

Title	方向性の手掛かりが雑音環境下での報知音の検知能力に及ぼす影響
Author(s)	黒田, 直樹
Citation	
Issue Date	2009-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/8126
Rights	
Description	Supervisor:赤木 正人, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

**方向性の手掛かりが雑音環境下での
報知音の検知能力に及ぼす影響**

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

黒田 直樹

2009年3月

修 士 論 文

**方向性の手掛かりが雑音環境下での
報知音の検知能力に及ぼす影響**

指導教官 赤木 正人 教授

審査委員主査 赤木 正人 教授
審査委員 鷗木 祐史 准教授
審査委員 党 建武 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

0710026 黒田 直樹

提出年月: 2009年2月

概要

実環境下での報知音は、いかなる対象者にも正確に知覚される必要がある。しかし実環境下では、残響や雑音などにより報知音が正確に知覚できない場合がある。そのため、実環境下での報知音の知覚特性を明らかにすることは重要である。そこで本論文では、実環境下でも正確に知覚できる報知音の呈示方法の確立を目指して、実際の雑音環境下でも特に自動車内環境下に着目し、走行雑音下での報知音知覚に方向性の手掛かりがどのような影響を与えるかを調査した。その結果、報知音の成分周波数が 1.0 kHz のとき、主に両耳間時間差 (ITD : Interaural Time Difference) と両耳間位相差 (IPD : Interaural Phase Difference) が報知音の検知能力に大きな影響を与えることが明らかになった。一方、報知音の成分周波数が 2.5 kHz のとき、雑音を正面に固定した条件下では、主に ITD と IPD が報知音の検知能力に大きな影響を与え、報知音を正面に固定した条件下では、ITD と IPD に加え両耳間レベル差 (ILD : Interaural Level Difference) が報知音の検知能力に大きな影響を与えることが明らかになった。これらの結果は、信号音の両耳間相関処理を仮定することにより説明することができる。

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	研究の背景	1
1.2.1	報知音知覚に関する研究	1
1.2.2	雑音下での報知音知覚に関する研究	2
1.3	本研究の目的	4
1.4	本論文の構成	5
第2章	本研究の方針	7
第3章	HRTF の個人化	11
3.1	目的と背景	11
3.2	DOMISO による HRTF の選択	12
3.2.1	目的	12
3.2.2	DOMISO の概要	12
3.2.3	条件	14
3.2.4	手続き	14
3.2.5	DOMISO による HRTF の決定	14
3.3	HRTF の定位評価実験	15
3.3.1	目的	15
3.3.2	評価方法と評価基準	16
3.3.3	結果と考察	17
第4章	白色雑音下でのパルス列信号知覚	22
4.1	目的	22
4.2	方法	22
4.3	手続き	24
4.4	結果と考察	25
第5章	自動車走行雑音下での報知音知覚	30
5.1	目的	30
5.2	方法	30

5.3	手続き	31
5.4	結果と考察	32
5.4.1	報知音の周波数が 1.0 kHz の場合	32
5.4.2	報知音の周波数が 2.5 kHz の場合	32
5.5	まとめ	33
第 6 章	複数の走行雑音下での報知音知覚	36
6.1	目的	36
6.2	方法	36
6.3	手続き	36
6.4	結果と考察	36
6.5	まとめ	37
第 7 章	方向性の手掛かりが雑音環境下での信号音の検知能力に与える影響	40
第 8 章	結論	42
8.1	本論文で明らかにされたことの要約	42
8.2	今後の展望	43

目次

1.1	SRM の一例 . : 目的音と雑音の到来方向が異なるときに , 目的音を知覚しやすくなる現象のこと	3
2.1	実環境下での報知音知覚に影響を与える様々な要因	9
2.2	本研究で行う実験の枠組み: 赤線で囲まれた環境下で実験を行う	10
3.1	実験システム	15
3.2	上方水平面 (仰角 30°) 軌道	16
3.3	HRTF による聴取者の定位精度の評価における音像配置	18
3.4	音像定位実験のフローチャート	19
3.5	音像定位実験の実験システム	20
3.6	定位テストの回数に伴う定位正答率と前後知覚誤り率の推移: 聴取者 B (上図) と聴取者 H (下図)	21
4.1	パルス列信号の概略図	23
4.2	雑音信号中に存在する目的信号: 目的信号の呈示開始位置は (a), (b), (c) からランダムに設定された	24
4.3	両耳に到来する音の時間差と音源の方向の関係	25
4.4	雑音信号と目的信号の配置: 聴取者の正面 (0°) には雑音信号または目的信号が固定される	26
4.5	信号音または雑音の呈示角度の増加に伴う白色雑音に対するパルス列信号の平均マスキング閾値の変化	28
4.6	呈示角度の増加に伴う ILD の変化: 全聴取者の平均値と標準偏差	29
5.1	本実験で使用した報知音の例: 報知音の断続パターンは 1 秒間あたり , ON = 0.1 s , OFF = 0.05 s である	31
5.2	信号音または雑音の呈示角度の増加に伴う走行雑音に対する 1.0 kHz の報知音の平均マスキング閾値の変化	34
5.3	信号音または雑音の呈示角度の増加に伴う走行雑音に対する 2.5 kHz の報知音の平均マスキング閾値の変化	35
6.1	信号音と雑音の位置関係: (a) $S_0NL_{45}NR_{45}$, (b) $S_0NL_{45}NR_{90}$, (c) $S_0NL_{90}NR_{90}$	38

6.2 二つの走行雑音下での報知音知覚におけるマスクング閾値：全聴取者の
平均値，横軸は雑音の配置を表し，左から順に $S_0NL_{45}NR_{45}$, $S_0NL_{45}NR_{90}$,
 $S_0NL_{90}NR_{90}$ である 39

表 目 次

3.1	HRTF の個人化にかかるコスト	12
3.2	各聴取者において2回のトーナメントとも上位6位以内に選択された HRTF の個数	17
4.1	各角度における ITD とこれに対応するポイント数：信号のサンプリング周波数は 48 kHz である	27
7.1	走行雑音下での報知音知覚に用いられる方向性の手掛かり	40

第1章 序論

1.1 はじめに

私たちは視覚，聴覚，触覚などの五感を用いて，日々生活している．五感の中でも聴覚は音を知覚することで様々な多くの情報を得ることができる重要な感覚器の一つであるといえる．私たちの身の回りには人の話声，音楽，電気製品から発せられる人工音など様々な種類の音が存在する．これら多様な種類の音の中で，近年，特に家電製品や自動車などの多機能化・高機能化に伴い，開始，終了，注意など様々な目的で発せられる報知音の使用頻度は増加傾向にある．これら数多くの報知音はその目的をいかなる対象者にも正確に知覚される必要がある．特に，視覚障害者や視力の低下した高齢者にとって報知音を正確に知覚することは重要である．しかし，実環境下において，報知音を知覚する各対象者により異なる印象を与える場合があることから，本来の目的と異なって知覚されたり，また周囲の雑音や残響などの影響を受けるため，正確に知覚されない可能性がある．特に，注意や警告を目的として発せられる報知音は対象者に正確に知覚されないと，重大な事故を招く恐れがある．そのため，実環境下でも報知音を正確に知覚でき，かつ周囲の雑音や残響の影響を受けにくい報知音の設計方法と呈示方法を確立することは重要な課題である．

1.2 研究の背景

1.2.1 報知音知覚に関する研究

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]．報知音は終了，開始，呼出，注意などの様々な情報を使用者に伝えるため，家電製品，インターホン，自動車内の機器，サイレン等において頻繁に使用されている．特に近年，自動車内では，カーナビゲーションシステムが広く普及し，視覚による情報伝達よりも聴覚による情報伝達が使用者への負担を軽減できるケースもある．しかし，様々な製品の多機能化・高機能化に伴い，様々な種類の報知音が数多く使用されるようになり，使用者が目的の報知音を他の報知音と混同して知覚してしまうという問題が生じるようになってきている [2]．そこで，このような報知音の知覚誤りを防ぐため，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ってきている [3]–[6]．水浪らは報知音の印象評価実験を行い，注意音と終了音の混同を避けるために望ましい報知音の ON/OFF の時間パターンを明らかにした [7][8]．その他にも報知音をより正確に

知覚させるために、より良い設計方法及び伝達システムを目指した研究が数多く行われている [9][10]。また、自動車内の報知音に関しても、サイン音の主観評価実験が行われ、「終了」、「呼出」などの各機能イメージに望ましいサイン音の音響特徴が明らかになっている [11][12]。

以上の調査は、報知音を使用者に伝える際、その目的に相応しい報知音の設計方法を確立するために行われており、実環境下において、複数の報知音の混同を避けるうえで有用なものである。

一方、報知音の呈示方法に関して、実環境に存在する様々な雑音に対する報知音の検知能力のロバスト性を検討すること重要である。しかし、これまでに、このような検討はあまり行われていない。そこで、雑音にロバストな報知音の呈示方法を調査するために、信号音のもつ方向性の手掛かりが信号検出能力に影響を与えるという知見を次節で紹介する。

1.2.2 雑音下での報知音知覚に関する研究

実環境下において音を知覚する場合、私たちは様々な音が存在する中から目的音を聴き分けて知覚することができる。しかし、実環境下では雑音や残響の影響により目的音を正確に知覚できない場合がある。これは実環境下での音知覚において非常に重大な問題の一つであり、私たちの日常生活のあらゆる場面で起こり得る。特に、目的音が危険や警告を促すようなとき、目的音を正確に知覚できないと深刻な問題を引き起こす恐れがある。実環境下でも特に雑音による目的音のマスキング現象は非常に大きな問題であるため、本研究では、雑音環境下でも目的音を正確かつ容易に検知できる方法について検討する。

これまでに、雑音下での信号検出について、Ebata らは信号音の方向性の手掛かりを利用することで、信号音の検知能力が向上することを報告している [13]。また、Saberri らは、自由音場において、信号音と雑音が異なる方向から呈示されるとき、信号音の検知能力が向上することを報告している [14]。方向性の手掛かりによりマスキング解除が生じることは方向性マスキング解除 (SRM: Spatial Release from Masking) と呼ばれている。図 1.1 に SRM の生起の一例を示す。SRM は両耳聴取により生起し、カクテルパーティー効果を引き起こす要因の一つである [15]。これに関して、Peissing と Kollmeier は、雑音源の数と目的音の種類 (純音と音声) に着目した。雑音源が一つである場合は大きな SRM が生起するが、雑音源が増えるにつれ SRM は生起しにくくなることが報告されている [16]。また、目的音の種類が異なるとき、雑音源が一つの場合は目的音に純音を用いるほうが大きなマスキング解除量を得られ、雑音源が二つ以上の場合は目的音に音声を用いるほうが大きなマスキング解除量を得られることが分かっている。さらに、目的音と雑音の性質が異なるほど低いマスキング閾値が得られることも分かっている [17][18]。加えて、目的音と雑音のエネルギー比の変化が SRM に及ぼす影響も報告されている [19][20]。

ここで、SRM の生起には両耳聴取による方向性の手掛かりが大きな影響を与えていることから、両耳による音知覚について以下に述べる。私たちは、音源が死角にあったとし

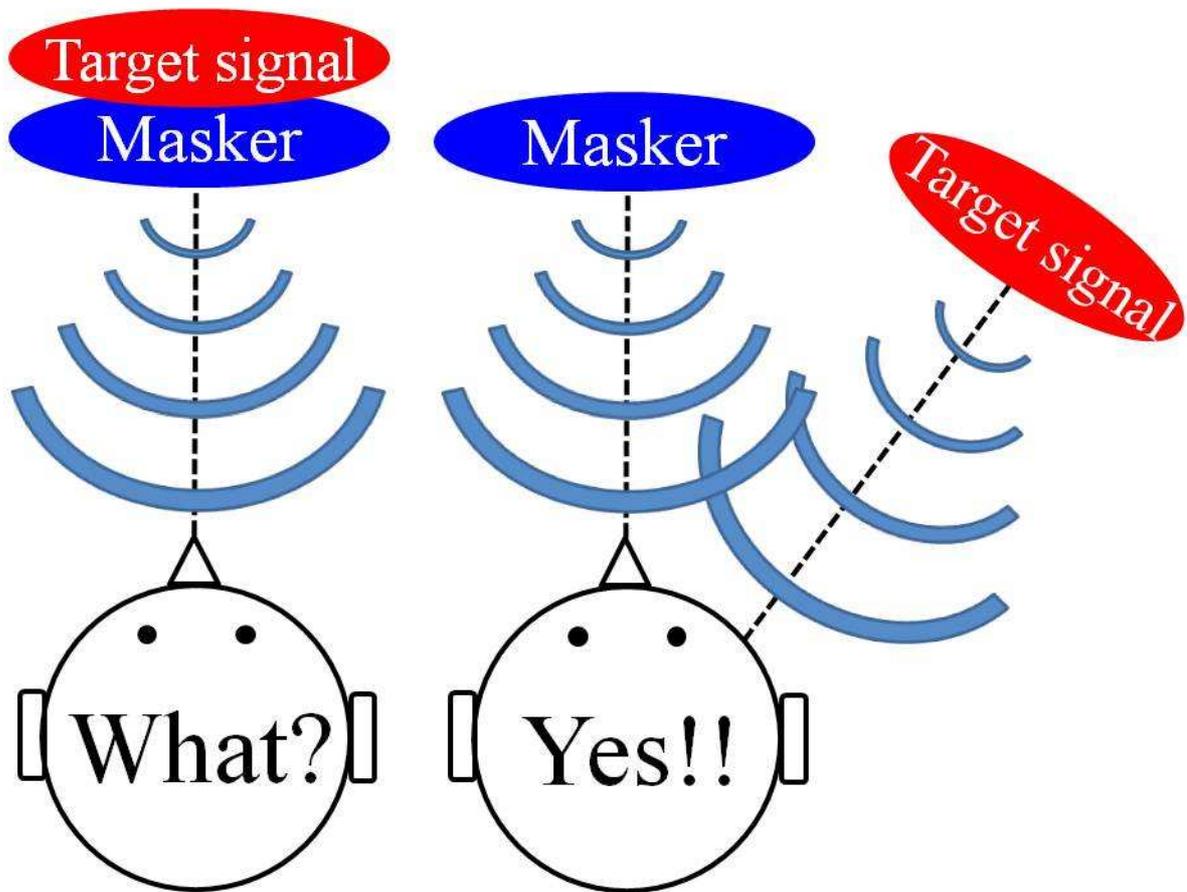


図 1.1: SRM の一例 . : 目的音と雑音の到来方向が異なるときに、目的音を知覚しやすくなる現象のこと

ても両耳聴取により得られる情報を用いて音源の位置 (方向や距離) を知ることができる . この能力を方向定位能力という . 方向定位能力には SRM と同様に方向性の手掛かり影響している . また , 方向定位能力を利用することにより音源の位置を正確に検出することで , より目的音を強調して検知することができる [21] . このことから SRM と方向定位は深く関わっていると考えられる .

両耳により音を知覚するとき , 私たちは両耳間時間差 (ITD : Interaural Time Difference) , 両耳間レベル差 (ILD : Interaural Level Difference) や両耳間位相差 (IPD : Interaural Phase Difference) などの方向性の手掛かりを利用して方向定位をしている . また , 音の成分周波数により利用できる方向性の手掛かりが異なることが分かっている . 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 . これは位相多義性や , 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 [22][23] . これに関して , 高い周波数の搬送波に , 半波整流を雑音除去した低い周波数のエンベロープを掛け合わせた信号を用いることで ITD の検知能力が向上することが報告されている [24] . また , 成分周波

数が 1.5 kHz 以下では IPD, 1.8 kHz 以上では ILD を主な方向性の手掛かりとして方向定位することが知られている [22] .

以上のように, ITD, IPD や ILD などの方向性の手掛かりが音の方向定位に利用される. また, SRM には ITD と ILD が大きな影響を与えていることが分かっている [25] . ここで, ITD と ILD が個々に SRM にどのような影響を与えるかを調査することは, 雑音の影響を受けにくい報知音の呈示方法を考慮する上で重要である. 次に SRM の知見に基づいて行われた雑音環境下での信号音の検知能力に関する調査を紹介する .

これまでに, 中西らは実環境下での音知覚に重要な方向性の手掛かりの一つである ITD が SRM に与える影響を調査した. そのために雑音下での信号検出において, 信号音の ITD を制御することで呈示方向を変化させ, 雑音に対する信号音のマスキング閾値を測定した. 実験は, 残響や暗騒音が信号音知覚に与える影響を切り分けるため, 防音室内でのヘッドホン呈示により行われた. 刺激音には Saberi らが使用したものと同様のものが用いられた. 実験の結果, ITD のみを方向性の手掛かりとして SRM が生起することが明らかとなった [26] . このことから SRM の生起において, ITD は重要な方向性の手掛かりとして用いられる. さらに, 中西らは目的信号に報知音を用い, 白色雑音に対する報知音のマスキング閾値を測定した. その結果, 報知音の成分周波数によっては, ITD による SRM だけでなく, IPD による両受聴マスキングレベル差 (BMLD : Binaural Masking Level Difference) が同時に起こることが分かった [26] . また内山らは雑音信号に自動車の走行雑音を用い, 走行雑音に対する報知音のマスキング閾値を測定した. その結果, 白色雑音下での報知音知覚と同様に, ITD による SRM と IPD による BMLD が生起することが明らかになった [27] .

以上より, 雑音環境下での報知音知覚において, ITD と IPD が重要な方向性の手掛かりとして利用されることが分かった. しかし, 実環境下で音を知覚するとき, 重要な方向性の手掛かりとして利用される ILD の与える影響についてはこれまで議論されていない. SRM の生起において, ILD の与える影響を明らかにすることで, 従来より実環境に近い報知音の呈示方法に指針を示すことができる. これを踏まえて, 本研究の目的を以下に述べる .

