

令和6年度卒業論文

Ambisonics に基づく
立体音響再生技術の方向定位実験

関西大学 環境都市工学部 建築学科

建築環境工学第1研究室

建 21-0020 織田智也

指導教員 豊田政弘

目次

1. 緒言	
1.1 研究背景	1
1.2 既往研究	2
1.3 研究目的	3
2. 研究内容	4
2.1 Ambisonics の概要	4
2.2 Ambisonics の理論	5
3. 研究方法	6
3.1 使用した機材・ソフト	6
3.2 音源作成	8
3.3 実験方法	9
3.4 聴感評価	10
4. 研究結果	12
4.1 バブルチャート	12
4.2 正答率	27
4.3 角度差	28
4.4 考察	30
5. 結言	31
参考文献	32
付録	33

1. 緒言

1.1 研究背景

近年、立体音響再生技術は急速に発展しており、特に VR (Virtual Reality、仮想現実) や AR (Augmented Reality、拡張現実) の普及に伴い、多種多様な三次元音場再現手法が提案されてきた。三次元音場再現手法とは、上下、左右、前後といった三次元な音の到来方向や、音像までの距離、音の拡がりなどを再現する手法のことである。三次元音場再現にはいくつかの技術的アプローチがあり、それぞれの手法が拠り所とする概念が違う。それぞれの手法ならではの特性があるため、その特性を十分に活かせるよう、目的や使用環境によって手法を選択する必要がある。

三次元音場再現は音環境を立体的に再現することが出来るため、建築分野においては室内の音響設計に利用されている。良い音響空間を必要とするコンサートホールなどの施設は、設計段階で想定する室形状や吸音材などの音響的処置がその空間の良し悪しに直結するため、事前の聴感的な予測や評価は非常に重要である。この際、三次元音場再現手法を用いて、設計段階の音場を再現することが出来れば、設計意図通りの音響的処置の効果が得られているかどうか、その効果が得られていない場合は、どこを改善したら良くなるのかという試行錯誤を効率的に行うことができるようになり、結果、より良い建築物を建設することが出来る。

1.2 既往研究

前節で述べたように、三次元音場再現手法には様々な手法があるが、本研究の研究対象である Ambisonics は、1970 年代にイギリスの Gerzon ら[1]によって提唱され、その後、高次 Ambisonics (HOA)の開発、Poletti の理論体系[2]の研究により音場の再現性が向上している。しかし、HOA を用いて厳密に音場を再現するには、理論的には無数のスピーカーが必要であるため、スピーカーの数を減らす場合、その厳密性は徐々に損なわれ、音場が再現される領域を縮小する形で影響を及ぼすことが分かっている。また、チャンネル数の増加に伴い、データ処理の負荷上昇が問題となる。実用例として、YAMAHA の ViReal [3]や東北大学の SENZI [4]などが挙げられるが、どちらもスピーカーの数が多く、コストが高くなっている。また、Ambisonics を実用した際に、どの程度正確に立体的な音環境が再現されているかの評価は未だ十分でないと考えられる。

1.3 研究目的

前節で述べた Ambisonics の問題点・課題から、スピーカーの数を減らしても頭部付近で十分に再現がされているならば、少なくとも一人で聴くには支障がないと考える。そこで、本研究では、HOA の理論を用いて、スピーカーを減らしたことにより、どの程度頭部付近での再現性が損なわれるのかを明らかにすること、また、仮想的な点音源のみを想定し、立体的な音環境が再現されているかを、方向定位精度に着目して検証・評価することを目的とし、実験を行うこととした。

2. 研究内容

2.1 Ambisonics の概要

Ambisonics とは立体音響技術、すなわち、三次元音場再現手法の一つである。音場の球面調和展開に基づき、複数のスピーカーからの合成出力により、受聴者近傍の領域内の任意の位置の音圧を再現するものである。これにより、受聴者から見てあらゆる方向への音像定位が可能となる。また、Ambisonics の特徴として、収音系（エンコード）と再生系（デコード）を分離して考えることが可能である。このことから、それぞれの音の動きや位置を再現音場の中に有したまま、その音場を自由に回転でき、非常に柔軟に再現できるという利点がある。

2.2 Ambisonics の理論 [2]

球面座標 (r, θ, ϕ) では、波動方程式の解は第 1 種球ベッセル関数 j_n と球面調和関数 Y_n^m を用いて記述することができ、音場の任意点の音圧 p は、

$$p(r, \theta, \phi, k) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n A_n^m(k) j_n(kr) Y_n^m(\theta, \phi) \quad (1)$$

と表せる。ここで、 p は音圧、 r は距離、 θ は天頂角、 ϕ は方位角、 n は次数、 m は位数、 A_n^m は球面調和展開係数である。

一方、点音源から受聴点までの Green 関数の球面調和展開は(2)式のように表すことが出来る。

$$G(r|r_s) = ik \sum_{n=0}^{\infty} j_n(kr) h_n(kr_s) \sum_{m=-n}^n Y_n^m(\theta, \phi) Y_n^m(\theta_s, \phi_s)^* \quad (2)$$

ここで、 G は Green 関数、 r は受聴点位置、 r_s は点音源位置、 h_n は球ハンケル関数、 $*$ は複素共役である。

(1)、(2)式の左辺が等しいとすれば、

$$A_n^m(k) = ik h_n(kr_s) Y_n^m(\theta_s, \phi_s)^* \quad (3)$$

となり、 $A_n^m(k)$ を求めることが出来る。この処理をエンコードと呼ぶ。

また、これをデコードしたスピーカーからの出力 \hat{w} は

$$\hat{w} = \Psi^T [\Psi \Psi^T]^{-1} H^{-1} A \quad (4)$$

と表せる。ここで、 Ψ はモード行列、 H は対角行列であり、それぞれ、

$$\Psi_{v,l} = Y_n^m(\theta_l, \phi_l)^* \quad (5)$$

$$H = \begin{pmatrix} ikh_0(kR) & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & ikh_1(kR) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & ikh_1(kR) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & ikh_1(kR) & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & ikh_N(kR) \end{pmatrix} \quad (6)$$

と表せる。ここで、 l はスピーカーの番号、 R は受聴点からスピーカーまでの距離である。また、 A は(3)式の A_n^m をベクトル表示したものである。

3. 研究方法

本研究は、1.3 節の研究目的で述べたように、頭部付近での音場再現性がどの程度損なわれるのかを明らかにすること、また、仮想的な点音源のみを想定し、立体的な音環境が適切に再現されているかを、方向定位精度に着目して検証・評価することを目的としている。そこで本研究では、まず、2.2 節の Ambisonics の理論を基にプログラムを作成し、これを用いて実験に必要な音源を作成した。次に、作成した音源を使用して、方向定位実験を実施した。

3.1 使用した機材・ソフト

プログラム作成、実験に使用したソフトウェアを以下に示す。

- ・分析ソフト：MathWorks MATLAB

MATLAB は関数やアルゴリズム開発、行列計算、GUI など様々なことができるインタープリンタ型のプログラミング言語である。収録した音源を数値計算処理し、素早くグラフの作成ができるため、物理的評価として扱うことができる。そのため、本研究ではこれを使用する。

引用：<https://jp.mathworks.com/products/matlab.html>

- ・再生ソフト：Steinberg Cubase pro 12 (図 3.1-1)

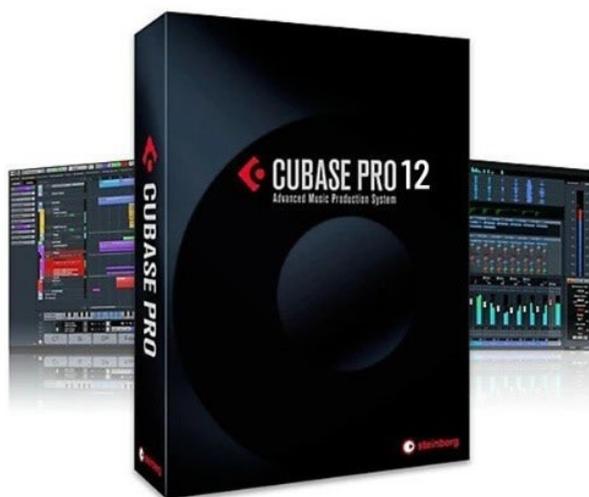


図 3.1-1 再生ソフト

引用：https://japan.steinberg.net/jp/support/downloads/cubase_12/cubase_pro_12.html

次に、実験に使用した機材を以下に示す。

- ・スピーカー：GENELEC 8050B (図 3.1-2)



図 3.1-2 スピーカー

引用：<https://item.rakuten.co.jp/auc-maskdb/genelec8050bpm/>

- ・オーディオインターフェイス：RME Fireface UCX II (図 3.1-3)



図 3.1-3 オーディオインターフェイス

引用：<https://item.rakuten.co.jp/rockonline/71077/>

3.2 音源作成

2.2 節の Ambisonics の理論で述べたスピーカーの出力式を基に、仮想的な点音源のみを想定したスピーカーの出力比率を求めるプログラムを MATLAB で作成した。この際のスピーカー位置は、**図 3.2-1** に示す実験装置の写真に従い、以下の 6 つの位置に設定した：① 右斜め前 45 度、② 左斜め前 45 度、③ 左斜め後ろ 45 度、④ 右斜め後ろ 45 度、⑤ 真上、⑥ 真下。



図 3.2-1 実験装置写真

次に、作成したプログラムを用いて、ホワイトノイズにバンドパスフィルタを適用し、62.5 Hz、125 Hz、250 Hz、500 Hz、1 kHz、2 kHz、4 kHz を中心周波数とした 7 種類の 1 オクターブ帯域制限ノイズを作成した。これらの帯域制限ノイズに、各スピーカーの出力比率をかけ、各スピーカーの出力信号とした。

想定する点音源位置は、方位角（前後左右方向を示す角度）と仰角（上下方向を示す角度）の 2 つの角度で制御した。方位角は正面を 0 度、真後ろを 180 度とし、左右対称性を考慮して左側のみを対象とした。仰角については、真上を 90 度、真下を -90 度とし、方位角及び仰角をそれぞれ 30 度ごとに分割することで、（方位角 7 通り × 仰角 5 通り + 真上 1 通り + 真下 1 通り） × 周波数 7 通りの計 259 通りの音響信号を作成した。

3.3 実験方法

前節で作成した計 259 通りの音響信号を再生ソフトウェア Steinberg Cubase pro 12 に取り込み、方向定位実験を実施した。取り込む際には、各スピーカーと対応する音源が適切に一致するように設定に注意を払った。また、音響信号を再生する順番はランダムに設定し、被験者には再生される音像の方向を回答させた。回答方法についての詳細は、3.4 節の聴感評価にて説明する。

実験は、関西大学建築環境工学第 1 研究室に設置された無響室内の立体音響装置を用いて実施した。実験の手順として、まず 4 kHz の周波数から開始し、順次 2 kHz、1 kHz と低い周波数へと下げていくように実験を行った。実験中、被験者は首を自由に動かしても良いと教示し、自然な聴取姿勢での評価を行った。

音源再生の詳細条件として、各音源の再生時間は 3 秒間、音源間のインターバルは 10 秒間と設定し、その間に被験者に回答を求めた。実験は、各周波数帯域において練習問題 3 問と本問題 37 問の計 40 問を実施し、これを 7 つの周波数帯域で繰り返した。練習問題は本問題から抜粋したものであり、被験者が実験に慣れるための予備的な実験手順として設けた。

3.4 聴感評価

被験者 10 名に対し、各音源の聴音回数を 1 回ずつとしてランダムに聴取させ、方位角および仰角をそれぞれ 10 度ごとに分割して評価させた。方位角は 1 から 19 までの番号で、仰角は A から S までのアルファベットでナンバリングした図 (図 3.4-1) を用意し、これを添付した回答シート (図 3.4-2) を作成した。実験時には被験者にこの回答シートを用いて聴取した音像の方向を記録させた。被験者 1 人当たりから 259 回答を収集し、被験者 10 名から計 2590 回答を得た。

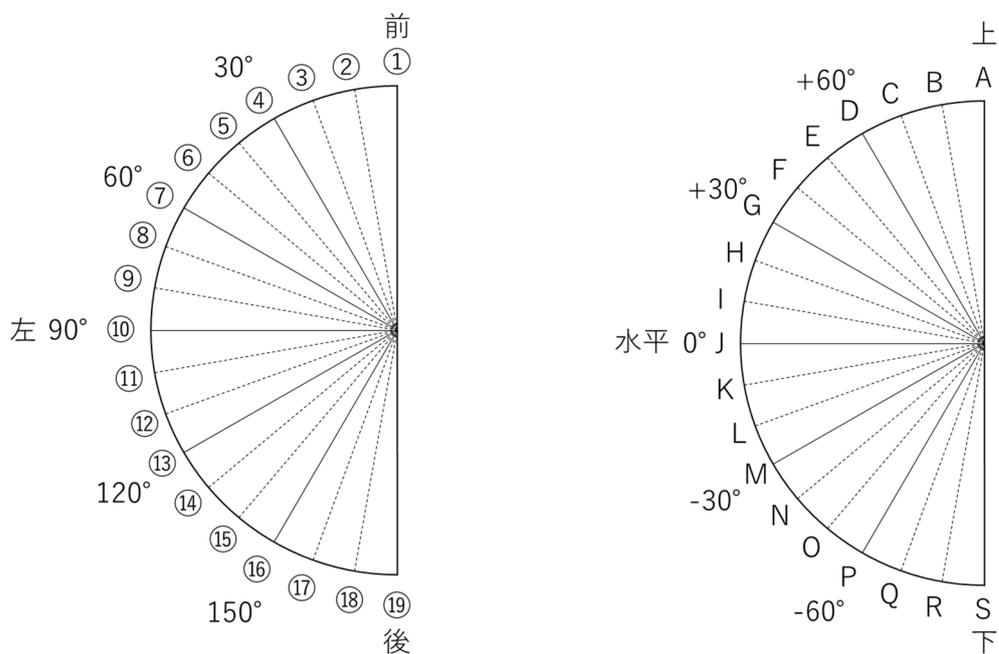


図 3.4-1 ナンバリングした図

4. 研究結果

前節の聴感評価から得たデータ計 2800 回答のうち、練習問題分を除いた、計 2590 回答を対象に分析を行った。分析方法はバブルチャート[4.1]を主とした。しかし、バブルチャートは 3 つの変数を視覚的に表現し、データ間の複雑な関係性を理解することに長けている反面、具体的な数値を用いて表現出来ないという欠点がある。そこで、本研究では、バブルチャートの欠点を補うべく、7 種類の周波数帯域についての正答率[4.2]と角度差[4.3]についても分析を行った。

