

第 1 章

序論

1.1 背景と研究目的

音響再生方式の研究は音響再現における忠実度と臨場感の向上を目指して行われてきた。周波数特性やダイナミックレンジの拡大が大きな課題であった時代は、スピーカー1個によるモノフォニック再生が主流であったが、複数個のスピーカーを用いた音場空間の再現の試みも同時進行で早くから行われた。音響再生方式において、そのチャンネル数(スピーカー数)とスピーカーの配置は重要な要素である。初期の頃(1930年代~)は聴取者前方のみに複数のスピーカーを配置し、前方における左右の拡がり感や音像定位の向上が検討された。その後、聴取者後方にもスピーカーを配置することで、2次元水平面での拡がり感や包みこまれ感が再現されるようになった。1990年代以降導入されたデジタルオーディオ技術や高能率音響符号化技術によって高音質化と普及が進み、さまざまなメディアで立体音響再生が導入されるようになった。立体音響再生では聴取者周囲に複数個のスピーカーを配置することから、このような音響再生方式を総称して、マルチチャンネル音響と呼ぶようになった。最近では5.1マルチチャンネル音響システム(以下5.1方式)(図1.1)に代表されるように、「(再生チャンネル合計).(LFEチャンネル数)」という表記でマルチチャンネル音響のスピーカー構成が記述されている。なお、LFE(Low Frequency Effects)とは、120[Hz]以下の重低音成分だけを記録再生するためのチャンネル(サブウーファ)を意味する。

映画音響やデジタル放送で普及が進んでいる5.1方式はすべてのスピーカーが水平面にのみ配置されているため、映画音響などでスクリーン上に対象映像が上下に移動した際、その対象映像に同期した音像の移動の再現が困難である。

22.2マルチチャンネル音響システム(以下22.2方式)は上記のような5.1方式の課題を解決し、聴取者の前後、左右、上下のあらゆる方向での均一な音質と音像定位を可能とし、音による包みこまれ感や音場の再現性を向上させることを目的として開発された。22.2マルチチャンネル音響システムの特徴は、聴取者の耳と同じ高さだけでなく、聴取者上方や下方にもスピーカーを配置することである(図1.2)。これにより、従来のマルチチャンネル音響システムでは困難であった上下方向の音像定位を実現した。しかし、22.2方式は多数のスピーカー設置スペースが必要になるため、同等の音響効果が再現できるより簡便なシステムの実現が望まれる。

本研究では、マルチチャンネル音声をヘッドホンで容易にモニタ出来る環境の構築について検討を行った。22.2方式のスピーカー再生音をヘッドホンで再現することが出来ればスピーカー設置スペースの問題を解決することが出来る。しかし、通常のヘッドホン再生では22.2方式が持つ3次元方向の音像定位や、スピーカー再生の様に聴

取者から離れた位置に音像を再現することは困難である。

ヘッドホンを用いて 3 次元方向の音像定位を実現する方法としては頭部伝達関数をヘッドホンの再生信号に畳み込む手法が先行研究で報告されている。頭部伝達関数とは、残響のない空間で音源から聴取者の鼓膜までの音の伝達特性を表したものである。頭部伝達関数の特性は、人の頭部や耳介の形状によって決まり聴取者から見た音源方向によってその特性が変化の特徴を持つ。先行研究によると、頭部伝達関数の音源方向依存性が人間の音源方向の知覚手がかりであると考えられている。また、頭部伝達関数を畳み込んだ音声信号をヘッドホン受聴することで、3 次元方向の音像定位が実現できることが報告されている。

ヘッドホンに限らずスピーカーなどで音像の距離感を制御する方法として、残響を付加する方法が挙げられる。先行研究では、スピーカー再生音などに人工的な残響を付加することで音像距離を制御できることが確認されている。

本研究では、鏡像法を用いた室内残響音のシミュレーションを行いヘッドホン受聴時に残響付加を行い反射音に頭部伝達関数の畳み込みを行うことで、3 次元方向の音像定位や音像距離の改善を目的とする。また、鏡像法によるシミュレーションを行う際に用いるパラメータ(室内寸法、壁面反射係数の周波数特性)と聴感による音像定位や音像の距離感の関係を主観評価実験により検証する。更に、付加する残響音の物理的特徴量(残響時間、直接音対間接音比など)と主観評価実験の結果との関係について考察する。

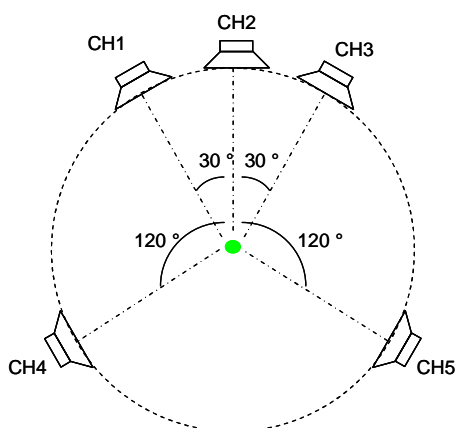


図 1.1 ITU-R BS775-1 の推奨に基づいた 5.1 方式のスピーカー配置例(LFE は省略)

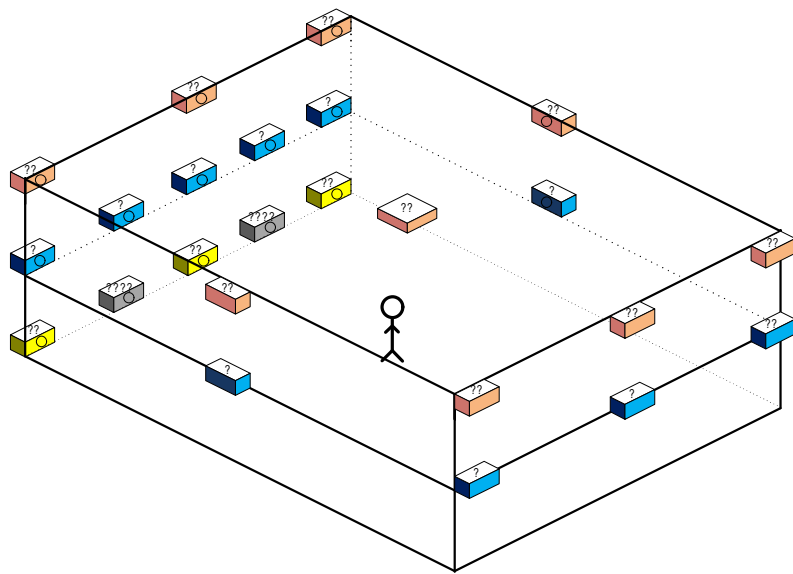


図 1.2 22.2 方式のスピーカー配置例

第 2 章

ヘッドホン受聴における 3 次元方向の 音像定位と距離感のある音像の 再現手法

2.1 概要

本項では、ヘッドホン受聴において 3 次元方向の音像定位や距離感のある音像を再現する手法について述べる。

2.2 頭部伝達関数の畳み込みによる 3 次元方向の音像定位の実現

一般にヘッドホン受聴で 3 次元方向の音像定位を実現する方法として頭部伝達関数をヘッドホンで再生する音声信号に畳み込む手法が用いられている。頭部伝達関数とは、反射が存在しない空間における音源から聴取者の鼓膜までの音の伝達特性を表したものである。頭部伝達関数の周波数特性の測定結果を図 2.1 に示す。頭部伝達関数は音源の方向が変化すると、周波数特性や左右の鼓膜の音圧レベル差、時間差が変化する。これは、音が音源から聴取者の鼓膜まで伝搬する際に頭部や耳介の形状、音源から左右の鼓膜までの距離の差に起因するものであるが、これらの特性は音源方向の知覚手がかりであると考えられている。先行研究では、頭部伝達関数を畳み込んだ音源をヘッドホン受聴すると畳み込んだ頭部伝達関数の方向に音像が定位することが報告されている。また、頭部伝達関数は頭部や耳介の形状によって決まるため個人性を持つ。従って、畳み込みを行う場合はヘッドホンの受聴者本人の頭部伝達関数を用いることが理想的である。しかし不特定多数の受聴者を想定した場合、本人の頭部伝達関数を用いることは非現実的である。この場合、受聴者本人以外の頭部伝達関数を用いるが、音像定位は受聴者本人の頭部伝達関数を使う場合よりも劣ることが多い。

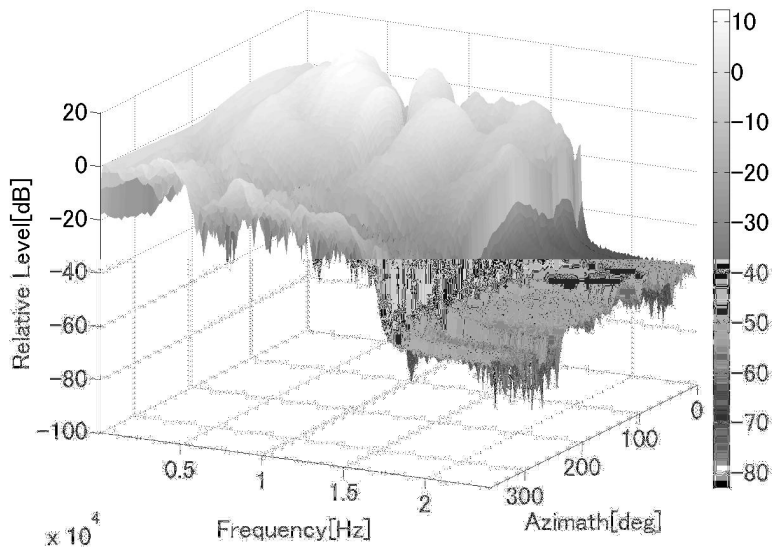


図 2.1 頭部伝達関数の測定結果(周波数特性)

2.3 残響付加による音像距離の制御手法

スピーカーやヘッドホンの再生音像の距離感を制御する手法として残響付加が挙げられる。先行研究によると、人工的な残響音を付加することで知覚される音像距離を制御できることが報告されている。これは人間が間接音を距離知覚の手がかりとして利用しているためであると考えられている。報告では直接音に対する間接音のエネルギー比を増加させると、音像距離が増加することが確かめられている。しかし、付加する間接音の量が過剰であると音像距離は大きく増加するが、音像定位や音像の動き、音質が損なわれる可能性が高い。従って、付加する間接音の量について最適値を検討する必要がある。また、付加する間接音の周波数特性についても音像定位や音質、音像距離の観点から最適な特性を検討する必要がある。また、先行研究では残響音と物理的特徴量の関係が報告されている。具体的には、残響時間や直接音対間接音比、両耳間相関度が挙げられる。これらの特徴量は音像距離や、音の拡がり感と関係があると考えられている。

第 3 章

鏡像法を用いた 室内残響シミュレーション

3.1 概要

室内で音源から音が発せられた場合に聴取者に聞こえるは、音源から聴取者に直接伝わる直接音と音源から壁や天井、床などで反射して聴取者に伝わる間接音に分類することができる。聴取者から見た場合、直接音は音源と同じ方向から聞こえるが間接音は色々な方向から時間遅延を伴って聞こえる。鏡像法を用いると、聴取者から見た直接音・間接音の方向や音源が音を発してから聴取者に到達するまでの時間遅延、音源から聴取者に伝わるまでの壁面反射回数を幾何的に求めることが出来る。鏡像法で求めた直接音・反射音に対して、その方向を考慮した頭部伝達関数を畳み込めば、室内でのスピーカー再生音についてその頭部インパルス応答を求めることができる。

3.2 鏡像法

鏡像法とは、反射音を、反射壁を挟んで音源と線対称な位置にある「鏡像音源」からの直接音と等価であるとみなし反射音の経路長や方向、壁面反射回数を幾何学的に求める方法である。

3.2.1 鏡像法の原理

反射のある室内の実音源について考える。図 3.1 の様に室内右側の壁面について実音源 a, b と線対称になるように鏡像音源 a, b を置く。壁面の反射係数が 1 であれば図 3.1 より、実音源 a, b から右側の壁面を反射して聴取者に到達する反射音は、鏡像音源 a, b からの直接音と等価であるとみなせる。これを室内のあらゆる壁面に適用することで、すべての壁面からの反射音を鏡像音源に置き換えることが出来る。また、壁面を複数回反射した間接音についても、図 3.2 の様に鏡像を拡張していくことで、鏡像音源に置き換えることができる。室内の寸法や、音源位置、聴取者位置を 3 次元座標で設定して鏡像法を適用すれば鏡像音源の座標が導出できるので、聴取者からみた反射音の方向や実音源が音を発してから反射音が聴取者に到達するまでの時間を求めることが出来る。

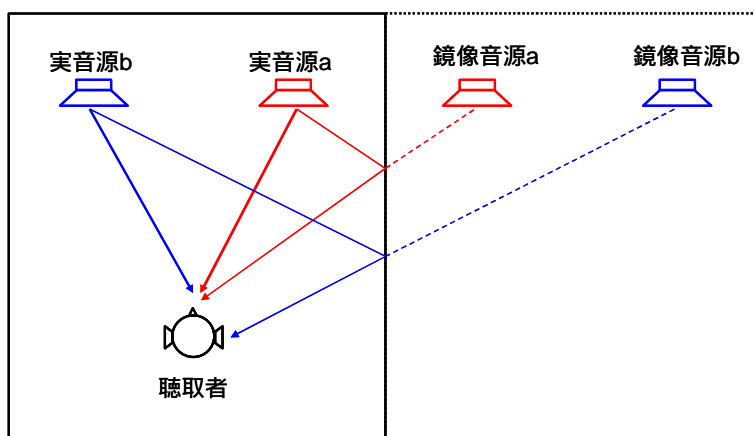


図 3.1 鏡像法

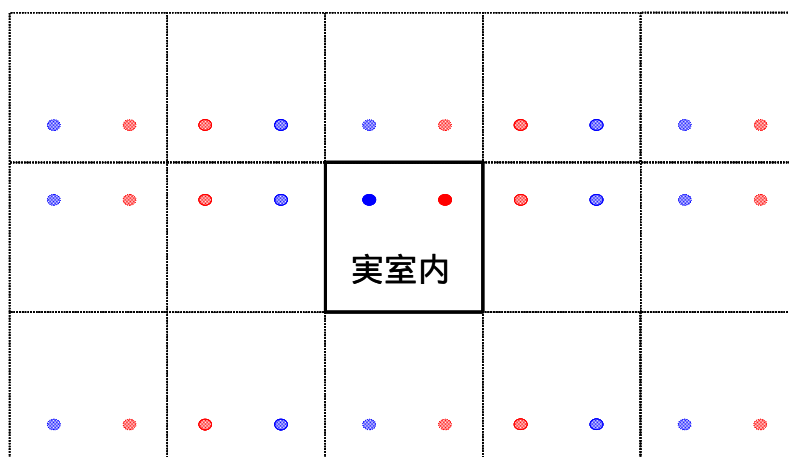


図 3.2 鏡像法の拡張

3.3 鏡像法と頭部伝達関数を用いた頭部インパルス応答のシミュレーション

ここでは、鏡像法と頭部伝達関数の畳み込みを用いて、室内スピーカー再生音の頭部インパルス応答を求める方法について述べる。

3.3.1 シミュレーションの手順

頭部インパルス応答のシミュレーション手順の概要を下記に示す。

- (1) シミュレーションパラメータの設定
- (2) 鏡像法を用いて鏡像音源の座標を求める。
- (3) 聴取者から見た反射音方向をもとめる。
- (4) 反射音の音圧距離減衰の大きさを求める。
- (5) 壁面反射による反射音の音圧減衰の大きさを求める

- (6) (3)～(5)で求めた反射音に対して反射音方向に近い方向の頭部伝達関数を畳み込む。
- (7) (2)～(6)の手順を全ての鏡像音源に適用する。
- (8) 壁面の反射係数が周波数によって異なる場合は、バンドパスフィルタによる帯域分割をしてから各帯域の反射音を求める。
- 手順(1)～(8)の詳細はそれぞれ 3.3.2～3.3.8 で述べる。

3.3.2 シミュレーションパラメータの設定

鏡像法によるシミュレーションでは複数のパラメータを使用するが、パラメータには事前に値を設定する必要があるものが含まれる。

- (1) 聴取者位置：聴取者の位置を X_L 、 Y_L 、 Z_L として、3次元座標で設定する(単位：[m])。
- (2) 音源位置：音源の位置を X_{S_k} 、 Y_{S_k} 、 Z_{S_k} として、値を設定する(単位：[m])。k は音源のチャンネル番号に対応する。例えば、音源が 22.2 チャンネルの場合は k は 1～24 の整数値を取る。
- (3) 室内寸法：鏡像法によるシミュレーションは直方体の室内を対象とし、室内の幅、奥行き、高さをそれぞれ W 、 D 、 H と定める(単位：[m])。W、D、H はそれぞれ、聴取者や音源位置の座標系の X、Y、Z に対応する。
- (4) 壁面反射係数：シミュレーションの対象となる室内は前後左右の壁と天井、床面の 6 面で構成されるが、それぞれの面に対して反射係数を設定する。反射係数の範囲は 0～1 の実数値である。反射係数はオクターブバンドパスフィルタによって分割された各帯域で異なる値を設定することが出来る。今回使用したバンドパスフィルタの帯域は 125[Hz]、250[Hz]、500[Hz]、1k[Hz]、2k[Hz]、4k[Hz] である。

3.3.3 鏡像音源座標の導出

ここでは鏡像音源の位置座標の導出方法について述べる。はじめに、図 3.3 の様に音源や鏡像音源がある部屋に対して(m,n,o)と番号を付ける。チャンネル k の音源(X_{S_k} 、 Y_{S_k} 、 Z_{S_k})について(m,n,o)=(a,b,c)の室内にある鏡像音源の座標(X_{S_k}' 、 Y_{S_k}' 、 Z_{S_k}')は次式で表わされる。

$$(X_{S_k}', Y_{S_k}', Z_{S_k}') = (a \cdot W + X_{S_k}, b \cdot D + Y_{S_k}, c \cdot H + Z_{S_k}) \quad (3.1)$$

{a,b,c: 偶数}

$$(X_{S_k}', Y_{S_k}', Z_{S_k}') = (a \cdot W + (W - X_{S_k}), b \cdot D + (D - Y_{S_k}), c \cdot H + (H - Z_{S_k})) \quad (3.3)$$

{a,b,c: 奇数}

ここで、実数 p の絶対値を Abs(p)、実数 q,r に対して、q を r で割った余りを Rem(q,r)と表すことにする。(3.1)、(3.3)式は(3.3)式にまとめることができる。

$$\begin{aligned}
X_{S_k}' &= (a + \text{Rem}(\text{Abs}(a), 2)) \cdot W + (1 - 2 \cdot \text{Rem}(\text{Abs}(a), 2)) \cdot X_{S_k} \\
Y_{S_k}' &= (b + \text{Rem}(\text{Abs}(b), 2)) \cdot D + (1 - 2 \cdot \text{Rem}(\text{Abs}(b), 2)) \cdot Y_{S_k} \\
Z_{S_k}' &= (c + \text{Rem}(\text{Abs}(c), 2)) \cdot H + (1 - 2 \cdot \text{Rem}(\text{Abs}(c), 2)) \cdot Z_{S_k}
\end{aligned} \quad (3.3)$$

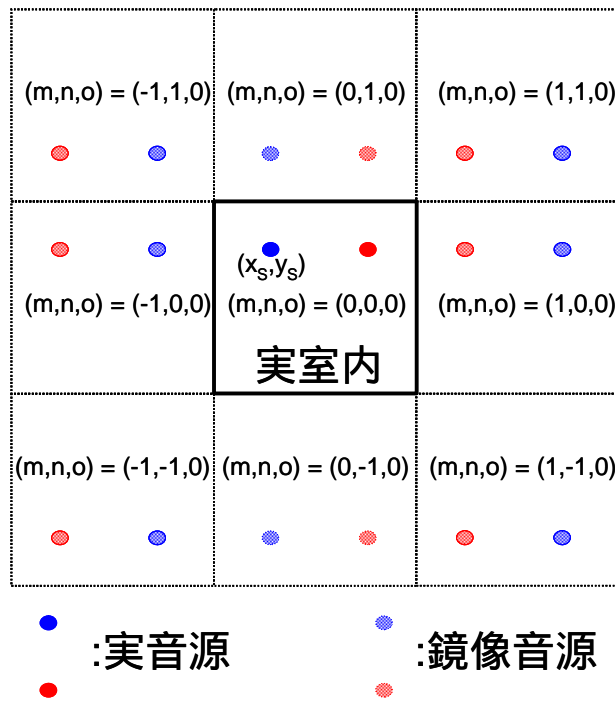


図 3.3 鏡像音源の座標計算

3.3.4 反射音方向の導出

鏡像法では、聴取者から見た鏡像音源の方向が反射音の方向と等価である。したがって、聴取者から見た反射音の方向を求めるには鏡像音源の方向を求めればよい。聴取者の座標を (X_L, Y_L, Z_L) 、鏡像音源の座標を $(X_{S_k}', Y_{S_k}', Z_{S_k}')$ とした場合、聴取者から見た鏡像音源の水平角、仰角（図 3.4 を参照）はそれぞれ(3.4)、(3.5)式で表される。

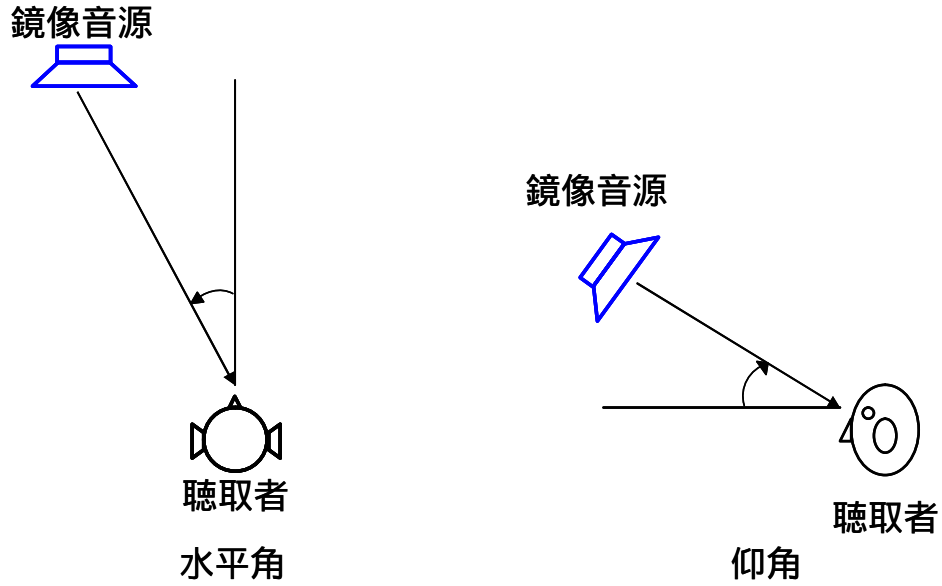


図 3.4 鏡像音源の水平角と仰角

$$\begin{aligned}
 q' &= \tan^{-1}(\text{Abs}((X_{S_k}' - X_L)/(Y_{S_k}' - Y_L))) \\
 q &= p - q' (X_{S_k}' < X_L \text{ かつ } Y_{S_k}' < Y_L \text{ の場合}) \\
 q &= p + q' (X_{S_k}' > X_L \text{ かつ } Y_{S_k}' < Y_L \text{ の場合}) \\
 q &= 2p - q' (X_{S_k}' > X_L \text{ かつ } Y_{S_k}' > Y_L \text{ の場合}) \quad (3.4) \\
 q &= q' (X_{S_k}' < X_L \text{ かつ } Y_{S_k}' > Y_L \text{ の場合}) \\
 q &= \frac{p}{2} (X_{S_k}' < X_L \text{ かつ } Y_{S_k}' = Y_L \text{ の場合}) \\
 q &= \frac{3}{2}p (X_{S_k}' > X_L \text{ かつ } Y_{S_k}' = Y_L \text{ の場合})
 \end{aligned}$$

$$f = \tan^{-1}\left(\frac{(Z_{S_k}' - Z_L)}{\sqrt{(X_{S_k}' - X_L)^2 + (Y_{S_k}' - Y_L)^2}}\right) \quad (3.5)$$

3.3.5 反射音の音圧距離減衰の導出

無響室内では音源から聴取者に伝わる音の音圧は音源・聴取者間距離に反比例する。従って、鏡像音源と聴取者の距離を求めれば反射音の音圧距離減衰の大きさを求めることができる。聴取者の座標を (X_L, Y_L, Z_L) 、鏡像音源の座標を $(X_{S_k}', Y_{S_k}', Z_{S_k}')$ とした場合、音圧の距離減衰の大きさ $decay$ は(3.6)式で表される。

$$decay = \frac{1}{\sqrt{(X_L - X_{S_k}')^2 + (Y_L - Y_{S_k}')^2 + (Z_L - Z_{S_k}')^2}} \quad (3.6)$$

3.3.6 壁面反射による反射音の音圧減衰の導出

間接音の音圧は距離減衰以外にも、壁面反射によって音圧の減衰を伴う。壁面反射による音圧減衰の大きさは、壁面の反射回数と反射した壁面の反射係数によって決まる。ここでは、室内の各壁面が異なる反射係数を持つ場合について考える。

図 3.5 の様に、室内の壁面に対して 0 から 5 の番号を付ける。次に、各壁面の反射係数をそれぞれ $r_0 \sim r_5$ とする。次に、図 3.6 のように、鏡像室に対して m, n, o とナンバリングを行う。ここで、 $(m, n, o) = (-2, 1, 0)$ の青い鏡像音源に注目した場合、この鏡像音源によって生じる反射音の壁面反射回数は、鏡像音源と聴取者を結ぶ直線が壁面と交差する回数になることがわかる。壁面反射回数を Ref_num とした場合、 m, n, o (鏡像音源が存在する鏡像室の番号) を用いて次式で表すことが出来る。

$$ref_num = |m| + |n| + |o| \quad (3.7)$$

しかし、 r_g がそれぞれ異なる値をとる場合、各鏡像音源に対して、各壁面の反射回数を求める必要がある。ここでは、 m, n, o の 3 変数に着目し、各壁面の反射回数を求める方法について考える。ただし、 Ref_num_x は壁面 x の反射回数とする。

(1) m について

(a) m が偶数の場合 : $Ref_num_1 = Ref_num_2 = m/2$

(b) m が奇数の場合

1. $m < 0$ の場合 : $Ref_num_1 = m/2 + 1$ 、 $Ref_num_2 = m/2$

2. $m > 0$ の場合 : $Ref_num_2 = m/2 + 1$ 、 $Ref_num_1 = m/2$

(2) n について

(a) n が偶数の場合 : $Ref_num_0 = Ref_num_3 = n/2$

(b) n が奇数の場合

1. $n > 0$ の場合 : $Ref_num_0 = n/2 + 1$ 、 $Ref_num_3 = n/2$

2. $n < 0$ の場合 : $Ref_num_3 = n/2 + 1$ 、 $Ref_num_0 = n/2$

(3) o について

(a) o が偶数の場合 : $Ref_num_4 = Ref_num_5 = o/2$

(b) o が奇数の場合

1. $o > 0$ の場合 : $Ref_num_4 = o/2 + 1$ 、 $Ref_num_5 = o/2$

2. $o < 0$ の場合 : $Ref_num_5 = o/2 + 1$ 、 $Ref_num_4 = o/2$

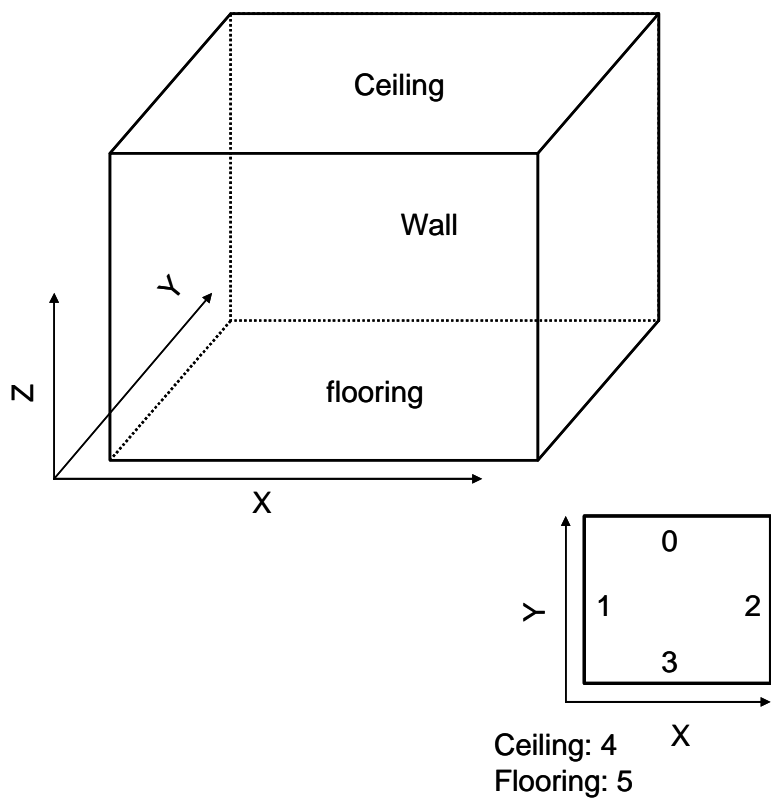


図 3.5 室内の床・天井・壁面のナンバリング

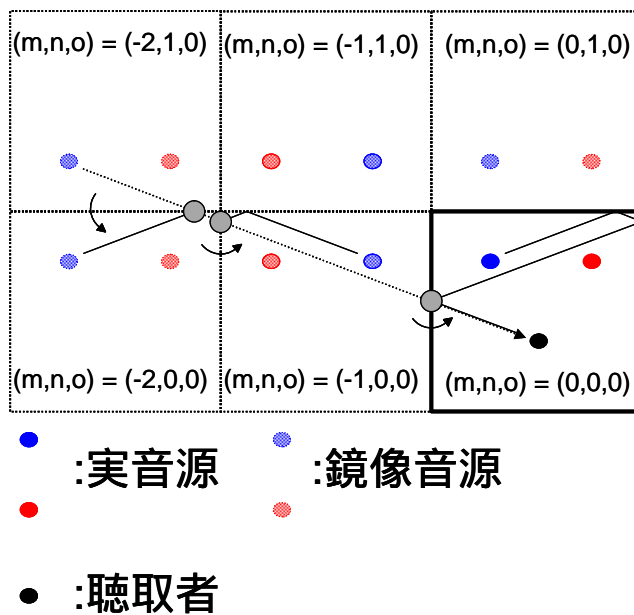


図 3.6 壁面反射回数 of 導出

3.3.7 頭部伝達関数の畳み込み

鏡像法を用いて反射音の音圧や時間遅延、到来方向を求めたが様々な方向からの反射音にその方向の頭部伝達関数を畳み込むことで仮想室内での頭部インパルス応答を求めることができる。本研究では、鏡像法で求めた其々の反射音に対して対応する鏡像音源方向の頭部伝達関数を畳み込むことで仮想室内の頭部インパルス応答を求めた(図 3.7)。

