

### 1. まえがき

コンサートホールなどの音響空間を再現する際、音響空間を部屋の音源から受音点までの伝送系と考えた場合、そのインパルス応答特性が重要になる。現在室内音響再現において重要な物理量であるインパルス応答の、高速で信頼性の高いモデル化手法は種々提案されている。しかし生成されたインパルス応答の精度や妥当性の判断は難しく、残響時間周波数特性を算出し、それぞれ比較する方法がある程度である。

本研究の目的は、聴感的印象と対応するインパルス応答の物理評価手法の構築である。本研究ではシミュレーションから求めた共通のインパルス応答を用い、聴感的印象と物理評価との対応関係を検討する。

### 2. インパルス応答の物理・心理評価手法

本研究の概略を Fig.1 に示す。

#### 2-1. インパルス応答生成

Vorlander[1] が提案した音線追跡法と虚像法を融合した幾何音響シミュレーションを用い、63Hz~8kHz の 8 つのオクターブバンドごとに分割、再合成することによって、広帯域のインパルス応答を生成した。

周波数の低音域 (63~500Hz)、中音域 (500~1000Hz)、高音域 (1000~8000Hz) の残響時間を制御するために、周波数ごとに壁の吸音率 [2] の設定を変更して幾何音響シミュレーションを行った。基本となる残響時間は 1.5 秒に設定し、Fig.2 のように低音域を 3 パター

ン、中音域を 1 パターン、高音域を 3 パターンの残響時間の組み合わせで、各受音点ごとに a から g までの合計 9 パターンのインパルス応答をシミュレートし生成した。

シミュレーションに用いた部屋の平面形状を Fig.3 に示す (室容積  $8992.5m^3$ 、面積  $2630m^2$ 、部屋の高さ  $15m$ 、座標はすべて  $m$  単位)。音源を Fig.3 の S に設置し、受音点は音源に近い位置 R1(残響半径内) と音源から遠い位置 R2(残響半径外) の 2 点に設定した。Fig.4(a) に受音点 R1、また (b) に受音点 R2 における、a から g までのインパルス応答の残響時間周波数特性を示す。太線はシミュレーションで設定した残響時間周波数特性、点線は実際に生成されたインパルス応答の残響時間周波数特性を示す。Fig.4 において a から c に向かって高音域の残響時間周波数特性が変

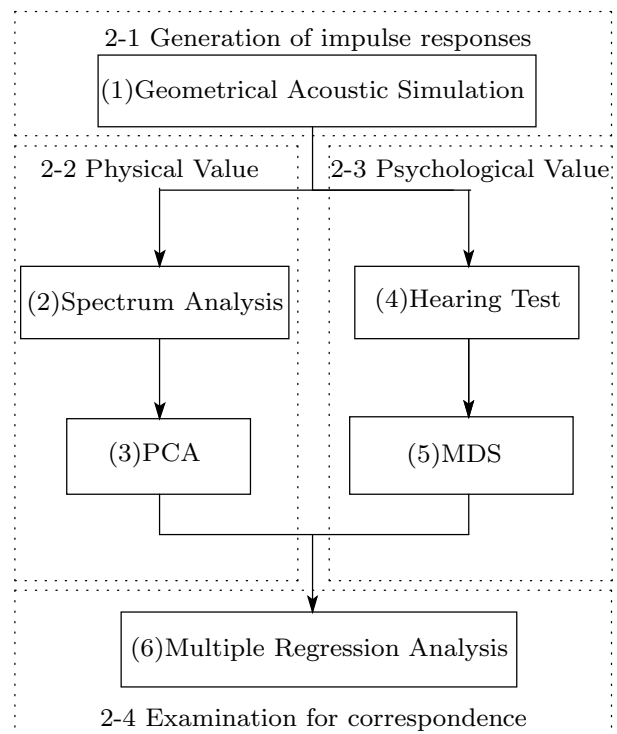


Fig.1 Flow diagram for correspondence between physical and psychological value

\*Physical and Psychological Evaluation of Room Acoustic Impulse Responses.  
By Shinya Taoki, Takashi Nishi (The University of Kitakyushu)

