

# 周波数による定位精度の変化に関する研究

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 音環境ゼミ

建 19-0024 片岡祐貴

指導教員 豊田 政弘 教授

# 目次

1. はじめに	
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究目的 .....	2
2. 研究方法	
2.1 実験 .....	3
2.1.1 実験条件 .....	3
2.1.2 実験方法 .....	6
3. 結果と考察	
3.1 バブルチャート .....	7
3.2 正答率 .....	14
3.3 角度差 .....	16
3.4 考察 .....	18
4. おわりに .....	19
参考文献 .....	20

# 1. はじめに

## 1.1 研究背景

私たちは、普段から無意識のうちに音の聴こえてくる方向を理解し、自分の周りの空間を認識している。それにより、他人から声をかけられたときに反応することが可能であり、車が後ろから近づいてくるのを感じ取ることができる。この、音がどの方向からきこえてきたかを把握する能力のことを音像定位と言う。ただし、音源の周波数が低い場合には、音がどの方向から鳴っているのかわからないことがある。人はどの周波数から正確に音像を定位することができるのか、既存の研究結果[1, 2]だけでは、定量的な評価が不明確である。

また、関連研究である西村[3]の研究において、クロスオーバー周波数の適正值が不明確であることも本研究を行うこととした背景の一つである。

## 1.2 研究目的

本研究の目的は二つある。一つは、人はどの周波数以上で正確に音像定位をすることができるのかを定量的に評価することである。もう一つは、関連研究[3]におけるクロスオーバー周波数の適正値を提案することである。ここで、関連研究[3]で用いられるハイブリッド音場解析とは、低周波数は波動音響理論に基づいた手法、高周波数は幾何音響理論に基づいた手法を採用し、それらの結果を組み合わせることで従来の手法より高精度かつ広帯域の予測結果を得る手法である。コンサートホールなどの大規模空間への適用を目的としている。低周波数と高周波数で異なる理論に基づく手法を扱うわけだが、これらの解析手法にはそれぞれメリットとデメリットが存在する。波動音響理論では、音の波動性が考慮された波動方程式に基づき計算を行うため精度の高い計算が可能だが、高音域では計算量が膨大になり計算を行うのにかなりの時間とコストが必要である。一方で幾何音響理論では、音を幾何学的に扱って計算を行うため計算は容易だが、音の干渉や回折などの波動性が現れやすい低音域では誤差が生じる可能性が高い。さらには、予測結果を立体音響提示する際、幾何音響理論の結果は比較的容易に対応可能であるが、波動音響理論の結果は立体音響提示が直接的には難しい。このことから、人が正確に音像定位できないと予想される低周波数帯では波動音響理論を、人が正確に音源定位できると予想される高周波数帯では幾何音響理論を使用することにより、幾何音響理論のみの結果より正確な音場解析が可能となる。以上より、人が正確に音像定位できる境目の周波数をハイブリッドのクロスオーバー周波数とすれば適正だと思われるため、これを明確にすることが関連研究[3]において重要となる。

## 2. 研究方法

本研究ではホワイトノイズにバンドパスフィルタをかけ 62.5Hz・125Hz・250Hz・500Hz・1000Hz・2000Hz の六種類の周波数の帯域制限ノイズを作成した。音源の時間は 3 秒とした。制作した音源をスピーカーから鳴らし、その音源がどの方向から鳴っているか被験者に回答させる実験を行うこととした。実験で収集したデータから実際に鳴らしたスピーカーの方向と回答の方向との相関関係を調べる。それを可視化し、どの周波数以上で人が正確に音像を定位することができるのか定量的に評価することとした。

### 2.1 実験

研究方法で説明した方法を使用し、実験を行った。先行研究[1, 2]では、250Hz 以上の周波数に対してのみ検討されており、本研究目的に合致するデータは存在しなかった。本実験はより低い周波数で実験を行うので、先行研究との直接的な比較はできない。

#### 2.1.1 実験条件

実験条件としては、無響室にスピーカーを 13 個設置し、被験者とスピーカーとの距離は 1.5m、各スピーカー間の角度は  $15^\circ$  とした。図 2.1, 2.2 に実験装置の写真とスピーカー配置図をそれぞれ示す。スピーカーの床面からの高さは着座した人の耳の高さと同程度とした。図 2.3, 図 2.4 に設置したスピーカーの写真を示す。被験者は聴力が正常な男女計 20 名とした。

