

## Particle Swarm Optimization による音響反射板の最適設計

正会員 ○太刀岡勇気\*

音響反射板 PSO 幾何音響解析

## 1. はじめに

コンサートホール等の音響的な配慮が必要とされる空間においては、直接音を補う初期反射音を音場全体に分散するために、音響反射板(いわゆる浮雲)が天井に設置される。波動解析による検討も行われているが[1]、このような反射板の形状は実験によって決められることが多い。最適な形状を決定するためには繰り返し実験を行う必要があり、その手間は大きい。数値解析により最適な設計が行えればその手間を小さくできる。電磁界解析において、アンテナを覆うレドームの最適化に幾何光学法と Particle Swarm Optimization(以下 PSO) [2]を組み合わせた例が見られる[3]。そこで本報では幾何音響解析と PSO を組み合わせ、反射板の形状の最適化設計を行う。

## 2. PSO の原理

PSO は、遺伝的アルゴリズムのようなグローバル最適化を目的とする最適化手法であり、様々な分野に応用されている。ここではその原理を述べる。PSO において、集団は個体から構成される。ここで  $k$  回目の反復における個体  $i$  の位置・速度ベクトルをそれぞれ  $x_i^k$ ,  $v_i^k$  とすると、 $k+1$  回目のそれは Eqs. (1), (2) により更新される。

$$v_i^{k+1} = \gamma v_i^k + c_1 \eta (x_{best(i)}^k - x_i^k) + c_2 \eta (x_{best}^k - x_i^k) \quad (1)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + t v_i^{k+1} \quad (2)$$

ここで  $x_{best(i)}^k$  は個体の最適解、 $x_{best}^k$  は集団の最適解の位置ベクトルであり、 $\gamma$  は inertia weight、 $c_1$ ,  $c_2$  は定数、 $\eta$  は [0,1] の乱数である。(パラメータは、 $\gamma=0.6$ 、 $c_1=1.0$ 、 $c_2=1.0$ 、 $t=1$ 、 $v_i^0=0$  にそれぞれ設定した。) Eq. (1) の第1項は慣性項、第2項は局所的な最適解を探索する項、第3項は大域的な最適解を探索する項である。個体は自身の最適解  $x_{best(i)}^k$  と、集団の最適解  $x_{best}^k$  に引き寄せられる。また移動速度  $v_i$  は最適解から遠い個体ほど大きい。PSO は遺伝的アルゴリズムに比べて収束速度は速いが、突然変異の機構は強力には働かないので、初期値の影響で局所的な最適解に陥ることもある。そこで本報では3つの初期値から開始し、100回繰り返して最適化を行った。

## 3. 解析対象

解析の対象としたホールを Fig. 1 に示す。図のように室形状、吸音率等を設定した。(Sabine 1.85 秒、Eyring 1.52 秒である。) 反射板は図の点線位置に  $N \times N$  個配置した。形状は文献[1]を参考に、Eq. (3) の形とした。この際  $q$  は 0.6 で固定し、 $\theta$  および  $\beta$  を最適化の変数とした。

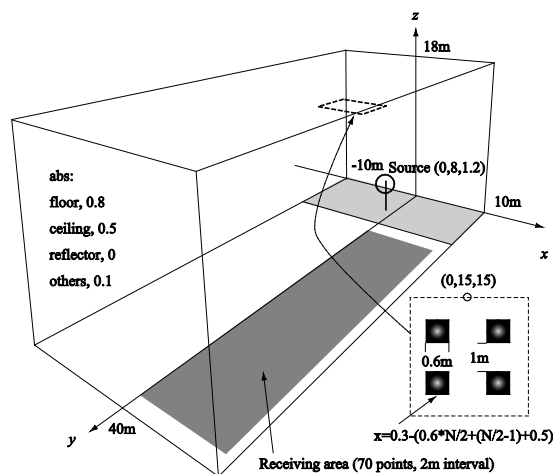


Fig. 1 Geometry of an analyzed hall.

