

東京大学大学院工学系研究科  
建築学専攻

2023 年度  
修士論文

反射音到来方向が合唱者に  
与える影響に関する実験的検討

2024年1月15日提出  
指導教員 佐久間 哲哉 教授

学籍番号 37-226077

板垣 大稀

# 目 次

<b>第 1 章 はじめに</b>	<b>5</b>
1.1 背景 . . . . .	5
1.2 既往研究 . . . . .	7
1.3 本研究の目的 . . . . .	9
1.4 AFC の概要 . . . . .	9
1.5 本論文の構成 . . . . .	11
<b>第 2 章 反射音到来方向の物理的評価</b>	<b>13</b>
2.1 はじめに . . . . .	13
2.1.1 Gade によるステージ音響指標 ST の提案 . . . . .	13
2.1.2 ST に関する研究の展開 . . . . .	14
2.2 方向別 ST の提案 . . . . .	15
2.2.1 方向別 ST の定義 . . . . .	15
2.2.2 アンビソニックマイクを用いた測定システム . . . . .	16
2.3 方向別 ST の実測 . . . . .	17
2.3.1 測定方法および測定結果 . . . . .	17
2.3.2 測定結果の考察 . . . . .	30
2.4 生成する音場の目標値の設定 . . . . .	35
<b>第 3 章 実験音場の生成</b>	<b>37</b>
3.1 音場支援システム AFC について . . . . .	37
3.1.1 音場支援システムの概要 . . . . .	37
3.1.2 音場支援システムの仕組み . . . . .	38
3.1.3 実験室における AFC のシステム機器配置 . . . . .	40
3.2 音場生成の準備 . . . . .	42
3.2.1 マイクとスピーカーのルーティング . . . . .	42
3.2.2 重畳に用いる FIR フィルタ . . . . .	44
3.2.3 AFC の音場生成における制御幅 . . . . .	46
3.3 生成音場の調整方法 . . . . .	47
3.4 生成した音場の特性 . . . . .	48
3.4.1 基準音場 . . . . .	48
3.4.2 方向の偏りをつけた音場 . . . . .	53
<b>第 4 章 演奏実験</b>	<b>65</b>
4.1 実験の概要 . . . . .	65
4.2 方法 . . . . .	66
4.2.1 実験の手順 . . . . .	66

---

4.2.2 音場の評価方法	66
4.3 結果と考察	68
4.3.1 全体的な傾向	68
4.3.2 パートによる評価の違い	70
4.3.3 散布図を用いた検討	75
<b>第5章 おわりに</b>	<b>83</b>
5.1 まとめ	83
5.2 今後の展望	83
<b>付録A 演奏実験の資料</b>	<b>85</b>
<b>発表論文一覧</b>	<b>103</b>
<b>参考文献</b>	<b>120</b>
<b>謝辞</b>	<b>123</b>



# 第1章 はじめに

## 1.1 背景

本研究は反射音の到来方向が演奏者に与える影響について検討を行うものであり、コンサートホール音響学の中でも特に演奏者の立場からホールの評価を行うことを試みるステージ音響学の分野に位置づく。研究の前史として、まずコンサートホールの起源とその研究の起りについて概観する。

### コンサートホールの起源

18世紀以前のヨーロッパにおいて音楽家は主に王室や貴族、教会の保護下で活動していたが、18世紀後半になるとブルジョワジーと呼ばれる中産階級が社会の富と実験を握り始めたことで従来の庇護者の力が相対的に弱まり、市民層を対象としたコンサートにより収入を得る音楽家が現れたとされる。

最初期のコンサートホールは既存の建物を利用したものだったが、市民向けコンサートが興行的な成功を収めるようになると、より多くの聴衆を収容する必要性が高まり、コンサート用の会場として約800席の座席数を持つハノーヴァー・スクエア・ルームズ（1774年）などが建設されるようになった。19世紀以降には2000席程度の座席数を誇るようより大規模なコンサート専用ホールがヨーロッパ各地に建設されるようになり、特に代表的な初期の大規模コンサートホールとして、ウィーン楽友協会大ホール（1870）、初代ベルリン・フィルハーモニー（1882）、アムステルダムのコンセルトヘボウ（1888）が挙げられる。ルネサンス期に成立したオペラのための大規模な劇場は18世紀にはヨーロッパ各地に建造されていたことを思うと、コンサートホールの歴史は比較的新しいものと言えよう。



図 1.1: ウィーン楽友協会大ホール  
© Wolf-Dieter Grabner, ウィーン楽友協会  
公式ホームページ [1]



図 1.2: アムステルダム コンセルトヘボウ  
© Amsterdam Municipal Department for the  
Preservation and Restoration of Historic  
Buildings and Sites (bMA) [2]

## コンサートホール音響学の創始

これらのホールは靴箱のような直方体の空間形状からシューボックス型と呼ばれる形式で、この形状がコンサートホールの形として良いのではないかということは経験的に認識されていたという。特にウィーン楽友協会大ホールは響きの優れたホールとしても有名であるが、しかし、これらのホールの響きは必ずしも音響設計によって狙った響きが実現されたものではない。コンサートホールの建造にあたっての本格的な音響設計の開始は、ボストンシンフォニーホールの設計における Sabine の音響コンサルティングを待つことになる [3]。

Sabine はハーバード大学の物理学の研究者であり、彼の建築音響に関する研究はハーバード大学に建設された Fogg Art Museum (1895) の講義室に生じた「残響により言葉が明瞭に聞こえない」という音響的な問題の改善を依頼されたことから始まった。この問題の解決のための過程で Sabine が導入した残響時間や吸音率といった概念は現代の室内音響学の基礎となっており、ボストンシンフォニーホールの音響設計においてもこれらの概念を活用して設計が進められた。これらの Sabine の取り組みにより、建築音響工学、そしてコンサートホール音響学が創始された [4]。それ以降、優れた音響空間をいかにして建築するかという課題に向かって、基本的な残響感から極めて感性的な判断である音の好みに至るまで、物理的あるいは聴覚心理的視点から数多くの研究が積み重ねられてきた。



図 1.3: ボストン シンフォニーホール  
ボストンシンフォニーホール公式ホームページより [5]

## 1.2 既往研究

### ステージ音響学の始まり

演奏者にとっても空間の響きが極めて重要であることは演奏者にとっては半ば自明であって、ホール設計者や音響学の研究者にもよく知られていたのではないかと推測されるが、コンサートホール音響学に関する研究は、主に客席での聴こえ方、すなわち聴衆の視点に立って行われてきた。演奏者の視点に立ったコンサートホールに関する音響学の研究領域は今日では「ステージ音響学」と呼ばれて分類されるが、この研究が本格的に行われるようになるのは1970年代に入ってからのことである。

ステージ音響の研究が Sabine によるコンサートホール音響学の創始から随分と遅れて始まった理由を直接述べることは困難であるが、「演奏家はホールを評価するというよりも、どうしたらそのホールで良い演奏ができるかということを考える」という言葉 [6] によく表れてように、熟練した演奏者であれば空間の響きに合わせて演奏を適応させると他ならぬ演奏者自身が考えているであろうという動機の点は一つの理由として考えられる。またこのような適応的な演奏の変化を行うという事実から、多数の演奏者を対象として信頼性の高い均一な主観評価結果を得るのが難しいという研究上の困難さがある点も、その理由の一部ではないかと推測できる。

ともかくコンサートホール音響学の創始から遅れつつも1970年代にステージ音響に関する研究は始まり、その初期の研究は、模擬音場での演奏実験によって [?, 7, 8]、または実際のホールステージの現場での実験によって [9–11]、音場に対する演奏者の主観印象の評価を求めるものであった。

さらに、菅 [12] は演奏者が好むステージ音響状態を説明する指標として「響きの量」「響きの質」「自分の音の出しやすさ」「自分の音の聞き取りやすさ」「他の演奏の聞き取りやすさ」「音の鳴りの手応え」「弱音の伸び」「音の通り」のそれぞれの関係を検討している。その結果、ホールの音響的印象は響きの量・質、自分の音の出しやすさ、聞き取りやすさの四要因の評価でほとんど決定されること、演奏のしやすさの評価はこのうち前三者との相関が高く、これらが音響的総合印象を支配する要因であるとしている。

舞台音響特性の物理的な測定を通じた大規模な調査は1989年にGade [9] によって初めて行われ、演奏者自身の演奏のしやすさに関する物理指標値として”SUPPORT (ST) ”、アンサンブルの取りやすさに関する指標値として”Early Ensemble Level (EEL) ”が定義された。また、指揮者、歌手、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) の六つにまとめている。これら Gade の取り組みの成果がステージ音響学が本格化する画期となったと考えられ、今日 ISO3382-1:2009 にも ST および EEL が規格化されており、音響設計やステージ音場の評価に用いられている。なお、ステージ音響指標 ST に関する説明について、また Gade の提案から ISO に規格化されるまでのステージ音響指標値に関する研究の経緯については第2章第1節にて詳細に記述する。

## ステージ音響学の発展

菅ら [13] はボストン交響楽団、ライブツィヒ・ゲヴァンドハウス管弦楽団、新日本フィルハーモニー交響楽団の団員に対して多数のホールでのコンサートに基づく主観評価調査を行った結果からホールの音響設計という観点から考慮すべき点について考察し、「舞台の大きさ」「舞台音響反射板の開き具合」「舞台音響反射板の拡散性」という三点をまとめている。

上野ら [14] は、演奏家のホールに対する心象が演奏という能動的行為における個々の意識に密接に関係するものであるため、ホールに対する演奏家の意識の理解のために、実験により検証可能な仮説を設定して統計的にその妥当性を確かめる一般的な心理統計的手法を適用することが難しいという問題を指摘した上で、ホールの音響効果に関する演奏家の言語構造について検討を行い、その結果として、演奏中の演奏家の意識に関して「個人」「共演者」「聴衆」の三つの軸を想定することにより演奏家の言語表現が整理された。

上野らはさらに、演奏者がホール音場についてどのように考えているかについて、演奏者自身の言葉を用いて個人別の評価項目を作成して評価を行う”個別尺度法”を適用した主観評価実験を行い、各演奏家の好みなど総合的な評価に関しては個人差が大きく表れるのに対し、具体的な響きの特徴や音の聴こえ方については複数の演奏家がある程度共通した判断を行っていることを報告している [14]。

## ステージへの反射音の到来方向に関する研究

Gade により提案され、今日では ISO に規格化されるステージ音響指標 ST および EEL は、舞台上に音源・受音点を置いて測定したインパルス応答において、直接音のエネルギーに対する反射音のエネルギーの量を評価することで、演奏者の聴取する響きを定量化することを試みる量である。すなわちこれらの音響指標値は、演奏者の聴取する響きのある時間窓の中のエネルギー量に着目して構築された指標であるが、演奏者による響きの評価はその他にも多様な項目により決定されると考えられる。

反射音の到来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と考えられたもののうちの一つであり、1993 年の中村による研究中村 1993 にて演奏者が室の響きの方向性に何らかの影響を受けている可能性が指摘されている。2008 年の上田による研究 [15] では、6ch スピーカーシステムを用いて生成した音場において、反射音の到来方向が左右に偏りがある音場か、後方から多い音場が好まれる可能性があることが示されている。一方で、同じ研究グループにより指摘されているように、実際のステージ上において、このような響きの方向特性に近い音場が実現されていると考えられる舞台側壁または後壁付近を選んで演奏者が演奏を行うことは通常なく、標準的な演奏位置である舞台中央・前方付近では左右の偏り、後方からの反射音供給量ともに比較的小さい [16]。

このように、6ch スピーカーシステムによる模擬音場での主観評価実験の結果と、現実の音場の響きの条件に関する対応関係は明らかになっていない。方向特性が演奏者に与える影響についてより適切な評価結果を得るためにには、より現実に即した音場条件において反射音の到来方向特性を変化させて主観評価実験を行う必要があると考えられるが、このような検討例は見られない。

### 1.3 本研究の目的

ステージ音響における主観評価実験の手法は模擬音場を実験室内に生成して演奏実験を行う方法、実際のホールステージの現場にて演奏実験を行う方法に大別される。前者は音場要因の制御は後者に比べて容易であるという利点があるが、6chスピーカーシステムをはじめとする従来の手法により生成される模擬音場では、音場領域が狭く現実のホールと同等の測定を行うことが困難であり、生成した音場の特性と現実のホールとの対応関係を明らかにすることが難しい。逆に、実際のホールステージで演奏実験を行おうとする場合、当然のことながら、響きの条件を自由に制御することはほとんど不可能である。

しかし、前項にて現実に即した音場条件での評価の必要性を指摘したように、反射音到来方向が演奏者に与える影響に関する評価のためには、実験環境と現実のコンサートホールステージの間での乖離を可能な限り小さくし、より現実の演奏環境に即した実験を行うことが望ましい。そこで本研究では、実際のコンサートホールの反射音到来方向を模した音場を実験室において生成し、その生成した音場における演奏実験を通して反射音到来方向が演奏者に与える影響について検討することを目的とする。

なお、本研究ではより現実に即した演奏条件下で実験を行うことを試みるため、最も基本的な演奏形態のうちの一つである混声四部のカルテット（ソプラノ、アルト、テノール、バスの四声部各一名ずつからなるアンサンブル形態）にて演奏実験を行うことを考える。

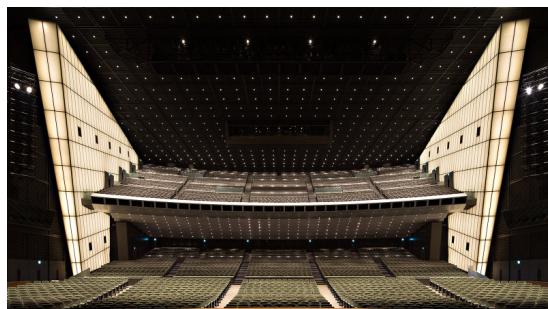
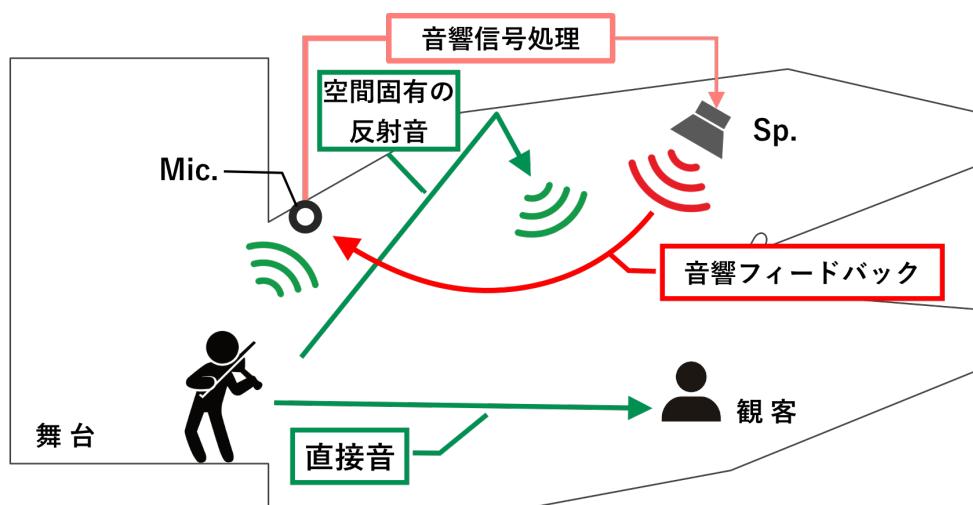
### 1.4 AFC の概要

室内の最適な響きは行われる演目によって異なり、例えばオルガンや合唱の演奏には楽音を豊かにする響きのある空間が適している一方で、演劇や講演会には響きの少ない明瞭な空間が適しているとされている。音場支援システム（YAMAHA：Active Field Control Enhance、以下 AFC）は一つの空間において多様な演目を最適な響きの中で行いたいというモチベーションから開発されたシステムであり、最新の電気音響・信号処理技術を用いて、室内の響きや空間の拡がり・音量感などの聴感印象を自然に変化させることができる [17]。本研究では、音場の生成に用いるシステムとして AFC を採用し、半無響室に導入して用いる。AFC システムの基本コンセプトを図 1.4 に示す。

AFC を用いることによりカルテットによる演奏実験および現実のホールでの測定と同様の音場測定が実施可能なある程度広い範囲に現実に即した自然な音場を生成することができる、また導入する室をもともとの響きのない半無響室とすることで大きな制御幅を得ることが期待できる。

AFC システムは世界中のおよそ 150 の会場に設置されている [18]。AFC は現在では世界中の 150 を超える施工事例があり、電気音響設備の助けなしにはクラシックのコンサートを実施し得ないような 5012 席という極めて大きいキャパシティを持つ東京国際フォーラムのホール A(大ホール)や、壁面からの反射音が全く存在しない屋外劇場である池袋西口公園のグローバルリングシアターは、特に代表的な施工事例として挙げられる。図 1.5、図 1.6 にこれらの写真を示す。

AFC の仕組み、および本研究における音場生成の具体的な手法については 3 章にて記述する。



## 1.5 本論文の構成

本論文は全5章から構成される。

第1章では、研究の背景としてコンサートホールとその研究について概観し、コンサートホール音響学の一領域であるステージ音響学と、特に反射音の方向特性に関する既往研究について整理した。さらに、本研究の目的として反射音到来方向が演奏者に与える影響について検討することを述べ、また本研究で用いる実験システムである AFC について簡単に紹介した。

第2章では、反射音の到来方向について物理的に評価する方法の提案を行い、その方法によって実際のコンサートホールにおける反射音到来方向特性を評価し、その結果を考察する。さらに、それを踏まえて、演奏実験を行うための生成音場の目標値を設定する。

第3章では、第2章では、本研究で用いる音場生成システムである AFC の仕組み、およびそれを導入した実験室のシステム機器構成について説明し、AFC を用いた音場の生成方法と生成された音場の音響特性について述べる。

第4章では、第3章で得られた音場を用いて行った演奏実験について、その方法、結果および考察について述べる。

第5章では、本研究で得られた成果を整理して総括し、今後の課題と展望について述べる。



## 第2章 反射音到来方向の物理的評価

### 2.1 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。

#### 2.1.1 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 [21] 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 (2.1) (2.2) の通り定義した。

$$ST1 = 10 \log_{10} \frac{\int_{20 \text{ ms}}^{100 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{0 \text{ ms}}^{10 \text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (2.1)$$

$$ST2 = 10 \log_{10} \frac{\int_{20 \text{ ms}}^{200 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{0 \text{ ms}}^{10 \text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (2.2)$$

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 [9] 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 (2.3) の通り提案している。

$$ST_{Late} = 10 \log_{10} \frac{\int_{100 \text{ ms}}^{1000 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{0 \text{ ms}}^{10 \text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (2.3)$$

### 2.1.2 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 [10] 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 つのシユ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  $7\sim100 \text{ ms}$  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 [11] 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 [22] 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  $111\sim189 \text{ m}^2$ 、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 [23] 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 [24] 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 [25] 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。

$$\text{ST}_{\text{Early}} = 10 \log_{10} \frac{\int_{20 \text{ ms}}^{100 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{0 \text{ ms}}^{10 \text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (2.4)$$

$$\text{ST}_{\text{Late}} = 10 \log_{10} \frac{\int_{100 \text{ ms}}^{1000 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{0 \text{ ms}}^{10 \text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (2.5)$$

## 2.2 方向別 ST の提案

### 2.2.1 方向別 ST の定義

第1章の第2節でも触れたように、反射音の到来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 [26] 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(2.6)および式(2.7)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。

$$ST_{Early,dir} = 10 \log_{10} \frac{\int_{20\text{ ms}}^{100\text{ ms}} p_{dir}^2(t) dt}{\int_{0\text{ ms}}^{10\text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (2.6)$$

$$ST_{Late,dir} = 10 \log_{10} \frac{\int_{100\text{ ms}}^{1000\text{ ms}} p_{dir}^2(t) dt}{\int_{0\text{ ms}}^{10\text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (2.7)$$

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 2.1 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(2.6)および式(2.7)に従い計算したのちに算術平均をとり指標値とする。

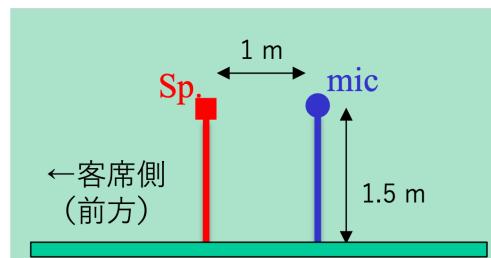


図 2.1: ST のインパルス応答測定条件の概略図

### 2.2.2 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2.2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[27]。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2.3に示す。



図2.2: アンビソニックマイク

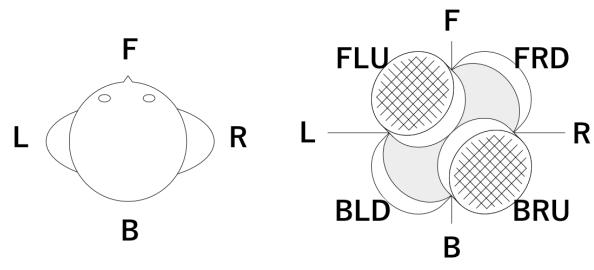


図2.3: 本研究における方向の定義

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(2.8)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(2.9)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。

$$\begin{aligned} p(t) &= \frac{1}{2}(p_{FLU} + p_{FRD} + p_{BLD} + p_{BRU}) \\ p_{FB}(t) &= \frac{\sqrt{3}}{2}(p_{FLU} + p_{FRD} - p_{BLD} - p_{BRU}) \\ p_{LR}(t) &= \frac{\sqrt{3}}{2}(p_{FLU} - p_{FRD} + p_{BLD} - p_{BRU}) \\ p_{UD}(t) &= \frac{\sqrt{3}}{2}(p_{FLU} - p_{FRD} - p_{BLD} + p_{BRU}) \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} p_F(t) &= \frac{1}{2}(p(t) + p_{FB}(t)) \\ p_B(t) &= \frac{1}{2}(p(t) - p_{FB}(t)) \\ p_L(t) &= \frac{1}{2}(p(t) + p_{LR}(t)) \\ p_R(t) &= \frac{1}{2}(p(t) - p_{LR}(t)) \\ p_U(t) &= \frac{1}{2}(p(t) + p_{UD}(t)) \\ p_D(t) &= \frac{1}{2}(p(t) - p_{UD}(t)) \end{aligned} \quad (2.9)$$

## 2.3 方向別 ST の実測

### 2.3.1 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2.4に示す無指向性の対向スピーカー、マイクロホンには図2.2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2.1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2.5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。2.6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2.7から図2.13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。

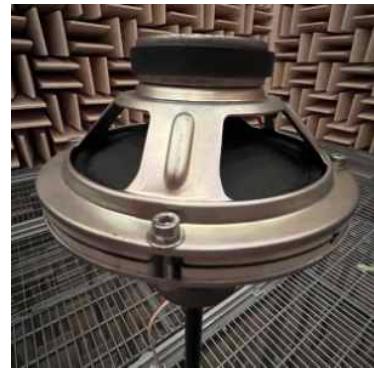


図2.4: 対向スピーカー

表2.1: 測定を実施したホールの諸元

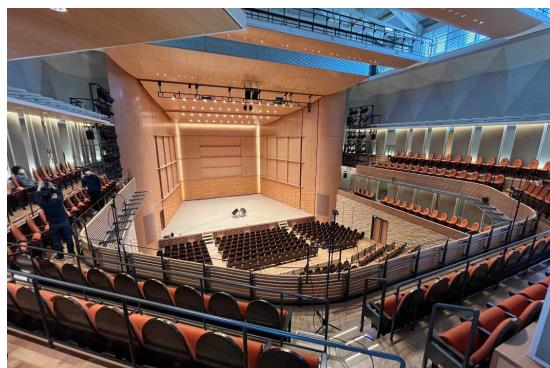
ホール	座席数 (席)	$T_{30}(s)$ 500- 1kHz 平均	室容積 ( $m^3$ )	表面積 ( $m^2$ )	舞台間口 (m)	舞台奥行 (m)	舞台高さ (m)
A	421	1.3	4420	2070	16.5	10.5	8
B	500	1.4	5680	2740	15.5	9	7.4
C	698	2.5	11150	4600	12	16.2	13
D	1033	1.9	11940	4380	20	10	10
E	1104	1.6	10225	3435	19	9	8
F	1514	2.3	15580	5860	18.2	18.2	15
G	1884	2.2	18610	6445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

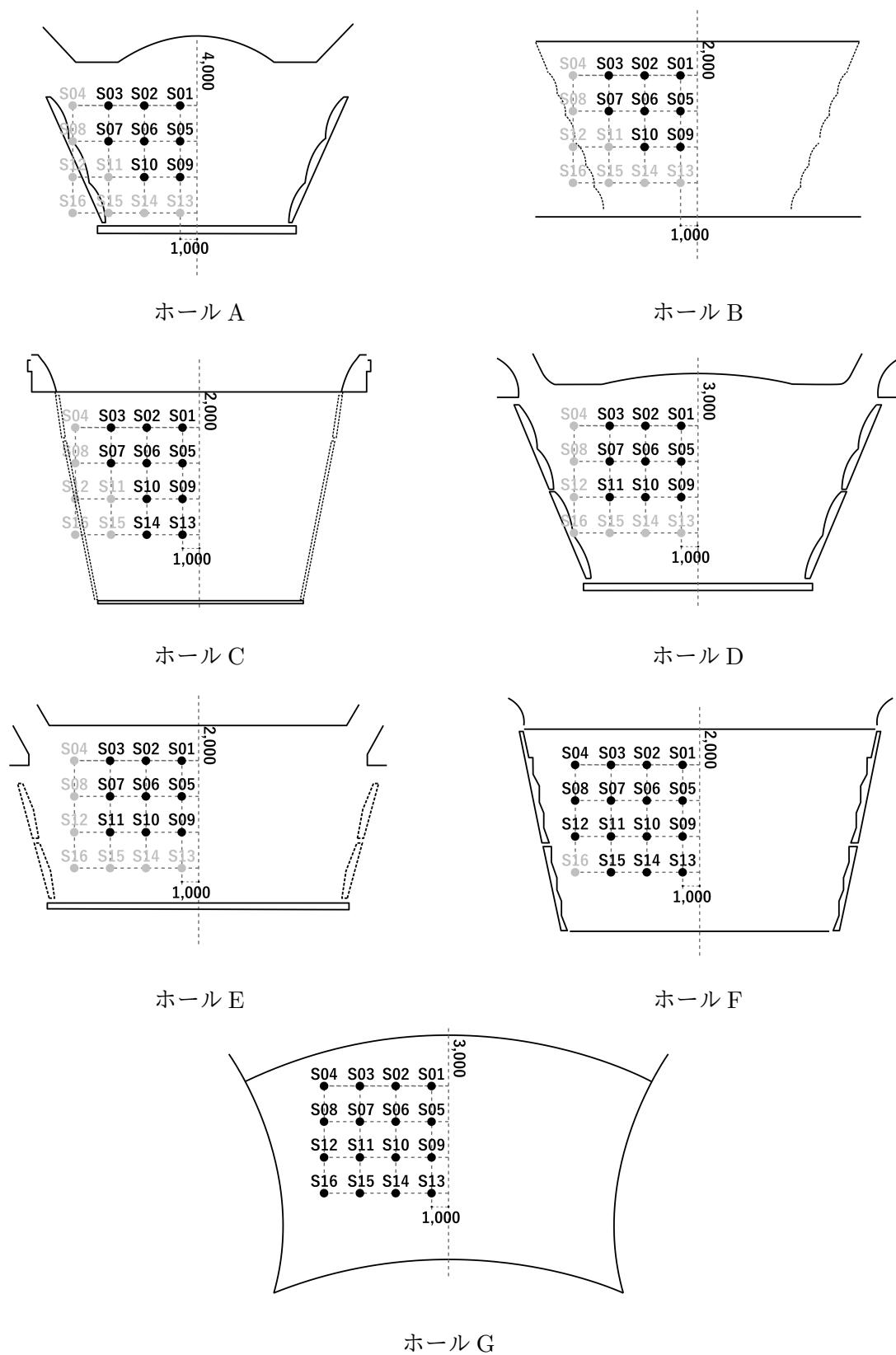


図 2.6: 各ホールの測定位置

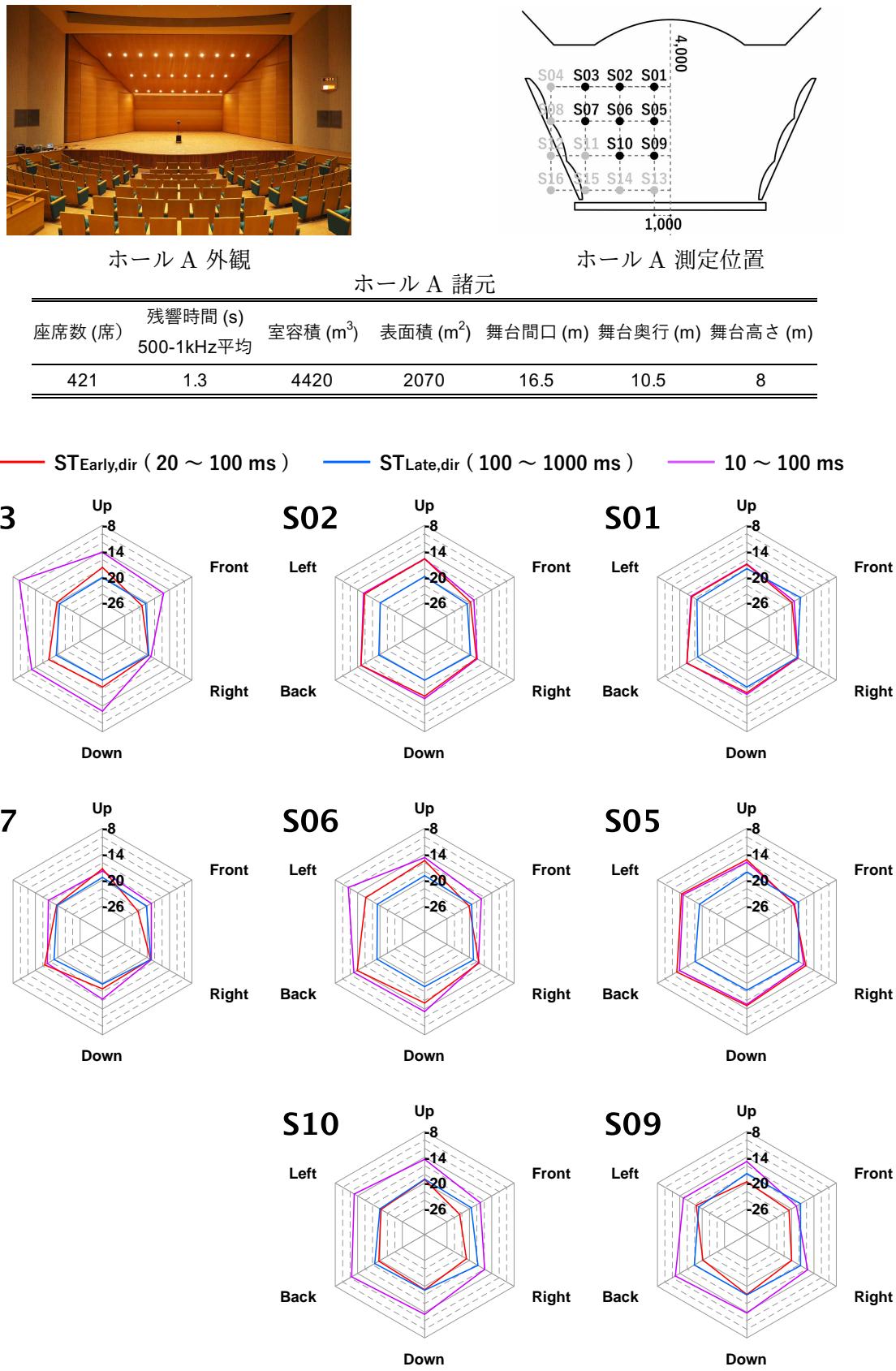


図 2.7: ホール A 方向別 ST

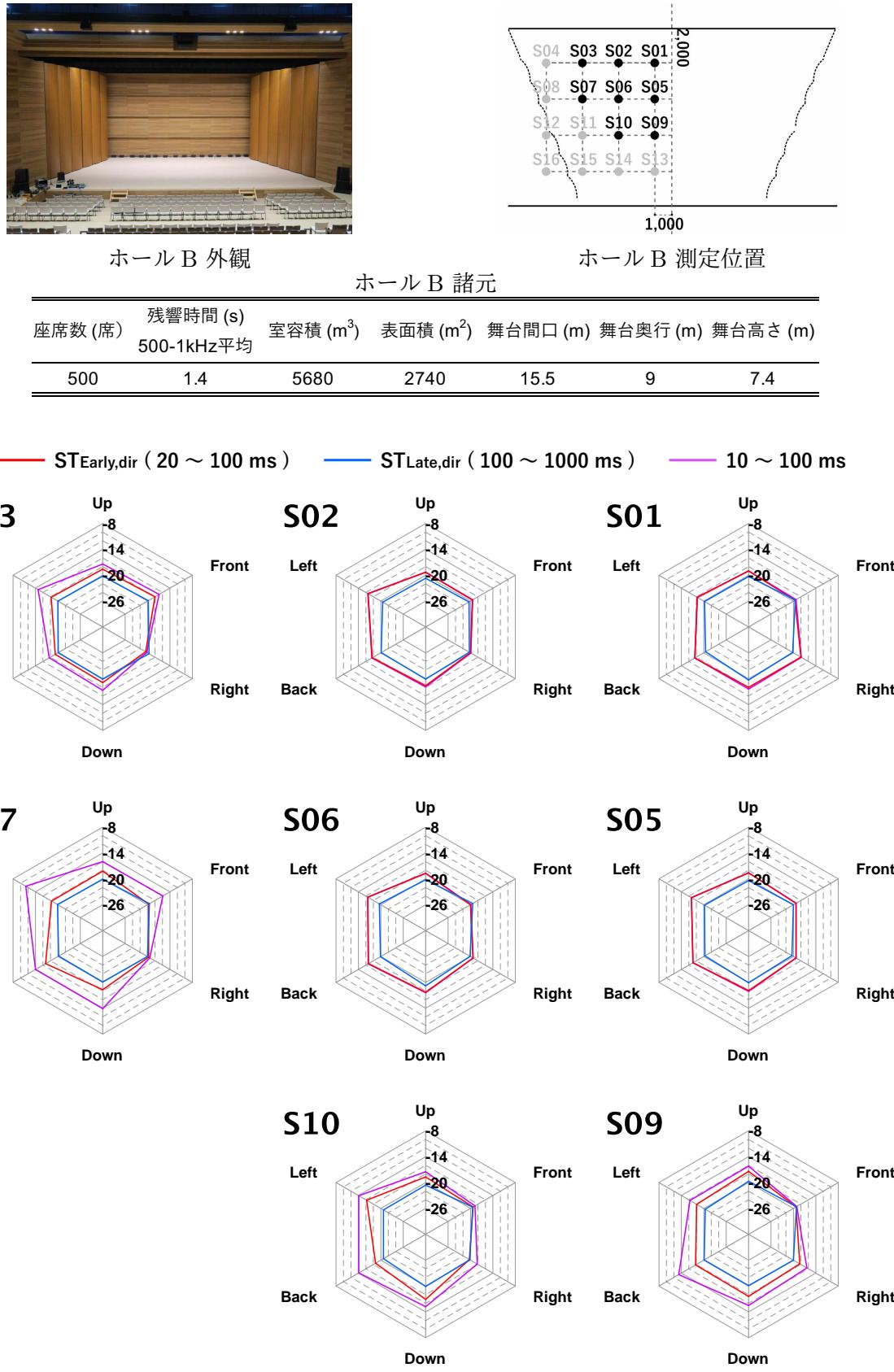
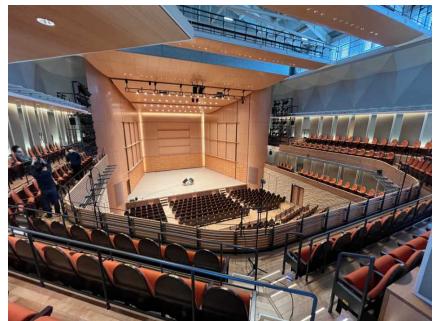


図 2.8: ホール B 方向別 ST



ホールC 外観



ホールC 測定位置

ホールC 諸元

座席数 (席)	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

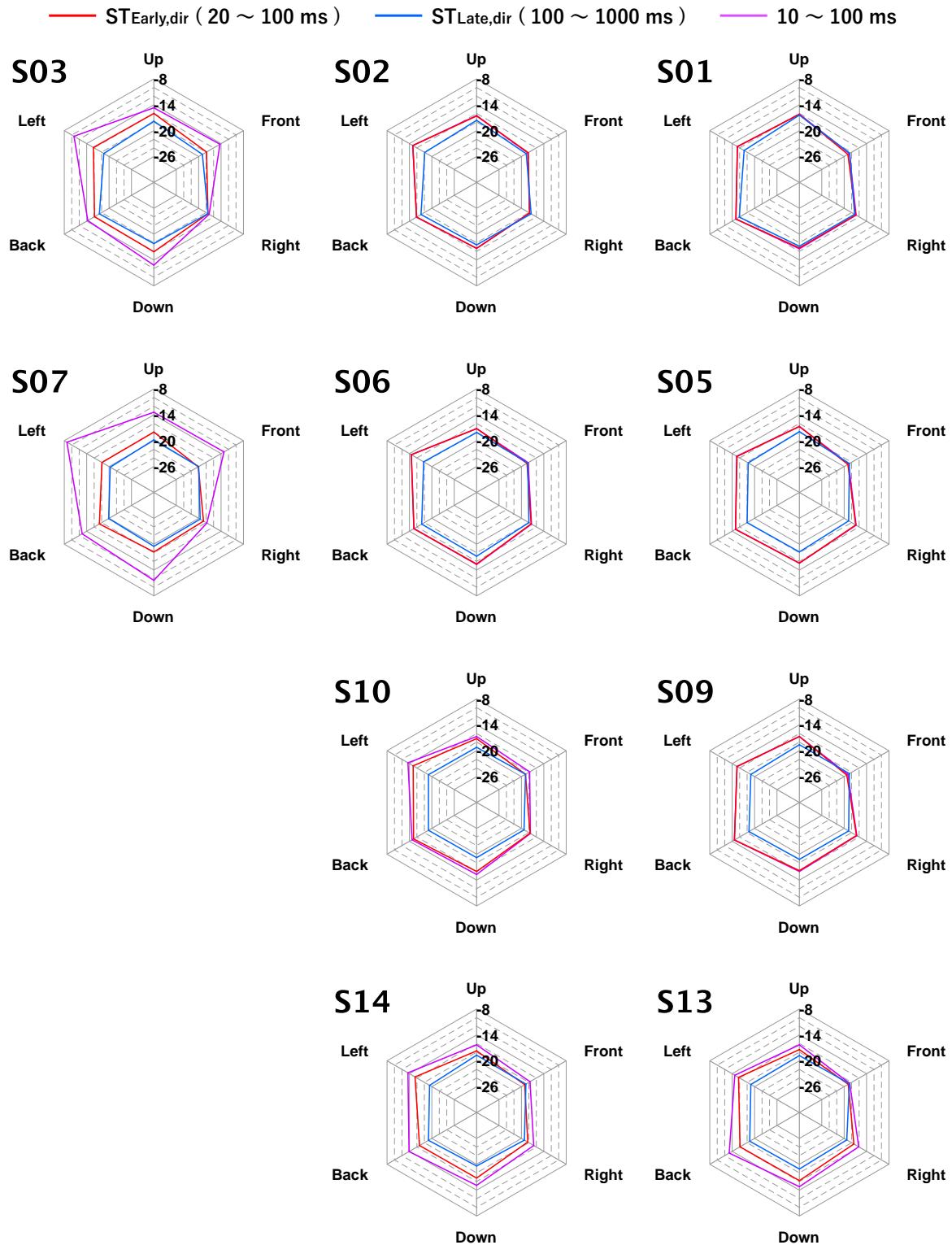


図 2.9: ホール C 方向別 ST

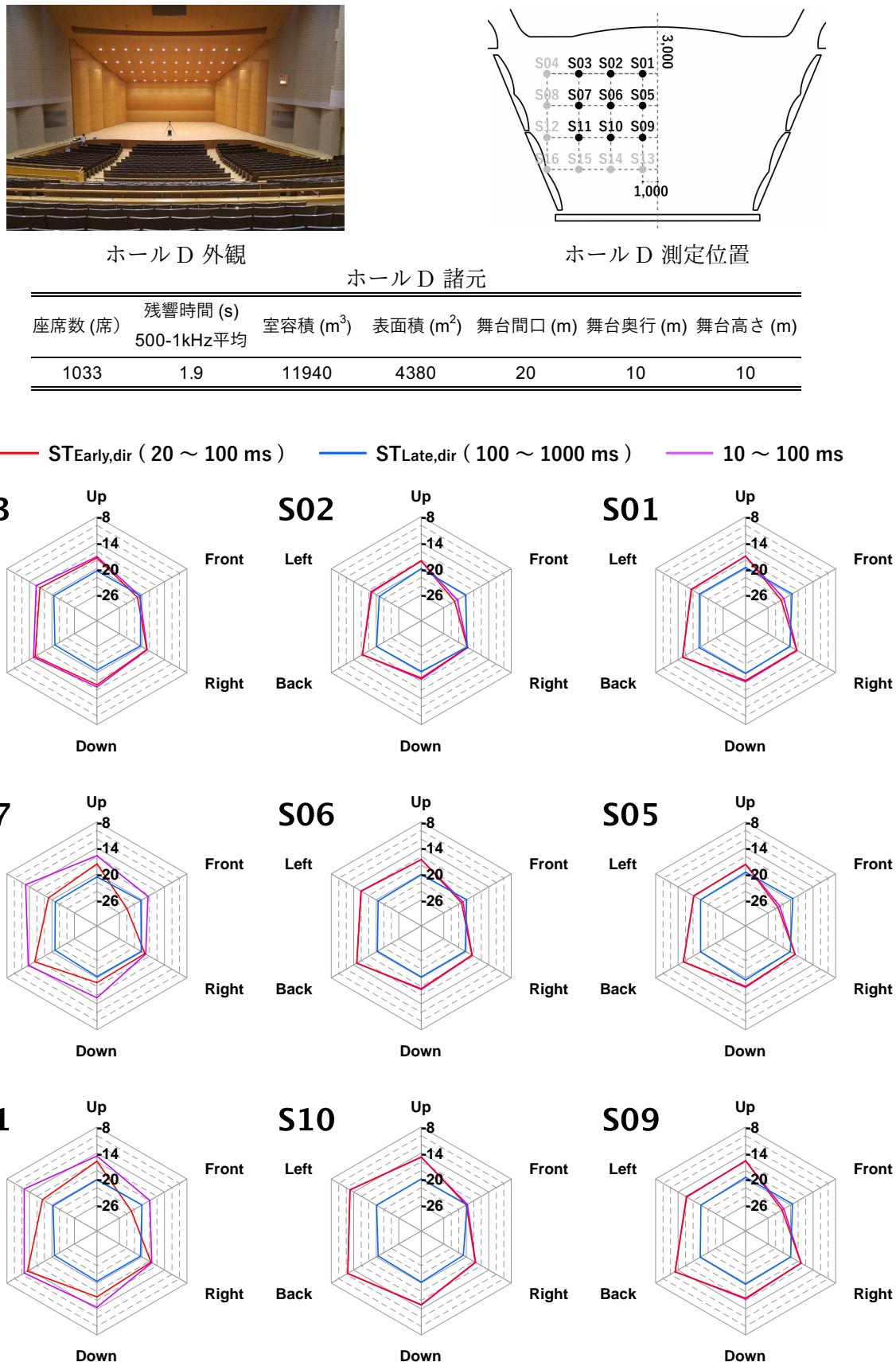


図 2.10: ホール D 方向別 ST

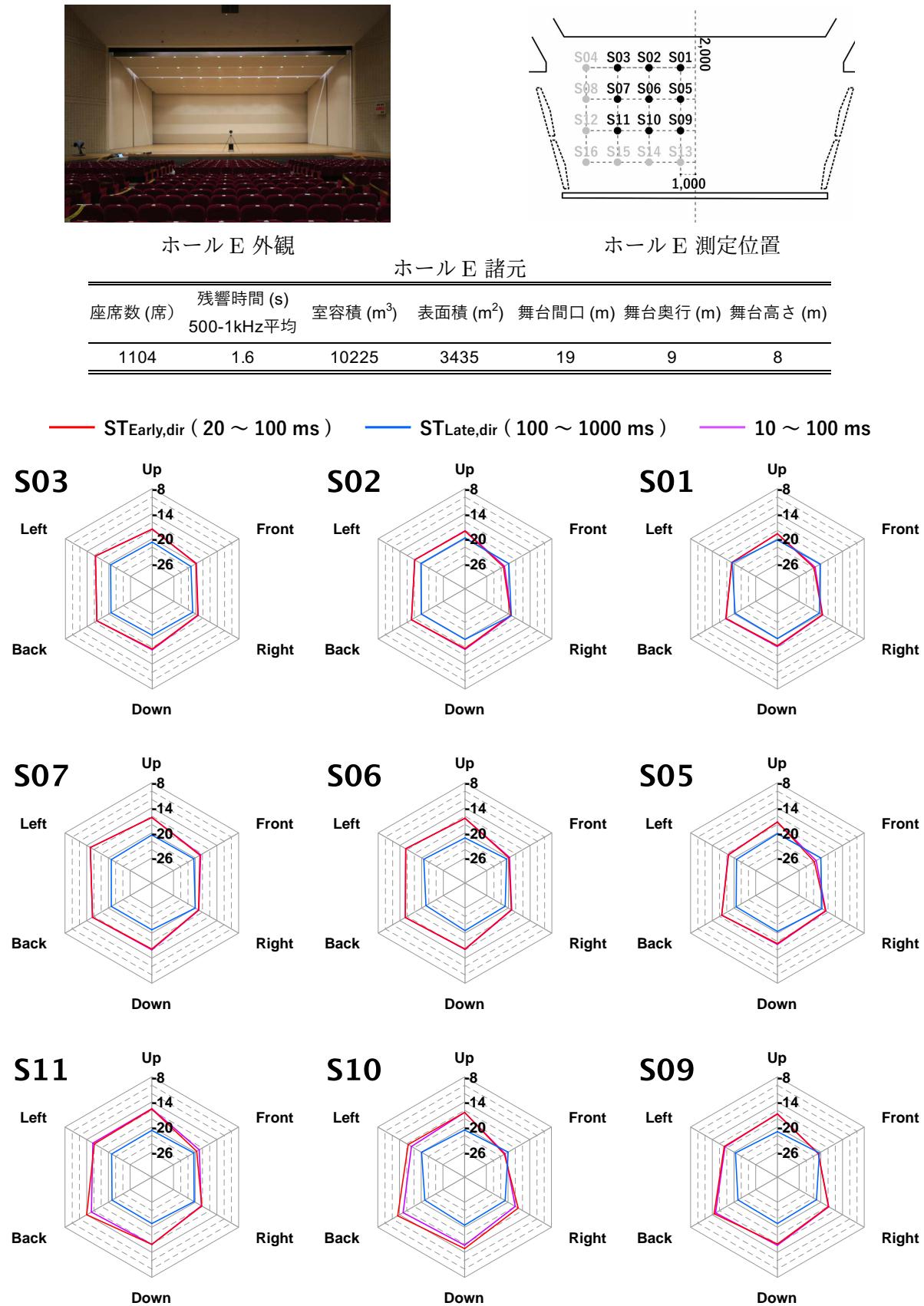
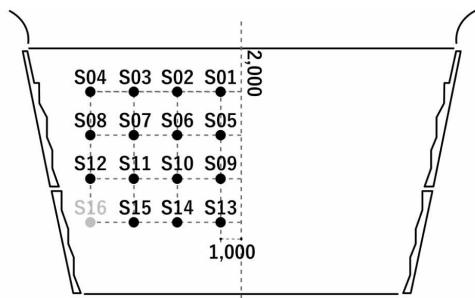


