

TR-S-0016

TSP 信号を用いた室内音響特性の測定  
Measurement of room acoustic characteristics  
by Time Stretched Pulse

青木 淳  
Jun Aoki

水町 光徳  
Mitsunori Mizumachi

2001.2.23

音響インパルス応答は、残響時間や周波数伝達特性等を導出する為の重要な物理量である。一般に、インパルス応答は測定方法や測定位置によって異なることが知られている。そこで、TSP法を用いてインパルス応答を測定し、その違いを残響時間を比較することにより定量的に調べた。

©2001 ATR 音声言語通信研究所

©2001 by ATR Spoken Language Translation Research Laboratories

## 1 目的

音響インパルス応答は、残響時間や周波数伝達特性などを導出する為の重要な物理量である。一般に、インパルス応答は測定方法や測定位置によって異なることが知られている。しかし、目視しただけではどの程度異なるのかわからない場合がある。そこで、室内インパルス応答を短時間で高い SN 比のインパルス応答を得ることができる TSP 法を用いて測定し、インパルス応答から得られる音響パラメータの 1 つである残響時間を比較することによりインパルス応答の変化を定量的に調べる。

## 2 理論

### 2.1 TSP と TSP 法

音響系の伝達関数は、一般にダイナミックレンジが広く、インパルス応答が長いという特徴を持っている。ある系のインパルス応答を求めるには、持続時間が長くその時間中心が標本時刻に一致するようなパルスを用いて測定を行えば良いが、このようなパルスは波高の割にエネルギーが小さく、S/N の良い測定を行うために極めて多くの同期加算が必要となる [3]。

青島 [1] によって提案され、鈴木ら [4] によって最適化された TSP (Time Stretched Pulse) と呼ばれる信号はこれらの問題に対して非常に有効な信号である。TSP は、インパルスの位相を周波数の 2 乗に比例して変化させることにより時間軸を引き伸ばした信号であり、インパルスに比べてエネルギーが非常に大きく S/N の高い測定ができる。また、TSP には S/N が高いために広帯域の応答をまとめて測定でき、各帯域の応答を一度の測定で求められるという利点もある [3]。TSP は、

$$H(k) = \begin{cases} a_0 \exp(j4\pi mk^2/N^2) & (0 \leq k \leq N/2) \\ H^*(N-k) & (N/2 < k < N) \end{cases} \quad (1)$$

$$G(k) = 1/H(k) \quad (2)$$

を逆フーリエ変換して得られる信号  $h(n)$  であり、TSP 逆フィルターは  $g(n)$  で示される。ここで、 $a_0$  は TSP の振幅を、 $m$  は TSP stretch を、 $N$  は TSP 長をそれぞれ表している。 $m$  はパルスの幅を決める整数のパラメータであり、これが大きければパルスの幅が広がる。今回の実験では  $a_0$  は  $a_0=30000$  で一定の値とした。

TSP 法は系のインパルス応答を、TSP に対する系の応答 (TSP 応答) を TSP 逆フィルターと畳み込むことにより求める方法であり、長い TSP を用いればたった 1 回の測定で十分 S/N を確保したインパルス応答の計算が可能である。畳み込みには直線状畳み込み (Linear Convolution) と円状畳み込み (Circular Convolution) の 2 種類のやり方がある [2]。なお、以下の説明においての都合上  $N=2^P$  として  $P$  を定義し、TSP の長さの目安とする。

図 1,2 に式 (1),(2) から  $N=4096, m=1200$  で設計した TSP と ITSP を示す。なお、これらの図は  $N/2-m$  の円状シフトを行ってある。これは、式 (1) で設計した TSP は周波数の一番低い部分の続きが円状シフトにより前に回り込んでしまうからである。このままの TSP を測定に用いると TSP の先頭部分が不連続になり、測定誤差を生じてしまう。そこで、式 (1),(2) の TSP と ITSP を直線状畳み込みした時の誤差が最小になるような円状シフトを行うことが必要となる。最適な円状シフト量として、 $N/2-m$  だけ前にシフトさせればよいことが知られている [4]。

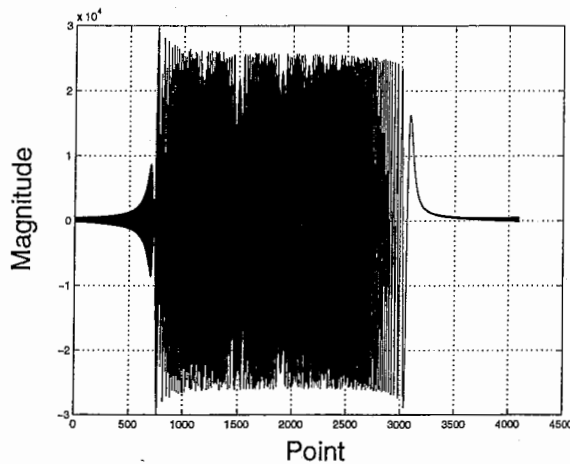


図 1: TSP 時間波形

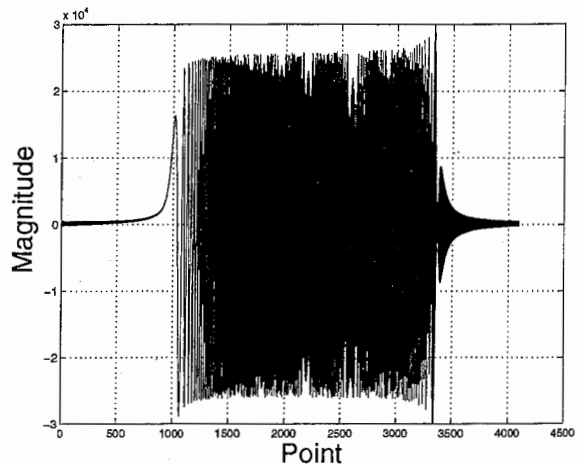


図 2: ITSP 時間波形

## 2.2 残響時間と残響時間測定法

残響時間は、音が部屋に定常的に行き渡った状態で音を途切らせた時から音圧レベルが  $-60[\text{dB}]$  に減衰するまでの時間として JIS で定義されている。測定法としては、バンドノイズ音源を用いたノイズ断続法があるが、 $60[\text{dB}]$  の音圧レベル差が必要なことによる SN 比の問題や測定回数による処理時間や周波数分析の面からパルス音源を用いたインパルス積分法が良く用いられている。

インパルス応答が十分な精度で記録、保存されていれば周波数帯域別の残響波形を計算できる。残響波形の集合平均  $\langle S^2(t) \rangle$  が、インパルス応答  $h(t)$  の自乗積分を用いて次式のように表されることが Schroeder によって示されている。

$$\begin{aligned} \langle S^2(t) \rangle &= \int_t^{\infty} h^2(t) dt \\ &= \int_0^{\infty} h^2(t) dt - \int_0^t h^2(t) dt \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 式の右辺第一項はインパルス応答全体のエネルギーを、第二項が一番始めの時刻から各時刻までにおけるインパルス応答のエネルギーを示している。(3) 式の左辺を対数表示し、各時刻の値から一番始めの時刻の値を減算した値をグラフにすると残響波形が描ける(一番始めの時刻の値が  $0[\text{dB}]$  となる)。その波形が  $-60[\text{dB}]$  減衰した時間から残響時間を求められる。しかし、波形自体が  $-60[\text{dB}]$  減衰するには時間がかかりすぎるため、波形に最小自乗直線を当てはめてその傾きと  $-60[\text{dB}]$  の値から計算で残響時間を求める。

今回の実験ではこのインパルス積分法を用いて残響時間を求めることにする。しかし、本来は無指向性の音源スピーカーを用いて無指向性のマイクロホンで収録したものからインパルス応答を求めるべきであるが、測定機器の都合上、今回は単一指向性のスピーカーで無指向性のマイクロホンを用いて測定する。そのため、室内のスピーカー、マイクロホン間の伝達特性から求めたインパルス応答における残響時間を求めることになるが、本実験ではこれを残響時間と呼ぶことにする。

また、残響時間は JIS に定義されたもの(ノイズ断続法でバンドノイズを用いて求めた残響時間)を真の値として使われることが多く、今回の実験でもその値に対する比較検討を行いたかったが、今回使用した実験室ではその方法での測定はされておらず比較することができないため、今回の実験では測定方法及び測定位置の違いにより、どの程度残響時間に差が出るのかを調べることにする。

### 2.3 直線状畳み込みと円状畳み込み

畳み込みには直線状畳み込みと円状畳み込みがある。2つの信号  $h(n)$  と  $g(n)$  を畳み込むことにより  $x(n)$  を求める場合を考える。

直線状畳み込みは、 $h(n)$  を反転させた上で直線状にシフトさせ、これを  $g(n)$  と重ね合わせた上で重なっている点の値同士を掛け合わせて足し合わせることにより  $x(n)$  のある1点が求まる。次の点は一標本分シフトさせて再び計算し、 $h(n)$  と  $g(n)$  が重なり合わなくなったら値は0になる、というような演算方法である。

一方、円状畳み込みは、 $h(n)$  と  $g(n)$  の長さ  $N$  と同じ円周をもつお茶筒を用意して、まず  $g(n)$  をぐるりと巻き付ける。次に、 $h(n)$  を反転させた上でシフトする分だけぐるっと回転させて  $g(n)$  の上に巻き付ける。その上で、重なっている点の値同士を掛け合わせて足し合わせることにより  $x(n)$  のある1点が求まる。次の点は一標本分回転させて計算してこれを1回繰り返せば計算終了となる、というような演算方法である。

#### 2.3.1 円状畳み込みを用いた TSP 法

円状畳み込みの利点は、TSP 応答長  $L$  は TSP 長  $N$  と等しく、計ろうとするインパルス応答長  $I$  に対して  $L > I$  であればよいことである(直線状畳み込みの場合  $L > N + I - 1$  必要)。これはデータを取り込むのに必要なメモリの節約になり、計測時間も短くなることを示している。また、計測時間が同じ場合には直線状畳み込みに比べて TSP stretch  $m$  を長く取れるため  $S/N$  が向上することも利点である。

欠点としては、あらかじめ測定系のインパルス応答長  $I$  を知っておく必要があることである。直線状畳み込みの場合には TSP の出力間隔をある程度余裕を持って取っておけばインパルス応答が切れてしまうことはあっても時間軸でのインパルス応答の尻尾が先頭に回り込む aliasing が発生することはない。しかし、円状畳み込みの場合には連続して TSP を出力するため、TSP 長  $N$  がインパルス応答長  $I$  よりも短いと aliasing が生じてしまう。

測定の仕方としては、まず直線状畳み込み(方法は2.3.2で述べる)を行ってその結果からインパルス応答長を推測した上で  $N > I$  となる TSP を用意し、TSP を同期加算回数  $K$  だけ間隔を空けずに連続して出力して TSP 応答を  $K$  回取り込む。得られた  $K$  回の応答を同期加算し、TSP 長と同じ長さの TSP 逆フィルターを畳み込んでインパルス応答を求める。同期加算を行わない場合には、2回連続して TSP を流して2回目の TSP 応答に重なる部分の応答を取り込んだ後に逆フィルターを畳み込んで求める。

