

Title	騒音環境下での報知音知覚における両耳間位相差の影響に関する研究
Author(s)	中西, 穰作
Citation	
Issue Date	2006-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/1964
Rights	
Description	Supervisor:赤木 正人, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

騒音環境下での報知音知覚における両耳間位相差
の影響に関する研究

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報処理学専攻

中西 穰作

2006年3月

修士論文

騒音環境下での報知音知覚における両耳間位相差 の影響に関する研究

指導教官 赤木 正人 教授

審査委員主査 鵜木 祐史 助教授
審査委員 党 建武 教授
審査委員 小谷 一孔 助教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報処理学専攻

410091 中西 穰作

提出年月: 2006 年 2 月

概要

警告音などに利用されている報知音は、実環境においても正確に知覚される必要がある。しかし、雑音によるマスキング現象などにより、報知音の知覚が困難になり、場合によっては重大な問題を引き起こす危険性がある。そこで、雑音中においても正確に知覚可能な報知音の設計や呈示方法を確立することが重要となる。一方で、マスキング量を削減する効果の一つとして、Spatial Release from Masking (SRM) という現象がある。SRM とは、信号音と同方向から到来する雑音によるマスキング量に対して、信号音と雑音の到来方向が異なる場合、マスキング量が減少する現象である。もし SRM が実環境においても生起するならば、報知音源と雑音源の最も良い位置関係が存在すると考えられる。これにより、雑音中においても、知覚可能な報知音の設計に指針を与えることができる。本研究では、異なる成分周波数から成る報知音を用いて、報知音の両耳間時間差 (interaural time difference: ITD) を変化させた場合におけるマスキング閾値を測定し、得られた知覚特性について考察した。その結果、SRM は ITD のみを手掛かりとしても生起し、SRM において ITD は重要な手掛かりであることが示された。また、報知音の ITD によって生じる成分周波数の両耳間位相差 (interaural phase difference: IPD) が報知音の知覚特性に影響して、聞こえが良くなる方向や聞こえが悪くなる方向が生じることが示された。さらに、ITD による方向定位が困難な状況においても SRM が生起することが確認できた。これは、報知音の ON と OFF の繰り返しによる ITD の手掛かりと、成分周波数による IPD の手掛かりの両者を利用できたことによると考えられる。以上より、報知音を正確かつ効率よく知覚させるためには、報知音の ITD と成分周波数の IPD の手掛かりを効果的に利用できる性質を持った報知音の設計及び呈示方法について考察する必要があると言える。

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	本研究の背景	1
1.2.1	報知音の知覚に関する研究	1
1.2.2	雑音中の音知覚に関する研究	2
1.2.3	方向定位に関する研究	3
1.3	本研究の目的と手法	3
1.4	本論文の構成	4
第2章	報知音の知覚特性の測定方針	6
2.1	知覚特性の測定全体の枠組み	6
2.2	本研究における知覚特性の測定方針	6
第3章	両耳間時間差のみを手掛かりとしたときの知覚特性の測定	9
3.1	目的	9
3.2	被験者	9
3.3	刺激音	9
3.4	両耳間時間差の設定	9
3.5	実験システム	10
3.6	実験手続き	11
3.7	実験結果および考察	12
3.8	まとめ	13
第4章	両耳間時間差と両耳間位相差を手掛かりとしたときの知覚特性の測定	19
4.1	目的	19
4.2	刺激音	19
4.3	その他の実験方法	20
4.4	実験結果	20
4.5	考察	21
4.5.1	両耳間位相差の影響	21
4.5.2	両耳間時間差と両耳間位相差の関係	22

4.6	まとめ	23
第5章	報知音の設計および呈示方法への提言	39
第6章	結論	41
6.1	本論文のまとめ	41
6.2	今後の展望	42

目 次

2.1	知覚特性の測定全体の枠組みと本研究で扱う領域	8
3.1	クリック音の概略図	10
3.2	角度 θ (radian) から到来する音による ITD	11
3.3	実験システム	12
3.4	白色雑音中の信号音呈示状況図。信号音の呈示開始時刻は (a)、(b)、(c) からランダムに決定する。	13
3.5	クリック音の知覚特性: 被験者 A	14
3.6	クリック音の知覚特性: 被験者 B	14
3.7	クリック音の知覚特性: 被験者 C	15
3.8	クリック音の知覚特性: 被験者 D	15
3.9	クリック音の知覚特性: 被験者 E	16
3.10	クリック音の知覚特性: 被験者 F	16
3.11	クリック音の知覚特性: 被験者 G	17
3.12	クリック音の知覚特性: 被験者 H	17
3.13	クリック音の知覚特性: 全被験者の平均	18
4.1	実験に用いた報知音の例	20
4.2	成分周波数が 1.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 A	24
4.3	成分周波数が 1.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 B	24
4.4	成分周波数が 1.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 C	25
4.5	成分周波数が 1.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 D	25
4.6	成分周波数が 1.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 E	26
4.7	成分周波数が 1.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 F	26
4.8	成分周波数が 1.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 G	27
4.9	成分周波数が 1.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 H	27
4.10	成分周波数が 1.5 kHz の報知音の知覚特性: 全被験者の平均	28
4.11	成分周波数が 2.0 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 A	29
4.12	成分周波数が 2.0 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 B	29
4.13	成分周波数が 2.0 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 C	30
4.14	成分周波数が 2.0 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 D	30

4.15	成分周波数が 2.0 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 E	31
4.16	成分周波数が 2.0 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 F	31
4.17	成分周波数が 2.0 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 G	32
4.18	成分周波数が 2.0 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 H	32
4.19	成分周波数が 2.0 kHz の報知音の知覚特性: 全被験者の平均	33
4.20	成分周波数が 2.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 A	34
4.21	成分周波数が 2.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 B	34
4.22	成分周波数が 2.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 C	35
4.23	成分周波数が 2.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 D	35
4.24	成分周波数が 2.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 E	36
4.25	成分周波数が 2.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 F	36
4.26	成分周波数が 2.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 G	37
4.27	成分周波数が 2.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 H	37
4.28	成分周波数が 2.5 kHz の報知音の知覚特性: 全被験者の平均	38
5.1	両耳間時間差と報知音の成分周波数の関係。実線は逆位相条件、破線は同位相条件となる状態を示す。ITD が最大となる場合 (信号音が被験者の右側、または左側から呈示される場合) の時間差は約 0.68 ms である。	40

表 目 次

3.1 各角度における ITD および対応するポイント数	11
4.1 被験者毎の S_0N_0 と他の 1 つのピークの傾き	23

第1章 序論

1.1 はじめに

母親が台所で楽しそうに鼻歌を歌いながら料理をしている。ジュージューとフライパンで何か炒め物をしている様だ。電子レンジのチーンという音も聞こえる。隣りのリビングでは、父親と子供がテレビを見ながら大笑い。何やら、人気のバラエティ番組に夢中のようだ。二人で楽しそうに会話をしている——。このような光景は、どこの家庭においても見受けられるものである。今、例としてある家庭内のある一場面を切り取っただけでも、我々は、実に多くの音に囲まれて生活していることがわかる。その中で、我々の身の回りにある機器には、動作状態を使用者に伝えるために、警告音などを始めとする報知音を利用した情報伝達手段が用いられている。先程の例においては、電子レンジの「チーン」という音が報知音にあたる。特に近年、機器の多機能化・高機能化により、報知音の使用頻度は増加していると言える。このような情報伝達手段は、実環境においても正確かつ効率よく情報伝達される必要がある。しかし、実環境においては報知音を正確に知覚させる上で様々な問題が生じていると考えられる。中でも、生活環境音などを始めとする雑音によるマスキング現象が最も大きな問題点として考えられる。マスキングが生じると、報知音の知覚が困難になり、場合によっては重大な問題を引き起こす危険性がある。そこで、できるだけ雑音に影響されにくく、気づきやすい報知音の設計や呈示方法を確立することが重要な課題となる。

1.2 本研究の背景

1.2.1 報知音の知覚に関する研究

報知音とは、「使用者が製品を正しく使用するために情報を伝える目的で、製品から発せられる音」と定義されている [1]。この報知音は、多くの家電製品を始めとして、携帯電話、インターホン、カーナビゲーションシステム、電車の発進時のベル、パトカーのサイレン等、様々な環境で利用されている。そして近年、これらの機器の多機能化・高機能化に伴って、報知音の使用頻度は増加傾向にあると考えられる。ところが、様々な機器で多くの報知音を利用することで、他の報知音と混同して知覚してしまうという問題点も生じている [2]。そこで、最近ではユニバーサル・デザインの考え方が取り入れられるようになり、様々な目的に沿った報知音を設計するための研究が盛んに行われている [3, 4, 5, 6]。

例えば、水浪らによると報知音の ON/OFF の時間パターンにより、注意音と知覚されるものから、終了音と知覚されるものまで、与える印象が異なることが報告されている [7]。

このように、報知音は多くの機器で利用されていることから、各々の機器や目的に適した報知音の設計が試みられている。そして、報知音を呈示するにあたり、報知音の使用意図を機器の使用者に正確に知覚させることが重要である。しかし、実環境で報知音を呈示する場合、雑音によるマスキング現象の問題を解決しなければならない。そこで、次に雑音中の音知覚に関する研究について述べる。

1.2.2 雑音中の音知覚に関する研究

一般的に、報知音は実環境において利用されることから、雑音中の報知音の知覚特性について考察する必要がある。そこで、雑音中で音を知覚する場合、雑音によるマスキング現象が最も大きな問題点として考えられる。マスキング現象が生じる例として、混雑した駅やデパートなどでは、友人との会話が困難になったり、館内放送が聞き取りにくくなったりする状況が挙げられる。このように、マスキングが生じると音声や音（報知音）の知覚が困難になり、特に危険や注意を促すような状況では深刻な問題を引き起こす恐れがある。

マスキング量を削減する効果の一つとして、Spatial release from masking (SRM) という現象が報告されている [8]。SRM とは、信号音と同方向から到来する雑音によるマスキング量に対して、信号音と雑音の到来方向が異なる場合、マスキング量が減少する現象である。言い換えると、音源の空間的な配置の変化に応じて、マスキング量が変化する現象である。この SRM 現象は両耳聴知覚によって生じるとされており、カクテルパーティー効果を引き起こす要因の一つとして考えられている [9]。例えば、Peissig と Kollmeier は、雑音源の数と目的音の種類（純音と音声）に着目している。ここでは、雑音源が 1 つである場合に大きな SRM が生起し、雑音源が増えると SRM は生起しにくくなることが報告されている [10]。また、目的音に純音と音声を用いた場合、雑音源が 1 つの場合では目的音が音声よりも純音の方がマスキング量が減少し、雑音源が 2 つ以上の場合では目的音に音声を用いた方がマスキング量が減少することも報告されている [9, 10]。さらに、目的音と妨害音の性質が異なるほど低い閾値が得られると報告しているものもある [11, 12]。ただし、これらの研究のほとんどは、目的音として純音や音声を用いており、報知音を対象としている研究は行われていない。

以上、雑音中に報知音を呈示する際の雑音によるマスキング現象の問題解決案の一つとして、SRM を取り上げた。また、音を聴取する際には、音源の方向情報が重要である。そのため、報知音を知覚する際にも、報知音源の方向定位ができることが望まれる。そこで、次に方向定位に関する研究について述べる。

1.2.3 方向定位に関する研究

人間は、音源の方向を知覚することによって、目的音以外の音を排除し、目的音を浮かび上がらせることができる。さらに、方向定位することで音源の位置を視覚的にも知覚できれば、より目的音を強調して知覚することができる [13]。そのため、外界から音を取り込むとき (特に分凝して音を知覚するとき) には、音源の方向情報は重要である。

人間は、実生活において両耳を使って音を聴いている。その場合、両耳間時間差 (interaural time difference: ITD)、両耳間レベル差 (interaural level difference: ILD)、両耳間位相差 (interaural phase difference: IPD) などの両耳情報を利用して音源の方向を判断している。また、一般に ITD による純音の方向定位能力は、1.5 kHz 付近で低下するとされている。この原因は、位相多義性や、神経系での時間情報の喪失によるものと考えられている [14, 15]。これに関して、最近では、高周波数 (例えば 4 kHz) の搬送波に、半波整流し雑音除去した低周波数 (例えば 128 Hz) のエンベロープを掛け合わせた信号を用いることで ITD の検知が良くなることが報告されている [16]。また、周波数成分が 1.5 kHz 以下では IPD、1.8 kHz 以上では ILD を主な手掛かりとして方向定位を行うことが知られている [14]。

このように、方向定位には、ITD、ILD 及び IPD の両耳情報が手掛かりとして用いられている。また、先に述べた SRM にも ITD と ILD が大きく影響していることが知られている [17]。そこで、SRM に関して ITD や ILD に関する考察は多くなされているが、方向定位におけるもう一つの手掛かりである IPD と SRM の関係については、これまで議論されてこなかった。

1.3 本研究の目的と手法

本研究の背景で示した通り、報知音は使用意図を機器の使用者に正確に知覚させることが重要である。さらに、実環境下で報知音を正確に知覚させるためには、雑音中の報知音の知覚特性について考察しなければならない。そこで、マスキング量を削減する現象の一つとして、SRM を取り上げた [8]。しかし、これまで報知音を対象とした SRM の研究は行われていない。また、音を聴取する際、音源の方向情報が重要であるため、方向定位についても述べた。ここでは、方向定位の手掛かりの一つである IPD と SRM の関係については、まだ議論されていないということであった。

以上より、本研究では、報知音の中でも、より正確かつ効率よく知覚させる重要性の高い注意音を用いることとする。さらに、雑音中の報知音の知覚特性について議論するために、SRM の知見をヒントに問題解決を試みる。そこで、雑音中に報知音を呈示した場合に、SRM が生起するかどうかを調べる。この場合、実環境において音源は一様に分布していないことから、まずは報知音源と雑音源を 1 つずつとした場合について考える。もしも SRM が生起するならば、報知音源と雑音源の最も良い位置関係が存在すると考えられる。これにより、雑音に影響されにくく、知覚されやすい報知音の設計に指針を与える

ことができる。また、SRMがITDとILDに大きく依存しているとされている[17]ことから、まず始めに、方向定位の手掛かりの一つでもあるITDに着目する。ITDのある状況で音を聴取する場合、同時にIPDも生じていると考えられる。さらに、方向定位に利用される手掛かり(ITD、ILD、IPD)は、信号周波数(特に1.5 kHzから2.0 kHz付近)によって変化するため、報知音の成分周波数を変化させた場合に、どの手掛かりが知覚特性に影響を与えるか調べる必要がある。そこで本研究では、報知音の成分周波数によるIPDの知覚特性への影響を明らかにすることを目的とする。この目的を達成するための手法を以下に示す。

1. まず始めに、SRMがITDのみを手掛かりとしても生起するかどうか重要である。もし、SRMが生起するならば、ITDが知覚特性にどの程度寄与するのか調べることができる。ここで、SRMにおけるITDの重要性を示し、本研究における報知音の知覚特性に対する基礎知識とする。そこで、ITDのみを変化させた目的音(信号音)を用いて、ITDのみを手掛かりとしたときの知覚特性を測定する。このとき信号音には、IPDが生じないように配慮した刺激を用いる。
2. 一般にITDによる純音の方向定位能力は、1.5 kHz付近で低下するとされている。また、周波数成分が1.5 kHz以下ではIPD、1.8 kHz以上ではILDを主な手掛かりとして方向定位を行うことが知られている[14]。この様に、方向定位に利用される手掛かり(ITD、ILD、IPD)が知覚特性に与える影響は、信号周波数(特に1.5 kHzから2.0 kHz付近)によって変化する。さらに、報知音の成分周波数は約2 kHzが良いとされていることから、2.0 kHz付近の成分周波数を持つ報知音を用意し、ITDとIPDを手掛かりとしたときの知覚特性を測定する。そして、1.による基礎知識を基に、報知音の成分周波数が異なると、IPDが知覚特性にどのような影響を与えるか考察する。

以上の二つの段階を踏むことで、報知音知覚におけるITDの重要性および成分周波数のIPDの影響について議論することができる。そして、SRMおよび方向定位の観点から考察することで、できるだけ雑音に影響されにくく、気付きやすい報知音の設計や呈示方法について提言を行うことができる。

1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第1章 本研究が掲げる目標に対する研究背景と問題点を挙げ、本研究の意義と目的を述べる。

第2章 できるだけ雑音に影響されにくく、気付きやすい報知音の設計や呈示方法に対して提言を行うためには、報知音の知覚特性を測定する必要がある。そこで、本章では報知音の知覚特性の測定の枠組みについて詳しく述べる。

