九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

ホールステージにおける反射音方向特性の実測

飯塚，亜希子
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻修士課程

林，光一郎
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻修士課程

古屋，浩
九州共立大学

藤本，一壽
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

https://doi.org/10.15017/19095

出版情報：都市・建築学研究. 11, pp.137-142, 2007-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン：
権利関係：

都市・建築学研究　九州大学大学院人間環境学研究院紀要　第11号，2007年1月
J. of Architecture and Urban Design, Kyushu University, No.11, pp.137～142, Jan. 2007

ホールステージにおける反射音方向特性の実測

Acoustic Measurement of Directional Characteristics of Reflections on the Stage in Actual Halls

飯塚亜希子*，林光一郎*，古屋　浩**，藤本一壽***
Akiko IIZUKA, Koichiro HAYASHI, Hiroshi FURUYA and Kazutoshi FUJIMOTO

The final goal of this study is to clarify which kind of sound field is desirable for musical performers on the stage in auditoria and to propose a new method to evaluate stage acoustics. In this paper, as the first step of the study, an acoustical measurement is performed in three actual halls, and *ST* index and the directional characteristics of reflections are discussed. The results show that the directional characteristics of reflections vary with the position on the stage and there exist some points that have different directional characteristics of reflections even though their values of *ST* are equal. This suggests that *ST* is not sufficient to evaluate the ease of performance and it is necessary to examine a new evaluating method considering the form of musical performance.

Keywords *: Acoustic Measurement, Stage Acoustics, Directional Characteristics of Reflections, ST*
音響測定，ステージ音響，反射音方向特性，*ST*

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，客席音場に関する様々な評価指標やそれらの推奨値が提案されている．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．このような観点から，筆者らは，演奏者が気持ちよく演奏できる音場を明らかにし，ステージ音響の評価方法を提案することを目的として研究を行っている．

ステージ音響に関しては，Gade[1] 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[2] 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[3)4)5)6)] 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．筆者らは，反射音の方向分布も演奏のしやすさの重要な要因の一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) ごとに変化させた音場を用いて，演奏しやすいステージ音場に関する心理実験を行った．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[7)]．

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．反射音方向特性と演奏しやすさと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．そこで本報告では，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．

