東北大学博士学位論文

聴覚の内因性空間的注意に関する研究

2019年 3月

寺岡　諒

緒言

近年の情報通信技術の発展に伴い，あたかもその場にいるような感覚をもたらす，高臨場感システムに対する需要が高まっている．例えば，PlayStation VR や Occulus シリーズ等に代表される家庭用頭部搭載型ディスプレイ（head mounted display：HMD）や，Dolby Digital や Dolby Atmos，dts:X 等に代表されるサラウンド音響システムは，バーチャルリアリティ（virtual reality：VR）システムとも呼ばれ，収録（または擬似的に再現）した場を，物理的に忠実に再現することによって高い臨場感を実現している．さらに最近では，「その場」にいる以上に，より大きな感動，より深い理解，より豊かな想像力を喚起する「超臨場感システム」の実現が期待され，研究が進められている．このような超臨場感システムを実現するためには，より忠実な場の再現はもちろん，臨場感の受け手である我々ヒトの知覚の特性をよく理解することも重要である．

人間の知覚体験は，五感（通例では，視覚，聴覚，触覚，嗅覚，味覚を五感と称されているが，本稿では最近の定義に倣い，人間の感じるすべての感覚を五感として扱う）を通じて得られた外界の情報によって形作られている．その際，それらの入力情報が脳内で統合されることで，安定した知覚世界が構成されている．すなわち，五感情報によって，自分を取り巻く外側の世界があることを認識している．以上のことから，高い臨場感を感じさせるシステムの本質は，適切な五感情報を提示することであるといえる（例えば，頭を動かせば世界がその動きに追従して動くなど）．

しかし，外界には無数の信号源が存在しており，五感から得られる情報は，脳がすべてを同時に処理する量をはるかに超えている．この問題に対して我々の脳がとる方略として，「自分の次の行動に必要な情報を優先的に処理する」というものが考えられる．例えば，人混みの中で友人を会話するとき，友人の会話に集中することで，その会話の内容の理解が容易になる．このように，無数に存在する信号の中から何を知覚するかを決定する情報処理を**注意**と呼び，我々は無意識的にこの営みを活用していると考えられる．以上のことから，五感情報を効果的に提示し，高い臨場感を感じさせるシステムを実現するためには，この営みに対する知見は欠かせない．

注意は，19 世紀に Wilhelm Wundt が科学的な心理学を創立して以来，心理学という学問において非常に重要なテーマとして研究が行われてきた．特に，アメリカの哲

学者，心理学者であり，近代心理学の父とも呼ばれる William James は，注意を「外界に存在する多くの刺激の一部のみを処理する過程」，そして「誰でも知っているもの」と定義している．我々は特定の事象や物体に注意を向ける（目を凝らす，耳を傾ける）ことで，その感覚信号によって得られる情報を詳細に分析し，意味内容を把握している．そして，注意を向けた事象や物体のみが，我々の意識的な知覚体験を構成している．当然ながら，この注意情報処理の体系的な理解や脳内での情報処理過程は心理学研究において常に注目の的であり，事実，注意に定義が与えられてから一世紀以上経つ現在においても，新たな現象の発見や多くの注意モデルが提案されている．しかし，これまでの注意研究は視覚が主流であり，聴覚的注意は視覚的注意ほど理解されているとは言えないというのが現状である．

聴覚的な注意が聞こえに及ぼす影響は非常に大きい．例えば，自分がパーティ会場のような騒がしい場所に立っていることを想像してみるとする．周囲には談笑する人だかりがいくつもできていて，それらの人や足音，食器同士が触れ合う音等，様々な音源から発せられた音が混合されて耳に入ってきている．そのような状況下で誰かの会話に耳を傾けると，その会話とそれ以外の音は混合されて耳に入ってくるにも関わらず，聴きたい会話とそれ以外の音とを聞き分けることができ，会話の内容の把握もできる．このような現象（能力）はカクテルパーティ効果（cocktail-party effect）と呼ばれ，その生起に聴覚的注意が大きな役割を果たしていることが知られている．

注意は，対象の持つ様々な属性（手がかり）に対して向けられることが知られている．前述したカクテルパーティ効果の例で考えると，会話の聴こえてくる方向（空間）や，話者の性別（周波数）や話す速度（時間）などがその属性として挙げられる．言い換えれば，注意はこれらの属性に対して選択的に向けることができるといえる．特に，カクテルパーティ効果のように，ガヤガヤした環境下で特定の音を聞き取るような状況においては，方向という属性に対して向けられる注意（空間的注意）が，大きく寄与していることが予想される．しかし，聴覚の空間的注意の情報処理過程やその空間的，時間的な特性（注意の空間的範囲，どれくらい持続させられるか等）は，注意を体系的に理解する上で重要な要素であるにも関わらず，その全容は明らかになっていない．

そこで本研究では，聴覚の空間的注意の特性の解明を目的とする．これまでの研究では，聴覚の空間的注意が知覚に及ぼす影響を検討したものが多く，この効果がどれくらいの空間的な広がりを持ち，どれくらいの時間持続させられるのかについてはよくわかっていない．そこで本研究では，聴覚の空間的注意の時間的，空間的な特性について，心理物理学的な手法を用いて検討する．そしてその知見をもとに，時間的，空間的特性を考慮した聴覚の空間的注意のモデルを検討する．

以上の目的を達成するために，本論文を以下のような構成とする．第 1 章は序論で

ある．ここでは，研究の背景として，複数の音源が存在する環境下での音聴取おいて重要な役割を果たす聴覚的な現象であるカクテルパーティ効果に着目し，その情報処理過程や知覚的・認知的特性に関する研究について概観する．次に，本研究の目的を詳述する．

第2章では，聴覚の空間的注意が競合音存在下での音聴取に及ぼす影響とその空間特性について明らかにする．聴取者の注意を正面に向けた場合，注意を向けない場合に比べてどれほど聴き取りを向上させるかについて，音が聴き取れた割合（例：音声了解度，聴覚いき値）を指標として用い，その効果を定量的に評価する．また，注意を向けた方向からどれだけ離れると，注意の効果による聴き取りの向上が見られなくなるかという観点から，注意の効果がどれくらいの範囲で得られるか（空間特性）について検討する．

第3章では，第2章では得られなかった，正面以外での聴覚の注意の空間特性について明らかにする．聴取者の注意を正面以外の場所へ向けた場合，どのような空間特性が見られるか，そして正面に向けた場合に比べて変化するかについて検討する．

第4章では，第2章および第3章で得られた聴覚の注意効果が，時間経過によって変容しうるかについて明らかにする．具体的には，注意を向けてその効果が現れるまでにどれくらいの時間を要するか，そして，注意を同じ位置にどれくらいの時間向け続けられるか，すなわち聴覚の注意の空間特性について明らかにする．そこで，聴取者の注意を特定の方向へ向けるよう仕向けるための手がかりを提示してから標的音が提示されるまでの時間を操作し，各時間条件での聴取能を計測する．

第5章では，これまでの研究から得られた知見を踏まえ，本論文で仮定する競合音存在下での音情報処理過程のモデルについて考察を行う．

第6章は本論文の結論である．

目 次

緒言 **i**

第 1 章　序論 **1**

1.1　はじめに 1

1.2　カクテルパーティ効果とその生起要因 1

1.2.1　カクテルパーティ効果 [1] 2

1.2.2　空間的な分離による聴取能の向上 4

1.2.3　音響信号の特徴による聴取能の向上 7

1.3　注意による聴取能の向上 9

1.3.1　注意とは何か？ 10

1.3.2　外因性注意と内因性注意 10

1.3.3　内因性注意が聴取に及ぼす影響 12

1.3.4　音事象に対する注意 18

1.4　注意のモデル 19

1.4.1　初期選択モデル 20

1.4.2　後期選択モデル 20

1.4.3　減衰モデル 21

1.5　研究目的 23

第 2 章　聴覚の内因性空間的注意が競合音存在下での標的音聴取に及ぼす影響 **26**

2.1　はじめに 26

2.2　実験 1：競合音声存在下での音声聴取に聴覚の空間的注意が及ぼす影響 27

2.2.1　聴取者 27

2.2.2　実験装置および実験刺激 27

2.2.3　実験手続き 30

2.2.4　実験結果・考察 33

2.3　実験 2：競合雑音存在下での標的雑音聴取に聴覚の空間的注意が及ぼす影響 36

2.3.1　聴取者 36

2.3.2 実験装置および実験刺激 36
2.3.3 実験手続き 36
2.3.4 実験結果・考察 37
2.4 全体考察 39
2.4.1 音声に対する注意効果（実験 1）と NBN に対する注意効果（実験 2）の比較 39
2.4.2 空間的注意効果と音の物理的要因による効果の影響 43
2.4.3 注意の空間特性 45
2.5 まとめ 47

第 3 章 正面以外における内因性注意の空間特性 49
3.1 はじめに 49
3.2 実験 1：前方における聴覚の内因性注意の空間特性の検討 50
3.2.1 聴取者 50
3.2.2 実験装置および実験刺激 50
3.2.3 実験手続き 50
3.2.4 実験結果・考察 51
3.3 実験 2：後方における聴覚の内因性注意の空間特性の検討 60
3.3.1 聴取者 60
3.3.2 実験装置および実験刺激 60
3.3.3 実験手続き 60
3.3.4 実験結果・考察 61
3.4 全体考察 66
3.4.1 聴覚の空間知覚特性と注意の空間特性 66
3.4.2 空間的注意効果の効果範囲 67
3.4.3 後方での注意効果と空間特性 69
3.5 まとめ 70

第 4 章 聴覚の内因性注意の時間特性に関する検討 72
4.1 はじめに 72
4.2 実験 1：聴覚の内因性空間的注意の時間特性の検討 73
4.2.1 聴取者 73
4.2.2 実験装置および実験刺激 73
4.2.3 実験手続き 74
4.2.4 実験結果・考察 75

4.3 実験 2 :手がかり刺激の呈示モダリティの違いが時間特性の及ぼす影響の検討 78
4.3.1 聴取者 78
4.3.2 実験装置および実験刺激 78
4.3.3 実験手続き 79
4.3.4 実験結果・考察 80
4.4 全体考察 84
4.4.1 先行研究との比較 84
4.4.2 予想される注意の時間特性 86
4.4.3 手がかり刺激のモダリティの違いが時間特性に及ぼす影響 . . 87
4.5 まとめ 88

第 5 章 聴覚の内因性空間的注意に関する総合的考察 90
5.1 はじめに 90
5.2 得られた知見のまとめ 90
5.3 想定されるモデル 91
5.3.1 音像の分離＋定位 93
5.3.2 注意による選択的聴取 93
5.4 まとめ 96

第 6 章 結論 97

付 録 A 聴覚の内因性空間的注意が音声聴取に及ぼす影響の予備的検討 101
A.1 はじめに 101
A.2 実験 101
A.2.1 聴取者 101
A.2.2 実験装置および実験刺激 101
A.3 実験結果・考察 102

謝辞 105

参考文献 109

第1章　序論

1.1　はじめに

日常生活においては，常に膨大な事象や物体から生起し動的に変化する音響信号が飛び交う（i.e., 騒がしい）環境下であっても，耳から取得された非常に複雑な音響信号を聴覚系で処理することによって，特定の音だけを聴き取ることができる．このような営みはカクテルパーティ効果（cocktail-party effect [1–3]）と呼ばれ，この営みがどのようにして成し遂げられているのかについて，長年に渡り研究され，議論されてきた．この営みが日常生活における周辺環境の把握や対人コミュニケーションにおいて重要な役割を果たしていることは想像に難くない．

こういった営みの本質は，様々な手がかりを用いて標的音を競合音の中から抽出することにある．これまでの研究では，標的音と競合音の空間的な分離，音の高さ，音色，音の大きさ等の物理的特徴，そして聴取者が標的音に対して向ける注意が標的音の抽出に影響していることが知られている（総説として [1, 4–6]）．以上のことから，カクテルパーティ効果の生起には低次から高次まで様々なレベルの情報処理が影響していることが考えられる．

これまでの研究によって，上述したような要因によってカクテルパーティ効果が生起していることが示されてきたが，これらの情報処理がそれぞれどのような役割をすることによってこの営みを実現しているのか，その体系的な理解には至っていない．

以上のことを踏まえ，本章では研究の目的を明確にするために，第 1.2 節ではカクテルパーティ効果とその生起要因について，特に音響信号の物理特徴による音像分離プロセスに焦点を当てて概観する．第 1.3 節では，同じくその生起要因について，注意による選択的聴取プロセスに焦点を当てて概観する．第 1.5 節では，これまでの研究を概観した結果に基づいて，本研究の目的を明らかにする．

1.2　カクテルパーティ効果とその生起要因

日常生活のような，複数の音源から同時に音が呈示される状況下であっても，カクテルパーティ効果によって特定の音を容易に聴取できている．本節では，この現象に着目し，どのような要因が聴き取りを向上させるのかについて概観する．

1.2.1　カクテルパーティ効果 [1]

> “how do we recognize what one person is saying when others are speaking at the same time (the ”cocktail party problem”) ?.”
> (Edward Collin Cherry [1], pp.975–976)

カクテルパーティ効果の定義

1953 年に Cherry [1] は,「我々はどうやって，複数の会話が飛び交う中で特定の一人の会話を聴き取ることができるのか？」という疑問に対して，カクテルパーティ問題（cocktail-party problem）と名付けた．以降，この問題について，聴覚心理学はもちろん，情報科学など様々な観点から検討がなされてきた．現在では，我々が無意識的に行うこのような営みをカクテルパーティ効果（cocktail-party effect）と呼び，その定義は以下の 2 種類に大別される．

- 複数の音声が飛び交う環境下であっても，聴きたい音を聴くことができる現象 [1]
- 自分の名前や聴き馴染みのある単語が聴こえると，聴いていなくても自然と聴き取れてしまう現象 [7, 8]

1 つ目は，複数の会話が飛び交うような環境下において，所望の音（聞きたい音）に耳を傾けることでその音の聞き取りが容易になる現象である．これは，1953 年に Cherry [1] が行った，両耳分離聴課題を用いた実験的な検討によって明らかになった．実験では，聴取者の両耳に，別々の音声によって発声される別々のメッセージを提示し，一方の耳へ入力されたメッセージ（注意を向けたメッセージ）を追唱するよう求めた．その結果，意識を向けたメッセージの追唱は容易であったが，他方の耳に入力された内容について後に訊ねられても聴取者はほとんど答えることができなかった．これは，競合音下であっても特定の音に対して注意を向けることで，聴取能が向上することを示している．

2 つ目は，同じく複数の会話が飛び交うような環境下において，自分の名前などの聴き馴染みのある単語が聞こえたとき，全く意識していなくてもその単語が聴き取れてしまう現象である．これは，1959 年に Moray [7] が行った，同様に両耳分離聴課題を用いた実験的な検討によって明らかになった．Cherry [1] は，片耳から聞こえてくるメッセージに耳を傾けると，もう片方から聴こえてくるメッセージの内容を聴くことができないということを示した．一方で，もう片方の耳から聴こえてくるメッセージの話者の性別などが変化した場合は，その変化に気付けることも示した．Moray [7]

は，この現象がどのような特性によって引き起こされているのかを明らかにするために，意識を向けていない方の耳から，日常生活において重要な音が聴こえてきたときの効果について検討した．実験では，Cherry が行った実験と同様，聴取者の両耳に別々のメッセージを提示し，一方の耳へ入力されたメッセージを追唱するよう求めた．このとき，もう一方の耳に，被験者の名前や数字等が出現するよう実験を統制し，その単語が聴き取れるかどうかを検証した．その結果，意識を向けたメッセージの追唱が簡単であったのはもちろん，もう片方の耳に被験者の名前が提示された場合のみ，意識を向けていなくても聴き取れた．この結果は，自分の名前のような重要な音声は，意識を向けていなくても聴き取れることを示している．本論文では，特に 1 番目に定義される現象に着目し，以降出現する「カクテルパーティ効果」は 1 番目の定義を意味するものとする．

このカクテルパーティ効果が生じると考えられる状況（カクテルパーティ環境：cocktail-party situation）に関しては，その定義は研究によって異なる．カクテルパーティ効果という名前を初めて名付けた Pollack & Pickett [9] は，競合音声が存在する環境下で特定の方向から到来する音声を選択的に聴取する際に，カクテルパーティ効果が生じると示唆している．さらに，Lewald et al. [10] による最近の研究では，日常生活でも経験するような，競合音が複数存在し，加えて背景雑音や反響音が存在する環境がカクテルパーティ環境であると定義している．以上の知見を考慮すると，競合音が存在する環境下で特定の音，とりわけ音声を認知するという状況を，カクテルパーティ環境と考えるのが妥当である．また，日常生活では様々な方向から到来する音声の中から特定の音声を聴取することが予想されるため，比較的狭い範囲で生じる音を選択的に聴取することが考えられる．以上のことから，本論文では「競合音が狭い範囲に複数存在する聴取環境下で，特定の音声を認知する課題を行う」状況をカクテルパーティ環境であると定義する．

カクテルパーティ効果の生起要因

このカクテルパーティ効果の生起要因は複数考えられる．これまでこの効果の生起要因に関する研究は数多く行われてきたが，1958 年当時 Cherry が挙げた以下の 5 つの要因は，現在でも重要であると考えられている（ [1]，総説として [6]）．

- 話者の方向情報
- 話者の体や唇の動きなどの視覚情報
- 話者の声質や話速，ピッチ，性別などの情報
- 会話のアクセント情報

- 文章の遷移確率

以上のような要因を手がかりとして用いることで，標的となる音を抽出することができていることが考えられる．この5要因は大きく分けて，**空間的な手がかり**，**音の特徴手がかり**，そして**異種感覚的手がかり**に大別される．これらの手がかりを用い，混合された音響信号を，標的となる音源から発せられた音とそれ以外の音を分離していることが考えられる．

本研究では，特に聴覚的な手がかりである**空間的な手がかり**，および**音の特徴手がかり**に着目し，次節以降は，これらの手がかりが競合音下での聴取能に及ぼす影響について概観する．

1.2.2 空間的な分離による聴取能の向上

特定の音を聴く際，雑音源が標的音の音源から十分に離れている場合，近くにある場合に比べて聴き取りが容易になることは想像に難くない．心理音響学の分野では，競合音の存在によって標的音が検出しにくくなることをマスキング（masking），標的音と競合音との空間的な分離により聴き取りが向上する現象を方向性マスキング解除（spatial release from masking; SRM）と呼び，古くから検討がなされてきた（総説として [11]）．

我々の聴覚系は，2つの耳に提示された音響信号の到達時間差（ITD：interaural time difference）や強度差（ILD：interaural level difference），位相差（IPD：interaural phase difference）等の物理的な差異を測ることで，音像の位置を定位している．このとき，図1.1のAのように，1つの標的と1つの雑音が同位置に存在する場合，両耳間での物理的な差は2つの音の間で生じないのに対し，図1.1のBのように標的と雑音が90° 離れて呈示される場合は，左耳に入る雑音の音響信号は頭部による反射や回折等によって減衰するため，両耳間で信号対雑音比（SNR：signal-to-noise ratio）に違いが現れる．このような効果を良聴耳効果（better-ear advantage [12]）と呼び，騒音下での聴き取りに影響を及ぼしている（SRMの効果を増大させる）ことが知られている．

また，両耳に入力された音の位相差が手がかりとなって，SRMの効果が増大することもある．標的音（Target）と妨害音（Masker）が同一の位相を持つ場合，どちらの音像も頭内の中央に定位する．一方で標的音と妨害音が異なる位相を持つ場合（特に逆位相の場合），音像はそれぞれ頭内の異なる位置に定位する．この2条件を比較すると，前者の場合に比べて後者の場合の方が2つの音を区別しやすくなり，結果的に標的音の聴き取りが容易になる（SRMの効果が増大する）．このような両条件の

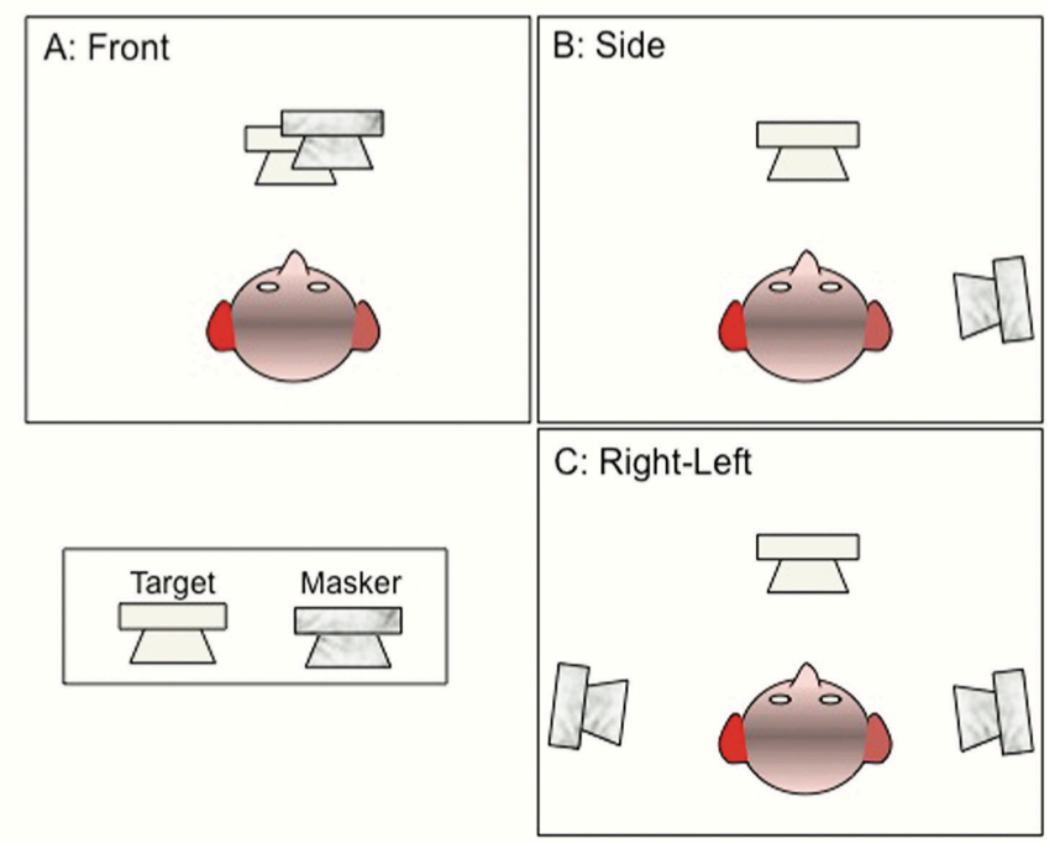


図 1.1: 方向性マスキング解除の模式図（Litovsky [11] より引用）．標的音と競合音をそれぞれ白と灰のスピーカの図で示す．聴取者は正面を向き，標的刺激が常に正面から呈示される．A: 1 つの競合音が標的音と同じ位置から呈示される条件，B: 1 つの競合音が標的音の 90° 右の位置から呈示される条件，C: 1 つの競合音が標的音の 90° 右の位置から，もう 1 つの競合音が 90° 左の位置からそれぞれ呈示される条件．

効果の差を両耳マスキングレベル差（BMLD：binaural masking level difference）と呼ぶ．以上のような要因が組み合わさることによって，SRM の効果量が決定される．

この SRM が聴取能に及ぼす影響に関しては，過去様々な研究が行われ，知見が蓄積されている．Ebata et al. [13] は，標的音と雑音の空間的な分離が聴き取りに及ぼす影響について実験的な検討を行っている．実験では，1 kHz 純音を標的音として 0°，10°，20°，30°，45°，60°，90°，135° の角度からランダムに，標的音と同様の中心周波数を持つ狭帯域雑音を雑音として常に正面（0°）から提示した．このとき被験者は，標的音が聴こえたか否かを回答し，標的音が聴き取れた割合が 50%となるときの標的音の音圧レベル，すなわち最小可聴いき値を指標として採用した．実験の結果を図 1.2 に示す．図は標的と雑音との空間的な分離と，標的音の雑音の BMLD，そして雑音の音圧レベルとの関係性を示したものである．雑音を正面から，標的音を様々な角度から提示した場合，標的音が呈示される方向が 0° から離れるに従って BMLD が向

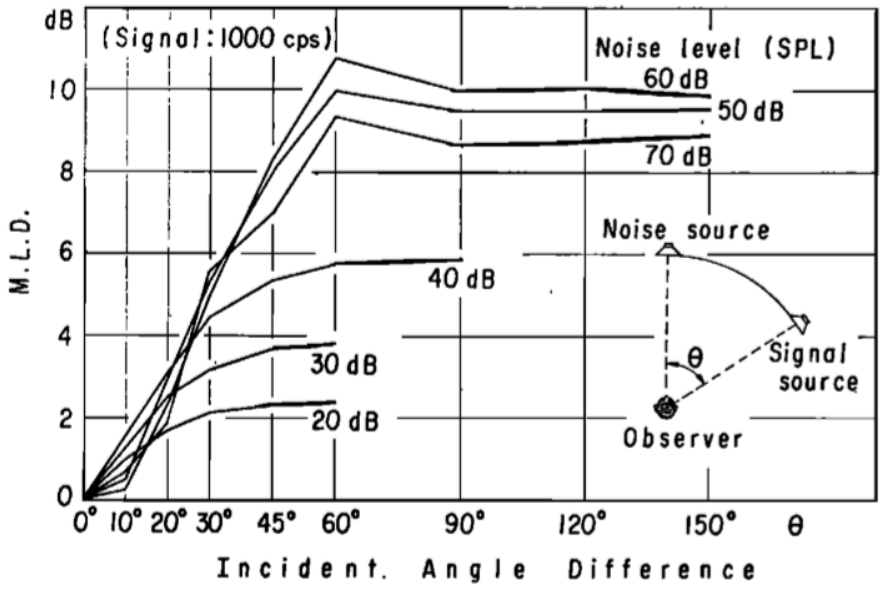


図 1.2: Ebata et al. [13] による実験の結果（Ebata et al. [13] より引用）．縦軸は BMLD の結果，横軸は標的音と競合音との分離角度を示す．各線はそれぞれ雑音の音圧レベルに応じた標的音の最小可聴いき値の結果を示す．

上（= 最小可聴いき値が減少）し，30°〜60° に達すると BMLD が最大（= 最小可聴いき値が最低）となりその後一定になることを示した．これは，標的音と雑音が空間的に分離するに従って SRM の効果が徐々に向上し，30°〜60° でその効果が最大になることを示している．

Saberi et al. [14] は，360° 全方位での SRM の効果について検討している．実験では，標的音を 360° 様々な方向から，雑音を 0°（360°：正面），または 180°（後方）から提示し，その際の聴覚いき値を計測した．実験の結果を図 1.3 に示す．その結果，聴覚いき値の分布は雑音を正面または後方どちらから提示しても変化しないことを示した．

また，Plomp & Mimpen [15] は，標的音として音声，雑音として白色雑音を採用し，より日常に近い聴取環境下での SRM の効果について検討した．実験では，標的音声を 0° から，雑音を 0°，45°，90°，135°，180° からランダムに選択されて呈示された．このとき被験者は標的音声が聴こえたか否かを回答し，標的音声の最小可聴いき値を計測することで，SRM の効果を検討した．実験の結果を図 1.4 に示す．SRM の効果は，これまでの研究で示唆されていたものと同様，標的音声と雑音が離れるに従って徐々に向上し，90° 程度離れた時点でその効果が最大となることが示された．音声に対する SRM の効果についても，その空間的な分布が様々な研究で示されている（ [15–17]，総説として [4]）．

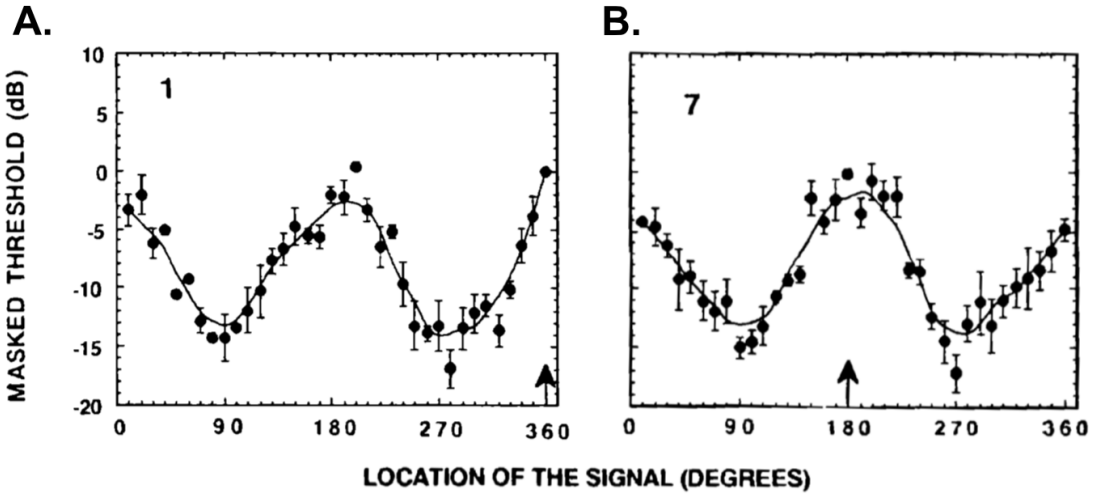


図 1.3: Saberi et al. [14] による実験の結果（Saberi et al. [14] より一部改変し引用）．A. 雑音を 0°（矢印の位置）から，標的音を聴取者の周囲から提示した際の聴覚いき値の分布，B. 雑音を 180°（矢印の位置）から，標的音を聴取者の周囲から提示した際の聴覚いき値の分布をそれぞれ示す．縦軸は聴覚いき値，横軸は標的音の提示位置を示している．

さらに，Grange et al. [16] は，頭の向きと SRM の効果の関係性について検討を行った．実験では，1 つの標的音（音声）と 1 つの競合音（speech-shaped noise）が同時に提示され，ダミーヘッドの両耳に設置されたマイクロフォンを介して聴取者の耳に提示された．標的音は，0° から必ず提示され（T_0），競合音は 180°（M_{180}），150°（M_{150}），112.5°（$M_{112.5}$），または 97.5°（$M_{97.5}$）の中からランダムに決定され提示された．このとき被験者は，音声が何を言っていたかを回答し，その結果から標的音声の最小可聴いき値を計測することで，SRM の効果を検討した．加えて，ダミーヘッドの正面方向を 8 方向の中からランダムに決定し，頭の向きと SRM との関係性についても検討を行った．実験の結果を図 1.5 に示す．SRM の効果（eTIR : effective target-to-interferer ratio）は，先行研究 [**?**, 15, 17] と一致して，競合音から離れるごとに上昇し，60° 離れるとその効果が最も大きくなることを示している．また，頭の向いている方向（図 1.5 の矢印の位置）において SRM の改善が認められた．以上の結果は，頭の向きが SRM の効果に影響を及ぼすことを示している．

1.2.3　音響信号の特徴による聴取能の向上

日常生活では，複数の事象から生じた音響信号によって，聴覚的な「情景」（auditory scene）が構成される [18]．そして，これらの事象から発せられた音響信号は，耳に届いた段階で全ての信号が混合された 1 つの波形になる．このとき，前述したように

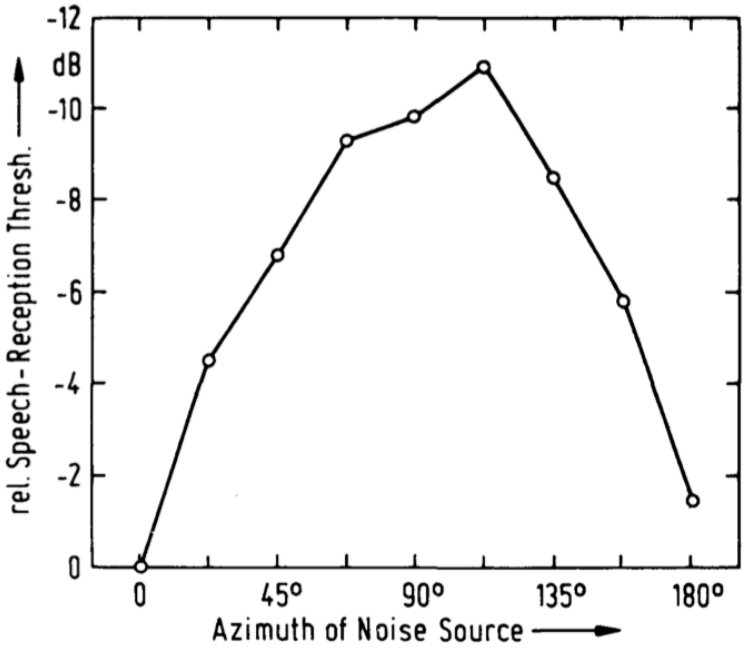


図 1.4: Plomp & Mimpen [15] による実験の結果（Plomp & Mimpen [15] より引用）．縦軸は標的音声の最小可聴いき値，横軸は標的音と雑音の空間的な分離角度を示している．

音源が空間的に分離しているような状況でなくとも，音の特徴（例：高さ，音色）を用いることで，同一の事象から生じた音を一つのまとまりとして知覚することができる．以上のような，同一の事象に由来する音のまとまりを音脈（sound stream）と呼び，このような情報処理過程を聴覚情景分析（ASA：auditory scene analysis，総説として [19]）と呼ぶ．

Bregman [19] は，複数の音が存在する環境下で特定の音を聴取する際に，どのような音響信号の特徴が音脈の形成に寄与するかついて総説している．聴覚情景分析で行われる音脈の形成は，日常の環境中に存在する音の規則性を反映していることが考えられる．例えば，多くの振動する物体（例：声帯）は，基本波とその整数倍の成分（高調波）からなる複数の周波数成分の組を発生する．一般的に，複数の音は同じ基本周波数・倍音構造を持たないため，このような要因を手がかりとして音脈が形成される．また，自然界では生じ得ない，ピッチやスペクトルの急激な変化や複数の音が同様の変化をするなどといった要因も手がかりとして用いられていることが知られている．このように，同一の音源から発せられた信号同士が音脈としてまとめられることで，音脈同士が分離され，特定の音源から発せられた音が聴き取りやすくなることが考えられる．

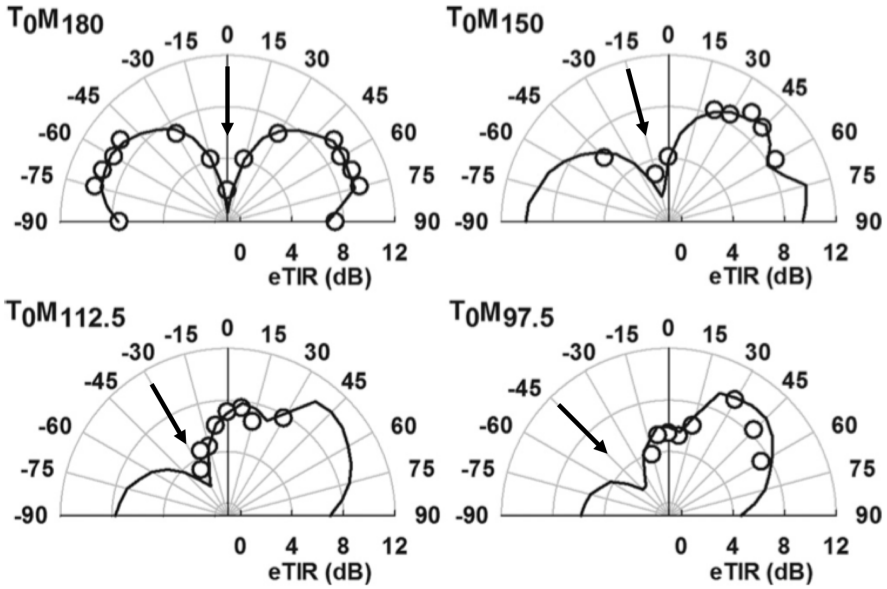


図 1.5: Grange et al. [16] による実験の結果（Grange et al. [16] より一部改変し引用）．標的音は常に 0° から，競合音は 180°，115°，112.5°，または 97.5°，から提示された（T_0M_{180}，T_0M_{150}，$T_0M_{112.5}$，$T_0M_{97.5}$）．軸は SRN の効果量（eTIR：effective target-to-interferer ratio），矢印は頭の方向を示す．

1.3　注意による聴取能の向上

これまで概観してきた SRM や ASA などによる聴き取りの向上は，物理的な手がかりを用いた混合音の音事象ごとの分離（1.2.1 節，SRM）や，各音事象をある属性にしたがって群化（1.2.2 節，ASA）をすることで達成している．これに加え，以上のような営みで音事象ごとに分離しまとめられた音の中から目下必要なものだけを重点的に処理する，注意が及ぼす影響も重要である．注意は，分離された音に対して向けることで，特定の音事象から発せられた音を知覚的に強調する情報処理であることから，SRM や ASA などの音事象の分離がなされたものに対して行われるものであると考えられる．Cherry [1] も，標的音に対して向けられる注意の重要性について言及しており，カクテルパーティ効果と注意の関係性に関する研究は古くから行われており，その生起要因の一つであることが示唆されている．

本節では，競合音下で注意が聴取能に及ぼす影響について概観する前に，注意という概念について，そしてその種類について概観する．そして，以上のことを踏まえ，注意が聴取能に及ぼすに影響について概観する．

1.3.1　注意とは何か？

> ”Everyone know what attention is. It is the taking possesion by the mind, in clear and vivid form, of one out of what seem several simultaneously possible objects or trains of thought. Focalization, concentration, of consciousness are of its essence.”
> (William James [20], p.403)

注意（attention）とは「外界に存在する膨大な信号の中から，所望の情報を選択的に処理する内的過程」である．周囲の環境は数多くの信号源から生じた無数の物理的な信号から構成されており，脳が一度に処理できる量をはるかに超えている．そこで我々の脳は，その時点で必要な情報のみを濾し取ることで，効率の良い周辺環境の把握を実現している．逆に言えば，注意機能が正常に働かなくなると，情報の取捨選択が上手くいかなくなり，日常生活に支障をきたすようになる（例：注意欠陥多動性障害（ADHD：attention deficit hyperactivity disorder），聴覚情報処理障害（APD：auditory processing disorder））．

James [20] の言葉のとおり，この営みは日常的な行為であり，それに関わる情報処理が脳内で行われていることは疑いようがない．この営みが行動選択，判断，思考等のヒトの活動に及ぼす影響，及びその情報処理過程ついては，長年に渡り議論がなされ，現在も心理学分野等において重要かつ全容が明らかではない研究テーマの 1 つである．

1.3.2　外因性注意と内因性注意

注意は大きく分けて，2 種類の方式で向けられる [21]：外因性注意（exogenous attention），そして内因性注意（endogenous attention）である．

外因性注意とは，意図に関わらず，フラッシュや均質な背景に 1 つだけ他とは大きく異なる要素がある場合のように，顕著な刺激に強制的に注意が向けられてしまう注意のことを指す．例えば，視界の端で強いフラッシュが生じたとき，あるいは J-ALERT 等の警報やガラスが割れる音などが聴こえたとき，自らの意図とは関係なくその刺激の方向に対して注意が向いてしまう．この方式の注意を刺激駆動的（stimulus-driven），あるいはボトムアップ的（bottom-up）注意制御と呼ぶこともある．一方で内因性注意とは，我々が自分の意志によって意図的に制御する注意のことを指す．例えば，無数に並ぶ「困」の中から「因」を見つけるとき，あるいは聞こえてくる音の中から特定の音を聴き取るとき，特定の文字や音に注意を向けることで，容易に所望の刺激を見つけ出すことができる．“Focus of attention” の意味で用いられる注意はこのことを

