

Title	不快な音の知覚とその物理関連量に関する研究
Author(s)	高橋, 由美子
Citation	
Issue Date	2019-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/15898
Rights	
Description	Supervisor: 赤木 正人, 先端科学技術研究科, 修士 (情報科学)

修士論文

不快な音の知覚とその物理関連量に関する研究

1710109 高橋 由美子

主指導教員 赤木正人
審査委員主査 赤木正人
審査委員 金子峰雄
党建武
吉高淳夫

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]

平成31年2月

概要

In many years, there have been serious disasters as typhoon and earthquake. These disasters cause serious damage. In such cases, evacuation behavior is very important. Further, the call for emergency evacuation is the main way in evacuation behavior. These calls are important to protect everyone's safety. This is because about 80% of the people who heard the evacuation calls felt the necessity of evacuation. Nevertheless, the emergency evacuation calls often do not catch because there are many information such as when the disaster occurred. In fact, there are reports that only 56% of the people are able to clearly grasp the evacuation warnings from emergency broadcast system. Therefore, evacuation warnings must be made more prominent. It is necessary to improve salience of those calls to be able to hear them more clearly. The noticeable sound is said to be discomfort sound. Accordingly, it is effective to increase discomfort of the sound in order to make the calls salient. However, discomfort sound has not been quantified at present. Thus, studying discomfort sounds is challenging. If characteristics of the discomfort sounds are clearly known, salient sounds could be designed.

In previous studies, Aures proposed a scale for 'comfort' using sound quality indices. The sound quality indices are index that associates psychological quantity with physical quantity according to human perception using psychoacoustic technology. Loudness, sharpness, roughness, tonality, etc. are present in this index. Watanabe et al. introduced that discomfort in tactile sense is closely related to phrases representing and roughness sharpness. From these studies, roughness and sharpness of sound quality indices seems to be related to sound discomfort. However, 'comfort' is on the opposite direction of discomfort. Additionally, there are differences between touch and hearing. Thus, if we pay attention to the discomfort of sound, we must think from another point of view. In the present situation, relationships between discomfort sounds and acoustic features in sense of hearing are still not clear. Therefore, it is necessary to discuss physical correlates of discomfort sounds. Moreover, it is required to clarify what kind of physical quantity is related to sound discomfort. To answer the above question, we investigate correlations between degrees of discomfort sounds and acoustic features. However, discomfort sound has not been quantified. Therefore, it is necessary to know what type of sounds discomfort and the degree of discomfort of those sounds are. Hence listening test is carried out to collect scores for discomfort from sounds.

The system of listening test is constructed with a Windows-based PC, audio interface (Fireface UCX), headphone amplifier (STAX SRM-1/MK-2), and headphone (STAX SR-404). The experiment is conducted in a soundproof room. 25 types of sounds are used as stimuli. All these stimuli sounds are electronic sounds. Also included are railroad crossing

sounds and birdcall. Duration time of all stimuli was 5 seconds. Sampling frequency was 44.1 kHz. The average sound pressure level was 60 dB. The stimuli used for these experiments were actual warning sounds produced by Schneider Electric Japan Holdings Ltd. There is a previous study that frequency characteristics and time variation are related to sound discomfort. Therefore, we focused on these physical features. In order to study correlations between degrees of discomfort and features, we extract centroid, skewness and kurtosis of the modulation spectra and long-term amplitude spectra. Participants were seven male and seven female Japanese listeners in their twenties with normal hearing ability. here are sounds whose impressions change depending on the country. Hence, all the subjects are Japanese. In the experiment, participants were asked to listen to stimuli to score degrees of discomfort (not dis-comfort (0) - very discomfort (3)). One session includes 25 stimuli and 5 sections were presented to the participants. The evaluated values were averaged, and the extent of discomfort of the stimulation sound was calculated. The minimum value of the value is 0.543, and the maximum value is 2.314.

Using pearson product-moment correlation coefficient, correlation coefficient between the discomfort of the sound and the physical quantity was calculated. The correlation coefficient about centroid of the long-term spectra vs degrees of discomfort is 0.59. Therefore, it can be said that there is a positive correlation. The correlation coefficient about skewness of the long-term spectra vs degrees of discomfort is -0.56. Therefore, it can be said that there is a negative correlation. The correlation coefficient about kurtosis of the long-term spectra vs degrees of discomfort is -0.41. Therefore, it can be said that there is a low negative correlation. The correlation coefficient about centroid of the modulation spectra vs degrees of discomfort is -0.48. Therefore, it can be said that there is a low negative correlation. The correlation coefficient about skewness of the modulation spectra vs degrees of discomfort is 0.45. Therefore, it can be said that there is a low positive correlation. The correlation coefficient about kurtosis of the modulation spectra vs degrees of discomfort is 0.42. Therefore, it can be said that there is a low positive correlation.

From this result, it can be said that the sound concentrating at the high frequency component position and the sound concentrated at the low modulation frequency component are unpleasant. In other words, it feels unpleasant sounds that feel shrill and feel slowly fluctuating.

In order to clarify the physical characteristics of discomfort sounds, correlations between the evaluation values of discomfort obtained by the listening experiment and the estimated physical features were investigated. As a result, it was found that deviation of the spectra considered to be discomfort if the higher. The result of this research is considered to help research that considers the remarkable sound from physical properties.

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	研究背景	2
1.3	研究の目的	3
1.4	本論文の構成	3
第2章	本研究のコンセプト	6
第3章	不快さの程度の算出	8
3.1	目的	8
3.2	実験方法	8
3.3	実験結果	9
第4章	不快さと物理量との関係性	14
4.1	物理量の計算方法	14
4.2	相関の算出方法	15
4.3	解析結果	15
4.4	考察	16
第5章	全体考察	24
第6章	結論	25
6.1	本研究で明らかになったこと	25
6.2	今後の課題	25
	参考文献	27
	謝辞	1
	付録	1

目次

1.1	論文の構成	5
3.1	実験環境	10
3.2	実験時に使用した GUI	11
3.3	刺激音の不快さの程度	12
4.1	長時間スペクトル重心と不快さの関係	18
4.2	長時間スペクトルの歪度と不快さの関係	19
4.3	長時間スペクトルの尖度と不快さの関係	20
4.4	変調スペクトル重心と不快さの関係	21
4.5	変調スペクトルの歪度と不快さの関係	22
4.6	変調スペクトルの尖度と不快さの関係	23
6.1	刺激音 No.01 の波形	1
6.2	刺激音 No.02 の波形	2
6.3	刺激音 No.03 の波形	2
6.4	刺激音 No.04 の波形	3
6.5	刺激音 No.05 の波形	3
6.6	刺激音 No.06 の波形	4
6.7	刺激音 No.07 の波形	4
6.8	刺激音 No.08 の波形	5
6.9	刺激音 No.09 の波形	5
6.10	刺激音 No.10 の波形	6
6.11	刺激音 No.11 の波形	6
6.12	刺激音 No.12 の波形	7
6.13	刺激音 No.13 の波形	7
6.14	刺激音 No.14 の波形	8
6.15	刺激音 No.15 の波形	8
6.16	刺激音 No.16 の波形	9
6.17	刺激音 No.17 の波形	9
6.18	刺激音 No.18 の波形	10
6.19	刺激音 No.19 の波形	10

6.20	刺激音 No.20 の波形	11
6.21	刺激音 No.21 の波形	11
6.22	刺激音 No.22 の波形	12
6.23	刺激音 No.23 の波形	12
6.24	刺激音 No.24 の波形	13
6.25	刺激音 No.25 の波形	13
6.26	刺激音 No.01 のスペクトル	14
6.27	刺激音 No.02 のスペクトル	14
6.28	刺激音 No.03 のスペクトル	15
6.29	刺激音 No.04 のスペクトル	15
6.30	刺激音 No.05 のスペクトル	16
6.31	刺激音 No.06 のスペクトル	16
6.32	刺激音 No.07 のスペクトル	17
6.33	刺激音 No.08 のスペクトル	17
6.34	刺激音 No.09 のスペクトル	18
6.35	刺激音 No.10 のスペクトル	18
6.36	刺激音 No.11 のスペクトル	19
6.37	刺激音 No.12 のスペクトル	19
6.38	刺激音 No.13 のスペクトル	20
6.39	刺激音 No.14 のスペクトル	20
6.40	刺激音 No.15 のスペクトル	21
6.41	刺激音 No.16 のスペクトル	21
6.42	刺激音 No.17 のスペクトル	22
6.43	刺激音 No.18 のスペクトル	22
6.44	刺激音 No.19 のスペクトル	23
6.45	刺激音 No.20 のスペクトル	23
6.46	刺激音 No.21 のスペクトル	24
6.47	刺激音 No.22 のスペクトル	24
6.48	刺激音 No.23 のスペクトル	25
6.49	刺激音 No.24 のスペクトル	25
6.50	刺激音 No.25 のスペクトル	26
6.51	刺激音 No.01 の変調スペクトル	26
6.52	刺激音 No.02 の変調スペクトル	27
6.53	刺激音 No.03 の変調スペクトル	27
6.54	刺激音 No.04 の変調スペクトル	28
6.55	刺激音 No.05 の変調スペクトル	28
6.56	刺激音 No.06 の変調スペクトル	29
6.57	刺激音 No.07 の変調スペクトル	29

6.58 刺激音 No.08 の変調スペクトル	30
6.59 刺激音 No.09 の変調スペクトル	30
6.60 刺激音 No.10 の変調スペクトル	31
6.61 刺激音 No.11 の変調スペクトル	31
6.62 刺激音 No.12 の変調スペクトル	32
6.63 刺激音 No.13 の変調スペクトル	32
6.64 刺激音 No.14 の変調スペクトル	33
6.65 刺激音 No.15 の変調スペクトル	33
6.66 刺激音 No.16 の変調スペクトル	34
6.67 刺激音 No.17 の変調スペクトル	34
6.68 刺激音 No.18 の変調スペクトル	35
6.69 刺激音 No.19 の変調スペクトル	35
6.70 刺激音 No.20 の変調スペクトル	36
6.71 刺激音 No.21 の変調スペクトル	36
6.72 刺激音 No.22 の変調スペクトル	37
6.73 刺激音 No.23 の変調スペクトル	37
6.74 刺激音 No.24 の変調スペクトル	38
6.75 刺激音 No.25 の変調スペクトル	38

表 目 次

1.1	2016 年以降の日本付近で発生した主な被害地震	2
1.2	2016 年以降の災害をもたらした日本の気象事例	3
3.1	刺激音の名称と元の時間長	13
4.1	不快さの程度と物理量との間の相関係数	17

第1章 序論

1.1 はじめに

日本では古くから地震や台風，豪雪といったような多くの災害に悩まされてきた．その一つである地震において，記録に残っている最も古いものでは日本書紀を出典とする416年8月23日に発生した河内地震がある [1,2]．また，昨今では2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震 [3] があり，長年もの間災害被害に遭い続けているという事実がある．表4.1に2016年以降の日本付近で発生した主な被害地震 [4] を，表1.2に災害をもたらした気象事例を示す [5]．

ヒトはこのような災害からどのような方法で生き残ってきたのだろうか．それは単純に避難行動ではないだろうか．もちろん事前の対策も重要であるが，避難行動が最終的に生命を守るために必要な行為であることには変わりはない．この生死を分ける行為である避難行動において重要となるものは情報であると考えられる．適切な情報を適切に受け取ることが生存率を上げることになるだろう．避難行為に重要となる情報のうちでも大多数の人に伝えられる音情報である避難警報はより効果的であると考えられる．また，音情報は視覚情報に比べ素早く伝達する [6] という研究もあり迅速な避難行動にもつながるであろう．それを示すように，避難警報を聞いた人のうち約80%の人が避難する必要性を感じた [7] ということがある．しかし，災害時という多くの情報が錯綜する中では，警報を聞き逃すことがあるかもしれない．実際に，防災行政無線からはっきりと避難警報を聞き取ることができたのは避難警報を聞いた人のうち過半数の56%であるという報告がある [7]．よって，警報自体を目立たせる必要がある．

目立つ，つまり顕著性が高い音とはどのようなものであろうか．古川らの聴覚的顕著性の検討から，不快な音と受動的な聴覚的注意である聴覚的顕著性との相関が非常に高いことが知られている [8,9]．よって，不快な音であれば顕著性が高い音であるといえるだろう．

表 1.1: 2016 年以降の日本付近で発生した主な被害地震

発生日時	発生場所	マグニチュード	最大震度	津波
2016/1/14	浦河沖	6.7	5 弱	
2016/4/14	熊本県熊本地方など	7.3	7	
2016/5/16	茨城県南部	5.5	5 弱	
2016/6/16	内浦湾	5.3	6 弱	
2016/10/21	鳥取県中部	6.6	6 弱	
2016/11/22	福島県沖	7.4	5 弱	144cm
2016/12/28	茨城県北部	6.3	6 弱	
2017/6/25	長野県南部	5.6	5 強	
2017/7/1	胆振地方中東部	5.1	5 弱	
2017/7/11	鹿児島湾	5.3	5 強	
2017/10/6	福島県沖	5.9	5 弱	
2018/4/9	島根県西部	6.1	5 強	
2018/6/18	大阪府北部	6.1	6 弱	
2018/9/6	胆振地方中東部	6.7	7	
2019/1/3	熊本県熊本地方	5.1	6 弱	

1.2 研究背景

心理的な感覚を数値として表現するといった研究は、今までも多く存在している。音に関して感覚的な表現を数値化している研究では、Aures は音質評価指標を用いて「快さ」を定量化している [10]。以下にそのモデルを示す。

$$W = e^{-0.55R} e^{-0.113S} (1.24 - e^{-2.2K}) e^{-(0.023N)^2} \quad (1.1)$$

ここで、R はラフネス、S はシャープネス、K はトナリティ、N はラウドネスを表している。これらの4つはすべて音質評価指標である。ラフネスは「音の粗さ」に対応する尺度、シャープネスは「音の甲高さ」や「鋭さ」に対応する尺度、トナリティは音の狭帯域成分の強さや純音成分に対応する尺度、ラウドネスは「音の大きさ」に対応する尺度である。ここで出てきた音質評価指標というものは、音響工学の範疇である「音はどのように伝わるか」、聴覚生理学の範疇である「音はどのように聞こえるか」、音響心理学の範疇である「音をどのように感じるか」といった3つの分野の考え方を利用した技術である心理音響技術を使ってヒトの知覚に沿って心理量を物理量に関連付けた指標である [11-13]。

また、不快さという感覚的な表現を数値化している研究においては、渡辺らが触覚において「ざらざら」と感じるような「粗さ」や「ちくちく」と感じるような「鋭さ」が「不快さ」に関係していると論じている [14]。

表 1.2: 2016 年以降の災害をもたらした日本の気象事例

発生日時	事例
2016/6/19～6/30	梅雨前線による大雨
2016/8/16～8/31	台風第 7 号、第 11 号、第 9 号、第 10 号及び前線による大雨・暴風
2017/6/30～7/10	梅雨前線及び台風第 3 号による大雨と暴風
2017/9/13～9/18	台風第 18 号及び前線による大雨・暴風等
2017/10/21～10/23	台風第 21 号及び前線による大雨・暴風等
2018/1/22～1/27	南岸低気圧及び強い冬型の気圧配置による大雪・暴風雪等
2018/2/3～2/8	強い冬型の気圧配置による大雪
2018/6/28～7/8	前線及び台風第 7 号による大雨等
2018/9/3～9/5	台風第 21 号による暴風・高潮等
2018/9/28～10/1	台風第 24 号による暴風・高潮等

これらの研究から考えられるには、音質評価指標、その内でも「シャープネス」と「ラフネス」が重要ではないかということである。しかし、快さは不快さと対極の感覚ではない。さらに、触覚と聴覚では感じ方に差異があるのは当然である。よって、「音の不快さ」に着目するならば最も基本的な特徴である物理量との関係性について考えていくことが適当であると考えられる。

1.3 研究の目的

災害対策に非常に有用である避難誘導音をより効果的に運用するためには、音の顕著性を上げ聞き取りやすくする必要がありと考えられる。音の顕著性はその音に不快さに関係が深く、音の不快さを増せば顕著性が高くなるということが分かっている。よって、不快さをコントロールすることができればより顕著性の高い音を作成することができると思われる。しかし、現状では音の不快さというものは定量化されておらず、不快さを増大させると言うことはできない。よって、まずは不快さの特徴をつかむことが重要である。前述したように、聴覚においては音質評価指標と不快な音との関連性は詳しく研究されていない。よって、「不快さ」とその物理特性との関連性を論じる必要がある。

1.4 本論文の構成

本論文は 6 章から構成されている。図 1.1 本論文の構成を図にしたものを示す。1 章は序論である。この章では本論文の研究背景と研究目的について述べる。

2章は研究のコンセプトに関する章である。研究目的について考えるため必要となる研究工程やそれにかかわる計算方法について述べる。

3章は関係性を論じるために必要な不快さの程度を算出した章である。実際に行った聴取実験について述べる。

4章は不快さの程度と物理量との関係性についての章である。実際に相関を計算し、算出した結果について述べている。

5章は全体考察の章である。4章で出た結果についてなぜそのような結果になったかということについて自身の考えを述べている。

6章は結論を記した章である。本研究で明らかになったことと残された課題について述べている。

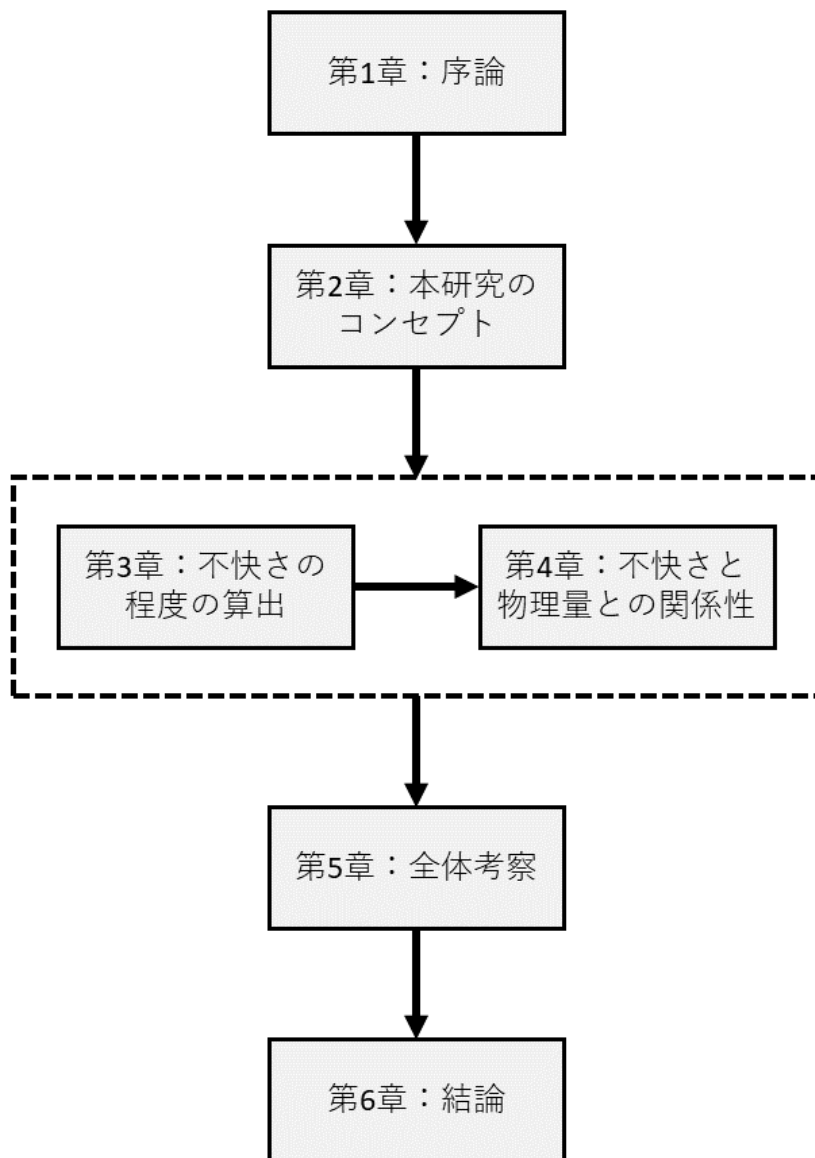


図 1.1: 論文の構成

第2章 本研究のコンセプト

本研究のコンセプトは、不快な音とその物理量に関係があるかどうかということ明らかにすることである。そのために、1：不快な音とその音の物理量を算出する。2：これら2つの間に相関があるかどうかを調査する。3：2の結果から不快な音とその物理量との関係性を論じる、といった工程を行うこととした。

音の不快さに関してだが、現状では定量化されておらず、その程度を数値化することは困難である。よって、主観評価を行い不快さの程度を評価することにより、これを数値化することとした。数値化には心理学的測定法を用い、測定の水準は間隔尺度を用いた。間隔尺度というものは、距離尺度とも呼ばれ、ある特性について経験的に等しいとされる距離を、数値的に等しい距離として表すことができる尺度である [15,16]。数字的距離と心理的距離が対応するように、この主観評価を行う実験では、評価間の心理的距離が等しいものであると事前に説明しておく。

