

境界要素法と2段階探索による防音壁の最適設計

OPTIMAL DESIGN OF NOISE BARRIER BASED ON BEM WITH TWO-STAGE SEARCH

荒井 雄理¹⁾, 田中 正隆²⁾, 松本 敏郎³⁾, 荒井 政大⁴⁾

Youri ARAI, Masataka TANAKA, Toshiro MATSUMOTO, Masahiro ARAI

- 1) 信州大学大学院工学系研究科 (〒380-8553 長野市若里 4-17-1, E-mail: youri@artist.shinshu-u.ac.jp)
2) 信州大学工学部機械システム工学科 (〒380-8553 長野市若里 4-17-1, E-mail: dtanaka@gipwc.shinshu-u.ac.jp)
3) 名古屋大学大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町, E-mail: t.matsumoto@nuem.nagoya-u.ac.jp)
4) 信州大学工学部機械システム工学科 (〒380-8553 長野市若里 4-17-1, E-mail: arai@shinshu-u.ac.jp)

This paper presents a numerical approach to determine the optimal shapes of noise barriers in acoustic fields. A genetic algorithm and a gradient method are employed for search process of the optimal values of the design variables determining the barrier-shape. Although the gradient method is straightforward, it often comes across some difficulties in obtaining the optimal solution if the landscape of the objective function exhibits a multimodal property. In order to overcome this, a two-stage search approach is proposed to find the optimal solution. In the first stage, a genetic algorithm is employed to find 'rough' solutions of the design variables. In the second stage, a gradient method is applied to find a more accurate solution, which is expected to be optimal, starting from the first-stage solution as the initial value. The effectiveness of the proposed approach is demonstrated through a numerical example for a 2-D noise barrier shape optimization problem.

Key Words: Optimal Design, Noise Barrier, Boundary Element Method, Genetic Algorithm, Gradient Method

1. はじめに

環境問題に対して非常に関心が高まっている現代社会において、交通騒音問題は我々の身近にある問題である。騒音の抑制・制御の技術開発は近年盛んに行なわれており、工学あるいは環境工学の面で非常に重要なテーマの一つである。

現在採用されている道路用防音壁は、その防音効果よりも外観が優先されて設計されたり、あるいは、防音壁の有する騒音制御の技術も偶然的に発見された技術が多数であり、具体的な最適設計問題を解くことで得られた技術は少ないというのが現状である。そこで、本研究では道路用防音壁の最適設計問題を定義し、その問題を効率良く解くような数値解析手法を提案する。

最適設計問題は一種の最適化問題⁽¹⁾として考えることができる。すなわち、目的関数を定義し、その関数を最小化するような設計変数の最適値を推定する問題に帰着させることができる。目的関数を最小化するような最適化問題は、一般に目的関数の勾配を利用する勾配法が適用される。最適解の近傍が単純な凸形状を示している場合には、勾配法は目的関

数の勾配を適用しない他の反復解法に比べて解の収束は早いという特徴を有している。しかしながら、最終的な解が与えられた変数の初期値に依存してしまうため、目的関数の分布が多峰性を示す場合には適切な変数の初期値に関する考察が必要となる。簡便な方法は直接探索、すなわち、いくつかの変数の組み合わせに対して目的関数の値を計算し、そこからある程度適切であろう変数の値を求める方法である。しかしながら、このような方法は変数の値が増加するにしたがって計算コストが増大してしまうため効率的とはいえない。そこで本報ではまず、多点探索アルゴリズムである遺伝的アルゴリズム⁽²⁾を適用した1次探索を行い、適切と思われる変数の初期値を推定し、その値を用いて勾配法を適用した2次探索を行なうことでより精度の良い設計変数の値を求める2段階探索手法を提案する。

具体的には、2次元半無限の音場内に防音壁が設置されているとし、任意の評価点での音圧絶対値の平均値を下げるような防音壁形状を定義するいくつかの設計変数の最適値の推定を本提案手法により計算を行なう。音場の解析には境界要素法⁽³⁾⁽⁴⁾を適用する。また、勾配法を適用する際に必要とされる勾配ベクトルの計算は、境界要素法に基づく直接微分