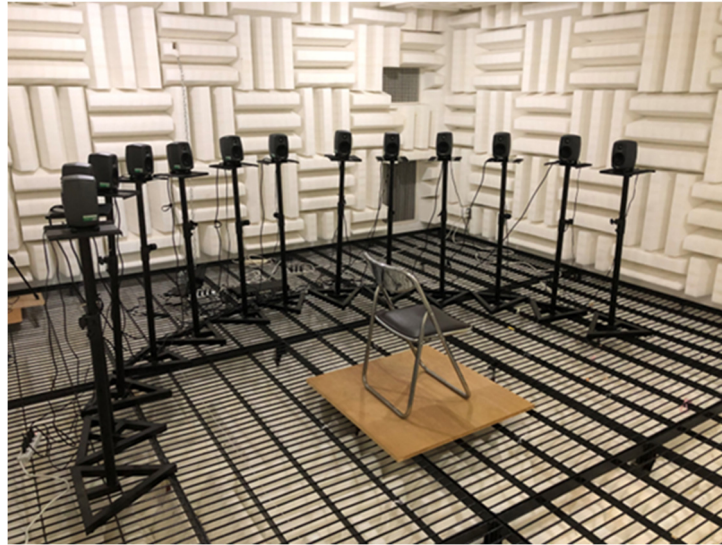


図 2.1 実験装置写真

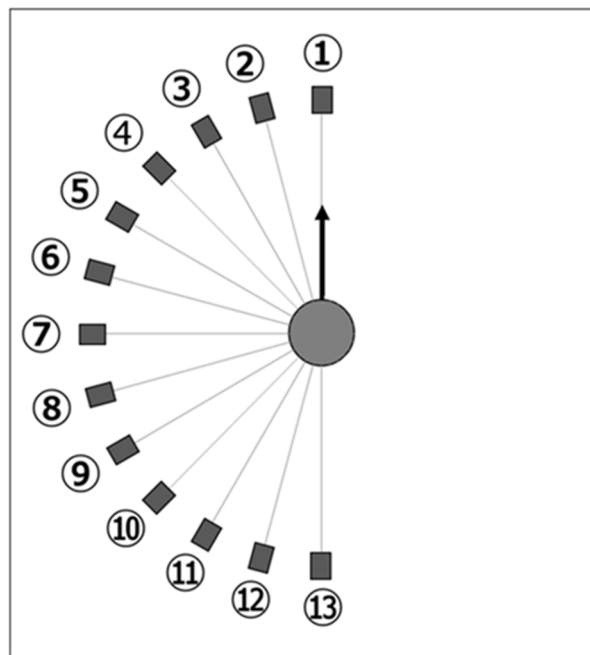


図 2.2 スピーカーの配置図とスピーカーの番号振り分け



図 2.3 スピーカー



図 2.4 スピーカーの高さ

## 2.1.2 実験方法

62.5Hz・125Hz・250Hz・500Hz・1000Hz・2000 Hzの六種類の周波数についての帯域制限ノイズを用意し、それを実験条件で説明したように並べたスピーカーの計13方向からランダムに鳴らし被験者に音源の方向を回答させた。1周波数につき、同方向から5回、計65回を鳴らした。回答方法は被験者にノートパソコンを使用させ、Excelのシートに図2.2を見ながら、音源が流れたと思うスピーカーの番号を数字で入力させた。これを六周波数分、すなわち、被験者一人当たり390回答、被験者20名で計7800回答のデータを得た。



### 3. 研究結果と考察

#### 3.1 バブルチャート

図 3.1, 図 3.2, 図 3.3, 図 3.4, 図 3.5, 図 3.6 に六種類の周波数の実験結果を示す。横軸は実際に音源を鳴らしたスピーカーの番号、縦軸は被験者が回答した番号である。図の円の大きさが回答した人数である。これをバブルチャートと呼ぶ。対角線上に引かれている直線は、音源を鳴らした番号と回答者が回答した番号が一致している正答ラインである。

