

VBAP 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 21-0002 赤阪陸斗

指導教員 豊田 政弘

目次

1	緒言	1
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	VBAP の概要	4
2.2	VBAP の理論	5
2.2.1	二次元 VBAP	5
2.2.2	三次元 VBAP	7
3	研究方法	9
3.1	使用した機材・ソフト	9
3.2	実験方法	11
3.2.1	音源作成	11
3.2.2	実験内容	12
3.3	聴感評価	13
4	研究結果と考察	15
4.1	バブルチャート	15
4.1.1	方位角方向バブルチャート	16
4.1.2	仰角方向バブルチャート	24
4.2	正答率	32
4.3	角度差	33

4.4 考察.....	35
5 結言.....	36
参考文献.....	37
付録.....	38

1 緒言

1.1 研究背景

現在に至るまで、多くの三次元音場再生手法が提案されており、その発展は音響工学の分野において重要な役割を果たしている。三次元音場再生手法とは、音の到来方向や音像までの距離、さらには音の拡がりといった空間的な特性を再現する技術であり、その応用範囲は非常に広い。例えば、VR (Virtual Reality)や映画館といった音環境を忠実に再現する必要がある空間において、これらの技術が積極的に活用されている。

さらに、三次元音場再生はコンサートホールやライブ会場といった音響設計が重視される施設においても重要である。特に、設計の初期段階で室形状や残響時間などの音響的特徴を検討する際、空間内の音場をその響きも含めて立体的に再現することが可能であれば、設計意図通りの特性が得られるかどうかを聴覚的に確認し、評価することができる。このような技術は、良質な音響空間の実現に向けた設計支援ツールとして期待されている。

しかしながら、現在提案されている立体音響装置の多くは、多数のスピーカーを必要とし、広い空間と高いコストを要するという課題がある。そのため、これらの制約を克服しつつ、より実用的で低コストな三次元音場再生手法の開発が求められている。

1.2 既往研究

前述の通り、音響技術の分野では、仮想音源の定位と空間音響再現を目的とした多様な三次元音場再生手法が提案されてきた。従来のステレオおよび 5.1 チャンネルサラウンドシステムは、振幅パニングを用いることで音像定位を実現しているが、垂直方向の制御には限界があり、さらなる技術革新が求められている。この課題に対して、Pulkki [1]は、2次元および3次元の空間音響定位に適応する新しい手法の必要性を指摘している。

アンビソニックス (Ambisonics) は、1970 年代に Gerzon ら[2]によって提案された技術であり、球面調和関数を用いて音場を数学的に表現する点が特徴である。この手法には、一次アンビソニックス (FOA) として4つのチャンネル (W, X, Y, Z) を用いて音場を表現する方法と、高次アンビソニックス (HOA) として球面調和展開の次数を拡張し、より高精度な音場再現を目指した方法がある。しかし、HOA には次数の打ち切りが必要となることから再現可能な周波数帯域や定位精度に制限が生じる点や、高次展開による計算負荷の増加といった課題がある。

HRTF (Head-Related Transfer Function) を利用した音響再生技術では、受聴者が特定の音源方向から受け取る音波の特性を信号として記述し、それを用いることで仮想音源の方向を再現することが可能である。ステレオヘッドホンを用いて再現を行うことが一般的であり、バイノーラル技術と呼ばれる。スピーカーを用いる場合には、クロストークキャンセラを実装することで実現され、トランスオーラル技術と呼ばれる。いずれの場合も比較的簡易に立体音響再生を提供できるが、HRTF の個人差の問題や頭部運動の考慮の必要性など、まだ課題は多い。

さらに、1993 年に Berkhout ら[3]が提案した Wave Field Synthesis (WFS) は、ホイヘンスの原理に基づき音場を平面波として再現するアプローチである。この手法では、平面波の集合として音場を構成し、スピーカーアレイを用いて広範囲の音場再現を可能とする。しかし、計算コストが高いことや、多数のスピーカー配置が必要となることが制約となる。

これら既存技術の限界を克服するために、1997 年に Pulkki [1]は振幅パニングの一種である Vector Base Amplitude Panning (VBAP) を提案した。VBAP は任意のスピーカー配置に適用可能であり、ベクトル計算を用いることで効率的な音像定位を目指したものである。特に、従来技術で課題とされていた垂直方向の定位や不規則なスピーカー配置に対応可能な点、計算コストが非常に低い点が特徴である。ただし、VBAP は理論的な基盤が十分に確立されていない点、また、精緻な聴感実験結果が不足している点が懸念される。

1.3 研究目的

前述で述べた通り、従来の技術においては、アンビソニックス、HRTF ベースの手法、WFS など、さまざまなアプローチが提案されてきたが、いずれもスピーカー配置の制約、計算負荷、定位精度の限界といった課題に直面している。これらの手法の中でも、振幅パニングの一種である VBAP は、3 次元的に不規則なスピーカー配置に対しても柔軟に対応可能であり、また計算負荷が低いという利点を有している。しかしながら、VBAP を含む振幅パニングは理論的な背景が不十分であること、ならびに、緻密な聴感評価が十分に実施されているとはいえず、方向定位精度といった基本的な評価ですら明確にされていない点が課題として挙げられる。本研究では、VBAP を実装した 6ch のスピーカーアレイにより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する。

2 研究内容

2.1 VBAP の概要

本研究で用いる VBAP とは、三次元音場再現手法の一つであり、複数のスピーカーの音量差を利用して任意の位置に音像を定位させる技術である。この方法は、図 1 のように聴取者から等距離の位置にスピーカーを配置し、それらが含まれる球面上の任意の位置に音像を提示することが可能である。さらに、この技術は任意のスピーカー配置に対応する柔軟性を持ち、スピーカー配置に基づいて球面を球面三角形に分割する。それぞれの球面三角形の頂点にあたるスピーカーに対して、ベクトル演算を用いた重み付けを行うことで音像の定位を制御する。この簡易な処理により、計算コストが低く、リアルタイム処理に適した手法となっている。

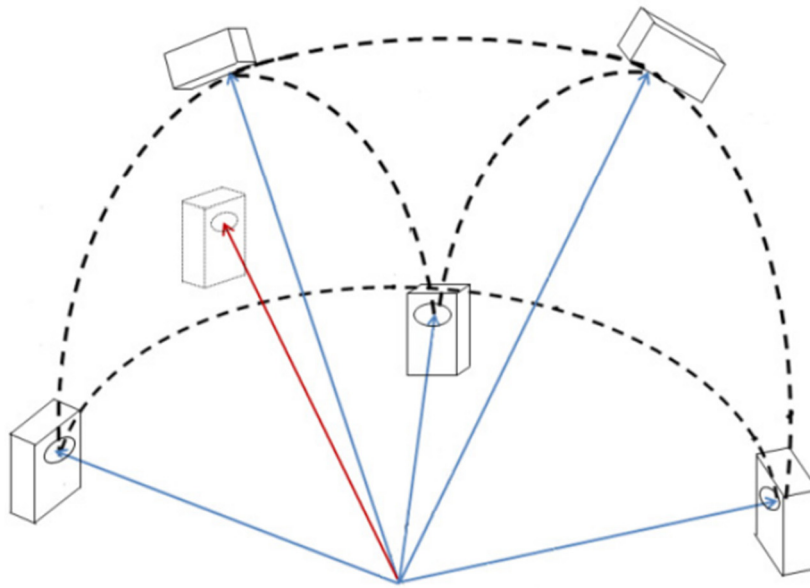


図 1 VBAP

2.2 VBAP の理論

2.2.1 二次元 VBAP

二次元 VBAP は、現在最も広く利用されている立体音響再生手法の一つで、家庭用の小規模なシステムから専門的な大規模システムに至るまで、さまざまな分野で利用されている。この手法は、音像を任意のスピーカー配置で定位させる技術で、二次元平面上での音響再現に特化したものである。

図 2 に示すように聴取者から等距離かつ線対称に 2 つのスピーカーを配置した場合を考える。2 つのスピーカーが同位相の信号を発すると、聴取者は音像が 2 つのスピーカーの間にあると知覚する。さらに、各スピーカーの出力振幅を調整することで、音像を 2 つのスピーカーの成す弧の任意の位置に定位させることができる。定位される音像の位置は、各スピーカーのゲインファクター (gain factor) [1]、すなわち、音量によって決定される。

また、この技術はスピーカーの配置が直線的でない場合にも対応可能で、スピーカーの位置ベクトルを適切に指定することで、自由な形状のスピーカー配置でも利用でき、より柔軟な音響再現を実現することができる。

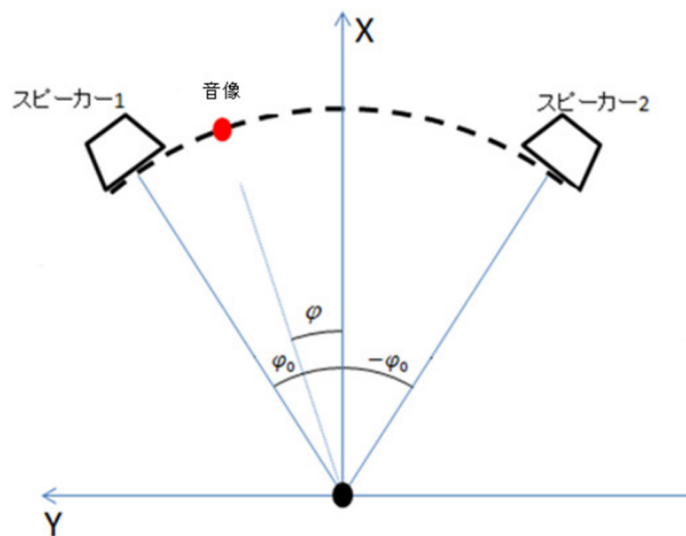


図 2 二次元 VBAP

音像の位置は、各スピーカーが出力する信号の振幅の関係によって決まる。聴取者が知覚する音量を一定に保ちながら、聴取者を中心とした 2 つのスピーカーがなす円弧上に音像を定位させる条件は、次の式で示される [4]。

$$g_1^2 + g_2^2 = C \quad (1)$$

ここで、 g_1 と g_2 は各スピーカーの gain factor を表し、 C は円弧の半径、すなわち、聴取者が知覚する音量を決定する定数である。図 2 では、スピーカー 1 の振幅がスピーカー 2 よりも大きいため、音像はスピーカー 1 側に偏って定位している。

次に、音像を自由に定位させるための理想的なパンニング処理における gain factor の計算方法について説明する。聴取者が感じる音像の方向は、以下の立体音響における正弦の法則に基づいて決定される。

$$\frac{\sin\phi}{\sin\phi_0} = \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2} \quad (2)$$

ここで、 $0^\circ < \phi_0 < 90^\circ$ 、 $-\phi_0 \leq \phi \leq \phi_0$ 、および $g_1, g_2 \in [0, 1]$ とする。 ϕ は X 軸と音像の間の角度を表し、 $\pm \phi_0$ は X 軸とスピーカーの間の角度を示す。(2)式は聴取者が正面を向いているときに成り立つが、頭を回転させた場合は(3)式のほうがより正確になる。

$$\frac{\tan\phi}{\tan\phi_0} = \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2} \quad (3)$$

音響出力レベルを一定に保った場合、(1)式と(2)式、または(1)式と(3)式を使用することで、gain factor を算出することができる。(2)式と(3)式のわずかな違いは、聴取者の頭部の回転によって音像が移動することによるが、主観的な評価においてはその違いは無視できる程度である。

2.2.2 三次元 VBAP

二次元 VBAP に 3 つ目のスピーカーを追加し、残りの 2 つのスピーカーと聴取者を等間隔に配置することにより、音像を 3 次元的に定位させる三次元 VBAP が可能となる。この際、既存の 2 つのスピーカーと聴取者が作る平面上に 3 つ目のスピーカーを配置することは避けるべきである。

音像は図 3 に示すように、聴取者を中心に 3 つのスピーカーによって囲まれた球面三角形上に定位する。二次元 VBAP と同様に、各スピーカーの gain factor によって音像の位置が決定され、音の大きさを一定に保ちつつ音像を定位させる条件は、次式により表される。

$$g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 = C \quad (4)$$

ここで、 g_1 、 g_2 、 g_3 は各スピーカーの gain factor を示し、 C は球面の半径、すなわち、聴取者が知覚する音量を決定する定数である。

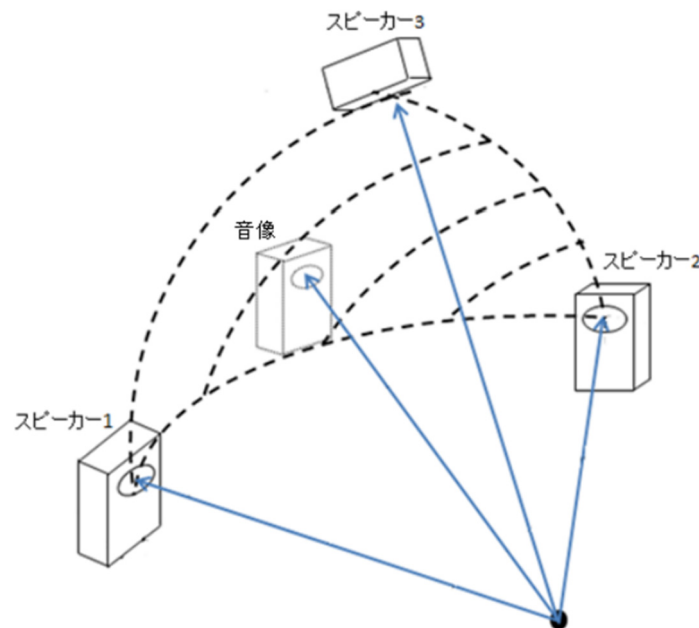


図 3 三次元 VBAP

図4のように、原点を聴取点とし、3つのスピーカーが直交座標軸上に配置されている場合、各スピーカーの固有のゲインファクターは次式で表される。

$$g_1 = C \cos \theta \cos \gamma \quad (5)$$

$$g_2 = C \sin \theta \cos \gamma \quad (6)$$

$$g_3 = C \sin \gamma \quad (7)$$

ここで、 γ は仰角、 θ は方位角である。gain factor は球面座標での (γ, θ) 方向の単位ベクトルを直交座標に変換したものに定数を乗じた形で表される。