第3章 SRMにおけるITDの重要性について述べるために、ITDのみを変化させた信号音を用いて、ITDのみを手掛かりとしたときの知覚特性を測定する。そして、得られた知見をもとに第4章でさらに深い議論を行う。

第4章 報知音の成分周波数は約2 kHzが良いとされている。しかし、方向定位に用いられる手掛かりは、信号周波数に依存して、知覚特性に与える影響が変化し、特に2.0 kHz付近では方向定位に影響を与える手掛かりが曖昧になる。そこで、成分周波数を2.0 kHz付近で変化させた報知音を用いて、ITDとIPDを手掛かりとしたときの知覚特性を測定する。そして、報知音の知覚特性に対するIPDの影響について、SRMおよび方向定位の観点から考察する。

第5章 第3章と第4章で明らかになったことから、報知音の設計および呈示方法に対して提言を行う。

第6章 本研究で明らかになったことと今後の展望について述べる。

第2章 報知音の知覚特性の測定方針

2.1 知覚特性の測定全体の枠組み

図 2.1 に、知覚特性の測定全体の枠組みと、本研究で扱う領域を示す。報知音の使用環境を考慮すると、知覚特性の測定は実環境で行うことが望ましい。しかし、実環境下では周囲の残響や暗騒音の影響が知覚特性に含まれるため、知覚特性に対するそれらの影響を個別に調べることは難しい。そこで、実験の枠組みを縮小し、段階的に考察していくことで、報知音の知覚特性を明らかにしていく。実験の枠組みに関して以下に示す。(1)SRM は、ITD とILD が大きく影響しているとされている [17]。そこでまず、ITD とILD の影響を個別に調べるために、防音室内でヘッドホン受聴により実験を行う。ヘッドホンを使用することで、周囲の残響の影響を遮断することが可能である。また、呈示する刺激音を容易に制御できるという利点もある。(2)次に、刺激音に頭部伝達関数を畳み込み、仮想空間に音源を配置した状況(頭外定位)で知覚特性の測定を行う。これにより、(1)で求めた頭内定位の知覚特性と頭外定位の知覚特性の差について議論することができる。(3)さらに、防音室内でスピーカによる刺激音呈示を行ったときの知覚特性を測定し、(4)最後に実環境下でスピーカによる刺激音呈示を行ったときの知覚特性を測定することで段階的に知覚特性を調べることができる。

2.2 本研究における知覚特性の測定方針

本研究では、上記に示した報知音の知覚特性の測定の全体の枠組みの中から、(1)に焦点を当てて、さらに詳細に議論する。そこで、ITD とILD の手掛かりは、SRM のみならず方向定位においても用いられていることから、本研究では、まず ITD を中心とした知覚特性の測定を行い議論する。

まず始めに、SRM における ITD の重要性を確認するために、ITD のみを設定したクリック音 (Saberri らが利用したものと類似 [8]) を用いて実験を行う。SRM が ITD のみを手掛かりとしても生起するならば、ITD が知覚特性にどの程度影響を与えるのか調べることができる。ここで SRM が ITD のみを手掛かりとしても生起することが示されれば、その知見は次に行う報知音を用いた知覚特性の測定に対する基礎となる。つまり、ITD によって SRM が生起する上で、IPD がどのように影響するのか議論することができる。

次に、信号音に報知音を用いて知覚特性の測定を行う。報知音に ITD のみを設定すると、同時に成分周波数による IPD も生じていると考えられる。そこで、報知音の ITD と

IPD を手掛かりとしたときに、それぞれの手掛かりが知覚特性にどのような影響を与えるか調べる。まず、報知音の成分周波数は約 2 kHz が良いとされているが、一般に ITD による純音の方向定位能力は、1.5 kHz 付近で低下するとされている [14]。そこで、成分周波数が 2.0 kHz の報知音以外に、1.5、2.5 kHz の報知音も用いることで、ITD による方向定位能力と SRM に関連があるか議論する。さらに、純音の方向定位は、周波数が 1.5 kHz 以下では IPD、1.8 kHz 以上では ILD を主に手掛かりとして方向定位を行うことが知られている [14]。そこで、ITD を手掛かりとして SRM が生起する上で、IPD の手掛かりは知覚特性にどのような影響を与えるか議論する。

以上の二つの知覚特性の測定を行うことで、これまで議論が行われてこなかった SRM と IPD の関係について明らかにすることができる。

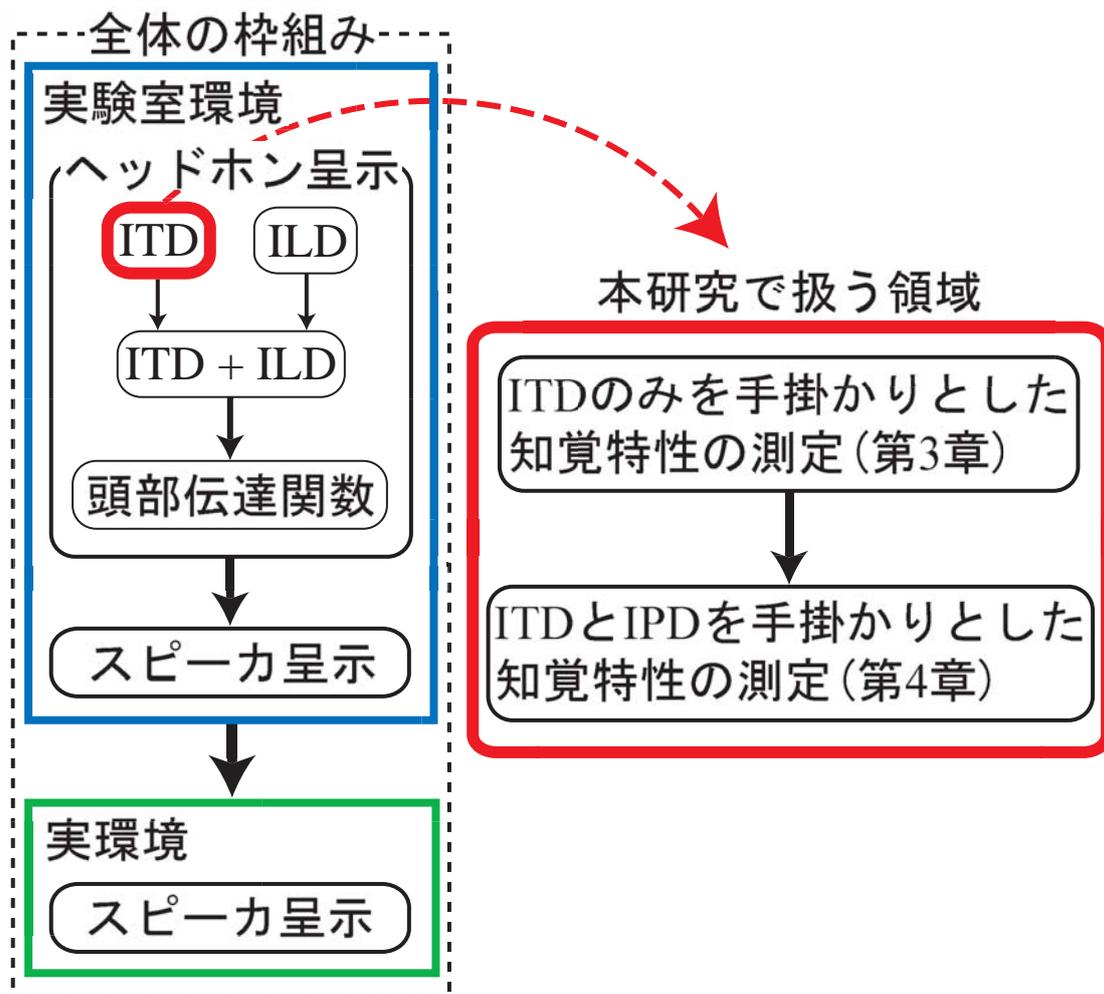


図 2.1: 知覚特性の測定全体の枠組みと本研究で扱う領域

第3章 両耳間時間差のみを手掛かりとしたときの知覚特性の測定

3.1 目的

本実験は、SRM は ITD と ILD が大きく影響するとされている [17] ことから、SRM に ITD がどれほど寄与するのかを調べることを目的とする。そこで、文献 [8] で Saberi らが用いたクリック音と類似したクリック音を用いることで、知覚特性が彼らと同様の傾向を示すかどうか調べる。

3.2 被験者

被験者は 23 ~ 32 歳の大学院生 8 名である。全ての被験者は、可聴域 (125 Hz ~ 8 kHz のオクターブ周波数) において、両耳共に 15 dBHL 以下であるため、正常な聴力を有している。また、被験者は過去に他の聴取実験の経験がある。

3.3 刺激音

クリック音は、毎秒 100 回の割合で呈示される $62.5 \mu\text{s}$ の矩形クリックから成る音とし、1 秒間とした。図 3.1 にクリック音の概略図を示す。ここで用いるクリック音は、ITD のみが設定してあり、その他の両耳情報 (IPD および ILD) はないものとして考えられるように設計してある (ITD の設定に関しては次節を参照)。雑音には 2 秒間の白色雑音を用いた。サンプリング周波数は、全て 48 kHz である。

3.4 両耳間時間差の設定

報知音は多くの機器に用いられているが、その機器を使用する人間は、常に機器と対面しているとは限らない。そこで、音源の配置は、雑音源を正中面に固定し、信号音源が移動するように設定した。そのため、本研究では ITD は信号音のみに適用した。

図 3.2 に角度 θ から到来する音による ITD を示す。一般に、ITD は式 3.1 により算出できる。ここで、 r : 頭の半径 (m)、 θ : 音の到来方向 (radian)、 c : 音速 (m/s)、 d : 両耳の経

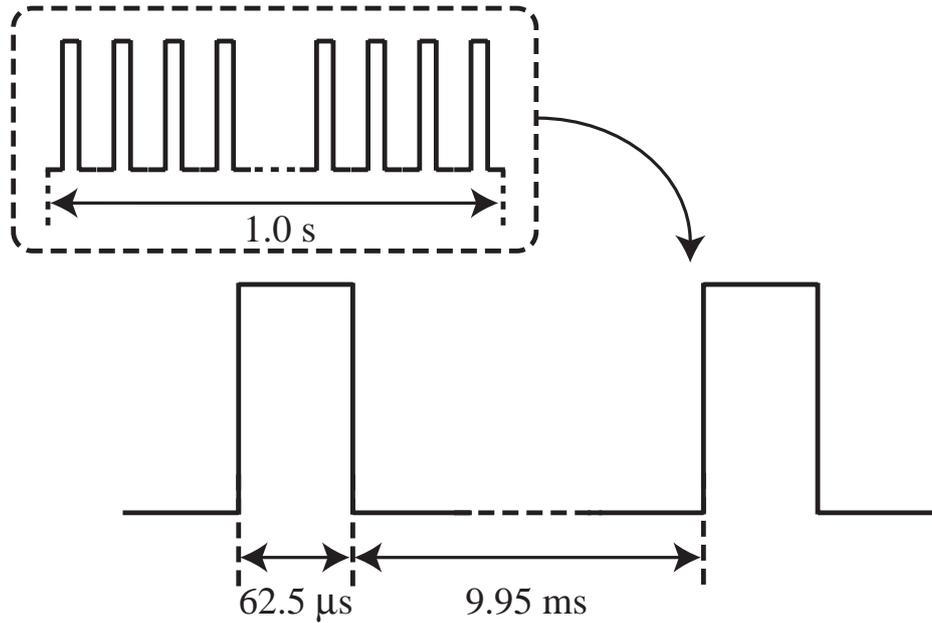


図 3.1: クリック音の概略図

路差 (m) である。頭の半径は 9 cm、音速は 343.5 m/s として計算した。正中面を 0° とした場合に、被験者の右側に信号音源が移動するように、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° ($\theta = \frac{\pi}{12}$ 、 $\frac{\pi}{6}$ 、 $\frac{\pi}{4}$ 、 $\frac{\pi}{3}$ 、 $\frac{5\pi}{12}$ 、 $\frac{\pi}{2}$) として設定した。また、表 3.1 に各角度における ITD および、サンプリング周波数を 48 kHz としたときの ITD に対応したポイント数 (サンプル数) を示す。なお、以降の信号音と雑音の位置関係は、 S_0N_0 、 $S_{15}N_0$ 、 $S_{30}N_0$ 、 $S_{45}N_0$ 、 $S_{60}N_0$ 、 $S_{75}N_0$ 、 $S_{90}N_0$ と表現することとする。例えば、 $S_{30}N_0$ は、信号音 (S) の到来方向が 30 度、雑音 (N) の到来方向が 0 度を示す。

$$\begin{cases} \text{ITD} = \frac{d}{c} = \frac{r}{c}(\theta + \sin \theta) \\ d = r\theta + r \sin \theta, \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (3.1)$$

3.5 実験システム

図 3.3 に、実験システムを示す。実験は防音室内で行った。刺激音は、被験者がノート PC 上に構築されたアプリケーションを操作することで呈示される。このアプリケーションは、実験を円滑に行うもので、刺激音呈示用サーバである Linux とシリアル通信を行うことで刺激音呈示を要求できる。また、被験者の回答を記録することにも利用した。

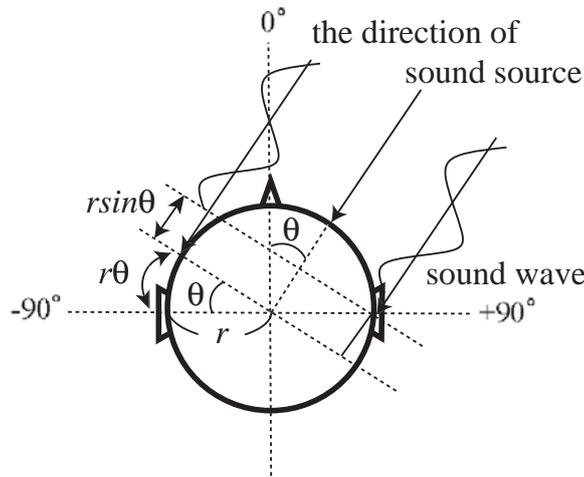


図 3.2: 角度 θ (radian) から到来する音による ITD

表 3.1: 各角度における ITD および対応するポイント数

角度 (度)	ITD(ms)	ポイント数
15	0.136	7
30	0.268	13
45	0.391	19
60	0.501	24
75	0.596	29
90	0.674	32

3.6 実験手続き

実験は精神物理学的測定法の一つである極限法で行った [18]。実験開始時の信号音と白色雑音の呈示音圧は 65 dB SPL となるようにキャリブレーションした。そして、実験中の白色雑音の呈示音圧は 65 dB SPL に固定し、信号音の呈示音圧は 1 dB ずつ変化させた。被験者は呈示された刺激音に対し、雑音中に信号音が「聞こえる」、「聞こえない」で判断した。また、極限法は、高い音圧から低い音圧に向かって刺激が変化する下降系列と、低い音圧から高い音圧へと変化する上昇系列がある。下降系列の場合、報知音の実験開始音圧は、確実に「聞こえる」であろう範囲からランダムに選択した。上昇系列の場合、報知音の実験開始音圧は、確実に「聞こえない」であろう範囲からランダムに選択した。また、白色雑音中の報知音の呈示開始位置は、被験者に予測されないように、ランダムに変化させた (図 3.4 参照)。そして、上昇系列、下降系列をそれぞれ 10 回ずつ行い、各系列の

