

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¹⁾・規格化²⁾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³⁾。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⁴⁾ (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録した信号に「イコライザによる周波数特性の補正」「FIR フィルタの重畳による響きの付加」「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。

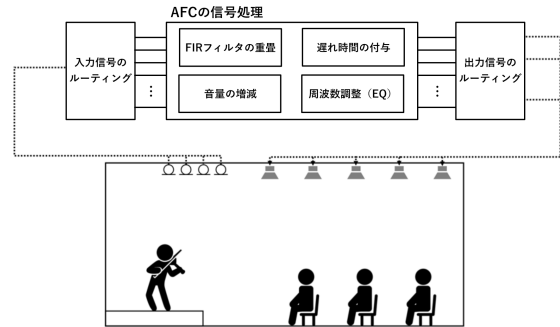


図 1 AFC の信号処理の概要

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。

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

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

$p(t)$ は全指向性マイクで収録したインパルス応答、 $p_{\text{dir}}(t)$ 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 ISO⁵⁾ 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 の時間に測定用マイクに到来しているが、AFC によって

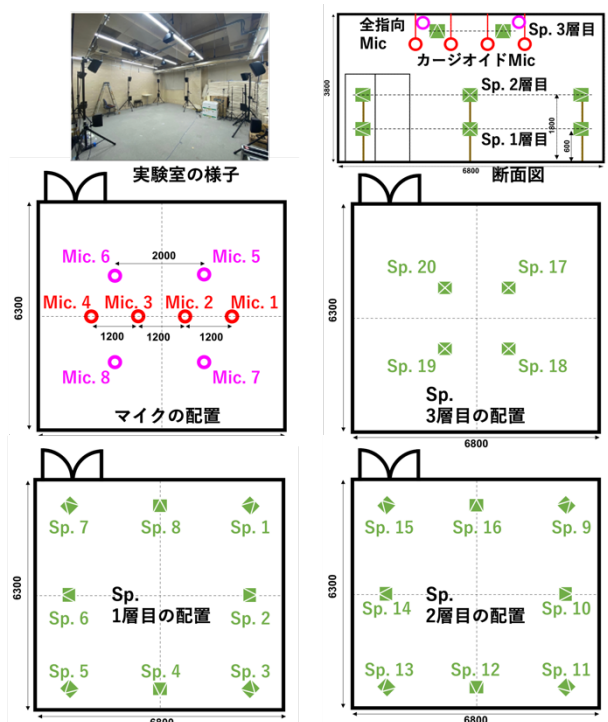


図 2 半無響室の外観とシステム機器配置

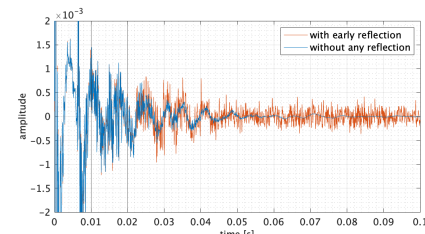


図 3 初期反射音付加時の IR 時間構造

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 1σ 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 1σ 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变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畳する 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ったため、後期反射音制御部で重畳する 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

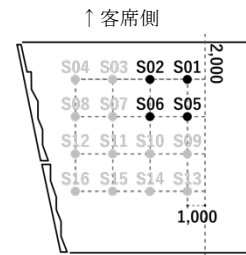


図 4 測定位置

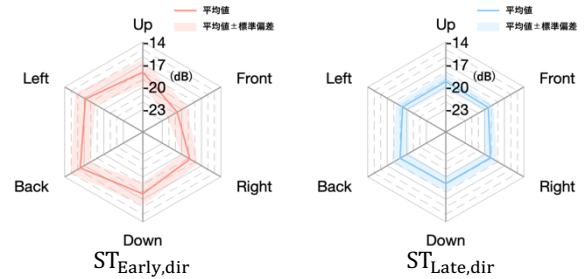


図 5 ステージ前方・中央付近の方向別 ST

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				mic				mic				mic				mic			
Sp.1								x												
Sp.2																				
Sp.3								x												
Sp.4																				
Sp.5								x												
Sp.6																				
Sp.7								x												
Sp.8																				
Sp.9								x												
Sp.10																				
Sp.11																				
Sp.12																				
Sp.13								x												
Sp.14																				
Sp.15								x												
Sp.16																				
Sp.17												x								
Sp.18												x								
Sp.19												x								
Sp.20																				

