

Title	異なる覚醒度で測定された耳音響放射特性を利用した選択的聴取能力の推定
Author(s)	宮家, 一真
Citation	
Issue Date	2023-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/18332
Rights	
Description	Supervisor: 鶴木 祐史, 先端科学技術研究科, 修士(情報科学)

修士論文

異なる覚醒度で測定された耳音響放射特性を利用した
選択的聴取能力の推定

宮家 一真

主指導教員 鷗木 祐史

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科
(情報科学)

令和5年3月

Abstract

Otoacoustic emission is a phenomenon described by Kemp in 1978 in which weak sounds are radiated into the ear canal by the active function of the cochlea. Otoacoustic emissions are used in newborn hearing screening because it is a phenomenon that demonstrates the nonlinearity of the cochlea and can be detected regardless of the listener's intention in the measurement. On the other hand, problems in hearing everyday sounds can occur even if the hearing test shows normal hearing. An example of this is the inability to hear selectively. Selective hearing is the ability to listen selectively to the sounds one wants to hear by directing one's attention to the sounds one wants to hear in noisy situations. Even if newborns are screened for hearing problems, problems such as a lack of selective hearing may be found after growth. Children with problems such as selective hearing loss have difficulty learning, such as in high-noise classrooms, and may have delays in learning and speech production. It is important to take early interventions for such children, such as providing a quiet environment. Studies of auditory attention and otoacoustic emissions related to selective hearing have shown that attention can alter otoacoustic emissions. If the relationship between otoacoustic emissions and selective hearing can be clarified, selective hearing ability can be estimated from characteristic changes in otoacoustic emissions, and auditory information processing problems such as reduced selective hearing ability can be detected during newborn hearing screening.

In a study of auditory attention and otoacoustic emissions associated with selective auditory performance, we investigated whether centrifugal projection input to external hair cells contains the effects of attention and whether these effects are manifested in otoacoustic emissions. The results showed that changes in the peripheral auditory system induced by auditory attention are likely to be measured by measuring otoacoustic emissions. However, no characteristic changes in attention-related otoacoustic emissions were observed.

In a study investigating whether the function of centrifugal projection from the brainstem to the outer hair cells varied with awareness, an overwhelming positive correlation was found between alpha waves associated with awareness and centrifugal projection function in the EEG.

The reason that there were no characteristic changes in the attention-related otoacoustic emissions is probably because the listening experiment was conducted in a situation in which attention was always active, and attention was always directed to things that were not desired. In order to imagine a situation in which attention-related changes in the properties of the otoacoustic emissions are observed and thus affect selective listening performance, it is necessary to compare the changes in the properties of the otoacoustic emissions in different awareness

states.

The novelty of this study is that it focuses on the changes in otoacoustic emissions at different awareness to assess the ability of selective hearing using otoacoustic emissions. Listening experiments are conducted to investigate the relationship between the feature changes of otoacoustic emissions at different awareness and the ability of selective hearing during wakefulness. The significance of this study is to clarify the features of otoacoustic emissions corresponding to selective hearing at different awareness. This suggests that focusing on arousal level in the study of auditory attention related to selective listening may provide characteristic changes in otoacoustic emissions that are directly related to attention.

The aim of this study was to measure selective hearing ability as a function of different awareness and attention levels in relation to otoacoustic emissions and to clarify whether it is possible to assess selective hearing ability based on changes in otoacoustic emissions. A two-task experiment was conducted to measure selective hearing ability during wakefulness. The first task consisted of listening to target speech words from a mixed speech of several speakers (auditory figure-ground task). The second task consisted of hearing separate target sounds presented to each ear (competing word task). Transitory evoked otoacoustic emission was measured in the awake/sleep condition to investigate the relationship between otoacoustic emissions at different awareness and selective auditory performance.

The results showed that in the auditory figure-ground task, there was a tendency for the correct response rate to increase in response measured otoacoustic emissions in the right ear during the awake condition. In the left ear, the percentage of correct responses tended to decrease in response to the measurements of otoacoustic emissions in the awake/sleep condition. In the competing word task, there was a tendency for the correct response rate to increase in response to the otoacoustic emissions measurements in both the awake and sleep. These results suggest that there is a relationship between selective hearing ability and the intensity of otoacoustic emissions and that otoacoustic emissions can be used to assess selective hearing ability. In addition, measurements of otoacoustic emissions during sleep were predominantly lower than those of otoacoustic emissions during wakefulness, suggesting that otoacoustic emissions also decrease as awareness decreases. This implies that the awareness can be estimated from the otoacoustic emissions.

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	関連研究	2
1.3	関連研究の問題点	2
1.4	研究の目的	3
1.5	本論文の構成	3
第2章	研究の方略	5
2.1	選択的聴取能力	5
2.2	耳音響放射	6
2.3	覚醒度	8
2.3.1	覚醒度とは	8
2.3.2	脳波	8
2.3.3	睡眠脳波	9
2.3.4	本研究における覚醒度	9
2.4	研究の方略	12
第3章	選択的聴取能力の測定	13
3.1	図と地課題	13
3.1.1	実験目的	13
3.1.2	実験方法	13
3.1.3	結果	13
3.1.4	考察	15
3.2	競合語課題	16
3.2.1	実験目的	16
3.2.2	実験方法	16
3.2.3	結果	16
3.2.4	考察	16
第4章	耳音響放射の測定	18
4.1	覚醒中の耳音響放射測定実験	18
4.1.1	実験目的	18

4.1.2	実験方法	18
4.1.3	結果	18
4.1.4	考察	19
4.2	睡眠中の耳音響放射測定実験	20
4.2.1	実験目的	20
4.2.2	実験方法	20
4.2.3	結果	20
4.2.4	考察	21
第5章	異なる覚醒度の耳音響放射と選択的聴取能力	22
5.1	覚醒中の耳音響放射と選択的聴取能力の関係	22
5.1.1	覚醒中の TEOAE と図と地課題	22
5.1.2	覚醒中の TEOAE と競合語課題	25
5.2	睡眠下の耳音響放射と選択的聴取能力の関係	28
5.2.1	睡眠下の TEOAE と図と地課題	28
5.2.2	睡眠下の TEOAE と競合語課題	28
5.3	異なる覚醒度の耳音響放射と選択的聴取能力の関係	33
5.3.1	異なる覚醒度の耳音響放射	33
5.3.2	異なる覚醒度の耳音響放射と図と地課題	35
5.3.3	異なる覚醒度の耳音響放射と競合語課題	35
第6章	全体考察	40
第7章	結論	41
7.1	本研究で明らかにしたこと	41
7.2	残された課題	42
	謝辞	42
	参考文献	43
	研究業績	47
付録A		48
A.1	覚醒中の DPOAE の測定実験	48
A.1.1	実験目的	48
A.1.2	実験方法	48
A.1.3	結果	48
A.2	覚醒中の DPOAE と選択的聴取能力	51
A.2.1	覚醒中の DPOAE と図と地課題	51
A.2.2	覚醒中の DPOAE と競合語課題	51

目 次

1.1	本論文の構成.	4
2.1	再現性の概念図.	7
2.2	電極配置の図.	11
3.1	図と地課題の正答率.	14
3.2	競合語課題の正答率.	17
5.1	覚醒中の右耳の TEOAE と図と地課題の正答率.	23
5.2	覚醒中の左耳の TEOAE と図と地課題の正答率.	24
5.3	覚醒中の右耳の TEOAE と競合語課題の正答率.	26
5.4	覚醒中の左耳の TEOAE と競合語課題の正答率.	27
5.5	睡眠下の右耳の TEOAE と図と地課題の正答率.	29
5.6	睡眠下の左耳の TEOAE と図と地課題の正答率.	30
5.7	睡眠下の右耳の TEOAE と競合語課題の正答率.	31
5.8	睡眠下の左耳の TEOAE と競合語課題の正答率.	32
5.9	覚醒中と睡眠下の右耳の TEOAE の差分と図と地課題の正答率.	36
5.10	覚醒中と睡眠下の左耳の TEOAE の差分と図と地課題の正答率.	37
5.11	覚醒中と睡眠下の右耳の TEOAE の差分と競合語課題の正答率.	38
5.12	覚醒中と睡眠下の左耳の TEOAE の差分と競合語課題の正答率.	39
A.1	覚醒中の右耳の DPOAE と図と地課題正答率.	52
A.2	覚醒中の左耳の DPOAE と図と地課題の正答率.	53
A.3	覚醒中の右耳の DPOAE の測定値と競合語課題の正答率.	54
A.4	覚醒中の左耳の DPOAE の測定値と競合語課題の正答率.	55

表 目 次

2.1	脳波の種類.	10
2.2	睡眠脳波の段階.	10
4.1	覚醒中の TEOAE の測定値. 上段の数字は実験参加者に割り振った 番号.	19
4.2	覚醒中の TEOAE の測定値の平均値と標準偏差.	19
4.3	睡眠下の TEOAE の測定値.	21
4.4	睡眠下の TEOAE の測定値の平均値と標準偏差.	21
5.1	覚醒中と睡眠下の TEOAE の測定値の差分. 上段の数字は実験参加 者に割り振った番号.	34
A.1	DPOAE 測定値. 左列の番号は実験参加者に割り振った番号. . . .	49
A.2	DPOAE 測定値の平均値と標準偏差.	50

第1章 序論

1.1 はじめに

耳音響放射 (Oto-Acoustic Emission, OAE) は、蝸牛の能動的な機能によって外耳道内に微弱な音が放射される現象 [1] のことで、蝸牛の非線形性を見ている。測定の際に聴取者の意思に関係なく取得できるため、新生児の聴覚スクリーニングに利用されている [2, 3]。新生児の聴覚スクリーニングでは、睡眠中の新生児の耳音響放射を測定する。

一方、純音聴力検査にて聴力の問題を検査し、問題が見つからない場合でも日常生活の音の聴き取りの問題が見つかる場合がある。その例として、選択的聴取能力の欠如が挙げられる。選択的聴取能力とは、騒がしい状況下で聴きたい音に注意を向けることで選択的に聴きたい音を聴き取る能力である。この選択的聴取能力は聴覚末梢で生じるマスキングに関連がある [4]。

新生児の聴覚スクリーニングにて、聴覚に問題がないと判定されても、成長後に選択的聴取能力の欠如といった問題が見つかる場合がある。選択的聴取能力の欠如といった問題をもつ子供は、妨害音の多い教室などの学習が難しく、学習や発話の遅れが見られる [5]。そのような子供に対して、静かな環境の提供といった対策を早期に取ることは重要となる。

これまでに、選択的聴取能力に係る聴覚的注意と耳音響放射の研究にて、注意の影響が耳音響放射に現れる可能性が示されている [6, 7]。耳音響放射と選択的聴取の関係性を明らかにすることができれば、耳音響放射から選択的聴取能力を推定でき、選択的聴取能力の低下といった聴覚情報処理の問題を新生児の聴覚スクリーニングの段階で発見できる可能性がある。

1.2 関連研究

選択的聴取能力に係る聴覚的注意と耳音響放射の研究として宮内らの研究がある [6, 7]. 宮内らは, 外有毛細胞に inputs される遠心性の投射に注意の影響が含まれており [8], その影響が耳音響放射に現れるかどうかを検討した. その結果, 聴覚的注意による聴覚末梢系の変化を耳音響放射によって測定できる可能性を示した. しかし, 注意に係わる耳音響放射の特徴変化はなかった.

また, 脳幹と外有毛細胞を結ぶ遠心性の投射にある働きと覚醒度との関係について鈴木らの研究がある [9]. 鈴木らは, 脳幹と外有毛細胞を結ぶ遠心性の投射にある働きがまどろみ状態で低下する [10] ことから覚醒度によって脳幹と外有毛細胞を結ぶ遠心性の投射にある働きがどのように変動するのかを調査した. その際, 脳幹と外有毛細胞を結ぶ遠心性の投射にある働きを耳音響放射の抑圧量をもとに算出し, 覚醒度を脳波によって推定した. その結果, 脳波のなかで, 覚醒度と関連する α 波と遠心性の投射の働きについて優位な正の相関があった.

1.3 関連研究の問題点

宮内らは, 聴覚的注意による聴覚末梢系の変化を耳音響放射の測定によって測定できる可能性を示した. しかし, 注意に係わる耳音響放射の特徴変化はなかった. これは, 注意が常に働いている状況 (例えば覚醒中) で聴取実験が行われたことに起因し, 注意を向けてほしくないものにも注意が常に注意が向けられ, 耳音響放射に現れなかった可能性が高い. 注意に関連する耳音響放射の特徴変化が見られ, その結果, 選択的聴取能力に影響が見られる状況を想定するためには, 覚醒度の異なる状態での耳音響放射の特徴変化の比較を行う必要がある. 本研究の新規性は, 耳音響放射による選択的聴取能力の推定に対して, 覚醒度の異なる状態での耳音響放射の特徴変化に着目することである. 覚醒度の異なる耳音響放射の特徴変化と覚醒中の選択的聴取能力について聴取実験を行い, 覚醒度の異なる耳音響放射の特徴変化と選択的聴取能力の関係を調査する. 本研究の重要性は, 覚醒度の異なる状態で選択的聴取と対応する耳音響放射の特徴を明らかにすることである. これにより, 選択的聴取と関連する聴覚的注意の研究においても覚醒度に着目することで, 注意と直接関係する耳音響放射の特徴変化が得られると考えられる.

