

多目的最適化を用いた防音材仕様検討手法の確立

Establishment of Method for Optimizing Multi Specifications for Sound-proof Packages

多田 寛子*

Hiroko TADA

佐々木 匡**

Tadashi SASAKI

井出 史彦*

Fumihiko IDE

許 筠**

Jun HSU

要 旨

車室内音低減と燃費向上のために、車体に適用される防音材仕様最適化探索手法に注目した。最適な防音材仕様を提案するために、2ステップからなる手法を確立した。(1)防音材をいくつかの要素に分割し、各要素における多層構造材料とその板厚を設計変数とする。車室内音と防音材重量を目的関数とし、各要素での最適音響特性(吸音率、透過損失)を探索する。(2)各要素の多層構造板厚分布を設計変数とし、二つの音響特性(吸音率、透過損失)を目的関数とした最適板厚分布を探索する。

確立した手法を用いて、フロア部を事例に最適防音材仕様の探索をおこなった。その結果、軽量で車室内音目標値を満足する最適防音材仕様を探索できた。

ABSTRACT

This paper describes an optimization method for designing a vehicle sound-proof package. This method enables the achievement of an optimum balance between lower weight and higher absorption performance. In order to propose a sound-proof package in the early stages of vehicle development, it is necessary to assess the number of sound-proof elements required and to select the optimum design specifications for weight and absorption performance. However, it is difficult to achieve conflicting objectives simultaneously, and acoustic engineers therefore require special technical knowledge. The research discussed here developed a new automated optimization method that resolves these issues. The new method enables detailed sound-proof package specifications to be obtained, including the thickness distribution for each part. These specifications can be easily transferred to drawings. The method was successfully used to reduce the sound pressure level of a vehicle cabin, providing verification of its accuracy.

1. はじめに

近年、自動車の車室内における静粛性は、商品性能を向上させる大きな要素となっている。一方、低燃費の観点から軽量化も必要不可欠な項目となっている。しかし、静粛性向上(防音性能向上)と軽量化は相反するケースが多い。

効率的な防音材仕様を適用するためには、仕様検討を開発初期段階からおこなう必要がある^{(1), (2)}。その検討の流れを以下に示す。

- (1)車室内音目標値の設定
- (2)車室内目標値を達成するための、車体特性目標値の設定(SEA 法による吸音特性:DLF, 遮音特性:CLF)
- (3)車体特性目標値を達成するための防音材音響特性目標値の設定(吸音率, 透過損失)

- (4)防音材音響特性目標値を達成するための防音材仕様検討(材料, 板厚, 適用面積)

(1)-(3)については、既に SEA 法を用いた検討手法が確立されている^{(1), (2)}。しかし、(4)における防音材仕様を決定するためには、防音材の材料, 板厚, 適用面積などの多くの項目について検討が必要となり、短時間で仕様を決定するのは困難である。

本研究では、車室内音目標値を満足させる最適な仕様を短時間で決定するために多目的最適化を用いた検討手法を提案し、探索した解集合と最適解を比較することで、その妥当性を検証することを目的とする。提案した手法を用いて、自動車の車室内音目標値を満足する最小重量の防音材仕様を決定し、実車へ適用した際の車室内音から最適仕様の妥当性について述べる。

* 四輪開発センター

** エンジニアス・ジャパン株式会社

2. 解析手法

自動車に適用される防音材は、いくつかの材料の積層構造からなっている。その一例を Fig. 1 に示す。ここでは、その構造を多層構造とよぶ。

防音材音響特性(吸音率, 透過損失)は, 多層構造の各層の材料と板厚, およびその適用面積によって決定される。これらの項目を防音材仕様とよぶ。

車室内音目標値を達成するための防音材仕様検討の流れを Fig. 2 に示し, 詳細を以下に記す。

(1) 要素における防音材仕様の検討

防音材の板厚はボデーパネル形状や空調用ダクト, ハーネス等の他レイアウトにより制約を受ける。これらの制約を基に防音材をいくつかの要素に分割する。この時, 分割された各要素の多層構造の各層は一樣材料とし, 板厚も等価であるとする。車室内音目標値を満足する要素の各層材料と等価板厚を検討する。同時に, 音響特性(吸音率 $\bar{\alpha}_{if}$, 透過損失 $\overline{TL}_{if}$)を算出する。ここで, f は 1/3 オクターブバンド中心周波数である。