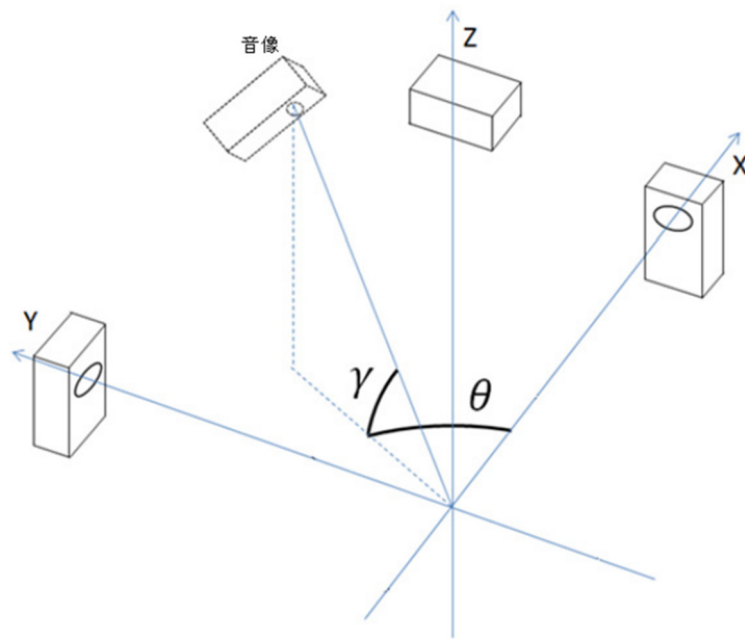


図4 直交座標上のスピーカーと音像

3 研究方法

3.1 使用した機材・ソフト

プログラム、音源作成、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の開発、行列演算、GUI 構築など、多岐にわたる用途に対応したインタープリタ型プログラミング言語である。収録した音源の数値計算処理や迅速なグラフ作成が可能であり、物理的評価のツールとして有用である。このため、本研究では MATLAB を採用した。

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

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

Cubase Pro 12 は、ドイツの Steinberg 社が開発した音楽制作ソフトウェア「Cubase」シリーズの最上位版で、高性能な音楽制作ソフトウェアであり、作曲、録音、編集、ミキシングを行うための多機能なツールを備えている。プロフェッショナル向けの柔軟なワークフローと高品質な音響処理が特徴である。

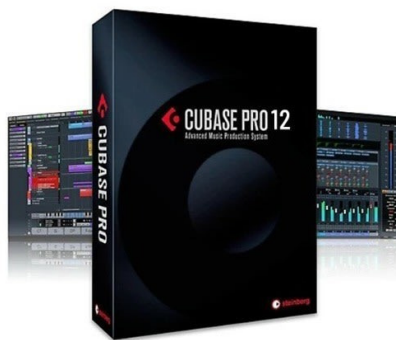


図 3.1-1 再生ソフト

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)

GENELEC 8050B はコンパクトなエンクロージャーサイズでありながら高 SPL 出力、幅広い帯域幅を提供する 2 ウェイの アクティブモニタリングラウドスピーカーである。



図 3.1-2 スピーカー

引用：<https://www.genelec.jp/active-2-way-studio-monitors/8050b/>

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

RME Fireface UCX II は、RME 社により開発された高性能で、低レイテンシー、優れた音質、多数の入出力を備えているオーディオインターフェイスである。



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 実験方法

3.2.1 音源作成

VBAP に基づいて記述された式(5)～(7)を用い、仮想的な点音源ひとつのみを想定した条件下でスピーカーの出力比率を計算するプログラムを作成した。一方で、ホワイトノイズにバンドパスフィルタを適用して、62.5Hz、125Hz、250Hz、500Hz、1kHz、2kHz、4kHz の 7 種類の周波数帯域に帯域制限ノイズを作成した。これらの帯域制限ノイズに計算された出力比率を掛け算し、各スピーカーから出力する音源サンプルとした。

仮想的な点音源の方向は、方位角（前後方向を示す角度）と仰角（上下方向を示す角度）の 2 つの角度に基づいて制御した。方位角は正面を 0° 、真後ろを 180° と定義し、左右対称性を考慮して左側のみを対象とした。仰角は真上を 90° 、真下を -90° とし、方位角および仰角をそれぞれ 30° ごとに分割した結果、（方位角 7 通り $\times$ 仰角 5 通り + 真上 1 通り + 真下 1 通り） $\times$ 周波数 7 通りの合計 259 通りの音源サンプルを作成した。

3.2.2 実験内容

前項で述べたように計 259 通りの音源サンプルを作成後、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。音源サンプルを再生する順番は周波数帯域ごとにランダムに設定した。

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（図 3.2-1）。スピーカーの配置は、図 3.2-1 の写真左奥方向を正面として中央の椅子に座った時（図 3.2-2）、被験者の頭位置を水平とし、①右斜め前 45° ②左斜め前 45° ③左斜め後ろ 45° ④右斜め後ろ 45° ⑤真上 ⑥真下の 6 つの位置に設定した。また、各スピーカーは被験者の頭位置から等距離（1 m）の位置に配置した。

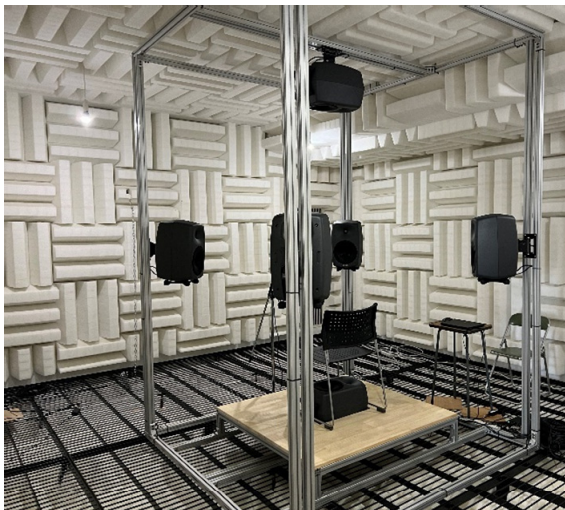


図 3.2-1 立体音響装置



図 3.2-2

音源再生の条件は、各音源サンプルの再生時間を 3 秒、音源サンプル間のインターバルを 10 秒に設定し、インターバル中に被験者に音源方向を回答させた。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 問で構成され、このプロセスを 7 つの周波数帯域にわたって繰り返し実施した。なお、練習問題は本問題から抽出したもので、被験者が実験手順に慣れるための予備実験として設けた。

3.3 聴感評価

被験者 15 名に対して、各音源を 1 回ずつ聴取させた。実験手順として、まず 4 kHz の周波数から開始し、順次 2 kHz、1 kHz と低い周波数へ移行する形式で進行した。これは、周波数帯域が低いほど人間にとって方向定位が困難になるため、高い周波数帯域から開始することで被験者を慣れさせる目的がある。また被験者は実験中、頭部を自由に動かしてよいと教示した。

評価は方位角及び仰角をそれぞれ 10° 刻みに分割して実施した。方位角は 1～19、仰角は A～S の番号を付した図（図 3.4-1）を用い、この図を添付した回答シート（図 3.4-2）を作成した。実験中、被験者にはこのシートを用いて聴取した音像の方向を解答させた。

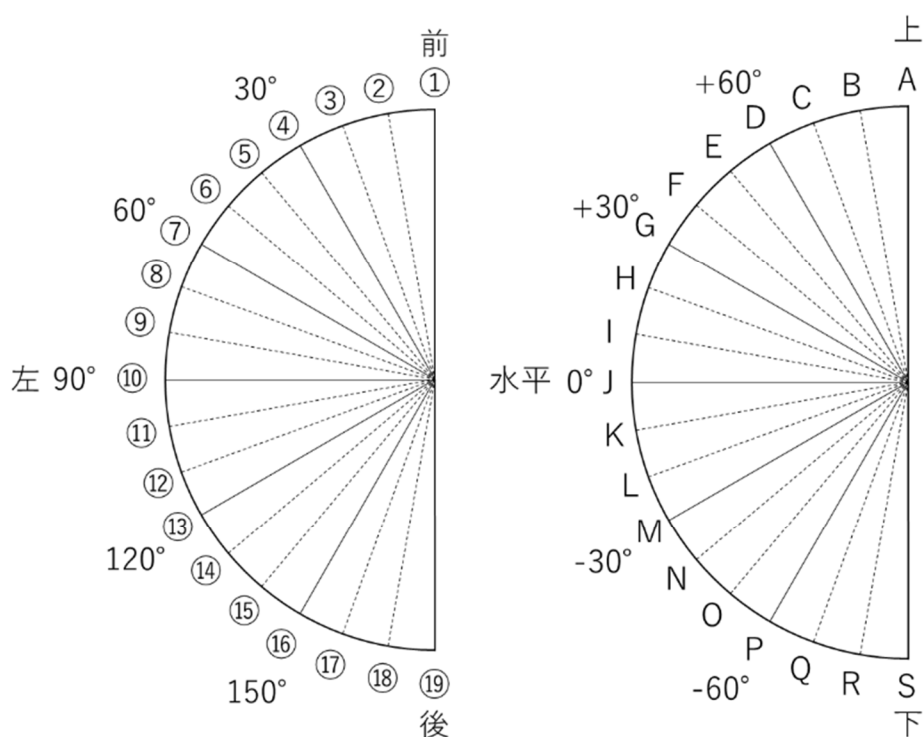
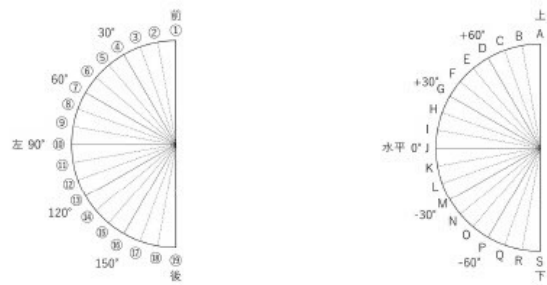


図 3.4-1



62.5Hz

前後	上下

前後	上下

前後	上下

前後	上下

125Hz

前後	上下

前後	上下

前後	上下

前後	上下

図 3.4-2 回答シート

4 研究結果と考察

前節で述べた方法で実施した 15 名の回答を集計し、4.1 節～4.3 節の方法で分析を行った。

4.1 バブルチャート

結果をバブルチャートで図 4.1.1-1～図 4.1.1-7、図 4.1.2-1～図 4.1.2-7 に示す。

バブルチャートは 3 つのデータ変数を同時に視覚的に表現するグラフである。本研究では、横軸に提示角度 [度] (仮想的な点音源の角度)、縦軸に回答角度 [度] (被験者が回答した角度) を設定し、円 (バブル) の大きさを回答人数を表現した。

また、チャートの対角上に二本の斜線が引かれており、右上がりの直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いる。右下がりの破線は、提示された音の方向を前後逆に認識した場合の結果が示される基準線を表している。この破線付近にデータがプロットされるとき、提示角度と回答角度が前後対称の関係になっている (例えば、提示角度が 30 度の場合に回答角度が 150 度になる) ことを意味する。

ここでは、方位角方向と仰角方向の結果を統合的に示し、それぞれを分けた詳細な結果については省略している。すなわち、方位角方向バブルチャートでは仰角に関わらず、その方位角に提示したすべての回答を合計しており、仰角方向バブルチャートでは方位角に関わらず、その仰角に提示したすべての回答を合計している。なお、仰角方向バブルチャートにおいて、仰角が 90 度および -90 度の場合については、他の仰角の値との比較を容易にするため、結果を 7 倍して表示している。仰角方向ごとに分けた場合の方位角方向の結果や、方位角方向ごとに分けた場合の仰角方向の結果については、付録に詳細を掲載している。

