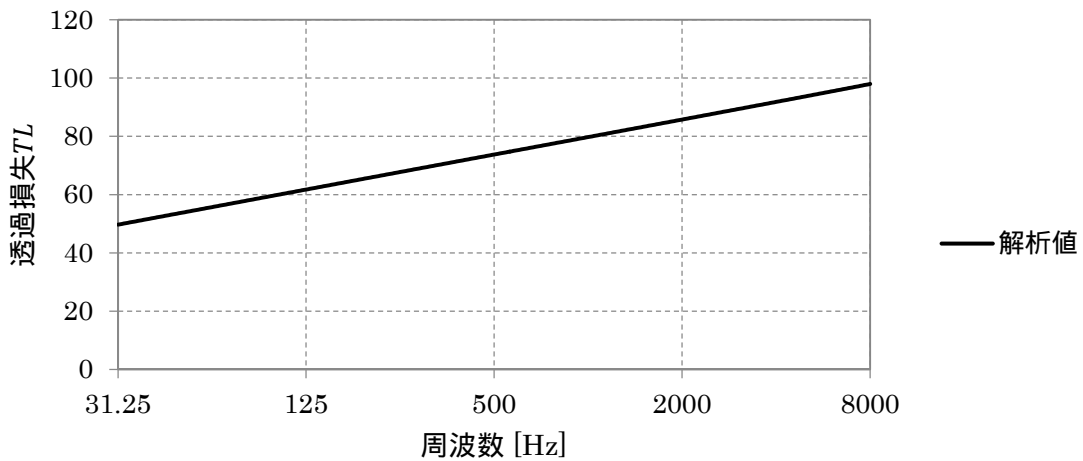


図 3.26 透過損失の比較

表 3.16 パラメータの数値

e_v	-20000000.0000001
m_1	988.9712
m_2	264.3797
m_3	34.8203
c_1	88801122.9224
c_2	11902121.8270
k_1	5805204063.6540
k_2	44924034271.3893

・剛壁完全吸音

吸音率の比較を図 3.27 に、透過損失の比較を図 3.28 に、表 3.17 にパラメータの数値を示す。ただし図 3.28 の目標値は全周波数で のため省略する。

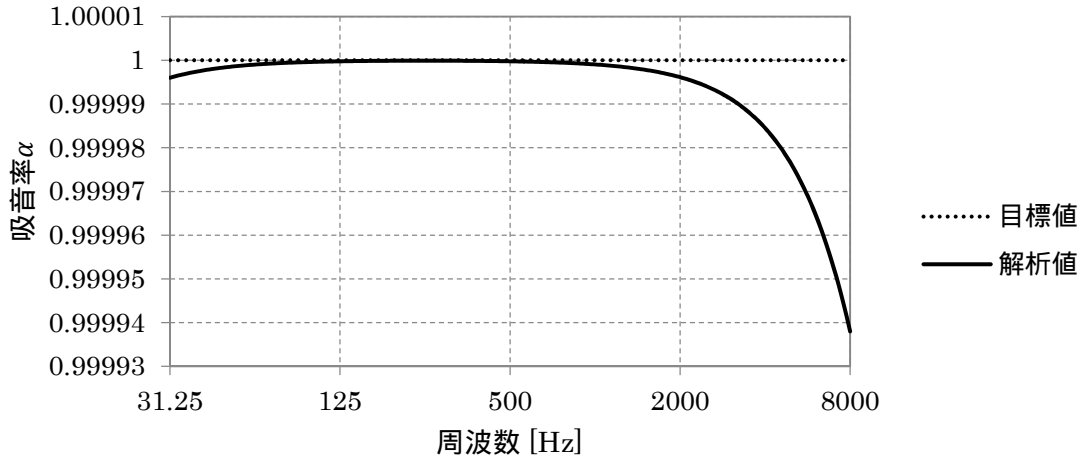


図 3.27 吸音率の比較

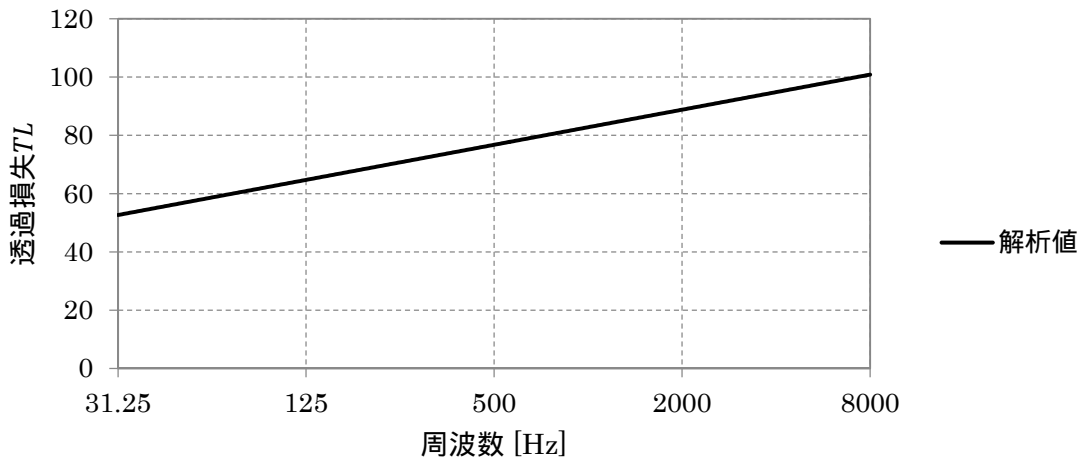


図 3.28 透過損失の比較

表 3.17 パラメータの数値

e_v	-10000000.0000001
m_1	0.00009999
m_2	0.00010093
m_3	906.2530
c_1	903.7554
c_2	762.7531
k_1	2328.3065
k_2	93.1323

吸音率についてはどの構造も解析値が目標値に近い数値となったことがわかる。透過損失についてはグラスウール 10 cm(図 3.4)とベニヤ板 1 cm + グラスウール 9 cm(図 3.8)では周波数が高くなるにつれ残差が大きくなった。アクリルガラス - MPP0.05 cm + グラスウール 9.9 cm + アクリルガラス - MPP0.05 cm (図 3.22) では 31.25 Hz から 500 Hz にかけて残差が大きくなり、500 Hz から 8000 Hz にかけて小さくなった。また、図 3.11 の解析値は目標値のピークに即した値となったが、目標値にピーク、ディップが複数ある図 3.12、図 3.15、図 3.16、図 3.19、図 3.20 の解析値は目標値に即した値にならなかった。これは 2 つの質点系でモデルを構成していることが要因だと考えられ、複数のピーク、ディップがある目標値では質点系の数を増やすことでより良い結果が得られると考えられる。

