

博 士 論 文

変動音の評価法とその応用に関する研究

2012年 1月

龍谷大学大学院 理工学研究科

博士後期課程 情報メディア学専攻

T 0 9 D 0 0 3 安 井 希 子

変動音の評価法とその応用に関する研究

論文要旨

本論文は、筆者が龍谷大学大学院理工学研究科情報メディア学専攻在学中に行なった研究のうち、“変動音の評価法とその応用に関する研究”の成果をまとめたものである。

人間は絶えず様々な音を聞いており、特に、振幅変調 (Amplitude Modulation, AM) 音を聴取した際には、音の大きさが変動しているという印象、すなわち変動感や、音がざらざらしているという印象、すなわち粗さ感を知覚すると言われている。それらの感覚は、一定の範囲内の変調周波数においてのみ知覚され、変調周波数以外に変調度や音圧レベルなどがそれらの知覚に影響を及ぼすことが知られている。また、変動感を表わす音質評価指標として Fluctuation Strength (FS)、粗さ感を表わす音質評価指標として Roughness が提案されている。

変動感や粗さ感は人間が主観的に感じるものであるが、その程度は個人間で比較的共通であるため、FS や Roughness を音響信号から直接推定することが可能となり、よって、変動音に対する印象を客観的に評価できる。過去の研究では、正弦波によって振幅変調または周波数変調された純音や広帯域雑音を対象とし、それらの物理的特徴と変動感や粗さ感の関係を明らかにした後に、その結果に基づいて FS や Roughness を推定する方法が提案されている。しかし、それらの方法を別の変動音に対しても適用可能か否かは検討されておらず、かつ、そのような音を対象とした推定方法は提案されていない。また、正弦波とは異なる形状の振幅包絡を持っている、工事や交通などの身近な変動音に対する変動感や粗さ感の評価への適用は検討されていない。もし、そのような変動音に対する変動感や粗さ感を正しく評価できれば、工事や交通などにおける騒音の印象に対する評価や、自動車や家電製品などにおける報知音に対する適切性評価を客観的に行なうことができるなどのメリットがある。

そこでこの研究では、工事や交通などにおける身近な変動音として演奏音と騒音を導入し、それらに対する変動感や粗さ感を正しく評価できる新しい方法を提案している。また、それらの方法がどのような場面に応用可能か否かを検討している。本論文は次の 7 章で構成されている。

第 1 章においては、本研究の目的について述べ、本研究の位置づけを行ない、本研究によっ

て得られた諸成果を概説している．

第 2 章においては，過去の研究において明らかにされていること，および残された課題について述べ，本研究で取り組む課題とその必要性について述べている．工事や交通などの身近にある変動音について概説した後に，変動感や粗さ感の知覚に関する過去の研究について説明している．さらに，FS や Roughness の推定方法に関する過去の研究について述べている．

第 3 章においては，過去の研究では対象とされていなかった変動音として演奏音や騒音を導入し，それらに対する変動感と，その音響信号に含まれる特徴の関係について述べている．その結果に基づいてそれらの音に対する変動感を音響信号から推定する方法を提案し，演奏音や騒音などにおける変動音の新しい評価法を検討している．特に，過去の研究で明らかにされた物理パラメタだけでは，演奏音や騒音における変動音に対する変動感を説明できないことを述べ，それを説明するためには新しい物理パラメタが必要であり，それらを用いることで変動感を適切に表わす物理パラメタを得ることができることを示している．

第 4 章においては，過去の研究では扱われていなかった変動音に対する粗さ感と，音響信号に含まれる特徴の関係について述べている．その結果に基づいてそれらの音に対する粗さ感を音響信号から推定するための物理パラメタを調査し，特に，演奏音や騒音などにおける変動音の新しい評価法を検討している．過去の研究で明らかにされた物理パラメタだけでは，振幅包絡が正弦波とは異なる変動音に対する粗さ感を説明できないことを述べ，それを説明するために新たに必要となる物理パラメタを示唆している．

第 5 章においては，変動感に関する評価法の応用例として，演奏音の熟達度評価への導入について述べている．演奏音として，マンドリン演奏におけるトレモロ音を取り上げ，その音に対する演奏の熟達度評価の結果と，第 3 章で述べた方法を用いて得られた変動感の評価結果の関係を検討している．その結果，上手に聴こえるトレモロ音は，変動感が大きく感じられる領域を避けた plucking rate で演奏されており，上手に聞こえるトレモロ音は，速すぎない plucking rate という要請と，変動感が大きく感じられないという要請が両立した状態であることが示唆されている．よって，変動感の評価法が，熟達度評価に応用できることが示されている．

第 6 章においては，変動感に関する評価法の応用例として，電気自動車の接近に対する気

づきやすさの評価への導入について述べている．過去の研究で提案された音とは異なる，様々な２次変動を含んでいる音の方が気づきやすい音であると仮定し，実際に気づきやすいか否かを検討している．その結果，２次変動を含ませることによって，電気自動車の接近が気づきやすくなることが確認されている．また，変動音に含まれる２次変動を大きくすればするほど，電気自動車の接近が気づきやすくなることも確認されている．よって，変動感の評価法が，電気自動車の接近に対する気づきやすさの評価に応用できることが示されている．

第７章においては，本研究で得られた成果をまとめ，今後に残された課題と本研究に関連する分野における将来の予測を述べている．

A study on method of evaluation and its application for fluctuating sound

Abstract

This thesis develops “A study on method of evaluation and its application for fluctuating sound”, given by the author in Division of Media Informatics, Graduate School of Science and Technology, Ryukoku University.

People have listened to various sound and perceived sensation of hearing. Specifically, the amplitude modulated (AM) sounds elicit the sensation of hearing. Previous studies represented the sensation of hearing fluctuation as fluctuation strength (FS), and another sensation as roughness by conducting psychoacoustical experiments. FS is elicited by AM sounds with a modulation frequency of up to around 20 Hz, and roughness is elicited by AM sounds with a modulation frequency in the region between about 20 to 300 Hz. It was found that the FS from an AM pure tone (AM SIN) and AM broad-band noise (AM BBN) with a modulation frequency within 4–8 Hz is greater than that outside this range, and the strongest sensation for fluctuation is obtained within 4–8 Hz. Also, it was found that the roughness from an AM SIN and AM BBN with a modulation frequency around 70 Hz is greater than that outside the frequency. More specifically, the modulation frequency at which the maximum roughness is reached depends on center frequency. The maximum is shifted towards lower frequency of modulation with decreasing center frequency below 1 kHz. For center frequencies above 1 kHz, the height of the maximum is reduced although the modulation frequency at which this maximum is reached remains unchanged. Although FS and roughness are influenced by the modulation frequency, they increase as modulation depth and sound pressure level increase independently from the frequency. Then, it was showed that FS and roughness increases as modulation depth and sound pressure level increase.

In other studies, FS or roughness was estimated from the physical parameters of fluctuating sounds. The FS or roughness estimated using the parameters extracted from acoustic

signals was found to correspond approximately to the sensation of hearing for FS or roughness, respectively. In the estimation procedure, the parameters that strongly affect the sensation of hearing were extracted on the basis of the experimental results of previous studies. The FS or roughness estimated using that procedure and commercial software for evaluating sound quality were found to represent the sensation of hearing from an AM SIN and AM BBN only. However, those studies have not yet investigated validity of estimating FS or roughness from amplitude fluctuating sound except for those AM sounds using conventional procedure. Moreover, procedures for estimating FS or roughness from those sounds have not yet been proposed. If the procedure is constructed, it will contribute to objective evaluation for actual noise given by constructions and/or traffics or the auditory signals of domestic appliances or vehicle.

In this study, performance sound and actual noise such as fluctuating sound given by constructions and/or traffics are introduced, and procedures for estimating FS or roughness from these sounds are developed. Also, application of the procedures is proposed.

This thesis is consists of the following 7 chapters.

Chapter 1 is an introduction, describing aims and outline of this study.

Chapter 2 describes definition for fluctuating sound in this study, the outline of previous studies and the purpose of this study.

Chapter 3 describes a procedure for estimating FS from tremolo and exhaust sound. This study developed a procedure for estimating FS from tremolo produced by irregular plucking of mandolin, that produced by irregular stroking of marimba and exhaust sound of motorbike. Those tremolo and exhaust sound are characterized by the average frequency on amplitude envelope, as well as the onset and amplitude deviations. The fluctuation elicited by only the average frequency on amplitude envelope is called the “1st fluctuation”, and that elicited by onset and amplitude deviations is called the “2nd fluctuation”. Unlike the tremolo produced with a mandolin, the shape of amplitude envelope on a tremolo produced with a marimba and explosive sound is different among mallets or motorbikes and may affect

FS. Thus, the fluctuation of shape is called the “3rd fluctuation”. This study calculated the feature parameters of a tremolo and exhaust sound based on 1st, 2nd and 3rd fluctuation, and estimated FS from those sounds using the calculated parameters. The results showed that this procedure based on not only the 1st fluctuation but also the 2nd and 3rd fluctuation approximately represents the sensation of hearing fluctuation.

Chapter 4 describes a procedure for estimating roughness from sounds amplitude-modulated with triangular wave. This study investigated possibility of estimating roughness using conventional procedure. A correlation between roughness estimated using conventional procedure and the sensation of hearing roughness for sound amplitude-modulated with triangular wave was investigated. As a result, it was found that estimated roughness is weakly correlated with roughness obtained from subjective experiment ($r = .46$ ($n=18$)). Thus, it can be said that roughness for sounds amplitude-modulated with triangular wave estimated using conventional procedure cannot approximately represent the sensation of hearing roughness. Therefore, it is necessary to investigate the influence of the shape of amplitude envelope on roughness. So, the influence was investigated using sounds amplitude-modulated with triangular wave. Here, the slope for rising and falling and the phase in triangular wave are introduced as characteristic on the shape of amplitude envelope. As a result, it was found that roughness on stimuli with very short rising or falling time is larger than the one with very long rising or falling time. The roughness on stimuli with very short rising time is the largest, whereas that with the one with equal rising and falling time is the smallest. Thus, the results showed that the roughness varies by the shape of amplitude envelope. As another result, it was observed that there are differences among some experimental results for phase. Thus, the results showed that the roughness also varies by the phase of amplitude envelope. Therefore, it was found that the shape and phase of amplitude envelope are needed to estimate correctly the roughness that represents the sensation of hearing from fluctuating sounds.

Chapter 5 describes an application of the proposed method of evaluation for fluctuating

sound to evaluation for performance proficiency. This study investigated a relation between performance proficiency and estimated FS. First, the region of plucking rates used in actual tremolo performance was investigated. Next, onset and amplitude deviation included within actual tremolo performance was investigated. Also, the relationship between performance proficiency and estimated FS was investigated using synthesized sounds by controlling plucking rate, onset and amplitude deviations. As a result, highly rated tremolos had a relatively low FS estimated using conventional procedure described in chapter 3 and were correlated with highly subjective evaluations. Therefore, the results showed that skilled tremolos satisfied both playing restrictions and psychoacoustical criteria.

Chapter 6 describes an application of the proposed method of evaluation for fluctuating sound to evaluation for detection of approaching electric vehicle. This study investigated an influence of fluctuation sound on ease of detection of approaching vehicle as well as synthesizing a sound for warning. A motor sound with characteristics of the fluctuation of the gasoline vehicle was synthesized using procedure described in chapter 3. In this study, synthesized motor sound is called “fluctuating motor sound”. This study investigated loudness of fluctuating motor sound and influences of the fluctuating motor sound on the perception of loudness. As a result, an influence of 1st and 2nd fluctuation on perception of loudness was observed. Also, it was observed that there are slight differences among experimental results based on only onset deviation. On the other hand, it was observed that there are significant differences among experimental results based on only amplitude deviation. In addition, whether or not fluctuating motor sound is easy to notice approaching vehicles was investigated by conducting an evaluation experiment. As a result, it was found that fluctuating motor sound with both 1st and 2nd fluctuations elicited by only amplitude deviation is appropriate to let people notice the approaching vehicles. Therefore, it was found that the proposed method of evaluation for fluctuating sound can be applied to evaluation for detection of approaching electric vehicle.

Chapter 7 describes the conclusions and future works.

目 次

第 1 章 緒論	1
第 2 章 変動音の評価法に関する先行研究	7
2.1 緒言	7
2.2 変動音の概要	7
2.3 変動感の知覚に関する研究	12
2.4 粗さ感の知覚に関する研究	14
2.5 演奏の熟達度評価に関する研究	16
2.6 電気自動車の接近を気づかせる音に関する研究	19
2.7 結言	23
第 3 章 変動音に対する変動感の評価法	25
3.1 緒言	25
3.2 変動感の評価法に対する検討	25
3.3 変動感の知覚に影響をおよぼす特徴	28
3.4 本研究で提案する変動感の評価法	33
3.4.1 2 次変動に関するパラメタ	33
3.4.2 3 次変動に関するパラメタ	35
3.4.3 提案する変動感の評価法	40
3.5 提案法の精度評価	41
3.5.1 マンドリントレモロ音における評価	42
3.5.2 マリンバトレモロ音における評価	49
3.5.3 排気音における評価	52
3.6 精度評価結果に対する考察	58
3.6.1 マンドリントレモロ音における考察	58

3.6.2	マリンバトレモロ音における考察	60
3.6.3	排気音における考察	60
3.7	結言	61
第 4 章	変動音に対する粗さ感の評価法	63
4.1	緒言	63
4.2	粗さ感の評価法に対する検討	63
4.3	従来法の妥当性	64
4.3.1	妥当性に対する検討	64
4.3.2	従来の評価法	65
4.3.3	本研究で用いた評価法	66
4.3.4	変調周波数に基づいた主観評価実験	69
4.3.5	主観評価実験の結果と推定された Roughness の関係	69
4.4	振幅包絡の形状と Roughness の関係	71
4.4.1	振幅包絡の形状に関する主観評価実験	71
4.4.2	振幅包絡の形状に関する主観評価実験の結果	72
4.4.3	振幅包絡の形状と Roughness の関係に対する考察	73
4.5	位相と Roughness の関係	75
4.5.1	振幅包絡の位相に関する主観評価実験	75
4.5.2	振幅包絡の位相に関する主観評価実験の結果	77
4.6	検討結果に対する考察	78
4.7	結言	79
第 5 章	演奏音の熟達度評価に対する変動音評価法の応用	81
5.1	緒言	81
5.2	マンドリントレモロ音に対する熟達度と変動感の関係	82
5.3	マンドリントレモロ音に含まれる特徴	82
5.3.1	奏者が演奏可能な最大 Plucking rate	83
5.3.2	実演奏における時間および振幅逸脱	83
5.4	トレモロ音に対する熟達度評価実験	85
5.4.1	模擬トレモロ音の合成	86

5.4.2	熟達度評価実験の概要	88
5.4.3	熟達度評価実験の結果	89
5.5	トレモロ音に対する変動感評価	90
5.6	実験結果と評価した変動感の関係	91
5.7	結言	92
第 6 章	電気自動車の接近に対する気づきやすさ評価に対する変動音評価法の応用	95
6.1	緒言	95
6.2	気づきやすさの検討	95
6.3	提案する接近音	96
6.3.1	合成の概要	96
6.3.2	ガソリン車の排気音および電気自動車のモーター音の記録	97
6.3.3	ガソリン車の排気音から抽出した各逸脱の特徴強調	99
6.4	気づきやすさを検討するための主観評価実験	101
6.4.1	主観評価実験の概要	101
6.4.2	主観的な音の大きさに関する実験結果	103
6.4.3	接近音の気づきやすさに関する実験結果	105
6.5	調査結果に対する考察	106
6.6	結言	108
第 7 章	結論	109
	謝辞	113
	参考文献	117
	関連発表論文	123

第1章 緒論

人間は、絶えず様々な音を聞いており、それらに対して、大きさや高さまたは、鋭さ、粗さや明るさなどの印象を知覚する。それらの印象の程度、すなわち心理量は、個人の主観によって評価されるため、客観的な数値で表わすことは難しいと考えられるが、その心理量は音の物理量に対応していることが過去に明らかにされている [1]。

本研究では、様々な音のうち変動音のみに着目する。変動音とは、音の大きさや高さが周期的または非周期的に変化する音とみなせる。ただ、実環境にはそのような変動音だけでなく、周期的な変動とわずかに異なる変動、準周期変動 [2] を含む音も存在する。例えば、正弦波や三角波などの周期的な波によって変調された音は、振幅包絡が周期的に変動しているので、周期的に変化している音、電車や航空機における走行音などの鉄道騒音や航空機騒音、自動車の排気音は、周期変動とわずかに異なる準周期変動を含んでいるので、準周期変動を含む音、ホワイトノイズやピンクノイズや交通量の多い道路における騒音は、振幅包絡が非周期的に変動しているので、非周期的に変化している音とみなせる。

音の大きさが時間的に変化している音、例えば、搬送波の振幅を変調波に比例して変化した、振幅変調 (Amplitude Modulation, AM) 音 [2], [3] を聴取した際に、音の大きさが変動している印象の“変動感”や、音がざらざらしている印象の“粗さ感”を知覚すると言われている [4] ~ [6]。それらの感覚は、一定の範囲内における変調周波数において知覚され、それ以外に変調度や音圧レベルなどがそれらの知覚に影響を及ぼしていることが明らかにされている。なお、変調周波数は、変調波の周波数、変調度は、AM において、搬送波をある大きさの信号で変調した時の変調の深さと、変調できる最大の信号で理想的な変調をした時の変

調の深さとの比．すなわち，変調時の包絡線における変調信号振幅と，無変調時の搬送波振幅との比の百分率」[3]を意味している．

また，変動感を表わす音質評価指標として Fluctuation Strength (FS)，粗さ感を表わす音質評価指標として Roughness が提案されている [1], [4]．変動感や粗さ感の知覚については，過去の研究で主観評価実験によって明らかされている．変動感や粗さ感 は人間が主観的に感じるものであるが，その程度は個人間で比較的共通であるため，その研究結果に基づいて，FS や Roughness を客観的な物理量として音響信号から直接推定する研究が過去に報告されている．

FS の推定方法はいくつか提案されており，それらの方法はいずれも，過去の実験結果 [7], [8] に基づいているという共通点を持つ．提案されたそれらの方法や市販のソフトウェアを用いて，振幅変調された純音 (AM SIN) や広帯域雑音 (AM BBN)，電動モーター音，ミシンの動作音などに対する FS を推定した研究も報告されている [7] ~ [13]．AM SIN や AM BBN の場合は，FS を適切に推定できることが確認されているが [9], [13]，電動モーター音やミシンの動作音などの場合は，推定した FS と変動感の関係を確認するなどの検討は見られず，この方法を AM SIN や AM BBN とは異なる変動音に対して適用することの妥当性については検討されていない．

Roughness に対する推定方法はいくつか提案されており，それらの推定方法はそれぞれ異なるものの，いずれも粗さ感に関する実験結果 [14] に基づいているという共通点を持つ．さらに，それらのうちのある方法を用いて Roughness を推定する音質評価システムも市販されており，そのソフトウェアに基づいて推定された AM 音の Roughness が正しい値であることも確認されている [14] ~ [17]．ただし，その確認では正弦波を振幅包絡として持つ AM 音のみを用いており，工事騒音やオートバイ排気音などの現実の騒音は対象としていない．一般に，これらの騒音における振幅包絡は様々な形状を持つが，従来の方法がそのような音の Roughness を正しく評価できるのかについては明らかではない．

変動感や粗さ感 は，音の大きさが周期的または準周期的に変動している身近な音，例えば音

楽演奏におけるトレモロ音や、アイドリング時におけるオートバイの排気音、電気自動車のモーター音などを聴取した際に知覚される。それらの音は、変動感や粗さ感だけでなく、他の印象、例えば、演奏の上手さや車の接近に対する気づきやすさの知覚に影響を及ぼすと考えられるため、そのような音に対する変動感や粗さ感を正しく評価する、すなわち FS や Roughness を適切に推定できれば、演奏音評価や騒音評価に応用できることが期待される。

そこで本研究では、工事や交通などにおける身近な変動音として演奏音と騒音を導入し、それらに対する変動感や粗さ感を正しく評価する方法を検討する。また、それらの方法がどのような場面に応用可能かを検討する。そのような変動音に対する評価法を検討することにより、それらに対する印象を客観的に正しく評価できるようになり、演奏音や騒音に対する評価における様々な問題の解決に貢献することが期待される。

本論文の構成は以下のとおりである。

2章においては、過去の研究において明らかにされている、変動感や粗さ感の知覚について述べている。また、それらの印象の評価法に関する過去の研究について述べ、その研究において残された課題と本研究で取り組む課題とその必要性について述べている。

3章においては、工事や交通などにおける身近な変動音として、マンドリンおよびマリンバ演奏におけるトレモロ音、アイドリング時におけるオートバイの排気音を導入し、それらの音に対する変動感を評価する方法を検討している。過去の研究で対象とされてきた AM 音の特徴とそれらの音の特徴を比較し、トレモロ音や排気音に含まれている新たな特徴を明らかにしている。また、それらの特徴が変動感の知覚に影響を及ぼすことを確認し、それらの特徴に関するパラメタを新たに用いることで、トレモロ音や排気音の変動感を正しく評価する方法を検討している。

4章においては、過去の研究では対象とされていなかった変動音として、三角波によって振幅変調された音を導入し、それに対する粗さ感を評価する方法を検討している。過去に提案された方法では、三角波によって振幅変調された音の粗さ感を正しく評価できないことを確

認し、評価において新たに導入すべき物理パラメタを検討している。

5章においては、変動感に関する評価法の応用例として、演奏音の熟達度評価への導入について述べている。3章で用いていたマンドリン演奏におけるトレモロ音を対象とし、主観評価実験によって得られた熟達度評価値と、第3章で述べた方法を用いて音響信号から推定した変動感の評価結果の関係を検討している。

6章においては、変動感に関する評価法の応用例として、電気自動車の接近に対する気づきやすさの評価への導入について述べている。過去の研究で提案された音とは異なる、様々な2次変動を含んでいる音の方が気づきやすい音であると仮定し、実際に気づきやすいか否かを検討している。

最後に、7章では、本研究で得られた成果をまとめ、今後に残された課題と本研究に関連する分野における将来の予測について述べている。

本論文の内容の相互関係を示したものを Fig.1.1 に示す。[] 内の数字は関連発表論文の論文番号を表わす。Fig. 1.1 で示したように、本論文では変動音の評価法では変動感と粗さ感を対象としており、各印象に対する評価法の検討を行なっている。また、変動感に対する評価法の応用として、演奏音における熟達度評価への応用と電気自動車の接近に対する気づきやすさ評価への応用可能性を検討している。

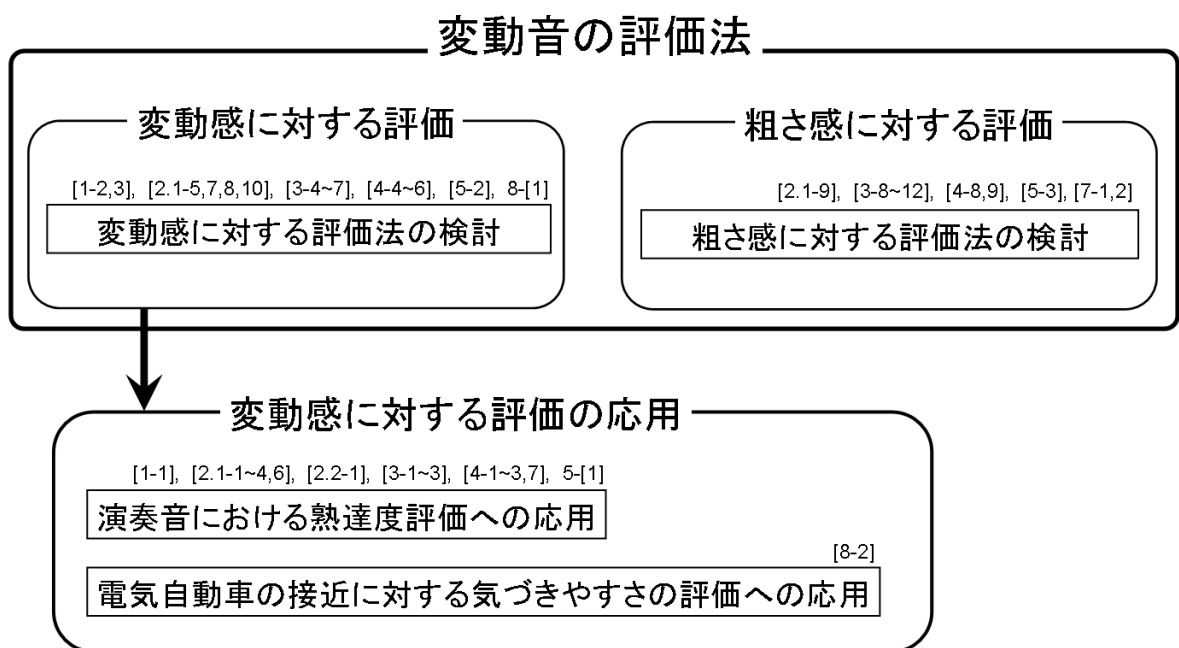


Figure 1.1 Overview in this study.

第2章 変動音の評価法に関する先行研究

2.1 緒言

本章では、過去の研究において明らかにされている、変動感や粗さ感の知覚について述べる。また、それらの印象の評価法に関する過去の研究について述べ、その研究において残された課題と本研究で取り組む課題とその必要性について述べる。

2.2 変動音の概要

人間は、絶えず様々な音を聞いており、大きさや高さ、鋭さ、粗さ、明るさなどの印象を知覚し、それらに対する印象を評価する。本研究では、様々な音のうち変動音のみに着目する。変動音は、音の大きさや高さが時間軸上において周期的または非周期的に変化する音とみなせる。音の高さの変化を表わす時間関数は、音の大きさの変化を表わす時間関数と比較すると、横軸を時間とした場合に縦軸が高さまたは大きさの違いであることから、それらは時間関数としては同じとみなすことができるため、本研究では、音の大きさが変化する音のみを対象とし、高さが変化する音は対象としない。また、本研究でいう変動音とは大きさが変動する音に限定する。なお、実環境には周期的または非周期的に変化する変動音だけでなく、周期的な変動とわずかに異なる変動、準周期変動 [2] を含む音も存在する。

上記で述べた変動音の性質は、波形の特徴、すなわち、物理領域から考えられたものである。ただし、その音の大きさが周期的または非周期的に変化していたとしても、人間が聴取すると、音の大きさが変化しないと感じられる場合は、変動音というよりも定常音と知覚されることもあるため、心理領域から考えると、変動音の性質は上記で述べたものでは説明で

きない場合もあると考えられる．例えば，300 Hz の変調周波数で振幅変調された 1 kHz の純音を聴取すると，知覚としては変動音ではなく，一つのピッチを持った定常的な音と知覚される [18]．ただし，その AM 音の波形を局所的に見ると，例えば 10 ms の時間窓で見た場合，振幅包絡は 3 回変動しており，変動音とみなすことができる．一方，大域的に見た場合，例えば 10 分の時間窓で見た場合，変調周波数が高く，変動の速さが速いため，振幅包絡が変動しているというよりは定常的であり，定常的な音とみなすことができる．よって，物理または心理の領域からみた場合と，波形を局所的または大域的にみた場合で，変動音か否かの判断が食い違う場合があると考えられる．

そこで，定常的な音や変動する音の定義を述べる．騒音・振動の研究分野では，定常的な音の一つとして“定常騒音”は“レベル変化が小さく，ほぼ一定とみなされる騒音”[2]，別の変動する音の一つとして“変動騒音”は“レベルが不規則かつ連続的にかなりの範囲にわたって変化する騒音”[2]と定義されている．ただし，この定義では，“定常的”と“変動する”という意味があいまいであり，物理または心理の領域から判断する基準や，波形を局所的または大域的にみて判断する基準に関する明確な議論はこれまでに示されていなかった．しかし，AM 音に対する心理的な知覚印象は変調周波数によって変化し，また，物理的な音響波形を局所的に見た場合と大域的に見た場合で振幅包絡の定常 / 変動性が異なるという理由から，物理または心理の領域からみて判断する際の基準と，波形を局所的または大域的にみて判断する際の基準の両方が存在している可能性が考えられる．

心理領域に基づいた変動音の判断は，客観的なものではなく，主観的なもののみに基づいているため，心理領域に基づいて客観的に変動音の性質を明確にすることは困難である（例えば，変調周波数が 70 Hz の AM 音を「変動している」というか「変動していない」というかの判断は，人や状況に依存するといったように）．そこでここでは，物理領域において波形を局所的または大域的にみることで，客観的に変動音の性質を明確化する．波形を局所的または大域的にみて，波形の振幅包絡が変動しているとみなせるか否かを判断することによって，

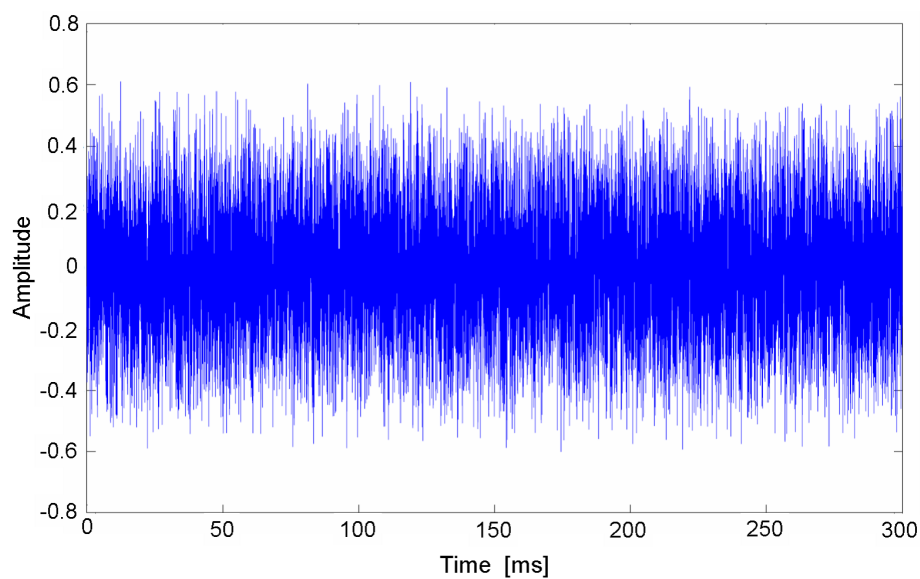
音の性質を分類した．その結果を Table 2.1 に示す．Table 2.1 は，局所的または大域的に波形を見た場合の振幅包絡における変動の有無と，局所的または大域的に見る際の波形における時間長の例，そのような特徴をもつ音の例を示しており，Table 2.1 内の“変動なし”とは，振幅包絡が変動しておらず，定常的であることを意味している．

Table 2.1 に示した例のうち，ホワイトノイズと発話音声について述べる．ホワイトノイズを局所的にみた場合の波形と大域的に見た場合の波形を Fig. 2.1，発話音声の場合の波形を Fig. 2.2 に示す．Fig. 2.1(a) は，発音開始時刻から 300 ms までの波形，(b) は，発音開始時刻から 3 分までの波形を表わしており，Fig. 2.2(a) は，発音開始後 100 ms から 400 ms までの波形，(b) は，発音開始時刻から 1.5 秒までの波形を表わしている．Fig. 2.1(a) と (b) を比較すると，Fig. 2.1(a) に示した局所的にみた波形における振幅包絡は変動しているとみなせるが，Fig. 2.1(b) に示した大域的にみた波形における振幅包絡は変動しているというよりは，定常的であるとみなせると考えられる．一方，Fig. 2.2(a) と (b) を比較すると，Fig. 2.2(b) に示した大域的にみた波形における振幅包絡は変動しているとみなせるが，Fig. 2.2(a) に示した局所的にみた波形における振幅包絡は変動しているというよりは，定常的であるとみなせると考えられる．

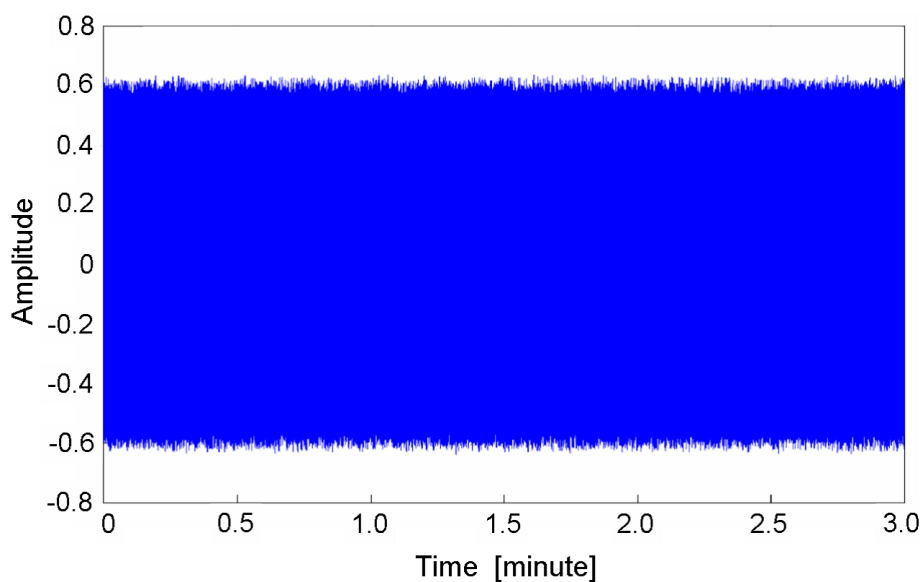
よって，Table 2.1 に示したように，局所的または大域的のどちらか一方でみた場合に，振幅包絡に変動が含まれているということは，物理領域からみて，音の大きさが変化する音とみなすことができる（ここでは，心理的な大きさは度外視する）．また，局所的だけでなく大域的にみた場合でも振幅包絡に変動が含まれていないということは，物理領域からみて，音の大きさが変化する音とみなすことができず，変動音というよりは定常的な音とみなすことができることを意味している．

以上のことから，本研究では，物理領域において波形を局所的または大域的のどちらか一方でみた場合に振幅包絡が変動してさえいれば，その音を変動音とみなす．

次に，その変動の周期性に着目すると，変動音は主に 3 つに分類される．調波複合音や正



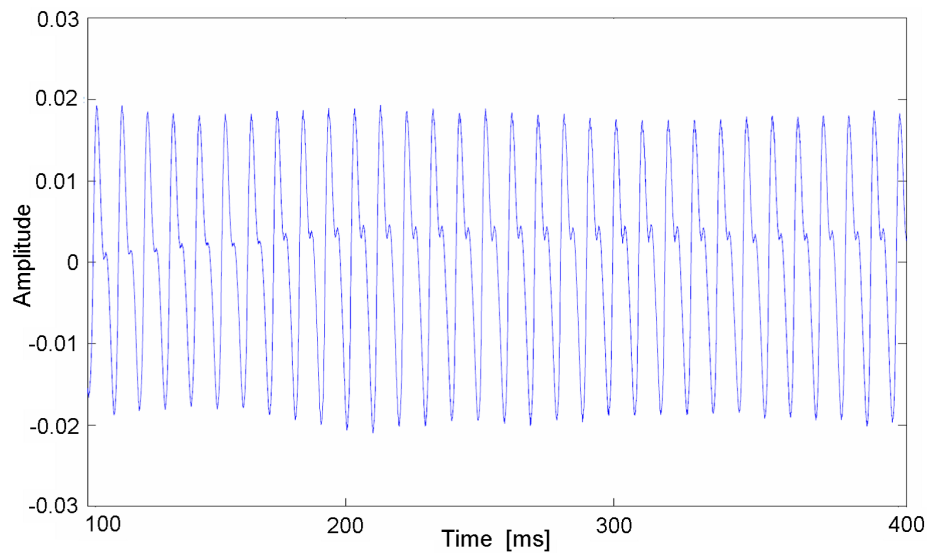
(a) Local wave



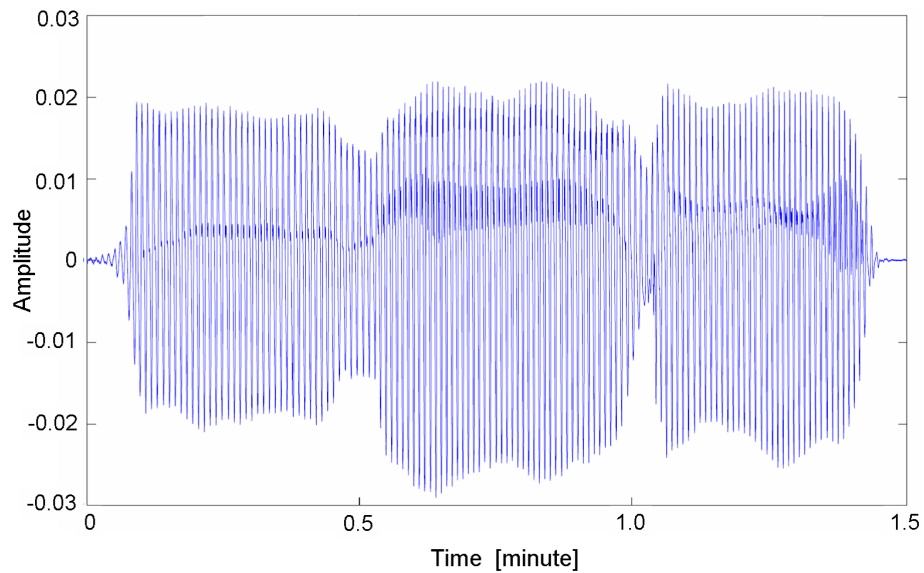
(b) Global wave

Figure 2.1 A white noise.

弦波や三角波などの周期的な波によって変調された音は，振幅包絡が周期的に変動しているので，周期的変動音とみなす．また，電車や航空機における走行音などの鉄道騒音や航空機騒音，自動車の排気音，コンクリートブレーカの発生音などは，周期的変動音とわずかに異なる変動を含んでいるので，準周期的変動音とみなす．さらに，ホワイトノイズやピンクノイズなどの雑音や交通量の多い道路における騒音などは，振幅包絡が非周期的に変動しているの



(a) Local wave



(b) Global wave

Figure 2.2 A speech sound.

で、非周期変動音とみなす．そのような分類はこれまでになく、これまでの変動に関する研究を概観すると、Table 2.2 のようになる．なお、Table 2.2 内の“ピッチ”とは主観的な音の高さを表わしており、周波数や基本周波数を意味していない．

過去の研究 [1], [4] ~ [8], [14] より、周期的変動音を聴取した際には変動感や粗さ感が知覚されると言われているため、音の大きさが周期的または準周期的に変動している身近な変動音、

Table 2.1 Fluctuating sound classified based on characteristic of acoustic signal.

