

2011 年度 修 士 論 文

幾何音響シミュレーションに基づく
6チャンネル音場再現システムの構築
—室内音響特性の再現性について—

Construction of 6-channel sound simulation system
based on geometrical acoustic simulation
—reproducibility of room acoustics—

三上 雄一郎

Mikami, Yuichiro

東京大学大学院新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 既往文献	2
1.4 音響物理指標について	3
1.4.1 各種物理指標の定義	3
1.4.2 弁別閾	5
1.5 乱反射率について	5
第 2 章 6 チャンネル音場再現システム	7
2.1 概要	7
2.2 6 チャンネル収音・再生システム	8
2.2.1 システム構成	8
2.2.2 6 チャンネルマイク	9
2.2.3 収音系	10
2.2.4 再生系	11
第 3 章 幾何音響シミュレーションに基づく 6 チャンネル音場再現システム	13
3.1 概要	13
3.2 既往文献	13
3.3 幾何音響シミュレーションについて	14
3.3.1 概要	14
3.3.2 既往文献	14
3.3.3 CATT-Acoustic v8 について	15
3.4 幾何音響シミュレーションによる検討	15
3.4.1 概要	15
3.4.2 解析条件	15
3.5 幾何音響シミュレーション結果に基づく可聴化	17
3.5.1 システム構成	17
3.5.2 使用機材	18
3.5.3 レベル設定	19
3.5.4 時間遅れについて	19

3.5.5	インパルス応答ファイルの出力	20
第4章	物理的再現性に関する検討	21
4.1	概要	21
4.2	インパルス応答測定	21
4.3	インパルス応答波形の確認	22
4.3.1	解析音場（無指向性）と解析音場（6ch 同期加算）の比較	22
4.3.2	解析音場（6ch 同期加算）と再現音場での実測の比較	25
4.4	残響減衰曲線の比較	28
4.5	音響物理指標の比較	31
4.5.1	解析音場（無指向性）と解析音場（6ch 同期加算）の比較	31
4.5.2	解析音場（6ch 同期加算）と再現音場での実測の比較	32
4.6	物理指標の周波数帯域値の比較	34
4.6.1	解析音場（無指向性）と解析音場（6ch 同期加算）の比較	34
4.6.2	解析音場（6ch 同期加算）と再現音場での実測の比較	37
4.7	相関分析	41
4.8	まとめ	43
第5章	室内音響に及ぼす壁面拡散性の影響に関する検討	45
5.1	概要	45
5.2	条件間のインパルス応答波形の比較	45
5.3	条件間の残響減衰曲線の比較	48
5.4	条件間の音響物理指標の比較	53
5.4.1	全体傾向の把握	53
5.4.2	条件間の個別比較	57
5.5	まとめ	61
第6章	聴感印象評価	63
6.1	概要	63
6.2	被験者実験	63
6.2.1	評価方法	64
6.2.2	空間印象について	64
6.2.3	実験システム	65
6.2.4	音量設定	67
6.2.5	結果	67
6.2.6	条件間の比較	69

6.3 再現音場の音響特性と主観評価の対応.....	71
6.3.1 再現音場での物理指標と聴感印象評価の対応関係.....	71
6.4 解析と実測と聴感印象評価の対応関係.....	75
6.5 まとめ.....	78

第7章 まとめ	79
----------------	-----------

付録

参考文献

謝辞

第 1 章

序論

1.1 研究背景

より良い音環境を実現するためには様々な音場を評価する必要があるが、その方法としては、測定、数値解析といった物理的な評価と被験者を用いた主観評価などがある。

騒音評価やホールの視聴、都市の音環境の主観評価をする際に、実験室における音場再現は非常に有効な手段である。実験室での音場再現は、音以外の要因による誤差をできるだけ排除し、複数の音場を複数人で評価することができ、目的に応じた実験条件を設定することができるため物理量と心理量の影響関係を精密に調べることができるという利点がある。

音場再現を行う際の再生システムは様々であるが、モノラル再生、ステレオ再生、ヘッドホン再生などでは音の再現性について改善の余地があり、トランスオーラルシステムやマルチチャンネルシステムは 3 次元音場を実験室に正確にシミュレートできるが、複雑な信号処理が必要で、受聴時の姿勢に関する制約も大きいものが多い[1]。

6 チャンネル音場再現システムは、3 次元音場を自然な聴感印象で実験室内に再現する目的で考案、改良されてきたシステムで、物理的、主観的な再現精度も検証されており、これまでに室内音響の印象評価や騒音の影響評価など様々な主観評価実験に応用されている。音響数値解析の結果を実際に聞いてみる「可聴化」にも応用されている。音場の再現性、扱いやすさ、受聴する際の姿勢の自由度、評価対象となる音場の種類の多さといった観点でみると優れた音場再現システムである。

音響設計をする際には、模型実験や音響数値シミュレーションが行われる。音響数値シミュレーションには、幾何音響解析と波動音響解析があるが、実務の音響設計においては、計算コストが少なく操作が簡単な幾何音響解析が普及している。近年は、幾つかの商用幾何解析ソフトにおいて、壁面の境界条件として吸音率だけでなく、壁面の拡散性に関する物理指標である乱反射率が導入され、より現実に近い音響伝搬をシミュレートする試みがされている。しかし、乱反射率が室内音響特性に及ぼす影響については未解明の部分が多く、特に聴感印象の観点から検討した例はあまりない。

音響設計において、設計の資料として最終的には音響数値シミュレーションの結果を可聴化することが求められる。近年、数値解析結果の 6 チャンネル音場再現システムによる可聴化が行われて成果をあげており[2]、幾何音響シミュレーション結果に基づく 6 チャンネル音場再現による可聴化は有効な手法であると考えられる。

1.2 研究目的

幾何音響シミュレーションに基づく 6 チャンネル音場再現システムを構築し、乱反射率や吸音面配置を変化させて解析を行った幾何音響シミュレーション結果に対する音場再現の再現性について、物理的、聴感的な観点から検討を行い、システムに関する知見を得ることが目的である。研究の位置づけとしては、システムの特徴を把握し、将来的に実測したインパルス応答による実音場の室内音響特性の再現、波動音響解析結果の可聴化、リアルタイムで残響を付加するシステムへ発展させるための第一段階である。また、乱反射率を導入した幾何音響シミュレーションの結果を可聴化することにより、室内音響に関する知見を得ることができる。

1.3 既往文献

6 チャンネル音場再現システム

主観的、物理的精度が確認されており、インテンシティベクトルの向きや大きさについても高い再現性が確認されている。音源方向の方向定位精度に関しては、主観評価により良好な結果が得られている。受聴エリアに関しては、インパルス応答では再生中心位置から半径 20cm、楽音については半径 30cm の範囲で許容できる。[1]

再生システム

印象評価に対する再生システムの依存性について検討を行った。[3]

幾何音響シミュレーションに基づく可聴化

2010 年に竣工した銀座ヤマハホールの設計・施工段階での音響検討において、小ホールでの過大な拡がりを回避するため、側方反射音の制御に着目し、ASW を評価指標として縮尺模型実験や、音響シミュレーションによる可聴化実験を行い、最適な側壁形状の検討を行った。音場を評価するにあたり、幾何音響シミュレーションと 6 方向可聴化システムを利用し、その結果、一連の設計手法としての可能性が示された[2]。

乱反射率

模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定法について検討がされている。[4]

1.4 音響物理指標について

室内音響設計を科学的裏付けによって進めるために室内音響指標が用いられる。室内音響指標は音場の特性を数値で表した物理量である。一方、音を聞いた印象は心理量である。物理量と心理量の対応関係が明らかになってはじめて音響指標による設計が可能になる[5]。物理指標は、ISO3382[6]で整理されている。また ISO3382-1 では各心理量と対応する物理指標値の弁別閾が規定されている。物理指標値はインパルス応答から求められる。

1.4.1 各種物理指標の定義

G 絶対レベル

Sound Strength G は音源の出力レベルに依存しない音場の特性である。自由空間において音源より 10m の距離で測定した応答で基準化される。

$$G = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10m}^2(t) dt} \right\} \quad [\text{dB}]$$

$p(t)$: 受音点における無指向性インパルス応答

$p_{10m}(t)$: 室内測定と同一の測定系（音源出力も同じ）を用い自由空間において音源より 10m の距離で測定した応答

EDT 初期減衰時間

初期減衰時間 EDT は残響時間と同様に減衰カーブから直線近似によって傾きをもとめ、60dB 減衰に要する時間に換算する。EDT は初期の-10dB までの区間で評価する。EDT は残響時間より主観的な残響感に対応するとされている[5]。

T₃₀ 残響時間

減衰カーブから直線近似によって傾きをもとめ、-60 dB 減衰に要する時間に換算する。-5~-35 dB 区間評価する。一般的に残響時間とは T30 のことを示す。

C₈₀ Clarity

音楽に対する透明度（明瞭度）を表す指標であり、次式で定義される。

$$C_{80} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad [\text{dB}]$$

p : 音圧

t : 時間

D₅₀ Deutlichkeit

スピーチの明瞭度に関するパラメータ D 値は次式で定義される。

$$D = \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

p : 音圧

t : 時間

T_s 時間重心

減衰波形の評価値で、音声明瞭度とよく対応する。次式で表される。

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad [\text{s}]$$

p : 音圧

t : 時間

LF 初期側方エネルギー率

初期反射音エネルギー全体に対する側方エネルギー全体に対する側方エネルギーの比率を示しており、側方から到来する反射音ほど空間印象に対する寄与が大きいという Barron の心理実験結果が根拠となっている。

$$LF = \frac{\int_5^{80\text{ms}} p_L^2(t) dt}{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}$$

p_L(t) : ゼロ感度方向を音源方向に向けた双指向性マイクロホンで測定した応答

LG 後期側方反射音

次式で表わされ、音に包まれた感じ (LEV) の評価指標として提案されている。

$$LG = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p_L^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10m}^2(t) dt} \right\} \quad [\text{dB}]$$

1.4.1 弁別閾

ISO3382-1 に整理されている物理指標値の弁別閾(JND)を Table1.1 に示す。

Table. 1.1 物理指標値の分類

Subjective listener aspect	Acoustic quantity	Single number frequency averaging ^a Hz	Just noticeable difference (JND)	Typical range ^b
Subjective level of sound	Sound strength, G , in decibels	500 to 1 000	1 dB	-2 dB; +10 dB
Perceived reverberance	Early decay time (EDT) in seconds	500 to 1 000	Rel. 5 %	1,0 s; 3,0 s
Perceived clarity of sound	Clarity, C_{80} , in decibels	500 to 1 000	1 dB	-5 dB; +5 dB
	Definition, D_{50}	500 to 1 000	0,05	0,3; 0,7
	Centre time, T_S , in milliseconds	500 to 1 000	10 ms	60 ms; 260 ms
Apparent source width (ASW)	Early lateral energy fraction, J_{LF} or J_{LFC}	125 to 1 000	0,05	0,05; 0,35
Listener envelopment (LEV)	Late lateral sound level, L_L , in decibels	125 to 1 000	Not known	-14 dB; +1 dB

^a The single number frequency averaging denotes the arithmetical average for the octave bands, except for L_L which shall be energy averaged [see (A.17)].

^b Frequency-averaged values in single positions in non-occupied concert and multi-purpose halls up to 25 000 m³.

1.5 乱反射率について

乱反射率は壁面の拡散性を表す指標で、壁面の全反射エネルギーに対する鏡面反射成分以外のエネルギーの割合として定義され、次式により表される。

$$S_{\theta} = \frac{\alpha_{\text{spec}} - \alpha}{1 - \alpha} = 1 - \frac{E_{\text{spec}}}{E_{\text{total}}}$$

E_{total} は全反射エネルギー、 E_{spec} は鏡面反射エネルギー、 α は試料表面の吸音率、 α_{spec} は鏡面反射成分以外を吸音成分とみなした場合のみかけの吸音率である。

第2章

6チャンネル音場再現システム

2.1 概要

6チャンネル音場再現システムは、3次元音場を自然な聴感印象で実験室内に再現する目的で考案、改良されてきたもので、これまでに室内音響の印象評価や騒音の影響評価など様々な主観評価実験に応用されている。

最初に、6チャンネル收音・再生システムとして考案された。收音系と再生系により構成される。単一指向性（カージオイド）をもつ6本のマイクロホンをそれぞれX,Y,Z軸方向に指向性を向けて組み合わせたマイクで收音を行い、無響室内に配置したマイクの向きが対応した6台のスピーカーを通して再生することにより、再生中心において音圧を正確に再現でき、音の到来方向も含めて物理的・主観的に高い精度で原音場を再現できる。受聴時の姿勢に対する制約が少ないという特徴がある。

6チャンネル音場再現の方法として2つの方法があり、收音系で実音場を録音した音源を再生系で再生し音場再現する方法と、実音場において收音系で測定して得られた直交6方向指向性重み付きインパルス応答とドライソースをたたみ込んだ音源を再生系で再生し、室内音響特性を再現する方法がある。

この原理を応用すると、音響数値解析結果に基づく可聴化を行うことができる。具体的には、数値解析音場の受信点における直交6方向の指向性重み付きインパルス応答を出力し、それらとドライソースをたたみ込んだ音源を、各方向に対応して無響室内に設置したスピーカーから同時に再生することによって、システムの再生中心で室内音響特性が再現される。この手法はハイブリッドシミュレーションとも呼ばれており、可聴化により、ホールの音響設計など、室内音響設計の際の有効な手法となっている。

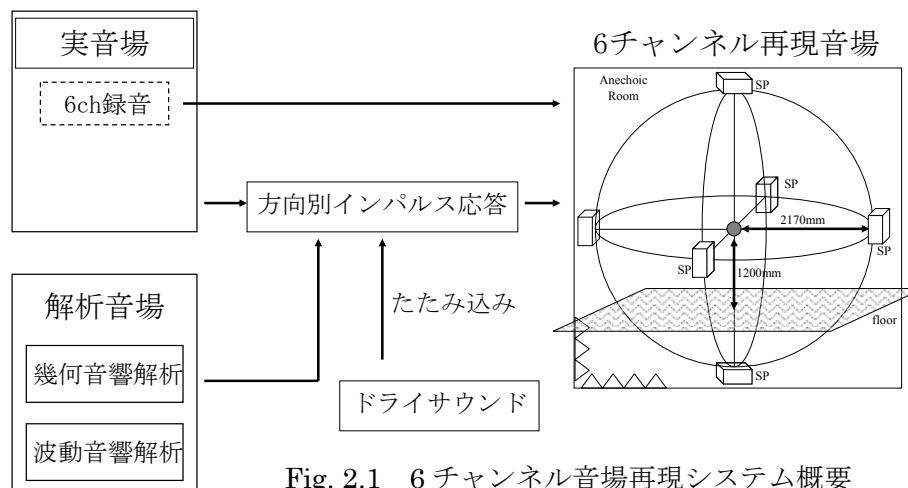


Fig. 2.1 6チャンネル音場再現システム概要

2.2 6チャンネル収音・再生システム

2.2.1 システム構成

システムの構成図を収音系については Fig. 2.2 に、再生系について Fig. 2.3 に示す。機材のリストを Table. 2.1 に示す。

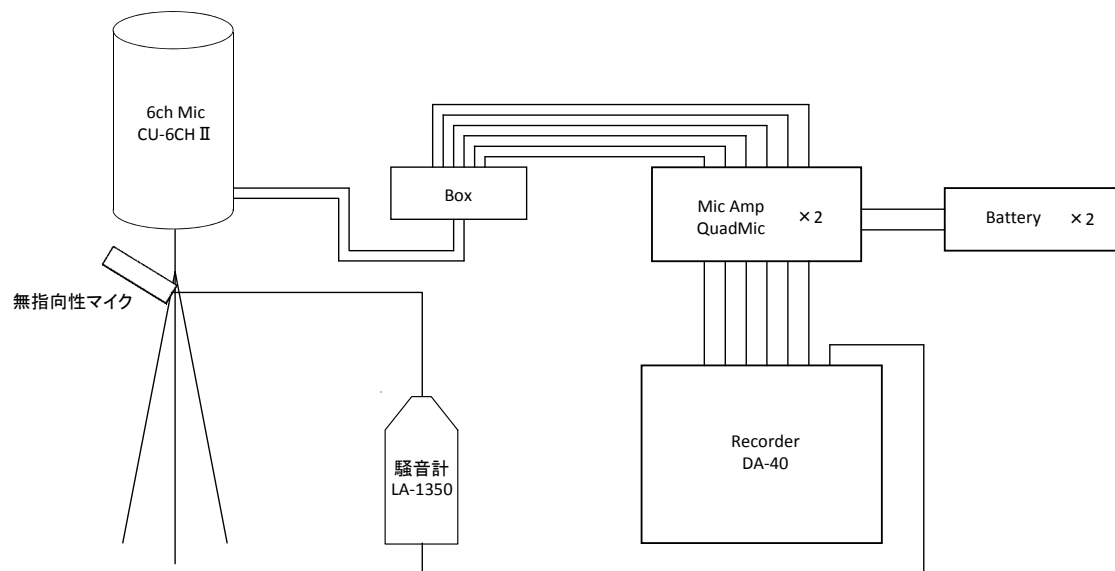


Fig. 2.2 6チャンネル再生系

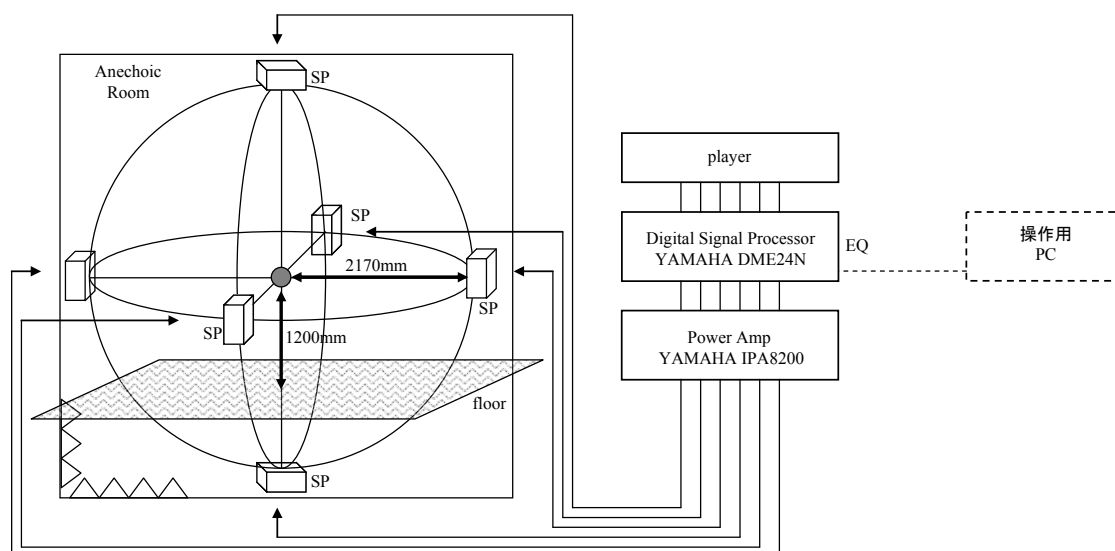


Fig. 2.3 6チャンネル再生系

Table. 2.1 6チャンネル収音・再生システム機材リスト

	採用機材	メーカー	備考
① 6ch mic	CU-6CHII	sanken	
② Monitor mic	LA-1350	小野測器	精密騒音計マイク部
③ Mic amp	QuadMic	RME	Gain: +20, +30, +40 dB
④ Recorder	DA-40	RION	16bit/48kHz, 8ch同時録音
⑤ PC Audition	Audition	Adobe	
⑧ Signal processor	DME24N	YAMAHA	
⑨ Power amp	IPA 8200	YAMAHA	
⑩ Loudspeakers	NS-2HX	YAMAHA	再生周波数: 60Hz~50kHz 2way, クロスオーバー周波数2.5kHz

2.2.2 6チャンネルマイク

6つのコンデンサーマイクロホンで構成される。指向特性は Fig. 2.4 に示すようにカージオイドである。径が数ミリ程度の直交6方向のマイクが、マイクカプセルの中に収納されている。マイクの周波数特性は40Hz~20kHz。Fig. 2.6 に6チャンネルマイクを示す。

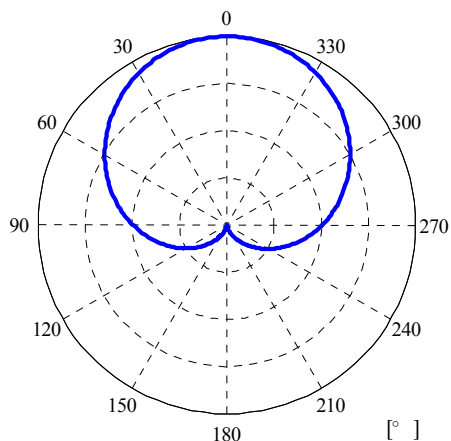


Fig. 2.4 カージオイド特性

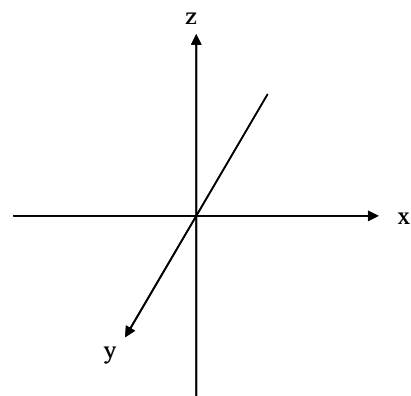


Fig. 2.5 マイクの向き



Fig. 2.6 6チャンネルマイク



Fig. 2.6 6チャンネル再生系

2.2.3 収音系

周波数特性の補正

マイクの指向特性は、実際には全ての周波数帯域でカージオイド特性を正確に満たしておらず、実音場の周波数特性と 6 チャンネル収音を行い 6 チャンネル再生系で再現した音場の周波数特性が一致しないため補正を行う必要がある。

特定の方向からの音の影響を小さくするため、残響室にてスピーカーからピンクノイズを出力し、6 チャンネル収音システムで録音を行った。また同時に無指向性マイクロホンで収音を行い、残響室における音場の周波数特性を把握した。

収音した 6 チャンネルのデータを無響室内の再生系で 6 チャンネル再生し、中心位置での周波数特性が残響室での周波数特性と同じになるように、1/3 オクターブバンドでのイコライジングを行い、63Hz から 20kHz 帯域において 1dB 以内に補正した。DME24N のグラフィックイコライザコンポーネントを用いて補正を行った。

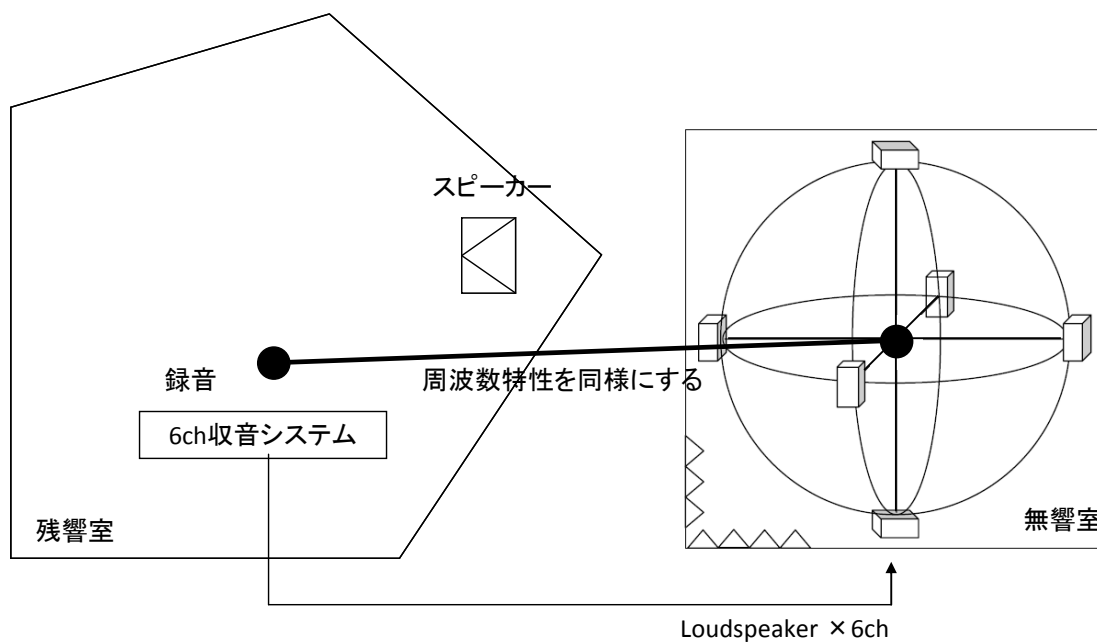


Fig. 2.7 収音系の補正

2.2.4 再生系

スピーカー配置

本研究室の再生系のスピーカー配置について、再生中心からスピーカーまでの距離は無響室内の中心から最大限に円の半径をとった 2170mm、スピーカー高さはツイーターの中心で床面から 1200mm である。

周波数特性とレベルの補正

スピーカー毎にピンクノイズを出力し、6チャンネル再生系の中心点の周波数特性をもとにイコライジングを行った。1/3 オクターブバンドで 63Hz 帯域から 20kHz 帯域において各チャンネルとも 1dB 以内に補正した。また、同時に各チャンネル間の再生レベルも揃えた。DME24N のグラフィックイコライザコンポーネントを用いて補正を行った。

第 3 章

幾何音響シミュレーションに基づく 6 チャンネル音場再現システム

3.1 概要

幾何音響シミュレーションによる検討を行い、その結果得られた直交 6 方向指向性重み付きインパルス応答を用いて無響室内にて 6 チャンネル音場再現システムで可聴化を行う。

3.2 既往文献

可聴化

2010 年に竣工した銀座ヤマハホールでの設計・施工段階での音響検討において、小ホールでの過大な拡がりを回避するため、側方反射音の制御に着目し、ASW を評価指標として縮尺模型実験や、音響シミュレーションによる可聴化実験を行い、最適な側壁形状の検討を行った。音場を評価するにあたり、幾何音響シミュレーションと 6 方向可聴化システムを利用し、その結果、一連の設計手法としての可能性が示された[2]。

波動音響解析結果に基づく可聴化を行った例としては、日光東照宮の“鳴き竜”現象の 3 次元 FDTD 解析を可聴化したものがある。無響室内で拍手した音を方向別インパルス応答に実時間でたたみ込み演算を行い、合成した信号を 6 チャンネル音場再現するシステムを用いている[9]。

2 次元音場を対象とした FDTD 法波動解析結果を基に可聴化を行った例として、室内音場における拡散体のフラッターエコー低減効果に関するものがある。数値解析結果の可聴化により、フラッターエコー低減効果が壁面形状および凹凸寸法に大きく依存することを聴感的に確認した[10]。

実時間たたみ込み機を用いたホール音響の評価

ホール音響が演奏者に及ぼす影響について、6 チャンネル音場再現システムを用いて、演奏者の主観評価と音響特性に関係性について検討されている。[11]

受音点の指向特性

解析音場の受音点におけるカージオイドではない指向特性が提案されている。この指向特性を用いると、再現音場において音圧だけでなくインテンシティベクトルの向きも正確に再現される。[10]

乱反射率

壁面の拡散性を表す乱反射率と室内音響特性との関係性について、測定や波動や幾何により検討がされている。[12]

3.3 幾何音響シミュレーションについて

3.3.1 概要

室内音響設計においては、模型実験や数値シミュレーションが行われている。計算機技術の発展とともに、模型実験より低コスト、短時間でモデル作成ができ、形状の変更も容易な数値シミュレーションは盛んに行われている。

建築音響分野での数値シミュレーション手法は幾何音響解析手法と波動音響解析手法に大きく分けられる。幾何音響解析は音の波動性を無視して、そのエネルギー伝搬・拡散を幾何的に考える方法であり、波動音響解析は波動方程式（または Helmholtz 方程式）から解を導く手法である。音の波動性を無視している幾何音響シミュレーションは、精度の点で波動音響シミュレーションに劣るが、目的によっては十分であることも多い。例えば、波長に比べて十分大きな室内空間においては、その周壁が複雑であれば波動性を無視した幾何音響解析によって、非常に単純明快に、その音場を解析することができる[19]。コンサートホールなどがその例である。

幾何音響解析手法は、音源点から等立体角間隔で多数の音線を出して反射伝搬経路を追跡計算する音線法と、周壁角面による音源の鏡像を幾何学的に求めて、受音点と多数の鏡像を結ぶ各音線の作図と、その長さから時系列のインパルス応答を近似的に求める鏡像法に大別される。

幾何音響解析は、計算コストがかからず、操作が簡単なため、実務の音響設計で普及しており、音響設計の第一段階である室の基本形状の設計に用いられてきた。近年は壁面の境界条件として、吸音率だけでなく、壁面の拡散性に関する物理指標で反射エネルギー中の錯乱エネルギー（非鏡面反射成分）である乱反射率が、幾つかの商用幾何シミュレーションソフトウェアにおいて壁面の境界条件として導入され、より現実に近い音響伝搬をシミュレートする試みがされている。

3.3.2 既往文献

旧東京音楽学校の改修前と改修後の建築的特徴が音場に及ぼす影響について、幾何音響シミュレーションにより検討されている。[7]

3.3.3 CATT-Acoustic v8 について

本研究では、商用幾何音響解析ソフト CATT-Acoustic v8 [8] (以下、CATT) を用いて検討を行う。125Hz から 16kHz の 8 オクターブバンドの周波数帯域について解析を行うことができる。壁面の境界条件として吸音率と乱反射率を周波数帯域ごとに設定できる。設定することができる。CATT は AutoCAD で作成した形状データを簡単に CATT へ書き出すことができる機能を備えている。

Early part detailed ISM、Audience Area Mapping、Full detailed calculation の 3 つの解析タイプを選ぶことができ、解析タイプはそれぞれ、鏡像(Image Source Model、ISM)法、音線法、音線法の一つである Randomized Tail-corrected Cone-tracing (RTC)method に基づいて計算されている。

