

第1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。

1.1 音場支援システム AFC について

1.1.1 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 [1]。音源自体に人工的なリバーブを附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 [2]。

1.1.2 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 1.1 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 1.2 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) [3] 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 1.3 に示す。

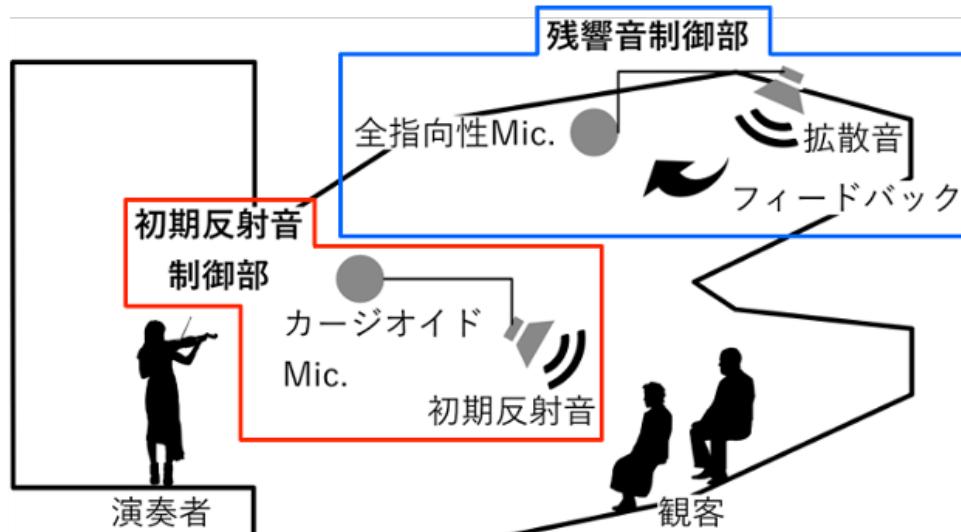
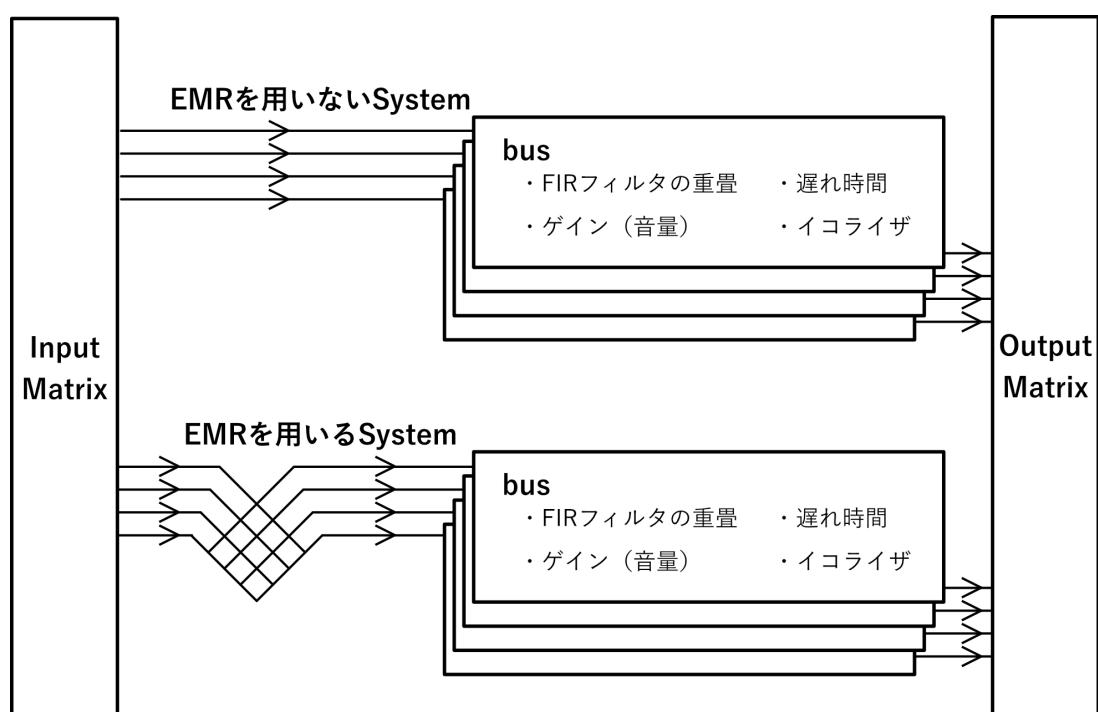
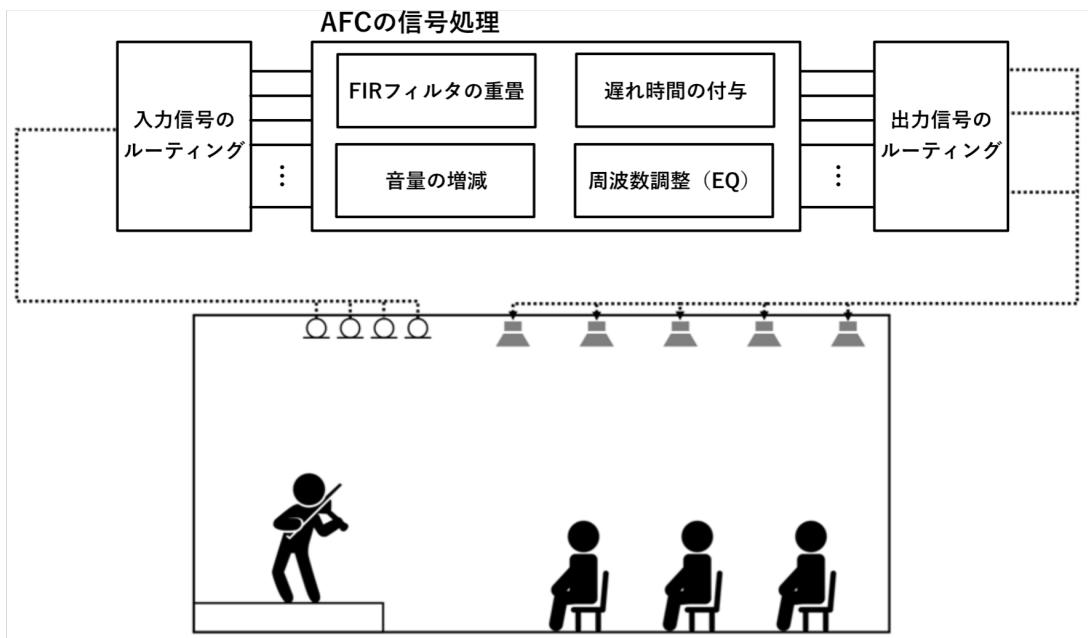


図 1.1: AFC における初期反射音と後期反射音の制御の概略図



1.1.3 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 1.4 に、音響機材の配置を図 1.7 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 1.5 に、そのときの様子を図 1.6 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 1.4: 実験室の内部の様子

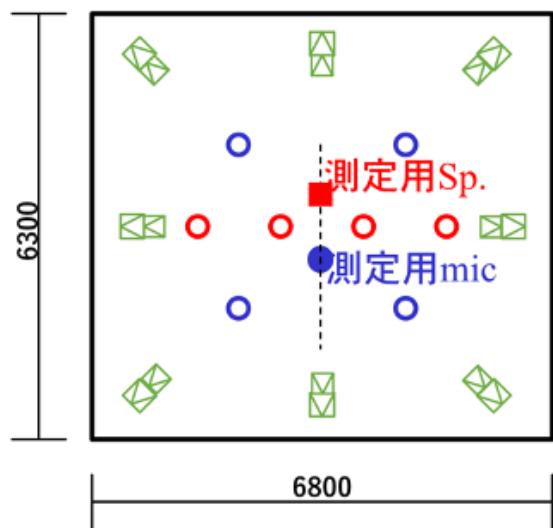


図 1.5: 音響測定機器の配置

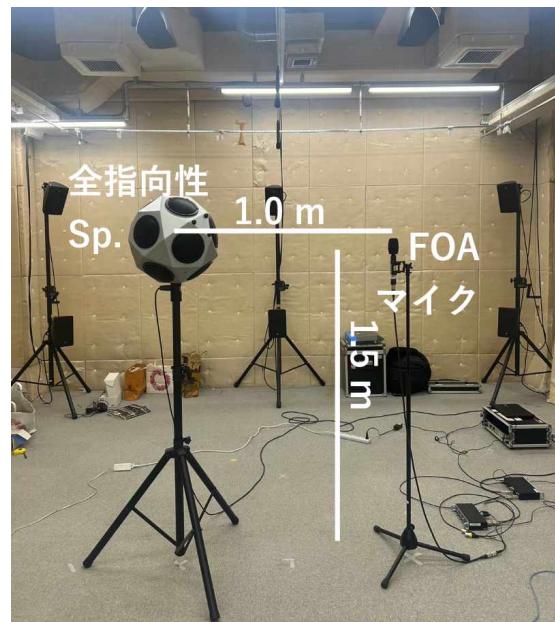
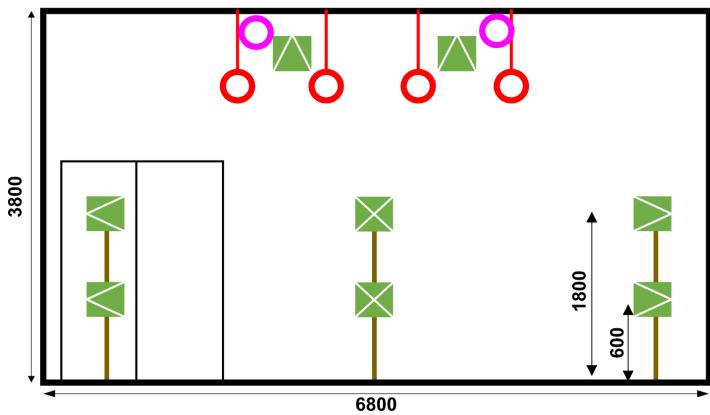
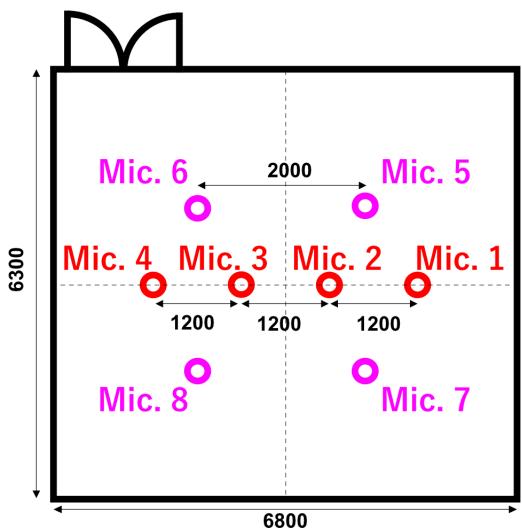


