

進化計算による設備騒音の最適消音設計システムの開発

荒木 陽三*¹・浜田 由記子*¹・田中 ひかり*¹・増田 潔*¹

Keywords : equipment noise, acoustic silencer, mathematical optimization, evolutionary computation

設備騒音, 消音装置, 数理最適化, 進化計算

1. はじめに

工場やごみ処理場, データセンターなどの施設では, 室外機や冷却塔をはじめ, 様々な建築設備が敷地内に設置され, 多い場合にはその数は数百におよぶこともある。そして, その設備の一つ一つが騒音を発生させる騒音源であり, そこで発生した音波は敷地境界, さらに敷地外まで伝搬する。このような施設で発生する騒音に対して, 法律や条例で規制値が定められており, 敷地境界において騒音レベルをその規制値以下に抑えなければならない。そのため, 設備の設置計画時には屋外騒音伝搬の予測を行い, もし敷地境界において複合騒音の騒音レベルが規制値を超えることが予測される場合には騒音を低減する対策が必要である。

設備騒音を低減するために一般的に講じられる対策の一つは, 騒音を発生させる設備を取り囲むように防音塀を設置することである。防音塀を設置してもなお規制値を超えることが予測される場合, 各設備に消音装置を設置して対策することがある。消音装置は主にグラスウールと鋼板で構成され, その内部で音響エネルギーを吸収することで設備から放射されるパワーを低減するものである。

消音装置は消音性能の周波数特性とコストが異なる様々な種類のものが存在し, 消音性能が優れているものほどコストが高い。そのため, できるだけ安い消音装置を選択して敷地境界における騒音レベルを規制値以下とすることが望ましい。しかし, 敷地境界において観測される騒音レベルは一つの設備に起因するものではなく, すべての設備から発生した騒音の合成値であるため, 一つの設備に対してその騒音レベルが敷地

境界で規制値以下となるように消音装置を選定するだけでは不十分である。その他の設備に起因する騒音についても考慮し, それらの合成値が敷地境界において規制値以下となるように各設備に適切な消音装置を選ぶ必要がある。そのような消音装置の組み合わせは無数に存在し, その中から設置する消音装置の総コストが安くなる組合せを選ぶことは容易ではない。

従来は専門技術者が各設備のパワーレベルと騒音伝搬予測結果に基づいてできるだけ低コストで規制値を満たすように試行錯誤しながら消音装置を選定していたが, 大規模な工場や施設では対策すべき設備の数が数百台におよぶこともあり, 多大な労力と時間を要していた。また, 騒音源や消音装置, 設備から敷地境界への伝搬にはそれぞれ周波数特性があり, それらを詳細に考慮して設計することは人の手では困難であった。

そこで, 本研究では消音装置の選定に数理最適化技術の一つである進化計算を適用し, 消音装置選定の自動化および消音装置にかかるコストの削減を試みた。次章以降では, まず設備に設置する消音装置の最適な組合せを選定する手法について説明する。最適化の中で, 設備に消音装置を設置したときの敷地境界における騒音レベルを評価する必要があるが, そのための騒音伝搬予測手法についても述べる。そして, 設備機器が多数配置された架空のごみ処理場に対して, 消音装置による対策を施す問題を設定し, 提案手法と従来のように専門技術者が消音装置を選定した場合で, 設計に要した時間と消音装置にかかるコストを比較する。

