

# 中規模ホールステージにおける反射音方向特性の実測

林 光一郎

## 1. はじめに

コンサートホール音場に関する研究は、これまで主として客席について検討され、様々な評価指標が提案されている。一方、ステージについては音場特性すら十分に把握されていない。聴衆により音楽を提供するためには、ステージに演奏者が気持ちよく演奏できる音場を創り出す必要があると考えられる。

ステージ音響に関しては、Gade<sup>1)</sup>による評価指標STの提案をはじめとして、実測による検討<sup>2)</sup>やシミュレーションによって客席後部からの反射音や初期反射音について検討した報告<sup>3)4)5)6)</sup>がある。実際のステージ音場は反射音の方向分布や時間遅れなど非常に複雑であると考えられるが、STは反射音の時間情報のみに着目しており、方向情報は考慮されていない。本研究室では、反射音の方向分布も演奏のしやすさの重要な要因のひとつではないかと考え、インパルス応答の初期部分(80msまで)の振幅を方向(後・前・左・右・上)ごとに变化させた音場を用いて、演奏しやすいステージ音場のあり方に関する心理実験を行い、その結果、ステージの反射音方向分布が演奏しやすさに関与することが示唆された<sup>7)</sup>。

しかしながら、上記の実験で使用した音場は模擬的に設定したものであり、実音場の複雑な特性は考慮されていない。今後、反射音方向特性と演奏のしやすさの関連を明らかにするには、実音場の複雑な特性の考慮は不可欠であると考えられる。そこで本研究では、実際のホールステージにおけるSTと反射音方向特性の実態を把握するために、既存のホールステージにおいて音響測定を行った。

## 2. 音場測定

### 2.1 対象ホール

測定は3ホール(Hall F, Hall K, Hall H)で行った(表-1, 図-1)。本研究での実験はソロ演奏を想定しており、したがって、測定対象には中規模の室内楽を対象としたホールを選んだ。Hall Fは、会議から室内楽まで様々な用途に対応したワンフロアの多目的ホールで、3つのホールの中では最もデッドなホールである。Hall Kは3階席を有するプロセニウム型の劇場指向のホールである。測定では、コンサート時に用いる音響

表-1 対象ホールの諸元

Hall	Seats	V(m <sup>3</sup> )	S(m <sup>2</sup> )	S <sub>0</sub> (m <sup>2</sup> )	V/S(m)	RT(s)	$\bar{\alpha}$
F	775	6,403	2,336	145	2.74	1.36	0.32
K	1,269	9,200	3,800	161	2.42	1.52	0.25
H	720	8,300	3,300	147	2.52	1.85	0.22