1.4 研究の目的

本研究の目的は、覚醒度の異なる耳音響放射と注意に関連する選択的聴取能力を測定し、耳音響放射の特徴変化から選択的聴取能力を推定可能かどうか明らかにすることである。本研究では、覚醒中の選択的聴取能力を調査するために背景音中の目的音検知の実験を行う。また、覚醒中／睡眠中の耳音響放射を測定し、覚醒度の異なる耳音響放射と選択的聴取能力との関係を調べる。これらの結果から、耳音響放射から選択的聴取能力を推定する方略を検討する。これらを実現できれば、注意と耳音響放射の関係が明らかになるだけでなく、選択的聴取能力の低下といった聴覚情報処理の問題の早期発見に役立てることができる。

1.5 本論文の構成

本論文は、7章で構成される。図 1.1 は本論文の構成である。

第1章は序論であり、本論文で対象とする耳音響放射と選択的聴取に関する背景を述べる。これにより研究の目的を述べる。

第2章は本研究の方略を述べる。まず、本研究で用いる選択的聴取能力と耳音響放射について述べる。次に、本研究の新規性である覚醒度についての説明をする。最後に本研究の方略を述べる。

第3章では、選択的聴取能力の測定について述べる。選択的聴取能力の測定を行うために、二つの課題を行い、結果の考察する。

第4章では、耳音響放射の測定について述べる。覚醒中及び睡眠下での耳音響放射の測定を行い、結果の考察を行う。

第5章では、第3章の選択的聴取能力の結果と第4章の耳音響放射の結果から異なる覚醒度の耳音響放射と選択的聴取能力の関係について述べる。

第6章では、全ての結果から耳音響放射による選択的聴取能力の推定について考察する。

第7章は結論であり、本研究で明らかになったこと、残された課題について述べる。

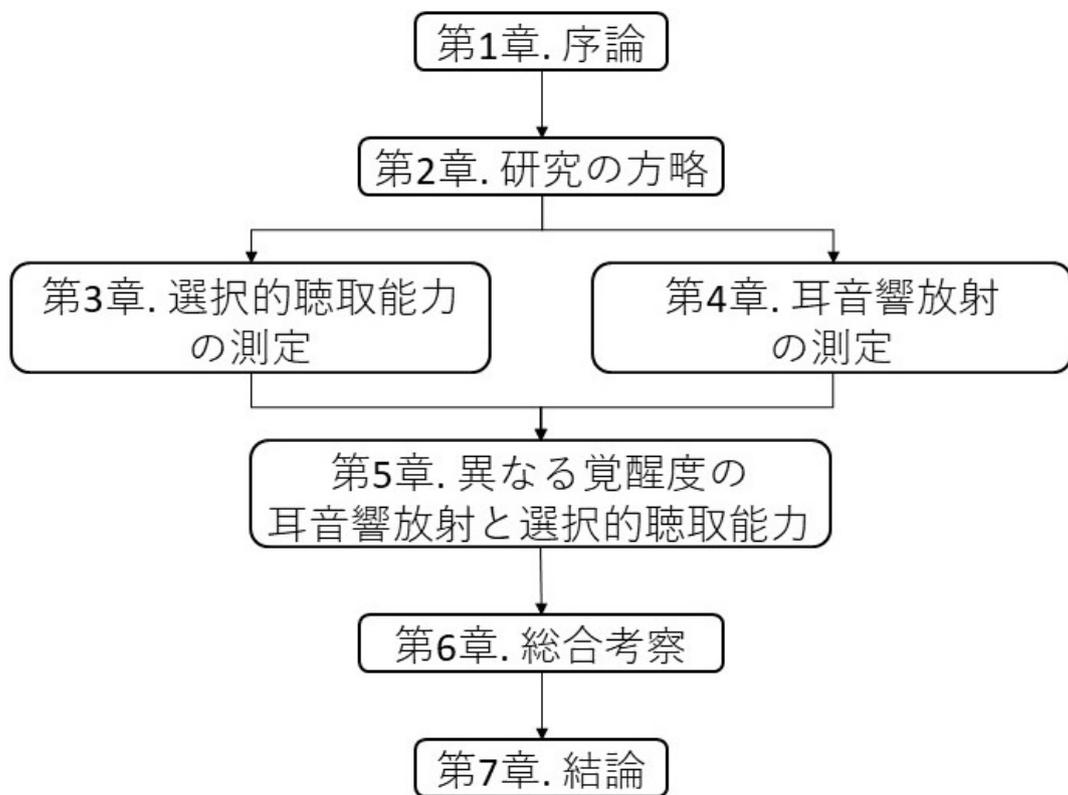


図 1.1: 本論文の構成.

第2章 研究の方略

2.1 選択的聴取能力

聴覚機能の低下により、健常者と比べて聴力が 20 dB 以上低下している状態を難聴という。難聴は原因によって、感音性難聴や伝音性難聴と呼ばれている。これらの難聴は純音聴力検査によって特定される。しかし、純音聴力検査にて聴力に問題なしと判定されても音声の聞き取りに問題が発生する場合がある。特に騒音が存在すると現れる傾向が強い。このように純音聴力検査では問題なしなのに、特定の条件で音の聞き取りに問題が発生する聴覚障害を正常な純音聴力検査から隠れているとして、隠れ難聴と呼ばれている [11]。

隠れ難聴による音声聞き取りの問題として、選択的聴取能力 (selective listening ability) の欠如が挙げられる。選択的聴取能力とは、雑音が提示されている中で聞き取りたい音に対してのみ注意を集中し、その他の音は無視するような聴取のことである [12]。選択的聴取能力は、個人差があり、その原因は聴覚抹消が関わっている [13]。選択的聴取能力は成長と共に発達するといわれており、成人より子供の方が妨害音存在下での目的音聴取の成績が低くなる [14]。選択的聴取能力の発達が遅い子供に対して、教室をはじめとした騒がしい場所での学習は困難である。そのため、早期に子供の選択的聴取能力を測定することができれば、静かな場所を提供することで学習の遅れといった問題を解決できる。

2.2 耳音響放射

ヒトの聴覚には優秀な音響処理装置が備わっており、それによって音を聞き分けている。しかし、この優秀な聞き分け能力は1970年代後半までは、内耳では大雑把な弁別が行われ、大脳皮質聴覚領に至る過程で周波数分析されると考えられていた[15]が、その後の研究により、蝸牛内で周波数分析が行われていることが分かっている。

音は空気の振動として、外耳道内で鼓膜を経て耳小骨からアブミ骨の振動により、蝸牛に至る[12]。蝸牛には基底膜があり、Békésyは音による振動によって基底膜が振動する現象として、進行波説を唱えた[16]。進行波説とは、蝸牛へと至った振動の周波数に従って特定の基底膜が振動するという説である。Békésyはヒトの標本で観察し、進行波説を示した。また、基底膜振動が入力音に依存した振動特性よりも鋭いため、基底膜振動にはなにかしらのエネルギー供給があると考えた。また、Békésyは進行波は蝸牛の頂部に向かって進み、エネルギーが消えてしまうのであり、進行波を駆動させるほどの強い興奮性の振動があるのであれば、それが中耳へ放出され外耳道内で検出できるはずだと考えていた。そして、1977年にKempは自分の耳にマイクロフォンを挿入し、耳をシリコン・パテで埋め、ヘッドホンを通して純音を提示した。その結果、耳内に自発的な音が検出された[1]。これが、耳音響放射の始まりである。

ヒトの聴覚末梢系にある外有毛細胞は、入力音による基底膜の振動によって外有毛細胞に含まれるモータ蛋白であるプレスチンの駆動により伸縮する。その伸縮の潜時によって生じた基底膜振動が微弱な音として外耳道内に放射される現象を耳音響放射という[3, 15, 17]。

耳音響放射は、蝸牛の非線形性を見ている現象であり、測定の際に聴取者の意思に関係なく取得できるため、新生児の聴覚スクリーニングに用いられている[2, 18]。

耳音響放射は、二種類あり、提示する刺激によって種類が異なる。一つは誘発耳音響放射(Transient Evoked Oto-Acoustic Emission, TEOAE)である。TEOAEはクリック音によって誘発された一定の潜時を持つ微弱なエコーである。もう一つは歪成分耳音響放射(Distortion Product Oto-Acoustic Emission, DPOAE)である。DPOAEは周波数の異なる二種類の純音を刺激として同時に提示したときに、外耳道内に放射される内耳の非線形性により生じる歪成分に由来する。DPOAEは提示する純音を変えることで、周波数ごとの耳音響放射を測定することができる[19]。

先行研究において、TEOAEには聴覚的注意の影響が現れる可能性が示されており[6, 7]、聴覚的注意と関連する選択的聴取能力も現れると考えられる。そのため本研究では、TEOAEによる耳音響放射の測定を行う。

耳音響放射はエコーが微弱であり、雑音の影響を強く受ける。そのため、加算平均を行い、雑音を取り除く必要がある。また、TEOAEでは、測定したデータに耳音響放射が存在するか判断する必要がある。その判断には再現性を用いる。再

再現性の概念図を図 2.1 に示す。図のように測定されたデータを A, B として刺激ごとに切り分け 2 分割し，加算平均する。TEOAE は刺激を提示して約 12 ms 後に現れる。そのため，図の赤枠である刺激を提示して 10~20 ms の区間を A, B から抜き出し，波形の一致率を確認する。この一致率を再現性といい，再現性が 50%以上のデータを TEOAE が測定されたデータとして扱う。

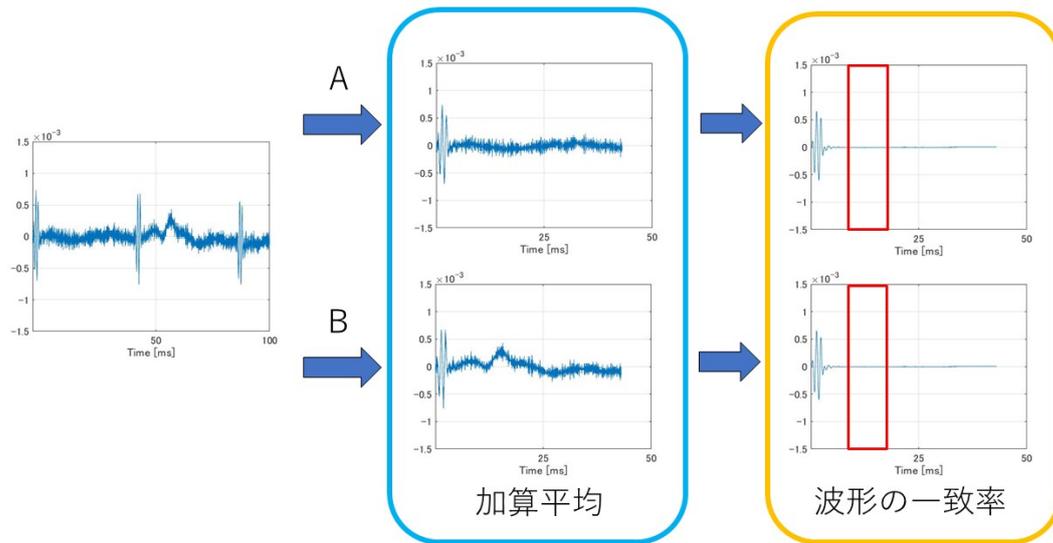


図 2.1: 再現性の概念図.

2.3 覚醒度

2.3.1 覚醒度とは

覚醒度という単語が現れたのは、ヒトの脳波が測定できるようになってからである [20]. 覚醒度という単語が現れるまでは、意識 (consciousness) という単語の中に意味が含まれていた. そこから、中枢神経系の話を行う際にビジランス (vigilance) が用いられるようになった [21]. その後、ヒトの脳波が発見された. 脳波によって覚醒と睡眠の関係といった研究が進められた結果、意識よりも狭い意味として覚醒度 (degree of arousal) が利用されるようになった.

覚醒度という単語は、現在に至るまで覚醒と睡眠と関わる研究で利用されているが、用いられる場面において覚醒度の英訳そのものが変わる場合がある. 数多くの論文には、Degree of arousal, arousal, arousal level といった覚醒を意味する arousal を含む単語を覚醒度として英訳している [22]. これは、脳波学の論文で多くみられる. また、ドライバーの覚醒度に関連する論文に多くみられる英訳として Drowsiness という眠気を意味する単語もある [23]. 一方、私の先行研究である鈴木らの研究では awareness という意識の意味を表す単語を覚醒度として用いている [9].

覚醒度は覚醒度が上昇する、低下するという表現がなされる. 覚醒度が上昇するというのは不安や恐怖、緊張などによって脳波の周波数が上昇することで、 δ 波や θ 波といった睡眠に関わる脳波の出現率が低下することで判断する. しかし、覚醒度が上昇したかどうかを確認するためには平時の状態の脳波を事前に知っておく必要があるため、覚醒度の上昇を判断することは難しい. 覚醒度が低下するというのは、 α 波の変化や周波数が低下することによる δ 波や θ 波といった睡眠に関わる脳波の出現率が上昇することによって判断する. 睡眠脳波の出現率の上昇などである程度判断ができるため、平時の状態の脳波の測定を必要としない.

覚醒度の推定には様々な手法がある. 最も親しまれている方法は脳波による測定である. その他にも、心拍数や眼球運動、呼吸、皮膚電気活動などによる測定もある.

2.3.2 脳波

脳波とは、脳の活動によって生じる電位の変動を頭皮に配置した電極から検出し、時系列に沿って記述したデータである [24]. 脳波は、時間的特性解析に優れているという特徴がある. 1929 年ヒトから初めて脳波が検出され [21], 5つの周波数帯域に分けて考えられるようになった [24, 25, 26]. 表 2.1 がその帯域になる.

脳波の測定に用いられる装置は、用いられる用途によって様々あり、ウェアラブル脳波計と呼ばれる安価で取り扱いやすいものも研究で用いられている [27]. 本研

究では、脳波の測定をウェアラブル脳波測定装置である EMOTIV 社の EPOC X を用いて測定する。

脳波測定において電極を配置する位置は電極配置法に従って行われる [28]。電極配置法は 10-20 法と 10%法がある。本研究で用いる EPOC X は 10%法に従って電極が配置されている。図 2.2 が電極が配置されている場所の図である。この図の灰色の丸は EPOC X で測定可能な電極の位置である。また、緑の丸は鈴木らの研究で測定された電極の位置である。鈴木らの研究では、右脳中心部あたりを測定する電極位置を用いている。理由として、覚醒度が低下していくと発生する δ 波が現れやすいのが中心部といわれているためである。また、後頭部の α 波の出現率をみることで睡眠を判断することができることが知られている [20]。そこで、本研究では、後頭部である O1, O2 と中心部の FC5, FC6 の 4 点において脳波を測定する。

2.3.3 睡眠脳波

睡眠脳波は国際的な睡眠段階判定基準であり、5 段階に分けられる [29]。表 2.2 に睡眠脳波の判断基準を示す。

2.3.4 本研究における覚醒度

本研究では脳波測定によって覚醒度を推定し、異なる覚醒度による耳音響放射の測定を行う。異なる覚醒度として、覚醒中、睡眠下の二つに分け、覚醒度の低下による違いを調査する。そのため、覚醒度が低いと睡眠脳波の出現率上昇するといった特徴から覚醒度の低下を測定する。本研究では、睡眠脳波の段階である覚醒期～深睡眠期 5 段階のうち覚醒期と入眠期を覚醒中、軽入眠期～深睡眠期を睡眠下として脳波による覚醒度の推定を行う。

表 2.1: 脳波の種類.

周波数	種類	出現しやすい場面
0.5~4 Hz 帯	δ 波	深睡眠期
4~8 Hz 帯	θ 波	入眠期から軽睡眠期
8~13 Hz 帯	α 波	安静閉眼時
13~30 Hz 帯	β 波	安静開眼時

表 2.2: 睡眠脳波の段階.

睡眠段階	判別基準
覚醒期	α 波が連続して現れ, α 波の振幅が低下しない.
入眠期	α 波の振幅が低下, 途切れ途切れにしか現れなくなる.
軽入眠期	θ 波と δ 波が不規則に出現する. 睡眠紡錘波が出現する.
中等度睡眠期	δ 波が 20~50% を占める. 紡錘波の出現率が低下する.
深睡眠期	δ 波が 50% 以上を占める. 紡錘波がほぼ出現しない.

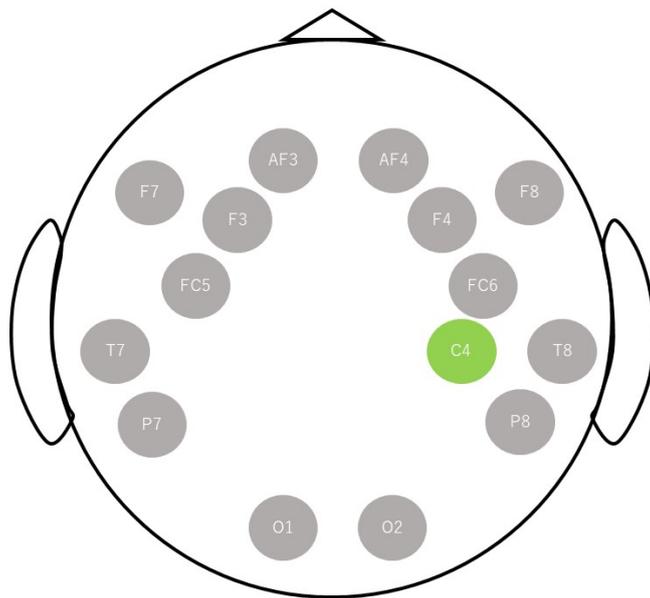


図 2.2: 電極配置の図.