図 2.11: ホール E 方向別 ST

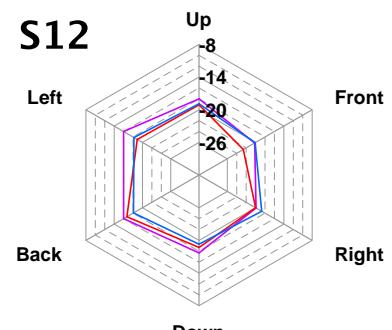
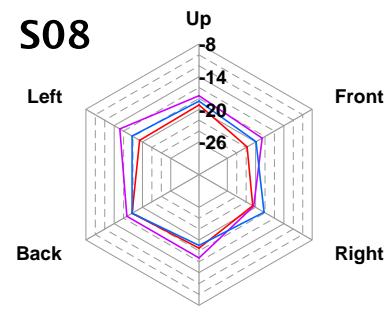
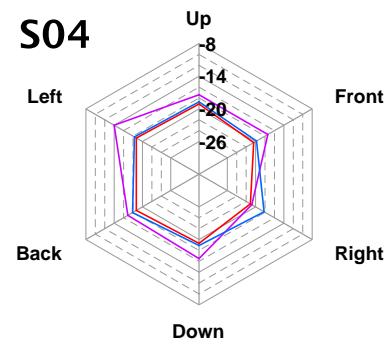


ホール F 外観

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



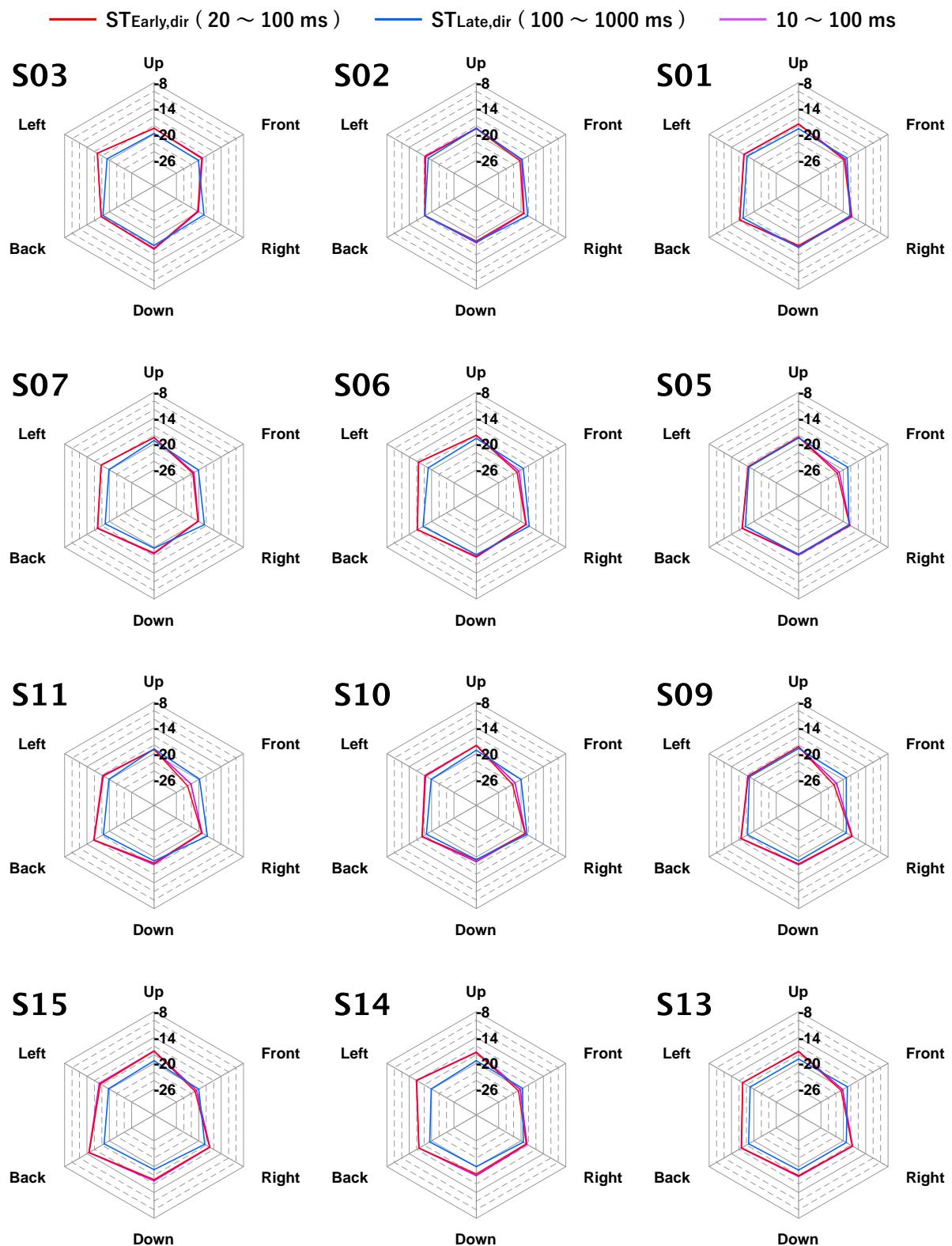
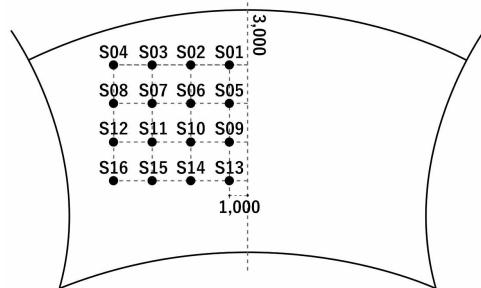


図 2.12: ホール F 方向別 ST

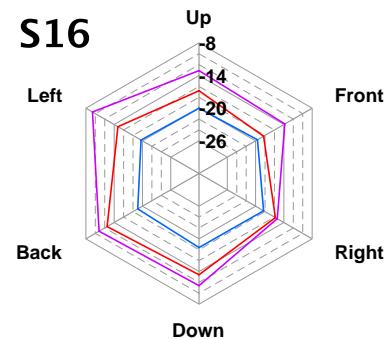
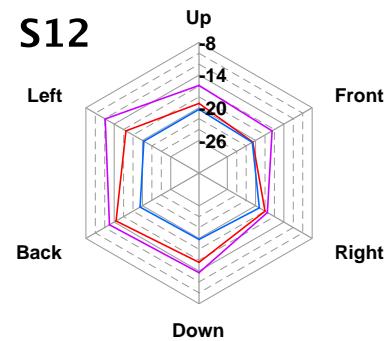
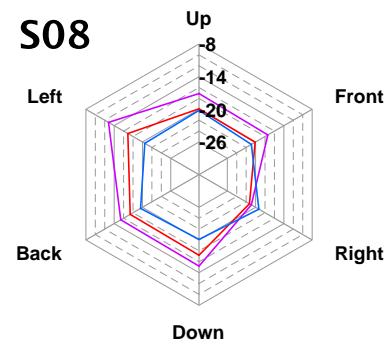
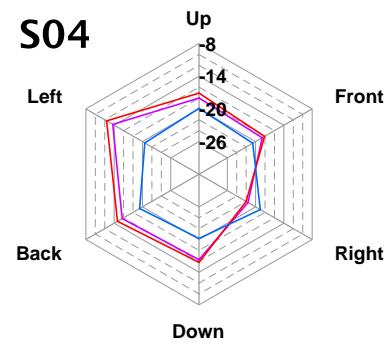


ホール G 外観

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



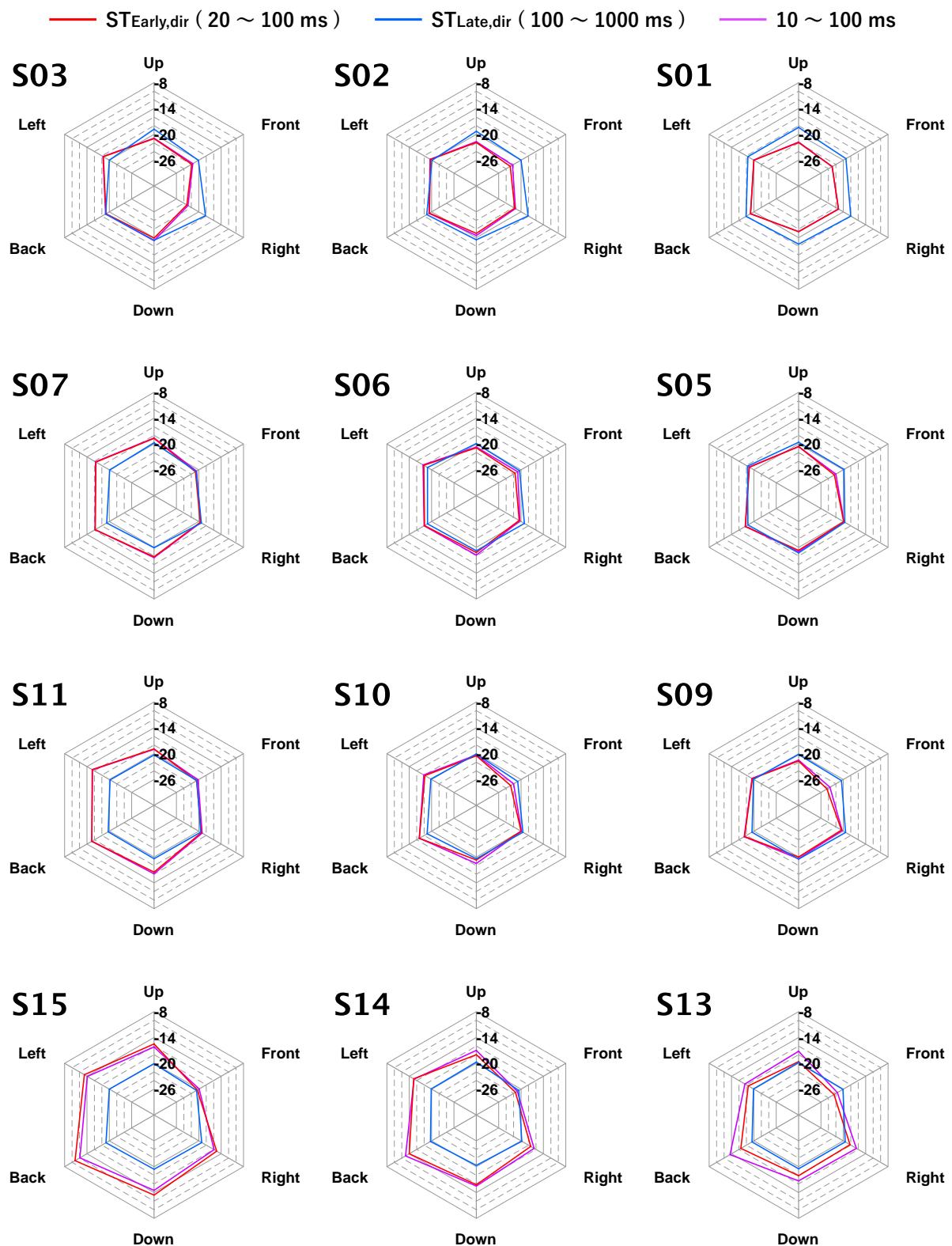


図 2.13: ホール G 方向別 ST

### 2.3.2 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 2.14 および図 2.15 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 2.14 および図 2.15 に示す。ただし、図 2.14 および図 2.15 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。

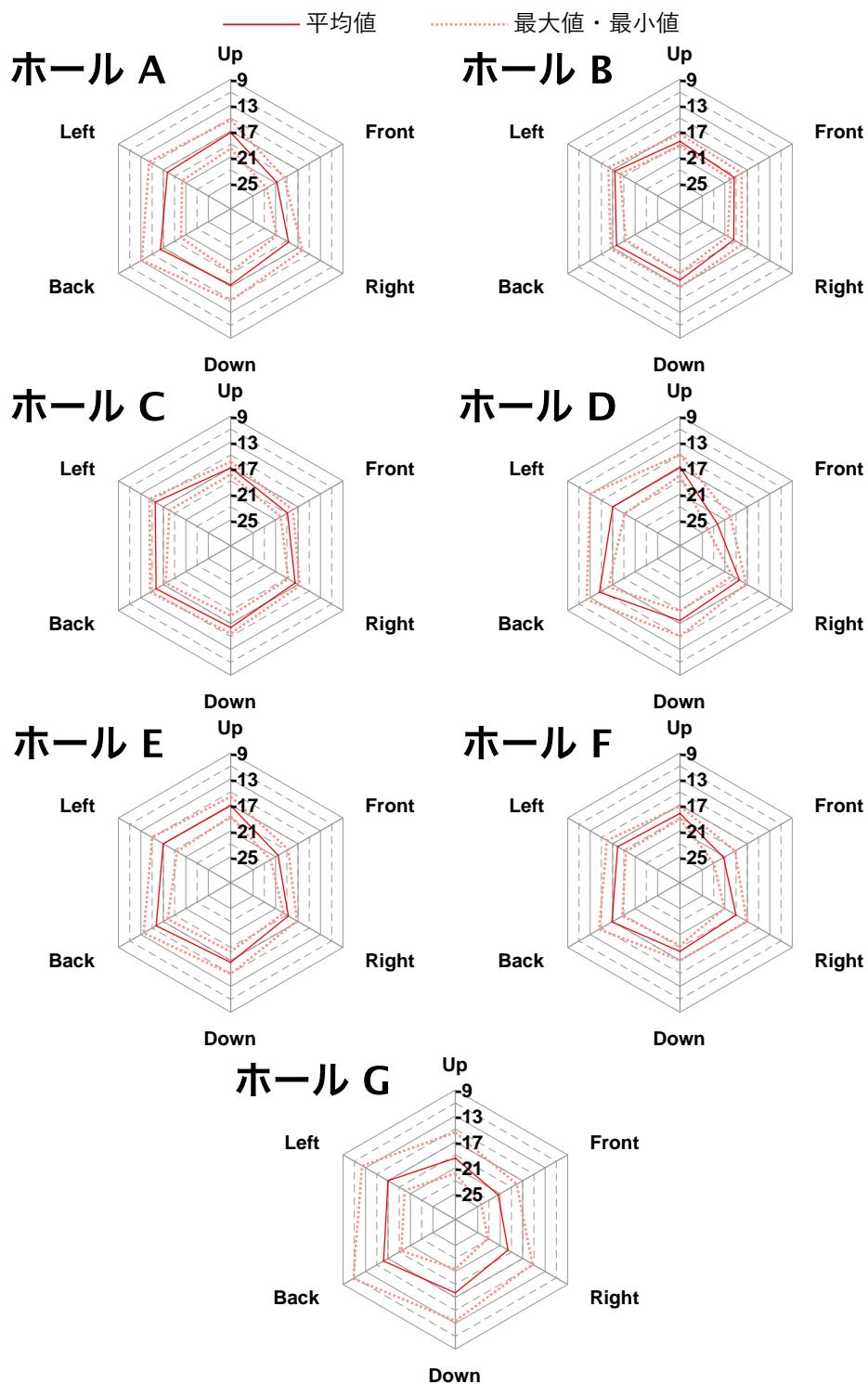
#### 初期反射音に関する評価について

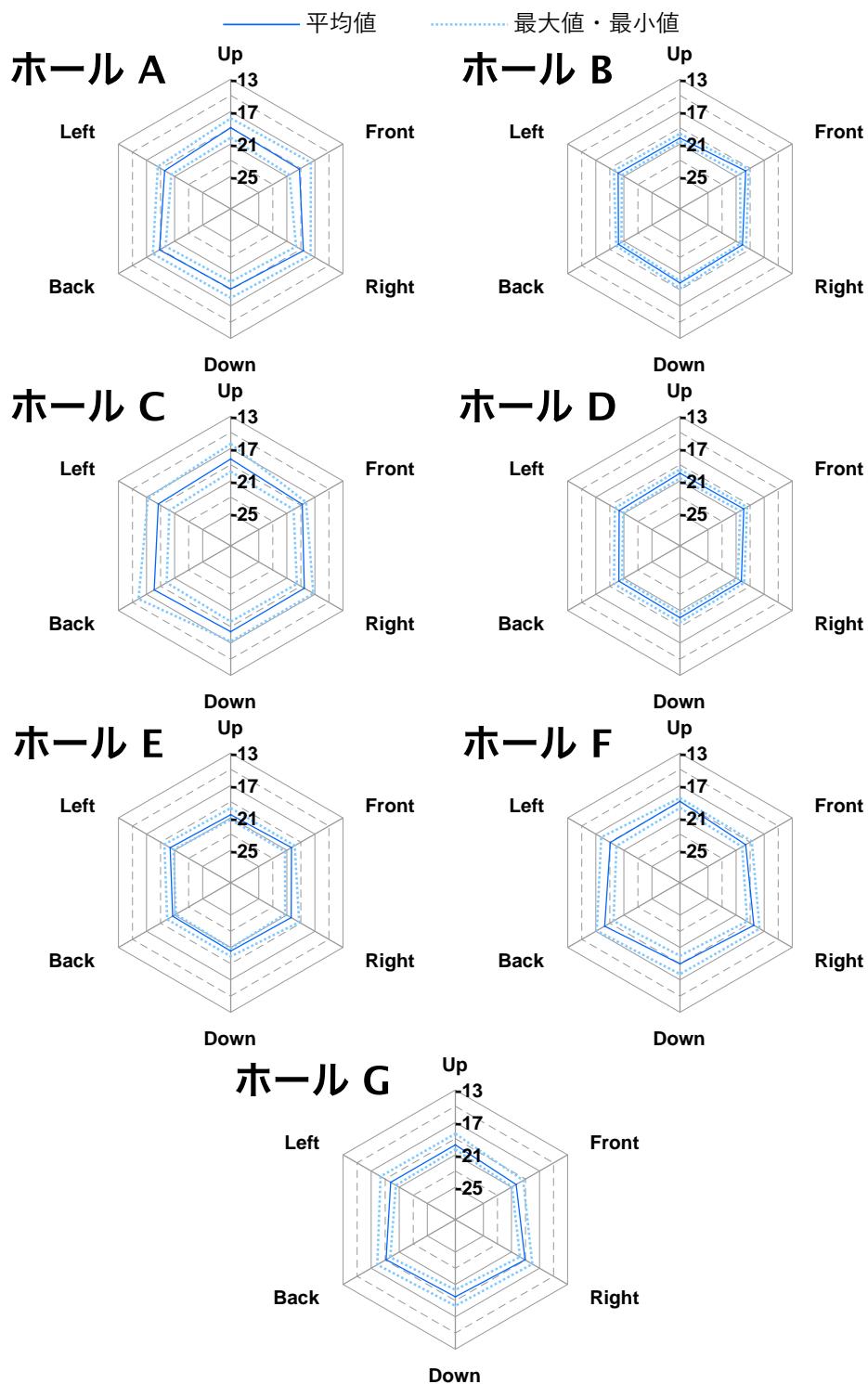
$ST_{Early,dir}$  および 10~100 ms に到来する反射音については、全ホールに共通して方向別の偏差が見られ、方向ごとに強度が異なっていた。特に、すべての測定位置で Front の値が相対的に低く、100 ms までに到来する客席側からの反射音レベルが低くなっている傾向が見られた。

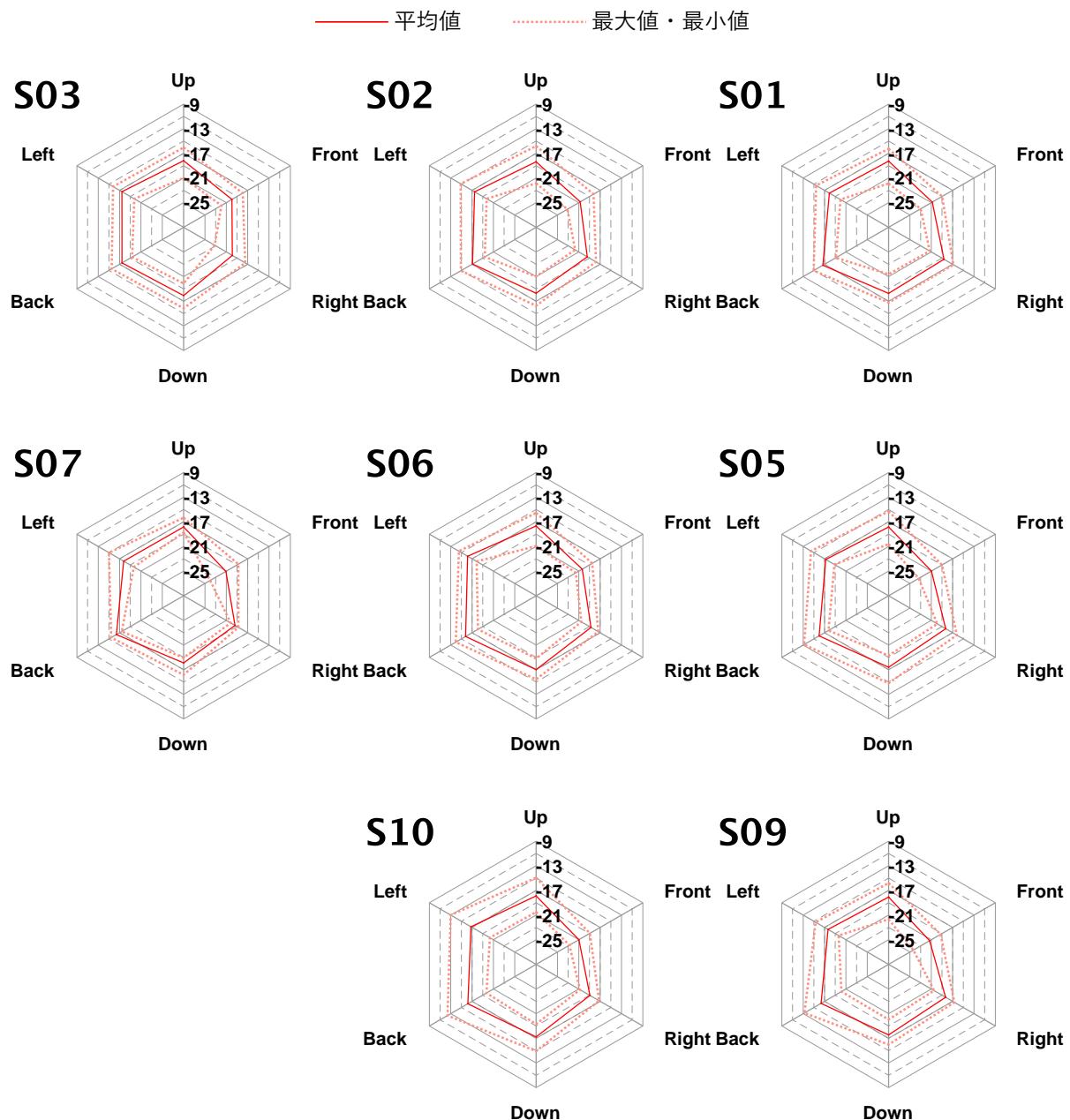
舞台中央側および前方側の測定点では  $ST_{Early,dir}$  と 10~100 ms に到来する反射音の評価値はほぼ等しいのに対し、壁面との距離の近い舞台上手側および舞台奥付近の測定点では、特に Left および Back の方向で 10~100 ms の評価値が  $ST_{Early,dir}$  よりも顕著に大きくなる傾向が見られた。100 ms 以内に到来する反射に占める一次の反射音のエネルギーが大きく、これが評価区間に含まれるかどうかによって評価値が大きく変化していると考えられる。また、壁面の近傍における測定点ではこの一次の反射音の減衰も小さく、10~20 ms に到来し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。

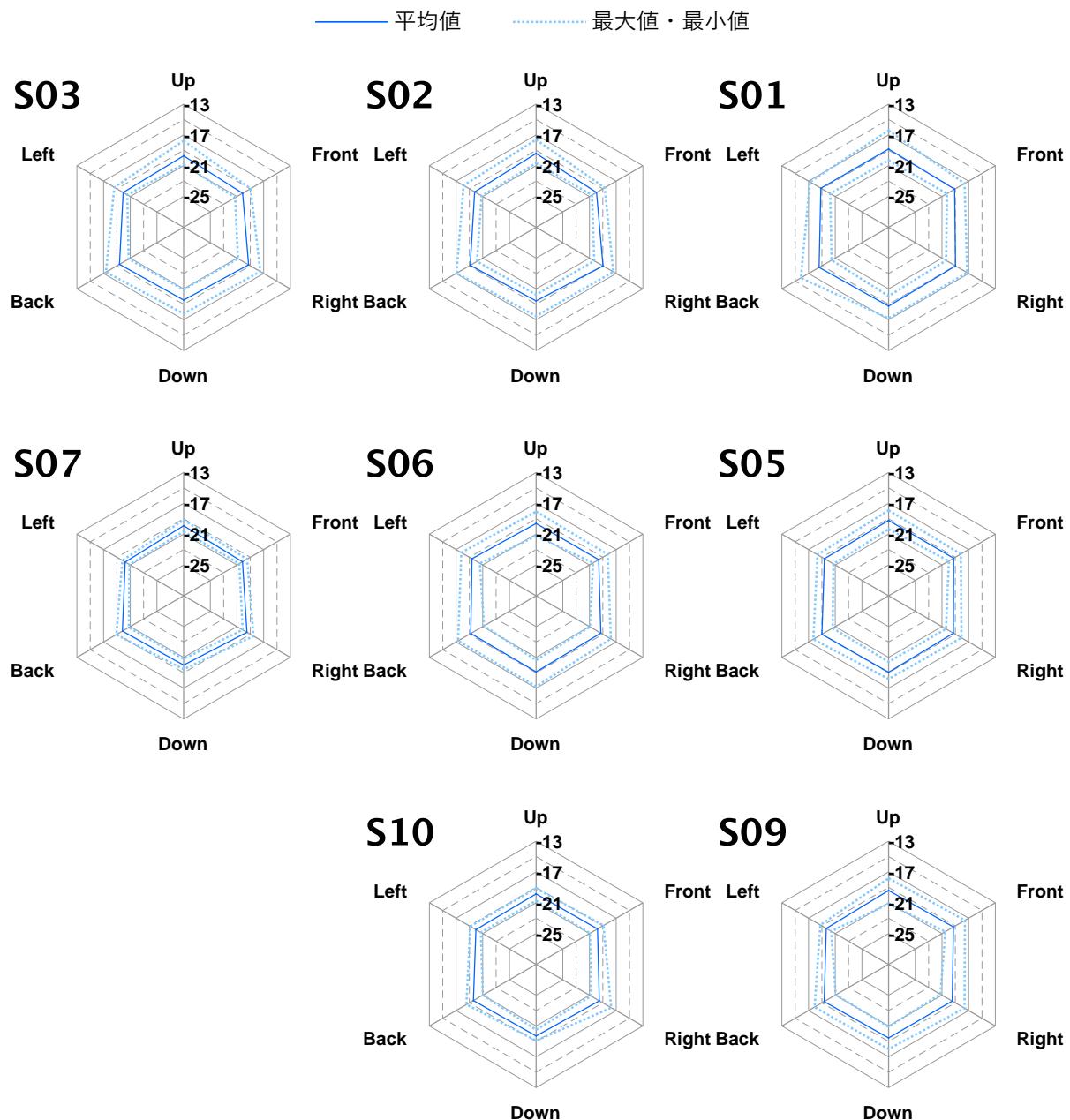
#### 後期反射音に関する評価について

$ST_{Late,dir}$  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有すホール 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。

図 2.14: 各ホールの  $ST_{Early,dir}$  の平均値と最大値・最小値

図 2.15: 各ホールの  $ST_{Late,dir}$  の平均値と最大値・最小値

図 2.16: 各測定点の  $ST_{Early,dir}$  の平均値と最大値・最小値

図 2.17: 各測定点の  $ST_{Late,dir}$  の平均値と最大値・最小値

## 2.4 生成する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して生成を試みる。壁面に近い測定点での測定結果では、カラレーションの発生に大きく寄与しうる 10~20 ms のごく短い時間に到来する一次の反射音のエネルギーが大きく、エネルギーの値に着目して構築された指標値である  $ST_{Early,dir}$  によって適切に音場が記述されない恐れがあるため、ステージ中央・前方付近の測定点である S01,S02,S05,S06 の 4 点の測定結果を用いて基準とする音場の目標値を設定する。これらの標準的な演奏位置とも対応し、現実の演奏条件を模倣する音場生成の目標値の設定として妥当であると考えられる。

まず、測定位置の違いとホールによる違いを平均化するため、測定を実施した 7 つすべてのホールでのこの 4 点での測定結果の平均値を算出した。さらに、測定を上手側反面で行なったことによる左右の偏りを補正するため、左右方向の値を平均して、基準とする音場の生成の目標値として設定した。これを図 2.18 に示す。

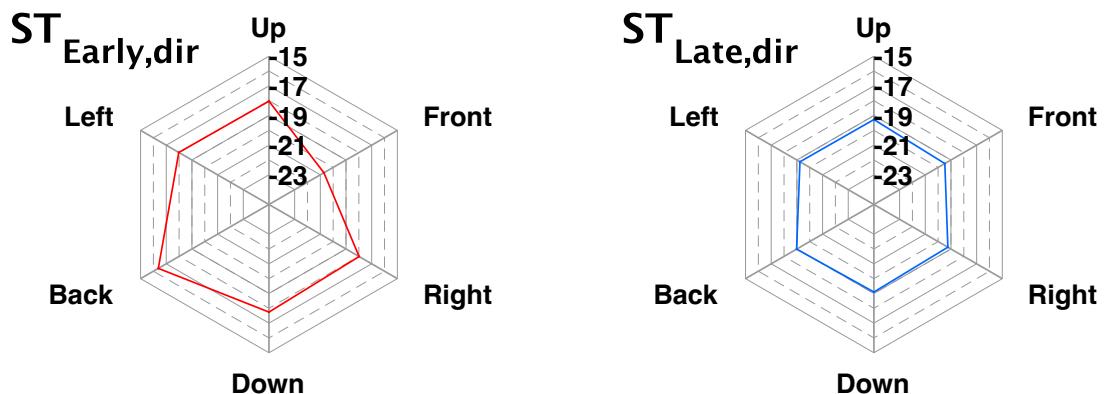


図 2.18: 生成音場の目標値



# 第3章 実験音場の生成

第2章にて、コンサートホールのステージ上における反射音の到来方向を定量化する指標として  $ST_{Early,dir}$  および  $ST_{Late,dir}$  を定義し、その実測値をもとに演奏実験に用いるために生成する音場の目標値を設定した。

本章では、音場生成システム AFC を用いた実験音場の生成に関して述べる。まず、本研究で音場生成に用いるシステムである音場支援システム AFC とそれを導入した実験室（半無響室）について紹介する。続いて、生成する音場での方向別 ST および周波数特性の調整を含む残響時間と ST の調整方法について、音場の生成における考え方とそれに基づく具体的な調整値について説明する。最後に、コンサートホールを模して生成した音場を基準音場として、基準音場の音響特性と、基準音場から方向特性を変化させた音場の音響特性を測定した結果結果を示す。

## 3.1 音場支援システム AFC について

### 3.1.1 音場支援システムの概要

第1章4節でも触れたように、音場支援システム（Active Field Control Enhance、AFC）は、一つの空間において多様な演目を最適な響きの中で行いたいというモチベーションから開発されたシステムであり、最新の電気音響・信号処理技術を用いて、室内の響きや空間の拡がり・音量感などの聴感印象を自然に変化させることができる [17]。音源自体に人工的なリバーブを付加して異なる音の印象を作り出す手法とは異なり、楽器や歌声の自然な聴こえ方を保ちながら、その空間に拡がる音の残響感や音量感をコントロールし、用途に適した音響空間を提供できる点にその特徴がある。

マイクロフォンとスピーカーを配置して音場を生成するシステムにおける信号処理の方式は、マイクで収音した音をスピーカーから再生し、スピーカーからの再生音に空間固有の響きが加わった音を再びマイクで収音する音響的フィードバックを利用する室内音場制御方式と、収音した音に様々な実測インパルス応答のデータを畳み込むことで任意の音場を再現する音場合成方式の二つの方式に大別され、AFC ではこれら二つの方式を兼ね備えたハイブリッドなシステムとして構成されている [28]。

### 3.1.2 音場支援システムの仕組み

響きの聴覚印象には初期反射音と残響音（後期反射音）がそれぞれ異なる影響を与えていていると考えられ、AFCにおける音響信号の処理系統も、初期反射音制御部と後期反射音制御部に大きく分かれてそれぞれの反射音成分をある程度独立に制御している。この概略図を図3.1に示す。

どちらの制御部においても、マイクロホンで収音した音に対してインパルス応答の畠み込みによる響きの付加を行ってからスピーカーでその信号を再生し、響きを増幅させる点は共通している。初期反射音制御部では演奏者の付近に設置した指向性マイクによって主に直接音と舞台上からの初期反射音を収音して初期反射音成分に相当する響きをスピーカーから再生させるのに対し、後期反射音制御部では演奏者から遠方に付置した全指向性マイクによって主に空間の残響音とスピーカーから再生される音響フィードバック成分を収音して後期反射音に相当する響きをスピーカーから再生させている。

初期・後期どちらの制御部でも室内音場制御方式と音場合成方式を組み合わせた制御方式となっており、AFC内部での信号処理の流れは次の通りである。まず、室内に配置された各マイクに収音された信号がbusと呼ばれる信号処理系に割り振られる。続いて、busに割り振られた音響信号に対して「FIR フィルタの重畠」「遅れ時間の付与」「音量の増減」「イコライザによる周波数特性の変化」が組み合わせて適用される。そして、busによって処理された音響信号は室内に配置されたスピーカーに割り振られて出力される。このbusごとの信号処理の概要を図3.2に示す。

AFCではスピーカーから再生された音がマイクへ戻る音響的フィードバックを利用するため、生成する響きを大きくしようとするとループゲインが増大してハウリングが発生しやすくなる恐れがあることが重要な技術的課題となっている。そこでAFCでは、マイクからbusへのルーティングを時変的に切り替えることによってハウリングの発生を抑制する処理であるヤマハ独自の特許技術EMR(Electronic Microphone Rotator) [29]が使用されている。AFCにおける信号処理系は4つのbusを1組の「System」として管理され、EMRは主に後期反射音の制御用に割り当てられたSystemにおいて適用される。このSystemごとの信号処理の概要を図3.3に示す。

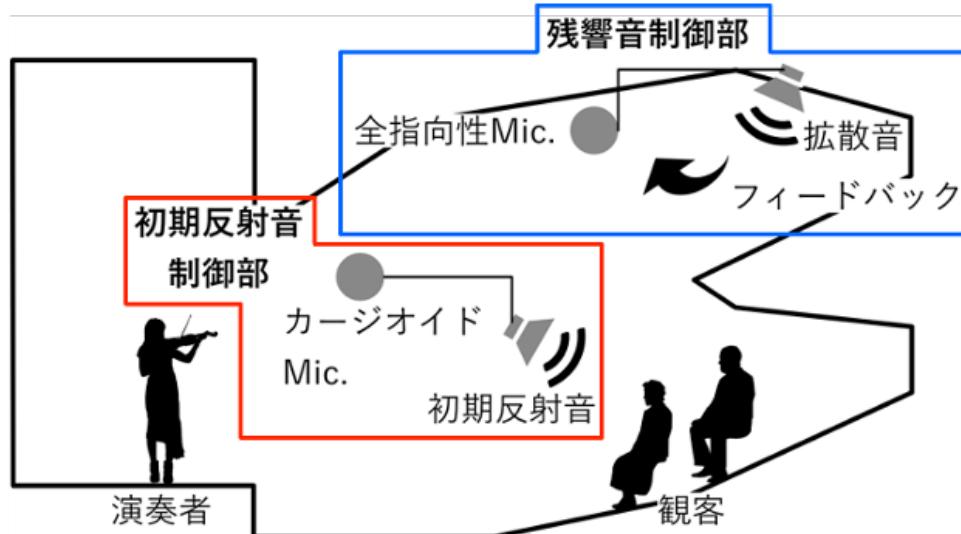


図3.1: AFCにおける初期反射音と後期反射音の制御の概略図

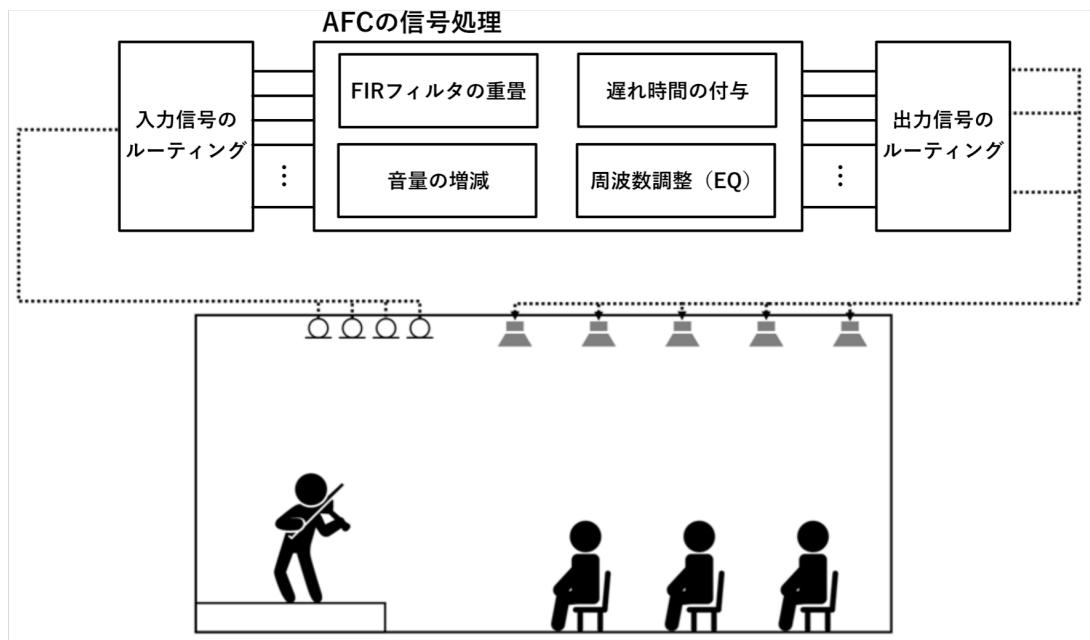


図 3.2: bus ごとの信号処理の概要

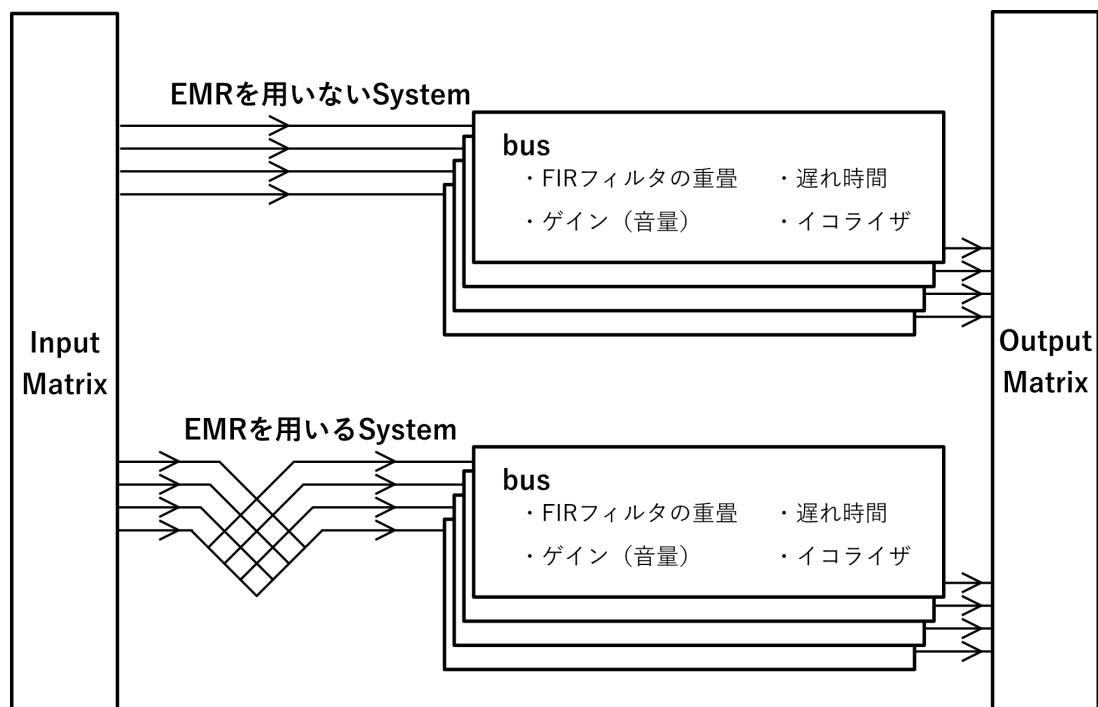


図 3.3: System による信号処理の概要

### 3.1.3 実験室における AFC のシステム機器配置

もともとの響きの小さい室で AFC を用いることにより、大きな制御幅を得て自由度の高い音場の生成を行えることが期待できるため、本実験では半無響室に AFC を導入して用いることとした。導入した AFC システムを構成する音響機材は 4 つのカージオイドマイク、4 つの無指向性マイク、および 20 個のスピーカーであり、実験室の内部の様子を図 3.4 に、音響機材の配置を図 3.7 に示す。

また、生成する音場の評価を行うための音響測定は実験室の中央で行うものとし、音響測定時の測定機器の配置を図 3.5 に、そのときの様子を図 3.6 示す。なお、紙面の上方を実験室の前方として実験室内における方向を定義した。