$$z' = \frac{q}{\sin(\theta)} - \left( \beta \sqrt{\left( \frac{q}{\sin(\theta)} \right)^2 - x'^2} + (1 - \beta) \sqrt{\left( \frac{q}{\sin(\theta)} \right)^2 - y'^2} \right) \quad (3)$$

反射板の拡散係数  $s$  は 0 (固定)の場合と、最適化変数に含めた場合の2通り実験した。拡散反射時には、境界で乱数によりランベルト則に従うよう反射方向を決定した。

次に評価関数  $F$  を決定する。音響反射板は、初期反射音を分散し、多くの場所に直接音を補う初期反射音を到達させるのとともに、ある特定の場所に反射音が集中することを避けることを目的としている。周囲の受音点と音響指標が大きく異なる受音点では、音響障害が起こっている可能性がある。一つの考え方として、これを避けるためには、室内音響指標のばらつきを小さくすることが考えられる。そこで評価関数  $F$  としては、Eq. (5) のように各受音点における残響時間( $T_{20}$ )、クラリティー( $C_{80}$ )、時間重心( $T_s$ )の3つの室内音響指標の標準偏差  $\sigma$  の逆数の和とした。

$$F(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sigma(T_{20})} + \frac{1}{\sigma(C_{80})} + \frac{1}{\sigma(T_s)} \quad (4)$$

## 4. 結果と考察

まず、繰り返しによる評価関数の集団の最大値の推移を示す。3つの初期値から始めて、最終的な評価関数の最大値が最も高かったものを示している。乱反射を考慮しない場合を Fig. 2 に示す。乱反射を考慮した場合も同傾向であった。このように、どちらもほぼ単調に増加しており、100回の繰り返してほぼ収束している。

次に  $N=3$  の場合の100回繰り返しの最適化変数(乱反射なしの場合)の分布を Fig. 3 に示す。(最も  $F$  の値の高

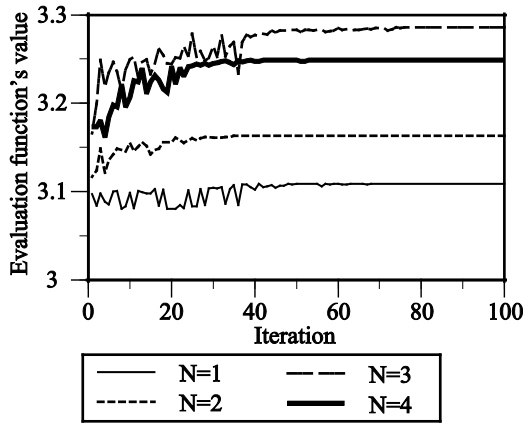


Fig. 2 Change in a maximum value of evaluation function by iteration without diffuse reflections.

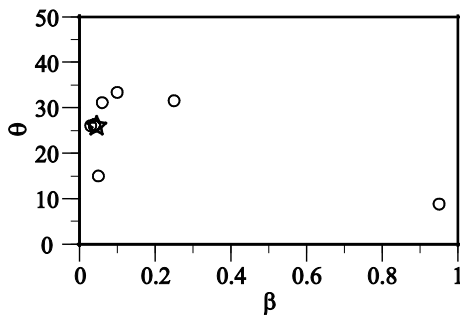


Fig. 3 Value after 100 iterations on  $\beta$ - $\theta$  plane corresponding to 1<sup>st</sup> set of initial value.

い点を星で示す。) 初期状態では $\beta$ - $\theta$ 平面に点がほぼ均等に分布しているが、集団の最適解に吸い寄せられるように個体が移動した。乱反射ありの場合も同傾向を示した。本手法による改善の程度を見るために、 $N=3$ で(乱反射ありの場合)の各受信点での $C_{80}$ の値をFig. 4に示す。図中縦の区切り位置が、列のステージに最も近い点である。最適化によって、ばらつきが小さくなっている。特に、受信点中央から1列目の中後方付近(ID20~30)の改善が著しい。これは反射板の影響で直接音をサポートする低次の反射音を受音点に到来し、明瞭性が増したためである。