法による感度解析⁽⁵⁾により計算を行う。得られた計算結果について検討・考察を行い、本提案手法の有効性について確認を行う。

2. 音場の解析

遺伝的アルゴリズムにおける適合度関数および勾配法における目的関数を計算する際に、任意の評価点における音圧値を必要とする。そこで本研究では、音圧値の計算に境界要素法を採用する。境界要素法は本研究で取り扱うような Helmholtz 方程式に支配される無限あるいは半無限の領域を有するような問題において解析精度の面で他の数値解法より優位性が存在する。

しかしながら、このような問題を境界要素法を適用して解く際に見かけの固有振動数問題⁽³⁾⁽⁴⁾が生じる。そこで、音場の境界要素解析には本グループが提案する2つの異なる境界積分方程式をソース点の位置により使い分ける音響境界要素解析手法⁽⁶⁾を適用する。

微小振幅の振動を考慮のものとし、角振動数 ω で定常振動している場合には、音場の支配微分方程式は次の非同次 Helmholtz 方程式となる⁽⁷⁾。

$$\nabla^2 p(x) + k^2 p(x) + f(x) = 0 \quad (1)$$

ただし、 $p(x)$ は音圧、 $f(x)$ は集中音源等を表すソース項である。また、 k は波数であり c を音速、 ω を角振動数とすれば次式で表される。

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (2)$$

通常の音響境界要素解析では、式(1)から導出される境界積分方程式を適用することで境界上の未知量を精度良く計算することが可能である。しかしながら前述のように見かけの固有振動数問題が生じるため、本研究では以下に示す Burton-Miller⁽⁸⁾により提案された結合境界積分方程式を正則化した式と同じ結合係数を乗じた正則化された法線方向導関数境界積分方程式の2式をソース点の位置により使い分ける方法で音場の解析を行なう。

本研究で適用される結合境界積分方程式は次式である。

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma} \left\{ (q^*(x, y) - Q^*(x, y)) + \alpha (\tilde{q}^*(x, y) - \tilde{Q}^*(x, y)) \right\} \\ & \times p(x) d\Gamma(x) + \int_{\Gamma} \left\{ (Q^*(x, y) + \alpha \tilde{Q}^*(x, y)) (p(x) - p(y)) \right. \\ & \quad \left. - \alpha \tilde{Q}^*(x, y) r_m(x, y) p_{,m}(y) \right\} d\Gamma(x) \\ & = -i\omega\rho \left[\int_{\Gamma} \{ p^*(x, y) + \alpha (\tilde{p}^*(x, y) - \tilde{u}^*(x, y)) \} v(x) d\Gamma(x) \right. \\ & \quad \left. + \alpha \int_{\Gamma} \tilde{u}^*(x, y) \left(v(x) - \frac{n_m(x) p_{,m}(y)}{i\omega\rho} \right) d\Gamma(x) \right] \\ & \quad + I (p^*(x^s, y) + \alpha \tilde{p}^*(x^s, y)) \quad y \text{ on } \Gamma \end{aligned} \quad (3)$$

また、結合係数を乗じた法線方向導関数境界積分方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} & \alpha \int_{\Gamma} \left\{ \tilde{q}^*(x, y) - \tilde{Q}^*(x, y) \right\} p(x) d\Gamma(x) \\ & \quad + \alpha \int_{\Gamma} \tilde{Q}^*(x, y) \{ p(x) - p(y) - r_m(x, y) p_{,m}(y) \} d\Gamma(x) \\ & = -i\omega\rho\alpha \int_{\Gamma} \{ \tilde{p}^*(x, y) - \tilde{u}^*(x, y) \} v(x) d\Gamma(x) \\ & \quad - i\omega\rho\alpha \int_{\Gamma} \tilde{u}^*(x, y) \left\{ v(x) - \frac{n_m(x) p_{,m}(y)}{i\omega\rho} \right\} d\Gamma(x) \\ & \quad + \alpha I \tilde{p}^*(x^s, y) \quad y \text{ on } \Gamma \end{aligned} \quad (4)$$

