

# 第1章 反射音到来方向の物理的評価

## 1.1 はじめに

ステージへの反射音到来方向の物理的評価に関する議論に先立って、ステージ音響学について、特にその指標値が今日用いられるようになるまでの経緯に着目して既往の研究を概観する。

### Gadeによるステージ音響指標 ST の提案

Gade は 1989 年に発表した論文 [1] の中で、オーケストラ団員に対するインタビューを通して演奏家のホールに対する評価項目を「響き (Reverberance)」「自分の音の聞きやすさ (Support)」「音色 (Timbre)」「ダイナミクス (Dynamics)」「互いの音の聞きやすさ (Hearing Each Other)」「時差 (Time Delay)」の 6 つにまとめている。このうち「自分の音の聞きやすさ (Support)」に関して、演奏者自身が発する音に対する初期反射音成分の寄与を評価することを意図し、演奏者に返ってくる音のエネルギーを床からの反射音を含む直接音のエネルギーで基準化して dB で定量化する指標 ST (SUPPORT) を考案して、20-100ms または 20-200ms の短い時間に到来する反射音を評価する ST1 と ST2 を式 (1.1) (1.2) の通り定義した。

$$ST1 = 10 \log_{10} \frac{\int_{20 \text{ ms}}^{100 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{0 \text{ ms}}^{10 \text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (1.1)$$

$$ST2 = 10 \log_{10} \frac{\int_{20 \text{ ms}}^{200 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{0 \text{ ms}}^{10 \text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (1.2)$$

ここで、 $p(t)$  は音源から舞台後方側に距離 1.0 m 離して設置した無指向性マイクにて測定したインパルス応答を示し、音源および受音点の高さは床から 1.0 m で、時刻 0 ms は直接音がマイクに到来した時刻を表す。

ST1 および ST2 の値はステージ上の測定位置によって異なった値を取るが、同時に発表されたこれらの実測を含む研究 [2] では、典型的なソリストの位置、チェロ奏者の位置、木管楽器の位置の三点がステージの代表点とされた。分析対象の周波数帯域は 250 Hz から 2000 Hz を中心とする 4 帯域の 1/1 オクターブバンドであり、全帯域および全測定点の計算値の算術平均をホールにおける单一の指標値として ST が算出されている。さらに、反射音のエネルギーの大部分は ST1 および ST2 の評価区間の間に到来するものの、Gade は同論文にて実施した演奏実験の中で「響き (Reverberance)」および「ダイナミクス (Dynamics)」の評価項目に関して後期反射音が演奏者に与える影響について指摘した上で、これらの評価項目に関わる後期反射音のエネルギーを直接評価する指標として ST<sub>Late</sub> を式 (1.3) の通り提案している。

$$ST_{Late} = 10 \log_{10} \frac{\int_{100 \text{ ms}}^{1000 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{0 \text{ ms}}^{10 \text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (1.3)$$

## STに関する研究の展開

前項で示した Gade の研究を嚆矢として、ステージ上の物理的な測定による評価を含む研究がいくつか行われた。

Chiang ら [3] は、舞台面積が  $49 \text{ m}^2$  から  $269 \text{ m}^2$  の範囲で規模の異なる 5 つのシーボックス型のコンサートホールにおける舞台音響を評価した。各ホールについて、測定位置に関する舞台前方または舞台中央の 2 条件と側面反射板の有無による 2 つのステージ条件からなる室内楽を想定した 4 つの音場条件が検討され、各音場条件について、音源と受音点の位置関係を舞台下手・上手方向または舞台前後方向とする 2 つの測定位置で測定が行われた。この研究では ST2 は評価せずに ST1 を  $\text{ST}_{\text{Early}}$  として呼称が改められて  $\text{ST}_{\text{Late}}$  とともに測定されたほか、比較的小さな舞台寸法を持つホールの壁面から提供される初期反射音のエネルギーを考慮できる 7~100 ms の積分窓を持つアーリー/ダイレクト・エネルギー比 (ED100) も提案された。

Jeon と Barron [4] は、舞台上の位置の違いによる  $\text{ST}_{\text{Early}}$  の値の差異について検討するため、ソウルの扇形平面を持つ大規模なホールのステージ上（舞台面積  $270 \text{ m}^2$ 、舞台の幅の平均値  $22 \text{ m}$ 、天井の高さ  $14\sim15 \text{ m}$ ）の 8 つの位置で  $\text{ST}_{\text{Early}}$  の測定を行った。この研究では、音源と受音点の高さとして  $1.2 \text{ m}$  が使用され、これは演奏者の座位の高さと対応する。測定された  $\text{ST}_{\text{Early}}$  はステージ後方の位置で最も高く、ステージ前方の位置で最も低くなり、その値はそれぞれ約  $-15 \text{ dB}$ 、約  $-24 \text{ dB}$  であった。

Dammerud と Barron [5] は、イギリスの 4 つのホールのステージで測定と主観的調査を実施した。舞台面積は  $111\sim189 \text{ m}$ 、舞台の幅は  $18.0\sim27.0 \text{ m}$ 、平均高さは  $9.6\sim19.0 \text{ m}$  の範囲であった。この研究では、実際の演奏条件を想定してステージ上に椅子が配置された状態にて  $\text{ST}_{\text{Early}}$  および  $\text{ST}_{\text{Late}}$  が測定された。

上野 [6] は、Gade が ST の測定において音源と受音点の距離および高さをともに  $1.0 \text{ m}$  としたことに根拠が見られないことを指摘し、演奏家と楽器との関係をモデル化した測定位置として、音源である無指向性スピーカーを楽器の高さを想定した  $1.2 \text{ m}$ 、受音点である無指向性マイクを耳の高さを想定した  $1.5 \text{ m}$  とし、音源・受音点の水平面内の中心間距離を楽器と耳の距離を想定した  $0.3 \text{ m}$  の位置とした測定条件においてインパルス応答測定を行って ST を求めた。その結果、Gade の測定条件で得られる結果に対して、音源受音点間距離が近いことから、全般的に約  $7 \text{ dB}$  程度低い値が得られている。

このように、ステージ音響指標 ST に関して様々な研究者によって検討がなされてきたが、その一方で測定方法が確立・統一されていないことから、異なる研究機関同士の測定結果を単純に比較して検討することは難しい。Giovannini [7] らは主要な楽器セクション間の音響条件の違いを検出することを目的とした測定を行う 2008 年に投稿した論文の中で、異なる研究者が実施した場合にも比較可能で再現性のある結果が得られるように定義した測定手順について紹介している。

これらの成果は ISO3382-1:2009 [8] の中にまとめられ、ステージ音響指標  $\text{ST}_{\text{Early}}$  および  $\text{ST}_{\text{Late}}$  が次の式の通りに規格化されている。

$$\text{ST}_{\text{Early}} = 10 \log_{10} \frac{\int_{20 \text{ ms}}^{100 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{0 \text{ ms}}^{10 \text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (1.4)$$

$$\text{ST}_{\text{Late}} = 10 \log_{10} \frac{\int_{100 \text{ ms}}^{1000 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{0 \text{ ms}}^{10 \text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (1.5)$$

## 1.2 方向別 ST の提案

### 方向別 ST の定義

第1章の第2節でも触れたように、反射音の到來方向も演奏者の感じる響きの印象に影響を与える物理的要因であることが中村ら [9] により指摘されており、本研究では方向特性が演奏者に与える影響に関して検討を行うことを目的としている。そこで、本研究では ISO に規格化される ST をもとに方向特性を評価する指標として方向別 ST を式(1.6)および式(1.7)の通りに構築し、ホールステージの音場の特性の把握および実験室において生成される音場の評価に用いる。

$$ST_{Early,dir} = 10 \log_{10} \frac{\int_{20\text{ ms}}^{100\text{ ms}} p_{dir}^2(t) dt}{\int_{0\text{ ms}}^{10\text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (1.6)$$

$$ST_{Late,dir} = 10 \log_{10} \frac{\int_{100\text{ ms}}^{1000\text{ ms}} p_{dir}^2(t) dt}{\int_{0\text{ ms}}^{10\text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (1.7)$$

ここで、 $p(t)$ 、 $p_{dir}(t)$  はそれぞれ全指向性マイクで測定したインパルス応答とカージオイドマイクを用いて測定したインパルス応答を表し、添え字 dir は上下方向を U, D (Up, Down)、客席側・舞台奥側を F, B (Front, Back)、舞台上手・下手方向を L, R (Left, Right) と表記する。

インパルス応答の測定方法は ISO3382-1:2009 に規格化される  $ST_{Early}$  および  $ST_{Late}$  にならうものとし、音源には全指向性のスピーカーを用い、また音源・受音点間の距離は音源を客席側として 1.0 m、音源・受音点の高さはともに 1.0 m または 1.5 m、壁面からの距離は 2.0 m 以上離した条件でインパルス応答を測定する。測定条件の概略図を図 1.1 に示す。

また、分析対象の周波数帯域は 250 Hz から 2000 Hz の 4 帯域の 1/1 オクターブバンドとし、各周波数帯域で式(1.6)および式(1.7)に従い計算したのちに算術平均をとり指標値とする。