*　空間システム専攻修士課程
**　九州共立大学
***　都市・建築学部門

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 (図-

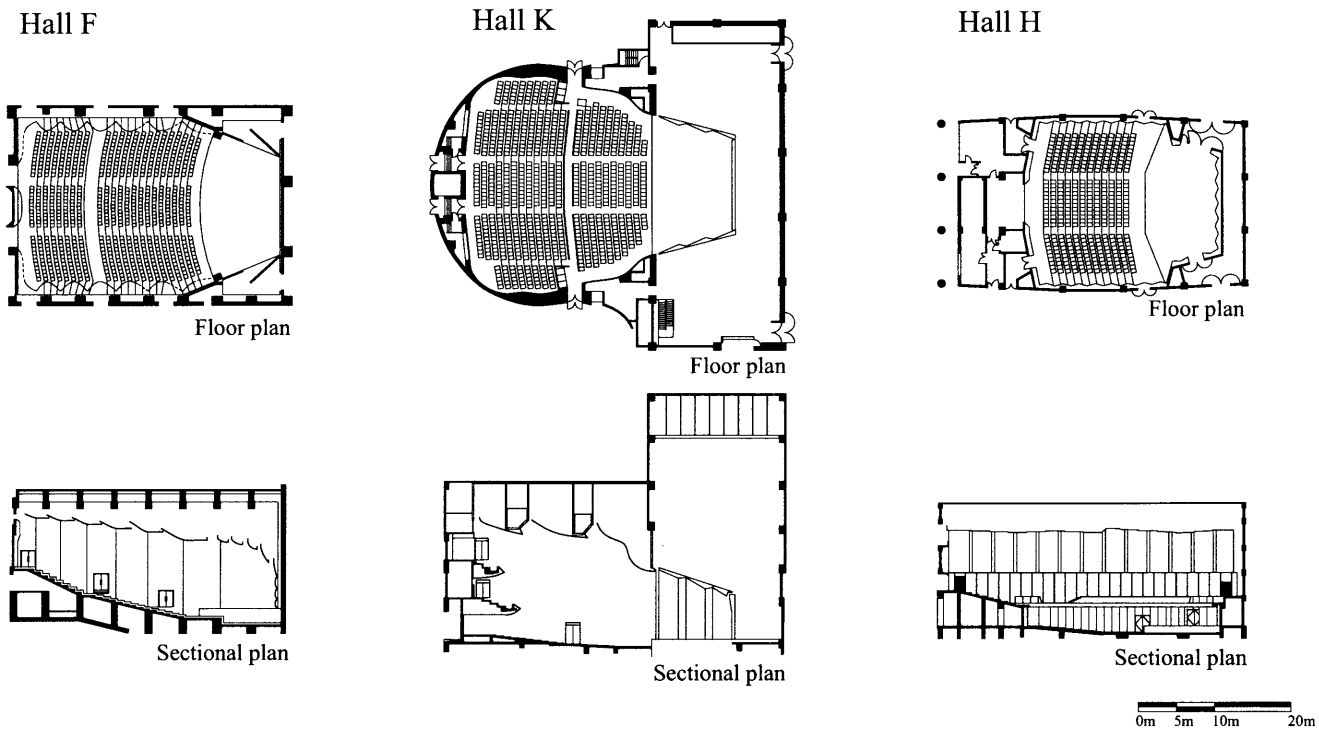

図-1 対象ホール

表-1 対象ホールの音響諸元

Hall	Seats	V (m^3)	S (m^2)	S_0 (m^2)	V/S (m)	RT (s)	$\bar{\alpha}$
F	775	6,403	2,336	145	2.74	1.36	0.28
K	1,269	9,200	3,800	161	2.42	1.52	0.22
H	720	8,300	3,300	147	2.52	1.85	0.20

S_0:ステージ床面積

1). 本研究で今後行おうとしている演奏のしやすさに関する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中心に選んだ．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ア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のが大きな特徴である．ホールの諸元を**表-1** に示す．

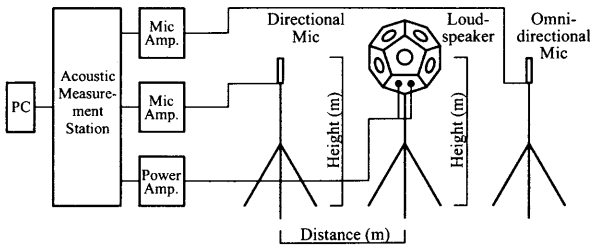

図-2 測定システム

2.2 測定方法

測定装置の概要を**図-2** に示す．音源には 12 面体無指向性スピーカを，受音には無指向性マイクロホンと単一指向性マイクロホンを用いた．単一指向性マイクロホンは，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．音源とマイクロホンの配置は，**表-2** に示すように，標準的な *ST* の測定を目的とした A パターン，立奏を想定した B パターン，座奏を想定した C パターンの 3 種類

表-2 音源と測定点の位置関係

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

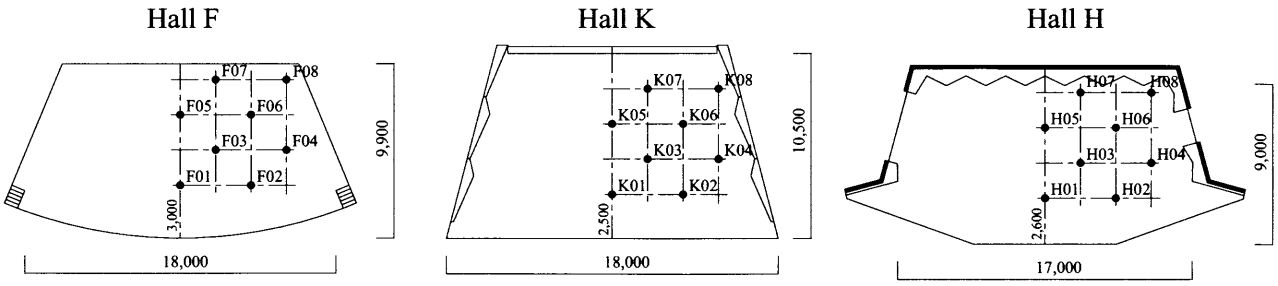

図-3 測定点

を設定した．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-3**)．測定点はパターンごとに異なり，A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，以下の考察ではA·Cパターンのみを用いて検討した．