ここで式(3)、(4)において x は観測点、 y はソース点、 x^s は集中音源の座標、 $p^*(x, y)$ 、 $q^*(x, y)$ はそれぞれ Helmholtz の基本解とその法線方向勾配、 $u^*(x, y)$ 、 $Q^*(x, y)$ はそれぞれ Laplace の基本解とその法線方向勾配、 $\tilde{()}$ = $\partial()/\partial n(y)$ 、 $r_m = x_m - y_m$ 、 n_m は外向き単位法線方向ベクトル成分、 I は集中音源の強さ、 α は複素数の結合係数である。

3. 感度解析

勾配法を適用する際には、目的関数の勾配が必要となる。目的関数の勾配は、任意の設計変数に対する目的関数の微分量である。本研究では任意の評価点での音圧値を下げるような設計変数の最適値を求めることになるので、目的関数は評価点での音圧値に関して定義されることになる。したがって、目的関数の勾配は任意の設計変数に対する評価点での音圧感度と捉えることができる。そこで本報ではこれらの値を境界要素法に基づく直接微分法による感度解析により計算する。

本研究で採用する感度係数の計算法においては、あらかじめ計算される境界上の音圧および粒子速度を用いる。したがって、境界上の諸量の計算精度が直接的に感度係数の計算精度に影響を及ぼす。そのため、境界積分方程式を設計変数に関して微分した式から感度係数を計算する場合に見かけの固有振動数問題を回避する処理が必要となる。そこで感度係数の計算には、音場の解析に適用する2つの境界積分方程式(3)、(4)をそれぞれ設計変数に関して微分した式をソース点の位置により使い分ける方法⁽⁵⁾で感度係数の計算を行う。実際に適用した感度係数に関する境界積分方程式は、任意の設計変数 b_i を想定し、それらに関して微分を実行する以下の式である。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial b_i} \left[\int_{\Gamma} \left\{ (q^*(x, y) - Q^*(x, y)) + \alpha (\tilde{q}^*(x, y) - \tilde{Q}^*(x, y)) \right\} \right. \\ & \quad \times p(x) d\Gamma(x) + \int_{\Gamma} \left\{ (Q^*(x, y) + \alpha \tilde{Q}^*(x, y)) (p(x) - p(y)) \right. \\ & \quad \quad \left. - \alpha \tilde{Q}^*(x, y) r_m(x, y) p_{,m}(y) \right\} d\Gamma(x) \\ & = -i\omega\rho \left[\int_{\Gamma} \{ p^*(x, y) + \alpha (\tilde{p}^*(x, y) - \tilde{u}^*(x, y)) \} v(x) d\Gamma(x) \right. \\ & \quad \left. + \alpha \int_{\Gamma} \tilde{u}^*(x, y) \left(v(x) - \frac{n_m(x) p_{,m}(y)}{i\omega\rho} \right) d\Gamma(x) \right] \\ & \quad + I (p^*(x^s, y) + \alpha \tilde{p}^*(x^s, y)) \quad y \text{ on } \Gamma \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial b_i} \left[\alpha \int_{\Gamma} \left\{ \tilde{q}^*(x, y) - \tilde{Q}^*(x, y) \right\} p(x) d\Gamma(x) \right. \\
& + \alpha \int_{\Gamma} \tilde{Q}^*(x, y) \{ p(x) - p(y) - r_m(x, y) p_m(y) \} d\Gamma(x) \\
& = -i\omega\rho\alpha \int_{\Gamma} \{ \tilde{p}^*(x, y) - \tilde{u}^*(x, y) \} v(x) d\Gamma(x) \\
& - i\omega\rho\alpha \int_{\Gamma} \tilde{u}^*(x, y) \left\{ v(x) - \frac{n_m(x) p_m(y)}{i\omega\rho} \right\} d\Gamma(x) \\
& \left. + \alpha I \tilde{p}^*(x^s, y) \right] y \text{ on } \Gamma \quad (6)
\end{aligned}$$