*1 技術センター 先進技術開発部 AI連携技術開発室

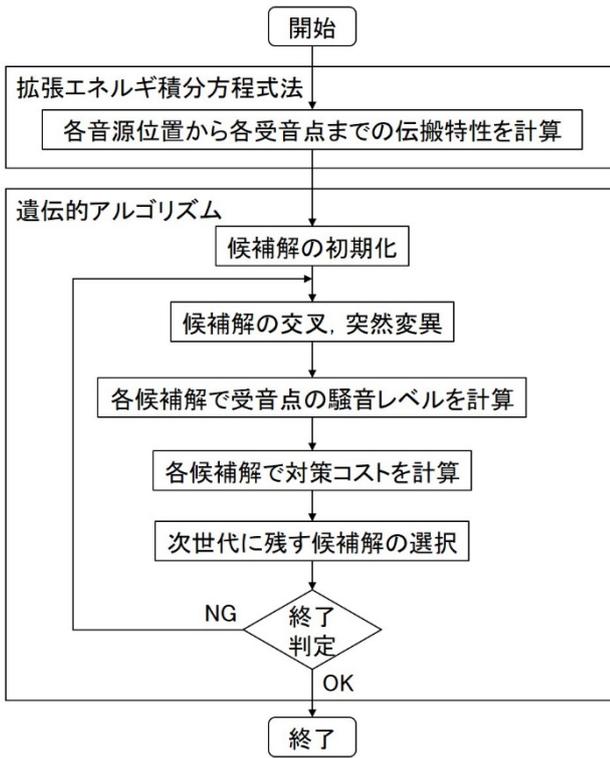


図-1 提案する最適消音設計のフローチャート
Fig. 1 Flowchart of proposed optimum attenuation design

2. 消音装置の最適設計手法

2.1 最適化の概要とフローチャート

消音装置のフローチャートを図-1 に示す。本システムでは各音源、つまり各設備の位置から敷地境界上に設けた受音点までの伝搬特性の予測結果を入力として最適化手法により各設備に設置する消音装置を選定する。この音源位置から受音点までの伝搬特性は拡張エ

ネルギー積分方程式法により予測する。次に最適化手法としては生物の進化の過程を模倣しながら、最適解を探索する進化計算を用いる。次節では具体的なアルゴリズムについて説明する。

2.2 騒音伝搬予測手法

提案する最適化手法では、各設備機器に消音装置を設置した場合の敷地境界における低減量を全ての設備に関して評価する必要がある、そのためには各設備機器の設置位置から敷地境界上の受音点までの伝搬をあらかじめ予測により求めておく必要がある。

このような音響予測手法には、時間領域有限差分法や有限要素法、境界要素法に代表される波動音響理論に基づく手法と音線法や幾何音響理論に基づく手法がある。屋外騒音伝搬の予測はスケールが大きいいため、差分法や有限要素法、境界要素法などの波動音響理論に基づく数値シミュレーション手法を用いることは現実的ではない。そこで、幾何音響理論をベースとし、境界面の要素間の関係式から連立方程式を構築してエネルギー場を解析するエネルギー積分方程式を応用した拡張エネルギー積分方程式法を用いる。拡張エネルギー積分方程式法は波動音響理論による手法よりも効率的な予測が可能であり、反射・回折・音響透過といった波動現象も近似的に考慮することが可能である。また、予測結果が実測結果とよく対応することも示されている。図-2 に拡張エネルギー積分方程式法による騒音伝搬の予測例を示す。

i 番目の設備のパワーレベルを $L_{w,i}$ 、拡張エネルギー積分方程式法により予測した i 番目の設備から j 番目の受音点までの伝搬による減衰量を R_{ij} 、 i 番目の設備に設置する消音装置の減衰量を R'_i とすると、 i 番目の設備に起因し、 j 番目の受音点で観測されるバンド音圧レベル L_{ij} は、

$$L_{ij} = L_{w,j} - R_{ij} - R'_i \quad (1)$$

により求められる。 j 番目の受音点において全ての設備からの影響を考慮したバンド音圧レベル L_j は、 L_{ij} の i に関するエネルギー和となる。なお、受音点におけるバンド音圧レベル L_j に周波数重み特性を足し合わせ、全バンドについてエネルギー和をとったものが騒音レベルである。式(1)において、 R_{ij} が拡張エネルギー積分方程式法によって計算される値であるが、これは設備と受音点の位置によってのみ決まり、最適化の対象ではないため、最適化の処理の前に一度だけ求めておけば以降の最適化の過程では繰り返し計算する必要はない。

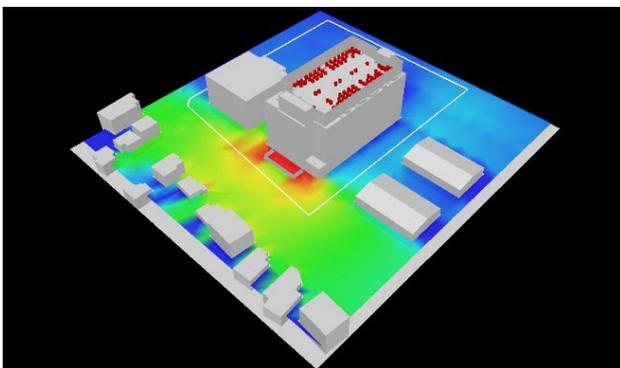


図-2 拡張エネルギー積分方程式法による屋外騒音伝搬の予測例

Fig. 2 Example of outdoor noise propagation prediction by using extended energy integral equation method