#### 2.3.2 直線状畳み込みを用いた TSP 法

直線状畳み込みの利点は、直線状畳み込みとは違い TSP の出力間隔  $T$  を空けることにより、短い TSP でも長いインパルス応答を計ることができる。もちろん TSP 長  $N$  及び TSP 間隔  $T$  を決めるにはデータを図示する等して決めなければならないが、円状畳み込みの前のインパルス応答長などを調べるような、あたりをつける場合には非常に便利である。また、正確な TSP 応答を直接耳で聞けることや、円状では前の応答を用いるために波形が連続ではないが直線状は1つの連続した応答を用いるため時不変性には問題が生じにくいことも利点である。

欠点としては2.3.1で示したように測定時間、メモリ、SN比( $m$ を円状程大きくできないため。)の点で円状に比べると不利であることである。

測定の仕方としては、まず任意の長さの TSP を用意する。そして、TSP を同期加算回数  $K$  だけ間隔を  $T$  だけ空けて出力する。この間隔  $T$  は、被測定系のインパルス応答長  $I$  よりも長く設定する( $T > I$ )。TSP 応答長  $L$  を  $L = N + T > N + I - 1$  だけ取り込み、得られた  $K$  回の応答を同期加算し、TSP 長と同じ長さの TSP 逆フィルターを畳み込んでインパルス応答を求める。同期加算を行わない場合には、1回の応

答を取り込んだ後に逆フィルターを畳み込んで求める。

なお、今回の実験では同期加算は行わないことにする。理由としては、同期加算を行うと全体的に平均化された波形及び計算結果となってしまうことと、TSP 信号は非常にエネルギーの高い信号であり、同期加算を行わなくても十分高い SN 比のとれた測定をすることができるためである。

### 3 測定内容

実験室は取り外しの出来ない遮音材が天井に、床にはカーペットが、四方の壁面には取り外しの出来る遮音材が取り付けられている。

#### 1. 測定方法の違い

- 演算方法の違い
  - － 直線状畳み込み
  - － 円状畳み込み
- TSP パラメーターの違い
  - － TSP 長  $N$  の変化
  - － TSP Stretch  $m$  の変化
  - －  $m/N$  の変化

#### 2. 測定位置の違い

- マイクの位置の変化
- マイクの高さの変化

#### 3. 測定条件の違い

- 部屋状態の変化 (四方の壁面の遮音材を外した状態)

なお、予備実験では主に測定方法の違いを、本実験では主に測定位置及び測定条件の違いを検討する。測定条件の違いは部屋の特徴をより詳しく知るために行うものとする。

### 4 予備実験

#### 4.1 実験目的

本実験の為にインパルス応答の長さや残響時間の長さのおおよその値を知り、本実験で流すべき TSP の  $N$  と  $m$  を決める。なお、最適な TSP パラメーターとは、誤差や雑音等の影響をほとんど受けずに安定したインパルス応答及び残響時間が求められるパラメーターである。

また、測定方法の違いによるインパルス応答及び残響時間の変化を調べる。

#### 4.2 測定条件

実験は、パラメーターの異なる TSP を流して任意のスピーカー、マイク位置で TSP 応答の収録をして処理を行い、測定方法の違いによるインパルス応答、残響時間の変化を調べる。

#### 4.2.1 測定機器

- Microphone (audio-technica AT8531,ATM14a omnidirectional)
- Mixer (YAMAHA MX12/4)
- Loud Speaker (BOSE MODEL 101MM unidirectional)
- Loud Speaker Amp (BOSE MODEL 1702MX-II)
- Recorder (SONY SIR-1000 (sampling frequency  $f_s=48[\text{kHz}]$ ))
- Recording Tape (SONY SDX1-25C)
- DAT (SONY TCD-D10 PRO-II)

#### 4.2.2 実験配置

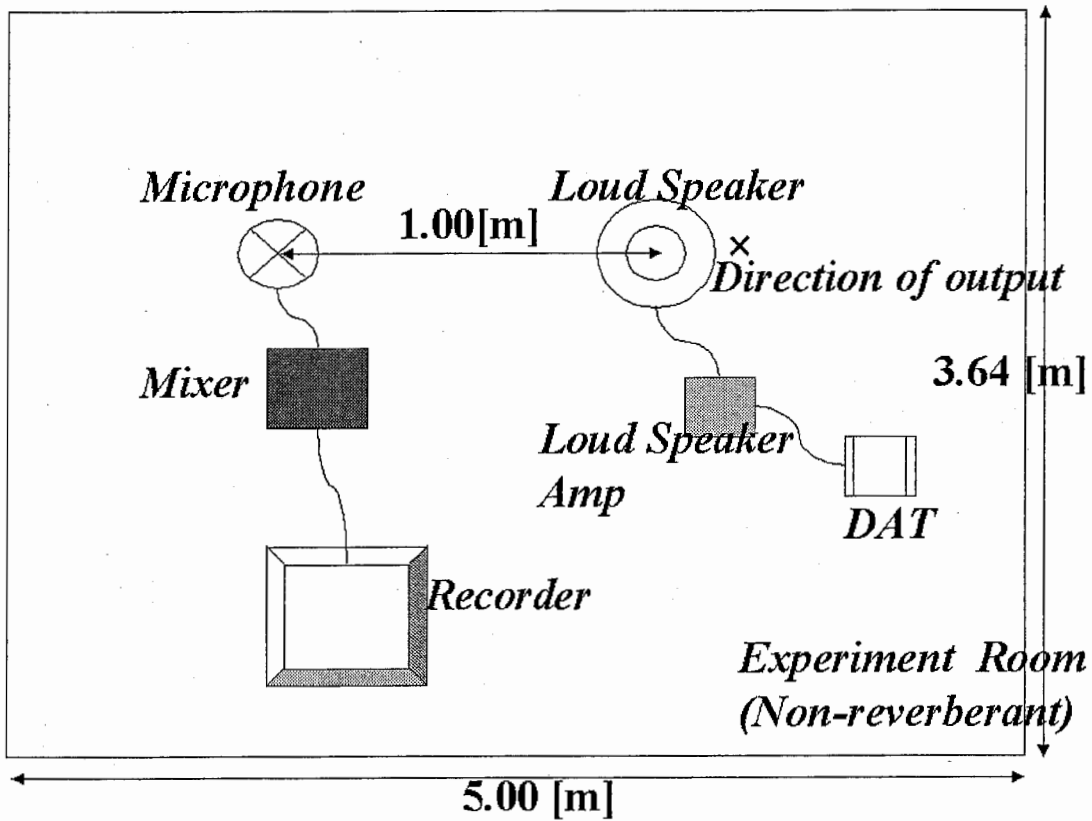


図 3: 機器配置

図 3 に実験における機器の配置を示した。なお、マイクはマイクスタンドにクリップでスピーカー方向に取り付け、上向きに留めた。スピーカーは床に置き、部屋の天井に向けて信号を放射させた。

### 4.2.3 入力信号

入力信号には、TSP と ITSP の直線状畳み込みを行った場合の誤差が-100[dB] 以下になるように、N と m を設定した表 1 のようなパラメーターの TSP を流した [4]。ちなみに、P=12 は N=4096, P=17 は N=131072 である。

P	m
12	800
12	1000
12	1200
12	1500
12	1644
13	1200
13	2000
13	2800
13	3584
13	4000

表 1: Input TSP

P	m
14	1200
14	4000
14	5400
14	6000
14	7424
15	1200
15	4000
15	10000
15	12000
15	15000

P	m
16	1200
16	10000
16	25000
16	30000
17	1200
17	20000
17	30000
17	50000
17	60000

### 4.3 予備実験結果

得られたインパルス応答の一例を図 4 に示す。このインパルス応答から自乗積分法を用いて残響波形を

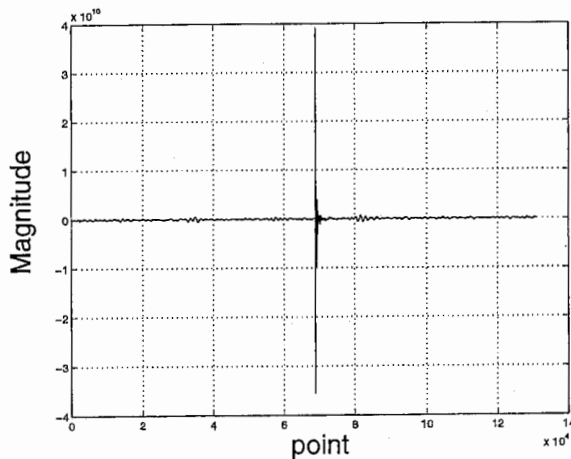


図 4: インパルス応答の一例 (P=17,m=1200)

求めるわけであるが、この方法で残響波形を描いた場合ノイズフロアとよばれる誤差の影響で真の残響波形が見えなくなってしまう部分が現われる [5]。インパルス応答を不必要に長く切り出して残響波形を描くと、雑音区間を多く含んで残響曲線を計算することになるため、ノイズフロアが上昇して真の残響曲線が隠されてしまう。インパルス応答を短く切り出したほうが誤差の影響が低減し真の残響曲線が低い

レベルまで見えてくる [5]。短く切り出すと測定誤差は少なくなるが、あまりにも短く切り出すと真のインパルス応答の一部も切り捨ててしまうために切り捨てる誤差が現われ、残響時間が真の残響時間よりも短くなってしまふ。そのため、インパルス応答の切り出しには十分注意が必要である。真の残響曲線は指数減少関数となるのに対し、一様分布した誤差が多く含まれる区間において残響曲線は直線となる。近似的には、真数軸で描いた残響曲線が真の残響曲線を表す指数関数から誤差区間を表す直線に変化するあたりを切り出しの点(あるいは、切り出しの時刻)とすれば、ほぼ良好な結果を得ることができるといわれている [5]。

今回の実験ではこの方法で切り出しの点を決めることにする。図4のインパルス応答の切り出しの点

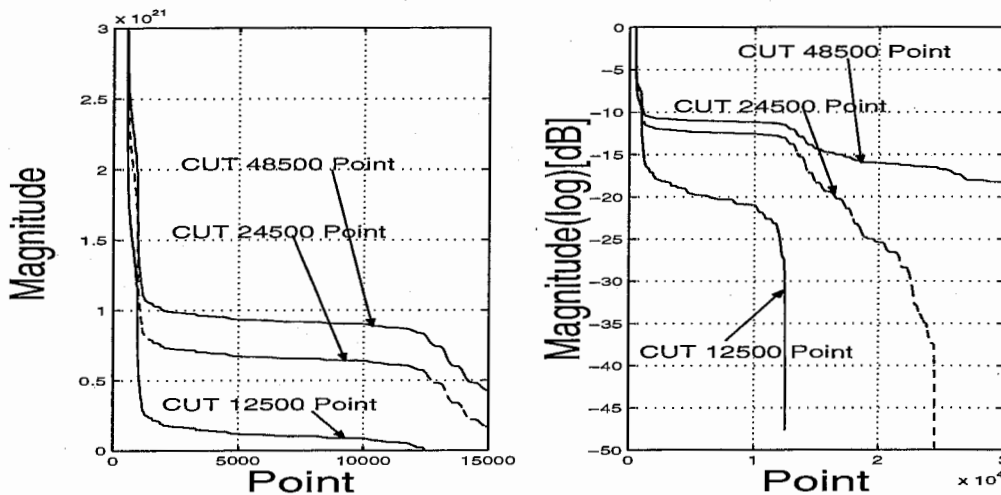


図 5: 切り出しを変えた時の残響波形 ((a) 真数 (b) 対数) の変化 (P=17,m=1200)

