

中央大学博士論文

主観的および客観的な音質評価に基づく
機械の機能音生成に関する研究

Research on Creation of Functional Sounds from Machines
Based on Subjective and Objective Sound Quality Evaluation

山口 雅夫
Masao Yamaguchi

博士（工学）

中央大学大学院
理工学研究科
精密工学専攻

平成26年度
2015年3月

-目次-

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	
1.2	論文の目的と構成	
第2章	機能音の効果を客観的に音質評価する生体情報の検討	13
2.1	はじめに	
2.2	快・不快やストレス刺激に反応する生体情報の種類	
2.3	心拍を用いた客観的な音質評価	
2.3.1	心拍の計測	
2.3.2	心拍を用いた音質評価	
	(a) 心拍を用いた音質評価方法	
	(b) 心拍を用いた音質評価結果	
2.4	唾液アミラーゼを用いた客観的な音質評価	
2.4.1	唾液アミラーゼの計測	
2.4.2	唾液アミラーゼを用いた音質評価	
	(a) 唾液アミラーゼを用いた音質評価方法	
	(b) 唾液アミラーゼを用いた音質評価結果	
2.5	近赤外分光法による脳血流を用いた客観的な音質評価	
2.5.1	近赤外分光法による脳血流の計測	
2.5.2	近赤外分光法による脳血流を用いた音質評価	
	(a) 近赤外分光法による脳血流を用いた音質評価方法	
	(b) 近赤外分光法による脳血流を用いた音質評価結果	
2.6	呼吸を用いた客観的な音質評価	
2.6.1	呼吸の計測	
2.6.2	呼吸を用いた音質評価	
2.7	客観的な音質評価における精度向上	
2.7.1	呼吸を用いたデータ処理手法および評価指標の提案	

- 2.7.2 提案した評価指標を用いた音質評価
 - (a) 音質の差が大きい音の主観的な音質評価
 - (b) 音質の差が大きい音の客観的な音質評価
 - (c) 音質の差が小さい音の主観的な音質評価
 - (d) 音質の差が小さい音の客観的な音質評価
- 2.7.3 客観的な音質評価に基づく快適な稼働音の開発
 - (a) 酸素濃縮機の稼働音
 - (b) 酸素濃縮機の稼働音の構造変更
 - (c) 音質評価に基づく酸素濃縮機の稼働音の快適性向上
- 2.8 まとめ

第3章 機能音の音質安定化手法に基づく快適性と知的生産性の向上 …………… 51

- 3.1 はじめに
- 3.2 周期音のリズム感を考慮した主観的な音質評価
 - 3.2.1 非定常音の音質評価
 - (a) 事務機稼働音の概要
 - (b) 事務機稼働音の主観的な音質評価
 - 3.2.2 周期音のリズム感評価
 - (a) 周期部の時間長さを変更したリズム感評価
 - (b) 周期部を構成する過渡部の音質と発生間隔の寄与の把握
 - (c) 周期部を構成する過渡部の発生間隔を変えたリズム感評価
 - (d) 一般的なランダム波を用いたリズム感評価
- 3.3 周期音のリズム感を考慮した客観的な音質評価
 - 3.3.1 音質評価に用いる周期音
 - 3.3.2 心拍とアミラーゼを用いた客観的な音質評価
 - (a) 心拍とアミラーゼを用いた客観的な音質評価方法
 - (b) メトロノーム音の音質評価結果
 - (c) 事務機稼働音の音質評価結果
- 3.4 周期音のリズム感を考慮した音質安定化手法
 - 3.4.1 特異な過渡音を含む周期音が聴感に与える影響

- (a) 特異な周期部が連続的に発生する場合
- (b) 特異な周期部が非連続的に発生する場合
- 3.4.2 周期音に含まれる過渡音のばらつきが聴感に与える影響
 - (a) 過渡音の音圧レベルのばらつき評価
 - (b) 過渡音の発生タイミングのばらつき評価
 - (c) 過渡音の発生タイミングのばらつきが聴感に与える影響
- 3.5 周期音のリズム感を考慮した知的生産性の評価
 - 3.5.1 知的生産性に与える影響の評価音
 - 3.5.2 知的生産性に与える影響の評価
 - (a) 知的生産性に与える影響の評価方法
 - (b) 知的生産性に与える影響の評価結果
- 3.6 まとめ

第4章 複合刺激下の音質評価手法に基づく快適性の向上と覚醒水準の維持 …… 93

- 4.1 はじめに
- 4.2 音刺激と映像刺激および動作意志を考慮した快適性の向上
 - 4.2.1 電気自動車走行音の印象変化
 - (a) 評価用ドライビングシミュレータの構成
 - (b) 電気自動車走行音の作成
 - (c) 電気自動車走行音の主観的な音質評価方法
 - (d) 疑似モータ音の音圧レベルを変更した音質評価
 - (e) 疑似モータ音の次数成分の周波数を変更した音質評価
 - 4.2.2 走行条件および車種の違いによる自動車走行音の印象変化
 - (a) 走行条件の違いによる走行音の主観的な音質評価方法
 - (b) ガソリンエンジン車走行音の音質評価
 - (c) 電気自動車走行音の音質評価
- 4.3 近赤外分光法による脳血流を用いた客観的な音質評価
 - 4.3.1 動作意志が脳血流に与える影響
 - (a) 動作意志の影響の評価方法
 - (b) 動作意志の影響の評価結果

- 4.3.2 実車を用いた客観的な音質評価
 - (a) 実車を用いた脳血流の評価方法
 - (b) 実車を用いた脳血流の評価結果
- 4.4 音刺激と色刺激の複合刺激下における覚醒水準の維持
 - 4.4.1 覚醒水準の維持に効果がある走行音の検討
 - (a) 評価に使用する走行音
 - (b) 走行音の評価方法
 - (c) カロリンスカ眠気尺度を用いた主観的な音質評価
 - (d) 心拍を用いた客観的な音質評価
 - (e) 覚醒水準の維持に有効な走行音の音質評価
 - 4.4.2 音刺激と色刺激の複合刺激が与える心理的作用
 - (a) 色刺激が与える心理的作用
 - (b) エンジン回転数を変えた音刺激と色刺激の心理的作用
 - 4.4.3 音刺激と色刺激の複合刺激による覚醒水準の維持
 - (a) 複合刺激による覚醒水準の維持の評価方法
 - (b) 複合刺激による覚醒水準の維持の評価結果
- 4.5 まとめ

第5章 時間経過に伴う機能音の聞き慣れ評価手法 143

- 5.1 はじめに
- 5.2 定常音の主観的な聞き慣れ評価手法
 - 5.2.1 評価に使用する定常音
 - 5.2.2 聞き慣れの主観的な評価
 - (a) 聞き慣れの主観的な評価方法
 - (b) 聞き慣れの主観的な評価結果
 - 5.2.3 音圧レベル変動評価手法に用いる評価音および評価条件
 - (a) 評価音および評価条件の検討方法
 - (b) 評価音および評価条件の検討結果
 - 5.2.4 従来の客観的な手法と提案した主観的な手法を用いた聞き慣れ評価
 - (a) 聞き慣れ評価方法

- (b) 従来の客観的な聞き慣れ評価結果
- (c) 音圧レベル変動評価手法を用いた主観的な聞き慣れ評価結果
- (d) 音圧レベル変動評価手法の有用性

5.3 非定常音の客観的な聞き慣れ評価手法

5.3.1 唾液アミラーゼを用いた客観的な聞き慣れ評価

- (a) 聞き慣れ評価方法
- (b) 聞き慣れの事前評価
- (c) 不規則な時間間隔で過渡音が発生する聞き慣れ評価

5.3.2 非定常音を発生する事務機稼働音の聞き慣れ評価

- (a) 事務機稼働音の聞き慣れ評価方法
- (b) 事務機稼働音の聞き慣れ評価結果
- (c) リズム感を変更した事務機稼働音の聞き慣れ評価方法
- (d) リズム感を変更した事務機稼働音の聞き慣れ評価結果

5.4 まとめ

第6章	結論	169
	6.1	研究成果	
	6.2	今後の課題と展望	
参考文献		177
謝辞		193

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

近年，機械製品の開発競争は激化しており，他社製品との差別化を図るために，その製品が本来持つ目的の機能をより高めることが要求されている．そして，オフィス，自動車車室内において，音を活用して目的の機能を有する音環境を創造する研究が始まっている^{[1],[2]}．ここで，環境に新たな機能を生成する音を「機能音」と定義し，様々な環境の快適性，オフィスでの計算や作業をする速度などの知的生産性，および自動車車室内の覚醒水準の維持の向上などに機能音の活用が望まれている．

機能音の生成を実現するには，機能の効果を検証する評価が重要である．機能音の評価方法は，従来，主観的な音質評価としてSD（Semantic Differential）法や一対比較法が行われてきた^[3]．しかし，これらの主観的な方法には3つの問題点がある．1つ目は，評価音の印象に関する質問の回答が個人の判断に委ねられるため，被験者により質問の解釈に差が生じ，評価の不確実性が発生すること，2つ目は，リアルタイムの評価ができないこと，3つ目は，幼児や高齢者は行うのが難しいことである．そこで，これらの問題点を解決するための客観的な音質評価として，生体情報を用いた評価の研究が行われている^{[4]-[7]}．生体情報の活用は，心理的な状態や変化の評価^{[8],[9]}，快眠寝室システム，住居内の癒やし空間や快適空間トイレなどの指標，自動車運転中や危険を伴う作業現場においてストレス状態に応じて警報を発することによる事故防止，およびストレス緩和や労務管理の支援などの安全対策システムなどが期待されている^[10]．

生体情報を用いた評価では，計測時のデータのばらつきが問題となる．電気信号や光量を計測して生体情報を捉える方式では，生体情報の信号が電気ノイズ，外乱光の影響や被験者の体動が原因でばらつきが生じる^[11]．そこで，計測誤差が小さく，被験者にとって計測時の拘束が小さいセンサが必要となり，適切な計測機器の選定が必要となる．

機械の機能をより高めることで利便性が向上する反面，機械製品は部品点数の増加や製品内部の機構の複雑化により，その稼働音が問題になることが多い．機械製品から発生する音は，定常音と非定常音に大きく分けることができる．非定常音は過渡音や間欠音などを含み時間と共に変動するため，耳に付きやすく不快な音として認識されることが多い^[12]．さらに非定常音の音質評価は，従来行われてきた定常

音の評価^{[13], [14]}と同様の方法では、被験者がどの音部分を聞いて評価したら良いのかわからず、一般性のある評価結果を得ることは難しい。したがって、好まれる稼働音を従来の音質評価だけで推定するのは困難である。

非定常音を発生する機械には、MFP (Multi-Function Peripheral) がある。MFP は、コピー、プリンタ、ファックス、スキャナなどの複数の機能を1つの機器に統合した複合的な事務機で、大量ドキュメントの印刷から文書作成、情報共有まで多くのシーンに応えられ、オフィスで多用されている。