図 3.4: 実験室の内部の様子

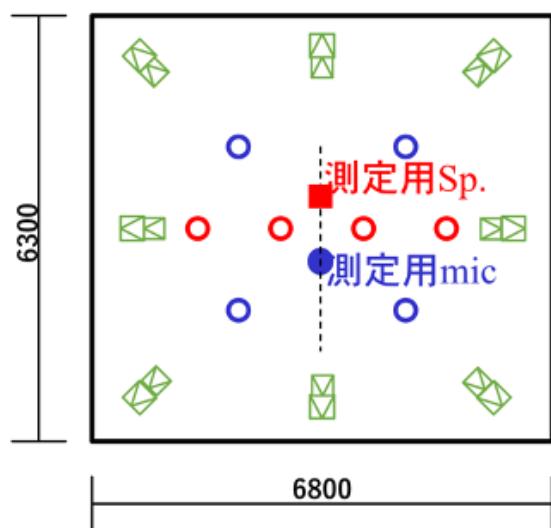


図 3.5: 音響測定機器の配置

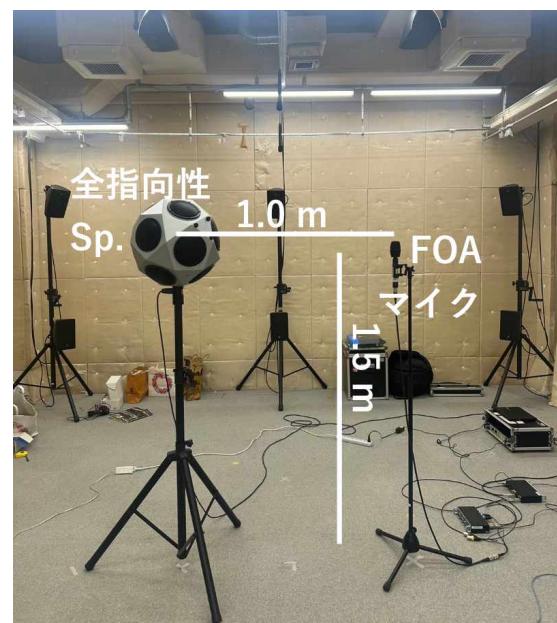


図 3.6: 音響測定時の様子

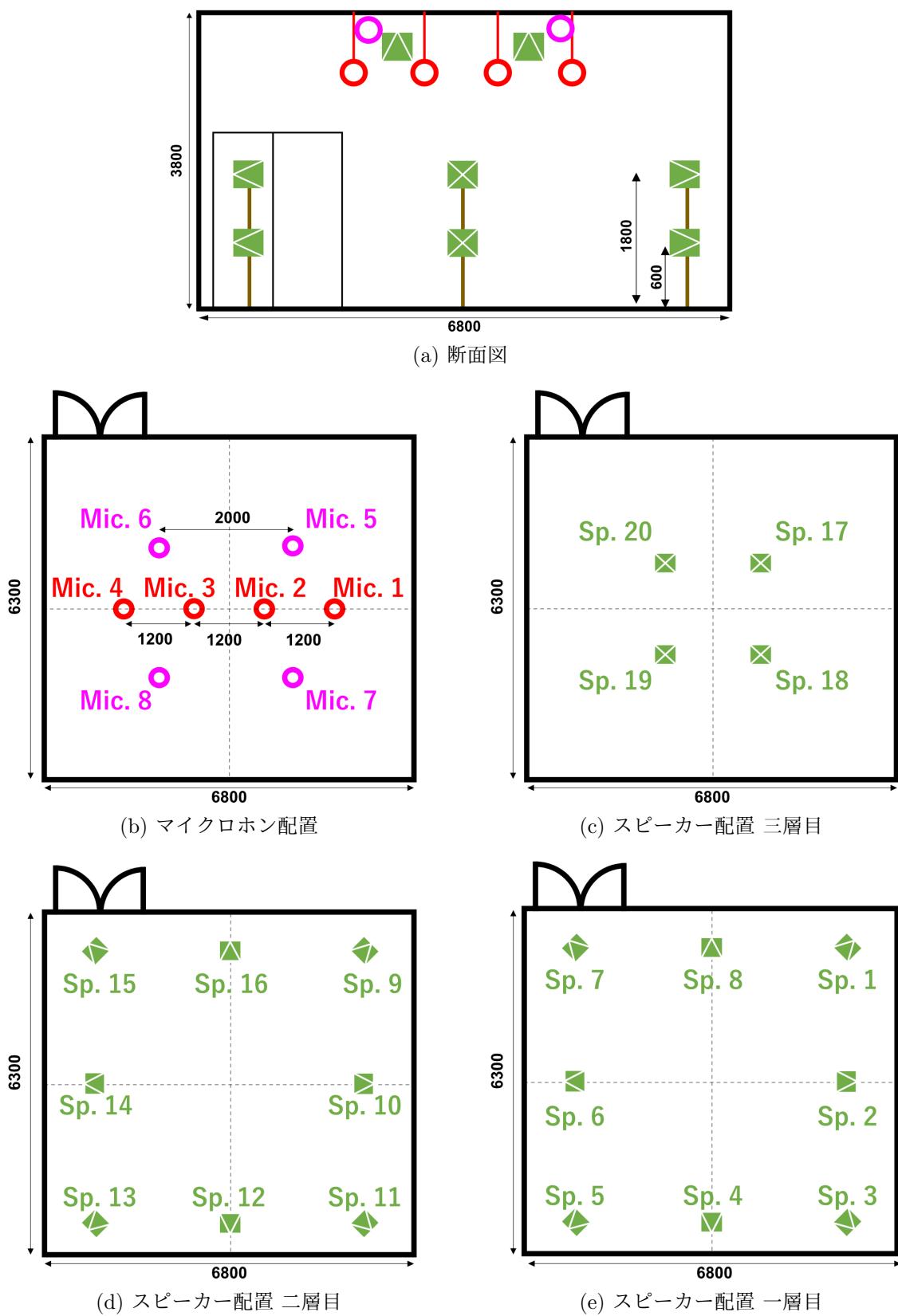


図 3.7: AFC のシステム機器配置

## 3.2 音場生成の準備

前節にて AFC システムの仕組みと本研究で用いる実験室およびシステム機器構成について紹介した。本節では AFC で音場生成を行う前の準備事項に関して、まず実験室に配置したマイクとスピーカーのルーティングについて、続いて調整で用いる FIR フィルタについて、最後に実験室における響きの制御幅について述べる。

### 3.2.1 マイクとスピーカーのルーティング

2章4節にて設定した目標値を踏まえて、まず音場生成時のマイクとスピーカーのルーティングを決定する。前節で示したように、AFC のマイク入力は bus と呼ばれる信号処理系に割り当てられ、さらに 4つの bus を一つの System として取り扱う。本研究では、5つの System を作成して音場の生成を行った。

System1 は、大まかな初期反射音成分の付加のため、入力系としてカージオイドマイクである Mic.1~4 の信号を用い、出力系として後方側からの再生音がやや多くなるように全方向のスピーカーを割り当てた。

System2 は、水平面内からの全体的な後期反射音を満遍なく付加するため、マイクの入力と bus のルーティングを切り替える処理である EMR をオンにした上で、入力系として全指向性マイクである Mic.5~8 の信号を用い、出力系として実験室の対角線上に配置した 8つのスピーカーを割り当てた。

System3 は、System2 のみでは不足する上方からの後期反射音を増強して供給するため、入力系として全指向性マイクである Mic.5~8 の信号を用い、出力系として実験室の天井に設置した 4つのスピーカーを割り当てた。

System4 は、System1 ではエネルギーの量が不足する後方からの初期反射音を増強しつつ、System1 で小さくなるように調整する前方から初期反射音の供給量を細かく調整できるよう、出力系として実験室の後方に設置した 3つのスピーカーと、前に設置した 1つのスピーカーを割り当てた。入力系としては、カージオイドマイクである Mic.1~4 を用いた場合にカラレーションが発生したため、全指向性マイクである Mic.5~8 の信号を用いた。

System5 は、後期反射音の制御系だが、EMR の利用による後期反射音の方向特性の時変的な変化を是正して安定させるため、EMR の利用によるルーティングの切り替えは行わずに、全指向性マイクである Mic.5~8 の信号を用い、出力系として実験室の前後左右方向に設置した 4つのスピーカーを割り当てた。

初期反射音および後期反射音とともに、床からの反射音供給によって、上方よりも下方からの寄与が大きくなる傾向が見られたため、System4 および System5 では、前後左右方向の反射音供給を行うスピーカーとして、床面に近い 1層目ではなく、床面から離れた 2層目のスピーカーを用いた。

これらのルーティングを表 3.1 に示す。

表 3.1: マイクとスピーカーのルーティング

System	1	2	3	4	5
主な制御対象	初期反射音・全体	後期反射音・全体	後期反射音・上方	初期反射音・後方	後期反射音・方向
EMRの有無	なし	あり	あり	なし	なし
Mic.	1 2 3 4	5 6 7 8	5 6 7 8	5 6 7 8	5 6 7 8
bus	1 2 3 4	5 6 7 8	9 10 11 12	13 14 15 16	17 18 19 20
Sp.1			X		
Sp.2					
Sp.3		X			
1層目 Sp.4	O				
Sp.5		X			
Sp.6					
Sp.7			X		
Sp.8	O				
Sp.9			X		
Sp.10		O			O
Sp.11	O	X		O	O
2層目 Sp.12				O	O
Sp.13	O	X		O	O
Sp.14	O		X		O
Sp.15			X		
Sp.16				O	O
Sp.17				X	
3層目 Sp.18		O	X		
Sp.19	O		X		
Sp.20			X		

O: EMRなし X: EMRあり

### 3.2.2 重畠に用いる FIR フィルタ

響きの可変幅を十分に確保できるよう、重畠する FIR フィルタには図 3.8 に示す 2000 席程度の豊かな響きを持つコンサートホールにて実測したインパルス応答を用いた。初期反射音制御部には舞台付近で測定したインパルス応答を、後期反射音制御部には舞台から遠方にて測定したインパルス応答を用いた。それぞれについて、ともに異なる 4 点で測定したインパルス応答を用いているが、これは完全に同じインパルス応答を用いることによって AFC システム内のループごとの周波数特性が近くなることでカラレーションに対する安定性が低下するのを防ぐことを目的としている。また、反射音としての聴感的な自然さを向上させるため、実測したインパルス応答から直接音が事前に除かれたものを用いている。さらに、初期反射音制御部のインパルス応答は、合成された響きが長時間に渡ることを防ぐため、300 ms で減衰するように事前に信号長を制限した。

重畠に用いたインパルス応答の時間波形を図 3.9 および図 3.10 に示す。



図 3.8: FIR フィルタを測定したコンサートホール

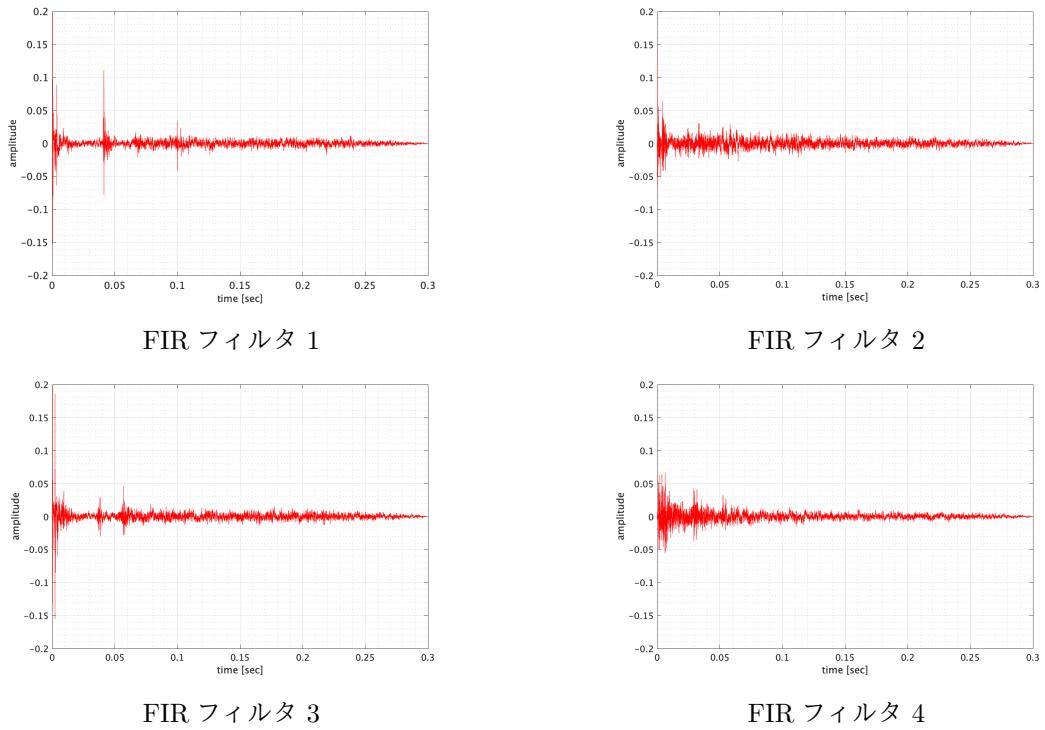


図 3.9: 初期反射音の重畠に用いた FIR フィルタ

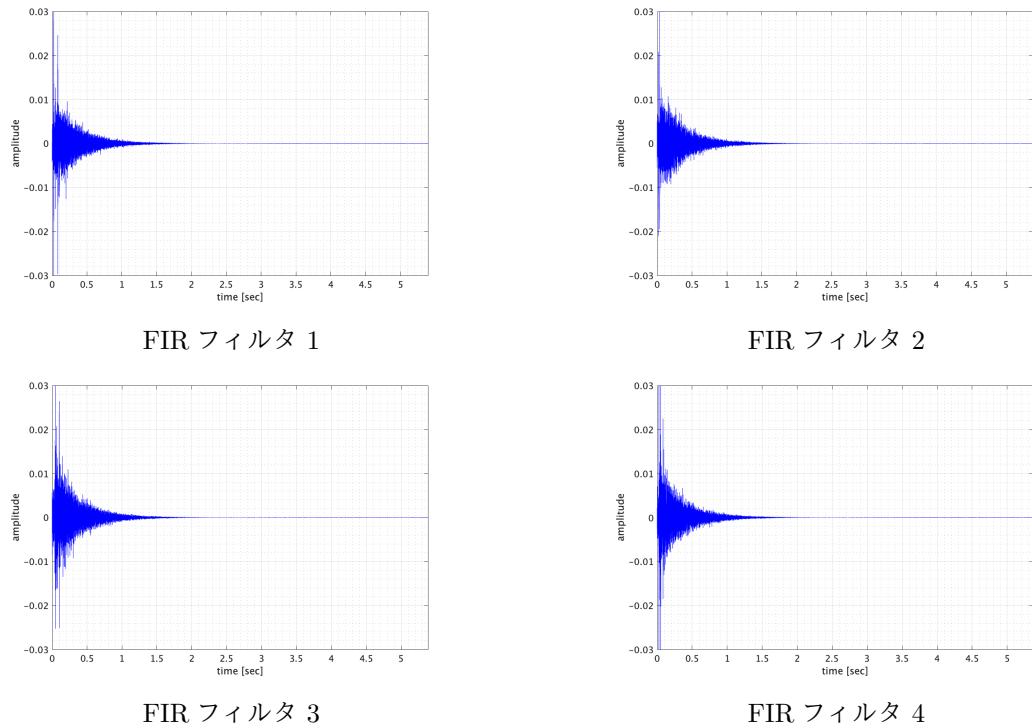


図 3.10: 後期反射音の重畠に用いた FIR フィルタ

### 3.2.3 AFC の音場生成における制御幅

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  $ST_{Early,dir}$ 、 $ST_{Late,dir}$  を表3.2に示す。

この結果、AFCをオフにしたときの  $ST_{Late,dir}$  は非常に小さく、この評価区間では音がほぼ完全に吸音されており、後期反射音についてはシステムで付加する成分によってほぼ完全に決定されると考えられる。一方で、 $ST_{Early,dir}$  は -25 dB 前後と、 $ST_{Late,dir}$  に比べて大きな値となっていた。これは半無響室に配置した吸音材に吸音され切らなかった低次の反射音がわずかに 100~100 ms の間に残っているためと考えられる。特に Front 方向では図2.18に示した基準音場の生成目標値との差が約 3 dB に迫っており、慎重な調整が必要となる。

響きを増やすことに関してはあ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による周波数特性の変化をはじめとする様々な要素によって変化し、最大の響きの条件を厳密に調べることはできないが、イコライザによる周波数特性の補正を行わずに、その分のゲインの稼得を残す安全側にて響きの可変幅を大まかに検討する。周波数特性の手動調整を行わずに仮の設定で AFC をオンにして、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  $ST_{Early,dir}$  および  $ST_{Late,dir}$  を測定した。その結果を表3.3に示す。

これらの結果から、実験室における  $ST_{Early,dir}$  と  $ST_{Late,dir}$  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。

表 3.2: AFC をオフにしたときの  $ST_{Early,dir}$ 、 $ST_{Late,dir}$

	Front	Back	Left	Right	Up	Down
$ST_{Early,dir}$ (dB)	-24.2	-25.5	-24.2	-25.9	-25.9	-23.3
$ST_{Late,dir}$ (dB)	-65.5	-66.7	-67.0	-65.6	-66.6	-64.2

表 3.3: AFC 仮調整時の  $ST_{Early,dir}$ 、 $ST_{Late,dir}$

	Front	Back	Left	Right	Up	Down
$ST_{Early,dir}$ (dB)	-16.4	-18.0	-16.7	-17.3	-19.9	-16.1
$ST_{Late,dir}$ (dB)	-15.8	-15.9	-16.0	-15.8	-19.2	-15.0

### 3.3 生成音場の調整方法

図3.2および図3.3に示したように、AFCにおける調整項目はFIRフィルタの畳み込み、遅れ時間の付加、音量の増減、イコライザによる周波数特性の補正からなる。いずれの調整においても、AFCのシステムで響きが付加された室内での音響測定と調整項目の変更を繰り返し、所望の値に近づけていく必要がある。なお、本実験で用いた実験室における音響測定では、部屋の広さによる制約により、直接音の減衰が大きいため残響時間の評価としてよく用いられる  $T_{20}$  または  $T_{30}$  を適切に測定することができない。そこで本研究では、STの測定条件によるインパルス応答の測定結果からエネルギーの減衰曲線を描き、−15 dBから−45 dBまでの減衰曲線の傾きを読むことにより残響時間を求めることとした。

#### FIR フィルタの設定

$ST_{Early,dir}$  および  $ST_{Late,dir}$  を目標値に近づけて制御するためには、初期反射音と後期反射音の成分をある程度独立に制御することが必要となる。初期反射音制御部のために付加したエネルギーが後期反射音の評価区間に漏れ出す量を少なくするため、初期反射音制御部では重畠する FIR フィルタにフェードアウトを設定することにより信号長を 120 ms に限定した。また、生成した音場の残響時間は通常よくあるコンサートホールでの残響時間よりもかなり長くなる傾向があつたため、後期反射音制御部で重畠する FIR フィルタにフェードアウトを設定することで残響時間を短くし、1.8 秒程度の自然な長さになるよう調整した。

#### 遅れ時間の付与

後期反射音制御部では、反射音の付加に長い遅れ時間を加えることで  $ST_{Early,dir}$  の評価区間にに入るエネルギーを減らすことができるが、遅れ時間が大きすぎるとエコー障害が生じる恐れがある。本研究では、45 ms の遅れ時間を付け加えることにより、聴感的な自然さを保つつ  $ST_{Early,dir}$  への影響を低減した。

#### 音量の増減

方向別 ST の調整には主にゲインの変更による音量の増減を用いた。初期反射音制御部では、主に後方からの反射音を強めるために後方の音量を増加させたほか、左右からの反射音供給量を増減させて左右の偏りがなくなるよう調整した。後期反射音制御部では、方向別の偏りがなるべく小さくなるように音量を調整した。

#### イコライザによる周波数特性の補正

AFCのイコライザ設定は自動設定部と手動設定部に分かれており、主にハウリングを抑えるための大まかな設定に自動設定部を、カラレーションや聴感上の不自然さの低減に手動調整部を用いる。本研究においては、上記の役割に加え、手動調整部のイコライザの設定の変更を繰り返して、オクターブバンドごとの ST および残響時間の値が極端にばらつくことを防ぐように周波数特性を調整した。

## 3.4 生成した音場の特性

### 3.4.1 基準音場

コンサートホールのステージを模して生成した基準音場の方向別 ST を図 3.11 に示す。各方向での目標値からの差はすべて 1 dB 未満であり、およそ目標値の通りの方向別 ST を実現することができた。

残響時間および ST を図 3.12 に示す。残響時間および  $ST_{Late}$  はすべてのオクターブバンドでほぼフラットな周波数特性となった。 $ST_{Early}$  は室自体の持つ特性が影響していると考えられ、完全な制御はできていないが、平均値からの偏差はすべてのオクターブバンドで 1 dB 程度に収めることができた。

減衰曲線を図 3.13 に示す。AFC で生成した音場では、エネルギーの付加によって特に響きの後期反射音側で減衰曲線が盛り上がる場合があるが、今回生成した音場ではこのような現象は見られず、実際の空間と同様の直線的な減衰が確認できた。

AFC の調整パラメータについて、図 3.14 から図 3.18 に示す。

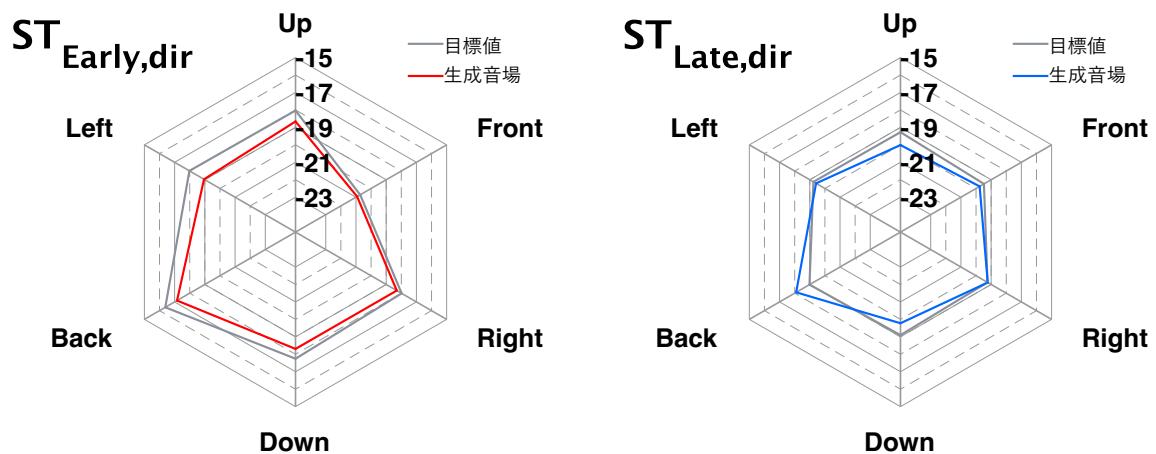


図 3.11: 基準音場の方向別 ST

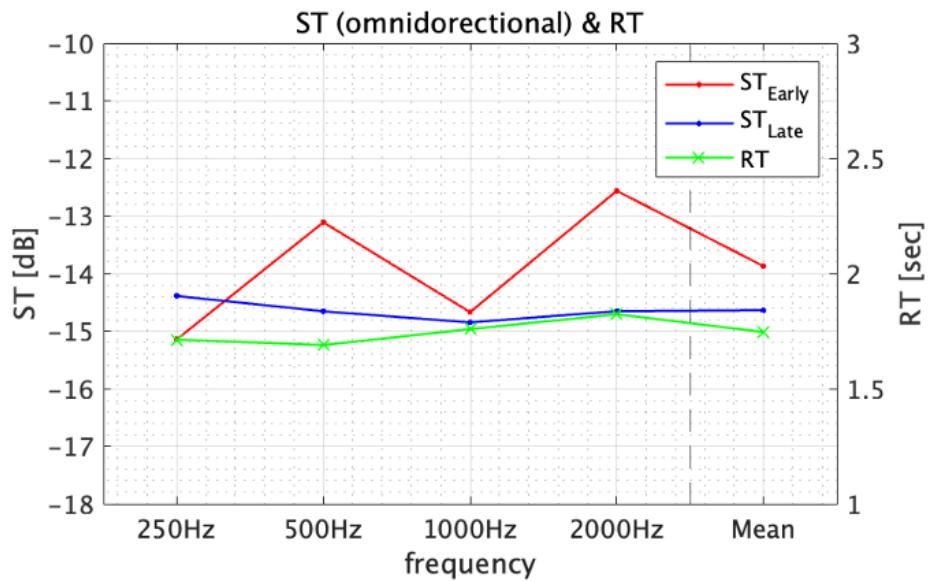


図 3.12: 基準音場の残響時間と ST

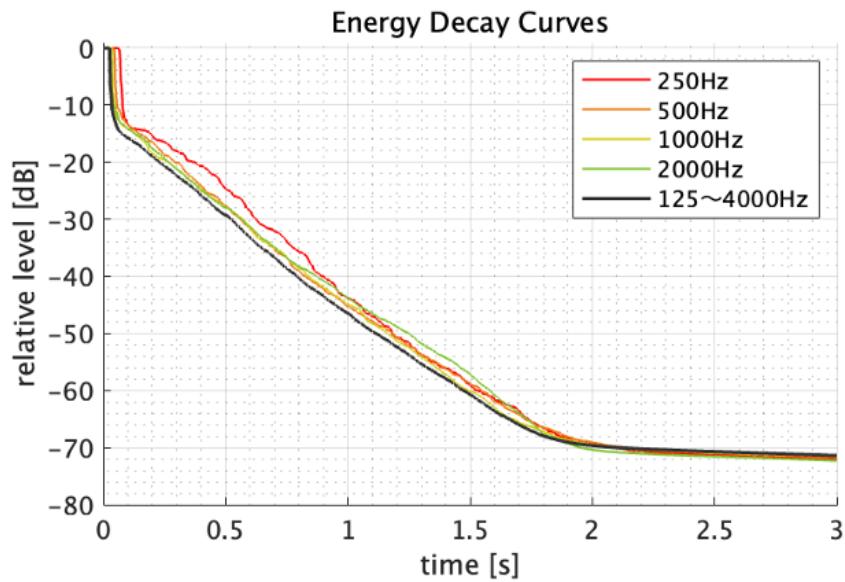


図 3.13: 基準音場の減衰曲線

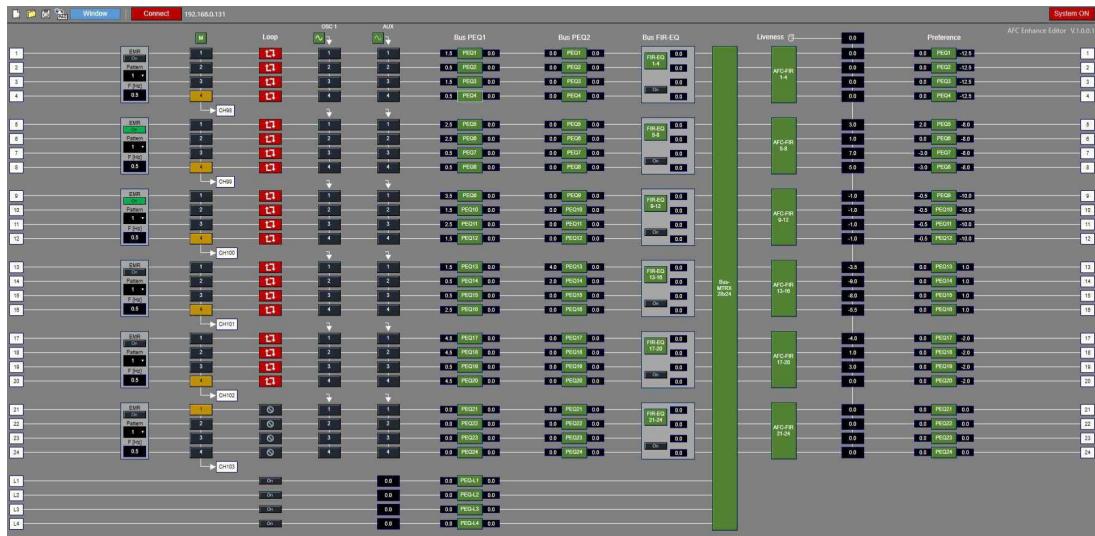


図 3.14: AFC 操作画面とゲインの設定

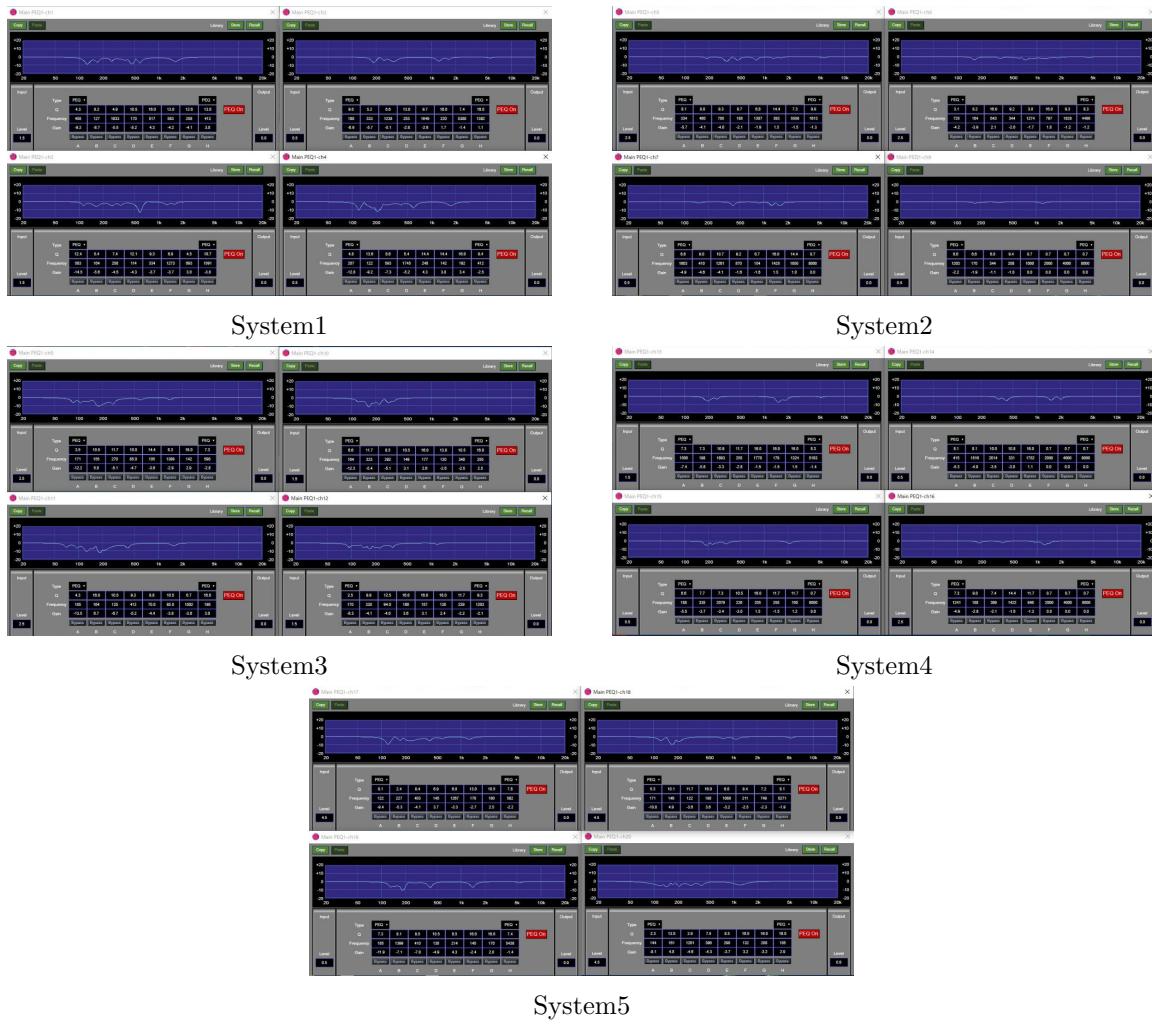


図 3.15: イコライザ自動調整部



図 3.16: FIR フィルタと遅れ時間の設定

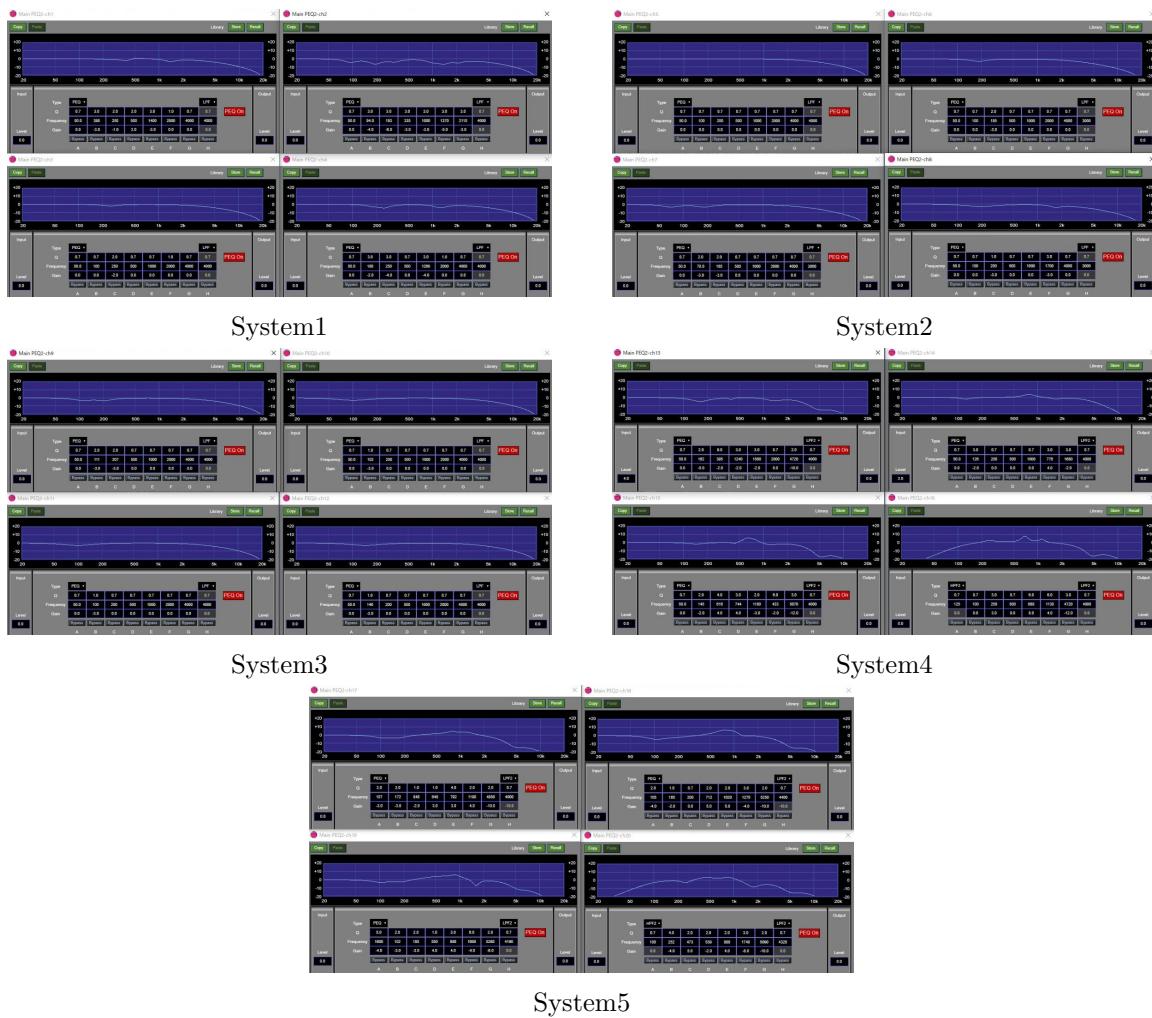


図 3.17: イコライザ 手動調整部 1

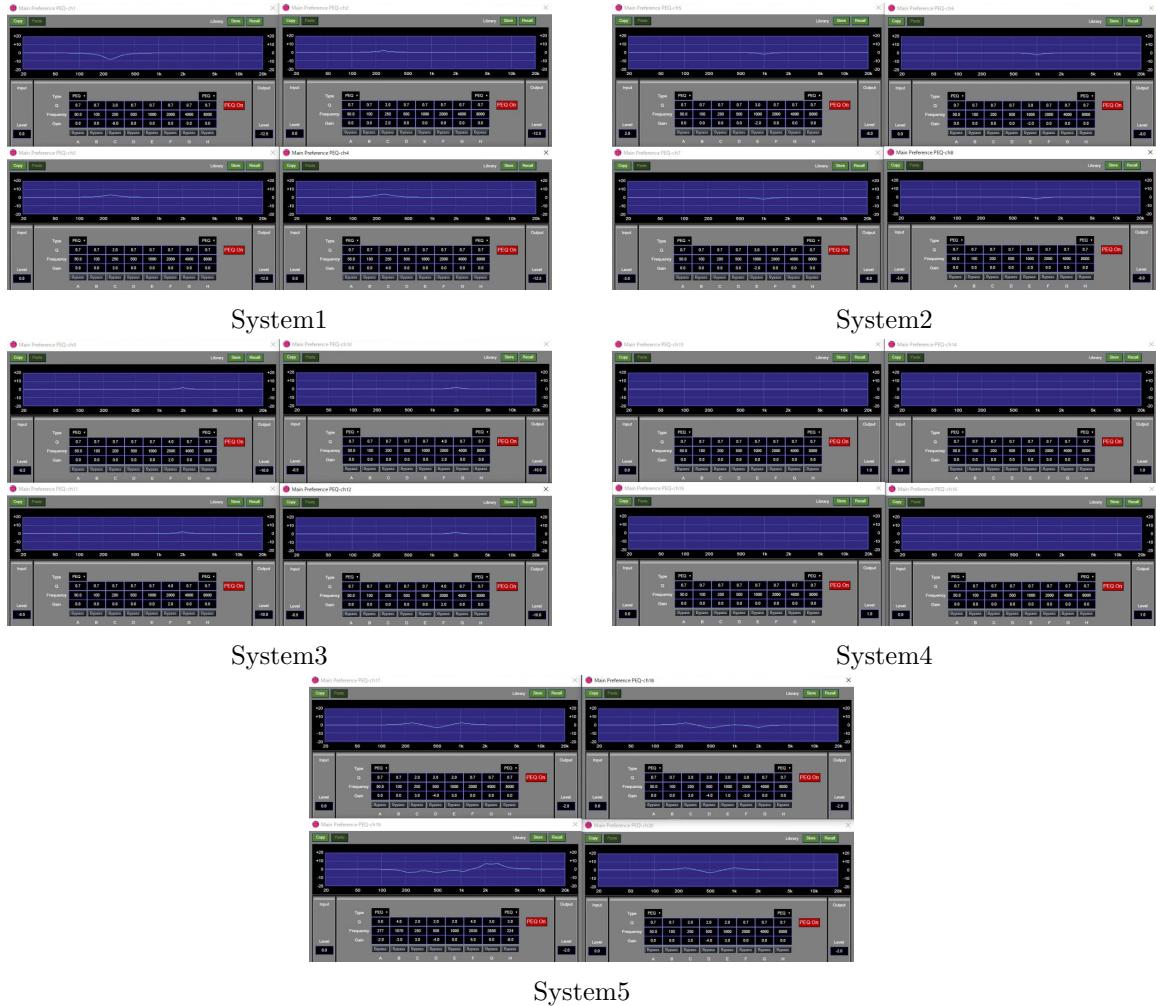


図 3.18: イコライザ 手動調整部 2

### 3.4.2 方向の偏りをつけた音場

基準音場に対して、付加する音のゲインおよび手動調整部のイコライザの設定を変更して調整し、初期反射音・後期反射音のそれぞれについて、前方からの反射を強めた音場と後方からの反射を強めた音場を実験音場として生成した。初期反射音の前方を強めた音場を音場 $\alpha$ 、初期反射音の後方を強めた音場を音場 $\beta$ 、後期反射音の前方を強めた音場を音場 $\gamma$ 、後期反射音の後方を強めた音場を音場 $\delta$ とする。生成した音場のST<sub>Early</sub>、ST<sub>Late</sub>、残響時間をそれぞれ図3.19から図3.21に示す。概ね同程度の音場が生成できていることが確認できたものの、いずれの音響指標も基準音場と比べてやや増加する傾向にあり、聴感印象の評価時に留意する必要がある。また、方向別STを図3.22から図3.25に示す。いずれの音場でも概ね意図通りの方向特性を持つことが確認できた。各音場条件について、AFCの設定を図3.26から図3.37に示す。

