

6ch立体音響再生システムの 周波数特性補正に関する研究

関西大学 環境都市工学部 建築学科

建築環境工学第1研究室

建 22-0062 難波香圭

指導教員 豊田政弘

目次

1. 緒言	1
1.1 研究背景	1
1.2 既往研究	2
1.3 研究目的	3
2. 研究内容	4
2.1 バックトレース法の概要	4
2.2 バックトレース法によって得られる情報	4
2.3 理論的インパルス応答の合成	5
2.4 周波数特性への変換	5
2.5 VBAPの概要	5
2.6 Ambisonicsの概要	6
3. 研究方法	7
3.1 実験および解析の概要	7
3.2 立体音響再生システムおよび測定環境	8
3.3 使用機材およびソフトウェア	10
3.4 計算結果の作成方法	14
3.5 実測方法	14
3.6 スピーカー単体測定および周波数特性補正	14

4. 研究結果	17
4.1 計算結果と実測結果の比較	18
4.2 周波数帯域別の結果	20
4.2.1 低周波数帯域	20
4.2.2 中周波数帯域	20
4.2.3 高周波数帯域	20
4.3 再生方式およびホール条件による違い	21
4.4 考察	21
4.4.1 周波数帯域による差の要因について	21
4.4.2 再生方式およびホール条件の違いについて	22
5. 結言	23
5.1 結論	23
5.2 今後の課題	23
参考文献	24

1. 緒言

1.1 研究背景

近年、建築音響を含む音響工学分野において、実際の建築空間を想定した音場を再現・評価する技術への関心が高まっている。ホール音響の評価や音響設計、演奏支援、音響実験などの分野では、実際の建築空間を用いることが困難な場合も多く、再現性の高い仮想音空間を用いた検討が重要となっている。

このような背景のもと、計算機シミュレーションによって音場を理論的に求め、それを立体音響再生システムによって再現する手法が考案されてきた。特に、受音点に到達する音の伝搬経路を理論的に求めるバックトレース法[1]は、反射音を含む音場構造を効率的に計算できる手法として知られており、室内音響分野において多くの研究で用いられている。

一方で、理論計算によって得られた音場が、実際の再生システムにおいてどの程度正確に再現されているかを検証することは容易ではない。スピーカーを用いた立体音響再生では、スピーカーの数や配置、個々のスピーカーの音響特性、さらには再生環境の影響など、多くの要因が音場再現精度に影響を与える。そのため、理論計算と実測結果との間に差異が生じる可能性がある。これまで、VBAP (Vector Base Amplitude Panning)[2]やAmbisonics[3]といった立体音響再生方式に関する研究は数多く報告されている。しかし、これらを用いた実際の立体音響再生システムにおいて、理論的に計算された信号と、実際に再生・測定された信号との周波数特性がどの程度一致しているかについては、十分に検証されているとは言い難い。

特に、限られたチャンネル数の立体音響再生システムでは、理論計算では理想化されているスピーカー特性や再生環境の影響が無視できず、それらが音場再現の精度にどのように影響しているかを明らかにすることが重要である。再生システムの性能が十分に検証されていない場合、当該システムを用いた音響実験や評価結果の信頼性にも影響を及ぼす可能性がある。以上のことから、立体音響再生システムにおいて、理論計算に基づく音場と実際の再生結果との一致度を客観的に評価し、その差異が生じる要因を明らかにすることは、今後の音響研究や応用における重要な課題であるといえる。

1.2 既往研究

室内音場の再現および評価に関する研究は、建築音響を含む音響工学分野においてこれまで数多く行われてきた。特に、受音点に到達する音の伝搬経路を理論的に求める手法として、幾何音響理論に基づく音場シミュレーション手法が実務的に広く用いられている。

その代表的な手法の一つとして、バックトレース法が挙げられる。Vorländer[1]は、音線法と虚像法を組み合わせた効率的な計算手法としてバックトレース法を提案し、受音点から音線を逆向きに追跡することで、反射音を含む音の到来方向や到達時間を短時間で算出できることを示した。この手法は、複雑な反射構造を有する室内音場においても計算効率と精度の両立が可能であることから、その後の室内音響シミュレーションにおいて広く用いられている。

一方、理論計算によって得られた音場を実際の音響特性と比較・評価するためには、信頼性の高い測定手法が不可欠である。青島[4]は、Time Stretched Pulse (TSP) 信号を用いたインパルス応答測定手法を提案し、高い信号対雑音比を確保しつつ室内音場のインパルス応答を取得できることを示した。その後、橘・日高[5]や金田[6]らにより測定精度や実用性の向上に関する検討が行われ、TSP信号を用いたインパルス応答測定は、現在では室内音響評価における標準的な手法として広く利用されている。

理論計算によって得られた音場を再生する手法としては、立体音響再生技術が発展してきた。Pulkki[2]は、複数のスピーカーを用い、それらの音量比を制御することで仮想音源の方向を表現するVBAPを提案し、比較的少ないスピーカー数でも方向性のある音場再現が可能であることを示した。この手法は、スピーカー配置の自由度が高く、実用的な立体音響再生方式として広く用いられている。