1.3 本研究の目的

報知音は目的に応じて, 適切に使用され, その意図を正確にあらゆる対象者に知覚させる必要がある. しかし, 実環境下では対象者が目的とする報知音だけでなく他にも複数の報知音が混在するだけでなく様々な雑音も存在するため, 目的の報知音を正確に知覚できないこと, または雑音により報知音がマスクされることが考えられる. そのため, 報知音の使用意図を正確に知覚でき, かつ雑音に影響を受けにくい報知音の設計方法や呈示方法を確立する必要がある. 報知音の設計方法に関して, これまでに報知音の印象評価実験が行われ, どのような音響特徴をもつ報知音が望ましいか明らかにされている. 一方, 報知音の呈示方法に関して, SRM の知見に基づいて実験が行われきたが, まだ数多くの課題

が残っており，これらの課題を解決するため，実環境下における報知音知覚の基礎データを得ることは重要である．

実際の雑音環境において報知音を知覚するとき，定常な雑音だけでなく話声や突発的な音など非定常な雑音が数多く存在するが，これら全てを最初から考慮することは難しい．そのため，雑音環境下での報知音特性を明らかにするには，段階的に研究を進めていく必要がある．そこで本研究では，雑音環境下でも特に自動車内環境下に存在する走行雑音を対象とする．これは使用者の頭部と報知音の呈示される方向が固定されており，報知音の知覚特性を考慮しやすいためである．また自動車内で用いられる報知音は注意や警告を目的としており，正確に知覚できないと重大な事故を招く恐れがあることから，報知音を正確に知覚する重要性が非常に高い．さらに自動車内の走行雑音は小さなうねりがあるが，定常雑音に近いので，雑音にマスクされにくい報知音の知覚特性を考慮しやすい．これまでに，走行雑音下での報知音知覚について，内山らの検討により ITD と IPD が重要な方向性の手掛かりとして利用されることが明らかとなった [27]．ここで，これまで ILD が報知音の検知能力にどのような影響を与えるかについては検討されていないが，ILD は SRM の生起に重要な方向性の手掛かりとして用いられるため，ILD の影響を考慮することで，従来よりさらに報知音の検知能力を向上できることが期待される．また，ILD の影響を考慮することにより，実環境における報知音の呈示方法の確立において，有用な基礎データとして利用できる．そこで本研究では，ITD と IPD に ILD の影響を加えて，これらの方向性の手掛かりが自動車走行雑音下での報知音知覚に与える影響を明らかにすることを目的とする．

1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す．

第 1 章 本研究の背景と本研究に関係のある従来研究を紹介する．また従来研究により明らかにされたこととまだ未解明の課題を挙げ，本研究の目的を述べる．

第 2 章 実環境下での報知音の知覚特性には，方向性の手掛かり，残響，視覚など様々な要因が影響を与えている．そのため，これらが報知音知覚に与える影響を個々に明らかにする必要がある．そこで，本章では本研究で着目する方向性の手掛かりと本研究で行う実験の枠組みについて述べる．

第 3 章 本研究では，頭部伝達関数 (HRTF : Head-Related Transfer Function) を用いた仮想聴空間下で，聴取実験を行う．そこで，HRTF を用いて聴取実験を行う際の利点と問題点を述べる．また問題点を解決するための方法を紹介，実践し，HRTF を用いた信号音の検知実験を行うための実験環境を構築する．

第4章 HRTF を用いた仮想聴空間下での実験が無響室内でのスピーカ呈示を模擬できる確かめるため，Saberri らと同様の刺激音を用いて信号音の検知実験を行う．これにより HRTF を用いた信号音の検知実験の有効性について議論する．

第5章 本研究の目的を達成するため，実際の雑音環境下（走行雑音下）での報知音の検知実験を行う．これにより，ITD と IPD に加え ILD を考慮することで，報知音の検知能力にどの方向性の手掛かりが大きな影響を与えているかを議論する．

第6章 実環境下では，一般に複数の雑音源が存在する．そこで複数の走行雑音を用いて，報知音の検知実験を行う．これにより第5章よりさらに実環境近い報知音の知覚特性について議論する．

第7章 第4章，第5章と第6章で行われた信号音の検知実験のまとめを述べる．

第8章 本研究により明らかにされたことと未解明の課題について述べる．

第2章 本研究の方針

実環境下では、様々な報知音があらゆる場面で用いられている。しかし、実環境下では多くの雑音が存在し、報知音をマスクする場合がある。そのため、実環境下での報知音の知覚特性を明らかにすることは重要である。実環境下での報知音知覚には、図 2.1 に示されるように残響、暗騒音、視覚、方向性の手掛かりなど様々な要因が影響を与えていると考えられる。これらの要因の中で、何が報知音の検知能力に大きな影響を与えるのかを明らかにすることは重要である。これまでに信号音のもつ方向性の手掛かりを利用することで、雑音環境下での信号音の検知が容易になることが分かっている。この方向性の手掛かりによる信号音の検知能力の向上が、報知音知覚に対しても起こるかどうかを検討することは重要である。そこで本研究では、方向性の手掛かりに着目し、実際の雑音環境下での報知音知覚に与える影響を調査する。そのために、本研究で行う実験の枠組みを以下で説明する。

雑音環境下での信号検出において、方向性の手掛かりである ITD と ILD が SRM に大きな影響を与えることが分かっている。このことから、雑音環境下での報知音知覚においても ITD と ILD により SRM が生起するかどうかを検討することは重要である。これに関して、中西ら [26] は雑音に白色雑音を用いたとき、ITD のみを方向性の手掛かりとして利用することより SRM が生起するかどうかを検討した。その結果、白色雑音下での報知音知覚には ITD による SRM だけでなく IPD による BMLD が影響を与えることが明らかとなった。特に、IPD が同位相のとき、報知音の検知限が低下し、逆位相のとき、報知音の検知限が向上することが分かった。また内山ら [26] は雑音に自動車の走行雑音を用いて同様の検討を行い、ITD と IPD が重要な方向性の手掛かりとして利用されると報告している。これらの知見から雑音環境下での報知音の提示方法を考えるとき、ITD と IPD の影響を考慮することは重要である。本研究では、ITD と IPD に加え ILD が走行雑音下での報知音知覚に与える影響を検討する。ILD は SRM だけでなく音の方向定位にも影響を与える重要な方向性の手掛かりであるため、ILD の与える影響を考慮することで、従来より信号音の検知能力を向上できる可能性がある。ゆえに、ILD が雑音環境下での報知音知覚に与える影響を調査することは重要である。そのために、本研究では頭部伝達関数 (HRTF : Head-related transfer function) による仮想聴空間下で、信号音の検知実験を行う。HRTF を用いることで、刺激音の提示方向を容易に制御でき、ITD、IPD と ILD の情報を個々に抽出できる。しかし、HRTF を用いて信号音の検知実験を行うとき、HRTF の個人差に留意する必要がある。これは HRTF が測定された聴取者の身体的特徴に大きく依存するためである。これを踏まえて、本研究の実験方針を図 2.2 に示す。

まず初めに、より精巧で信頼性の高い信号音の検知実験を行うための準備として、HRTF の個人化を行い、各聴取者に適切な HRTF を求める。これにより適切な HRTF が求められた聴取者を対象に、次の信号音の検知実験を行う。信号音の検知実験では雑音環境下での信号音のマスキング閾値を測定する。また中西ら [26] と内山ら [27] と同様の方向性の手掛かりに ITD のみを設定した条件下での実験と、HRTF による仮想聴空間下での実験を行う。まず第一に、目的信号にパルス音、雑音信号に白色雑音を用いて実験を行う。これにより HRTF による仮想聴空間下での実験が Saberi らと同等の環境下での実験を模擬できるかについて議論できる。さらに、ITD のみを方向性の手掛かりとした条件下での実験との比較により ILD が SRM に与える影響についても議論できる。第二に、目的信号に報知音、雑音信号に走行雑音を用いて実験を行う。これにより、ITD、IPD と ILD の方向性の手掛かりが走行雑音下での報知音知覚にどのような影響を与えるか議論できる。さらに、ITD と IPD を方向性の手掛かりとした条件下での実験との比較により ILD の効果についても議論できる。最後に、複数の走行雑音を用いて実験を行う。これにより、より実環境に近い条件下での報知音の知覚において、方向性の手掛かりが与える影響について議論できる。

以上の実験により、方向性の手掛かりにより走行雑音にマスクされにくい報知音の呈示方向を明らかにできる。

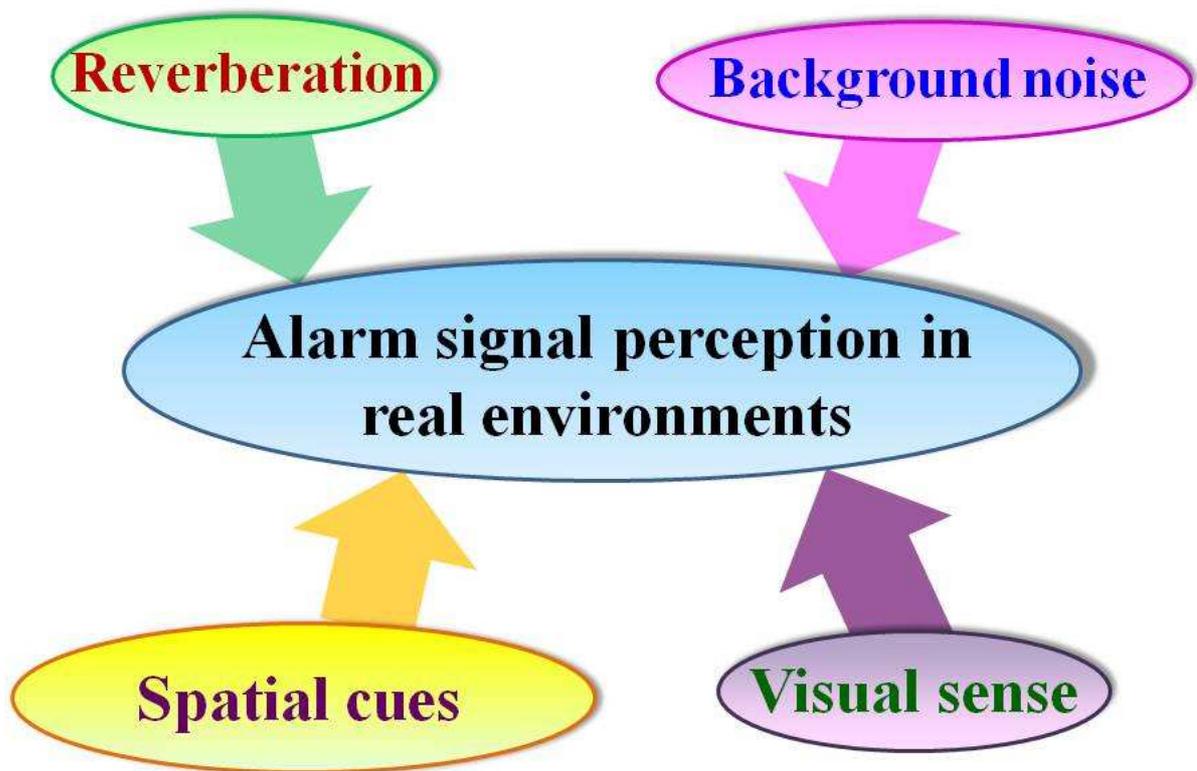


図 2.1: 実環境下での報知音知覚に影響を与える様々な要因

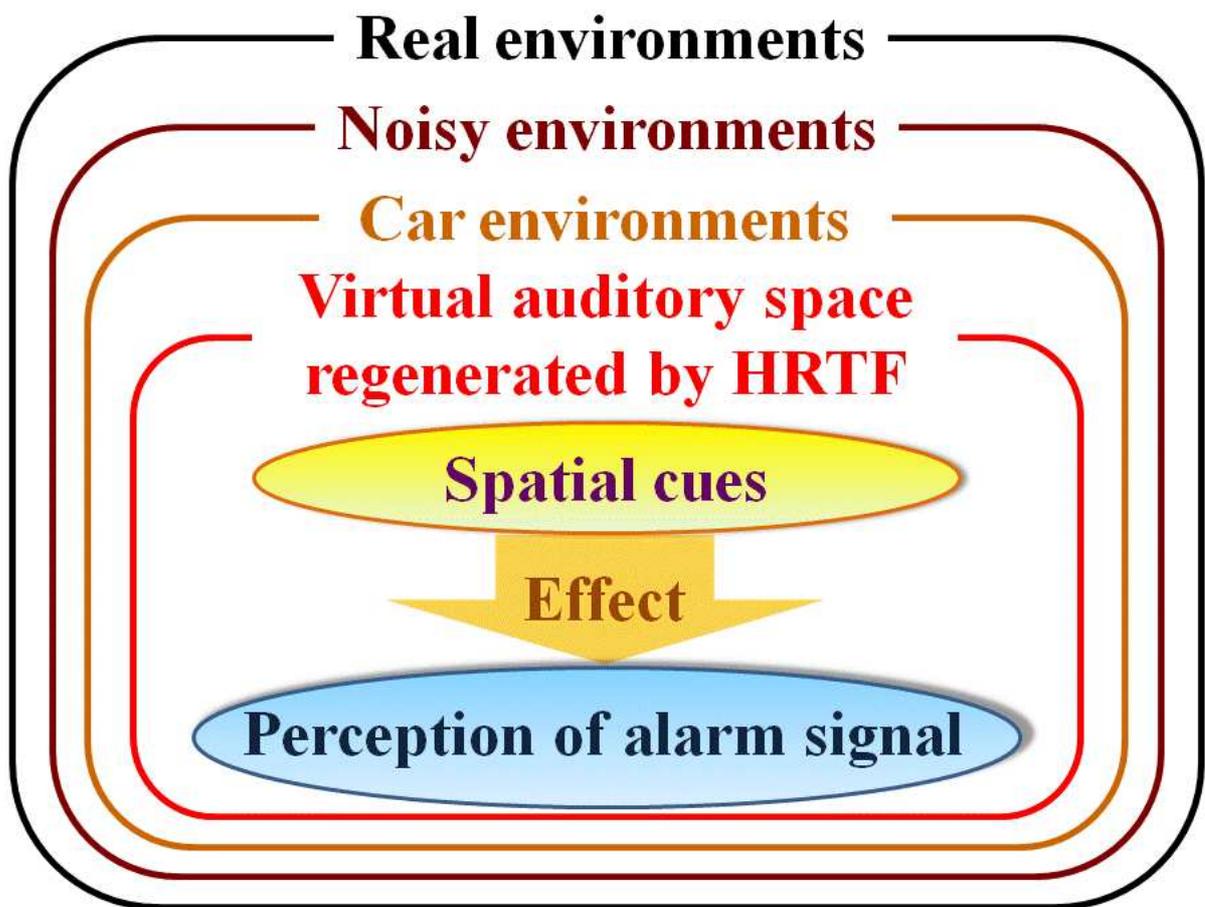


図 2.2: 本研究で行う実験の枠組み: 赤線で囲まれた環境下で実験を行う

第3章 HRTF の個人化

3.1 目的と背景

HRTF は反射音の無い自由音場における音源から聴取者の鼓膜近傍までの音響伝達関数として求められる [28]。これにモノラル音を畳み込み、ヘッドホンまたはイヤホンを用いてバイノーラル再生することにより、3次元空間における任意の点からの音を模擬することができる。このような仮想的な自由音場を仮想聴空間と呼び、仮想的に設置された音源を音像と呼ぶ。バーチャルリアリティーの分野では、仮想聴空間内で聴取者に音像を呈示する技術は聴覚ディスプレイと呼ばれている。このように臨場感のある音を呈示できる HRTF は非常に有用性の高いものである。しかし HRTF は聴取者の頭部、耳介、肩などの身体的特徴に大きく依存するため、他人の HRTF を用いると、音像の定位精度が低下する場合がある [29][30]。そのため、HRTF を用いて聴取実験を行うとき、HRTF の個人性に配慮して、各聴取者に最適な HRTF を求める必要がある。

これまでに、HRTF の個人性に関して様々な研究が行われてきた。まず各聴取者の両耳に到来する音の物理特性を精密に模擬する場合、聴取者本人の HRTF を測定し、それを用いて聴取実験を行えば良い。しかし、聴取者本人の HRTF を測定する場合、無響室、球状スピーカアレイなど大掛かりな設備が必要となる。さらに、水平角と仰角のあらゆる点を測定しなければならないため、非常に多大な時間を要する。この HRTF の測定に関して、より精度の高い HRTF を得るために、音源には何を使用すれば良いか、また測定時間の短縮のために、HRTF を精度良く補間する方法が検討されている。まず音源については、従来、M 系列信号が用いられていたが、最近では青島らによって提案された時間引き延ばしパルス (TSP 信号)[31]、さらにこれを改良した OATSP 信号 [32] などが用いられている。また頭部近傍における HRTF の測定には、スパーク音源を使用することが望ましいことが分かっている [33]。次に HRTF の補間に関して、水平方向 45° 、仰角方向 30° の測定を行えば、他の方向は線形 2 点補間法により精度良く HRTF を補間できると報告されている [34][35]。しかし、聴取者本人の HRTF の測定では、その測定環境の違いにより HRTF の振幅スペクトルが異なることがあり、これは HRTF を計測中の頭の動きと計測系に起因することが分かっている [36]。このことから、HRTF の実測精度にはまだまだ多くの課題がある。

一方、聴取者本人の HRTF を測定せずに、十分な音像定位精度を得るために、HRTF の推定やモデル化など様々な試みがなされている。まず、HRTF の推定に関して、聴取者の身体的特徴の計測データを用いた重回帰分析による推定 [37]、聴取者の頭部の MRI デー