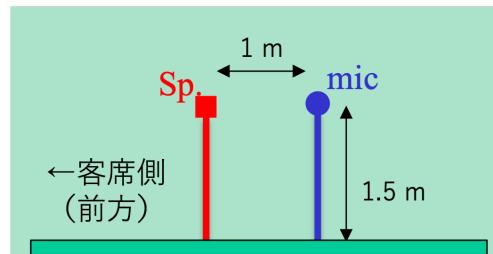


図 1.1: ST のインパルス応答測定条件の概略図

## アンビソニックマイクを用いた測定システム

本研究における受音系のマイクとして、図1.2に示す商用のアンビソニックマイク（Ambeo VR Mic, Sennheiser）を用いた。アンビソニックマイクは4つのカージオイド特性のマイクを正四面体の頂点方向に配置したものであり、測定後の簡単な信号処理により、全指向性マイクで測定した信号および任意の方向にカージオイド特性のマイクを向けて測定した信号と等価な信号を得ることができる[10]。本研究で用いたアンビソニックマイクの方向に関する定義を図1.3に示す。



図 1.2: アンビソニックマイク

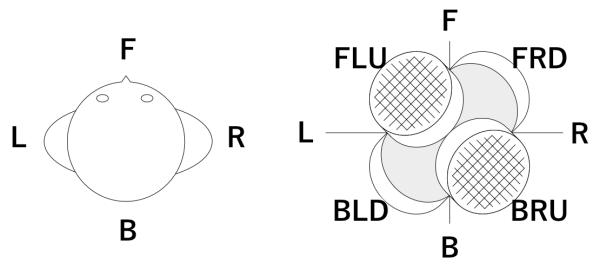


図 1.3: 本研究における方向の定義

方向別インパルス応答を得る手順は次の通りである。まず、A フォーマットと呼ばれる正四面体の頂点方向の信号から式(1.8)により全指向性の信号と互いに直交する3つの双指向性の信号からなるB フォーマットと呼ばれる信号を得る。続いて、式(1.9)によりB フォーマットの信号から直交6方向の方向別インパルス応答を計算する。

ここで、 $p(t)$  は全指向性マイクで測定したインパルス応答と等価な信号、 $p_{FB}(t)$ 、 $p_{LR}(t)$ 、 $p_{UD}(t)$  は前後、左右、上下の双指向性マイクで収録したインパルス応答と等価な信号を表し、 $p_{FLU}$ 、 $p_{FRD}$ 、 $p_{BLD}$ 、 $p_{BRU}$  はアンビソニックマイクのうち前方左上方 (Front Left Up)、前方右下方 (Front Right Down)、後方左下方 (Back Left Down)、後方右上方 (Back Right Up) の信号を表す。

$$\begin{aligned} p(t) &= \frac{1}{2}(p_{FLU} + p_{FRD} + p_{BLD} + p_{BRU}) \\ p_{FB}(t) &= \frac{\sqrt{3}}{2}(p_{FLU} + p_{FRD} - p_{BLD} - p_{BRU}) \\ p_{LR}(t) &= \frac{\sqrt{3}}{2}(p_{FLU} - p_{FRD} + p_{BLD} - p_{BRU}) \\ p_{UD}(t) &= \frac{\sqrt{3}}{2}(p_{FLU} - p_{FRD} - p_{BLD} + p_{BRU}) \end{aligned} \tag{1.8}$$

$$\begin{aligned} p_F(t) &= \frac{1}{2}(p(t) + p_{FB}(t)) \\ p_B(t) &= \frac{1}{2}(p(t) - p_{FB}(t)) \\ p_L(t) &= \frac{1}{2}(p(t) + p_{LR}(t)) \\ p_R(t) &= \frac{1}{2}(p(t) - p_{LR}(t)) \\ p_U(t) &= \frac{1}{2}(p(t) + p_{UD}(t)) \\ p_D(t) &= \frac{1}{2}(p(t) - p_{UD}(t)) \end{aligned} \tag{1.9}$$

### 1.3 方向別 ST の実測

#### 測定方法および測定結果

前節で提案した方向別 STについて、室形状・空間規模の異なる複数のホールの多数点で方向別実測を行い、現実のホールステージにおける反射音到来方向特性を把握する。音源には図1.4に示す無指向性の対向スピーカー、マイクロホンには図1.2に示す商用の1次アンビソニックマイク(Ambeo VR Mic, Sennheiser)を使用した。

音響測定を実施した各ホールの諸元を1.1に示す。ホールAからFは舞台を反射板形式とした多目的ホール、ホールGはアリーナ型のコンサートホールである。なお、ホールBは天井反射板が無い舞台となっている。また、測定を実施した各ホールの外観を1.5に示す。測定点は各ホールの舞台の上手側半面に2m間隔のグリッド上に配置した。1.6に各ホールにおける測定点の音源位置を示す。全ての測定点において音源を客席側、マイクを舞台奥側に配置している。

各ホールのすべての測定点における測定結果を図1.7から図1.13に示す。測定位置によって10msから20msにも反射音のエネルギーが到来し、これも踏まえた考察を行うため、前節で提案した $ST_{Early,dir}$ および $ST_{Late,dir}$ に加え、10msから100msの時間窓で反射音を評価した結果についても合わせて示した。



図1.4: 対向スピーカー

表1.1: 測定を実施したホールの諸元

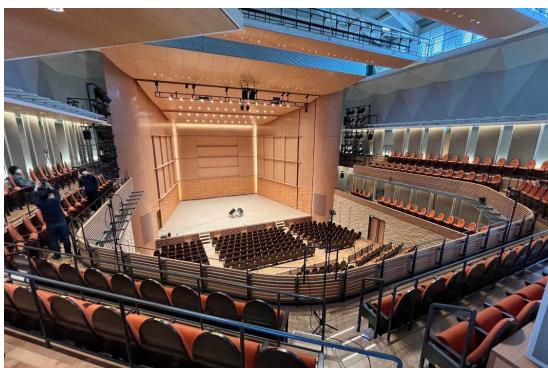
ホール	座席数 (席)	$T_{30}(s)$ 500- 1kHz 平均	室容積 ( $m^3$ )	表面積 ( $m^2$ )	舞台間口 (m)	舞台奥行 (m)	舞台高さ (m)
A	421	1.3	4420	2070	16.5	10.5	8
B	500	1.4	5680	2740	15.5	9	7.4
C	698	2.5	11150	4600	12	16.2	13
D	1033	1.9	11940	4380	20	10	10
E	1104	1.6	10225	3435	19	9	8
F	1514	2.3	15580	5860	18.2	18.2	15
G	1884	2.2	18610	6445	20.8	11.7	-



ホール A



ホール B



ホール C



ホール D



ホール E



ホール F



ホール G

図 1.5: 測定を実施したホールの外観

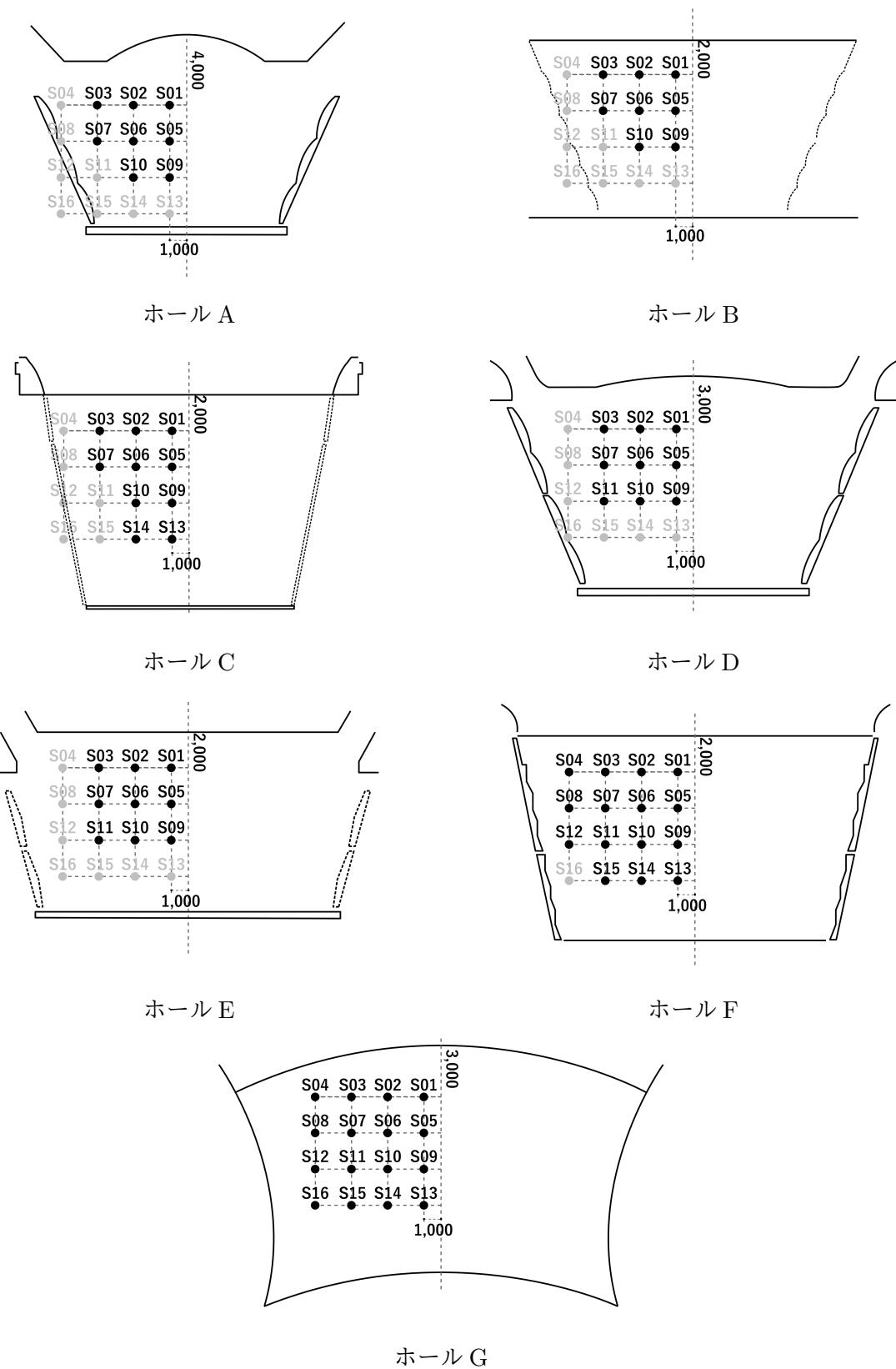
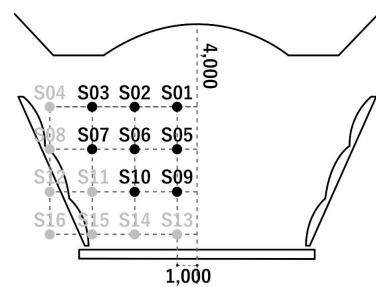