S<sub>0</sub>:ステージ面積

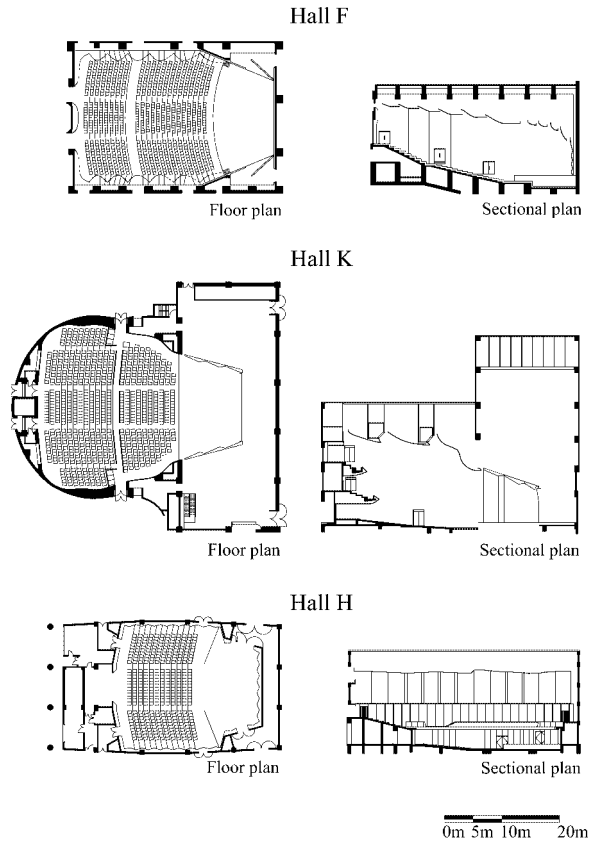


図-1 対象ホール

反射板を設置した。Hall Hは、2階サイドバルコニー席を有するシューボックス形状を基本としたホールで、ステージはアリーナ型となっている。

### 2.2 測定方法

測定において、音源には12面体無指向性スピーカを、受音には単一指向性マイクロホンと無指向性マイクロホンを用い、客席側を前方、ステージ奥を後方として、音源が常に受音点の前方にあるように設置した。音源スピーカからスイープパルスを発生させ、同期加算法により時間応答波形を観測した。また、音源を挟んで反対側にレファレンスとして無指向性マイクロホンを設置し、測定間の校正に用いた。方向情報は、単一指向性マイクロホンの指向軸を、後・前・左・右・下・上の6方向に向けることにより測定した。測定機器の配置はSTの測定を目的としたAパターンと立奏を想定したBパターン、座奏を想定したCパターンとした。各パターンの音源・受音点間距離並びにそれぞれの高さを表-2に示す。測定点は、各ホールのステージ半面に2m間隔のグリッドを想定し、メッシュ上に一定間隔で配置した(図-2)。測定点はパターンごとに異なり、A

表-2 測定機器位置関係

Pattern	Height(m)		Distance(m)
	Speaker	Mic	
A	1.20	1.20	1.00
B	1.20	1.50	0.50
C	0.95	1.10	0.50

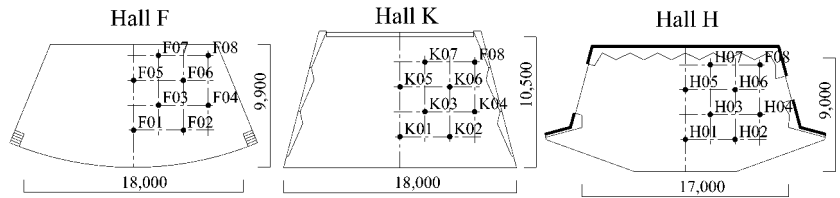


図-2 測定点

パターンは各ホール測定点 01～07 までの計 21 点，C パターンは各ホール測定点 01～08(Hall F は測定点 04 を除く) までの計 23 点である。なお，B パターンは測定点数が少ないため，以降の考察では A パターンと C パターンのみ用いて検討した。

### 2.3 解析

無指向性マイクロホンで測定されたインパルス応答から，音響評価指標 ST(全方向) を，単一指向性マイクロホンで測定されたインパルス応答から 4 つの方向別 ST を (1) 式に基づき算出した。各インパルス応答は 125Hz～4kHz(6 オクターブ) の範囲を対象とした。

$$ST = \frac{\int_{10ms}^{100ms} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{5ms} p^2(t) dt} \quad (1)$$

また，方向別反射音エネルギーの全反射音エネルギー(直接音を除く)に対する割合を，方向別反射音エネルギー比として (2) 式により定義した。

$$\begin{aligned} BR &= \frac{\int_{100ms}^{100ms} p_b^2(t) dt \pm P_{all}}{\int_{100ms}^{5ms} p_f^2(t) dt \pm P_{all}} \\ FR &= \frac{\int_{100ms}^{5ms} p_f^2(t) dt \pm P_{all}}{\int_{100ms}^{5ms} p_r^2(t) dt \pm P_{all}} \\ LR &= \frac{\int_{100ms}^{5ms} p_l^2(t) dt \pm P_{all}}{\int_{100ms}^{5ms} p_r^2(t) dt \pm P_{all}} \\ RR &= \frac{\int_{100ms}^{5ms} p_r^2(t) dt \pm P_{all}}{\int_{100ms}^{5ms} p_d^2(t) dt \pm P_{all}} \\ DR &= \frac{\int_{100ms}^{5ms} p_d^2(t) dt \pm P_{all}}{\int_{100ms}^{5ms} p_u^2(t) dt \pm P_{all}} \\ UR &= \frac{\int_{100ms}^{5ms} p_u^2(t) dt \pm P_{all}}{\int_{100ms}^{5ms} p_j^2(t) dt} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで  $p_b(t)$ ,  $p_f(t)$ ,  $p_l(t)$ ,  $p_r(t)$ ,  $p_d(t)$ ,  $p_u(t)$  は，各々，単一指向性マイクロホンの指向軸を後・前・左・右・下・上に向けて得られた音圧を示し，また  $P_{all}$  は (3) 式である。

