

平成 13 年度

東京電機大学 工学部  
物質工学科 卒業研究論文

# 「適応フィルタの基本特性評価」

研究場所：東京電機大学工学部物質工学科  
固体物性研究室  
音響信号処理研究室

指導教授：田巻 明  
金田 豊

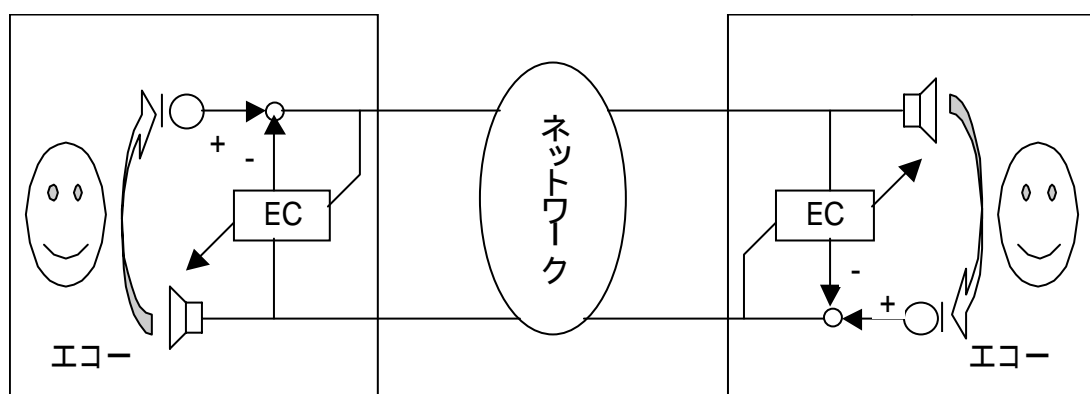
98KS113 平田 智紀

# 目次

1. はじめに	1
2. 研究の目的	2
3. 音の大きさ	3
4. 音響エコーキャンセラ	4
4.1 音響エコーキャンセラ概要	4
4.2 インパルス応答	5
4.3 畳み込み	6
4.4 適応フィルタ	7
4.5 適応アルゴリズム	8
4.6 学習同定法	10
5. シミュレーションによる適応フィルタの性能評価	12
5.1 測定方法	12
5.2 結果検討	15
5.3 まとめ	21
6. 実測による適応フィルタの性能評価	22
6.1 測定方法	26
6.2 結果検討	26
6.3 まとめ	34
7. まとめ	35
8. 参考文献	38
9. 謝辞	38

# 1. はじめに

通信を利用して多人数が同時に会話をするテレビ会議の利用がビジネス分野で広まっている。また、電話機からコンピュータテレホニー機器へと発展してきた通信機器は、将来、特定の機能のみを持つ端末イメージではなくなり、情報通信環境そのものが提供されるようになると考えられる。遠隔地と通信しているにも関わらず、あたかも同一の室内にいるように会話ができることや、マイクロホンやスピーカの位置を意識しないで会話ができるなど、距離や場所を意識しないシームレスな音響空間の実現が望まれている。



EC:音響エコーキャンセラ

図 1.1 拡声通話のモデルと音響エコーキャンセラ

図 1.1 にモデル化した拡声通話系と音響エコーキャンセラの関係を示す。テレビ会議などに代表される拡声通話をする場合、マイクロホンから入った自分の声はネットワークを経由して相手のスピーカから出ることになる。いったん相手側に出た声は相手側のマイクロホンに拾われ、ネットワークを経由して再びこちら側のスピーカから出る。つまり、自分がしゃべる声に戻ってくることによるエコーが生じる。スピーカから出た自分の声は、再び自分側のマイクロホンで拾われるので拡声通話系の利得設定によってはエコーだ

けでなく、ハウリングを生じる場合もある。音響エコーキャンセラは、このようなスピーカからマイクロホンに回り込む音を消去する装置である。

シームレスな音響環境を実現するためには、スピーカの音量やマイクロホンの感度を十分確保する必要がある。しかしながら、単に音量を確保しようとする、前述のとおりハウリングを起こしてしまうため、高性能エコーキャンセラによってエコーを十分に抑圧し、ハウリングマージンをとることが必要となる。<sup>(1)</sup>

## 2. 研究の目的

音響エコーキャンセラの構成要素である、適応フィルタの基本特性を `matlab` によるプログラムを作成し、評価する。また、ハンドフリー電話機やデスクトップ会議、テレビ会議装置等、拡声通話系を有する通信機器の異なる使用形態や設置音響環境にそれぞれ適応したシステムを提案する。

### 3. 音の大きさ

ここでは、音の大きさを、どのように数値表現するか説明する。音の大きさを数量化するとき、正弦波であれば、振幅でも比較できるが、一般波形の場合、振幅が不規則であり、比較することはできない。そこで、通常はパワーで定量化する。パワー $P$ は音圧 $p(t)$ の二乗平均値である。

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt \quad (1)$$

また、感覚に対応した単位として利用されるのが、[dB]である。[dB]はパワーと基準量を比較した相対値を計算し、常用対数をとった値 Bell を 10 倍した値である。10 倍する理由は、そのままでは、小数点以下が多く、使いにくいからである。人は音のパワーが 1 10 となったのと、10 100 となったのでは、同じような変化を感じる。[dB]では、0[dB] 10[dB]の変化と、10[dB] 20[dB]という変化を表す。

以下、音の大きさを表す単位として、[dB]を用いていく。(2)

## 4. 音響エコーキャンセラの原理

### 4.1 音響エコーキャンセラとは

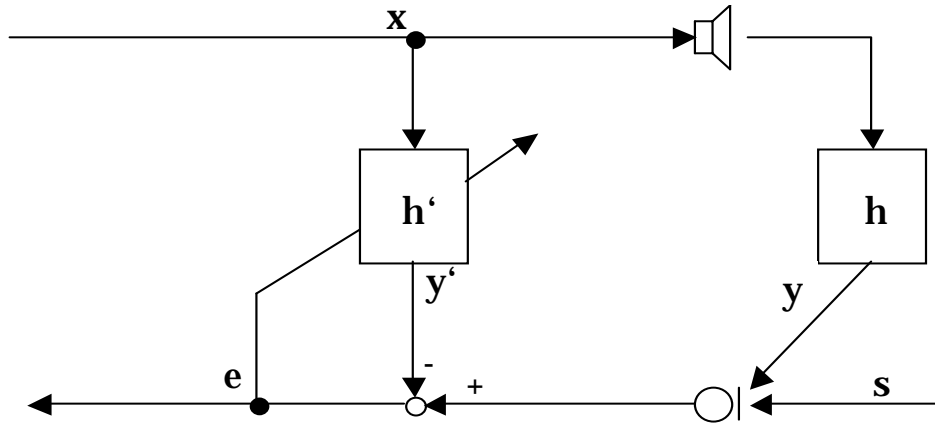


図 4.1 音響エコーキャンセラの原理

エコーキャンセラの原理を図 4.1 に示す。スピーカに入力される受話信号を  $x$ 、マイクロホンで受音されるエコー信号を  $y$  とすると、これらは室内のインパルス応答  $h$  を用いて、 $y=x*h$  ( $*$ は畳み込み演算) と関係づけられる。そこで、音響エコーキャンセラは、この  $h$  の推定値  $h'$  を求め、これにより推定エコー信号  $y'$  を作り、それをマイクロホンでの受音信号から差し引くことで音響エコーを防止する。図の  $s$  はマイクロホンで受音される、入力信号とする。

室内のインパルス応答は、人の移動や扉の開閉などによって時間的変動を伴うため、その推定には適応フィルタが用いられる。適応フィルタは図 4.1 の誤差  $e$  のパワーを最小にするように推定値  $h'$  を逐次的に修正していく。(3)

## 4.2 インパルス応答

アナログ系のインパルス応答は、幅が  $0$  で高さが  $1$ 、積分値が  $1$  のパルス(インパルス信号  $\delta(t)$ )を入力した時の系の出力である。また、デジタル系では、時間  $0$  で値  $1$ 、その他の点では値  $0$  の信号(単位サンプル信号  $\delta(k)$ )に対する応答  $g(k)$ をインパルス応答という。デジタル系の単位サンプル信号  $\delta(k)$ はアナログ系のインパルス信号  $\delta(t)$ と等価である。

インパルス応答は、線形系の全ての情報をふくんでおり、インパルス応答がわかれば、あらゆる入力に対する出力がわかる。また、インパルス応答のフーリエ変換は、その線形系の周波数応答特性となる。<sup>(4)</sup>

### 4.3 畳み込み

インパルス信号  $\delta(t)$  を使うと任意の  $x(t)$  は次のように表現できる。

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \delta(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

この表現を使い、線形系  $T$  に対する入力  $x(t)$  の出力を  $T[x(t)]$  と表すと、その関係は次のようになる。

$$\begin{aligned} y(t) &= T[x(t)] = T\left[\int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \delta(t - \tau) d\tau\right] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} T[x(\tau) \delta(t - \tau)] d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) T[\delta(t - \tau)] d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau \end{aligned} \quad (3)$$

ここで  $h(t) = T[\delta(t)]$  であり、シフト不変性を仮定すれば、

$$h(t) = T[\delta(t)] \quad (4)$$

上式の定義からわかるように、 $h(t)$  はこの系のインパルス応答である。

$t - \tau = \theta$  と変換すれば、

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau = \int_{\infty}^{-\infty} x(t - \theta) h(\theta) (-d\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \theta) h(\theta) d\theta \quad (5)$$