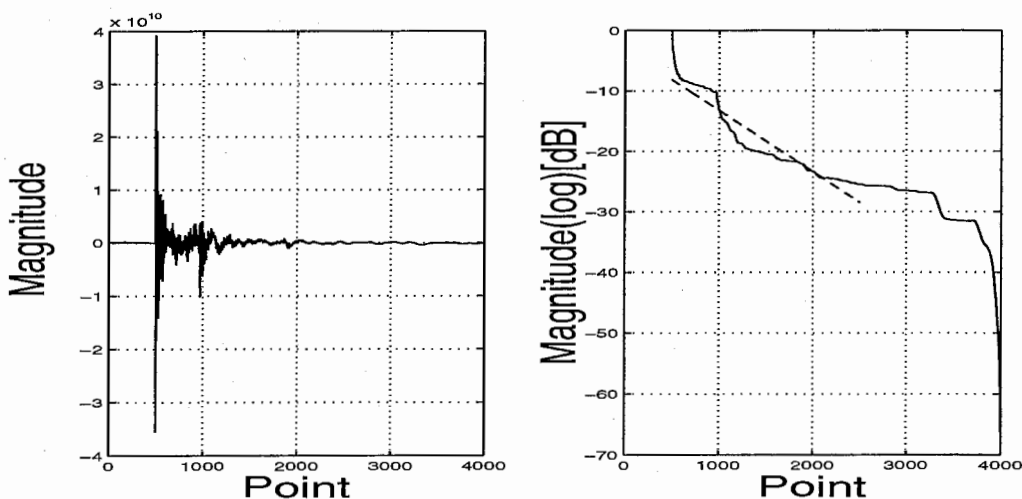


図 6: 切り出したインパルス応答 (a) と残響波形 (b) (P=17,m=1200)

を変えた場合の残響曲線の一例を図5に示す。なお、(a)図は変化をより大きく見るために拡大してある (15000Point 以上はカットされている)。切り出したインパルス応答と残響波形を図6に示す。インパル



ス応答は図 5(a),(b) からノイズフロアの影響を考慮して切り出し (図 6(a))、残響時間は図 6(b) のように最小自乗法を用いて近似直線を引いて求めた。

#### 4.3.1 演算の違い

表 2: 演算の違いによる残響時間の変化

P	m	rtime[s]		differ[ms]
		cir	lin	
16	1200	0.115403	0.115486	0.00830
16	10000	0.101315	0.101314	0.000100
17	1200	0.106492	0.108003	0.151
17	20000	0.101119	0.101117	0.000200
17	30000	0.101383	0.101384	0.000100

max_differ[ms]
0.151

表 2に P=16,17 の時のいくつかのデータを例として示した。

なお、 $N=2^P$ :TSP length , m:TSP stretch , rtime:Reverberation Time

cir:Circular Convolution , lin:Linear Convolution

differ= $\text{abs}(\text{cir\_rtime}-\text{lin\_rtime})$ :Difference(Absolute Value)

であり、max\_differ は演算の違いによる残響時間の差の最大を示している。有効桁数は 3 桁として計算した。以下も同様に 3 桁とする。

### 4.3.2 TSP パラメーターの違い

- N の変化

表 3: TSP 長 N の変化による残響時間の変化

P	m	mag_max	rtime[s]	max_differ[ms]
12	1200	$4.17 \times 10^{10}$	0.122781	3.73
13	1200	$4.45 \times 10^{10}$	0.113397	
14	1200	$4.23 \times 10^{10}$	0.105579	
15	1200	$3.90 \times 10^{10}$	0.142861	
16	1200	$4.38 \times 10^{10}$	0.115403	
17	1200	$3.19 \times 10^{10}$	0.106492	
13	4000	$1.36 \times 10^{11}$	0.105094	0.531
14	4000	$1.26 \times 10^{11}$	0.099783	
15	4000	$1.41 \times 10^{11}$	0.104574	
15	10000	$3.21 \times 10^{11}$	0.101489	0.0174
16	10000	$2.95 \times 10^{11}$	0.101315	
16	30000	$6.44 \times 10^{11}$	0.102007	0.0624
17	30000	$7.25 \times 10^{11}$	0.101383	

MAX_differ[ms]
3.73

表 3 に N の長さを変化させた時の結果を, 図 7 に横軸を P, 縦軸を rtime[s] とした時のグラフを示す。なお, mag\_max は求めたインパルス応答の振幅の最大値を, MAX\_differ は TSP 長 N の変化による残響時間の差の最大を示している。

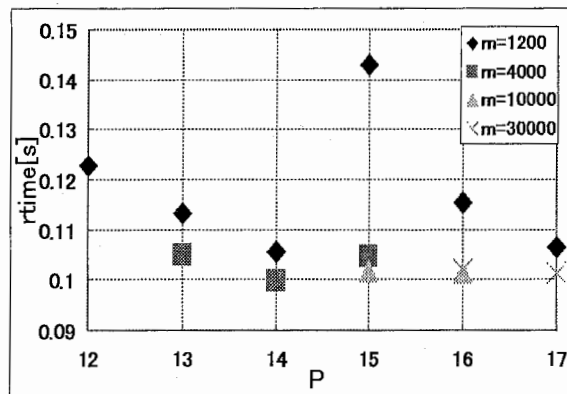


図 7: P と残響時間 rtime[s] の関係

- m の変化

表 4 に m の大きさを変化させた時の結果を, 図 8 に横軸を m, 縦軸を rtime[s] とした時のグラフを示す。なお, MAX\_differ は TSP stretch m の変化による残響時間の差の最大を示している。

表 4: TSP stretch m の変化による残響時間の変化

P	m	m/N	mag_max	rtime[s]	max_differ[ms]
12	800	0.195	$3.72 \times 10^{10}$	0.124607	1.75
12	1000	0.244	$3.67 \times 10^{10}$	0.114573	
12	1200	0.293	$4.17 \times 10^{10}$	0.122781	
12	1500	0.366	$4.85 \times 10^{10}$	0.110991	
12	1644	0.401	$5.65 \times 10^{10}$	0.107061	
13	1200	0.146	$4.45 \times 10^{10}$	0.113397	0.830
13	2000	0.244	$6.96 \times 10^{10}$	0.105938	
13	2800	0.342	$9.31 \times 10^{10}$	0.111365	
13	3584	0.438	$1.51 \times 10^{11}$	0.110609	
13	4000	0.488	$1.36 \times 10^{11}$	0.105094	
14	1200	0.0732	$4.23 \times 10^{10}$	0.105579	0.580
14	4000	0.244	$1.26 \times 10^{11}$	0.099783	
14	5400	0.330	$1.82 \times 10^{11}$	0.101640	
14	6000	0.366	$1.91 \times 10^{11}$	0.103563	
14	7424	0.453	$2.43 \times 10^{11}$	0.101026	
15	1200	0.0366	$3.90 \times 10^{10}$	0.142861	4.21
15	4000	0.122	$1.41 \times 10^{11}$	0.104574	
15	10000	0.305	$3.21 \times 10^{11}$	0.101489	
15	12000	0.366	$4.06 \times 10^{11}$	0.100721	
15	15000	0.458	$4.40 \times 10^{11}$	0.100760	
16	1200	0.0183	$4.38 \times 10^{10}$	0.115403	0.339
16	10000	0.153	$2.95 \times 10^{11}$	0.101315	
16	25000	0.381	$6.91 \times 10^{11}$	0.098622	
16	30000	0.458	$6.44 \times 10^{11}$	0.102007	
17	1200	0.00916	$3.91 \times 10^{10}$	0.106492	0.573
17	20000	0.153	$5.06 \times 10^{11}$	0.101119	
17	30000	0.229	$7.25 \times 10^{11}$	0.101383	
17	50000	0.381	$1.56 \times 10^{12}$	0.100759	
17	60000	0.458	$1.84 \times 10^{12}$	0.100880	

MAX_differ[ms]
4.21

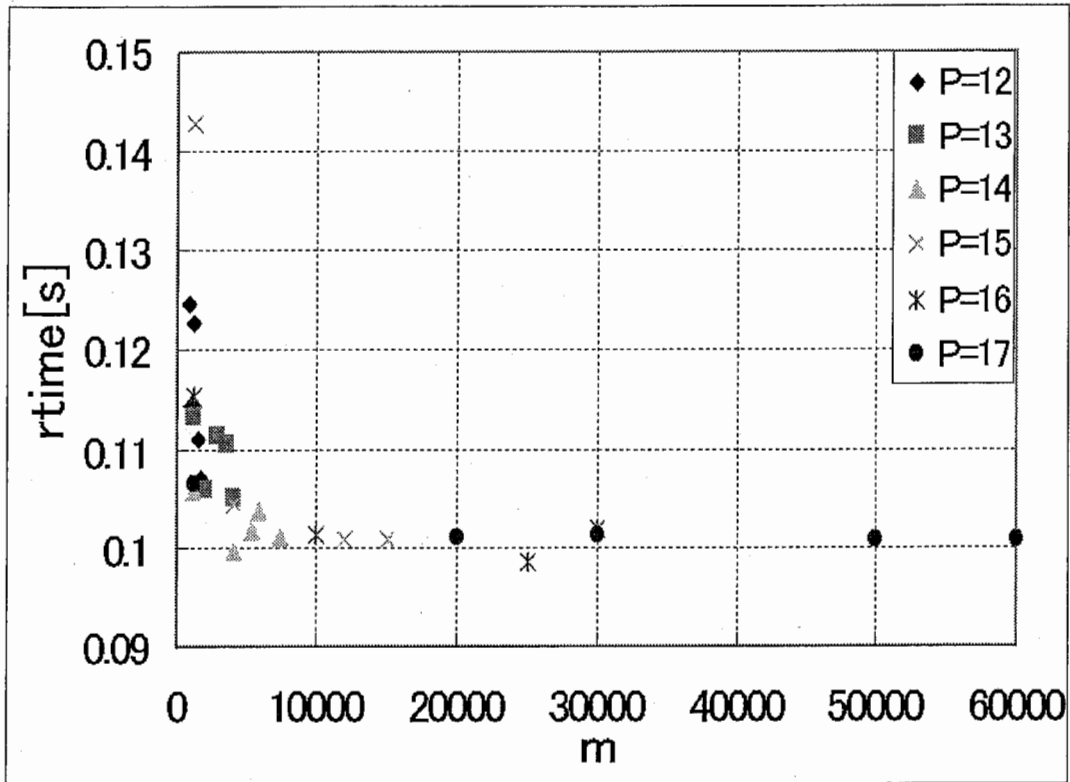


図 8: TSP stretch  $m$  と残響時間  $rtime[s]$  の関係

•  $m/N$  の違い

表 4 により  $m/N$  の変化による残響時間の差の最大は表 5 のような値であることが計算できる。また、図 9 に、横軸を  $m/N$ 、縦軸を  $rtime[s]$  とした時のグラフを示す。

