

# 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

学籍番号 096773

氏名 三上 雄一郎 (Mikami, Yuichiro)

指導教員 佐久間 哲哉 准教授

## 1. はじめに

音響設計においては、音響数値シミュレーションの結果を実際に聞いてみる「可聴化」が求められる。実務の音響設計実務においては、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、幾つかの商用ソフトにおいて、壁面の境界条件として吸音率に加えて壁面の拡散に関する指標であり、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る乱反射率が導入され、解析精度を高める試みがされている。しかし、乱反射率が聴感印象に及ぼす影響についてはあまり検討されていない。

可聴化の手法である 6 チャンネル音場再現システムは、無響室において 3 次元音場を自然な聴感印象で再現することができ、これまでに様々な主観評価実験に用いられている。

本研究では、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、乱反射率と吸音面配置を変化させた解析音場を可聴化し、再現音場の再現性について物理的、聴感的に検討することを目的とする。

## 2. 6 チャンネル音場再現システム

### 2.1 概要

単一指向性（カージオイド）をもつ 6 本のマイクロホンで、直交 6 方向指向性インパルス応答を測定して、無響録音とたたみ込むことで室内音響特性を再現することができる。この原理を応用し、数値解析音場の受信点で、直交 6 方向重み付きインパルス応答を出力して、無響録音とたたみ込むことで室内音響特性を再現する。

### 2.2 システム設定

水平方向のスピーカー配置は、直交軸を正面から 45 度傾けた配置とした。中心からスピーカーの距離は 2170mm、スピーカー高さはツイーターの位置で床面から 1200mm である。再生スピーカーの周波数特性は 1/3 オクターブバンド

63Hz~20kHz 帯域で 1dB 以内にイコライジングした。

## 3. 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

幾何音響解析音場の受信点における直交 6 方向指向性重み付きインパルス応答を出力し、実時間たたみ込み機で無響録音音源とたたみ込んで音場再現を行った。Fig. 1 にシステム概要を示す。

### 3.2 幾何音響シミュレーションによる検討

商用ソフト CATT-Acoustics v8 を用いて解析を行った。境界条件として吸音率と乱反射率を変化させることができる。解析周波数は 1 オクターブバンド 125Hz~16kHz 帯域である。Table. 1 に解析条件、Fig. 2 に音源と受信点の位置関係を示す。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室を解析対象とし、音源は周波数特性が平坦な無指向性点音源とした。音源、受信点の高さは 1.2m である。全ての条件において平均吸音率は 0.3 である。乱反射率は全周波数帯域に等しく与えた。乱反射率を  $\alpha$  と表記する。音線数は  $1.0 \times 10^5$  本とした。

Table. 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

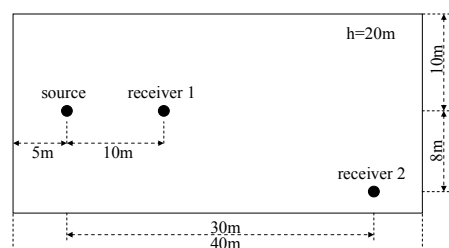


Fig. 2 音源と受信点の位置関係（平面図）

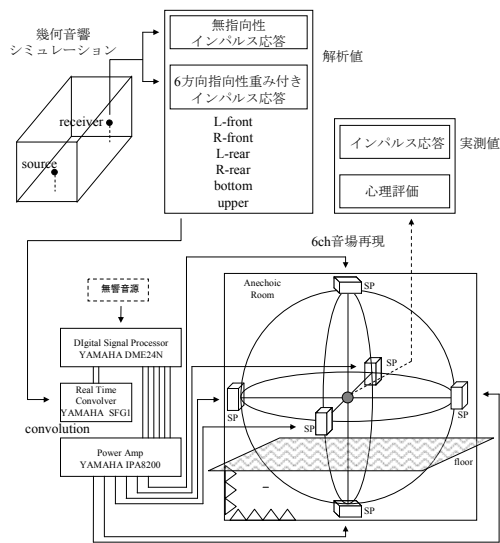


Fig. 1 幾何音響シミュレーションに基づく6チャンネル音場再現システム

#### 4. 物理的再現性について

解析音場の音響特性が、再現音場でどの程度反映されるのか検証する。

##### 4.1 解析値について

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の(6ch同期加算)が一致するか検証する。インパルス応答波形は、振幅の二乗値を1msの区間幅で加算したRMS波形を用いる。Fig. 3にuni\_sc20の波形を示す。上側が無指向性、下側が6ch同期加算である。両者の反射音構造に差異があることがわかる。