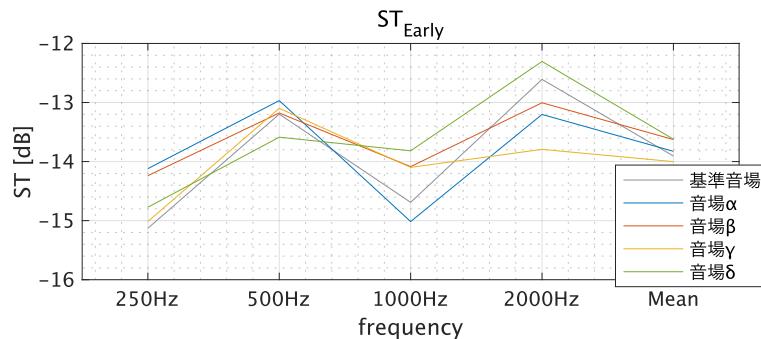


図3.19: 実験音場のST<sub>Early</sub>

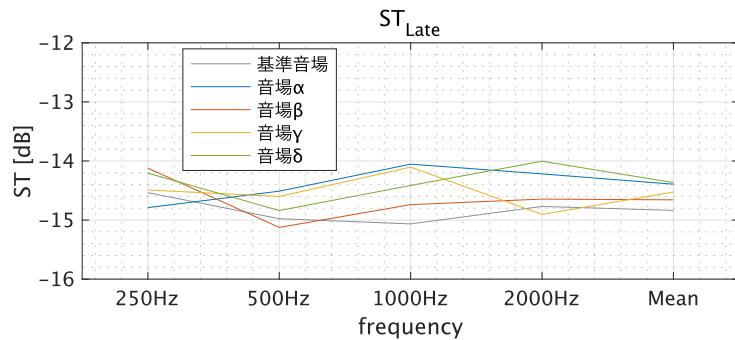


図3.20: 実験音場のST<sub>Late</sub>

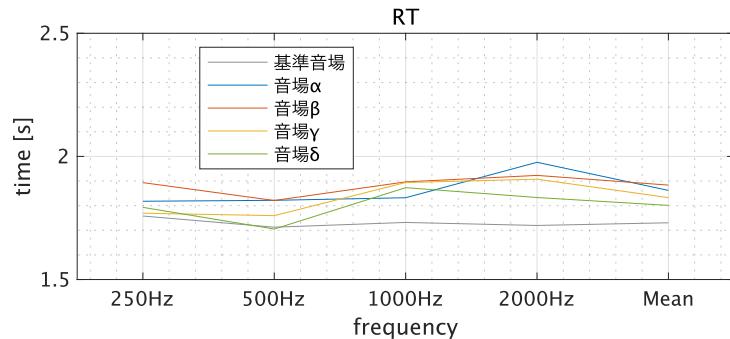
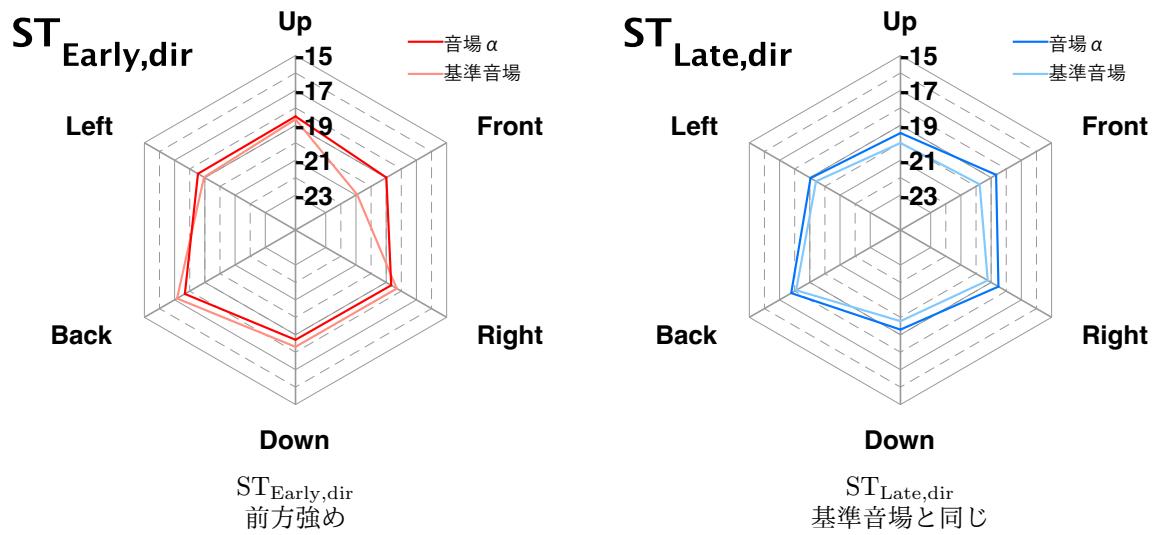
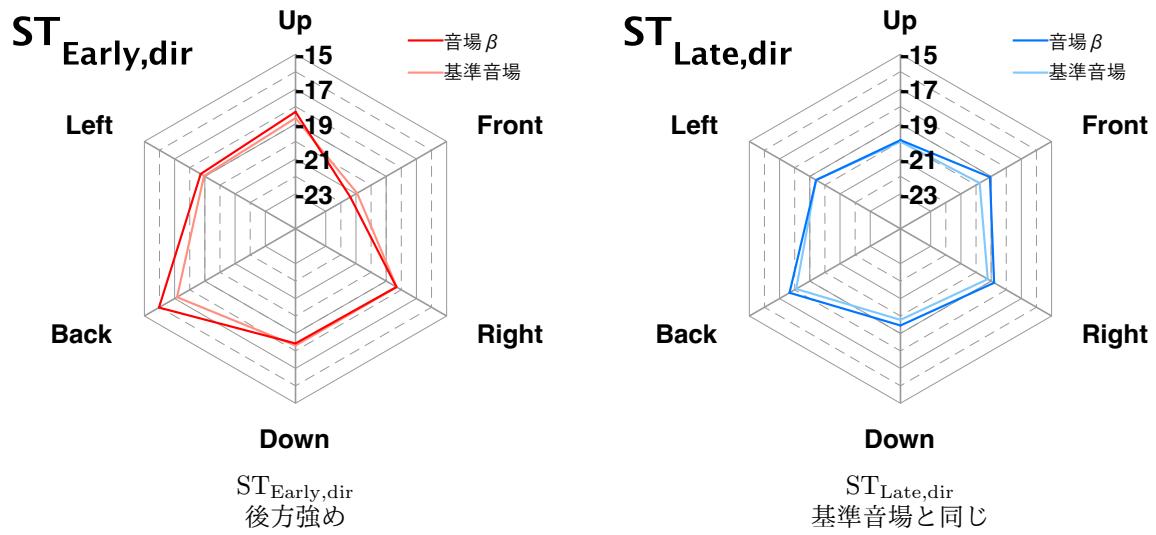
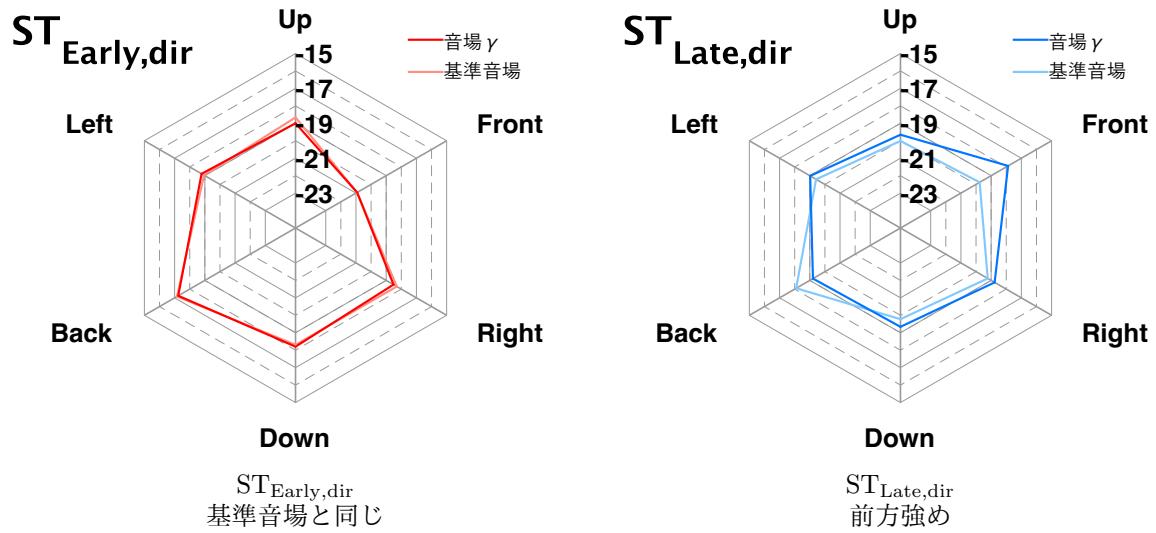
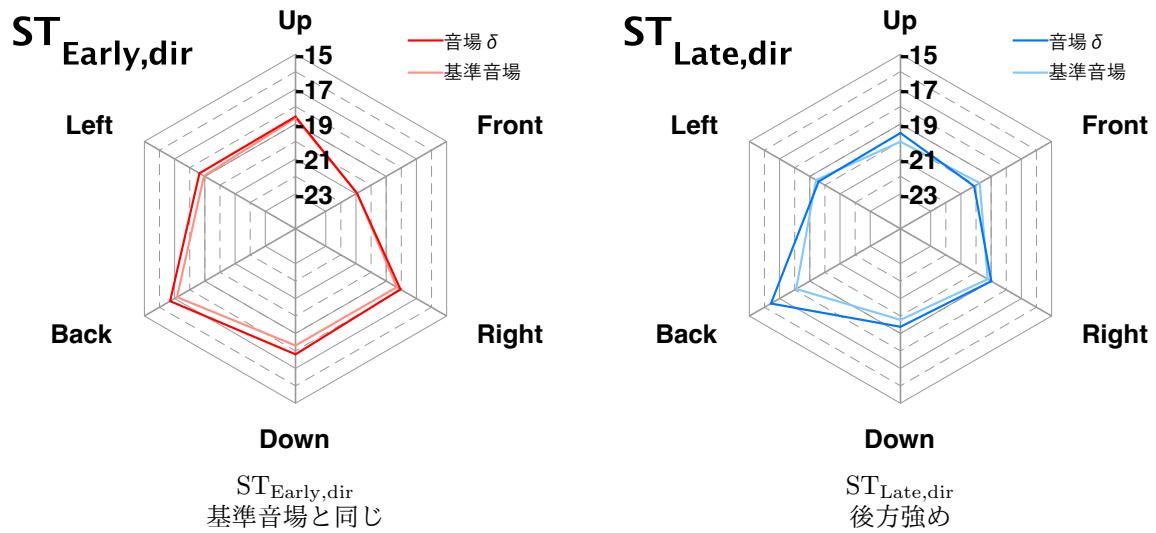
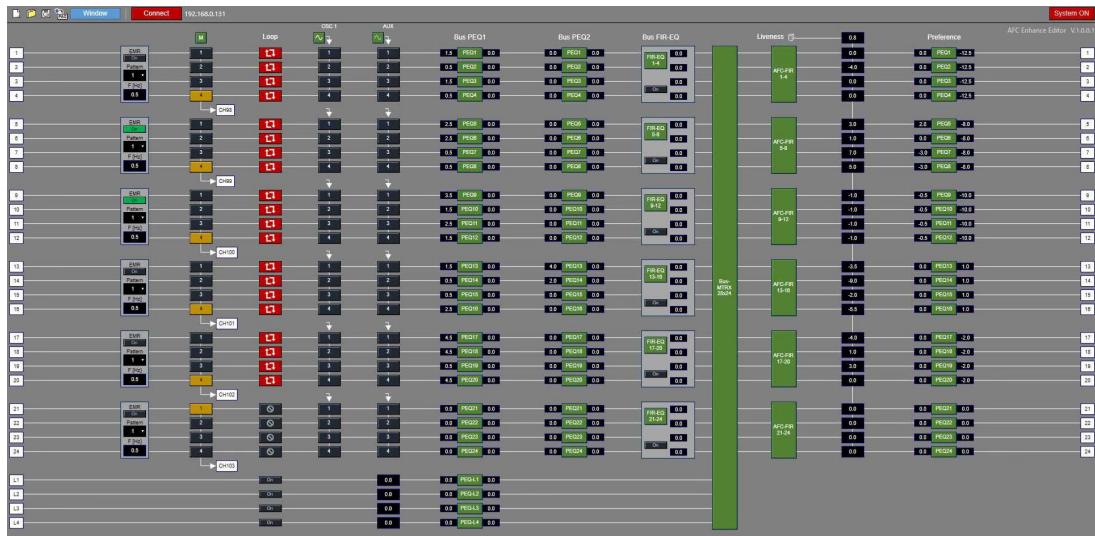
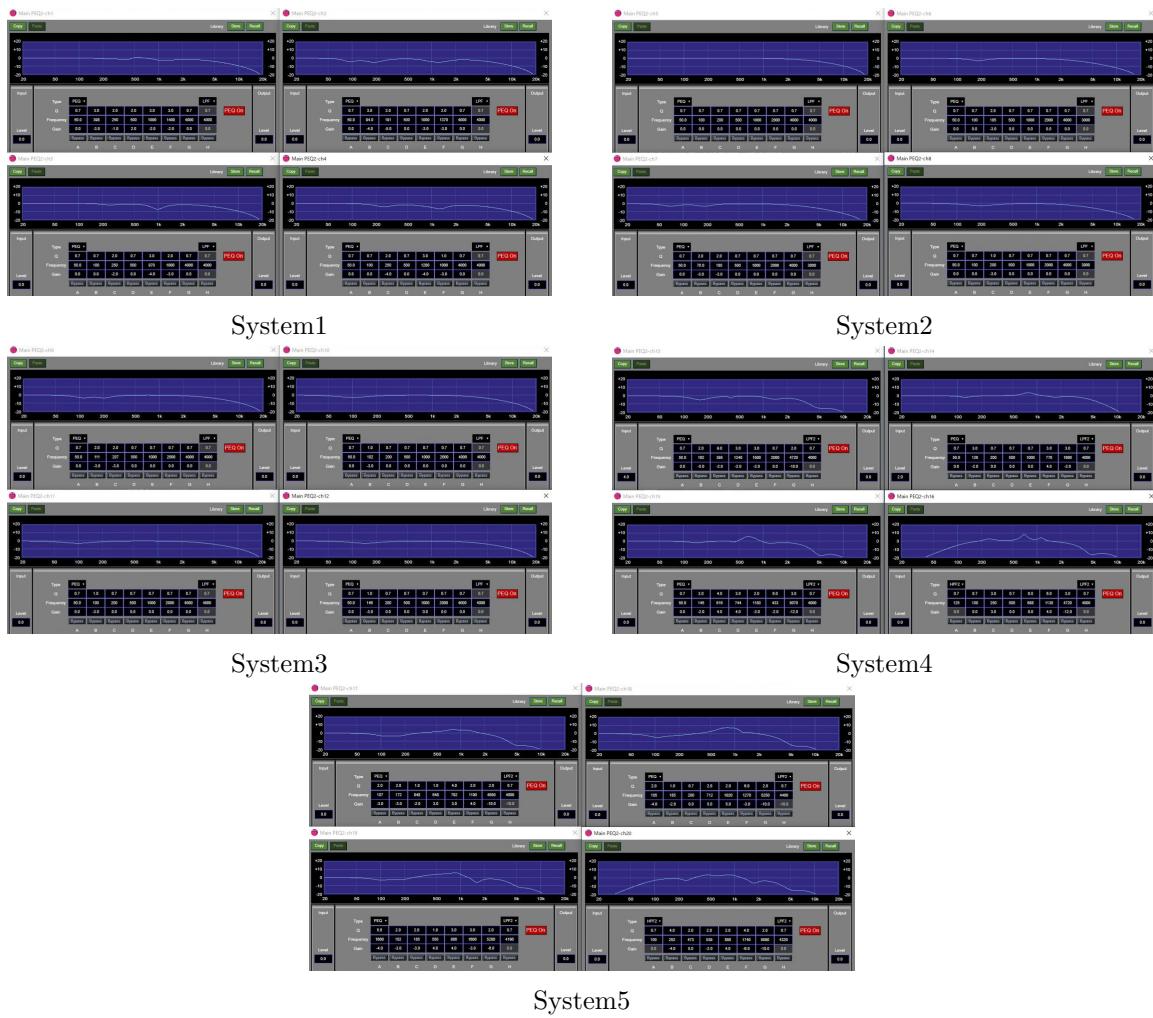
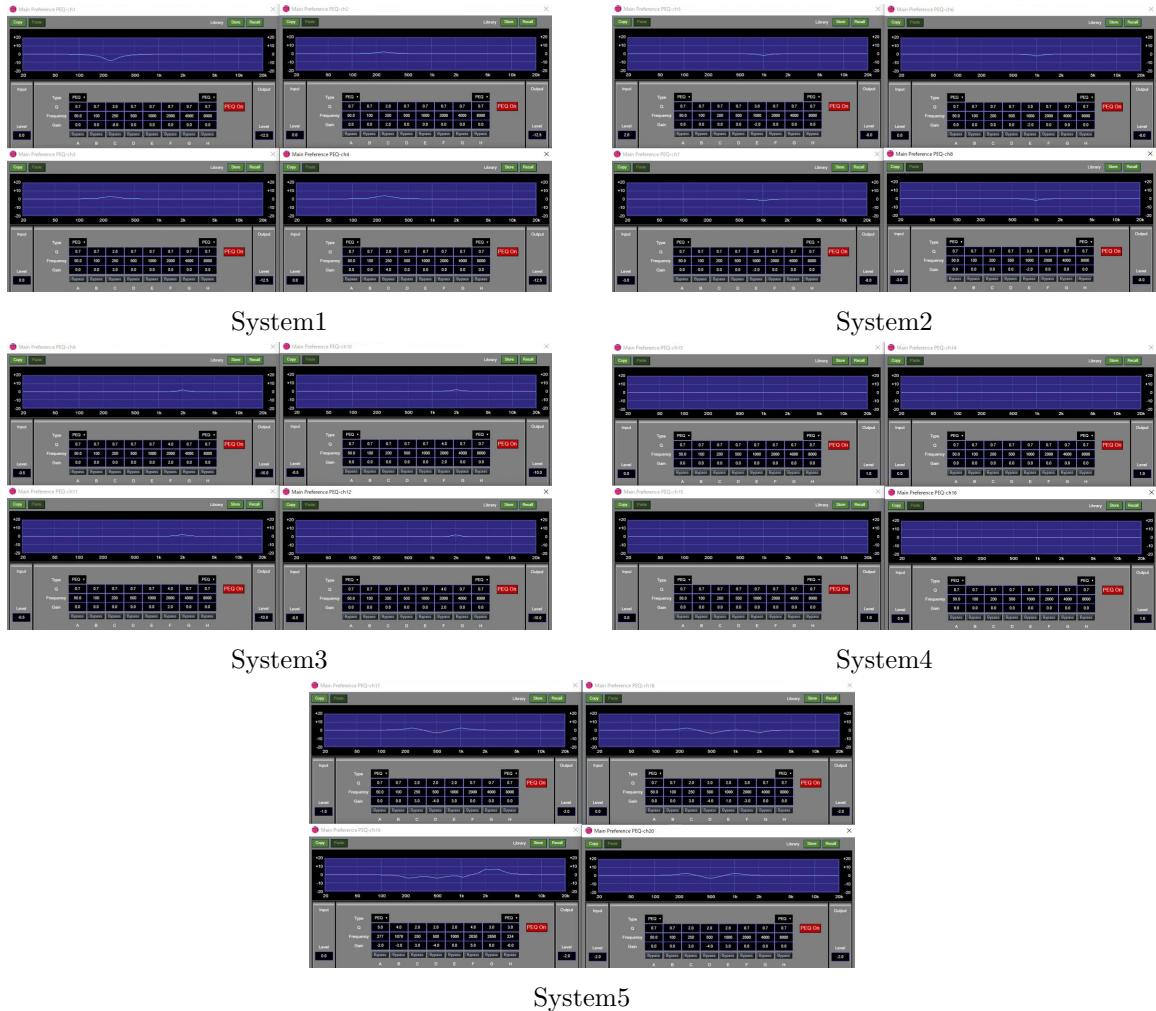


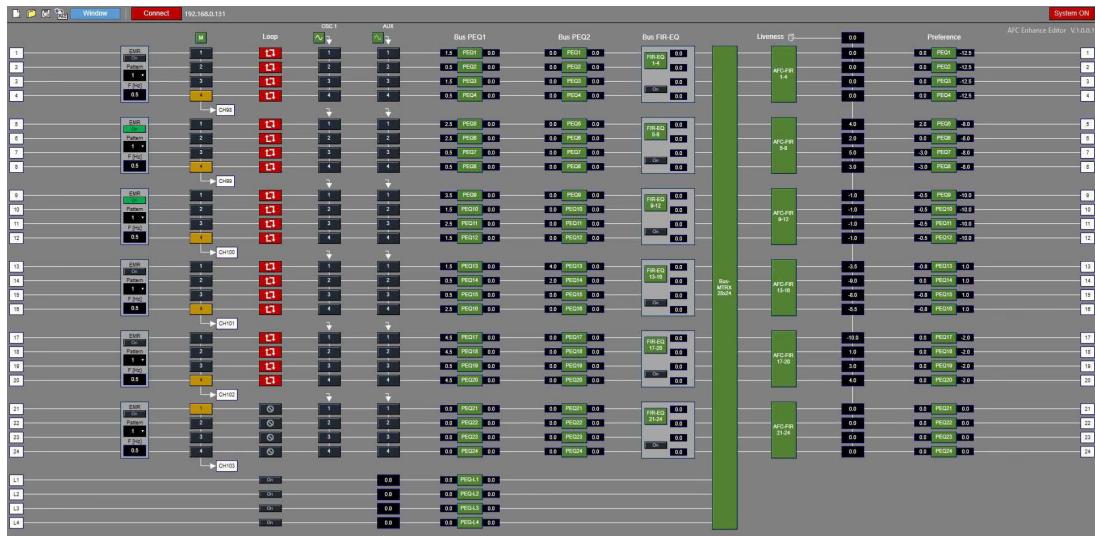
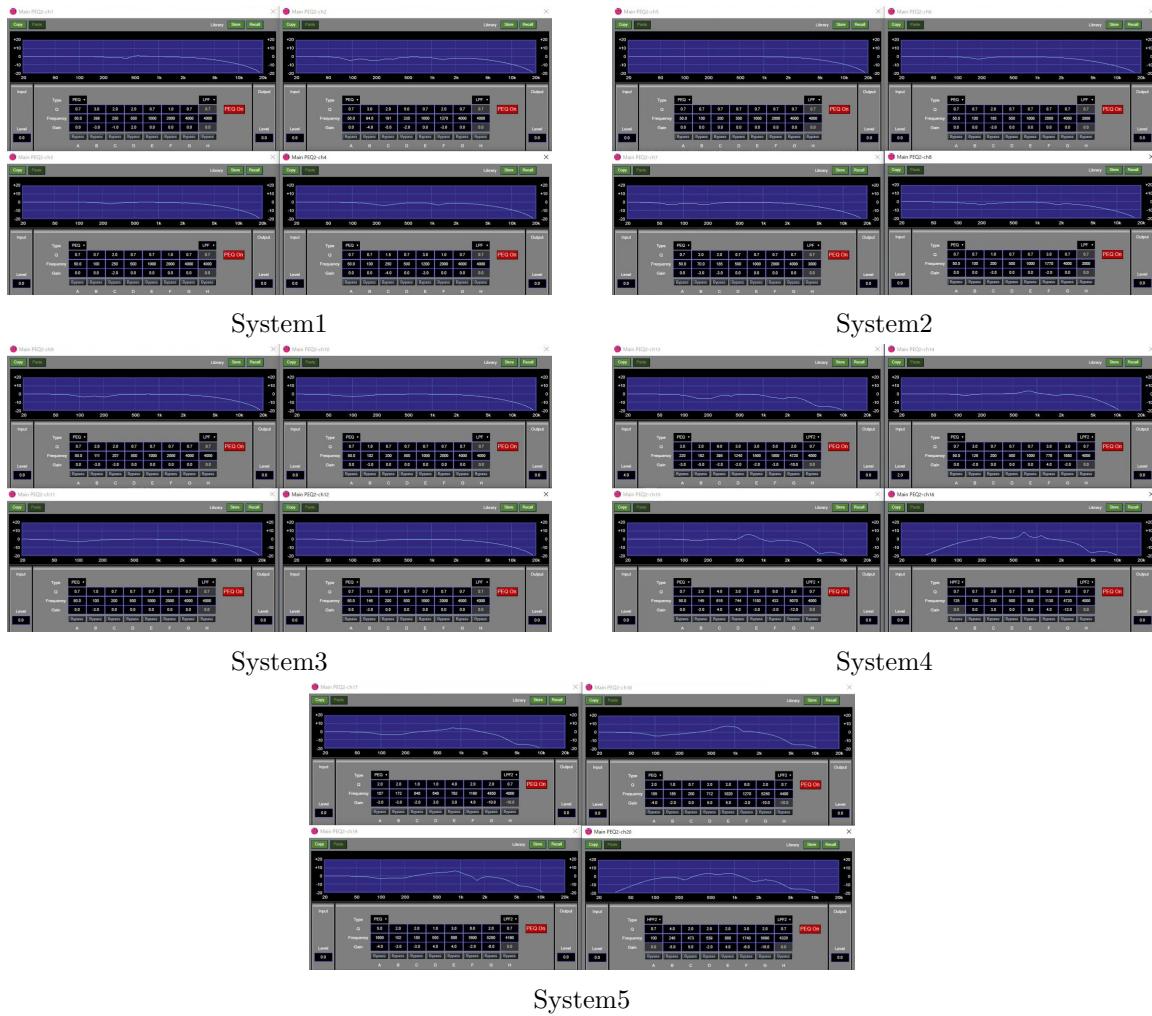
図3.21: 実験音場の残響時間

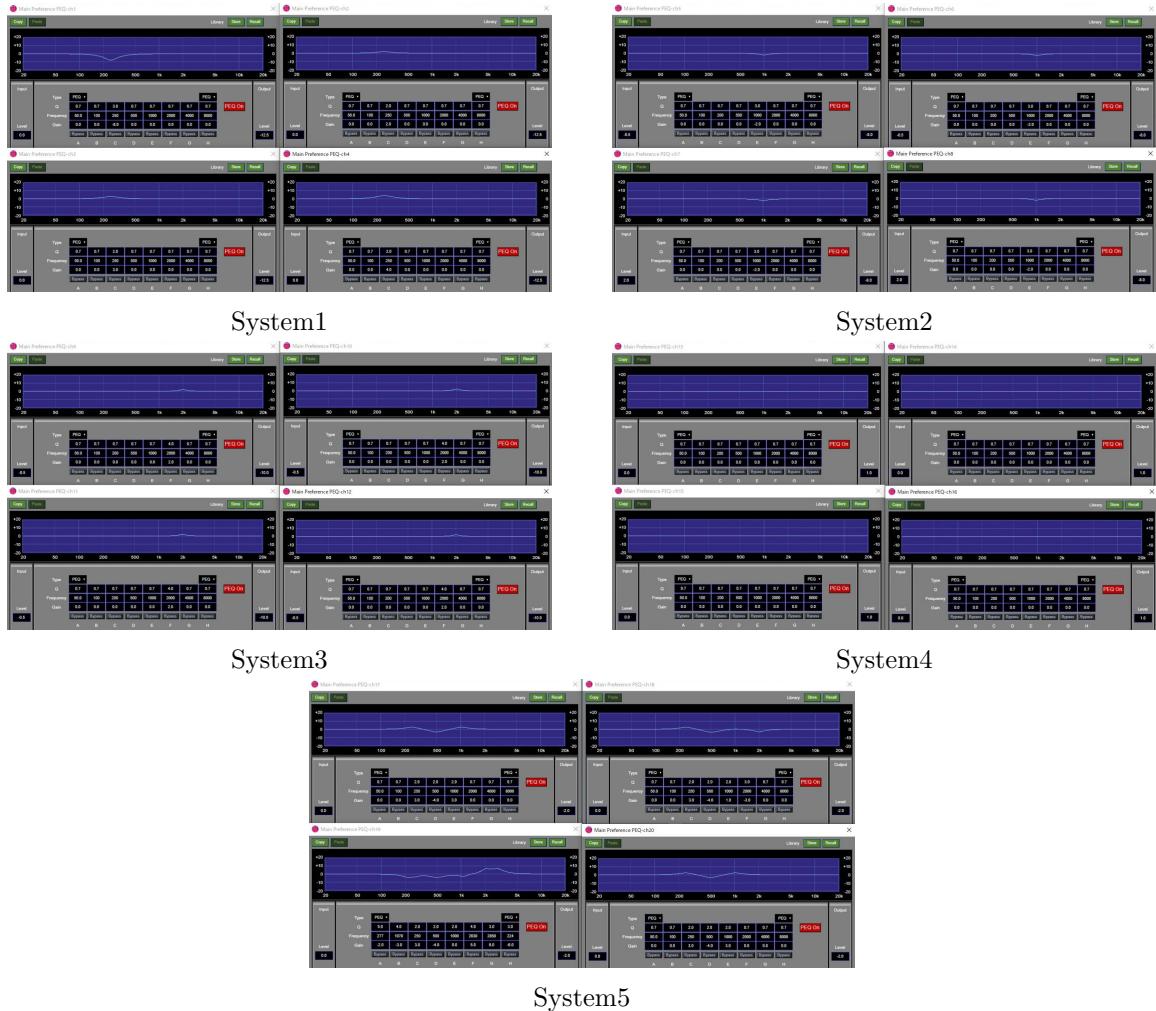
図 3.22: 音場 $\alpha$  の方向別 ST図 3.23: 音場 $\beta$  の方向別 ST

図 3.24: 音場  $\gamma$  の方向別 ST図 3.25: 音場  $\delta$  の方向別 ST

図 3.26: 音場  $\alpha$  操作画面とゲインの設定図 3.27: 音場  $\alpha$  イコライザ 手動調整部 1

図 3.28: 音場 $\alpha$  イコライザ 手動調整部 2

図 3.29: 音場  $\beta$  操作画面とゲインの設定図 3.30: 音場  $\beta$  イコライザ手動調整部 1

図 3.31: 音場 $\beta$  イコライザ 手動調整部 2

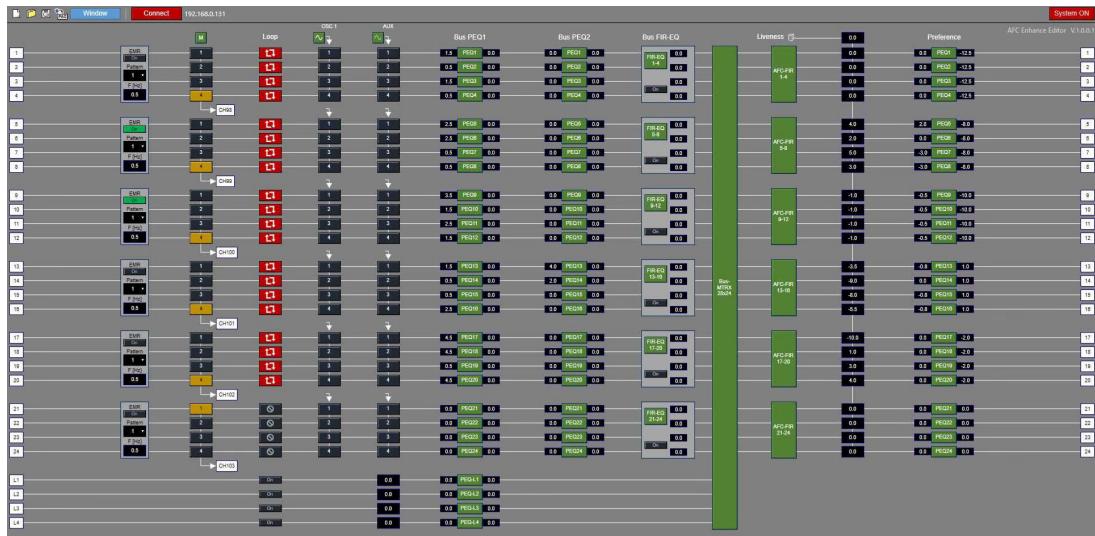


図 3.32: 音場  $\gamma$  操作画面とゲインの設定

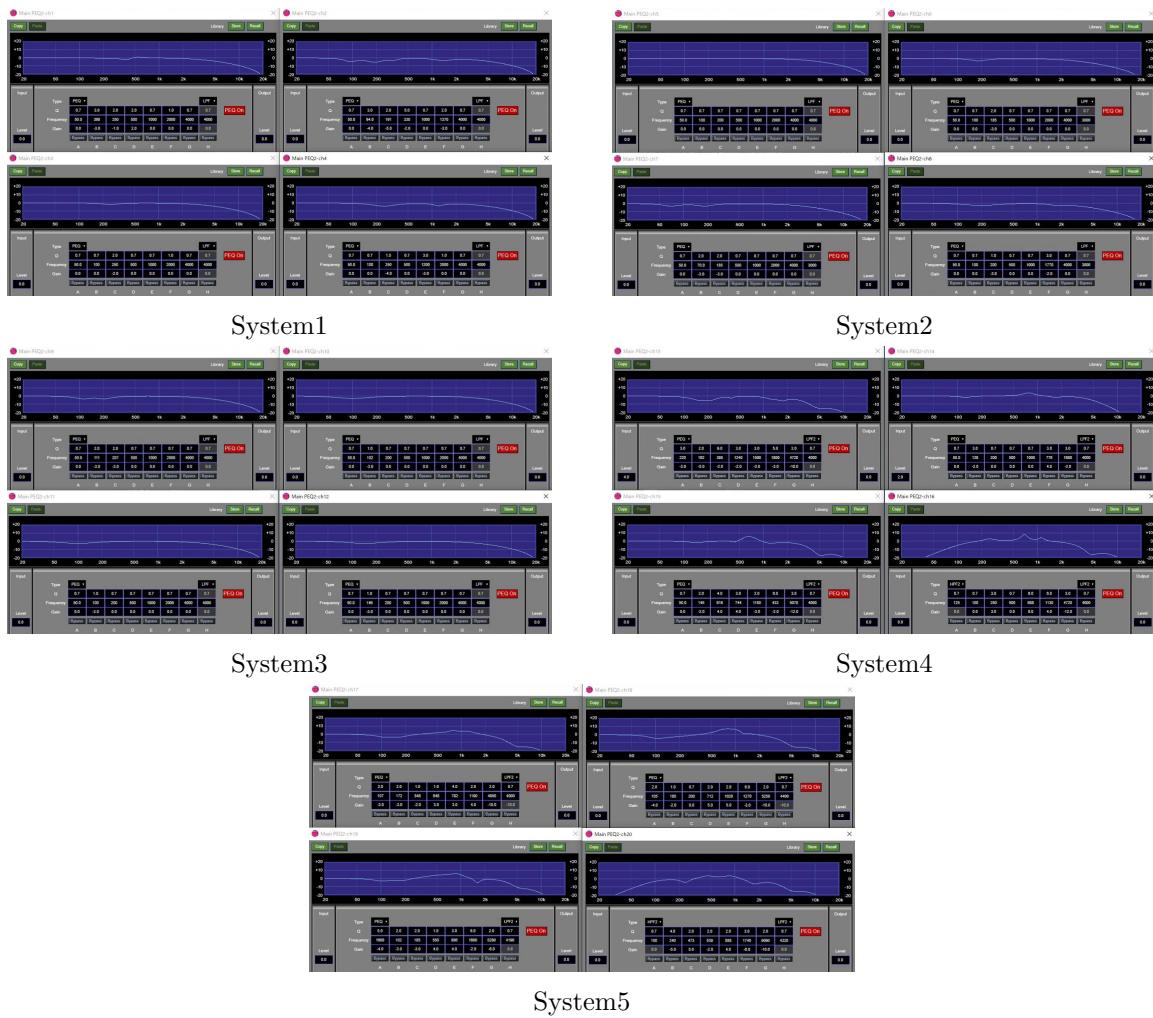
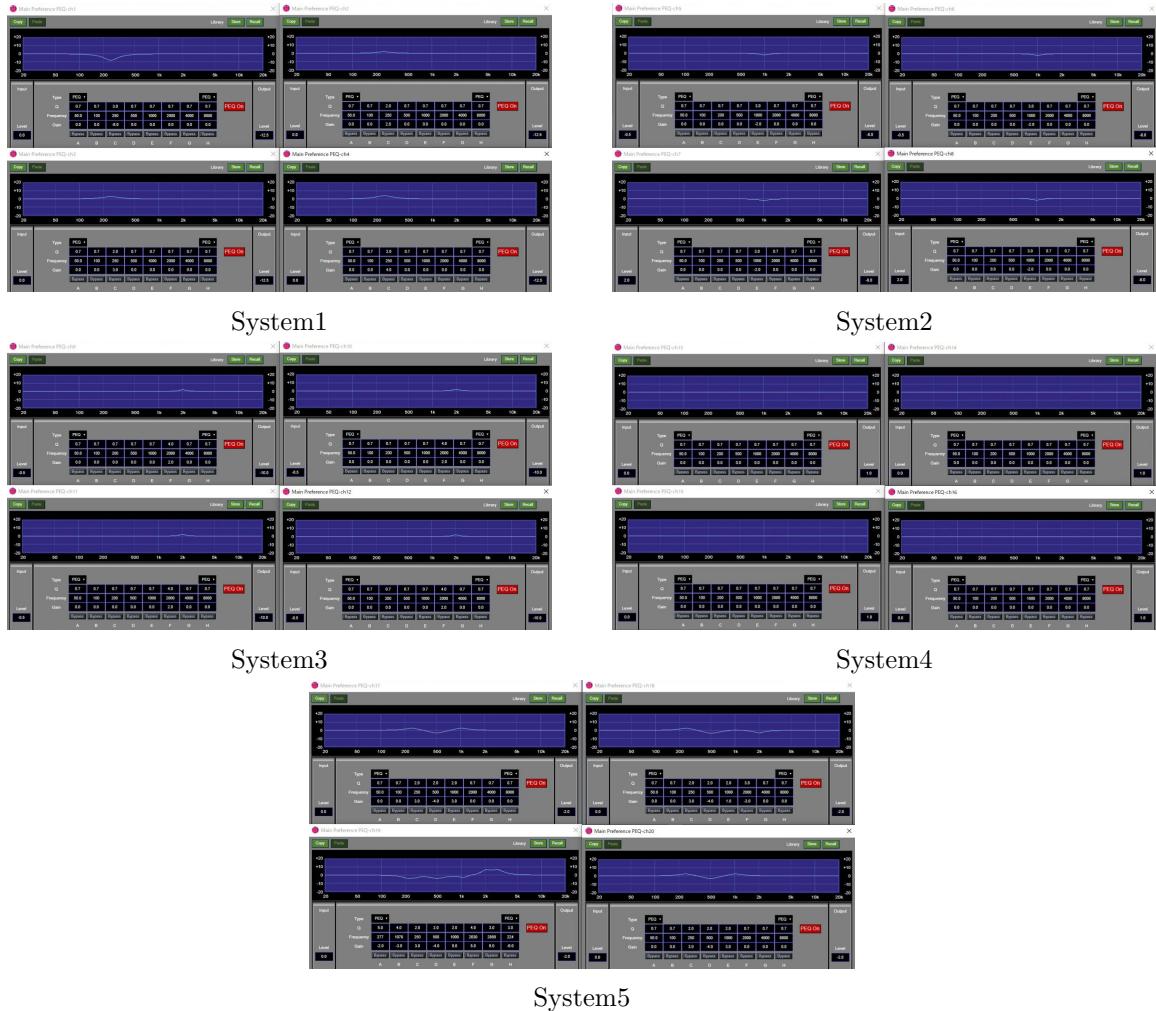
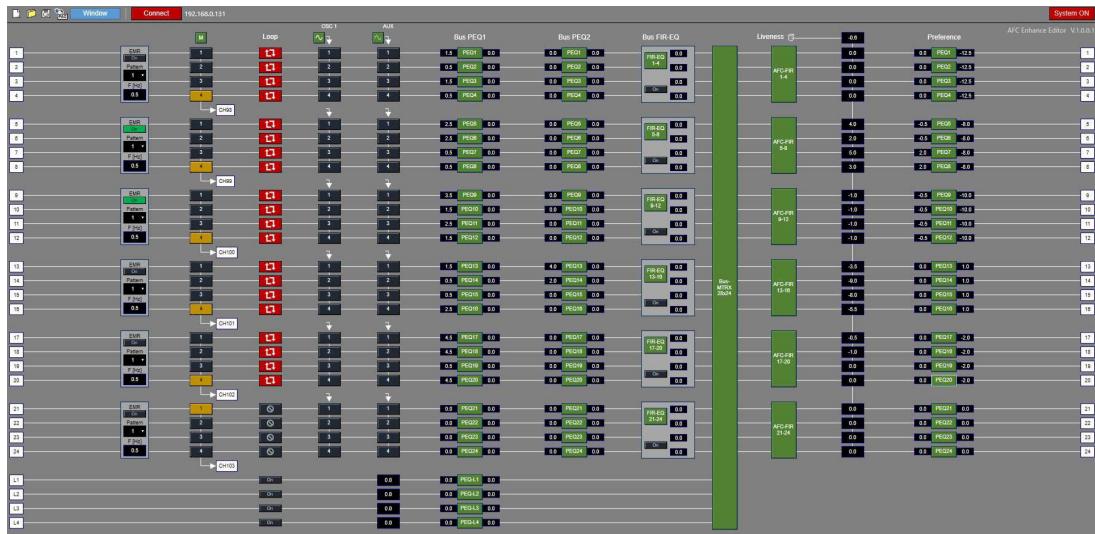
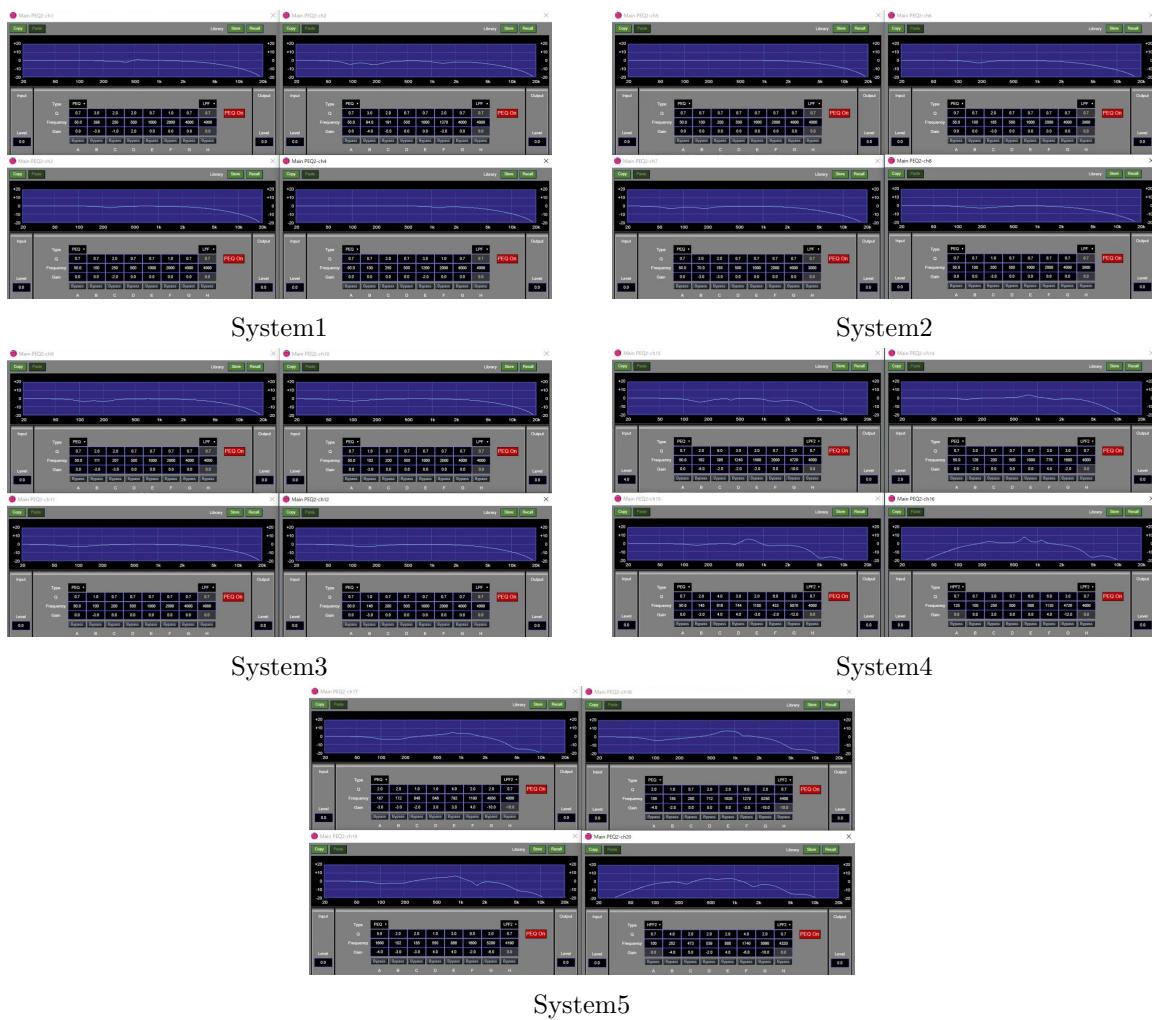
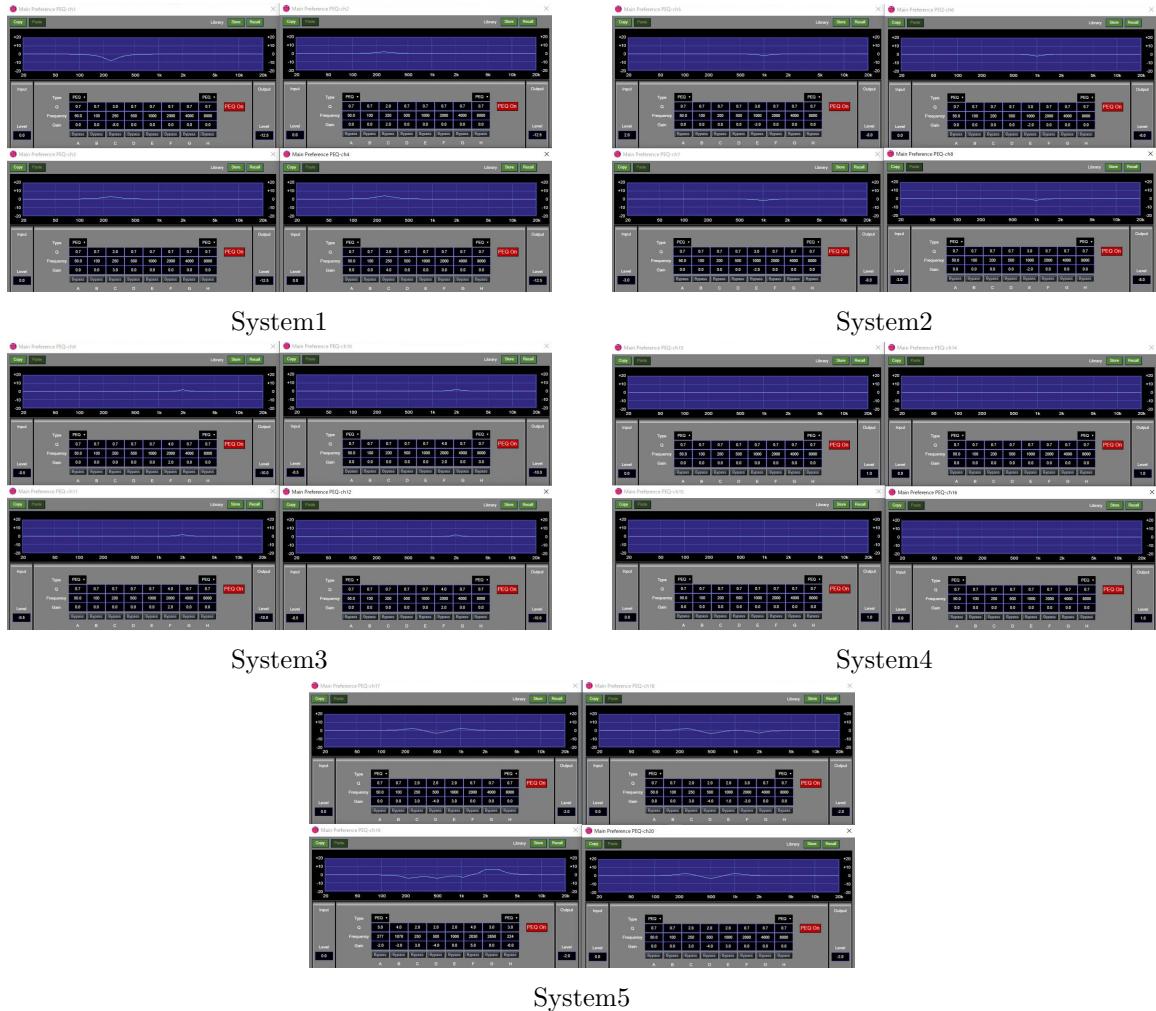


図 3.33: 音場  $\gamma$  イコライザ 手動調整部 1

図 3.34: 音場 $\gamma$  イコライザ 手動調整部 2

図 3.35: 音場  $\delta$  操作画面とゲインの設定図 3.36: 音場  $\delta$  イコライザ 手動調整部 1

図 3.37: 音場 $\delta$  イコライザ 手動調整部 2



# 第4章 演奏実験

反射音の到来方向が合唱者の演奏時の主観印象評価に与える影響について検討するため、第4章で生成した音場を用いて声楽カルテットによる演奏実験を行った。本章では、演奏実験の方法とその結果および考察について述べる。

## 4.1 実験の概要

図3.19から図3.21に示すように、音場 $\alpha$ から $\delta$ の音響特性は近く、その聴感的な印象の差異も残響時間が異なる場合のような極端な違いを感じさせるものとはなっておらず、各音場の印象の絶対評価では反射音到来方向の影響が適切に抽出できない可能性がある。そこで、本実験では、被験者に基準音場での演奏のうちに、基準音場から反射音の方向特性を変化させた音場 $\alpha$ から $\delta$ のうちいずれかの音場での演奏を行ってもらい、その印象の変化について回答を得る試行を $\alpha$ から $\delta$ のすべての音場について繰り返すことで、反射音の到来方向特性を変化させたときの演奏時の印象の変化を調べることを試みた。

演奏実験はソプラノ、アルト、テノール、バスによる4人1組の混声四部の四重奏にて行った。被験者は合唱経験者31名（ソプラノ・アルト・バス8人、テノール7人。うち声楽経験者9名）であり、8組の実験グループを作成した。なお、実験グループのうち一つのグループでテノールに欠員が生じたため、そのグループにおいては筆者がテノールとして演奏に参加した。

実験には平易な日本語の混声四部合唱曲として「ふるさと」の一番を用いた。音場 $\alpha$ から $\delta$ の提示順序はランダムとした。並び順は一般的な混声四部のカルテットと同様に、舞台下手側として想定した方からソプラノ、アルト、テノール、バスの順とした。演奏実験の様子を図4.1に示す。

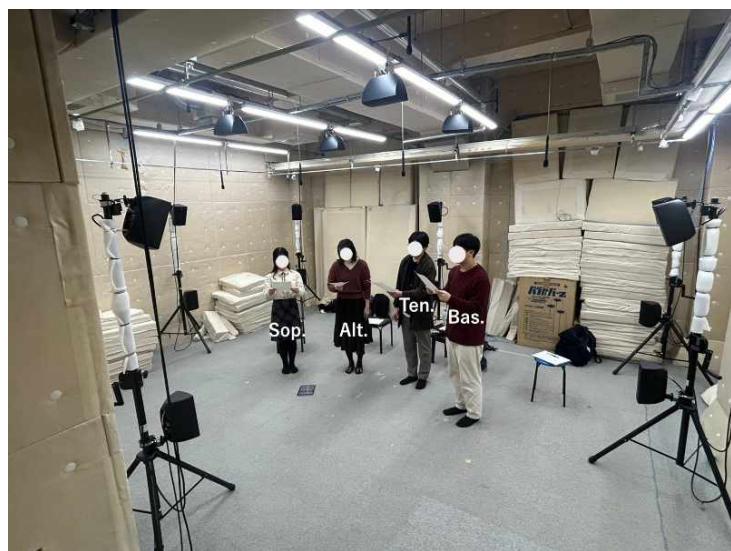


図4.1: 演奏実験の様子

## 4.2 方法

### 4.2.1 実験の手順

実験の実施に先立ち、被験者に実験に関する説明を行い、実験の参加同意書およびフェイスシートの記入を求めた。その後、ウォーミングアップと曲の練習を行う時間を設け、「自身のパートを歌うことに一生懸命になりすぎず、他パートや空間の響きなどに意識が向けられる程度に習熟する」よう教示して各自のパートの音の確認およびアンサンブルの練習を求めた。練習の時間は厳密には区切らず、教示した習熟度に達した旨の申告を受け練習を終了した。練習の最後に、演奏実験の流れと評価項目について確認するため、基準音場での演奏ののちにランダムに一つ実験音場を提示して演奏する実験1条件あたりの流れを体験させた。