局所的にみた場合 (時間長の例)	大域的にみた場合 (時間長の例)	例
変動あり (0.3 s)	変動あり (1 s)	振幅変調されたホワイトノイズ
変動あり (0.3 s)	変動なし (180 s)	ホワイトノイズ, 調波複合音
変動なし (0.3 s)	変動あり (1.5 s)	発話音声, 楽器音
変動なし (0.3 s)	変動なし (1 s)	純音

Table 2.2 Outline of fluctuating sound on past studies.

	変動の時間間隔および 変動の大きさにおける物理特徴	心理的な効果	例	関連研究
周期的変動音	一定	変動感, 粗さ感, ピッチ	調波複合音, AM 音	[1], [4] ~ [7], [9] ~ [12] [15] ~ [19]
準周期的変動音	一定 / ランダム	変動感, 粗さ感, ピッチ	音声, 楽器音, 自動車の排気音	(なし)
非周期的変動音	ランダム	(ピッチ)	ホワイトノイズ, ピンクノイズ	(なし)

例えば, 音楽演奏におけるトレモロ音や, アイドリング時におけるオートバイの排気音, 電気自動車のモーター音などを聴取した際にも, 変動感や粗さ感は知覚されと考えられる. それらの音は変動感や粗さ感だけでなく, 他の印象, 例えば, 演奏の上手さを表わす熟達度や, 車の接近に対する気づきやすさの知覚に影響を及ぼすと考えられるため, そのような音に対する変動感や粗さ感を正しく評価できれば, 演奏音評価や騒音評価に応用できることが期待される.

2.3 変動感の知覚に関する研究

変動感とは, 振幅変調 (AM) 音を人間が聴取した際に知覚されると言われており, その変動感を表わす音質評価指標として FS が提案されている [1], [4], [7], [8]. FS は, 約 20 Hz 以下の変調周波数で生じる変動感, つまり, 遅い速度の変動音に対する変動感を対象としている.

先行研究より, AM SIN や広帯域雑音 AM BBN において変調周波数が約 4 - 8 Hz の時に FS は最大となり, それよりも変調周波数が低く, または高くなるにつれて徐々に小さくなる

ことが先行研究で示されている．さらに，変調度や音圧レベルが大きくなると，FS もそれらに比例して大きくなることも示されている [1], [4], [7], [8]．すなわち，AM 音における FS を表すパラメタとして，“変調周波数”，“変調度” および “音圧レベル” が示されている．また，変調周波数が 4 Hz，変調度が 100 % で振幅変調された 60 dB，搬送周波数が 1 kHz の純音に対する変動感を 1 vacil と定義している．

このように変動感とパラメタの関係を明らかにする研究だけでなく，音響信号から FS を推定する方法を提案している研究がいくつか報告されており [8] ~ [12]，それらの方法はいずれも，Fastl *et al.* の変動感に関する調査結果 [7], [8] に基づいているという共通点を持っている．それらのうちのある方法を用いて FS を推定する音質評価システムが市販されており，提案されたそれらの方法やそのソフトウェアを用いて，AM SIN や AM BBN，電動モーター音，ミシンの動作音などに対する FS を推定した研究も報告されている [9] ~ [13]．

AM SIN や AM BBN の場合は，変動感を適切に表わす FS を推定できることが確認されているが [9], [13]，電動モーター音やミシンの動作音などの場合は，推定した FS と変動感の関係を確認するなどの検討は見られず，この方法を AM SIN や AM BBN とは異なる変動音に対して適用することの妥当性については検討されていない．すなわち，トレモロ音やオートバイ排気音に対する変動感を適切に表す FS を，既存の方法で推定できるか否かについては，これまで報告されていない．すなわち，過去の研究 [8] ~ [12] では周期変動音のみに対する FS 推定方法の妥当性は確認されているが，準周期変動音や非周期変動音に対する FS 推定方法は，周期的な変動を重畳性を仮定して提案されているものの，その方法の妥当性は確認されていない．

ただし，FS と他の現象を関連づけた研究がいくつか報告されている．例えば，Fastl [7] は，純音に対する広帯域雑音の時間マスキングパターンと FS の関係を調査しており，Rauber *et al.* [20] は，楽曲の音響信号に含まれる周波数帯域の FS によって，楽曲間のリズムパターンの特徴を抽出している．また，Kurakata *et al.* [21] は，ピアノ演奏における音の強さの変動が FS

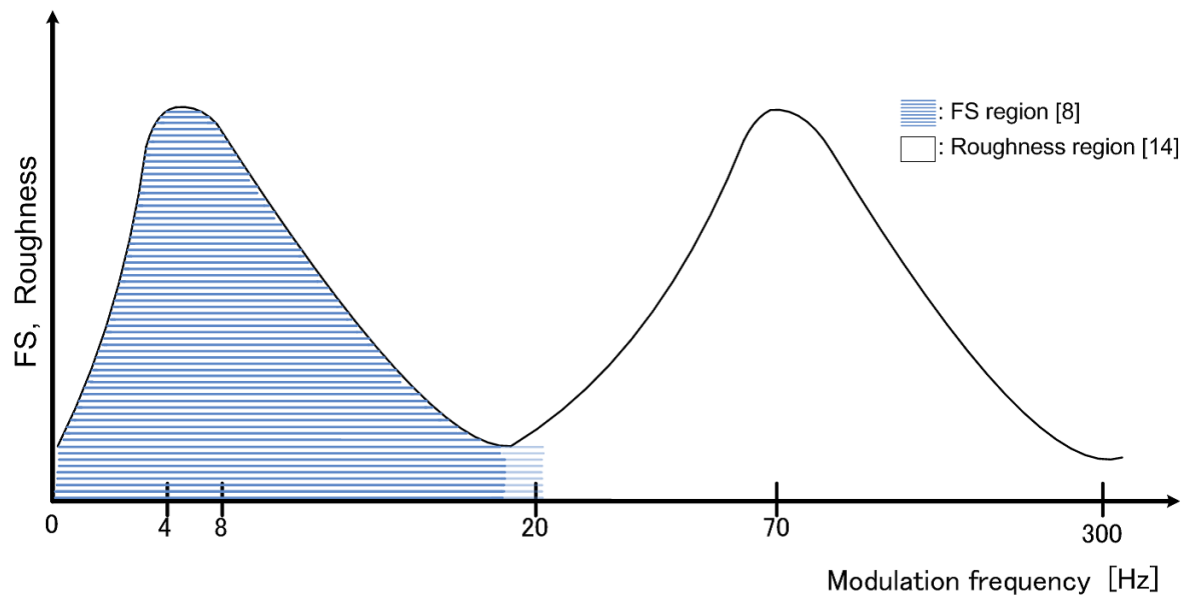


Figure 2.3 A relation between modulation frequency and FS/Roughness.

と関係すると述べている。

2.4 粗さ感の知覚に関する研究

粗さ感とは、変動感の場合と同様に、AM 音を人間が聴取した際に知覚されるとされており、その粗さ感を表わす音質評価指標として Roughness が提案されている [1], [4] ~ [6], [14]。Roughness は、FS とは異なり、約 20 Hz 以上の変調周波数で生じる粗さ感、つまり、速い速度の変動音に対する粗さ感を対象としている。変調周波数と変動感および粗さ感の関係を Fig. 2.3 に示す。

先行研究より、AM 音の変調周波数が約 70 Hz の時に Roughness は最大、すなわち、主観的な粗さ感が最も高くなり、それよりも変調周波数が低く、または高くなるにつれて、知覚される Roughness は徐々に小さくなることがこれまで確認されている。ただし、変調周波数が約 70 Hz の時に最大となるのは搬送波の周波数が 1 kHz 以上の場合であり、それより低い場合は、Roughness が最大となる変調周波数が 70 Hz よりも低くなることも確認されている。さらに、変調周波数以外に Roughness 知覚に影響を及ぼすパラメタとして、変調度や音圧レ

ベルなどがあり，変調度の 2 乗に Roughness が比例することや，音圧レベルが上昇するにつれて Roughness が大きくなることなども確認されている [1], [4] ~ [6], [14]．すなわち，AM 音における Roughness を表すパラメタとして，FS と同様に，“変調周波数”，“変調度” および “音圧レベル” が示されている．

それらのパラメタは，いずれも AM 音における振幅包絡の波形に表れる特徴であると言える．変調周波数は振幅包絡の周波数，変調度および音圧レベルは振幅包絡の振幅スペクトルにおけるその周波数のパワーとして表される．すなわち，それら 3 つのパラメタは，全て振幅包絡の波形における振幅スペクトルで表されるため，それら 3 つのパラメタは振幅スペクトルのみに基づいていると言える．

Roughness を表わすパラメタの検討結果に基づいて，音響信号から Roughness を推定する方法も提案されている [14] ~ [17]．さらに，それらのうちのある方法を用いて Roughness を推定する音質評価システムも市販されており，そのソフトウェアに基づいて推定された AM 音の Roughness が正しい値であることも確認されている [13]．ただし，その確認では正弦波を振幅包絡として持つ AM 音のみを用いており，工事騒音やオートバイ排気音などの現実の騒音や演奏音などは対象としていない．一般に，それらの音における振幅包絡は様々な形状であるが，従来の方法がそのような音の Roughness を正しく評価できるのかについては明らかではない．

ただ，振幅包絡の形状や AM 音の位相が Roughness 知覚に影響を及ぼす可能性が報告されている [22]．その研究 [22] では，AM SIN における搬送波の位相を系統的に変化させた場合の Roughness を主観評価させ，その結果，0 rad から $\pi/2$ rad になるにつれて Roughness は小さくなることが確認されている．また，複数の周波数成分をもつ変調波を用いて振幅変調された純音とそれを時間軸上で反転させた音の Roughness を主観評価させ，Roughness 知覚に振幅包絡の形状が影響を及ぼす可能性が示唆されている．しかし，正弦波とは異なる波によって振幅変調された音における，位相と Roughness 知覚の関係や，振幅包絡におけるどの

ような特徴が Roughness 知覚に影響を及ぼすことは明らかにされていない。

また、振幅包絡の形状が音色の評価に影響を及ぼす例が過去に示されている [23] ~ [25]。Miller *et al.* [23] は、振幅スペクトルが異なる 3 種類の複合音に対して、楽器音を模した 3 種類の振幅包絡を持たせた音を用いて、音色の類似度評価における、振幅スペクトルによる影響と振幅包絡の形状による影響を比較した。その結果、振幅スペクトルによる影響よりも振幅包絡の形状による影響が大きいことを示している。また、Patterson [24] は、正弦波に対して指数的に減衰する包絡を持たせた音と、それを時間軸上で反転した音、すなわち、指数的に減衰する音と同じ振幅スペクトルを持つが、位相スペクトルが異なる音を用いて、音色の類似度評価における、振幅包絡の形状による影響を調査した。その結果、同じ振幅スペクトルを持つ音であっても、振幅包絡の形状によって音色の類似度評価が異なることが示唆されている。さらに、Kumagai *et al.* [25] は、様々な立ち上がりの傾きを持つ三角波を振幅包絡として用いて、音色の類似度評価における、振幅包絡の形状による影響を調査した。その結果、Patterson [24] の研究と同様、音色の類似度評価が振幅包絡の形状に依存することが示唆されている。さらに、Roughness を用いてダミ声の周波数ゆらぎを調査している研究も見られる [26]。

以上のように、振幅包絡の形状が音色の評価に影響を及ぼすことが示されているが、これらの研究では音色の類似度評価に限定しており、Roughness を対象とした研究はこれまであまり報告されていなかった。また、振幅包絡の形状が Roughness に影響を及ぼす可能性が示唆されているが、検討すべきことがまだ残されている。

2.5 演奏の熟達度評価に関する研究

音楽的な演奏音を聴取すると、「この演奏は上手だなあ」と感じる、すなわち、演奏の上手さや下手さを表わす熟達度を評価することがしばしばある。その熟達度に関する研究は古くから行なわれており、様々な研究が多く報告されている。それらの研究では、マイクロフォンで録音した音響情報に対する解析だけでなく、モーションキャプチャや高速度カメラなどで記

録した演奏者の動作情報に対する解析や、記録した演奏者の筋電位などの生体的情報に対する解析が行なわれており、熟達者による演奏と中級者または初心者による演奏を比較することで、熟達した演奏の特徴を検討したり [27], [28], 様々な奏者による演奏音から、熟達度評価に貢献する特徴量を抽出し、それらを用いて熟達度評価を行なうモデルの検証を行なったりしている [29] ~ [31] .

例えば、熟達者による演奏と中級者または初心者による演奏を比較している研究では、ドラム演奏時におけるスティックの制御をどのように行なっているかを調査している [27], [28] . モーションキャプチャを用いた動作解析の研究 [27] では、様々な奏者の演奏動作を記録し、記録した映像から奏者の手足動作の軌跡を抽出することによって、熟達者は楽器からのフィードバックや跳ね返りを上手く制御していることを確認している．生体的情報に着目した研究 [28] では、腕の表面筋電位を測定し、ドラム奏者は非ドラム奏者に比べ、左右腕の動作が一致しており、身体的に効率の良い制御を行なっていることを確認している．また、疲労上昇程度が小さい演奏を行なっていることも確認している．

熟達度評価モデルの検証に関する研究では、ピアノによる 1 オクターブの上下行長音階演奏やギターによるコード演奏、ドラムによる繰り返し演奏を対象とし、演奏データから発音時刻や音の大きさなどに関するパラメタを抽出し、それらを用いて熟達度を推定するシステムを提案している．それらの研究では、熟達度の推定方法は異なっているが、熟達度評価で用いるパラメタを時間と大きさに着目して抽出している点では同じである．抽出する、時間に関するパラメタは、メトロノームが与える演奏タイミングからの逸脱や演奏課題において基準となる発音時間長からの逸脱に関するものであり、各音符に対するそれらの逸脱量を求め、それらの平均や標準偏差などが用いられている．大きさに関するパラメタは、演奏者の平均演奏強度からの逸脱に関するものであり、各音符に対するその逸脱量を求め、それらの平均や標準偏差などが用いられている．

それらの研究における熟達度の推定方法について述べる．ピアノ演奏に関する研究 [29] で

は、抽出したパラメタと類似しているパラメタを持つ評価済みデータを k -近傍法によって求め、それらに対する評価スコアの平均を算出することで熟達度を推定している。ギター演奏に関する研究 [30] では、ファジィ階層化意思決定法に基づいて熟達度を評価しており、抽出したパラメタだけでなく、算出したファジィ測度を用いてファジィ積分を行なうことで熟達度を推定している。ドラム演奏に関する研究 [31] では、抽出したパラメタを独立変数、人間の主観評価値を従属変数として重回帰分析を行ない、得られた回帰方程式を用いて熟達度を推定している。

以上で述べたように、それらの研究では、抽出した特徴と熟達度の関係を明らかにしているものの、そのような特徴を人間がどのような印象として知覚して熟達度を評価しているかは明らかにされていない。

熟達度とは若干異なるが、音楽における芸術性について調査した研究が報告されている [32]。その研究では、様々な奏者の演奏を記録し、音楽演奏は楽譜の機械的な再現ではなく、様々な側面において楽譜からの逸脱を含んでいることを確認しており、その逸脱を“artistic deviation(芸術的逸脱)”と呼んでいる [32]。それとは異なる過去の研究では、その逸脱を時間的側面における“ゆらぎ”として捉え、そのゆらぎを“奏者の時間的制御能力の限界に起因するゆらぎ”と“奏者が芸術表現のために付加するゆらぎ”に分け、それぞれのゆらぎを測定、検討している [33]。以上のことから、音楽を聴取した際に感じられるゆらぎ、すなわち、変動感が音楽演奏に対する評価にかかわっていると考えられる。そこで本研究では、変動感に対する評価法を熟達度評価に応用できると考え、その可能性を検討する。

楽曲演奏では、曲想やテンポ、コンテキストなど、様々な要因によって変動感は変わる可能性があり、それら全ての要因について網羅的に調べあげるのは困難であるため、本研究では単一の音符の演奏を対象とする。また、2.3 節で述べたように、変動感は音の大きさや高さが遅い速度で変動する音において知覚されるため、対象とする演奏音は繰り返し動作で演奏されることによって音の大きさが変動している音でなければならない。本研究では、そのよう

に演奏される，トレモロ音を用いることとする．

2.6 電気自動車の接近を気づかせる音に関する研究

近年，電気自動車が市場に急速に普及しつつあり，低炭素社会の実現という政策 [34] や社会的要請によって，その数は今後も増加すると予想されている．ガソリンを動力源としてエンジンを駆動させることによって走行するガソリン車とは異なり，電気自動車は，電気を動力源としてモーターを駆動させることにより走行する自動車である [35], [36]．電気自動車において，ドライバーがアクセルペダルを踏むと，バッテリーからモーターに電気が流れることによってモーター内に磁力が発生し，磁力の影響で回転軸の磁石が回る．磁石の回転により発生した力がタイヤに伝達されることにより，電気自動車は走行している．また，坂道や停車する直前にドライバーがアクセルペダルから足を離れた際に，タイヤの回転のみによって発生した力が回転軸に伝わり，それが回転することによって発電された電気がバッテリーに充電される．

電気自動車は，エンジンで走るガソリン車とは異なり，排気ガスや二酸化炭素を排出しないため，環境に優しいと言われている．また，モーターを駆動させることで発生する音（モーター音）や，モーターへ流す電気を調整するインバータから音は発生しているが，これらの音は一般的に騒音と評価される大きさで発せられているわけではないため，静音性に優れていると言われている．一方，モーター音や自動車走行音が実環境における騒音と比べてあまりにも静かであれば，その音を車の存在や接近を知るための情報として利用することが困難になり，歩行者の近くを電気自動車が“動いている”または“動き始める”ことに気づきにくいというデメリットがある．このデメリットを解決するために，現在普及している電気自動車は，様々な方法で合成した音を出すように設計されている．例えば，日産社の LEAF [37] や三菱社の i-MiEV [38] は，モーター音に類似した音を開発し，その音の発生装置を電気自動車に搭載している．他には，接近警告音発生装置 [39] や，車接近警告装置 [40] などが発明されている．それらの詳細を以下に示す．なお，そのような，歩行者に気づかせるための音は一般に

接近音または報知音などと呼ばれており、本研究では接近音に統一する。

・接近警告音発生装置 [39]

この装置は、走行音の静かな移動体に搭載され、移動体の外部に接近警告音を放音し、移動体が接近していることを知らせることで、歩行者に注意を促している。接近警告音として、その移動体を想起できるような音を使用することができる。例えば、移動体が静音性に優れた自動車の場合、ガソリン車のエンジン音を模した模擬エンジン音を使用することができる。電気自動車が低速走行しているとき以外は、タイヤと路面の摩擦音が、歩行者に接近を気づかせる程度の音の大きさで発生するため、接近警告音は必ずしも必要でない。よって、この装置は、約 20km/h 以下の低速走行時に接近警告音を発生させるように設計されている。

・車接近警告装置 [40]

この装置は、速度検知手段を車に設置することによって走行速度を検知し、走行速度に連動して警告音の呈示レベルを増減させている。例えば、車の走行速度が速い場合は、呈示レベルが大きくなり、歩行者は車の接近を早めに察知することができるため、接触事故を防ぐことが可能となる。

上記で述べたように、様々な接近音が開発されているが、それらは自動車と想起させることが困難であり、騒音評価に関する専門家や視覚障害者などからそれらの音は接近音として適切ではないと評価されいた。そこで、国土交通省は、平成 21 年 7 月に、学識経験者や視覚障害者団体、自動車メーカ、ユーザ団体などからなる“ハイブリッド車等の静音性に関する対策検討委員会”を開催し、平成 22 年 1 月に「ハイブリッド車等の静音性に関する対策について」というガイドラインが公表された [41]。このガイドラインでは、“対策が必要な場面”、“発音の種類および音の性質”、“音の大きさ”に関する条件を定義している。ガイドラインで定められた条件とその必要性を以下で述べる。

条件 1：対策が必要な場面

条件内容：発進時から車速 20 km/h までの速度および後退時

条件の必要性：自動車が歩行者にもっとも接近している場面として、自動車が停止状態から発進しようとしている時、および低速で走行している時が考えられるため、これらの場面において自動車の接近を知らせる必要がある。

条件 2：発音の種類および音の性質

条件内容：自動車の走行状態を想起させる音

条件の必要性：音としての気づきやすさだけでなく、自動車の存在、接近、離脱などの動作を知らせる必要がある。

条件 3：音の大きさ

条件内容：一般ガソリン車における通常走行時の騒音レベル以下の大きさ

条件の必要性：一般ガソリン車と同程度に歩行者が気づく音の大きさにする必要がある。
また、音を発している車が大量に普及した際に、環境騒音への悪影響を避けなければならない。従って、対策が必要な場面において、一般ガソリン車における通常走行時の騒音レベル以下とする必要がある。

このガイドラインで定められた条件に基づいて過去に開発された接近音を評価すると、全ての条件を満たしていると言える接近音はこれまで提案されていない。各自動車製造会社が開発した接近音、接近警告音発生装置 [39] で発生する音、および車接近警告装置 [40] で発生する音とガイドラインで示されている条件の比較を Table2.3 に示す。Table2.3 内の“○”は、条件を満たしている、“ ” は、条件を満たさない可能性がある、“×”は、条件を満たしていないことを意味している。

Table2.3 より、条件 1 に関しては、すべての接近音は条件 1 を満たしていると言える。条件 2 に関しては、LEAF および i-MiEV に搭載されている接近音は、モーターを模したような

Table 2.3 Comparison of the guideline with warning sound proposed by past studies.

	LEAF(日産社)[37]	i-MiEV(三菱社)[38]	接近警告音発生装置 [39]	車接近警告装置 [40]
条件 1	○	○	○	○
条件 2	×	×	○	
条件 3	×	×		

音 [37], [38] であり, 自動車と想起させる音ではないため, 条件 2 を満たしているとは言えない。また, 接近警告音発生装置は条件 2 を満たしていると言えるが, 車接近警告装置は自動車を想起させるような警告音を必ずしも発生させるとは言えないため, 条件 2 を満たしているとは言えない。条件 3 に関しては, LEAF および i-MiEV に搭載されている接近音の大きさは小さく [37], [38], 一般ガソリン車と同程度に気づく大きさではないため, 条件 3 を満たしているとは言えない。また, 接近警告音発生装置および車接近警告装置は条件 3 を満たしていると言えるが, それらは速度に応じた音の大きさを警告する技術であることから, 速度が速い場合は音が大きくなる可能性があり, 騒音問題につながる可能性があると考えられる。

過去に提案された音は, そのガイドラインで定められた全ての条件を満たしておらず, “電気自動車の接近を気づかせることができる”, かつ “騒音問題にならない音の大きさ” という 2 つの条件を満たしていない。それらの条件を満たすためには, まず歩行者に対して, 自動車が接近してきたと思わせることが必要である。歩行者は, 自動車が接近してきたと認識する一つの手段として, 自動車の排気音を聴取することが考えられる。電気自動車は, モーターやインバータから音が発生しているため, 本研究では, そのモーター音を自動車の排気音のような音に変化させることで, 電気自動車の接近を歩行者に気づかせることができると考えられる。また, 変動音を用いることで, 定常音よりも歩行者周辺の状況変化が気づきやすくなると考えられる。このような変動音を聴取した際には変動感が知覚されると言われており, 変動感が大きい音の方がより気づきやすくなると予想される。そこで, 音の大きさが変動する音の方が気づきやすいと仮定し, 気づきやすさの評価に変動感の評価法を応用可能か否かを検討する。

2.7 結言

本章では，変動音に対する，新しい評価法を検討するうえで参考となる先行研究について述べた．過去の研究で明らかにされた，変動感や粗さ感の知覚について説明し，それらの評価法について述べた．また，変動音に対する評価法の応用に関する先行研究について説明し，それらの研究において残された課題を述べ，本研究で取り組む課題とその必要性について述べた．

第3章 変動音に対する変動感の評価法

3.1 緒言

本章では、変動音に対する変動感の評価法について述べる。2章で述べたように、過去に提案された、変動感に対する評価法で対象とする音は、正弦波によって変調された音に限られており、現実の音では正弦波以外の波によって変調されている音が存在するにもかかわらず、それは対象とされていなかった。そこで、演奏音や騒音を対象とし、それらに対する変動感の評価する方法を検討する。まず、3.2節において、変動感の評価法に対する検討の概要について述べた後に、3.3節において、変動感の知覚に影響をおよぼす特徴について説明する。次に、3.4節において、本研究で提案する変動感の評価法を述べ、3.5節において、提案法の精度評価について説明し、3.6節において、精度評価結果に対する考察を述べる。

3.2 変動感の評価法に対する検討

2で述べたように、AM音を人間が聴取すると、音の大きさが変動している感覚、すなわち、変動感を知覚すると言われており、その変動感を表わす音質評価指標としてFSが提案されており、FSによって変動音に対する変動感の評価できると言われている[7],[8]。AM SINやAM BBNなどの音響信号に対するFSを推定する方法が提案されているが[8]~[12]、工事や交通などの身近にあり、かつ、音の振幅包絡が20 Hz以下の速さで変動している演奏音や騒音に対する変動感を適切に表わすFSを推定できる方法は検討されていない。

本研究では、そのような演奏音としてトレモロ音を導入する。トレモロ音は、演奏動作を連続的に繰り返すことによって奏でられ、そのような奏法は“トレモロ奏法”と言われている。

トレモロ音は、すばやく減衰する音を繰り返し発音させることで奏でられるため、持続的な音の代用であると言え、単一の演奏動作による音がすばやく減衰する楽器演奏において用いられることが多い。そのような楽器の例として、撥弦楽器の“マンドリン”や鍵盤打楽器の“マリンバ”がある。

マンドリンは、弦を弾くことによって演奏されるリュート属の撥弦楽器の一つであり、洋ナシ型に膨らんだ木製の胴と完全 5 度の関係で調弦された金属製の複弦を 4 対持ち、各対はほぼ同じ高さに調弦された 2 本の弦から成っている [42] ~ [44]。マンドリンは様々な音楽ジャンルで用いられている。マンドリンの概観を Fig.3.1 に示す。マンドリン演奏におけるトレモロ奏法とは、ピックを用いて 1 対の弦を上下方向に撥弦させることを細かく連続的に繰り返す奏法であり、それ以外にピックを用いて 1 つの音符に対して 1 対の弦を 1 回だけ弾くピッキング奏法がある [45], [46]。

マリンバは、ピアノと同様に配置された木製の鍵盤を打鍵することによって演奏され、木製の鍵盤の下には金属製の共鳴管が置かれており、共鳴管の長さは音の高さによって異なっている [47]。マリンバも様々な音楽ジャンルで用いられている。マリンバの概観を Fig.3.2 に示す。マリンバ演奏では、“マレット”と呼ばれる“ばち”を用いて打叩する。マレットの先端には毛糸を巻きつけられたゴムが付いており、“ヘッド”と呼ばれている。ヘッドにおけるゴムの材質、毛糸の種類や、巻き方などによってヘッドの硬さが異なり、その硬さによって奏でられる音の音色が異なると言われている。マレットの概観を Fig.3.3 に示す。マリンバ演奏におけるトレモロ奏法とは、マレットを用いて単一の高さの音を連続して小刻みに打叩する、または複数の高さの音を交互に小刻みに打叩する奏法である。

本研究では、マンドリン演奏におけるトレモロ奏法による音を“マンドリントレモロ音”，マリンバ演奏におけるトレモロ奏法による音を“マリンバトレモロ音”と表記する。マンドリンやマリンバトレモロ音を大略的に考えると、単一の演奏動作による音がすばやく減衰する楽器によって奏でられるため、のこぎり波のような振幅包絡を持った音、すなわち、AM 音であ



Figure 3.1 A mandolin.

ると見なすことができる．しかも，マンドリンやマリンバ奏者が1秒間に20回以上の演奏動作を繰り返すことは不可能と思われるので，20 Hz 以下の低い変調周波数の AM 音であると見なすことが可能である [48]．よって，マンドリンまたはマリンバトレモロ音を聴取した際には，変動感が知覚されると考えられるが，そのような演奏音に対しても既存の方法で変動感を適切に表す FS を推定できる方法は検討されていない．

また，本研究では，そのような騒音としてアイドリング時におけるオートバイの排気音を導入する．排気音は，エンジン音を構成する音の一つであり，それ以外に機械音，吸気音がある [49]．機械音は機械装置において摩擦や衝突，転動が生じることで発生し，吸気音は気筒が空気を吸入する時に発生する圧力脈動によって発生し，排気音は排気ガスが気筒から排出される時に圧力脈動を起こすことで発生する．それらのうち人間に最もよく聴こえる音は排気音であると考えられる．オートバイのような，日常でよく聞かれる音の変動感を正しく評価できることで，その音のうるささの程度を高い精度で評価することができ，騒音レベルのみに基づいた基準よりも，より正確に人が感じた印象などを評価できるようになることから，その工学的意義は大きいと言えるが，そのような騒音に対しても既存の方法で変動感を適切に表す FS を推定できる方法は検討されていない．

そこで本研究では，マンドリンおよびマリンバトレモロ音と，オートバイの排気音に対す



Figure 3.2 A marimba.

る変動感を適切に表わす FS を推定する方法を提案する．まず，過去の研究 [7], [8] で用いられてきた AM SIN と，トレモロ音および排気音の音響的特徴を比較し，FS の推定において新たに考慮すべきパラメタを検討する．その検討結果に基づき，様々なトレモロ音や排気音に対する FS を推定する方法を提案する．

3.3 変動感の知覚に影響をおよぼす特徴

先行研究 [7], [8] で用いられてきた AM SIN とは異なる，トレモロ音および排気音の音響的特徴を調査した．

マンドリンおよびマリンバトレモロ音の知覚印象は，単位時間あたりのピッキングまたはストロッキングの回数，すなわち plucking rate または stroking rate によって大きく異なるであろう．Plucking rate および stroking rate により，発音時刻から次の発音時刻までの時間間隔 (Inter-Onset Interval, IOI) は一意に決定される．単一の撥弦音または打叩音を録音しておき，これを等時間間隔に配置すれば，のこぎり波のような時間包絡を持った変動的持続音を構成することが可能である．本研究では，単一の撥弦音または打叩音を“単発音”に統一する．この時間包絡のピークからピークまでの時間間隔は IOI と一致した一定の値であり，ピー

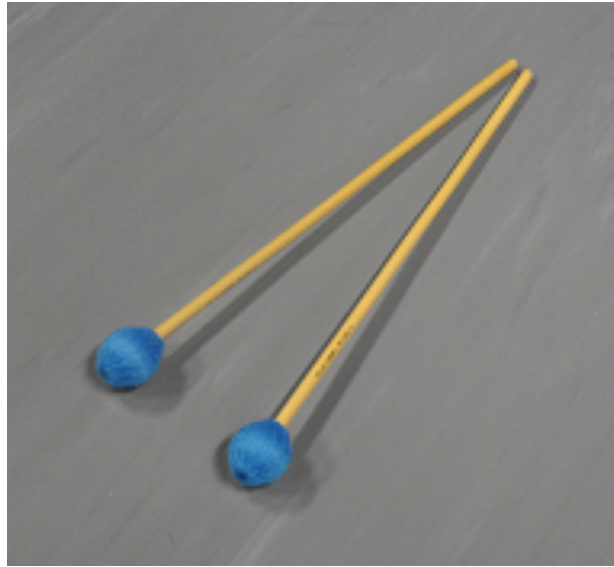


Figure 3.3 Mallets.

クの振幅値も完全に同一であるはずである．

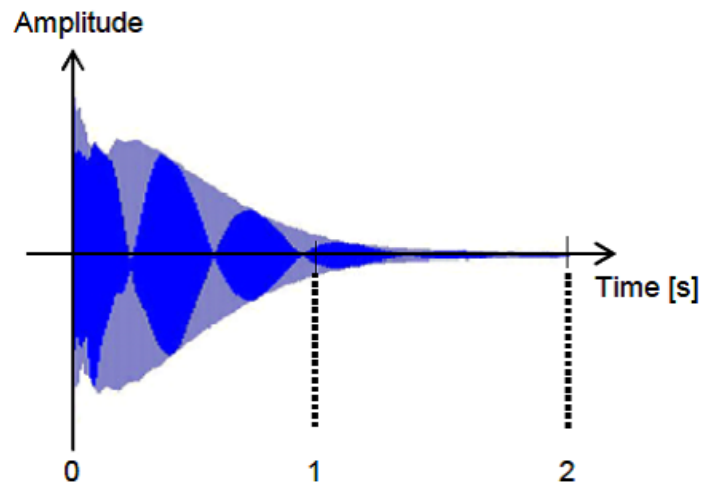
もちろん，演奏者が実際にマンドリンをトレモロ奏法で演奏する場合，下方向へのピッキングと上方向へのピッキングで異なる減衰音が発せられる要因によって，上記のような変動音とは異なる様相となる．また，マリンバ演奏の場合も，右手のストロッキングと左手のストロッキングで異なる減衰音が発せられる要因によって，そのような変動音とは異なる様相となる．しかし，演奏者のトレモロ音には，それ以外にも上記のような完全に均一な変動音から逸脱する要因がある．それは，機械ではない人間にとって完全に等しい時間間隔で，同じ強さでピッキングやストロッキングを行なうことは不可能であり，実際に演奏されたトレモロ音には上記のような完全な均一な時間間隔と振幅包絡を持った変動音からの時間的な逸脱や強度の逸脱が含まれているという要因である．これらの逸脱には，単に人間の制御限界に起因している側面だけでなく，音楽的な要請から意図的に付与されている側面も含まれているであろう．逆にこれらの逸脱のない演奏は，機械的に聞こえ，自然な印象を与えないかもしれない．すなわち，過去の実験で用いられていた，振幅変調音とは異なり，人間の癖や演奏技能のレベルなどによって変調の周期と変調度は一定にならない．言い換えるならば，トレモ

口音はピッキングやストロッキングによってほぼ一定の間隔で生じる変動に対して、時間および振幅方向の逸脱が必ず生じるため、振幅変調された振幅包絡をもつ振幅変調音となる。

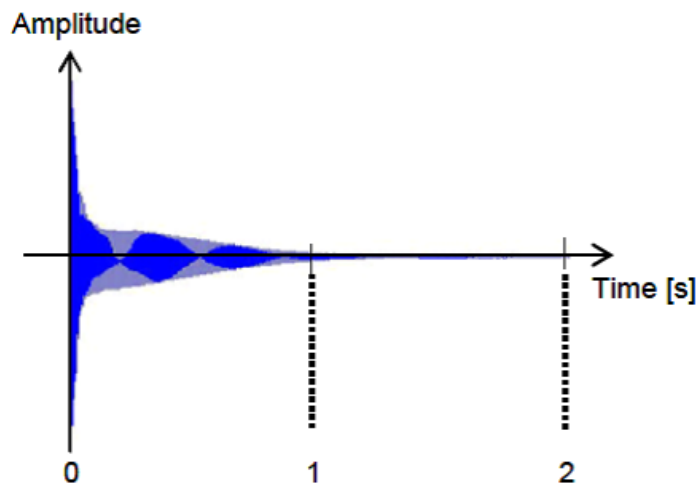
また、マリンバ演奏におけるトレモ口音は、マンドリン演奏とは異なり、マレットの硬さによって単発音における振幅包絡の形状が異なっている。硬さが異なるマレットを用いて演奏された単発音を Fig. 3.4 に示す。Fig. 3.4(a) は軟らかいマレットを用いて演奏された単発音、Fig. 3.4(b) は硬いマレットを用いて演奏された単発音を表している。Fig. 3.4 より、軟らかいマレットを用いた場合、単発音はゆっくり減衰するが、硬いマレットを用いた場合は急速に減衰しており、振幅包絡の形状が異なる様子が確認できる。振幅包絡における形状が音色の類似度評価に影響を及ぼすことが多数報告されていることから [23] ~ [25]、その形状もトレモ口音の知覚印象に影響を及ぼす可能性があると考えられる。

3.2 節で述べたように、オートバイ排気音はエンジン内の気筒から排気ガスが排出される際に生じた圧力脈動によって発生しており、エンジンは 1 秒間に何回も爆発が断続的に起こるため、排気音はエンジン内で生じた爆発によって生じた音（爆発音）が連続的に発生している、継続的な音となる。すなわち、排気音には一定の間隔で生じる変動が含まれる。一定の間隔で生じる変動は、爆発音が連続的に発生することによって生じるため、その変動は単位時間当たりの爆発音の発生回数に起因しており、排気音の知覚印象はその発生回数の平均、言うなれば、排気音の振幅包絡における基本周波数によって大きく異なると予想される。爆発音は完全に均一に発生することはないため、マンドリンやマリンバトレモ口音と同様に、オートバイ排気音における爆発音の発音時刻の間隔（IOI）、および爆発音の大きさにいくらかの不均一性が生じると考えられる。実際に記録された、2 種類のオートバイにおける排気音の波形を Fig. 3.5 に示す。

Fig. 3.5(a) はスズキ社製の GrassTracker[50] における排気音、Fig. 3.5(b) はヤマハ発動機社製の SEROW 250[51] における排気音であり、Fig. 3.5 内の破線は発音時刻、実線は発音時刻における振幅、点線は等間隔の発音時刻を表わす。Fig. 3.5 より、発音時刻、および各発音



(a) Soft mallet

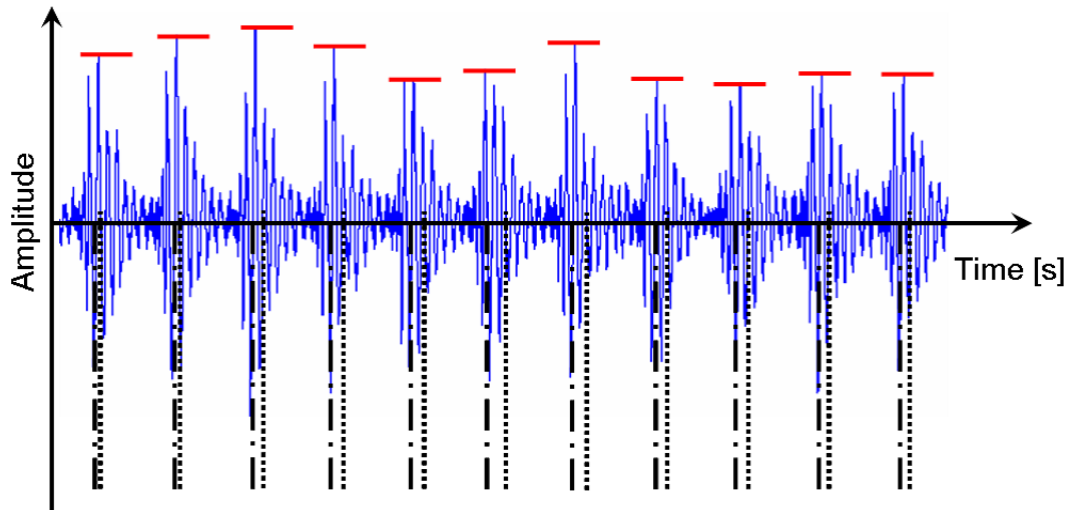


(b) Hard mallet

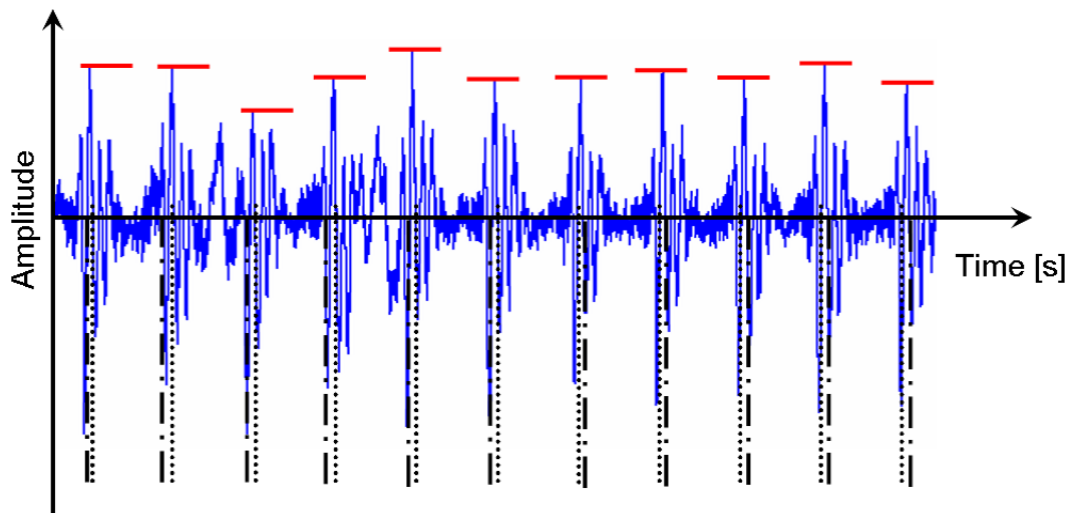
Figure 3.4 Recorded down-stroke sounds produced on a marimba.