また着目する物理量に関して、先行研究を踏まえたうえで選択することとした。工藤らは、騒音対策として騒音の低周波数帯を減衰させるということが不快さという心理量にどのように影響するのかということを検討した。その結果、低周波数帯を減衰させることで不快さを抑えられるということが分かった [17]。つまり、周波数特性は不快さに関係しており、不快さの特徴を知るには周波数に着目することが有用である。しかし、この研究では低周波数帯に着目しており、高周波数帯については深く言及していない。よって、周波数全体の特徴が表れるスペクトル形状に注目していくべきであると考えられる。スペクトル形状を得るためにはスペクトルの重心・歪度・尖度という物理量が必要となってくる。また、先行研究において振幅変調音の時間エンベロープ形状と不快さの官能評価結果との対応があるということが分かっている [18,19]。エンベロープ形状を得るためには、エンベロープを信号としてみた変調周波数をフーリエ変換した変調スペクトルの重心・歪度・尖度という物理量が必要となってくる。よって、本研究では着目する物理量にスペクトルの重心・歪度・尖度と変調スペクトルの重心・歪度・尖度を選択した。ここで挙げた歪度というものは、分布の非対称性を表すものである。0になるときは左右対称に、正になるときは右側に偏るような非対称の分布に、負になるときは左側に伸びるような非対称な分布になる [20]。また、尖度というものは、対象となるデータが正規分布よりもどれだけとがっているのかを表すものである。0になるときは正規分布と同様、正になるときは鋭角、負になるときは平坦である [20]。よって、これら2つの値を得ることができればスペクトルの形状を判断することできると考えられる。

相関の有無については、2つのデータの直線的な関係性を表す指標である相関係数を算

出することで判断する。不快な音とその物理量との関係性については、相関係数を参考として考える。相関係数の値を見ることで、音の不快さとその音の物理量はどのように連動しているのかということがわかる。その結果から不快な音とその物理量との関係性を論じる。

第3章 不快さの程度の算出

3.1 目的

不快さと物理量との関係性を論じるためには、定量化されていない不快さの程度を算出する必要がある。そのために実験を行い、刺激音の不快さを評価することで不快さの程度を数値化する。また、使用する刺激音は有事に参考となるように、実際に警報機の搭載されているものが望ましいと考えた。

3.2 実験方法

実験は図3.1のような環境で行った。実験に使用した機器については、オーディオインターフェイスはFireface UCXを使用し、ヘッドホンはSTAX SR-404、ヘッドホンアンプはSTAX SRM-1/MK-2を使用した。また、実験は防音室で行った。

実験ではシュナイダーエレクトリックホールディングス株式会社から提供を受けた音源データベースのうち、単音もしくは単音が連続していない25個を刺激音として使用した。このデータベースの音源は実際の警報機である同社製のST-25シリーズに搭載されているものであり、すべて電子音である。実験条件をそろえるために、時間長を5secに揃えたのち、サンプリング周波数を44.1kHzに変更した。また、時間長を揃えるにあたって、必要に応じて繰り返しを行ったり、無音区間を挿入したりと適宜加工を加えた。このとき、連続音にならないよう実際に聞いてもらい確認した。個々の刺激音の名前と加工前の時間長を表4.1にまとめた。

被験者は正常な聴力を有している北陸先端科学技術大学院大学の博士前期課程の男女各7名、合計14名である。出身国によって印象が変わってくる音も存在しているため [21,22], 被験者は日本人に限定した。

実験手順については、被験者に防音室内でヘッドホンをつけてもらい、その状態で刺激音を聞いてもらう。そして、不快さの程度を0を「不快ではない」とし、4を「非常に深い」とする4段階で評価してもらい、PC上に入力してもらう。このとき評価間の心理的距離は等しいものとする。この実験は、1セクションを25回とし、これを5セット行う。実験時に使用したグラフィカルユーザーインターフェイスを図3.2に示す。

被験者に入力してもらった不快さの程度の値を平均して、不快さの程度を算出した。

3.3 実験結果

実験結果より，評価された不快さの程度の平均と分散を図 3.3 に示す．この図は，横軸が個々の刺激音になっており，縦軸が実験で得られた不快さの程度となっている．また，バーは個々の標準偏差である．縦軸の値が大きければ大きいほど，対応する刺激音の不快さの程度が高いということになる．個々の値を見ていくと，最低値は No.22 の 0.543，最大値は No.01 の 2.314 であった．

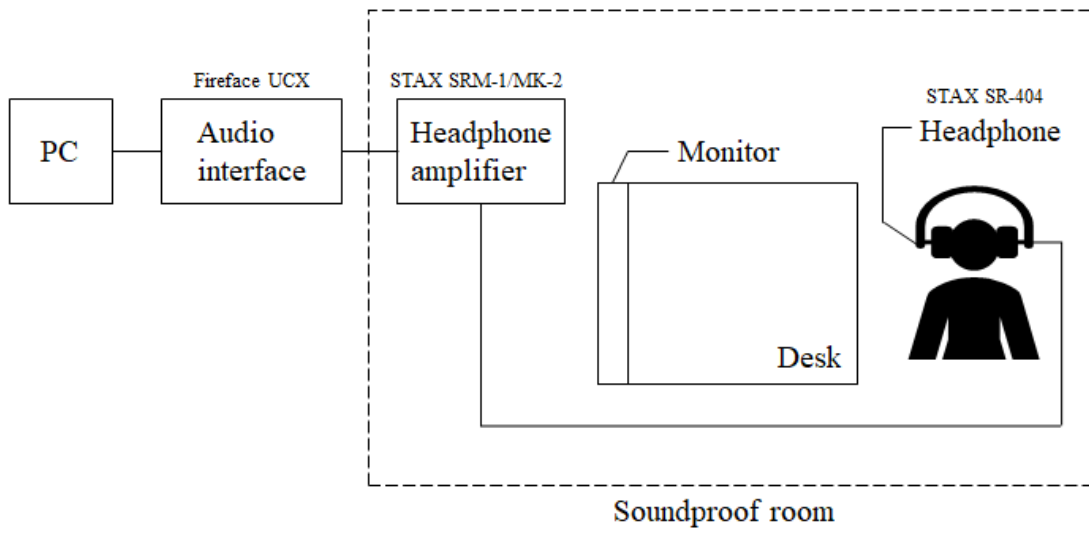


図 3.1: 実験環境

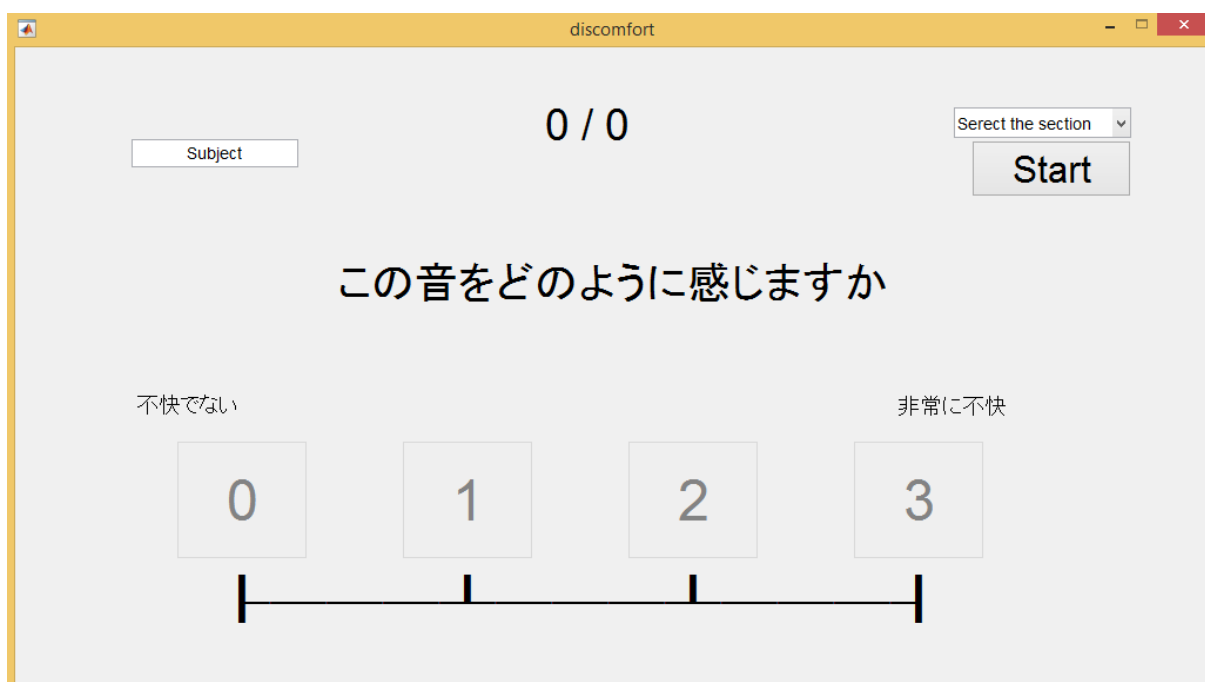


図 3.2: 実験時に使用した GUI

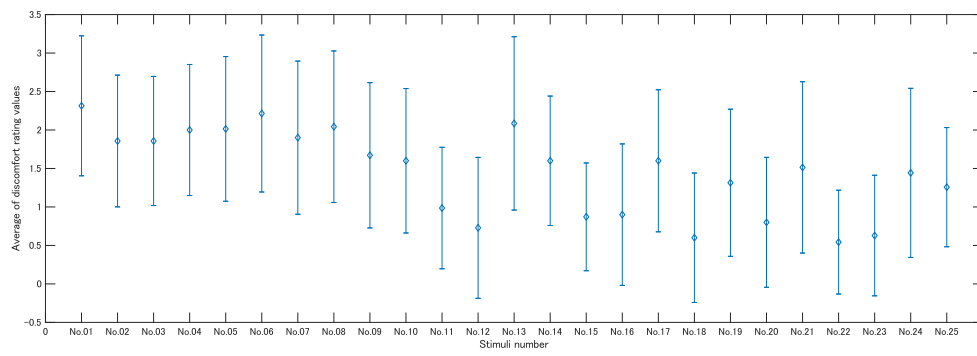


図 3.3: 刺激音の不快感の程度

表 3.1: 刺激音の名称と元の時間長

	名称	時間 [sec]
No.01	アラーム音 ウィウィウィ	3.896
No.02	電鈴音 プルルル (周波数が高い)	4.274
No.03	ピーポー音 ピーポー・ピーポー	4.623
No.04	フリッカー音 プー・プー・プー	4.499
No.05	サイレン音 ウー・ウー	3.726
No.06	ブザー連続音 ピーピーピー	4.306
No.07	ファーン音 ファーン・ファーン	4.25
No.08	フェーン音 フェーン・フェーン	4.797
No.09	ピューピュー音 ピュー・ピュー	4.306
No.10	非常ベル音 自火報ベル音に類似	3.163
No.11	警鐘音 カン・カン・カン (周期が長い警鐘音)	4.386
No.12	ピンポン音 ピンポーン (周期が長いチャイム音)	2.034
No.13	ブザー [断続音] ビー・ビー・ビー	4.399
No.14	電鈴音 プルルル (周波数が低い)	4.421
No.15	ピポ音 ピンポンピンポン (周期が短いチャイム音)	4.386
No.16	クラクション音 フォーン・フォーン	5.321
No.17	インベータ音 ピュウピュウピュウ	3.764
No.18	ピララ音 ピララピララプララ	1.153
No.19	警鐘ベル音 タララン・タララン	0.944
No.20	ピンポンパンポン音 ピンポンパンポン	2.649
No.21	連打音 ボン・ボン・ボン	4.252
No.22	タンカタタ音 タララララーラ	2.664
No.23	カッコー音 カッコー・カッコー	1.434
No.24	ウグイス音 ホーホケキョ	2.167
No.25	踏切音 カンカンカン (周期が短い警鐘音)	4.130

第4章 不快さと物理量との関係性

不快さと物理量の関係性を論じるためには、類似性を示す具体的な値を得ることが重要になってくると考えられる。そのためにはどのような方法を用いればよいのだろうか。

統計学においてピアソンの積率相関係数、いわゆる相関係数という指標が存在している。これは2つのデータの直線的な関係性を表す指標であり、どの程度関係しているかという曖昧な感覚を数値化したものである。よって、不快さと物理量の相関係数を求めることにより、不快さと物理量の関係性が見えてくると考えられる。

4.1 物理量の計算方法

相関係数を算出する前に刺激音の物理量を求める。求める物理量は、スペクトルの重心・歪度・尖度と変調スペクトルの重心・歪度・尖度の6つである。

まず、変調スペクトルは以下のように計算した。まず元の信号を $s(t)$ として、パワーエンベロープである $e^2(t)$ を (4.1) より求めた [23]。その後、変調スペクトルを (4.2) より求めた [24]。

$$e^2(t) = LPF(|x(t) + j * Hilbert(x(t))|^2) \quad (4.1)$$

$$E(f_m) = |DFT(e^2(t))| \quad (4.2)$$

ここで、Hilbert はヒルベルト変換、LPF カットオフ周波数が 64Hz であるローパスフィルタ、DFT は離散フーリエ変換、 f_m は変調周波数である。

スペクトルの重心は以下のように計算した。

$$\mu = \int freq_v(x) \cdot \frac{ampl_v(x)}{\sum_x ampl_v(x)} dx \quad (4.3)$$

ここで、 $freq_v(x)$ はスペクトルの周波数、 $ampl_v(x)$ はスペクトルの振幅である。

スペクトルの歪度は以下のように計算した。

$$m_3 = \int (freq_v(x) - \mu)^3 \cdot \frac{ampl_v(x)}{\sum_x ampl_v(x)} dx \quad (4.4)$$

ここで、 μ は上記で求めたスペクトル重心の値である。

スペクトルの尖度は以下のように計算した。

$$m_4 = \int (freq_v(x) - \mu)^4 \cdot \frac{ampl_v(x)}{\sum_x ampl_v(x)} dx \quad (4.5)$$

4.2 相関の算出方法

相関係数は以下の式 (4.6) にデータを代入することで求められる。この式は二つのデータの共分散を各々の標準偏差の積で割ったものである。

$$\rho(A, B) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i - \mu_A)(B_i - \mu_B)}{(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i - \mu_A)^2}) * (\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (B_i - \mu_B)^2})} \quad (4.6)$$

ここで、N はデータの総数、A は聴取実験で求めた不快さの程度に関するデータ、B は計算した各々の物理量に関するデータ、 μ は平均、 σ は標準偏差である。

相関係数は-1 から+1 までの値をとり、-1 に近いほど強い負の相関があるとされ、逆に+1 に近いほど強い正の相関があるとされている。また、0 に近いほど相関がないとされている [25]。

4.3 解析結果

不快さと長時間スペクトルの重心の関係を図 4.1 に、不快さと長時間スペクトルの歪度の関係を図 4.2 に、不快さと長時間スペクトルの尖度の関係を図 4.3 に、不快さと変調スペクトルの重心の関係を図 4.4 に、不快さと変調スペクトルの歪度の関係を図 4.5 に、不快さと変調スペクトルの尖度の関係を図 4.6 に示す。

図 4.1 は、縦軸が長時間スペクトルの重心に対応する周波数であり、横軸は実験で得られた不快さの程度の値である。この図に着目すると、不快さの値が増えていくにつれ長時間スペクトルの重心に対応する周波数が大きくなっていくことがわかる。このことから、不快な音は長時間スペクトルの重心に対応する周波数が高いことがわかる。長時間スペクトルの重心に対応する周波数が高いということは、パワーが高域に寄っているということである。また、相関係数は 0.59 であり、正の相関があるといえる。図 4.2 は、縦軸が長時間スペクトルの歪度であり、横軸は実験で得られた不快さの程度の値である。この図に着目すると、不快さの値が増えていくにつれ長時間スペクトルの歪度が小さくなっていくことがわかる。このことから、不快な音はスペクトルの歪度が小さくなるということがわかる。長時間スペクトルの歪度が小さくなるということは、スペクトルの分布の裾が左側に偏っているということである。また、相関係数は-0.56 であり、負の相関があるといえる。図 4.3 は、縦軸が長時間スペクトルの尖度であり、横軸は実験で得られた不快さの程度の値である。この図に着目すると、不快さの値が増えていくにつれ長時間スペクトルの尖度が小さくなっていくことがわかる。このことから、不快な音はスペクトルの尖度が小さくなるということがわかる。長時間スペクトルの尖度が小さくなるということは、スペクトルの分布の裾が軽くなっているということである。また、相関係数は-0.41 であり、負の相関があるといえる。図 4.4 は、縦軸が変調スペクトルの重心であり、横軸は実験で得られた不快さの程度の値である。この図に着目すると、不快さの値が増えていくにつれ変調スペクトルの重心に対応する周波数が小さくなっていくことがわかる。このことから、

不快な音は変調スペクトルの重心に対応する周波数が低いことがわかる。変調スペクトルの重心に対応する周波数が低いということは、パワーが低域に寄っているということである。また、相関係数は-0.48であり、負の相関があるといえる。図4.5は、縦軸が変調スペクトルの歪度であり、横軸は実験で得られた不快さの程度の値である。この図に着目すると、不快さの値が増えていくにつれ変調スペクトルの歪度が大きくなっていくことがわかる。このことから、不快な音は変調スペクトルの歪度が大きくなるということがわかる。変調スペクトルの歪度が大きくなるということは、変調スペクトルの分布の裾が右側に偏っているということである。また、相関係数は0.45であり、正の相関があるといえる。図4.6は、縦軸が変調スペクトルの尖度であり、横軸は実験で得られた不快さの程度の値である。この図に着目すると、不快さの値が増えていくにつれ変調スペクトルの尖度が大きくなっていくことがわかる。このことから、不快な音はスペクトルの尖度が大きくなるということがわかる。変調スペクトルの尖度が小さくなるということは、変調スペクトルの分布の裾が重くなっているということである。また、相関係数は0.38であり、正の相関があるといえる。

不快さと6つの物理量の相関に関する解析結果を表4.1にまとめた。これらの結果から、長時間スペクトルの重心は正の相関が、歪度・尖度は負の相関が、変調スペクトルの重心は負の相関が、歪度・尖度は正の相関があるということが分かった。

4.4 考察

解析結果から、不快さと長時間スペクトルの重心は正の、不快さと長時間スペクトルの歪度・尖度は負の相関があるということと不快さと変調スペクトルの重心は負の、不快さと長時間スペクトルの歪度・尖度は正の相関があるということが分かった。このことから読み取れるのは、周波数成分が高い位置に集中している音やゆっくりとした変動感を感じる音が不快と感じられるということである。

周波数成分が高い位置に集中している音は一般的に甲高いと表現されることが多く、音質評価指標におけるシャープネスと関係が深い。よって、不快な音というものはシャープネスと関係があるといえるのではないか。甲高い音が不快と感じられる理由は何であろうか。私は恐怖感を想起させるからであると考えた。甲高い音というものは普段から聞くことのない音、いわゆる異音とされることが多い。このような音が発せられる状況は環境が変化した、つまり異常事態であると考えられる。このような事態では何かが自分の身に起こるということが考えられる。よって、恐怖を感じるのではないか。

ゆっくりとした変動感を感じる音は、音質評価指標における「変動感」の尺度であるフラクチュエーションストレングス [26] と関係が深い。よって、不快な音というものはフラクチュエーションストレングスと関係があるといえるのではないか。類似研究であるペッセルらによる悲鳴の研究において、音質評価指標であり、早い変動感、つまり粗さの尺度であるラフネスは不快さと関係があるとされている [27]。なぜ本研究では早い変動感ではなくゆっくりとした変動感の方が深いと感じられたのかという理由を考えると、実験

に使用した刺激音に要因があると考えられる。本研究で使用した刺激音は駅のホームで聞くような音など情景が浮かぶような音が含まれている。よって、その情景のイメージに引っ張られ、音というよりはそのイメージで不快かどうかを判断してしまったという可能性がある。実際に、実験後のヒアリングにおいて生活の中で聞きなれている音であるので不快ではないといった意見や、鳥の鳴き声など自然界に存在している音のはずであるのに刺激音は電子音であるのでその差異に違和感を覚えるといった理由で不快だと感じたという意見が存在した。また、刺激音の長さをそろえるために無音区間を挿入したことも時間変動に影響を与えたのではないかと考えられる。

表 4.1: 不快さの程度と物理量との間の相関係数

		correlation coefficient
長時間スペクトル	重心	0.59
	歪度	-0.56
	尖度	-0.41
変調スペクトル	重心	-0.48
	歪度	0.45
	尖度	0.38