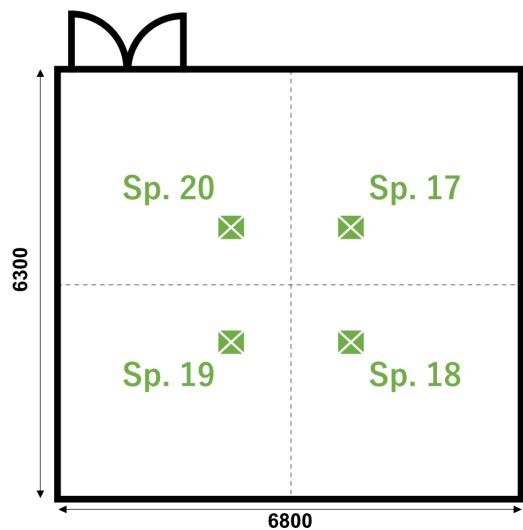
図 1.6: 音響測定時の様子



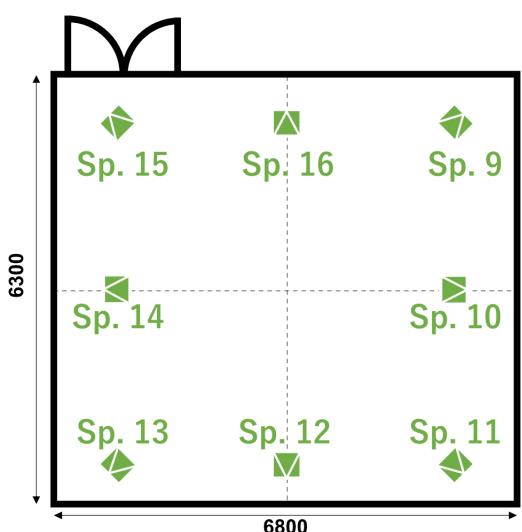
(a) 断面図



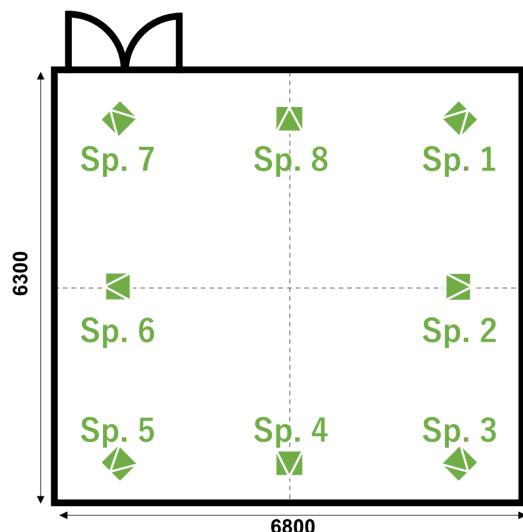
(b) マイクロホン配置



(c) スピーカー配置 三層目



(d) スピーカー配置 二層目



(e) スピーカー配置 一層目

図 1.7: AFC のシステム機器配置

1.2 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。

1.2.1 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 1.1 に示す。

表 1.1: 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		
Sp.15					
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

1.2.2 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 1.8 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 1.9 および図 1.10 に示す。



図 1.8: FIR フィルタを測定したコンサートホール

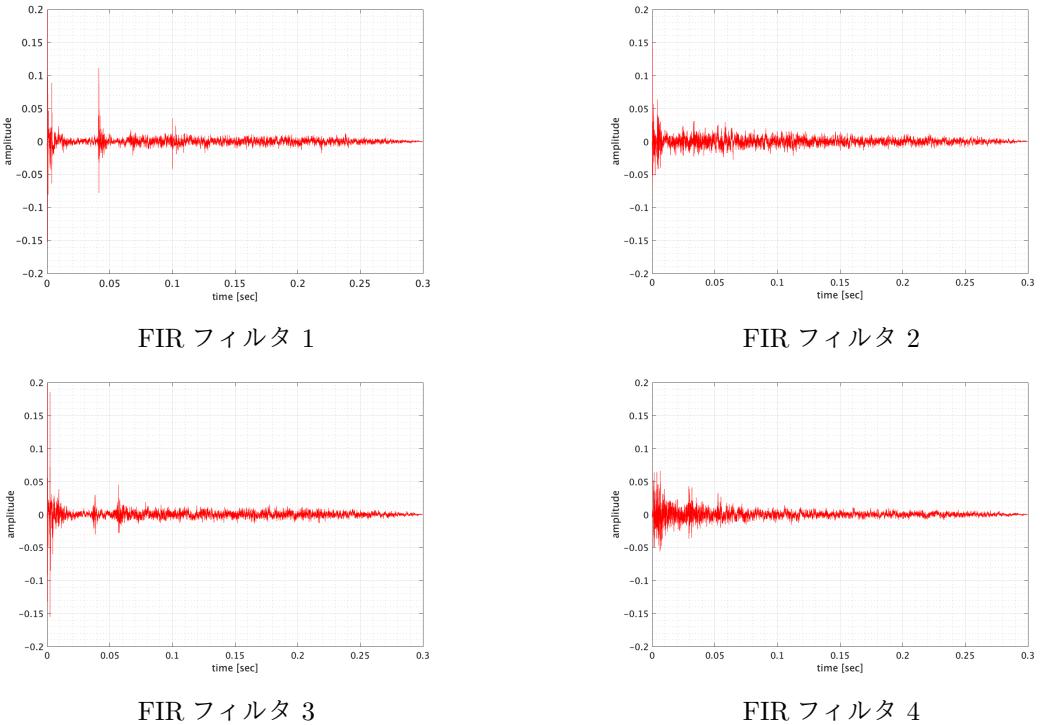


図 1.9: 初期反射音の重畠に用いた FIR フィルタ

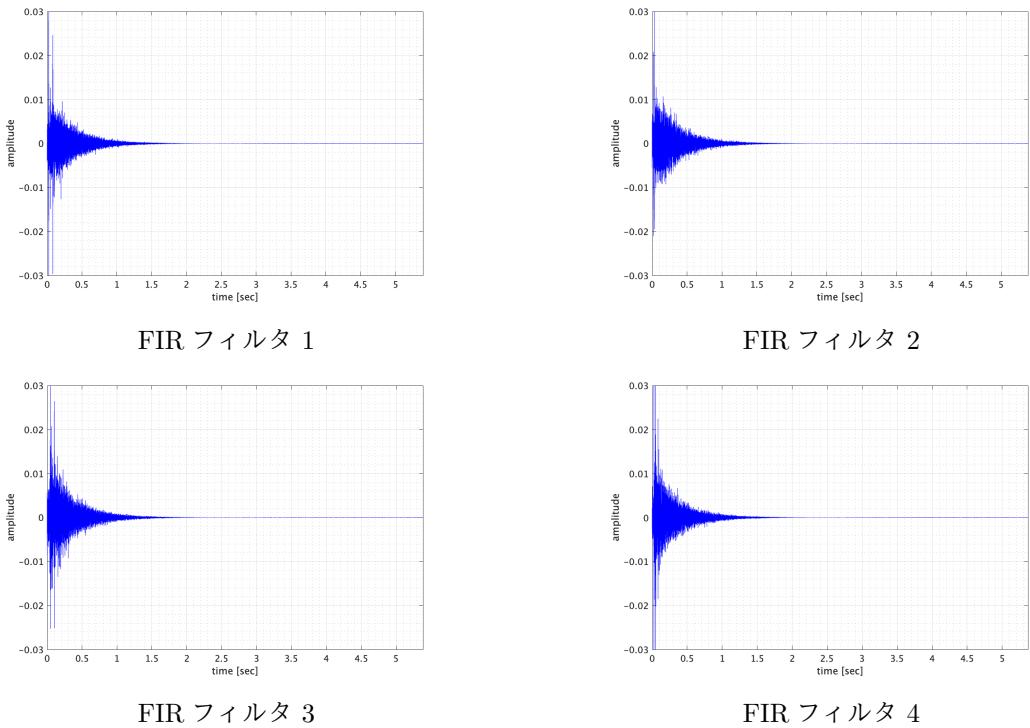


図 1.10: 後期反射音の重畠に用いた FIR フィルタ

1.2.3 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 1.2 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??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 1.3 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 1.2: 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 1.3: 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

1.3 生成音場の調整方法

図 1.2 および図 1.3 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。

1.4 生成した音場の特性

1.4.1 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 1.11 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 1.12 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 1.13 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 1.14 から図 1.18 に示す。