図 1.6: 各ホールの測定位置



ホール A 外観



ホール A 諸元

座席数(席)	残響時間(s) 500-1kHz平均	室容積(m <sup>3</sup> )	表面積(m <sup>2</sup> )	舞台間口(m)	舞台奥行(m)	舞台高さ(m)
421	1.3	4420	2070	16.5	10.5	8

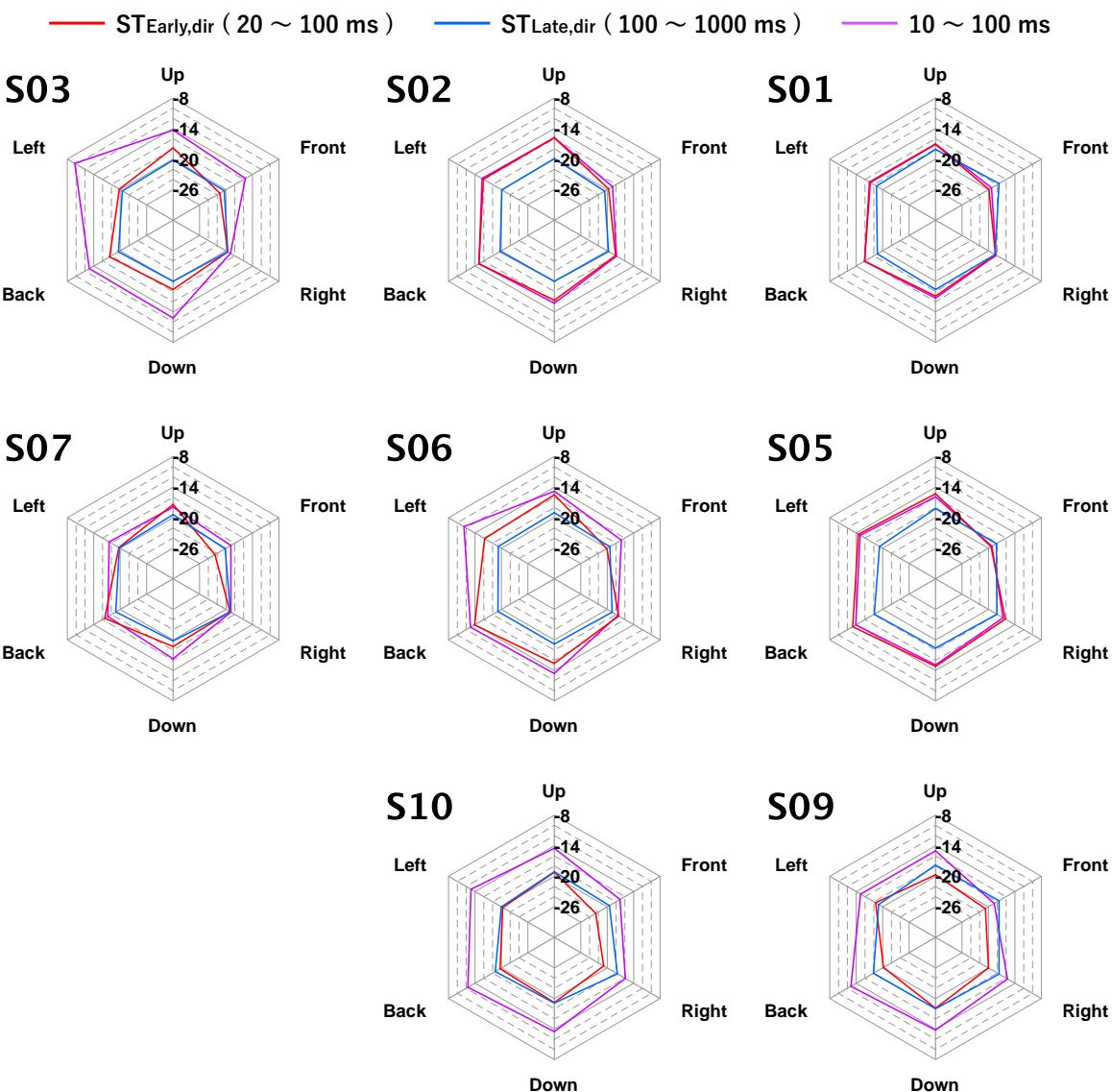
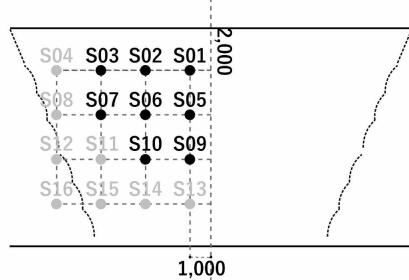


図 1.7: ホール A 方向別 ST



ホール B 外観

ホール B 諸元

ホール B 測定位置

座席数(席)	残響時間(s) 500-1kHz平均	室容積(m <sup>3</sup> )	表面積(m <sup>2</sup> )	舞台間口(m)	舞台奥行(m)	舞台高さ(m)
500	1.4	5680	2740	15.5	9	7.4

— STEarly,dir ( 20 ~ 100 ms )      — STLate,dir ( 100 ~ 1000 ms )      — 10 ~ 100 ms

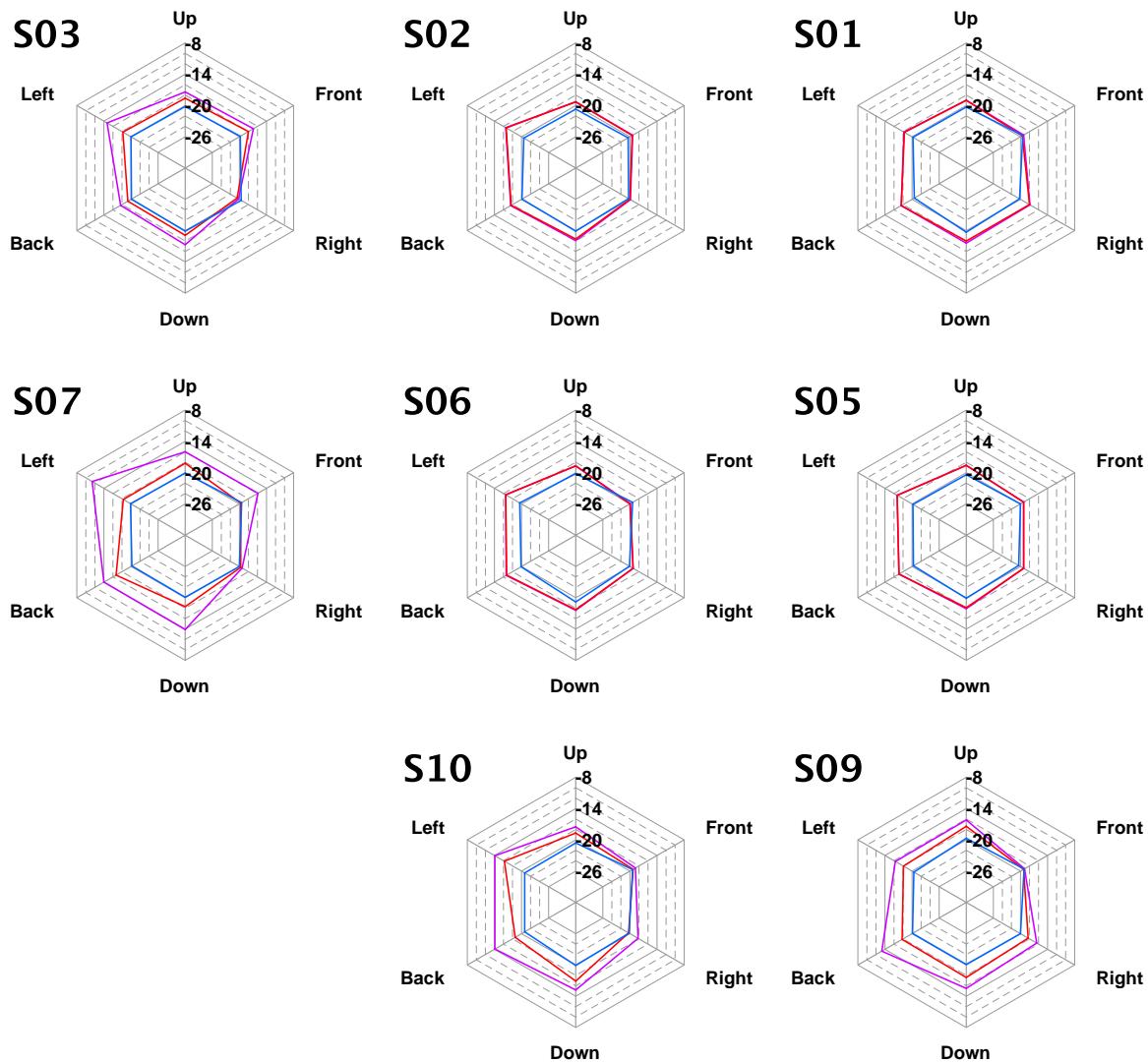
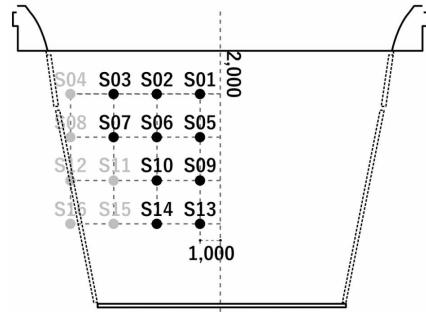