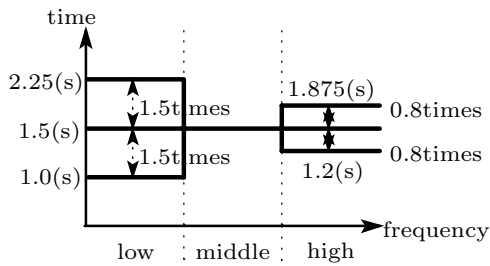


Fig.2 Setting parameter for simulation

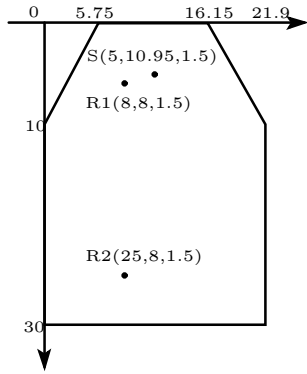


Fig.3 Flat type of room used by simulation(stage)

化し、一方 a から g に向かって低音域の残響時間周波数特性が変化している。また (a)R1 で a,b,c の低音域の残響時間がのびていないのは、音源と受信点が近いこと拡散音場ではないことに起因していると考えられる。

Fig.1 の流れに即して、各処理内容を以下に示す。

## 2-2. 物理評価

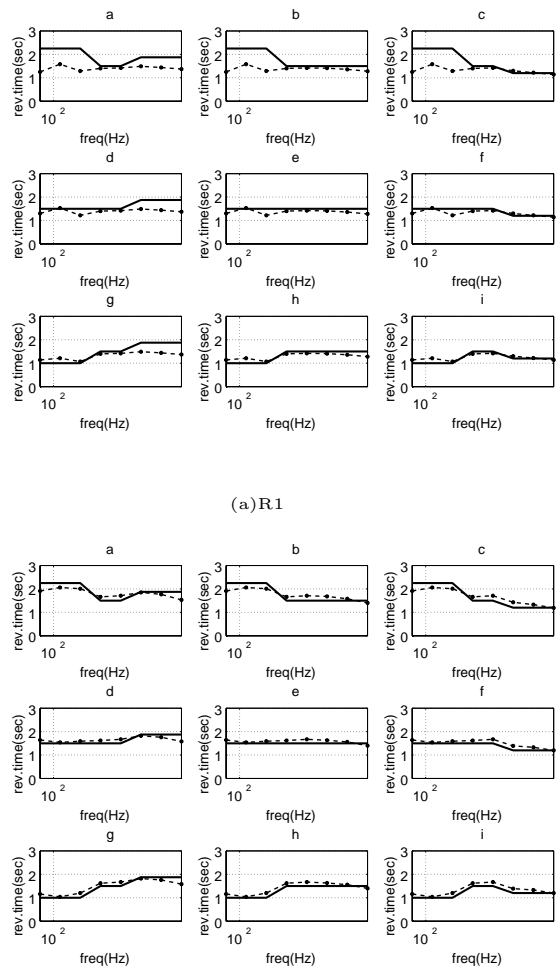
- (2) インパルス応答それぞれをスペクトル解析 (STFT) し、時間-周波数表示のスペクトログラムで表示する。
- (3) スペクトログラムを 9 パターンの画像として、主成分分析する。

## 2-3. 心理評価

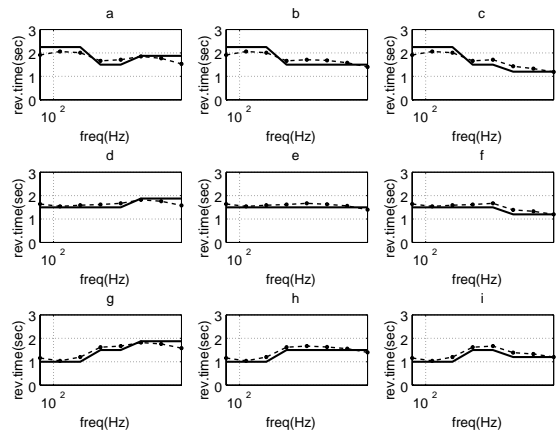
- (4) 無響室音源とインパルス応答を畳み込み、聴覚上の類似度を評価する。
- (5) 多次元尺度構成法を用いて、心理空間の布置を求める。