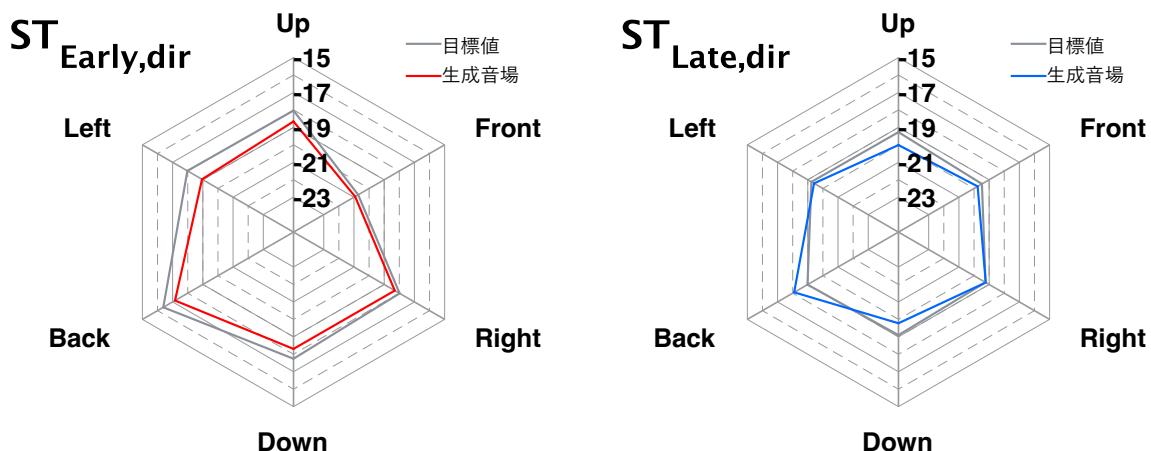


図 1.11: 基準音場の方向別 ST

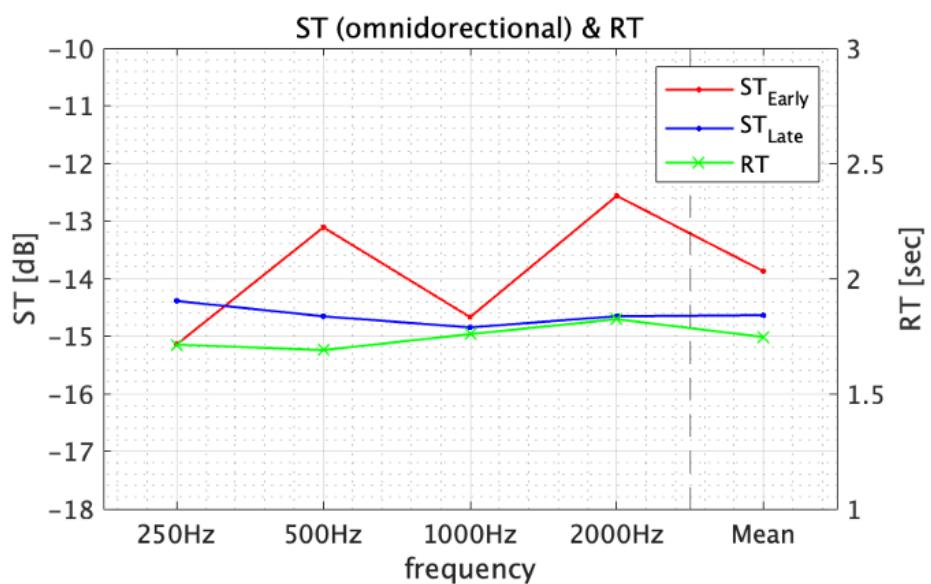


図 1.12: 基準音場の残響時間と ST

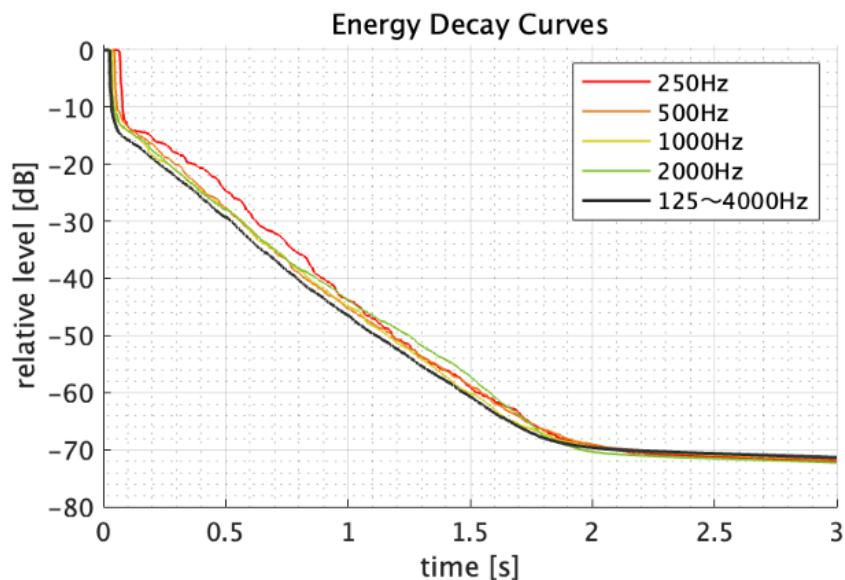


図 1.13: 基準音場の減衰曲線

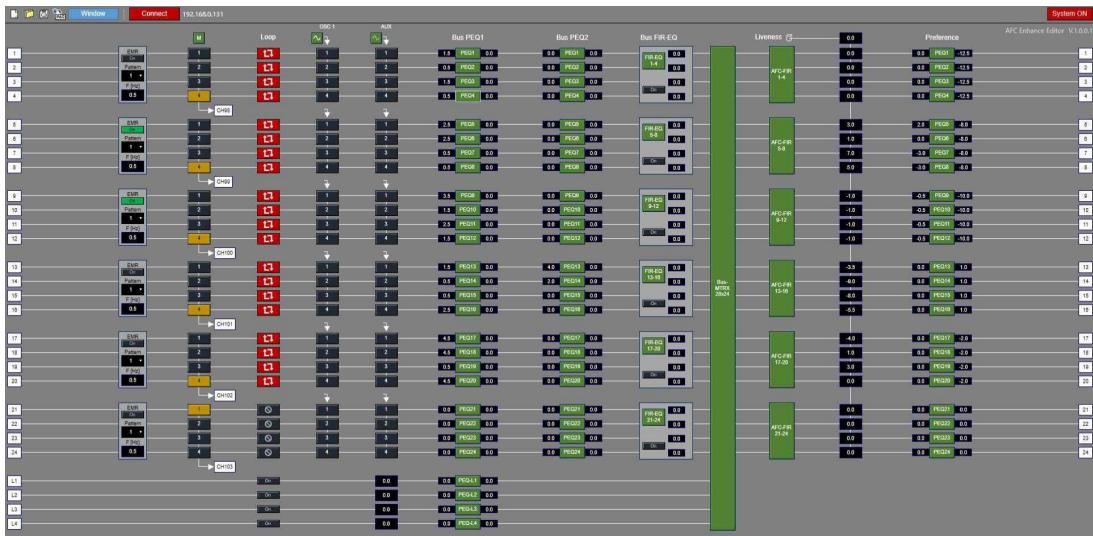


図 1.14: AFC 操作画面とゲインの設定

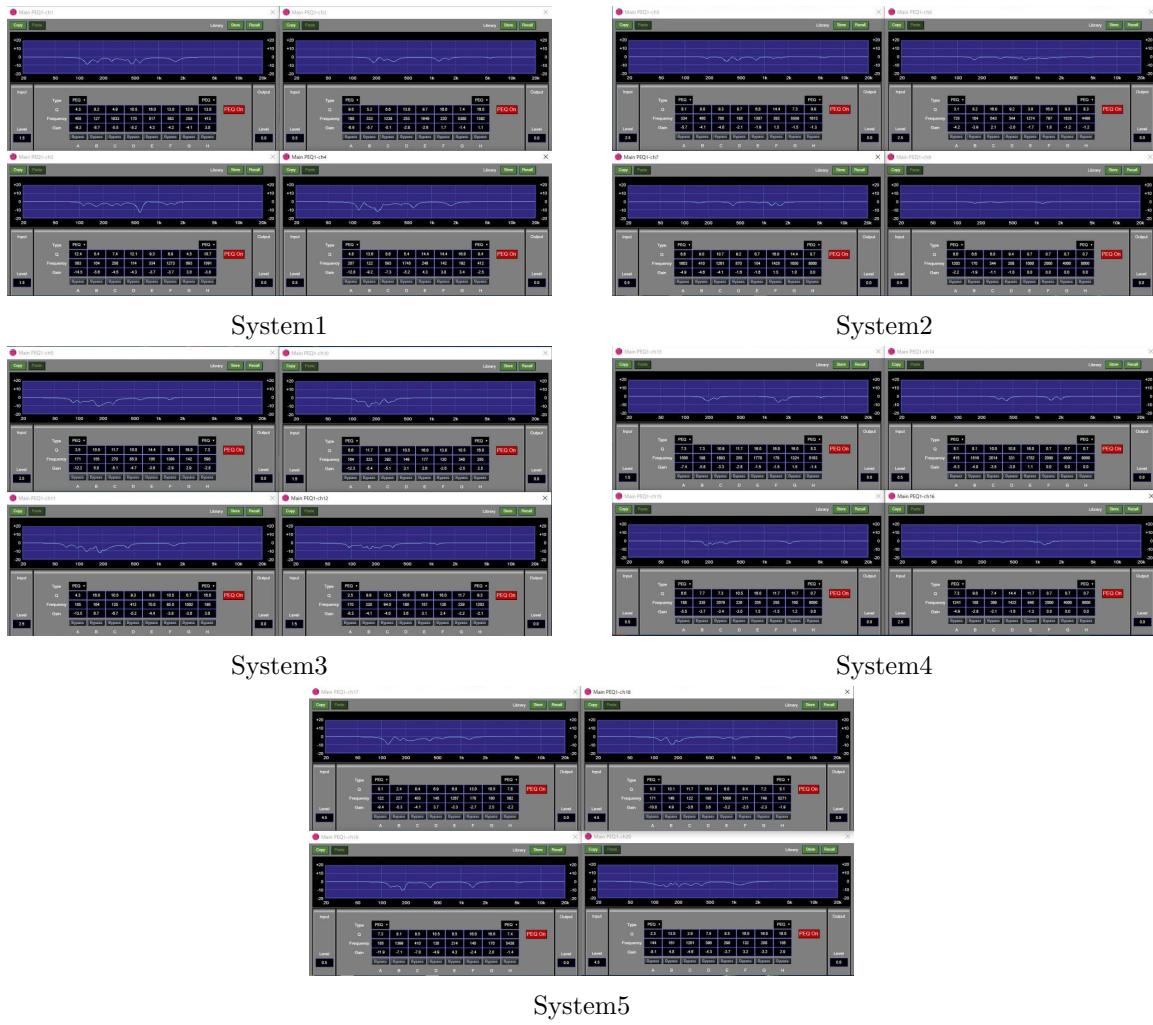


図 1.15: イコライザ 自動調整部



図 1.16: FIR フィルタと遅れ時間の設定

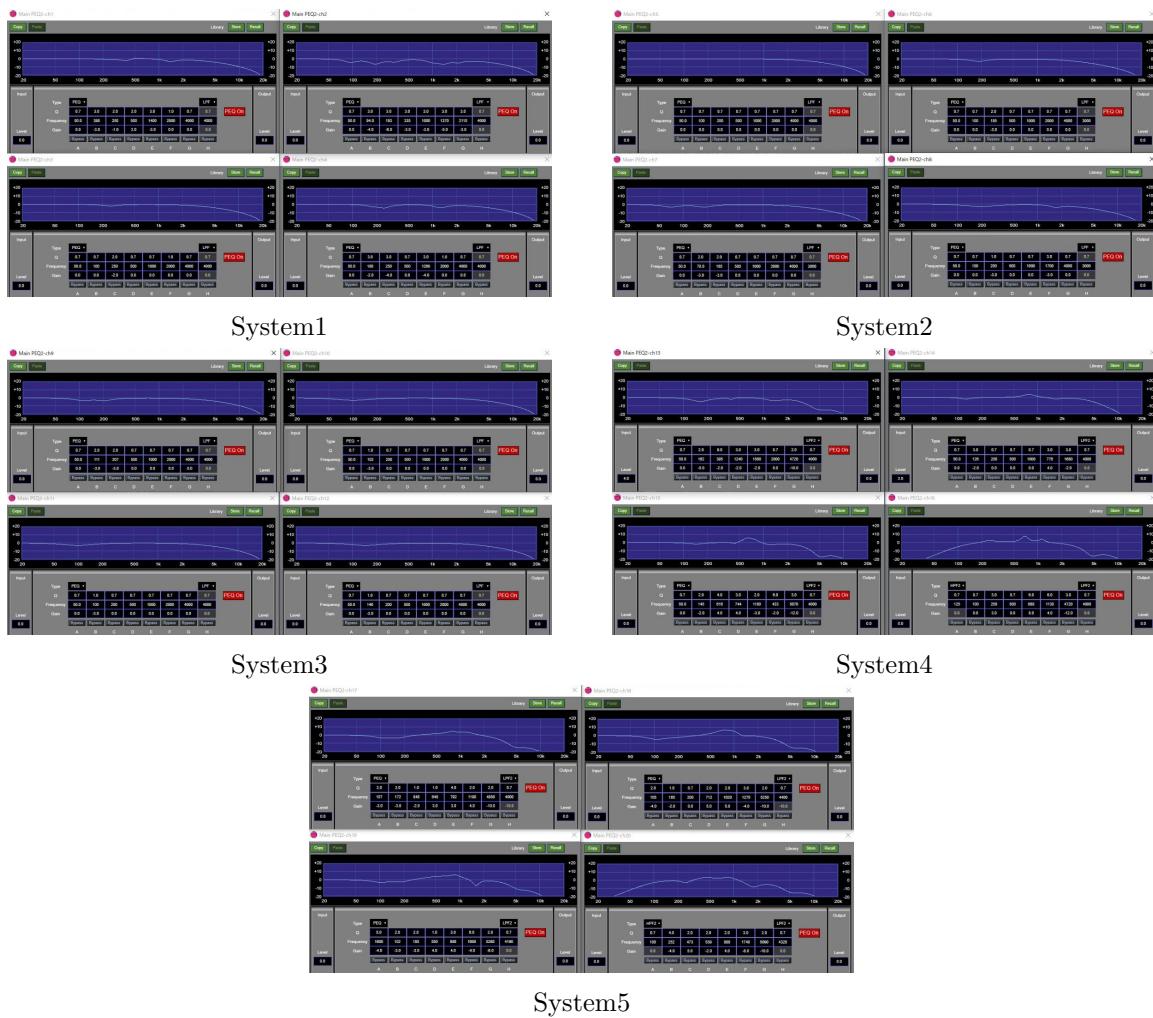