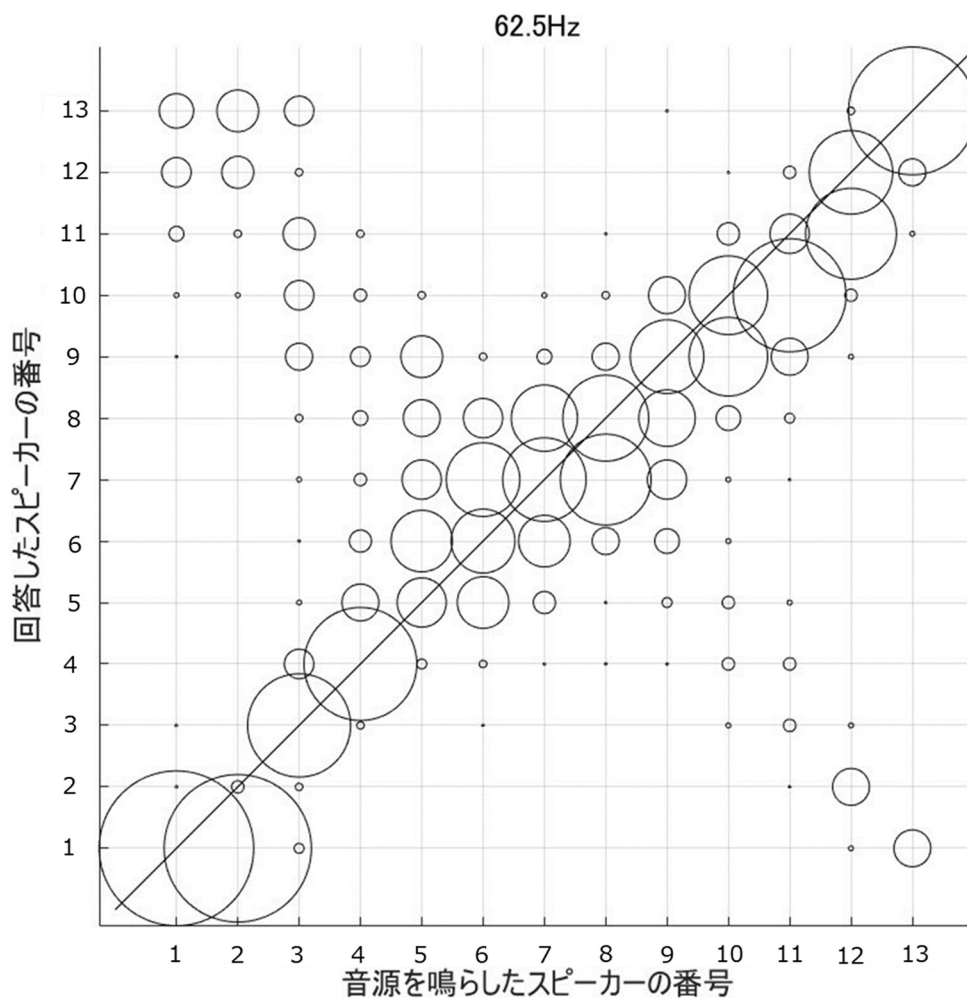


図 3.1 62.5 Hz のバブルチャート

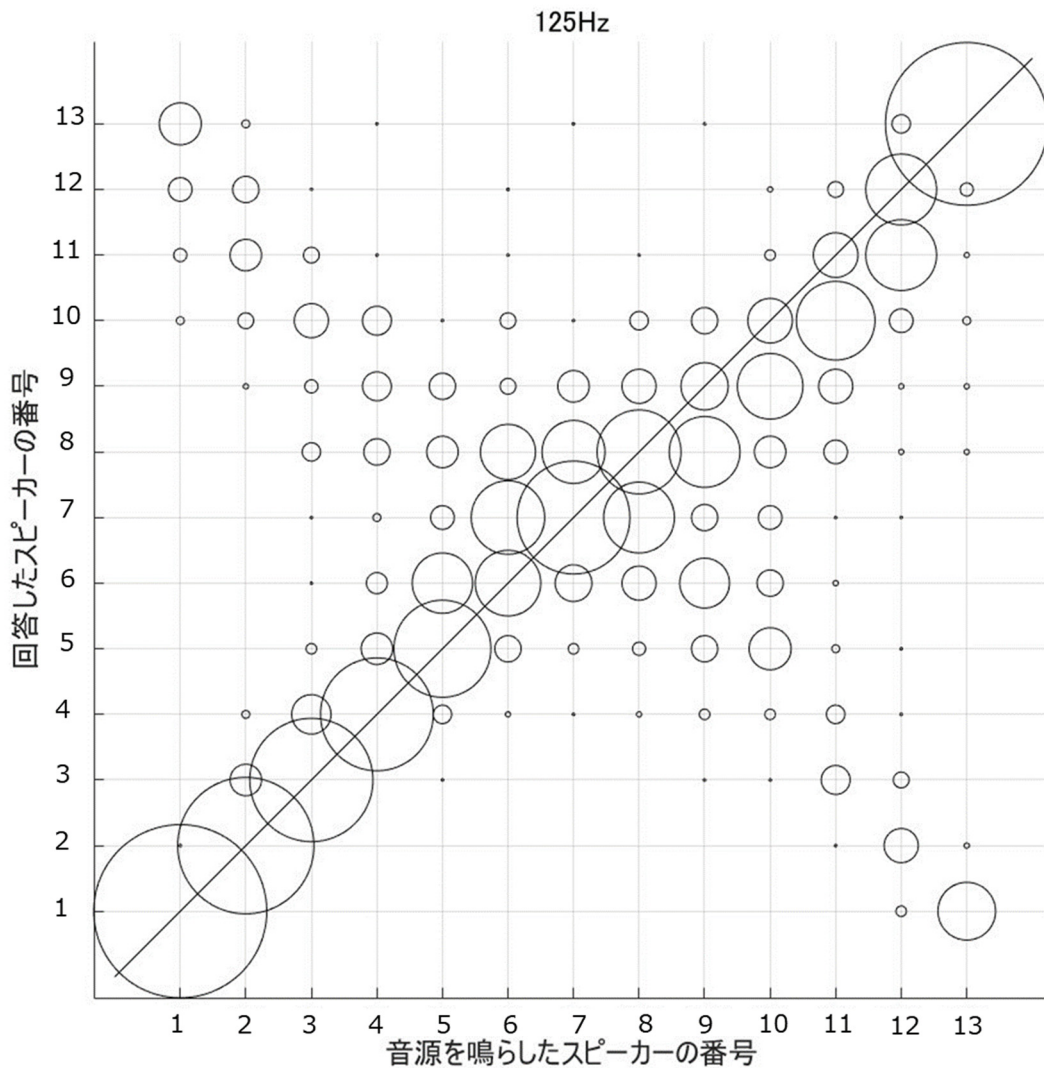


図 3.2 125 Hz のバブルチャート

62.5 Hz, 125 Hz のバブルチャートを図 3.1, 図 3.2 に示す。特に 1 番と 13 番のスピーカーの判別、つまり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。