4.1.1 方位角方向バブルチャート

方位角方向の結果をまとめたバブルチャートを以下に示す。

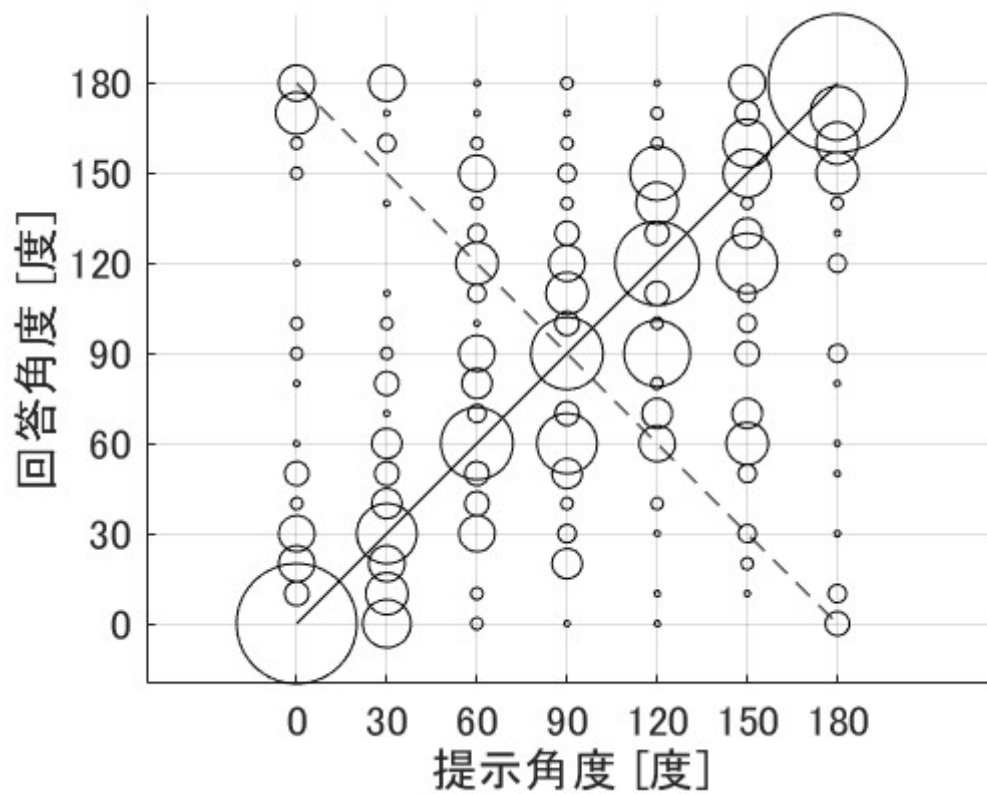


図 4.1.1-1 方位角 62.5 Hz バブルチャート

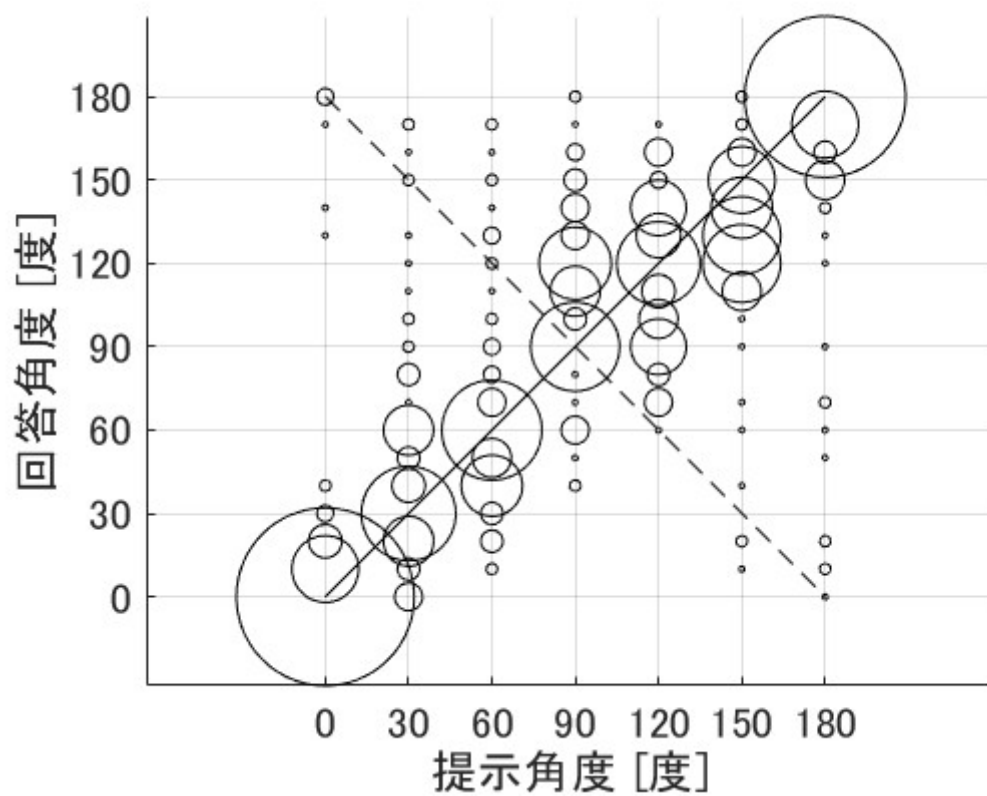


図 4.1.1-2 方位角 125 Hz バブルチャート

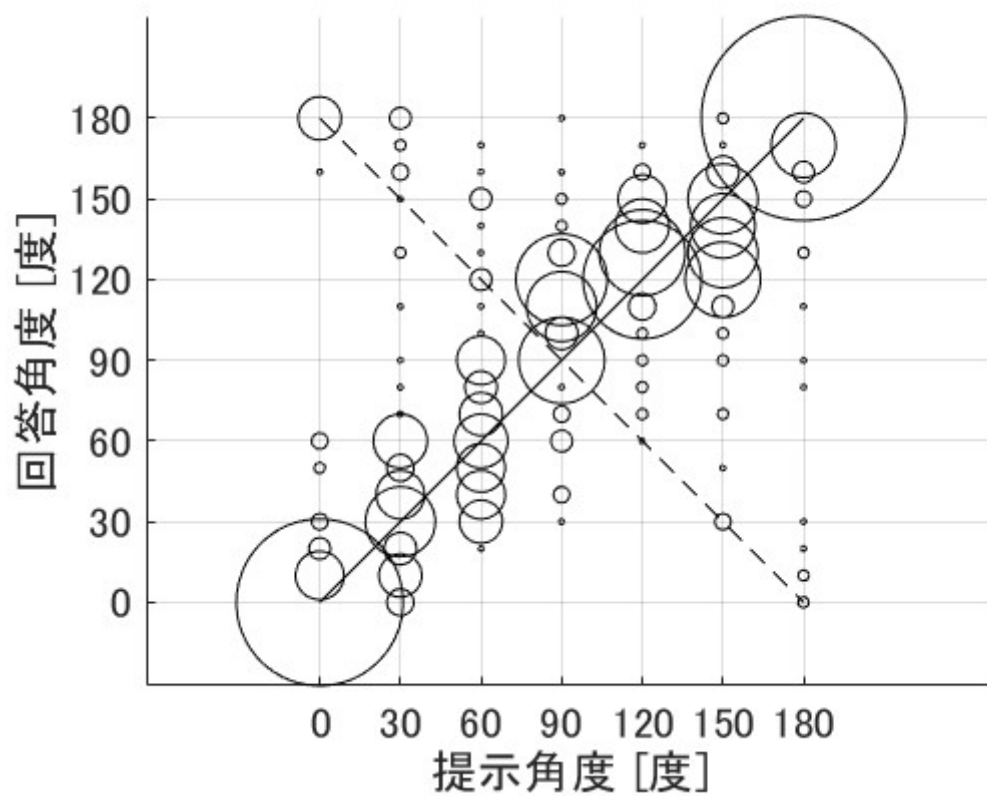


図 4.1.1-3 方位角 250 Hz バブルチャート

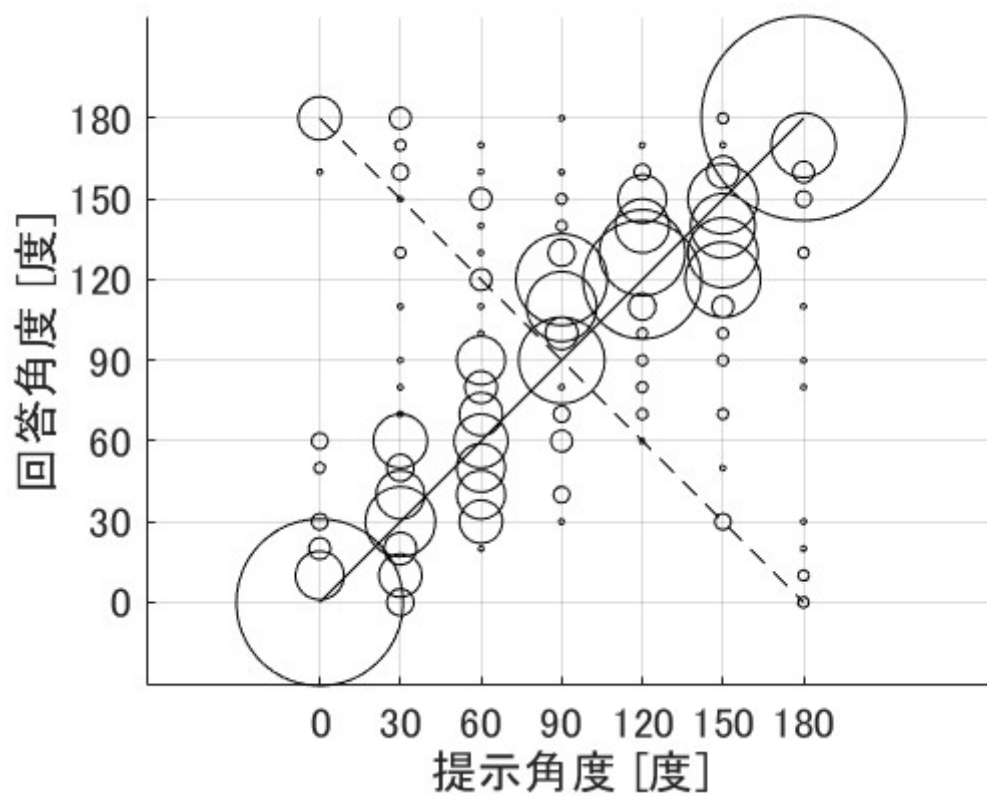


図 4.1.1-4 方位角 500 Hz バブルチャート

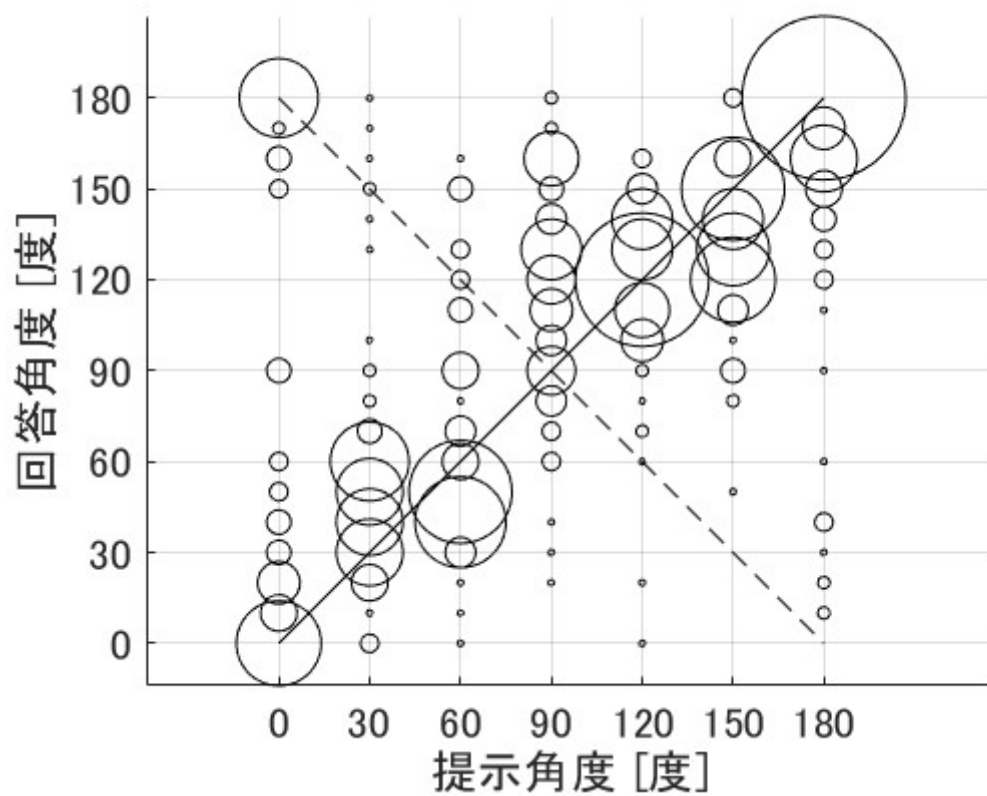


図 4.1.1-5 方位角 1000 Hz バブルチャート

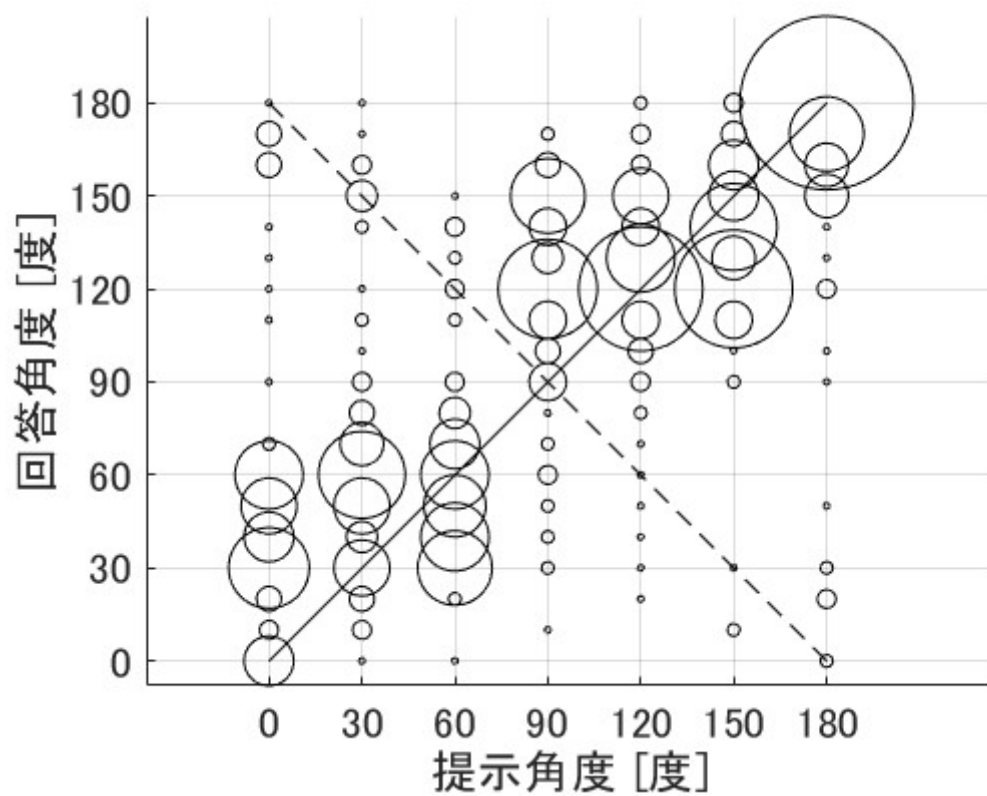


図 4.1.1-6 方位角 2000 Hz バブルチャート

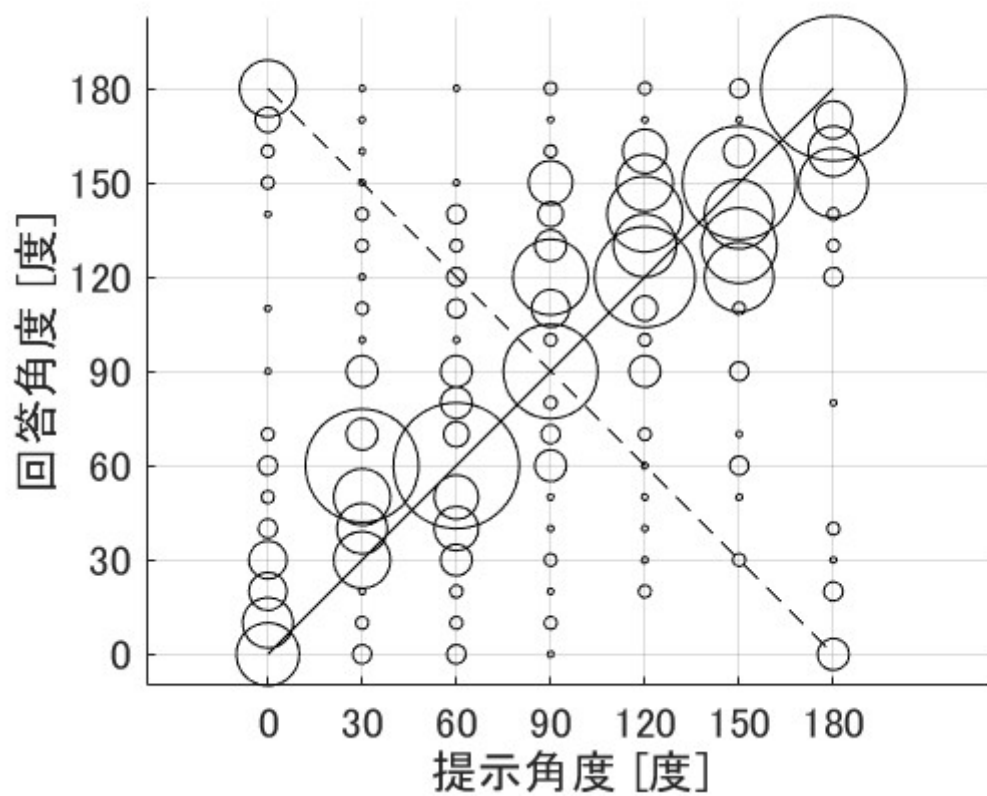


図 4.1.1-7 方位角 4000 Hz バブルチャート

方位角方向について、62.5 Hz（図 4.1.1-1）においては、予想以上に正の相関が見られたものの、正答ラインから外れた回答も多く見られ、回答にはばらつきが認められた。125 Hz（図 4.1.1-2）においては、顕著な正の相関が確認され、回答のばらつきも少なく、提示角度から概ね 30° 以内に回答が集中する傾向が見られた。250 Hz（図 4.1.1-3）、500 Hz（図 4.1.1-4）では、より顕著な正の相関が確認され、回答のばらつきも少なく、ほとんどが 30° 以内の誤差に収まった。また、前方よりも 90° より後方がより正答に近い回答が多かった。1000 Hz（図 4.1.1-5）では、125 Hz から 500 Hz と比較すると正の相関がやや低下したものの、 90° より後方では依然として 30° 以内に回答が集中する傾向が見られた。しかし、他の周波数と比較して、前方から真横にかけてのずれが顕著であり、特に 0° の提示時に 180° と誤認する回答が多く観察された。2000 Hz（図 4.1.1-6）においては、 90° より後方の位置では 30° 以内に回答が集中し、他の周波数と遜色ない正の相関が確認された。一方で、真正面から真横にかけてのずれはおおよそ 60° 以内に収まり、一定の正の相関が見られた。また、 90° の提示時には比較的后方寄りに知覚される傾向が示唆された。4000 Hz（図 4.1.1-7）では、ある程度の正の相関が確認されたが、 0° を 180° 、 180° を 0° と誤認する回答が散見された。全体的には前後 30° 以内の誤差に収まる傾向が見られた。