具体的な音圧あるいは粒子速度の設計変数に関する感度係数の導出方法については、本報では紙面の都合上省略するが、詳しい導出方法については文献(5)を参照していただきたい。

4. 防音壁形状の最適化

本研究では、防音壁形状の最適化に取り組む。すなわち、防音壁形状を規定する設計変数を幾つか定義し、任意に設置された評価点での音圧値を低減するような設計変数の最適値を推定する。

一般にこのような問題では、局所最適値が多数存在してしまい、勾配法のみで大域最適値を推定するのは非常に困難な場合が多い。そこで、本研究ではまず単純遺伝的アルゴリズム(SGA)⁽²⁾による1次探索を行う。多点探索アルゴリズムであるSGAは大域的な探索が可能なアルゴリズムであり、1次探索手法として非常に適した手法である。しかしながら、最適解近傍で解の収束が勾配法などと比べると遅いという欠点も有している。そこで、1次探索により得られた1次探索解を最急降下法⁽¹⁾を適用する際の変数初期値として定義し、目的関数の極値を与えるようなより厳密な設計変数の値を推定する2段階の探索手法を適用する。

以下に本研究におけるSGAによる1次探索および最急降下法における2次探索の解析手順について説明する。

4.1. SGAによる1次探索

1次的な探索は基本的な遺伝的アルゴリズムすなわちSGAで行う。これは、2次探索として最急降下法を用いるときの変数の初期値を探索するものである。本研究で提案する最適設計手法としての適用について、箇条書きで以下に記述する。

Step 1 SGAを適用する際に必要となる以下のGAパラメータ⁽²⁾を設定する。

- 個体数, 染色体の個数, 染色体の長さ, 交叉率, 突然変異率, 世代ギャップ, 総世代数

Step 2 ランダムな染色体を有する初期個体群を生成する。

Step 3 各個体の適合度を音場の境界要素解析により計算する。

Step 4 エリート保存選択により次世代に残す個体を1個決定する。また、世代ギャップを G ($0 \leq G \leq 1$), 個体数 P とした場合、 $P \times (1 - G) - 1$ の個体を次世代に残す個体とし、それらの個体をルーレット選択により決定する。

Step 5 交叉の実行。交叉に用いる親個体を個体群からルーレット選択により2つ選択する。そして、交叉点の位置をルーレット選択により1点決定し、1点交叉により交叉を行う。

Step 6 突然変異の実行。エリート選択で選ばれた個体以外の全ての染色体の遺伝子について突然変異率にしたがって突然変異を実行する。

Step 7 **Step 3**から**Step 6**の手順を実行することで次世代の個体群が決定される。

Step 8 終了判定を行う。本研究における終了判定は、現在の世代が**Step 1**で定義された総世代数に達した場合に計算終了とする。この条件を満足した場合は計算終了であり、現在の世代が最終世代に達していない場合は**Step 3**から**Step 7**の手順を最終世代まで繰り返し実行する。

本研究では、適合度関数を次式のように定義する。

$$\phi(b_i) = p^{\max} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |p_j(b_i)| \quad (7)$$

ただし、 b_i は防音壁形状を規定する設計変数、 p^{\max} は点音源の音圧、 N は評価点の総数、 p_j は j 番目の評価点での音圧をそれぞれ表す。適合度関数(7)は、評価点でより低い音圧値 p_j を与えるような防音壁形状を規定する設計変数の値を有する個体の適合度がより大きくなるように定義されており、また、評価点での音圧値 p_j は音場の境界要素解析により計算される。