また、音場全体を記述する再生手法としてAmbisonicsが提案されている。Gerzon[3]は、音場を球面調和関数によって表現するAmbisonicsの概念を提唱し、三次元的な音場再現の理論的枠組みを示した。その後、Poletti[7]によって理論体系が整理され、高次Ambisonics (HOA) へと発展することで、より高精度な音場再現が可能となっている。Ambisonicsは、特定のスピーカー方向に依存せず音場そのものを成分として扱う点に特徴があり、再生環境に応じた柔軟な音場再現が可能である。

このように、理論的な音場計算手法、インパルス応答測定手法、および立体音響再生手法はそれぞれ確立されてきた。しかし、これらを組み合わせた立体音響再生システムにおいて、理論的に計算された音場が実際の立体音響再生環境でどの程度正確に再現されているか、特に周波数特性の観点から定量的に検証した研究は多くない。とりわけ、限られたチャンネル数の立体音響再生システムにおいて、計算結果と実測結果の差異や、その要因を明らかにした研究は十分とは言えない。

1.3 研究目的

本研究の目的は、6チャンネル立体音響再生システムにおいて、理論的に計算された音場が、実際の再生環境においてどの程度再現されているかを、周波数特性の観点から検証することである。特に、理論計算と実際の再生・測定結果との間に生じる周波数特性の不一致に着目し、その要因の一つとしてスピーカー特性が与える影響を明らかにするとともに、周波数特性補正が音場再現性の改善にどの程度有効であるかを検証することを主な目的とする。

そこで、バックトレース法によって得られた計算結果から理論的なインパルス応答および周波数特性を算出し、それを基準として、6チャンネル立体音響再生システムで再生・測定した実測結果との比較を行う。比較は、補正前および補正後の状態について実施し、周波数特性補正による改善効果を評価する。

また、再生方式としてVBAPおよびAmbisonicsの二種類を用い、再生方式の違いが周波数特性補正の効果に与える影響について検討する。さらに、規模の異なる二つのホールを対象とし、対象空間の違いが補正効果に及ぼす影響についても検討する。

以上により、本研究では、6チャンネル立体音響再生システムにおける周波数特性補正の有効性を整理し、立体音響再生システムの再現性向上に向けた基礎的な知見を得ることを目的とする。

2.研究内容

2.1 バックトレース法の概要

本研究では、立体音響再生システムにおいて受音点に到達する音を理論的に求める手法として、バックトレース法を用いる。バックトレース法とは、幾何音響理論に基づいた音線法と虚像法という二つの手法を組み合わせることによって両者のデメリットを補い、より効率的に計算を進めつつ精度の高い結果を導き出す手法としてVorländer[1]により提案された手法である。音源から音が放射される過程を順方向に追跡するだけでなく、受音点から仮想的に音線を逆向きに追跡する。具体的には、受音点から多数の音線を放射し、それらが壁や床、天井などの反射面で反射を繰り返しながら音源に到達するまでの経路を計算する。次に、受音点からその経路を逆にたどり、音源まで矛盾なく到達できるかどうかを判別する。その後、矛盾なく到達できた経路に基づいた虚音源を作成し、受音点への音波伝搬を求める。この手法により、複雑な反射音を含む室内音場においても、効率的に受音点での応答を求めることが可能である。バックトレース法は、室内音響シミュレーションにおいて広く用いられており、反射音構造の把握に有効な手法として知られている。

2.2 バックトレース法によって得られる情報

バックトレース法によって得られる情報は、音の伝搬特性に関するものであり、音の到来方向、各反射経路における音の強度、音が受音点に到達するまでの時間などがある。これらは、受音点に到達する音を構成する重要な要素であるが、直接的に音響信号として表現されたものではない。そのため、これらの情報をもとに、受音点で観測される音響信号を理論的に合成する必要がある。本研究では、これらの情報を用いて理論的なインパルス応答を構成し、計算結果として扱う。

2.3 理論的インパルス応答の合成

受音点に到達する音を理論的に表現するため、バックトレース法によって得られた音の到来方向、強度、および到達時間の情報をもとに計算結果として扱う理論的インパルス応答を合成する。具体的には、各虚像音源について、到達時間と強度を考慮したインパルスを作成し、空気吸収を考慮してそれらを周波数領域で重畳することで受音点でのインパルス応答を合成する。この理論的インパルス応答は、理想的な条件下における音の時間応答を表しており、本研究における計算結果として用いられる。

2.4 周波数特性への変換

合成した理論的インパルス応答に対してフーリエ変換を行うことで、周波数特性を算出する。ここでの周波数特性は、音の周波数ごとの振幅特性を採用する。振幅特性は音響システムの評価に広く用いられている。本研究では、この理論的に得られる周波数特性と、実際の6チャンネル立体音響再生システムを用いて測定した周波数特性を比較することで、システムが意図した通りに動作しているかを検証する。

2.5 VBAPの概要

本研究では、立体音響再生方式の一つとして、バックトレース法によって得られた音の到来方向を実際のスピーカー配置に対応させるため、VBAPを用いる。VBAPは、Pulkki[2]によって提案された音像定位手法であり、複数のスピーカーを用いて、それらの音量比を制御することで仮想音源の方向を表現する手法である。仮想音源の方向に最も近いスピーカーの組み合わせを選択し、各スピーカーに割り当てる音量を計算することで、指定した方向から音が到来しているように知覚させることができる。本研究では、バックトレース法によって得られた各虚像音源の到来方向情報をVBAPに基づいて6チャンネルのスピーカーに音を割り振ることで音場再生を行っている。