タを用いた推定 [38]，境界要素法による推定 [39] などが行われている．しかし，推定した HRTF は実測の HRTF とのスペクトル歪を小さくできる効果は示されているが，その精度はまだ十分ではない．また HRTF モデルの精度を向上のするため，パラメトリックモデルを用いて，実測の HRTF を用いた音像定位に HRTF の振幅スペクトルにおけるどのピークやノッチが大きな影響を及ぼすかについても調査されている [40]．この他にも聴取者が平均的に音像を定位できる汎用的な HRTF の模索も行われている [41] が，この場合，平均から離れた聴取者への適応ができない．そこで，聴取者への負担が少なく，優れた定位感を得られる手法として，聴取者の定位感に基づいた HRTF の個人化法 (DOMISO : Determination method of OptimuM Impulse-response by Sound Orientation) が提案されている [42][43]．表 3.1 に実測による HRTF の個人化と DOMISO による HRTF の個人化にかかるコストの違いを示す．表より DOMISO による HRTF の個人化は実測に比べ，簡易な装置で行うことができ，測定に要する時間も短い．さらに，音像の定位精度についても実測による個人化と同等の精度であることが分かっている [44]．以上のことから，本研究では DOMISO を用いて，HRTF の個人化を行う．

表 3.1: HRTF の個人化にかかるコスト

	実測による HRTF の個人化	DOMISO による HRTF の個人化
測定時間	約 2 時間	約 15 分
測定装置	球状スピーカアレイ，無響室など	イヤホン，PC など
聴取者の負担	頭や体を動かさずに椅子に座る	定位感の良い音像を選択する

3.2 DOMISO による HRTF の選択

3.2.1 目的

HRTF は聴取者の身体的特徴に依存するため，大きな個人性がある．そのため，HRTF の個人化を行い，各聴取者に適切な HRTF を求めなければならない．そこで本実験では，DOMISO を行うことにより，複数の HRTF の中から各聴取者により近い HRTF を決定することを目的とする．

3.2.2 DOMISO の概要

本実験では聴取者の定位感に基づいた HRTF の個人化手法である DOMISO を用いる．本実験の DOMISO で使用された HRTF は東北大学電子通信研究所にある無響室で測定された 114 名分のデータを用いた [45]．DOMISO の概要を以下に示す．

1. 全 114 名の HRTF のケプストラム距離を計算し，LBG アルゴリズム [46] により特徴的な 32 名分の HRTF を抽出する．
2. 抽出した 32 名の HRTF を用いて，呈示軌道面上を連続的に移動する音像を 32 種類作成する．
3. 聴取者にあらかじめ呈示する音像の軌道を教示する．
4. 32 名の HRTF から合成した移動音像を聴取者に 2 名分ずつ呈示し，定位感の良かった方を選択させる．
5. この選択を変形スイス式トーナメント方式で行い，対戦相手がいなくなるまで繰り返す．
6. 最も勝利数の多かった HRTF をその聴取者により近い HRTF とする．

ケプストラム距離は，HRTF の周波数振幅特性において，その概形の類似度を表す係数である．本実験では，HRTF のケプストラム係数において，周波数振幅特性の微細構造を表す高次の項と，バイアス成分を表す 0 次の項を除外して，第 1 次から第 32 次までを対象とした．また，水平面上の 5° 間隔で 72 方向の HRTF のケプストラム係数を用いてケプストラム距離を算出した．データ i とデータ j のケプストラム距離は次式により定義した．

$$d(i, j) = \frac{10}{\ln 10} \sqrt{2 \sum_{\theta=0^\circ}^{355^\circ} \sum_{m=1}^{32} (C_{i,\theta}[m] - C_{j,\theta}[m])^2} \quad (3.1)$$

$C_{i,\theta}[m]$ は，データ i のある HRTF のケプストラム係数の第 m 次の項を表している．角度 θ は， $\theta=0^\circ, 5^\circ, \dots, 355^\circ$ とした．実ケプストラム FFT は 512 ポイントで行った．ケプストラム距離が小さいほど二つの HRTF の周波数振幅特性の概形が類似していることを意味する．

また 32 名分の HRTF を選択するために利用した LBG アルゴリズムはベクトル量子化の手法の一つである [46]．本研究では全ての HRTF のデータについて，ケプストラム距離の平均値を求め，その値に最も近い HRTF のデータを基準に 2 分割した．これを繰り返すことにより 114 名のデータから 32 名のデータを選択した．

最後に DOMISO で利用したトーナメント方式について説明する．スイス式トーナメントとは初めはランダムに組をつくり，組同士で試合を行い勝敗を決め，それ以降は勝ち数が同じもの同士で試合を行う方式である [47]．本実験で用いる変形スイス式トーナメント方式の実施条件を以下に示す．

- 2 戦目以降は，同じ勝利数どうしで対戦する．
- 3 敗した HRTF はトーナメントから除外する．
- 同一トーナメントでは同じ対戦は行わない．

3.2.3 条件

HRTF の合成に用いる刺激音には、ピンクノイズを使用した。刺激音のサンプリング周波数は 48 kHz とし、呈示時間は 13 s である。

本実験の実験システムを図 3.1 に示す。全ての実験は防音室内で行った。刺激音の A/D 変換及び D/A 変換には、防音室の外に設置した Tucker-Davis Technologies (TDT) System III を使用した。刺激音はイヤホン (STEREO EAR RECIEVER MDR-EX90SL) を介して聴取者に呈示した。ここで、本実験にヘッドホンではなく、イヤホンをを用いた理由を述べる。HRTF の測定はスピーカから呈示される OATS P 信号を外耳道の入り口近傍にマイクロホンを設置し、集音することにより行われる [45]。そこで、集音された位置により近い場所から音像を呈示したほうが、正確な実験を行えると考えたため、イヤホンを使用した。ヘッドホン受聴の場合、少なくともヘッドホンの伝達特性及び装着特性が含まれるため、これらの特性を打ち消す必要があり、その測定も必要になる。またイヤホン呈示による音像定位実験において、十分な音像定位精度が得られることも分かっている [48]。聴取者は呈示された二つの音像を主観的に評価し、防音室内に設置された REACTION BOX のボタンを押すことでより良い音像を選択する。本実験の DOMISO で呈示される音像軌道のイメージを図 3.2 に示す。音像は仰角 30° の上方水平面を一周する音像軌道で呈示された。ここで音像軌道に仰角 30° の上方水平面を用いたのは、仰角 0° の水平面よりも DOMISO により選択された HRTF とケプストラム距離との相関が高いためである [49][50]。聴取者には呈示された音像軌道に対し、音像の定位感が「良い」、「悪い」で判断させた。

3.2.4 手続き

本実験での DOMISO におけるトーナメントは 2 回実施した。各トーナメントの初戦の組み合わせは毎回ランダムに設定した。また同一のトーナメントにおいて、同じ HRTF の組み合わせにならないよう配慮した。

聴取者には正常な聴力 (0.125 kHz~8 kHz のオクターブ周波数内で 15 dB HL 以下) を有する大学院生 9 名 (男性 8 名, 女性 1 名) が参加した。全ての聴取者は他の聴取実験の経験があった。

3.2.5 DOMISO による HRTF の決定

表 3.2 に DOMISO による HRTF の個人化の結果、各聴取者が上位に選択した HRTF の個数を示す。表より、全ての聴取者において、2 回のトーナメントとも上位に選択された HRTF が少なくとも一つ存在することがわかる。これら上位に選択された HRTF の中から、最も勝利数の多かった HRTF をその聴取者に最も近い HRTF と判断した。また最も勝利数の多い HRTF が複数存在するとき、その総当たり戦により最も勝利数の多かったものをその聴取者に相応しい HRTF と決めた。

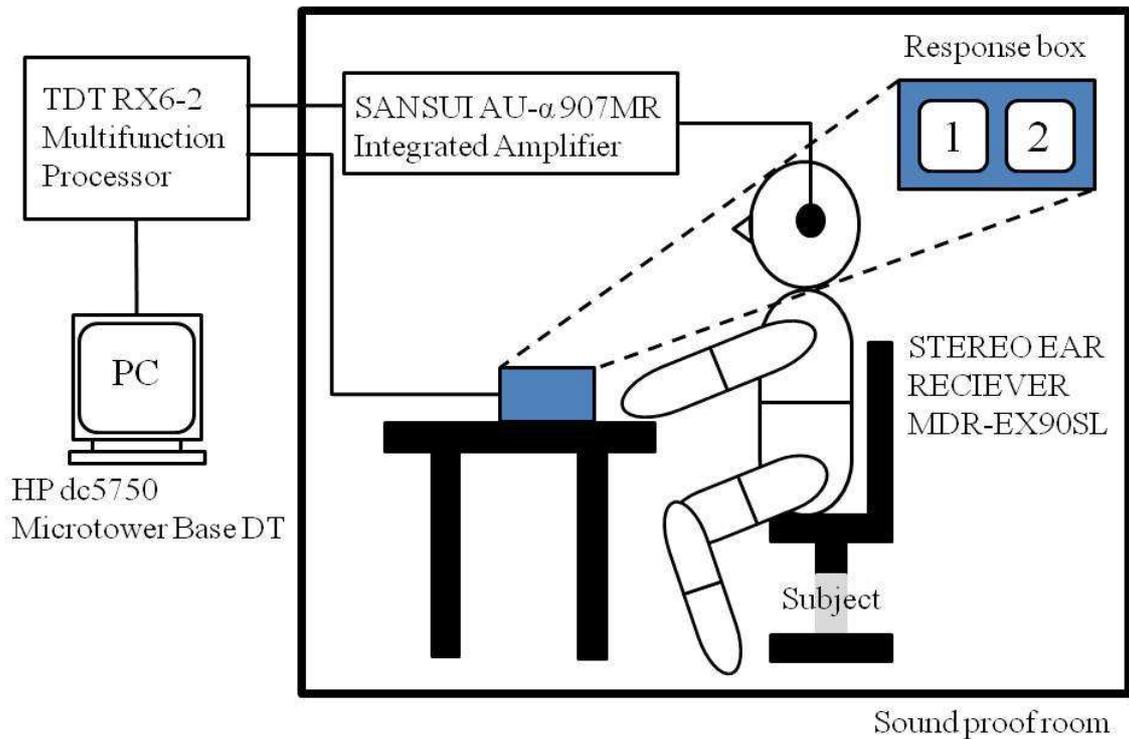


図 3.1: 実験システム

3.3 HRTF の定位評価実験

3.3.1 目的

DOMISO により各聴取者に最も近い HRTF が選択された。しかし、これらの HRTF を用いた仮想聴空間内で十分な音像定位精度を得られるかどうか分からない。そこで、各聴取者が選択した HRTF を用いて、音像定位実験を行い、その精度を評価する必要がある。ゆえに、本実験の目的は以下の通りである。

1. 音像定位テストを行い、音像の定位精度を評価することにより各聴取者により選択された HRTF が、次の聴取実験を行うにあたり十分に有効であるか判断すること。
2. 音像定位トレーニングにより聴取者を仮想聴空間内での実験に適応させること。

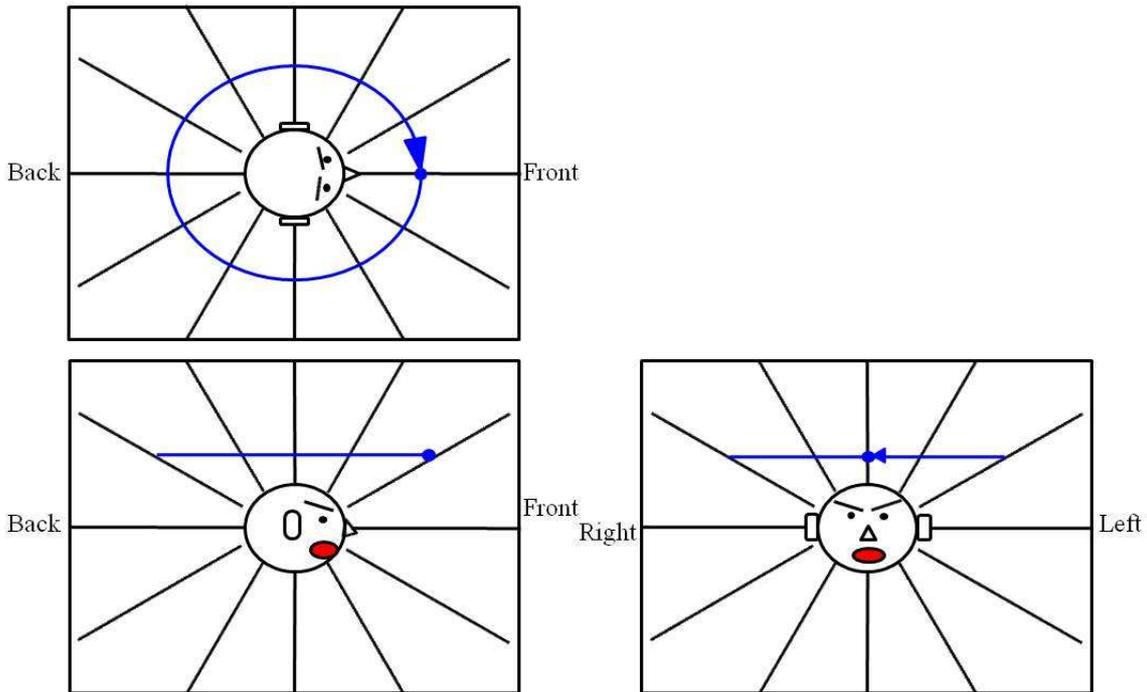


図 3.2: 上方水平面（仰角 30°）軌道

3.3.2 評価方法と評価基準

刺激音にはサンプリング周波数 48 kHz，呈示時間 3 s のピンクノイズを使用した．これに各呈示角度における HRTF を畳み込むことで，各呈示角度における音像を作成した．本実験で用いた音像の配置を図 3.3 に示す．音像は仰角 0° の水平面上を 10° 間隔で 0°~350° まで全 36 方向に設置した．評価基準には以下に示される 3 条件を設定し，これらの条件すべてを満たした聴取者は，十分な定位精度が得られたと判断する．

1. 正答範囲が呈示された音源方向 $\pm 10^\circ$ のとき，正答率が 70% 以上である．
2. 正答範囲が呈示された音源方向 $\pm 20^\circ$ のとき，正答率が 90% 以上である．
3. 前後知覚誤り率が 10% 以下である．

また図 3.4 に本実験の評価手順を示す．本実験は音像の定位テストと定位トレーニングから構成される．定位テストは，全ての呈示角度から音像がランダムに 1 回ずつ呈示される．最初に定位テストを行い，その結果，評価基準を満たした聴取者は，その後 2~3 回の定位テストを行い，定位精度が安定しているかどうか確認した後，信号音の検知実験に進む．一方，評価基準を満たさなかった聴取者は，その後正解フィードバックのある定位

表 3.2: 各聴取者において 2 回のトーナメントとも上位 6 位以内に選択された HRTF の個数

聴取者	2 回のトーナメントとも上位 6 以内に 選択された HRTF の個数
A	2
B	4
C	4
D	4
E	5
F	3
G	5
H	2
I	2

トレーニングを数回行い、再度定位テストを行った。この試行を数回繰り返し、評価基準を満たした聴取者のみ、次の信号音の検知実験に進む。

本実験の実験システムを図 3.5 に示す。実験は防音室内で行われた。聴取者はラップトップ PC (Panasonic, CF-R6) で動作するアプリケーションを操作して実験を行った。本実験で使用されたアプリケーションは心理学実験呈示刺激プログラム EXPLAB である [51]。音像はイヤホン (STEREO EAR RECIEVER MDR-EX90SL) を介して聴取者に呈示され、聴取者は呈示された音像の呈示角度を応答する。応答は PC のキーボードを押すことにより得られた。

3.3.3 結果と考察

評価の結果、聴取者によって評価基準を満たすまでの定位テストの回数に個人差があった。また何度定位テストを行っても、評価基準を満たさない聴取者もいた。これらの中から、HRTF による仮想聴空間に適応し、評価基準を満たした聴取者のみ次に行う信号音の検知実験に参加した。評価基準を満たした聴取者とそうでない聴取者の代表例として、聴取者 B と聴取者 H における定位テストの回数に伴う定位正答率、前後知覚誤り率の推移を図 3.6 に示す。赤線、青線はそれぞれ呈示された音像の呈示角度に対する正答範囲が 10° 、正答範囲が 20° のときの定位正答率を示し、緑線は前後知覚誤り率を示す。赤色、青色、緑色の点線はそれぞれ評価基準 (1), (2), (3) を示している。図より聴取者 A は多少のバラつきはあるが、定位テストの正答率は徐々に上昇し、評価基準を越えていることがわかる。一方、聴取者 B は定位テストの正答率は向上しているところも見られるが、評価基準には達していない。これは各聴取者のもつ HRTF による仮想聴空間への適応能力、