3.3 吸音率・透過損失での評価

3.2 節と同じ構造の吸音率と透過損失を目標値として、2.8 節の(2-28)式で最適化を行い、周波数ごとの目標値と解析値の比較を行う。

・ベニヤ板 1 cm

吸音率の比較を図 3.29 に、透過損失の比較を図 3.30 に、表 3.18 にパラメータの数値を示す。

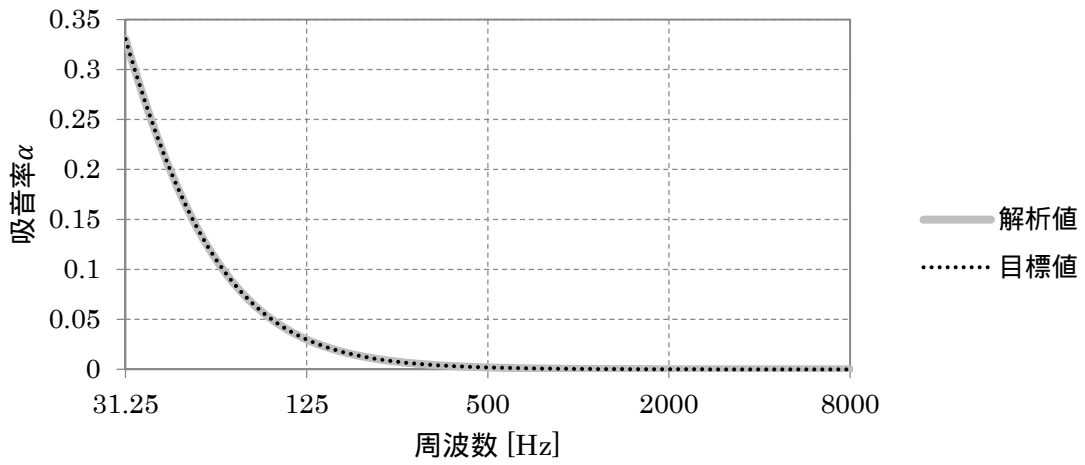


図 3.29 吸音率の比較

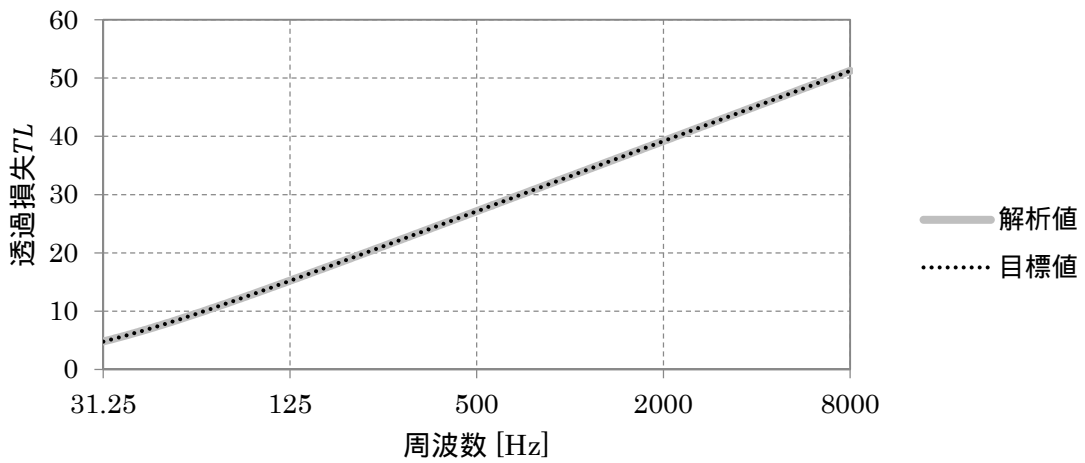


図 3.30 透過損失の比較

表 3.18 パラメータの数値

e_v	-0.00000019
m_1	3.5228
m_2	2.4758
m_3	0.001262
c_1	99996943.7718
c_2	508788897.7749
k_1	99987617693.8415
k_2	50769099313.7658

・グラスウール 10 cm

吸音率の比較を図 3.31 に、透過損失の比較を図 3.32 に、表 3.19 にパラメータの数値を示す。

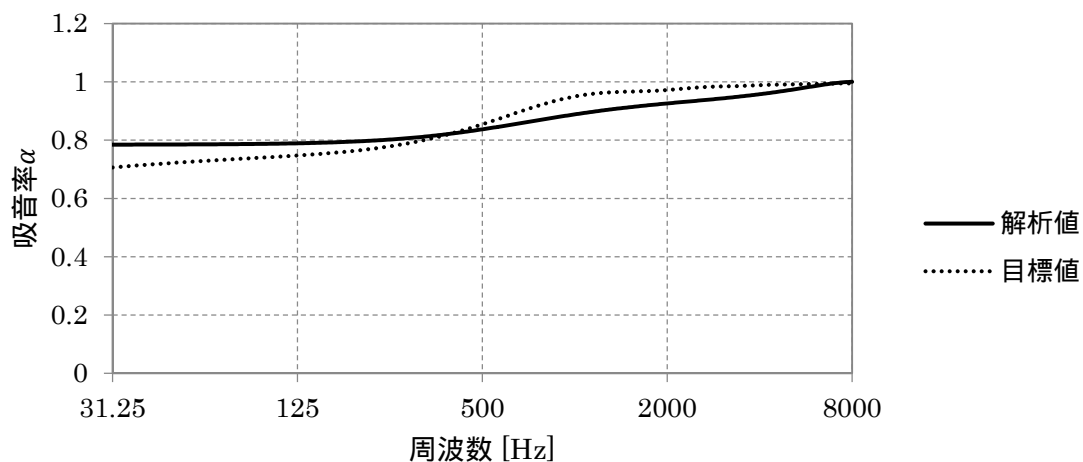


図 3.31 吸音率の比較

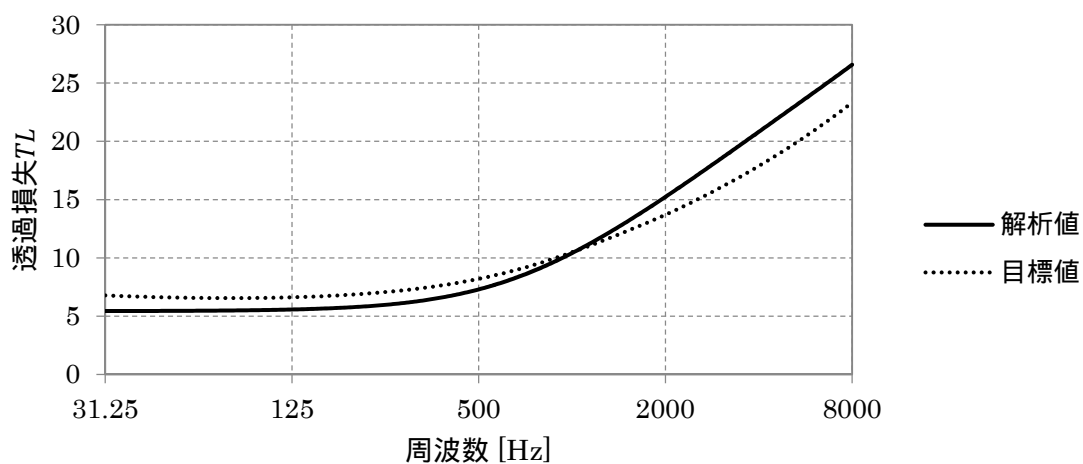


図 3.32 透過損失の比較

表 3.19 パラメータの数値

e_v	-83.949
m_1	0.00009999
m_2	0.003913
m_3	0.1326
c_1	0.0000009999
c_2	238.4185
k_1	24414062.5001
k_2	0.00009999