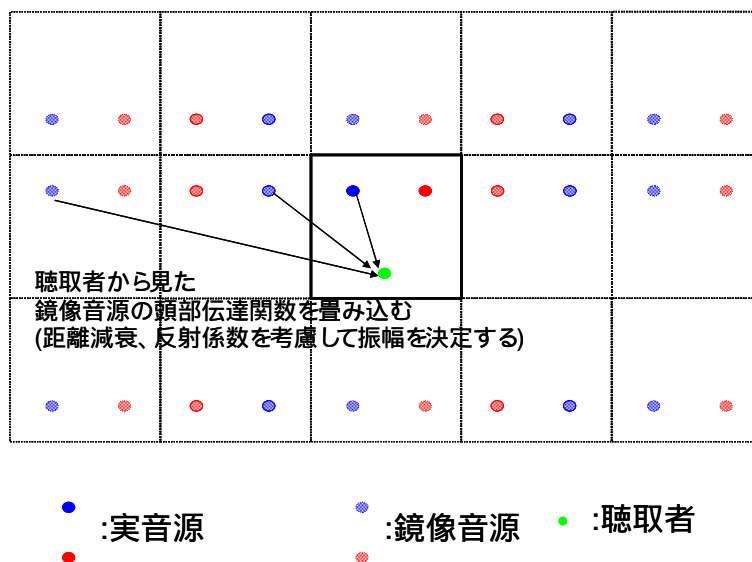


図 3.7 鏡像法における頭部伝達関数の畳み込み

3.3.8 バンドパスフィルタによる帯域分割

周波数によって異なる壁面反射係数を実現するために、オクターブバンドの帯域を持つバンドパスフィルタを用いて帯域分割を行った。具体的には、先ず壁面反射係数のシミュレーションパラメータを設定する際に、125[Hz]、250[Hz]、500[Hz]、1[kHz]、2[kHz]、4[kHz]の中心周波数を持ったオクターブバンドの帯域ごとに壁面反射係数を設定する。次に各分割帯域でシミュレーションを行い、頭部インパルス応答を求める。例えば、125[Hz]の帯域の壁面反射係数を a とすると、全帯域の壁面反射係数が a の条件で頭部インパルス応答を求める。そして、求めたインパルス応答の反射音に対してオクターブバンドパスフィルタを用いて帯域制限を行う。ただし、直接音は帯域制限を行わない。同様の処理をすべての帯域で行った後、求めたすべてのインパルス応答を線形加算することで最終的に求める頭部インパルス応答を求めることができる。今回は、4[kHz]よりも高い音域については反射音を取り除いた条件で実験を行った。

第 4 章

実験

4.1 目的

本章では、鏡像法によるシミュレーションで用いるパラメータとシミュレーションで生成した残響が音像の空間印象に及ぼす影響を主観実験により調べる。

3章で述べた鏡像法による頭部インパルス応答のシミュレーションでは、スピーカ配置や部屋の寸法、壁面の反射係数などのパラメータの条件をあらかじめ設定する必要がある。シミュレーションで求めた頭部インパルス応答をマルチチャンネルの音源に畳み込み、ヘッドホン受聴することでスピーカ再生音を再現することが出来るが、シミュレーションパラメータの値によってヘッドホン受聴時の音像の空間的印象が異なる可能性が考えられる。本章では、シミュレーションパラメータと主観による再生音の空間的印象の関係をシェッフェの対比較法による主観評価実験によって確かめる。

4.2 実験方法

4.2.1 実験手法

実験はシェッフェの対比較法(浦の変法)を用いた。対比較法は、 k 個の試料 A_1, A_2, \dots, A_k から 2 個ずつ対にして組み合わせ、組み合わせた 2 種類の試料同士で比較を行う。例えば、 A_i を先にして A_j を後にした順序で比較した組み合わせを (A_i, A_j) とすると、被験者には始めに A_i を提示し A_j を後に提示する。被験者は A_i に対して A_j がどの程度良いと思うか、あるいは悪いと思うかを表に示したような $-2 \sim +2$ の評点を用いて表現させる。シェッフェの原法では被験者を数組に分けて、1 人の被験者が 1 つの組み合わせのだけを 1 回比較するが、浦の変法では 1 人が全ての組み合わせについて対比較を行い、人を変えて反復する。また、浦の変法は順序効果を考慮するため比較順序を逆にした組み合わせも実験する必要がある。例えば、 (A_i, A_j) という組み合わせの比較順序を逆にしたものは (A_j, A_i) となる。順序効果を考慮する場合、試料数が k 個の場合は ${}_k C_2 \times 2$ 対の組み合わせが生じる。

表 4.1 シェッフェの対比較法で用いる評点

評価	点数
A_j が A_j に比べて非常に良いとき	+2 点
A_j が A_j に比べて幾分良いとき	+1 点
A_j が A_j と同じ良さであるとき	0 点
A_j が A_j に比べて幾分悪いとき	-1 点
A_j が A_j に比べて非常に悪いとき	-2 点

4.2.2 評価項目、評点方法

今回の実験では、「音の移動感」、「音の距離感」の2種類の評価項目を設けた。音の移動感とは、音像が移動する際の音像の方向変化の分かりやすさとし、対比較の際には音像の方向変化がより分かりやすい試料を音の移動感が優れているとした。音の距離感については、被験者の頭部を基準として音像がどれくらい離れて聞こえるかを基準とした。対比較の際には、音像がより遠くに聞こえる試料を音の距離感が優れているものとした。逆に、音が被験者の頭の近くで聞こえる場合は音の距離感が悪い評価になる。実験を行う際には、上述の評価項目について資料を用いて説明を行い、本実験と同様の形式の主観評価のトレーニングを実施して評価基準の個人差を出来るだけ少なくなるように努めた。

4.2.3 被験者

本実験では、被験者を2つのグループ A、B に分類する。グループ A の被験者は6人の学生、グループ B は5人の音響の専門家でグループ A 被験者よりも主観評価実験の経験が多い。本実験では A、B の被験者には異なる実験条件を提示した。被験者グループ B に課した実験条件は、実験日程の都合上、被験者グループ A の実験結果において評価が低かった条件等を省略している。各被験者グループに提示した条件については4.3.5項で述べる。

4.2.4 実験装置

実験装置の構成を図4.1に示す。4台のヘッドホンは並列に接続されているため、最大4人の被験者が同時に実験に参加できる。また、実験は遮音された音響実験室内で行った。

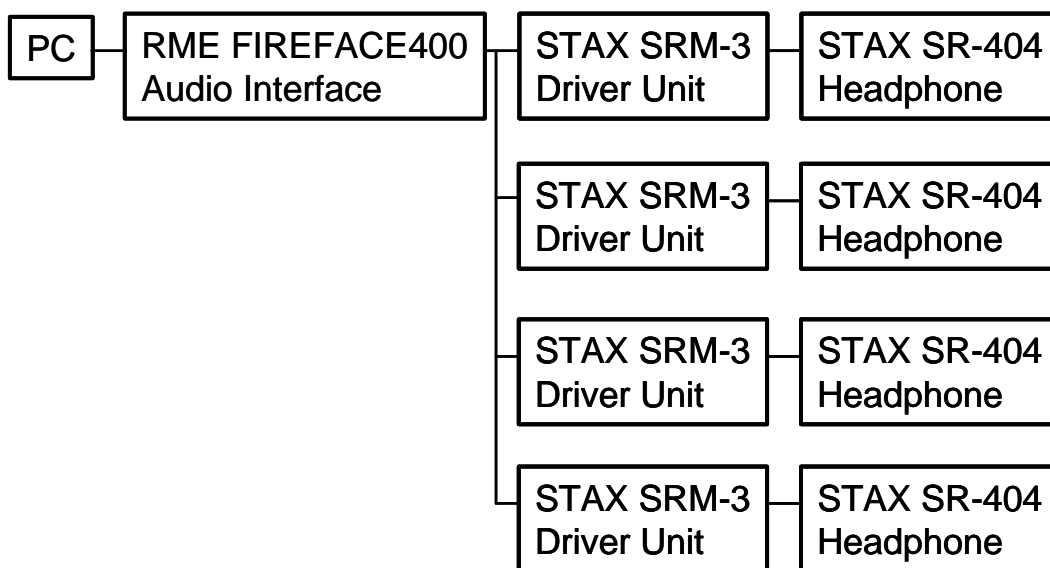


図 4.1 実験装置の構成

4.2.5 実験手順

実験では、4.3 で示した組み合わせについて被験者グループ A は 62 通り、被験者グループ B には 28 通りの組み合わせの比較を行った。被験者グループ A は 62 通りの組み合わせを 4 つのセッションに分割した(グループ B は 2 つのセッション)。1 セッションあたり 14 ~ 16 通りの組み合わせについて評価を行った。ひとつのセッションの構成について図 4.3 に示す。セッション開始時には音声によるアナウンスが流れ、14 ~ 16 回の試行で評価を行う。1 セッションあたりの所要時間は 30 分以内で、被験者は各セッションの間に 15 分以上の休憩を取った。また、図 4.3 の 1 試行は一对の比較に相当する。次に 1 回の試行の構成を図 4.4 に示す。1 試行では 1 対比較の組み合わせ A、B について A、B、A、B の順に提示した。1 回の試行が終了するまでに行った。

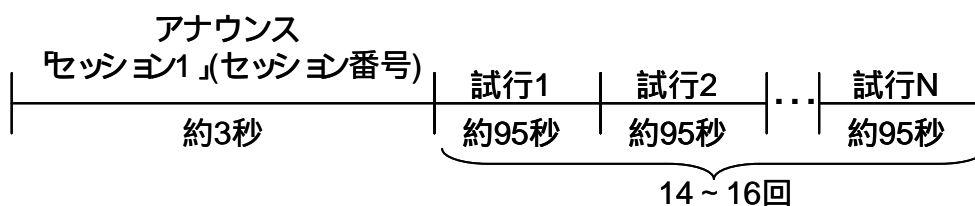


図 4.3 セッションの構成

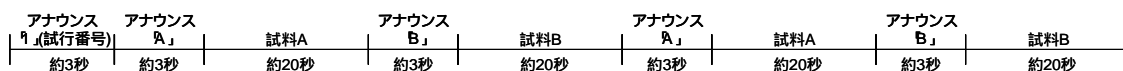


図 4.4 1 試行の構成

4.3 実験条件

実験は、シミュレーションで用いるパラメータについて実験条件を設定した。実験条件を定めるパラメータは以下の4種類である。

1. 壁面反射係数
2. 室内寸法、音源位置、聴取者位置などの座標系の倍率
3. 反射音の生成法
4. 音源のフォーマット

上記の4種類以外のパラメータについては条件を固定し、また値を変化させる4種のパラメータについても、同時に2種類以上のパラメータを振らず、1種類のパラメータの値を変化させた。これは、パラメータ間の相互関係を調べるためには膨大な試行回数の実験が必要になるためである。1~4のパラメータの詳細については、4.3.1~4.3.4で詳しく述べる。

4.3.1 壁面反射係数

壁面の反射係数については、実際の建築用素材の反射係数の実測値をシミュレーションに用いた。表4.2にシミュレーションで用いた建築素材の反射係数のデータを示す。ただし、表4.2の周波数はオクターブバンドの中心周波数を表す。また、中心周波数が8[kHz]以上の帯域については反射音の付加を行わなかった。シミュレーションでは室内が直方体であるため6面の反射係数を定めることが出来るが今回の実験では、床の反射係数はカーペットで固定し、それ以外の5面の壁面について反射係数の条件を変化させた。実験条件について表4.3に示す。

表 4.2 建築素材の反射係数

素材	125[Hz]	250[Hz]	500[Hz]	1000[Hz]	2000[Hz]	4000[Hz]
コンクリートブロック(ペンキ塗装)	0.9	0.95	0.94	0.93	0.91	0.92
コンクリートブロック(素地)	0.64	0.56	0.69	0.71	0.61	0.75
サウンドブロックユニット 200mm厚、ペンキ塗装	0.26	0.43	0.55	0.65	0.64	0.66
吸音プラスター	0.93	0.83	0.5	0.4	0.32	0.34
石膏ボード(13mm); 下地 50×100mm,410mm 間隔	0.71	0.9	0.95	0.96	0.93	0.91
木製パネル(10~13mm); 50~100mm空気層	0.7	0.75	0.8	0.83	0.85	0.9
カーペット(厚手、フェルト (1.35kg/m ²)かフォームラバー下地)	0.92	0.76	0.43	0.31	0.29	0.27
反射なし	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 4.3 実験条件：壁面反射係数

実験条件	床面	床を除いた天井、壁面
1-1	カーペット	コンクリートブロック(ペンキ塗装)
1-2	カーペット	コンクリートブロック(素地)
1-3	カーペット	サウンドブロックユニット、200mm厚、ペンキ塗装
1-4	カーペット	吸音 plaster
1-5	カーペット	石膏ボード(13mm);下地 50 × 100mm,410mm 間隔
1-6	反射なし	反射なし(無響室を想定、直接音のみ)
1-7	カーペット	木製パネル(10 ~ 13mm) 50 ~ 100mm空気層

4.3.2 室内寸法、音源位置、聴取者位置などの座標系の倍率

室内寸法は、幅 4[m]、奥行き 5[m]、高さ 3[m]とした。スピーカーの座標や聴取者の位置は XYZ の 3次元座標により定めるが、幅、奥行き、高さはそれぞれ X、Y、Z 軸に対応する。

スピーカーの座標については、実験で用いる音源フォーマットに 5.1 方式と 22.2 方式の 2種類を用いるため、5.1 方式と 22.2 方式のスピーカー配置を定めた。なお、5.1 方式の配置については ITU-R BS775-1 の推奨に基づいた配置を定めた。表 4.4、表 4.5 に 22.2 方式、5.1 方式のスピーカー(音源)、聴取者座標を示す。また、スピーカーの配置図は 1 章の図 1.1、図 1.2 に示してある。ただし、座標系の倍率を定める変数を α とし、座標系全体に掛けることで各パラメータの条件を定めた。室内寸法についても同様に上述の値に α を掛けた値を用いた。例えば α の値を変化させた場合、室内の寸法比やスピーカーの相対的な位置関係を維持したまま部屋の大きさやスピーカーと聴取者の距離を変化させることが出来る(図 4.2)。今回の実験では α の値を変化させることで実験条件を定めた。これは、シミュレーション上のスピーカーの距離や部屋の大きさが、ヘッドホン受聴における空間的印象に作用するか検証するためである。また、座標系全体を 1 つの変数で一括して変化させることで実験条件の設定を単純化している。表 4.6 に実験条件を示す。ただし、 α の条件についてはグループ A の被験者にのみ実験を実施した。

表 4.4 22.2 方式のスピーカー、聴取者座標

CH	X[m]	Y[m]	Z[m]	聴取者間距離[m]	水平角[deg]	仰角[deg]
1	0.06	2.56	1.00	1.55	50.00	0.00
2	0.78	2.56	1.00	1.10	25.00	0.00
3	1.25	2.56	1.00	1.00	0.00	0.00
4	1.72	2.56	1.00	1.10	335.00	0.00
5	2.44	2.56	1.00	1.55	310.00	0.00
6	0.25	1.56	1.00	1.00	90.00	0.00
7	2.25	1.56	1.00	1.00	270.00	0.00
8	0.25	0.56	1.00	1.41	135.00	0.00
9	1.25	0.56	1.00	1.00	180.00	0.00
10	2.25	0.56	1.00	1.41	225.00	0.00
11	0.06	2.56	2.70	2.30	50.00	47.56
12	1.25	2.56	2.70	1.97	0.00	59.53
13	2.44	2.56	2.70	2.30	310.00	47.56
14	0.25	1.56	2.70	1.97	90.00	59.53
15	1.25	1.56	2.70	1.70	0.00	89.97
16	2.25	1.56	2.70	1.97	270.00	59.53
17	0.25	0.56	2.70	2.21	135.00	50.24
18	1.25	0.56	2.70	1.97	180.00	59.53
19	2.25	0.56	2.70	2.21	225.00	50.24
20	0.06	2.56	0.30	1.70	50.00	-24.24
21	1.25	2.56	0.30	1.22	0.00	-34.99
22	2.44	2.56	0.30	1.70	310.00	-24.24
LFE1	0.78	2.56	0.30	1.31	25.00	-32.35
LFE2	1.72	2.56	0.30	1.31	335.00	-32.35
聴取者	1.25	1.56	1.00	0.00		

表 4.5 5.1 方式のスピーカー、聴取者座標

CH	X[m]	Y[m]	Z[m]	聴取者間距離[m]	水平角[deg]	仰角[deg]
1	2.25	3.50	1.00	1.00	30.00	0.00
2	4.25	3.50	1.00	1.00	0.00	0.00
3	2.25	3.50	1.00	1.00	300.00	0.00
4	3.25	3.50	1.00	1.00	120.00	0.00
5	4.25	3.50	1.00	1.00	240.00	0.00
LFE	2.06	5.20	1.00	1.00	0.00	0.00
聴取者	2.00	2.50	1.00	0.00		

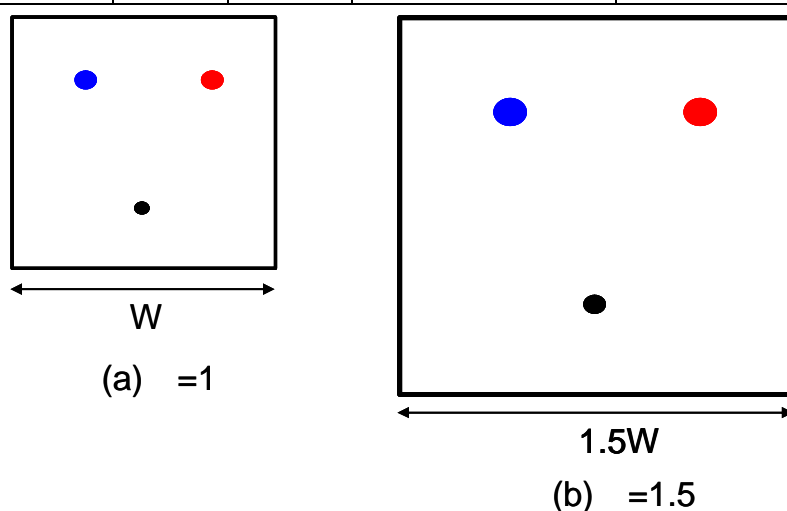


図 4.2 について

表 4.6 実験条件：（被験者グループ A）

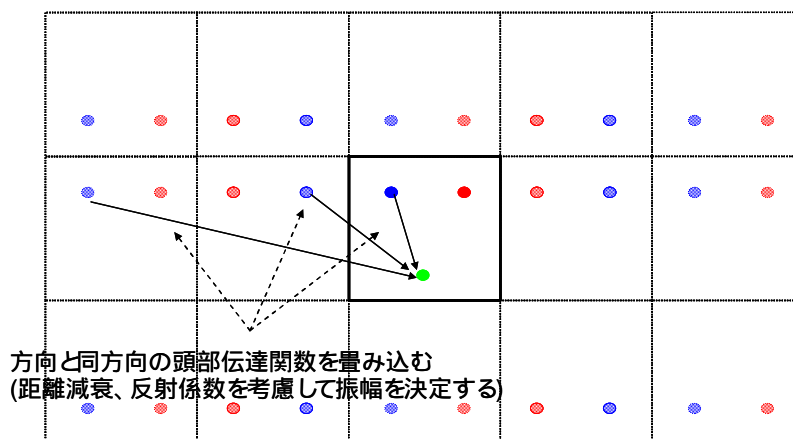
条件	
2-1	1
2-2	3
2-3	9
2-4	27

4.3.3 反射音の生成法

鏡像法では反射音方向を幾何的に求めているが、反射音方向の設定の仕方が空間的印象に影響を与えることが考えられる。本実験では反射音方向の導出方法について 3 種類の実験条件を定めた。実験条件について表 4.7 に、各条件の概要図を図 4.3～図 4.5 に示す。

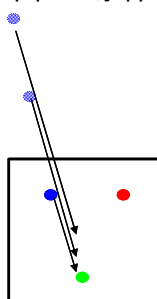
表 4.7 反射音方向に関する実験条件

条件	
3-1	3.3.7 で述べたように鏡像法によって求めた反射音の方向に基づいて、反射音の到来方向と同方向の頭部伝達関数を畳み込む方法である(図 4.3)。
3-2	すべての反射音が鏡像音源ではなく音源方向から到来していると仮定し、すべての反射音に対して音源方向の頭部伝達関数を畳み込む方法である(図 4.4)。 ただし、反射音方向以外の反射音の距離減衰の影響や、壁面反射の影響は条件 3-1 と同様に求める。
3-3	反射音に畳み込む頭部伝達関数の方向をランダムで設定する方法である(図 4.5)。 ただし、反射音方向以外の反射音の距離減衰の影響や、壁面反射の影響は条件 3-1 と同様に求める。



● :実音源 ● :鏡像音源 ● :聴取者
●

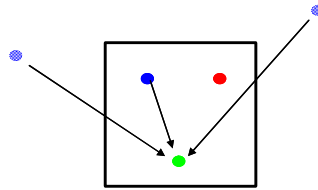
図 4.3 条件 3-1



鏡像音源は実音源と同じ方向にあるとみなし、実音源と同方向の頭部伝達関数を畳み込む。

● :実音源 ● :鏡像音源 ● :聴取者
●

図 4.4 条件 3-2



畳み込む頭部伝達関数の方向をランダムに指定する。

● :実音源 ● :鏡像音源 ● :聴取者

図 4.5 条件 3-3

4.3.4 音源

22.2 方式、5.1 方式の 2 種類の音源を用いた。これらの音源内容は同一であり、長さは約 20 秒である。これに各実験条件についてシミュレーションで求めた頭部インパルス応答を畳み込んだものを実験試料として用いた。

4.3.5 一対比較の組み合わせについて

実験では 4.3.1 ~ 4.3.4 で定めた実験条件はそれぞれ独立したセッションとして一対比較の組み合わせを定めた。各セッションについては(1) ~ (4)に示す。

また、被験者グループ A、B に対してはそれぞれに異なる実験条件で実験を行ったので各グループに提示した条件について示す。

(1) セッション 1 : 壁面反射係数についての一対比較組み合わせ

壁面反射係数についての一対比較の組み合わせを表 4.8a、4.8b に示す。ただし、条件 2 ~ 4 については、

- ・ $\tau = 3$ (条件 2-2)
- ・ 鏡像法を用いて反射音方向を導出(条件 3-1)
- ・ 22.2 方式の音源(条件 4-1)

とし、セッション 1 では常に固定とした。

表 4.8a 条件 1 の一対比較組み合わせ(被験者グループ A)

		試料 B						
		1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7
試料 A	1-1							
	1-2							
	1-3							
	1-4							
	1-5							
	1-6							
	1-7							

表 4.8b 条件 1 の一対比較組み合わせ(被験者グループ B)

		試料 B				
		1-2	1-3	1-4	1-6	1-7
試料 A	1-2					
	1-3					
	1-4					
	1-6					
	1-7					

(2)セッション 2：座標条件の一対比較組み合わせ

に関する条件での一対比較の組み合わせを表 4.9 に示す。ただし、条件 1,3,4 については、

- ・ 壁面の素材：サウンドブロックユニット(条件 1-3)
- ・ 鏡像法を用いて反射音方向を導出(条件 3-1)
- ・ 22.2 方式の音源(条件 4-1)

とし、セッション 2 では常に固定とした。またセッション 2 は被験者グループ A に対してのみ実験を行った。

表 4.9 条件 2 の一対比較組み合わせ(被験者グループ A)

		試料 B			
		2-1	2-2	2-3	2-4
試料 A	2-1				
	2-2				
	2-3				
	2-4				

(3)セッション 3：反射音生成に関する条件の一対比較組み合わせ

反射音生成に関する条件の一対比較の組み合わせを表 4.10 に示す。ただし、条件 1,2,4 については、

- ・ 壁面の素材：サウンドブロックユニット(条件 1-3)
- ・ =3(条件 2-2)
- ・ 22.2 方式の音源(条件 4-1)

とし、セッション 3 では常に固定とした。セッション 3 については被験者グループ A、B に対して同じ実験を行った。

表 4.10 条件 3 の一対比較組み合わせ(被験者グループ A、B)

		試料 B		
		3-1	3-2	3-3
試料 A	3-1			
	3-2			
	3-3			

(4)セッション 4：音源フォーマットの一対比較組み合わせ

音源のチャンネル数による違いについて一対比較の組み合わせを表 4.11 にしめす。ただし、条件 1,2,3 については、

- ・ 壁面の素材：サウンドブロックユニット(条件 1-3)
- ・ =3(条件 2-2)
- ・ 鏡像法を用いて反射音方向を導出(条件 3-1)

とし、セッション 4 では常に固定とした。セッション 4 については被験者グループ A、B に対して同じ実験を行った。

表 4.11 条件 4 の一対比較組み合わせ(被験者グループ A、B)

		試料 B	
		4-1	4-2
試料 A	4-1		
	4-2		

4.3.6 その他実験条件に関する補足事項

畳み込みに用いる頭部伝達関数は実験者本人の頭部伝達関数を測定したものを使用した。使用した頭部伝達関数は、水平角は 5 度刻みで 0 度～360 度、仰角は 10 度刻みで-50 度から 90 度の範囲のデータを持っている。

第 5 章

実験結果・考察

5.1 概要

本項では、第 4 章の実験結果と考察について述べる。主観評価実験の結果については、被験者の回答を統計処理し、各条件に対する嗜好度を棒グラフでプロットしている。棒グラフに重なっている直線はヤードスティックを表し、比較する 2 条件でヤードスティックが重なっていなければ 5[%]で有意差があることを意味する。5.2、5.3 項では各被験者グループの実験結果を示し、5.4 項では両グループで共通する実験条件について、一括して統計処理を行った結果を示す。

5.2 実験結果・考察(被験者グループ A)

この項では、学生で構成される被験者グループ A の実験結果とその考察について述べる。

5.2.1 条件 1：壁面反射係数

反射係数に関する条件 1 について統計処理を行った結果を図 5.1、図 5.2 に示す。音の移動感については、無響室の条件(1-6)が他の条件に較べて有意に優れている結果が得られた。また、コンクリートブロック(ペンキ塗装)(1-1)、石膏ボード(1-5)、木製パネルの 3 条件はその他の条件よりも有意に劣る結果が得られた。以上のことから、反射係数の低い素材のほうが音の移動感が優れている傾向が見られた。

音の距離感については、移動感とは逆にコンクリートブロック(ペンキ塗装)(1-1)と石膏ボードが高い値を示した。しかし、残りの 5 条件に関しては互いに有意な差は認められなかった。音の移動感と音の距離感の両者に注目すると、壁面反射係数の大きい条件では音の距離感が優れている傾向が見られたが音の移動感については、壁面反射係数が小さい条件ほど優れている傾向が見られた。