上式から、線形系の入出力はその系のインパルス応答によって完全に表現できることがわかる。

系の入力  $x(t)$  と出力  $y(t)$  の関係が式(3)または式(5)によって表されるとき、出力  $y$  を、入力  $x$  と系のインパルス応答  $h$  との畳み込みといい、次のように表す。

$$y = x * h \quad \text{または} \quad y = h * x \quad (6)$$

畳み込み表現においては畳み込まれる関数の順序は重要ではない。<sup>(5)</sup>



## 4.4 適応フィルタ

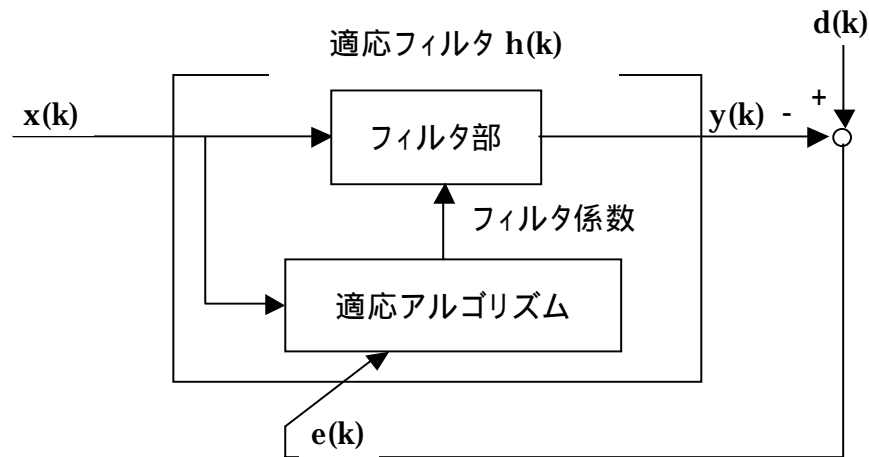


図 4.2 適応フィルタの原理

適応フィルタの原理を図 4.2 に示す。図 4.2 において、 $x(k)$  および  $y(k)$  は、それぞれ適応フィルタの入力信号および出力信号を表す。ただし、 $k$  は離散的時間を表す変数とする。また、 $d(k)$  は目的信号と呼ばれる信号で、 $e(k)$  は誤差信号である。このとき、適応フィルタは、出力  $y(k)$  が目的信号  $d(k)$  に似た信号になって、誤差  $e(k)$  のパワーが小さくなるように、自分自身の特性を修正する。そして、その修正は、入力  $x(k)$  および誤差  $e(k)$  に基づいて、時間の経過とともに行われていく。フィルタ特性の修正手順は、適応アルゴリズムと呼ばれ、種々の手法が知られている。

適応フィルタの内部は入力信号  $x(k)$  をフィルタリングして出力信号  $y(k)$  を生成するフィルタ部と、そのフィルタ特性を適応アルゴリズムに基づいて修正する適応部とから構成される。

## 4.5 適応アルゴリズム

適応アルゴリズムとは、各時間において観測される入力  $x(k)$  と誤差  $e(k)$  に基づいて、係数  $h(k)$  を最適係数  $h_0$  に近づけていく修正手順である。適応フィルタの動作開始時刻  $k=0$  において、係数には適当な初期値（例えば、 $h(0)=0$ ）が与えられる。適応アルゴリズムは各時刻  $k$  において、次式に示すように、係数  $h(k)$  を  $h(k+1)$  に修正し、少しずつ最適係数に近づけていく。

$$h(k+1) = h(k) + \delta h(k) \quad (7)$$

上式において、 $h(k)$  は  $L$  次のベクトルであり、これを修正ベクトルと呼ぶ。また、アルゴリズムによっては、修正量の大きさを制御するためのスカラー量を導入して

$$h(k+1) = h(k) + \alpha \cdot \delta h(k) \quad (8)$$

と表す場合もある。この  $\alpha$  は時間  $k$  によらない一定値で、ステップサイズと呼ばれている。

さて、(7)式(8)式の係数修正は、時刻  $k$  において観測される入力  $x(k)$  と誤差  $e(k)$  の基づいて行われる。そして、計算された  $h(k+1)$  と  $x(k+1)$ 、および、 $d(k+1)$  に基づいて、時刻  $k+1$  の誤差  $e(k+1)$  が次式のように決定される。

$$e(k+1) = d(k+1) - x(k+1) * h(k+1) \quad (9)$$

以上説明してきたことに基づいて、適応アルゴリズムの一般的な手順は以下のようなものとなる。

時刻  $k=0$  として、初期値  $h(0)$  を設定する。

時刻  $k$  における誤差  $e(k)$  を次式より計算する。

$$e(k) = d(k) - x(k) * h(k)$$

修正ベクトル  $h(k)$  を計算し、(7)式または(8)に基づいて  $h(k+1)$

を計算する。

$k$  の値を 1 つ増やして、上記 を繰り返す。

適応アルゴリズムとして、LMS アルゴリズムや学習同定法、射影アルゴリズム、RLS アルゴリズムなどが知られている。

今回は適応アルゴリズムとして、学習同定法を用いた。

## 4.6 学習同定法

最初に、学習同定法の動作原理を説明し、アルゴリズムを導く。目的信号  $d(k)$  は最適フィルタに  $x(k)$  を入力した時の出力と考えることができる。そこで、適応フィルタも、 $x(k)$  を入力した時の出力が  $d(k)$  となるように係数を修正する、というのが学習同定法の基本的考え方である。即ち、修正後の係数  $h(k+1)$  が次式の関係を満たすように係数を修正する。

$$x(k) * h(k) = d(k) \quad (10)$$

時刻  $k$  における係数の修正式が

$$h(k+1) = h(k) + \delta h(k) \quad (11)$$

と表されるものとし、(11)式を(10)式に代入して整理すると、

$$x(k) * \delta h(k) = d(k) - x(k) * h(k) = e(k) \quad (12)$$

が得られる。これより、学習同定法の修正ベクトル  $h(k)$  は、(12)式を満たすように決定される。

しかし、(12)式は、未知数 ( $h(k)$  の要素  $h_i(k), i=1, \dots, L$ ) が  $L$  個であるのに対して、満たすべき方程式の数は一個であるため、その解は無数に存在する。そこで、学習同定法では、(12)式を満たす解の中で、修正量の大きさ、 $h(k)^2$  が最小となるものを選び出す。このような条件を満たす  $h(k)$  は、次式のように求められる。

$$\delta h(k) = \frac{e(k)x(k)}{\|x(k)\|^2} \quad (13)$$

ここで、修正の大きさを制御するステップサイズ  $\mu$  を導入し、また、入力  $x(k)$  が零の時、(13)式の分母項が零になって、アルゴリズムが発散することを防ぐためのパラメータ  $\epsilon$  を導入して、学習同定法の修正式は次式のように表される。

$$h(k+1) = h(k) + \frac{\alpha}{\|x(k)\|^2 + \beta} e(k)x(k) \quad (14)$$

ただし、 $\alpha$  はその性質上、 $0 < \alpha < 2$  の範囲と考えられ、 $\beta$  の値は、通常、十分小さな値に設定するので、以下では  $\beta = 0$  と考える。

## 5. シミュレーションによる、適応フィルタの性能評価

### 5.1 測定方法

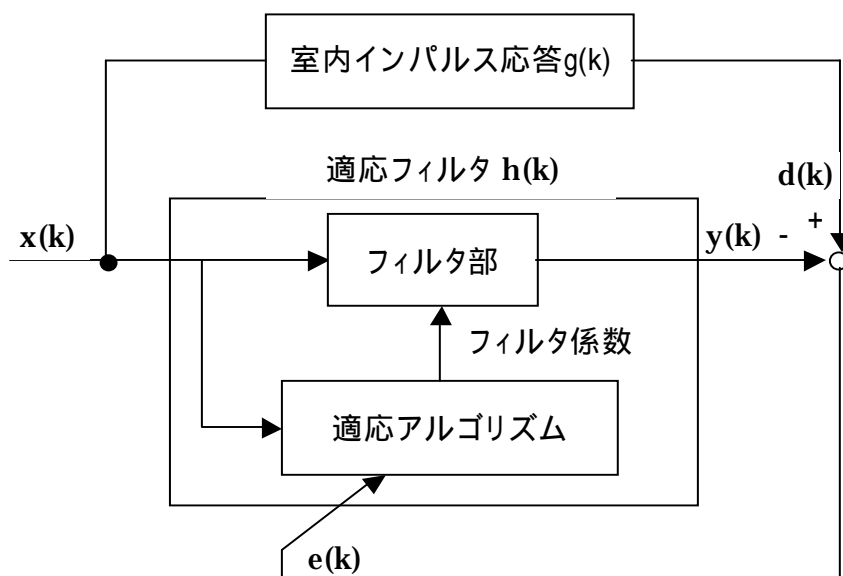


図 5.1 シミュレーションのブロック図

シミュレーションとして、室内(縦 900[cm],横 510[cm],高さ 230[cm],残響時間 0.3[s])のインパルス応答  $g$  を測定し、白色雑音信号  $x$  と畳み込んだものを目的信号  $d$  とする。白色雑音  $x$  を適応フィルタに通し、推定した  $y$  を差し引き、その誤差  $e$  のパワーを測定し、ステップサイズ、フィルタの長さ  $L$  を変化させた場合における、誤差  $e$  のパワーの変化について検討する。

以下に作成したプログラムを掲載する。

```

% xx の合成
Fs=8000;
% サンプリング周波数
k=4*Fs;
% データ xx の長さ
xx=randn(k,1);
% 信号 xx(白色雑音)の合成

% ----- 未知系のインパルス応答 gg -----
% gg (部屋のインパルス応答)を読み込む
[gg0,Fs]=wavread('D:\MATLAB\WORK\sound\imp11.wav');
Lg=500;
% インパルス応答の有効長
gg=gg0(291:290+Lg);
% インパルス応答を短縮(演算量軽減)

% ----- 未知系の出力 dd -----
% 実測した雑音重畳音声 dd の読み込み
% xx と gg を畳み込んで dd を合成

dd=conv(xx,gg);
% xx と gg のたたみこみ
Pd=dd'*dd/length(dd);
% dd のパワー(二乗平均値)の計算
SNR=60;
% dd の SN 比
nnn=randn(length(dd),1)*10^(-SNR/20)*sqrt(Pd);
% SN 比 SNR で雑音を付加
dd=dd+nnn;
% SN 比 SNR で雑音を付加

% ----- 適応フィルタ hh の設定 -----
L=500;
% フィルタの長さを決定
hh=zeros(L,1);
% 適応フィルタ係数の初期化(全ての要素が 0 の L*1 の行列を作成)

% ----- パラメータの初期化、など -----
% 全ての要素が 0 の 1*k の行列を作成

yy=zeros(k,1);
% 全ての要素が 0 の k*1 の行列を作成
ee=zeros(k,1);
% 全ての要素が 0 の k*1 の行列を作成
ee1=zeros(k,1);
% 全ての要素が 0 の k*1 の行列を作成
alp=1;
% ステップサイズの設定

% ----- 適応フィルタの動作開始 -----
Nrep=length(xx)-L;
% 適応フィルタの動作時間長
for ip=1:Nrep;
% ip が 1 ~ Nrep まで繰り返す