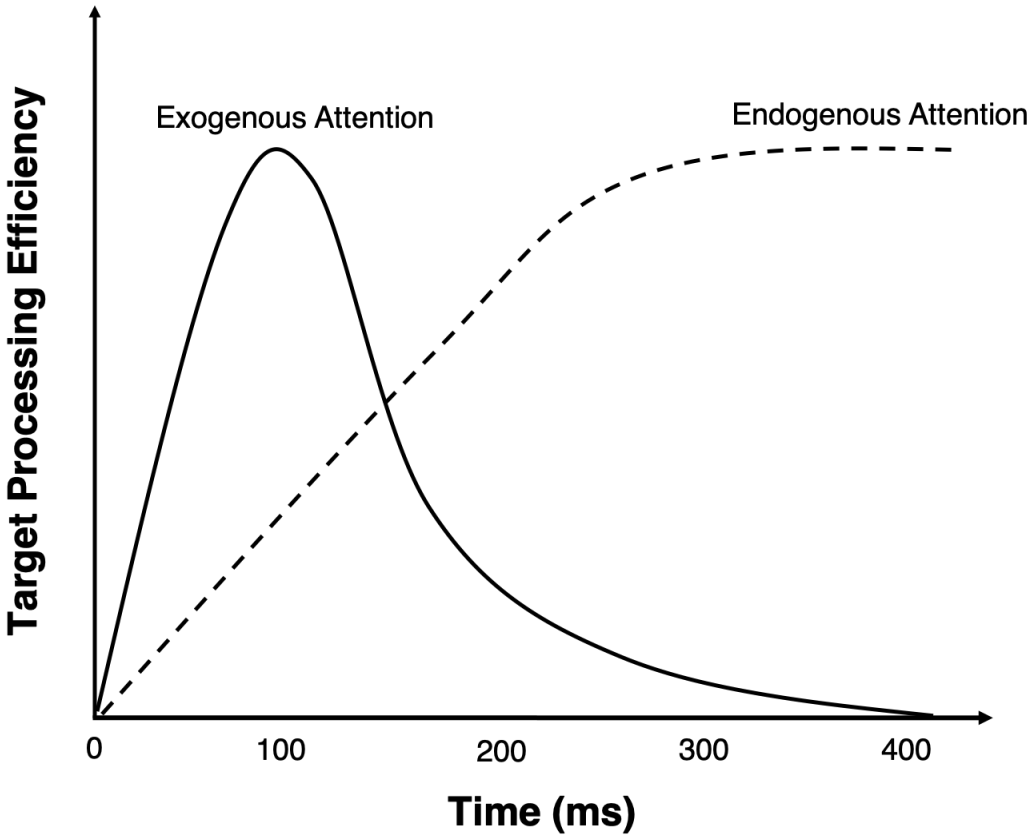


図 1.6: 外因性注意と内因性注意の時間特性（Ward [22] をもとに作成）

指し，この方式の注意を目的志向的（goal-directed），トップダウン的（top-down），あるいは選択的（selective）注意制御と呼ぶこともある．

外因性注意と内因性注意は，いくつかの点で性質が大きく異なる．最も大きな違いとして，その時間特性が挙げられる [22]．図 1.6 にもあるように，外因性注意は注意を誘引する刺激（手がかり）が出てからすぐに効果が現れ始め，100〜150 ms でその効果が最大となり，その後急激に効果が消失する．一方内因性注意は，手がかりによる注意効果が出始めるまでに 300 ms ほどかかり，その後 1 s 程度その効果が持続することが知られている．この時間特性の非対称性は，ヒトが危険をいち早く察知して回避するために注意機能を進化させてきた結果であることが考えられる．

カクテルパーティ効果は前述したように，競合音が狭い範囲に複数存在する環境下であっても，所望の音が聴き取れる現象である．よって，特に内因性注意がこの現象において重要な役割を果たすことが予想される．そこで本研究では，特に内因性注意に着目し，以降出現する「注意」は内因性注意を意味するものとする．

表 1.1: 聴覚の内因性注意が各知覚的属性に及ぼす影響とその効果範囲に関する主な知見と不明点

	知覚・認知に及ぼす影響	注意効果が及ぶ範囲
周波数に対する注意	標的音の周波数に注意を向けた場合，その周波数から100〜200 Hz 離れると標的音の検出率がチャンスレベル（50%）まで低下する [23, 24]	注意を向けた周波数を中心とした周波数帯域に対して注意窓が生成される
タイミングに対する注意	特定のタイミングに注意を向けた場合，そのタイミングから約 200 ms 離れると標的音の検出率が 60%程度まで低下する [25, 26]	注意を向けた時間（タイミング）を中心とした時間的注意窓が生成される
空間に対する注意	ほとんど影響を及ぼさない（数 ms の反応時間の減少 [27]，1〜2 dB の最小可聴いき値の低下 [13]） **特定の状況下においては**，特定の方向へ注意を向けると，その方向から到来する音の聴取精度や反応時間が促進される（注意を向けた方向から 6° 離れると，反応時間が約 200 ms 減少 [28,29]，10%程度の標的音に対する正答率の向上 [29]）	概形は状況によって異なる（第 3 章で検討）

1.3.3 内因性注意が聴取に及ぼす影響

内因性注意は，主に周波数，タイミング，そして空間（方向）という属性に対して選択的に向けることができる．これらの属性に対して向けられた注意が知覚・認知に及ぼす影響とその効果範囲について表 1.1 に示す．本説では，この表を踏まえて，前述したカクテルパーティ環境下という観点から，内因性注意が聴取に及ぼす影響について概観する．

周波数（刺激の特徴）に対する注意

周波数への注意は，聴覚的注意の中で最もよく研究された分野である．両耳分離聴実験が行われた 1950 年代から，信号検出理論の枠組みで研究が進められてきた．そして 1960 年代になって，Greenberg & Larkin [23] が，聴覚の内因性注意を定量的に計測する手法として Probe-signal 法を提案した．この方法では，特定の標的音 (Primary 音) を全試行のうちの大多数で呈示し，残りの少数の試行でそれとは異なる標的音 (Probe 音) を呈示する方法である．これにより Primary 音に対する注意を促し，Probe 音との検出閾値や検出に要する反応時間の差を比較することで，注意の効果を明らかにすることができる．

Greenberg & Larkin [23] はこの手法を用い，聴覚の内因性注意が純音検出を促進しうるかについて検討を行った．実験では，Primary 音として 1000 あるいは 1100 Hz の純音を，Probe 音としてそれ以外の周波数を持つ純音を 700 Hz から 1300 Hz の中からランダムに選択した．これらの音刺激を，Primary 音は全試行中の 75%の確率で，Probe 音は残りの 25%の確率で呈示することで，Primary 音に対して注意による促進効果が得られることを予想した．実験の結果，Primary 音の検出率は 75〜90%と最も高く，Probe 音の検出率は Primary 音に周波数が近いほど高く，Primary 音から 100〜200 Hz 離れると検出率は 50%まで低下した．日本でもほぼ同時期に，Ebata et al. [13] が同様の手法を用い，聴覚的注意を特定の純音に向けるよう仕向けたとき，その純音に対する促進効果が得られるかについての検討を行い，5〜7 dB もの注意を向けた純音に対する弁別いき値の低下を示した．以上の結果から，聴取者の注意を特定の純音（Primary 音）に向けるよう仕向けた場合，その純音の周波数を中心とした周波数帯域に注意が誘導されることが明らかになった．この効果を，あたかも注意が向けられている周波数帯域に帯域通過フィルタがかけられているように見えることから，注意フィルタ（attention filter）と呼び，注意フィルタが向けられている帯域を注意帯域（attention band）と呼ぶ [24, 30–32]．ちなみに，蝸牛内の基底膜での周波数選択性を表現した聴覚フィルタの興奮パターンと，注意を向けた周波数を中心とした注意帯域が一致することが報告されている [24]．これは，聴覚系末梢（例：蝸牛）での情報処理が注意に影響を及ぼしていることを示唆している．

ここまでの知見は，実験室的な状況（単純な音刺激がただ 1 つ提示される状況下における注意効果）に関するものであるが，カクテルパーティ環境のような複雑な聴取環境においても周波数に対する注意が重要な役割を果たしていることが知られている [33]．複数の音事象が入り交じる（まさにカクテルパーティ環境的な）状況において，ピッチ等の音の物理的な特徴が，音事象（音脈）の分離において重要な手がかりであることは前述のとおりである（1.2.3 節参照）．Darwin & Hukin [33] は，標的音

と競合音のピッチ手がかりが聴き取りに及ぼす影響について検討した．実験では，異なる 2 種類の文章がヘッドフォンからモノラルで提示された．このとき，2 種類の文章を話す F0 が同一の音声について，片方の音声のピッチ（声道の長さ）のみ変化させ，音声のピッチ手がかりの影響を検討した．聴取者は，2 つの文章のうちどちらか一方の文章に注意を向け，その文章に含まれる単語について回答し，その正答率から注意効果を検討した．その結果，2 種類の音声のピッチが十分に異なる場合，注意を向けた音声に対する聴き取りが有意に高くなることを示した．この結果は，カクテルパーティ環境のような複雑な聴取環境においても，周波数に対する注意が聴取に影響を及ぼすことを示唆している．

タイミングに対する注意

我々は特定のタイミングで出現する音に対して，そのタイミングの規則性を把握し，次の音の出現に備えることができる．それをタイミングに対する注意と捉え，数は非常に少ないが，その注意効果についても検討がなされている．

Wright & Fitzgerald [25] は，標的音が提示されるタイミングに向けた注意の効果について検討を行った．実験では，まず事前刺激によって標的音の提示予告を行い，その後，0，25，50，100，200，400 ms のいずれかのタイミングで標的音である 1000 Hz の純音を呈示した．聴取者には事前刺激呈示後のいずれかのタイミングに注意を向けるよう求め，全試行の 60% で注意を向けさせたタイミングで標的音を呈示し，残りの 40% の試行で注意を向けていないタイミングで標的音を呈示した．実験の結果，標的音の呈示されるタイミングが注意を向けたタイミングから離れるほど，標的音の検出率は低下し，注意を向けたタイミングより 150–375 ms 以上前と，100–200 ms 以上後に呈示された標的音をほとんど検出できないことを示した．以上の結果は，注意を向けたタイミングを中心とした時間的な注意窓が形成されることを示唆している．

また最近では，カクテルパーティ環境下におけるタイミングに対する注意効果についても検討が行われている．藤村ら [26] は，空間に対する注意とタイミングに対する注意効果を比較し，どちらの効果がより聴き取りに影響を及ぼしうるかについて検討を行った．実験では，事前刺激が提示されてから同じタイミングで標的刺激を提示することでタイミングの手がかりを，事前刺激と同じ方向から標的刺激を提示することで空間的な手がかりを付与した．加えて，何も手がかりを付与しない条件も行い，比較する基準とした．聴取者には，事前刺激が提示された後に提示される標的刺激（音声）が話していた単語を回答するよう求め，単語が聴き取れた割合（単語了解度）を指標として用いた．実験の結果，空間的な手がかりを付与された場合，何も付与されない条件と比べて，10%程度単語了解度が向上したが，タイミングに対す

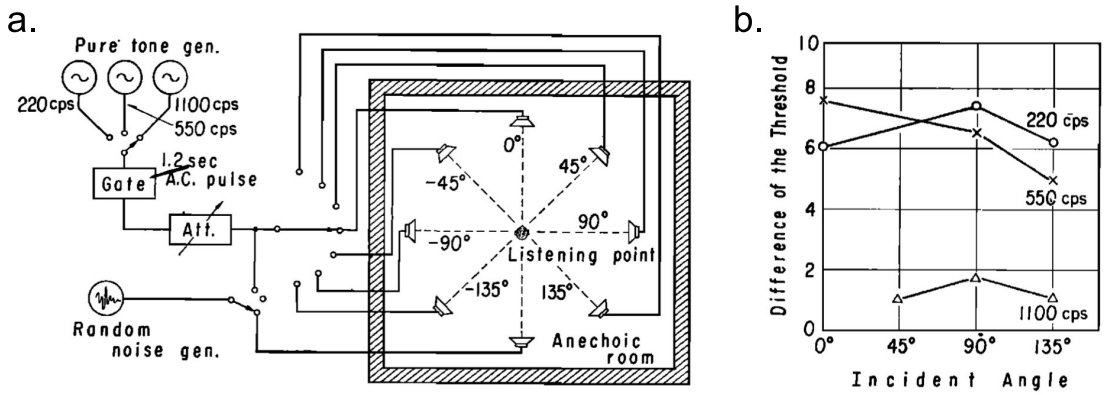


図 1.7: Ebata et al. [13] の実験環境と実験結果（Ebata et al. [13] から一部改変し引用）．a. 実験環境の概観図，b. 実験結果．

る手がかりが付与されても，何も付与されない条件と比べて 5%ほどしか了解度は向上せず，その変化も有意ではなかったことが示された．以上の結果では，Wright & Fitzgerald [25] の研究で得られた頑健なタイミングに対する注意効果が見られなかったことから，カクテルパーティ環境下においてはタイミングに対する注意は聴き取りに影響を及ぼさないことを示唆している．

空間的な位置に対する注意

これまで概観してきた周波数に対する注意に関する知見に比べると，聴覚の空間的注意に関する知見は，その重要性に反して驚くほどに少ない．Ebata et al. [13] は，前述した Probe-signal 法と同様の手段を用い，聴覚の空間的注意が純音の検出いき値を向上させうるかについて実験的な検討を行った．実験では，図 1.7-a のようなスピーカアレイを用い，標的音は 90%の確率で 0° から，残りの 10%はそれ以外の 45°，90°，135° から呈示された．これにより，Probe-signal 法と同様に，0° に空間的注意が向くことによって，0° から呈示される標的音の検出いき値が他に比べて低くなることが予想された．実験の結果，0° に対するいき値はそれ以外の角度に対するものに比べて，わずか 1 dB 程度しかいき値が低下しないことを示した（図 1.7-b，1100 cps の結果参照）．その後，他の指標（例：正答率，反応時間）を用いて行われた，Spence & Driver [27]，Quinlan & Bailey [34] らの研究においても同様の知見が得られ，聴覚の空間的注意効果が聴覚に及ぼす影響は非常に小さい [27, 34]（または影響を及ぼさない [24]）と結論付けられてきた．これらの研究は，実験室的な状況（単純な音刺激がただ 1 つ提示される状況下における注意効果）で標的音の弁別を行うというものであった．加えて，その音刺激が提示される方向は 45° おきであり，本論文で定義したカクテルパーティ環境と照らし合わせると，間隔が広すぎる．以上のことは，本論文

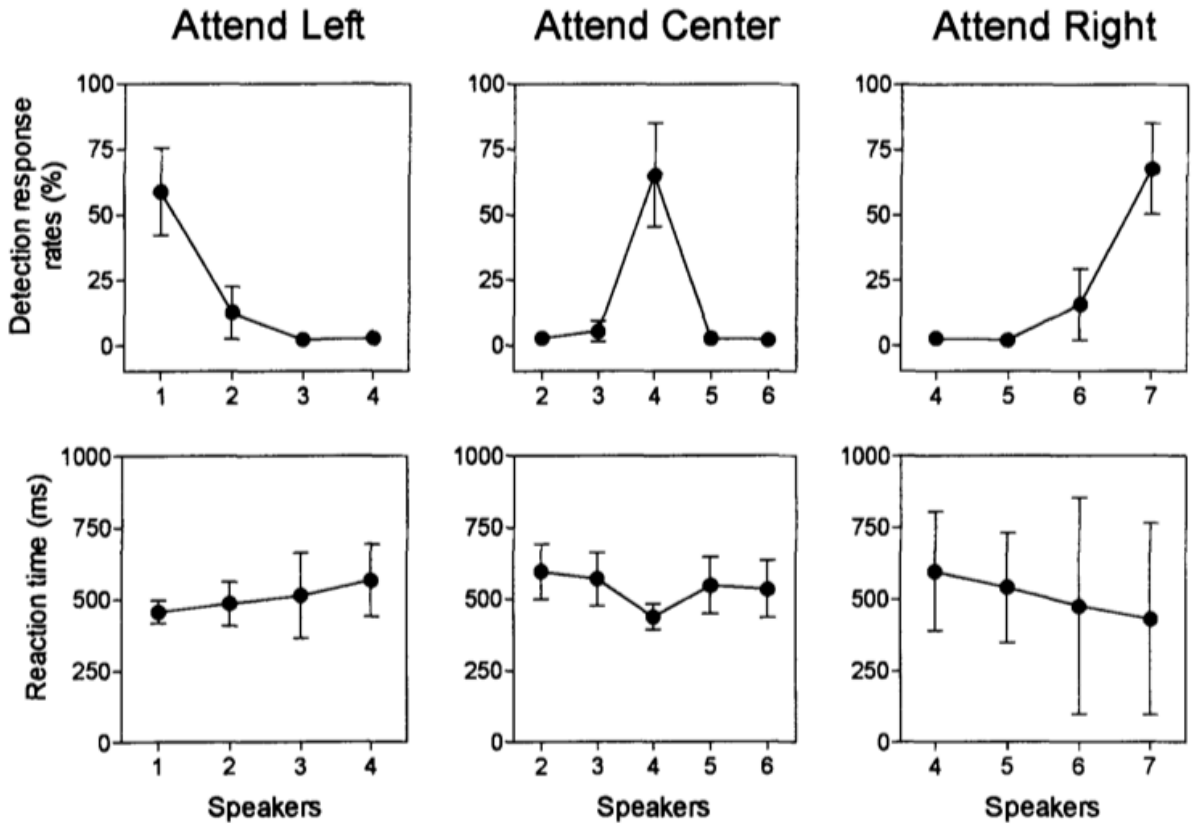


図 1.8: Teder-Sälejärvi & Hillyard [28] の実験結果（Teder-Sälejärvi & Hillyard [28] より引用）．上段は標的刺激に対する反応率，下段はその反応時間を示す．Attend Left，Attend Left，Attend Left はそれぞれ，−27°，0°，+27° に対する注意条件を示す．

で扱う聴取環境を適切に模擬したとは言えないため，実際のカクテルパーティ環境での聴取を必ずしも説明しているとはいえない．

一方で，聴覚の空間的注意効果が聴き取りに大きな影響を及ぼすことを示した研究も存在する [28, 35, 36]．Teder-Sälejärvi & Hillyard [28] は，Ebata et al. [13] とは別の方法で，聴覚の空間的注意が標的音の検出に及ぼす影響を検討した．実験では，周波数帯域の異なる 82 ms のピンクノイズ（標準刺激 : 500–5000 Hz，標的刺激 : 500–15000 Hz）が，被験者の正面方向に設置された 8 つのラウドスピーカ（0°，±9°，±18°，±27°）から提示された．刺激は，1 試行中に 1000 個，連続的に様々な方向からランダムに提示され，標準刺激は試行中の 90%の確率で，標的刺激は残りの 10%の確率で提示された．刺激間間隔（ISI : inter-stimulus interval）8 ms から 188 ms の間でランダムに設定された．各試行で注意を向けるよう求める方向（−27°，0°，または +27°）を事前教示し，被験者には，正面を向いた状態で，注意方向から標的音が聴こえてきた場合のみ，手元のボタンを素早く押下するよう求めた．実験の結果を 1.8 に示す．上段が標的音に対する反応率を示し，下段はそれに対する反応時間を示

す．反応率は各注意角度において最も高くなり，それからわずか 8° 離れるだけで反応率は大幅に低下することを示し，反応時間も注意角度において最も短くなることを示した．以上の結果は，前述した Ebata et al. [13] 等の結果に反し，聴覚の空間的注意を向けることで特定の方向から聴こえてくる音に対する反応を促進させることを示している．また，Röder et al. [36] や Teder-Sälejärvi et al. [35] らの研究でも，以上の結果を支持する結果が得られている．これらの研究は，標的音が 6° 間隔という狭い状況を考慮していることから，カクテルパーティ環境での聴取の結果を説明できるといえる．しかし，周波数帯域の広さが異なる帯域制限雑音に対する弁別課題を行っている（音声の聴き取り課題でない）点や，連続的に標的音が様々な方向から提示されるが，音刺激が同時提示されることがないという点については，カクテルパーティ環境での聴取の様相を反映しているとは言い難い．

また最近の研究は，聴覚の空間的注意効果が競合音存在下においてその効果が発揮されることを示唆している [29,37,38]．Arbogast & Kidd [29] は，聴感的に似た競合音が複数存在するような聴取環境で標的音の聴き取り課題を行った場合，空間的注意が聴き取り精度を向上させることを示した．実験では，聴取者の前半面 180° に 30° 間隔で配置された 7 つのラウドスピーカから，6 つの競合音と 1 つの標的音が同時に呈示された．Probe-signal 法を用い，75%の確率で 0° から標的音が呈示され，残りの 25%はそれ以外の角度から呈示された．これにより，0° に空間的注意が向くことによって，0° から呈示される標的音に対する聴き取りが他に比べて向上することが予想された．また，聴覚刺激として，時間的に周波数が変化する複数の純音を組み合わせた純音列を用い，聴取者には，周波数が無秩序に変化する複数の競合音の中から，周波数が規則的に変化する標的音を聴き取るよう求めた（図 1.9-A 参照）．その結果，空間的注意が向けられた 0° での標的音に対する正答率が 6〜10%程度，それ以外の角度に比べて高いことを示した（図 1.9-B 参照）．この研究では，同時に提示される競合音が複数存在し，聴取課題が標的音の認知課題であり，加えて標的音が提示される方向が 30° おきという比較的狭い範囲に対する注意効果を検討している．よって，この点については，カクテルパーティ環境での聴取の結果を説明できるといえる．しかし標的音は，図 1.9-A のように，周波数が規則的に変化する音列について判断するというものであり，音声を聴取した際の結果を適切に表していない可能性がある

Kidd et al. [37] は，競合音声が複数存在する環境下で標的音声の聴き取り課題を行った場合，空間的注意が聴き取り精度を向上させることを示した．さらに，Ericson et al. [38] も，刺激として音声を用いた実験によって，競合音声が 2 つ以上ある場合，空間的注意の効果によって標的音声に対する聴き取りが向上することを報告した．これらの研究は，聴取する対象，課題，環境という多くの点において，カクテルパーティ環境を再現した環境である．しかし，音声が提示される方向は 60° おきと非常に

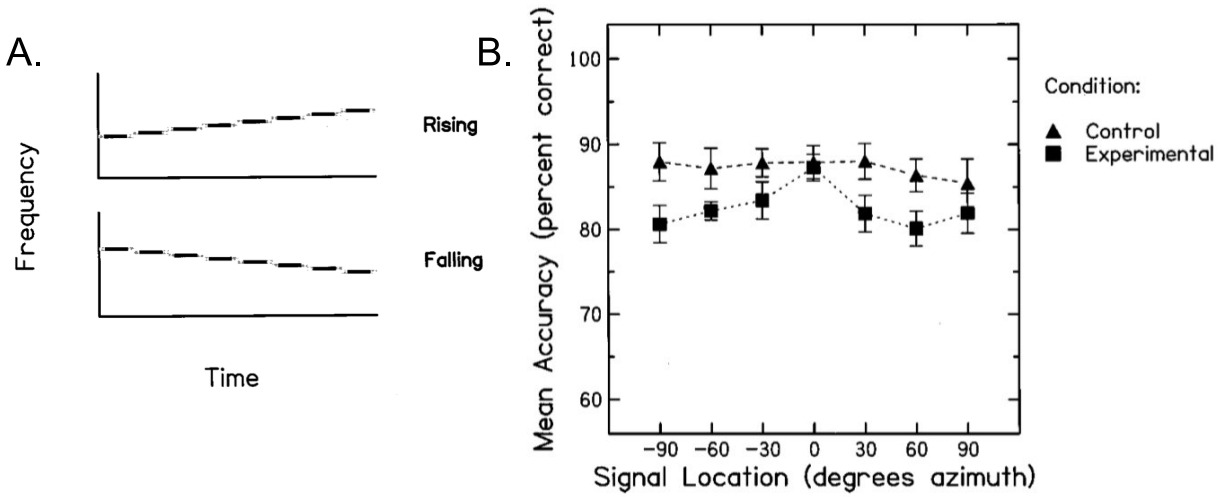


図 1.9: Arbogast & Kidd [29] の実験結果（Arbogast & Kidd [29] より一部改変し引用）．A. 標的音の周波数パターン，B. 実験の結果

広く，本論文で定義したカクテルパーティ環境と照らし合わせると，間隔が広すぎることが考えられる．

以上の内因性空間的注意に関する研究結果を表 1.2 に示す．太字で示された研究は，空間的注意効果が聴取に影響を及ぼしたとされる研究を示す．これまでの研究では，本研究で定義するカクテルパーティ環境における注意効果について検討した研究は未だに存在しないことが見て取れる．また，一部カクテルパーティ環境を再現できている状況において，空間的な注意が聴き取りに影響を及ぼすことを示唆しているが，どのような要因がそれに影響しているのかについては明らかではない．

1.3.4 音事象に対する注意

ここまで，注意による特定の音事象の選択的聴取について概観してきた．しかし，日常生活で特定の音を聴く場合，ある特定の属性のみに注意を向けるというよりも，その音の事象（音事象：Auditory object）自体に対して注意を向けていることが想像される．注意はその音事象の持つ単一の属性に対して向けられるものとして議論されることが多いが，最近の研究では．個々の属性に特化せずにそれらすべてを含んだ音事象自体に注意が向けられることが示唆されている（総説として [39]）．具体的には，特定の方向へ注意を向けた場合，その方向から到来される音声の周波数特性に対しても注意が向けられることが報告されている [40]．

また，この注意の情報処理過程について，脳波や機能的核磁気共鳴画像法（fMRI : functional magnetic resonance imaging）を用いた電気生理学的・生理心理学的な検

表 1.2: カクテルパーティ環境に焦点を当てた空間的注意に関する先行研究．太字で示した研究は，空間的注意効果があると報告した研究を示す．

	競合音が複数存在するか？	音声を聴き取る課題か？	標的音の認知課題か？	狭い範囲での聴き取りか？
Ebata et al. [13], Spence & Driver [27], Scharf et al. [24]	×	×	×	△
Teder-Sälejärvi & Hillyard [28], Teder-Sälejärvi et al. [35]	△	×	×	○
Arbogast & Kidd [29]	○	×	○	○
Kidd et al. [37], Ericson et al. [38]	○	○	○	△

討が近年の研究によってなされている（総説として [41]）．取得された音事象は,「その音事象が何であるか（& 何と言っているか）」という特徴を処理する経路（What 経路）と,「その音事象がどこから到来したか」という空間的な位置を処理する経路（Where 経路）という二経路によって独立に処理される [42–44]．そして，特定の音事象に対して注意を向けた場合，その音事象が持つ特徴について各経路で処理が行われ，注意がその経路での情報処理に影響を及ぼす [45]．ただし，どちらの経路も注意による影響を受けるが，それぞれの経路に対しての注意の働きかけは独立である．したがって，注意が聴覚の情報処理に与える影響を詳細に明らかにするためには，各経路での注意の影響を個々に明らかにしていくことが重要である．

1.3.3 節でも概観したように，カクテルパーティ環境においては，周波数に対する注意と，方向に対する注意が聴き取りに大きな影響を及ぼしていることが考えられる．特に空間に対する注意は，提唱した Cherry はその生起要因の 1 つとして音源の方向情報を挙げており [1]，約三四半世紀経った今でもこの要因が重要であると考えられていることから [6]，その重要性が伺える．

1.4 注意のモデル

これまでの内因性注意に関する研究では，人間の情報処理過程を，感覚処理，意味処理，反応選択処理に大別し，これらの処理が系列的に行われていると仮定した理論的枠組みを採用してきた．そして，その枠組みの中のどこで情報の取捨選択（注意による選択）が行われるかについて，長年に渡って論争が続けられてきた [46,47]．本節では，長年に渡り論争を続けてきた 2 つの理論的立場（初期選択理論 : early-selection

theory，後期選択理論：late-selection theory）について概観する．

1.4.1　初期選択モデル

選択的注意の機能に関する最初の実験的検証は，前述したように（1.2.1 節参照），Cherry による両耳分離聴実験である [1]．被験者は，片方の耳に提示される文章を無視しながら，もう片方の耳から提示される文章を追唱した．その結果，無視した方の耳に提示された音声の物理的な特徴の変化（例：音声の性別が変化する）には気づけるものの，音声の意味的内容の変化（例：音声の言語が変化する）には気づけなかった．であることが示された．この結果から Cherry は，人間は強力な情報の選択機能を有すると結論づけている．

以上の知見をもとに Broadbent [48] は，最初の注意の情報処理モデルを提唱した．モデルの概略図を図 1.10-A に示す．このモデルでは，無視した方の耳（注意を向けていない方の耳）では意味的内容に対する処理がなされないことを考慮して，意味処理前の時点で注意による選択が行われる．そして，選択されなかった刺激の処理は行われない．

Broadbent [48] の提唱した注意のモデルは，情報処理過程の比較的早期の段階で選択が生じると仮定されていることから，初期選択モデルと呼ばれる．

1.4.2　後期選択モデル

1.2.1 節で概観したように，カクテルパーティ効果には 2 種類の定義がある．Moray [7] や Wood & Cowan [8] は，複数の会話が飛び交うような環境下において，自分の名前や聴きなじみのある単語が聴こえたとき，全く意識していなくてもその単語が聞き取れてしまう現象もカクテルパーティ効果の 1 つであると提唱した．これは，無視された耳で意味的処理が行われないとした初期選択モデルと矛盾する．

以上の知見をもとに，Deutsch & Deutsch [49] は，Broadbent のモデルに変更を加えた注意モデルを提唱した．モデルの概略図を図 1.10-B に示す．このモデルでは，以上の特性を考慮し，注意を向けた耳か無視した方の耳かを問わず，すべての情報に一度意味的処理がなされ，反応選択の段階で注意による選択が行われる．

Deutsch & Deutsch [49] の提唱した注意のモデルは，情報処理過程の比較的後期の段階で選択が生じると仮定されていることから，後期選択モデルと呼ばれる．

1.4.3 減衰モデル

Treisman [50] は，前述した Moray [7] の研究で得られた結果を初期選択モデルで解釈するために，Broadbent のモデルに変更を加えた減衰モデルを提唱した．モデルの概略図を図 1.10-C に示す．このモデルでは，無視した耳に提示された情報に対する処理が行われないわけではなく，減衰すると表現した．Moray [7] の実験結果に照らし合わせると，たとえ減衰されていても，名前や聴きなじみのある音声に対するしきい値が他の刺激に対するものよりも相対的に低いため，このような現象が生じていることが考えられる．このモデルによって，Moray [7] や Wood & Cowan [8] の実験結果が初期選択モデルの枠組みで説明できることを示した．

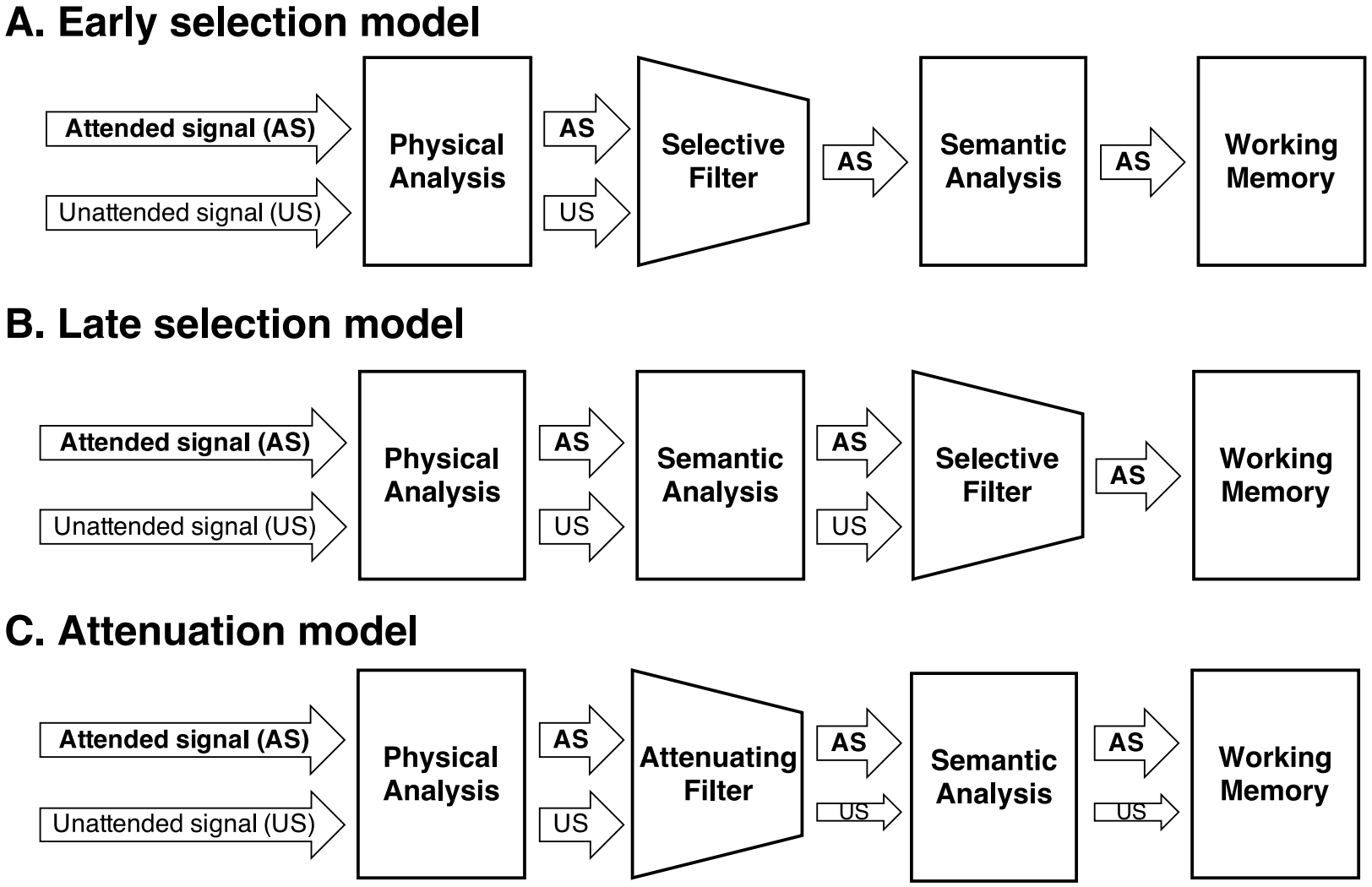


図 1.10: 注意モデルの概念図．A. 初期選択モデル，B. 後期選択モデル，C. 減衰モデル

1.5 研究目的

ここまで，カクテルパーティ効果とそれを引き起こす要因であると考えられる，標的音と雑音の空間的な分離，標的音の物理特徴に基づく，標的音と雑音の音事象の分離，そして，それらの手がかりに対する内因性注意による選択的聴取が及ぼす影響について概観した．ここまでの話を踏まえ，図 1.11 に，本研究で仮定するカクテルパーティ環境下での選択的聴取の概念的な枠組みを示す．今回は，カクテルパーティ効果の様々な要因を説明できる，Treisman の減衰モデルで考える．これまでの知見を踏まえると，カクテルパーティ効果に代表される競合音下での音聴取は，SRM や ASA などの情報処理による音事象の分離と，その分離された音響信号に対して注意が向けられることによって生じる所望の音響信号の選択的聴取の，2 つの段階によって実現されていることが考えられる．このとき，減衰モデルでの過程に置き換えると，音事象の分離が感覚処理（Physical Analysis），注意による選択的聴取は減衰器によるフィルタ処理（反応選択処理，Attenuating Filter）と考えることができる．1.3.4 節で概観したように，注意を音事象へ向けた場合，その音事象の持つ様々な属性に対する情報処理が促進されることから，各属性に対する注意フィルタが存在することが考えられる．そして，注意を向けた音事象に対する情報処理は意味処理（Semantic Analysis）であると考えられ，1.3.4 節で概観したように，各属性に対して独立に行われ，注意が向けられる．これは，注意フィルタを通過した特定の音事象の持つ特徴が処理されていると考えることができる．

これまでの研究では，カクテルパーティ環境下において，SRM や ASA などの音事象の分離プロセスがどのような役割を果たすかについてはよく調べられているが，選択的に特定の音の聴取に関する情報処理に関しては不明な点が多い．1.3.3 節で概観したように，カクテルパーティ環境下では空間的注意が重要な役割を果たしていることが考えられるが，この環境下で空間的注意がどれほど聴き取りに影響を及ぼすかについては明らかではない．特に，過去の研究では，空間的注意が音聴取に影響を及ぼす状況と及ぼさない状況があることを報告しており，どのような要因が空間的注意に影響しているのかは未だ不明である．

加えて，この注意が持つ特性に関しても，カクテルパーティ環境下での聴き取りの情報処理過程を明らかにする上で重要な知見である．これまでの聴覚の内因性注意に関する研究では，注意の効果が及ぶ範囲，すなわち注意窓について様々な検討がなされてきた．注意窓は，注意効果の有効範囲を決定するものであり，それはすなわち聴取者が知覚する対象を決定する情報処理であることから，この知見は非常に重要であることが考えられる．空間的注意に関しても注意効果の有効範囲，すなわち，注意窓の形状に関する研究が行われてきたが，一貫した理解はなされていない．また，聴き

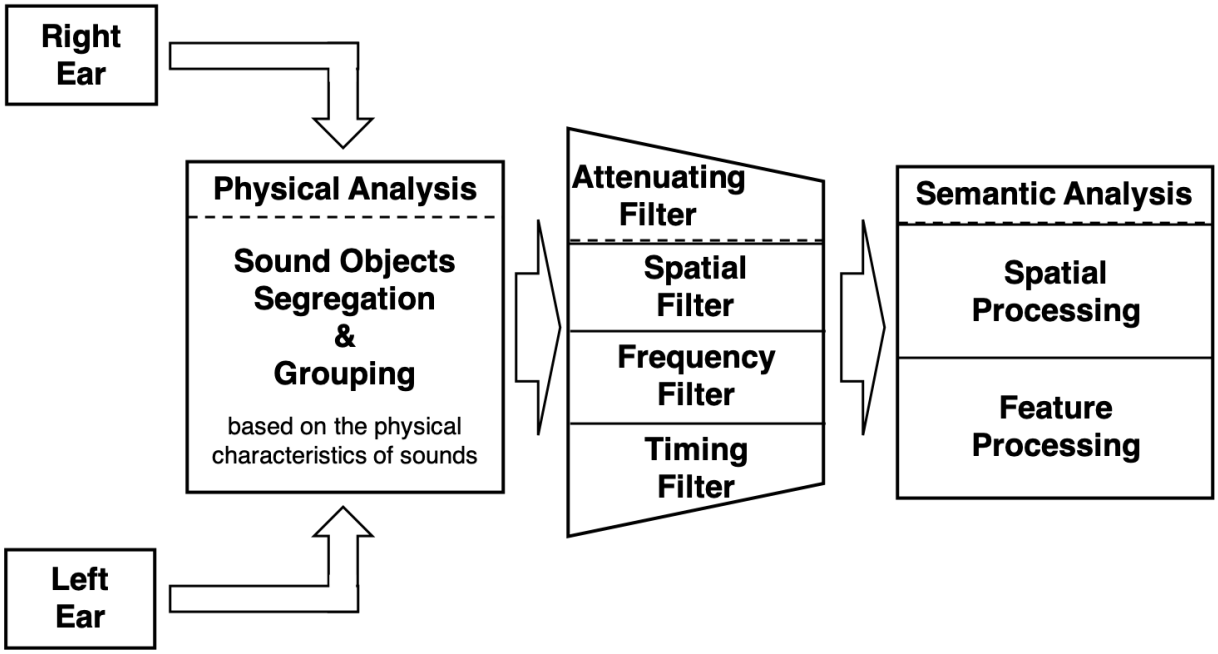


図 1.11: 本研究で仮定するカクテルパーティ環境下での選択的聴取の概念的枠組み.

たい音が動的に移動・変化することが多いことから，聴取の精度は注意の移動や固定の時間的な特性を明らかにすることが極めて重要と思われるが，そのような観点での研究はこれまでにほとんど行われていない.

以上のことから，本研究では，カクテルパーティ環境下でも所望の音を容易に聴き取ることができるメカニズムを明らかにするために，聴覚の内因性空間的注意がカクテルパーティ環境下での聴き取りに及ぼす影響とその注意窓が持つ特性を解明することを目的とする.

以下に，本論文の章構成を示す．まず第 2 章では，聴覚の内因性空間的注意の効果が知覚・認知に及ぼす影響から，その効果を表出させる要因について検討する．具体的には，前述したカクテルパーティ環境において空間的注意の効果に及ぼす影響から，空間的注意効果が生じる要因について検討を行う.

第 3 章では，第 2 章で得られた内因性注意に関する知見を踏まえ，内因性空間的注意の注意窓について検討する．具体的には，注意を特定の方向に向けるよう仕向けた場合に，この注意窓がどのような形状を持っているかについて検討を行う.