2.4 研究の方略

本研究では、覚醒度の異なる耳音響放射と選択的聴取能力の関係性を検討するために二つの実験を行う。一つは、選択的聴取能力を測定する実験、もう一つは、耳音響放射を測定する実験である。

まず、選択的聴取能力の測定実験では、二つの課題を行う [5, 30]。一つ目は、多数の話者の会話の混合音声から目的音声の単語を聴き取る課題である（図と地課題）。この課題は聴覚末梢で生じるマスキングレベルでの選択的聴取能力を反映している。聴覚末梢での影響を反映しているため、課題の成績と耳音響放射との関係が見られると考えられる。

二つ目は、両耳に別々の目的音を提示し、それぞれを聴き取る課題である（競合語課題）。この課題は、聴覚末梢の先の下丘において左右耳の情報の統合後における選択的聴取能力を反映している [31]。下丘より高次での聞き分けによる影響は、聴覚末梢の反応とは独立であるため、課題の成績と耳音響放射との関係は見られないと考えられる。

次に、耳音響放射の測定実験では、誘発耳音響放射（Transient Evoked Oto-Acoustic Emission, TEOAE）の測定を行う。TEOAEは刺激音にクリック音を用いて誘発された一定の潜時を持つ微弱なエコーである。先行研究において、TEOAEには聴覚的注意の影響が現れる可能性が示されており [6, 7]、選択的聴取能力も反映されることが考えられる。そして、本研究では、二つの状態での耳音響放射の測定を行う。一つは、覚醒中の耳音響放射の測定。もう一つは、睡眠下の耳音響放射の測定である。二つの状態で測定した耳音響放射をもとに、異なる覚醒度の耳音響放射を求める。

最後に、選択的聴取能力の正答率と覚醒度の異なる耳音響放射の測定値の対応関係を調査する。

第3章 選択的聴取能力の測定

3.1 図と地課題

3.1.1 実験目的

聴覚末梢で生じるマスキングレベルでの選択的聴取能力を測定するために図と地課題を行う。

3.1.2 実験方法

図と地課題では、防音室内で実験参加者にヘッドホン (Sennheiser HDA200), USB Audio Interface (Fireface UCX) を用いて音を提示した。刺激の音圧レベルは、HATS (B&K Type 4128C), マイクアンプ (B&K NEXUS), 騒音計 (B&K Type 2250) を利用して校正した。

実験参加者は、正常な聴力を有する大学院生8名 (女性1名, 男性7名) で、平均年齢は、24.0歳, 標準偏差は1.31であった。

図と地課題では、背景音としてカフェノイズ, 目的音として男性による単語発話音声を音圧レベル65 dBで提示した。単語は、子供の絵本等から参照した簡単な単語である。図と地課題では、目的音と同じ男性による「はい」という呼びかけを行った0.5秒後に単語発話音声を片耳に提示し、実験参加者に聴取した単語をキーボードで入力するよう求めた。その際、競合音を同じ耳に提示した。各耳20語ずつランダムに単語発話音声を提示した。提示耳の順番はランダムに割り振った。

3.1.3 結果

図と地課題と競合語課題の結果を図3.1に示す。この図は箱ひげ図である。縦軸に図と地課題の正答率を示す。左の箱ひげ図が左耳の結果で、右の箱ひげ図が右耳の結果である。

図と地課題では、右耳よりも左耳の方が正答率が高かった。また、右耳よりも左耳の方がばらつきが大きかった。

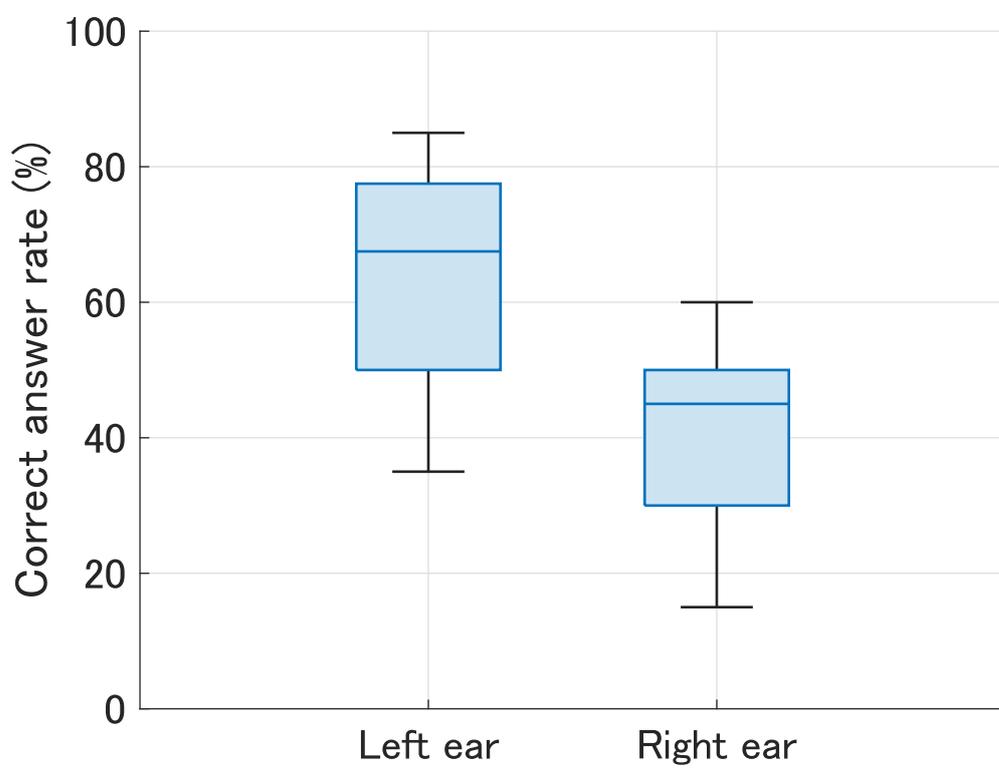


図 3.1: 図と地課題の正答率.

3.1.4 考察

右耳よりも左耳の方が良い結果について、右耳優位性という特徴があり、本来左耳よりも右耳の方がよい結果になると考えていた。しかし、結果は逆になった。この原因として、出題した問題が左耳よりも右耳の方が、困難だったことが考えられる。すべての実験参加者が間違えた回答として右耳では、「はきはき、おかし、たね」。左耳では「かみ、あさ」がある。また、右耳に「わに」と「にわ」が出題され、実験参加者の1名を除いて片方ずつしか回答されなかった。このように間違えた回答が右耳には多くあり、その結果が右耳よりも左耳の方がよいという結果に繋がったと考えた。また、ばらつきも右耳よりも左耳が大きい理由も共通して間違えた回答が少ないことにより、実験参加者によって聞き取りにくい単語が変わり、ばらつきが大きくなったと考えた。

3.2 競合語課題

3.2.1 実験目的

聴覚末梢の先の下丘において左右耳の情報の統合後における選択的聴取能力を測定するために競合語課題を行う。

3.2.2 実験方法

競合語課題では、防音室内で実験参加者にヘッドホン（Sennheiser HDA200）、USB Audio Interface（Fireface UCX）を用いて音を提示した。刺激の音圧レベルは、HATS（B&K Type 4128C）、マイクアンプ（B&K NEXUS）、騒音計（B&K Type 2250）を利用して校正した。

実験参加者は、正常な聴力を有する大学院生8名（女性1名、男性7名、平均年齢24.0歳、標準偏差1.31歳）であった。

競合語課題では、目的音は男性による単語発話音声を音圧レベル65 dBで提示した。こちらも単語は、子供の絵本等から参照した簡単な単語である。競合語課題では、目的音と同じ男性による「はい」という呼びかけを行った0.5秒後に2つの単語発話音声を両耳にそれぞれ提示した。実験参加者には両耳の回答をそれぞれキーボードで入力するよう求めた。その際、背景音の提示は行わなかった。各耳20語ずつランダムに単語発話音声を提示した。

3.2.3 結果

競合語課題の結果を図3.2に示す。この図は箱ひげ図である。縦軸に課題の正答率を示す。

競合語課題では、回答の多くが正答率100%となった。また、1名の回答のみ正答率が悪かったため、外れ値となった。実験参加者間のばらつきはみられなかった。外れ値となった実験参加者の回答は、単語の聴き取りはできていたが左右の回答を聴き間違えていた。

3.2.4 考察

実験参加者のほぼ全員が全問正解という結果は、聴覚抹消の先の下丘での聞き分けに問題がないことを示している。一名のみ3問間違えており、その結果は聞き取りの間違いではなく、左右の音の聞き間違いによるものであった。これは、この実験参加者が下丘での聞き分けにおいて苦手な傾向があると考えられる。

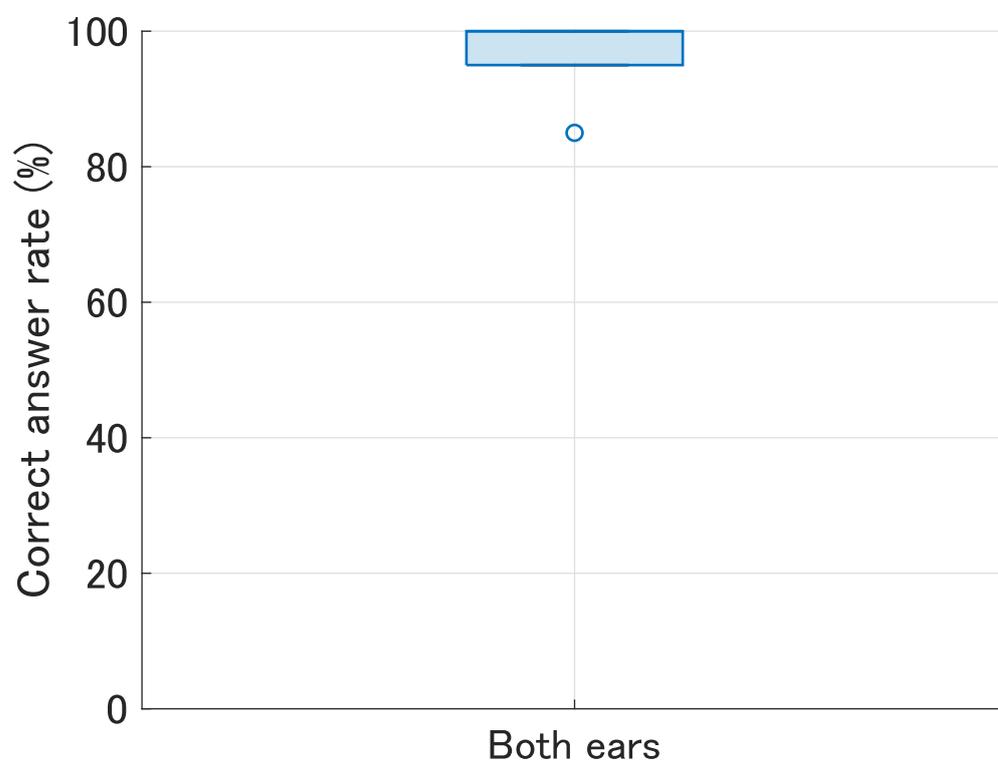


図 3.2: 競合語課題の正答率.

第4章 耳音響放射の測定

4.1 覚醒中の耳音響放射測定実験

4.1.1 実験目的

覚醒度が低下していない状態の耳音響放射として、覚醒中の耳音響放射を測定する。測定する耳音響放射は、TEOAEである。

4.1.2 実験方法

計算機から USB Audio Interface を経由して、防音室内でインナーイヤーマイクロホンとイヤホン (etymotic research ER-10C) で刺激の提示と耳音響放射を收音した。

刺激の音圧レベルは、HATS (B&K Type 4128C)、マイクアンプ (B&K NEXUS)、騒音計 (B&K Type 2250) を利用して校正した。

実験参加者は、正常な聴力を有する大学院生 8 名 (女性 1 名, 男性 7 名) で、平均年齢は、24.0 歳, 標準偏差は 1.31 歳であった。

TEOAE の測定では、1 回の測定に 1 kHz のトーンバースト 3 ms, 無音区間 40 ms の計 43 ms の刺激を 1500 回提示した。その際、トーンバーストが 65 dB になるようにした。実験参加者の両耳にインナーイヤーマイクロホンとイヤホンを装着させ、片耳ずつ右耳, 左耳の順で 3 回測定した。刺激 1500 回を加算平均し、10~20 ms の区間のパワースペクトルを測定値とした。この際、加算平均した 10~20 ms の区間を、測定した 3 回同士で波形の一致率を求め、再現性が確認できたデータの平均値を測定値とした。

4.1.3 結果

TEOAE の再現性を求めた結果、再現性が求まらなかった 1 名の実験参加者のデータを除いた。

TEOAE の測定値を表 4.1 に示す。また、TEOAE の全体の平均値と標準偏差を表 4.2 に示す。

表 4.1: 覚醒中の TEOAE の測定値. 上段の数字は実験参加者に割り振った番号.

	1	2	3	4	5	7	8
Right (dB)	18.42	3.84	12.41	11.61	17.24	9.07	19.09
Left (dB)	12.98	14.38	12.26	6.39	17.62	5.89	12.07

表 4.2: 覚醒中の TEOAE の測定値の平均値と標準偏差.

	Right (dB)	Left (dB)
avg. (dB)	13.1	11.66
SD	5.57	4.21

4.1.4 考察

TEOAE の平均値は, 全体で 12.38 dB となった. 標準偏差は, 右耳で 5.57, 左耳で 4.21 となった. TEOAE の測定値の左右の差が大きい実験参加者が多い中, 左右の TEOAE の測定値の差が 10 dB 以上となった実験参加者もいた.

4.2 睡眠中の耳音響放射測定実験

4.2.1 実験目的

覚醒度が低下している状態の耳音響放射として、睡眠下の耳音響放射を測定する。測定する耳音響放射は、TEOAEである。

4.2.2 実験方法

計算機から USB Audio Interface を経由して、防音室内でインナーイヤーマイクロホンとイヤホン (etymotic research ER-10C) で刺激の提示と耳音響放射を收音した。

刺激の音圧レベルは、HATS (B&K Type 4128C)、マイクアンプ (B&K NEXUS)、騒音計 (B&K Type 2250) を利用して校正した。

脳波の測定は、EMOTIV EPOC X によって測定した。

実験参加者は、正常な聴力を有する大学院生 8 名であった。

実験参加者をソファの上に実験参加者のリラックスできる体制にさせ、TEOAE と脳波を 2 時間測定した。TEOAE の測定では、1 回の測定に 1 kHz のトーンバースト 3 ms、無音区間 40 ms の計 43 ms の刺激を 1500 回提示した。その際、トーンバーストが 65 dB になるようにした。実験参加者の両耳にインナーイヤーマイクロホンとイヤホンを装着させ、片耳ずつ右耳、左耳の順で測定した。2 時間の実験中、常に音の提示を行った。

脳波の測定では、10%法によって定められた電極のうち、後頭部の O1, O2 と中心部の FC5, FC6 の 4 点の電極の脳波を 1 分毎に FFT をかけることで、各時点での脳波を計算した。パワースペクトルを周波数帯域で分類し、 α 波、 θ 波、 δ 波を求めた。本実験では、 α 波の低下と θ 波の上昇、 δ 波の出現を持って、覚醒度が低下し、睡眠状態にあると判断した。

4.2.3 結果

実験参加者の脳波を見た結果、全ての実験参加者において δ 波の出現は見られなかった。しかし、 α 波の低下と θ 波の上昇が確認できた実験参加者は 5 名いた。残りの 3 名は θ 波の出現が確認できなかった。そこで、 α 波の低下と θ 波の上昇が確認できた実験参加者 5 名のうち TEOAE の再現性が確認できなかった 1 名を除いた TEOAE の測定値を表 4.3 に示す。また、睡眠下の TEOAE の全体の平均値と標準偏差を表 4.4 に示す。

表 4.3: 睡眠下の TEOAE の測定値.