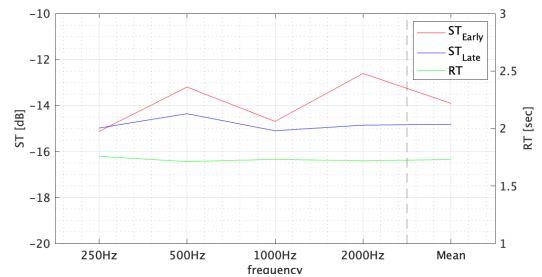


図 6 基準音場 O の ST と残響時間

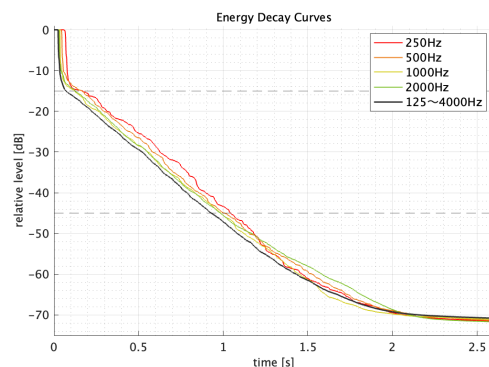


図 7 基準音場 O の残響減衰曲線

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。

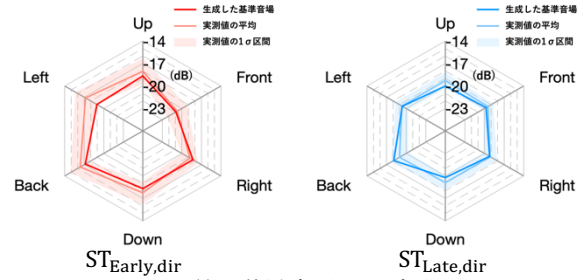


図 8 目標値と基準音場 O の方向別 ST

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、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。

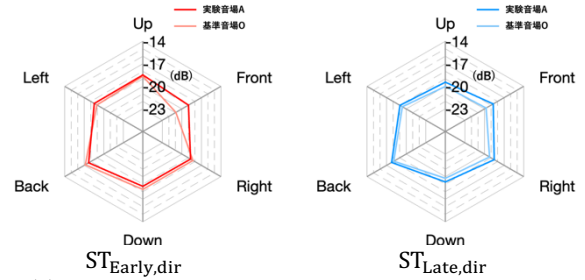
4.2 演奏実験の手順

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。

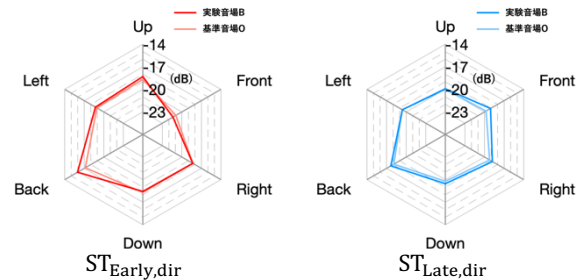
一回の実験では、音場 O で演奏したのち音場 A~D のうちいずれか一つをランダムに提示して演奏を行い、音場 O に対する印象の変化を 7 段階の評定尺度を用いた段階評価により回答を求めたほか、演奏時の響きの印象・感想等について自由記述により回答を求めた。これを 4 つの音場すべてで演奏するまで繰り返したのち、全体を通した印象について自由記述により回答を求めた。

表 3 段階評価の項目と評価尺度

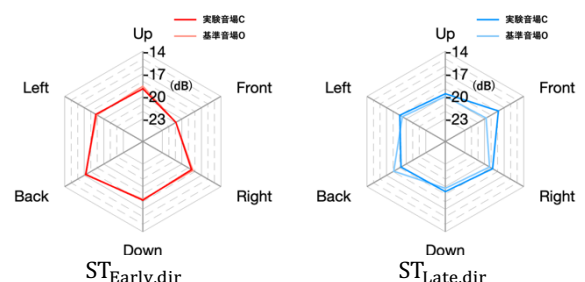
段階評価項目		評価尺度 (-3~3の7段階)
響きの印象	響きが増えたか	減った / 増えた
	自分の音の聴きやすさ	聴きにくくなった / 聴きやすくなった
	他人の音の聴きやすさ	聴きにくくなった / 聴きやすくなった
空間の印象	空間の広がり	狭まった / 広がった
	客席全体に届く感じ	
	自分に音が返る感じ	減った / 増えた
演奏の印象	音に包まれる感じ	
	疲れ感	疲れやすくなった / 疲れにくくなった
	強弱のつけやすさ	つけにくくなった / つけやすくなった
	アンサンブルのしやすさ	しにくくなった / しやすくなった
総合的な評価	音が溶け合う感じ	減った / 増えた
	演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



