

スピーチプライバシー確保のための
楢円パーティションについての研究

関西大学 環境都市工学部 建築学科

建築環境工学第 I 研究室

建 10 - 70 中本 英明

指導教官 豊田 政弘 助教

目次

1	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
2	楕円パーティションの提案	3
3	数値解析	5
3.1	インパルス応答の計算方法	5
3.2	解析対象	6
3.3	妥当性の検証	7
3.3.1	実験方法	7
3.3.2	比較結果	8
3.4	解析結果	9
3.4.1	可視化	9
3.4.2	待合エリアの L_{AE} の分布	10
3.4.3	待合エリアの STI の分布	12
4	実験	14
4.1	実験方法	14
4.2	実験結果	17
5	総括	23
5.1	まとめ	23
5.2	今後の課題	24

1 序論

1.1 研究背景

会話にもプライバシーが存在し、その会話に含まれる情報が第三者に漏れてしまうことを防ぐためにスピーチプライバシー確保が必要となる。例えば銀行での金銭のやり取りの場や病院内で病気の説明する場合など極秘事項や個人の情報が会話に含まれる場合には一般的な会話に比べスピーチプライバシーをより確保する必要がある。

スピーチプライバシー確保のための基本的対策として ABC ルールという吸音(Absorption)、遮蔽(Block)、マスキング(Cover up)の三つが挙げられる。吸音とは天井や壁などに吸音材を張ることで音のエネルギーを吸収することである。次に遮蔽とは会話内容が周りに伝わらないように間に遮蔽板を設置することで音エネルギーを遮蔽板に当たり、反射させることである。最後にマスキングとはマスキング音をスピーカーで鳴らすことで会話を掻き消すことである。これら ABC ルールの説明を図 1.1 で示す。

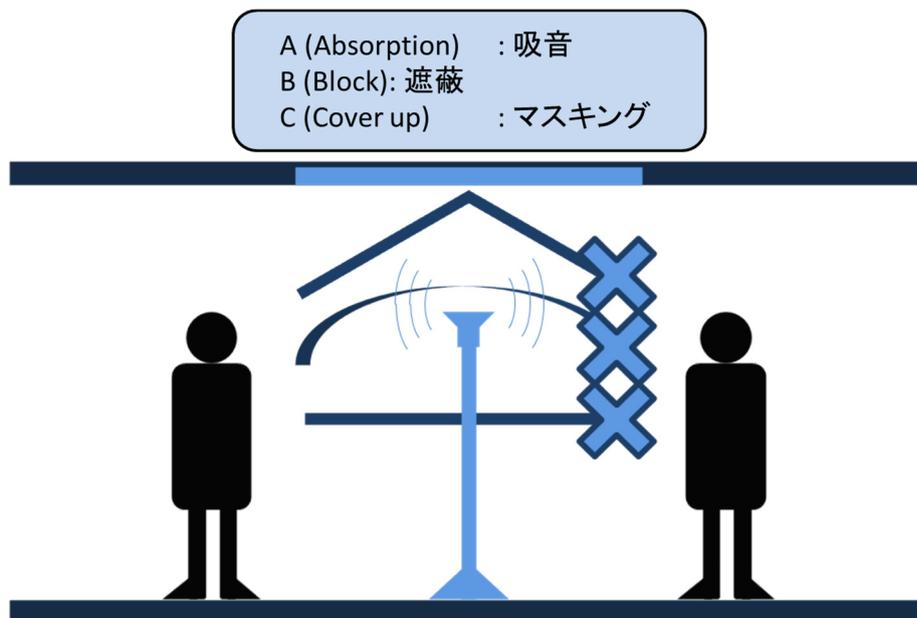


図 1.1 ABC ルールの説明

1.2 研究目的

本研究では前節の基本的対策である吸音、遮蔽、マスキングに則らず、パーティションの形状に着目した対策を提案する。具体的には銀行や薬局での応対ブースといったスピーチプライバシーの確保の重要性が高い状況を想定している。その応対ブースを仕切るパーティションの形状を変形させることで応対ブース内のスピーチプライバシーを確保する提案である。

研究の目的は、波動音響と幾何音響を併用した数値解析により応対ブース後方（待合エリアなど）への音声伝達性能を検討するとともに、実寸大模型を使用した実験により、楕円パーティション内で会話をすると矩形パーティション内で会話をするよりも小さい声になるという仮説を証明し、提案するパーティションがスピーチプライバシー確保のために有効であることを示すことである。

2 楕円パーティションの提案

パーティションは矩形パーティションと楕円パーティションを考える。矩形パーティションはパーティションの形状がまっすぐである標準的な形状を示す。楕円パーティションはパーティションの形状を楕円形に曲げたものを示す。各パーティションの形状の平面図・断面図は図 2.1 に示す。

楕円の「二つの焦点を形成する」という特性に着目し、楕円パーティションでは音源・受音点を焦点に置くことで話者音声が集まると考え、小さい声で話しても、よく聞こえる空間を提案する。楕円パーティションのイメージ画は図 2.2 に示す。

「楕円パーティション内で会話をすると話者は相手の声がよく聞こえるため、矩形パーティション内で会話をするよりも小さい声で話すようになる」という仮説をもとに、楕円パーティション内では話者音声が減り、周辺への音声伝達が抑制できるものと期待される。