第 4 章でも，第 2 章で得られた内因性注意に関する知見を踏まえ，内因性空間的注意の時間特性について検討する．具体的には，注意が向けられてから標的刺激が呈示されるまでの時間間隔を変数として，空間的注意効果が受ける影響について検討する.

第 5 章では，ここまで得られた知見をもとに，カクテルパーティ環境下での標的音

聴取に関する定性的なモデルを検討する．

最後に第6章では，聴覚の内因性空間的注意に関する研究成果についてまとめ，本研究の今後の展望について述べる．

第2章　聴覚の内因性空間的注意が競合音存在下での標的音聴取に及ぼす影響

2.1　はじめに

本章は，聴覚の内因性空間的注意が競合音存在下における標的音聴取に及ぼす影響とその効果が生起する要因について検討した．

序論で概観した通り，カクテルパーティ環境において内因性空間的注意が聴き取りに及ぼす影響に関しては検討がなされていない．また，内因性空間的注意が聴き取りに及ぼす影響に関しては，その影響が小さい，または影響を及ぼさないと結論づけた研究と [13,27,34]，聴き取りに影響すると結論づけた研究 [28,29,35–38] が存在し，どのような状況下で影響を及ぼすのかについては明らかではない．

そこで本章では，空間的注意効果を表出させる要因について明らかにする．

以上を踏まえ，本章の構成を以下に示す．第 2.2 節では，カクテルパーティ環境を再現し，音声の聴取に空間的注意がどれほど影響を及ぼすかについて検討を行う．具体的には，複数の競合音声が存在する聴取環境下で，標的となる音声が呈示される方向に対して向けられた注意が聴き取り（単語了解度）をどれほど向上させるかについて定量的な測定を行う．第 2.3 節では，第 2.2 節と同様のカクテルパーティ環境を再現しつつ，聴取対象を音声から純音に変えることで，聴取対象の違いが空間的注意の表出に及ぼす影響を明らかにする．具体的には，雑音の検出を課題として用い，複数の類似した競合雑音が存在する聴取環境下で，標的となる狭帯域雑音が呈示される方向に対して向けられた注意が聴き取り（最小可聴値）をどれほど向上させるかについて定量的な測定を行う．第 2.4 節では，以上の実験で得られた結果を比較し，空間的注意を表出させる要因を明らかにする．最後に，第 2.5 節において，本章の内容をまとめる．

2.2 実験1：競合音声存在下での音声聴取に聴覚の空間的注意が及ぼす影響

2.2.1 聴取者

聴取者は正常な聴力をもつ日本語母語話者の成人20名であった（男性10名，女性10名，20–24歳）．本実験では，聴取者に対するインフォームドコンセントを確実に行い，東北大学電気通信研究所人間対象の研究に関する倫理委員会の承認を受けて実施された．

2.2.2 実験装置および実験刺激

実験系の概略図を図 2.1 に示す．実験には東北大学電気通信研究所本館の無響室（図 2.2）に設置された球状ラウドスピーカアレイを使用した．ラウドスピーカを図 2.1 のように，聴取者の頭部から半径 1.6 m の円周上に，聴取者の正面方向を 0° として，−60°，−30°，0°，+30°，+60° の方向に 1 個ずつ配置した*．実験刺激はデスクトップ PC (HP ENVY 700–260jp) で生成され，多チャンネル用デジタルオーディオインターフェース (RME MADIface USB) および D/A コンバータ (DirectOut Technologies ANDIAMO 2.DA) を通して，標本化周波数 48 kHz でラウドスピーカに出力した．実験刺激の生成および制御には，MATLAB（Mathworks version 2017a）と Playrec（`http://www.playrec.co.uk/`）を用いた．

実験刺激として，親密度別単語了解度試験用音声データセット (FW03 [51,52]) に収録されている，男性話者と女声話者によって発話された 4 モーラ単語を用いた．データセットは，高親密度 (7.0–5.5)，中高親密度 (5.5–4.0)，中低親密度 (4.0–2.5)，低親密度 (2.5–1.0) の 4 つの単語親密度ランクの単語リストで構成されており，それぞれのランクごとに 1000 単語が収録されている．実験では，高親密度 (7.0–5.5) の単語リストに収録されている 1000 単語を用いた．標的音声には，1000 単語の中から，臨床使用のための FW03 の縮小版である親密度別単語了解度試験用音声データセット 2007 (FW07 [53,54]) にも収録されている 400 単語（20 単語からなるリスト 20 枚）を用いた．競合音声にはその他の 600 単語を用いた．音声刺激の長さは単語ごとに異なり，約 750 ms（標的音声に用いた音声データの平均は 772.45 ms，図 2.3 参照）であった．男性音声 (mya) を競合音声，女性音声 (fhi) を標的音声とした．聴取者の頭の中央の位置において，標的音声および競合音声の A 特性音圧レベル（L_{Aeq}）がそれぞれ 65 dB になるように呈示音圧を設定した．ここでは，音が継続しているものとみなし

*負の値は聴取者の正面から左方向，正の値は右方向を指す

て，等価騒音レベルを用いて校正された．標的音声はランダムに選択された 1 つのラウドスピーカから，競合音声は残りの 4 つのラウドスピーカからそれぞれ同時に呈示された．

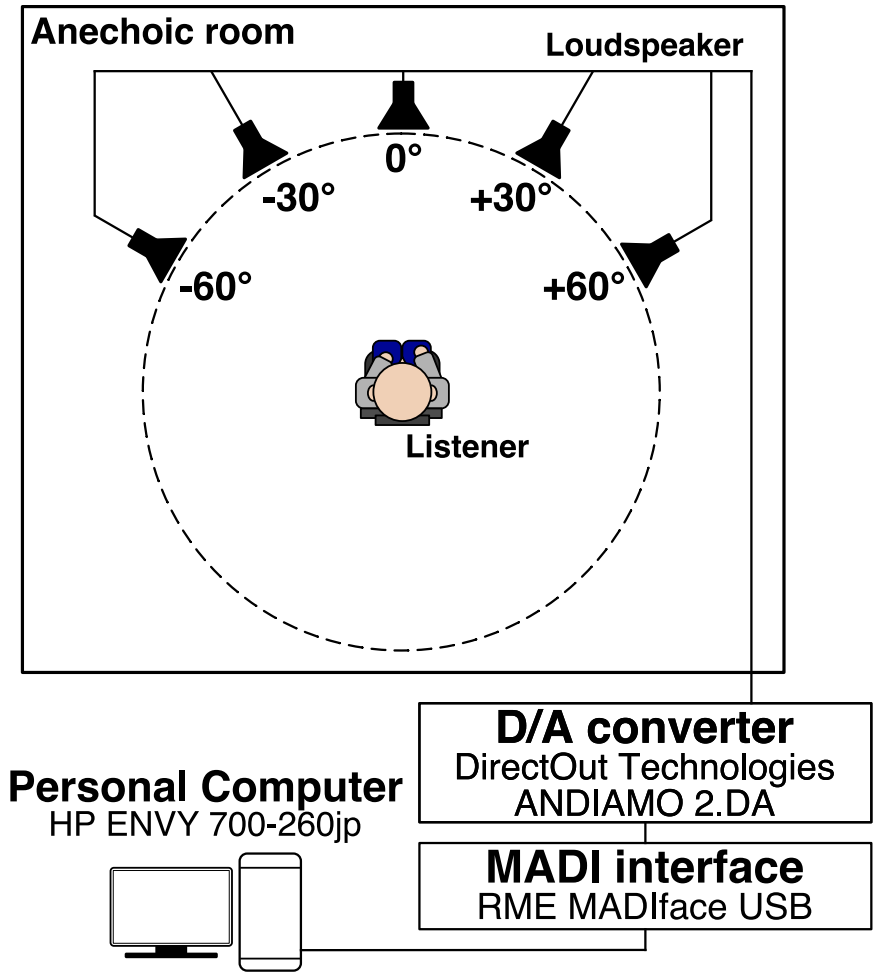


図 2.1: 本章で用いた実験系の概略図

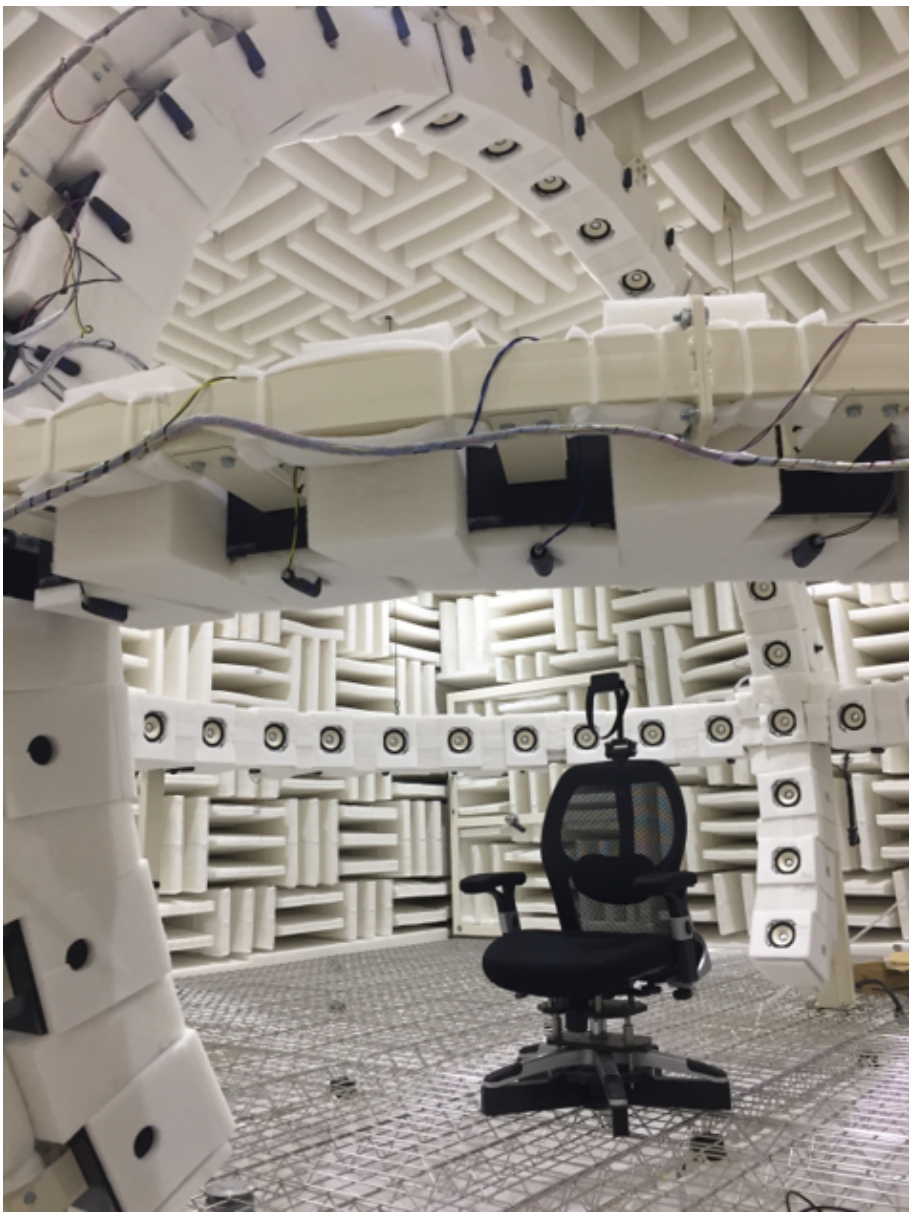


図 2.2: 東北大学電気通信研究所無響室に設置された球状ラウドスピーカアレイ

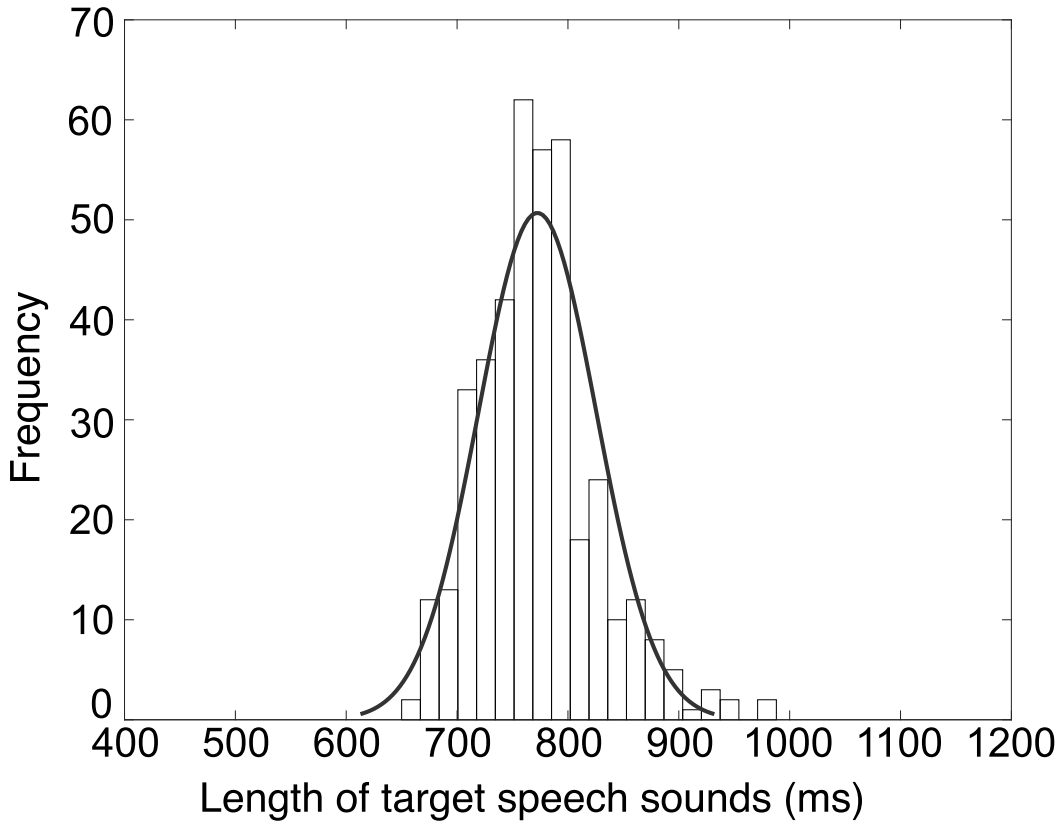


図 2.3: 標的音声の長さのヒストグラム．縦軸と横軸はそれぞれ頻度と標的音の時間長（ms）を示す．

2.2.3 実験手続き

聴取者は無響室内に設置された椅子に座り，呈示される音声刺激を聴取した．このとき聴取者には，頭は正面を向けて動かさないよう指示した．音声刺激を聴取した後，聴取者は聴き取った標的音声を手元の紙に書き取るよう求めた．この教示にしたがって聴取者は 5 つのラウドスピーカから同時に呈示される音声刺激の中から，標的音声のみを聴き取り回答した．回答時間は音声刺激呈示後の 4 s 間とし，回答された単語の全てのモーラが一致した場合を正答とした．

本実験は，空間的注意の効果を検討するために，標的音声が呈示される方向を事前に教示する条件（方向教示条件; Cue condition）と，事前教示は行わないが，各方向での標的音声の出現確率を変化させた条件（確率統制条件; Probability-control condition）の 2 条件から構成された．実験を行う順番は被験者ごとにランダムに設定し，カウンターバランスをとった．

方向教示条件では，図 2.4 のように，標的音声が提示される 1000 ms 前に，標的音声が呈示されるラウドスピーカから 500 ms のホワイトノイズを呈示し，標的音声が

提示されるラウドスピーカを教示した．事前刺激であるホワイトノイズの立ち上がりと立ち下がりには，長さが 5 ms の raised-cosine 窓を適用した．事前刺激の音圧レベルは，音声刺激と同様，聴取者の頭部位置における A 特性音圧レベル（L_{A}）が 65 dB になるように設定した．ここでも，音が継続しているものとみなして，等価騒音レベルを用いて校正された．聴取者には，ホワイトノイズが呈示された後その方向から必ず標的音声が呈示されること，そしてその方向にすばやく注意を向けることを教示した．この条件では，聴取者の聴覚的注意は，音声聴取時，常に標的角度へ向いていることが期待される（カクテルパーティ効果が標的角度において常に最高の状態で生じる条件）．この条件を 20 単語 ×5 方向（0°，±30°，±60°）で計 100 試行行った．

確率統制条件では，図 2.5 にもあるように，方向教示条件で行ったような顕示的な教示は行わなかった．しかし，全体の 80%の試行で標的音声を正面（0°）から呈示し，残りの 20%の試行はそれ以外の 4 方向（−60°/−30°/+30°/+60°）から各 5%の確率で標的音声を呈示した（Probe-signal 法 [23]）．この条件では，聴取者の聴覚的注意は，試行を重ねるごとに徐々に正面に向くことが期待される（カクテルパーティ効果が正面において最高の状態で生じる条件）．この条件を，標的音声が正面（0°）の場合は 320 単語，それ以外は 20 単語 ×4 方向（±30°, ±60°）で，計 400 試行行った．

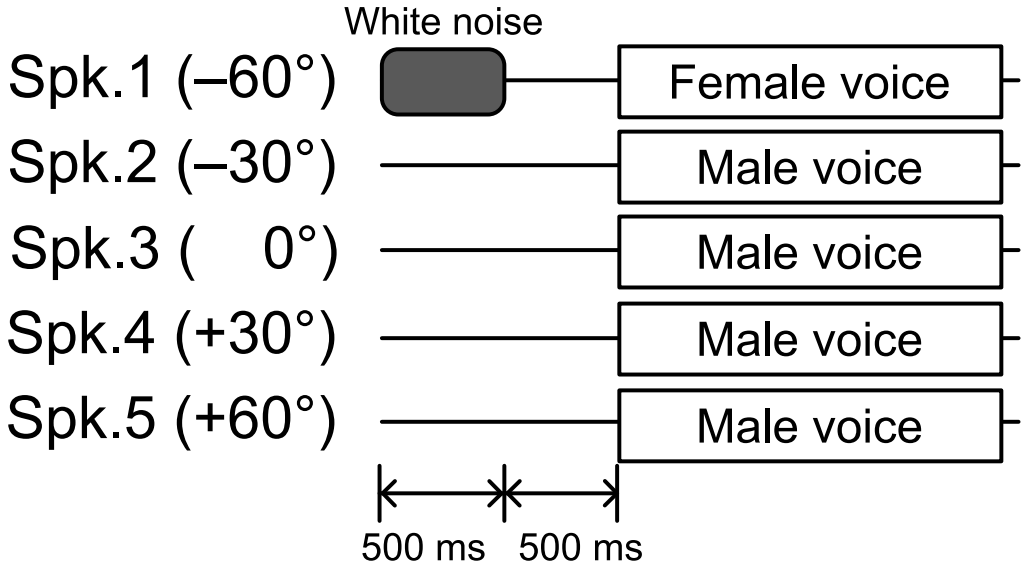


図 2.4: 方向教示条件

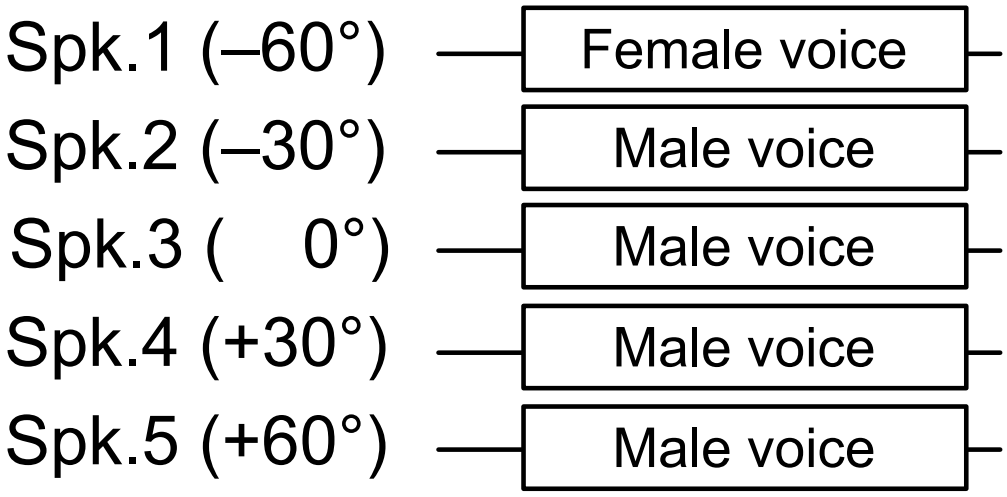


図 2.5: 確率統制条件

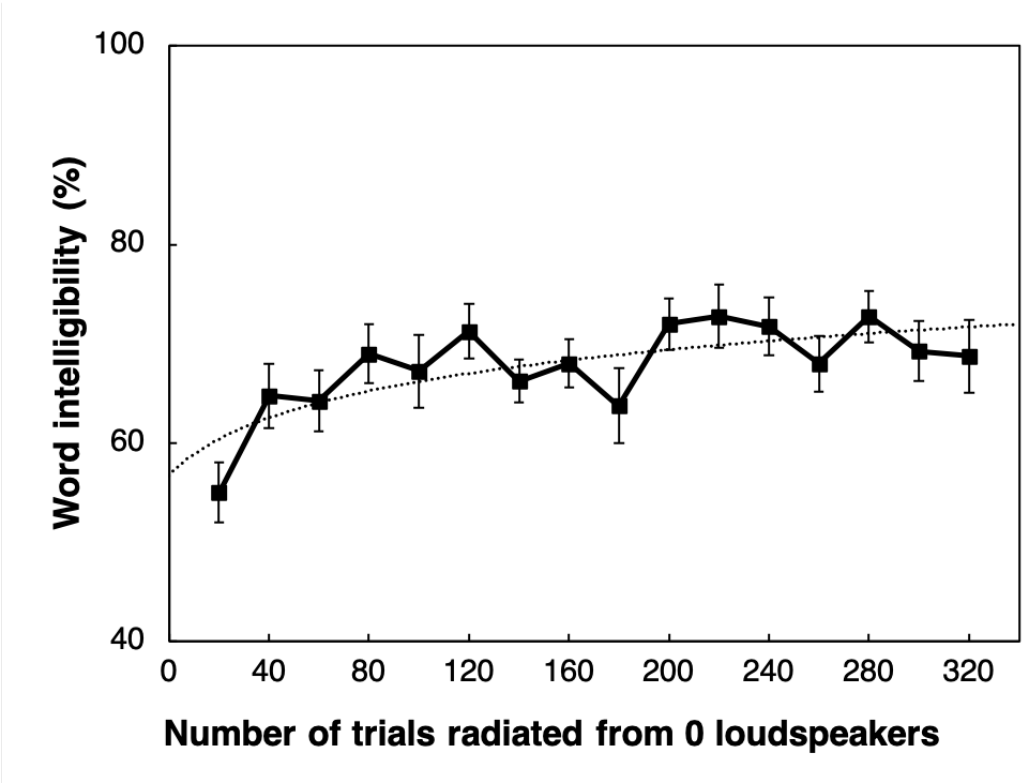


図 2.6: 確率統制条件での 0° 方向における，試行回数と単語了解度の関係性．縦軸と横軸はそれぞれ単語了解度と試行数，誤差棒は標準誤差を示す．点線は結果に対する対数近似によって得られた近似曲線である．

2.2.4 実験結果・考察

この実験の確率統制条件では，聴取者の注意を 0° にひきつけるために，他の角度に比べて 16 倍の試行回数を行っている．このとき，全試行（320 試行）の平均をとってしまうと，注意の効果が得られていない初期の試行での結果と注意効果が得られた後期の試行の結果が含まれてしまうことから，常に最高の空間的注意効果が得られる方向教示条件と比較するのには適切ではない．そこで，実験結果の分析の前に，確率統制条件での 0° における，単語了解度と試行回数の関係性を明らかにした．これにより，Probe-signal 法を用いた場合に，注意効果が十分に得られるまでに何試行を要するかを検討した．

結果を図 2.6 に示す．縦軸と横軸はそれぞれ単語了解度と試行数を示し，点線は結果に対する対数近似によって得られた近似曲線である．実験の結果，最初の 20 試行では単語了解度が 60%を下回っていたが，徐々に単語了解度が向上しており，近似曲線も徐々に平坦になっていることが見て取れる．これは，Probe-signal 法によって空間的注意が 0° に徐々にひきつけられ，注意効果によって得られる最大の単語了解度

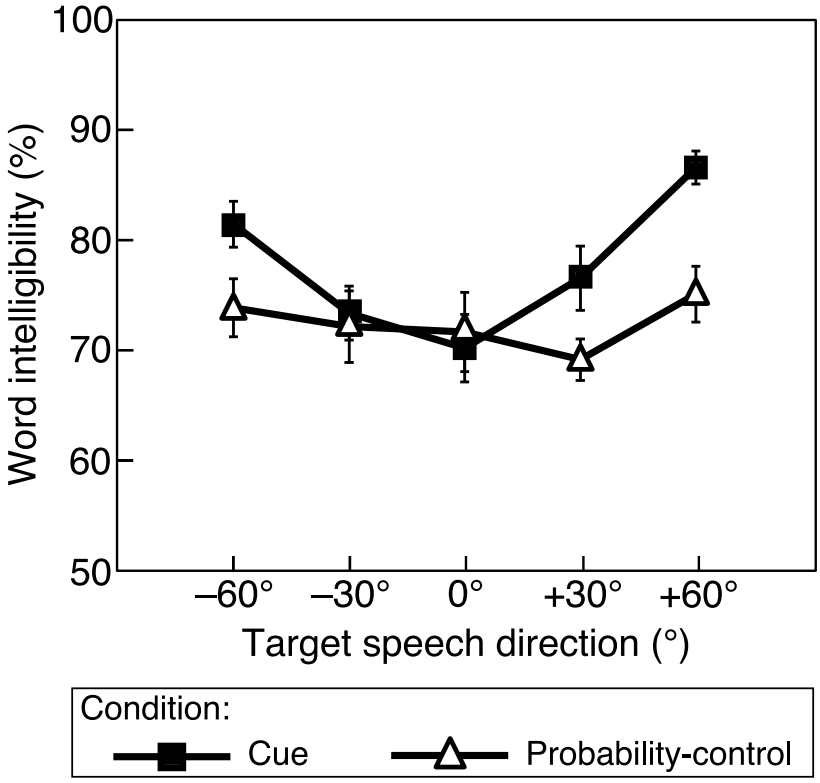


図 2.7: 実験結果．縦軸と横軸はそれぞれ単語了解度と標的音の提示角度を示す．四角は方向教示条件（Cue），三角は確率統制条件（Probability-control）の結果，誤差棒は標準誤差を示す．

に近づいていることを示している．以上のことを考慮し，正面から標的音声が提示された 320 試行の最後の 20 試行を結果として用いることとした．

実験の結果を図 2.7 に示す．縦軸は単語了解度，横軸は標的音声が呈示されたラウドスピーカの方向を示している．方向教示条件の結果は，0° の単語了解度が他の方向に比べて最大 10%も低く，0° から離れるごとに単語了解度が改善していた．一方で，確率統制条件の結果は，単語了解度が 70%程度で安定していた．両条件の結果を比較すると，±60° において最大 10%程度，確率統制条件の結果が教示条件よりも単語了解度が低いことが見て取れる．この結果について，実験条件（2; 方向教示/確率統制）と標的音声の呈示方向（5; 0°, ±30°, ±60°）を要因とする 2 要因分散分析を行ったところ，実験条件と呈示方向の主効果と交互作用が有意であった（条件: $F_{1,19} = 4.69, p = .043, \eta_G^2 = .049$; 方向: $F_{4,76} = 6.94, p < .001, \eta_G^2 = .091$; 条件 × 方向: $F_{4,76} = 2.54, p = .046, \eta_G^2 = .039$）．実験条件の単純主効果の検定を行ったところ，−60° と +60° において，条件間に有意な差が認められた（−60°: $F_{1,19} = 3.95, p = .050, \eta_G^2 = .219$; +60°: $F_{1,19} = 9.08, p = .003, \eta_G^2 = .503$）を用いた．

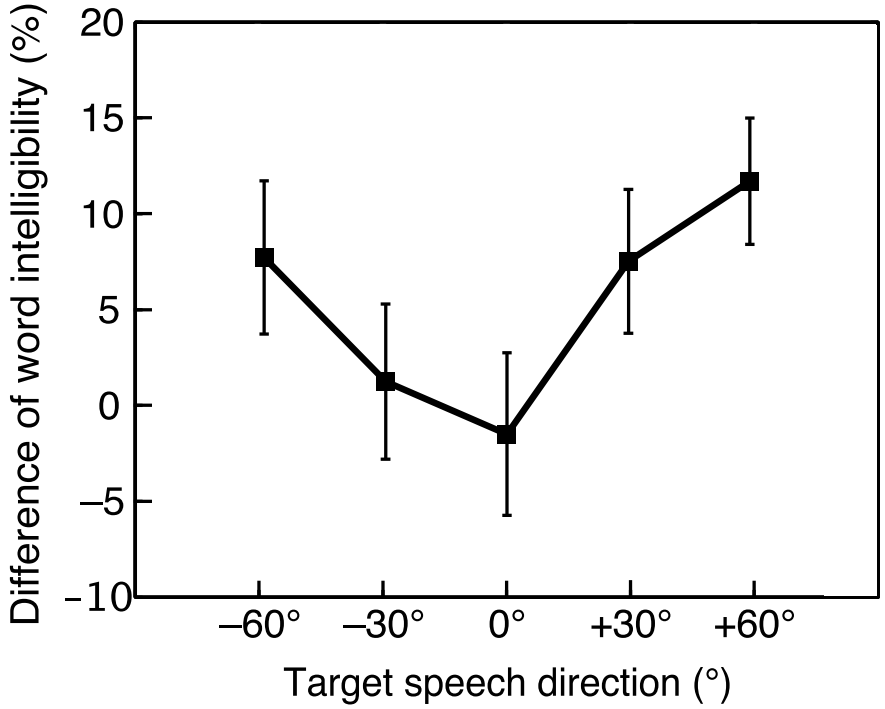


図 2.8: 2 条件の差分の結果（方向教示条件 − 確率統制条件）．誤差棒は標準誤差を示す．

さらに，呈示方向条件の単純主効果の検定を行ったところ，方向教示条件において，角度条件間に有意な差が認められた．($F_{4.36} = 8.24, p < .001, \eta_G^2 = .869$)．加えて，呈示方向について Ryan 法（$p < .05$）による多重比較検定を行ったところ，$+30°$ と $+60°$ の間，$-60°$ と $+30°$ の間，$0°$ と $+60°$ の間，そして $-30°$ と $+60°$ の間に有意な差が見られた．

実験の結果，確率統制条件で注意をひきつけた $0°$ では，単語了解度が方向教示条件とほぼ一致した．これは，どちらの条件でも $0°$ に対する（方向教示条件ではすべての注意角度に対して）注意効果が最大になるように仕向けているためであり，この結果は，聴取者の注意が仕向けた方向に対して正しく向いていることを示している．

図 2.7 の結果には，聴覚の空間的注意効果だけではなく，方向性マスキング解除（SRM）等の物理的な要因による諸効果が含まれていることが予想される（2.4 節参照）．そこで，両条件の差分をとることで（方向教示条件 − 確率統制条件），両条件に等しく影響を及ぼしている物理的な要因を排除し，純粋な注意効果だけを示した†．

二条件の差分の結果を図 2.8 に示す．縦軸は単語了解度の差分の値，横軸は標的音声が呈示されたラウドスピーカの方向を示している．この結果，正面（$0°$）での値が最も低く，そこから離れるごとに徐々に値が上昇していることを示している．正面

†この点に関しては，全体考察で詳しく考察する

（0°）で最も値が低くなるのは，了解度が両条件で一致しているためであり，この値が一致しているほど，その方向に対する注意効果が高いことを，差分の値が大きくなるほど，その方向に対する注意効果が低いことを意味している．以上の結果は，空間的な注意を正面（0°）に向けた場合，**実験1の実験条件下**では，正面（0°）を中心とした注意の広がり（注意窓）によって，その方向から到来する音を捉えていることを示唆している．

2.3 実験2：競合雑音存在下での標的雑音聴取に聴覚の空間的注意が及ぼす影響

2.3.1 聴取者

聴取者は正常な聴力をもつ日本語母語話者の成人20名であった（男性17名，女性3名，20–24歳，平均22.4歳)．うち1名（女性1名，21歳）は，実験1にも参加した聴取者であった．本実験では，聴取者に対するインフォームドコンセントを確実に行い，東北大学電気通信研究所人間対象の研究に関する倫理委員会の承認を受けて実施された．

2.3.2 実験装置および実験刺激

実験装置は前節の実験とほぼ同様であった．前節からの変更点を以下に述べる．

本実験では，MATLAB と Playrec, Psychtoolbox 3.0 [55–57] によって実験を制御し，PC マウスを用いて聴取者の反応を取得した．

音刺激として，中心周波数の異なる狭帯域雑音を用いた．雑音の帯域幅は1/12 oct. に設定した．中心周波数には，125 Hz，200 Hz，350 Hz，500 Hz，1000 Hz の5種類を使用し，1000 Hz の中心周波数を持つ雑音を標的音，それ以外の中心周波数を持つ雑音を競合音に割り当てた．狭帯域雑音の長さは，前節の実験で用いた音声の長さの平均をとって750 ms（図 2.3 参照）とし，立ち上がりと立ち下がりには，長さが5 ms の raised-cosine 窓を適用した．

2.3.3 実験手続き

聴取者は無響室内に設置された椅子に座り，呈示される音刺激を聴取した．このとき聴取者には，頭は正面方向へ向けて動かさないよう指示した．

標的となる狭帯域雑音の最小可聴値を計測するために，1-up/1-down 法によって標的音の音圧レベルを2 dB ずつ変化させた．本実験では，試行開始時の標的音の音圧

レベルに応じて，聴取者を 2 つのグループに分けた．全体のうち 10 人の聴取者は，試行開始時の標的音の音圧レベル（L_{A}）を 80 dB に設定し，残りの 10 人の聴取者は 55 dB に設定した．このとき，競合音の音圧レベル（L_{A}）は常に 65 dB に設定した．ここでも，音が継続しているものとみなして，等価騒音レベルを用いて校正された．聴取者には，同時に呈示された複数の刺激音の中で標的音が聞こえたか否かを判断し，聞こえた場合はマウスの左のボタンを，聞こえなければ右のボタンを押すように教示した．聴取者が標的音が聞こえたと判断した場合（左ボタンを押した場合），標的音の音圧レベルを 2 dB 上昇させ，聞こえないと判断した場合（右ボタンを押した場合）は，2 dB 減少させた．

本実験でも，標的音声が呈示される方向を事前に教示する条件（方向教示条件; Cue condition）と，事前教示は行わないが，各方向での標的音声の出現確率を変化させた条件（確率統制条件; Probability-control condition）の 2 条件から構成された．実験を行う順番は被験者ごとにランダムに設定し，カウンターバランスをとった．

方向教示条件では，標的音声が提示される 1000 ms 前に，標的音声が呈示されるラウドスピーカから 500 ms のホワイトノイズを呈示し，標的音声が提示されるラウドスピーカを教示した．事前刺激であるホワイトノイズの立ち上がりと立ち下がりには，長さが 5 ms の raised-cosine 窓を適用した．聴取者には，ホワイトノイズが呈示された後その方向から必ず標的音声が呈示されること，そしてその方向にすばやく注意を向けることを教示した．この条件は，各角度につき 20 試行，計 100 試行からなるブロックの組み合わせから構成されており，ブロックの終了時にすべての角度において聴取者の判断が 10 回以上反転していた場合，実験を終了した（もし 1 角度でも判断の反転が条件に満たない場合，次のブロックへ進めた）．

確率統制条件では，全体の 80%の試行で標的音声を正面（0°）から呈示し，残りの 20%の試行はそれ以外の 4 方向（−60°/−30°/+30°/+60°）から各 5%の確率で標的音声を呈示した．この条件は，正面で 320 試行，それ以外の角度で 20 試行ずつ，計 400 試行からなるブロックの組み合わせから構成されており，ブロックの終了時に，正面で 160 回，それ以外の角度で 10 回，聴取者の判断が反転していた場合，実験を終了した（もし 1 角度でも判断の反転が条件に満たない場合，次のブロックへ進めた）．

本実験では，反転した最後の 5 試行の音圧レベルの平均値を最小可聴値とした．

2.3.4　実験結果・考察

実験の結果を図 2.9 に示す．両条件の結果とも，最小可聴値は 60%程度で安定しており，両条件の間に大きな差は見られなかった．実験条件（2; 教示/確率統制）と標的音の呈示方向（5; 0°, ±30°, ±60°）に対して 2 要因分散分析を行ったところ，有意な

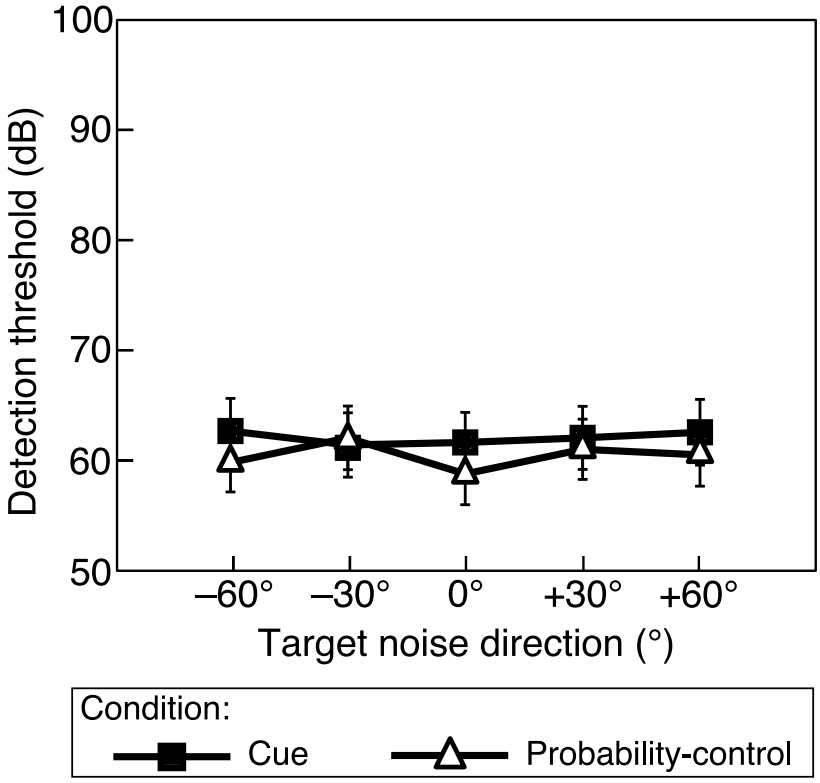


図 2.9: 実験結果．縦軸と横軸はそれぞれ聴覚いき値と標的音の提示角度を示す．四角は方向教示条件（Cue），三角は確率統制条件（Probability-control）の結果，誤差棒は標準誤差を示す．

差は見られなかった（条件: $F_{1,19} = 0.67, p = .421, \eta_G^2 = .004$; 方向: $F_{4,76} = 0.72, p = .584, \eta_G^2 = .004$; 条件 × 方向: $F_{4,76} = 1.33, p = .266, \eta_G^2 = .003$）．

前節と同様，注意の効果を検討するために，両条件の差分を算出した．二条件の差分の結果を図 2.11 に示す．縦軸は二条件の最小可聴値の差分の値，横軸は標的音が呈示されたラウドスピーカの方向を示している．結果は，どの注意角度においても最小可聴いき値の差は 0 付近で安定しており，角度による差は見られなかった．この結果は，どの方向へ注意を向けても同程度聴き取れる，すなわち空間的な注意による影響が見られないことを示している．