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，(1)式に基づき4つの方向別STを算出した．周波数範囲は，125～4kHz(6オクターブバンド幅)を対象とした．

$$ST = \int_{10\mathrm{ms}}^{100\mathrm{ms}} p^2(t)dt \Big/ \int_{0\mathrm{ms}}^{5\mathrm{ms}} p^2(t)dt \tag{1}$$

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

$$\begin{aligned} BR &= \int_{5\mathrm{ms}}^{100\mathrm{ms}} p_{\mathrm{b}}^2(t)dt/E_{\mathrm{all}} \\ FR &= \int_{5\mathrm{ms}}^{100\mathrm{ms}} p_{\mathrm{f}}^2(t)dt/E_{\mathrm{all}} \\ LR &= \int_{5\mathrm{ms}}^{100\mathrm{ms}} p_{\mathrm{l}}^2(t)dt/E_{\mathrm{all}} \\ RR &= \int_{5\mathrm{ms}}^{100\mathrm{ms}} p_{\mathrm{r}}^2(t)dt/E_{\mathrm{all}} \\ DR &= \int_{5\mathrm{ms}}^{100\mathrm{ms}} p_{\mathrm{d}}^2(t)dt/E_{\mathrm{all}} \\ UR &= \int_{5\mathrm{ms}}^{100\mathrm{ms}} p_{\mathrm{u}}^2(t)dt/E_{\mathrm{all}} \end{aligned} \tag{2}$$

ここで$p_{\mathrm{b}}(t)$，$p_{\mathrm{f}}(t)$，$p_{\mathrm{l}}(t)$，$p_{\mathrm{r}}(t)$，$p_{\mathrm{d}}(t)$，$p_{\mathrm{u}}(t)$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E_{all}は(3)式による．

$$E_{\mathrm{all}} = \sum_{\mathrm{j}} \int_{5\mathrm{ms}}^{100\mathrm{ms}} p_{\mathrm{j}}^2(t)dt \tag{3}$$

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比の結果にほとんど差がなかったため，本報告では100msとしてSTを算出している．

3. 測定結果と考察

3.1 ST

はじめに3つのホールで測定されたSTについて考察する(**表-3**)．Aパターンの場合，STは全測定点でみると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程度である．詳細にみれば，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か比較的小さな値となっている．Cパターン(座奏を想定した測定)ではAパターン(標準的なSTの測定)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パターンのSTは-14.2dBと-14.1dBでほとんど差は認められないが，CパターンのSTは-19.2dBと-14.9dBと

表-3 ST(全方向)

(dB)

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

大きな差となっている．このように，測定パターンの違いによって ST の値には大きな差が生じることがわかる．

3.2 ST と測定点-周壁間距離の関係

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と予想される．そこで，今回の測定結果にこの傾向が認められるかについて基礎的な検討を行った．まず，測定点ごとにステージ周りの 3 つの壁 (ステージ後壁，左右側壁) までの水平距離 (D_b，D_l，D_r) を求め，その和 (D) と ST の相関を調べてみた．**図-4** 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認められる．次に，測定点から客席後部の壁面までの水平距離 (D_f) を求め，各方向別 ST と D_b，D_f，D_l，D_r の関係をみてみた．図より，A，C 両パターンともに，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，前方向には相関が認められない．これは，客席後壁はステージ反射板と比べて距離が大きく，また一般に吸音処理されることが多いため，前方からの反射音の特徴はこのような単純な距離だけでは捉えることができなかったものと判断される．