演奏実験では、基準音場と音場 $\alpha$ から $\delta$ の違いを評定尺度法による段階評価および自由記述による音場の印象の評価を行い、これを音場 $\alpha$ から $\delta$ すべてについて終えるまで繰り返した。実験全体の流れを表4.1に、実験1条件あたりの流れを表4.2に示す。

### 4.2.2 音場の評価方法

音場の評価は評定尺度法による段階評価と自由記述にて実施した。段階評価に用いた評価項目はGade [21]によりまとめられた演奏家のホールに対する6つの評価項目である、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)を参考に決定した。

響き、自分の音の聞きやすさ、互いの音の聞きやすさに関する評価について、「響きが増えたか」「自分の音の聞きやすさ」「他人の音の聞きやすさ」を「響きの印象に関する項目」として設定した。

音色に関する評価として、本研究では「空間の印象」として具体化し、「空間の広がり」「客席全体に届く感じ」「自分に音が帰る感じ」「音に包まれる感じ」を設定した。また、時差についても空間の広がりを感じさせる要素として、本研究では空間印象に反映されるものとみなした。

ダイナミクスを含めた演奏の印象の評価について、「疲れ感」「強弱の付けやすさ」「アンサンブルのしやすさ」「音が溶け合う感じ」として設定した。

また、総合的な評価として、演奏の完成度自体に対する客観的な視点からの評価として「演奏がうまくいったか」、演奏の巧拙によらない自身の演奏時の感覚に基づく評価として「演奏のしやすさ」を設定した。

段階評価に用いた評価項目および評価尺度を表4.3に示す。また、評定尺度は-3から3までの7段階評価とした。さらに、すべての条件での演奏および評価が終了した後に、自由記述による全体を通じた印象の評価を行った。

表 4.1: 実験全体の流れ

時間	内容
0:00~0:10	説明、同意書およびフェイスシートの記入
0:10~0:25	ウォーミングアップ・音取り・アンサンブル練習・評価練習
0:25~0:30	1回目の演奏実験（基準音場→ $\alpha$ から $\delta$ のうち一つの音場）と評価
0:30~0:35	2回目の演奏実験（基準音場→ $\alpha$ から $\delta$ のうち一つの音場）と評価
0:35~0:40	3回目の演奏実験（基準音場→ $\alpha$ から $\delta$ のうち一つの音場）と評価
0:40~0:45	4回目の演奏実験（基準音場→ $\alpha$ から $\delta$ のうち一つの音場）と評価
0:45~0:50	全体を通した評価
0:50~0:55	回答用紙を回収して終了

表 4.2: 実験 1 条件あたりの流れ

基準音場で演奏	音場 $\alpha \sim \delta$ の いずれかで演奏	響きの印象の変化を評価
1分	1分	3分

表 4.3: 段階評価の評価項目および評定尺度

	評価項目	評定尺度（-3 ~ 3 の 7 段階）
音場の印象	響きが増えたか	減った / 増えた
	自分の音の聴きやすさ	聴きやすくなった / 聽きにくくなかった
	他人の音の聴きやすさ	
空間の印象	空間の広がり	狭くなった / 広くなった
	客席全体に届く感じ	減った / 増えた
	自分に音が返る感じ	
	音に包まれる感じ	
演奏の印象	疲れ感	疲れやすくなった / 疲れにくくなかった
	強弱のつけやすさ	つけやすくなった / つけにくくなかった
	アンサンブルのしやすさ	しにくくなったり / しやすくなったり
	音が溶け合う感じ	減った / 増えた
総合的な印象	演奏がうまくいったか	うまくいかなかった / うまくいった
	演奏のしやすさ	しにくくなったり / しやすくなったり

## 4.3 結果と考察

評定尺度法による段階評価における全被験者 ( $N = 31$ ) の評点平均と標準偏差（エラーバー）を図4.2に示す。また段階評価の各項目について「平均値が0に等しい」ことを帰無仮説とするt検定（両側検定）を行なったところ、いくつかの項目で有意差が検出されたため、 $0.01 \leq p < 0.05$  の項目を\*、 $p < 0.01$  の項目を\*\*として検定結果を図中に併せて示す。

### 4.3.1 全体的な傾向

全体的に評価の平均値は0以上の値になっているが、3.19から3.21に示すように音場 $\alpha$ から $\delta$ の響きはわずかに基準音場よりも増加していることため、このことが影響している可能性がある。しかし $ST_{Early}$ および $ST_{Late}$ は実験音場間での差異が小さく、また残響時間の伸長の程度は音場 $\beta$ で最も大きいにもかかわらず、音場 $\beta$ の評価の平均値は他の音場と比較して低い値となっている。このことから、残響時間の伸長や $ST_{Early}$ 、 $ST_{Late}$ の違いではなく、反射音到来方向の変化が響きの増加感に影響を与えている可能性が示唆される。

全体の傾向として、平均値は1以下と小さい値となった。特に、初期反射音の方向特性に変化を与えた音場 $\alpha$ と音場 $\beta$ ではほとんどすべての評価項目で0.5以下の値となった。初期反射音は0.1 s以内というごく短い時間に到来するため、主観印象への影響は音色の変化として生じることが多く、大きな音色の変化を伴わない方向特性の変化が知覚されにくかったためと考えられる。

### 各評価項目の結果と考察

響きの印象についての三項目のうち、「響きが増えたか」では音場 $\alpha$ 、音場 $\gamma$ 、音場 $\delta$ で基準音場よりも評価が高くなる傾向が見られた。音場 $\beta$ は後方からの初期反射音を増強した音場で、後壁からの初期反射音供給が多い現実の音場を模している基準音場と似通った方向特性となっているが、音場 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$ は方向特性の変化が音場 $\beta$ よりも大きく、音場 $\beta$ の方向特性の変化の小ささが残響時間の伸長の割に響きの増加感に影響を与えたのではないかと考えられる。

また、「自分が発した音の聴きやすさ」についてはいずれの実験音場でも基準音場に対する有意差は検出されなかったが、「他人が発した音の聴きやすさ」については前方からの後期反射音を増強させた音場 $\gamma$ で評価が高くなった。このことから、前方からの後期反射音の増強が他人の音の聴きやすさに対して有意な影響を与えることが示唆される。

空間の印象について、「空間の広がり」「客席全体に届いている感じ」で音場 $\gamma$ の評価が高くなかった。音場 $\gamma$ は前方からの後期反射音を増強させた音場で、前方からの後期反射音の増強が空間の広がりや客席全体に届いている感じに対して有意な影響を与えることが示唆される。

演奏の印象について、「疲れ感」の評価については、平均値はほぼ0であり、また標準偏差もたの評価項目に比べて比較的小さい値となっており、方向特性による影響はほとんどないと考えられる。響きの印象および空間の印象においても評価の高い傾向が見られた音場 $\gamma$ では、「強弱のつけやすさ」「アンサンブルのしやすさ」においても評価が高く、前方からの後期反射音が演奏者にとって好ましい変化をもたらすことが示唆される。また、「アンサンブルのしやすさ」では後方からの後期反射音を増強した音場 $\delta$ でも有意差が検出された。

総合的な評価については有意差は検出されず、上述した評価が演奏の巧拙や主観的な好みによらないことが示唆された。

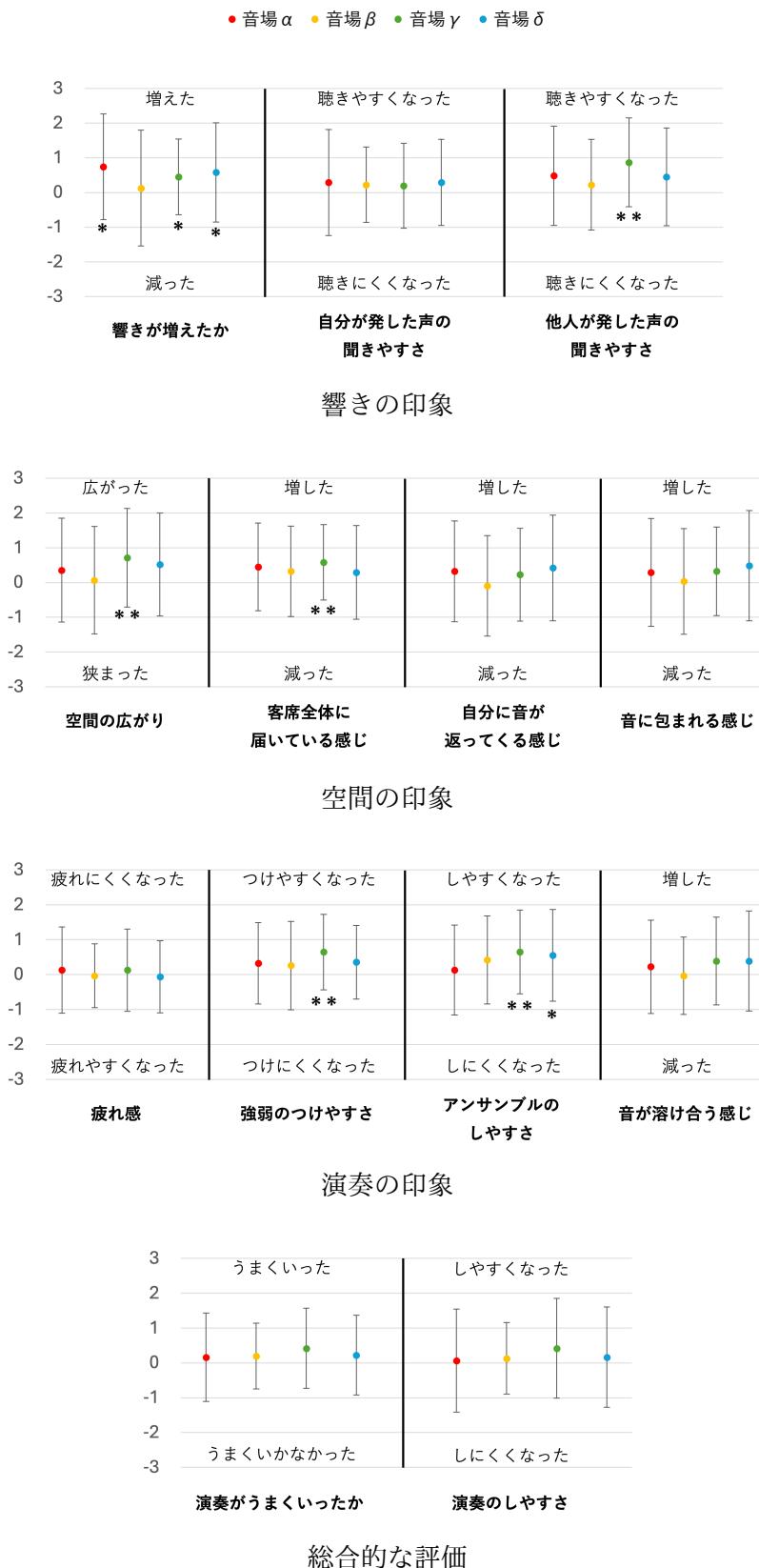


図 4.2: 評定尺度法による段階評価の平均値と標準偏差 (\* p &lt; 0.05      \*\* p &lt; 0.01)

### 4.3.2 パートによる評価の違い

本実験では、演奏時の条件を現実的な条件に近いものとするため、標準的な混声四部のカルテットの並び順に倣い、舞台下手側と想定したからソプラノ・アルト・テノール・バスの順の並びとした。演奏者のパートにより、自身の音域や立ち位置、アンサンブルにおける音楽上の役割が異なっているため、パートによって評価に異なった傾向が現れる可能性がある。そこで、パートによる評価の違いを調べるため、パートごとの評点平均と標準偏差を計算した。この結果を図4.3から図4.6に各音場ごとに示す。

段階評価の各項目について「平均値が0に等しい」ことを帰無仮説とするt検定（両側検定）を行なったところ、いくつかの項目で有意差が検出された。また、同一の音場での同一の評定項目に対するすべてのパートの組み合わせについて、「評定平均が等しい」ことを帰無仮説とするステューデントのt検定を行なったところ、いくつかの項目で有意差が検出された。これらの検定結果について、 $0.01 \leq p < 0.05$  の項目を\*、 $p < 0.01$  の項目を\*\*として図中に併せて示す。

#### 初期反射音に関する評価

全体での評価において、初期反射音の方向特性に変化を与えた音場 $\alpha$ と音場 $\beta$ ではほとんどすべての評価項目で0.5以下の値となっていた。パートごとの評価をみた場合であっても、音場 $\beta$ への評価で有意差が検出された項目は「他人が発した音の聴きやすさ」に対するバスパートの評価のみであり、後方からの初期反射音の供給量の変化はどのパートに対しても顕著な聴感印象の変化を与えないことが示唆される。一方で、音場 $\alpha$ に対する評価では、「アンサンブルのしやすさ」「響きが溶け合う感じ」「演奏がうまくいったか」「演奏のしやすさ」の評価項目にてパート間の有意差が検出され、これらのいずれの評価項目でもソプラノ・テノールからの評価が高く、アルト・バスからの評価が低くなる傾向が見られ、前方からの初期反射音の供給量の変化がパート間の感じ方の差異を生じさせたことが示唆された。

#### 後期反射音に関する評価

全体での評価において、「他人が発した音の聴きやすさ」「空間の広がり」「客席全体に届いている感じ」「強弱のつけやすさ」「アンサンブルのしやすさ」で高い評価を得た音場 $\gamma$ は、これ以外の評価項目も含め、多くの評価項目において、ソプラノ・バスからの評価が高く、アルト・テノールからの評価が低くなる傾向が見られた。逆に、音場 $\delta$ では、多くの評価項目においてソプラノ・バスからの評価は低く、テノール・アルトからの評価が高くなる傾向が見られた。これにより、後期反射音の方向特性は、その偏りが前後のどちらであっても各演奏者に対して何らかの差異を感じさせている可能性が高いことが示唆された。

パートごとの評価の傾向の違いを生じさせる原因についてさらに考察するため、次節にて個人の評価を散布図としてプロットして検討する。

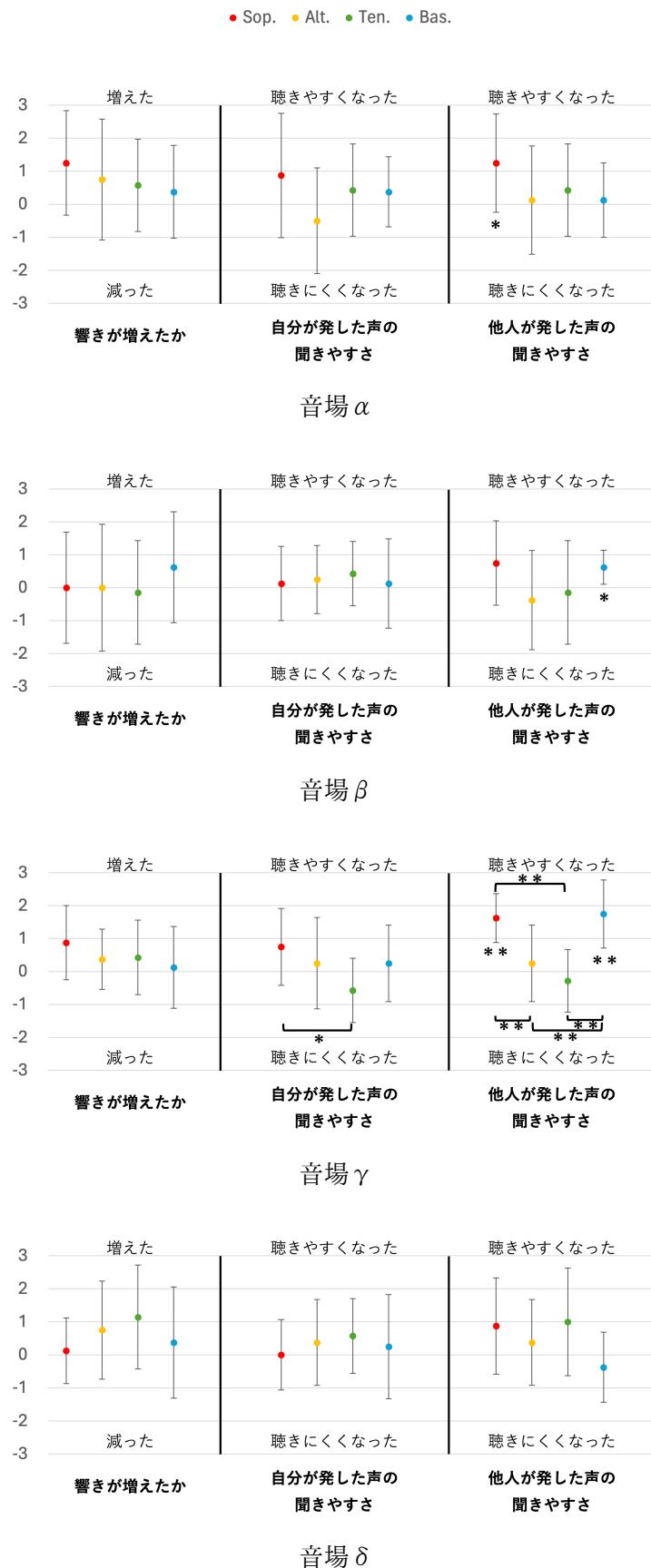


図 4.3: パートごとの響きの印象に関する評価

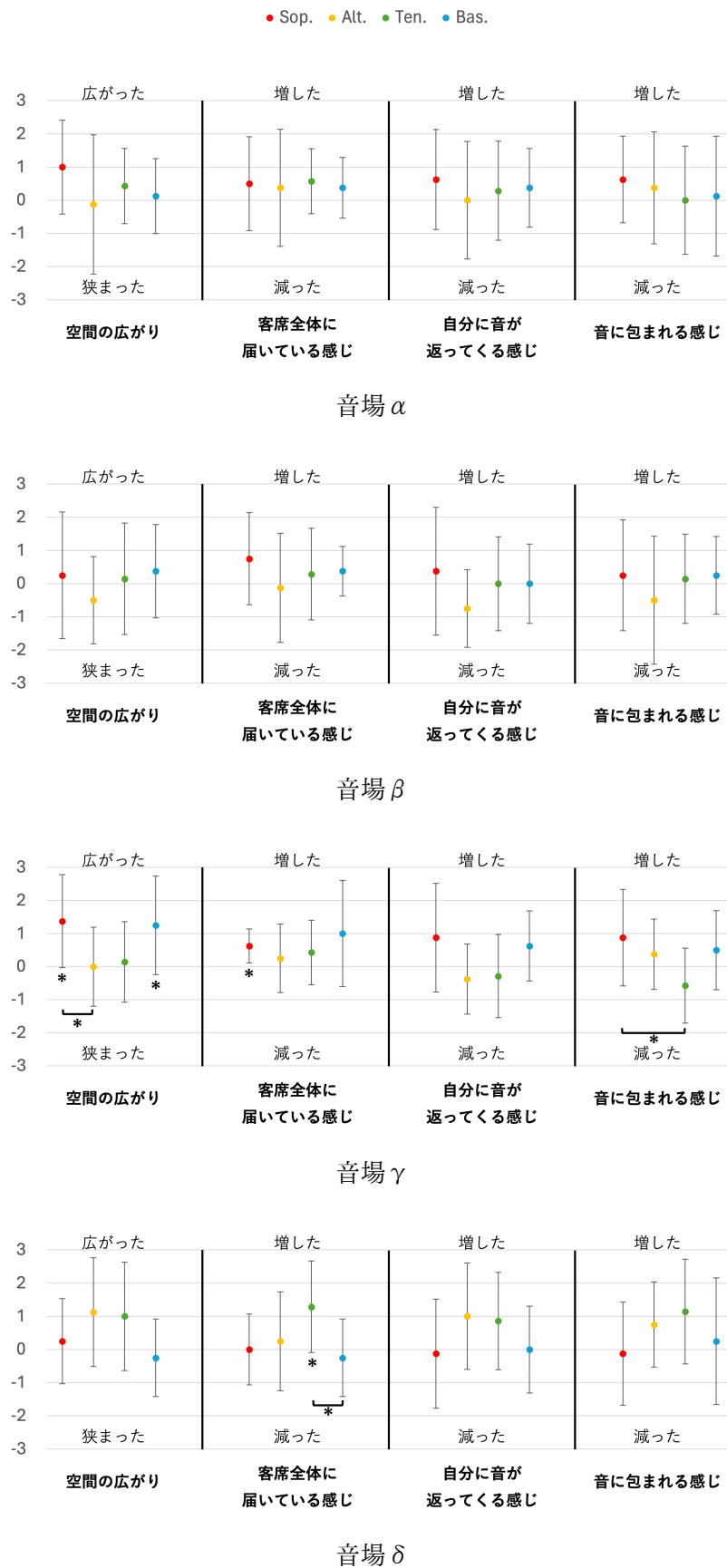


図 4.4: パートごとの空間の印象に関する評価

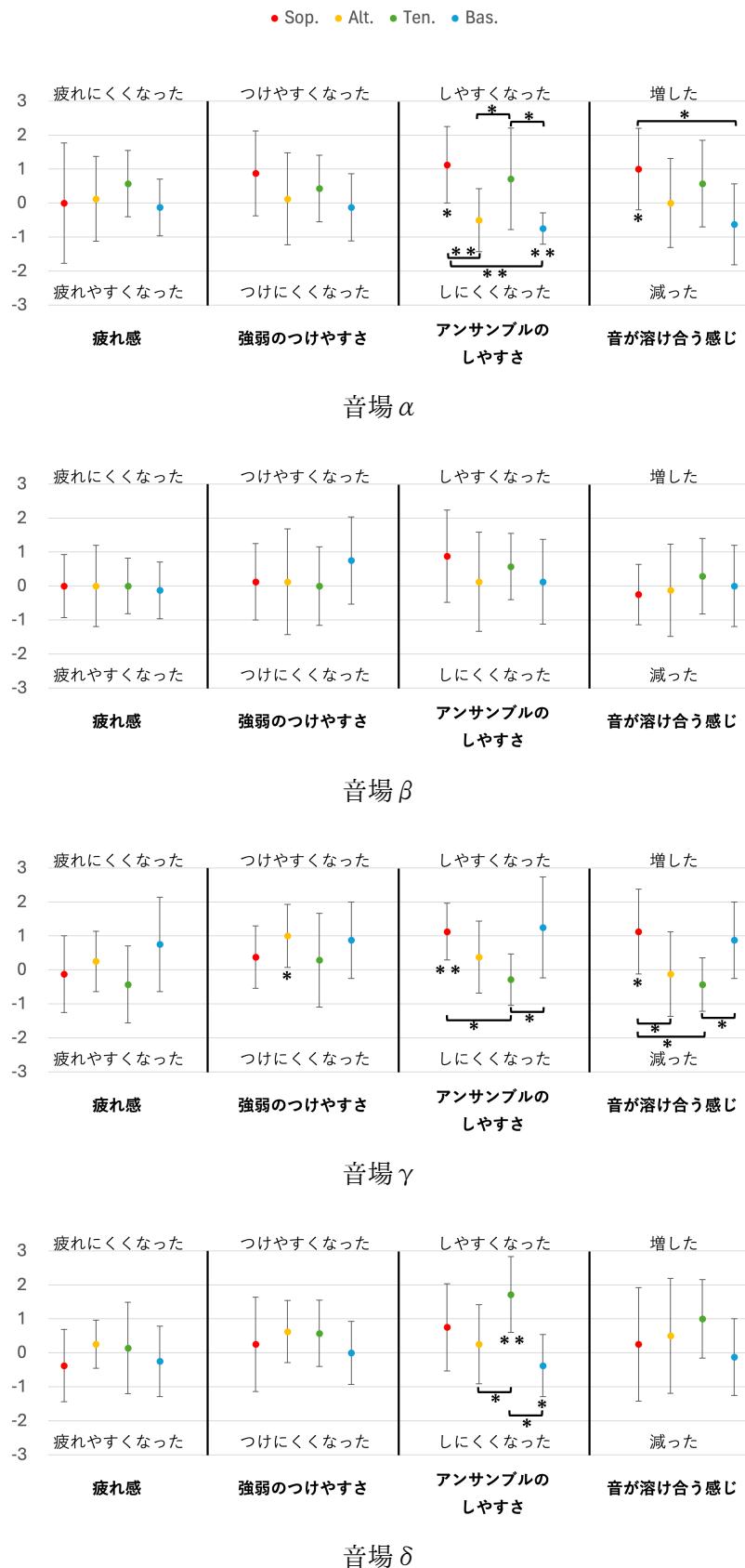


図 4.5: パートごとの演奏の印象に関する評価

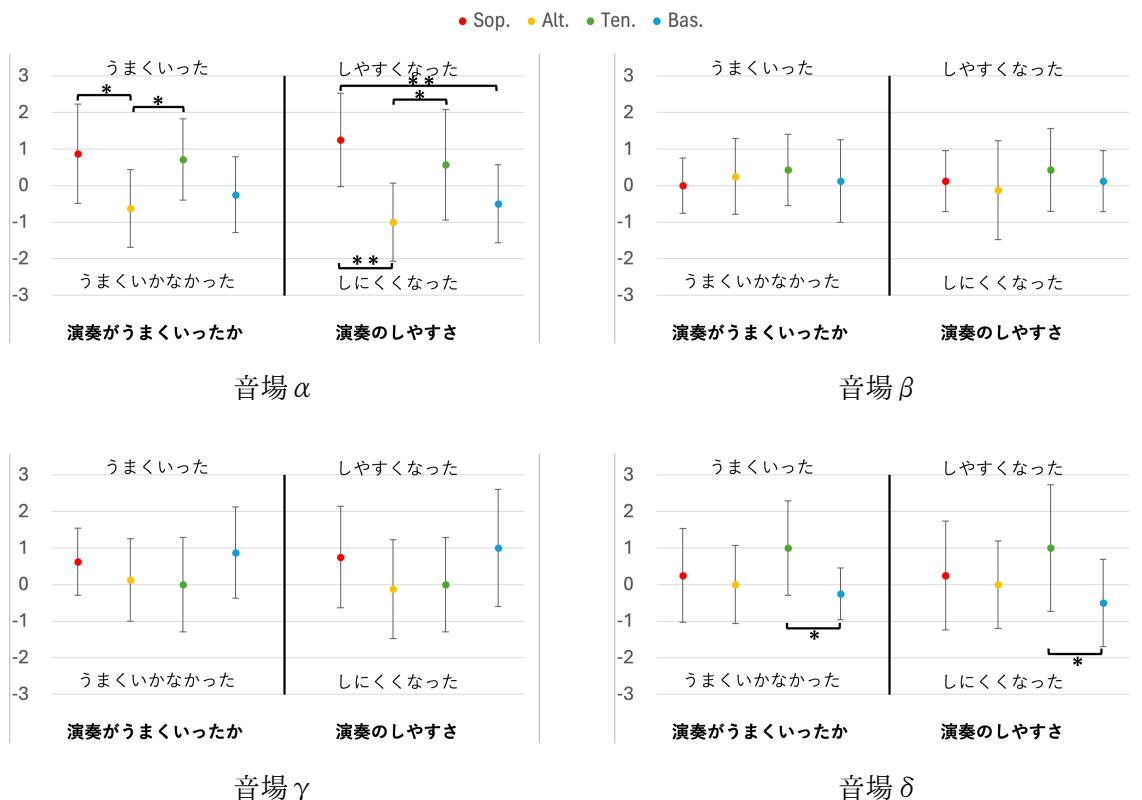


図 4.6: パートごとの総合的な評価

### 4.3.3 散布図を用いた検討

いずれの評価項目においても標準偏差は1以上と大きく、個人間での音場の評価のばらつきが大きい。そこで、個々人の評価を散布図としてプロットし、評価の傾向について検討する。

#### 初期反射音の方向特性による響きの印象の変化

自他の声の聴きやすさについて、ソプラノの一部の被験者が高い評価をしているほかは、評価は概ね中央付近に集まっており、音場間での差異は見られなかった。音場 $\alpha$ は響きが増えたと回答している被験者が多く、前方からの初期反射音供給が響きの増加感を与えていていると考えられる。

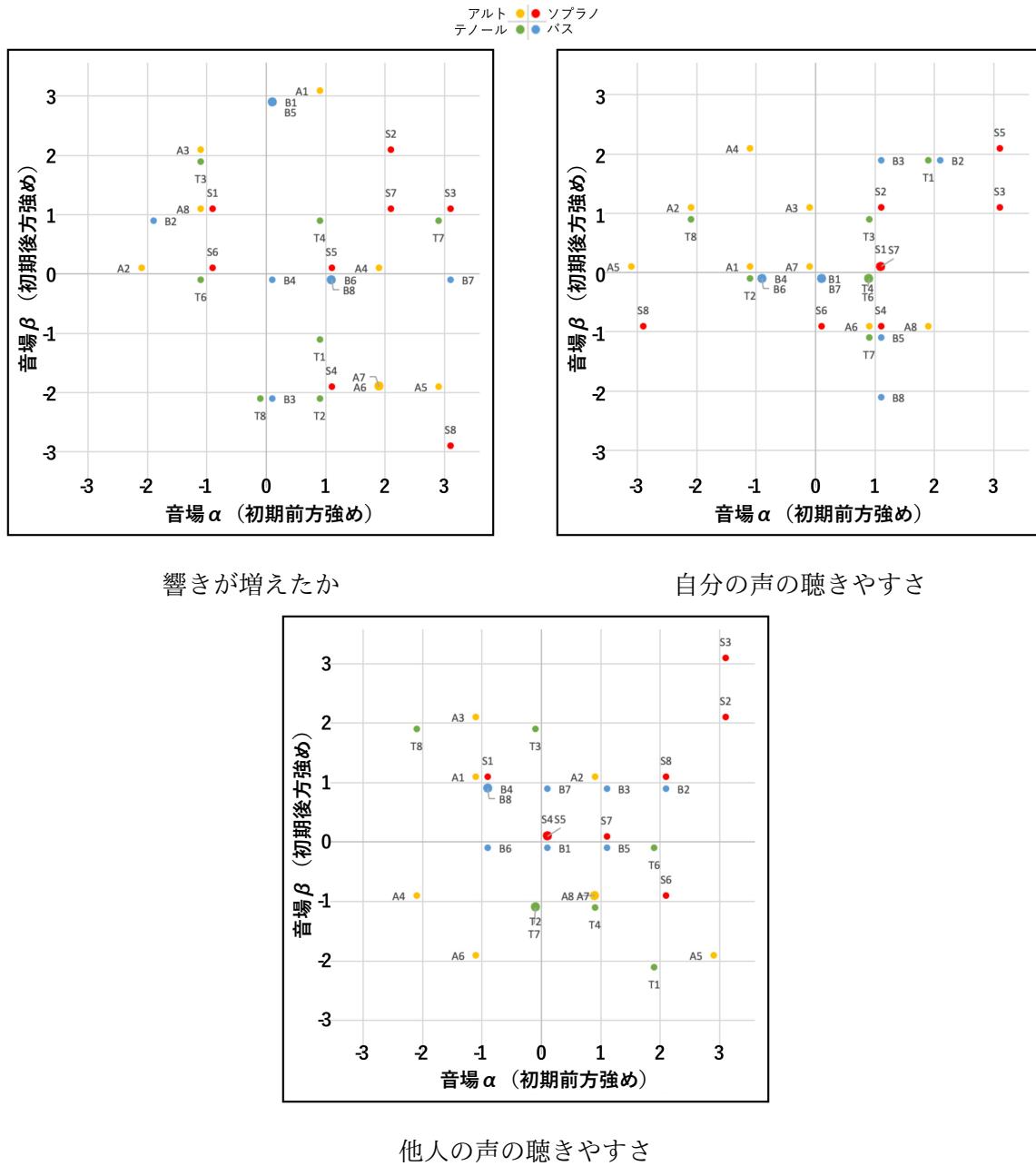


図 4.7: 韶きの印象に関する評価の散布図

## 初期反射音の方向特性による空間の印象の変化

いずれの評価項目でも、被験者の評価は広く分布しており、初期反射音の方向特性は空間の印象に対して個人差を生じさせる要因であると考えられる。また、「空間の広がり」については音場 $\alpha$ に対するソプラノの評価が高い傾向にあった。初期反射音の供給のためにソプラノ側のスピーカーからの音が増幅されている可能性があり、そうであれば、そのことが空間の広がりに対して有意な影響を与えている可能性が大いに考えられる。

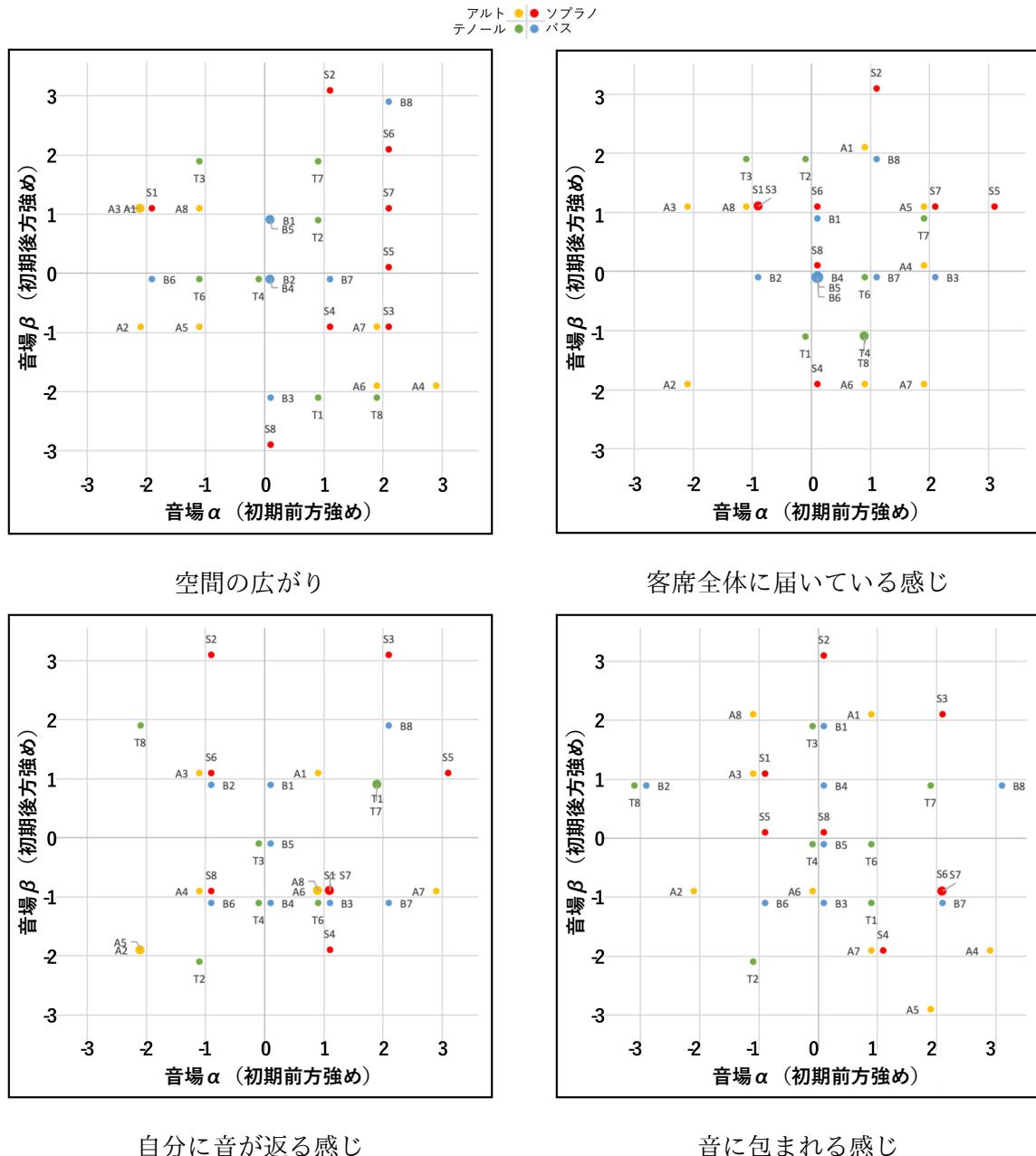


図 4.8: 空間の印象に関する評価の散布図

## 初期反射音の方向特性による演奏の印象の変化

空間の印象に関する評価項目では被験者が広く分布していたのに対し、演奏の印象に関する評価項目では被験者の評価は中央付近に集中している傾向が見られた。演奏の印象に対する初期反射音の方向特性による影響は多くの演奏者にとって共通して小さい傾向にあると考えられる。「疲れ感」については被験者のばらつきが特に小さく、初期反射音の方向特性による影響はほとんどないと考えられる。

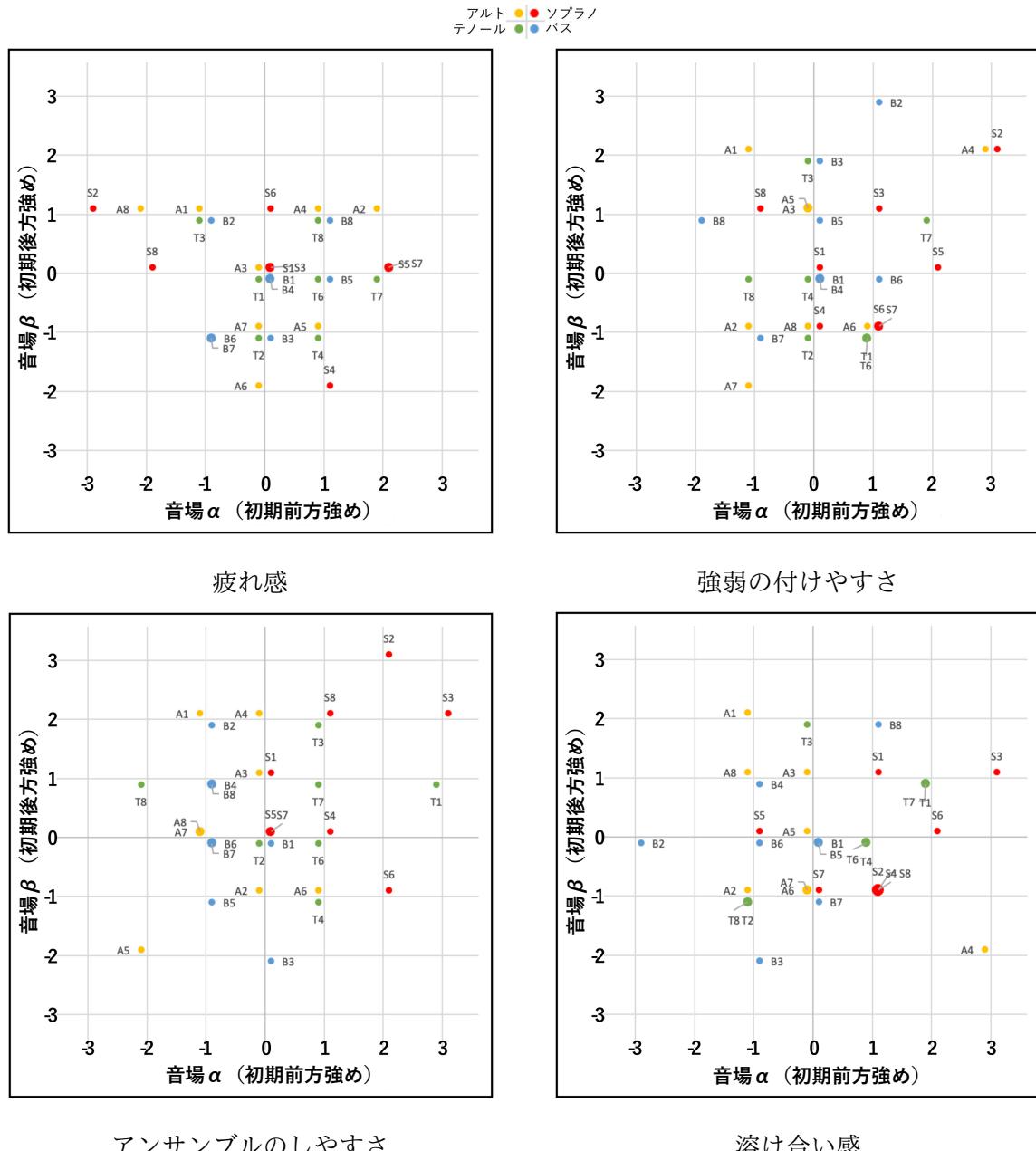


図 4.9: 演奏の印象に関する評価の散布図

## 初期反射音の方向特性による総合的な評価の変化

「演奏がうまくいったか」「演奏のしやすさ」のどちらの項目でも、音場 $\beta$ の評価は0付近に集中しているのに対し、音場 $\alpha$ の評価は広く分布していた。音場 $\alpha$ の評価において、ソプラノの評価が高くアルトの評価が低い傾向はある程度はっきりと見られた一方で、テノールとバスのばらつきの傾向はあまり顕著でなかった。

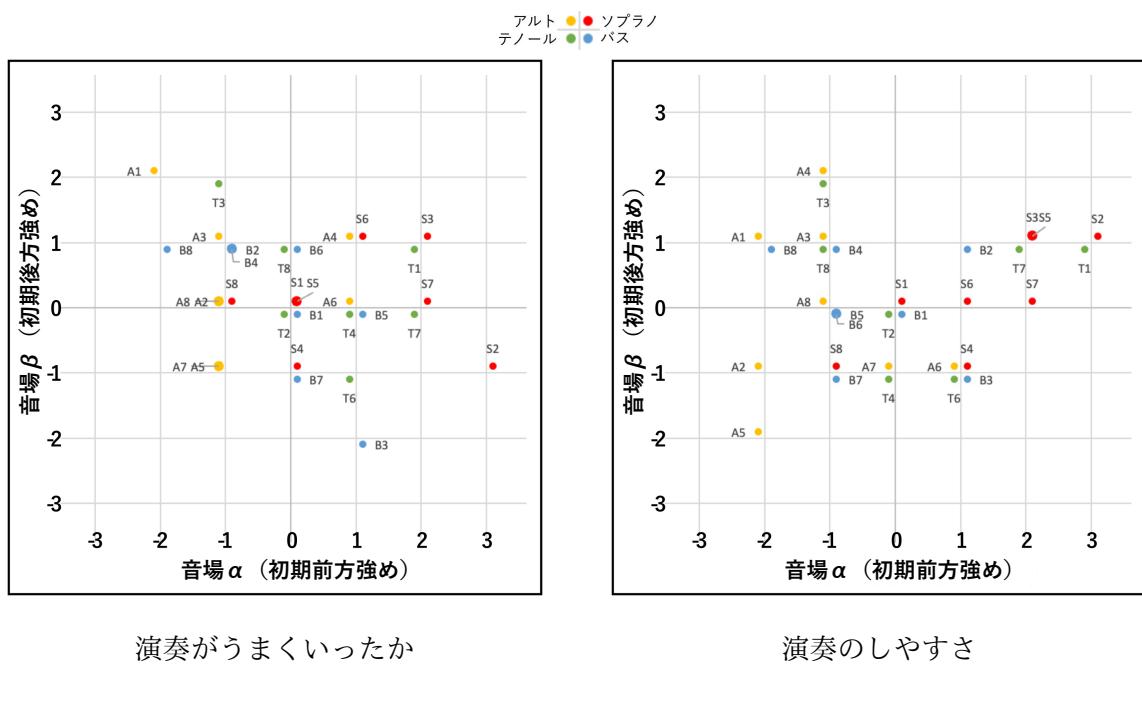


図 4.10: 総合的な評価の散布図

## 後期反射音の方向特性による響きの印象の変化

「響きが増えたか」の評価項目では、音場 $\delta$ の評価が全体的に高くなかった。また、「他人の声の聞きやすさ」では、音場 $\gamma$ 、音場 $\delta$ とともに評価が全体的に高くなっている。 $ST_{Late}$ と残響時間は音場 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$ で大きく異なっていないため、これらの評価の向上は後期反射音の方向特性によるものと考えられ、後方からの後期反射音供給の増加が響き感や他人の声の聞きやすさを向上させ、また前方からの後期反射音供給の増加も他人の声の聞きやすさを向上させることが示唆される。