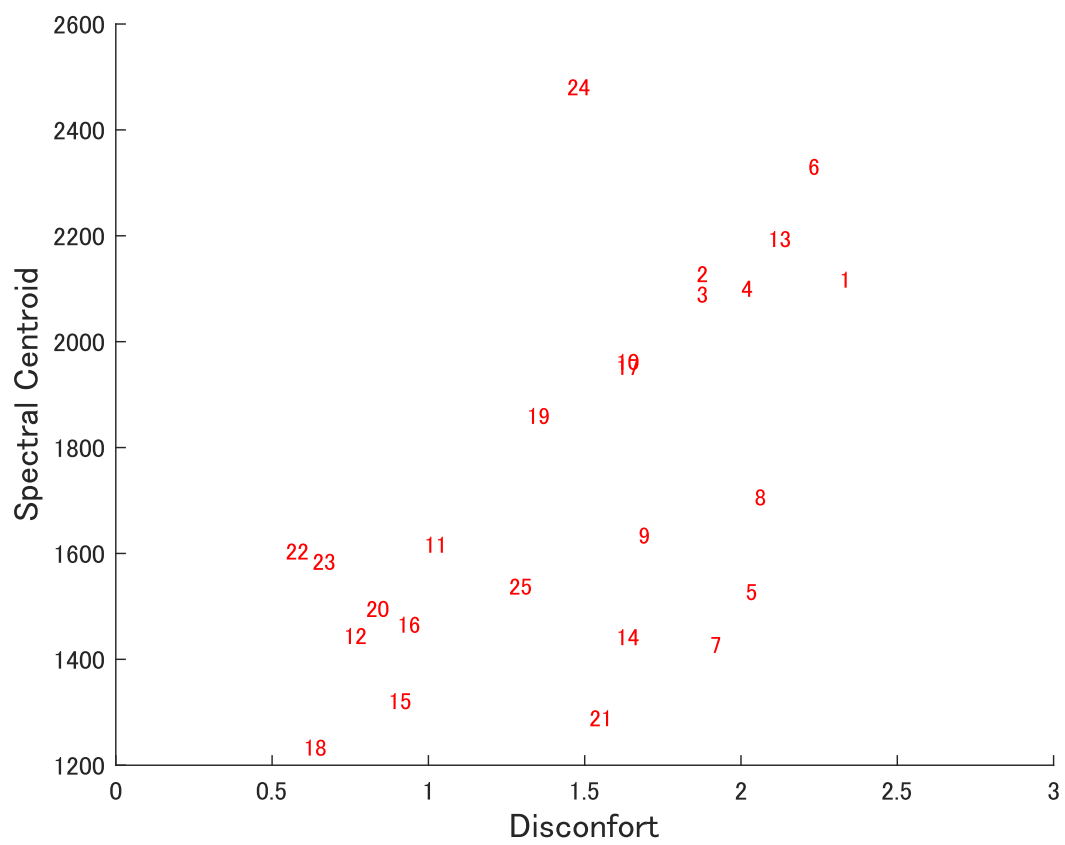


図 4.1: 長時間スペクトル重心と不快さの関係

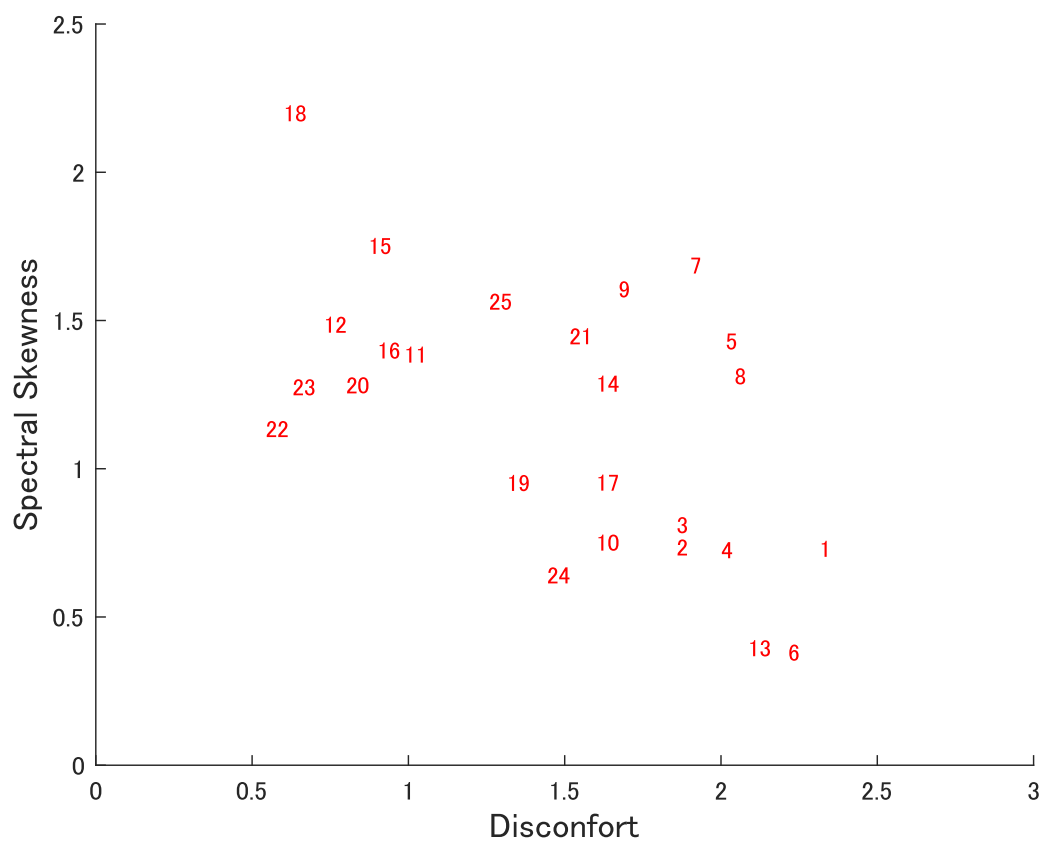


図 4.2: 長時間スペクトルの歪度と不快さの関係

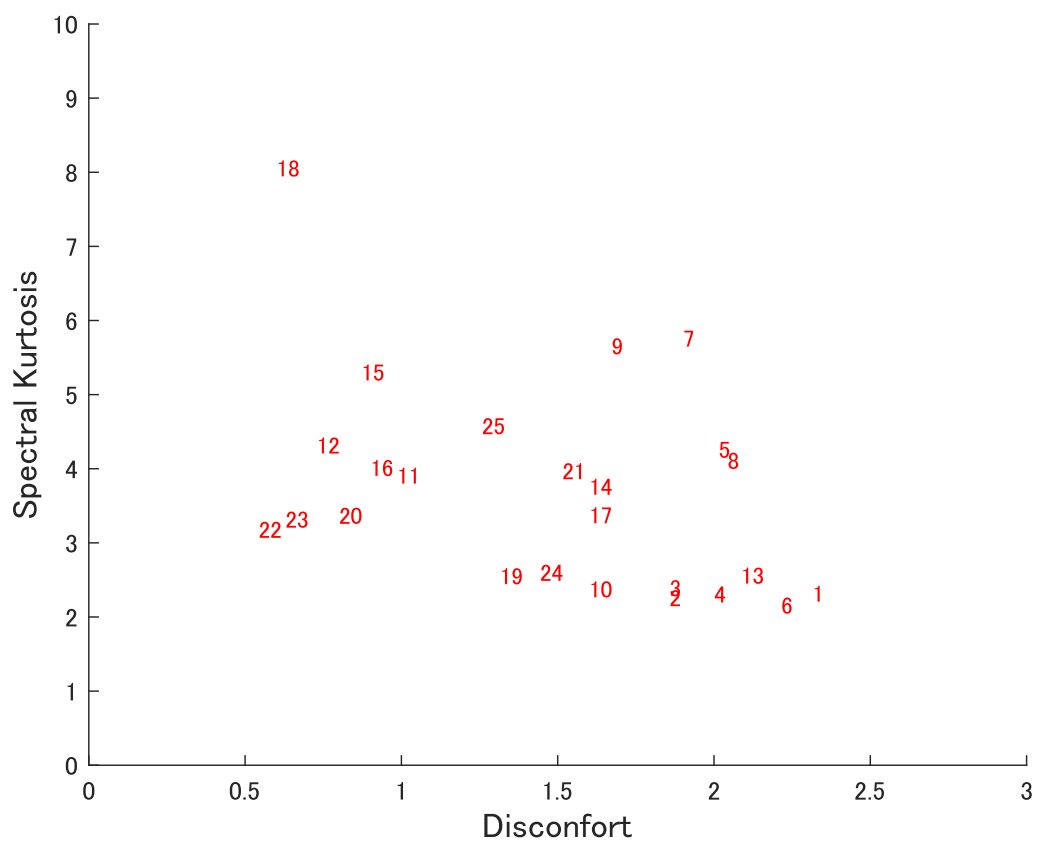


図 4.3: 長時間スペクトルの尖度と不快さの関係

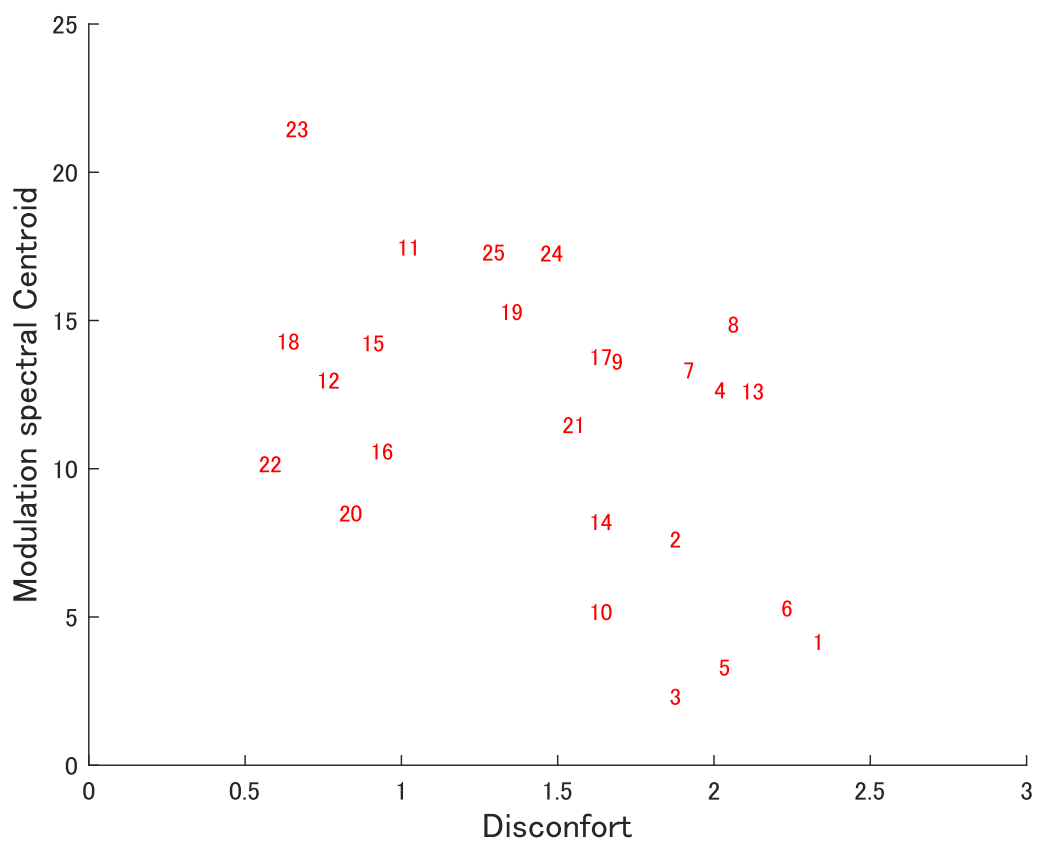


図 4.4: 変調スペクトル重心と不快さの関係

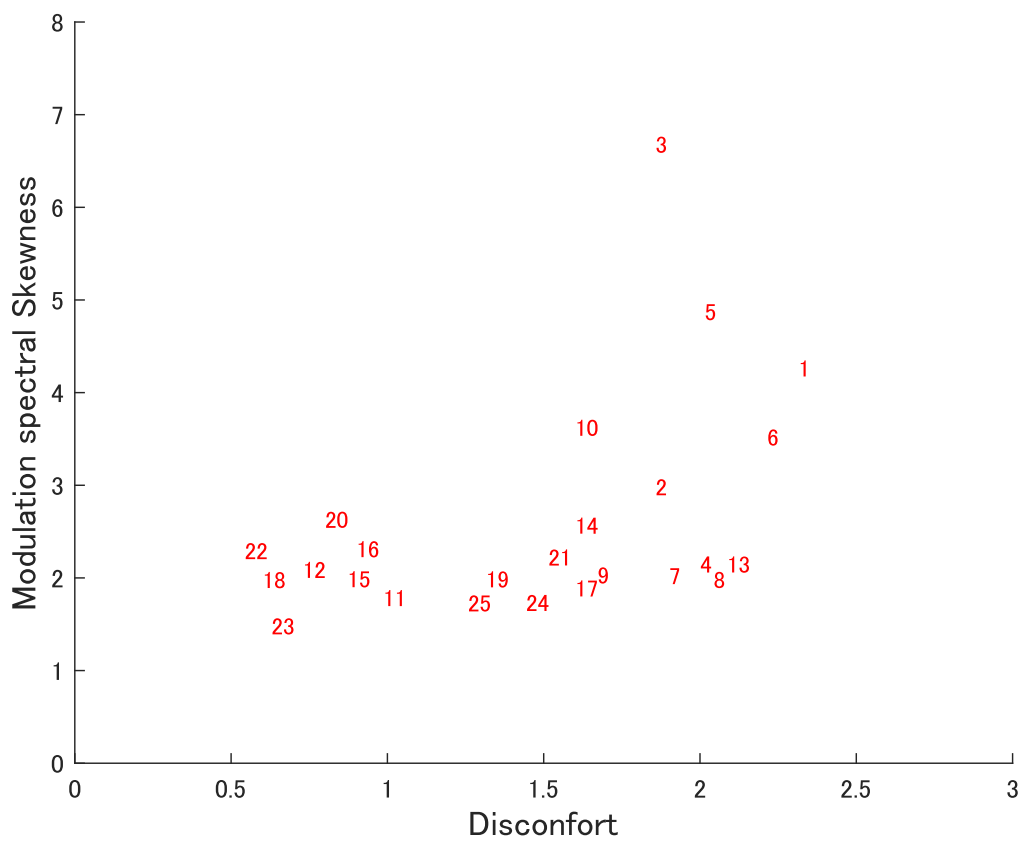


図 4.5: 変調スペクトルの歪度と不快さの関係

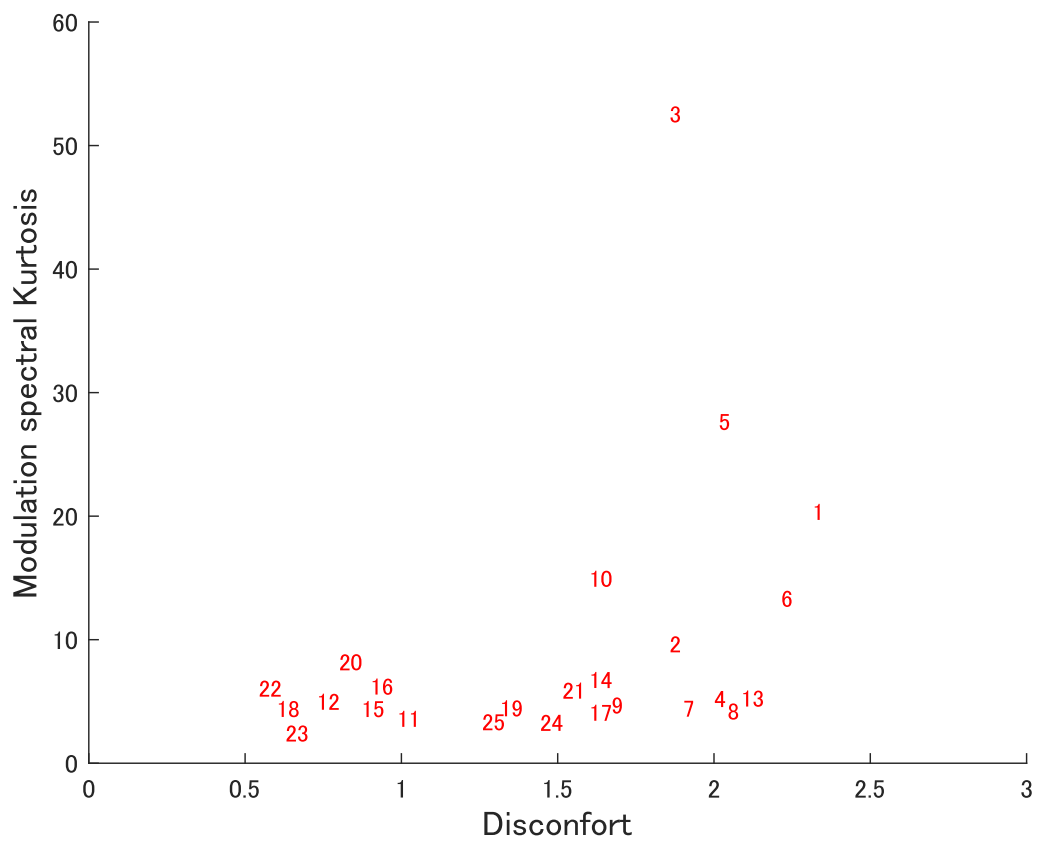


図 4.6: 変調スペクトルの尖度と不快さの関係

第5章 全体考察

3章では、現状では定量化されておらず、その程度を数値化することは困難である音の不快さの程度を、主観評価を行うことにより数値化した。4章では、3章で算出した音の不快さの程度と着目する物理量であるスペクトルの重心・歪度・尖度と変調スペクトルの重心・歪度・尖度の相関係数を算出し、値を精査することで不快さと物理量との関係性を探った。

その結果、不快さと長時間スペクトルの重心は正の、不快さと長時間スペクトルの歪度・尖度は負の相関があり、不快さと変調スペクトルの重心・歪度・尖度は相関がほとんどなかったということかわかった。相関があるということは、直線的な関係性があるということである。よって、不快さと物理量は関係している。

またこれらの結果から、スペクトル形状が右に偏っている音、つまり、周波数成分が高い位置に集中している音が不快だと感じるということがいえるであろう。ほかにも変調スペクトル形状が左に偏っている音、つまり、ゆっくりとした変動感がある音が不快だと感じるということがいえるであろう。

第6章 結論

6.1 本研究で明らかになったこと

本研究では、不快な音とその物理量に関係があるかどうかということを目明らかにすることを目的としている。そのために、定量化されていない音の不快さの程度を、聴取実験を行うことで数値化し、算出した物理量との相関をとり、検討することで関係性を探った。その結果、不快さと物理量は関係しているということが分かった。具体的に関係している物理量は、長時間スペクトルにおける重心・歪度・尖度と変調スペクトルにおける重心・歪度・尖度である。これらの関係性から、周波数成分が高い位置に集中している音、つまり甲高いと表現される音や変調周波数成分が低い位置に集中している音、つまりゆっくりとした変動感を感じる音が不快であるということがいえる。

本研究で明らかになった知見は、顕著性の高い避難誘導音声のデザインの設計の一助になるだけではなく、騒音抑制や補聴器の品質の向上にも役立つのではないかと考えている。

6.2 今後の課題

今後の課題としては、

- 刺激音のサンプル数を増やす

現状ではサンプル数が少なすぎて、結果の値に外れ値の影響が強くなってしまふことが懸念される。よって、より多くの刺激音を使用する必要があると考えられる。

- 変調スペクトルを帯域分割したうえで解析を行う

本研究では、帯域分割せず解析を行っている。よって、帯域分割を行ったうえで相関を算出するならばこの研究と同様の結果になるとは限らない。

- 別の物理量に着目する

本研究では、スペクトルと時間変動にかかわりがある、長時間スペクトルにおける重心・歪度・尖度と変調スペクトルにおける重心・歪度・尖度について調査した。だが、物理量も多くの種類がありすべてを網羅できているわけではない。よってまた別の物理量に着目し、不快さとの関係性を探っていく必要があると考えられる。

- 相関係数以外で関係性を明らかにする

この研究では相関係数を用い、線形の相関の値を算出している。よって、線形ではない相関を算出するならばまた違った結果が得られる可能性もある。またこのほかにも違ったアプローチから関係性を探っていく必要があると考えられる。

参考文献

- [1] 今村 明恒, “本邦正史に現はれる最初の大地震,” 地震 第1輯, vol. 16, no. 5, pp. 103–104, 1944.
- [2] 大森 房吉, “本邦大地震概表：臺灣朝鮮ヲ除ク,” 震災豫防調査會報告, vol. 88, no. 2, pp. 1-61, 1919.
- [3] 地震調査研究推進本部 地震調査委員会, “平成 30 年北海道胆振東部地震の評価,” 2018.
- [4] 気象庁, “日本付近で発生した主な被害地震（平成 8 年以降）,” 2019.
- [5] 気象庁, “災害をもたらした気象事例（平成元年～本年）,” 2019.
- [6] 堀内 英雄, “視覚的提示と聴覚的提示の効果について (2)：簡単反応および弁別反応の場合,” 信愛紀要, 7, pp. 32–42, 1966.
- [7] 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会 第7回会合, “平成 23 年東日本大震災における避難行動等に関する面接調査（住民）分析結果,” 資料 1, 2011.
- [8] 古川茂人（代表）, “聴覚的気顕著性に基づく, 音響情の選択的協調技術の創出,” SCOPE, 2015.
- [9] H.-I. Liao, S. Kidani, M. Yoneya, M. Kashino, S. Furukawa, “Correspondences among pupillary dilation response, subjective salience of sounds, and loudness,” Psychon. Bull. & Rev., 2015.
- [10] von W. Aures, “Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale (A model for calculating the sensory euphony of various sounds),” Acoustica, vol. 59, pp. 130–141, 1985.
- [11] 日本音響学会編, “音色の感性学,” コロナ社, pp. 96–113, 2010.
- [12] 株式会社小野測器, “音質評価とは,” pp. 1-18, 2011.
- [13] H. Fastl, E. Zwicker, “PSYCHOACOUSTICS,” Springer, pp. 221–237, 1990.

- [14] 渡邊 淳司, 加納 有梨紗, 清水 祐一郎, 坂本 真樹, “触感覚の快・不快とその手触りを表象するオノマトペの音韻の関係性 (特集 ハプティクスと VR)”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 16, no. 3, pp. 367-370, 2011.
- [15] 難波 誠一郎, 桑野 園子, “音の評価のために心理学的測定法,” コロナ社, pp. 1-20, 1998.
- [16] 佐藤 信, “官能検査入門,” 日科技連, pp. 93-97, 1978.
- [17] 工藤 多賀, 加納 有二, 小寺 一興, “周波数特性の変化と環境騒音の不快閾値,” AUDIOLOGY JAPAN, vol. 30, no. 6, pp. 785-791, 1987.
- [18] Tsuge, K., Kanamaru, K., Kido, T., and Masuda, N., “A Study of Noise in Vehicle Passenger Compartment during Acceleration,” SAE Technical Paper, 850965, pp. 27-34, 1985.
- [19] Aoki, H., Ishihama, M., and Kinoshita, A., “Effects of Power Plant Vibration on Sound Quality in the Passenger Compartment During Acceleration,” SAE Technical Paper, 870955, pp. 1-10, 1987.
- [20] 栗原 伸一, “入門統計学,” オーム社, pp. 51-55, 2011.
- [21] 桑野 園子, “警告信号音の心理的評価,” 騒音制御, vol. 25, no. 1, pp. 3-7, 2001.
- [22] S. Kuwano, S. Namba, A. Schick, H. Hge, H. Fastl, T. Phillipou, M. Florentine, H. Moesch, “The timbre and annoyance of auditory warning signals in different countries,” Proceedings of the International Congress on Noise Control Engineering, pp. 3201-3206, 2000.
- [23] 鷓木 祐史, “変調伝達関数に基づく音声信号 (1) パワーエンベロープ逆フィルタ処理の原理とその応用について,” Journal of Signal Processing, pp. 339-348, 2008.
- [24] L. Atlas, S. Greenberg and H. Hermansky, “The modulation spectrum and its application to speech science and technology,” Interspeech Tutorial, Antwerp, Belgium, 2007.
- [25] 上田 尚一, “統計学の論理,” 朝倉書店, pp. 43-46, 2002.
- [26] 岩宮 眞一郎, “音質評価指標 : 入門とその応用 (やさしい解説),” 日本音響学会誌, vol. 66, no. 12, pp. 603-609, 2010.
- [27] Arnal, L. H., Flinker, A., Kleinschmidt, A., Giraud, A. L., & Poeppel, D. , “Human screams occupy a privileged niche in the communication soundscape,” Current biology : CB, vol. 25, no. 15, pp. 2051-2056, 2015.