表 5:  $m/N$  の変化による残響時間の変化

max_differ[ms]
4.42

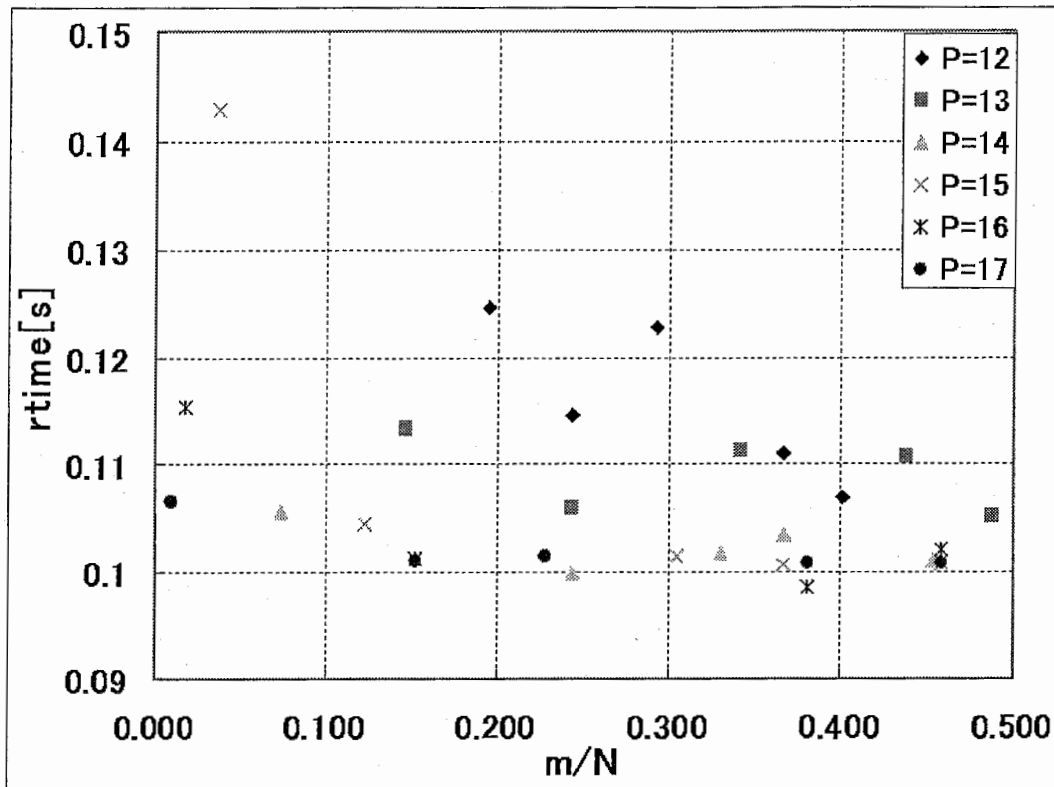


図 9:  $m/N$  と残響時間  $rtime[s]$  の関係

#### 4.4 予備実験考察

この実験で得られたインパルス応答(図 6(a))を見てわかるように、1000 点付近の波形が変形している。このため、残響波形(同図 (b))も 1000 点付近でがたついてしまい、最小自乗直線を引くのが難しくなっている。今回は (b) 図のような直線の引き方をしたため、若干、全体の残響時間が短くなってしまったといえる。この主な原因としては、スピーカーを床に置いた状態で測定してしまったことと、スピーカーの低域の信号を遮音材が吸収出来なかったことが挙げられる。今回用いたスピーカーは低域の信号を位相反転させて作っており、バスレフポートからこの信号を放出するため、測定時にはこの穴を閉じて測定しなければならないのだが、その事に気付かず測定を行ってしまったためである。しかし、予備実験は本実験で用いる TSP のパラメーターを決めるために行うのが目的であることと、同じ条件下で TSP パラメーターを変化させたため、得られたデータから演算の違い及びパラメーター変化による残響時間変化を読み取ることはできる。よって、以下で測定方法の違いによるインパルス応答及び残響時間変化を考察する。

#### 4.4.1 演算方法の違い

表2より演算の違いによる残響時間の差は最大で0.151[ms]と非常に小さいことがわかる。そこで、4.3.2節以下の計算は全て円状で行った。なお、この値を以下の差の大きさの基準とする。

#### 4.4.2 TSP パラメーターの違い

表3,4及び図7,8より、 $m, N$  がともに低い時に残響時間の差が大きくなることがわかる。また、 $m$  が小さい場合には  $N$  の長さに関係なく残響時間への影響は大きいことや、 $N$  が大きい程 ( $m$  が極端に小さい場合は除く) 残響時間は短くなる傾向があることも読み取れる。他にも図9より、 $m/N$  が0.5に近い程残響時間のばらつきが少なく、 $N$  の長さが長いほど安定した残響時間が得られていると言える。具体的には  $P$  が14( $N=16384$ )以上で  $m/N$  が0.2から0.5であれば安定していると言える。

理由としては、 $m, N$  が大きくなるにつれてTSPのエネルギーが増加して  $S/N$  が大きくなることと、インパルス応答長の長さが関係しているからであると推測できる。

$S/N$  が大きくなると残響波形が雑音区間の影響を受けにくくなるため、本来のインパルス応答波形の減衰により残響波形が対数軸では、より直線に近づく。そして正確な最小自乗直線を引くことができ、残響時間にばらつきがなくなると考えることができる。また、4.3節の始めで述べたことから、雑音区間の影響を受けるとノイズフロアが上昇するため真の残響波形が見えなくなり、正確な最小自乗直線を引けずに残響時間が長くなってしまおうと考えられる。

図4よりインパルス応答の長さは6000点(=125[ms])程度であることがわかった。つまり、円状で処理を行うためにはTSPは  $P=13$ 以上 ( $N=8192$ )で設計してあれば時間軸上のaliasingが起らず正確なインパルス応答が求められるはずである。しかし図9より、 $P=13$ の時にも残響時間のばらつきが目立っている。これは、前述したように予備実験における測定の方法に問題があったため、正確なインパルス応答が求められなかったものと思われる。つまり、本来のインパルス応答長は  $P=13$ ( $N=8192$ )点よりも長く、 $P=13$ ではaliasingが起こってしまったためにばらつきが生じたのではないかと推測できる。

表3,4,5より、 $N$  の変化による残響時間の差は最大3.73[ms]、 $m$  の変化では4.21[ms]、 $m/N$  の変化では4.42[ms]である。このことから、パラメーターの違いによる残響時間の差は演算の違いによる差よりもかなり大きいことがわかる。

#### 4.4.3 予備実験まとめ

測定方法により残響時間の値が変化することが確認された。特にパラメーターによる違いが残響時間に大きな(演算の違いよりも)影響を与えることがわかった。

今回の実験で  $m/N$  を0.2から0.5までの値で、 $P$  を14( $N=16384$ )以上の値でTSPを設計して測定を行えば、比較的安定した残響時間を得る事ができることがわかった。

(但し先ほども述べたが、今回のインパルス応答及び残響時間は室の正確な値ではないと考えられるので、本来のインパルス応答長よりも短いインパルス応答であるならば、本実験でのインパルス応答長が長い場合には測定にさしかえる。また、本実験では遮音材を外した状態での測定も行うため、インパルス応答及び残響時間がさらに長くなることは明白である。よって、これらのことも考えて  $P$  を15以上にして測定を行うことにする。)

#### 4.4.4 予備実験結論

本実験では  $m/N$  を0.2から0.5までの値で、 $P$  を15以上の値で設計したTSPを用いて測定することにする。

## 5 本実験

4章で得られたデータを元にして  $N$  と  $m$  を設定した TSP を流して TSP 応答を収録し、処理を行いインパルス応答及び残響時間を求める。

### 5.1 実験目的

測定位置の違いによるインパルス応答の違いを残響時間の違いから定量的に考える。また、測定に用いるべき最適な TSP パラメーターやこの実験室での残響時間のおおよその値を推定する。なお、5.2節の3の実験は部屋の特徴をより詳しく知るために行う。

### 5.2 測定条件

実験は以下の3パターンで行う。

1. マイク位置変化測定 (部屋4隅にマイクを設置し、吸音材を付けた状態)
2. マイク高さ変化測定 (1つの場所で異なる高さにマイクを設置し、吸音材を付けた状態)
3. 部屋状態変化測定 (1で吸音材を外した状態)

#### 5.2.1 測定機器

- Microphone (audio-technica AT8531,ATM14a omnidirectional)
- Microphone Amp (YAMAHA HA8)
- Loud Speaker (TANNOY SYSTEM 600 unidirectional)
- Loud Speaker Amp (BOSE MODEL 1702MX-II)
- Recorder (SONY SIR-1000 fs=48[kHz])
- Recording Tape (SONY SDX1-25C)
- DAT (SONY TCD-D10 PRO-II)
- Sound Level Meter (RION NA-26)