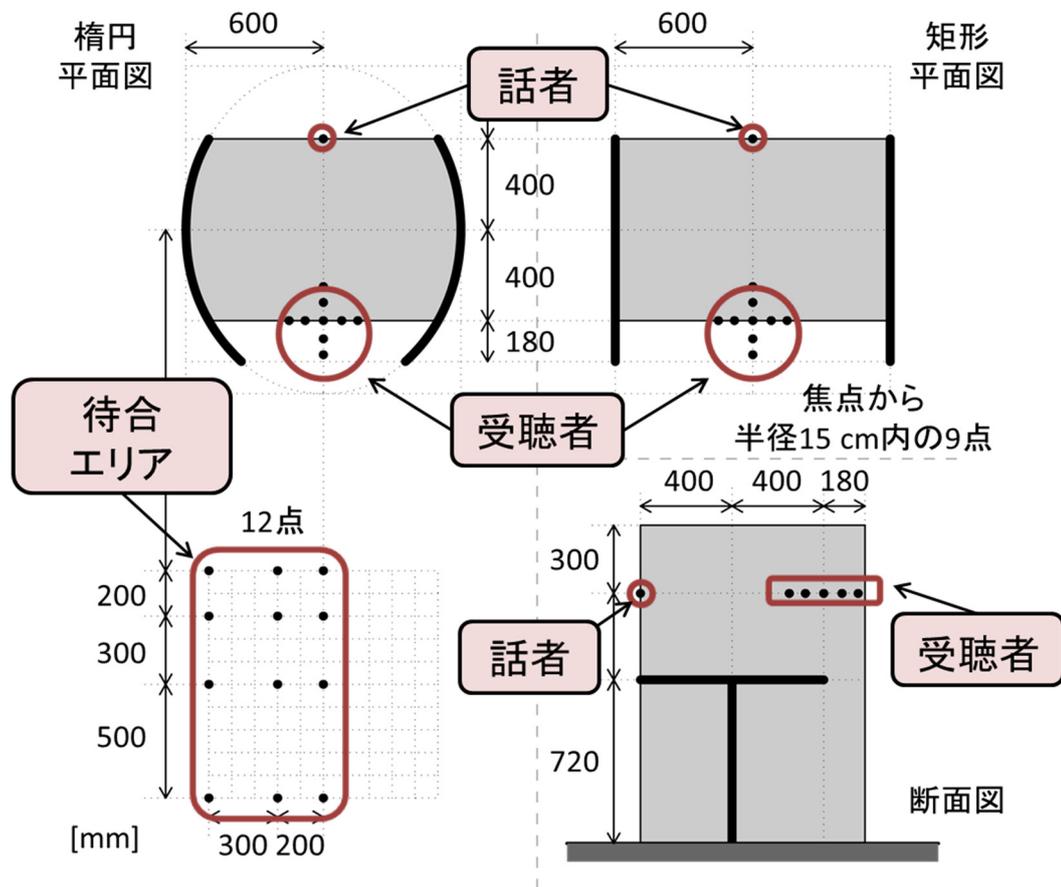


図 2.1 各パーティションの断面図・平面図

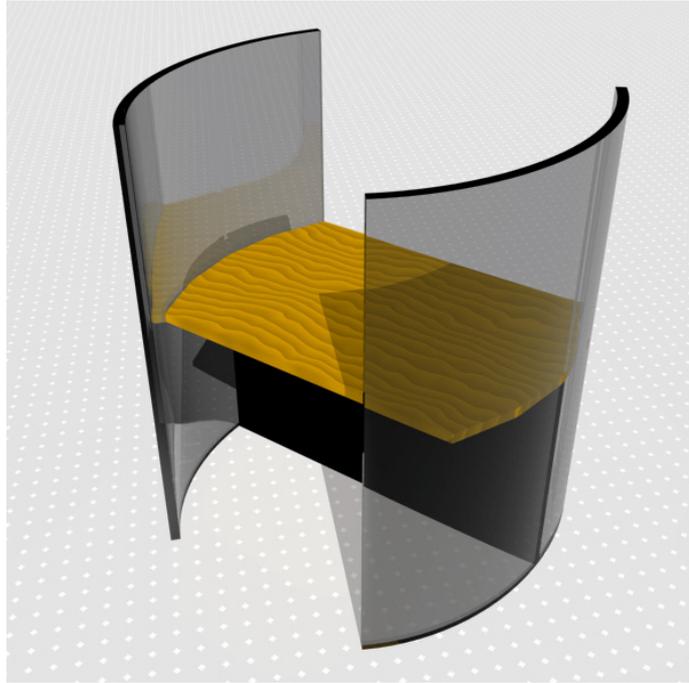


図 2.2 楕円パーティションのイメージ画

3 数値解析

楕円パーティションと比較対象としての矩形パーティションのそれぞれの話者位置に音源を置いた場合での受音点や待合エリアでのインパルス応答を数値解析により算出し、パーティション内および待合エリアでの音声伝達性能を検討する。

3.1 インパルス応答の計算方法

図 3.1 はインパルス応答の計算方法を示す。低域は波動音響 (FDTD 法) を使い、ガウシアンパルスを入力した際の受音点での時間応答を計算し、その応答にガウシアンパルスの逆フィルターとカットオフ周波数が 3.2 k Hz のローパスフィルターをかける。高域は、幾何音響 (CATT Acoustict TUCT) を用いて算出したインパルス応答にカットオフ周波数が 3.2 k Hz のハイパスフィルターをかけ、全体の算出から高域のみ取り出す。別途、自由空間中に音源を置き、1m 離れた点で同様の方法でインパルス応答を計算しておく。そのインパルス応答の周波数特性がなめらかに繋がるように、振幅を調整し、またインパルスの位置が等しくなるように位相を調整し、それらを重ね合わせることで可聴域全体のインパルス応答とする。この自由空間での調整量をパーティションの計算でも同様に用いる。

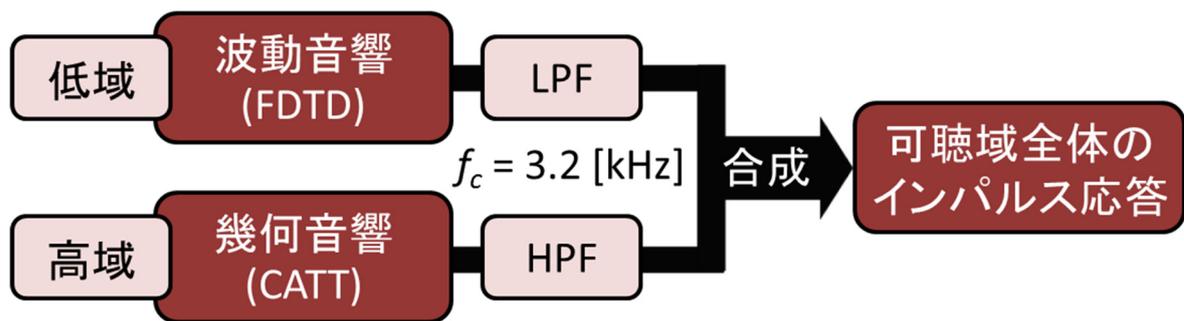


図 3.1 インパルス応答の計算方法

3.2 解析対象

解析対象となる各パーティションの話者、受聴者は図 3.2 のように楕円パーティションでの焦点の位置と同じ位置に設定し、高さは話者たちが座った時に頭がある位置に設定した。話者のスピーチプライバシーがどれだけ確保されているかを検討するために各パーティション後方には待合エリアも想定し、解析を行った。

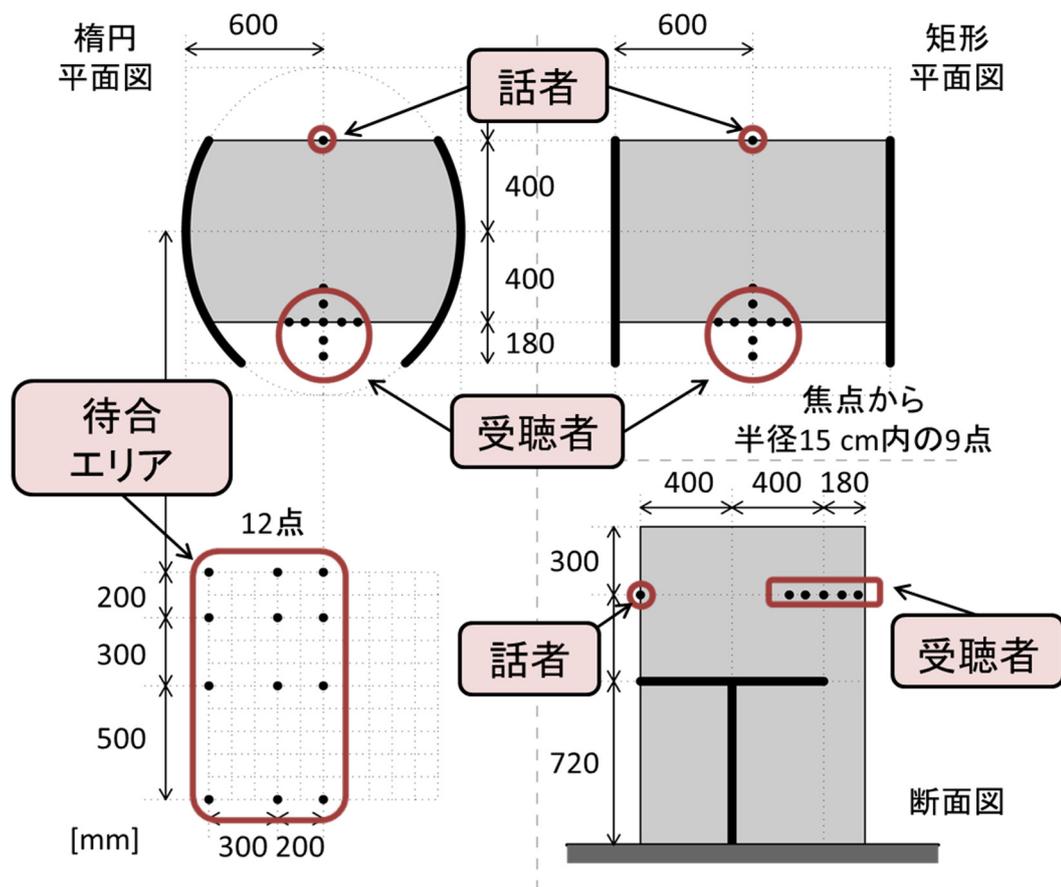


図 3.2 解析対象の平面図および断面図

3.3 妥当性の検証

焦点位置でのインパルス応答について解析結果と実大模型を用いた実測結果を比較する。

3.3.1 実験方法

実大模型の材料は机には木材を、パーティションにはアクリル板を使用した。サンプリング周波数は 48000Hz とし、話者と受聴者の位置は図 3.2 を参照し、楕円パーティションの焦点位置にスピーカーとマイクを設置し収録を行った。図 3.3.1.1 と図 3.3.1.2 は収録の様子を示す。