・グラスウール 9 cm + ベニヤ板 1 cm

吸音率の比較を図 3.33 に、透過損失の比較を図 3.34 に、表 3.20 にパラメータの数値を示す。

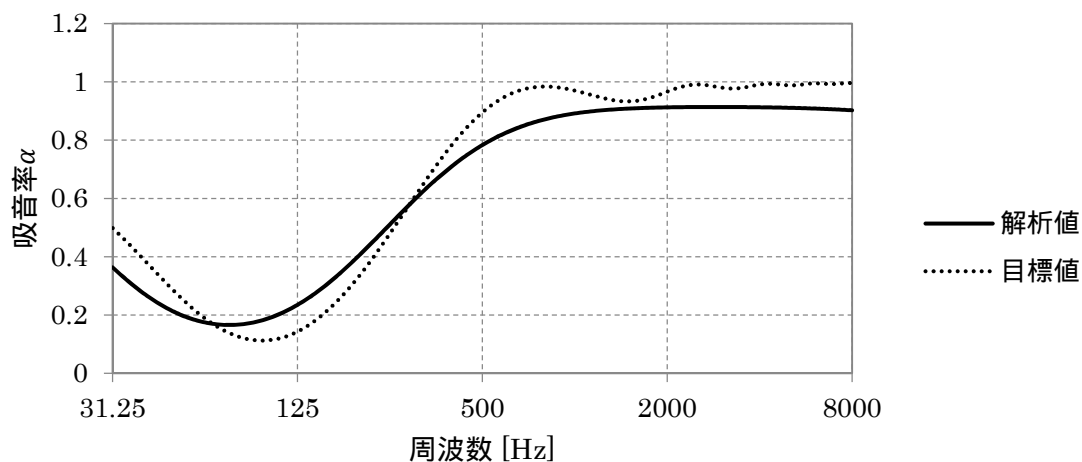


図 3.33 吸音率の比較

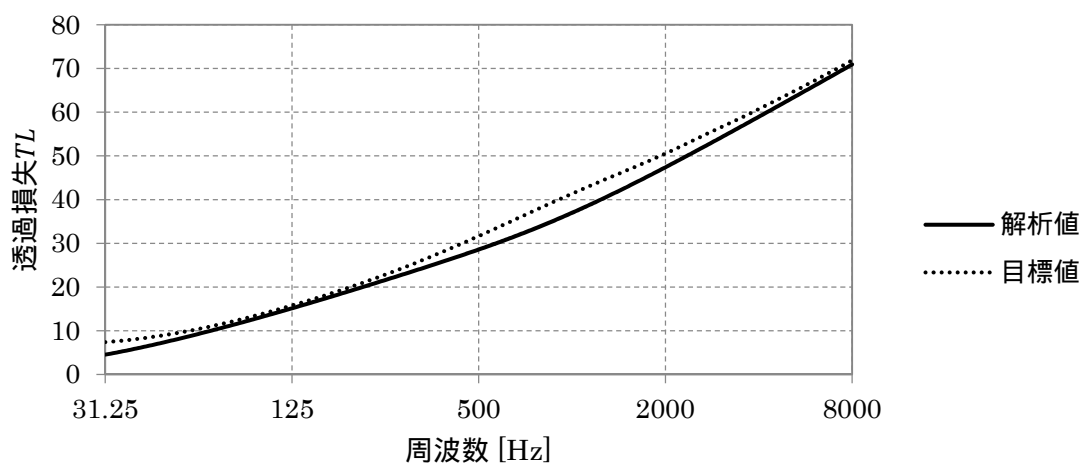


図 3.34 透過損失の比較

表 3.20 パラメータの数値

e_v	-264.9429
m_1	0.002961
m_2	0.9215
m_3	4.8829
c_1	762.9394
c_2	6103.5156
k_1	1847743.988
k_2	12206938.1178

・ベニヤ板 1 cm + グラスウール 9 cm

吸音率の比較を図 3.35 に、透過損失の比較を図 3.36 に、表 3.21 にパラメータの数値を示す。

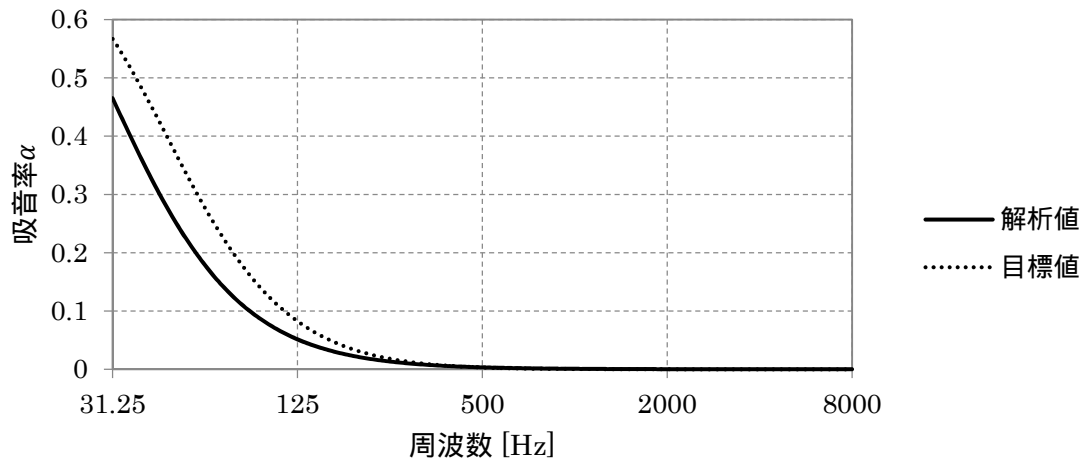


図 3.35 吸音率の比較

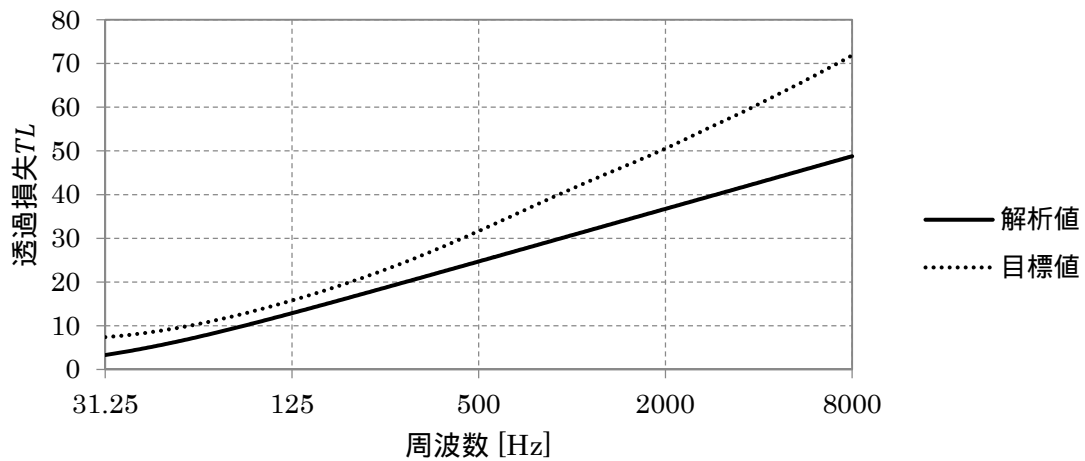


図 3.36 透過損失の比較

表 3.21 パラメータの数値

e_v	-10000551.639
m_1	4.2849
m_2	0.03824
m_3	0.1984
c_1	12500000.1862
c_2	390625.000
k_1	3505642712.1163
k_2	122070312.500