```

```

xxx=xx(ip:ip+L-1);
% L次の入力ベクトル xxx
yy(ip)=hh'*xxx;
% 信号 xx を適応フィルタ hh にかけて、出力 y を計算する
ee(ip)=dd(ip+L-1)-yy(ip);
% 誤差 ee の計算
ee1(ip)=ee(ip)-nnn(ip+L-1);
hh=hh+alp*ee(ip)*xxx/(xxx'*xxx);
% 誤差をもとに、学習同定法で適応フィルタを修正する。
end

% 誤差の減少のをグラフにして確認

figure(1)
plot(gg)
hold on
plot(flipud(hh),'r')
% 推定された未知系のインパルス応答の図示
title('推定した未知系のインパルス応答')

Pee=ee.*ee/Pd;
% 誤差 ee の二乗と正規化
Pee1=ee1.*ee1/Pd;
Pee2=conv(Pee,ones(100,1))/100;
% 誤差を平均する(平坦化)
Pee3=conv(Pee1,ones(100,1))/100;

figure(2)
plot(10*log10(Pee2+10^(-10)));
% 誤差パワーをプロット
axis([0,31000,-140,20])
% グラフの範囲を設定
grid
% 目盛りをつける
ylabel('誤差パワー [dB]')
title('誤差パワーの減少')
hold on

figure(3)
plot(10*log10(Pee3+10^(-10)),'b');
% 誤差パワーをプロット
axis([0,31000,-70,5])
% グラフの範囲を設定
grid
% 目盛りをつける
ylabel('誤差パワー [dB]')
title('誤差パワーの減少')
hold on

return

```



## 5.2 結果検討

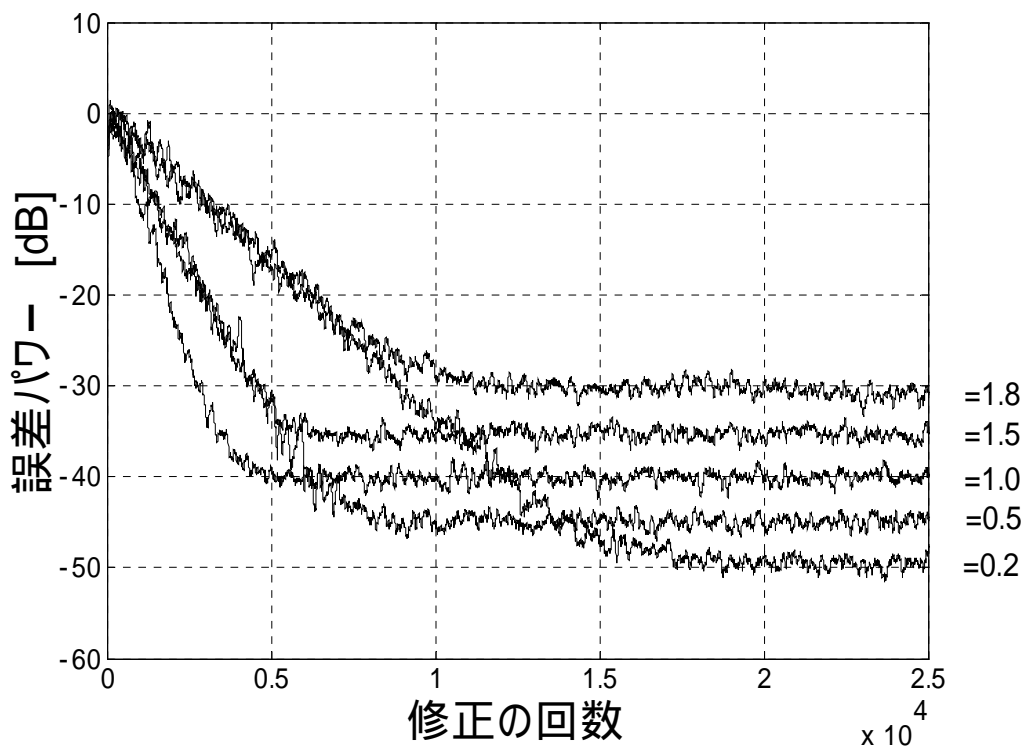


図 5.2 を変化させたときの誤差パワーの変化(L=500)

図 5.2 はステップサイズ を変化させたとき、誤差パワーの減少経過の変化を表したものである。縦軸は誤差パワー、横軸は経過時間として、修正の回数を表しており、修正の回数 8000 回が経過時間 1 秒に相当する。

図 5.2 から読み取れることを以下にあげる。まず、ステップサイズ を大きくすると、誤差パワー大きくなっていることがわかる。また、変化の様子に注目すると、0.2 と 1.8、0.5 と 1.5 それぞれにおいて、傾きが同じように読み取れる。これは、ステップサイズ の規則性として、あるステップサイズ  $a(0 < a < 2)$  を考えた場合、 $a$  と  $2-a$  の傾きが同じになると仮定できる。

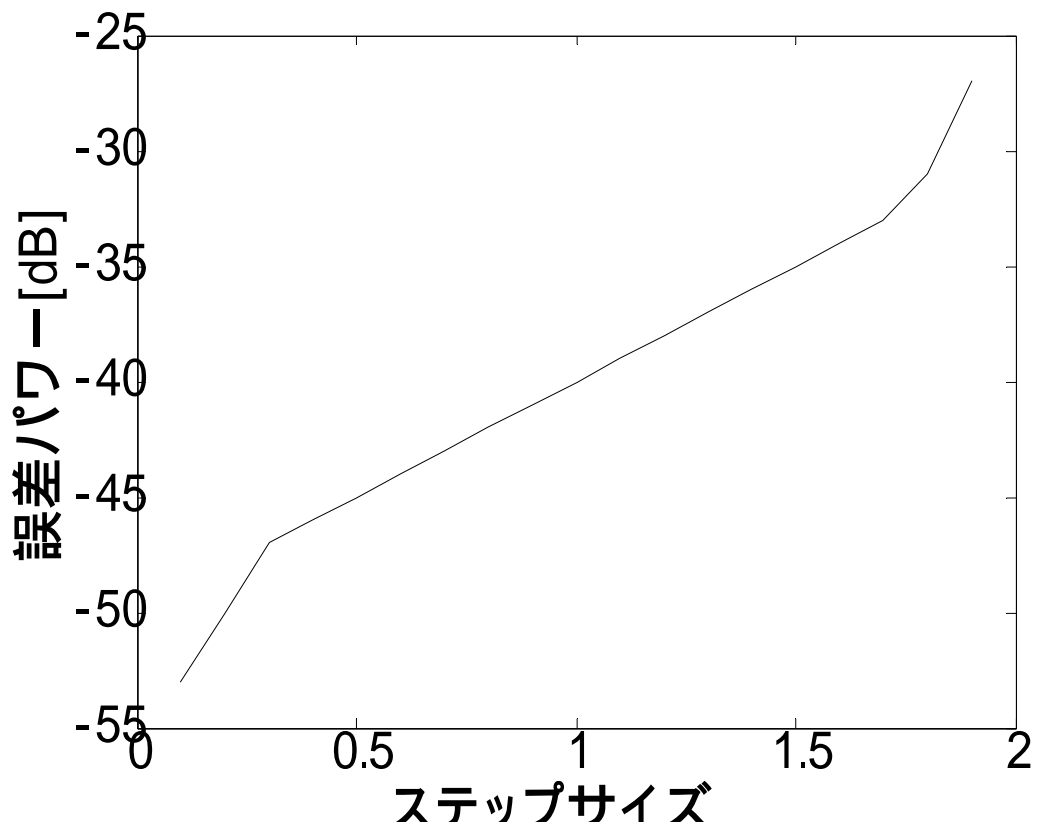


図 5.3 誤差パワーとステップサイズの関係

図 5.3 は誤差パワーとステップサイズの関係を表している。縦軸は誤差パワー、横軸はステップサイズ の値を表している。

図 5.3 から読み取れることをあげると、ステップサイズ が大きくなるにつれ、誤差パワーは大きくなっていることがわかる。

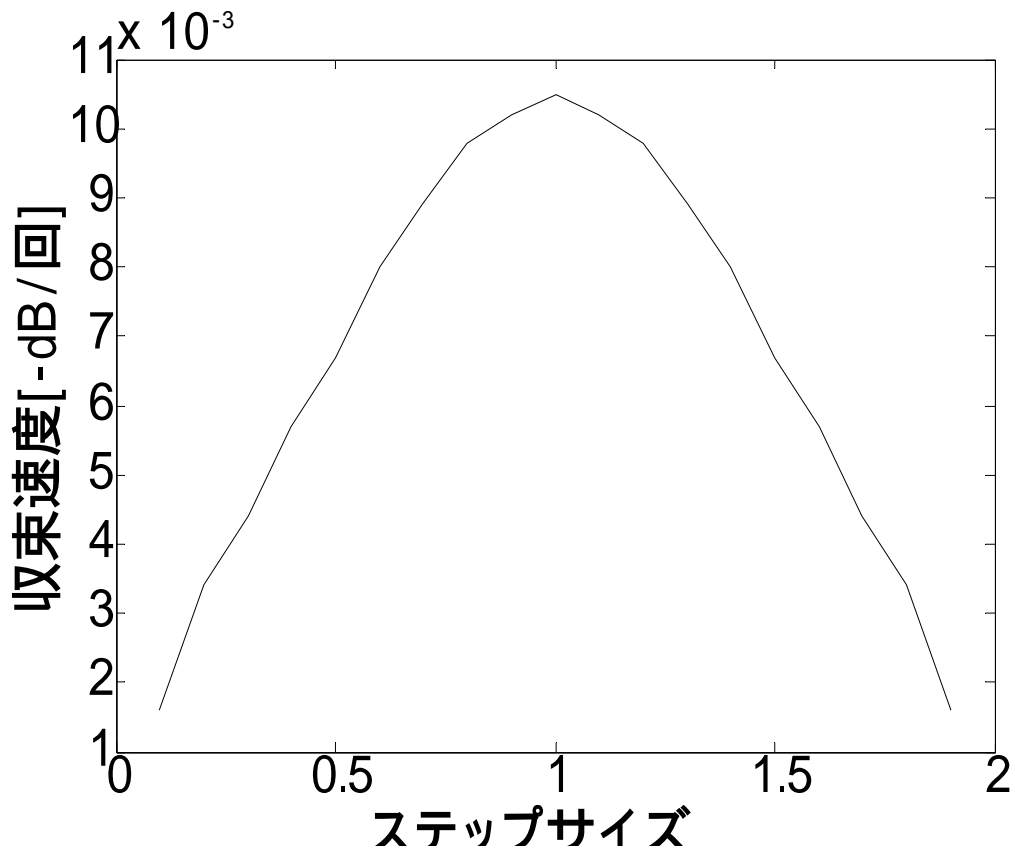


図 5.4 収束速度とステップサイズの関係

図 5.4 は収束速度とステップサイズの関係を表している。縦軸は収束速度、横軸はステップサイズ の値を表している。

図 5.4 から読み取れることをあげると、ステップサイズ が  $0 < \alpha < 1$  の範囲にあるとき、収束速度は次第に速くなっていくが、 $1 < \alpha < 2$  の範囲にあるときには収束速度は次第に遅くなっていく。また、図 5.2 で述べた規則性を検討してみると、図 5.4 からその規則性(あるステップサイズ  $a(0 < a < 2)$  を考えた場合、 $a$  と  $2-a$  の傾きが同じになる)を読み取ることができる。その変化の仕方は、二次関数的と読み取ることができる。