## 5.2.2 実験配置

### 1. マイク位置変化測定

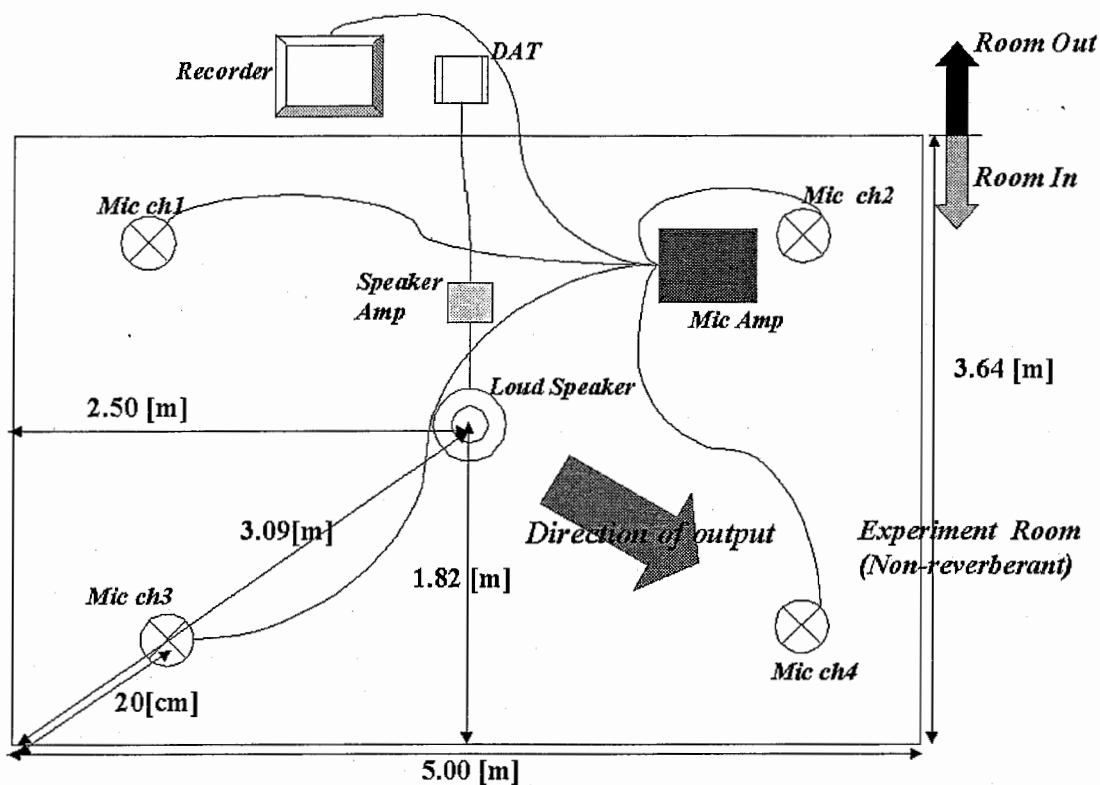


図 10: 機器配置

機器は図 10 のように配置した。スピーカー、マイクともに床から 1[m] の高さに設置した。スピーカーは ch4 のマイク方向に向け、マイクはそれぞれマイクスタンドにクリップでスピーカー方向に取り付け、上向きに留めた。



## 2. マイク高さ変化測定

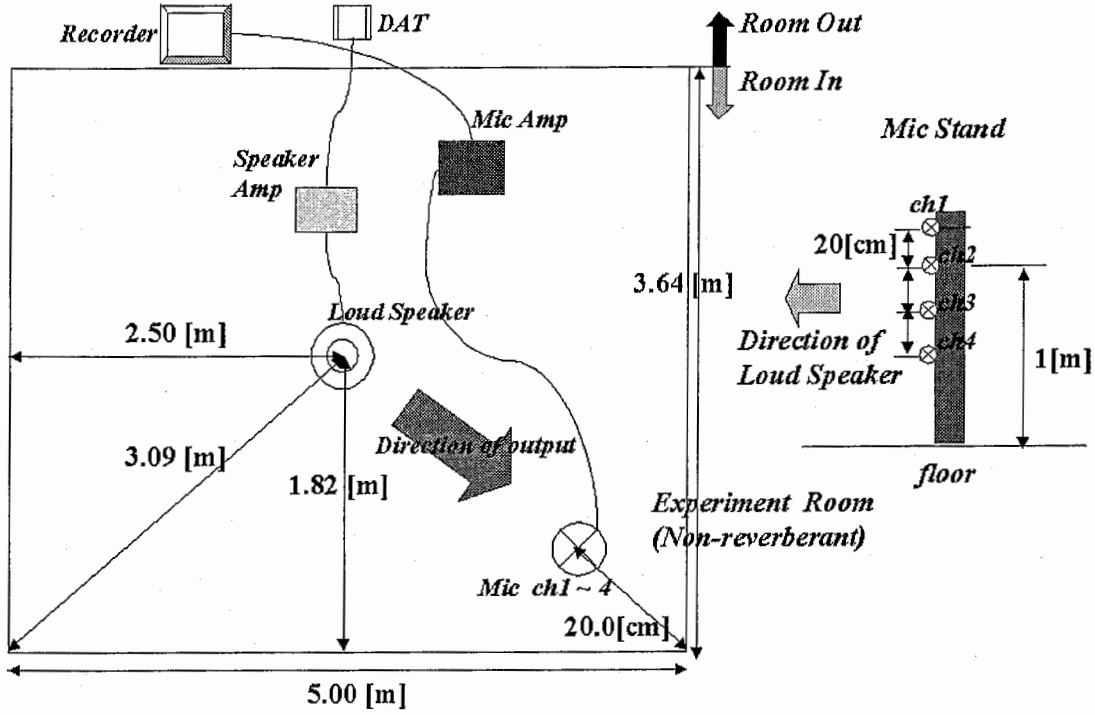


図 11: 機器配置

機器はそれぞれ図 11(左図) のように配置した。スピーカーは 1 [m] の高さに設置し、マイクスタンドの方向に向けた。マイクはマイクスタンドに、ch1 はクリップで、ch2 から ch4 はテープでスピーカー方向に同図(右図) のように 20[cm] 間隔に高さを変えて取り付け、上向きに留めた。ちなみに、スピーカーと ch2 のマイクの高さがともに床から 1[m] で等しい。

## 3. 部屋状態変化測定

機器の配置については図 10 と全く同じである。但し、床のカーペットと天井以外の四方の吸音材を取り除いた。

### 5.2.3 入力信号

入力信号には、4章の予備実験で得られた結果をふまえて  $m/N$  が 0.2 から 0.5 までの値で、 $P$  が 15 ( $N=32768$ ) 以上の値の表 6 のような TSP を流した。

表 6: Input TSP

P	m
15	10000
16	10000
16	32000
17	10000
17	32000
17	40000
17	50000
17	65000

### 5.3 本実験結果

実験では表6で示したようなP=15,16のTSPも流したが、いくつかのデータ処理を行ったところ、P=15,16,17の結果にほとんど違いが見られなかったため、今回はP=17での結果のみ示す。なお、測定の前に騒音計で各チャンネルにおけるマイク位置で音圧レベルを測ったところ、一番エネルギーの大きいTSP(P=17,m=65000)を流した時の値で、

Ch1:85[dB(A)],Ch2:76[dB(A)],Ch3:80[dB(A)],Ch4:93[dB(A)]

であった。

#### 5.3.1 マイク位置変化による残響時間変化

図12に得られたインパルス応答の一例を示す。

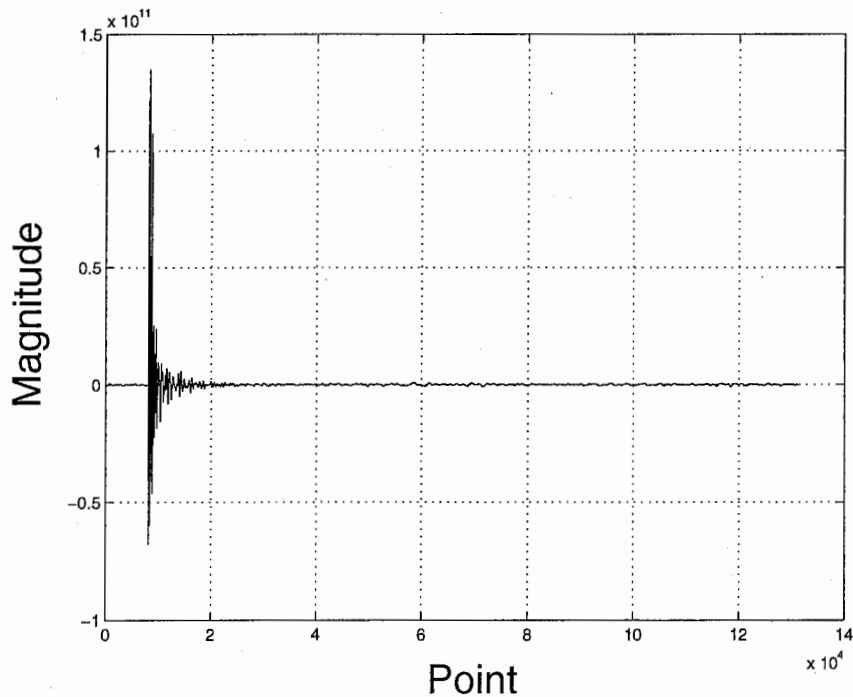


図 12: ch1 におけるインパルス応答の一例 (P=17,m=32000)

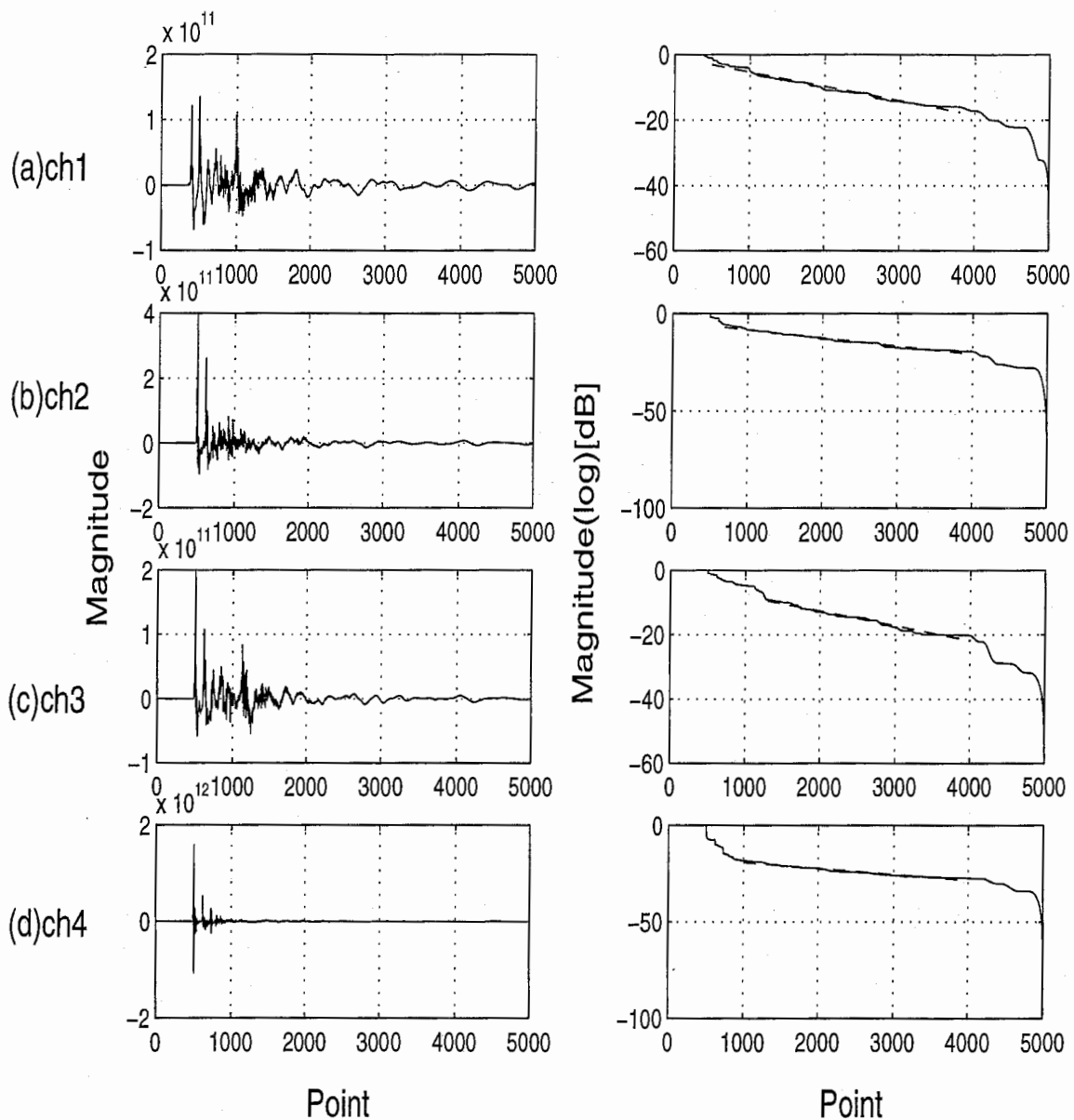


図 13: 各マイク位置によるインパルス応答及び残響波形 (P=17,m=32000)