・グラスウール 4.5 cm + ベニヤ板 1 cm + グラスウール 4.5 cm

吸音率の比較を図 3.37 に、透過損失の比較を図 3.38 に、表 3.22 にパラメータの数値を示す。

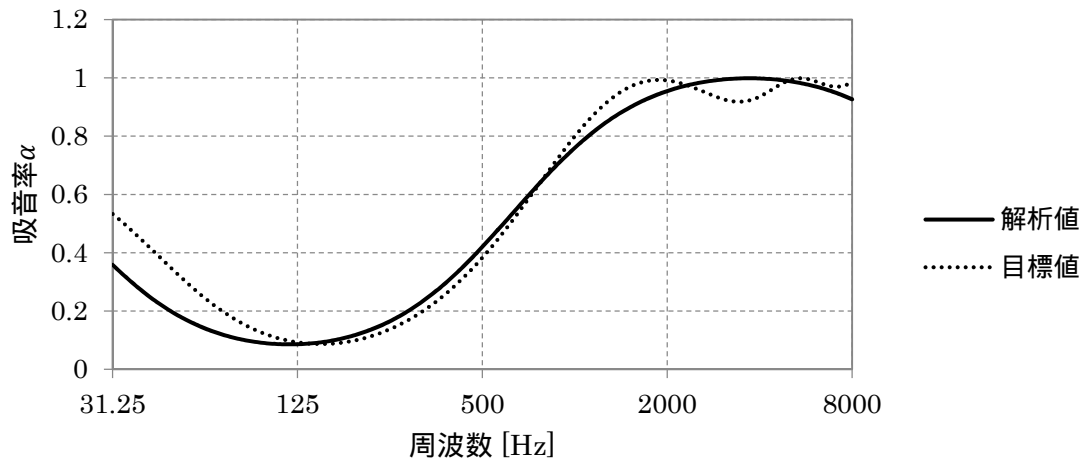


図 3.37 吸音率の比較

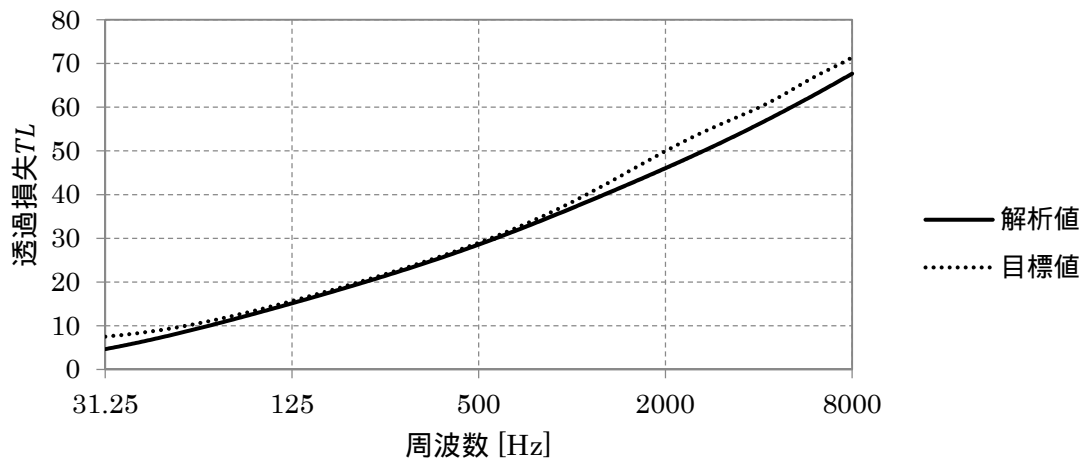


図 3.38 透過損失の比較

表 3.22 パラメータの数値

e_v	-201.334
m_1	0.005613
m_2	2.9297
m_3	2.9297
c_1	381.4697
c_2	24414.0625
k_1	3074854.6124
k_2	1543667.1675

・ベニヤ板 1 cm + 空気 8 cm + ベニヤ板 1 cm

吸音率の比較を図 3.39 に、透過損失の比較を図 3.40 に、表 3.23 にパラメータの数値を示す。

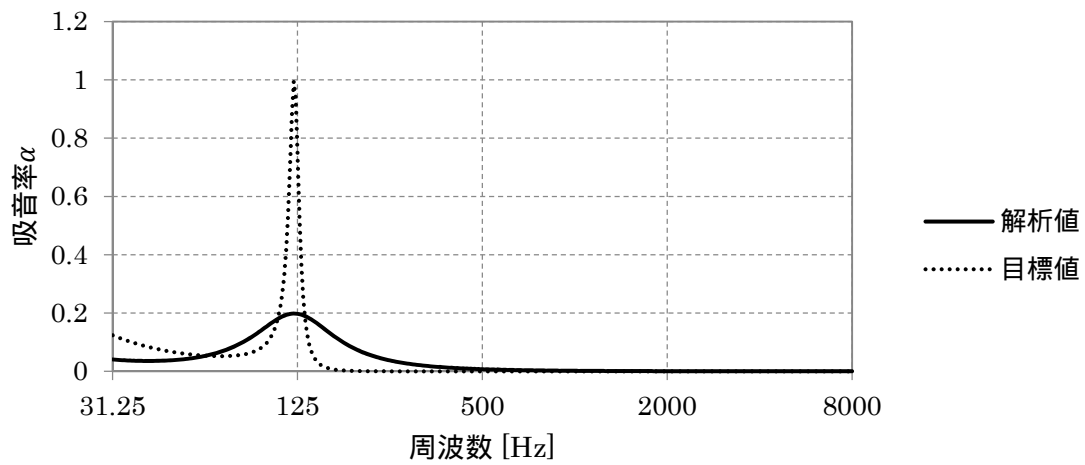


図 3.39 吸音率の比較

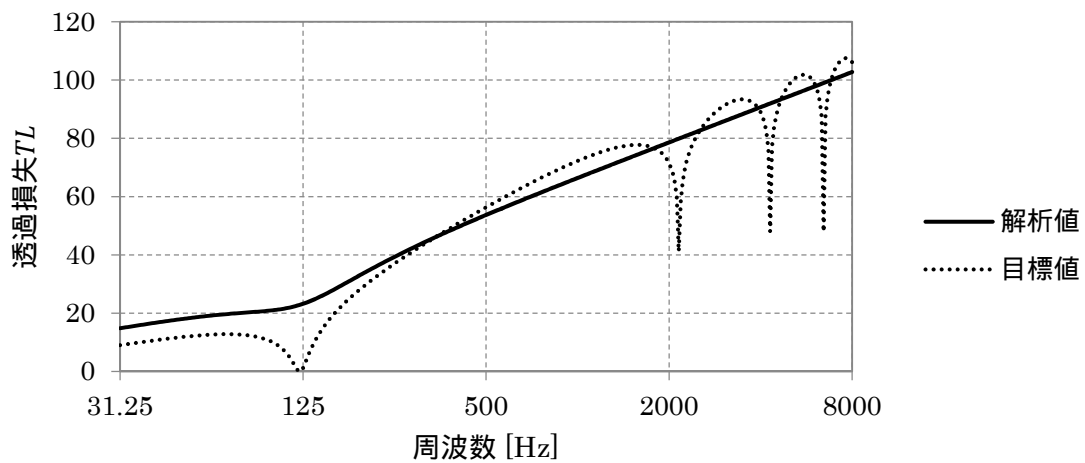


図 3.40 透過損失の比較

表 3.23 パラメータの数値

e_v	-20000379.3049
m_1	8.4687
m_2	2.9297
m_3	9.7657
c_1	905.9906
c_2	48828.1250
k_1	3051757.8126
k_2	6250000000.0000