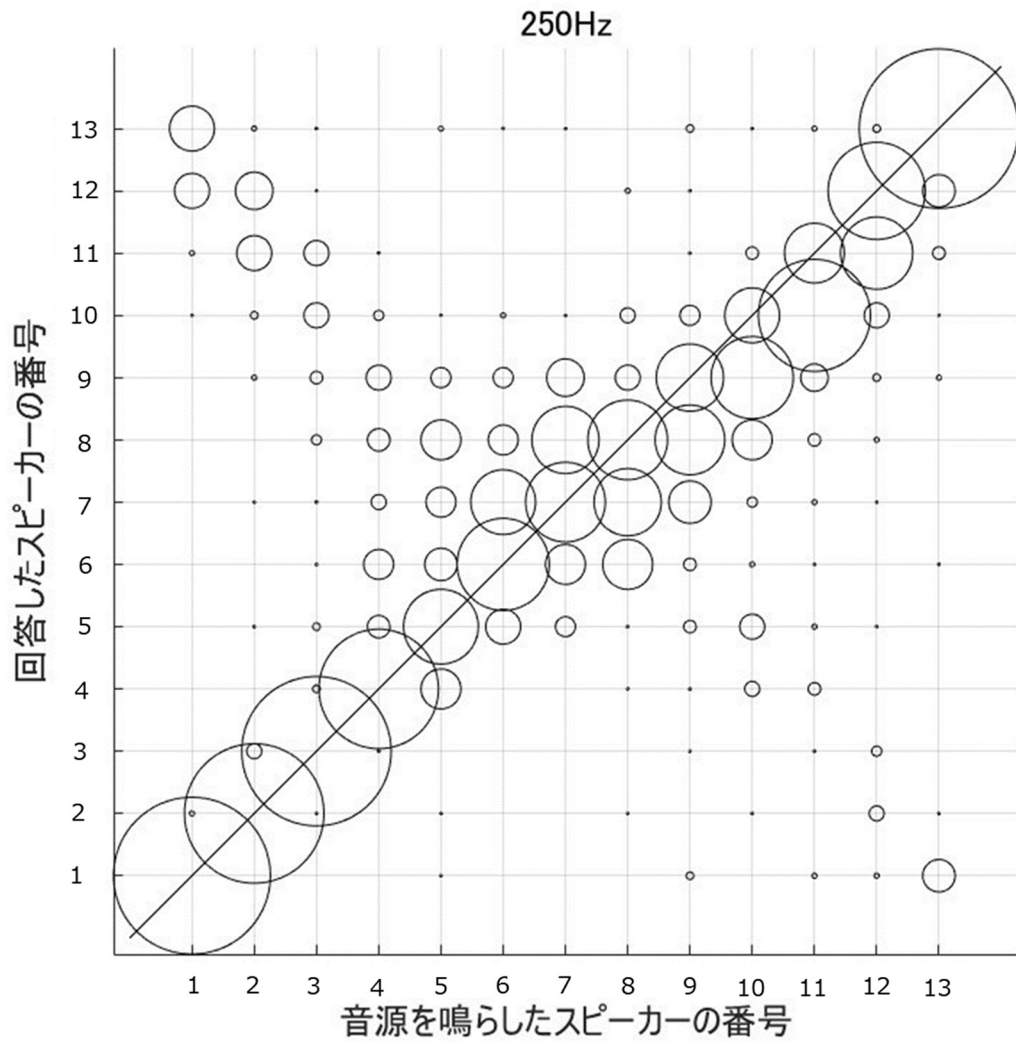


図 3.3 250 Hz のバブルチャート

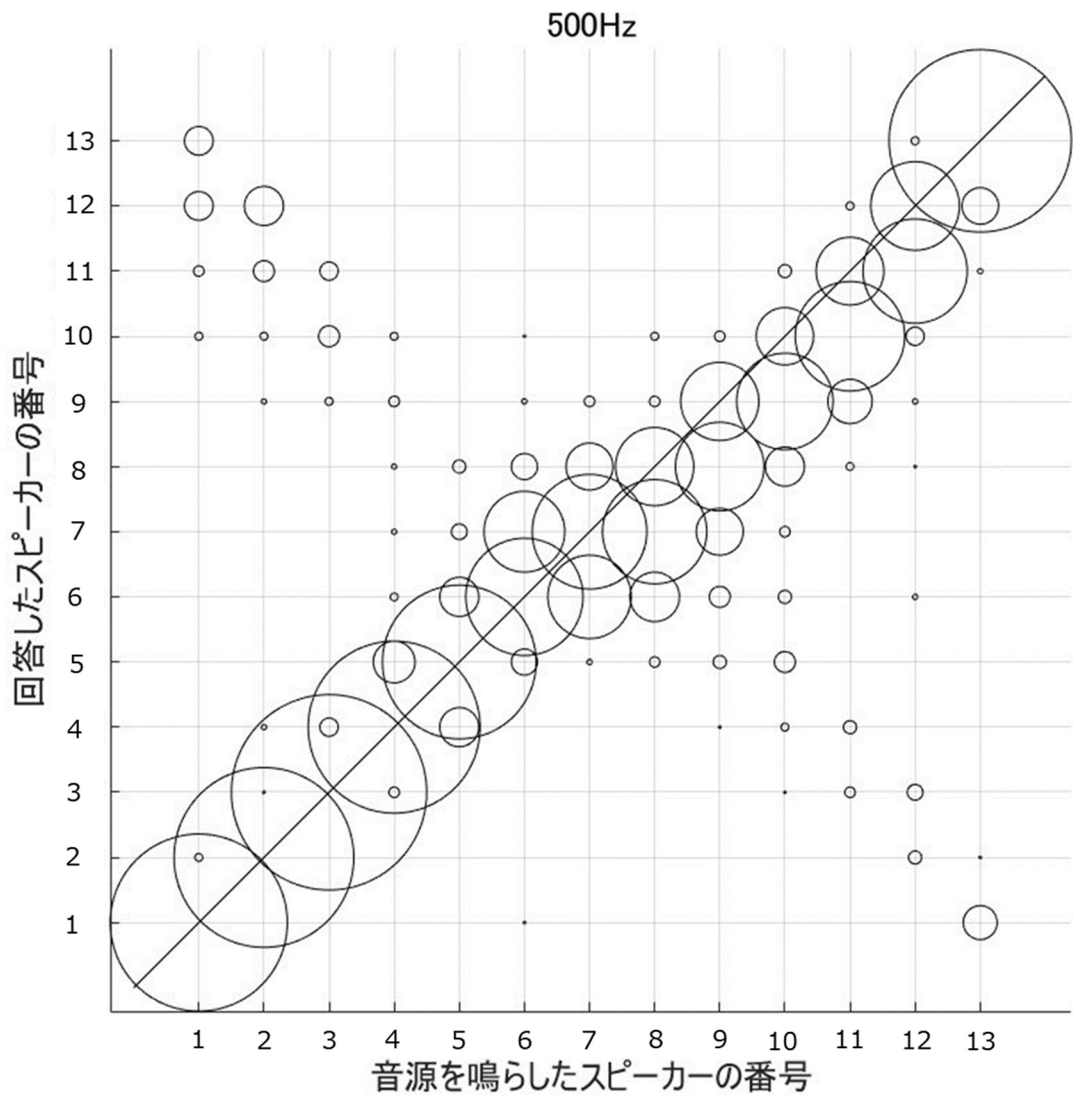


図 3.4 500 Hz のバブルチャート

次に 250Hz・500Hz のバブルチャートを図 3.3・図 3.4 に示す。500Hz のバブルチャートは 62.5Hz～250Hz のバブルチャートに比べて、正答ラインに回答が集中していることが読み取れる。