謝辞

本研究を進めるにあたり，主指導教員である赤木正人教授には多大な助言を賜りましたことを深く感謝いたします。また，研究室会議やミーティングといった場においてアドバイスをいただいた久保理恵子氏，聴取実験において相談に乗っていただいた小林まおり氏に深く感謝いたします。公私において様々な相談に乗って下さった鳥谷輝樹氏，高橋響子氏，磯山拓都氏，共に切磋琢磨した同期のみなさんに感謝いたします。実験に協力いただいた被験者のみなさまにも感謝いたします。シュナイダーエレクトリックホールディングス株式会社からは研究に必要なデータの提供がありました。厚く御礼を申し上げ，感謝いたします。

付録

刺激音として使用した音源の加工前の波形を図 6.20 から図 6.25 に示す. この図は, 縦軸が振幅で横軸は時間 (秒) である. また, 同一図上にこの波形の包絡線も記載した.

図 6.26 から図 6.50 には, 個々の刺激音のスペクトルを示す. この図は, 縦軸がパワー (dB) で横軸は周波数 (Hz) である.

図 6.51 から図 6.75 には, 個々の刺激音の変調スペクトルを示す. この図は, 縦軸がパワー (dB) で横軸は変調周波数 (Hz) である.

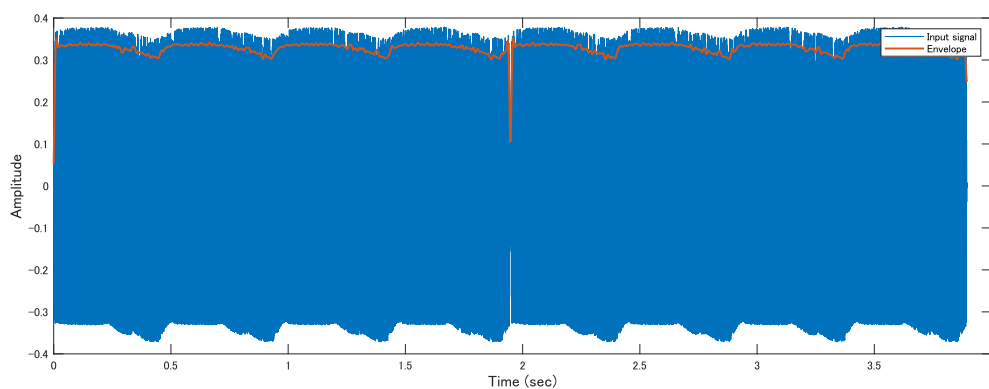


図 6.1: 刺激音 No.01 の波形

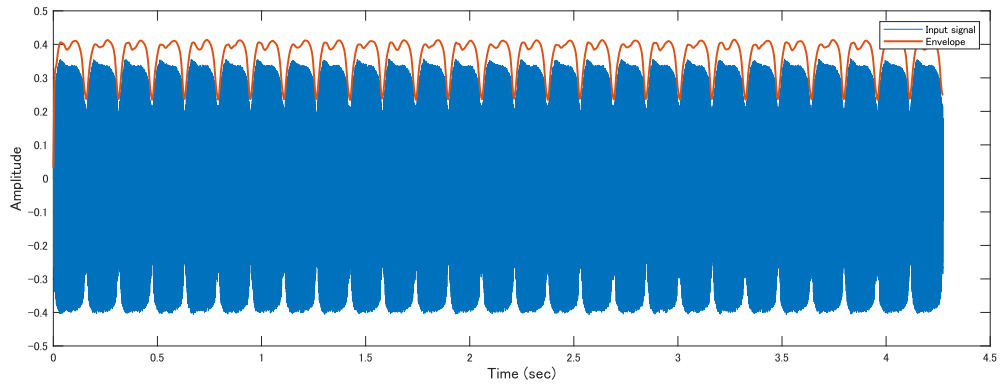


図 6.2: 刺激音 No.02 の波形

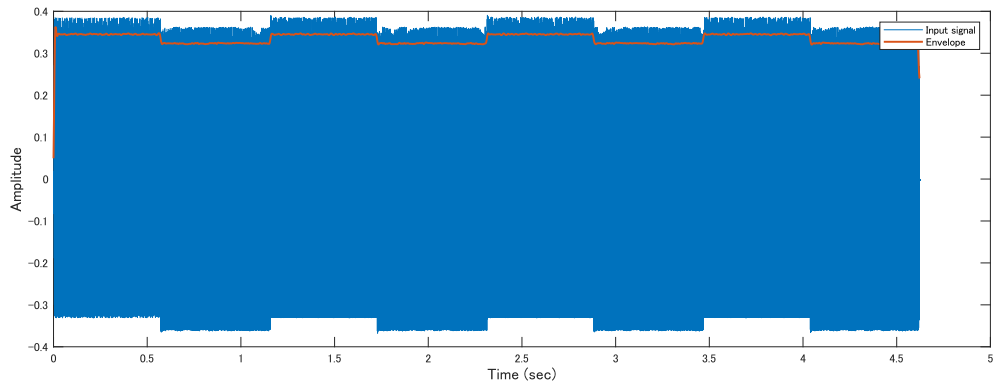


図 6.3: 刺激音 No.03 の波形

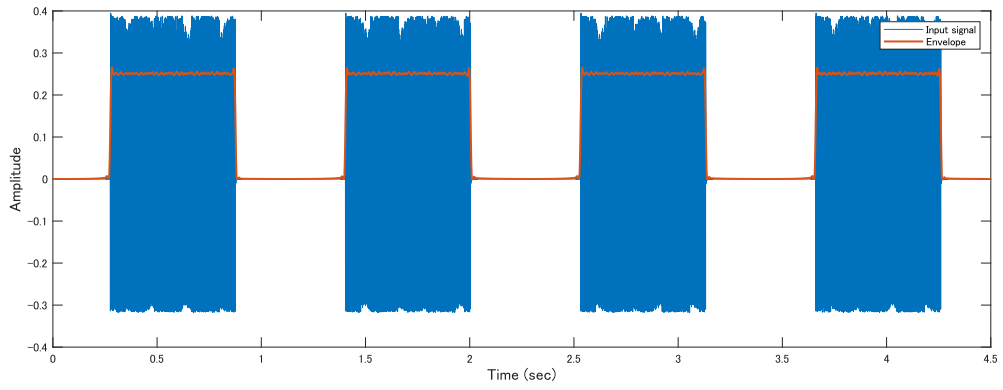


図 6.4: 刺激音 No.04 の波形

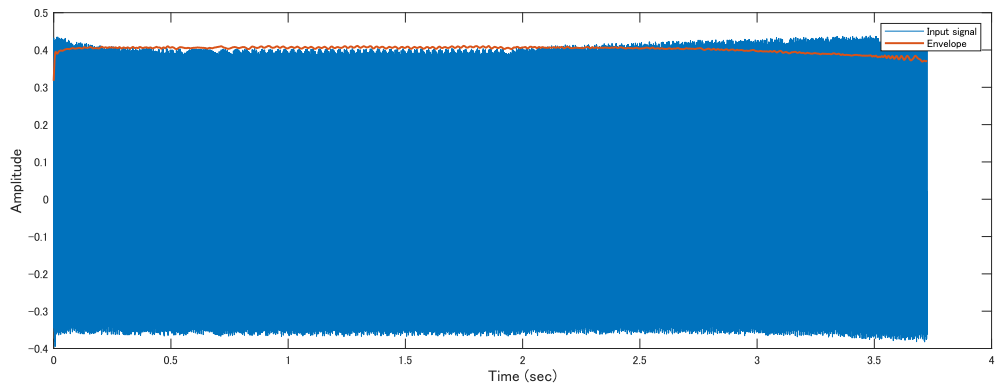


図 6.5: 刺激音 No.05 の波形

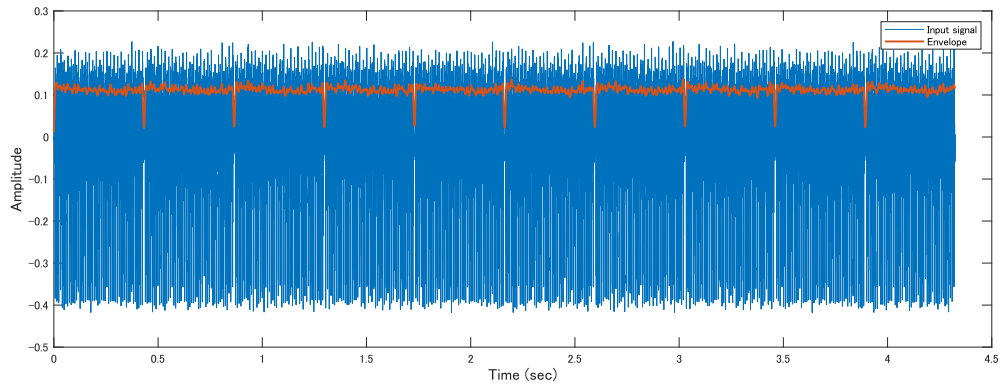


図 6.6: 刺激音 No.06 の波形

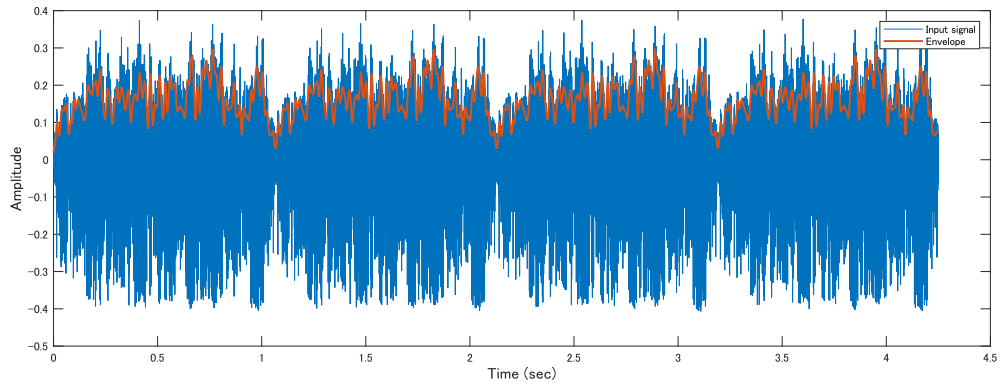


図 6.7: 刺激音 No.07 の波形

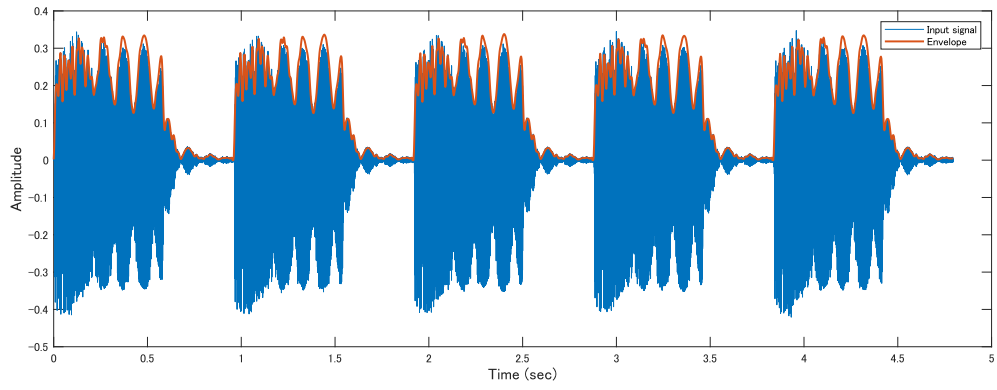


図 6.8: 刺激音 No.08 の波形

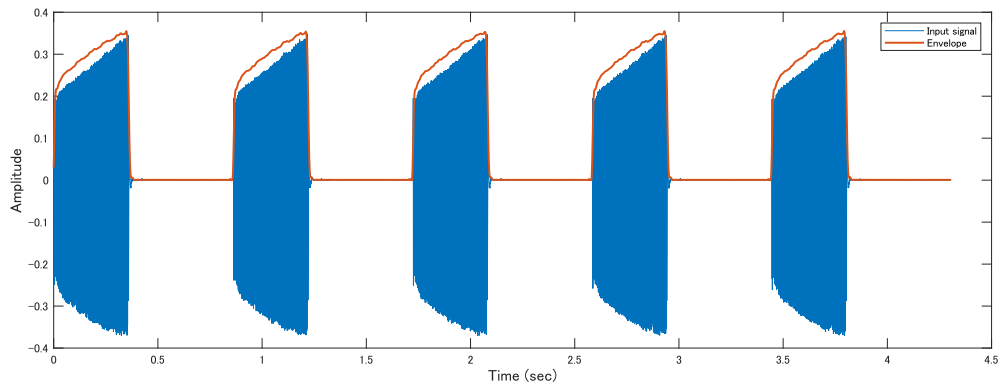


図 6.9: 刺激音 No.09 の波形