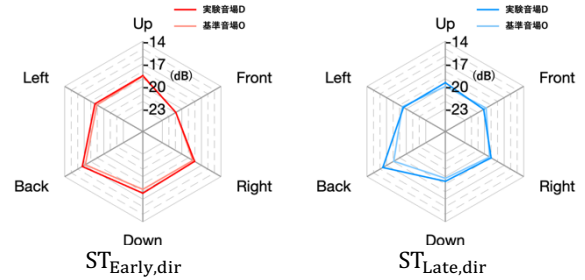
(a) 音場 A (初期:前方強め、後期:基準と同じ)



(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、空間的印象、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。

響きの印象と空間的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、響きの印象や空間的印象を向上させることができる可能性があると考えられる。

5. まとめ

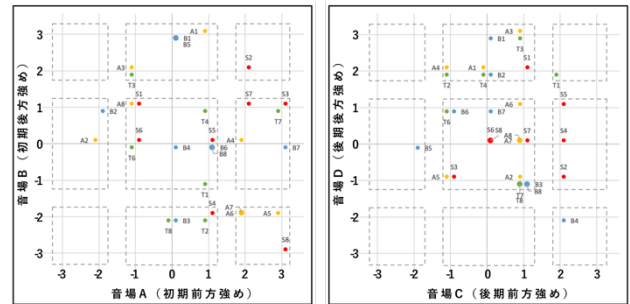
コンサートホールの上への反射音の到来方向を評価する物理指標を構築し、その実測結果をもとに、半無響室に導入した音場生成システムを用いて反射音の到来方向を制御した実験音場を生成した。生成した音場において混声四部のカルテットによる演奏実験を行った。その結果、後期反射音の前方から供給量の増加が演奏の印象を、後方からの供給量の増加が響きと空間的印象を向上させる可能性が示唆された。

6. 参考文献

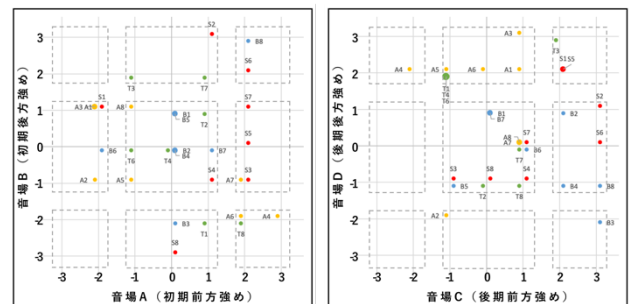
- [1] A.C. Gade, "Investigations of Musicians' Room Acoustic Conditions in Concert Halls. II- Field Experiments and Synthesis of Results," *Acustica*, Vol. 69, p249-262(1989)
- [2] ISO 3382-1:2009, *Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces*
- [3] 中村俊一, 白砂昭一: "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.

表4 各音場の平均値および標準偏差

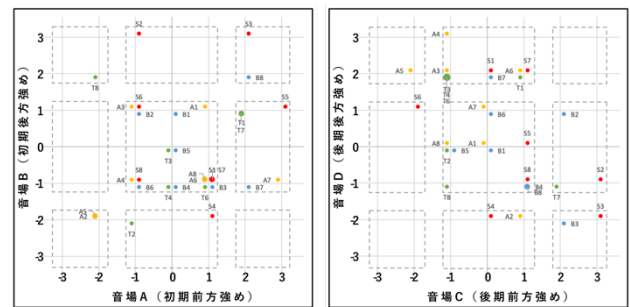
		平均				標準偏差			
		音場A	音場B	音場C	音場D	音場A	音場B	音場C	音場D
響きの印象	響き増	0.74	0.13	0.45	0.58	1.53	1.67	1.09	1.43
	自分の声	0.29	0.23	0.19	0.29	1.53	1.09	1.22	1.24
	他人の声	0.48	0.23	0.87	0.45	1.43	1.31	1.28	1.41
空間的印象	広がり	0.35	0.06	0.71	0.52	1.50	1.55	1.42	1.48
	客席に届く	0.45	0.32	0.58	0.29	1.26	1.30	1.09	1.35
	自分に返る	0.32	-0.10	0.23	0.42	1.45	1.45	1.33	1.52
	包まれる	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	うまかった	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



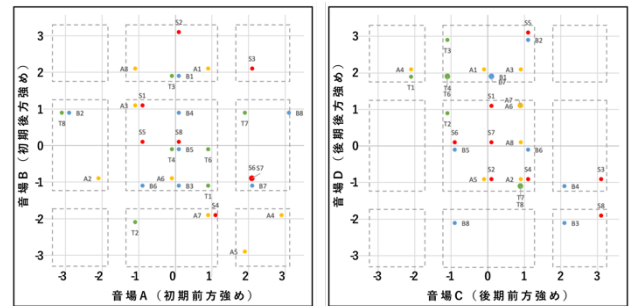
(a) 響きが増えたか



(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