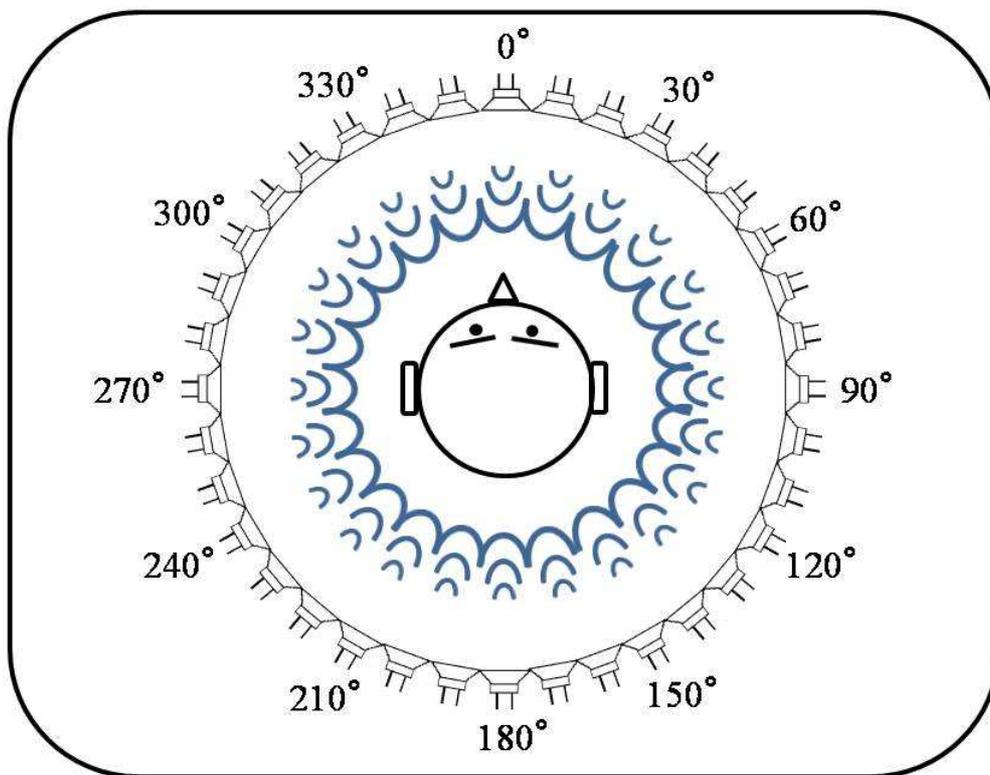


図 3.3: HRTF による聴取者の定位精度の評価における音像配置

音像定位能力の個人差や DOMISO に用いた HRTF のデータベースにはその聴取者に相応しいものがなかったことなどが原因と考えられる。

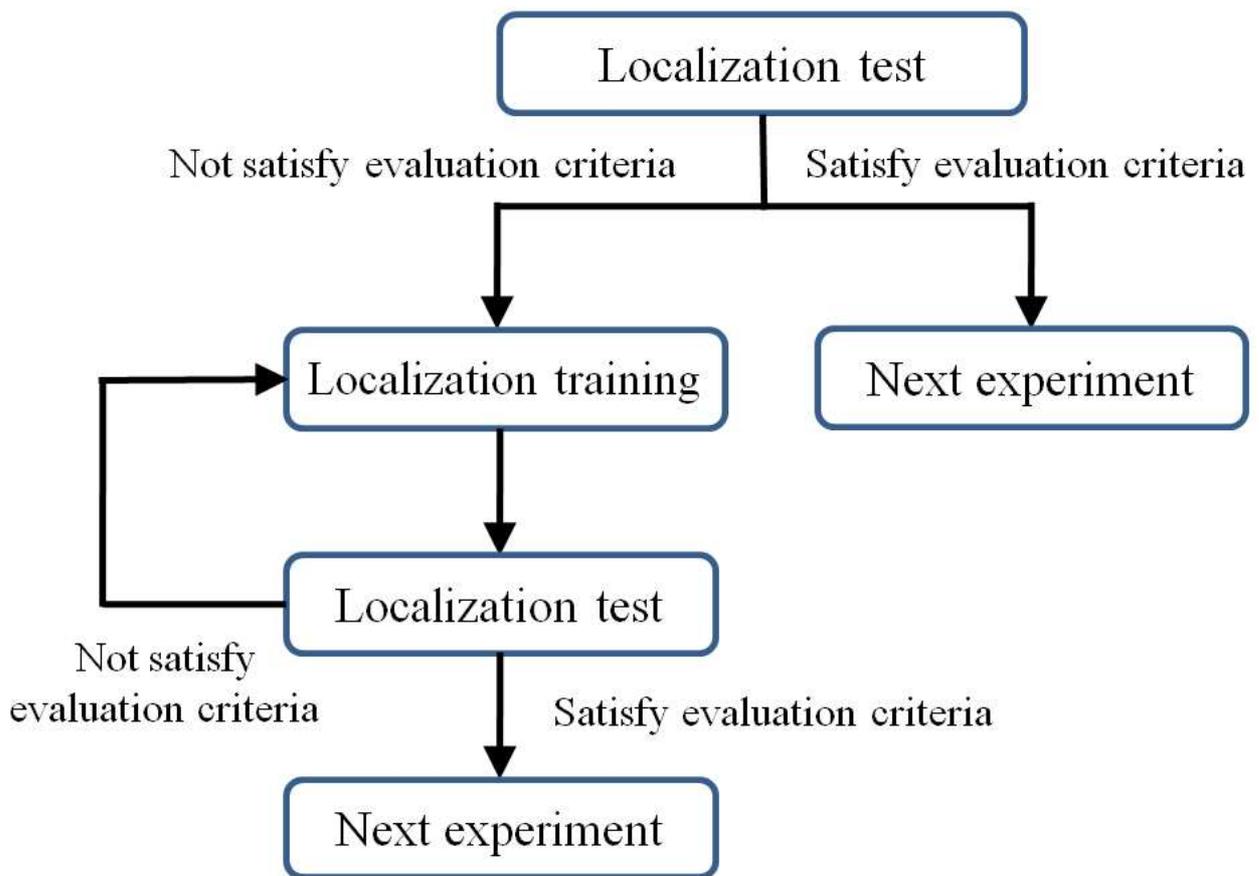
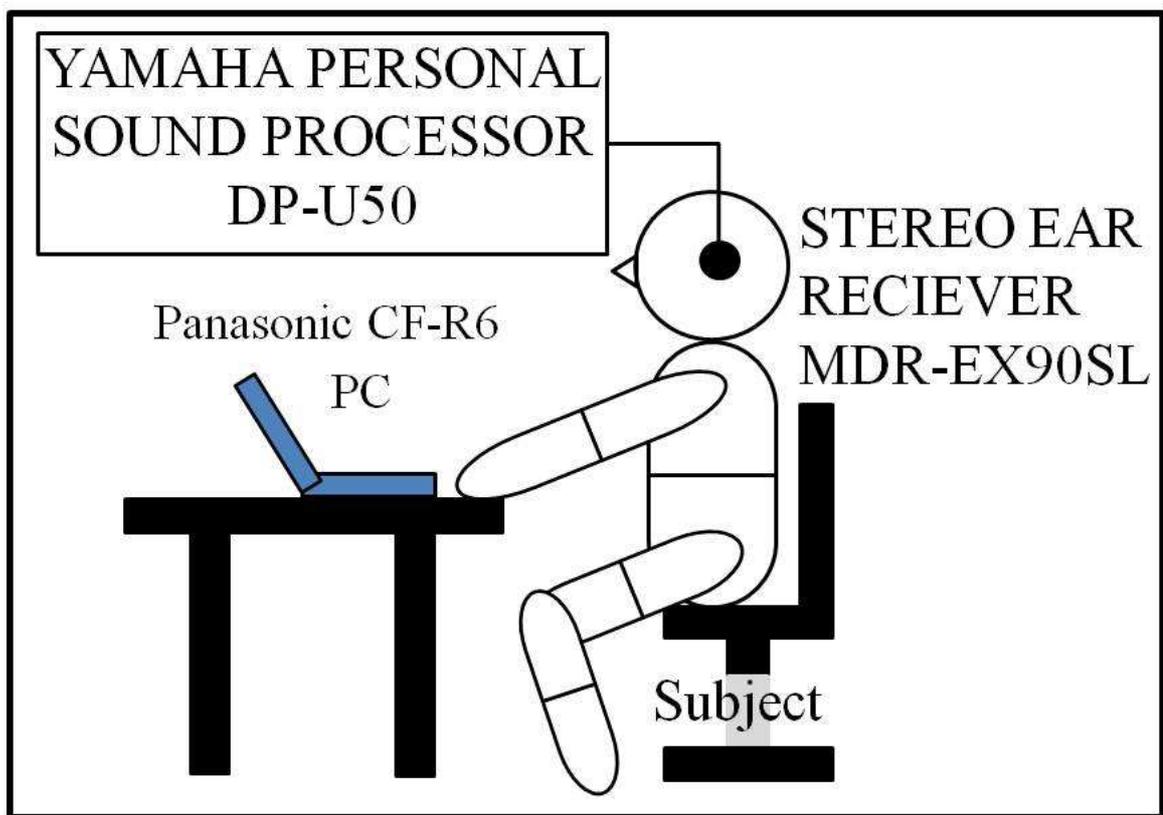


図 3.4: 音像定位実験のフローチャート



Sound proof room

図 3.5: 音像定位実験の実験システム

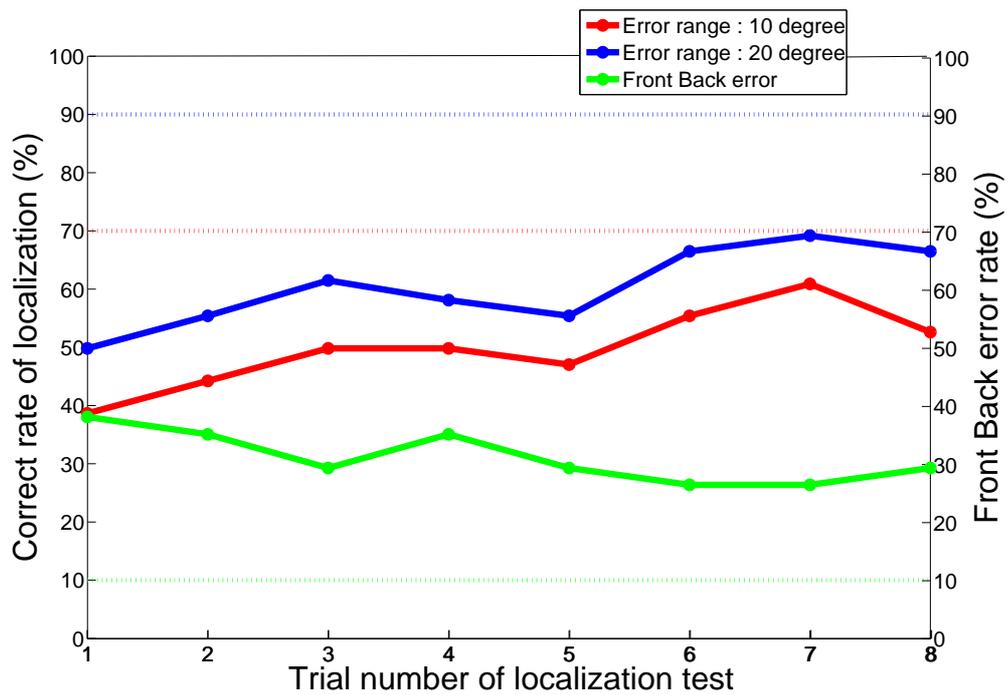
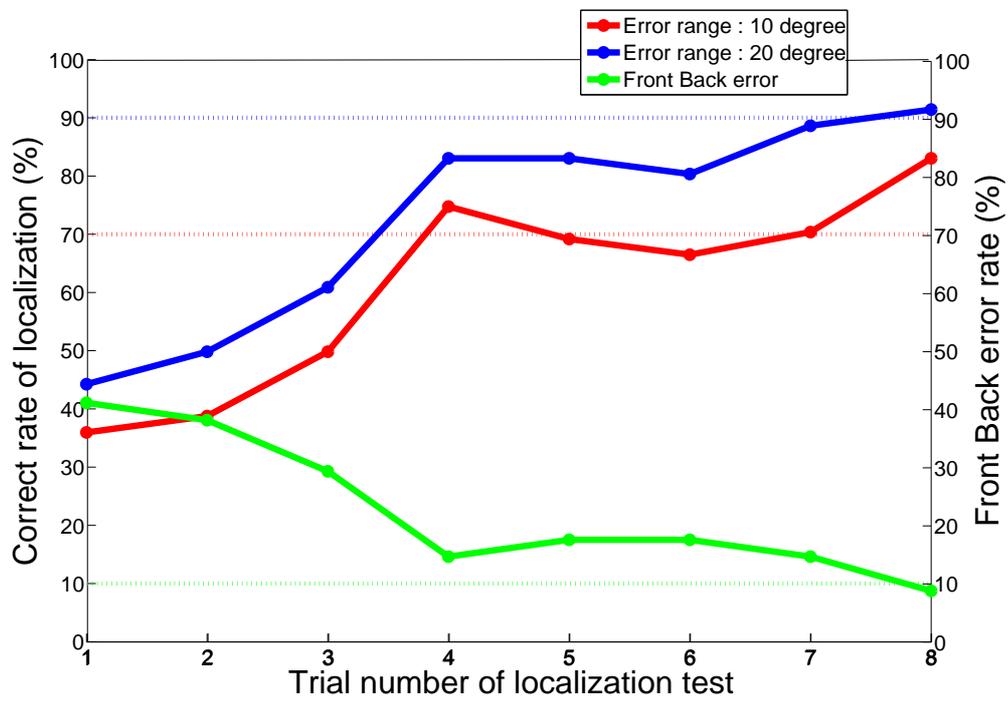


図 3.6: 定位テストの回数に伴う定位正答率と前後知覚誤り率の推移：聴取者 B（上図）と聴取者 H（下図）

第4章 白色雑音下でのパルス列信号知覚

4.1 目的

SRM の生起には ITD と ILD が重要な方向性の手掛かりとして用いられる．Saberri らが行った自由音場でのスピーカ呈示による実験では，信号音と雑音の呈示角度の差が大きくなるにつれ，SRM は大きくなり，最大マスキング解除量は約 14 dB であった [14]．また先行研究で行われた防音室内でのヘッドホン呈示による実験では，ITD のみにより最大約 7 dB の SRM が生じたことから，ITD は白色雑音下でのパルス列信号知覚において重要な方向性の手掛かりであることが明らかにされた [26]．そこで本研究では，第 3 章で個人化された HRTF を用いた仮想聴空間内で信号音の検知実験を行い，ITD だけでなく ILD が SRM に与える影響についても議論する．以上より，本実験では，以下の二つを目的とする．

1. ILD が SRM にどのような影響を与えるか確認すること．
2. ITD と ILD の影響を考慮できる HRTF を用いた仮想聴空間内での実験が，無響室内でのスピーカ呈示と等価な実験が行えるか確認すること．

4.2 方法

目的信号に用いるパルス列信号は，Saberri らの実験 [14] と同様に 1 s 当たり 100 個の $65 \mu\text{s}$ 幅の矩形パルスで構成した．その概略図を図 4.1 に示す．雑音信号には白色雑音を用いた．呈示された刺激音は，2 s の雑音信号中に 1 s の目的信号が存在する音で，目的信号の呈示開始位置は，聴取者に予測されないように，ランダムに変化させた．その概略図を図 4.2 に示す．またこれらの信号のサンプリング周波数は 48 kHz とした．

先行研究では，ITD のみを制御することにより音の到来方向を変化させた．図 4.3 に ITD による音源の到来方向の制御方法を示す．また，ITD を求める式を次に示す．

$$\text{ITD} = \frac{d}{c} = \frac{r(\theta + \sin \theta)}{c} \quad (4.1)$$

但し， r m は人間の頭の半径， θ rad は音源の方向， c m/s は音速， d m は両耳間の経路差を表す．本実験では，頭部の半径 r を 0.09 m，音速 c を 343.5 m/s とした．刺激音の呈示方向 θ は，聴取者の正面を 0° として，右前方水平面上を 15° 間隔で 90° まで変化させ

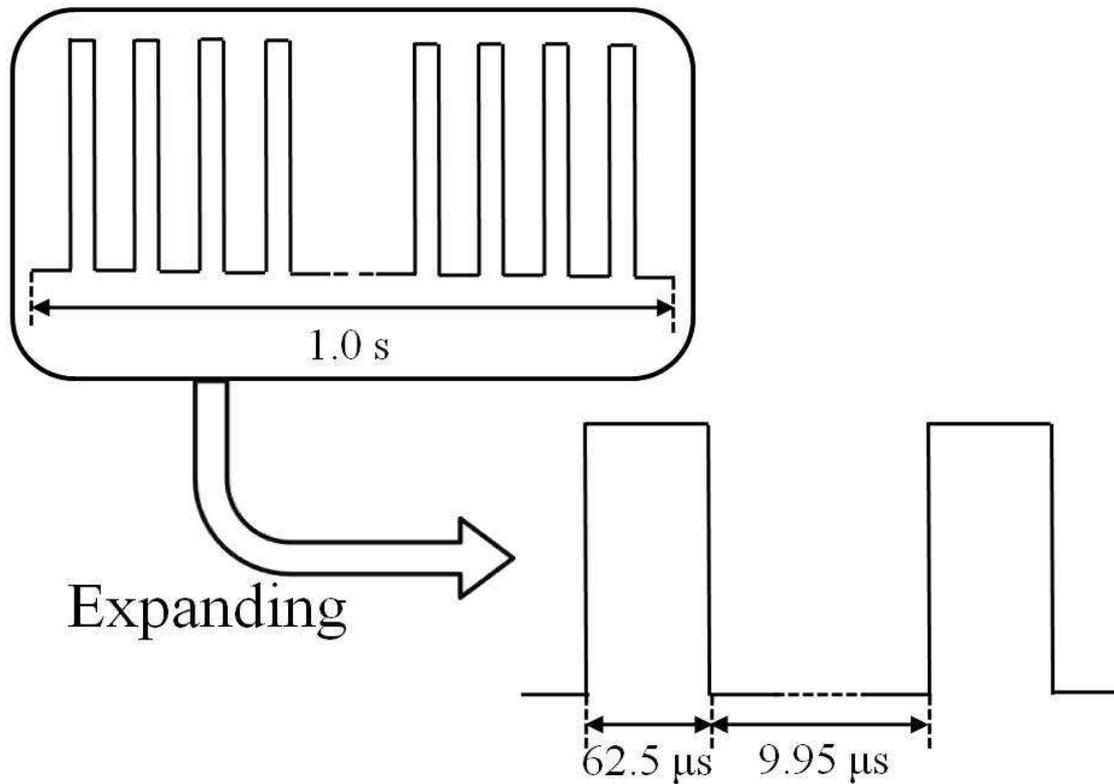


図 4.1: パルス列信号の概略図

た全7方向とした．図4.4にその様子を示す．表4.1に各角度における ITD 及び，信号音のサンプリング周波数を 48 kHz としたときの ITD に対応するポイント数（サンプル数）を示す．また，聴取者の正面に固定する信号は雑音信号と目的信号の両方の条件下で実験を行った．なお，目的信号 (S) と雑音信号 (N) の位置関係は，雑音信号が固定された条件は $S_m N_0$ ($m = 0, 15, \dots, 90$) と表し，目的信号が固定された条件は $S_0 N_m$ ($m = 0, 15, \dots, 90$) と表す．例えば， $S_{60} N_0$ は，目的信号と雑音信号の到来方向がそれぞれ $60^\circ, 0^\circ$ であることを表す．