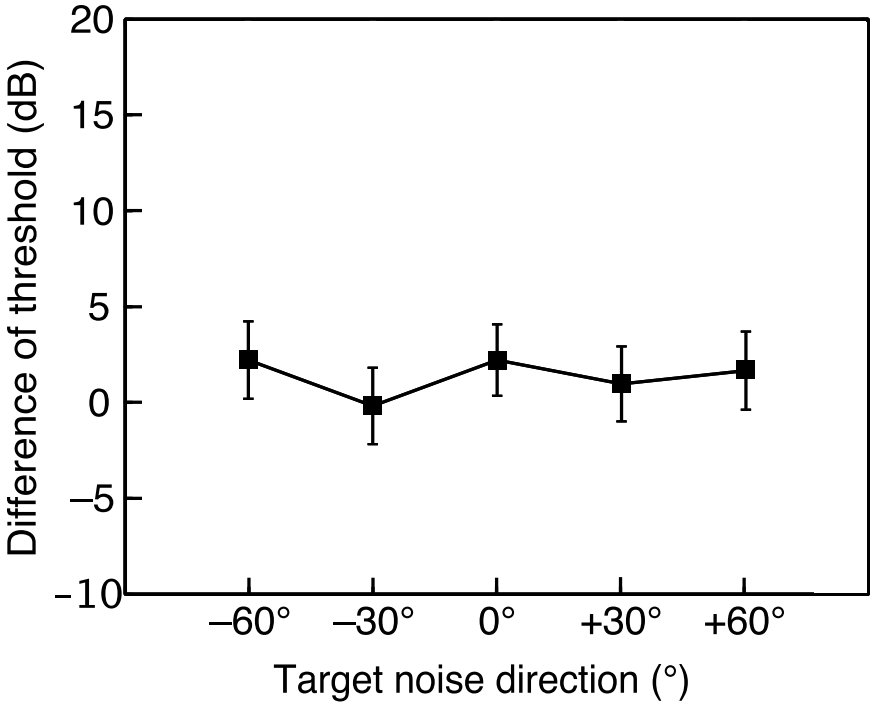


図 2.10: 2 条件の差分の結果（方向教示条件 – 確率統制条件）．誤差棒は標準誤差を示す．

2.4 全体考察

2.4.1 音声に対する注意効果（実験 1）と NBN に対する注意効果（実験 2）の比較

実験 1 での 2 条件間の差分の結果は（図 2.7），正面（0°）で最も差が小さく，正面（0°）から離れるごとに徐々に値が大きくなっていく，下に凸形状のグラフが見られた．前述した通り，差分の結果が 0 に近づくほど，その方向に対する注意効果が高いことを示していることから，この結果は，空間的注意効果が正面（0°）で最も高く，そこから離れるごとに徐々に注意効果が小さくなっていくことを意味している．一方で，実験 2 の差分の結果は（図 2.9），角度によらず一定の平坦なグラフが見られた．これは，どの角度においても一様に聞き取れていることを意味しており，空間的な注意効果は聴取に影響を及ぼしていないことを示している．2 つの結果を比較すると，実験 1 においてのみ，注意効果が表出したことを示している．

しかし実験 1 と実験 2 では，用いている指標が異なることから（単語了解度 vs. 最小可聴いき値），直接的な比較が難しい．そこで，両実験の結果の直接的な比較を行うため，過去の研究の結果を使用して実験 1 の結果を最小可聴いき値に変換する．Amano et al. [58] は，本実験で音声刺激として使用した FW03 について，単耳聴での擬似音

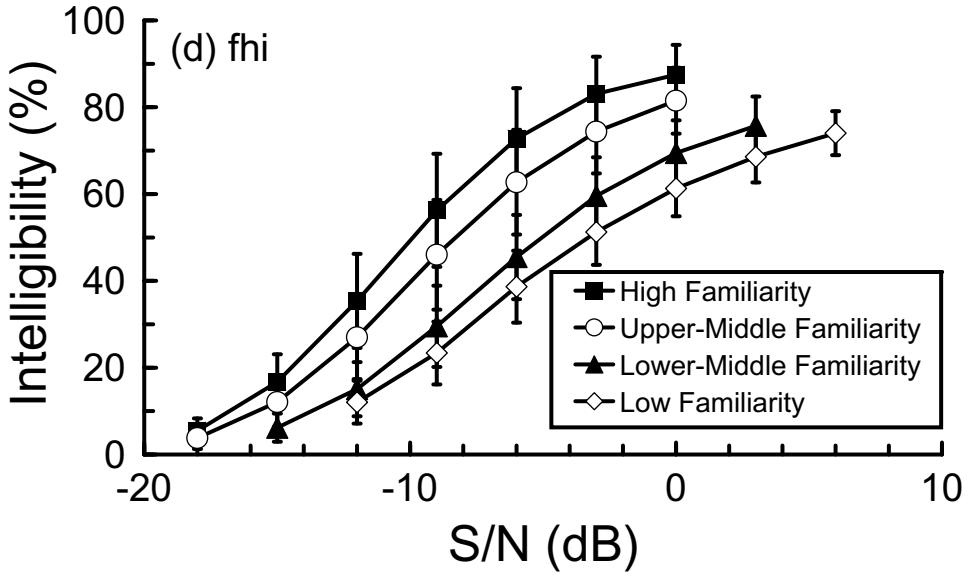


図 2.11: 単語リスト FW03 に収録されている女性音声（fhi）の各親密度における SNR ごとの単語了解度．誤差棒は標準誤差を示す（Amano et al. [58] より改変して引用）．

声雑音（speech noise）下における単語了解度試験を行い，音声と擬似音声雑音との物理的な信号対雑音比（SNR : signal-to-noise ratio）と単語了解度との関係性を明らかにしている．実験 1 で標的音声として使用した女性音声 (fhi) の，各親密度における SNR ごとの単語了解度のグラフを図 2.11 に示す．この結果を用い，図 2.7 の 2 条件の結果を SNR の値に変換し，その差分を取ることで最小可聴いき値を指標とした純粋な注意効果を算出する．例えば，図 2.7 の 0° での結果はおよそ 70%であり，図 2.11 の了解度が 70%に対応する SNR の値は −8 dB であると考えることができる．しかし，Amano et al. [58] での結果は，あくまで単耳聴での擬似音声雑音（speech-shaped noise）下における結果であるため，両耳聴で競合音として音声を用いた実験 1 の結果と単純な比較はできない．

実験 1 と Amano et al. [58] での実験デザインの違いによって，大きく分けて 2 種類の効果が影響を及ぼすことが考えられる．まず，標的音と競合音が空間的に分離していることによって生じる SRM の効果である．序論で概観したように，標的音と競合音が空間的に同じ位置から提示される場合に比べて，空間的に分離している方が，標的音の聴き取りは容易になる．Amano et al. [58] の実験では，ヘッドフォンの同じ耳側から標的音と競合音が提示される状況下で聴き取りを行っていることから，空間的な分離による手がかりは全く使えない状況であるのに対し，実験 1 では標的音と競合音が最低でも 30° は分離している状況下で標的音の聴き取りを行っている．よって，実験 1 では，SRM による聴き取りの向上が見込めることになる．過去の研究は，標

的音と競合音との空間的な分離の有無が標的音の聴き取りに及ぼす影響について検討している [59]．実験では，標的音声と 4 つの競合音が同じ方向（0°）から提示される場合と，標的音声が正面（0°）から，4 つの競合音が（−90°，−30°，+30°，+90°）からそれぞれ提示される場合の，標的音声の最小可聴いき値を計測から SRM の効果を検討した．その結果，空間的な手がかりが使用できない場合に比べて，使用できる場合は，標的音声の最小可聴いき値が約 2 dB 低下することが示された．このことから，Amano et al. [58] の結果から算出される単耳聴条件での SNR に比べて，実験 1 の結果は，最小可聴いき値が約 2 dB 低下することが予想される．

また，実験 1 では競合音が意味のある音声であることによる，マスキング量の違いも聴き取りに影響を及ぼす．競合音が複数存在する環境下で特定の音を聴き取る際，標的音と競合音とのスペクトルの重なりによるマスキング効果（エネルギーマスキング：Energetic masking）と，標的音も競合音もどちらも聴こえているにも関わらず，標的音と競合音の意味的な重なりによるマスキング効果（情報マスキング：Informational masking）の 2 つの効果が聴き取りに影響を及ぼす．過去の研究は，標的音として音声，競合音として擬似音声雑音，異性話者，同性話者，同一話者の音声を用い，情報マスキングの効果をそれぞれ検討した [60,61]．実験では，1 つの標的音声と 3 つの競合音が空間的に分離して提示される状況下で，標的音声が話した単語を回答し，標的音声の了解度からマスキングの効果を検討した．ここでは，Amano et al. [58] と実験 1 の結果との比較を行うために，競合音が擬似音声雑音の場合と異性話者の場合の結果に着目する．実験の結果，競合音に異性話者音声を使用した場合，擬似音声雑音を使用した場合に比べて，最小可聴いき値が約 6 dB 上昇することが示された．このことから，Amano et al. [58] の結果から算出される耳元での SNR に比べて，実験 1 の結果は，最小可聴いき値が約 6 dB 上昇することが予想される．

これらの，競合音の種類の違いによって生じるマスキングの効果や，両耳聴によって生じる SRM の効果は，実験条件（方向教示/確率統制）によらず一定に生じることが考えられる．本実験では，空間的注意効果のみを抽出するために，2 つの実験条件間で差分を算出している．以上の要因による SNR の向上（または低下）は，差分を取る際に相殺されるため，差分の結果について考察する分には考慮する必要がない．よって，今回の結果に関しては，Amano et al. [58] の研究で得られた結果を用いて最小可聴いき値を算出する．

実験 1 の差分の結果を最小可聴いき値に変換し，実験 2 の差分の結果に重ねた結果を図 2.12 に示す．その結果，音声に対する注意効果は，正面（0°）を中心とした下に凸のグラフを示した．一方で，NBN に対する注意効果は，どの注意角度においても最小可聴いき値の差は 0 付近で安定しており，角度による差は見られなかった．以上の結果は，空間的注意効果の有無を反映していることが考えられる．

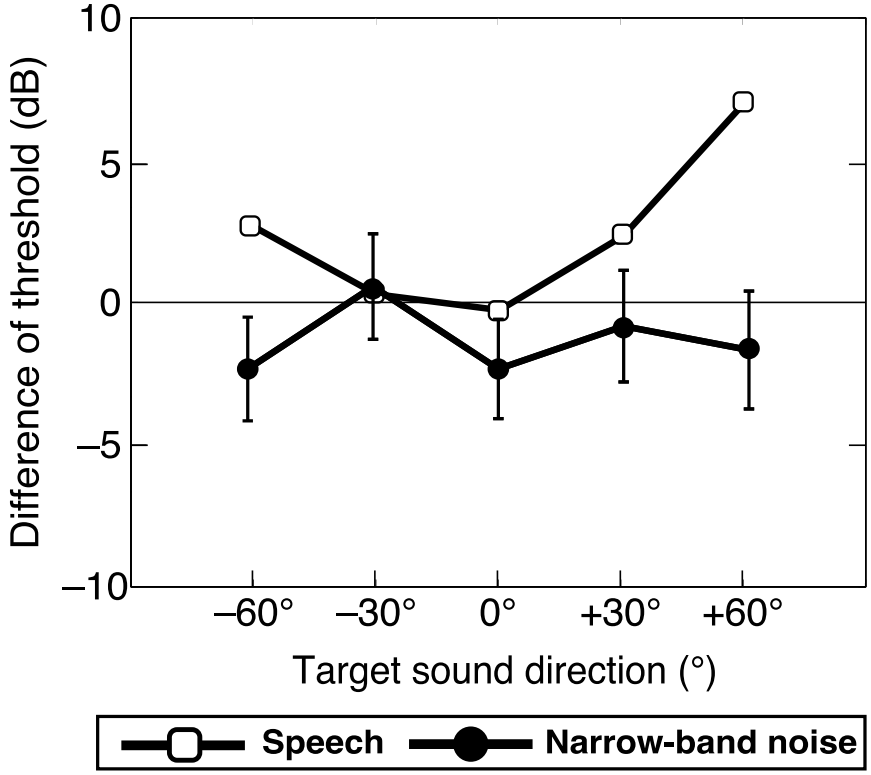


図 2.12: 実験 1 と実験 2 の結果の比較．縦軸と横軸はそれぞれ最小可聴いき値と標的音の提示角度を示す．

これまでの研究では，空間的注意効果は聴取環境に依存することが示唆されてきた [29,37,62]．Arbogast & Kidd [29] は，標的音と聴感的に類似した競合音 [29] が複数（実験では 4 つ）存在するような，極めて複雑で標的音の聴き取りが困難な状況下において，空間的注意の効果が表出することを報告している．また，Ericson et al. [62] は，競合音の数が注意効果に及ぼす影響を検討し，競合音が 2 つ以上になると，空間的注意が聴取に影響を及ぼすようになることを報告している．一方で，Teder-Sälejärvi & Hillyard [28] や Teder-Sälejärvi et al. [35] 等の研究では，競合音が存在する環境下ではないのにも関わらず，頑健な空間的注意効果が確認されている．事実，本章の 2 つの実験は，どちらも競合音存在下であり，競合音は（Arbogast & Kidd での知見に倣って）標的音と聴感的に類似しているものを採用していた．しかし，実験 1 では空間的注意効果が影響を及ぼしたのにも関わらず，実験 2 では見られなかった．以上のことは，競合音下での聴取という要因は，空間的注意効果の表出において本質ではないことを意味している．

考えられる別の要因として，課題の特性の違いが影響を及ぼした可能性がある．空間的注意効果が聴き取りに及ぼす影響が小さいと結論づけた研究の多くは，課題に弁

別課題が用いられている [13,27,34]．Ebata et al. [13] は，聴取者に標的音（純音）が聴こえたかどうかを判断するよう求め，標的音の最小可聴値を計測した．Spence & Driver [27] は，聴取者に標的音が提示されたら素早くボタンを押下するよう求め，標的音に対する反応時間を計測した．これらの課題の遂行には，標的音が聴こえたかどうかが判断できれば良いため，どこから聴こえてきたのかを意識する必要はない．

一方で，空間的注意効果が影響を及ぼすと結論づけた研究では，課題に認識課題が用いられている [29,37,38,62]．Arbogast & Kidd [29] は，聴取者は周波数が徐々に変化する純音の系列（480 ms）が上昇系列か下降系列かを回答し，標的音に対する正答率を計測した．Kidd et al. [37] た Ericson et al. [62] は，標的刺激は音声であり，その了解度を計測した．これらの課題の遂行には，ある程度の時間，標的刺激を聴き続ける必要があるため，注意を特定の方向へ向け続ける必要がある．また，空間的注意効果が影響を及ぼすと結論づけた，弁別課題を用いている研究では，刺激が連続して提示され，特定の方向から聴こえてくる標的音にのみ反応する必要があった [28,35,36]．以上の結果と一致して，本実験の実験 1 は課題の遂行に注意の持続を要したが，実験 2 は注意を向け続ける必要がなかった．以上のことは，課題の遂行に**注意を特定の方向へ向け続ける必要があるかどうか**が，空間的注意効果に大きな影響を及ぼしていることを示唆している．

今回の結果は，左側（−60°）に比べて右側（+60°）の方が，最小可聴いき値の差が（単語了解度の差も）大きかった．これは，注意を右側へ向けた場合，左に向けた場合に比べてより聴き取りが良くなる（空間的注意の効果が大きい）ことを意味している．過去の研究では，左右の耳に同時に異なる言語音を提示すると，右耳からの言語音をより正確に報告することができる，すなわち右耳優位性があることが報告されている（right-ear advantage，[63–65]，総説として [66]）．Kimura [63,64] は，左右の耳に異なる数字を連続的に提示し，聴取者には左右どちらかの耳から提示された数字を追唱するよう求めた．その結果，右耳から聴こえてくる数字の方がより正確に追従できることを示した．この結果に対し，右耳に入力された音が処理されるのが脳の左半球の聴覚野であり，左半球の聴覚野は言語処理に優れていることによるものであると解釈されている．また，近年の研究は，この現象が注意の影響を受けやすいことを示唆している [67,68]．本研究の結果は，これらの先行研究の結果と一致して，右耳の優位性が空間的注意効果に影響したことが示唆される．

2.4.2　空間的注意効果と音の物理的要因による効果の影響

実験 1 において，方向教示条件の結果は，下に凸の形状のような概形のグラフが得られた．0° において単語了解度が最も低く，0° から離れるごとに了解度が徐々に上

昇し，±60° において最も了解度が高くなることが示された（図 2.7 参照）．一方で，確率統制条件の結果は，どの角度においても了解度に大きな差異は生じなかった．方向教示条件は，どの角度においても同様に標的音声提示方向の事前教示がなされるため，角度による聴き取りの差が生じることは考えにくい．また，確率統制条件では，聴取者の注意が 0° に向くように仕向けていることから，注意効果は 0° において最大になることが予想されるが，今回の結果では平坦なものになっている．以上の結果が生じた要因として，注意以外の物理的な要因による影響，特に標的音と競合音の空間的な分離によるマスキング解除（方向性マスキング解除，1.2.2 参照）が大きな影響を及ぼしたことが考えられる．

一方で実験 2 では，どちらの条件でも注意方向に対する選択性を持たない，平坦な特性が得られた．この結果は，SRM が NBN の聴き取りに影響を及ぼさなかったことを意味している．Arbogast & Kidd [29] の結果は，本実験の実験 1 とほぼ同様の実験条件を用いたのにも関わらず，SRM の効果は見られなかった．そして，実験 2 の結果も同じく，SRM の効果は見られなかった．

この違いを引き起こした要因として，マスキング量の違いが挙げられる．前節で概観したように，競合音が複数存在する環境下で特定の音を聴取する際，臨界帯域内のエネルギー的な重なりによるエネルギーマスキングの効果に加え，標的音と競合音の意味的な重なりによる情報マスキングが影響を及ぼす．本研究では，どちらの実験も競合音存在下で聴感的に類似した標的音と競合音を聴取していることから，どちらのマスキング効果も影響を及ぼすことが予想される．しかし，単語の認識をしなければならない実験 1 は，単に音の高さを判断する実験 2 に比べてより情報マスキングの影響が大きくなることが考えられる．このような要因が，実験 2 の結果につながったことが予想される．この影響に関しては，今後も別の観点から検討を行っていく必要があると考えられる．

これらの物理的要因に基づく了解度の改善は，注意の向きなどの影響を受けないので，条件（方向教示/確率統制）によらず等しく影響を及ぼすことが考えられる．この考えに基づき，実験 1 と実験 2 の考察では，2 条件間の差分をとることで注意効果のみを抽出した．本実験において得られる単語了解度は，以下のような式で記述できる．

$$I(\theta, \psi_i) = C + \alpha I_{SAttention}(\theta, \omega) + I_{SRM}(\theta, \psi_i) \tag{2.1}$$

C，ω は定数である．θ は標的音の提示角度，ω は空間的注意が向けられている角度，ψ_i は競合音 i の角度をそれぞれ示す．C は角度によらない聴き取り精度の向上を示し，音の物理的な特徴に基づく聴き取り精度の向上（ASA の効果）や，周波数に対する注意の効果が含まれることが予想される．すなわち，モノラル環境で音を聴いた

状況での聴き取り精度を意味している．I は聴き取りの精度（了解度/最小可聴いき値）を示し，$I_{SAttention}$ は空間的注意，I_{SRM} はSRMによる聴き取り精度の向上（了解度の向上/最小可聴いき値の低下）を示す．α は，注意効果の強さを示す変数であり，$0 \leq \alpha \leq 1$ をとる．方向教示条件では，標的音が提示される方向に対して常に最高のパフォーマンス（了解度/最小可聴いき値）が得られる条件であることから，α は常に1をとり，確率統制条件ではProbe-signal法における標的音の提示確率によって変化することが考えられる．

ベースとなる聴き取り精度とマスキングによる影響は，空間的注意の角度によらないことから，方向教示条件と確率統制条件の結果の差分をとると，

$$I_{Cue}(\theta, \psi_i) - I_{ProbabilityControl}(\theta, \psi_i) = (1-\alpha) I_{SAttention}(\theta, \omega) \tag{2.2}$$

となり相殺され，空間的注意効果のみを抽出できる．さらに，$I_{SAttention}(\theta, \omega)$ に $(1-\alpha)$ が掛けられることから，確率統制条件での空間的注意効果（本実験では0° に対する空間的注意効果）を反転させた結果になる．

2.4.3 注意の空間特性

各実験において，2つの条件の差を求めることにより，純粋な空間的注意効果を算出した．前述したように，図 2.11 は実験1（の結果を最小可聴いき値に読み替えたもの）および実験2の空間的注意効果を重ねて図示したものである．実験1は，正面で最も注意効果が高く，そこから離れるごとに徐々にその影響が小さくなる，下に凸形状の空間特性が得られ，実験2では，注意方向に対する選択性を持たない，平坦な特性が得られた．

序論（1.3.4節）でも概観したように，聴覚的注意の空間特性に関する研究は，主張が一貫していない．Arbogast & Kidd [29] は，注意効果はその方向から離れるごとに徐々に低下する，広い窓を持つことを示唆しているが，Teder-Sälejärvi & Hillyard [28] の研究では，注意効果はその方向を中心とした8° 程度の，非常に狭い窓を持つことを報告している（図1.8参照）．本実験の実験1の結果は，その窓は明らかに8° よりはるかに広いことを示していることから，Arbogast & Kidd [29] の結果と一致している．

このような違いを生じさせる要因として，課題の特性の違いが挙げられる．Arbogast & Kidd [29] の実験や本実験（実験1）は，注意方向に関わらず提示された標的刺激に反応する必要があった．言い換えれば，課題の遂行自体には，空間情報を必要としなかった．一方で，Teder-Sälejärvi & Hillyard [28] の実験は，注意方向から聴こえてきた標的刺激にのみ反応する必要があり，課題の遂行に空間情報が必要であった．以

上の結果は，このような聴取課題の特徴によって注意の空間特性が変化する，いわゆるズームレンズ的な振る舞いをすることを示唆している．

このような特徴は，前述した注意モデル（初期選択/後期選択，参照）によって説明できる．Arbogast & Kidd [29] の実験や本実験（実験 1）では，注意を向けた方向の周辺（±60° の範囲）から標的音が提示されても，その正答率や了解度は 10%ほど低下するものの，聴き取れることを示した．これは後期選択的な振る舞いであり，注意を向けなかった方向から聴こえてきた情報も，減衰はされるものの意味の処理がなされることを示唆している．一方で，Teder-Sälejärvi & Hillyard [28] の実験では，注意を向けた方向以外から標的音が提示されても聴き取ることができないことを示した．これは前期選択的な振る舞いであり，注意を向けなかった方向から聴こえてきた情報は早期の段階で失われていることが示唆されている．以上のことは，注意の選択位置は以上のような課題の特性によって変化していることを示唆している．

もし課題の特性の違いによって初期選択か後期選択かが切り替わるのであれば，それは非常に興味深い．近年の研究では，注意における選択が課題に関連する負荷によって決定されると考える，注意の負荷理論（load theory of attention，[69, 70]，総説として [71, 72]）が提唱されている．負荷理論では，課題の知覚的な負荷が高い場合，情報が初期選択され，負荷が低い場合は後期選択されると考えられている．よって，上記の実験で得られた空間特性の違いに関しても，負荷理論で説明できるかもしれない．しかし，注意の負荷理論において，何を負荷と捉えるかという点に関しては現在も批判が多く [72, 73]，どのような課題をどれくらい課すと，注意における選択に影響が及ぶのかについては，現在でも明確にされていない．この問題に関しては，今後脳波や MRI などによる生理心理学的手法を組み合わせた手法によって，負荷と聴覚の空間的注意との関係性について明らかにしていく必要があると考えられる．

本章の実験によって，音声に対する注意の空間特性を明らかにした．しかし，本実験では正面に対する空間的注意についてのみ検討しているため，正面以外でどのような様相をしているかについては，今回の結果からは明らかではない．

この問題を解決すべく第 3 章では，正面以外の方向に対する空間特性（注意窓）について検討する．そのために，第 2 章で得られた，空間的注意効果が頑健に得られる実験 1 の実験デザインを用い，正面以外の方向へ対して空間的注意を向けるように仕向ける．

2.5　まとめ

本章では，聴覚の内因性空間的注意が表出される要因を明らかにすることを目的とした．この目的を達成するために，競合音声存在下での音声聴取と，競合雑音存在下での標的音検出に聴覚の空間的注意が及ぼす影響を検討し，その結果を比較した．その結果，競合音声存在下における音声聴取時でのみ，空間的注意効果が影響を及ぼした．また，その効果は注意を向けた方向を中心とした広がりを持つことを明らかにした．この結果は，聴取課題の遂行に特定の方向へ注意を向け続ける必要がある場合，空間的注意が影響を及ぼすことを示唆した．

第3章　正面以外における内因性注意の空間特性

3.1　はじめに

第 2 章において，聴覚の内因性空間的注意の表出に課題の特性の違い（課題の遂行に，特定の方向へ注意を向け続ける必要があるか否か）が関与していることが示唆された．加えて，この注意が，注意を向けた方向を中心とした，比較的緩やかな分布を持つことが示唆された．

本章では，第 2 章で得られた知見をもとに，検討が十分になされていない正面以外の方向における聴覚の内因性空間的注意が聴き取りに及ぼす影響とその空間特性について検討する．

一般的に，正面から離れるごとに聴覚の空間的な知覚精度は低下することが知られている [74–78]．Mills [74] は，正面での定位誤差は 1°〜2° 程度であるにも関わらず，真横（90°）では 10° 以上の誤差が生じることが報告している．特定の方向から聴こえてくる音を聴き取る際，前章で明らかになったように，特定の方向へ注意を向け続ける必要があることから，その方向へ対する音像定位が伴う．しかし，これまでの聴覚的注意に関する研究は，正面での特性に焦点を当てたものがほとんどで，正面以外での聴き取りに注意が及ぼす影響についてはよく知られていない [79]．そこで本研究では，正面以外における空間的注意の効果と，その空間特性（注意窓）が受ける影響を明らかにする．

以上を踏まえ，本章の構成を以下に示す．第 3.2 節では，±30° 方向における聴覚の空間的注意効果とその空間特性について検討する．第 3.3 節では，後方（180°）における聴覚の空間的注意効果とその空間特性について検討する．最後に，第 3.4 節では，これまでの結果を比較し，聴覚の空間的注意の方位依存性に関して総合的に考察し，本章の結論を述べる．

3.2 実験1：前方における聴覚の内因性注意の空間特性の検討

3.2.1 聴取者

聴取者は正常な聴力をもつ日本語母語話者の成人32名であった（男性19名，女性13名，20–26歳)．聴取者の中に，第2章の実験に参加した者はいなかった．本実験では，聴取者に対するインフォームドコンセントを確実に行い，東北大学電気通信研究所人間対象の研究に関する倫理委員会の承認を受けて実施された．

3.2.2 実験装置および実験刺激

実験装置および実験に用いる音声の種類は第2章の実験1と同様とした．

3.2.3 実験手続き

聴取者は無響室内に設置された椅子に座り，呈示される音声刺激を聴取した．このとき聴取者には，頭は正面を向けて動かさないよう指示した．音声刺激を聴取した後，聴取者は聴き取った標的音声を手元の紙に書き取るよう求めた．この教示にしたがって聴取者は5つのラウドスピーカから同時に呈示される音声刺激の中から，標的音声である女性話者が発声した音声のみを聴き取り回答した．回答時間は音声刺激呈示後の4 s間とし，回答された単語の全てのモーラが一致した場合を正答とした．

本実験も実験2.1の実験と同様，標的音声が呈示される方向が事前に教示される条件（方向教示条件）と，事前教示は行わないが，各方向での標的の出現確率を変化させた条件（確率統制条件）の2条件から構成された．

方向教示条件では，標的音声が呈示される1000 ms前に，標的音声が呈示されるラウドスピーカから500 msのホワイトノイズを呈示し，標的音声が呈示されるラウドスピーカを教示した．聴取者には，ホワイトノイズが呈示された方向から標的音声が呈示されること，および，注意をその方向に素早く向けて音声を聴くよう求めた．この条件を一方向あたり20単語 × 5方向（0°, ±30°, ±60°）で，計100試行行った．

確率統制条件では，標的音声が呈示される方向はランダムに設定した．このとき，注意の方向を統制するために，特定の角度（注意角度）から標的音声が提示される確率を操作した．この条件では2つの注意角度（+30° or −30°）から構成され，各注意角度ごとに16名ずつ参加した（+30° 条件：16名，男性10名，女性6名；−30° 条件：男性9名，女性7名）．Probe-signal法によって，80%の試行で標的音声を標的方向+30°（or −30°）から呈示し，残りの20%はそれ以外の方向から呈示した．標的音声

が注意角度（+30° or −30°）からは 320 単語，それ以外は 20 単語 × 4 方向（±30°, ±60°）で，計 400 試行行った．

3.2.4 実験結果・考察

この実験の確率統制条件でも，聴取者の注意を注意角度（+30° or −30°）にひきつけるために，他の角度に比べて 16 倍の試行回数を行っている．このとき，全試行（320 試行）の平均をとってしまうと，注意の効果が得られていない初期の試行での結果と注意効果が得られた後期の試行の結果が含まれてしまうことから，実験結果の比較を行う上で適切ではない．そこで，実験結果の分析の前に，確率統制条件での 0° における，単語了解度と試行回数の関係性を明らかにした．これにより，Probe-signal 法を用いた場合に，注意効果が十分に得られるまでに何試行を要するかを検討した．

結果を図 3.1 に示す．a は注意角度 −30° の際の了解度の推移，b は注意角度 +30° の際の了解度の推移をそれぞれ示す．縦軸と横軸はそれぞれ単語了解度と試行数を示し，点線は結果に対する対数近似によって得られた近似曲線である．実験の結果，どちらの条件でも最初の 20 試行では単語了解度が 50%を下回っていたが，試行回数を経るごとに徐々に了解度が向上し，最終的には 80%程度まで上昇した．それに伴い，近似曲線も徐々に平坦になっていくさまが見て取れる．これは，Probe-signal 法によって空間的注意が各注意角度に徐々にひきつけられ，注意効果によって得られる最大の単語了解度に近づいていることを示している．以上のことを考慮し，正面から標的音声が提示された 320 試行の最後の 20 試行を結果として用いることとした．

実験の結果を図 3.2 に示す．注意角度 0° 条件の結果は，実験 2.1 のものである．縦軸は単語了解度，横軸は標的音声が呈示されたラウドスピーカの方向を示している．

注意角度 −30° の方向教示条件の結果は U 字型になっており，±60° において最も了解度が高く，0° および ±30° では，了解度が 70%で安定していた．一方で，確率統制条件の結果も，±60° において最も了解度が高いことが示された．また，30° において了解度は最も低いことが示された．両条件の結果を比較すると，−30° で 2 条件の結果は一致しており，30° と 60° において 20%程度，確率統制条件の結果が教示条件よりも了解度が低いことが見て取れる．この条件において，実験条件（2; 方向教示/確率統制）と標的音声の呈示方向（5; 0°, ±30°, ±60°）に対して 2 要因分散分析を行ったところ，方向の主効果に有意な差は見られなかった（条件: $F_{1,15} = 4.58, p = .049, \eta_G^2 = .057$; 方向: $F_{4,60} = 11.22, p < .001, \eta_G^2 = .187$; 条件 × 方向: $F_{4,60} = 2.49, p = .052, \eta_G^2 = .027$）．

注意角度 −30° の方向教示条件の結果も U 字型になっており，±60° において最も了解度が高いことが示された．一方で，確率統制条件の結果は，への字を反転させた形状になっており，±60° において最も了解度が高いことが示された．両条件の結果を比較

すると，$-30°$ において 20%程度，確率統制条件の結果が教示条件よりも単語了解度が低いことが見て取れる．また，これまでの結果とは異なり，注意角度から最も遠い $-60°$ において，両条件の了解度の結果がほぼ一致していることが示された．注意角度 $+30°$ 条件では，方向の主効果が有意であった（条件: $F_{1,15} = 2.30, p = .150, \eta_G^2 = .018$; 方向: $F_{4,60} = 12.69, p < .001, \eta_G^2 = .204$; 条件 × 方向: $F_{4,60} = 1.05, p = .391, \eta_G^2 = .021$）．

第 2 章で示した通り，2 条件の差分を求めれば（方向教示条件 − 確率統制条件），両条件に等しく影響を及ぼしている物理的な要因（両耳マスキング差）を排除することができ，注意の空間特性を示すことができる．2 条件の差分の結果を図 3.3 に示す．縦軸は単語了解度の差分の値，横軸は標的音声が呈示されたラウドスピーカの方向を示している．この結果は，注意角度での値が最も低く，注意角度から離れるごとに徐々に値が上昇し，$60°$ 離れると飽和することを示している．

加えて，注意角度の違いが注意の空間特性に及ぼす影響を検討する．比較のために，3 つの注意角度条件の結果の，注意角度からの相対的な距離を示した結果を図 3.4 に示す．どの注意角度条件においても，その分布は同程度であることが見て取れる．

この差分の結果に対して，注意角度条件（3; $-30°/0°/30°$）と標的音声の呈示方向（5; $0°, \pm 30°, \pm 60°$）の 2 要因の分散分析（混合計画）を行った．その結果，交互作用のみが有意であった（条件: $F_{2,49} = 0.35, p = .705, \eta_G^2 = .005$; 方向: $F_{4,196} = 1.42, p = .230, \eta_G^2 = .002$; 条件 × 方向: $F_{4,140} = 2.00, p = .048, \eta_G^2 = .046$）．各提示方向に対する注意角度条件の単純主効果検定を行ったところ，有意な結果は認められなかった．また，各注意角度条件における標的音声提示方向の単純主効果検定を行ったところ，注意角度 $0°$ で，有意な差が認められた（$F_{4,76} = 2.57, p = .046, \eta_G^2 = .074$）．さらに，注意角度 $0°$ 条件に対し，Ryan 法（$p < .05$）による多重比較検定を行ったところ，標的音声提示方向 $0°$ と $60°$ の間に有意な差が見られた．これは，第 2 章でも考察したように，右耳優位性の効果によって，右方向から到来する標的音に対する聴き取りが向上した結果によるものであることが考えられる．以上の結果は，注意角度の違いが空間的注意効果に影響を及ぼさないことを示唆している．

さらに，注意角度の違いが空間特性の分布に及ぼす影響を検討する．ここでは，空間特性の分布を定量的に評価するために，各聴取者の差分の結果に円周ガウス関数の当てはめを行い，その標準偏差を分布と定義した．円周ガウス関数の式を以下に示す．

$$f(\theta|\mu, k) = A\frac{e^{\{k\cos(\theta-\mu)\}}}{2\pi I_0(k)} \tag{3.1}$$

$$I_0(k) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} e^{k\cos\theta}d\theta \tag{3.2}$$

θ は標的音の提示角度を意味する．μ は平均値，すなわち注意の方向，k は標準偏

差，すなわち空間特性の分布を示す．A はガウス関数のスケールであり，$A > 0$ であれば注意の方向を中心とした上に凸の形状，$A < 0$ であれば下に凸な形状を示す．これまでの結果から，注意は注意方向に対して向けられていることが示されていることから，μ を各注意角度，$A = -1$ とした．

加えて，母集団の標準偏差の性質を明確にするために，ブートストラップ法による統計的検定を行った．ブートストラップ法では，標本データから無作為に重複を許して同サンプル分（聴取者が 20 名なら 20 サンプル）抽出し，新たな標本を作成する．ここでは，聴取者 16 名分のデータから 16 サンプル，無作為かつ重複を許して抽出し，上記の円周ガウス関数を回帰することで，空間特性の分布 k を予測する．このサンプリングを各注意角度条件についてそれぞれ 10000 回ずつ繰り返し，k を求めた．

図 3.5 に 10000 回抽出および回帰を行った k の結果のヒストグラムを示す．縦軸が頻度，横軸が標準偏差，すなわち空間特性の分布を示す．

結果を見てみると，注意角度 0° 条件では標準偏差のピークが 50° 前後の位置にあるのに対し，±30° 条件ではそれが 60〜70° にあることが見て取れる（0° のヒストグラムの平均値：52.10，−30° のヒストグラムの平均値：64.53，+30° のヒストグラムの平均値：59.03）．さらに，0° のヒストグラムの分布は，±30° に比べて非常に狭いことが見て取れる（0° のヒストグラムの標準偏差：3.08，−30° のヒストグラムの標準偏差：12.41，+30° のヒストグラムの標準偏差：7.63）．これは，注意の空間的な分布はどの注意角度においても同等であるが，±30° ではその分布に個人差があることを示している．この結果は，0° に対する空間的な注意が，±30° に比べて非常に精緻であることを示唆している．

注意角度による空間的な分布の違いをより明確にするために，0° 条件および 30°（−30°）条件の標準偏差の差分を取ることで分析を行う．２条件間での標準偏差の差分は，２条件間で空間特性の分布がどれだけ異なるかの指標となる．そして，その差分が 0 に近いほど，空間特性の分布が同一であることを意味する．

しかし本実験では，0° 条件および ±30° 条件には，同じ聴取者は参加していない．この２条件間の差を検討するために，0° 条件のある聴取者の結果と，+30° 条件（または −30° 条件）のある聴取者の結果の平均を同じ 1 人のデータとみなす．これをすべての聴取者の組み合わせについて行い，同じ聴取者の複数角度に対するサンプルを増やす．今回の実験では，0° 条件の 19 名と +30° 条件の 15 名について，計 285 名の聴取者のデータとみなし，それぞれの標準偏差 k を算出する．

分析結果を図 3.6 に示す．縦軸は頻度，横軸は標準偏差の差分をそれぞれ示している．結果を見てみると，どちらの注意角度条件でもヒストグラムのピークは 0° に近い（0° − −30° の平均値：12.45，0° − +30° の平均値：6.94）．どちらの条件でも，ヒストグラムにフィッティングした正規分布の $\pm 2SD$ 区間の間に 0 が含まれている

（$0° - -30°$：[-91.15, 116.05]，$0° - +30°$：[-60.15, 74.04]）．この結果は，注意の空間特性の分布は $0°$ と $\pm 30°$ の間で差がないことを示している．

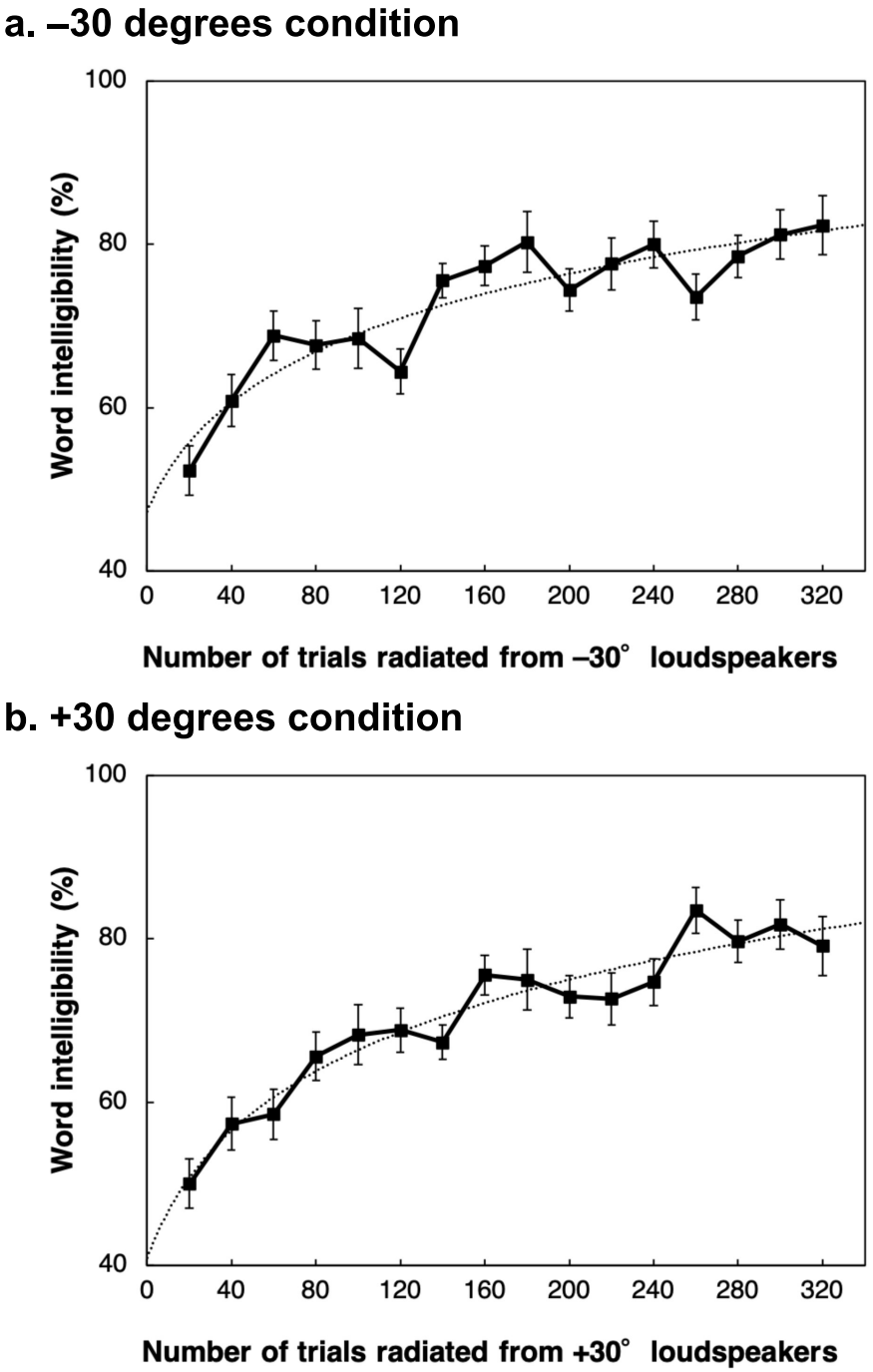


図 3.1: 確率統制条件での注意角度（+30° or −30°）における，試行回数と単語了解度の関係性．a. 注意角度 −30° の際の了解度の推移，b. 注意角度 +30° の際の了解度の推移．縦軸と横軸はそれぞれ単語了解度と試行数，誤差棒は標準誤差を示す．点線は結果に対する対数近似によって得られた近似曲線である．