図 1.8: ホール B 方向別 ST



ホール C 外観



ホール C 測定位置

ホール C 諸元

座席数 (席) 500-1kHz平均	残響時間 (s) 500-1kHz平均	室容積 (m <sup>3</sup> )	表面積 (m <sup>2</sup> )	舞台間口 (m)	舞台奥行 (m)	舞台高さ (m)
698	2.5	11150	4600	12	16.2	13

— ST<sub>Early,dir</sub> ( 20 ~ 100 ms )    — ST<sub>Late,dir</sub> ( 100 ~ 1000 ms )    — 10 ~ 100 ms

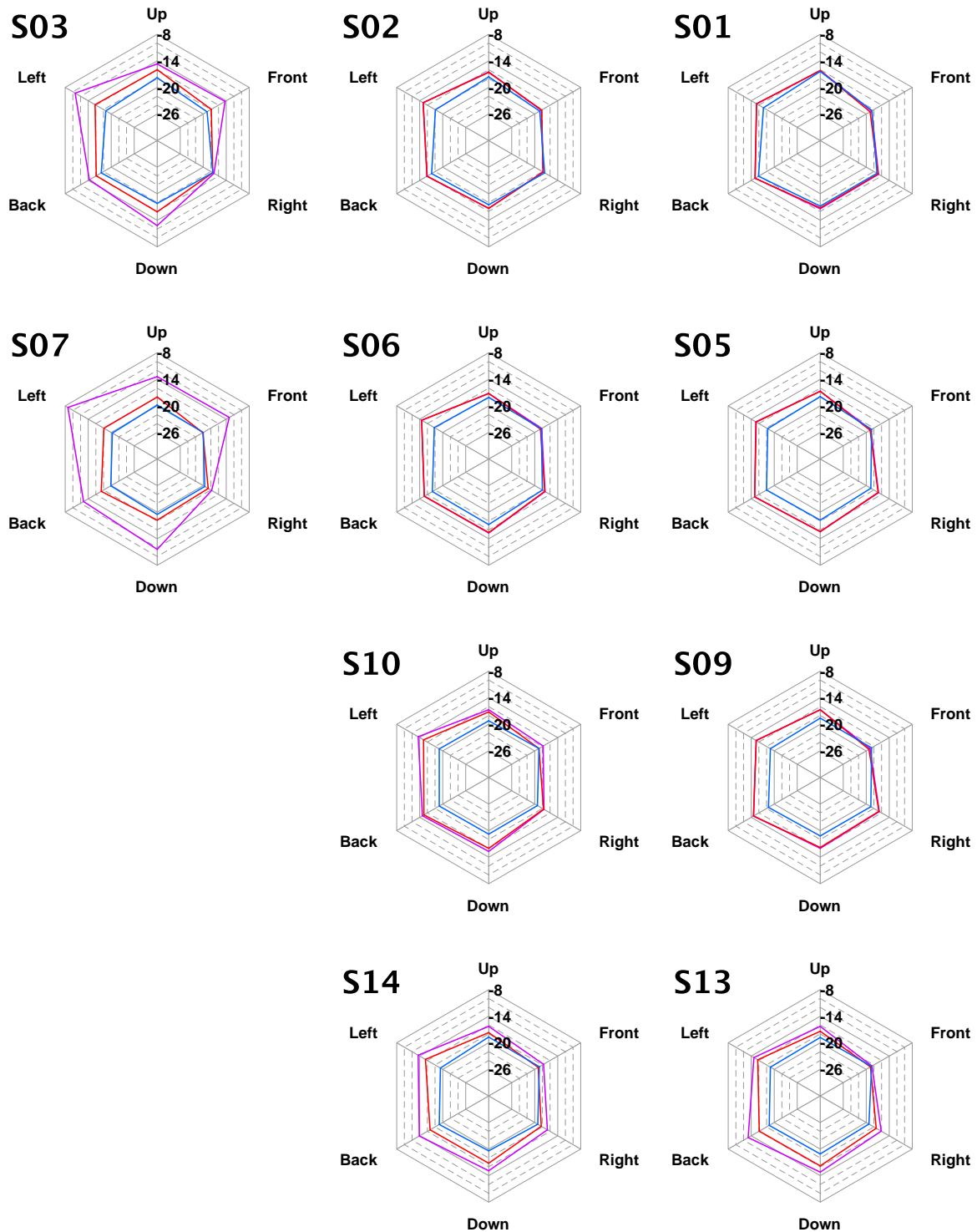
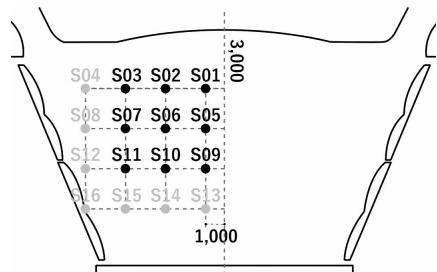


図 1.9: ホール C 方向別 ST



ホール D 外観

ホール D 諸元

ホール D 測定位置

座席数(席)	残響時間(s) 500-1kHz平均	室容積(m <sup>3</sup> )	表面積(m <sup>2</sup> )	舞台間口(m)	舞台奥行(m)	舞台高さ(m)
1033	1.9	11940	4380	20	10	10