図 1.17: イコライザ 手動調整部 1

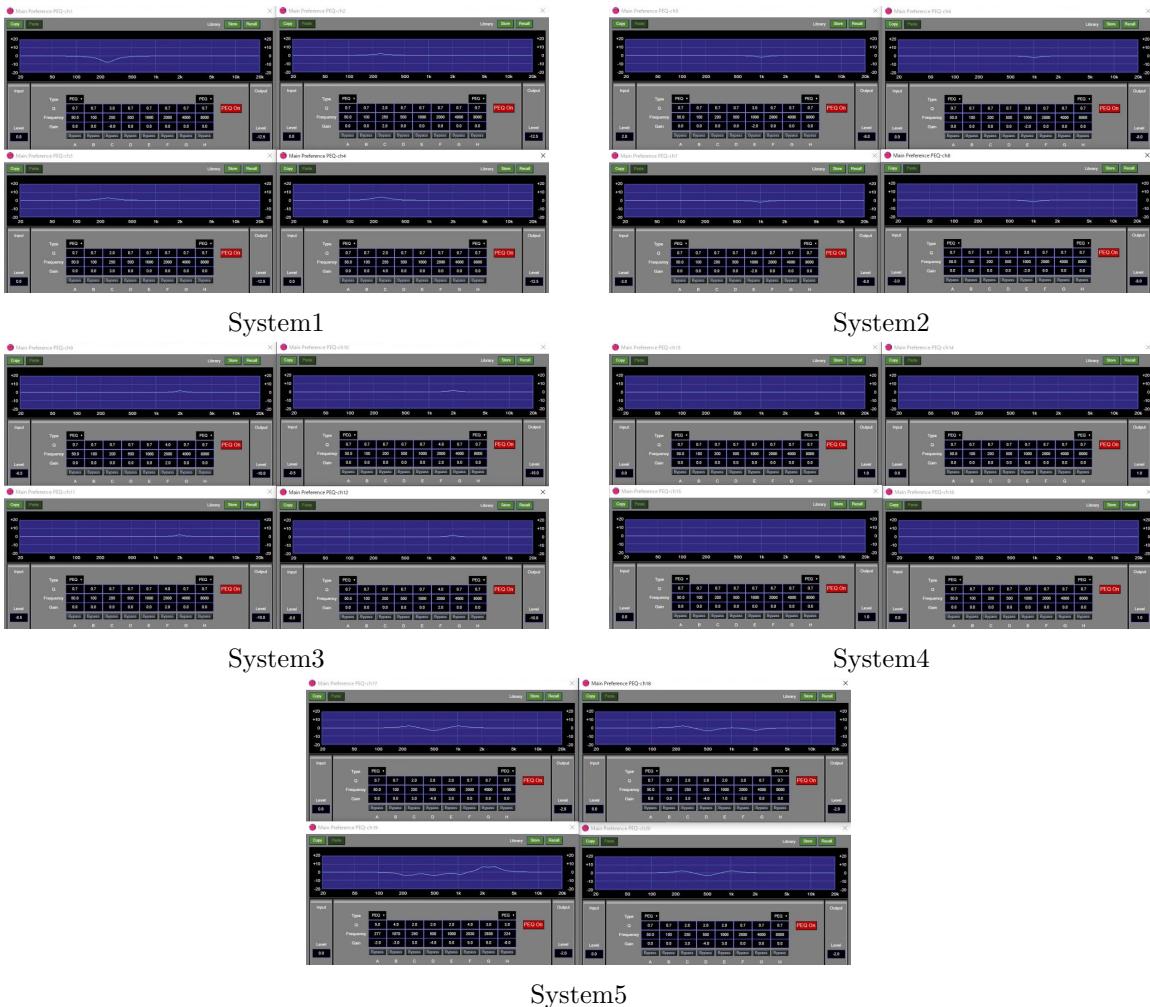


図 1.18: イコライザ 手動調整部 2

1.4.2 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 α 、初期反射音の後方を強めた音場を音場 β 、後期反射音の前方を強めた音場を音場 γ 、後期反射音の後方を強めた音場を音場 δ とする。生成した音場の ST_{Early} 、 ST_{Late} 、残響時間をそれぞれ図 1.19 から図 1.21 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 1.22 から図 1.25 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 1.26 から図 1.37 に示す。