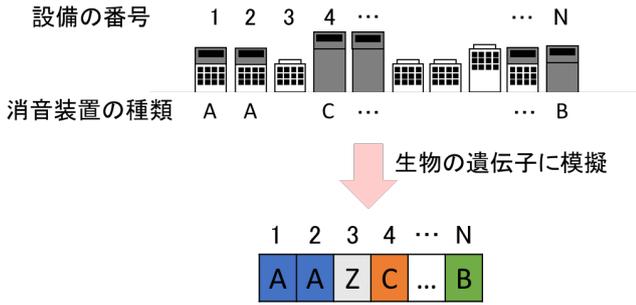


図-3 GAにおける設計変数の遺伝子表現
Fig. 3 Encoding of design variables in GA

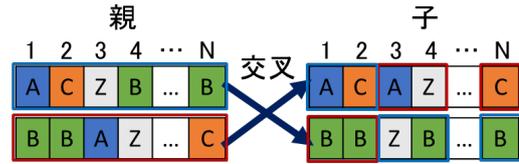


図-4 交叉操作の例
Fig. 4 Example of crossover operation

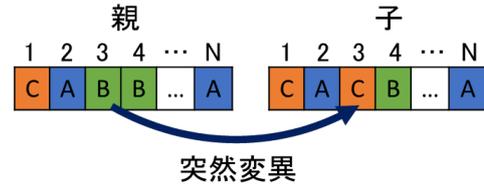


図-5 突然変異操作の例
Fig. 5 Example of mutation operation

2.3 数理最適化手法

本研究で対象としている問題は、数十～数百台の設備機器に対して、消音装置の種類を選定する問題であり、組合せ最適化問題に分類される。組合せ最適化問題を解くアルゴリズムとして、工学的問題に対して数多く応用されており、実績も多い遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以下 GA) を本研究では用いる。

GA は生物の進化の過程を模倣しながら最適解を探索する進化計算の一つで、図-3 に示すように設計変数 (ここでは設備に設置する消音装置の種類) を遺伝子列に見立てて、選択 (自然淘汰)、交叉、突然変異という操作を繰り返すことにより最適な遺伝子 (消音装置の組合せ) を探索する。GA の基本的な手順は次のとおりである。

1. 初期化
世代 $t = 0$ とし、初期解集団 $P(t)$ を生成する。
2. 選択
集団 $P(t)$ の i 番目の個体について適応度 g_i を求め、選択操作を行い、 $P'(t)$ を生成する。
3. 交叉
集団 $P'(t)$ に交叉操作を行い、 $P''(t)$ を生成する。
4. 突然変異
集団 $P''(t)$ に突然変異操作を行い、次世代の集団 $P(t + 1)$ を生成する。
5. 反復
終了条件を満たせば、現在の解集団の中から最良の実行可能解を出力して終了。そうでなければ $t = 0$ として 2.へ。

次に、選択、交叉、突然変異の具体的な操作について説明する。

2.3.1 選択 (自然淘汰)

集団の中で優れている個体を次世代に残す操作が選択(自然淘汰)である。選択の操作は様々なものが提案

されているが、本システムではルーレット選択とエリート戦略を採用している。

まず、ルーレット選択とは、集団 $P(t)$ に含まれる i 番目の個体の適応度を g_i 、その総和を G とすると、選択後の集団 $P'(t)$ に個体 i が確率 g_i/G で含まれるように集団 $P'(t)$ を決める方法である。なお、 g_i の決め方については後述する。ルーレット選択では、適応度 g_i が大きい、つまり優れている個体ほど次世代に残る可能性は高いが、乱数で決めるため、最も優れている個体が次世代に選ばれない可能性もゼロではない。その場合、最適解への収束が遅くなってしまいうことも考えられる。

そこで、ルーレット選択に加えてエリート戦略を採用する。エリート戦略とは適応度が大きい個体については、無条件で集団 $P'(t)$ に残すという方法である。このエリート戦略によって、適応度が大きい個体が淘汰されることを防ぎ、最適解への収束が早くなるのが期待できる。

2.3.2 交叉

交叉とは集団 $P'(t)$ から $P''(t)$ を生成する際に、確率 p_c で集団の中の個体をかけあわせて、個体を変化させる操作である。ここで、 p_c を交叉率という。交叉の例を図-4 に示す。個体の遺伝子列 s が遺伝子(本システムでは消音装置の種類を表すインデックス) s_j を並べた $s = s_1s_2 \dots s_N$ と表されるとき、親となるランダムに選ばれた二つの個体を s^{P_1} と s^{P_2} 、その交叉によって生成される子を s^C とする。交叉によって遺伝子をどちらの親から遺伝するか決めるためのマスク $z = z_1z_2 \dots z_N$ をランダムに生成し、各 j に対して $z_j = 0$ であれば $s_j^C = s_j^{P_1}$ 、 $z_j =$