一方，ITD と ILD の影響を考慮できる HRTF を用いた仮想聴空間下での実験では，各呈示角度で測定された HRTF を信号音または雑音に畳み込むことで音源の到来方向を変化させた．

本実験は第3章と同様の実験システムで行った．

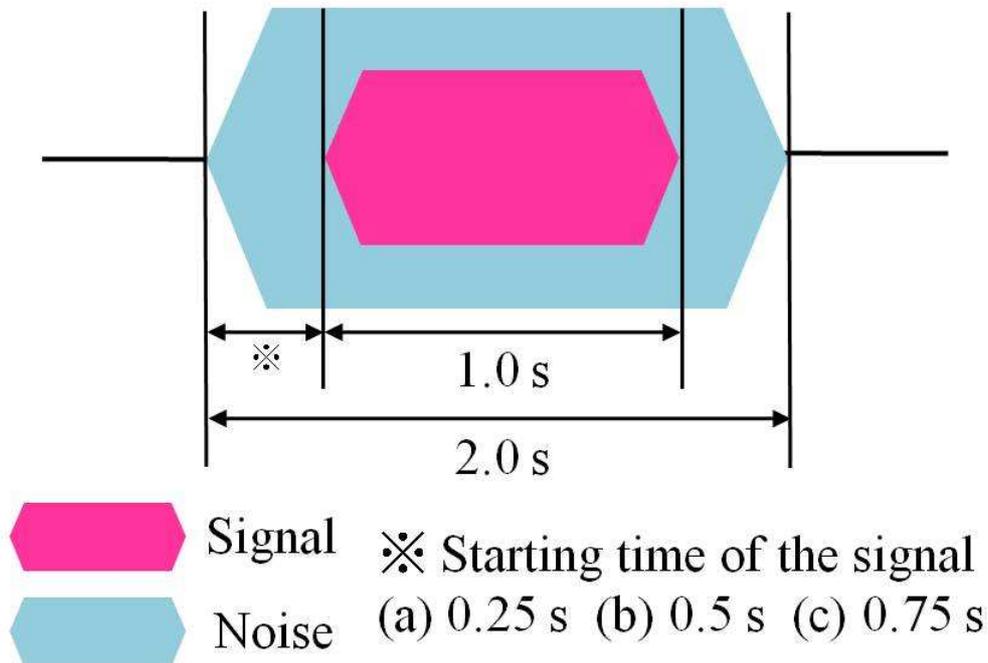


図 4.2: 雑音信号中に存在する目的信号：目的信号の呈示開始位置は (a), (b), (c) からランダムに設定された

4.3 手続き

本実験では、マスキング閾値の測定に精神物理学的測定法の一つである極限法を利用した [52]。この方法では、聴取者が確実に目的信号を検知できる高い音圧から低い音圧へと変化させる下降系列と、目的信号を確実に検知できない低い音圧から高い音圧へと変化させる上昇系列の二つの信号呈示順序を用いた。音圧を変化させる目的信号の初期値は、下降系列、上昇系列ともランダムに設定し、音圧は 1 dB 刻みで変化させた。雑音信号の音圧は実験開始時に 65 dB にキャリブレーションした。聴取者は呈示された刺激音に対し、雑音信号中に目的信号が「検知できる」または「検知できない」で判断した。各呈示角度におけるマスキング閾値は、上昇系列と下降系列を交互に 10 回ずつ行い、二つの系列で求められたそれぞれの閾値の平均値の差が 2 dB 以内のとき、全ての測定値の平均値として決定した。

本実験には第 3 章により選択された大学院生 6 名 (男性 5 名, 女性 1 名) が参加した。全ての聴取者は正常な聴力 (0.125 kHz~8 kHz のオクターブ周波数内で 15 dB HL 以下) を有し、また他の聴取実験に参加した経験があった。

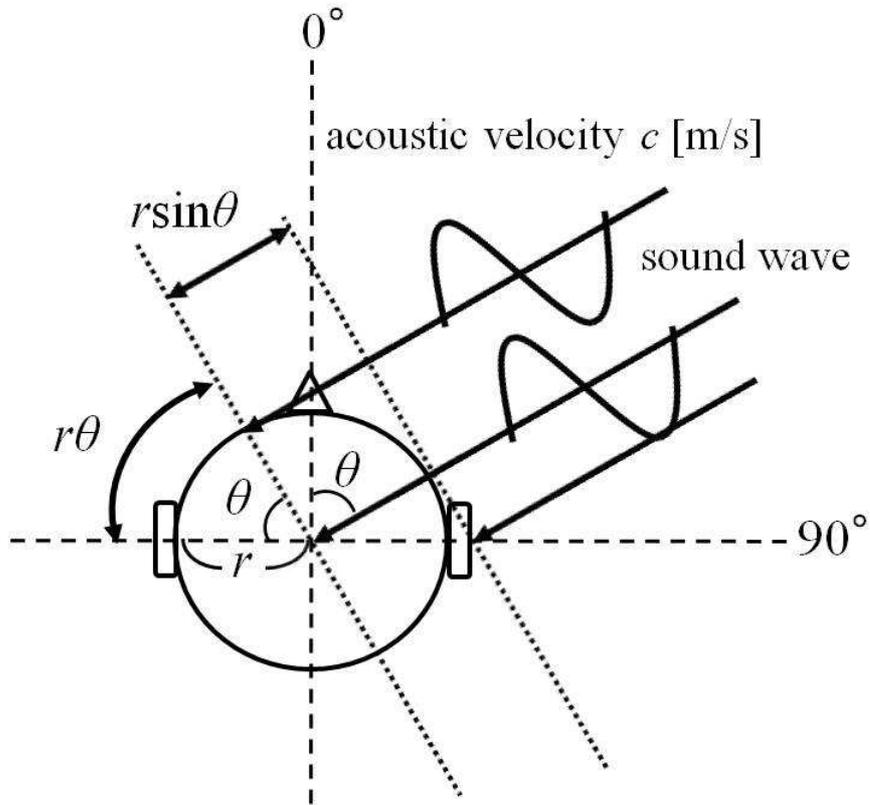


図 4.3: 両耳に到来する音の時間差と音源の方向の関係

4.4 結果と考察

図 4.5 に各呈示角度における白色雑音に対するパルス列信号のマスクング閾値を示す。全ての聴取者が同様の傾向を示していたため、マスクング閾値は全聴取者の平均値を示す。これらの図の横軸はパルス列信号または白色雑音の呈示方向を示し、縦軸は S_0N_0 でのマスクング閾値で正規化した相対マスクング閾値を示している。青線が ITD のみを方向性の手掛かりとした条件下での結果で、赤線が ITD と ILD の影響を考慮できる HRTF を用いた条件下での結果である。また実線が S_mN_0 ($m = 0, 15, \dots, 90$) 条件、点線が S_0N_m ($m = 0, 15, \dots, 90$) 条件の結果を示している。エラーバーは各呈示角度における平均マスクング閾値の標準偏差を示す。

まず ITD のみを方向性の手掛かりとした先行研究と同様の条件下での結果 (青線) について述べる。 S_mN_0 と S_0N_m の両条件において、信号音と雑音の呈示角度の差が大きくなるにつれ、マスクング閾値は低下し、最大約 7 dB のマスクング解除量が得られた。これは先行研究と同様の傾向を示しており [26]、ITD が SRM の生起に重要な方向性の手掛かりであることが確認できた。

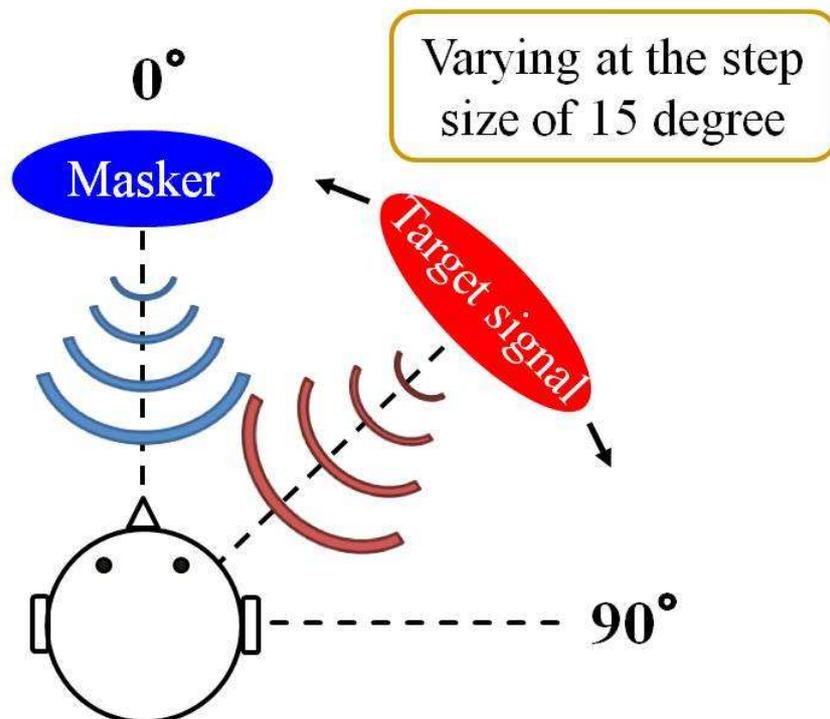


図 4.4: 雑音信号と目的信号の配置：聴取者の正面 (0°) には雑音信号または目的信号が固定される

次に、HRTF を用いた仮想聴空間下での実験結果 (赤線) について述べる。 $S_m N_0$ 条件において、信号音と雑音の呈示角度の差が大きくなるにつれてマスキング閾値は低下し、最大約 7 dB のマスキング解除量が得られた。これは青線とほぼ同様の傾向であることから、この条件下では主に ITD を利用して SRM が生起していると考えられ、ILD が SRM に与える影響は見られない。ただ、呈示角度が $45^\circ \sim 75^\circ$ の間は、赤線が青線より高くなっている。そこで、これらの条件の間で有意水準 1% で有意差検定を行った。その結果、呈示角度 45° と 60° において、有意差が見られた。これは ILD の影響を考慮したことで、右耳と左耳に到来する信号音の音圧が異なることにより両耳間相関検出機能が低下したために、ITD を利用しにくくなり、SRM が小さくなったためだと考えられる。一方、 $S_0 N_m$ 条件において、信号音と雑音の呈示角度の差が大きくなるにつれ、SRM も大きくなり、最大マスキング解除量は Saberi らと同程度の約 16 dB となった [14]。これは ITD と ILD が SRM に大きな影響を与えたためだと考えられる。

以上の結果と予測されたことの比較を以下に述べる。図 4.6 に各呈示角度における ILD を示す。ILD は左耳で測定された音圧と右耳で測定された音圧の差で求められ、最大約

表 4.1: 各角度における ITD とこれに対応するポイント数：信号のサンプリング周波数は 48 kHz である

角度 [°]	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

23 dB 生じている。まず、 $S_m N_0$ 条件において、雑音は両耳に約 65 dB というほぼ等しい音圧で呈示される。一方、信号音の呈示角度が大きくなるにつれ、左耳に呈示される信号音の音圧は低下し、右耳に呈示される信号音の音圧は雑音とほぼ等しい音圧となる。そのため、信号音の呈示角度の増加に伴い、左耳の SNR は次第に低下し、右耳の SNR はほぼ一定のままとなる。そのため、両耳の SNR があらゆる呈示角度でほぼ一定であった ITD のみを方向性の手掛かりに用いた場合に比べ、目的信号の検知能力は低下し、SRM は生起しないことが予測された。しかし、結果は ITD のみを方向性の手掛かりに用いた場合と同程度の SRM の生起を示したことから、この条件下でも ITD は重要な方向性の手掛かりとして用いられたといえる。ゆえに、両耳に到来する信号音に音圧差が加わっても、両耳間相関は十分に計算できたと考えられる。ただし、ITD のみを方向性の手掛かりとした場合より SRM は小さくなることがあるため、両耳間相関の計算は信号音の音圧差がない場合ほど正確なものではないと考えられる。また逆に、 $S_0 N_m$ 条件では、上記と逆の現象が生じるため、雑音の呈示角度が大きくなるにつれ、左耳の SNR は向上し、右耳の SNR はほぼ一定となる。そのため、左耳からの情報を有効に使うことで目的信号の検知を容易にでき、大きなマスキング解除量を得られることが予測された。結果はこの予測と一致し、ITD と ILD による SRM の生起が確認でき、特に ILD が大きな影響を与えたため大きなマスキング解除量が得られたと考えられる。

最後に、本実験のまとめを述べる。まず、本実験の目的(1)について、白色雑音下でのパルス列信号知覚において、 $S_m N_0$ 条件では、ILD が与える影響は見られず、主に ITD が SRM に影響を与えること、一方 $S_0 N_m$ 条件では、ITD と ILD、特に ILD が SRM に大きな影響を与えることが分かった。また、目的(2)について、HRTF を用いることにより Saberri らの実験結果と同等のマスキング解除量を得られたこと、さらに ITD と ILD による SRM の影響を観察できたことから、本実験は無響室内でのスピーカ呈示による実験を模擬できた。以上のことから本実験の目的を十分に達成できたといえる。