・ベニヤ板 1 cm + グラスウール 8 cm + ベニヤ板 1 cm

吸音率の比較を図 3.41 に、透過損失の比較を図 3.42 に、表 3.24 にパラメータの数値を示す。

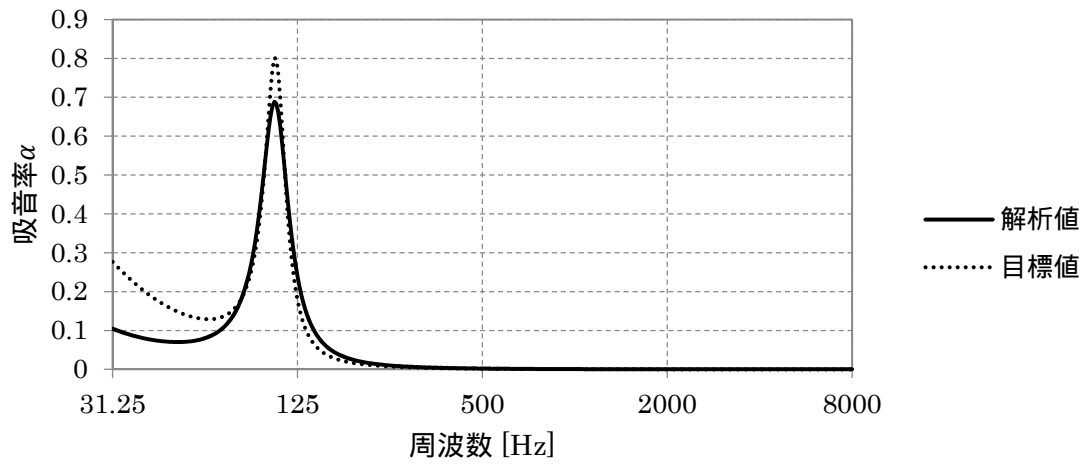


図 3.41 吸音率の比較

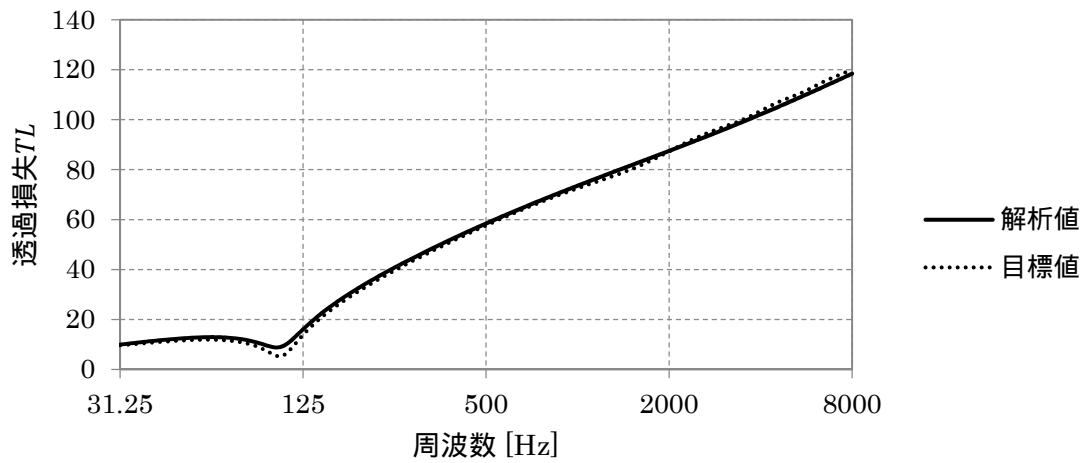


図 3.42 透過損失の比較

表 3.24 パラメータの数値

e_v	-80.003
m_1	6.1036
m_2	3.6316
m_3	4.1657
c_1	381.4697
c_2	48828.125
k_1	1525878.906
k_2	97656436.264

・ アクリルガラス - MPP0.05 cm + 空気 8.95 cm + ベニヤ板 1 cm

吸音率の比較を図 3.43 に、透過損失の比較を図 3.44 に、表 3.25 にパラメータの数値を示す。

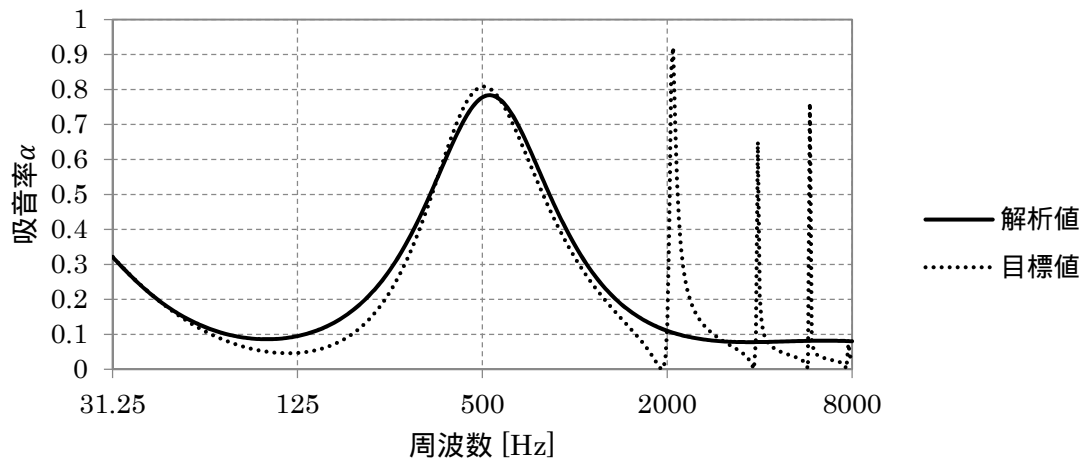


図 3.43 吸音率の比較

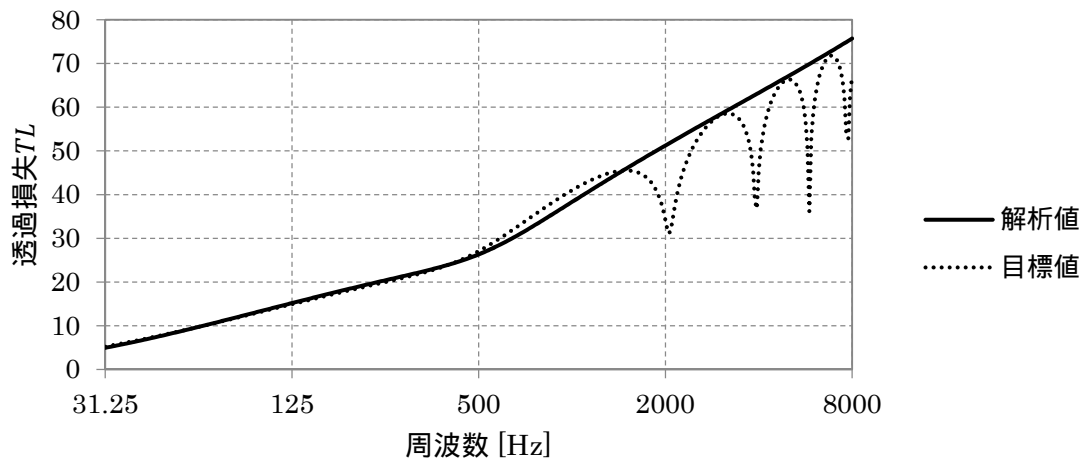


図 3.44 透過損失の比較

表 3.25 パラメータの数値

e_v	-20000470.765
m_1	0.1221
m_2	0.2442
m_3	5.8594
c_1	9202.9571
c_2	1019.2394
k_1	195312500.0001
k_2	3814604.1334