(2) 要素における防音材板厚分布の検討

量産車に適用される防音材の板厚は, Fig. 3 で示されるように, 薄い部分から厚い部分までの分布を持つ。これを板

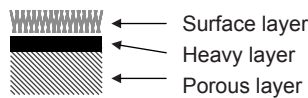


Fig. 1 Multi-layer sound-proof package

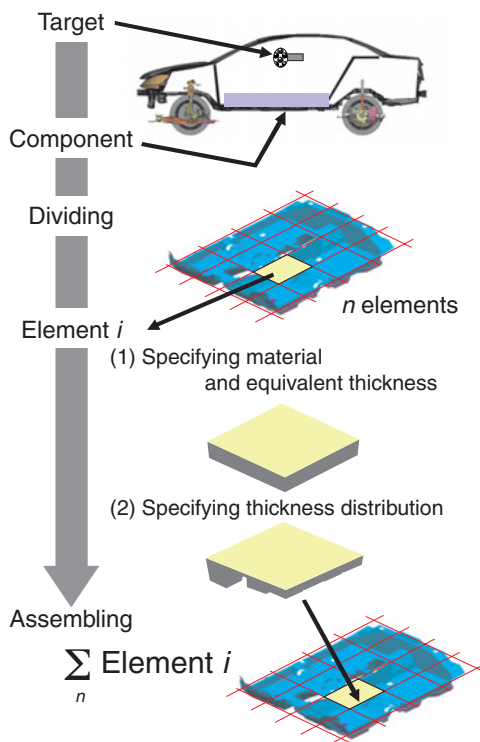


Fig. 2 Procedure for design of optimized sound-proof package

厚分布とよぶ。

これは, 分割した各要素内でもパネル形状やその他レイアウトにより一定板厚を保てないからである。そのため, (1)に示す防音材仕様の検討で分割された等価な板厚をもつ要素の音響特性を維持したまま, 図面反映可能な防音材板厚の検討をおこなう。等価板厚要素と図面反映可能な板厚分布を持つ要素の音響特性には式(1), (2)のような関係がある。

$$\bar{\alpha}_{if} = \frac{\sum_j A_{ij} \cdot \alpha_{jf}}{A_i} \quad (1)$$

$$\overline{TL}_{if} = 10 \times \log \left(\frac{1}{\bar{\tau}_{if}} \right) \\ \bar{\tau}_{if} = \frac{\sum_j A_{ij} \cdot \tau_{jf}}{A_i}, \quad TL_{if} = 10 \times \log \left(\frac{1}{\tau_{if}} \right) \quad (2)$$

ここで, 要素 i の面積を A_i , 要素 i における一定板厚 j の面積を A_{ij} , 吸音率を α_j , 透過損失を τ_j とする。

以下に, 各要素での防音材仕様検討と防音材板厚分布についての最適仕様検討手法について述べる。

2.1. 防音材仕様最適化

ここでは, 防音材の要素における最適仕様の検討の流れと用いられたアルゴリズムについて述べる。

2.1.1. 最適仕様探索の流れ

Fig. 4 に分割した要素における仕様最適化の計算の流れを示す。それぞれの内容は以下の通りである。

- (1) 防音材を n 個の要素に分割し, 各要素での多層構造各層の材料と等価板厚を設計変数とする解析用 SEA モデルを作成する。
- (2) 各要素ごとに, 構造全体板厚, 各層等価板厚, 解析周波数, および車室内音に制約条件を設定する。
- (3) 防音材全体重量, 車室内音を目的関数として設定する。
- (4) 上記条件下における最適防音材仕様を探索する。