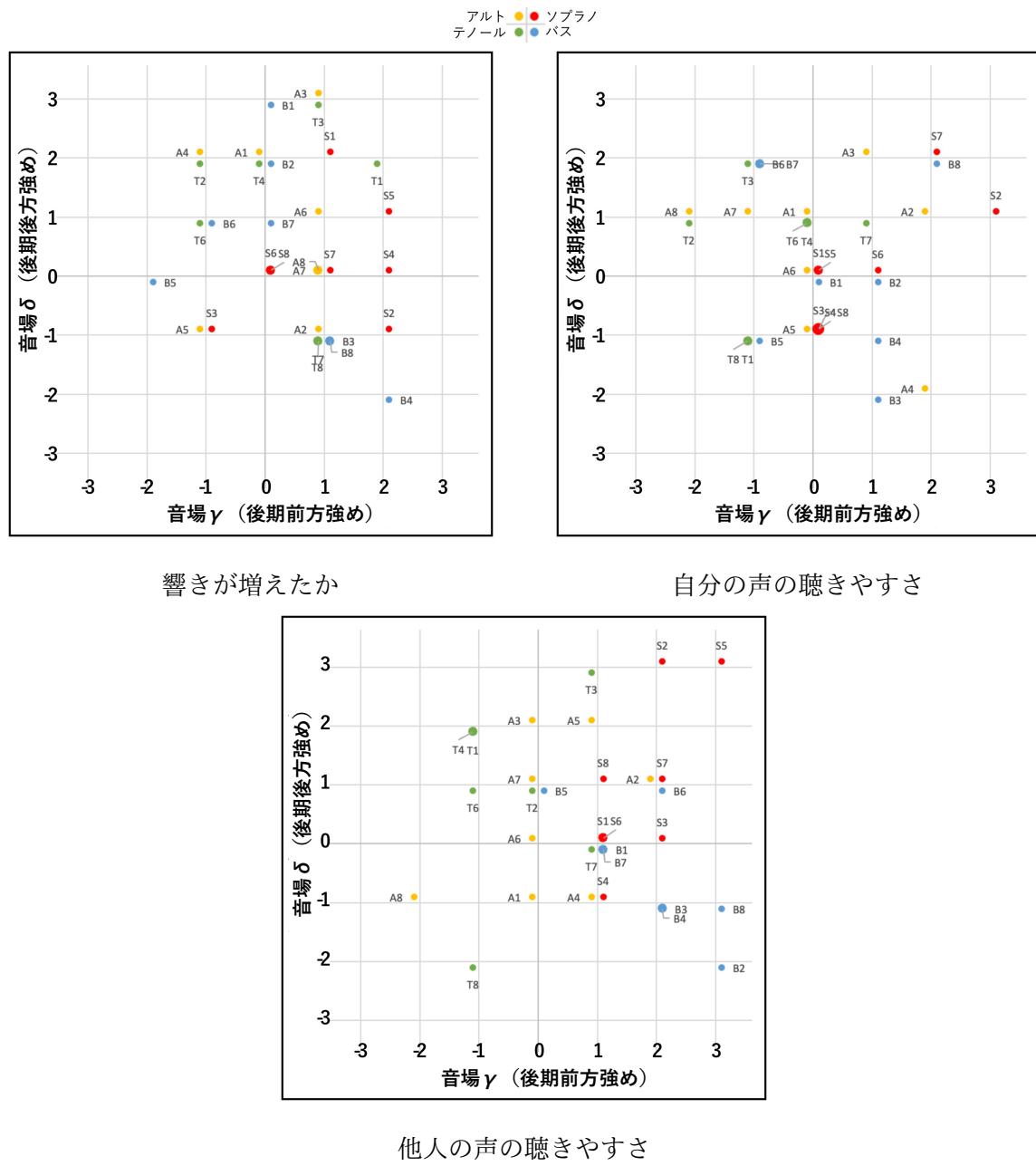


図 4.11: 韶きの印象に関する評価の散布図

## 後期反射音の方向特性による空間の印象の変化

「自分に音が返る感じ」「音に包まれる感じ」の2項目では、散布図に負の相関が見られた。音場 $\gamma$ を高く評価した被験者の自由記述を見ると、「客席で聞こえる音をモニターしているよう」「残響が前に伝わる感触があった」などの客席での聴こえ方や客席への届き方を意識した記述が見られた。一方、音場 $\delta$ を高く評価した被験者では、「響きの残り具合がホールっぽい」「周囲からの反響をよく聴けた」「他パートの声がよく聴こえた」といったステージ上の自分の周囲の音に対する意識からくる記述が見られた。これらの記述から、ここでの評価傾向の差異は被験者ごとの意識の置き方の差異に起因している可能性が示唆される。

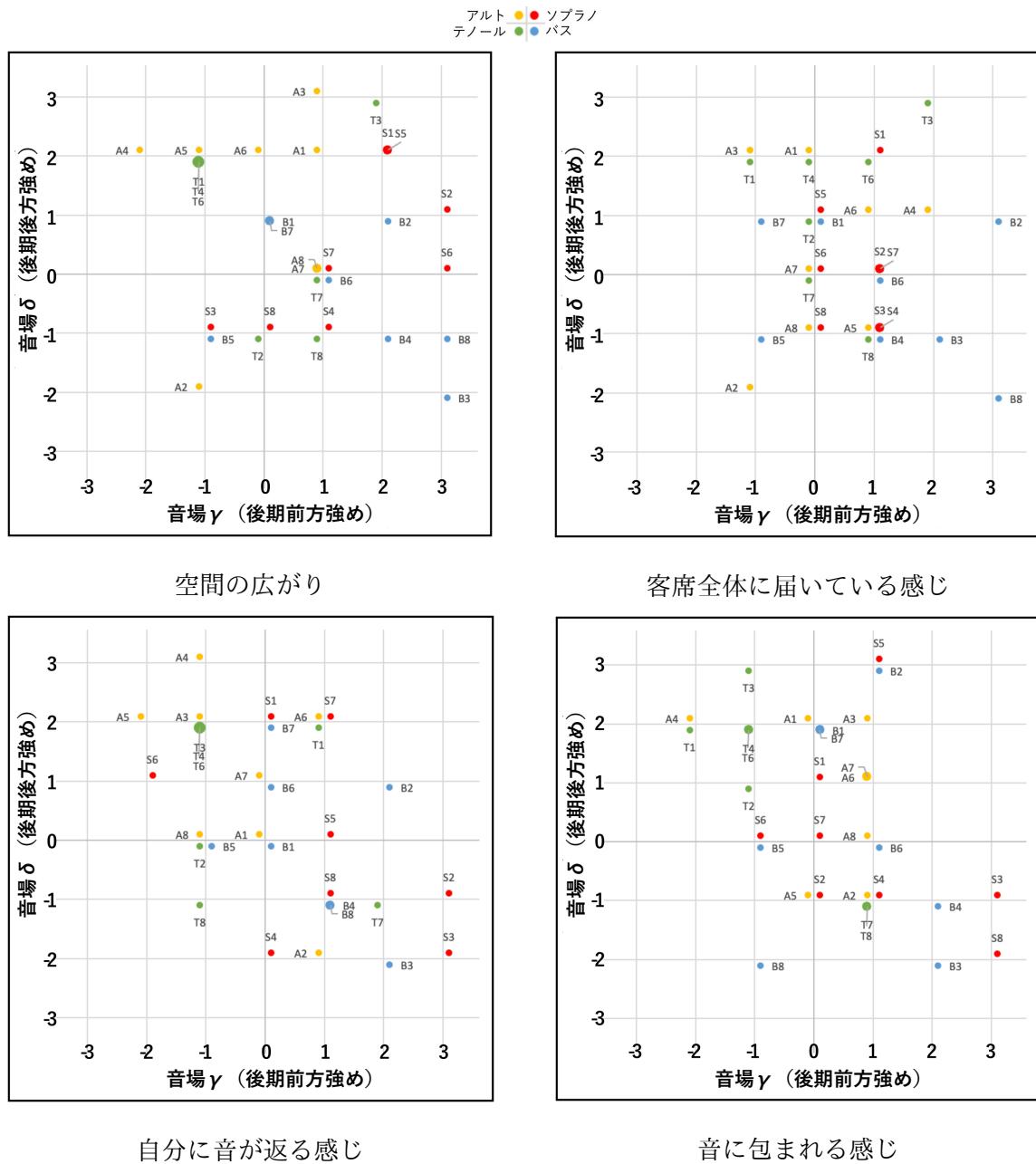


図 4.12: 空間の印象に関する評価の散布図

## 後期反射音の方向特性による演奏の印象の変化

「疲れ感」については、音場 $\gamma$ 、 $\delta$ ともに評価が0付近に集中していた。この傾向は初期反射音の方向特性を変化させたときも同様であり、疲れ感に対する反射音の方向特性による影響はほとんどないと考えられる。「強弱の付けやすさ」「アンサンブルのしやすさ」2項目については、評価が散布図の右上に寄っている傾向が見られ、後期反射音の前方・後方いずれの供給量の増加も演奏の印象を向上させる可能性があることが示唆された。しかし、この2項目と「溶け合い感」を合わせた3項目では、音場 $\gamma$ と音場 $\delta$ の両方を高く評価した人は多くなく、多くの被験者が音場 $\gamma$ と音場 $\delta$ のいずれか一方を高く評価していた。

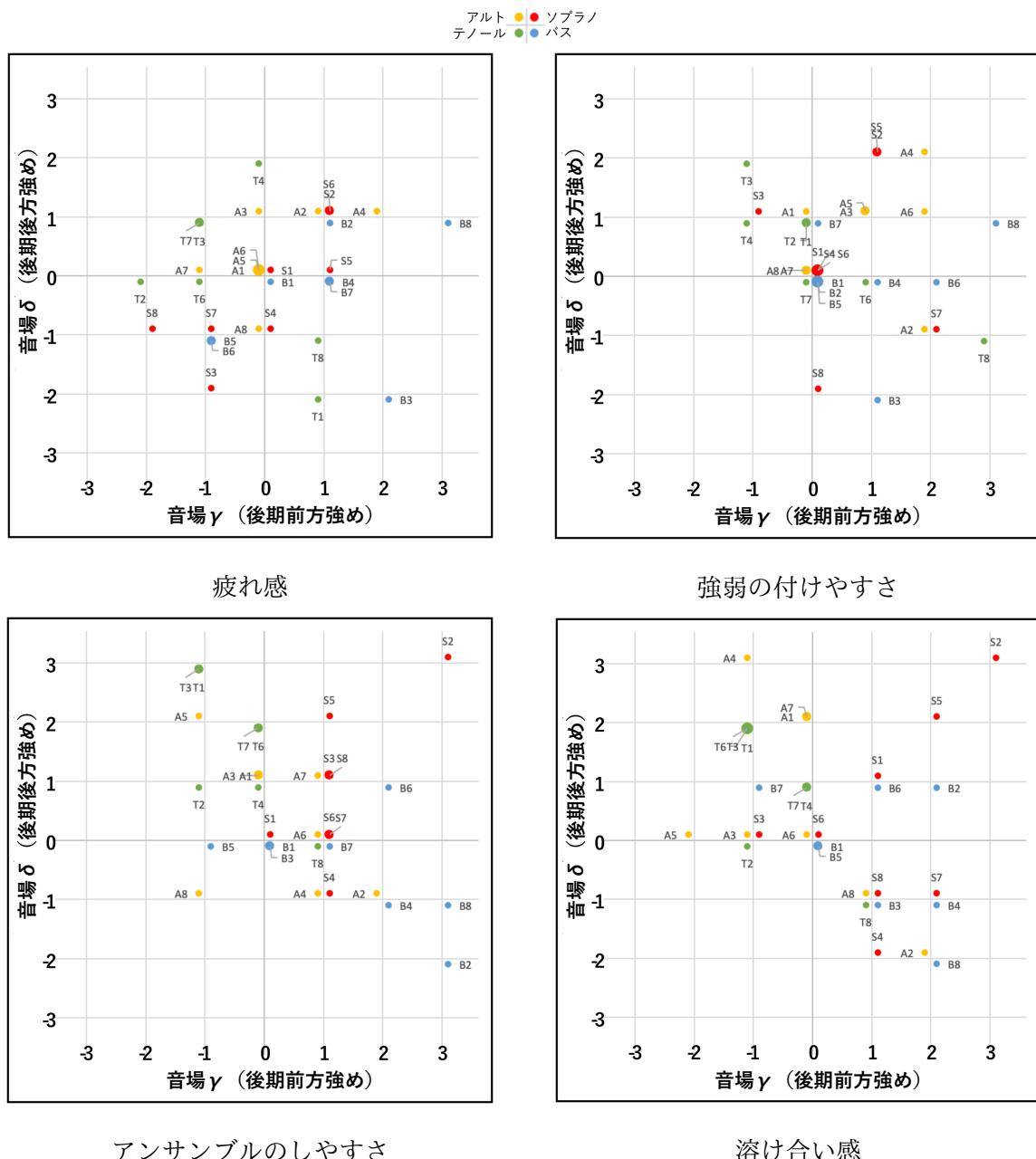


図 4.13: 演奏の印象に関する評価の散布図

## 後期反射音の方向特性による総合的な評価の変化

「演奏がうまくいったか」の項目については、音場 $\gamma$ 、 $\delta$ ともに変化を少ないとした回答が多く、演奏者自身が環境に応じて演奏することに慣れています。一方で「演奏のしやすさ」には音場 $\gamma$ 、 $\delta$ ともに評価にはばらつきが大きかった。特に音場 $\gamma$ では評価の平均値が高いことから、後期残響音の前方からの供給量が大きい音場が好まれることが示唆された。

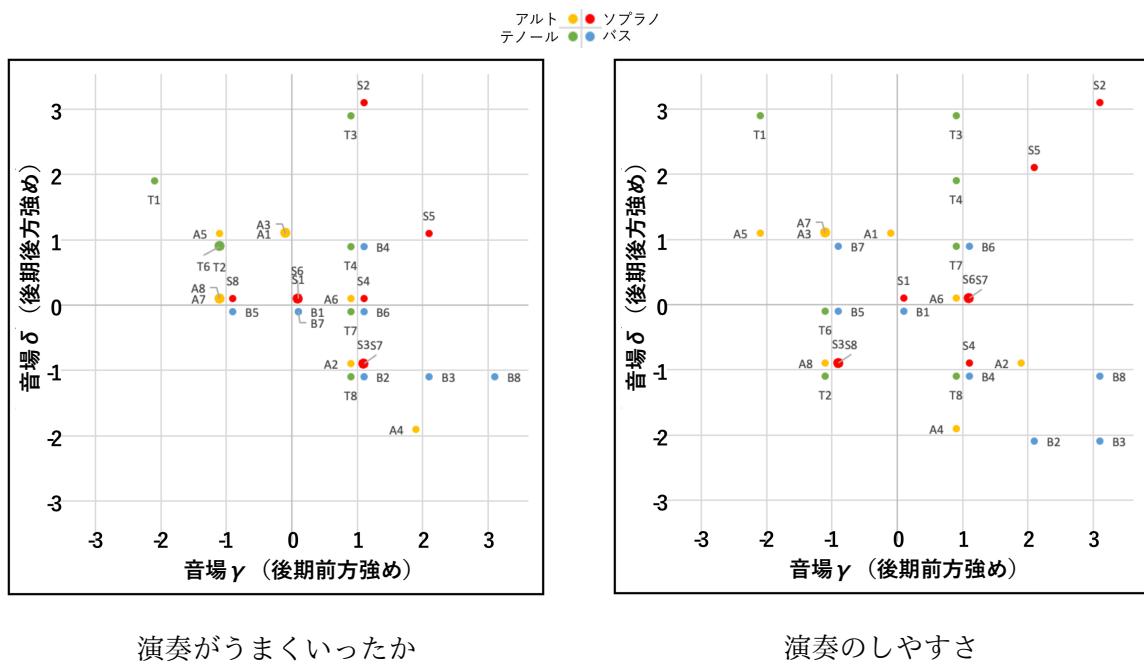


図 4.14: 総合的な評価の散布図

# 第5章 おわりに

## 5.1 まとめ

本研究では、コンサートホールのステージ上への反射音の到来方向を評価する物理指標を構築し、その実測結果をもとに音場の生成を行い、反射音の到来方向特性が合唱者に与える影響について検討を行うことを目的とした。

第1章では、研究の背景としてコンサートホールとその研究について概観し、コンサートホール音響学の一領域であるステージ音響学と、特に反射音の方向特性に関する既往研究について整理した。さらに、本研究の目的として反射音到来方向が演奏者に与える影響について検討することを述べ、また本研究で用いる実験システムである AFC について簡単に紹介した。

第2章では、反射音の到来方向について物理的に評価する方法として方向別 ST を提案し、コンサートホールにおいてその実測を行なった。その結果から、 $ST_{Early,dir}$  は、全ホールに共通して方向別の偏差が見られ、特にすべての前方の値が相対的に低く、壁面側で値が大きくなっているのに対し、 $ST_{Late,dir}$  は方向的に拡散しており、方向別の偏差が小さいことを示した。また、ISOにおける測定条件の範囲であっても、壁面の付近では 10~20 ms に到来するエネルギーが反射音のエネルギーのうちで支配的であることを示し、方向別 ST の評価では標準的な演奏位置でもある舞台中央・前方付近での測定値を用いて評価することとした。さらに、これらの測定結果を踏まえて、演奏実験を行うための生成音場の目標値を設定した。

第3章では、本研究で用いた音場生成システムである AFC の仕組み、およびそれを導入した実験室のシステム機器構成について説明し、AFC を用いた音場の生成方法と生成された音場の音響特性について述べた。また、AFC における調整項目や本研究において用いた設定値についても示した。

第4章では、第3章で得られた音場を用いて、混声四部のカルテットによる演奏実験を行い、その方法、結果および考察について示した。その結果、被験者ごとの評価の個人差が大きい中でも、全体的な傾向として、後期反射音の前方から供給量の増加が演奏の印象を、後方からの供給量の増加が響きと空間の印象を向上させる可能性を示唆した。

## 5.2 今後の展望

実際のコンサートホールにおける後期反射音はほとんど拡散しており、建築的な手法で到来方向の偏りを大きくすることは容易ではないと考えられる。しかし、本研究で用いた AFC のような自然な響きを付加することのできる電気音響設備を用いて方向特性に偏りのある後期反射音を演奏者に対して供給することは可能である。ステージ付近には演奏音を収集するためのマイクロホンが置かれており、ステージ上への反射音供給がハウリングやカラレーションの原因になる場合を避けるため、現在では AFC を用いた反射音成分の付加の多くは客席に対して行われているが、ステージ上にも電気音響設備による反射音成分を演奏者に対して積極的に供給することで、演奏者にとってより好ましい音環境を作ることができるようになる可能性がある。

また、本研究において、AFCの調整の仕方を工夫することにより所望の音場をある程度自由に生成することができた。音響指標値を制御した音場を自由に生成できれば、演奏実験はもちろん、AFCを用いて様々な建築音環境に関する主観評価実験を行うことができる可能性がある。そのような用途でAFCを用いることを考える場合、現時点ではAFCの調整はその大部分を手動のパラメータ調整に頼っており、物理音響指標値等を所望の値に調整して音場を生成することは容易ではないことが課題としてあげられるが、モデルベースド制御とモデル上でのAFCのパラメータの探索および最適化等を行うことで、現在手動で調整しているAFCのパラメータを自動で調整することができるようになる可能性がある。

## 付録A 演奏実験の資料

被験者実験に用いた資料を以下に示す。

1. フェイスシート
2. アンケート用紙
3. 研究参加同意書
4. 演奏実験使用楽譜
5. 演奏実験教示資料

## フェイスシート

記入日 年 月 日

・ 氏名 : \_\_\_\_\_

・ 性別 : 男 ・ 女 ・ その他

・ 年齢 : \_\_\_\_\_ 歳

・ 職業 : \_\_\_\_\_

・ 自身のパート : \_\_\_\_\_

・ 声楽経験 : 有 ・ 無

(目安: ソリストとしての指導を受け、本番を経験したことがある)

・ ホールでの演奏経験 : 約 \_\_\_\_\_ 回

・ 過去に演奏したホールとおおよその規模について

(例: ○○ホール ○○席)



ご協力ありがとうございます。

いただいた個人情報は本研究のみに使用し、第三者に開示することはありません。

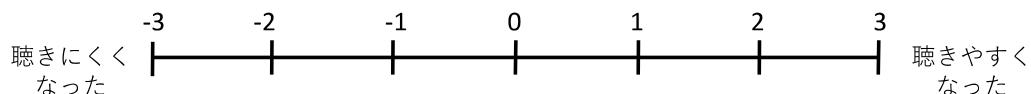
## アンケート①<例題>

はじめに演奏した音場と比較して、現在の音場で演奏をした際の評価を丸印でお願いいたします。

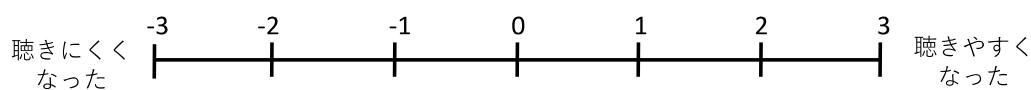
### ・響きが増えたか



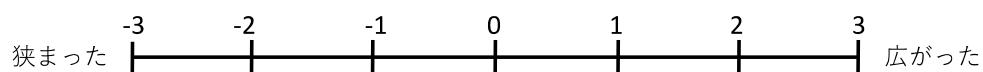
### ・自分の発した声の聞きやすさ



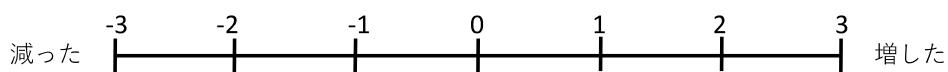
### ・他人の発した声の聞きやすさ



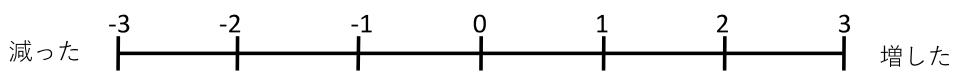
### ・空間の広がり



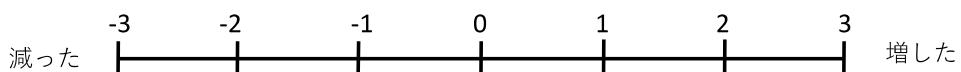
### ・客席全体に届いている感じ



### ・自分に音が返ってくる感じ



### ・音に包まれる感じ



次ページに続く

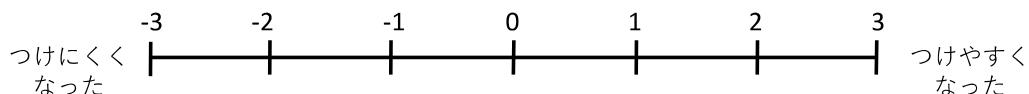
## アンケート①<例題>

はじめに演奏した音場と比較して、現在の音場で演奏をした際の評価を丸印でお願いいたします。

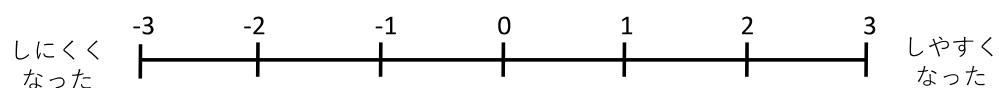
### ・疲れ感



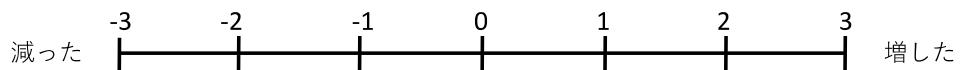
### ・強弱のつけやすさ



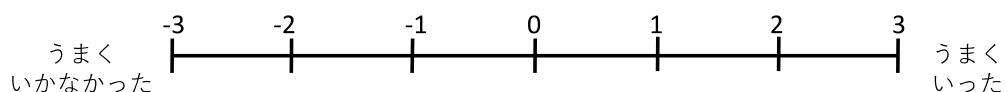
### ・アンサンブルのしやすさ



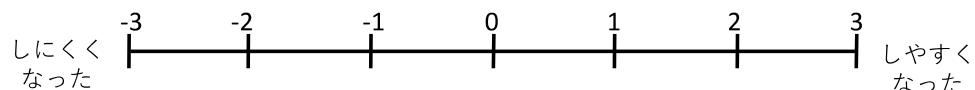
### ・音が溶け合う感じ



### ・演奏がうまくいったか



### ・演奏のしやすさ



### ・その他、感じたこと、思ったこと（響きの印象や演奏時の感想等）

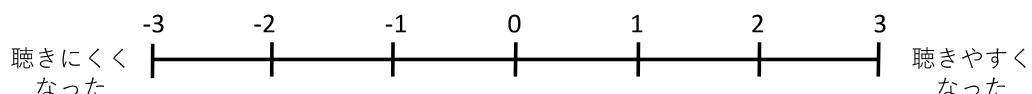
## アンケート①<パターン1>

はじめに演奏した音場と比較して、現在の音場で演奏をした際の評価を丸印でお願いいたします。

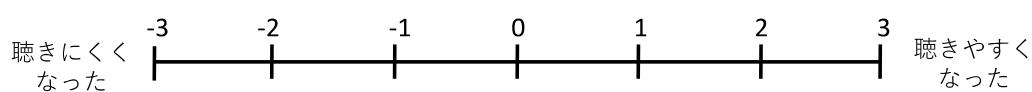
・響きが増えたか



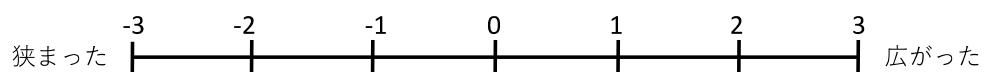
・自分の発した声の聞きやすさ



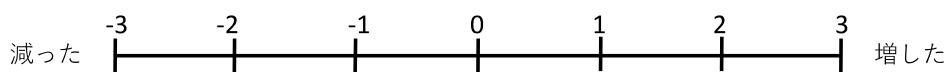
・他人の発した声の聞きやすさ



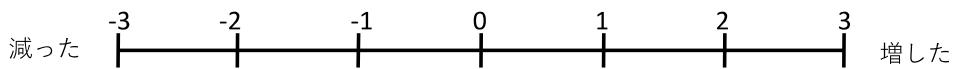
・空間の広がり



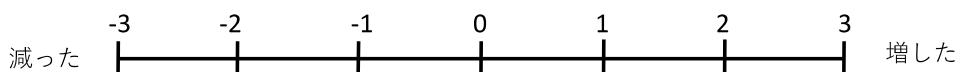
・客席全体に届いている感じ



・自分に音が返ってくる感じ



・音に包まれる感じ



次ページに続く

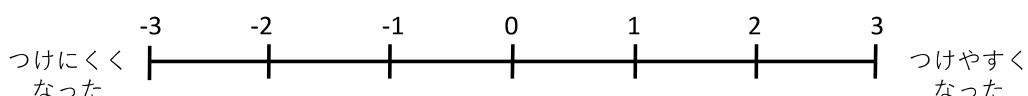
## アンケート①<パターン1>

はじめに演奏した音場と比較して、現在の音場で演奏をした際の評価を丸印でお願いいたします。

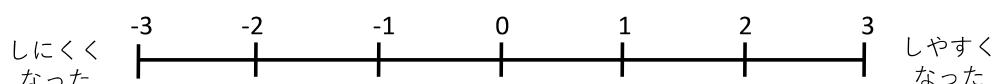
### ・疲れ感



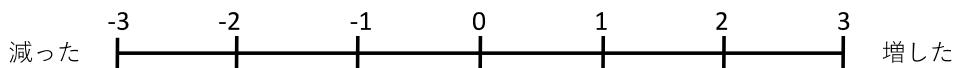
### ・強弱のつけやすさ



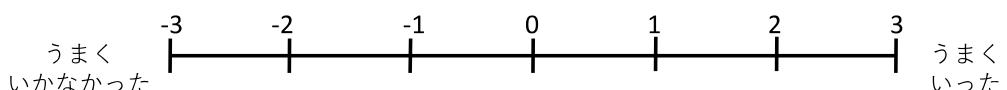
### ・アンサンブルのしやすさ



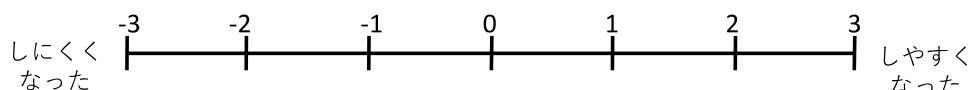
### ・音が溶け合う感じ



### ・演奏がうまくいったか



### ・演奏のしやすさ



### ・その他、感じしたこと、思ったこと（響きの印象や演奏時の感想等）

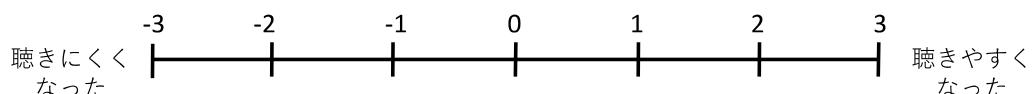
## アンケート①<パターン2>

はじめに演奏した音場と比較して、現在の音場で演奏をした際の評価を丸印でお願いいたします。

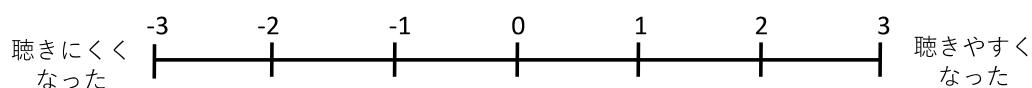
### ・響きが増えたか



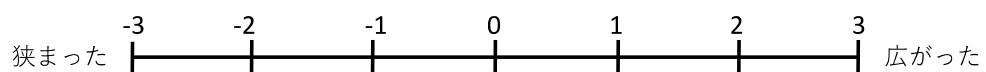
### ・自分の発した声の聞きやすさ



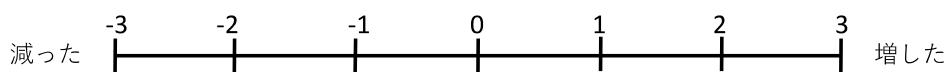
### ・他人の発した声の聞きやすさ



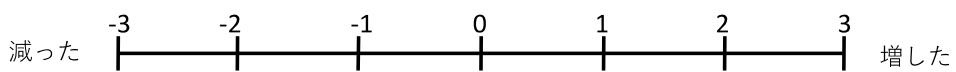
### ・空間の広がり



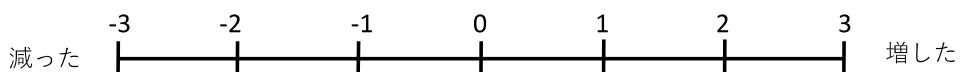
### ・客席全体に届いている感じ



### ・自分に音が返ってくる感じ



### ・音に包まれる感じ

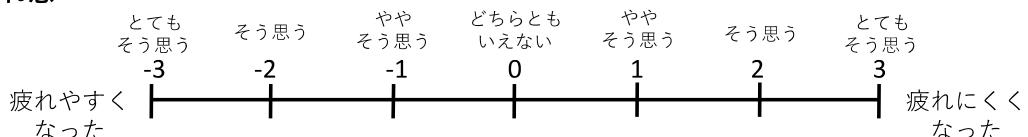


次ページに続く

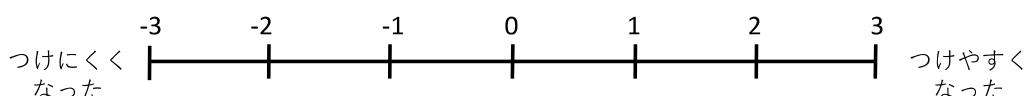
## アンケート①<パターン2>

はじめに演奏した音場と比較して、現在の音場で演奏をした際の評価を丸印でお願いいたします。

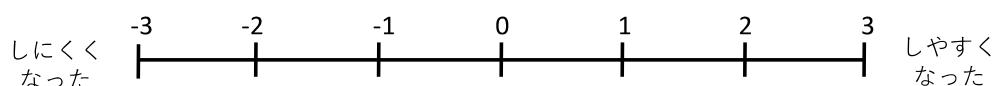
### ・疲れ感



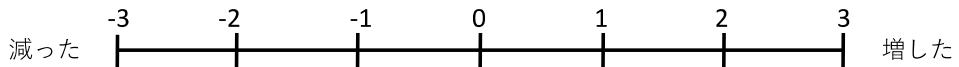
### ・強弱のつけやすさ



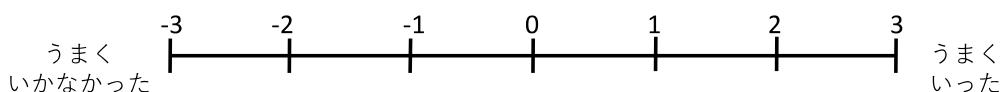
### ・アンサンブルのしやすさ



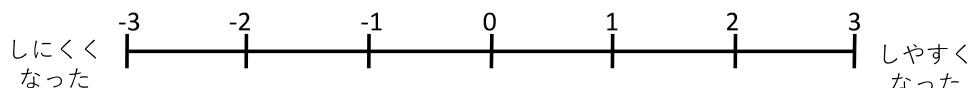
### ・音が溶け合う感じ



### ・演奏がうまくいったか



### ・演奏のしやすさ



### ・その他、感じしたこと、思ったこと（響きの印象や演奏時の感想等）

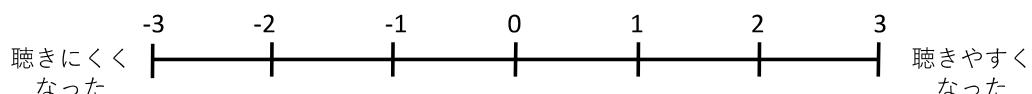
## アンケート①<パターン3>

はじめに演奏した音場と比較して、現在の音場で演奏をした際の評価を丸印でお願いいたします。

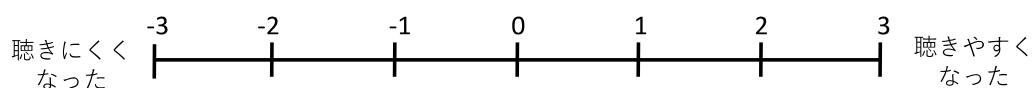
### ・響きが増えたか



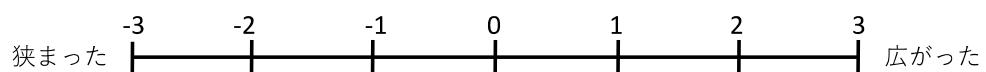
### ・自分の発した声の聞きやすさ



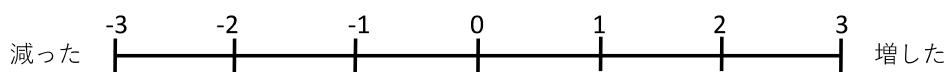
### ・他人の発した声の聞きやすさ



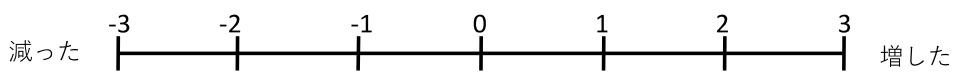
### ・空間の広がり



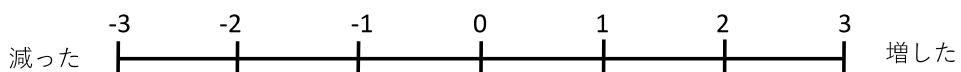
### ・客席全体に届いている感じ



### ・自分に音が返ってくる感じ



### ・音に包まれる感じ

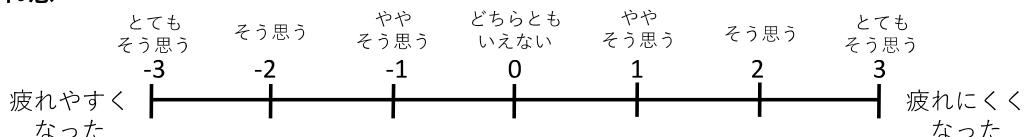


次ページに続く

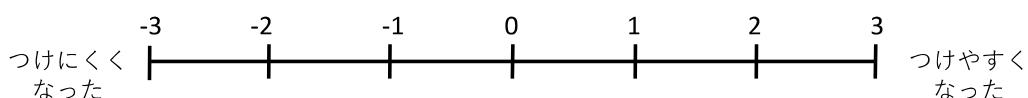
## アンケート①<パターン3>

はじめに演奏した音場と比較して、現在の音場で演奏をした際の評価を丸印でお願いいたします。

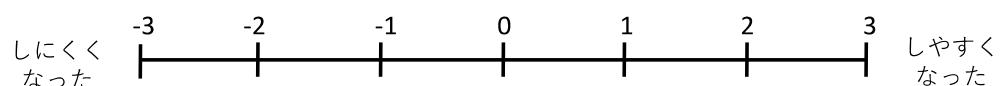
### ・疲れ感



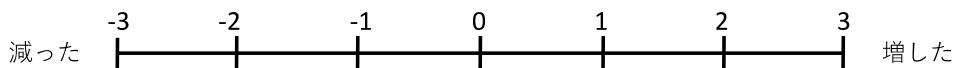
### ・強弱のつけやすさ



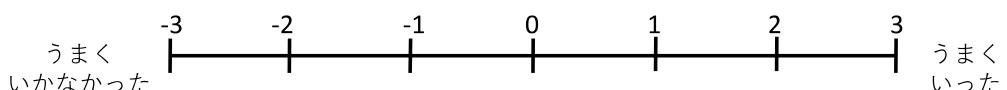
### ・アンサンブルのしやすさ



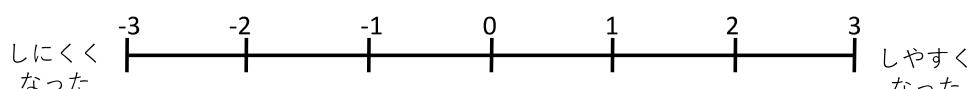
### ・音が溶け合う感じ



### ・演奏がうまくいったか



### ・演奏のしやすさ



### ・その他、感じたこと、思ったこと（響きの印象や演奏時の感想等）

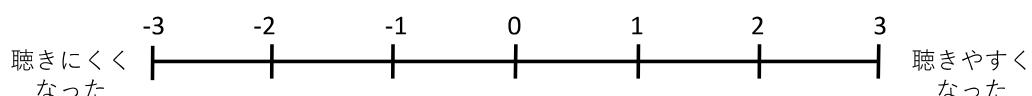
## アンケート①<パターン4>

はじめに演奏した音場と比較して、現在の音場で演奏をした際の評価を丸印でお願いいたします。

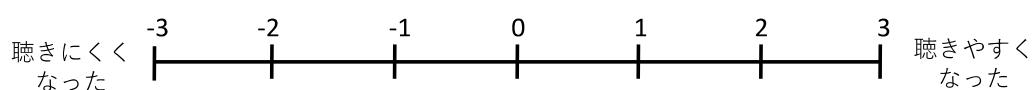
・響きが増えたか



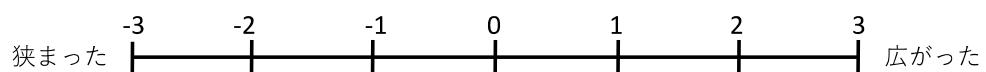
・自分の発した声の聞きやすさ



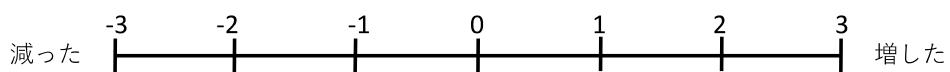
・他人の発した声の聞きやすさ



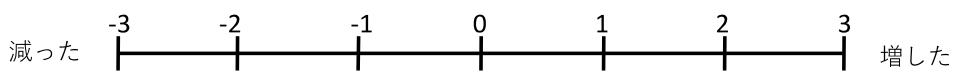
・空間の広がり



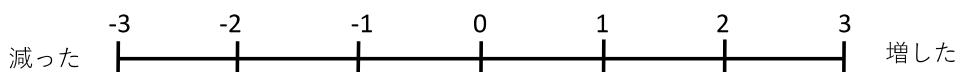
・客席全体に届いている感じ



・自分に音が返ってくる感じ



・音に包まれる感じ



次ページに続く

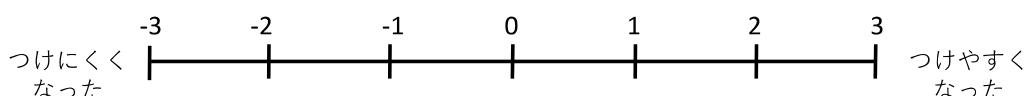
## アンケート①<パターン4>

はじめに演奏した音場と比較して、現在の音場で演奏をした際の評価を丸印でお願いいたします。

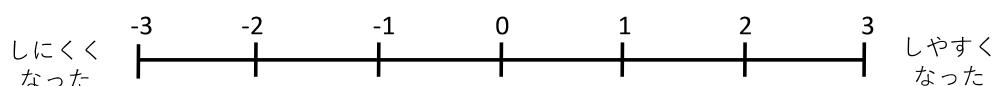
### ・疲れ感



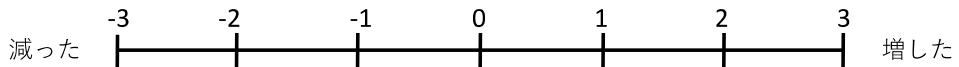
### ・強弱のつけやすさ



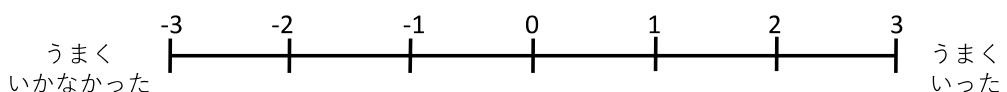
### ・アンサンブルのしやすさ



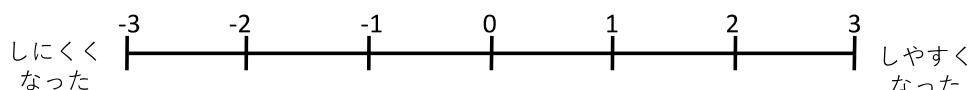
### ・音が溶け合う感じ



### ・演奏がうまくいったか



### ・演奏のしやすさ



### ・その他、感じしたこと、思ったこと（響きの印象や演奏時の感想等）

## アンケート②

実験全体を通しての感想をご自由にお書きください。

- ・本実験を通して感じたこと、思ったこと

以上で本実験を終了させていただきます。ご協力ありがとうございました。

## 研究参加同意書 (本人控)

研究実施者

板垣大稀

東京大学大学院 佐久間研究室 修士 2 年 (0879799427@g.ecc.u-tokyo.ac.jp)

岩佐正樹

明治大学 上野研究室 学部 4 年 (ee205091@meiji.ac.jp)

本研究は、合唱者の演奏に響きがどのような影響を及ぼしているのか検討する実験を行います。つきましては、以下の項目について同意していただける場合は、署名をお願い致します。

1. 本研究に被験者として参加するのは自由意志によるものです。
2. 本研究に被験者として参加することを決定した後でも、またインタビュー及び実験の途中であっても、自由意志または何らかの事情でその参加を中止することができます。
3. 本研究で用いる実験方法は、これまでの研究によりその安全性が確認されています。
4. 研究の内容や安全性について疑問があるときは、研究者に質問をしてその答えを求めるることができます。
5. 研究データは研究者により厳重に保管され、被験者のプライバシーに関わる情報や個人名を公開することはありません。

私は、上記の研究内容について適性かつ十分な説明を受け、その目的・被験者の人権保護・研究の安全性等をよく理解しましたので、この研究に被験者として参加することに同意いたします。

令和 年 月 日

署名

## 研究参加同意書 (実験者控)

研究実施者

板垣大稀

東京大学大学院 佐久間研究室 修士 2 年 (0879799427@g.ecc.u-tokyo.ac.jp)

岩佐正樹

明治大学 上野研究室 学部 4 年 (ee205091@meiji.ac.jp)

本研究は、合唱者の演奏に響きがどのような影響を及ぼしているのか検討する実験を行います。つきましては、以下の項目について同意していただける場合は、署名をお願い致します。

1. 本研究に被験者として参加するのは自由意志によるものです。
2. 本研究に被験者として参加することを決定した後でも、またインタビュー及び実験の途中であっても、自由意志または何らかの事情でその参加を中止することができます。
3. 本研究で用いる実験方法は、これまでの研究によりその安全性が確認されています。
4. 研究の内容や安全性について疑問があるときは、研究者に質問をしてその答えを求めるることができます。
5. 研究データは研究者により厳重に保管され、被験者のプライバシーに関わる情報や個人名を公開することはありません。

私は、上記の研究内容について適性かつ十分な説明を受け、その目的・被験者の人権保護・研究の安全性等をよく理解しましたので、この研究に被験者として参加することに同意いたします。

令和 年 月 日

署名

# ふるさと

作詞:高野辰之  
作曲:岡野貞一  
アレンジ:山室紘一

**A Andantino ♩ = 82**

うさぎおいしかのやま  
うさぎおいしかのやま

こぶなつりしかのかわ  
こぶなつりしかのかわ

ゆめはいまもめくりて  
ゆめはいまもめくりて

わすれがたきふるさと  
わすれがたきふるさと

## 事前説明書

本日はお忙しい中、研究にご協力いただきまして誠にありがとうございます。

本研究では、音場支援システム AFC (YAMAHA : Active Field Control) を用いて、合唱者の演奏に響きがどのような影響を及ぼしているのか検討しています。研究参加者の皆様には、響きの印象を評価してもらうため、演奏およびアンケートシートへの回答をお願いします。説明事項は以下の通りです。

1. 所要時間は全体で約1時間弱を予定しています。
2. 同意書は、1枚は提出いただき、もう1枚はお持ち帰りいただきます。
3. 発声練習は特に指定はありませんので、演奏前の普段のルーティンを行っていただければと思います。
4. 条件1つあたりの実験では、2種類の響きでホールのステージでの本番を想定して演奏していただき、はじめの響きに対する次の響きでの印象の変化についてアンケートにご記入ください。

### 全体の流れ

<u>フェイスシート 及び同意書記入</u>	発声練習	例題	実験	アンケート② 回答
10分	20分	5分	約5分×4条件 = 約20分	5分

### 実験（1条件あたり）の流れ

基準音場で演奏	実験音場で演奏	アンケート①回答
1分	1分	3分

以上、ご不明な点等ございましたら遠慮なくお尋ねください。



# 発表論文一覧

- 修士論文梗概
- 本研究に関する発表論文
  - 板垣大稀, 佐久間哲哉, 橋本悌: 反射音の到来方向を考慮したステージ音響指標の測定法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学 I）pp.256-257, 2022.7
  - 板垣大稀, 佐久間哲哉, 橋本悌: 反射音の到来方向を考慮したステージ音響評価に関する研究 その 1 -方向別 ST の計測方法-, 日本音響学会講演論文集 pp.761-764, 2022.9
  - 橋本悌, 板垣大稀, 佐久間哲哉: 反射音到来方向を考慮したステージ音響評価に関する研究 その 2 -各種ホールの測定事例-, 日本音響学会講演論文集 pp.765-768, 2022.9
  - 板垣大稀, 新井梓文, 永野洋介, 松尾綾子, 上野佳奈子, 佐久間哲哉: 合唱者による室内音響条件の主観評価に関する実験的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学 I）pp.247-248, 2023.7

## 反射音到来方向が合唱者に与える影響に関する実験的検討

37-226077 板垣 大稀

### 1. はじめに

#### 1.1 研究の背景と目的

響きは演奏者にとって重要であることがよく知られており、ステージ上に返るエネルギーの量で演奏者の音場をお評価する指標が提案<sup>[1]</sup>・規格化<sup>[2]</sup>されている。他方、反射音の到来方向も演奏者に影響を与えることが指摘されている<sup>[3]</sup>。本研究では、反射音到来方向の偏りを前後に変化させたときの合唱者の演奏時の印象の変化を調べることを目的とし、混声四部のカルテットを対象に検討を行う。

