

ステージ側壁の形状がステージ中央部の左右反射音レベルに与える影響

酒井 伸明

1. はじめに

“音のよい”コンサートホールを設計するための研究はこれまで数多くなされてきた。そのほとんどは客席における音をよくするためのもので、ステージ上で発生させた音が客席でどのような特性になるかを示すインパルス応答に基づく G (Strength), EDT(初期残響時間), C_{80} , LE などの室内音響指標が提案されている。現在、これらの指標を手掛かりにした音響設計は一般的な音響設計法となっており、客席を対象とした室内音響設計はほぼ確立されたといえるであろう。

しかし、聴衆によい音楽を提供するためには、演奏者が気持ちよく演奏できるステージ音場を創り出す必要があると考えられる。このような考えから、本研究室は、演奏者が“演奏しやすい”と感じるステージ設計法の提案を目指して、これまで、実ホールの実測によるステージ音場の把握¹⁾²⁾、模擬音場を用いた心理実験による“演奏しやすい”と評価される音場の解明³⁾⁴⁾、“演奏しやすい”と評価されるステージ上の位置に関するアンケート調査⁵⁾を行ってきた。その結果、演奏者はステージの客席側中央付近を“演奏しやすい位置”と考えていること、左右反射音レベル差がある程度ある方が“演奏しやすい”と評価されることが明らかとなった。しかしながら、大多数のコンサートホールは左右対称形であり、したがってステージ中央付近の左右反射音レベルにはほとんど差がない。すなわち、演奏者が“演奏しやすい位置”と考えているステージの客席側中央付近は、音響的には必ずしも“演奏しやすい”条件とはなっていないと思われる。これは、ステージの客席側中央付近において左右反射音レベルにある程度の差があるようにすれば、演奏者にとって、心理的にも音響的にも“演奏しやすい”と感じることができるステージを実現できる可能性があることを示唆している。

そこで本研究は、演奏者の演奏しやすいと感じるステージを創り出すことを目指して、ステージの客席側中央付近において左右反射音レベルに差を生じさせる方法を示すことを目的とした。客席側中央付近における左右反射音レベルに差を生じさせるためには、ステージ側壁の形状を不規則にしたり非対称にしたりすることが有効ではないかと考え、本研究ではステージ側壁の形状がステージ中央付近における左右反射音レベルに与える影響について音響シミュレーションに基づいて検討した。

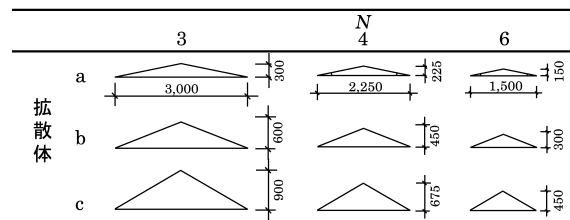


図-1 拡散体

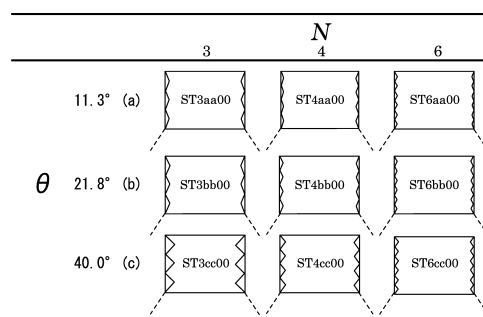


図-2 解析モデル (タイプ 0)

2. 音響シミュレーション

収容人数 700 人程度の中規模ホールステージを想定し、幅 18m, 奥行 9m, 高さ 7.5m, 側壁がフラットなステージ (モデル ST00) を基本とし、このようなステージの側壁に拡散体を設置した場合のステージ上の客席側中央付近における左右反射音レベルの差がどのように変化するかを調べた。

拡散体は、図-1 に示す傾斜角度 θ が 11.3, 21.8, 41.0° の 3 パターンとし、このような拡散体の設置数 (ステージの側壁の片側に設置する拡散体数) N を 3, 4, 6 個の 3 種類に変化させた。なお、左右側壁の N は統一した。