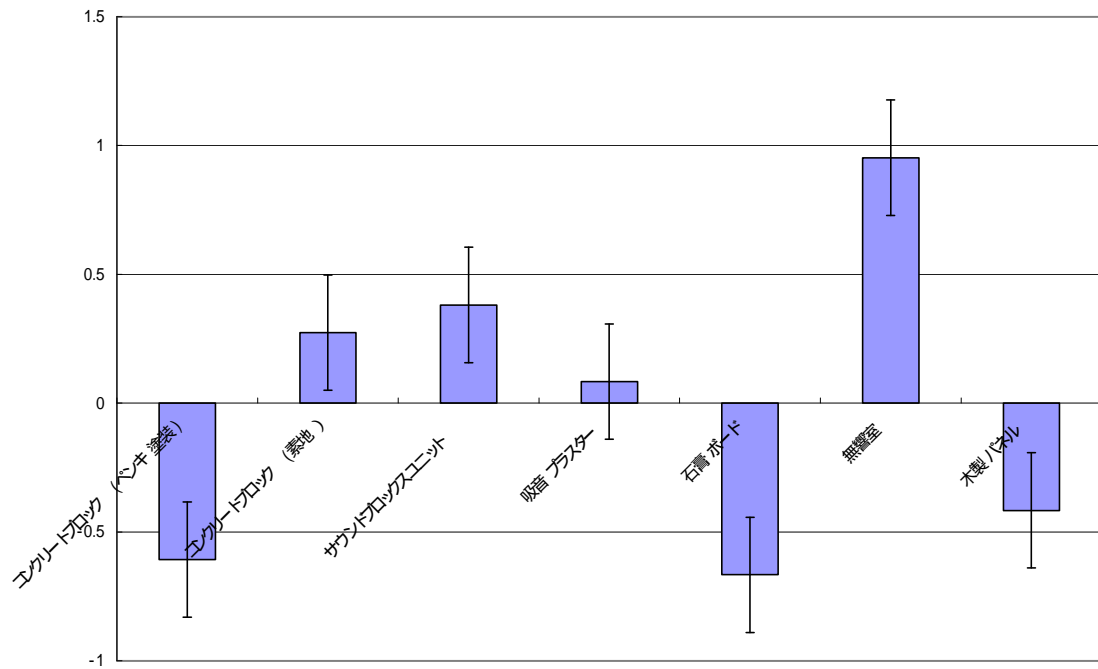


図 5.1 実験結果：条件 1 音の移動感

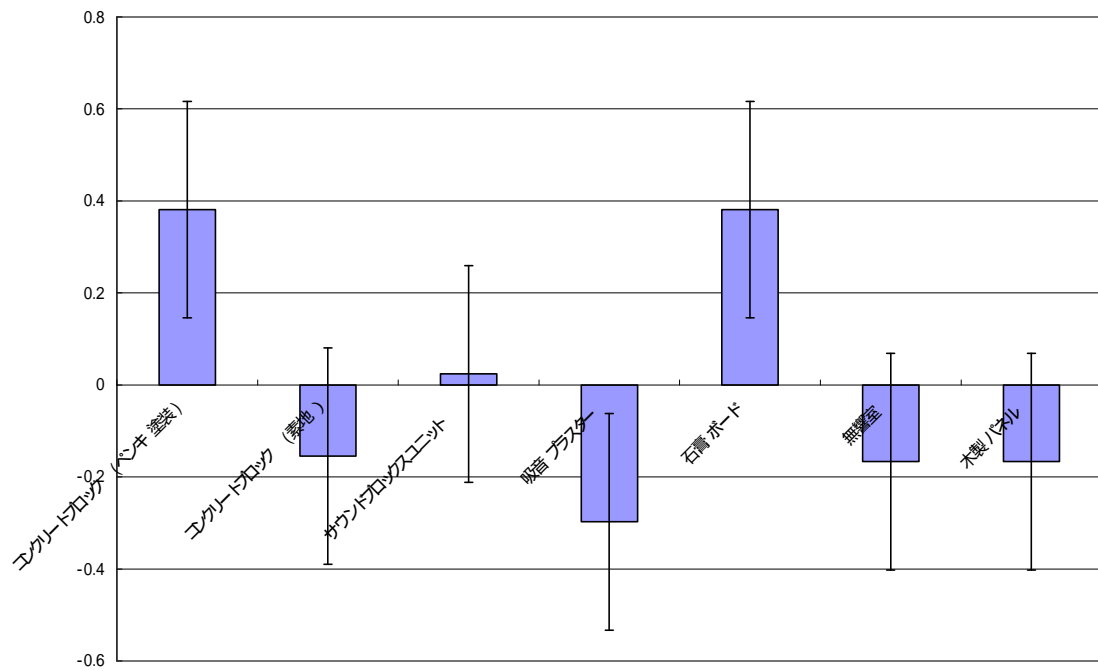


図 5.2 実験結果：条件 1 音の距離感

5.2.2 条件 2：室内寸法、音源位置、聴取者位置などの座標系の倍率

の条件についての実験結果を図 5.3、図 5.4 に示す。音の移動感、距離感のいずれの結果について、各条件間で有意な差は見られなかった。

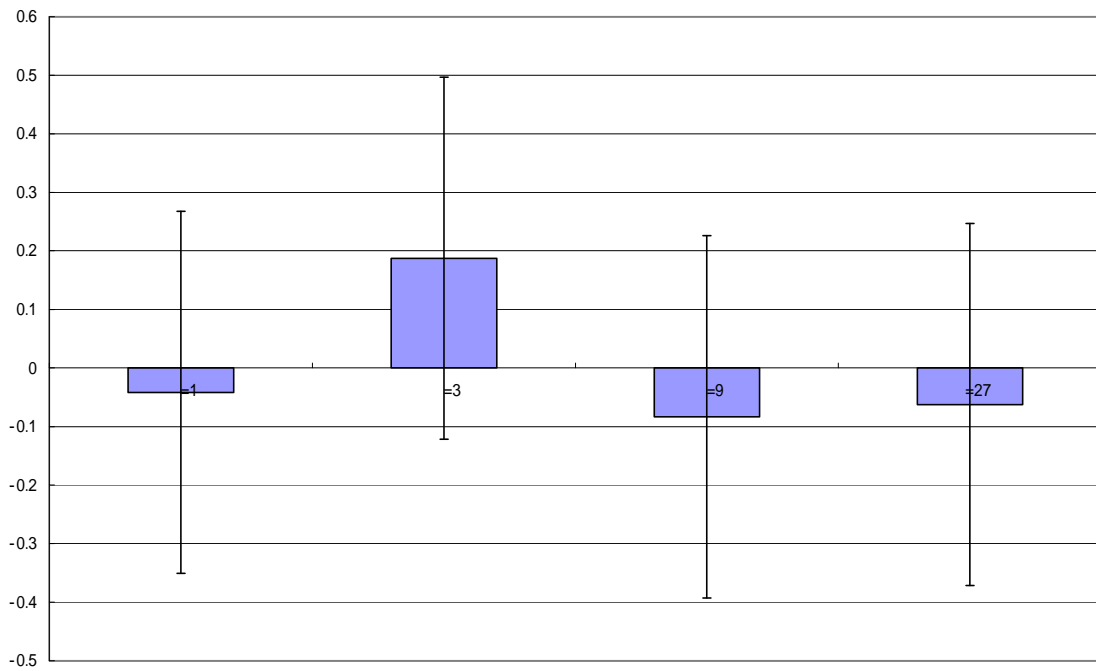


図 5.3 実験結果：条件 2 音の移動感

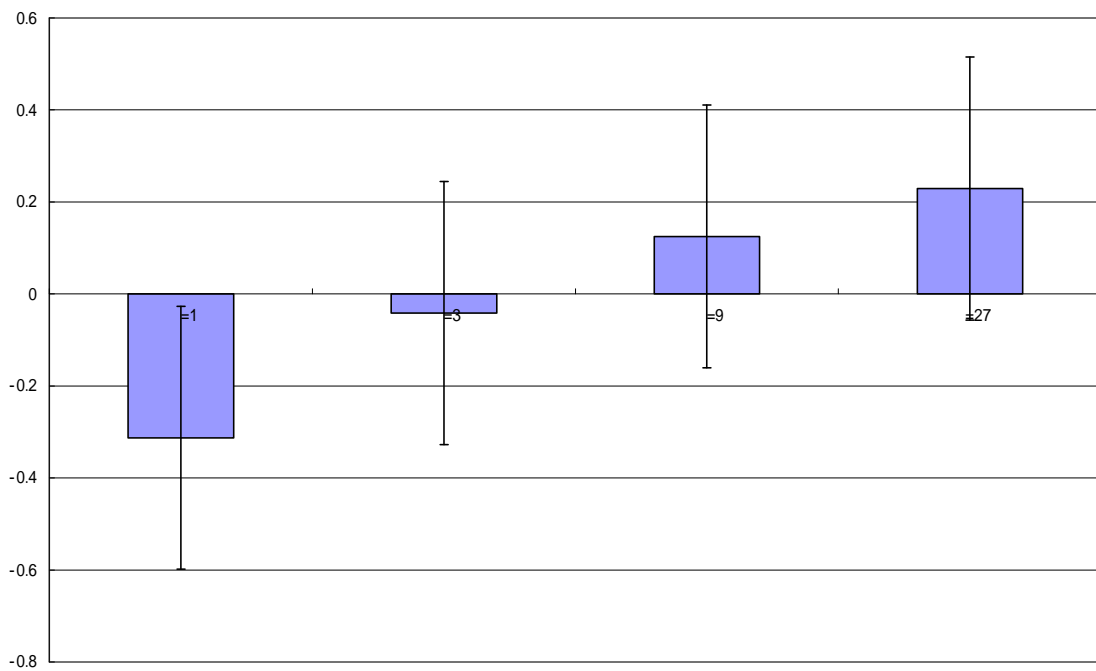


図 5.4 実験結果：条件 2 音の距離感

5.2.3 条件 3：反射音の生成法

反射音の畳み込み方法の条件に関する実験結果を図 5.5、図 5.6 に示す。音の移動感、距離

感いずれの結果について、各条件間で有意な差は見られなかった。

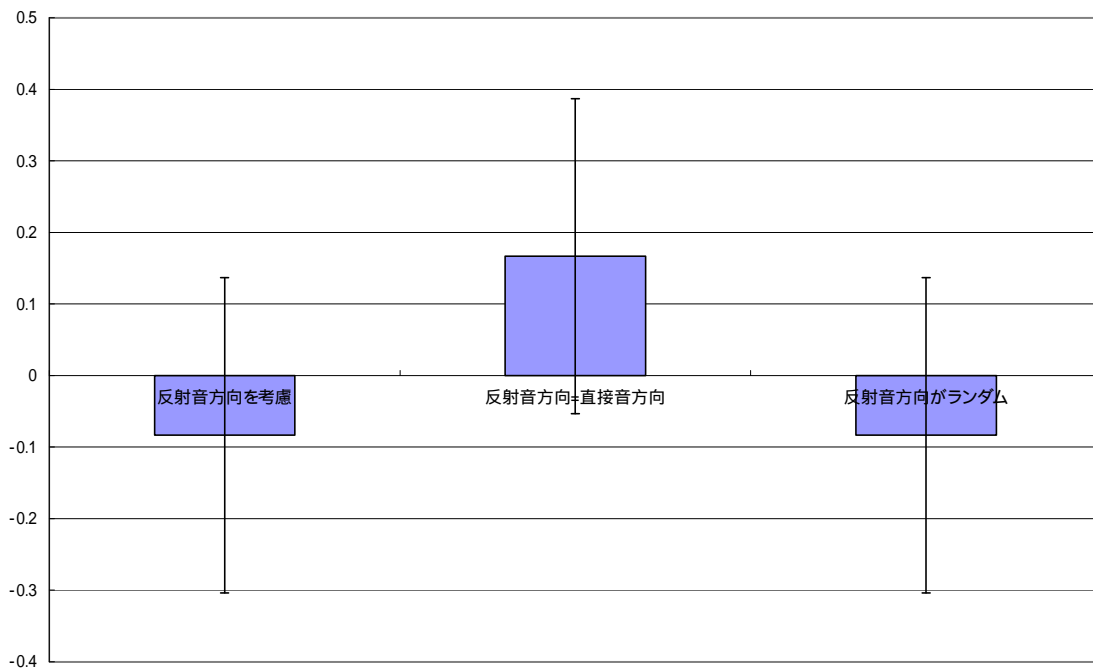


図 5.5 実験結果：条件 3 音の移動感

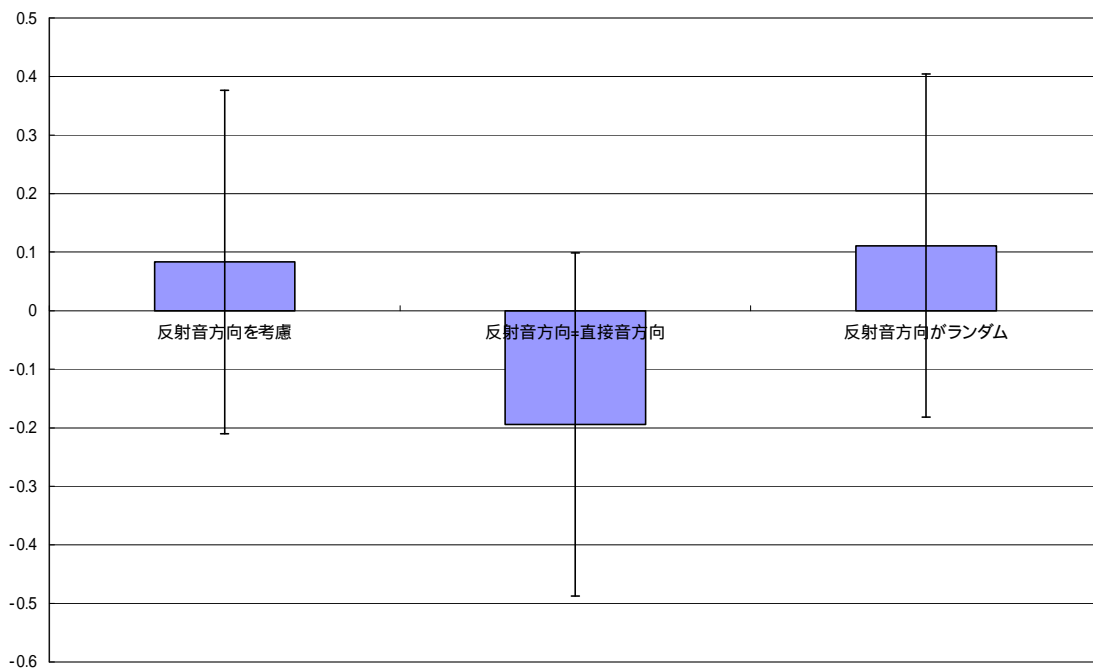


図 5.6 実験結果：条件 3 音の距離感

5.2.4 条件 4 : 音源

音源の条件による実験結果を表 5.1、表 5.2 に示す。計算処理の都合上、いくつかの値が求められないが、各条件の嗜好度に対して誤差の平方和の値が非常に小さいことから 22.2 方式が 5.1 方式よりも、音の移動感、距離感共に優れていると言える。この結果から、マルチチャンネル音響システムのヘッドホン受聴においても 22.2 方式が 5.1 方式よりも有効であると言える。

表 5.1 実験結果：条件 4 音の移動感

要因	平方和	自由度	不偏分散	F0
主効果 i	0.083333	1	0.083333	0
主効果 × 個人(B)	13.41667	5	2.683333	0
組合せ効果	0	0	N/A	N/A
順序効果	0.083333	1	0.083333	0
順序 × 個人(B)	13.41667	5	2.683333	0
誤差 e	1.78E-15	0		
総計 T	27	12		
嗜好度 _i 22.2CH	0.041667			
嗜好度 _i 5.1CH	-0.04167			

表 5.2 実験結果：条件 4 音の距離感

要因	平方和	自由度	不偏分散	F0
主効果 i	10.08333	1	10.08333	0
主効果 × 個人(B)	14.41667	5	2.883333	0
組合せ効果	0	0	N/A	N/A
順序効果	0.083333	1	0.083333	0
順序 × 個人(B)	4.416667	5	0.883333	0
誤差 e	-1.78E-15	0	-	
総計 T	29	12		
嗜好度 _i 22.2CH	0.458333			
嗜好度 _i 5.1CH	-0.45833			

5.3 実験結果・考察(被験者グループ B)

この項では、音響専門家で構成される被験者グループ B の実験結果とその考察について述べる。

5.3.1 条件 1：壁面反射係数

条件 1 の実験結果を図 5.7、図 5.8 に示す。図 5.7 より音の移動感は、吸音プラスター(1-4)が木製パネルを除いた他の条件よりも有意に劣ることが分かる。音の距離感については全ての条件で有意な差が認められなかった。吸音プラスターは低音の反射係数が大きい、このような特性は音の移動感を損なう可能性がある。コンクリートブロック(素地)は音の移動感、距離感共に高い値を示している。

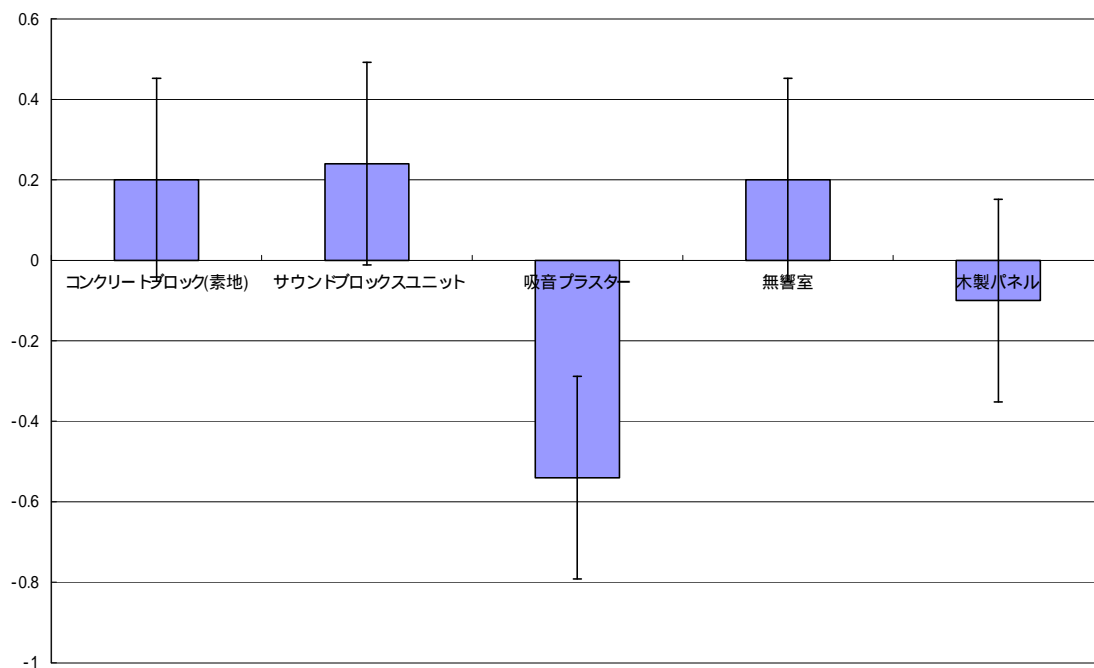


図 5.7 実験結果：条件 1 音の移動感

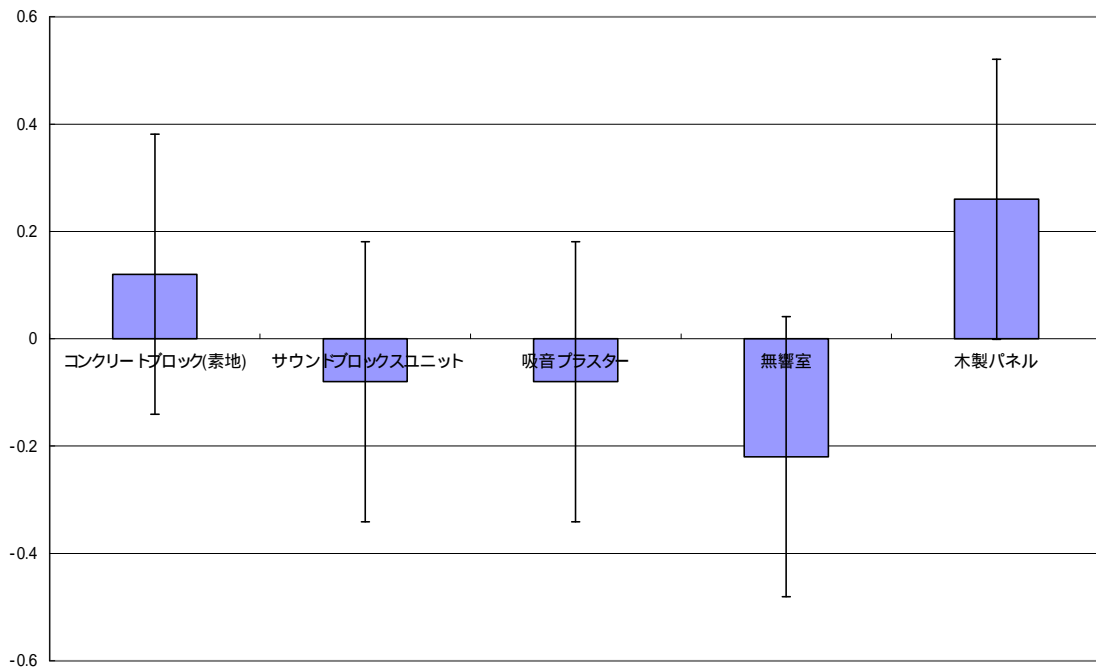


図 5.8 実験結果：条件 1 音の距離感

5.3.2 条件 3：反射音の生成法

反射音の生成法の条件について実験結果を図 5.9、図 5.10 に示す。音の移動感については、全ての条件間で有意差が見られなかったが、音の距離感については反射音を考慮した場合(3-1)が反射音 = 直接音方向(3-2)よりも有意に優れていることが分かった。以上のことから反射音は一方向に偏らず、様々な方向から到来させたほうがよりすぐれた距離感が得られるといえる。しかし、反射音方向を考慮した場合と反射音方向をランダムにした場合では有意差は見られなかった。このことから、人間の聴覚では反射音の各々の到来方向までは認識できないものと思われる。

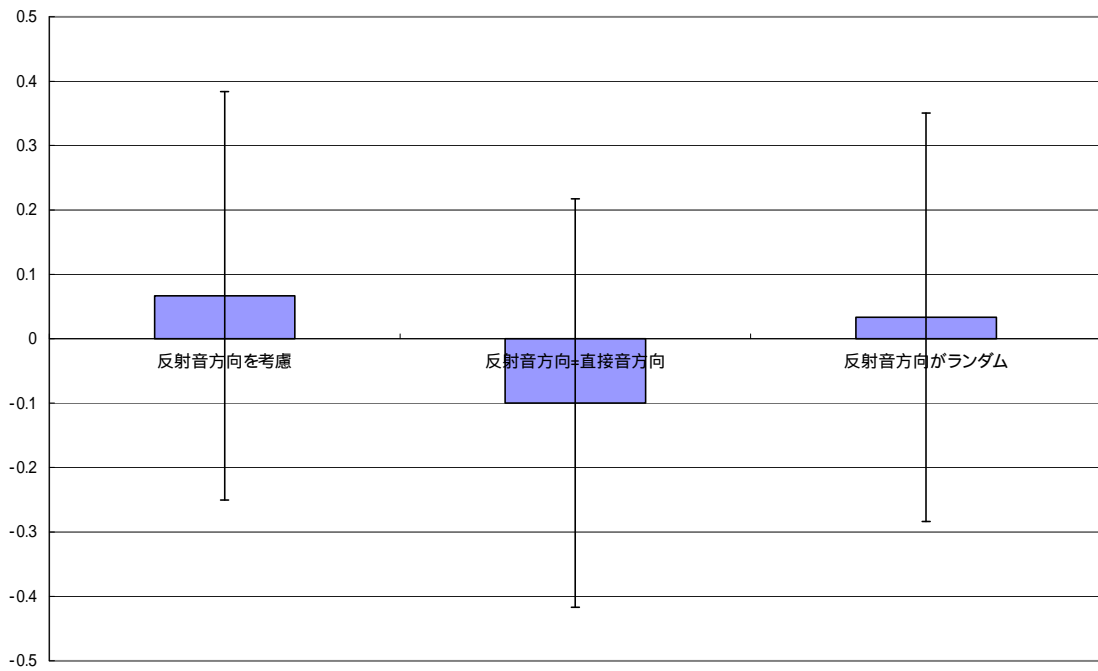


図 5.9 実験結果：条件 3 音の移動感

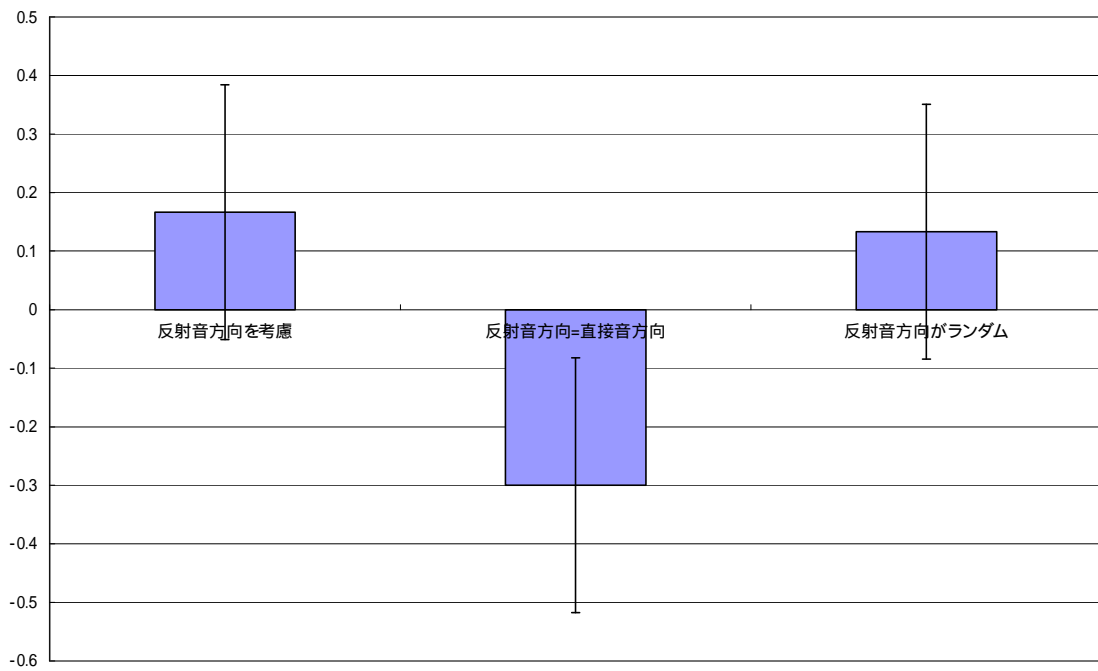


図 5.10 実験結果：条件 3 音の距離感

5.3.3 条件 4 : 音源

音源の条件による実験結果を表 5.3、表 5.4 に示す。計算処理の都合上、いくつかの値が求められないが、各条件の嗜好度に対して誤差の平方和の値が非常に小さいことから 22.2 音源が 5.1 音源よりも、音の移動感、距離感共に優れていると言える。

表 5.3 実験結果：条件 4 音の移動感

要因	平方和	自由度	不偏分散	F0
主効果 i	40	1	40	
主効果 × 個人(B)	0	4	0	
組合せ効果	0	0		
順序効果	0	1	0	
順序 × 個人(B)	0	4	0	
誤差 e	0.00E+00	0		
総計 T	40	10		
22.2CH	1			
5.1CH	-1			

表 5.4 実験結果：条件 4 音の距離感

要因	平方和	自由度	不偏分散	F0
主効果 i	12.1	1	12.1	
主効果 × 個人(B)	12.4	4	3.1	
組合せ効果	0	0		
順序効果	0.9	1	0.9	
順序 × 個人(B)	1.6	4	0.4	
誤差 e	0	0		
総計 T	27	10		
22.2CH	0.55			
5.1CH	-0.55			

5.4 実験結果(被験者グループ A+B)

グループ B の実験は、グループ A の実験条件からいくつかの条件を省略したもので実験方法は同一であることから両グループの実験結果をまとめて統計処理することが可能である。ここでは、グループ A、グループ B を合わせた実験結果を示す。

5.4.1 条件 1：壁面反射係数

条件 1 の実験結果を図 5.11、5.12 にしめす。

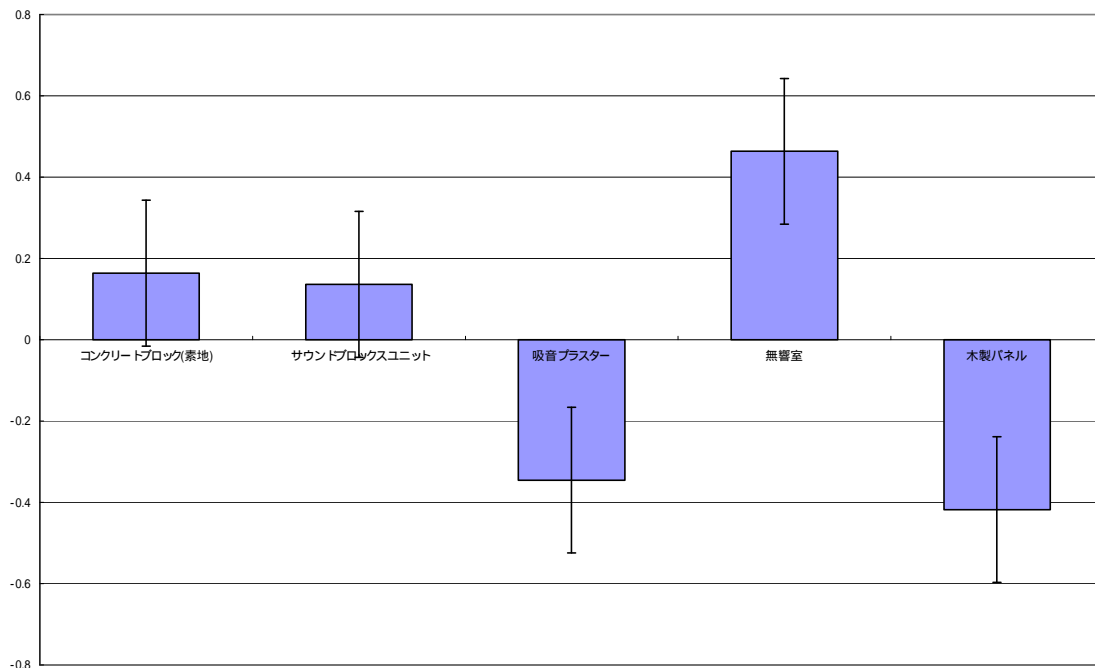


図 5.11 条件 1 音の移動感

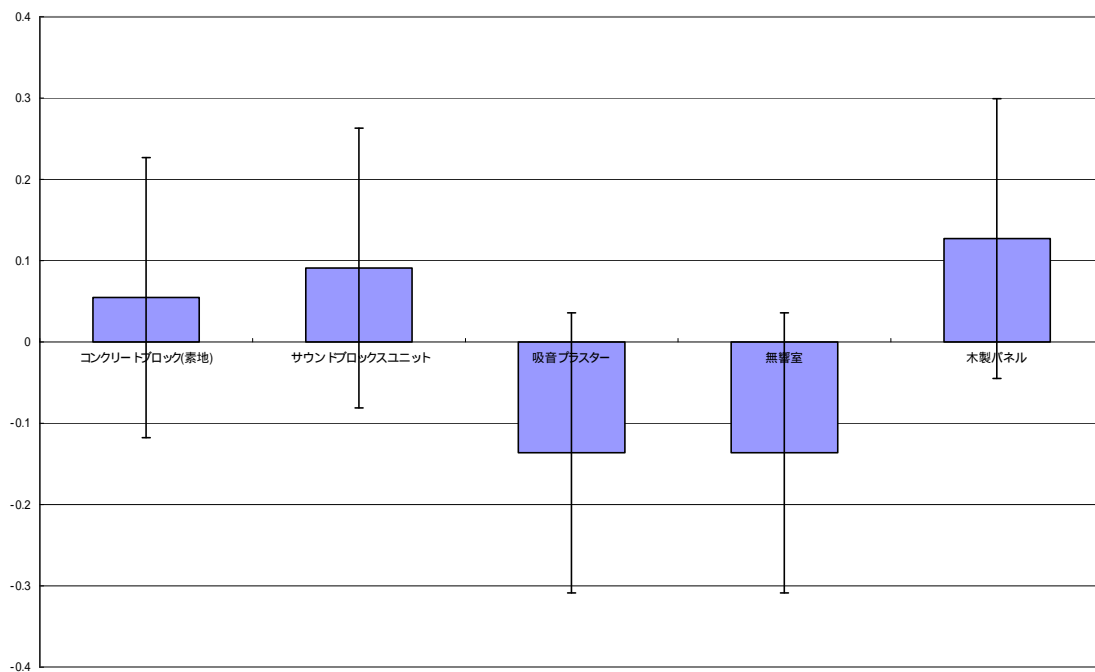


図 5.12 条件 1 音の距離感

5.4.2 条件 3 : 反射音の生成法

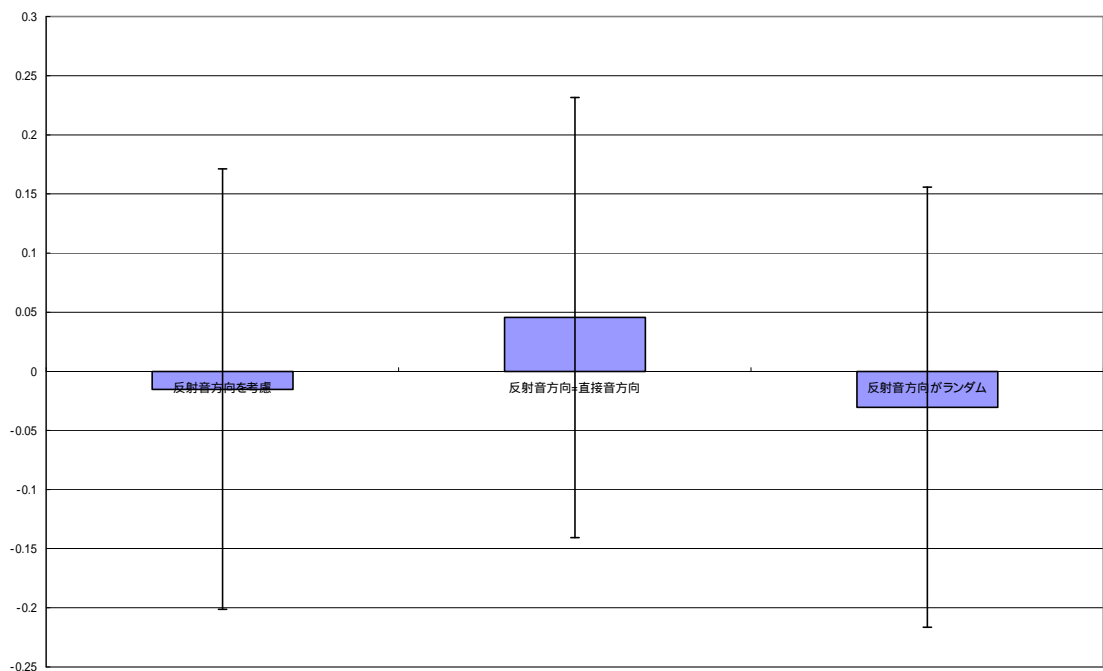


図 5.13 条件 3 音の移動感

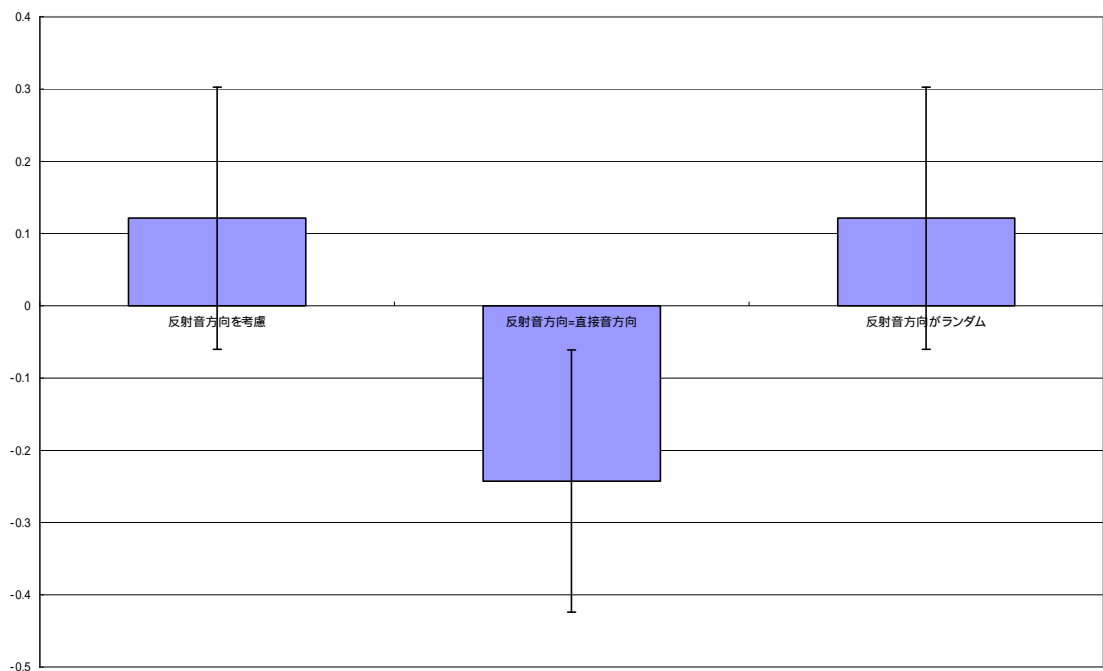


図 5.14 条件 3 音の移動感

5.4.3 条件 4 : 音源

音源の条件による実験結果を表 5.5、表 5.6 に示す。計算処理の都合上、いくつかの値が求められないが、各条件の嗜好度に対して誤差の平方和の値が非常に小さいことから 22.2