時刻における爆発音の振幅値が変動していることが確認できるため、IOIが等間隔な状態からの逸脱や、完全に同じ大きさの爆発音が発音されている状態からの逸脱が排気音に含まれていると言える。すなわち、マンドリンやマリンバトレモロ音と同様に、排気音にも一定の間隔で生じる変動だけでなく、その変動における時間および振幅方向の変動が含まれており、これらの逸脱も排気音の知覚印象に影響を及ぼす可能性があると考えられる。

また、Fig. 3.5 に示した波形と過去の Fastl *et al.* の変動感に関する研究 [7], [8] で用いられていた AM 音の波形を比較すると、その AM 音における振幅包絡は正弦波であったが、排気



(a) GrassTracker



(b) SEROW 250

Figure 3.5 Recorded exhaust sounds of motorbikes.

音における爆発音の振幅包絡における形状は、正弦波とは異なる波形となっていることが確認できる。また、オートバイの種類が異なることによって、爆発音の振幅包絡における形状も異なることが確認できる。振幅包絡における形状が音色の類似度評価に影響を及ぼすことが多数報告されていることから [23] ~ [25]，その形状も排気音の知覚印象に影響を及ぼす可能性があると考えられる。

以上のことから、過去の Fastl *et al.* の変動感に関する研究 [7], [8] で用いられていた AM 音

とは異なり、トレモロ音および排気音には、ほぼ一定の間隔で生じる変動と、その変動における時間および振幅方向の変動が含まれていると言える。本研究では、ほぼ一定の間隔で生じる変動を“1 次変動”，時間および振幅方向の逸脱に起因する変動を“2 次変動”と呼ぶ。既存の方法は、いうなれば、1 次変動のみに基づいた方法と言えるが、1 次変動と 2 次変動の両方を考慮した方法とは言えず、推定した FS はトレモロ音や排気音の変動感を適切に表わすとはいえない。

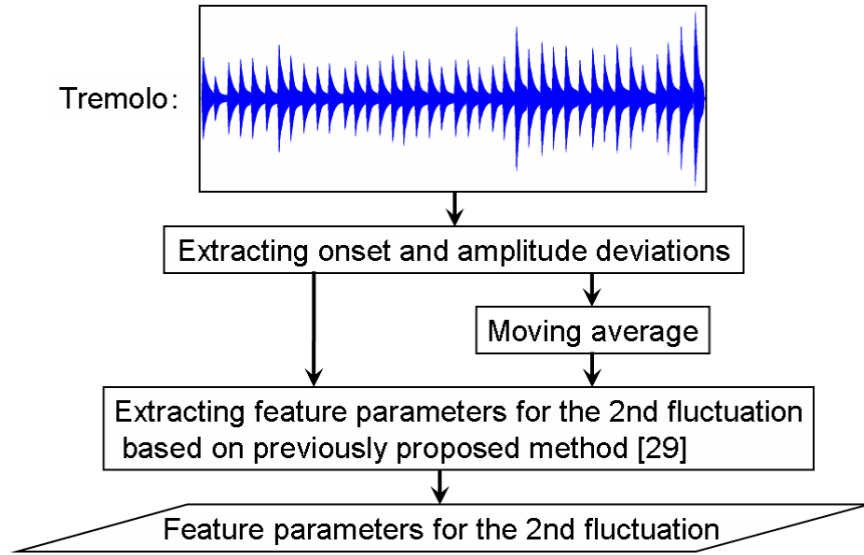
また、1 次変動や 2 次変動だけでなく、単発音や爆発音の振幅包絡における形状の違いも変動感に影響を与えられられるが、既存の FS 推定方法ではそれは考慮されていない。単発音の振幅包絡における形状は、振幅逸脱によって爆発音の振幅値が大きくなったり、または小さくなったりする、すなわち、2 次変動によって変動するため、振幅包絡における形状の変動を 3 次変動と呼ぶ。

3.4 本研究で提案する変動感の評価法

1 次変動だけでなく、2 次変動も含むトレモロ音や 1 – 3 次変動を含む排気音に対する FS を推定することを考えた場合、従来法 [7] ~ [12] では考慮していなかった、それらの変動に関する特徴の違いによる変動感への影響を考慮する必要がある。そこで、2 次変動に関する、時間および振幅逸脱に関する特徴と、3 次変動に関する、単発音や爆発音の振幅包絡における形状に関する特徴の抽出を行なう。ここでは、どのような特徴をパラメタとして FS 推定で用いるかについて述べ、その抽出方法を説明する。

3.4.1 2 次変動に関するパラメタ

2 次変動のパラメタ抽出では、過去に提案されたピアノ演奏の特徴抽出方法 [29]，に基づいてパラメタを取り出す。まず、トレモロ音から時間および振幅逸脱を抽出した。その抽出では、plucking rate や stroking rate から発音の周期を求め、その周期ごとに音響波形の振幅包



絡における最大音圧レベルの時刻を発音時刻とし，得られた発音時刻に対して，IOI が等間隔な状態の発音時刻からのずれを算出し，それを時間逸脱量 $x_{1,k}$ ($k = 1 \sim K$) とした． k は単発音における発音 ID， K は単発音の総数を表わしている．なお， $k = 1$ の発音における発音時刻を基準とし，各発音における $x_{1,k}$ を算出している．また，推定した発音時刻付近における最大振幅値に対して，トレモロ音や排気音の最大振幅値からのずれを抽出し，それを振幅逸脱量 $x_{2,k}$ とした．

得られた各逸脱量に対して移動平均を行ない，傾向曲線 $\hat{x}_{i,k}$ ($i = 1-2$) を求める．ここで， $\hat{x}_{1,k}$ は抽出した時間逸脱量 $x_{1,k}$ に対する傾向曲線， $\hat{x}_{2,k}$ は抽出した振幅逸脱量 $x_{2,k}$ に対する傾向曲線を表わしている．次に，式 (3.1) - (3.5) を用いて，2 次変動に関するパラメタ $pd_{i,j}$ ($j = 0-4$) を求める． $pd_{i,0}$ は各逸脱量の標準偏差であり， $pd_{i,1}$ は移動平均によって得られた逸脱傾向からの即時的な逸脱を表わし，逸脱量の傾向曲線からの差分量の和である． $pd_{i,2} - ps_{i,4}$ は逸脱傾向からの大局的な逸脱を表わし， $pd_{i,2}$ は傾向曲線における全体の変動幅， $pd_{i,3}$ は傾向曲線の階差の和， $pd_{i,4}$ は傾向曲線の逸脱がない状態における値からの誤差の和である．2 次変動に関する特徴の抽出方法を Fig. 3.6 に， $pd_{1,0} \sim pd_{1,4}$ の概念を Fig. 3.7 - 3.11 に示す．

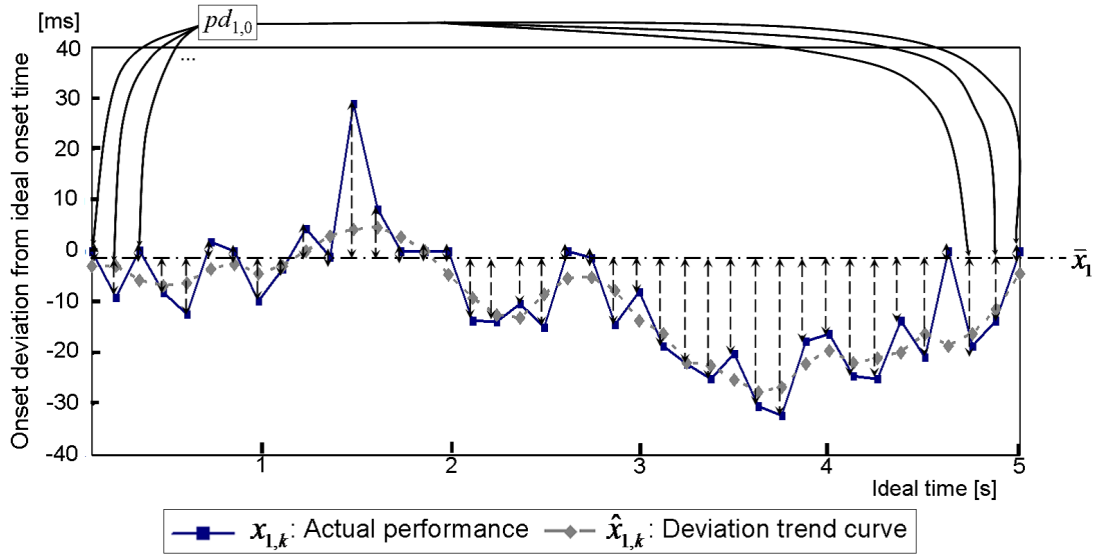


Figure 3.7 Feature parameter for onset deviation ($pd_{1,0}$).

$$pd_{i,0} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (x_{i,k} - \bar{x}_i)^2}{K-1}} \quad (3.1)$$

$$pd_{i,1} = \sqrt{\sum_{k=1}^K (x_{i,k} - \hat{x}_{i,k})^2} \quad (3.2)$$

$$pd_{i,2} = \max(\hat{x}_i) - \min(\hat{x}_i) \quad (3.3)$$

$$pd_{i,3} = \sqrt{\sum_{k=2}^K (\hat{x}_{i,k} - \hat{x}_{i,k-1})^2} \quad (3.4)$$

$$pd_{i,4} = \sum_{k=1}^K \hat{x}_{i,k} \quad (3.5)$$

3.4.2 3 次変動に関するパラメタ

3.3 節で述べたように，3 次変動は各単発音や爆発音における振幅包絡における形状の変動であるため，その特徴は単発音や爆発音の時間特性や周波数特性に表われると考えられる．本

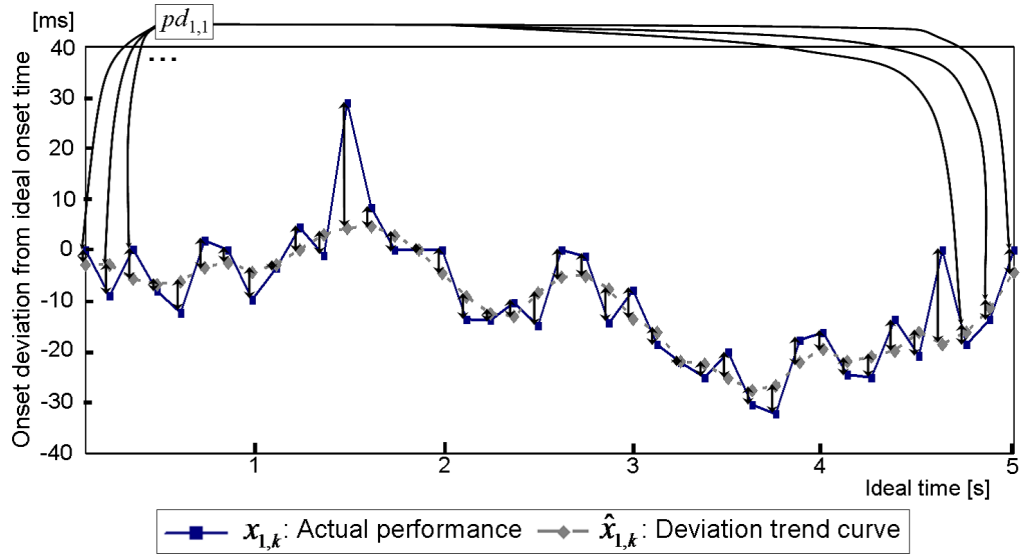


Figure 3.8 Feature parameter for onset deviation ($pd_{1,1}$).

研究では，各単発音や爆発音の音響パワー，正規化音響パワー，立ち上がり時間の長さ，立ち上がり時間における高さおよび傾き，立ち下がり時間の長さ，立ち下がり時間における高さおよび傾き，スペクトル重心を抽出し，それらの平均，標準偏差，変動幅，差分の絶対値における総和を，3次変動に関するパラメタとする．なお，正規化音響パワーとは，単位時間当たりの音響パワーを意味する．Fig. 3.12 に，抽出する振幅包絡の形状に関する特徴の概要を示す．

3次変動に関するパラメタ抽出では，まず，排気音から各単発音や爆発音の立ち上がり時刻および立ち下がり時刻を推定する．本研究では，それらの時刻を推定するために，音響波形を2乗して得られたパワー関数に窓幅 20 ms の移動平均を3回行ない，平滑化された振幅包絡を取得する．得られた振幅包絡に対して Fast Fourier Transform(FFT)を行ない，得られたパワースペクトルからパワーが最大となる周波数を基本周波数として求めた後にその逆数を算出し，排気音の周期を求める．その後，排気音の $1/4$ 周期ごとに振幅包絡の傾きを最小二乗法を用いて推定し，その傾きの符号が正から負に変化した場合の長さ，すなわち $1/2$ 周期の長さを持つ時間領域を求め，その領域内で振幅が最大となる時刻を“Onset 時刻”，また，傾きの符号が負から正に変化した場合の長さ，すなわち $1/2$ 周期の長さを持つ時間領域を求

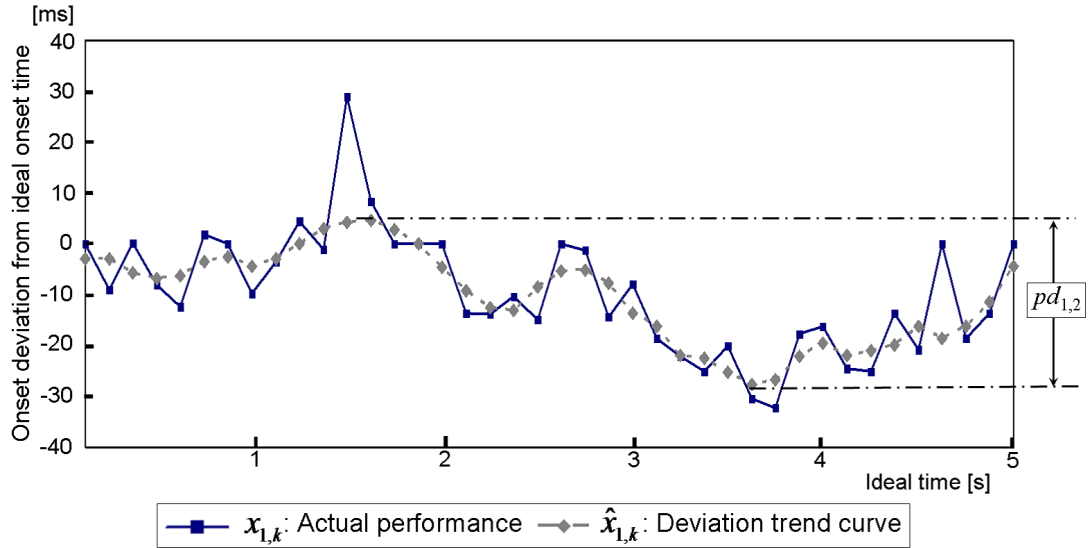


Figure 3.9 Feature parameter for onset deviation ($pd_{1,2}$).

め、その領域内で振幅が最小となる時刻を“Offset 時刻”とした。

次に、推定した Onset および Offset 時刻に基づいて、対象音から各単発音や爆発音を切り出した後に、得られた単発音や爆発音の音響波形から、その音の振幅包絡、立ち上がり時間の長さ、立ち下がり時間の長さ、音響パワーおよびスペクトル重心を求める。次に、立ち上がり時間における傾きおよび立ち下がり時間における傾き、正規化音響パワーを求める。その後、立ち上がり時間における高さおよび立ち下がり時間における高さを算出する。なお、各傾きは、立ち上がりまたは立ち下がり時間における単発音や爆発音の振幅包絡に対して、最小 2 乗法を行なうことによって得られた 1 次回帰式の傾きであり、その傾きを用いて各高さを算出した。なお、スペクトル重心の算出では式 (3.6)、音響パワーの算出では式 (3.7)、正規化音響パワーの算出では式 (3.8)、立ち上がり時間における高さの算出では式 (3.9) 立ち下がり時間における高さの算出では式 (3.10) を用いた。ここで、 SC はスペクトル重心の値、 q は周波数ピンのインデックス、 Q は周波数ピンのインデックスの総数、 $X(q)$ は単発音または爆発音のスペクトル、 SP は音響パワー、 NSP は正規化音響パワー、 D_{on} は立ち上がり時間の長さ、 D_{off} は立ち下がり時間の長さ、 H_{on} は立ち上がり時間における高さ、 a_{on} は立ち上がり時間における傾き、 H_{off} は立ち下がり時間における高さ、 a_{off} は立ち下がり時間における傾き

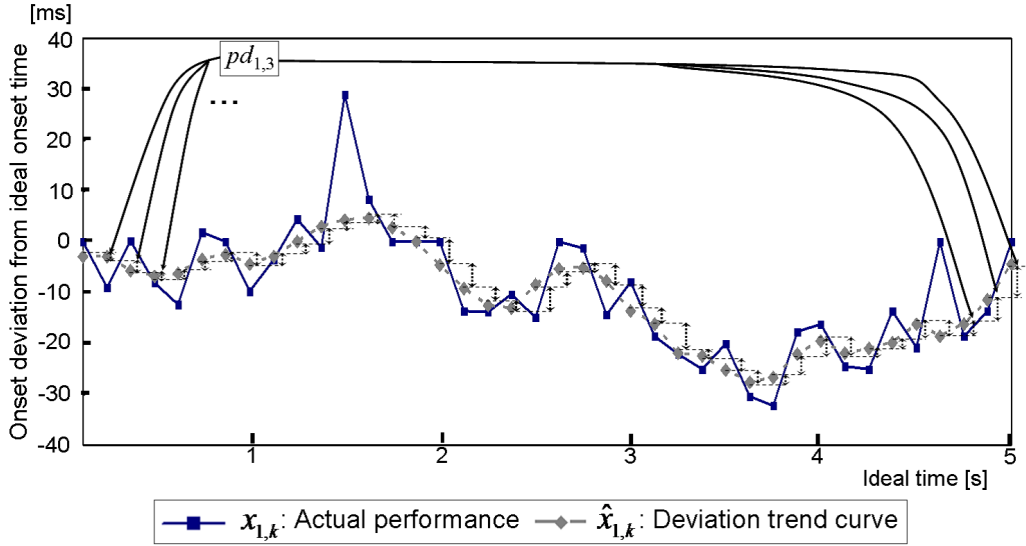


Figure 3.10 Feature parameter for onset deviation ($pd_{1,3}$).

Table 3.1 Extracted parameters for 3rd fluctation.

	AVE	RAN	SD	SUM
Acoustic power	$ps_{1,1}$	$ps_{1,2}$	$ps_{1,3}$	$ps_{1,4}$
Normalized acoustic power	$ps_{2,1}$	$ps_{2,2}$	$ps_{2,3}$	$ps_{2,4}$
Duration for rising	$ps_{3,1}$	$ps_{3,2}$	$ps_{3,3}$	$ps_{3,4}$
Fluctuation depth for rising	$ps_{4,1}$	$ps_{4,2}$	$ps_{4,3}$	$ps_{4,4}$
Slope for rising	$ps_{5,1}$	$ps_{5,2}$	$ps_{5,3}$	$ps_{5,4}$
Duration for falling	$ps_{6,1}$	$ps_{6,2}$	$ps_{6,3}$	$ps_{6,4}$
Fluctuation depth for falling	$ps_{7,1}$	$ps_{7,2}$	$ps_{7,3}$	$ps_{7,4}$
Slope for falling	$ps_{8,1}$	$ps_{8,2}$	$ps_{8,3}$	$ps_{8,4}$
Spectral centroid	$ps_{9,1}$	$ps_{9,2}$	$ps_{9,3}$	$ps_{9,4}$

を表わしている．そして，1つの単発音や爆発音に対して算出した各特徴におけるそれらの平均（AVE），変動幅（RAN），標準偏差（SD）および差分の絶対値における総和（SUM）を算出し，9種類の特徴 $\times$ 4種類の統計量 = 36個のパラメタ $ps_{u,v}$ を抽出する．なお， u は音響信号から抽出した特徴のID， v は算出した統計量のIDを表わす．Table3.1に，抽出した全パラメタのリストを示す．また，Fig. 3.13に3次変動に関するパラメタ抽出の手順を示す．

$$SC = \frac{\sum_{q=1}^Q q \times |X(q)|}{\sum_{q=1}^Q |X(q)|} \quad (3.6)$$

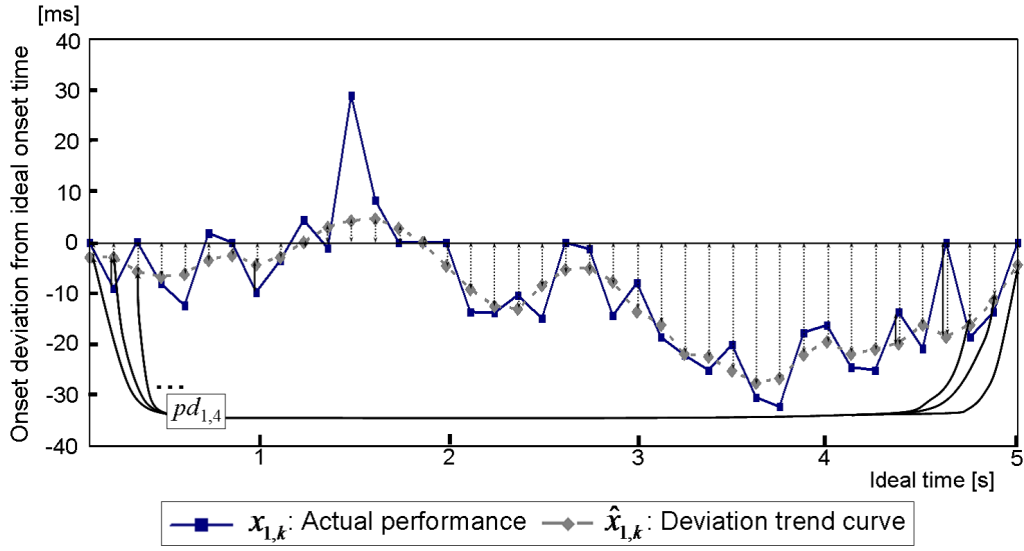


Figure 3.11 Feature parameter for onset deviation ($pd_{1,4}$).

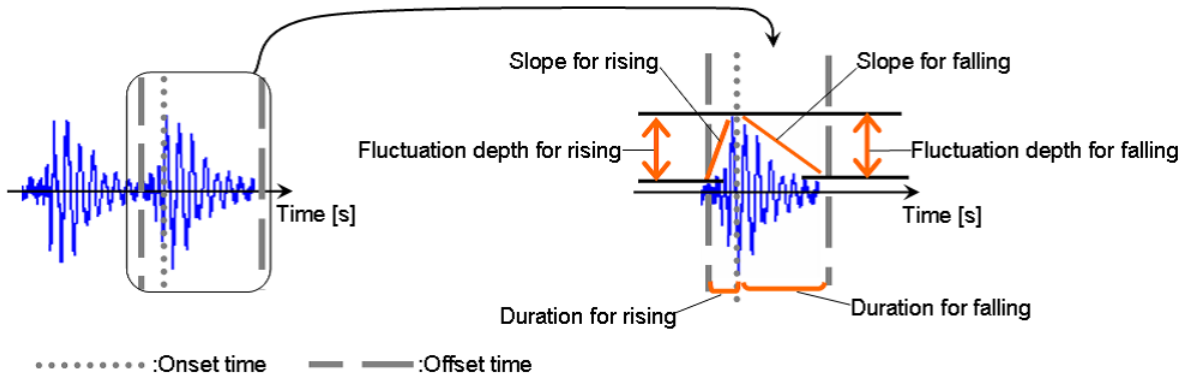


Figure 3.12 Characteristic for shape of envelope.

$$SP = \sum_{q=1}^Q |X(q)| \quad (3.7)$$

$$NSP = \frac{SP}{D_{on} + D_{off}} \quad (3.8)$$

$$H_{on} = a_{on} \times D_{on} \quad (3.9)$$

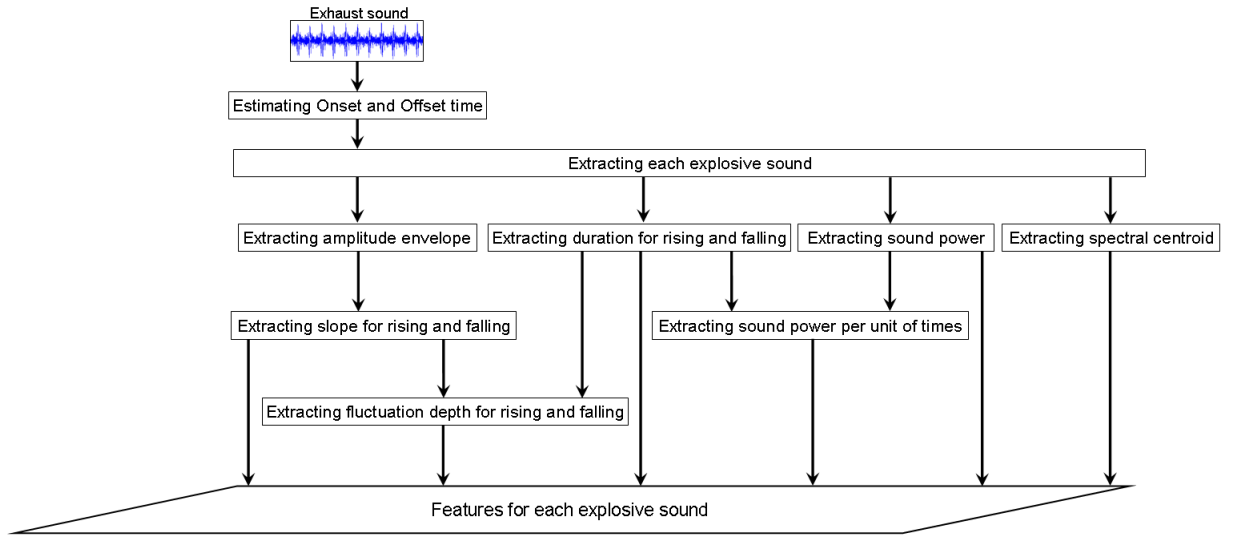


Figure 3.13 Procedure for extracting parameters for the 3rd fluctuation.

$$H_{\text{off}} = a_{\text{off}} \times D_{\text{off}} \quad (3.10)$$

3.4.3 提案する変動感の評価法

本研究で提案する，トレモロ音およびオートバイ排気音に対する FS の推定方法の概要を Fig. 3.14 に示す．なお，FS 推定の流れは，特徴量の抽出，主成分分析，判定関数といった，多くのデータマイニングやパターン認識に関する研究 [52], [53] で用いられている手法を用いている．まず，記録した音響信号から，2 次変動に関する 10 種類のパラメタ $pd_{i,j}$ または 3 次変動に関する 36 種類のパラメタ $ps_{u,v}$ を抽出する．次に，多数のトレモロ音や排気音を収集し，それらから抽出した 10 種類または 36 種類のパラメタに対して主成分分析を行なう．主成分分析を行なうデータは，3.5 節で述べる 25 種類のマンドリントレモロ音 $\times$ 10 種類のパラメタ，27 種類のマリンバトレモロ音 $\times$ 46 種類のパラメタまたは，54 種類の排気音 $\times$ 36 種類のパラメタとなる．主成分分析を行なった結果，累積寄与率が 99 %を超えた主成分までを合成変数 $P_y (y = 1 \sim Y)$ として用いることとした．なお， y は合成変数の ID， Y は合成変数の総数を示している．生成した合成変数 P_y を評価パラメタとし，これに対して任意の FS 推定

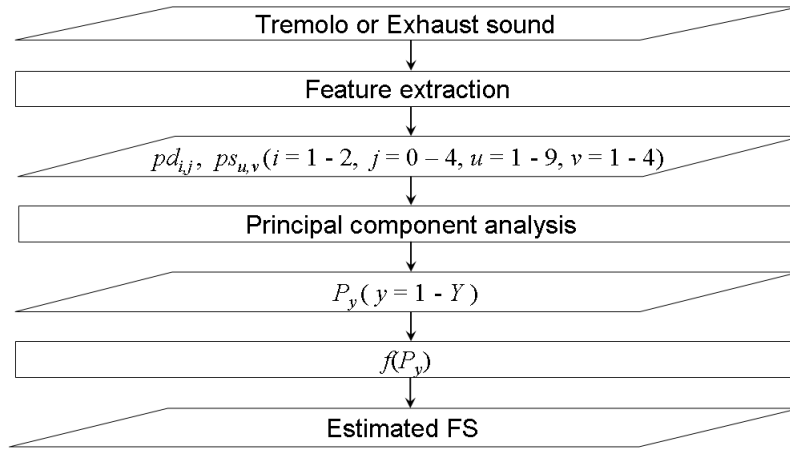


Figure 3.14 Proposed procedure for estimating FS.

関数 $f(P_y)$ を適用することによって FS の推定値を算出する．今回， $f(P_y)$ には， P_y に対して重回帰分析した結果，得られる回帰方程式を用いることにした．

3.5 提案法の精度評価

提案する FS の推定方法を実装するためには，トレモロ音とそれに対する変動感の主観評価値から成る学習データと，排気音とそれに対する変動感の主観評価値から成る学習データが必要である．そこで，そのデータを取得するために，マンドリンおよびマリンバトレモロ音と様々なオートバイの排気音の記録を行ない，トレモロ音または排気音に対する変動感の主観評価実験を行なった．なお，実験では，2 次変動によって生じた変動感のみまたは，3 次変動によって生じる変動感のみを主観評価させるために，記録したトレモロ音または排気音ではなく，そのトレモロ音や排気音の特徴を含ませた音を合成したものを用いた．次に，提案法の有効性を確認するために，複数の条件でマンドリンおよびマリンバトレモロ音，排気音の FS 推定を行なった．以下で，対象音ごとに推定精度の評価について述べる．

3.5.1 マンドリントレモロ音における評価

(a) マンドリントレモロ音の記録

マンドリントレモロ音の記録では、防音室内で、3年の演奏経験を持つマンドリンの熟達者1名に plucking rate が 8 Hz のトレモロ演奏を 5 秒間行なってもらい、マイクロフォンを用いて演奏音を記録した。用いたマイクロフォンは RODE Microphones 社の NT2-A、録音機はティアック社の HD-P2 であり、量子化ビット数 16 bit、サンプリング周波数 48 kHz で録音した。

(b) 様々な 2 次変動を持つマンドリントレモロ音の合成

逸脱を含むトレモロ音に対する変動感を適切に表わす FS の推定方法を提案するためには、様々な 2 次変動を含むトレモロ音が必要である。人間による演奏音では、2 次変動を統制することが困難であるため、本研究では、人間による演奏音における 2 次変動の傾向を持ち、かつ、様々な 2 次変動をもつ音を合成する。トレモロ音は、単一のピッキングによる単発音の繰り返しによって構成されるので [45], [46]、単一のピッキングによる単発音を記録し、それを時間軸上でつなげ合わせることでトレモロ音を合成することができる。しかし、そのような方法で合成したトレモロ音はマンドリンの音色をもっているため、変動感のみだけでなく、別の印象や感覚、例えば熟達度を感じてしまう可能性がある。そこで、マンドリンの音色とは異なる音色を知覚させるトレモロ音を合成するために、記録した単一のピッキングによる単発音をそのまま用いるのではなく、その音の振幅包絡をもつ調波複合音を用いる。その音を用いることにより、マンドリントレモロ音の振幅包絡と同様な形状を持つが、内挿波形がマンドリンの音色とは異なる音となるため、変動感のみを知覚できる音を合成することが可能となる。その合成において、各単発音に対して、人間による演奏音から抽出した時間および振幅逸脱を付与することで、人間による演奏音における 2 次変動の傾向を持つ音を合成することができる。ただし、その方法では 1 通りの 2 次変動の傾向しか付与することができず、様々な 2 次変動をもつ音を合成することができない。そこで、奏者の演奏傾向を保持したまま、演奏の

特徴を強調する方法が過去に提案されているので [54]，その方法を用いることで様々な 2 次変動を付与する．

具体的には，3.4.1 節で述べた方法を用いて，演奏音から各逸脱量を抽出し，過去に提案された特徴強調方法 [54] に基づいて，抽出した各逸脱量を強調または抑制する．その方法を用いることによって，演奏音に含まれる 2 次変動の傾向を持ち，かつ，含まれる 2 次変動が複数通りの音を合成することが可能となる．過去に提案された特徴強調方法 [54] では，既に提案されたピアノ演奏の熟達度推定に関する研究 [29] で抽出する特徴の一部を操作することにより，奏者の演奏傾向を保持した特徴強調を実現している．まず，逸脱量の傾向曲線を求め，それと実演奏の逸脱量，および式 (3.11) - (3.17) を用いて各逸脱量に含まれる複数の特徴に対する強調または抑制を行なう．なお， $C_{i,j}$ は特徴 $pd_{i,j}$ を変化させるための割合を表わす． $x'_{i,j,k}$ は特徴 $pd_{i,j}$ を操作した結果の値であり， $x'_{i,1,k}$ は実演奏に含まれる逸脱量と逸脱傾向の誤差を操作した結果， $x'_{i,2,k}$ は逸脱傾向における全体の変動幅の中心位置からの誤差を操作した結果， $x'_{i,3,k}$ は基準直線と逸脱傾向の誤差を操作した結果， $x'_{i,4,k}$ は逸脱傾向と逸脱がない状態における値の誤差の平均値を操作した結果を表わしている．なお， $x'_{i,2,k}$ で用いている M は変動幅の中心位置の値， $x'_{i,3,k}$ で用いている SU および SL は逸脱傾向の最大値と最小値を通る基準直線であり， SU は一次増加関数， SL は一次減少関数を表わしており，逸脱傾向とそれらの関数の誤差が小さい方を基準直線として用いている．本研究では，移動平均後の各逸脱量を逸脱の傾向曲線とし，強調または抑制を行なった．なお，移動平均では自身を含む前後 3 点の平均を用いている．

$$x'_{i,1,k} = \hat{x}_{i,k} + C_{i,1}(x_{i,k} - \hat{x}_{i,k}) \quad (3.11)$$

$$x'_{i,2,k} = M + C_{i,2}(\hat{x}_{i,k} - M) \quad (3.12)$$

$$M = \frac{\max(\hat{x}_i) + \min(\hat{x}_i)}{2} \quad (3.13)$$

$$x'_{i,3,k} = \begin{cases} SL(k) + C_{i,3}(\hat{x}_{i,k} - SL(k)) & (\sum |SL(k) - \hat{x}_{i,k}| < \sum |SU(k) - \hat{x}_{i,k}|) \\ SU(k) + C_{i,3}(\hat{x}_{i,k} - SU(k)) & (\sum |SL(k) - \hat{x}_{i,k}| > \sum |SU(k) - \hat{x}_{i,k}|) \end{cases} \quad (3.14)$$

$$SU(k) = \frac{(\max(\hat{x}_i) - \min(\hat{x}_i))}{K-1}k + \min(\hat{x}_i) \quad (3.15)$$

$$SL(k) = \frac{(\min(\hat{x}_i) - \max(\hat{x}_i))}{K-1}k + \max(\hat{x}_i) \quad (3.16)$$

$$x'_{i,4,k} = C_{i,4}\hat{x}_{i,k} \quad (3.17)$$

本研究では，式 (3.11)-(3.17) を用いて時間および振幅逸脱の各特徴を抑制および強調しており，その際に，全ての特徴を抑制または強調するために，制約条件として式 (3.18) を用いている．なお，式 (3.18) は，式 (3.11)-(3.17) を組み合わせること得られた式である．

$$\begin{aligned} x'_{i,k} &= C_{i,4}x'_{i,1,k} \\ &= C_{i,1}C_{i,4}x_{i,k} + C_{i,4}(1 - C_{i,1})x'_{i,2,k} \\ &= C_{i,1}C_{i,4}x_{i,k} + C_{i,2}C_{i,4}(1 - C_{i,1})x'_{i,3,k} \\ &\quad + C_{i,4}(1 - C_{i,1})(1 - C_{i,2})M \\ &= C_{i,1}C_{i,4}x_{i,k} + C_{i,2}C_{i,3}C_{i,4}(1 - C_{i,1})\hat{x}_{i,k} \\ &\quad + C_{i,4}(1 - C_{i,1})(1 - C_{i,2})M \\ &\quad + C_{i,2}C_{i,4}(1 - C_{i,1})(1 - C_{i,3})S \end{aligned} \quad (3.18)$$