	1	5	7	8
Right (dB)	11.63	14.28	6.67	14.85
Left (dB)	12.79	11.75	4.15	12.75

表 4.4: 睡眠下の TEOAE の測定値の平均値と標準偏差.

	Right (dB)	Left (dB)
avg. (dB)	12.21	10.50
SD	3.07	4.41

4.2.4 考察

脳波において、全ての実験参加者で δ 波が見られなかったのは、実験参加者が熟睡できなかったからだと考えられる。 δ 波はレム睡眠のような熟睡している場合に多くみられるもので、脳波装置を付けた状態で TEOAE の測定を行いながらの熟睡は困難であったと考えた。しかし、 θ 波の上昇は多くの実験参加者でみられ、実験参加者の多くは一時的に覚醒度の低下した状態であったと考えられる。

第5章 異なる覚醒度の耳音響放射と 選択的聴取能力

3章と4章で得られた結果をもとに、二つの状態での耳音響放射と二つの課題での選択的聴取能力の関係を調査する。

5.1 覚醒中の耳音響放射と選択的聴取能力の関係

5.1.1 覚醒中の TEOAE と図と地課題

覚醒中の右耳の TEOAE の測定値と図と地課題の正答率の関係を図 5.1 に示す。また、覚醒中の左耳の TEOAE の測定値と図と地課題の正答率の関係を図 5.2 に示す。縦軸に耳音響放射の測定値、横軸に課題の正答率を示す。図中に実験参加者のデータを点として表示し、その点をもとに最小二乗法で回帰直線を引いた。それが図中の線である。回帰直線は、最小二乗法により、TEOAE の測定値を x 、選択的聴取能力の課題の正答率を y とし、 $y = ax + b$ となる直線を求めた [32]。実験参加者のデータは正規分布に従うものとして仮定し、 x と y の相関がある場合において、 $y = ax + b$ の傾きによる傾向を見ていく。覚醒中の TEOAE の測定値と図と地課題の正答率の相関係数は、右耳で $r = 0.20$ ($p = 0.66$) となり弱い正の相関が、左耳で $r = -0.51$ ($p = 0.23$) となり負の相関が得られた。そのため、右耳は TEOAE の測定値が高いほど図と地課題の正答率が高くなったが、左耳は測定値が高いほど正答率が低くなった。

この結果から、図と地課題と覚醒中の耳音響放射では、右耳で耳音響放射の測定値によって図と地課題の正答率が上昇する傾向があり、左耳で耳音響放射の測定値によって正答率が減少する傾向があることが分かった。

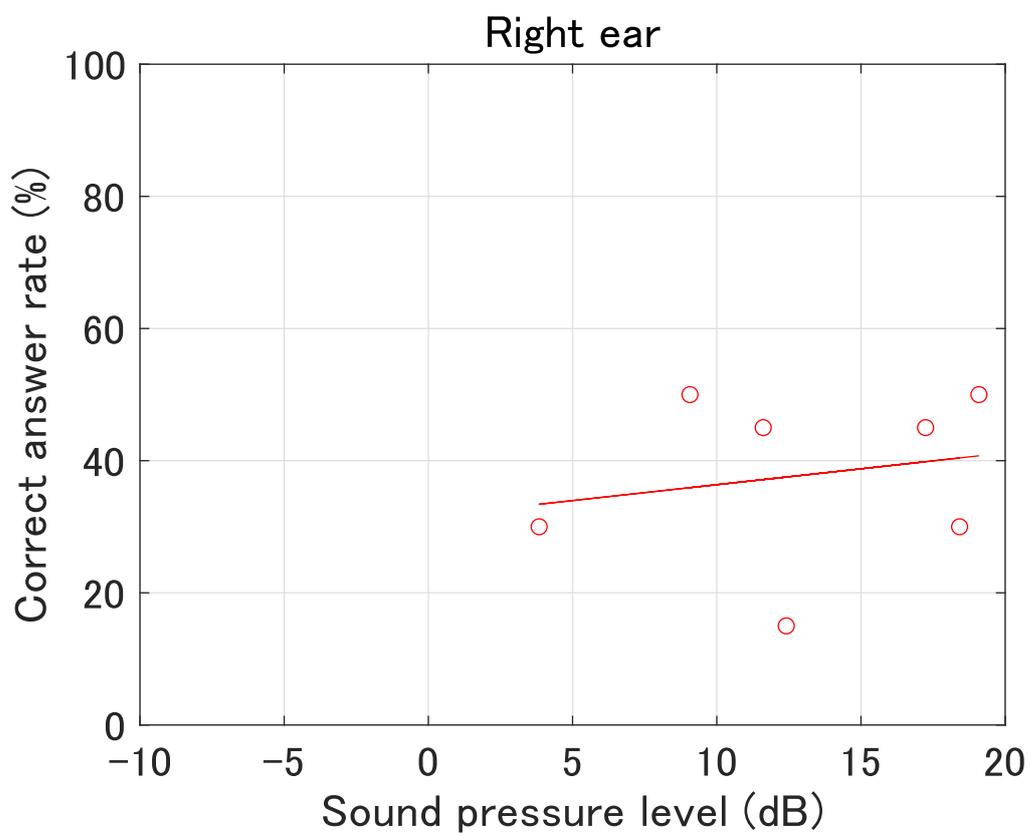


図 5.1: 覚醒中の右耳の TEOAE と図と地課題の正答率.

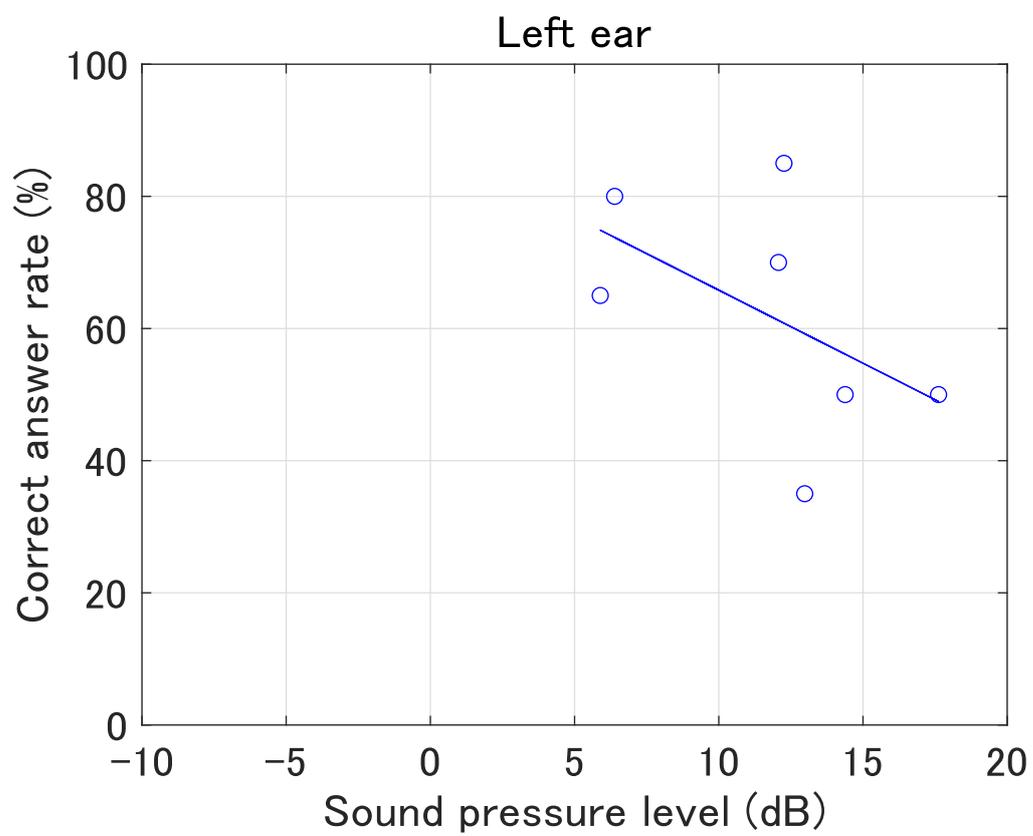


図 5.2: 覚醒中の左耳の TEOAE と図と地課題の正答率.

5.1.2 覚醒中の TEOAE と競合語課題

覚醒中の右耳の TEOAE の測定値と競合語課題の正答率の関係を図 5.1 に示す。また、覚醒中の左耳の TEOAE の測定値と競合語課題の正答率の関係を図 5.2 に示す。横軸に課題の正答率、縦軸に耳音響放射の測定値を示す。図中に実験参加者のデータを点として表示し、その点をもとに最小二乗法で回帰直線を引いた。それが図中の線である。覚醒中の TEOAE の測定値と競合語課題の正答率の相関係数は、右耳で $r = 0.69$ ($p = 0.08$) となり正の相関が、左耳で $r = -0.10$ ($p = 0.83$) となり相関は得られなかった。そのため、右耳は TEOAE の測定値が高いほど競合語課題の正答率が高くなったが、左耳は関係性があるとは言えない結果になった。

この結果から、競合語課題と覚醒中の耳音響放射でも、右耳で耳音響放射の測定値によって競合語課題の正答率が上昇する傾向にあることが分かった。競合語課題と耳音響放射には関係性がみられないと考えていたが、その仮説に反する結果であった。これまでに、対側耳に提示した雑音によって測定耳に提示された正弦波をマスクすることが知られている [33]。これは対側耳への刺激が測定耳の聴覚末梢系にも作用していることを示唆している。この現象が正弦波だけでなく、単語の認識の場面でも生じたために、競合語課題であっても覚醒中の耳音響放射の測定値との対応がみられたのではないかと考えられる。

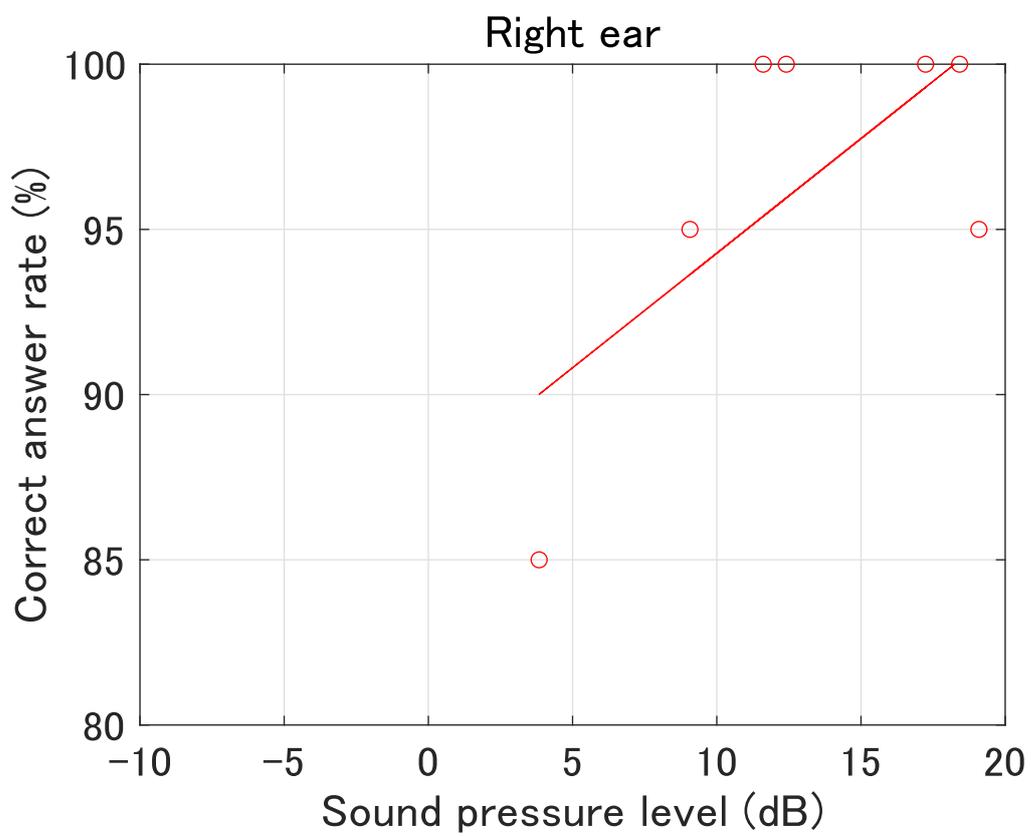


図 5.3: 覚醒中の右耳の TEOAE と競合語課題の正答率.

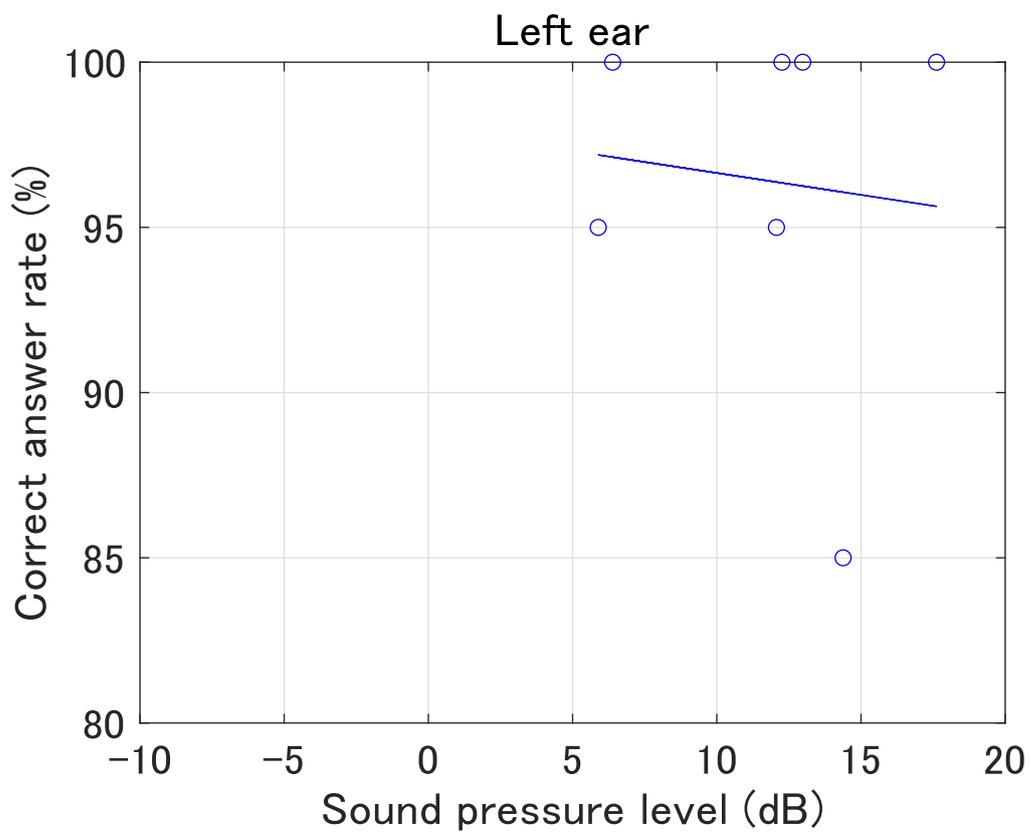


図 5.4: 覚醒中の左耳の TEOAE と競合語課題の正答率.