$$P_{all} = \sum_j \int_{5ms}^{100ms} p_j^2(t) dt \quad (3)$$

ここで，添え字  $j$  は指向軸の各方向(後・前・左・右・下・上)を示す。

なお，ST の積分区間を 100ms と 200ms にした場合，方向別反射音エネルギー比の結果にほとんど差がなかったため，本研究では 100ms として ST と表記している。

## 3. 測定結果と考察

### 3.1 ST

はじめに ST について考察する(表-3)。A パターンの場合，ST は全測定点で見ると 10dB 程度のばらつき

があるが，壁に近い測定点(F07, K04, K07, H07)を除くと-10.0～-15.0dB 程度に収まっている。測定点による差は，3 ホールとも 5.0～6.0dB 程度となる。詳細に見れば，ステージ先端やステージ中央では反射の影響が少ないため比較的小さな値となっている。C パターンでは A パターンに比べ値が小さくなる傾向があり，その程度は測定点ごとに異なる。たとえば，F01 と H02 では，A パターン(ST の測定に用いられる)の ST は-14.2dB と-14.1dB となって差は小さいが，C パターン(座奏を想定した位置)の ST は-19.2dB と-14.9dB と大きな差となっている。このように，既存の測定方法による ST の評価が近い場合でも，演奏形態によっては演奏のしやすさに違いが出るのではないかと推測される。

ステージでは，舞台反射板に近いほど反射板からの反射音が大きいが予想される。今回の測定結果にこのような傾向が認められるかについて検討を試みた。すなわち，測定点ごとに，測定点からホール壁面(ステージ後壁，客席後壁，左右側壁)までの水平距離(図-3 の上の  $D_b$ ,  $D_f$ ,  $D_l$ ,  $D_r$ ) を求め，そのうちステージ周壁( $D_b$ ,  $D_l$ ,  $D_r$ ) の和( $D$ ) と ST との相関を調べてみた(図-3)。図より，A パターン，C パターンともに ST と壁までの距離との間に弱い相関が見て取れる。

さらに，各方向別 ST と  $D_b$ ,  $D_f$ ,  $D_l$ ,  $D_r$  との関係をもてみた(図-3)。図より，後，左，右には相関が認められ，舞台上の位置と反射板までの距離がステージ上の反射音の方向特性を特徴付ける要因であることが示唆される。一方，前には相関が認められない。これは，客席後部壁はステージ反射板と比べて距離が大きく，一般に吸音処理されることが多いため，このような単純な距離だけでは捉えることができないと判断される。

### 3.2 方向別反射音エネルギー比

次に，(2) 式で定義した方向別反射音エネルギー比について検討する(図-4)。まず，全測定点に共通する傾向として DR(下) は大きくなり，UR(上) は小さく値が安定していることが認められた。また，水平方向からの

表-3 ST(全方向)

Pattern	Hall	Observing point							
		01	02	03	04	05	06	07	08
A	F	-14.2	-12.7	-15.1	-12.5	-11.7	-9.5	-15.5	-
	K	-10.2	-12.3	-9.2	-6.6	-9.1	-10.8	-7.9	-
	H	-13.9	-14.1	-14.4	-9.9	-11.9	-11.3	-9.4	-
C	F	-19.2	-18.1	-18.7	-	-14.1	-14.5	-15.8	-18.1
	K	-15.2	-16.0	-15.7	-11.5	-12.6	-15.7	-14.8	-14.8
	H	-15.5	-14.9	-17.1	-12.4	-14.1	-13.5	-10.2	-9.5