MFP には複数のモータ、ギア、ファン、クラッチ、紙の衝突音、反り返り音、擦り音など様々な音源があり、複数の定常音や過渡音が含まれている。そして、それらの音は時間と共に変動する非定常音で、耳に付きやすく不快な音として認識されることが多い。さらに、オフィスの静粛化により、従来と比較して小さな騒音でも気付きやすくなっている。

事務機の騒音規格は、世界的に権威のあるドイツの環境ラベル BAM (Blue Angel Mark) ^[15] や各国の環境ラベルがある。ドイツでは、約 38 %の顧客が MFP などの事務機を購入する際、BAM ラベルが付与されているかを強く意識しているとの報告がある^[16]。BAM ラベルの騒音の規格は数値指標の音響パワーレベルだけで規定されており、聞き心地に関する規定はない。そこで、事務機各社は、数値指標の音響パワーレベルを下げることを優先し、騒音を低減する静音化技術の開発^{[17]-[20]}、計測環境や計測方法の改善^{[21], [22]}を図ってきた。しかし、近年、機械製品の稼働音はマイナス要因の騒音を低減する静音化だけでなく、人間にとって聞き心地の良い快適な音にする快音化技術の開発や価値のある音創りをするサウンドデザイン、およびそれらを製品へ適用することが望まれている^{[23]-[27]}。そして、掃除機^{[28], [29]}、冷蔵庫^[30]や空気清浄機^[31]などの家電製品の放射音、自動車の走行音^{[32], [33]}やマフラ排気音^[34]、ゴルフクラブの打球音^{[35], [36]}、ドアの閉まり音^{[37]-[39]}やロック音^[40]、トイレの洗浄音^[41]、室内空間音^[42]、油圧ブレーカ音^[43]、カーナビゲーションの操作音^[44]など様々な業界において、快音化やサウンドデザインに関する研究事例が報告されている。一方、MFP やプリンタに関する従来の研究は、心理音響評価量^[45]を用いた音質の指標の提案^{[46], [47]}が報告されている。しかし、これらは評価方法や結果の報告で、快音設計の指針については記載されていない。他の報告では機器の低振動、低騒音の研究が行われており、高速回転体の騒音を低減する手法^[48]や紙鳴り騒音を低減する

手法^[49]などが提案されているが、これらは定常的な音部分や稼働音の一部分のみに着目しており、動作音全体に着目していない。よって、事務機業界では、快音化に関する報告は他の業界と比較すると少なく、快音化やサウンドデザインは進んでいないといえる。

さらに、オフィスでは業務を遂行する速度を速くするなど、知的生産性を向上させることが望まれている^[50]。店舗内で行った実験で、BGMを1分間108ビートのテンポの速い音楽から60ビートのテンポの遅い音楽に変えたところ、お客のショッピングカートを押すスピードが遅くなり、滞店時間が長くなることで売り上げが38.2%上昇した報告^[51]がある。さらに、カフェで行った実験では、テンポが遅いBGMよりもテンポが速いBGMの方が食事の時間が短くなる報告があり、BGMによってお客の入れ替えを多くできる。そこで、MFPの稼働音は、周期部が繰り返し発生することでリズム感が形成されるが、適切な周期音にしてリズム感のテンポを変えることで知的生産性の向上など人の行動を変える可能性があるが、十分に検討されていない。

自動車業界では、近年、環境問題が深刻化し、エネルギー源の主流となっている石油資源の将来的な枯渇に対する対策が迫られ、次世代エネルギーに関心が高まっている。そこで、エンジンとモータを併用したハイブリッド車が世界的に普及し、モータのみで走行する電気自動車（EV：Electric Vehicle）や燃料電池車などの研究開発が積極的に進められている^[52]。今後、モータを搭載したEVの数は増加することが予想されるが、モータと内燃機関では、その動力の発生メカニズムの違いから、自動車車室内外での音環境が大きく変化する^{[53],[54]}。

EV走行音は、自動車車室内外で動力源から発生する音圧レベルがガソリンエンジン車より小さいことが特徴であり、運転者は走行音が静かなため、加速時に加速感や迫力感が不足すると予測される。しかし、モータ音の音圧レベルや周波数特性を変えることで、改善が期待できる。一方、助手席および後席の同乗者には、車室内が静かなことで快適性が向上すると予測されるが、音圧レベルの目標値は明白でない。

このような背景から、EV車室内の運転者や同乗者に適切な音質とするサウンドデザインが求められている。サウンドデザインの分野では、音質評価は主に聴覚情報のみの単刺激で行われていた^{[55]-[58]}。また、従来、自動車加速音に対する聴感印象に

ついて研究はなされており，例えば，非定常音の自動車加速音に関して，時変ラウドネスと主観評価との相関についての研究成果が報告されている^[59]．しかし，聴覚刺激と視覚刺激などの複合刺激の影響が注目されており，例えば，川のせせらぎ，自動車の走行音やトリム打音などで音質評価が行われ，聴覚刺激のみの提示に対し視覚刺激を加えることや，視覚刺激を変化させることで，音の印象は変化することが報告されている^{[60]-[70]}．さらに，触覚刺激に視覚刺激や聴覚刺激を加えた複合刺激下においても，触覚刺激のみの提示と比較して感覚は変化することが報告されている^{[71]-[76]}．

自動車運転者は，走行音と走行映像だけでなく，運転意志も加わる複合刺激下であり，その状態で走行音の迫力感や快適性などの音質評価を行う必要がある．さらに，加速，定速，減速の走行条件の違いによる走行音の印象変化については，十分に解明されたとはいえない．そこで，走行音のみ，走行音と走行映像の複合刺激下，走行音と走行映像および運転意志の複合刺激下における音質評価や，後席および助手席の同乗者，運転者の立場の違いによる走行音の印象の差異を見出すことで，それぞれの違いを考慮したサウンドデザインの指針を得ることができると考えられるが，このような報告はされていない．

一方，近年，自動車運転中の事故対策として開発されたエアバッグや衝突安全ボディなど，ドライバや同乗者を助けるパッシブセーフティ技術の向上により，自動車事故全体に対する死亡事故の割合は減少している．しかし，覚醒水準の低下などによる漫然運転が原因の死亡事故は多い^[77]．

そこで，覚醒水準を検知する研究^{[78]-[83]}，および覚醒水準の低下に対する対策が検討されているが，3つの問題点が指摘されている．1つ目は，居眠り状態を検知し，ペパーミントやレモンの香りなどを提示して，ドライバの覚醒水準を向上させるシステムが開発されている^{[84], [85]}が，この方法では乗車する人が香りを不快に感じる場合があること，2つ目は，警報音を利用した覚醒水準の低下に対する対策は，特に運転者以外の同乗者が警報音を煩わしく感じる問題があること，3つ目は，居眠りと警告による目覚ましの繰り返しは，覚醒水準の低下に対する根本的な対策とはいえず，漫然運転の防止効果は小さいことである．そこで，覚醒水準の維持を目的に，未然に眠気を防止する新たな対策が必要である．

また，覚醒水準の低下による漫然運転は，特に夜間の高速道路走行のような単調

運転時が考えられる。近年、車内照明の多様化に伴い、スピードメータなどの内装部に LED 照明が利用されるようになり、色彩豊かな車内空間が実現可能となっているが、照明色の選択は主にデザイン性が重視されている。しかし、視覚刺激の色彩により心理変動が生じ、音の印象^{[86]-[92]}や体感温度^[93]への影響が報告がされており、視覚刺激の色彩により覚醒水準の維持が向上する可能性がある。また、聴覚刺激の機能音と視覚刺激の色彩を組み合わせることで、覚醒水準の維持の効果がさらに向上すると期待できるが、複合刺激下における有効な各刺激の検討はなされていない。

以上、機能音として、快適性の向上、知的生産性の向上、覚醒水準の維持の向上を取り上げたが、時間経過に伴い機能音の効果が低下することが懸念される。この原因として2つ考えられる。1つ目は、機能音を発生する機械側の観点で考えると、ばらつきや経時変化により音質が変わることが懸念される。従来、経時変化による音の変動は、定常音や異音について調査した事例はあるが、過渡音で構成される周期音についての検討はされていない。2つ目は、機能音を聞く人間側の観点で考えると、音には聞き慣れやすい音と聞き慣れにくい音があり、最初は機能音の効果があっても、継続的な音刺激により快適性や覚醒水準の維持などの機能が低下することが懸念される。そこで、音刺激に対する聞き慣れ評価手法を確立し、聞き慣れを考慮した機能音の生成が求められる。慣れとは新規性のない刺激に対する反応が時間経過と共に低減する現象^[94]であるが、慣れの計測は難しい^[95]。従来の聞き慣れ評価手法は、聞き慣れたか慣れていないかを回答する主観的な評価であり、被験者は回答するごとに評価音を意識するので、本質的な聞き慣れの評価が難しく精度が低い欠点がある。また、注意が向けられない刺激ほど慣れやすいという仮説を基に、聞き慣れの指標を検討した報告^[96]があるが、その対象はマイナス要因の騒音についてであり、音を活用して環境に新たな機能を生成する機能音についての報告事例はない。そこで、快適性の向上や覚醒水準の維持に有効な機能音の聞き慣れ評価手法の確立が必要となる。

「機能音」に関する背景と課題を以下にまとめる。様々な環境の快適性、オフィスの知的生産性、および自動車車室内の覚醒水準の維持の向上などに機能音の活用が望まれている。しかし、機能音について以下の3点の検討が不十分である。1つ目は、機能音の生成手法、2つ目は、機能音の評価手法、3つ目は、時間経過に伴う機能音の効果維持である。機能音の生成手法は、非定常音の快音化、ばらつきや経

時変化を考慮した検討が十分なされていない。機能音の評価手法は、主観的および客観的な音質評価、聴覚のみでなく視覚などを考慮した複合刺激下の音質評価手法が確立されていない。時間経過に伴う機能音の効果維持は、機能音のばらつきを考慮した経時変化や聞き慣れについての検討がなされていない。

1.2 論文の目的と構成

本研究の目的を Fig. 1-1 に示す。様々な環境の感性価値を向上するために、ばらつきや経時変化を考慮した“音質安定化手法”，聴覚のみでなく視覚や動作意志を考慮した“複合刺激下の音質評価手法”，および時間経過に伴う“聞き慣れ評価手法”を提案する。“音質安定化手法”については、非定常音の快音化のために、設問調査に基づく主観的および生体情報に基づく客観的な音質評価により、ばらつきや経時変化を考慮した機能音の生成手法を提案する。“複合刺激下の音質評価手法”については、聴覚のみでなく視覚や動作意志を考慮した複合刺激下における機能音の音質評価や、生体情報に基づく客観的な音質評価手法を提案する。“聞き慣れ評価手法”については、時間経過に伴う機能音の効果維持を検討するために、聞き慣れの主観的および生体情報に基づく客観的な評価手法を提案する。これらの提案により、様々な環境の感性価値が向上できる。