音源が 5.1 音源よりも、音の移動感、距離感共に優れていると言える。

表 5.5 実験結果：条件 4 音の移動感

要因	平方和	自由度	不偏分散	F0
主効果 i	26.18182	1	26.18182	0
主効果 × 個人(B)	31.81818	10	3.181818	0
組合せ効果	0	0		
順序効果	0	1	0	0
順序 × 個人(B)	12	10	1.2	0
誤差 e	-3.55E-15	0		
総計 T	70	22		
22.2CH	0.545455			
5.1CH	-0.54545			

表 5.6 実験結果：条件 4 音の距離感

要因	平方和	自由度	不偏分散	F0
主効果 i	22	1	22	
主効果 × 個人(B)	27	10	2.7	
組合せ効果	0	0		
順序効果	0.727273	1	0.727273	
順序 × 個人(B)	6.272727	10	0.627273	
誤差 e	0	0		
総計 T	56	22		
22.2CH	0.5			
5.1CH	-0.5			

5.5 室内インパルス応答の物理特徴量の分析

本項では、シミュレーションで求めた室内・頭部インパルス応答について残響時間や直接音対間接音比、残響周波数特性の時間変化を調べた。具体的には、22.2 のスピーカー配置のチャンネル 1、3、11 のスピーカーについて室内インパルス応答もしくは頭部インパルス応答の物理特徴量を求めた。

5.5.1 残響時間

主観評価実験で用いた頭部インパルス応答は鏡像法によって求めた反射音に頭部伝達関数を畳み込みことで生成するが、頭部伝達関数を畳み込まない場合は室内自体のインパルス応答を求めることが出来る。ここでは、実験条件で用いたシミュレーション条件の室内

インパルス応答から時間対音圧特性をプロットし残響時間を求めた。ただし、残響時間の定義は残響音が 60[dB]減衰するまでの時間とし、gnuplot の最小 2 乗法による直線近似を用いて残響時間を求めた。各実験条件における時間対音圧特性を図 5.16 ~ 図 5.30、残響時間を表 5.7 に示す。ただし、条件 1-6 については、無響室の条件であるためグラフを省略した。

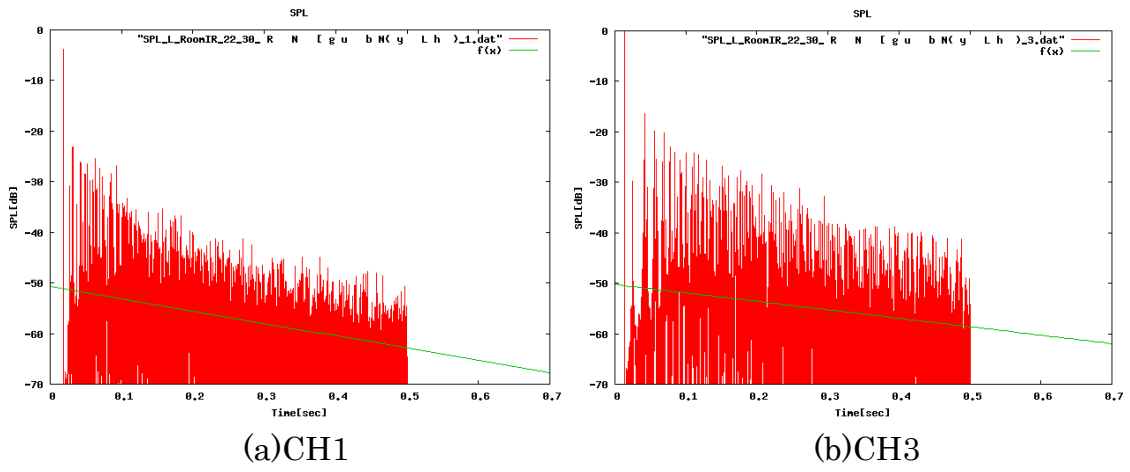


图 5.15 条件 1-1

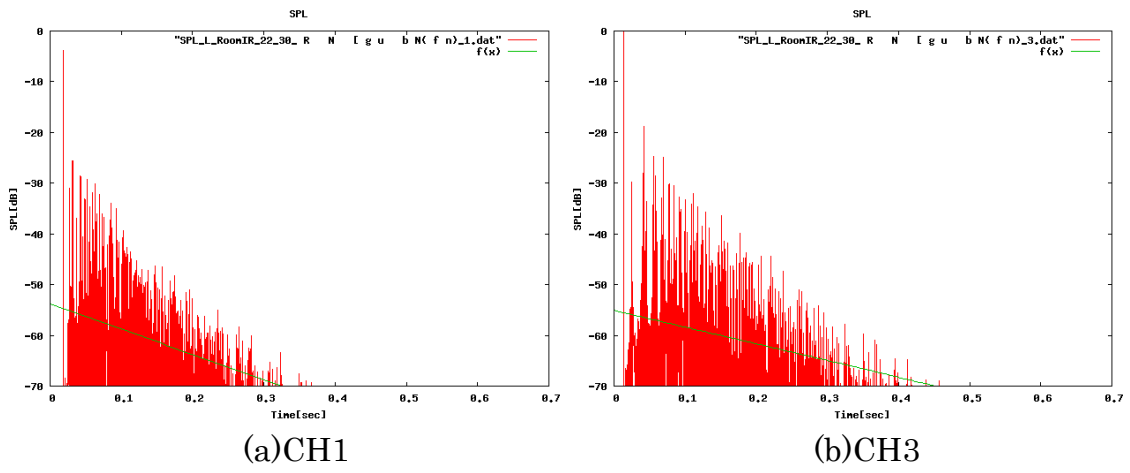


图 5.16 条件 1-2

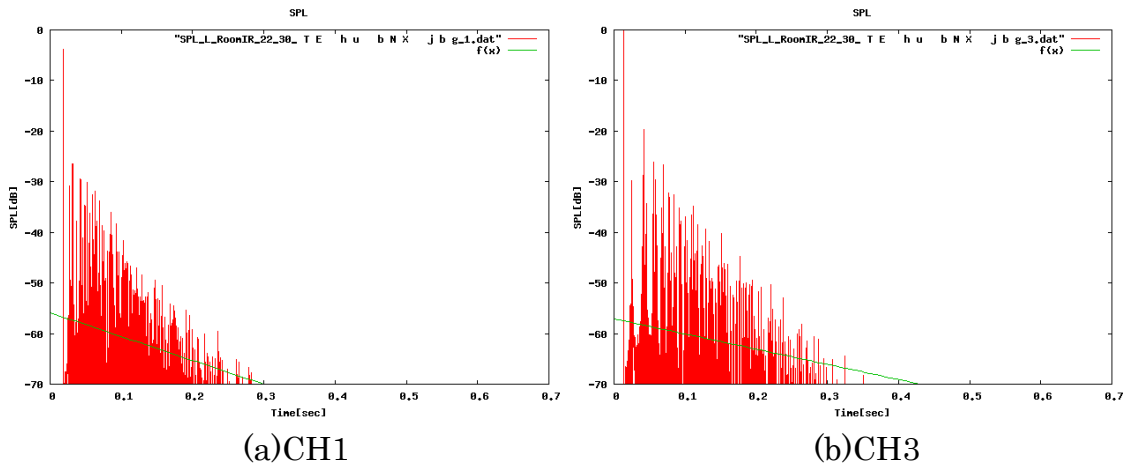


图 5.17 条件 1-3

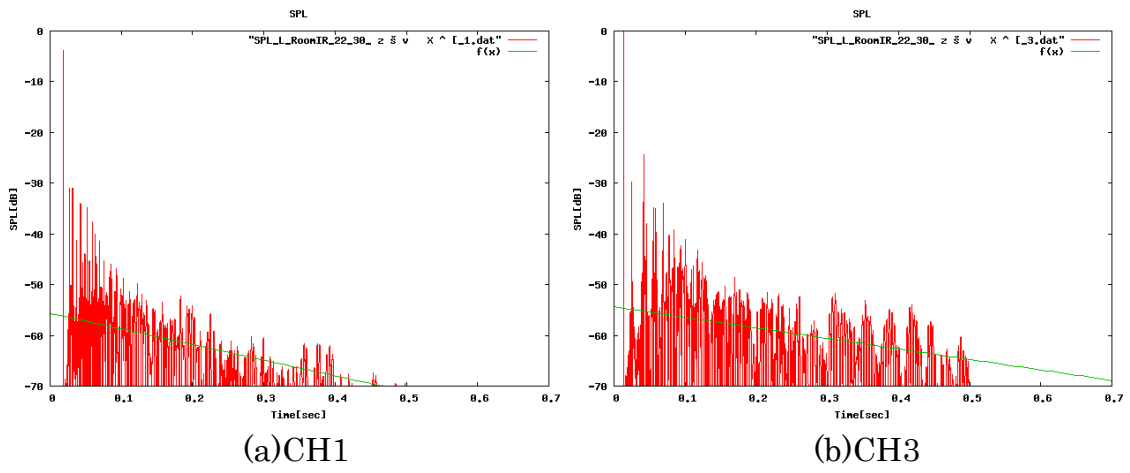
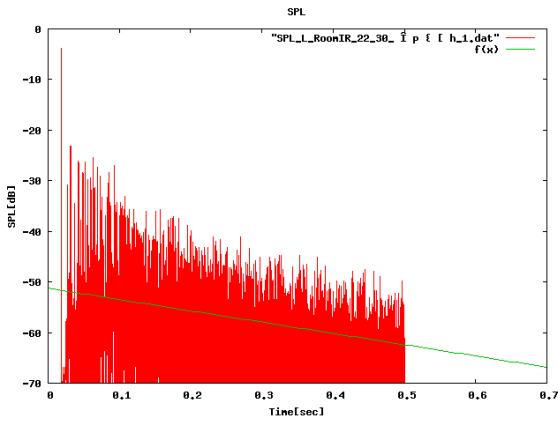
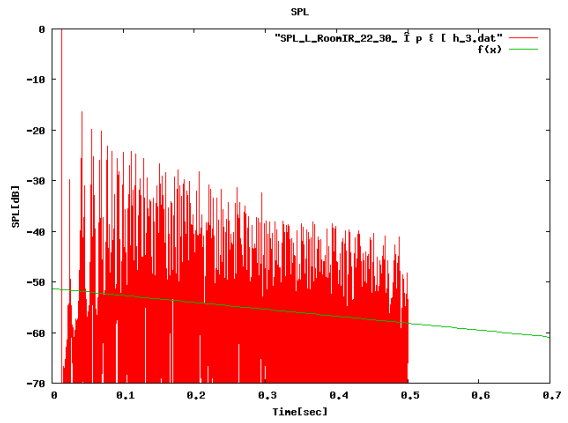


图 5.18 条件 1-4

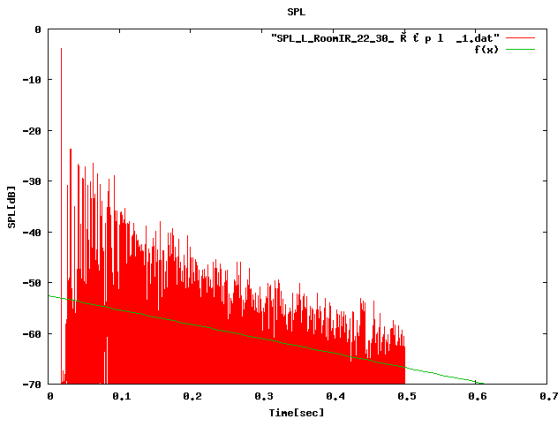


(a)CH1

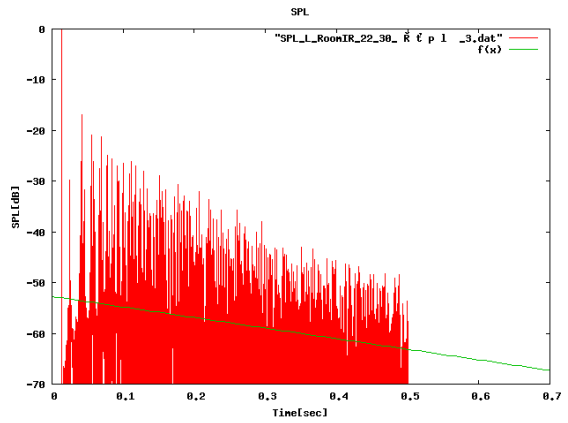


(b)CH3

图 5.19 条件 1-5



(a)CH1



(b)CH3

图 5.20 条件 1-7

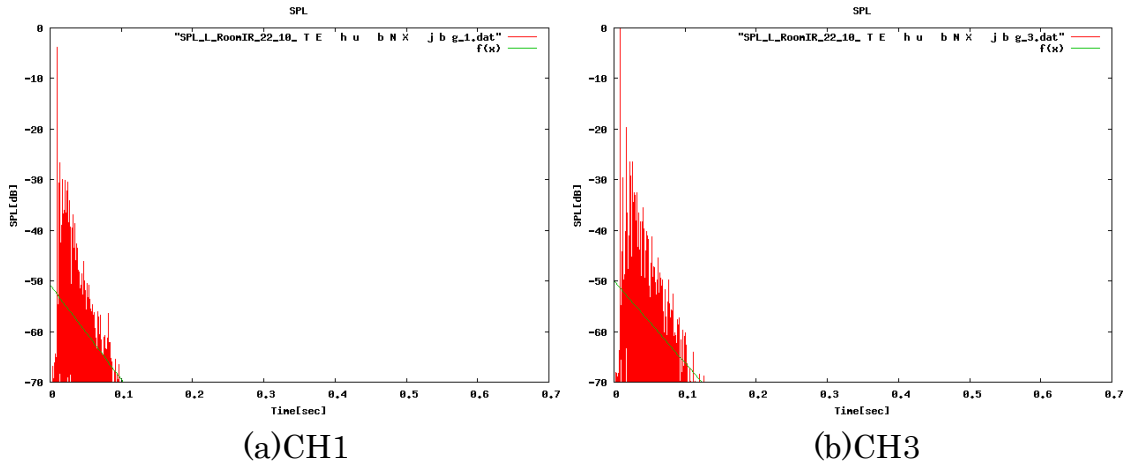


图 5.21 条件 2-1

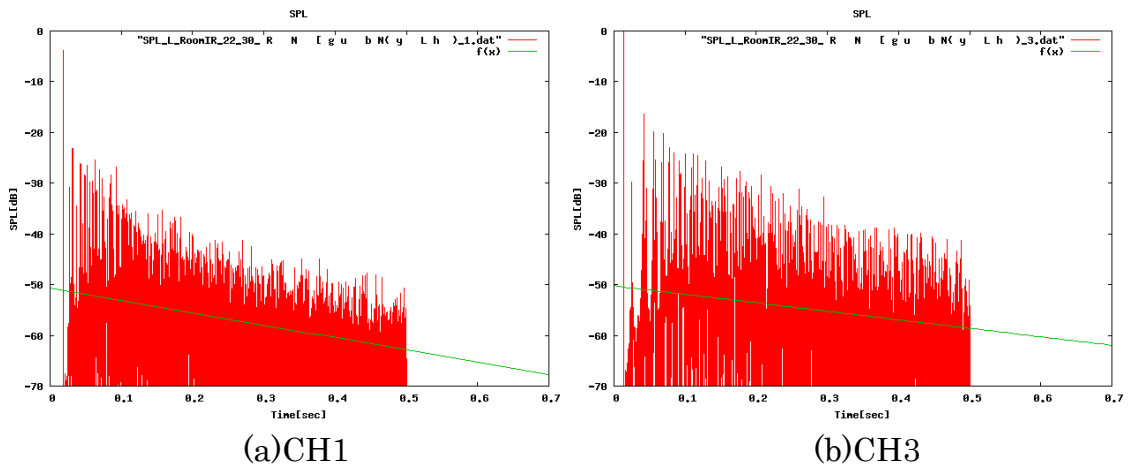
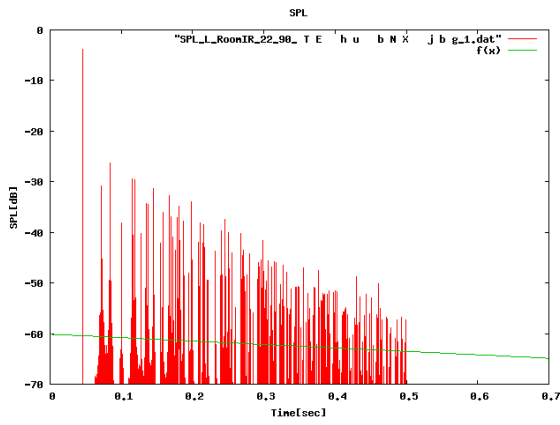
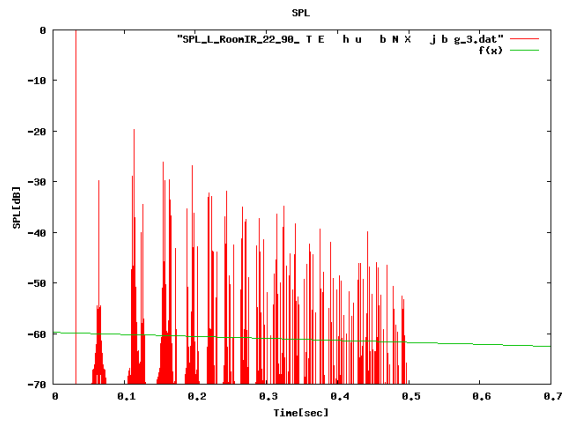


图 5.22 条件 2-2

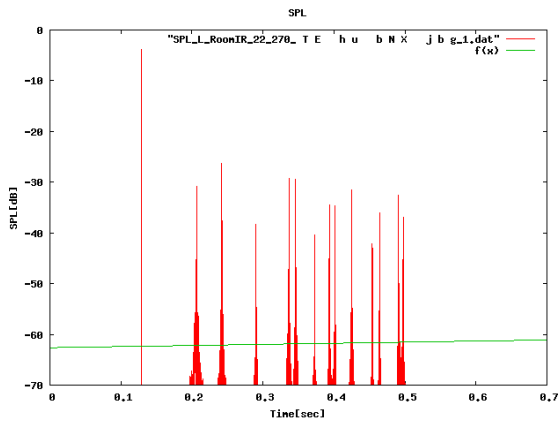


(a)CH1

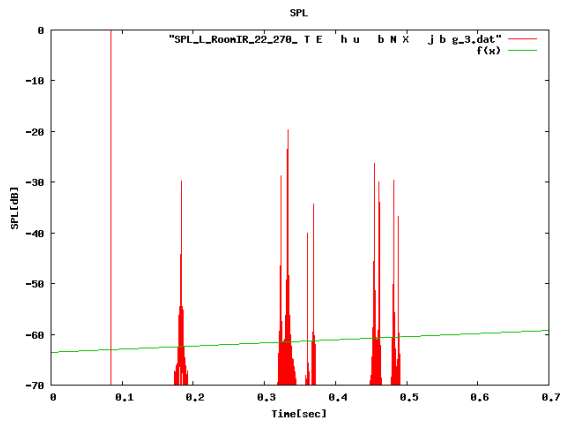


(b)CH3

图 5.23 条件 2-3



(a)CH1



(b)CH3

图 5.24 条件 2-4

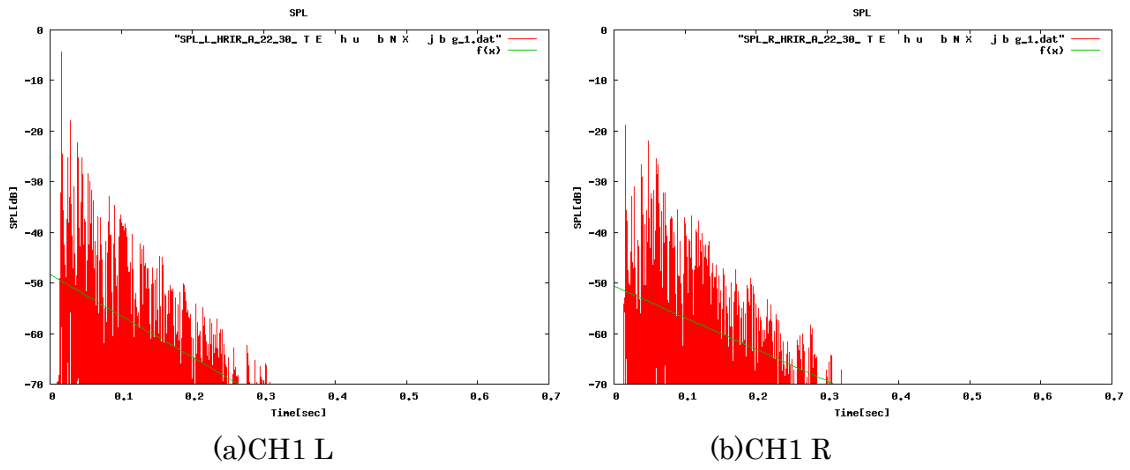


图 5.25 条件 3-1 CH1

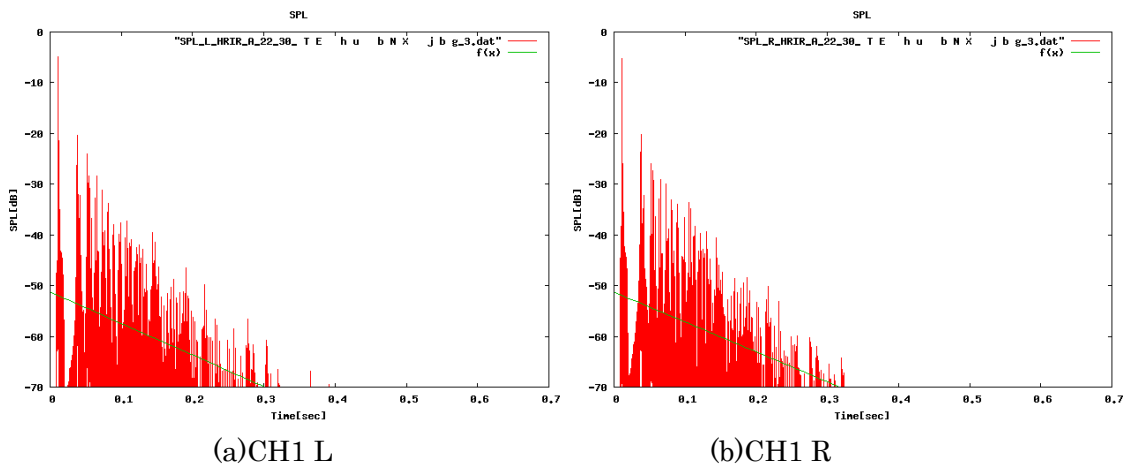


图 5.26 条件 3-1 CH3

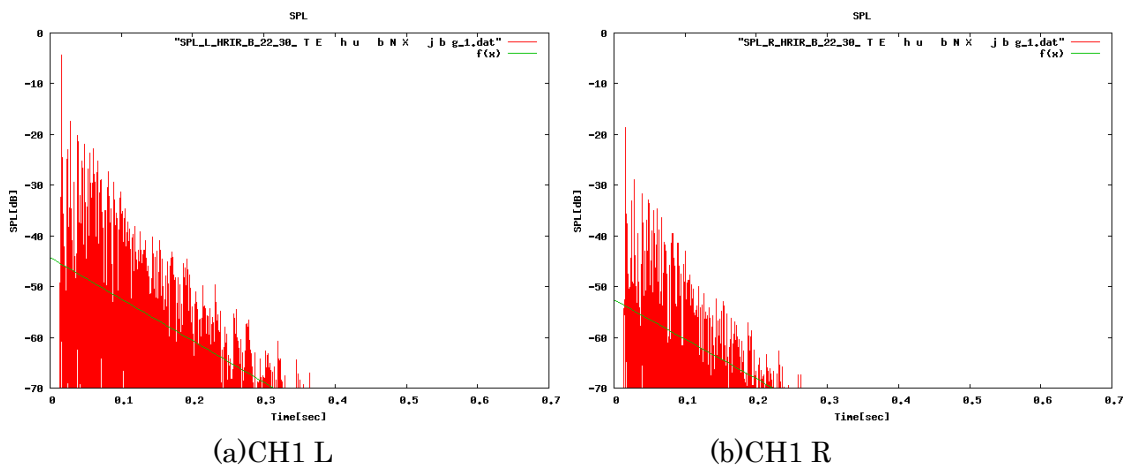


图 5.27 条件 3-2 CH1

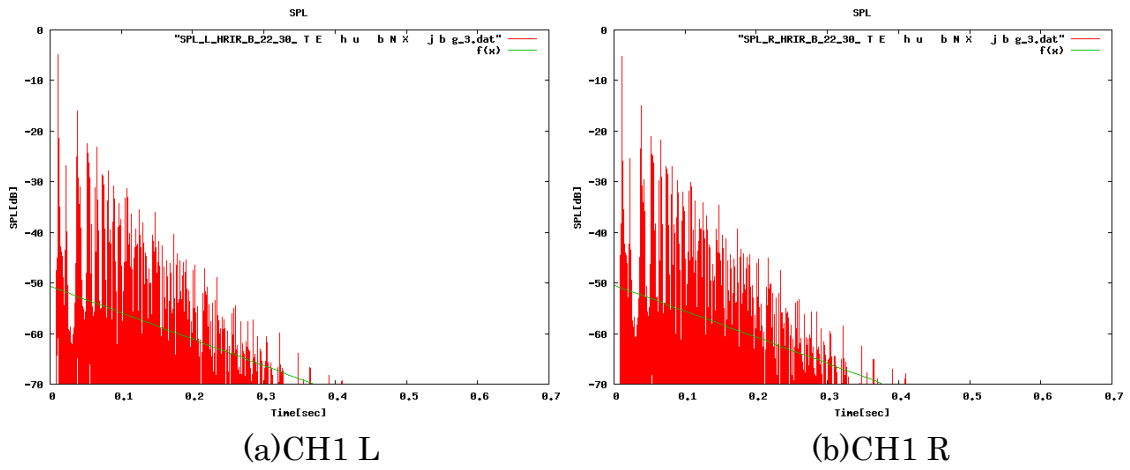


图 5.28 条件 3-2 CH3

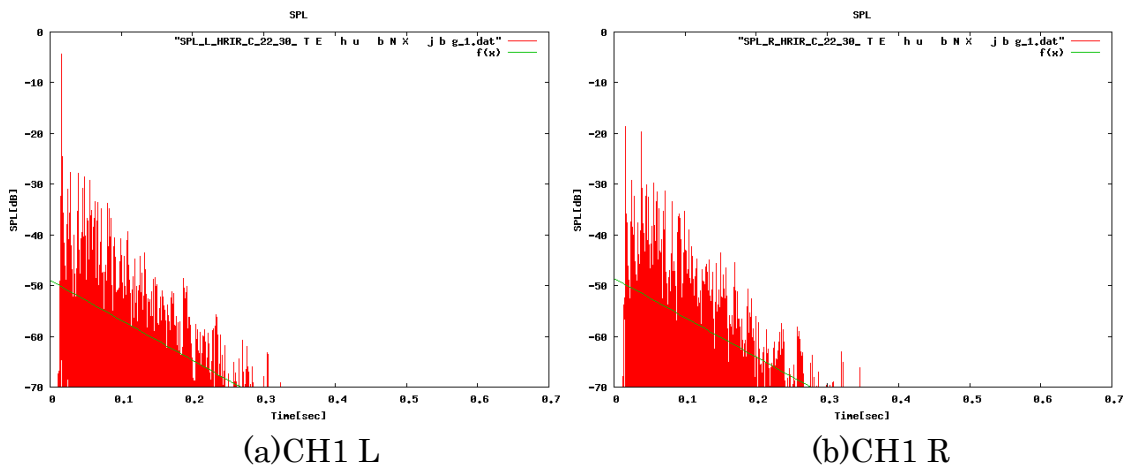


图 5.29 条件 3-3 CH1

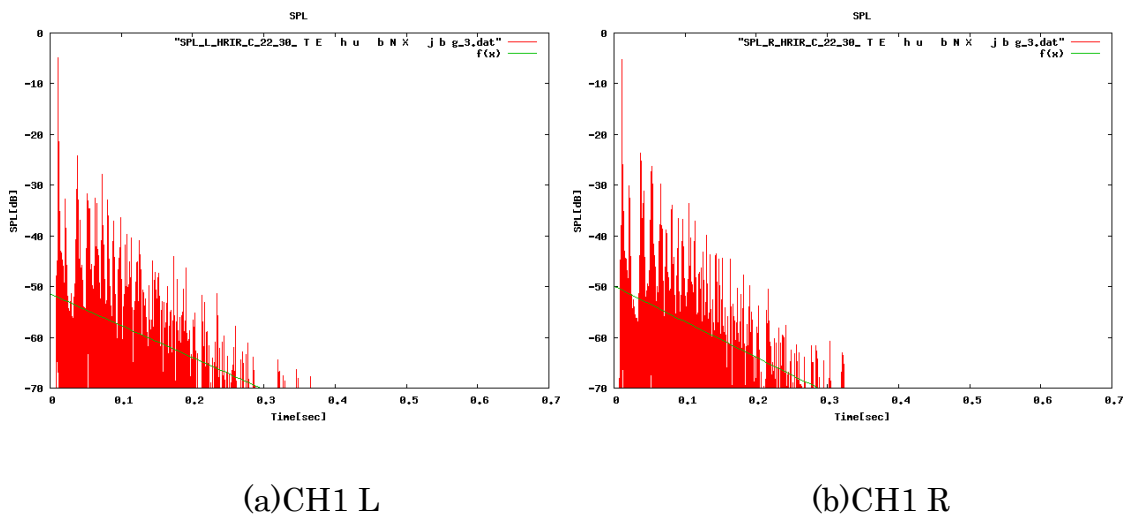


图 5.30 条件 3-3 CH3

表 5.7 残響時間

条件	CH	残響時間[sec]
1-1	1	2.479881958
	3	3.585364542
1-2	1	1.201884555
	3	1.821548924
1-3	1	1.272685621
	3	1.999753364
1-4	1	1.950268162
	3	2.893378984
1-5	1	2.691488169
	3	4.386061098
1-7	1	2.111040743
	3	2.87918922
2-1	1	0.32203872
	3	0.370929054
2-2	1	1.272685621
	3	1.999753364
2-3	1	8.863650465
	3	15.38552274
2-4	1	-27.53455587
	3	-9.727090271
3-1	1-L	0.732405782
	1-R	0.957784071
	3-L	0.965982912
	3-R	1.016513258
3-2	1-L	0.731387112
	1-R	0.772398594
	3-L	1.149989267
	3-R	1.162576657
3-3	1-L	0.772010999
	1-R	0.761419387
	3-L	0.955919371
	3-R	0.857158776