4.2. 最急降下法による2次探索

SGAによる1次探索解を変数の初期値として最急降下法による2次探索を行う。2次探索に関しても同様に、箇条書きで以下にその探索手順について示す。

Step 1 最急降下法を適用する際に必要とされる変数の初期値および目的関数 $W(b_i)$ を定義する。

Step 2 以下の処理を実行する。

- b_i^l の値における目的関数 $W(b_i^l)$ の値を境界要素解析により計算する。
- b_i^l の値における目的関数の勾配ベクトル $\nabla W(b_i^l)$ の成分を、境界要素法に基づいた直接微分法による感度解析を行うことで導出する。
- 最急降下方向 d_i^l を以下の式で定義する。

$$d_i^l = -\nabla W(b_i^l)$$

Step 3 以下の直線探索問題をPowell法を適用して解き、ステップサイズ α を決定する⁽⁹⁾。

$$\text{minimize } W(b_i^l + \alpha d_i^l) \quad \text{subject to } \alpha > 0$$

Step 4 変数 b_i を以下の式より更新する。

$$b_i^{l+1} = b_i^l + \alpha d_i^l$$

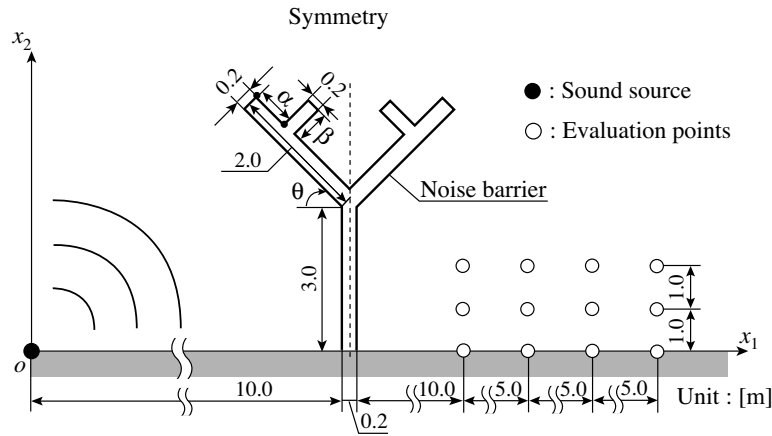


Fig. 1 Analysis model

Step 5 収束判定を行う.

ただし、各ステップにおける上付き添え字 I は反復計算回数を表す。本研究では目的関数を以下のように定義する。

$$W(b_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |p_j(b_i)| \quad (8)$$

すなわち、任意の評価点での音圧絶対値の平均値を下げるような設計変数 b_i の値を推定することになる。ここで、最急降下法を適用する際には Step 2 で説明されるように設計変数に対する目的関数の勾配が必要となる。式 (8) より、目的関数の勾配は各設計変数に対する評価点の音圧の感度として捉えることが可能であるため、本研究では境界要素法に基づく感度解析により目的関数の設計変数に対する勾配を計算する。

収束判定は以下の式を満足した場合に解が収束したとみなして 2 次探索を終了する。

$$\|W^{I+1} - W^I\| \leq 10^{-6} \quad (9)$$

5. 数値解析

数値解析対象として、Fig. 1 に示すように 2 次元半無限空間内に形状を仮定した防音壁モデルが存在する場合を考える。設計変数は防音壁の Y 字部分に設置する突起部分の位置 α および突起部分の長さ β および Y 字部分の角度 θ の 3 つとする。ただし、いずれの設計変数も正の領域のみを探索の対象とする。また、防音壁形状はその中心の面に対して対称であるとする。媒質密度 $\rho = 1.2[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、伝播速度 $c = 340[\text{m}/\text{s}]$ 、点音源 A の音圧を $(2.0, 0.0)[\text{Pa}]$ とし、壁の厚さ $0.2[\text{m}]$ 、地表面に対して垂直な部分の高さは $3.0[\text{m}]$ 、その部分から θ だけ傾いている部分の長さ $2.0[\text{m}]$ として与える。周波数は $200[\text{Hz}]$ の純音で解析する。評価点の数は Fig. 1 に示すように 12 点配置する。また、2 つの境界積分方程式を結合する複素数の係数は Cunefare-Koopmann⁽¹⁰⁾ らにしたがって i/k と定義する。

この例題に関して、 $\theta = 45[\text{deg}]$ で固定し、2 つの設計変数 α および β の最適値の推定に関する提案手法の有効性は

確認されている⁽¹¹⁾。したがって、ここでは θ も新たに設計変数として定義することで、評価点での音圧絶対値の平均値をより下げような防音壁形状を定義する 3 つの設計変数 α 、 β および θ の最適値を推定する。