5.2 睡眠下の耳音響放射と選択的聴取能力の関係

5.2.1 睡眠下の TEOAE と図と地課題

睡眠下の右耳の TEOAE の測定値と図と地課題の正答率の関係を図 5.5 に示す。また、睡眠下の左耳の TEOAE の測定値と図と地課題の正答率の関係を図 5.6 に示す。縦軸に耳音響放射の測定値、横軸に課題の正答率を示す。図中に実験参加者のデータを点として表示し、その点をもとに最小二乗法で回帰直線を引いた。それが図中の直線である。睡眠下の TEOAE の測定値と図と地課題の正答率の相関係数は、右耳で $r = -0.60$ ($p = 0.40$) となり負の相関が、左耳で $r = -0.33$ ($p = 0.67$) となり負の相関が得られた。そのため、両耳で TEOAE 測定値が高いほど正答率が低くなった。

この結果から、睡眠下の耳音響放射と図と地課題は、両耳で耳音響放射の測定値によって正答率が低下する傾向があることが分かった。

5.2.2 睡眠下の TEOAE と競合語課題

睡眠下の右耳の TEOAE の測定値と競合語課題の正答率の関係を図 5.5 に示す。また、睡眠下の左耳の TEOAE の測定値と競合語課題の正答率の関係を図 5.6 に示す。縦軸に耳音響放射の測定値、横軸に課題の正答率を示す。図中に実験参加者のデータを点として表示し、その点をもとに最小二乗法で回帰直線を引いた。それが図中の直線である。睡眠下の TEOAE の測定値と競合語課題の正答率の相関係数は、右耳で $r = 0.84$ ($p = 0.16$) となり強い正の相関が、左耳で $r = 0.52$ ($p = 0.48$) となり正の相関が得られた。そのため、両耳で TEOAE 測定値が高いほど正答率が高くなった。

この結果から、睡眠下の耳音響放射と競合語課題は、両耳で耳音響放射の測定値によって正答率が上昇する傾向にあることが分かった。

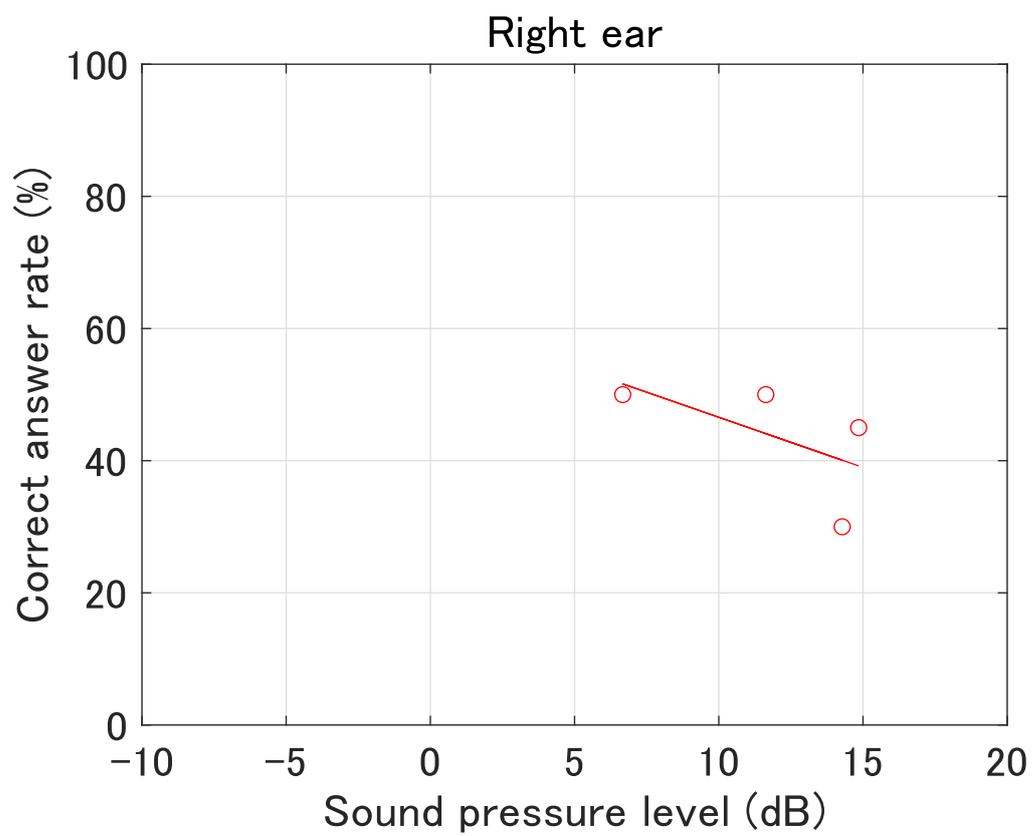


図 5.5: 睡眠下の右耳の TEOAE と図と地課題の正答率.

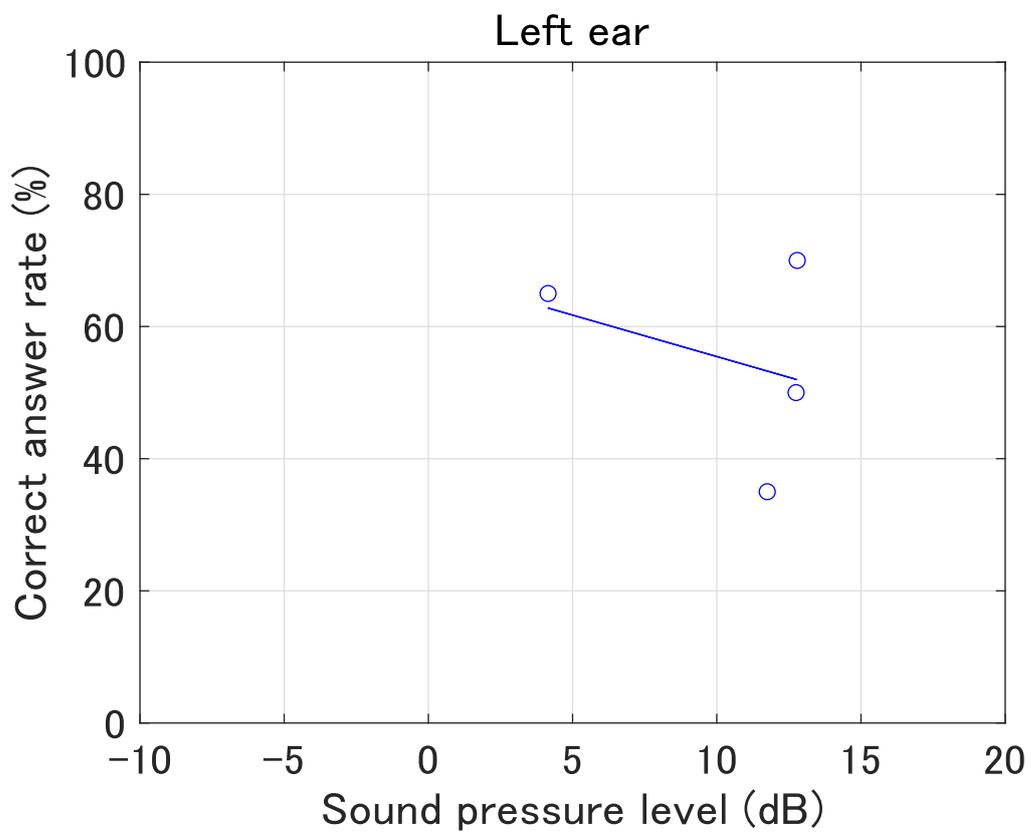


図 5.6: 睡眠下の左耳の TEOAE と図と地課題の正答率.

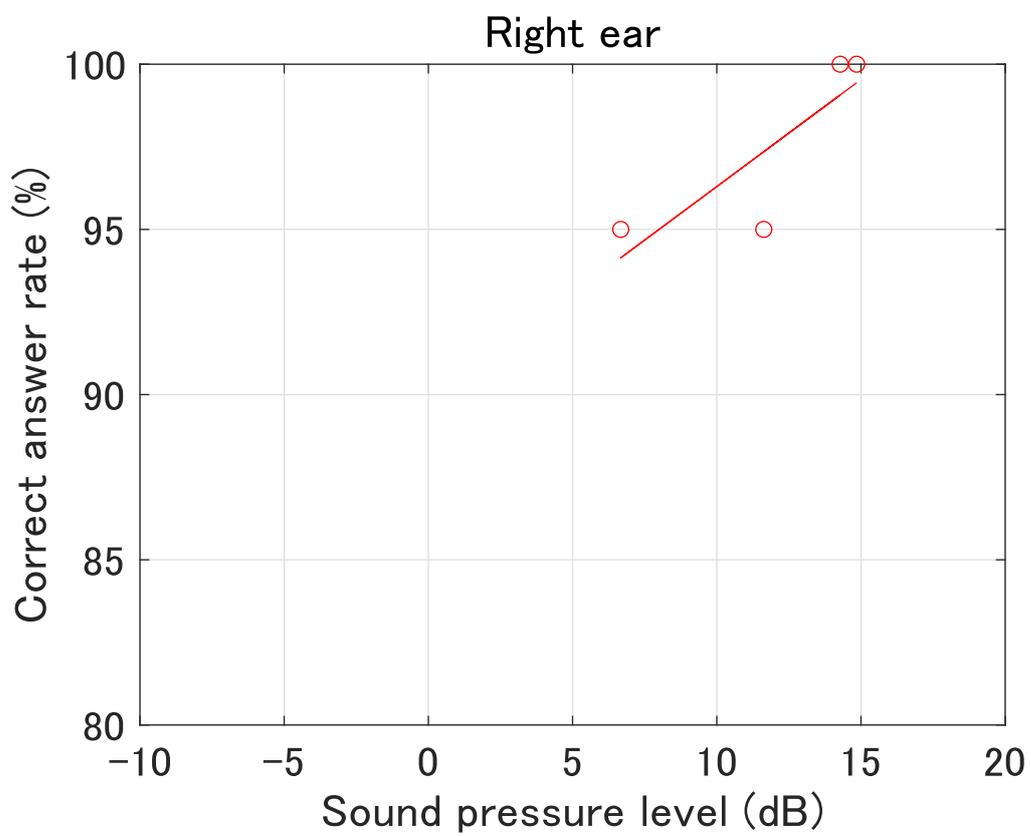


図 5.7: 睡眠下の右耳の TEOAE と競合語課題の正答率.

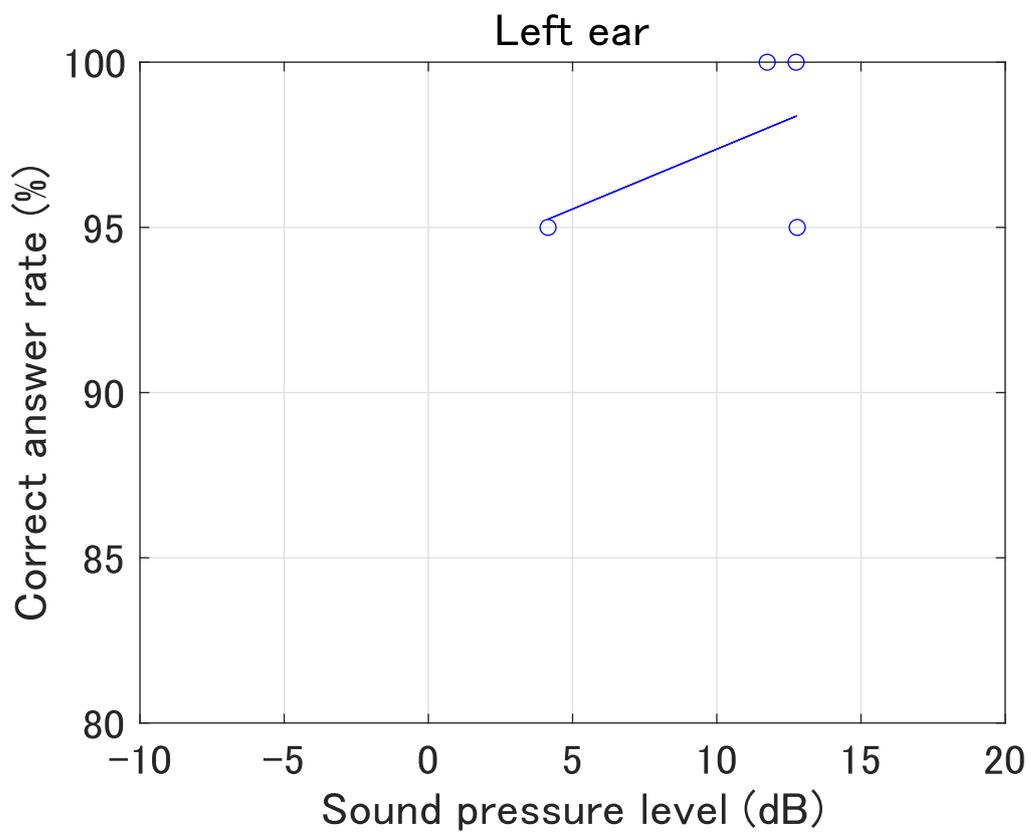


図 5.8: 睡眠下の左耳の TEOAE と競合語課題の正答率.