論文は以下で構成する。第2章「機能音の効果を客観的に音質評価する生体情報の検討」では、音刺激に対して、従来の設問調査に基づく主観的な音質評価に加え、生体情報に基づく客観的な音質評価の可能性を検討する。

まず、生体情報について神経系、内分泌系および免疫系の観点で整理する。そして、本研究では実用性を考慮して、生体を傷つけない非侵襲、省スペースおよび低拘束で計測できる生体情報を選定する。

次に、選定した生体情報が、音刺激に対して快適性を評価できるか検討する。さらに、音質評価の精度を向上させるためのデータ処理手法および音質評価指標を提案し、実際の機器に適用する。

第3章「機能音の音質安定化手法に基づく快適性と知的生産性の向上」では、非定常音を対象とし、機能音の音質安定化手法として周期音で形成されるリズム感を考慮した快適性の向上、周期音のばらつきや経時変化について検討する。

まず、定常音と過渡音が含まれる周期音について、音質変更には寄与が高い音源を明確にする。次に、被験者に周期音を提示した際の心拍と唾液アミラーゼを計測し、リズム感について主観的な評価と客観的な評価の相関を検討する。そして、心拍と唾液アミラーゼは周期音のリズム感の評価に適切であるか検討する。

次に、事務機稼働音の計測データを加工して任意のばらつきを与えた評価音を作成し、音質評価を行うことで、過渡音のばらつきが聴感に与える影響を把握する。また、周期間ばらつきと周期内動作ばらつきを定義し、これらの影響を定量的に評価し、ばらつきや経時変化を考慮した音質安定化手法を提案する。

さらに、周期音のリズム感を考慮した知的生産性を検討する。ここでは、リズム感を変更した周期音を被験者に提示した際に簡単な計算タスクを与え、両者の関係性を評価する。そして、リズム感と知的生産性の関係性を検討する。

第4章「複合刺激下の音質評価手法に基づく快適性の向上と覚醒水準の維持」では、聴覚のみでなく視覚や動作意志を加えた“複合刺激下の音質評価手法”を提案する。また、快適性と覚醒水準の維持に有効な機能音を提案する。

まず、視覚や動作意志が聴覚に与える影響を検討し、刺激条件などの違いによる音の印象変化を把握する。ここでは、自動車走行音の音質や走行映像および車種を任意に変更できるドライビングシミュレータを構築し、走行音の印象に対して走行映像や動作意志を考慮した複合刺激下における音質評価を行う。そして、車種の違いによる差異も把握するため、ガソリンエンジン車と電気自動車の走行音の印象に対して、加速、定速、減速の走行条件の違いによる走行映像や動作意志の影響について評価を行い、各条件での印象変化を把握する。また、ドライビングシミュレータと実車を用いて走行音や走行映像および動作意志の複合刺激下で、近赤外分光法による脳血流の計測を行い、走行音の印象変化を客観的に評価できるか検討する。

次に、聴覚刺激と視覚刺激を用いた覚醒水準の維持の効果を把握するために、まず聴覚刺激の機能音について、カロリンスカ眠気尺度を用いた主観的および心拍を用いた客観的な評価を行う。また、視覚刺激の色彩が与える心理的作用を主観的に評価し、さらに、音刺激と色刺激を組み合わせた複合刺激下における覚醒水準の維持の効果について、カロリンスカ眠気尺度を用いた主観的および心拍を用いた客観的な評価を行う。そして、覚醒水準の維持に有効な聴覚刺激の機能音と視覚刺激の色彩を提案する。また、複合刺激が覚醒水準の維持へ与える影響を把握する。

第5章「時間経過に伴う機能音の聞き慣れ評価手法」では、第3章と第4章で提案した機能音の“聞き慣れ評価手法”を提案する。また、継続的に機能音を使用した際に、機能の低下が小さい音、および騒音に対する不快感が軽減する音を提案する。

まず、定常音を対象とし、第4章で提案した自動車走行音の覚醒水準の維持に有効な機能音を用いて、時間経過に伴う機能音の効果の維持を評価し、聞き慣れの評価手法を検討する。ここでは、聞き慣れを音に対する意識の減少状態と考え、音圧レベルを変化させた評価音を被験者に提示したときに、その変化に気付くか否かで聞き慣れを判断する主観的な音圧レベル変動評価手法を検討する。

次に、事務機稼働音に含まれる一部の定常音、定常音と過渡音を合成した非定常音、および事務機駆動音を被験者に提示した際の主観的および唾液アミラーゼを用いた客観的な聞き慣れ評価を行う。そして、唾液アミラーゼは聞き慣れの評価に適切であるか検討する。また、聞き慣れやすい音、聞き慣れにくい音を検討する。

第6章「結論」では、各章で得られた知見に基づき、本研究の成果をまとめる。そして、今後に向けた展望を整理する。

以上より、本研究は、日常使われている機械製品を研究対象とすることで、得られる成果の実用化を期待する。なお、本研究の評価にあたって、十分なインフォームド・コンセントを行った上で被験者の同意を取得している。

研究の背景

機械の機能や性能が向上し, 新たな価値が求められている
音による感性価値の創造 ⇒ **機能音の活用**

問題点

- **機能音の生成手法が確立されていない**
 - ・ 非定常音の快音化
 - ・ 視覚と聴覚など複合刺激下の快音化
- **機能音の評価手法が確立されていない**
 - ・ 主観的および客観的な音質評価
 - ・ 視覚と聴覚など複合刺激下の音質評価
 - ・ 聞き慣れ評価
- **時間経過に伴う機能音の効果維持が検討されていない**
 - ・ 機能音の経時変化
 - ・ 機能音の聞き慣れ

研究の目的

様々な環境に有益な機能音の生成

- ・ 機能音の音質安定化手法を提案
- ・ 複合刺激下の音質評価手法を提案
- ・ 時間経過に伴う聞き慣れ評価手法を提案

様々な環境の感性価値の向上

- ・ 快適性
- ・ 知的生産性
- ・ 覚醒水準の維持

Fig. 1-1 Background and purpose of this research

第2章

機能音の効果を客観的に音質評価する 生体情報の検討

2.1 はじめに

快適性やストレスの評価方法には、主観的な評価と客観的な評価がある。従来、音質評価は、SD (Semantic Differential) 法や一対比較法などの主観的な評価が行われてきた。これらは、評価音の印象に関する質問の回答が個人の判断に委ねられるため、被験者により質問の解釈や回答の得点に差が生じ、評価の不確実性の問題が発生する。また、リアルタイムの評価ができない欠点がある。さらに、幼児や高齢者は行うことが難しい。そこで、これらの問題点を解決するための客観的な音質評価方法として、生体情報を用いた評価の研究が行われている。

オフィスや住居では様々な情報機器、家電機器などが普及しているが、それらは少なからず音を発生し、人々を不快な気分させることがある。そのため、多くの製品開発において静音化、人間にとって聞き心地の良い快適な音にする快音化技術や価値のある音創りをするサウンドデザインが必要とされており、その快音化やサウンドデザインを行う上で音質評価は欠かせない。また、自宅医療を望む患者数の増加や入院日数の制限などにより、病院医療から在宅医療への変化があり、医療機器の稼働音の快音化が望まれている。そこで、生体情報に基づく客観的な音質評価が実現できれば、心地よい製品を開発する際の指標となり得る^[97]。

しかし、生体情報を用いて感性を客観的に評価した事例は、音刺激に関しては少ない。生体情報を電気信号でケーブルを介して伝送する計測機器では、計測時の被験者の体動によるケーブルの揺れがノイズ源となり、計測データがばらつく問題がある^[98]。また、被験者は体動が生じないようにするため拘束され、評価自体がストレスとなる場合がある。そして、音のような比較的弱い刺激に対しては、これらの影響が大きく計測誤差が問題となる。しかし、昨今、生体情報をケーブルレスやノイズの小さいケーブル方式で計測できる機器が使用されるようになり、音刺激に対しても計測データのばらつきを低減できると期待できる。

そこで第2章では、まず快・不快やストレス刺激に反応する生体情報を整理し、本研究で用いる生体情報として生体を傷つけない非侵襲、省スペースおよび低拘束の観点で選定する。そして、選定した生体情報を用いて基礎的な音質評価を行い、客観的な評価が可能か検討する。ここでは、評価音は快音や極端に不快な騒音などを用いる。次に、音質評価における精度向上のためのデータ処理手法および音質評価指標を提案し、実際の機械を用いて、その有用性を検証する。

2.2 快・不快やストレス刺激に反応する生体情報の種類

本節では、快・不快やストレス刺激に反応する生体情報を整理し、本研究で用いる生体情報として生体を傷つけない非侵襲、省スペースおよび低拘束の観点で選定する。

生体情報は、中枢神経系の活動と末梢神経系の活動に分かれ、さらに神経系の活動そのものではない生体情報として、内分泌系と免疫系がある^{[99],[100]}。

中枢神経系の活動を用いて、刺激に対する反応や快適性およびストレスなどを評価した研究事例は多く報告されていて、脳波 (EEG: Electroencephalogram)^{[101],[102]}、脳磁図 (MEG: Magnetoencephalography)^{[103]-[106]}、陽電子放射断層撮影 (PET: Positron Emission Tomography)^[107]、核磁気共鳴画像 (MRI: Magnetic Resonance Imaging)、機能的核磁気共鳴画像 (fMRI: Functional Magnetic Resonance Imaging)^{[108],[109]}、単一光子放射断層撮影 (SPECT: Single Photon Emission Computed Tomography)^[110]、近赤外分光法計測 (NIRS: Near-Infrared Spectroscopy)^{[111]-[112]}、機能的近赤外分光法計測 (fNIRS: Functional Near-Infrared Spectroscopy)^[113]などがある。中枢神経系の情報は脳の活動を計測することができ、思考、行動の制御、情動、注意、記憶、意思決定などを把握できる利点がある。EEGは時間分解能が非常に高いが、空間分解能が低い。また、計測中に手足などを動かすと、出力信号は脳波の信号に加え筋肉の動きによる筋電信号が含まれ、計測誤差が生じる欠点がある。MEGは時間分解能が高い^[114]が、専用の計測室が必要となる。PET, MRI, fMRI, SPCTは空間分解能が比較的高いが、時間分解能が低い。また、専用の計測室が必要となる。中枢神経系の計測をする際に被験者は拘束による負担が大きい場合が多いが、NIRSは拘束が比較的小さく、時間分解能も高い利点がある。また、連続的なデータを採取できる利点もある。一方、空間分解能が低い欠点があり、さらに、刺激に対する反応や快適性およびストレスなどを評価した事例は比較的少ない。

末梢神経系の活動を用いて刺激に対する反応や快適性およびストレスなどを評価した研究事例は、多く報告されている。末梢神経系は機能的な違いから、自律神経系の活動、視覚-運動系の活動および骨格筋系の活動に分けられ、さらに自律神経系の活動は心臓循環器系^{[115],[116]}、呼吸器系、温熱系^{[117]-[122]}、汗腺活動^{[123],[124]}に分かれる。また、視覚-運動系反応には、眼球運動、瞳孔運動、瞬目運動があり、骨格筋反応には、筋電図、関節可動域がある。自律神経系は、交感神経系と副交感神