— STEarly,dir ( 20 ~ 100 ms )    — STLate,dir ( 100 ~ 1000 ms )    — 10 ~ 100 ms

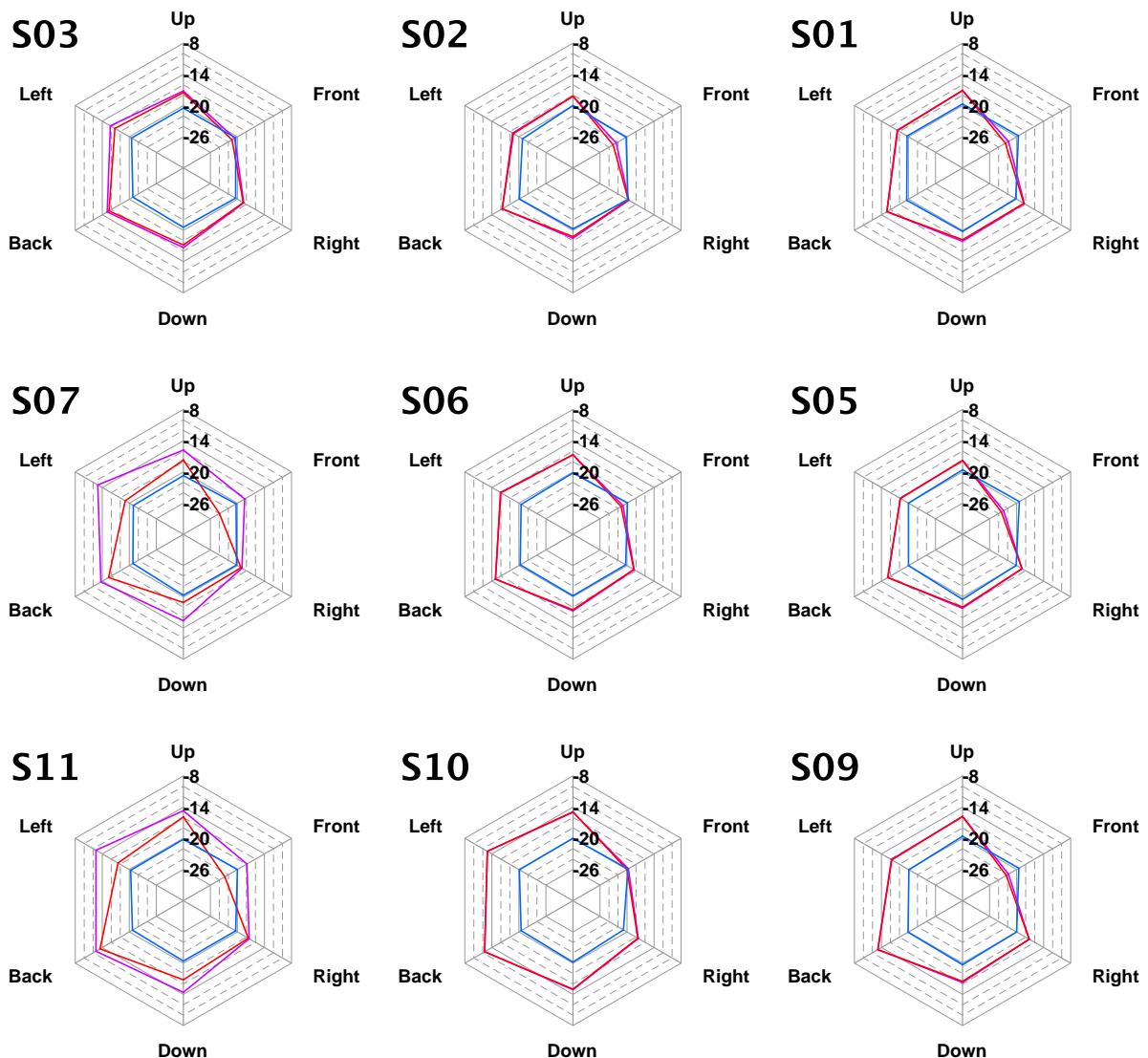


図 1.10: ホール D 方向別 ST

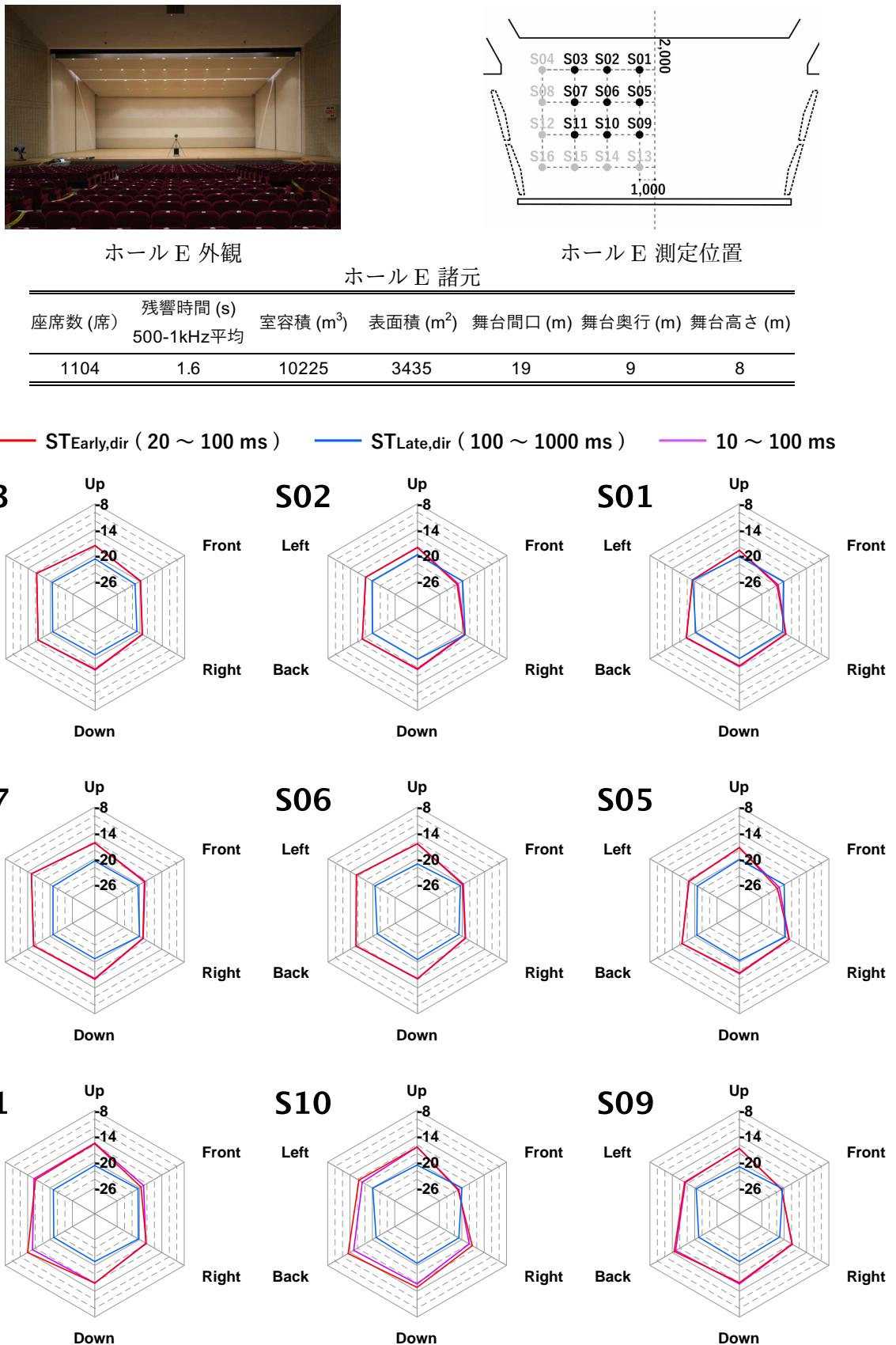
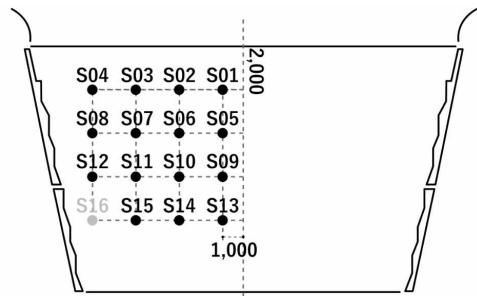


図 1.11: ホール E 方向別 ST

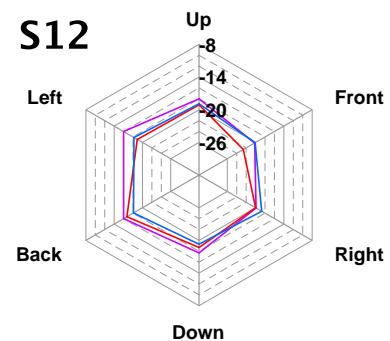
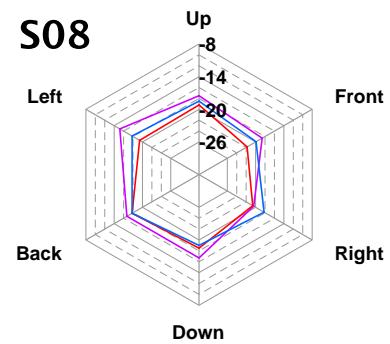
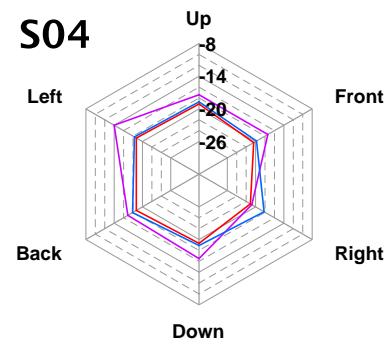


ホール F 外観

ホール F 諸元	
座席数 (席)	1514
残響時間 (s)500-1kHz平均	2.3
室容積 ( $m^3$ )	15580
表面積 ( $m^2$ )	5860
舞台間口 (m)	18.2
舞台奥行 (m)	18.2
舞台高さ (m)	15



ホール F 測定位置



— STEarly,dir ( 20 ~ 100 ms ) — STLate,dir ( 100 ~ 1000 ms ) — 10 ~ 100 ms

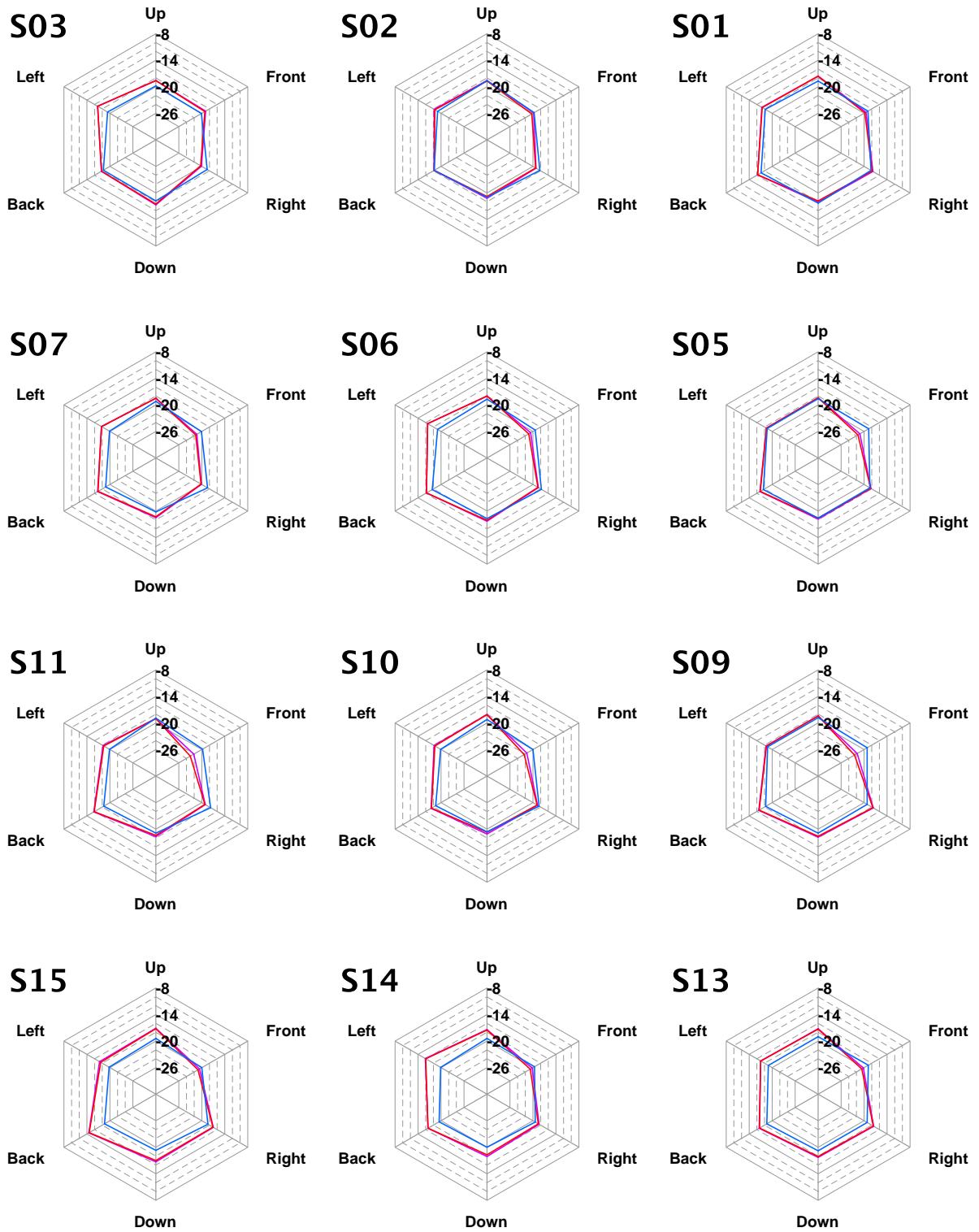
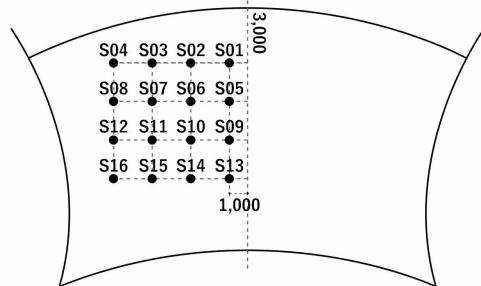