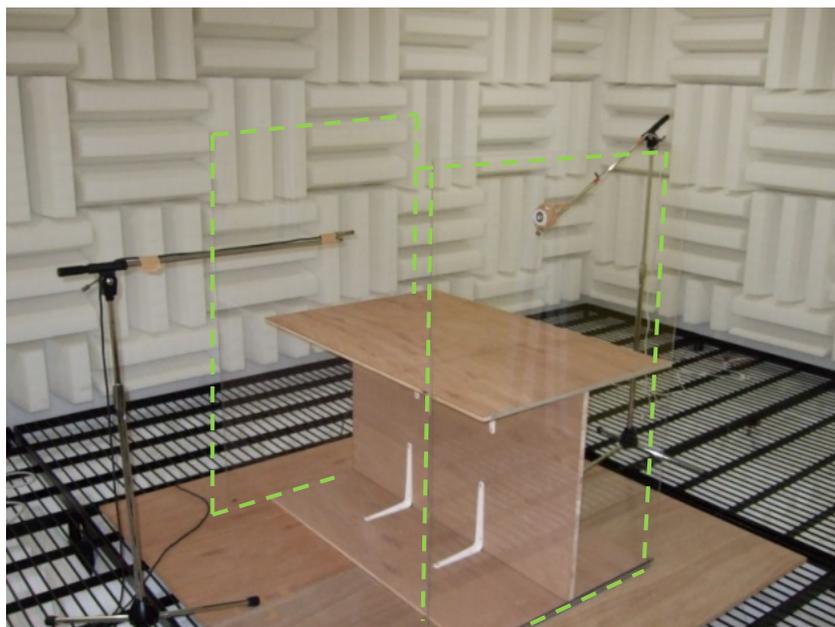


図 3.3.1.1 矩形パーティションでの実測の様子

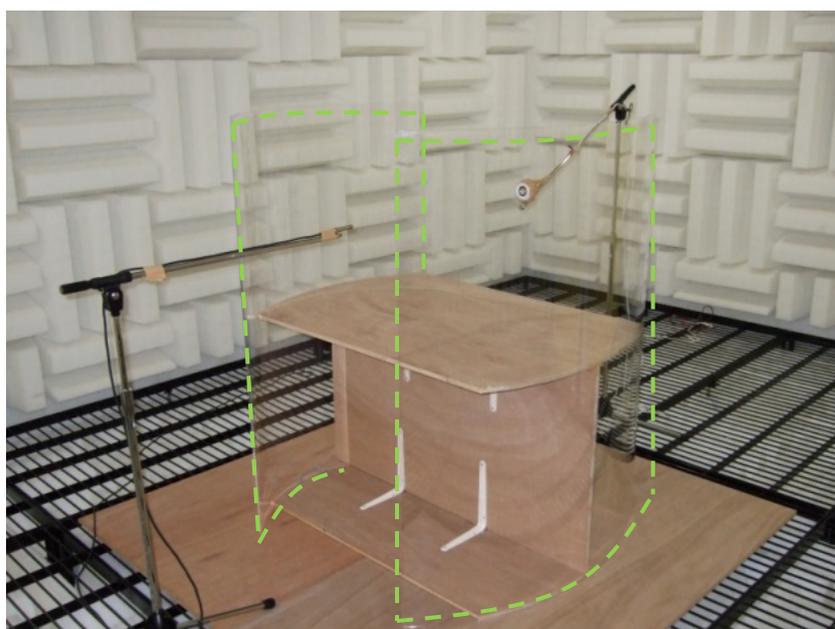


図 3.3.1.2 楕円パーティションでの実測の様子

3.3.2 比較結果

実測結果を図 3.3.2.1 および図 3.3.2.2 に示す。図 3.3.2.1 と図 3.3.2.2 の各パーティションの時間特性を比較すると反射音構造は計算と実測で良く一致している。

一方、周波数特性は低域、高域ともに実測値が低かった。原因として、低域では用いたスピーカーの出力不足のために数値が低くなっていると考えられる。また、高域ではパーティションの材料である木材とアクリルの表面吸音が働いたことや数値解析時の幾何音響の境界設定が不適切であった可能性がある。

しかしながら、反射音構造が良く一致していること、及び周波数特性の全体的な形状が似通っていることから数値解析の結果は妥当であると判断される。

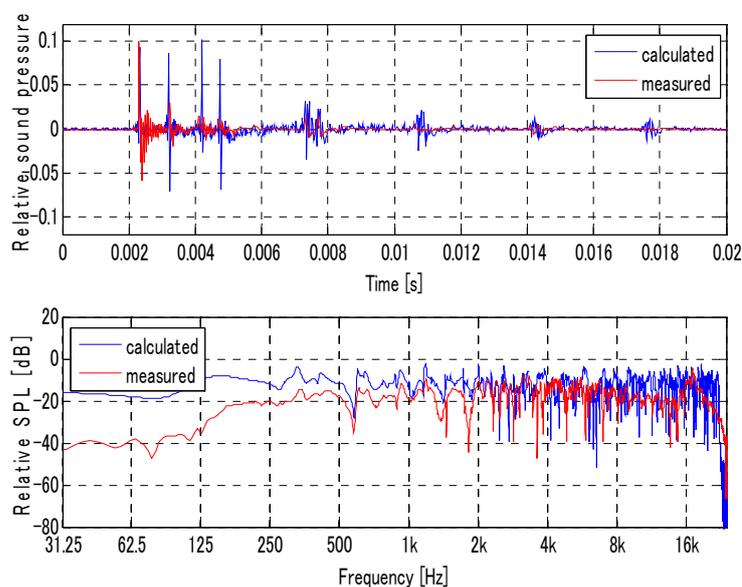


図 3.3.2.1 矩形パーティションの実測結果

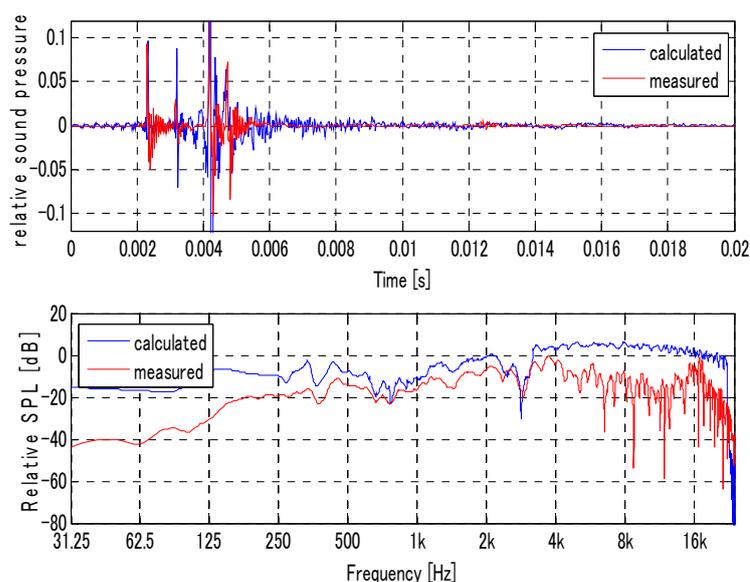


図 3.3.2.2 楕円パーティションの実測結果

3.4 解析結果

3.4.1 可視化

図3.4は音圧の可視化結果を示す。左が楕円パーティションで右が矩形パーティションである。音源は図3.2の話者と同じ位置を想定している。FDTD法により、音源としてガウシアンパルスを入力した場合の音圧分布の音圧を可視化した結果である。上下は各時間での音圧であり、上が5.63msで下が10.76msでの状況である。可視化の結果から、楕円パーティションの方では焦点の形成が確認できた。また、話者側である上方向に戻る波も確認でき、楕円パーティションの方がよりスピーチプライバシーが確保できると期待される。