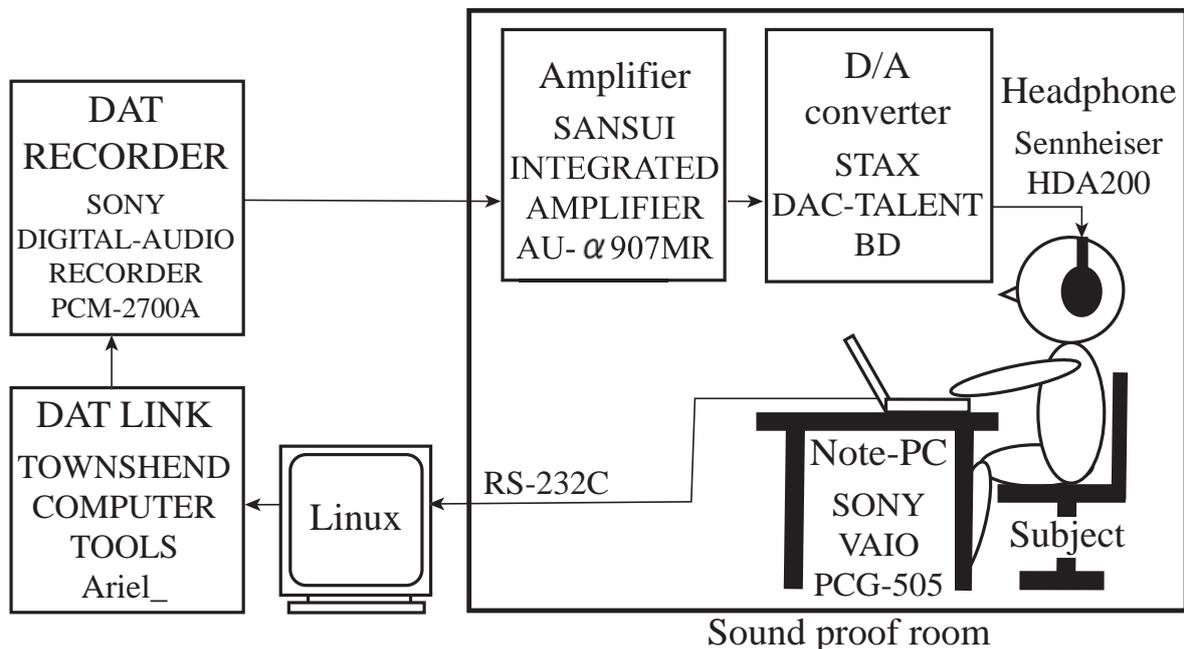


図 3.3: 実験システム

平均値の差が 2 dB 以内である場合、全ての測定値の平均値を閾値とした。そして、 S_0N_0 における閾値を 0 dB として、得られた閾値を相対的に表した。

3.7 実験結果および考察

図 3.5~3.12 に被験者 A~H までの知覚特性を示す。また、図 3.13 に全被験者の平均結果と標準偏差を示す。図より、全被験者一様に信号音源が右側に移動するにつれてマスキング閾値が低下する傾向を示した。この結果は、Saberri らが自由音場で得た知覚特性の傾向と同様である [8]。また、彼らが報告した最大マスキング解除量は $S_{90}N_0$ で約 15 dB であったが、ITD のみを手掛かりとする本実験では、6.45~9.4 dB、平均で 7.6 dB という大きなマスキング解除量が得られた。以上より、ITD のみの変化によっても SRM が生起することがわかった。また、 $S_{90}N_0$ において平均 7.6 dB という大きなマスキング解除量が得られたことから、SRM における ITD の重要性も示された。これにより、正中面 (S_0N_0) からの雑音のパワーが最も大きい様な状況で信号音を呈示する場合、できるだけ大きな ITD ($S_{90}N_0$ の状況) を設定すると良いことがわかった。

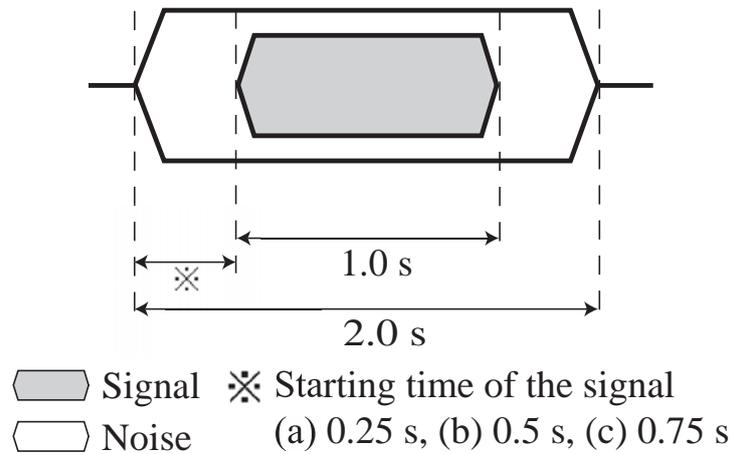


図 3.4: 白色雑音中の信号音呈示状況図。信号音の呈示開始時刻は (a)、(b)、(c) からランダムに決定する。

3.8 まとめ

本章では、ITD のみを手掛かりとしたときの知覚特性を測定するために、クリック音 (Saberri らが利用したものと類似 [8]) を用いて聴取実験を行った。得られた知覚特性は、信号音源が右側に移動するにつれて、全被験者一様に減少傾向を示した。これは Saberri が報告したものと同様の傾向であった。これにより、SRM は ITD のみを変化させても生起することが示された。また、 $S_{90}N_0$ において最大平均 7.6 dB という大きなマスキング解除量を示したことから、SRM において ITD は重要な手掛かりであることが示された。ここで得られた知見は、次の章の報知音の知覚特性 (ITD だけでなく、IPD も手掛かりとして用いることができる場合) と比較することができ、さらに議論を深めることができる。