ここで， $x'_{i,k}$ は全ての特徴が抑制または強調された時間または振幅逸脱， S は SL または SU を表わしている． $C_{i,2}$, $C_{i,3}$, and $C_{i,4}$ は以下で示したように， $C_{i,1}$ の三乗根とした．

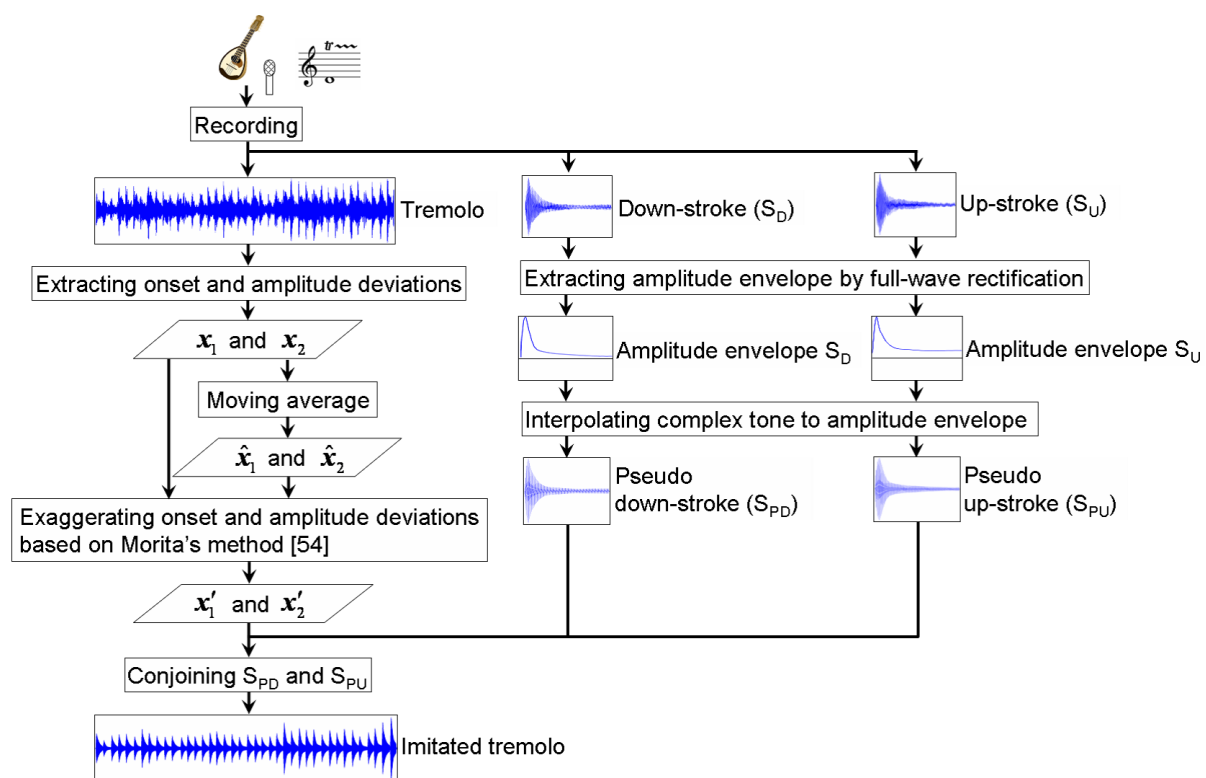


Figure 3.15 Procedure for synthesizing imitated tremolo.

$$C_{i,2} = C_{i,3} = C_{i,4} = \sqrt[3]{C_{i,1}}$$

次に，単一のサンプリング音の振幅包絡をもつ調波複合音に対して，強調または抑制された各逸脱量を付与し，それらを交互に張り合わせることによってトレモロ音を合成する．なお，本研究では，ピックを下方方向に動かすことによって得られた音の振幅包絡を持つ調波複合音を擬似ダウンストローク音，ピックを上方方向に動かすことによって得られた音の振幅包絡を持つ調波複合音を擬似ダウンストローク，それらの音を用いて合成したトレモロ音を“擬似マンドリントレモロ音”と呼ぶことにする．擬似マンドリントレモロ音の合成方法を Fig. 3.15 に示す．

(c) 変動感に関する主観評価実験

防音室にて正常な聴力を持つ健聴者 5 名 (Ltf₁-Ltf₅) に対して主観評価実験を行なった．用

いた刺激音は、3.5.1 節 (b) で述べた方法を用いて合成したトレモロ音である。なお、各逸脱量を強調または抑制する割合は、0, 50, 100, 150, および 200 % の 5 通りとし、合成した音は、時間および振幅逸脱量において強調する割合を組み合わせた ${}_5C_1 \times {}_5C_1 = 25$ 通りの方法によって強調または抑制された音である。主観評価実験の手順は、先行研究 [7], [8] で用いられていたものと同じであり、Magnitude Estimation (ME) 法を用いた。聴取者には、基準となる刺激音 (基準音) を呈示した後に、比較対象となる刺激音 (比較音) を呈示した。そして、基準音にはあらかじめ正の整数を割り当てておき、基準音に対する比較音の変動の大きさに反映すると思われる正の整数を回答させた。なお、基準音に割り当てた正の整数は 100 である。例えば、聴取者が比較音の変動の大きさが基準音に比べて 2 倍の大きさであると感じた場合、200 を回答することになる。基準音は時間および振幅逸脱量に対する強調の割合を 0 % として合成した音、比較音はそれを含む 25 通りの強調の割合によって合成された音である。刺激音は、STAX 社のアンプ SRM-313 とヘッドセット SR-303 を通じてダイオティックに呈示した。なお、呈示レベルは、聴取者それぞれに聞きやすいレベルに調節させた。1 kHz の純音を用いたラウドネスマッチングによって、これらの呈示レベルを測定した結果、これらの呈示レベルの平均値は $L_A = 48.0$ dB であった。

(d) 提案法の有効性に対する検討

提案する、1 および 2 次変動を含む音に対する FS 推定方法の有効性を確認するために、4 種類の条件でトレモロ音の FS 推定を行なった。

条件 SP (Simple Procedure)

過去に提案された FS 推定方法 [8] ~ [12] と同様に、Fastl *et al.* の変動感に関する調査結果 [4], [8] に基づいて変動感に影響を及ぼす特徴を抽出し、そのみを評価パラメタとして用いる。その特徴抽出では、まず、音響波形における振幅包絡を抽出するために、全波整流を行なう。次に、抽出した振幅包絡に対して FFT を行ない、1-20 Hz を通す重み付き帯域通過フィルタに通す。ここで用いる重み付けは、AM SIN の変動感に関する

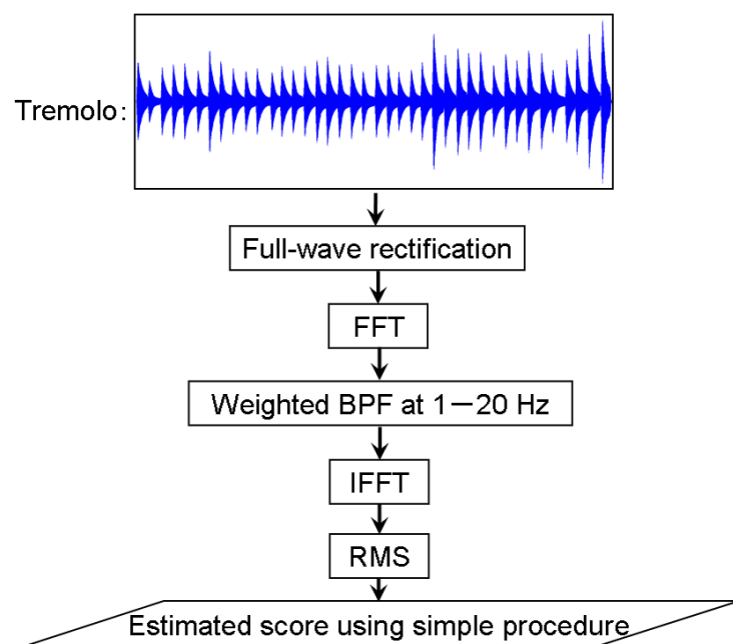


Figure 3.16 Simple procedure.

先行研究 [7], [8] の結果を用いる．そして，フィルタを通した波形に対して Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) を行ない，IFFT 後の波形における実効値を算出する．本研究では，この方法を単純法と呼ぶ．Fig. 3.16 に単純法の概要を示す．

条件 all OD(all Onset Deviation)

2 次変動に関するパラメタのうち，時間逸脱に関する 5 種類のパラメタのみに対して主成分分析を行ない，累積寄与率が 99 %を超える主成分までを評価パラメタとして用いる．

条件 all AD(all Amplitude Deviation)

2 次変動に関するパラメタのうち，振幅逸脱に関する 5 種類のパラメタのみに対して主成分分析を行ない，累積寄与率が 99 %を超える主成分までを評価パラメタとして用いる．

条件 all OD & AD

2 次変動に関するパラメタ全てに対して主成分分析を行ない，累積寄与率が 99 %を超

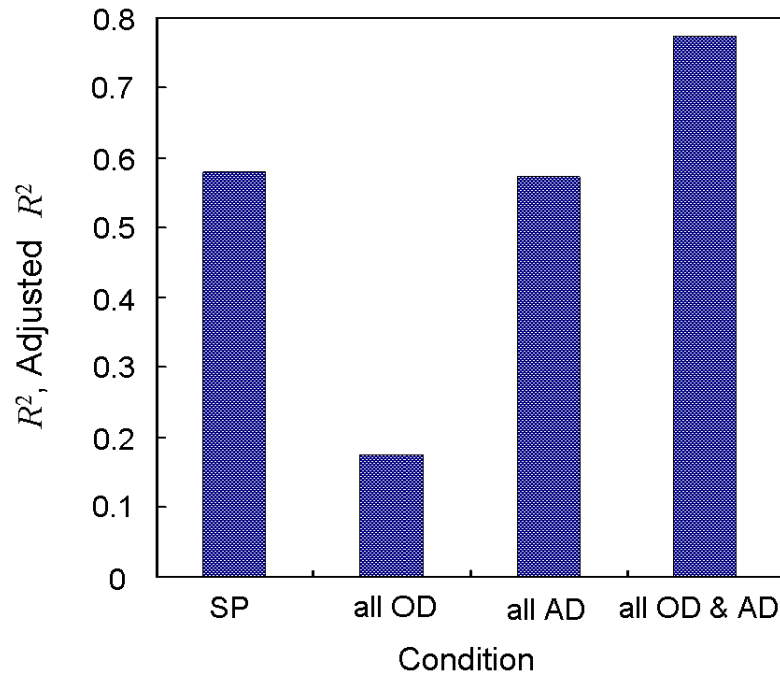


Figure 3.17 Results of calculating R^2 using simple procedure and adjusted R^2 using feature parameters for onset and/or amplitude deviation.

える主成分までを評価パラメタとして用いる。

各条件において、擬似マンドリントレモ口音に対する変動感の主観評価値を従属変数、評価パラメタを独立変数として回帰分析を行ない、決定係数 (R^2) を算出した。なお、重回帰分析では独立変数を増やせば増やすほど R^2 は高くなると言われているため、そのような R^2 の欠点を補うために定義されている“自由度調整済み決定係数 (adjusted R^2)”を算出した。算出した、条件 SP における R^2 および条件 all OD, all AD, all OD & AD における adjusted R^2 を Fig. 3.17 に示す。

Fig. 3.17 より、条件 SP よりも条件 all OD & AD の方が adjusted R^2 が大きく、推定精度が高いことが確認できる。また、条件 SP の R^2 と条件 all AD の adjusted R^2 はほぼ同じであり、条件 all OD の adjusted R^2 はそれ以外の条件よりも推定精度が低いことが確認できる。

3.5.2 マリンバトレモロ音における評価

(a) マリンバトレモロ音の記録

マリンバトレモロ音の記録では、防音室にて、9年以上の演奏経験を持つマリンバの熟達者1名にトレモロ音の演奏を行なわせ、マイクロフォンを用いて録音した。演奏者には「美しく演奏するために必要な *stroking rate*」で演奏するように指示し、*stroking rate* を明確に指定しなかった。なお、*stroking rate* とは単位時間あたりの打叩回数である。演奏音の音高は A2 (110 Hz) とし、全ての音高において、できる限り同じ *stroking rate* で演奏するように指示した。また、演奏強度は一定とし、「*mf* (メゾフォルテ)」と指定した。

用いたマリンバは、こおろぎ社のクラシックマリンバ UM3000CC、マレットは PLAY WOOD 社の吉岡孝悦モデル M-1001R-VH、M1004R-M、M1007R-VS である。なお、M-1001R-VH はヘッドの硬さが非常に硬いもの、M-1004R-M はヘッドの硬さが標準のもの、M-1007R-VS はヘッドの硬さが非常に軟らかいものである。本研究では、M-1001R-VH を「H マレット」、M-1004R-M を「M マレット」、M-1007R-VS を「S マレット」と呼ぶ。録音に用いたマイクロフォンは RODE Microphones 社の NT2-A、録音機はティアック社の HD-P2 であり、量子化ビット数 24 bit、サンプリング周波数 48 kHz で録音した。

(b) 様々な 2 次変動を持つマリンバトレモロ音の合成

マンドリントレモロ音の場合と同様に、人間による演奏音では、2 次変動を統制することが困難であるため、本研究では、人間による演奏音における 2 次変動の傾向を持ち、かつ、様々な 2 次変動をもつ音を合成する。マリンバトレモロ音は、単一のストローキングによる単発音の繰り返しによって構成されるので、単発音を記録し、それを時間軸上でつなげ合わせることでマリンバトレモロ音を合成することができる。しかし、そのような方法で合成したマリンバトレモロ音はマリンバの音色をもっているため、合成では、記録した単発音の振幅包絡をもつ調波複合音を用いる。右手または左手によるストローキングによって得られた音の振幅包絡を持つ調波複合音を擬似ストローキング音とし、そのような音と 3.5.1 節 (b) で述べ

た方法を用いて、様々な 2 次変動を持つマリンバトレモロ音を合成する．その方法で合成したマリンバトレモロ音を、本研究では、“擬似マリンバトレモロ音”と呼ぶ．

(c) 変動感に関する主観評価実験

防音室にて正常な聴力を持つ健聴者 5 名 ($Lmtf_1$ - $Lmtf_5$) に対して主観評価実験を行なった．用いた刺激音は、3.5.2 節 (b) で述べた方法を用いて合成したトレモロ音である．なお、時間逸脱量を強調または抑制する割合は、0, 200, および 400 %，振幅逸脱量を強調または抑制する割合は、0, 100, および 200 %，擬似ストロッキング音は、S マレット、M マレット、H マレットによって演奏された振幅包絡を持つものとし、合成した音は、時間および振幅逸脱量において強調する割合とマレットの種類を組み合わせた ${}_3C_1 \times {}_3C_1 \times 3 = 27$ 通りの方法によって強調または抑制された音である．主観評価実験の手順は、3.5.1 節 (c) で述べた方法と同じであり、聴取者には、基準音を呈示した後に比較音を呈示し、基準音に対する比較音の変動の大きさに反映すると思われる正の整数を回答させた．基準音は時間および振幅逸脱量に対する強調の割合を 0 %とし、M マレットによる擬似ストロッキング音を用いて合成した音、比較音はそれを含む 27 通りの強調の割合によって合成された音である．刺激音は、3.5.1 節 (c) で述べた実験と同様に、STAX 社のアンプ SRM-313 とヘッドセット SR-303 を通じてダイオティックに呈示した．なお、呈示レベルは、聴取者それぞれに聞きやすいレベルに調節させた．1 kHz の純音を用いたラウドネスマッチングによって、これらの呈示レベルを測定した結果、これらの呈示レベルの平均値は $L_A = 52.4$ dB であった．

(d) 提案法の有効性に対する検討

提案する、1-3 次変動を含むマリンバトレモロ音に対する FS 推定方法の有効性を確認するために、3 種類の条件でトレモロ音の FS 推定を行なった．

条件 SP

マンドリントレモロ音の場合と同じである．

条件 SP & 2nd

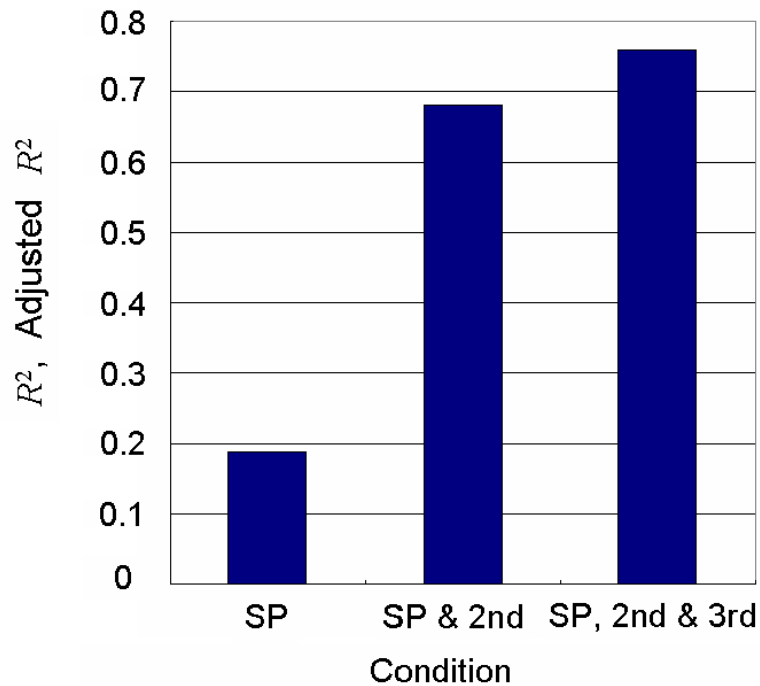


Figure 3.18 Results of calculating R^2 on condition SP and adjusted R^2 on condition SP & 2nd and SP, 2nd & 3rd .

条件 SP で得られたパラメタと 2 次変動に関するパラメタ全てに対して主成分分析を行ない，累積寄与率が 99 %を超える主成分までを評価パラメタとして用いる．

条件 SP, 2nd & 3rd

条件 SP で得られたパラメタと 2 次変動に関するパラメタ，3 次変動に関するパラメタ全てに対して主成分分析を行ない，累積寄与率が 99 %を超える主成分までを評価パラメタとして用いる．

各条件において，擬似マリンバトレモ口音に対する変動感の主観評価値を従属変数，評価パラメタを独立変数として回帰分析を行ない， R^2 および adjusted R^2 を算出した．算出した，条件 SP における R^2 および条件 SP & 2nd，SP, 2nd & 3rd における adjusted R^2 を Fig.3.18 に示す．

Fig. 3.18 より，条件 SP よりも条件 SP & 2nd や条件 SP, 2nd & 3rd の方が adjusted R^2 が

大きく、推定精度が高いことが確認できる。

3.5.3 排気音における評価

(a) 排気音の記録

排気音の記録では、オートバイのエンジンにおいて燃料を空気と混合する機構には、インジェクターとキャブレターの2種類が存在する。インジェクターは、燃料と空気をコンピューターで電子的な制御で混合するのに対し、キャブレターは、吸気口内の気圧が下がることによって燃料と空気を混合する。本研究では、キャブレターを搭載している、3種類のオートバイにおける排気音と、インジェクターを搭載している、3種類のオートバイにおける排気音、計6種類の排気音を記録した。キャブレターを搭載しているオートバイは本田技研工業社製のCB400ss(CB)[55]とFTR[56]、スズキ社製のGrassTracker(GT)、インジェクターを搭載しているオートバイはヤマハ発動機社製のSR400(SR)[57]、SEROW 250(SE)、WR250X(WR)[58]である。本研究では、マフラーの排気口を排気音の音源とし、排気口から0.5 m離れた位置にマイクロフォンを設置し、録音を行なった。用いたマイクロフォンはSHURE社のSM58、録音機はティアック社のHD-P2であり、サンプリング周波数48 kHz、量子化ビット数16 bitで録音し、時間長は60秒で3回ずつ録音した。なお、野外で録音を行なうため、マイクロフォンには風防を装着した。

(b) 様々な2次変動を持つ排気音の合成

記録したオートバイの排気音に含まれる1次変動および2次変動はオートバイごとに異なっているため、記録した排気音そのものを用いることは適切ではなく、それらの変動が統制されており、かつ、様々な2次変動を含む排気音が必要となる。また、記録した排気音の音色もオートバイごとに異なっており、その音色によって変動感のみだけでなく、別の印象を知覚してしまう可能性があるため、記録した排気音の音色を知覚させない音が必要となる。

しかし、記録した排気音に含まれる2次変動やその音色を統制することは困難なため、マ

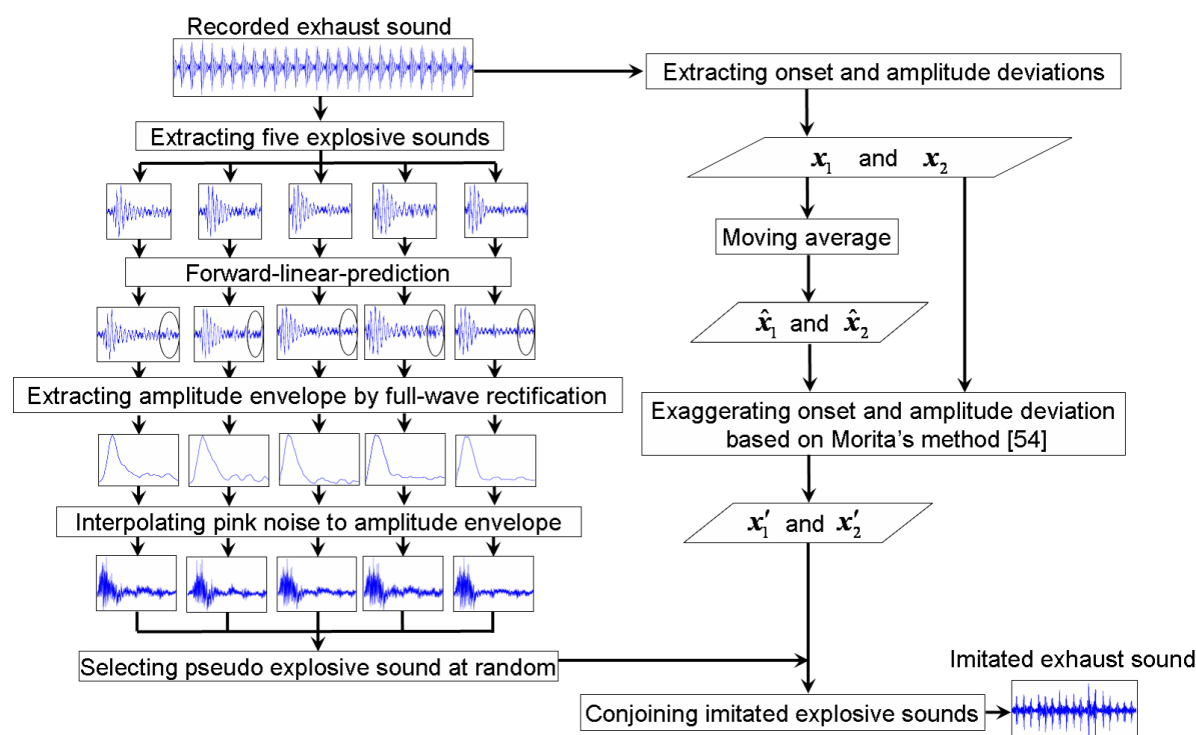


Figure 3.19 Procedure for synthesizing imitated exhaust sound.

ンドリンやマリンバトレモロ音の場合と同様に，本研究では記録した排気音から抽出した時間および振幅逸脱を強調または抑制し，記録した排気音の音色を知覚させないが，その振幅包絡を持つ爆発音に付与することによってそれらを統制する．オートバイ排気音は断続的に起こる爆発音から構成されるため，それらの爆発音を時間軸上でつなげ合わせることで，記録した排気音の音色を知覚させない，様々な2次変動をもつ音を合成する．本研究では，合成した排気音を“擬似排気音”と呼ぶこととする．Fig. 3.19に，様々な2次変動を含む擬似排気音の合成方法を示す．

具体的には，まず，記録した排気音の音色を知覚させないが，その振幅包絡を持つ爆発音を合成した．その合成では，記録した排気音から抽出した爆発音の振幅包絡をもつピンクノイズを合成する．そのピンクノイズを用いることにより，排気音の振幅包絡と同様な形状を持つが，記録した排気音の音色とは異なる音，つまり，変動感のみを知覚できる音を合成することが可能となる．本研究では，記録した排気音における爆発音の振幅包絡を持つピンクノイ

ズ“擬似爆発音”と呼ぶこととする．1通りの振幅包絡をもつ擬似爆発音を用いて排気音を合成した場合，擬似排気音における各爆発音の振幅包絡は同一であるため，その排気音は実際の排気音を聴取した場合とは異なり，不自然に聞こえると考えられるので，5通りの振幅包絡を持つ擬似爆発音を合成した．なお，それらの振幅包絡は，記録した排気音から抽出した爆発音のうち，排気音の振幅包絡における周期と，単一の爆発音の時間長の差分が最も小さいものから5つを選んだものであり，それらの爆発音の最大振幅値を揃えている．そのような5通りの擬似爆発音を用いることにより，1通りの擬似爆発音のみをつなぎ合わせたものよりも，違和感なく排気音として知覚できる音を合成することが可能となる．

また，収録した排気音から時間および振幅逸脱を抽出した．その抽出では，3.4.2節で述べた方法を用いて Onset 時刻を推定し，得られた Onset 時刻に対して，IOI が等間隔な状態の Onset 時刻からのずれを算出し，マンドリンやマリンバトレモロ音の場合と同様に，それを時間逸脱量 $x_{1,k}(k = 1 \sim K)$ とした． k は排気音における爆発音の ID， K は爆発音の総数を表わしている．また，推定した Onset 時刻付近における最大振幅値に対して，排気音の最大振幅値からのずれを抽出し，それを振幅逸脱量 $x_{2,k}$ とした．

次に，様々な2次変動を含む音を合成するために，マンドリンやマリンバトレモロ音の場合と同様に，抽出した各逸脱の傾向を保持したままそれらを強調および抑制した．逸脱の強調および抑制においては，トレモロ音の場合と同様に，過去に提案されたピアノ演奏における逸脱の特徴強調方法 [54] を用いた．その方法を用いることによって，排気音に含まれる2次変動の傾向を持ち，かつ，含まれる2次変動が複数通りの音を合成することが可能となる．

強調した時間逸脱を爆発音に付与して合成する場合，単一の爆発音の時間長が合成後の排気音における IOI よりも短いために，強調後の爆発音に無音時間が発生することがある．そこで，単一の爆発音に対して前向き線形予測を行ない，爆発音の時間長を補正した．本研究では，線形予測係数 (Linear Prediction Coefficient, LPC) を Levinson-Durbin のアルゴリズムを用いて算出した．また，赤池情報量規準 (Akaike Information Criterion, AIC)[59] を求

めることにより，最適に予測する LPC の次数を算出した．AIC を求めることによって，補正したい波形の最適な線形予測モデルを推定することが可能となる．補正した爆発音を用いて合成した結果，爆発音と，次の爆発音の間に無音時間が発生しない，擬似排気音を合成することが可能となった．

(c) 変動感に関する主観評価実験

防音室にて正常な聴力を持つ健聴者 5 名 (Lef₁-Lef₅) に対して，3 次変動のみが異なる擬似排気音の変動感を主観評価させる実験を行なった．実験では，3 次変動のみによって生じる変動感を主観評価させるために，1 次変動および 2 次変動は同一であるが，振幅形状のみが異なる排気音間で変動感を比較させた．なお，1 次変動，すなわち，変調周波数は 1 通り，2 次変動の傾向パターンは 1 通り，2 次変動の強調パターンは 9 通りとした．用いた刺激音は，3.5.3 節 (b) で述べた方法を用いて合成した擬似排気音である．なお，振幅包絡における形状は 3.5.3 節 (a) で記録した 6 車種の爆発音のものであり，変調周波数は，2 次変動の強調パターン，言うなれば，各逸脱を強調または抑制する割合に対する弁別実験を行なった結果，最も正答率が高かった SR の変調周波数とした．また，2 次変動の傾向パターンも SR のものを用いることとした．強調または抑制する割合は，0，150，および 300 % の 3 通りとし，合成した音は，時間および振幅逸脱量において強調する割合を組み合わせた ${}_3C_1 \times {}_3C_1 = 9$ 通りとした．

主観評価実験では，シェッフェの一対比較法の浦変法を用いた．聴取者には，2 つの音を呈示し，最初に聴いた音に比べて次に聴いた音がどの程度変動しているかを 7 段階評価で回答させた．なお，評価は同一の 2 次変動内で行わせており，爆発音の振幅包絡における形状が異なる 6 車種の擬似排気音に対して，順序を考慮に入れた ${}_6C_2 \times 2 = 30$ 通りを評価させた．刺激音は，STAX 社のアンプ SRM-313 とヘッドセット SR-303 を通じてダイオティックに呈示した．なお，全ての音の音響パワーをそろえており，呈示レベルは聴取者それぞれに聞きやすいレベルに調節させた．1 kHz の純音を用いたラウドネスマッチングによって，これらの呈示レベルを測定した結果，これらの呈示レベルの平均値は， $L_A = 52.1$ dB であった．聴取者 5

Table 3.2 Correlation coefficients between scores evaluated by each listener.

	Lef ₁	Lef ₂	Lef ₃	Lef ₄	Lef ₅
Lef ₁	1	-	-	-	-
Lef ₂	.643	1	-	-	-
Lef ₃	.711	.583	1	-	-
Lef ₄	.609	.471	.875	1	-
Lef ₅	.544	.390	.762	.843	1

名が回答した変動感の評価値における聴取者間の相関を Table 3.2 に示す．

(d) 提案法の有効性に対する検討

提案する，1 - 3 次変動を含む排気音に対する FS 推定方法の有効性を確認するために，4 種類の条件でオートバイ排気音の FS 推定を行なった．

条件 SP

マンドリントレモロ音の場合と同じである．なお，ここで用いる帯域通過フィルタの重み付けは，AM BBN の変動感に関する先行研究 [4], [7], [8] の結果である．

条件 SF(Specified Features)

3 次変動に関するパラメタのうち，単一の特徴に関する 4 種類のパラメタ，すなわち，表 3.1 における各行のパラメタ，例えば，音響パワーに関するパラメタ $ps_{1,v}$ ($v = 1 \sim 4$)，に対して主成分分析を行ない，累積寄与率が 99 %を超える主成分までを評価パラメタとして用いる．

条件 SS(Specified Statistics)

3 次変動に関するパラメタのうち，単一の統計量に関する 9 種類のパラメタ，すなわち，表 3.1 における各列のパラメタ，例えば，AVE に関するパラメタ $ps_{u,1}$ ($u = 1 \sim 9$)，に対して主成分分析を行ない，累積寄与率が 99 %を超える主成分までを評価パラメタとして用いる．

条件 AP(All Parameters)

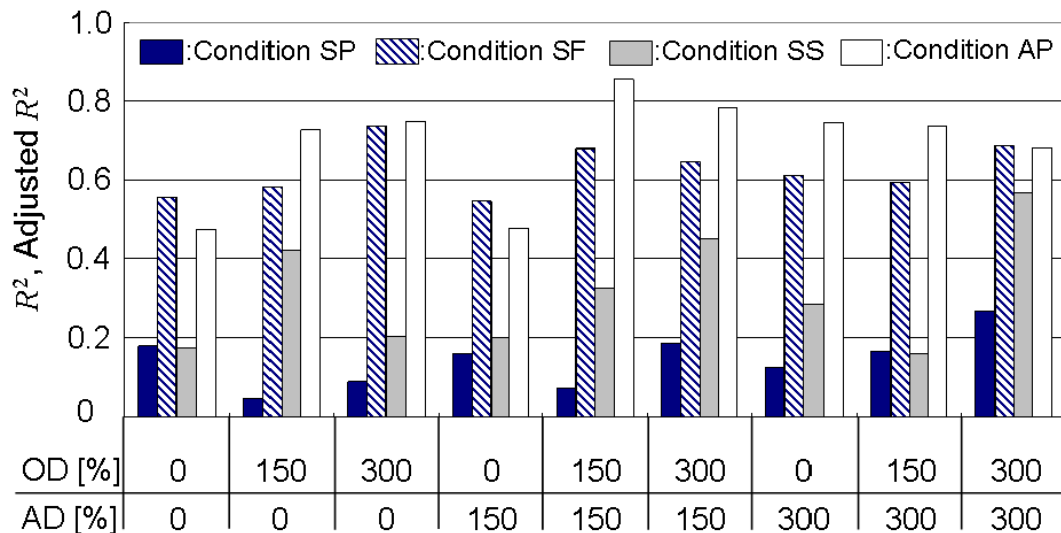


Figure 3.20 Calculated R^2 on condition SP and adjusted R^2 on condition SF, SS and AP.

3.4.2 節で述べた 3 次変動に関するパラメタ全てに対して主成分分析を行ない，累積寄与率が 99 %を超える第 4 主成分までを評価パラメタとして用いる．

各条件において，3.5.3 節 (c) で得られた，擬似排気音に対する変動感の主観評価値を従属変数，評価パラメタを独立変数として回帰分析を行ない， R^2 および adjusted R^2 を算出した．なお，回帰分析は同一の 2 次変動内で行なっている．算出した，条件 SP における R^2 および条件 SF，SS，AP における adjusted R^2 を Fig. 3.20 に示す．Fig. 3.20 の横軸は各逸脱に対する強調の割合，すなわち，2 次変動のパターンを表わし，Fig. 3.20 内，条件 SF の adjusted R^2 は，条件 SF において爆発音の振幅包絡の形状に関する 9 種類の特徴に対する回帰分析で得られた adjusted R^2 の平均であり，条件 SS の adjusted R^2 は，条件 SS において 4 種類の統計量に対する回帰分析で得られた adjusted R^2 の平均である．Fig. 3.20 より，全ての 2 次変動のパターンにおいて，条件 SP よりも条件 SF および条件 AP の方が adjusted R^2 が大きく，推定精度が高いことが確認できる．

3.6 精度評価結果に対する考察

3.6.1 マンドリントレモロ音における考察

Fig. 3.17 より，条件 SP よりも条件 all OD & AD の方が adjusted R^2 が大きく，条件 SP の R^2 と条件 all AD の adjusted R^2 はほぼ同じであることから，条件 SP の R^2 と条件 all OD & AD の adjusted R^2 の差は，時間逸脱による影響を表わしていると考えられる．そこで，条件 SP で得られたパラメタと 2 次変動に関するパラメタを用いることで，推定精度が高くなるか否かを調査した．その調査では，条件 SP で得られたパラメタと 2 次変動に関するパラメタのうち，時間逸脱に関するパラメタのみを用いた場合 (条件 SP & all OD)，条件 SP で得られたパラメタと 2 次変動に関するパラメタのうち，振幅逸脱に関するパラメタのみを用いた場合 (条件 SP & all AD)，および条件 SP で得られたパラメタと 2 次変動に関する全てのパラメタを用いた場合 (条件 SP, all OD & AD) の 3 条件で adjusted R^2 を算出した．調査結果を Fig. 3.21 に示す．Fig. 3.17 および 3.21 より，条件 SP で得られたパラメタと時間逸脱に関するパラメタを用いることで，条件 SP で得られたパラメタのみで推定した場合よりも，推定精度が高いことが確認できる．よって，1 次変動と 2 次変動を含むトレモロ音の FS 推定では，条件 SP で得られたパラメタと時間逸脱に関するパラメタを用いることで，高い精度で推定できると考えられる．

また， $pd_{1,j}$ の妥当性を確認するために，各 $pd_{1,j}$ と条件 SP で得られたパラメタを用いた場合の adjusted R^2 を算出した．算出した adjusted R^2 を Fig. 3.22 に示す．Fig. 3.22 より， $pd_{1,j}$ 間において，推定精度に差があまりないことが確認できる．よって，各 $pd_{1,j}$ が FS の推定に与える影響の程度はほとんど同じと考えられるが，それらの相互関係などについてはさらに明らかにする必要があるため，今度の検討事項と考えられる．

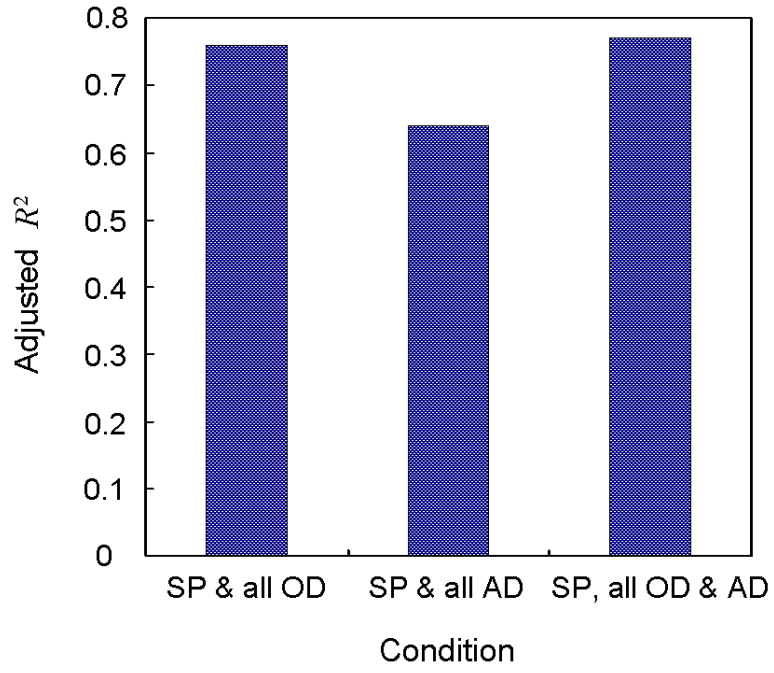


Figure 3.21 Results of calculating adjusted R^2 using estimated score using simple procedure and feature parameters for onset and/or amplitude deviation.