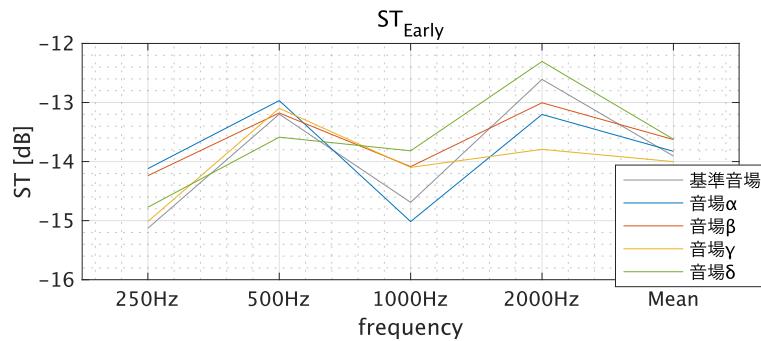


図 1.19: 実験音場の ST_{Early}

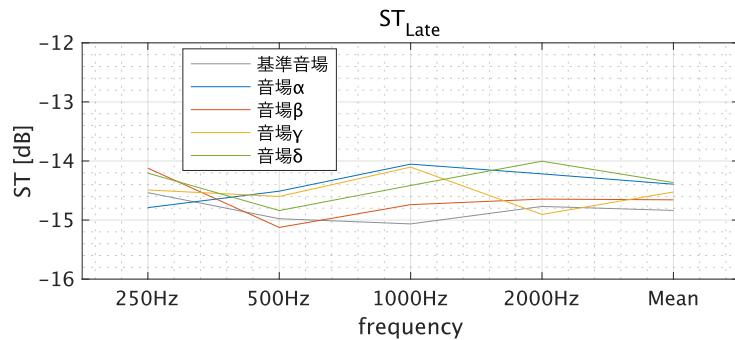


図 1.20: 実験音場の ST_{Late}

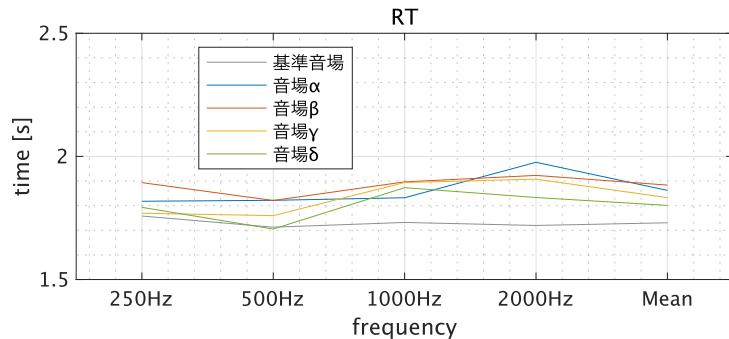


図 1.21: 実験音場の残響時間

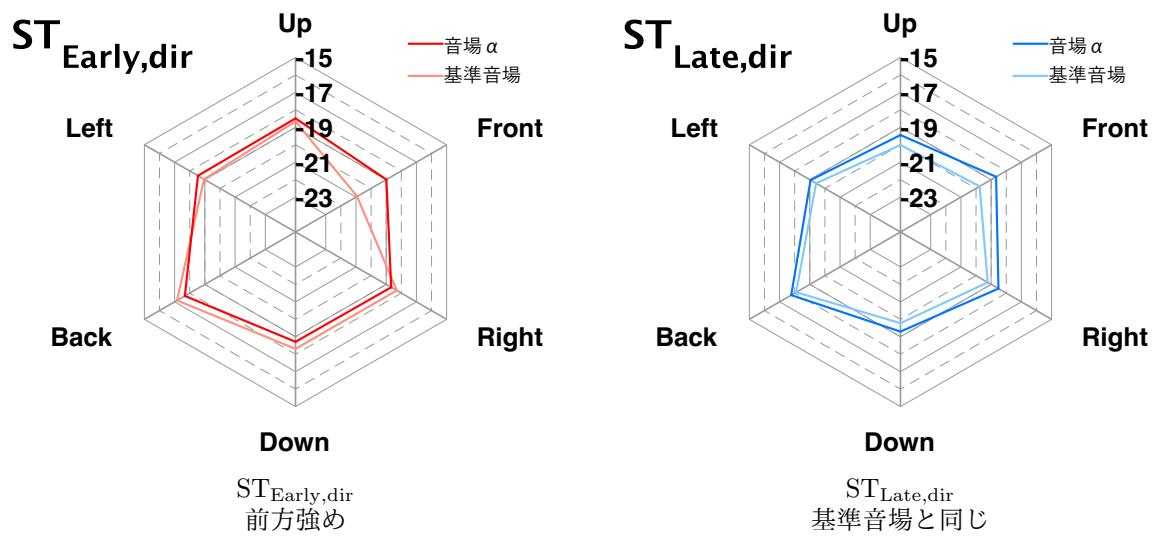


図 1.22: 音場 α の方向別 ST

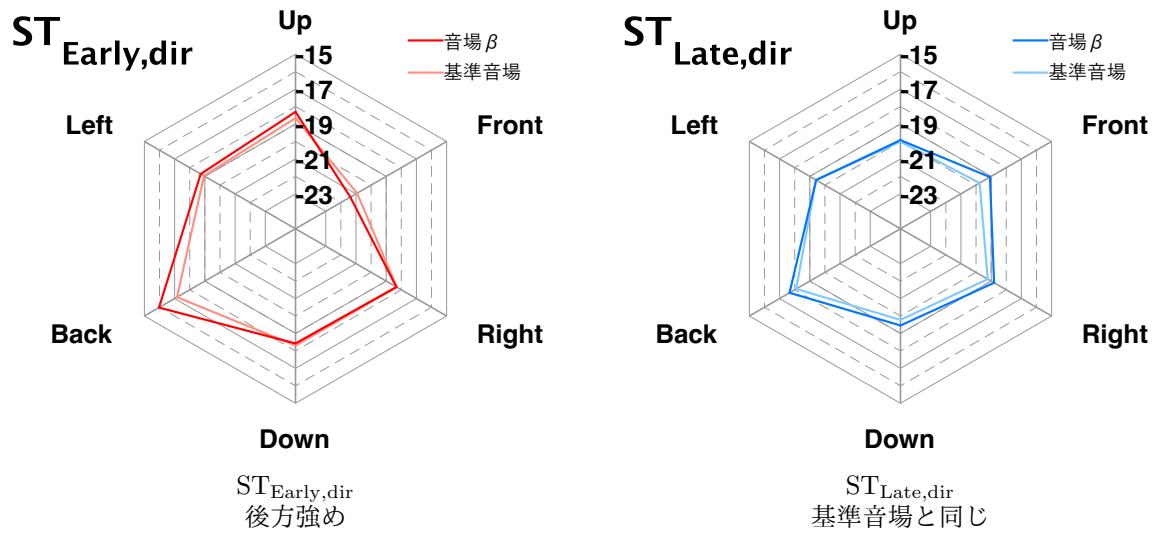


図 1.23: 音場 β の方向別 ST

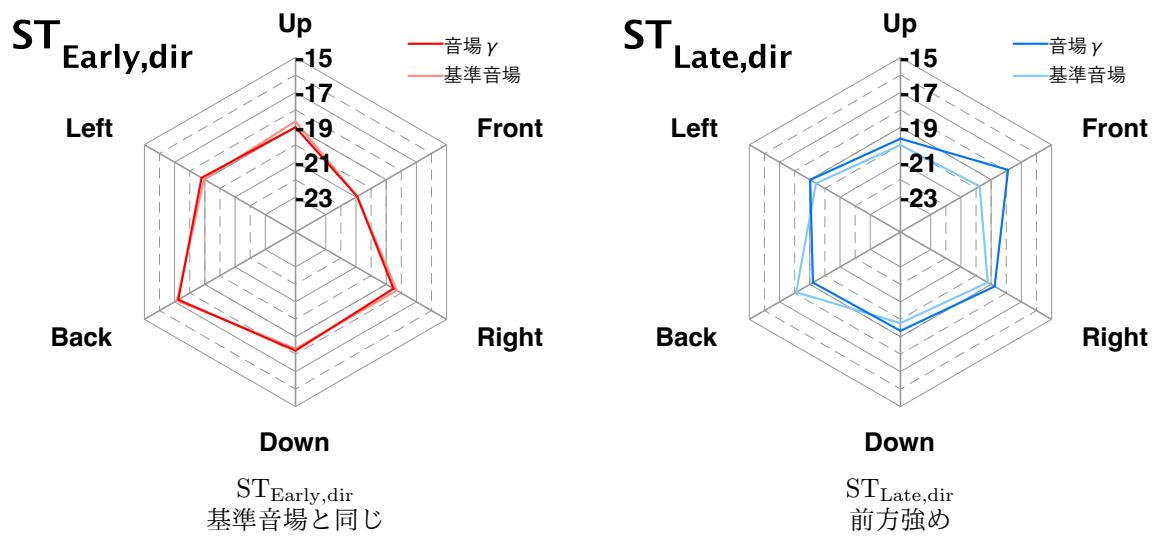


