

## 第Ⅳ章 研究資料

1. 半田浩規：エコーに基づく音電子透かしの空気伝搬耐性に関する検討，東北大学卒業論文，東北大学工学部情報工学科，2007

本論文は，カクトウ氏の修士論文「LDPC符号による音電子透かしの耐性強化に関する研究」に続いて東北大学において取り組まれた研究の1つであり，空気伝搬を目的とした音電子透かしの組み込み方式としてエコー法よりも，エコー拡散法（PN系列が2<sup>5</sup>）が優れていることを実験的に明らかにするなど，今後の音響のバリアフリー技術開発に重要な貢献が期待されるため研究資料として掲載する。



東北大学卒業論文

エコーに基づく音電子透かしの  
空気伝搬耐性に関する検討

2007年3月27日  
東北大学工学部  
情報工学科  
半田 浩規



# 目次

第 1 章 序論	41
1.1 研究背景	41
1.1.1 はじめに	41
1.1.2 ユニバーサルデザイン	41
1.1.3 聴覚障害者補助システム	42
1.2 電子透かし	43
1.3 本研究の目的	43
第 2 章 エコーに基づく音電子透かし	45
2.1 はじめに	45
2.2 埋め込み手法	45
2.2.1 エコー法	45
2.2.2 エコー拡散法	46
2.3 空気伝搬実験	49
2.3.1 実験方法	49
2.3.2 提示音圧レベル	49
2.3.3 エコー法	52
2.3.4 エコー拡散法	54
2.4 雑音耐性実験	55
2.4.1 はじめに	55
2.4.2 エコー法	55
2.4.3 エコー拡散法	57
2.5 拡散長の変化による検出性能の優劣に関する検討	58
2.5.1 はじめに	58
2.5.2 評価指標 $d'$	58
2.5.3 実験方法	59
2.5.4 空気伝搬	60

2.5.5	雑音耐性 . . . . .	61
2.6	まとめ . . . . .	63
<b>第 3 章</b>	<b>エコーに基づく音電子透かしの空気伝搬による性能劣化に関する検討</b>	<b>65</b>
3.1	はじめに . . . . .	65
3.2	劣化要因 . . . . .	65
3.3	劣化量に関する検討 . . . . .	67
3.3.1	デジタル・アナログ変換 . . . . .	67
3.3.2	妨害音 . . . . .	68
3.4	チップレートに関する耐性強化 . . . . .	69
3.4.1	はじめに . . . . .	69
3.4.2	実験方法 . . . . .	69
3.4.3	検出性能評価実験 . . . . .	70
3.5	雑音耐性に関する検討 . . . . .	70
3.6	まとめ . . . . .	72
<b>第 4 章</b>	<b>結論</b>	<b>73</b>
	謝辞	75
	参考文献	77

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 はじめに

視覚障害者のための点字ブロックや、車椅子生活者のためのスロープ等、我々は日常生活の中でいたるところで、日常生活に何らかの障害をもった人のための設備というものを目にする。このような「障害者に対してより快適な生活を提供する」、「障害者に対するバリアを減らす」ことを目的とした運動のことをバリアフリーデザイン、または単にバリアフリーと呼ばれる。しかし、近年の米国においては「バリアフリー」という言葉は、障害者のみが使う仕様を意味するものとして否定的に捉えられており、肯定的な用語として「ユニバーサルデザイン」が用いられている。これは、機会均等の議論における「分離されているは平等ではない」という概念に起因する。欧州および日本では、バリアフリーは肯定的で幅広い表現であるユニバーサルデザインを意味する用語として用いられていたものの、欧州では1967年以降、「デザインフォーオール (design for all: すべての人のためのデザイン)」のほうが一般的となっており、日本でも、「ユニバーサルデザイン」が広く使われている。

### 1.1.2 ユニバーサルデザイン

ユニバーサルデザインという言葉は、米国で RonMace(1985) によって初めて使われた。意味は、デザインにおける機会平等と社会公正を示すというものである。つまり、製品、建築物、環境を、障害、年齢、性別等、人が持つそれぞれの個人の特性というものを超えて、できるだけすべての人があらかじめ使えるようにデザインしようとする概念である [1]。この用語は障害者に限定しているという差別的でなく、幅広い用語として用いることができる。

文字が大きく書かれた道路標識はこの一例で、視力が低下した人に対してという側面はあるが、誰もが分かりやすく、認識しやすいという理由から、文字の大きい道路標識

が設置されている。他にも、車椅子利用者だけでなく妊婦やお年寄りなど誰でも安心して使える多目的トイレなどが例として挙げられる。つまりユニバーサルデザインという考え方を適用すると、はじめから様々な個人の特性を考慮してデザインすることによって、あらゆる人が快適に暮らせるようになるだけでなく、個々の特性に応じたモノを新たに作る必要がなくなる。

### 1.1.3 聴覚障害者補助システム

聴覚障害者にとって、公共の場にて流れる公共放送(アナウンス音)は聞き取りにくい、あるいは聞き取ることができないものである。すなわち聴覚障害者は、音声など日常に存在する音による情報を得ることができないということが出来る。例としては、駅のホームにおける電車の到着を知らせるアナウンス音が挙げられる。ユニバーサルデザインの考え方に基づいて、聴覚障害者にも報知内容を届ける場合、次の2種類の方法が考えられる。方法のうち1つはアナウンスされる情報を電子メールのような形で無線にて知らせるという方法である。しかし、これでは、アンテナの設置などの施設設備が必要である。また、聴覚障害者が聞くことができないアナウンス音が存在するのは駅のホームだけではなく、日常で数多く存在し、さまざま場所で、このシステムを適用させるとなるとコスト面の負担はなおのことである。つまり、技術的には正確に伝達することができるかもしれないが、コストの面で現実的ではない。

もう1つの方法は、公共放送の音信号自体に、情報を付加し、聴覚障害者の持つ携帯端末などで情報を抽出することで、音声による情報をディスプレイ上に視覚的に提示する方法である。この場合、アンテナ等の新しい通信機器が必要とならないのに加えて、情報の伝達手段として音を用いていることで、よりユニバーサルデザイン環境が実現可能である。また、この方法を用いると、聴覚障害者のためだけでなく、例えば外国において、外国語のアナウンス音の意味が分からない場合、付加情報により母国語に翻訳されて画面に表示されるといったことにも応用可能である。さらに、この方法が発展した場合、日常に存在するありとあらゆる音を携帯電話等の端末に取り込むだけで、音声で伝達されている情報と同一の情報を得ることが出来るというユビキタスな環境を実現できる可能性もある。

情報を付加する方法として、人間には聴くことのできない高周波数帯域を用いて情報の伝達をすればよいということも考えられるが、駅のプラットホーム等公共施設に設置されている市販のオーディオ機器では超音波を再生録音できるものは少なく、結局新し



い通信デバイスを設置する必要が出てくる。つまり、一般のスピーカ・マイクでも扱うことができる可聴域に、情報を付加しなくてはならない。この条件を満たす技術として音電子透かしがあり、本論文では、ユニバーサルデザインに向けた聴覚障害者補助システムを起因とした、よりユビキタスな環境の実現のための音電子透かしの検討を行う。

## 1.2 電子透かし

紙幣の本物か偽物かを見分けるのに、色合いやインク、紙質などの印刷条件と紙幣番号、透かしなどの付加条件がある。特に自動販売機などにおいて本物か偽者かを機械的に判定するうえで、この透かし模様は必要不可欠な情報となっている。この概念をマルチメディアに応用したものが電子透かし (digital watermark) である [2]。

つまり電子透かしとは、画像や動画、音声などのマルチメディアデータに、画質や音質にほとんど影響を与えずに透かしとして付加情報を埋め込む技術である。現在用いられている主な電子透かしの利用目的は、著作権保護であり、埋め込む情報として、コンテンツの著作権を所有しているということを記録する著作権情報や、コンテンツの所有者が不正コピーを行った場合のそのコピーをした人を特定するために利用される購入者情報、コンテンツを人から人、コンピュータからコンピュータに受け渡されるたびに、そのユーザの識別符号を記録し、不正コピーされたコンテンツの流通経路を調査するために利用される利用者情報などがある。

このような利用法において、音電子透かしに求められることは、著作権情報などの埋め込まれた透かし情報が欠落しないまま永久に保存されることである。そのためには、コンテンツの編集、圧縮、切り出し等デジタルデータを扱う上で行う操作に対して情報が失われないこと、改ざん、消去などの悪意ある攻撃に対しても情報が失われないことが必要となる。

## 1.3 本研究の目的

音電子透かしの聴覚障害者補助利用を考えたとき、音電子透かしの特性として、以下のことが重要となる。

1. 空気中を伝搬しても、透かし情報が正しく検出されること。
2. 埋め込み前の原信号を必要としない検出ができるブラインド、セミブラインドな音電子透かしである。

### 3. 情報を提示するのに十分なビットレートで伝送できること.

ここで、ブラインドな音電子透かしとは、透かしを検出する際に原信号や鍵を必要としない音電子透かしであり、セミブラインドな音電子透かしとは、原信号は必要としないが、秘密鍵を必要とする音電子透かしのことをいう。

つまり、著作権保護技術のための電子透かしの場合とは異なり、以上の3つに適した音電子透かしが必要となる。もちろん電子透かしを埋め込んでも知覚されないようであればよりよい埋め込み手法ということができる。本研究の目的は、提案されている音電子透かしの中で、上記の条件を考慮した上で適していると考えられるエコーに基づく音電子透かしを用いて、どの程度の検出性能を有しているのかの検討を行うことと、その空気伝搬過程における検出性能の劣化要因を探り、その改善策の検討を行うことである。本論文の構成は以下のようである。

第1章は序論である。ここでは、本研究の背景および電子透かしについて述べる。第2章では、エコーに基づく音電子透かしの埋め込み手法について述べ、どの程度空気伝搬に対する耐性の検討を行う。第3章では、空気伝搬時における具体的な劣化要因を挙げ、どの程度影響するのかという検討を行い、その改善策について検討を行う。第4章は結論である。

## 第2章 エコーに基づく音電子透かし

### 2.1 はじめに

エコーに基づく音電子透かしとは，時間軸方向へのマスクング効果 (temporal masking) を利用した電子透かし埋め込み手法である。人間は，強い音の前後に存在する微弱な音を人間は知覚できない。この効果を継時マスクングという。また，強い音の直前におけるマスクングのことを逆向性マスクング (backward masking)，強い音の直後におけるマスクングのことを順向性マスクング (forward masking) といい，逆向性マスクングは5～20 ms 以内で発生し，順向性マスクングは直後の 50～200 ms 程度において発生する [2]。エコーに基づく音電子透かし埋め込み手法とは，この知覚されない時間帯に人工的にエコーを付加し，情報を埋め込む手法のことを指す。本章では，エコーに基づく音電子透かしの基本的な埋め込み手法であるエコー法と，エコー法を発展させた埋め込み手法として，エコー拡散法について説明するとともに，これらの埋め込み手法に関して実際に空気伝搬を行った場合，どのような特性を示すのかについて検討した。

### 2.2 埋め込み手法

#### 2.2.1 エコー法

Bender らは，順向性マスクングを利用してエコーを埋め込む電子透かし埋め込み手法を提案した [3]。原音の微小時間後にエコー信号を挿入したとき，その原音信号とエコー信号の間隔が減少するに従って人間の耳にはそれが同一のものとして感じられ，その区別ができなくなる。