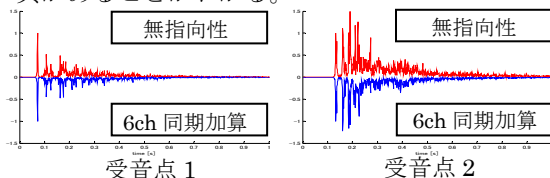


Fig. 3 RMS時間波形 (uni\_sc20, 1kHz)

##### 4.2 物理指標値による検討

無指向性と6ch同期加算のインパルス応答から算出した物理指標値の誤差について検証する。EDT、 $T_{30}$ は残響感に関する指標であり、減衰曲線から直線近似によって傾きをもとめ、60dB減衰に要する時間を算出する。EDTは初期の0~-10dBまでの区間で評価し、 $T_{30}$ は-5~-35dBで評価する。 $C_{80}$ はエネルギーの80ms $\sim$  $\infty$ 時間の積分に対する0~80msの積分の割合をdB表示する指標で楽音の明瞭度と対応する。各指標の弁別閾(JND)がISO3382-1により規定されており、EDTは5%、 $C_{80}$ は1dBである。 $T_{30}$ は規定されていないが一般的には5%であるため、この値を用いる。EDT、 $T_{30}$ については無指向性に

対する変化率を百分率で示し、 $C_{80}$ については差分で示す。ISOに従い、500Hz帯域と1kHz帯域の算術平均値を用いる。

Table. 2にEDT、 $T_{30}$ 、 $C_{80}$ の誤差を示す。濃い網掛の条件では誤差が弁別閾より小さく、薄い網掛の条件は誤差が弁別閾以上で弁別閾の2倍より小さい場合を意味する。これらは誤差が小さいことを示す。 $T_{30}$ は誤差が小さいが、EDTと $C_{80}$ は誤差が大きい。初期の減衰は異なり、後期の減衰は似ていることがわかる。

解析の無指向性と6ch同期加算のインパルス応答は異なっていると見える。

Table. 2 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				受音点2			
		sc20	sc40	sc60	sc80	sc20	sc40	sc60	sc80
EDT	uni	-7.2	-44.1	-35.9	-44.9	-33.1	-36.9	-24.0	-23.8
	fl ceil	-7.1	-44.0	-34.3	-38.9	-43.4	-36.3	-34.1	-33.3
	fl rear	-16.7	-41.2	-48.4	-42.7	-36.1	-48.2	-39.8	-20.4
$T_{30}$	uni	-19.0	-1.4	-1.4	2.1	-9.1	0.2	0.1	3.9
	fl ceil	-20.7	-2.8	-0.8	-0.0	-6.3	5.9	3.6	2.0
	fl rear	-16.9	-2.3	0.8	4.8	-7.9	-10.5	3.9	5.3
$C_{80}$	uni	0.5	3.1	3.1	4.3	2.4	4.6	5.6	4.2
	fl ceil	1.4	3.5	4.9	5.3	2.8	5.9	5.4	6.1
	fl rear	1.7	2.3	3.9	5.1	2.5	5.3	5.4	4.6

誤差 < JND  
JND ≤ 誤差 < JND × 2

##### 4.3 解析音場と再現音場の比較

解析音場の受音点における直交6方向指向性重み付きインパルス応答とTSP信号をたたみ込み、再現音場でインパルス応答を測定し、解析音場との関係について検討した。

###### 4.3.1 インパルス応答測定

Lin-TSP信号を用いた。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回である。

###### 4.3.2 インパルス応答波形の比較

Fig. 4にuni\_sc20の受音点1の500Hz帯域から4kHz帯域のRMS波形を示す。グラフの上側が解析(6ch同期加算)、下側が実測である。2kHz以下の帯域で両者は良い対応を示すが、4kHz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。

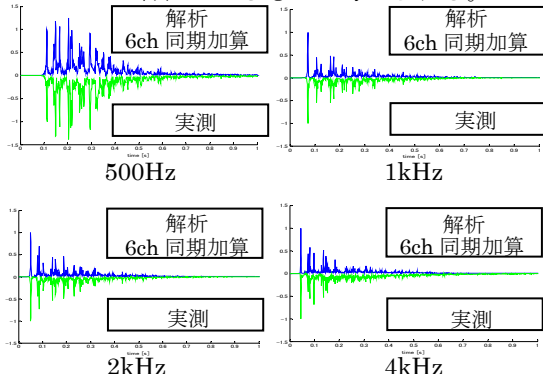


Fig. 4 RMS時間波形 (uni\_sc20, 受音点1)