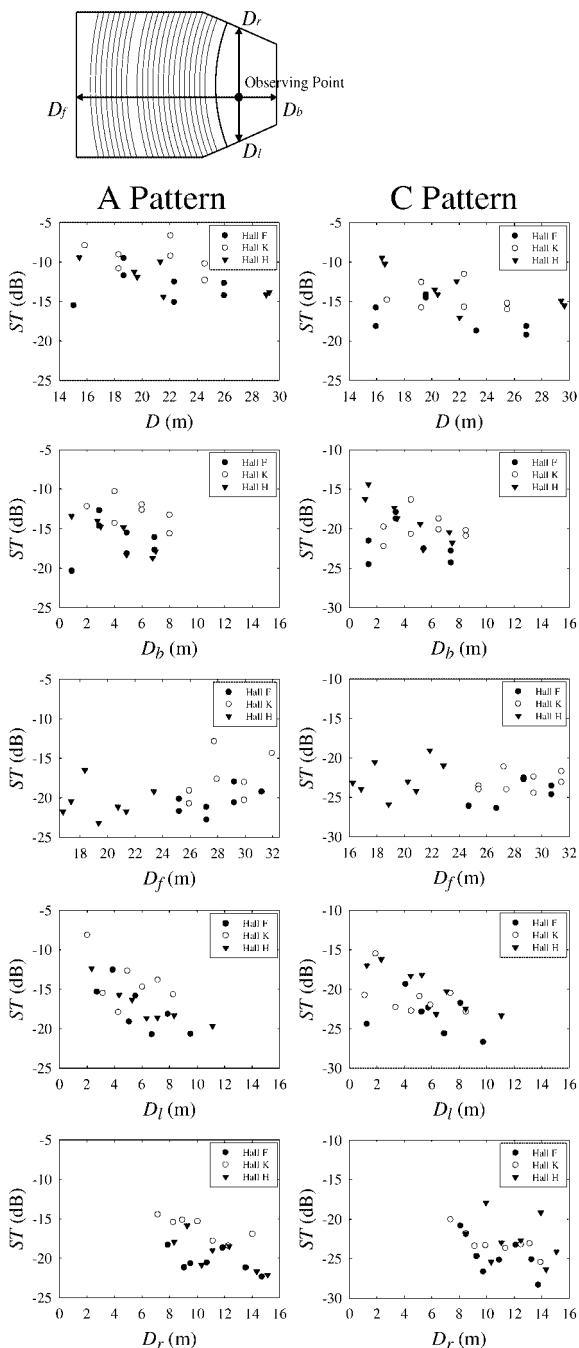


図-3 ST と測定点-周壁間距離の関係

反射音エネルギー比はどのホールにおいても測定点の違いによってその割合が変化する傾向が見られた。

そこで、ステージセンターライン上からの距離が等しい点 (X1, X2, X3, X4) と、ステージ前方からの距離が等しい点 (Y1, Y2, Y3, Y4) において各測定点の方向別反射音エネルギー比を算術平均し (図-5)、ステージ水平面上を左右、前後方向へ移動したときの変化を検討した (図-6)。このとき、平均した各測定点間での値のばらつきを確認するため、各点での最大値と最小値を表示した。

まず、Aパターンについてみる。LR(左)とRR(右)は、X方向に移動した際に3ホールともほぼ同様の傾向が見られ、LR(左)は側壁(左)に近づくほど大きく

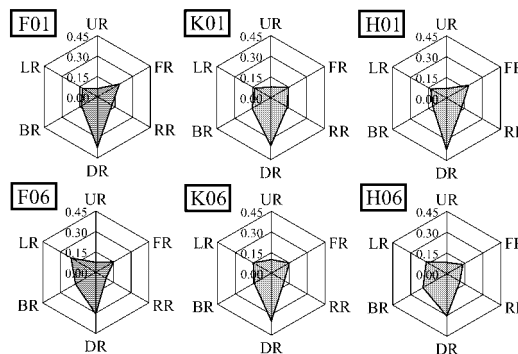


図-4 方向別反射音エネルギー比 (Aパターン)

なりRR(右)は小さくなっている。よって、側方からの反射音エネルギー比は側壁との距離に影響を受けることが示唆される。

BR(後)とFR(前)は、Hall HのみY方向の移動によって反射音エネルギー比の変化に傾向がみられ、BR(後)はステージ後方に行くにつれ大きくなり、FR(前)は小さくなることが認められた。Hall FではBR(後)、FR(前)ともに測定点の違いによる変化がほとんどなく常に安定している。Hall Kでは、FR(前)は安定した値をとるが、BR(後)は位置の違いによる値のばらつきが大きく、前後と左右といった単純な移動では傾向が見られない。