経系があり、交感神経系は身体の活動性を高める作用があり、ストレス状態になったときに機能する。一方、普段の状態では副交感神経系の活動が優位であり、内臓をはじめとした各器官を安定して機能させる働きがある。

末梢神経系を用いた生体情報の計測の中で、心臓循環器系の心拍と呼吸器系の計測は、昨今、ノイズの少ない計測機器が開発され、非侵襲、省スペースおよび低拘束で計測できる。また、価格も他の計測手段と比較すると安価である。さらに、連続的にデータを採取できることも利点である。汗腺活動は、交感神経系の緊張や覚醒水準の高さを反映し、皮膚を流れる電流の抵抗が皮膚の湿気で低くなる特性を用いて皮膚電位（SPR：Skin Potential Reflex）などを計測する^{[125],[126]}。しかし、センサがケーブル方式のため体動により計測データがばらつくため、被験者にとって拘束が大きい場合が多い。

内分泌系と免疫系は、血液、尿、胃液、涙、唾液などがあり、体液や分泌液の一定時間あたりの分泌量が、生理心理学的指標となる可能性がある。しかし、血液の採取は被験者に針を打って採血をしなければならず、被験者に大きな苦痛を与えてしまう。また、尿、胃液や涙の採取は容易でない。唾液の採取は、従来、脱脂綿などを用いて採取していたため容易でなかった^[127]。しかし、昨今、唾液を非侵襲、省スペースおよび低拘束で採取し、唾液中のアミラーゼ活性値を短時間で計測するストレスモニターが開発され^{[128],[129]}、これを用いて刺激に対する反応や快適性およびストレスなどを評価した事例^[130]が報告されている。アミラーゼは血液中にも分泌するが、血液の採取は非侵襲的ではない。一方、唾液中のアミラーゼの計測は、非侵襲で簡単に採取でき、さらに刺激に対する反応が速いことや、生体情報の中では比較的安価な機器で計測できる利点がある。しかし、連続的なデータを採取できないことが欠点である。また、採取した唾液を他人に提供することを不快と感じる人もいるので、このような被験者のデータを排除する必要がある。

本研究で用いる生体情報は、様々な環境で機能音の評価を想定しているため、非侵襲、省スペースおよび低拘束の観点で選定する。そして、中枢神経系の活動のNIRS、末梢神経系の活動の心拍と呼吸、内分泌系の唾液アミラーゼに着目し、これらの生体情報は音刺激に対して音質評価が可能か検討する。

2.3 心拍を用いた客観的な音質評価

本節では、非侵襲、省スペースおよび低拘束で生体情報を計測できる心拍を用いた客観的な音質評価の可能性を検討する。心拍の計測は、生体情報の中では比較的安価な機器で計測できる利点がある。従来、心拍を計測する際に、被験者の体動などによるケーブルの揺れがノイズ源となり、音のような比較的弱い刺激に対しては計測データがばらつく問題があった。しかし、昨今、ノイズの小さいケーブル方式や、ケーブルレスで生体情報を計測できる機器が使用されるようになり、音刺激に対しても計測データのばらつきを低減できると期待できる。また、連続的なデータを採取できることも利点である。

2.3.1 心拍の計測

人がストレスを受けると、まず大脳新皮質がストレスに反応し、神経伝達物質が分泌される。次に視床下部から副腎皮質刺激ホルモンが分泌され、ホルモンに促されて自律神経系が活動し、心筋の収縮に影響を与える^[131]。そして、心筋の一連の電気活動を示す心電図（ECG：Electrocardiogram）を心電計で捉える。

Fig. 2-1 (a) にケーブル方式の心電計のデータ収録装置（株式会社ミュキ技研製、Polymate II AP216）を、Fig. 2-1 (b) に電極の取り付け位置を示す。電極材には金を採用し、電極近傍にインピーダンス変換回路を設けることで、外来ノイズやケーブルの揺れに強い計測を可能にしている。サンプリング周波数は 1000 Hz まで設定可能で、リアルタイムでデータを採取できる。

Fig. 2-1 (c) にケーブルレス方式の心電計（マイクロ・メディカル・デバイス株式会社製、RF-ECG）を、Fig. 2-1 (d) にセンサの取り付け位置を示す。この心電計は、心臓電位、3 軸の加速度、および温度のデータ採取が可能で、サンプリング周波数は 204 Hz で、PC にデータをリアルタイムで送信する。

心電の波形を Fig. 2-1 (e) に示す。P 波～T 波が出るが、R 波は電位が比較的大きいため心臓の拍動速度を表すのに適しており、R 波の間隔（RR 間隔）で心理状態を測る。そして、計測した被験者の ECG データを周波数解析して心拍変動（HRV：Heart Rate Variability）を求める。0.04～0.15 Hz の周波数帯域（LF）は交感神経と迷走神経の両方の機能を反映し、0.15～0.40 Hz の周波数帯域（HF）は迷走神経の機能を反映する。そして、それらの比率の LF/HF は、両神経のバランスを表し、ストレス度

や緊張度が增大すると LF/HF は増大する。

2.3.2 心拍を用いた音質評価

評価音は、不快な音として歯科ドリル音を使用し、心拍を用いた客観的な音質評価の可能性を検討する。

(a) 心拍を用いた音質評価方法

不快な音として使用する歯科ドリル音のスペクトログラムを Fig. 2-2 に示す。評価音は、高周波数成分まであり、さらに、約 5 kHz, 約 10 kHz のピーク音の周波数が変動している。

評価手順を Fig. 2-3 に示す。被験者は防音室内で椅子に座り、精神的、肉体的に落ち着かせるために 60 秒間安静を保った後に、60 秒間評価音を聞く。ここで、評価音の提示時間は、被験者の評価の負担を軽減するために短くすることを事前に検討し、60 秒とする。心電計はワイヤレスタイプを用い、安静時から計測を行う。また、被験者は呼吸統制を行うために、呼気と吸気のタイミングでそれぞれ“○”と“×”が表示される PC ディスプレイを見て、呼吸を表示に合わせて統制を行う。本評価では吸気 1.38 秒、吸気 2.22 秒とする。被験者は聴覚が正常な 20 歳代の 6 名である。

(b) 心拍を用いた音質評価結果

評価により得られた結果の中で、評価時に普段より体調が悪い被験者、評価音を既に聞いたことがある被験者、評価音を不快と感じなかった被験者を除いた計 3 名を有効被験者とし、そのデータを使用する。

心電図より得られた RR 間隔を周波数解析し、LF/HF を算出した結果を Fig. 2-4 に示す。グラフの縦軸の値は、各被験者のデータを正規化した後に、全被験者の平均値を算出し、さらに評価音を提示する前の安静時の結果を 0 としている。そして、値が大きいほどストレスを感じ不快であることを表す。Fig. 2-4 より、不快な音を提示すると LF/HF は大きくなり、ストレス度が上がることがわかる。以上の結果より、LF/HF は音刺激に対して音質評価が可能といえる。

2.4 唾液アミラーゼを用いた客観的な音質評価

本節では、非侵襲、省スペースおよび低拘束で生体情報を計測できる唾液アミラーゼを用いた客観的な音質評価の可能性を検討する。

2.4.1 唾液アミラーゼの計測

人がストレスを受けると、まず大脳新皮質がストレスに反応し、神経伝達物質が分泌される。次に視床下部から交感神経系に信号が送られ、唾液アミラーゼの制御をしているノルエピネフリンの分泌が促進され、唾液アミラーゼの分泌が多くなる。このようにストレスにより、唾液アミラーゼが活性化する^[132]。

被験者は Fig. 2-5 (a) に示すテストストリップ（ニプロ株式会社製，59-010）を Fig. 2-5 (b) に示すように舌下の唾液腺付近に当ててくわえて、唾液を採取する。唾液が付着したテストストリップを Fig. 2-5 (c) に示す唾液アミラーゼモニター本体（ニプロ株式会社製，59-011）に挿入すると、アミラーゼがテストストリップの唾液採取紙から試験紙に転写される。ここで、アミラーゼ試験紙は酵素反応によって発色する特性を持ち、アミラーゼの活性状態により発色の濃度が変わる。その濃度を本体内で LED とフォトカプラにより光学的な反射率を計測して、アミラーゼの活性値を数値化する。この方式の唾液アミラーゼの計測は、センサを体に取り付ける必要がないため、被験者の拘束が小さく、評価の負担が小さい利点がある。

2.4.2 唾液アミラーゼを用いた音質評価

評価音は、不快な音として 2.3 節と同じ歯科ドリル音を使用し、唾液アミラーゼを用いた客観的な音質評価の可能性を検討する。

(a) 唾液アミラーゼを用いた音質評価方法

評価手順を Fig. 2-6 に示す。被験者は防音室内で椅子に座り、精神的、肉体的に落ち着かせるために 60 秒間安静を保った後に、60 秒間評価音を聞く。そして、安静時および評価音を提示してから 30 秒後にテストストリップを口にくわえて 30 秒間唾液を採取する。その後、アミラーゼ活性値を計測する。被験者は聴覚が正常で、口腔内疾患が認められない 20 歳代の 6 名である。

(b) 唾液アミラーゼを用いた音質評価結果

2.3 節と同様に、評価により得られた結果の中で、評価時に普段より体調が悪い被

験者，評価音を既に聞いたことがある被験者，評価音を不快と感じなかった被験者を除いた計3名を有効被験者とし，そのデータを使用する．

評価により得られた唾液アミラーゼ活性値の結果を Fig. 2-7 に示す．グラフの縦軸の値は，各被験者のデータを正規化した後に，全被験者の平均値を算出し，さらに評価音を提示する前の安静時の結果を0としている．そして，値が大きいほどストレスを感じ不快であることを表す．Fig. 2-7 より，不快な音を提示すると唾液アミラーゼ活性値は大きくなり，ストレス度が上がることがわかる．以上の結果より，唾液アミラーゼは音刺激に対して音質評価が可能といえる．

2.5 近赤外分光法による脳血流を用いた客観的な音質評価

本節では，中枢神経の計測の中で，非侵襲，省スペースおよび低拘束で生体情報を計測できる近赤外分光法（NIRS）計測による脳血流を用いた客観的な音質評価の可能性を検討する．