### 4.3.3 音響物理指標による検討

4.2と同様に解析(6ch同期加算)と実測の物理指標の誤差を比較する。Table. 3にEDT, T<sub>30</sub>, C<sub>80</sub>の誤差を示す。EDT, T<sub>30</sub>は変化率、C<sub>80</sub>は差で表す。各条件の500Hz帯域と1kHz帯域の算術平均値とuniの周波数帯域値を示す。

500Hz帯域と1kHz帯域の算術平均値について、T<sub>30</sub>とC<sub>80</sub>で全体的に誤差が小さくなっている。

周波数帯域ごとに誤差をみると、T<sub>30</sub>はどの周波数帯域でも誤差が小さい。EDT, C<sub>80</sub>をみると、4kHz帯域以上では誤差が弁別閾より小さいものではなく、再現性が良くないといえる。

再現音場は6つのスピーカー出力の同期加算とみなすことができ、解析(6ch同期加算)との対応がよいため、解析(6ch同期加算)を解析値として扱う。

Table. 3 解析(6ch同期加算)に対する再現音場の物理指標の誤差と弁別閾の関係  
500Hzと1kHzの算術平均値

		受音点1				受音点2			
		sc20	sc40	sc60	sc80	sc20	sc40	sc60	sc80
EDT	uni	3.4	24.2	20.9	25.8	2.1	10.2	3.0	-9.1
	fl_cceil	-1.1	17.0	32.3	37.9	-1.0	26.8	5.7	12.4
	fl_rear	0.9	4.5	22.9	26.6	5.6	2.9	13.7	10.5
T <sub>30</sub>	uni	7.4	0.9	3.1	2.3	5.7	1.5	2.5	-0.2
	fl_cceil	4.4	5.0	1.5	2.5	-0.3	1.2	2.3	1.2
	fl_rear	7.2	2.8	1.2	-0.7	3.3	4.0	2.8	-1.0
C <sub>80</sub>	uni	-1.0	-1.3	-1.3	-1.8	-0.4	-0.6	-0.9	-1.4
	fl_cceil	-1.1	-1.3	-1.4	-1.9	-0.3	-1.0	-0.6	-0.8
	fl_rear	-0.8	-1.1	-1.1	-1.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.5

### 周波数帯域値

		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
		EDT	sc20	26.8	13.2	0.6	6.0	4.3
	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
T <sub>30</sub>	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
C <sub>80</sub>	sc20	-1.2	-1.0	-0.9	-1.1	-1.4	-2.8	-4.3
	sc40	-0.7	-0.9	-1.0	-1.5	-1.9	-5.3	-6.7
	sc60	-2.2	-1.7	-1.0	-1.5	-2.3	-6.7	-8.5
	sc80	-2.2	-1.8	-2.0	-1.5	-2.9	-6.6	-8.6

誤差 < JND  
JND ≤ 誤差 < JND × 2

## 5 聴感印象評価

再現音場において被験者による聴感印象評価実験を行い、乱反射率と吸音面配置が聴感印象に及ぼす影響に着目して、シェッフエの一対比較法(浦の変法)により2つの実験を行った。

### 5.1 聴感印象評価実験

#### 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乱反射率の条件が違う刺激対を被験者に呈示し、乱反射率の主効果を調べた。

#### 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吸音面配置の条件が違う刺激対を被験者に呈示し、吸音面配置の主効果を調べた。

それぞれ、順序効果を考慮し、刺激の順序を逆にした刺激対についても評価した。刺激対の

数は実験1が72対、実験2が48対である。実験1、実験2とも受音点ごとに実験を行い、受音点における全刺激対を混ぜてランダムに呈示した。実験と実験の間には十分な休憩をとった。

#### 5.1.1 使用音源

各条件の6方向インパルス応答に、ショパン作曲「幻想即興曲」の無響室録音冒頭13秒間をたたみ込んだものを刺激とした。

#### 5.1.2 被験者

20才代の学生11名である。

#### 5.1.3 評価方法

被験者は各刺激対に対して、前の刺激に対する後の刺激の各評価項目を7段階で判断し、回答用紙に記入した。Table. 4に5つの評価項目を示す。ここにある、みかけの音源の幅(ASW)と音に包まれた感じ(LEV)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。

Table. 4 評価項目

非常に	かなり	少し	同じ	少し	かなり	非常に
音が大きい			音の大きさ		音が小さい	
響きが長い			響きの長さ		響きが短い	
はっきりした			音の明瞭性		はっきりしない	
みかけの音源の幅が大きい			みかけの音源の幅(ASW)		みかけの音源の幅が小さい	
音に包まれた感じがある			音に包まれた感じ(LEV)		音に包まれた感じがない	