このエコー法を用いて情報を埋め込む際に必要となるパラメータは，図 2.1 のようにエコー信号の初期振幅とオフセット時間である。初期振幅は”0”及び”1”を表すエコー信号の振幅，オフセット時間は原信号からエコー信号までの時間差である。ここで，”0”を

表すエコー信号と”1”を表すエコー信号の時間幅を $\Delta$ とする。すなわち、オフセットで表す時間間隔を透かし情報によって切り替えることにより、エコーによって透かし情報を埋め込むことが可能となるのである。また、図 2.1 のような原音とエコー信号でできるエコーカーネルと、原音信号との畳み込み処理によって、透かしの入った音信号が作られる。

エコーを埋め込む際に、原信号をある小区間に分割し、それぞれの区間に”0”と”1”のどちらを埋め込むか決定する。その小区間の量が透かしの情報量となる。例えば、1秒間に小区間が5つであれば(0.2秒の各小区間)、1秒間で5ビットの情報を伝送することができる。

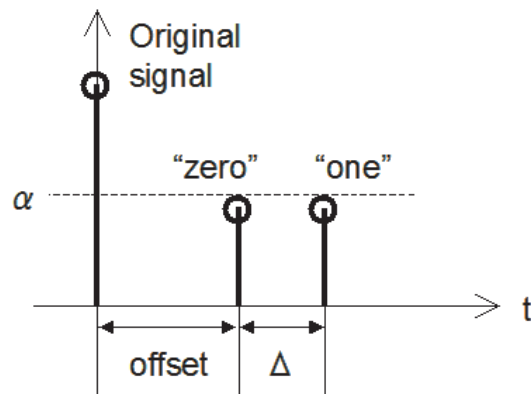


図 2.1: エコー法におけるエコーカーネル

また、埋め込まれている透かしを検出する方法としては、ケプストラム変換 (FFT  $\rightarrow$  log  $\rightarrow$  IFFT) を用いる。情報を埋め込んだ信号のケプストラムを求めると、ある時間間隔でインパルスが立つ。その時間間隔によって”0”と”1”のどちらのエコー信号に対応する間隔なのかを判断し、埋め込んだ透かし情報を検出する。

### 2.2.2 エコー拡散法

エコー拡散法は、高らによって提案されたもので、前節で説明したエコー法による電子透かしを発展させ、耐攻撃性および秘密性を高めた手法である [4]。エコー法の問題点は、検出する性能を高く保つためにはエコー信号の振幅をある程度大きくしなければならず、聴感上の音色に影響を与えてしまう可能性があることや、ケプストラム変換を行うことで透かし情報を得ることができ、攻撃者にとって検出が容易であることが挙げられる。この欠点を改善するために、図 2.2 のように透かし情報である振幅  $\alpha$  のエコー信

号を PN 系列を用いて時間軸で拡散させることを考える。長さ  $L$  の PN 系列にて拡散された拡散エコー信号の振幅は、PN 系列と相互相関をとることによる逆拡散処理により、従来のエコー法におけるエコー信号と同じ振幅に復元されるため、単発エコーの振幅の  $1/L$  の大ききで同等の検出性能を見込むことができる。つまり、エコーを埋め込む際の総エネルギー量は、埋め込み強度と拡散長で表すことができる。例として、エコー法において埋め込み強度： $\alpha$ 、エコー拡散法において拡散長： $L$  のときの埋め込み強度： $\beta$ 、とし、埋め込む総エネルギーが等しい場合、式 (2.1) のように表せ、埋め込み強度の 2 乗に拡散長  $L$  をかけたものと等しくなり、同等の検出性能を見込んだ場合、全体的に埋め込む総エネルギー量を小さくすることができる。

$$\alpha^2 \approx \beta^2 \cdot L \quad (2.1)$$

このような埋め込み手法のことをエコー拡散法といい、従来のエコー法に比べ全体的に埋め込むエネルギーを小さくでき、聴感上の音色に対する影響を少なくすることができる。また、検出は、エコー法と同様に信号に対してケプストラム変換を行った後、埋め込みの際に拡散させた PN 系列と同じ PN 系列との相互相関をとることにより埋め込んだ透かし情報を得る。つまり、使用された PN 系列は、透かし情報を音信号から検出するための秘密鍵となっており、エコー法よりも耐攻撃性および秘密性を高めた手法であるといえる。

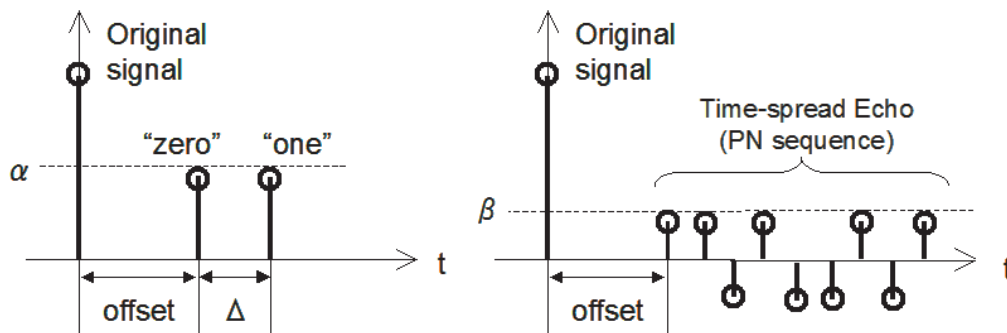


図 2.2: エコー法におけるエコーカーネルとエコー拡散法におけるエコーカーネル

以下では、エコー拡散法の埋め込み、および検出の原理を数式を用いて説明する。まず、エコーを生成するためのエコーカーネル  $k(n)$  は、PN 系列  $p(n)$ 、拡散エコーの振幅  $\beta$ 、拡散エコーの遅延量  $\Delta$  を用いて式 (2.2) のように表される。

$$k(n) = \delta(n) + \beta p(n - \Delta) \quad (2.2)$$

また、透かしの埋め込み処理は、このエコーカーネルと原信号との畳み込み処理によって行われるので、原信号を  $s(n)$  とすると、透かし入り信号  $w(n)$  は式 (2.3) で表される。

$$w(n) = s(n) * k(n) \quad (2.3)$$

また、検出の際には、透かしの埋め込まれた信号に対しケプストラム変換を行う。フーリエ変換  $F[\cdot]$ 、および逆変換  $F^{-1}[\cdot]$  を用いて、式 (2.4) と書けるとする。

$$W(\omega) = F[w(n)], \quad S(\omega) = F[s(n)], \quad K(\omega) = F[k(n)] \quad (2.4)$$

$\omega$  は角周波数である。まず、式 (2.3) をフーリエ変換すると、畳み込み演算が乗算演算となり、式 (2.4) を用いて式 (2.5) になる。

$$W(\omega) = S(\omega)K(\omega) \quad (2.5)$$

次に対数をとることにより、乗算演算がさらに加算演算となり、式 (2.6) になる。

$$\log W(\omega) = \log (S(\omega)K(\omega)) = \log S(\omega) + \log K(\omega) \quad (2.6)$$

最後に逆変換を行うことにより、式 (2.7) となる。

$$F^{-1}[\log W(\omega)] = F^{-1}[\log S(\omega)] + F^{-1}[\log K(\omega)] \quad (2.7)$$

このとき次元は、ケプストラム変換の前後で変化しないが、対数演算の非線形演算が行われているため、ケフレンシと呼ばれる軸になる。

ここで、 $K(\omega)$  は、式 (2.2) のようなインパルス列のフーリエ変換であることから、式 (2.8) となる。また、 $K(\omega)$  の対数をとったものを  $K_l(\omega)$  とすると式 (2.9) と表せる。

$$K(\omega) = 1 + \beta e^{-j\omega\Delta} P(\omega) \quad (2.8)$$

$$K_l(\omega) = \log(K(\omega)) = \log(1 + \beta e^{-j\omega\Delta} P(\omega)) \quad (2.9)$$

$P(\omega)$  は、エコーカーネル中の PN 系列のフーリエ変換を表す。よって、 $K(\omega)$  の対数をとると、 $P(\omega)$  が 1 より十分小さいことから、 $|\beta e^{-j\omega\Delta} P(\omega)|$  は 1 より十分小さくなる。よって、 $K_l(\omega)$  は Taylor 展開によって、式 (2.10) に近似展開できる。

$$K_l(\omega) \sim \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i \frac{(\beta e^{-j\omega\Delta} P(\omega))^{i+1}}{i+1} \approx \beta e^{-j\omega\Delta} P(\omega) \quad (2.10)$$

2 項目以上の高次項の寄与は小さいとみなすと、式 (2.10) のように 1 項目のみに近似される。つまり式 (2.7) は、透かし入り信号  $w(n)$  のケプストラム  $\hat{w}(n)$ 、原信号  $s(n)$  のケプストラム  $\hat{s}(n)$  を用いて式 (2.11) のように近似することができる。

$$\hat{w}(n) = \hat{s}(n) + \beta p(n - \Delta) \quad (2.11)$$

つまり、この信号  $\hat{w}(n)$  と埋め込みに用いた PN 系列  $p(n)$  との相互相関関数を計算することによって逆拡散され、埋め込んだエコーカーネルに対応する時間  $\tau = \Delta$  に明らかなピークが立ち、どの時間差  $\Delta$  を用いた透かしなのかを検出することができる。以上がエコー拡散法の埋め込み、および検出手法の原理である。

## 2.3 空気伝搬実験

### 2.3.1 実験方法

2.2 節で、エコーに基づく音電子透かしの埋め込みおよび検出手法について述べた。これらの音電子透かしが、スピーカとマイクを用いて空気を伝搬したときに、どのような影響を受けるのかという検討を行うために実際に空気伝搬実験を行った。実験は無響室にて行った。音源は RWC 研究用音楽データベース [5] より選出したジャズ音楽 (RWC-MDB-G-2001-M03-Tr.04, 曲名: Azure) の開始時間より 30 s を用いた。埋め込むビットレートは 4 bps とし、オフセットの長さを 1 ms および 1.2 ms とした。スピーカは SRS-200(SONY)、マイクは精密騒音計 NL-32(Rion) を用い、スピーカとマイクとの距離を 3 m とした。

### 2.3.2 提示音圧レベル

音圧レベルとは、計測可能な音の基本量であり、他の量も、音圧レベルの計測を基礎として求められているのが現状である [6]。本検討では、暗騒音による雑音等、電子透かしを検出する要因が伝搬する信号に対してどのくらいの強さであるのかを知る必要が