CATT では、可聴化を行えるよう Post Processing module にてインパルス応答ファイルを出力することができる。この出力ファイルを用いて、実時間たたみ込み機で演算を行い可聴化する。詳細については、後述する。

3.4 幾何音響シミュレーションによる検討

3.4.1 概要

CATT にて解析を行った。基本的な形状のモデルにて、乱反射率と吸音面配置を変化させることで、それらが室内音響特性に及ぼす影響に関する知見を得ることができる。乱反射率は吸音力配分と影響関係があり、室内音響に及ぼす影響関係について未解明の部分が多い。吸音面が偏在していると、拡散性が低いとされている。

3.4.2 解析条件

解析モデルは豊かな響きで評価の高いシューボックス型ホールを仮定した直方体とした。解析条件を Table. 3.1 に示す。音源と受音点の位置を Fig. 3.1 に示す。音源は無指向性点音源で、周波数特性は平坦である。音線数は 1.0×10^5 本とした。CATT では空気吸収を考慮することができるが、本研究では空気吸収は無しとした。

吸音面配置は 3 条件で、均一、床・天井吸音、床・後壁吸音である。拡散音場を仮定した Sabine の残響式による残響時間が約 2 秒となるよう、どの吸音面配置も平均吸音率を 0.3 で与えた。乱反射率は 20%、40%、60%、80% の 4 条件である。吸音率、乱反射率ともに全周波数帯域で一様である。乱反射率 20%、40%、60%、80% の 4 条件を、それぞれ sc20、sc40、sc60、sc80 と表記する。

Table. 3.1 解析条件

条件名	吸音面配置	室寸法 [m]	平均吸音率	各壁面の吸音率	乱反射率 [%]
uni	均一	w=20, d=40, h=20	0.3	全面 $\alpha=0.3$	20, 40, 60, 80
fl_ceil	床・天井	w=20, d=40, h=20	0.3	床 $\alpha=0.7$ 天井 $\alpha=0.5$ その他 $\alpha=0.1$	20, 40, 60, 80
fl_rear	床・後壁	w=20, d=40, h=20	0.3	床 $\alpha=0.7$ 後壁 $\alpha=0.9$ その他 $\alpha=0.1$	20, 40, 60, 80

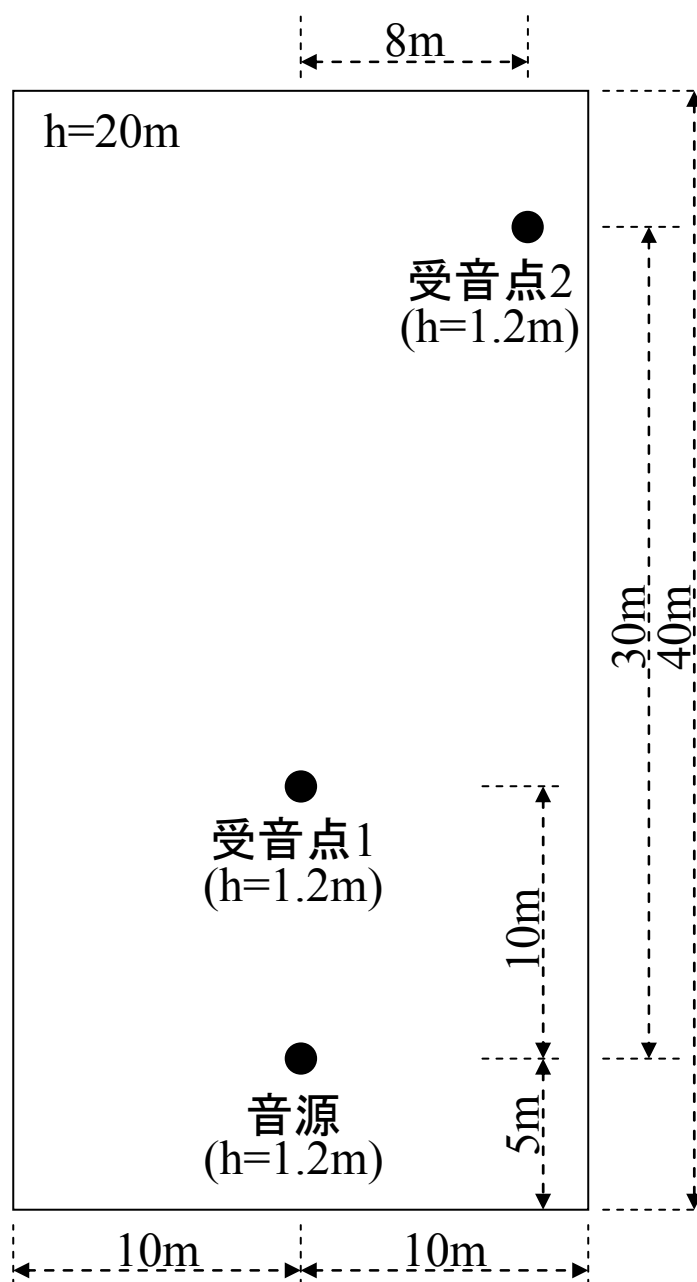


Fig. 3.1 音源と受音点の位置関係 (平面図)

3.5 幾何音響シミュレーション結果に基づく可聴化

3.5.1 システム構成

Fig. 3.2 にシステム概要を示す。

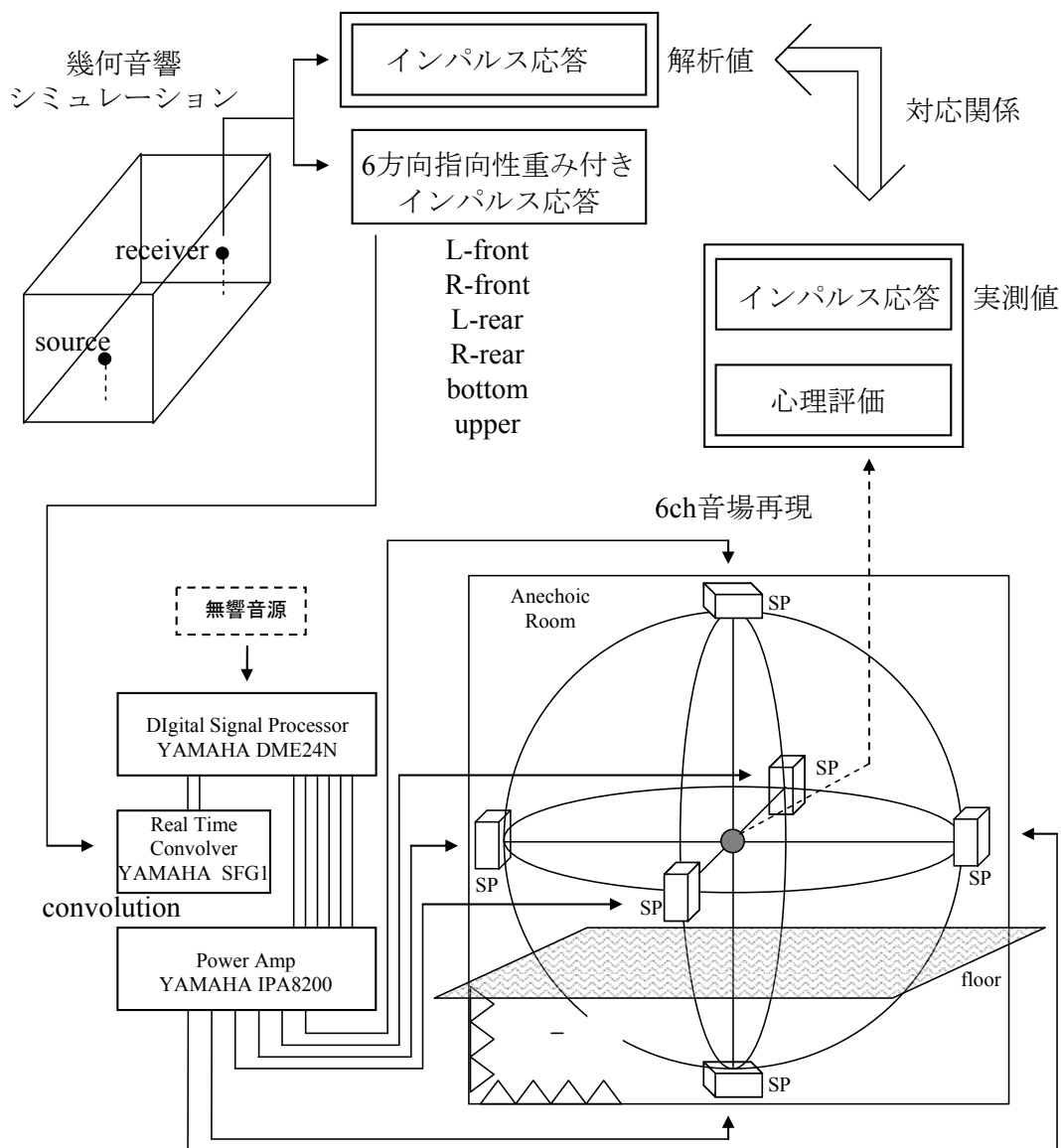


Fig. 3.2 幾何音響シミュレーションに基づく 6 チャンネル音場再現システム

3.5.2 使用機材

実時間たたみ込み機 SFG1

インパルス応答を実時間たたみ込み演算することができる。8チャンネルまで対応している。DME24N とオプティカルケーブルで接続して使用する。WAVES 社の IR-1 が搭載されている。たたみ込みによる遅延時間はサンプリング周波数 44.1kHz から 48kHz で 11.6ms、88.2kHz から 96kHz で 5.3ms となっている。残響時間や出力レベル、遅延時間、たたみ込み時間長さ、たたみ込み開始時間などの設定が可能である。たたみ込むインパルス応答は、独自のファイル形式.wir または WAV ファイルが使える。CATT ではインパルス応答の WAV ファイルが出力できるので、WAV ファイルを用いてたたみ込みを行う。インパルス応答の最大値が-12 dB 以上のときは-12 dB にノーマライズされる特徴がある。たたみ込み処理にはたたみ込むインパルス応答の長さ以上のゼロデータ（振幅が 0）を必要とする。たたみ込み演算はインパルス応答長 6 秒まで対応している。OS は Windows XP である。

デジタルシグナルプロセッサ YAMAHA DME24N

デジタルオーディオを処理する際に考えられるあらゆるプロセッサの機能を搭載している。ミキサー、イコライザー、ディレイ、ダイナミクス、サラウンド対応 PAN、マトリックス、クロスオーバー、空間系のエフェクトなど、多くのサウンドプロセッシング機能が備わっており、ブロックダイアグラムを書くようにミキシングプロセスを構築でき、大量に搭載した DSP リソースを多彩なプロセッサとして割り当てて使用することができる。サンプリング周波数 44.1kHz、48kHz、88.2kHz、96kHz に対応している。遅延時間は 0.5ms である。PC にインストールした専用ファームウェア DME Designer で設定や操作を行うことができる。外部との接続に関して、たたみ込み機との接続にはオプティカル接続を用い、ドライソース音源の入力は XLR 端子を用いてアナログで入力した。

パワーアンプ YAMAHA IPA8200

アッテネータで出力を制限可能だが 0 dB に固定して使用する。入力感度は DME24N に合わせて+4dBu とした。4 オーム、8 オーム、8 オームブリッジを選ぶことができる。周波数特性は 20Hz～20kHz。

スピーカー YAMAHA NS-2HX

2WAY スピーカー、クロスオーバー周波数 2.5kHz、再生周波数帯域 60Hz～50kHz である。

サンプリング周波数

全システムにおいて 48kHz とした。

3.5.3 レベル設定

チャンネル間の相対レベルの反映

本検討に用いた 16bit の WAV ファイルは、最大振幅で基準化されたファイルであり、各チャンネル間の相対レベルは反映されていないファイルである。よって、各チャンネル間の相対レベル差を反映させなければならない。32bit の WAV ファイルにより最大振幅を読み取り、DME24N のフェイダーや SFG1 のアウトプットレベル、インパルス応答のファイルを増幅することなどで調整する。

今回はインパルス応答ファイルを増幅することで実験を行った。インパルス応答 WAV ファイルを増幅する際に注意することは、実時間たたみ込み機 SFG1 では入力するインパルス応答の最大値が -12dB 以上の場合は、-12dB にノーマライズする特徴があるので、振幅の最大値が最も大きいチャンネルのレベルを -12dB として他のチャンネルのレベルを合わせた。

境界条件の違いによるレベルの反映

直接音のレベルを把握し、同一受音点における各チャンネルの直接音のレベルを同じにしておく必要がある。今回の検討では、最もレベルが大きいチャンネルで直接音が最大振幅となっていたため、考慮する必要はなかった。

ドライソース音源のレベルの反映

ドライソース（無響録音）とたたみ込みを行って音場再現を行う際、ドライソースを録音した際のレベルとドライソース音源からマイクロホンまでの距離が分かれば、ドライソース音源のレベルに合わせて再現音場の音量を設定することができる。具体的には、ドライソース音源のレベルから距離減衰の理論式により音響パワーレベルを求め、解析音場における音源と受音点の距離減衰によるレベルの差を直接音のレベルで反映させる。各チャンネル間の相対レベル差が反映された直接音にドライソースをたたみ込み、再生中心で音圧レベルを測定して、フェイダーなどで出力レベルを調整することで絶対レベルを反映させる。

3.5.4 時間遅れについて

鳴竜の可聴化[9]やステージ音響の評価[11]のような、無響室で収録した音にリアルタイムで残響を付加する音場再現システムに発展させる場合、システムでの遅れ時間を考慮しなければならない。時間遅れは、実時間たたみ込み機でのたたみ込み演算による約 12ms（仕様書より）、スピーカーから再生中心までの距離による約 6ms である。今回の検討では必要ないが、今後検討する必要がある。

3.5.5 インパルス応答ファイルの出力

CATT では、Post Processing module(以下 PP)で可聴化のためのインパルス応答ファイルを出力することができる。解析を行う Prediction module にて Full detailed calculation で解析を行うと、ECH ファイルが作成され、それを PP で読み取ると、バイノーラル、モノ、ステレオ、B-format などのインパルス応答を作成できる。

インパルス応答ファイル作成にあたっては、インパルス応答長、サンプリング周波数、レシーバーモデルを設定できる。レシーバーモデルは無指向性、バイノーラル、モノ、ステレオ、B-format、5 チャンネルを選択できる。モノやステレオを選択すると、マイクロホンタイプとして無指向性、カージオイド、ハイパーカージオイド、スーパーカージオイド、双指向性、user define を選択できる。6 チャンネル音場再現システムで可聴化を行う場合には、各チャンネルの方向ごとに、レシーバーモデルで無指向性またはモノを選択し、マイクロホンタイプとしてカージオイド特性を選択してインパルス応答を出力することになる。また、解析音場の音響物理指標値を求める等の検証が必要であるため、無指向性のインパルス応答も出力する。本研究において、解析値としては、6 つの単一指向性重み付きインパルス応答を同期加算したものをを用いた。

アウトプットファイルとして、Lake SIM-format (.SIM)、MLSSA ASCII-format (IR)、MATLAB binary-format (IR)、16-bit WAV uncalibrated (.WAV)、32-bit WAV calibrated (.WAV)を出力することができる。実時間たたみ込み機 SFG1 では、WAV ファイルを用いるため、PP で WAV ファイルを出力する。

16bit と 32bit の二つの WAV ファイルが出力できるが、16bit の WAV ファイルは音源から受音点までの時間遅れが含まれず、直接音が 1 サンプル目となっていて、振幅最大値が 16bit の最大値となっているファイルである。本研究のたたみ込み演算にはこのファイルを使用した。

32bit のファイルは、音源から受音点までの時間遅れが反映され、解析音場での個々のインパルス応答の相対的な振幅スケールが反映されたファイルとなっている。このファイルは、6 チャンネル音場再現を行う際に、チャンネル間、受音点間の相対レベル差を把握する際や、指標値の算出などのために使用した。

第 4 章

物理的再現性に関する検討

4.1 概要

CATT Acoustic v8 による解析結果を 6 チャンネル音場再現してインパルス応答測定を行い、解析結果と測定結果の対応関係をみることで、本システムにおける音響特性の再現性を物理的に把握する。解析による無指向性インパルス応答、直交 6 方向指向性重み付きインパルス応答を同期加算したもの（6ch 同期加算）が一致するか検討し、解析によるインパルス応答（6ch 同期加算）が再現音場とどの程度一致するのか検討する。

4.2 インパルス応答測定

CATT Acoustic v8 で解析した音場の受音点 1、受音点 2 における直交 6 方向指向性重み付きインパルス応答と TSP 信号を実時間たたみ込み機でたたみ込み、対応するスピーカーから放射して音場再現を行い、再生システムの中心位置で得られた応答に逆 TSP をたたみ込んでインパルス応答を得た。Lin-TSP 信号を用い、サンプリング周波数 48kHz、次数 17、インパルス応答長 1.365 秒、S/N 比改善のための同期加算回数は 5 回とした。Fig. 4.1 に測定システムを示す。無指向性のインパルス応答の測定に使用したマイクロホンは LA-1350 (ONO SOKKI)、双指向性のインパルス応答の測定に用いたマイクロホンは C-48 (SONY) である。

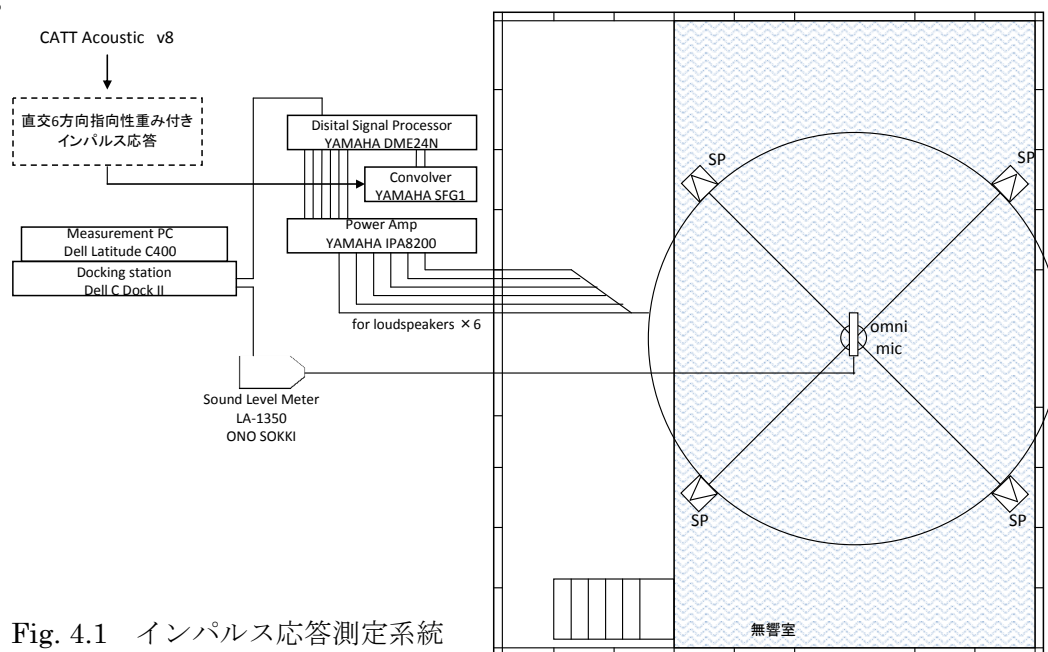


Fig. 4.1 インパルス応答測定系統

4.3 インパルス応答波形の比較

4.3.1 解析音場（無指向性）と解析音場（6ch 同期加算）の比較

インパルス応答の振幅値を二乗して 1ms の時間幅の区間内で加算して平方根をとった RMS 波形を Fig. 4.2～Fig. 4.3 に示す。Fig. 4.2 に受音点 1、Fig. 4.3 に受音点 2 を示す。直接音で基準化してある。グラフの上側が解析による無指向性インパルス応答、下側が解析による 6ch 同期加算インパルス応答の波形である。uni_sc20 の波形を示す。類似度は高いが、両者の反射音構造に若干差異があることがわかる。受音点 1 と受音点 2 を比較すると、受音点 1 では直接音のレベルが大きく、受音点 2 では反射音のレベルが大きいという受音点間の特性の違いはあるが、無指向性と 6ch 同期加算の比較という観点では同様の傾向を示す。

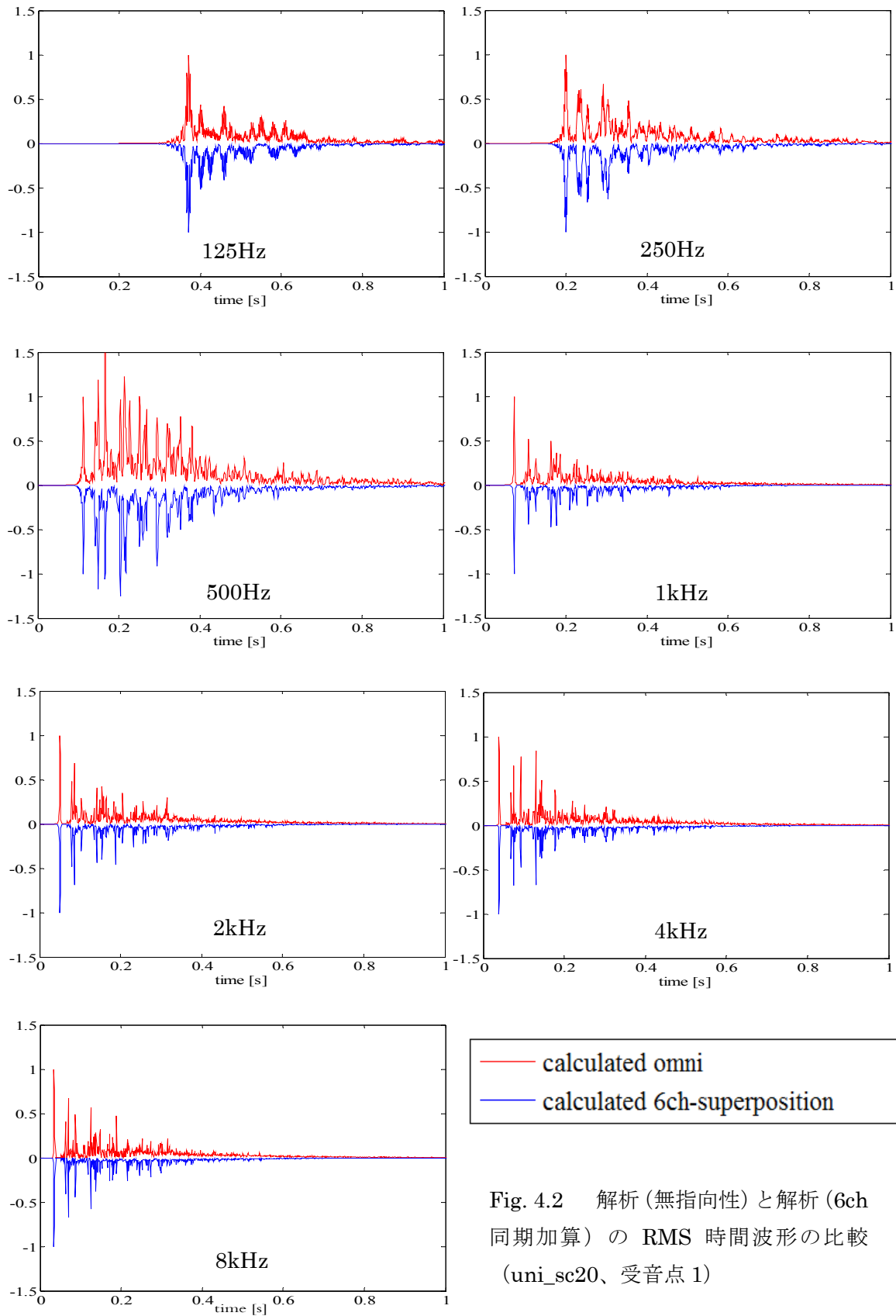
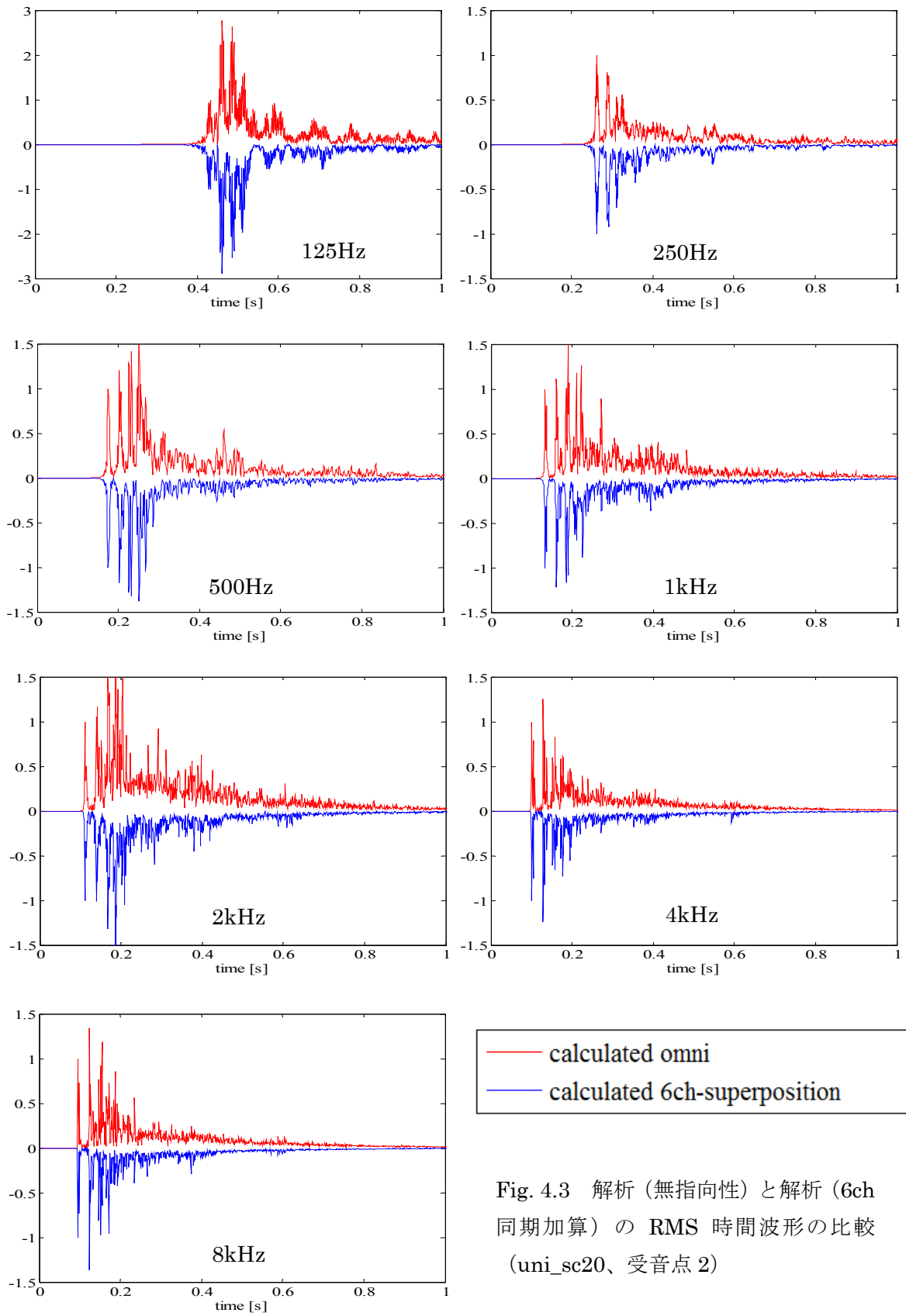


Fig. 4.2 解析（無指向性）と解析（6ch同期加算）の RMS 時間波形の比較 (uni_sc20、受音点 1)



— calculated omni
 — calculated 6ch-superposition

Fig. 4.3 解析（無指向性）と解析（6ch同期加算）の RMS 時間波形の比較 (uni_sc20、受音点 2)

4.3.2 解析音場（6ch 同期加算）と再現音場での実測の比較

インパルス応答の振幅値を二乗して 1ms の時間幅の区間内で加算して平方根をとった RMS 時間波形を Fig. 4.4～Fig. 4.5 に示す。Fig. 4.4 に受音点 1 を、Fig. 4.5 に受音点 2 を示す。直接音で基準化してある。グラフの上側が解析して出力したインパルス応答（6ch 同期加算）波形、下側が再現音場で実測したインパルス応答波形である。uni_sc20 の波形を示す。

2kHz 以下の帯域で両者は良い対応を示すが、4kHz 以上の帯域では実測の残響部の波形が崩れる。これはスピーカーの特性によるものと考えられる。受音点 2 では低周波数領域の初期の反射音の振幅に若干違いがみられるが、全体的な傾向としては受音点 1 と受音点 2 は同様である。