5.5.2 直接音対間接音比

直接音対間接音比の定義を次式に示す。

$$C_{80} = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^{t_e} p^2(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} p^2(t) dt} \right) [dB]$$

$p(t)$: インパルス応答

t : 時刻

$t_e = 80[ms]$

シミュレーションで求めた室内インパルス応答を表 5.8 ~ 5.11 に示す。ただし、条件 3-1 ~ 3-3 は室内インパルス応答に違いがないため、頭部インパルス応答を示す。

表 5.8 室内インパルス応答の直接音対間接音比

条件	直接音対間接音比 (CH1)[dB]	直接音対間接音比 (CH3)[dB]	直接音対間接音比 (CH11)[dB]
1-1	0.60150357	0.47988778	0.466764023
1-2	1.485107049	1.467505048	1.29983221
1-3	1.794712917	1.801349997	1.574001436
1-4	1.546569771	1.404819549	1.474728877
1-5	0.610847311	0.48562262	0.470712676
1-6			
1-7	0.843610055	0.757009933	0.674489062
2-1	3.963400377	3.820500316	3.955159621
2-2	1.794712917	1.801349997	1.574001436
2-3	1.053765257	0.943804121	0.873193168
2-4	1.095086639	1.071756647	0.883849866
4-1	1.794712917	1.801349997	1.574001436

表 5.9 頭部インパルス応答の直接音対間接音比(左耳)

	直接音対間接音比 (CH1)[dB]	直接音対間接音比 (CH3)[dB]	直接音対間接音比 (CH11)[dB]
3-1	1.873594305	1.828129365	1.725381505
3-2	1.344800012	1.356908917	1.374225123
3-3	1.944257953	1.830738792	1.783246873

表 5.10 頭部インパルス応答の直接音対間接音比(右耳)

	直接音対間接音比 (CH1)[dB]	直接音対間接音比 (CH3)[dB]	直接音対間接音比 (CH11)[dB]
3-1	0.948135534	1.725381505	0.966643817
3-2	1.326649052	1.358657661	1.221247636
3-3	1.035851835	1.798002893	0.837151642

表 5.11 室内インパルス応答の直接音対間接音比

	直接音対間接音 比(CH1)[dB]	直接音対間接音比 (CH2)[dB]
4-2	2.136001067	1.801349997

5.5.3 残響周波数特性の時間変化

実験で用いた室内インパルス応答に対して短時間 FFT 変換を用いて残響周波数特性の時間変化を求めた。ただし、FFT の大きさは 2048 サンプルとし、オーバーラップは 1984 サンプルとした(図 5.30 参照)。図 5.31 ~ 図 5.48 に実験で使用した室内インパルス応答残響周波数特性の時間変化を示す。ただし、条件 3-1 ~ 3-3 については、室内インパルス応答に違いがないため頭部インパルス応答のグラフを掲載した。また、条件 4-1、4-2 については、スピーカーの配置が異なるため両者の結果を直接比較することは出来ない。

図 5.31 ~ 図 5.48 のうち、いくつかのグラフではグラフの濃淡が帯状に広がっているものが見られる(図 5.31 など)。

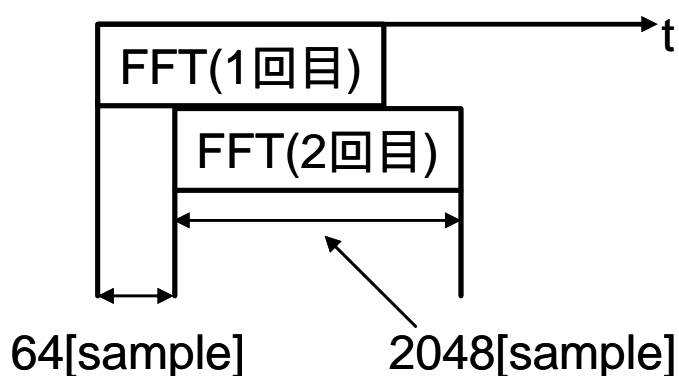
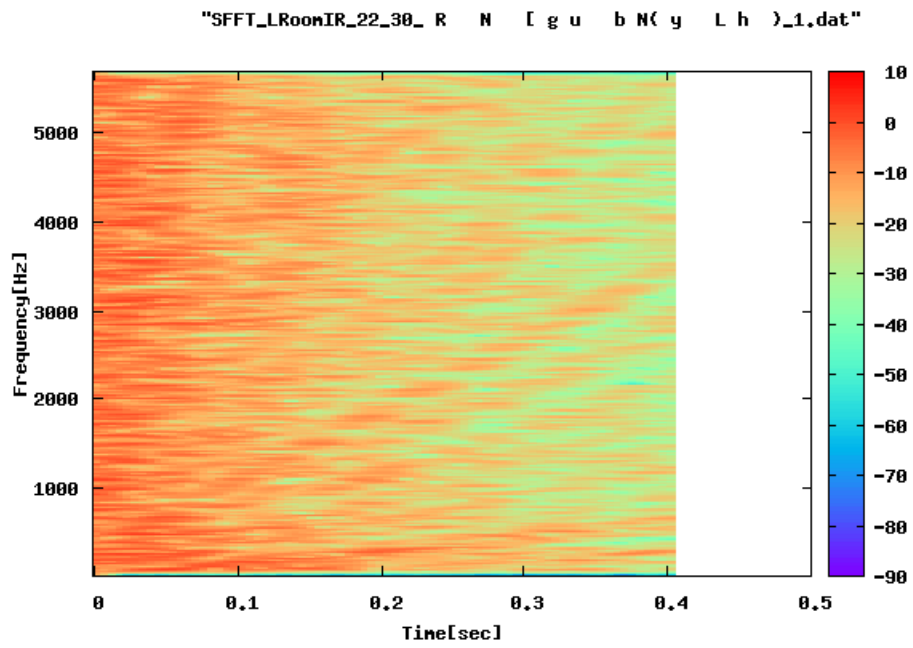
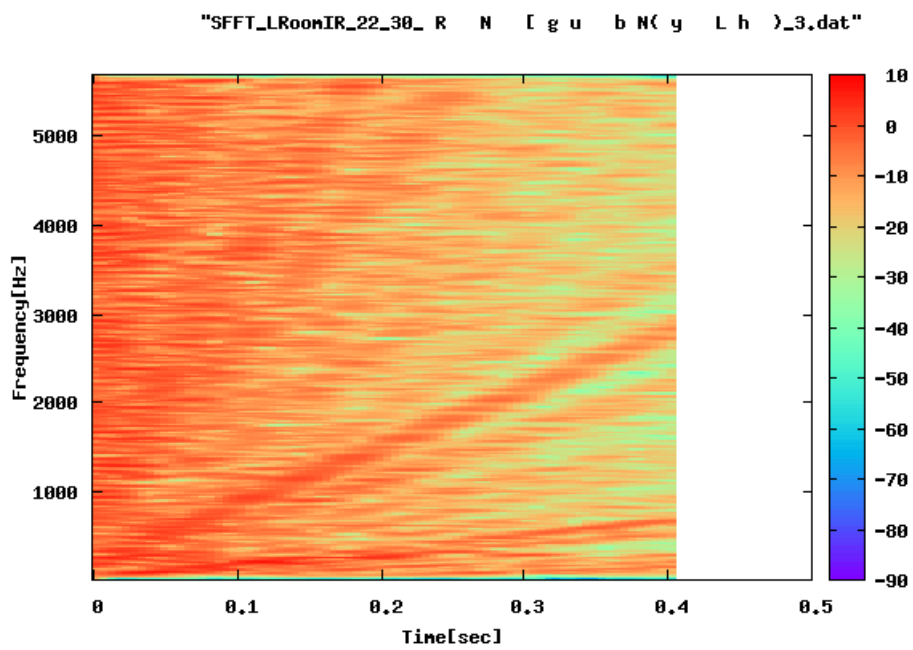


図 5.31 短時間 FFT

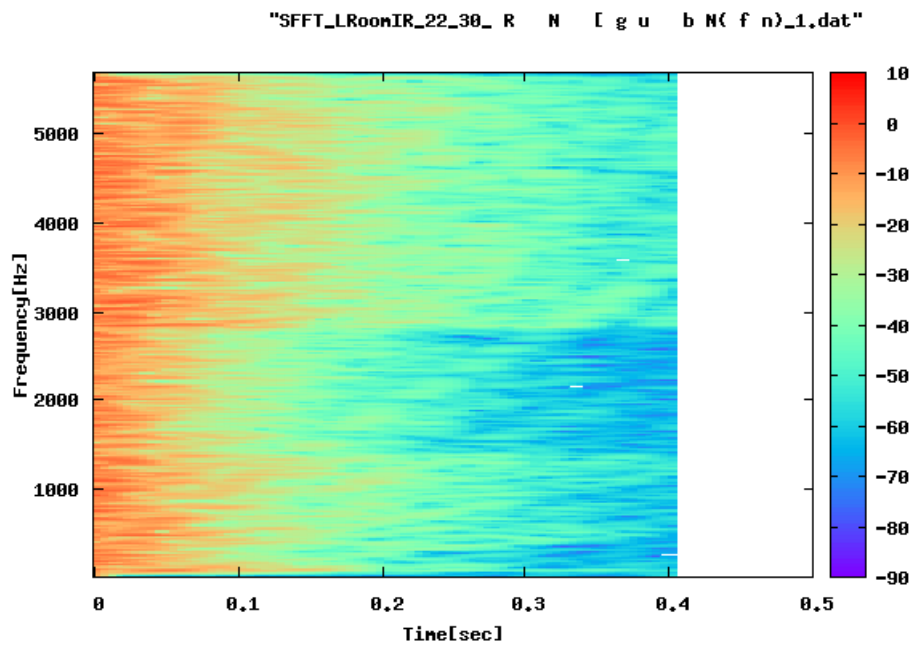


(a) CH1

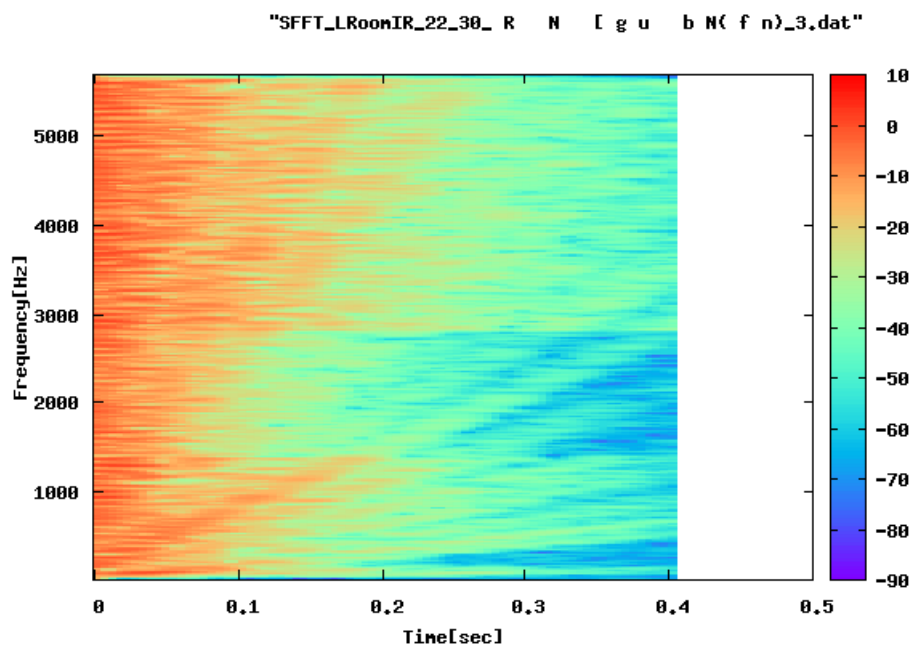


(b) CH3

図 5.32 残響周波数特性の時間変化(条件 1-1)

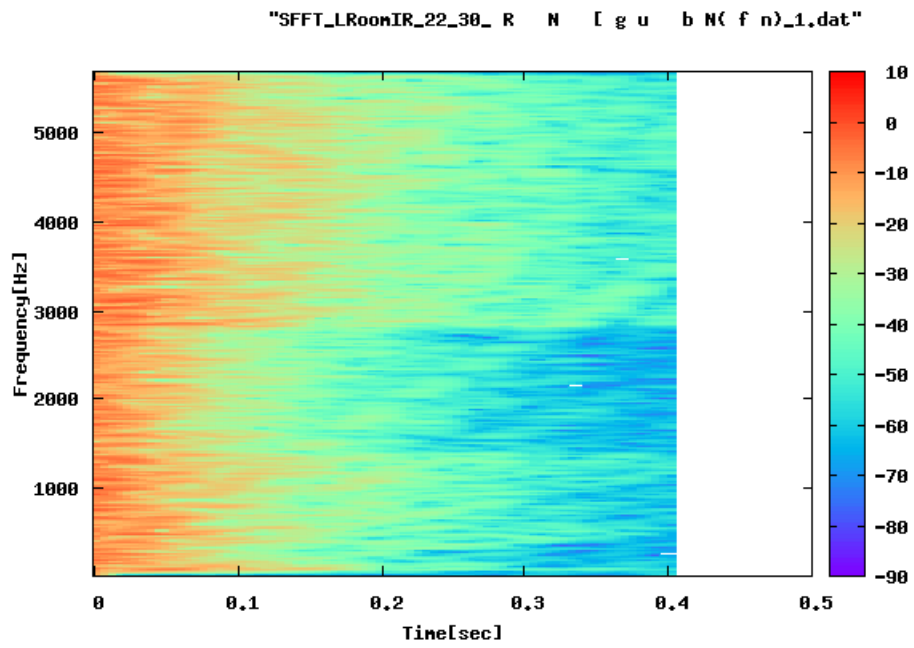


(a) CH1

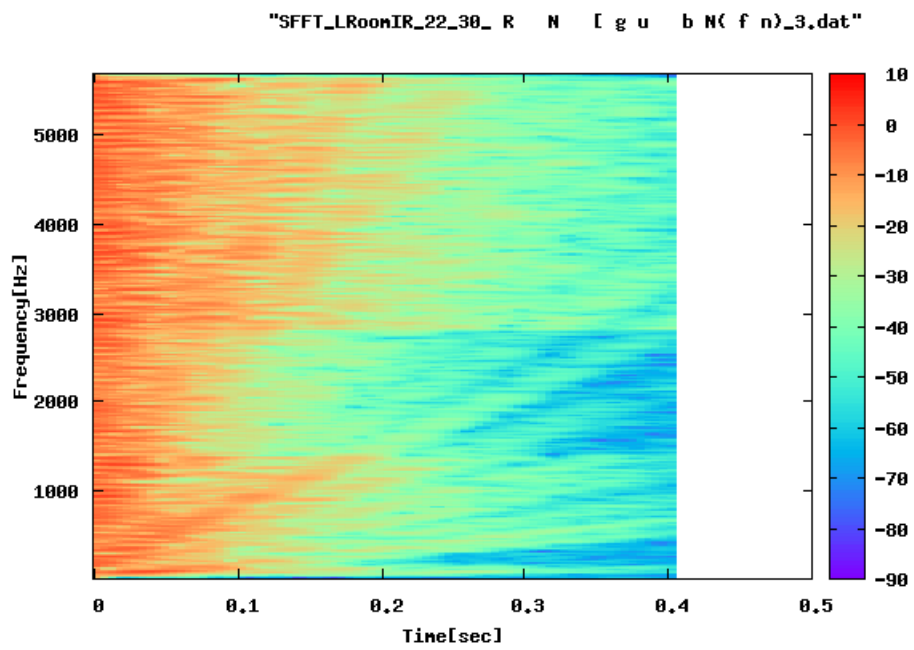


(b) CH3

図 5.33 残響周波数特性の時間変化(条件 1-2)



(a) CH1



(b) CH3

図 5.34 残響周波数特性の時間変化(条件 1-3)

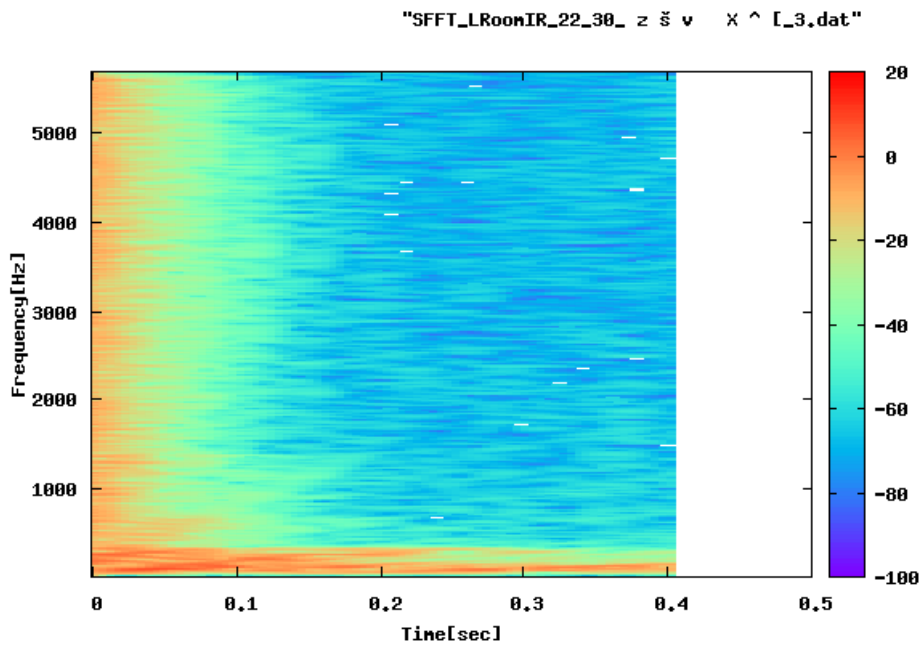
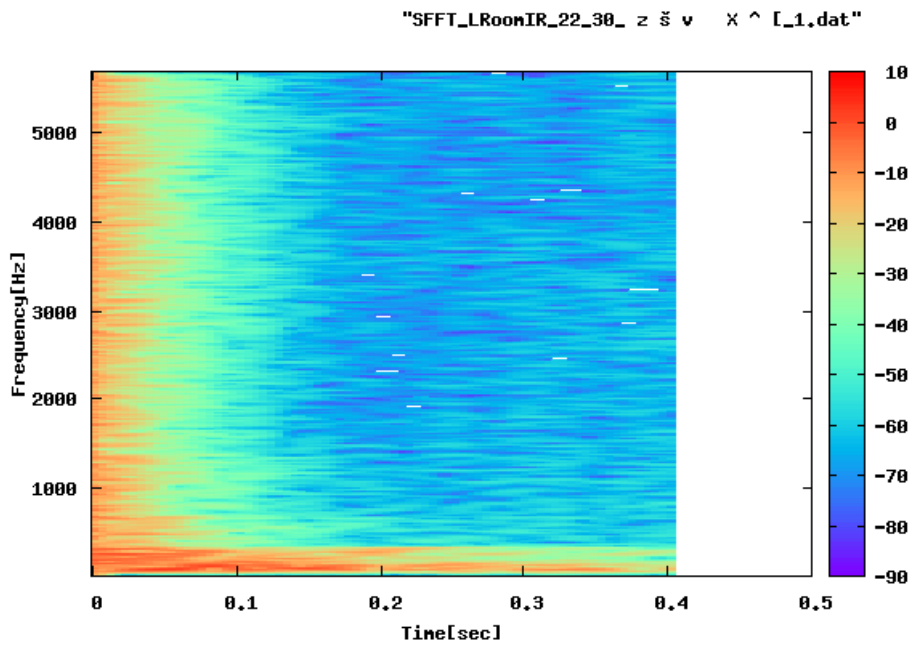
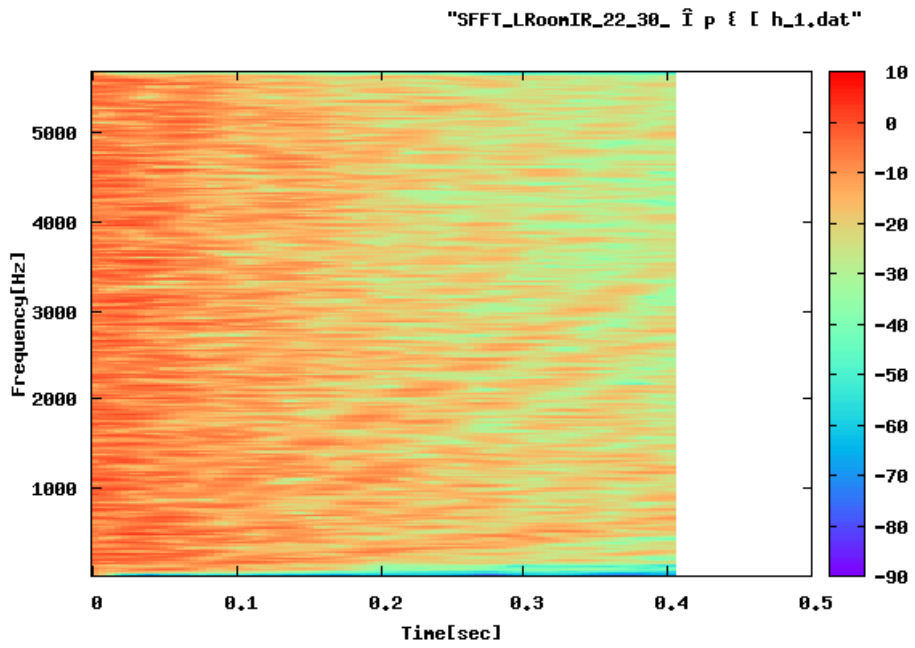
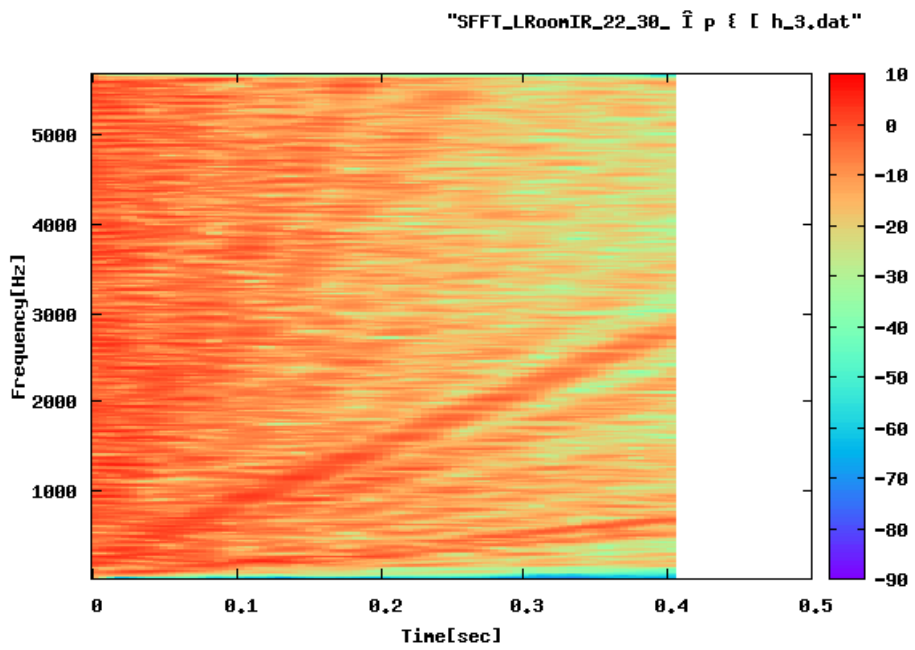


図 5.35 残響周波数特性の時間変化(条件 1-4)

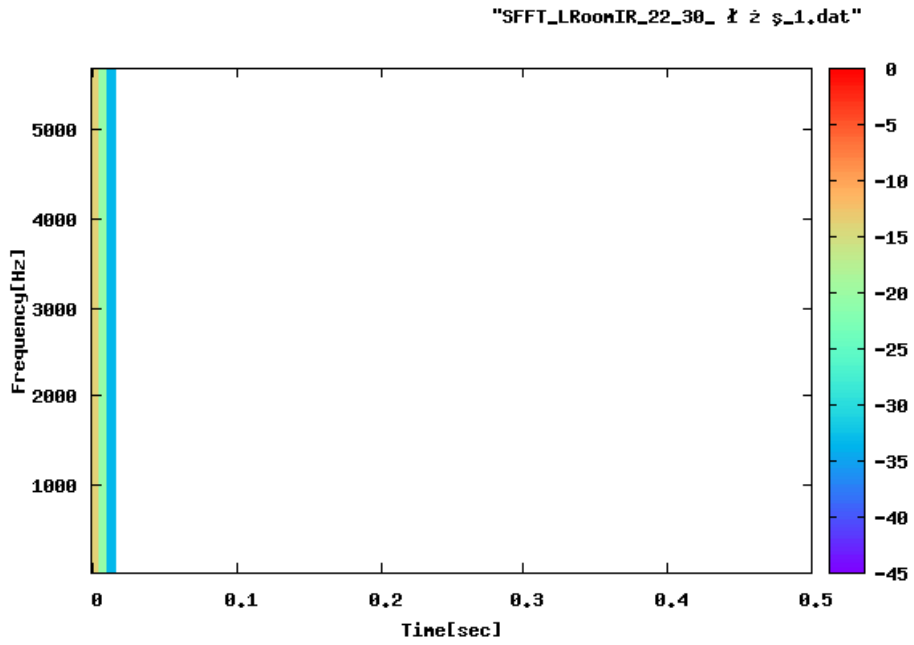


(a) CH1

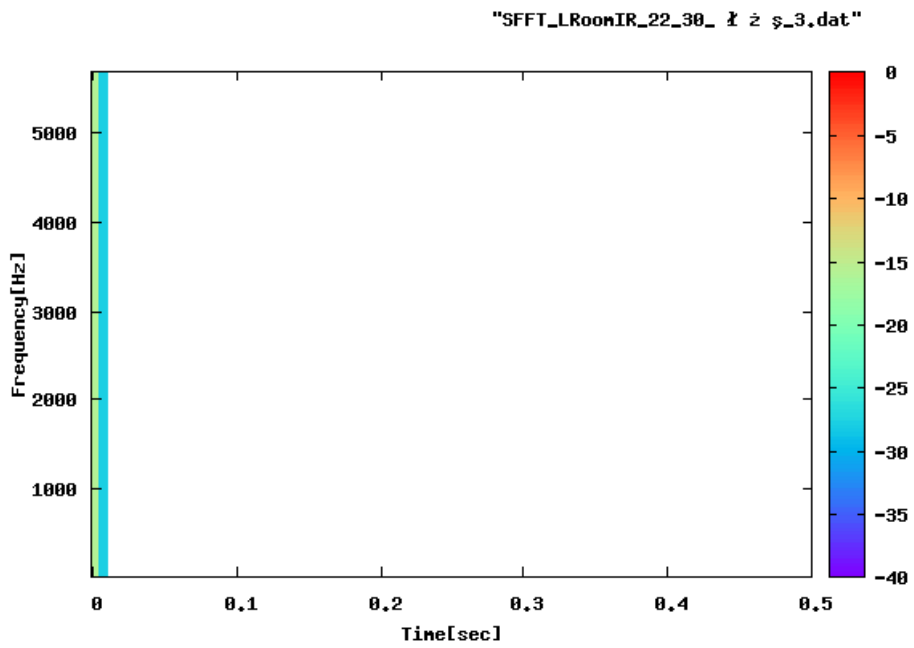


(b) CH3

図 5.36 残響周波数特性の時間変化(条件 1-5)

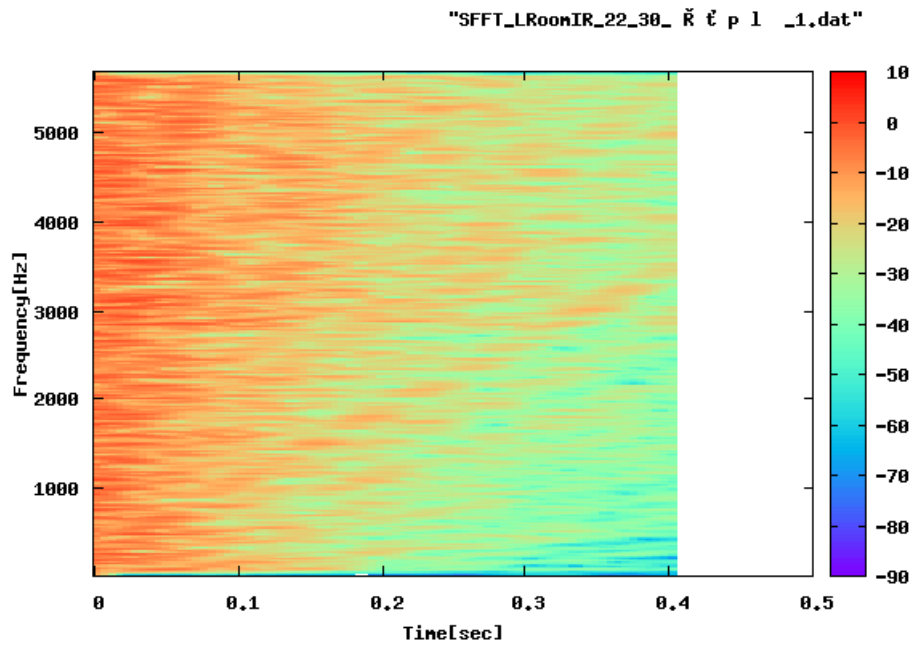


(a) CH1

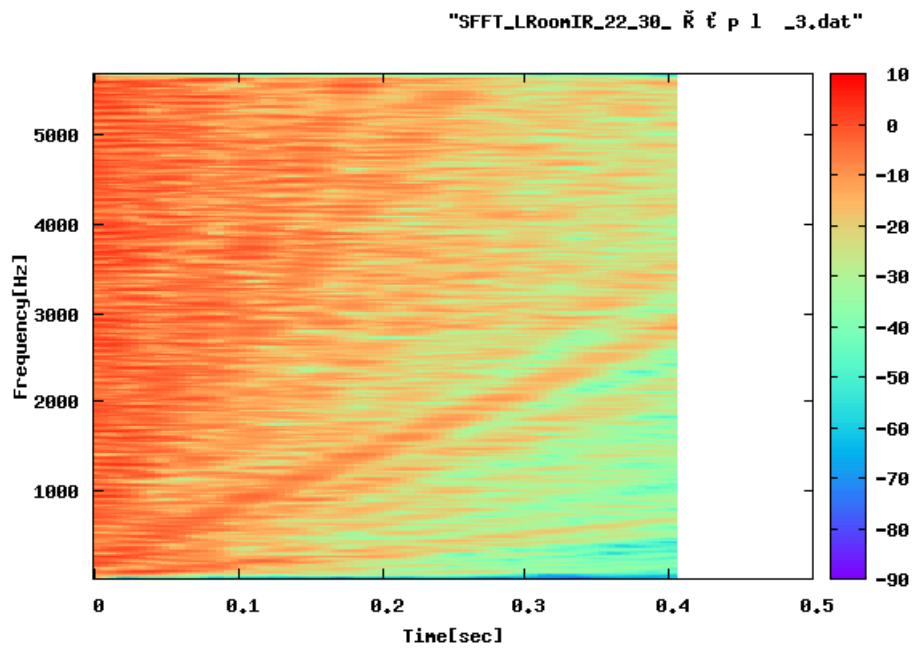


(b) CH3

図 5.37 残響周波数特性の時間変化(条件 1-6)