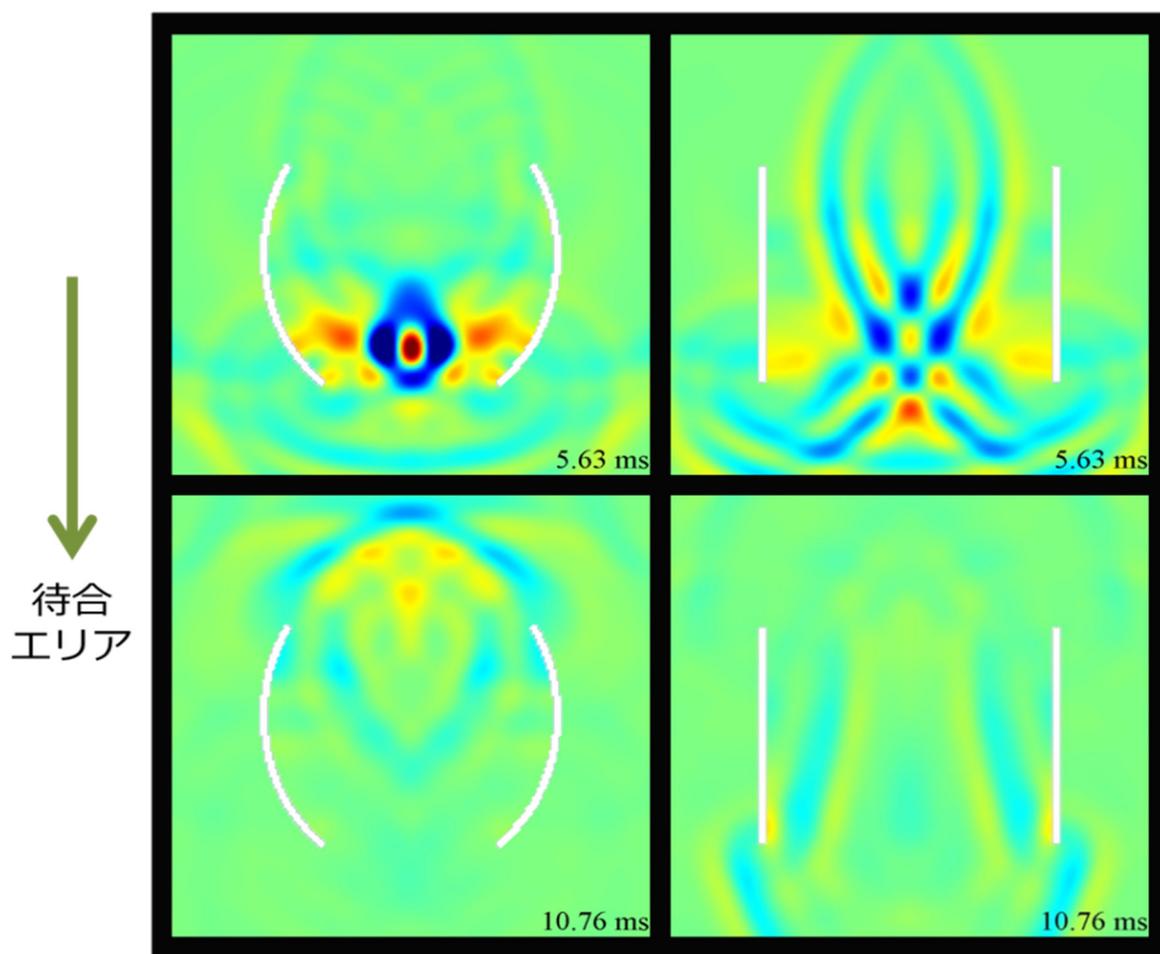


図 3.4 音圧の可視化

3.4.2 待合エリアの L_{AE} の分布

図 3.4.2.1 にパーティション後方にある待合エリアでの L_{AE} 分布を示す。ここでは焦点位置での L_{AE} が 0dB となるように音源出力を調整した。

パーティション後方にある待合エリアでの L_{AE} は楕円パーティションの方が 10dB 以上減少した。さらに図 3.4.2.2 は図 3.4.2.1 で各パーティション後方の L_{AE} 分布を別のカラーレンジで色分けしたものを示す。楕円パーティションの待合エリアでは下方方向になだらかに減少しており、音のエネルギーの流れが強く、楕円パーティションの方が待合エリアに抜ける音のエネルギーの指向性が強いことが確認できた。これは横方向にエネルギーが流れにくいことを意味しており、パーティション斜め後方ではさらに L_{AE} が減少している可能性があると考えられる。