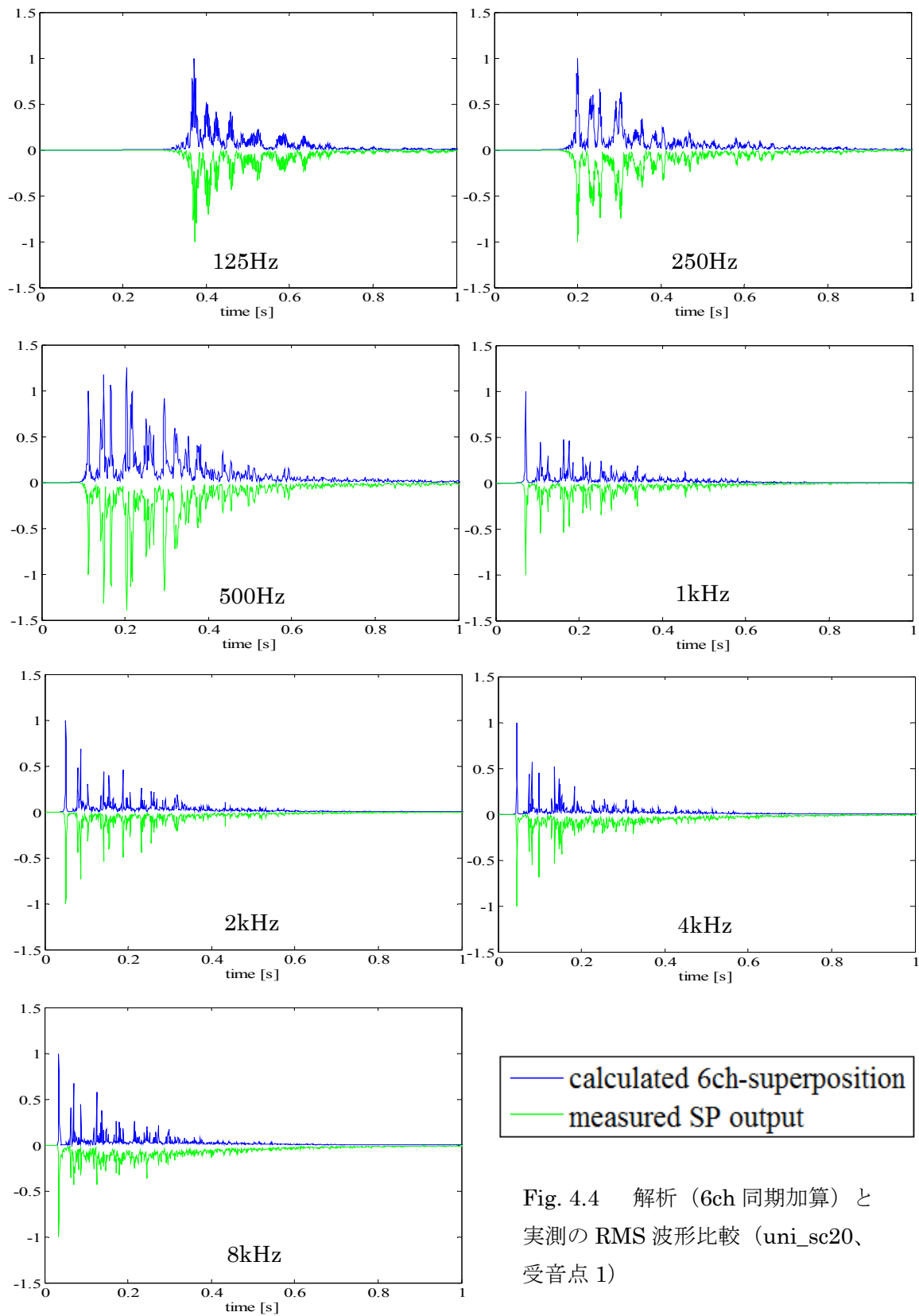


Fig. 4.4 解析 (6ch 同期加算) と
 実測の RMS 波形比較 (uni_sc20、
 受音点 1)

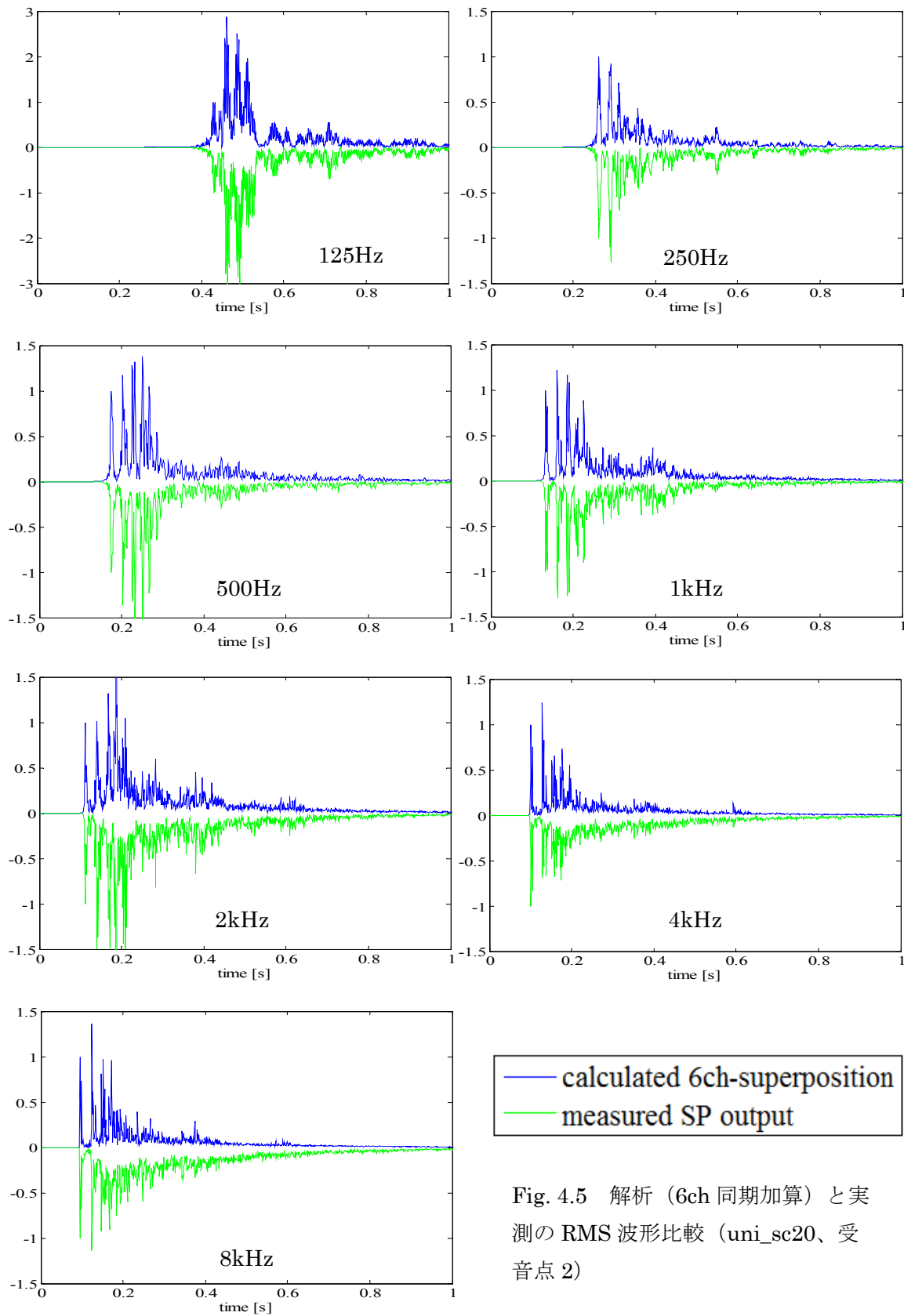


Fig. 4.5 解析（6ch 同期加算）と実測の RMS 波形比較（uni_sc20、受音点 2）

4.4 残響減衰曲線の比較

解析音場のインパルス応答（無指向性）、解析音場のインパルス応答（6ch 同期加算）、再現音場で実測したインパルス応答から逆二乗積分によりもとめた残響減衰曲線を比較する。uni_sc20 の減衰曲線を Fig. 4.6～Fig. 4.7 に示す。Fig. 4.6 に受音点 1 を、Fig. 4.7 に受音点 2 を示す。赤線が解析（無指向性）、青線が解析（6ch 同期加算）、緑線が再現音場における実測である。

解析音場のインパルス応答（無指向性）と解析音場のインパルス応答（6ch 同期加算）から求めた残響減衰曲線を比較すると、後期の減衰は比較的似ているが、初期の減衰に違いがみられ、6ch 同期加算は無指向性より初期減衰が大きい。解析音場のインパルス応答（6ch 同期加算）と再現音場で実測したインパルス応答から求めた残響減衰曲線を比較すると、2kHz 以下の周波数帯域ではよく対応しており、減衰曲線の形も似ているが、初期の減衰は異なっており、実測は解析（6ch 同期加算）より初期減衰が小さい。特に 4kHz 以上ではその違いが大きい。受音点 1 と受音点 2 は同様の傾向を示した。

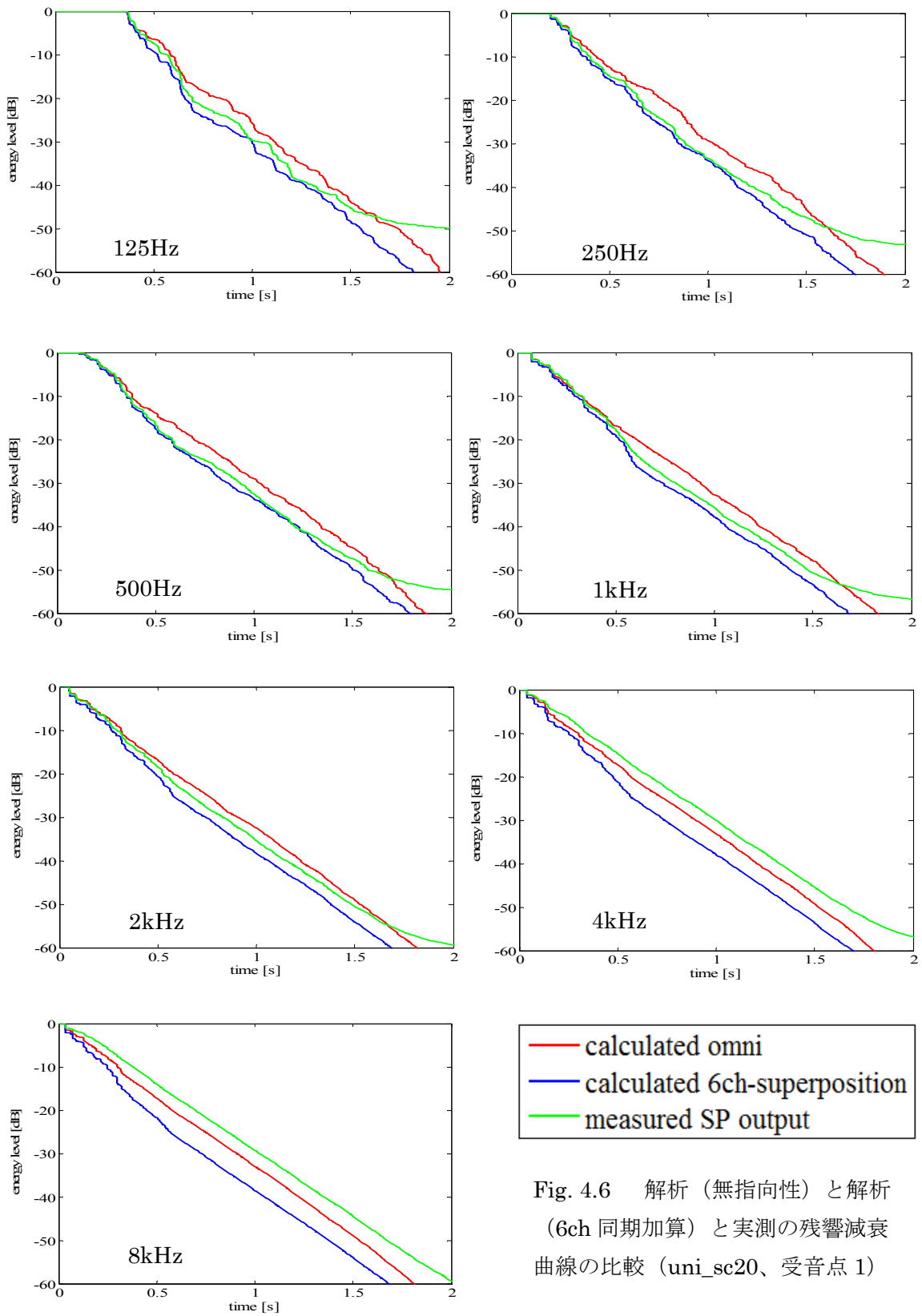


Fig. 4.6 解析（無指向性）と解析（6ch 同期加算）と実測の残響減衰曲線の比較（uni_sc20、受音点 1）

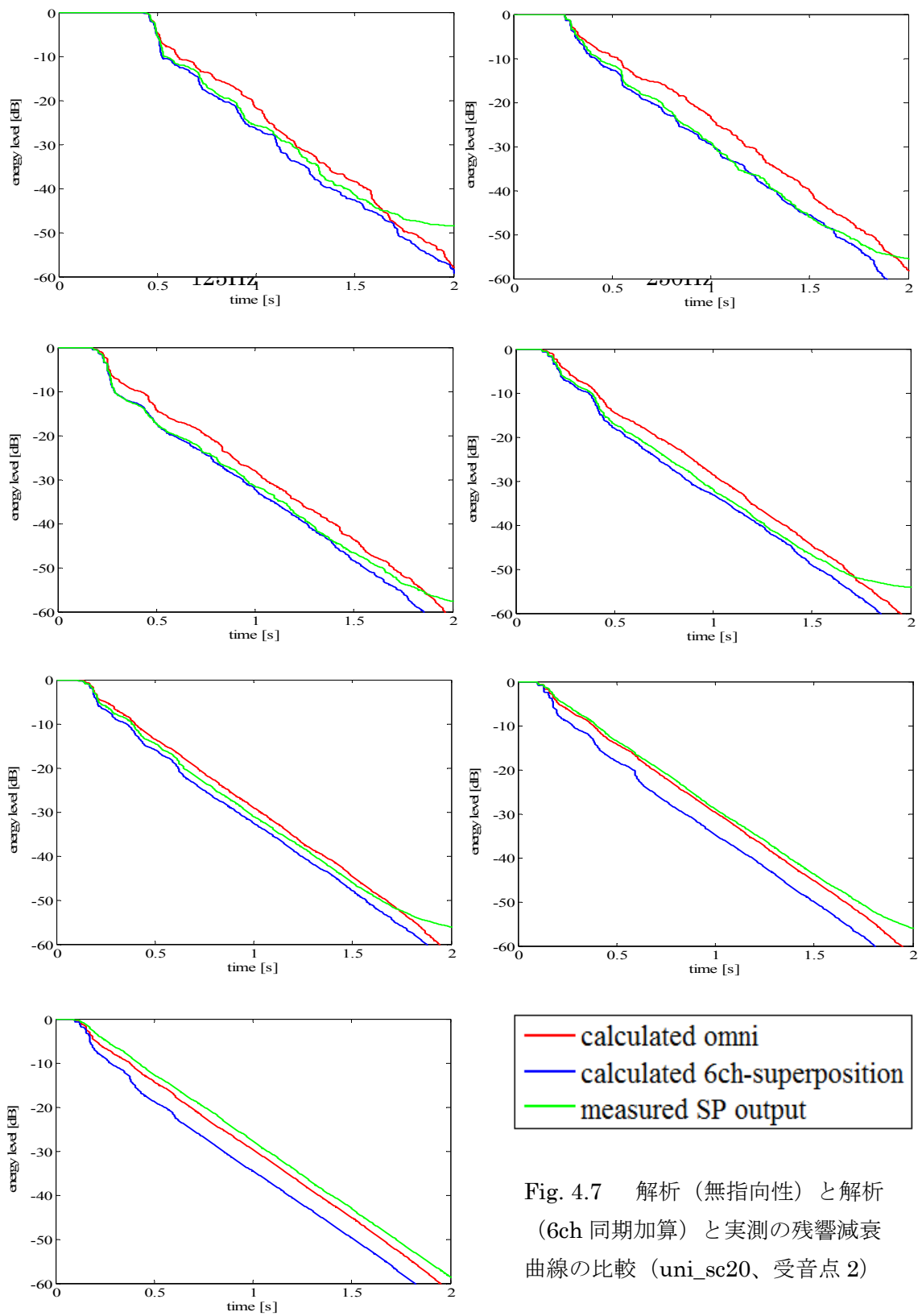


Fig. 4.7 解析（無指向性）と解析（6ch 同期加算）と実測の残響減衰曲線の比較（uni_sc20、受音点 2）

4.5 音響物理指標の比較

4.5.1 解析音場（無指向性）と解析音場（6ch 同期加算）の比較

解析音場のインパルス応答（無指向性）と解析音場のインパルス応答（6ch 同期加算）から音響物理指標を算出し比較する。ISO3382-1 で規定されている音響物理指標の弁別閾（JND）により誤差を評価する。 T_{30} 、 LG は弁別閾が規定されていないが、 T_{30} については一般的には5%とされているのでこの値を用い、 LG については Vorlander [20] を参考に 1dB とした。

Table. 4.1～Table. 4.2 に解析値（無指向性）に対する解析値（6ch 同期加算）の誤差を示す。EDT、 T_{30} については解析値に対する変化量の割合を百分率で示し、それ以外については差分で示す。黒文字は誤差が正の値、赤文字は誤差が負の値であることを示す。

ISO3382-1 に従い、 G 、EDT、 T_{30} 、 C_{80} 、 D_{50} 、 T_s については 500Hz 帯域と 1kHz 帯域の算術平均値、 LF については 125Hz 帯域から 1kHz 帯域の算術平均値、 LG については 125Hz 帯域から 1kHz 帯域のエネルギー平均値を用いる。濃い赤の網掛は誤差が弁別閾より小さくなっている場合、薄い赤の網掛は誤差が弁別閾以上で弁別閾の 2 倍より小さい場合である。つまり、網掛の場合は誤差が小さいことを意味する。

誤差の値に着目すると、EDT は負の値となっており 6ch 同期加算は無指向性より初期の減衰が大きいことがわかる。 T_{30} は正負どちらの場合もあり、誤差が小さい。明瞭性に関する C_{80} 、 D_{50} 、 T_s をみると、6ch 同期加算は無指向性より初期のエネルギー比率が大きく、明瞭度が高くなっていることがわかる。 G に関しては、負の値となっており、6ch 同期加算は無指向性より残響のエネルギーが小さくなっていることがわかる。 LF はほとんどが正となっており、6ch 同期加算は無指向性より 80ms 以前のエネルギー比率が若干小さくなっている。

誤差と弁別閾の関係をみると、 T_{30} はほとんどの条件で誤差が小さい。これは、残響減衰曲線の後期の傾きが類似していることからみてとれる。一方、EDT は誤差が大きい。これは残響減衰曲線の初期の減衰が異なっていることからみてとれる。 G 、 C_{80} 、 D_{50} 、 T_s は乱反射率の低い条件で誤差が小さいものもあるが、全体的に誤差が大きい。 LF はほとんどの条件で誤差が小さくなっている。 LF の算出において、分母には無指向性インパルス応答の 0ms から 80ms の区間のエネルギーの積分値を用いるが、 LF の誤差が小さいことから、インパルス応答の 80ms 以前のエネルギーは類似度が高いといえる。受音点 1 と受音点 2 は同様の傾向を示す。

4.5.2 解析音場（6ch 同期加算）と再現音場での実測の比較

誤差の値に着目すると、EDT は正の値となっており実測は 6ch 同期加算より初期の減衰が小さいことがわかる。T₃₀ はほとんどが正となっており、実測は 6ch 同期加算より後期の減衰が小さいが、誤差は小さい。明瞭性に関する C₈₀、D₅₀、Ts をみると、実測は 6ch 同期加算より初期のエネルギー比率が小さく、明瞭度が低くなっていることがわかる。G に関しては、受音点 1 では正、受音点 2 では負の値となっており、受音点により傾向が異なる。受音点 1 では実測は 6ch 同期加算より残響のエネルギーが大きく、受音点 2 では逆となっている。LF は負の値となり、実測は 6ch 同期加算より初期の側方からのエネルギーの割合が少ないか、0 から 5ms までのエネルギーが影響していることが考えられる。LG は負の値となり、後期の側方のエネルギーの割合が小さいと考えられる。

誤差と弁別閾の関係をみると、T₃₀、C₈₀、D₅₀、Ts は全ての条件において誤差が小さく、減衰曲線の後期残響の傾き、前期対後期のエネルギー比共に類似していることがわかる。EDT は sc20 の条件で誤差が小さいが、それより乱反射率が高い条件では誤差が大きくなっており、条件により対応に差が出た。誤差が大きい条件は弁別閾と相当違う値となり、初期の減衰が一致することはあまり期待できないといえる。LF は受音点 1 の乱反射率が低い条件で誤差が小さくなったが、全体的に誤差が大きい。G、LG は誤差が大きい。

Table. 4.1 解析（無指向性）に対する解析（6ch 同期加算）の物理指標の誤差と弁別閾の関係

受音点 1

		G	EDT	T ₃₀	C ₈₀	D ₅₀	T _s	LF
uni	sc20	-1.5	-7.2	-19.0	0.5	0.072	-0.017	0.012
	sc40	-1.9	-44.1	-1.4	3.1	0.142	-0.050	0.011
	sc60	-2.7	-35.9	-1.6	3.1	0.234	-0.047	0.047
	sc80	-2.8	-44.9	2.1	4.3	0.245	-0.055	0.037
fl_ceil	sc20	-1.3	-7.1	-20.7	1.4	0.068	-0.027	0.003
	sc40	-1.8	-44.0	-2.8	3.5	0.180	-0.052	-0.005
	sc60	-1.9	-54.3	-0.8	4.9	0.264	-0.055	0.006
	sc80	-2.4	-58.9	-0.9	5.3	0.223	-0.052	0.020
fl_rear	sc20	-1.2	-16.7	-16.9	1.7	0.080	-0.024	0.002
	sc40	-1.7	-41.2	-2.3	2.3	0.119	-0.035	0.011
	sc60	-2.3	-48.4	0.8	3.9	0.200	-0.044	0.023
	sc80	-2.7	-42.7	4.8	5.1	0.285	-0.048	0.041

受音点 2

		G	EDT	T ₃₀	C ₈₀	D ₅₀	T _s	LF
uni	sc20	-1.9	-33.1	-9.1	2.4	0.118	-0.030	0.018
	sc40	-3.0	-36.9	0.2	4.6	0.212	-0.049	0.043
	sc60	-3.7	-24.0	0.1	5.6	0.205	-0.055	0.061
	sc80	-4.3	-23.8	3.9	4.2	0.202	-0.053	0.119
fl_ceil	sc20	-1.7	-43.4	-6.3	2.8	0.078	-0.047	0.032
	sc40	-2.5	-56.3	5.9	5.9	0.213	-0.064	0.012
	sc60	-3.7	-34.1	3.6	5.4	0.241	-0.055	0.076
	sc80	-3.4	-33.3	2.0	6.1	0.249	-0.061	0.035
fl_rear	sc20	-1.3	-36.1	-7.9	2.5	0.093	-0.029	0.018
	sc40	-2.3	-48.2	-10.5	5.3	0.257	-0.059	0.025
	sc60	-3.0	-39.8	3.9	5.4	0.258	-0.054	-0.017
	sc80	-4.2	-20.4	5.3	4.6	0.273	-0.051	0.071

Table. 4.2 解析（6ch 同期加算）に対する実測の物理指標の誤差と弁別閾の関係

受音点 1

		G	EDT	T ₃₀	C ₈₀	D ₅₀	T _s	LF	LG
uni	sc20	5.4	3.4	7.4	-1.0	-0.048	0.013	-0.064	-5.6
	sc40	5.2	24.2	0.9	-1.3	-0.055	0.015	-0.084	-6.2
	sc60	5.2	20.9	3.1	-1.3	-0.073	0.017	-0.172	-6.2
	sc80	5.2	25.8	2.3	-1.8	-0.083	0.018	-0.173	-5.9
fl_ceil	sc20	5.5	-1.1	4.4	-1.1	-0.054	0.015	-0.035	-5.4
	sc40	5.3	17.0	5.0	-1.3	-0.062	0.015	-0.083	-6.7
	sc60	5.0	32.3	1.5	-1.4	-0.059	0.013	-0.108	-7.1
	sc80	5.2	37.9	2.5	-1.9	-0.084	0.015	-0.174	-8.5
fl_rear	sc20	5.1	0.9	7.2	-0.8	-0.030	0.007	-0.028	-6.2
	sc40	5.1	4.5	2.8	-1.1	-0.045	0.010	-0.062	-8.1
	sc60	5.1	22.9	1.2	-1.1	-0.054	0.011	-0.086	-7.9
	sc80	5.1	26.6	-0.2	-1.7	-0.083	0.014	-0.169	-7.3

受音点 2

		G	EDT	T ₃₀	C ₈₀	D ₅₀	T _s	LF	LG
uni	sc20	-6.1	2.1	5.7	-0.4	-0.018	0.004	-0.174	-8.9
	sc40	-5.2	10.2	1.5	-0.6	-0.021	0.006	-0.176	-6.6
	sc60	-4.8	3.0	2.5	-0.9	-0.020	0.007	-0.191	-7.5
	sc80	-4.5	9.1	-0.2	-1.4	-0.050	0.014	-0.192	-7.5
fl_ceil	sc20	-6.9	-1.0	-0.3	-0.3	-0.010	0.004	-0.216	-10.5
	sc40	-5.9	26.8	1.2	-1.0	-0.025	0.008	-0.204	-8.2
	sc60	-4.9	5.7	2.3	-0.6	-0.045	0.007	-0.185	-7.4
	sc80	-4.8	12.4	1.2	-0.8	-0.021	0.010	-0.291	-8.0
fl_rear	sc20	-5.3	5.6	3.3	-0.7	-0.028	0.005	-0.229	-9.5
	sc40	-4.9	2.9	4.0	-0.7	-0.033	0.006	-0.186	-7.6
	sc60	-5.1	13.7	2.8	-0.7	-0.029	0.009	-0.189	-7.6
	sc80	-4.9	10.5	-1.0	-0.5	-0.036	0.010	-0.163	-7.5

誤差 < JND
 JND ≤ 誤差 < JND × 2

4.6 物理指標の周波数帯域値の比較

4.6.1 解析音場（無指向性）と解析音場（6ch 同期加算）の比較

物理指標の誤差を周波数帯域値で比較する。Table. 4.3 に解析（無指向性）に対する解析（6ch 同期加算）の物理指標の誤差と弁別閾の関係（各周波数帯域値）を示す。全体的な傾向は平均値で検討したものと同様であり、 T_{30} 、 LF は誤差が小さい。G は平均値ではあまり対応が良くなかったが、帯域値では比較的良い対応をしている。無指向性と 6ch 同期加算のインパルス応答の総エネルギーは類似しているといえる。受信点 1 と受信点 2 はほぼ同じ傾向を示している。

Table. 4.3 解析（無指向性）に対する解析（6ch 同期加算）の物理指標の誤差と弁別閾の関係（各周波数帯域値）

	誤差 < JND
	JND ≤ 誤差 < JND × 2

G

受信点 1

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	0.1	-0.5	-1.7	-1.2	-1.1	-1.6	-1.1
	sc40	-0.6	-1.7	-1.9	-1.9	-1.7	-1.9	-1.6
	sc60	-0.8	-1.0	-3.5	-1.9	-2.2	-2.3	-2.3
	sc80	-1.2	-1.4	-2.5	-3.0	-1.9	-2.7	-2.0
fl_ceil	sc20	-0.0	-0.5	-1.7	-0.9	-1.2	-1.1	-1.1
	sc40	-1.2	-0.5	-2.3	-1.3	-1.1	-1.8	-1.6
	sc60	-1.1	-0.9	-2.4	-1.5	-1.5	-1.9	-1.7
	sc80	-0.8	-0.9	-1.9	-2.8	-1.7	-2.3	-2.0
fl_rear	sc20	-0.4	-0.3	-1.1	-1.2	-1.0	-0.8	-1.0
	sc40	-0.6	-0.6	-1.9	-1.5	-1.4	-1.9	-1.6
	sc60	-2.0	-2.8	-2.3	-2.3	-1.9	-2.1	-2.0
	sc80	-2.5	-1.9	-2.6	-2.9	-1.9	-2.7	-2.5

受信点 2

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	-1.1	-0.2	-1.6	-2.3	-3.1	-1.5	-1.7
	sc40	-1.5	-1.8	-2.3	-3.7	-3.4	-2.9	-3.1
	sc60	-3.4	-2.4	-3.4	-4.1	-4.2	-3.6	-4.3
	sc80	-4.8	-2.7	-3.4	-5.3	-5.4	-4.6	-4.5
fl_ceil	sc20	-1.6	-1.4	-1.3	-2.1	-1.9	-1.9	-1.3
	sc40	-1.8	-1.3	-2.3	-2.7	-4.0	-3.0	-2.9
	sc60	-2.9	-2.5	-2.8	-4.5	-3.7	-3.7	-4.0
	sc80	-2.0	-2.0	-2.9	-3.9	-4.4	-3.9	-3.9
fl_rear	sc20	-0.8	-1.7	-0.9	-1.8	-2.2	-1.7	-2.1
	sc40	-2.6	-1.2	-2.0	-2.5	-3.2	-2.8	-2.9
	sc60	-1.8	-1.5	-2.0	-4.0	-4.4	-3.1	-3.6
	sc80	-1.9	-3.5	-3.2	-5.1	-4.4	-3.6	-3.8

EDT

受信点 1

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	-44.6	-29.3	-11.2	-3.2	-14.5	-13.7	-19.6
	sc40	-31.5	-25.9	-39.1	-49.0	-45.3	-41.2	-44.5
	sc60	-41.4	-65.8	-21.6	-50.3	-50.1	-49.8	-45.4
	sc80	-53.9	-65.8	-50.8	-36.9	-58.7	-43.6	-47.1
fl_ceil	sc20	-28.1	-20.0	-6.0	-8.2	-6.4	-16.4	-24.1
	sc40	-40.4	-54.9	-35.5	-52.3	-52.4	-52.8	-45.8
	sc60	-48.5	-55.2	-44.6	-63.2	-64.6	-57.3	-58.1
	sc80	-62.9	-75.2	-55.4	-63.0	-56.1	-56.1	-49.4
fl_rear	sc20	-36.5	-14.4	-11.9	-21.4	-15.5	-21.2	-13.0
	sc40	-14.0	-29.7	-44.3	-37.5	-41.8	-33.3	-35.9
	sc60	-44.0	-39.2	-41.7	-55.5	-53.3	-48.0	-51.3
	sc80	-31.7	-76.0	-41.7	-43.8	-52.0	-47.3	-42.0