図 1.24: 音場 γ の方向別 ST

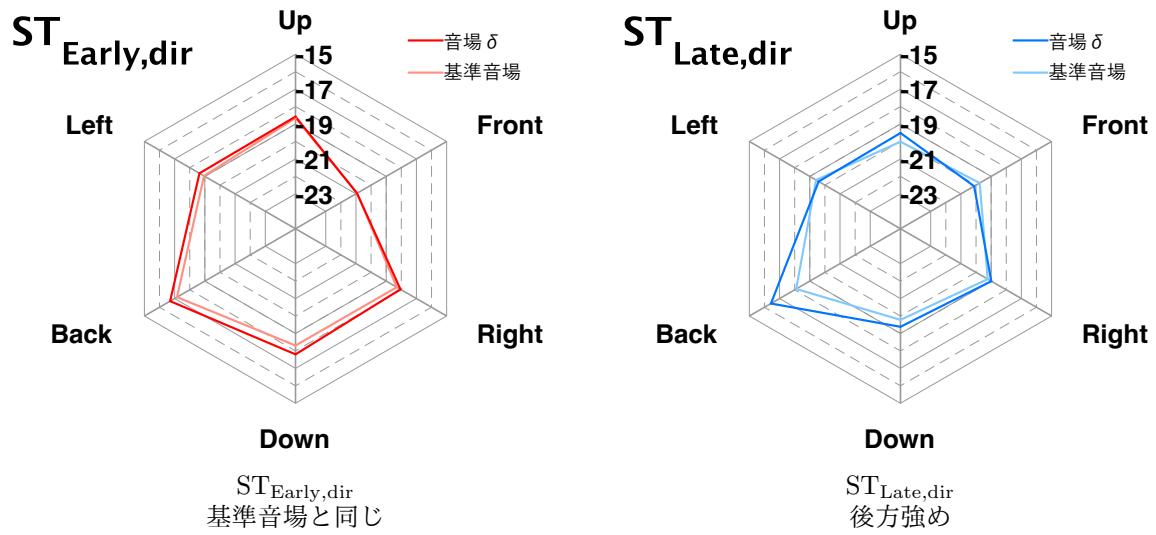


図 1.25: 音場 δ の方向別 ST

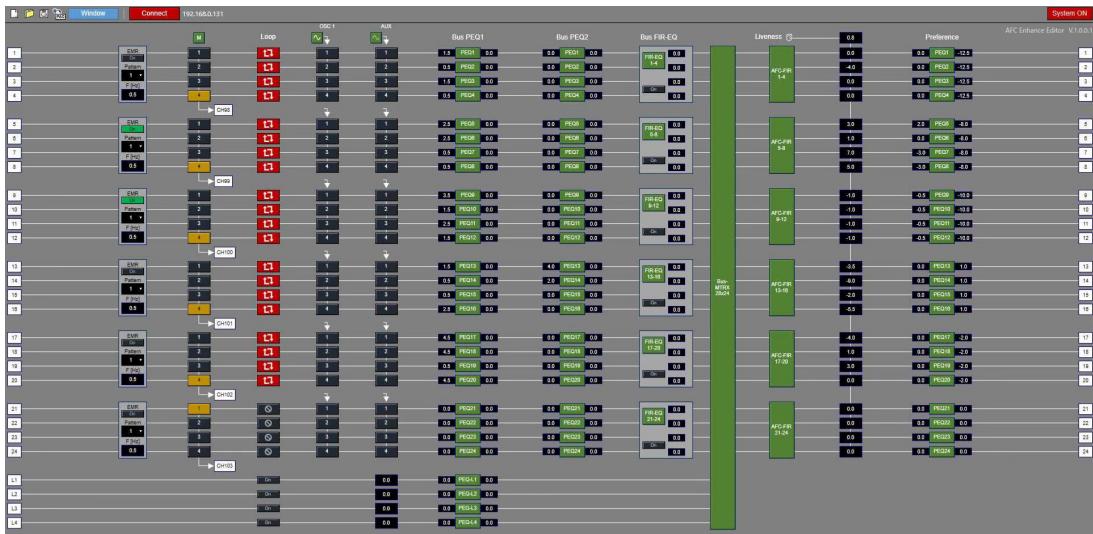


図 1.26: 音場 α 操作画面とゲインの設定

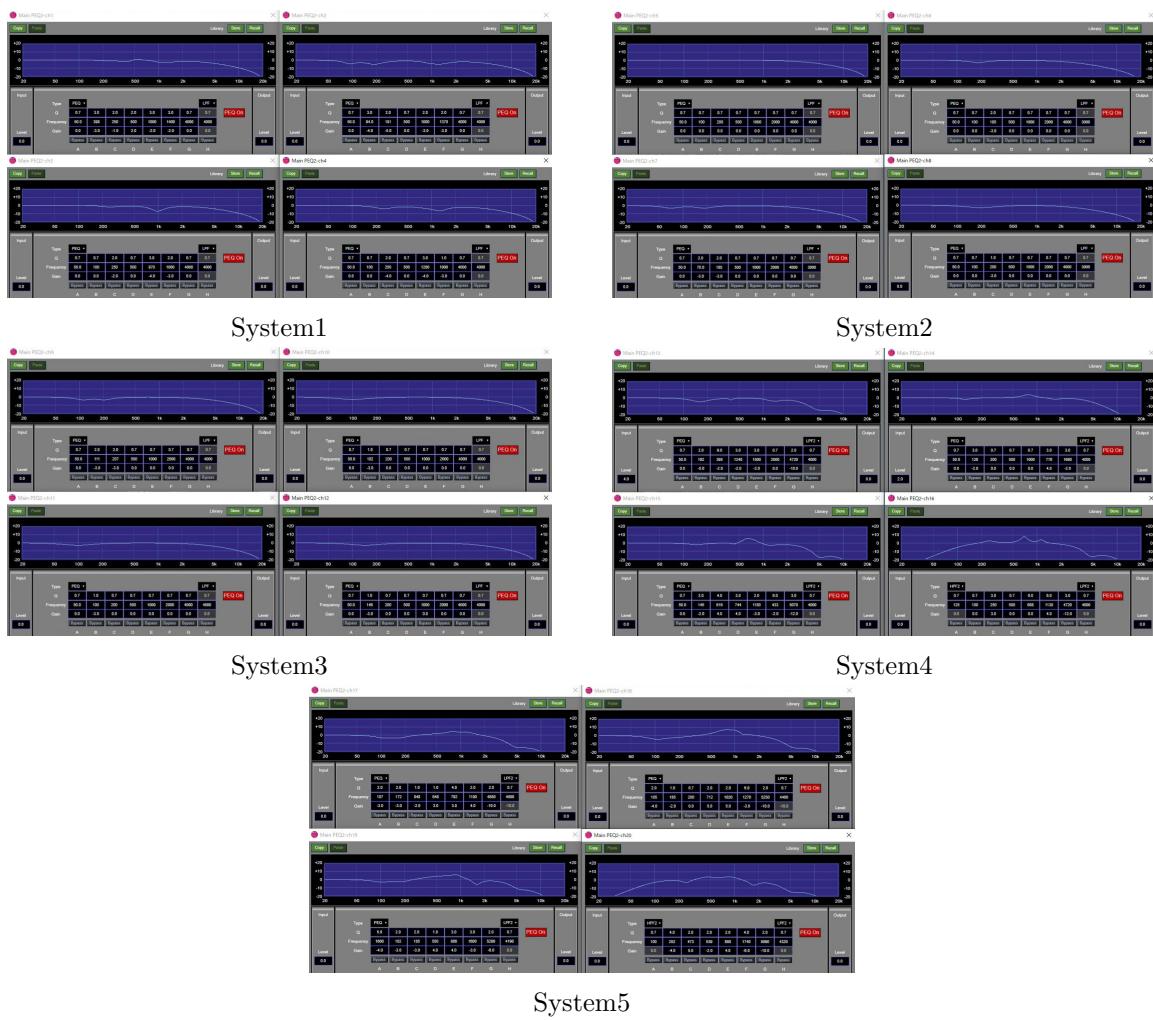


図 1.27: 音場 α イコライザ 手動調整部 1

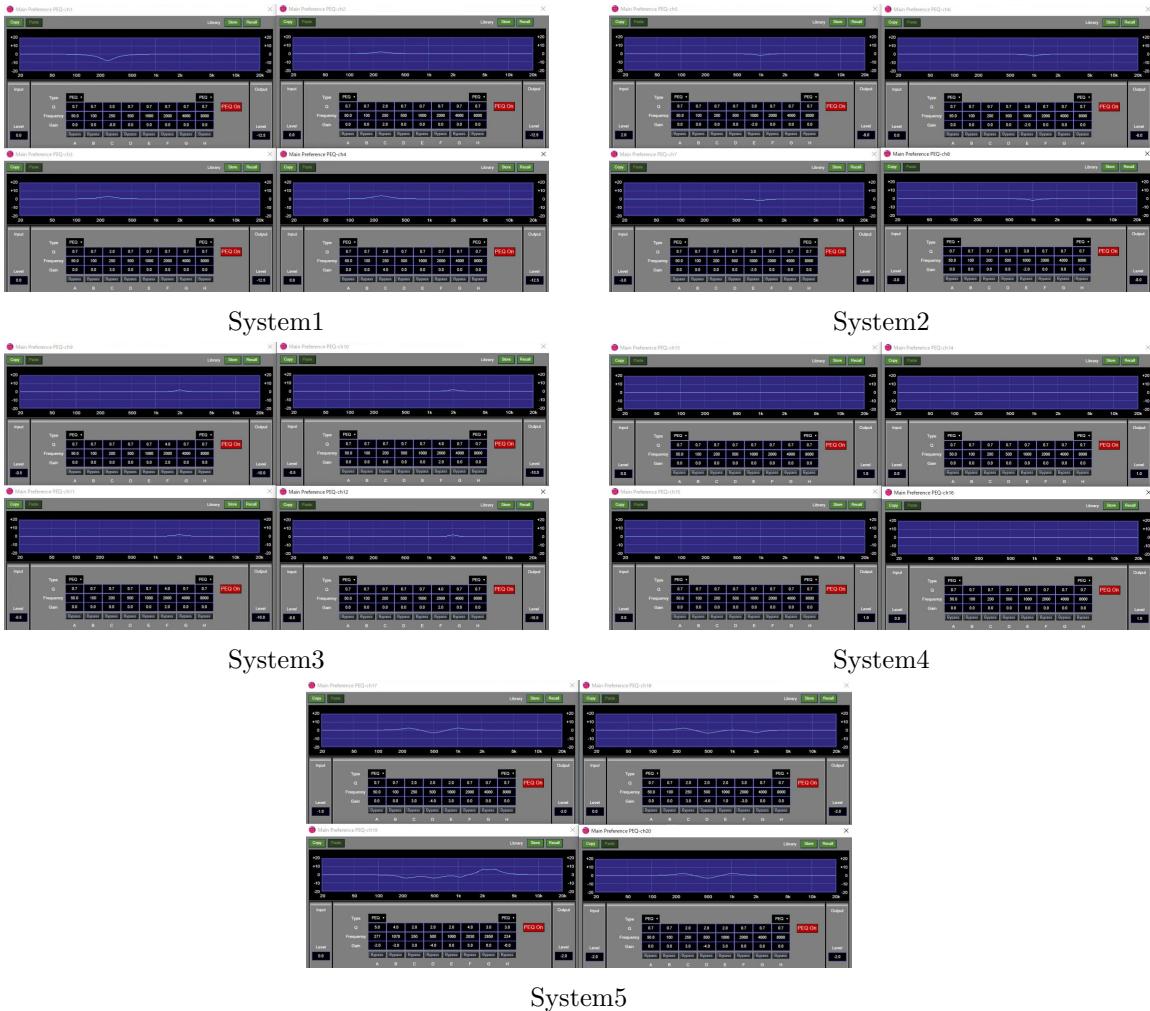


図 1.28: 音場 α イコライザ 手動調整部 2

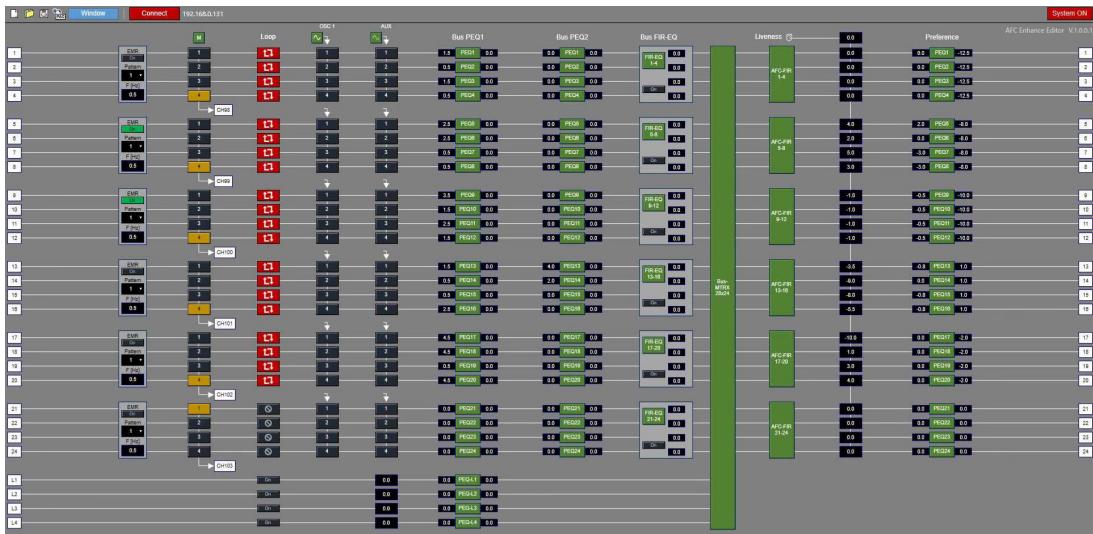


図 1.29: 音場 β 操作画面とゲインの設定