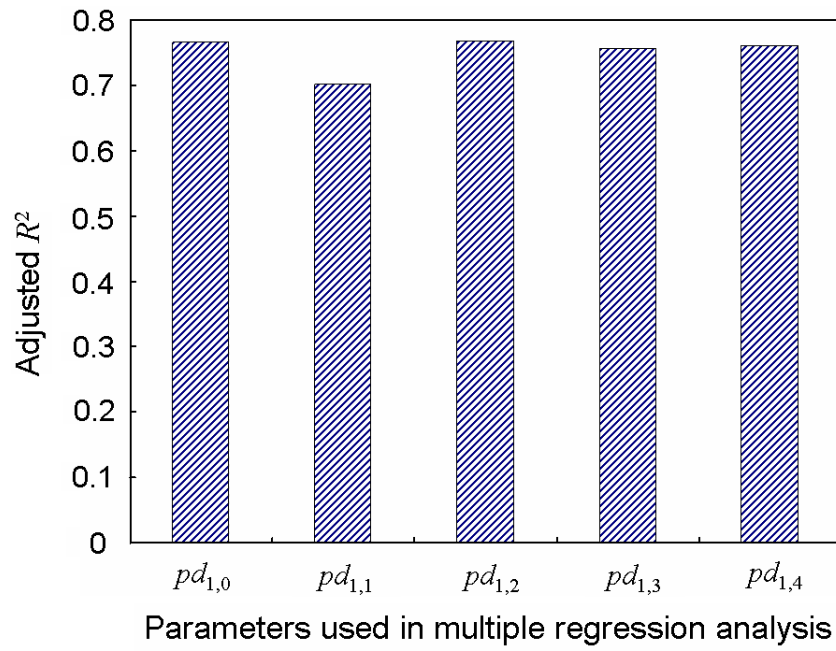


Figure 3.22 Adjusted R^2 between evaluation results and estimated score using estimated score using simple procedure and $pd_{1,j}$.

3.6.2 マリンバトレモロ音における考察

Fig. 3.18 より，条件 SP よりも条件 SP & 2nd や条件 SP, 2nd & 3rd の方が adjusted R^2 が大きいことが確認できる．また，条件 SP & 2nd よりも条件 SP, 2nd & 3rd の方が adjusted R^2 が大きいことが確認でき，人間は 1 次変動だけでなく，2 や 3 次変動の特徴を聴取して変動感を評価していると考えられる．よって，1-3 次変動を含むマリンバトレモロ音の FS では，従来法で得られたパラメタだけでなく，2 や 3 次変動に関するパラメタを新たに導入することで，高い精度で推定できると考えられる．

3.6.3 排気音における考察

Figure 3.20 より，全 9 ケースにおいて，条件 SP よりも条件 SF および条件 AP の方が adjusted R^2 が大きいことから，爆発音における振幅包絡の形状に関する特徴を考慮することで，従来法よりも高精度で FS を推定できると考えられる．ただし，Fig. 3.20 内，条件 SF の adjusted R^2 は，条件 SF において爆発音における振幅包絡の形状に関する 9 種類の特徴に対する回帰分析で得られた adjusted R^2 の平均であるため，この結果からは，爆発音における振幅包絡の形状に関する特徴のうちどの特徴が有効であるのかはわからない．そこで，条件 AP で得られた adjusted R^2 と，条件 SF において各特徴に対して回帰分析を行なうことで得られた adjusted R^2 を調査した．その結果，全ての 2 次変動のパタンにおいて，adjusted R^2 が 0.6 以上であったものは，条件 SF において，正規化音響パワー，立ち上がり時間の長さ，立ち上がり時間における高さ，立ち上がり時間における傾き，立ち下がり時間における高さに関するパラメタを用いた場合であった．よって，それらの特徴に関するパラメタを用いることで FS を高精度で推定できると考えられる．

そこで，正規化音響パワー，立ち上がり時間の長さ，立ち上がり時間における高さ，立ち上がり時間における傾き，立ち下がり時間における高さに関するパラメタ $ps_{u,v}(u = 2-5, 7; v = 1-4)$ に対して主成分分析を行ない，累積寄与率が 99 %を超える主成分まで，ここでは第 5 主成分

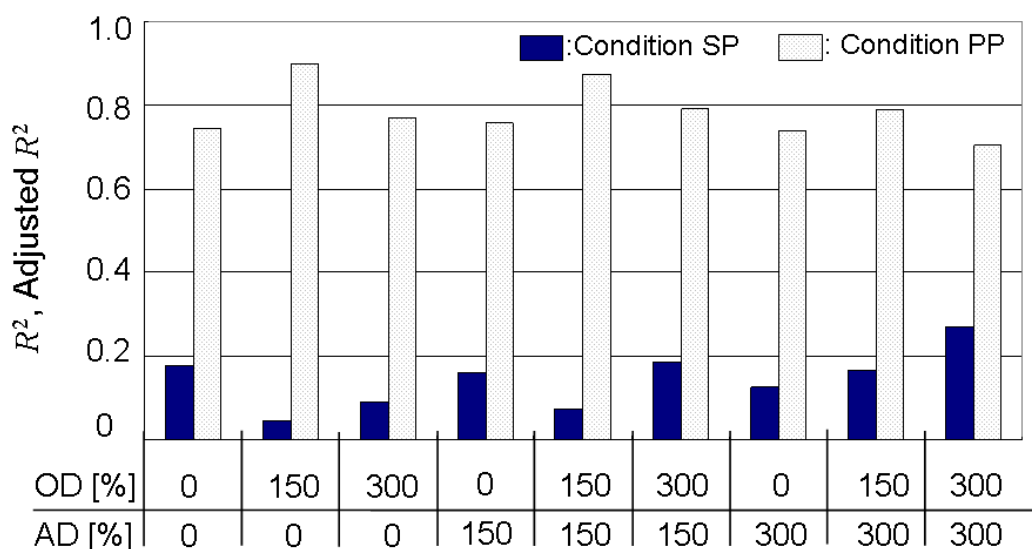


Figure 3.23 Calculated R^2 on condition SP and adjusted R^2 on condition PM.

までを評価パラメタとし、そのパラメタを用いて回帰分析を行なって adjusted R^2 を算出した。なお、それらの主成分を用いる方法を、条件 PP(Proposed Procedure) とした。算出した、条件 PP における adjusted R^2 、および条件 SP における R^2 を Fig. 3.23 に示す。Fig. 3.23 内、条件 SP の結果は Fig. 3.20 と同一である。Fig. 3.23 の横軸は Fig. 3.20 と同様に、各逸脱に対する強調の割合を表わす。Fig. 3.20 および Fig.3.23 より、条件 SP よりも条件 PP の方が adjusted R^2 が大きく、推定精度が高いことが確認できる。

以上のことより、爆発音の振幅包絡における形状が異なるオートバイ排気音間の FS 推定において、正規化音響パワー、立ち上がり時間の長さ、立ち上がり時間における高さ、立ち上がり時間における傾き、立ち下がり時間における高さに関するパラメタ $ps_{u,v}(u = 2 - 5, 7; v = 1 - 4)$ が有効であることが確認された。

3.7 結言

本章では、身近にある変動音として、演奏音におけるマンドリンおよびマリンバトレモロ音、騒音におけるオートバイの排気音を導入し、それらに対する変動感を評価する方法の検

討について述べた．その結果，それらの音には，過去の研究で用いられていた対象音とは異なり，変動に関する様々な特徴が含まれていることが確認された．そこで，従来法で考慮されていなかったパラメタを考案し，それらを新たに導入することで，マンドリンやマリンバトレモロ音，オートバイの排気音に対する変動感を正しく評価できることが示された．

第4章 変動音に対する粗さ感の評価法

4.1 緒言

本章では、変動音に対する粗さ感の評価法について述べる。2章で述べたように、過去に提案された、粗さ感に対する評価法で対象とする音は、正弦波によって変調された音に限られており、現実の音では正弦波以外の波によって変調されている音が存在するにもかかわらず、それは対象とされていなかった。そこで、三角波によって振幅変調された音を対象とし、それに対する粗さ感の評価する方法を検討する。まず、4.2 節において、粗さ感の評価法に対する検討の概要について述べた後に、4.3 節において、従来法の妥当性について説明する。次に、4.4 節において、振幅包絡の形状と Roughness の関係を述べ、4.5 節において、位相と Roughness の関係を説明し、4.6 節において、それらの関係に対する考察を述べる。

4.2 粗さ感の評価法に対する検討

2章で述べたように、AM 音における Roughness 知覚に影響を及ぼすパラメタとして“変調周波数”、“変調度”および、“音圧レベル”が示されているが、それ以外の特徴、例えば振幅包絡の形状については検討されていなかった [5], [6], [14]。言うなれば、それら 3 つのパラメタは、全て振幅包絡の波形における振幅スペクトルで表されるため、それら 3 つのパラメタは振幅スペクトルのみに基づいていると言える。ただし、振幅包絡の形状が音色の類似度評価に影響を及ぼすことが多数報告されていることから [23] ~ [25]、その検討が望まれていた。そこで本研究では、過去の研究で常に用いられていた正弦波ではなく、三角波を振幅包絡としてもつ AM 音を用いて、振幅包絡の形状が Roughness 知覚に及ぼす影響を調査する。

まず、三角波を振幅包絡としてもつ AM 音の Roughness を従来の方法を用いて推定し、得られた値と主観的な粗さ感の相関関係を調査することで、従来の推定方法が AM 音の振幅包絡の形状の変化に対応できているか否か、すなわち、Roughness 知覚における従来のモデルが振幅包絡における形状の変化に対応しているか否かを確認する。もし、従来のモデルが振幅包絡における形状の変化に対応できていない場合、その変化によって Roughness 知覚が変わる可能性が示唆され、その可能性を検討する必要性が示される。

その後、AM 音の振幅包絡における形状の変化が Roughness 知覚を変える可能性について検討する。全てのパターンを調査することは困難であるため、本研究では、単発音における波形の基本的な特徴といえる立ち上がりおよび立ち下りの時間特性のみに着目し、振幅包絡として三角波を用いて、振幅包絡における形状が Roughness 知覚に及ぼす影響の有無を調査する。特に、三角波の立ち上がりの傾きに着目し、5 通りの傾きをもつ三角波を振幅包絡としてもつ AM 音を合成する。聴取実験においてその傾きが異なる 2 つの音を呈示し、最初に呈示された音と比較して後続の呈示音の Roughness を評価させることで、Roughness 知覚に対する立ち上がりの傾きによる影響を検討する。すなわち、振幅包絡の振幅スペクトルや位相スペクトルの特徴によって Roughness 知覚が変わるかを調査する。次に、振幅スペクトルによる Roughness 知覚への影響は従来の 3 つのパラメタによって説明されると考えられるが、位相スペクトルによる影響は説明されないと考えられるため、その影響を調査する。

以上のことより、AM 音に対する Roughness の推定において振幅包絡における形状の変化に対応することの必要性が確認できる。

4.3 従来法の妥当性

4.3.1 妥当性に対する検討

Roughness 知覚における従来のモデルが振幅包絡の形状に対応しているか否かを確認するために、三角波を振幅包絡としてもつ AM 音の Roughness を従来法を用いて推定し、得られ

た値と主観評価実験によって得られた粗さ感の相関関係を調査する．なお，用いた三角波は立ち上がりの傾きが最大となる， $\pi/2$ rad の波，すなわち，のこぎり波とした．また，刺激音の変調周波数は 30-200 Hz，変調度は 100 %，搬送波の周波数は 1 kHz とし，全ての音の音響パワーをそろえている．

4.3.2 従来の評価法

Roughness の推定方法については，様々な研究において調査されており [14] ~ [17]，提案されている全ての手法では，変調によって生じる聴覚系の興奮レベルに基づいて Roughness を推定しているものの，提案されている各々の手法には若干の違いがみられる．

Fastl[14] の研究では，継時マスキングパタンの深さ，言い換えるならば，興奮レベルの差分 ΔLE と変調周波数 f_{mod} を用いることで，Roughness ER を表わすことができると述べている． ER ， ΔLE ，および f_{mod} の関係を式 (4.1) に示す．

$$ER \propto \Delta LE \times f_{\text{mod}} \quad (4.1)$$

AM 音の場合，時間的に変化する音がマスキャーとして働き，継時マスキングが生じる．そのマスキングによって，AM 音における山と谷で言えば，谷の位置における興奮レベルが低くなり，結果的に，AM 音における山がマスキャーとしての役割をもつことによって，Loudness level が変化することになる．そのため，Loudness level の変化によって Roughness も変化するので，Roughness の推定において， ΔLE が用いられているのである．また，変化の速度，すなわち，変調周波数が高くなるにつれて，継時マスキングによる効果が大きくなり， ΔLE は変化する．よって， f_{mod} も Roughness の推定において重要なパラメタである．

しかし，Fastl が提案したこの方法では， ΔLE と f_{mod} が既知である音しか対象となり得ないため，それ以外の音に対しては Roughness を推定できないという問題がある．そこで，Widmann *et al.* は各臨界帯域における Loudness から ΔLE と f_{mod} を算出し，それらを用い

て推定する方法を提案している [15] が、主観的な Roughness との関係を確認するなどの検討は見られず、この方法の妥当性については確認されていないと言える。

また、Aures や Daniel *et al.* は各臨界帯域内の興奮パターンを時間関数で表わし、その振幅包絡を用いて推定する方法を提案している [16], [17]。Aures は、正弦波を振幅包絡としてもつ AM 音、すなわち、周期的に振幅包絡が変化している音だけでなく、周期的な振幅包絡を持たない雑音 (unmodulated broad-band noise) に対しても Roughness が感じられることを示し、それに対する Roughness も推定できるように拡張している [16]。しかし、Aures が提案した方法 [16] では、unmodulated broad-band noise に対する Roughness の推定精度が低いため、Daniel *et al.* [17] は、Aures の方法を正弦波的な AM 音だけでなく、unmodulated broad-band noise に対する Roughness も高精度で推定可能な方法に改善している。

4.3.3 本研究で用いた評価法

4.3.2 節で述べたように、従来の Roughness 推定方法はいくつかあるが、それらのうち Daniel *et al.* の方法 [17] では搬送波の周波数や興奮レベルの差分と変調周波数が未知でも推定可能であるため、本研究では、Daniel *et al.* が提案した方法に基づいた独自の手法で Roughness を推定することとした。

本研究で用いた Roughness の推定方法を Fig. 4.1 に示す。まず、対象音の時間波形を 200 ms に切り出して Blackman 窓をかけた後に、フーリエ変換を行ない、47 個のフィルタを用いて複数の時間波形 $d_w(t)$ ($w = 1, 2, \dots, 47$) に分割する。 w はフィルタの ID を意味している。なお、それらのフィルタの窓長は 1 Bark であり、0.5 Bark でオーバーラップしており、フィルタのスロープは Terhardt が提案した減少関数 [19] に基づいている。各フィルタの中心 Bark の値 z_w は式 (4.2) で表わされ、スペクトルにおける各 Bark の値が $z_w + 0.5$ よりも大きい場合はスロープ $Slope_1$ 、各 Bark 値が $z_w - 0.5$ よりも小さい場合はスロープ $Slope_2$ を用いた。 $Slope_1$ を式 (4.3)、 $Slope_2$ を式 (4.4) に示す。

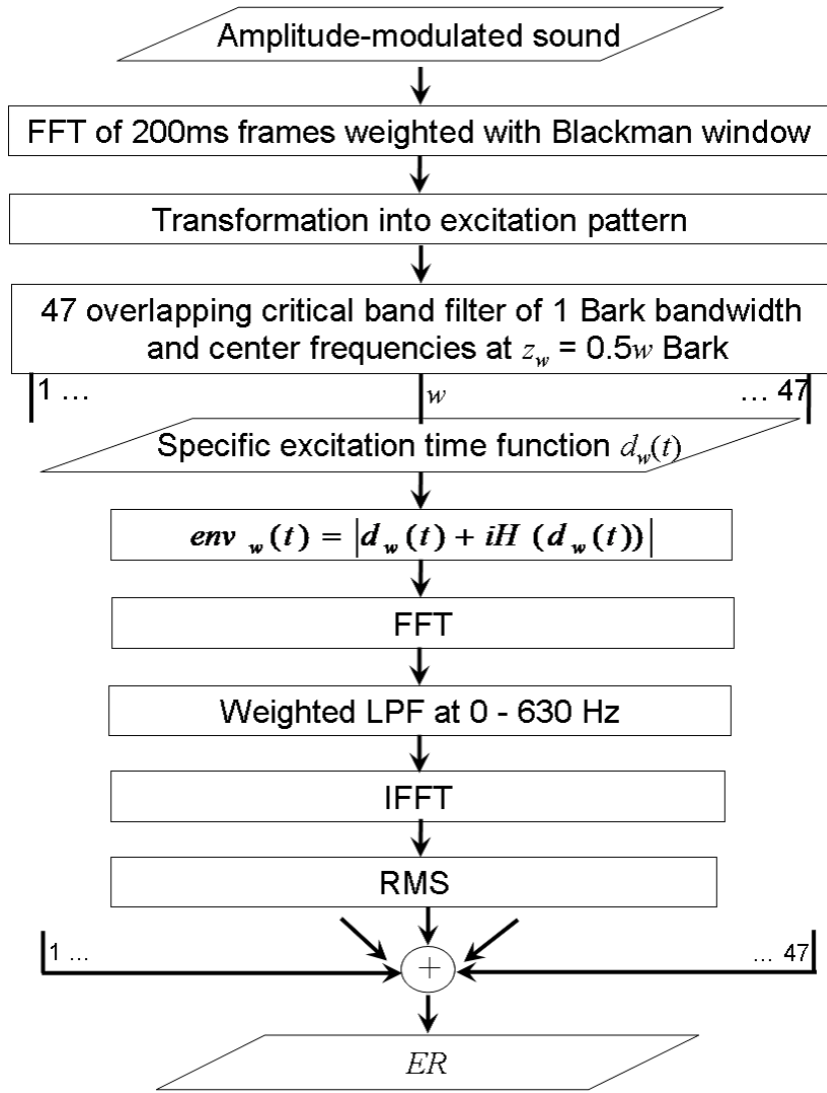


Figure 4.1 Procedure for estimating Roughness in this study.

$$z_w = 0.5 \times w [\text{Bark}] \quad (4.2)$$

$$Slope_1 = -27 \left[\frac{\text{dB}}{\text{Bark}} \right] \quad (4.3)$$

$$Slope_2 = -24 - \frac{230}{f} + 0.2L \left[\frac{\text{dB}}{\text{Bark}} \right] \quad (4.4)$$

f は周波数, L は周波数 f におけるパワースペクトルのレベルを意味している. このよう
なフィルタ処理を行なうことによって, 各臨界帯域内における興奮パタンの時間関数が得ら
れる.

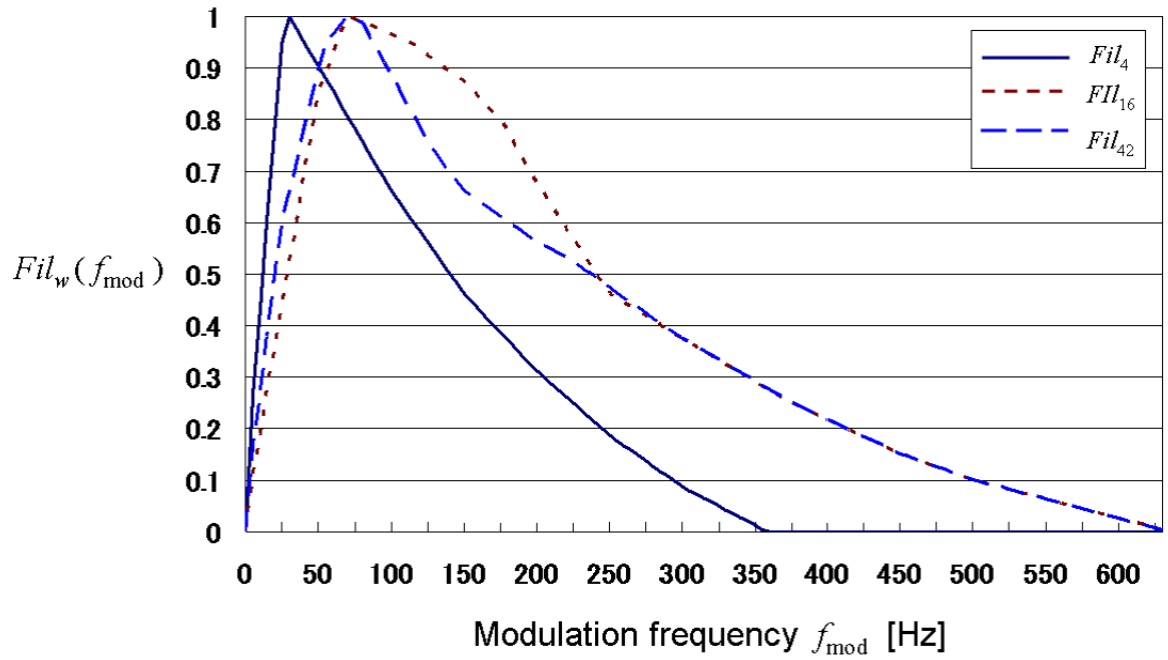


Figure 4.2 Weighting function $Fil_w(f_{\text{mod}})$ of channels $w = 4, 16, 42$.

次に、フィルタによって分割された時間波形に対してヒルベルト変換を行なうことにより、それらの波形の振幅包絡 $env_w(t)$ を抽出する．抽出した振幅包絡をフーリエ変換した後に、Daniel *et al.* の方法 [17] と同様に、約 0-630 Hz を通す重み付き低域通過フィルタを通して逆フーリエ変換を行なう．なお、用いた帯域通過フィルタは、Daniel *et al.* が提案したフィルタ $Fil_w(f_{\text{mod}})$ [17] を用いており、それらのフィルタは Roughness が生じないとされる周波数領域を取り除いている．それらのフィルタの内、 $w = 4, 16, 42$ におけるフィルタ $Fil_4(f_{\text{mod}})$, $Fil_{16}(f_{\text{mod}})$, $Fil_{42}(f_{\text{mod}})$ を Fig. 4.2 に示す．

$w = 1-3$ の場合は $Fil_4(f_{\text{mod}})$, $w = 6-15$ の場合は $Fil_4(f_{\text{mod}})$ と $Fil_{16}(f_{\text{mod}})$ の間を補間したフィルタ , $w = 17-20$ の場合は $Fil_{16}(f_{\text{mod}})$, $w = 21-41$ の場合は $Fil_{16}(f_{\text{mod}})$ と $Fil_{42}(f_{\text{mod}})$ の間を補間したフィルタ , $w = 43-47$ の場合は $Fil_{42}(f_{\text{mod}})$ を用いた．帯域通過フィルタを通した後に得られた 47 個の波形の RMS 値を算出し、それらの総和を求めることによって Roughness ER を推定する．

4.3.4 変調周波数に基づいた主観評価実験

三角波的な AM 音に対する主観的な粗さ感を調査するために，防音室にて正常な聴力を持つ健聴者 4 名に対して，ME 法を用いた主観評価実験を行なった．刺激音は変調波がのこぎり波，変調周波数が 30-200 Hz，変調度が 100 %，搬送波の周波数が 1 kHz の AM 音である．聴取者には，基準音を呈示した後に，比較音を呈示した．基準音にはあらかじめ正の整数を割り当てておき，基準音に対する比較音の粗さの大きさに反映すると思われる正の整数を回答させた．なお，基準音に割り当てた正の整数は 100 とした．基準音は変調周波数が 70 Hz の AM 音，比較音はそれを含む 18 通りの AM 音とした．基準音に対する評価は 3 回行なわせた．刺激音は，STAX 社のアンプ SRM-313 とヘッドセット SR-303 を通じてダイオティックに呈示した．なお，呈示レベルは，聴取者それぞれに聞きやすいレベルに調節させた．1 kHz の純音を用いたラウドネスマッチングによって，これらの呈示レベルを測定した結果，これらの呈示レベルの平均値は， $L_A = 51.7$ dB であった．

主観評価実験の結果と，先行研究 [5], [6], [14] で得られた，正弦波的な AM 音に対する主観的な Roughness を Fig. 4.3 に示す．Fig. 4.3 内，主観評価実験の結果は各変調周波数における回答の幾何平均を示している．Fig. 4.3 より，正弦波的な AM 音に対する主観的な Roughness と同様に，三角波的な AM 音の場合も変調周波数が約 70 Hz において主観的な Roughness が最大となることが確認できる．よって，振幅包絡の形状が正弦波とは異なる波であっても，変調周波数と Roughness の関係は先行研究 [5], [6], [14] で得られた結果とよい対応を示すことが確認されたので，従来法でも三角波的な AM 音における Roughness の変調周波数に対する変化を推定できると考えられる．

4.3.5 主観評価実験の結果と推定された Roughness の関係

4.3.4 節で述べた結果より，三角波的な AM 音の Roughness における変調周波数に対する変化を従来法でも推定できると考えられた．そこで，4.3.3 節で述べた方法を用いて三角波的な

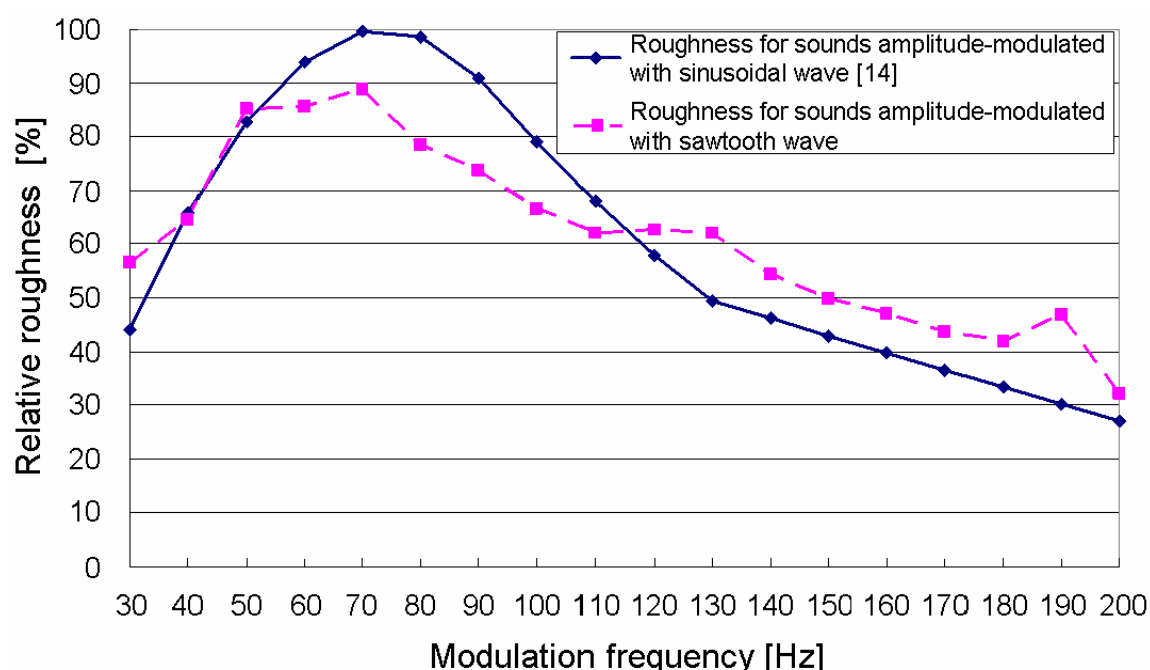


Figure 4.3 Results of evaluation experiment for Roughness.

AM 音の Roughness を推定し，得られた値と主観評価実験の結果の相関関係を調査することによって，従来法でも三角波的な AM 音における Roughness の変化を推定できるかを確認する．すなわち，Roughness 知覚における従来のモデルが振幅包絡の形状に対応しているか否かを確認する．

まず，本研究で用いた Roughness の推定方法に対する妥当性を確認するために，4.3.3 節で述べた方法を用いて正弦波的な AM 音の Roughness を推定し，得られた Roughness と過去の研究 [5], [6], [14] で報告された正弦波的な AM 音に対する主観的な Roughness の相関関係を調査した．その結果，強い正の相関 ($r = .92$ ($n=18$)) が確認されたため，この方法の妥当性が確認されたと言える．

次に，4.3.3 節で述べた方法を用いて，正弦波的な AM 音の Roughness を高い精度で推定可能であることが確認できたので，三角波的な AM 音の場合も Roughness を推定可能か否かについて検討するために，4.3.3 節で述べた方法を用いて推定した Roughness と，4.3.4 節で得られた主観的な Roughness における平均の相関関係を調査した．その結果，中程度の正の相

関 ($r = .45$ ($n = 18$)) が確認され、相関がほとんど認められないと言える。このような結果になった理由として、三角波的な振幅包絡の場合、そのスペクトルの高域に複数の成分が見られるため、それらと 70Hz で最大となる釣鐘型重み付きフィルタの出力が、正弦波のみの場合と異なってしまうためであると考えられる。よって、4.3.3 節で述べた方法、すなわち、従来の推定方法は正弦波を振幅包絡としてもつ AM 音の Roughness には対応しているが、三角波を振幅包絡としてもつ AM 音の Roughness には対応できていないと言える。よって、AM 音の振幅包絡における形状と Roughness の関係を明らかにする必要があると考えられる。

4.4 振幅包絡の形状と Roughness の関係

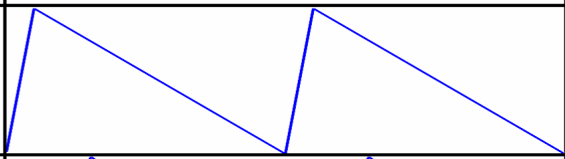
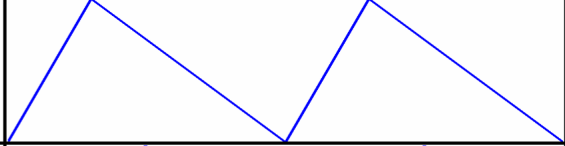
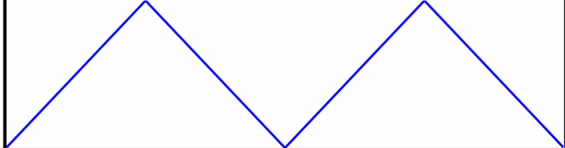
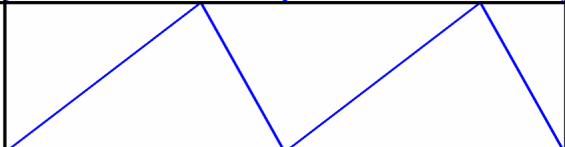
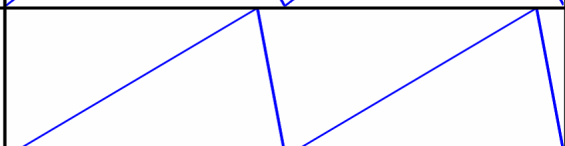
4.4.1 振幅包絡の形状に関する主観評価実験

三角波を振幅包絡とする AM 音を用いて、振幅包絡の形状が Roughness 知覚に及ぼす影響を調査する。防音室内で正常な聴力を持つ健聴者 3 名に、立ち上がりの傾きが異なる三角波を振幅包絡とする AM 音に対して、粗さ感を主観評価させる実験を行なった。

用いた刺激音は、5 通りの傾きをもつ三角波によって振幅変調された、1 kHz の純音である。用いた三角波は、周期は等しいが、立ち上がりの時間と立ち下りの時間が異なっており、周期に対する立ち上がり時間の割合が、0.1, 0.3, 0.5, 0.7 および 0.9 のものであり、それぞれ $T_{0.1}$ – $T_{0.9}$ とした。Table 3.3 に用いた三角波の概観を示す。

ここで、 $T_{0.1}$ および $T_{0.9}$ と、 $T_{0.3}$ および $T_{0.7}$ は時間反転の関係になっているので、そのパワースペクトルは同じであるが、位相スペクトルは異なっている。本研究では、周期に対する立ち上がり時間の割合を「傾き比」と呼ぶことにする。変調度は、Kumagai *et al.* [25] の研究と同様に、0.4, 0.8 および 1.0 の 3 通りとした。変調周波数は、Roughness が最大となる時が 70 Hz であると過去に報告されており [5], [6], [14]、また本研究では傾き比による影響のみを調査するため、70 Hz のみとした。よって、振幅包絡における形状の条件が 5 通り、変調度の条件が 3 通りであり、刺激音は、それらを組み合わせた $5 \times 3 = 15$ 個である。各刺激音

Table 3.3. Triangular wave used as modulation wave.

ID	Waveform
$T_{0.1}$	
$T_{0.3}$	
$T_{0.5}$	
$T_{0.7}$	
$T_{0.9}$	

のリストを Table 3.4 に示す．また，刺激音 S_{TAM3} の波形を Fig. 4.4 に示す．

刺激音は，STAX 社のアンプ SRM-313 とヘッドセット SR-303 を通じてダイオティックに呈示した．なお，全ての音の音響パワーをそろえており，呈示レベルは聴取者それぞれに聞きやすいレベルに調節させた．1 kHz の純音を用いたラウドネスマッチングによって，これらの呈示レベルを測定した結果，これらの呈示レベルの平均値は， $L_A = 52.4$ dB であった．

主観評価実験では，シェッフェの一対比較法の浦変法を用いた．具体的には，聴取者には，傾き比が異なる 2 つの音を呈示し，最初に呈示された音と比較して後続の呈示音の Roughness を 7 段階で評価させた．なお，評価は同一の変調度内で行なわせた．

4.4.2 振幅包絡の形状に関する主観評価実験の結果

変調度が 0.4，0.8，1.0 の場合の主観評価実験の結果をそれぞれ Fig. 4.5，4.6，4.7 に示す．

Fig. 4.5 - 4.7 の横軸は Roughness の相対的な大きさを表わしており，尺度上の矢印は各刺激

Table 3.4. List of stimuli.

Stimulus ID	Modulation wave ID	Modulation depth
S _{TAM1}	T _{0.1}	0.4
S _{TAM2}		0.8
S _{TAM3}		1.0
S _{TAM4}	T _{0.3}	0.4
S _{TAM5}		0.8
S _{TAM6}		1.0
S _{TAM7}	T _{0.5}	0.4
S _{TAM8}		0.8
S _{TAM9}		1.0
S _{TAM10}	T _{0.7}	0.4
S _{TAM11}		0.8
S _{TAM12}		1.0
S _{TAM13}	T _{0.9}	0.4
S _{TAM14}		0.8
S _{TAM15}		1.0

を表わし，尺度上で右に布置された刺激ほど，その刺激に対する Roughness が大きいことを意味している．各変調度において，いずれの刺激間においても 5 %有意水準で有意差が認められた．また，分散分析の結果，いずれの変調度においても，5 %有意水準で主効果が有意であることが示された．

Fig. 4.5 - 4.7 より，傾き比によって Roughness が変わることが確認できる．また，変調度間において，Roughness が大きい順序は同一であることが確認でき，いずれの変調度においても，最も Roughness が大きいものが T_{0.1}，最も小さいものが T_{0.5} であることが確認できる．さらに，同じパワースペクトルをもつ，すなわち振幅包絡の形状が対称な三角波間では，全ての組み合わせにおいて，立ち上がりの傾きが鋭い方が，Roughness が大きいことも確認できる．

4.4.3 振幅包絡の形状と Roughness の関係に対する考察

Fig. 4.5 - 4.7 より，振幅包絡の形状によって Roughness が変わることが確認できた．また，Roughness が大きい順に，T_{0.1}，T_{0.9}，T_{0.3}，T_{0.7}，T_{0.5} となっていたので，Roughness が大

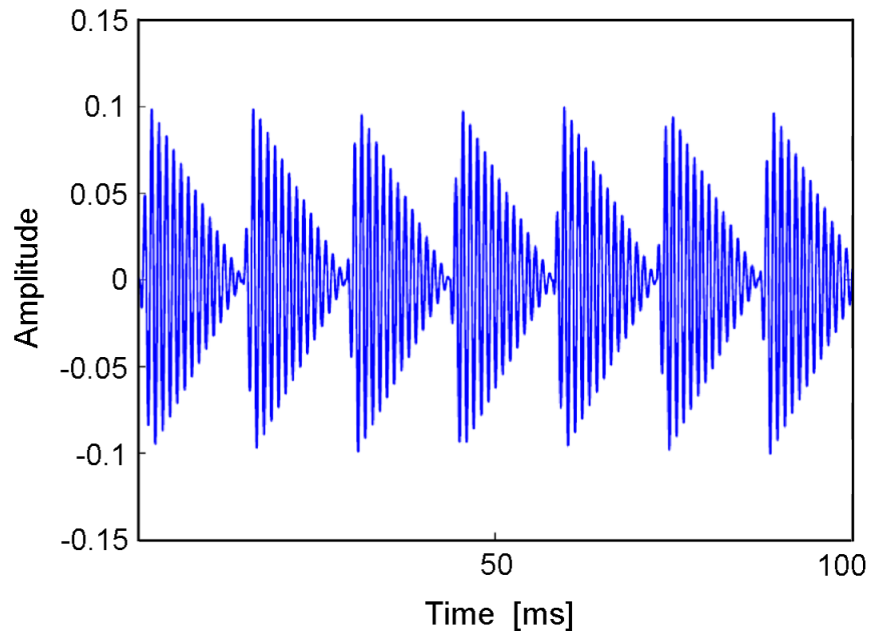


Figure 4.4 Waveform (Stimulus ID : S_{TAM3}).

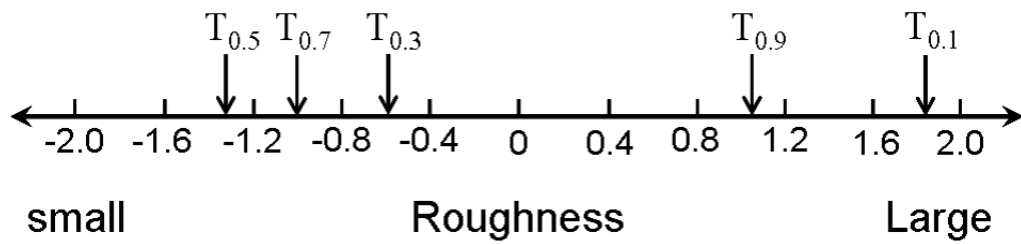


Figure 4.5 Result of experiment (Modulation depth : 0.4).