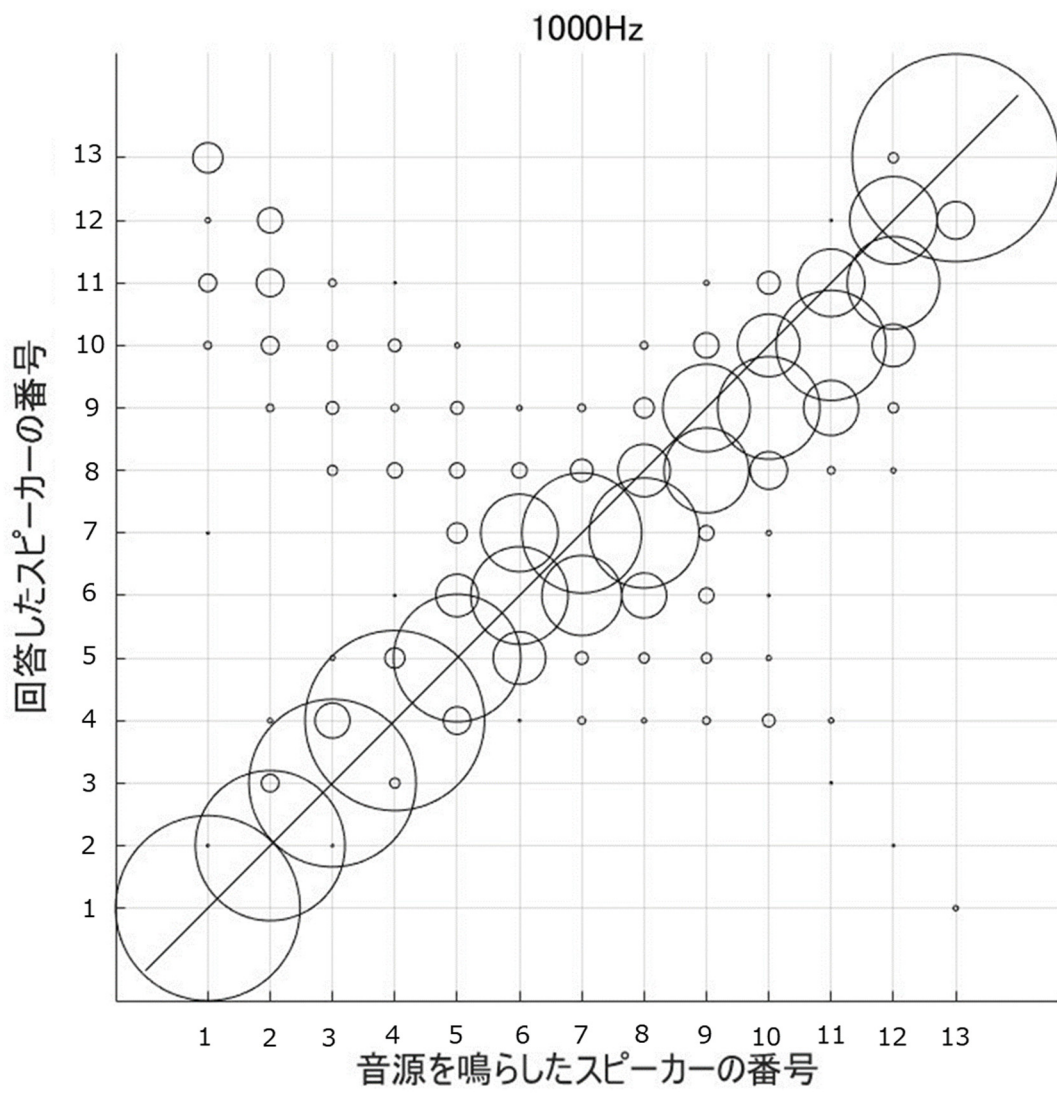


図 3.5 1000 Hz のバブルチャート

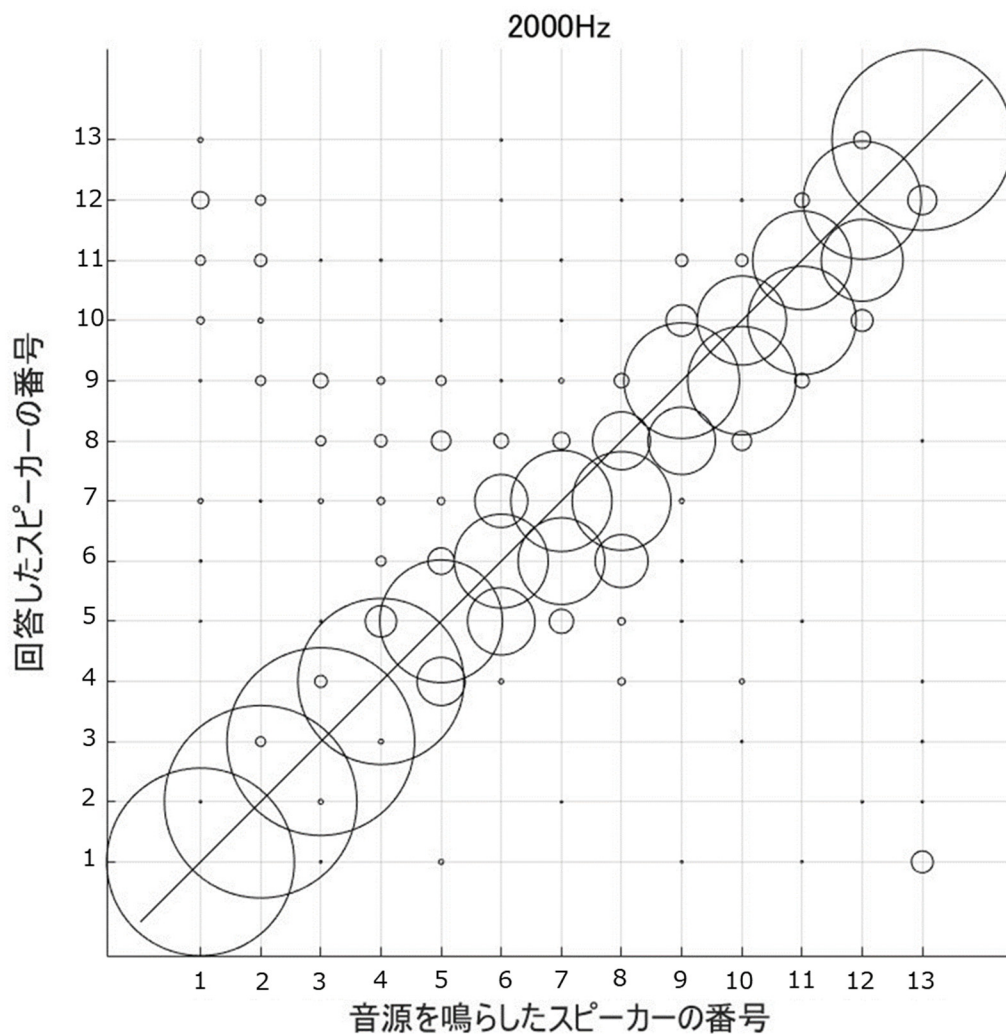


図 3.6 2000 Hz のバブルチャート

最後に 1000Hz, 2000Hz のバブルチャートを図 3.5・図 3.6 に示す。500Hz のバブルチャートと比べても、正答ラインから外れた回答が少なく、さらに正答ラインに回答が集中していることが読み取れる。この結果から、高周波数になるにつれて正答に近い回答が得られること、ならびに、62.5Hz~250Hz あたりの低周波数帯では特に前後の音像を正確に定位できていないことが確認できた。

## 3.2 正答率

62.5Hz・125Hz・250Hz・500Hz・1000Hz・2000 Hzの六種類の周波数についての正解回答数を全回答数で割った正答率を表 3.1 に示す。

表 3.1 各周波数の各スピーカーの番号の正答率と正答率平均

	スピーカー番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
周波数	正答率平均	正答率												
62.5Hz	33.46153846	63	5	42	46	20	26	34	35	30	32	16	34	52
125Hz	37.38461538	66	52	47	43	37	25	43	32	18	17	17	27	62
250Hz	41.07692308	63	56	60	48	30	37	32	32	27	22	24	39	64
500Hz	49.07692308	68	69	75	66	59	45	44	30	30	22	26	34	70
1000Hz	49	74	60	67	72	51	39	48	21	35	25	27	35	83
2000Hz	54.69230769	78	80	78	69	51	39	42	24	48	37	41	49	75