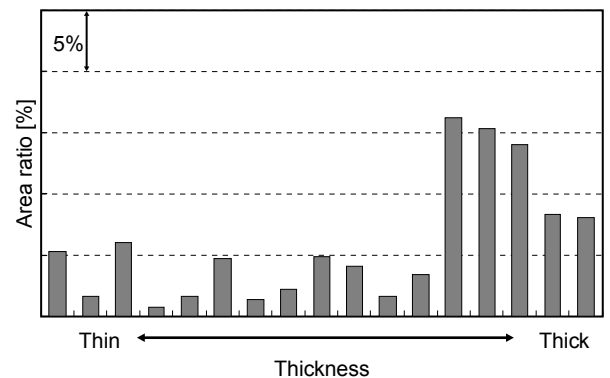


Fig. 3 Thickness distribution of mass produced floor carpet

(5)(4)で満足した各要素ごとの最適音響性能(吸音率 $\bar{\alpha}_{ij}$, 透過損失 $\overline{TL}_{ij}$)を算出⁽³⁾する。

2.1.2. 最適仕様探索アルゴリズム

前項(3)で設定された複数の目的関数(防音材全体重量, 車室内音)を満足する最適な設計変数探索においては, Non-dominated Sorting Genetic Algorithm(NSGAI⁽⁵⁾)を採用する。しかし, 設計変数が多く, 探索時間が長くなるため, 二段階で設計変数の絞込みを実施する。その方法を以下に示す⁽⁶⁾。

(1) グルーピング

分割された各要素において同じ多層構造を持つ要素をグループ化し, 設計変数の絞込みをおこなう。

(2) サンプルによる車室内音感度解析

直交表実験計画法を用いて, 設計変数である多層構造各層の等価板厚を3水準に変化させ, 車室内音への感度が低い設計変数を初期値固定とし, 設計変数の絞込みをおこなう。

2.2. 防音材板厚分布最適化

ここでは, 防音材要素における最適板厚分布検討の流れと, 用いられたアルゴリズムについて述べる。

2.2.1. 最適板厚分布探索の流れ

Fig. 5 に要素における板厚分布の最適解探索の流れを示す。それぞれの内容は以下の通りである。

(1) 分割要素 i での最適音響性能(吸音率 $\bar{\alpha}_{ij}$, 透過損失 $\overline{TL}_{ij}$)を目的関数として設定する。

(2) 分割要素 i の面積を A_i , その要素での一定板厚 j の

面積を A_{ij} とする。各一定板厚の面積割合は $\frac{A_{ij}}{A_i}$ で示され, 設計変数として設定する。この面積割合の変化を板厚分布とする。