受信点 2

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	-55.2	-48.1	-48.4	-21.1	-24.4	-44.8	-40.7
	sc40	-63.8	-64.4	-54.6	-18.3	-25.5	-37.9	-39.0
	sc60	-17.5	-69.1	-24.0	-24.0	-21.3	-31.4	-21.4
	sc80	-15.6	-47.0	-32.2	-14.8	-5.6	-10.8	-10.6
fl_ceil	sc20	-75.2	-36.3	-57.0	-30.0	-22.2	-28.9	-53.5
	sc40	-69.0	-67.9	-58.4	-54.5	-27.3	-51.2	-44.7
	sc60	-42.9	-53.4	-49.7	-16.5	-23.2	-32.7	-28.2
	sc80	-39.5	-69.5	-42.0	-24.3	-12.2	-25.6	-17.4
fl_rear	sc20	-46.4	-15.9	-36.1	-36.2	-45.2	-38.5	-27.4
	sc40	-73.4	-66.7	-57.9	-38.0	-38.5	-56.0	-44.8
	sc60	-63.4	-63.7	-52.0	-26.9	-15.9	-33.1	-29.7
	sc80	-55.8	-25.4	-30.9	-8.6	-22.5	-30.7	-19.7

誤差 < JND
 JND ≤ 誤差 < JND × 2

T₃₀

受音点 1

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	-11.6	-14.8	-14.9	-23.3	-19.6	-16.9	-17.7
	sc40	-8.8	-2.4	2.7	-5.7	-6.9	-7.0	-5.5
	sc60	-5.6	-1.6	-0.9	-2.2	-1.9	0.3	-1.5
	sc80	-2.7	4.4	4.3	-0.1	3.2	0.5	-1.5
fl_ceil	sc20	-16.2	-20.8	-16.4	-25.1	-19.6	-16.0	-16.0
	sc40	-4.2	1.8	-0.6	-5.0	-7.2	-4.4	-7.8
	sc60	-1.9	-2.8	2.9	-4.6	-5.1	-4.0	-5.1
	sc80	-2.7	5.9	-3.1	1.5	-2.7	-1.5	-2.1
fl_rear	sc20	-11.5	-23.0	-14.7	-19.3	-20.0	-20.7	-20.4
	sc40	-4.0	-7.4	-0.4	-4.3	-8.4	-2.5	-7.9
	sc60	10.4	-7.0	0.4	1.3	-3.1	0.4	-2.8
	sc80	1.3	18.3	8.4	1.0	0.9	4.1	-3.0

受音点 2

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	-6.3	-13.4	-5.3	-12.9	-7.5	-10.8	-10.7
	sc40	-1.8	0.1	1.2	-1.0	-1.9	-1.9	0.3
	sc60	9.6	1.5	2.0	-1.9	-0.8	-1.4	1.0
	sc80	3.0	4.0	4.4	3.3	1.2	1.0	-0.1
fl_ceil	sc20	11.0	-5.0	-3.6	-9.1	-9.5	-7.4	-12.7
	sc40	19.6	4.4	5.2	6.6	-2.5	1.1	2.9
	sc60	7.3	2.0	4.0	3.2	3.0	-3.8	-1.9
	sc80	4.0	9.0	5.3	-1.3	1.2	1.8	2.4
fl_rear	sc20	-6.9	-11.2	-8.8	-6.9	-2.2	-6.7	-9.3
	sc40	-5.2	-6.8	-9.4	-11.6	-12.5	-12.2	-12.0
	sc60	25.7	1.7	5.3	2.3	2.0	-1.0	-2.3
	sc80	4.6	0.7	9.5	0.9	3.4	7.2	0.5

C₈₀

受音点 1

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	2.4	1.7	0.1	1.0	1.8	1.9	1.9
	sc40	1.7	3.0	2.8	3.4	4.6	3.1	3.7
	sc60	2.3	5.2	2.1	4.1	5.1	4.8	3.7
	sc80	2.2	5.1	4.2	4.5	5.6	5.4	5.1
fl_ceil	sc20	1.6	1.9	1.6	1.1	2.1	2.7	2.2
	sc40	3.1	3.8	4.1	3.0	2.7	4.4	4.6
	sc60	2.5	3.9	5.0	4.8	5.0	4.7	4.3
	sc80	3.1	6.2	5.4	5.1	5.1	4.8	5.4
fl_rear	sc20	1.1	0.5	1.7	1.7	1.7	0.9	1.7
	sc40	1.5	2.3	1.6	3.1	3.0	3.0	3.0
	sc60	4.4	4.3	4.1	3.6	3.6	4.4	4.6
	sc80	3.9	6.0	5.3	4.8	5.8	5.7	4.4

受音点 2

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	2.8	1.9	1.9	2.9	2.3	3.3	2.7
	sc40	4.7	3.9	4.3	4.8	5.2	4.5	4.8
	sc60	7.5	5.6	6.0	5.1	4.0	4.1	4.7
	sc80	3.4	4.9	5.1	3.3	4.6	4.8	4.8
fl_ceil	sc20	3.1	3.0	2.3	3.3	3.3	2.3	2.0
	sc40	5.9	6.7	5.8	6.1	4.7	4.8	5.2
	sc60	3.4	4.5	6.0	4.9	5.0	4.4	5.3
	sc80	4.1	6.3	6.4	5.8	3.1	4.9	4.9
fl_rear	sc20	3.8	3.7	0.9	4.0	2.8	3.3	3.8
	sc40	6.8	5.1	5.5	5.0	6.1	5.9	5.7
	sc60	9.8	7.0	6.0	4.7	5.7	5.9	5.4
	sc80	5.6	5.8	6.4	2.7	3.3	5.2	5.0

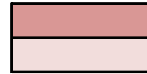
D₅₀

受音点 1

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	0.046	0.035	0.077	0.067	0.101	0.159	0.117
	sc40	0.036	0.174	0.136	0.148	0.225	0.184	0.185
	sc60	0.085	0.255	0.291	0.177	0.239	0.251	0.202
	sc80	0.101	0.202	0.232	0.257	0.253	0.289	0.248
fl_ceil	sc20	0.071	0.072	0.079	0.057	0.124	0.111	0.099
	sc40	0.111	0.068	0.215	0.145	0.136	0.202	0.202
	sc60	0.146	0.152	0.327	0.201	0.206	0.232	0.198
	sc80	0.115	0.219	0.236	0.209	0.207	0.244	0.238
fl_rear	sc20	0.039	0.022	0.052	0.108	0.095	0.068	0.093
	sc40	0.089	0.131	0.092	0.146	0.177	0.182	0.170
	sc60	0.195	0.220	0.254	0.145	0.215	0.237	0.224
	sc80	0.223	0.175	0.300	0.270	0.238	0.264	0.241

受音点 2

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	0.036	0.088	0.098	0.137	0.054	0.101	0.097
	sc40	0.284	0.212	0.174	0.249	0.175	0.270	0.224
	sc60	0.474	0.178	0.243	0.166	0.191	0.242	0.270
	sc80	0.242	0.252	0.194	0.210	0.265	0.298	0.276
fl_ceil	sc20	0.129	0.155	0.045	0.111	0.111	0.146	0.095
	sc40	0.250	0.209	0.191	0.234	0.212	0.251	0.245
	sc60	0.318	0.256	0.228	0.254	0.206	0.297	0.269
	sc80	0.262	0.271	0.254	0.243	0.243	0.297	0.292
fl_rear	sc20	0.106	0.149	0.055	0.130	0.075	0.155	0.151
	sc40	0.323	0.199	0.239	0.274	0.255	0.255	0.295
	sc60	0.366	0.239	0.256	0.259	0.278	0.295	0.242
	sc80	0.177	0.236	0.274	0.271	0.283	0.309	0.270


 誤差 < JND
 JND ≤ 誤差 < JND × 2

Ts

受音点 1

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	-0.023	-0.024	-0.018	-0.015	-0.025	-0.026	-0.031
	sc40	-0.018	-0.032	-0.057	-0.043	-0.046	-0.040	-0.046
	sc60	-0.021	-0.048	-0.045	-0.049	-0.049	-0.054	-0.044
	sc80	-0.029	-0.048	-0.060	-0.050	-0.057	-0.057	-0.053
fl_ceil	sc20	-0.025	-0.033	-0.031	-0.022	-0.036	-0.039	-0.039
	sc40	-0.021	-0.034	-0.059	-0.045	-0.039	-0.049	-0.046
	sc60	-0.025	-0.036	-0.059	-0.050	-0.045	-0.049	-0.047
	sc80	-0.026	-0.051	-0.056	-0.048	-0.043	-0.048	-0.049
fl_rear	sc20	-0.018	-0.011	-0.023	-0.025	-0.020	-0.018	-0.021
	sc40	-0.016	-0.026	-0.034	-0.035	-0.034	-0.036	-0.034
	sc60	-0.039	-0.030	-0.047	-0.040	-0.041	-0.044	-0.044
	sc80	-0.032	-0.051	-0.052	-0.044	-0.049	-0.051	-0.045

受音点 2

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	-0.013	-0.029	-0.026	-0.033	-0.028	-0.034	-0.032
	sc40	-0.047	-0.036	-0.051	-0.046	-0.051	-0.050	-0.048
	sc60	-0.040	-0.046	-0.056	-0.053	-0.046	-0.049	-0.051
	sc80	-0.028	-0.048	-0.062	-0.044	-0.041	-0.048	-0.047
fl_ceil	sc20	-0.041	-0.037	-0.042	-0.052	-0.050	-0.045	-0.050
	sc40	-0.046	-0.048	-0.058	-0.070	-0.046	-0.051	-0.059
	sc60	-0.031	-0.038	-0.062	-0.048	-0.055	-0.046	-0.054
	sc80	-0.040	-0.047	-0.067	-0.055	-0.045	-0.055	-0.060
fl_rear	sc20	-0.016	-0.026	-0.022	-0.035	-0.038	-0.035	-0.031
	sc40	-0.050	-0.043	-0.060	-0.058	-0.065	-0.060	-0.058
	sc60	-0.065	-0.035	-0.059	-0.049	-0.051	-0.054	-0.050
	sc80	-0.049	-0.033	-0.064	-0.038	-0.049	-0.057	-0.055

LF

受音点 1

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	-0.007	-0.006	0.040	0.020	0.005	0.015	0.003
	sc40	0.001	0.012	0.020	0.012	0.001	0.018	0.005
	sc60	0.002	-0.023	0.197	0.013	0.013	0.020	0.032
	sc80	0.016	-0.004	0.046	0.089	0.014	0.037	0.014
fl_ceil	sc20	-0.003	-0.002	0.015	0.003	0.001	-0.004	-0.001
	sc40	0.006	-0.032	0.006	0.001	0.004	0.004	0.002
	sc60	0.012	-0.002	0.020	-0.004	0.004	0.019	0.014
	sc80	-0.001	-0.021	0.021	0.081	0.010	0.045	0.014
fl_rear	sc20	0.000	0.000	0.001	0.005	0.002	0.004	0.002
	sc40	0.001	-0.001	0.037	0.007	0.008	0.020	0.011
	sc60	0.007	0.036	0.024	0.025	0.019	0.012	0.014
	sc80	0.046	0.013	0.040	0.067	0.000	0.029	0.036

受音点 2

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	0.023	-0.018	0.022	0.046	0.088	0.012	0.024
	sc40	0.017	0.048	0.023	0.085	0.040	0.044	0.050
	sc60	0.061	0.047	0.055	0.081	0.137	0.084	0.060
	sc80	0.190	0.055	0.056	0.177	0.184	0.099	0.113
fl_ceil	sc20	0.035	0.037	0.020	0.038	0.009	0.035	0.019
	sc40	0.015	-0.015	0.016	0.030	0.064	0.053	0.052
	sc60	0.085	0.058	0.021	0.140	0.068	0.097	0.075
	sc80	0.006	0.020	0.023	0.092	0.281	0.088	0.084
fl_rear	sc20	-0.000	0.050	0.022	0.003	0.054	0.028	0.042
	sc40	0.030	0.009	0.033	0.030	0.076	0.048	0.038
	sc60	-0.170	-0.008	0.002	0.107	0.151	0.028	0.079
	sc80	-0.004	0.056	0.021	0.213	0.150	0.067	0.082

4.6.2 解析音場（6ch 同期加算）と再現音場での実測の比較

物理指標の誤差を周波数帯域値で比較する。Table. 4.4 に解析（6ch 同期加算）に対する実測の物理指標の誤差と弁別閾の関係（各周波数帯域値）を示す。

平均値での検討と同様に、 T_{30} と明瞭性に関する指標 C_{80} 、 D_{50} 、 T_s は誤差が小さい。 EDT は誤差が小さい条件も比較のみられるが、良い対応をしているとは言えない。 T_{30} は全周波数帯域で誤差が小さくなったが、 EDT 、 C_{80} 、 D_{50} 、 T_s は 4kHz 以上の帯域では 2kHz 以下の帯域と比べて、誤差が非常に大きくなっている。高い周波数領域では初期のエネルギー比率が低くなっていることがわかる。これはインパルス応答波形や残響減衰曲線による検討でみられた傾向と同じである。 LF と LG をみると、 LF は 8kHz で、 LG は 4kHz で誤差の正負がそれより低い周波数帯域と異なっており、高い周波数領域では正となっている。 LF をみると、高い周波数領域において、初期のエネルギー比率が低くなっていることから考えると、初期の側方からのエネルギーは全方向からのエネルギーに比べるとあまり減少していないか、0 から 5ms のエネルギーが影響している可能性がある。 LG をみると、無指向性の明瞭度の指標と同じように、高い周波数領域では、側方のエネルギーも後期残響のエネルギー比率が大きくなっている可能性がある。

Table. 4.4 解析 (6ch 同期加算) に対する実測の物理指標の誤差と弁別閾の関係 (各周波数帯域値)

誤差 < JND
 JND ≤ 誤差 < JND×2

G

受音点 1

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	5.3	4.5	6.2	4.6	5.1	3.4	1.4
	sc40	5.2	4.3	5.9	4.4	5.0	4.6	3.1
	sc60	5.4	4.3	5.9	4.6	5.4	5.3	4.0
	sc80	5.3	4.5	5.8	4.6	5.4	6.0	4.3
fl_ceil	sc20	5.4	4.7	6.2	4.8	4.8	3.7	1.8
	sc40	5.1	4.6	5.9	4.7	5.0	4.5	3.0
	sc60	5.6	4.6	5.6	4.5	5.2	5.5	4.0
	sc80	5.2	4.4	5.7	4.8	5.4	5.6	3.9
fl_rear	sc20	5.0	4.6	5.9	4.4	4.8	3.0	0.7
	sc40	5.2	4.4	5.8	4.4	4.9	4.4	3.0
	sc60	5.3	4.4	5.7	4.5	5.1	5.2	3.8
	sc80	5.2	4.2	5.7	4.6	5.4	5.6	4.6

受音点 2

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	-6.4	-6.9	-5.2	-6.9	-5.7	-6.9	-7.5
	sc40	-5.2	-5.9	-4.3	-6.0	-4.2	-4.2	-4.3
	sc60	-4.6	-5.7	-4.1	-5.5	-3.8	-3.5	-2.8
	sc80	-4.3	-5.5	-4.0	-5.1	-3.7	-2.4	-2.2
fl_ceil	sc20	-7.2	-7.8	-6.0	-7.8	-6.7	-7.2	-8.1
	sc40	-5.9	-6.7	-5.1	-6.7	-5.1	-5.2	-5.0
	sc60	-4.9	-5.9	-4.2	-5.6	-4.3	-3.6	-3.5
	sc80	-4.4	-5.5	-4.2	-5.4	-3.7	-2.7	-2.5
fl_rear	sc20	-5.9	-6.0	-4.5	-6.1	-4.8	-5.7	-6.5
	sc40	-4.7	-5.9	-4.2	-5.6	-4.3	-4.6	-4.0
	sc60	-5.0	-5.9	-4.4	-5.7	-4.4	-4.0	-3.3
	sc80	-5.6	-5.4	-4.2	-5.7	-4.5	-3.2	-2.9

EDT

受音点 1

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	26.8	13.2	0.6	6.0	4.3	47.6	47.4
	sc40	-3.9	-0.9	15.7	34.4	57.4	116.2	122.5
	sc60	26.0	43.5	5.1	45.9	71.4	115.4	118.2
	sc80	35.7	34.1	30.2	21.1	88.2	79.3	101.6
fl_ceil	sc20	12.1	5.9	-4.2	1.9	4.4	42.8	77.8
	sc40	4.4	18.4	13.1	22.4	65.1	162.8	140.8
	sc60	35.5	33.4	26.1	41.0	100.6	146.4	169.7
	sc80	38.1	65.3	25.2	55.5	83.8	142.0	140.4
fl_rear	sc20	11.0	2.5	-1.1	3.1	16.3	68.5	76.4
	sc40	-7.7	-1.1	11.7	-3.1	37.8	89.9	109.5
	sc60	9.7	9.0	19.5	27.5	47.3	108.4	145.4
	sc80	27.4	28.5	24.0	29.7	63.9	116.9	106.4

受音点 2

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	5.4	11.5	-14.2	10.6	20.6	89.9	90.6
	sc40	2.7	20.3	-0.6	16.6	15.5	70.9	76.3
	sc60	3.4	5.1	2.4	3.7	13.5	46.3	32.0
	sc80	7.8	20.3	14.9	4.1	5.5	17.5	13.7
fl_ceil	sc20	9.0	10.3	-7.6	3.0	8.8	34.8	120.9
	sc40	22.3	14.0	9.2	41.0	33.2	118.5	90.7
	sc60	7.3	34.6	0.7	9.0	18.9	54.5	51.1
	sc80	-6.0	25.7	12.7	12.2	7.1	34.7	24.6
fl_rear	sc20	6.0	5.0	3.8	6.9	28.2	68.0	101.9
	sc40	38.8	12.4	-3.5	7.5	17.1	96.0	69.7
	sc60	22.2	10.6	15.9	12.2	18.0	58.1	47.5
	sc80	4.0	13.2	9.9	11.1	11.8	31.3	19.2

T₃₀

受音点 1

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	4.8	-0.8	7.7	7.1	12.3	26.6	28.8
	sc40	6.5	3.2	-2.1	4.5	4.1	4.5	5.6
	sc60	5.5	4.7	2.3	3.9	2.7	2.4	1.5
	sc80	15.5	-0.5	0.8	3.9	0.4	2.3	1.2
fl_ceil	sc20	1.8	3.9	1.2	8.0	16.7	25.2	26.0
	sc40	4.4	-6.4	5.7	4.2	3.2	5.6	5.9
	sc60	-1.4	0.9	-0.1	3.3	3.6	3.0	1.7
	sc80	11.3	0.8	6.7	-1.8	-0.7	-1.3	0.6
fl_rear	sc20	9.7	11.4	4.0	10.9	16.3	29.4	30.5
	sc40	5.0	8.6	0.3	5.6	7.9	8.0	5.6
	sc60	-0.1	1.8	-2.8	5.7	6.0	5.6	1.9
	sc80	6.5	1.6	-1.9	1.8	2.9	0.6	1.4

受音点 2

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	8.2	-3.3	6.3	5.1	3.5	13.5	13.4
	sc40	2.9	-0.1	1.7	1.4	1.9	2.2	0.5
	sc60	-0.1	7.2	1.0	4.1	1.6	1.7	-1.7
	sc80	10.1	-1.3	0.0	-0.5	1.6	1.1	-1.0
fl_ceil	sc20	-2.7	-1.7	-3.6	3.3	6.5	13.5	10.0
	sc40	-8.1	1.4	2.2	0.3	1.0	-0.2	-2.4
	sc60	-3.9	1.2	6.0	-1.5	2.3	0.8	-0.7
	sc80	-4.7	-2.5	0.8	1.7	0.2	1.5	-0.8
fl_rear	sc20	4.5	3.2	-1.0	8.1	9.5	16.9	10.6
	sc40	0.7	1.9	4.3	3.6	3.3	3.4	1.0
	sc60	-4.9	4.0	1.5	4.2	2.4	4.0	2.9
	sc80	7.6	-0.6	0.4	-2.6	2.7	0.4	-1.3

誤差 < JND

 JND ≤ 誤差 < JND × 2

C₈₀

受音点 1

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	20%	-1.2	-1.0	-0.9	-1.1	-1.4	-2.8	-4.3
	40%	-0.7	-0.9	-1.0	-1.5	-1.9	-5.3	-6.7
	60%	-2.2	-1.7	-1.0	-1.5	-2.3	-6.7	-8.5
	80%	-2.2	-1.8	-2.0	-1.5	-2.9	-6.6	-8.6
fl_ceil	20%	-1.5	-0.7	-1.1	-1.2	-0.9	-3.1	-4.6
	40%	-1.2	-1.2	-1.3	-1.4	-1.7	-5.8	-8.0
	60%	-3.0	-1.7	-1.1	-1.6	-2.8	-7.0	-8.6
	80%	-2.4	-1.4	-1.5	-2.2	-3.1	-6.7	-9.0
fl_rear	20%	-0.5	-0.8	-0.7	-0.8	-1.2	-2.4	-3.5
	40%	-1.1	-1.1	-1.0	-1.1	-1.3	-4.4	-7.5
	60%	-1.8	-1.1	-1.2	-1.1	-1.8	-5.8	-8.5
	80%	-1.9	-1.4	-2.0	-1.4	-2.5	-6.6	-9.3

受音点 2

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	-2.2	-1.1	-0.2	-0.7	-1.5	-4.3	-5.6
	sc40	-1.4	-1.6	-0.3	-0.9	-0.7	-6.1	-7.1
	sc60	-2.0	-0.2	-0.7	-1.1	-1.5	-6.3	-6.5
	sc80	-1.8	-0.7	-1.1	-1.7	-2.1	-6.4	-6.7
fl_ceil	sc20	-1.1	-0.3	0.0	-0.5	-0.1	-4.0	-5.4
	sc40	-2.1	-1.1	-0.6	-1.3	-1.5	-6.6	-7.9
	sc60	-1.5	-1.0	-0.2	-0.9	-2.0	-6.7	-8.1
	sc80	-1.2	-1.3	-0.9	-0.8	-1.9	-5.6	-6.6
fl_rear	sc20	-1.6	-1.5	-0.4	-0.9	-1.0	-4.9	-5.4
	sc40	-1.7	-1.5	-0.6	-0.7	-2.1	-6.3	-7.6
	sc60	-1.9	-1.6	-0.5	-1.0	-2.2	-6.4	-6.6
	sc80	-0.2	-1.8	-0.3	-0.7	-2.0	-5.4	-7.3

D₅₀

受音点 1

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	-0.045	-0.080	-0.029	-0.066	-0.080	-0.195	-0.238
	sc40	-0.021	-0.072	-0.049	-0.060	-0.079	-0.288	-0.391
	sc60	-0.070	-0.106	-0.068	-0.079	-0.105	-0.374	-0.447
	sc80	-0.071	-0.121	-0.089	-0.077	-0.116	-0.340	-0.480
fl_ceil	sc20	-0.062	-0.085	-0.035	-0.072	-0.048	-0.192	-0.253
	sc40	-0.037	-0.092	-0.048	-0.075	-0.070	-0.296	-0.398
	sc60	-0.109	-0.101	-0.055	-0.063	-0.095	-0.352	-0.477
	sc80	-0.103	-0.092	-0.082	-0.086	-0.114	-0.328	-0.460
fl_rear	sc20	-0.020	-0.081	-0.009	-0.050	-0.049	-0.134	-0.175
	sc40	-0.037	-0.095	-0.036	-0.054	-0.055	-0.256	-0.388
	sc60	-0.074	-0.075	-0.062	-0.047	-0.069	-0.307	-0.424
	sc80	-0.070	-0.066	-0.097	-0.070	-0.108	-0.345	-0.497

受音点 2

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	-0.012	-0.018	-0.008	-0.028	-0.003	-0.165	-0.182
	sc40	-0.061	-0.006	-0.011	-0.030	-0.049	-0.331	-0.313
	sc60	-0.106	-0.008	-0.009	-0.031	-0.076	-0.365	-0.362
	sc80	-0.082	-0.014	-0.017	-0.083	-0.135	-0.331	-0.373
fl_ceil	sc20	-0.018	-0.010	-0.004	-0.015	0.012	-0.171	-0.201
	sc40	-0.034	-0.003	-0.028	-0.021	-0.062	-0.281	-0.365
	sc60	-0.070	-0.007	-0.017	-0.072	-0.079	-0.362	-0.404
	sc80	-0.029	0.008	-0.003	-0.039	-0.142	-0.360	-0.377
fl_rear	sc20	-0.004	-0.055	-0.012	-0.044	-0.036	-0.197	-0.223
	sc40	-0.119	-0.031	-0.040	-0.026	-0.094	-0.249	-0.355
	sc60	-0.072	-0.006	0.005	-0.063	-0.096	-0.341	-0.373
	sc80	0.036	-0.032	-0.009	-0.063	-0.115	-0.329	-0.374

T_s

受音点 1

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	0.008	0.012	0.009	0.016	0.017	0.053	0.077
	sc40	0.008	0.010	0.014	0.015	0.019	0.072	0.096
	sc60	0.011	0.012	0.016	0.017	0.022	0.080	0.103
	sc80	0.012	0.013	0.020	0.016	0.024	0.072	0.102
fl_ceil	sc20	0.013	0.010	0.013	0.016	0.015	0.067	0.094
	sc40	0.004	0.012	0.016	0.014	0.020	0.077	0.105
	sc60	0.018	0.012	0.013	0.013	0.021	0.076	0.101
	sc80	0.011	0.009	0.013	0.016	0.022	0.072	0.103
fl_rear	sc20	0.006	0.007	0.006	0.009	0.012	0.042	0.059
	sc40	0.002	0.007	0.010	0.010	0.013	0.057	0.084
	sc60	0.010	0.009	0.012	0.010	0.015	0.061	0.092
	sc80	0.007	0.009	0.015	0.012	0.020	0.071	0.098

受音点 2

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	0.001	0.007	0.001	0.007	0.013	0.048	0.066
	sc40	0.004	0.006	0.003	0.009	0.011	0.065	0.075
	sc60	0.006	0.005	0.004	0.009	0.018	0.068	0.074
	sc80	0.011	0.008	0.011	0.017	0.023	0.063	0.073
fl_ceil	sc20	0.003	0.007	0.001	0.006	0.007	0.056	0.087
	sc40	0.005	0.006	0.005	0.011	0.016	0.065	0.088
	sc60	0.008	0.006	0.004	0.010	0.018	0.070	0.082
	sc80	0.007	0.005	0.008	0.011	0.021	0.064	0.077
fl_rear	sc20	0.001	0.006	0.003	0.007	0.014	0.047	0.069
	sc40	0.007	0.005	0.004	0.008	0.016	0.054	0.075
	sc60	0.004	0.006	0.005	0.013	0.021	0.065	0.069
	sc80	0.003	0.011	0.005	0.015	0.024	0.063	0.079

誤差 < JND
 JND ≤ 誤差 < JND × 2

LF

受音点 1

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	-0.002	-0.036	-0.111	-0.106	-0.067	-0.056	0.391
	sc40	-0.026	-0.088	-0.157	-0.064	-0.101	-0.012	0.336
	sc60	-0.038	-0.112	-0.383	-0.153	-0.067	-0.084	0.279
	sc80	-0.088	-0.127	-0.163	-0.315	-0.205	-0.106	0.229
fl_ceil	sc20	0.005	-0.006	-0.089	-0.049	-0.041	-0.011	0.496
	sc40	-0.051	-0.115	-0.083	-0.083	-0.056	-0.062	0.333
	sc60	-0.095	-0.121	-0.119	-0.099	-0.062	-0.094	0.338
	sc80	-0.121	-0.104	-0.195	-0.277	-0.133	-0.144	0.249
fl_rear	sc20	0.004	-0.027	-0.033	-0.058	-0.026	-0.010	0.476
	sc40	-0.024	-0.032	-0.116	-0.075	-0.050	-0.052	0.468
	sc60	-0.067	-0.093	-0.104	-0.081	-0.083	-0.002	0.377
	sc80	-0.139	-0.126	-0.161	-0.251	-0.096	-0.068	0.249

受音点 2

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	-0.148	-0.267	-0.096	-0.183	-0.182	-0.066	0.561
	sc40	-0.194	-0.197	-0.114	-0.198	-0.138	0.012	0.406
	sc60	-0.184	-0.200	-0.189	-0.192	-0.240	-0.072	0.426
	sc80	-0.246	-0.193	-0.180	-0.149	-0.275	-0.026	0.147
fl_ceil	sc20	-0.112	-0.306	-0.192	-0.255	-0.181	-0.032	0.644
	sc40	-0.167	-0.171	-0.151	-0.328	-0.085	-0.027	0.521
	sc60	-0.178	-0.176	-0.156	-0.231	-0.174	-0.084	0.301
	sc80	-0.174	-0.170	-0.369	-0.451	-0.495	-0.079	0.107
fl_rear	sc20	-0.190	-0.375	-0.155	-0.196	-0.232	-0.136	0.251
	sc40	-0.166	-0.306	-0.133	-0.140	-0.171	-0.063	0.333
	sc60	-0.245	-0.162	-0.160	-0.190	-0.325	-0.009	0.267
	sc80	-0.132	-0.124	-0.140	-0.255	-0.199	-0.025	0.146

LG

受音点 1

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	-7.7	-7.7	-4.3	-4.4	-4.0	1.6	10.8
	sc40	-7.0	-9.3	-5.4	-4.8	-5.4	0.9	8.3
	sc60	-7.7	-7.9	-4.2	-5.6	-5.0	1.1	7.6
	sc80	-8.4	-6.8	-4.6	-5.3	-5.2	1.1	6.8
fl_ceil	sc20	-6.7	-8.1	-4.0	-4.4	-5.1	1.2	10.2
	sc40	-9.6	-7.6	-7.8	-5.0	-6.5	0.1	6.6
	sc60	-7.0	-9.6	-6.8	-6.1	-5.5	-0.0	6.2
	sc80	-9.2	-9.8	-8.4	-7.7	-5.7	0.6	5.9
fl_rear	sc20	-7.5	-6.8	-5.3	-5.6	-6.0	0.1	9.1
	sc40	-10.0	-8.1	-7.6	-7.8	-6.0	0.0	6.3
	sc60	-9.4	-8.6	-6.7	-7.5	-6.6	0.3	6.4
	sc80	-9.6	-8.9	-7.2	-6.2	-5.1	-0.1	5.5