図 1.12: ホール F 方向別 ST

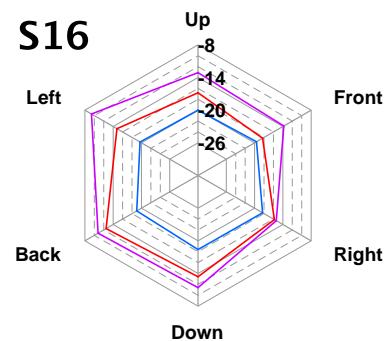
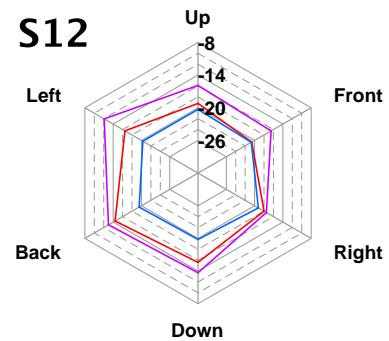
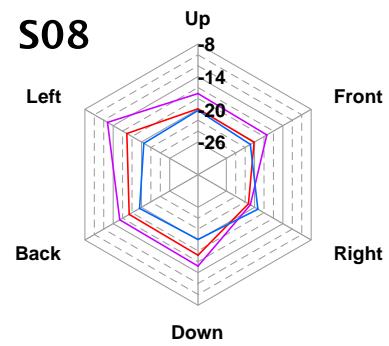
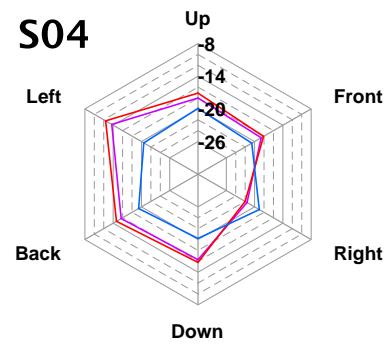


ホール G 外観

ホール G 諸元	
座席数 (席)	1884
残響時間 (s)500-1kHz平均	2.2
室容積 ( $m^3$ )	18610
表面積 ( $m^2$ )	6445
舞台間口 (m)	20.8
舞台奥行 (m)	11.7
舞台高さ (m)	-



ホール G 測定位置



— STEarly,dir ( 20 ~ 100 ms ) — STLate,dir ( 100 ~ 1000 ms ) — 10 ~ 100 ms

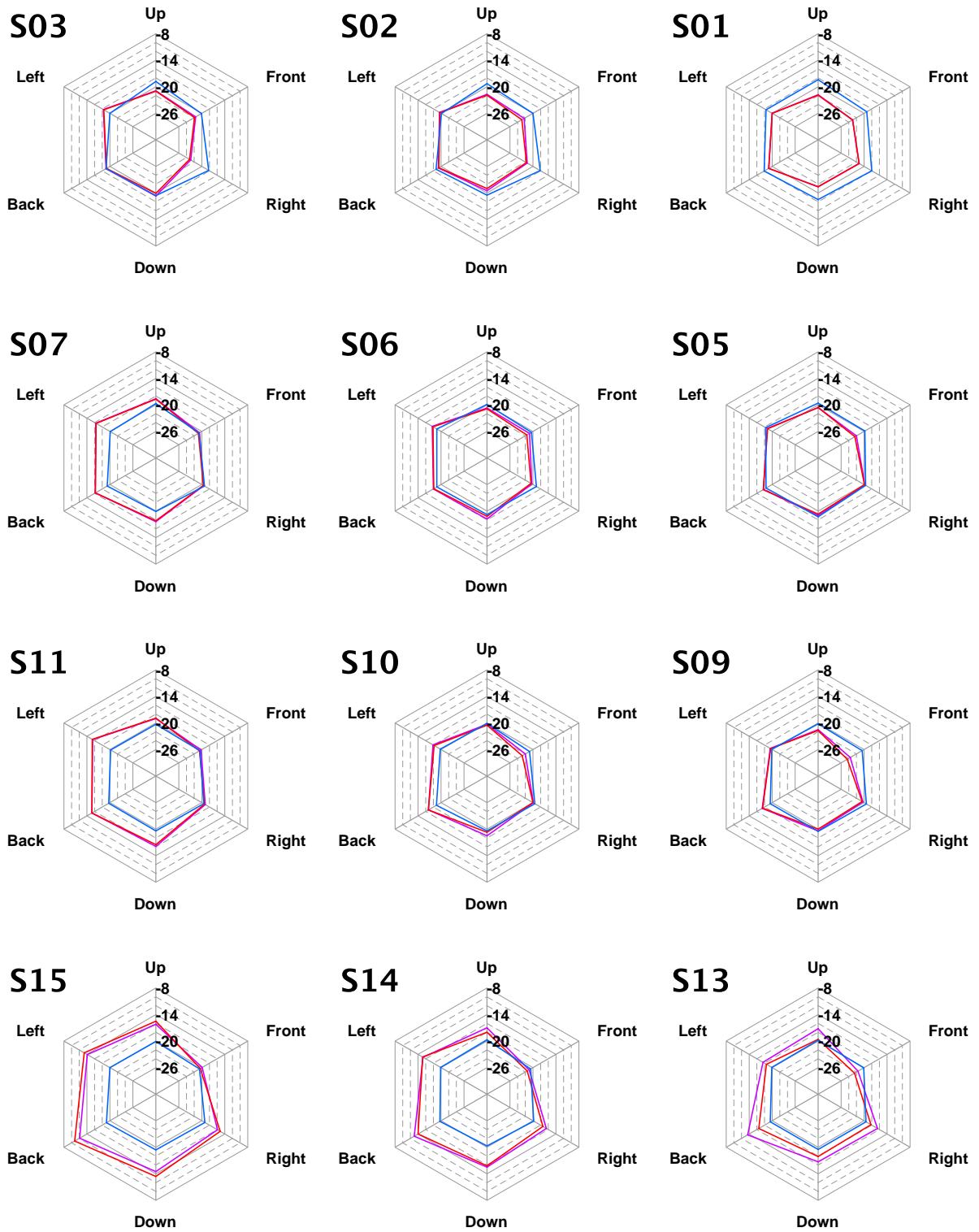


図 1.13: ホール G 方向別 ST

## 測定結果の考察

前項にて、各ホールの全測定点における  $ST_{Early,dir}$ 、 $ST_{Early,dir}$  および 10~100 ms での方向別反射音のエネルギーの評価値について、測定結果を示した。

さらに、 $ST_{Early,dir}$  および  $ST_{Early,dir}$  のホール間での傾向の違いについて、各ホールにおけるすべての測定点の平均値と最大値・最小値を図??および図??に示し、また  $ST_{Early,dir}$  および  $ST_{Early,dir}$  の測定位置による傾向の違いについて、各測定位置におけるすべてのホールでの平均値と最大値・最小値を図??および図??に示す。ただし、??および図??では、すべてのホールで測定を行った測定点である S01、S02、S03、S05、S06、S07、S09、S10 の結果について計算した。

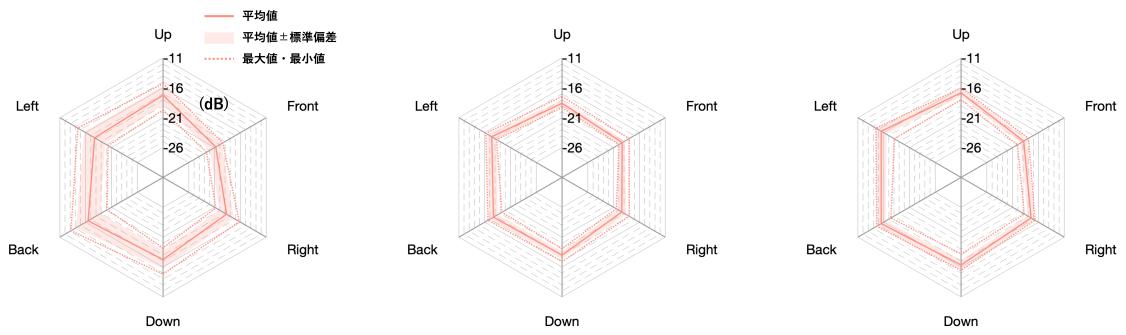
### 初期反射音に関する評価について

$ST_{Early,dir}$  および 10~100 ms に到来する反射音については、全ホールに共通して方向別の偏差が見られ、方向ごとに強度が異なっていた。特に、すべての測定位置で Front の値が相対的に低く、100 ms までに到来する客席側からの反射音レベルが低くなっている傾向が見られた。