DR(下)とUR(上)は、Hall HのみY方向の移動で反射音エネルギー比が変化し、ステージ後方に行くにつれてDR(下)は小さくなり、UR(上)は大きくなる傾向が見られる。他の2ホールにおけるDR(下)は、測定点による変化は大きいが前後もしくは左右の移動による傾向は見られない。一方、UR(上)は位置の違いによる変化があまりない。

Cパターンにおいては、Aパターンにおいて認められた傾向とほぼ同様の傾向が見られる。しかし、Hall FでのBR(後)、FR(前)など、Aパターンにおいて各点の値に変化が見られなかった方向別反射音エネルギー比でも、Cパターンでは特徴が見られる場合がある (図-7)。

Aパターン、Cパターン共通してHall F, Hall Kはステージ水平面上の移動による変化が小さく、ステージ上での方向別反射音の分布が一様であるといえる。一方、Hall Hは変化が大きいので、ステージ上での反射音分布が一様でないといえる。これはHall Hのみステージ周りに音響反射板として機能するものが少ないためではないかと推測される。

### 3.3 ST と方向別反射音エネルギー比の比較

最後にSTと方向別反射音エネルギー比を比較する (図-8)。まず、AパターンにおけるK01(-10.2dB)とH04(-9.9dB)に着目する。これらの測定点でのSTは差が

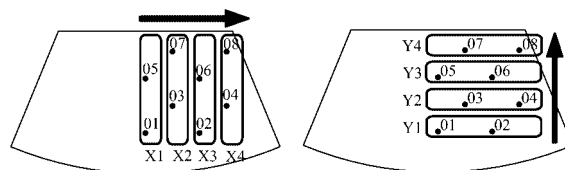


図-5 方向別反射音エネルギー比の平均方法

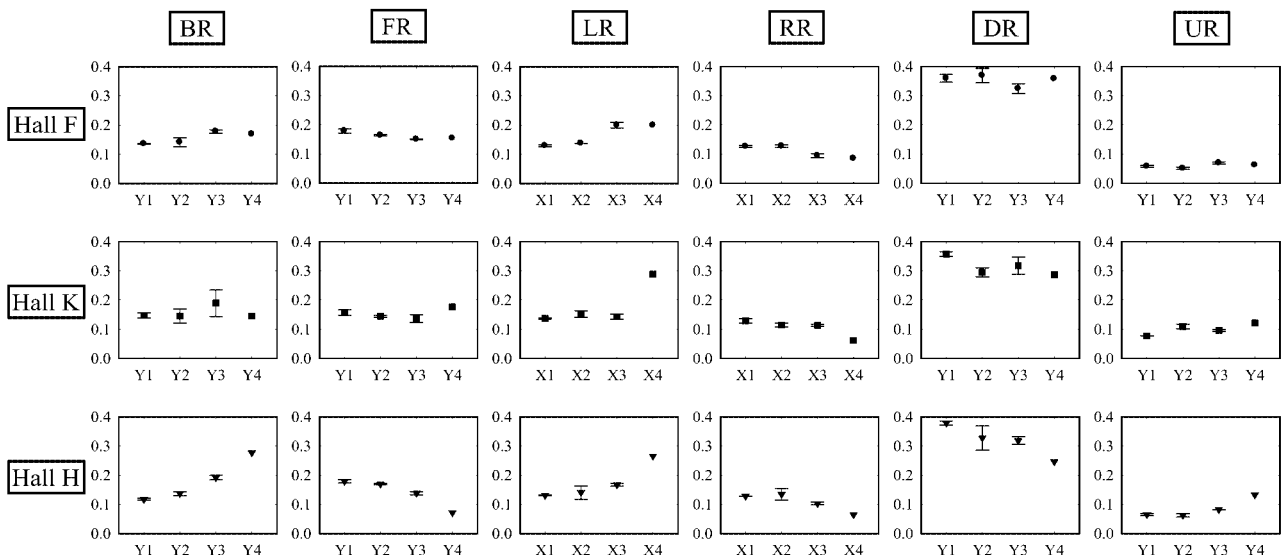


図-6 方向別反射音エネルギー比の平均 (A パターン)