(3) 上記条件下において, 最低重量で最適音響性能を満足する最適板厚分布を探索する

2.2.2. 最適板厚分布探索のアルゴリズム

分割した要素における最適板厚分布は, 具現化が可能で

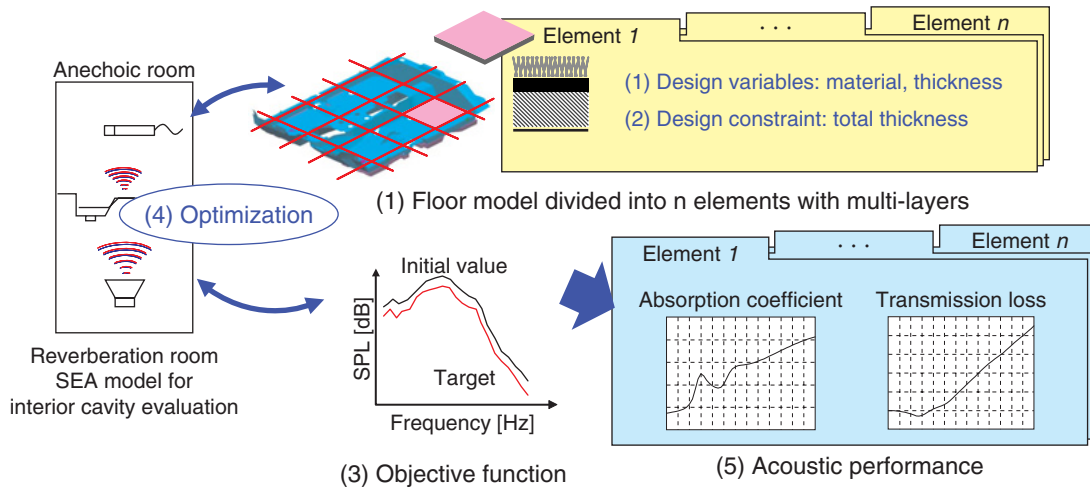


Fig. 4 Optimization process for design variables in elements

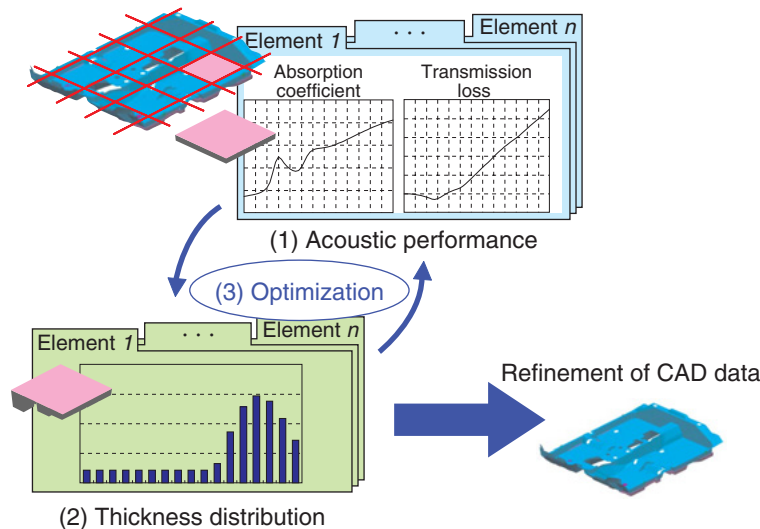


Fig. 5 Optimization process for thickness distribution

あり、かつその探索時間が短いことが望ましい。これを満足するために、三つの項目を探索アルゴリズムに取り入れ、その内容を以下に示す。

(1) 板厚分布の関数化 Fig. 3で示すように、量産車の分割した要素での板厚分布は、パネル形状やそのほかのレイアウト制約の影響を受ける。その板厚分布はある板厚を中心に滑らかな曲線を描く傾向を示す。本手法では、この傾向を再現可能な、板厚分布 $\frac{A_{ij}}{A_i}$ を式(3)のような関数で表す。

$$\frac{A_{ij}}{A_i} = K_1 \cos(k_1 \times j) + L_1 \sin(l_1 \times j) + K_2 \cos(k_2 \times j) + L_2 \sin(l_2 \times j) + M \quad (3)$$

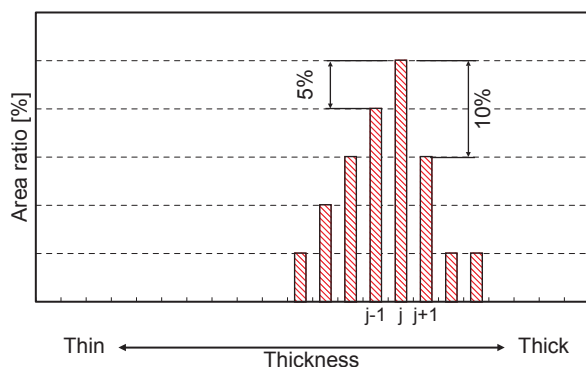


Fig. 6 Constraint for thickness distribution

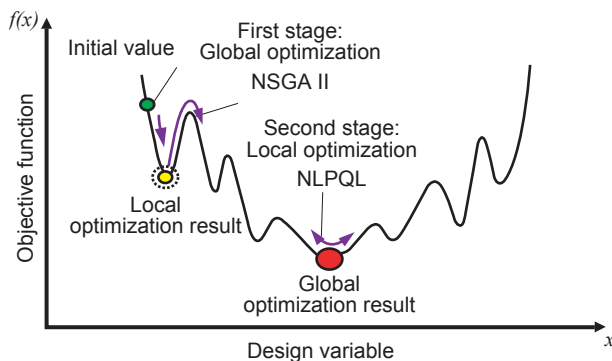


Fig. 7 Results of local and global optimization

ここで、式(3)中の係数 $K_1, k_1, L_1, l_1, K_2, k_2, L_2, l_2, M$ は $\frac{A_{ij}}{A_i}$ を決定するための変数である。