舞台中央側および前方側の測定点では  $ST_{Early,dir}$  と 10~100 ms に到来する反射音の評価値はほぼ等しいのに対し、壁面との距離の近い舞台上手側および舞台奥付近の測定点では、特に Left および Back の方向で 10~100 ms の評価値が  $ST_{Early,dir}$  よりも顕著に大きくなる傾向が見られた。100 ms 以内に到来する反射に占める一次の反射音のエネルギーが大きく、これが評価区間に含まれるかどうかによって評価値が大きく変化していると考えられる。また、壁面の近傍における測定点ではこの一次の反射音の減衰も小さく、10~20 ms に到来している成分のエネルギーが特に大きくなっていると考えられる。ごく短い遅れ時間で到来する反射音はカラレーションを引き起こす恐れがあり、10~20 ms の間に到来する反射音もカラレーションを起こして心理印象を変化させる原因になりうるため、これらの点におけるエネルギー量に着目した指標での評価は心理印象とうまく対応しない可能性がある。

### 後期反射音に関する評価について

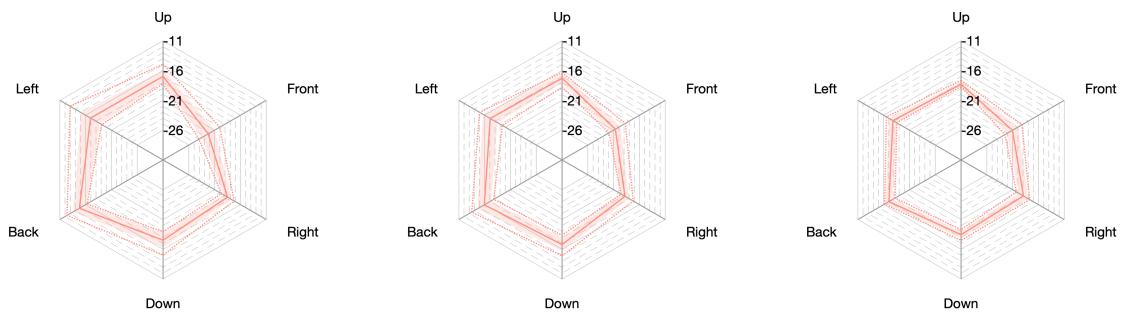
$ST_{Late,dir}$  については、方向別の差異が小さい傾向にあり、100~1000 ms に到来する反射音は一様な強度になっていて、拡散してあらゆる方向から到来していると考えられる。また、同一のホール内での測定点毎の差も小さく、舞台上での位置依存性も小さいと推察される。一方で、ホール間での差異は大きい傾向にあり、ホール C および F は他のホールに比べて全体的に値が高くなっている。ホール C および F は残響時間も 2 秒以上とホール A、B、D、E に比べてかなり長くなっているが、同じく 2 秒以上の長い残響時間を持つホール G における  $ST_{Late,dir}$  は他のホールと同程度の水準である。ホール A から F がシューボックス型の形状をしているのに対し、ホール G はアリーナ型の形状であるため、ホール G では残響時間の長さの割に演奏者に返る後期反射音が少なく、 $ST_{Late,dir}$  がホール C、F よりも小さくなっているのではないかと考えられる。



ホール A

ホール B

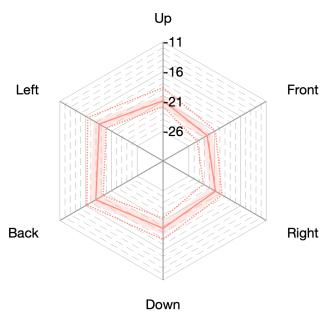
ホール C



ホール D

ホール E

ホール F



ホール G

図 1.14: 各ホールにおける  $ST_{Early,dir}$

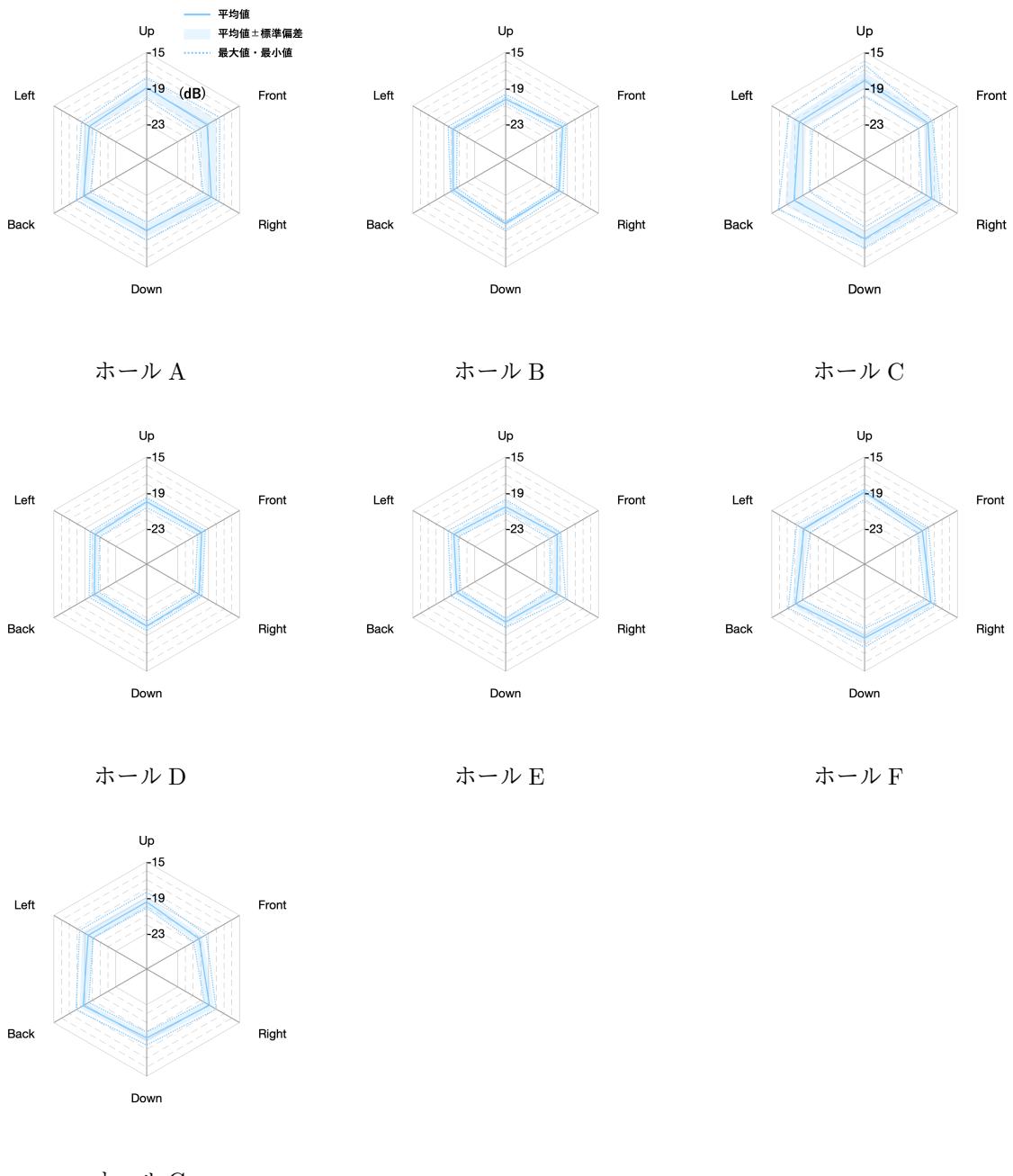
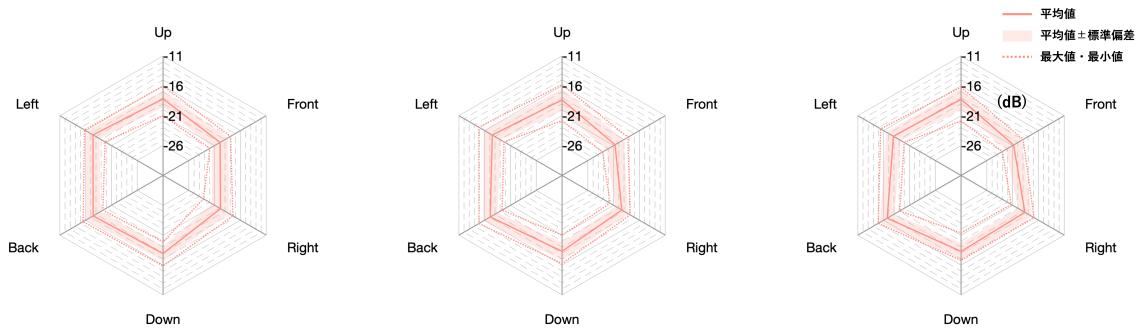