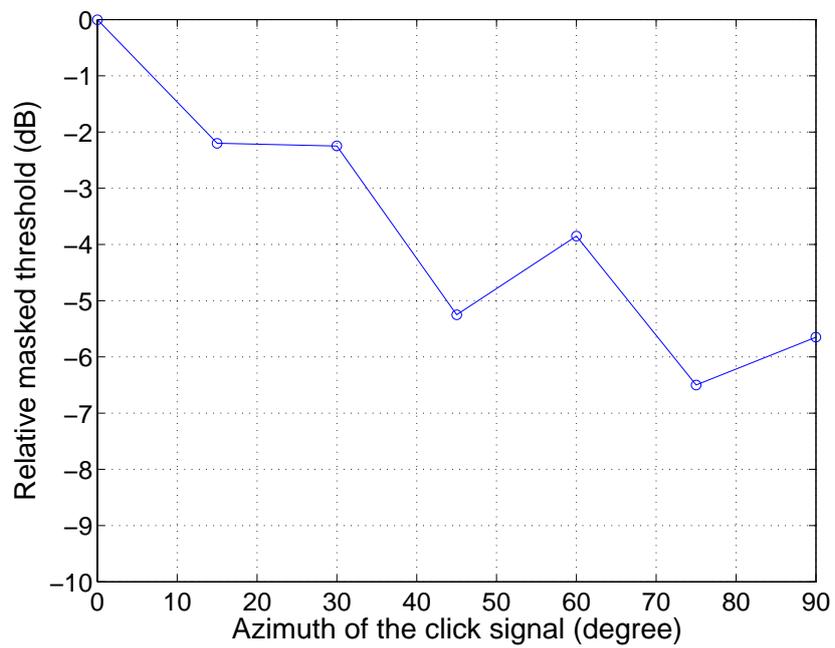


図 3.5: クリック音の知覚特性: 被験者 A

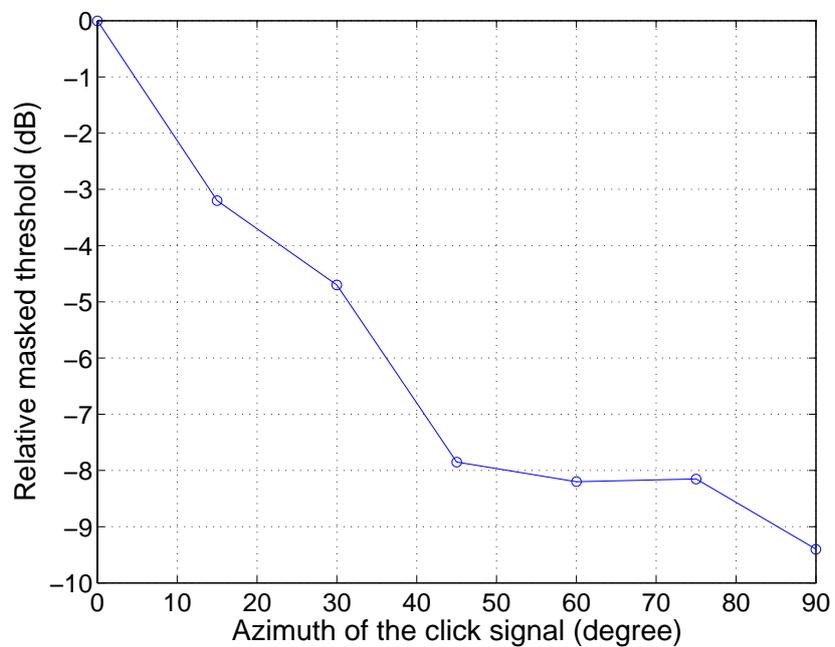


図 3.6: クリック音の知覚特性: 被験者 B

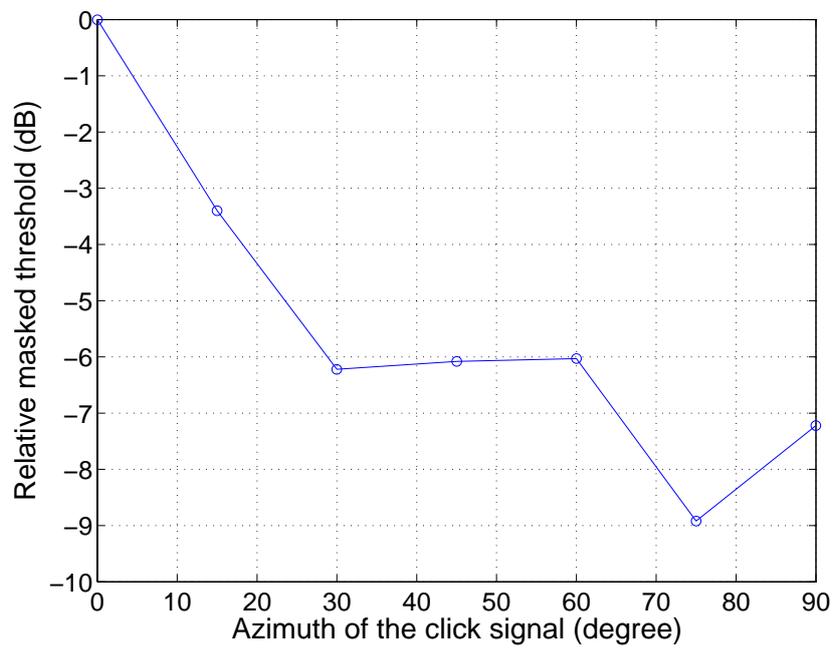


図 3.7: クリック音の知覚特性: 被験者 C

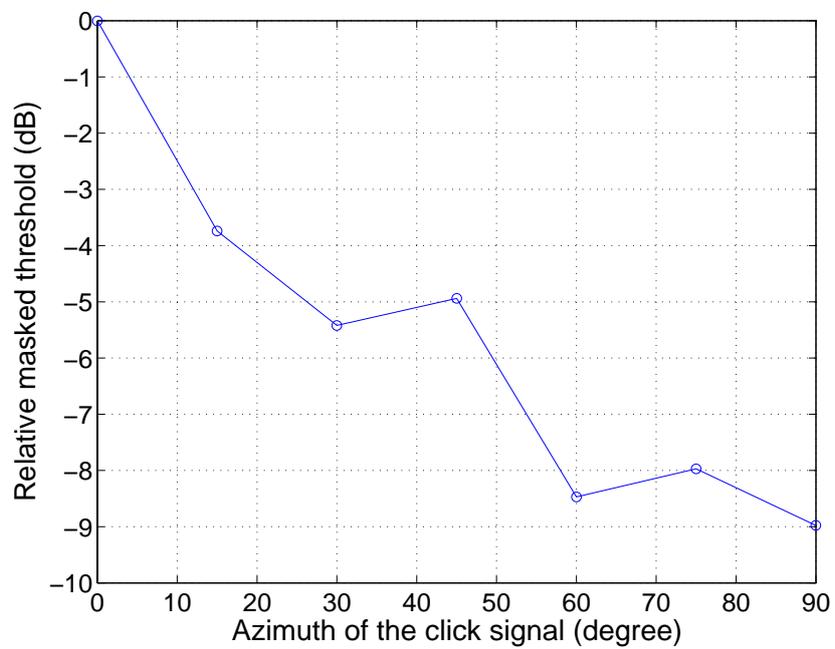


図 3.8: クリック音の知覚特性: 被験者 D

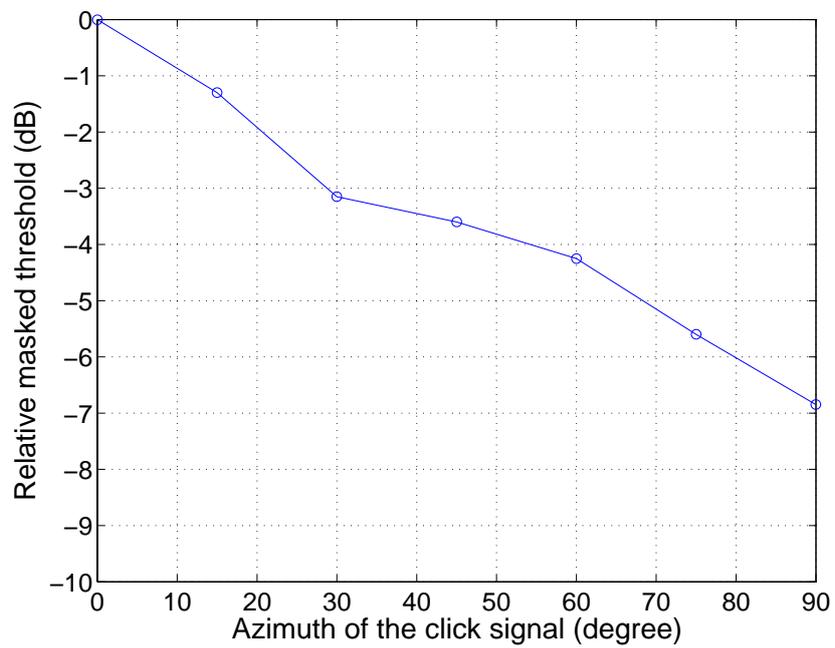


図 3.9: クリック音の知覚特性: 被験者 E

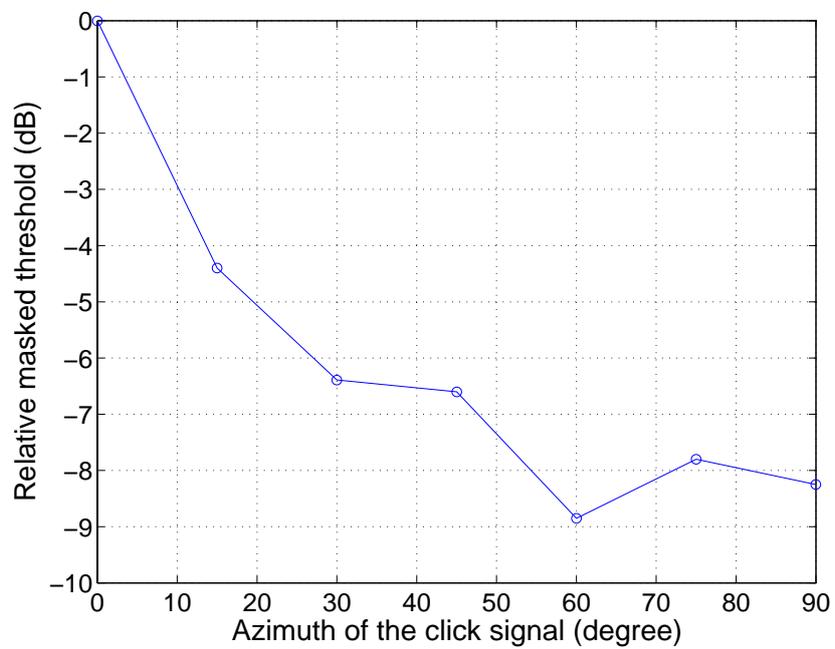


図 3.10: クリック音の知覚特性: 被験者 F

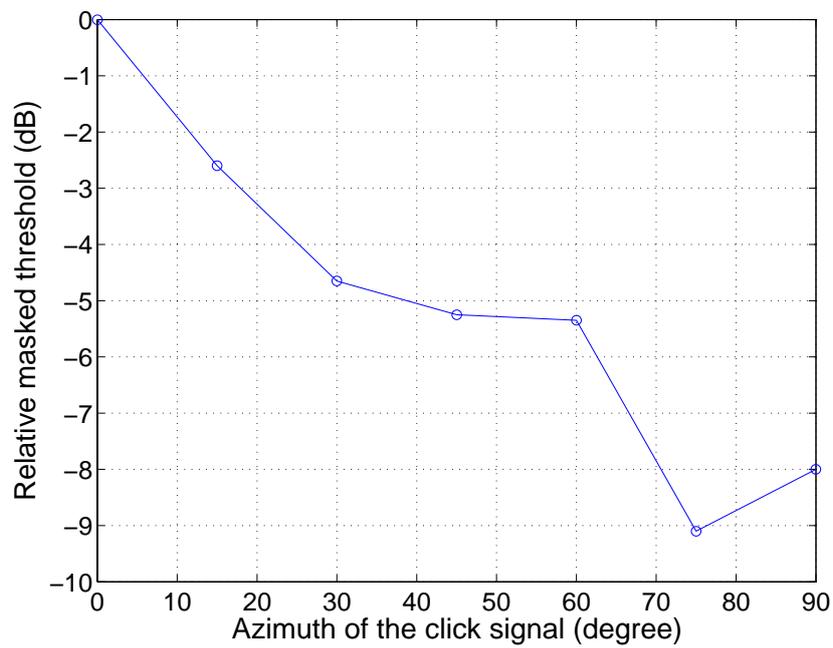


図 3.11: クリック音の知覚特性: 被験者 G

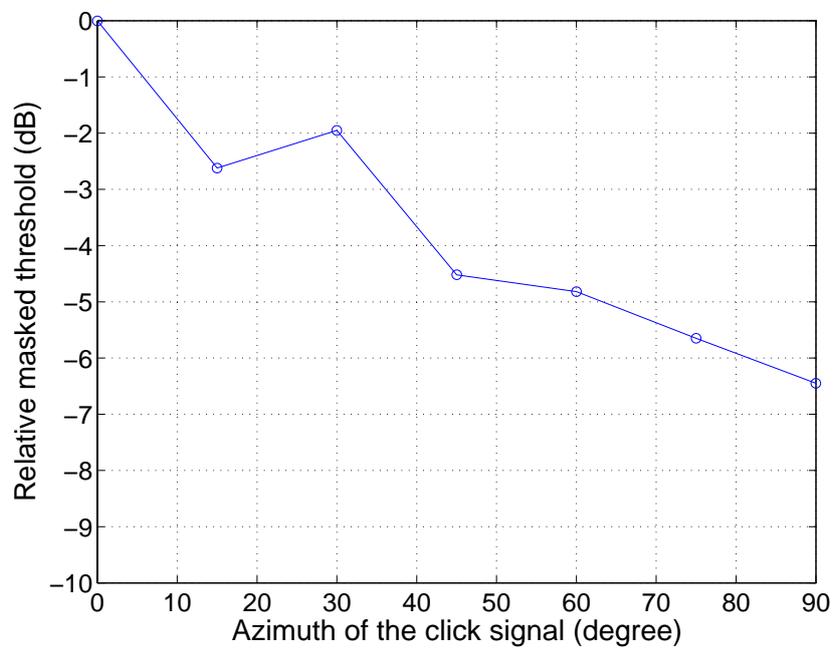


図 3.12: クリック音の知覚特性: 被験者 H

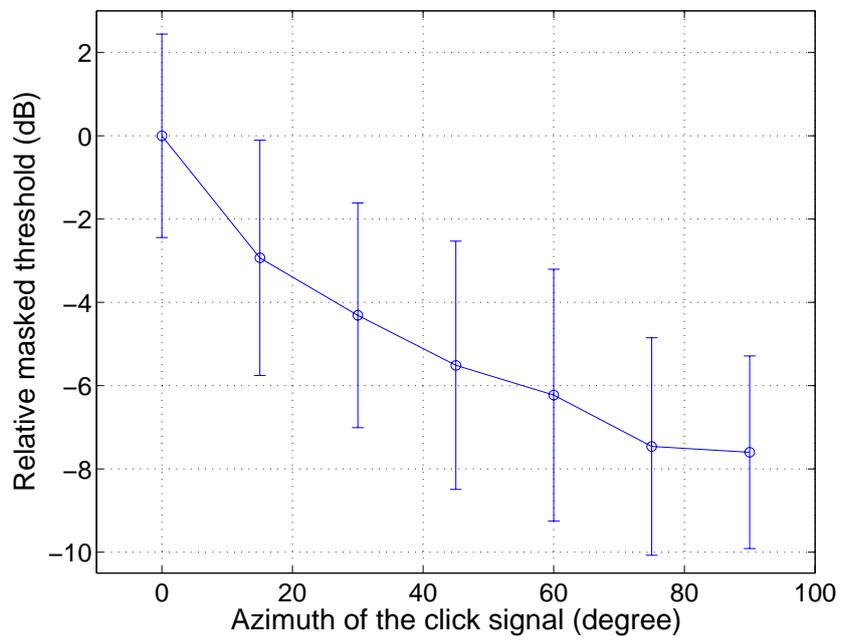


図 3.13: クリック音の知覚特性: 全被験者の平均

第4章 両耳間時間差と両耳間位相差を手掛かりとしたときの知覚特性の測定

4.1 目的

前章では、ITDのみを手掛かりとしてもSRMが生起することを示した。そこで、本章では報知音知覚におけるIPDの影響を明らかにすることを目的として、実際に報知音を用いて前章同様の実験を行う。ここで、信号音に報知音を用いてITDのみを設定すると、同時に成分周波数によるIPDも生じていると考えられる。そのため、被験者にはITDのみならずIPDの手掛かりも与えていることとなる。そこで、報知音のITDとIPDを手掛かりとしたときに、それぞれの手掛かりが知覚特性にどのような影響を与えるか調べる。まず、報知音の成分周波数は約2kHzが良いとされているが、一般にITDによる純音の方向定位能力は、1.5 kHz付近で低下するとされている[14]。そこで、成分周波数が2.0 kHzの報知音以外に、1.5、2.5 kHzの報知音も用いることで、ITDによる方向定位能力とSRMに関連があるか議論する。さらに、純音の方向定位は、周波数が1.5 kHz以下ではIPD、1.8 kHz以上ではILDを主に手掛かりとして方向定位を行うことが知られている[14]。そこで、ITDを手掛かりとしてSRMが生起する上で、IPDの手掛かりは知覚特性にどのような影響を与えるか議論する。

4.2 刺激音

報知音は、報知音に関する設計指針 JIS S 0013[1] より最も注意音として知覚されるものを用いた (ON/OFF の時間パターン: ON=0.1 s、OFF=0.05 s)[7]。報知音の成分周波数は1.5、2.0、2.5 kHzとした。報知音は、立ち上がりと立ち下りの部分に10 msの傾斜がつけてあり、すべて1秒間である。図4.1に実験に用いた報知音の例を示す。また、雑音には第3章と同様の2秒間の白色雑音を用いた。サンプリング周波数はすべて48kHzである。ITDは、第3章と同様に報知音のみに設定した。

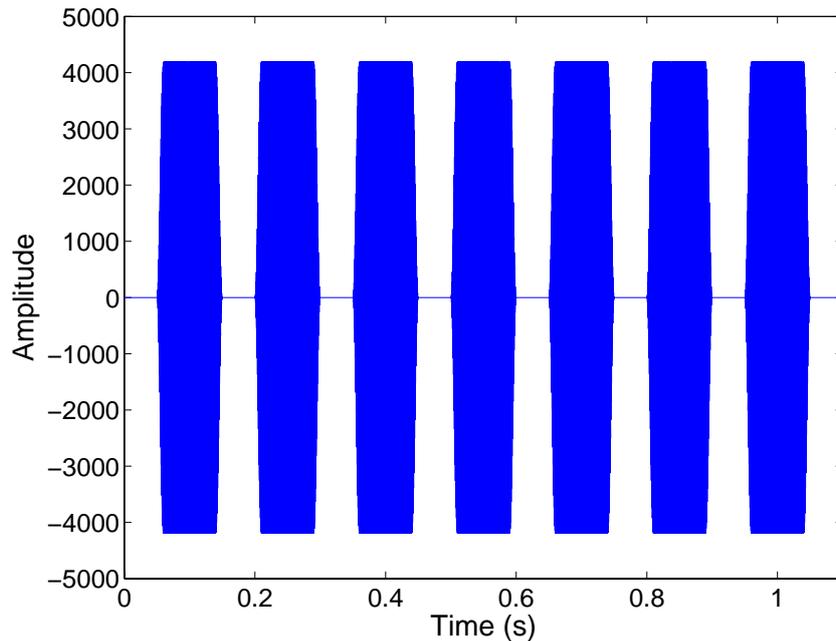


図 4.1: 実験に用いた報知音の例

4.3 その他の実験方法

被験者、実験システム、実験手続きは第3章と同様である。

4.4 実験結果

図 4.2~4.9 に、成分周波数が 1.5 kHz の報知音による知覚特性 (被験者 A~H) を示す。また、図 4.10 に全被験者の平均結果と標準偏差を示す。図 4.2~4.9 より、マスキング閾値は $S_{45}N_0$ のときに最大で 1.8~3.7 dB 減少した。そして、平均では 2.3 dB 減少した。また、被験者 G を除く被験者 A~F、H (図 4.2~4.7、4.9) は S_0N_0 から $S_{45}N_0$ にかけては減少傾向、 $S_{45}N_0$ から $S_{90}N_0$ にかけては上昇傾向を示した。さらに、 $S_{90}N_0$ におけるマスキング閾値は、 S_0N_0 でのマスキング閾値と近い値を示した。平均結果もこれと同様の傾向となった。

図 4.11~4.18 に、成分周波数が 2.0 kHz の報知音による知覚特性 (被験者 A~H) を示す。また、図 4.19 に全被験者の平均結果と標準偏差を示す。図 4.11~4.18 より、マスキング閾値は最大で 0.3~6.0 dB 減少した。そして、平均では 2.5 dB 減少した。また、被験者 B を除く被験者 A、C~H (図 4.11、4.13~4.18) は S_0N_0 から $S_{30}N_0$ 付近にかけては減少傾向、 $S_{30}N_0$ 付近から $S_{60}N_0$ 付近にかけては上昇傾向を示し、さらに $S_{60}N_0$ 付近から $S_{90}N_0$ 付近にかけては減少傾向を示した。平均結果もこれと同様の傾向となった。

図 4.20~4.27 に、成分周波数が 2.5 kHz の報知音による知覚特性 (被験者 A~H) を示す。また、図 4.28 に全被験者の平均結果と標準偏差を示す。図 4.20~4.27 より、マスキング閾

値は最大で 1.2~6.1 dB 減少した。そして、平均では 2.8 dB 減少した。また、被験者 A を除く被験者 B~H(図 4.21~4.27) は S_0N_0 から $S_{15}N_0$ 付近にかけては減少傾向、 $S_{15}N_0$ 付近から $S_{45}N_0$ 付近にかけては上昇傾向を示し、さらに $S_{45}N_0$ 付近から $S_{75}N_0$ 付近にかけては減少傾向、 $S_{75}N_0$ 付近から $S_{90}N_0$ にかけては上昇傾向を示した。平均結果もこれと同様の傾向となった。

以上より、ITD による純音の方向定位能力は 1.5 kHz 付近で低下すると言われている [14] が、方向定位が困難な条件下 (成分周波数 2.0、2.5 kHz の報知音) においても、SRM が生起することが確認できた。被験者毎にマスキング解除量が異なるが、これは個人差によるものと考えられる。また、報知音の成分周波数により、知覚特性の様相が大きく変化した。第 3 章でクリック音を用いて得られた知覚特性は、信号音源が右側に移動するにつれてマスキング閾値が低くなる傾向を示したが、本実験で報知音を用いて得られた知覚特性は、それとも異なる様相であった。この原因については以下の考察にて詳しく議論する。

4.5 考察

4.5.1 両耳間位相差の影響

成分周波数を変化させた報知音を用いて知覚特性の測定を行った結果、SRM が生じたことを確認することはできたが、第 3 章でクリック音を用いて得られた知覚特性とは異なる様相を示した。また、成分周波数毎の知覚特性も様相が大きく異なった。これについては、両耳マスキングレベル差 [14] によって説明ができる。両耳マスキングレベル差とは、両耳に同位相の白色雑音と純音が混合されて呈示されているときの純音のマスキング閾値を ML_0 dB、同位相の白色雑音と逆位相の純音が混合されて呈示されているときの純音のマスキング閾値を ML_{π} dB とすると、この二つのレベル差 (dB) として知られている。その値は低い周波数 (500 Hz 付近) で最大 15 dB 程度、1.5 kHz 以上の周波数では、2~3 dB となる。ここで、成分周波数が 1.5 kHz の報知音について考えると、サンプリング周波数は 48 kHz であることから、成分周波数 1.5 kHz の正弦波の 1 周期は約 0.67 ms である。この時間は、 $S_{90}N_0$ における ITD と同様である (表 3.1 参照)。言い換えると、 $S_{90}N_0$ では、報知音の位相が両耳間でちょうど 1 周期ずれた状態で刺激音が呈示されているということである。そのため、両耳間で報知音が同位相の状態に極めて近くなった (以降、同位相条件と呼ぶ) ことから高い閾値を得たと考えられる。同様に、 $S_{45}N_0$ においては、両耳間で報知音の位相が $\frac{1}{2}$ 周期ずれた逆位相の状態に極めて近くなった (以降、逆位相条件と呼ぶ) ことから低い閾値を得たと考えられる。これは、報知音の成分周波数が 2.0、2.5 kHz の場合からも同様のことが言える。成分周波数が 2.0 kHz の報知音では、2.0 kHz の正弦波の 1 周期は約 0.5 ms である。この時間は、 $S_{60}N_0$ における ITD と同様である (表 3.1 参照)。そのため、 $S_{60}N_0$ では両耳間で報知音が同位相条件、 $S_{30}N_0$ では逆位相条件となっており、それぞれ高い閾値および低い閾値を示している。成分周波数が 2.5 kHz の報知音で

は、2.5 kHz の正弦波の 1 周期は約 0.4 ms である。この時間は、 $S_{45}N_0$ における ITD と同様である (表 3.1 参照)。そのため、 $S_{45}N_0$ では両耳間で報知音が同位相条件、 $S_{15}N_0$ および $S_{75}N_0$ では逆位相条件となっており、それぞれ高い閾値および低い閾値を示している。

以上より、報知音の成分周波数の違いにより異なる知覚特性を示した原因は、両耳間に呈示される報知音の位相のずれ、つまり IPD であることがわかった。そのため、クリック音から得られた知覚特性と様相が異なった原因も IPD によると言える。そのため、ITD のみの手掛かりならば、信号音源が右側に移動するにつれてマスキング量は減少するが、IPD の手掛かりも加わると、ITD のみの場合ほど単純ではなく、刺激音を呈示する方向によっては、よりマスクされてしまう状況が生じてしまうということである。これにより、雑音中の報知音知覚を考える場合は、報知音の成分周波数に着目し、IPD を考慮する必要があることが示された。

4.5.2 両耳間時間差と両耳間位相差の関係

ここでは、(1) 一般に純音に対する ITD による方向定位能力は、1.5 kHz 付近で低下するとされており、(2) さらに、1.5 kHz 以下の帯域では IPD、1.8 kHz 以上の帯域では ILD を主に手掛かりとして方向定位を行うことが知られている [14] ことから、報知音の成分周波数を 1.5、2.0、2.5 kHz と変化させた場合に、ITD と IPD の両手掛かりの優位性がどのように現れるのか、被験者毎に調べた。方法は、 S_0N_0 と、その他のピークとなる点 (S_0N_0 以外で最も高いマスキング閾値の点) の 2 点の傾きを計算することで ITD と IPD の影響を被験者毎に調べた。もしも、この 2 点の傾きが報知音の成分周波数の上昇と共に小さくなれば、ITD の影響が強くなってきていることが言える。例えば、成分周波数が 1.5 kHz の知覚特性においては、被験者 G を除く被験者 A~F、H (図 4.2~4.7、4.9) は $S_{90}N_0$ でピークを示しているため、 S_0N_0 と $S_{90}N_0$ の傾きを求めた。また、被験者 G (図 4.8) は、他の被験者とは異なり $S_{90}N_0$ でピークを示さない知覚特性となったが、これは、被験者によりどの手掛かりを主に用いてマスキング解除を行っているかわからないことから、被験者 G は IPD よりも ITD を主な手掛かりとして用いたことが原因であると考えられる。そのため、 $S_{90}N_0$ ではピークよりもむしろ低い閾値を示したと言える。これは、報知音が ON と OFF の繰り返しパターンを持つことにより、立ち上がり情報が繰り返し与えられるため、立ち上がりの時間差を他の被験者よりも上手く利用することができたことが原因であると考えられる。そこで、この被験者においては、ピークが得られていないため、他の被験者と同様に S_0N_0 と $S_{90}N_0$ の傾きを求めた。その他にも、被験者によりピークやディップの位置が異なる場合があるが、これについても同じ音を呈示しても、被験者毎に感じ方が異なるため、個人差によるものであると考えられる。

表 4.1 に求めた傾きを被験者毎にまとめた。表 4.1 より、被験者 A、B、D、H は成分周波数が高くなるにつれて S_0N_0 とピークの傾きが小さくなっていっていることがわかる。これは、成分周波数 1.5 kHz のときには IPD の影響が強く知覚特性に現れていたものが、2.0、2.5 kHz と移るにつれて IPD の影響が弱まり ITD の影響が強調されてきたことによ