2.5.1 近赤外分光法による脳血流の計測

Fig. 2-8 に示す NIRS による脳血流の計測は，非侵襲的に酸化ヘモグロビン（Oxy-Hb : Oxy-Hemoglobin）と脱酸化ヘモグロビン（Deoxy-Hb : Deoxy-Hemoglobin）の濃度変化量を計測することで，脳血流の変動から脳活動を捉える．計測の原理を Fig. 2-8 (a) に示す．波長 700 nm から 1000 nm の近赤外光は，皮膚や骨などの生体組織に対して高い透過性を持ち，一方でヘモグロビンにより吸収され，その酸化状態によって吸光度が異なる性質を持つ．照射プローブから発せられた近赤外光は頭部表層の組織から大脳皮質に到達し，錯乱と反射を繰り返してその一部が頭蓋外に戻る．波長の異なる複数の近赤外光を検出プローブで検出することで，近赤外光の性質と錯乱媒体における光の減衰に基づき，酸化ヘモグロビンと脱酸化ヘモグロビンの濃度変化を計測できる．脳機能が活性化しているときは，脳血流内の酸化ヘモグロビンと脱酸化ヘモグロビンの濃度変化が活発になるので，その変化から脳活動の状態を捉えることが可能となる^[133]．

Fig. 2-8 (b) は，脳の任意部位を計測できる設置型の NIRS による脳血流の計測装置（株式会社日立メディコ製，光トポグラフィ装置 ETG-4000）で，右上図に示す直径数 mm の検出プローブを用いることで毛髪によるノイズの影響を受けにくい特徴

がある。そして、右下図に示す頭部の位置にプローブを設置したホルダを取り付ける。一方、Fig. 2-8 (c) は無線を用いる可搬型の前頭葉専用の脳血流計測装置（株式会社日立製作所製、ウェアラブル光トポグラフィ WOT-100）で、自動車車室内など屋外での実験にも使用できる。検出プローブは直径 10 mm 程度と大きいため、毛髪の少ない額での計測に適する。そして、Fig. 2-8 (c) の上図は、プローブ位置と頭部の取り付け位置を、下図はプローブとチャンネルの構成を示しており、“○”で示す照射側と受光側が対となり上下 8 対のプローブを有している。各プローブ間でヘモグロビンの濃度変化を計測することで、“□”に示した計 22 ch の脳血流の計測が可能となる。

2.5.2 近赤外分光法による脳血流を用いた音質評価

評価音は、音質の差が極端に大きい評価音として快音、ランダムノイズ、騒音を使用し、NIRS による脳血流を用いた客観的な音質評価の可能性を検討する。

(a) 近赤外分光法による脳血流を用いた音質評価方法

音質の差が極端に大きい評価音は、Fig. 2-9 に示す周波数特性が比較的フラットな快音（川のせせらぎ）、-10dB/Oct のランダムノイズ、高い周波数にピークのある騒音（ガラスの擦り合わせ）の 3 種の評価音を用いる。そして、これらを被験者に提示した際の脳血流の変化量を Fig. 2-8 (b) に示す設置型の NIRS を用いて計測する。被験者は聴覚が正常な 20 歳代の 4 人であり、計測部位は前頭前野 22ch、聴覚野 12ch とする。

評価手順を Fig. 2-10 に示す。NIRS を用いた脳血流の計測は刺激に対する反応が速いので、計測時間は 21 秒とする。被験者は椅子に座り、精神的、肉体的に落ち着かせるために 30 秒間安静を保った後に、酸化ヘモグロビンを 21 秒間計測する。その後、評価音を計測機のプローブと干渉しないようにイヤホンで 21 秒間聞き、その際の酸化ヘモグロビンを計測する。そして、この手順を 3 種の評価音に対して繰り返す。

(b) 近赤外分光法による脳血流を用いた音質評価結果

評価により得られた脳血流の時系列データに対し、移動平均法によりノイズを除去し、さらに使用した全 ch の時系列データを加算平均する。酸化ヘモグロビンの濃

度の結果を Fig. 2-11 に示す。グラフの縦軸の値は全被験者の平均値を示し、値が大きいかほど酸化ヘモグロビンの濃度が上昇し、脳機能が活性化していることを表す。Fig. 2-11 より、音質の違いにより酸化ヘモグロビンの活性値に有意な差が得られ、NIRS による脳血流は音刺激に対して音質評価が可能といえる。NIRS を用いた音質評価の事例は比較的少ないが、末梢神経系の活動では評価できない脳活動も捉えられる可能性もある。

2.6 呼吸を用いた客観的な音質評価

本節では、非侵襲、省スペースおよび低拘束で生体情報を計測できる呼吸を用いた客観的な音質評価の可能性を検討する^{[134]-[136]}。まず、種々の音を被験者に聞かせたときに、SD 法を用いた主観的な評価と呼吸の揺らぎを用いた客観的な評価との相関を検討する。次に、主観的な評価と客観的な評価との相関の精度を向上させ、呼吸の揺らぎを用いて快音、騒音を定量的に評価できる指標を見出す。さらに、指標は実際の機器が発生する稼働音の音質評価に適用できるか検討する。

2.6.1 呼吸の計測

心理変動は呼吸器系へ影響を与え、安静状態では深い呼吸となり、緊張状態では浅い呼吸となる。呼吸を司る呼吸中枢は、呼息中枢と吸息中枢に分かれ、大脳皮質などの上位中枢の刺激がない場合において呼息中枢と吸息中枢はポジティブフィードバック系を形成し、その系内で発信が起こり一定のリズムで自発呼吸を行うことができる。一方、ポジティブフィードバックの結合は弱いために、上位中枢から刺激が加わった場合、外乱として容易にその系は乱れる^{[137],[138]}。よって、音刺激に対しても呼吸に揺らぎが生じ、それらの相関を見出せる可能性がある。

従来の呼吸の計測は、カーボン粒をつめたゴムチューブを胸部か腹部に巻き、通電抵抗値の変化を呼吸波とみなす方法、肺活量計測などで用いられるマスクで鼻と口を覆って呼吸量を計測する方法、鼻部に装着したサーミスタで呼気と吸気の温度を測り、温度変化曲線を呼吸曲線とする方法などがある。しかし、これらは計測のためのプローブが体幹部を圧迫することや、鼻部に取り付けるサーミスタが呼気と吸気の出入り口にあるため、呼吸活動に影響を与える可能性がある。また、ゴムチューブ、マスクやサーミスタなどを装着すること自体がストレスとなり、音質評価

のような比較的弱い刺激の計測には適用が難しい。ここで、Fig. 2-12 に示す睡眠時の無呼吸計測などに使用されている呼吸センサ（株式会社エム・アイ・ラボ製）を改良し、被験者の背面とセンサとの圧力変化から呼吸を捉える。センサを被験者の腰の位置に取り付けることで、個人の体格によらずに呼吸センサに十分な圧力をかけることができ、同時に腹式呼吸や肺式呼吸などの各個人の呼吸方式によらず一様に呼吸を計測できる。このセンサは、被験者にとって非拘束で計測できるため負担が小さく、体動の影響も比較的小さい利点がある。また、連続的なデータを採取できることも利点である。

2.6.2 呼吸を用いた音質評価

評価音は、音質の差が極端に大きい評価音として 2.5 節で用いた快音（川のせせらぎ）、高い周波数にピークのある騒音（ガラスの擦り合わせ）の 2 種の評価音を使用する。

評価手順を Fig. 2-13 に示す。被験者は実験室内で椅子に座り、精神的、肉体的に落ち着かせるために 10 分間安静を保った後に、評価音をヘッドホンで 3 分間聞き、その際の呼吸を計測する。被験者は聴覚が正常な 20 歳代の 10 人である。

評価により得られた呼吸の定常時の時系列波形を Fig. 2-14 に示す。得られた呼吸の時系列データに対し、計測時間と分解能を考慮して 10 秒 1 フレームの周波数解析を行い、Fig. 2-15 (a), (b) にそれぞれ快音、騒音を聞いたときの呼吸の周波数特性を示す。両者を比較すると、快音では振幅が大きく揺らぎも大きい傾向を、騒音では振幅が小さく揺らぎも小さい傾向を示す。これより、呼吸の揺らぎは快適な音や不快な音の音質を評価できると考える。

ここで、計測中に被験者の大きな体動や深呼吸がある場合は、呼吸センサへの圧力が変動し、例えば Fig. 2-16 に示すような特異なデータとなる。そこで、特異なデータを取り除く新たなデータ処理方法を検討することが必要となる。

2.7 客観的な音質評価における精度向上

本節では、音質評価における精度向上のためのデータ処理手法および音質評価指標を提案する。そして、稼働音の音質を改善した酸素濃縮機を用いて音質評価を行い、提案した音質評価指標の有用性を検証する。

2.7.1 呼吸を用いたデータ処理手法および評価指標の提案

被験者の大きな体動や深呼吸によって生じる特異なデータを取り除き，評価精度を向上させることを検討する．

快音と騒音を提示したときに呼吸データの周波数特性で顕著な差が生じるのは，呼吸深さを示す振幅のピーク値である．そこで，呼吸の周波数特性のピーク値に着目したデータ処理方法を検討する．

呼吸の有意なデータを抽出する処理として，以下の手順の手法を検討する．

- ① 呼吸の時系列データに計測時間と周波数分解能を考慮して周波数解析を行い，それぞれの呼吸の周波数データより，Fig. 2-17のように呼吸のピーク値を抽出する．この例の場合，ピーク値 a, b, c が有意であるか不明である．
- ② 定常的な呼吸のデータは正規分布に従うと仮定する．そこで，正規分布に従う値の正規確率プロットは一直線に並ぶことを利用し，Fig. 2-17に示すピーク値を抽出したデータから，体動や深呼吸などの影響がある特異なデータを排除する．Fig. 2-18に示す正規確率プロットより，2つのピーク値 b, c が大きく外れている以外は，データがほぼ一直線上に並び，ピーク値 a は有意な値，ピーク値 b, c は排除すべき値であることが確認できる．
- ③ 抽出した呼吸のピーク値から式 (2-1) に示す変動係数 C_v を算出する．

$$C_v = \sigma / \bar{A} \quad (2-1)$$

ここで， σ はピーク値の標準偏差， \bar{A} は各ピーク値の平均を示す．そして，音の刺激に対して呼吸が敏感に反応しやすい被験者と，鈍感で反応が鈍い被験者が存在するため，被験者ごとに式 (2-2) を用いて変動係数を正規化する．

$$SQC = \frac{C_v - C_{v_{\min}}}{C_{v_{\max}} - C_{v_{\min}}} \times 100 \quad (2-2)$$

ここで， $C_{v_{\max}}$ は各被験者の変動係数の最大値を， $C_{v_{\min}}$ は変動係数の最小値を示す．

この手順のデータ処理を施すことで，音に対する各被験者の感度の影響が小さい評価が可能となる．この正規化した変動係数を音質評価係数（SQC：Sound Quality Coefficient）と定義する．

2.7.2 提案した評価指標を用いた音質評価

評価音は、主観的な評価が大きく異なると予想される音として 2.5 節と同じ 3 種の評価音を使用する。評価は Fig. 2-13 に示す手順に加え、評価音の提示後に SD 法を用いた主観評価を 5 分間行う。そして、この手順を 3 種の評価音に対して繰り返す。被験者は聴覚が正常な 20 歳代の 10 人である。