4.1 バブルチャート

本研究では、横軸に提示角度（想定した点音源の角度）、縦軸に回答角度（被験者が回答した角度）を設定し、さらにバブル（円）の大きさを回答人数とした。図の対角線上に引かれている実線は、提示角度と回答角度が一致している正答ラインを表しており、破線は、提示角度を前後逆に認識した回答角度が示された正反対のラインである。この破線は、方位角における前後の対称性を考慮した基準線となっているが、仰角においては非対称であるため、点線は無関係である。

図 4.1-1、図 4.1-2、図 4.1-3、図 4.1-4、図 4.1-5、図 4.1-6、図 4.1-7 は仰角を考慮せず、すなわち、仰角がいずれであっても方位角の回答のみに着目し、7 つの周波数帯域ごとにまとめたバブルチャートである。一方、図 4.1-8、図 4.1-9、図 4.1-10、図 4.1-11、図 4.1-12、図 4.1-13、図 4.1-14 は方位角を考慮せず、すなわち、方位角がいずれであっても仰角の回答のみに着目し、7 つの周波数帯域ごとにまとめたバブルチャートである。なお、仰角が 90 度、 -90 度については、他の仰角の値との比較のため、結果を 7 倍して表示している。

なお、ここでは方位角、仰角共に統合的な結果を示し、分析・考察を行った。30 度ごとに分割した方位角、仰角の詳細な結果に関しては、巻末の付録に掲載した。

方位角方向バブルチャート

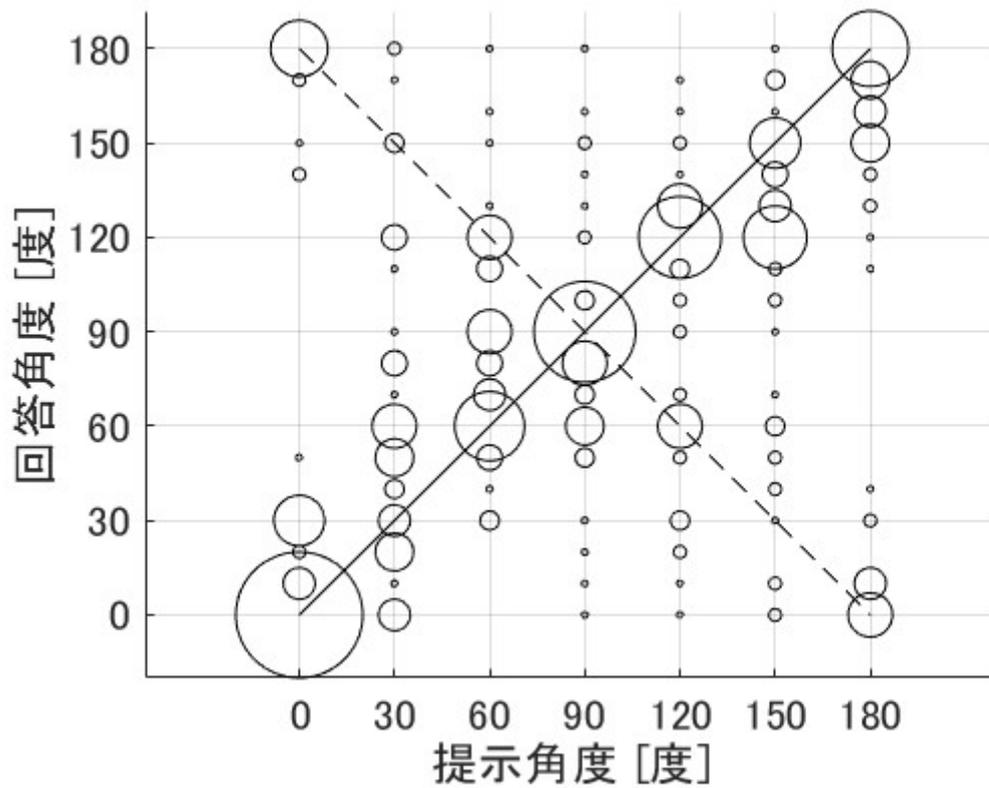


図 4.1-1 方位角 62.5Hz のバブルチャート

方位角に着目した 62.5 Hz のバブルチャートを図 4.1-1 に示す。正面、真横、真後ろといった比較的分かりやすい角度で正答ライン上に大きな円が見られる反面、60 度、120 度では正反対のライン上に中程度の大きさの円が見られることから、前後どちらから音が鳴っているかを被験者が正確に認知できていないことが読み取れる。しかし、角度誤差が正答ラインの前後 30 度に回答が集中していることから、若干の正の相関を得られていることが読み取れる。

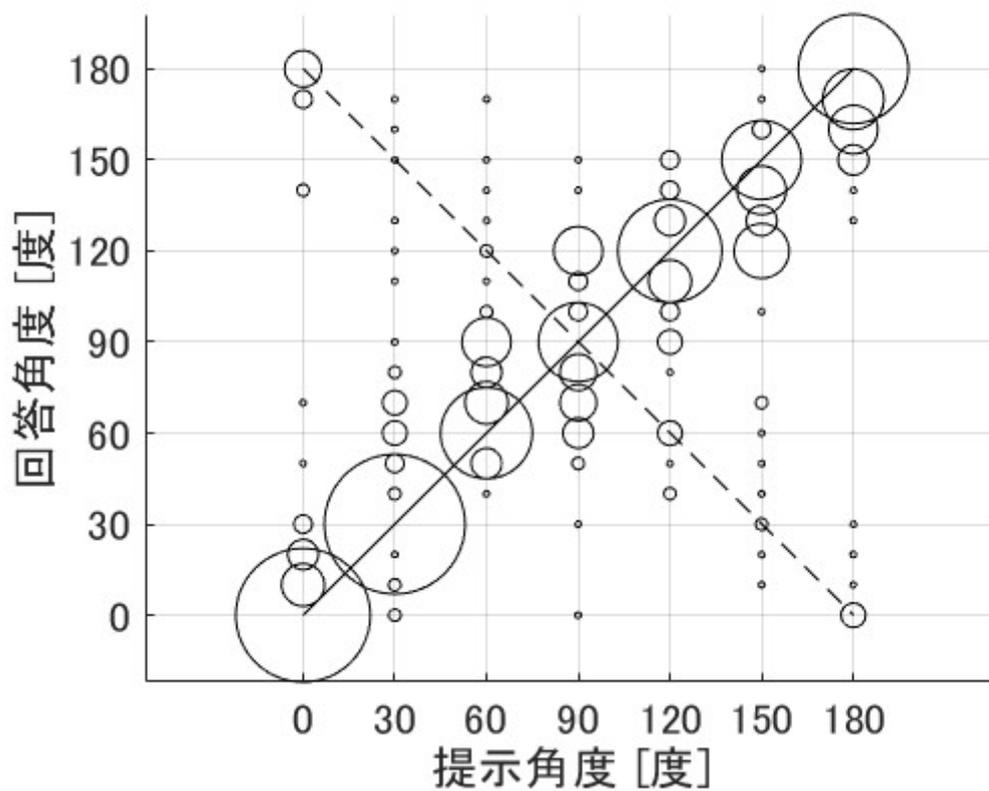


図 4.1-2 方位角 125Hz のバブルチャート

方位角に着目した 125 Hz のバブルチャートを図 4.1-2 に示す。250 Hz を除く他の 5 つの周波数帯域に比べ、各角度で正答ライン上に大きな円が見られ、正反対のライン上には大きな円や中程度の円が見られないこと、角度誤差が正答ラインの前後 30 度に回答が集中していることから、比較的綺麗な正の相関を得られていることが読み取れる。

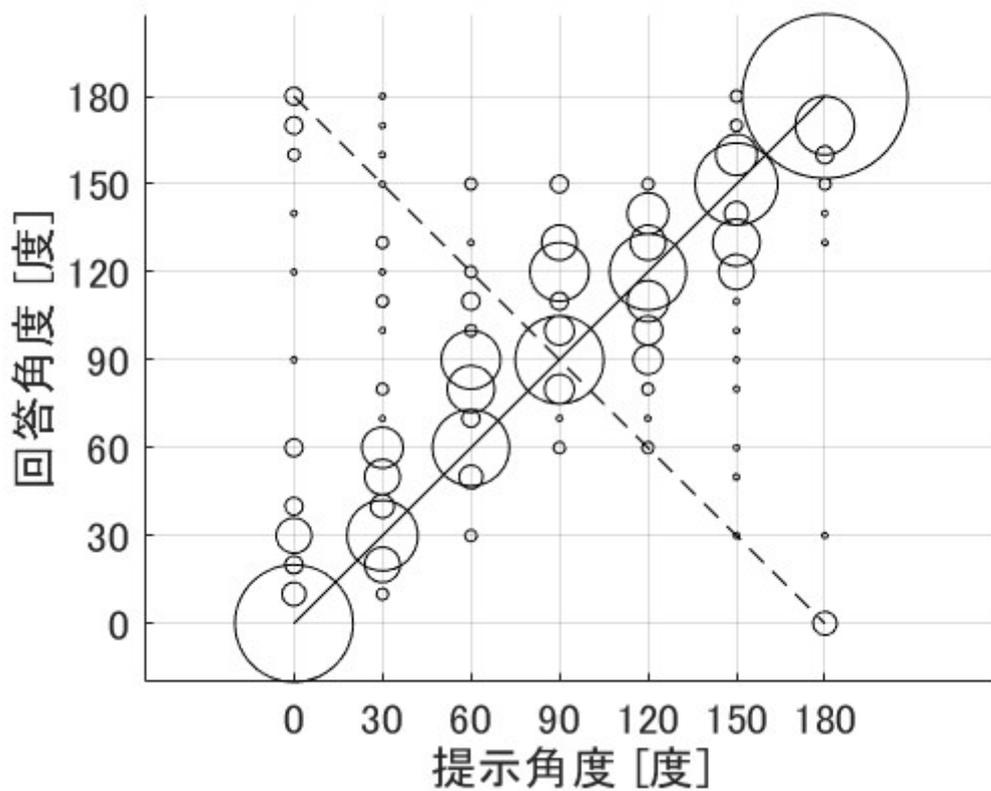


図 4.1-3 方位角 250Hz のバブルチャート

方位角に着目した 250 Hz のバブルチャートを図 4.1-3 に示す。125 Hz の場合と同様、各角度で正答ライン上に大きな円が見られ、正反対のライン上には大きな円や中程度の円が見られないこと、角度誤差が正答ラインの前後 30 度に回答が集中していることから、比較的綺麗な正の相関を得られていることが読み取れる。

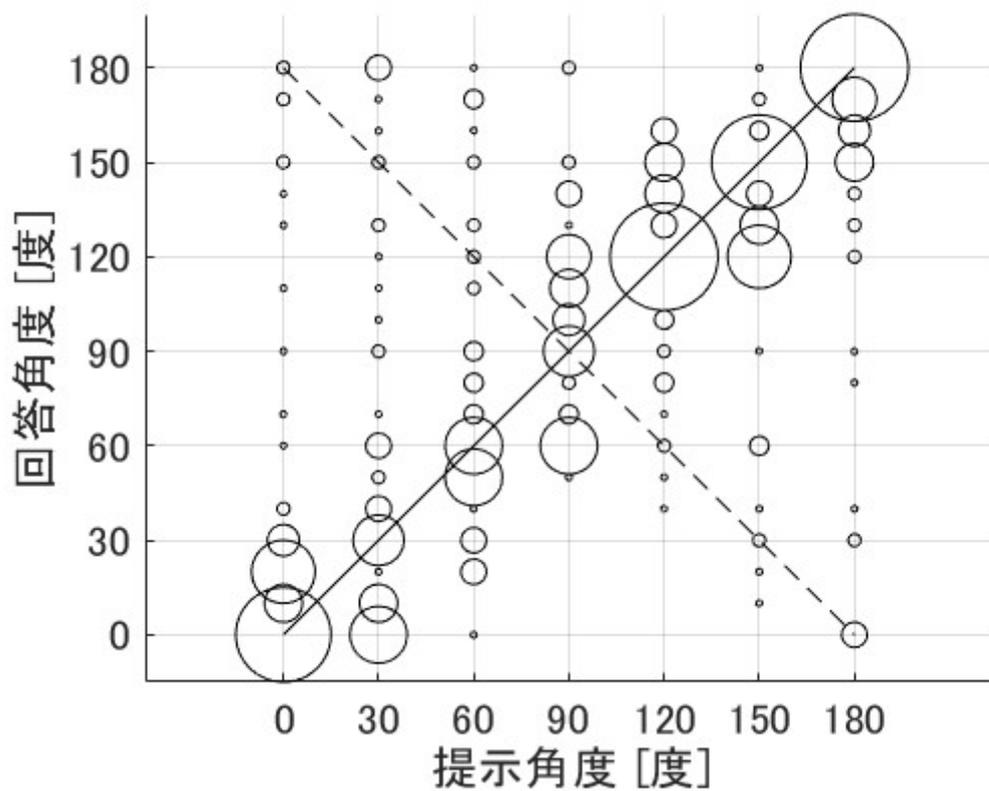


図 4.1-4 方位角 500Hz のバブルチャート

方位角に着目した 500 Hz のバブルチャートを図 4.1-4 に示す。後ろ方向（真横から真後ろ間）の角度で正答ライン上に大きな円が見られる反面、前方向（正面から真横間）の角度では、小さな円がまばらに存在することから、前方向に関しては、どこから音が鳴っているかを被験者が正確に認知できていないことが読み取れる。しかし、角度誤差が正答ラインの前後 30 度に回答が集中していることから、こちらも若干の正の相関を得られていることが読み取れる。