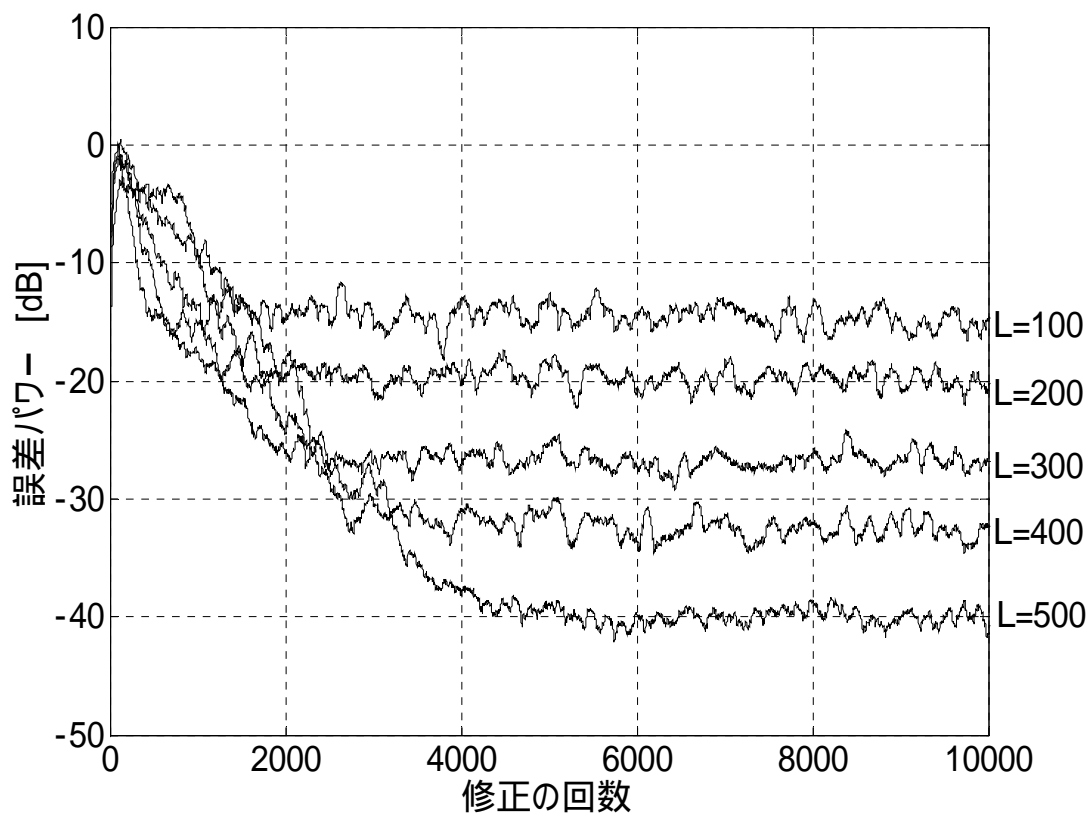
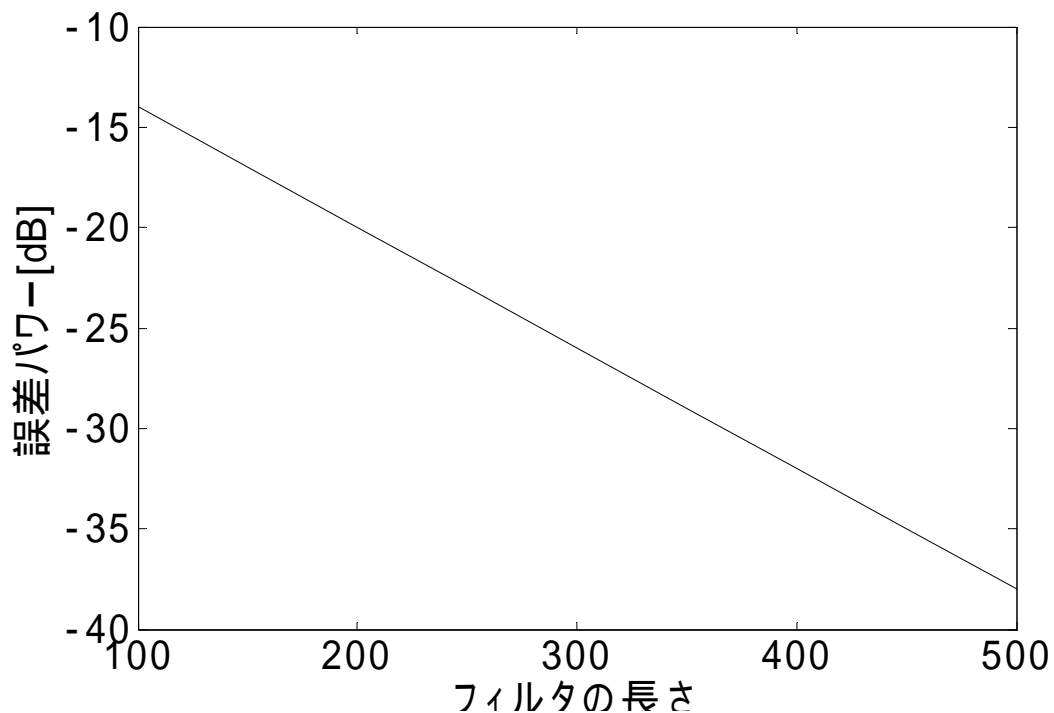


図 5.5 L を変化させたときの誤差パワーの変化(  $\alpha=1.0$  )

図 5.5 はフィルタの長さ  $L$  を変化させたとき、誤差パワーの変化を表したものである。縦軸は誤差パワー、横軸は経過時間として、修正の回数を表示しており、修正の回数 8000 回が経過時間 1 秒に相当する。

図 5.5 から読み取れることとして、フィルタの長さ  $L$  を長くすると、誤差パワーは次第に小さくなっていることが読み取れる。また、フィルタの長さ  $L$  を長くすると、収束速度は次第に遅くなっていることが読み取れる。



**図 5.6 誤差パワーとフィルタの長さの関係**

図 5.6 は誤差パワーとステップサイズの関係を表している。縦軸は誤差パワー、横軸はフィルタの長さ  $L$  の値を表している。

図 5.6 から読み取れることをあげると、フィルタの長さ  $L$  が長くなるにつれ、誤差パワーは小さくなっていることがわかる。その変化の仕方は、比例的と読み取ることができる。

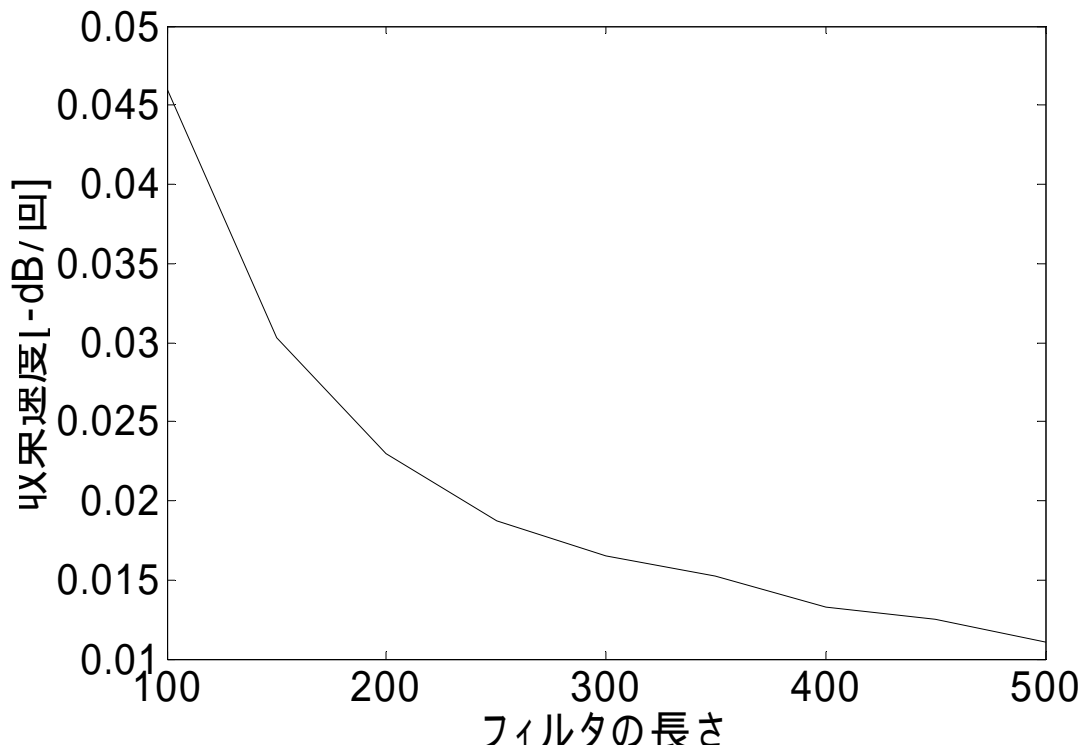


図 5.7 収束速度とフィルタの長さの関係

図 5.7 は、収束速度とフィルタの長さ  $L$  の関係を表している。縦軸は収束速度、横軸はフィルタの長さ  $L$  の値を表している。

図 5.7 から読み取れることをあげると、フィルタの長さ  $L$  を長くすると、収束速度は次第に、遅くなることが読み取れる。その変化の仕方は、反比例的と読み取れる。