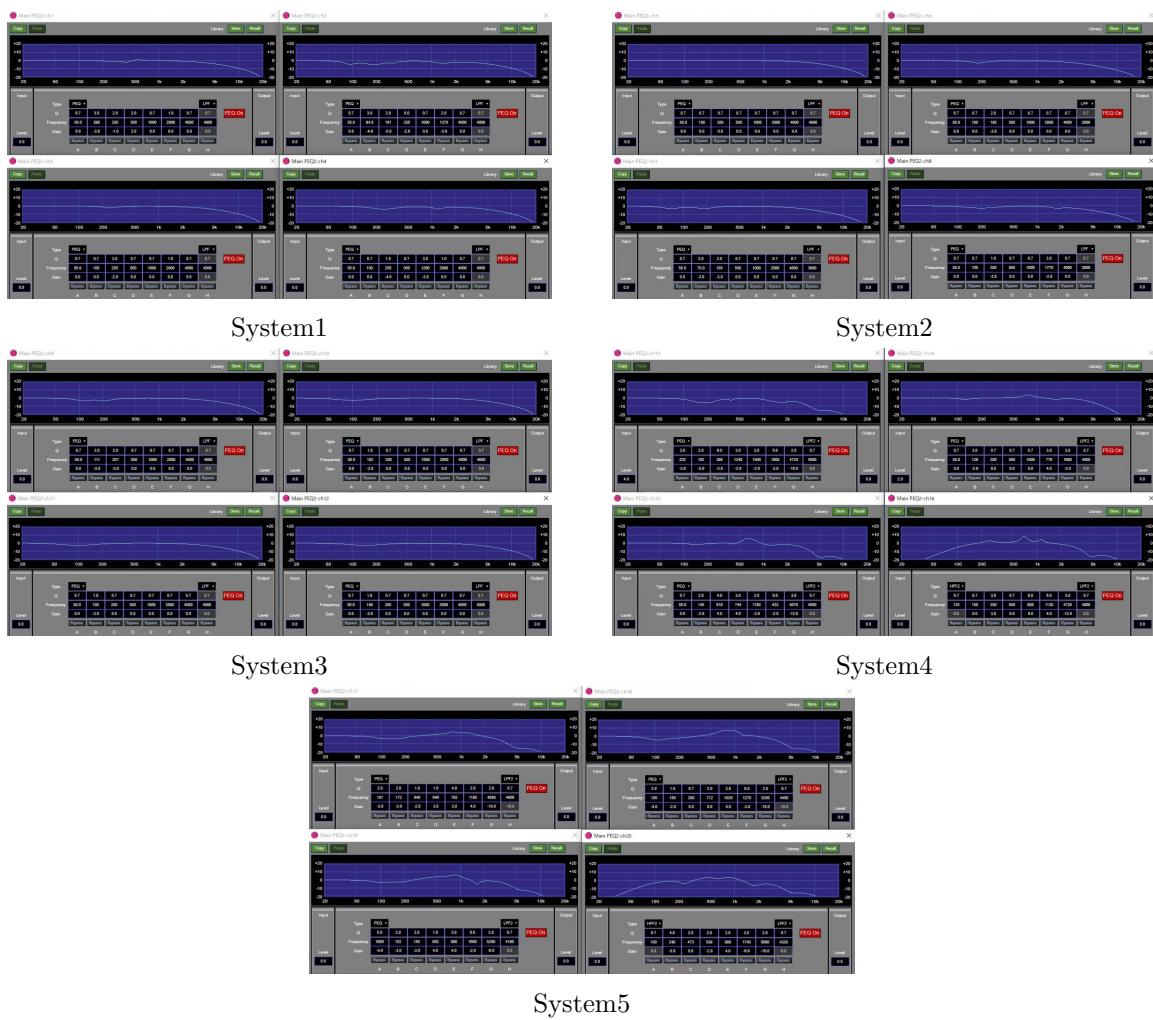


図 1.30: 音場 β イコライザ手動調整部 1

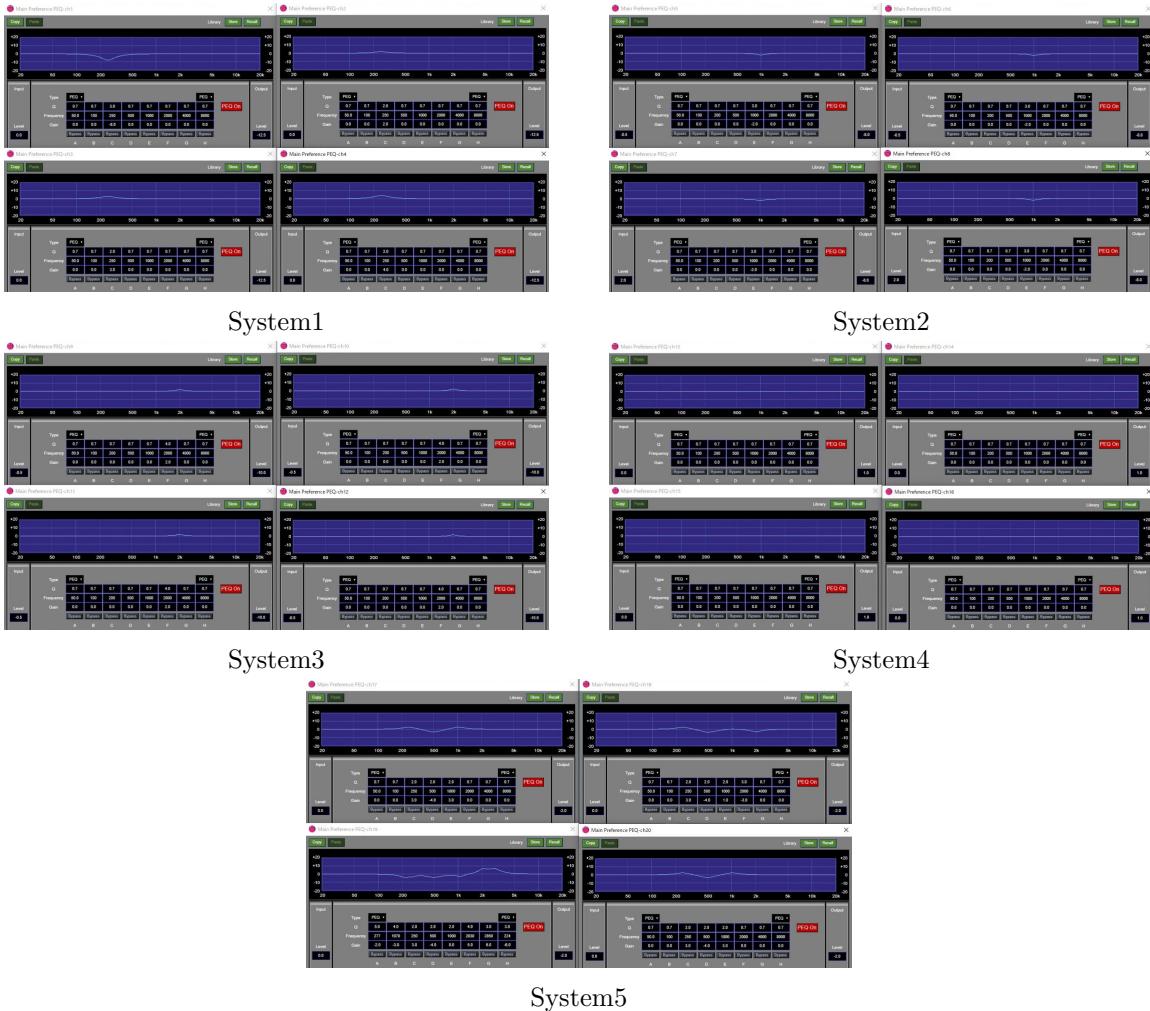


図 1.31: 音場β イコライザ 手動調整部 2

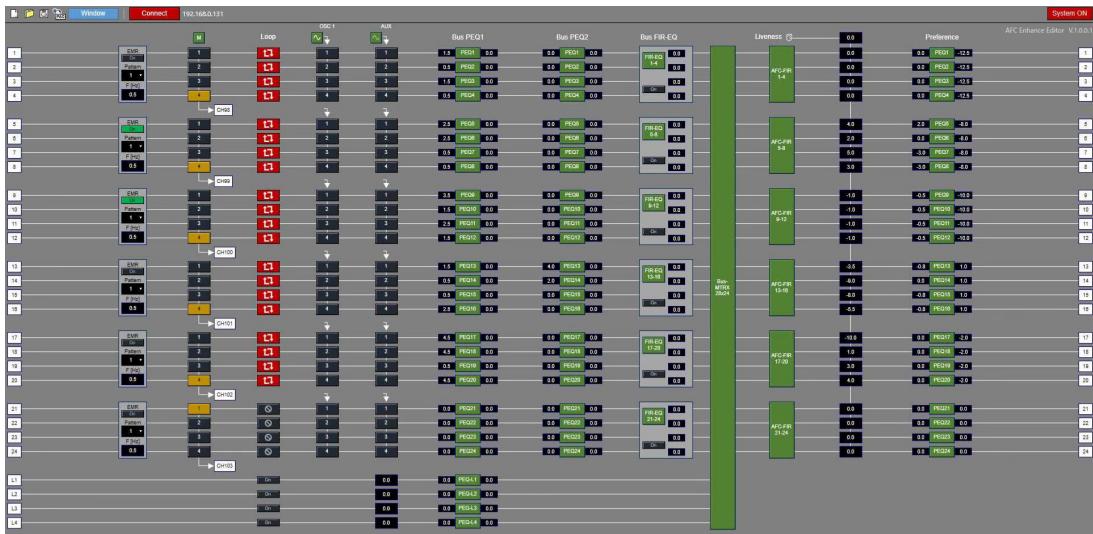


図 1.32: 音場 γ 操作画面とゲインの設定

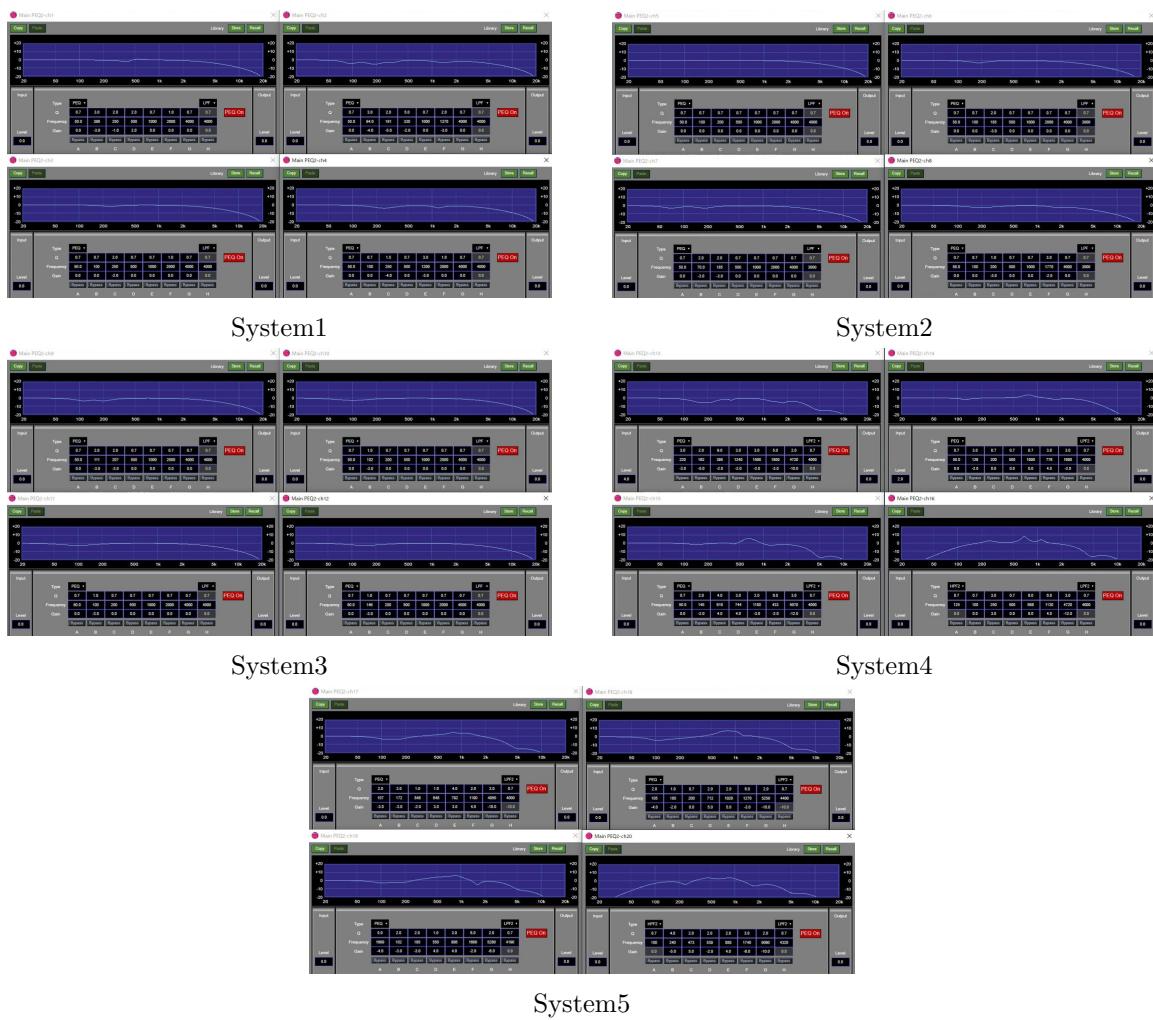


図 1.33: 音場 γ イコライザ手動調整部1

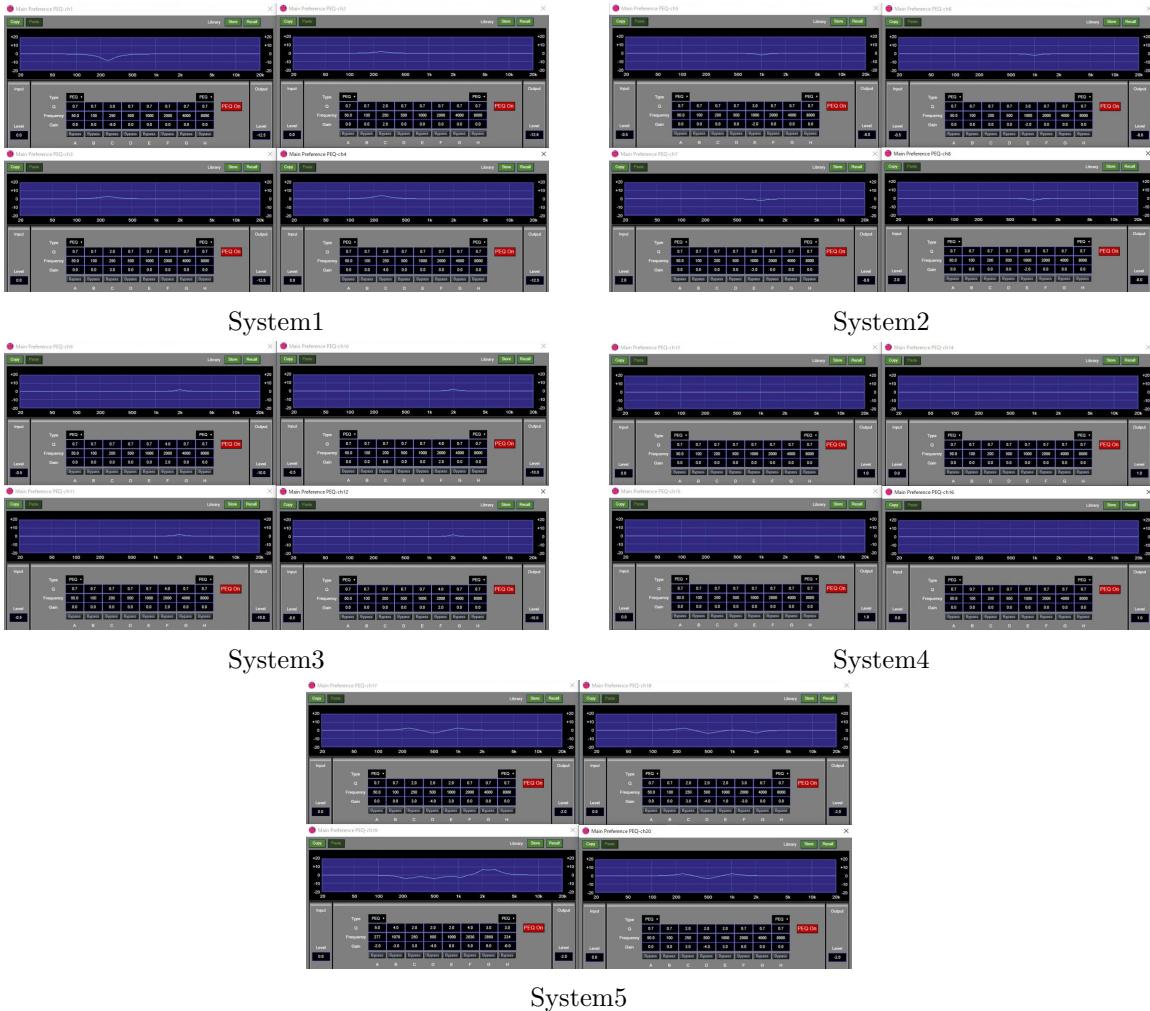


図 1.34: 音場 γ イコライザ 手動調整部 2



図 1.35: 音場 δ 操作画面とゲインの設定