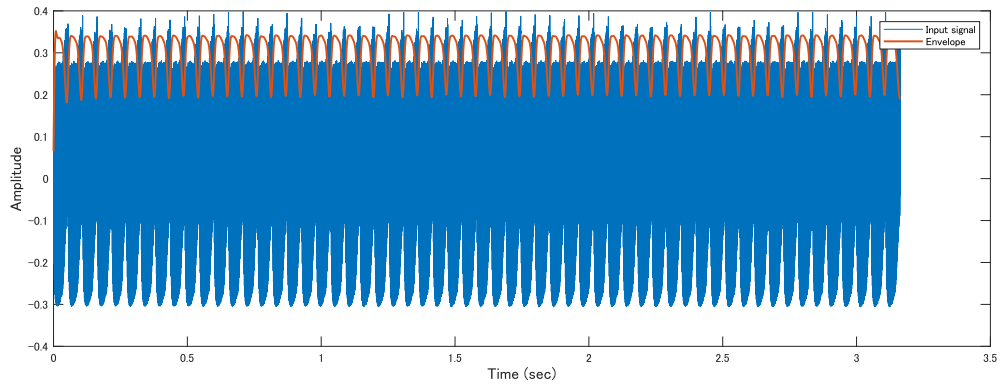


図 6.10: 刺激音 No.10 の波形

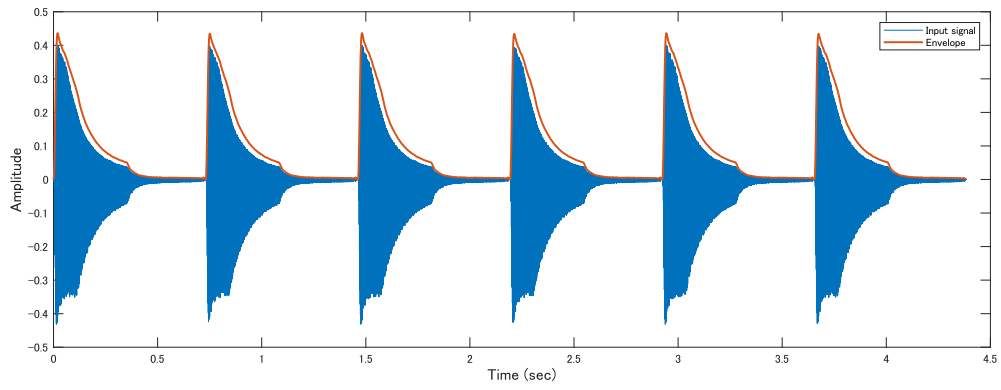


図 6.11: 刺激音 No.11 の波形

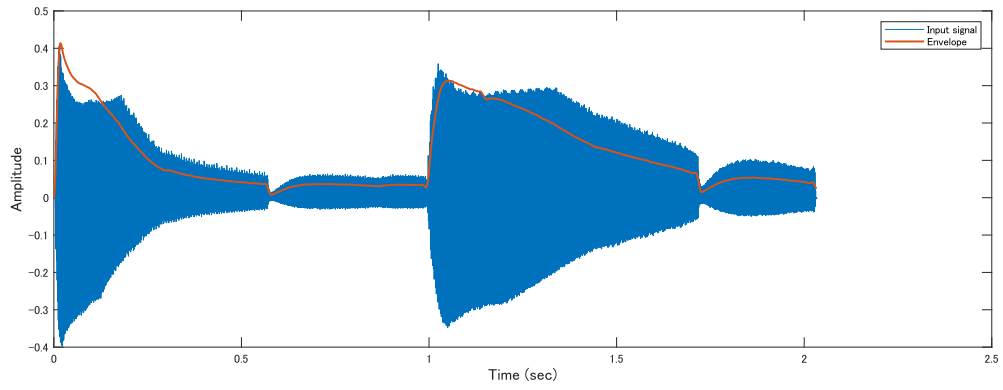


図 6.12: 刺激音 No.12 の波形

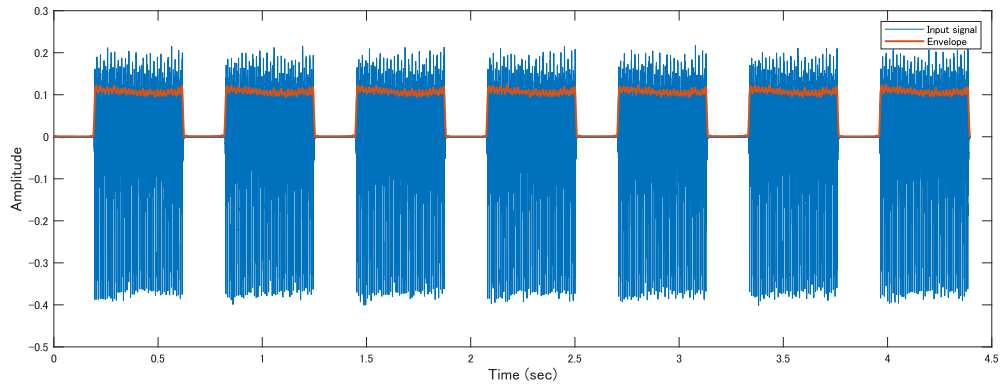


図 6.13: 刺激音 No.13 の波形

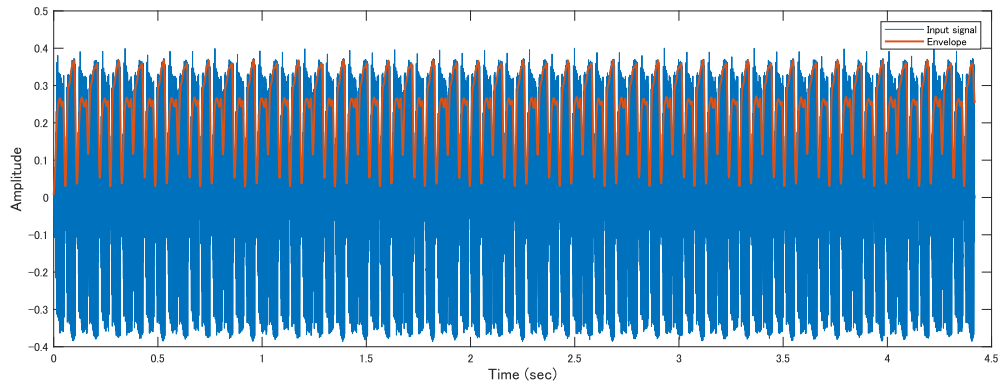


図 6.14: 刺激音 No.14 の波形

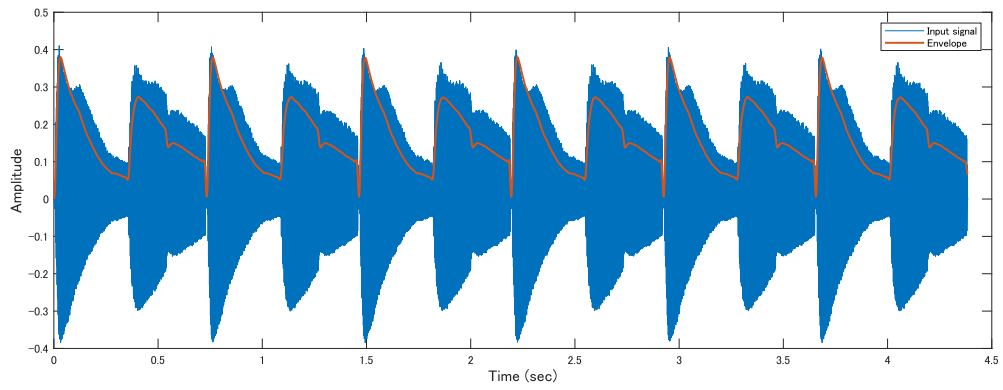


図 6.15: 刺激音 No.15 の波形

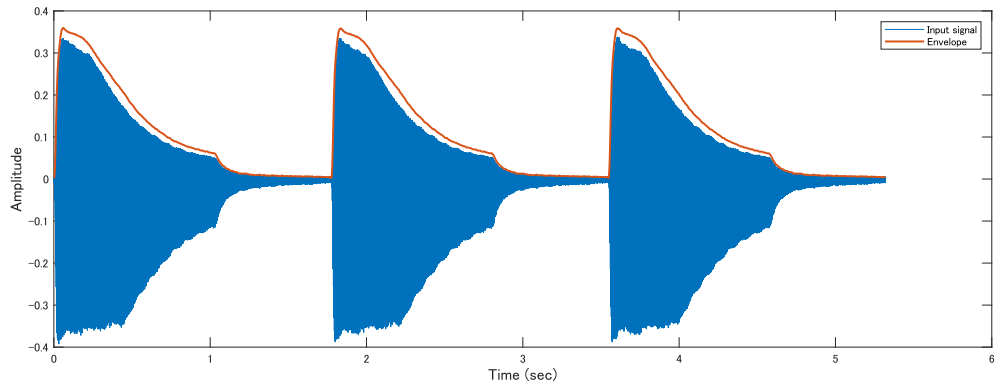


図 6.16: 刺激音 No.16 の波形

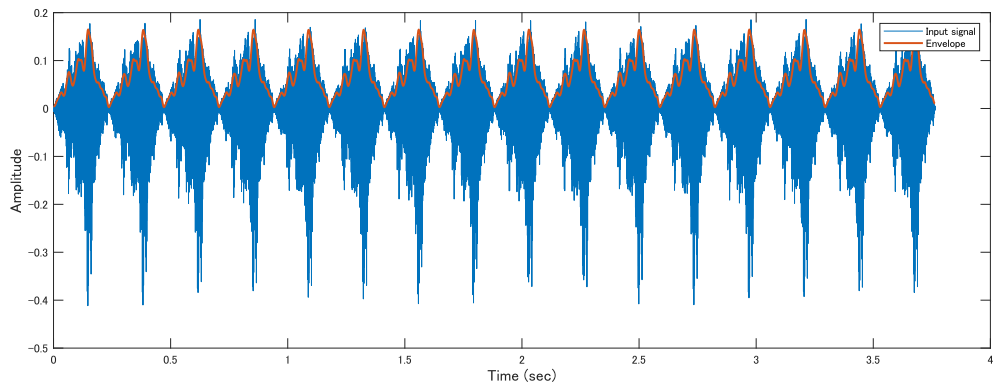


図 6.17: 刺激音 No.17 の波形

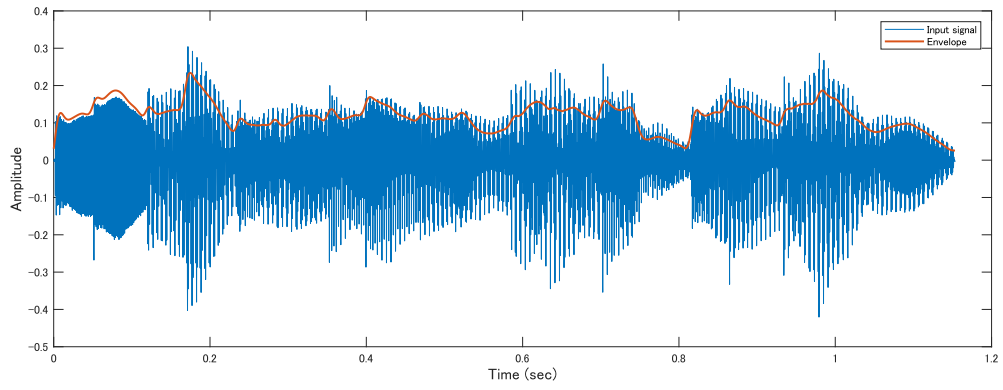


図 6.18: 刺激音 No.18 の波形

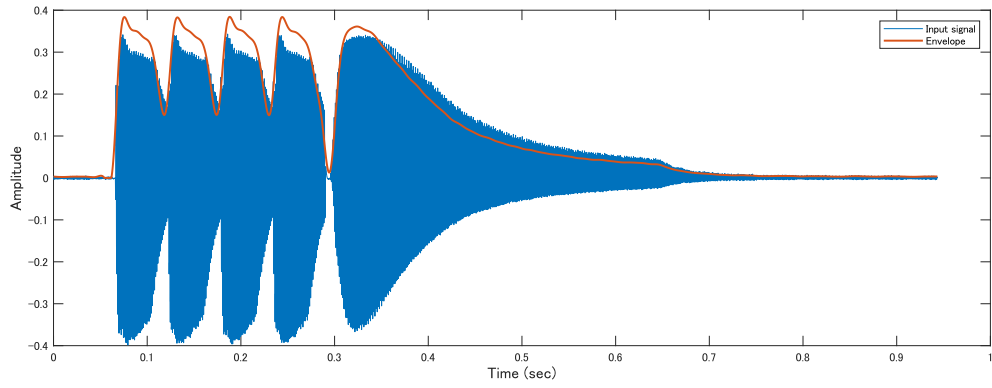


図 6.19: 刺激音 No.19 の波形

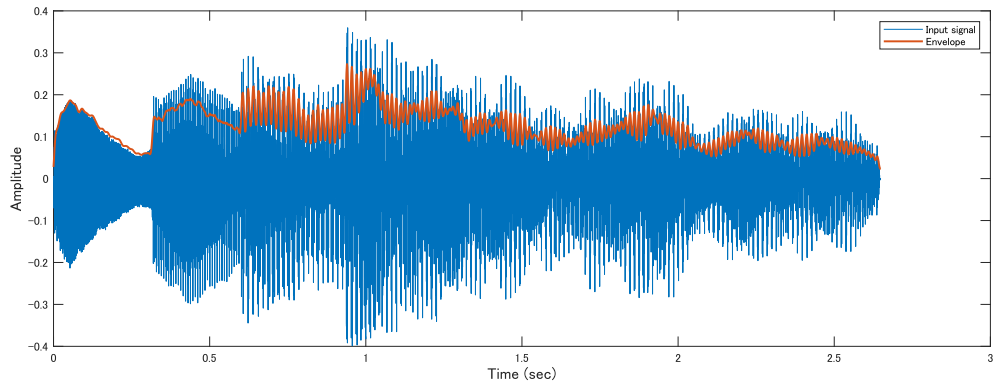


図 6.20: 刺激音 No.20 の波形

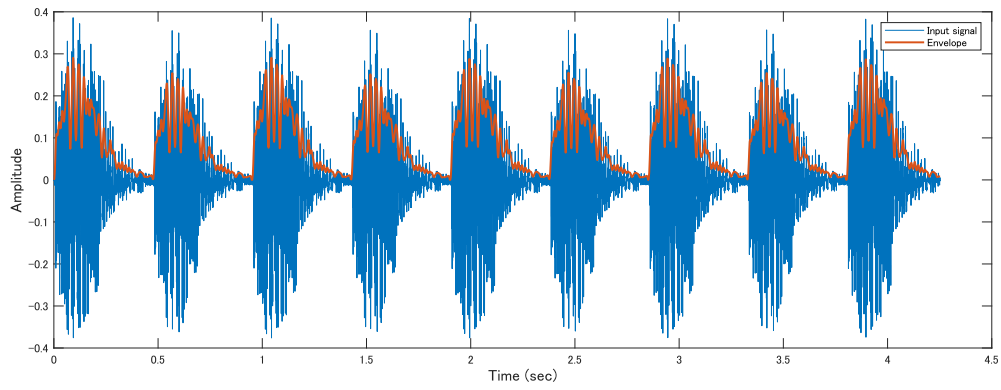


図 6.21: 刺激音 No.21 の波形

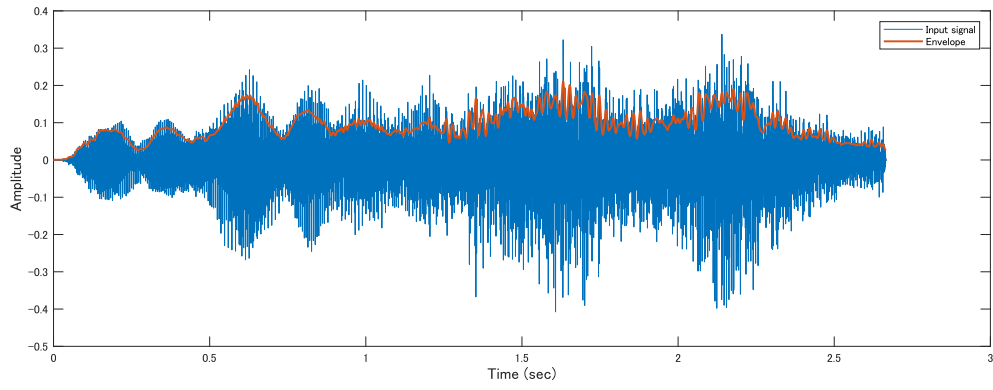


図 6.22: 刺激音 No.22 の波形

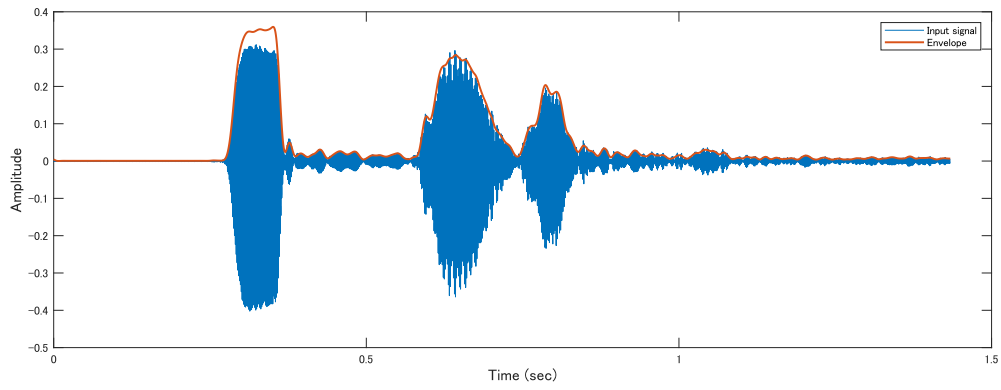


図 6.23: 刺激音 No.23 の波形

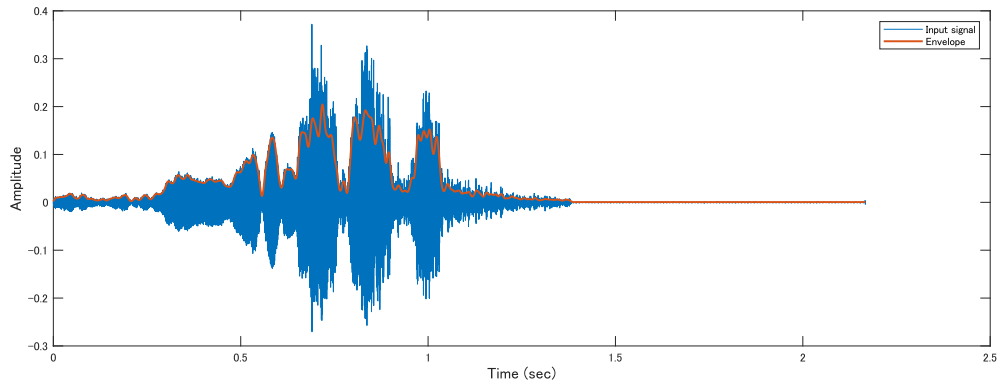


図 6.24: 刺激音 No.24 の波形

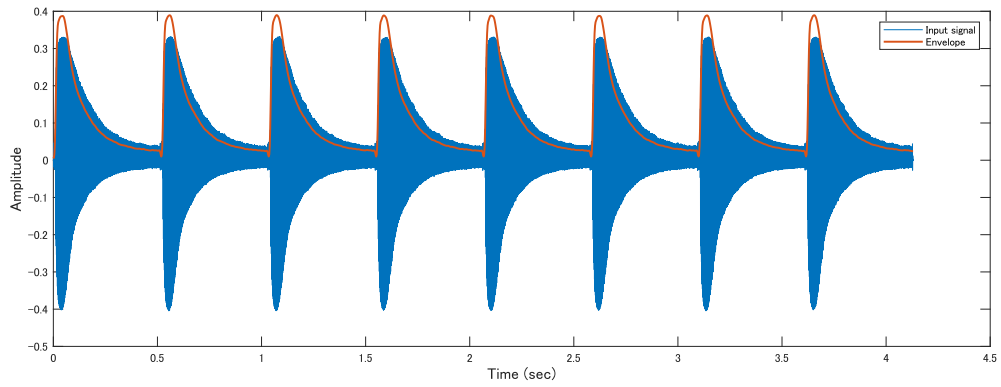


図 6.25: 刺激音 No.25 の波形

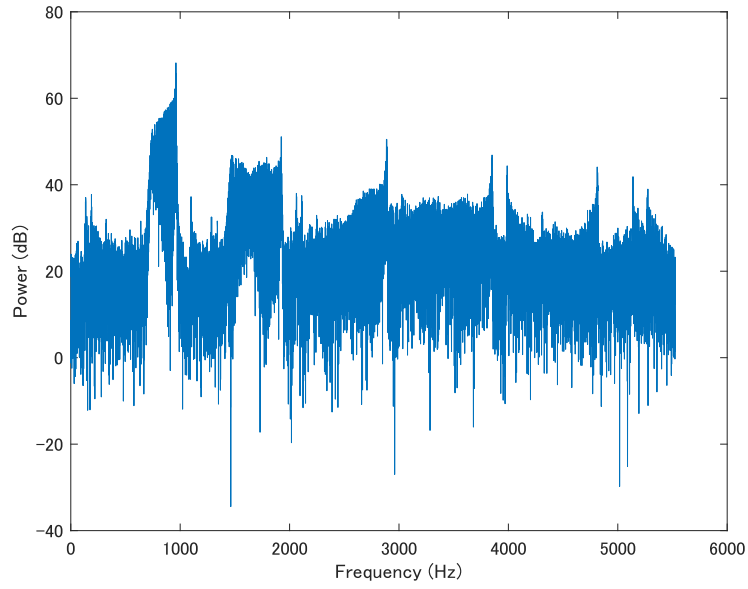


図 6.26: 刺激音 No.01 のスペクトル

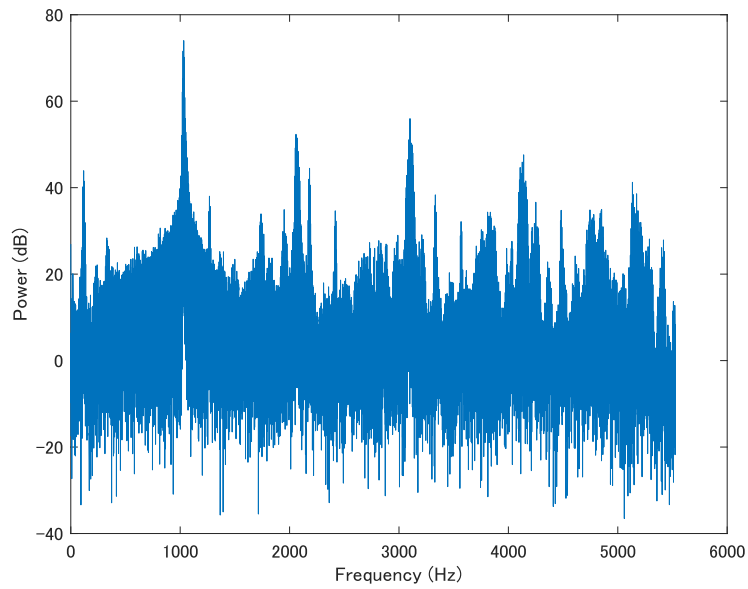