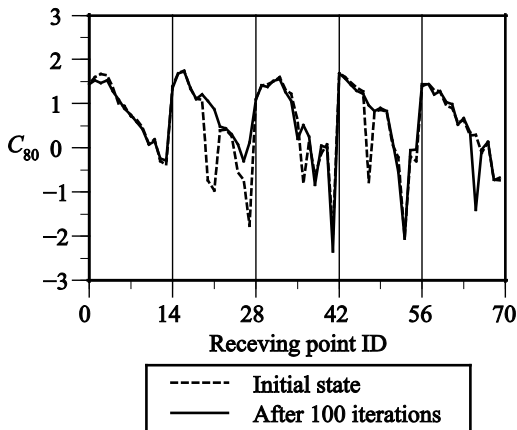


Fig. 4  $C_{80}$  respective to receiving points at initial state and after optimization. (with scattering reflections,  $N=3$ )

最後に100回繰り返し後の $\beta$ と $\theta$ の分布をFig. 5に示す。乱反射なし・ありで結果は近い。 $N=2$ と $N=4$ は反射板が $y$ 軸上( $x=0$ )にないことが、 $N=1$ と $N=3$ は反射板が $y$ 軸上( $x=0$ )にあることが共通している。前者は $\theta$ の値が小さく、ほぼ平板である。反射板が反ると中心部の間隔があき、吸音率の高い天井に直接波が入射し、 $y$ 軸付近の受信点の明瞭性が低下するため、平板に近い形にして、反射板間の隙間が空かないようにした方が $F$ を大きくできたと思われる。後者の場合は、 $\theta$ の値が比較的大きい。 $y$ 軸上には反射板があるため、中心部に反射が返らなくなることはなく、なるべく反ることで側方にも反射波を反射させることが有効であるためと考えられる。 $\beta$ の大小は側方と後方どちらに反射音を到達させることを重視するかに対応している。Fig. 6に、 $\theta$ が同じ場合の $y$ - $z$ 平面の断面図を、 $\beta$ の大小に対応して示す。 $N=3$ の場合は側方への反射音を重視していると考えられる。

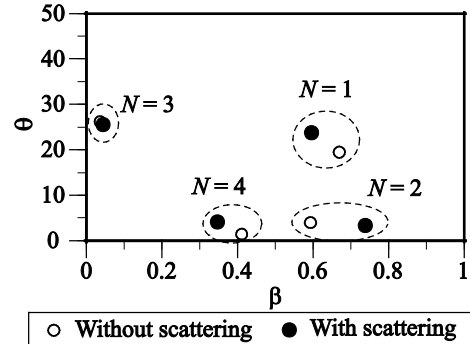


Fig. 5 Optimal value on  $\beta$ - $\theta$  plane after 100 iterations ( $N=1, 2, 3, 4$ ) without and with scattering reflections.

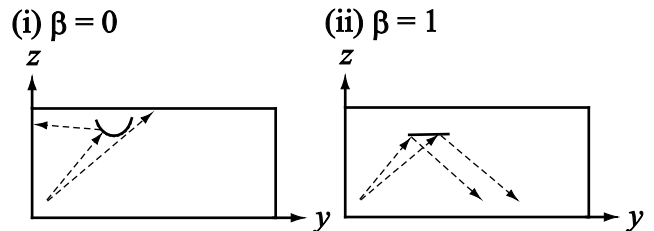


Fig. 6 Schematics that represent the reflected sounds at  $\beta=0$  and  $\beta=1$ .

### 5. まとめ

本報では、空間の音響設計に数値解析を援用するのに必要な最適設計の一例として、音響反射板の設計を取り上げた。室内音響指標のばらつきの最小化を目的に評価関数を設定し、PSOを用いることで目的を達成できた。

### 参考文献

- [1] 伊藤 他, “音響反射板の立体的形状が反射特性に及ぼす影響について,” 建築学会講演梗概集, pp. 69-70, (2001. 9).
- [2] J. Kennedy et al., “Particle Swarm Optimization,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Neural Networks, pp. 1942-1948, (1995.12).
- [3] 千葉 他, “Particle Swarm Optimization を用いたレドーム最適設計,” 信学技報(AP) 107 (431), pp. 21-25, (2008. 1).