## 5.2 各条件が音場に及ぼす影響

### 乱反射率による影響

Fig. 5に吸音面配置ごとの残響減衰曲線を示す。乱反射率が低いほど減衰が少なくなっている。sc20の条件は初期の減衰が他の条件と異なる傾向となっている。吸音面配置がfl\_cceilの条件は、乱反射率による影響が大きい。

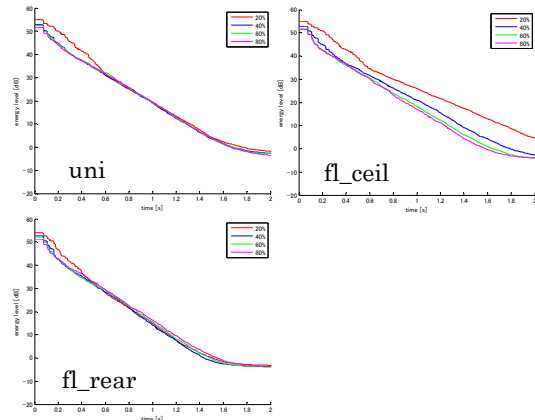


Fig. 5 残響減衰曲線(受音点1、1kHz)

### 吸音面配置による影響

Fig. 6に乱反射率条件ごとの残響減衰曲線を示す。uniはfl\_rearより減衰が少ない。fl\_cceilは乱反射率40%以下では最も減衰が少ないが、60%でuniとほぼ同じになり、80%ではuniとfl\_cceilの間になる。

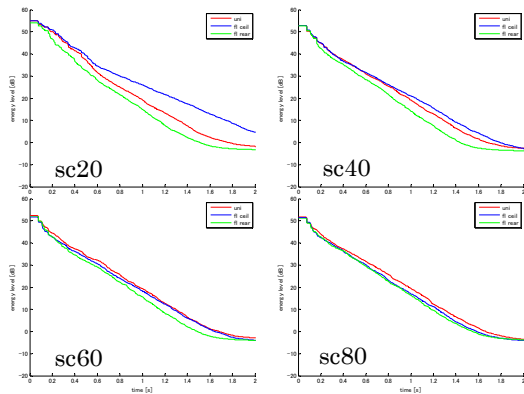


Fig. 6 残響減衰曲線 (受音点 1, 1kHz)

### 5.3 聴感評価実験の結果

実験 1 は乱反射率の主効果、実験 2 は吸音面配置の主効果について、乱反射率条件ごとに、各評価項目での主効果、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 (有意水準 5%) を行った。Table. 5 に各条件間の実測の物理指標の変化量と聴感印象評価の結果を示す。物理指標の変化量が弁別閾以上、または聴感印象に有意差がある場合を不等号で示し、そうでない場合を等号で示している。A/B において、A が B より大きければ「>」、B が A より大きければ「<」、そうでなければ「=」で示している。物理指標の不等号の右の数字は、変化量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 倍である。

聴感印象評価について、uni の条件では有意差が出た項目が少なく、fl\_ceil の条件では多くの項目で有意差がある。明瞭性に関しては、あまり有意差が出なかった。

### 5.4 物理指標と聴感印象評価の対応関係

再現音場の各条件間での物理指標の変化量と、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。G は受音点の応答を自由音場の音源から 10m 点で測定した応答で基準化したものである。LF, LG は次の式により算出する。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。LF の弁別閾は 0.05、LG は 1dB とする。

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

$p(t)$ : 受音点における無指向性インパルス応答

$p_{10m}(t)$ : 自由空間において音源より 10m の距離で測定した応答

$p_L(t)$ : 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

Table. 5 において、物理指標と聴感評価が対応している場合は橙の網掛、逆の対応をしているものは青の網掛、どちらでもないものは網掛無しで示している。

音響特性とまったく逆の聴感評価になった条件間は少ないが、必ずしも物理指標と対応する聴感評価にはなっておらず、物理指標と聴感印象評価が一致する割合は、40%から 70%である。物理指標の変化量が弁別閾を大きく超えても、聴感印象評価では有意差がない場合も多い。