拡散体の配置方法は、図-2 に示す θ が同じ拡散体を両側壁に対称に設置したモデル (タイプ 0), タイプ 0 を基に、側壁の左右で θ を変化させたモデル (タイプ 1), タイプ 1 を基に、ステージ客席側から数え偶数番目の拡散体を側壁の左右で入れ替えたモデル (タイプ 2), タイプ 0 を基に、下手側側壁の拡散体をステージ客席方向へ拡散体の半分の長さ移動させたモデル (タイプ 3), タイプ 1 を基に、拡散体をタイプ 3 と同様の方法で移動させたモデル (タイプ 4) の 5 種類とした (図-3)。タイプ 0 は左右対称, タイプ 1~4 は左右非対称となって

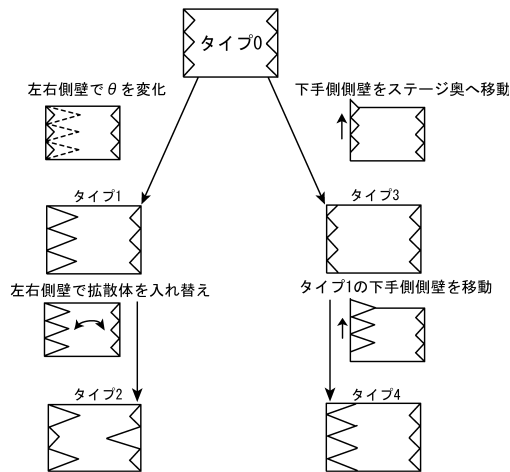


図-3 解析モデルの構成

表-1 吸音率

	中心周波数 (Hz)					
	125	250	500	1k	2k	4k
ステージ床(假太床)	0.16	0.14	0.11	0.08	0.08	0.07
ステージ周壁・天井(舞台反射板)	0.20	0.13	0.10	0.07	0.06	0.06
客席開口部	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

おり、解析モデルは合計 73 モデルである。解析モデルの名称は STxyz0m と表記した、ここで、 x は拡散体数 N 、 y 、 z はそれぞれ上手側、下手側側壁配置する拡散体の種類、 m は解析モデルのタイプを表している。なお、タイプ 2 の xy は拡散体を入れ替える前の状態を示している。なお、各解析モデルの室容積は側壁間の距離を調整することによって ST00 と同様にしてしている。

ステージの各構成部材の吸音率を表-1 に示す。ここで、ステージ側壁形状が会場に与える影響に着目するために、客席側開口部の吸音率は 1.00 としている。

受音点は、図-4 に示すように、ステージのセンターライン上 (cn と表記) とその左右 0.5m のライン上 (上手、下手をそれぞれ rn 、 ln と表記) に、客席側先端部より 1m、2m、3m、4m、5m、6m、7m の 7 列 (各点の記号の 2 桁目が列番号 n を示す) の合計 21 点とした。各受音点に対して、ステージ奥側 1m の点にパワーレベル 90 dB の無指向性音源を設定し、受音点のインパルス応答を求めた。なお、受音点、音源ともに高さはステージ上 1.1m とした。

シミュレーションには、音線法と虚像法のハイブリッド手法により解析を行う幾何音響シミュレーションプログラムを用いた。ステージの形状 (床、壁、天井を構成する各面の座標) と各面の吸音率 (表-1) を入力し、受音点 (21 点) におけるインパルス応答を求めた。シミュレーションの設定条件は、全ホールとも放射音線本数 999,999 本、音線の追跡打ち切り時間 (分析時間) 400 ms、

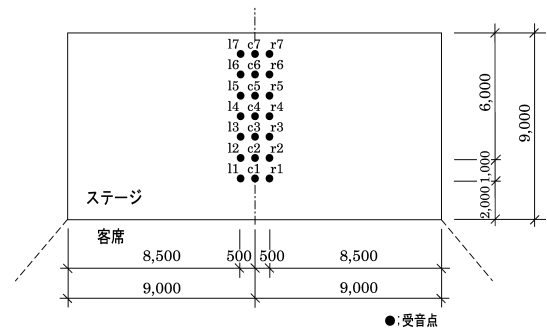


図-4 受音点の位置

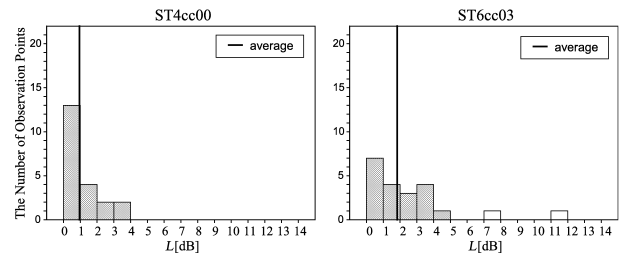


図-5 L の度数分布

反射次数は 20 次に設定した。

3. 結果

シミュレーションより得られた 500 Hz のインパルス応答から、0~200 ms までに受音点に到来する反射音を 6 方向ごとの成分に分解し、左右反射音レベルを算出した。受音点 21 点の左右反射音レベルの差 L [dB] の分布の例として解析モデル ST4cc00, ST6cc03 の分布図を図-5 に示す。