ここで、本例題における解の性質について考える。この例題では 3 つの設計変数 α 、 β および θ の最適値を探索するのだが、これらの設計変数と目的関数との関係を表す解空間を厳密に図示するのは困難である。そこで、 $\theta = 45[\text{deg}]$ で固定した場合における解空間の図を Fig. 2 に、また、設計変数の値を 4 通り仮定し、それらを初期値として最急降下法のみを適用した場合の結果を Table 1 に示す。ただし、Fig. 2 において右上半分の白塗り部分は後に定義する制約により定義域に含まれない部分である。Fig. 2 および Table 1 より、この例題は局所最適値が多数存在する問題であり、勾配法のみで最適値を求めるのは非常に困難であり、SGA による 1 次探索を行う必要があると考えられる。

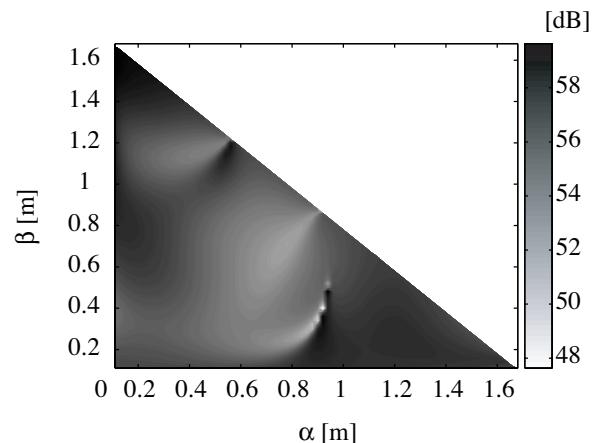


Fig. 2 Distribution of objective function for fixed $\theta = 45[\text{deg}]$

5.1. 1 次探索

まず、1 次探索として SGA による解析を行う。GA パラメータの値はそれぞれ、個体数 100、世代数 100、染色体は各設計変数 α 、 β および θ に対してそれぞれ 1 つずつの計 3 つ、

Table 1 Numerical results obtained by applying Steepest Descent Method for different initial design variable values

	α [m]	β [m]	θ [deg]	SPL [dB]
Initial 1	0.2500	0.7500	60.0000	54.8348
Optimal 1	0.7679	0.4211	66.1466	47.6016
Initial 2	0.1500	0.5000	15.0000	50.1275
Optimal 2	0.1783	0.5731	25.9091	39.5677
Initial 3	0.5000	0.5000	30.0000	50.9938
Optimal 3	0.6660	0.4292	26.4031	46.3583
Initial 4	0.7500	0.7500	10.0000	46.5229
Optimal 4	0.7870	0.6923	9.5267	44.9407

染色体の長さはそれぞれ 24 ビット, 世代ギャップ $G = 0.8$, 交叉率 $p_c = 0.8$, 突然変異率 $p_m = 0.001$ とする. 交叉は 1 点交叉でルーレット選択より交叉する個体を決定する. また, 適合度関数は式 (7) で定義される.

なお, Fig. 1 の防音壁形状を与える設計変数 α , β および θ に関して, 下記の制約条件を課す. これらの制約条件は, 左右対称な形状同士が対称面上で互いに接触しないための条件である.

$$\begin{cases} 0 \leq \alpha \leq 1.8 \\ 0 < \theta < 90 \\ \frac{1.8 - \alpha}{\tan \theta} > \beta \quad (\beta > 0) \end{cases} \quad (10)$$

本研究では制約に違反するような個体は, その個体の適合度を 0 として処理し, 数値計算は異なる初期個体群に対して 5 回計算を実行する.

Fig. 3 に世代に対する各試行における最優良個体の音圧レベルの推移を示し, Table 2 に最終世代における各試行の設計変数 α , β および θ の値とそれらの値により定義される形状における音圧レベルをそれぞれ示す.