1であれば $s_j^f = s_j^{P2}$ とする。

2.3.3 突然変異

上記の交叉の操作だけを繰り返すと、集団が収束してきたときに局所的最適解に陥ってしまうことがある。このことを解消する役割をもつ操作が突然変異である。突然変異の例を図-5に示す。突然変異ではある個体の j 番目の遺伝子 s_j を確率(突然変異率) p_m でランダムな値に変化させる。これによって、集団の中の個体の交叉だけでは生成できない個体へ変化させることで、より優れた解の探索を期待するものである。

2.4 適応度の設定

前節で述べたGAにおける選択の操作の中で個体の適応度(目的関数) $g_i(\geq 0)$ を評価するが、この適応度についてはGAを適用する問題に応じて設定が必要である。また、GAでは一般的に制約条件を課すための操作がないため、制約条件の評価も適応度に組み込むこととする。

消音対策を施す設備の数を M 、敷地境界上に配置した受音点の数を N としたとき、 i 番目の個体の適応度 g_i を次式で定義する。

$$g_i = \begin{cases} Q_i & \text{if } Q_i < N \\ Q_i + MC_{max} - C_{tot}^i & \text{if } Q_i = N \end{cases} \quad (2a)$$

$$(2b)$$

ここで、 Q_i は i 番目の個体(すなわち消音装置の組合せを表す)を採用したときに、規制値を満たしている受音点の数、 C_{max} は選択可能な消音装置のうち最も高い消音装置のコスト、 C_{tot}^i は i 番目の個体の消音装置の総コストである。規制値を満たしている受音点の数 Q_i によって評価する適応度の定義を変えており、式(2a)は規制値を満たしていない受音点がある場合の適応度、式(2b)は全受音点で規制値を満たしている場合の適応度である。適応度を段階的に変えている理由は、制約

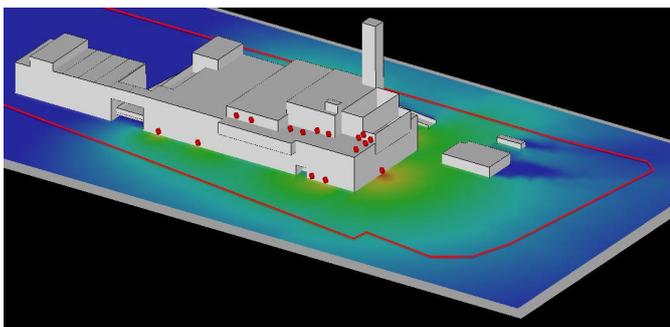


図-6 最適化の対象としたごみ処理施設

Fig. 6 Disposal center optimized in numerical example

条件として「全受音点において規制値を満足していること」を課し、例えば対策コストが安くても、規制値を満足していない受音点がある場合には式(2a)によって適応度を小さく評価するためである。全受音点で規制値を満足している場合の式(2b)において、 $MC_{max} - C_{tot}^i$ はコストが高い消音装置を割り当てるほど評価が小さく、コストが安い消音装置を割り当てるほど評価が大きくなることを意味している。なお、 MC_{max} は M 個の設備に対して最もコストの高い消音装置を設置した場合の総コストを表しており、式(2b)の値が式(2a)よりも小さくならないようにするためのオフセットである。

3. 最適設計例

3.1 設計条件

本章では開発したシステムによる消音装置の最適設計例について述べる。図-6に示すようなごみ処理場において、建物周辺に設置される32台の設備の複合騒音の騒音レベルが敷地境界で40dB以下となり、かつ消