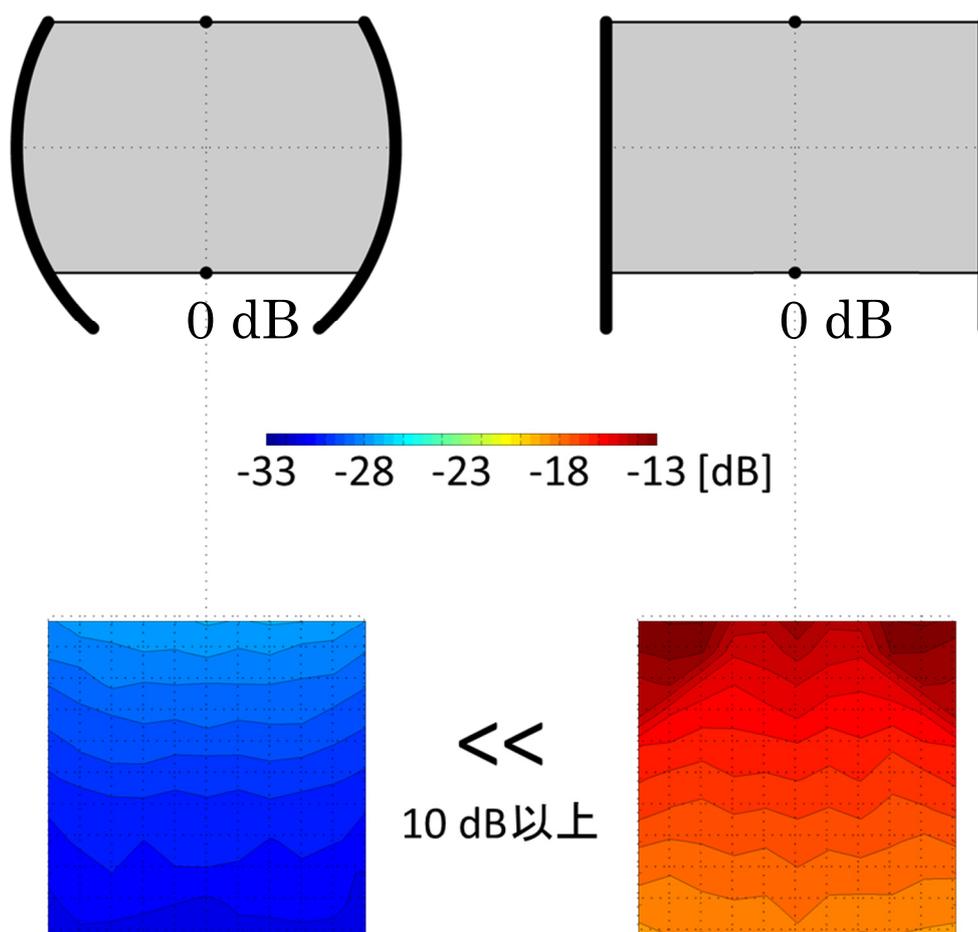


図 3.4.2.1 待合エリアの L_{AE} 分布

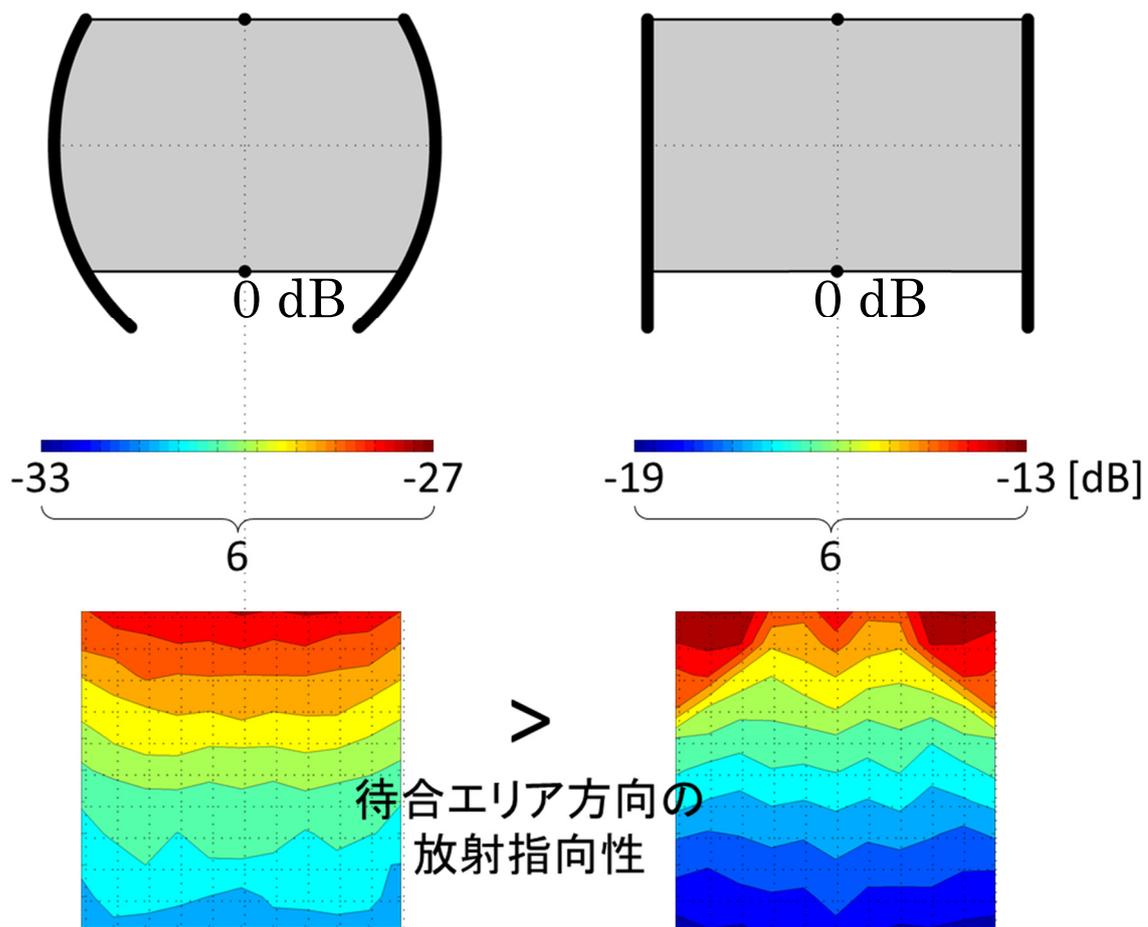


図 3.4.2.2 待合エリアの L_{AE} 分布

3.4.3 待合エリアの STI の分布

STI とは音声伝達のしやすさを示す指標であり、値が小さいほどスピーチプライバシーが確保されやすいことを意味する。

図 3.4.3.1 に各パーティション後方の待合エリアの STI の分布を示す。ここでは受音点近傍 9 点での平均 L_{AE} が 66dB となるように音源出力を調節した。

より実際の環境に近づけるために、暗騒音を NC40 の曲線で近似し、音源には AIJES のスピーチ特性を想定した。

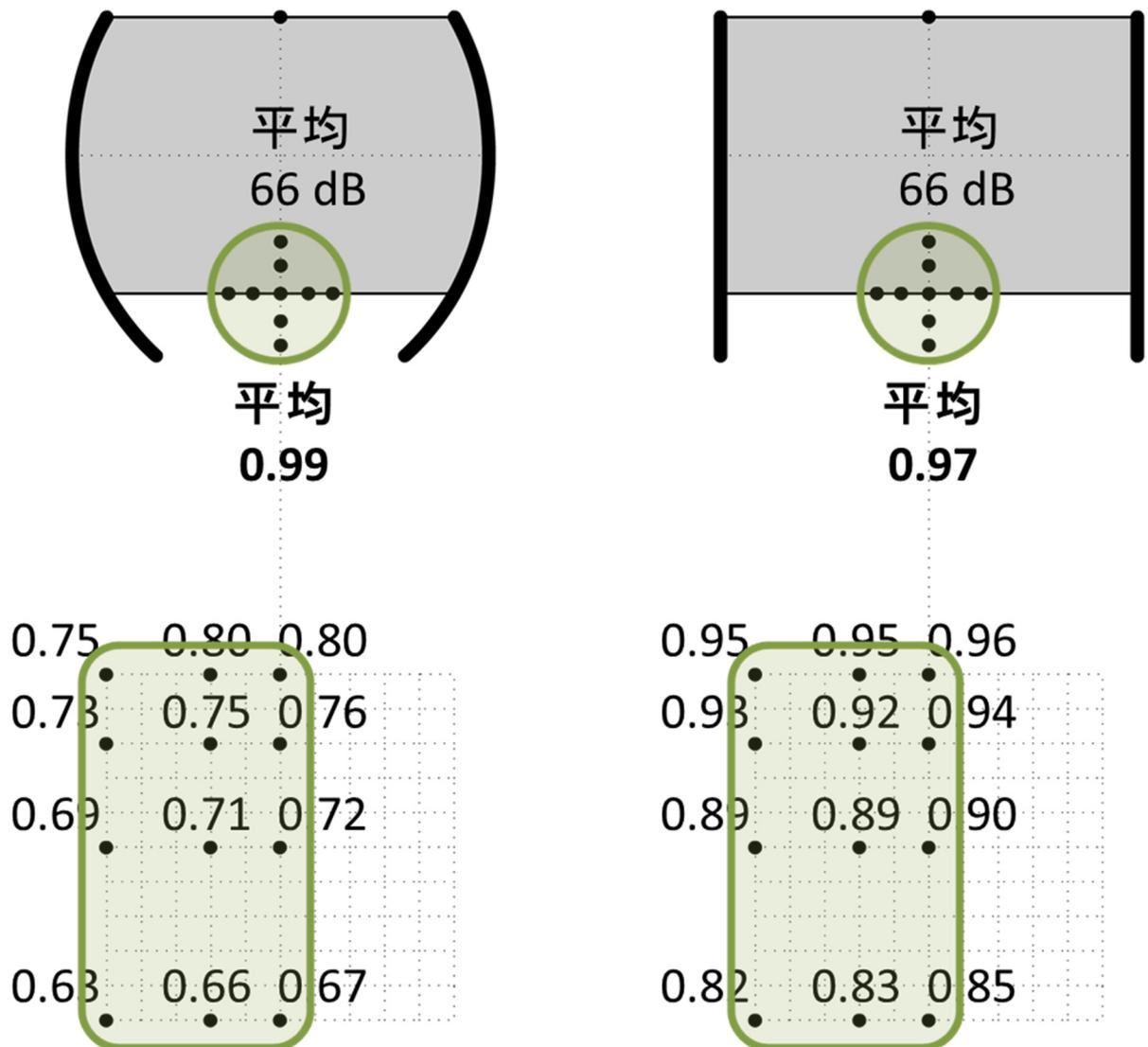


図 3.4.3.1 待合エリアの STI の分布

結果として待合エリアでの STI の平均は楕円パーティションでは 0.72、矩形パーティションでは 0.90 となり 1 ランク程度の差がみられた。受聴者に同じ大きさで音声聞こえる場合には、楕円パーティションの方がよりスピーチプライバシーが確保されると考えられる。