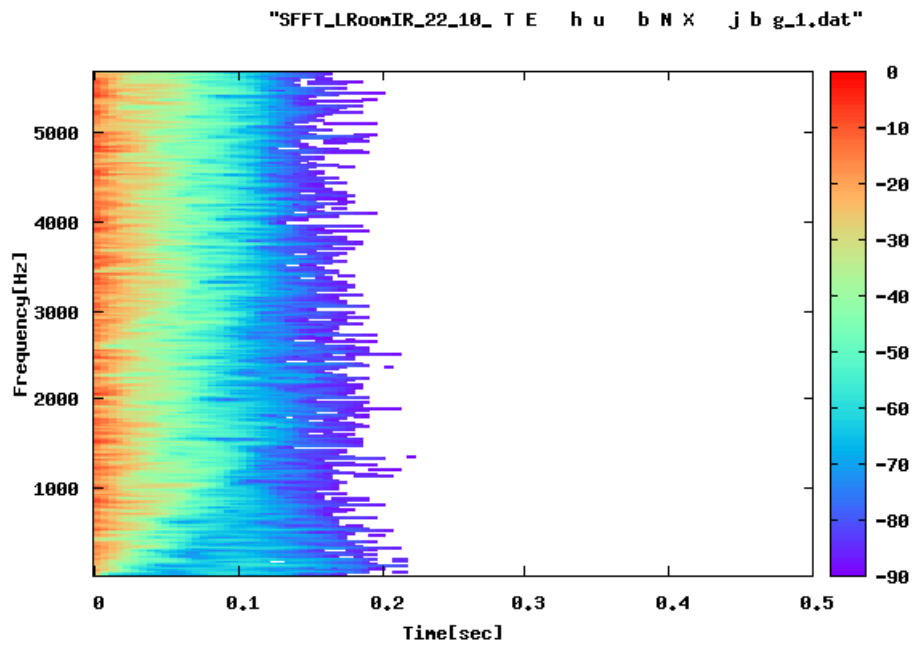


(a) CH1

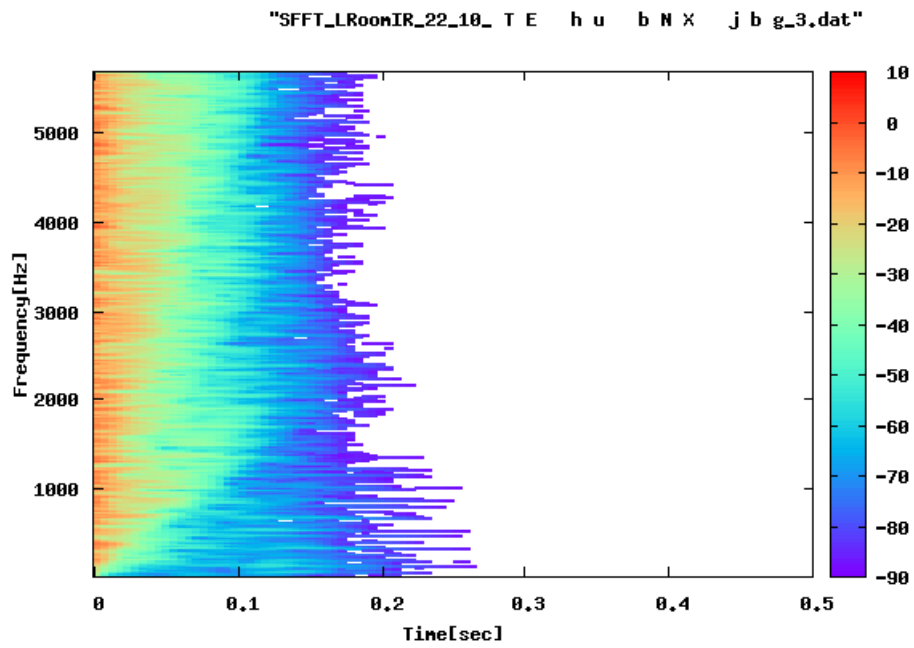


(b) CH3

図 5.38 残響周波数特性の時間変化(条件 1-7)



(a) CH1



(b) CH3

図 5.39 残響周波数特性の時間変化(条件 2-1)

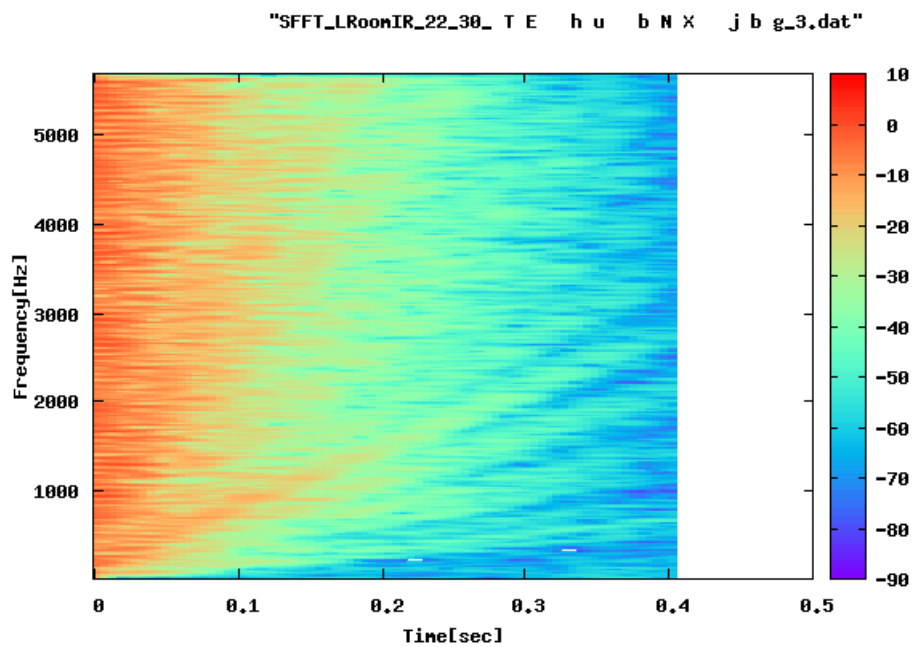
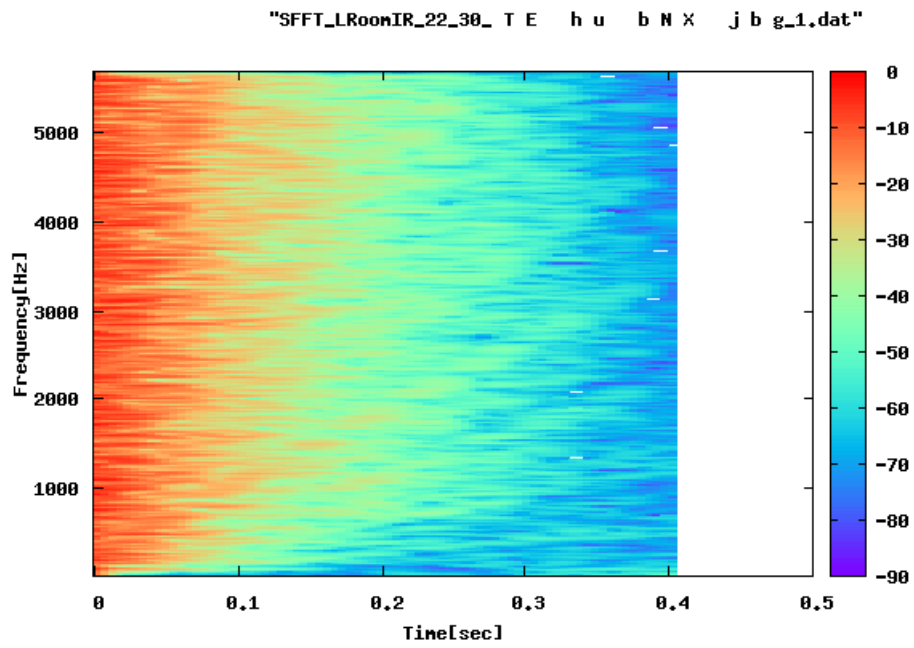


図 5.40 残響周波数特性の時間変化(条件 2-2)

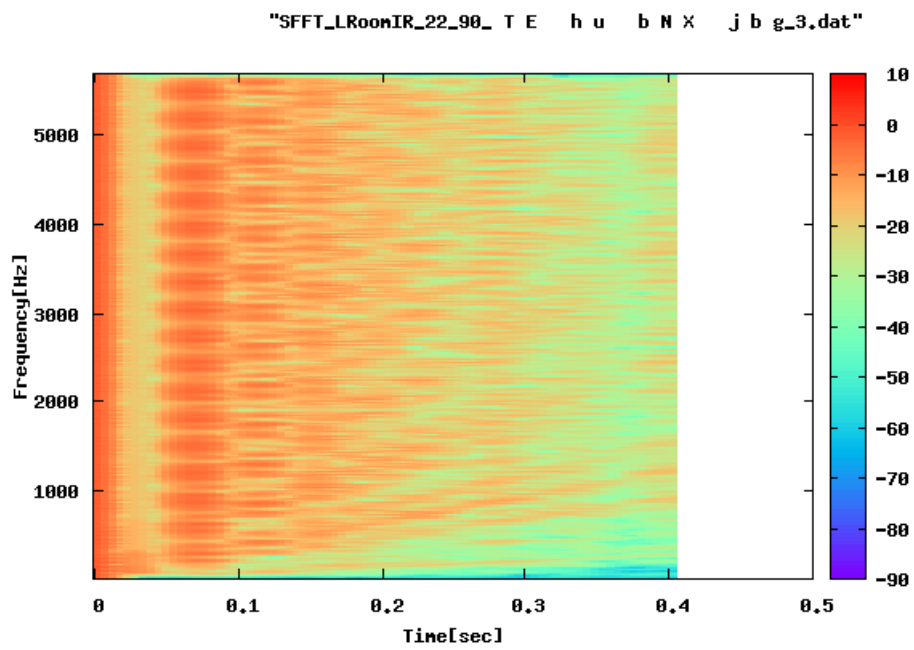
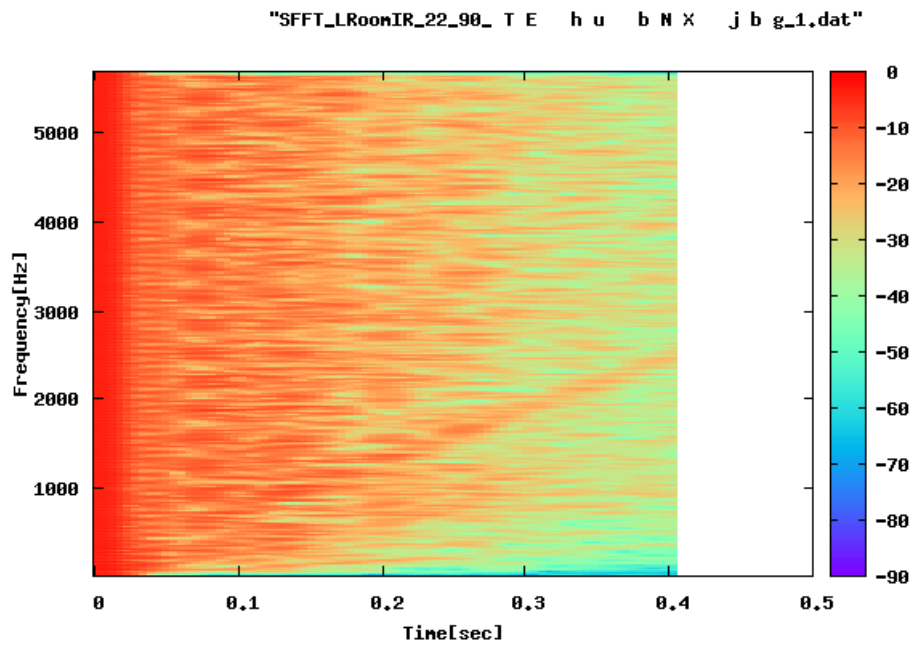


図 5.41 残響周波数特性の時間変化(条件 2-3)

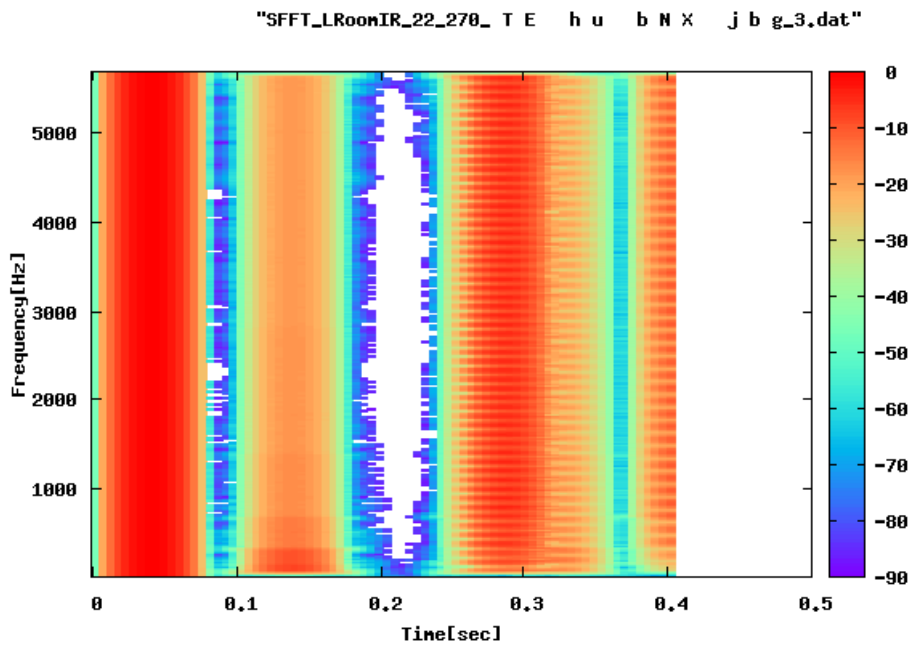
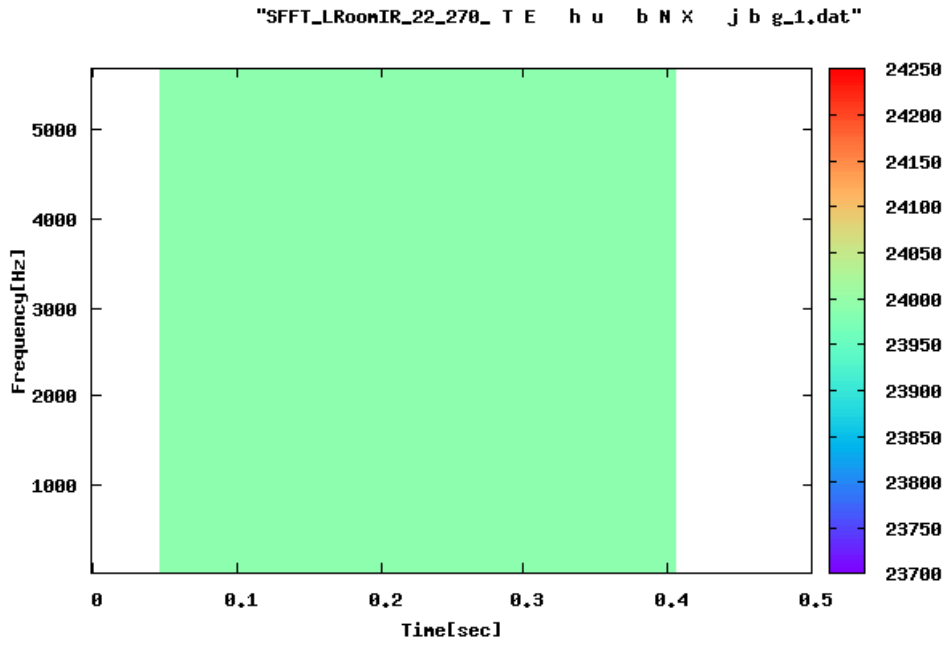
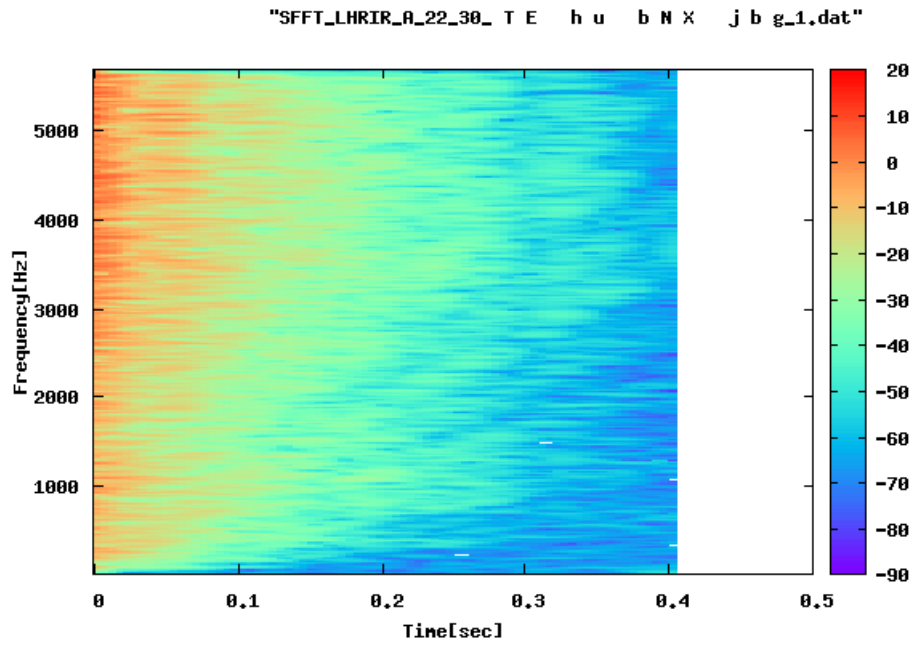
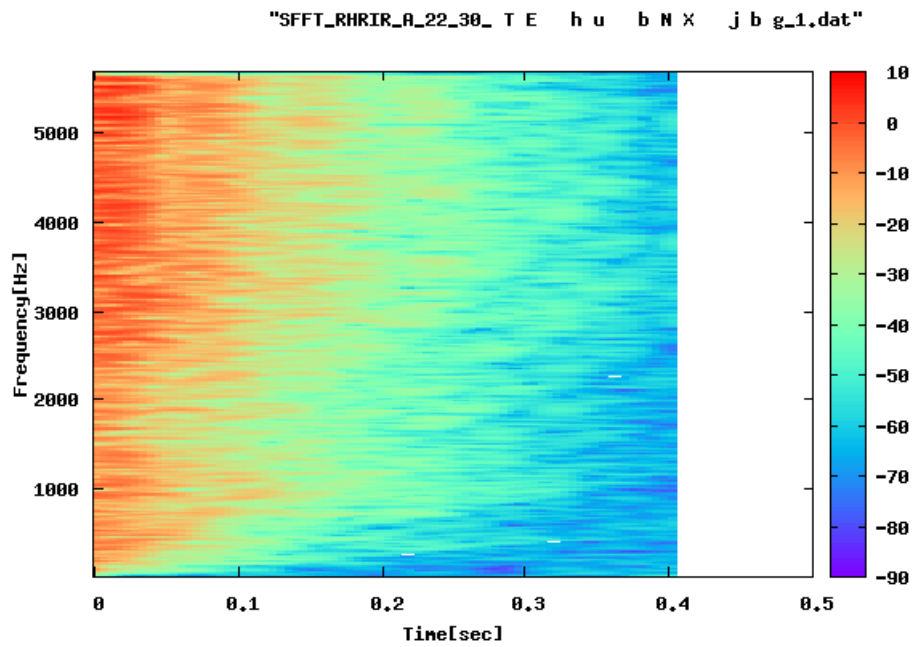


図 5.42 残響周波数特性の時間変化(条件 2-4)

2-4



(a) L



(b) R

図 5.43 残響周波数特性の時間変化(条件 3-1 CH1)

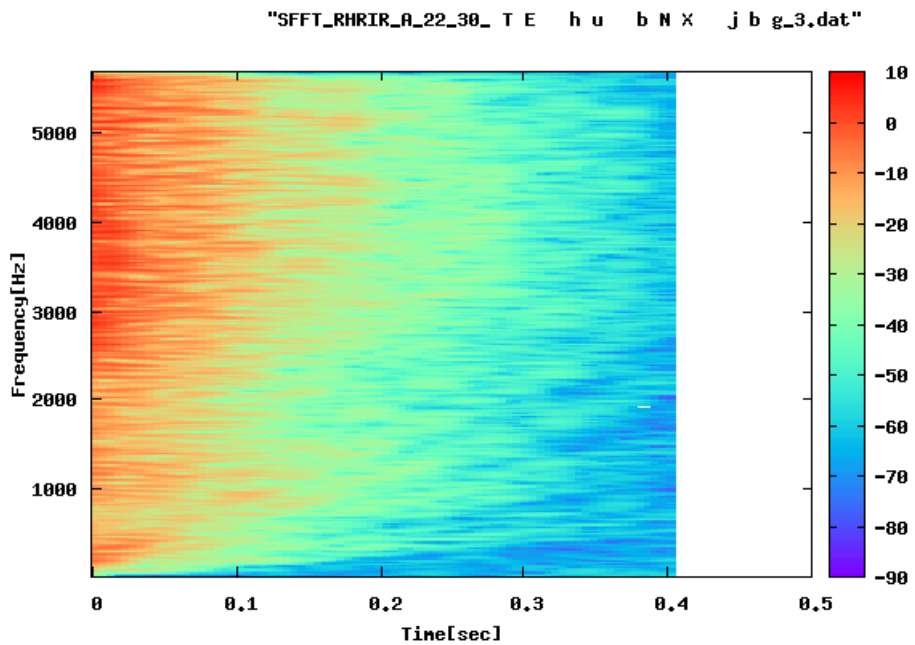
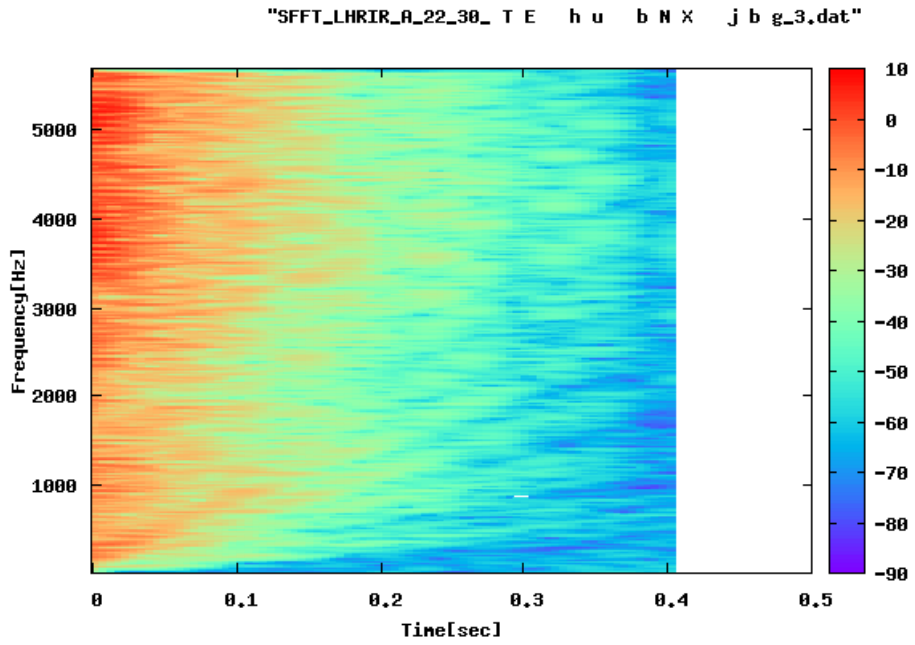


図 5.44 残響周波数特性の時間変化(条件 3-1 CH3)

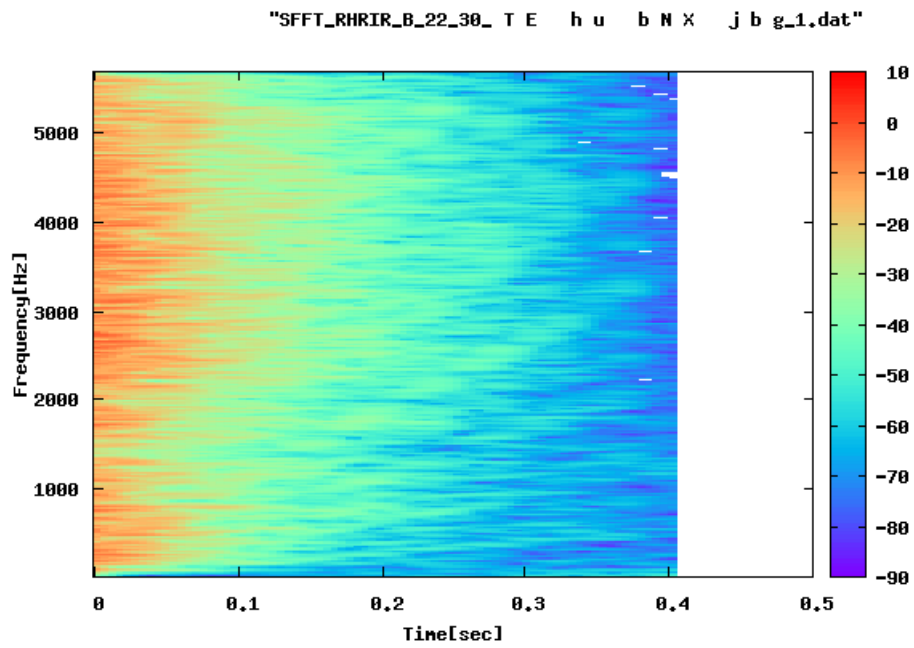
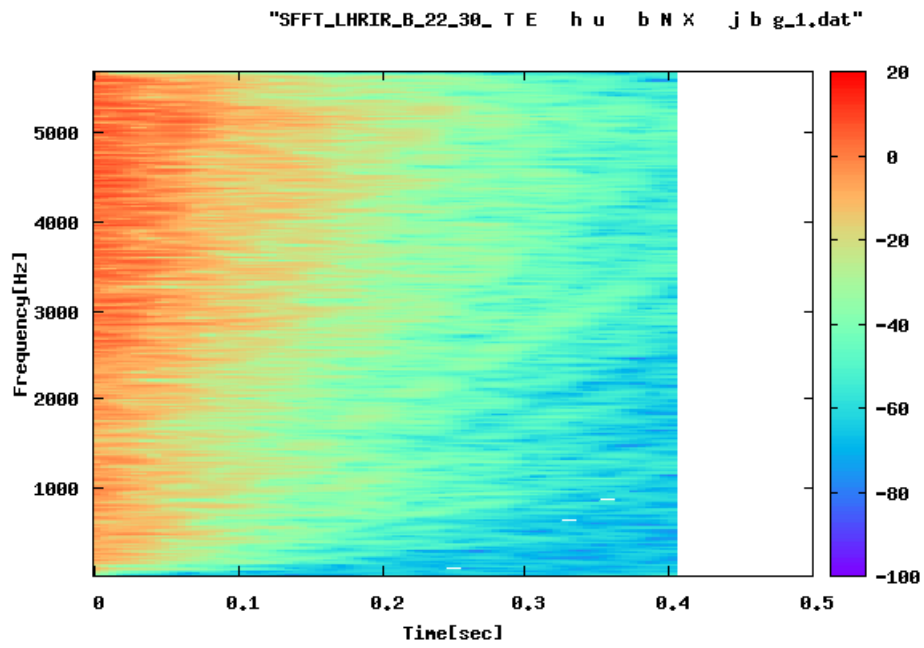


図 5.45 残響周波数特性の時間変化(条件 3-2 CH1)

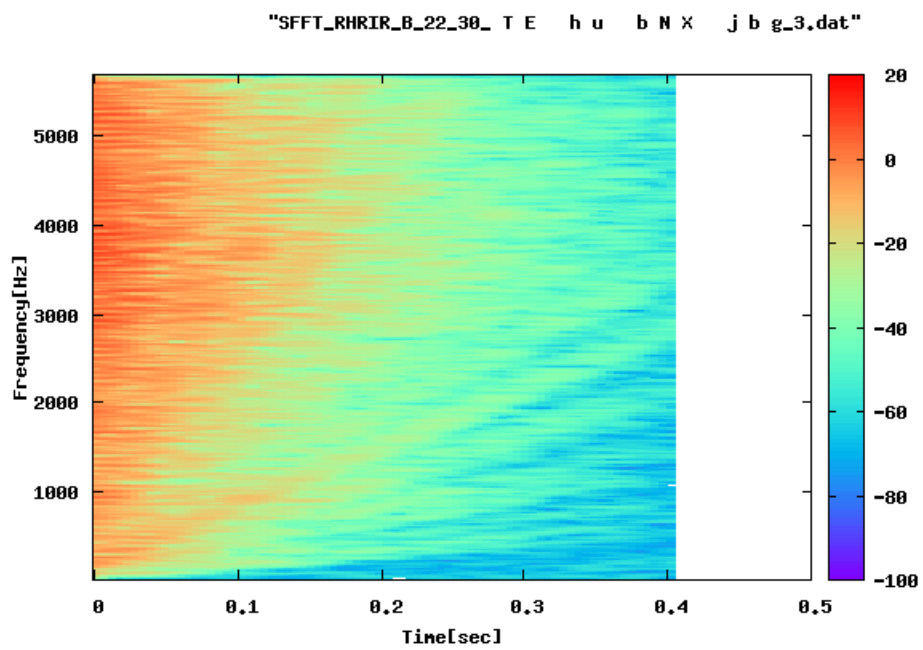
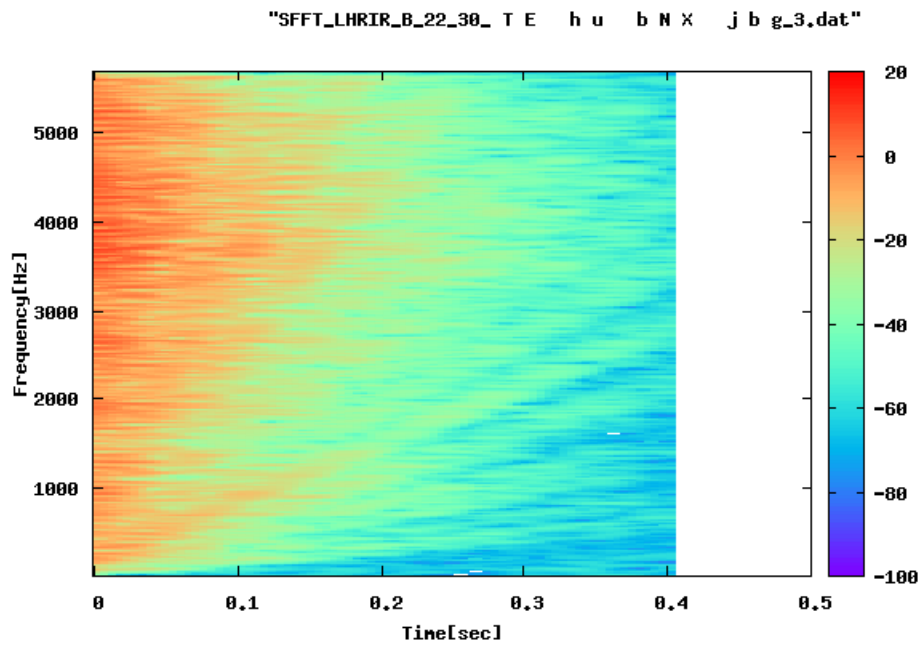