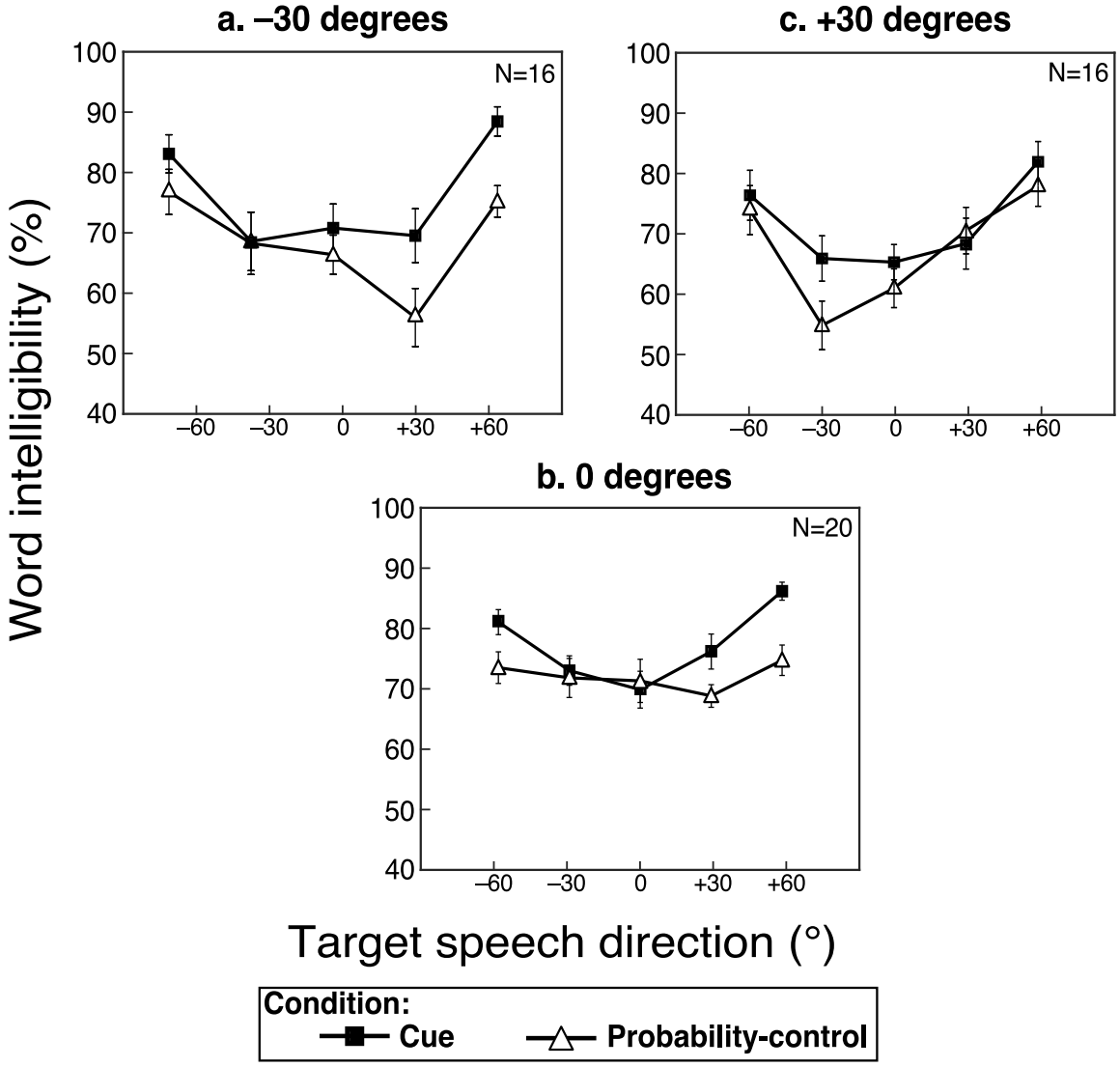


図 3.2: 実験結果．a. 注意角度が −30° の際の単語了解度，a. 注意角度が 0° の際の単語了解度（第 2 章実験 1 の結果），c. 注意角度が +30° の際の単語了解度を示す．四角は方向教示条件（Cue），三角は確率統制条件（Probability-control）の結果，誤差棒は標準誤差を示す．

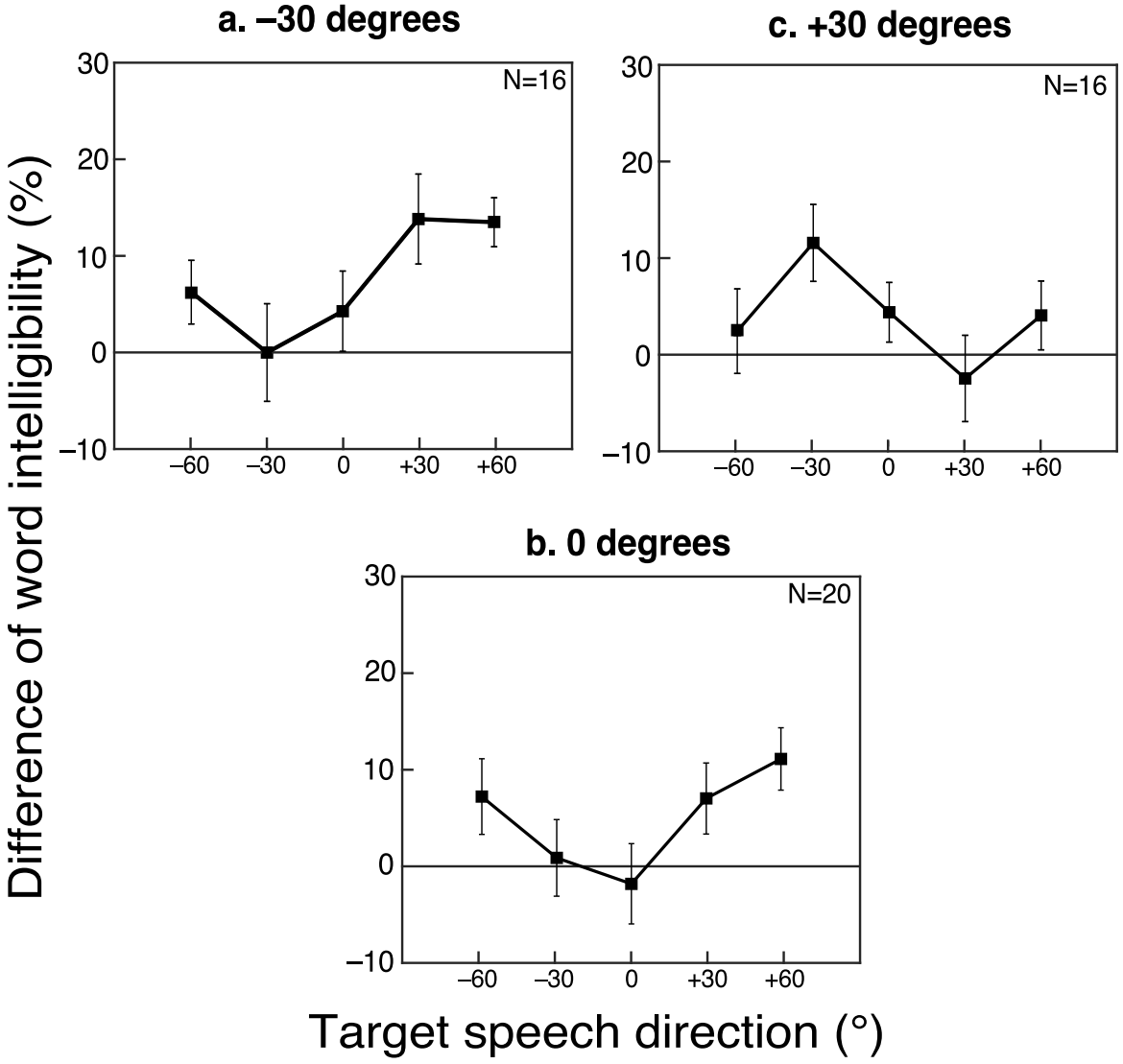


図 3.3: 2 条件の差分の結果（方向教示条件 – 確率統制条件）．a. 注意角度 −30° 条件の結果，a. 注意角度 0° 条件の結果（実験 2.1 の結果），c. 注意角度 +30° 条件の結果を示す．誤差棒は標準誤差を示す．

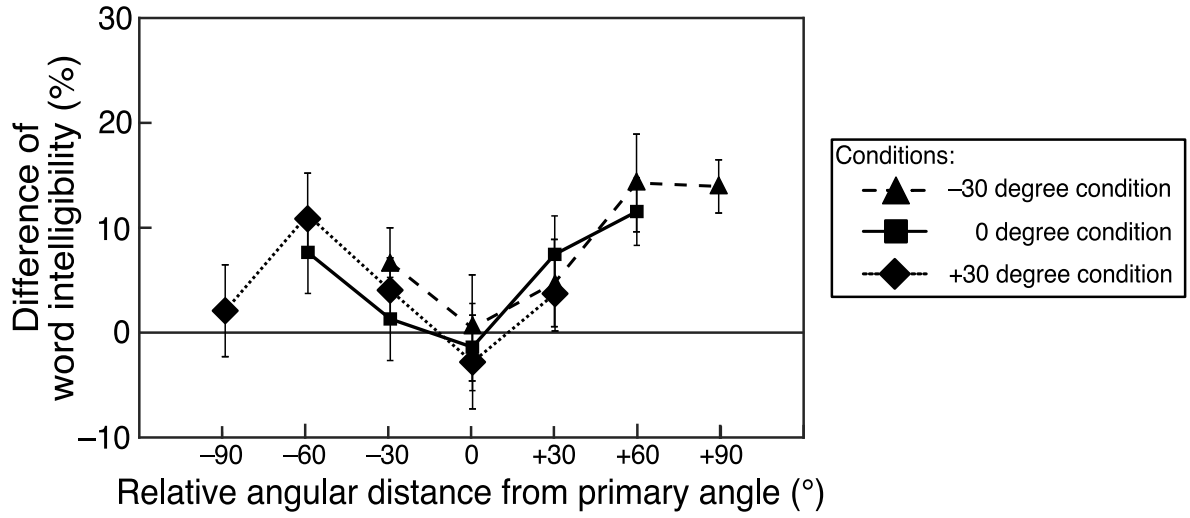


図 3.4: 2 条件の差分の結果（方向教示条件 − 確率統制条件）.

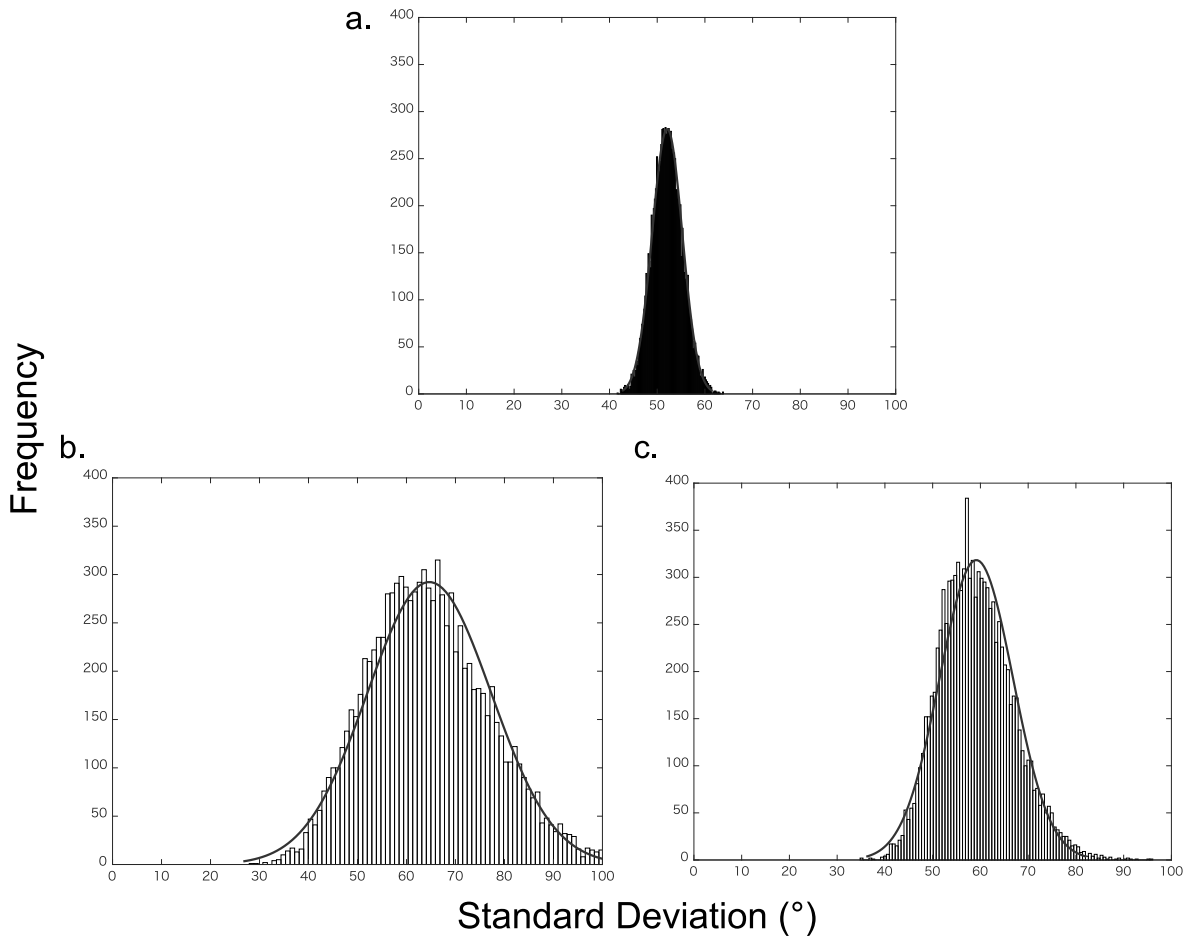


図 3.5: 結果のヒストグラム．a. 注意角度 0° 条件の結果，b. 注意角度 −30° 条件の結果，c. 注意角度 +30° 条件の結果．縦軸は頻度，横軸は標準偏差（注意の空間的な分布）をそれぞれ示す．プロットされた分布はヒストグラムの確率密度関数を示す.

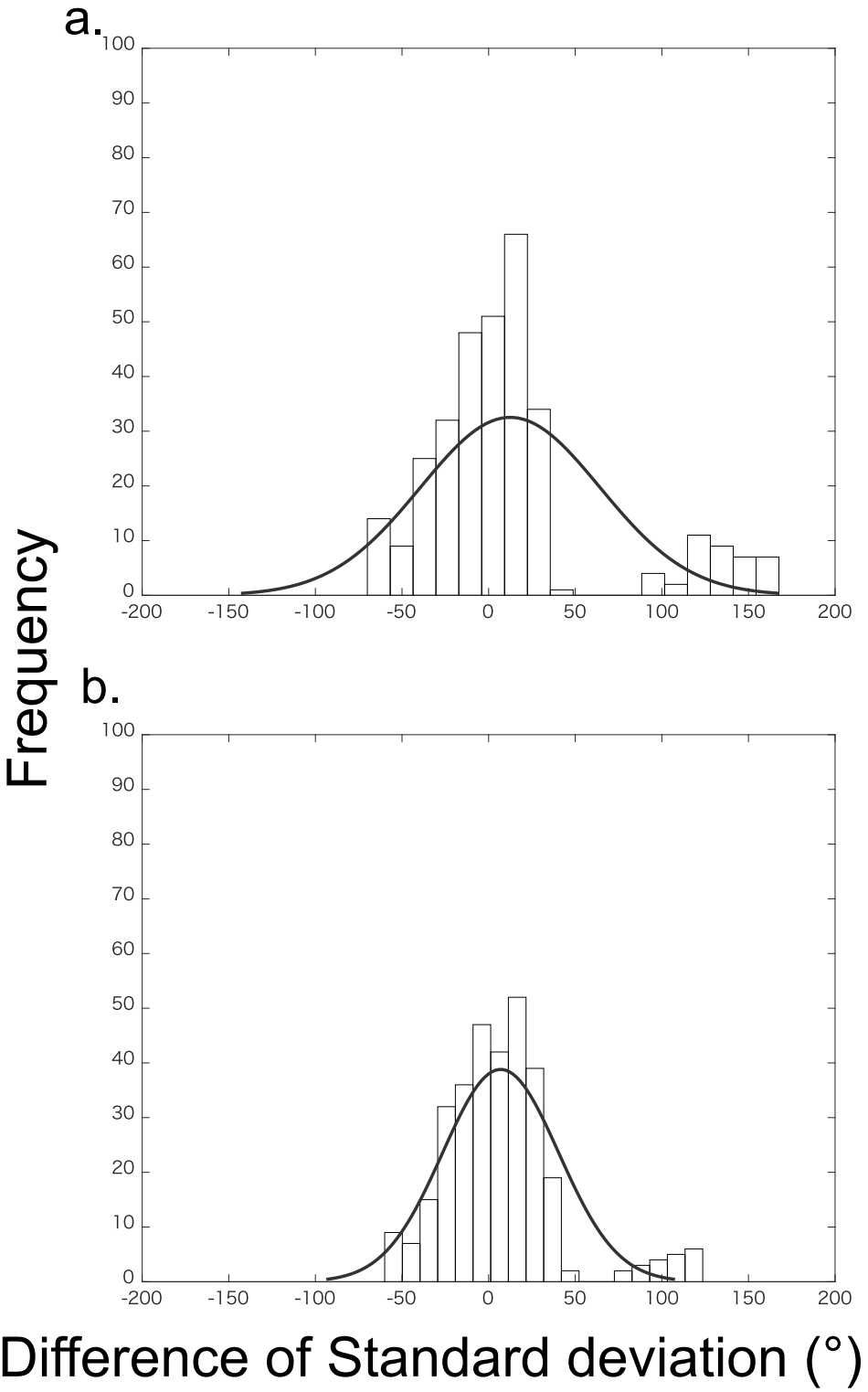


図 3.6: 結果のヒストグラム．a. 注意角度 0° 条件と −30° 条件の比較，b. 注意角度 0° 条件と +30° 条件の比較．縦軸は頻度，横軸は標準偏差の差分（0° 条件の標準偏差 −180° 条件の標準偏差）をそれぞれ示す．プロットされた分布はヒストグラムの確率密度関数を示す．

3.3 実験2：後方における聴覚の内因性注意の空間特性の検討

3.3.1 聴取者

聴取者は正常な聴力をもつ日本語母語話者の成人20名であった（男性11名，女性6名，20–26歳)．聴取者のうち4名は，実験3.1にも参加した聴取者であった．本実験では，聴取者に対するインフォームドコンセントを確実に行い，東北大学電気通信研究所人間対象の研究に関する倫理委員会の承認を受けて実施された．

3.3.2 実験装置および実験刺激

実験装置および実験に用いる音声の種類は第2章の実験1と同様とした．変更点を以下に示す．

実験の概略図を図3.7に示す．ラウドスピーカは，聴取者の頭部から半径1.6 mの円周上に，聴取者の正面方向を0°として，−120°，−150°，180°，+150°，+120°の方向に1個ずつ配置した*．

3.3.3 実験手続き

聴取者は無響室内に設置された椅子に座り，呈示される音声刺激を聴取した．このとき聴取者には，頭は正面を向けて動かさないよう指示した．音声刺激を聴取した後，聴取者は聴き取った標的音声を手元の紙に書き取るよう求めた．この教示にしたがって聴取者は5つのラウドスピーカから同時に呈示される音声刺激の中から，標的音声のみを聴き取り回答した．回答時間は音声刺激呈示後の4 s間とし，回答された単語の全てのモーラが一致した場合を正答とした．

本実験も第2章の実験1の実験と同様，標的音声が呈示される方向が事前に教示される条件（方向教示条件）と，事前教示は行わないが，各方向での標的の出現確率を変化させた条件（確率統制条件）の2条件から構成された．実験を行う順番は被験者ごとにランダムに設定し，カウンターバランスをとった．

方向教示条件では，標的音声が呈示される1000 ms前に，標的音声が呈示されるスピーカから500 msのホワイトノイズを呈示し，標的音声が呈示されるスピーカを教示した．聴取者には，ホワイトノイズが呈示された方向から標的音声が呈示されること，および，注意をその方向に素早く向けて音声を聴くよう求めた．この条件を一方向あたり20単語 × 5方向（180°, ±150°, ±120°）で，計100試行行った．

*負の値は聴取者の正面から左方向，正の値は右方向を指す

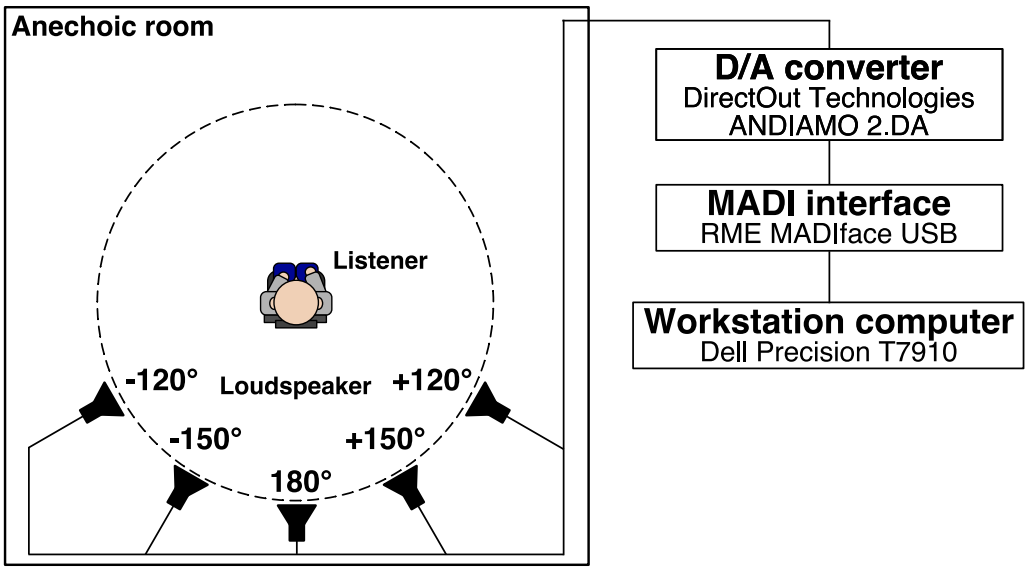


図 3.7: 本章で用いた実験系の概略図.

確率統制条件では，標的音声が呈示される方向はランダムに設定した．このとき，注意の方向を統制するために，特定の角度（注意角度）から標的音声が提示される確率を操作した．Probe-signal 法によって，80%の試行で標的音声を後方（180°）から呈示し，残りの 20%はそれ以外の方向から呈示した．標的音声が標的角度（+30° or −30°）からは 320 単語，それ以外は 20 単語 × 4 方向（±150°, ±120°）で，計 400 試行行った．

3.3.4 実験結果・考察

実験の結果を図 3.8 に示す．方向教示条件の結果は，180° で了解度が最小であり，そこから離れるごとに徐々に了解度が上昇した．一方で，確率統制条件の結果は，標的音声の提示角度によらず一定であることが示された．実験条件（2; 教示/確率統制）と標的音の呈示方向（5; 180°, ±150°, ±120°）に対して 2 要因分散分析を行ったところ，有意な差は見られなかった（条件: $F_{1,16} = 2.29, p = .150, \eta_G^2 = .023$; 方向: $F_{4,64} = 1.46, p = .224, \eta_G^2 = .022$; 条件 × 方向: $F_{4,64} = 0.778, p = .543, \eta_G^2 = .008$）.

本節でも，注意の効果を検討するために，両条件の差分を算出した．二条件の差分の結果を図 2.11 に示す．この結果，後方（180°）での値が最も低く，そこから離れるごとに徐々に値が上昇していることを示している．後方（180°）で最も値が低くなるのは，了解度が両条件で一致しているためであり，この値が一致しているほど，その方向に対する注意効果が高いことを，差分の値が大きくなるほど，その方向に対する注意効果が低いことを意味している．以上の結果は，空間的な注意を後方（180°）

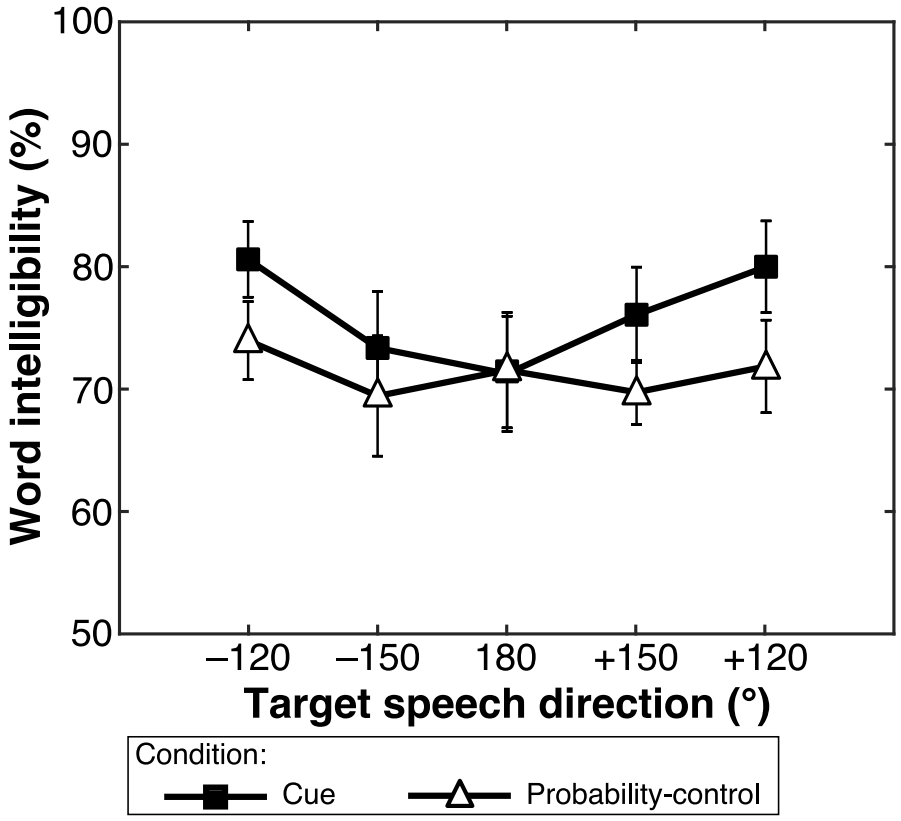


図 3.8: 実験結果．縦軸と横軸はそれぞれ聴覚いき値と標的音の提示角度を示す．四角は方向教示条件（Cue），三角は確率統制条件（Probability-control）の結果，誤差棒は標準誤差を示す．

に向けた場合，後方（180°）を中心とした注意の分布（注意窓）によって，その方向から到来する音を捉えていることを示唆している．

加えて，注意角度の違いが注意の空間特性に及ぼす影響を検討するために，この差分の結果に対して，注意角度条件（2; 0°/180°）と標的音声の呈示方向（5; 0°, ±30°, ±60°）の 2 要因分散分析（混合計画）を行った．その結果，方向の主効果のみが有意であった（条件: $F_{1,35} = 0.02, p = .893, \eta_G^2 = .002$; 方向: $F_{4,140} = 2.92, p = .023, \eta_G^2 = .044$; 条件 × 方向: $F_{4,140} = 0.250, p = .909, \eta_G^2 = .004$）．標的音提示方向について，Ryan 法（$p < .05$）による多重比較検定を行ったところ，0° と 60° の間に有意な差が見られた．この結果も，右耳優位性の効果によって，右方向から到来する標的音に対する聴き取りが向上した結果によるものであることが考えられる．

この結果に関しても，注意角度の違いが空間特性の分布に及ぼす影響を検討するために，円周ガウス関数の当てはめと，ブートストラップ法による分析を行った．今回も各注意角度条件（0°/180°）でそれぞれ 10000 回のサンプリングおよび回帰を行い，標準偏差 k を求めた．

図 3.10 に 10000 回抽出および回帰を行った k の結果のヒストグラムを示す．縦軸

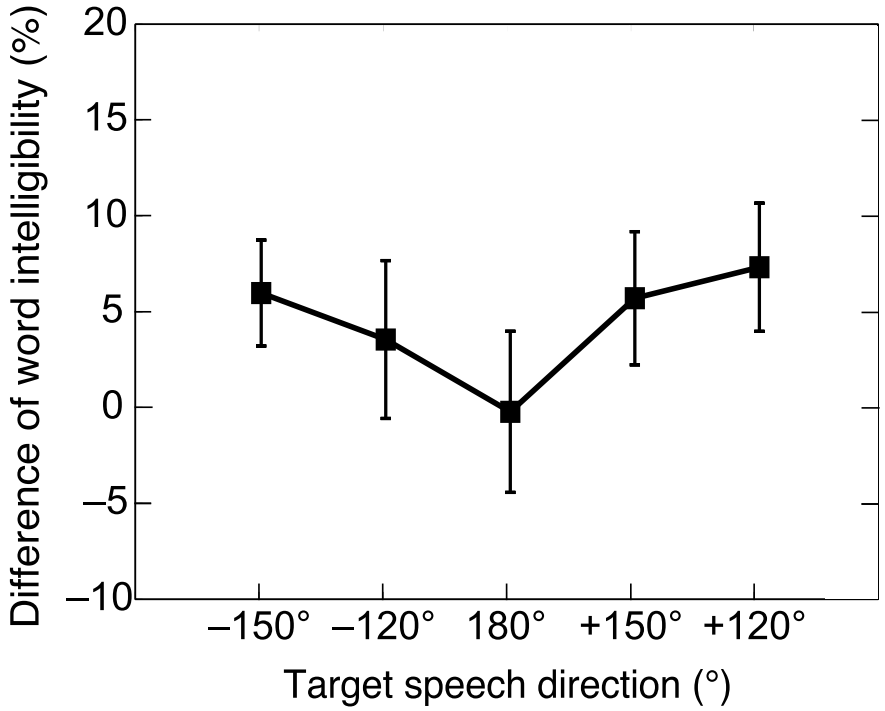


図 3.9: 2 条件の差分の結果（方向教示条件 − 確率統制条件）．誤差棒は標準誤差を示す．

が頻度，横軸が標準偏差，すなわち空間特性の分布を示す．なお，今回の結果には，標準偏差の結果が著しく逸脱した（$k > 1000$）聴取者を除外した．今回の結果からは，各注意角度条件においてそれぞれ 1 名ずつ排除した．よって，注意角度 0° 条件は 19 名，注意角度 +180° 条件は 16 名で分析を行った．

結果を見てみると，実験 3.1 の結果と同じく，注意角度 0° 条件では標準偏差のピークが 50° 前後の位置にあるのに対し，180° 条件では 60° 周辺にあることが見て取れる（0° のヒストグラムの平均値：52.10，180° のヒストグラムの平均値：58.04）．さらに，0° のヒストグラムの分布は，180° に比べて非常に狭いことが見て取れる（0° のヒストグラムの標準偏差：3.08，180° のヒストグラムの標準偏差：10.04）．

実験 3.1 と同様，注意角度による空間的な分布の違いをより明確にするために，0° 条件および 180° 条件の標準偏差の差分を取ることで分析を行う．

分析結果を図 3.11 に示す．結果を見てみると，ヒストグラムのピークは 0° に近いことが見て取れる（0° − 180° の平均値 : 6.04）．この条件でも，ヒストグラムにフィッティングした正規分布の $\pm 2SD$ 区間の間に 0 が含まれている（0° − 180° : [-82.54, 94.62]）．

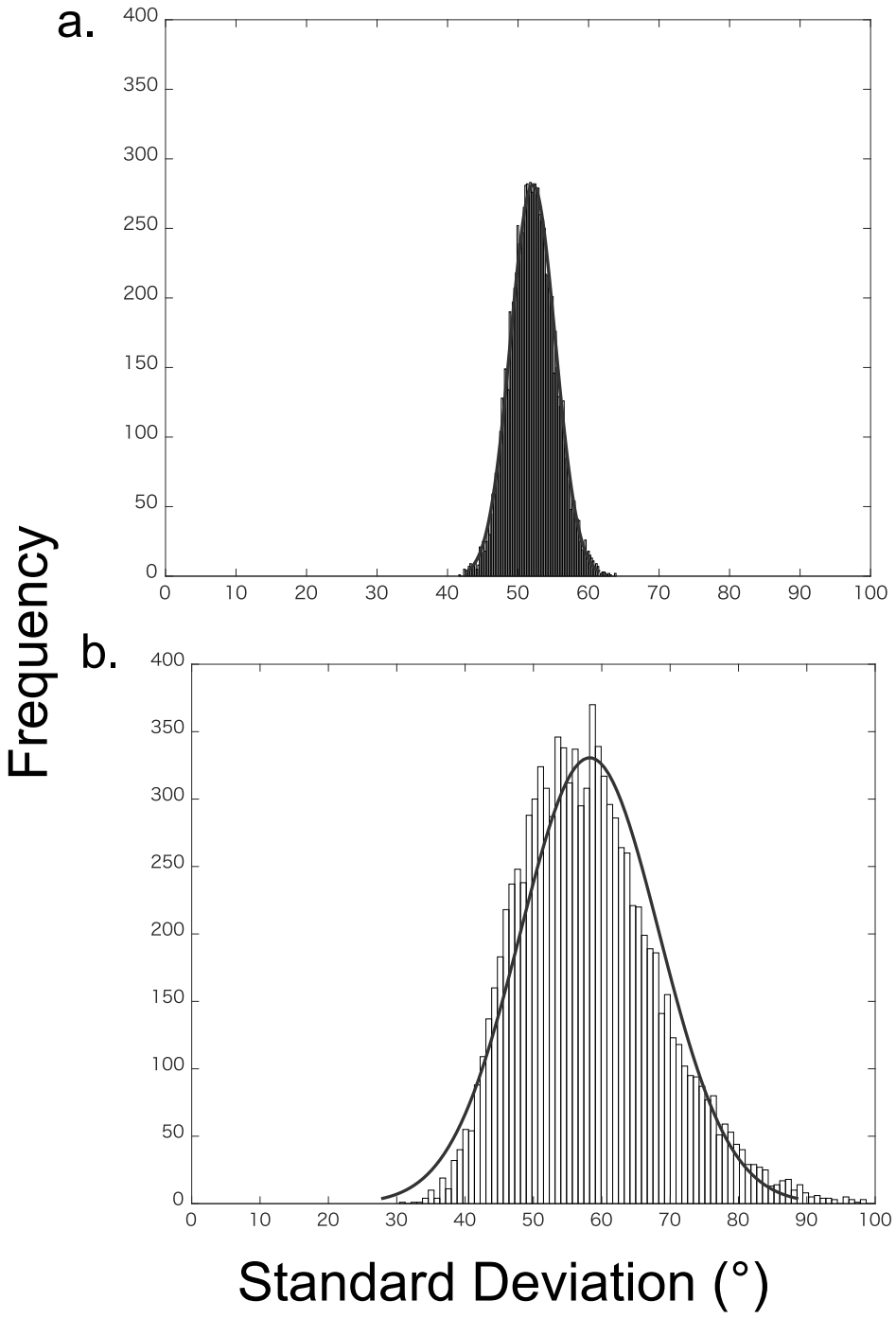


図 3.10: 結果のヒストグラム．a. 注意角度 0° 条件の結果，b. 注意角度 180° 条件の結果．縦軸は頻度，横軸は標準偏差（注意の空間的な分布）をそれぞれ示す．プロットされた分布はヒストグラムの確率密度関数を示す．

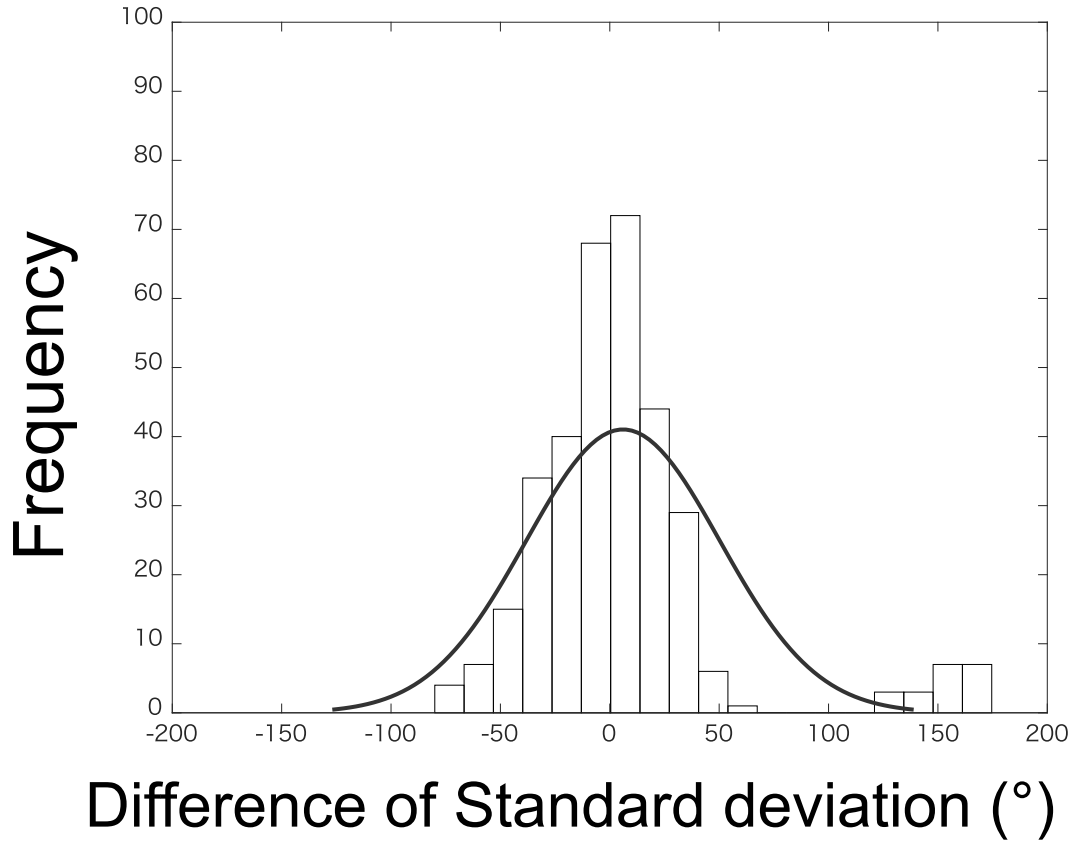


図 3.11: 結果のヒストグラム．注意角度 0° 条件と −30° 条件の比較を示す．縦軸は頻度，横軸は標準偏差の差分（0° 条件の標準偏差 −180° 条件の標準偏差）をそれぞれ示す．プロットされた分布はヒストグラムの確率密度関数を示す．

3.4 全体考察

3.4.1 聴覚の空間知覚特性と注意の空間特性

実験 1 での 2 条件間の差分の結果は（図 3.3），各注意角度において差分の値が小さく，その角度から離れるごとに徐々に値が大きくなっていく，下に凸形状のグラフが見られた．この結果は，第 2 章の結果と同様，空間的注意効果が注意角度から離れるごとに徐々に注意効果が小さくなっていく，注意角度を中心とした注意窓が形成されていることを示している．

一般的には，正面から離れるごとに聴覚の空間的な知覚精度は低下する [74–78]．Mills [74] は，正面（0° 周辺）における音像定位誤差は 1°〜2° 程度であるにも関わらず，側面（90° 周辺）では 10° 程度の誤差が生じることを報告している．

空間的注意を特定の方向へ向ける際，特定の方向から到来する音を選択的に聴取するため，その営みには音像定位が必ず伴う．よって，角度による音像定位精度の違いは，空間的注意効果に影響を及ぼす可能性がある．この注意の方位依存性については，少ないもののいくつか検討がなされている [35,36]．Teder-Sälejärvi et al. [35] は，正面（0° 周辺）と側面（90° 周辺）での空間的注意効果とその注意窓について検討を行っている．実験では，周波数帯域の異なる 82 ms のピンクノイズ（標準刺激：500–5000 Hz，標的刺激：500–15000 Hz）が，被験者の正面方向および側方に設置された 8 つのラウドスピーカ（0°，6°，12°，18°，72°，78°，84°，90°）から提示された．刺激は，1 試行中に 1000 個，連続的に様々な方向からランダムに提示され，標準刺激は試行中の 90%の確率で，標的刺激は残りの 10%の確率で提示された．各試行で注意を向けるよう求める方向（0°，または 90°）を事前教示し，被験者には，正面を向いた状態で，注意角度から標的音が聴こえてきた場合のみ，手元のボタンを素早く押下するよう求めた．

実験の結果を図 3.12 に示す．横軸は標的音の提示角度（1〜8 はそれぞれ，0°〜90° を示す），A が標的音に対する反応時間，B が標的音に対する反応率を示す．標的音に対する反応時間は，注意を向けた角度において最小で，そこから離れるごとに徐々に反応時間が上昇している（図 3.12-A 参照）．しかし，正面（Speaker position = 1）に注意を向けた場合に比べて，側方（Speaker position = 8）へ注意を向けた場合は，反応時間の減少が緩やかであることを示している．標的音に対する反応率も，注意角度で反応率が最大であるが，側方へ注意を向けた場合は，反応率の上昇が緩やかであることを示している．この結果は，空間的注意効果やその空間特性は音像定位精度に依存することを示唆している 3.12.