きい方がより急峻な傾きを含む，すなわち，三角波の振幅スペクトルにおいて高域の振幅が大きいことも確認できた．この結果は，従来の知覚モデルに矛盾せず，振幅包絡の振幅スペクトルによって Roughness を表すことができることを意味している．ところが，同一の振幅スペクトルをもつ変調波，すなわち， $T_{0.1}$ および $T_{0.9}$ と， $T_{0.3}$ および $T_{0.7}$ では，立ち上がりの傾きが緩やかな場合よりも，立ち上がりの傾きが急峻な方（ここでは， $T_{0.1}$ および $T_{0.3}$ ）が，Roughness が大きいことも確認できた．よって，振幅スペクトルが同じであっても，位相スペクトルが異なっていれば，Roughness 知覚は異なると考えられる．すなわち，過去の研究 [22] で用いられていた波とは異なる波を変調波として用いているが，その研究と同様に，

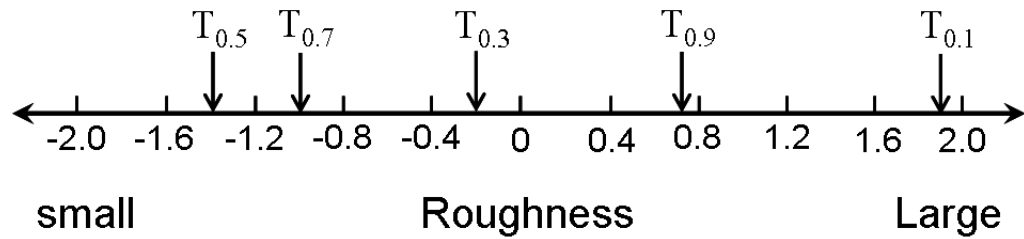


Figure 4.6 Result of experiment (Modulation depth : 0.8).

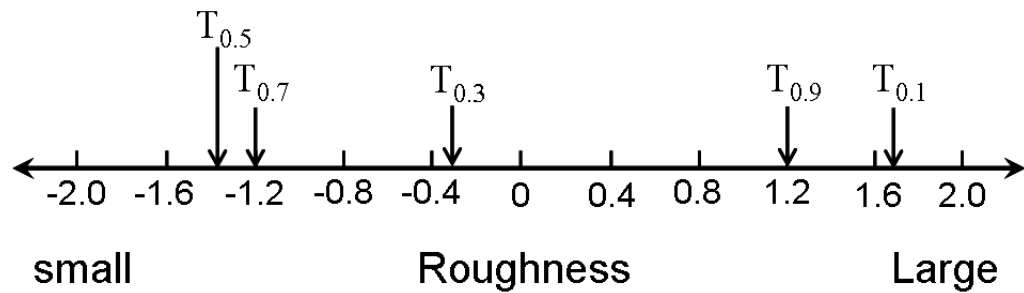


Figure 4.7 Result of experiment (Modulation depth : 1.0).

Roughness 知覚において振幅包絡の位相が影響を及ぼす可能性が示唆され，その影響を調査する必要性が示された．

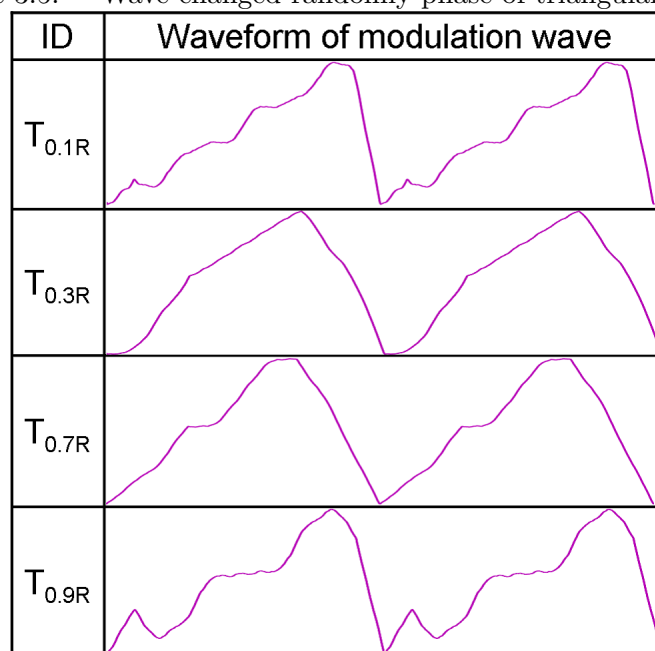
4.5 位相と Roughness の関係

4.4 節より，振幅包絡の位相が Roughness 知覚に及ぼす影響を調査する必要性が示唆された．そこで，4.4 節において用いた三角波と同じ振幅スペクトルをもつが，異なる位相スペクトルをもつ三角波を振幅包絡とする AM 音を新たに合成し，それらを用いて，振幅包絡の位相が Roughness 知覚に及ぼす影響を調査する．

4.5.1 振幅包絡の位相に関する主観評価実験

振幅包絡の位相スペクトルのみが，4.4 節において用いた三角波と異なる波を振幅包絡とする AM 音を用いて，振幅包絡の位相スペクトルが Roughness 知覚に及ぼす影響を調査する．

Table 3.5. Wave changed randomly phase of triangular wave.



防音室内で正常な聴力を持つ健聴者 3 名に，振幅包絡の振幅スペクトルは同一であるが，位相スペクトルのみが異なる三角波を振幅包絡とする AM 音に対して，粗さ感を主観評価させる実験を行なった．用いた刺激音は，4.4 節と同様に，振幅変調された 1 kHz の純音である．なお，用いた変調波は， $T_{0.1}$ ， $T_{0.3}$ ， $T_{0.7}$ ， $T_{0.9}$ だけでなく，それらの三角波における各周波数成分の位相をランダムに反転したものであり，それぞれ $T_{0.1R}$ ， $T_{0.3R}$ ， $T_{0.7R}$ ， $T_{0.9R}$ とした．それらの波の概観を Table 3.5 に示す．変調度および変調周波数は，4.4 節と同じである．刺激音は 4.4 節と同様にダイオティックに呈示した．なお，全ての音の音響パワーをそろえており，4.4 節と同様に呈示レベルを測定した結果，これらの呈示レベルの平均値は $L_A = 56.5$ dB であった．

主観評価実験では，4.4 節と同様に，シェッフェの対比較法の浦変法を用いて Roughness を 7 段階で評価させた．なお，評価は $T_{0.1}$ または $T_{0.3}$ と同じ振幅スペクトルをもつ波を振幅包絡とする AM 音において，各変調度内で行なわせた．

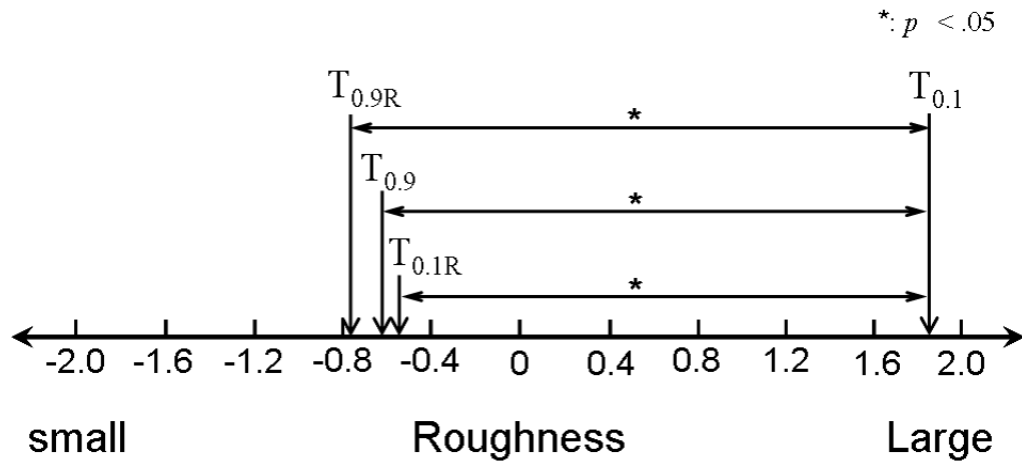


Figure 4.8 Result of experiment using AM sounds with amplitude spectrum on S_{TAM1} .

4.5.2 振幅包絡の位相に関する主観評価実験の結果

$T_{0.1}$ と同じ振幅スペクトルをもつ波を振幅包絡とする AM 音における，各変調度の実験結果をそれぞれ Fig. 4.8 - 4.10， $T_{0.3}$ の場合の実験結果をそれぞれ Fig. 4.11 - 4.13 に示す．Fig. 4.8 - 4.13 の横軸は，Fig. 4.5 - 4.7 と同様に，Roughness の相対的な大きさを表わしており，尺度上の矢印は各刺激を表わしている．分散分析の結果，いずれの実験結果においても，5 %有意水準で主効果が有意であることが示された．

Fig. 4.8 - 4.13 より，ほとんどの刺激間に有意差が確認されており，振幅包絡の位相によって Roughness が変わることが確認できる．また，いずれの変調度であっても，最も Roughness が大きいものは立ち上がりの傾きが最も急峻な $T_{0.1}$ または $T_{0.3}$ であることが確認できる．さらに，変調度によって刺激間に 5 %水準で有意差が認められた刺激の組み合わせ数は異なっており（例えば，変調度が 0.4 の Fig. 4.8 では 3 組だが，変調度が 0.8 の Fig. 4.9 では 5 組，変調度が 1.0 の Fig. 4.10 では 6 組），Fig. 4.8 - 4.13 より，変調度が 1.0 の場合にその個数が最も多く，かつその個数は全ての組み合わせ数であることも確認できる．

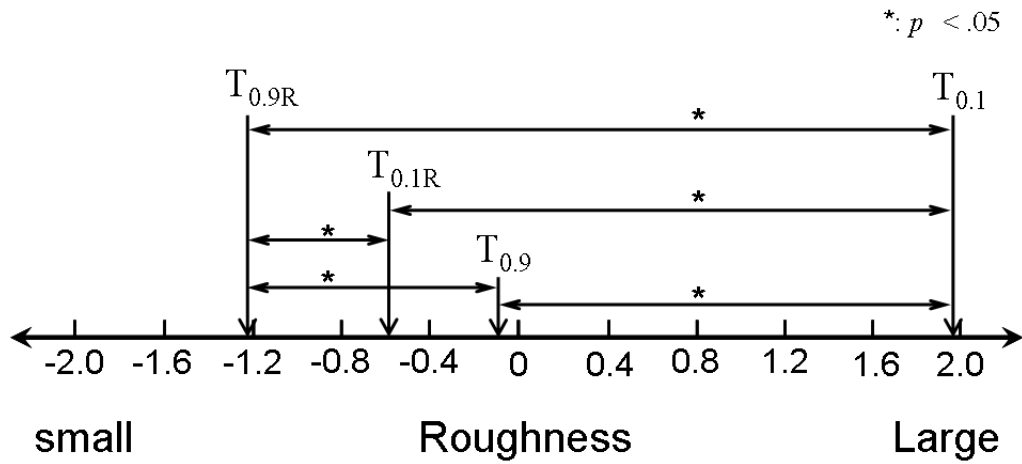


Figure 4.9 Result of experiment using AM sounds with amplitude spectrum on S_{TAM2} .

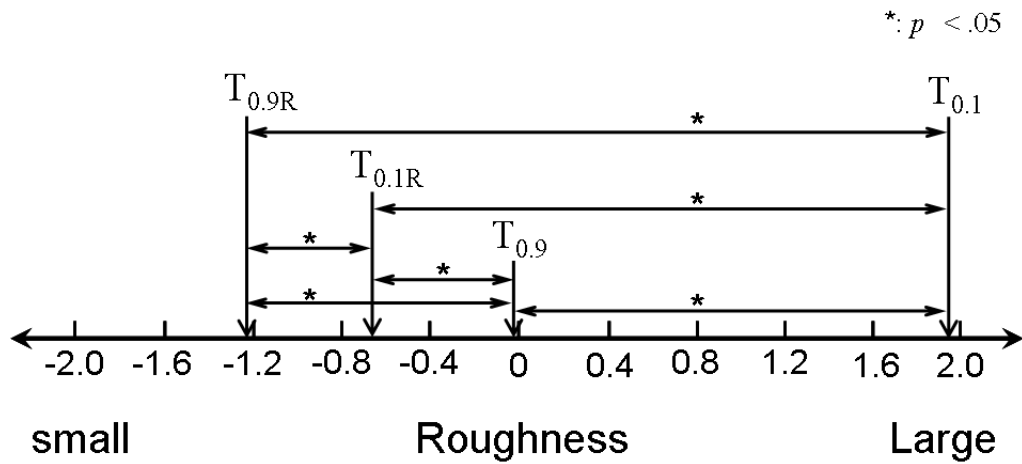


Figure 4.10 Result of experiment using AM sounds with amplitude spectrum on S_{TAM3} .

4.6 検討結果に対する考察

Fig. 4.8 - 4.13 より，振幅包絡の位相によって Roughness 知覚が有意に変化することが確認できた．すなわち，過去の研究 [22] で用いられていた波とは異なる変調波として用いた場合でも，Roughness 知覚においては，振幅包絡の位相スペクトルが影響を及ぼすことが明らかになった．また，各刺激間に有意差が認められた刺激の組み合わせ数に変調度によって異なっていることが確認された．よって，振幅包絡の位相スペクトルによる Roughness の違いは，変調度によって知覚しやすくなる，または，知覚しにくくなることが示唆された．この

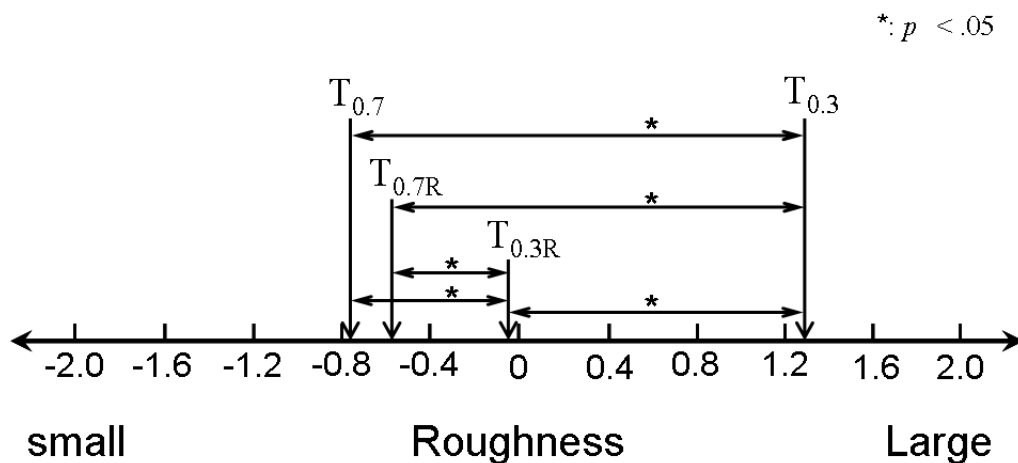


Figure 4.11 Result of experiment using AM sounds with amplitude spectrum on S_{TAM4} .

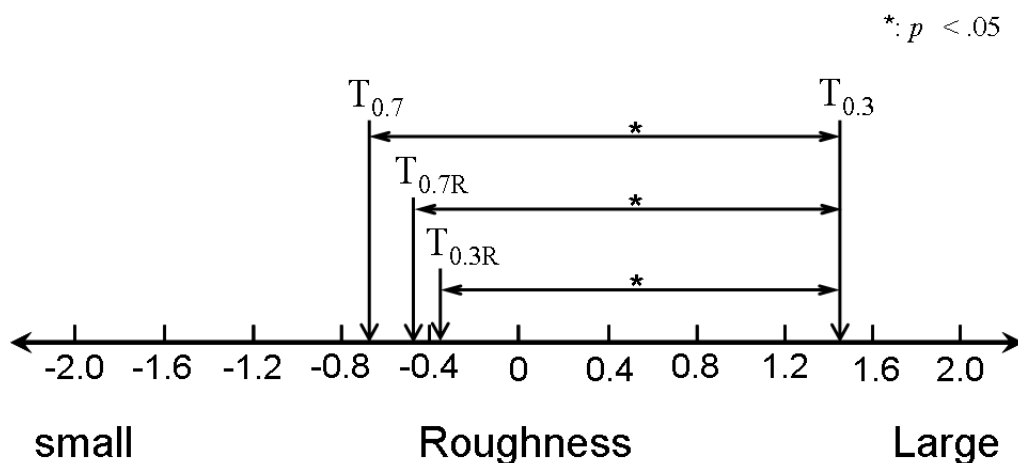


Figure 4.12 Result of experiment using AM sounds with amplitude spectrum on S_{TAM5} .

結果は、変調度が大きいほど Roughness が大きくなるという従来の知見に矛盾していないと考えられる。

4.7 結言

本章では、三角波によって振幅変調された音を対象とし、それに対する粗さ感を評価する方法の検討について述べた。その結果、従来法は、三角波によって振幅変調された音に対する粗さ感を正しく評価できないことが確認され、Roughness 知覚における従来のモデルが振

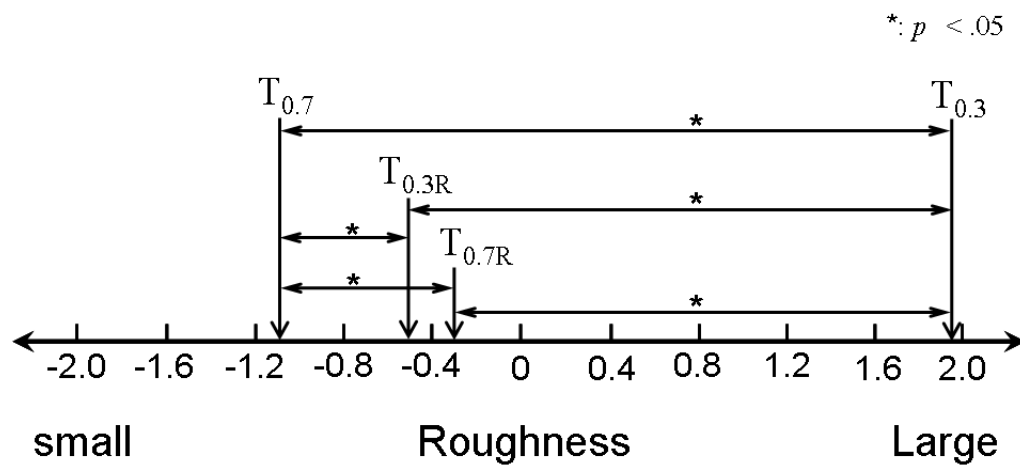


Figure 4.13 Result of experiment using AM sounds with amplitude spectrum on S_{TAM6} .

幅包絡における形状の変化対応できておらず，振幅包絡の形状が Roughness 知覚に影響を及ぼすことが示唆された．そこで，振幅包絡の形状と Roughness の関係を調査し，振幅包絡における立ち上がりの傾きによって Roughness 知覚が変わることが確認された．また，振幅包絡における位相と Roughness の関係も調査し，その位相によって Roughness 知覚が変わることも確認された．よって，振幅包絡における立ち上がりの傾きや位相を新たに考慮することで，Roughness を正しく評価できることが示された．

第5章 演奏音の熟達度評価に対する変動音評価法の応用

5.1 緒言

本章では、変動音に対する評価法の応用例として、演奏音の熟達度評価への導入について述べる。2章で述べたように、熟達度評価に関する先行研究では、演奏データから抽出した特徴を用いて熟達度を自動評価している。人間による熟達度評価は、演奏の特徴のみだけでなく、その特徴に対する印象に基づいて行なわれていると考えられるが、熟達度とその印象の関係については明らかにされていない。先行研究 [32], [33] より、音楽を聴取した際に感じられる、ゆらぎに対する印象の変動感が、熟達度評価にかかわっていると考えられるので、本研究では、変動感評価と熟達度評価の間には何らかの関係があると考え、それを明らかにすることで、変動音評価法の一つである、変動感の評価法を演奏音の熟達度評価に応用可能か否かを検討する。変動感評価においては、周期的または準周期的に変動している演奏音を用いることが適切であるため、マンドリントレモロ音を対象とする。まず、5.2 節において、熟達度評価への応用に関する概要を述べた後に、5.3 節において、トレモロ音に含まれる特徴の分析として行なった、最大 plucking rate、実演奏に含まれる時間および振幅逸脱の調査について説明する。次に、5.4 節において、その調査結果に基づいた、熟達度評価実験の概要とその結果について述べ、5.5 節において、トレモロ音に対する変動感の評価結果を説明し、5.6 節において、熟達度評価結果と変動感の評価結果の関係に対する考察を述べる。

5.2 マンドリントレモロ音に対する熟達度と変動感の関係

3.2 節で述べたように，トレモロ音は plucking rate，時間逸脱および，振幅逸脱の要因で特徴づけられる，ゆらぎを持った変動的持続音として捉えることが可能であろう．倍音の含み具合やノイズ成分の含み方など，上記の 3 要因以外にも，楽曲演奏におけるトレモロ音の知覚印象に寄与する要因は存在するであろうし，曲想，テンポ，コンテキストなどによっても，ある音符を演奏する際に適切なトレモロ音は異なるであろう．しかし，これら全ての要因について網羅的に調べあげることは困難であるため，本研究では，曲想やテンポなどを排除した条件下で，上記 plucking rate，時間逸脱および，振幅逸脱の 3 つの物理的要因に絞って取り扱うこととする．

トレモロ音を聴取したとき，少なくともマンドリン奏者であれば，それが熟達した演奏者による演奏であるのか，未熟な者によるものであるのかを，ある程度判断することができる．一方で，3.2 節で述べたように，トレモロ音は大略的に考えるとのこぎり波のような振幅包絡を持った音，すなわち，AM 音であると見なすことができる．このような遅い速度の変動音を聴取すると，変動感を知覚すると言われている [7], [8] ため，トレモロ音の聴取時には変動感も知覚されていると考えられる．

そこで本研究では，トレモロ音の知覚印象として，変動感と，その音を演奏しているであろう演奏者の熟達度を上げ，これら 2 種類の知覚印象の間関係を調べるとともに，これらと物理的要因，特に plucking rate との関係を明らかにすることとした．換言すると，どのような plucking rate のとき，熟達した演奏者のトレモロ音に聞こえ，そのとき変動感はどうに感じられるのかを明らかにする．

5.3 マンドリントレモロ音に含まれる特徴

予備調査として，実際のマンドリントレモロ演奏で用いられる最大 plucking rate と，実演奏における時間逸脱および振幅逸脱について調査を行なった．

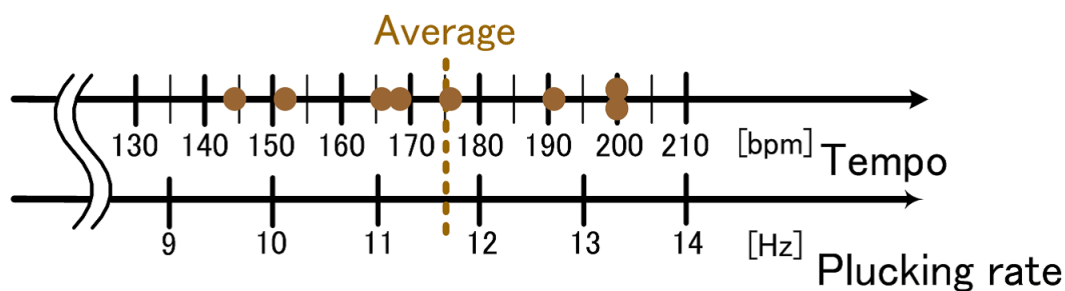


Figure 5.1 Results of questionnaire.

5.3.1 奏者が演奏可能な最大 Plucking rate

奏者が演奏可能な plucking rate の範囲を明らかにするために，1 年以上 7 年未満の演奏経験を持つマンドリン奏者 8 名に，メトロノームを用いて演奏可能な最大の plucking rate を確認させて回答させた．奏者には，「メトロノームを用いてトレモロ演奏を行ない，1 拍の間に撥弦操作を 4 回行なうことができる最大テンポを bpm (beats per minute) で答えてください」と教示し，bpm 値を回答させた．なお，回答に当たっては，必ず実際にマンドリンを弾いて確かめるよう指示した．bpm 値は 1 分 (60 秒) 間の拍数を表すので，bpm 値を b とすると，plucking rate Pr は，式 (5.1) で求められる．

$$Pr = \frac{4 \times b}{60} \quad (5.1)$$

このようにして得られた，最大 plucking rate を Fig. 5.1 に示す．横軸はテンポおよび plucking rate を示し，グラフ内の丸印は得られた回答結果を示している．Fig. 5.1 に示すとおり，最大の plucking rate の平均は 11.7 Hz，標準偏差は 1.8 であった．このことより，奏者は平均約 12 Hz までの plucking rate でトレモロ演奏を行なっていることが確認できた．

5.3.2 実演奏における時間および振幅逸脱

様々な奏者の演奏音における時間および振幅逸脱を明らかにするために，防音室内で，3 年以上 6 年未満の演奏経験を持つマンドリンの熟達者 7 名 (Pl₁-Pl₇) に 5 秒間のトレモロ演奏を

計 5 回行なってもらい、高速度カメラを用いて撥弦操作を記録した。用いた高速度カメラは日本ローパー社の Motion Pro で、撮影速度は 2000 fps、シャッター速度は $1/4000$ s である。用いた楽器は鈴木バイオリン社のマンドリン M-150、ピックはヤマハ社のナイロン製で、色は黒、厚さは 0.635 mm のピック (演奏しやすいように加工したもの) である。演奏音は第 3 対の開放音 D4 (約 295 Hz) とした。第 1, 2 対では弦が細いため、撮影した動画からは弦の振動を確認することは困難であることから今回は調査に用いなかった。また、第 4 対では上方に非演奏弦対が存在しないため、上方向の撥弦操作が他の対を演奏する場合と異なる可能性があるため、この対についても調査しないこととした。演奏強度は一定とし、「 p (ピアノ)」と指定した。これは、「音量は比較的小さい方が良いトレモロ音と悪いトレモロ音の区別がしやすい」という熟達者の意見を取り入れたためである。また、plucking rate は 8 Hz とした。具体的には、120 bpm のメトロノーム音を演奏者の左の耳のみにダイナミックイヤホンを用いて呈示し、メトロノームの 1 拍中に 4 回の撥弦操作を行なうよう教示した。ここで用いたメトロノームはローランド社の DB-90、用いたダイナミックイヤホンはソニー社の ME-L91D である。

市販の運動解析ソフトウェア、ディテクト社 DIPP-Motion XD を用いてピックの動きを追跡させ、2 次元座標データを作成した。実験で用いたピックを Fig. 5.2 に示す。作成した座標データからピックの縦方向の軌跡を抽出した後に、得られたピックの縦方向の軌跡から撥弦時刻を測定した。具体的には、2 本の弦が静止した状態における位置のちょうど中間の位置をピックが通過した時刻を撥弦時刻と定義した。なお、撥弦時刻の推定誤差は、撮影速度が 2 kfps のため、約 0.5 ms であると言える。

このようにして測定された撥弦時刻から時間および振幅逸脱の量を調査した。3.2 節で述べたように、“逸脱がない状態の演奏における撥弦時刻からのずれ”を抽出し、時間逸脱 $x_{1,k}$ ($k = 1 - K$) とした。また、“撥弦時刻における最大振幅値からのずれ”を記録波形から抽出し、振幅逸脱量 $x_{2,k}$ とした。そして、 $x_{1,k}$ および $x_{2,k}$ の標準偏差を求めた。

演奏者毎の $x_{1,k}$ の標準偏差を Fig. 5.3、演奏者毎の $x_{2,k}$ の標準偏差を Fig. 5.4 に示す。Fig.



Figure 5.2 Pick used for recording experiment.

5.3 より，時間逸脱は演奏者によって異なるが， $x_{1,k}$ の標準偏差は約 3 – 14 ms の範囲内にあり，その平均は約 7 ms であることが分かる．また，Fig. 5.4 より，振幅逸脱は演奏者によって異なるが， $x_{2,k}$ の標準偏差は約 2 – 3 dB の範囲内にあり，その平均は約 2 dB であることが分かる．

5.4 トレモロ音に対する熟達度評価実験

マンドリントレモロ音に含まれる特徴の調査によって，マンドリントレモロ演奏における最大 plucking rate および，実演奏に含まれる時間および振幅逸脱が測定された．そこで，これらの調査結果を反映させてトレモロ音を合成し，これらを用いることで，マンドリントレモロ音の plucking rate，時間逸脱，振幅逸脱と，それを聴取したときに，マンドリン奏者が感じる“演奏者の熟達度”との関係を明らかにすることとした．また，これらの合成音を聴取した際の“変動感”も評価し，合成音から感じられる演奏者の熟達度と変動感の関係についても明らかにする．合成したトレモロ音を“模擬トレモロ音”と呼び，それらを刺激として用いたのは，実演奏を用いた場合，トレモロ音の plucking rate，時間逸脱，振幅逸脱を完全に統制することは困難なためである．

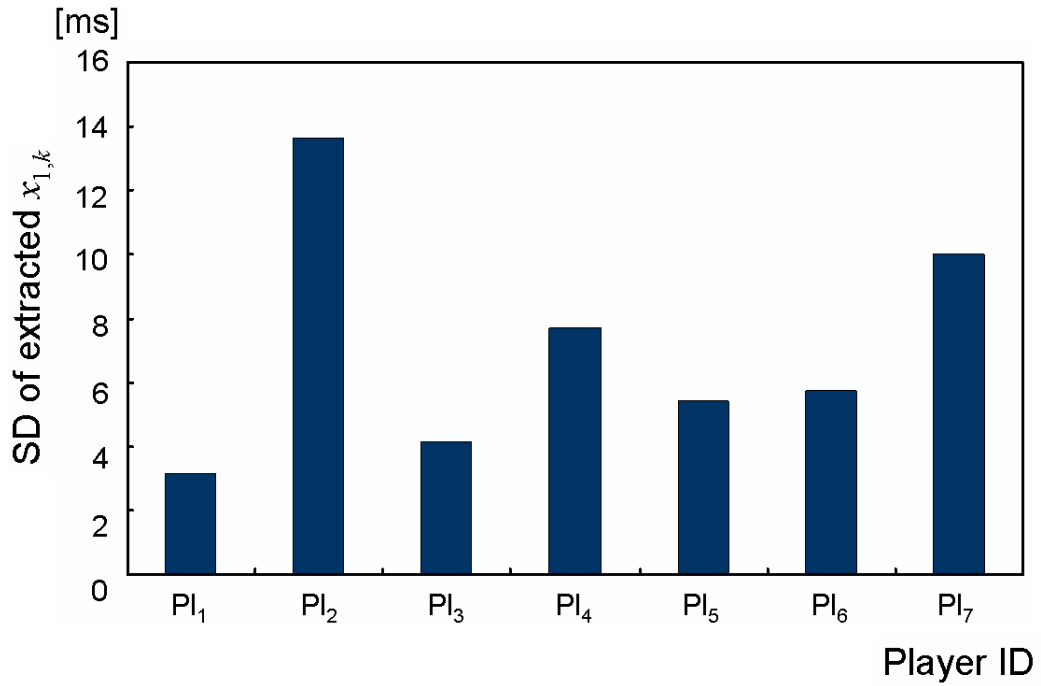


Figure 5.3 Standard deviation of onset deviation for actual performance.

5.4.1 模擬トレモロ音の合成

本研究では，正規乱数によって逸脱の量を決定し，ダウンストロークおよびアップストロークの記録音を用いて模擬トレモロ音を合成した．

防音室内にて，約 1 年の演奏経験を持つマンドリン奏者 1 名に単一のダウンストロークおよびアップストロークをそれぞれ 5 回行なわせ，マイクロフォンを用いて演奏音を録音した．演奏音は，5.3.2 節で述べた，時間および振幅逸脱の調査で用いたのと同様，第 3 対の開放音 D4(約 295 Hz) とした．演奏強度は「 p (ピアノ)」と指定した．使用楽器および使用ピックは，5.3.2 節で述べた，時間および振幅逸脱の調査におけるトレモロ演奏の記録で用いたものと同じである．録音に使用したマイクロフォンは RODE Microphones 社の NT2-A，録音機はティアック社の HD-P2 で，量子化ビット数 16 bit，サンプリング周波数 48 kHz で収録した．次に，収録したダウンストロークおよびアップストロークの記録音のうち，1 対における 2 本の弦の撥弦時刻差が約 30 ms 以下のものから無作為にそれぞれ 1 音選出した．このようにして

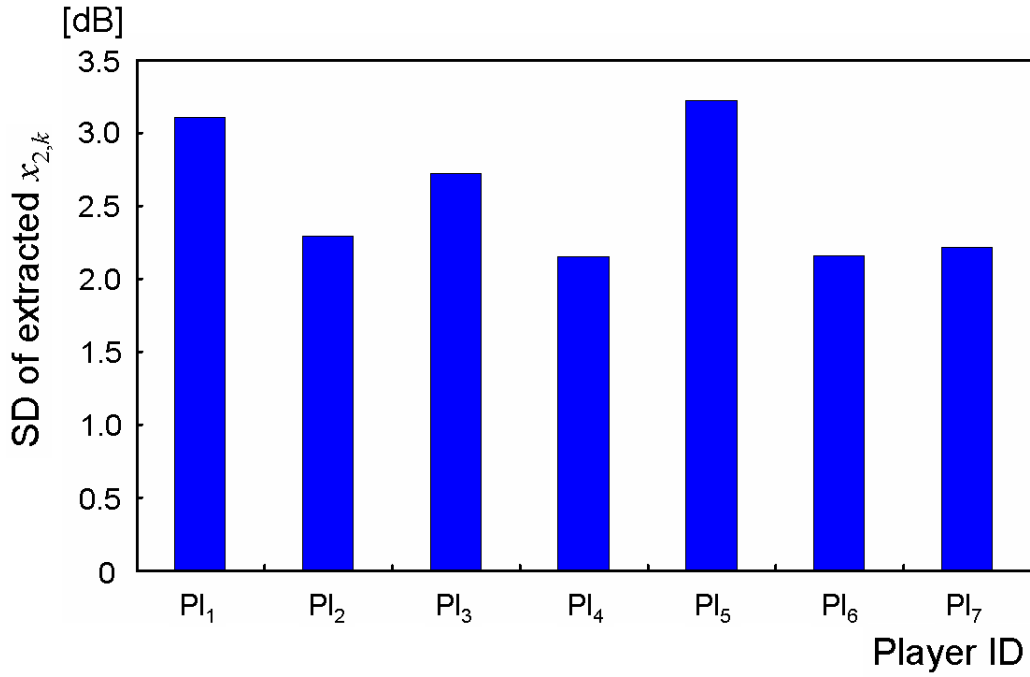


Figure 5.4 Standard deviation of amplitude deviation for actual performance.

選出されたダウンストローク音に対し，アップストローク音は $L_{AE} = 4.4$ dB 低かったため，アップストローク音のレベルを調整して，両者のレベルをそろえた．以上のように加工されたダウンストローク音，アップストローク音を，それぞれ S_D ， S_U と表記する．

S_D と S_U を用いて，まず，時間逸脱，振幅逸脱をともに含まない模擬トレモロ音を合成した．この際，plucking rate は 4 - 12 Hz (1 Hz 間隔) の 9 通りとした．plucking rate から IOI が自動的に算出されるので，この IOI の時間間隔で S_D と S_U を交互に配置した．この配置は時間長が 5 s を超えたときに終了した．なお， S_D と S_U を交互に配置した後に，各 S_D および S_U の波形の終端 20 ms にテーパーをかけた．今回は，撥弦の 20 ms 前の時刻から 0 に収束するように線形的に波形を弱めるテーパーを用いた．これらの刺激を「逸脱なし」の刺激と呼ぶことにする．

次に，上記の 9 通りの plucking rate に対して，時間逸脱と振幅逸脱の両方を含む模擬トレモロ音を合成した．この際，正規乱数を用意し，この乱数の分布の標準偏差が 7 ms に相当するような時間逸脱量の列を生成した．なお，ここで用いた乱数の分布の標準偏差は，5.3.2 節

で述べた，実演奏における時間逸脱の調査結果に基づいている．また，これと同一の乱数を用い，分布の標準偏差が，2 dB または 4 dB に相当する振幅逸脱レベルの列を生成した．なお，ここで用いた乱数の分布の標準偏差 2 dB は，5.3.2 節で述べた，実演奏における振幅逸脱の調査結果に基づいている．4 dB は，振幅逸脱の調査によって得られた $x_{2,k}$ の標準偏差の範囲を超える逸脱量をもつトレモロ音，すなわち熟達者の場合よりも大きい振幅逸脱を含んだトレモロ音においても plucking rate と熟達度評価の関係を調査するために設定した．Plucking rate から得られた等間隔な各 S_D ， S_U の時刻から上記の操作で得られた時間逸脱分それらをずらして， S_D 及び S_U の配置時刻を決定した．またこの際，各 S_D 及び S_U の振幅は，上記の操作で得た振幅逸脱レベル分，それぞれ増幅・減衰させた．時間逸脱量の列と振幅逸脱レベルの列は同一の乱数列によるものなので，次の音の発音時刻までの間隔が長い S_D または S_U ほど大きなレベルで合成されている．

以上のように，9 通りの plucking rate それぞれに対して，「逸脱なし」，「時間逸脱 7 ms; 振幅逸脱 2 dB」，および「時間逸脱 7 ms; 振幅逸脱 4 dB」の 3 種類の模擬トレモロ音を合成した．いずれの模擬トレモロ音とも持続時間は約 5 s である．

5.4.2 熟達度評価実験の概要

合成された 27 種類の模擬トレモロ音を用いて，そのトレモロ音を演奏していると想定される演奏者の熟達度を評価する聴取実験を行なった．聴取者は，1 年以上 6 年未満の演奏経験を持つマンドリン奏者 5 名である．27 種類の模擬トレモロ音を，3 種類の逸脱パターン（「逸脱なし」，「時間逸脱 7 ms; 振幅逸脱 2 dB」，「時間逸脱 7 ms; 振幅逸脱 4 dB」）ごとにグループ分けし，それぞれ，各逸脱パターン内の plucking rate が異なる 9 種類の模擬トレモロ音から 2 個ずつ前後に組み合わせた計 36 対を聴取者に呈示し，前後どちらの音の方がより熟達した演奏者によるトレモロ音と感じられるかを，二肢強制選択法で回答させた．なお，順序効果については考慮しなかった．ここで生じる順序効果とは，呈示される 2 つの模擬トレモロ音

の違いは plucking rate のみであるため、plucking rate のみに依存していると考えられる。例えば、plucking rate が 8 Hz のものと 9 Hz のものを呈示された場合、2 音の plucking rate の差が 1 Hz と小さく、2 音がほとんど同じような音であるため、呈示順序によって熟達度評価が変わってしまう危険性が呈示順序の影響といってよいだろう。本研究では全ての対における 2 音の呈示順序を、plucking rate が高い音から低い音のみ、または plucking rate が低い音から高い音のみなどとせず、ランダム、すなわち plucking rate が高い音から低い音とその逆を用いている。これにより、呈示順序による熟達度評価への影響はほとんどないと考え、本研究では順序効果を考慮しなかった。刺激音は、STAX 社のアンプ SRM-313 とヘッドセット SR-303 を通じてダイオティックに呈示した。呈示レベルは、聴取者それぞれに、聞きやすいレベルに調節させた。1 kHz の純音を用いたラウドネスマッチングによって、これらの呈示レベルを測定した結果、これらの呈示レベルの平均値は $L_A = 50.8$ dB であった。

5.4.3 熟達度評価実験の結果

各逸脱パターンの刺激グループ内で、それぞれの模擬トレモロ音が「より熟達した演奏者によるトレモロ音」と判断された数を 5 名の聴取者にわたってプールした数を Fig. 5.5 に示す。この数を、熟達度評価値と呼ぶことにする。聴取実験は、各逸脱パターンの刺激グループ内で行われたため、異なる逸脱パターン感での評価の比較を行なうことは直接できないが、Fig. 5.5 より、大略的には、どの逸脱パターンにおいても plucking rate が 9 - 11 Hz の模擬トレモロ音が他の plucking rate の場合より「熟達度が高い演奏」と評価された様子が分かる。各逸脱パターン内で χ^2 適合度検定を行なった結果、有意水準 5 %において、いずれの逸脱パターン内でも、plucking rate 間に偏りが無いとは言えないことが示された。

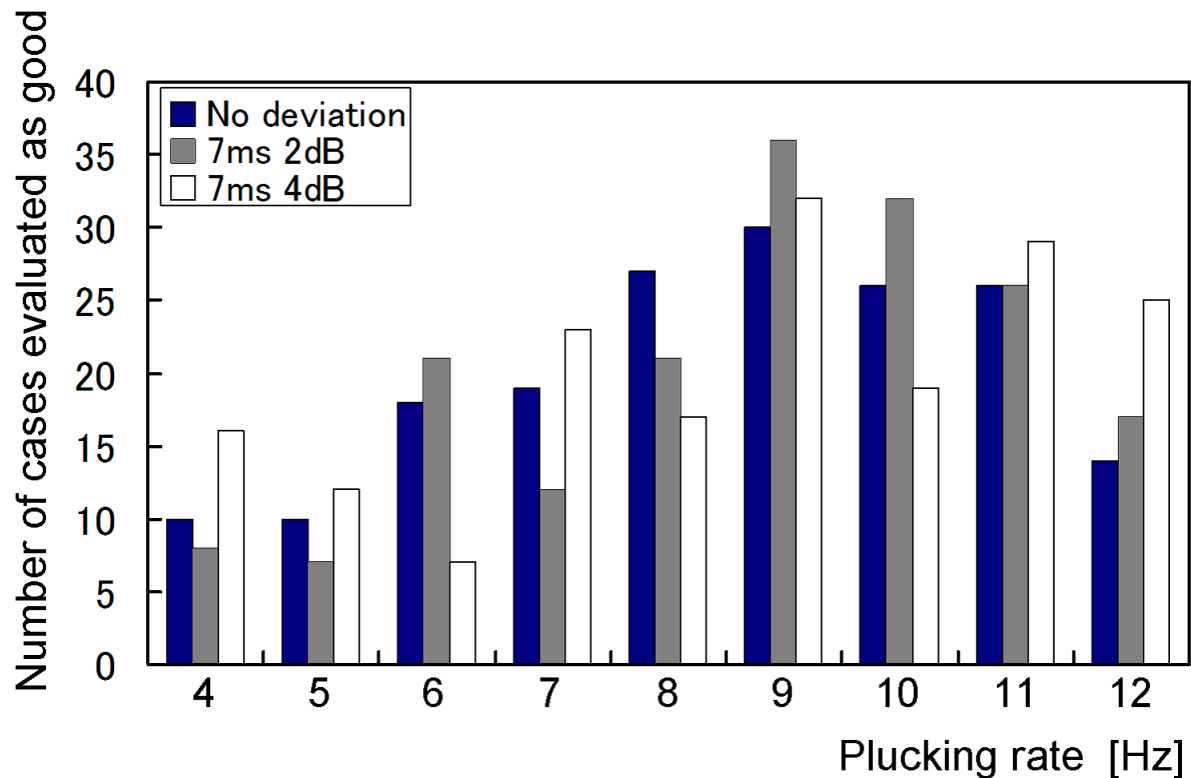


Figure 5.5 Comparison of subjective evaluation results for tremolo proficiency.