図 6.27: 刺激音 No.02 のスペクトル

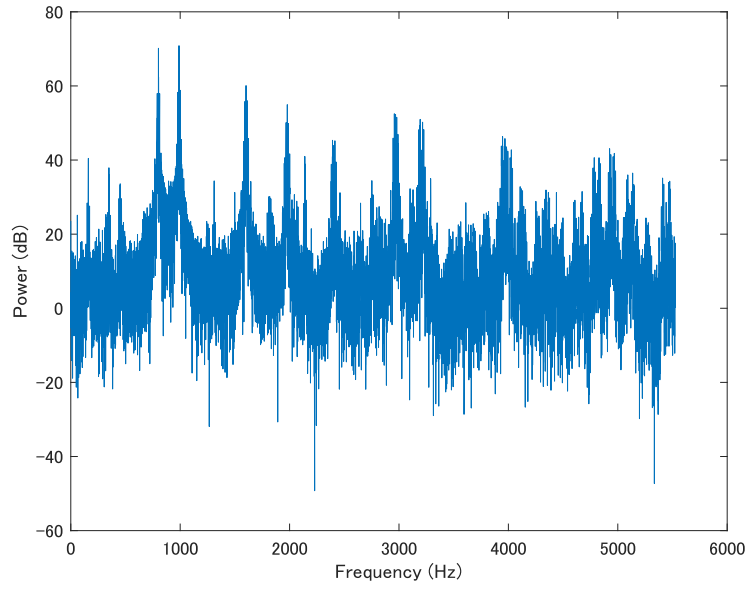


図 6.28: 刺激音 No.03 のスペクトル

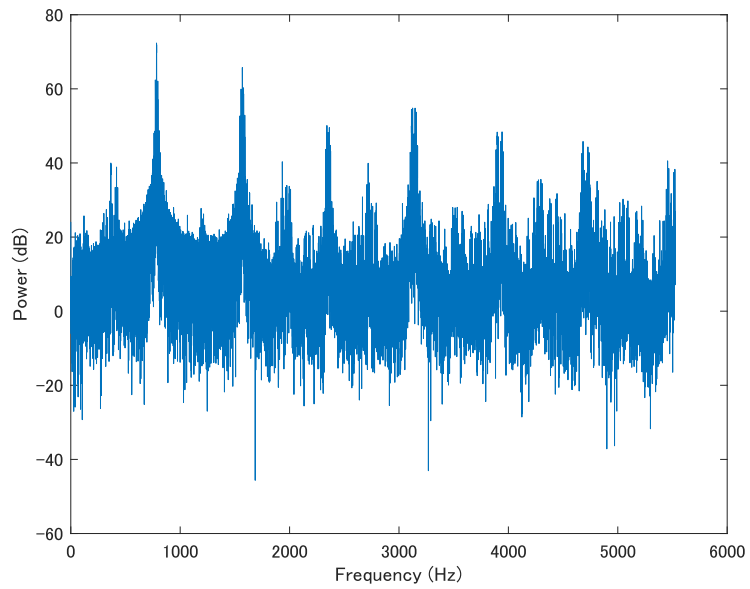


図 6.29: 刺激音 No.04 のスペクトル

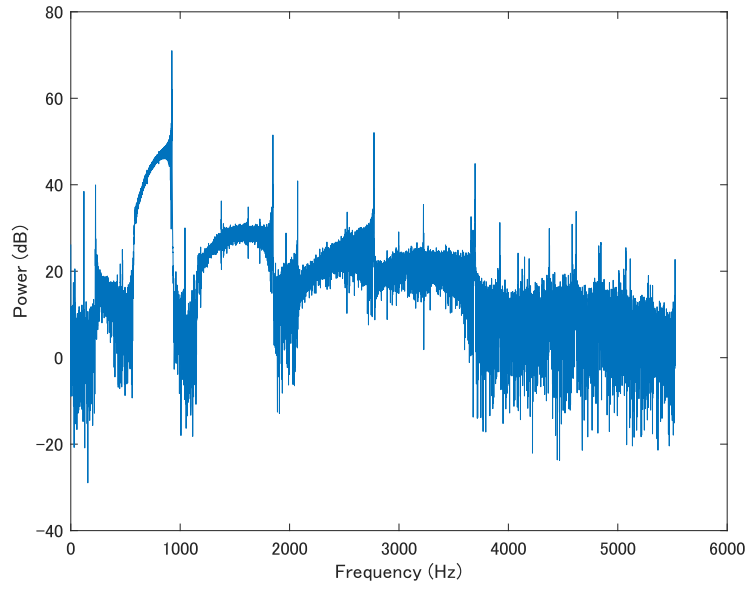


図 6.30: 刺激音 No.05 のスペクトル

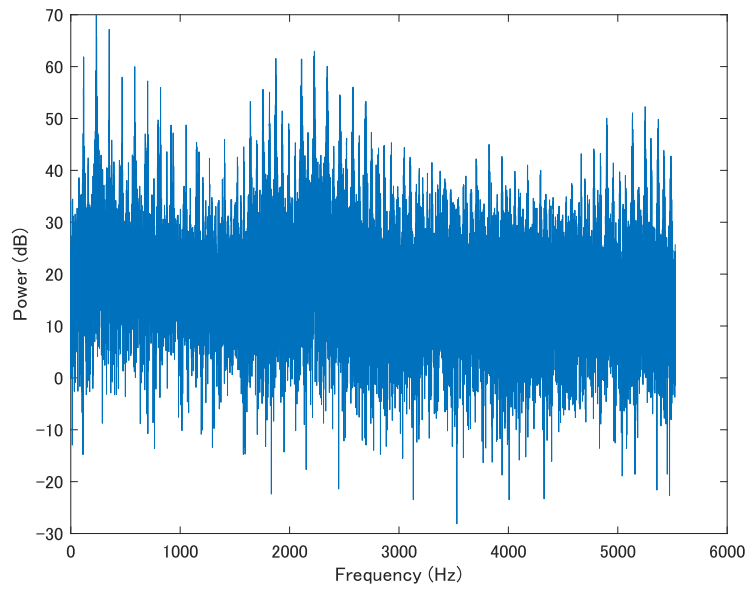


図 6.31: 刺激音 No.06 のスペクトル

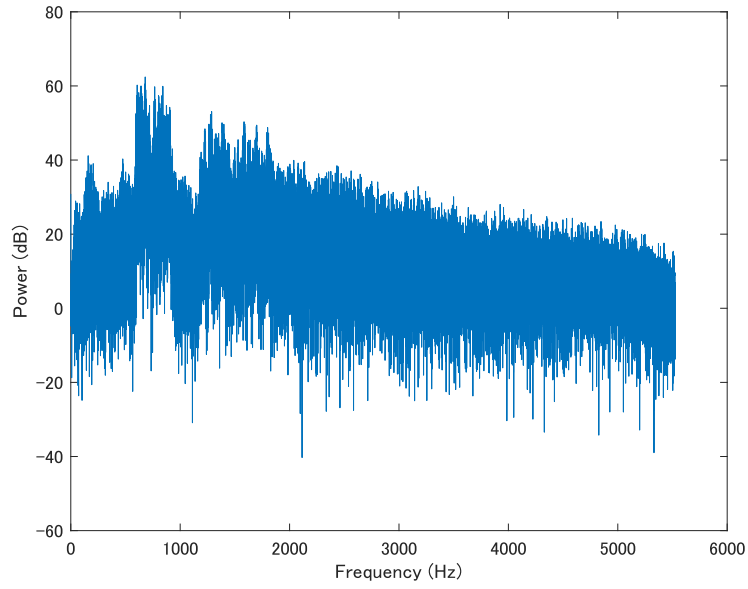


図 6.32: 刺激音 No.07 のスペクトル

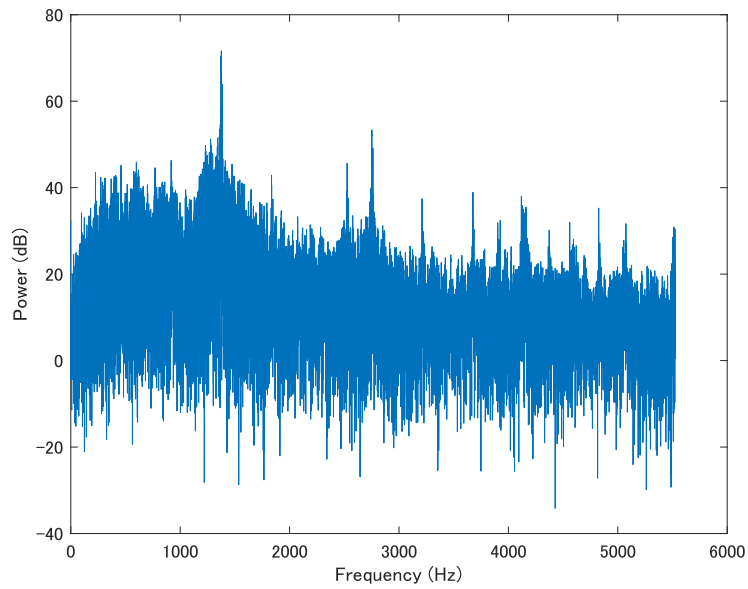


図 6.33: 刺激音 No.08 のスペクトル

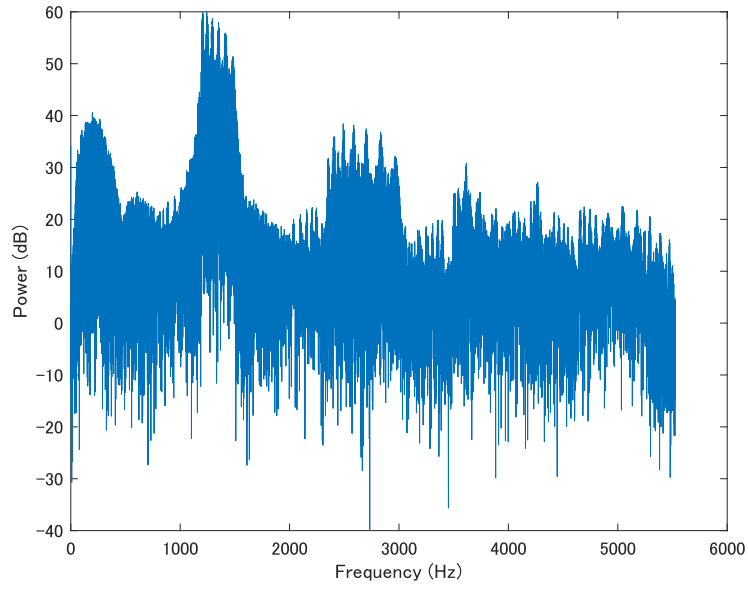


図 6.34: 刺激音 No.09 のスペクトル

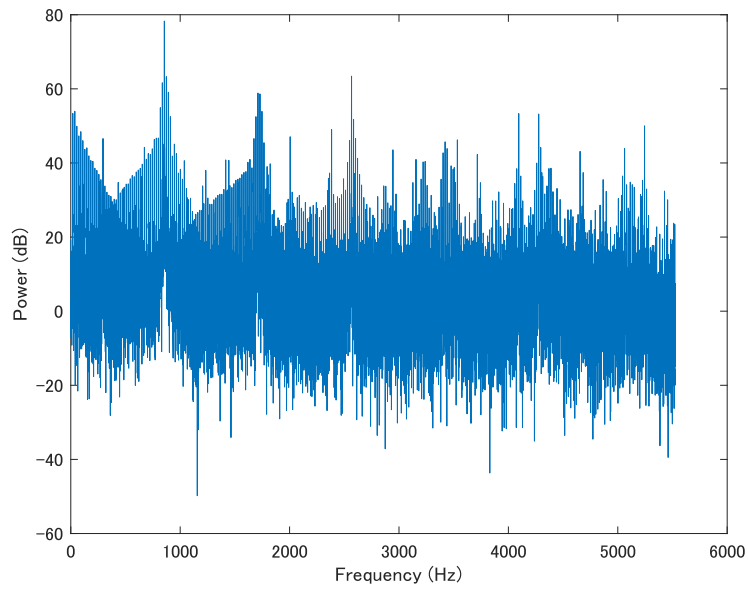


図 6.35: 刺激音 No.10 のスペクトル

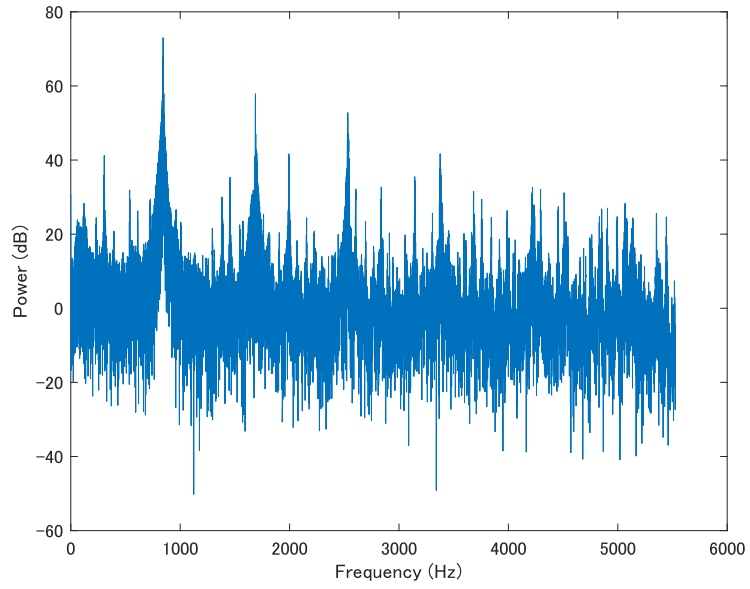


図 6.36: 刺激音 No.11 のスペクトル

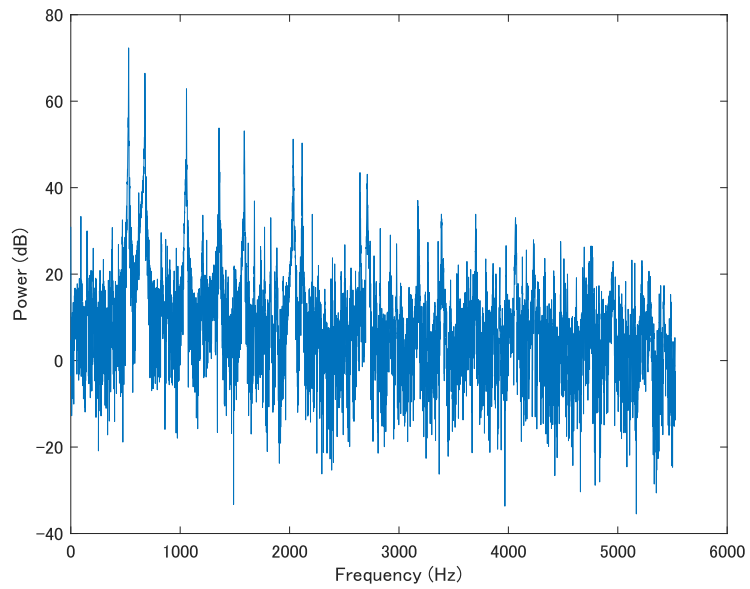


図 6.37: 刺激音 No.12 のスペクトル

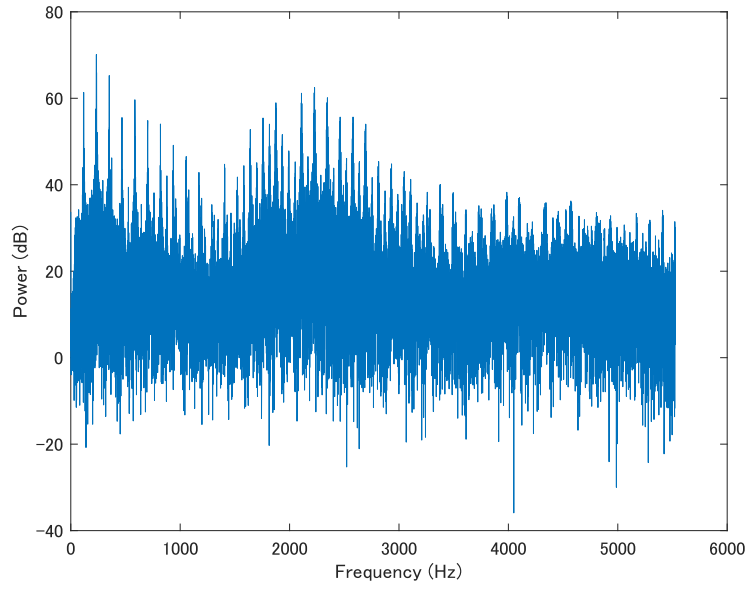


図 6.38: 刺激音 No.13 のスペクトル

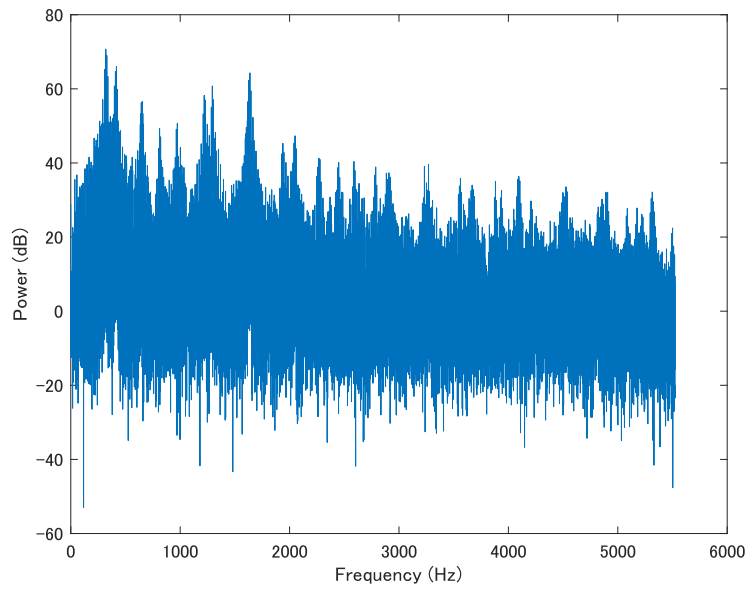


図 6.39: 刺激音 No.14 のスペクトル

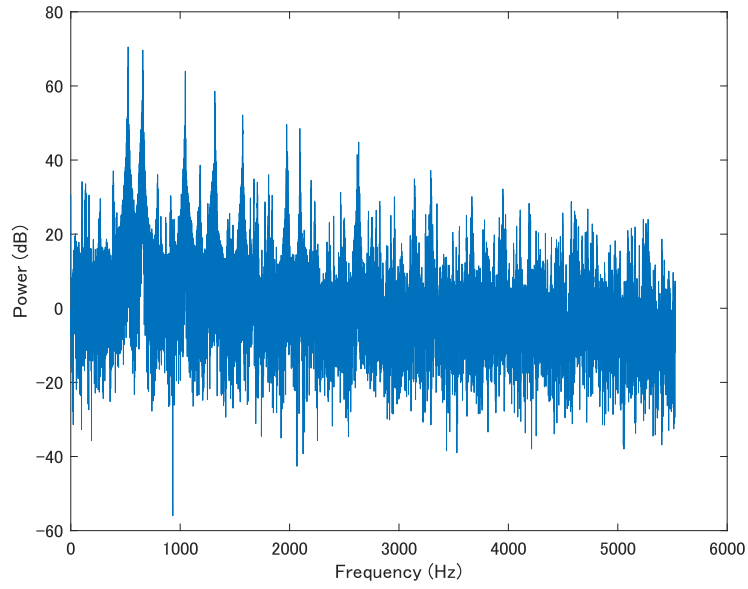


図 6.40: 刺激音 No.15 のスペクトル

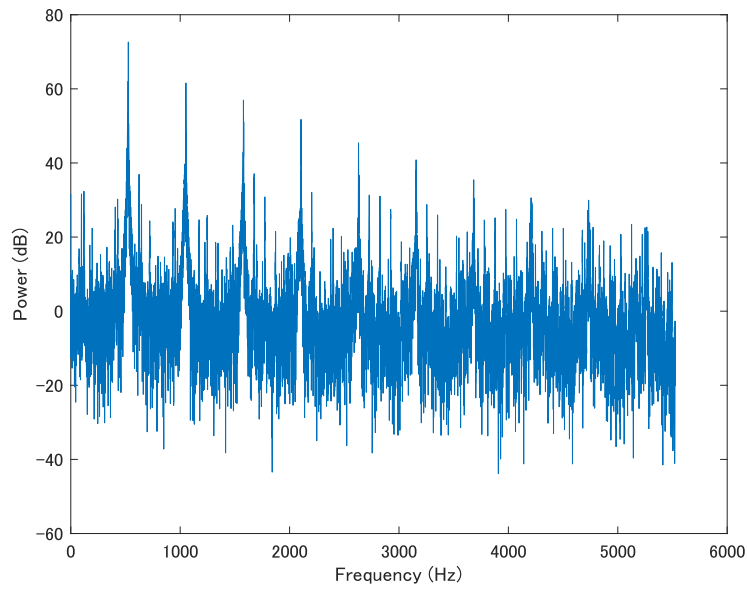


図 6.41: 刺激音 No.16 のスペクトル

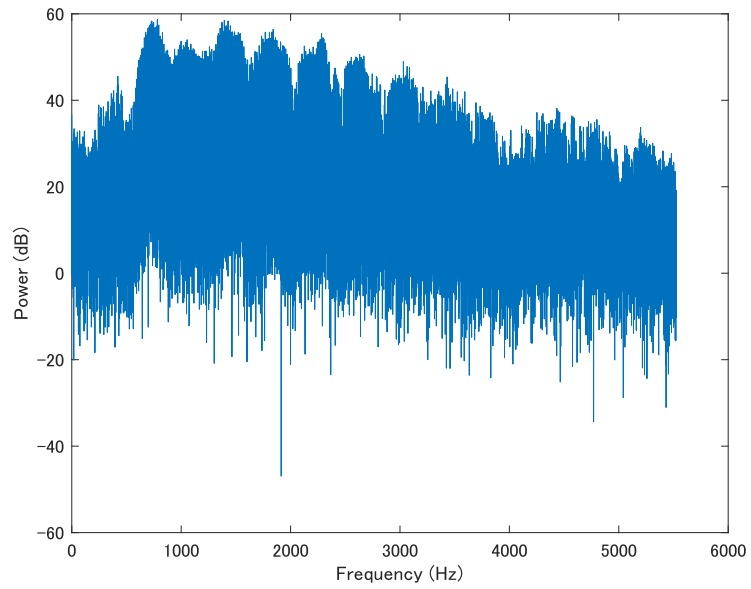


図 6.42: 刺激音 No.17 のスペクトル

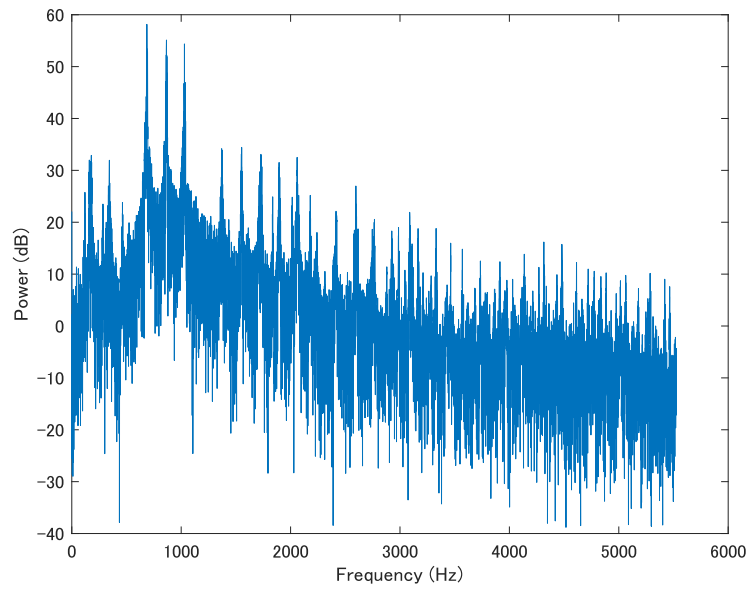