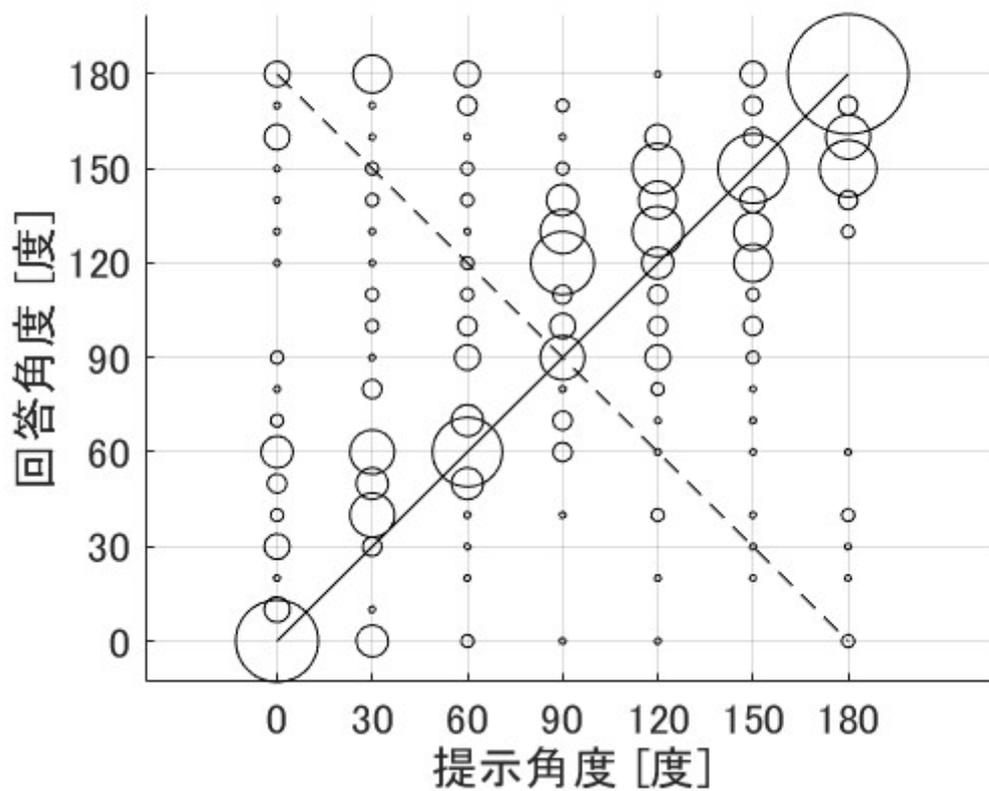


図 4.1-5 方位角 1000Hz のバブルチャート

方位角に着目した 1000 Hz のバブルチャートを図 4.1-5 に示す。後ろ方向（真横から真後ろ間）角度で正答ライン上に大きな円が見られる反面、500 Hz よりも前方向（正面から真横間）の角度では、小さな円がまばらに存在することから、前方向に関しては、どこから音が鳴っているかを被験者が正確に認知できていないことが読み取れる。しかし、角度誤差が正答ラインの前後 30 度に回答が集中していることから、こちらも若干の正の相関を得られていることが読み取れる。

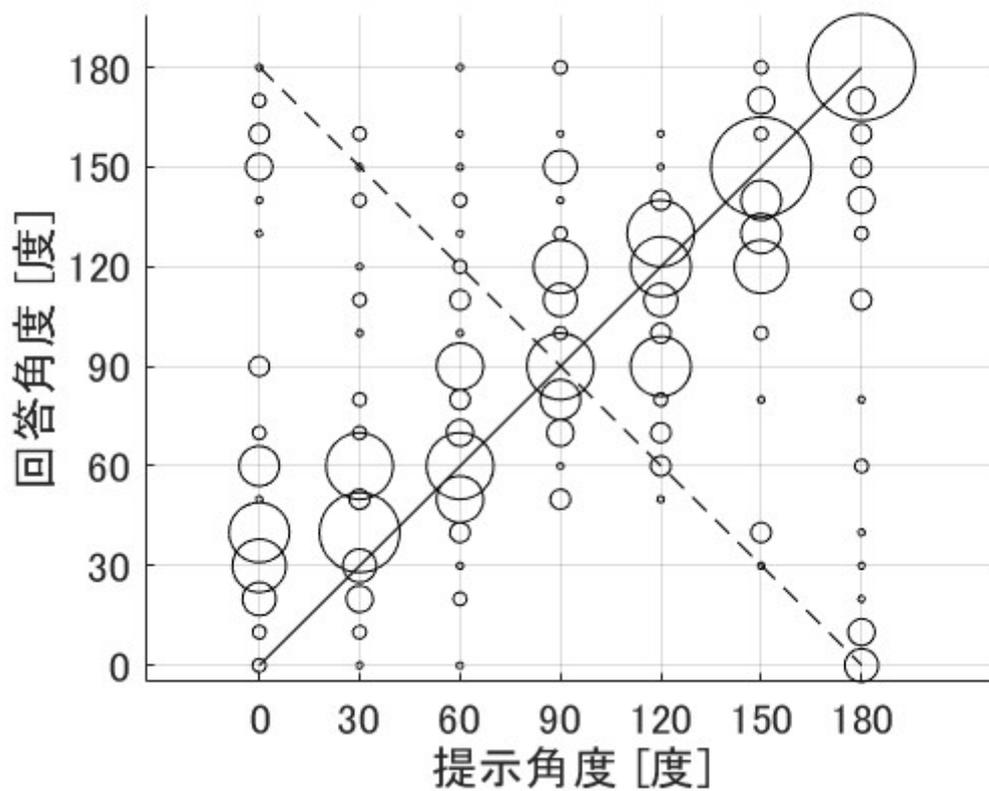


図 4.1-6 方位角 2000Hz のバブルチャート

方位角に着目した 2000 Hz のバブルチャートを図 4.1-6 に示す。500 Hz 同様、後ろ方向（真横から真後ろ間）の角度で正答ライン上に大きな円が見られ、前方向（正面から真横間）の角度においても、正答ライン上の円は小さいが、角度誤差が正答ラインの前後 30 度に回答が集中していることから、若干の正の相関を得られていることが読み取れる。

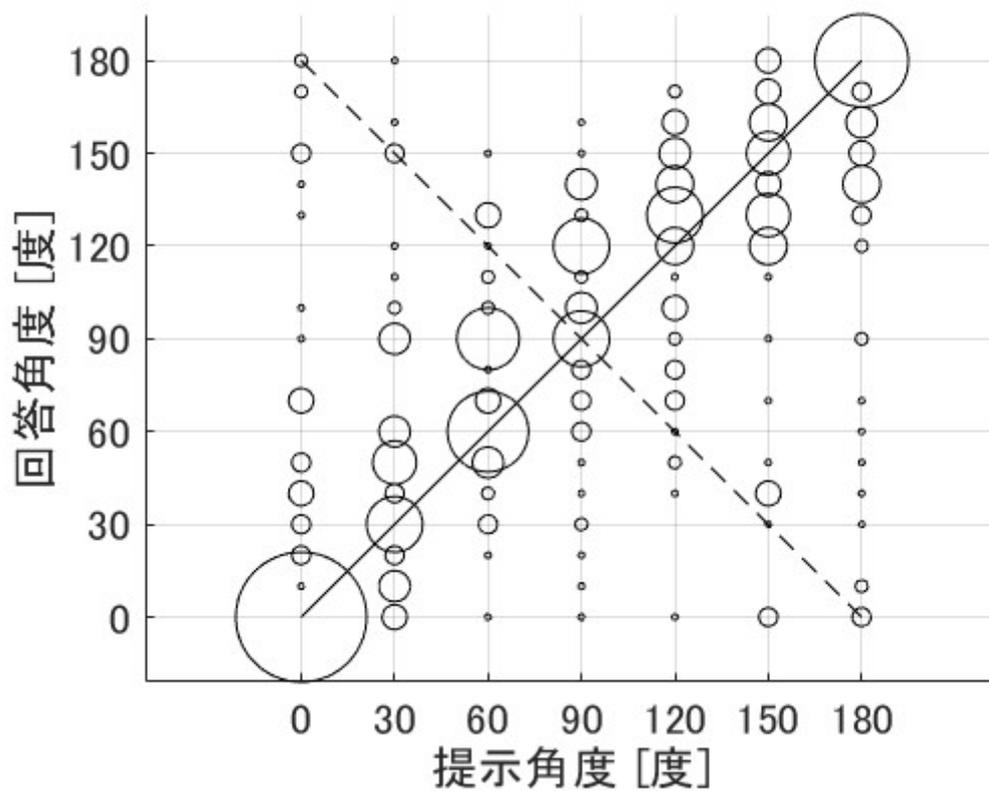


図 4.1-7 方位角 4000Hz のバブルチャート

方位角に着目した 4000 Hz のバブルチャートを図 4.1-7 に示す。正面、真後ろに大きな円が見られ、正答ライン上の円は小さいが、角度誤差が正答ラインの前後 30 度に回答が集中していることから、若干の正の相関を得られていることが読み取れる。

仰角方向バブルチャート

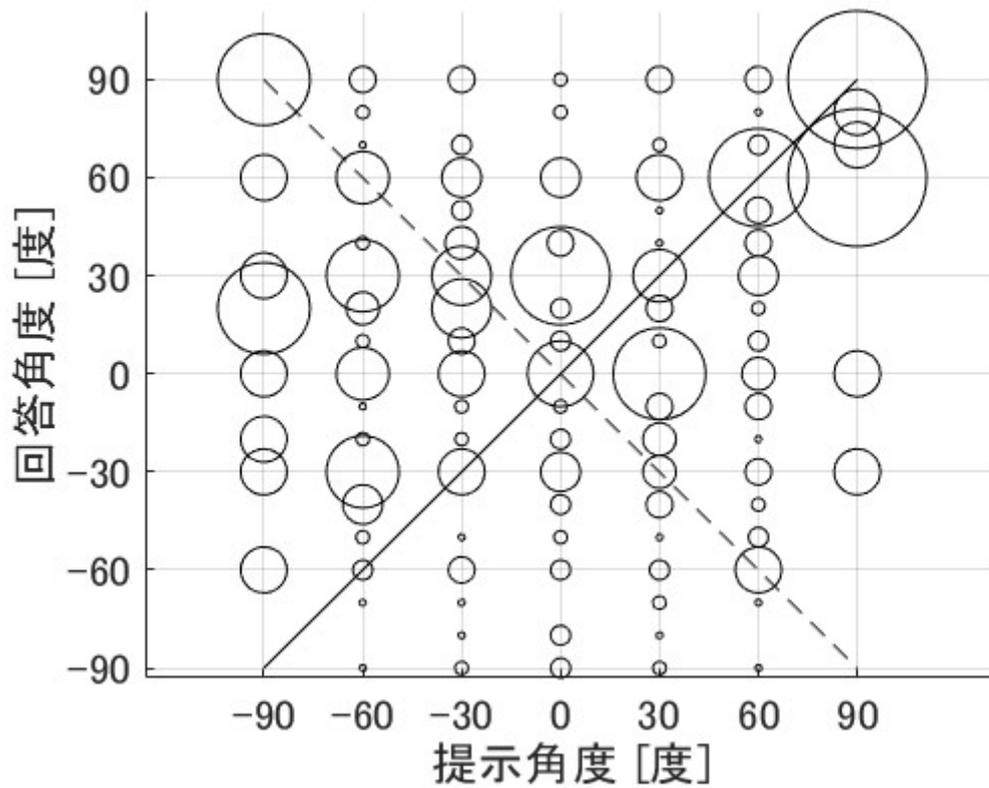


図 4.1-8 仰角 62.5Hz のバブルチャート

仰角に着目した 62.5 Hz のバブルチャートを図 4.1-8 に示す。上方向（真横から真上間）の角度で正答ライン付近に大きな円が見られるものの、方位角に比べ様々な点に円が散在しており、正の相関が得られていないことが読み取れる。

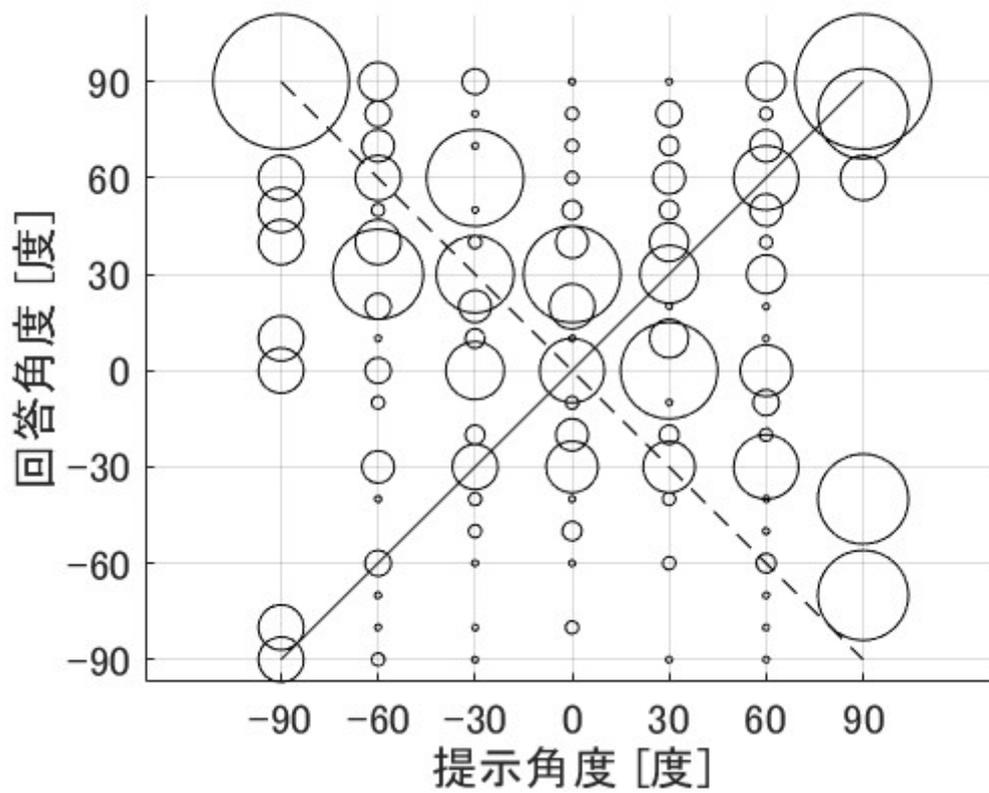


図 4.1-9 仰角 125Hz のバブルチャート

仰角に着目した 125 Hz のバブルチャートを図 4.1-9 に示す。上下を逆に答える回答が目立つ。62.5 Hz に比べれば様々な点に円が散在しているわけではないが、正の相関は得られていないことが読み取れる。