すなわち、これが実現されるためには仮説「楕円パーティション内で会話をすると矩形パーティション内で会話をするよりも小さい声になる」が成り立つことが必要である。

4 実験

仮説「楕円パーティション内で会話をするより矩形パーティション内で会話をするよりも小さい声になる」を証明するために以下のような実験を行った。

4.1 実験方法

被験者は以下の A~C の場合を考え、各パターンに 5 組 10 名ずつ用意した。

- A. 両者（話者となる店側、受聴者となる客側）とも本研究内容について無知
- B. 店側は本研究内容について既知、客側は無知
- C. 両者とも本研究内容について既知

被験者には各パーティションの焦点位置に頭部がくるように着座させた。

まず台本を 2 種類用意し、若干の練習の後にその内容を読ませた。台本 1 は銀行でのお金のやり取り、台本 2 では薬局での薬剤師と患者のやり取りを想定して作製した。内容は以下のとおりである。

・台本 1

- A 「今回少しお金をお借りしたいのですが。」
- B 「会社の資金ですか？おいくらのご予定ですか？」
- A 「400 万です。機材の投資に必要なんです。」
- B 「去年の決算を見せて頂きましたが赤字になっていますよね？失礼ですが、400 万も返済できるんですか？」
- A 「それについては、今新たな対策を考えているところでして…すぐにとは、けれども、今すぐお金は必要なんです。」
- B 「残念ですが、対策がはっきりしてない状況ですぐにお金をお貸しすることは出来ませんね。」

・台本 2

- A 「今回のお薬です。中身は三週間分で、白とピンクの錠剤になっています。」
- B 「この薬はなんの薬なんですか？」
- A 「白の方が症状を抑える薬で、ピンクの方は胃薬です。なので、食後に一つずつ飲んでください。」
- B 「胃薬は家に市販のやつがあるんですけど、そっちじゃダメですか？」
- A 「今回はこちらのピンクの方を飲んでいただければありがたいです。」
- B 「わかりました。」

また、「初恋」、「あなたの第一印象」、「自分の癖」、「昔の失敗談」という秘匿性の高いテーマをランダムにひとつ選び約 5 分間会話させた。

実験後には図 4.1.1 と図 4.1.2 に示すアンケートに答えさせた。

サンプリング周波数を 44100Hz とし、各パーティションの机の中央に三脚で固定したステレオマイクで、入力ゲインを一定にして会話を収録した。

アンケート1

年齢 () 性別 () 名前 () 実験日 ()

【矩形パーティションの場合】

1. 違和感がありましたか？

1	2	3	4	5
全くない	わずかにある	少しある	ある	とてもある

●2・3・4・5を選んだ方への質問

Q.どのような違和感でしたか？

2. 話しやすかったですか？

1	2	3	4	5
話しにくい	やや話しにくい	どちらでもない	やや話しやすい	話しやすい

3. 聞き取りやすかったですか？

1	2	3	4	5
聞きにくい	やや聞きにくい	どちらでもない	やや聞きやすい	聞きやすい

4. 何か気づいたこと、感じたことはありますか？

図 4.1.1 矩形パーティション用アンケート

アンケート2

年齢 () 性別 () 名前 () 実験日 ()

【楢円パーティションの場合】

1. 違和感がありましたか？

1	2	3	4	5
全くない	わずかにある	少しある	ある	とてもある

●2・3・4・5を選んだ方への質問

Q.どのような違和感でしたか？

2. 話しやすかったですか？

1	2	3	4	5
話しにくい	やや話しにくい	どちらでもない	やや話しやすい	話しやすい

3. 聞き取りやすかったですか？

1	2	3	4	5
聞きにくい	やや聞きにくい	どちらでもない	やや聞きやすい	聞きやすい

4. 何か気づいたこと、感じたことはありますか？

図 4.1.2 楢円パーティション用アンケート

4.2 実験結果

各パーティションで計測した音声の L_{Aeq} を比較した。比較の結果は表 4.2.1 に示す。また、音声データの 1 秒ごとの L_{Aeq} を算出し、それらの累積分布関数から $L95 \cdot L50 \cdot L05$ を得た。また L_{Aeq} の確率密度を Z 値に変換し、95%信頼区間を得た。ただし、の L_{Aeq} および $L95 \cdot L50 \cdot L05$ は本研究での相対値である。各パーティションの $L95 \cdot L50 \cdot L05$ の 95%信頼区間がお互いに含まれず、さらに矩形パーティション>楕円パーティションとなった場合を有効と考え、その割合を算出した結果を表 4.2.2 に示す。アンケートの結果は図 4.2.1 に示した。

信頼区間は以下の式で計算するものとする。

$$\text{信頼区間} = ax + b \pm t \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{S}} V$$

a : 回帰係数

b : 切片

t : スチューデントの t 分布の逆関数の値

n : データ数

S : 標本の平均値に対する引数の偏差平方和

x : 標本値

\bar{x} : 平均値

V : 誤差分布

表 4.2.1 計測した音声の L_{Aeq} の比較

既知-既知	台本1	台本2	テーマ
矩形	38.9 dB	38.3 dB	46.3 dB
楕円	38.9 dB	37.8 dB	44.8 dB
既知-無知	台本1	台本2	テーマ
矩形	42.2 dB	39.7 dB	43.1 dB
楕円	39.6 dB	39.6 dB	45.9 dB
無知-無知	台本1	台本2	テーマ
矩形	39.8 dB	40.3 dB	42.8 dB
楕円	40.2 dB	38.8 dB	42.0 dB

表 4.2.2 楕円パーティションが有効と考えられる割合

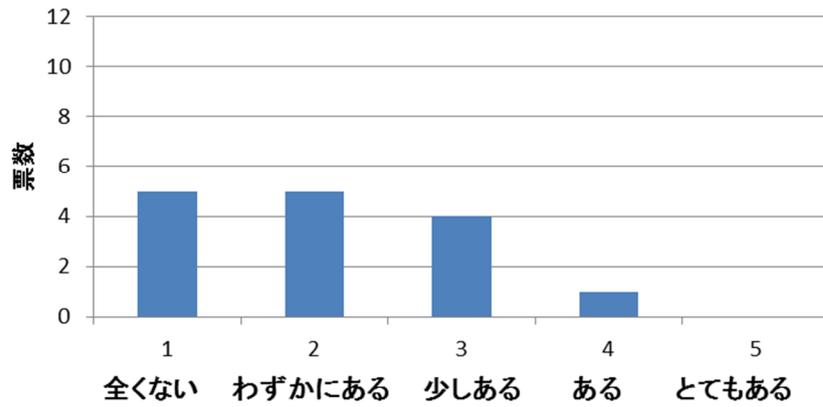
	L95		L50		L05
台本1	6.7 %	台本1	0 %	台本1	0 %
台本2	6.7 %	台本2	0 %	台本2	0 %
テーマ	13.3 %	テーマ	0 %	テーマ	0 %