## 2-4. 物理・心理評価結果の対応

- (6) 主成分分析で求めた軸を使い、重回帰分析



(a) R1



(b) R2

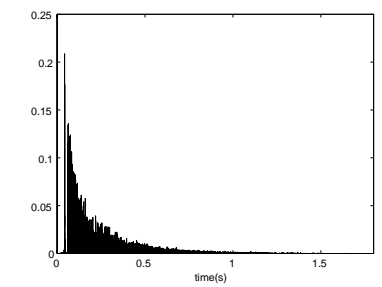
Fig.4 Reverberation time for frequency characteristic

で心理空間の軸との対応を検討する。

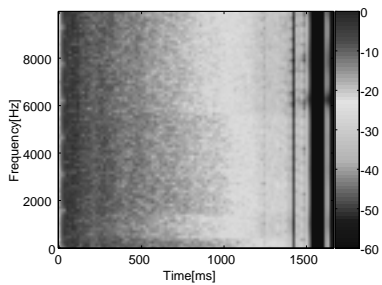
## 3. 物理評価実験

### 3-1. スペクトル解析

インパルス応答信号を切り出すための窓関数として、ハミング窓を用いた。切り出すフレームの長さは 30ms、シフト幅は 10ms とした。STFT(Short Time Fourier Transform : 短時間フーリエ変換)[3] を用いて、生成したインパルス応答をそれぞれ時間-周波数表示のスペクトログラムで表した。また得られた周波数スペクトルは dB 単位とし、それぞれの値をスペクトルの最大値で正規化し、-60dB が最小になるように表示した。Fig.5 にインパルス応答 a(受信点 R2) の、時間波形 (a)、スペ



(a) Waveform of impulse response



(b) Spectrogram

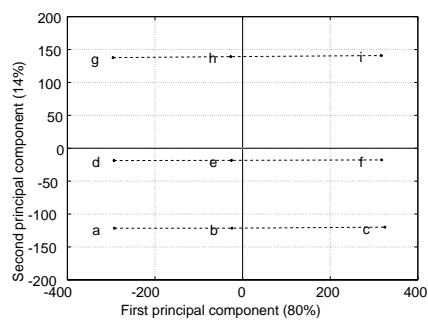
Fig.5 Impulse response pattern a (R2)

クトログラム (b) の例を示す。

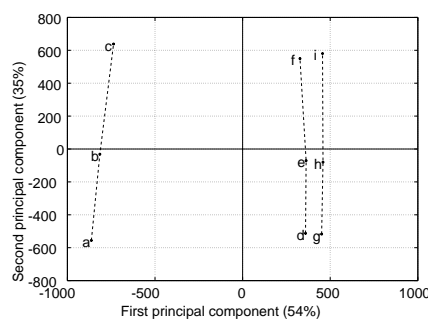
### 3-2. 主成分分析

主成分分析は多変量から、重要な少量の変量を合成する分析法であり、顔画像認識などの分野で応用されている [4]。

受音点ごとに、9 パターンのインパルス応答のスペクトログラムをそれぞれ一枚の画像として扱い、主成分分析を行った。Fig.6(a) に受音点 R1 の場合、(b) に受音点 R2 の場合の 2 つの主成分における主成分分析の結果を示す。2 つの主成分で R1、R2 それぞれ 94 %、89 % の累積寄与率であった (R1 : 第 1 主成分 80 %、第 2 主成分 14 %、R2 : 第 1 主成分 54 %、第 2 主成分 35 %)。Fig.6 では高音域だけ設定が違うもの同士を点線で表示した。これにより (a)R1 の場合、第 1 主成分は高音域の変化、第 2 主成分は低音域の変化、(b)R2 の場合は第 1 主成分は低音域の変化、第 2 主成分は高音域の変化と相関が高い。(b)R2 においては低音域の残響時間が長い a,b,c のインパルス応答が、他のインパルス応答 (d~i) からはなれて分布している。