受音点 2

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
uni	sc20	-8.0	-11.2	-7.7	-8.4	-6.9	-0.7	6.2
	sc40	-10.5	-7.5	-4.9	-5.4	-5.3	0.7	6.8
	sc60	-13.3	-8.7	-5.1	-6.2	-5.3	0.5	6.3
	sc80	-12.5	-7.8	-5.7	-6.6	-5.6	-0.1	6.6
fl_ceil	sc20	-13.6	-12.8	-9.3	-9.0	-8.8	-1.9	4.1
	sc40	-11.4	-10.0	-6.0	-7.1	-7.3	-0.4	4.9
	sc60	-9.9	-7.6	-7.3	-6.5	-6.0	0.1	6.0
	sc80	-12.2	-8.8	-5.7	-7.2	-5.5	0.5	5.9
fl_rear	sc20	-12.5	-10.6	-7.1	-8.9	-9.0	-2.0	3.8
	sc40	-11.5	-7.7	-5.7	-7.0	-6.9	-0.3	5.2
	sc60	-9.2	-6.6	-6.7	-7.8	-6.2	0.7	5.7
	sc80	-11.1	-8.9	-7.0	-6.2	-6.7	0.4	5.5

4.7 相関分析

解析（無指向性）、解析（6ch 同期加算）、再現音場での実測により算出された三者の物理指標間の相関係数を算出する。Table. 4.5 に周波数帯域値の平均値の相関係数を、Table. 4.6 に周波数帯域値の相関係数を示す。平均値については、ISO の規定に従い、LF は 125Hz 帯域から 1kHz 帯域の算術平均値、LG は 125Hz 帯域から 1kHz 帯域のエネルギー平均値を用い、それ以外の指標は 500Hz と 1kHz 帯域の算術平均値を用いる。黄色の網掛は相関係数が 0.8 以上であることを示す。黒文字は正、赤文字は負であることを示す。

平均値をみると、解析（6ch 同期加算）と実測の相関が高くなっている。無指向性の指標は相関係数がすべて 0.8 以上で、1 に近く、非常に相関が高い。双指向性の指標は相関が低い。解析（無指向性）と解析（6ch 同期加算）の相関、解析（無指向性）と実測との相関については、相関が高い指標もあるが、全体的に相関が高いとはいえない。

周波数帯域値の解析（6ch 同期加算）と実測の相関係数をみると、2kHz 以下の帯域の無指向性の指標はほとんどが 0.8 以上になっており、1 に近いものも多く、非常に相関が高い。4kHz 以上の帯域では相関が低い。双指向性の指標は相関が低い。

Table. 4.5 相関係数（周波数帯域値の平均値）

解析（無指向性）と解析（6ch 同期加算）の相関係数

	受信点1	受信点2
G	0.14	0.74
EDT	0.02	0.56
T ₃₀	0.72	0.90
C ₈₀	0.95	0.03
D ₅₀	0.92	0.64
Ts	0.80	0.58
LF	-0.58	0.33

解析（無指向性）と実測の相関係数

	受信点1	受信点2
G	0.16	0.74
EDT	0.39	0.60
T ₃₀	0.80	0.92
C ₈₀	0.96	0.20
D ₅₀	0.94	0.63
Ts	0.86	0.68
LF	-0.60	0.56

解析（6ch 同期加算）と実測の相関係数

	受信点1	受信点2
G	1.00	0.98
EDT	0.90	0.96
T ₃₀	0.99	0.99
C ₈₀	1.00	0.95
D ₅₀	1.00	0.99
Ts	0.99	0.96
LF	0.83	0.37
LG	-0.00	0.66


 相関係数が0.8以上

Table. 4.6 相関係数（周波数帯域値）

解析（無指向性）と解析（6ch 同期加算）の相関係数

受信点 1

	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
G	0.33	0.10	0.06	0.14	0.49	0.07	0.21
EDT	0.41	-0.33	-0.00	0.25	0.41	0.39	0.33
T ₃₀	0.79	0.52	0.76	0.53	0.75	0.79	0.84
C ₈₀	0.83	0.89	0.91	0.94	0.79	0.78	0.90
D ₅₀	0.80	0.90	0.90	0.82	0.83	0.86	0.95
T _s	0.74	0.51	0.81	0.78	0.79	0.59	0.75
LF	-0.10	-0.57	-0.25	-0.27	-0.48	-0.06	-0.22

受信点 2

	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
G	0.77	0.82	0.78	0.69	0.78	0.79	0.75
EDT	0.31	0.09	0.59	0.11	0.60	0.65	0.33
T ₃₀	0.51	0.82	0.89	0.81	0.94	0.92	0.92
C ₈₀	0.22	0.29	-0.35	0.36	0.19	0.41	0.24
D ₅₀	0.43	0.25	0.76	0.44	0.74	-0.14	0.14
T _s	0.33	0.65	0.47	0.59	0.62	0.66	0.64
LF	0.49	0.03	0.14	0.56	0.15	0.51	0.25

解析（無指向性）と実測の相関係数

受信点 1

	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
G	0.38	0.08	0.12	0.13	0.60	0.64	0.78
EDT	0.74	0.01	0.47	0.34	0.80	0.79	0.77
T ₃₀	0.72	0.54	0.80	0.65	0.95	0.97	0.98
C ₈₀	0.78	0.88	0.92	0.95	0.84	0.78	0.23
D ₅₀	0.83	0.89	0.91	0.84	0.85	0.80	0.02
T _s	0.77	0.57	0.87	0.83	0.87	0.92	0.89
LF	-0.18	-0.60	-0.18	-0.64	-0.21	0.08	0.76

受信点 2

	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
G	0.81	0.83	0.76	0.71	0.85	0.88	0.71
EDT	0.34	0.10	0.57	-0.01	0.60	0.81	0.73
T ₃₀	0.60	0.76	0.85	0.71	0.95	0.95	0.98
C ₈₀	0.19	0.28	-0.20	0.43	0.19	0.75	0.74
D ₅₀	0.60	0.18	0.76	0.40	0.80	0.58	0.47
T _s	0.39	0.62	0.63	0.58	0.47	0.79	0.82
LF	-0.34	-0.28	0.21	0.70	0.39	0.24	-0.28

解析（6ch 同期加算）と実測の相関係数

受信点 1

	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
G	0.99	1.00	1.00	1.00	0.98	0.55	0.10
EDT	0.78	0.89	0.85	0.90	0.81	0.68	0.61
T ₃₀	0.91	0.95	0.96	0.98	0.90	0.73	0.74
C ₈₀	0.92	1.00	1.00	0.99	0.98	0.79	0.29
D ₅₀	0.96	0.99	1.00	0.99	0.97	0.81	-0.07
T _s	0.89	0.99	0.99	0.99	0.92	0.65	0.48
LF	-0.63	0.80	0.73	0.56	0.65	0.72	-0.60
LG	0.41	0.25	0.01	-0.08	-0.06	0.42	-0.50

受信点 2

	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
G	0.97	0.97	0.99	0.97	0.90	0.57	-1.73
EDT	0.98	0.98	0.98	0.91	0.92	0.65	0.00
T ₃₀	0.83	0.97	0.98	0.98	0.98	0.92	0.94
C ₈₀	0.92	0.94	0.94	0.96	0.80	0.55	0.39
D ₅₀	0.95	0.96	0.99	0.94	0.98	-0.24	-0.12
T _s	0.96	0.99	0.95	0.96	0.88	0.77	0.81
LF	0.20	-0.46	0.36	0.49	0.13	0.49	-0.53
LG	0.31	0.45	0.58	0.50	0.42	0.52	0.61

 相関係数が0.8以上

4.8 まとめ

解析の無指向性と 6ch 同期加算を比較すると、インパルス応答波形の反射音構造に若干差異がある。初期応答が大きく異なっているが、後期は残響減衰曲線の傾きについては比較的対応している。残響時間の物理指標は比較的良い対応を示すが、明瞭性や初期減衰時間に関する指標値は大きく異なり、相関も低いため、解析の無指向性と 6ch 同期加算の特性は異なっているといえる。

解析 (6ch 同期加算) と再現音場の音響特性は、初期応答は必ずしも良い対応をするとはいえないが、2kHz 以下の周波数帯域においては、後期残響の対応が良く、残響時間、明瞭性に関する物理指標値の対応も良く、相関も高い。4kHz 以上の周波数帯域では対応が悪いが、これはスピーカーの特性によるものと考えられる。

6つのスピーカー出力の同期加算とみなすことができる再現音場と、解析 (6ch 同期加算) の対応がよいため、本研究においては、解析 (6ch 同期加算) を解析値として扱うこととする。

第 5 章

室内音響に及ぼす壁面拡散性および吸音面偏在の影響に関する検討

5.1 概要

乱反射率、吸音面配置が室内音響特性に及ぼす影響を物理的に把握する。

5.2 条件間のインパルス応答波形の比較

Fig. 5.1～Fig. 5.2 に各条件の解析音場のインパルス応答（6ch 同期加算）と再現音場で実測したインパルス応答の時間波形を示す（1kHz）。Fig. 5.1 に受音点 1 を、Fig. 5.2 に受音点 2 を示す。インパルス応答の振幅値を二乗して 1ms の時間幅の区間内で加算して平方根をとった RMS 波形であり、直接音で基準化してある。グラフの上側が解析して出力したインパルス応答（6ch 同期加算）波形、下側が再現音場で実測したインパルス応答波形である。

乱反射率が音場に及ぼす影響

乱反射率が高くなるにつれて、反射音の振幅が小さくなる傾向がみられる。乱反射率が低いと、鏡面反射によるエネルギーが音場に残るためと考えられる。

吸音面配置が音場に及ぼす影響

fl_ceil は他の条件より反射音の振幅が大きいことがわかる。また、その傾向は乱反射率が低い条件の方が顕著である。吸音面でない平行壁面間で多重反射するエネルギーが音場に残るためと考えられる。

受音点間の相違

受音点 1 と受音点 2 を比較すると、直接音の振幅に対する残響部の振幅の割合は受音点 1 より受音点 2 の方が大きくなっており、受音点 1 より受音点 2 の方が残響の影響が大きい音場であることがわかる。

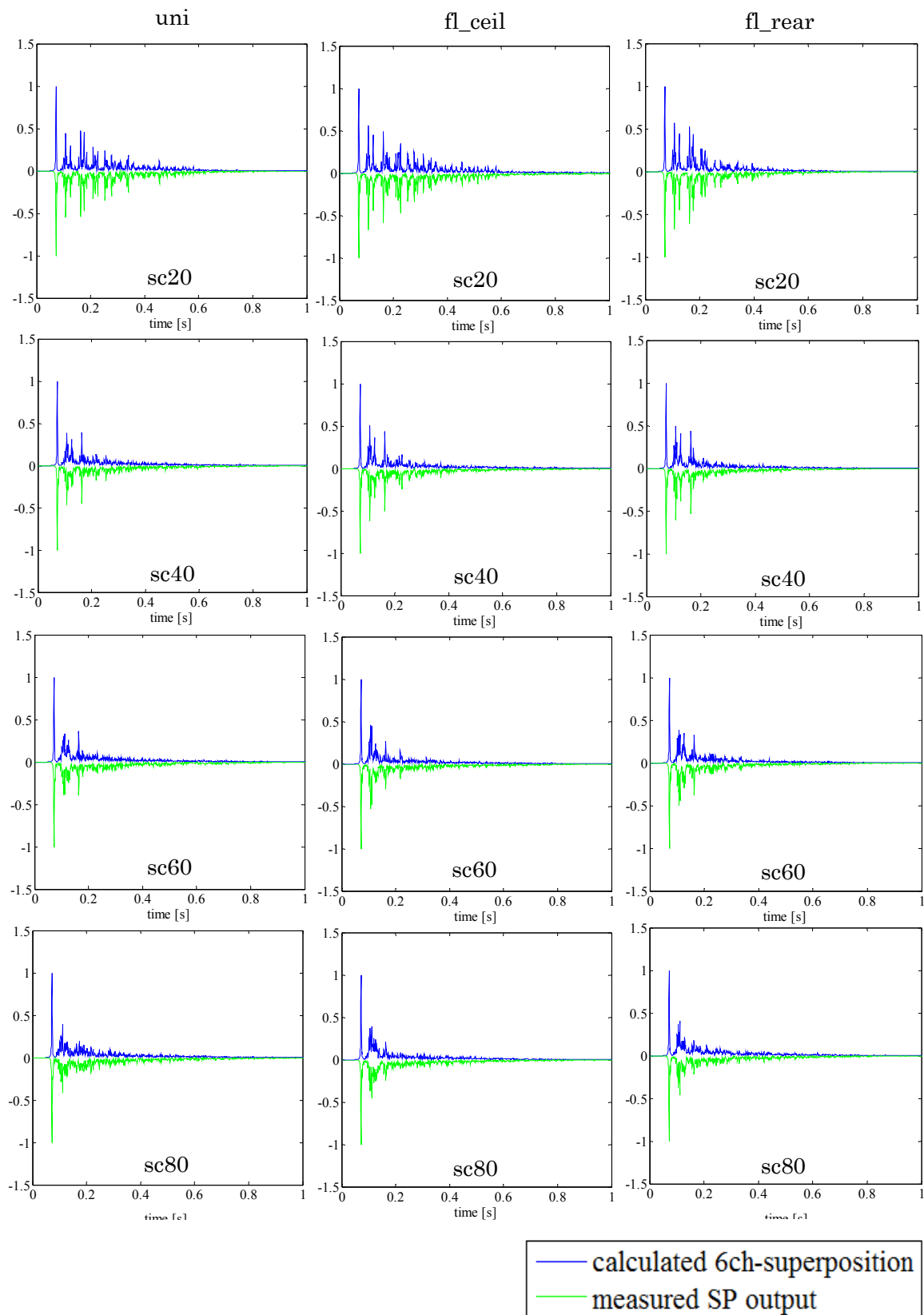


Fig. 5.1 各条件の RMS 時間波形（解析（6ch 同期加算）と実測、1kHz、受音点 1）

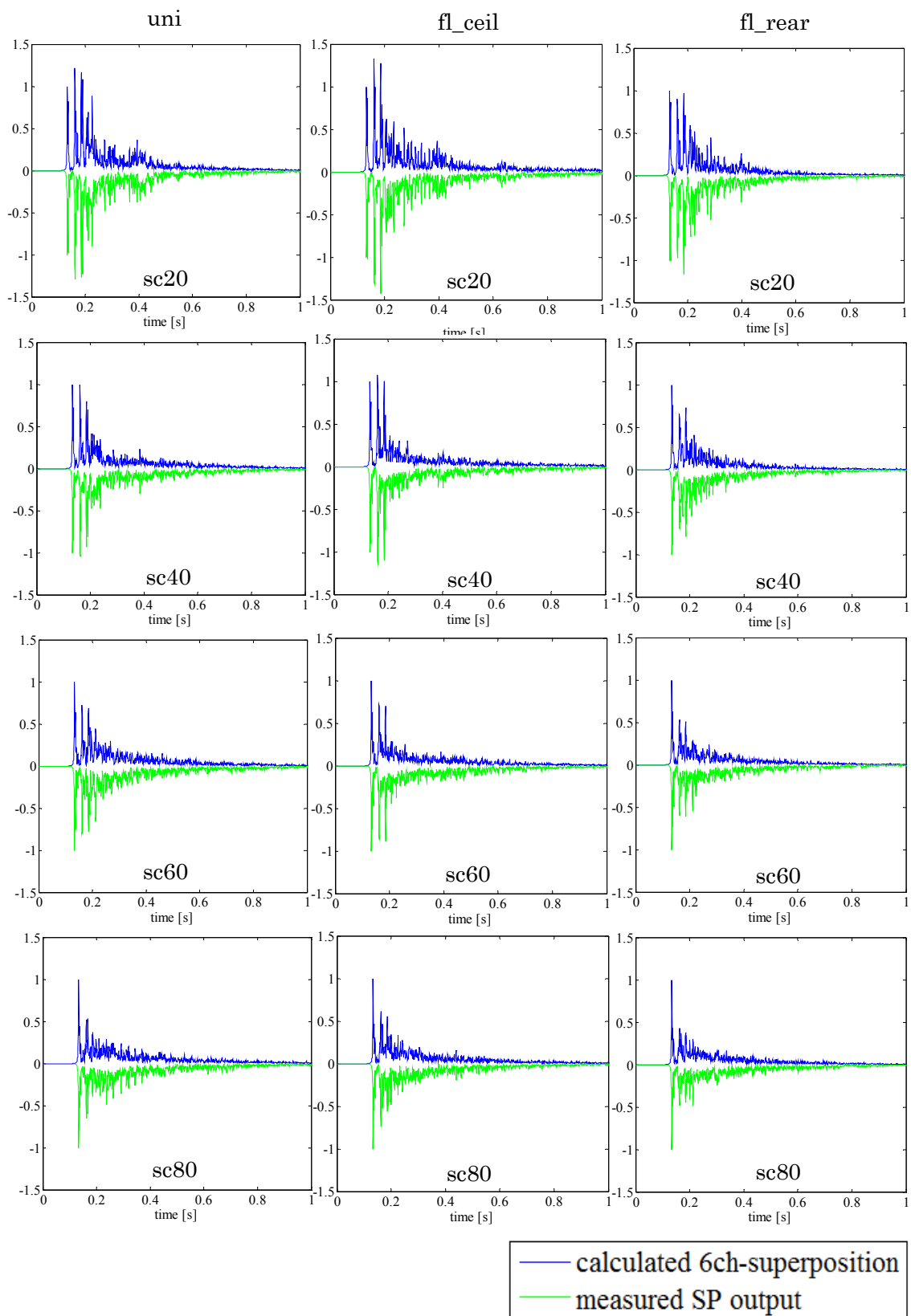


Fig. 5.2 各条件の RMS 時間波形（解析（6ch 同期加算）と実測、1kHz、受信点 2）

5.3 条件間の残響減衰曲線の比較

Fig. 5.3～Fig. 5.6 に解析音場の残響減衰曲線（6ch 同期加算）と再現音場の残響減衰曲線を示す。Fig. 5.3～Fig. 5.4 に吸音面配置ごとの各乱反射率条件の残響減衰曲線を示し、Fig. 5.5～Fig. 5.6 に乱反射率条件ごとの各吸音面配置条件の残響減衰曲線を示す。

乱反射率による影響

Fig. 5.3、Fig. 5.4 をみると、乱反射率が高いほど減衰が大きくなっている。sc20 の条件は初期の減衰が他の条件と異なっている。吸音面配置が fl_ceil の条件は、乱反射率による影響が大きい。

吸音面配置による影響

Fig. 5.5、Fig. 5.6 をみると、fl_rear は uni より減衰が大きい。後壁吸音の影響が大きいことがわかる。fl_ceil は乱反射率 40%以下では最も減衰が小さいが、60%で uni とほぼ同じになり、80%では uni と fl_ceil の間になる。乱反射率が低い方が吸音面配置条件間の差が大きい傾向がある。

受音点間の相違

受音点 1 と受音点 2 は同様の傾向を示している。

解析と実測の対応

解析（6ch 同期加算）と実測は同様の傾向を示すが、実測の方は-50dB 程度で減衰しなくなる。

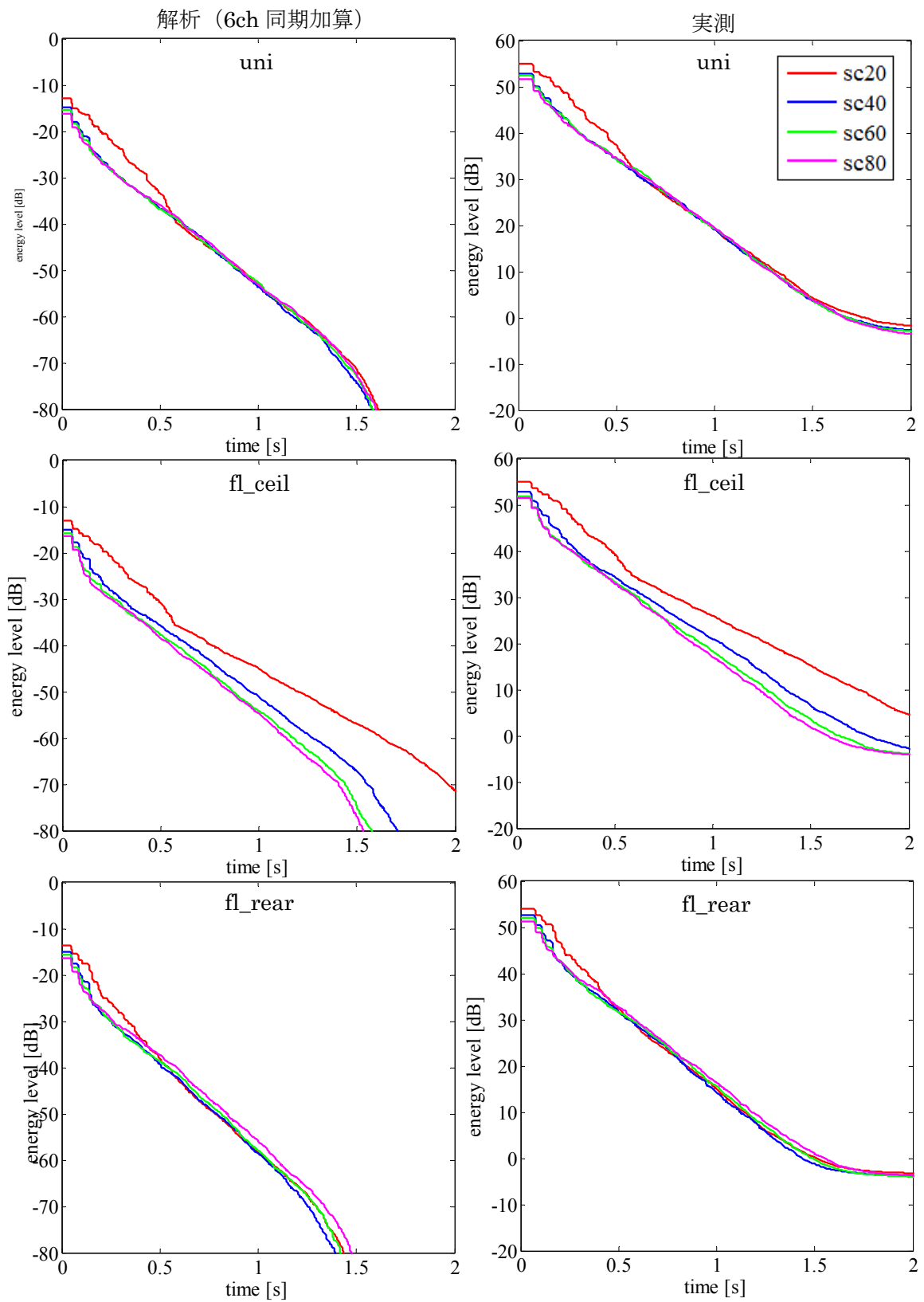


Fig. 5.3 乱反射率の違いによる残響減衰曲線の違い(解析(6ch 同期加算)と実測、1kHz、受音点1)

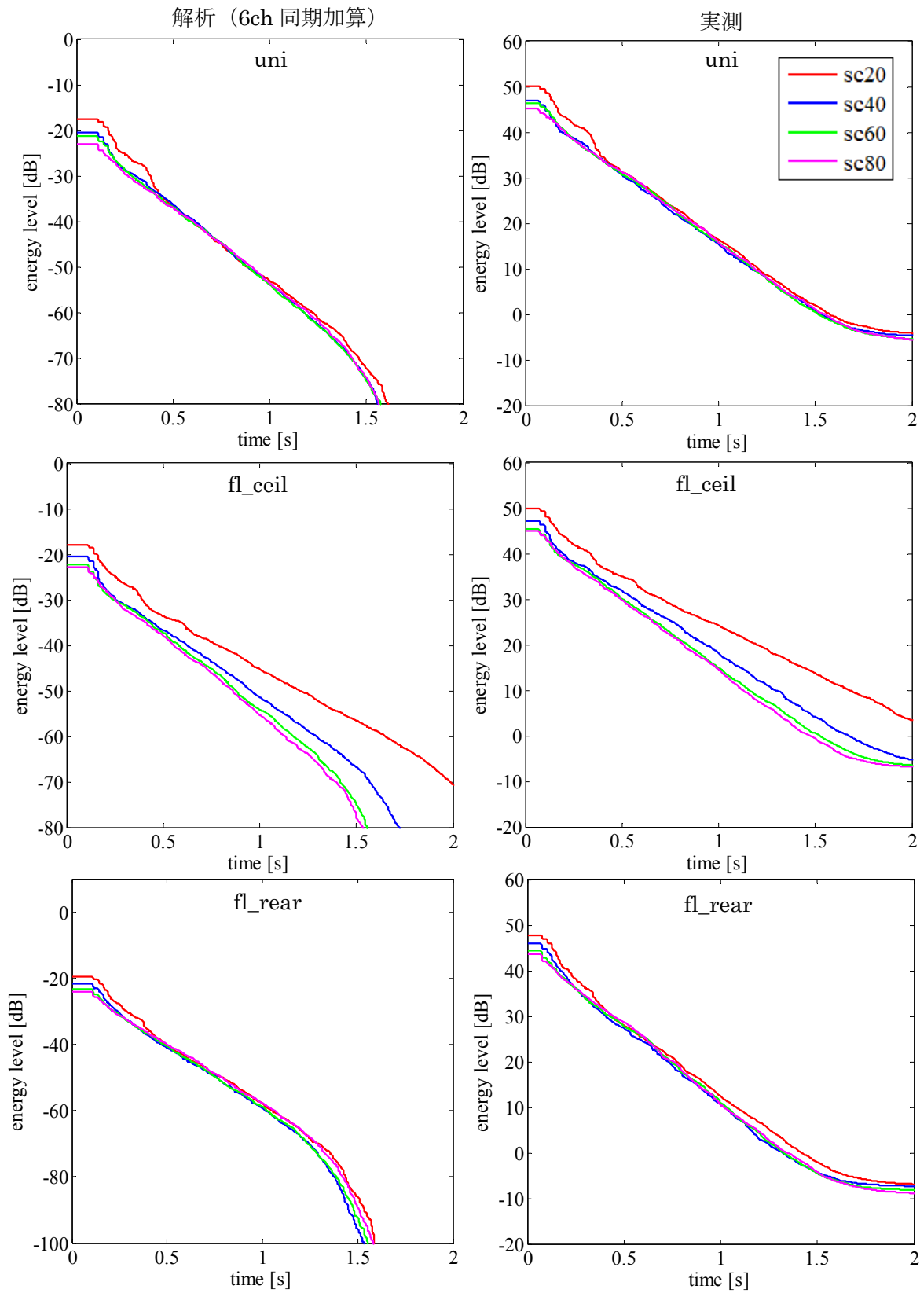


Fig. 5.4 乱反射率の違いによる残響減衰曲線の違い (解析 (6ch 同期加算) と実測、1kHz、受音点 2)

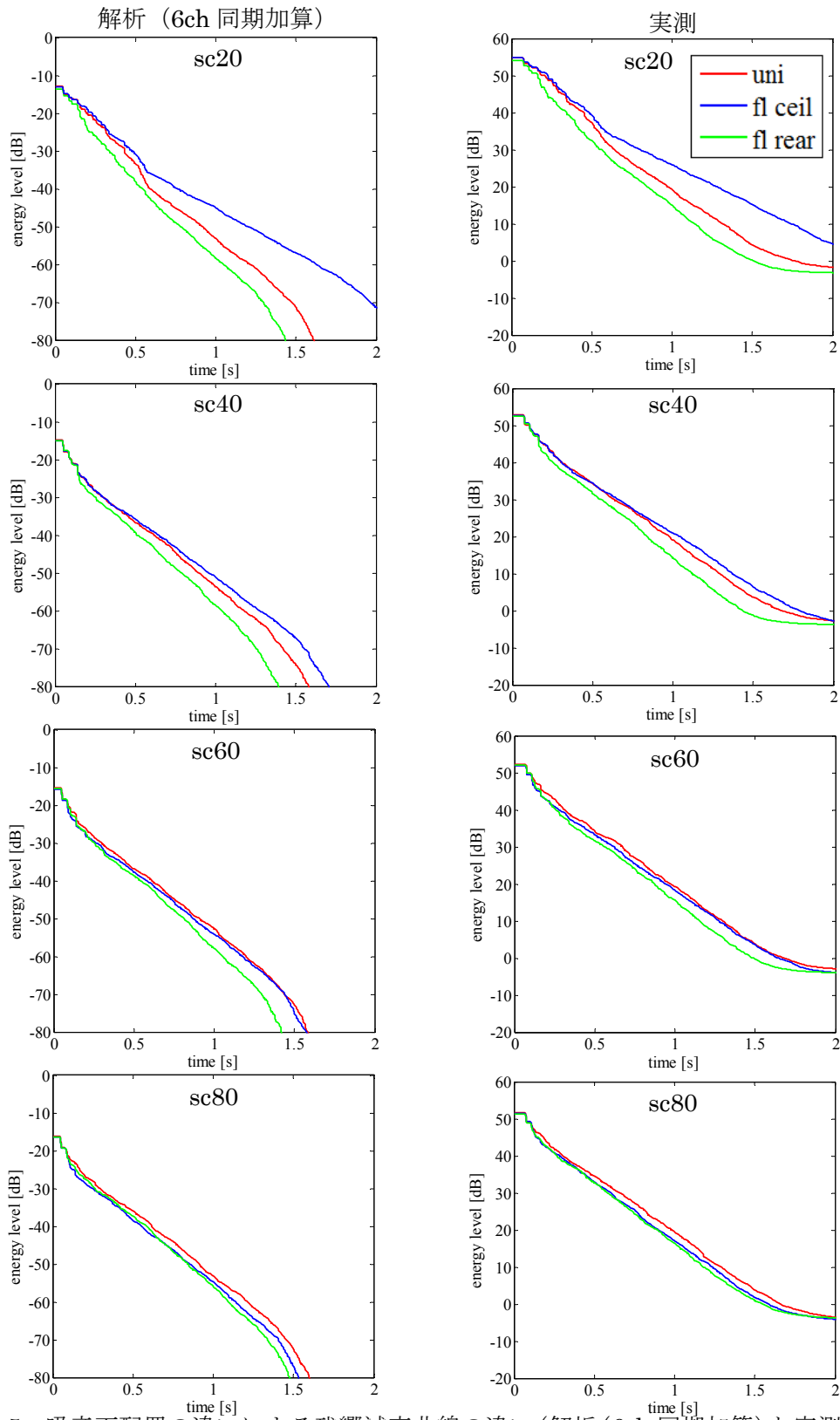


Fig. 5.5 吸音面配置の違いによる残響減衰曲線の違い(解析(6ch同期加算)と実測、1kHz、受音点1)