	A	B	C	D	E	F	G	H	平均
1.5 kHz	0.0061	0.0072	0.0169	0.0036	0.0083	-0.0002	-0.0200	-0.0022	0.0025
2.0 kHz	0.0039	0.0067	0.0079	-0.0233	-0.0130	0.0111	0.0100	-0.0149	-0.0062
2.5 kHz	0.0003	0.0049	0.0298	-0.0222	0.0189	0.0093	-0.0011	-0.0156	-0.0005

表 4.1: 被験者毎の S_0N_0 と他の 1 つのピークの傾き

ると考えられる。その他の被験者については、同様の傾向があるとは言いきれない。ただし、今回用いた成分周波数の報知音以外に、より低い成分周波数 (例えば 1.0 kHz) を持つ報知音や、より高い成分周波数 (例えば 4.0 kHz) を持つ報知音を用いて知覚特性の測定を行えば、ITD と IPD の手掛かりによる影響がより顕著に現れる可能性がある。これについては、今後の課題とする。

以上より、被験者により個人差はあるが、報知音の知覚特性も、一般的に純音の方向定位で知られている知見 (上記の (1)、(2)) にあるような特徴を示していることがわかった。さらなる検討が必要であるが、この結果は、より知覚されやすい報知音の設計や呈示方法を考える場合に、一般的な方向定位の知見を利用できることを示唆するものである。

4.6 まとめ

本章では、成分周波数を 1.5、2.0、2.5 kHz と変化させた報知音を用いて知覚特性の測定を行った。その結果、方向定位が困難な条件下でも SRM は生起することがわかった。また、報知音の成分周波数による IPD が知覚特性に影響を与えることを示した。さらに、方向定位の知見より被験者毎に個人差はあるが、低周波数 (1.5 kHz) では IPD、高周波数 (2.5 kHz) では ITD の影響が知覚特性に現れる可能性を示した。以上より、人間が報知音を知覚する場合、成分周波数による IPD と、ON/OFF の繰り返しによる立ち上がり情報の ITD の両手掛かりを用いることがわかった。そのため、雑音の影響を極力抑え、正確に報知音を知覚させるためには、報知音の成分周波数による IPD と報知音の ITD の両方の関係を考慮して呈示する必要があることが示された。