2.6 Ambisonicsの概要

本研究では、VBAPと並ぶ立体音響再生方式として、Ambisonicsによる音場再生も用いる。Ambisonicsは、Gerzon[3]らによって提案された三次元音場再現手法であり、音場を球面調和関数によって表現し、空間全体の音の分布を記述する手法である。特定のスピーカー方向に依存せず、音場そのものを成分として扱う点に特徴がある。その後、Poletti[7]による理論的整理により、Ambisonicsは実用的な再生方式として体系化されており再生環境に応じてスピーカー信号を生成することで一貫した音場再現が可能となっている。本研究では、Ambisonicsによる再生結果についても、VBAPと同一の評価指標を用いて理論的計算結果と実測結果の比較を行い、VBAPによる再生方式との違いを評価する。

3. 研究方法

3.1 実験および解析の概要

本研究では、6チャンネル立体音響再生システムを用い、理論的に計算された音場と実際に再生・測定された音場との一致度を周波数特性の観点から検証した。理論計算にはバックトレース法を用い、受音点に到達する音の伝搬特性から理論的インパルス応答および周波数特性を算出した。一方、実測では立体音響再生システムにTSP信号を入力し受音点におけるインパルス応答を測定した。

また、スピーカー単体の周波数特性に対して補正を施し、補正前後における計算結果と実測結果の比較を行うことで、周波数特性の不一致要因について検討した。比較は、VBAPおよびAmbisonicsの二つの再生方式に加え、対象空間の違いが一致度に与える影響を検討するため、規模の異なる二つのホール条件について行った。具体的には、比較的小規模なホールとして大阪府伊丹市のマグノリアホールをモデル化したもの、大規模なホールとしてオーストリア・ウィーンの本音楽フェラインザールをモデル化したものを採用した。マグノリアホールおよび本音楽フェラインザールはいずれも音楽演奏を主用途とするコンサートホールであるが、室容積や残響特性に大きな差を有している。本研究では、使用目的が共通でありながら空間規模の異なる二つのホールを対象とすることで、ホールの規模や残響特性の違いが、計算結果と実測結果の一致度に与える影響を検討することを意図した。

3.2 立体音響再生システムおよび測定環境

実験は、関西大学環境都市工学部建築学科の建築環境工学第 I 研究室に設置された無響室内の6チャンネル立体音響再生装置を用いて実施した。スピーカー配置および測定系の概要を図3.2-1、図3.2-2に示す。スピーカーは、受音点を中心として立体的な音場再生が可能となるよう、以下の6方向に配置した：①右前方45°②左前方45°③左後方45°④右後方45°⑤真上⑥真下。

受音点には測定用マイクロフォン（精密騒音計）を設置し、6台のスピーカーの幾何学的中心となる位置に配置した（図3.2-3）。マイクロフォンは三脚スタンドを用いて固定し、マイク先端が受音点に一致するよう高さおよび位置を調整した。また、受音点から各スピーカーの音源中心（コーン中心）までの距離が等しくなるよう、メジャーを用いて測定を行い、6台すべてについて距離を揃えた。これにより距離差による音圧レベルや到達時間のばらつきができる限り生じないよう配慮した。



図 3.2-1 6ch 立体音響再生装置全景



図 3.2-2 6ch 立体音響再生装置正面



図 3.2-3 測定用マイクロフォン

3.3 使用機材およびソフトウェア

本研究におけるプログラム作成、音響信号の再生、および測定・解析には以下に示すソフトウェアおよび機材を使用した。

- ・分析ソフト：MathWorks MATLAB

音響信号の解析および数値処理には、MathWorks社のMATLABを使用した。MATLABは、行列演算や信号処理、アルゴリズム開発に適した数値計算環境であり、収録した音響信号に対してインパルス応答の算出や周波数解析を効率的に行うことが可能である。本研究では、計算結果の作成および実測データの解析にMATLABを用いた。

引用：<https://jp.mathworks.com/products/matlab.html>

- ・再生ソフト：Steinberg Cubase pro 12（図3.3-1）

音響信号の再生には、Steinberg社のCubase Pro 12を使用した。Cubaseはマルチチャンネル音響信号の再生およびルーティング設定が可能なデジタルオーディオワークステーション（DAW）であり、6チャンネル立体音響再生システムへの信号出力を行うために用いた。

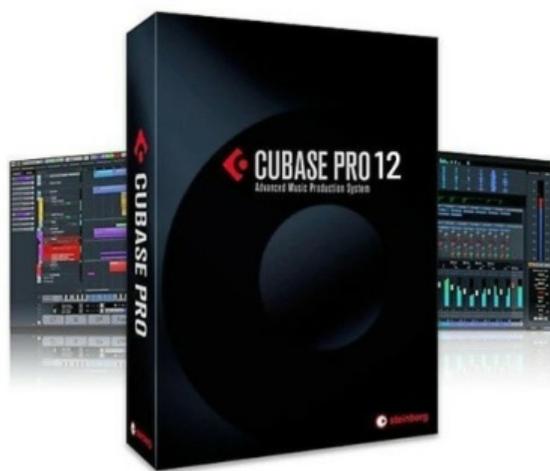


図 3.3-1 再生ソフト

引用：https://japan.steinberg.net/jp/support/downloads/cubase_12/cubase_pro_12.html

- ・スピーカー：GENELEC 8050B（図3.3-2）

スピーカーには、GENELEC社製のアクティブスピーカー8050Bを使用した。本スピーカーは、広い周波数帯域において安定した再生特性を有しており、本研究における立体音響再生用スピーカーとして適している。