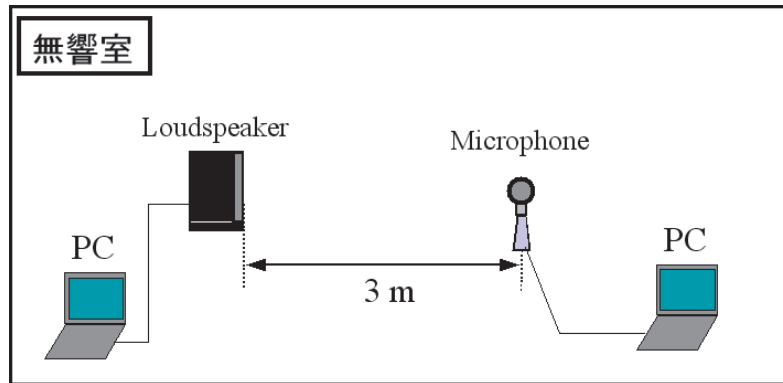


図 2.3: 実験環境

ある。したがって、信号の音圧レベルおよび暗騒音等の雑音の音圧レベルは知っておかなければならない。音圧レベル  $L_A$  (A-weighted sound pressure level) は次式で定義される。

$$L_A = 10 \log_{10} \left( \frac{p_A^2}{p_0^2} \right) \quad (2.12)$$

ここで、 $p_A$  は A 特性で重みづけられた音圧の実効値 (A 特性音圧)、 $p_0$  は基準音圧 (20  $\mu$  Pa) である。人間の耳は全ての周波数に対して感度が一定ではないので、音圧レベルは人間の感覚に合うように周波数毎に重みづけされることが多い。A 特性で重みづけを行うと、各周波数における雑音に対する感度が一致する。

また、音圧レベルが時間とともに変化する場合は、測定時間内でこれと等しい平均 2 乗音圧を与える連続定常音の騒音レベルで表す。これを等価騒音レベル  $L_{Aeq}$  (equivalent continuous A-weighted sound pressure level) といい、次式で定義される。

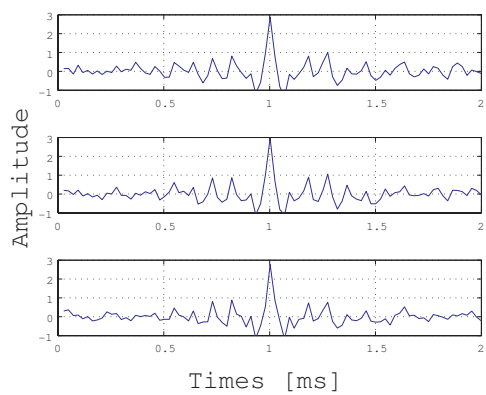
$$L_{Aeq} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right\} \quad (2.13)$$

本検討では、音圧レベルが時間とともに変化する音源を用いているので、音圧レベルの指標として等価騒音レベル  $L_{Aeq}$  を用いる。

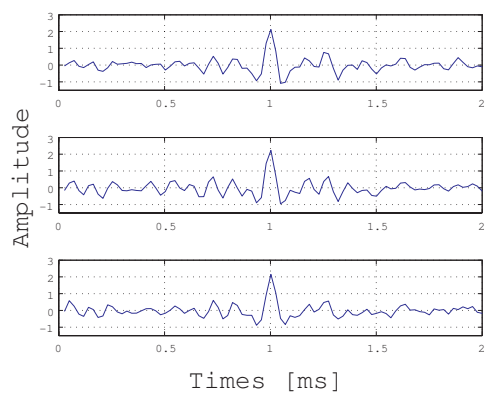
なお音圧レベルの測定には、音圧レベル計 (騒音計) を用いる。本検討においては、精密騒音計 (Rion, NL-32) を用いた。

図 2.4 は無響室 (暗騒音: 18 dB) における、マイクの位置の音圧レベルと、処理後のケプストラム波形の関係を表している。ソースとは、空気伝搬などの透かしが劣化する処理を全く行わないときの結果である。また、図 2.4 の検出波形のピークの平均値を各

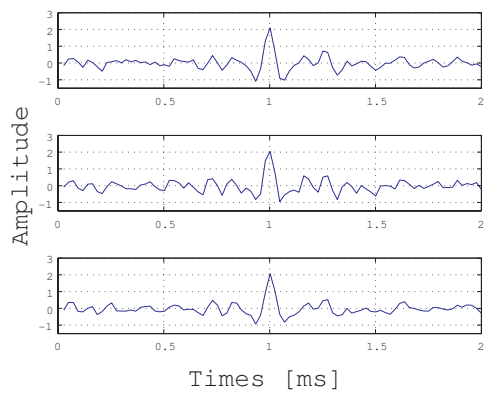




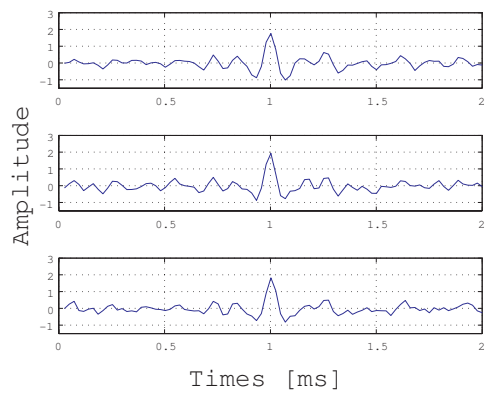
(a) ソース



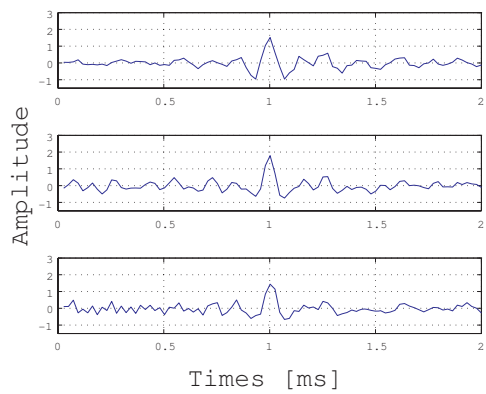
(b) 60 dB



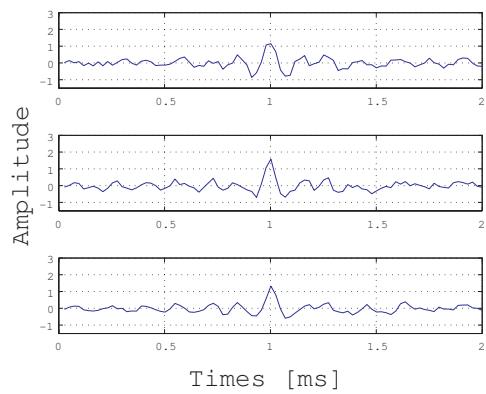
(c) 55 dB



(d) 50 dB



(e) 45 dB



(f) 40 dB

図 2.4: 音圧レベルによるケプストラム波形の変化 (無響室, 暗騒音: 18 dB)

音圧レベルごとにプロットした図が、図 2.5 である。図 2.5 をみると、音圧レベルが強くなるに従い、SNR が高くなり、検出波形のピークが高くなっている。つまりこれは、各実験において、音圧レベルをそろえる必要があるということを意味している。よって本検討では、マイクの位置の音圧レベルを 55 dB に統制して空気伝搬実験を行う。

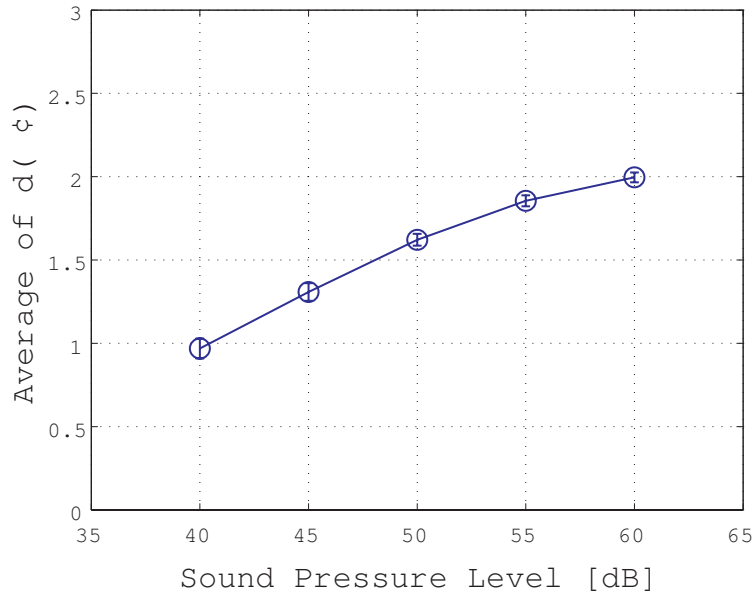
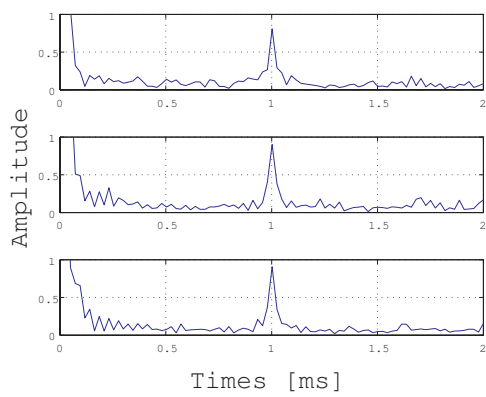


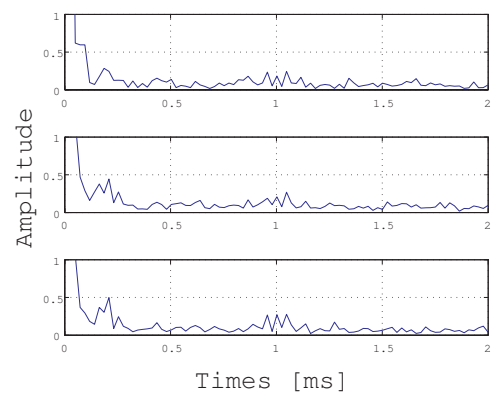
図 2.5: 音圧レベルと検出波形のピーク値

### 2.3.3 エコー法

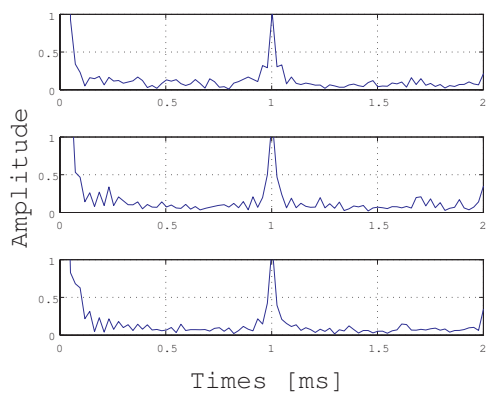
エコー法における空気伝搬前と、空気伝搬後のケプストラム波形の変化を表したグラフが図 2.6 である。ここで、ソースとは、空気伝搬などの透かしが劣化する処理を全く行わないときの結果である。図 2.6 をみると、空気伝搬後のケプストラム波形はあまり高くなっていない。つまり、このケプストラム波形におけるピークの高さが小さくなっていることが空気伝搬による影響であるといえる。また、埋め込み強度の違いを観察すると、埋め込み強度を強くすると、ケプストラム波形のピークの高さが増していることが分かる。



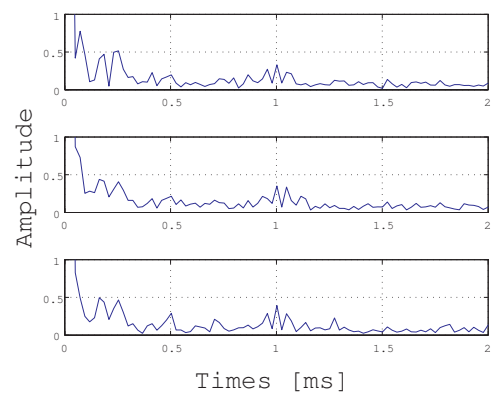
(a) ソース (強度  $\alpha : 0.48$ )