5.5 トレモロ音に対する変動感評価

2章で述べたように，Fastl [7] および Fastl & Zwicker [8] が純音に振幅変調をかけた刺激の主観的な変動感を調べた結果，変調周波数が約 4–8 Hz の時に FS が最大となり，それ以外の変調周波数では急激に FS が低下する様子が示されている．しかし，本研究で対象としているトレモロ音は，振幅変調を伴う複合音であるため，Fastl[7] および Fastl & Zwicker[8] の調査結果をそのままトレモロ音の変動感に適用できるかどうかは確かではなかった．そこで，前述の聴取実験で用いたトレモロ音と同じ基本周波数を持つ複合音に対して振幅変調した音に対する主観的な変動感を，実験によって予備的に調査した．この予備実験では，第 5 高調波までを含む複合音が用いられ，2 名によって変動感の評価が行なわれた．その結果，若干のばらつきはあったものの，大略的には，変調周波数が 4–8 Hz の時に主観的な変動感が大きくなり，振幅変動を伴う純音での変動感 [7], [8] と同様の調査結果が得られた．なお，ここで調べた，振

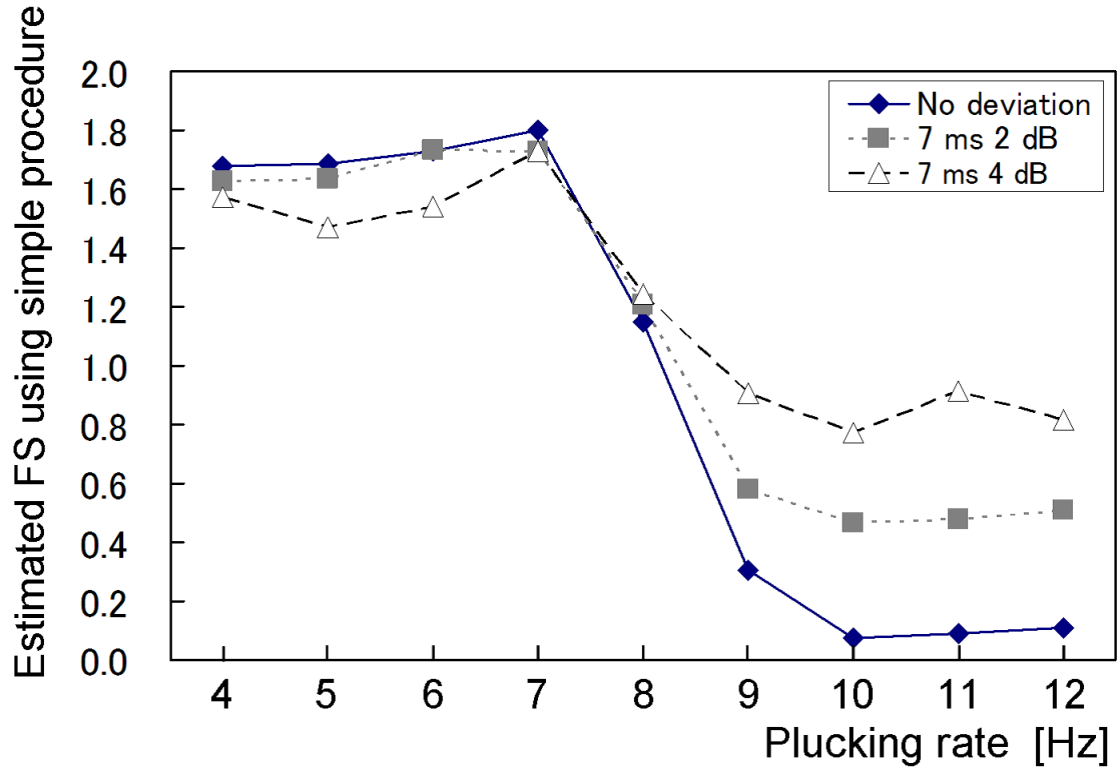


Figure 5.6 Estimated FS for simulated tremolos under three conditions.

幅変調された複合音の変動感と Fastl & Zwicker[8] によって得られた振幅変調された純音の変動感の間には強い正の相関 ($r = .94$ ($n = 15$)) が確認された．以上の結果をふまえ，今回用いた模擬トレモロ音の振幅包絡から 4 - 8 Hz の成分の量を抜き出し，この量をもってこれら模擬トレモロ音の FS を評価することとした．その評価では，3.5 節で述べた単純法を用いた．

模擬トレモロ音に対する FS の評価値を，Fig. 5.6 に示す．Fig. 5.6 より，plucking rate が 7 Hz 以下の領域においては，plucking rate が高くなるにつれて FS の評価値が大きくなるが，plucking rate が 7 Hz を超えると，急激に FS の評価値が小さくなる様子が分かる．

5.6 実験結果と評価した変動感の関係

模擬トレモロ音に対する FS の評価値と，Fig. 5.5 に示した熟達度評価値の相関を，各逸脱パターンにおいて求めた結果，どの逸脱においても中程度の負の相関 ($-.57 < r < -.74$ ($n = 9$)) が確認され，各逸脱パターンにおける r 値の平均を求めたところ，中程度の負の相関 (r

$= -0.63$ ($n=9$)) が確認された。このことは、熟達度の高い演奏者によるものと判断されたトレモロ音は、あまり強い変動感を与えない音であることを示唆する。たしかに、変動感が大きすぎるトレモロ演奏は、たどたどしい演奏であるとの印象を与えるであろうことは想像に難くないことから、この結果は、われわれの直感に合致するものだと考えられる。

Fig. 5.5 に示した熟達度評価値、および Fig. 5.6 に示した FS の評価値は、いずれも撥弦操作回数によって大きく変化し、その変化の様子は大略的にはどの逸脱パターンでも同様であった。したがって議論をより単純化するために、熟達度評価値の割合、および FS の評価値を 3 種類の逸脱パターンにわたって平均した様子を Fig. 5.7 に示す。Fig. 5.7 には、5.3 節で述べた、マンドリントレモロ音に含まれる特徴の調査で得られた、マンドリン演奏においてトレモロ演奏可能な plucking rate の範囲 (~ 12 Hz)、および、FS の領域も同時に示す。ここでいう FS とは、Zwicker や Fastl によって提案された心理的な変動感を表す FS を意味しており、評価された FS の値とは異なるものである。

Fig. 5.7 を見ると、9 - 11 Hz の plucking rate の領域において他より高い熟達度評価が得られていることが分かる。同時に Fig. 5.7 から 9 Hz 以上では、FS の評価値が小さいことも分かる。このことは、「上手に聞こえるトレモロ音」は、変動感が大きく感じられる領域を避けた頻度で撥弦を行なうことで実現されることを示唆する。また、中でも 9 Hz の plucking rate で最大の熟達度評価が得られたことから「上手に聞こえるトレモロ音」とは、速すぎない plucking rate という要請と、変動感が大きく感じられないという要請が両立した状態であると考えられることができるかもしれない。よって、変動感の評価法が熟達度評価に応用できることが示唆された。

5.7 結言

本章では、変動音の評価法の一つである、変動感評価を演奏音に対する熟達度評価に応用可能か否かを検討した。マンドリントレモロ音に含まれる特徴を調査し、その特徴と熟達度評

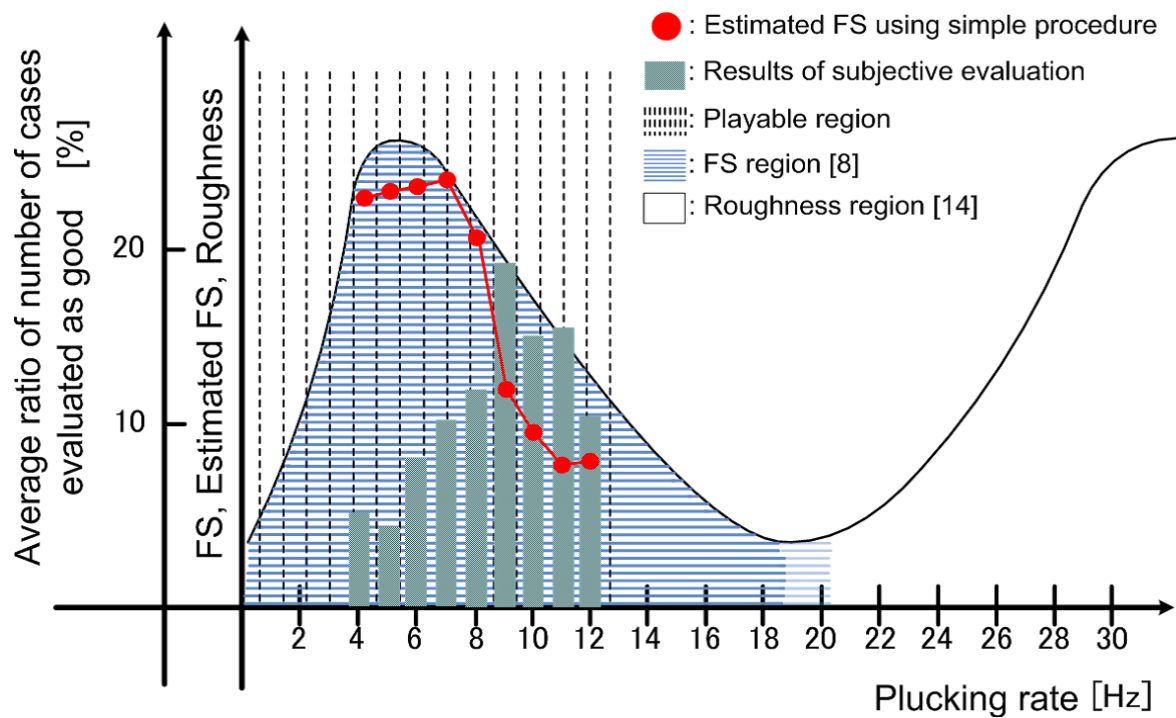


Figure 5.7 Reallationship between our results and FS.

価，変動感評価の関係を調査した．主観評価実験によって得られた熟達度評価値と3.2節で述べた方法を用いた変動感評価値の関係を考察した．調査結果より，熟達度が高い，すなわち，上手に聞こえるトレモロ音は，変動感が大きく感じられる領域を避けた plucking rate で演奏されていることが確認されており，上手に聞こえるトレモロ音は，速すぎない plucking rate という要請と，変動感が大きく感じられないという要請が両立した状態であることが示唆された．よって，変動感の評価法が熟達度評価に応用できることが示唆された．

第6章 電気自動車の接近に対する気づきやすさ 評価に対する変動音評価法の応用

6.1 緒言

本章では、変動感に関する評価法の応用例として、電気自動車の接近に対する気づきやすさの評価への導入について述べる。2章で述べたように、電気自動車は静音性に優れているという長所をもっているが、そのために歩行者がその接近を気づきにくいという短所をもっている。この問題を解決するために、国土交通省が対策案をガイドラインとしてまとめているが、それで示されている条件を全て満たした音はまだ提案されておらず、気づきやすさの評価方法は検討されていない。そこで、これまでに提案された定常音ではなく、音の大きさが変動する音の方が気づきやすいと仮定し、気づきやすさの推定に変動感の推定を応用可能か否かを検討する。まず、6.2節において、気づきやすさの検討に対する概要を述べた後に、6.3節において、本研究で提案する接近音を述べる。次に、6.4節において、気づきやすさを検討するための主観評価実験について述べた後に、6.5節において、その結果に対する考察を述べる。

6.2 気づきやすさの検討

国土交通省が定めるガイドラインに沿った、電気自動車の接近音を提案する。本研究では、音の大きさに対する変動感に着目し、ガソリン車の排気音に含まれる2次変動を電気自動車のモーター音に付与することで、提案する接近音を合成し、その妥当性を確認する。具体的には、まず、アイドリング時におけるガソリン車の排気音と徐行時における電気自動車のモーター音を収録し、収録したガソリン車の排気音における振幅包絡から、時間および振幅逸脱

の特徴を抽出し，得られた時間および振幅逸脱の特徴を強調する．そして，強調された時間および振幅逸脱を収録したモーター音に付与することで，変動をもつモーター音を合成している．この研究では，合成された音を「模擬モーター音」と呼ぶ．模擬モーター音に対して，主観的な音の大きさを表わす Loudness を測定し，Loudness の知覚に影響を与えるか否かを検討する．また，模擬モーター音に対して，気づきやすい音であるか否かを主観評価実験によって確認し，提案手法の妥当性を確認する．このような検討を行なうことによって，変動感の評価が電気自動車の接近に対する気づきやすさの評価に応用可能か否かを明らかにする．

6.3 提案する接近音

6.3.1 合成の概要

モーター音を自動車の排気音のように変動する音に変化させることによって変動感を知覚させ，そのような印象を知覚させることで，電気自動車の接近を歩行者に気づかせることができると考えられる．3章で述べた結果より，1次変動が同じであっても，2次変動が大きくなればなるほど，変動感は大きくなることが確認されているため，抽出した排気音の2次変動をモーター音に付与することで模擬モーター音を合成する．ただし，その方法では1通りの2次変動しか付与することができず，様々な大きさの2次変動をもつ音を合成することができない．

そこで，3章で述べた，様々な大きさの2次変動をもつ音の合成方法に基づいて，模擬モーター音を合成する．3章で述べた合成方法と同様に，模擬モーター音の合成は，主に，排気音からの時間および振幅逸脱の抽出，抽出した逸脱における特徴の抑制または強調，抑制または強調された各逸脱のモーター音への付与に分かれている．モーター音へ付与する時間および振幅逸脱は，離散的であり，連続的なものではなく，それらは短い時間長の爆発音から得られたものである．よって，各逸脱が付与されるモーター音は時間長が短いものでなければならない．そこで，本研究では時間および振幅逸脱を抽出する際に求めた，排気音に含まれ

Table 6.1 Overview of vehicle used in this study.		
Type of vehicle	Manufacturers	Power source
DEMIO	Mazda Motor Corporation	Gasoline
LEAF	NISSAN MOTOR CO.,LTD.	Electricity

る 1 次変動の周期を時間長とするモーター音を収録したモーター音から切り出し，それに対して抑制または強調された各逸脱を付与する．排気音に含まれる時間および振幅逸脱の抽出は，3.4.1 節で述べた方法を用いて行っており，排気音およびモーター音の記録については 6.3.2 節，抽出した各逸脱における特徴の抑制または強調方法については 6.3.3 節で説明する．

6.3.2 ガソリン車の排気音および電気自動車のモーター音の記録

ガソリン車の排気音が必要となるため，アイドリング時におけるガソリン車の排気音を記録する．また，ガイドラインでは，接近音が必要な場面として“発進時から車速 20 km/h までの速度および後退時”と定められているため，本研究では，車速 15 km/h 以下を徐行時とし，その徐行時における電気自動車のモーター音を記録する．

アイドリング時におけるガソリン車の排気音，および徐行時における電気自動車のモーター音を記録した．記録対象のガソリン車は，マツダ社のデミオ [60]，電気自動車は日産社の LEAF である．記録した車の詳細を Table 6.1，外観を Fig. 6.1 に示す．

アイドリング時における排気音の収録では，マフラーの排気口を音源と仮定し，排気口から 0.5m 離れた位置にマイクロフォンを設置した．収録で用いたマイクロフォンは，SHURE 社の SM58 であり，時間長は 5 分で 3 回ずつ収録した．徐行時におけるモーター音の収録では，モーターを音源と仮定し，モーターにマイクロフォンを設置した．モーター音は，モーターの回転数すなわち，走行速度に応じて音響パワーが変化するので，本研究では，15km/h の一定速度で電気自動車を走行させ，音響パワーがほぼ一定のモーター音を収録した．収録に用いたマイクロフォンは，audio-technica 社の AT899 であり，時間長は 30 秒で 5 回ずつ収録した．収録で用いた録音機は，TASCAM 社の DR-680 であり，サンプリング周波数 48 kHz，



(a) DEMIO



(b) LEAF

Figure 6.1 A gasoline vehicle and electric vehicle.

量子化ビット数 16 bit で収録した．なお，野外で収録を行なったため，マイクロフォンには風防を装着した．

6.3.3 ガソリン車の排気音から抽出した各逸脱の特徴強調

様々な大きさの 2 次変動を含む模擬モーター音を合成するために、3.5 節で述べた特徴強調方法に基づいて、抽出した時間および振幅逸脱を抑制または強調する。3.5 節で述べたように、それらの抑制または強調では、既に提案されたピアノ演奏の熟達度推定に関する研究 [29] で抽出する特徴の一部を操作することにより、奏者の演奏傾向を保持した特徴強調を実現しており、各特徴のみを強調する方法が提案されている。操作する特徴は、“記録データに含まれる逸脱量と逸脱傾向の差分”、“逸脱傾向における全体の変動幅”、“逸脱傾向における隣接 2 音間の差分”、および“逸脱傾向と逸脱がない状態における値の差分”である。

本研究では、抽出した各逸脱の傾向を保持したまま、各逸脱における全ての特徴を強調する。まず、3.4.1 節で述べた方法を用いて、排気音に含まれる時間および振幅逸脱 $x_{i,k}$ を抽出し、各逸脱の傾向曲線 $\hat{x}_{i,k}$ を算出する。

次に、3.5 節で述べたように、逸脱傾向曲線の最大値および最小値を求め、逸脱傾向曲線の最大値および最小値の中心値、言い換えるならば、逸脱傾向曲線における変動幅の中心値 M を算出する。また、逸脱傾向の一次的な変化傾向を表わす基準直線を算出する。なお、 $k = 1$ における値を逸脱傾向曲線の最小値、 $k = K$ における値を逸脱傾向曲線の最大値とし、それらを通る一次増加直線 SU 、 $k = 1$ における値を逸脱傾向曲線の最大値、 $k = K$ における値を逸脱傾向曲線の最小値とし、それらを通る一次減少直線 SL を求め、 SU および SL と逸脱傾向曲線の差分を計算し、差分が小さい方を基準直線として用いる。

各特徴の抑制または強調では、まず、逸脱傾向における隣接 2 音間の差分を表わす特徴 $pd_{i,3}$ を抑制または強調するために、基準直線 SU または SL と逸脱傾向曲線 $\hat{x}_{i,k}$ の差分を操作する。抽出した逸脱量には、値が徐々に上昇するまたは下降する傾向がみられるため、この操作によって、そのような逸脱量の一次的な変化傾向を保持したまま抑制または強調を行なうことができる。その操作方法を式 (6.1) に示す。式 (6.1) 内の $x''_{i,3,k}$ はその操作結果、 $C'_{i,3}$ はその特徴を強調する割合を表わしている。

$$x''_{i,3,k} = \begin{cases} SL(k) + C'_{i,3}(\hat{x}_{i,k} - SL(k)) & (\sum |SL(k) - \hat{x}_{i,k}| < \sum |SU(k) - \hat{x}_{i,k}|) \\ SU(k) + C'_{i,3}(\hat{x}_{i,k} - SU(k)) & (\sum |SL(k) - \hat{x}_{i,k}| > \sum |SU(k) - \hat{x}_{i,k}|) \end{cases} \quad (6.1)$$

次に，逸脱傾向と逸脱がない状態における値の差分を表わす特徴 $pd_{i,4}$ を抑制または強調するために，式 (6.1) を用いて得られた値 $x''_{i,3,k}$ と逸脱がない状態における値，すなわち，0 からの差分を操作する．この操作によって，各逸脱量の大きさを小さくまたは大きくすることができる．この操作は，音響信号のパワーを減少または増加させる処理と同じであり，この強調は標準的な強調方法である．その操作方法を式 (6.2) に示す．式 (6.2) 内の $x''_{i,4,k}$ はその操作結果， $C'_{i,4}$ はその特徴を強調する割合を表わしている．

$$x''_{i,4,k} = C'_{i,4}x''_{i,3,k} \quad (6.2)$$

逸脱傾向における全体の変動幅を表わす特徴 $pd_{i,2}$ を抑制または強調するために，式 (6.2) を用いて得られた値 $x''_{i,4,k}$ と逸脱傾向曲線の変動幅の中心値 M の差分を操作する．この操作によって，逸脱量の中心位置からの大きさを小さくまたは大きくすることができる．その操作方法を式 (6.3) に示す．式 (6.3) 内の $x''_{i,2,k}$ はその操作結果， $C'_{i,2}$ はその特徴を強調する割合を表わしている．

$$x''_{i,2,k} = M + C'_{i,2}(x''_{i,4,k} - M) \quad (6.3)$$

最後に，排気音から抽出した逸脱量と逸脱傾向の差分を表わす特徴 $pd_{i,1}$ を抑制または強調するために，式 (6.3) を用いて得られた値 $x''_{i,2,k}$ と抽出した逸脱量の差分を操作する．この操作によって，抽出した逸脱量と逸脱傾向の差分における変化が小さい区間をより小さく，変化が大きい区間をより大きくすることができる．その操作方法を式 (6.4) に示す．式 (6.4) 内の $x''_{i,1,k}$ はその操作結果， $C'_{i,1}$ はその特徴を強調する割合を表わしている．

$$x''_{i,1,k} = x''_{i,2,k} + C'_{i,1}(x_{i,k} - x''_{i,2,k}) \quad (6.4)$$

本研究では，以上の方法によって得られた逸脱 $x''_{i,1,k}$ を用いて模擬モーター音の合成を行なう．

6.4 気づきやすさを検討するための主観評価実験

3章で述べた研究結果より，2次変動を大きくすると変動感が大きくなることが確認されているが，2次変動がそれ以外の印象の知覚に影響を及ぼす可能性は確認されていない．振幅逸脱による2次変動を大きくすることによって，主観的な音の大きさを表わす Loudness の知覚に影響を及ぼす可能性がある．そこで，模擬モーター音の気づきやすさを検討するために，まず，6.3節で述べた方法を用いて合成した模擬モーター音に対する Loudness を主観評価実験によって調査する．

模擬モーター音に対する気づきやすさの検討では，環境音を聴取している状態であっても接近音を聴取可能な状態を“電気自動車の接近を気づくことができる状態”とし，その際の接近音の呈示レベルを2次変動の大きさが異なる模擬モーター音間で比較する．その結果，電気自動車の接近を気づくことができる状態における接近音の呈示レベルが小さいものを，電気自動車に対する接近を気づきやすい音として提案する．

6.4.1 主観評価実験の概要

防音室にて正常な聴力を持つ健聴者5名（Lev₁-Lev₅）に対して，模擬モーター音の大きさを主観評価させた後に，環境音聴取時における模擬モーター音の有無を判断させ，模擬モーター音が国土交通省が定めるガイドラインで示された条件を満たしている接近音であるか否かを検討した．

Table 6.2 List of fluctuating motor sound.

Stimulus ID	Exaggeration ratio for OD	Exaggeration ratio for AD
$S_{0,0}$	0	0
$S_{0,100}$	0	100
$S_{0,200}$	0	200
$S_{100,0}$	100	0
$S_{100,100}$	100	100
$S_{100,200}$	100	200

用いた刺激音は、6.3 節で述べた方法を用いて合成した 6 通りの模擬モーター音と記録した 1 通りの排気音およびモーター音である。なお、時間逸脱を強調または抑制する割合は、0 および 100 % の 2 通り、振幅逸脱を強調または抑制する割合は、0、100 および 200 % の 3 通りとし、合成した音は、時間および振幅逸脱量において強調する割合を組み合わせた ${}_2C_1 \times {}_3C_1 = 6$ 通りとした。また、用いた環境音はピンクノイズとした。用いた模擬モーター音のリストを Table 6.2 に示す。

大きさに対する主観評価実験では、シェッフェの一対比較法の浦変法を用いて刺激音を呈示した。なお、この実験ではモーター音に 2 次変動を付与することによって Loudness の知覚に影響を及ぼすか否かを調査するため、排気音を除く、6 種類の模擬モーター音と記録したモーター音を刺激音として用いた。聴取者には、2 つの音を呈示し、最初に聴いた音の主観的な大きさと次に聴いた音の大きさを比較し、その差を 7 段階評価で回答させた。刺激音は、STAX 社のアンプ SRM-313 とヘッドセット SR-303 を通じてダイオティックに呈示した。なお、全ての音の音響パワーをそろえており、呈示レベルは聴取者それぞれに聞きやすいレベルに調節させた。1 kHz の純音を用いたラウドネスマッチングによって、これらの呈示レベルを測定した結果、これらの呈示レベルの平均値は、 $L_A = 63.0$ dB であった。

模擬モーター音の有無に対する主観評価実験は、極限法を用いて行なった。その実験では、環境音と刺激音を重ね合わせた音を呈示しており、聴取者には、刺激音と環境音における音響パワーの差を 1 dB 増加または減少させたものを聴かせ、刺激音が聞こえたか否かを回答させ

ており，最初の回答結果とは異なる回答が4回続くまで，環境音と刺激音を重ね合わせた音を呈示した．なお，呈示レベルは，大きさに対する主観評価実験における呈示レベルと同じにしており，ここでは，環境音と刺激音を重ね合わせた音を“呈示音”と呼び，刺激音と環境音における音響パワーの差を DI とする．また， DI を増加させていく呈示音の系列を“上昇系列”，減少させていく呈示音の系列を“下降系列”と呼ぶ．なお， DI の上限は，環境音と比べて明らかに刺激音が聞こえる際の音響パワーとし，予備実験でそれを調査した結果に基づいて，+2 dB とした．また， DI の下限は，環境音と比べて明らかに刺激音が聞こえない際の音響パワーとし，予備実験でそれを調査した結果に基づいて -25 dB とした．試行回数は，上昇系列の呈示を3回，下降系列の呈示を3回，計6回であり，系列の呈示順序はランダムとした．例えば，下降系列の場合，まず， DI が +2 dB の呈示音を聴かせ，聴取者に刺激音が聞こえたか否かを回答させ，聞こえた場合は回答用紙に○，聞こえなかった場合は回答用紙に×を記述させる．次に，最初に呈示した音の DI を 1 dB 減少させた呈示音，すなわち， DI が +1 dB の呈示音を聴かせ，同様に，回答させる．そのような手順で，前に呈示した音よりも DI が 1 dB 小さい呈示音を聴かせて回答させ続けると，最初は“聞こえた”という回答の○が続くが，後に刺激音が聞こえなくなると，“聞こえない”と回答され，その回答の×が連続して4回行なわれた場合，呈示を打ち切る．その次は，同様に，上昇系列の音または下降系列の音を呈示し，呈示音に刺激音が含まれていたか否かを回答させた．回答例を Table 6.3 に示す．なお，Table 6.3 内の U は上昇系列，D は下降系列を意味している．

6.4.2 主観的な音の大きさに関する実験結果

主観評価実験の結果を Fig. 6.2 に示す．Fig. 6.2 の横軸は Loudness の相対的な大きさを表わしており，尺度上の矢印は各刺激音を表わし，尺度上で右に布置された刺激ほど，その刺激に対する Loudness が大きいことを意味している．また，Fig. 6.2 の S_M は記録したモーター音を意味している． S_M と各模擬モーター音 $S_{\alpha,\beta}$ ($\alpha = 0, 100, \beta = 0, 100, 200$)， $S_{0,0}$ とそれ

Table 6.3 An example of result for answer.

系列の呈示順序	1	2	3	4	5	6
系列の種類	U	D	U	U	D	D
呈示開始時の DI [dB]	-22	0	-23	-25	-2	1
2						
1						○
0		○				○
-1		○				○
-2		○			○	○
-3		○			○	○
-4		○			○	○
-5		○			○	○
-6		○			○	○
-7		○			○	○
-8	○	○			○	○
-9	○	○	○		○	○
-10	○	○	○	○	○	○
-11	○	○	○	○	○	○
-12	×	○	○	○	×	○
-13	×	×	×	○	×	×
-14	×	×	×	×	×	×
-15	×	×	×	×	×	×
-16	×	×	×	×		×
-17	×		×	×		
-18	×		×	×		
-19	×		×	×		
-20	×		×	×		
-21	×		×	×		
-22	×		×	×		
-23			×	×		
-24			×	×		
-25			×	×		

以外の模擬モーター音, $S_{0,100}$ と $S_{0,200}$, $S_{0,100}$ と $S_{100,200}$, $S_{100,0}$ と $S_{0,200}$, $S_{100,0}$ と $S_{100,200}$, $S_{100,100}$ と $S_{0,200}$, $S_{100,100}$ と $S_{100,200}$, において, 5 %有意水準で有意差が認められた.

Fig. 6.2 より, 記録したモーター音 S_M よりも, 模擬モーター音 $S_{\alpha,\beta}$ ($\alpha = 0, 100$, $\beta = 0, 100, 200$) の方が, Loudness が大きい, すなわち, 主観的に大きいと評価されることが確認できる. また, 模擬モーター音の中で, 最も Loudness が大きいものは $S_{0,0}$, 2 番目は $S_{0,100}$

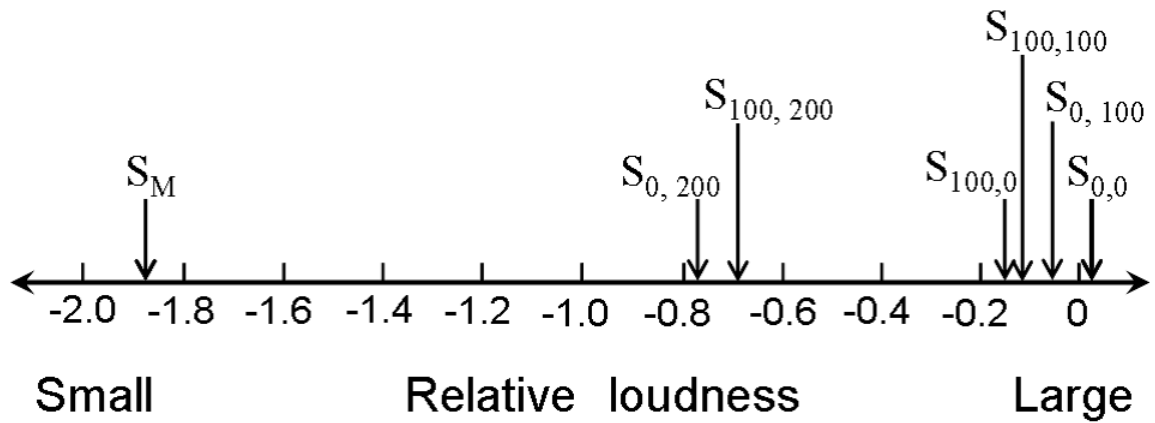


Figure 6.2 Result of experiment for loudness.

と $S_{100,0}$, $S_{100,100}$, 最も小さいものは $S_{0,200}$ と $S_{100,200}$ であることも確認できる .

6.4.3 接近音の気づきやすさに関する実験結果

各聴取者による各刺激音に対する回答結果から絶対閾を求めた . 絶対閾とは , “感覚を生じる最も小さな刺激値” [2] であり , 例えば , 聞こえる音と聞こえない音の境目における音圧レベルである . 本研究では , “聞こえた” という回答から “聞こえなかった” という回答に変わった際の DI と , それよりも 1 dB 大きい DI の中央値 , または , “聞こえなかった” という回答から “聞こえた” という回答に変わった際の DI と , それよりも 1 dB 小さい DI の中央値を算出して絶対閾を求めた . 例えば , Table 6.3 内の呈示順序が 1 の系列の場合 , -11 dB と -12 dB の中央値 -11.5 dB を絶対閾とした . 絶対閾 AL の算出方法を式 (6.5) に示す .

$$AL = \frac{LU + LL}{2} \quad (6.5)$$

ここで , 式 (6.5) 内の LU は , “聞こえた” という回答から “聞こえなかった” という回答に変わった際の DI よりも 1 dB 大きい DI , または , “聞こえなかった” という回答から “聞こえた” という回答に変わった際の DI , LL は , “聞こえた” という回答から “聞こえなかった” という回答に変わった際の DI , または , “聞こえなかった” という回答から “聞こえた” という回答に変わった際の DI よりも 1 dB 小さい DI である .

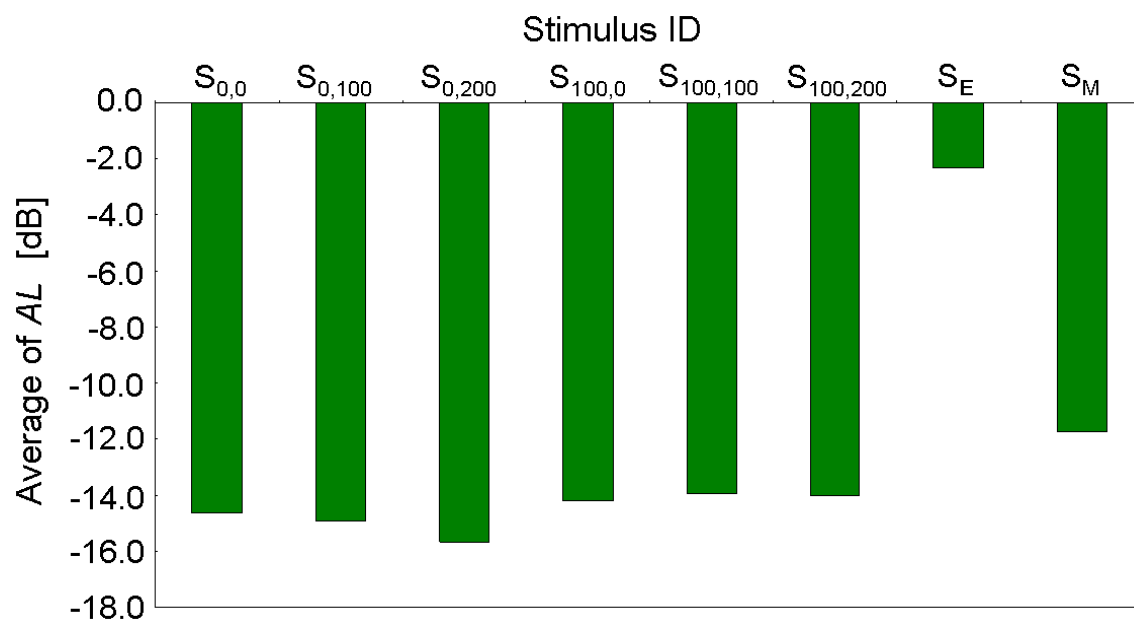


Figure 6.3 Average of absolute limen for each stimulus.