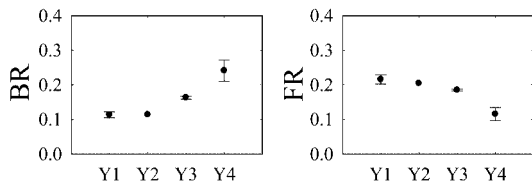


図-7 方向別反射音エネルギー比の平均 (C パターン, Hall F)

0.3dB と非常に近い。しかし側壁までの距離が異なるため、側方からの反射音エネルギー比の割合に大きな差が見られる。K01 はステージセンターライン上にあり、LR(左)、RR(右) の割合がほぼ等しいが、H04 は側壁(左) に近いので LR(左) に比べ RR(右) が非常に小さくなっている。これまでの実験から、側方反射音の割合の大きさが演奏しやすさに大きく影響するという結果が得られているので、これから判断すると、例えば ST が近い K01, H04 であっても、側方反射音エネルギーの割合の様子が違えば演奏のしやすさに違いが出るのではないかと推測される。同様に K03(-9.2dB) と H07(-9.4dB) に着目すると ST の差が 0.2dB と非常に小さいが、後壁までの距離が異なるため BR(後) に大きな差が見られる。また、H07 は全測定点でみた場合でも DR(下) が特に小さく、前 (FR) の割合を除いた 5 方向の差が比較的小さい。これまでの実験から、全方向の割合が等しいと音場に対する印象が大きく変化するという結果が得られており、これから判断すると、K03, H07 も演奏のしやすさに違いがあるのではないかと推察される。

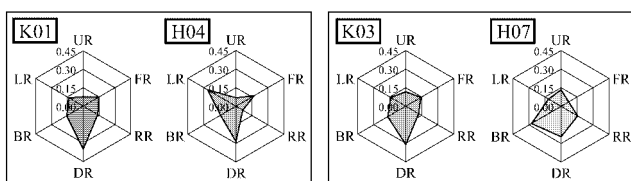


図-8 ST 近似点での方向別反射音エネルギー比

#### 4. おわりに

既存ホールのステージ音場の実測を行い、ST と方向別反射音エネルギー比について考察した。この結果、ST については、ステージ周壁までの距離との関連が大きいたことが示唆された。また既存の測定方法から算出される ST は、実際の演奏形態を想定した測定方法より得られる ST と差が認められる場合もあり、演奏形態に適した新たな ST 測定方法を検討する必要があると考えられる。方向別反射音エネルギー比については、どのホールにおいても下方からの反射音の影響が大きいたことがわかり、水平方向からの反射音エネルギー比はステージ上の位置によって変化することが認められた。また、ST の値が等しくても方向別反射音エネルギー比は異なることが明らかとなった。

今回の実測により、実際のステージにおける複雑な音場の一端が明らかになった。このデータを基に今後心理実験を行い、演奏しやすいステージ音場についてさらなる検討を重ねていきたい。

#### 参考文献

- 1) A. C. Gade: Investigation of musicians'room acoustics conditions in concert halls. Part II: Field experiments and synthesis of results, ACUSTICA, 69, 249-262, 1989.
- 2) 上野佳奈子, 佐藤史明, 橋秀樹: ホール・ステージ上の音響特性の測定, 日本音響学会講演論文集, 819-820, 1997.
- 3) 上野佳奈子, 佐藤史明, 橋秀樹, 小野隆彦, 千住真理子: ステージ音響に関する研究 -シミュレーション音場におけるバイオリニストによる評価実験-, 日本音響学会建築音響研究会資料, AA97-5, 1997.
- 4) 廣瀬大輔, 木村翔, 橋本修: 仮想音源分布の異なる音場におけるソロ演奏を想定した主観評価実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 57-58, 1997.
- 5) 中山一郎, 杉村信彦: ヴァイオリン奏者にとって好ましい初期反射音遅れ時間とレベルとの関係, 日本音響学会講演論文集 (春), 713-714, 1992.
- 6) 上野佳奈子, 佐藤史明, 橋秀樹, 小野隆彦, 千住真理子: 演奏者に対する初期反射音の効果に関する基礎実験, 日本音響学会講演論文集 (秋), 837-838, 1998.
- 7) 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.