図 6.43: 刺激音 No.18 のスペクトル

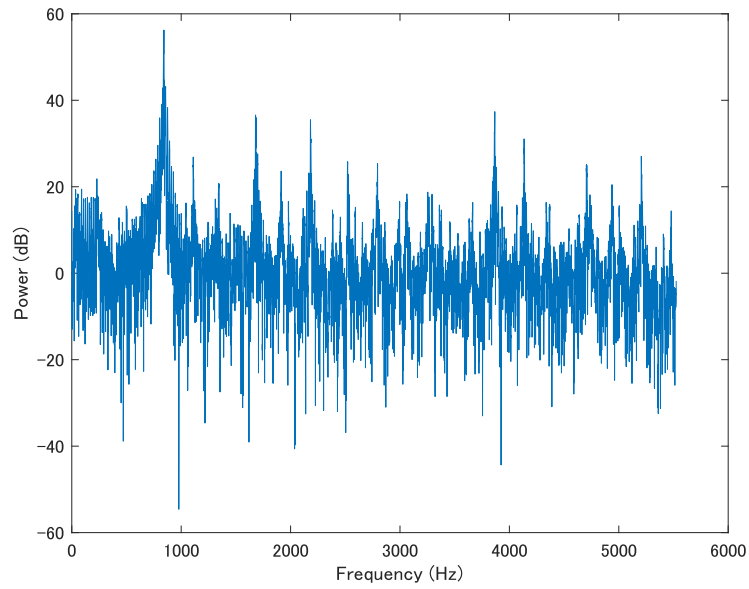


図 6.44: 刺激音 No.19 のスペクトル

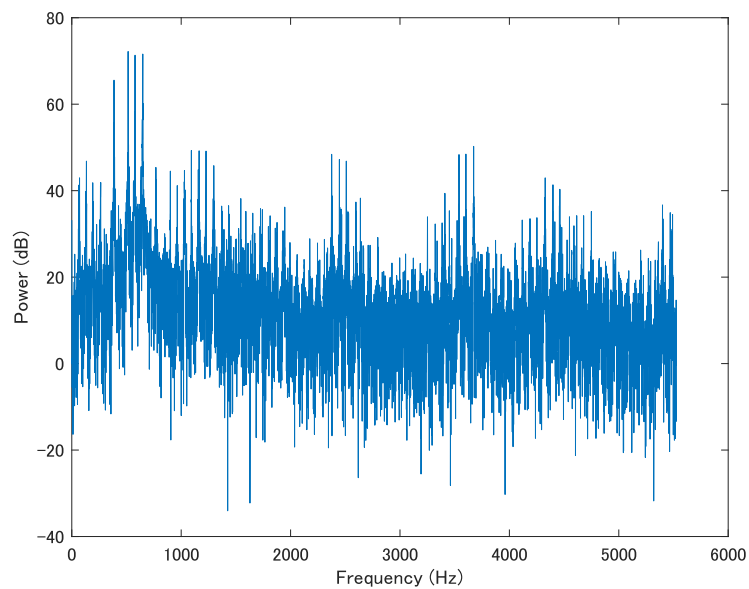


図 6.45: 刺激音 No.20 のスペクトル

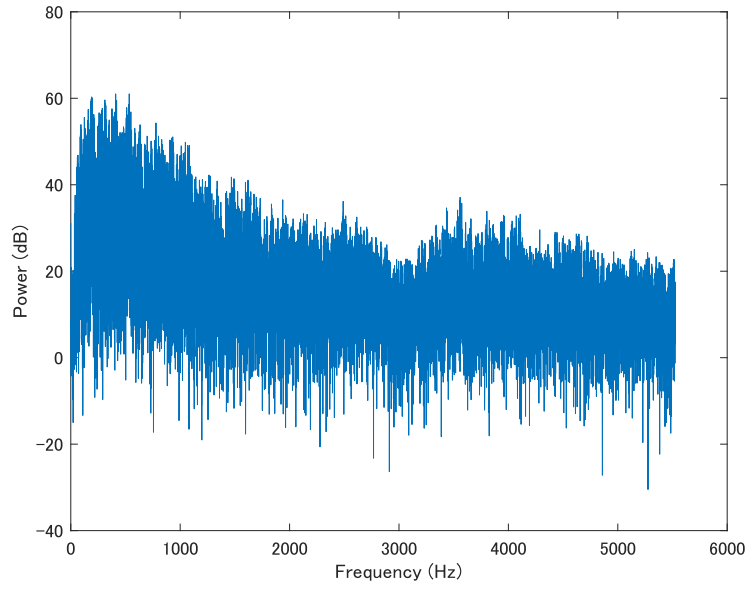


図 6.46: 刺激音 No.21 のスペクトル

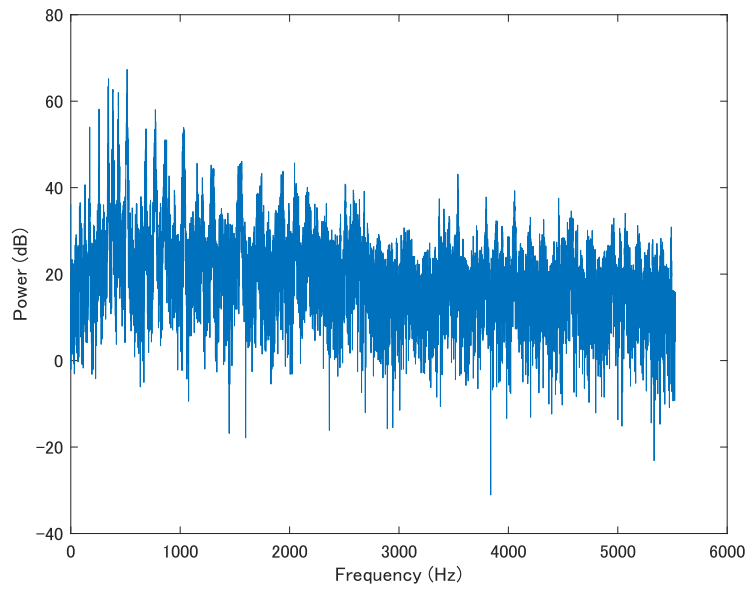


図 6.47: 刺激音 No.22 のスペクトル

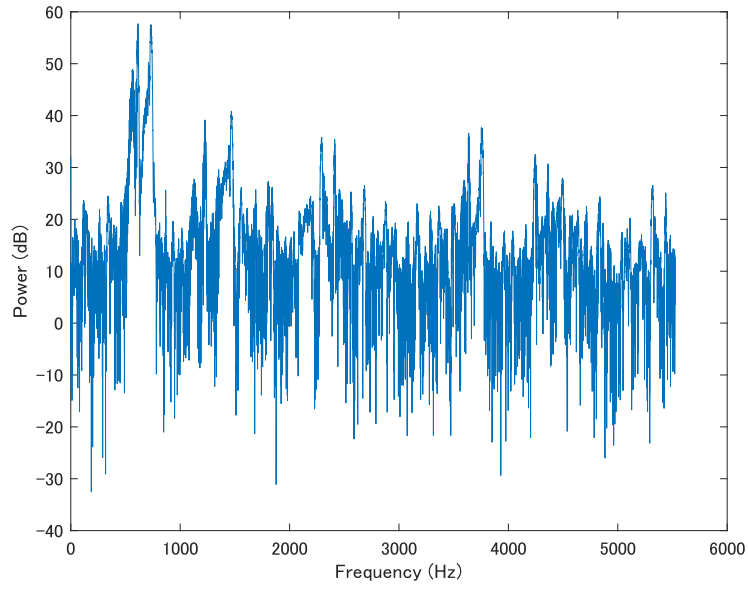


図 6.48: 刺激音 No.23 のスペクトル

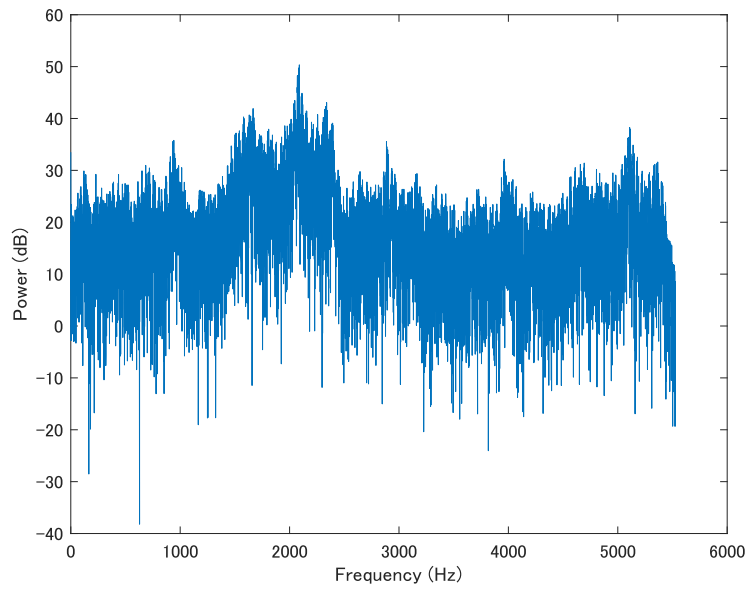


図 6.49: 刺激音 No.24 のスペクトル

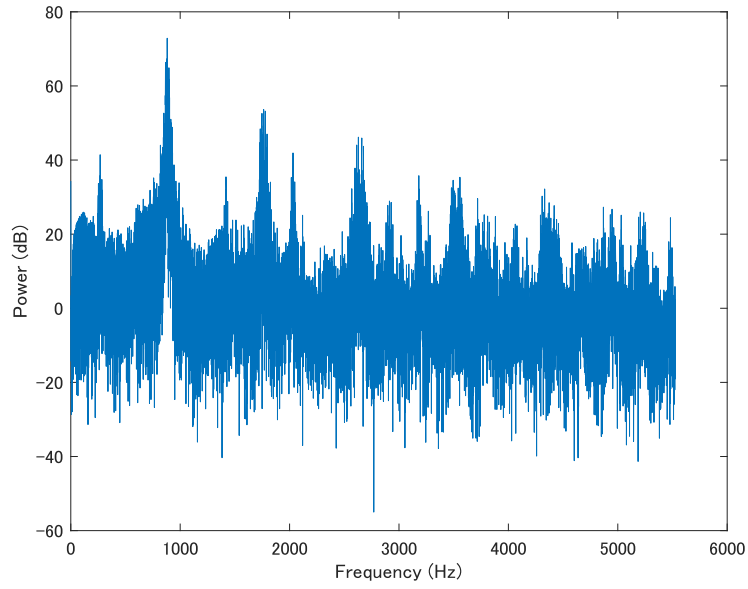


図 6.50: 刺激音 No.25 のスペクトル

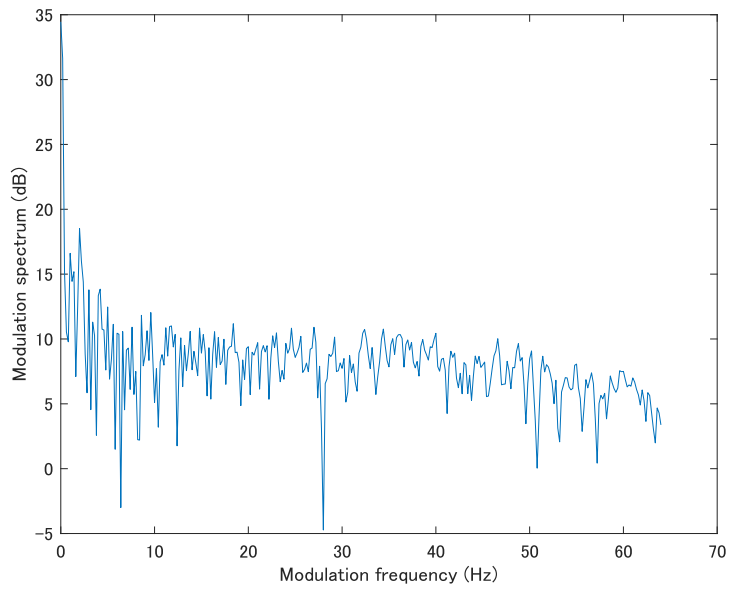


図 6.51: 刺激音 No.01 の変調スペクトル

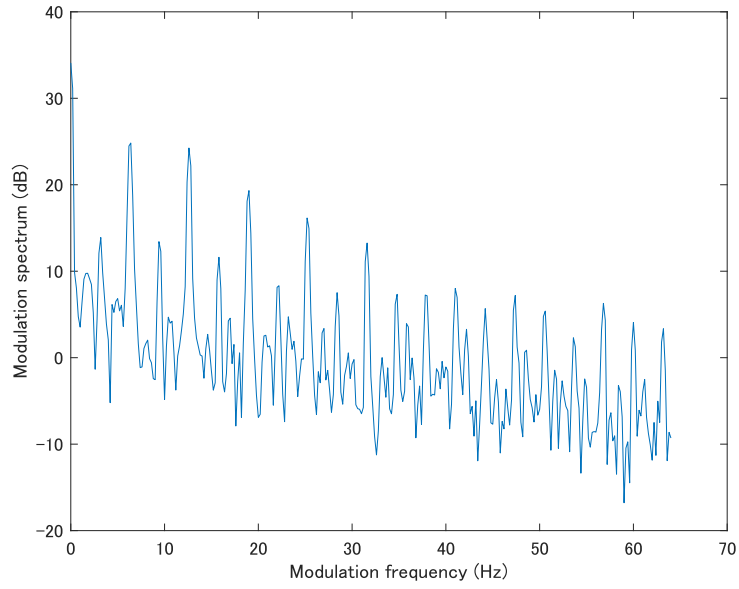


図 6.52: 刺激音 No.02 の変調スペクトル

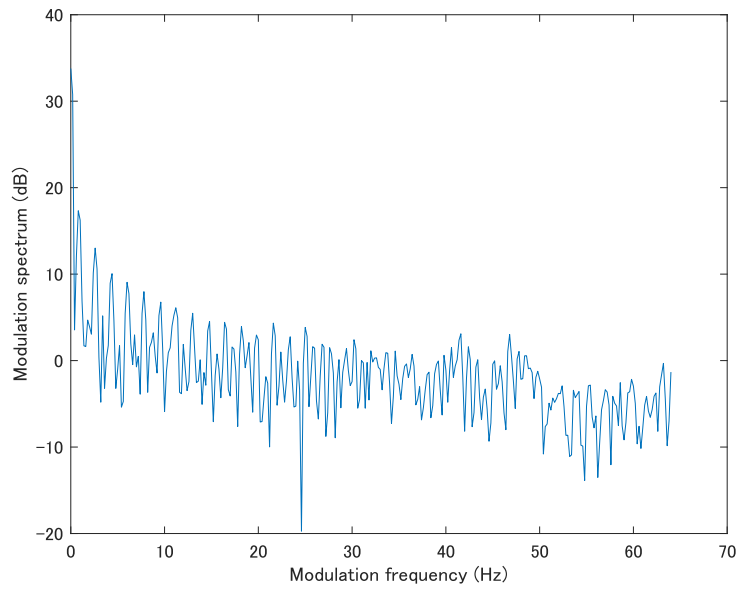


図 6.53: 刺激音 No.03 の変調スペクトル

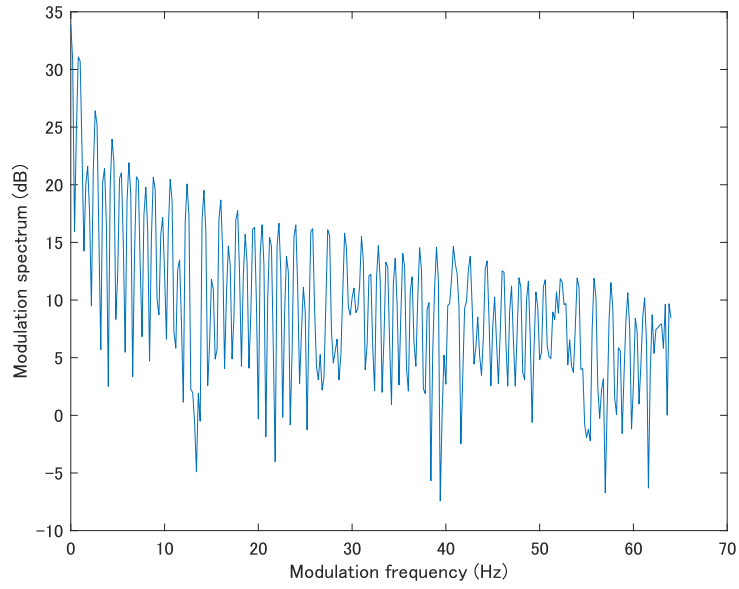


図 6.54: 刺激音 No.04 の変調スペクトル

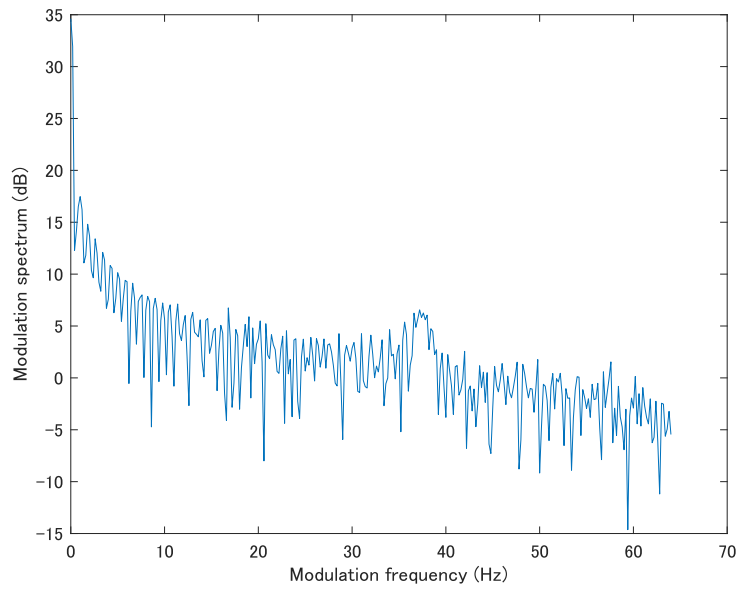


図 6.55: 刺激音 No.05 の変調スペクトル

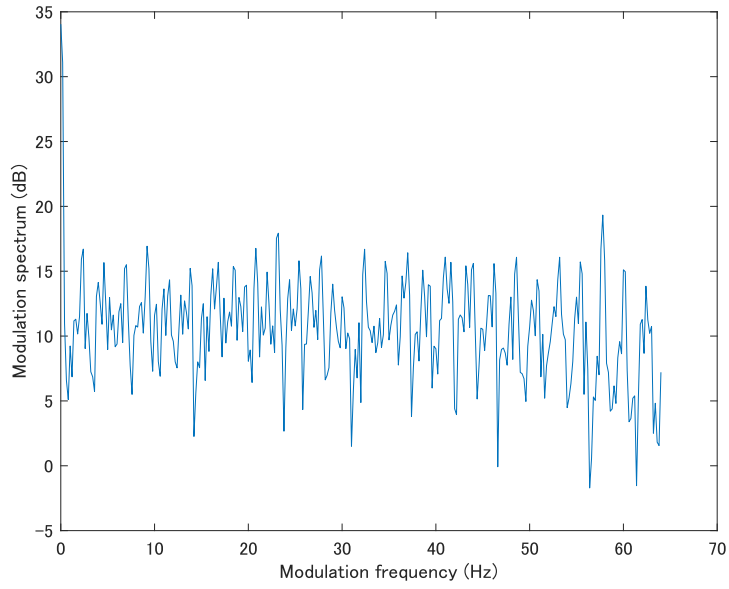


図 6.56: 刺激音 No.06 の変調スペクトル

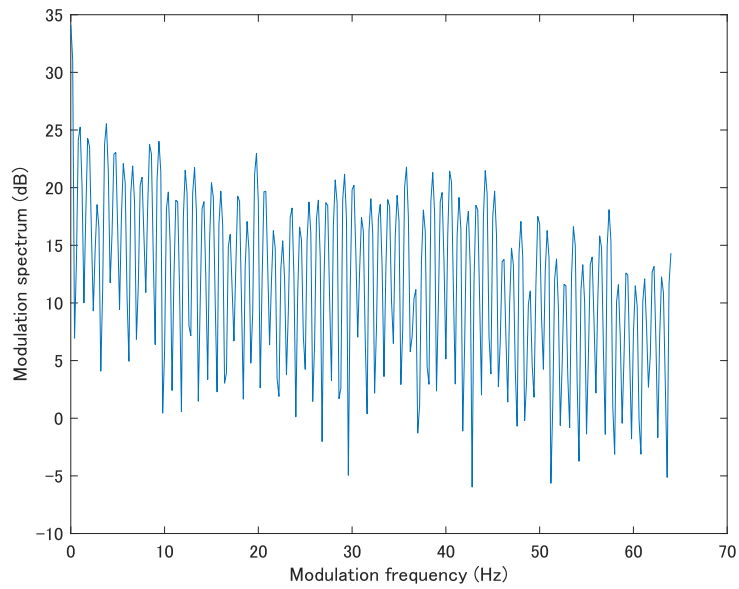


図 6.57: 刺激音 No.07 の変調スペクトル

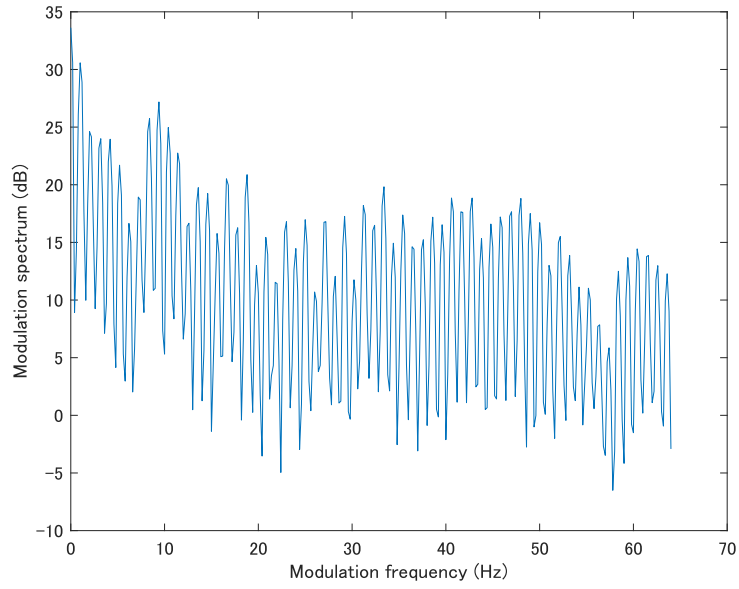


図 6.58: 刺激音 No.08 の変調スペクトル

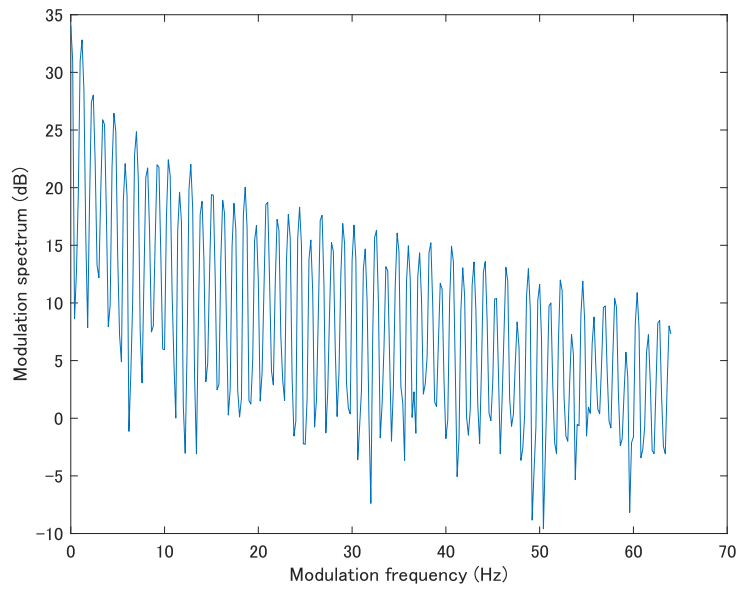


図 6.59: 刺激音 No.09 の変調スペクトル