(2) 板厚分布具現化のための制約設定 分割要素 i で関数で示した板厚分布 $\frac{A_{ij}}{A_i}$ において、ある板厚 j の面積割合が突出する場合があります。それを具現化するのは困難である。面積割合を突出させないために、板厚 j の面積割合と隣接する板厚 $j-1$ と $j+1$ の面積割合の変化度合いにそれぞれ制約を設定する。Fig. 6 にはその一例として、 $j-1$ に 5%, $j+1$ に 10% の制約を設定したものを示す。その結果、具現化可能な板厚分布探索が可能となる。

(3) 二段階最適解探索 目的関数とした吸音率と透過損失は個々に独立した指標であり相関性がない。そのため、用いるアルゴリズムによっては初期値近傍の局所最適解を探索し、大域最適解を見逃してしまう可能性がある。

ここでは、Fig. 7 に示すよう、大域探索として NSGAII を、局所探索として NLPQL (Sequential Quadratic Programming)⁽⁴⁾ を組み合わせたアルゴリズムを用いることにより、大域最適解探索を可能とした。

3. 解析結果

フロア部を事例にあげ、最適防音材の仕様検討を、提案した防音材仕様最適化と防音材要素板厚分布最適化の手法を用いておこなった。各最適化での検討内容を以下に示す。

3.1. 防音材仕様最適化

フロア部対策による車室内音の効果目標を設定し、これを満足する分割した要素での最適防音材仕様を探索した。Table 1 に防音材仕様最適化における変数設定を示す。

また、Table 2 に最適防音材仕様探索に対する目標値を示す。

Table 1 で設定された約100通りの設計変数に対し、Fig. 8 に示すよう、グルーピングとサンプリングを用いた車室内音響感度解析により設計変数の絞込みをおこなった。そ

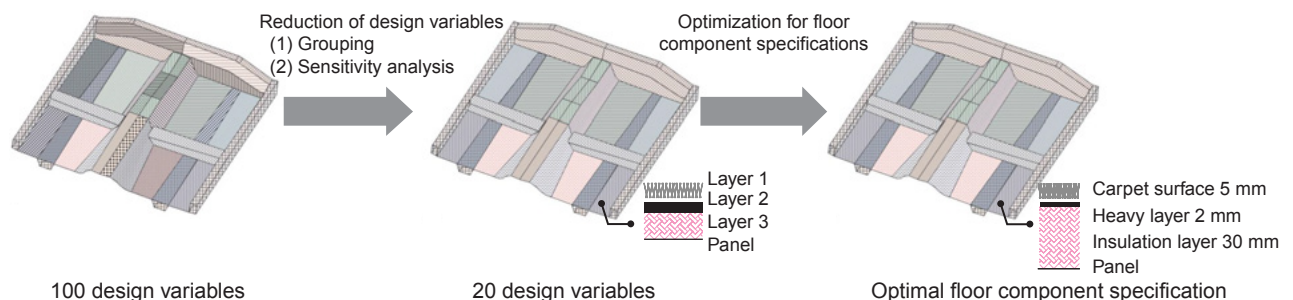


Fig. 8 Reduction of design variables and optimal result

Table 1 Optimization variables for elements

Objective component	Floor carpet divided along with floor panel shape into 50 elements
Design variables	Each layer thickness in multi-layer
Constraints	Total thickness of multi-layer in each part
Objective functions	Interior cavity sound pressure level in O.A. and high frequency range 1.25-5 kHz

Table 2 Target for floor optimization in interior cavity sound pressure level and floor carpet total weight

	High-frequency range 1.25-5 kHz	O.A.	Total weight
Target	1.0 dB reduction	1.0 dB reduction	Lighter than initial weight

の結果、設計変数を約 20 個まで絞込んだ。

次に、絞込んだ設計変数を用いて、条件を満足する要素における仕様最適化をおこなった。探索された最適仕様の一部を Fig. 8 に示す。また、その時の吸音率 $\bar{\alpha}_{ij}$ 、透過損失 $\overline{TL}_{ij}$ を Fig. 9 に示す。