(b) 3 m 空気伝搬 (強度  $\alpha : 0.48$ )



(c) ソース (強度  $\alpha : 0.64$ )



(d) 3 m 空気伝搬 (強度  $\alpha : 0.64$ )

図 2.6: 空気伝搬におけるケプストラム波形の変化

### 2.3.4 エコー拡散法

エコー拡散法における空気伝搬前と空気伝搬後のケプストラム波形の変化を表したグラフが、図 2.7 である。ソースとは、空気伝搬などの透かしが劣化する処理を全く行わないときの結果である。図 2.7 をみると、エコー法の場合と同様に、空気伝搬後のケプストラム波形のピークの高さが小さくなっていること、および、埋め込み強度を強くすると、ピークの高さがより高くなっていることが分かる。

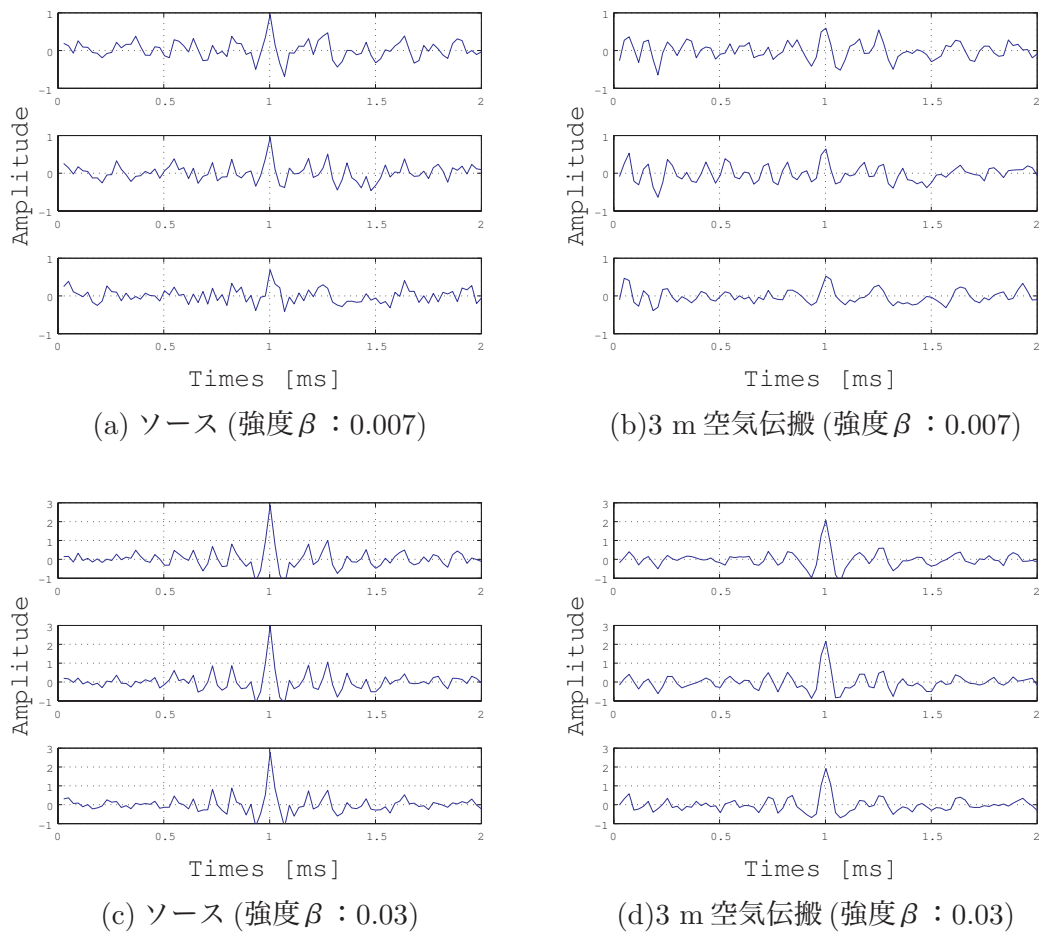


図 2.7: 空気伝搬におけるケプストラム波形の変化 (拡散長  $L$  : 255)

図 2.6 と図 2.7 を比べると、エコー法よりもエコー拡散法による埋め込み手法の方がケプストラム波形のピークの減り具合が小さい。また、式 (2.1) より、エコー法における埋め込み強度  $\alpha$  : 0.64 のときとエコー拡散法における拡散長  $L$  : 255 における埋め込み強度  $\beta$  : 0.03 のときは原信号に埋め込む総エネルギーが同程度となる。しかし、そのときのケプストラム波形のピークの平均値を比べると、空気伝搬などの透かしが劣化する処理を全く行わないときのソースの結果 (エコー法 : 1.055, エコー拡散法 : 2.831), お

よび空気伝搬後の結果 (エコー法：0.355, エコー拡散法：1.788) とともに, エコー拡散法の方が明らかに高い, つまり埋め込む総エネルギーが音質の劣化具合を決めるとすると, 音質の劣化具合で埋め込み強度を決定した場合, エコー拡散法は, エコー法よりもより空気伝搬耐性を有した埋め込み手法といえる.

## 2.4 雑音耐性実験

### 2.4.1 はじめに

音が空気を伝搬することを考えたとき, 一番影響すると考えられるものが雑音である. つまり電子透かしを空気伝搬させることを考える場合, 雑音による影響は考えなければならない事項であり, 本節では, どの程度雑音が透かし検出に影響を与えるのかの検討を行う.

実験条件は, 2.3.1 項で述べた条件と同じとし, 加える雑音は実環境に近いものとしてピンクノイズを用いた. また, ピンクノイズの音圧レベルは透かし入りの信号の音圧レベル ( $L_{Aeq}$ ) との SNR が 20 dB, 10 dB, 5 dB となるように調節した.

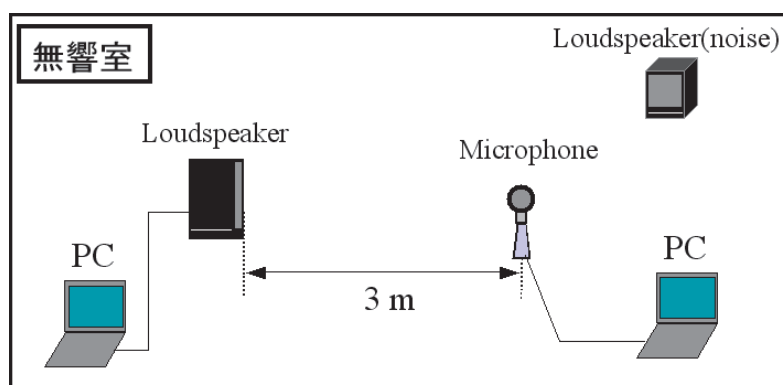


図 2.8: 実験環境

### 2.4.2 エコー法

図 2.9 がエコー法を用いた場合のケプストラム波形である. 図 2.9 をみると, 雑音の存在していない状況下においてもケプストラムのピークが高くないこともあり, ピークの低下具合が顕著にみてとれる.

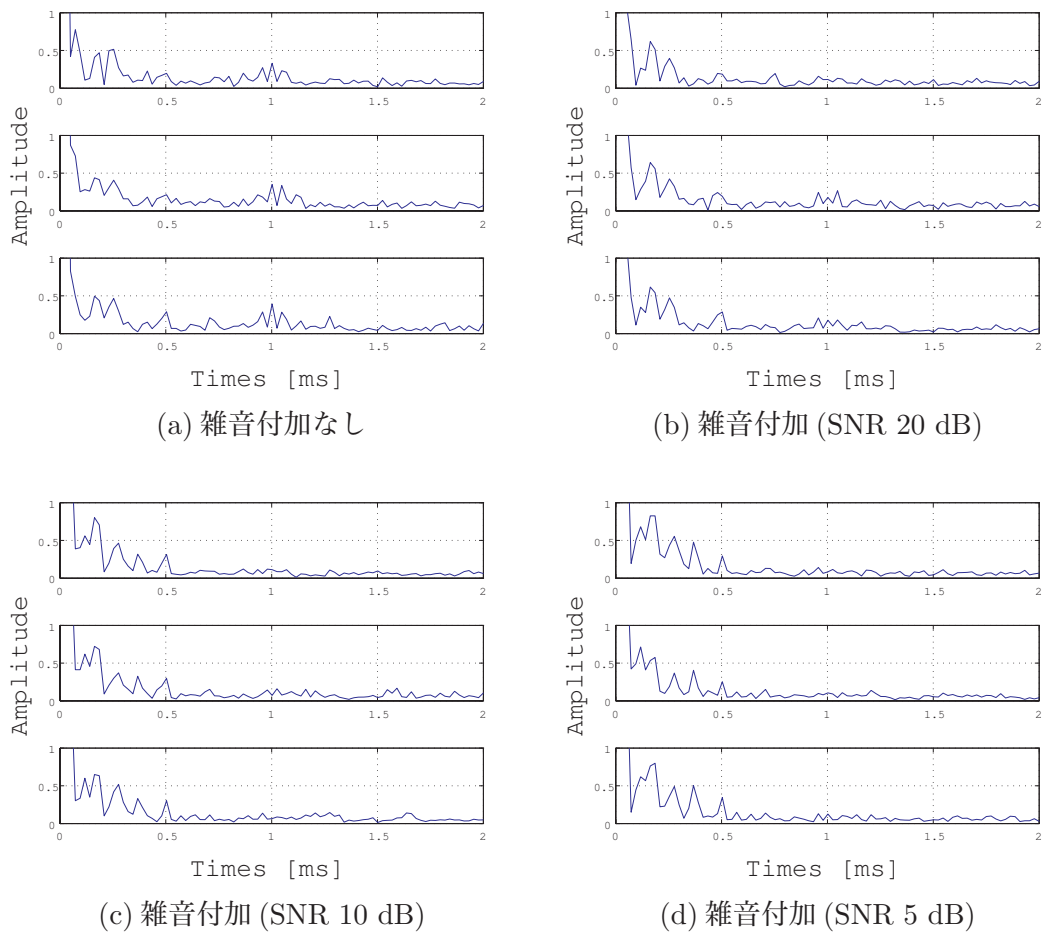


図 2.9: 雑音下でのケプストラム波形の変化 (強度  $\alpha : 0.64$ )

### 2.4.3 エコー拡散法

図 2.10 がエコー拡散法を用いた場合のケプストラム波形である。図 2.10 をみると、エコー法の場合とは異なり、SNR が 10 dB の状況下でもケプストラム波形のピークをある程度観察できる。これは雑音のない状況における元々のピークの高さに起因している可能性もあるが、雑音の存在する状況下においてもエコー法よりもエコー拡散法の方がより高いピークを有しているといえる。この観点からも、エコー法よりもエコー拡散法の方がより雑音耐性のある埋め込み手法といえる。