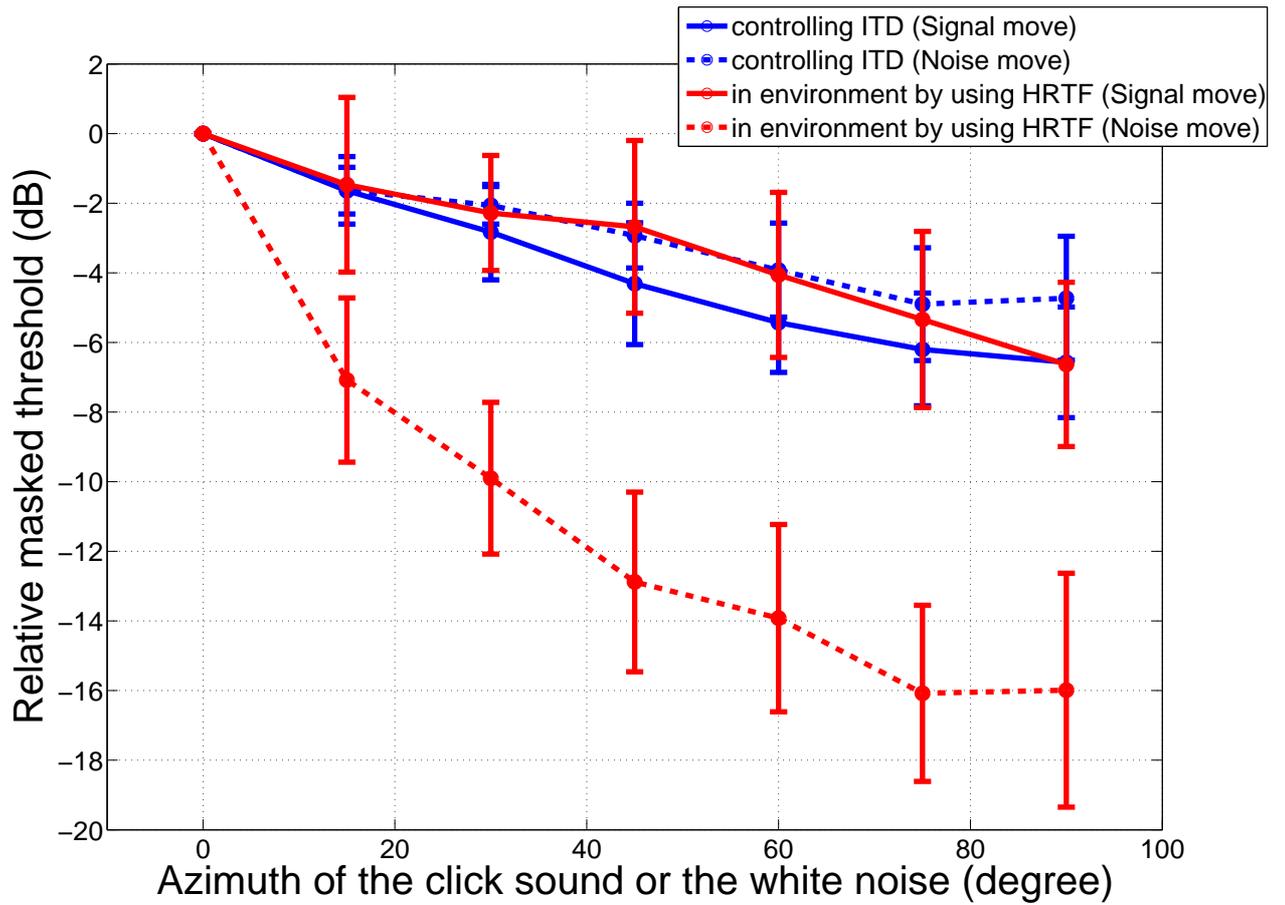


図 4.5: 信号音または雑音の呈示角度の増加に伴う白色雑音に対するパルス列信号の平均マスキング閾値の変化

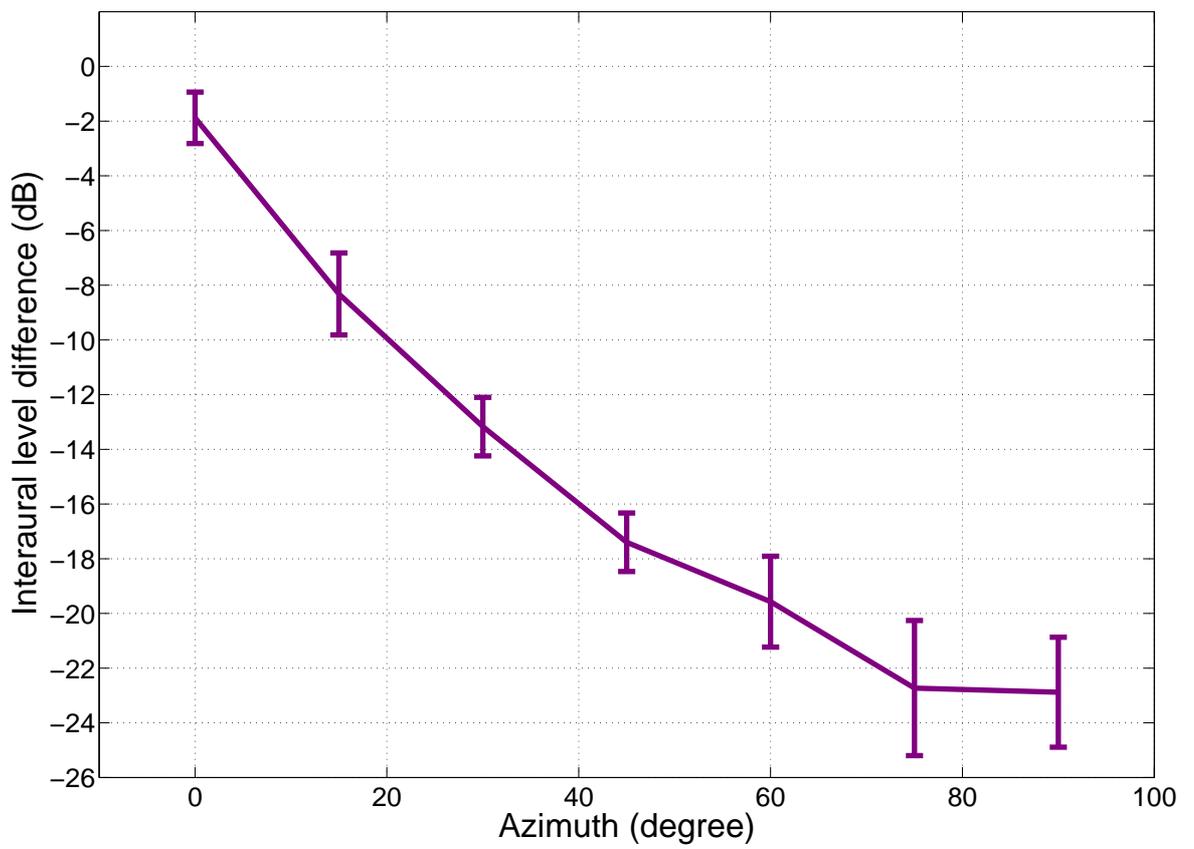


図 4.6: 呈示角度の増加に伴う ILD の変化: 全聴取者の平均値と標準偏差

第5章 自動車走行雑音下での報知音知覚

5.1 目的

これまでに自動車走行環境下での報知音知覚に関して、空間的な音を呈示することによりドライバーの遅延反応の数が減少することが示唆されている [53]。しかし、方向性の手掛かり、残響や視覚などが個々に走行雑音下での報知音知覚へどのような影響を与えるかは明らかになっていない。走行雑音下での報知音知覚において、より正確かつ容易に報知音を知覚できる呈示方法を確立するために、これらの影響を明らかにすることは重要である。

前章で示されたように、SRM の生起において、ITD と ILD は白色雑音下でのパルス列信号知覚において重要な方向性の手掛かりである。次に雑音環境下での報知音知覚に関して、ITD と ILD の影響を調査することが重要である。そこで、まず中西らは雑音に白色雑音を用いて ITD がどのような影響を与えているか調査した。その結果、ITD のみならず報知音の成分周波数による IPD による BMLD が大きく影響を与えていることが分かった [26]。また内山らは雑音に走行雑音を用いて報知音のマスクング閾値を測定した。その結果、白色雑音下での報知音知覚と同様に ITD と IPD が重要な方向性の手掛かりであることが分かった [27]。また ITD と IPD の影響を切り分けることはできず、これらは互いに複雑に絡み合って報知音の検知能力に影響を与えていることも分かった。本実験では次のステップとして、ITD と IPD に ILD の影響も考慮して、これらの方向性の手掛かりが報知音の検知能力に与える影響を調査する。そこで、以下の二つを目的とする。

1. ILD が走行雑音下での報知音知覚にどのような影響を与えるか明らかにすること。
2. 報知音の成分周波数の違いによりどの方向性の手掛かりを利用して報知音を検知しているかを明らかにすること。

5.2 方法

方向性の手掛かりとして ITD を利用した純音の方向定位能力は、音の成分周波数が約 1.5 kHz を越えると低下すること、また音の成分周波数が 1.8 kHz 以上では IPD を利用した純音の方向定位能力が低下し、ILD を主に利用して方向定位することが知られている [25]。先行研究では、体系的に、方向性の手掛かりによる SRM の特性を調べるために、

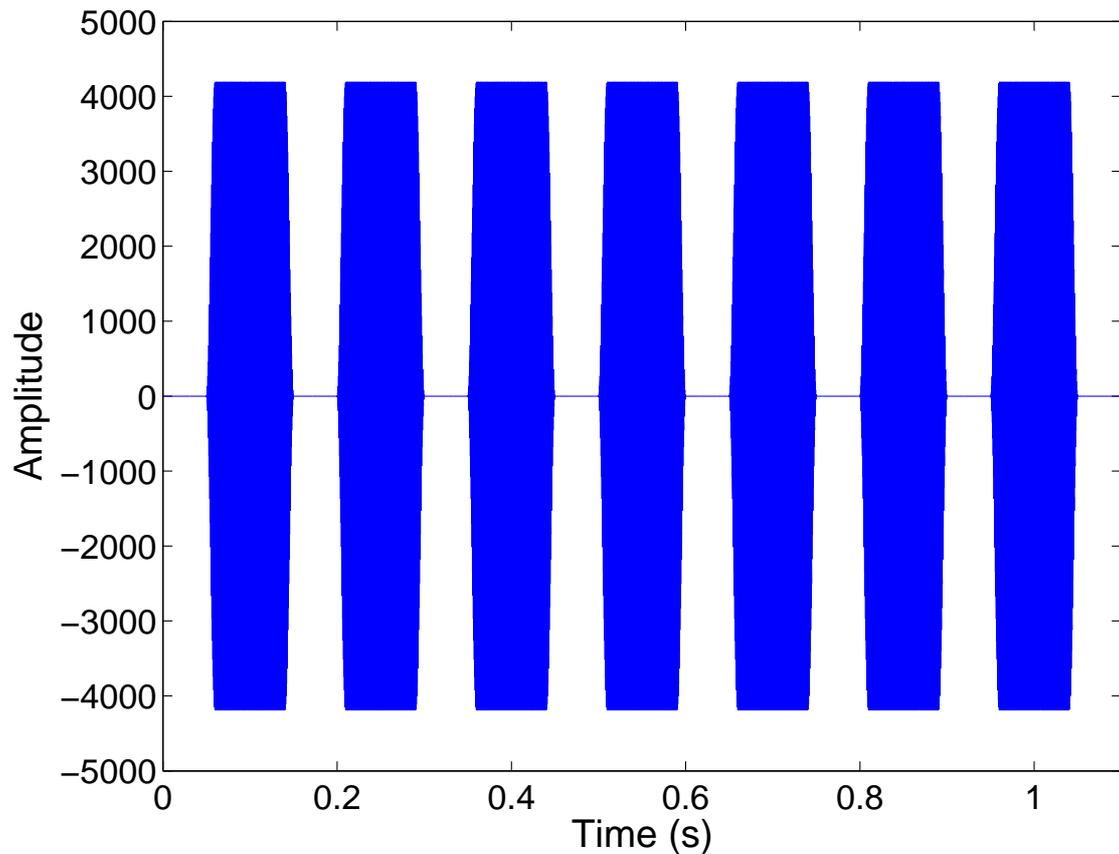


図 5.1: 本実験で使用した報知音の例: 報知音の断続パターンは1秒間あたり, ON = 0.1 s, OFF = 0.05 s である

五つの報知音 (1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 4.0 kHz) が利用された [27]. これを踏まえて, 本稿では, 1.5 kHz を境として低周波域から 1.0 kHz, 高周波域から 2.5 kHz の二つの報知音が使用された. 報知音の刺激形状は, JIS S 0013 で定められた最も注意を与える信号成分で構成した [1]. また報知音の断続パターンは1秒間あたり, ON = 0.1 s, OFF = 0.05 s とした. 図 5.1 に本実験で使用した報知音の例を示す. 雑音信号には走行速度 60 km/h の窓を開けた環境下において, 自動車内でデジタル録音された走行雑音を使用した. これらの信号のサンプリング周波数は 48 kHz とした.

ITD の設定方法, 実験システムは第 4 章と同様の設定とした.

5.3 手続き

第 4 章で用いられた極限法によりマスキング閾値を測定した. また第 4 章と同じ聴取者が実験に参加した.

5.4 結果と考察

5.4.1 報知音の周波数が 1.0 kHz の場合

図 5.2 に報知音の成分周波数が 1.0 kHz のときの各呈示角度における走行雑音に対する報知音のマスクング閾値を示す．全ての聴取者が同様の傾向を示していたため、マスクング閾値は全聴取者の平均値を示す．これらの図の各線の表示は図 4.5 と同様である．

先行研究と同様の条件下での実験結果（青線）を見ると、図より、 $S_m N_0$ 条件と $S_0 N_m$ 条件において、それぞれ $S_{75} N_0$ と $S_0 N_{45}$ で谷となっている．これは先行研究 [27] とほとんど同様の傾向を示しており、 $S_{60} N_0$ 及び $S_0 N_{60}$ で、報知音及び走行雑音の IPD が逆位相となるためと考えられる．しかし刺激音の呈示角度 $60^\circ \sim 90^\circ$ において、 $S_m N_0$ 条件と $S_0 N_m$ 条件の間のマスクング解除量に差が見られた．これはこれらの条件の間で、ITD と IPD が走行雑音下での報知音のマスクングに影響を与える程度が異なる場合があることを示唆している．この原因については、実験環境因子によるものなのかあるいは物理的因子によるものなのか明らかではないため、より詳しい検討をする必要がある．

一方、HRTF を用いた仮想聴空間下での実験結果（赤線）を見ると、図より、 $S_m N_0$ 条件と $S_0 N_m$ 条件の両条件において、刺激音の呈示角度 60° で谷となり、最大マスクング解除量は約 6 dB となっている．以上の結果から、 $S_m N_0$ 条件と $S_0 N_m$ 条件の両条件において、聴取者は ITD と IPD を主な方向性の手掛かりとして報知音を検出していることがわかる．また、青線と赤線を比較すると、 $S_0 N_m$ 条件ではほとんど同程度のマスクング閾値を示しているのに対し、 $S_m N_0$ 条件では赤線のマスクング閾値が青線より明らかに高くなっている．これは $S_m N_0$ 条件では、ILD が加わったことにより両耳間相関検出機能が低下し、この処理を行うことが困難となり、ITD と IPD の効果が小さくなったと考えられる．対照的に $S_0 N_m$ 条件では、報知音の音圧が両耳で等しいため、両耳間相関処理がうまく行うことができたと考えられる．

まとめとして、報知音の成分周波数が 1.0 kHz のとき、聴取者は $S_m N_0$ 条件と $S_0 N_m$ 条件の両条件とも ITD と IPD を主な方向性の手掛かりを走行雑音下での報知音検知に利用することが分かった．

5.4.2 報知音の周波数が 2.5 kHz の場合

図 5.3 に報知音の成分周波数が 2.5 kHz のときの各呈示角度における走行雑音に対する報知音のマスクング閾値を示す．全ての聴取者が同様の傾向を示していたため、マスクング閾値は全聴取者の平均値を示す．これらの図の各線の表示は図 4.5 と同様である．

まず先行研究と同様の条件下での実験結果（青線）を見ると、図より、 $S_m N_0$ 条件と $S_0 N_m$ 条件の両条件において、 $S_{45} N_0$ で山となっている．これは先行研究の実験結果とほとんど同様の傾向を示しており [27]、 $S_{45} N_0$ 及び $S_0 N_{45}$ で、報知音及び走行雑音の IPD が同位相となるためと考えられる．また刺激音の全ての呈示角度において、 $S_m N_0$ 条件と $S_0 N_m$ 条

件のマスキング解除量はほぼ同程度であり，最大マスキング解除量は 2 dB ~ 3 dB であることがわかる．

一方，HRTF を用いた仮想聴空間下での実験結果（赤線）を見ると，図より全聴取者の平均値では $S_{45}N_0$ で山となる傾向を示していることから，この条件下では主に ITD と IPD を利用して報知音の検知を行っていると考えられる．また S_0N_m 条件では，全ての聴取者が S_0N_{75} まで減少傾向を示し， S_0N_{75} で谷となっている．最大マスキング解除量は約 12 dB であり，青線より大きくなっている．これは ITD と IPD だけでなく ILD が報知音の検知能力に大きく影響を与えたと考えられる．またマスキング閾値が呈示角度 90° まで一様に減少していないことから，IPD による BMLD の影響も見られた．

まとめとして，報知音の成分周波数が 2.5 kHz のとき，聴取者は S_mN_0 条件では主に ITD と IPD を， S_0N_m 条件では ITD と IPD に加え ILD を利用して走行雑音下の報知音を検知することが分かった．

5.5 まとめ

本章では，走行雑音下での報知音のマスキング閾値を測定した．報知音の成分周波数には 1.0 kHz と 2.5 kHz の 2 種類を使用した．報知音または走行雑音に ITD のみを制御した刺激音の到来方向を変化させたとき，2 種類の成分周波数とも先行研究と同様の傾向を示した．このことから ITD と IPD が走行雑音下の報知音知覚に重要な方向性の手掛かりとして利用されると考えられる．また方向性の手掛かりの情報を抽出可能な HRTF を用いた仮想聴空間下で実験を行った．その結果，本実験の目的 (1) について，報知音の成分周波数が 1.0 kHz のとき， S_mN_0 条件と S_0N_m 条件の両条件とも ILD の影響は見られず，報知音の成分周波数が 2.5 kHz のとき， S_mN_0 条件では，ILD の影響はほとんど見られないが， S_0N_m 条件では，ILD による SRM の影響が見られた，という結果を得た．また目的 (2) について，報知音が 1.5 kHz 以下の低い周波帯域では ITD と IPD が優位な方向性の手掛かりとして報知音の検知能力に影響を与えるのに対し，報知音が 1.5 kHz 以上の高い周波帯域では ITD と IPD に加えて ILD が優位な方向性の手掛かりとして報知音の検知能力に影響を与えることが明らかとなった．以上より，本実験の目的を十分に達成できたといえる．