4.3節のように切出しに注意して求めたインパルス応答及び残響波形の一例を図 13に示す。また、得られた各マイク位置による結果を表 7に、 $m/N$  を横軸、 $rtime[s]$  を縦軸に取ったグラフを図 14に示す。なお、表 7において  $max\_differ$  は同じ条件 ( $m = \text{一定}$ ) におけるマイク位置の残響時間の差の最大を、 $MAX\_differ$  は全体における差の最大を示している。

表 7: マイク位置変化による残響時間の変化の割合

ch	P	m	mag_max	rtime[s]
1	17	32000	$1.35 \times 10^{11}$	0.270355
	17	40000	$2.03 \times 10^{11}$	0.270378
	17	50000	$2.45 \times 10^{11}$	0.266811
	17	65000	$2.21 \times 10^{11}$	0.268137
2	17	32000	$3.96 \times 10^{11}$	0.262942
	17	40000	$5.74 \times 10^{11}$	0.260537
	17	50000	$6.53 \times 10^{11}$	0.261972
	17	65000	$5.50 \times 10^{11}$	0.261147
3	17	32000	$1.97 \times 10^{11}$	0.229638
	17	40000	$1.68 \times 10^{11}$	0.230471
	17	50000	$2.44 \times 10^{11}$	0.228447
	17	65000	$3.12 \times 10^{11}$	0.227218
4	17	32000	$1.58 \times 10^{12}$	0.274188
	17	40000	$2.09 \times 10^{12}$	0.273339
	17	50000	$2.20 \times 10^{12}$	0.272747
	17	65000	$2.65 \times 10^{12}$	0.271325

m	max_differ[ms]	MAX_differ[ms]
32000	4.46	4.46
40000	4.29	
50000	4.43	
65000	4.41	

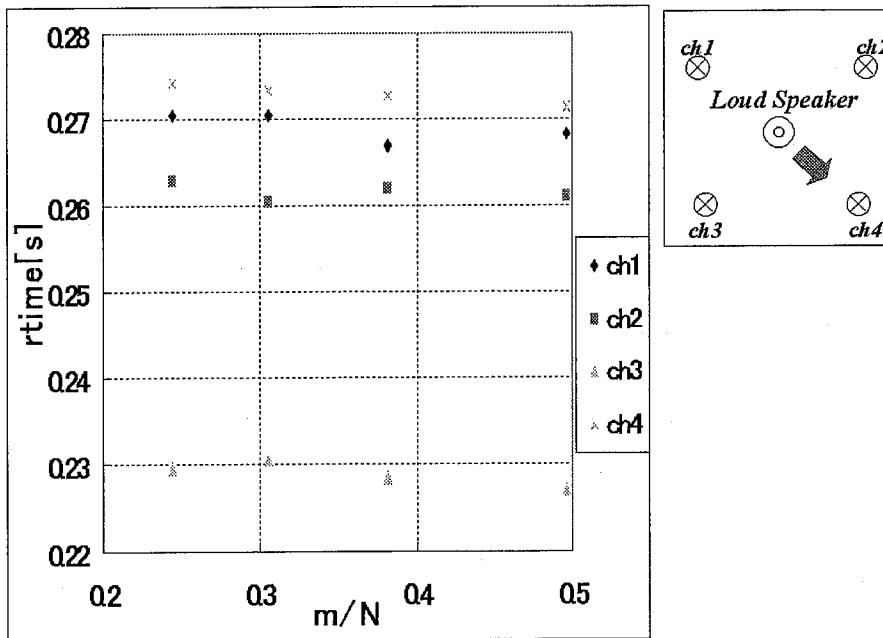


図 14: マイク位置変化による m/N と残響時間 rtime[s] の関係

### 5.3.2 マイク高さ変化

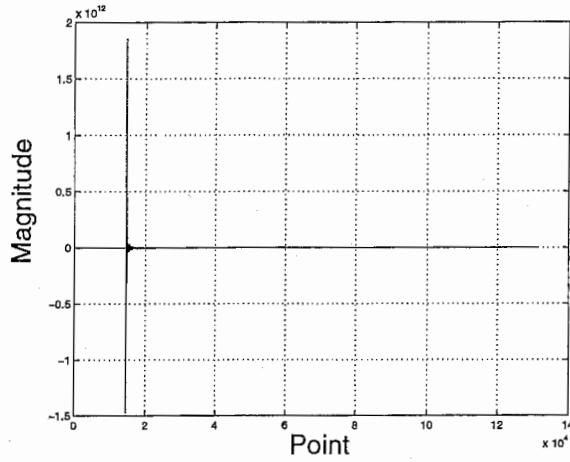


図 15: ch1 におけるインパルス応答の一例 (P=17,m=32000)

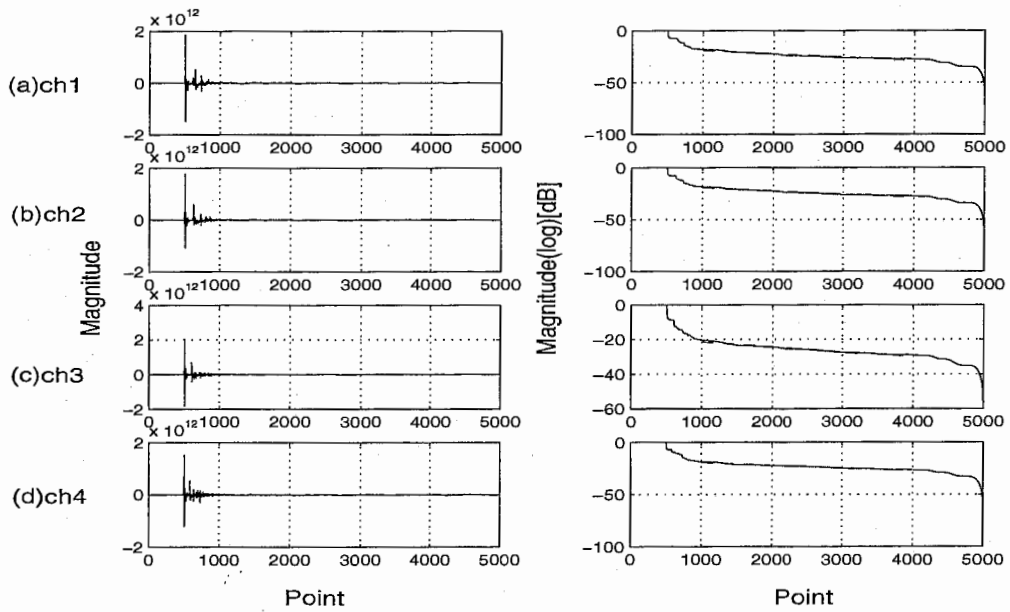


図 16: 各マイク位置によるインパルス応答及び残響波形 (P=17,m=32000)

図 15に得られたインパルス応答の一例を示す。また、4.3節のように切出しに注意して求めたインパルス応答及び残響波形の一例を図 16に示す。

得られた各マイク位置による結果を表8に示す。なお、表8において max\_differ は同じ条件 (m=一定) におけるマイク位置の残響時間の差の最大を, MAX\_differ は全体における差の最大を示している。

表 8: マイク高さ変化による残響時間の変化の割合

ch	P	m	mag_max	rtime[s]
1	17	32000	$1.85 \times 10^{12}$	0.266932
	17	40000	$2.54 \times 10^{12}$	0.270010
	17	50000	$2.66 \times 10^{12}$	0.271818
	17	65000	$2.60 \times 10^{12}$	0.269048
2	17	32000	$1.77 \times 10^{12}$	0.272668
	17	40000	$2.45 \times 10^{12}$	0.274771
	17	50000	$2.61 \times 10^{12}$	0.275927
	17	65000	$1.91 \times 10^{12}$	0.272652
3	17	32000	$2.03 \times 10^{12}$	0.279166
	17	40000	$2.77 \times 10^{12}$	0.280664
	17	50000	$2.94 \times 10^{12}$	0.279713
	17	65000	$2.61 \times 10^{12}$	0.278522
4	17	32000	$1.50 \times 10^{12}$	0.324098
	17	40000	$2.00 \times 10^{12}$	0.327981
	17	50000	$2.15 \times 10^{12}$	0.327387
	17	65000	$2.21 \times 10^{12}$	0.324234

m	max_differ[ms]	MAX_differ[ms]
32000	5.72	5.80
40000	5.80	
50000	5.56	
65000	5.52	

図 17 に表 8 の  $m/N$  を横軸,  $rtime[s]$  を縦軸に取ったグラフを示す。

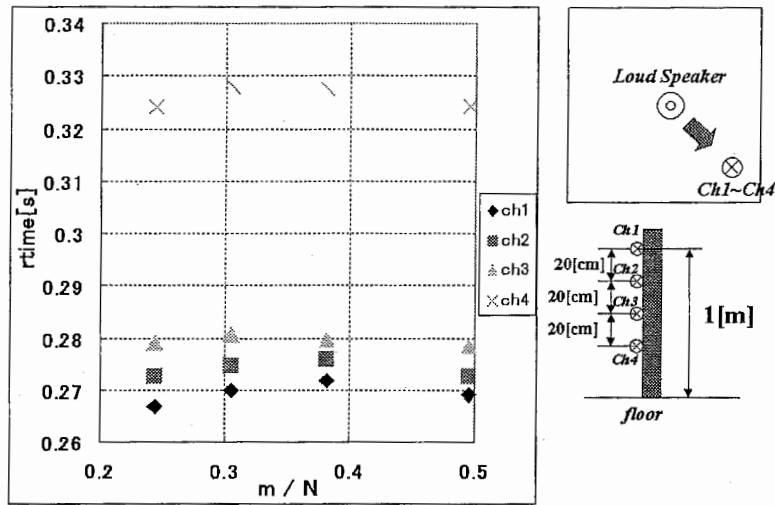


図 17: マイク高さ変化による  $m/N$  と残響時間  $rtime[s]$  の関係

### 5.3.3 部屋状態変化

図 18 に得られたインパルス応答の一例を示す。

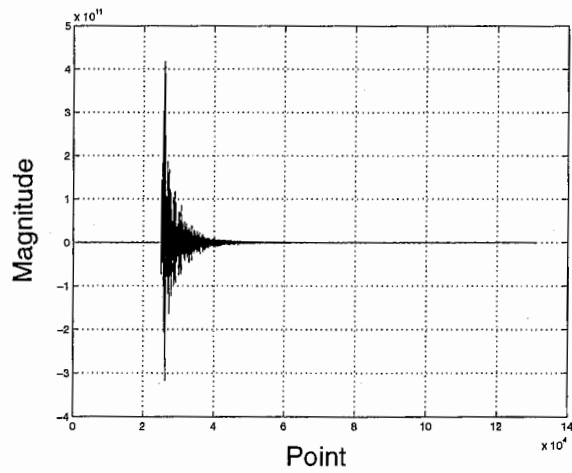


図 18: ch1 におけるインパルス応答の一例 ( $P=17, m=32000$ )