4.1.2 仰角方向バブルチャート

仰角方向の結果をまとめたバブルチャートを以下に示す。

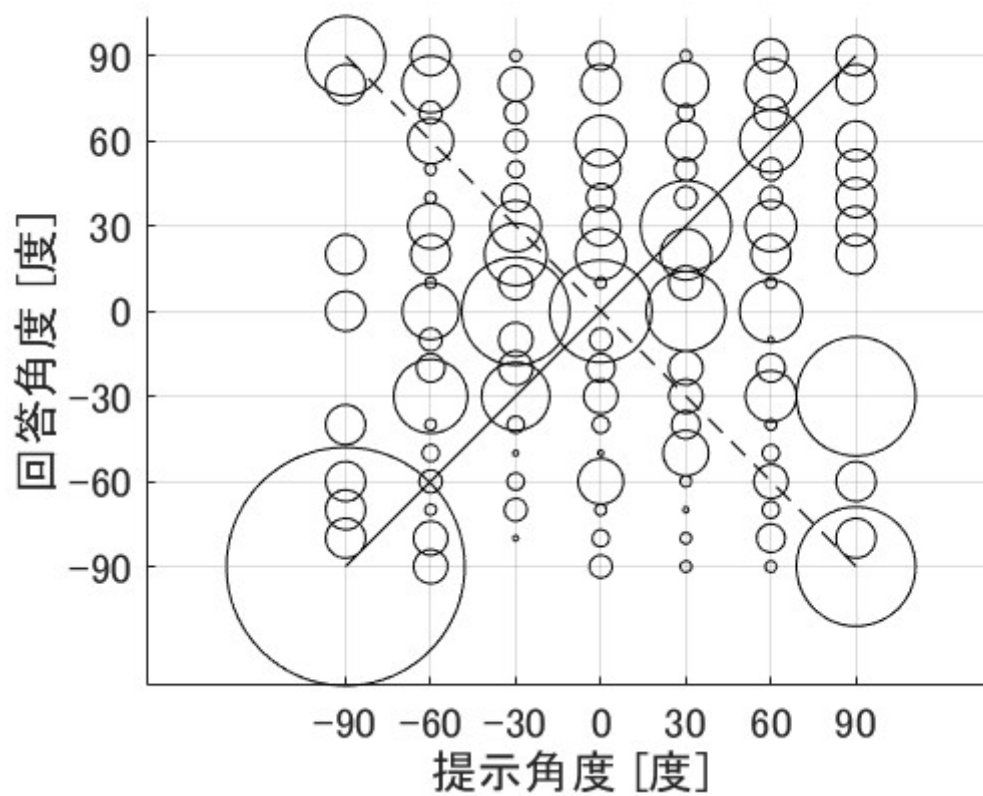


図 4.1.2-1 仰角 62.5 Hz バブルチャート

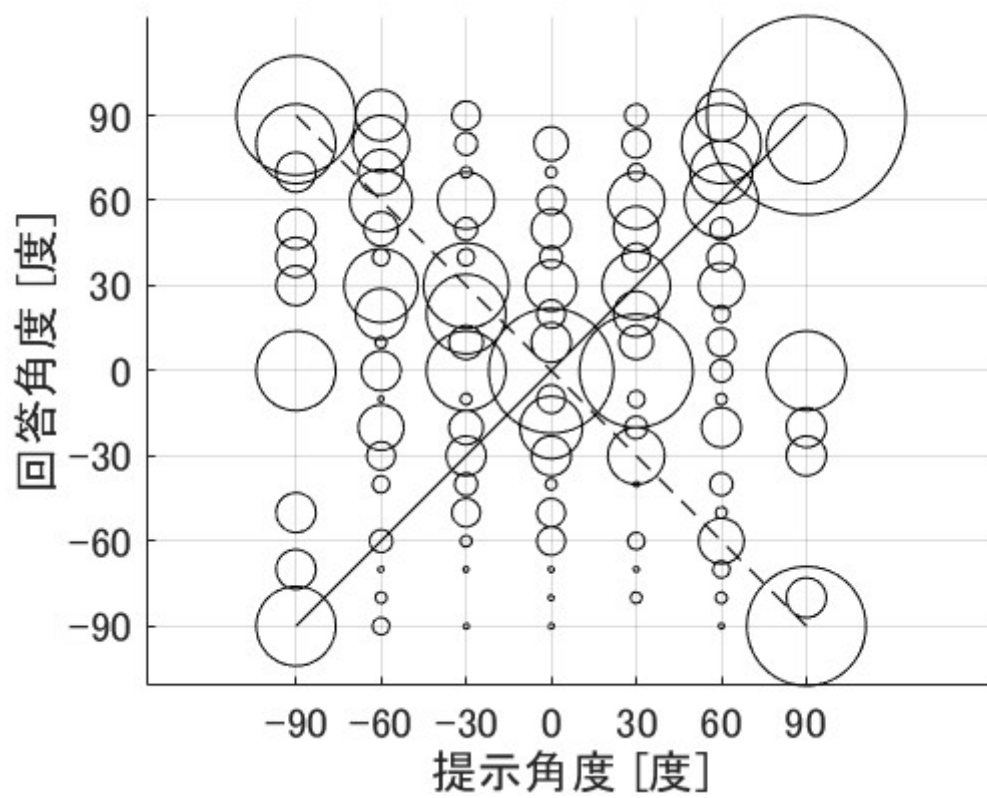


図 4.1.2-2 仰角 125 Hz バブルチャート

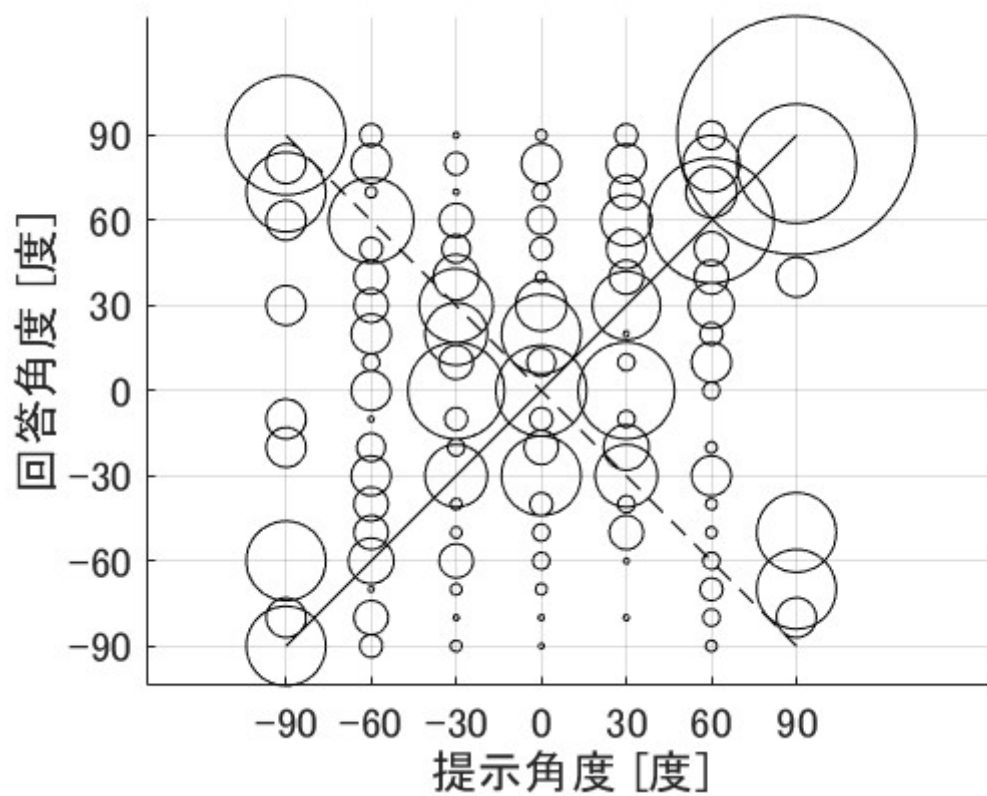


図 4.1.2-3 仰角 250 Hz バブルチャート

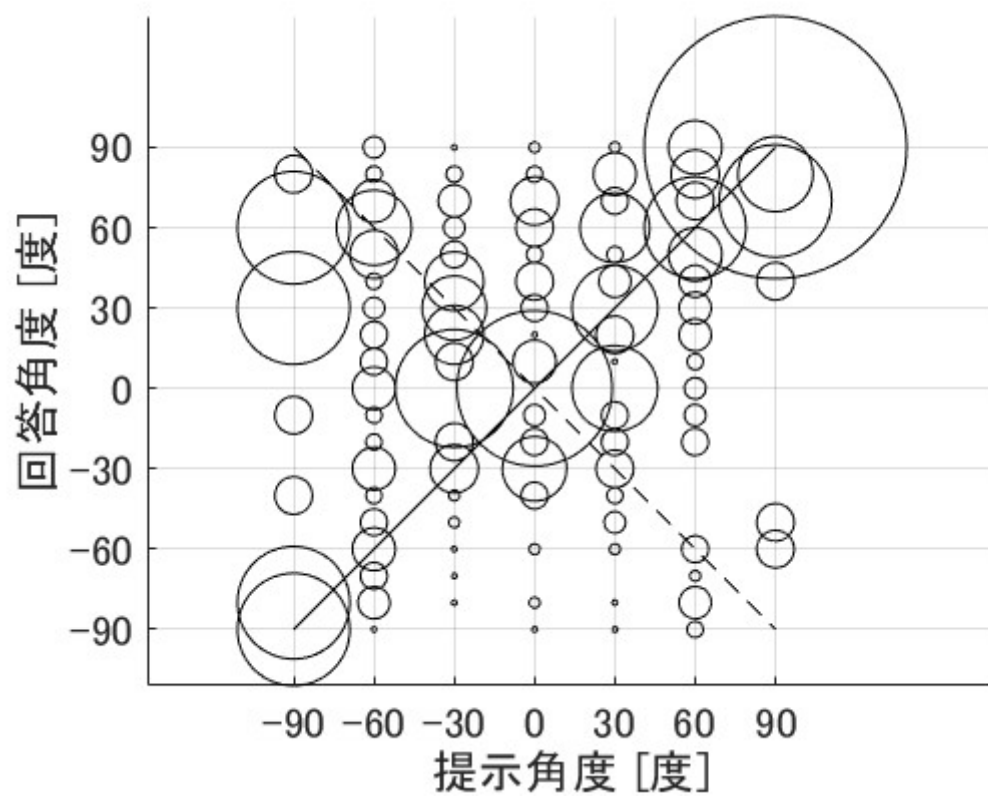


図 4.1.2-4 仰角 500 Hz バブルチャート

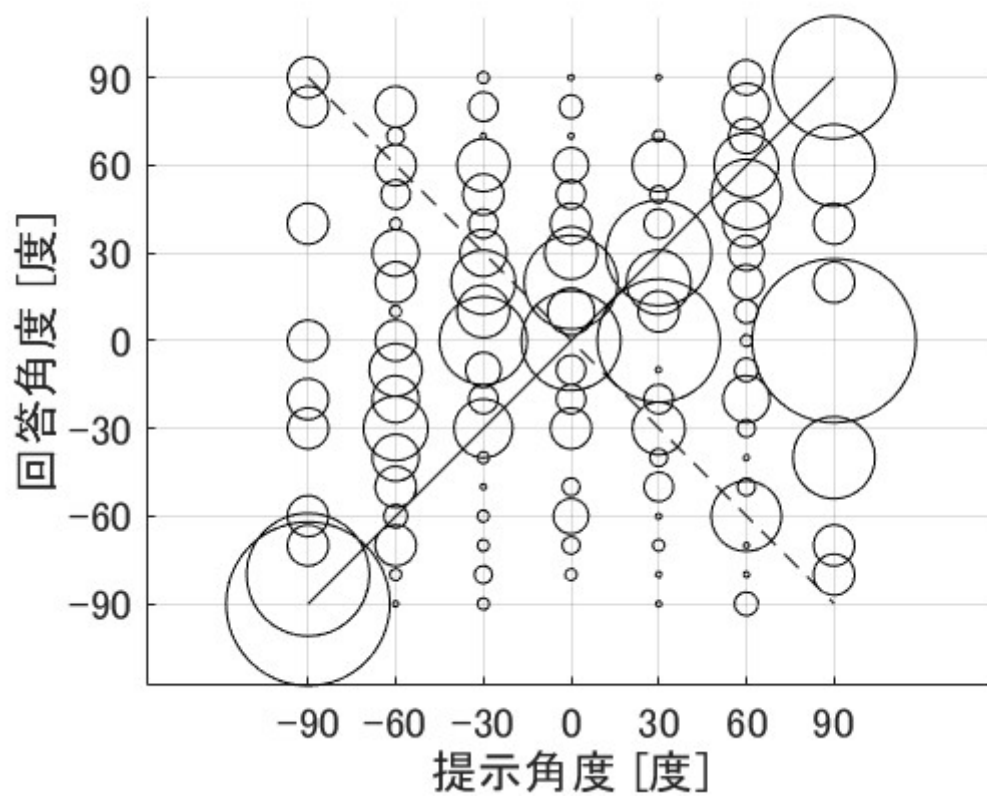


図 4.1.2-5 仰角 1000 Hz バブルチャート

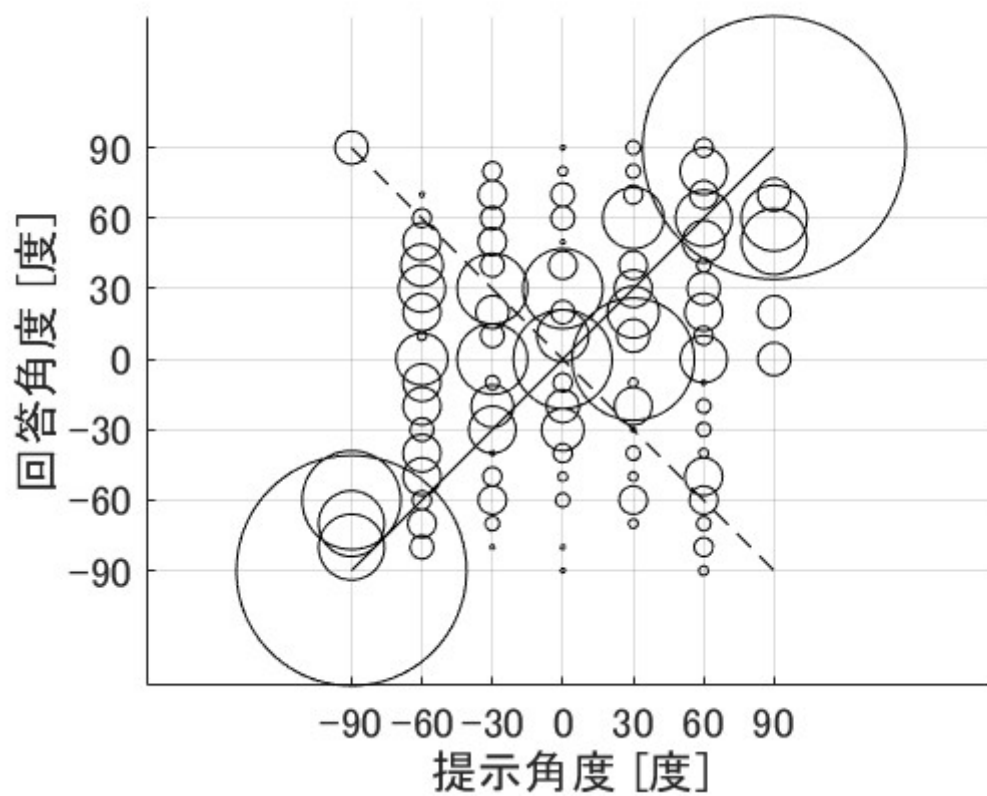


図 4.1.2-6 仰角 2000 Hz バブルチャート

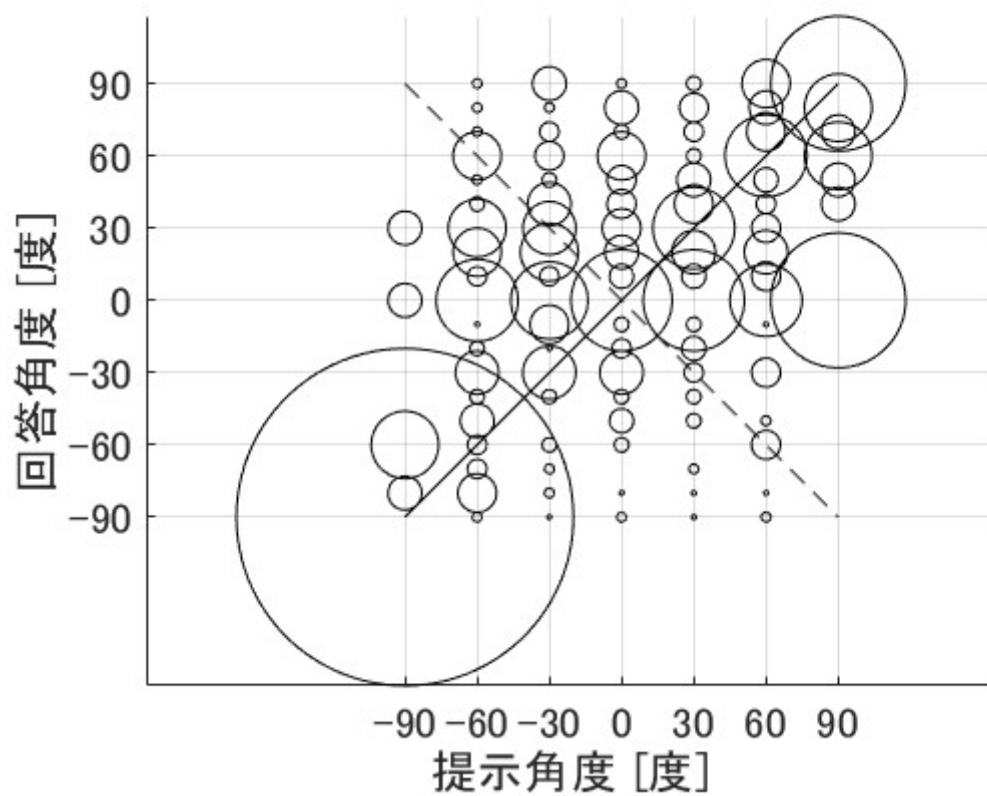


図 4.1.2-7 仰角 4000 Hz バブルチャート

仰角方向について、62.5 Hz（図 4.1.2-1）においては、真下の正答率が高いものの、回答の相関関係はほとんど確認できなかった。125 Hz（図 4.1.2-2）では、真上の正答者数が比較的多く、提示角度が下方であっても、回答は上方となる場合が多かった。また、真下を真上、真上を真下と回答する例も一定数見られた。250 Hz（図 4.1.2-3）では、62.5 Hz および 125 Hz と比較すると若干の正の相関が確認された。特に、真上における正答者数が多かった。500 Hz（図 4.1.2-4）においては、62.5 Hz から 250 Hz に比べて正の相関がやや強く見られ、真上、真下、水平の回答が比較的まとまっていた。さらに、仰角が正の方向では、 $\pm 30^\circ$ 以内に回答が集中する傾向が見られる。1000 Hz（図 4.1.2-5）では、回答がばらついており、明確な相関は確認できなかった。2000 Hz（図 4.1.2-6）では、真下および真上の正答者数が多く、水平付近（ $-30^\circ \sim 30^\circ$ ）における回答のずれは $\pm 30^\circ$ 以内に収まる傾向があった。これにより、弱い正の相関が認められた。4000 Hz（図 4.1.2-7）においても、弱い正の相関が見られた。特に真下の正答者数が非常に多く、また全体的に音が水平方向に聞こえる傾向があった。

4.2 正答率