図 3.3-2 スピーカー

引用：<https://item.rakuten.co.jp/auc-maskdb/genelec8050bpm/>

- ・ オーディオインターフェイス : RME Fireface UCX II (図3.3-3)

オーディオインターフェイスには、RME社製Fireface UCX IIを使用した。本機器は、多チャンネル入出力に対応しており、PCとスピーカーおよび測定系との間の音響信号の入出力を担った。



図 3.3-3 オーディオインターフェイス

引用 : <https://item.rakuten.co.jp/rockonline/71077/>

3.4 計算結果の作成方法

計算結果は、第2章で述べたバックトレース法に基づいて作成した。受信点から放射された仮想的な音線が反射面で反射を繰り返し、音源位置に到達する経路を計算することで、各虚像音源の到来方向、強度、および到達時間を算出した。得られた情報をもとに、各虚像音源に対応したインパルスを作成し、それらを周波数領域で重畳することで、受信点に到達する音を理論的に表現したインパルス応答を合成した。さらに、このインパルス応答に対してフーリエ変換を施すことで周波数特性を算出し、これを理論的に得られる計算結果として用いた。

3.5 実測方法

実測では、6チャンネル立体音響再生システムにTSP信号を入力し、各スピーカーから音を再生した。受信点に設置したマイクロフォンにより音を収録し、得られた信号からインパルス応答を抽出した。本測定は、スピーカー、再生方式、および再生環境を含めたシステム全体の応答を評価することを目的として行った。取得したインパルス応答は、計算結果と同様に周波数領域へ変換し、比較可能な周波数特性として整理した。

3.6 スピーカー単体測定および周波数特性補正

計算結果と実測結果の不一致要因を切り分けるため、スピーカー単体の周波数特性測定を行った。測定は無響室内で実施し、反射音の影響を極力排除した条件とした。得られた周波数特性に基づき、イコライジング（Steinberg GEQ-30）による補正を行い、できる限りフラットな特性となるよう調整した。補正後には再度測定を行い、補正効果を確認したうえで、補正済みスピーカーを用いたシステム全体の測定を実施した。

なお、本研究で用いた6チャンネル立体音響再生システムは床と椅子が設置されており、上下方向には非対称である。したがって、スピーカー単体の補正はスピーカー①⑤⑥の3つについて行った。スピーカー②③④については①と同様であると仮定した。スピーカー①⑤⑥の補正結果を図3.6-1、図3.6-2、図3.6-3に示す。