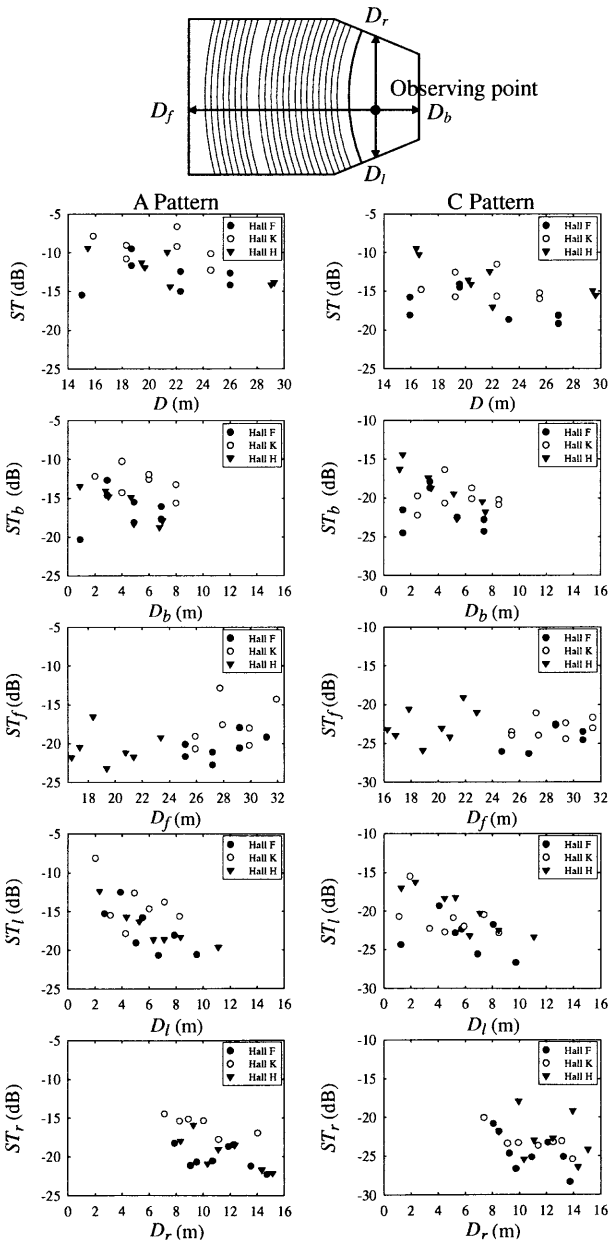

図-4 ST と測定点-周壁間距離の関係

3.3 方向別反射音エネルギ比

次に，(2) 式で定義した方向別反射音エネルギ比について検討する．結果の一例を**図-5** に示す．まず，全測定点に共通する傾向として DR(下方向) は特に大きく，逆に UR(上方向) は小さく，測定点による差があまりない．また，水平方向の反射音エネルギ比は，どのホールにおいても測定点によって割合が変化する傾向がみられた．

そこで，測定点位置による変化の傾向をみるため，ステージセンターラインからの距離が等しい測定点 (**図-6**，エリア X1，X2，X3，X4)，およびステージ先端からの距離が等しい測定点 (**図-6**，エリア Y1，Y2，Y3，Y4) における方向別反射音エネルギ比を各々エリアごとに算術平均し，ステージ水平面上を横方向，または前後方向へ移動したときの変化を検討した．このとき，平均した各測定点間

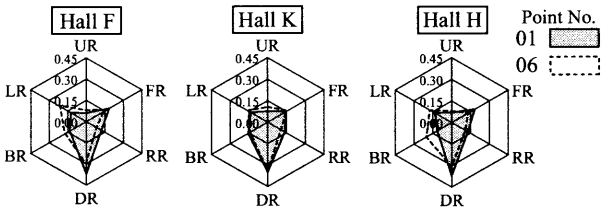

図-5 反射音エネルギの方向分布 (A パターン)