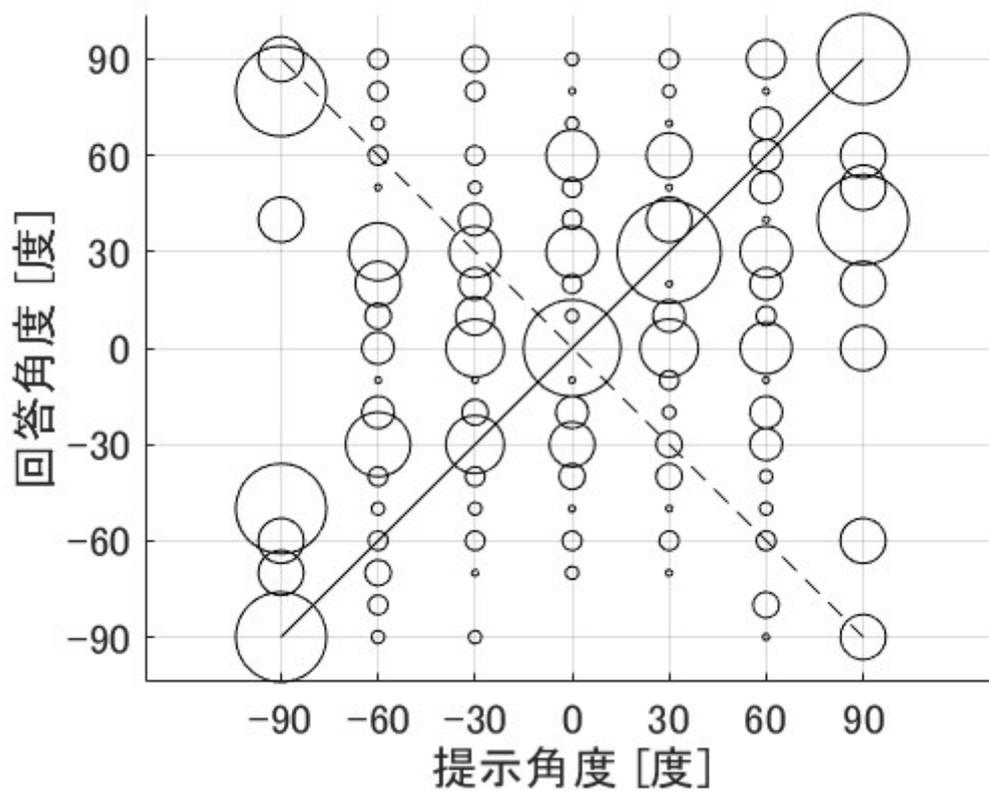


図 4.1-10 仰角 250Hz のバブルチャート

仰角に着目した 250 Hz のバブルチャートを図 4.1-10 に示す。他の周波数帯域に比べ、下方向（真下から真横間）の角度で正答ライン付近に大きな円が見られ、上方向（真横から真上間）の角度でも 62.5 Hz、125 Hz 同様に正答ライン付近に大きな円が見られ、仰角の中では若干の正の相関が得られている。しかし、方位角と比べると十分な結果は得られていない。

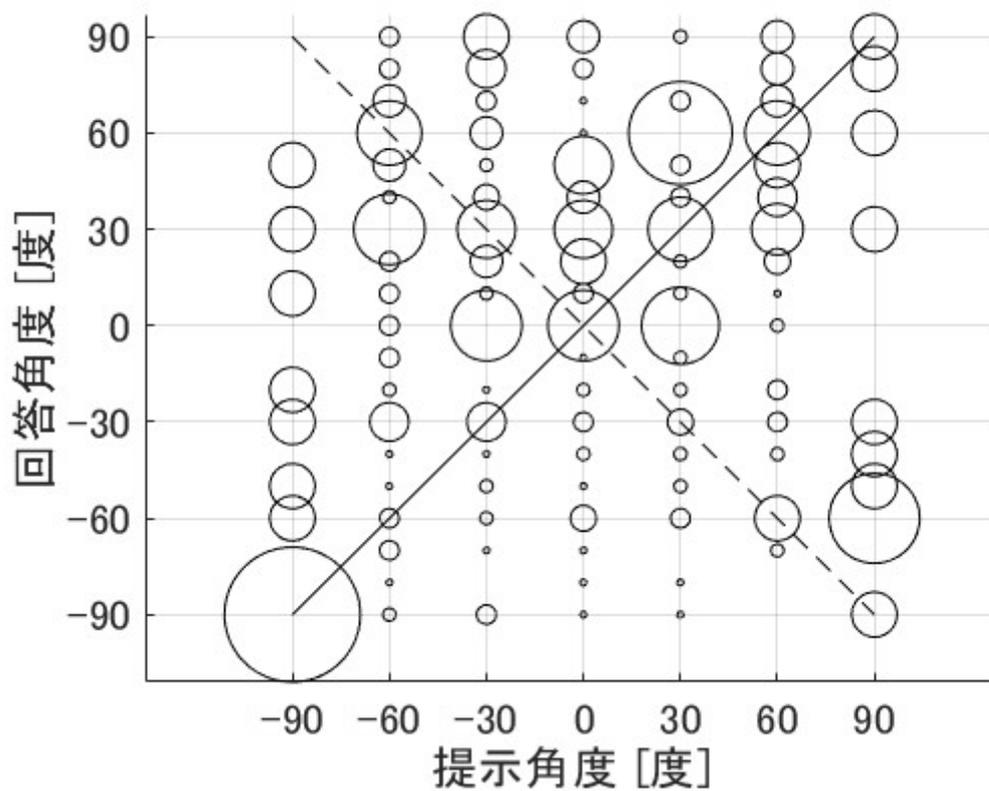


図 4.1-11 仰角 500Hz のバブルチャート

仰角に着目した 500 Hz のバブルチャートを図 4.1-11 に示す。真下においては正答ライン上に大きな円が存在し、上方向（真横から真上間）の角度でも 62.5 Hz、125 Hz 同様に正答ライン付近に大きな円が見られる。しかし、下方向（真下から真横間）に関しては、真下を除いた角度で、様々な点に円が散在していることから正の相関を得られていないことが読み取れる。

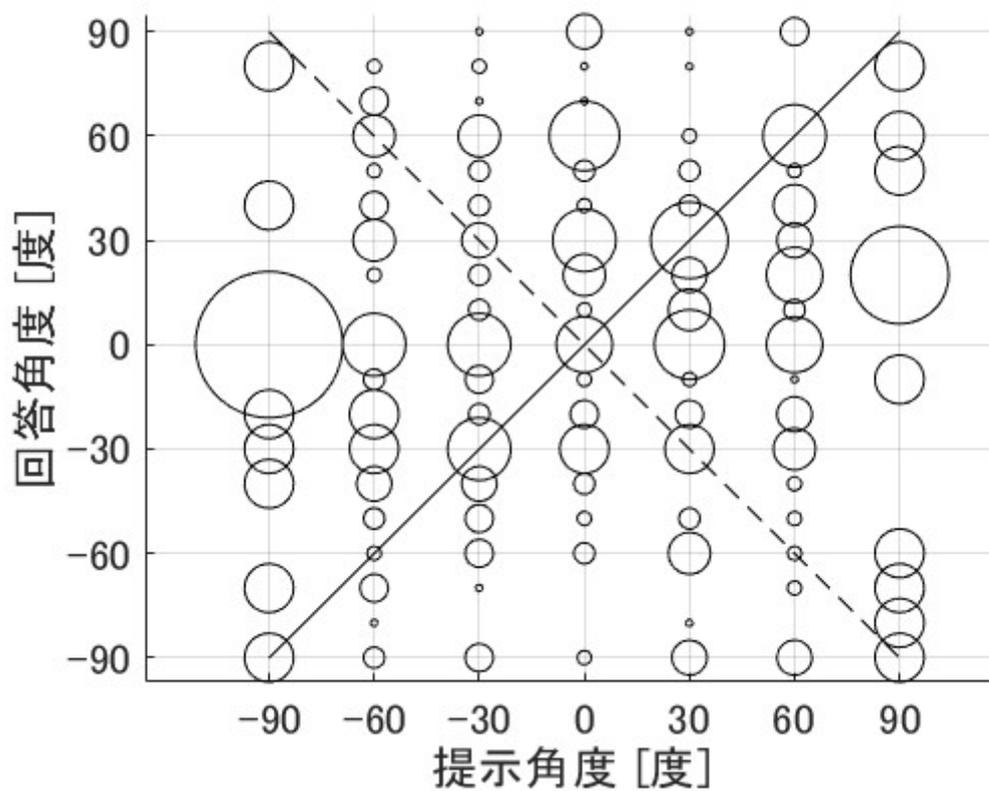


図 4.1-12 仰角 1000Hz のバブルチャート

仰角に着目した 1000 Hz のバブルチャートを図 4.1-12 に示す。他の周波数帯域に比べ、各角度、特に提示角度が真下の時の 0 度の回答が目立つ。また、中程度の円が様々な点で見られることから、正の相関を得られていないことが読み取れる。

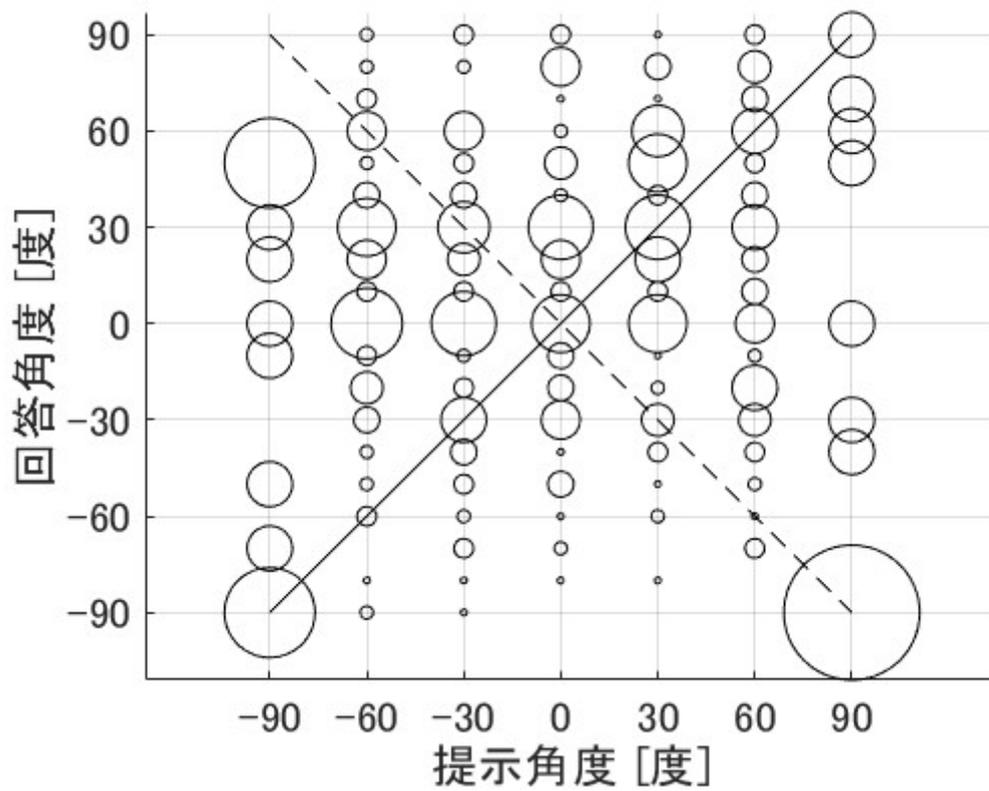


図 4.1-13 仰角 2000Hz のバブルチャート

仰角に着目した 2000 Hz のバブルチャートを図 4.1-13 に示す。真上を真下と回答が目立ち、1000 Hz 同様、各角度での 0 度の回答が目立つ。また、中程度の円が様々な点で見られることから、正の相関を得られていないことが読み取れる。

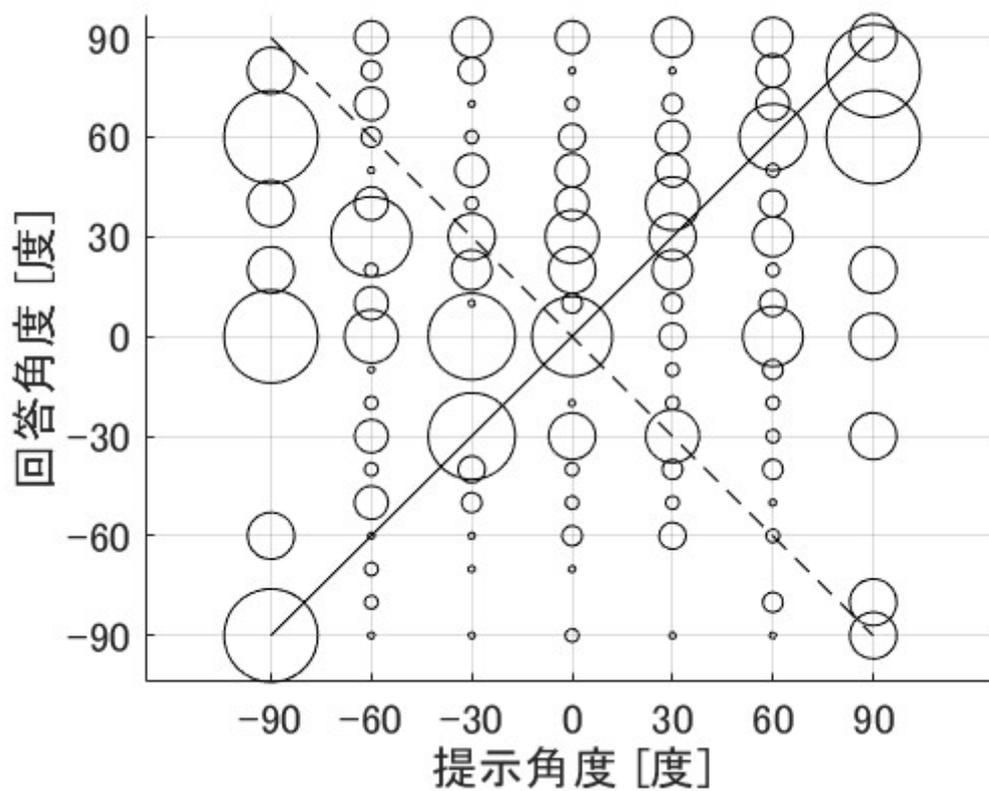


図 4.1-14 仰角 4000Hz のバブルチャート

仰角に着目した 4000 Hz のバブルチャートを図 4.1-14 に示す。真上を真下と回答が目立ち、1000 Hz、2000 Hz 同様、各角度での 0 度の回答が目立つ。また、中程度の円が様々な点でみられることから、正の相関を得られていないことが読み取れる。