また、図 3.7 に各周波数の正答率平均の推移を示す。バブルチャートでも確認できたが、周波数が大きくなるにつれて正答率が高くなっていることがわかった。ただし、今回の 6 種類の周波数のうち、最も低い周波数である 62.5Hz であってもその平均正答率は約 33% であり、どの方向から音源が鳴っているのかをまったく把握できていないということではないことと言える。

正答率平均推移

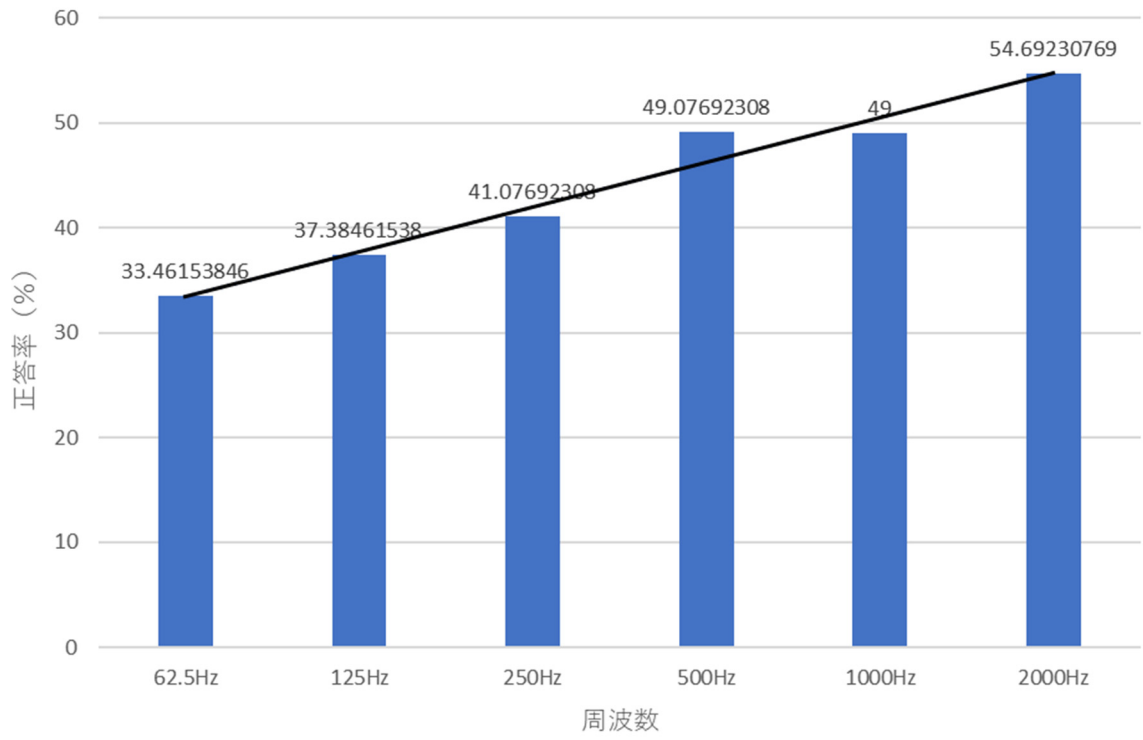


图 3.7 正答率平均推移



### 3.3 角度差

前後誤差をすべて排除（90度～180度を90～0度に変換）し、62.5Hz・125Hz・250Hz・500Hz・1000Hz・2000Hzの六種類の周波数について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3.2に示す。また、図3.8に角度差算出表を示す。

表 3.2 各周波数の角度差合計と平均角度差

周波数	角度差合計 (°)	平均角度差 (°)
62.5Hz	23085	17.75769231
125Hz	26625	20.48076923
250Hz	23115	17.78076923
500Hz	16845	12.95769231
1000Hz	17025	13.09615385
2000Hz	14085	10.83461538

角度差 (°)	正解のスピーカー番号													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
回答したスピーカー番号	1	0	15	30	45	60	75	90	75	60	45	30	15	0
	2	15	0	15	30	45	60	75	90	75	60	45	30	15
	3	30	15	0	15	30	45	60	75	90	75	60	45	30
	4	45	30	15	0	15	30	45	60	75	90	75	60	45
	5	60	45	30	15	0	15	30	45	60	75	90	75	60
	6	75	60	45	30	15	0	15	30	45	60	75	90	75
	7	90	75	60	45	30	15	0	15	30	45	60	75	90
	8	75	90	75	60	45	30	15	0	15	30	45	60	75
	9	60	75	90	75	60	45	30	15	0	15	30	45	60
	10	45	60	75	90	75	60	45	30	15	0	15	30	45
	11	30	45	60	75	90	75	60	45	30	15	0	15	30
	12	15	30	45	60	75	90	75	60	45	30	15	0	15
	13	0	15	30	45	60	75	90	75	60	45	30	15	0