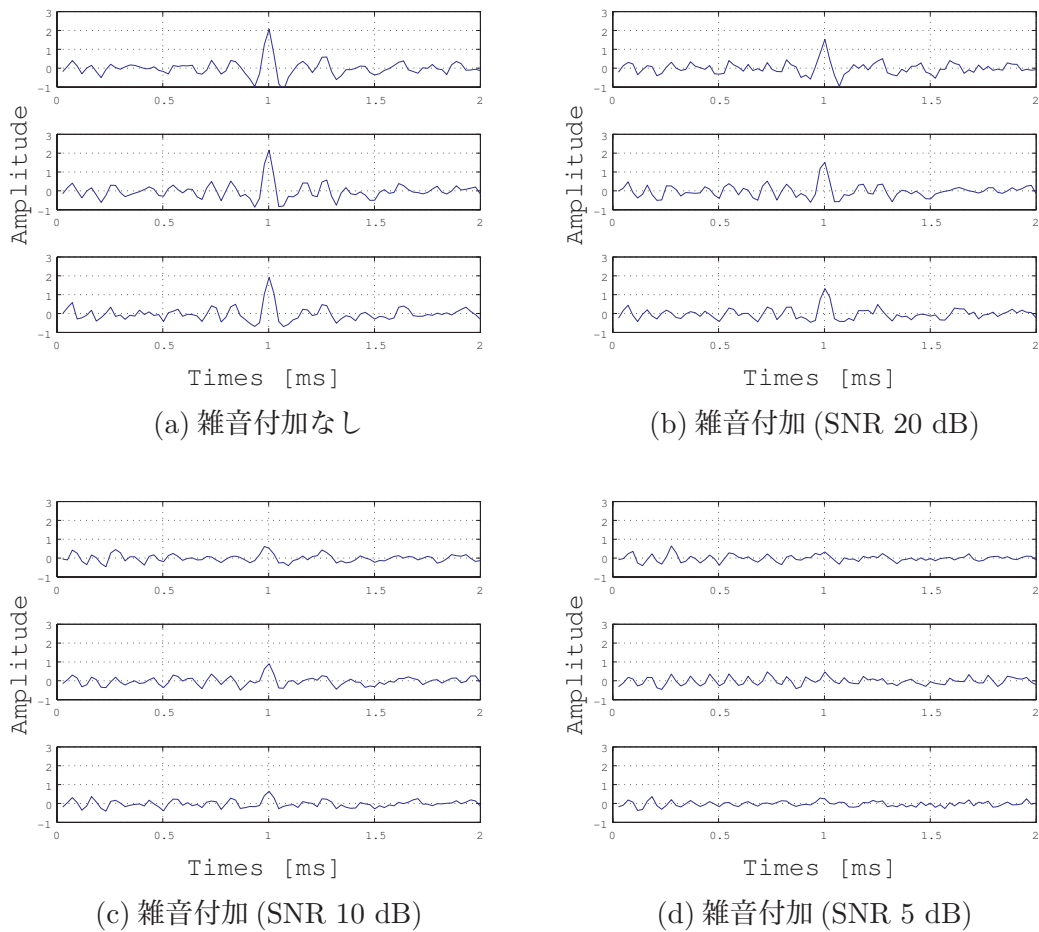


図 2.10: 雑音下でのケプストラム波形の変化 (拡散長  $L$  : 255, 強度  $\beta$  : 0.03, 雑音: ピンクノイズ)

## 2.5 拡散長の変化による検出性能の優劣に関する検討

### 2.5.1 はじめに

エコー拡散法の利点として、埋め込むエコーを時間軸で拡散させることにより全体的に埋め込むエネルギーを小さくすることができるのと述べた。それにより、聴感上の音色に対する影響を減らすことができるのであるが、逆を考えると、音質劣化に直接の関係があると思われる埋め込むエネルギーを一定にした場合、拡散長が長いほうが、電子透かしとして逆拡散後の検出波形のピークの高さがより大きくなることを見込める。図2.2を例とすると、エコー法における埋め込み強度を $\alpha$ 、エコー拡散法において拡散長が $L$ のときの埋め込み強度を $\beta$ としたとき、これらのエネルギーが同一となるのは式(2.1)のようなときである。

つまりエコー拡散法においては、各拡散長において、埋め込む総エネルギーを同一にするためには、埋め込み強度をこの式(2.1)により決定すればよいことになる。本節では、埋め込む総エネルギーを同一としたときに、エコー法およびエコー拡散法における拡散長を変化させたときの空気伝搬後の検出性能の変化について評価指標 $d'$ を用いて検討を行う。

### 2.5.2 評価指標 $d'$

検出性能を評価する指標には、主に信号検出理論において用いられている $d'$ という指標がある[7][8][9][10]。 $d'$ とは、“信号プラス雑音”と“雑音”との感覚的弁別力を表す指標[11]であり、エコーに基づく音電子透かしにおいては、この $d'$ の値が大きくなる程、よりケプストラム波形のピークを検出しやすくなるといえる。

まず、信号検出理論とは、ある期間に生起する事象について観測し、その期間に雑音だけしか存在しないか、あるいは雑音の他に信号が存在するのかの判断機構を、確率的モデルに従って説明するものである。この理論では、特定の観測を、感覚的連続体上での感覚の興奮の度合いを表す数値 $x$ によって表す。また、観測期間中に信号と雑音とが含まれている確率、あるいは雑音だけしか含まれていない確率と、この観測値 $x$ が結びついていると仮定する。“妨害雑音”の確率密度関数 $f_n(x)$ は正規分布すると考え、雑音に信号が付加された場合、図2.11に示すように“信号プラス雑音”の確率密度関数 $f_{sn}(x)$ は、付加された信号エネルギー分だけ、図2.11における左図から右図のように位置が上方にずれるとする。

観測者は感覚連続体上で、図2.11のようにある値に判定基準 $C$ を設定する。信号あるいは信号を含むらしい観測値がこの基準を超えると、「信号が観測期間中に存在する」と



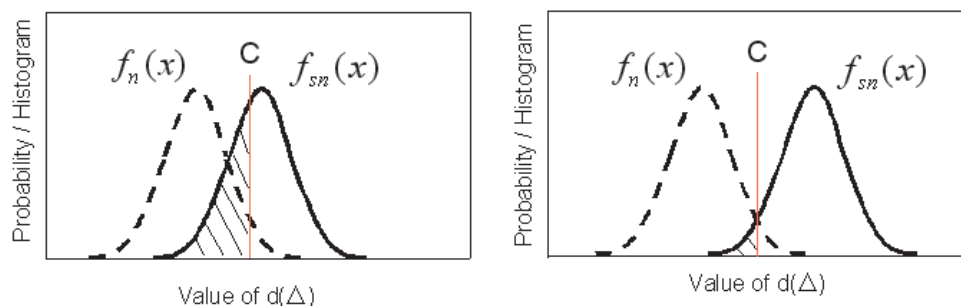


図 2.11: 検出信号の確率密度分布

の判断が生じる。

この  $d'$  を算出するためには、“信号プラス雑音”および、“雑音”のみの、確率密度関数が必要となる。しかし、これは、信号検出理論においてのことであり、電子透かしに当てはめて考えると、“信号プラス雑音”の場合は、透かし入りの検出信号  $d(n)$  の確率密度関数  $f_{sn}(x)$ ，“雑音”のみの場合は、透かしの入っていない原信号における検出信号  $d(n)$  の確率密度関数  $f_n(x)$  が必要ということになる。また、図 2.11 において透かし入りの検出信号  $d(n)$  の確率密度関数  $f_{sn}(x)$  において斜線で囲まれた部分、つまり「透かしの信号が観測期間中に存在する」判断がなされる基準  $C$  に観測値が達しないとき、「透かしの信号が検出できない」となる。 $d'$  は式 (2.14) によって表される。 $d'$  は式 (2.14) からわかるように、“信号プラス雑音”と“雑音”との感覚的弁別力を表すが、これは判定基準  $C$  とは独立に定められる。信号検出理論では、この判定基準  $C$  と、これとは独立に定まる感覚的弁別力を表す  $d'$  を分離した点に大きな特徴がある。

$$d' = \frac{\mu_s - \mu_n}{\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_n^2}} \quad (2.14)$$

$\mu_s$  および  $\mu_n$  はそれぞれ透かしの埋め込まれた信号と透かしの埋め込まれていない原信号の透かしの埋め込んだ時間差  $\Delta$  における検出信号 (ケプストラム波形) の値  $d(\Delta)$  の平均値であり、 $\sigma_s$  および  $\sigma_n$  はそれぞれの埋め込んだ時間差  $\Delta$  における検出信号の値  $d(\Delta)$  の標準偏差である。

### 2.5.3 実験方法

実験環境に関しては、2.3.1 項で述べたものと同様に行った。ここで、音圧レベルを大きくすると、図 2.12 のように、 $d'$  の数値も大きくなる。よって 2.3.1 項と同様に音圧レベルを 55 dB に統制する。また、エコー法は、エコー拡散法において、拡散長  $L:1$  のも

のとして扱った。また、各拡散長によって異なる PN 系列を用いることになるので、各拡散長ごとにそれぞれ5つの PN 系列を用いて、 $d'$  の値の平均値を算出し、検出性能について比較を行った。

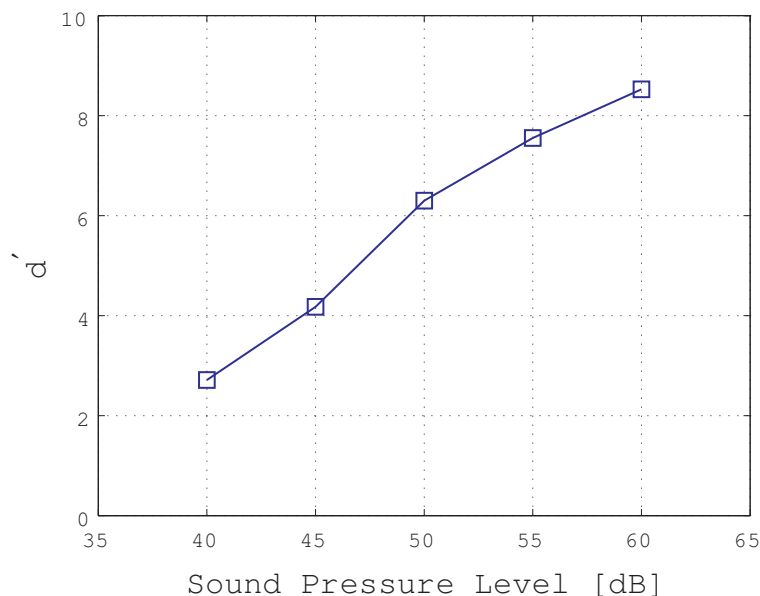


図 2.12: 音圧レベルと  $d'$  の値

#### 2.5.4 空気伝搬

図 2.13 は埋め込むエネルギーをそれぞれエコー法における埋め込み強度  $\alpha : 0.112$  および  $0.48$  にそろえた場合の検出性能の推移である。結果は  $d'$  の平均値で表し、誤差棒は標準偏差を表している。

図 2.13 をみると、それぞれ、拡散長  $L : 2^6$  のときに検出性能がピークになっている。また、エコー拡散法において  $L : 2^3$  よりも長い拡散長の場合、エコー法の検出性能よりもよい結果となった。これは、拡散長が短いエコー拡散法の場合、ケプストラム波形と PN 系列との相互相関を行う逆拡散過程において、拡散長が短いことにより、安定的にピークを高くすることができないことが考えられ、その結果、検出性能がよくないということが起こっていると考えられる。また、拡散長が長くなるにつれて、徐々に安定的にピークを高くすることができるようになり、検出性能が上がっているのではないかと考えられる。また、検出性能にピークが出る理由、つまり、拡散長を  $L : 2^6$  よりも長くすると検出性能が徐々に下がっていく原因としては、後で詳しく述べるが、空気伝搬時に、「計算機の中で表現可能な離散データとしての音楽 (Digital)」をスピーカにて再生するた