仰角全体に言えることとして、上方向（真横から真上間）に回答が集中していることが読み取れる。

4.2 正答率

62.5 Hz、125 Hz、250 Hz、500 Hz、1 kHz、2 kHz、4 kHz の 7 種類の周波数帯域についての正解回答数を全回答数で割った正答率を表 4.2-1 に示す。また、各周波数の正答率の推移を図 4.2-2 に示す。

表 4.2-1 各周波数の正答率

周波数	方位角	仰角
62.5 Hz	25%	12%
125 Hz	34%	12%
250 Hz	32%	14%
500 Hz	25%	12%
1000 Hz	19%	11%
2000 Hz	19%	11%
4000 Hz	23%	12%

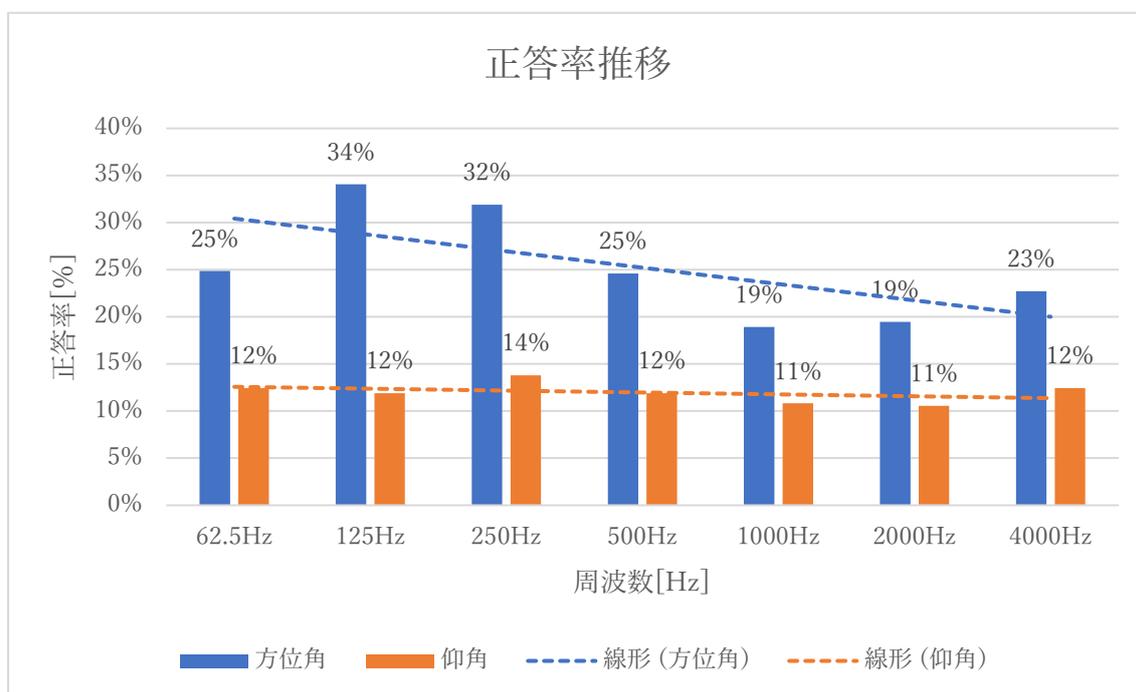


図 4.2-2 正答率推移

バブルチャートからも確認できたが、全体的に方位角の正答率に比べ、仰角の正答率が低いことが読み取れる。正答率が仰角に関しては、ほぼ横這いとなっており、7つ周波数帯域による上下変動が見られなかったのに対し、方位角に関しては、1000 Hz、2000 Hz の人間の聴覚が最も敏感な領域が一番低い値を示し、低音域（250Hz 以下）や高音域（4000Hz）の領域で1000 Hz、2000 Hz の2つの周波数帯域よりも高い値を示した。

また、正答率推移に示す線形近似より、仰角に関しては、各周波数による違いはほぼないのに対し、方位角に関しては、実験を開始した 4000 Hz から実験を重ねるごとに、正答率が上昇する傾向になっていることが読み取れる。

4.3 角度差

62.5 Hz、125 Hz、250 Hz、500 Hz、1000 Hz、2000 Hz、4000 Hz の7つの周波数帯域における各回答の正解からの角度の差を算出してその合計・平均をとったものを表 4.3-1 に示す。ただし、方位角に関しては、前後誤差をすべて排除（90 度～180 度を 90～0 度に変換）したものである。また、各周波数の平均角度差の推移を図 4.3-2 に示す。なお、この角度差の値が低いほど、提示角度からのずれが少ないことを意味する。

表 4.3-1 各周波数の平均角度差

	方位角平均角度差[度]	仰角平均角度差[度]
62.5Hz	18.0	50.9
125Hz	13.6	53.4
250Hz	15.4	46.8
500Hz	19.6	52.4
1000Hz	24.0	50.4
2000Hz	21.5	49.5
4000Hz	21.4	50.6

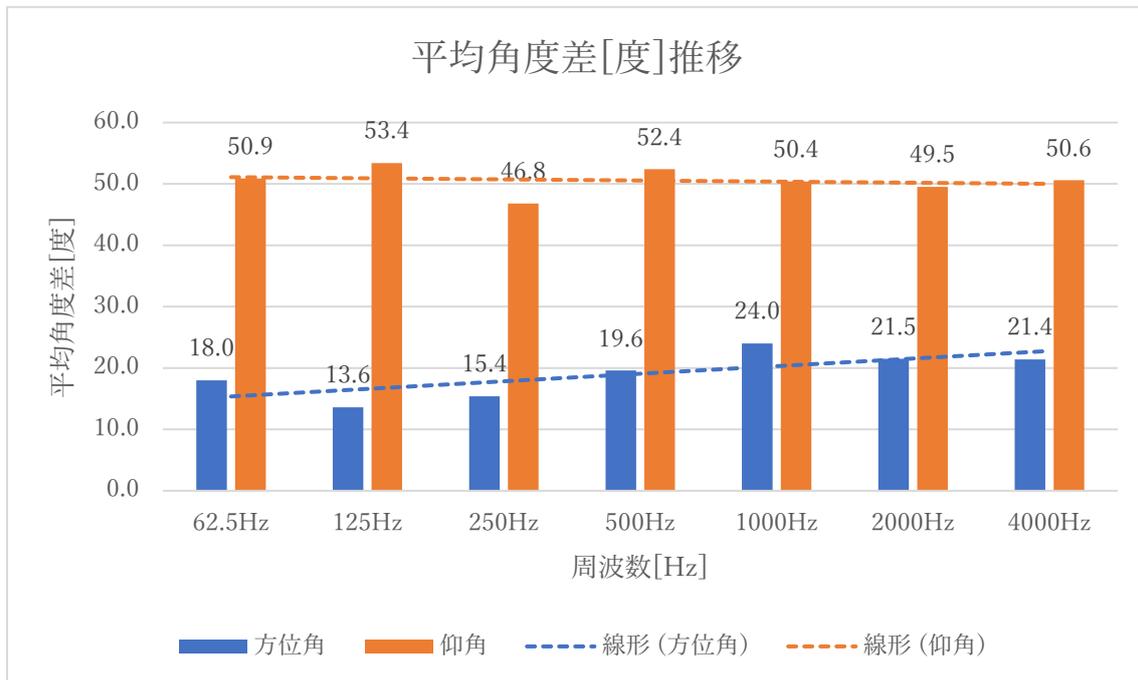


図 4.3-2 平均角度差推移

方位角の平均角度差は、実験を開始した 4000 Hz から実験を重ねるごとに、平均角度差が小さくなる傾向になっていることが読み取れる。ただし、各周波数の平均角度差に大きな差はなく、最も平均角度差が大きい 1000 Hz と最も平均角度差が小さい 125 Hz を比較しても、その平均角度差は 10 度程度であるため、今回対象とした 7 つ周波数いずれにおいても、前後の間違いはあるものの被験者が音源をどの方向から鳴っているのかをある程度認識していると考えられる。

次に、仰角の平均角度差は、ほぼ一定であることが読み取れる。また、最も平均角度差が小さい 125 Hz であっても約 47 度の角度差がある為、仰角の方向定位には限度があることが示唆される。

4.4 考察

本研究では、周波数が高くなるほど方向定位の精度が向上すると予想していた。しかし、4.1 節のバブルチャート、4.2 節の正答率、4.3 節の角度差の分析結果から、方位角において、主に 1000 Hz および 2000 Hz の結果が、低周波数帯域（250 Hz 以下）と比較して精度が低いことが確認された。これは、1000 Hz や 2000 Hz は音楽や日常音に頻繁に含まれており、「基準音」としてよく使用される。その為、比較的単調な音として認識されやすく、「特徴が少ない」と感じ識別しにくくなり、注意が向きにくい可能性がある。このことから、1000 Hz、2000 Hz の正答率が他の周波数帯域に比べて低くなったと推察できる。また、実験を 4000 Hz から開始したことも 1000 Hz、2000 Hz の正答率が他の周波数帯域に比べ、低くなった理由であると推察できる。改善点として、異なる音量で実験を行うことや実験順序を双方向にすることなどが挙げられる。しかし、平均角度差が正答率と逆になるような形を示したことや、バブルチャートで正の相関が得られていることなどから、方位角は方向定位がある程度できていることがわかる。また、実験を重ねるごとに精度が向上していることもわかる。

次に、仰角において、方位角よりも正答率が低いこと、角度差が大きいことが確認された。これは、今回のような 6ch スピーカーアレイでの Ambisonics では 2.2 節 Ambisonics の理論で説明した球面調波関数の特性から、十分に頭部周辺の音場が再現されていないことが起因していると考えられる。上下方向の方向定位の改善点として、スピーカー数を増やすことが挙げられる。

最後に、仰角において、下方向の回答が少ないことが確認された。これは頭や肩による遮蔽効果が起因していると考えられる。また、真下のスピーカーが椅子の下に隠れていること、ならびに、床が設置されており、床からの反射音が何かしらの影響を与えていることも考えられる。耳に入る音は耳介（耳の外側の部分）や頭部により反射・回折され、その影響で音の上下方向が分かりやすくなる。しかし、耳より下からの音は、頭や肩、胴体によって遮蔽されやすく、反射や回折が少なくなるため、方向の手がかりが減る。椅子や床の影響により、さらにこのような手掛かりが減ったことが原因として考えられる。

5. 結言

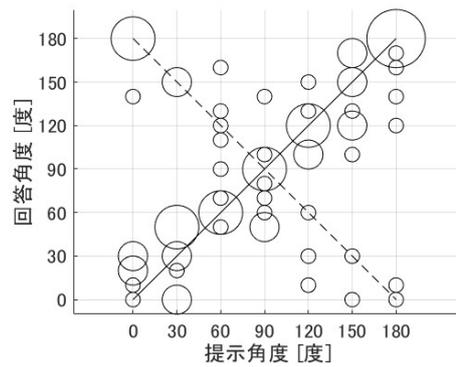
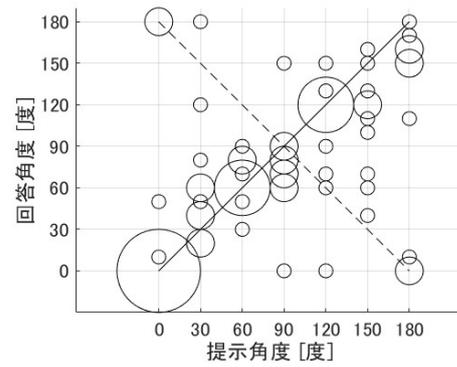
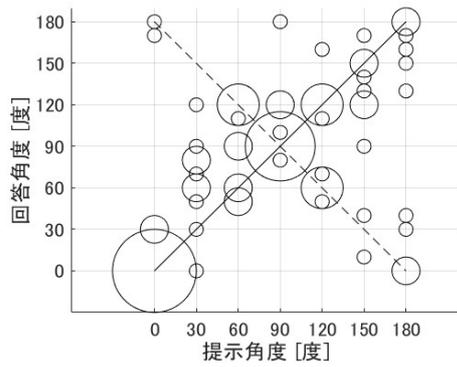
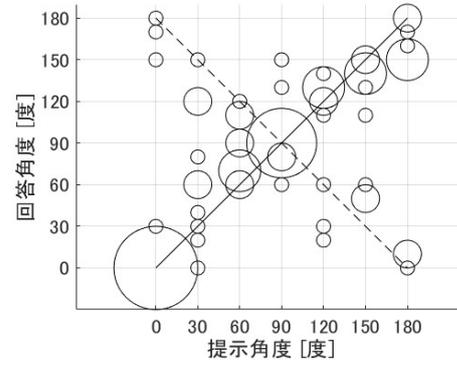
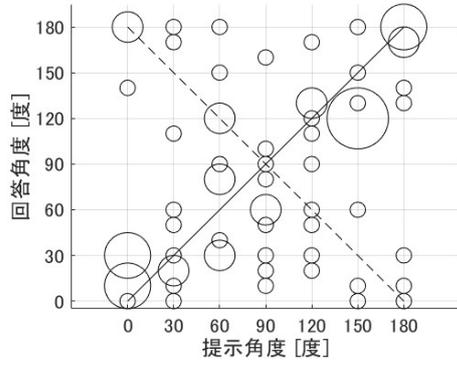
本研究では、Ambisonics を用いた再現音場における方向定位精度を実験的に評価し、周波数帯域ごとの定位精度を明らかにした。予想に反して、周波数が高くなるほど精度が向上するという結果には至らず、特に 1000 Hz および 2000 Hz 帯域において、水平方向の定位精度が低下する結果となった。前後誤判定については、頭部を回転させることで減らすことができると考え、そのように教示したが、実際には頭部を固定したまま回答した被験者も多く見られた。また、仰角方向における方向定位精度が顕著に低かったことや、上方と下方の誤認識が見られたことが課題として挙げられる。今後、Ambisonics がより実用的な三次元音場再生手法として広く適用されるためには、仰角方向における定位精度の向上が必須である。