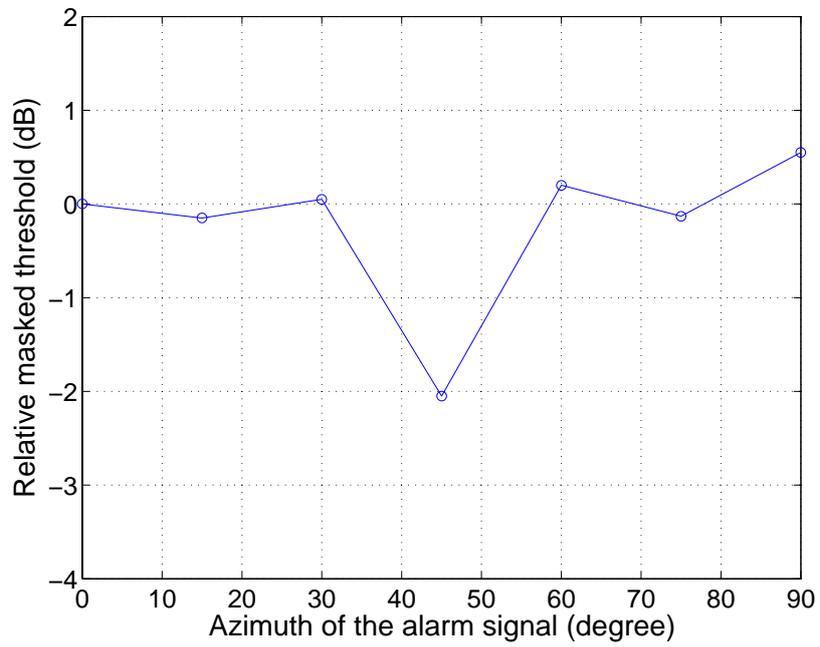


図 4.2: 成分周波数が 1.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 A

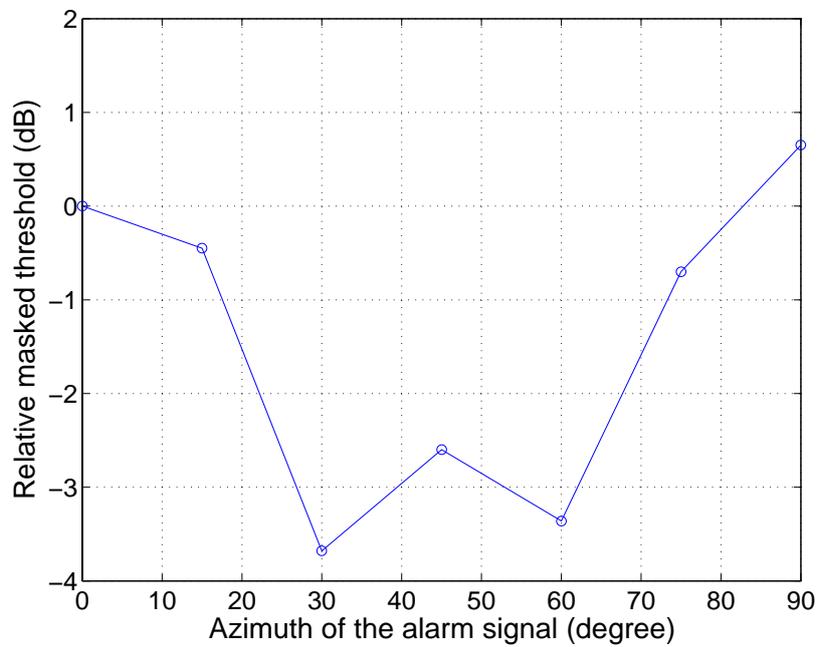


図 4.3: 成分周波数が 1.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 B

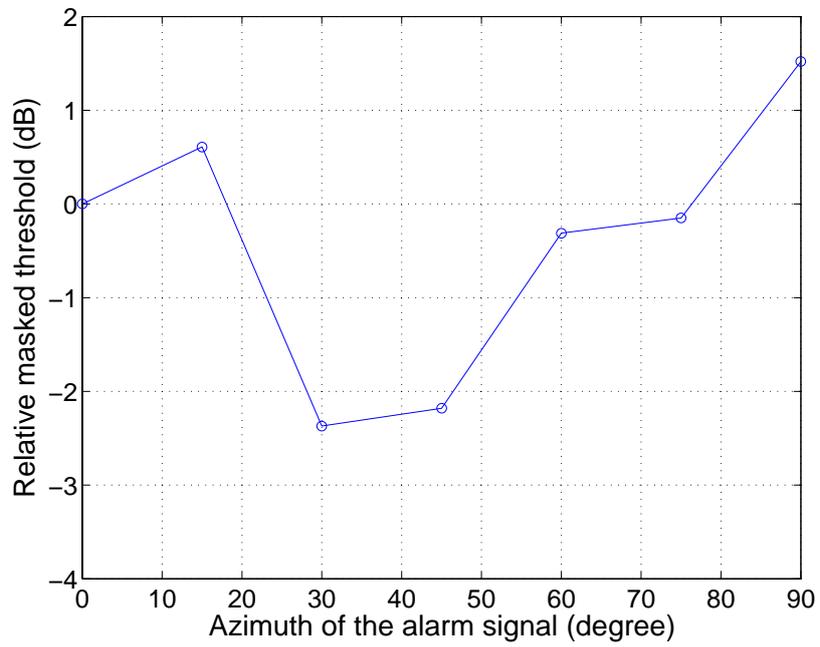


図 4.4: 成分周波数が 1.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 C

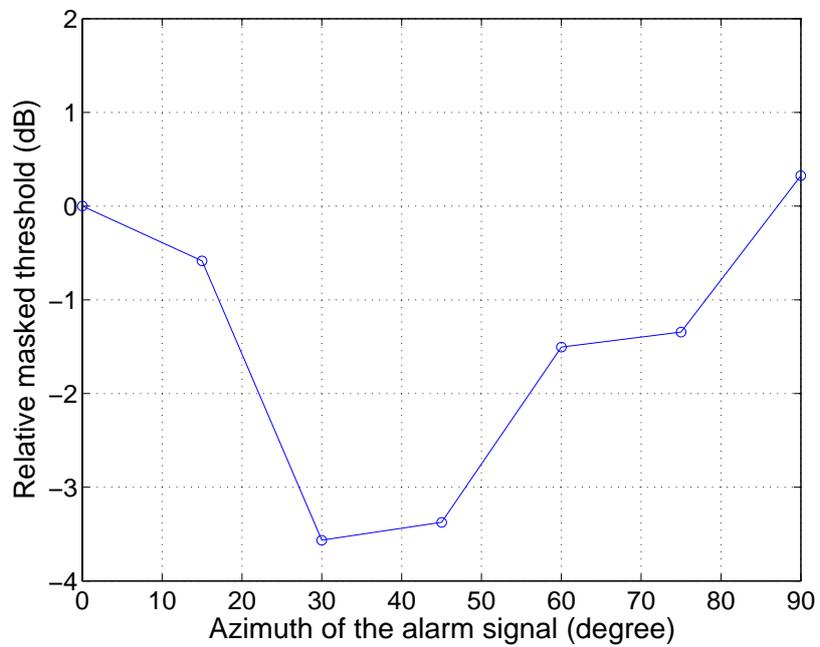


図 4.5: 成分周波数が 1.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 D

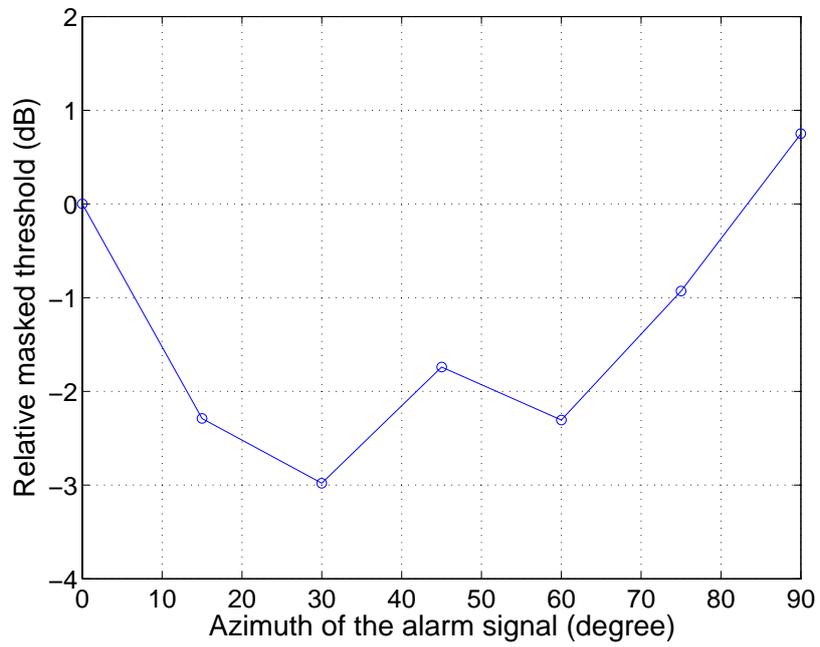


図 4.6: 成分周波数が 1.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 E

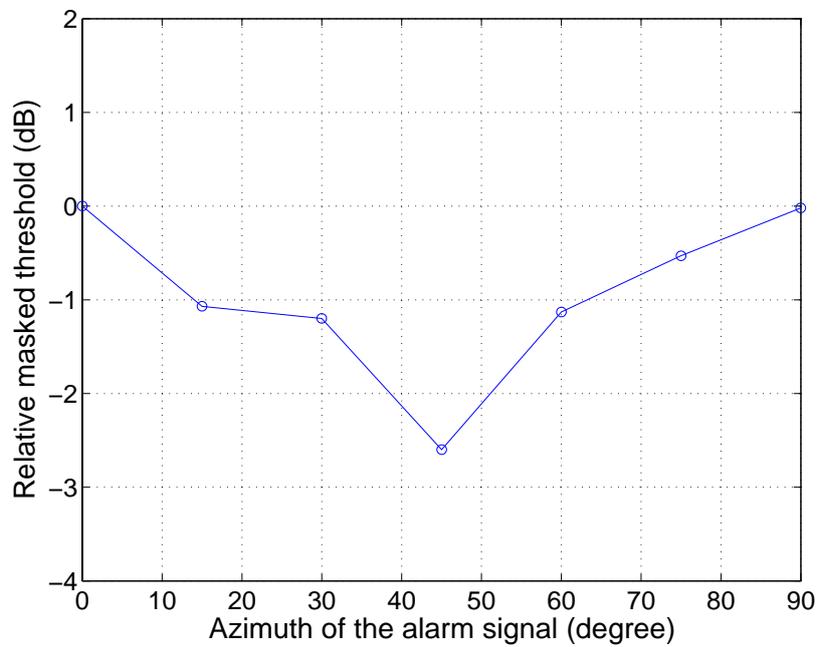


図 4.7: 成分周波数が 1.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 F

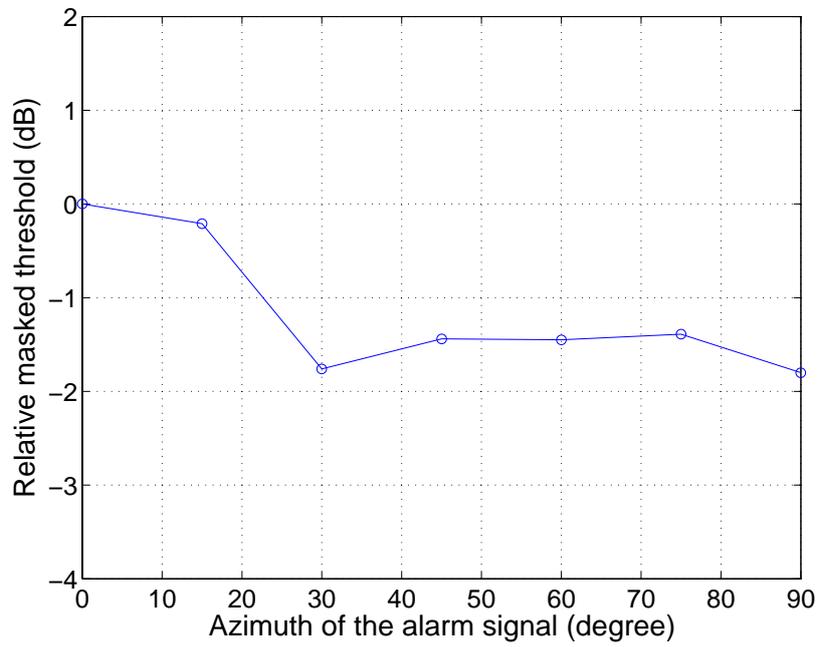


図 4.8: 成分周波数が 1.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 G

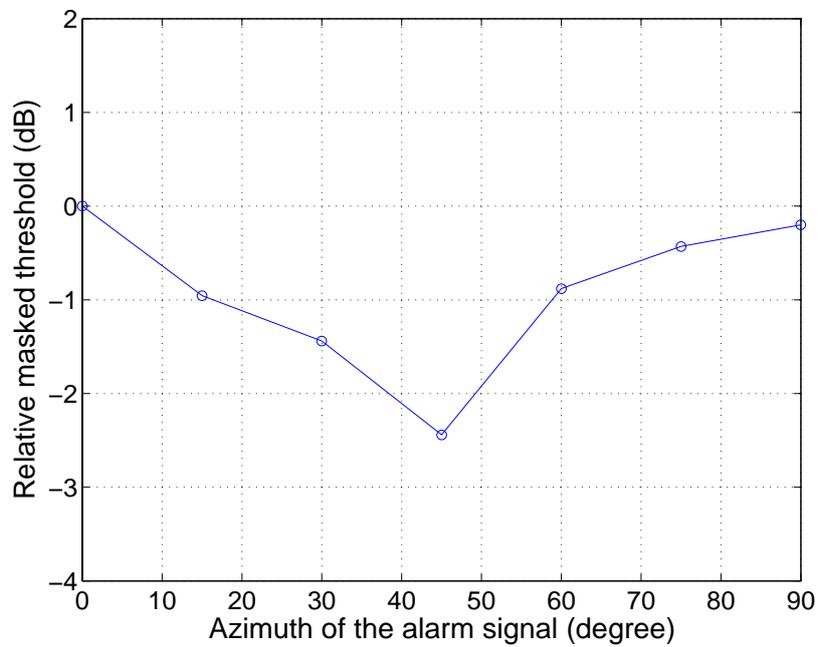


図 4.9: 成分周波数が 1.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 H

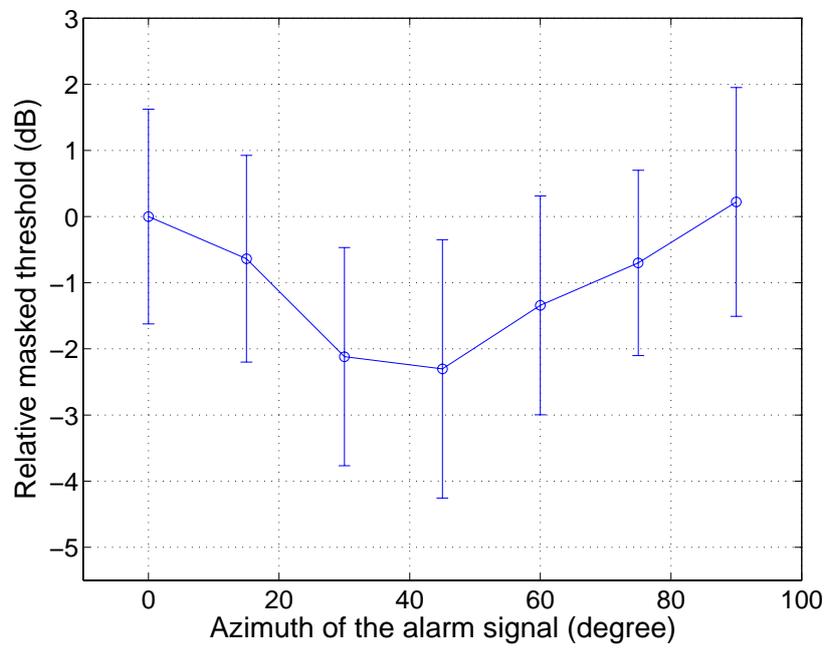


図 4.10: 成分周波数が 1.5 kHz の報知音の知覚特性: 全被験者の平均

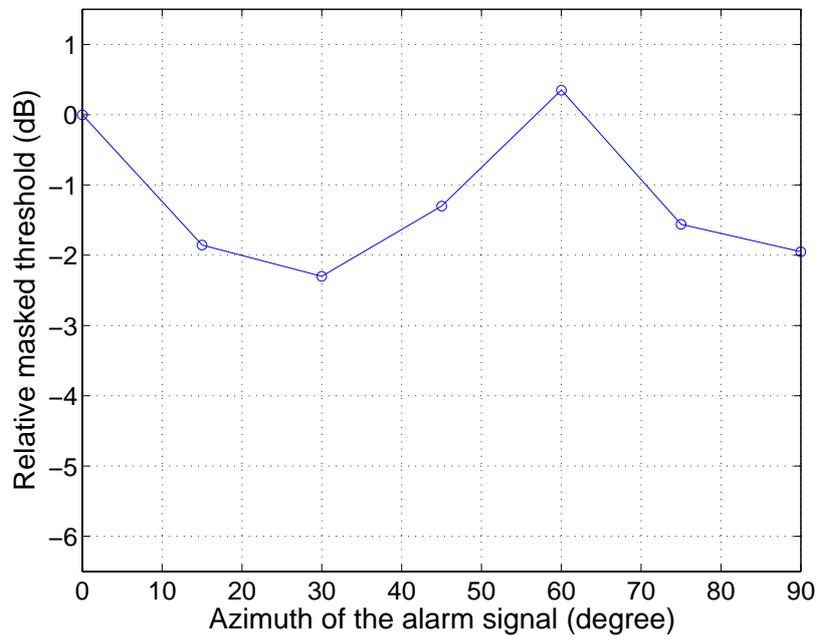


図 4.11: 成分周波数が 2.0 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 A

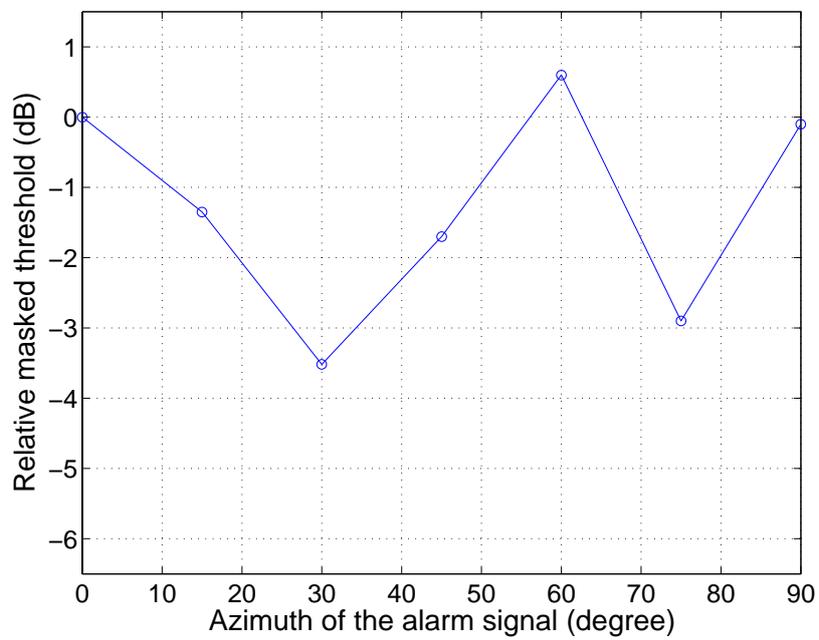


図 4.12: 成分周波数が 2.0 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 B

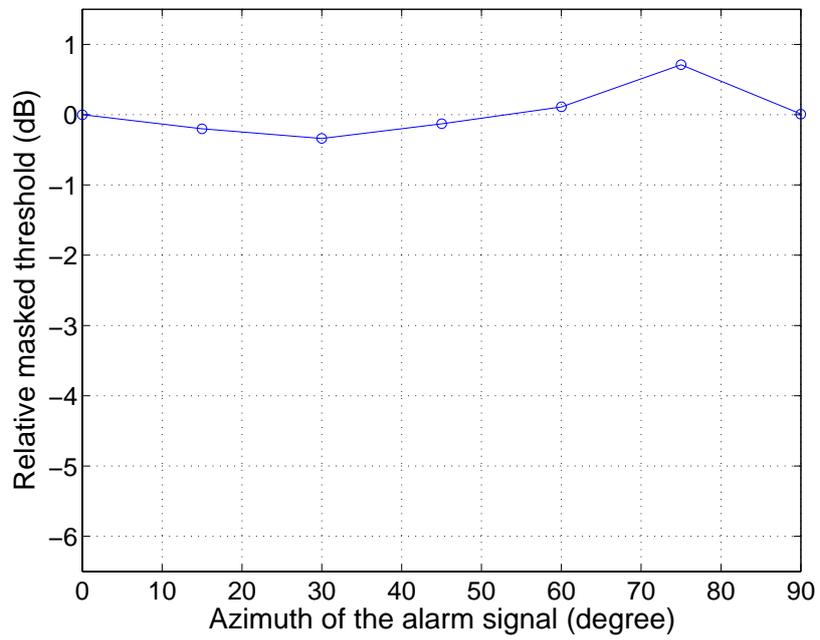


図 4.13: 成分周波数が 2.0 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 C

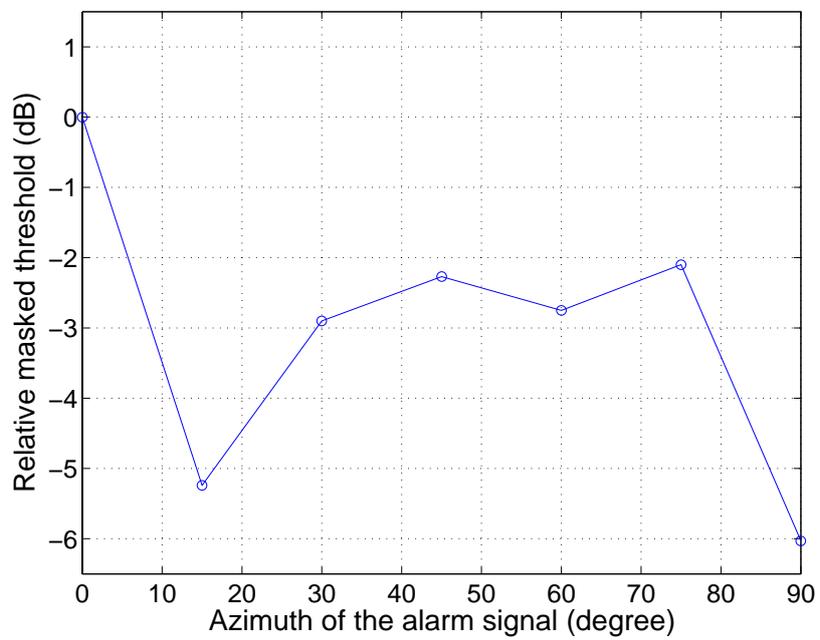


図 4.14: 成分周波数が 2.0 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 D

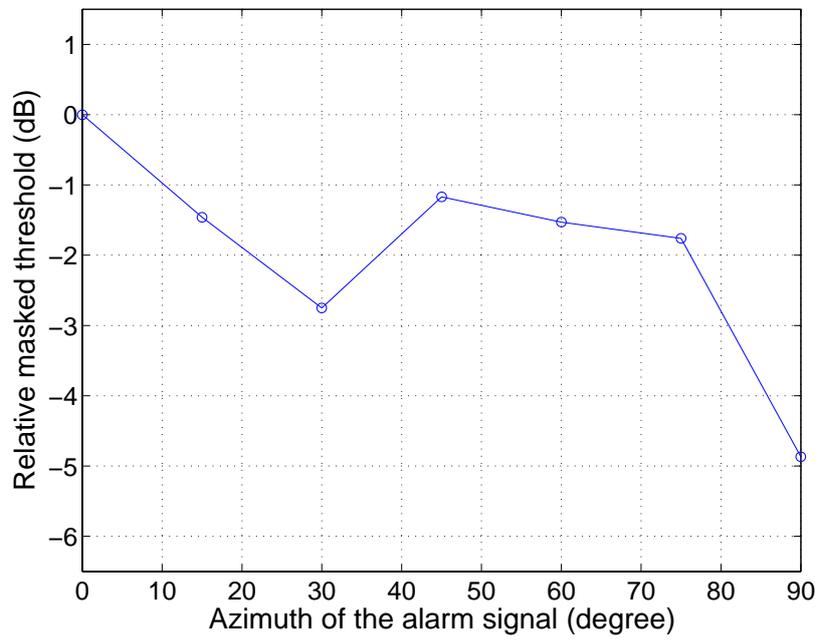


図 4.15: 成分周波数が 2.0 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 E