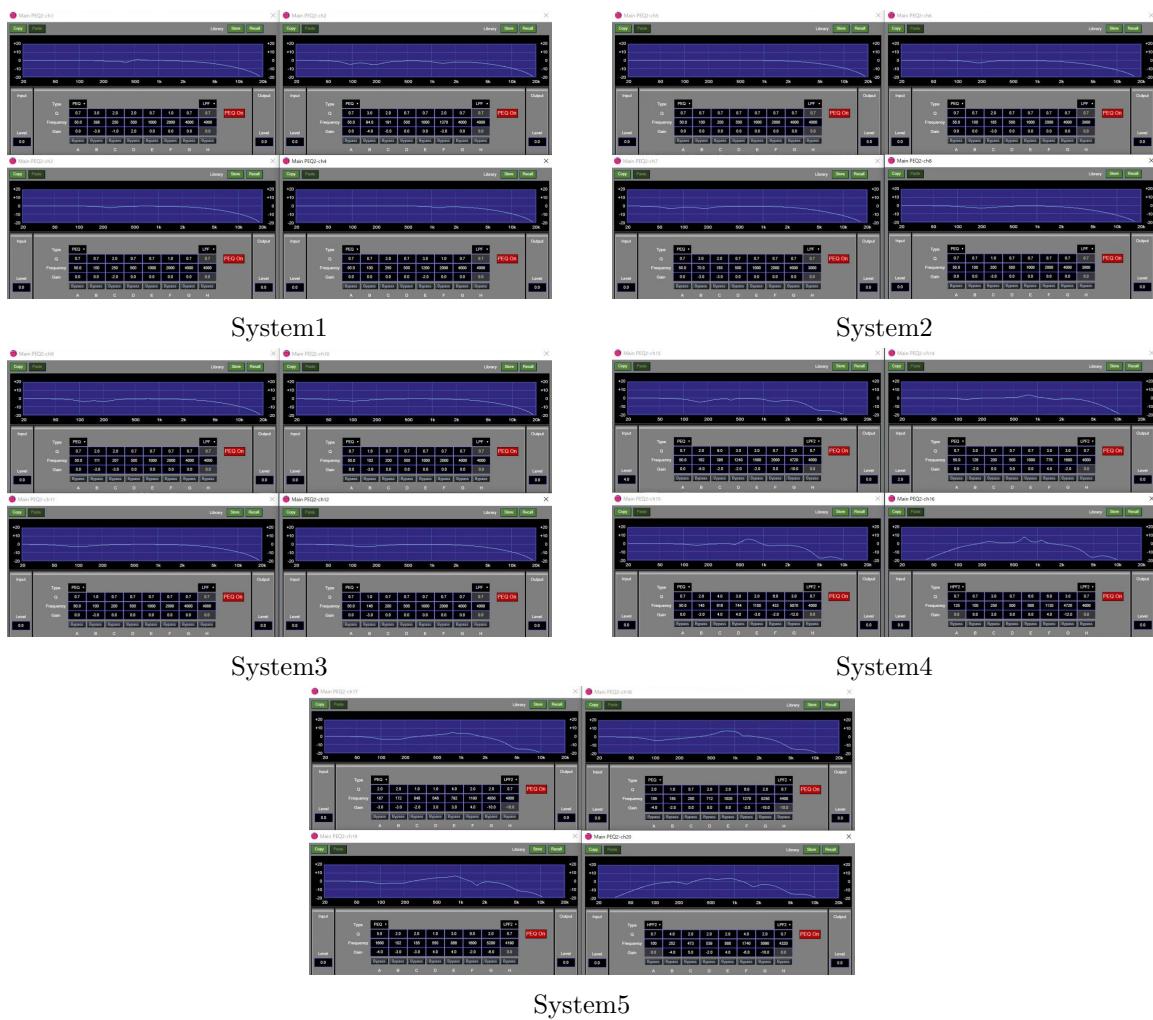


図 1.36: 音場 δ イコライザ手動調整部 1

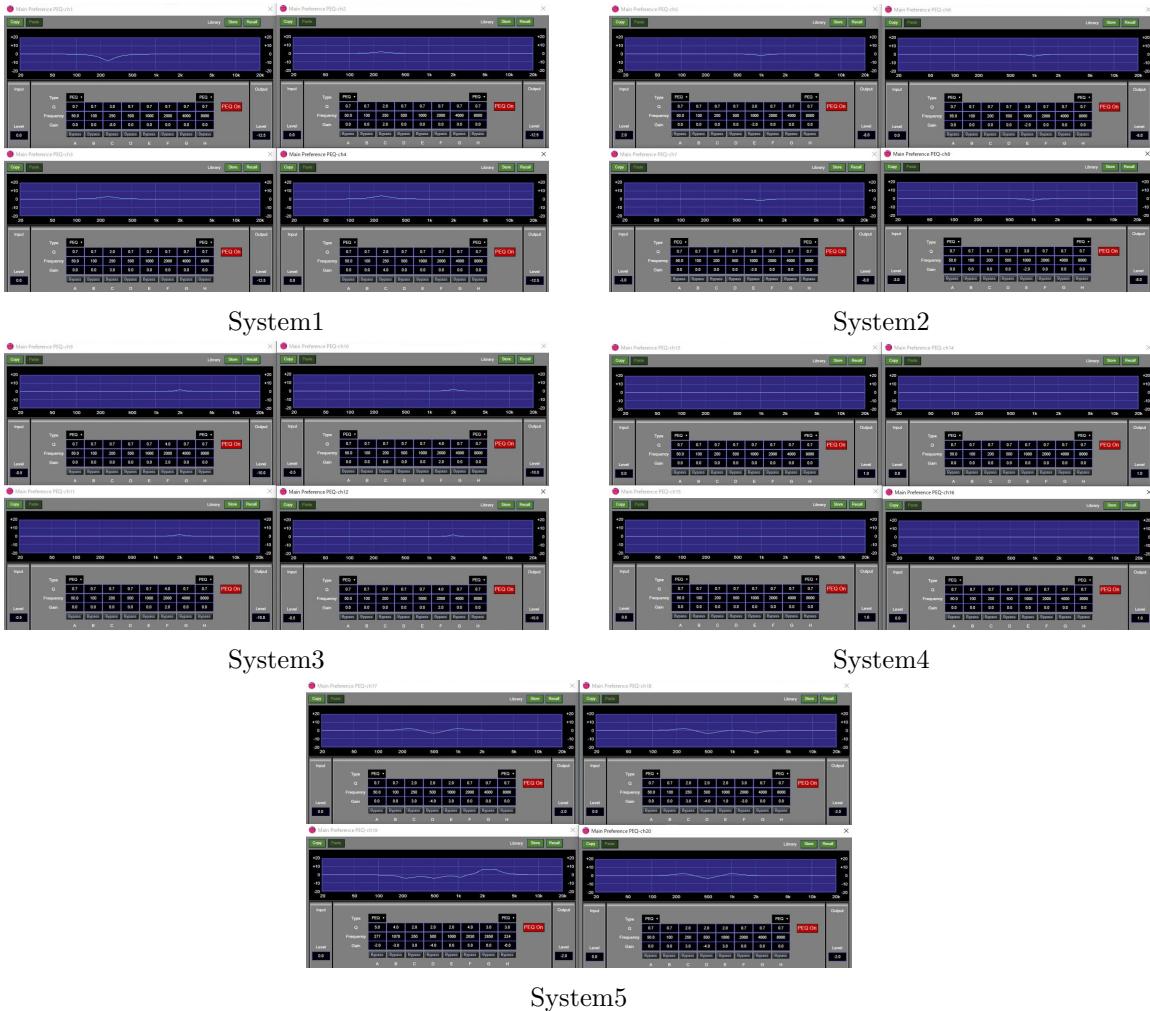


図 1.37: 音場 δ イコライザ 手動調整部 2

関連図書

- [1] 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).
- [2] 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. (Accessed on 02/22/2024).
- [3] 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.