62.5 Hz～4000 Hz の各周波数について、仰角方向および方位角方向に分け、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、その正答率をグラフ化したものを図 4.2-1 に示す。

表 4.2-1 各周波数の正答率

周波数	仰角	方位角
62.5Hz	12%	20%
125Hz	12%	27%
250Hz	14%	28%
500Hz	16%	23%
1000Hz	12%	20%
2000Hz	13%	19%
4000Hz	15%	23%

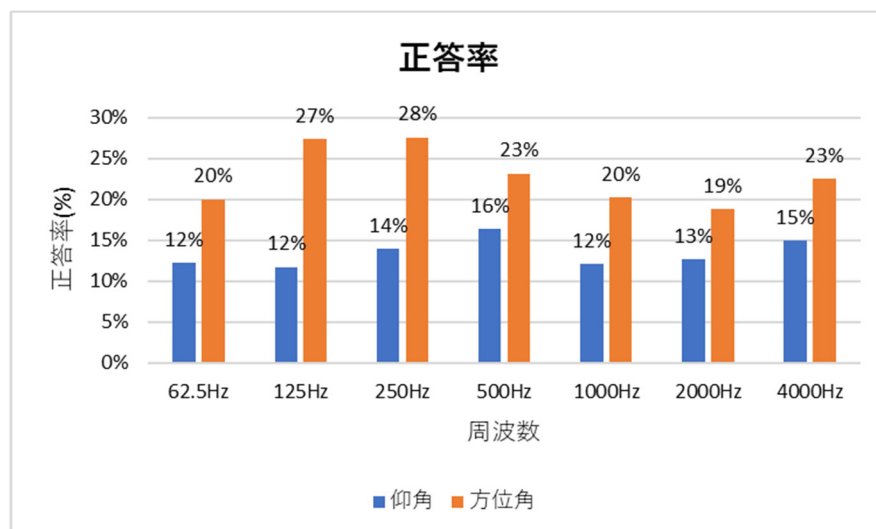


図 4.2-1 正答率推移

バブルチャートからも確認できたが、仰角方向の正答率は方位角方向に比べて低いことがわかる。また、仰角方向では、周波数による正答率の変動もそれほど大きくなかった。

4.3 角度差

方位角方向について、前後誤差をすべて排除し（ $90^{\circ} \sim 180^{\circ}$ を $90^{\circ} \sim 0^{\circ}$ に変換）、62.5 Hz～ 4000Hz の各周波数における各回答の正解からの角度差を算出した。その平均を表 4.2-2 に示し、平均角度差の推移を図 4.2-2 に示す。なお、この角度差は値が低いほど、提示角度からのずれが少ないことを意味する。

表 4.2-2 方位角方向 平均角度差

周波数	平均角度差(°)
62.5Hz	21.0
125Hz	16.8
250Hz	15.5
500Hz	19.6
1000Hz	20.2
2000Hz	23.1
4000Hz	19.9

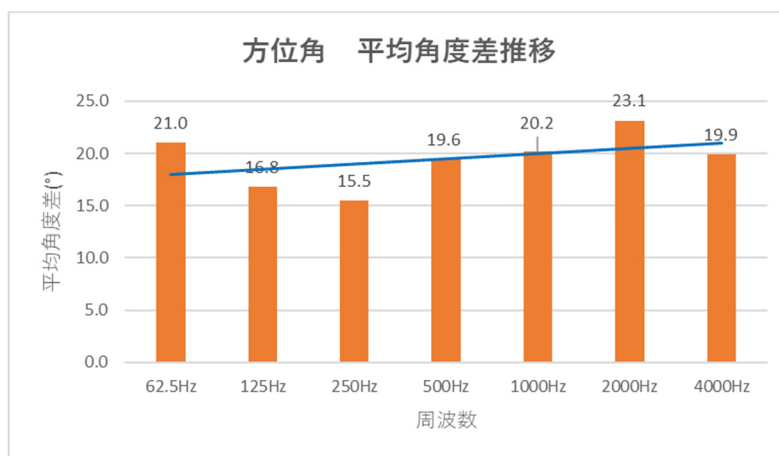


図 4.2-2 方位角方向 平均角度差推移

また仰角方向も同じように、62.5 Hz～4000 Hz の各周波数における各回答の正解からの角度差を算出し、その合計および平均を表 4.2-3 に示し、平均角度差の推移を図 4.2-3 に示す。

表 4.2-3 仰角方向 平均角度差

周波数	平均角度差(°)
62.5Hz	54.3
125Hz	55.0
250Hz	50.2
500Hz	48.2
1000Hz	48.1
2000Hz	44.8
4000Hz	45.8

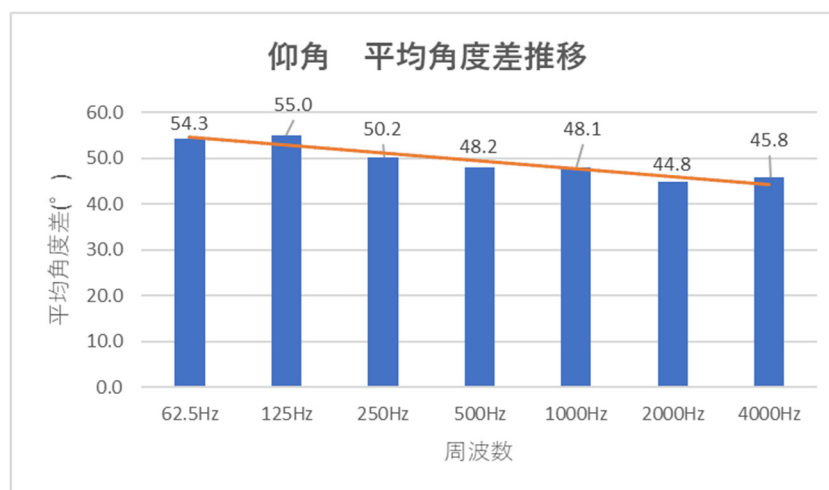


図 4.2-3 仰角方向 平均角度差推移

方位角方向の平均角度差の推移は、周波数の増加に伴い直線的な変化を示さず、非線形的な変動が観察された。一方、仰角方向においては、周波数の増加に伴い平均角度差が減少する傾向が確認された。しかし、仰角方向における平均角度差が最小でも約 45° と依然として大きな値を示していることから、仰角方向における音像の方向定位に限界があることが示唆される。