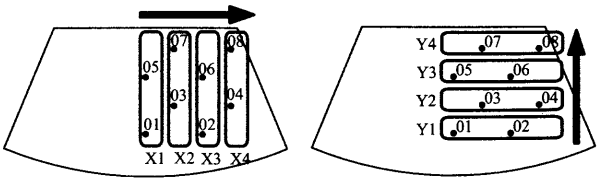

図-6 測定エリアの設定

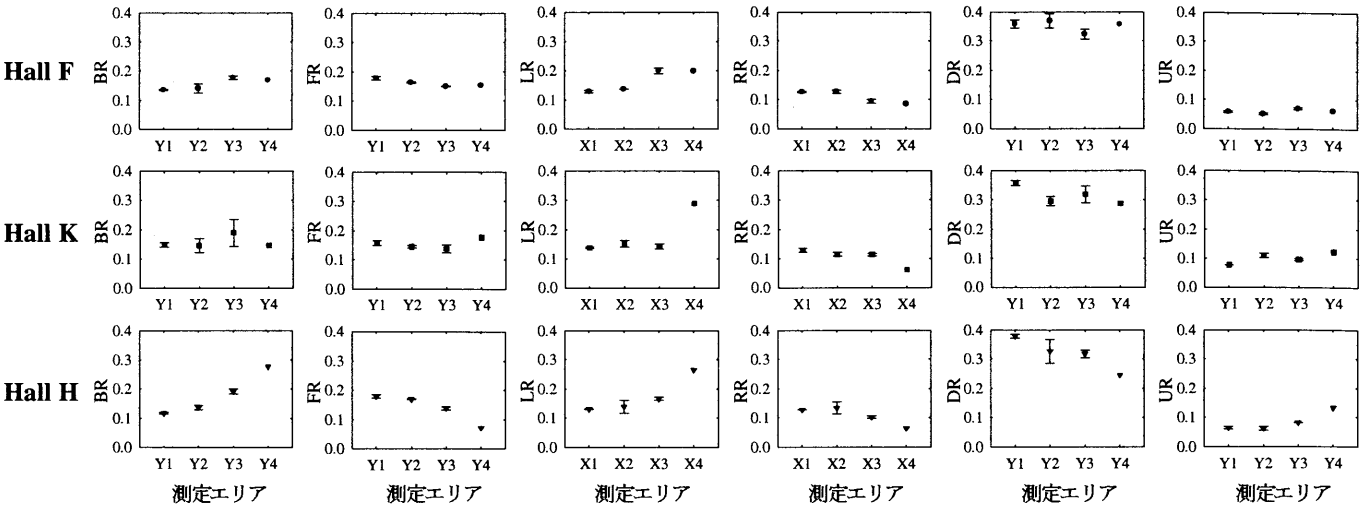

図-7 方向別反射音エネルギ比 (エリア平均，A パターン)

での値のばらつきを確認するため，各点の値も表示した．

まず，A パターンについてみる (**図-7**)．LR(左方向) と RR(右方向) のエネルギ比は，3 ホールとも横方向に移動した際に変化し，LR は左側壁に近づくほど大きくなり，RR は小さくなる傾向がみられる．

BR(後方向) と FR(前方向) のエネルギ比は，Hall H のみ前後方向の移動による変化が明確であり，ステージ後方に行くにつれて BR は大きく，FR は小さくなることが認められた．Hall F では BR，FR ともに測定エリアの違いによる変化がほとんどないが，Hall K では，FR は安定した値をとり，BR は位置の違いによるばらつきが大きく，横方向や左右方向といった単純な移動では傾向がみられない．DR(下方向) と UR(上方向) のエネルギ比は，Hall H のみ前後方向の移動で変化し，ステージ後方に行くにつれて DR は小さくなり，UR は大きくなる傾向がある．他の 2 ホールにおける DR は，測定点による変化は大きいが横もしくは前後の移動による傾向はみられない．一方，UR はエリアの違いによる変化はあまり認められない．

次に C パターンでは，A パターンとほぼ同様の傾向が認められた．ただし，Hall F における BR，FR のように，A パターンでは変化がみられなかった方向別反射音エネルギ比でも，前後方向の移動により特徴がみられる場合がある (**図-8**)．