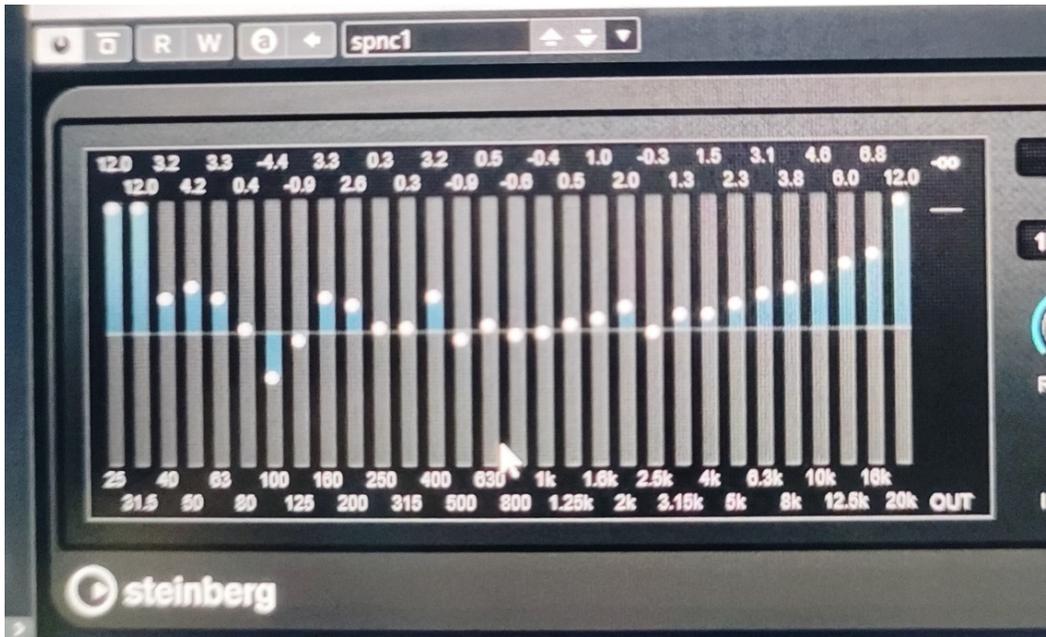


図 3.6-1 スピーカー①の補正結果

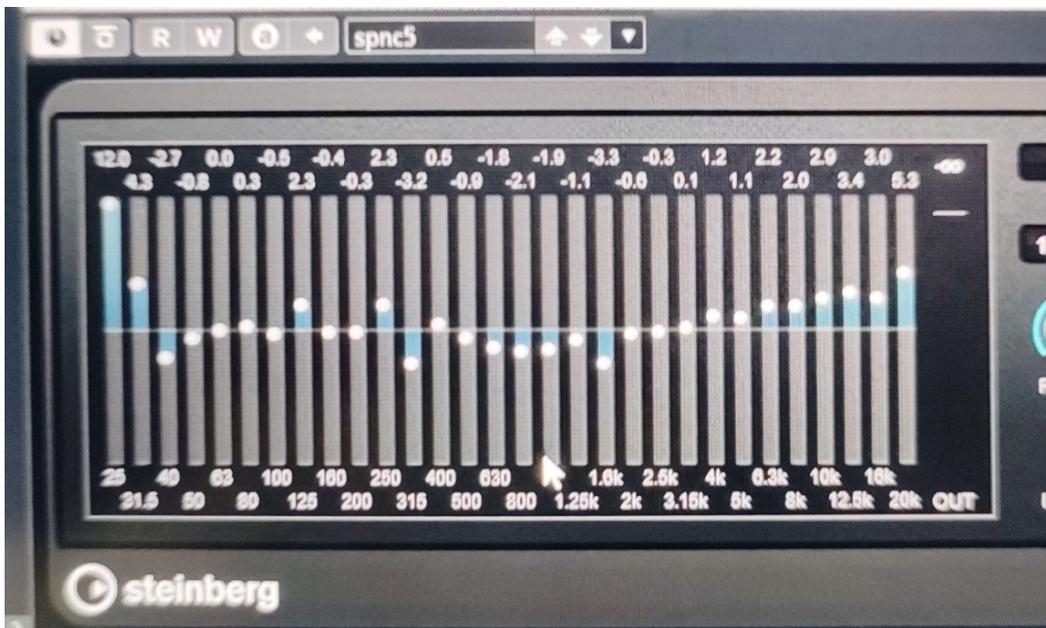


図 3.6-2 スピーカー⑤の補正結果



図 3.6-3 スピーカー⑥の補正結果

4.研究結果

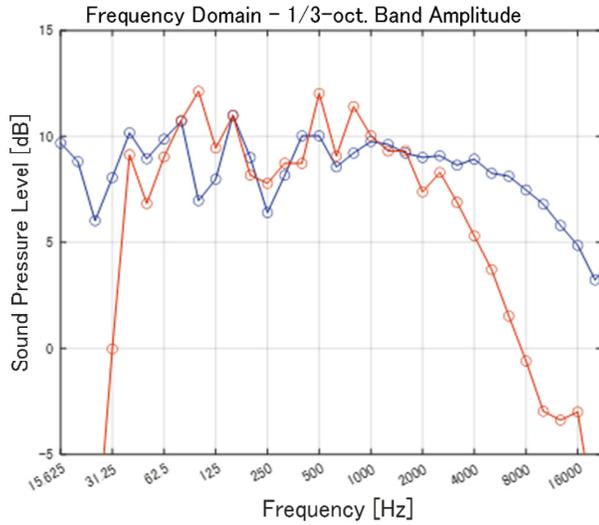
本章では、第3章で述べた比較方法に基づき、バックトレース法による計算結果と、6チャンネル立体音響再生システムによる実測結果の比較を行った結果について示す。比較は周波数特性を指標として行い、全帯域における傾向に加え、周波数帯域別の一致度、再生方式およびホール条件の違いについて検討した。

4.1 計算結果と実測結果の比較

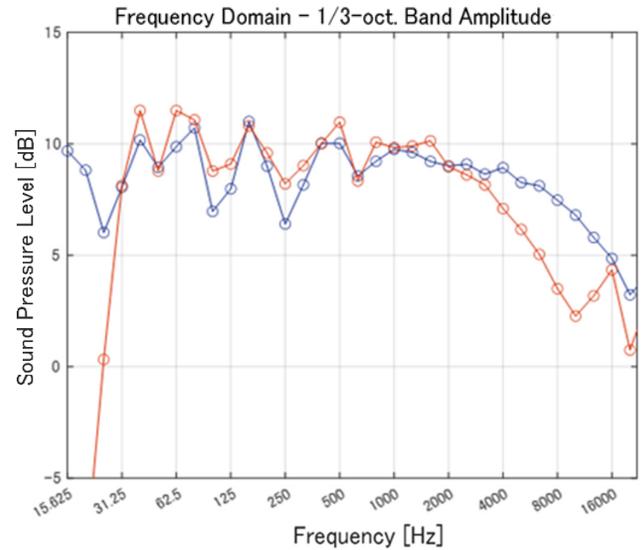
マグノリアホールおよびムジークフェラインザールにおける計算結果と実測結果の周波数特性を比較した結果を、それぞれ図4.1および図4.2に示す。