### 5.3 まとめ

室内インパルス応答を用いたシミュレーションから以下のことがわかった。

図 5.2 ~ 5.4 から

修正の大きさを制御するステップサイズ  $\Delta t$  は、 $0 < \Delta t < 1$  の範囲で大きくするほど収束速度は速くなるが、誤差パワーは大きくなる。ステップサイズ  $\Delta t$  が 1 を超えた場合、 $\Delta t$  が大きくなるにつれて、収束速度は遅くなり、誤差も大きくなる。したがって、 $\Delta t$  を 1 より大きくすると、その成果は期待できない。

あるステップサイズ  $a$  ( $0 < a < 2$ ) を考えた場合、 $a$  と  $2-a$  の傾きが同じになる。

ステップサイズ  $\Delta t$  を変化させたときの誤差パワーの変化は二次関数的に変化する。

図 5.5 ~ 5.7 から

フィルタの長さ  $L$  は、大きくするほど誤差パワーは比例的に小さくなり、収束速度は反比例的に遅くなる。

## 6. 実測による適応フィルタの性能評価

### 6.1 測定方法

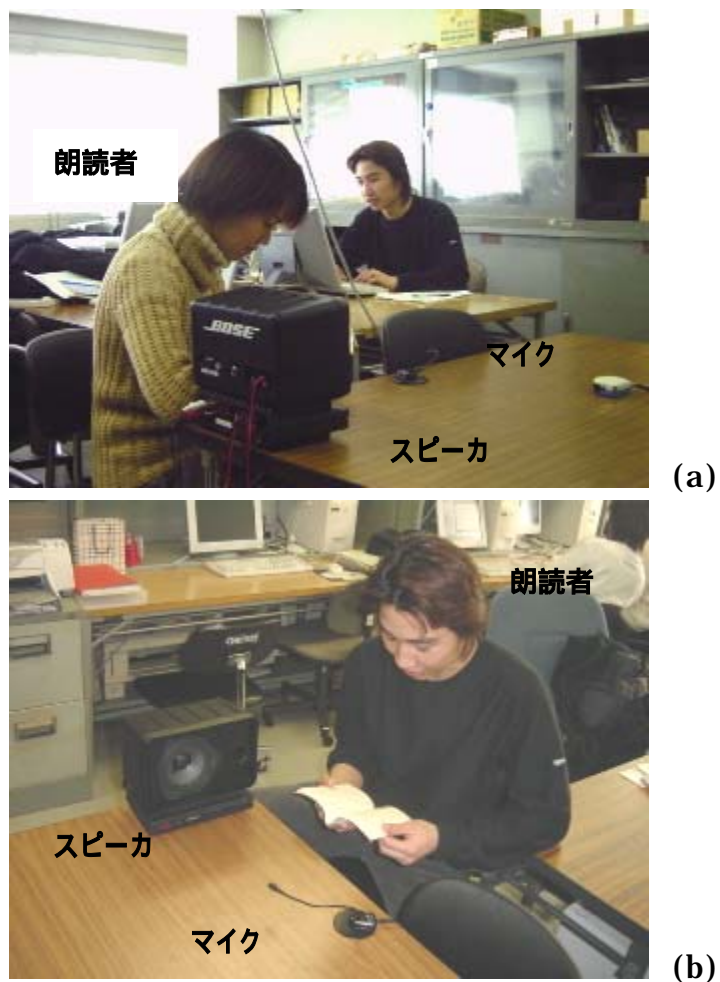


図 6.1 測定風景



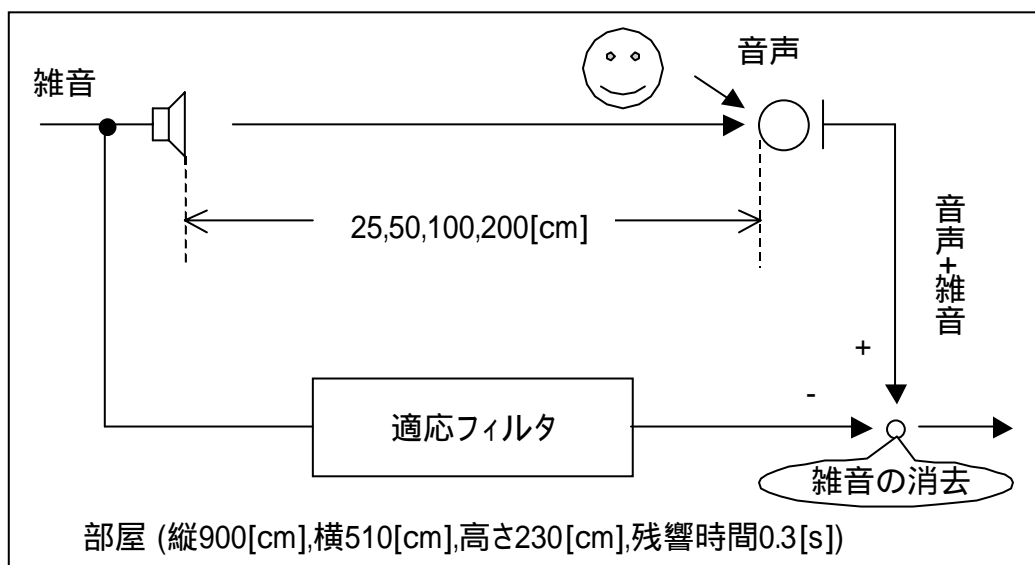


図 6.2 測定配置図

実測として、室内のスピーカから、ある距離にマイクロホンを置き、1 分間ノイズを流しながら録音する。30 秒を過ぎた時点から、人の音声を加える(今回は、ある本を音読したもの)。録音したものを目的信号  $d$  とし、ノイズを適応フィルタに通し、推定した  $y$  を差し引き、ノイズを消去し、音声だけを取り出す。その、ノイズの消去率と、音声の音質について検討する。

今回の実験は、縦 900[cm]、横 510[cm]、高さ 230[cm]、残響時間 0.3[s]の室内で行った。実験のための配置図は図 6.2 に示すように、マイクロホンの位置を 25、50、100、200[cm]と変化させた。

以下に作成したプログラムを掲載する。

```

Clf
    %今までの作業をクリアする

%パラメータの設定
Fs=8000;
    %サンプリング周波数
k=60*Fs;
    %データの長さ
tt=1;
    %フィルタにかける時間を設定
oo=30*Fs;
    %データの中心点を設定
ip0=1+oo-(tt+1)*Fs;
ip1=1+oo-tt*Fs;
    %データのどこからフィルタにかけるかを設定
ip2=1+oo+(tt+3)*Fs;
    %データのどこまでフィルタにかけるかを設定

%データを読み込む
[xx0,Fs]=wavread('D:\MATLAB\WORK\SOUND\xx01.wav');
[dd0,Fs]=wavread('D:\MATLAB\WORK\SOUND\kyoribetu\ddsp25.
wav');
xx=xx0(1:k);        %xx0のうち、1～kまでのデータをxxとする
dsp1=dd0(38585:k);
    %dd0のうち、38501～kまでのデータをdsp1とする
dsp2=dsp1(ip1:ip2);
    %dsp1のうち、ip1～ip2までのデータをdsp2とする
dsp3=dsp1(ip0+L:ip2+L);
    %dsp1のうち、ip0+L～ip2+Lまでのデータをdsp3とする

%フィルタの設定
L=150;
    %フィルタの長さを決定
hh=zeros(1,L)';
    %全ての要素が0の1×Lの行列を作成
ee=zeros(ip2,1);
    %全ての要素が0のip2×1の行列を作成
alp=0.2;
    %誤差の重さを設定

%データを適応フィルタにかける
for ip=ip0:ip2;
    %ipがip1～ip2まで繰り返す
    if mod(ip,1000)==0, disp(num2str(ip)), end
    %進行状況を1000ごとに把握する
    yy=hh'*xx(ip:ip+L-1);
    %信号を適応フィルタにかける
    ee(ip)=dsp1(ip+L-1)-yy;
    %ddとyyの誤差を計算
    if ip>ip1
        hh=hh+alp*ee(ip)*xx(ip:ip+L-1)/(xx(ip:ip+L-1)'*xx(ip:ip+L-1));
        %誤差をもとに、フィルタ係数を修正する。
    end
end
end

```

```

%フィルタにかけた結果をグラフにして確認
Pd=dsp1'*dsp1/length(dsp1);
    %dsp1 を二乗平均する
ee1=ee(ip0:ip2);
Pee=ee1.*ee1/Pd;
    %誤差を二乗平均する
Pee2=conv(Pee,boxcar(100))/100;
    %誤差を平均する
figure(1)
plot(10*log10(Pee2));
    %誤差パワーをプロット
axis([0,14000,-80,20])
    %グラフの範囲を設定
grid
    %目盛りをつける

figure(2)
plot(flipud(hh));

figure(3)
plot(dsp3);
hold on
xlabel('修正の回数');
ylabel('相対音圧')
plot(ee1,'r');
hold off
    %ee1 のグラフを書く

%フィルタにかけた結果を音として確認
dmy=input('?');
    %データ確認のため、一呼吸おく
sound(dsp2,Fs);
    %dp2 を再生
dmy=input('?');
    %作業が同時に実行されないように一呼吸おく
sound(ee1,Fs);
    %ee1 を再生

return

```

## 6.2 結果検討

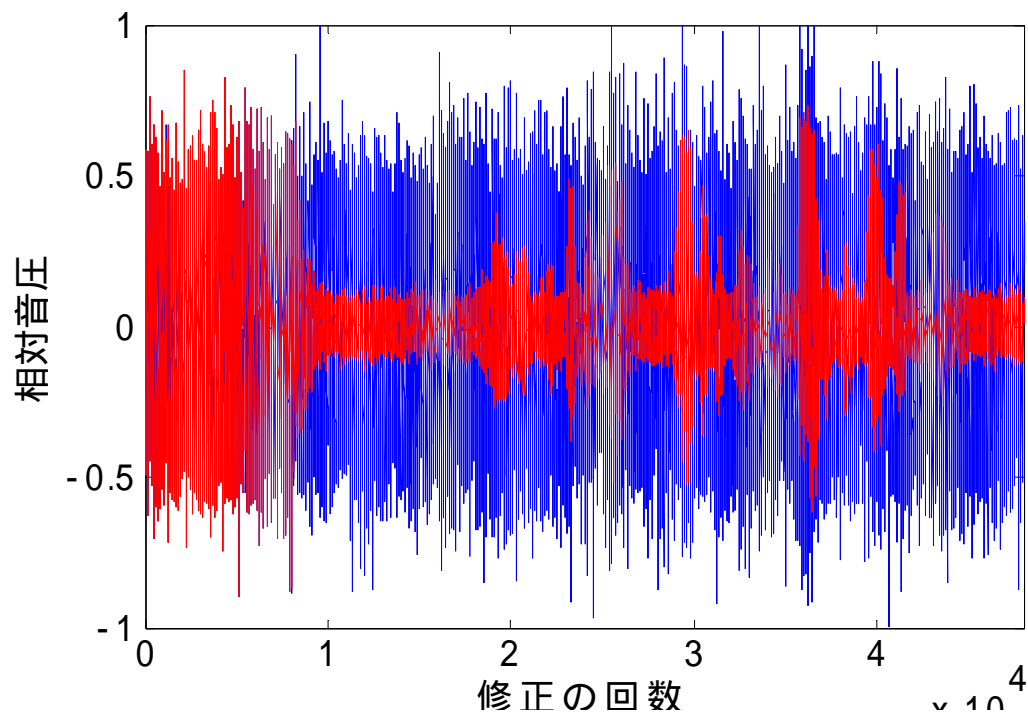


図 6.3 フィルタにかける前と後の波形の比較(25[cm])