4.4 考察

本研究では、過去の研究例[5]などから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～4.3 節の結果から、主に 1000 Hz および 2000 Hz の結果が、低周波数帯域（125 Hz～500 Hz）と比較して精度が低いことが確認された。これは、一般的に高周波数帯域の方が聞き取りやすく、方向定位に適しているとされる従来の知見と異なる結果である。人間が音の方位角方向定位を行う際には、2000 Hz 未満の低周波数音に対して機能する両耳間時間差（左右の耳に音が届く時間差）と、2000 Hz 以上の高周波数音に対して機能する両耳間音量差（両耳に届く音量の差）の二つの要素が関与する。今回の結果では、125 Hz～500 Hz では両耳間時間差が機能し、4000 Hz では両耳間音量差が適切に機能したため、高い定位精度が得られた可能性がある。一方で、1000 Hz および 2000 Hz は、両耳間時間差と両耳間音量差による判断の根拠が曖昧になりやすく、それが定位精度の低下につながった可能性が考えられる。特に真横方向の回答にばらつきが大きかったことから、水平面上のスピーカーを正面に対して斜め 45 度位置に配置したことなどが影響している可能性がある。

また時折、前方の提示を後方と認識するケースが見受けられたが、これは両耳間時間差、両耳間位相差に違いが無いことに加え、目の前に音源と成りうるものがないため、見えていない後方からの音だと誤認してしまうと考えられる。音源が視覚的に確認できていない状態の場合、後方からの音だと認識しやすいという仮説は今後さらなる検証の余地があるものと思われる。

さらに、全体的に仰角方向の定位精度は、方位角方向に比べて大幅に低かった。この原因として、仰角方向では両耳間時間差や両耳間音量差が活用されないため、全体的な精度が低下した可能性が考えられる。特に、 0° より下方の音が 0° よりも上方に聞こえるといった回答をした被験者が多く見られた。実験環境として、真下のスピーカーが被験者の座るパイプ椅子の下に設置されていたこと、またその周囲が木材の床であったため、音の反響によって音像の方向がぼやけたことも一因と考えられる。さらには、システム全体に関して十分な周波数特性の補正がなされていなかったため、仰角方向の定位に重要な周波数情報が欠落していた可能性もある。

5 結言

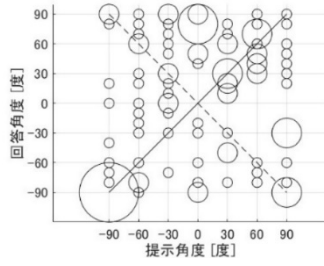
本研究では、VBAP を実装した 6ch スピーカーアレイにおける再現音場での方向定位精度を実験的に評価し、周波数帯域ごとの定位精度を明らかにした。事前の予想に反して、周波数が高くなるほど精度が向上するという結果にはならず、特に 1000 Hz および 2000 Hz 帯域において、両耳間時間差および両耳間音量差が十分に機能せず、方向定位精度が低下する結果となった。また、仰角方向における方向定位精度が顕著に低かったことや、前方と後方の誤認識が見られたことが、再現装置としての課題として挙げられる。スピーカーアレイの規模や性能にも大きく依存すると思われるが、今後 VBAP がより実用的な三次元音場再生手法として広く適用されるためには、仰角方向の定位精度が低くなった原因の解明、ならびに、それを踏まえた定位精度の向上が必要である。

参考文献

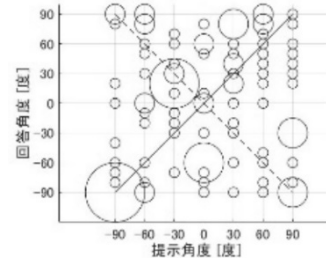
- [1] V. Pulkki, "Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning," Journal of the Audio Engineering Society, vol. 45, no. 6, pp. 456-466, 1997.
- [2] M. A. Gerzon, "Periphony: With-height sound reproduction," Journal of the Audio Engineering Society, vol. 21, no. 1, pp. 2-10, 1973
- [3] A. J. Berkhout, "A holographic approach to acoustic control," Journal of the Audio Engineering Society, vol. 36, no. 12, pp. 977-995, 1988.
- [4] A. D. Blumlein, "Stereophonic Techniques," U.K. Patent 394,325, 1931. Reprinted in Stereophonic Techniques, Audio Engineering Society, New York, 1986.

付録

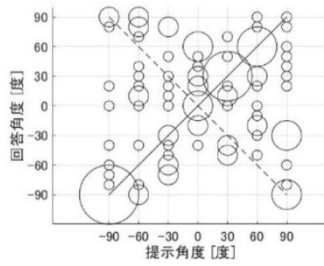
仰角方向 62.5 Hz



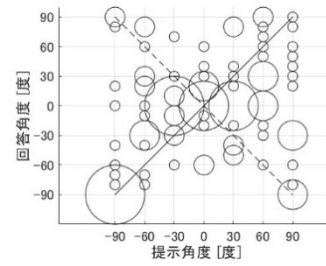
方位角 0° 62.5 Hz



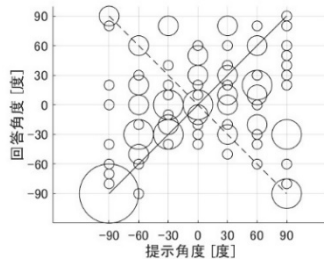
方位角 30° 62.5 Hz



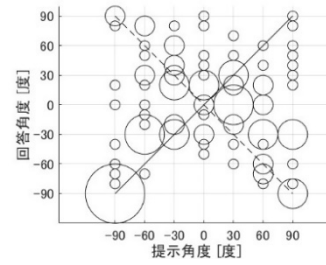
方位角 60° 62.5 Hz



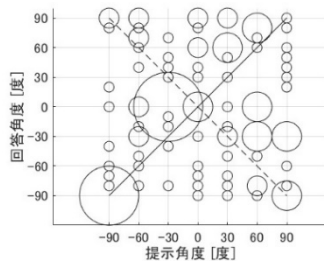
方位角 90° 62.5 Hz



方位角 120° 62.5 Hz

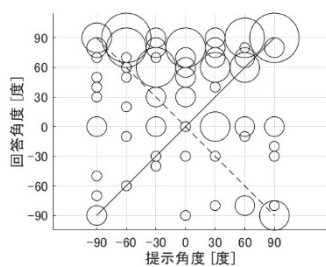


方位角 150° 62.5 Hz

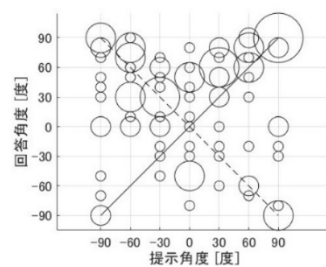


方位角 180° 62.5 Hz

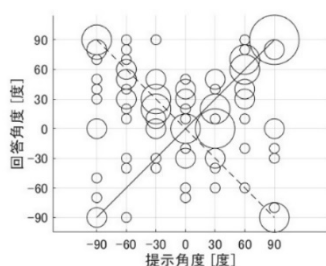
仰角方向 125 Hz



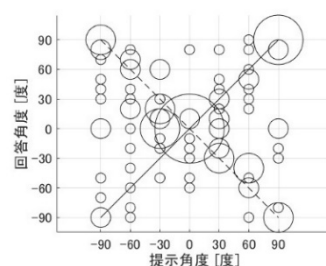
方位角 0° 125 Hz



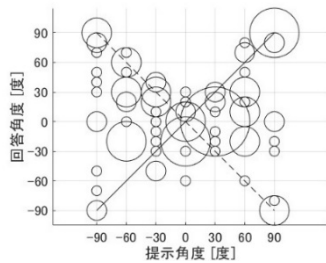
方位角 30° 125 Hz



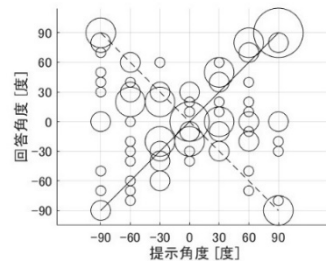
方位角 60° 125 Hz



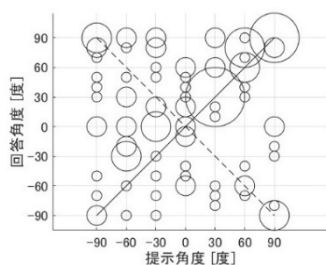
方位角 90° 125 Hz



方位角 120° 125 Hz

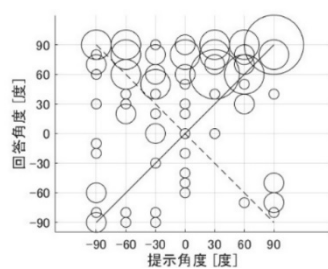


方位角 150° 125 Hz

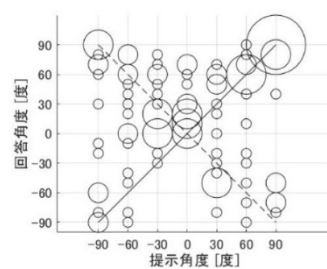


方位角 180° 125 Hz

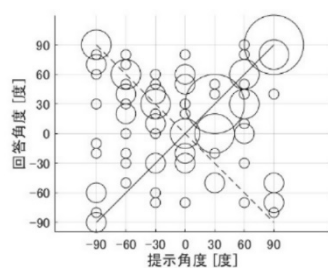
仰角方向 250 Hz



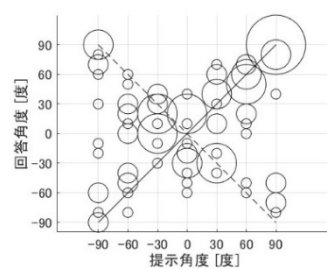
方位角 0° 250 Hz



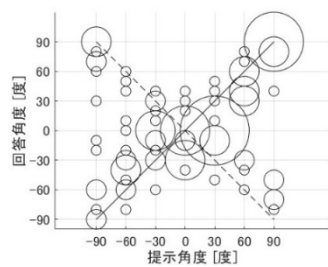
方位角 30° 250 Hz



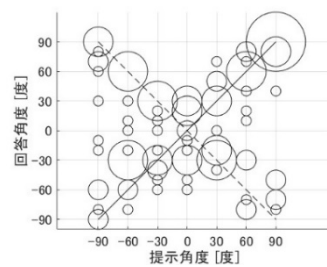
方位角 60° 250 Hz



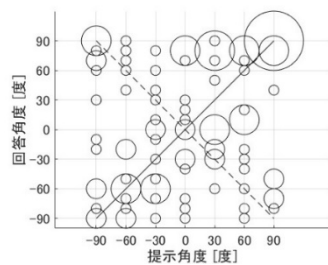
方位角 90° 250 Hz



方位角 120° 250 Hz

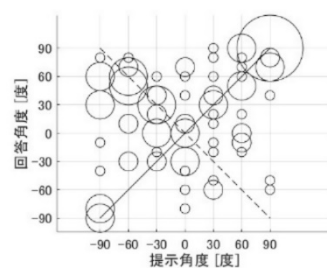
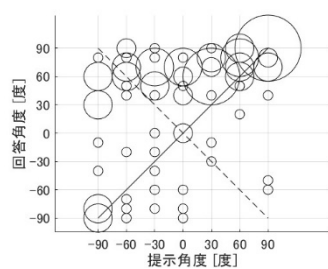


方位角 150° 250 Hz



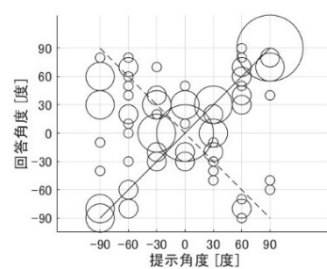
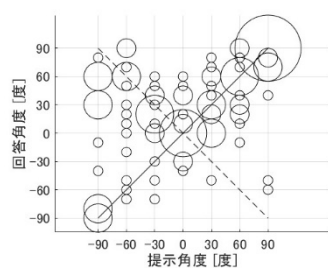
方位角 180° 250 Hz

仰角方向 500 Hz



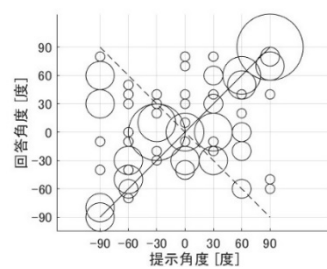
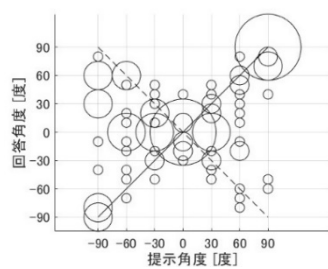
方位角 0° 500 Hz