マグノリアホール

VBAP

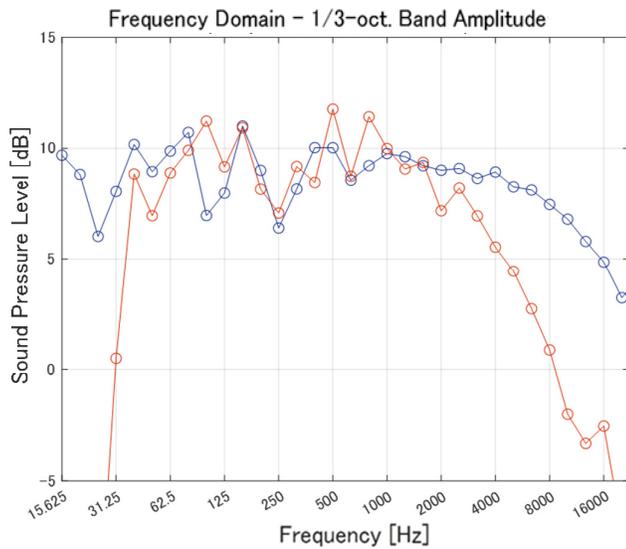


補正なし

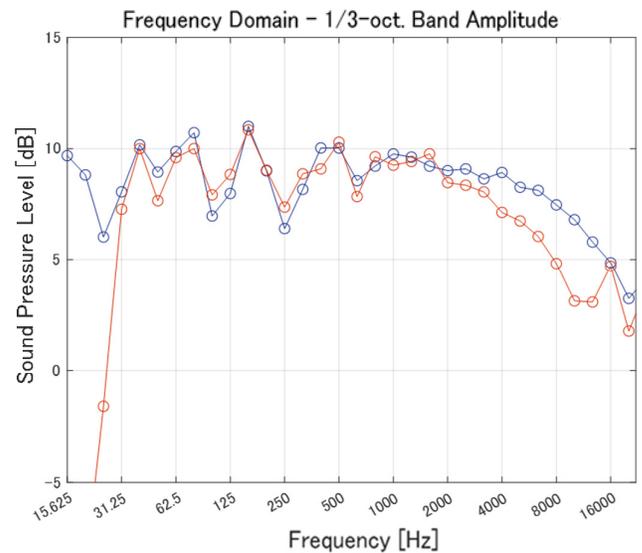


補正あり

Ambisonics



補正なし



補正あり

図4.1

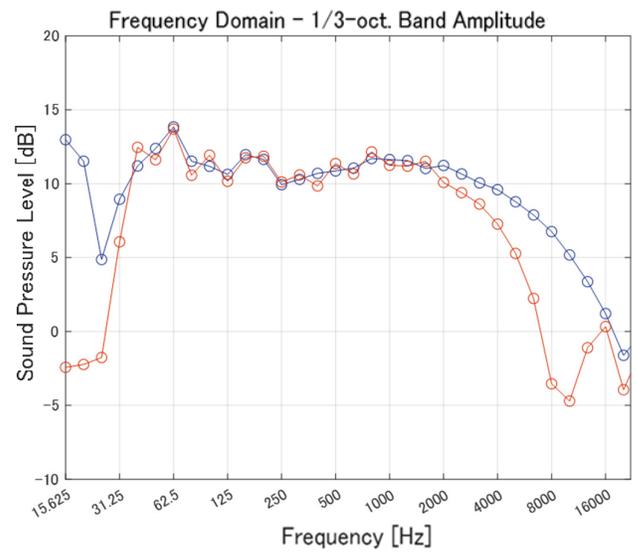
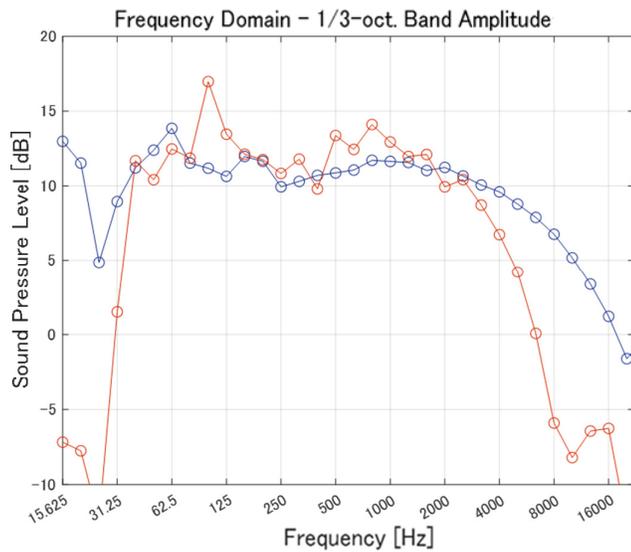
マグノリアホールにおける計算結果と実測結果の周波数特性

(上段：VBAP，下段：Ambisonics，左：補正なし，右：補正あり

青線：計算結果，赤線：実測結果)