図 5.46 残響周波数特性の時間変化(条件 3-2 CH3)

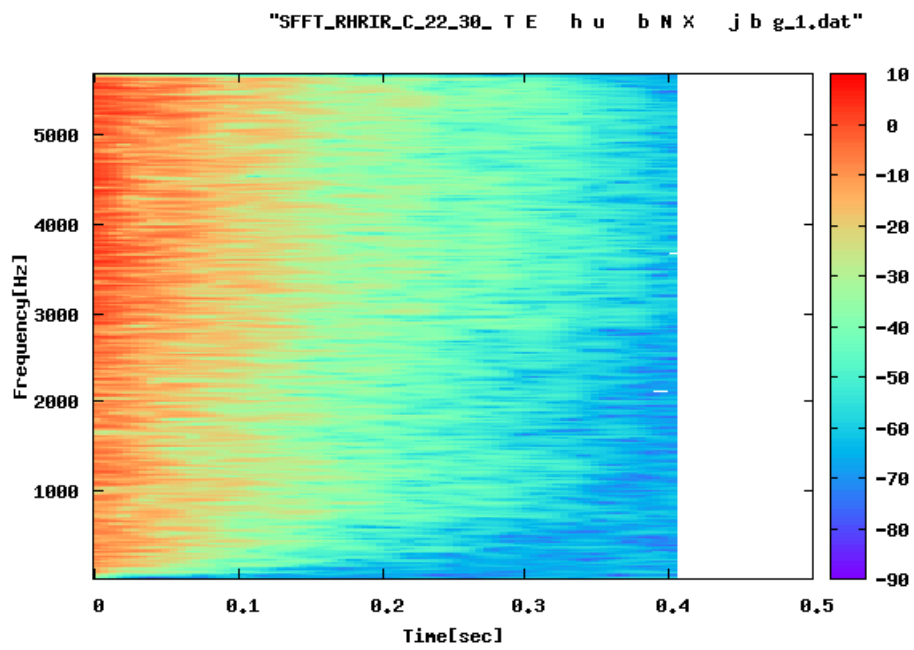
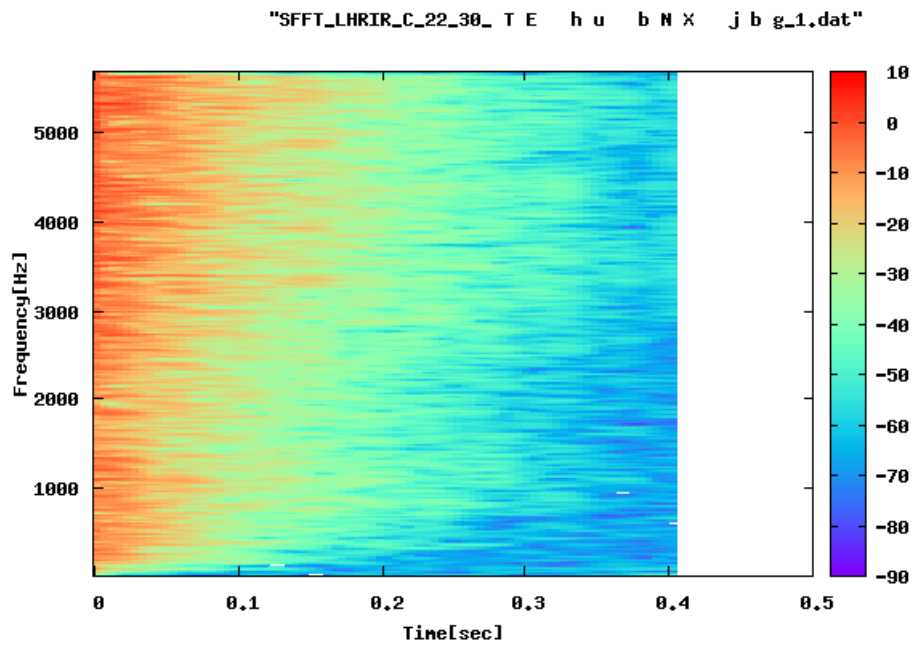


図 5.47 残響周波数特性の時間変化(条件 3-3 CH1)

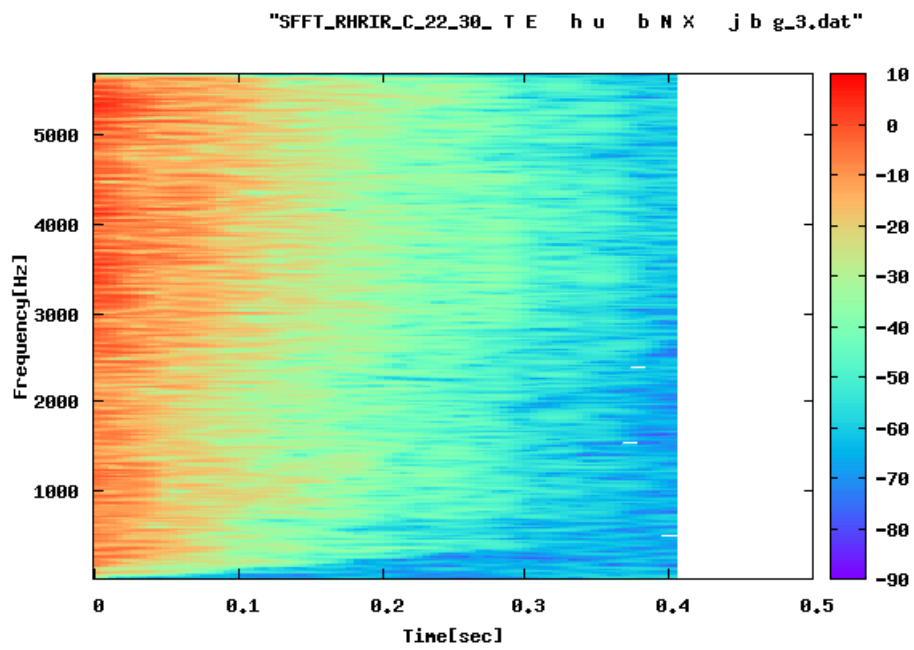
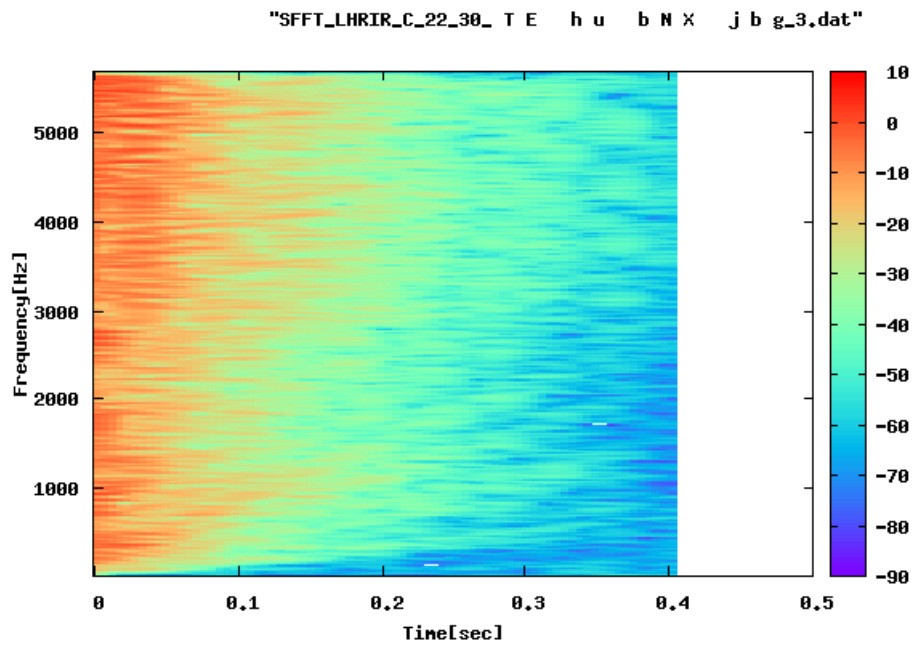


図 5.48 残響周波数特性の時間変化(条件 3-3 CH3)

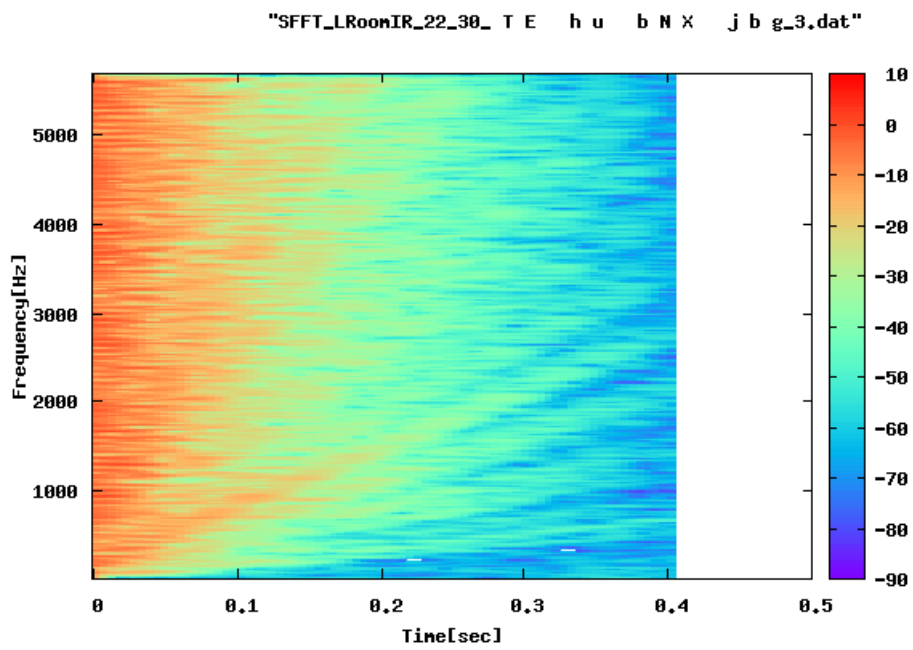
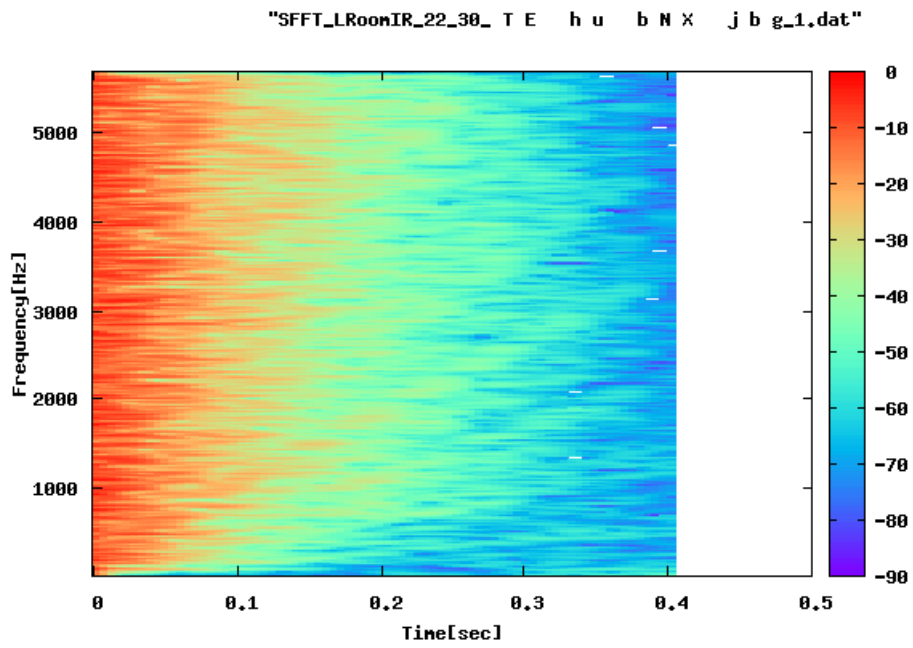
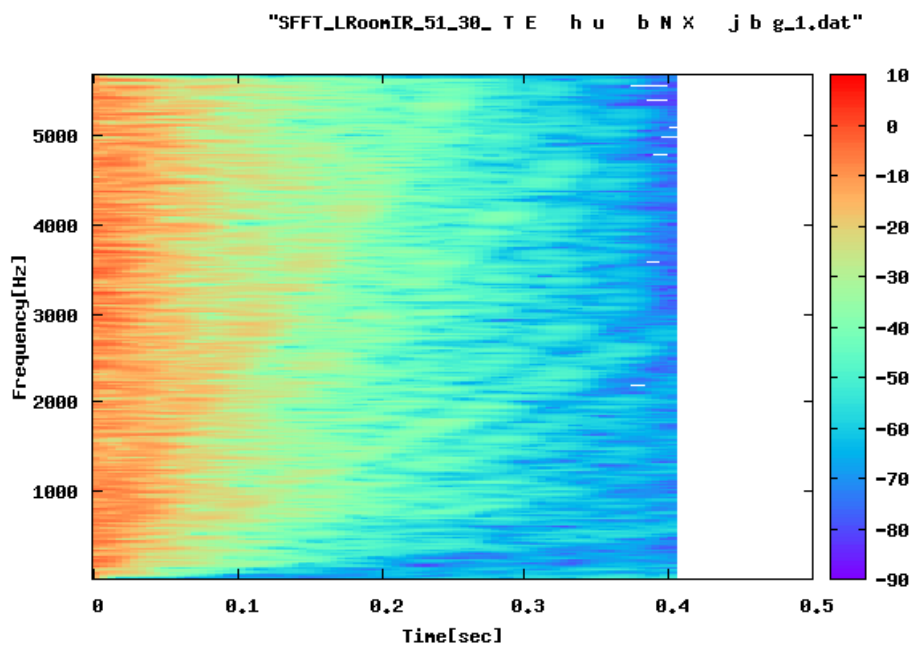
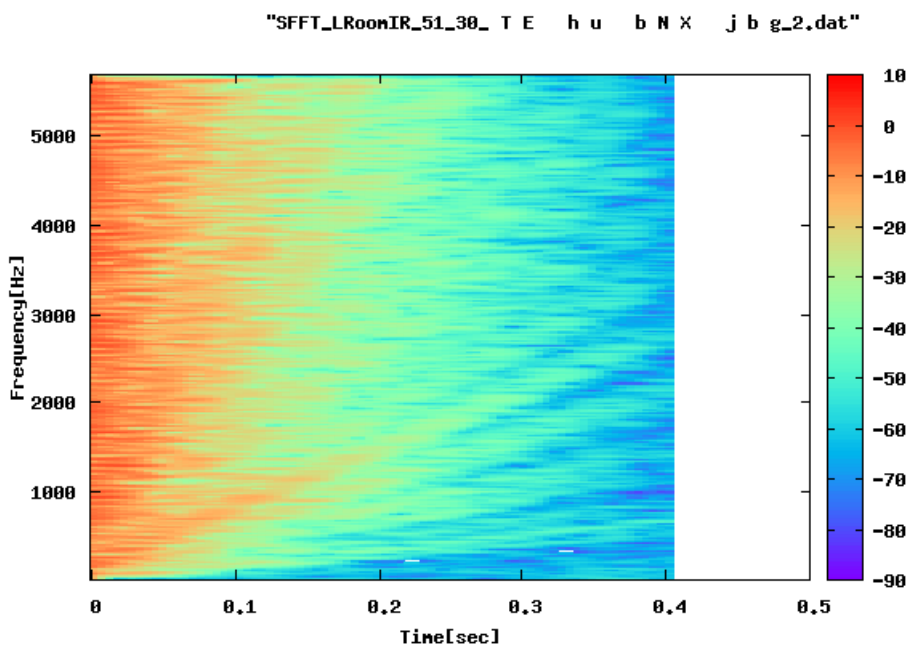


図 5.49 残響周波数特性の時間変化(条件 4-1)



(a) CH1



(b) CH2

図 5.50 残響周波数特性の時間変化(条件 4-2、5.1CH)

5.6 実験試料の両耳間相関度

実験試料について両耳間相関度(IACC:inter-aural cross correlation coefficients)を求めた。両耳間相関度の定義を次式に示す。図 5.30 ~ 図 5.45 のグラフは実験試料の音源を100[ms]区間で分割し、両耳間相関度を求めてプロットしている。

条件 1 の結果については、条件 1-4 が他の条件よりも両耳間相関度が高い傾向が見られる。条件 1-4 は主観評価実験の結果では距離感が良くない傾向が見られたが、両耳間相関度が高いことが原因であると考えられる。条件 2 に注目すると、 の増加に伴い両耳間相関度が低くなる傾向が確認できる。条件 3 については、条件 3-2 が他の条件に比較して両耳間相関度が僅かに高い傾向が見られる。条件 3-2 は主観評価実験の結果では距離感が良くない傾向が見られたが、両耳間相関度が高いことが原因であると考えられる。

$$IACF_{t_1 t_2}(t) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} pl(t) \cdot pr(t+t) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} pl^2(t) dt \cdot \int_{t_1}^{t_2} pr^2(t) dt}}$$

$$IACC_{t_1 t_2} = \max |IACF_{t_1 t_2}(t)|$$

$pl(t)$: 左耳の頭部インパルス応答

$pr(t)$: 右耳の頭部インパルス応答

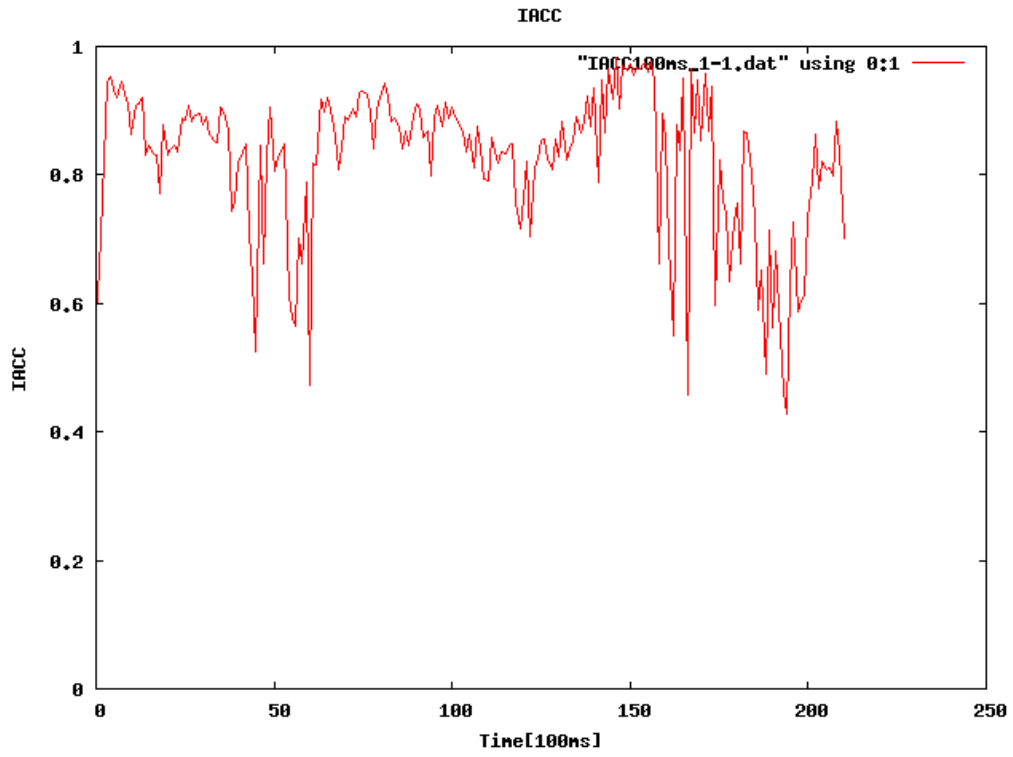


図 5.51 両耳間相関度(条件 1-1)

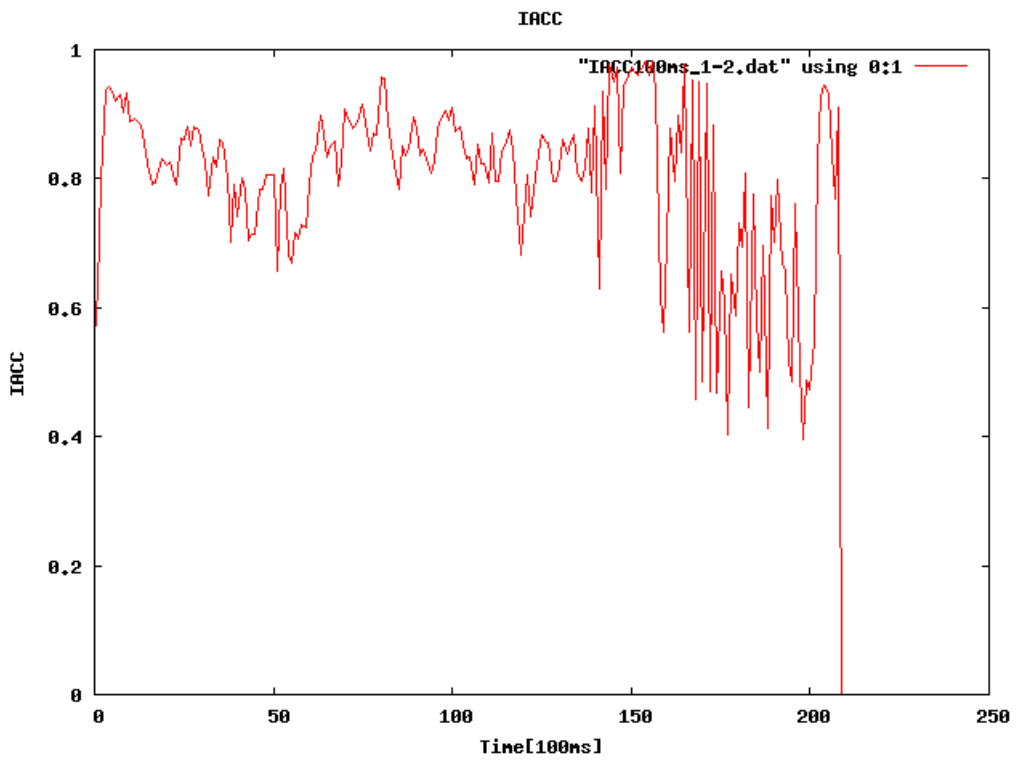


図 5.52 両耳間相関度(条件 1-2)

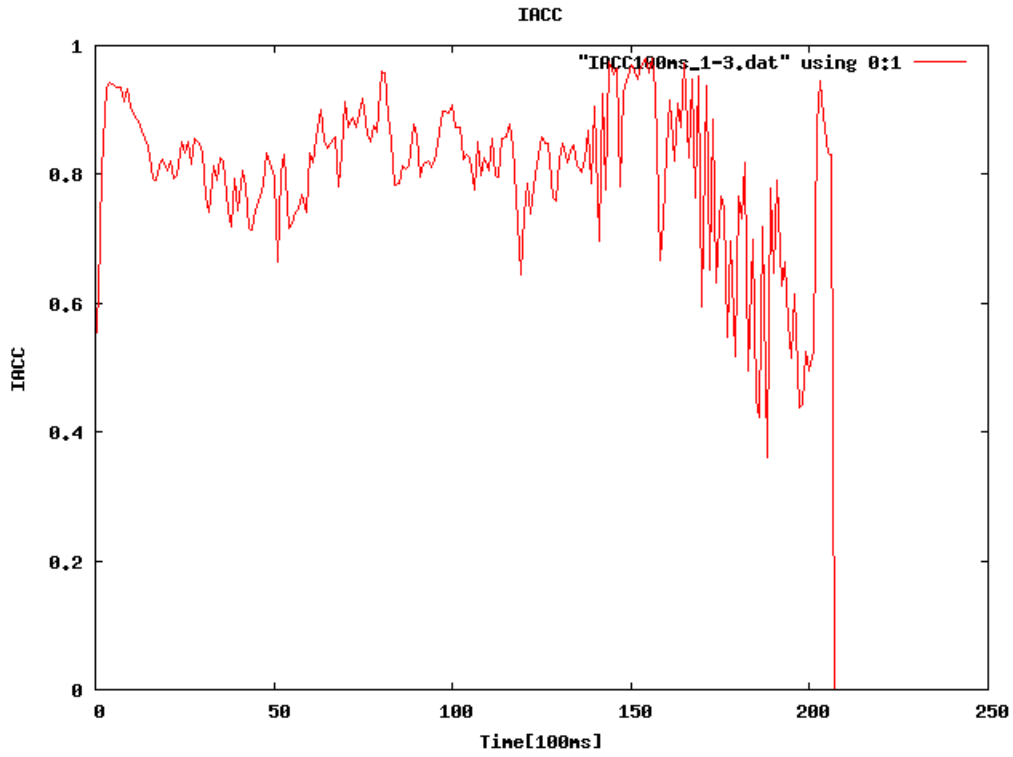


図 5.53 両耳間相関度(条件 1-3)

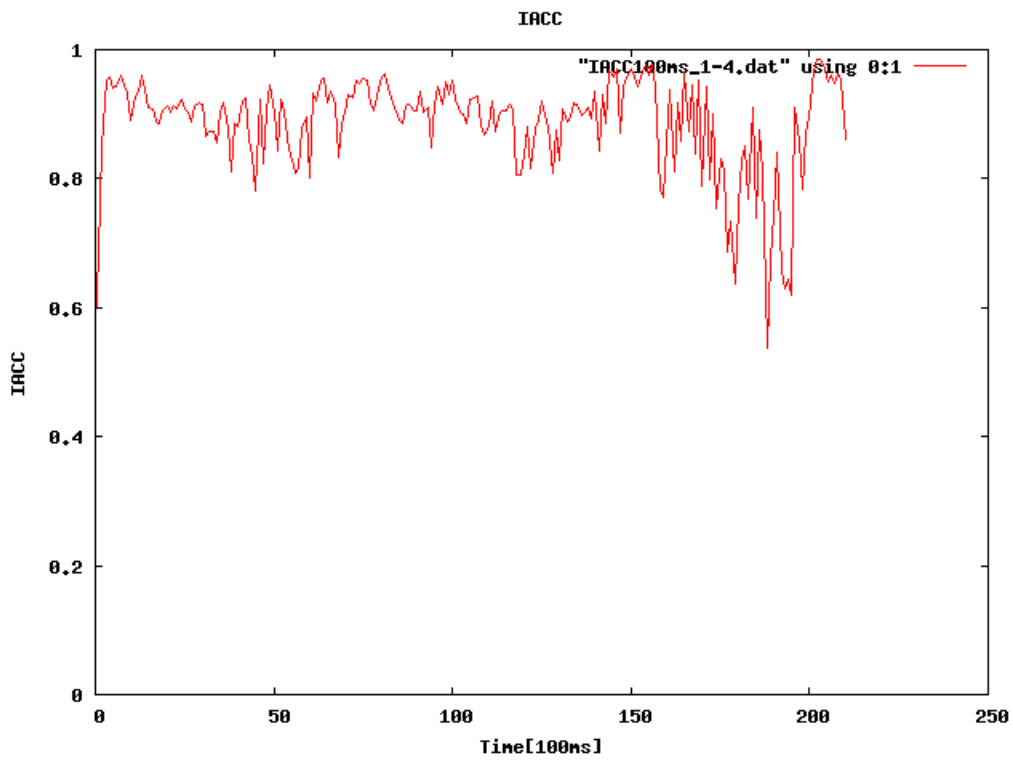


図 5.54 両耳間相関度(条件 1-4)

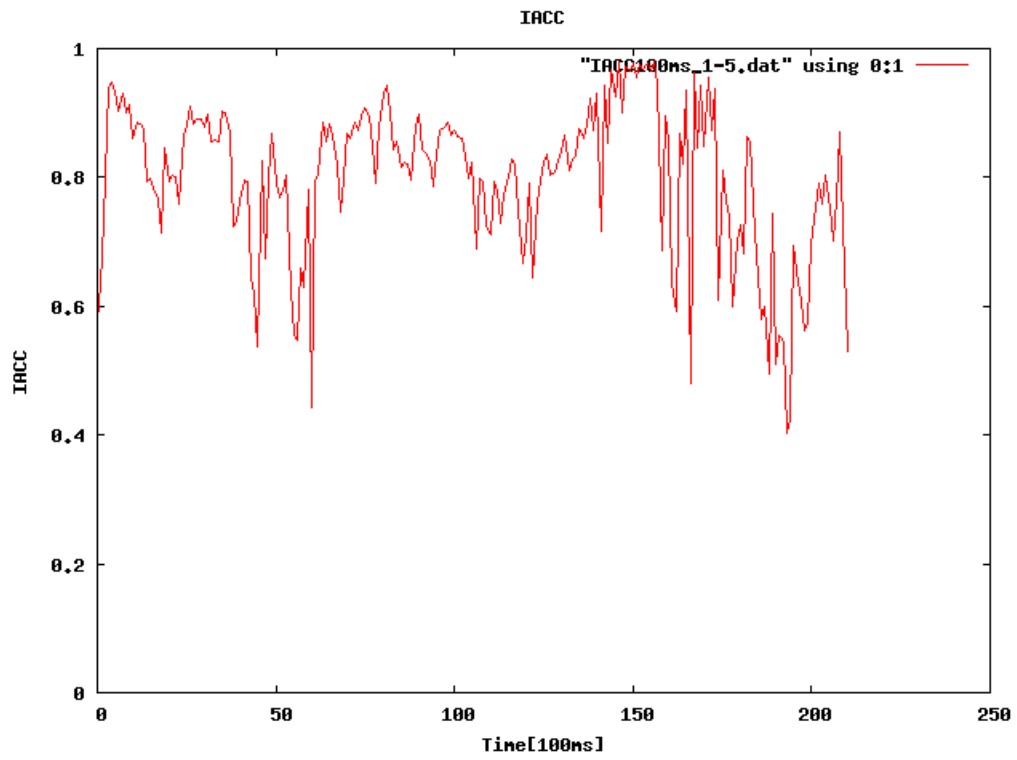


図 5.55 両耳間相関度(条件 1-5)