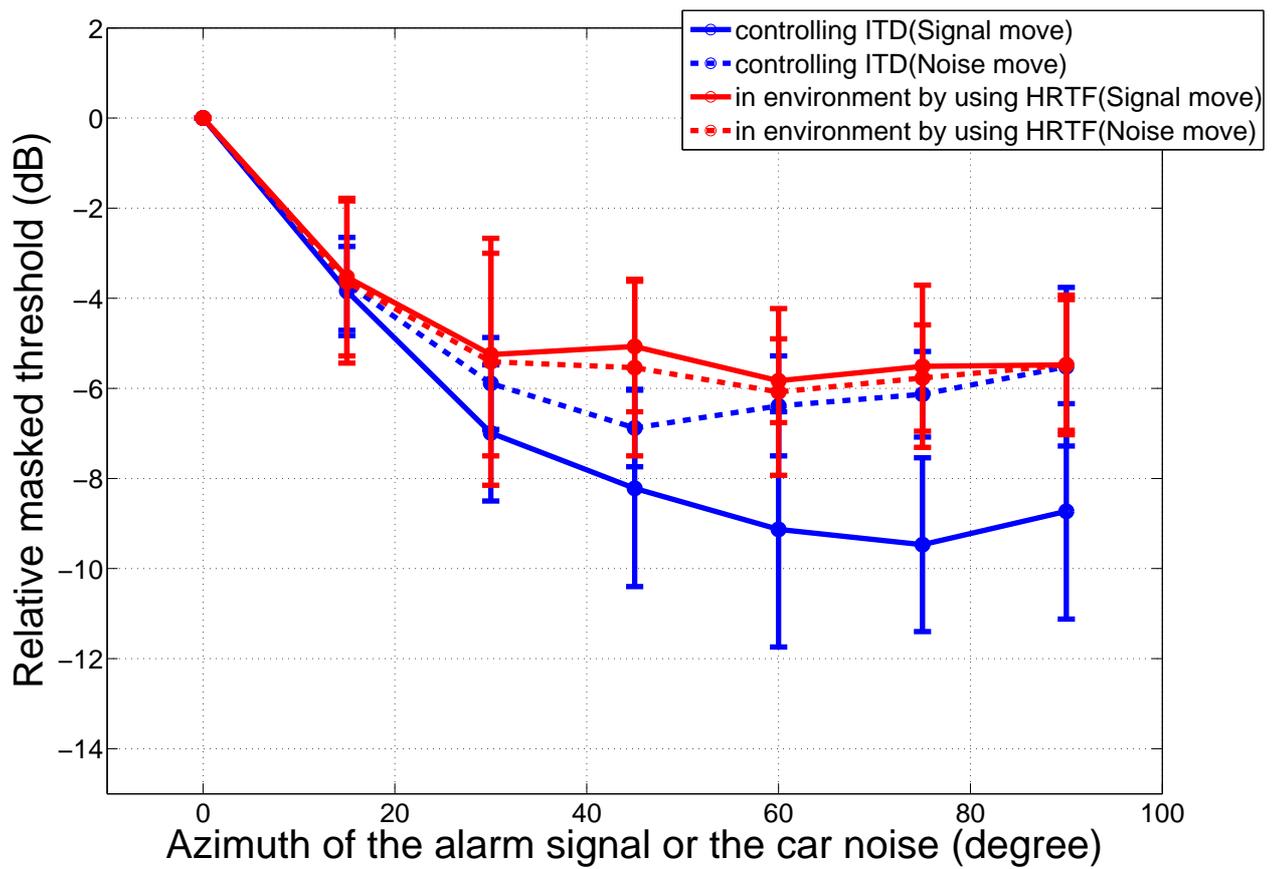


図 5.2: 信号音または雑音の呈示角度の増加に伴う走行雑音に対する 1.0 kHz の報知音の平均マスキング閾値の変化

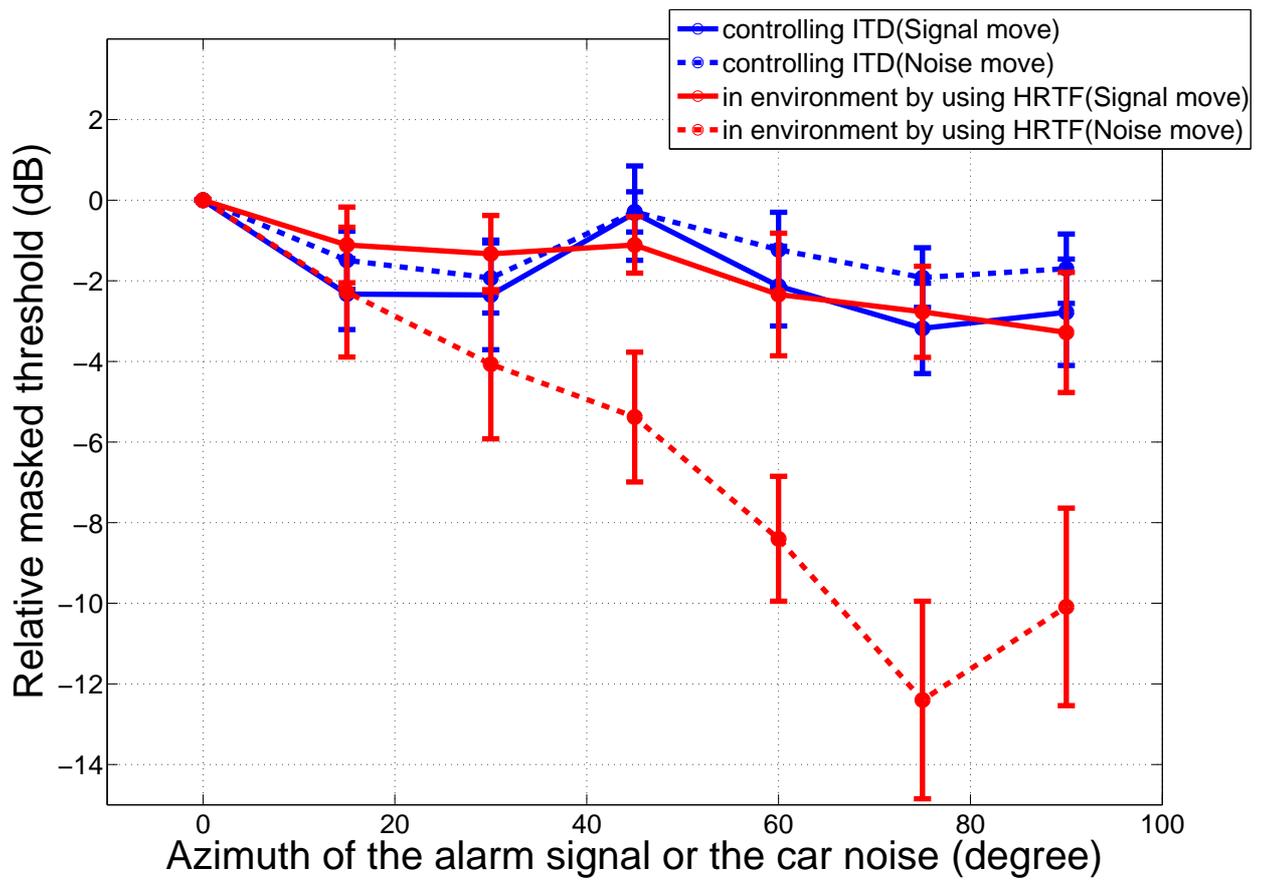


図 5.3: 信号音または雑音の呈示角度の増加に伴う走行雑音に対する 2.5 kHz の報知音の平均マスキング閾値の変化

第6章 複数の走行雑音下での報知音知覚

6.1 目的

前章では、方向性の手掛かりが走行雑音下での報知音の検知能力に与える影響が調べられた。このとき、雑音源と信号音源はそれぞれ一つずつ設置され、実験が行われた。しかし、実際の雑音環境下では、複数の雑音源が存在し、これらが報知音の検知能力に影響を与える。そこで、本実験では、二つの雑音源が存在する環境下において、方向性の手掛かりが報知音の検知能力にどのような影響を与えるか調査することを目的とする。

6.2 方法

目的信号には 2.5 kHz の成分周波数をもつ報知音とし、雑音信号には走行雑音を用いた。図 6.1 に目的信号 (S) と二つの雑音信号 (聴取者の左側に設置した雑音信号: NL, 聴取者の右側に設置した雑音信号: NR) の位置関係を示す。図に示されるように、本実験では $S_0NL_{45}NR_{45}$, $S_0NL_{45}NR_{90}$, $S_0NL_{90}NR_{90}$ の三つの位置関係で調査した。これは呈示角度 45° で IPD が同位相となり報知音の検知限が低下することが分かっており、これらの条件間でどの方向性の手掛かりが報知音の検知能力に影響を与えたか明らかにしやすいためである。

ITD の設定方法、実験システムは第 4 章と同様の設定とした。

6.3 手続き

第 4 章で用いられた極限法によりマスキング閾値を測定した。また第 4 章と同じ聴取者が実験に参加した。

6.4 結果と考察

図 6.2 に報知音の成分周波数が 2.5 kHz のときの各呈示角度における二つの走行雑音に対する報知音のマスキング閾値を示す。全ての聴取者が同様の傾向を示していたため、マスキング閾値は全聴取者の平均値を示す。エラーバーは標準偏差を示している。横軸は左

から $S_0NL_{45}NR_{45}$, $S_0NL_{45}NR_{90}$, $S_0NL_{90}NR_{90}$ 条件を表している．縦軸は実際に得られた報知音のマスクング閾値を示している．

まず ITD のみを制御して音の呈示方向を変化させた条件下での結果 (青の棒グラフ) について述べる．図より，全ての聴取者が $S_0NL_{45}NR_{45}$, $S_0NL_{45}NR_{90}$, $S_0NL_{90}NR_{90}$ 条件の順に報知音のマスクング閾値が低下していることが分かる．また，最大約 5 dB のマスクング解除量が得られた．特にマスクング閾値は $S_0NL_{45}NR_{45}$ と $S_0NL_{45}NR_{90}$ の間で約 4 dB と大きく低下し， $S_0NL_{45}NR_{90}$ と $S_0NL_{90}NR_{90}$ の間では約 1 dB の低下が見られる．これは $S_0NL_{45}NR_{45}$ 条件では，両耳とも IPD が同位相となるため，検知限が低下するが， $S_0NL_{45}NR_{90}$ 条件では右耳が， $S_0NL_{90}NR_{90}$ 条件では両耳が報知音を検知しやすくなったことによるものと考えられる．また，雑音源が一つの場合に比べ，大きなマスクング解除が生じた．これは $S_0NL_{45}NR_{45}$ 条件でのマスクング閾値が雑音源一つの場合 (S_0N_{45}) に比べ，大きく上昇したために，雑音源を NL_{90} または NR_{90} に設置したとき，ITD と IPD の効果がより際立って現れたと考えられる．

次に HRTF による仮想聴空間下での結果 (赤の棒グラフ) について述べる．図より，青の棒グラフと同様の傾向であり，全ての聴取者が $S_0NL_{45}NR_{45}$, $S_0NL_{45}NR_{90}$, $S_0NL_{90}NR_{90}$ 条件の順に報知音のマスクング閾値が低下していることが分かる．特にマスクング閾値は $S_0NL_{45}NR_{45}$ と $S_0NL_{45}NR_{90}$ の間で約 3 dB 低下しているが， $S_0NL_{45}NR_{90}$ と $S_0NL_{90}NR_{90}$ の間ではほぼ一定となっている．このマスクング解除については，青の棒グラフと同様の傾向であることから ITD と IPD を利用したことによるものと考えられる．また ILD については，雑音源が左右に設置されたことで，両耳に到来する音圧差がほとんどなかったため，報知音の検知に利用できなかったと考えられる．

6.5 まとめ

本章では，二つの走行雑音が存在する環境下での報知音のマスクング閾値を測定した．報知音の成分周波数には 2.5 kHz を使用した．雑音と信号音の位置関係は $S_0NL_{45}NR_{45}$, $S_0NL_{45}NR_{90}$, $S_0NL_{90}NR_{90}$ の 3 条件に設定した．ITD を制御した場合と HRTF を用いた仮想聴空間下で行った場合の結果は同様の傾向を示した．また ITD を制御した場合の方が両耳間処理の計算を正確にできることが分かった．まとめとして，二つの雑音を左右に設置したとき，ILD の両耳間相関検出機能が低下するが，ITD と IPD の両耳間相関検出機能の低下はほとんどないことが明らかとなった．

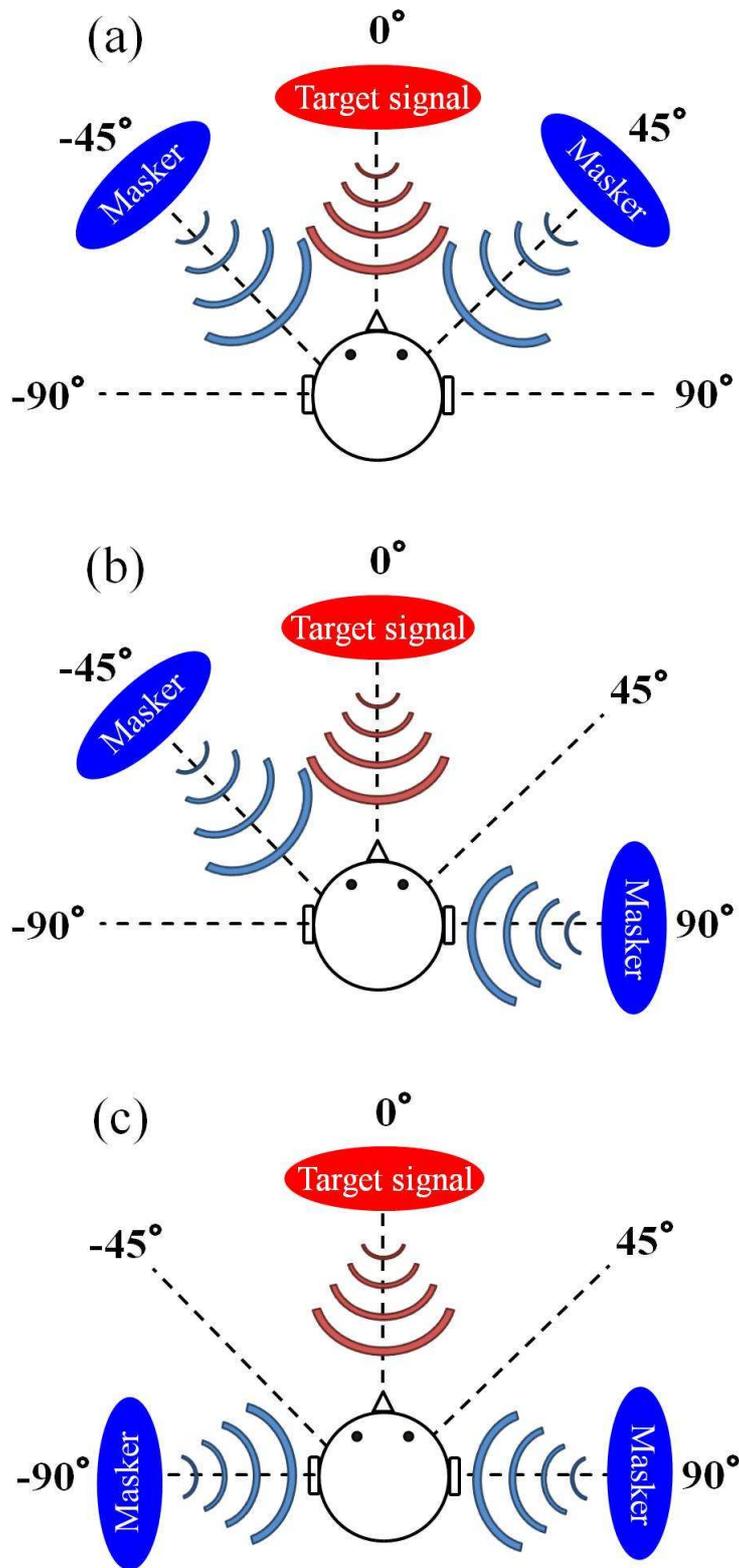


図 6.1: 信号音と雑音の位置関係: (a) $S_0NL_{45}NR_{45}$, (b) $S_0NL_{45}NR_{90}$, (c) $S_0NL_{90}NR_{90}$

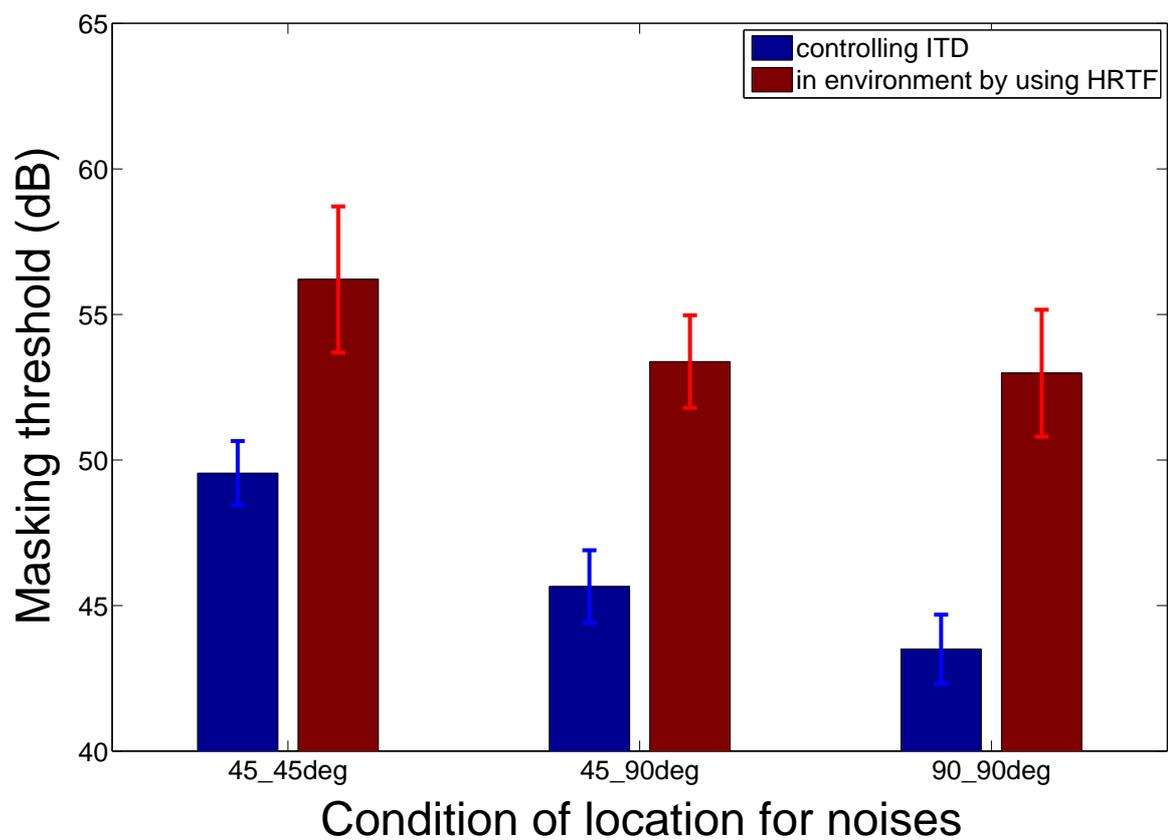


図 6.2: 二つの走行雑音下での報知音知覚におけるマスキング閾値：全聴取者の平均値，横軸は雑音の配置を表し，左から順に $S_0NL_{45}NR_{45}$ ， $S_0NL_{45}NR_{90}$ ， $S_0NL_{90}NR_{90}$ である

第7章 方向性の手掛かりが雑音環境下での信号音の検知能力に与える影響

本章では、第4章、第5章と第6章のまとめとして、方向性の手掛かりが雑音環境下での信号音の検出能力に与える影響について述べる。まず第4章では、方向性の手掛かりがSRMにどのような影響を与える調査するため、HRTFを用いた仮想聴空間において、白色雑音下でのパルス列信号のマスクング閾値が測定された。その結果、白色雑音を聴取者の正面に固定したとき、パルス列信号の呈示角度が大きくなるにつれ、マスクング閾値は低下し、最大約7 dBのマスクング解除量が得られた。これはITDのみを制御した先行研究と同様の傾向であることから、この条件下では、ITDがSRMの生起に大きな影響を与えていることが分かった。一方、パルス列信号を聴取者の正面に固定したとき、白色雑音の呈示角度が大きくなるにつれ、マスクング閾値は低下し、最大約16 dBの大きなマスクング解除量が得られた。このことからこの条件下では、ITDとILDがSRMの生起に大きな影響を与えていることが分かった。また特にILDの影響により大きなSRMが得られることが分かった。