図 6.3 はスピーカから、マイクロホンまでの距離が 25[cm]の時のものである。縦軸は相対音圧、横軸は経過時間として、修正の回数を表しており、修正の回数 8000 回が経過時間 1 秒に相当する。青い波形がフィルタにかける前、赤い波形がフィルタにかけた後の波形を表している。

図 6.3 を見てみると、フィルタに通した後には、ノイズに隠れていた音声信号がはっきりと見て取れるようになっている。ノイズ信号も 0.5 ほどあったものが 0.1 ほどまで消去できている。

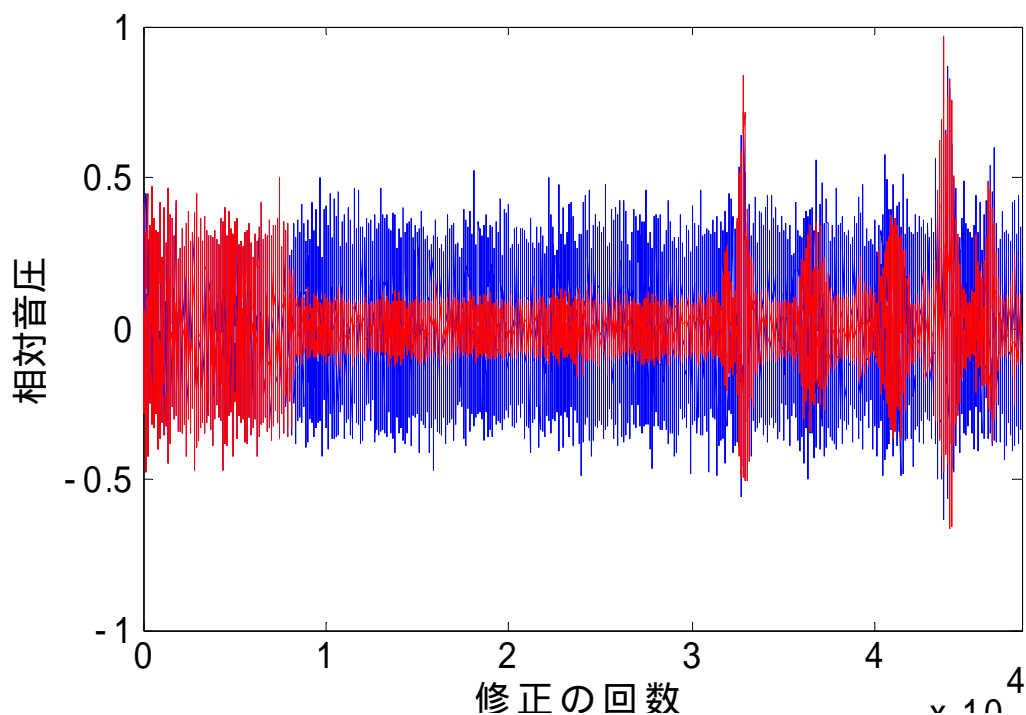


図 6.4 フィルタにかける前と後の波形の比較(50[cm])

図 6.4 はスピーカから、マイクロホンまでの距離が 50[cm]の時のものである。縦軸は相対音圧、横軸は経過時間として、修正の回数を表しており、修正の回数 8000 回が経過時間 1 秒に相当する。青い波形がフィルタにかける前、赤い波形がフィルタにかけた後の波形を表している。

図 6.4 を見てみると、フィルタに通した後には、ノイズに隠れていた音声信号がはっきりと見て取れるようになっている。ノイズ信号も 0.3 ほどあったものが 0.1 ほどまで消去できている。しかし、25[cm]の場合に比べ、響きがあるように感じ取れる。

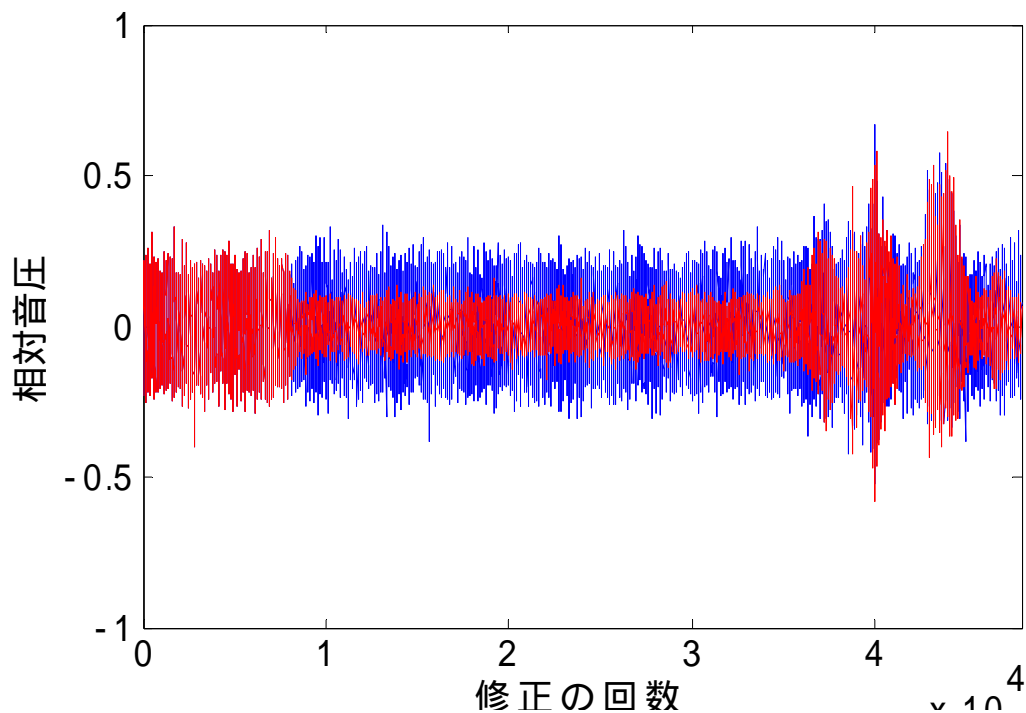


図 6.5 フィルタにかける前と後の波形の比較(100[cm])

図 6.5 はスピーカから、マイクロホンまでの距離が 100[cm]の時のものである。縦軸は相対音圧、横軸は経過時間として、修正の回数を表しており、修正の回数 8000 回が経過時間 1 秒に相当する。青い波形がフィルタにかける前、赤い波形がフィルタにかけた後の波形を表している。

図 6.5 を見てみると、フィルタに通した後には、ノイズが 0.2 から 0.1 ほどに減少しているのが見て取れる。ノイズに比べ、音声信号がしっかりとわかるので、ノイズが減少したというのは感じにくい。けれども、音声信号に響きのようなものが見て取れるようになった。

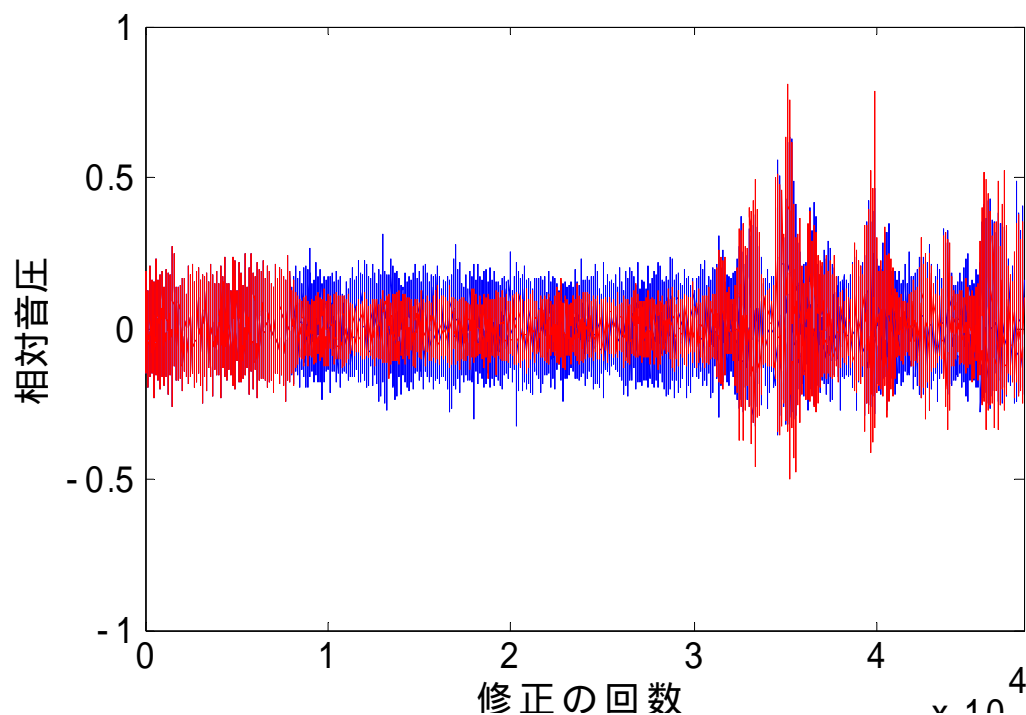


図 6.6 フィルタにかける前と後の波形の比較(200[cm])

図 6.6 はスピーカから、マイクロホンまでの距離が 200[cm]の時のものである。縦軸は相対音圧、横軸は経過時間として、修正の回数を表示しており、修正の回数 8000 回が経過時間 1 秒に相当する。青い波形がフィルタにかける前、赤い波形がフィルタにかけた後の波形を表している。