(a) R1



(b) R2

Fig.6 Principal component analysis of nine impulse response spectrograms

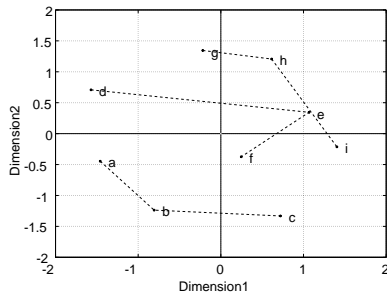
## 4. 心理評価実験

### 4-1. 実験条件

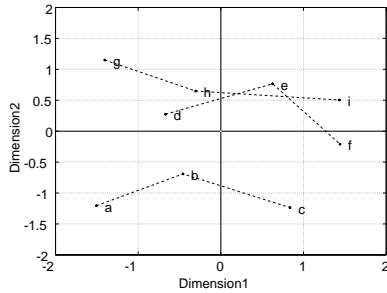
生成インパルス応答同士の聴覚上の違いを評価するため、心理評価実験を行った。評価法は A、B の 2 つの音を聞いて、類似度を 1(全く同じ) から 5(全く異なる) の数値で評価する方法を採用した。被験者には、受音点ごとに a から g の 9 種類のインパルス応答すべてのペアの組み合わせで類似度を評価させた。残響の有無、響きの音質の違いを評価しやすいことを考慮し、評価用音源として無響室録音の女性スピーチ (約 5 秒) を用いた。実験は 20 歳代の正常な聴覚を有する 11 名で、ヘッドフォン再生で行った。あらかじめ評価しやすい音を使って十分訓練した後、本実験を行った。同一条件における提示回数を 2 回とした。受音点 : R1、R2 の 2 種類、生成条件 : 残響時間周波数特性のパターンが 9 種類である。

### 4-2. 実験結果

心理評価実験結果をもとにして多次元尺



(a)R1



(b)R2

Fig.7 Multidimensional scaling based on hearing test

度構成法 [5](以下 MDS と略す) を使って心理空間の布置を求めた。受音点 R1 の場合を Fig.7(a) に、受音点 R2 の場合を (b) に示す。次元数はどちらも 2 と設定し、またストレスはそれぞれ 0.115、0.116 であった。

### 5. 物理・心理評価結果の対応

MDS で得られた心理空間の軸を解釈するため、スペクトログラム画像を主成分分析した結果を用いて重回帰分析 [3] した。Table.1 に重回帰分析で得られた心理空間の軸の重相関係数を示す。重相関係数は R1 の場合、MDS の次元 1 が 0.861、次元 2 が 0.931、R2 の場合、次元 1 が 0.956、次元 2 が 0.936 と非常に高い値となった。Fig.6 と Fig.7 を視覚的に見て、受音点 R1 の場合、第 1 主成分-次元 1、第 2 主成分-次元 2、受音点 R2 の場合、第 1 主成分-次元 2、第 2 主成分-次元 1 の相関が高いと判断できる。

### 6. むすび

本研究では残響時間周波数特性を 9 パター

Table.1 Multiple correlation coefficient

		Two principal component	
		R1	R2
MDS	Dim1	0.861	0.956
	Dim2	0.931	0.936

ン設定し、幾何音響シミュレーションでそれぞれのインパルス応答を生成した。それらのインパルス応答をスペクトログラムで表示し、スペクトログラム画像を主成分分析して物理量を求めた。また同じインパルス応答による音声を用いた心理評価を行い、多次元尺度構成法で構成した聴感的印象の類似度 (心理量) を求めた。

また重回帰分析で物理評価、心理評価間の対応を検討した。その結果、受音点 R1、R2 の場合ともに、MDS の次元 1 は残響時間周波数特性の高音域の変化、次元 2 は低音域の変化との相関が高いことがわかった。

今後さらに心理評価と相関の高い、信頼性ある物理評価手法を提案する方針である。

### 文献

- [1] M. Vorlander, Simulation of the transient and steady state sound propagation in rooms using new combined raytracing / image-source algorithm. J. Acoust. Soc. Am., 86(1), 172-178, 1989
- [2] ハインリッヒ・クットルフ, 室内音響学 建築の響きとその理論, 市ヶ谷出版社, 2003
- [3] ジェームズ・H・マクレラン, MATLAB による DSP 入門, 株式会社ピアソン・エデュケーション, 2000
- [4] 涌井良幸, 図解でわかる多変量解析, 日本実業出版社, 2001
- [5] 高根芳雄, 人間科学の統計学 1 多次元尺度法, 朝倉書店, 1980