以上の結果を踏まえ，本研究の結果について考察する．もし空間的注意効果が音像

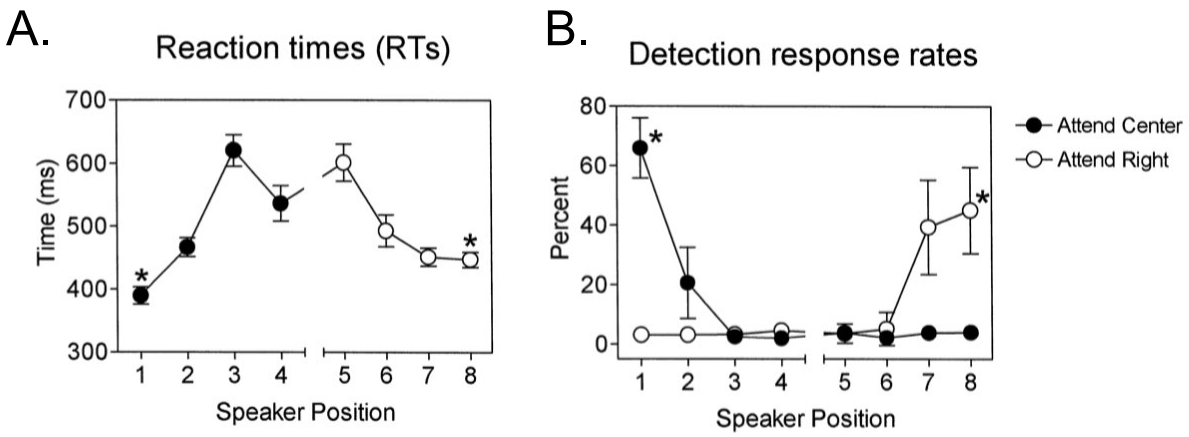


図 3.12: Teder-Sälejärvi et al. [35] の実験結果（Teder-Sälejärvi et al. [35] より一部改変し引用）．A. 標的音に対する反応時間，B. 標的音に対する反応率，*は注意を向けた位置を示す．

定位精度に依存するならば，Teder-Sälejärvi et al. [35] の結果のように，注意の空間特性はなだらかなものになるはずである．本実験の結果は，標準偏差の平均値がどの注意角度条件においても 50°～60° 程度であったことから，空間的注意を 0° 方向へ向けた場合と ±30° 方向へ向けた場合の空間特性は，同程度の分布を持つことを示している（図 3.5 参照）．この結果は，先行研究とは異なり，聴覚の空間知覚特性に依存しないことを示唆している．

この結果の原因として，課題の違いが考えられる．第 2 章で考察したとおり，聴取課題は注意効果に大きな影響を及ぼす．Teder-Sälejärvi et al. [35] の実験での聴取課題は，特定の方向から聴こえてくる標的音声のみに反応するというものであることから，課題の遂行に空間情報が必要であることがわかる．一方で本実験では，課題は聴こえてきた音声を回答するというものであることから，課題の遂行自体には空間情報を必要としなかった．また，本実験と同様に認識課題を用いた Arbogast & Kidd [29] においても，（彼らの研究ではその分布について考察していないが）その分布が Teder-Sälejärvi らの研究で得られた結果に比べて非常になだらかであることが示されている [28, 35]．以上のことから，前者の研究では課題の遂行自体に音像定位を必要としていることから，よりその影響を受けた可能性がある．

3.4.2　空間的注意効果の効果範囲

実験 3.1 の結果は，図 3.4 からも明らかなように，注意角度から 60° 離れると，0°～60° までの傾向から外れることが示されている．具体的には，これまで了解度の差が比較的単調に増加していたのにも関わらず，突然その差が平坦，または減少するこ

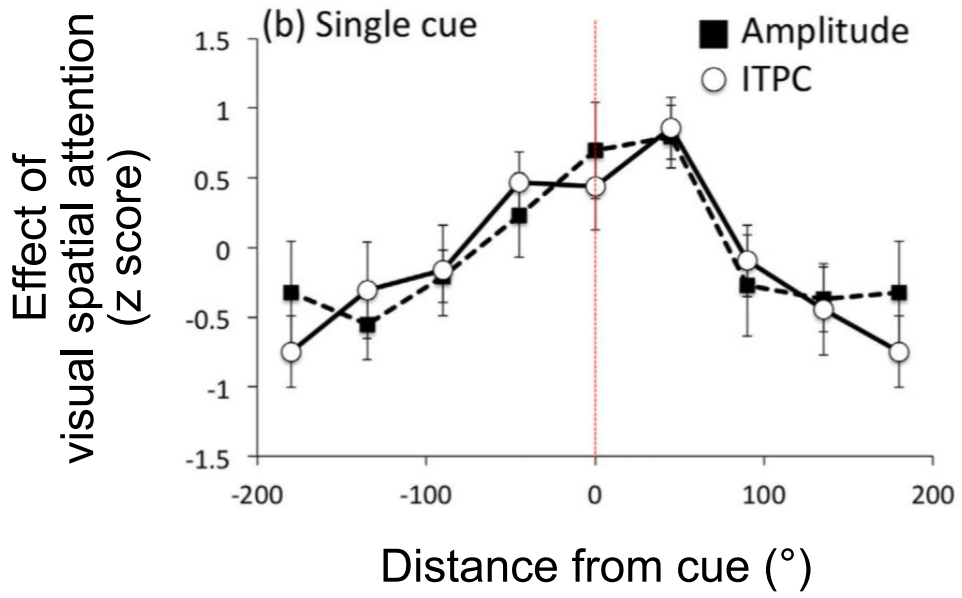


図 3.13: Shioiri et al. [80] の実験結果（Shioiri et al. [80] より一部改変し引用）.

とが示されている．どちらの条件でも同様にこのような様相が現れていることから，空間的注意の特性の 1 つであることが考えられる．

本章の実験 3.1 および実験 3.2 でのブートストラップ法による分析により，空間的注意の分布が 60° 程度であることを明らかにした．これは，差分の結果の傾向が変化した,「注意角度から 60° 離れる」という点と一致する．よってこの傾向の変化は，この注意効果の効果範囲に起因している可能性が高い．

視覚の空間的注意に関する研究では，注意を向けた位置から一定距離離れると，空間的注意による影響が聴き取りに及ぼす影響が小さくなる，いわば飽和することが示されている．例えば，Shioiri et al. [80] では，視覚的な注意を画面上に提示される刺激に向けた際の注意効果の空間的な分布について，脳波による分析を行った．結果を図 3.13 に示す．縦軸と横軸はそれぞれ，注意効果の大きさと，注意からの距離を意味する．この結果では，注意が向けられた方向を 0° としているため，この上に凸形状のグラフは，注意の方向を 0° としたときの注意の空間分布を示している．この結果の，0° から +100° まで単調に低下していた注意効果が，+100° から +200° にかけて，その効果が飽和していることが示された．また，Downing et al. [81] による視覚的注意の空間分布を心理物理学的に計測した研究でも，空間特性は注意を向けた方向を中心とした分布を持ち，一定距離離れると効果が飽和したことを報告している．以上の結果は，視覚的注意によるものであるため，本研究の結果と直接的な比較は難しいが，注意効果の効果範囲から外れるとその効果が飽和するという傾向は，モダリティによらず生じるものかもしれない．

3.4.3　後方での注意効果と空間特性

我々の周囲の大半は，視覚で感じ取ることはできない．見えない位置の事象や物体を把握する際に，聴覚情報は極めて重要な役割を果たすことは間違いなく，聴覚のアドバンテージであるといえる．しかし，後方における聴覚特性に関しては不明な点が多い．

後方における聴覚の空間的な知覚精度は，正面とほぼ同様であることが知られている．Preibisch-Effenberger [82] や Haustein & Schirmer [83] による，360° 全方向での音像定位精度を調査した大規模な研究では，正面と後方での音像定位誤差の差は 2° 程度であることを報告している（Blauert [84] 参照）．また，SRM の効果も，正面と後方で効果は同一であることを報告している（図 1.3 参照）[14]．これは，耳に入力される音響信号の両耳間での物理的な差が生じないことに起因する．以上の結果は，物理的な要因による知覚現象に関しては，正面と同等の効果が得られることを示唆している．

以上の知見を踏まえて，今回の結果を考察する．実験 3.2 の結果，180° に対する注意の空間特性は，実験 2.1 で得られた 0° に対する注意の空間特性と概形が非常に似ており，その注意効果には差がないことを示した．加えて，ブートストラップ法によって得られた標準偏差のヒストグラムより，前後でその分布に差がないことを示した．この結果は，注意の空間特性が正面と後方で，その概形が変わらないことを示唆しており，先行研究で得られた聴覚の空間知覚精度に関する知見と矛盾しない．

3.5　まとめ

本章では，正面以外の方向における聴覚の内因性空間的注意が聴き取りに及ぼす影響とその空間特性について明らかにすることを目的とした．この目的を達成するために，正面以外の方向（±30°/180°）に向けた聴覚の空間的注意が競合音声存在下での音声聴取に及ぼす影響とその空間特性を検討し，その結果を比較した．その結果，どの方向へ注意を向けても，空間的注意効果は同様の空間特性を持つことを示した．また，その空間特性が 60° ほどの広がりを持つことを定量的に明らかにした．

第4章　聴覚の内因性注意の時間特性に関する検討

4.1　はじめに

本章は，第2章で得られた内因性注意に関する知見を踏まえ，内因性空間的注意効果の経時的な変化（時間特性）について検討した．

日常生活においては，実験室実験で使用されるような数十～数百ミリ秒単位の音刺激のみならず，数十秒あるいは数分単位の音列（例：会話）を聴き続ける状況も数多く存在する．また，突然話しかけられた際にすぐにその会話に耳を傾けられないなど，注意を突然特定の方向へ向けることが難しいことは，日常生活での経験からも明らかである．以上のことから，カクテルパーティ環境での音声聴取を体系的に理解するためには，注意の時間特性に関する理解も欠かせない．しかし，聴覚における注意の時間特性についてはほとんど検討がなされておらず，その特性には不明な点が多い．

序論で前述したように，カクテルパーティ環境下における標的音の聴取は,「音脈の分離＋定位」と「選択的な聴取」という2つの段階から構成される．音響信号の持つ特徴の違いや両耳間の物理的な特徴の差異を聴覚系中枢で分析することにより，異なる音源から発せられた音響信号を各イベントごとに分離することができる（1.2節参照）．そしてその情報処理によって分離された音脈の中から，特定の音脈だけを選択的に聴取していることが考えられる（1.3節参照）．これまでの実験デザインで考えてみると，まず手がかりとなる音が提示され，聴取者はその音が提示された方向に対して空間的注意が向く．その結果，その後その方向から到来する標的音に対する処理が促進されるということが考えられる．しかしその際に，手がかり音に対する音像定位や，標的音の提示時に同時に提示される競合音との分離などの情報処理が伴う．よって，現在の実験デザインでは，注意の時間特性を明らかにすることは出来ない．

そこで本章では，聴覚の内因性空間的注意がどのような時間特性を持つのかについて明らかにする．具体的には，注意を向けるまでの猶予の時間を操作することで，注意を向けるまで，または向けた後の注意効果の変容を明らかにする．

第2章において頑健な空間的注意効果の得られた競合音声下での標的音聴取課題を応用し，刺激提示までの時間間隔が聴き取り（音声の了解度）にどれほど影響を及ぼ

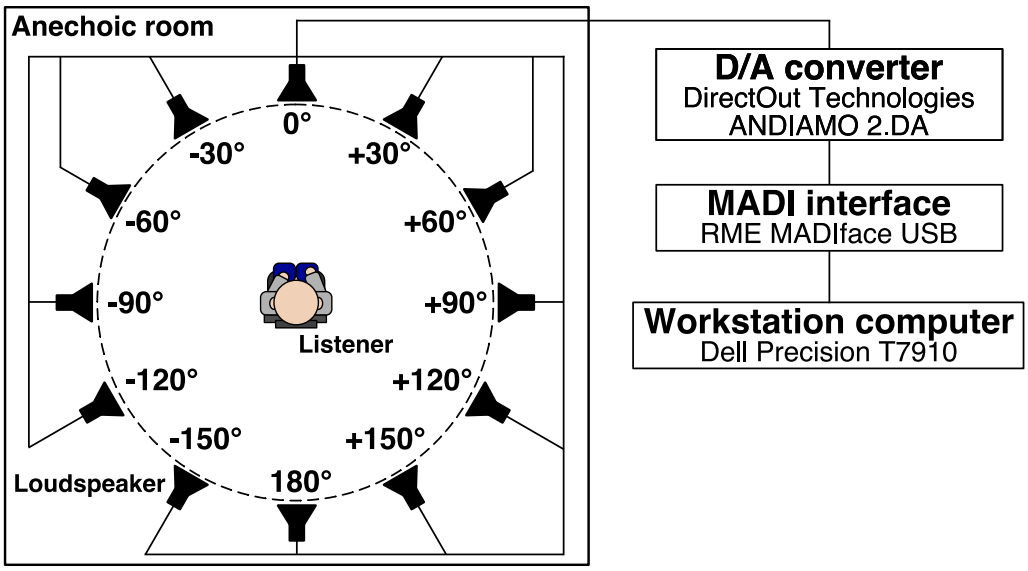


図 4.1: 本章で用いた実験系の概略図

すのかについて定量的な測定を行った．

4.2 実験 1：聴覚の内因性空間的注意の時間特性の検討

4.2.1 聴取者

聴取者は正常な聴力をもつ日本語母語話者の成人 6 名であった（男性 6 名，22–24 歳)．本実験では，聴取者に対するインフォームドコンセントを確実に行い，東北大学電気通信研究所人間対象の研究に関する倫理委員会の承認を受けて実施された．

4.2.2 実験装置および実験刺激

実験系の概略図を図 4.1 に示す．本実験も，無響室に設置された球状ラウドスピーカアレイを使用した．ラウドスピーカを図 4.1 のように，聴取者の頭部から半径 1.6 m の円周上に，聴取者の正面方向を 0° として，30° ごとに 1 個ずつ 12 個のラウドスピーカを設置した．本実験では，標的音は 0°，±60°，±120° の 5 方向からのみ提示し，競合音は標的音提示方向の 1 方向を抜いた 11ヶ所から同時提示された．

実験刺激として，親密度別単語了解度試験用音声データセット (FW03 [51, 52]) に収録されている，男性話者と女声話者によって発話された 4 モーラ単語を用いた．実験では，高親密度 (7.0–5.5) の単語リストに収録されている 1000 単語を用いた．標的音声には，1000 単語の中から，臨床使用のための FW03 の縮小版である親密度別単

語了解度試験用音声データセット 2007 (FW07 [53,54]) にも収録されている 400 単語（20 単語からなるリスト 20 枚）を用いた．競合音声にはその他の 600 単語を用いた．音声刺激の長さは単語ごとに異なり，約 750 ms であった．男性音声 (mya) を競合音声，女性音声 (fhi) を標的音声とした．聴取者の頭の中央の位置において，標的音声および競合音声の A 特性音圧レベル（L_{Aeq}）がそれぞれ 70 dB，および 65 dB になるように呈示音圧を設定した．このレベルは，等価騒音レベルを用いて校正された．このとき，語中の無音区間は無視し，音が継続しているものとみなした．標的音声はランダムに選択された 1 個のラウドスピーカから，競合音声は残りの 11 個のラウドスピーカからそれぞれ同時に呈示された．

4.2.3 実験手続き

聴取者は無響室内に設置された椅子に座り，呈示される音声刺激を聴取した．このとき聴取者には，頭は正面を向けて動かさないよう指示した．音声刺激を聴取した後，聴取者は聴き取った標的音声を手元の紙に書き取るよう求めた．この教示にしたがって聴取者は 12 個のラウドスピーカから同時に呈示される音声刺激の中から，標的音声のみを聴き取り回答した．回答時間は音声刺激呈示後の 4 s 間とし，回答された単語の全てのモーラが一致した場合を正答とした．

本実験の刺激提示条件を図 4.2 に示す．実験では，これまでの実験と同様，標的音声が提示される一定時間前に，標的音声が呈示されるラウドスピーカから 50 ms のホワイトノイズを呈示し，標的音声が提示されるラウドスピーカを教示した．事前刺激であるホワイトノイズの立ち上がりと立ち下がりには，長さが 5 ms の raised-cosine 窓を適用した．このとき，注意の時間特性を明らかにするために，図 4.2 のように，ホワイトノイズの提示から標的音声の提示までの時間間隔（ISI : inter-stimulus interval）を操作した．具体的には，ISI が 100，200，500，1000 ms の 4 条件を用意した．事前刺激の音圧レベルは，音声刺激と同様，聴取者の頭部位置における A 特性音圧レベル（L_{A}）が 65 dB になるように設定した．ここでも，音が継続しているものとみなして，等価騒音レベルを用いて校正された．聴取者には，ホワイトノイズが呈示された後その方向から必ず標的音声が呈示されること，そしてその方向にすばやく注意を向けることを教示した．このような条件を，5 単語 ×5 方向（0°，±60°，±120°）×4ISI 条件（100，200，500，1000 ms）で計 100 試行行った．

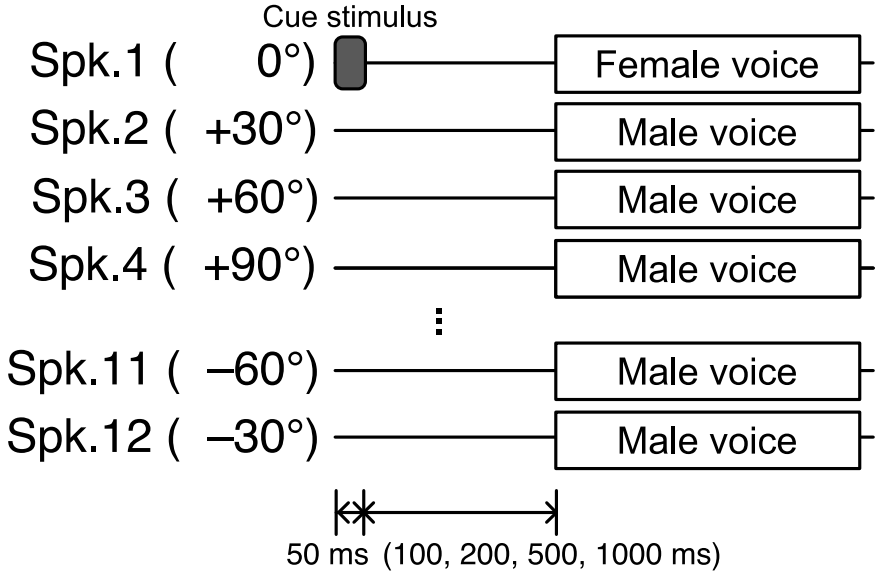


図 4.2: 刺激提示条件

4.2.4 実験結果・考察

この実験でも，回答された単語のすべてのモーラが一致した割合を単語了解度として算出し，指標として用いた．

実験の結果を図 4.3 に示す．縦軸と横軸はそれぞれ単語了解度と手がかり音の呈示から標的音の呈示までの時間差を示す．単語了解度は ISI が 500 ms までは単調増加し，500 ms 後は値がわずかに減少することが見て取れる．この結果について，ISI 条件（4; 100，200，500，1000 ms）を要因とする 1 要因分散分析を行ったところ，有意な結果は得られなかった（$F_{3,15} = 1.25, p = .328, \eta_G^2 = .006$）．この結果は，メタ的には注意の成長が見られたが，統計的に有意な経時的な変化は見られないことを示している．

また，音像定位の方位依存性による効果も考慮し [74]，角度ごとの了解度の経時変化に関する分析も行った．実験の結果を図 4.4 に示す．縦軸と横軸はそれぞれ単語了解度と手がかり音の呈示から標的音の呈示までの時間差を示す．結果を見てみると，その傾向は角度により異なり，0° と ±60° に比べて，±120° で了解度が比較的低いことを示している．これらの結果について，角度条件（5; 0°，±60°，±120°）× ISI 条件（4; 100，200，500，1000 ms）を要因とする 2 要因分散分析を行ったところ，角度条件の主効果が有意であった（角度：$F_{4,20} = 6.58, p = .002, \eta_G^2 = .180$，ISI：$F_{3,15} = 0.92, p = .457, \eta_G^2 = .034$，角度 ×ISI：$F_{12,60} = 1.30, p = .243, \eta_G^2 = .072$）．以上の結果は，有意な経時変化は見られないが，角度における了解度の違いが影響しているかもしれない．

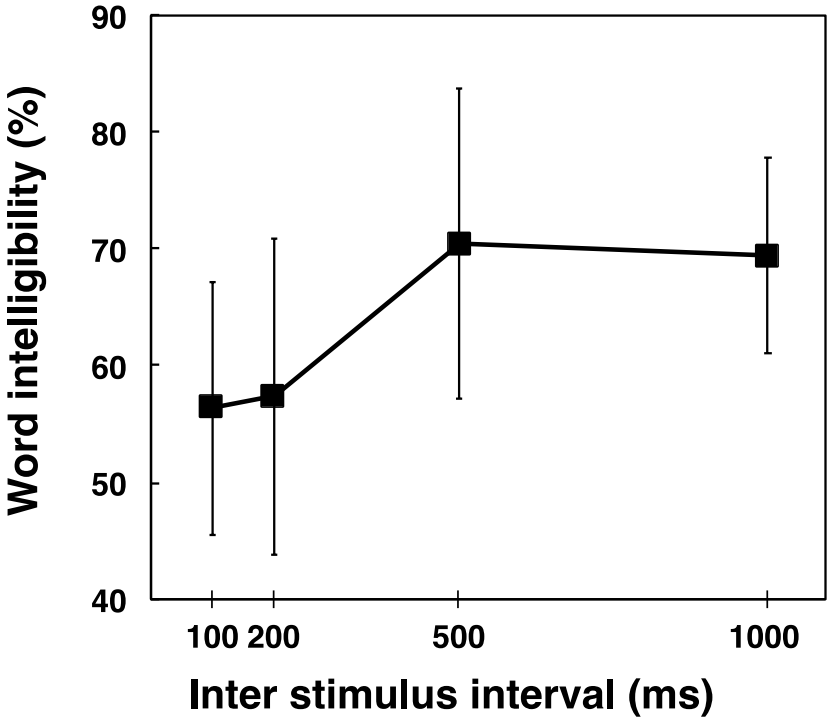


図 4.3: 実験結果．縦軸と横軸はそれぞれ単語了解度と手がかり音の呈示から標的音の呈示までの時間差を示す．誤差棒は標準誤差を示す．

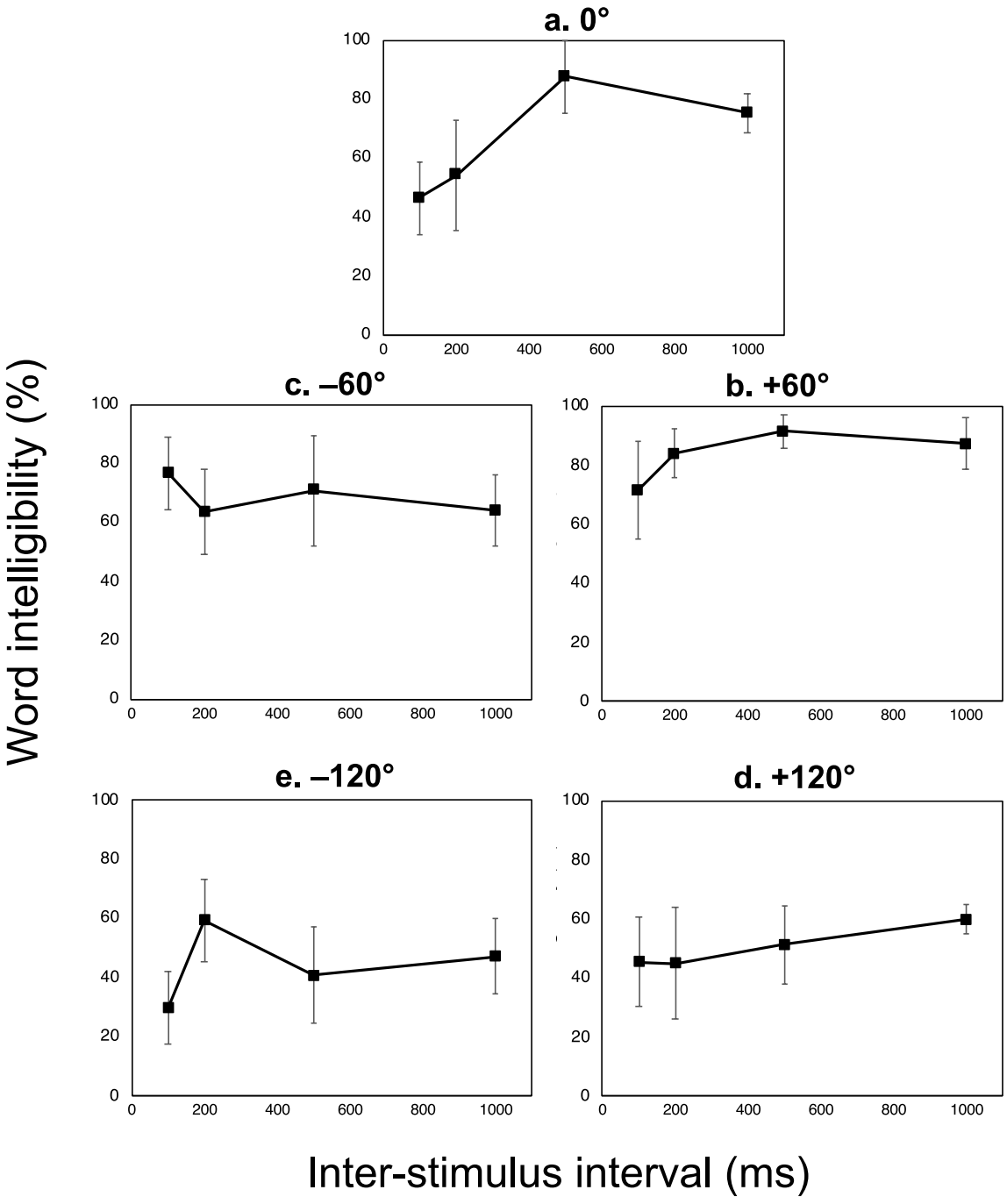


図 4.4: 各方向における単語了解度の経時変化．縦軸と横軸はそれぞれ単語了解度と手がかり音の呈示から標的音の呈示までの時間差を示す．誤差棒は標準誤差を示す．

実験 1 の結果は，統計的には有意な差が見られないものの，ISI が 200〜1000 ms の間に注意効果が最も高い点があることを示している．これは，方向の手がかり音となるホワイトノイズが提示されてから，注意を向けて聴くまでの時間的な流れを反映していることが考えられる．過去の研究では，いわゆる「音脈の分離＋定位」に関係するプロセスは聴覚系中枢（蝸牛神経核〜第一次聴覚野）にて行われ，それにはおよそ 300 ms ほど要することを報告していることから（総説として [85]），本研究で得られた結果とは矛盾しない．しかし，今回の結果はホワイトノイズに対する音像定位にかかる時間も含まれており，また音像定位にかかる時間についても過去の研究で明らかになっていないことから，実際に注意の移動にかかる時間は推定できない．そこで次の実験では，手がかり刺激として視覚刺激と聴覚刺激をそれぞれ採用し，その結果を比較することで，音像定位に関連する要因を排除する．

また，了解度が正面（0°，±60°）と後方（±120°）で異なることや，各角度における試行数が少ないことなど問題点も多い．そこで次の実験では，標的音声の提示角度をこれまでの条件と合わせた正面 5 方向（0°，±30°，±60°）とし，十分に試行数を設けたものとする．

4.3 実験２:手がかり刺激の呈示モダリティの違いが時間特性の及ぼす影響の検討

4.3.1 聴取者

聴取者は正常な聴力をもつ日本語母語話者の成人 6 名であった（男性 4 名，22–24 歳)．本実験では，聴取者に対するインフォームドコンセントを確実に行い，東北大学電気通信研究所人間対象の研究に関する倫理委員会の承認を受けて実施された．

4.3.2 実験装置および実験刺激

実験装置および実験刺激は実験 1 とほぼ同様であった．以下，異なる点を示す．

本実験も，無響室に設置された球状ラウドスピーカアレイを使用した．ラウドスピーカを図 4.1 のように，聴取者の頭部から半径 1.6 m の円周上に，聴取者の正面方向を 0° として，30° ごとに 1 個ずつ 12 個のラウドスピーカを設置した．本実験では，標的音は 0°，±30°，±60° の 5 方向からのみ提示し，競合音は標的音提示方向の 1 方向を抜いた 11ヶ所から同時提示された．

実験刺激として，親密度別単語了解度試験用音声データセット (FW03 [51, 52]) に収録されている，男性話者と女声話者によって発話された 4 モーラ単語を用いた．実

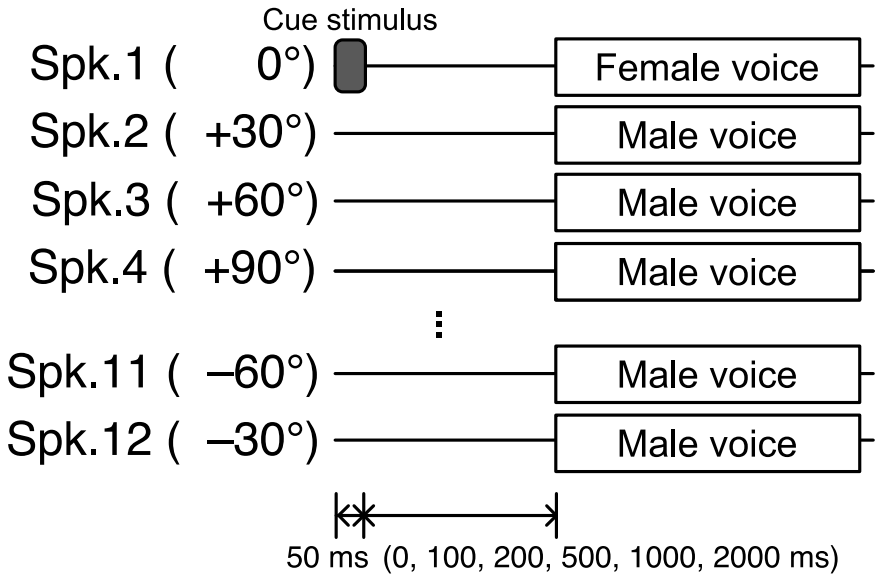


図 4.5: 刺激提示条件

験では，高親密度 (7.0–5.5) の単語リストに収録されている 1000 単語を用いた．

標的音声提示方向の教示のため，白色の LED を標的音声が提示されるラウドスピーカ（0°，±30°，±60°）に設置し，制御に Arduino Uno（Arduino SRL）を使用した．加えて，固視点として赤色 LED を 0° のラウドスピーカに設置した．

4.3.3 実験手続き

本実験では，LED を用いる都合上，無響室内を暗室とした．聴取者は無響室内に設置された椅子に座り，呈示される音声刺激を聴取した．このとき聴取者には，頭は正面を向けて動かさないよう指示した．音声刺激を聴取した後，聴取者は聴き取った標的音声を膝に置いたラップトップコンピュータ（Macbook Pro, Apple）に入力した．この教示にしたがって聴取者は 12 個のラウドスピーカから同時に呈示される音声刺激の中から，標的音声のみを聴き取り回答した．回答時間は音声刺激呈示後の 4 s 間とし，回答された単語の全てのモーラが一致した場合を正答とした．

本実験の刺激提示条件を図 4.5 に示す．実験は，方向教示刺激の影響を検討するために，標的音声が提示される方向を LED で教示する条件（視覚手がかり条件）と同じくホワイトノイズで教示する条件（聴覚手がかり条件）の 2 条件から構成された．

視覚手がかり条件では，標的音声が提示される一定時間前に，標的音声が呈示されるラウドスピーカに設置された LED を 50 ms 点灯させ，標的音声が提示されるラウドスピーカを教示した．このとき，図 4.5 のように，LED の点灯から標的音声の提示までの時間間隔（ISI : inter-stimulus interval）を，0，100，200，500，1000，2000 ms の

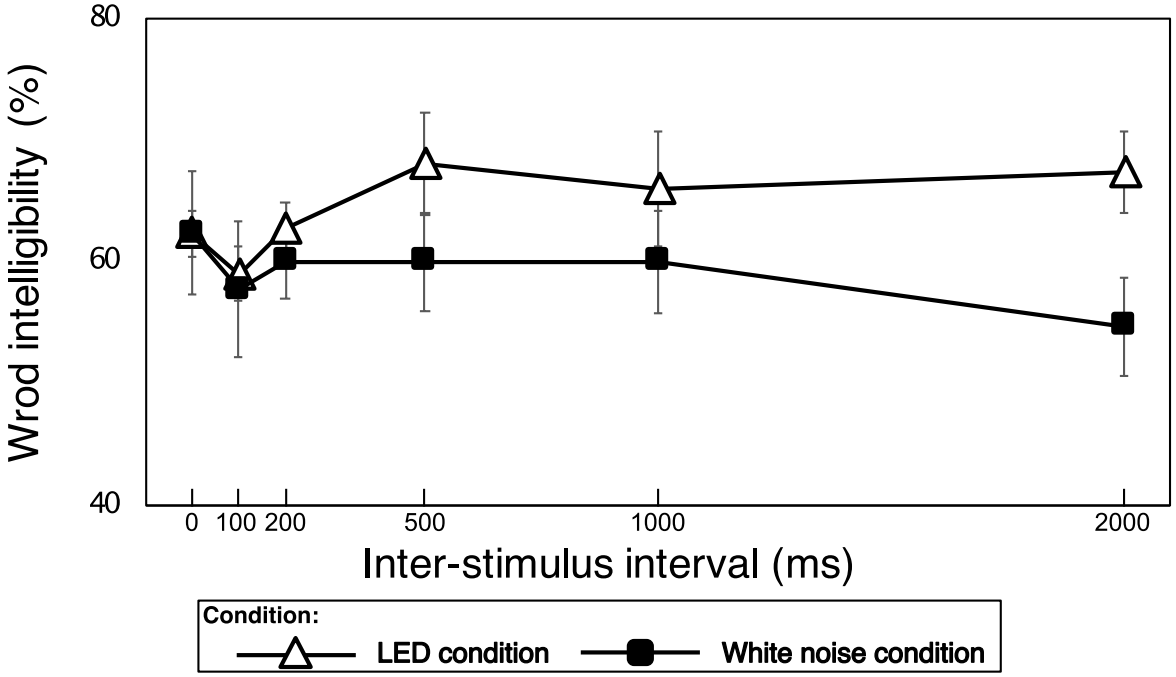


図 4.6: 実験結果．縦軸と横軸はそれぞれ単語了解度と手がかりの呈示から標的音の呈示までの時間差（ISI）を示す．白抜き三角と黒塗り四角はそれぞれ視覚手がかり条件と聴覚手がかり条件の結果を示す．

中から選択した．この条件を，10 単語 ×5 方向（0°，±30°，±60°）×6ISI 条件（100，200，500，1000 ms）で計 300 試行行った．

聴覚手がかり条件では，実験 1 と同様，標的音声が提示される一定時間前に，標的音声が呈示されるラウドスピーカから 50 ms のホワイトノイズを呈示し，標的音声が提示されるラウドスピーカを教示した．この条件も，10 単語 ×5 方向（0°，±30°，±60°）×6ISI 条件（0, 100，200，500，1000, 2000 ms）で計 300 試行行った．以上の 2 条件を各聴取者が順番に行い，その順番はランダムかつカウンターバランスをとった．

聴取者には，手がかり刺激が呈示された後その方向から必ず標的音声が呈示されること，そしてその方向にすばやく注意を向けることを教示した．

4.3.4 実験結果・考察

実験結果を図 4.6 に示す．ISI 条件が 0〜200 ms までは，両条件とも一致して，数% 程度了解度が低下し，その後上昇するという傾向が見られた．しかし，視覚手がかり条件では，ISI が 200 ms〜500 ms までは了解度が上昇し，その後 2000 ms まで了解度は一定であった．一方で聴覚手がかり条件では，200 ms〜1000 ms まで了解度が一

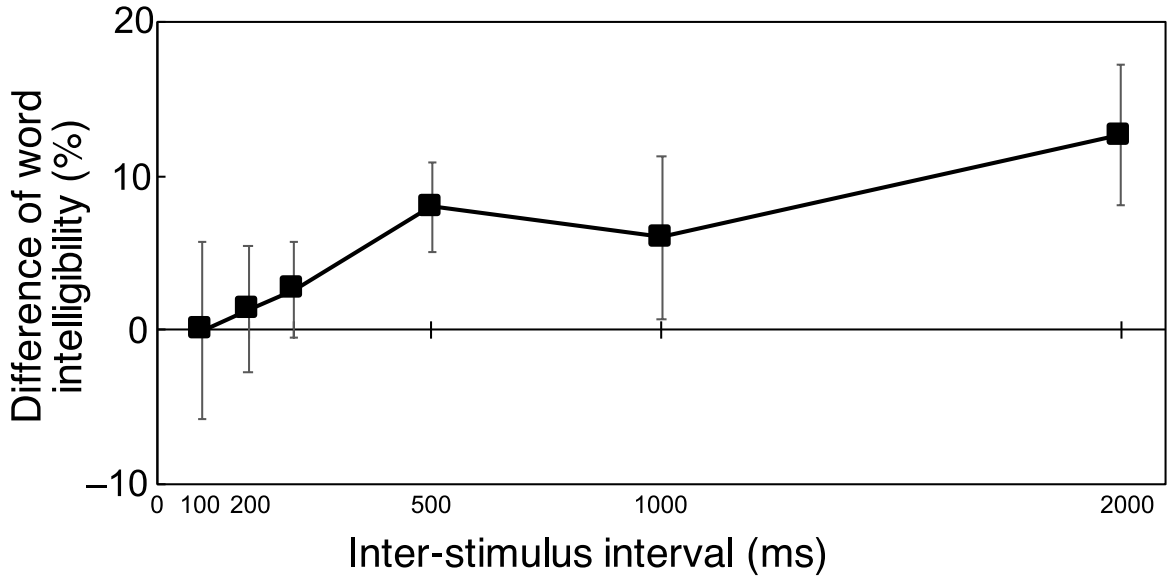


図 4.7: 2 条件の差分の結果（視覚手がかり – 聴覚手がかり条件）．縦軸と横軸はそれぞれ単語了解度の差と手がかりの呈示から標的音の呈示までの時間差（ISI）を示す．