・ アクリルガラス - MPP0.05 cm + グラスウール 8.95 cm + ベニヤ板 1 cm

吸音率の比較を図 3.45 に、透過損失の比較を図 3.46 に、表 3.26 にパラメータの数値を示す。

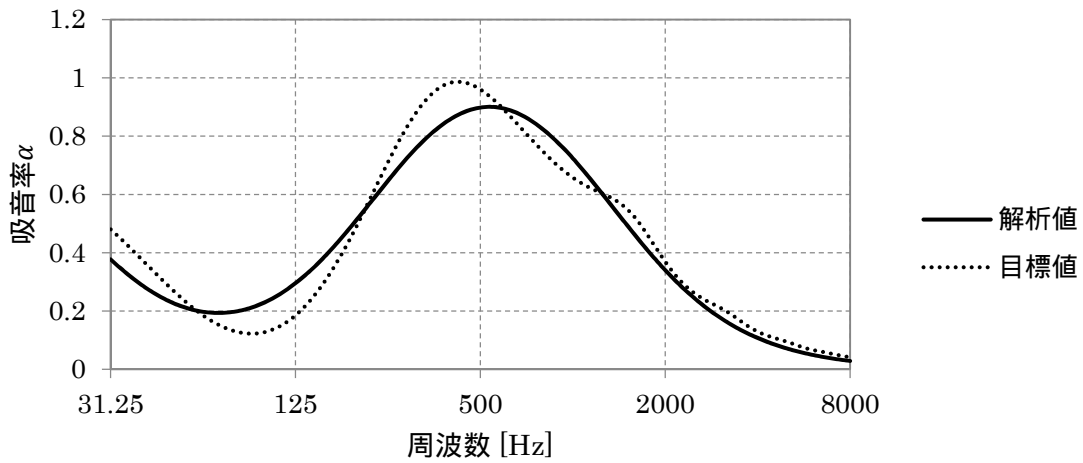


図 3.45 吸音率の比較

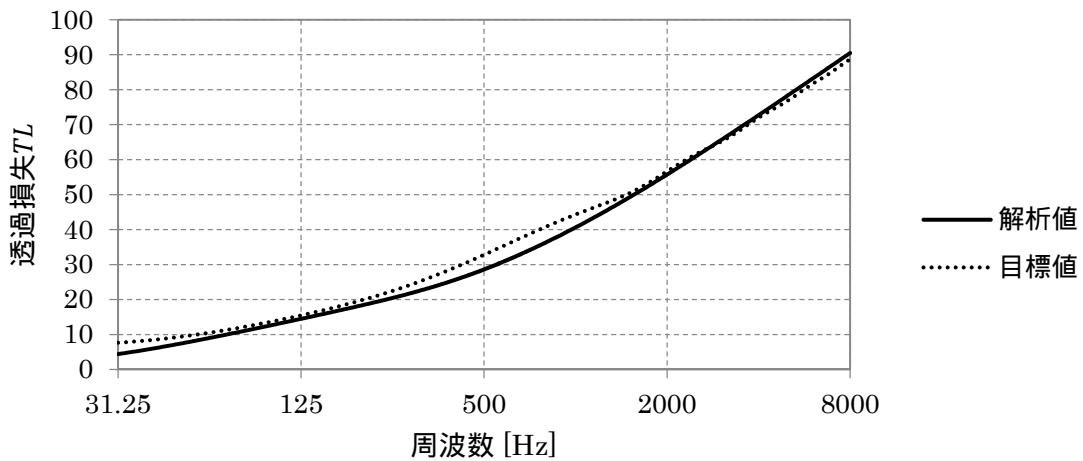


図 3.46 透過損失の比較

表 3.26 パラメータの数値

e_v	-193.746
m_1	0.1302
m_2	3.1739
m_3	2.4264
c_1	762.9394
c_2	6103.5156
k_1	1550652.0868
k_2	8773710.5787

・ アクリルガラス - MPP0.05 cm + 空気 9.9 cm + アクリルガラス - MPP0.05 cm
 吸音率の比較を図 3.47 に、透過損失の比較を図 3.48 に、表 3.27 にパラメータの数値を示す。

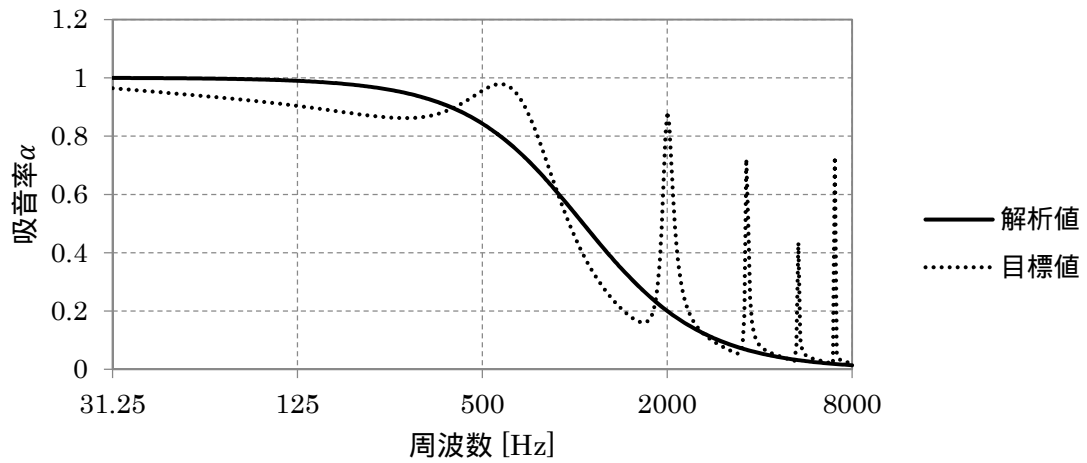


図 3.47 吸音率の比較

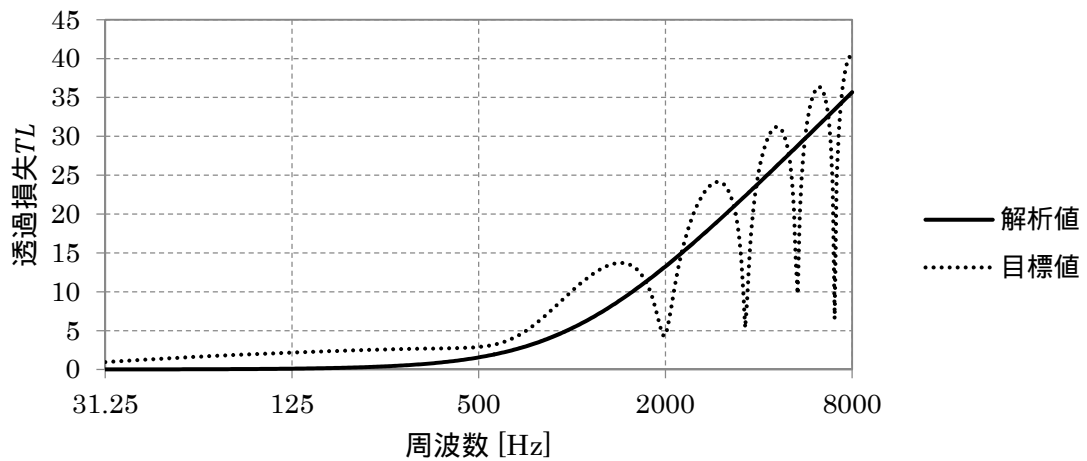


図 3.48 透過損失の比較

表 3.27 パラメータの数値

e_v	-20000669.325
m_1	0.1221
m_2	0.00009999
m_3	0.05255
c_1	2299.9942
c_2	381.3765
k_1	14877319.3360
k_2	3051757.8126

・アクリルガラス - MPP0.05 cm + グラスウール 9.9 cm + アクリルガラス - MPP0.05 cm
 吸音率の比較を図 3.49 に、透過損失の比較を図 3.50 に、表 3.28 にパラメータの数値を示す。

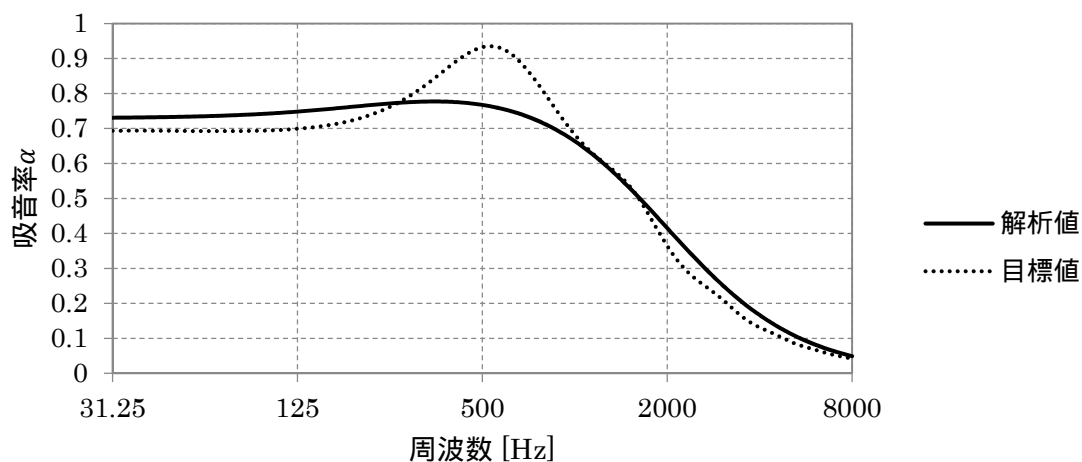


図 3.49 吸音率の比較

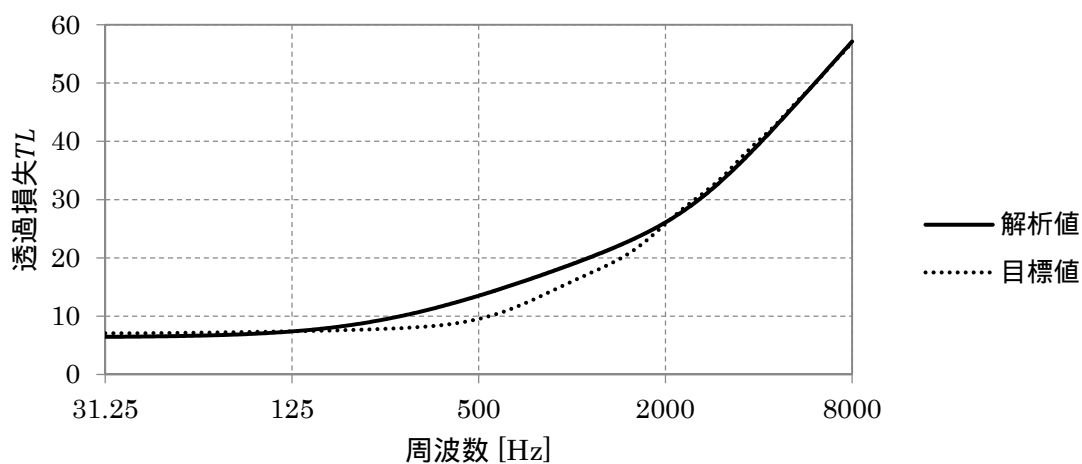


図 3.50 透過損失の比較

表 3.28 パラメータの数値

e_v	-172.783
m_1	0.04873
m_2	0.2289
m_3	0.1221
c_1	190.6417
c_2	1525.8789
k_1	0.00009999
k_2	19838009.0297