Table. 5 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

#### 実験 1 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
		G	大きさ	EDT	響き	T <sub>60</sub>	響き	C <sub>80</sub>	明瞭性	LF	ASW	LG	LEV
uni	sc20/sc40	>3	>	>2	=	<4	=	<4	=	=	=	=	=
	sc20/sc60	>3	>	>	=	<4	=	<5	=	=	=	=	=
	sc20/sc80	>3	>	>	=	<5	=	<5	=	=	=	=	=
	sc40/sc60	=	=	<2	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	sc40/sc80	=	=	<2	=	=	=	=	=	=	=	=	=
fl_ceil	sc20/sc40	>2	>	>1	>	>	>	<4	<	=	>	>	>
	sc20/sc60	>4	>	>6	>	>2	>	<6	<	=	>	>2	>
	sc20/sc80	>4	>	>7	>	>2	>	<7	<	=	>	>2	>
	sc40/sc60	>	=	>3	>	=	=	<3	=	=	=	=	=
	sc40/sc80	>	=	>3	>	>	>	<3	=	=	=	=	=
fl_rear	sc20/sc40	>2	=	>3	>	<3	>	<3	=	=	=	=	>
	sc20/sc60	>3	=	=	=	<4	=	<4	=	=	=	=	>
	sc20/sc80	>3	=	=	=	<4	=	<4	=	=	=	=	>
	sc40/sc60	>3	=	<4	=	<4	=	<4	=	=	=	=	>
	sc40/sc80	=	=	<4	=	<4	=	<4	=	=	=	=	>

#### 実験 1 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
		G	大きさ	EDT	響き	T <sub>60</sub>	響き	C <sub>80</sub>	明瞭性	LF	ASW	LG	LEV
uni	sc20/sc40	>2	=	<3	=	<	=	=	=	=	=	=	=
	sc20/sc60	>3	=	<3	=	<	=	=	=	=	=	=	=
	sc20/sc80	>4	=	<13	=	<	=	=	=	=	=	=	=
	sc40/sc60	>	=	<4	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	sc40/sc80	>2	=	<4	=	=	=	>2	=	=	=	=	=
fl_ceil	sc20/sc40	>2	=	>	>	>2	>	<	=	=	>	>	>
	sc20/sc60	>3	=	<3	>	>4	>	<	=	=	=	=	>
	sc20/sc80	>3	=	<3	=	>4	=	=	=	=	=	=	>
	sc40/sc60	>	=	<4	=	=	=	=	=	=	=	=	>
	sc40/sc80	>	=	<4	=	>2	=	=	=	=	=	=	>
fl_rear	sc20/sc40	>2	=	=	=	=	=	<	=	=	=	=	>
	sc20/sc60	>3	=	<3	=	<	=	<	=	=	=	=	>
	sc20/sc80	>5	>	<14	=	<	=	<	=	=	=	=	>
	sc40/sc60	>	=	<8	=	=	=	=	=	=	=	=	>
	sc40/sc80	>2	>	<14	=	=	=	=	=	=	=	=	>

#### 実験 2 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
		G	大きさ	EDT	響き	T <sub>60</sub>	響き	C <sub>80</sub>	明瞭性	LF	ASW	LG	LEV
sc20	uni/fl_ceil	=	=	<2	=	<8	=	=	=	=	=	=	=
	uni/fl_rear	=	>	>5	>	>	>	<2	=	=	>	>	>
sc40	fl_ceil/fl_rear	=	>	>6	>	>6	>	<	=	=	>	>	>
	uni/fl_rear	=	>	>5	>	>	>	<	=	=	>	>	>
sc60	fl_ceil/fl_rear	=	>	>6	>	>1	>	<	=	=	=	=	>
	uni/fl_rear	=	>	>4	=	>	>	<2	=	=	=	=	>
sc80	fl_ceil/fl_rear	=	>	>4	=	>	>	<2	=	=	=	=	>2
	uni/fl_rear	=	>	>4	=	>	>	<	=	=	=	=	>

#### 実験 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
		G	大きさ	EDT	響き	T <sub>60</sub>	響き	C <sub>80</sub>	明瞭性	LF	ASW	LG	LEV
sc20	uni/fl_ceil	>	=	<4	=	<8	=	=	=	=	=	=	=
	fl_ceil/fl_rear	>	>	>2	=	>	=	=	=	=	=	=	>
sc40	uni/fl_rear	=	=	>5	>	>6	=	=	=	=	=	=	>
	fl_ceil/fl_rear	>	>	>4	>	>	=	=	=	=	=	=	>2
sc60	uni/fl_rear	=	=	>4	=	>	=	=	=	=	=	=	>
	fl_ceil/fl_rear	=	>	>4	=	>3	=	=	=	=	=	=	>
sc80	uni/fl_rear	=	=	=	=	=	=	<	=	=	=	=	=
	fl_ceil/fl_rear	>	>	>2	>	>	>	<	=	=	=	=	>

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

## 6. 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。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検証していく必要がある。

### 参考文献

[1] 横山栄, 東京大学博士論文, 2003