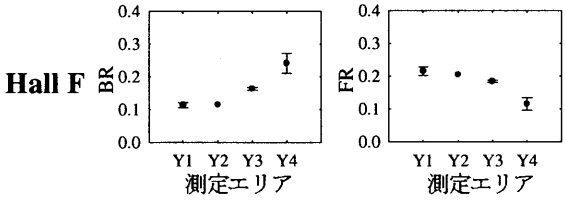

図-8 方向別反射音エネルギ比 (エリア平均,C パターン)

両パターンに共通して，Hall F，Hall K では測定点の移動による値の変化は小さく，ステージ上における反射音の方向分布はほぼ一様であるといえる．一方，Hall H は Hall F，K に比べて変化が大きいが，これは Hall H が舞台反射板を有していない天井の高いワンルーム形状であることに起因しているものと推測される．

3.4 *ST* と反射音方向特性の関係

ST(全方向) の値がほぼ同じである測定点対において方向別反射音エネルギ比を比較検討することにより，*ST*(A パターン) と反射音方向特性の関係について調べる．まず，Hall K の測定点 K01 と Hall H の測定点 H04 に着目し，それらの反射音方向特性を**図-9**(a) に示す．*ST* の値は，両測定点とも約-10dB とほぼ等しい．しかし，測定点 K01 はステージセンターライン上に位置するため，LR と RR の値がほぼ等しい．それに対し，H04 は左側壁に近いため LR に比べ RR が非常に小さくなっており，側方からの反射音エネルギ比に大きな差がみられる．同様に，*ST* の値

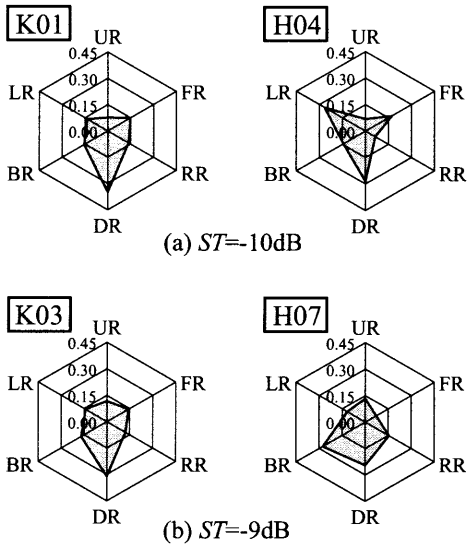

図-9 反射音方向特性の比較

が約-9dBで等しい測定点K03とH07に着目し，それらの反射音方向特性を**図-9**(b)に示す．これらの測定点は，ステージ後壁までの距離が異なるためBRに大きな差がみられる．また，H07は全測定点でみた場合でもDRが特に小さく，各方向の割合の差が比較的小さい．筆者らは，これまでに行った心理実験の結果[7]から，側方から到来する反射音の強さや初期反射音の方向分布の一様性が演奏しやすさに影響するという知見を得ている．したがって，上記の結果は，従来の*ST*値だけではステージにおける演奏しやすさを充分に評価できない場合があることを示唆している．

4. まとめ

既存ホールにおいてステージ音場の実測を行い，*ST*と方向別反射音エネルギ比について考察した．その結果，*ST*については，ステージ先端やステージ中央に近い点の値が比較的小さくなる傾向にあり，ステージ周囲の壁との関連が大きいことが示唆された．さらに，従来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で得られる*ST*と差が認められる場合もあり，演奏形態に対応した新たな*ST*の測定方法を検討する必要性が示唆された．方向別反射音エネルギ比については測定点による差がみられ，いずれのホールにおいても下方向からの床反射音の影響が大きく，また水平方向からの反射音エネルギ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*の値が等しい場合でも，反射音の方向特性は大きく異なることが明らかになった．

今回の実測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．

謝辞

実測に際して各ホールの関係者，藤本研究室，九州共立大学古屋研究室関係者にご協力いただいた．また，本研究の一部は，平成18年度サウンド技術振興財団研究助成によるものである．ここに記して感謝します．

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, 橘秀樹: 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, 橘秀樹, 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, 橘秀樹, 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.

（受理：平成18年12月7日）