参考文献

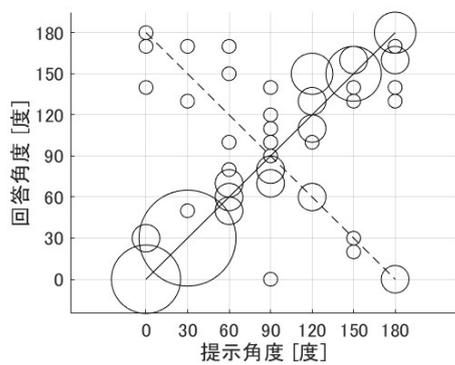
- [1] M. A. Gerzon, "Periphony: With-height sound reproduction," J. Audio Eng. Soc., vol. 21, no. 1, pp. 2-10, 1973
- [2] M. Poletti, "Three-dimensional surround sound systems based on spherical harmonics," Journal of the Audio Engineering Society, vol. 60, no. 6, pp. 458-468, 2013.
- [3] 末永司, 金子昌賢, 奥村啓, 白木原太, 秋山仁志, 関根聡, "高次アンビソニクスを利用した高臨場感音場収録・再現システム ViReal の開発," 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, vol. 22, no. 1ATE-26, Sept. 2017.
<https://www.yamaha.com/ja/tech-design/research/technologies/vireal/>
- [4] 坂本修一, 松永純, 本郷聖司, 岡本拓也, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, "SENZI 音空間情報取得システムによる 252ch リアルタイム処理を用いた 3D 音空間合成の精度向上," 日本音響学会誌, vol. 70, no. 7, pp. 379-384, 2014.
<https://www.riec.tohoku.ac.jp/riecnews/lab/suzuki/03.html>