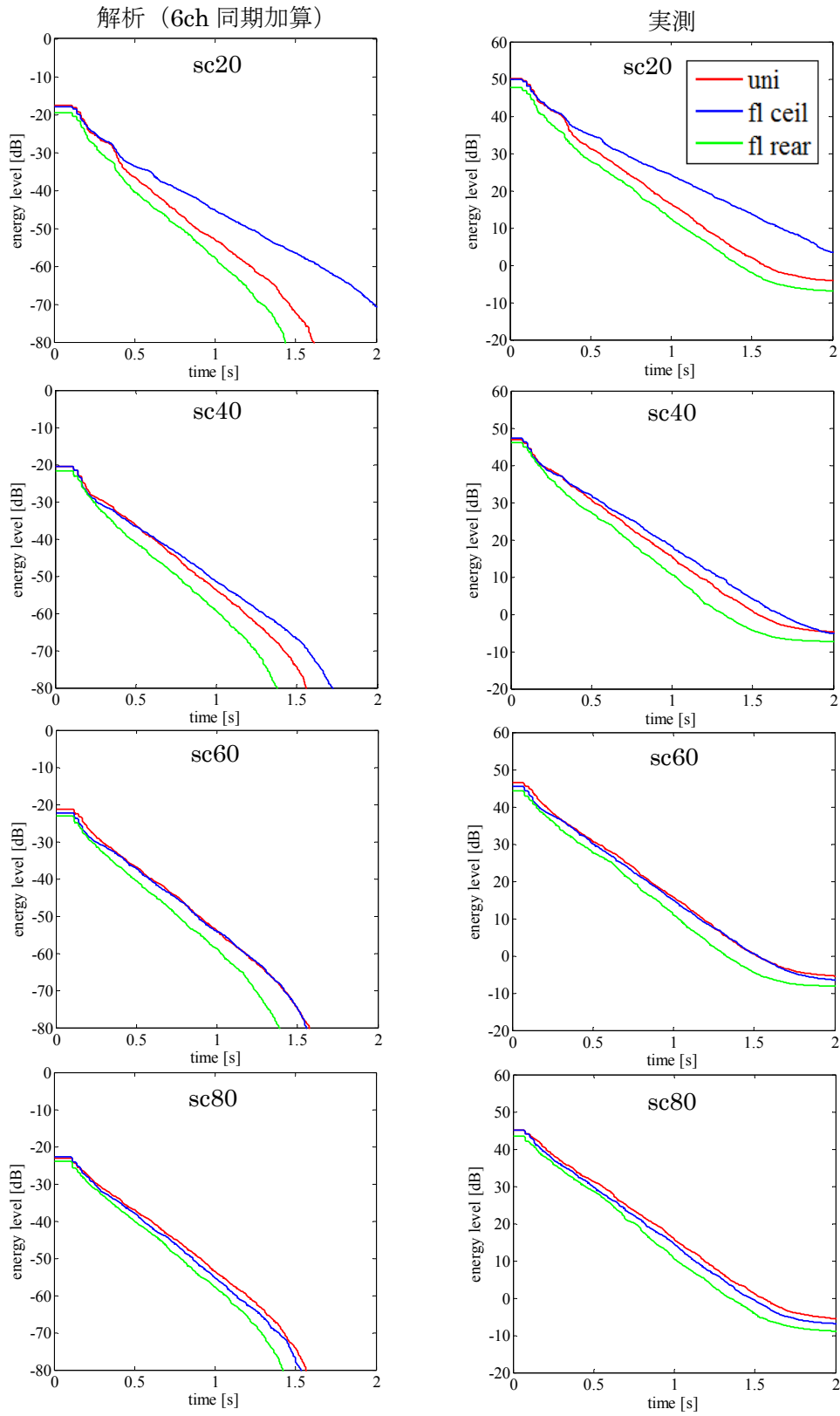


Fig. 5.6 吸音面配置の違いによる残響減衰曲線の違い(解析(6ch同期加算)と実測、1kHz、受音点2)

5.4 条件間の音響物理指標の比較

解析音場のインパルス応答（6ch 同期加算）から算出した音響物理指標及び再現音場で実測したインパルス応答から算出した音響物理指標を用い、各条件間の指標値の差と弁別閾の関係について検討する。この際の差とは、EDT と T_{30} については A に対する変化量の割合であり、その他については差分である。吸音面配置条件ごとに各乱反射率条件間の物理指標値の差を比較し、また、乱反射率条件ごとに吸音面配置条件間の物理指標値の差を受音点別に比較する。

5.4.1 全体傾向の把握

解析

まず全体の傾向を把握する。Table. 5.1~Table. 5.2 に条件間の物理指標の差と弁別閾の関係（解析）を示す。Table. 5.1 に吸音面配置ごとの乱反射率による影響、Table. 5.2 に乱反射率ごとの吸音面配置による影響を示す。*は少なくとも一条件間に弁別閾以上の差があることを示す。全体として、各条件間に弁別閾以上の差があるものが多く、乱反射率、吸音面配置が音場に影響を及ぼしていることがわかる。残響時間 EDT、 T_{30} は全て差がある。明瞭性に関する C_{80} 、 D_{50} 、 T_s もほとんどで差がある。これらは乱反射率、吸音面配置の両方に影響をうけることがわかる。LF は差があるものとないものがあり、残響時間や明瞭性よりは乱反射率、吸音面配置の影響を受けにくいことがわかる。G は受音点 1 では吸音面配置による影響を受けていない。LG は受音点 1 では乱反射率、吸音面配置両方の影響をほぼ受けていない。

Table. 5.1 条件間の物理指標の変化量と弁別閾の関係（乱反射率による影響、解析）

受信点 1

	G	EDT	T ₃₀	C ₈₀	D ₅₀	Ts	LF	LG
uni	*	*	*	*	*	*	*	
fl_ceil	*	*	*	*	*	*	*	
fl_rear	*	*	*	*	*	*	*	*

受信点 2

	G	EDT	T ₃₀	C ₈₀	D ₅₀	Ts	LF	LG
uni	*	*	*	*	*	*	*	*
fl_ceil	*	*	*	*	*	*	*	*
fl_rear	*	*	*	*	*	*		*

* 少なくとも 1 条件間に弁別閾以上の差がある

Table. 5.2 条件間の物理指標の変化量と弁別閾の関係（吸音面配置による影響、解析）

受信点 1

	G	EDT	T ₃₀	C ₈₀	D ₅₀	Ts	LF	LG
sc20		*	*	*	*	*		
sc40		*	*	*		*		
sc60		*	*	*	*	*	*	
sc80		*	*	*	*	*		

受信点 2

	G	EDT	T ₃₀	C ₈₀	D ₅₀	Ts	LF	LG
sc20	*	*	*		*	*	*	*
sc40	*	*	*	*	*	*		*
sc60	*	*	*	*	*	*		*
sc80	*	*	*	*	*	*	*	*

* 少なくとも 1 条件間に弁別閾以上の差がある

実測

Table. 5.3~Table. 5.4 に各条件間の物理指標の差と弁別閾の関係（実測）を示す。Table. 5.3 に吸音面配置ごとの乱反射率による影響、Table. 5.4 に乱反射率ごとの吸音面配置による影響を示す。*は少なくとも一条件間に弁別閾以上の差があることを示す。全体の傾向は解析の結果とあまり変わらない。残響時間に関する EDT、 T_{30} は全て差があり、明瞭性に関する C_{80} 、 D_{50} 、 T_s もほとんどで差がある。G は受音点 1 では解析と同じく差がない。これらは解析の結果とほぼ同じ傾向である。一方、LF、LG は解析と実測で少し傾向が違う。LF はまったく差がなく、LG は乱反射率による差がほぼない。無指向性の指標は解析と実測の傾向がほぼ一致するが、双指向性の指標は解析と実測で少し違いがある。全体として、条件間に弁別閾以上の差があるものが多く、聴感印象評価実験により有意差がでることが期待される。LF は差がないことから、みかけの音源の幅に有意差がでることはあまり期待できない。

Table. 5.3 条件間の物理指標の変化量と弁別閾の関係（乱反射率による影響、実測）

受信点 1

	G	EDT	T ₃₀	C ₈₀	D ₅₀	Ts	LF	LG
uni	*	*	*	*	*	*		
fl_ceil	*	*	*	*	*	*		*
fl_rear	*	*	*	*	*	*		

受信点 2

	G	EDT	T ₃₀	C ₈₀	D ₅₀	Ts	LF	LG
uni	*	*	*	*	*	*		
fl_ceil	*	*	*	*	*	*		
fl_rear	*	*	*	*	*	*		

* 少なくとも 1 条件間に弁別閾以上の差がある

Table. 5.4 条件間の物理指標の変化量と弁別閾の関係（吸音面配置による影響、実測）

受信点 1

	G	EDT	T ₃₀	C ₈₀	D ₅₀	Ts	LF	LG
sc20		*	*	*	*	*		*
sc40		*	*	*	*	*		*
sc60		*	*	*	*	*		*
sc80		*	*	*	*	*		*

受信点 2

	G	EDT	T ₃₀	C ₈₀	D ₅₀	Ts	LF	LG
sc20	*	*	*			*		*
sc40	*	*	*			*		*
sc60	*	*	*	*	*	*		*
sc80	*	*	*	*	*	*		*

* 少なくとも 1 条件間に弁別閾以上の差がある

5.4.2 条件間の個別比較

各条件間を個別に比較する。Table. 5.5、Table. 5.6 に各条件間の音響物理指標の差（解析、実測）を示す。表において、「A/B」はAの条件に対するBの条件の物理指標値の差を示している。AがBより弁別閾以上に大きければ「>」、BがAより弁別閾以上に大きければ「<」、AとBの差が弁別閾より小さければ「=」で示す。この際の差とは、EDTとT₃₀についてはAに対する変化量の割合であり、その他については差分である。不等号の右側の数字は、差が弁別閾の何倍以上になっているかを示す。数字が無いものは1倍以上を意味する。緑の網掛は解析と実測が同じ不等号となっている場合であり、紫の網掛は不等号が逆の場合である。緑の網掛の場合、解析音場の条件間の音響特性の違いが再現音場で反映されているといえる。

乱反射率による影響

Table. 5.5 の解析をみると、全体的にみて、乱反射率が低い条件は、他の条件と比較すると指標値の差が大きい傾向がある。弁別閾より大幅に大きい差がある条件間も多い。fl_ceilの条件において、最も乱反射率による影響が大きくなっている。これは残響減衰曲線により確認した傾向と同じである。LFは解析値でみると、受音点1では乱反射率が高い方が大きくなる傾向があり、受音点2ではほとんど弁別閾以上の差がない。LGは解析値でみると、受音点1ではほとんど弁別閾以上の差がなく、受音点2ではsc20が他の条件より大きくなる傾向がある。Gは乱反射率が低いほど大きくなる傾向があった。T₃₀はfl_ceilでは乱反射率が低いほど大きい傾向があるが、uniとfl_rearでは逆に乱反射率が高いほど大きい傾向がある。EDTは受音点1と受音点2で逆の傾向となり、受音点1では乱反射率が低いほど大きくなり、受音点2では乱反射率が高いほど大きい傾向となった。明瞭性に関する指標C₈₀、D₅₀、Tsについては、乱反射率が高いほど明瞭性が高くなる傾向がある。

Table. 5.5 条件間の物理指標の変化量と弁別閾の関係 (乱反射率による影響、解析・実測)

受音点 1

		G		EDT		T ₃₀		C ₈₀		D ₅₀		Ts		LF		LG	
		解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測
uni	sc20/sc40	>2	>3	>6	>3	<6	<4	<4	<4	<4	<4	>3	>3	=	=	=	=
	sc20/sc60	>3	>3	>3	>	<5	<4	<5	<5	<6	<5	>4	>3	<2	=	=	=
	sc20/sc80	>3	>3	>4	>	<6	<5	<6	<5	<6	<5	>4	>4	<2	=	=	=
	sc40/sc60	=	=	<2	<2	=	=	<	<	<	<	=	=	<	=	=	=
	sc40/sc80	=	=	<2	<2	=	=	<2	<	<2	<	=	=	<	=	=	=
	sc60/sc80	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
fl_ceil	sc20/sc40	>2	>2	>7	>4	>	>	<4	<4	<4	<4	>4	>4	<	=	=	>
	sc20/sc60	>3	>4	>9	>6	>	>2	<7	<6	<7	<7	>6	>6	<	=	=	>2
	sc20/sc80	>3	>4	>10	>7	>2	>2	<8	<7	<7	<7	>6	>6	<2	=	=	>2
	sc40/sc60	=	>	>4	>2	=	>	<2	<2	<2	<2	>	>	=	=	=	=
	sc40/sc80	>	>	>5	>3	>	>	<3	<3	<2	<2	>	>2	<	=	=	>
	sc60/sc80	=	=	>	>	=	=	<	=	=	=	=	=	<	=	=	=
fl_rear	sc20/sc40	>2	>2	>4	>3	<4	<3	<3	<3	<4	<4	>2	>2	=	=	<	=
	sc20/sc60	>3	>3	>3	=	<5	<3	<5	<5	<5	<5	>2	>2	<	=	<	=
	sc20/sc80	>3	>3	>2	<	<6	<5	<5	<5	<6	<5	>3	>2	<3	=	=	=
	sc40/sc60	=	=	=	<4	=	=	<	<	<	<	=	=	=	=	=	=
	sc40/sc80	=	=	<2	<6	<2	<	<2	<	<2	<	=	=	<2	=	=	=
	sc60/sc80	=	=	<	<2	<	=	=	=	=	=	=	=	>	=	=	=

受音点 2

		G		EDT		T ₃₀		C ₈₀		D ₅₀		Ts		LF		LG	
		解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測
uni	sc20/sc40	>3	>2	<	<3	<2	<	<	=	<2	<2	=	=	=	=	>	=
	sc20/sc60	>4	>3	<7	<8	<2	<	=	=	<2	<2	=	=	=	=	=	=
	sc20/sc80	>6	>4	<11	<13	<2	<	=	>	<2	<2	<	<2	<	=	>	=
	sc40/sc60	>1	>	<6	<4	=	=	=	=	=	=	=	<	=	=	=	=
	sc40/sc80	>2	>2	<9	<9	=	=	>	>2	=	=	<	<2	=	=	=	=
	sc60/sc80	<	<	<2	<3	=	=	>	>	=	=	<	<	=	=	=	=
fl_ceil	sc20/sc40	>3	>2	>5	>	>3	>2	<2	<	<3	<2	>	>	=	=	>2	=
	sc20/sc60	>5	>3	<2	<3	>4	>4	<	<	<4	<3	>	=	=	=	>3	=
	sc20/sc80	>5	>3	=	<3	>4	>4	=	=	<2	<2	=	=	<	=	>3	=
	sc40/sc60	>2	>	<10	<5	>	>	=	=	<	=	=	=	=	=	=	=
	sc40/sc80	>2	>	<8	<4	>2	>2	>	>	=	=	<	<	<	=	=	=
	sc60/sc80	=	=	>	=	=	=	=	>	>	=	=	=	>2	=	=	=
fl_rear	sc20/sc40	>2	>2	=	=	=	=	<	<	<2	<2	=	=	=	=	>2	=
	sc20/sc60	>4	>4	<5	<7	<	<	<	<	<4	<4	=	=	=	=	>2	=
	sc20/sc80	>5	>5	<12	<14	<2	<	=	=	<3	<3	=	<	=	=	>2	=
	sc40/sc60	>	>	<5	<8	=	=	=	=	<	<	=	=	=	=	=	=
	sc40/sc80	>2	>2	<12	<14	<	=	>	>	=	=	<	<2	=	=	=	=
	sc60/sc80	<	<	<5	<4	=	=	>	<	=	=	<	>	=	=	=	=

A/Bにおいて、AがBより弁別閾以上に大きければ「>」、BがAより弁別閾以上に大きければ「<」、そうでなければ「=」

解析と実測の不等号または等号が一致
 解析と実測の不等号が逆

吸音面配置による影響

Table. 5.6 の解析をみると、uni と fl_rear の条件間で最も弁別閾以上の差が出やすくなっている。残響時間は uni の方が大きく、明瞭性は fl_rear の方が大きい傾向がある。fl_ceil と他の条件間の比較では、sc40 か sc60 を境に傾向が変わっている傾向がみられる。EDT と T₃₀ は多くの条件間で差が出ている。T₃₀ について、fl_rear は他の条件より小さい傾向がある。G は受音点 1 では全く弁別閾以上の差が出ず、受音点 2 では fl_rear は他の条件より小さくなる傾向がある。LF はほとんどの条件間で弁別閾以上の差がない。LG は受音点 1 では差が出なかったが、受音点 2 では fl_rear が他の条件より小さい傾向がある。

Table. 5.6 条件間の物理指標の変化量と弁別閾の関係（吸音面配置による影響、解析・実測）

受音点 1

		G		EDT		T ₃₀		C ₈₀		D ₅₀		Ts		LF		LG	
		解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測
sc20	uni/fl_ceil	=	=	<3	<2	<9	<8	=	=	=	=	=	<	=	=	=	=
	uni/fl_rear	=	=	>5	>5	>	>	<	<2	<	<	>2	>3	=	=	=	=
	fl_ceil/fl_rear	=	=	>7	>6	>7	>6	<	<	=	<	>3	>4	=	=	=	>
sc40	uni/fl_ceil	=	=	<	=	=	<	=	=	=	=	=	<	=	=	=	=
	uni/fl_rear	=	=	>3	>5	>2	>2	<	<	=	<	>	>	=	=	=	>
	fl_ceil/fl_rear	=	=	>4	>6	>3	>3	=	=	=	=	>	>	=	=	=	>
sc60	uni/fl_ceil	=	=	>5	>4	=	=	<2	<2	<	<	>	>	>	=	=	>
	uni/fl_rear	=	=	>4	>4	>	>	<	<	=	<	>	>	>	=	=	>
	fl_ceil/fl_rear	=	=	=	=	>2	>2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
sc80	uni/fl_ceil	=	=	>6	>4	=	=	<2	<2	<	<	>	>	=	=	=	>2
	uni/fl_rear	=	=	>3	>3	=	>	<	<	<	<	=	>	=	=	=	>
	fl_ceil/fl_rear	=	=	<4	<2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	<

受音点 2

		G		EDT		T ₃₀		C ₈₀		D ₅₀		Ts		LF		LG	
		解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測
sc20	uni/fl_ceil	=	>	<4	<4	<9	<8	=	=	=	=	<	=	=	=	<	=
	uni/fl_rear	>2	>	>2	>2	=	>	=	=	<	=	=	=	<	=	=	>
	fl_ceil/fl_rear	>	=	>6	>5	>7	>6	=	=	=	=	>	>	=	=	=	>2
sc40	uni/fl_ceil	=	=	>3	=	<2	<2	<	=	<	=	=	=	=	=	=	>
	uni/fl_rear	>	>	>3	>4	>2	>	=	=	=	=	>	>	=	=	=	>2
	fl_ceil/fl_rear	>	=	=	>4	>4	>3	=	=	=	=	=	=	=	=	=	>
sc60	uni/fl_ceil	=	=	=	=	=	=	=	<	<2	<	=	=	=	=	=	=
	uni/fl_rear	>	>	>4	>2	>1	>	<	<	<2	<2	>	>	=	=	=	>2
	fl_ceil/fl_rear	=	>	>3	>2	>1	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	>
sc80	uni/fl_ceil	=	=	>3	>3	=	=	<	<	=	<	>	>	<	=	=	=
	uni/fl_rear	>	>	>2	>	>1	>	<	<2	<	<	>	>	=	=	=	>2
	fl_ceil/fl_rear	>	>	<2	<	>1	>	=	=	=	=	=	=	>2	=	=	>2

A/Bにおいて、AがBより弁別閾以上に大きければ「>」、BがAより弁別閾以上に大きければ「<」、そうでなければ「=」

解析と実測の不等号または等号が一致
解析と実測の不等号が逆

解析と実測の対応

Table. 5.5 と Table. 5.6 より、LF と LG では解析と実測が対応しない条件間も多くみられるが、それ以外の指標の条件間ではほとんどが緑の網掛となり、解析と実測がほぼ対応している。これより、無指向性で評価する物理指標に関して、解析音場における条件間の音響特性の違いは、無指向性であれば再現音場において高い割合で反映されているといえる。Table. 5.7 に解析の物理指標と実測の物理指標の対応が一致する割合を示す。双指向性の LF、LG は 60%程度だが、他の無指向性の指標は 90%程度となっている。

Table. 5.7 解析の物理指標と実測の物理指標の対応が一致する割合 (%)

	G	EDT	T ₃₀	C ₈₀	D ₅₀	T _s	LF	LG
全体	91.7	86.7	90.0	88.3	86.7	86.7	63.3	58.3
受音点1	96.7	86.7	86.7	96.7	90.0	90.0	50.0	53.3
受音点2	86.7	86.7	93.3	80.0	83.3	83.3	76.7	63.3
uni	100.0	100.0	100.0	83.3	100.0	91.7	50.0	83.3
fl ceil	91.7	83.3	91.7	83.3	83.3	91.7	33.3	41.7
fl rear	100.0	83.3	83.3	100.0	100.0	91.7	66.7	58.3
sc20	66.7	100.0	83.3	100.0	66.7	66.7	83.3	50.0
sc40	83.3	66.7	83.3	83.3	66.7	83.3	100.0	50.0
sc60	83.3	100.0	100.0	83.3	83.3	100.0	66.7	66.7
sc80	100.0	100.0	83.3	100.0	83.3	83.3	66.7	50.0

5.5 まとめ

乱反射率、吸音面配置が室内音響特性に及ぼす影響について、インパルス応答波形、残響減衰曲線、物理指標により検討した。

乱反射率および吸音面配置は音場に大きく影響する。乱反射率が低いほど残響が大きく、明瞭性が低くなる傾向があり、乱反射率が低いほど吸音面配置の影響が大きくなる。一對の平行壁面が吸音の場合、乱反射率の影響が大きくなり、直交二方向に吸音面が配置されると、吸音の影響が大きくなる。今回の検討では、無指向性の指標の方が、双指向性の指標よりも乱反射率、吸音面配置の影響を受けやすい結果となった。

解析の物理指標と実測の物理指標の対応が一致する割合は、無指向性の指標は 90%程度、双指向性の指標は 60%程度となった。再現音場の各条件間の物理的な差が、解析音場の各条件間の差と比較的よく対応しているので、システムによる各条件間の差異の物理的再現性という意味では、再現性が高いといえる。主観評価により各条件間の差異を検出するシステムとしては有効と考えられる。

第 6 章

聴感印象評価

6.1 概要

幾何音響シミュレーションの結果に基づく 6 チャンネル音場再現を行い、再現音場にて被験者を用いた聴感印象評価実験を行う。これより幾何音響シミュレーションによる物理量と被験者実験による心理量の対応関係について検討する。乱反射率が聴感印象に及ぼす影響、吸音面配置が聴感印象に及ぼす影響の二つについて実験を行った。前者を実験 1、後者を実験 2 とする。

6.2 被験者実験

刺激に対する判断の信頼性、判断の容易さ、被験者数の制約などを考慮し、シェッフェの対比較法（浦の変法）[13]を用いた。

幾何音響シミュレーションにより得られた各条件での直交 6 方向指向性重み付きインパルス応答に、ショパン作曲「幻想即興曲」の無響録音冒頭 13 秒間をたたみ込んだものを刺激として呈示する。刺激と刺激の間隔は 5 秒である。被験者は無響室に入る前に実験に関する教示を受ける。視覚情報をなるべく排除するために、部屋の明かりを消し、回答用紙に記入するのに最低限な必要なスポット照明を用いた。

実験 1 乱反射率が聴感印象に及ぼす影響

刺激対は吸音面配置ごとに乱反射率の条件が違うものを用い、1つの受音点における全刺激対を混ぜてランダムに被験者に呈示した。吸音面配置条件は uni、fl_ceil、fl_rear の 3 条件、乱反射率条件は sc20、sc40、sc60、sc80 の 4 条件である。つまり 1つの吸音面配置につき乱反射率条件の違う刺激対 6 対であり、1つの受音点では 18 対の組み合わせがある。順序効果を相殺するため、刺激の順番を入れ替えた刺激対についても評価するため、1つの受音点では 36 対の刺激対を評価する。2つの受音点を評価するため、実験 1 での合計の刺激対は 72 対である。1つの受音点における実験を 1 ユニットとして実験を行い、1 ユニット目と 2 ユニット目の間には十分な休憩をとった。

実験 2 吸音面配置が聴感印象に及ぼす影響

刺激対は乱反射率条件ごとに吸音面配置の条件が違うものを用い、1つの受音点における全刺激対を混ぜてランダムに被験者に呈示した。乱反射率条件は sc20、sc40、sc60、sc80 の

4 条件、吸音面配置条件は uni、fl_ceil、fl_rear の 3 条件である。つまり 1 つの乱反射率条件につき吸音面配置条件の違う刺激対 3 対であり、1 つの受音点では 12 対の組み合わせがある。順序効果を相殺するため、刺激の順番を入れ替えた刺激対についても評価するため、1 つの受音点では 24 対の刺激対を評価する。2 つの受音点を評価するため、実験 2 での合計の刺激対は 48 対である。1 つの受音点における実験を 1 ユニットとして実験を行い、1 ユニット目と 2 ユニット目の間には十分な休憩をとった。

被験者は 20 才代の学生 11 名である。実験 1 と実験 2 の被験者は同じであり、実験 1 と実験 2 の間には十分長い休憩をとった。

6.2.1 評価方法

それぞれの刺激対について、各評価項目に関して、前の音場に対する後の音場の印象を 7 段階で判断し、回答用紙にチェックした。評価項目は音の要素感覚の中から、音の大きさ、響きの長さ、音の明瞭性、みかけの音源の幅、音に包まれた感じの 5 つとした。Table. 6.1 に評価項目を示す。

Table. 6.1 評価項目

音が大きい	非常に	かなり	少し	同じ	少し	かなり	非常に	音が小さい
響きが長い	非常に	かなり	少し	同じ	少し	かなり	非常に	響きが短い
音がはっきりしている	非常に	かなり	少し	同じ	少し	かなり	非常に	音がはっきりしていない
みかけの音源の幅が大きい	非常に	かなり	少し	同じ	少し	かなり	非常に	みかけの音源の幅が小さい
音に包まれた感じがある	非常に	かなり	少し	同じ	少し	かなり	非常に	音に包まれた感じがない

6.2.2 空間印象について

評価項目のみかけの音源の幅、音に包まれた感じの 2 つは空間印象と呼ばれ、コンサートホールの音場を評価する重要な属性の一つである。空間印象は、少なくとも見かけの音源の幅 (Auditory Source Width : ASW) と音に包まれた感じ (Listener Envelopment : LEV) の二つの要素感覚に分けられることが森本らによって明らかにされている[14]。物理量との対応として、Barron[16]らが側方反射音と音場の空間印象に関する研究成果を発表して以来、空間印象を評価する指標として側方エネルギー率 LF が定着しつつある。LEV は LG と対応するとされているが、ISO3382-1 では弁別閾は規定されていないが、今回の検討では、LG を LEV と対応する指標として用いる。

コンサートホール等の室内音響設計をよりの確に進めていく上で、室の大きさや形状、

壁面材料の建築的諸条件によって創出される室内音場の物理特性と受聴者が感じる心理量との関係をさらに明確にする必要がある[15]。

6.2.3 実験システム

Fig. 6.1 に実験のシステム構成図を示す。実験実施者は無響室内に設置した操作系統から音源と条件を変化させて実験を進行した。スピーカー配置は直交軸を正面方向から 45° 傾けた配置である。