(a) 音質の差が大きい音の主観的な音質評価

SD 法は Table 2-1 の形容詞対を用い、得られた回答を因子抽出は主因子法、回転はバリマックス回転法によって因子分析を行う。第 1 因子から順に「心地よい (Comfortable) – 不快な (Uncomfortable)」などに代表される快適因子 (Comfortable factor), 「軽快な (Light) – 重々しい (Heavy)」などに代表される軽快因子 (Light factor), 「臨場感のある (Realistic) – 偽の (Fake)」などに代表される臨場感因子 (Realistic factor) の 3 つの因子が抽出でき、各因子の寄与は (快適因子, 軽快因子, 臨場感因子) = (47.0%, 22.9%, 7.0%) である。そして、各因子得点を算出し、その結果を Fig. 2-19 に示す。

(b) 音質の差が大きい音の客観的な音質評価

呼吸の揺らぎに着目した音質評価係数 (SQC) の有用性を検討するために、各評価音を提示したときの呼吸データから SQC を算出する。主観的な評価による因子得点と客観的な評価による SQC との相関係数を算出した結果は、快適因子と SQC との相関係数が 0.92 で相関が高く、SQC の有用性を見出した。

快適因子の因子得点と SQC の傾向を Fig. 2-20 にまとめる。各評価音に対する快適因子の因子得点を折れ線グラフで、SQC を棒グラフで示し、快適因子は値が大きいほど快適性が大きいことを表す。快適因子と SQC は、快音が最も高く、次にランダムノイズ、騒音の順になっており、主観的な評価による快適因子と客観的な評価による SQC との傾向が一致している。よって、呼吸の揺らぎに着目した SQC による客観的な音質評価は、快適性に関する音の違いを評価できることがわかる。

(c) 音質の差が小さい音の主観的な音質評価

SQC のさらなる有用性の検討を行うために、音質の差が小さい評価音を使用して音質評価を行う。評価音は、快音として今まで使用した Fig. 2-9 に示す川のせせら

ぎ (Comfortable sound), 川のせせらぎにカットオフ周波数 $F_c=1500$ Hz のハイパスフィルタをかけて加工した快音 A (Comfortable sound A), 川のせせらぎにカットオフ周波数 $F_c=3000$ Hz のハイパスフィルタをかけて加工した快音 B (Comfortable sound B) の3種を使用し, 2.7.2 (b) 節と同様の評価を行う。

SD法は Table 2-2 の形容詞対を用い, 得られた回答を用いて因子分析を行う。第1因子から順に「心地よい (Comfortable) – 不快な (Uncomfortable)」などに代表される快適因子 (Comfortable factor), 「広がりのある (Spatial) – 窮屈な (Constrained)」などに代表される広がり因子 (Spatial factor), 「静かな (Quiet) – 騒々しい (Clamorous)」などに代表される静けさ因子 (Quiet factor) の3つの因子が抽出でき, 各因子の寄与は (快適因子, 迫力因子, 静けさ因子) = (42.7%, 25.6%, 14.7%) である。そして, 各因子得点を算出し, その結果を Fig. 2-21 に示す。

(d) 音質の差が小さい音の客観的な音質評価

SQCの有用性を検討するために, 各評価音を提示したときの呼吸データから SQC を算出する。主観的な評価による因子得点と客観的な評価による SQC との相関係数を算出した結果は, 快適因子と SQC との相関係数が 0.98 で相関が高く, SQC の有用性を見出した。

快適因子の因子得点と SQC の傾向を Fig. 2-22 にまとめる。各評価音に対する快適因子の因子得点を折れ線グラフで, SQC を棒グラフで示し, 快適因子は値が大きいほど快適性が大きいことを表す。快適因子と SQC は, 快音が最も低く, 快音 A, 快音 B の順に高くなっており, 主観的な評価による快適因子と客観的な評価による SQC との傾向が一致している。よって, SQC による客観的な音質評価は, 音質の差が小さい音についても快適性に関する音の違いを評価できることがわかる。

以上より, これらの評価音について, 呼吸の揺らぎに着目した SQC は快適性に関する音の違いを評価できるといえる。

2.7.3 客観的な音質評価に基づく快適な稼働音の開発

実際の機械の稼働音として医療機器を用いて, 音質評価係数の実用性を検討する。在宅の医療機器に着目し, まず酸素濃縮機の稼働音の聞き心地を改善することを検討する。次に, 呼吸の揺らぎを用いた SQC が, 医療機器の稼働音の快適性を評価できるか検討する。ここでは, 稼働音の改善前後の音質評価を, SD法を用いた主観的

な評価と呼吸の揺らぎを用いた客観的な評価を行い、両者の結果を考察する。そして、SQCの有用性を検討する。

(a) 酸素濃縮機の稼働音

呼吸器疾患などの患者が自宅で酸素を吸入する酸素濃縮機は、吸気した空気を酸素以外の成分を取り除くことで高濃度の酸素を供給する。実験で使用する装置は、窒素を吸着する機能を持つゼオライトを用いて酸素を濃縮する。ゼオライトは圧力を高めたときに、より多くの窒素を吸着する特徴があるので、装置内にゼオライトが入った2本のシリンダを入れ、コンプレッサにより空気の加圧と減圧を交互に繰り返して行き、空気中の酸素と窒素を分離する。コンプレッサによる吸排気の制御には弁が使用されていて、ピストンの動きと連動した圧力変動により弁が上下する。高速度カメラで弁の動きを捉えた写真を Fig. 2-23 に示す。弁は下のプレートで打ち付けられ、振動していることが確認できる。そして、騒音の発生タイミングから、この振動が稼働音に大きく影響し、さらに、コンプレッサを冷却するファン音も稼働音に大きく影響していると考えられる。

(b) 酸素濃縮機の稼働音の構造変更

まず、弁が下のプレートで打ち付けられた際に発生する振動の対策により、稼働音の改善を検討する。Fig. 2-24 に示すように弁に当たっていたプレート表面の突起をなくし、弁とプレートの間に隙間を持たせる構造にする。これにより弁がプレートにぶつかるときの衝撃が低減することに加え、弁とプレートとの接触面積が増え、弁に加わる衝撃が分散されて弁の振動による騒音が低減すると考える。

振動対策を施す前後のコンプレッサ単体の音響パワースペクトル密度 (PSD : Power Spectral Density) を、コンプレッサの上側 0.2 m の位置で計測し、得られた結果を Fig. 2-25 に示す。ここで、太線でプロットしたデータは計測した PSD を 80 Hz ごとの移動平均した曲線を示している。対策前のコンプレッサと比較して、対策後は 300 Hz 以上の周波数帯域で PSD が低減していて、対策効果が確認できる。

次に、コンプレッサを冷却するファン音の対策を検討する。現状の排気経路の音響特性を把握するために、周波数応答比関数 (FRRF : Frequency Response Ratio Function) を計測した結果を Fig. 2-26 の細線で示す。318 Hz, 800 Hz, 1500 Hz で排気経路の共鳴があるので、この3つのピークに着目した騒音の低減を検討する。

吸音材による対策は、その特性より低周波数領域では吸音効果は期待できないため、318 Hz の対策はヘルムホルツ共鳴器を用いる。ヘルムホルツ共鳴器は小さい孔を持つ空洞により、空洞と孔内部の空気の振動が特定の周波数で共鳴し、音を振動エネルギーに変換して消音させる原理である。そこで、318 Hz の音響モードの最大振幅位置を数値解析で算出し、共鳴器を設置する。

一方、800 Hz と 1500 Hz の対策は吸音材を用いる。吸音効果を大きくするために、800 Hz と 1500 Hz の粒子速度モードの最大振幅位置を数値解析で算出し、2つの周波数でほぼ一致する位置に吸音材を配置する。

これらの対策を施した結果を Fig. 2-26 の太線で示す。対策前と比較して対策後は、着目した 318 Hz、800 Hz、1500 Hz のピークが低減していることがわかる。

そして、コンプレッサの弁による騒音とコンプレッサを冷却するファン音の対策を施した酸素濃縮機を試作し、実稼働時の音圧レベルを計測した結果を Fig. 2-27 に示す。騒音に寄与が高い 843 Hz から 966 Hz の大きなピーク群が対策後は減少していて、対策効果が確認できる。

(c) 音質評価に基づく酸素濃縮機の稼働音の快適性向上

稼働音の改善効果を確認するために、SD 法を用いた主観的な音質評価と SQC による客観的な評価を行う。被験者は聴覚が正常な 20 歳代の 13 人であり、改善前後のそれぞれの稼働音をヘッドホンから聞き、その際の呼吸を計測する。その後、主観的な評価を行う。

SD 法は Table 2-3 の形容詞対を用い、得られた回答を用いて因子分析を行う。第 1 因子から順に「心地よい (Comfortable) - 不快な (Uncomfortable)」などに代表される快適因子 (Comfortable factor)、「落ち着いた (Calm) - 甲高い (Shrill)」などに代表される落ち着き因子 (Calm factor)、「暖かみのある (Warm) - 冷たい (Cool)」などに代表される暖かさ因子 (Warm factor) の 3 つの因子が抽出でき、各因子の寄与は (快適因子, 落ち着き因子, 暖かさ因子) = (20.4%, 18.9%, 14.3%) である。対策前後の各因子得点を算出し、その結果を Fig. 2-28 に示す。対策後の快適因子は得点上がり、快適性が向上していることがわかる。

快適因子の因子得点と SQC の傾向を Fig. 2-29 にまとめる。各評価音に対する快適因子の因子得点を折れ線グラフで、SQC を棒グラフで示し、快適因子は値が大き

いほど快適性が大きいことを表す。快適因子と SQC は、改善前よりも改善後の方が高くなっており、主観的な評価と快適因子の傾向が一致している。以上より、提案した SQC は、実際の機器を用いた音質評価においても主観的な評価の快適性と相関が高く、快適性に関する音の違いを評価できるといえる。

2.8 まとめ

第2章では、音刺激に対して、従来の設問調査に基づく主観的な音質評価に加え、生体情報に基づく客観的な音質評価の可能性を検討した。

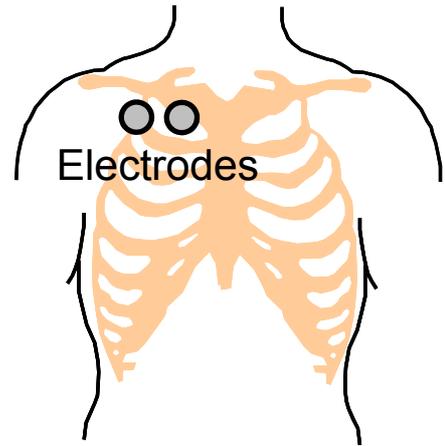
まず、生体情報を整理し、本研究で用いる生体情報として生体を傷つけない非侵襲、省スペースおよび低拘束の観点で選定した。次に、選定した生体情報を用いて基礎的な音質評価を行い、客観的な評価が可能か検討した。また、評価における精度向上のためのデータ処理手法および音質評価指標を提案し、実際の機器に適用した。以下、結果をまとめる。