付録

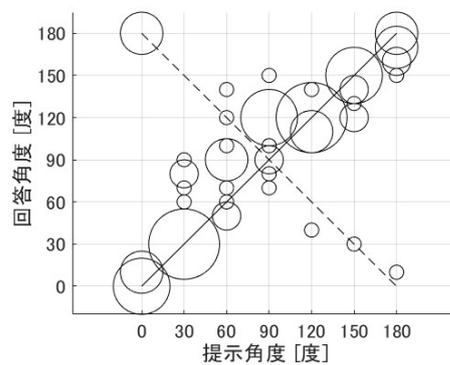
方位角 62.5 Hz



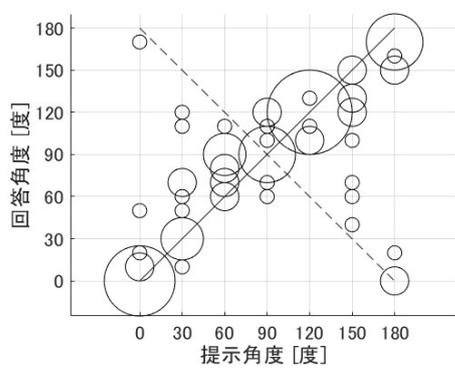
方位角 125 Hz



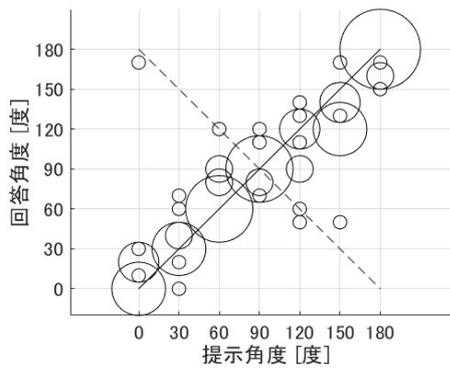
60度 125 Hz



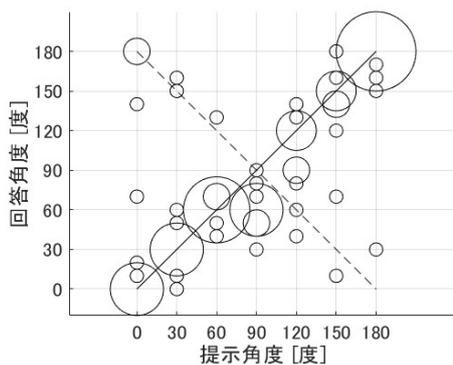
30度 125 Hz



0度 125 Hz

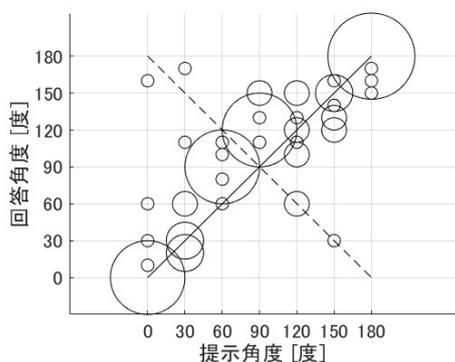


-30度 125 Hz

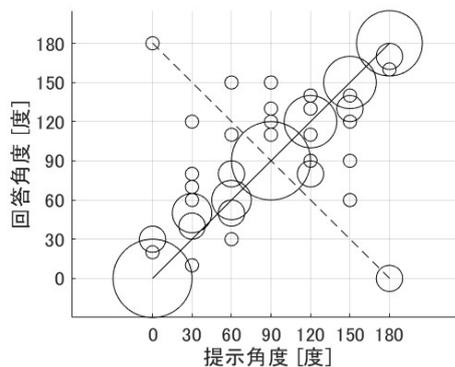


-60度 125 Hz

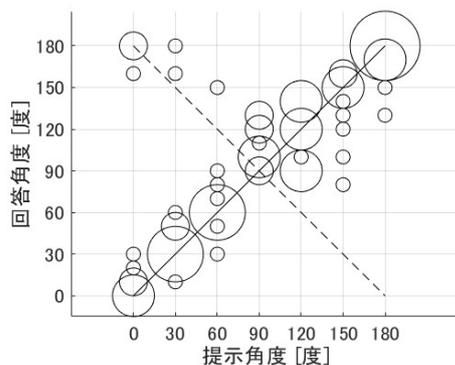
方位角 250 Hz



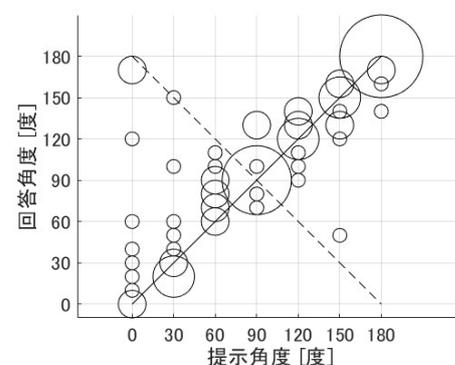
60度 250 Hz



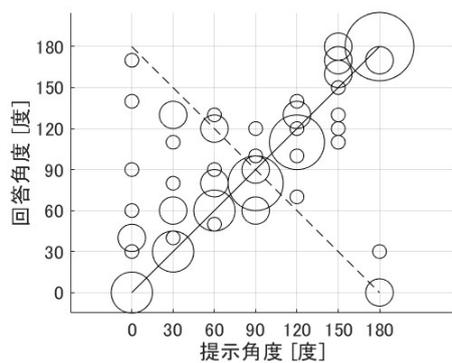
30度 250 Hz



0度 250 Hz

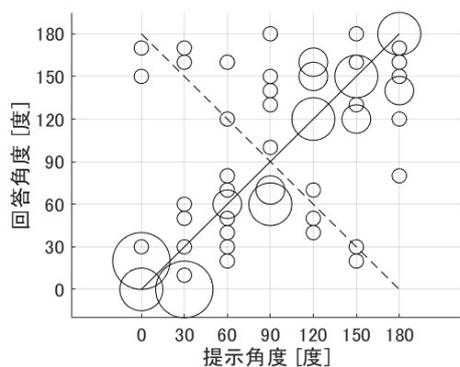


-30度 250 Hz

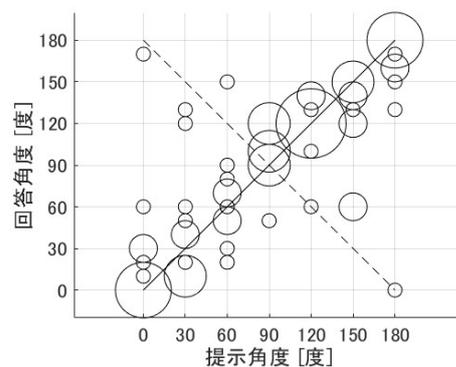


-60度 250 Hz

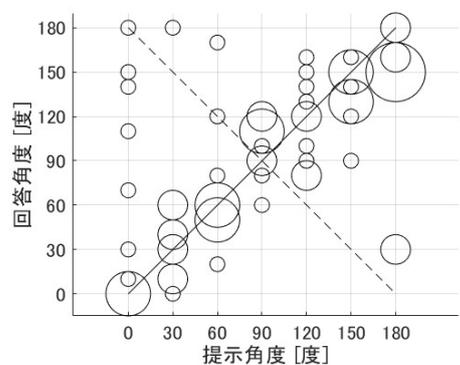
方位角 500 Hz



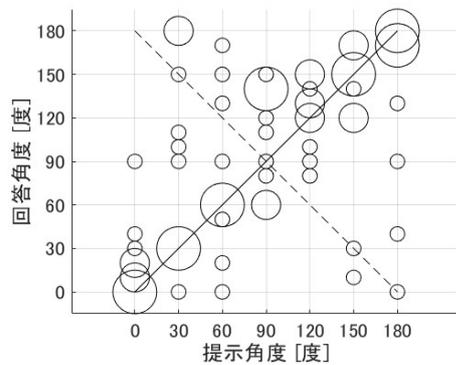
60度 500 Hz



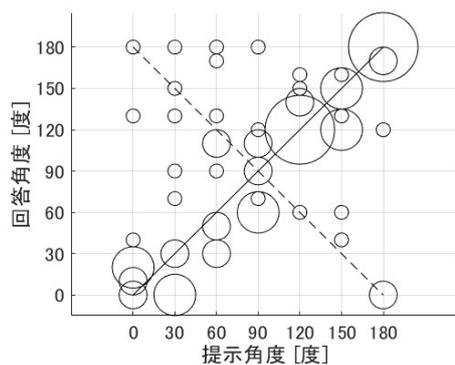
30度 500 Hz



0度 500 Hz

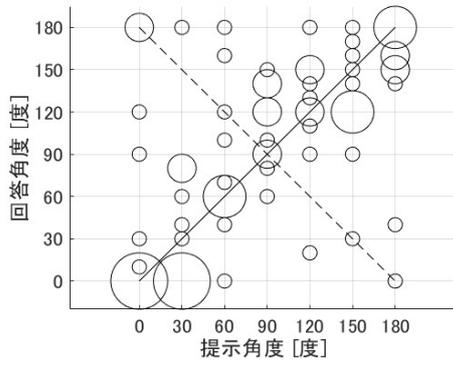


-30度 500 Hz

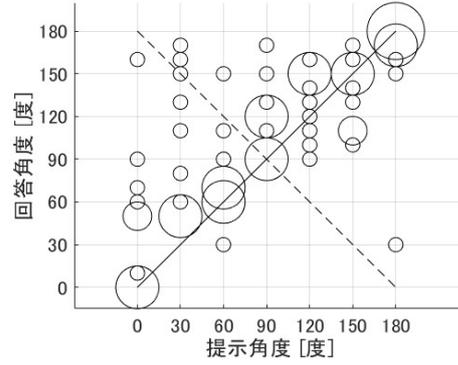


-60度 500 Hz

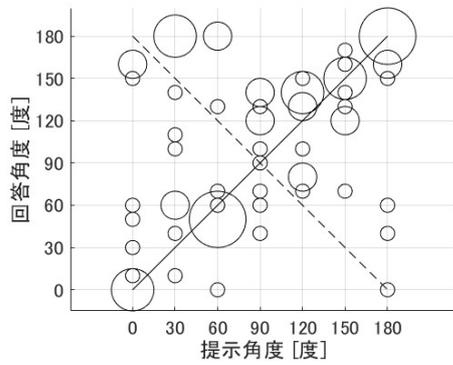
方位角 1000 Hz



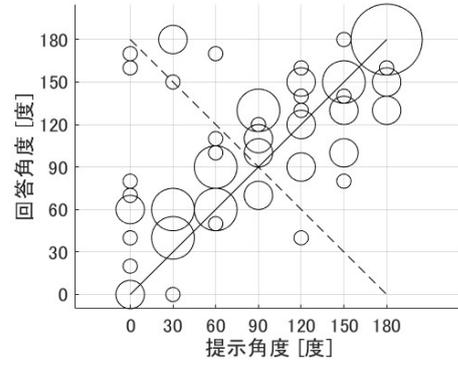
60度 1000 Hz



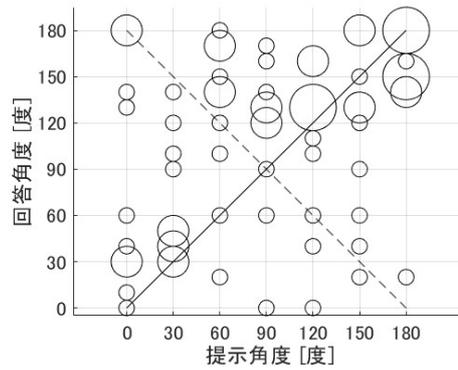
30度 1000 Hz



0度 1000 Hz

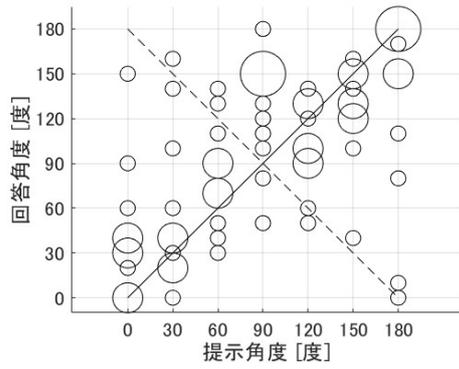


-30度 1000 Hz

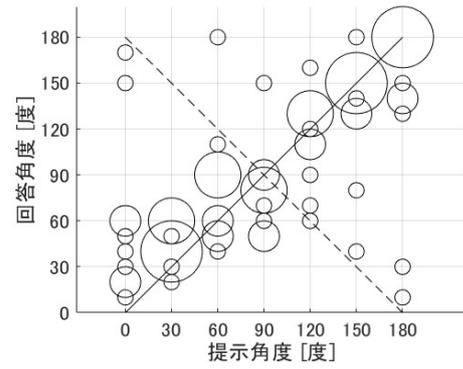


-60度 1000 Hz

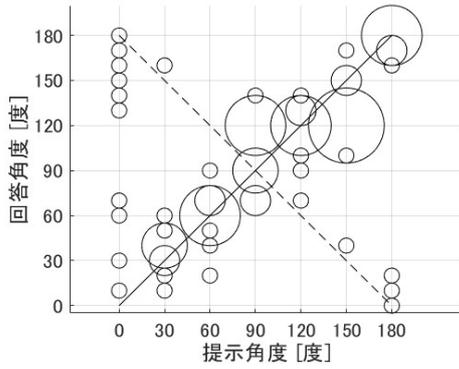
方位角 2000 Hz



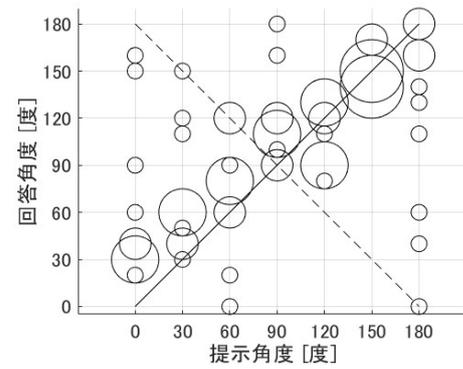
60度 2000 Hz



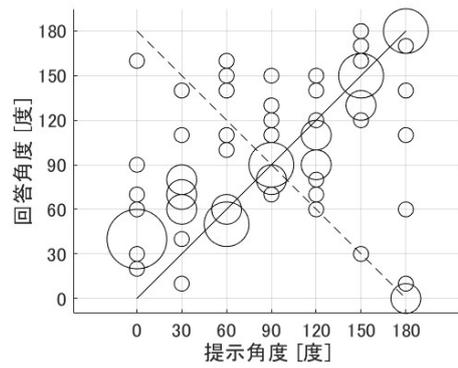
30度 2000 Hz



0度 2000 Hz

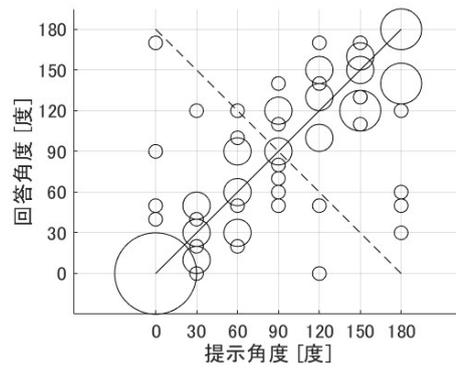
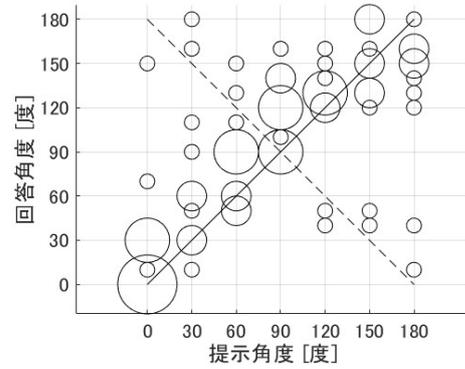
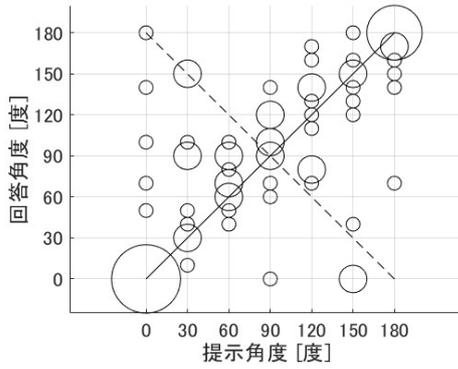
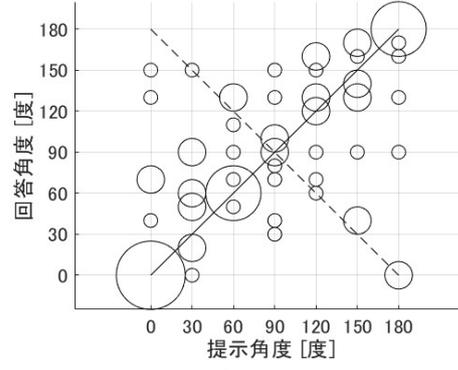
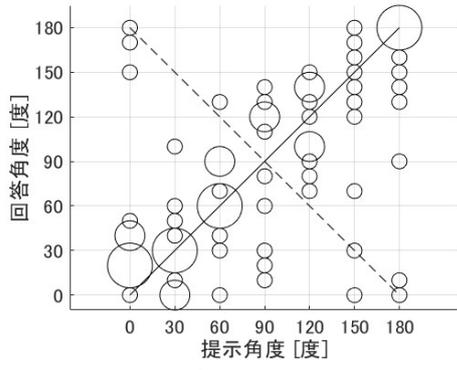