各解析モデルの受音点 21 点における L の値を見ると、多くのモデルでは図-5 の左図のように狭い範囲に連続した分布を示した。このようなケースでは、受音点 21 点の L の平均値をステージ中央部の値と考えてよいと判断した。

一方、一部の解析モデルでは、図-5 の右図のように、 L の値は連続した分布を示さず、他の点の値に比べて著しく大きな値を示す場合が見られた。その理由を調べるため、このような特異な値を示す場合について、音源から受音点に到来する音線の軌跡を調べてみた。例として、解析モデル ST6bb03 の受音点 1c に 0~100ms の間に到来した音線の軌跡を図-6 に示す。図を観察すると、受音点に到来する音線には、上手側壁の 1 次反射音として到来するものとステージ後壁 → 上手側壁の 2 次反射音として到来するものの 2 つの行路があり、両者とも左からの反射音となっていることがわかる。この例のように、特別大きな L となる受音点では、音源から放射された音線がほぼ同様の行路を辿り、ある一

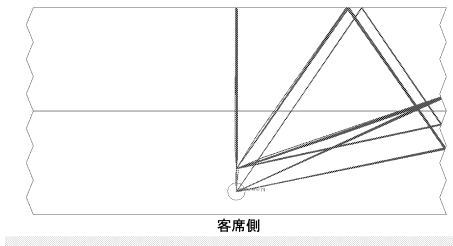


図-6 L が特に大きな値となる場合の音線図

定の方向から受音点に到来する音線の数が多くなっていることがわかった。これは、幾何音響シミュレーションの特徴(音は壁面に対してほぼ鏡面反射するという計算手法)に起因し、今回のシミュレーションのように、音源、壁面、受音点が近い位置にあると受音点が重複する音線の行路上にあるため、わずかな位置のずれでも受音点に到来する反射音エネルギーに著しい差異が発生すると理解される。実際の音場は波動音響的な伝搬であるので、このような特異な値に着目することは妥当ではない。そこで、このような特異な値は除外し、それ以外の L の平均値をとることにした。なお、特異値の判定は、受音点 21 点の値について左右反射音レベルを 1 dB 毎の度数分布で見たとき、連続して存在する範囲から 2 dB 以上離れた値を特異値とした。

このように特異値を除外した残りのデータを平均したものを表-2 に表す。表より、タイプ 0 では L は比較的小さな値であるが、タイプ 1、タイプ 4 では大きな値となること、非対称型にするほど L の値は大きくなるという傾向が認められる。以降、詳しく考察する。

4. 考察

側壁に設置する拡散体の数 (N)、拡散体の傾斜角度 (θ)、拡散体の配置方法(タイプ)の違いによって、ステージ客席側中央付近の左右反射音レベルの差 (L) がどのように変わるかについて検討した。ここで、本研究室のこれまでの研究より、左右反射音レベルの差 (L) は 2.0~2.8 dB のときに“演奏しやすい”と評価されることがわかっているため、 L がこの範囲となる側壁の形状に着目した。

拡散体の配置方法別に L の値を以下のように示す。対称型モデル(タイプ 0)を図-7、対称型とその一方の側壁の拡散体の傾斜角度を変化させた非対称型モデル(タイプ 1、タイプ 0)の値を図-8、タイプ 2、タイプ 1 の値を図-9、タイプ 3、タイプ 0 の値を図-10、タイプ 4、タイプ 1 の値を図-11、タイプ 4、タイプ 3 の値を図-12 に示す。

4.1 拡散体の数

側壁に設置する拡散体の数 N は、6 のときに左右反射音レベルの差が最大、4 のときに最小になるケース

表-2 左右反射音レベルの差 (dB)