方位角 30° 500 Hz



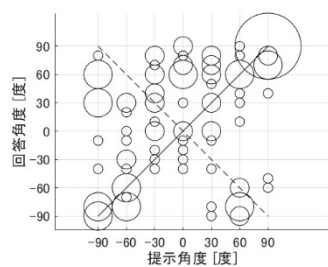
方位角 60° 500 Hz

方位角 90° 500 Hz



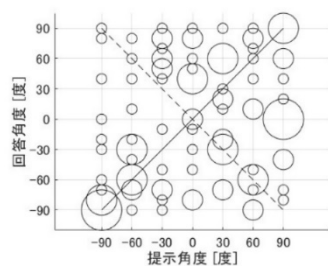
方位角 120° 500 Hz

方位角 150° 500 Hz

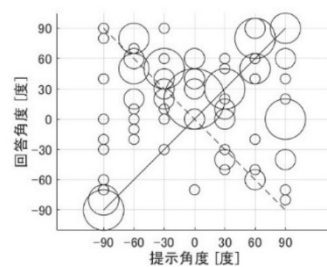


方位角 180° 500 Hz

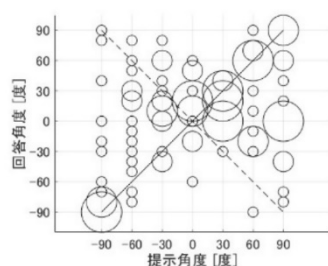
仰角方向 1000 Hz



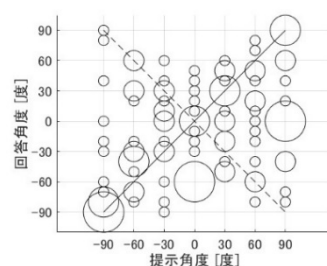
方位角 0° 1000 Hz



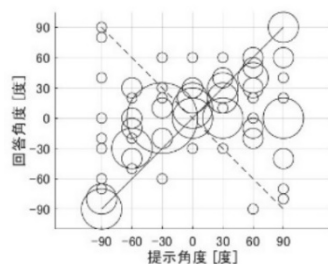
方位角 30° 1000 Hz



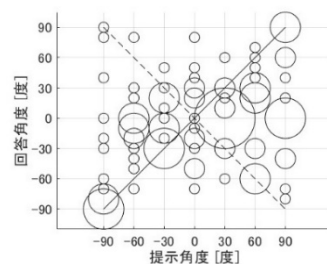
方位角 60° 1000 Hz



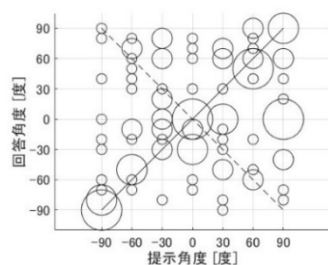
方位角 90° 1000 Hz



方位角 120° 1000 Hz

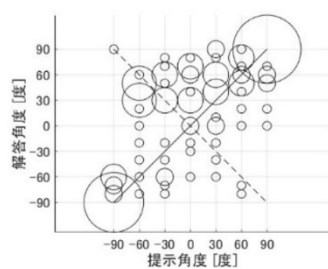


方位角 150° 1000 Hz

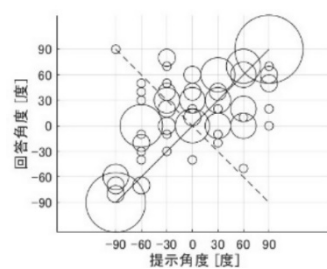


方位角 180° 1000 Hz

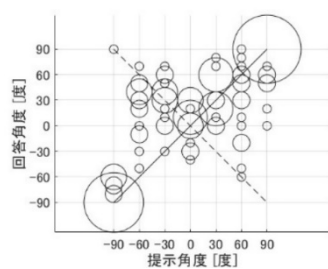
仰角方向 2000 Hz



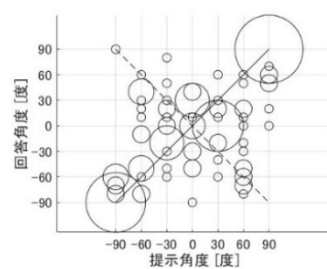
方位角 0° 2000 Hz



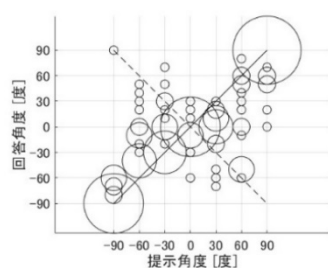
方位角 30° 2000 Hz



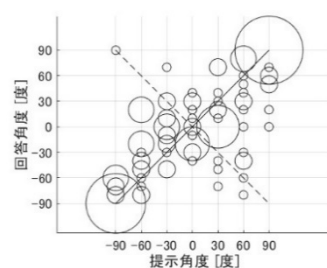
方位角 60° 2000 Hz



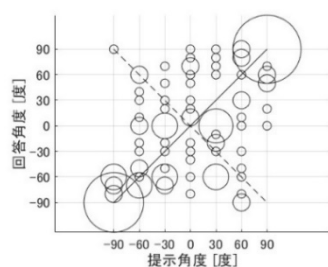
方位角 90° 2000 Hz



方位角 120° 2000 Hz

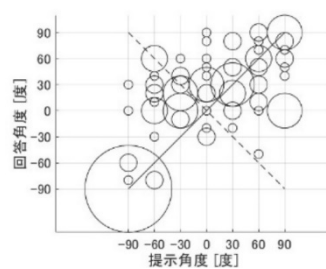
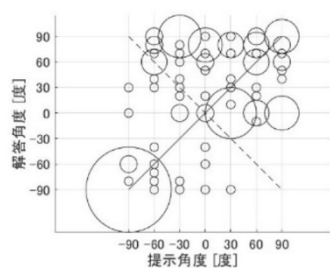


方位角 150° 2000 Hz



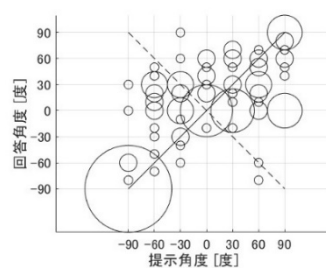
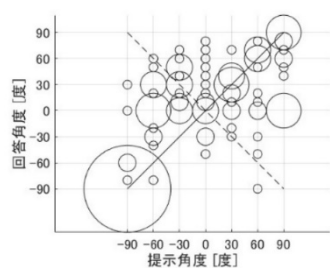
方位角 180° 2000 Hz

仰角方向 4000 Hz



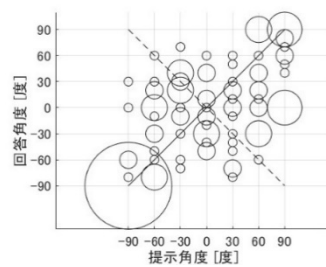
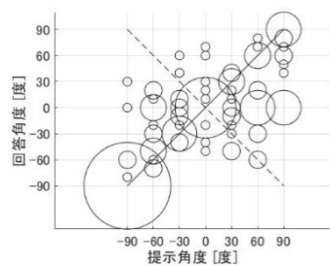
方位角 0° 4000 Hz