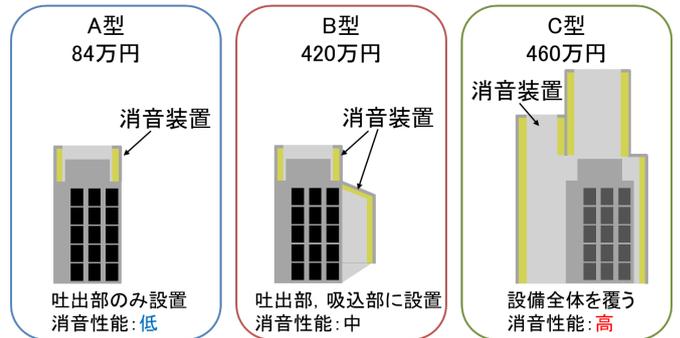


図-7 選定候補とした消音装置の種類

Fig. 7 Types of candidate silencers

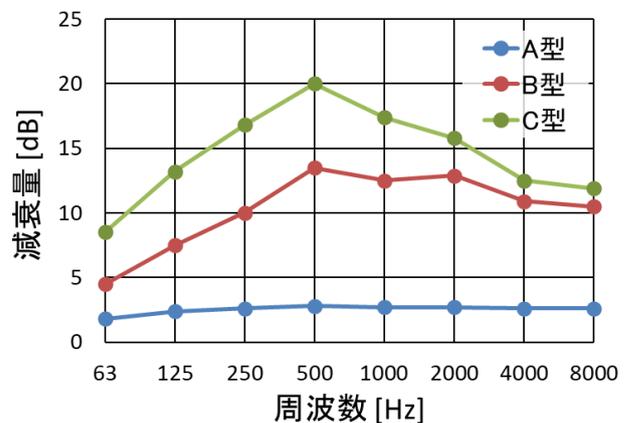


図-8 消音装置の周波数特性

Fig. 8 Frequency characteristics of silencers

音装置の総コストが最小となるように消音装置を選定する例で検討を行った。選定の候補とした3種類の消音装置の種類を図-7に示す。吐出部のみに設置するA型(84万円)、吐出部に加えて、吸込部にも設置するB型(420万円)、設備全体を覆うC型(460万円)を各設備に割り当てることとした。また、それらの減衰量の周波数特性を図-8に示す。なお、対策なしという選択も含めると、1台の設備あたりの選択肢は全部で4つあり、組み合わせの総数としては約10の20乗という数になる。

GAにはパラメータとして、交叉率 p_c 、突然変異率 p_m 、1世代あたりの個体数があり、これらは設計者が設定する必要がある。これらは他の進化計算のアルゴリズムにみられるパラメータであるが、GAは交叉が主要な探索の操作であるため、交叉率を比較的大きめの値に設定し、逆に突然変異率については大きいと収束しないため、小さい値に設定するのがよいとされている。本検討では交叉率 p_c は0.7、突然変異率 p_m は0.05、1世代あたりの個体数は100とした。

なお、同様の問題に対して、従来のように専門技術者による消音装置の選定も行い、本システムによる最適化の結果と比較を行った。

3.2 最適設計結果

本システムによって、選定した各消音装置の数を表-1に示す。なお、専門技術者が検討して選定した場合の消音装置の数を従来設計として同表に示している。いずれの結果も敷地境界における騒音レベルの予測結果は規制値の40dB以下である。従来設計では消音装置の総コストが約5千万円だったのに対して、本システムで選定した結果は3千万円であった。つまり、人の手による従来設計に対して、本システムでは総コストを40%削減することができた。また、設計にかかった時間についても従来の専門技術者による設計では約2日要していたのに対して、本システムでは1時間で終えることができた。

本システムでコストを大きく削減できるより最適な消音装置の組合せを選定できた要因として、従来の専門技術者による設計では、設備のパワーレベルや消音装置の減衰量の周波数特性までは考慮していなかった

ことが考えられる。時間が限定された実務の中で、それぞれの周波数特性まで考慮することは人の手による設計では不可能である。しかし、本システムでは最適化手法を用いて自動化することによって、各設備のパワーレベル、伝搬、消音装置の消音性能、それぞれの周波数特性まで詳細に考慮して最適化することが可能になった。その結果、従来よりも低コストな消音装置の組合せを選択することができた。

表-1 消音装置の最適設計結果

Table 1 Optimum assignment result of silencers

消音装置の種類	A型	B型	C型	総コスト
コスト	84万円	420万円	460万円	
従来設計	0台	12台	0台	5千万円
GA	5台	4台	2台	3千万円

4. まとめ

本論文では建築設備が多数設置される施設における設備騒音を対象として、その対策を低コストで立案する方法を提案した。具体的には、各設備に設置する消音装置の組合せを、設備の複合騒音が敷地境界において規制値以下、かつ消音装置の総コストが最小となるように選定する手法をGAによって構築した。32台の設備に対して3種類の消音装置を含む4種類の対策を選ぶ例では、従来の専門技術者による設計では合計5千万円の消音装置が必要だと設計していたのに対して、本システムでは合計3千万円で敷地境界において規制値を満足するような消音装置の組合せを選定し、対策にかかるコストを大きく削減できることを示した。また、設計にかかる時間についても2日から1時間に大きく削減することができた。

参考文献

- 1) 増田潔：拡張エネルギー積分方程式法による騒音伝搬予測，大成建設技術センター報，第36号，46，2003。