5.3 異なる覚醒度の耳音響放射と選択的聴取能力の関係

5.3.1 異なる覚醒度の耳音響放射

異なる覚醒度の耳音響放射として、覚醒中と睡眠下の TEOAE の測定値の差分を求め、覚醒度の違いが耳音響放射に現れるのかを見る。差分は、覚醒中の耳音響放射を x 、睡眠下の耳音響放射を y とする時、 $x - y$ で求めた。

覚醒度の低下が確認できた実験参加者 5 名のうち TEOAE の再現性が確認できなかった 1 名を除いた 4 名の覚醒中と睡眠下の TEOAE の測定値の差分を求めた。表 5.1 に差分の結果を示す。

表 5.1 からわかる通り、覚醒中と睡眠下で耳音響放射の変動があった。右耳では、全ての実験参加者で覚醒中の耳音響放射よりも睡眠下の耳音響放射の方が低下することが分かった。また、左耳でも覚醒中の耳音響放射よりも睡眠下の耳音響放射の方が低下することが分かった。しかし、差が 1 dB 以下の実験参加者が 2 名おり、左耳での差は右耳と比較して小さいことが分かった。また、 t 検定の結果、右耳の覚醒中と睡眠下の耳音響放射の測定値の間に、有意な差があった ($t(3) = -4.20$, $p = 0.02$)。左耳の覚醒中と睡眠下の耳音響放射の測定値の間には、有意な差はなかった ($t(3) = -1.23$, $p = 0.31$)。また、両耳の覚醒中と睡眠下の耳音響放射の測定値の間に、有意な差があった ($t(3) = -3.19$, $p = 0.01$)。

これらの結果により、覚醒中の耳音響放射よりも睡眠下の耳音響放射の測定値は優位に減少することが分かった。これは覚醒度の低下によって、耳音響放射も低下することが示唆している。これまでに、脳幹と外有毛細胞を結ぶ遠心性の投射にある働きがまどろみ状態で低下することが知られている [10]。耳音響放射は、外有毛細胞の能動的な働きに起因して発生しているため、耳音響放射の測定値の変化は外有毛細胞の働きの変化と考えられる。つまり、外有毛細胞の働きが覚醒度の低下によって弱まったことにより、耳音響放射の測定値が低下したと考えられる。覚醒中と睡眠下の耳音響放射の測定値の差分が大きいということは、覚醒中と睡眠下で外有毛細胞の働きの変動が大きく、覚醒中と睡眠下の耳音響放射の測定値の差分が小さいということは、覚醒中と睡眠下で外有毛細胞の働きに差がないということになる。

表 5.1: 覚醒中と睡眠下の TEOAE の測定値の差分. 上段の数字は実験参加者に割り振った番号.

	1	5	7	8
Right (dB)	6.79	2.96	2.4	4.81
Left (dB)	0.19	5.87	1.74	-0.68

5.3.2 異なる覚醒度の耳音響放射と図と地課題

異なる覚醒度の耳音響放射と図と地課題の正答率の関係を図 5.9 に示す。また、異なる覚醒度の耳音響放射と図と地課題の正答率の関係を図 5.10 に示す。縦軸に耳音響放射の測定値、横軸に課題の正答率を示す。図中に実験参加者のデータを点として表示し、その点をもとに最小二乗法で回帰直線を引いた。それが図中の直線である。覚醒中と睡眠下の TEOAE の測定値の差分と図と地課題の正答率の相関係数は、右耳で $r = 0.40$ ($p = 0.60$) となり正の相関が、左耳で $r = -0.68$ ($p = 0.32$) となり負の相関が得られた。そのため、右耳は覚醒中と睡眠下の耳音響放射の測定値の差分が大きいほど図と地課題の正答率が上昇する傾向があり、左耳では耳音響放射の測定値の差分が小さいほど図と地課題の正答率が減少する傾向がある。

この結果から、右耳では覚醒中と睡眠下で外有毛細胞の働きの変動が大きいほど図と地課題の正答率が上昇する傾向が考えられる。つまり、図と地課題の正答率が低い実験参加者は、覚醒中の外有毛細胞の働きが弱く、その影響が正答率の低下として現れたのだと考えられる。

5.3.3 異なる覚醒度の耳音響放射と競合語課題

覚醒中と睡眠下の右耳の TEOAE の差分と競合語課題の正答率の関係を図 5.9 に示す。また、覚醒中と睡眠下の右耳の TEOAE の差分と競合語課題の正答率の関係を図 5.10 に示す。縦軸に耳音響放射の測定値、横軸に課題の正答率を示す。図中に実験参加者のデータを点として表示し、その点をもとに最小二乗法で回帰直線を引いた。それが図中の直線である。覚醒中と睡眠下の TEOAE の測定値の差分と競合語課題の正答率の相関係数は、右耳で $r = -0.29$ ($p = 0.71$) となり弱い負の相関が、左耳で $r = 0.32$ ($p = 0.68$) となり弱い正の相関が得られた。そのため、右耳は耳音響放射の測定値の差分が小さいほど競合語課題の正答率が減少する傾向があり、左耳は覚醒中と睡眠下の耳音響放射の測定値の差分が大きいほど競合語課題の正答率が上昇する傾向がある。

この結果から、右耳では覚醒中と睡眠下で外有毛細胞の働きの変動が大きいほど競合語課題の正答率が減少する傾向があり、左耳は覚醒中と睡眠下で外有毛細胞の働きの変動が大きいほど競合語課題の正答率が上昇する傾向があった。競合語課題と耳音響放射には関係性がないと考えていたが、耳音響放射の測定値の差分にも関係性が見られた。

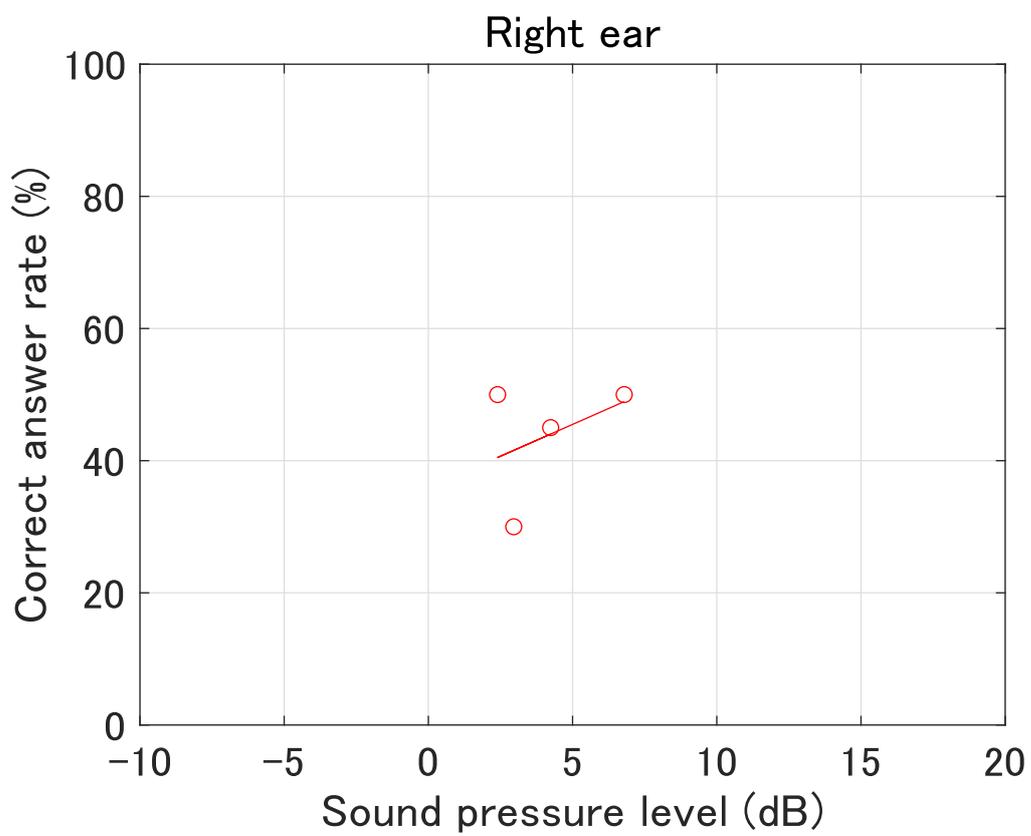


図 5.9: 覚醒中と睡眠下の右耳の TEOAE の差分と図と地課題の正答率.

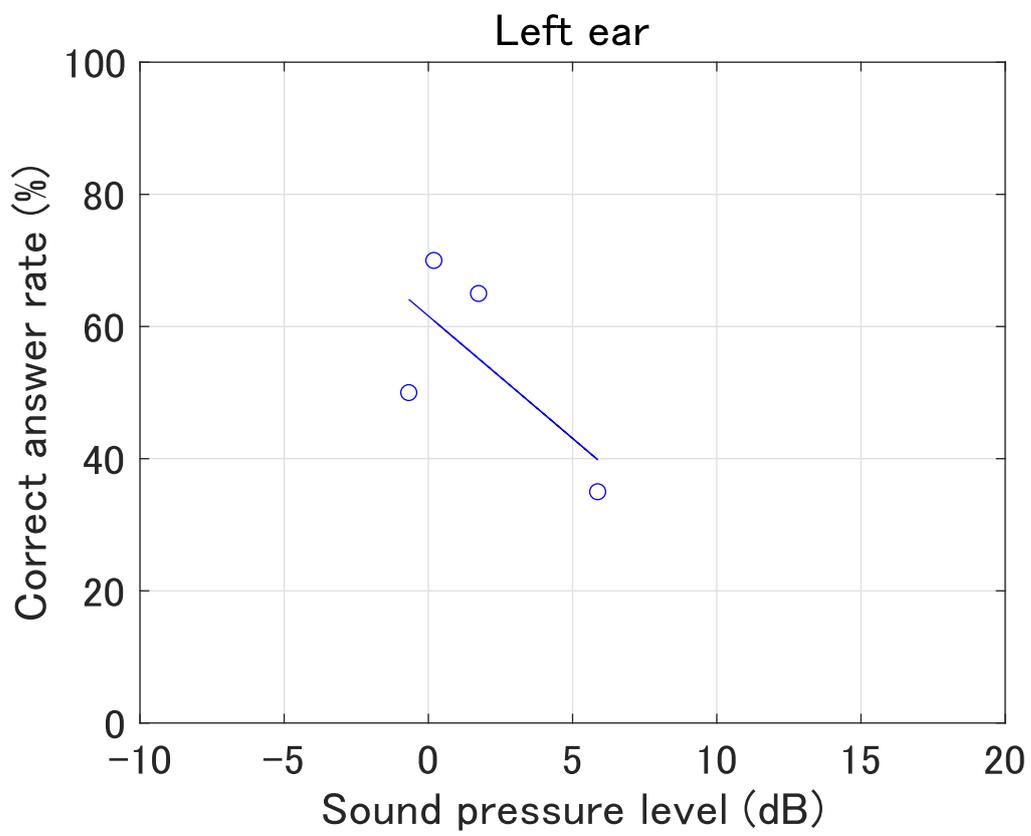


図 5.10: 覚醒中と睡眠下の左耳の TEOAE の差分と図と地課題の正答率.

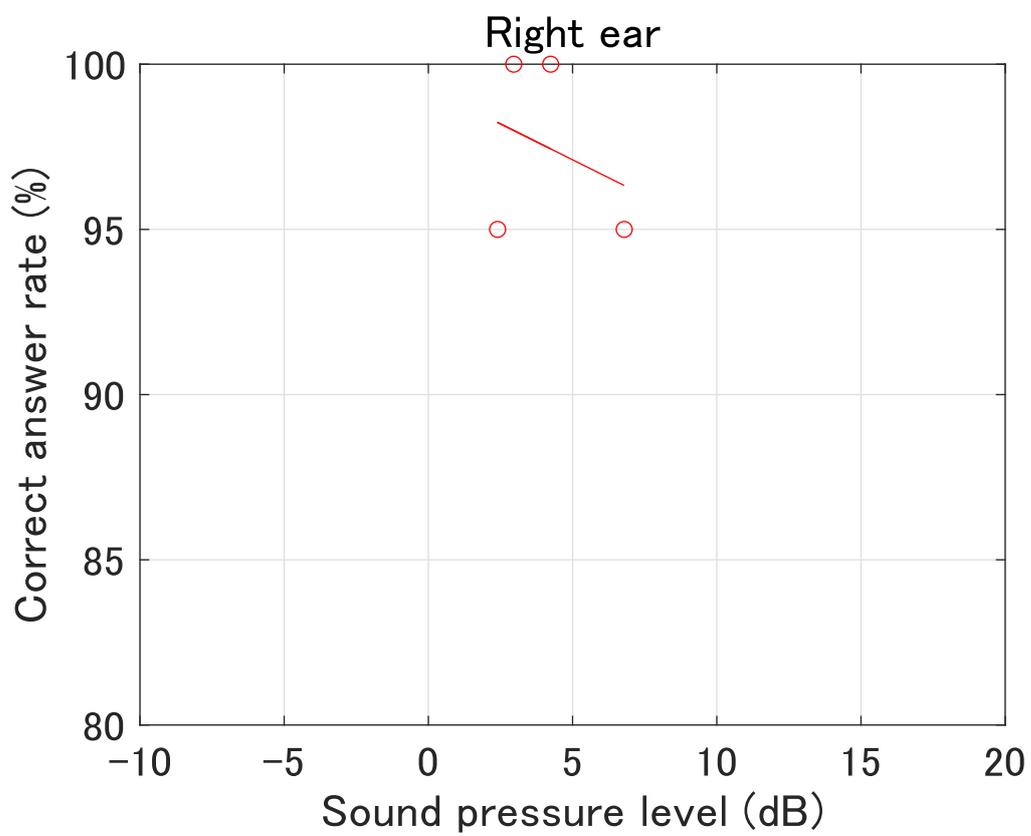


図 5.11: 覚醒中と睡眠下の右耳の TEOAE の差分と競合語課題の正答率.

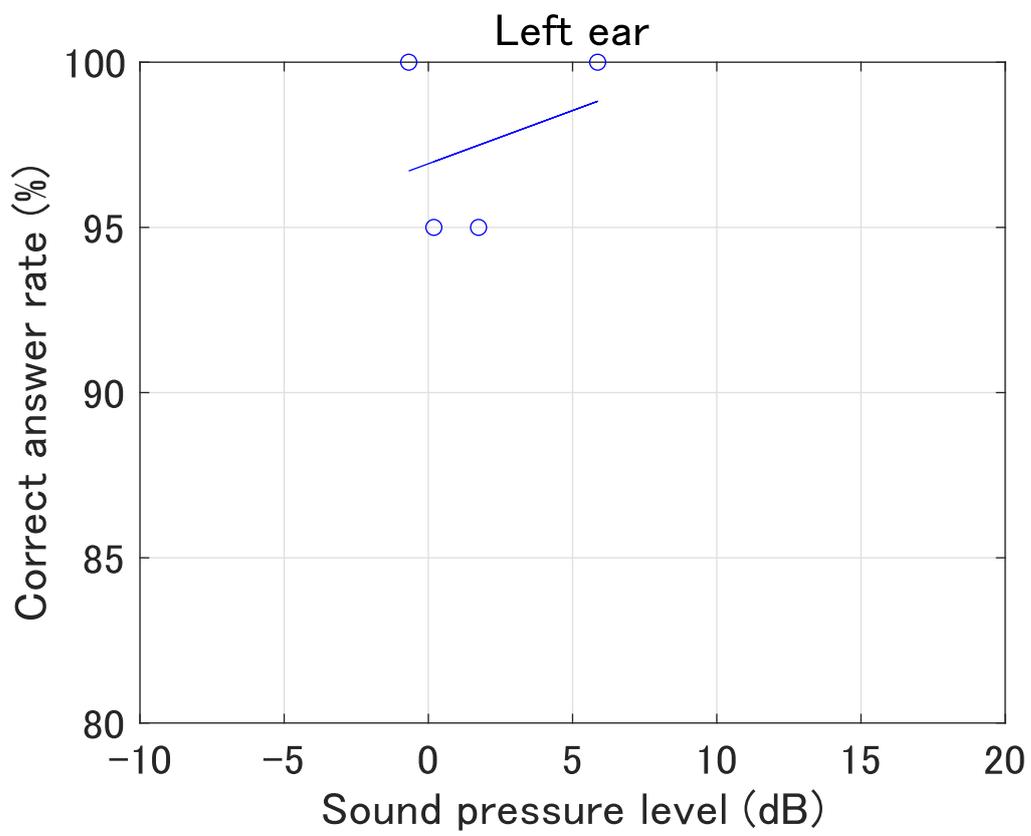


図 5.12: 覚醒中と睡眠下の左耳の TEOAE の差分と競合語課題の正答率.