3.2. 防音材板厚分布最適化

Fig. 9 に示す分割要素での最適音響性能(吸音率 $\bar{\alpha}_{ij}$ 、透過

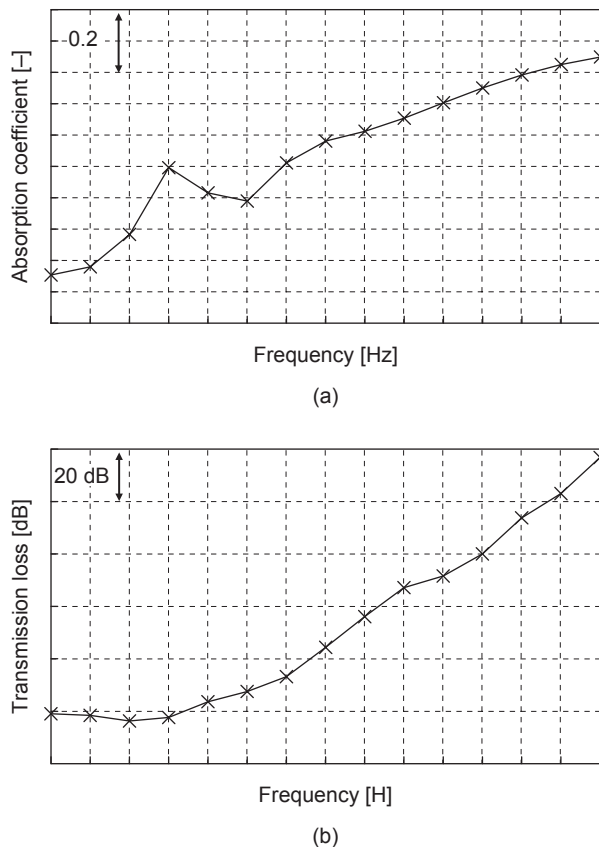


Fig. 9 Sound-proof performance of optimal sound package: (a) absorption coefficient and (b) transmission loss

Table 3 Optimization variables for thickness distribution

Design variables	Thickened in 2 mm pitch from 7 mm to 41 mm in an element
Constraints	Coefficients in Eq.(3) restrained as follows; $-10000.0 \leq K_1, L_1, K_2, L_2 \leq 10000.0$ $-10000 \leq k_1, l_1, k_2, l_2 \leq 10000$ $0 \leq M \leq 10000$
Objective functions	Absorption coefficient and transmission loss of the element

損失 $\overline{TL}_{ij}$) を保持したまま、より具現化可能な板厚分布となるよう検討をおこなった。

要素における板厚分布の最適解探索における変数設定を Table 3 に示す。

上記条件のもと、分割した要素最適板厚分布の探索をおこない、最適音響性能を保持した、具現化可能な板厚分布の探索ができた。探索された最適板厚分布の結果を Fig. 10 に示す。

4. 手法の妥当性

探索された最適防音材仕様の結果から、提案した防音材仕様最適化と防音材要素板厚分布最適化手法の妥当性を述べる。また、検討されたフロア部防音材の最適仕様を実車へ適用し、その効果を検証した。

4.1. 防音材要素仕様最適化

二段階の絞り込みをおこなった設計変数に対し、最適仕様探索をおこない、その時の解分布の高周波域車室内音とフロアカーペット重量の関係を Fig. 11(a) の×印に示す。また、フロアカーペットの最軽量で達成できる高周波車室内音の解分布(パレート解)を●印、今回の手法を用いて探索された最適仕様解を▲印で示す。また、この時の車室内音 O.A. に対するフロアカーペット重量との関係を Fig. 11(b) の▲印に示す。