1. 生体情報を神経系、内分泌系、および免疫系で分類し、整理した。そして、本研究で検討する生体情報として、非侵襲、省スペースおよび低拘束の観点で心拍、唾液アミラーゼ、近赤外分光法による脳血流、および呼吸を選定した。
2. 被験者に快音、ランダムノイズや騒音などを提示した際の心拍、唾液アミラーゼ、近赤外分光法による脳血流を評価した結果、音刺激の提示により生体反応に有意な差が得られ、これらの生体情報は音刺激に対して音質評価が可能であることを示した。
3. 被験者に快音や騒音を提示した際の呼吸を評価した結果、音質の違いによる呼吸振幅のピーク値と揺らぎに有意な差が得られ、呼吸は音刺激に対して音質評価が可能であることを示した。また、被験者の体動や深呼吸などがある場合に生じる特異なデータを取り除く新たなデータ処理手法の必要性を示した。

4. 定常的な呼吸のデータは正規分布に従うと仮定し，正規確率プロットが一直線に並ぶことを利用して，体動や深呼吸などによる特異な呼吸振幅のピーク値のデータを排除する手法，および客観的に音質を評価できる音質評価係数を提案した．また，提案した評価係数が，実際の機器である酸素濃縮機の稼働音の音質評価に適用できることを示した．



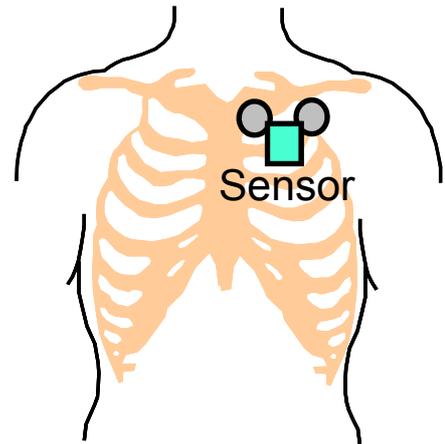
(a) ECG monitor (Cable type)



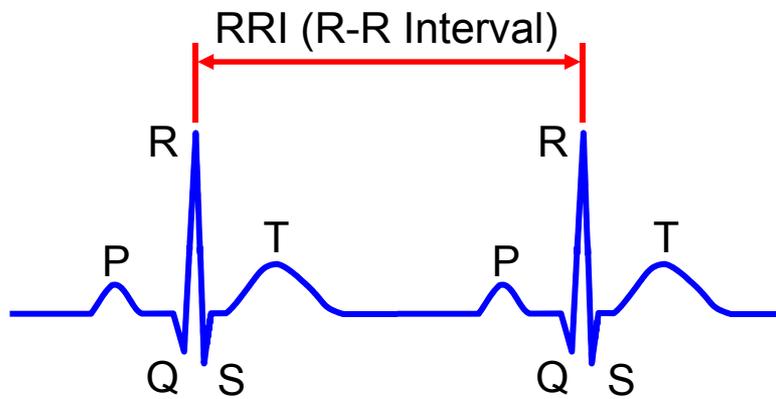
(b) Position of electrodes



(c) ECG sensor (Cable-less type)



(d) Position of sensor



(e) R-R Interval of ECG

Fig. 2-1 ECG (Electrocardiogram)

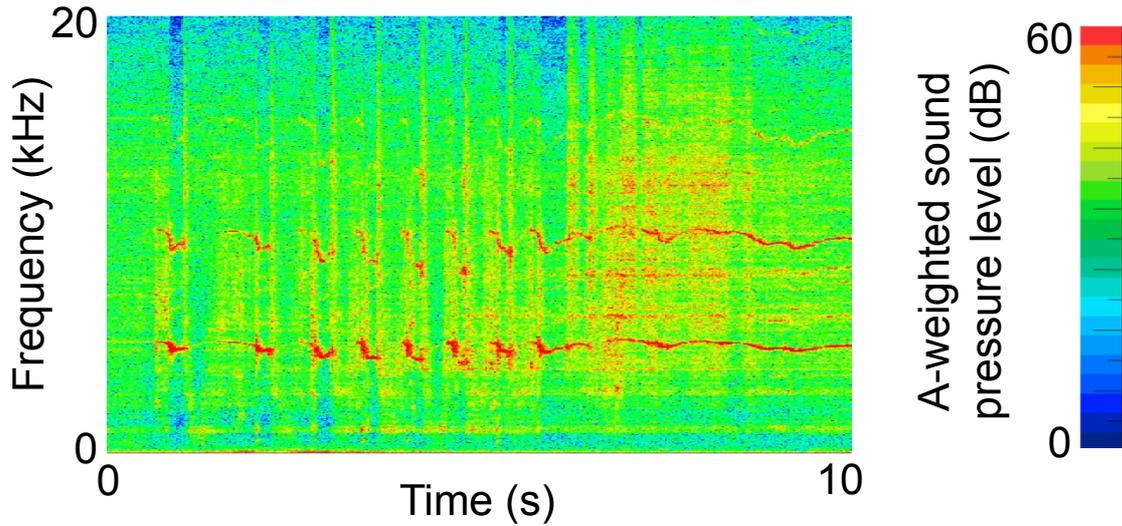


Fig. 2-2 Spectrogram of noise

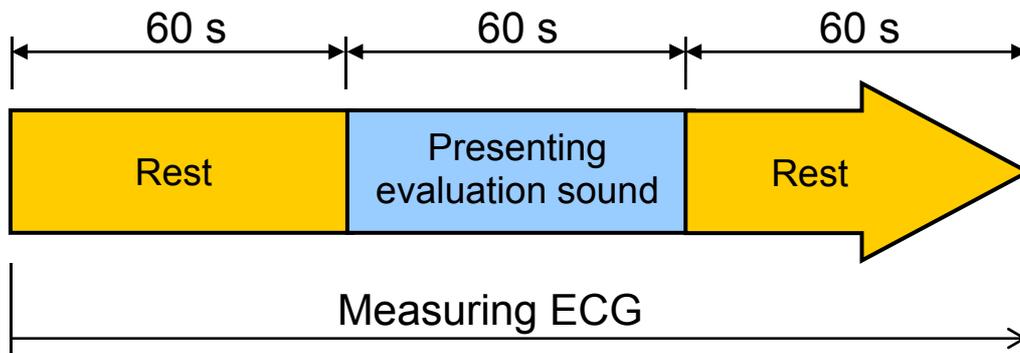


Fig. 2-3 Time protocol for sound quality evaluation by using heart rate

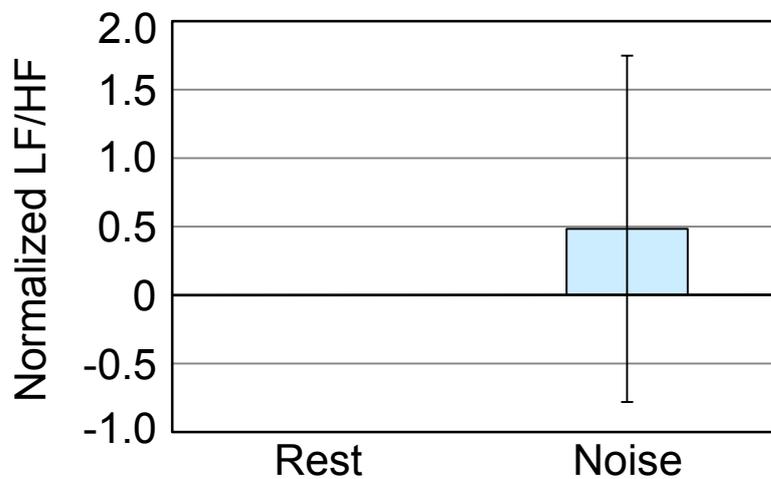
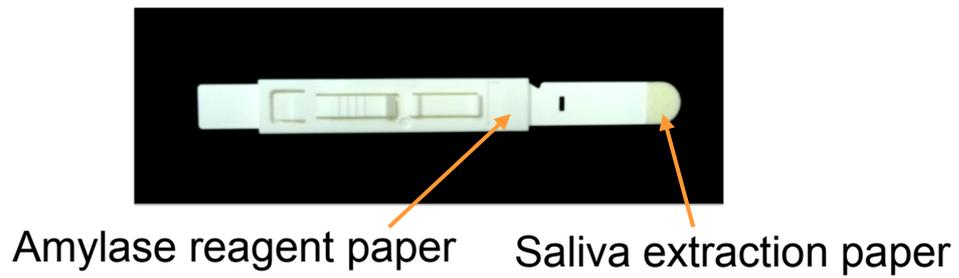
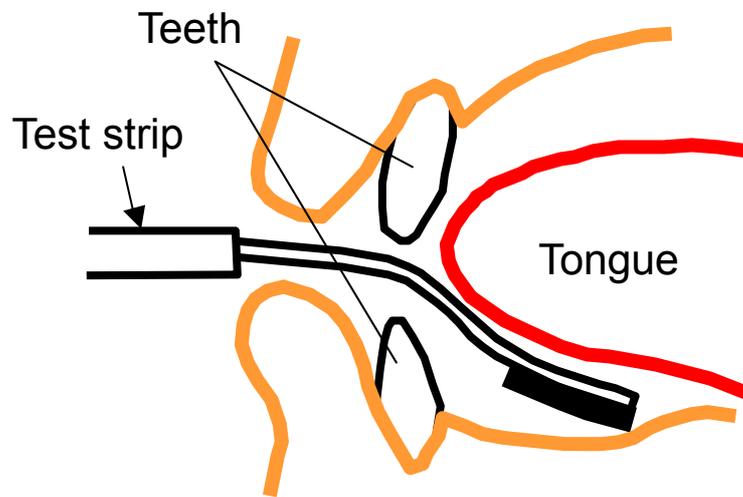


Fig. 2-4 Evaluation result of sound quality by using heart rate



(a) Test strip



(b) Schematic view of extracting saliva



(c) Main body

Fig. 2-5 Stress monitor by measurement of salivary amylase activity

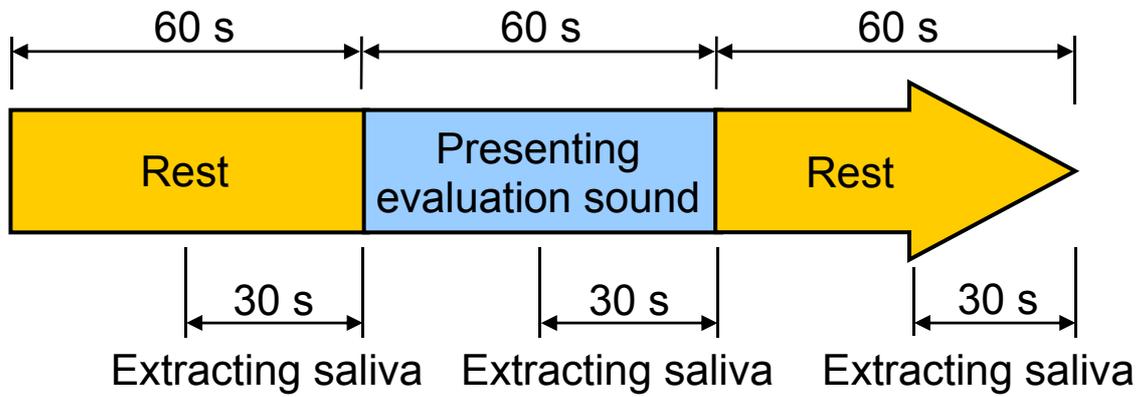


Fig. 2-6 Time protocol for sound quality evaluation by using salivary amylase activity