・完全透過

吸音率の比較を図 3.51 に、透過損失の比較を図 3.52 に、表 3.29 にパラメータの数値を示す。

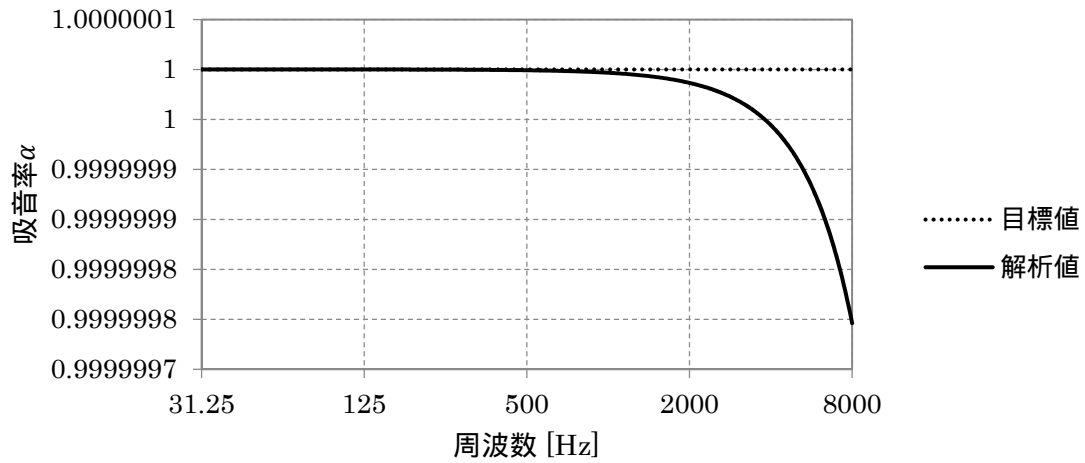


図 3.51 吸音率の比較

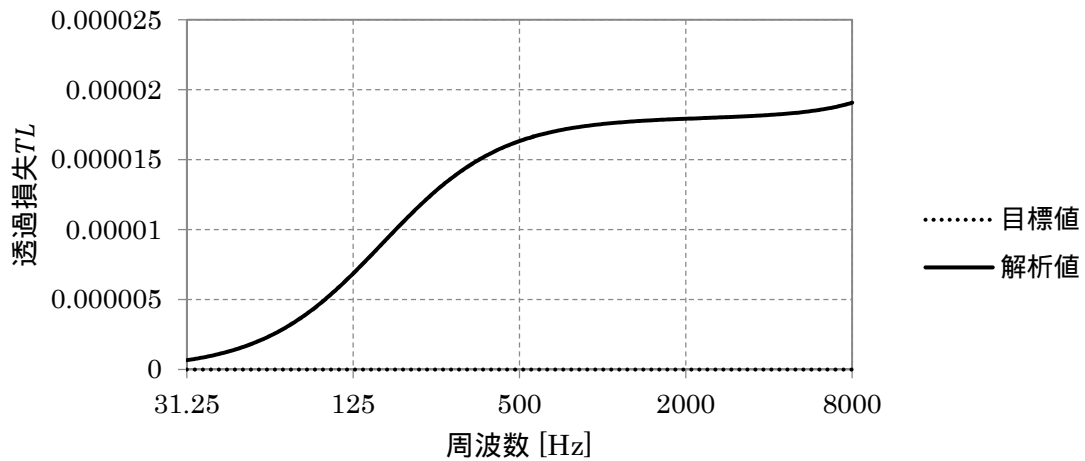


図 3.52 透過損失の比較

表 3.29 パラメータの数値

e_v	-0.000000000883
m_1	0.00009999
m_2	0.00009999
m_3	0.00009999
c_1	99999971.9671
c_2	0.0000009999
k_1	99999953620.1358
k_2	585937500.0000

・完全反射

吸音率の比較を図 3.53 に、透過損失の比較を図 3.54 に、表 3.30 にパラメータの数値を示す。ただし図 3.54 の目標値は全周波数で 10000 のため省略する。

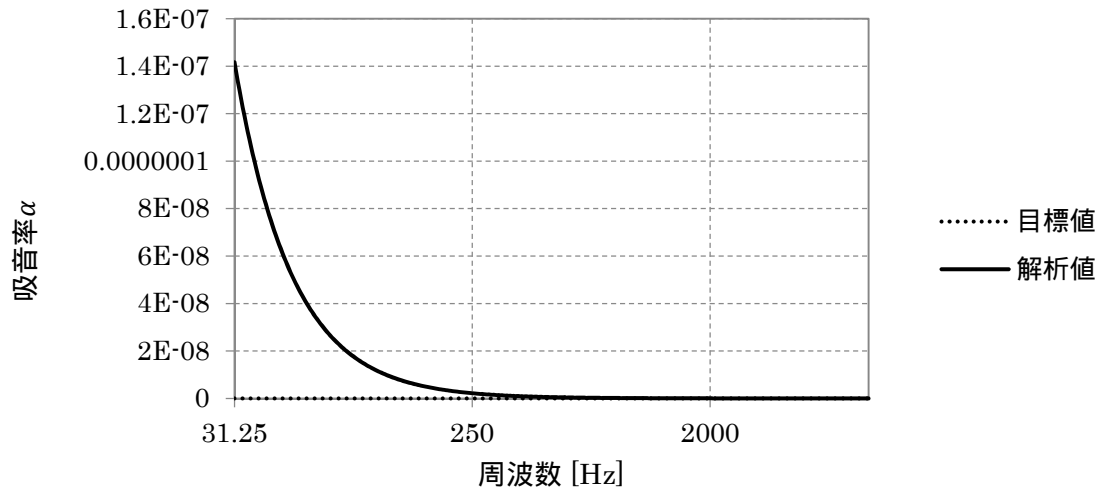


図 3.53 吸音率の比較

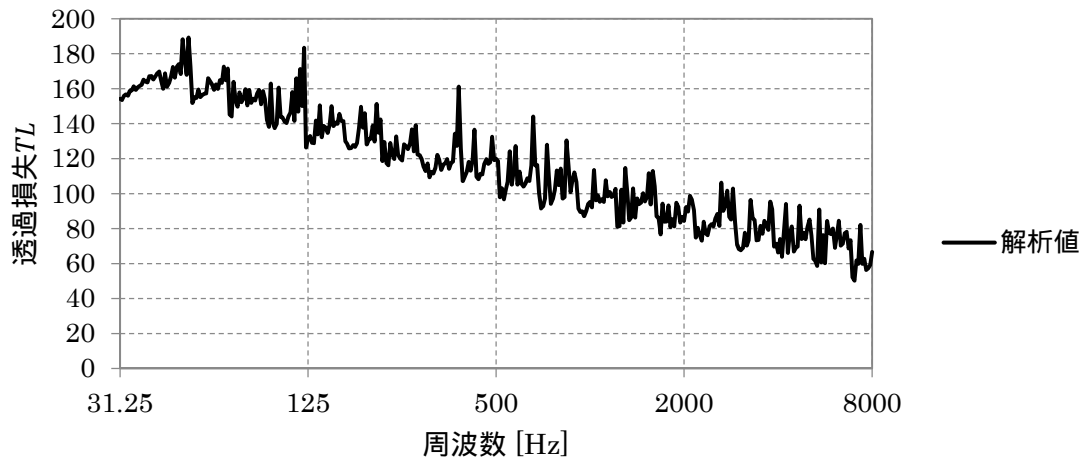


図 3.54 透過損失の比較

表 3.30 パラメータの数値

e_p	-34902793730.747
m_1	873.1866
m_2	9991.5962
m_3	997.1787
c_1	2.5145
c_2	18231.0119
k_1	1583.2684
k_2	17787795.5139