配置	aa			bb			cc					
N	0	3	4	6	3	4	6	3	4			
タイプ 0	0.2	0.6	1.0	1.0	0.7	1.5	1.7	0.8	1.0			
タイプ 3	1.4	2.7	2.8	3.1	2.9	1.8	2.1	1.5	1.8			
配置	ab		ac		ba		bc		ca		cb	
N	3	4	6	3	4	6	3	4	6	3	4	6
タイプ 1	2.2	1.7	1.4	2.1	1.7	2.6	2.2	1.7	1.4	3.2	1.7	1.9
タイプ 2	0.6	1.0	0.9	0.5	1.5	1.7	0.6	1.0	0.9	0.7	1.6	2.7
タイプ 4	1.5	2.5	2.7	2.3	1.4	1.7	1.6	0.9	3.2	1.6	1.2	2.7

が多い(図-7、図-11)。しかし、これは拡散体の傾斜角度や配置方法によって異なる。タイプ 0 では拡散体数が増えるにつれてレベル差は大きくなるが(図-7)、タイプ 1 と 4 では拡散体の数が 6、4 のときに最小となり(図-11)、タイプ 2 とタイプ 3 では明確な傾向が認められなかった(図-9、図-10)。全体的にみて、拡散体の数が 3 のときに左右反射音レベルの差が最適範囲となるケースが多い。

4.2 傾斜角度

拡散体の傾斜角度 θ は、図-10 で見る様に 21.8°(拡散体 b) を用いるときに左右反射音レベルの差が最大となるケースが多い。しかし、これは拡散体の数、拡散体の配置方法によって異なる。タイプ 0 と 3 では両壁に拡散体 b を用いた場合に最大値をとり(図-10)、タイプ 1 の場合は拡散体の数が 3 あるいは 6 のとき、拡散体 ab から ac、ba から bc のように、両壁に設置する拡散体の傾斜角度を大きくするとレベル差が大きくなる。一方、拡散体の数が 4 のときには傾斜角度によらずレベル差はほぼ一定となった(図-8)。全体的にみて、傾斜角度 11.3° の拡散体 a を用いたときに左右反射音レベルの差が最適範囲となるケースが多い。

4.3 拡散体の配置方法

拡散体の配置方法(タイプ)と左右反射音レベルの差の関係を見ると、左右側壁に拡散体を設けた方が(図-7)、また側壁の形状は左右対称型より非対称型の方がレベル差が大きくなる傾向がみえる(図-8)。ただし、図-9 で見る様にタイプ 2(タイプ 1 の拡散体の配置を変化)はタイプ 1 に比べ左右反射音レベルの差が著しく減少しており、側壁の形状を複雑にするとレベル差が大きくなる訳ではない事が分かる。また、タイプ 1 とタイプ 4(図-11)、タイプ 3 とタイプ 4 では(図-12)、左右反射音レベルの差に明確な違いが認められず、左右側壁で拡散体の傾斜角度を変えても、また一方の側壁の拡散体をステージ前後に移動させても、左右反射音レベルの差には影響しないといえる。拡散体の配置方法につ

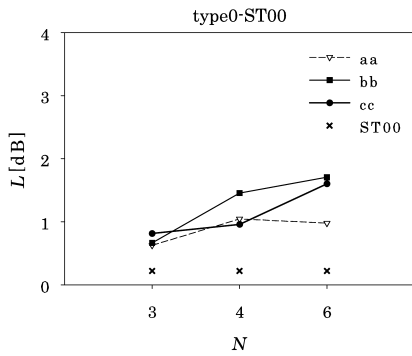


図-7 タイプ0(拡散体数)

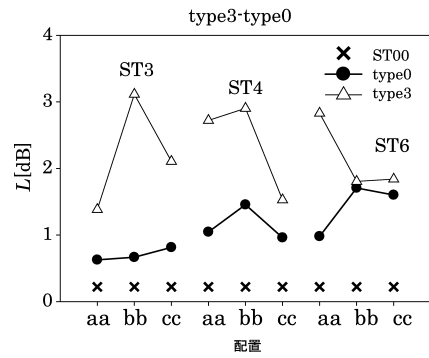


図-10 タイプ3-タイプ0(拡散体傾斜角度)