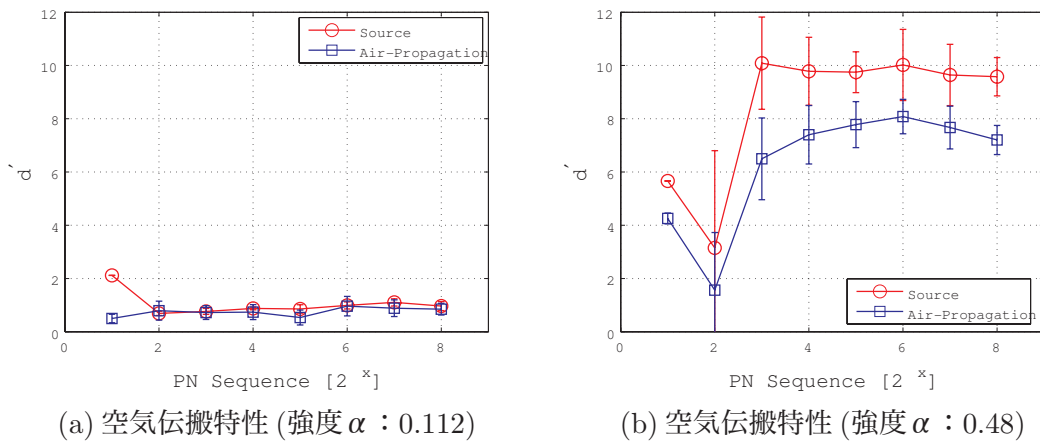


図 2.13: 空気伝搬における検出性能評価

めに「音圧の連続変化として物理的に実現された音楽 (Analogue)」に変換する (D/A 変換)・マイクで收音した「音圧の連続変化として物理的に実現された音楽 (Analogue)」を「計算機の中で表現可能な離散データとしての音楽 (Digital)」に変換する (A/D 変換) 必要があるのだが、これらを異なる計算機で行うと、クロック周波数がずれることによってサンプリング周波数に定常的なずれが生じているためではないかと考えられる。

### 2.5.5 雑音耐性

妨害音には、2.4 節と同様に、実環境の雑音に近いものとして、ピンクノイズを用いた。また、SNR がそれぞれ 20 dB, 10 dB, 5dB となるように音圧レベルを統制して妨害音とした。図 2.14 が、埋め込むエネルギーをそれぞれエコー法の埋め込み強度  $\alpha : 0.48$  にそろえた場合における、各 SNR の妨害音が存在する条件での検出性能を表す  $d'$  の平均値の推移である。また、誤差棒は標準偏差を表している。図 2.14 より、検出性能のピークが妨害音の音圧レベルの増加とともに、拡散長が短いほうに推移している。これは雑音のない空気伝搬実験の結果と合わせて考えると、検出性能はピークの高さのみに決定されているというわけではなく、妨害音の音圧レベルの増加にしたがって、埋め込み強度の大きさの重要度が増すのではないかと考えられる。したがって今後の展望としては、埋め込み強度と音質の劣化とのトレードオフの中で、どの埋め込み強度が最適であるのかを選択するといったことが考えられる。

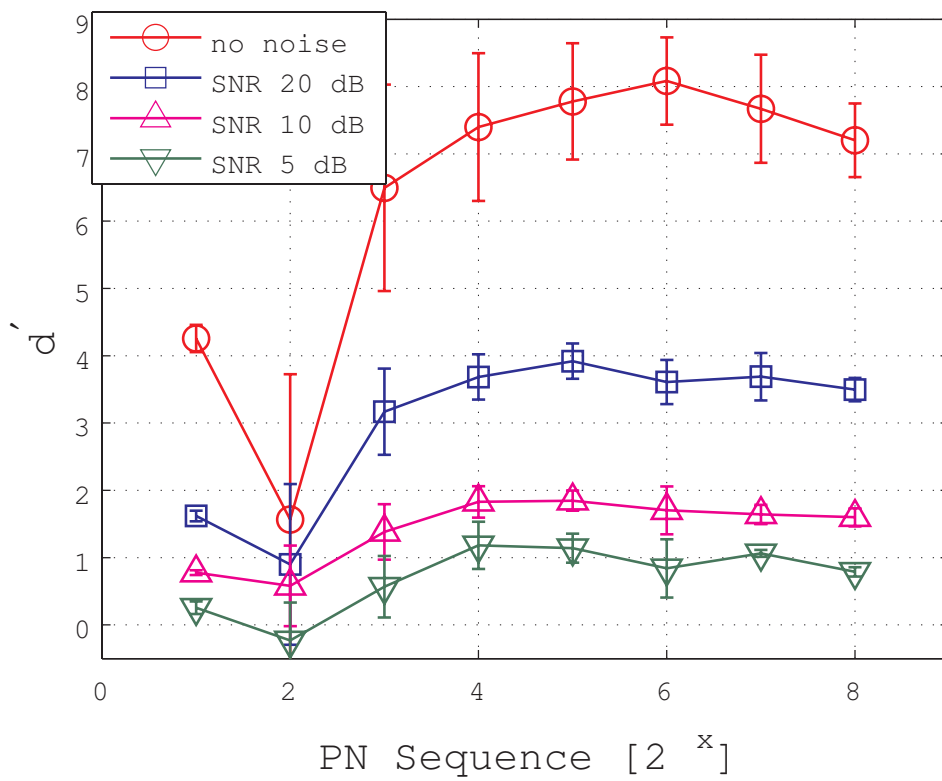


図 2.14: 雑音下における空気伝搬耐性 (強度  $\alpha : 0.48$ )

## 2.6 まとめ

この章では、エコーに基づく音電子透かしの埋め込み・検出手法について述べ、実際に空気伝搬させた場合、および雑音下において空気伝搬させた場合の変化について検討した。その結果、エコーに基づく音電子透かしは空気伝搬させると検出性能が劣化することが分かった。また、雑音下においては、雑音の音圧レベルが強くなる程、検出性能が劣化することが分かった。

また、エコー法とエコー拡散法を比べたとき、埋め込むエネルギーを同程度とした場合、雑音のあるなしに関わらず、エコー拡散法の方がより高い検出性能を有していることが分かった。これは、エコー拡散法における逆拡散後の検出波形のピークの推定される値が、エコー法のピークの推定される値よりも高いということによると考えられる。

しかし、この章においては、雑音を考慮した上で空気伝搬を行っているだけで、検出性能が一体どのような理由で劣化しているのかが検討されていない。そこで、次章では、具体的な検出性能の劣化要因を挙げ、どのくらい劣化するのかの検討を行うとともに、その劣化要因に対する耐性強化について検討を行う。



## 第3章 エコーに基づく音電子透かしの空気伝搬による性能劣化に関する検討

### 3.1 はじめに

空気伝搬耐性のある音電子透かしを考案する場合、空気伝搬過程において何が劣化の要因であるかを把握しておく必要がある。なぜならば、空気伝搬過程における劣化要因を解明したうえで、その要因に対して対策をとることにより空気伝搬耐性のある音電子透かしの考案、もしくは耐性強化ができるからである。

### 3.2 劣化要因

エコーに基づく音電子透かしの劣化要因として考えられるものを以下にて示す。

- 同期

本検討では、エコーに基づく音電子透かしを情報伝達手段として考え、原音信号とエコー信号の時間間隔を変化させることによって異なるエコーカーネルを作成し、ある一定の時間幅(4 bps ならば 0.25 s)ごとに畳み込むエコーカーネルを変化させることで埋め込む情報を変化させる。つまり検出の際には、畳み込まれるエコーカーネルが変化する時刻を見つけなければならない。この畳み込まれるエコーカーネルが変化する時刻を見つけ、一定の時間幅において、埋め込んだ区間と検出する区間を同じにすることをフレーム同期と呼ぶ。このフレーム同期がずれると検出性能は劣化する。

本検討では、畳み込むエコーカーネルを終始変えないことで、このフレーム同期問題を解消しているが、実装を考える場合、このフレーム同期は正しく行われなければならない。

- 残響

エコーに基づく音電子透かしとは、簡略化すると、残響(エコー)を人工的に原

信号に付加し、その残響を検知することによって情報を得るというものであるが、そもそも残響とは、直接音に対する、物体に反射した反射音であるので、無響室など特殊な環境でない限りは存在する。つまりこの日常に存在する残響がエコーに基づく音電子透かしの検出性能に影響を及ぼすことは十分に考えられる。また、残響はエコーに基づく音電子透かし以外の埋め込み手法での空気伝搬にも妨害音(雑音)として影響を及ぼす。しかし、本検討では扱わないことにする。

- デジタル・アナログ変換

2.5.4 項で述べたように、空気伝搬を行うためには、「計算機の中で表現可能な離散データとしての音楽 (Digital)」をスピーカにて再生するために「音圧の連続変化として物理的に実現された音楽 (Analogue)」に変換する D/A 変換及び、マイクで収録した「音圧の連続変化として物理的に実現された音楽 (Analogue)」を「計算機の中で表現可能な離散データとしての音楽 (Digital)」に変換する A/D 変換が必要になる。この D/A 変換器、A/D 変換器それぞれの機器の内部クロックを同期させずに用いた場合、サンプリング周波数の定常的なずれが生じることも報告されている [12]。つまり本検討の実験系のように、この D/A 変換、A/D 変換を異なる計算機で行ってしまうと、各計算機でのクロック周波数が異なるため、内部クロックの同期が取れなくなり、検出性能が劣化してしまう可能性がある。しかし、本論文にて考えている聴覚障害者のためのシステムを考える場合、現状の設備を変えない限り、内部クロックの同期を取ることは困難であり、クロック周波数のズレが生じることは避けられない。よって、次節にて、その劣化具合に関して検討を行う。

- ゆらぎ

音とは、媒質の圧力が平均圧力の上下に振動的に変動する現象であり、その変化分を音圧という。音圧は音波として周囲に伝搬し、時間と空間座標の関数となる。音波が伝搬するときには、空間的な圧力の差によって、媒質を構成する粒子に密な部分と疎な部分とができる。すなわち、音波は疎密波である。つまり、音が空気中を伝搬する際、音は振幅や周波数に変調が生じている・ゆらぎが生じているといえる。このゆらぎが検出信号に影響を与え、検出性能が劣化する。

- 妨害音

2.5.5 節で述べたように、妨害音が存在する状況下において、検出性能が劣化する。

以上の項目以外にもスピーカの特性、マイクの特性等で検出性能が劣化する可能性がある。



### 3.3 劣化量に関する検討

#### 3.3.1 デジタル・アナログ変換

2.3.1 項や 2.5.3 項で説明した，本検討で用いた実験系において，図 3.1 で表されるように，空気を伝搬させずにクロック周波数のずれが存在する計算機上で D/A 変換，A/D 変換を行った場合の検出性能の劣化について検討を行った．また，拡散長による変化も見するために拡散長は  $L: 2^6, 2^7, 2^8$  を用い，埋め込む総エネルギーが揃うように埋め込み強度を決定した．すなわち，拡散長  $L: 2^6, 2^7, 2^8$  のときの埋め込み強度は  $\beta: 0.06, 0.03 \cdot \sqrt{2}, 0.03$  となる．また，各拡散長によって異なる PN 系列を用いることになるので，各拡散長ごとにそれぞれ 5 つの PN 系列を用いて， $d'$  の平均値，標準偏差を算出し，検出性能について比較を行った．