次に第5章では、方向性の手掛かりが実際の雑音環境下(走行雑音下)での報知音の検知能力にどのような影響を与えるか調査するため、HRTFを用いた仮想聴空間において、走行雑音下での報知音のマスクング閾値が測定された。その結果、報知音の成分周波数が1.0 kHzのとき、走行雑音または報知音が聴取者の正面に固定された両条件において、ITDとIPDが主に報知音の検知能力に大きな影響を与えることが分かった。一方、報知音の成分周波数が2.5 kHzのとき、走行雑音を聴取者の正面に固定した条件下では、ITDとIPDが主に報知音の検知能力に影響を与え、対照的に、報知音を聴取者の正面に固定した条件下では、ITDとIPDに加えILDが報知音の検知能力に大きな影響を与えることが分かった。特にILDの与える影響により報知音の検知能力が大きく向上することが分かった。これらの結果のまとめを表7.1に示す。

表 7.1: 走行雑音下での報知音知覚に用いられる方向性の手掛かり

Alarm signal		
	Signal move	Signal fix
1.0 kHz	ITD, IPD	ITD, IPD
2.5 kHz	ITD, IPD	ITD, IPD, ILD

最後に、第6章では、複数の走行雑音下での報知音知覚において、方向性の手掛かりがどのような影響を与えるか調査するため、二つの雑音源が存在する環境下での報知音のマスク閾値が測定された。その結果、ITD と IPD による報知音の検知能力の向上が見られたが、ILD の影響は見られなかった。これは左右に雑音源を設置したため、両耳に到来する雑音の音圧差が小さく、ILD を利用できなかったと考えられる。しかし、ITD と IPD については、複数の雑音が存在しても、これらの両耳間相関検出機能が低下することはなかったと考えられる。

まとめとして、実環境下において、正確に報知音を知覚するための報知音の呈示方法について、本実験で得られたこれらの知見がどのように役立つかを述べる。まず、走行雑音と報知音の音源が一つずつ存在するとき、第5章で得られた結果から報知音の成分周波数の違いにより望ましい報知音の呈示方向は異なると考えられる。具体的には、報知音の成分周波数が 1.5 kHz 以下の低周波域では、ITD と IPD を主な方向性の手掛かりとして利用するため、IPD が逆位相かつ ITD ができるだけ大きくなる呈示方向が望ましいといえる。また、報知音の成分周波数が 1.5 kHz 以上の高周波域では、ITD と IPD だけでなく ILD が報知音の検知能力に大きな影響を与えるため、IPD が逆位相かつ ITD と ILD ができるだけ大きくなる呈示方向が望ましいといえる。一方、走行雑音を二つ、報知音を一つの音源に設定した条件下では、ITD と IPD の両耳間相関機能の低下はほとんどないが、ILD の両耳間相関検出機能が低下する。そのため、ITD と IPD を最大限利用できるよう報知音の呈示方向を決定することが望ましいといえる。

第8章 結論

8.1 本論文で明らかにされたことの要約

本論文では、実際の雑音環境下、特に走行雑音下での報知音知覚において、方向性の手掛かりがどのような影響を与えるかを明らかにするために、

Q1 白色雑音下でのパルス列信号知覚（第4章）

Q2 走行雑音下での報知音知覚（第5章）

Q3 複数の走行雑音下での報知音知覚（第6章）

という三つの実験を段階的に行った。これらの実験により得られた知見を以下に示す。

A1 白色雑音下でのパルス列信号知覚において、雑音が正面に固定された条件下では、主に ITD が SRM に影響を与え、信号音が正面に固定された条件下では、ITD と ILD が SRM の生起に影響を与える。

A2 走行雑音下での報知音知覚において、報知音の成分周波数が 1.0 kHz のとき、主に ITD と IPD が報知音の検知能力に影響を与える。

A2 走行雑音下での報知音知覚において、報知音の成分周波数が 2.5 kHz のとき、雑音が正面に固定された条件下では、主に ITD と IPD が報知音の検知能力に影響を与え、信号音が正面に固定された条件下では、ITD と IPD に加え ILD が報知音の検知能力に影響を与える。

A3 二つの雑音源が存在する環境下での報知音知覚について、報知音の成分周波数が 2.5 kHz のとき、ITD と IPD が報知音の検知能力に影響を与える。

これらの知見に基づくと、一つの雑音源が存在する環境下での報知音の望ましい呈示方向は、報知音の成分周波数が 1.0 kHz と 2.5 kHz のとき、それぞれ 60° と 75° ということになる。また、二つの雑音源が存在する環境下での報知音知覚では、ITD と IPD を最大限利用できる呈示方向が望ましい。これにより報知音の成分周波数に応じて、対象者が方向性の手掛かりを最大限利用できる呈示方向を決定でき、雑音にマスクされにくい報知音の呈示方向が明らかにできた。今後は報知音の設計と呈示の両方の指針に基づいて、最も報知音に望ましい資質についてさらに詳しく検討していく必要がある。

8.2 今後の展望

本研究では，実環境下での報知音知覚に方向性の手掛かりがどのような影響を及ぼすかを明らかにした．しかし，実環境下での報知音知覚には方向性の手掛かりだけでなく他の要因も影響を及ぼしていると考えられ，まだ数多くの課題がある．そこで，より正確に報知音を知覚させるための報知音の設計及び呈示方法について，今後の展望を以下に示す．

- 本研究で用いた報知音の成分周波数より低いまたは高い周波数帯域で報知音の聴取実験を行い，知覚特性を明らかにする．
 - － 本研究では，1.0 kHz と 2.5 kHz の 2 種類の報知音を用いて実験を行った．そのため，報知音の成分周波数が 1.0 kHz では ITD と IPD の影響が現れ，2.5 kHz では信号音が正面に固定されたとき，ITD と IPD に加え ILD の影響が現れることが分かった．しかし，ILD の影響が現れる報知音の成分周波数は明らかになっていない．より広い周波数帯域で報知音の知覚特性を求めることは実環境での報知音の呈示方法に有用である．
- 実環境下での報知音知覚には方向性の手掛かりだけでなく，残響や視覚なども影響を与えると考えられるため，これらの影響が報知音の知覚特性に与える影響を明らかにする必要がある．そこで以下に示す条件下で実験を行うことで，実環境下でより正確に知覚できる報知音の呈示方法に指針を示すことができる．
 - － 半無響室内でのスピーカ呈示による報知音の聴取実験
 - － 様々な実環境下でのスピーカ呈示による報知音の聴取実験
- 複数の成分周波数をもつ報知音を用いたときの報知音の知覚特性を明らかにする．
 - － 報知音は多くの成分周波数をもつほうが検知しやすく，音源の定位能力も向上するといわれている．このことから，複数の倍音をもつ報知音を用いて実験を行うことで，実環境下でもより正確に知覚できる報知音を設計及び呈示できる．
- 本研究では，聴取者の右水平面上から報知音を呈示して聴取実験を行ったが，実環境下では水平方向だけでなく仰角方向などあらゆる角度から雑音または報知音が呈示される．そこで仰角方向を考慮した報知音の聴取実験を行うことで，より実環境下に近い報知音の知覚特性を解明できる．
- 本研究では，複数の走行雑音下での報知音知覚において，左右の雑音源の音圧を同じレベルに設定した．しかし，実環境下では，複数の雑音源の音圧が全て等しいということはほとんどあり得ない．そこで，雑音の音圧を左右で異なるレベルに設定したときの報知音の知覚特性を明らかにする必要がある．

謝辞

本研究を行うにあたり，北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科の赤木正人 教授に熱心に御指導いただきましたことを深く感謝いたします。また，折に触れて御指導，御討論いただきました，北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科の鵜木祐史 准教授，李軍鋒 助教に深く感謝いたします。さらに本研究を遂行していく中で，熱心な議論ならびに貴重な助言を賜りました，北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科の党建武 教授，徳田功 准教授，末光厚夫 助教に深く感謝いたします。加えて，本研究の遂行にあたり，実験を行う貴重なデータをご提供していただきました，東北大学電気通信研究所 大学院情報科学研究所の岩谷幸雄 准教授に深く感謝いたします。その他，本研究の遂行に際して，多忙な中，貴重な時間を割いて本研究の実験に参加していただいた赤木，鵜木研究室の皆さんに心より感謝いたします。日頃の研究生活において，多くの御助言ならびに激励を賜りました，音情報処理学講座の皆様および諸先輩方に厚く御礼申し上げます。最後に，常に励ましたくださった多くの皆様に心から感謝申し上げます。

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.*, vol. 22, no. 4, pp. 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, pp. 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,” 日本音響学会誌 52 巻 4 号, pp. 244–252, 1996.
- [5] 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, pp. 244–252, 1996.
- [6] 倉片 憲治, 久場 康良, 口ノ町 康夫, “高齢社会における家電製品の報知音—高齢者にも聞き取りやすい音とは?—,” 人間工学関連技術シンポジウム資料集, 1996(3)–11.
- [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), pp. 457–458, 2003.
- [8] 水浪 田鶴, 下迫 晴加, 松下 一馬, 倉片 憲治, “JIS S 0013 における報知音 (終了音・注意音) の推奨 ON/OFF パターンの追検討,” 日本人間工学会誌, vol. 40, no. 5, pp.264–271, 2004.
- [9] 山内 勝也, 高田 正幸, 岩宮 眞一郎, “サイン音の機能イメージと擬音語表現,” 日本音響学会誌 59 巻 4 号, pp. 192–202, 2003.
- [10] 織田 修平, 青木 真理子, 古家 賢一, 片岡 章俊, “雑音環境下における報知音伝達システムとその有効性,” 電子情報通信学会論文誌 A, vol.J90-D, no.10, pp.2765-2774, 2007.
- [11] 崔 鍾 大, 毎熊 亮, 高田 正幸, 岩宮 眞一郎, “自動車内の各種サイン音にとって望ましい音響特性,” 音響学会騒音・振動研資 N-2003-62, 2003.
- [12] 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, pp. 118–125, 2005.

- [13] M. Ebata, T. Sone, and T. Nimura, “Improvement of hearing ability by directional information,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 43, no. 2, pp. 289–297, 1968.
- [14] K. Saberi, L. Dostal, T. Sadralodabei, V., Bull, and R., D., Perrot, “Free-field release from masking,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 90, no. 3, pp. 1355–1370, 1991.
- [15] 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.*, vol. 115, no. 2, pp. 833–843, 2004.
- [16] J. Peissing and B. Kollmeier, “Directivity of binaural noise reduction in spatial multiple noise-source arrangements for normal and impaired listeners,” *J. Acoust. Soc.*, vol. 101, no. 3, pp. 1660–1670, 1997.
- [17] D.S. Brungart, “Informational and energetic masking effects in the perception of two simultaneous talkers,” *J. Acoust. Soc.*, vol. 109, no. 3, pp. 1101–1109, 2001.
- [18] 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.*, vol. 114, no. 1, pp. 368–379, 2003.
- [19] Antje Ihlefeld and Barbara Shinn-Cunningham, “Spatial release from energetic and informational masking in a selective speech identification task,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 123, no. 6, pp. 4369–4379, 2008.
- [20] Antje Ihlefeld and Barbara Shinn-Cunningham, “Spatial release from energetic and informational masking in a divided speech identification task,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 123, no. 6, pp. 4380–4392, 2008.
- [21] 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 卷 11 号, pp. 735–741, 1999.
- [22] Brian C. J. Moore, *An Introduction to the Psychology of Hearing Fifth Edition*, Chap. 7, Academic Press, London, 2003.
- [23] 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.
- [24] L.R. Bernstein and C. Trahiotis, “The apparent immunity of high-frequency “transposed” stimuli to low-frequency binaural interference,” *J. Acoust. Soc.*, vol. 116, no. 5, pp. 3062–3069, 2004.

- [25] C. Lane, N. Kopco, B. Delgutte, B.G. Shinn-Cunningham, and H.S. Colburn, “A cat’s cocktail party: Psychophysical, neurpphysiological, and computational studies of spatial release from masking,” *Proc. ISH 2003*, pp. 341–347, 2003.
- [26] J., Nakanishi, M., Unoki, and M., Akagi, “Effect of ITD and component frequencies on perception of alarm signals in noisy environments,” *Journal of Signal Processing*, vol. 10, no. 4, July, pp. 231–234, 2006.
- [27] H., Uchiyama, M., Unoki, and M., Akagi, “Improvement in detectability of alarm signal in noisy environments by utilizing spatial cues,” *Proc. WASPAA2007*, pp. 74–77, New Paltz, NY, 2007.
- [28] J. Blauert, *Spatial Hearing*, The MIT Press, 1983.
- [29] M. Morimoto and Y. Ando, “On the simulation of sound localization,” *J. Acoust. Soc. Jpn.*, vol. 1, no. 3, pp. 167–174, 1980.
- [30] E. M. Wenzel, M. Arruda, D. J. Kistler, and F. L. Wightman, “Localization using nonindividualized head-related transfer functions,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 94, no. 1, pp. 111–123, 1993.
- [31] N. Aoshima, “Computer-generated pulse signal applied for sound measurement,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 69, no. 5, pp. 1484–1488, 1981.
- [32] Y. Suzuki, H. Y. Kim, F. Asano, T. Sone, N. Aoshima, “An Optimum computer generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 97, no. 2, pp. 1119–1123, 1995.
- [33] 荒木 順二, 西野 隆典, 武田 一哉, 板倉 文忠, “スパーク音源を用いた頭部伝達関数の測定,” *日本音響学会誌*, vol. 60, no. 6, pp. 314–318, 2004.
- [34] 西野 隆典, 梶田 将司, 武田 一哉, 板倉 文忠, “水平面上の頭部伝達関数の補間,” *日本音響学会誌*, vol. 55, no. 2, pp. 91–99, 1999.
- [35] 西野 隆典, 梶田 将司, 武田 一哉, 板倉 文忠, “水平方向及び仰角方向に関する頭部伝達関数の補間,” *日本音響学会誌*, vol. 57, no. 11, pp. 685–692, 2001.
- [36] 平原 達也, 大谷 真, 矢入 聡, 岩谷 幸雄, 戸嶋 巖樹, “頭部伝達関数の陥穽,” *日本音響学会講演論文集 (春)*, 1-7-2, pp. 513–514, 2008.
- [37] 西野 隆典, 中井 勇祐, 武田 一哉, 板倉 文忠, “重回帰分析に基づく頭部伝達関数の推定,” *電子情報通信学会論文誌*, vol. J84-A, no. 3, pp. 260–268, 2001.

- [38] M. Parham, T. Hironori, N. Ryouichi, and K. Hiroaki, “Comparison of simulated and measured HRTFs: FDTD simulation using MRI head data,” *Audio. Engineering Society.*, pp. 7240–7251, 2007.
- [39] 松橋 太陽, 高根 昭一, 曾根 敏夫, “境界要素法を用いた個人の頭部伝達関数の推定に関する検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 104, no. 526, pp. 7–12, 2004.
- [40] K. Iida, M. Itoh, A. Itagaki, and M. Morimoto, “Median plane localization using a parametric model of the head-related transfer function based on spectral cues,” *Applied Acoustics*, vol. 68, no. 8, pp. 835–850, 2007.
- [41] 飯田 一博, 中村 一啓, “正中面の頭部伝達関数の非個人化に関する一考察,” 日本音響学会講演論文集 (秋) , pp. 297–298, 2000.
- [42] 西塔 宏二, 岩谷 幸雄, 鈴木 陽一, “定位感に基づく個人化頭部伝達関数の勝抜き戦選択,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 104, no. 247, pp. 1–6, 2004.
- [43] 西塔 宏二, 岩谷 幸雄, 鈴木 陽一, “定位感に基づいて個人化された HRTF の特徴,” 日本音響学会聴覚研究会資料, vol. 35, no. 11, pp. 711–716, H-2005-121, 2005.
- [44] Y. Iwaya, “Individualization of head-related transfer functions with tournament-style listening test: Listening with other’s ears,” *Acoust. Sci & Tech.*, vol. 27, no. 6, pp. 340–343, 2006.
- [45] 東北大学電気通信研究所で測定された HRTF の測定概要 : <http://www.ais.riec.tohoku.ac.jp/lab/db-hrtf/index-j.html>
- [46] Y. Linde, A. Buzo, and R. M. Gray, “An Algorithm for Vector Quantizer Design,” *IEEE Trans. on Communications*, vol. 28, no. 1, pp. 84–95, 1980.
- [47] MIND SPORTS WORLDWIDE, “How to Organise a Tournament from the Mind Sports For Schools initiative,” <http://www.msoworld.com/schools/tournament.html>
- [48] 青山 裕樹, 大谷 真, 平原 達也, “イヤホン呈示刺激による音像定位,” 日本音響学会講演論文集 (秋) , 2-2-2, pp. 515–516, 2007.
- [49] 楊 洋, 岩屋 幸雄, 鈴木 陽一, “上方水平面で個人化した頭部伝達関数の仮想音像定位精度,” 日本音響学会聴覚研究会資料, vol. 36, no. 7, pp. 593–598, 2006.
- [50] 矢入 聡, 岩谷 幸雄, 鈴木 陽一, “定位感評価に基づく頭部伝達関数個人化における音像軌道面の影響,” 電子情報通信学会, vol. 107, no. 187, pp. 7–11.
- [51] 心理学実験呈示刺激プログラム EXPLAB : <http://psy2.tamacc.chuo-u.ac.jp/students/suto/vb/>

- [52] 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.
- [53] H. Hoshino, S. Kojima, Y. Uchiyama, and T. Hongo, “Evaluation of Effects on Improvement in a Driver’s Reaction by Spatial Warning Sounds,” *IEICE TRANS. INF. & SYST.*, vol. E85-D, no. 11, pp. 1793–1800, 2002.

本研究に関する研究業績

口頭発表

1. Naoki Kuroda, Junfeng Li, Yukio Iwaya, Masashi Unoki, and Masato Akagi, “Effects from spatial cues on detectability of alarm signals in car environments,” *Proc. NCSP’09*, March 2009 (to be appeared).
2. 黒田 直樹, 李 軍鋒, 岩谷 幸雄, 鵜木 祐史, 赤木 正人, “方向性の手掛かりが雑音環境下での報知音の検知能力に及ぼす影響,” 信学技報 (音声研究会), 2009.3 (発表予定).