最適解とその近傍の解の目標値との関係を比較したものを Table 4 に示す。この表から、探索された最適解は設定

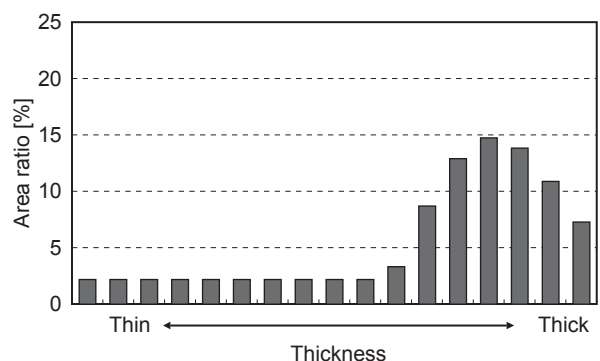


Fig. 10 Optimal thickness distribution for floor element

Table 4 Comparison between optimization results

	High-frequency range 1.25-5 kHz	O.A.	Total weight
Target	1.0 dB reduction	1.0 dB reduction	Lighter than initial weight
Optimal result	Achieved	Achieved	Achieved
Result 1	Achieved	Achieved	Not achieved
Result 2	Achieved	Not achieved	Achieved

したすべての目標値を満足しているのに対し、その近傍の解は一部の目標値を満足していないことがわかる。

これらの結果より、提案した手法を用いることで、多数の仕様パターンから車室内音への効果目標を満足する最適解が探索されており、その妥当性を検証できた。

4.2. 防音材要素板厚分布最適化

分割した要素における最適板厚分布探索時の音響性能の解分布(×印)を Fig. 12 に示す。同時に、初期板厚分布での性能を図中■印、最適板厚分布での性能を▲印で示す。

最適解探索を進めていく中で、解が目標性能を満足する図中の左下へ分布していくことがわかる。このことから、提

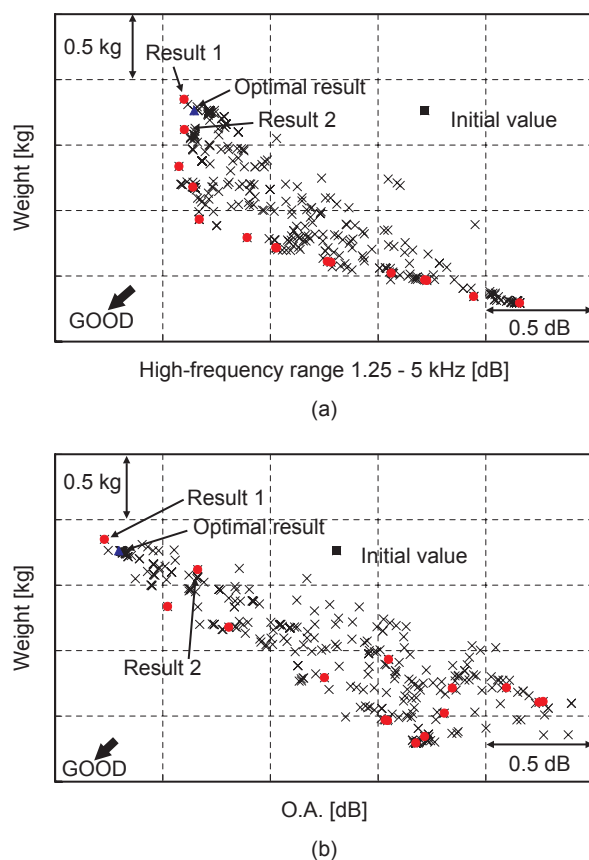


Fig. 11 Distribution of samples during optimization:
(a) high-frequency range versus weight
(b) O.A. versus weight

案した手法を用いることで、関数化されたさまざまな板厚分布から目標とした吸音率、透過損失を満足する最適板厚分布が探索されていることが確認できた。

次に、今回提案した式(3)に示す板厚分布関数の妥当性を検証するために、式(3)を用いずに板厚分布を乱数で表し、最適解を探索した。その結果を Fig. 13 に示す。この板厚分布はすでに Fig. 10 に示したものと異なり、ある板厚を中心にした滑らかな曲線を描いていない。一般的にパネルは連続的な形状をしており、この結果に示される極端な板厚分布の変化は、カーペット表面に凸凹を有することを意味する。このことから、式(3)に示す関数を用いて板厚分布を示すことにより、目標音響性能を満足する具現化可能な板厚分布の探索が可能であることが確認できた。