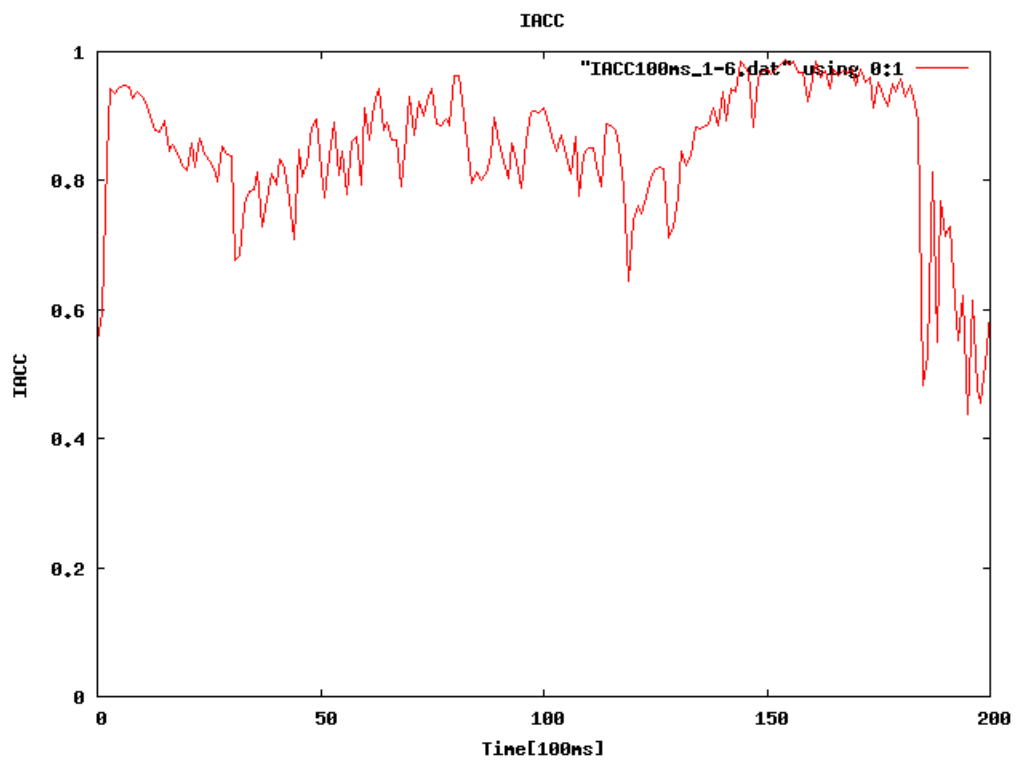


図 5.56 両耳間相関度(条件 1-6)

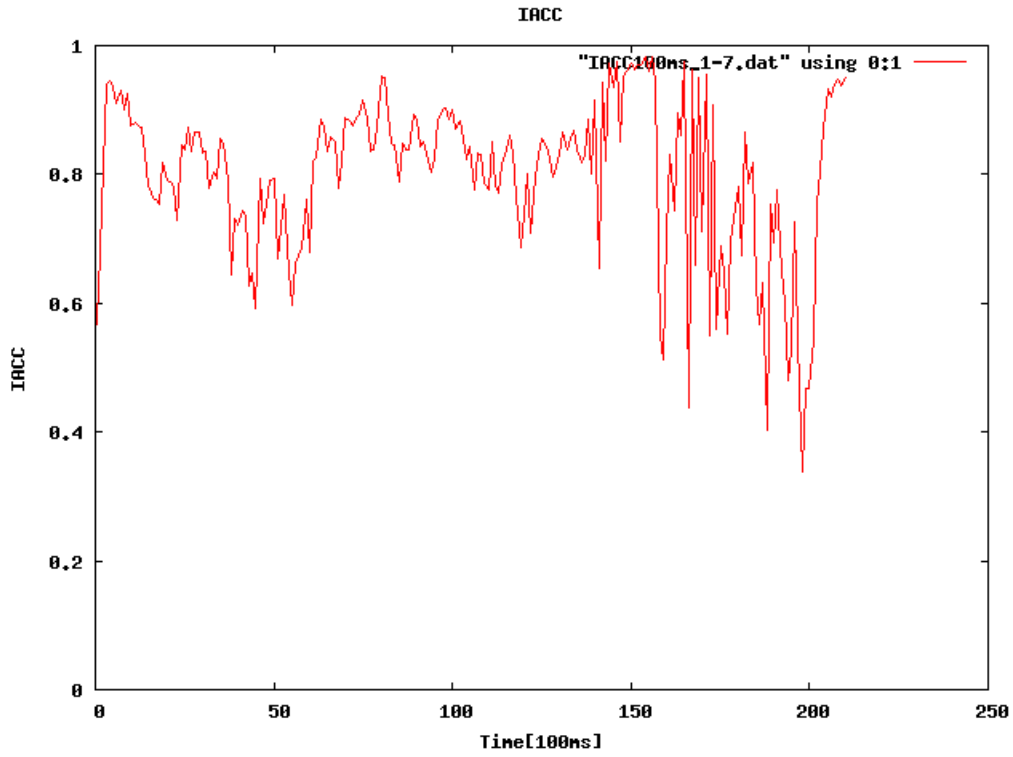


図 5.57 両耳間相関度(条件 1-7)

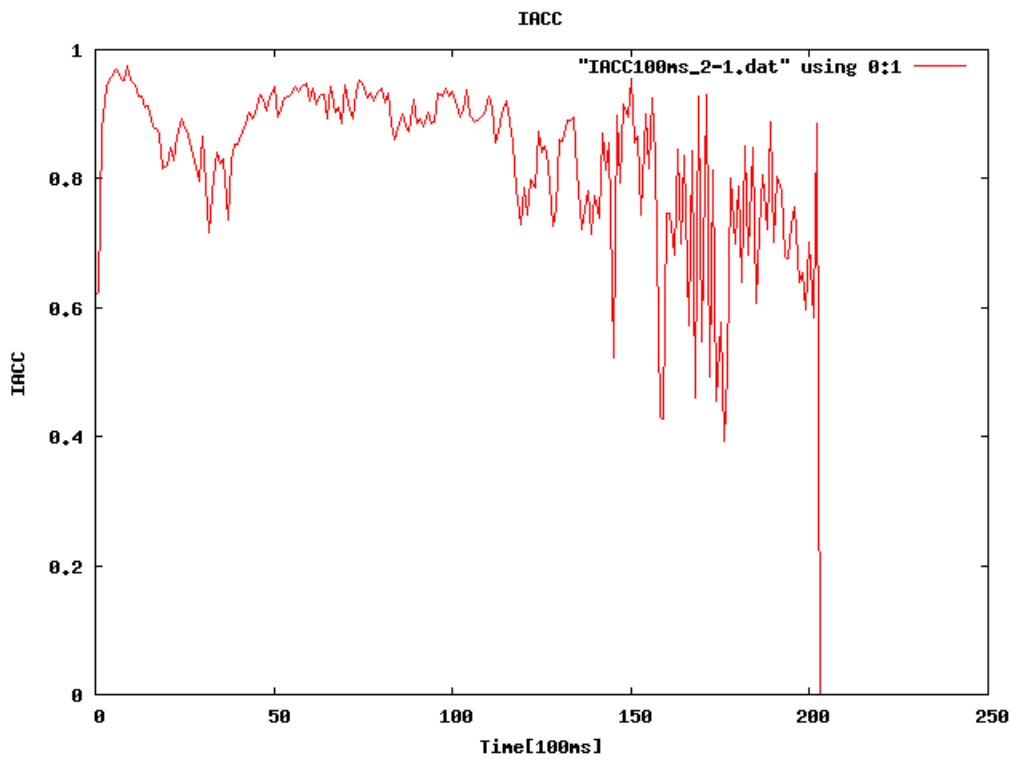


図 5.58 両耳間相関度(条件 2-1)

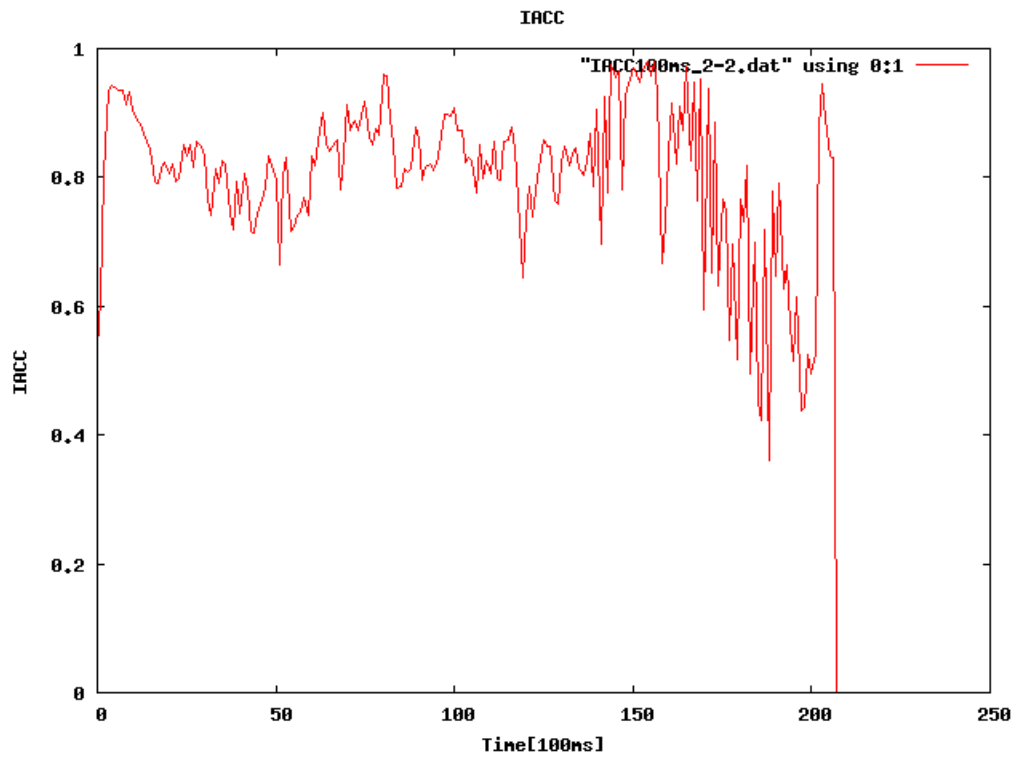


図 5.59 両耳間相関度(条件 2-2)

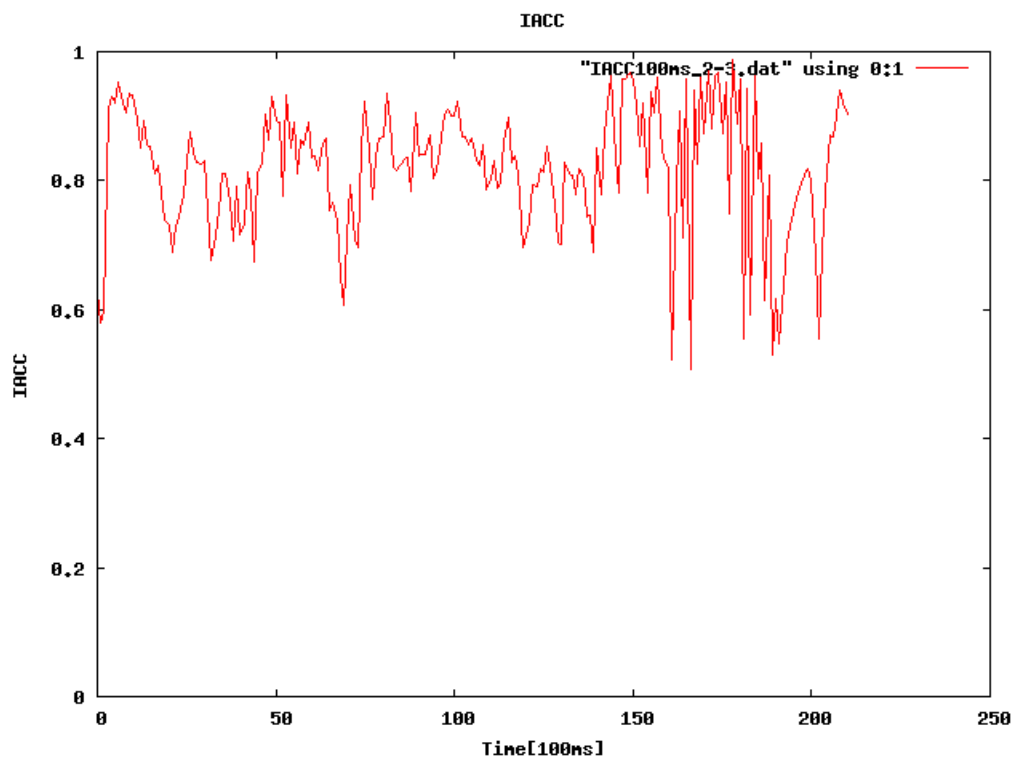


図 5.60 両耳間相関度(条件 2-3)

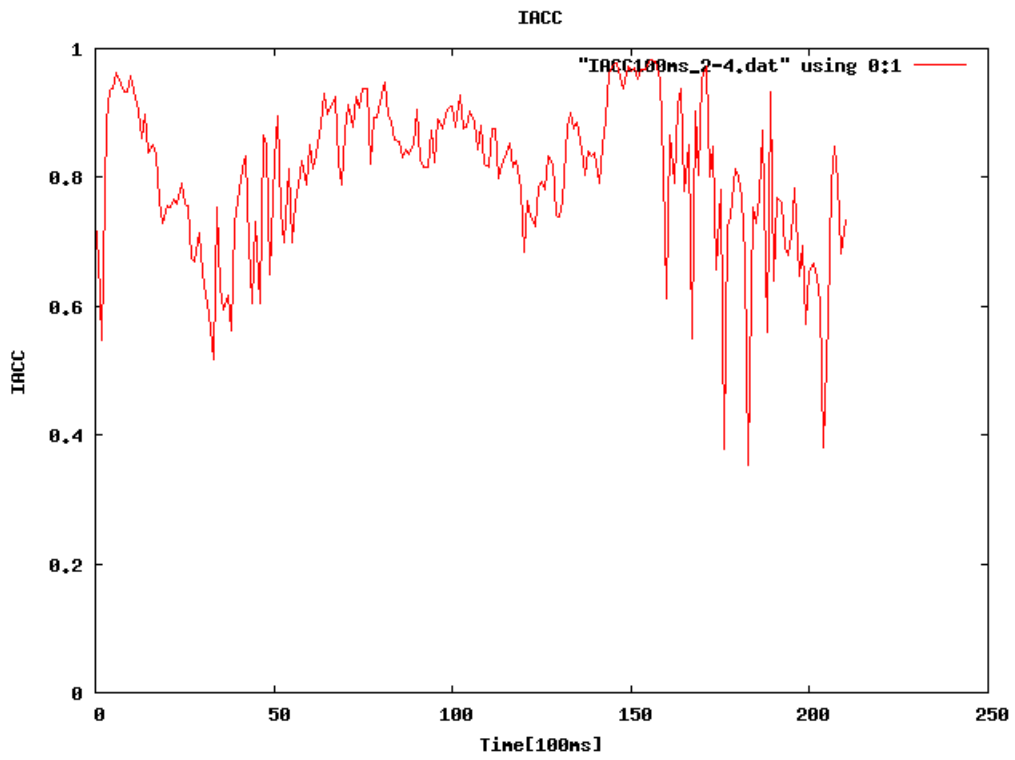


図 5.61 両耳間相関度(条件 2-4)

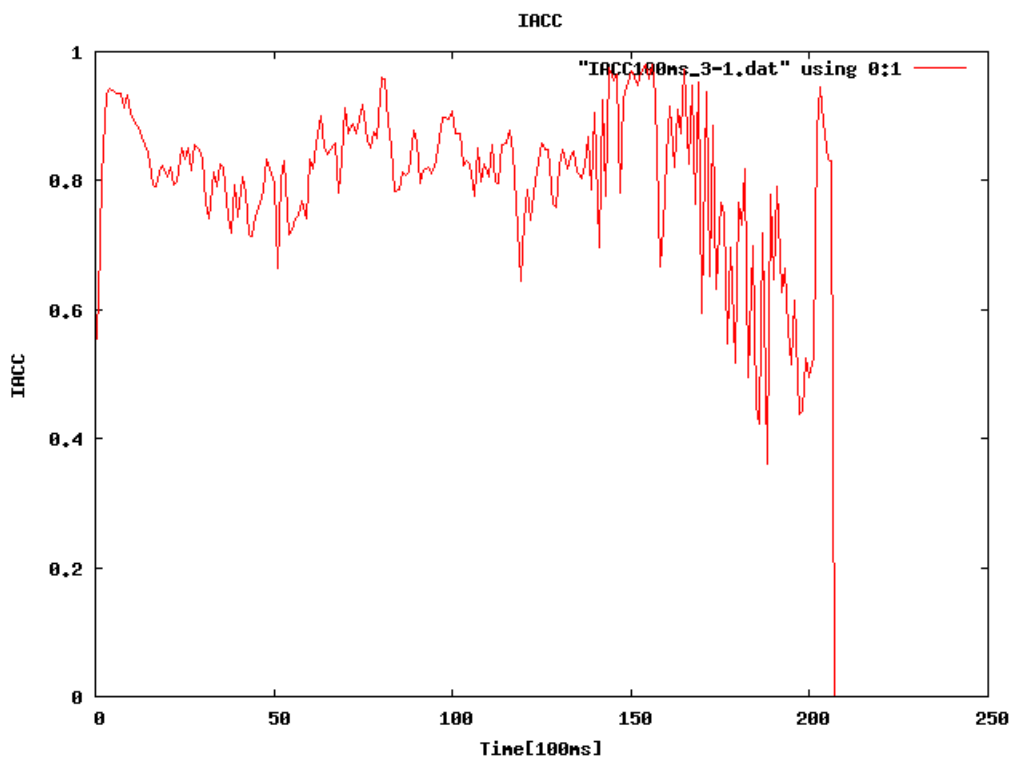


図 5.62 両耳間相関度(条件 3-1)

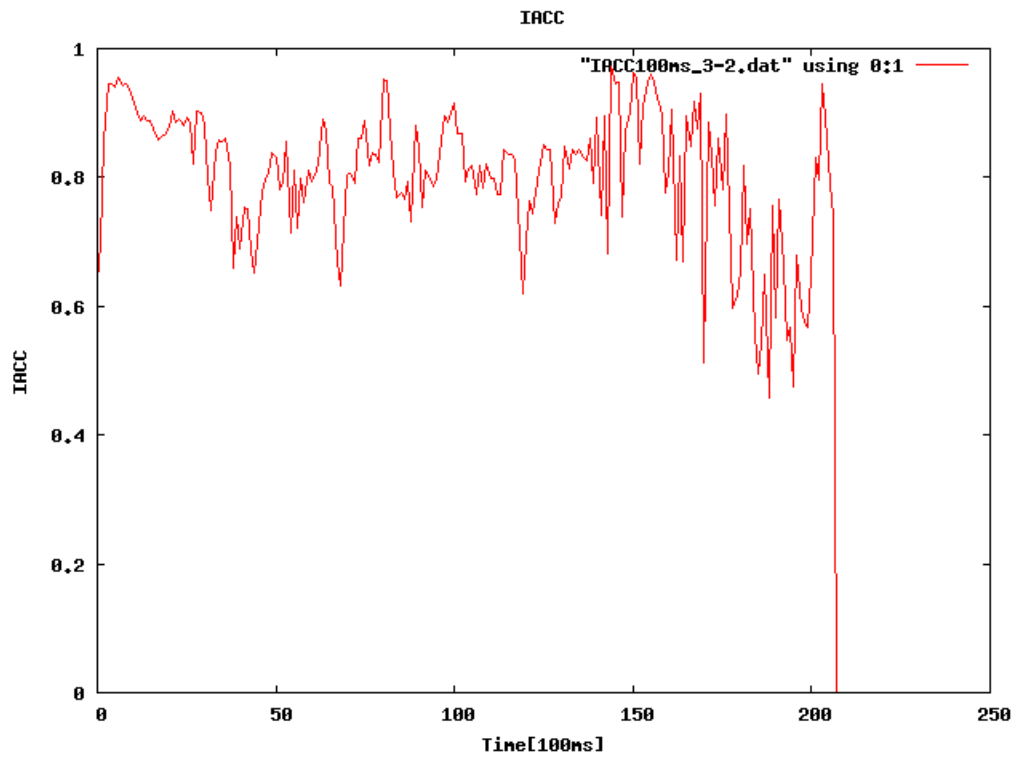


図 5.63 両耳間相関度(条件 3-2)

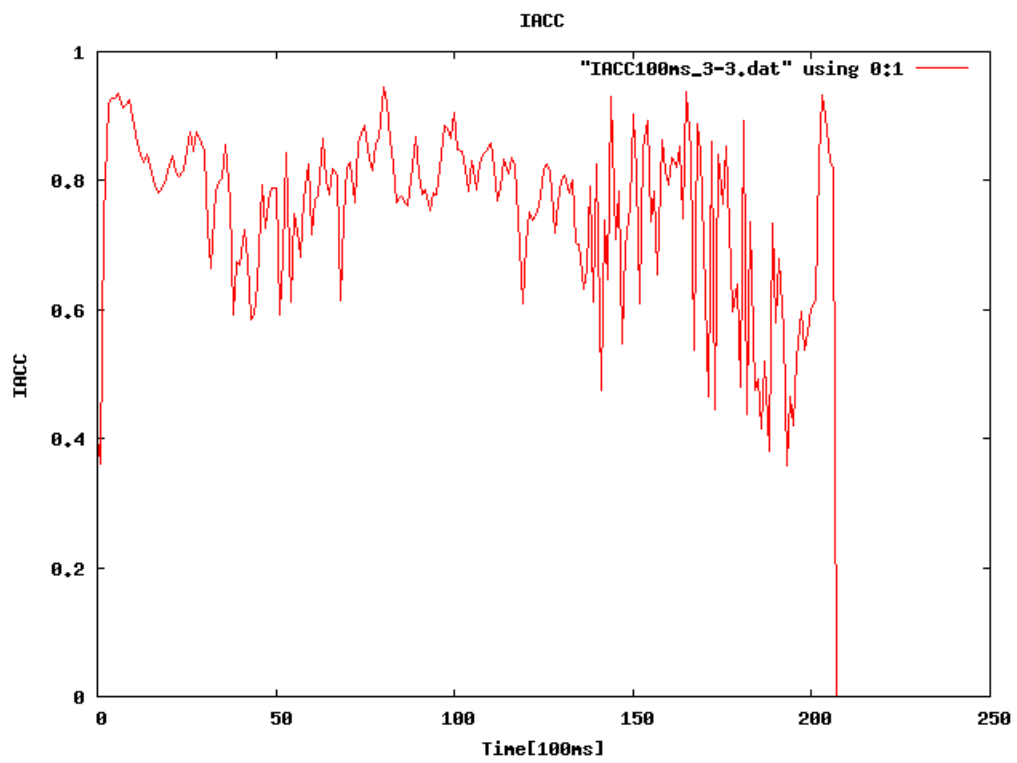


図 5.64 両耳間相関度(条件 3-3)

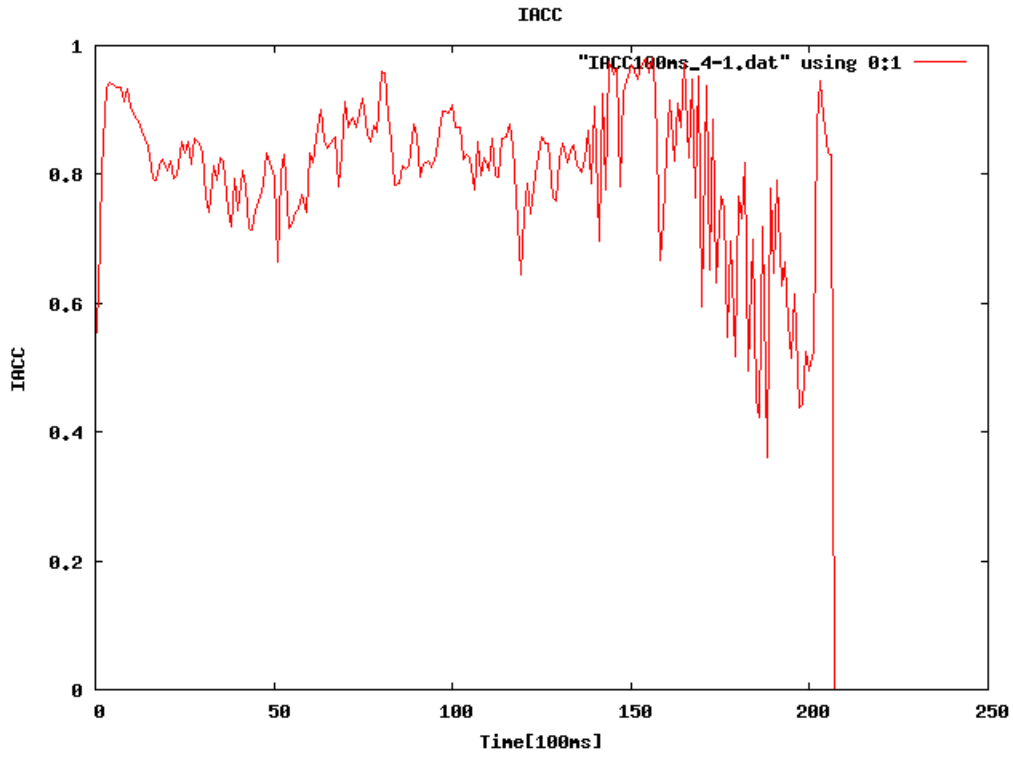


図 5.65 両耳間相関度(条件 4-1)

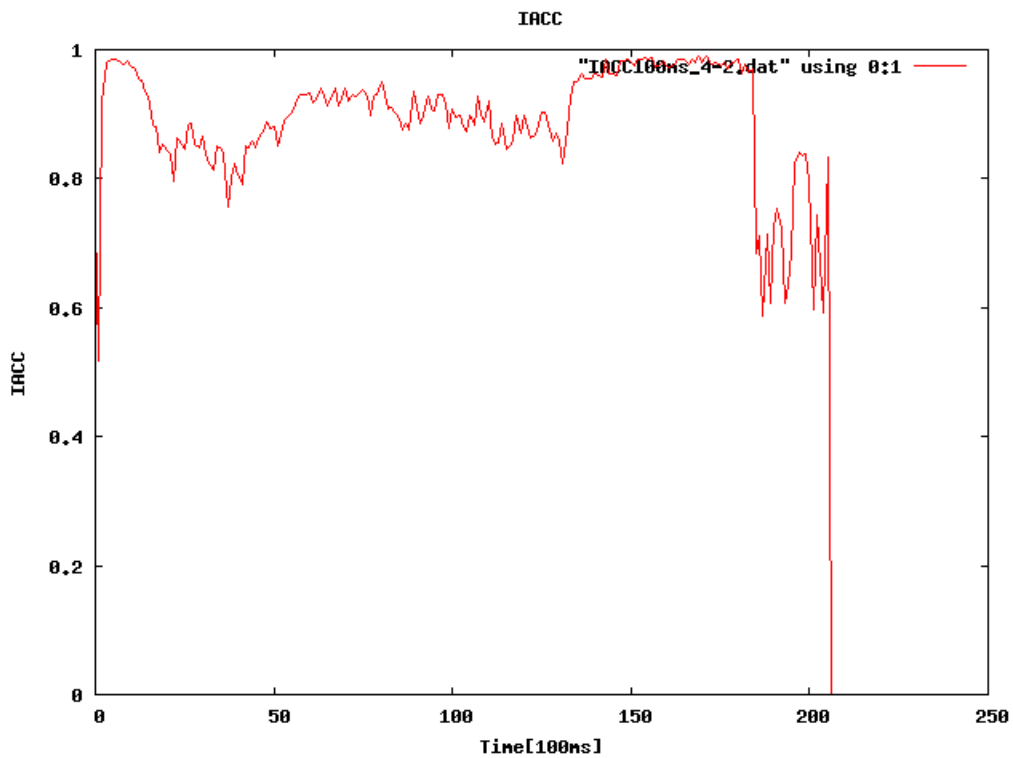


図 5.66 両耳間相関度(条件 4-2)

第 6 章

結論

本研究では、マルチチャンネル音響のスピーカー再生音をヘッドホンで再現する方法として、鏡像法による残響シミュレーションと頭部伝達関数の畳み込みを用いて仮想室内の頭部インパルス応答を求めてマルチチャンネルの音源に畳み込む方法を試みた。また、主観評価実験を行い、音像の空間的印象の観点からシミュレーションパラメータの最適な値について検討を行った。壁面反射係数の条件については、壁面反射係数の大きい条件では音の距離感が優れている傾向が見られたが音の移動感については、壁面反射係数が小さい条件ほど優れている傾向が見られた。従って壁面反射係数は音の移動感と距離感のトレードオフの問題であると言える。トレードオフの観点から今回の実験に関しては、コンクリートブロック(素地)(条件 1-2)とサウンドブロックユニット(条件 1-3)が比較的好ましい結果が得られた。しかし、被験者のグループによる結果のばらつきが大きいため、より多くの被験者で評価実験を行い、最適な壁面反射係数を求めることが望ましい。シミュレーションにおける音源距離や部屋の大きさに影響する の条件については、 の異なる条件において有意な差は認められなかったが が大きくなるほど音像の距離感も増加する傾向が見られた。反射音の生成法の条件については、鏡像法を用いて反射音の到来方向を求める方法(条件 3-1)の方が、反射音の到来方向を直接音の到来方向と等しいものとする方法(条件 3-2)よりも音像の距離感が優れていることが示された。これは、条件 3-1 が反射音の到来方向に合わせた頭部伝達関数を畳み込むのに対して、条件 3-2 では頭部伝達関数を 1 種類しか使わないため、両耳間相関度が高くなることが原因であると考えられる。再生音源のチャンネル数の条件については、22.2 チャンネル音源のほうが 5.1 チャンネル音源よりも音の移動感、距離感共に優れていることが実験的に示された。したがって、マルチチャンネル音響システムのヘッドホン受聴においても音の移動感や音の距離感において 22.2 方式が 5.1 方式よりも有効であると言える。

参考文献

- [1]Leslie L. Doelle 著、前川純一 訳：
建築と環境の音響設計、丸善出版
- [2]濱崎 公男、火山 浩一郎、金澤 勝、三谷 公二、菅原 正幸：
走査線 4000 本級超高精細映像のための 3 次元音響システム、信学技報
EID2003-37(2003-11)
- [3]Pavel Zahorik：
Auditory distance perception in humans: Asummary of past and present research
- [4]福留公利 竹谷和樹：
本人の頭部インパルス応答とイヤホン再生による音像の頭外定位距離について
信学技報 EA-2005-14 SIP2005-19 (2005-05)
- [5]川浦淳一 鈴木陽一 浅野太：
頭部伝達関数の模擬によるヘッドホン再生音像の定位
日本音響学会誌 45 巻 10 号(1989)
- [6]黒住幸一 大串健吾：
2 チャンネル音響信号の相互相関関数とヘッドホン受聴時における
音像の拡がり感の対応関係 日本音響学会誌 42 巻 6 号 (1986)
- [7]難波精一郎 編：
聴覚ハンドブック、ナカニシヤ出版
- [8]天坂格郎、長沢伸也 共著：
官能評価の基礎と応用、日本規格協会
- [9]中山靖茂、桑田聡、小森智康、渡辺馨：
残響を手がかりとした音像距離判断の周波数依存性の検討
日本音響学会講演論文集 1-5-23 2003 春 537-538)

謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なるご指導とご助言をいただいた NHK 放送技術研究所の安藤彰男氏、濱崎公男氏、中山靖茂氏、電気通信大学大学院情報システム学研究科の出澤正徳教授、阪口豊准教授、石田文彦助教、島井博行助教に、この場を借りて深く御礼申し上げます。また、頭部伝達関数の測定でご協力を頂いた NHK 放送技術研究所の松井健太郎氏に深く感謝いたします。

最後に、多くのご意見とご協力をいただいたヒューマンインターフェース学講座の皆様
に深く御礼申し上げます。