図 6.6 を見てみると、フィルタに通した後は、ノイズが 0.15 から 0.1 ほどに減少しているのが見て取れる。ノイズに比べ、音声信号がしっかりとわかるので、ノイズが減少したというのは感じにくい。けれども、音声信号に響きのようなものがはっきりと見て取れるようになった。

図 6.3 ~ 6.6 から、マイクロホンからスピーカまでの距離が遠くなるほど、ノイズの消去率は悪くなる。この原因は、距離が短ければ、それだけ直接にスピーカの音が、マイクロホンに録音されるが、長くなればなるほど、部屋の

特性がかかる。そして、部屋の特性は刻々と変化していくので、予測した特性とずれてしまう。したがって、消去率が落ちてしまうと考えられる。

また、マイクロホンからスピーカの距離が遠くなるほど、残響があるような波形を読み取ることができる。この原因は、距離が遠のくほど、部屋の壁などに反射したものがマイクロホンに入ってしまう、それが予想した特性に影響してしまうためだと考えられる。

実際に、距離によって、ノイズの消去率はどのように変化するかを次の図に示す。比較しやすいようにフィルタの長さを統一した。

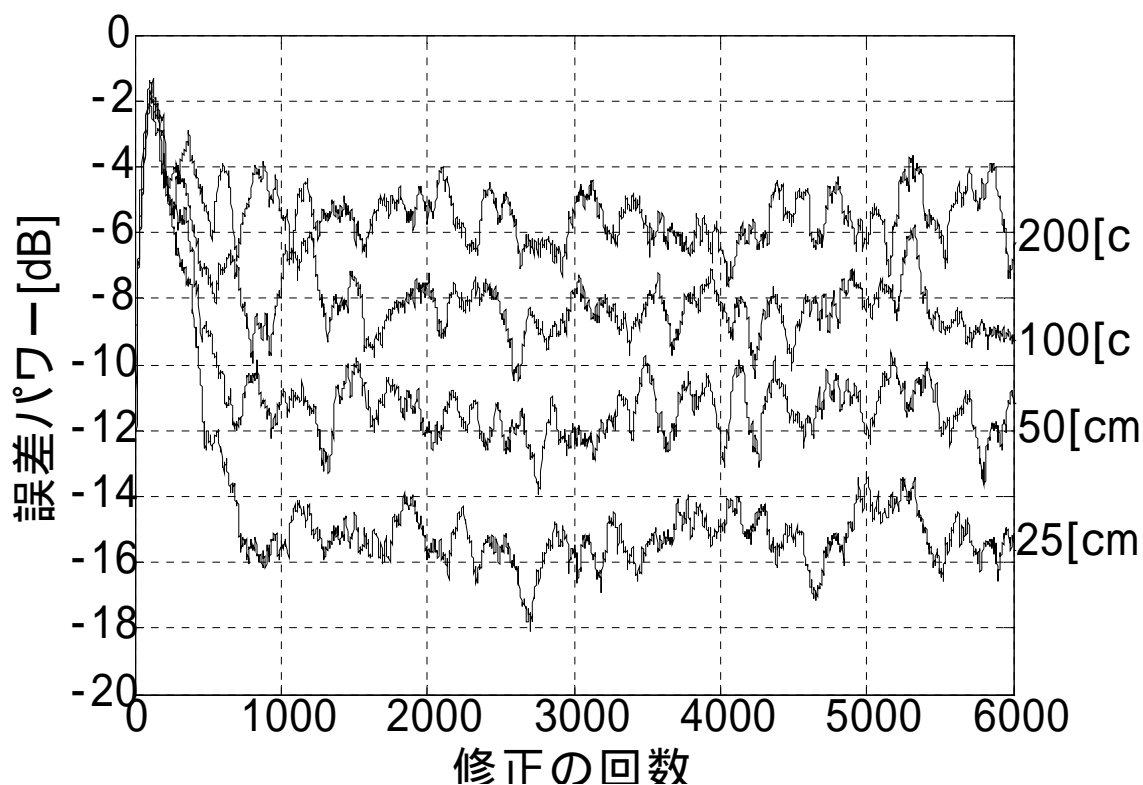


図 6.7 距離による誤差パワーの違い(L=150)



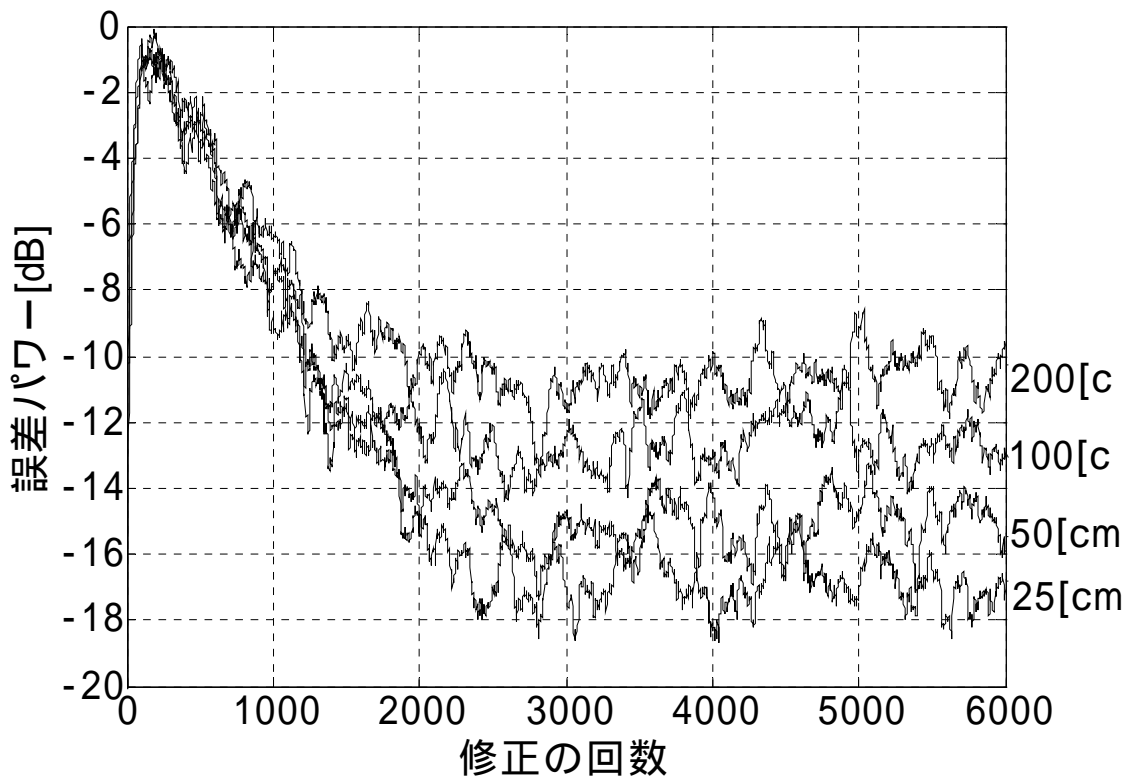


図 6.8 距離による誤差パワーの減少の違い(L=500)

図 6.7 図 6.8 は距離による誤差パワーの変化を表している。縦軸は誤差パワー、横軸は経過時間として、修正の回数を表しており、修正の回数 8000 回が経過時間 1 秒に相当する。図 6.7 はフィルタの長さ  $L$  を  $L=150$ 、図 6.8 はフィルタの長さ  $L$  を  $L=500$  に設定した。

図 6.7 図 6.8 から、スピーカからマイクロホンまでの距離を長くすると、誤差パワーが次第に大きくなっていることが読み取れる。これは、部屋の反響などにより、特性の変化が敏感に関係してくるからと考えられる。また、前述にもあるように、フィルタの長さ  $L$  を長くすると、誤差パワーは下がるが、収束速度は遅くなることが、ここでも読み取れる。

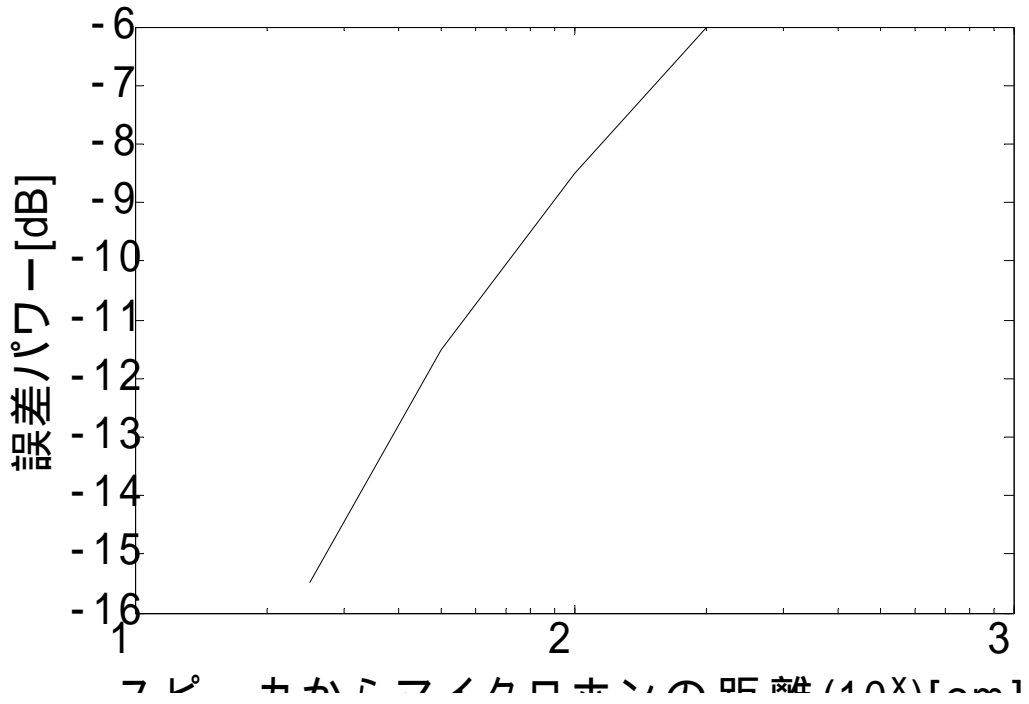


図 6.9 距離による誤差パワーの違い(L=150)