ミュージックフェラインザール

VBAP



Ambisonics

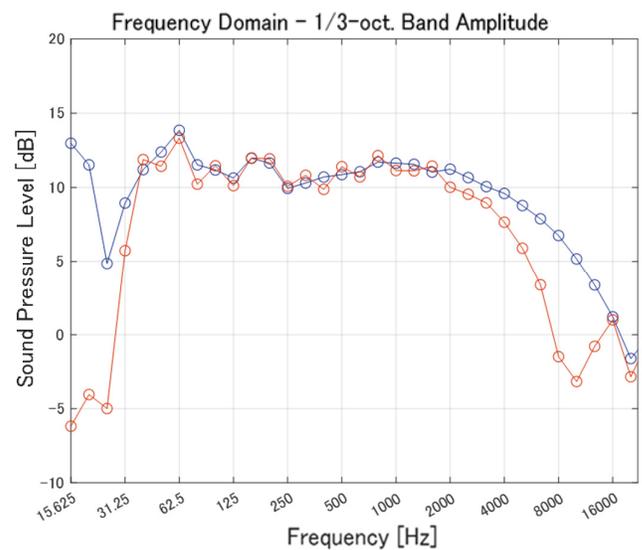
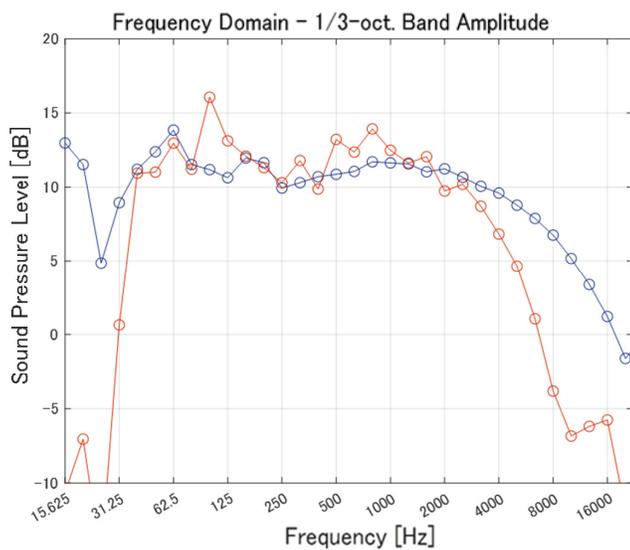


図4.2

ミュージックフェラインザールにおける計算結果と実測結果の周波数特性

(上段：VBAP，下段：Ambisonics，左：補正なし，右：補正あり)

青線：計算結果，赤線：実測結果)

図4.1および図4.2より、計算結果と実測結果の周波数特性は、全体的な形状において概ね類似した傾向を示していることが確認できる。一方で、特定の周波数帯域においては音圧レベルの差が見られ、完全な一致には至っていない。これらの差異は、スピーカーの再生特性や再生環境における反射・吸音特性など、理論計算では理想化されている要素の影響によるものと考えられる。

4.2 周波数帯域別の結果

次に、周波数帯域ごとに計算結果と実測結果の一致度について検討した。本研究では、全周波数帯域を低周波数帯域、中周波数帯域、高周波数帯域の三つに分けて結果を整理した。

4.2.1 低周波数帯域

低周波数帯域においては、図4.1および図4.2に示すように、計算結果と実測結果の周波数特性の比較が困難であった。実測結果では、当該帯域における音圧レベルが全体的に低く、スピーカーからの出力自体が十分に得られていない傾向が確認された。そのため、周波数特性補正の前後における変化を明確に評価することが難しく、本帯域においては補正効果の有無を十分に判断できない結果となった。

4.2.2 中周波数帯域

中周波数帯域では、図4.1および図4.2に示すように、補正前と比較して補正後における計算結果と実測結果の一致度が向上する傾向が確認された。周波数特性の形状においても、補正後には両者の差が小さくなり、補正の効果が比較的明瞭に表れている。このことから、中周波数帯域においては、スピーカー単体の周波数特性に対する補正が計算結果と実測結果の一致度向上に寄与していることが示唆される。

4.2.3 高周波数帯域

高周波数帯域においては、補正後において計算結果と実測結果の一致度が改善する傾向が見られたものの、中周波数帯域と比較すると、その効果は十分とは言えない結果となった(図4.1, 図4.2)。補正後においても、一部の周波数帯域では音圧レベルの差が残存しており、高周波数帯域における補正効果には限界があることが確認された。

4.3 再生方式およびホール条件による違い

次に、再生方式およびホール条件の違いが、計算結果と実測結果の一致度に与える影響について検討した。再生方式の違いに着目すると、VBAPと比較してAmbisonicsでは、補正後における計算結果と実測結果の一致度が補正前よりもやや高くなる傾向が確認された(図4.1, 図4.2)。ただし、その差は大きなものではなく限定的な改善にとどまっている。

また、ホール条件の違いによる比較では、小規模なマグノリアホールと比較して、大規模なムジークフェラインザールにおいて、補正後の一致度が補正前よりもやや高くなる傾向が見られた。しかしながら、これらの差について明確な要因を特定するには至らなかった。

4.4 考察

本研究では、バックトレース法による計算結果と、6チャンネル立体音響再生システムによる実測結果を周波数特性の観点から比較した結果、周波数帯域によって一致度や補正効果に差が生じることが明らかとなった。以下では、まず低・中・高周波数帯域における差の要因について考察し、次に再生方式およびホール条件の違いについて検討する。