第6章 全体考察

耳音響放射と関係がみられると予想していた図と地課題では、覚醒中の右耳において、耳音響放射の測定値によって正答率が上がる傾向があった。また、覚醒中/睡眠下の左耳において、耳音響放射の測定値によって正答率が低下する傾向があった。覚醒中と睡眠下の耳音響放射の差分と図と地課題は、右耳では覚醒中と睡眠下の耳音響放射の測定値の差分が大きいほど正答率が上昇する傾向があり、左耳では覚醒中と睡眠下の耳音響放射の測定値の差分が小さいほど正答率が上がる傾向があった。図と地課題の正答率が低い実験参加者は、覚醒中の外有毛細胞の働きが弱く、その影響が正答率の低下として現れたのだと考えられる。

耳音響放射と関係がみられないと予想していた競合語課題では、覚醒中/睡眠下の両方で耳音響放射の測定値によって正答率が上昇する傾向があった。覚醒中と睡眠下の耳音響放射の差分と競合語は、右耳では覚醒中と睡眠下の耳音響放射の測定値の差分による関係は見られなかったが、左耳では覚醒中と睡眠下の耳音響放射の測定値の差分が大きいほど正答率が上昇する傾向があった。

これら二つの結果は、競合語課題も含めた選択的聴取能力が聴覚末梢系にも関係し、選択的聴取能力と耳音響放射の強度に関係があることを示しており、耳音響放射の測定値によって、選択的聴取能力を推定可能なことを示している。また、覚醒中の耳音響放射よりも睡眠下の耳音響放射の測定値は優位に減少することから、覚醒度の低下によって、耳音響放射も低下することが示された。つまり、耳音響放射によって覚醒度を推定可能なことを示している。

第7章 結論

7.1 本研究で明らかにしたこと

本研究の目的は、覚醒度の異なる耳音響放射と注意に関連する選択的聴取能力を測定し、耳音響放射の特徴変化から選択的聴取能力を推定可能かどうか明らかにすることである。まず、覚醒中の選択的聴取能力を測定するために、二つの課題を実験参加者に課した。また、覚醒中／睡眠中の耳音響放射を測定し、覚醒度の異なる耳音響放射と選択的聴取能力との関係を調べた。その結果、本研究で明らかにしたことを以下にまとめる。

- ・耳音響放射と図と地課題では、覚醒中の右耳において、耳音響放射の測定値によって正答率が上昇する傾向があることが分かった。また、覚醒中／睡眠下の左耳において、耳音響放射の測定値によって正答率が低下する傾向があることが分かった。

- ・覚醒中と睡眠下の耳音響放射の差分と図と地課題は、右耳では覚醒中と睡眠下の耳音響放射の測定値の差分が大きいほど正答率が上昇する傾向があり、左耳では覚醒中と睡眠下の耳音響放射の測定値の差分が小さいほど正答率が上がる傾向があった。図と地課題の正答率が低い実験参加者は、覚醒中の外有毛細胞の働きが弱く、その影響が正答率の低下として現れたのだと考えられる。

- ・競合語課題では、覚醒中／睡眠下の両方で耳音響放射の測定値によって正答率が上昇する傾向があることが分かった。

- ・覚醒中と睡眠下の耳音響放射の差分と競合語課題は、右耳では覚醒中と睡眠下で外有毛細胞の働きの変動が大きいほど競合語課題の正答率が減少する傾向があり、左耳は覚醒中と睡眠下で外有毛細胞の働きの変動が大きいほど競合語課題の正答率が上昇する傾向があった。競合語課題と耳音響放射には関係性がないと考えていたが、関係性が見られた。

- ・上記の結果は選択的聴取能力と耳音響放射の強度に関係があることを示しており、耳音響放射によって、選択的聴取能力を推定可能なことを示している。

- ・覚醒中の耳音響放射よりも睡眠下の耳音響放射の測定値は優位に減少するため、覚醒度の低下によって耳音響放射も低下することが示唆された。これは、耳音響放射によって覚醒度を推定可能なことを示している。

7.2 残された課題

以下に残された課題についてまとめる。

- ・新生児の聴覚スクリーニングにて選択的聴取能力を推定するための第一歩として、耳音響放射によって、選択的聴取能力を推定することができることを示した。次の段階として実際に新生児の前に子供のような選択的聴取能力が発達しきれていない人を対象として耳音響放射の測定実験を行う。子供を対象とした耳音響放射と選択的聴取能力の関係の調査で本研究で明らかにしたことに類する結果を得ることができれば、最終的な新生児を対象とした耳音響放射による選択的聴取能力の推定への道筋を立てることができると考えられる。

- ・耳音響放射には、二つの純音の提示による歪成分を求める DPOAE がある。DPOAE は周波数ごとの影響を見ることができると、選択的聴取能力の測定にて実験参加者が間違えた単語の子音と耳音響放射の関連などを見ることができるとは。しかし、覚醒中の DPOAE の測定までは行うことができたが、睡眠下の測定を行えなかった。睡眠下の測定を行い、分析することでより耳音響放射と選択的聴取能力の関係について調査することができる。

- ・本研究では、脳波による覚醒度の推定を行い、覚醒中か睡眠下を判断した。しかし、覚醒中と睡眠下のような二つの状態だけでなく、表 2.2 のような睡眠脳波の判断によって細かく分けることでより覚醒度の低下と耳音響放射の低下の関連がより見られると考えられる。また、脳波のみの覚醒度の推定ではなく、脈拍などの脳波以外の覚醒度推定方法との併用によってより正確な覚醒度推定を行うことができると考えられる。

- ・実験参加者の脳波には、 δ 波が見られなかった。つまり、実験参加者は実験で熟睡できなかったと考えられる。熟睡できなかった原因は、ベットではなくソファによる睡眠の強要といった睡眠しやすい環境構築の不備や耳音響放射の測定に伴う刺激音の常時提示などが挙げられる。睡眠しやすい環境を見直し、熟睡できるようにすることで、覚醒度の低下と耳音響放射の低下の関連がさらに見られると考えられる。

謝辞

研究活動に始まり、私生活に至るまで時に厳しく、時に優しく、愛に溢れた指導をしていただいた、主指導教員である鶴木祐史教授に心から深く感謝致します。

研究室会議やミーティングなどの研究活動の場において、研究のあらゆる面で研究のあり方や実験方法、実験考察のご指導を数多くいただき、研究面、精神面で支えてくださった木谷俊介講師に心から深く感謝致します。

同じチームとして、RPの時は共に先生に挑み、日常的なミーティングでは支えあい、主に精神面や研究への情熱を支えてくれた堀口さん、先輩として進むべき道を示してくださった田中さん、不甲斐ない先輩である私の研究の引継ぎを行ってくれた新谷さんに心より感謝申し上げます。

同期として、井上さん、市川さん、Sichengさん、Benitaさん、宮崎さん、谷口さんとともに切磋琢磨した時間は、私の人生においてかけがえのないものでした。深く感謝致します。

渡辺さん、入野さん、姫子松さんの後輩の皆様方には、実験参加に協力して頂き、感謝いたします。

研究だけでなく、進路の相談や内定先の攻略法や社会に出てからの立ち回りをご教授いただいた大田さん、スキーなどのレジャーに始まり、研究の面白さに至るまでこれまでに体験したことがないことを教えてくださった上江洲先生、夜ご飯に連れて行っていただき、研究のアドバイスをくださった磯山さんを始めとした鶴木・赤木研究室のスタッフを含めた全メンバーの皆様に感謝致します。

夜な夜な集まり、色々支えてくれた友人達に心から感謝します。

最後に、これまで私の学生生活、私生活を金銭面から物資の調達に至るまで支え、遥か彼方遠い土地である熊本から見守ってくれた両親と弟に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] D. T. Kemp, “Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system”, *Acoust. Soc. Am.*, vol. 64, pp. 1386–1391, 1978.
- [2] 加我君孝 (編), 新生児・幼少児の耳音響放射と ABR, 診断と治療社, 2012.
- [3] 加我君孝 (編), 新生児・幼少児の難聴, 診断と治療社, 2014.
- [4] 木谷俊介, “聴覚末梢系の能動性”, 音響誌, vol. 73, no. 10, pp. 650–655, 2019.
- [5] 木谷俊介 加藤正晴, 嶋田容子, “学童期における日本語を用いた選択的聴取能力—選択的聴取の児童向けアセスメントツール開発—”, 音響誌, vol. 77, no. 8, pp. 500–503, 2021.
- [6] 鵜木祐史 宮内良太, 木谷俊介, “様々な刺激を呈示して測定した耳音響放射音の特徴解析”, 音響学聴覚研資, vol. 46, no. 2, pp. 89–94, 2016.
- [7] 宮内良太 鵜木祐史 木谷俊介, 濱田康弘, “耳音響放射音を用いた聴覚的注意の測定手法に関する予備的検討”, 音響学聴覚研資, vol. 44, no. 1, pp. 1–6, 2014.
- [8] 鵜木祐史 木谷俊介, 宮内良太, “ノッチ雑音同時マスキングデータから推定された聴覚フィルタの同調特性に手がかり音呈示が与える影響”, 音響誌, vol. 68, pp. 546–556, 2012.
- [9] 中川誠司 鈴木裕登, 大塚翔, “覚醒度とオリーブ蝸牛束反射強度との関係”, 春季音講論, vol. 3-P-37, pp. 537–538, 2019.
- [10] Kyle P. Walsh, Edward G. Pasanen, and Dennis McFadden, “Overshoot measured physiologically and psychophysically in the same human ears”, *Hearing Research*, vol. 268, no. 1, pp. 22–37, 2010.
- [11] 大串健吾, 音響聴覚心理学, 誠信書房, 2019.
- [12] 日本音響学会 (編), 音響学入門, コロナ社, 2011.
- [13] 大塚翔, “聴覚末梢の個人差”, 音響誌, vol. 73, no. 10, pp. 645–649, 2017.

- [14] Frederic L Wightman and Doris J Kistler, “Informational masking of speech in children: Effects of ipsilateral and contralateral distracters”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 118, no. 5, pp. 3164–3176, 2005.
- [15] 田中康夫 (編), 耳音響放射活用ガイド, 金原出版, 2004.
- [16] Georg V Békésy, “The variation of phase along the basilar membrane with sinusoidal vibrations”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 19, no. 3, pp. 452–460, 1947.
- [17] William E Brownell, Charles R Bader, Daniel Bertrand, and Yves De Ribaupierre, “Evoked mechanical responses of isolated cochlear outer hair cells”, *Science*, vol. 227, no. 4683, pp. 194–196, 1985.
- [18] 田中康夫 (編), 誘発耳音響放射の臨床, 金原出版, 1996.
- [19] 高坂知節 大山健二, 和田仁, “歪成分耳音響放射 (dpoae) による蝸牛機能の評価”, *Audiology Japan*, vol. 35, pp. 46–55, 1992.
- [20] 斎藤正範, “覚醒度を脳波で把握する”, *精神誌*, vol. 110, no. 9, pp. 843–849, 2018.
- [21] H. Head, “The conception of nervous and mental energy. (ii.) vigilance; a physiological state of the nervous system.”, *Br J Psychol*, vol. 14, pp. 126–147, 1923.
- [22] Andrew J Davidson, “Measuring anesthesia in children using the eeg”, *Pediatric Anesthesia*, vol. 16, no. 4, pp. 374–387, 2006.
- [23] 呉双 毛利宏 青木壮椰 佐藤晴彦, 三浦弘雅, “自動運転中のドライバ覚醒度推定手法の提案”, *自動車技術会論文集*, vol. 50, no. 2, pp. 473–479, 2019.
- [24] 今泉敏 (編), 聴覚・発話に関する脳活動観測, コロナ社, 2022.
- [25] 池田昭夫 人見健文, “脳波の基礎知識”, *臨床神経生理学*, vol. 42, no. 6, pp. 365–370, 2014.
- [26] 萩原啓, 荒木和典, 道盛章弘, and 斎藤正己, “脳波を用いた覚醒度定量化の試みとその応用”, *BME*, vol. 11, no. 1, pp. 86–92, 1997.
- [27] 成瀬康, “ウェアラブル脳波計による無意識情報の可視化”, *音響誌*, vol. 78, no. 10, pp. 600–605, 2022.
- [28] 芹沢陽太 and 福原義久, “脳波-動作特徴空間を介した外部環境変化による集中度回復システムの実現”, *情報処理学会*, vol. 1, pp. 07, 2021.

- [29] “脳波の手習い”, https://naraamt.or.jp/Academic/kensyuukai/2005/kirei/nouha_suimin/nouha_suimin.html.
- [30] 寺田千沙子 竹原卓真 嶋田容子 木谷俊介 加藤正晴, 中島七海, “図と地課題および競合語課題を用いた選択的聴取能力の発達”, 日本心理学会, vol. 83, pp. 65, 2019.
- [31] J. O. Pickles, 聴覚生理学 (谷口郁雄 監訳), 二瓶社, 1995.
- [32] “相関係数の意味”, <https://sci-pursuit.com/math/statistics/correlation-coefficient.html>.
- [33] B. Delgutte T. Kawase and M. C. Liberman, “Antimasking effects of the olivocochlear reflex. ii. enhancement of auditory-nerve response to masked tones”, *J. Neurophysiol.*, vol. 70, no. 6, pp. 2533–2549, 1993.

研究業績

1. 宮家一真, 木谷俊介, 鵜木祐史, “選択的聴取能力と耳音響放射特性の関係性の検討,” 日本音響学会春季研究発表会講演資料, 2-4-9, 2023.

付録A

A.1 覚醒中のDPOAEの測定実験

A.1.1 実験目的

選択的聴取能力の影響が周波数ごとにどのように現れるのかを調査するためにDPOAEの測定を行う。

A.1.2 実験方法

計算機からUSB Audio Interfaceを経由して、防音室内でインナーイヤーマイクロホンとイヤホン (etymotic research ER-10C) で刺激の提示と耳音響放射を収録した。刺激の音圧レベルは、HATS (B&K Type 4128C), マイクアンプ (B&K NEXUS), 騒音計 (B&K Type 2250) を利用して校正した。

実験参加者は、正常な聴力を有する大学院生8名 (女性1名, 男性7名, 平均年齢24.0歳, 標準偏差1.31歳) であった。

DPOAEの測定では、刺激として二つの周波数 f_1 , f_2 の純音を用いた。DPOAEは、 f_1 , f_2 が、 $f_2/f_1=1.2$ とするとき $2f_1 - f_2$ ($f_2 > f_1$) の周波数に現れる信号のピークを測定値とするため、本実験では f_2 が1 kHz, 1.5 kHz, 2 kHz, 4 kHzとなるように f_1 を設定した。四つの純音をそれぞれ10秒ずつ提示した。二つの純音の音圧レベル L_1 と L_2 の差が10 dB であると大きなDPOAEが得られるといわれているため、 L_1 を65 dB, L_2 を55 dB となるように刺激を提示した。片耳にインナーイヤーマイクロホンとイヤホンを装着させ、右耳, 左耳の順で3回ずつ測定した。 $2f_1 - f_2$ に現れるピークの音圧レベルの平均を測定値とした。

A.1.3 結果

DPOAEの測定値を表A.1に示す。また、表A.2にDPOAEの平均値と標準偏差を示す。DPOAEでは周波数が高くなるほど、標準偏差の値が大きくなった。両耳で4 kHzのDPOAEの測定値が0 dBを下回っている結果が多くみられた。

表 A.1: DPOAE 測定値. 左列の番号は実験参加者に割り振った番号.