定で，その後了解度は低下した．この結果について，実験条件（2; 視覚手がかり条件/聴覚手がかり条件）と ISI 条件（6; 0，100，200，500，1000，2000 ms）を要因とする 2 要因分散分析を行ったところ，実験条件と ISI 条件の交互作用が有意であった（条件: $F_{1,5} = 2.01, p = .215, \eta_G^2 = .080$; ISI: $F_{5,25} = 2.21, p = .085, \eta_G^2 = .041$; 条件 ×ISI: $F_{5,25} = 2.84, p = .036, \eta_G^2 = .059$）．ISI 条件の単純主効果の検定を行ったところ，ISI=500 ms と 2000 ms において，条件間に有意な差が認められた（500 ms: $F_{1,5} = 7.50, p = .041, \eta_G^2 = .158$; 2000 ms: $F_{1,5} = 7.75, p = .039, \eta_G^2 = .375$）．本実験の結果は，注意をひきつける刺激によって，ISI 条件が 200 ms 以降の結果が大きく異なることを示した．この結果は，注意をひきつける刺激のモダリティの違いが，注意効果に影響を及ぼすことを示唆している．

さらに，ホワイトノイズに対する音像定位の影響などについても検討するため，2 条件間で差分を算出し，注意をひきつける刺激のモダリティの違いの効果をより明確にした．その結果を図 4.7 に示す．0 ms の時点では 2 条件間に差は見られないが，500 ms までに徐々に了解度の差は広がることが示された．また，その後 1000 ms まで了解度の差が減少し，その後再び了解度の差が広がることを示している．この結果について，ISI 条件（6; 0，100，200，500，1000，2000 ms）を要因とする 1 要因分散分析を行ったところ，その主効果が有意であった（$F_{5,25} = 2.84, p = .036, \eta_G^2 = .161$）．この結果は，視覚手がかり条件の方が，短い ISI で注意の効果が得られていることを示唆している．

また，実験 4.1 と同様に，角度ごとの了解度の経時変化に関する分析も行った．実験の結果を図 4.8 に示す．結果は，0° では 2 条件間に大きな差はなく，0° から離れるごとにその差が徐々に大きくなっていることが見て取れる．この結果について，実験条件（2; 視覚手がかり条件/聴覚手がかり条件），角度（5; 0°，±30°，±60°），ISI 条件（6; 0，100，200，500，1000，2000 ms）を要因とする 3 要因分散分析を行ったところ，角度の主効果および，実験条件と ISI 条件，角度と ISI 条件の交互作用が有意であった（条件: $F_{1,5} = 2.01, p = .215, \eta_G^2 = .034$; 角度: $F_{4,20} = 30.43, p < .001, \eta_G^2 = .030$; ISI: $F_{5,25} = 2.21, p = .085, \eta_G^2 = .041$; 条件 × 角度: $F_{4,20} = 1.22, p = .332, \eta_G^2 = .013$; 条件 ×ISI: $F_{5,25} = 2.84, p = .036, \eta_G^2 = .059$; 角度 ×ISI: $F_{20,100} = 2.70, p < .001, \eta_G^2 = .110$; 条件 $times$ 角度 ×ISI: $F_{20,100} = 1.62, p = .063, \eta_G^2 = .074$）．角度条件の多重比較を行った結果（Ryan 法，$p < .05$），−60° に比べて −30° のほうが了解度が高いことが示された．さらに，角度条件と ISI 条件の交互作用について単純主効果を分析したところ，角度条件において 0 ms，100 ms，200 ms，2000 ms で差が見られ（0 ms: $F_{4,20} = 11.72, p < .001, \eta_G^2 = .405$; 100 ms: $F_{4,20} = 12.42, p < .001, \eta_G^2 = .426$; 200 ms: $F_{4,20} = 12.909, p < .001, \eta_G^2 = .524$; 2000 ms: $F_{4,20} = 12.82, p < .001, \eta_G^2 = .425$），ISI 条件において −30°，+30°，+60° で差が見られた（−30°: $F_{5,25} = 3.22, p = .022, \eta_G^2 = .162$; +30°: $F_{5,25} = 4.18, p = .006, \eta_G^2 = .148$; +60°: $F_{5,25} = 4.09, p = .008, \eta_G^2 = .139$）．以上の結果は，0° から離れると，2 条件間の差が広がっていることを示している．この結果は，注意を向ける角度が 0° から離れるごとに，視覚手がかり条件と聴覚手がかり条件の差が広がることを示唆している．

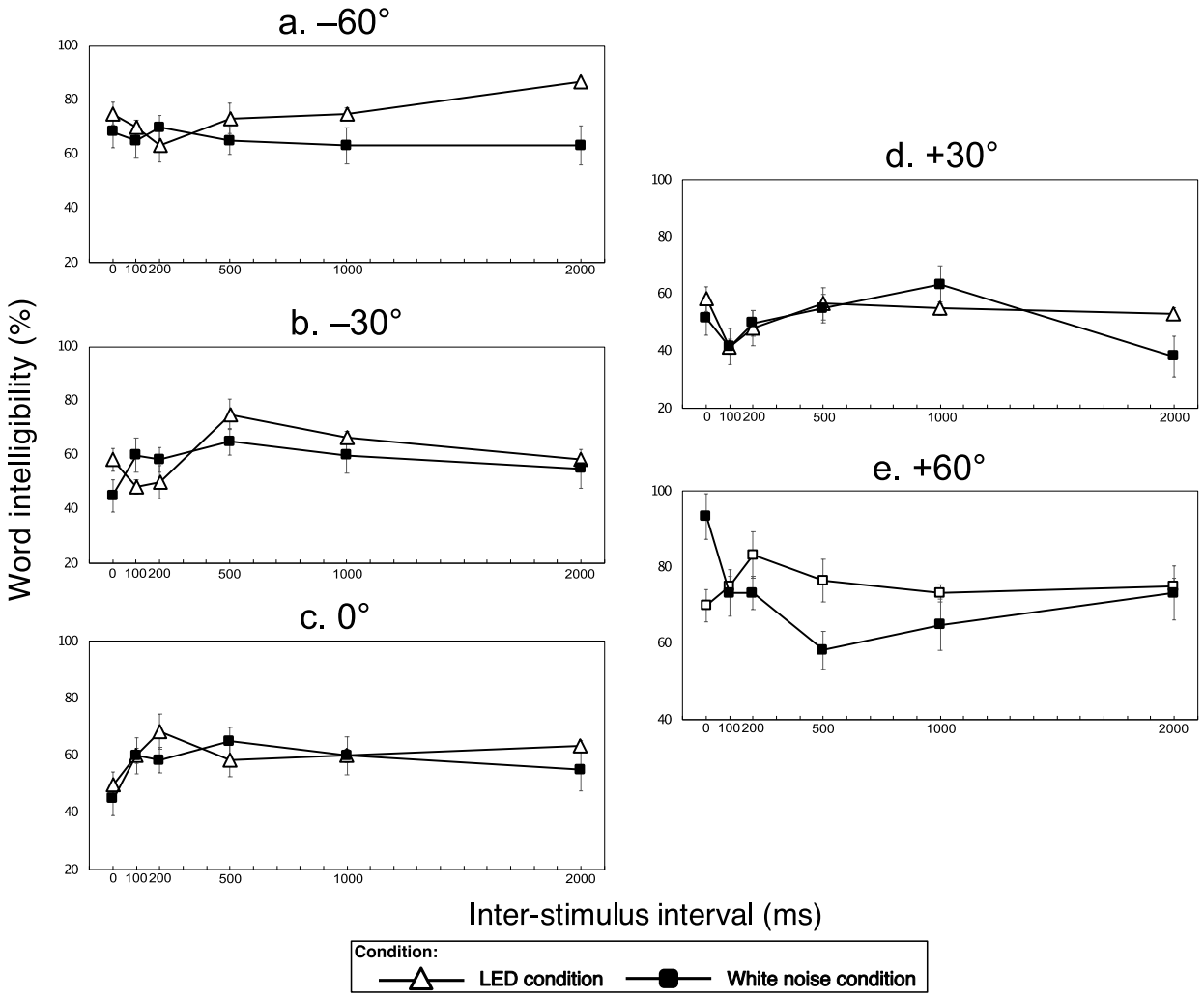


図 4.8: 各方向における単語了解度の経時変化．縦軸と横軸はそれぞれ単語了解度と手がかり音の呈示から標的音の呈示までの時間差を示す．誤差棒は標準誤差を示す．

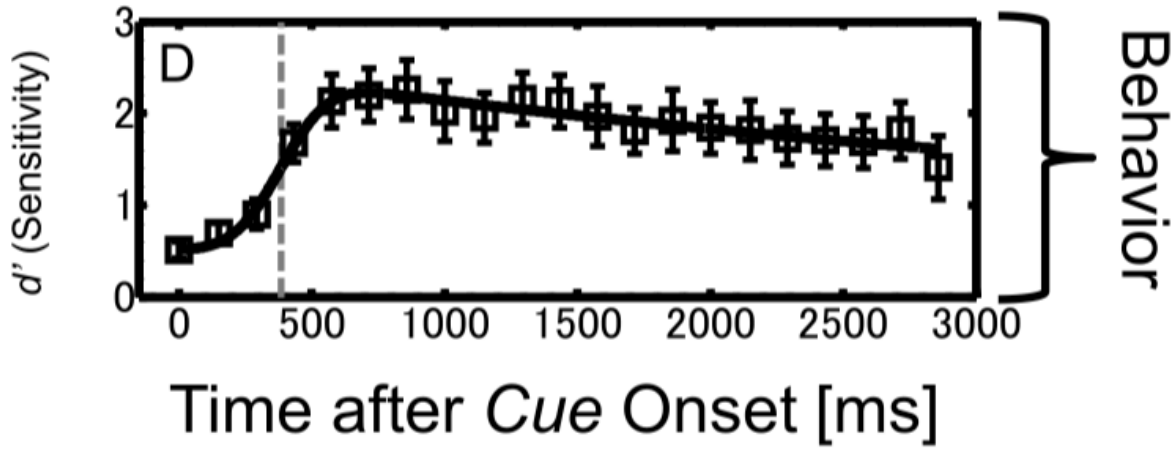


図 4.9: Kashiwase et al. [89] の実験結果（Kashiwase et al. [89] より一部改変し引用）.

4.4 全体考察

4.4.1 先行研究との比較

内因性注意の時間特性は，主に視覚で研究が行われてきた [86–89]．Kashiwase et al. [89] は，標的に対する反応率と脳波を指標に，視覚の空間的注意の時間特性を検討した．実験では，注意をひきつける刺激が提示されてから標的刺激が提示されるまでの時間間隔を操作し，注意の時間特性を検討した．被験者には，画面中央に提示された固視点を注視しながら，その両側に提示される標的刺激に反応するよう求めた．実験の結果を図 4.9 に示す．縦軸は標的刺激に対する反応率であり，横軸は注意を引きつける刺激が提示されてから標的刺激が提示されるまでの時間間隔（ISI）を示す．ISI が 600 ms 前後までは，感度が単調増加しており，その後，感度が徐々に減少していくことが見て取れる．以上の結果は，空間的注意を特定の位置へ向けるまでに 300 ms ほど要することを示唆している．一方で，注意定位後の感度の減少は，注意効果は数秒（2000 ms [90]）持続するとした過去の研究と矛盾する [90,91]．この結果に対し著者らは，注意の一時的な機能不全である，注意の瞬き（Attentional blink, [92]）の影響であると解釈している．

聴覚の内因性注意の時間特性に関する研究もいくつか行われてきた [93]．Monder & Zatorre [93] は，注意の向け直しにかかる時間から，時間特性を検討した．実験では，本実験のように，標的音が提示される方向を予め教示し，その教示音と標的音の刺激間間隔（ISI）を操作した（50，500，950，1400 ms）．また，教示音と標的音の提示位置は，一致する条件（0°）と一致しない条件（45°，90°，135°，180°）の 5 条件を用いた．被験者には，教示音が聴こえた方向へ注意を向け，標的音が聴こえたら素早く反応するよう求めた．その結果，教示音と標的音の提示位置の一致不一致に関

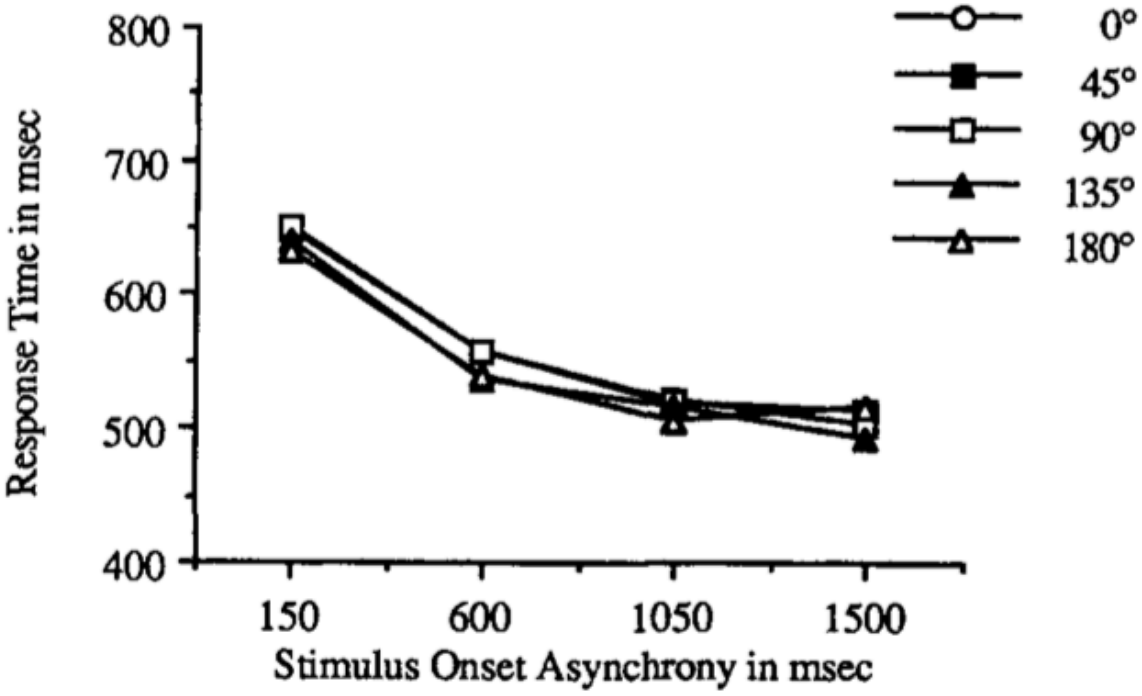


図 4.10: Mondor & Zatorre [93] の実験結果（Mondor & Zatorre [93] より引用）.

わらず，ISI が 600 ms までは反応時間が大きく減少し，その後なだらかに反応時間が減少することが確認された．これは，聴覚の空間的注意の移動に時間を要しないことを示唆している．

一方で今回の結果は，正面（0°）に比べてそれ以外の角度での了解度が低いことを示し（実験 4.1），視覚手がかり条件での結果と聴覚手がかり条件の結果の差が正面（0°）から離れるごとに広くなることを示した（実験 4.1）．これは，空間的注意の移動に時間を要することを示唆しているかもしれない．これまでの空間的注意の研究で，注意の効果が表出できる条件が明らかになっていなかったことと関連し，その時間特性についても「時間を要する条件」と「要しない条件」が存在するかもしれない．この点については，今後さらなる検討を行っていく必要があるだろう．

また，ISI が 600 ms の条件までは急激に反応時間が低下していることから，Kashiwase et al. [89] の結果と一致して，注意の定位には 500〜600 ms ほど時間を要することを示唆している．加えて，過去の視覚の空間的注意の時間特性に関する研究と一致して [90, 91]，注意効果が注意定位後数秒にわたって持続することを示唆している．

4.4.2　予想される注意の時間特性

今回の結果から，内因性空間的注意の時間特性について検討する．前述したように，今回の実験デザインでは，まず手がかり刺激が提示され，聴取者はその音が提示された方向に対して空間的注意が向く．その結果，その後その方向から到来する標的音に対する処理が促進されるということが考えられる．ここでは，この一連の流れに今回の結果を当てはめ，それぞれの情報処理にどれほどの時間を要しているのかについて考察する．

まず，実験 4.1 の結果によって，空間的注意の効果が十分に得られるようになるまで 500 ms ほど要することが明らかになった．これは，注意を向けるまでの時間と考えられることから,「音脈の分離＋定位」＋注意の定位が約 500 ms であることが考えられる．

音像の分離および定位は，蝸牛神経核から第一次聴覚野までの聴覚系中枢で行われていることが明らかになった．聴覚系中枢は，聴覚系での情報処理の中でも特に初期の領域である．過去の研究によって，ERP の潜時から処理領域が推測できることが知られている（総説として [94,95]）．刺激提示後 10 ms に現れる ERP の反応は，脳幹での情報処理を反映していることが知られている．刺激提示後 10 ms から 50 ms の間に現れる反応は，下丘を含む中脳や A1 の情報処理を反映していることが知られている．そして刺激提示後 50 ms 以降の処理は，A1 以降の情報処理を反映していることが知られている．また，聴覚情景分析による音像の分離を ERP によって検討した研究では，その反応が刺激提示後 140 ms から 240 ms に現れることが報告されている [96]．以上のことをまとめると，刺激提示後 250 ms までには音像の分離や定位が始まることが考えられる．注意の定位が始まるのはそれ以降であることが考えられることから，注意を特定の刺激へ向けた際，刺激提示後 200 ms や 300 ms に特有の ERP 反応が現れることが知られている [97,98]．この結果からも，刺激提示後 300 ms 周辺で注意に関する情報処理が始まっていることを示している．

図 4.7 では，視覚手がかり条件と聴覚手がかり条件の差分をとることで，手がかりに対する音像定位にかかる時間を排除した．その結果，ISI が 500 ms まで差が単調に増加することを示したことから，0〜500 ms の間に音像定位の効果が現れていることが考えられる．ここまでの結果から，音像定位は 300 ms までに起こることが考えられる．

4.4.3　手がかり刺激のモダリティの違いが時間特性に及ぼす影響

実験 2 の結果は，手がかり刺激が異なる以外は実験条件が全く一緒であるにも関わらず，ISI 条件が 200 ms 以降の結果は大きく異なる．この結果は，手がかり刺激のモダリティの違い（視覚 vs. 聴覚）が結果に影響していることが考えられる．

過去の研究では，手がかり刺激のモダリティの違いが知覚に及ぼす影響が検討されている（crossmodal-cuing paradigm [99–101]）．Spence & Driver [99] は，視覚的な手がかりが特定の方向から提示されると，その方向から提示された視覚刺激のみならず，聴覚刺激に対しても反応が促進されることを報告している．また，手がかりと標的刺激が同一モダリティ内の場合，複数モダリティに渡る場合に比べて反応が促進されることを示している．

本研究の結果は，聴覚手がかりを用いた実験での音声了解度は視覚のものに比べて低く，Spence & Driver [99] の結果と矛盾する．この点に関しては，今後検討を行う必要があるだろう．

4.5　まとめ

本章では，内因性空間的注意効果の経時的な変化（時間特性）を明らかにすることを目的とした．この目的を達成するために，注意を向けるまでの猶予の時間（ISI）を操作することで，注意を向けるまで，または向けた後の注意効果の変容を明らかにした．

第5章　聴覚の内因性空間的注意に関する総合的考察

5.1　はじめに

本論文ではこれまで，心理物理学的な測定法を用いて，聴覚の空間的注意が聴き取りに及ぼす影響と課題の負荷の違いがその効果に及ぼす影響（第2章），その注意の空間特性の方位依存性（第3章），そして注意効果の経時的な変容（第4章）について検討してきた．以上の知見を組み合わせることで，注意を向けた際の音の聴こえを推測することができ，我々が競合音下で特定の音を聴く情報処理過程，つまりカクテルパーティ効果の情報処理過程の体系的な理解のよすがになることが期待される．このことが明らかになれば，音響学や心理学などの学術分野に与える影響のみならず，ヒトの注意特性を反映した補聴器などの産業応用についても大いに期待できる．このとき，得られた知見を考慮したシステム等の開発には，一連の情報処理の体系的なモデルの構築が重要である．そこで本章では，本論文の集大成として，これまでの実験で得られた知見を踏まえ，競合音存在下での音情報処理のメカニズムの全体像を考察していく．

5.2　得られた知見のまとめ

本節では，本研究で得られた結果を考慮したモデルを構築するために，まず，ここまでに得られた知見を振り返る．

第２章：空間的注意が競合音下での標的音聴取に及ぼす影響

第２章では，聴覚の内因性空間的注意が表出される要因を明らかにすることを目的とした．過去の研究の知見等から，聴取環境と聴取課題の特性の違いが肝要であると考え，本実験では競合音声存在下での音声識別と，競合雑音存在下での標的音検出に聴覚の空間的注意が及ぼす影響を検討し，その結果を比較した．実験では，競合音が複数存在する聴取環境下で，競合音と構造的に類似した標的音を提示した．その結果，競合音声存在下での音声の識別でのみ，空間的注意が影響を及ぼすことを示し

た．この結果は，課題の遂行に特定の方向へ注意を向け続ける必要がある場合，内因性空間的注意が表出に重要であることを示唆している．また，その効果が注意を向けた方向を中心とした広がりを持つことを示した．

第３章：正面以外へ向けられた空間的注意の効果と空間特性

第３章では，正面以外の方向における聴覚の内因性空間的注意が聴き取りに及ぼす影響とその空間特性を明らかにすることを目的とした．この目的を達成するために，第２章の実験デザインを応用し，正面以外の方向（±30°/180°）に向けた聴覚の空間的注意が競合音声存在下での音声聴取に及ぼす影響とその空間特性を検討し，その結果を比較した．その結果，±30° に対する注意効果は 0° に向けられた場合と比べて差は見られなかったが，後方に対する注意効果は正面と異なる結果を示した．この結果は，後方に対する注意効果は，正面方向へ向けられる場合とは様相が異なることを示唆している．

第４章：空間的注意の時間特性

第４章では，聴覚の内因性空間的注意効果の経時的な変化（時間特性）を明らかにすることを目的とした．この目的を達成するために，注意を向けるまでの猶予の時間（ISI）を操作することで，注意を向けるまで，または向けた後の注意効果の変容を明らかにした．その結果，ISI が 500 ms までは注意効果が単調増加し，その後その効果が一定になることが示された．これは，視覚での先行研究と一致し，注意の定位に 500 ms 程度時間を要することを示唆している．

5.3　想定されるモデル

第１章でも考察したように，競合音下での音聴取には「音像の分離＋定位」と「選択的聴取」の２つのプロセスによって実現されていることが考えられる（図 1.11 参照）．本章では，第１章で仮定したモデルをもとに，本研究で得られた知見を考慮したモデルを構築する．加えて，過去の生理心理学的知見から，提案モデルの裏付けを行う．

本研究で得られた知見を考慮したモデルを図 5.1 に示す．この図の Grouping & Segregation / Localization のプロセスまでが「音像の分離＋定位」，それ以降が「注意による選択的聴取」のプロセスを示している*．以降，各プロセスについて概観する．

*今回のモデルでは，他感覚からの入力（視覚情報，頭部回転による自己受容感覚情報など）は無いものとする

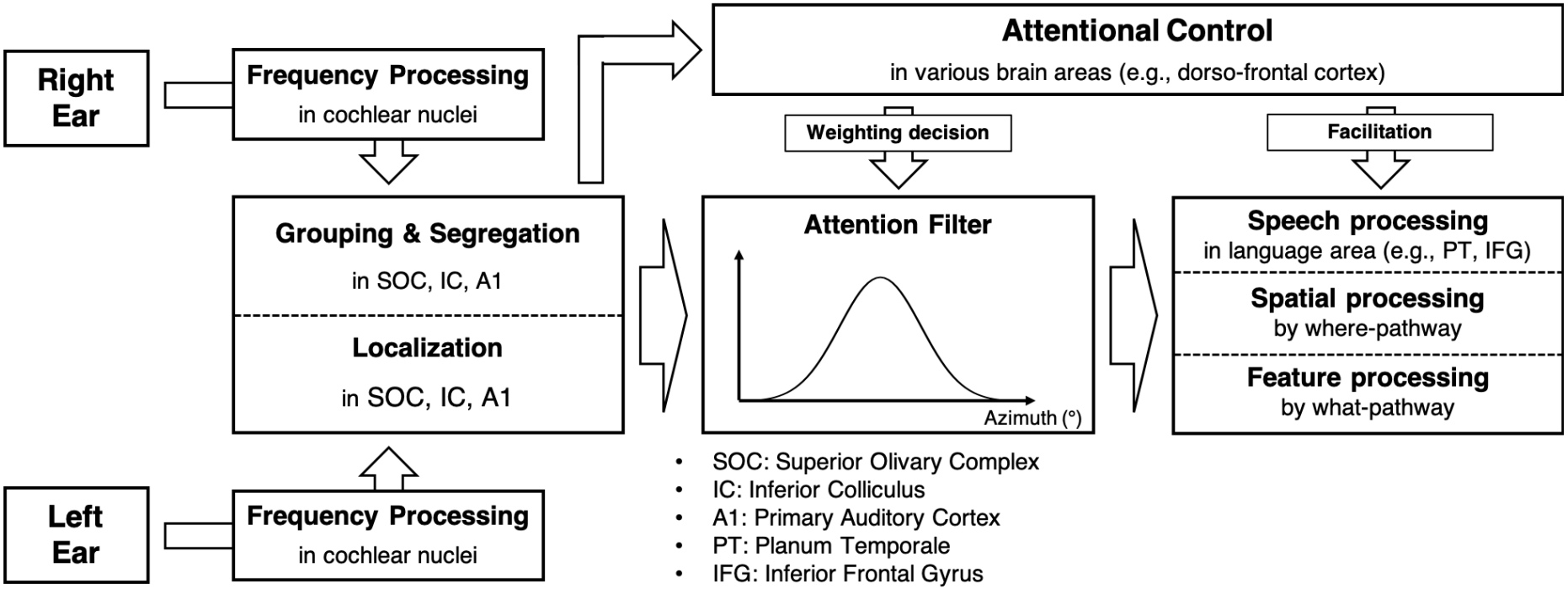


図 5.1: 本研究の結果を考慮した，競合音存在下での選択的聴取モデルの概念図.

5.3.1　音像の分離＋定位

音響信号の物理的な特徴に基づく音像分離や定位は，聴覚情報処理の比較的初期の段階（蝸牛神経核 [102]，下丘 [103, 104]，第一次聴覚野 [105]）で行われることが報告されている（総説として [85]）．

両耳から取得された音響信号は，蝸牛の時点で周波数分解され，音の位相に対応したスパイク列として，蝸牛神経核（cochlear neuclei）に伝達される．この部位は，前腹側核，後腹側核，背側核の 3 領域から構成され，それぞれの発火パターンや情報処理，投射先が異なる．ここで，入力された音響信号の特徴（音のタイミング，振幅の変化）を抽出していると考えられている．

両耳から取得された音響信号の比較が初めて行われるのは，上オリーブ複合体（SOC: Superior olivaly complex）である．ここは，外側上オリーブ核と内側上オリーブ核から構成され，それぞれ音の強度差と時間差を符号化しており，全体として音の方向を検出する部位である．

SOC の各部位で処理された信号は，下丘（IC：inferior colliculus）へ投射される．この部位は，中心核，背側皮質，外側皮質の 3 領域から構成され，音の周波数弁別，音の高さ，聴覚空間の認知など，様々な聴覚機能に関わる．また，視覚や体性感覚などの情報処理を司る上丘（SC：superior colliculus）や大脳皮質との連絡が行われていることが知られており，多感覚統合にも影響を及ぼすと考えられている．過去の研究では，周波数パターンに基づく音像の分離（聴覚情景分析）に下丘の情報処理が関与していることが示唆されている [103, 104]．

ここまで処理されてはじめて，信号は大脳新皮質の第一次聴覚野（A1：primary auditory cortex）に到達する．A1 は脳の側方に位置し，側頭を意味する temporal を用いて，temporal area とも呼ばれる．この部位は，様々な情報処理を司ることが示唆されているが，詳しい機能についてはほとんどわかっていないのが現状である．過去の研究では，基本周波数が異なる音同士を分離する情報処理に，A1 での情報処理が関与していることが示唆されている [105]．

以上の知見をまとめると，周波数の特性が異なる音同士の音像分離には，脳幹から A1 までの，いわゆる聴覚系中枢が大きな役割を果たしていることが考えられる．

5.3.2　注意による選択的聴取

蝸牛から第一次聴覚野までのプロセスによって分離された音響情報は，以降の選択的聴取プロセスによって特定の音のみを優先的に処理される．このことは，そもそも物理的な手がかりで音像ごとに分離できない音の中から特定の音を聞くことができな

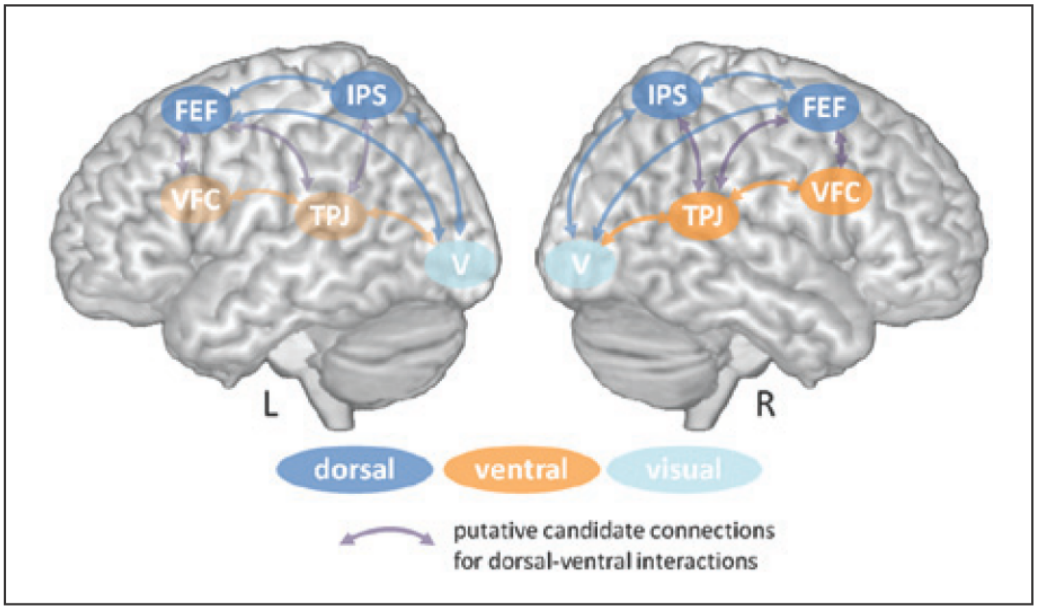


図 5.2: 注意ネットワークの概略図（Vossel et al. [108] より引用）

いという過去の研究からも明らかである []．

注意を特定の感覚モダリティ，空間的な位置，属性などに対して向けることで，感覚入力に対する神経応答が変化することは，脳波（EEG：Electroencephalogram），脳磁図（MEG：Magnetoencephalography），機能的核磁気共鳴画像法（fMRI：functional magnetic resonance imaging）などを用いた生理心理学的，電気生理学的な検討によって明らかにされてきた．このことから，注意を専門に処理する脳領域 or システムが存在し，この注意機構が入力された感覚信号や，他の機構による予測等の情報に基づき，注意を制御していることが考えられる．近年の研究では，内因性注意や外因性注意は，解剖学的に離れた複数の脳領域が互いに情報のやり取りを行う，注意ネットワーク（機能的結合：functional connectivity）によって実現されていると考えられている（総説として [106, 107]）．

図 5.2 に外因性注意と内因性注意の機能的結合を示す．これまでの研究によって，外因性注意は側頭・頭頂葉（TPJ：temporoparietal junction）– 前頭葉（VFC：ventral frontal cortex）間の機能的結合による腹側注意ネットワークが，内因性注意は前頭（FEF：frontal eye fields）– 頭頂連合野（IPS：Intraparietal sulcus）間の機能的結合による背側注意ネットワークが関与していることが報告されている．

音像分離処理が行われた複数の音像は，注意のフィルタによって取捨選択がなされる．このフィルタの形状は，第 2 章で明らかにしたように，聴取課題等の要因によって変化する．競合音の数 [37, 38] や競合音と標的音の類似性 [29]，課題の特性などの

空間的注意効果に影響を及ぼす要因は，その入力信号に依存することから，その音像の分離プロセスから注意情報処理へのボトムアップ的な情報伝達が行われることが予想される．この情報伝達を受けて，注意のフィルタ形状が変化することが考えられる．

上記のような，特定の音を競合音から分離する情報処理も，脳の様々な部位の活動の機能的結合によって実現されることが報告されている．最近の研究では，後上側頭回（pSTG：posterior superior temporal gyrus）や側頭葉水平面（PT：planum temporale）が，このような情報処理に関与していることが示唆されている [?, 109]．よって，これらの領域が空間的注意フィルタによる取捨選択に関与していることが予想される．

また，課題の遂行に空間情報を要する場合，視覚の空間情報処理を司る，視聴覚連合野の一部である上頭頂小葉（SPL：superior parietal lobule）や頭頂間溝（IPS：intraparietal sulcus）が賦活することが報告されている [45, 110]．このような結果は，課題によって空間特性が変化する本実験の結果と対応するかもしれない．

図 5.1 のように，特定の方向に注意を向けることで，その方向から到来する音に対する処理が促進される．取得された音響信号は，各属性（音の認識，より精緻な音像位置の把握，音声なら音声認識）ごとに，様々な領域で並行して処理がなされることが知られている．

大脳の特に聴覚野近傍において，音像が空間のどこにあるのかを理解する空間認識に関わる “Where” 経路と，その音が何であるのかを理解する特徴認識に関わる “What” 経路が存在することが報告されている [42–44]．両方の経路を示した模式図を図 5.3 に示す．

両経路は側頭葉の一次聴覚野（A1：primary auditory cortex）から始まる．“Where” 経路は，A1 に始まり，後頭頂葉皮質（PPC：posterior parietal cortex）を経て，前頭前皮質（PFC：prefrontal cortex）に至る．また，A1 から PFC へ直接投射する経路も存在することが知られている．“Where” 経路での処理は，音がどこから聴こえてきたかという，音空間把握に関連することが知られている．一方で “What” 経路は，A1 に始まり，上側頭回（ST：sperior temporal region）を経て PFC に至る．この経路でも，A1 から PFC へ直接投射する経路も存在する．“What” 経路での処理は，聴こえた音が何の音であるかという，音認識に関連することが知られている．

また，聴取する音が音声である場合，その音声自体の特徴の認識のみならず，何を話していたかという意味理解に関する情報処理も伴う．音声の認識にも “What” 経路が関与していることが示されているが，それと同時に，音声処理に関わる様々な領域が賦活することが報告されている．

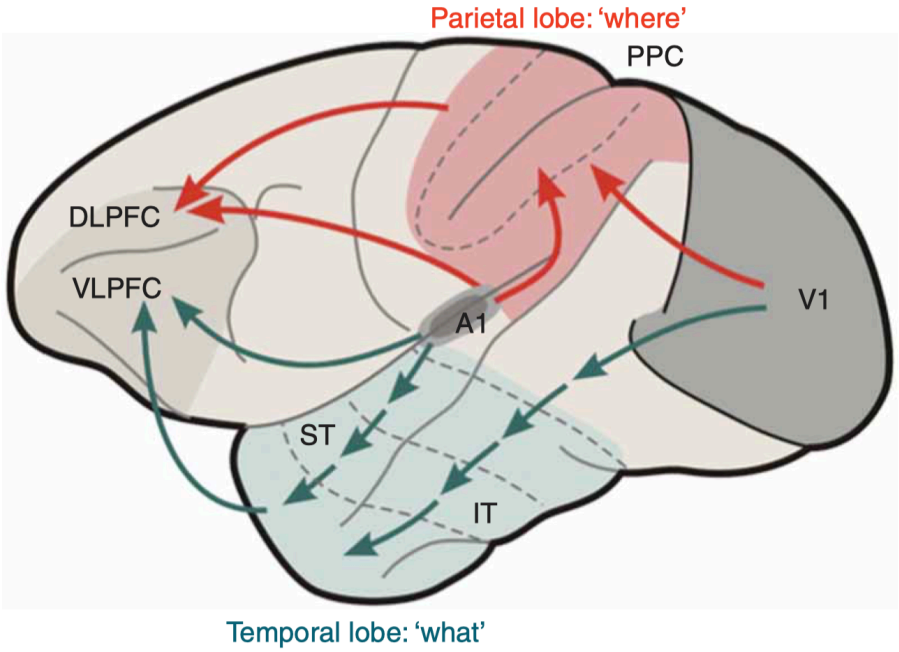


図 5.3: “Where”経路と “What”経路の模式図（Rauschecker & Scott [44]）．この脳はマカク猿のものである．

5.4　まとめ

本章では，第 2 章から第 4 章で見られた聴覚の内因性空間的注意に関する特性について，過去の生理心理学的な知見と比較しながら，競合音存在下での音情報処理のメカニズムについて総合的に検討した．

その結果，これまでの実験で得られた結果を考慮した，競合音存在下での音情報処理モデルを構築した．また，過去の生理心理学的知見によって，このモデルの妥当性を検証することができた．

第6章　結論

日常生活においては，常に膨大な事象や物体から生起し動的に変化する音響信号が飛び交う（i.e., 騒がしい）環境下であっても，耳から取得された非常に複雑な音響信号を聴覚系で処理することによって，特定の音だけを聴き取ることができる（カクテルパーティ効果）．カクテルパーティ効果については，三四半世紀に渡って研究がなされてきたが，その処理メカニズムについては不明な点が多い．このような競合音下での特定音聴取の情報処理過程が明らかになれば，音響学や聴覚心理学分野に対するインパクトはもちろん，認知的な要因による聴覚障害（例：聴覚情報処理障害）の治療法および検査法の縁になることが期待される．

カクテルパーティ効果が生起することが想定される環境下においては，標的音の属性に対して向けられる注意が重要な役割を果たしていることが考えられる．事実，過去の研究は，競合音存在下での標的音聴取においては，特に方向に対する注意が影響を及ぼすことを報告している．しかし，この注意がどれほど聴取に影響し，それがどのような特性を持つのかについては不明な点が多い．そこで本論文では，競合音が存在する環境下でも所望の音を容易に聴き取ることができるメカニズムを検討するために，聴覚の内因性空間的注意が聴き取りに及ぼす影響とその注意窓が持つ特性を解明することを目的とした．

序論では，過去の研究で報告されている，カクテルパーティ効果の生起に関わる知覚的・認知的要因について概観した．具体的には，標的音の物理的な特徴によって生じる音像の分離効果（方向性マスキング解除・聴覚情景分析）と，その特徴に対して向けられる注意効果の影響について詳細に概観した．それを基に，未だに明らかになっていない聴覚の内因性空間的注意について明らかにすべき点を特定し，本研究の目的を述べた．

第２章では，競合音存在下において聴覚の内因性空間的注意の効果が知覚・認知に及ぼす影響から，その効果が生起する要因を明らかにすることを目的とした．この目的を達成するために，競合音声存在下での音声聴取と，競合雑音存在下での標的音検出に聴覚の空間的注意が及ぼす影響を検討し，その結果を比較した．実験では，競合音が複数存在し，競合音と構造的に類似した標的音を聴取するという実験パラダイムで，聴取課題の違いが注意効果に及ぼす影響を計測した．その結果，競合音声存在下