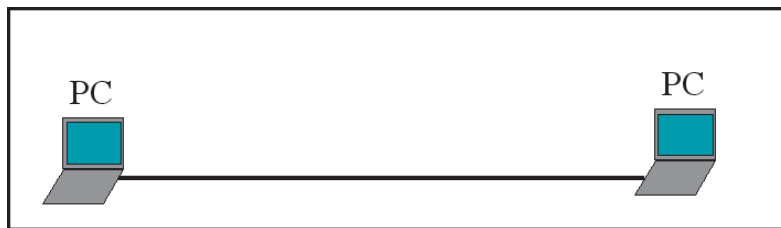


図 3.1: 実験環境

図 3.2 は，原信号を白色雑音とした場合における，空気伝搬も，D/A，A/D 変換も行わないソース信号，本検討における実験系にて用いた計算機で，D/A，A/D 変換のみを行った信号，および空気伝搬を行った信号それぞれの，検出信号のピーク値および  $d'$  である．誤差棒は  $d'$  の標準偏差である．

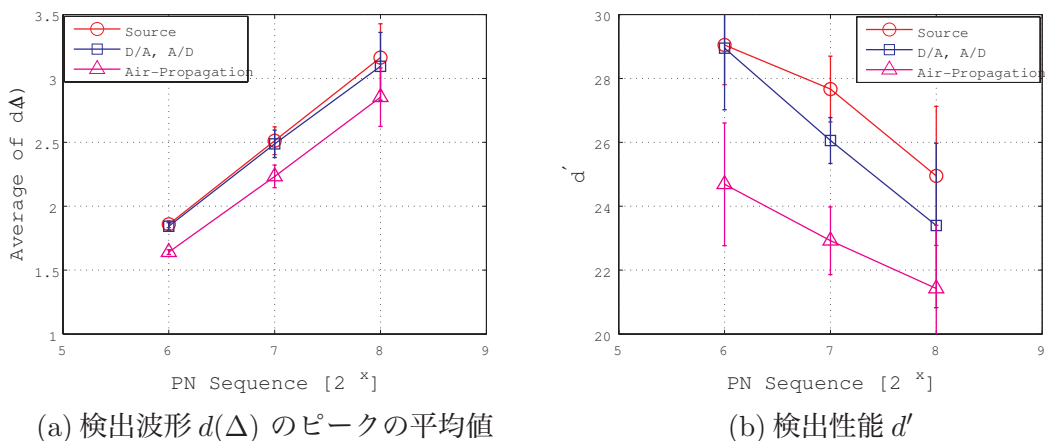


図 3.2: D/A, A/D 変換の性能劣化 (原信号: 白色雑音)

図 3.2 を見ると、拡散長が長くなるにつれて、検出波形のピークは徐々に高くなっていくのに対し、検出性能を表す  $d'$  では、数値が減少している。それは、D/A, A/D 変換のみを行ったときにもいえ、ソース信号よりもその減少傾向は見てとれる。この減少は、クロック周波数の同期ずれがあるために、拡散長が長いほうがより長い時間幅を用いることから、より同期ずれの影響を受けやすくなるからだと考えられる。

また、図 3.3 は原信号をジャズ音楽とした場合における、空気伝搬も、D/A, A/D 変換も行わないソース信号、本検討における実験系にて用いた計算機で、D/A, A/D 変換のみを行った信号、および空気伝搬を行った信号それぞれの、検出信号のピーク値および  $d'$  である。誤差棒は  $d'$  の標準偏差である。

図 3.3 を見ると原信号が白色雑音の場合とほとんど同様の変化がみられるが、ただ1点、検出性能を表す  $d'$  において、D/A, A/D 変換を行うと  $d'$  の数値が上昇している。この現象の物理的な説明はできないが、図 3.2 の原信号が白色雑音の場合と比較して、D/A, A/D 変換した場合の内部クロックのずれの検出性能への影響は、高周波数領域のレベルが大きいとより大きな性能の劣化が生じるのではないかと考える。信号の振幅は高周波数成分に、より依存するので、音源の高周波数成分のレベルが大きい分だけ内部クロックのずれが生じたときに、より影響を与えてしまうと考える。

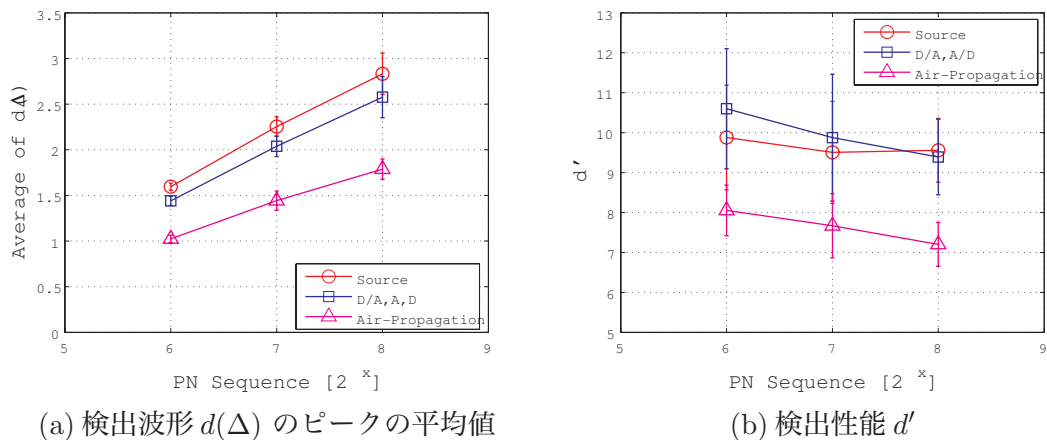


図 3.3: D/A, A/D 変換の性能劣化 (原信号：ジャズ音楽)

### 3.3.2 妨害音

2.4 節の実験系を用いたときの、検出性能の妨害音による影響を図 3.4 に示す。用いた PN 系列の拡散長は  $L : 2^6$  であり、埋め込み強度は  $\beta : 0.06$  とした。

図 3.4 より、明らかに雑音が検出性能に与える影響は極めて大きいといえる。

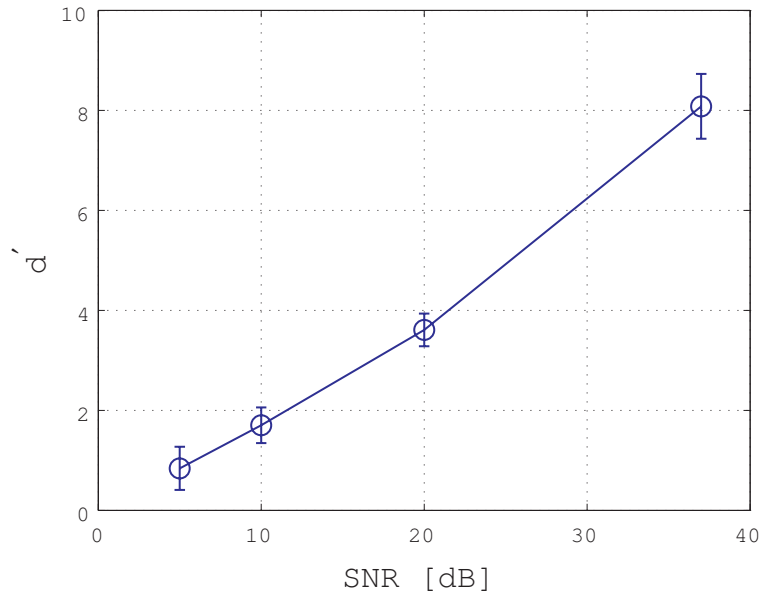


図 3.4: 雑音下の検出性能の変化 (拡散長:  $2^6$ ,  $\beta$ : 0.06)

### 3.4 チップレートに関する耐性強化

#### 3.4.1 はじめに

チップレートとは、1秒間あたりのPN系列の個数であり、cps(chip per second)で表現される。単位はHzである。PN系列の1パルスあたりのポイント数は「サンプリングレート/チップレート」で表現でき、1パルスあたりのポイント数を増やすことで音が空気伝搬する際の空気のゆらぎに対処できる。チップレートを適用する際のデメリットは、1パルスあたりのポイント数を増やすことで、拡散長を増やすことになり、埋め込むエネルギーが増すことである。また、検出時においては、逆拡散前に、パルス幅を増やした分だけ加算平均してパルス幅を元に戻す必要がある。つまり、この加算平均を行うことにより、雑音耐性も良くなるのではないかと考える。しかし、本検討では、雑音耐性について検討せず、雑音のない状況下で、パルス幅を増やしたときの検出性能の変化について評価し、チップレートを変更する有効性について検討する。

#### 3.4.2 実験方法

実験環境は、2.3.1項で述べたものと同様に行った。また、チップレートを考慮する場合、単にチップレートを変更して拡散長を増すと、その分エネルギーも増すことになることから、埋め込むエネルギーを同一にするためには、埋め込み強度を統一し、1パルス

あたりのポイント数と PN 系列長を乗算したものを統制すればよいことになる。今回は、1 パルスあたりのポイント数と PN 系列長の乗算が約  $2^8$  になるように統制を行った。つまり、1 パルスあたりのポイント数が 1, 2, 4 のとき、用いる PN 系列の長さは  $2^6$ ,  $2^5$ ,  $2^4$  となる。すなわちチップレートに応じて異なる PN 系列が必要となり、各 PN 系列長に対してそれぞれ 5 種類の PN 系列を用いて  $d'$  の平均値、標準偏差を算出した。

### 3.4.3 検出性能評価実験

チップレートを 44100 [Hz], 22050 [Hz], 11025 [Hz] としたとき、つまり 1 パルスあたりのポイント数を 1, 2, 4 としたときの変化をみる。  $d'$  の推移を図 3.5 に示す。誤差棒は標準偏差を表す。

図 3.5 より、1 パルスあたりのポイント数を増やすと、つまりチップレートを小さくすると、検出波形  $d(\Delta)$  のピークは小さくなっていくが、検出性能の観点では、パルス幅を 2 としたときに  $d'$  の値が大きくなっており、検出性能が向上しているといえる。つまりチップレートを検討することは、空気伝搬耐性向上のために有効であると考えられる。