以上の結果より、提案した手法を用いることで、多数の板厚分布から、具現化可能な最適解が探索されており、その妥当性を検証できた。

4.3. 実車による検証

提案した手法を用いて検討したフロア部防音材の最適仕様を実車へ適用し、車室内音への効果を検証した結果、Table 2で設定された車室内音への効果目標を満足するレベルにあることが確認でき、その妥当性を検証できた。

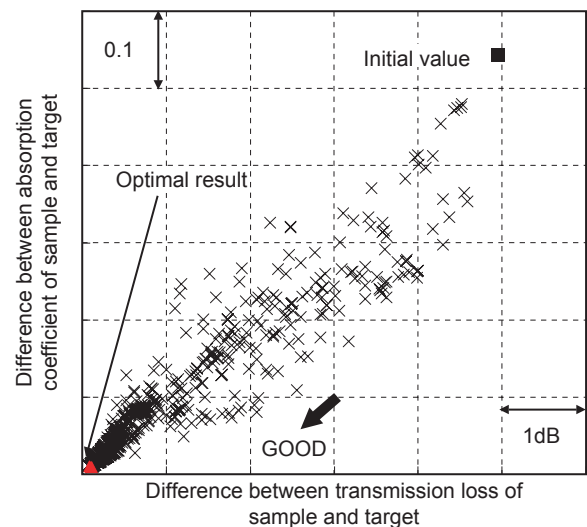


Fig. 12 Distribution of samples during optimization of thickness distribution

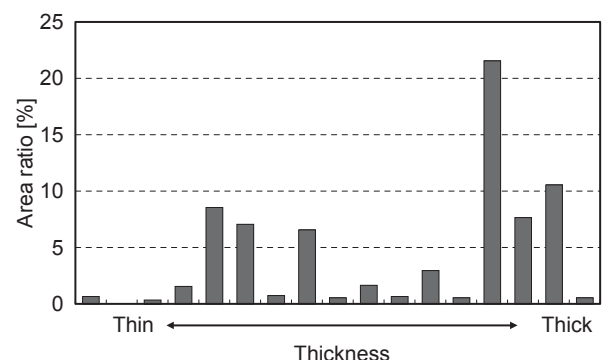


Fig. 13 Optimal random thickness distribution

5. まとめ

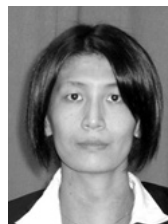
目標性能を満足する防音材仕様検討における、最適仕様探索手法を提案した。その手法の妥当性を考察し、優位性を検証した結果、以下の項目がわかった。

- (1) 目標性能を満足する防音材仕様検討のために、防音材の分割した要素における最適仕様探索と、各要素での最適板厚分布探索からなる防音材最適仕様探索手法を確立できた。
- (2) 提案した手法を用いて検討された解集合から、探索された最適解の妥当性を確認できたと考える。
- (3) 本手法を用いて、仕様の検討をおこない、実車へ適用した結果、車室内音が目標値を満足し、その妥当性を確認できた。

参考文献

- (1) 野口好洋, 土居隆之, 多田寛子, 見坐地一人: SEA 法による吸音型防音材料仕様の決定手法, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.1, p.149-153
- (2) 野口好洋, 土居隆之, 多田寛子, 見坐地一人: 次期大衆車軽量防音パッケージの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.123-05, p.11-15(2005)
- (3) 見坐地一人, 多田寛子, 山下剛, Mantovani, M., Gaudino, C., Falk, T.: Prediction of the SEA Input Parameters for the Sound Package, SAE Paper, 2003-01-1022(2003)
- (4) Schittkowski, K.: A fortran subroutine for solving constrained nonlinear programming problems, Annals of Operations Research, Vol. 5, p.485-500(1985/86)
- (5) Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., Meyarivan, T.: A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II, Technical Report 200001, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur Genetic Algorithm Laboratory(2000)
- (6) Deb, K.: Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms, Jhon Wiley & Sons(2001)

■著 者■



多田 寛子



井出 史彦



佐々木 匡



許 筠