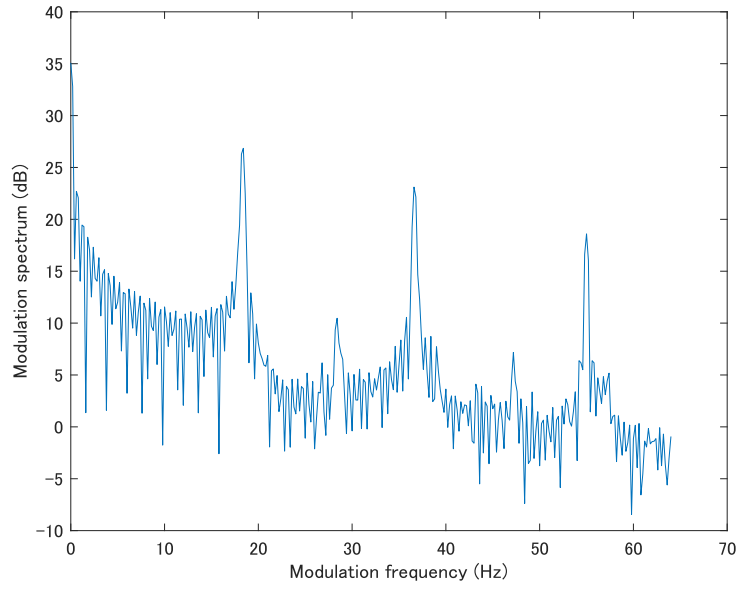


図 6.60: 刺激音 No.10 の変調スペクトル

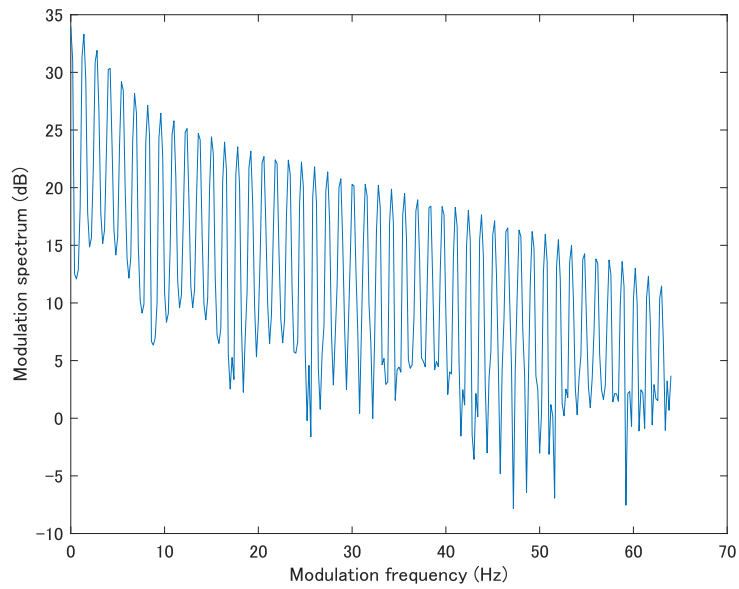


図 6.61: 刺激音 No.11 の変調スペクトル

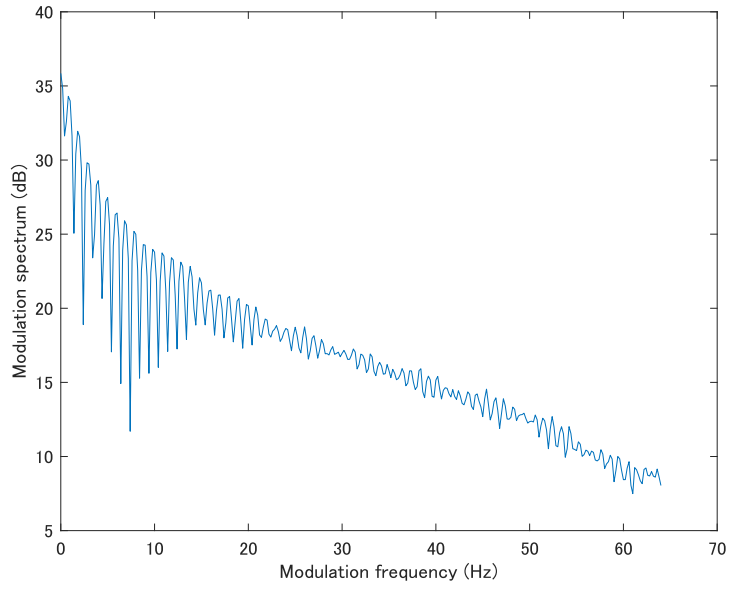


図 6.62: 刺激音 No.12 の変調スペクトル

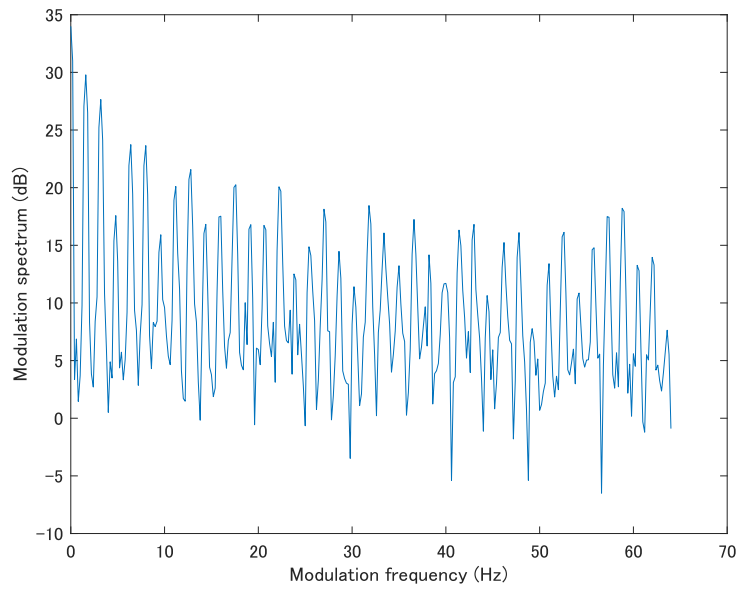


図 6.63: 刺激音 No.13 の変調スペクトル

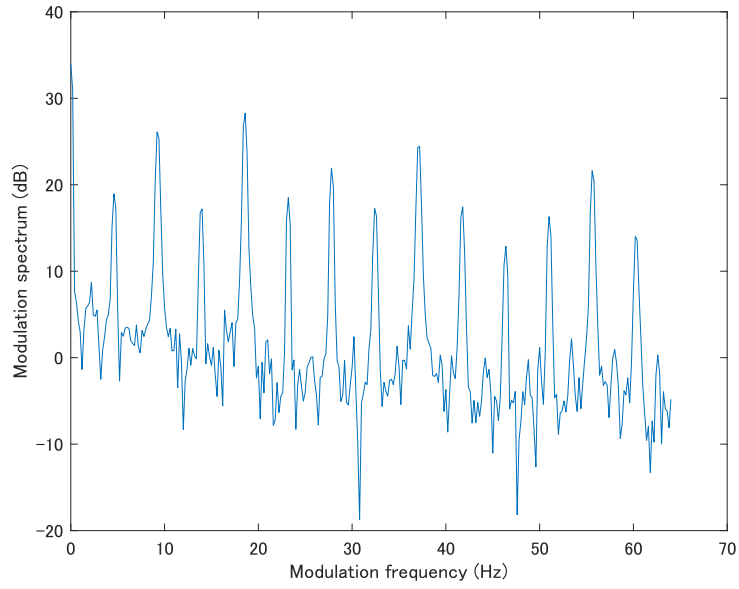


図 6.64: 刺激音 No.14 の変調スペクトル

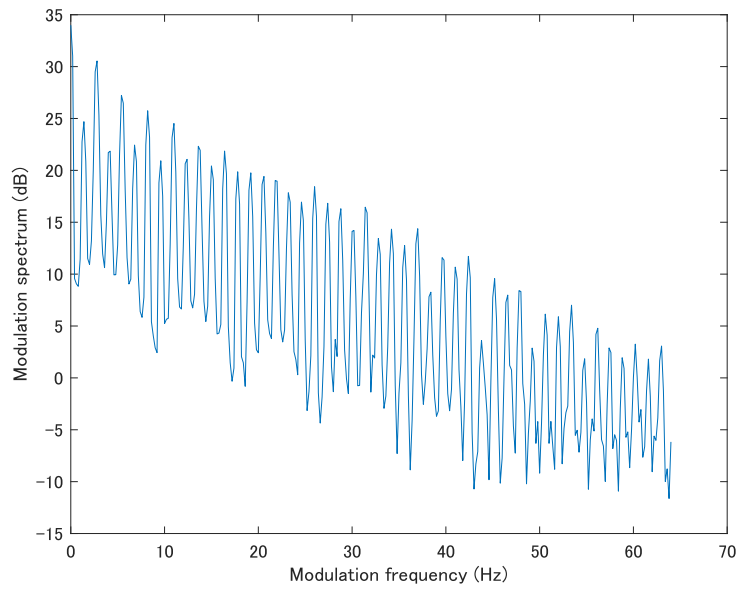


図 6.65: 刺激音 No.15 の変調スペクトル

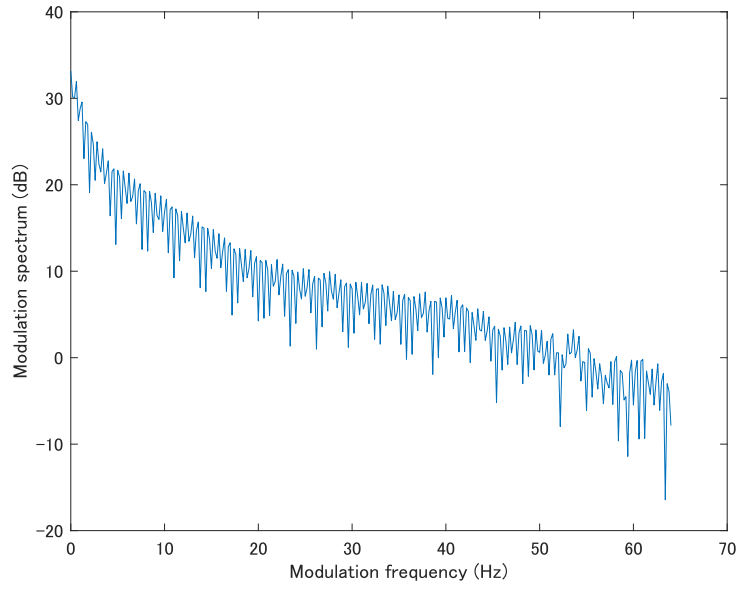


図 6.66: 刺激音 No.16 の変調スペクトル

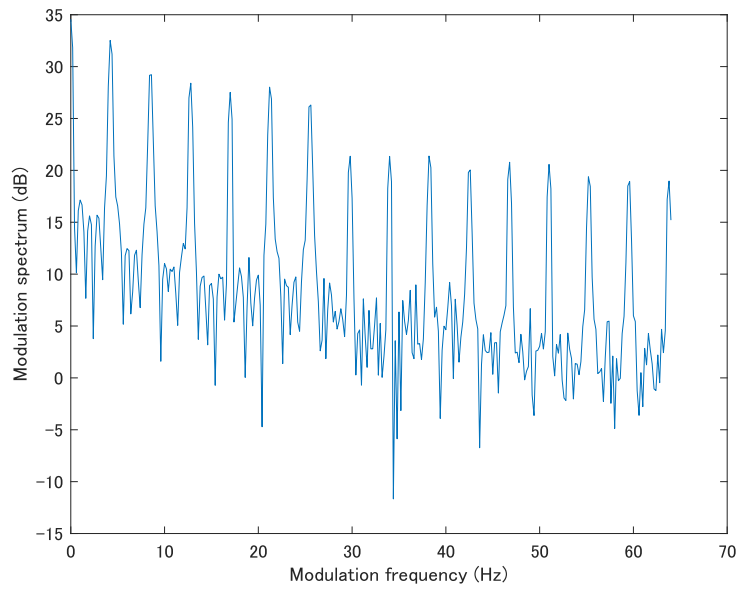


図 6.67: 刺激音 No.17 の変調スペクトル

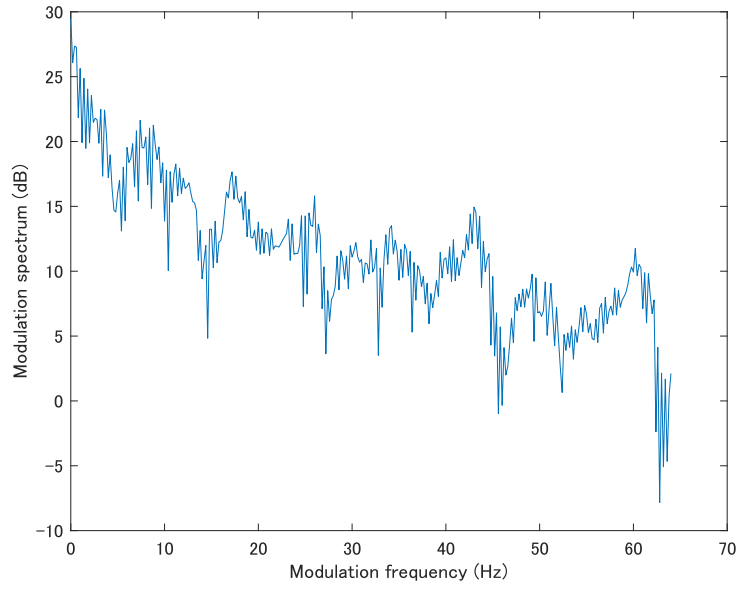


図 6.68: 刺激音 No.18 の変調スペクトル

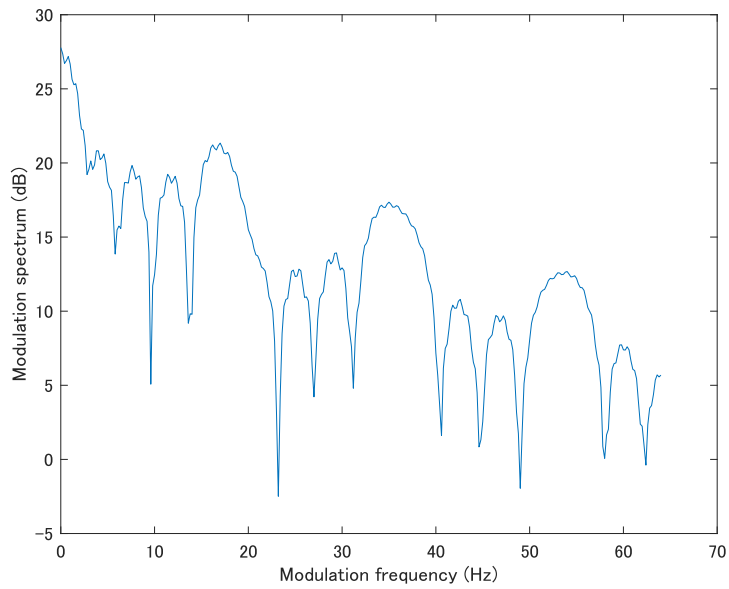


図 6.69: 刺激音 No.19 の変調スペクトル

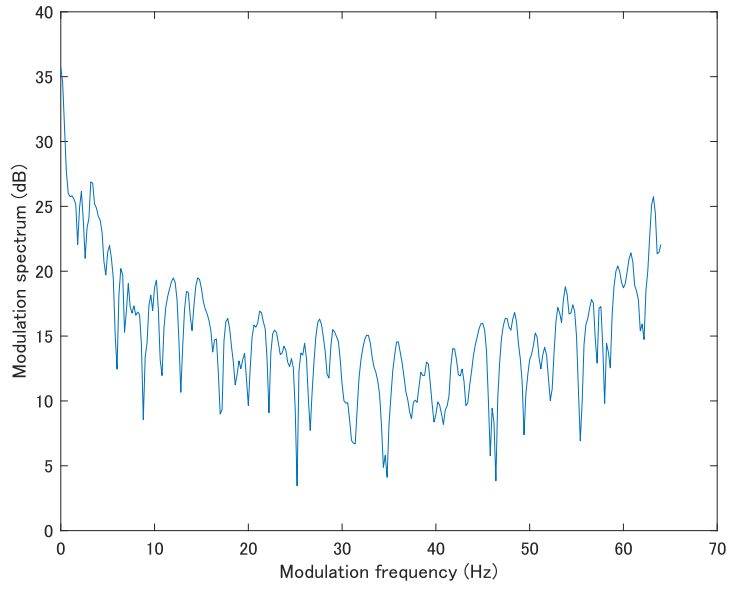


図 6.70: 刺激音 No.20 の変調スペクトル

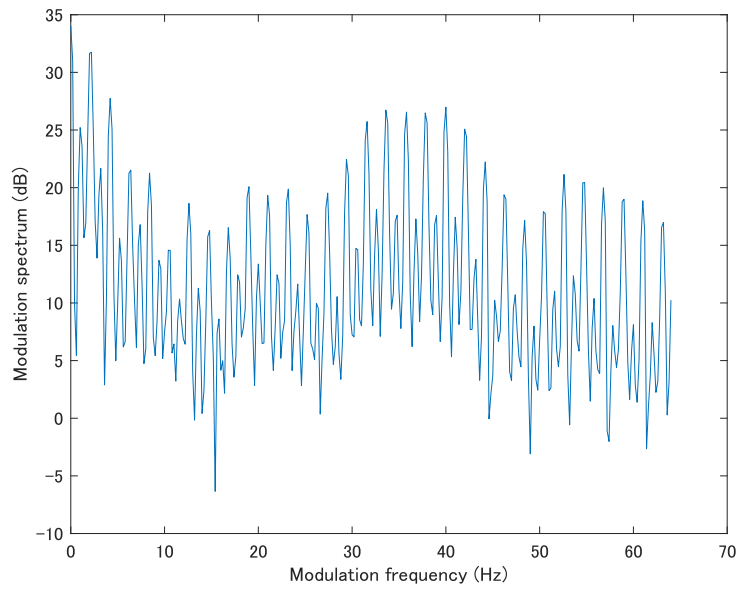


図 6.71: 刺激音 No.21 の変調スペクトル

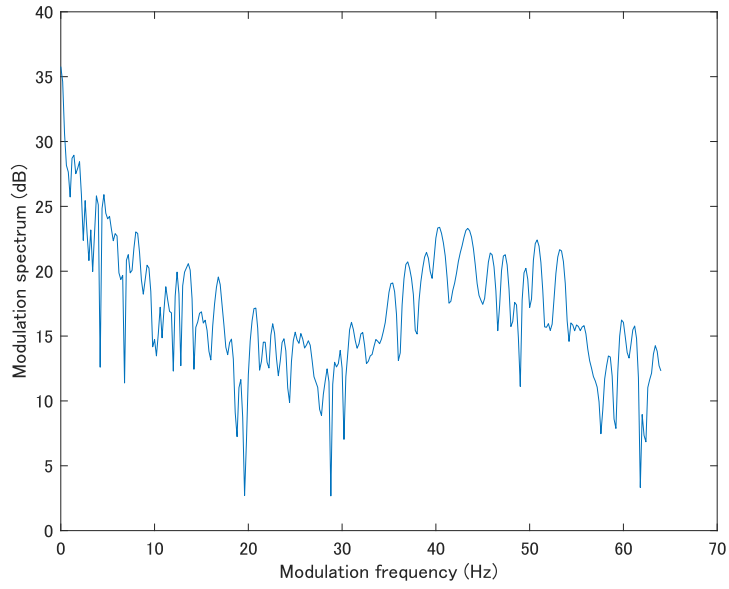


図 6.72: 刺激音 No.22 の変調スペクトル

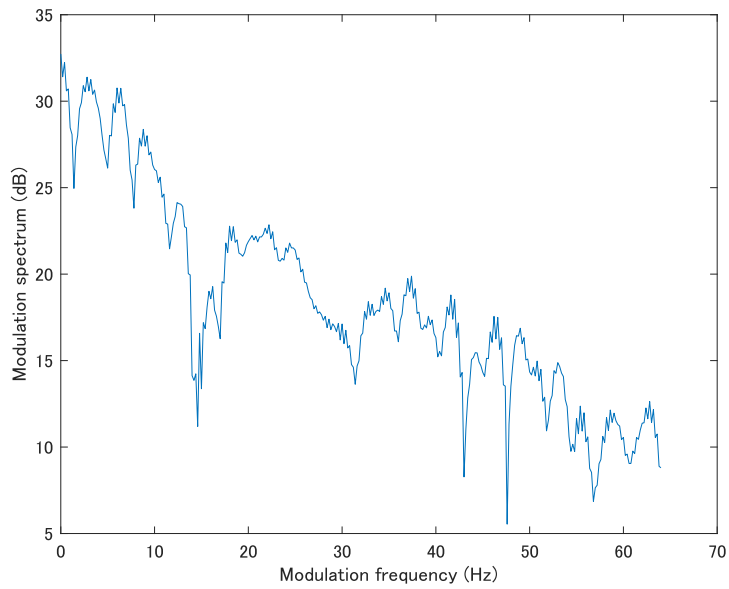


図 6.73: 刺激音 No.23 の変調スペクトル

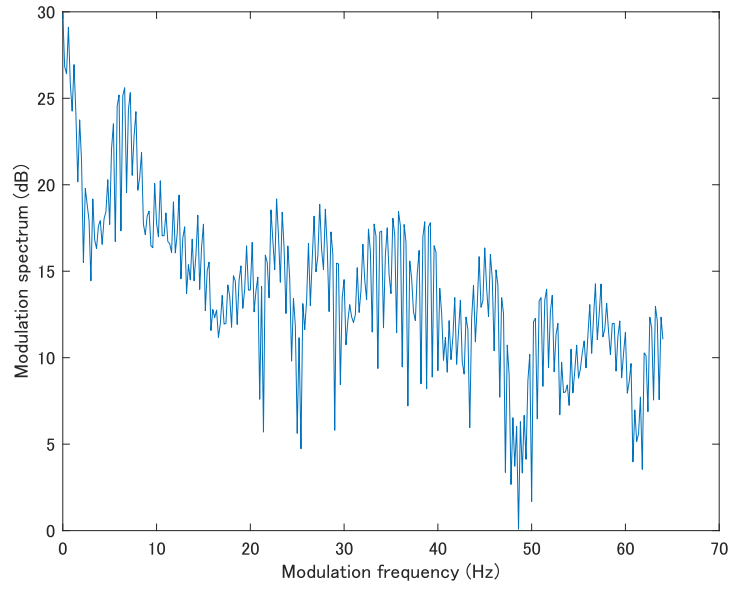


図 6.74: 刺激音 No.24 の変調スペクトル

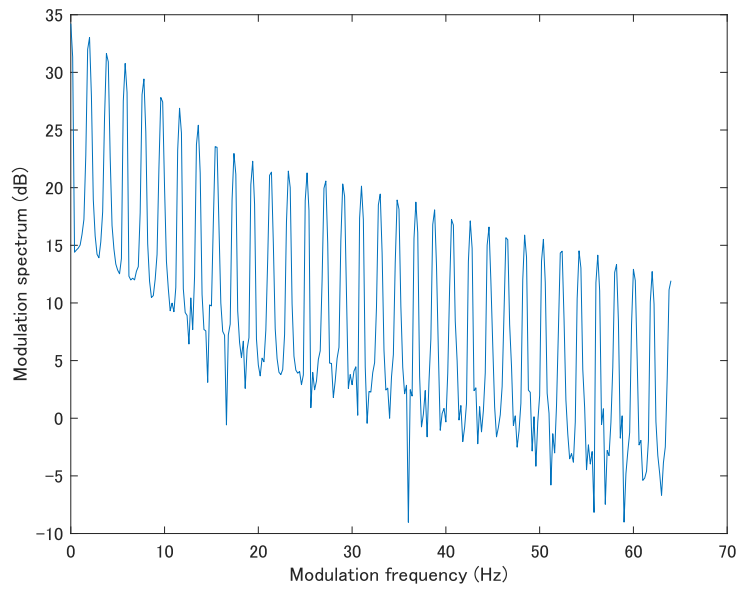


図 6.75: 刺激音 No.25 の変調スペクトル