表 4.2.1 より全体の L_{Aeq} に楕円パーティションと矩形パーティションでは大差は見られなかった。また、表 4.2.2 からは L95 の位置では微少ではあるが有効性は見られたが、その他 L50、L05 では全く有効性は見られなかった。

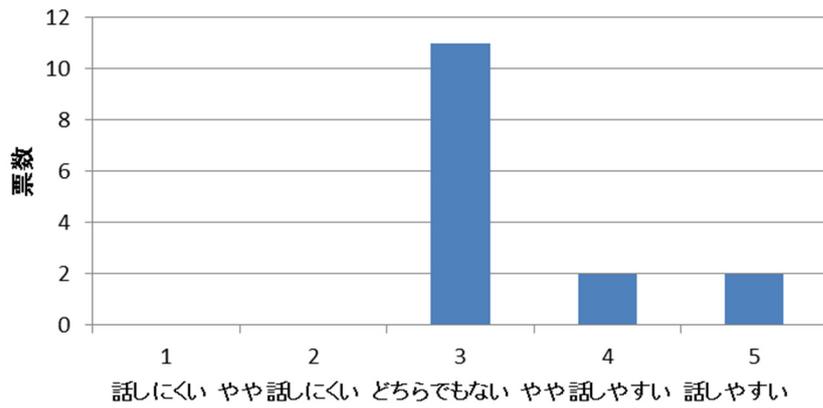
結果から実際に楕円パーティションで対話し、相手の声がよく聞こえることと、自分の声を小さくして話すことは無関係であることが分かった。

図 4.2.1 からは無知のアンケートでは大きな変化は確認できなかったが、既知のアンケートでは質問 1・2・3 とともに指標 5 側に票数が移動していることが確認できた。無知のアンケートは反応がなく、既知のアンケートで反応があったことから、これは研究内容を知っているが故に敏感に違和感、話しやすさ、聴きやすさを感じ取った結果だと考えられる。