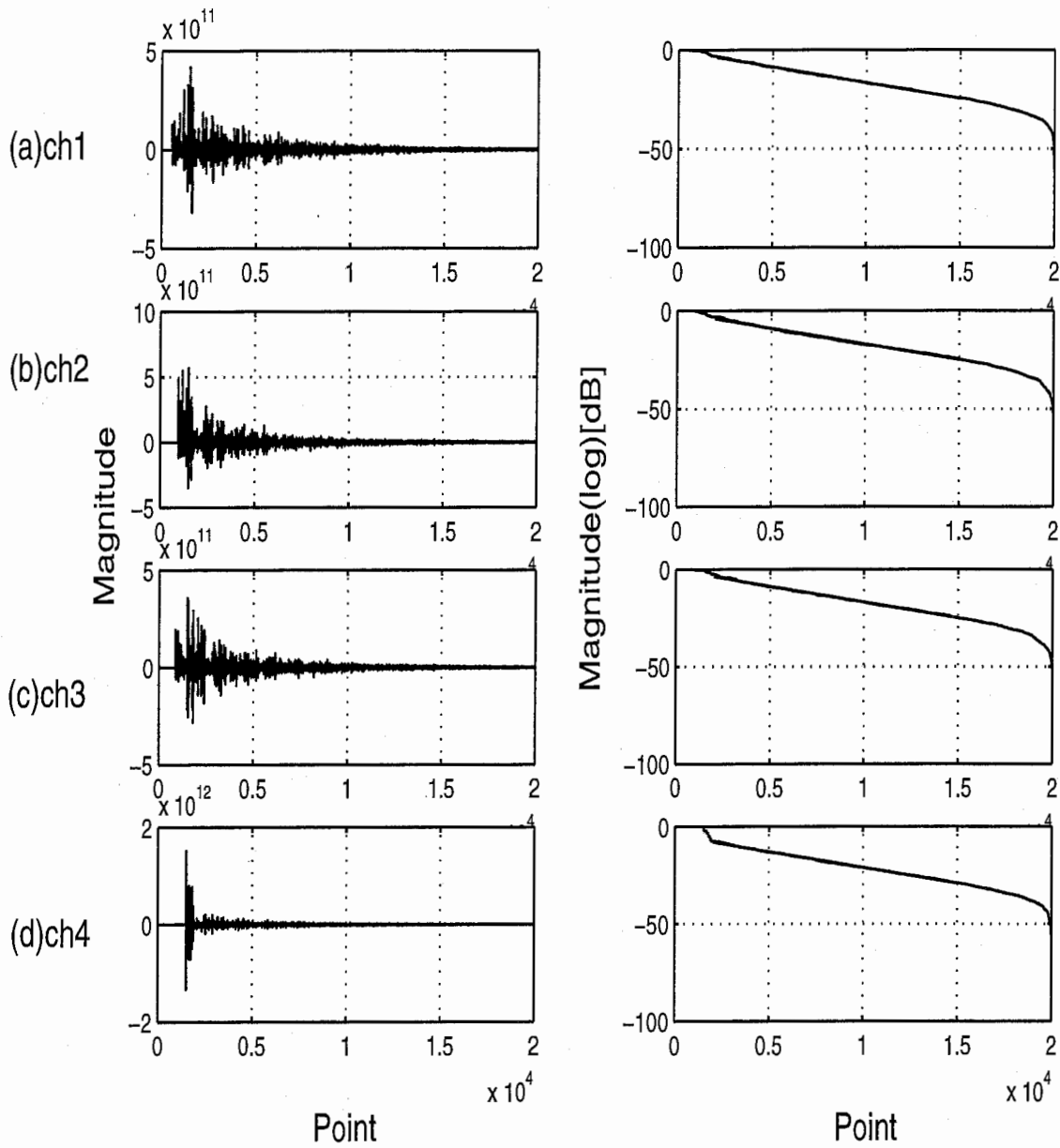


図 19: 各マイク位置によるインパルス応答及び残響波形 (P=17,m=32000)

4.3節のように切出しに注意して求めたインパルス応答及び残響波形の一例を図 19に示す。



得られた各マイク位置による結果を表9に示す。なお、表9において max\_differ は同じ条件 (m=一定) におけるマイク位置の残響時間の差の最大を, MAX\_differ は全体における差の最大を示している。

表 9: 部屋状態変化による残響時間の変化の割合

ch	P	m	mag_max	rtime[s]
1	17	32000	$4.18 \times 10^{11}$	0.729166
	17	40000	$5.77 \times 10^{11}$	0.728786
	17	50000	$6.46 \times 10^{11}$	0.727550
	17	65000	$5.57 \times 10^{11}$	0.710940
2	17	32000	$5.68 \times 10^{11}$	0.725125
	17	40000	$6.35 \times 10^{11}$	0.725531
	17	50000	$8.27 \times 10^{11}$	0.723572
	17	65000	$8.07 \times 10^{11}$	0.708489
3	17	32000	$3.56 \times 10^{11}$	0.717061
	17	40000	$5.17 \times 10^{11}$	0.718992
	17	50000	$4.88 \times 10^{11}$	0.715667
	17	65000	$4.58 \times 10^{11}$	0.693816
4	17	32000	$1.52 \times 10^{12}$	0.664957
	17	40000	$2.05 \times 10^{12}$	0.665447
	17	50000	$2.08 \times 10^{12}$	0.663623
	17	65000	$2.47 \times 10^{12}$	0.644953

m	max_differ[ms]	MAX_differ[ms]
32000	6.42	6.60
40000	6.33	
50000	6.39	
65000	6.60	

図 20に表 9の  $m/N$  を横軸,  $rtime[s]$  を縦軸に取ったグラフを示す。

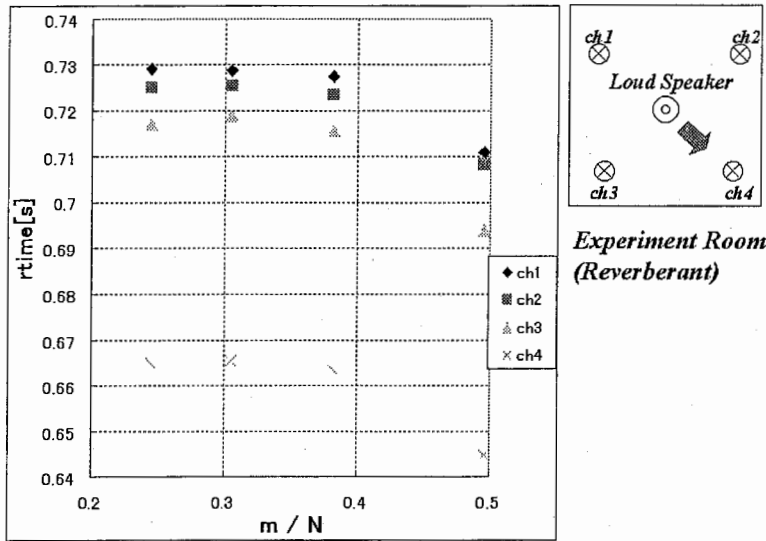


図 20: 部屋状態変化による  $m/N$  と残響時間  $rtime[s]$  の関係

## 5.4 本実験考察

### 5.4.1 測定位置の変化

図 12,15より、インパルス応答の長さは 12500 点 (=260[ms]) 程度であることがわかる。このことから、予備実験で求めたインパルス応答及び残響時間が正確ではなく、どちらも本来の長さよりも短かかったものと考えられる。

図 13,14より、マイクの位置が変わることによりインパルス応答と残響時間が大きく変わることがわかる。特に、ch3 における残響時間は他のものと比べてかなり異なる値となっている。

図 16,17より、マイクの高さが変わることによってインパルス応答はほとんど変化しないが残響時間は大きく変わることがわかる。特に ch4 における残響時間は他のものと比べてかなり異なる値となっている。また、高さが高くなる程残響時間は短くなっていることも読み取れる。これは、高さが高くなる程スピーカ (ch2 と同じ高さ) との距離が近づき直接音が強くなり、そのために残響波形がいち早く減衰して残響時間が短くなったものと考えられる (しかし、この考えでは ch1 が ch2 の残響時間よりも低いことは説明できないため、他の原因も関係しているものと思われる。)

表 7,8より、位置変化による残響時間の差は最大 4.46[ms]、高さ変化では 5.80[ms] である。これらは、4.4節で述べた測定方法の違いの差よりも大きい値である。

なお、部屋 (Non-reverberant) の残響時間は図 14,17等から 270[ms] 程度であることが推測できる。

### 5.4.2 測定条件の変化

図 18より、インパルス応答の長さは 40000 点 (=833[ms]) 程度であることがわかる。

図 19より残響波形ががたついておらず、残響時間を測る直線が引き易くなっている事がわかる。また、図 20より ch4 における残響時間が他と比べて低いことも読み取れる。他にも、図 14と比べると、同じ場

所で測定したにも関わらず部屋状態が変化すると各チャンネルにおける残響時間の傾向が異なっていることがわかる (特に ch4)。

表 9 より、残響時間の差は最大で 6.60[ms] であることがわかる。残響が大きい場合には部屋全体に均等に音が行き渡るため、残響時間は測定位置の変化によりあまり変化がないように思われたが、この値は遮音材を付けた時よりも大きい値である (しかし、図 14 における ch3, 図 20 における ch4 を除いたチャンネルの差は遮音材を外した場合の方が小さいことがわかるためこの考えはあながち間違っていないと考えられる。)。原因としては、単一指向性のスピーカーを ch4 の向きに向けて測定を行ったことが挙げられる。これは、図 20 で ch4 の残響時間が他と比べて低いことから推測できる。おそらく、ch4 は直接音と反射音のレベル差があまりにも大きいため残響波形が他チャンネルよりも早く減衰し、残響時間が短くなったものと考えられる。(但し、この考えでは図 14 の ch4 の残響時間が他と比べて高いことは説明できないため他の原因も関係しているものと考えられる。)