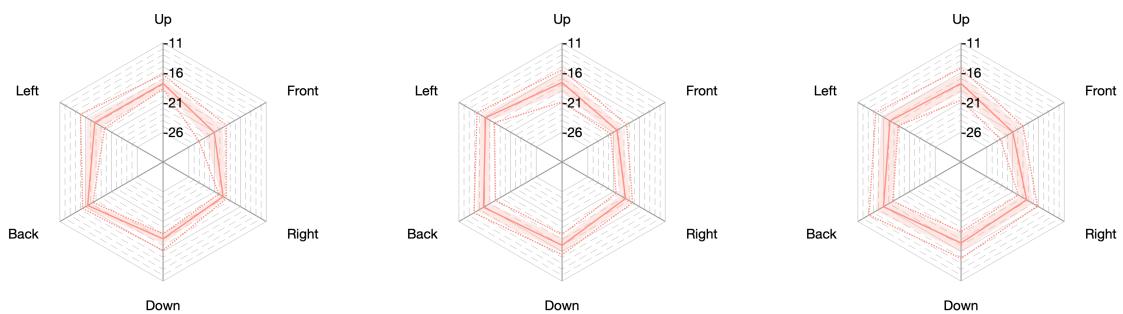
図 1.15: 各ホールにおける ST<sub>Late,dir</sub>



測定点 3

測定点 2

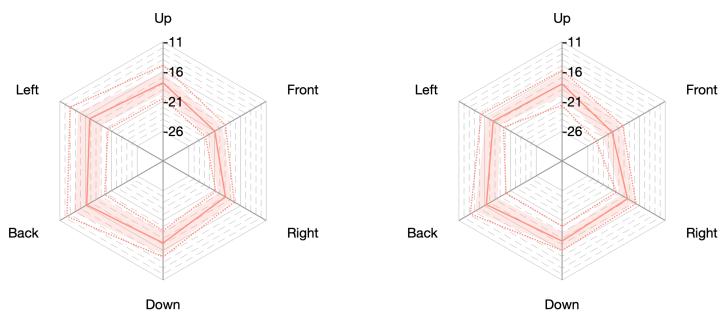
測定点 1



測定点 7

測定点 6

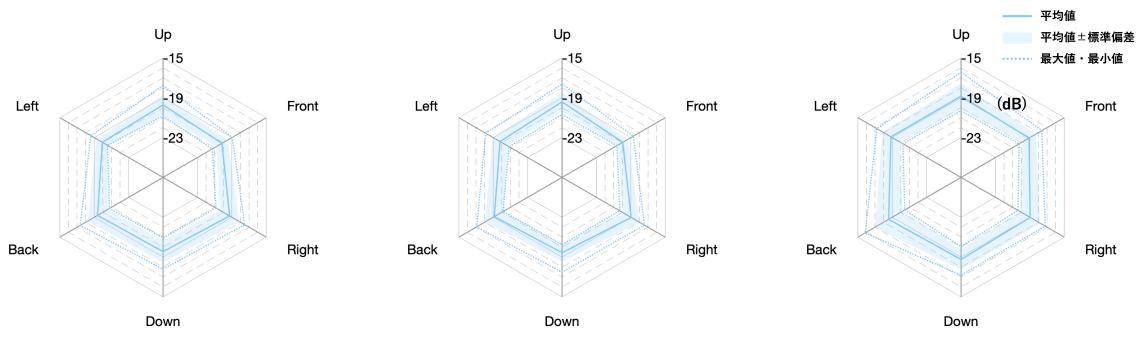
測定点 5



測定点 10

測定点 9

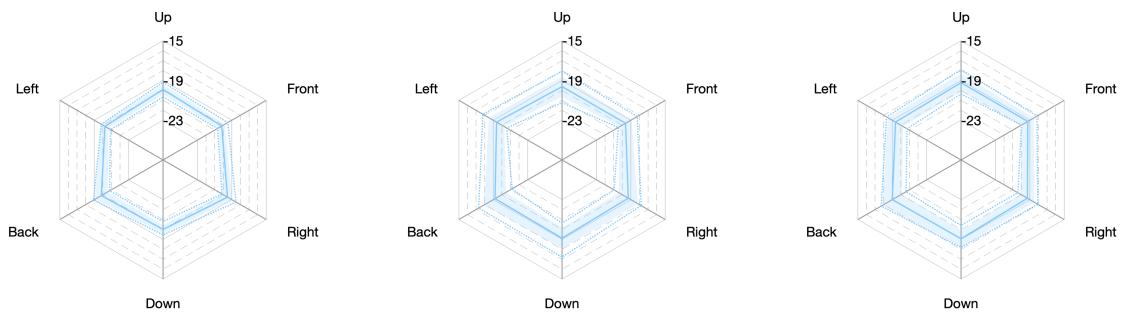
図 1.16: 各測定点における  $ST_{Early,dir}$  (全ホール)



測定点 3

測定点 2

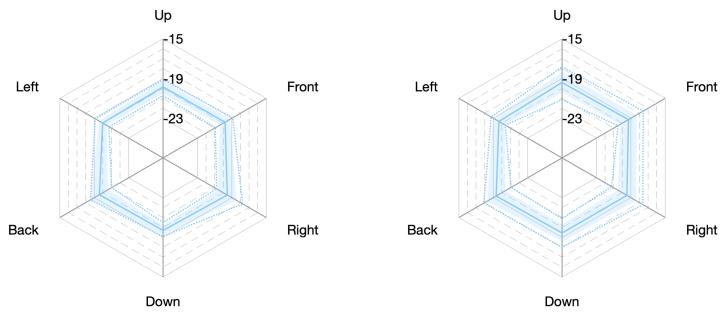
測定点 1



測定点 7

測定点 6

測定点 5



測定点 10

測定点 9

図 1.17: 各測定点における  $ST_{Late,dir}$  (全ホール)

## 1.4 生成音場の目標値の設定

方向特性の評価を行う演奏実験を行うために生成する音場について、実際のコンサートホールのステージ上の音場に近づけることを目指すため、前節までに示したコンサートホールのステージにおける実測結果に基づいて設定する。

## 実験室における音場の可変幅の確認

実験室に響きを付加するにあたり、目標とした音場が実験室で実現可能な響きの幅、すなわち最小の響きの条件と最大の響きの範囲に収まることを確認する必要がある。

AFCは響きを増幅するシステムであるため、実験室で実現可能な最小の響きは、AFCをオフにしたときの響きとなる。AFCをオフにしたときのST<sub>Early,dir</sub>、ST<sub>Late,dir</sub>を表1.2に示す。

表1.2: AFCをオフにしたときのST<sub>Early,dir</sub>、ST<sub>Late,dir</sub>

	Front	Back	Left	Right	Up	Down
ST <sub>Early,dir</sub> (dB)	-24.2	-25.5	-24.2	-25.9	-25.9	-23.3
ST <sub>Late,dir</sub> (dB)	-65.5	-66.7	-67.0	-65.6	-66.6	-64.2

響きを増やすことに関する程度自由度を持って調整することができるが、AFCでつける響きを大きくしていく、つまり再生音の音量を上げていくと、ある音量を超えたときに不自然な音色の変化（カラレーション）が発生し始める。カラレーションが起こり始める音量の条件はイコライザの設定等様々な要素によって変化するため最大の響きを厳密に調べることは困難である。

実験室での可変幅の大まかな検討のため、イコライザによる周波数特性の手動調整を行わずに仮の設定でAFCをオンにし、カラレーションの生じ始めを聴感的に確認し、その直前の音量の設定におけるST<sub>Early,dir</sub>およびST<sub>Late,dir</sub>を測定した。その結果を表1.3に示す。

表1.3: AFC仮調整時のST<sub>Early,dir</sub>、ST<sub>Late,dir</sub>

	Front	Back	Left	Right	Up	Down
ST <sub>Early,dir</sub> (dB)	-16.4	-18.0	-16.7	-17.3	-19.9	-16.1
ST <sub>Late,dir</sub> (dB)	-15.8	-15.9	-16.0	-15.8	-19.2	-15.0

これらの結果とコンサートホールでの実測値から、実験室におけるST<sub>Early,dir</sub>とST<sub>Late,dir</sub>はコンサートホールでの実測値と同程度の値を十分取ることができると考えられ、詳細な設定により所望の音場を実現しうることが期待できる。

## 関連図書

- [1] A. C. Gade. Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. part i: Methods and laboratory experiments. Acta Acustica united with Acustica, Vol. 69, No. 5, pp. 193–203, 1989.
- [2] A.C. Gade. Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. ii: Field experiments and synthesis of results. Acta Acustica united with Acustica, Vol. 69, No. 6, pp. 249–262, 1989.
- [3] Weihwa Chiang, Shih-tang Chen, and Ching-tsung Huang. Subjective assessment of stage acoustics for solo and chamber music performances. Acta Acustica united with Acustica, Vol. 89, No. 5, pp. 848–856, 2003.
- [4] Jin Yong Jeon and Michael Barron. Evaluation of stage acoustics in seoul arts center concert hall by measuring stage support. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 117, No. 1, pp. 232–239, 2005.
- [5] Jens Jørgen Dammerud and Michael Barron. Early subjective and objective studies of concert hall stage conditions for orchestral performance. In 19th international congress on acoustics Madrid, Vol. 2, 2007.
- [6] 上野佳奈子. ホール音場に対する演奏家の評価に関する研究. PhD thesis, 東京大学大学院, 2002. 第3章 ステージ上の音響特性 第3節 音響特性の定量化 より.
- [7] Maria Giovannini and Arianna Astolfi. The acoustical characterization of orchestra platforms and uncertainty estimation of the results. Applied Acoustics, Vol. 71, No. 10, pp. 889–901, 2010.
- [8] ISO 3382-1:2009. Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 1: Performance spaces.
- [9] 中村俊一. 演奏者の感じる室の響きの方向性について. 音響学会建築音響研資, pp. AA 93–18, 1993.
- [10] 西村竜一. 5. アンビソニックス. 映像情報メディア学会誌, Vol. 68, No. 8, pp. 616–620, 2014.