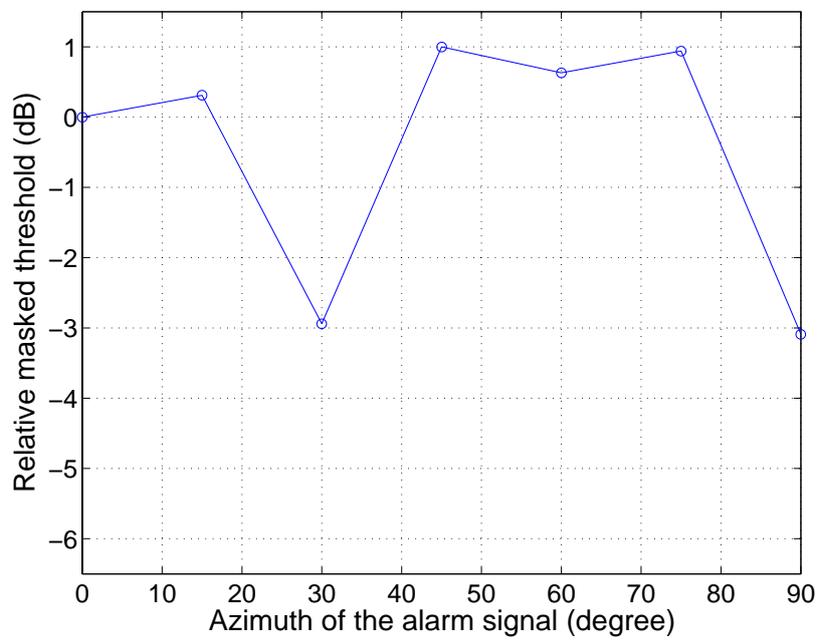


図 4.16: 成分周波数が 2.0 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 F

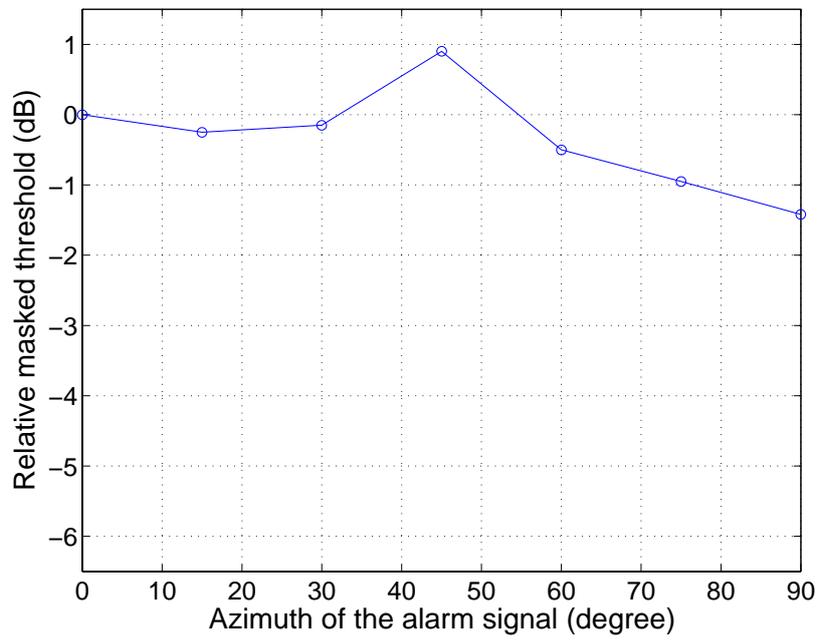


図 4.17: 成分周波数が 2.0 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 G

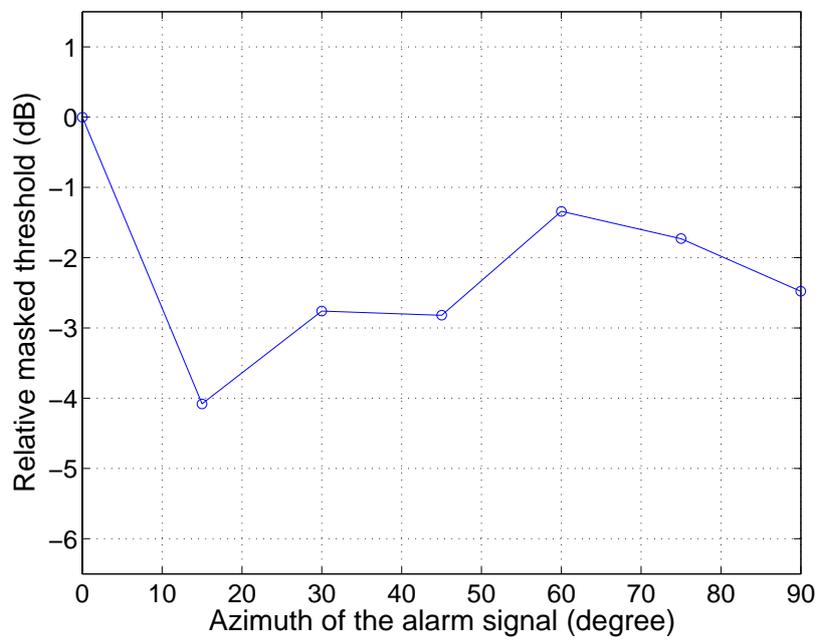


図 4.18: 成分周波数が 2.0 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 H

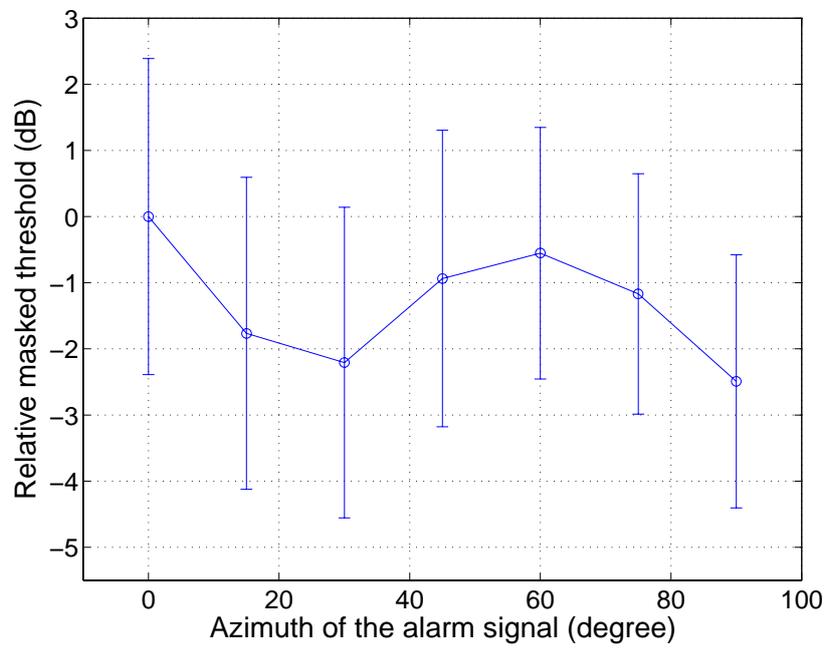


図 4.19: 成分周波数が 2.0 kHz の報知音の知覚特性: 全被験者の平均

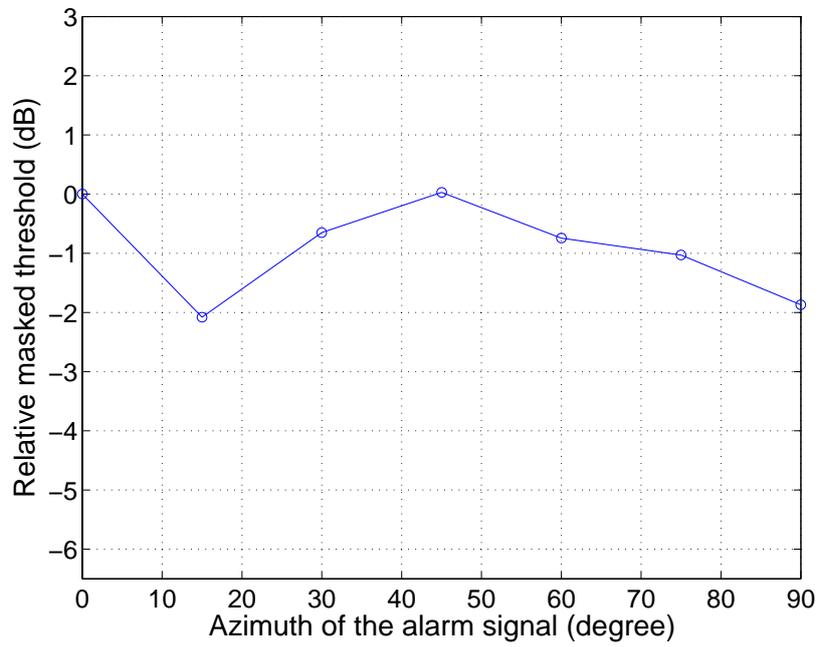


図 4.20: 成分周波数が 2.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 A

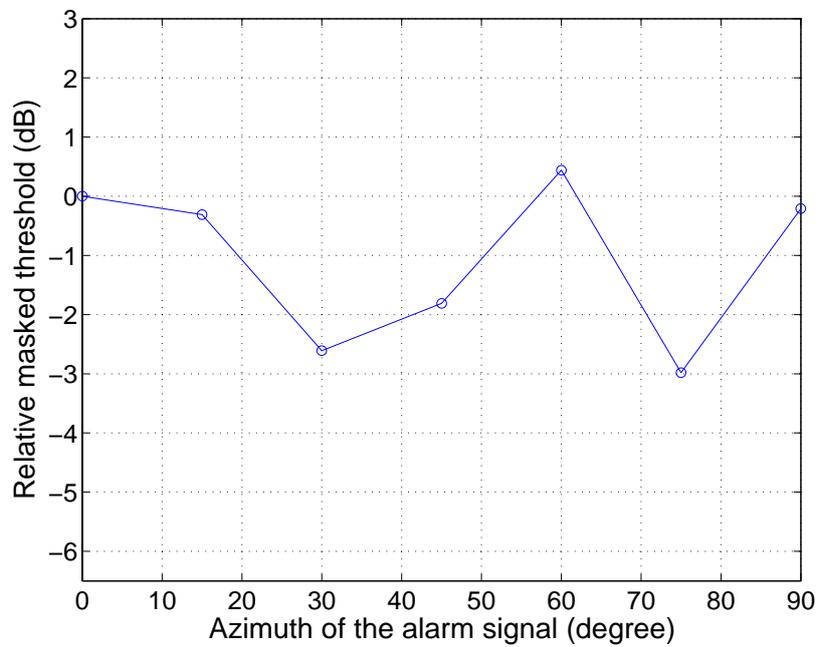


図 4.21: 成分周波数が 2.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 B

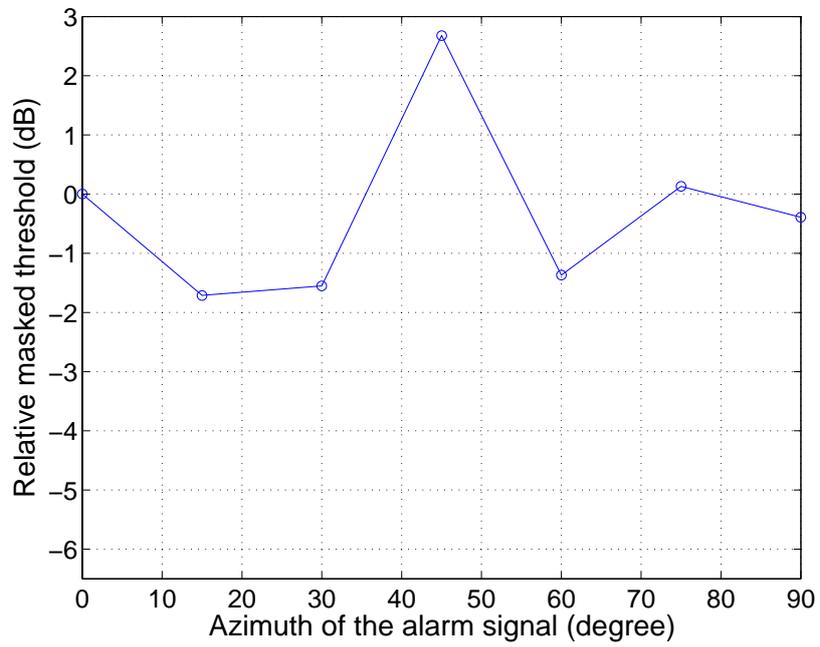


図 4.22: 成分周波数が 2.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 C

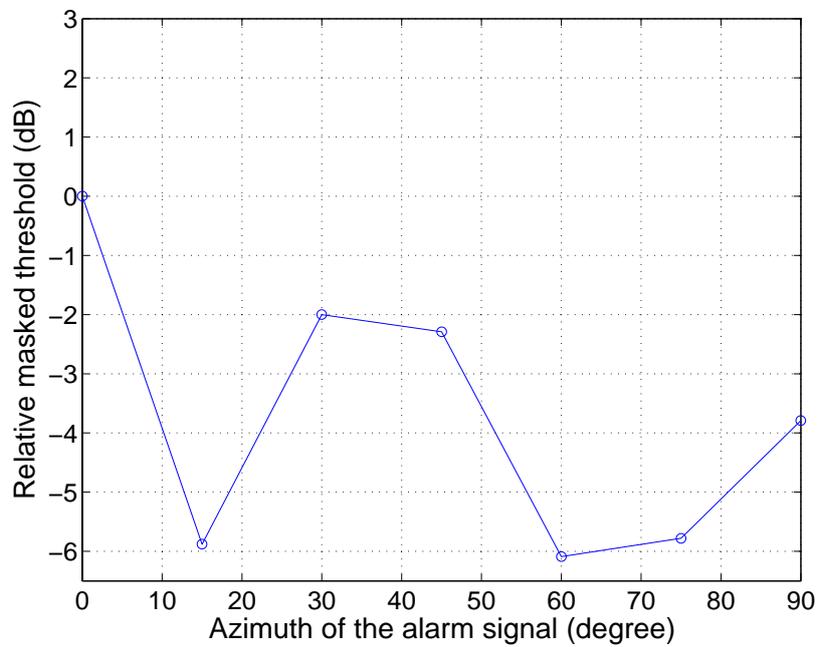


図 4.23: 成分周波数が 2.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 D

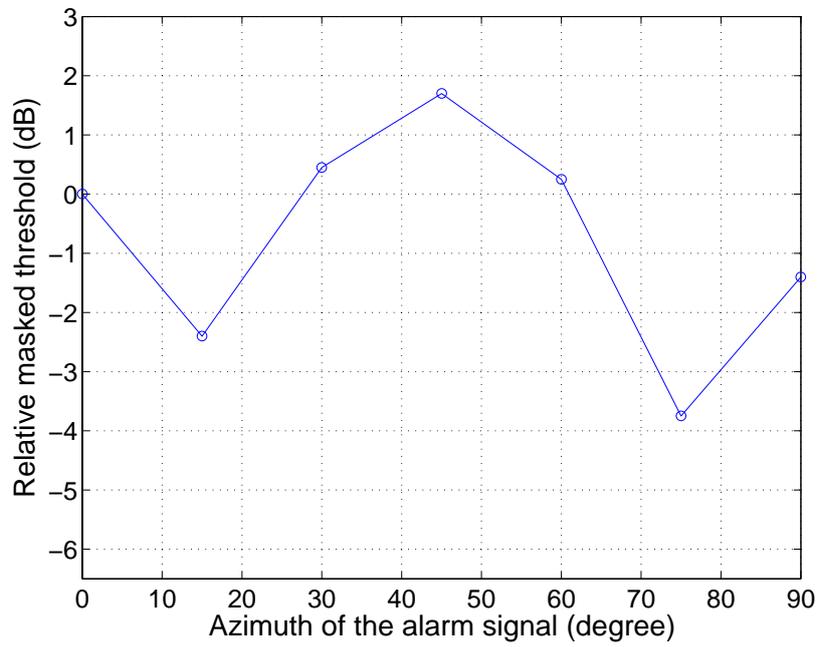


図 4.24: 成分周波数が 2.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 E

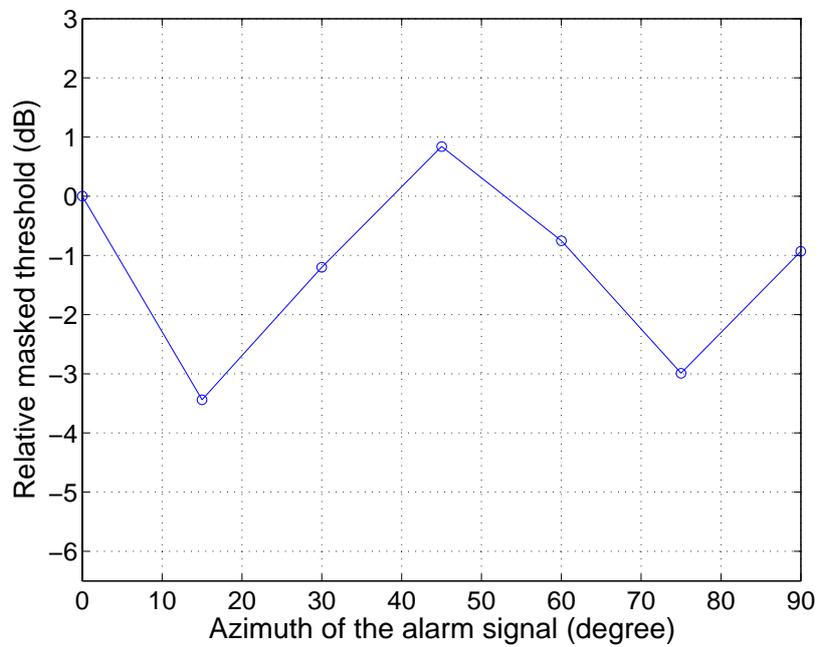


図 4.25: 成分周波数が 2.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 F

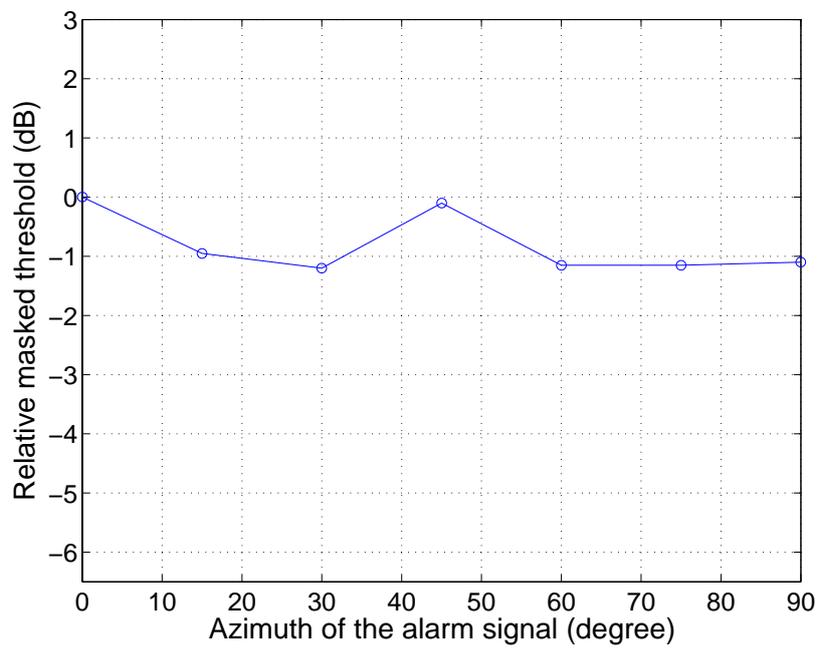


図 4.26: 成分周波数が 2.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 G

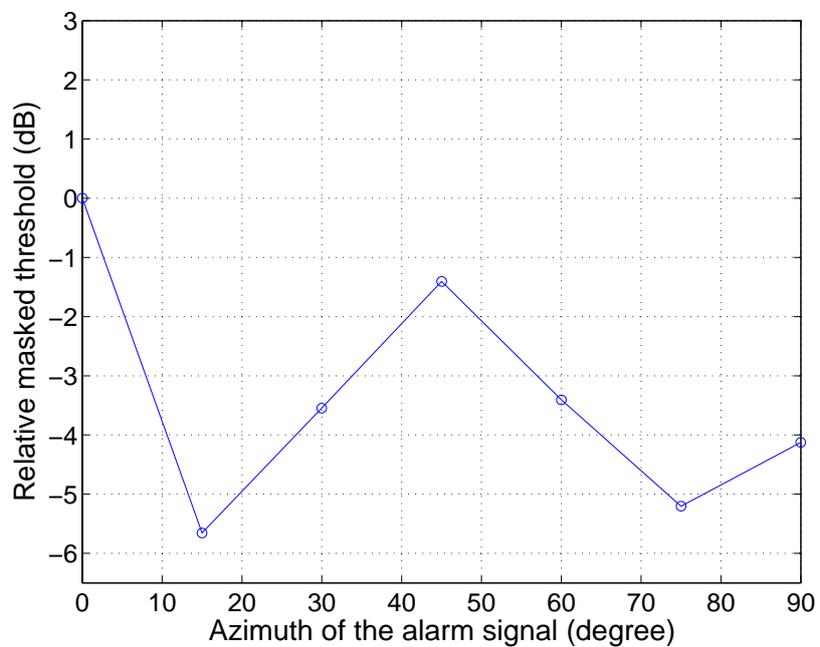


図 4.27: 成分周波数が 2.5 kHz の報知音の知覚特性: 被験者 H

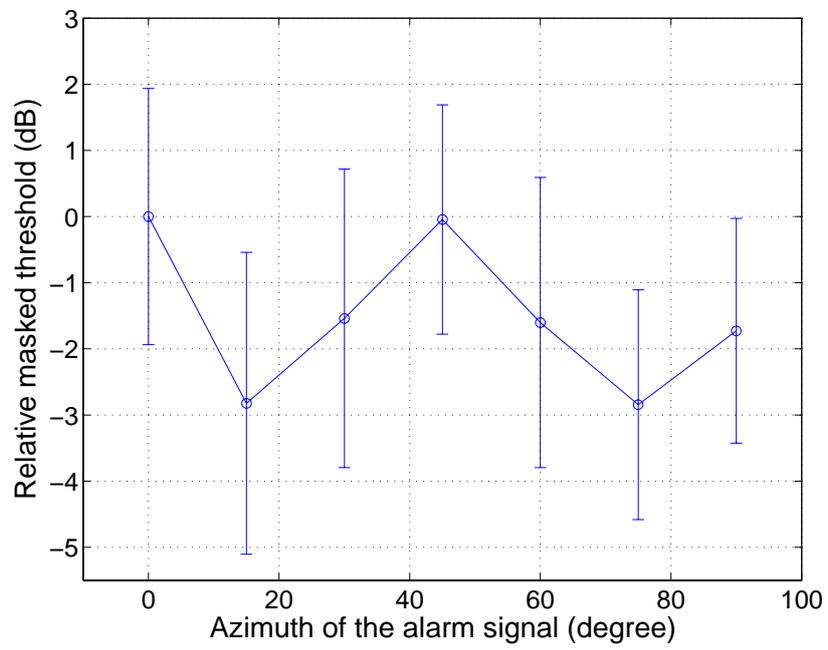


図 4.28: 成分周波数が 2.5 kHz の報知音の知覚特性: 全被験者の平均

第5章 報知音の設計および呈示方法への提言

ここでは、本研究で得られた知見をもとに、できるだけ雑音に影響されにくく気付きやすい報知音のためのより良い性質について、報知音の成分周波数および到来方向を中心に述べる。まず、本研究で得られた知見を以下に示す。