Table 2 Numerical results obtained by applying SGA

	α [m]	β [m]	θ [deg]	SPL [dB]
Trial 1	0.1284	0.5169	29.1942	36.2013
Trial 2	0.1478	0.5367	27.8565	35.9896
Trial 3	0.1318	0.5224	29.1599	36.1686
Trial 4	0.1285	0.5188	29.4629	36.2510
Trial 5	0.1361	0.5258	28.6969	36.0931

5.2. 2 次探索

1 次探索により得られた各試行の設計変数の値を初期値として最急降下法による 2 次探索を行う. 目的関数は式 (8) で

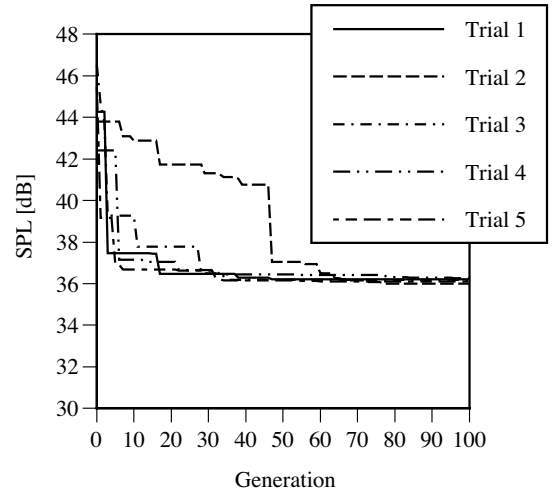


Fig. 3 Generation v.s. SPL for 100th generation

定義し, 収束条件は式 (9) を満足した場合に解が収束したと判断する.

Fig. 4 に各試行における 1 次探索解を初期値として定義して最急降下法を適用した場合の音圧レベルの推移を示し, Table 3 に各試行における最終的な設計変数 α , β および θ の値と, それらの値により定義される形状における音圧レベルをそれぞれ示す. また, 比較のために Table 4 に $\theta = 45$ [deg] で固定し, 2 つの設計変数 α および β の最適値の推定に提案手法を適用して得られる最終的な各設計変数の値ならびに与えられる音圧レベルをそれぞれ示す. ただし, 数値解析の条件は本例題と同様の条件である.

この例題の解析において最急降下法を適用した 2 次探索を行った場合は, 音圧レベルが SGA による 1 次探索により得られた値からほとんど変化せず, 1 次探索解を最適解と定義することが可能である. これは, Table 3 の最終的な各試行における設計変数 α , β および θ の値とそれらにより定義される形状から与えられる音圧レベルより, この例題は最適値近傍における目的関数の分布が非常になだらかな凸形状の様相を呈していることにより, 最適値としてとり得る設計変数の値が多数存在するような問題であると考えられる. したがって Fig. 3 より, 最終世代数をより少なく設定して, そこでの各設計変数の値を用いて最急降下法を適用することでより短時間で最適解を得ることが可能であると考えられる. しかしながら, 直接探索でそのような各設計変数の値を決定するには膨大な数の組み合わせで計算を行うことが要求され, 相当な労力が必要であると考えられる. また, 若干ではあるが 2 次探索を行うことで音圧レベルが 1 次探索に比べて下がっていること, 設計変数として θ を加えたことで, どの試行においても θ を固定した場合より音圧レベルが 12 [dB] 程度下がるような防音壁形状が推定されていることより本提案手法の有効性を確認できるような計算結果であると思われる.