#### 1.2 本研究に用いる実験システム

本研究では比較的広範囲に音場生成が可能な音場支援システム<sup>[4]</sup> (YAMAHA : Active Field Control (以下 AFC)) を半無響室に導入して音場生成に用いる。AFC の信号処理の概要を図 1 に、半無響室の外観とシステム機器配置を図 2 に示す。AFC は室内のマイクロホン群から収音した信号に「イコライザによる周波数特性の補正」「FIR フィルタの重畠による響きの付加」「遅れ時間の付与」「ゲイン(音量)の変更」の操作を組み合わせて適用し、スピーカー群に信号を割り当てて再生することにより、室内の響きを自然に増幅できる。響きのない半無響室で AFC を用いることにより、自由度の高い音場の生成が可能であると考えられる。

### 2. 音場の物理的評価方法

#### 2.1 ST および方向別 ST

Gade により提案されたステージ音響指標 ST は式 (1) の通り定式化され、これに反射音の到来方向特性を反映させた方向別 ST を式 (2) の通り定義して響きの方向特性の評価に用いる。

$$ST = 10 \log_{10} \frac{\int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt}{\int_{0 ms}^{10 ms} p^2(t) dt} \quad (1)$$

$$ST_{dir} = 10 \log_{10} \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_{dir}^2(t) dt}{\int_{0 ms}^{10 ms} p^2(t) dt} \quad (2)$$

$p(t)$  は全指向性マイクで収録したインパルス応答、 $p_{dir}(t)$  はカージオイドマイクで収録したインパルス応答を表し、添字 dir は上下方向を U, D、客席側・舞台奥側を F, B、舞台上手・下手方向を L, R と表記する。 $t_1$  および  $t_2$  は反射音の評価区間の開始および終了時刻を表す。測定条件は ISO<sup>[8]</sup> に規格化されるステージ音響指標 ST に準じ、音源-受音点間距離は音源点を客席側として 1 m、床面からの高さは 1.5 m として、250~2kHz の各オクターブ帯域で式に従い値を計算した後、4 帯域の算術平均を算出する。音源系には全指向性スピーカーを、受音系にはアンビソニックマイク (Sennheiser Ambeo VR Mic) を用い、半無響室での測定は室中央に測定系を付置して行った。

#### 2.2 エネルギーの評価区間の決定

ISO では式 (1) の  $t_1$  を 20 ms とするが、10 ~ 20 ms のエネルギーについても検討する必要がある。初期反射音付加時のインパルス応答の時間構造を図 3 に示す。壁面からの一次の反射音は吸音され切らずに 10 ms ~ 20 ms の間に測定用マイクに到来しているが、AFC によって

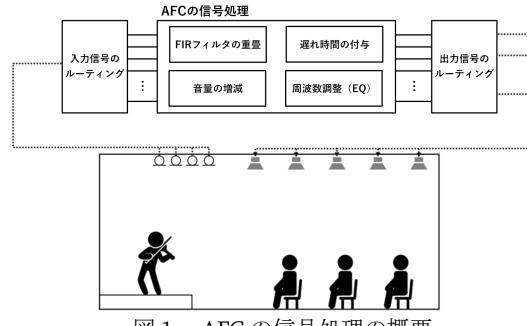


図 1 AFC の信号処理の概要

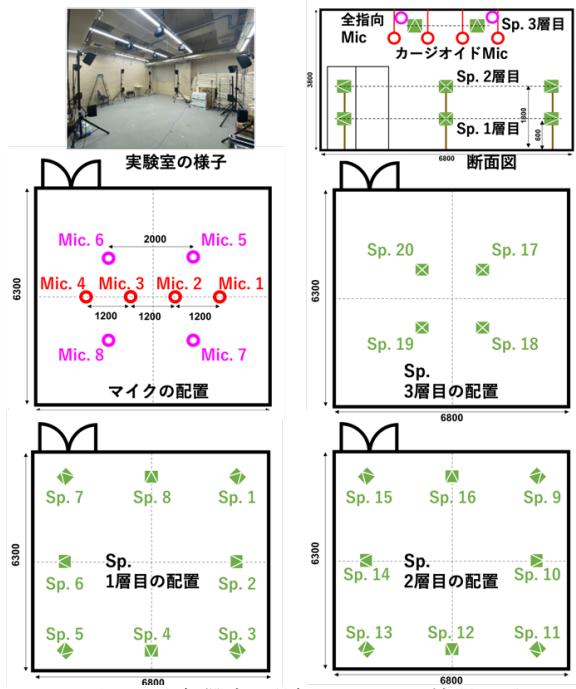


図 2 半無響室の外観とシステム機器配置

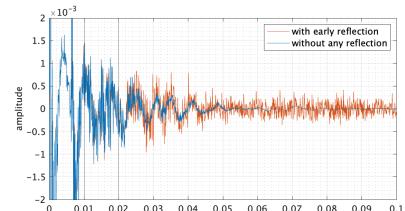


図 3 初期反射音付加時の IR 時間構造

付加される反射音成分は、システム機器および測定系の幾何学的条件とプロセッサ内部での信号処理によってそれぞれ 10 ms 程度生じる遅れ時間のため、直接音に対して 20 ms 以降に到来している。吸音され残った反射音は

直接音に対して -12 dB 程度と比較的大きなエネルギーを持つが、演奏者の主観印象への寄与は付加した成分が支配的と考えられるため、反射音の評価区間から 10 ~ 20 ms を除き、式 (1) (2) の  $t_1 \sim t_2$  を 20 ~ 100 ms としたものを初期反射音の評価に用いる  $ST_{Early}$  および  $ST_{Early,dir}$  、100 ~ 1000 ms としたものを後期反射音の評価に用いる  $ST_{Late}$  および  $ST_{Late,dir}$  とした。

### 3. 実験音場の生成

#### 3.1 目標とする方向別 ST の条件

表 1 に示す 7 つのホールのステージ上の上手側半面の 2 m グリッド上で方向別 ST を測定した。図 4 に示す舞台中央・前方側の 4 点を標準的な演奏位置として想定し、全ホールのこれらの測定点における方向別 ST の平均値、平均値の  $1\sigma$  区間を図 5 に示す。平均値が実験室で生成しうる音場の方向別 ST の可変幅におよそ収まることを確認し、平均値とその  $1\sigma$  区間の範囲を目標値として設定して音場生成を試みる。

#### 3.2 音場の調整方法

音場の生成は AFC システムをオンにしたときの音響測定とその結果を踏まえた AFC のパラメータ調整を繰り返すことによって行う。コンサートホールのステージ上を模擬して方向別 ST と残響時間を調整した音場を作成して基準の音場とし、さらに ST と残響時間を基準の音場と同程度に維持したまま、初期・後期反射音それぞれについて前方または後方からの供給量を増やした音場を作成する。残響時間は好ましくかつ長すぎない 1.8 秒を目標値とする。

##### 3.2.1 方向別 ST の調整

実測した方向別 ST の特性を考慮して、初期反射音は舞台後方から多く供給できるようにし、また後期反射音は全方向から満遍なく供給できるようにするため、響きの付加に用いるスピーカーは表 2 の通り割り当てた。後期反射音制御部の系のうち System 2 および 3 ではハウリングに対する安定性の確保のため時変的にルーティングを切り替える処理 (EMR) を用い、これを表中に x の印として示す。

響きの可変幅を十分に確保するため、響きの付加に用いる FIR フィルタには客席数 2000 席程度のコンサートホールで実測した響きの豊かなインパルス応答を用いた。初期反射音および後期反射音の成分をある程度独立に制御するため、初期反射音成分の制御部については重畠する FIR の信号長は 120 ms に制限し、後期反射音成分の制御部についてはエコー障害を防止しつつ長い遅れ時間を与えるため直接音に対して 65 ms 程度の遅れになるようにディレイを設定した。

##### 3.2.2 残響時間の調整

ST の IR 測定条件では直接音の減衰が大きく  $T_{20}$  または  $T_{30}$  を求めることができないため、減衰曲線の -15 dB から -45 dB の間の傾きを読んで残響時間とした。生成した音場の残響時間は目標値の 1.8 秒より長くなる傾向があつたため、後期反射音制御部で重畠する FIR フィルタにフェードアウトを設定することで残響時間を短くすることで調整した。

##### 3.2.3 周波数特性の調整

オクターブバンドごとの ST および残響時間の値が極端にばらつくことを防ぐため、測定と AFC システム内部のイコライザおよびスピーカーゲインの調整を繰り返して周波数特性を調整した。

表 1 測定対象のホール

Venue	座席数(席)	残響時間(s) 500-1kHz平均
A	421	1.3
B	500	1.4
C	698	2.5
D	1033	1.9
E	1104	1.6
F	1514	2.3
G	1884	2.2

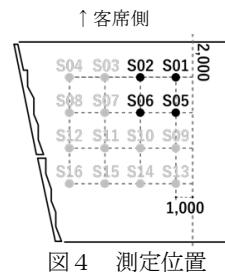


図 4 測定位置

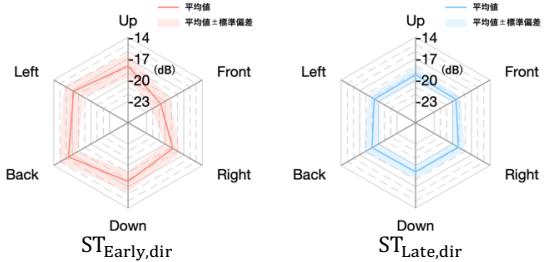


図 5 ステージ前方・中央付近の方向別 ST

表 2 マイクとスピーカーのルーティング

system	1 EMRなし 初期反射音				2 EMRあり 後期反射音				3 EMRあり 後期反射音				4 EMRなし 初期反射音				5 EMRなし 後期反射音				
	mic	1	2	3	4	5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8
Sp.1										x											
Sp.2											x										
Sp.3												x									
Sp.4													x								
Sp.5														x							
Sp.6														x							
Sp.7														x							
Sp.8														x							
Sp.9														x							
Sp.10														x							
Sp.11														x							
Sp.12															x						
Sp.13														x	x						
Sp.14														x							
Sp.15														x							
Sp.16														x							
Sp.17														x							
Sp.18														x							
Sp.19														x							
Sp.20														x							

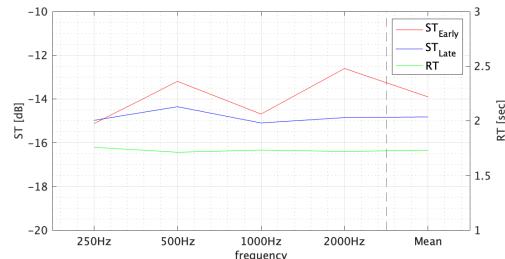


図 6 基準音場 O の ST と残響時間

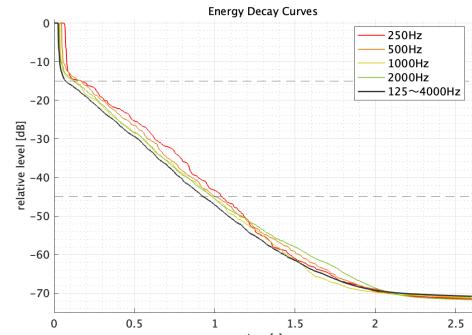


図 7 基準音場 O の残響減衰曲線

### 3.3 生成した音場の特性

作成した基準の音場を音場 O とし、音場 O の ST および残響時間を図 6 に、残響減衰曲線を図 7 に示す。また、目標音場に対する音場 O の方向別 ST を図 8 に示す。さらに、音場 O から方向特性に変化を与えた 4 つの音場 A～D の条件を図 9 に示す。測定はすべての音場で 5 回ずつ行い、それぞれ平均値を図示している。

音場 A は初期反射音の前方からの供給を、音場 B は初期反射音の後方からの供給を、音場 C は後期反射音の前方からの供給を、音場 D は後期反射音の後方からの供給を増やした音場としており、供給を増やした方向についておよそ 1～2dB の増加量となった。また、歌唱時にカラレーションが起こらないことを聴感的に確認した。

## 4. 主観評価実験

### 4.1 実験概要

反射音到来方向の偏りを前後に変化させたときの合唱者の演奏時の印象の変化を調べるために、生成した音場で演奏実験を行った。被験者は 9 名の声楽経験者を含む合唱経験者 31 名（ソプラノ・アルト・バス各 8 名、テノール 7 名）であり、四人一組の声楽四重奏で演奏実験を行った。演奏時は実験室を舞台上に見立てて舞台下手側からソプラノ、アルト、テノール、バスの順に並んだ。また、実験に用いる混声四部の合唱曲として、日本語による 30 秒程度の平易な曲である「ふるさと」の一番を用いた。

### 4.2 演奏実験の手順

ウォーミングアップおよび各パートの音取りを各自で行ったあと、部屋の響きに意識を向けることができる程度の習熟度を目安にアンサンブル練習を求めた。

一回の実験では、音場 O で演奏したのち音場 A～D のうちいずれか一つをランダムに提示して演奏を行い、音場 O に対する印象の変化を 7 段階の評定尺度を用いた段階評価により回答を求めたほか、演奏時の響きの印象・感想等について自由記述により回答を求めた。これを 4 つの音場すべてで演奏するまで繰り返したのち、全体を通じた印象について自由記述により回答を求めた。

表 3 段階評価の項目と評価尺度

段階評価項目		評価尺度 (-3～3の7段階)
響きの印象	響きが増えたか	減った / 増えた
	自分の音の聞きやすさ	聞きにくくなった / 聽きやすくなった
	他人の音の聞きやすさ	
空間的印象	空間の広がり	狭まった / 広がった
	客席全体に届く感じ	
	自分に音が返る感じ	減った / 増えた
演奏的印象	音に包まれる感じ	
	疲れ感	疲れやすくなった / 疲れにくくなった
	強弱のつけやすさ	つけにくくなった / つけやすくなった
総合的な評価	アンサンブルのしやすさ	しにくくなった / しやすくなった
	音が溶け合う感じ	減った / 増えた
	演奏がうまくいったか	うまくいかなかった / うまくいった
	演奏のしやすさ	しにくくなった / しやすくなった

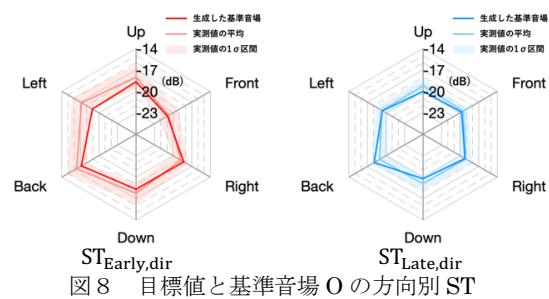
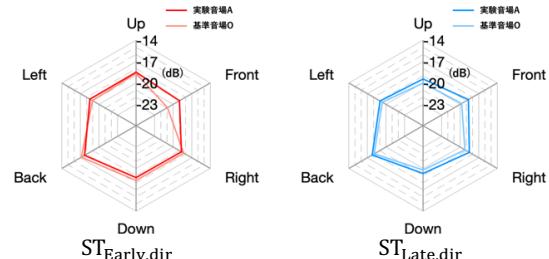
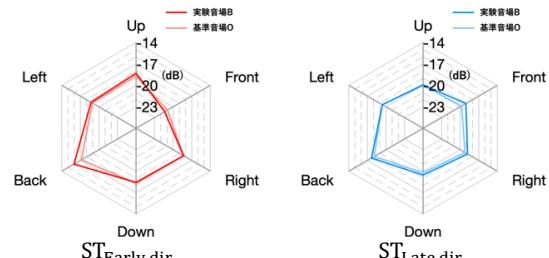


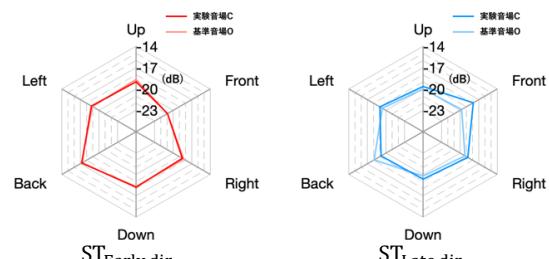
図 8 目標値と基準音場 O の方向別 ST



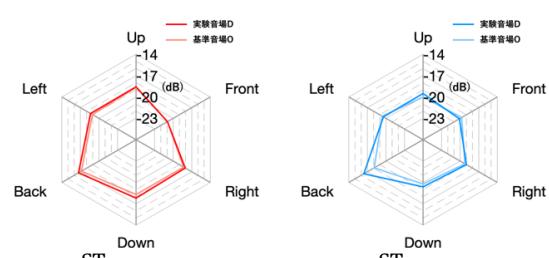
(a) 音場 A (初期:前方強め、後期:基準と同じ)



(b) 音場 B (初期:後方強め、後期:基準と同じ)



(c) 音場 C (初期:基準と同じ、後期:前方強め)



(d) 音場 D (初期:基準と同じ、後期:後方強め)

図 9 実験音場の条件

### 4.3 結果と考察

評定尺度法による段階評価の結果について、各音場での平均値と標準偏差を表4に示す。平均値は色が濃いほど値が大きいことを表し、標準偏差は赤色が濃いほど値が大きく、青色が濃いほど値が小さいことを示す。

全体の傾向として、平均値は1以下と小さい値となった。特に、初期反射音の方向特性を変化させた音場Aと音場Bでは、音場Aの「響きが増えたか」を除くすべての項目で0.5以下となった。初期反射音は0.1秒以内というごく短い時間に到来し、響きの量感としては知覚されないため、大きな音色の変化を伴わない方向特性の変化による影響が小さかったと考えられる。

標準偏差はほとんどの評価項目で1以上と大きい値となり、個人間での音場の評価のばらつきは大きかった。その中で、演奏の印象に関する4項目は標準偏差が比較的小さく、平均値が各項目への評価の傾向をある程度代表していると考えられる。「疲れ感」の平均はほぼ0であり、方向特性による影響は小さいと考えられる。「強弱のつけやすさ」「アンサンブルのしやすさ」「音が溶け合う感じ」の平均値は音場Cでの評価が比較的高かった。音場Cの評価は響きの印象、空間の印象、総合的な評価の他の項目でも総じて高く、前方からの後期反射音の供給量を増やすことにより演奏時の印象を向上させられる可能性がある。

響きの印象と空間の印象に関する項目について、「響きが増えたか」「空間の広がり」「自分に音が返ってくる感じ」「音に包まれる感じ」は標準偏差が特に大きい。そこで、全被験者それぞれの回答について分析するため、横軸に音場AまたはC、縦軸に音場BまたはDを取り、初期・後期の反射音ごとに図10に示す散布図を作成した。図中の点線は評価値の高低に応じた被験者の集団を表す。

初期反射音に方向特性を与えた音場では、AとBのどちらも低評価から高評価まで広く分布しているのに対し、後期反射音に方向特性を与えた音場では少なくとも一方を高く評価した被験者が多く、特に後方を強めた音場Dに高い評価が多くなった。このことから、後方からの後期反射音の供給を増やすことにより、響きの印象や空間の印象を向上させることができると考えられる。

### 5.まとめ

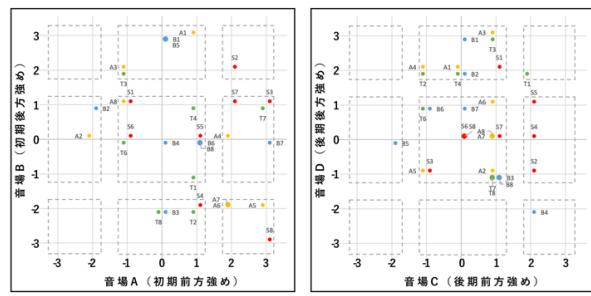
コンサートホールのステージ上への反射音の到来方向を評価する物理指標を構築し、その実測結果をもとに、半無響室に導入した音場生成システムを用いて反射音の到来方向を制御した実験音場を生成した。生成した音場において混声四部のカルテットによる演奏実験を行った。その結果、後期反射音の前方から供給量の増加が演奏の印象を、後方からの供給量の増加が響きと空間の印象を向上させる可能性が示唆された。

### 6.参考文献

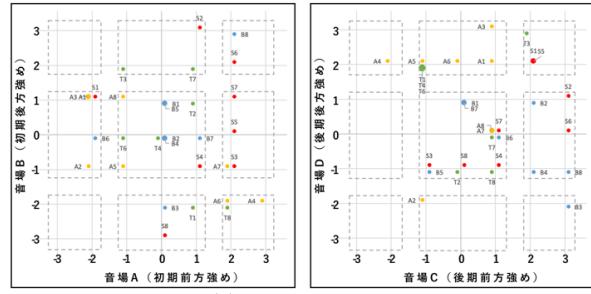
- [1] A.C. Gade, "Investigations of Musicians' Room Acoustic Conditions in Concert Halls. II- Field Experiments and Synthesis of Results," *Acustica*, Vol. 69, p249-262(1989)
- [2] ISO 3382-1:2009, *Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces*
- [3] 中村俊一, 白砂昭一: “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究会資料, AA93-18(1993)
- [4] ヤマハ株式会社 音場支援システムについて.(2024.1.15 参照)  
[https://www.yamaha.co.jp/acoust/\\_contents/afc.html](https://www.yamaha.co.jp/acoust/_contents/afc.html)

表4 各音場の平均値および標準偏差

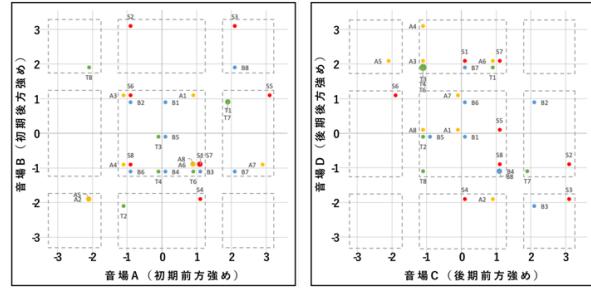
		平均				標準偏差			
		音場A	音場B	音場C	音場D	音場A	音場B	音場C	音場D
響きの印象	響き増	0.74	0.13	0.45	0.58	1.53	1.67	1.09	1.43
	自分の声	0.29	0.23	0.19	0.29	1.53	1.09	1.22	1.24
	他人の声	0.48	0.23	0.87	0.45	1.43	1.31	1.28	1.41
空間的印象	広がり	0.35	0.06	0.71	0.52	1.50	1.55	1.42	1.48
	客席に届く	0.45	0.32	0.58	0.29	1.26	1.30	1.09	1.35
	自分に返る	0.32	-0.10	0.23	0.42	1.45	1.45	1.33	1.52
	包まる	0.29	0.03	0.32	0.48	1.55	1.52	1.28	1.59
演奏の印象	疲れ感	0.13	-0.03	0.13	-0.06	1.23	0.91	1.18	1.03
	強弱	0.32	0.26	0.65	0.35	1.17	1.26	1.08	1.05
	アンサンブル	0.13	0.42	0.65	0.55	1.28	1.26	1.20	1.31
	溶け合う	0.23	-0.03	0.39	0.39	1.33	1.11	1.26	1.43
総合的な評価	うまくいった	0.16	0.19	0.42	0.23	1.27	0.95	1.15	1.15
	しやすさ	0.06	0.13	0.42	0.16	1.48	1.02	1.43	1.44



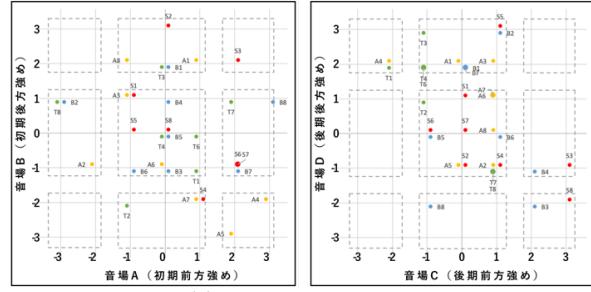
(a) 韶きが増えたか



(b) 空間の広がり



(c) 自分に音が返ってくる感じ



(d) 音に包まれる感じ

図10 回答結果の散布図

# 反射音の到来方向を考慮したステージ音響指標の測定法に関する研究

正会員 ○板垣 大稀\*1

同 佐久間哲哉\*2

非会員 橋本 悅 \*3

音楽ホール	舞台	室内音響
インパルス応答	反射音	指向性

## 1. はじめに

音楽ホールの舞台上の音響特性は演奏者にとって極めて重要であり、ISO 3382-1<sup>[1]</sup>では Support と呼ばれる音響指標として、合奏しやすさに関わる ST<sub>Early</sub> 及び残響感に関わる ST<sub>Late</sub> が規定されている。これらの指標は反射音の到来方向を考慮していないが、演奏しやすさには反射音の時間構造だけでなく到来方向も関係することが指摘されている<sup>[2]</sup>。本研究ではアンビソニックマイクを用いた舞台上の方向別インパルス応答計測に基づく ST の測定法を構築した上で、複数のホールにおいて実測を行い、音響上の特徴把握を試みる。

## 2. 方向別 ST の測定方法

### (1) 測定システム

ISO に準じ、舞台上の音源-受音点間距離 1 m (高さ 1.5 m) でスイープサイン信号を用いてインパルス応答を計測する。音源系には全指向性音源の対向スピーカ、受音系にはアンビソニックマイク (Sennheiser Ambeo VR Mic) を用い、正四面体配置の 4ch の単一指向性マイクの信号から直交 6 方向の信号に変換し、方向別インパルス応答を得る。

### (2) 方向別 ST の算出

ISO による ST<sub>Early</sub> の定義では、直接音到来時刻から 20~100 ms の反射音エネルギーを 0~10 ms の直接音及び床面反射音のエネルギーで規準化し、デシベル表示する。しかし、ISO では測定範囲を壁面から 2 m 以上としており、20 ms 以前に反射音が到来しうることから、本報では 10~100 ms を方向別エネルギーの積分区間とする。一方、ST<sub>Late</sub> の計算では従来通りの 100~1000 ms を方向別エネルギーの積分区間とし、両指標ともに全指向性インパルス応答の 0~10 ms のエネルギーを規準値とする。

$$ST_{Early,dir} = 10 \lg \left( \frac{\int_{10ms}^{100ms} p_{dir}^2(t) dt}{\int_{0ms}^{10ms} p^2(t) dt} \right) [dB] \quad (1)$$

$$ST_{Late,dir} = 10 \lg \left( \frac{\int_{100ms}^{1000ms} p_{dir}^2(t) dt}{\int_{0ms}^{10ms} p^2(t) dt} \right) [dB] \quad (2)$$

ただし、添字 dir は、上下方向を U, D、客席側・舞台奥側を F, B、舞台上手・下手方向を L, R と表記する。周波数範囲については ISO に準じ、250~2k Hz の各オクターブ帯域で ST を計算した後、4 帯域の算術平均値を算出した。

## 3. 対象ホールと測定概要

表 1 に示す規模及び形式の異なる 3 つのホールにおいて、舞台上の上手側半分に 2 m 間隔の格子点上に受音点を配置し、音源を受音点前方 1 m に設置してインパルス応答計測を行った (図 1)。小ホール A、中ホール B は多目的ホールであり、舞台反射板が設置された状態で測定を行った。また、大ホール C はアリーナ型コンサートホールであり、舞台側方及び後部に客席が配置されている。

表 1 ホールの諸元

ホール	座席数	室容積[m <sup>3</sup> ]	残響時間[s]	舞台間口/奥行/高さ[m]
A	500	5,680	1.4	15.5/9.0/7.4
B	1,033	11,940	1.9	20/10/10
C	1,884	18610	2.2	20.8/11.7/n/a

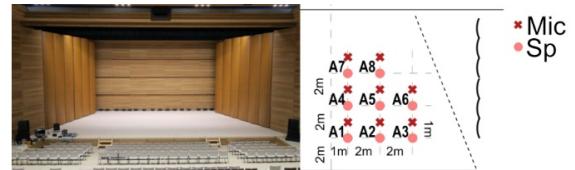


図 1 ホール A の測定点配置 (A1~8)

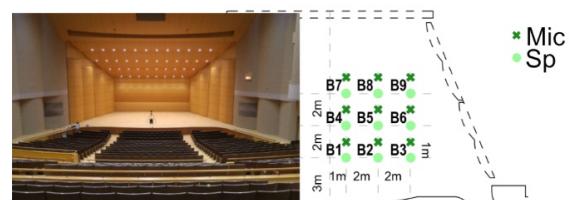


図 2 ホール B の測定点配置 (B1~8)

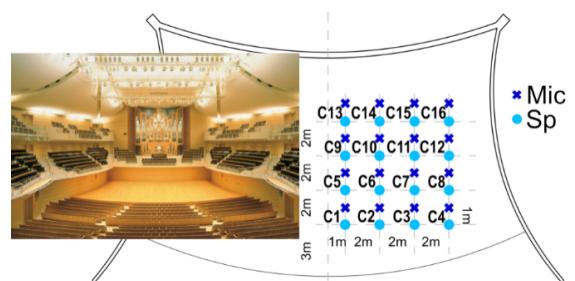


図 3 ホール C の測定点配置 (C1~16)

#### 4. 結果と考察

図4~6に上下方向、図7~9に前後左右方向のSTの測定結果を示す。全体傾向として、ST<sub>Late</sub>では方向による差が小さいのに対して、ST<sub>Early</sub>では舞台上の位置によって顕著な偏差が生じている。

上下方向のST<sub>Early</sub>は、舞台後方及び側方ほど増大している。特にホールCで顕著であり、前方中央と比べて後方上手では10 dB程度も高く、舞台周囲のバルコニーからの反射音が寄与しているものと考えられる。また、ホールA,Cでは上より下方向の値が高い傾向にある。

前後左右方向でも、舞台最後列及び側壁近傍列で後・左方向のST<sub>Late</sub>よりST<sub>Early</sub>が低い値となっており、アリーナ型の一般的特徴と考えられる。

#### 5. まとめ

規模及び形式の異なるホールについて方向別STを測定し、ST<sub>Early</sub>においてホール及び舞台上位置における特徴が確認された。一方、ST<sub>Late</sub>は方向の違いは小さいことから、今後は方向別ST<sub>Early</sub>に着目し、演奏者の主観印象との関係を検討する予定である。

#### 参考文献

- [1] ISO 3382-1:2009, Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces
- [2] 中村俊一, 白砂昭一: “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究会資料, AA93-18(1993)

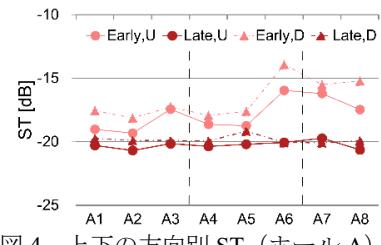


図4 上下の方向別ST（ホールA）

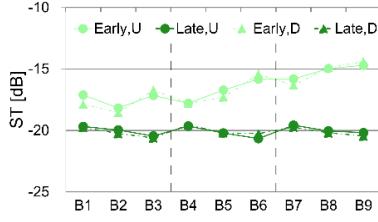


図5 上下の方向別ST（ホールB）

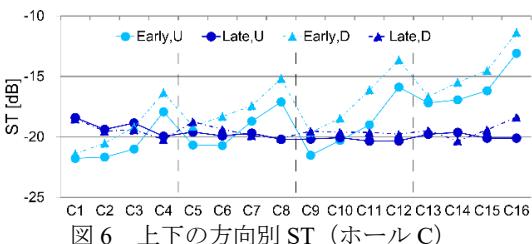


図6 上下の方向別ST（ホールC）

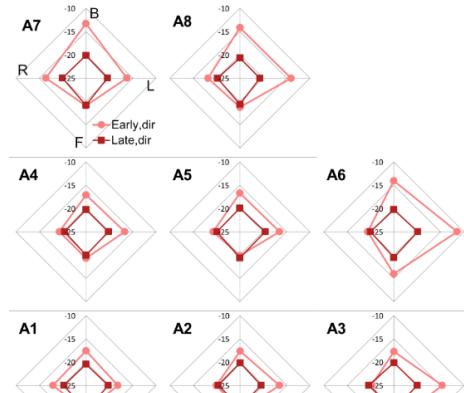


図7 前後左右の方向別ST（ホールA）

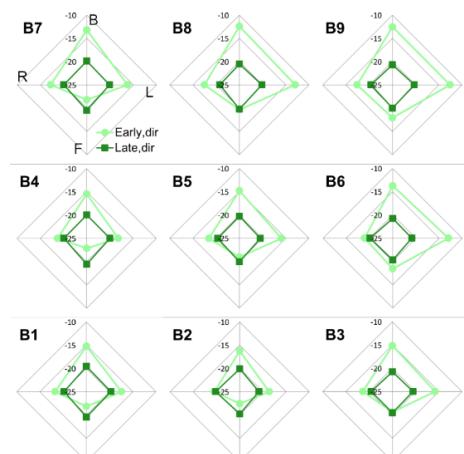


図8 前後左右の方向別ST（ホールB）

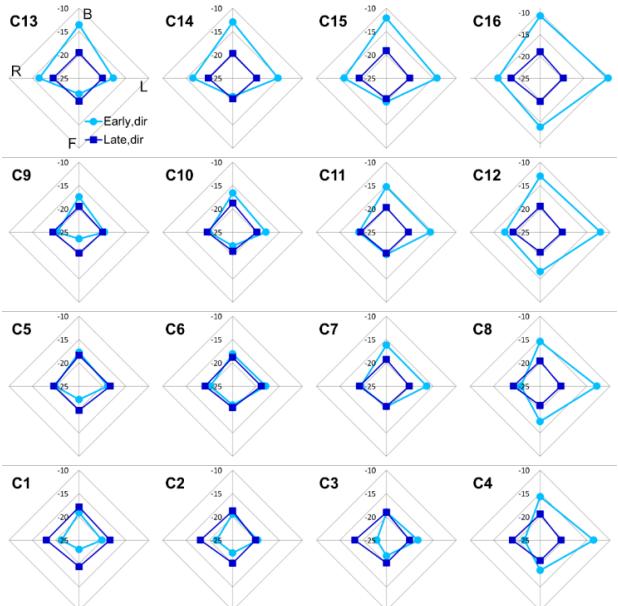


図9 前後左右の方向別ST（ホールC）

\*1 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 修士課程

\*2 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授・博士(工学)

\*3 ヤマハ株式会社音響事業本部空間音響グループ 修士(環境学)

\*1 Grad. Student, Dep. of Arch., Grad. Sch. of Eng., Univ. of Tokyo

\*2 Prof., Dep. of Arch., Grad. Sch. of Eng., Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

\*3 Yamaha Corp., M. Environ.

# 反射音到来方向を考慮したステージ音響評価に関する研究

## その1 -方向別STの計測方法- \*

☆板垣大稀（東大・工）、橋本悌（ヤマハ）、佐久間哲哉（東大・工）

### 1 はじめに

筆者らは、反射音の到来方向を考慮した舞台音場評価のため、方向別インパルス応答計測に基づくSTの測定手法を構築した<sup>[1]</sup>。しかし、ISO 3382-1<sup>[2]</sup>に規格化されるSTには測定位置と時間窓に関する不整合が見られるほか、既往研究においてSTを求める上での基準エネルギーの再現性に関する問題点も指摘されている<sup>[3]</sup>。本研究では、二種類のスピーカーを用いた測定システムにおいてSTの基準エネルギーの再現性とSTの評価区間の妥当性について検討して、方向別STの測定システムの検証を行う。

### 2 STの測定方法

#### 2.1 STの定義

ISO 3382-1において、ステージ音響指標STが次式で規定されている。

$$ST_{Early} = 10 \log_{10} \frac{\int_{20\text{ ms}}^{100\text{ ms}} p(t)^2 dt}{\int_{0\text{ ms}}^{10\text{ ms}} p(t)^2 dt} (\text{dB}) \quad (1)$$

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

ここで、 $p(t)$ は全指向性マイクで収録したインパルス応答を表す。解析周波数は250～2000 Hz(1/1 oct.)の4帯域であり、各周波数について上式に従い計算した値を算術平均して算出する。スピーカー及びマイクの位置は、床からの高さを1 mまたは1.5 m、壁面からの距離を2 m以上とし、マイクはスピーカーから距離1 m離して舞台後方に付置する。

#### 2.2 計測システム

Fig. 1に用いた機材を示す。マイクロホンとして、一次アンビソニックスマイク(Ambeo VR Mic、Sennheiser)を用いた。全指向性マイクおよび直交六方向に向けたカージオイドマイクのインパルス応答は、Aフォーマットの

インパルス応答をBフォーマットに変換したのち、Eq. (3)～(8)の通りに算出した。

$$p_{Front}(t) = \frac{1}{2} \times (p(t) + p_{FB}(t)) \quad (3)$$

$$p_{Back}(t) = \frac{1}{2} \times (p(t) - p_{FB}(t)) \quad (4)$$

$$p_{Left}(t) = \frac{1}{2} \times (p(t) + p_{LR}(t)) \quad (5)$$

$$p_{Right}(t) = \frac{1}{2} \times (p(t) - p_{LR}(t)) \quad (6)$$

$$p_{Up}(t) = \frac{1}{2} \times (p(t) + p_{UD}(t)) \quad (7)$$

$$p_{Down}(t) = \frac{1}{2} \times (p(t) - p_{UD}(t)) \quad (8)$$

ただし、 $p_{dir}$ (dir=Front, Back, Left, Right, Up, Down)は前後左右上下に向けたカージオイドマイクで収録したインパルス応答と等価な信号であり、 $p_{FB}$ ,  $p_{LR}$ ,  $p_{UD}$ 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である。

また、音源系として全指向性の対向型スピーカーと小型十二面体スピーカーの二種類のスピーカーを用い、音源にはスイープサイン信号を用いた。両方のスピーカーで4000 Hz帯域では指向性の偏りが見られたが、STの分析に用いる250～2000 Hzの帯域では方向による出力の偏りは0.5 dB以下であり、およそ全指向性となっていることを確認した。



Fig. 1: Two types of loudspeakers (left: small dodecahedron, middle: opposed-type) and ambisonic microphone (right).

\*Stage acoustic evaluation considering arrival direction of reflection sound, Part 1 - Measurement method of directional ST, by ITAGAKI, Daiki (Univ. of Tokyo), HASHIMOTO, Dai (Yamaha Corp.) and SAKUMA, Tetsuya (Univ. of Tokyo)

### 2.3 測定対象

座席数約 1500 席の中ホールの舞台において、インパルス応答を測定した。舞台の諸元を Table 1 に示す。測定点は上手側半面に 2 m グリッドで配置し、ISO に準じて壁面から 2 m 程度距離を取ることができる 15 点とした。舞台平面図および測定位置を Fig. 2 に示す。スピーカー及びマイクは床から 1.5 m の高さに設置した。

Table 1: Details of Hall A.

座席数 (席)	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)
1514	15580	5860	18.2	18.2	15

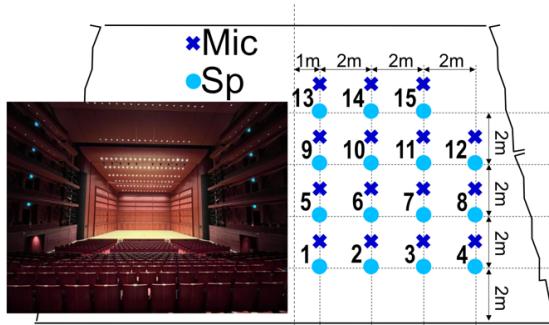


Fig. 2: Measurement points for Hall A.

### 3 基準エネルギーの再現性の検討

二つのスピーカーを用いて測定したインパルス応答波形の 0~10 ms の区間を Fig. 3 に示す。信号処理にあたっては、ピークの音圧から 30 dB 下がる時刻を直接音到来時刻と見なして時間窓をかけた。また、バンドパスフィルタによる周波数帯域のフィルタリングは、時間窓をかけたのちに行った。

小型十二面体スピーカーおよび対向型スピーカーのインパルス応答から計算した ST の基準エネルギーの平均値を Fig. 4 に示す。小型十二面体の周波数特性は比較的平坦なのに對して、対向型では 250 Hz 帯域の出力がかなり小さい。ただ、両スピーカーとも基準エネルギーの標準偏差は 0.1dB 以下であり、測定の再現性は十分高いことが確認された。

### 4 初期反射音エネルギーに関する検討

#### 4.1 測定システムに関する検討

二種類のスピーカーで測定したインパルス応答について、ISO に準拠し、初期反射音の時間窓を 20~100 ms として  $ST_{Early}$  を計測した。各帯域及び 4 帯域平均の結果を Fig. 5 に

示す。

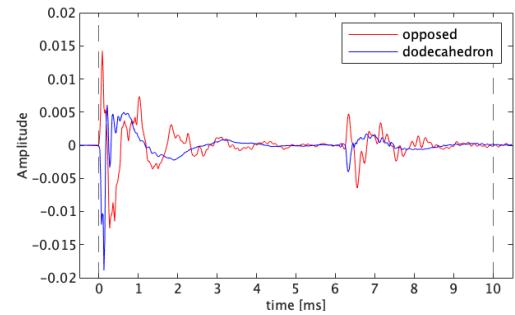


Fig. 3: Example of IR (No.6)

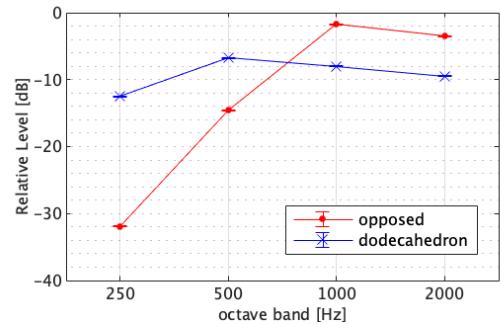


Fig. 4: Mean level and standard deviation of direct sound energy including floor reflection.

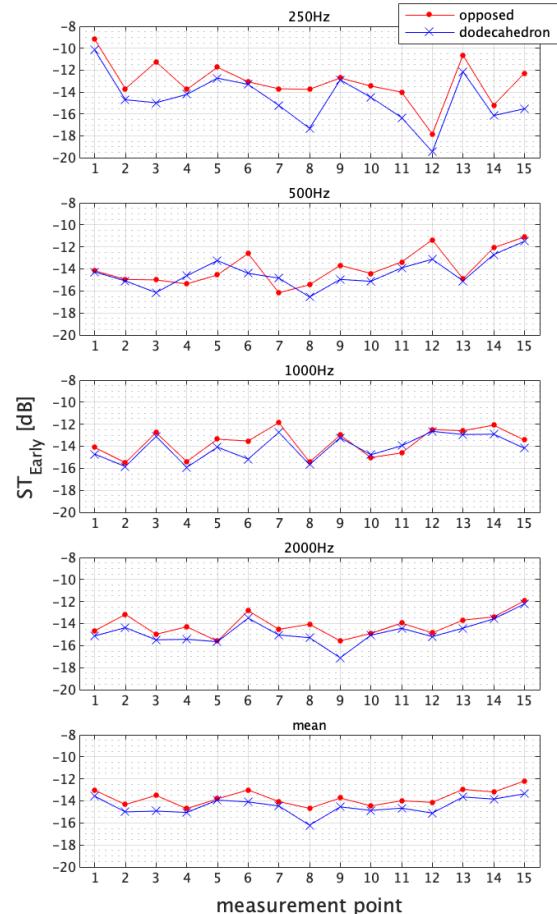


Fig. 5:  $ST_{Early}$  measured with two loudspeakers.

250 Hz 帯域では、対向型の方が全体的に値が高く、最大 3 dB 程度の差があった。この帯域では対向型の出力が小さいため、SN の影響の可能性が考えられる。

#### 4.2 評価区間にに関する検討

対向型スピーカーを用いたインパルス応答を用い、初期反射音の評価区間について検討する。ISO では初期反射音の評価区間を 20~100 ms と定めるとともに、測定点を壁面から 2 m 以上離すこととしているが、壁面から 2 m の測定点では壁から一次反射音が 20 ms 以内に到達する可能性がある。壁面から遠い測定点 1、近い測定点 4 におけるインパルス応答の 0~20 ms の区間を Fig. 6 に例示する。測定点 4 では 16 ms に反射音が到来することがわかる。

初期反射音の評価区間の開始時刻を 10 ms 及び 20 ms とした場合の ST<sub>Early</sub> を Fig. 7 に示す。開始時間 10 ms の場合、舞台上手側の測定点 4, 8, 12 では最大 3 dB 程度の顕著な上昇が見られる。

#### 4.3 方向別 ST の検討

既報<sup>[1]</sup>にて方向別 ST を Eq. (9), (10) の通り提案し、特に ST<sub>Early,dir</sub> が方向性を持つことを示した。

$$ST_{Early,dir} = 10 \lg \left( \int_{10ms}^{100ms} p_{dir}^2(t) dt / \int_{0ms}^{10ms} p^2(t) dt \right) \quad (9)$$

$$ST_{Late,dir} = 10 \lg \left( \int_{100ms}^{1000ms} p_{dir}^2(t) dt / \int_{0ms}^{10ms} p^2(t) dt \right) \quad (10)$$

初期反射音の評価区間の開始時刻を 10 ms 及び 20 ms とした場合における測定点 1, 4, 8, 12 における水平面内の ST<sub>Early,dir</sub> を Fig. 8 に示す。壁面から遠い測定点 1 では時間窓によらず同じ値となった。これは他の測定点でも同様であった。舞台上手側の測定点 4, 8, 12 では、ST<sub>Early,Left</sub> が開始時刻 10 ms の場合の方が 20 ms の場合よりも 4 dB 程度大きいことが確認できる。

10~20 ms の間に到来する初期反射音も演奏者に対して直接音のラウドネスを増強し、空間印象にも大きく影響すると予想されるため、方向別 ST において初期反射音の評価区間は 10~100 ms とした方が妥当であると考えられる。

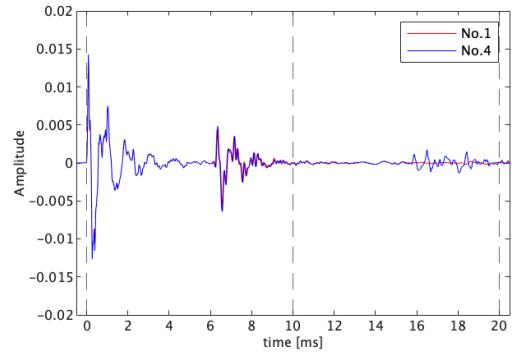


Fig.6: Example of IR measured at two points (No. 1, 4)

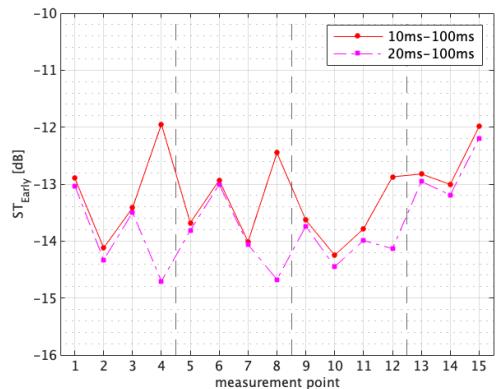


Fig.7: ST<sub>Early</sub> measured with two time intervals for early reflection energy.