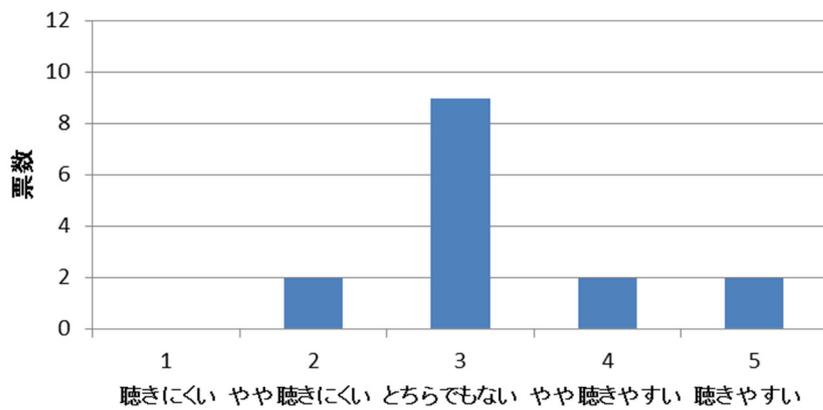
既知・矩形・質問1



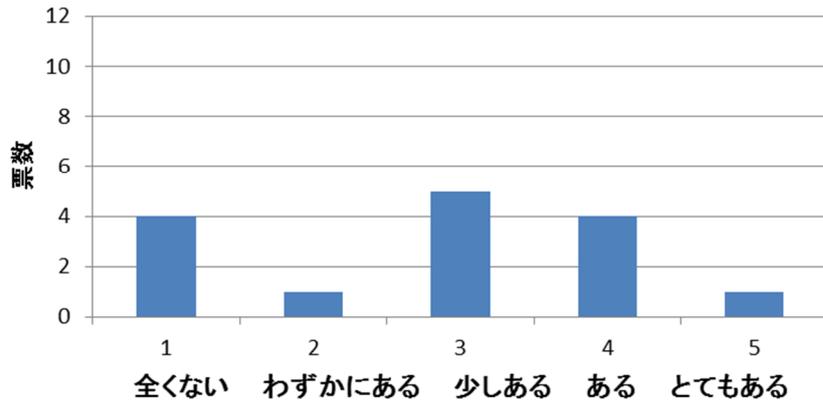
既知・矩形・質問2



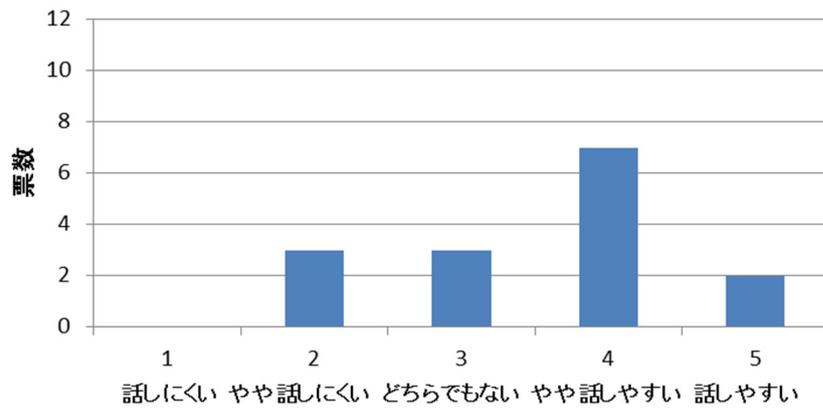
既知・矩形・質問3



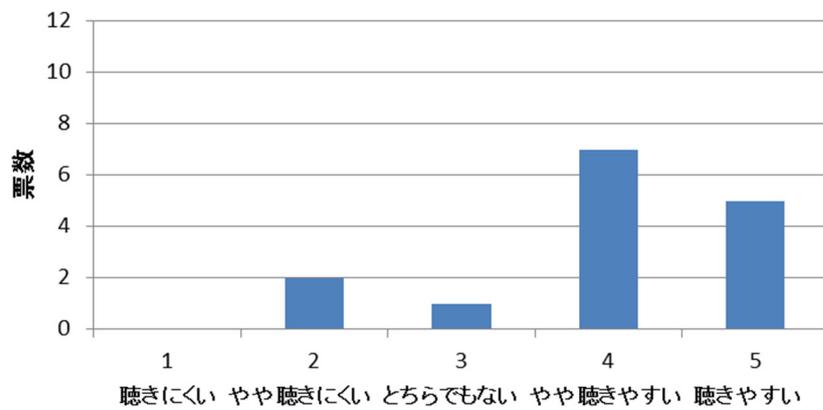
既知・楢円・質問1



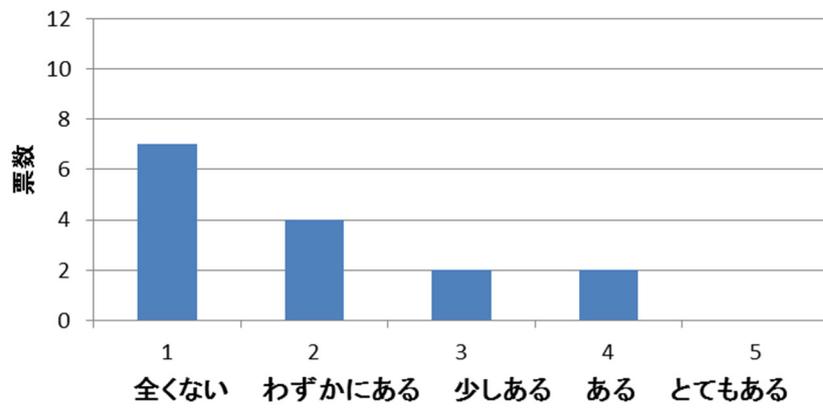
既知・楢円・質問2



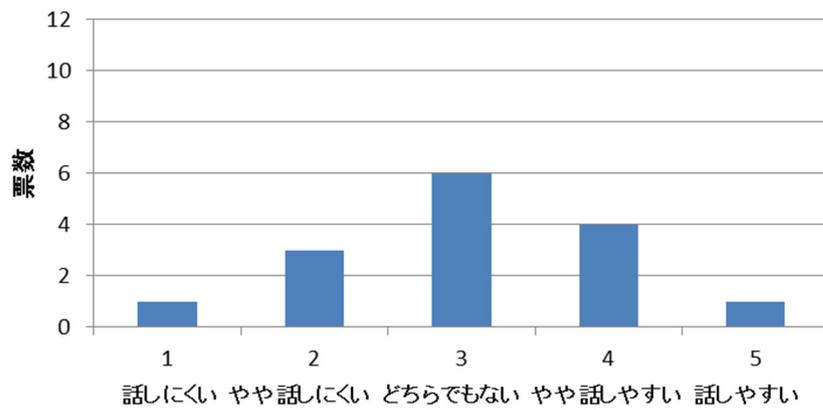
既知・楢円・質問3



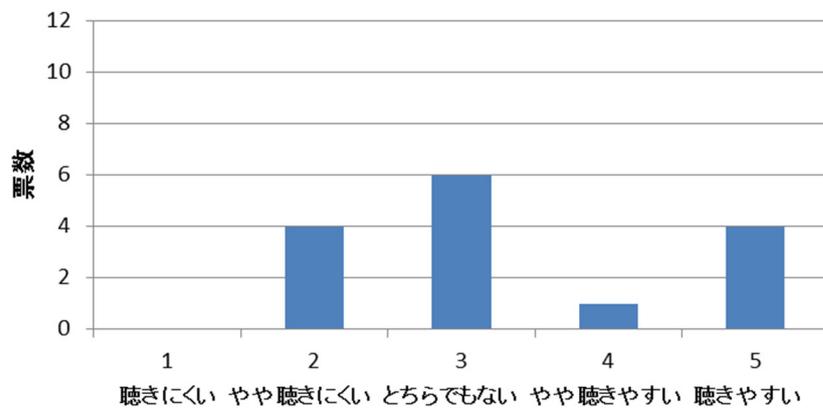
無知・矩形・質問1



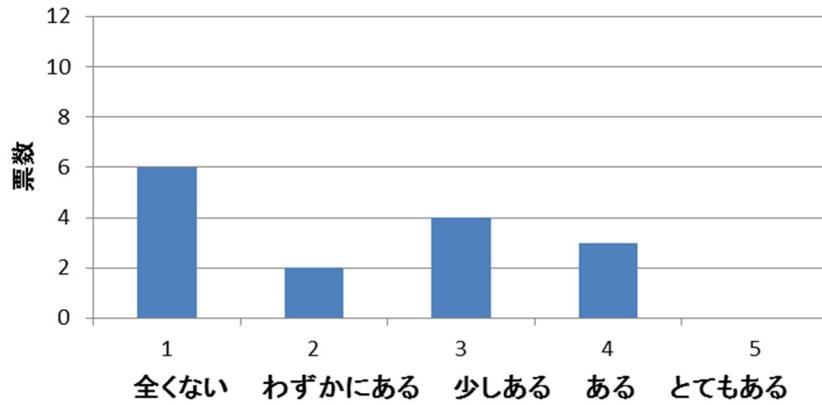
無知・矩形・質問2



無知・矩形・質問3

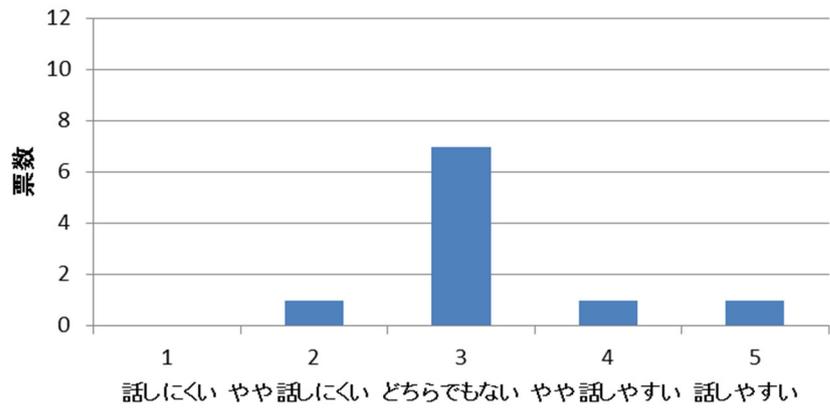


無知・楢円・質問1



+

無知・楢円・質問2



無知・楢円・質問3

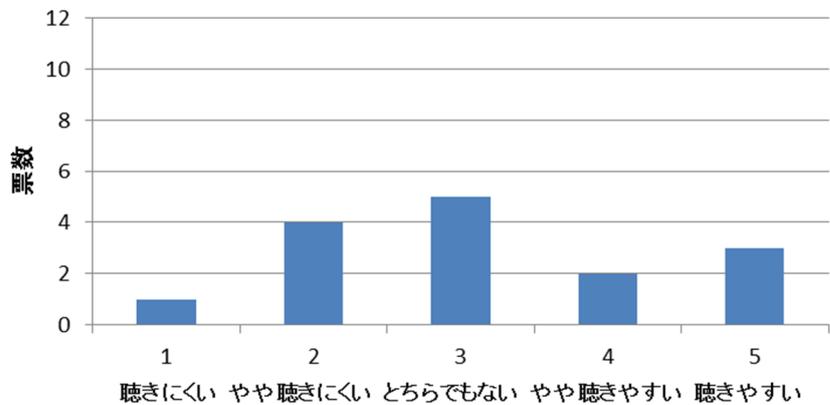


図 4.2.1 アンケート結果

5 総括

5.1 まとめ

本研究ではスピーチプライバシー確保のために楕円パーティションを提案した。音圧を可視化した結果により焦点を確認、楕円パーティションの方がより話者音声を受聴点で大きく聴こえることが明確となった。また、計算結果を実測結果と比較し、計算の妥当性を示した。

受聴点での音量が等しくなると想定した場合の待合エリアの L_{AE} の分布では、楕円パーティションで待合エリアの L_{AE} が 10dB 以上減少し、さらに楕円パーティションの方が待合エリアに抜ける音のエネルギーの指向性が強いことが確認できた。また、STI の分布では、楕円パーティションと矩形パーティションでは 1 ランク程度の差がみられ、楕円パーティションの方がよりスピーチプライバシーが確保された。

しかしながら実験の結果では、両パーティションに有効な差は見られず、アンケート結果からは研究内容について既知な者だけに反応があった。従って本研究の仮説は棄却され、相手の声がよく聴こえるようになることだけでは話者音声は減少しないことが分かった。

5.2 今後の課題

本研究で仮説「楕円パーティション内で会話をするより矩形パーティション内で会話をするよりも小さい声になる」が実際に成り立たないことがわかったので、こういった状況になると話者音声が増加するのかを明確にすることが今後の課題である。

話者音声が減少する条件が判明すると、その条件を楕円パーティションに反映することができればパーティションの形状だけでスピーチプライバシーの確保の性能が向上でき、さらに ABC ルールによる効果の付加することでより大きな効果が得られることが期待される。さらに、既存の方法以外の新たなアプローチによりスピーチプライバシーを確保する方法が考えられるものと思われる。

謝辞

研究を進めるにあたり、お忙しい中数々のご指導ご鞭撻を頂いた豊田政弘先生には厚く御礼申し上げます。また、ご議論を通して多くの知識や示唆を頂いた鹿島技術研究所の矢入幹記さんに感謝いたします。最後に、ご協力いただいた建築環境工学第一研究室の先輩や同期の皆様にも大変お世話になりました。心より御礼申し上げます。