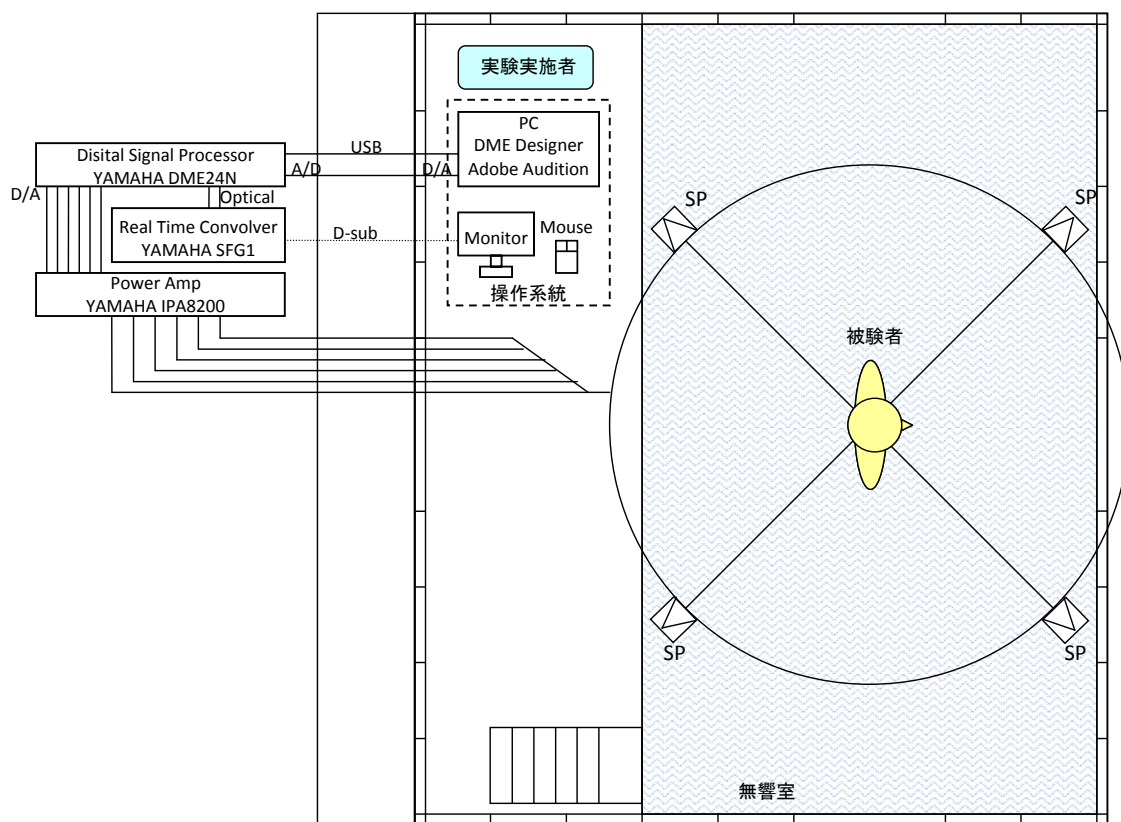


Fig. 6.2 実験システム

6.2.4 音量設定

無響録音音源は SMILE2004[17]に収録されている音源を用いた。SMILE2004 では、無響録音の WAV ファイルに録音時の Leq、LAeq と音源から收音したマイクロホンまでの距離が記録されており、これを用いることで音源のパワー反映した音場再現が可能である。

SMILE2004 収録のショパン「幻想即興曲」の無響室録音冒頭 13 秒間の音響パワーレベルを記録されている曲全体の Leq から求めると 101.5 dB である。幾何音響解析音場において、受音点 1、受音点 2 はそれぞれ音源から 10m、31.1m の距離にあり、直接音のレベルは距離減衰により、それぞれパワーレベルより 31 dB、40.8 dB 小さくなる。各チャンネル間の相対レベルを反映させた直接音と幻想即興曲をたたみ込んで再生し、再生中心において、70.5 dB、60.7 dB になるように DME24N の Fader でレベルの調整を行った。この設定で測定した実験 1、実験 2 の各条件の刺激 13 秒間の Leq を Table. 6.2 に示す。

Table. 6.2 被験者実験における刺激の Leq[dB]

受音点 1					受音点 2				
	sc20	sc40	sc60	sc80		sc20	sc40	sc60	sc80
uni	78.7	78.7	78.8	78.8	uni	75.2	75	74.9	74.5
fl ceil	78.3	78	77.9	77.8	fl ceil	75.2	74.9	74.2	73.8
fl rear	78.1	78.1	78.2	78.3	fl rear	74.2	73.8	73.6	73.4

6.2.5 結果

浦の変法に従い、分散分析を行う。

実験 1 乱反射率が聴感印象に及ぼす影響

吸音面配置条件ごとに、各評価項目での乱反射率の主効果、主効果の個人差、組み合わせ効果、平均の順序効果、順序効果の個人差を要因として分散分析を行った。Table.6.3 に分散分析の結果を示す。表中の印の付いている項目で、乱反射率の主効果に関して 1 つ以上の条件間で有意差がある。

有意差が出た項目のうち、受音点 2 の明瞭性の uni の条件以外は有意水準 1%でも有意であった。uni の条件では有意差が出た項目が少なく、受音点 1 の音の大きさ、受音点 2 の明瞭性のみ有意となった。fl_ceil の条件では多くの項目で有意差となり、受音点 2 の明瞭性以外の評価項目で有意となった。fl_ceil と fl_rear の条件では、みかけの音源の幅と音に包まれた感じの両方とも有意となった。fl_ceil の吸音面配置は、残響減衰曲線が乱反射率に大きく影響を受けていたので、聴感印象で有意差が出たことと対応している。しかし、物理指標においては、明瞭性で弁別閾以上の差がでていたものが多かったにも関わらず、聴感印象では有意差があまり出なかった。他の評価項目に関しては、有意差は出ているが、必ずしも物理指標とは対応していない。

実験 2 吸音面配置が聴感印象に及ぼす影響

乱反射率条件ごとに、各評価項目での吸音面配置の主効果、主効果の個人差、組み合わせ効果、平均の順序効果、順序効果の個人差を要因として分散分析を行った。Table6.4 に分散分析の結果を示す。表中の印の付いている項目で、吸音面配置の主効果に関して 1 つ以上の条件間で有意差がある。

実験 1 と同じく、明瞭性に関してはどの条件でも有意差が出なかった。他の項目に関しては、受音点 1 と受音点 2 で傾向が異なる。受音点 1 では乱反射率が小さい条件ほど有意差が出やすく、有意水準 1%でも有意となる傾向となった。受音点 2 では逆に乱反射率が大い条件ほど有意差が出やすく、有意水準 1%でも有意となる傾向となった。実験 1 と同じく、物理指標とは必ずしも対応していない。

Table. 6.3 分散分析結果（実験 1）

受信点 1

	音の 大きさ	響きの 長さ	音の 明瞭性	みかけの 音源の幅	音に包ま れた感じ
uni	**				
fl_cceil	**	**	**	**	**
fl_rear		**		**	**

受信点 2

	音の 大きさ	響きの 長さ	音の 明瞭性	みかけの 音源の幅	音に包ま れた感じ
uni			*		
fl_cceil	**	**		**	**
fl_rear	**			**	**

* p<0.05, ** p<0.01

Table. 6.4 分散分析結果（実験 2）

受信点 1

	音の 大きさ	響きの 長さ	音の 明瞭性	みかけの 音源の幅	音に包ま れた感じ
sc20	**	**		**	**
sc40	**	**		*	**
sc60	*	**		*	*
sc80		*		*	

受信点 2

	音の 大きさ	響きの 長さ	音の 明瞭性	みかけの 音源の幅	音に包ま れた感じ
sc20	*	*			
sc40	**	*		*	*
sc60	**	**		**	**
sc80	**	**		**	**

* p<0.05, ** p<0.01

6.2.6 条件間の比較

聴感印象評価における条件間の評価

ヤードスティック値（有意水準 5%）を求め、主効果に有意差が出た条件間を Table.6.5、Table6.6 に示す。実験 1 では乱反射率の主効果、実験 2 では吸音面配置の主効果についてである。表において、「A/B」は A の条件に対する B の条件の評価を示している。A が B より有意に大きければ「>」、B が A より有意に大きければ「<」、有意差がなければ「=」で示している。

実験 1 において、有意差がある条件間は多くないが、sc20 と他の条件間で有意差が出やすく、また、乱反射率の差が大きい条件間の方が有意差が出やすい傾向がある。条件間に有意差がある場合、音の大きさ、響きの長さ、みかけの音源の幅、音に包まれた感じについては、乱反射率が低いほど高い評価となる。また、音の明瞭性については、受音点 1 では乱反射率が高いほど低い評価となったが、受音点 2 ではその逆の傾向となった。

実験 2 において、fl_rear と他の条件間で有意差が出やすく、fl_rear は他の条件より低い評価となる傾向がある。uni と fl_rear の条件間は、ほとんど有意差がでなかった。

全体的な傾向としては、物理指標と対応しているものもみられるが、必ずしもそうではない。物理指標と全く逆の聴感印象になったものは少ない。

Table. 6.5 条件間の有意差 (実験 1 乱反射率が聴感印象に及ぼす影響)

受音点 1

		音の 大きさ	響きの 長さ	音の 明瞭性	みかけの 音源の 幅	音に包ま れた感じ
uni	sc20/sc40	>	=	=	=	=
	sc20/sc60	>	=	=	=	=
	sc20/sc80	>	=	=	=	=
	sc40/sc60	=	=	=	=	=
	sc40/sc80	=	=	=	=	=
sc60/sc80	=	=	=	=	=	
fl_ceil	sc20/sc40	>	>	<	>	>
	sc20/sc60	>	>	<	>	>
	sc20/sc80	>	>	<	>	>
	sc40/sc60	=	=	=	=	=
	sc40/sc80	>	>	<	=	>
sc60/sc80	=	=	<	=	>	
fl_rear	sc20/sc40	=	>	=	=	>
	sc20/sc60	=	>	=	=	>
	sc20/sc80	=	>	=	>	>
	sc40/sc60	=	=	=	=	=
	sc40/sc80	=	=	=	=	=
sc60/sc80	=	=	=	=	=	

受音点 2

		音の 大きさ	響きの 長さ	音の 明瞭性	みかけの 音源の 幅	音に包ま れた感じ
uni	sc20/sc40	=	=	=	=	=
	sc20/sc60	=	=	=	=	=
	sc20/sc80	=	=	>	=	=
	sc40/sc60	=	=	=	=	=
	sc40/sc80	=	=	=	=	=
	sc60/sc80	=	=	>	=	=
fl_ceil	sc20/sc40	=	>	=	>	>
	sc20/sc60	=	>	=	=	=
	sc20/sc80	>	=	=	>	>
	sc40/sc60	=	=	=	=	=
	sc40/sc80	=	=	=	=	=
sc60/sc80	=	=	=	=	=	
fl_rear	sc20/sc40	=	=	=	=	>
	sc20/sc60	>	=	=	>	>
	sc20/sc80	>	=	=	>	>
	sc40/sc60	=	=	=	=	=
	sc40/sc80	>	=	=	>	=
sc60/sc80	>	=	=	>	=	

A/Bにおいて、AがBより有意に大きければ「>」、BがAより有意に大きければ「<」、そうでなければ「=」（有意水準5%）

Table. 6.6 条件間の有意差 (実験 2 吸音面配置が聴感印象に及ぼす影響)

受音点 1

		音の 大きさ	響きの 長さ	音の 明瞭性	みかけの 音源の 幅	音に包ま れた感じ
sc20	uni/fl ceiling	=	=	=	=	=
	uni/fl rear	>	>	=	>	>
	fl ceiling/fl rear	>	>	=	>	>
sc40	uni/fl ceiling	=	=	=	=	=
	uni/fl rear	>	>	=	>	>
	fl ceiling/fl rear	>	>	=	=	=
sc60	uni/fl ceiling	=	=	=	=	=
	uni/fl rear	>	>	=	>	>
	fl ceiling/fl rear	=	>	=	=	=
sc80	uni/fl ceiling	=	>	=	>	=
	uni/fl rear	>	>	=	>	=
	fl ceiling/fl rear	=	=	=	=	=

受音点 2

		音の 大きさ	響きの 長さ	音の 明瞭性	みかけの 音源の 幅	音に包ま れた感じ
sc20	uni/fl ceiling	=	=	=	=	=
	uni/fl rear	>	=	=	=	=
	fl ceiling/fl rear	=	>	=	=	=
sc40	uni/fl ceiling	=	=	=	=	=
	uni/fl rear	>	>	=	>	>
	fl ceiling/fl rear	>	=	=	=	=
sc60	uni/fl ceiling	=	=	=	=	=
	uni/fl rear	>	>	=	>	>
	fl ceiling/fl rear	>	>	=	>	>
sc80	uni/fl ceiling	=	=	=	=	=
	uni/fl rear	>	>	=	>	>
	fl ceiling/fl rear	>	=	=	>	>

A/Bにおいて、AがBより有意に大きければ「>」、BがAより有意に大きければ「<」、そうでなければ「=」（有意水準5%）

6.3 再現音場の音響特性と主観評価の対応

6.3.1 再現音場での物理指標と聴感印象評価の対応関係

再現音場での実測による物理指標と聴感印象評価の対応関係について検証する。再現音場の各条件間での物理指標値の変化量と、一対比較による各条件間の聴感印象評価の対応について検討する。前者については弁別閾を基準に判断し、後者については主効果の有意差（有意水準 5%）を基準に検証する。Table.6.7、Table.6.8 に各条件間の物理指標の変化量と聴感印象評価の対応関係を示す。

表において、物理指標に関しては、「A/B」は A の条件に対する B の条件の物理指標値の変化量を示している。A が B より弁別閾以上に大きければ「>」、B が A より弁別閾以上に大きければ「<」、A と B の差が弁別閾より小さければ「=」で示す。この際の変化量とは、EDT と T₃₀については A に対する変化率であり、その他については差分である。不等号の右側の数字は、差が弁別閾の何倍以上になっているかを示す。数字が無いものは 1 倍以上を意味する。

聴感印象評価に関しては、「A/B」は A の条件に対する B の条件の評価を示している。A が B より有意に大きければ「>」、B が A より有意に大きければ「<」、有意差がなければ「=」で示している。

橙の網掛は物理指標と聴感印象評価が同じ不等号となっている場合、青の網掛は不等号が逆の場合、網掛なしはそれ以外である。橙の網掛の場合、再現音場の音響特性と聴感印象が一致しているといえる。青の網掛の場合、音響特性とまったく逆の聴感印象評価となっているといえる。

青の網掛は少なく、ほとんどが橙の網掛か網掛なしである。物理指標とまったく逆の聴感印象評価になった条件間は少ないが、必ずしも音響特性と対応する聴感印象評価にはなっていない。また、物理指標の変化量が弁別閾を大きく超えていたとしても聴感印象評価では有意差がない場合も多い。音の明瞭性に関しては、物理指標の変化量に関わらず、ほとんどの条件間で聴感印象評価が有意差なしとなっている。このシステムでは明瞭性を判断できない可能性がある。

物理指標と聴感印象評価が一致している割合を Table. 6.9 に示す。全体としては、大体 40%から 70%となっている。EDT と響きの対応関係に関して、uni と fl_rear はかなり対応が悪い。残響感と対応する物理指標として、EDT は主観と良い対応をするとされているが、T₃₀の方が聴感印象との対応が良い結果となった。

実験 1 乱反射率が聴感印象に及ぼす影響

Table. 6.7 条件間の物理指標（実測）の変化量と聴感印象評価の対応関係

受音点 1

		物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理
		G	音の大きさ	EDT	響きの長さ	T ₃₀	響きの長さ	C ₈₀	明瞭性	D ₅₀	明瞭性	T _s	明瞭性	LF	ASW	LG	LEV
uni	sc20/sc40	>3	>	>3	=	<4	=	<4	=	<4	=	>3	=	=	=	=	=
	sc20/sc60	>3	>	>	=	<4	=	<5	=	<5	=	>3	=	=	=	=	=
	sc20/sc80	>3	>	>	=	<5	=	<5	=	<5	=	>4	=	=	=	=	=
	sc40/sc60	=	=	<2	=	=	=	<	=	<	=	=	=	=	=	=	=
	sc40/sc80	=	=	<2	=	=	=	<	=	<	=	=	=	=	=	=	=
	sc60/sc80	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
fl_ceil	sc20/sc40	>2	>	>4	>	>	>	<4	<	<4	<	>4	<	=	>	>	>
	sc20/sc60	>4	>	>6	>	>2	>	<6	<	<7	<	>6	<	=	>	>2	>
	sc20/sc80	>4	>	>7	>	>2	>	<7	<	<7	<	>6	<	=	>	>2	>
	sc40/sc60	>	=	>2	=	>	=	<2	=	<2	=	>	=	=	=	=	=
	sc40/sc80	>	>	>3	>	>	>	<3	<	<2	<	>2	<	=	=	>	>
	sc60/sc80	=	=	>	=	=	=	=	<	=	<	=	<	=	=	=	>
fl_rear	sc20/sc40	>2	=	>3	>	<3	>	<3	=	<4	=	>2	=	=	=	=	>
	sc20/sc60	>3	=	=	>	<3	>	<5	=	<5	=	>2	=	=	=	=	>
	sc20/sc80	>3	=	<	>	<5	>	<5	=	<5	=	>2	=	=	>	=	>
	sc40/sc60	=	=	<4	=	=	=	<	=	<	=	=	=	=	=	=	=
	sc40/sc80	=	=	<6	=	<	=	<	=	<	=	=	=	=	=	=	=
	sc60/sc80	=	=	<2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=

受音点 2

		物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理
		G	音の大きさ	EDT	響きの長さ	T ₃₀	響きの長さ	C ₈₀	明瞭性	D ₅₀	明瞭性	T _s	明瞭性	LF	ASW	LG	LEV
uni	sc20/sc40	>2	=	<3	=	<	=	=	=	<2	=	=	=	=	=	=	=
	sc20/sc60	>3	=	<8	=	<	=	=	=	<2	=	=	=	=	=	=	=
	sc20/sc80	>4	=	<13	=	<	=	>	>	<2	>	<2	>	=	=	=	=
	sc40/sc60	>	=	<4	=	=	=	=	=	=	=	<	=	=	=	=	=
	sc40/sc80	>2	=	<9	=	=	=	>2	=	=	=	<2	=	=	=	=	=
	sc60/sc80	<	=	<3	=	=	=	>	>	=	>	<	>	=	=	=	=
fl_ceil	sc20/sc40	>2	=	>	>	>2	>	<	=	<2	=	>	=	=	>	=	>
	sc20/sc60	>3	=	<3	>	>4	>	<	=	<3	=	=	=	=	=	=	=
	sc20/sc80	>3	>	<3	=	>4	=	=	=	<2	=	=	=	=	>	=	>
	sc40/sc60	>	=	<5	=	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	sc40/sc80	>	=	<4	=	>2	=	>	=	=	=	<	=	=	=	=	=
	sc60/sc80	=	=	=	=	=	=	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=
fl_rear	sc20/sc40	>2	=	=	=	=	=	<	=	<2	=	=	=	=	=	=	>
	sc20/sc60	>4	>	<7	=	<	=	<	=	<4	=	=	=	=	>	=	>
	sc20/sc80	>5	>	<14	=	<	=	=	=	<3	=	<	=	=	>	=	>
	sc40/sc60	>	=	<8	=	=	=	=	=	<	=	=	=	=	=	=	=
	sc40/sc80	>2	>	<14	=	=	=	>	=	=	=	<2	=	=	>	=	=
	sc60/sc80	<	>	<4	=	=	=	<	=	=	=	>	=	=	>	=	=

物理指標： A/Bにおいて、AがBより弁別閾以上に大きければ「>」、BがAより弁別閾以上に大きければ「<」、そうでなければ「=」

聴感印象： A/Bにおいて、AがBより有意に大きければ「>」、BがA（有意水準5%）より有意に大きければ「<」、そうでなければ「=」

物理指標と聴感評価の不等号または等号が一致
物理指標と聴感評価の不等号が逆向き

実験 2 吸音面配置が聴感印象に及ぼす影響

Table. 6.8 条件間の物理指標（実測）の変化量と聴感印象評価の対応関係
受音点 1

		物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理
		G	音の 大きさ	EDT	響きの 長さ	T ₃₀	響きの 長さ	C ₈₀	明瞭 性	D ₅₀	明瞭 性	T _s	明瞭 性	LF	ASW	LG	LEV
sc20	uni/fl ceil	=	=	<2	=	<8	=	=	=	=	=	<	=	=	=	=	=
	uni/fl rear	=	>	>5	>	>	>	<2	=	<	=	>3	=	=	>	=	>
	fl ceil/fl rear	=	>	>6	>	>6	>	<	=	<	=	>4	=	=	>	>	>
sc40	uni/fl ceil	=	=	=	=	<	=	=	=	=	<	=	=	=	=	=	=
	uni/fl rear	=	>	>5	>	>2	>	<	=	<	=	>	=	=	>	>	>
	fl ceil/fl rear	=	>	>6	>	>3	>	=	=	=	=	>	=	=	=	>	=
sc60	uni/fl ceil	=	=	>4	=	=	=	<2	=	<	=	>	=	=	=	=	>
	uni/fl rear	=	>	>4	>	>	>	<	=	<	=	>	=	=	>	>	>
	fl ceil/fl rear	=	=	=	>	>2	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
sc80	uni/fl ceil	=	=	>4	>	=	>	<2	=	<	=	>	=	=	>	>2	=
	uni/fl rear	=	>	>3	>	>	>	<	=	<	=	>	=	=	>	>	=
	fl ceil/fl rear	=	=	<2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	<	=

受音点 2

		物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理
		G	音の 大きさ	EDT	響きの 長さ	T ₃₀	響きの 長さ	C ₈₀	明瞭 性	D ₅₀	明瞭 性	T _s	明瞭 性	LF	ASW	LG	LEV
sc20	uni/fl ceil	>	=	<4	=	<8	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	uni/fl rear	>	>	>2	=	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	>	=
	fl ceil/fl rear	=	=	>5	>	>6	>	=	=	=	=	>	=	=	=	>	=
sc40	uni/fl ceil	=	=	=	=	<2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	>	=
	uni/fl rear	>	>	>4	>	>	>	=	=	=	=	>	=	=	>	>2	>
	fl ceil/fl rear	=	>	>4	=	>3	>	=	=	=	=	=	=	=	=	>	=
sc60	uni/fl ceil	=	=	=	=	=	=	<	=	<	=	=	=	=	=	=	=
	uni/fl rear	>	>	>2	>	>	>	<	=	<2	=	>	=	=	>	>2	>
	fl ceil/fl rear	>	>	>2	>	>	>	=	=	=	=	=	=	=	>	>	>
sc80	uni/fl ceil	=	=	>3	=	=	=	<	=	<	=	>	=	=	=	=	=
	uni/fl rear	>	>	>	>	>	>	<2	=	<	=	>	=	=	>	>2	>
	fl ceil/fl rear	>	>	<	=	>	=	=	=	=	=	=	=	=	>	>	>

物理指標： A/Bにおいて、AがBより弁別閾以上に大きければ「>」、BがAより弁別閾以上に大きければ「<」、そうでなければ「=」

聴感印象： A/Bにおいて、AがBより有意に大きければ「>」、BがA（有意水準5%）より有意に大きければ「<」、そうでなければ「=」

物理指標と聴感評価の不等号または等号が一致
物理指標と聴感評価の不等号が逆向き

Table. 6.9 物理指標と聴感印象評価が一致する割合 (%)

	G 音の大きさ	EDT 響きの長さ	T ₃₀ 響きの長さ	C ₈₀ 明瞭性	D ₅₀ 明瞭性	T _s 明瞭性	LF みかけの 音源の幅	LG 音に包ま れた感じ
全体	58.3	40.0	60.0	46.7	43.3	50.0	65.0	68.3
受音点1	66.7	46.7	63.3	36.7	36.7	40.0	66.7	66.7
受音点2	50.0	33.3	56.7	56.7	50.0	60.0	63.3	70.0
uni	50.0	8.3	50.0	50.0	25.0	58.3	100.0	100.0
fl ceil	58.3	50.0	66.7	50.0	58.3	66.7	58.3	75.0
fl rear	50.0	16.7	50.0	25.0	25.0	50.0	50.0	50.0
sc20	50.0	50.0	50.0	66.7	66.7	33.3	66.7	50.0
sc40	50.0	83.3	50.0	83.3	83.3	33.3	66.7	50.0
sc60	83.3	66.7	100.0	33.3	33.3	50.0	50.0	66.7
sc80	83.3	50.0	66.7	33.3	33.3	33.3	33.3	66.7

6.4 解析と実測と聴感印象評価の対応関係

解析音場（6ch 同期加算）の物理指標、再現音場での実測による物理指標、聴感印象評価の対応関係について検証する。6.3.1 と同じ方法で検証する。

Table.6.10、Table.6.11 に各条件間の物理指標の変化量と聴感印象評価の対応関係を示す。これは

縦縞と横縞は解析と実測の対応関係を示している。縦縞は解析と実測の不等号が一致する場合、横縞は解析と実測の不等号が逆になっている場合である。実測と聴感印象評価の対応関係は 6.3.1 と同じものである。縦縞かつ橙の条件間は解析と実測と聴感印象評価の対応が一致し、システムの再現性という意味では最も望ましいものである。

解析の物理指標、実測の物理指標、聴感印象評価が一致している割合を Table. 6.12 に示す。全体としては、大体 35%から 55%となっている。

実験 1 乱反射率が聴感印象に及ぼす影響

Table. 6.10 解析の物理量と心理量の対応と実測の物理量と心理量の対応との関係

受音点 1


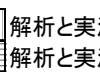
		物理		心理		物理		心理		物理		心理		物理		心理		物理		心理													
		G		音の大きさ		EDT		響きの長さ		T ₃₀		響きの長さ		C ₈₀		明瞭性		D ₅₀		明瞭性		Ts		明瞭性		LF		A S W		LG		L E V	
		解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測		
uni	sc20/sc40	>2	>3	>	>6	>3	=	<6	<4	=	<4	<4	=	<4	<4	=	>3	>3	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=		
	sc20/sc60	>3	>3	>	>3	>	=	<5	<4	=	<5	<5	=	<6	<5	=	>4	>3	=	<2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=			
	sc20/sc80	>3	>3	>	>4	>	=	<6	<5	=	<6	<5	=	<6	<5	=	>4	>4	=	<2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=		
	sc40/sc60	=	=	=	<2	<2	=	=	=	=	=	=	=	<	<	=	=	=	=	<	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=		
	sc40/sc80	=	=	=	<2	<2	=	=	=	=	<2	<	=	<2	<	=	=	=	=	<	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=		
sc60/sc80	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=			
fl_ceil	sc20/sc40	>2	>2	>	>7	>4	>	>	>	>	<4	<4	<	<4	<4	<	>4	>4	<	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=			
	sc20/sc60	>3	>4	>	>9	>6	>	>	>	>2	<7	<6	<	<7	<7	<	>6	>6	<	<	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=			
	sc20/sc80	>3	>4	>	>10	>7	>	>2	>2	>	<8	<7	<	<7	<7	<	>6	>6	<	<2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=			
	sc40/sc60	=	>	=	>4	>2	=	=	>	=	<3	<2	=	<2	<2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=		
	sc40/sc80	=	>	=	>5	>3	>	=	>	=	<3	<3	<	<2	<2	<	=	>2	>2	<	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=		
sc60/sc80	=	=	=	=	=	=	=	=	=	<	<	=	<	<	=	=	=	=	<	<	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=			
fl_rear	sc20/sc40	>2	>2	=	>4	>3	>	<4	<3	>	<3	<3	=	<4	<4	=	>2	>2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=			
	sc20/sc60	>3	>3	=	>3	=	=	<5	<3	>	<5	<5	=	<5	<5	=	>2	>2	=	<	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=		
	sc20/sc80	>3	>3	=	>2	<	>	<6	<5	>	<5	<5	=	<6	<5	=	>3	>2	=	<3	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=		
	sc40/sc60	=	=	=	<4	=	=	=	=	=	<	<	=	<	<	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=		
	sc40/sc80	=	=	=	<2	<6	=	<2	<	=	<3	<	=	<2	<	=	=	=	=	<2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=		
sc60/sc80	=	=	=	<	<2	=	<	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=			


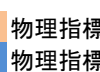
受音点 2

		物理		心理		物理		心理		物理		心理		物理		心理		物理		心理													
		G		音の大きさ		EDT		響きの長さ		T ₃₀		響きの長さ		C ₈₀		明瞭性		D ₅₀		明瞭性		Ts		明瞭性		LF		A S W		LG		L E V	
		解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測		
uni	sc20/sc40	>3	>2	=	<	<3	=	<2	<	=	<	=	=	<2	<2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=			
	sc20/sc60	>4	>3	=	<	<7	<8	=	<2	<	=	=	=	<2	<2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=			
	sc20/sc80	>6	>4	=	<	<11	<13	=	<2	<	=	=	>	>	<2	<2	>	<	<2	>	<	=	=	=	=	=	=	=	=	=			
	sc40/sc60	>	>	=	<	<6	<4	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	<	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=			
	sc40/sc80	>2	>2	=	<	<9	<9	=	=	=	=	>2	=	=	=	=	=	<	<2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=			
sc60/sc80	<	<	=	<	<2	<3	=	=	=	=	>	>	=	=	=	=	>	>	>	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=				
fl_ceil	sc20/sc40	>3	>2	=	>5	>	>	>3	>2	>	<2	<	=	<3	<2	=	>	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=				
	sc20/sc60	>5	>3	=	<	<3	>	>4	>4	>	<	<	=	<4	<3	=	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=				
	sc20/sc80	>5	>3	>	=	<3	=	>4	>4	=	=	=	=	<2	<2	=	=	=	=	<	=	=	=	=	=	=	=	=	=				
	sc40/sc60	>2	>	=	<	<10	<5	=	>	>	=	=	=	<	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=				
	sc40/sc80	>2	>	=	<	<8	<4	=	>2	>2	=	>	>	=	=	=	=	<	<	=	<	=	=	=	=	=	=	=	=				
sc60/sc80	=	=	=	>	=	=	=	=	=	=	>	>	=	=	=	=	=	=	=	>2	=	=	=	=	=	=	=	=					
fl_rear	sc20/sc40	>2	>2	=	=	=	=	=	=	=	<	<	=	<2	<2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=				
	sc20/sc60	>4	>4	>	<	<5	<7	=	<	<	=	<	=	<4	<4	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=				
	sc20/sc80	>5	>5	>	<	<12	<14	=	<2	<	=	=	=	<3	<3	=	=	<	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=				
	sc40/sc60	>	>	=	<	<5	<8	=	=	=	=	=	=	<	<	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=				
	sc40/sc80	>2	>2	>	<	<12	<14	=	<	=	=	=	=	=	=	=	=	<	<2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=				
sc60/sc80	<	<	>	<	<5	<4	=	=	=	=	>	<	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=					