-30度 2000 Hz

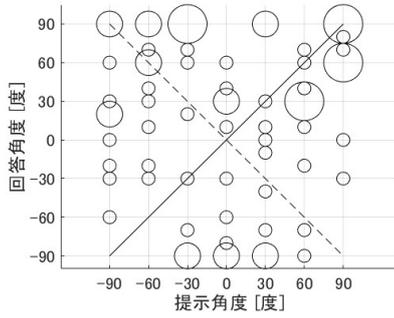


-60度 2000 Hz

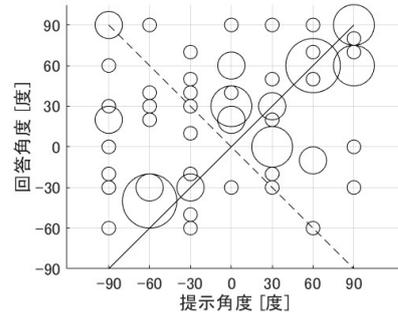
方位角 4000 Hz



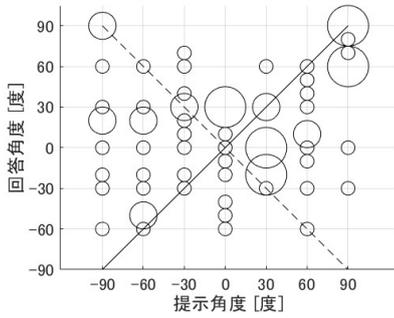
仰角 62.5 Hz



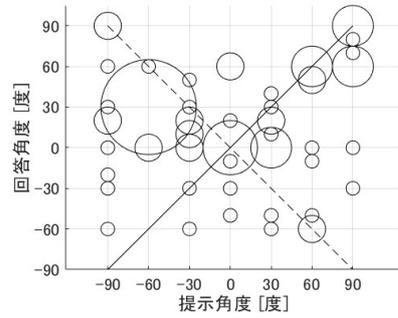
0度 62.5 Hz



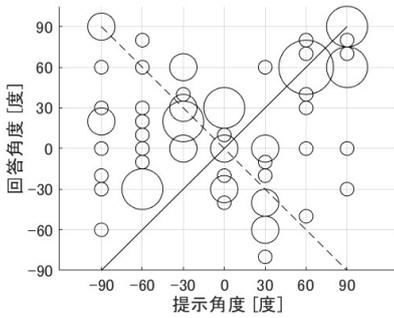
30度 62.5 Hz



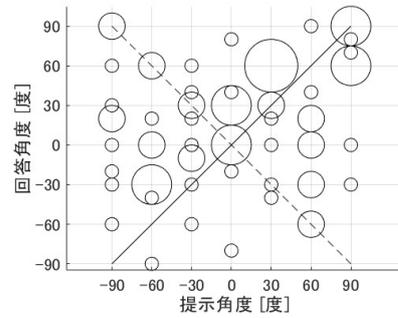
60度 62.5 Hz



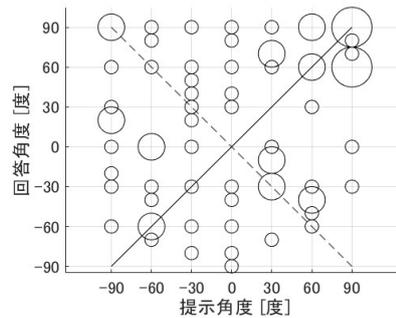
90度 62.5 Hz



120度 62.5 Hz

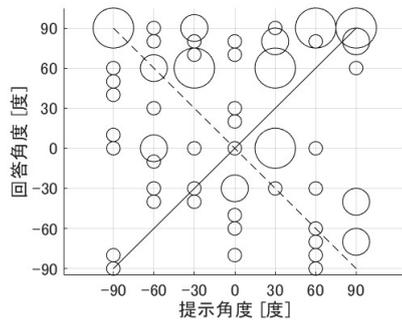


150度 62.5 Hz

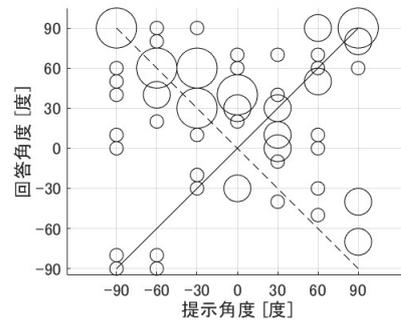


180度 62.5 Hz

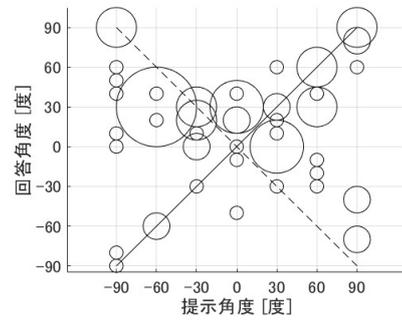
仰角 125 Hz



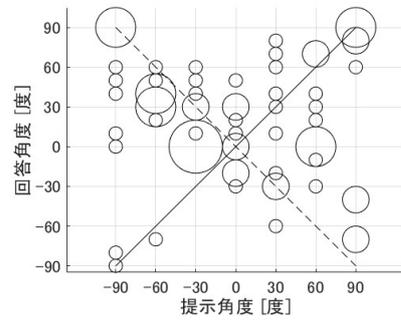
0度 125 Hz



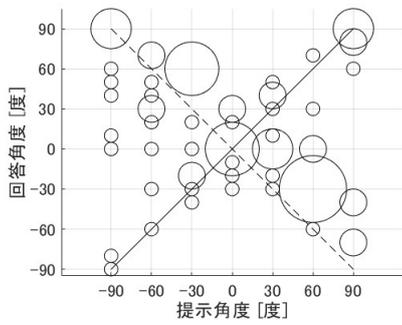
30度 125 Hz



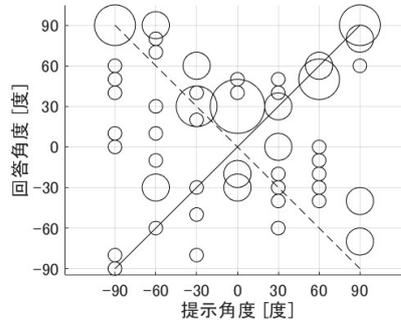
60度 125 Hz



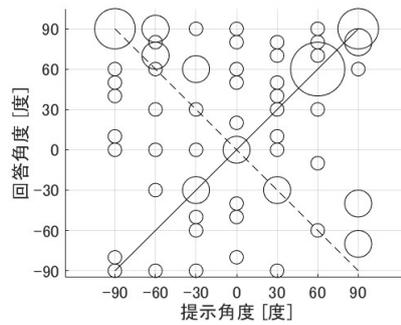
90度 125 Hz



120度 125 Hz

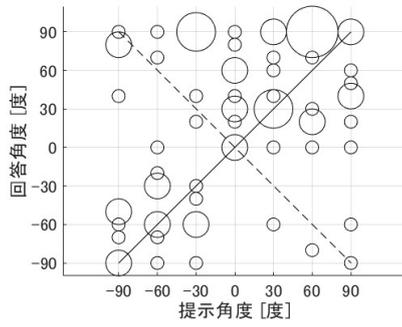


150度 125 Hz

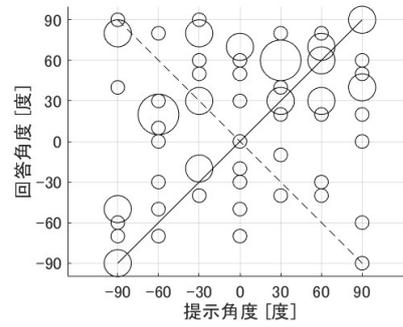


180度 125 Hz

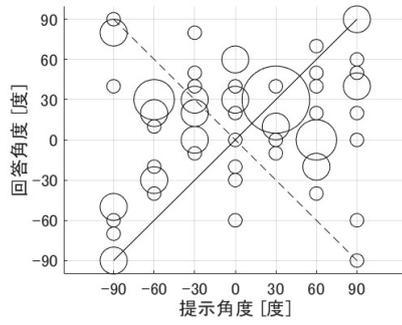
仰角 250 Hz



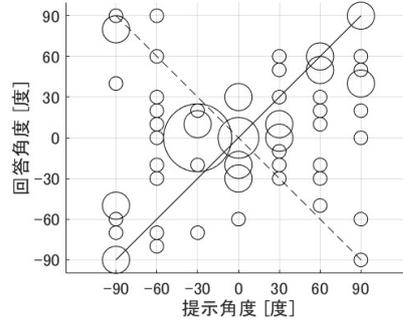
0度 250 Hz



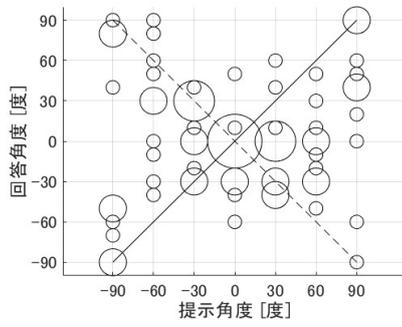
30度 250 Hz



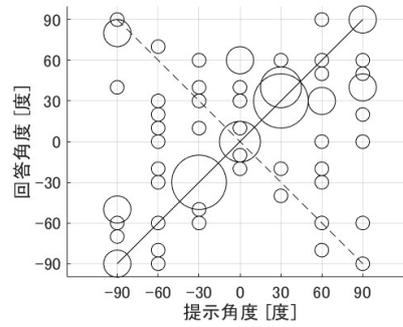
60度 250 Hz



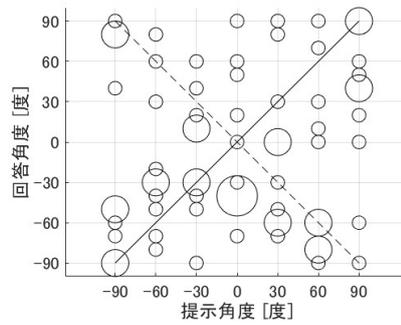
90度 250 Hz



120度 250 Hz

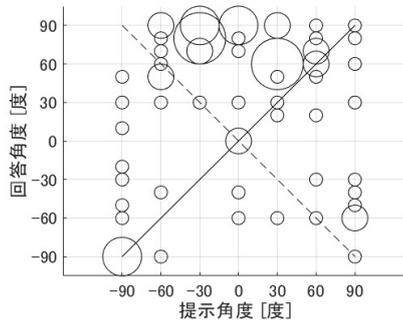


150度 250 Hz

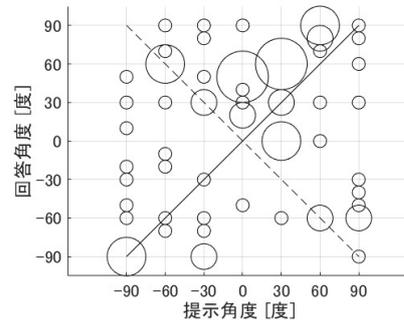


180度 250 Hz

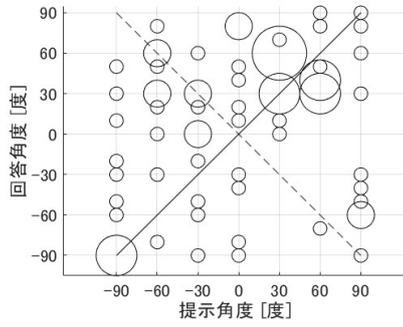
仰角 500 Hz



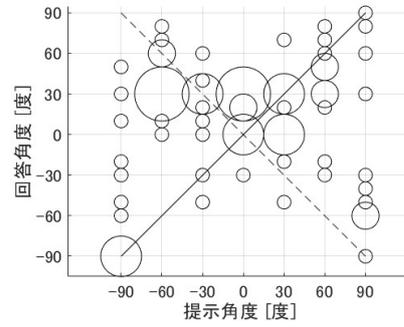
0度 500 Hz



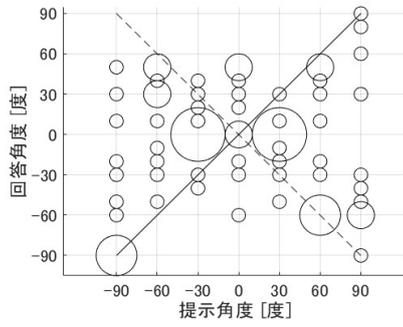
30度 500 Hz



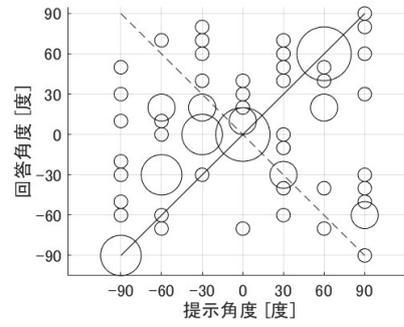
60度 500 Hz



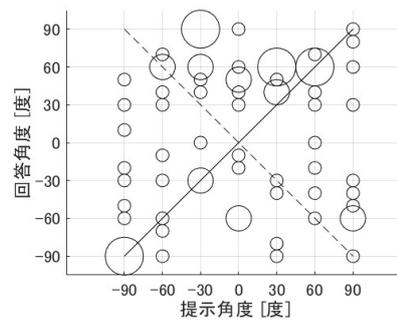
90度 500 Hz



120度 500 Hz

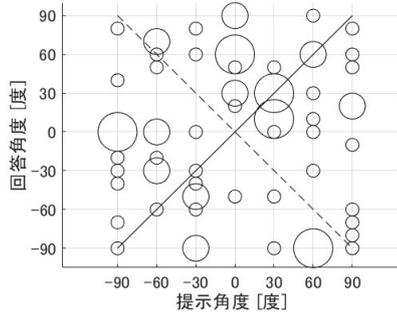


150度 500 Hz

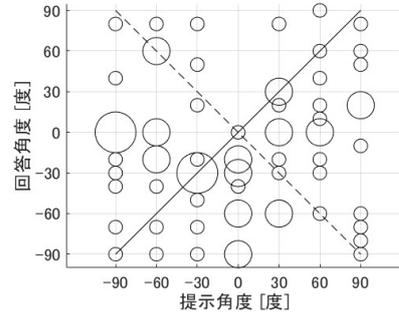


180度 500 Hz

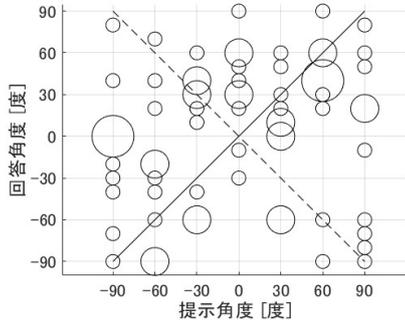
仰角 1000 Hz



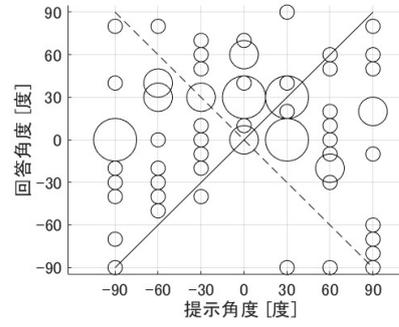
0度 1000 Hz



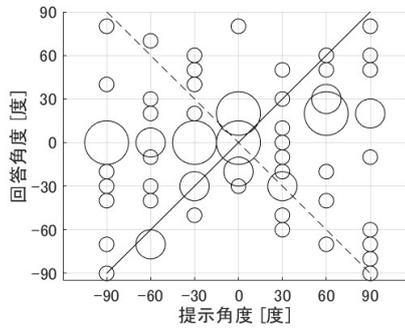
30度 1000 Hz



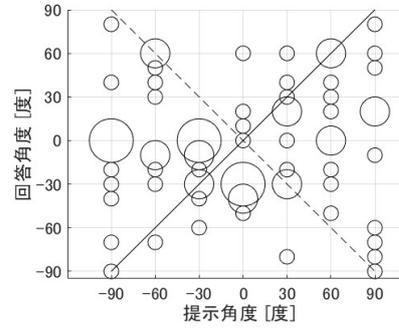
60度 1000 Hz



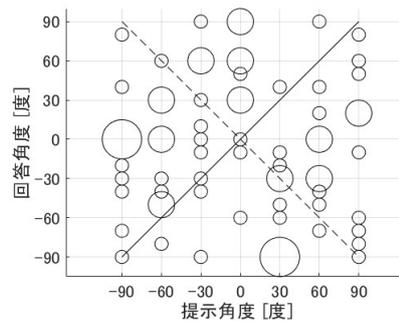
90度 1000 Hz



120度 1000 Hz

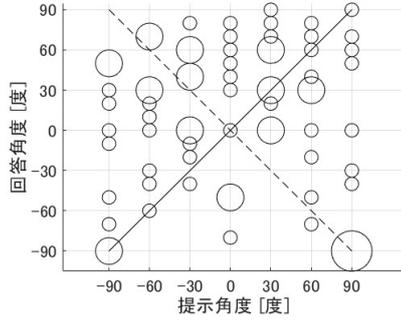


150度 1000 Hz

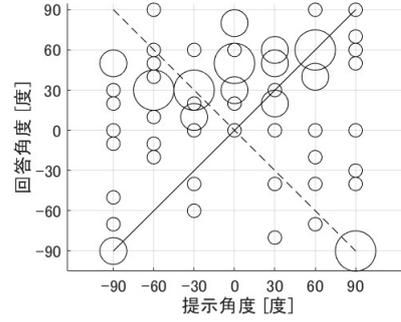


180度 1000 Hz

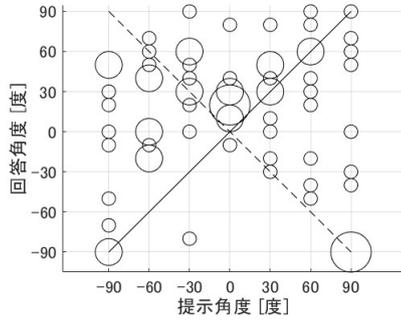
仰角 2000 Hz



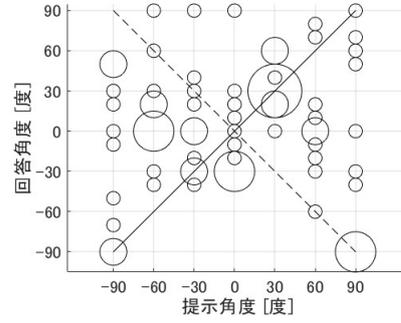
0度 2000 Hz



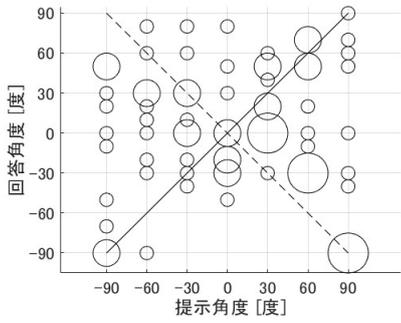
30度 2000 Hz



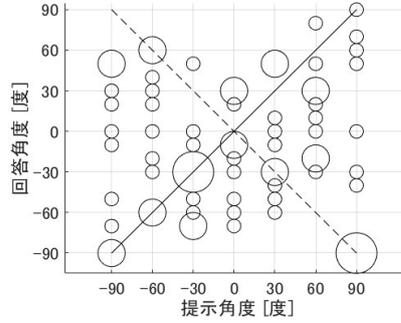
60度 2000 Hz



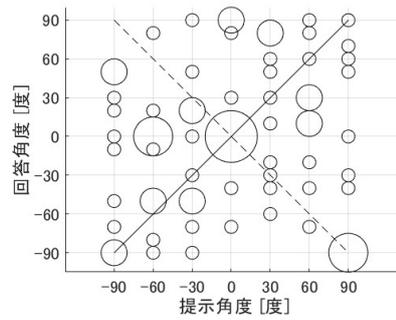
90度 2000 Hz



120度 2000 Hz

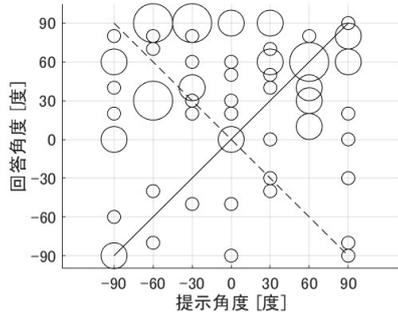


150度 2000 Hz

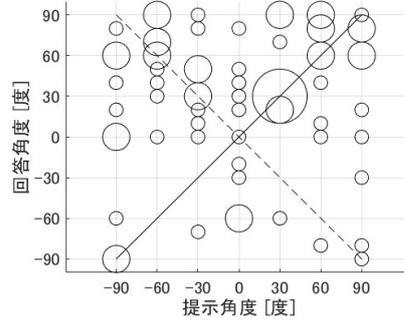


180度 2000 Hz

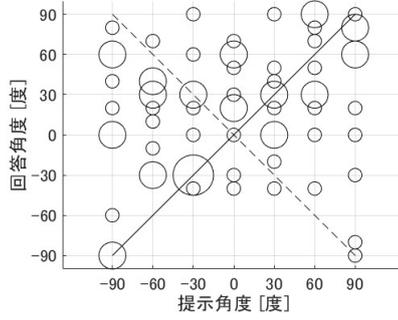
仰角 4000 Hz



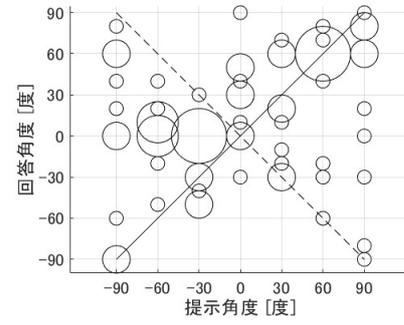
0度 4000 Hz



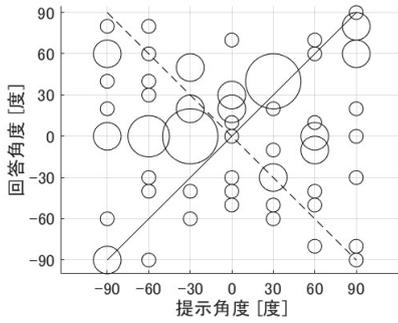
30度 4000 Hz



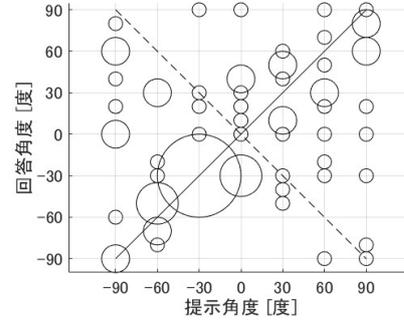
60度 4000 Hz



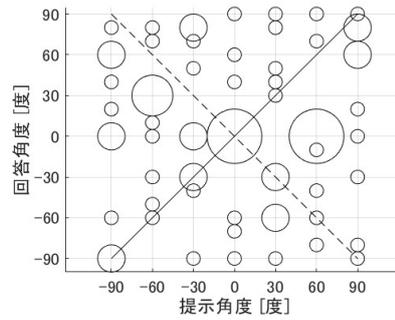
90度 4000 Hz



120度 4000 Hz



150度 4000 Hz



180度 4000 Hz