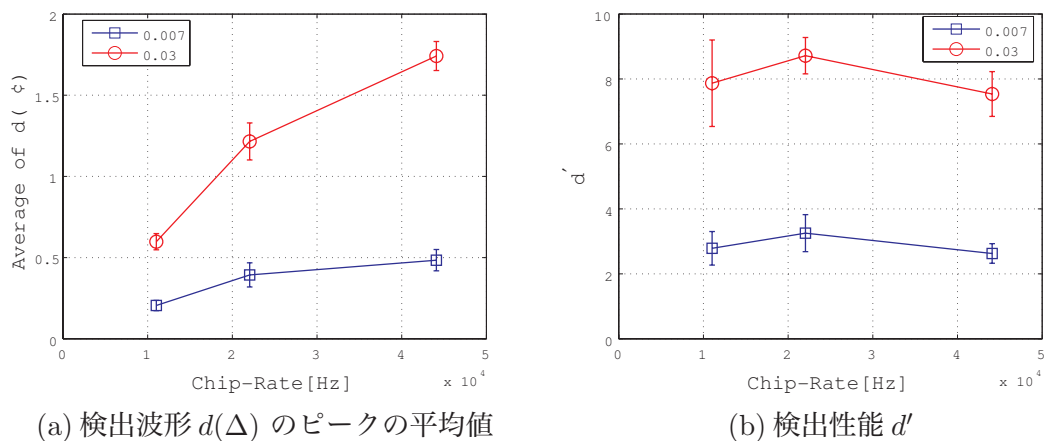


図 3.5: チップレートを考慮した際の変化

### 3.5 雑音耐性に関する検討

雑音耐性について検討を行う場合、まず図 3.6 のように電子透かしを埋め込む前の原信号の違いにより検出性能に大きな変化があることに注意する必要がある。図 3.6 は原信号が白色雑音とジャズ音楽、埋め込み手法が拡散長  $L: 2^6$  のエコー拡散法 (埋め込み強度  $\beta: 0.06$ )、妨害音はピンクノイズを用い、SNR が 20 dB, 10 dB, 5 dB となるよう

に音圧レベルを調節した。誤差棒は、5種類のPN系列を用いたことによる標準偏差である。

図 3.6 をみると、原信号を白色雑音とすると原信号をジャズ音楽とした場合と比較して、強い雑音耐性を有している。この原因を考えると、白色雑音というものは、パワースペクトルが各周波数帯域で一定であるが、ジャズ音楽を含む一般的な音楽は高周波数になるにしたがってレベルが下がっていく。この下げ幅は、妨害音として用いたピンクノイズと比べても大きい。一方、信号の振幅は高周波数成分に、より依存するので、SNRが確保されていても、妨害音の高周波数成分のレベルが原信号の高周波数成分のレベルより大きい分だけ、より検出性能が劣化してしまうと考えられる。

つまり、妨害音の高周波数成分がより検出性能の劣化に影響するならば、高周波数成分をフィルタによって除去することで、検出性能が改善される可能性がある。すなわち、検出処理の前処理として、信号の高周波数成分を除去することで、性能が改善される可能性がある。また、信号の高周波数成分を除去することは、3.3.1 項における内部クロックのずれによる検出性能への影響も改善される可能性がある。この件に関しては、まだ検討を行なっておらず、今後の課題であるが、検出性能に雑音の与える影響が極めて大きいことから、検討する重要性はかなり高いと考える。

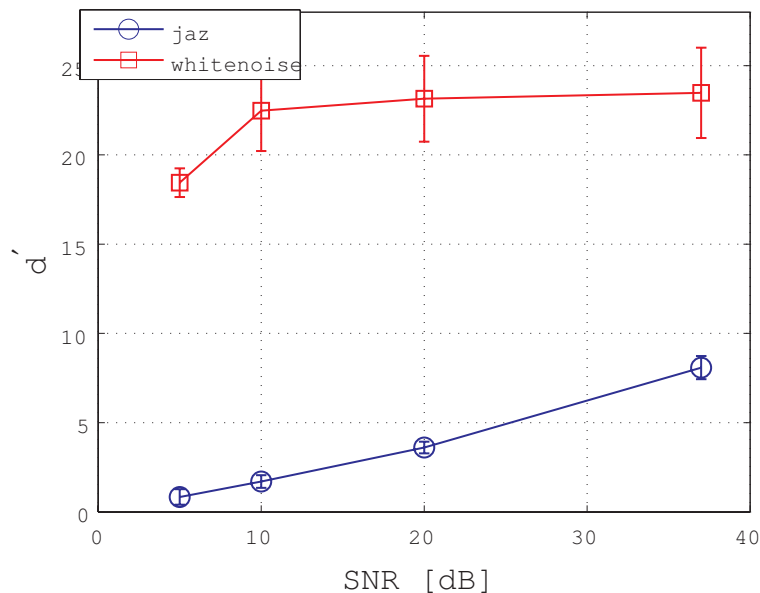


図 3.6: 音源が異なる場合の検出性能の変化 (拡散長  $L : 2^6$ ,  $\beta : 0.06$ )

### 3.6 まとめ

本章では、電子透かしが空気を介して伝達されたときの劣化要因について述べ、その劣化に対する耐性の強化の検討を行った。検討の結果、空気のゆらぎに対してはピッチレートの考慮、および雑音耐性に対しては高周波数成分の除去の検討は行う価値が十分にあると考える。

## 第4章 結論

本検討では、聴覚者障害者補助システムのための音電子透かしの空気伝搬を起因としたエコーに基づく音電子透かしの空気伝搬耐性に関する検討を行った。

2章では、エコーに基づく音電子透かしの埋め込み・検出手法について述べ、空気伝搬・雑音耐性に関する性能評価を行なった。その結果、エコー拡散法はエコー法より空気伝搬耐性のある埋め込み手法であり、またエコー拡散法において、エネルギーを統一した条件下で拡散長を変化させた場合、検出波形のピークの高さに関係なく、最適な拡散長が存在することがわかった。

また3章では空気伝搬にて生じる劣化要因について述べ、その劣化に対する耐性強化の検討を行った。その結果、ピッチレートの考慮、および高周波数成分の除去により、エコーに基づく音電子透かしの検出性能が改善される可能性があることを示した。

今後の検討課題としては、本検討では行なっていない、ビットレートによる性能評価が挙げられる。聴覚障害者補助システムやユビキタス社会へ向けた技術として実用化を考えた場合、ビットレートは重要なパラメータであるからである。





## 謝辞

本研究は、東北大学卒業論文として、以下にあげる方々のご指導、ご鞭撻、ご協力のもとに行われたものである。ここに深く感謝する。

東北大学電気通信研究所鈴木陽一教授には、研究の機会を賜り、また本研究を進めるにあたり終始一貫して有益なご指導と励ましをいただき、ここに深く感謝する。

東北大学電気通信研究所西村竜一助教授には、本研究を進めるにあたって直接のご指導と多くのご助言を頂き、またそのために多大な時間を割いて頂いた。ここに深く感謝する。

東北大学電気通信研究所助手坂本修一博士には、ゼミ等の場にて有益なご助言を頂くとともに、研究室での生活においても様々なご助言を頂いた。ここに深く感謝する。

東北大学電気通信研究所技術職員齋藤文孝氏には機器の取り扱い方を直接ご指導頂くとともに、研究への取り組み方、姿勢についてご指導頂いた。ここに深く感謝する。

東北大学電気通信研究所博士課程前期1年阿部俊一郎氏には、本研究を進めるにあたって直接のご指導・ご助言を頂くとともに予稿の添削に多大な時間を割いて頂くなど言葉では言い表せないほどお世話になった。ここに深く感謝する。

東北大学電気通信研究所李軍鋒氏には研究に取り組む姿勢を示してくれたほか、海外のことについて色々と教えて頂いた。ここに深く感謝する。

やわらかい情報システム研究センター矢入聡博士には、研究から普段の生活まで様々な面でご助言を頂いた。ここに深く感謝する。

東北大学電気通信研究所技術補佐員小貫輝義氏には、研究に支障がなく円滑に行えるよう機器や環境の整備をして頂き、研究に対しても有益な助言を頂いた。ここに深く感謝する。

東北大学電気通信研究所博士課程後期1年岡本拓磨氏、姜大基氏、魏浩石氏には研究はもちろんのこと、日常生活において様々なご助言を頂いた。ここに深く感謝する。

東北大学電気通信研究所博士課程前期2年佐々木直哉氏には、電子透かしという共通の研究テーマを通じて様々なご指導・ご助言を年間を通じて頂いた。ここに深く感謝する。

東北大学電気通信研究所博士課程前期2年高崎政久氏には、同じ西村グループとして様々なご助言を頂くとともに、聴取実験について有益なお話をして頂いた。ここに深く感謝する。

東北大学電気通信研究所博士課程前期2年小笠原亮氏、門井涼氏には、研究室の先輩として様々な生活のアドバイスを頂くとともに、研究への姿勢について学ばせて頂いた。ここに深く感謝する。

東北大学電気通信研究所博士課程前期1年佐々木愛氏、関本彩保氏、瀬戸幹生氏、沼畑俊氏、吉村美智子氏には研究・日常生活を問わず非常に細かな質問にも優しく対応して頂き、また、研究室生活を非常に楽しいものとさせて頂いた。ここに深く感謝する。

東北大学工学部情報工学科4年千葉武尊氏には、よき同輩として、楽しいこと辛いことを分かち合い、数多くの協力や励ましを頂いた。ここに深く感謝する。

秘書の小室まり氏、事務補佐員の今野亜未氏には、日常の生活において研究に専念できるよう、様々なご助力を頂いた。ここに深く感謝する。

実験、計算、論文、ブラウジング等、私の必要以上の処理要求に対し、時に凍結しながらも最後まで応えてくれたHiphopおよびredsに深く感謝する。

また、私の学に対する意に理解を示し、大学に快く送り出してくれた私の家族に心より深く感謝する。

最後に、本研究は、多くの方々のご指導、ご協力の下で行なわれたものであり、ここに名前を挙げることにできなかった方々も含め、重ねて感謝する。

## 参考文献

- [1] Wolfgang F.E. Preiser[編]:[秋山哲男ほか訳], ユニバーサルデザインハンドブック, 丸善, 2003
- [2] 松井甲子雄, 電子透かしの基礎, 森北出版, 1998.
- [3] D.Gruhl, A.Lu, and W.Bender, "Echo Hiding", *Information Hiding*, pp.295-315, 1996.
- [4] B.S.Ko, R.Nishimura, and Y.Suzuki, "Time-spread echo method for digital audio watermarking using pn sequences," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing(ICASSP)*, 2002.
- [5] 後藤真孝, 橋口博樹, 西村拓一, 岡隆一, "RWC 研究用音楽データベース:音楽ジャンルデータベースと楽器音データベース", 情報処理学会 音楽情報処理研究会研究報告, 2002-MUS-45-4, Vol.2002, No.40, pp.19-26, 2002.
- [6] 城戸健一編著, 基礎音響工学, コロナ社, 1990.
- [7] Kenneth R. Boff, Lloyo Kaufman, and James D. Thomas, *Handbook of Perception and Human Performance, Volume* , John Willey and Sons, 1986.
- [8] David Heeger, "Signal Detection Theory," *Teaching Handout*, Department of Psychology, Stanford University, November 12, 1997.
- [9] Thomas D. Wickens, *Elementary Signal Detection Theory*, Oxford University Press Inc., 2002.
- [10] David M. Green and John A. Swets, *Signal Detection Theory and Psychophysics*, Peninsula Publishing, 1988.
- [11] 境久雄著, 聴覚と音響心理, コロナ社, 1978.
- [12] 西村明, 小泉宣男, "AD/DA 変換器における時間ゆらぎを考慮に入れた波形比較による音質差測定法", 電子情報通信学会技術研究報告, EA2004-29,pp.15-22, 2004.