- 音源の角度差(時間差)を大きくするとマスキング量は減少することから、SRMにおいてITDは重要な手掛かりである。
- 報知音の知覚には成分周波数のIPDを考慮する必要がある。
- 低周波数ではIPD、高周波数ではITDの影響が現れる。

以上より、クリック音を用いた実験からITDを大きくするとマスキング量は減少することが示されたが、報知音の成分周波数により聞き取りやすい方向と聞き取りにくい方向が生じるということがわかった。これは、両耳マスキングレベル差の知見より、報知音が両耳間で逆位相となる状態で低いマスキング閾値(聞えが良い)が得られ、同位相の状態の高いマスキング閾値(聞えが悪い)を得るということであった。そこで、報知音に逆位相条件となる時間差を与えると知覚しやすくなることから、逆位相条件となる時間差 Δt を以下の式5.1で表す。

$$\Delta t = \frac{1}{2f} + \frac{n-1}{f} = \frac{2n-1}{f} \quad (5.1)$$

ここで、 f は報知音の成分周波数(Hz)、 n は時間差によってずれる周期の数($n \geq \frac{1}{2}$)を示す。式5.1で算出された時間差と報知音の成分周波数の関係を図5.1に示す。式5.1で算出された逆位相条件となる時間差($n = 1, 2$)は実線で表されている。また、図には同位相条件となる時間差($n = 1, 2$)と報知音の成分周波数の関係も示してある(破線)。図5.1より、各成分周波数を持つ報知音をより雑音に影響されにくく正確に知覚させるためには、この実線部分の時間差が両耳に与えられる方向から報知音を呈示してやれば良いことになる。また、ITDの影響(報知音源と雑音源の角度差が大きいほど低いマスキング閾値を得る)も考慮すると、角度差(時間差)が大きく、かつ逆位相の条件となる状態を選択することが望ましいと言える。以上より、できるだけ雑音に影響されにくく、気付きやすい報知音のより良い性質についての提言を以下にまとめる。

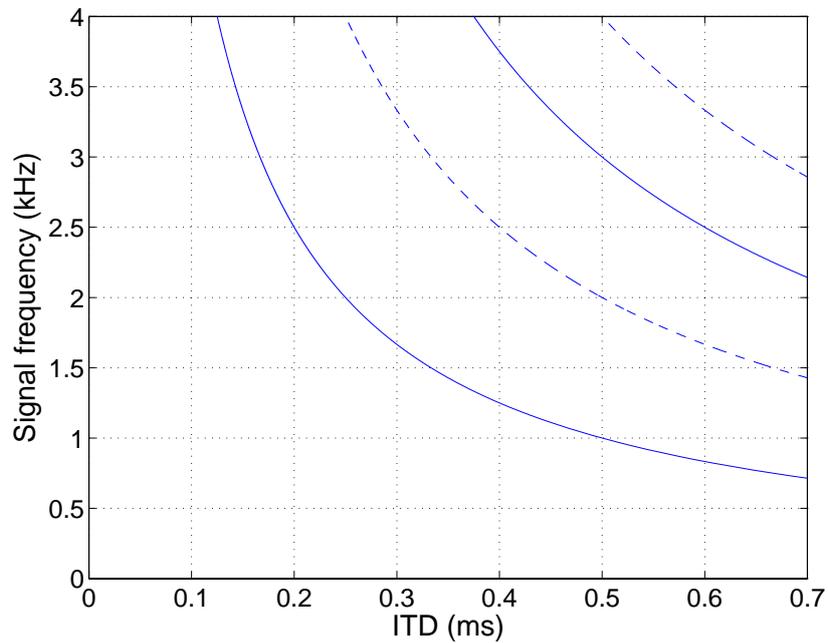


図 5.1: 両耳間時間差と報知音の成分周波数の関係。実線は逆位相条件、破線は同位相条件となる状態を示す。ITD が最大となる場合 (信号音が被験者の右側、または左側から呈示される場合) の時間差は約 0.68 ms である。

- 報知音の知覚特性には、成分周波数による IPD が大きな影響を与えることから、報知音の位相が両耳で逆位相となる時間差を与えて呈示する。
- 報知音知覚において ITD は重要な手掛かりであるため、ITD の手掛かりも十分に利用できるように、ITD はできるだけ大きい方が望ましい。

この両条件を満たすような手掛かりを与えることで、報知音の知覚を向上させることができると考えられる。

第6章 結論

6.1 本論文のまとめ

本研究では、報知音の成分周波数による IPD の知覚特性への影響を明らかにすることを目的として、以下の二つの実験を行った。

1. ITD のみを手掛かりとしたときの知覚特性の測定。(第 3 章)
2. ITD と IPD を手掛かりとしたときの知覚特性の測定。(第 4 章)

そして本研究では、これらの実験から以下の知見を得た。まず、1. の ITD のみを手掛かりとしたときの知覚特性の測定では、信号音源と雑音源の角度差を大きくすることによって、マスキング量が減少することが確認できた。これは、Sabeti らが得た結果 [8] と同様であり SRM における ITD の重要性が示された。次に、2. の ITD と IPD を手掛かりとしたときの知覚特性の測定では、報知音の成分周波数の違いにより知覚特性の様相が異なる結果となった。原因は、両耳マスキングレベル差の知見より、報知音の成分周波数による IPD であることが示された。これは、報知音をある方向 (角度) から呈示する場合、その成分周波数によっては、聞えが良くなる方向や悪くなる方向が存在するということである。また、報知音の成分周波数が低い場合 (1.5 kHz) は IPD、高い場合 (2.5 kHz) では ITD の影響が知覚特性に現れていたことから、報知音の成分周波数によっては、主に用いる (影響を受ける) 手掛かりに違いがある可能性が示された。これは、純音の方向知覚において、IPD は低周波数 (1.5kHz 以下) で優位にはたらくという知見 [14] を支持するものであった。また、ITD による純音の方向定位能力は、1.5 kHz 付近で低下することが知られているが、報知音は立ち上がり情報を繰り返すため、成分周波数が 1.5 kHz 以上の報知音においても、ITD 情報を利用することができたと考えられる。以上のことを以下にまとめる。

- SRM において ITD は重要な手掛かりである。
- 報知音の知覚には成分周波数の IPD を考慮する必要がある。
- 低周波数では IPD、高周波数では ITD の影響が現れる。

そして最後に、以上を踏まえて、できるだけ雑音に影響されにくく、気付きやすい報知音の設計や呈示方法についての提言を行った。それは、以下の 2 点である。

- 報知音の成分周波数による IPD が知覚特性に強く影響することから、報知音が両耳で逆位相となる時間差を与えて呈示する。
- ITD の手掛かりも十分に利用できるように、ITD はできるだけ大きい方が望ましい。

この両条件を満たすような手掛かりを与えることで、報知音により良い性質を与えることができると考えられる。

6.2 今後の展望

報知音を実環境で用いた場合に、機器の使用者に対して正確に知覚させるためには、まだまだ考察すべき点が残されている。以下に、報知音の設計および呈示方法について今後の展望を示す。

- 本研究で用いた報知音の成分周波数よりも低い、または高い成分周波数を持つ報知音を用いて知覚特性の測定を行う。
 - － 本研究では、低周波数では IPD、高周波数では ITD の影響が知覚特性に優位に現れる可能性を示した。そこで、より低い、または高い成分周波数を持つ報知音を用いることで、成分周波数の違いによって知覚特性がどのような手掛かりの影響を受けるかをより詳しく調べることができる。
- 第 2 章で示した報知音の知覚特性の測定手順 (図 2.1 参照) に沿って引き続き実験を行うことで、知覚特性に与える要因を明らかにする。
 - － 報知音は実環境で使用することから、最終的には実環境で知覚特性の測定を行う必要がある。そのために、以下の手順で実験を進めることで報知音の知覚特性に与える要因を明らかにすることができると考えられる。
 - * ILD を手掛かりとしたときの知覚特性の測定
 - * ITD と ILD を手掛かりとしたときの知覚特性の測定
 - * 頭部伝達関数を畳み込んだ刺激音を用いた知覚特性の測定
 - * 防音室内でスピーカ呈示による知覚特性の測定
 - * 実環境でスピーカ呈示による知覚特性の測定
- 複数の周波数成分を持つ報知音を用いた知覚特性の測定を行う。
 - － 報知音は周波数成分を多く含む方が知覚しやすく、音源の位置を特定しやすいと言われている [2] ことから、倍音を含んだ報知音を使用して知覚特性の測定を行う。また、このときの IPD の影響についても考察する。
- ITD の手掛かりをより効果的に利用できる信号音を用いて知覚特性の測定を行う。

- 本研究では、報知音を正確に知覚させるためには、ITD は重要な手掛かりであることを示した。ここで、一般に ITD による純音の方向定位能力は、1.5 kHz 付近で低下するとされているが、高周波数 (例えば 4 kHz) の搬送波に、半波整流し雑音除去した低周波数 (例えば 128 Hz) のエンベロープを掛け合わせた信号を用いると ITD の検知が良くなることが報告されている [16]。そこで、このような加工した信号音を用いることで、高周波数においても ITD の手掛かりを利用しやすくした場合、どのような知覚特性が得られるか調べる。

以上の課題を達成することで、より良い報知音の性質、呈示方法について指針を与えることができると考えられる。また、今後の社会では、報知音だけでなく音声による情報伝達もさらに増加していくと考えられる。そこで、本研究およびこれらの課題から得られた知見が、音声による情報伝達方法に対しても指針を与え、また、科学的な側面においてはカクテルパーティー効果などの音の知覚に関する研究の発展に貢献することを期待している。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多大なる御指導並びに御鞭撻賜りました、北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 赤木正人 教授に深く感謝致します。

本研究を遂行するにあたり、熱心な御指導並びに御協力賜りました、北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 鷓木祐史 助教授に深く感謝致します。

本研究を遂行するにあたり、日頃から熱心な議論並びに貴重な御助言賜りました、北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 党建武 教授に深く感謝致します。

本研究を遂行するにあたり、多忙な中、時間の合間を縫って実験に参加してくれた、羽二生篤さん、竹山佳成くん、田中貴文くん、内山英昭くん、柴野洋平くん、細呂木谷敏弘くん、簀輪明子さん、村上泰樹くんに心より感謝致します。

日頃の研究生生活において、多くの御助言ならびに激励を賜りました、北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 博士後期課程の西本博則さん、齋藤毅さん、並びに、音情報処理学講座の皆様、知能情報処理学講座の皆様、及び諸先輩方に厚く御礼申し上げます。

筆者が同志社大学在学中から現在に至るまで、多大なる励ましをいただきました、同志社大学 工学部 電子工学科 松川真美 助教授、並びに、超音波エレクトロニクス・応用計測研究室の諸先輩方に心より感謝致します。

最後になりましたが、石川県での2年間の研究生生活を、いつも暖かく見守ってくれて、心の支えとなってくれた両親、弟、並びに多くの友人、諸先輩方、後輩たち、生徒たち、そして多くの知人の方々に心より感謝致します。

これまでの人生の中で出会った多くの方々の支えがあって、本論文を執筆することができました。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] JIS S 0013, 高齢者・障害者配慮設計指針 —消費生活製品の報知音, 2002.
- [2] S. Kuwano, S. Namba and T. Mizunami, “Desirable properties for identification of auditory warning signals,” *Acoust. Sci. & Tech.*, **22** (4), 311-314, 2001.
- [3] 倉片 憲治, “音のユニバーサル・デザイン —家電製品報知音の標準化—,” 日本音響学会誌 58 巻 6 号, 360-365, 2002.
- [4] 土田 義郎, 松岡 政治, 小村 二郎, 大成 直子, “家庭内背景音下での報知音の聴取閾値,” 日本音響学会講演論文集 (秋), 377-378, 1999.
- [5] 崔 鍾 大, 毎熊 亮, 山内 勝也, 高田 正幸, 岩宮 眞一郎, “自動車内のリバーズ報知音にとって望ましい音響特性,” 日本音響学会誌 61 巻 3 号, 118-125, 2005.
- [6] 馬場 紘彦, 江端 正直, “救急車の警告音の検知に関する研究,” 日本音響学会誌 52 巻 4 号, 244-252, 1996.
- [7] 水浪 田鶴, 下迫 晴加, 松下一馬, 倉片 憲治, “報知音 (注意音・終了音) の時間パターンの比較聴取実験,” 日本音響学会講演論文集 (秋), 457-458, 2003.
- [8] K. Saberi, L. Dostal, T. Sadralodbai, V. Bull and D.R. Perrot, “Free-field release from masking,” *J. Acoust. Soc.*, **90** (3), 1355-1370, 1991.
- [9] M.L. Hawley, R.Y. Litovsky and J.F. Culling, “The benefit of binaural hearing in a cocktail party: Effect of location and type of interferer,” *J. Acoust. Soc.*, **115** (2), 833-843, 2004.
- [10] J. Peissig and B. Kollmeier, “Directivity of binaural noise reduction in spatial multiple noise-source arrangements for normal and impaired listeners,” *J. Acoust. Soc.*, **101** (3), 1660-1670, 1997.
- [11] D.S. Brungart, “Informational and energetic masking effects in the perception of two simultaneous talkers,” *J. Acoust. Soc.*, **109** (3), 1101-1109, 2001.

- [12] N.I. Durlach, C.R. Mason, B.G. Shinn-Cunningham, T.L. Arbogast, H.S. Colburn and G.Kidd, Jr., “Informational masking: Counteracting the effects of stimulus uncertainty by decreasing target-masker similarity,” *J. Acoust. Soc.*, **114** (1), 368-379, 2003.
- [13] 西田 鶴代, 筧 一彦, 穂刈 治英, 島田 正治, “音源定位における視覚情報の影響 –FLMP における視覚情報の影響の定量化–,” 日本音響学会誌 55 巻 11 号, 735-741, 1999.
- [14] Brian C. J. Moore, *An Introduction to the Psychology of Hearing* Fifth Edition, Chap. 7, Academic Press, London, 2003.
- [15] 伊藤 一仁, 初期聴覚中枢系の神経細胞レベルでの時間情報処理機構に関する研究, 北陸先端科学技術大学院大学博士論文, 2003.
- [16] L.R. Bernstein and C. Trahiotis, “The apparent immunity of high-frequency “transposed” stimuli to low-frequency binaural interference,” *J. Acoust. Soc.*, **116** (5), 3062-3069, 2004.
- [17] C. Lane, N. Kopco, B. Delgutte, B.G. Shinn-Cunningham and H.S. Colburn, “A cat’s cocktail party: Psychophysical, neurophysiological, and computational studies of spatial release from masking,” *Proc. ISH 2003*, 341-347, 2003.
- [18] 難波 精一郎, 桑野 園子 共著, 日本音響学会編 音響テクノロジーシリーズ 4: 音の評価のための心理学的測定法, コロナ社, 東京, 1998.

本研究に関する研究業績

口頭発表

Josaku Nakanishi, Masashi Unoki and Masato Akagi, “Effect of ITD and component frequencies on perception of alarm signals in noisy environments,” *Proc. NCSP'06*, March 2006 (to be appear).

中西 穰作, 鷓木 祐史, 赤木 正人, “雑音中の報知音知覚における報知音の ITD および成分周波数の影響,” 日本音響学会春季講演論文, 2-3-1, March 2006.