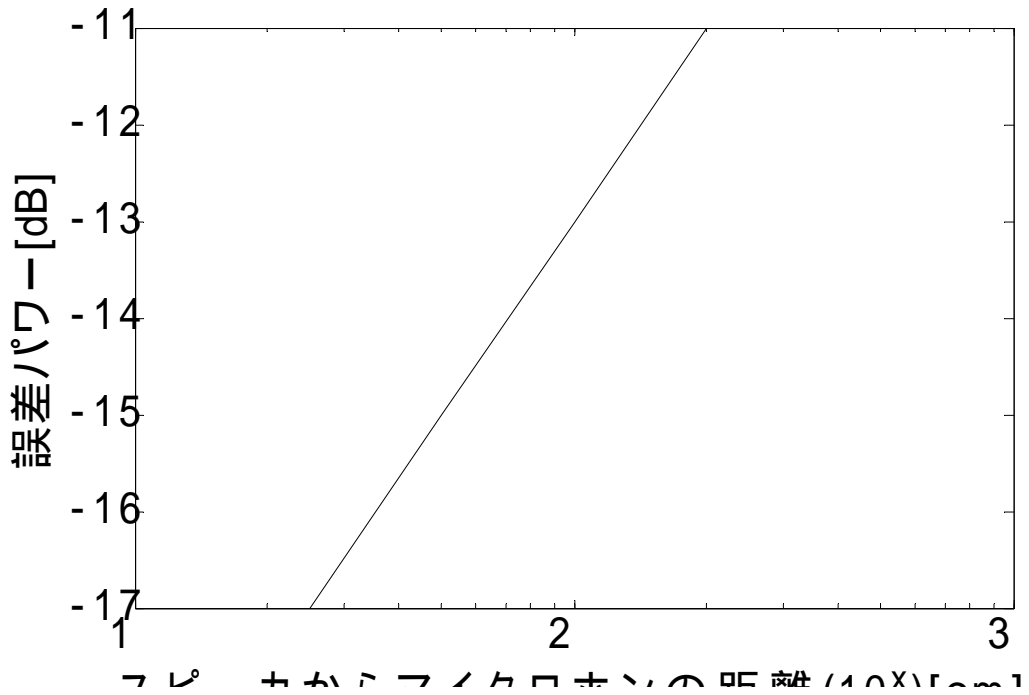


図 6.10 距離による誤差パワーの違い(L=500)

図 6.9 図 6.10 は距離による誤差パワーの変化を表している。縦軸は誤差パワー、横軸はスピーカとマイクロホンとの距離を対数軸で表したものである。図 6.9 はフィルタの長さ  $L$  を  $L=150$  , 図 6.10 はフィルタの長さ  $L$  を  $L=500$  に設定した。

図 6.9 図 6.10 から読み取れることとして、スピーカからマイクロホンまでの距離を長くすると、誤差パワーは次第に大きくなっていることが読み取れる。また、スピーカからマイクロホンまでの距離を長くすると、誤差パワーは対数的に大きくなっていることが読み取れる。これは、部屋の反響などにより、特性の変化が敏感に関係してくるからと考えられる。また、前述にもあるように、フィルタの長さ  $L$  を長くすると、誤差パワーは小さくなることも読み取れる。

## 6.3 まとめ

実測実験から以下のことがわかった。

図 6.3~6.6 から

スピーカからマイクロホンまでの距離を長くすると、次第に誤差パワーは大きくなっていく。

スピーカからマイクロホンまでの距離を長くすると、次第に音声に響きがあるように感じられるようになる。

図 6.7~6.10 から

スピーカからマイクロホンまでの距離を長くすると、誤差パワーは次第に大きくなっていることが読み取れる。その変化は対数的に変化する。

5.3 の で述べたようにフィルタの長さ  $L$  を大きくするほど、誤差パワーは小さくなっている。

## 7 まとめ

本研究ではシミュレーションおよび、実測によって、適応フィルタの処理パラメータと、性能との関係について調べた。

まず、室内インパルス応答を用いたシミュレーションから以下のことがわかった。

修正の大きさを制御するステップサイズ  $\alpha$  は、 $0 < \alpha < 1$  の範囲で大きくするほど収束速度は速くなるが、誤差パワーは大きくなる。

ステップサイズ  $\alpha$  が 1 を超えた場合、 $\alpha$  が大きくなるにつれて、収束速度は遅くなり、誤差も大きくなる。したがって、 $\alpha$  を 1 より大きくすると、その成果は期待できない。

あるステップサイズ  $a$  ( $0 < a < 2$ ) を考えた場合、 $a$  と  $2-a$  の傾きが同じになる。

ステップサイズ  $\alpha$  を変化させたときの誤差パワーの変化は二次関数的に変化する。

フィルタの長さ  $L$  は、大きくするほど誤差パワーは比例的に小さくなり、収束速度は反比例的に遅くなる。

次に、実際の室内において、音声と雑音の混じった受信信号から雑音を抑圧するという実験を行い、以下のことがわかった。

図 6.3~6.6 から

スピーカからマイクロホンまでの距離を長くすると、次第に誤差パワーは大きくなっていく。

スピーカからマイクロホンまでの距離を長くすると、次第に音声に響きがあるように感じられるようになる。

スピーカからマイクロホンまでの距離を長くすると、誤差パワーは次第に大きくなっていることが読み取れる。その変化は対数的に変化する。

で述べたようにフィルタの長さ  $L$  を大きくするほど、誤差パワーは小さくなっている。

これらのことより、最適な適応フィルタというのは、処理速度と消去率をどれほど求めるかによって変わってくることがわかる。また、使用する音響環境条件によって、その性能も変わってきてしまう。

例えば、ハンドフリー電話機は個人が家庭、またはオフィスで使い、送・受話距離  $50\text{cm}\sim 1\text{m}$  くらいで普通の部屋で使うと考えられる。さらに、エコーの発生状況に密接に関係のあるスピーカ、マイクロホンの距離については、 $5\sim 20\text{cm}$  と考えられる。

デスクトップ会議はオフィスで使い、送・受話とも  $1\sim 2\text{m}$  くらいでカーペット、天井の吸音ボードなどにより多少の吸音処理が成されている部屋で使う場合が多い。スピーカとマイクロホンの距離については  $50\text{cm}\sim 1\text{m}$  と考えられる。

テレビ会議装置は特定の会議室で多人数で使う場合が多く、送話距離  $50\text{cm}\sim 1\text{m}$ 、受話距離  $2\sim 5\text{m}$  くらいでカーペット、天井の吸音ボードなどにより多少の吸音処理が成されている部屋で使う場合が多い。スピーカとマイクロホンの距離については  $2\sim 5\text{m}$  と考えられる。

これらの違いをエコーキャンセラのフィルタ長 ( $8\text{kHz}$  サンプリングの場合) で考えてみるとおおむね図 7.1 のように書くことができる。<sup>(6)</sup>

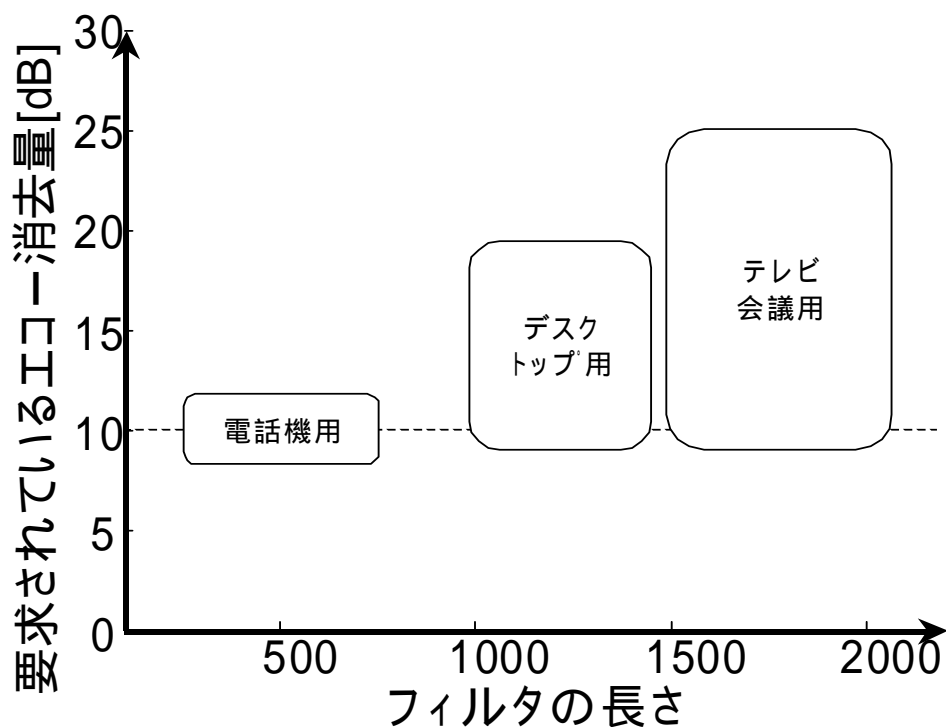


図 7.1 エコーキャンセラの規模と適応域<sup>(6)</sup>

図の縦軸は要求されるエコー消去量であり、横軸はフィルタの長さをサンプリング数で表している。<sup>(6)</sup>

本研究の結果を応用して、図からわかるように用途によって、要求されるエコー消去量とフィルタの長さは異なっており、これに基づいて、ステップサイズパラメータやフィルタの長さを定めて、最適な適応フィルタ特性をシステム化することができるようになる。

## 8 参考文献

- ( 1 ) 北脇信彦・小島順治：“シームレスな音響環境の実現を目指して”,NTT R&D vol.44 No.1,1995 年,pp.33~35
- ( 2 ) 金田豊：デジタル信号処理の基礎,日本音響学会第 67 回技術講習会資料,1999 年 11 月発行
- ( 3 ) 大賀寿郎・山崎芳男・金田豊：音響システムとデジタル処理,電子情報通信学会,1995 年 3 月発行,pp.209 ~ 214
- ( 4 ) 金田豊：デジタル信号処理の基礎,日本音響学会第 67 回技術講習会資料,1999 年 11 月発行,pp.22~24
- ( 5 ) 金田豊：デジタル信号処理の基礎,日本音響学会第 67 回技術講習会資料,1999 年 11 月発行、pp.25~27
- ( 6 ) 小島順治・牧野昭二・羽田陽一・島内末廣：“高性能音響エコーキャンセラの開発”,NTT R&D vol.44 No.1,1995 年.p.41

## 9 謝辞

本研究を進めるに当たり、提案、指導をしていただいた、本学物質工学科田巻明教授、並びに情報通信工学科金田豊教授、音響信号処理研究室の卒研究生の皆様に厚くお礼申し上げますとともに、深く感謝します。