図 3.8 角度差算出表

また、図 3.9 に各周波数の平均角度差の推移を示す。周波数が大きくなるにつれて、平均角度差が小さくなる傾向があることがわかる。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 125Hz と最も平均角度差が小さい 2000Hz を比較しても、その平均角度差は  $10^{\circ}$  未満であるため、今回対象とした六周波数いずれの周波数においても、前後の間違ひ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。

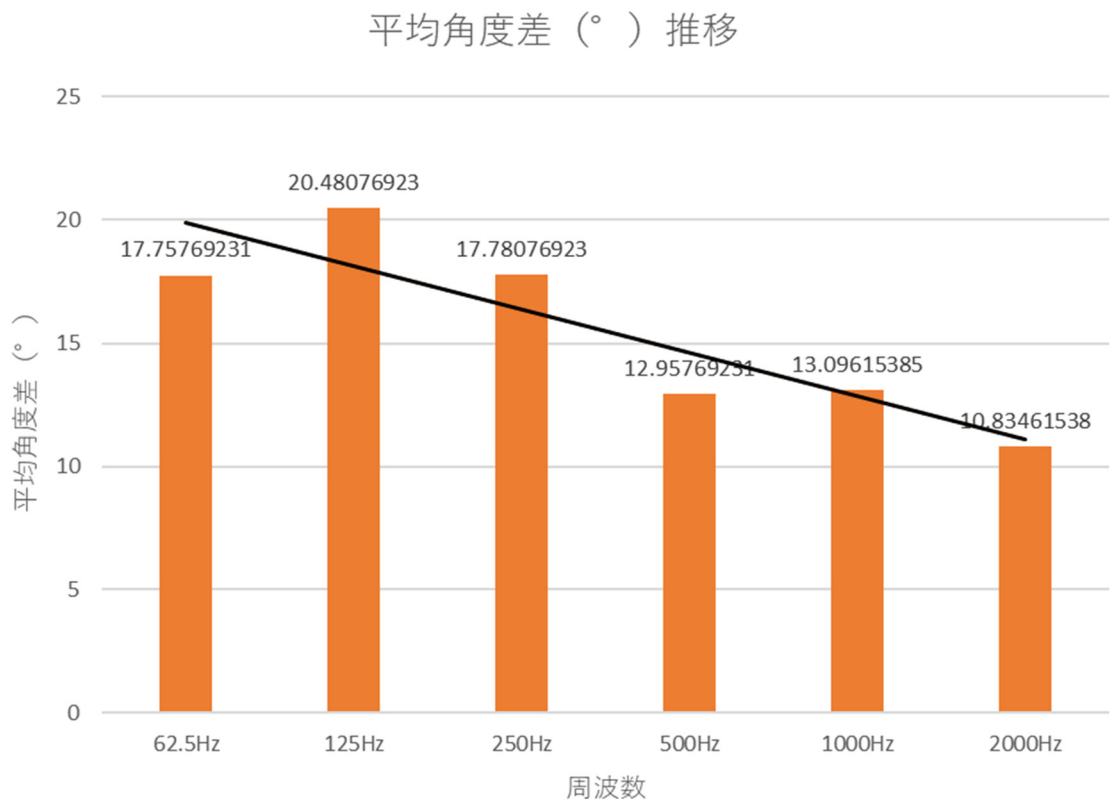


図 3.9 平均角度差推移

### 3.4 考察

本研究の目的の一つは、人はどの周波数以上で正確に音像定位をすることができるのかを定量的に評価することである。もう一つは、関連研究[3]における適正なクロスオーバー周波数を提案することである。

実験結果では、周波数が大きくなるにつれてバブルチャートでは正答ラインに回答が集中する傾向があり、正答率においては正答率の平均が高くなり、平均角度差においては角度差が小さくなった。以上より、周波数が大きくなるにつれて定位精度も正確になると言える。この点は先行研究[1, 2]の結果と一部合致している。しかし、実験結果のバブルチャート・正答率・角度差のどの結果からも前後の周波数間に極端な差は存在せず、人はどの周波数以上で正確に音像定位をすることができるのかという疑問において、明確な回答を導き出すには至らなかった。六種類の周波数のうち最も周波数の低い 62.5Hz よりもさらに低い周波数に境目が存在すると推測される。したがって、関連研究[3]における適正なクロスオーバー周波数を見出すことができなかった。言い換えれば、今回対象とした六種類の周波数については、いずれにおいても音の方向の情報は必要であると結論付けられる。

## 4. おわりに

今回の実験結果から、周波数が高くなるにつれて定位精度が向上することが確認できた。しかしながら、その変化は連続的であり、また、今回対象とした最低の周波数である 62.5 Hz 帯域でも方向についてある程度の正答率であったことから、境目となる周波数を特定することはできなかった。したがって、関連研究[3]のクロスオーバー周波数の適正值も提案ができなかった。境目となる周波数は 62.5 Hz よりもさらに低い周波数に存在する可能性が推察されるため、今後はより低い周波数帯域で同様の実験することで本研究の目的を達成できると考える。

## 参考文献

- [1] J. Blauert, “Spatial Hearing”, Chapter 2, MIT Press, 1996.
- [2] A. W. Mills, “Lateralization of High-Frequency Tones”, J. Acoust. Soc. Am. 32(1), 132-134, 1960.
- [3] 西村洸志郎, “ハイブリッド解析に基づくバイノーラル合成技術の開発”, 関西大学修士論文, 2023.