における音声聴取時でのみ，空間的注意効果が影響を及ぼした．また，その効果は注意を向けた方向を中心とした広がりを持つことを明らかにした．この結果は，聴取課題の遂行に特定の方向へ注意を向け続ける必要がある場合，空間的注意が影響を及ぼすことを示唆している．

第 3 章では，第 2 章で得られた正面に対する注意の空間特性をもとに，正面以外の方向における聴覚の内因性空間的注意が聴き取りに及ぼす影響とその空間特性について明らかにすることを目的とした．この目的を達成するために，正面以外の方向（±30°/180°）に向けた聴覚の空間的注意が競合音声存在下での音声聴取に及ぼす影響とその空間特性を検討し，正面に対する効果の結果と比較した．その結果，±30° に対する注意効果は 0° に向けられた場合と比べて差は見られなかったが，後方に対する注意効果は，正面と異なる結果を示した．この結果は，後方に対する注意効果は，正面方向へ向けられる場合とは様相が異なることを示唆している．

第 4 章では，内因性空間的注意効果の経時的な変化（時間特性）を明らかにすることを目的とした．この目的を達成するために，注意方向教示の手がかり刺激の提示から標的音の提示までの提示時間間隔（ISI）を操作することで，注意を向けるまでの猶予を変化させた．これにより，注意の定位に要する時間を検討した．その結果，ISI が 500 ms までは注意効果が単調増加し，その後その効果が一定になることが示された．これは，注意の定位に 500 ms 程度時間を要することを示唆している．

第 5 章では，各章における検討の結果に基づき，競合音存在下での標的音聴取に関する定性的なモデルについて考察を行った．また，過去の生理心理学的な知見を基に，考案したモデルの妥当性を検証した．

最後に，内因性空間的注意の特性および情報処理過程のさらなる解明に向けた課題について述べる．まず，第 2 章で明らかにした生起要因に関しては，どれくらいの時間，特定の方向へ注意を向け続ける必要があるかについても，検討を行う必要がある．また，標的音の音源が動的に変化する環境下での注意効果とその特性についても明らかにしていく必要がある．空間的注意効果の表出に注意を向け続ける必要があるならば，向ける位置が重要なのか特定の音像が重要なのかは，日常生活ではありふれた状況であるが，その詳細は明らかではない．以上のような内因性空間的注意の詳細な生起特性を明らかにすることで，日常生活における注意の役割を明らかにする縁になることが考えられる．

加えて，後方に対する注意の空間特性についても，より詳細な検討が必要であると考える．前述したが，自分の正面から高々±60° 程度しか情報を得ることができない視覚とは異なり，聴覚は常に，360° 様々な方向からの情報を得ることができる．よって，特に情報の得られない後方での聴き取りは，前方に比べて鋭敏であるとの仮説を立てて，第 3 章の実験を実施した．しかし，予想とは異なり，第 3 章の実験の結果

は，後方での空間的注意効果は正面に比べて精度が低いことを示唆している．ヒトの感覚情報処理の特性には生態学的な妥当性があることが考えられることから，後方での注意特性の鈍感さに関しても何かしらの妥当性があることが期待される．過去の研究でも後方の空間的注意効果に焦点を当てた研究は調べた限り存在せず，その疑問に関しても現状答えられていない．

以上において，本研究から得られる知見，および今後の検討課題について述べてきた．本研究の成果が，カクテルパーティ効果の情報処理過程の全容解明，およびその知見を基盤とした，高臨場感システムにおける効果的な刺激提示や，聴きたい音を選択的に聴くことができるスマート補聴器の開発などに貢献することを願って，本論文の結びとする．

付 録A　聴覚の内因性空間的注意が音声聴取に及ぼす影響の予備的検討

A.1　はじめに

本付録では，第 2 章の実験の予備実験として実施した，聴覚の内因性空間的注意が音声聴取に及ぼす影響に関する検討について述べる．

第 2 章の実験を行う前，競合音声存在下での音声聴取に聴覚の内因性空間的注意が及ぼす影響は明らかではなく，その実験法も確立されていなかった．そこで本研究ではまず，注意効果が頑健に現れる実験デザインを構築することを目的とした実験を行った．実験デザインは競合音下での標的音聴取効果を初めて実証した Arbogast & Kidd [29] を参考に，注意が標的音声の聴取に及ぼす影響を，単語了解度を指標として計測した．

A.2　実験

A.2.1　聴取者

聴取者は正常な聴力をもつ，日本語母語話者の成人 8 名であった（20–24 歳，女性 4 名）．

A.2.2　実験装置および実験刺激

実験環境の概略図を図 A.1 に示す．本実験はすべて，東北大学電気通信研究所本館の無響室で実施した．ラウドスピーカを図 A.1 のように，聴取者の正面方向を 0° として，左右 60° の範囲に 30° 間隔で配置した．

標的音声はランダムに選択された 1ヶ所のラウドスピーカから，競合音声は残りの 4ヶ所からそれぞれ同時に呈示された．聴取者には 5 つのラウドスピーカから同時に呈示される音声の中から，標的音声が話す単語のみを聴き取り，回答した．

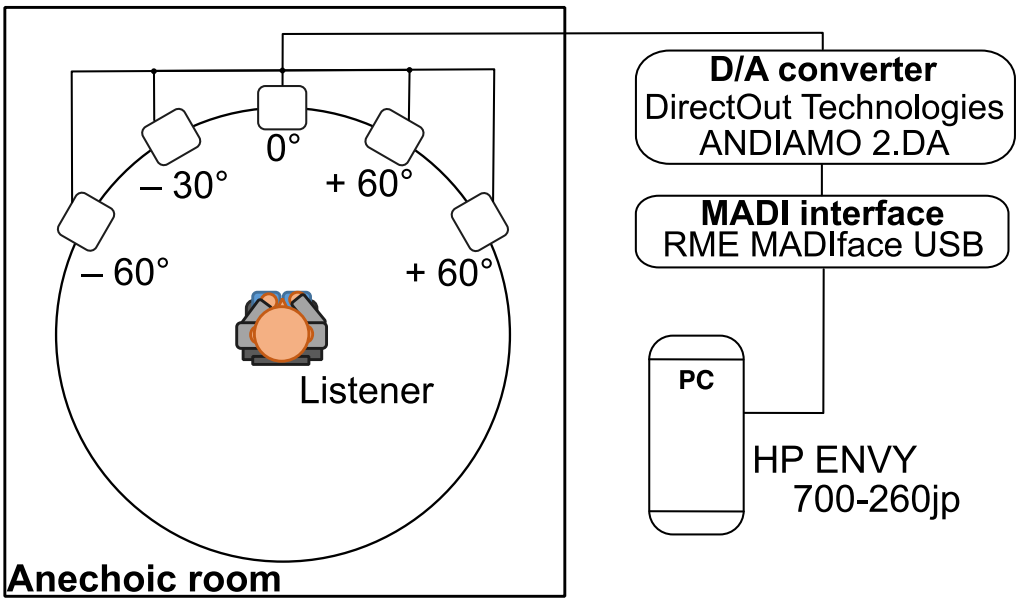


図 A.1: Schema of experiment setup.

音声刺激には，親密度別単語了解度試験用音声データセット（FW07 [53,54]）に収録されている 4 モーラ単語の中から，親密度ランクが 5.5 以上（最大値 7.0）の比較的親密度が高い 20 リスト ×20 単語，計 400 単語を話す男性音声と女性音声を用いた．実験では，女性音声と男性音声をそれぞれ標的音声，競合音声とした．標的音声，競合音声はそれぞれ等価騒音レベル 85 dB，79 dB に調整し呈示した．

A.3　実験結果・考察

本実験の結果を図 A.2 に示す．縦軸は課題の単語了解度，横軸は標的音の呈示方向を示している．四角と三角のマーカーはそれぞれ，統制条件と実験条件を示している．

統制条件の結果は，$-60°$ の単語了解度が他の方向に比べて若干高いものの，単語了解度が 80 %程度で安定していた．この結果について，標的音声の方向（$-60°$/ $-30°$/ $30°$/ $60°$）に対する 1 要因分散分析を行ったところ，有意差は認められなかった（$F_{3,21} = 1.05, p = .390, \eta_G^2 = .073$）．

実験条件の結果は，$-60°$ の単語了解度が他より高く，$-30°$ では単語了解度が他より低くなっていた．この結果についても，標的音声の方向（$-60°$/ $-30°$/ $30°$/ $60°$）に対して 1 要因分散分析を行ったところ，有意な差は認められなかった（$F_{4,28} = 0.86, p = .498, \eta_G^2 = .088$）．

図 2 において，実験条件の結果と統制条件の結果を比べてみると，5-10 %程度，実

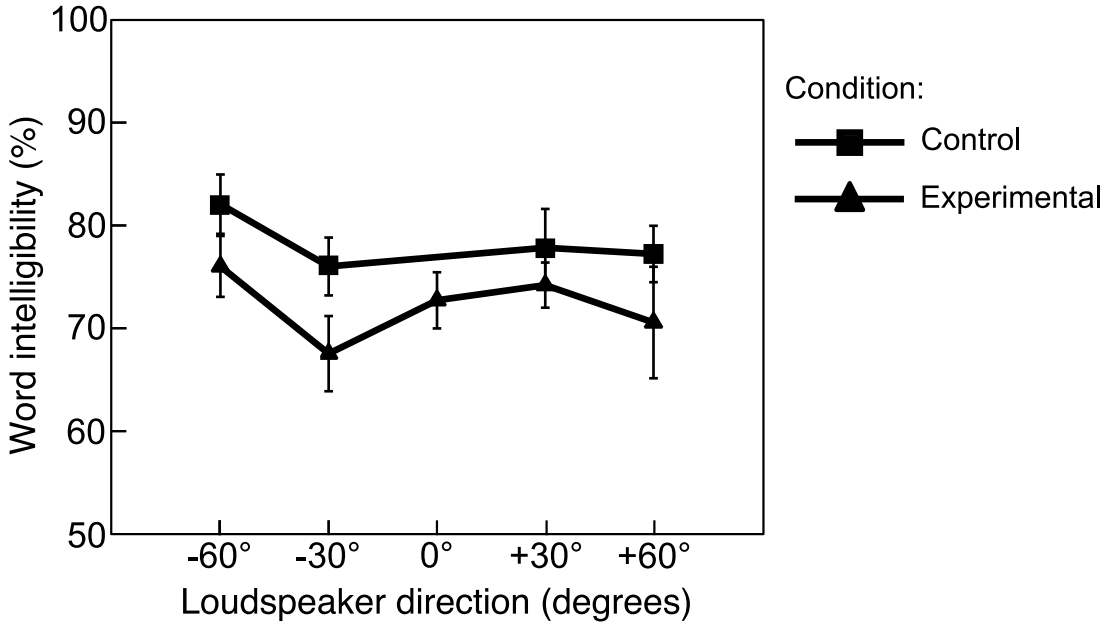


図 A.2: Word intelligibility as a function of the target word direction. Triangles and squares represent the results of the control and experimental conditions, respectively. Error bars denote the standard error of the mean.

験条件の方が単語了解度が低いことが見て取れる．しかし，条件（統制/ 実験）と標的音声の方向（$-60°$/ $-30°$/ $30°$/ $60°$）に対して 2 要因分散分析を行ったところ，有意差は認められなかった（条件: $F_{1,7} = 4.89, p = .063, \eta_G^2 = .105$; 方向: $F_{3,21} = 1.47, p = .253, \eta_G^2 = .080$; 条件 × 方向: $F_{3,21} = 0.21, p = .887, \eta_G^2 = .009$）．

本研究の結果，各条件内，条件間において単語了解度に有意な差は認められなかったが，実験条件では統制条件に比べてで 5-10 %程度高い値を示した．この結果は，標的音声に対する注意の効果によるものであると考えられる．

ところで，実験条件では聴取者の注意は正面にのみ向けさせたため，単語了解度のピークが正面に来ることが期待されたが，得られた結果は $-60°$ や $30°$ の位置にそれが生じていた．これは，実験条件において，空間的注意が正面スピーカに正しく向けられていなかった可能性を示唆している．本実験では，Probe-signal 法によって正面に聴取者の注意が向いているが，統制条件ほど顕示的に向けられていないため注意が向けられるまで時間がかかる可能性がある．そこで，試行回数と単語了解度の変化の関係性を検討した．

正面スピーカから呈示される標的音声の単語了解度の推移を図 A.3 に示す．縦軸は課題の単語了解度，横軸は正面のスピーカ（$0°$）からの標的音声の呈示回数を示している．実線は 20 試行ごとの単語了解度の推移，点線は最小二乗法による回帰直線である．この結果は，最初の 20 試行では単語了解度が 60 %を下回ったが，徐々に単語

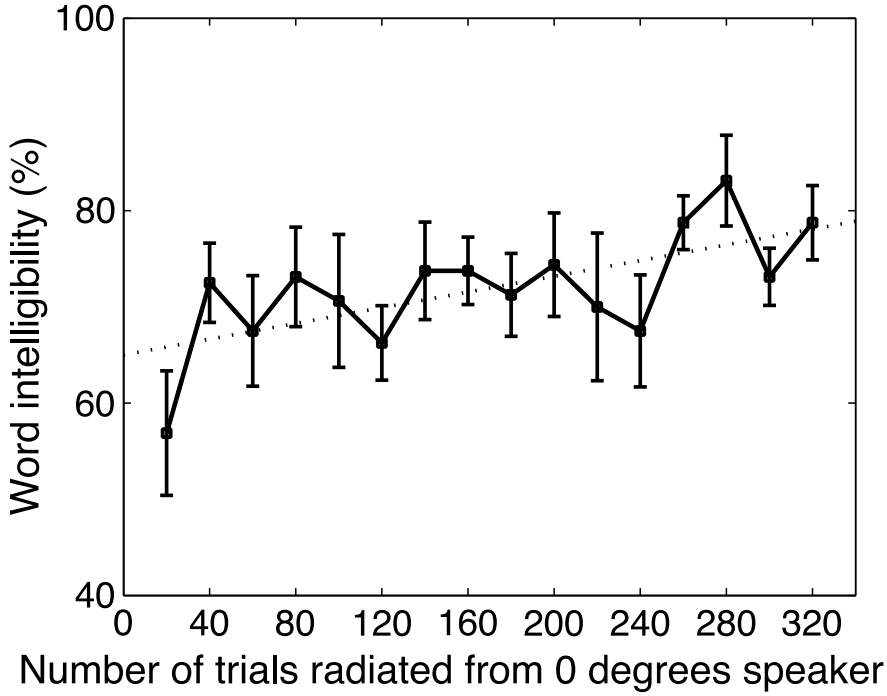


図 A.3: Word intelligibility of target words presented at 0° as a function of the number of trials. Dotted line is delivered using the least-squares linear regression. Error bars denote the standard error of the mean.

了解度が上昇しており，回帰直線も右肩上がりであることが示された．さらに，試行数の変化と単語了解度の変化量との相関関係について分析を行ったところ，中程度の有意な相関が認められ，試行数の増加に従って単語了解度が上昇していることが統計的に示された（$r = 0.65, p = .006$）．この結果から考えると，正面スピーカに充分に注意が向けられると，空間的注意の寄与が実験条件でも観測される可能性が高い．

謝辞

本論文は，非常に多くの方々のご指導，ご援助なしにはまとめることができなかった．ここにお世話になった方々への感謝の意を記す．

現国立研究開発法人情報通信研究機構耐災害 ICT 研究センターの鈴木陽一センター長には，博士後期過程への編入を快諾していただき，研究の機会を賜った．そして，本研究に関する一貫したご指導をいただいただけではなく，研究に対する姿勢や問題の捉え方といった，研究者として最も重要な視点を数多く与えていただいた．また，日常での言葉遣いや立ち振る舞い，礼儀作法など，社会人として必要な知識に関しても，普段の生活を通して厳しくも優しくご指導いただいた．鈴木先生の存在なくして，今の自分はないと言っても過言ではない．ここに深く感謝申し上げる．

東北大学電気通信研究所塩入諭教授には，本論文の審査，大学院ゼミ，ミーティングや研究会など様々な場で，研究に関する様々なご意見，ご指導をいただいた．また，研究の進め方や論文の書き方などに関して数多くのご指導をいただいた．塩入先生の存在なくして，本論文を仕上げることはできなかった．ここに深く感謝申し上げる．

東北大学電気通信研究所堀尾喜彦教授には，本論文の審査員として有益なご意見，ご指導いただいた．また，所内での研究会など，様々な場面で研究に関するコメントをいただいた．ここに深く感謝申し上げる．

東北大学電気通信研究所坂本修一教授には，本研究を進めるにあたり一貫したご指導をいただいた．ご多忙であるにもかかわらず，数え切れないほどのご指導およびご助言をいただいた．また，日常生活においても，励ましの言葉をかけていただくなど，精神的な面からも支えていただいた．坂本先生の存在なくして，本論文は完成できなかった．ここに深く感謝申し上げる．

César Daniel Salvador Castañeda 博士には，信号処理の観点から本研究に関して様々なコメントをいただいた．また，個人的なミーティングによく誘っていただき，様々な海外の研究者と議論する機会を与えてくれた．さらに，私生活でもよく食事や飲み会に連れ出していただき，研究室生活がより豊かなものになったことは言うまでもない．深く感謝申し上げる．

現愛知工科大学工学部山高正烈准教授には，研究室ゼミやミーティングなどの場で研究に有益なご指導，ご助言をいただいた．現 YAMAHA の Jorge Treviño 博士には，

研究室ゼミの場で様々なご意見をいただいた．東北大学医学部耳鼻咽喉科川瀬哲明教授には，聴覚情報処理障害ミーティングにおいて研究の方向性や実験方法について貴重なご意見をいただいた．これらの方々に深く感謝申し上げる．

熊本大学文学部寺本渉教授には，東北大学への編入を後押ししていただき，研究の機会を賜るきっかけをいただいた．そして，共同研究者として数多くのご指導，ご意見をいただいた．また，研究の進め方，考察の仕方，学会発表や論文の執筆に関するご助言など，研究者として最も基本的な部分に関して，数多くのご指導をいただいた．本研究は寺本先生の存在なくして完成には至らなかった．ここに深く感謝申し上げる．

東北大学電気通信研究所北村喜文教授，栗木一郎准教授，Chia-Huei Tseng 准教授，高嶋和毅准教授，金子沙永助教，佐藤好幸助教，羽鳥康裕助教，藤田和之助教，山本浩輔助教，同大学院工学研究科伊藤彰則教授，千葉祐弥助教，同加齢医学研究所樋田浩一博士，同大学院文学研究科齋藤五大助教には，大学院ゼミやミーティング，学会などの場でご助言や示唆をいただいた．また，懇親会等でも温かく接していただいた．これらの方々に深く感謝申し上げる．

東北大学電気通信研究所技術職員齋藤文孝氏にはさまざまな機器の取り扱い方や音響測定方法などをご指導いただいた．かつての研究室事務補佐員の小野寺美紀氏，箕輪牧子氏には，事務手続きをはじめ，様々な場面で研究に専念できるようにご配慮していただいた．これらの方々に感謝申し上げる．

現株式会社ソシオネクストの藤村達弘氏，現 NHK の高井萌子氏，東北大学工学部電気情報物理工学科 4 年新妻未菜氏には，同じ研究グループの一員として本論文の実験の一部を担っていただいた．本研究は，これらの方々の助力なくして完成には至らなかった．ここに深く感謝申し上げる．

東北大学大学院情報処理過程博士後期過程 1 年の阿部翔太氏，同博士前期課程 2 年，板垣匠氏，岡部敏貴氏，富樫凌氏，前田啓氏，同 1 年片田晃輔氏，及川隼平氏，Kadu Anand Anil 氏には研究室生活の中で数多くのご支援，ご助言を受けた．既に，東北大学大学院情報科学研究科博士後期課程を修了された清水拓氏，胡詩超氏，同博士前期課程を修了された佐藤広則氏，角掛沙也香氏，Virgilijus Bracilulis 氏，愛知秀斗氏，齋藤翔氏，田村祐揮氏，清水（野田）美春氏，史俊傑氏，日吉啓氏，藤村達弘氏，舟山拓実氏，Florent Monasterolo 氏，同工学部電気情報物理工学科を卒業された鈴木美乃里氏，笹原稜翼氏，渋谷壮氏には，研究室生活の中で数多くのご支援，ご助言を受けた．特に，佐藤氏と角掛氏には，数少ない同輩としてミーティングや研究室生活に関して数多くの助言をいただき，様々な面で支えていただいた．これらの方々に深く感謝申し上げる．

また，長きにわたる研究生活に理解を示し，あらゆる面で私を支え続けてくれた家

族に，心より深く感謝したい．本研究は，多くの方々のご指導，ご協力の下で行なわれたものであり，ここに名前を挙げることにできなかった方々も含め，重ねて感謝申し上げる．

最後に，本研究の一部は，文部科学省科学研究費助成事業（KAKENHI）特別研究員奨励費 18J13203 の助成を受けたものである．この助成が本研究の完成と健康的な研究室生活を支えていたことは言うまでもない．申請書の作成にご協力いただいた鈴木先生，坂本先生，塩入先生を含め，関わったすべての人に感謝申し上げる．

参考文献

[1] EC Cherry. Some Experiments on the Recognition of Speech, with One and with Two Ears. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 25, No. 5, pp. 975–979, 1953.

[2] EC Cherry and JA Bowles. Contribution to a Study of the "Cocktail Party Problem". *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 32, No. 7, pp. 884–884, 1960.

[3] JH McDermott. The cocktail party problem. *Current Biology*, Vol. 19, No. 22, pp. R1024–R1027, December 2009.

[4] AW Bronkhorst. The cocktail party phenomenon: A review of research on speech intelligibility in multiple-talker conditions. *Acustica*, Vol. 86, No. 1, pp. 117–128, 2000.

[5] AW Bronkhorst. The cocktail-party problem revisited: early processing and selection of multi-talker speech. *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol. 77, No. 5, pp. 1465–1487, 2015.

[6] M Ebata. Spatial unmasking and attention related to the cocktail party problem. *Acoustical Science and Technology*, Vol. 24, No. 5, pp. 208–219, 2003.

[7] N Moray. Attention in dichotic listening: Affective cues and the influence of instructions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol. 11, No. 1, pp. 56–60, 1959.

[8] N Wood and N Cowan. The cocktail party phenomenon revisited: how frequent are attention shifts to one's name in an irrelevant auditory channel? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, Vol. 21, No. 1, pp. 255–260, 1995.

[9] I Pollack and JM Pickett. Cocktail party effect. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 29, No. 11, pp. 1262–1262, 1957.

[10] J Lewald, C Hanenberg, and S Getzmann. Brain correlates of the orientation of auditory spatial attention onto speaker location in a “cocktail-party” situation. *Psychophysiology*, Vol. 53, No. 10, pp. 1484–1495, 2016.

[11] RY Litovsky. Spatial Release from Masking. *Acoustics Today*, Vol. 8, No. 2, p. 18, 2012.

[12] Patrick M. Zurek. Binaural advantages and directional effects in speech intelligibility. 1993.

[13] M Ebata, T Sone, and T Nimura. Improvement of hearing ability by directional information. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 43, No. 2, pp. 289–297, 1968.

[14] K Saberi, L Dostal, T Sadralodabai, V Bull, and DR Perrott. Free-field release from masking. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 90, No. 3, pp. 1355–1370, September 1991.

[15] R Plomp and AM Mimpen. Effect of the orientation of the speaker's head and the azimuth of a noise source on the speech-reception threshold for sentences. *Acta Acustica United with Acustica*, Vol. 48, No. 5, pp. 325–328, 1981.

[16] Jacques A Grange and John F Culling. The benefit of head orientation to speech intelligibility in noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 139, No. 2, pp. 703–712, 2016.

[17] AW Bronkhorst and R Plomp. The effect of head-induced interaural time and level differences on speech intelligibility in noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 81, No. S1, pp. S27–S28, 1987.

[18] 柏野牧夫. 聴覚情景分析の脳内メカニズム. 計測と制御, Vol. 46, No. 6, pp. 472–478, 2007.

[19] AS Bregman. *Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound*. MIT press, 1990.

[20] W James, F Burkhardt, F Bowers, and IK Skrupskelis. *The principles of psychology*, Vol. 1. Macmillan London, 1890.

[21] H Pashler, JC Johnston, and E Ruthruff. Attention and performance. *Annual review of psychology*, Vol. 52, No. 1, pp. 629–651, 2001.

[22] LM Ward. Attention. *Scholarpedia*, Vol. 3, No. 10, p. 1538, 2008. revision #185343.

[23] GZ Greenberg and WD Larkin. Frequency-response characteristic of auditory observers detecting signals of a single frequency in noise: The probe-signal method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 44, No. 6, pp. 1513–1523, 1968.

[24] B Scharf, S Quigley, C Aoki, N Peachey, and A Reeves. Focused auditory attention and frequency selectivity. *Perception & Psychophysics*, Vol. 42, No. 3, pp. 215–223, 1987.

[25] BA Wright and MB Fitzgerald. The time course of attention in a simple auditory detection task. *Perception & Psychophysics*, Vol. 66, No. 3, pp. 508–516, 2004.

[26] 藤村達弘, 寺岡諒, 坂本修一, 川瀬哲明, 鈴木陽一. 競合音声存在下における時空間的手がかりが単語了解度に及ぼす影響. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 118, No. 190, pp. 153–156, aug 2018.

[27] CJ Spence and J Driver. Covert spatial orienting in audition: Exogenous and endogenous mechanisms. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 20, No. 3, pp. 555–574, 1994.

[28] WA Teder-Sälejärvi and SA Hillyard. The gradient of spatial auditory attention in free field: an event-related potential study. *Perception & Psychophysics*, Vol. 60, No. 7, pp. 1228–1242, 1998.

[29] TL Arbogast and G Kidd. Evidence for spatial tuning in informational masking using the probe-signal method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 108, No. 4, pp. 1803–1810, 2000.

[30] B Scharf. Spectral specificity in auditory detection. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, Vol. 10, No. 6, pp. 309–317, 1989.

[31] RS Schlauch and ER Hafter. Listening bandwidths and frequency uncertainty in pure-tone signal detection. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 90, No. 3, pp. 1332–1339, 1991.

[32] ER Hafter, RS Schlauch, and J Tang. Attending to auditory filters that were not stimulated directlya. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 94, No. 2, pp. 743–747, 1993.

[33] CJ Darwin and RW Hukin. Effectiveness of spatial cues, prosody, and talker characteristics in selective attention. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 107, No. 2, pp. 970–977, 2000.

[34] PT Quinlan and PJ Bailey. An examination of attentional control in the auditory modality: Further evidence for auditory orienting. *Perception & Psychophysics*, Vol. 57, No. 5, pp. 614–628, 1995.

[35] WA Teder-Sälejärvi, SA Hillyard, B Röder, and HJ Neville. Spatial attention to central and peripheral auditory stimuli as indexed by event-related potentials. *Cognitive Brain Research*, Vol. 8, No. 3, pp. 213–227, 1999.

[36] B Roöder, WA Teder-Saälejärvi, A Sterr, F Rosler, SA Hillyard, and HJ Neville. Improved auditory spatial tuning in blind humans. *Nature*, Vol. 400, No. 6740, p. 162, 1999.

[37] G Kidd, TL Arbogast, CR Mason, and FJ Gallun. The advantage of knowing where to listen. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 118, No. 6, pp. 3804–3815, 2005.

[38] MA Ericson, DS Brungart, and Simpson BD. Factors that influence intelligibility in multitalker speech displays. *The international journal of ...*, Vol. 14, No. 3, pp. 313–334, 2004.

[39] BG Shinn-Cunningham. Object-based auditory and visual attention. *Trends in cognitive sciences*, Vol. 12, No. 5, pp. 182–186, 2008.

[40] DL Woods, SA Hillyard, and JC Hansen. Event-related brain potentials reveal similar attentional mechanisms during selective listening and shadowing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 10, No. 6, p. 761, 1984.

[41] JB Fritz, M Elhilali, SV David, and SA Shamma. Auditory attention—focusing the searchlight on sound. *Current opinion in neurobiology*, Vol. 17, No. 4, pp. 437–455, 2007.

[42] JP Rauschecker and B Tian. Mechanisms and streams for processing of "what" and "where" in auditory cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 97, No. 22, pp. 11800–11806, 2000.

[43] B Tian, D Reser, A Durham, A Kustov, and JP Rauschecker. Functional specialization in rhesus monkey auditory cortex. *Science*, Vol. 292, No. 5515, pp. 290–293, 2001.

[44] JP Rauschecker and SK Scott. Maps and streams in the auditory cortex: nonhuman primates illuminate human speech processing. *Nature Publishing Group*, Vol. 12, No. 6, pp. 718–724, 2009.

[45] SW Michalka, ML Rosen, L Kong, BG Shinn-Cunningham, and DC Somers. Auditory Spatial Coding Flexibly Recruits Anterior, but Not Posterior, Visuotopic Parietal Cortex. *Cerebral Cortex*, Vol. 26, No. 3, pp. 1302–1308, 2016.

[46] A Johnson and RW Proctor. *Attention: Theory and practice*. Sage Publications, 2004.

[47] SE Palmer. *Vision science: Photons to phenomenology*. MIT press, 1999.

[48] DE Broadbent. *Perception and communication*. Pergamon Press, 1958.

[49] JA Deutsch and D Deutsch. Attention: Some theoretical considerations. *Psychological review*, Vol. 70, No. 1, p. 80, 1963.

[50] AM Treisman. Strategies and models of selective attention. *Psychological review*, Vol. 76, No. 3, p. 282, 1969.

[51] Speech Resources Consortium. `http://research.nii.ac.jp/src/FW03.html`.

[52] S Amano, S Sakamoto, T Kondo, and Y Suzuki. Development of familiarity-controlled word lists 2003 (FW03) to assess spoken-word intelligibility in japanese. *Speech Communication*, Vol. 51, No. 1, pp. 76–82, 2009.

[53] Speech Resources Consortium. `http://research.nii.ac.jp/src/FW07.html`.

[54] S Sakamoto, Y Suzuki, S Amano, K Ozawa, T Kondo, and T Sone. New lists for word intelligibility test based on word familiarity and phonetic balance. *J. Acoust. Soc. Jpn*, Vol. 54, No. 12, pp. 842–849, 1998.

[55] D Brainard. The psychophysics toolbox. *Spatial vision*, Vol. 10, pp. 433–436, 1997.

[56] D Pelli. The videotoolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies. *Spatial vision*, Vol. 10, pp. 437–442, 1997.

[57] M Kleiner, D Brainard, and D Pelli. What's new in psychtoolbox-3? 2007.

[58] S Amano, S Sakamoto, T Kondo, and Y Suzuki. Development of familiarity-controlled word lists 2003 (FW03) to assess spoken-word intelligibility in Japanese. *Speech Communication*, Vol. 51, No. 1, pp. 76–82, 2009.

[59] AW Bronkhorst and R Plomp. Effect of multiple speechlike maskers on binaural speech recognition in normal and impaired hearing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 92, No. 6, pp. 3132–3139, 1992.

[60] DS Brungart. Informational and energetic masking effects in the perception of two simultaneous talkers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 109, No. 3, pp. 1101–1109, 2001.

[61] DS Brungart, BD Simpson, MA Ericson, and KR Scott. Informational and energetic masking effects in the perception of multiple simultaneous talkers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 110, No. 5, pp. 2527–2538, 2001.

[62] MA Ericson, DS Brungart, and BD Simpson. Factors that influence intelligibility in multitalker speech displays. *The International Journal of Aviation Psychology*, Vol. 14, No. 3, pp. 313–334, 2004.

[63] D Kimura. Cerebral dominance and the perception of verbal stimuli. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie*, Vol. 15, No. 3, p. 166, 1961.

[64] D Kimura. Some effects of temporal-lobe damage on auditory perception. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie*, Vol. 15, No. 3, p. 156, 1961.

[65] RJ Zatorre. Perceptual asymmetry on the dichotic fused words test and cerebral speech lateralization determined by the carotid sodium amytal test. *Neuropsychologia*, Vol. 27, No. 10, pp. 1207–1219, 1989.

[66] D Kimura. From ear to brain. *Brain and Cognition*, Vol. 76, No. 2, pp. 214–217, 2011.

[67] AE Asbjørnsen and K Hugdahl. Attentional effects in dichotic listening. *Brain and language*, Vol. 49, No. 3, pp. 189–201, 1995.

[68] AE Asbjørnsen and MP Bryden. Biased attention and the fused dichotic words test. *Neuropsychologia*, Vol. 34, No. 5, pp. 407–411, 1996.

[69] N Lavie. Perceptual load as a necessary condition for selective attention. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, Vol. 21, No. 3, p. 451, 1995.

[70] N Lavie, A Hirst, JW de Fockert, and E Viding. Load theory of selective attention and cognitive control. *Journal of Experimental Psychology: General*, Vol. 133, No. 3, p. 339, 2004.

[71] N Lavie. Distracted and confused?: Selective attention under load. *Trends in cognitive sciences*, Vol. 9, No. 2, pp. 75–82, 2005.

[72] G Murphy, JA Groeger, and CM Greene. Twenty years of load theory—where are we now, and where should we go next? *Psychonomic bulletin & review*, Vol. 23, No. 5, pp. 1316–1340, 2016.

[73] E Styles. *The psychology of attention*. Psychology Press, 1997.

[74] AW Mills. On the minimum audible angle. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 30, No. 4, pp. 237–246, 1958.

[75] RS Heffner and HE Heffner. Sound localization acuity in the cat: effect of azimuth, signal duration, and test procedure. *Hearing research*, Vol. 36, No. 2-3, pp. 221–232, 1988.

[76] WM Jenkins and RB Masterton. Sound localization: effects of unilateral lesions in central auditory system. *Journal of Neurophysiology*, Vol. 47, No. 6, pp. 987–1016, 1982.

[77] SR Oldfield and SPA Parker. Acuity of sound localisation: a topography of auditory space. i. normal hearing conditions. *Perception*, Vol. 13, No. 5, pp. 581–600, 1984.

[78] DR Perrott, B Costantino, and J Cisneros. Auditory and visual localization performance in a sequential discrimination task. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 93, No. 4, pp. 2134–2138, 1993.

[79] C Spence, J Lee, and N Van der Stoep. Responding to sounds from unseen locations: crossmodal attentional orienting in response to sounds presented from the rear. *European Journal of Neuroscience*, Vol. 14, pp. 257–14, 2017.

[80] S Shioiri, H Honjyo, Y Kashiwase, K Matsumiya, and I Kuriki. Visual attention spreads broadly but selects information locally. *Scientific Reports*, Vol. 6, No. 1, p. srep35513, 2016.

[81] CJ Downing. The spatial structure of visual attention. In M Posner and O Martin, editors, *Mechanisms of attention: Attention and performance XI*, pp. 171–187. Erlbaum, 1985.

[82] R Preibisch-Effenberger. *Die Schallokalisationsfähigkeit des Menschen und ihre audiometrische Verwendung zur klinischen Diagnostik (The human faculty of sound localization and its audiometric application to clinical diagnostics)*. PhD thesis, Technische Universität, Dresden, The address of the publisher, 1966.

[83] BG Haustein and W Schirmer. Messeinrichtung zur Untersuchung des Richtungslokalisationsvermöogens (A measuring appartus for the investigation of the faculty of directional localization). *Hochfrequenztech. u. Elektroakustik*, Vol. 79, pp. 96–101, 1970.

[84] J Blauert. *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*. MIT press, 1997.

[85] C Alain and LJ Bernstein. From sounds to meaning: the role of attention during auditory scene analysis. *Current Opinion in Otolaryngology & Head and Neck Surgery*, Vol. 16, No. 5, pp. 485–489, 2008.

[86] RD Wright and LM Ward. *Orienting of attention*. Oxford University Press, 2008.

[87] HE Egeth and S Yantis. Visual attention: Control, representation, and time course. *Annual review of psychology*, Vol. 48, No. 1, pp. 269–297, 1997.

[88] Y Kashiwase, K Matsumiya, I Kuriki, and S Shioiri. Time courses of attentional modulation in neural amplification and synchronization measured with steady-state visual-evoked potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, Vol. 24, No. 8, pp. 1779–1793, 2012.

[89] Y Kashiwase, K Matsumiya, I Kuriki, and S Shioiri. Temporal dynamics of visual attention measured with event-related potentials. *PloS one*, Vol. 8, No. 8, p. e70922, 2013.

[90] O Hikosaka, S Miyauchi, and S Shimojo. Focal visual attention produces illusory temporal order and motion sensation. *Vision research*, Vol. 33, No. 9, pp. 1219–1240, 1993.

[91] TM Herrington and JA Assad. Neural activity in the middle temporal area and lateral intraparietal area during endogenously cued shifts of attention. *Journal of Neuroscience*, Vol. 29, No. 45, pp. 14160–14176, 2009.

[92] JE Raymond, KL Shapiro, and KM Arnell. Temporary suppression of visual processing in an rsvp task: An attentional blink? *Journal of experimental psychology: Human perception and performance*, Vol. 18, No. 3, p. 849, 1992.

[93] TA Mondor. A transient processing deficit following selection of an auditory target. *Psychonomic Bulletin & Review*, Vol. 5, No. 2, pp. 305–311, 1998.

[94] TW Picton and PG Fitzgerald. A general description of the human auditory evoked potentials. *Bases of auditory brain-stem evoked responses. New York: Grune & Stratton*, pp. 141–56, 1983.

[95] D Ballantyne. *Handbook of audiological techniques.* Butterworth-Heinemann Rushden, UK, 1990.

[96] C Alain, SR Arnott, and TW Picton. Bottom–up and top–down influences on auditory scene analysis: Evidence from event-related brain potentials. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 27, No. 5, p. 1072, 2001.

[97] J Polich. Updating p300: an integrative theory of p3a and p3b. *Clinical neurophysiology*, Vol. 118, No. 10, pp. 2128–2148, 2007.

[98] U Pomper and M Chait. The impact of visual gaze direction on auditory object tracking. *Scientific Reports*, Vol. 7, No. 1, p. 4640, 2017.

[99] C Spence and J Driver. Audiovisual links in endogenous covert spatial attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 22, No. 4, p. 1005, 1996.

[100] M Eimer. Crossmodal links in spatial attention between vision, audition, and touch: evidence from event-related brain potentials. *Neuropsychologia*, Vol. 39, No. 12, pp. 1292–1303, 2001.

[101] D Talsma and MG Woldorff. Selective attention and multisensory integration: multiple phases of effects on the evoked brain activity. *Journal of cognitive neuroscience*, Vol. 17, No. 7, pp. 1098–1114, 2005.

[102] DG Sinex. Responses of cochlear nucleus neurons to harmonic and mistuned complex tones. *Hearing research*, Vol. 238, No. 1-2, pp. 39–48, 2008.

[103] DG Sinex, JH Sabes, and H Li. Responses of inferior colliculus neurons to harmonic and mistuned complex tones. *Hearing research*, Vol. 168, No. 1-2, pp. 150–162, 2002.

[104] DG Sinex, H Li, and DS Velenovsky. Prevalence of stereotypical responses to mistuned complex tones in the inferior colliculus. *Journal of neurophysiology*, Vol. 94, No. 5, pp. 3523–3537, 2005.

[105] BJ Dyson and C Alain. Representation of concurrent acoustic objects in primary auditory cortex. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 115, No. 1, pp. 280–288, 2004.

[106] M Corbetta and GL Shulman. Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature reviews neuroscience*, Vol. 3, No. 3, p. 201, 2002.

[107] J Fan and M Posner. Human attentional networks. *Psychiatrische Praxis*, Vol. 31, No. S 2, pp. 210–214, 2004.

[108] S Vossel, JJ Geng, and GR Fink. Dorsal and ventral attention systems: distinct neural circuits but collaborative roles. *The Neuroscientist*, Vol. 20, No. 2, pp. 150–159, 2014.

[109] IC Zündorf, HO Karnath, and J Lewald. The effect of brain lesions on sound localization in complex acoustic environments. *Brain*, Vol. 137, No. 5, pp. 1410–1418, 2014.

[110] SW Michalka, L Kong, ML Rosen, BG Shinn-Cunningham, and DC Somers. Short-Term Memory for Space and Time Flexibly Recruit Complementary Sensory-Biased Frontal Lobe Attention Networks. *Neuron*, Vol. 87, No. 4, pp. 882–892, 2015.