・剛壁完全吸音

吸音率の比較を図 3.55 に、透過損失の比較を図 3.56 に、表 3.31 にパラメータの数値を示す。ただし図 3.55 の目標値は全周波数で 1、図 3.56 の目標値は全周波数で 10000 のため省略する。

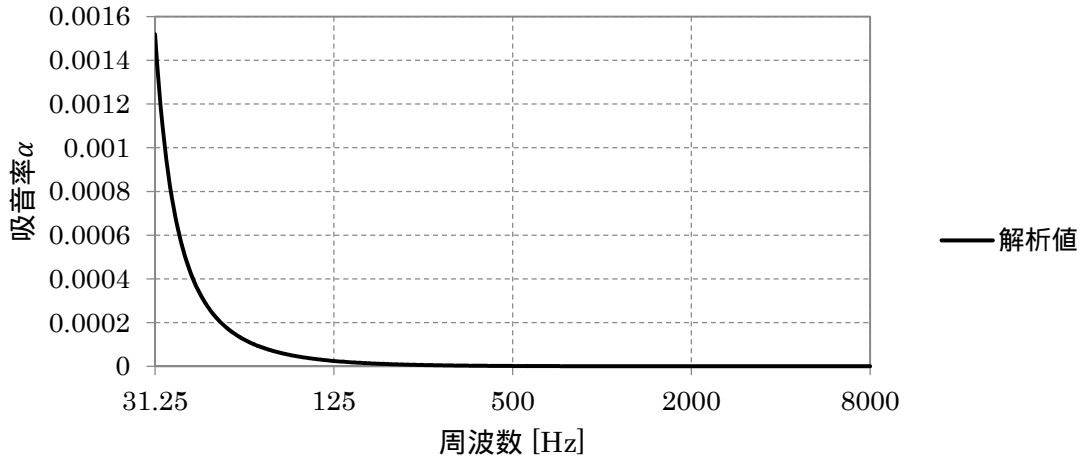


図 3.55 吸音率の比較

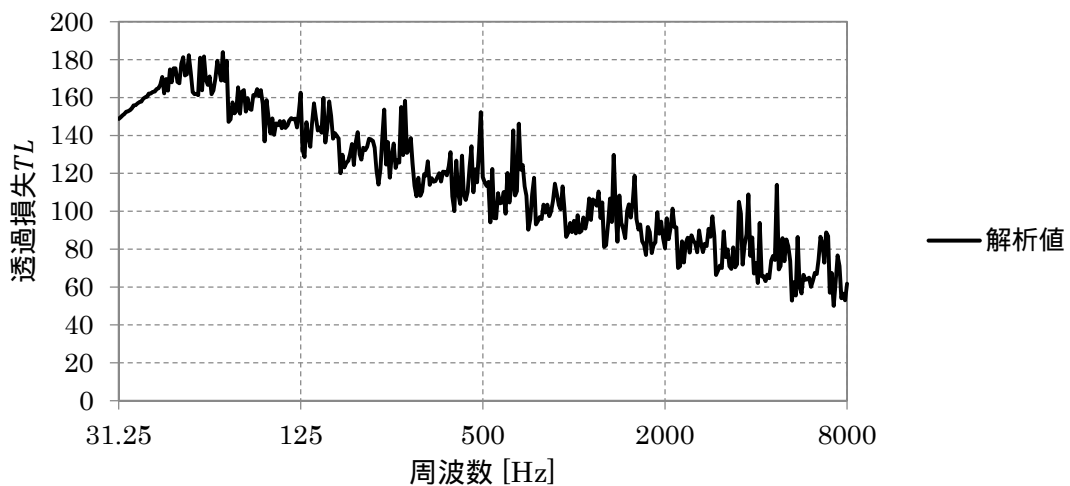


図 3.56 透過損失の比較

表 3.31 パラメータの数値

e_v	-26740154592.646
m_1	941.3368
m_2	888.7828
m_3	974.8876
c_1	7654.54022
c_2	0.4656
k_1	9046774.3576
k_2	558.7936

吸音率についてはベニヤ板 1 cm + 空気 8 cm + ベニヤ板 1 cm (図 3.39) で 125 Hz 付近において 3.2 節の結果よりも残差が大きくなった。他の構造は 3.2 節の結果と同様に解析値が目標値に近い数値となった。透過損失についてはグラスウール 10 cm (図 3.32) とアクリルガラス - MPP0.05 cm + グラスウール 9.9 cm + アクリルガラス - MPP0.05 cm (図 3.48) で 3.2 節の結果よりも残差が小さくなった。ベニヤ板 1 cm + グラスウール 9 cm (図 3.36) は 3.2 節と同様に周波数が高くなるにつれ残差が大きくなった。また、図 3.39、図 3.40、図 3.43、図 3.44、図 3.47、図 3.48 の解析値は目標値に即した値にならなかった。これは 3.2 節と同様に 2 つの質点系でモデルを構成していることが要因だと考えられ、ピーク、ディップがある目標値では質点系の数を増やすことでより良い結果が得られると考えられる。

4 おわりに

本研究では、GA を用いてパラメータの値をわかりやすく、手軽に見つけられないかと考え、複数の目的関数で最適化を試みた。最適化により、多くの目的関数について目標値に近い値となるパラメータの値を見つけることができた。

今後の課題として吸音率、透過率の目標値が 0 の場合の目的関数があげられる。2.8 節の(2-28)式、(2-29)式では T_1 , T_2 , T_3 を用いて解析値が目標値の 5dB 以内かどうかを評価しているが、目標値が 0 の場合は解析値がちょうど 0 となる時を除いて、 T_1 , T_2 , T_3 の値は常に 1 となり、残差二乗和だけの評価になってしまう。また、2.8 節の(2-29)式では目標値、解析値の透過率が 0 の場合は透過損失の値を 10000 としているため、残差二乗和 C のとりうる値の範囲が残差二乗和 A よりも極端に広く、(2-29)式の A に係数つけて A を C の値に近づけることは困難であると考えられる。そのため、 C が極端に大きい値の個体の場合に、 A が小さい値であったとしても遺伝子が次の世代の個体に反映されないことがあると考えられる。

この問題点を修正することで透過率の目標値が 0 の特徴的な目標値でもよい結果が得られるようになるのではないかと考えられる。

参考文献

- { 1 } Shinichi Sakamoto , Hiroshi Nagatomo , Ayumi Ushiyama and Hideki Tachibana ,
“ Calculation of impulse responses and acoustic parameters in a hall by the finite-
difference time-domain method ”, Acousr.Sci.&Tech.29 , 4 , 2008 , pages 256-265
- { 2 } 石川翔一郎 , “ FDTD 法におけるインピーダンス境界について ” , 関西大学環境都市工
学部建築学科卒業論文 , 2012 , pages 24-42

謝辞

研究を進めるにあたり、お忙しい中数々のご指導ご鞭撻を頂いた豊田政弘准教授には熱くお礼申し上げます。また、ご協力いただいた建築環境工学第一研究室の先輩や同期の皆様にも大変お世話になりました。心よりお礼申し上げます。