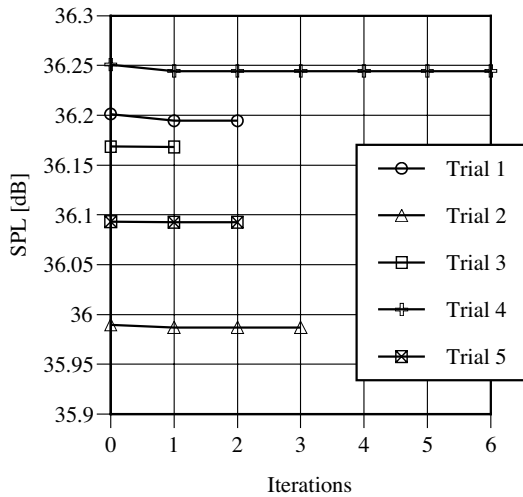


Fig. 4 Iteration v.s. SPL

Table 3 Numerical results obtained by applying Steepest Descent Method

	α [m]	β [m]	θ [deg]	SPL [dB]
Trial 1	0.1280	0.5172	29.1923	36.1946
Trial 2	0.1475	0.5368	27.8558	35.9870
Trial 3	0.1316	0.5225	29.1594	36.1682
Trial 4	0.1281	0.5190	29.4381	36.2445
Trial 5	0.1360	0.5259	28.6965	36.0925

Table 4 Optimal values for design variables obtained by applying proposed method in α and β

	α [m]	β [m]	SPL [dB]
Trial 1	0.9170	0.3885	48.0499
Trial 2	0.9154	0.3838	48.1878
Trial 3	0.9186	0.3938	47.8942
Trial 4	0.9171	0.3888	48.0402
Trial 5	0.9108	0.3854	48.1108

6. 結論

道路用防音壁の最適設計問題に対して、単純遺伝的アルゴリズムと最急降下法を適用した2段階探索手法を適用することに関して検討を行った。音場の解析には見かけの固有振動数問題を回避する新たな音響境界要素解析法を適用し、目的関数の勾配ベクトルの計算には境界要素法に基づく直接微分法による新たな感度解析手法を適用した。具体的な防音壁の最適設計問題に対して本提案手法を適用し、手法の有効性に関する考察を行った。

本提案手法は、解空間が多峰性を示し GA のみで目的関数の極値を与えるような最適値を求めるのが困難な場合の問題に対して有効な探索手法であると考えられる。今後は様々な例題解析を行い、本提案手法の位置づけをより明確にする必要があると考える。

参考文献

- (1) 山川宏：最適化デザイン，(1993)，培風館。
- (2) 坂和正敏，田中雅博：遺伝的アルゴリズム，(1995)，朝倉書店。
- (3) 田中正隆，松本敏郎，中村正行：境界要素法，(1991)，培風館。
- (4) 小林昭一：波動解析と境界要素法，(2000)，京都大学学術出版会。
- (5) 荒井雄理，田中正隆，松本敏郎：見かけの固有振動数問題を回避した境界要素法による音響問題の新しい設計感度解析法，日本機械学会論文集，**73**-729 C (2007) pp. 1392-1399。
- (6) 田中正隆，荒井雄理，松本敏郎：音場の見かけの固有振動数問題を回避するための境界要素解析法（第2報，改訂版），日本機械学会論文集，**72**-719 C (2006) pp. 2088-2093。
- (7) 一宮亮一：機械系の音響工学，(1992)，コロナ社。
- (8) A. J. Burton, G. F. Miller：The application of integral equation methods to the numerical solution of some exterior boundary-value problems, *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, **323** (1971) pp.201-210。
- (9) R. L. Fox: Optimization methods for engineering design, *Addison - Wesley Publishing Company*, (1971) pp. 38-116。
- (10) K. A. Cunefare, G. Koopmann：A Boundary element method for acoustic radiation valid for all wavenumbers, *J. Acoust. Soc. Am.*, **85** (1989) pp. 39-48。
- (11) 荒井雄理，田中正隆，松本敏郎，荒井政大：境界要素法による2次元音場の最適形状推定，日本機械学会第20回計算力学講演会講演論文集，No. 07-36 (2007) pp. 441-442。
- (12) A. S. Sarigül, A. Seğgin：A Study on the Applications of the Acoustic Design Sensitivity Analysis of Vibrating Bodies, *Applied Acoustics.*, **65** Issue 11(2004) pp. 1037-1056。
- (13) Z. Wei, L. Qi, H. Jiang：Some Convergence Properties of Descent Method, *Journal of Optimization Theory and Applications*, **95** No. 1 (1997) pp. 177-188。