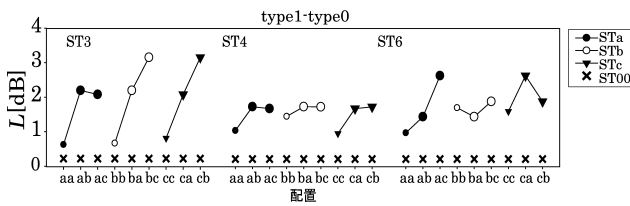


図-8 タイプ1-タイプ0(拡散体傾斜角度)

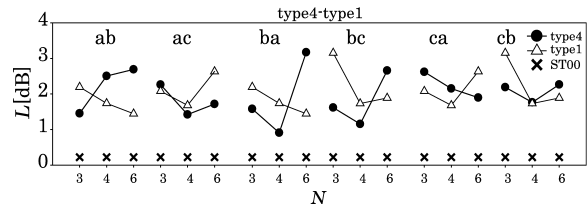


図-11 タイプ4-タイプ1(拡散体数)

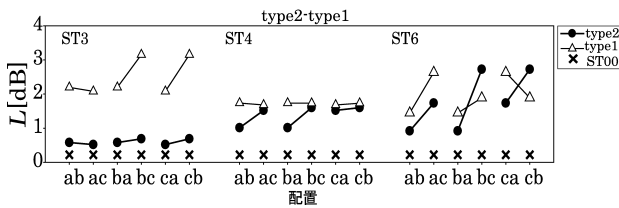


図-9 タイプ2-タイプ1(拡散体傾斜角度)

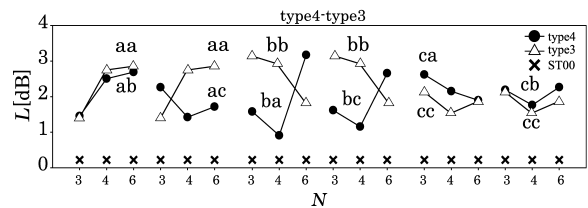


図-12 タイプ4-タイプ3(拡散体数)

いて見ると、タイプ0ではレベル差の最大値は1.7dBに過ぎず、最適範囲にならない。タイプ2も最適範囲を満たさない。タイプ1では拡散体の数が3のときに2.1~3.2dB、タイプ3では拡散体の数が6のときに1.8~2.8dB、タイプ4では拡散体の数が6のときに1.7~3.2dBとなり、最適範囲にほぼ収まっているといえる。

5. まとめ

ステージ側壁に拡散体を設けることで、ステージ客席側中央付近における左右反射音レベルの差を大きく出来るかどうかについて、幾何音響シミュレーションを用いて検討した。その結果、ステージ側壁の形状はフラットより拡散体を設けた方が、対称型よりは非対称型の方が左右反射音レベル差は大きくなるが、非対称型の場合より複雑な形状にするとレベル差はかえって小さくなる場合もあることがわかった。また、側壁に配置する拡散体の数、傾斜角度は大きくする程左右反射音レベルの差が大きくなる訳ではなく、傾斜角度は左右側壁の角度の差が小さい方がレベル差を大きくでき、あまり極端な形状を用いると左右反射音レベル

の差は小さくなることがわかった。

今回の検討では、配置する拡散体の傾斜角度、数、配置方法をうまく設定することで演奏者が演奏しやすいとする左右反射音レベルの差を確保できることが確認できたが、大きさや形の異なるステージに対して、拡散体の傾斜角度、数、配置方法をどのようにすれば演奏しやすいとされる左右反射音レベルの差を確保できるかは整理できなかった。今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 林光一郎, 飯塚亜希子, 古屋浩, 藤本一寿: 中規模ホールステージにおける反射音方向特性の実測 その1 測定概要とSTに関する考察: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 19-20, 2006.
- 2) 飯塚亜希子, 林光一郎, 古屋浩, 藤本一寿: 中規模ホールステージにおける反射音方向特性の実測 その2 反射音方向特性に関する考察: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 21-22, 2006.
- 3) 飯塚亜希子, 藤本一寿: 演奏しやすさからみたステージ音場に関する基礎的検討: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 157-158, 2005.
- 4) 林光一郎, 飯塚亜希子, 藤本一寿: 演奏者による反射音方向分布の異なるステージ音場の評価実験: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 299-300, 2007.
- 5) 藤本一寿, 上田麻理, 林光一郎: 演奏しやすいステージ音場に関する考察: 日本音響学会講演論文集, 1191-1194, 2008.