各刺激音における絶対閾の平均を Fig. 6.3 に示す．Fig. 6.3 の縦軸は AL の平均，横軸は刺激音 ID を表わしており， S_E は記録した排気音を意味している．Fig. 6.3 より，記録した排気音 S_E における AL の平均値が最も大きいことが確認できる．また，記録したモーター音 S_E における AL の平均値よりも，各模擬モーター音 $S_{\alpha,\beta}$ の方が小さいことが確認できる．

6.5 調査結果に対する考察

主観的な音の大きさに関する実験結果の考察を述べる．Figure 6.2 より，振幅包絡がほとんど変動しない，すなわち，1 次変動を含まないモーター音よりも，1 次変動を含む模擬モーター音の方が，主観的に大きいと評価されることが確認できた．よって，同じ音響パワーであっても，1 次変動によって音の主観的な大きさが大きくなると考えられる．また，模擬モーター音間において，主観的な大きさが異なることから，1 次変動による影響よりは変化量が小さいが，2 次変動によっても大きさが変わると考えられる．特に，振幅逸脱による 2 次変動が大きくなればなるほど，主観的な大きさが小さくなり，時間逸脱による 2 次変動を大きくしても主観的な大きさはほとんど変わらないことが確認された．以上のことから，1 および 2 次変

動は Loudness の知覚に影響を及ぼしており、特に 1 次変動による影響が最も大きく、次に振幅逸脱の 2 次変動による影響が大きいことが示唆された。また、時間逸脱の 2 次変動による影響はほとんどないことが示された。

次に、電気自動車の気づきやすさに関する実験結果の考察を述べる。Fig. 6.3 より、排気音とそれ以外の刺激音の絶対閾が大きく異なることが確認できた。刺激音間の比較をするために、モーター音における絶対閾とそれ以外の刺激音の絶対閾の差を算出した。その差が負になるということは、その刺激音は、環境音が呈示されている中で聞こえる接近音として、モーター音を用いた場合よりも小さい呈示レベルで呈示できることを意味している。すなわち、その差が負になる刺激音は、モーター音よりも、電気自動車の接近を気づきやすいことを表わしていると言える。そこで本研究では、モーター音における絶対閾とそれ以外の刺激音の絶対閾の差を Degree for Ease of Detection(DED) と呼ぶ。

モーター音を除く各刺激音の DED を Fig. 6.4 に示す。Fig. 6.4 より、 $S_{0,200}$ の DED が最も小さく、次に $S_{0,100}$ の DED が小さいことが確認できる。よって、1 次変動と振幅逸脱のみによる 2 次変動をモーター音に付与することにより、モーター音よりも気づきやすくなると考えられる。また、排気音 S_E の DED が正であることが確認できるので、排気音はモーター音よりも気づきにくい音であり、接近音としては不適切であると考えられる。さらに、1 次変動および時間逸脱のみによる 2 次変動を含む模擬モーター音 $S_{100,\beta}$ の DED は、1 次変動のみの模擬モーター音 $S_{0,0}$ の DED よりも小さいため、時間逸脱のみによる 2 次変動をモーター音に付与することはあまり適切でないと考えられる。

以上のことから、1 次変動と振幅逸脱のみによる 2 次変動を含む模擬モーター音は、自動車の走行状態を想起させることができ、かつ、ガソリン車の排気音よりも小さい呈示レベルで電気自動車の接近を気づくことができるので、そのような音が、国土交通省が定めるガイドラインに沿った、電気自動車の接近音であると提案する。また、1 次変動や振幅逸脱のみによる 2 次変動を付与することによって変動感が大きくなるので、変動感を評価することで、電

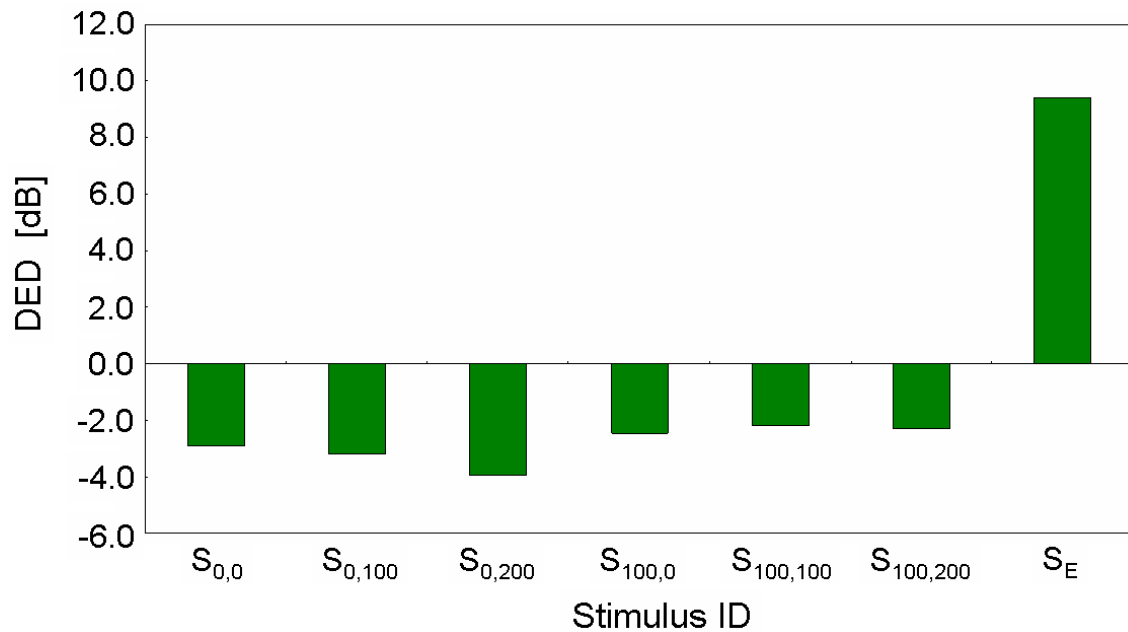


Figure 6.4 DED for recorded exhaust sound and each fluctuating motor sound.

気自動車の接近に対する気づきやすさを評価できることが示唆された。

6.6 結言

本章では、変動音の評価法の一つである、変動感評価を電気自動車の接近に対する気づきやすさの評価に応用可能か否かを検討した。過去の研究で提案された音とは異なる、様々な大きさの2次変動を含んでいる音の方が気づきやすい音であると仮定し、実際に気づきやすいか否かを検討した。その結果、1次変動や振幅逸脱のみによる2次変動を含ませることによって、電気自動車の接近を気づきやすくなることが確認された。また、振幅逸脱のみによる2次変動を大きくすればするほど、電気自動車の接近を気づきやすくなることが確認された。よって、変動感の評価法が、電気自動車の接近に対する気づきやすさの評価に応用できることが示された。

第7章 結論

本研究では，過去の研究では対象とされていなかった様々な変動音を導入し，それらに対する変動感や粗さ感を正しく評価する方法を検討した．変動感の評価法に対する検討では，工事や交通などにおける身近な変動音として，マンドリンおよびマリンバ演奏におけるトレモロ音，アイドリング時におけるオートバイの排気音を導入し，それらの音に対する変動感を評価する方法を検討した．粗さ感の評価法に対する検討では，三角波によって振幅変調された純音を導入し，それに対する粗さ感を評価する方法を検討した．また，演奏の熟達度評価や，電気自動車の接近に対する気づきやすさ評価に変動感の評価法が応用可能か否かを検討した．

2章においては，先行研究 [4] ~ [8], [14] で明らかにされている，変動感や粗さ感の知覚に影響を及ぼす特徴やその研究における知覚モデルについて述べた．また，それらの研究において残された課題を説明し，本研究で取り組む課題とその必要性について述べている．変動感を表わす音質評価指標として Fluctuation Strength，粗さ感を表わす音質評価指標として Roughness が提案されており，それらを音響信号から推定する方法が過去にいくつか報告されている．その方法は，変動感や粗さ感の知覚に関する研究 [4] ~ [8], [14] の結果に基づいて提案されており，正弦波によって変調された音に対する変動感や粗さ感を正しく評価できることが明らかにされていることを詳述した．その方法は，そのような変動音のみを対象としており，工事や交通などの身近にある変動音に対しても正しく評価できるか否かについて検討されていないことを述べた．

3章においては，工事や交通などにおける身近な変動音として，マンドリンおよびマリンバ演奏におけるトレモロ音，アイドリング時におけるオートバイの排気音を導入し，それらの

音に対する変動感を評価する方法を検討した．過去の研究で対象とされてきた振幅変調音の特徴とそれらの音の特徴を比較し，トレモロ音や排気音に含まれている新たな特徴を明らかにした．また，それらの特徴が変動感の知覚に影響を及ぼすことを確認し，それらの特徴に関するパラメタを新たに用いることで，トレモロ音や排気音の変動感を正しく評価できる方法を検討した．この方法は，変調周波数や変調度といった変動音の大域的な特徴のみに基づいて議論されていた過去の方法 [4], [7] ~ [12] に，変動音に含まれる各々の単発音における特徴の変化という局所的な特徴に着目し，それを導入することで実現された．この方法はトレモロ音や排気音に限定して検討されており，他の変動音に対しても導入可能か否かの検討が望まれる．また，新たに用いたパラメタの相互作用に関する検討も残されている．

4 章においては，過去の研究では対象とされていなかった変動音として，三角波によって振幅変調された音を導入し，それに対する粗さ感を評価する方法を検討した．過去に提案された方法 [4], [14] ~ [17] では，三角波によって振幅変調された音の粗さ感を正しく評価できないことを確認し，評価において新たに導入すべきパラメタを検討した．過去の研究では変調周波数という変動音の大域的な特徴のみに着目されているが，本研究では変動音の振幅包絡における立ち上がりの傾きやその位相といった局所的な特徴に着目することで，その変動音に対する粗さ感の知覚が変化することが確認した．本研究では，その物理量による影響を系統的に検討できていないため，今後明らかにしていく必要がある．

5 章においては，変動感に関する評価法の応用例として，演奏音の熟達度評価への導入について述べた．3 章で用いていたマンドリン演奏におけるトレモロ音を対象とし，主観評価実験によって得られた熟達度評価値と，3 章で述べた方法を用いて音響信号から推定した変動感の評価結果の関係を検討した．その結果，上手に聞こえるトレモロ音は，変動感が大きく感じられる領域を避けた plucking rate で演奏されていることが確認されており，上手に聞こえるトレモロ音は，速すぎない plucking rate という要請と，変動感が大きく感じられないという要請が両立した状態であることが示唆された．よって，変動感の評価法が，熟達度評価に応

用できることが示された．また，過去の研究 [4], [7], [8] で提案された変調周波数という変動音の大域的な特徴が，演奏に対する熟達度に影響を及ぼす可能性が見い出された．本研究では，マンドリン演奏におけるトレモロ音のみを対象としているため，他の楽器演奏に対する調査が今後の課題として残されている．

6章においては，変動感に関する評価法の応用例として，電気自動車の接近に対する気づきやすさの評価への導入について述べた．過去の研究で提案された音とは異なる，様々な2次変動を含んでいる音の方が気づきやすい音であると仮定し，実際に気づきやすいか否かを検討した．2次変動を含ませることによって，電気自動車の接近が気づきやすくなり，変動音に含まれる2次変動を大きくすればするほど，電気自動車の接近が気づきやすくなることが確認された．すなわち，電気自動車の接近音の設計において，変調周波数という過去の大域的な特徴だけでなく，変動音の局所的な特徴の時間変化により，その気づきやすさを向上させることができた．よって，変動感の評価法が，電気自動車の接近に対する気づきやすさの評価に応用できることが示されている．本研究では，気づきやすさの評価における雑音としてピンクノイズのみを用いており，実環境においても気づきやすいか否かは検討されていないため，その検討が今後の課題として残されている．

以上のように，本研究の結果より，過去の研究 [4], [7] ~ [12] では対象とされていなかった変動音に対する評価法が新たに提案された．なお，粗さ感に対する評価法はまだ提案できていないが，新たに考慮すべき特徴は明らかになった．また，新たに提案した評価法が，演奏の熟達度評価や，電気自動車の接近に対する気づきやすさ評価応用できることが示唆された．いずれも，過去の研究 [4] ~ [8], [14] では，変動音の大域的な特徴のみに基づいて議論されていたものを，本研究で，その局所的な特徴に基づくことで高い精度で認識させたり，また合成することを実現したことにより，局所的特徴の重要性を見い出した．

本研究で得られた知見は，今後，計算機による演奏評価や騒音評価において，人間が知覚した印象をより正しく評価するうえで，寄与することが少なくないものと考えている．工事

や交通などの身近にある様々な変動音に対応する評価法を提案することによって、計算機による客観的な評価が実現でき、様々な問題の解決に貢献することを期待する。また、人間の聴覚における知覚モデルの解明において、変動感や粗さ感の知覚モデルを既存のものより正確なモデルを提案するうえで、寄与することが少なくないものと考えている。変動音が人間の鼓膜に伝わると、聴覚におけるどの部位において変動や粗さを知覚し、どのような基準で判断されているかを解明するにあたって、本研究が貢献することを期待する。

謝辞

本研究を進めるにあたり，常に理解ある御指導，御鞭撻をいただいた三浦雅展講師に衷心より感謝の意を申し上げます．研究内容だけでなく，研究の進め方や研究者としての心構えなど多くの御助言をいただきました．また，本論文をまとめるにあたり，暖かい御指導，御助言をいただいた片岡章俊教授，新川芳行教授，岡田至弘教授に深く感謝いたします．さらに，多大な御指導をいただいた寄能雅文実験助手に感謝いたします．

講義などで御指導をいただいた龍谷大学堂下修司名誉教授，杉田繁治教授，藤本好司教授，長谷智弘教授，外村佳伸教授，三好力教授，野村竜也教授，吉見毅彦准教授，藤田和弘准教授，渡辺靖彦講師，曾我麻佐子講師，芝公仁助教，南條浩輝助教，岩嶋浩樹実験助手に厚く御礼申し上げます．

本研究について多大な評価とご意見をいただきましたミュンヘン工科大学 Hugo Fastl 教授に深く感謝いたします．また，本研究にあたり，有益な御助言をいただいた京都市立芸術大学大串健吾名誉教授，同志社大学柳田益造教授，九州大学岩宮眞一郎教授，金沢工業大学山田真司教授に心から感謝いたします．

本論文の各部は日本音響学会，日本音楽知覚認知学会などで発表を行ないましたが，これらの発表の場で有益な御議論，御助言をいただいた九州大学中島祥好教授，上田和夫准教授，東京芸術大学亀川徹教授，丸井淳史准教授，くらしき作陽大学加藤充美教授，京都市立芸術大学津崎実教授，和歌山大学河原英紀教授，大阪学院大学谷口高士教授，大阪大学木下博教授，東京情報大学西村明准教授，筑波大学若槻尚斗准教授，北海道大学安達真由美准教授，桐朋学園芸術短期大学羽藤律准教授，NHK 放送技術研究所大出訓史氏，長崎県立大学藤沢望講

師，金沢工業大学江村伯夫講師，長崎大学山内勝也助教に感謝いたします。また，各学会にてお世話になりました大阪大学難波精一郎名誉教授，桑野園子名誉教授，神奈川工科大学西口磯春教授，筑波大学水谷孝一教授，九州大学白石君男教授，国立音楽大学森太郎准教授，宇部工業高等専門学校江原史朗准教授，九州産業大学菅野禎盛准教授，京都女子大学荒川恵子教授，白鷗大学仁平義明教授，新潟大学大浦容子教授，上野学園大学星野悦子教授，鳥取大学小川容子教授，愛知県立大学高橋範行講師，長野県看護大学松本じゅん子講師，愛知淑徳大学安田恭子助教に感謝いたします。

日本音響学会関西支部聴覚基礎理論談話会メンバーの情報通信研究機構加藤宏明氏，産業技術総合研究所中川誠司氏，添田喜治氏，伊藤一仁氏，保手浜拓也氏，岡本洋輔氏，籠宮隆之氏，大塚明香女史，The University of Arizona 高野佐代子博士研究員，TOA(株) 栗栖清浩氏，リオン(株) 津田直紀氏，神戸市立工業高等専門学校長谷芳樹准教授，甲南大学／同志社大学橘亮輔博士研究員らをはじめとするメンバーに感謝いたします。また，関西合同音声ゼミにおいて有益な御助言をいただいた，同志社大学山本誠一教授，西田昌史准教授，京都大学奥乃博教授，和歌山大学入野俊夫教授，関西学院大学川端豪教授を始めとするメンバーの皆様に感謝いたします。

3章における，マンドリントレモロ音の記録および，第5章における熟達度評価実験において御協力いただいた，本学のマンドリンオーケストラのOB / OG 池田類子女史，丸本大悟氏，井口優氏，武田志緒子女史，根来美佳女史，小山奈邦女史，岡田如子女史，深川有香女史，丸林奈弥子女史をはじめとするOB / OG メンバーに感謝いたします。また，マリンバトレモロ音の記録において御協力いただいた，フリーの打楽器演奏者中路友恵女史，梅寄由季女史，池田愛子女史，改發麻衣女史，同志社女子大学学部生の久保菜々恵女史に感謝いたします。さらに，排気音の記録実験において御協力をいただいたYSP 滋賀の皆様に感謝いたします。時間および振幅逸脱の強調において御協力いただいた本学学術研究生森田慎也氏，疑似マンドリントレモロ音を用いた主観評価実験の実施において御協力いただいた本学OB 織

田将史氏，疑似マリンバトレモロ音を用いた主観評価実験の実施において御協力いただいた
本学 OB 岡本好弘氏，疑似排気音を用いた主観評価実験の実施および分析において御協力い
ただいた本学 OB 津里幸太郎氏に感謝いたします．

4 章における，粗さ感関する主観評価実験において御協力いただいた本学院生小西夕貴女史，
庄司正氏に感謝いたします．

5 章における，模擬トレモロ音を用いた主観評価実験の実施において御協力いただいた本学
OG 上村昌代女史に感謝いたします．

6 章における，電気自動車の接近に対する気づきやすさの主観評価実験の実施において御協
力いただいた本学の学部生仙石和香女史に感謝いたします．

最後に，研究中多方面にわたりご支援下さった龍谷大学理工学部情報メディア学科/龍谷大
学大学院理工学研究科情報メディア学専攻三浦研究室の諸氏に厚く御礼申し上げます．

参考文献

- [1] 日本音響学会 編, 音色の感性学 音色・音質の評価と創造 (コロナ社, 東京都, 2010).
- [2] 日本音響学会 編, 新版 音響用語辞典 (コロナ社, 東京都, 2003).
- [3] 電子情報通信学会 編, 改訂 電子情報通信用語辞典 (コロナ社, 東京都, 1999).
- [4] E. Zwicker and H. Fastl, *Psychoacoustics Facts and Models* (Springer-Verlag, Berlin, 1990).
- [5] von E. Terhardt, “Über die durch amplitudenmodulierte Sinustöne hervorgerufene Hörempfindung (The auditory sensation produced by amplitude modulated tones)”, *Acoustica*, **20**, 210–214 (1968).
- [6] von E. Terhardt, “Über akustische Rauigkeit und Schwankungsstärke (Acoustic roughness and fluctuation strength)”, *Acoustica*, **20**, 215–224 (1968).
- [7] H. Fastl, “Fluctuation strength and temporal masking patterns of amplitudemodulated broadband noise”, *Hearing Research*, **8**, 56–69 (1982).
- [8] E. Zwicker and H. Fastl, *Psychoacoustics Facts and Models* (Springer-Verlag, Berlin, 1990), pp. 247–256.
- [9] M. Blommer and N. Otto, “A new method for calculating Fluctuation Strength in electric motors”, *Proc. SAE 2001 Noise and Vibration Conference and Exposition*, CD-ROM, 2001–01–1588 (2001).

- [10] E. Accolti and F. Miyara, “Fluctuation Strength of Mixed Fluctuating Sound Sources”, *Mecánica Computacional*, **XXVIII** 9–22 (2009).
- [11] D. Cabrera, S. Ferguson and E. Schubert, “Psysound3: Software for acoustical and psychoacoustical analysis of sound recordings”, *Proc. of the 13th International Conference on Auditory Display*, pp. 356–363 (2007).
- [12] J. J. Chatterley, “Sound Quality Analysis of Sewing Machines”, M. S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University, United States of America, pp. 58–61 (2005).
- [13] S. Shin, “Comparative study of the commercial software for sound quality analysis”, *Acoustical Science and Technology*, **29** 221–228 (2008).
- [14] E. Zwicker and H. Fastl, *Psychoacoustics Facts and Models* (Springer-Verlag, Berlin, 1990), pp. 257–264.
- [15] U. Widmann and H. Fastl, “Calculating roughness using time-varying specific loudness spectra”, *Proc. of Sound Quality symposium’98*, pp. 55–60 (1998).
- [16] W. Aures, “Ein Berechnungsverfahren der Rauigkeit (”A Procedure for Calculating Auditory Roughness”, *Acoustica*, **58**, 268–281 (1985).
- [17] P. Daniel and R. Weber, “Psychoacoustic Roughness: Implementation of an Optimized Model”, *Acustica*, **83**, 113–123 (1997).
- [18] R. Plomp, WJM Levelt, “ Tonal Consonance and Critical Bandwidth ”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 38, pp.548-560, 1965.
- [19] E. Terhalt, “Calculating virtual pitch”, *Hearing Research*, **1**, 155–182 (1979).

- [20] A. Rauber, E. Pampalk, and D. Merkl, “Using Psycho-Acoustic Models and Self-Organizing Maps to Create a Hierarchical Structuring of Music by Sound Similarity”, *Proc. of ISMIR 2002* (2002).
- [21] K. Kurakata, S. Kuwano, and S. Namba, “Factors determining the impression of the equality of intensity in piano performance”, *Journal of the Acoustical Society of Japan*, **14** 441–447 (1993).
- [22] D. Pressnitzer and S. McAdams, “Two phase effects in roughness perception”, *Journal of the Acoustical Society of America*, **105** 2773–2782 (1999).
- [23] J. R. Miller and E. C. Carterette, “Perceptual space for musical structures”, *Journal of the Acoustical Society of America*, **58** 711–720 (1975).
- [24] R. D. Patterson, “The sound of a sinusoid: Spectral models”, *Journal of the Acoustical Society of America*, **96** 1409–1418 (1994).
- [25] K. Kumagai, K. Ozawa, Y. Suzuki and T. Sone “Perception of the quality of sound amplitude-modulated with triangular waves”, *Interdisciplinary Information Sciences* **7** 227–236 (2001).
- [26] N. Fujisawa, M. Yamada, and I. Nakayama, “Fluctuation in frequency of Japanese pressed voice, Dami-Goe”, *Journal of the Acoustical Society of Japan*, **21** 365–367 (2000).
- [27] S. Dahal, “Striking movements: A survey of motion analysis of percussionists”, *Acoustical Science and Technology*, **32** 168–173 (2011).
- [28] T. Fujisawa and M. Miura, “Investigating a playing strategy for drumming using surface electromyograms”, *Acoustical Science and Technology*, **31** 301–303 (2010).

- [29] 三浦 雅展, 江村 伯夫, 秋永 晴子, 柳田 益造, “ピアノによる 1 オクターブの上下行長音階演奏に対する熟達度の児童評価”, 日本音響学会誌, **66**, pp.203-212 (2010).
- [30] 数森康弘, 江村伯夫, 三浦雅展, “ギターコード演奏の練習支援を目的としたファジィ階層化意思決定法に基づく熟達度自動評価” 日本音響学会誌, **66**, pp431-439 (2010).
- [31] 小西夕貴, 岩見直樹, 三浦雅展, “練習支援を目的としたドラム基礎演奏における熟達度の自動評価手法” 電子情報通信学会論文誌, **J94-D(3)**, pp.549-559 (2011).
- [32] C.E. Seashore, *Psychology of Music* (McGraw-Hill, New York, 1938), pp. 18–21.
- [33] 山田 真司, “音楽演奏に含まれる時間ゆらぎ：演奏者の制御能力の限界に起因するゆらぎと芸術表現のゆらぎ” 九州芸術工科大学博士論文 (1998).
- [34] 山内 勝也, “ハイブリッド車・電気自動車などの静音性対策の動向—車両接近報知音のデザイン—” 日本音響学会誌, **68**, pp.31-36 (2012).
- [35] 市川 克彦, “エコカーのしくみ見学 電気自動車” ほるぷ出版 (2010).
- [36] 御堀 直嗣, “電気自動車の“ なぜ ”を科学する” アーク出版社 (2011).
- [37] 日産自動車社, LEAF <http://ev.nissan.co.jp/>.
- [38] 三菱自動車工業社, i-MiEV <http://www.mitsubishi-motors.co.jp/i-miev/index.html>.
- [39] ヤマハ株式会社, 曽根 卓郎, “接近警告音発生装置” 特開 2011-201368 号 (2011).
- [40] エヌ・ビー・エス株式会社, 石橋 一海, 本田 良, 黒石 忠, “車接近警告装置” 特開 2011-11662 号 (2011).
- [41] 国土交通省, “ハイブリッド車等の静音性に関する対策について”, <http://www.mlit.go.jp/common/000057778.pdf> (2010).

- [42] D. Choen and T. D. Rossing, “The acoustics of mandolins”, *Acoustical Science and Technology*, **24** 1–6 (2003).
- [43] 海老澤 敏, 上参郷 祐康, 西岡 信雄, 山口 修, “新編 音楽中辞典 [CD-ROM]”, 音楽之友社, 2003.
- [44] 池内 友次郎, 野村 良雄, 服部 幸三, 皆川 達夫, “新音楽辞典 楽語”, p 550, 音楽之友社, 1977.
- [45] O. Fujita, *Illustrated the correct way to play Mandolin for beginners to instructors with concert repertories* (Zen-On Music Company Ltd., Tokyo, 2005), pp. 48–49 (in Japanese).
- [46] 伊藤 翁介, オデルマンドリン教則本 1 (全音楽出版社, 1956).
- [47] N.H.Fletcher, T.D.Rossing, 楽器の物理学 (シュプリンガー・フェアラーク東京株式会社, 2002).
- [48] C. Roads 著, 青柳 龍也, 小坂 直敏, 後藤 真孝, 引地 孝文, 平田 圭二, 平野砂峰旅, 堀内 靖雄, 松島 俊明 訳, コンピュータ音楽 -歴史・テクノロジー・アート- (東京電機大学出版局, 2001), p272.
- [49] バイク技術研究会, “バイクの不思議”, ナツメ社, 2008.
- [50] スズキ社, GrassTracker, <http://www1.suzuki.co.jp/motor/grasstracker/>.
- [51] ヤマハ発動機社, SEROW250, <http://www.yamaha-motor.jp/mc/lineup/sportsbike/serow/>.
- [52] 森山剛, 斎藤英雄, 小沢慎治, “音声における感情表現語と感情表現パラメータの対応付け,” 電子情報通信学会論文誌 D-II, **J82-D-II** 703–711 (1999).

- [53] 西野隆典, 中井勇祐, 武田一哉, 板倉文忠, “重回帰分析に基づく頭部伝達関数の推定,” 電子情報通信学会論文誌 A, **J84-A** 260–268 (2001).
- [54] S. Morita, N. Emura, M. Miura, S. Akinaga and M. Yanagida, “A feature exaggeration system for basic piano performance with extracted performance parameters”, *Acoustical Science and Technology*, **31**, 296–299 (2010).
- [55] 本田技研工業社, CB400ss, <http://www.honda.co.jp/news/2001/2011010-cb400ss.html>.
- [56] 本田技研工業社, FTR, <http://www.honda.co.jp/FTR/photo/index.html>.
- [57] ヤマハ発動機社, SR400, <http://www.yamaha-motor.jp/mc/lineup/sportsbike/sr400/>.
- [58] ヤマハ発動機社, WR250X, <http://www.yamaha-motor.jp/mc/lineup/sportsbike/wr250x/>.
- [59] 赤池弘次, 甘利俊一, 北川源四郎, 樺島祥介, 下平英寿, “赤池情報量基準 AIC -モデリング・予測・知識発見-”, 共立出版, 2007 .
- [60] マツダ社, デミオ <http://www.demio.mazda.co.jp/>.

関連発表論文

1. 原著論文

1. 安井 希子, 寄能 雅文, 三浦 雅展, 杉田 繁治, “熟達したマンドリントレモロ音に対する変動感の調査”, 音楽知覚認知研究, 14(1&2) pp.17 – 27 (2008).
2. 安井 希子, 三浦 雅展, 片岡 章俊, “不均一な変動を含むオートバイ排気音に対する Fluctuation Strength の推定”, 電子情報通信学会論文誌 (採録決定)
3. 安井 希子, 三浦 雅展, 片岡 章俊, “Procedure for estimating Fluctuation Strength from tremolo by irregular plucking of mandolin”, *Acoustical Science and Technology*(in press)

2. 国際会議

2.1. 査読あり

1. Nozomiko YASUI, Masafumi KINOUE and Masanobu MIURA, “An index for evaluating the performance proficiency of tremolo played by the Mandolin”, *Proc. of The 19th International Congress on Acoustics*, MUS-07-014 (2007).
2. Nozomiko YASUI, Masafumi KINOUE and Masanobu MIURA, “A relation between characteristics and subjective evaluation for tremolo played with the Mandolin”, *Proc. of International Congress on Music Communication Science* (2007).

3. Nozomiko YASUI, Masafumi KINOUE and Masanobu MIURA, “Subjective evaluations of the performance proficiency for fluctuating musical sounds using Fluctuation Strength or Roughness”, *Proc. of Acoustics’08*, pp.5757 – 5762 (2008).
4. Nozomiko YASUI, Masafumi KINOUE and Masanobu MIURA, “Evaluations of Proficiency of Fluctuating Musical Sounds Using Fluctuation Strength”, *Proc. of The 10th International Conference on Music Perception and Cognition*, pp.712 – 716 (2008).
5. Nozomiko YASUI, Masafumi KINOUE and Masanobu MIURA, “Fluctuation strength for simulated sounds of tremolo played on the mandolin”, *Proc. of The 10th Western Pacific Acoustics Conference*, 0201 (2009).
6. Nozomiko YASUI, Masafumi KINOUE and Masanobu MIURA, “Fluctuation Strength of tremolo played on the mandolin: How tremolo is evaluated as good?”, *Proc. of International Symposium on Performance Science 2009*, pp.431 – 436 (2009).
7. Nozomiko YASUI and Masanobu MIURA, “Fluctuation strength on the mandolin tremolo with the 1st and 2nd fluctuations”, *Proc. of The 20th International Congress on Acoustics*, 269 (2010).
8. Nozomiko YASUI and Masanobu MIURA, “Fluctuation strength on the tremolo with the 1st, 2nd and 3rd fluctuations”, *Proc. of Forum Acusticum 2011*, pp.1223 – 1228 (2011).
9. Nozomiko YASUI and Masanobu MIURA, “Perception of Roughness on sounds amplitude-modulated with triangular wave”, *Proc. of Forum Acusticum 2011*, pp.1229 – 1234 (2011).
10. Nozomiko YASUI and Masanobu MIURA, “Estimating Fluctuation Strength for ex-

haust sound of motorbikes with 1st, 2nd and 3rd fluctuations”, *Proc. of Inter-noise 2011*, Mon-8-10 (2011).

2.2. Invited

1. Masanobu MIURA and Nozomiko YASUI, “Psychoacoustic criteria evaluates the quality of musical sounds”, *Proc. of Euronoise2009*, SQU14 (2009).

3. 全国大会

1. 安井 希子, 寄能 雅文, 三浦 雅展, “マンドリン演奏におけるトレモロ音の主観評価と物理特徴の関連性について”, 日本音響学会 2007 年春季研究発表会講演論文集, pp.723 – 724 (2007.3).
2. Nozomiko YASUI, Masafumi KINOUE and Masanobu MIURA, “Evaluating the performance proficiency for fluctuated continuous sounds using the Mandolin”, 日本音楽知覚認知学会平成 19 年度春季研究発表会資料, p.65 (2007).
3. 安井 希子, 寄能 雅文, 三浦 雅展, “マンドリントレモロ音の変動感が熟達度評価に与える影響”, 日本音楽知覚認知学会平成 19 年度秋季研究発表会資料, pp.33 – 38 (2007).
4. 安井 希子, 岡本 好弘, 三浦雅展, “マンドリントレモロ音の不均一性が変動感に与える影響”, 日本音響学会 2009 年秋季研究発表会講演論文集, pp.877 – 880 (2009.9).
5. 安井 希子, 三浦 雅展, “マンドリントレモロ演奏の不均一性を考慮した模擬音の合成”, 日本音楽知覚認知学会平成 21 年度秋季研究発表会資料, pp.27 – 32 (2009).
6. 安井 希子, 三浦雅展, “演奏の逸脱を含むマンドリントレモロ音の変動感を表わす指標の提案”, 日本音響学会 2010 年春季研究発表会講演論文集, pp.995 – 998 (2010.3).

7. 安井 希子, 三浦 雅展, “不均一性を持たせたトレモロ音の Fluctuation Strength”, 日本音楽知覚認知学会平成 22 年度春季研究発表会資料, pp.71 – 76 (2010).
8. 安井 希子, 三浦雅展, “振幅包絡の形状が Roughness に与える影響”, 日本音響学会 2010 年秋季研究発表会講演論文集, pp.861 – 864 (2010.9).
9. 安井 希子, 三浦 雅展, “のこぎり波的な振幅包絡を持つ AM 音の Roughness”, 日本音楽知覚認知学会平成 22 年度秋季研究発表会資料, pp.7 – 12 (2010).
10. 安井 希子, 三浦雅展, “AM 音の振幅形状が Roughness 知覚を変えるのか?”, 日本音響学会 2011 年春季研究発表会講演論文集, pp.1013 – 1016 (2011.3). 日本音響学会栗屋潔 学術奨励賞 受賞講演
11. 安井 希子, 三浦 雅展, “Roughness を表す新しいパラメタの提案”, 日本音楽知覚認知学会平成 23 年度春季研究発表会資料, pp.61 – 66 (2010). 日本音楽知覚認知学会研究選奨 受賞講演
12. 安井 希子, 三浦雅展, “AM 音の位相が Roughness 知覚を変えるか?”, 日本音響学会 2011 年秋季研究発表会講演論文集, pp.869 – 872 (2011.9).

4. 研究会

1. 安井 希子, 寄能 雅文, 三浦 雅展, “マンドリンを用いたトレモロ演奏の高速度カメラによる記録”, 日本音響学会音楽音響研究会資料, MA2006–42 (2006.9).
2. 安井 希子, 寄能 雅文, 三浦 雅展, “マンドリンを用いたトレモロ演奏の特徴とそれに対する主観評価の関係”, 日本音響学会音楽音響研究会資料, MA2006–82 (2007.1).
3. 安井 希子, 寄能 雅文, 三浦 雅展, “マンドリンの持続的な時間変動音における変動感と主観評価の関係”, 情報処理学会研究報告 (音楽情報科学研究会), 2007–MUS–71 (2007.8).

4. 上村 昌代, 安井 希子, 寄能 雅文, 三浦 雅展, “マンドリントレモロ音の不均一性と変動強度の関係”, 日本音響学会音楽音響研究会資料, MA2007-34 (2007.8).
5. 安井 希子, 上村 昌代, 寄能 雅文, 三浦 雅展, “マンドリントレモロ音の不均一性が主観評価に与える影響”, 日本音響学会音楽音響研究会資料, MA2007-41 (2007.8).
6. 織田 将史, 安井 希子, 三浦 雅展, “擬似トレモロ音に対する変動感と変動強度の関係”, 日本音響学会音楽音響研究会資料, MA2008-63 (2008.11).
7. 安井 希子, 寄能 雅文, 三浦雅展, “Fluctuation Strength を用いたマンドリントレモロ音に対する熟達度評価”, 日本音響学会音楽音響研究会資料, MA2009-14 (2009.6).
8. 安井 希子, 三浦雅展, “のこぎり波的な振幅変調音の Roughness”, 日本音響学会音楽音響研究会資料, MA2010-40 (2010.8).
9. 安井 希子, 三浦雅展, “振幅形状が AM 音の Roughness に与える影響”, 日本音響学会音楽音響研究会資料, MA2011-41 (2011.8).

5. 支部大会

1. 安井 希子, 寄能 雅文, 三浦 雅展, “マンドリン演奏におけるトレモロ音の物理特徴と音色評価の関係”, 平成 18 年度電気関係学会関西支部連合大会, G16-7 (2006.11).
2. 安井 希子, 三浦 雅展, “Fluctuation Strength を用いた楽器音の変動感を表す指標 : iFS”, 第 12 回関西支部若手研究者交流研究発表会 (2009.12).
3. 安井 希子, 三浦 雅展, “三角波を振幅包絡として持つ AM 音における Roughness の変化”, 第 12 回関西支部若手研究者交流研究発表会, A-23 (2010.12).

6. 他大学合同ゼミ

1. 安井 希子, “マンドリン演奏における弦に対するピックの位置及び角度がトレモロ音の音色に与える影響”, 第 23 回関西合同音声ゼミ (2006.7).
2. 安井 希子, “マンドリンを用いたトレモロ演奏における物理特徴と熟達度評価の調査”, 第 25 回関西合同音声ゼミ (2007.7).
3. 安井 希子, “マンドリントレモロ音の変動感と主観評価の関係”, 2007 年度音楽聴覚合同ゼミ (2007.9).
4. 安井 希子, “Fluctuation Strength を用いたマンドリントレモロ音の熟達度評価”, 第 26 回関西合同音声ゼミ (2007.12).
5. 安井 希子, “マンドリントレモロ音の特徴と熟達度評価の関連性について”, 2008 年度大合同ゼミ (2008.9).
6. 安井 希子, “マンドリントレモロ音に含まれる逸脱と変動の関係”, 第 29 回関西合同音声ゼミ (2009.7).
7. 安井 希子, “マンドリントレモロ音の不均一性と変動の関係”, 2009 年度大合同ゼミ (2009.8).
8. 安井 希子, “AM 音における振幅包絡の形状が Roughness に与える影響”, 第 31 回関西合同音声ゼミ (2010.7).
9. 安井 希子, “AM 音における振幅包絡の形状と Roughness の関係”, 2010 年度大合同ゼミ (2010.9).
10. 安井 希子, “AM 音の振幅形状による Roughness 知覚の変化”, 第 32 回関西合同音声ゼミ (2010.12).

11. 安井 希子, “AM 音における位相と Roughness の関係”, 第 33 回関西合同音声ゼミ (2011.7).

7. 受賞歴

1. 安井 希子, 三浦雅展, 日本音響学会栗屋潔学術奨励賞, 日本音響学会 2011 年春季研究発表会 (2011.3).
2. 安井 希子, 三浦雅展, 日本音楽知覚認知学会研究選奨, 日本音楽知覚認知学会平成 23 年度春季研究発表会 (2011.6).

8. 特許

1. 特願 2011-020266 号, 「音質評価システムおよび音質評価方法」, 三浦 雅展, 安井 希子, 平成 23 年 2 月 1 日.
2. 特願 2011-258397 号, 「疑似音出力装置」, 三浦 雅展, 安井 希子, 仙石 和香, 平成 23 年 11 月 28 日.