	1000 Hz		1500 Hz		2000 Hz		4000 Hz	
	L(dB)	R(dB)	L(dB)	R(dB)	L(dB)	R(dB)	L(dB)	R(dB)
1	0.14	4.89	9.03	13.0	1.8	11.95	5.48	7.11
2	4.65	-0.4	6.93	7.14	1.86	1.56	-5.47	-3.72
3	12.36	6.13	16.79	11.3	15.11	10.78	-6.92	-7.29
4	3.85	3.28	5.67	10.54	5.33	2.08	5.5	3.44
5	8.46	8.66	7.1	14.31	8.22	12.13	3.89	7.83
6	0.04	1.06	0.28	3.27	-3.62	-4.82	3.24	- 3.19
7	2.46	2.7	7.26	8.65	-1.99	2.85	-5.54	-1.92
8	7.51	11.71	11.37	17.11	8.93	10.74	-3.88	-4.03

表 A.2: DPOAE 測定値の平均値と標準偏差.

Freq. (Hz)		1000	1500	2000	4000
Left ear	avg. (dB)	5.63	9.16	5.61	-0.99
	SD	4.11	3.83	5.69	5.66
Right ear	avg. (dB)	5.28	11.72	7.44	0.20
	SD	4.01	3.40	4.98	5.92

A.2 覚醒中の DPOAE と選択的聴取能力

A.2.1 覚醒中の DPOAE と図と地課題

覚醒中の右耳の DPOAE の測定値と図と地課題の正答率の関係を図 A.1 に示す。また、覚醒中の左耳の DPOAE の測定値と図と地課題の正答率の関係を図 A.2 に示す。横軸に課題の正答率、縦軸に耳音響放射の測定値を示す。図中の点は実験参加者のデータであり、図中の直線は回帰直線である。回帰直線は、最小二乗法により、TEOAE の測定値を x 、図と地課題の正答率を y とし、 $y = ax + b$ となる直線を求めた。図と地課題と DPOAE の測定値では、右耳は 4 kHz を除いて DPOAE の測定値が高いほど図と地課題の正答率が高く、左耳は 2 kHz を除いて DPOAE の測定値が高いほど図と地課題の正答率が高くなった。右耳の 4 kHz と左耳の 2 kHz は、DPOAE の測定値が高いほど図と地課題の正答率が低くなった。4 章とこの結果から、図と地課題と耳音響放射では、TEOAE の右耳と DPOAE の両耳で耳音響放射の測定値によって正答率が上昇する傾向があることが分かった。

A.2.2 覚醒中の DPOAE と競合語課題

覚醒中の右耳の DPOAE の測定値と競合語課題の正答率の関係を図 A.3 に示す。また、覚醒中の左耳の DPOAE の測定値と競合語課題の正答率の関係を図 A.4 に示す。横軸に課題の正答率、縦軸に耳音響放射の測定値を示す。図中の点は実験参加者のデータであり、図中の直線は回帰直線である。競合語課題と DPOAE の測定値では、両耳で DPOAE の測定値が高いほど競合語課題の正答率が高くなった。4 章とこの結果から、競合語課題と耳音響放射でも、TEOAE の右耳と DPOAE の両耳で覚醒中の耳音響放射の測定値によって正答率が上昇する傾向にあることが分かった。これは対側耳への刺激が測定耳の聴覚末梢系にも作用していることを示唆している。この現象が正弦波だけでなく、単語の認識の場面でも生じたため、競合語課題であっても覚醒中の耳音響放射の測定値との対応がみられたのではないかと考えられる。

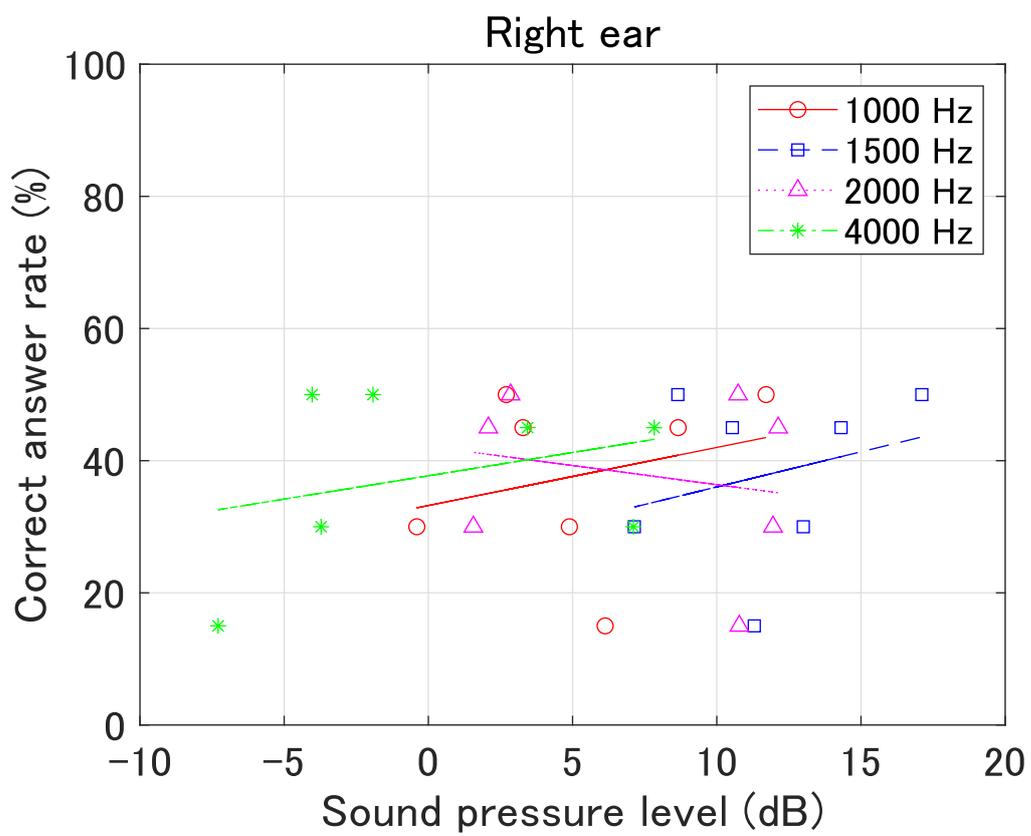


図 A.1: 覚醒中の右耳の DPOAE と図と地課題正答率.

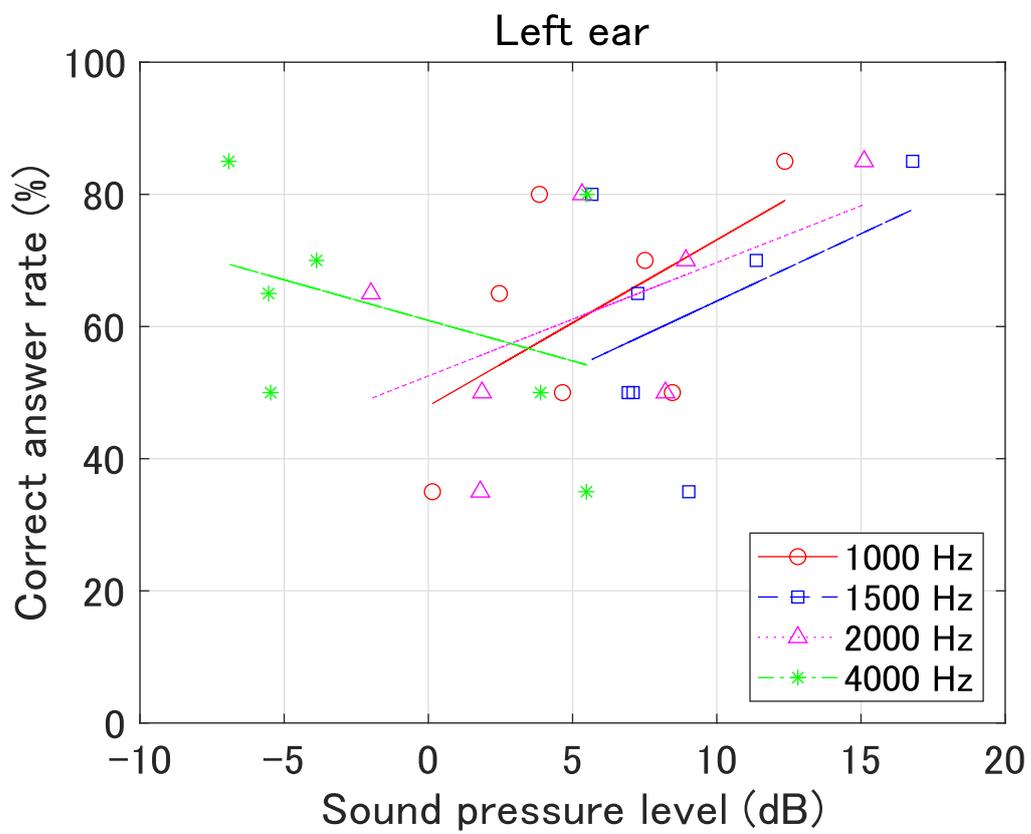


図 A.2: 覚醒中の左耳の DPOAE と図と地課題の正答率.

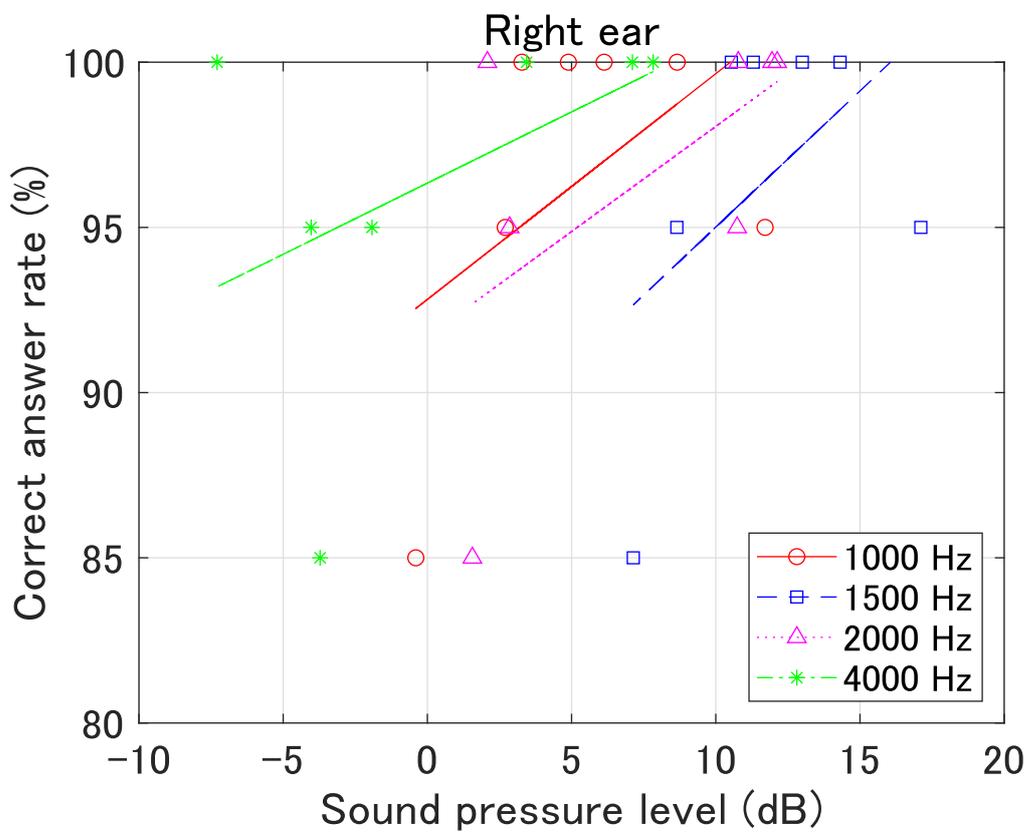


図 A.3: 覚醒中の右耳の DPOAE の測定値と競合語課題の正答率.

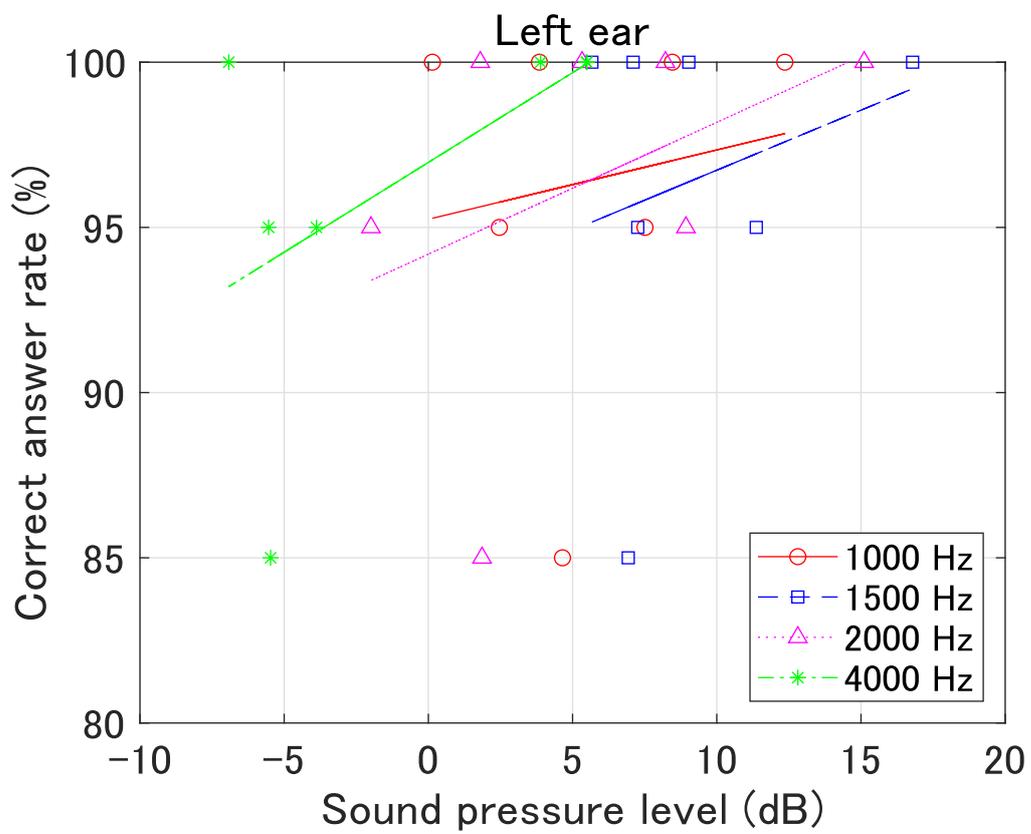


図 A.4: 覚醒中の左耳の DPOAE の測定値と競合語課題の正答率.