物理指標： A/Bにおいて、AがBより弁別閾以上に大きければ「>」、BがAより弁別閾以上に大きければ「<」、そうでなければ「=」

聴感印象： A/Bにおいて、AがBより有意に大きければ「>」、BがA（有意水準5%）より有意に大きければ「<」、そうでなければ「=」

 解析と実測の不等号または等号が一致
 解析と実測の不等号が逆向き

 物理指標と聴感評価の不等号または等号が一致
 物理指標と聴感評価の不等号が逆向き

実験 2 吸音面配置が聴感印象に及ぼす影響

Table. 6.11 解析の物理量と心理量の対応と実測の物理量と心理量の対応との関係
受音点 1


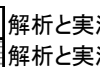
		物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	
		G		EDT		T ₃₀		C ₈₀		D ₅₀		Ts		LF		ASW		LEV
		解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	
sc20	uni/fl ceil	=	=	<3	<2	=	<9	<8	=	=	=	=	=	<	=	=	=	=
	uni/fl rear	=	=	>5	>5	>	>	>	<	<	=	<	<	>2	>3	=	=	>
	fl ceil/fl rear	=	=	>7	>6	>	>7	>6	<	<	=	=	<	>3	>4	=	=	>
sc40	uni/fl ceil	=	=	<	=	=	<	=	=	=	=	=	=	<	=	=	=	=
	uni/fl rear	=	=	>5	>5	>	>2	>2	<	<	=	=	<	>	>	=	=	>
	fl ceil/fl rear	=	=	>4	>6	>	>3	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	>
sc60	uni/fl ceil	=	=	>5	>4	=	=	=	<2	<2	=	<	<	=	>	=	=	>
	uni/fl rear	=	=	>4	>4	>	>	>	<	<	=	=	<	=	>	=	=	>
	fl ceil/fl rear	=	=	=	=	>	>2	>2	>	>	=	=	=	=	=	=	=	>
sc80	uni/fl ceil	=	=	>6	>4	=	=	=	<2	<2	=	=	=	=	=	=	=	>2
	uni/fl rear	=	=	>5	>3	>	=	>	<	<	=	<	<	=	>	=	=	>
	fl ceil/fl rear	=	=	<4	<2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	<

受音点 2

		物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	物理	心理	
		G		EDT		T ₃₀		C ₈₀		D ₅₀		Ts		LF		ASW		LEV
		解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	
sc20	uni/fl ceil	=	>	=	<4	<4	=	<9	<8	=	=	=	=	<	=	=	=	<
	uni/fl rear	>2	>	>	>2	>2	=	=	>	=	=	=	<	=	=	=	=	>
	fl ceil/fl rear	>	=	=	>6	>5	>	>7	>6	>	=	=	=	>	>	=	=	>2
sc40	uni/fl ceil	=	=	=	>3	=	<2	<2	=	<	=	=	<	=	=	=	=	=
	uni/fl rear	>	>	>	>5	>4	>	>2	>	>	=	=	=	>	>	=	=	>2
	fl ceil/fl rear	>	=	>	=	>4	=	>4	>3	=	=	=	=	=	=	=	=	>
sc60	uni/fl ceil	=	=	=	=	=	=	=	=	<	=	<2	<2	=	=	=	=	=
	uni/fl rear	>	>	>	>4	>2	>	>1	>	>	<	<	=	<2	<2	=	=	>
	fl ceil/fl rear	=	>	=	>5	>2	>	>1	>	>	=	=	=	=	=	=	=	>
sc80	uni/fl ceil	=	=	=	>5	>3	=	=	=	<	=	=	<	=	=	=	=	=
	uni/fl rear	>	>	>	>2	>	>	>1	>	>	<	<2	=	<	<	=	=	>2
	fl ceil/fl rear	>	>	>	<2	<	=	>1	>	=	=	=	=	=	=	=	=	>2

物理指標： A/Bにおいて、AがBより弁別閾以上に大きければ「>」、BがAより弁別閾以上に大きければ「<」、そうでなければ「=」

聴感印象： A/Bにおいて、AがBより有意に大きければ「>」、BがA（有意水準5%）より有意に大きければ「<」、そうでなければ「=」

 解析と実測の不等号または等号が一致
 解析と実測の不等号が逆向き



 物理指標と聴感評価の不等号または等号が一致
 物理指標と聴感評価の不等号が逆向き

Table. 6.12 解析の物理指標、実測の物理指標、聴感印象評価が一致する割合

	G 音の大きさ	EDT 響きの長さ	T ₃₀ 響きの長さ	C ₈₀ 明瞭性	D ₅₀ 明瞭性	T _s 明瞭性	LF みかけの 音源の幅	LG 音に包ま れた感じ
全体	55.0	35.0	55.0	41.7	36.7	46.7	40.0	50.0
受音点1	66.7	43.3	56.7	36.7	36.7	40.0	33.3	43.3
受音点2	43.3	26.7	53.3	46.7	36.7	53.3	46.7	56.7
uni	50.0	8.3	50.0	33.3	25.0	41.7	50.0	83.3
fl_cceil	58.3	41.7	66.7	50.0	41.7	58.3	25.0	33.3
fl_rear	50.0	16.7	33.3	25.0	25.0	33.3	33.3	50.0
sc20	33.3	50.0	50.0	66.7	50.0	16.7	50.0	16.7
sc40	50.0	50.0	50.0	66.7	50.0	33.3	66.7	50.0
sc60	66.7	66.7	100.0	33.3	33.3	50.0	33.3	66.7
sc80	83.3	50.0	50.0	33.3	33.3	33.3	16.7	50.0

6.5 まとめ

幾何音響シミュレーションの結果に基づく6チャンネル音場再現を行い、再現音場にて、乱反射率が聴感印象に及ぼす影響、吸音面配置が聴感印象に及ぼす影響の二つについて被験者による聴感印象評価実験を行った。物理量と心理量の対応関係について検討した。

物理指標とまったく逆の聴感印象評価になる場合は少ないが、必ずしも音響特性と対応する聴感印象評価にはならなかった。また、物理指標の変化量が弁別閾を大きく超えていたとしても聴感印象評価では有意差がない場合も多い。物理指標と聴感印象評価が一致している割合は40%から70%程度であった。さらに、解析と実測の物理指標、聴感印象評価が一致している割合は35%から55%程度であった。音の明瞭性に関しては、物理指標の変化量に関わらず、ほとんどの場合において聴感印象評価で有意差がなく、このシステムでは明瞭性を判断できない可能性がある。

第7章

まとめ

幾何音響シミュレーションに基づく6チャンネル音場再現システムを構築し、物理的、聴感的に再現性を検証した。また、吸音面偏在や乱反射率が室内音響特性に及ぼす影響について検討した。

第1章では、既往研究を概観し研究背景と目的について述べた。また、システムの再現性や聴感実験の検討に用いる音響物理指標値、室内音響の検討に用いる乱反射率をまとめた。

第2章では、6チャンネル音場再現システムの概要を述べた。また、本研究室におけるシステム構成、收音系・再生系それぞれの設定について述べた。

第3章では、本研究で用いた幾何音響シミュレーションに基づく6チャンネル音場再現システムの概要を示した。まず、6チャンネル音場再現システムによる可聴化や室内音響に関する既往文献を整理した。また、室内音響解析手法の一つとして幾何音響解析手法の特徴を理解し、解析に使用した商用幾何音響解析ソフト、CATTの特徴や本研究における設定・解析条件を述べた。そして、本研究で用いた幾何音響シミュレーションに基づく6チャンネル音場再現システムの構成、設定方法を述べた。これは今後このシステムを用いて実験を行っていくにあたり、非常に有益な資料である。

第4章では、システムの物理的再現性に関する検討について述べた。解析による無指向性インパルス応答、直交6方向指向性重み付きインパルス応答を同期加算したもの(6ch同期加算)の対応、解析によるインパルス応答(6ch同期加算)と再現音場での実測の対応について検討した。インパルス応答波形、残響減衰曲線、物理指標値により検討した。

解析による無指向性のインパルス応答と6ch同期加算のインパルス応答を比較すると、反射音構造に若干差異がある。後期残響は比較的対応しているが、初期応答が大きく異なっていた。残響時間以外の物理指標は対応が悪く、解析による無指向性のインパルス応答と6ch同期加算のインパルス応答は異なることが確認できた。

解析(6ch同期加算)と再現音場での実測を比較すると、2kHz以下の周波数帯域ではインパルス応答の波形、残響時間と明瞭性に関する物理指標は非常によい対応を示し、システムの再現性が高いことを確認した。しかし、4kHz以上の高い周波数帯域では波形、減衰曲線、物理指標の対応が悪くなった。これはスピーカーの特性によるものと考えられる。

第5章では、室内音響特性に及ぼす壁面拡散性と吸音面偏在の影響について検討した。幾何音響シミュレーションにより乱反射率と吸音面配置を変化させた条件を解析し、その影響関係をインパルス応答波形、残響減衰曲線、物理指標により検討した。また、解析と

実測の対応関係をみた。乱反射率および吸音面配置は音場に大きく影響した。乱反射率が低いほど残響が大きく、明瞭性が低くなる傾向があり、乱反射率が低いほど吸音面配置の影響が大きくなる。一对の平行壁面が吸音の場合、乱反射率の影響が大きくなり、直交二方向に吸音面が配置されると、吸音の影響が大きくなる。無指向性の指標の方が、双指向性の指標よりも乱反射率、吸音面配置の影響を受けやすい結果となった。

また、音場間の物理指標の差に関して、実測と解析の対応関係を検討したところ、解析と実測の対応が一致する割合は、無指向性の指標は 90%程度、双指向性の指標は 60%程度となった。再現音場の各条件間の物理的な差が、解析音場の各条件間の差と比較的よく対応しているので、システムによる各条件間の差異の物理的再現性という意味では再現性が高く、主観評価により各条件間の差異を検出するシステムとしての有効性が示された。

第 6 章では、幾何音響シミュレーションの結果に基づく 6 チャンネル音場再現を行い、再現音場にて、乱反射率が聴感印象に及ぼす影響、吸音面配置が聴感印象に及ぼす影響の二つについて被験者による聴感印象評価実験を行った。そして、物理量と心理量の対応関係について検討した。

物理指標とまったく逆の聴感印象評価になる場合は少ないが、必ずしも音響特性と対応する聴感印象評価にはならなかった。また、物理指標の変化量が弁別閾を大きく超えていたとしても聴感印象評価では有意差がない場合も多かった。物理指標と聴感印象評価が一致している割合は 40%から 70%程度であった。さらに解析と実測の物理指標、聴感印象評価が一致している割合は 35%から 55%程度であった。音の明瞭性に関しては、物理指標の変化量に関わらず、ほとんどの場合において聴感印象評価で有意差がなく、このシステムでは明瞭性を判断できない可能性が示された。

以上、本研究によって得られた成果をまとめた。壁面拡散性や吸音面偏在が室内音響特性に及ぼす影響については、大きく傾向を捉えることができた。今後は、影響が大きかった乱反射率が低い条件での詳細な検討や別の室形状についての検討等を行っていく必要がある。システムの再現性については、物理的、聴感的にある程度再現性があることが確認できたが、スピーカーの変更、実音場で測定したインパルス応答による音場再現、波動解析の可聴化等によりシステムをさらに検証していく必要がある。

付録

各種物理指標値

解析 (無指向性)

受音点 1

受音点 2

G [dB]

		125	250	500	1k	2k	4k	8k
uni	sc20	10.9	11.4	8.2	13.1	9.9	9.9	9.2
	sc40	10.1	9.8	4.8	11.4	9.1	8.7	8.2
	sc60	9.3	8.5	5.7	10.9	9.1	8.1	8.2
	sc80	9.2	7.8	5.7	11.1	8.3	8.2	7.5
fl_ceil	sc20	10.6	11.2	8.3	12.6	9.6	9.1	9.1
	sc40	9.6	8.9	5.7	10.6	8.1	8.0	7.7
	sc60	8.4	7.9	5.1	9.9	7.6	7.5	7.0
	sc80	7.4	7.4	4.9	10.5	7.6	7.5	6.8
fl_rear	sc20	10.6	11.1	7.4	12.4	9.2	8.8	9.1
	sc40	9.3	9.2	5.2	10.8	8.3	8.5	7.8
	sc60	9.6	9.6	5.0	11.0	8.3	7.8	7.5
	sc80	9.0	8.1	5.5	10.6	8.0	8.0	7.4

		125	250	500	1k	2k	4k	8k
uni	sc20	8.7	7.9	6.9	10.3	6.6	6.5	6.0
	sc40	5.5	7.1	4.0	8.7	4.6	5.6	5.0
	sc60	5.3	6.0	3.0	8.0	4.3	5.1	4.5
	sc80	5.1	5.2	2.1	7.4	4.8	5.0	4.0
fl_ceil	sc20	8.6	8.6	6.2	9.8	5.9	6.7	5.7
	sc40	6.2	6.9	3.9	7.8	5.2	5.8	4.5
	sc60	4.6	6.7	2.2	7.4	3.9	4.8	4.2
	sc80	2.6	4.9	1.8	6.2	3.7	4.0	3.1
fl_rear	sc20	6.1	7.0	4.1	7.7	3.8	4.8	4.5
	sc40	4.6	5.0	2.1	6.1	2.7	4.2	3.1
	sc60	2.2	4.2	0.8	6.0	3.3	3.2	2.9
	sc80	1.6	4.1	0.7	6.0	2.5	2.8	2.1

EDT [s]

		125	250	500	1k	2k	4k	8k
uni	sc20	1.9	1.5	1.6	1.6	1.9	1.6	1.8
	sc40	1.3	1.2	1.8	1.8	1.7	1.6	1.7
	sc60	1.4	1.8	1.8	1.8	1.7	1.9	1.8
	sc80	1.6	1.9	2.4	1.7	2.1	1.8	1.9
fl_ceil	sc20	1.7	1.6	1.8	1.9	2.1	2.1	1.8
	sc40	1.1	1.6	2.0	2.0	1.9	1.7	1.7
	sc60	1.4	1.3	1.8	1.9	1.8	1.8	1.8
	sc80	1.8	1.9	2.0	1.8	1.7	1.8	1.7
fl_rear	sc20	1.4	1.0	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2
	sc40	1.1	1.1	1.6	1.4	1.4	1.3	1.3
	sc60	1.5	1.1	1.8	1.7	1.6	1.5	1.5
	sc80	1.0	2.1	1.8	1.6	1.6	1.6	1.6

		125	250	500	1k	2k	4k	8k
uni	sc20	1.0	1.8	1.3	1.6	1.7	1.7	1.7
	sc40	1.6	1.6	1.7	1.6	1.8	1.8	1.8
	sc60	1.3	1.8	1.8	1.8	1.9	1.9	1.8
	sc80	1.8	1.7	2.1	1.9	1.8	1.8	1.8
fl_ceil	sc20	2.2	1.8	2.1	2.2	2.3	2.3	2.3
	sc40	1.5	1.6	1.9	2.1	1.9	1.9	2.0
	sc60	1.7	1.2	2.2	1.9	1.9	1.8	1.8
	sc80	1.8	1.9	1.9	1.8	1.9	1.8	1.9
fl_rear	sc20	0.8	1.1	1.1	1.5	1.7	1.5	1.2
	sc40	1.6	1.6	1.7	1.6	1.8	1.8	1.8
	sc60	1.8	1.4	1.9	1.8	1.5	1.7	1.6
	sc80	1.9	1.6	1.8	1.6	2.0	1.9	1.9

T30 [s]

		125	250	500	1k	2k	4k	8k
uni	sc20	1.6	1.8	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8
	sc40	1.8	2.1	2.1	1.9	1.9	1.9	1.9
	sc60	1.9	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9
	sc80	1.8	2.0	2.0	1.9	1.8	1.9	1.9
fl_ceil	sc20	2.2	2.6	2.8	2.7	2.6	2.6	2.6
	sc40	2.0	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
	sc60	1.9	2.1	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9
	sc80	1.9	2.0	2.1	1.9	1.9	1.9	1.9
fl_rear	sc20	1.5	1.8	1.8	1.6	1.7	1.7	1.7
	sc40	1.6	1.8	1.8	1.7	1.7	1.6	1.7
	sc60	1.6	2.0	1.9	1.7	1.7	1.6	1.7
	sc80	1.8	1.8	1.9	1.8	1.7	1.7	1.8

		125	250	500	1k	2k	4k	8k
uni	sc20	1.8	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9
	sc40	1.9	2.1	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9
	sc60	1.8	2.1	2.1	1.9	1.9	1.9	1.9
	sc80	1.8	2.1	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9
fl_ceil	sc20	2.1	2.7	2.9	2.8	2.8	2.7	2.9
	sc40	1.8	2.2	2.2	2.1	2.2	2.1	2.1
	sc60	1.8	2.0	2.0	1.9	1.9	2.0	2.0
	sc80	1.9	1.9	2.0	1.9	1.8	1.8	1.8
fl_rear	sc20	1.8	1.9	2.0	1.7	1.7	1.7	1.8
	sc40	1.9	2.1	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9
	sc60	1.5	1.9	1.9	1.7	1.7	1.7	1.7
	sc80	1.7	1.9	1.8	1.8	1.7	1.7	1.7

C80 [dB]

		125	250	500	1k	2k	4k	8k
uni	sc20	2.7	-0.3	-3.1	-0.3	0.2	-0.3	0.2
	sc40	4.9	1.6	-1.2	1.8	1.1	1.5	1.2
	sc60	5.6	2.2	1.3	1.4	1.7	1.2	2.5
	sc80	6.3	2.7	1.2	1.0	2.0	0.9	1.4
fl_ceil	sc20	2.2	0.0	-3.2	-0.6	-0.2	-0.5	-0.5
	sc40	4.8	1.9	-1.3	1.9	2.7	1.0	1.2
	sc60	5.6	3.8	0.7	2.6	3.0	1.9	2.6
	sc80	5.6	3.0	1.9	2.8	2.7	2.7	1.9
fl_rear	sc20	3.2	0.7	-1.9	0.0	0.8	0.7	0.0
	sc40	3.9	3.0	2.2	2.1	2.8	1.3	2.1
	sc60	2.4	2.4	1.6	2.8	2.9	1.5	1.9
	sc80	4.6	2.9	1.6	1.7	1.3	0.9	2.0

		125	250	500	1k	2k	4k	8k
uni	sc20	4.7	3.6	2.0	-0.2	-1.0	1.2	1.0
	sc40	2.8	4.5	0.7	-0.9	-2.3	0.3	-0.3
	sc60	-0.4	2.8	-0.6	-2.4	-2.0	-0.2	-1.2
	sc80	1.6	2.1	-0.9	-1.9	-3.1	-1.7	-2.2
fl_ceil	sc20	3.1	2.4	1.2	-0.8	-2.1	1.0	0.9
	sc40	1.7	2.4	0.3	-0.8	-0.7	1.0	-0.2
	sc60	2.6	3.8	-0.4	-0.7	-1.7	0.7	-0.8
	sc80	0.5	2.4	-1.1	-3.1	-1.1	-1.0	-1.7
fl_rear	sc20	4.3	2.5	3.2	-0.4	-0.5	1.3	-0.1
	sc40	2.8	4.5	0.7	-0.9	-2.3	0.3	-0.3
	sc60	-1.8	2.6	0.4	-0.9	-1.4	-0.5	-0.7
	sc80	0.3	1.2	-1.5	0.2	-0.6	-1.1	-1.5

D50

		125	250	500	1k	2k	4k	8k
uni	sc20	0.618	0.435	0.168	0.432	0.477	0.369	0.436
	sc40	0.762	0.523	0.363	0.541	0.521	0.476	0.596
	sc60	0.756	0.540	0.350	0.530	0.537	0.497	0.553
	sc80	0.774	0.554	0.455	0.450	0.550	0.464	0.507
fl_ceil	sc20	0.535	0.389	0.231	0.405	0.437	0.402	0.396
	sc40	0.691	0.548	0.357	0.531	0.590	0.480	0.505
	sc60	0.715	0.610	0.400	0.573	0.597	0.508	0.543
	sc80	0.754	0.581	0.535	0.562	0.579	0.519	0.522
fl_rear	sc20	0.584	0.437	0.268	0.415	0.491	0.439	0.401
	sc40	0.651	0.548	0.512	0.530	0.560	0.459	0.511
	sc60	0.610	0.524	0.471	0.567	0.536	0.473	0.498
	sc80	0.656	0.593	0.470	0.481	0.522	0.478	0.507

		125	250	500	1k	2k	4k	8k
uni	sc20	0.369	0.508	0.198	0.191	0.131	0.332	0.251
	sc40	0.397	0.528	0.284	0.199	0.168	0.299	0.257
	sc60	0.326	0.548	0.286	0.212	0.201	0.328	0.252
	sc80	0.448	0.456	0.281	0.233	0.164	0.216	0.211
fl_ceil	sc20	0.262	0.493	0.265	0.262	0.167	0.325	0.279
	sc40	0.276	0.533	0.309	0.274	0.257	0.324	0.294
	sc60	0.409	0.482	0.366	0.273	0.238	0.309	0.286
	sc80	0.418	0.418	0.273	0.212	0.240	0.296	0.256
fl_rear	sc20	0.408	0.487	0.281	0.258	0.186	0.317	0.269
	sc40	0.397	0.528	0.284	0.199	0.168	0.299	0.257
	sc60	0.337	0.466	0.349	0.273	0.193	0.307	0.284
	sc80	0.517	0.458	0.286	0.222	0.233	0.265	0.266

Ts [s]

		125	250	500	1k	2k	4k	8k
uni	sc20	0.106	0.115	0.147	0.103	0.105	0.103	0.106
	sc40	0.086	0.099	0.145	0.094	0.094	0.094	0.096
	sc60	0.086	0.114	0.126	0.101	0.093	0.101	0.090
	sc80	0.091	0.117	0.128	0.106	0.099	0.105	0.099
fl_ceil	sc20	0.016	0.133	0.161	0.125	0.130	0.127	0.123
	sc40	0.090	0.106	0.144	0.101	0.092	0.103	0.097
	sc60	0.090	0.099	0.124	0.097	0.087	0.096	0.093
	sc80	0.093	0.115	0.112	0.094	0.087	0.092	0.093
fl_rear	sc20	0.097	0.095	0.121	0.095	0.087	0.087	0.089
	sc40	0.088	0.091	0.103	0.084	0.082	0.088	0.082
	sc60	0.105	0.094	0.111	0.088	0.086	0.092	0.089
	sc80	0.097	0.115	0.109	0.095	0.094	0.098	0.091

		125	250	500	1k	2k	4k	8k
uni	sc20	0.095	0.099	0.105	0.123	0.135	0.112	0.115
	sc40	0.122	0.094	0.125	0.130	0.149	0.121	0.124
	sc60	0.125	0.108	0.139	0.147	0.150	0.138	0.142
	sc80	0.125	0.119	0.154	0.149	0.150	0.138	0.142
fl_ceil	sc20	0.126	0.113	0.132	0.151	0.169	0.137	0.140
	sc40	0.122	0.105	0.133	0.146	0.137	0.121	0.134
	sc60	0.116	0.097	0.140	0.135	0.149	0.119	0.132
	sc80	0.132	0.114	0.146	0.147	0.144	0.135	0.147
fl_rear	sc20	0.091	0.088	0.096	0.113	0.131	0.105	0.104
	sc40	0.122	0.094	0.125	0.130	0.149	0.121	0.124
	sc60	0.146	0.092	0.128	0.126	0.135	0.120	0.

解析 (6ch 同期加算)

受音点 1

G [dB]

Table with 9 columns (125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k) and 9 rows (uni, fl_ceil, fl_rear) containing G values in dB.

EDT [s]

Table with 9 columns (125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k) and 9 rows (uni, fl_ceil, fl_rear) containing EDT values in seconds.

T30 [s]

Table with 9 columns (125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k) and 9 rows (uni, fl_ceil, fl_rear) containing T30 values in seconds.

C80 [dB]

Table with 9 columns (125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k) and 9 rows (uni, fl_ceil, fl_rear) containing C80 values in dB.

D50

Table with 9 columns (125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k) and 9 rows (uni, fl_ceil, fl_rear) containing D50 values.

Ts [s]

Table with 9 columns (125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k) and 9 rows (uni, fl_ceil, fl_rear) containing Ts values in seconds.

LF

Table with 9 columns (125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k) and 9 rows (uni, fl_ceil, fl_rear) containing LF values.

LG [dB]

Table with 9 columns (125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k) and 9 rows (uni, fl_ceil, fl_rear) containing LG values in dB.

受音点 2

Table with 9 columns (125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k) and 9 rows (uni, fl_ceil, fl_rear) for 受音点 2.

Table with 9 columns (125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k) and 9 rows (uni, fl_ceil, fl_rear) for 受音点 2.

Table with 9 columns (125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k) and 9 rows (uni, fl_ceil, fl_rear) for 受音点 2.

Table with 9 columns (125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k) and 9 rows (uni, fl_ceil, fl_rear) for 受音点 2.

Table with 9 columns (125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k) and 9 rows (uni, fl_ceil, fl_rear) for 受音点 2.

Table with 9 columns (125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k) and 9 rows (uni, fl_ceil, fl_rear) for 受音点 2.

Table with 9 columns (125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k) and 9 rows (uni, fl_ceil, fl_rear) for 受音点 2.

Table with 9 columns (125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k) and 9 rows (uni, fl_ceil, fl_rear) for 受音点 2.

再現音場での実測

受音点 1

受音点 2

G [dB]

Table with columns: uni, fl_ceil, fl_rear, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k

Table with columns: uni, fl_ceil, fl_rear, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k

EDT [s]

Table with columns: uni, fl_ceil, fl_rear, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k

Table with columns: uni, fl_ceil, fl_rear, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k

T30 [s]

Table with columns: uni, fl_ceil, fl_rear, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k

Table with columns: uni, fl_ceil, fl_rear, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k

C80 [dB]

Table with columns: uni, fl_ceil, fl_rear, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k

Table with columns: uni, fl_ceil, fl_rear, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k

D50

Table with columns: uni, fl_ceil, fl_rear, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k

Table with columns: uni, fl_ceil, fl_rear, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k

Ts [s]

Table with columns: uni, fl_ceil, fl_rear, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k

Table with columns: uni, fl_ceil, fl_rear, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k

LF

Table with columns: uni, fl_ceil, fl_rear, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k

Table with columns: uni, fl_ceil, fl_rear, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k

LG [dB]

Table with columns: uni, fl_ceil, fl_rear, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k

Table with columns: uni, fl_ceil, fl_rear, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k

参考文献

- [1] 横山栄, シミュレーション音場を用いた環境騒音の主観評価に関する研究, 2003, 東京大学博士論文
- [2] 宮崎秀生等, ヤマハホールの音響設計—ASW に着目した側方反射音の制御—, 2010
- [3] 上杉崇, 多チャンネル音場再現システムを用いた音環境印象評価に関する研究—空間認知構造からみたシステムの再現性—, 東京大学修士論文
- [4] 李孝振, 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定法の構築, 東京大学修士論文
- [5] 羽生敏樹, 室内音響指標値, 日本音響学会誌 60 巻 2 号 (2004) pp72-77
- [6] ISO3382-1, Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 1: Performance spaces, 2009-06-15
- [7] 萬木智子, 旧東京音楽学校における室内音響特性の分析—建築的特徴及び改修の影響について—, 2009, 修士論文
- [8] User's Manual of CATT-Acoustic v8.0, CATT
- [9] 横田考俊等, FDTD 法による鳴竜現象の数値解析と可聴化, 日本建築学会環境系論文集, 2008
- [10] 横田考俊, 数値解析小委員会資料, 2010, 6, 1
- [11] Kanako Ueno, Experimental study on the evaluation of stage acoustics by musicians using a 6-channel sound simulation system
- [12] 佐久間哲哉等, 壁面音響反射の拡散性と室内音響特性,
- [13] 官能検査ハンドブック, 日科技連
- [14] 森本政之等, みかけの音源の幅と音に包まれた感じの差異, 1990, 日本音響学会誌 46 巻 6 号
- [15] 羽生敏樹, 反射音の空間バランスに着目した音に包まれた感じの定量化方法, 1996, 6, 日本建築学会計画系論文集, 第 520 号 9-16
- [16] Barron, M., Marshall, A. H., "Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls ; the derivation of a physical measure, "J.Sound and Vib. 77(2), 211-232, 1981
- [17] SMILE 2004 建築と環境のサウンドライブラリ, 日本建築学会編
- [18] Mike Barron Using the standard on objective measures for concert auditoria, ISO 3382, to give reliable result, Acoust. Sci. & Tech. 26, 2 (2005)
- [19] 前川純一等, 建築・環境音響学 (第 2 版), 共立出版株式会社
- [20] Michael Vorlander, Auralization, Springer

謝辞

本論文は、筆者が東京大学新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻佐久間研究室修士課程在学中に行った研究をまとめたものです。3年間、指導教員である佐久間哲哉准教授には研究テーマ決め方からものごとの考え方、資料の作り方まで丁寧に指導して下さいました。謹んで感謝の気持ちを申し上げます。

修士1年の時には安田洋介氏に様々なアドバイスを頂き、厳しさのなかにも優しさを持って指導していただきました。

副指導教官の神田順教授には、自分では気付かなかった問題を示唆していただき、有益なアドバイスを頂きました。副査の鯉淵幸生講師には有益かつ貴重なご意見を頂きました。

東大生研坂本研究室の横山栄氏には6チャンネルシステムの設定について、丁寧に指導していただきました。坂本先生をはじめ、坂本研究室の皆様には大変お世話になりました。

測定で残響室を使用させていただいた三井住友建設技術研究所の方々には大変お世話になりました。

忙しい時間の合間を縫って被験者実験に協力していただいた被験者の皆様には大変お世話になりました。

佐久間研究室の先輩である土屋裕造先輩、李孝振先輩、江田和司先輩、永井優花先輩はじめ先輩方、佐久間研究室OBで同期入学の安達公平君、杉原慎一郎君、村田義明君、共に研究活動や論文制作に取り組んだ芥川俊輔君、井上尚久君、楠井尚貴君、後輩の中島和博君、郭静さん、卒論生の入江田翔太君、外部研究生の竹下圭吾君とは日々生活を共にし、大変お世話になりました。

また、共に論文を執筆した社会文化環境学専攻の皆様、大変お世話になりました。

多くの方々のご助力に対して、深く感謝申し上げます。