図 14, 17, 20 及びこれらの考察から、やむを得ず単一指向性スピーカーを用いてインパルス応答や残響時間を測定する場合には、スピーカーの放射方向の受音点における測定は控えた方が良いといえる。また、同図 14, 17, 20 を見ると、 $m/N$  の変化による残響時間の変化は少なく、TSP 長がインパルス応答長に比べて十分長い場合には  $m/N$  が 0.2 から 0.5 の間の値で安定した残響時間が測定できているといえる。

なお、部屋 (Reverberant) の残響時間は図 20 等から 720[ms] 程度であることが推測できる。

### 5.4.3 本実験まとめ

測定位置の変化によりインパルス応答及び残響時間が大きく変化することが確認された。(遮音材を付けていない時に、単一指向性のスピーカーを用いて受音点に向かって放射した場合にはより変化が大きくなる。)

また、TSP 長がインパルス応答長に比べて十分長い場合には  $m/N$  が 0.2 から 0.5 の間の値で設計した TSP を用いれば安定した残響時間が測定可能であることがわかった。

そして、部屋の残響時間は 270[ms] 程度 (Non-reverberant), 720[ms] 程度 (Reverberant) であることがわかった。

## 6 考察

### 6.1 全体の考察

実験 4, 5 で得られた残響時間の差の最大とその中での最大 (つまり、本実験における差の最大。) を表 10 に示す。

表 10: 残響時間の変化

測定方法				測定位置		測定条件	MAX_DIFFERENCE[ms]
演算	N	m	m/N	位置	高さ	状態	
0.151	3.73	4.21	4.42	4.46	5.80	6.60	6.60

表 10 から、測定方法及び測定位置の変化により残響時間では最大 5.80[ms] の違いが生じたことがわかるが、部屋の特徴をより詳しく知るために行った測定条件の違いの変化が 6.60[ms] とそれよりも大きな違いが生じてしまった。残響時間の変化には違いがないのでこのデータを今回の実験における残響時間の変化の最大として以下考えていくことにする。しかし、この値は TSP パラメーターを適切なパラメーター

に設定して円状畳み込みで演算処理を行った場合の値であるため、直線状畳み込みをする場合には、より大きな違いが出ると推測できる。それは、直線状畳み込みをする場合には  $m/N=0.5$  付近では誤差が急激に増える ( $m=N/2$  の時サンプリング周波数  $f_s$  の半分  $f_s/2$  に対応する時間遅れがちょうどパルスの周期に一致し、パルスの頭と尻尾が接するため。) ことが知られており [4]、これは  $N$  の大きさと関係なく起きる現象であるために誤差をなるべく抑えるように TSP パラメーターを慎重に選ばなくてはならないからである。よって、直線状畳み込みをする場合には TSP パラメーターが制限され、 $S/N$  が低くなり、雑音区間の影響を受けやすくなる (同期加算をすれば改善できる。) ため、演算誤差が加わることで測定方法及び測定位置の変化による残響時間への影響が大きくなると推測できる。

円状の場合にも同様な現象は起こるが、TSP 及び ITSP の設計自体が DFT を基礎に定義されており円状畳み込み的に処理が行われている。そのため、演算誤差は aliasing や丸め誤差以外に出ないと考えられる。しかし、TSP 長がインパルス応答長より長ければ aliasing も生じないため誤差が急激に増えることはないといえる。

また、残響波形を描くためのインパルス応答の切り出しによってもさらに大きな違いが出ると推測できる。それは、4.3節で述べたことであるが、5.3.3節において切り出しを適切に行わなかった場合の結果から示すことができる。

図 21 に図 18 のインパルス応答の切り出し点を変えた場合の残響曲線の例を示す (図 21(真数) の、インパルス応答を 25500, 49500, 73500 点まで切り出した波形は重なっている)。なお、左図(真数)の方は CUT13500 Point の全体が見えるように拡大してある (サンプルの高い部分はカットされている)。

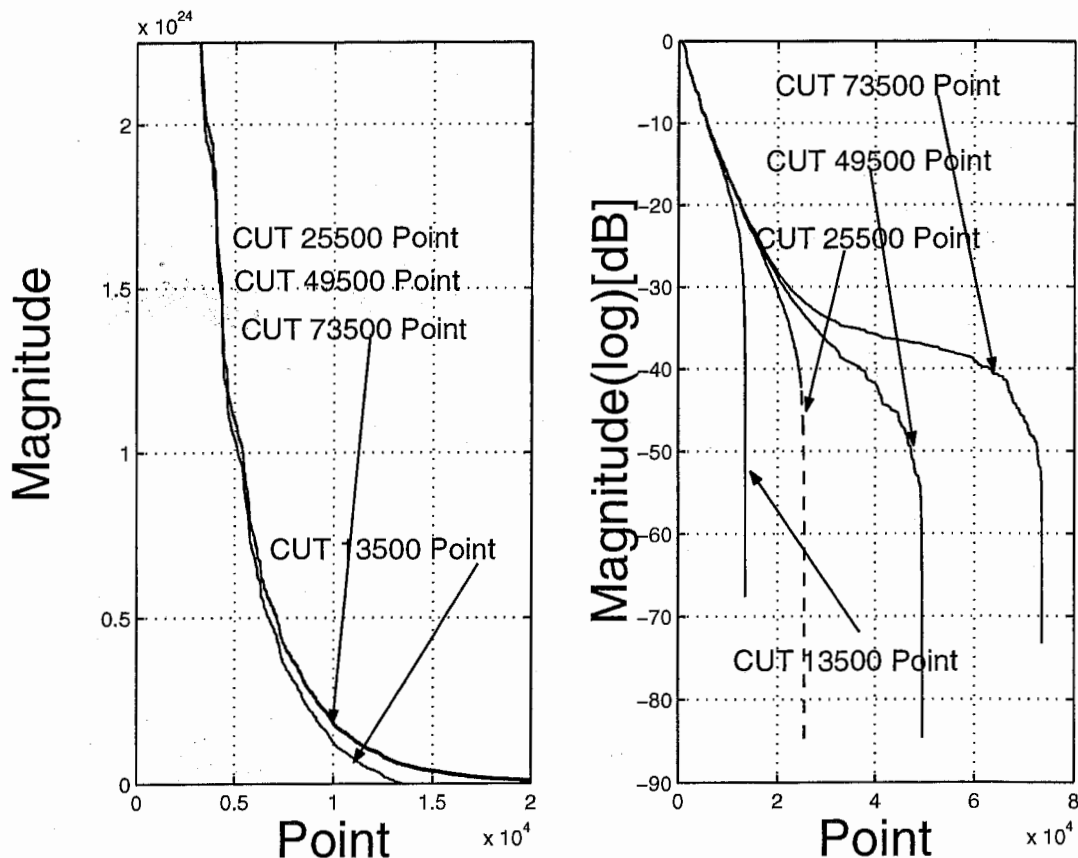


図 21: 切り出しを変えた時の ch1 の残響波形 (左が真数, 右が対数) の変化 ( $P=17, m=32000$ )

図 21(対数)を見てわかるように、インパルス応答を 13500 点で切り出した場合の残響波形は他と比べて急激に減衰している。インパルス応答長は 5.4.2 節で述べたように 40000 点 (=833[ms]) 程度であるため、切り出しが短すぎたためであると考えられる。5.3.3 節においては図 21 から考えて 20000 点までを切り出して残響波形を求めたが、この処理を行う前では図 21 における 73500 点までの切り出しを行った残響波形を見ておらず、8000 点までを切り出しの点としてしまった。この時の結果を表 9 の ch1 の結果とともに表 11 に示す。

表 11: 切り出しの違いによる残響時間の変化

P	m	rtime[s]		differ[ms]	max_differ[ms]
		CUT 8000 Point	CUT 20000 Point		
17	32000	0.501177	0.729166	22.8	22.8
17	40000	0.501457	0.728786	22.7	
17	50000	0.501505	0.727550	22.6	
17	65000	0.501177	0.710940	21.0	

表 11 を見てわかるように切り出しを変えるだけで 22.8[ms] もの差を生じてしまう。いかに切り出しが重要かがよくわかる。

このように、残響時間を求める場合には測定方法及び測定位置の他に切り出しにも十分注意して測定を行う必要がある。

## 6.2 測定における誤差について

今回の実験で生じる誤差の要因は次のようなものが挙げられる。

1. 実験室の構造上の問題
  - 外部からの足音や騒音
2. 測定上の問題
  - スピーカーの単一指向性
3. 演算による問題
  - 円状畳み込みにおける丸め誤差
  - 非同期加算による雑音の影響

## 7 結論

測定方法及び測定位置の変化によるインパルス応答の変化は、残響時間での変化では最大で5,80[ms]であったが、部屋の特性をより詳しく知るために行った測定条件の変化では6.60[ms]であった。(なお、インパルス応答の切り出しを誤った場合には22.8[ms]であった。)

インパルス応答の測定においてTSP法を用いる場合には、TSPパラメーターである $m/N$ を0.2から0.5の間で、 $N$ はインパルス応答長より大きい値でTSPを設計して円状畳み込みで処理を行えば $S/N$ の高い良好な結果が得られると考えられた。

インパルス自乗積分法を用いて残響時間を求める場合には、特にインパルス応答の切り出しに注意して処理を行わなければいけないことがわかった。

## 8 今後の課題

インパルス応答の求め方にはTSP法やM系列法等があるがどの測定方法にも長所及び短所があるため一番最適な方法がどの方法なのかまだわかっていない。これらの研究をより詳しく行う必要があるといえる。

残響時間については、インパルス応答から自乗積分法を用いて求める場合、インパルス応答の切り出し及び近似直線の引き方等があいまいであるため、測定する者の判断の仕方によって結果が異なってしまふ。今後これらについての整備を行っていく必要があるといえる。

## 参考文献

- [1] N.Aoshima, "Computer-generated pulse signal applied for sound measurement," J.Acoust.Soc.Am.vol69,pp.1484-1488,1981.
- [2] 鈴木 陽一, 浅野 太, 曾根 敏生, "音響系の伝達関数の模擬をめぐって(その1)," J.Acoust.Soc.Jpn.vol44,pp,936-942,1988.
- [3] 鈴木 陽一, 浅野 太, 曾根 敏生, "音響系の伝達関数の模擬をめぐって(その2)," J.Acoust.Soc.Jpn.vol45,pp,44-50,1989.
- [4] 鈴木 陽一, 浅野 太, 金 学胤, 曾根 敏生, "時間引き伸ばしパルスの設計法に関する考察," 信学技報,vol.EA92-86,Dec.1992.
- [5] 金田 豊, "インパルス応答測定の際の留意点," 音響学会誌,vol.55,pp364-369,Dec.1999.