4.4.1 周波数帯域による差の要因について

低周波数帯域においては、実測結果における音圧レベルが全体的に低く、スピーカーからの出力自体が十分に得られていない傾向が確認された。そのため、本帯域では補正前後の差を明確に捉えることが難しく、周波数特性補正の効果を評価するには至らなかった。低周波数帯域では、スピーカーの物理的な再生限界や、再生系全体の低域特性が結果に強く影響している可能性が考えられる。

一方、中周波数帯域では、補正後において計算結果と実測結果の一致度が向上する傾向が明確に確認された。この帯域は、スピーカーの再生能力が比較的安定しており、また周波数特性補正の影響が反映されやすい帯域である。そのため、スピーカー単体の周波数特性に対する補正が、実測結果の改善として最も顕著に現れたものと考えられる。

高周波数帯域においては、補正後に一定の改善が見られたものの、中周波数帯域と比較すると一致度の向上は十分ではなかった。高周波数帯域では波長が短く、スピーカーの指向性やマイクロフォンの設置位置、反射面の局所的な形状や吸音特性の影響を受けやすい。そのため、スピーカー単体の周波数特性を補正しても、再生環境や測定条件による影響が残存し、補正効果が限定的になった可能性が考えられる。

以上より、周波数特性補正は中周波数帯域において最も有効であり、低周波数帯域では評価が困難、高周波数帯域では補正効果に限界があることが示唆された。

4.4.2 再生方式およびホール条件の違いについて

再生方式の違いに着目すると、VBAPと比較してAmbisonicsでは、補正後における計算結果と実測結果の一致度が補正前よりもやや高くなる傾向が確認された。ただし、その差は大きなものではなく、限定的な改善にとどまっている。本研究の結果からは、再生方式の違いが一致度に与える影響を定量的に明確化するには至らなかった。

また、ホール条件の違いによる比較では、小規模なマグノリアホールよりも、大規模なムジークフェラインザールにおいて、補正後の一致度がやや高い傾向が見られた。しかしながら、この差についても明確な要因を特定することはできなかった。ホールの規模や残響特性の違いが結果に影響している可能性は考えられるものの、本研究の条件下では十分な検証には至っていない。

これらの結果から、再生方式およびホール条件の違いが周波数特性の一致度に与える影響については、今後さらなる測定条件の整理や評価指標の拡張を行った上で検討する必要があるといえる。

5. 結言

5.1 結論

本研究では、6チャンネル立体音響再生システムにおいて、理論的に計算された音場が実際の再生環境においてどの程度再現されているかを、周波数特性の観点から検証した。バックトレース法によって算出した理論的な周波数特性と、立体音響再生システムを用いて測定した実測結果との比較を行い、補正前後の変化を含めて検討した。その結果、周波数帯域によって計算結果と実測結果の一致度および補正効果に差が生じることが明らかとなった。低周波数帯域では、スピーカーからの出力自体が十分に得られておらず、周波数特性補正の効果を評価することが困難であった。一方、中周波数帯域では、補正後において計算結果と実測結果の一致度が向上し、周波数特性補正の有効性が確認された。高周波数帯域では、補正後に一定の改善が見られたものの、再生環境や測定条件の影響が残存し、補正効果は十分とはいえなかった。また、再生方式およびホール条件の違いによる比較では、Ambisonics は VBAP と比較して、補正後における一致度がやや高くなる傾向が確認された。さらに、小規模なマグノリアホールよりも、大規模なムジークフェラインザールにおいて、一致度がやや高い傾向が見られた。しかし、これらの差はいずれも限定的であり明確な要因の特定には至らなかった。

以上より、本研究により 6チャンネル立体音響再生システムにおける周波数特性補正は、中周波数帯域において特に有効であることが示された。一方で、低周波数帯域および高周波数帯域、ならびに再生方式やホール条件の違いが一致度に与える影響については今後の検討課題として残された。

5.2 今後の課題

今後は、低周波数帯域における再生能力の向上や高周波数帯域における再生環境・測定条件の影響を考慮した検討が必要である。また、再生方式やホール条件の違いについても、測定条件や評価指標をさらに整理・拡張することで、計算結果と実測結果の関係をより詳細に明らかにすることが求められる。

参考文献

- [1] N. Vorländer, “Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm”, *Journal of the Acoustical Society of America* 86(1), 172–178, 1989.
- [2] V. Pulkki, “Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning”, *Journal of the Audio Engineering Society* 45(6), 456–466, 1997.
- [3] M. A. Gerzon, “Periphony: With-height sound reproduction”, *Journal of the Audio Engineering Society* 21(1), 2–10, 1973.
- [4] N. Aoshima, “Computer-generated pulse signal applied for sound measurement”, *Journal of the Acoustical Society of America* 69(5), 1484–1488, 1981.
- [5] 橘秀樹, 日高新人, “実物及び模型ホールのインパルス応答の測定”, *日本音響学会誌* 48(4), 244–249, 1992.
- [6] 金田豊, “インパルス応答測定に基づく室内音場解析手法の展開”, *日本音響学会誌* 63(5), 279–285, 2015.
- [7] M. A. Poletti, “Three-dimensional surround sound systems based on spherical harmonics”, *Journal of the Audio Engineering Society* 53(11), 1004–1025, 2005.