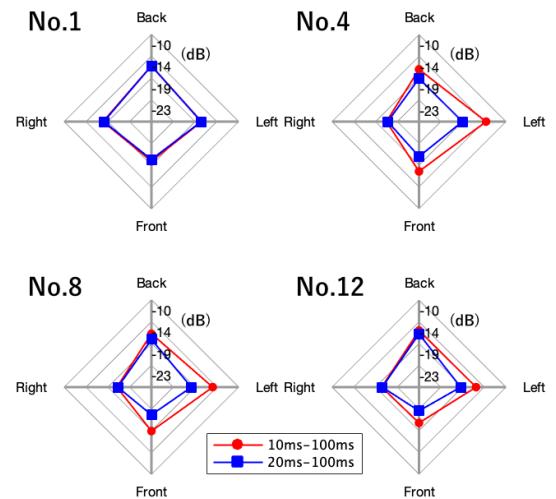


Fig. 8: ST<sub>Early,dir</sub> measured with two time intervals for early reflection energy (No. 1, 4, 8, 12).

## 5 床段差の影響に関する検討

現実の演奏環境では、ひな壇が用いられることが少なくない。舞台条件においては、床からの反射により ST の基準エネルギーにばらつきが生じると考えられる。スピーカーおよびマイクを床から 1.5 m の高さとする測定条件では、幾何学的条件より、床からの反射音は直接音よりも約 6 ms 遅れて到来する。ST の基準エネルギーの時間窓を直接音到来から 6 ms 間とすれば、床条件が異なる場合でも、直接音のみを切り出すことにより ST の適用条件を広げて評価できる可能性がある。そこで、Fig. 9 に示すホールにおいて、対向型スピーカーを用い、ひな壇を上げる場合と上げない場合の二つの床条件についてインパルス応答測定をして分析を行なった。ひな壇の一段当たりの高さは 17 cm であり、マイクとスピーカーが異なる段に乗る場合はスピーカーの高さを 1.5 m としマイクはスピーカーの正面に来るよう高さを調整した。直接音到来から 6 ms 間と 10 ms 間の二条件についてエネルギーの標準偏差を求めた(Fig.11)。10 ms 間では 6 ms 間に比べ標準偏差が大きく、特に低音域で顕著であった。

## 6 おわりに

ST の測定システムおよび評価区間について考察し、方向別 ST の計測方法を検証した。また、直接音のみを基準エネルギーとして、ST をステージの評価から演奏者の評価へ拡張できる可能性を示した。その 2 では、方向別 ST をさまざまなホールで計測し、その結果を考察する。

## 参考文献

- [1] 板垣他, AIJ 大会梗概集 (環境工学 1), 2022.
- [2] ISO 3382-1: 2009, Acoustics - Measurement of room acoustics parameters - Part 1: Performance spaces
- [3] 上野他, AIJ 大会梗概集 (環境工学 1), 1998.

Table 2. Details of Hall B

座席数 (席)	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)
1884	18610	6445	20.8	11.7	-

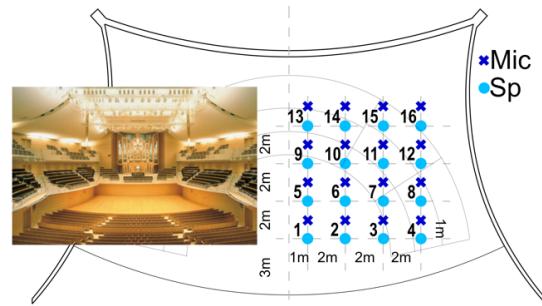


Fig. 9: Measurement points for Hall B

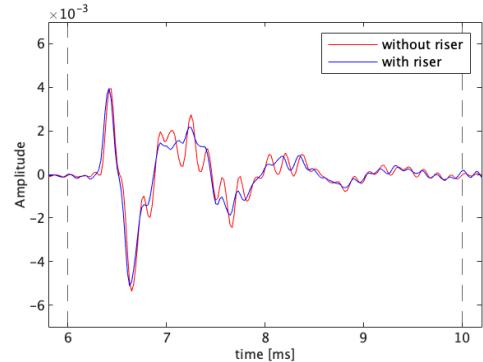


Fig. 10: Example of IR without and with stage riser (No. 14).

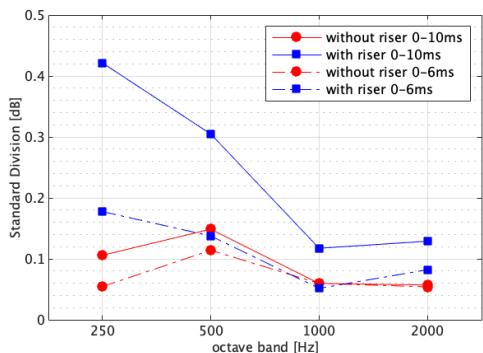


Fig. 11 standard deviation of direct energy

## 反射音の到来方向を考慮したステージ音響評価に関する研究 その2 - 各種ホールの測定事例 - \*

◎橋本悌（ヤマハ）、板垣大稀、佐久間哲哉（東大・工）

### 1はじめに

筆者らは、反射音の到来方向を考慮した舞台音場の評価のため、方向別インパルス応答計測に基づくSTの測定手法を構築した<sup>[1]</sup>。既報<sup>[2]</sup>では、ISO<sup>[3]</sup>で定義されるST<sub>Early</sub>、ST<sub>Late</sub>を1次のアンビソニックスマイクを用いて、直交6方向で算出する手法を提案し、評価区間や測定システムの検証等を行った。本報では、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STを測定し、その結果について考察を行う。

### 2測定概要

#### 2.1 测定システム

測定に使用した音源およびマイクロフォンをFig. 1に示す。音源は無指向性の対向スピーカー、マイクロフォンは商用の1次のアンビソニックスマイク（Ambeo VR Mic, Sennheiser）を使用した。ISOに基づき、音源から1m離れた位置にマイクロフォンを設置し、インパルス応答を計測した。なお、スピーカーおよびマイクの高さは床面から1.5mとした。

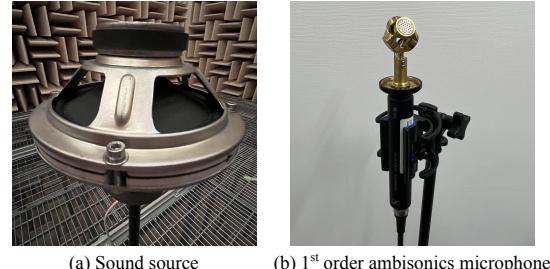
#### 2.2 方向別STの算出

既報に基づき、Eq.(1), (2)より、測定したインパルス応答から方向別STのST<sub>Early,dir</sub>およびST<sub>Late,dir</sub>を算出した。

$$ST_{Early,dir} = 10 \log_{10} \frac{\int_{10ms}^{100ms} p_{dir}^2(t) dt}{\int_{0ms}^{10ms} p^2(t) dt} \quad (dB) \quad (1)$$

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

ここで、 $p(t)$ は無指向性のインパルス応答、 $p(t)_{dir}$ は方向別のインパルス応答を表し、添字dirは、舞台上手・下手方向をLeft, Right、舞台面・舞台奥方向をFront, Back、上下方向をUp, Downを表す。解析周波数帯域は250～2k Hz



(a) Sound source (b) 1<sup>st</sup> order ambisonics microphone

Fig. 1 Measurement equipment

(1/1 oct, band) の4帯域で方向別STを算出し、算術平均を算出した。

#### 2.3 测定対象ホール

室形状や客席構成、座席数の異なる7つのホールにおいて、音響測定を実施した。音響測定を実施したホールをFig. 2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については、天井反射板が無い舞台となっている。各ホールの諸元をTable 1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。Fig. 3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。ISOに基づき、壁面から2m以上離れた測定点を設定した。

### 3測定結果

#### 3.1 ホールによる違い

各ホールにおけるST<sub>Early,dir</sub>およびST<sub>Late,dir</sub>の測定結果をFig. 4に示す。図中の実線が平均値、破線が最大値・最小値を表す。

ST<sub>Early,dir</sub>については、全てのホールに共通して方向別に偏差があり、10～100 msに到来する反射音は方向毎に強度が異なっている。特に、Frontの値が低く、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。舞台上手・舞台奥付近では壁面との距離が近いため、壁面からの反射音レベルが高くなり、Left, Backの変化量が大きい傾向にある。また、舞台の寸

\*Stage acoustic evaluation considering arrival direction of reflection sound, Part 2 - Measurement examples of various venues -, by HASHIMOTO, Dai (Yamaha Corp.), ITAGAKI, Daiki and SAKUMA, Tetsuya (Univ. of Tokyo)

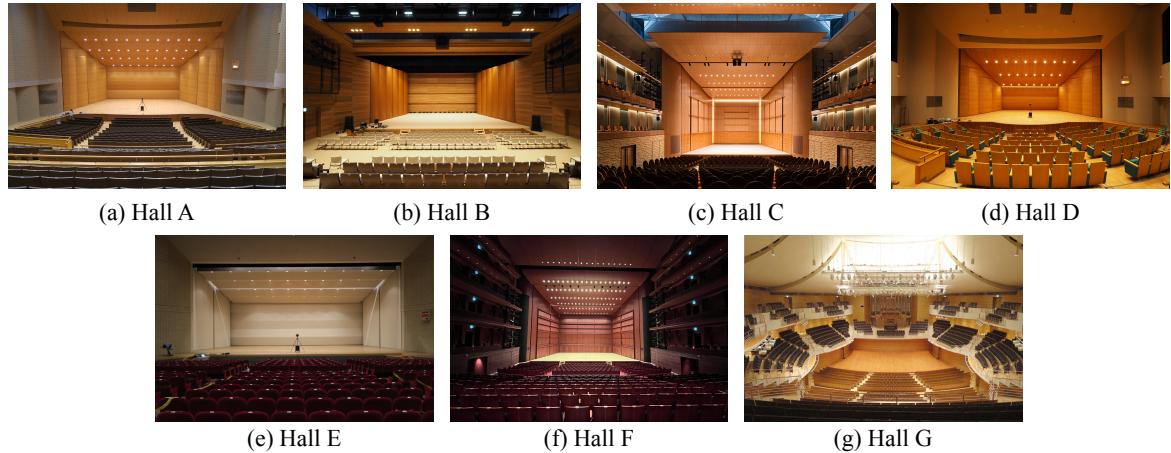


Fig. 2 Outline of the halls where acoustic measurement was performed

Table 1 Building details and acoustical data of each hall

Hall	No. of seats	$T_{30,\text{mid}}$ Unocc. (s)	Absorption Coeff.	Volume ( $\text{m}^3$ )	Total Area ( $\text{m}^2$ )	Stage width (m)	Stage depth (m)	Stage height (m)
A	421	1.3	0.23	4,420	2,070	16.5	10.5	8.0
B	500	1.4	0.21	5,680	2,740	15.5	9.0	7.4
C	698	2.5	0.15	11,150	4,600	12.0	16.2	13.0
D	1,033	1.9	0.21	11,940	4,380	20.0	10.0	10.0
E	1,104	1.6	0.27	10,225	3,435	19.0	9.0	8.0
F	1,514	2.3	0.17	15,580	5,860	18.2	18.2	15.0
G	1,884	2.2	0.16	18,610	6,445	20.8	11.7	-

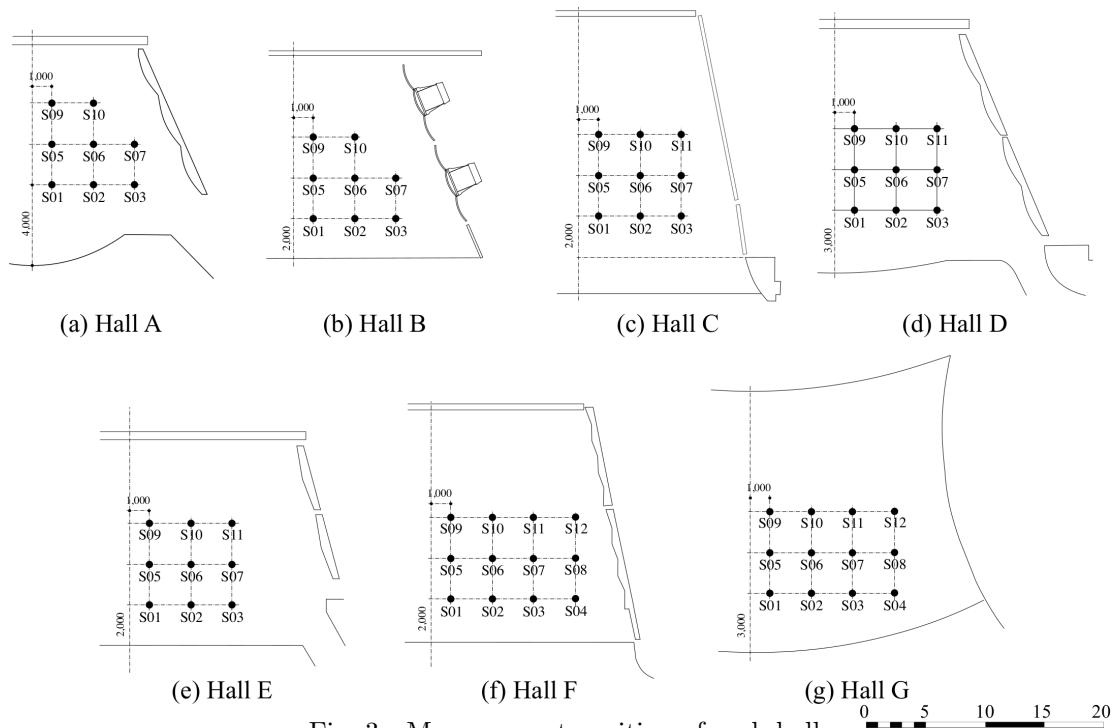


Fig. 3 Measurement position of each hall

法が小さいホールでは、全体的に値が高い傾向にあるが、ホールによって方向分布に違いが見られ、舞台の寸法比や反射面の角度が影響している可能性がある。さらに、舞台空間が音響反射板

に囲われていないアリーナ型のホール H では全体的に値が低く、舞台上の偏差も大きいことが確認できる。

$ST_{Late,dir}$ については、方向別に偏差が小さい傾向にあり、100 ms ~ 1 sに到来する反射音はあらゆる方向から到来し、一様な強度になっている。また、測定点毎の偏差も小さく、舞台上での位置依存性も小さいと推察される。さらに、他のホールに比べて、ホール C, F は全体的に値が高い。これらのホールは平均吸音率  $\bar{\alpha}$  が小さく、残響時間が長いためだと推察される。

### 3.2 舞台上の位置による影響

各ホールの各測定点の  $ST_{Early,dir}$  の測定結果を Fig.5、 $ST_{Late,dir}$  の測定結果を Fig.6 に示す。

$ST_{Early,dir}$ については、舞台上の位置による方向別の偏差が大きい。S01のような舞台面・中央付近では壁・天井面への距離が遠いため、全ての方向において  $ST_{Early,dir}$  が低くなっているが、ホール毎の偏差は小さい。舞台上手付近では Left の値が大きくなる傾向にあるが、側方反射板は平面的に傾いているため、上手に近づくほど値が高くなるとは限らない。

$ST_{Late,dir}$ については、舞台上の位置による方向別の偏差が小さい。 $ST_{Early,dir}$ とは異なり、S01のような舞台面・中央付近では値が高くなり、ホール毎の偏差が大きい。

### 4 おわりに

本報では、室形状・空間規模の異なる 7 つのホールにおいて、方向別 ST の測定を行い、その測定結果の考察を行った。 $ST_{Early,dir}$  と  $ST_{Late,dir}$  のそれぞれについて、ホールの規模や音響特性、舞台上の位置による影響が確認された。今後は、ST の方向分布が演奏者の主観評価に与える影響について検討を行う。

### 参考文献

- [1] 板垣他, 日本建築学会学術講演梗概集, 2022.
- [2] 板垣他, 音講論(秋), 2022.
- [3] ISO 3382-1: 2009, Acoustics - Measurement of room acoustics parameters - Part 1: Performance spaces

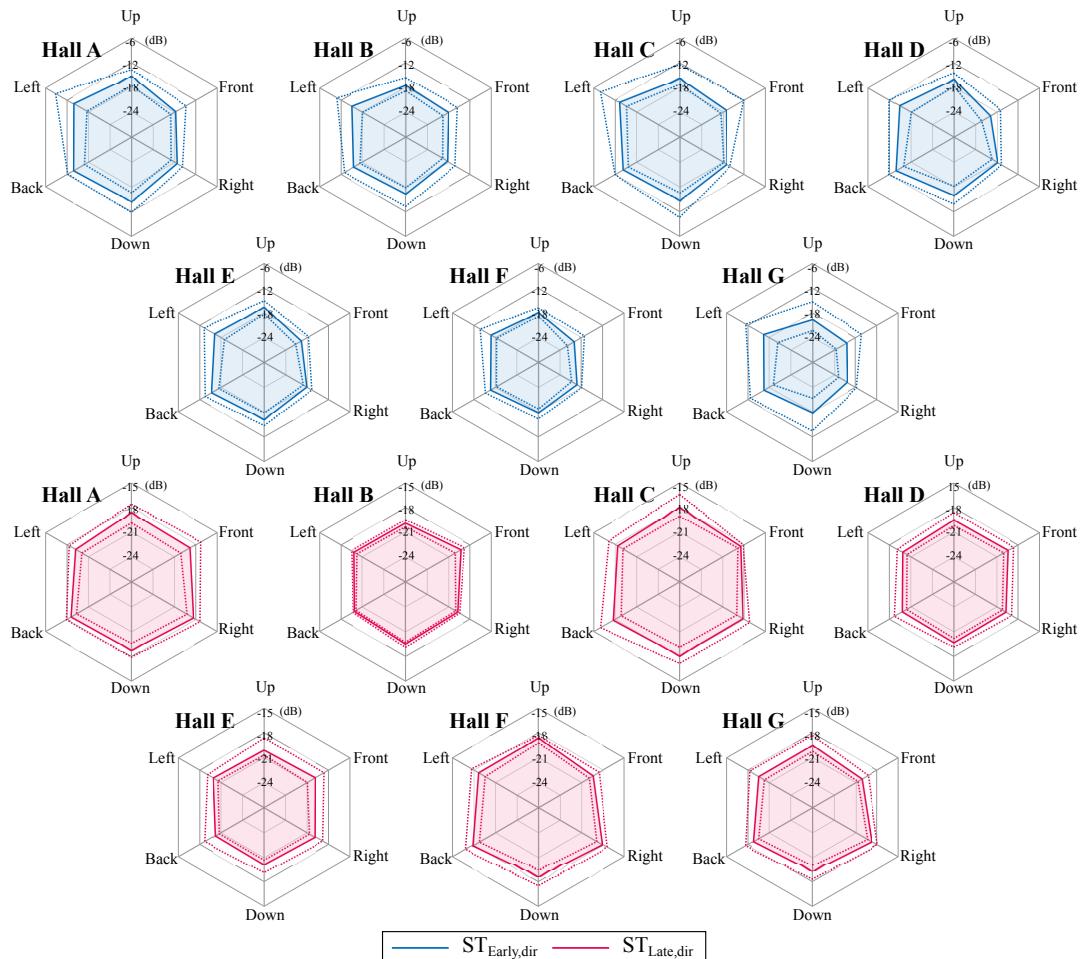


Fig. 4 Measurement result of directional early support and late support of each hall. Solid line represents avarage value; dotted lines represent maximum and minimum value.

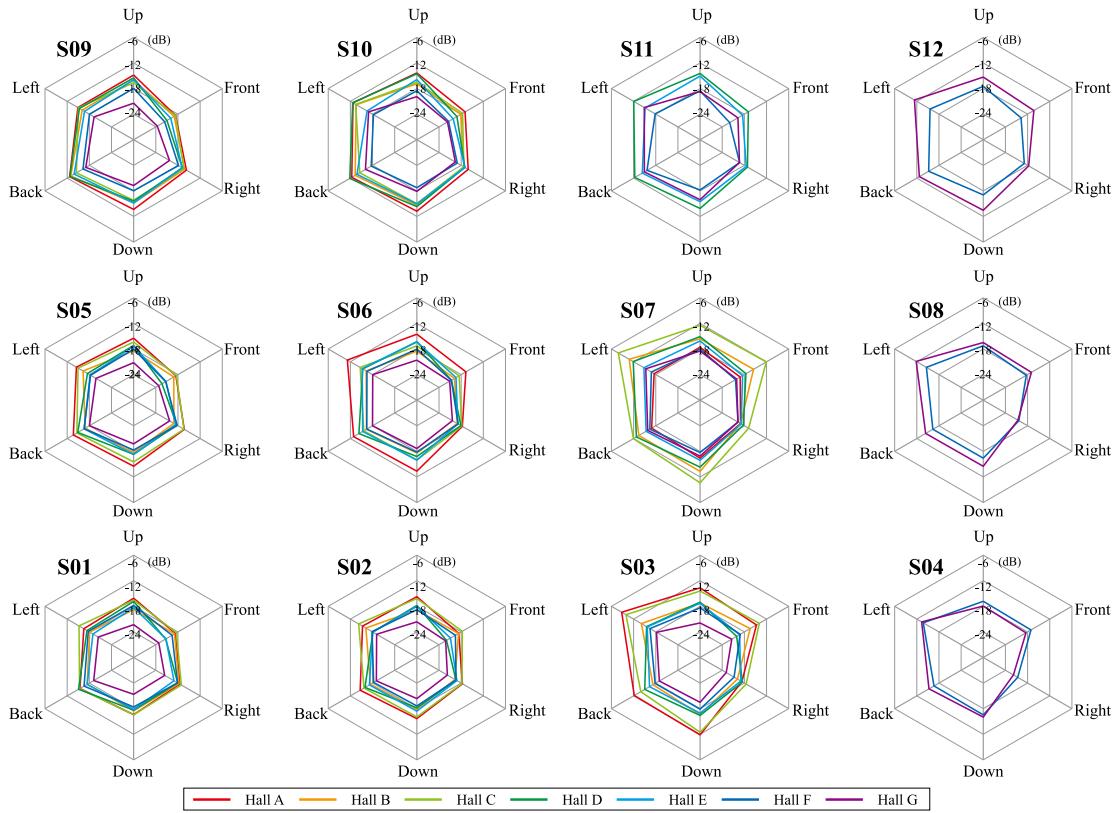


Fig. 5 Measurement result of directional early support at each measurement point of each hall

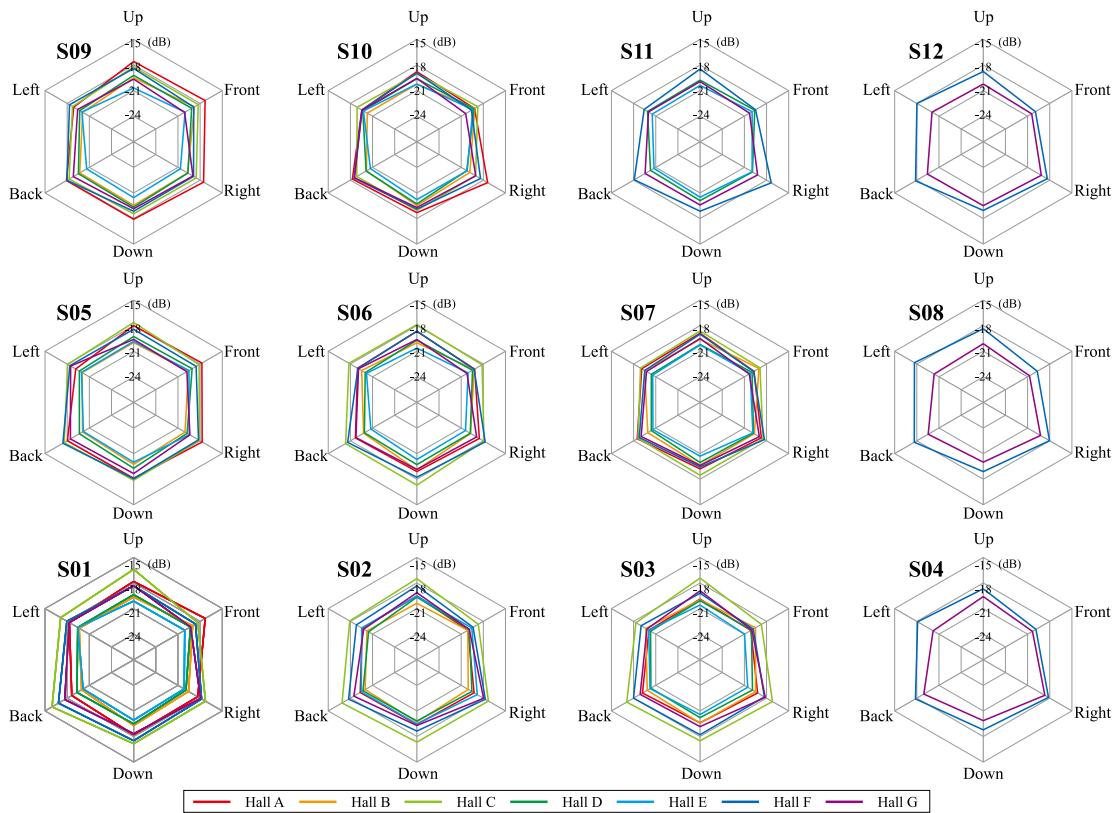


Fig. 6 Measurement result of directional late support at each measurement point of each hall

## 合唱者による室内音響条件の主観評価に関する実験的検討

音場支援システム アンサンブル 室内音響  
主観評価 演奏実験 残響音

正会員 ○板垣 大稀\*1  
非会員 新井 梓文\*2  
同 永野 洋介\*3  
正会員 松尾 綾子\*4  
同 上野 佳奈子\*5  
同 佐久間 哲哉\*6

### 1. はじめに

ホールの舞台上や練習室の響きと演奏者との関わりについて多くの研究が行われている<sup>[1][2][3]</sup>が、本研究では残響特性が声楽アンサンブルの練習時・本番時の印象に及ぼす影響について基礎的な検討を行う。半無響室内の残響付加装置により初期反射音と後期残響音の組合せを変化させ、声楽四重奏による主観評価実験を行い、練習・演奏しやすさの傾向把握を試みる。

### 2. 実験方法

#### (1) 実験システム

半無響室に設置した単一指向性マイク 4 個（初期反射音用）、全指向性マイク 4 個（後期残響音用）、スピーカ 20 個からなる残響付加装置（Yamaha AFC Enhance）を用い、初期反射音は In-line 方式、後期残響音は Regenerative 方式により制御する<sup>[4]</sup>。主観評価実験では初期反射音の音量を 2 水準（E1, E2）、後期反射音の音量の 3 水準（R1, R2, R3）とし、それらの組合せとして 6 条件の音場を生成した。各音場の ST<sub>Early</sub>, ST<sub>Late</sub> (250~2k Hz) および残響時間 T20 (500 Hz, ただし視認により減衰の傾きを評価) を表 1 に示す。

#### (2) 主観評価実験

合唱経験者 29 名を対象に、声楽四重奏（ソプラノ、アルト、テノール、バス各 1 名）を演奏させた。ランダム順に提示する 6 条件の音場において、テンポの異なる 2 曲各々の演奏後、表 3 の評価尺度を用いた段階評価および「この音場でしやすい演奏」「感想・気づいた点」についてインタビューを行った他、全体終了後に「最も心地よい響きを感じて演奏できた音場」「本番に向かう練習に最適な音場」について回答を得た。

### 3. 結果と考察

#### (1) 評価尺度を用いた段階評価

『曲』または『パート』を要因とする一元配置分散分析では主効果は認められず、室内音響条件への評価の影響は小さいと考えられる。要因を『音場』とすると主効果が得られ、「音楽の作りやすさ」「溶け合う感じがするか」「包まれる感じがするか」で有意差が認められた。残響が多いほど溶け合い感や包まれ感が得やすくなり、音楽が作りやすくなつたと考えられる（図 1）。

表 1 各音場の ST<sub>Early</sub>, ST<sub>Late</sub> および T20

Case	E1R1	E1R2	E1R3	E2R1	E2R2	E2R3
ST <sub>Early</sub> [dB]	-17.2	-17.1	-16.7	-15.3	-15.2	-15.0
ST <sub>Late</sub> [dB]	-25.0	-20.8	-17.0	-16.6	-15.3	-14.1
T20 [s]	1.3	3.1	4.5	1.4	2.0	3.4

表 2 初期反射音の開始時刻を 10 ms としたときの ST<sub>Early</sub>

Case	E1R1	E1R2	E1R3	E2R1	E2R2	E2R3
ST <sub>Early</sub> [dB]	-9.8	-9.8	-9.7	-9.4	-9.4	-9.4

表 3 各音場の評価に用いた項目

No.	評価項目	評価尺度(7 段階)
1	自分の音の聞きやすさ	聴きにくい-聞きやすい
2	他の人の音の聞きやすさ	しにくい-しやすい
3	練習のしやすさ	作りにくい-作りやすい
4	音楽の作りやすさ	作りにくい-作りやすい
5	溶け合う感じがするか	しない-する
6	包まれる感じがするか	しない-する

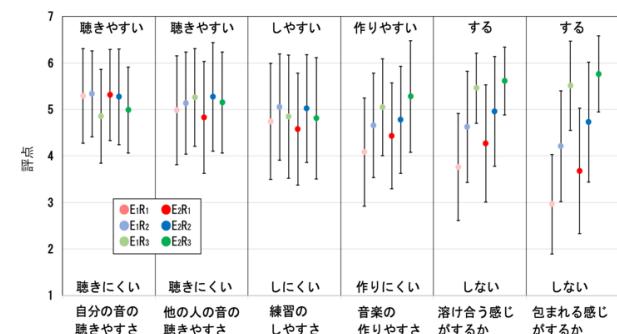


図 1 音場ごとの評価結果

一方で、「自分の音の聞きやすさ」「他の人の音の聞きやすさ」「練習のしやすさ」では有意差が認められなかった。これらの項目は初期反射音の量により違いが出ると予想されるが、本実験ではシステムによる初期反射音の供給よりも 10~20 ms に到来する壁面などからの供給が多く聽感上の差異が検出しにくかったと考えられる。初期反射音の評価区間の開始時刻を 20 ms から 10 ms に変更して ST<sub>Early</sub> を改めて評価すると、表 2 に示すように -9.6 dB から ± 0.2 dB の範囲に収まっており、ST<sub>Early</sub> 評価における初期反射音の開始時刻として 20 ms よりも 10 ms の方が適切である可能性が示唆された。また、これら項目の評点は総じて 4 以上と高く、実験を通して響きの違和感や不自然さは指摘されなかつた。

## (2) インタビュー

各音場での「しやすい練習」の回答を表4に示す。「音取り」は残響音の供給が少ないE1R1、E2R1では被験者の半数以上が挙げたが、残響の多いE1R3、E2R3では1名のみだった。これらの音場では他の音場に比べ「アンサンブル」「ハーモニー」の回答が増加し、残響の増加が奏者同士の関係を補助していると考えられる。E2R3は「最も心地よい響きを感じて演奏できた音場」としても支持され、またソプラノの半数に「本番に向けた練習に最適な音場」としても支持されたが、これは本番想定時に主旋律を担当するソプラノと他のパートで室内音響への要求が異なることを示唆すると考えられる(図2および図3)。

インタビューでは全体では有意差のない『曲』(テンポ)や自他の音の聞きやすさについても多く言及されており、個々人の着眼点の多様さへの留意を促す結果であった。

## 4.まとめ

音場支援システムで生成した音場で演奏実験を行った。合唱における室内音響条件の影響の検討により、残響音が演奏者同士のアンサンブルを支援することが示唆された。今後は物理指標及び個々人の着眼点と主観評価との関係に関してさらなる検討を行う予定である。

## 謝辞

実験に協力頂いた橋本悌氏(ヤマハ株式会社)に謝意を表する。

## 参考文献

- [1] A.H. Marshall and J.Meyer: The Directivity and Auditory Impressions of Singers, ACUSTICA Vol.58, 130-140, 1985
- [2] Ueno, K., et al.: Musicians' adjustment of performance to room acoustics Part I: Experimental performance and interview in simulated sound field, Proceedings 19th International Congress on Acoustics, MUS003-004, 2007. 9
- [3] 上野佳奈子, 橋秀樹: ホール音場における演奏家の意識-言語構造に着目した実験的検討-, 日本音響学会誌, vol.59, no.9, pp.519-529, 2003
- [4] 渡辺他: 音場支援システムの構成と適用事例, 日本音響学会誌 76(9), 511-517, 2020

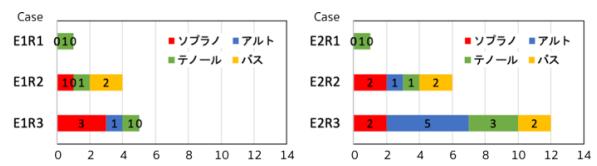


図2 最も心地よい響きを感じて演奏できた音場

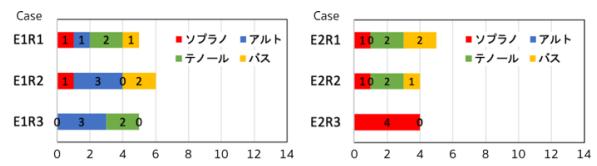


図3 本番に向けた練習に最適な音場

表4 各音場でしやすい練習に関するコメント(抜粋)

質問事項	E1R1	E1R2	E1R3	E2R1	E2R2	E2R3
この音場でしやすい練習	音取り(16名) 発声練習(7名) 表現・技巧(7名) アンサンブル(3名) ハーモニー(2名) リズム(2名)	表現・技巧(12名) 音取り(6名) 発声練習(4名) アンサンブル(4名) ハーモニー(2名) 本番前(1名)	表現・技巧(6名) アンサンブル(6名) 本番前(6名) ハーモニー(5名) 発声練習(3名) 音取り(1名)	音取り(15名) 表現・技巧(4名) アンサンブル(3名) 発声練習(3名) ハーモニー(2名) リズム(1名) 本番前(1名)	発声練習(7名) 音取り(6名) アンサンブル(4名) 表現・技巧(3名) リズム(2名) 本番前(2名) ハーモニー(1名)	表現・技巧(10名) 本番前(8名) アンサンブル(7名) ハーモニー(4名) 発声練習(3名) リズム(2名) 音取り(1名)

表5 各音場でのアンサンブル演奏に関するコメント(抜粋)

質問事項	E1R1	E1R2	E1R3
この音場の感想・気づいた点	○縦が合いやすい ○リアルな声に聴こえる ○フレーズやバランスに集中できる ×響きが薄く、合わせづらい ×表現には向いていない ×本番向けではない	○言葉が埋もれにくく響き ○速い曲でも音が聴きやすい ○自分の声と周りの音量のバランスが良い	○一番いい響きの残り方だった ○本番のホールの響きに近い ○ハーモニーを感じたい時に最適 ×響き過ぎて少々やりづらい ×テンボが落ちていた曲だと残響を聴きすぎてタイミングを合わせづらかった
本番に向けた練習をこの音場でしたい理由	・鳴りすぎはないが、音の聴きやすさやハモリ方が良く、音のコントロールもしやすい感じがしたから	・程よくシビアに周りを聴きつつ、自分の声も聞ける感じがしたから ・割と響きがあるが、返しが少ない分、自分たちの声やハーモニーをきちんと聞くには丁度いいと思う	・響きは強いが、言葉がある程度分かりやすく聴こえるため ・ハーモニーが聴き取りやすいため
質問事項	E2R1	E2R2	E2R3
この音場の感想・気づいた点	○速い曲が合わせやすいと感じた ○ちょうど良く各々の声を引き立ててくれる感じ ○響きすぎない印象 ×強弱変化による響きの差がない ×本番前には使いたくない	○ハーモニーが綺麗に響く ○音程やリズムのズレが分かりやすい ○穏やかな表現を作りやすい ×音が残り過ぎていて、次の音が混ざったり、テンボがずれたりする	○アンサンブルしやすい ○ホールに近い響きがする ○ハーモニーを合わせるにはやりやすい感じ ×演奏はしやすいけど、練習すべき点を見逃してしまいそう ・表現付けがしやすい ・本番のような鳴り方を体感できたから
本番に向けた練習をこの音場でしたい理由	・空間の響きが最も自然に感じられ、無理なく歌えたことで、多くの要素に意識を向けて行うことができたから	・バランスが良いのと、音の飛びが良くて歌っていて心地が良い	

\*1 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 修士課程

\*2 元明治大学理工学部建築学科

\*3 明治大学大学院理工学研究科建築学専攻 修士課程

\*4 早稲田大学人間科学学術院 助教・博士(工学)

\*5 明治大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

\*6 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授・博士(工学)

\*1 Grad. Student, Dep. of Arch., Grad. Sch. of Eng., Univ. of Tokyo

\*2 Former Member of Dep. of Arch., Sch. of Sci. and Tech., Meiji Univ.

\*3 Grad. Student, Dep. of Arch., Grad. Sch. of Sci. and Tech., Meiji Univ.

\*4 Assist. Prof., Faculty of Human Sciences, Waseda University, Dr. Eng.

\*5 Prof., Dep. of Arch., Sch. of Sci. and Tech., Meiji Univ., Dr. Eng.

\*6 Prof., Dep. of Arch., Grad. Sch. of Eng., Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

# 参考文献

- [1] © Wolf-Dieter Grabner. ウィーン楽友協会大ホール 写真, 2024年2月参照. ウィーン楽友協会公式ウェブサイトより.
- [2] © Amsterdam Municipal Department for the Preservation, Restoration of Historic Buildings, and Sites (bMA). アムステルダム コンセルトヘボウ大ホール 写真, 2024年2月参照. Wikipedia より.
- [3] 清水寧. 室内音響の歴史と変遷. 日本音響学会誌, Vol. 79, No. 4, pp. 224–231, 2023.
- [4] Paul E. Sabine. The beginnings of architectural acoustics. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 7, No. 4, pp. 242–248, 06 2005.
- [5] ボストンシンフォニーホール公式ウェブサイト. ボストンシンフォニーホール 写真, 2024年2月参照. ボストンシンフォニーホール公式ウェブサイトより.
- [6] 橘秀樹. ステージ音響 (小特集—室内音響設計の現状と課題—). 日本音響学会誌, Vol. 53, No. 4, pp. 306–310, 1997.
- [7] I Nakayama. Preferred time delay of a single reflection for performers. Acta Acustica united with Acustica, Vol. 54, No. 4, pp. 217–221, 1984.
- [8] GM Naylor. Modulation transfer and ensemble music performance. Acta Acustica united with Acustica, Vol. 65, No. 3, pp. 127–137, 1988.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 管真一郎. 演奏家によるホールステージの音響評価-国内オーケストラの海外及び地方公演における調査. 音響学会建築音響研資, pp. AA86–23, 1986.
- [13] 管真一郎, 高久勝彦. オーケストラ演奏家の評価に基づくホール舞台の主要な音響設計条件 : ホール舞台の音響設計に関する研究 その1. 日本建築学会計画系論文集, Vol. 60, No. 471, pp. 1–9, 1995.

- [14] 上野佳奈子, 橘秀樹. ホール音場における演奏家の意識 : 言語構造に着目した実験的検討. 日本音響学会誌, Vol. 59, No. 9, pp. 519–529, 2003.
- [15] 麻理上田, 優貴小寺, 一寿藤本. 40138 演奏しやすいステージ音場に関する基礎的検討 (音場評価, 環境工学 i). 学術講演梗概集. D-1, 環境工学 I, 室内音響・音環境, 騒音・固体音, 環境振動, 光・色, 給排水・水環境, 都市設備・環境管理, 環境心理生理, 環境設計, 電磁環境, No. 2008, pp. 307–308, 07 2008.
- [16] 光一郎林, 麻理上田, 一寿藤本. 422 演奏者によるステージ音場の評価実験と演奏しやすい位置に関するアンケート (環境工学). 日本建築学会研究報告. 九州支部. 2, 環境系, No. 47, pp. 85–88, 03 2008.
- [17] ヤマハ株式会社 音場支援システムについて. <https://jp.yamaha.com/products/proaudio/afc/index.html#product-tabs>. (Accessed on 02/22/2024).
- [18] ヤマハ株式会社 音場支援システム 納入実績. [https://jp.yamaha.com/products/proaudio/afc/case\\_studies.html](https://jp.yamaha.com/products/proaudio/afc/case_studies.html). (Accessed on 02/27/2024).
- [19] 東京国際フォーラム公式ウェブサイト. 東京国際フォーラム a ホール（大ホール）写真, 2024 年 2 月参照. 東京国際フォーラム公式 HP より.
- [20] © Asanagi. 池袋西口公園 グローバルリング シアター 写真, 2024 年 2 月参照. Wikipedia より.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] ISO 3382-1:2009. Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 1: Performance spaces.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] ヤマハ株式会社 afc enhance について. [https://jp.yamaha.com/products/proaudio/afc\\_afc\\_enhance.html#product-tabs](https://jp.yamaha.com/products/proaudio/afc_afc_enhance.html#product-tabs). (Accessed on 02/22/2024).

- [29] 清水寧, 佐原伸一, 川上福司. 音場支援の制御性拡大を目的とした時変性手法の検討 -時変性fir フィルターと空間平均化伝送システムによる安定化-. 日本音響学会研究発表会講演論文集, Vol. 1996, No. 2, pp. 829–830, 09 1996.

## 謝辞

本論文は東京大学大学院工学系研究科建築学専攻修士課程において、同専攻の佐久間哲哉教授の主指導の下行った研究をまとめたものです。指導教員である佐久間哲哉教授には、学部4年生の頃より充実したご指導を頂き、研究の進め方や論文の書き方等、研究活動における基礎的なことから専門的なことまで、多くのことを学ばせて頂きました。研究に関する真摯な助言を通じ、一生の宝となるに違いない様々な学びの機会をも頂きましたことを、深く感謝致します。

ヤマハ株式会社の橋本悌氏、大木大夢氏、渡辺隆行氏、宮崎秀生氏、日根野翔太氏、中川貴美子氏ら空間音響グループの皆様には、実験機材およびソフトウェアの貸与をはじめとし、実験に関する助言、コンサートホールにおける音響測定に関する実務的な数々のご指導、多様なコンサートホールにおける貴重な実測データをご提供いただいたことなど、本研究の実施にあたって多大なるご協力を頂きました。この場をお借りし、厚く御礼申し上げます。

明治大学理工学部建築学科の上野佳奈子教授、早稲田大学人間科学学術院の松尾綾子助教には、演奏実験の実施方法やその結果の分析方法について、多くのご助言を頂きました。心より感謝申し上げます。また、上野佳奈子教授の研究室の学生である永野洋介君、新井梓文君、岩佐正樹君は、所属は違えども共に建築音響学の研究に取り組む心強い仲間であり、よき友となってくれました。

本研究室OBの中津成博氏、深田竜岐氏、学術専門職員の劉金雨氏は、まだ私が右も左もわからない学部4年生だった頃から親身にたくさんの助言をいただき、研究生活に必要なほとんどあらゆることを教えてくださいました。音響測定の方法や音響機器の操作方法等の技術的なことに止まらず、折に触れて格別の心遣いをいただき、精神的にも大変心強く支えてくださいました。ここに感謝の意を表します。

また本研究室OGの中島美百合氏、廣瀬量子は、論文執筆や発表準備を進める上で参考資料の送付に快くご対応下さり、心理評価実験の実施にあたり頂いたご助言を役立てることができました。心より感謝申し上げます。

博士課程の曹達氏、山崎泰知氏、陳科吉氏は、学会でのご発表を拝見する機会が多く、その姿から研究活動に対する姿勢や発表の仕方など、多くのことを学びました。加えて、筆者が研究を進める上で不明点に關し質問する機会も多く、その度に快くご回答下さいました。大変感謝しております。

同期の萩原諒君とは、励まし合いながら学部4年生からの3年間をともに過ごしてきました。時に研究が辛く苦しいと感じることがあっても、隣にはいつも研究に励む萩原君がいたことは、筆者にとって大きな幸運であり、筆者が研究を続けてこられた大きな理由の一つです。萩原君には感謝の気持ちでいっぱいです。

後輩の所壮琉君、西恵太朗君、河野光貴君、大林紅音さんは同じキャンパスを拠点とし楽しい

時間を多く過ごしたほか、お互いの研究についての相談の中で、筆者自身にもたくさんの気づきを与えてくれました。心から感謝いたします。

演奏実験には、30名を超える多くの合唱経験者の皆様にご参加いただきました。また、演奏実験への協力者の募集自体も、団を挙げてご尽力くださったイタリアンサンブルの皆様をはじめ、多くの皆様が実験参加の呼びかけにもご協力くださいました。演奏実験にご協力くださった皆様に、心より感謝申し上げます。

最後に、筆者の学生生活を長きにわたり様々な局面からいつも支えて下さった家族と恋人に、感謝の意を表します。

2024年1月15日  
板垣大稀