方位角 30° 4000 Hz



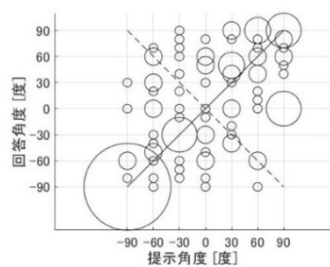
方位角 60° 4000 Hz

方位角 90° 4000 Hz



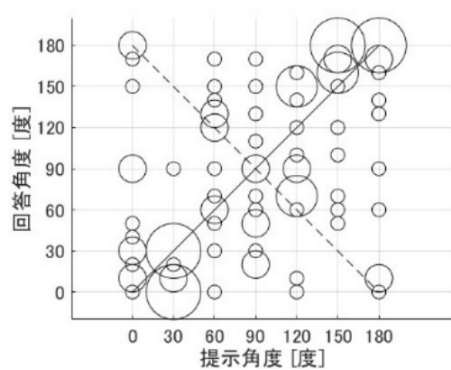
方位角 120° 4000 Hz

方位角 150° 4000 Hz

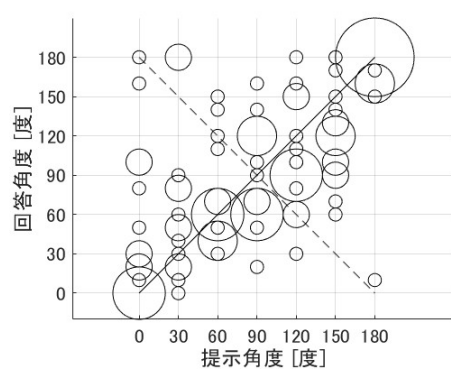


方位角 180° 4000 H

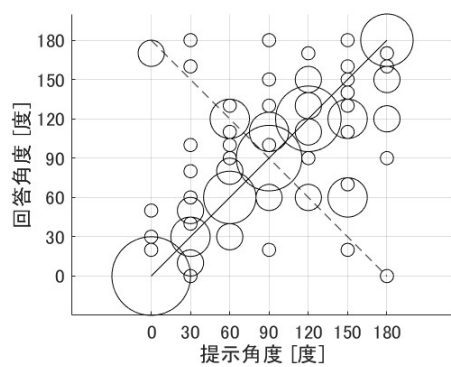
方位角方向 62.5Hz



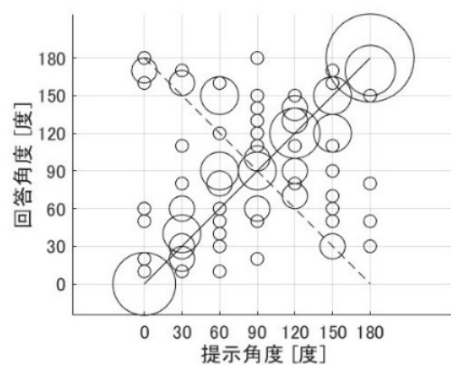
仰角 60° 62.5 Hz



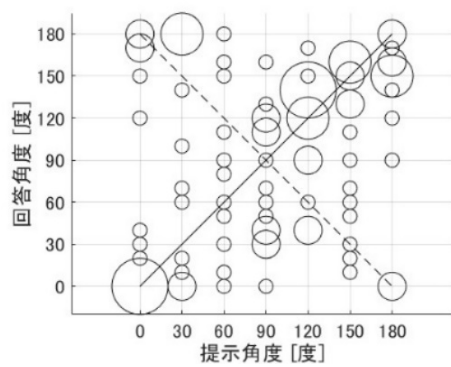
仰角 30° 62.5 Hz



仰角 0° 62.5 Hz

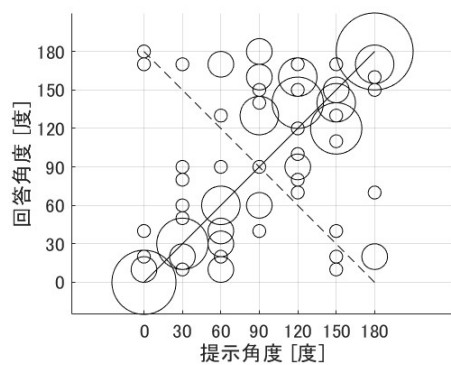


仰角 -30° 62.5 Hz

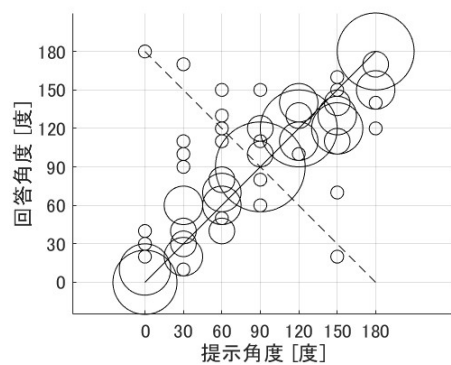


仰角 -60° 62.5 Hz

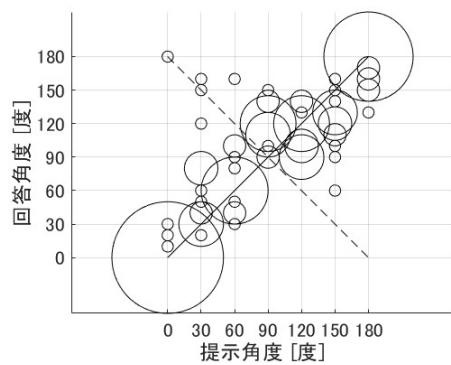
方位角方向 125 Hz



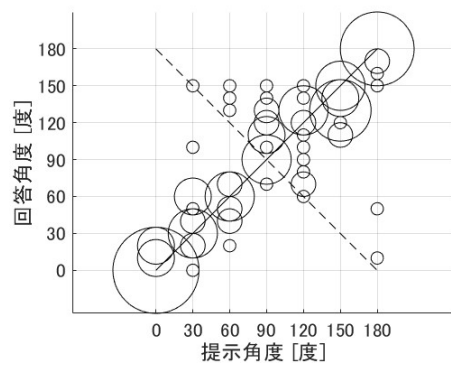
仰角 60° 125 Hz



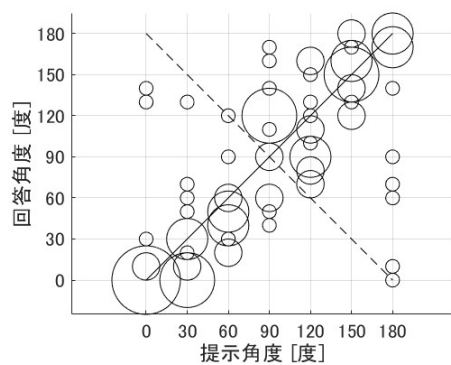
仰角 30° 125 Hz



仰角 0° 125 Hz

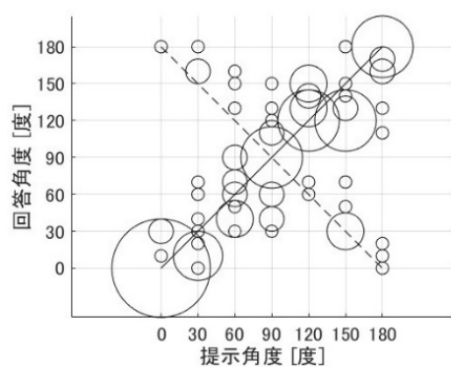


仰角 -30° 125 Hz

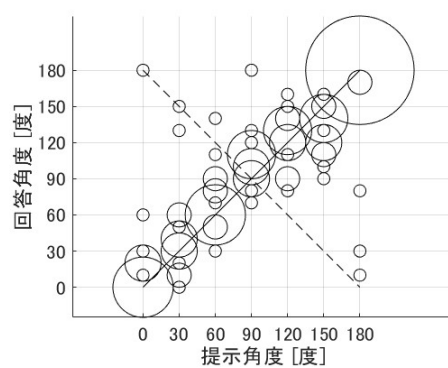


仰角 -60° 125 Hz

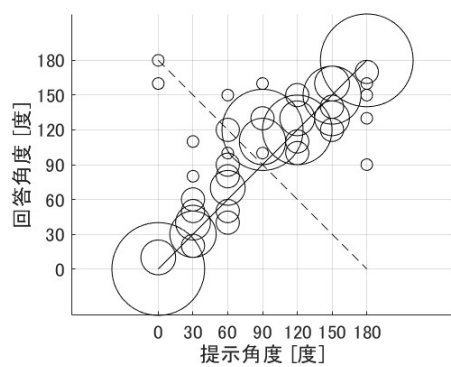
方位角方向 250 Hz



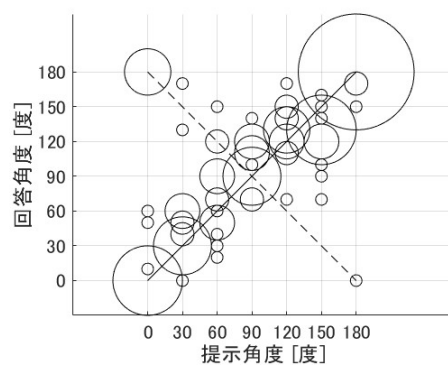
仰角 60° 250 Hz



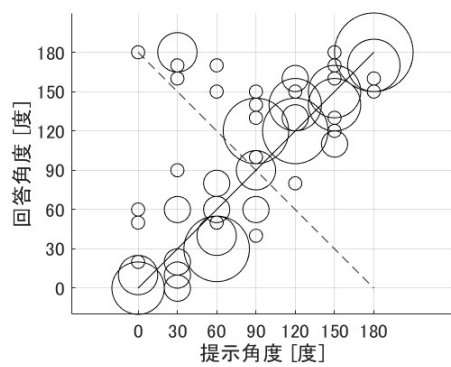
仰角 30° 250 Hz



仰角 0° 250 Hz

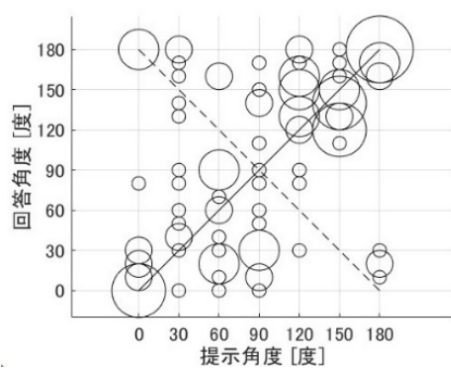


仰角 -30° 250 Hz

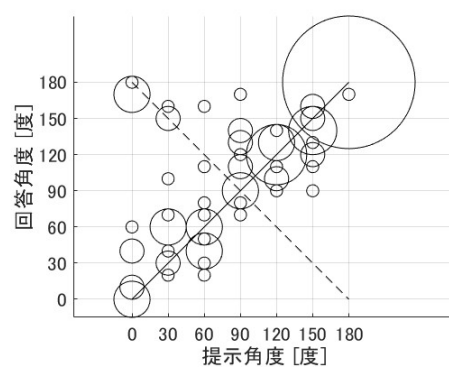


仰角 -60° 250 Hz

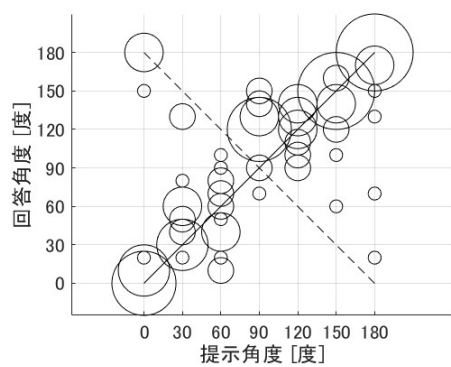
方位角方向 500 Hz



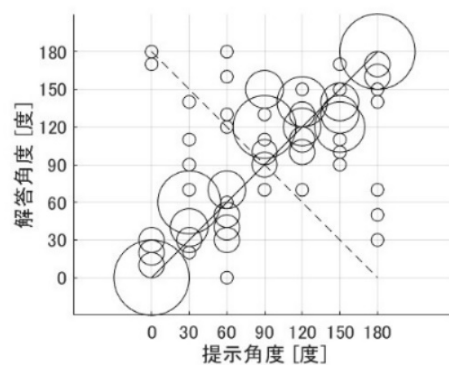
仰角 60° 500 Hz



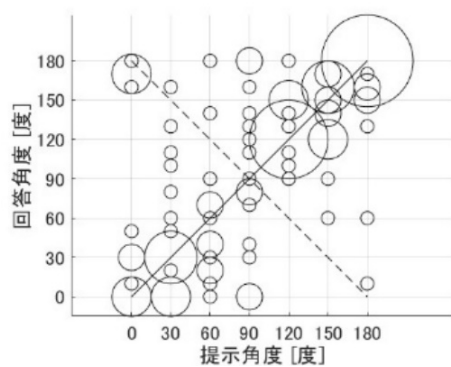
仰角 30° 500 Hz



仰角 0° 500 Hz

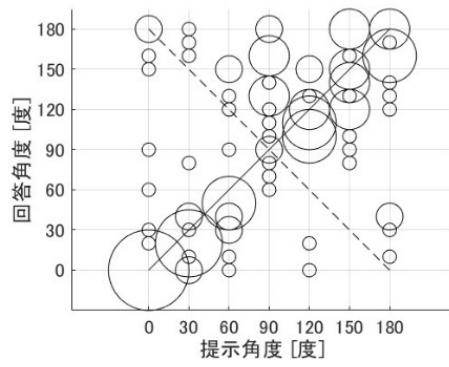


仰角 -30° 500 Hz

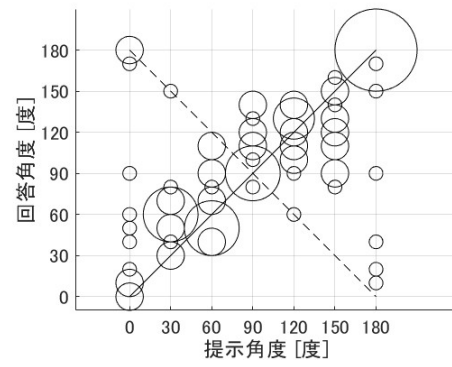


仰角 -60° 500 Hz

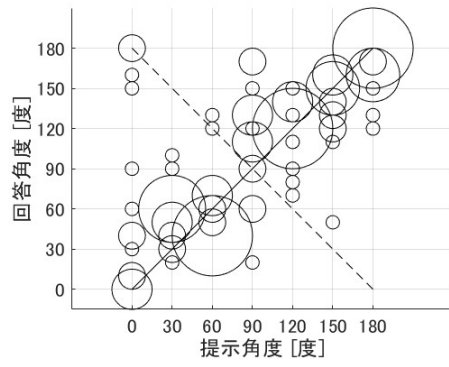
方位角方向 1000 Hz



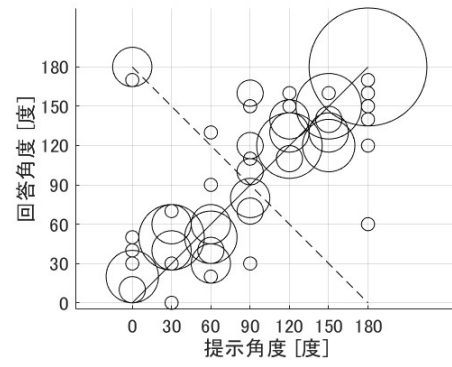
仰角 60° 1000 Hz



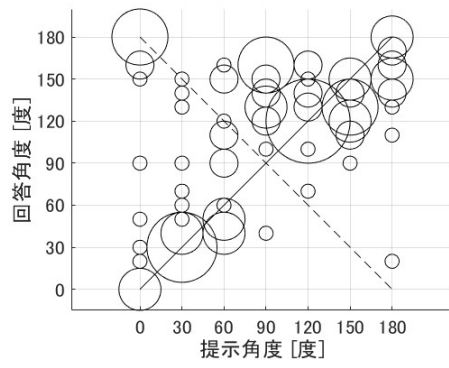
仰角 30° 1000 Hz



仰角 0° 1000 Hz

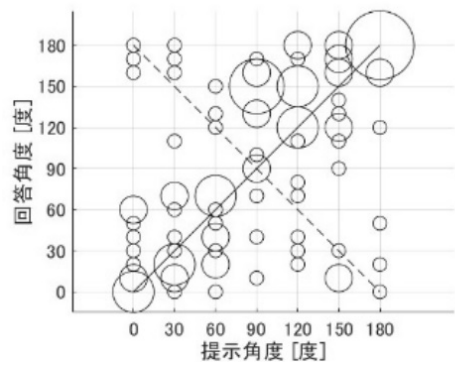


仰角 -30° 1000 Hz

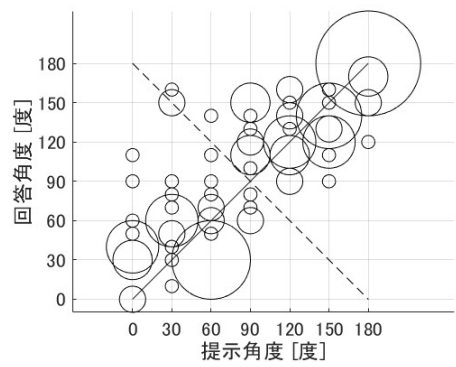


仰角 -60° 1000 Hz

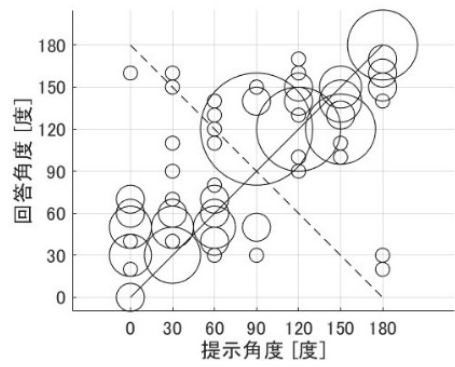
方位角方向 2000 Hz



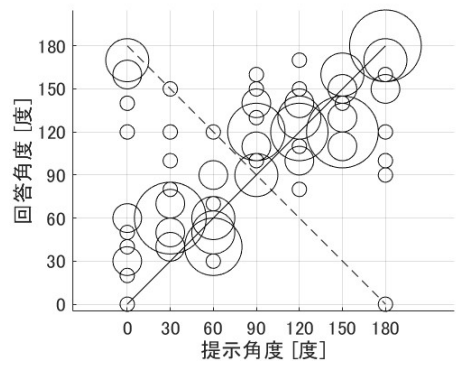
仰角 60° 2000 Hz



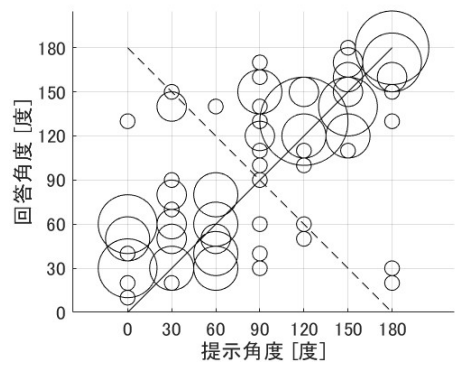
仰角 30° 2000 Hz



仰角 0° 2000 Hz

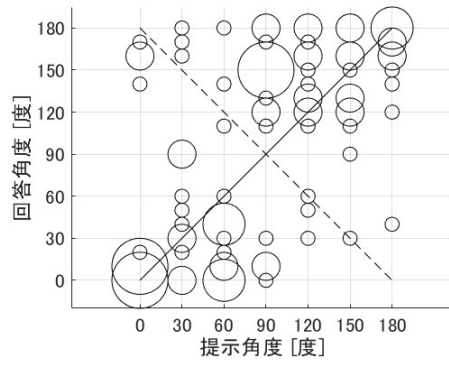


仰角 -30° 2000 Hz

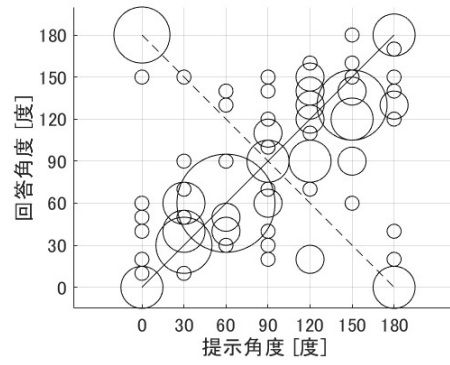


仰角 -60° 2000 Hz

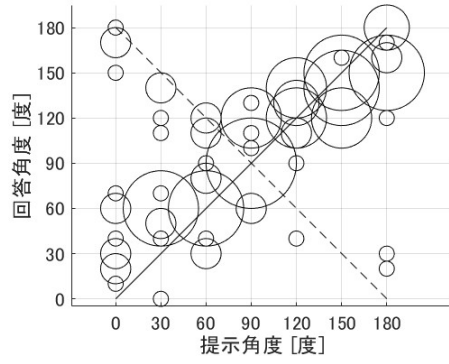
方位角方向 4000 Hz



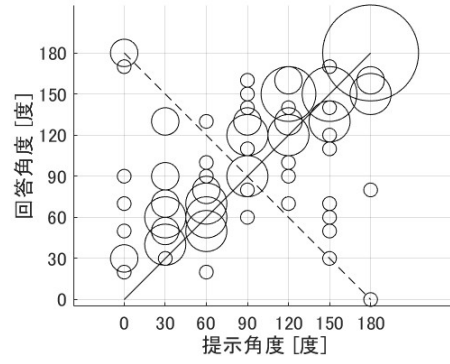
仰角 60° 4000 Hz



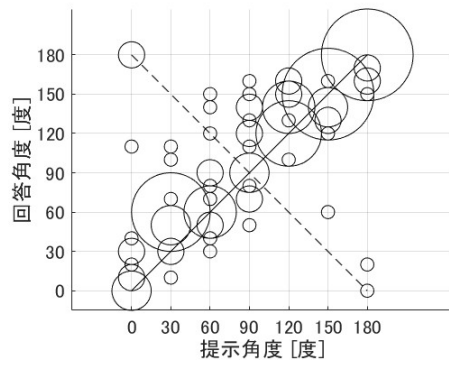
仰角 30° 4000 Hz



仰角 0° 4000 Hz



仰角 -30° 4000 Hz



仰角 -60° 4000 Hz