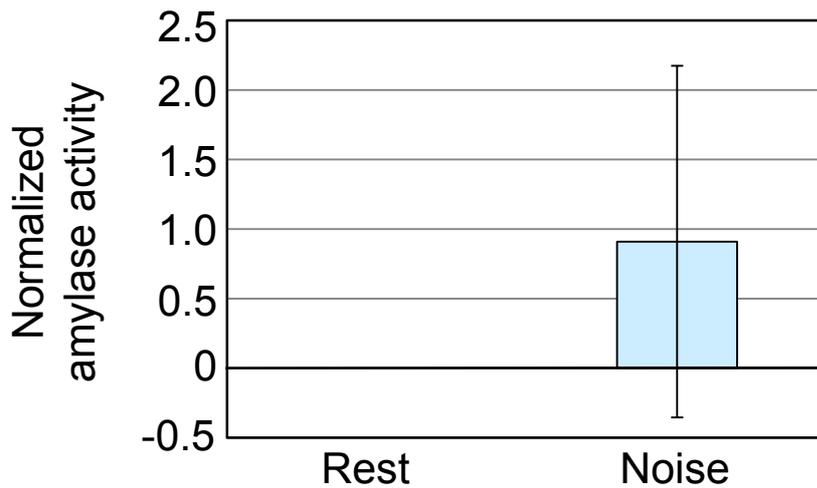
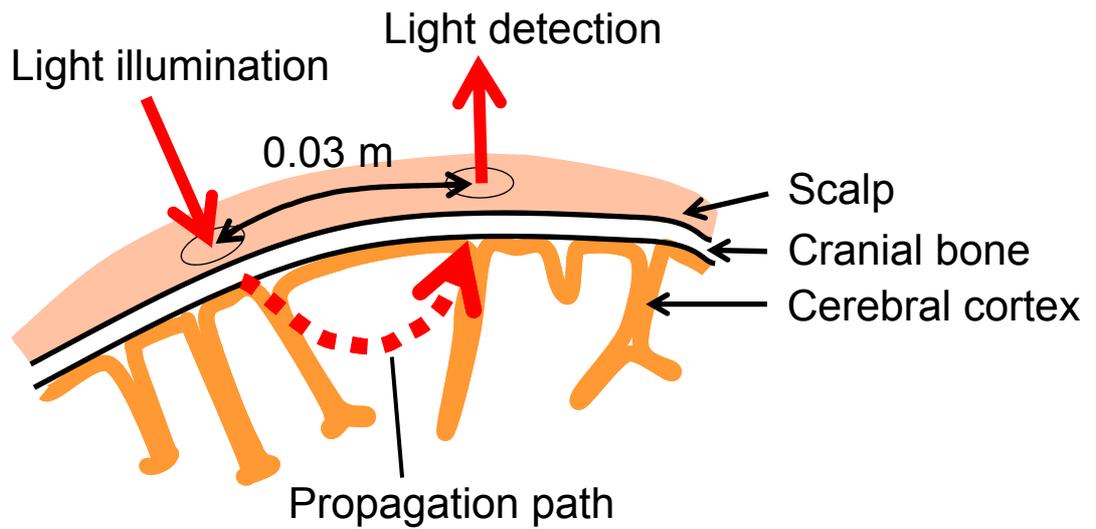
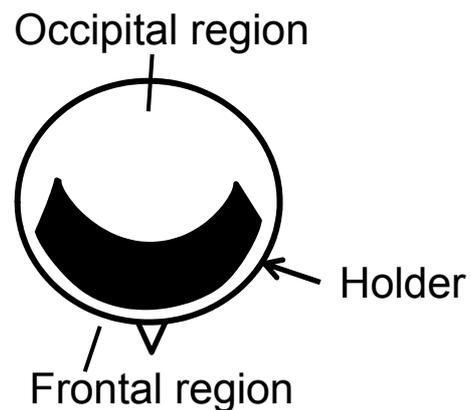
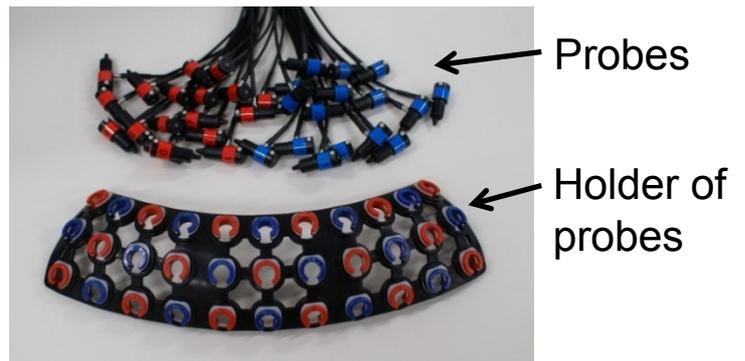


Fig. 2-7 Evaluation result of sound quality by using salivary amylase activity

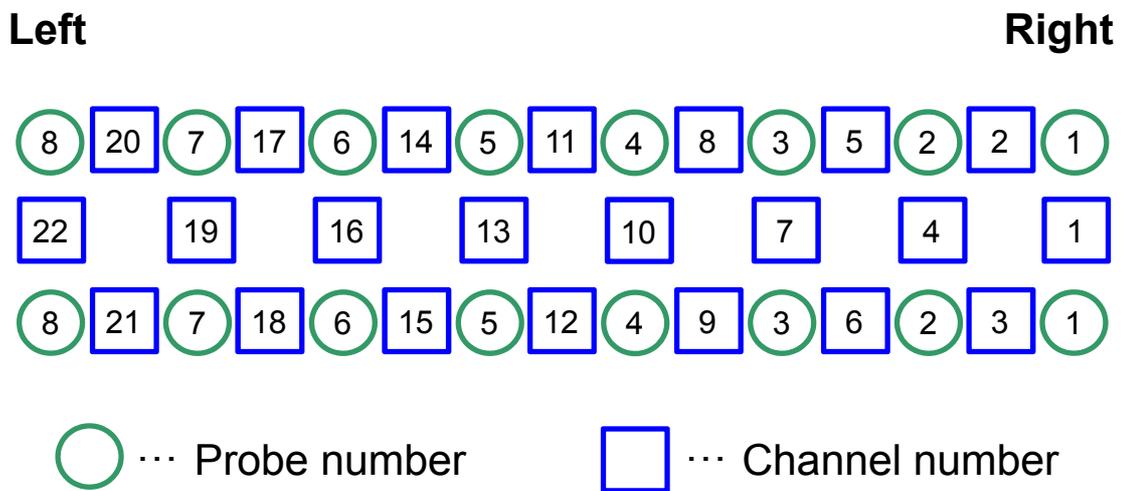
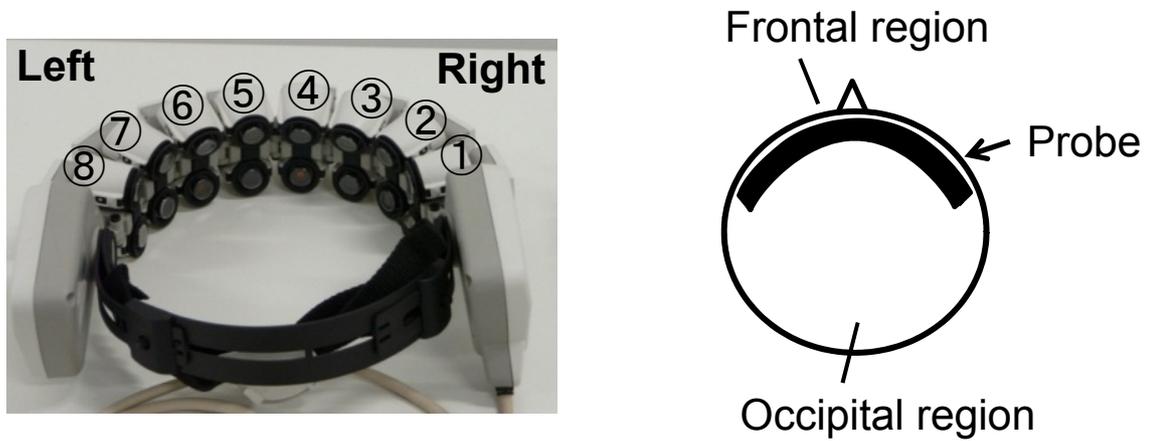


(a) Principle of NIRS



(b) Setting type of NIRS

Fig. 2-8 Brain activity measurement by near infrared spectrometer (NIRS)



(c) Portable type of NIRS

Fig. 2-8 Brain activity measurement by near infrared spectrometer (NIRS)

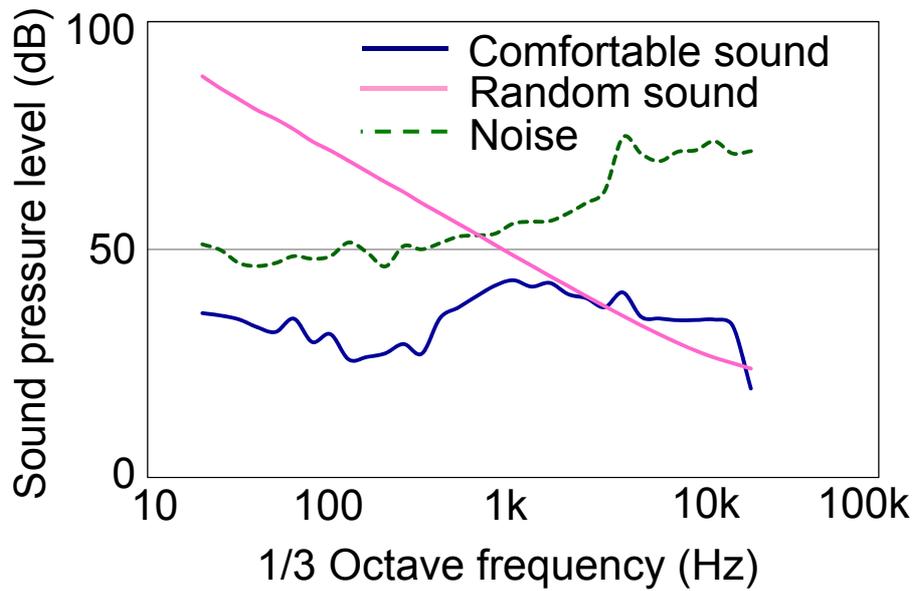


Fig. 2-9 Evaluation sounds for sound quality evaluation, which are comfortable sound, random sound and noise

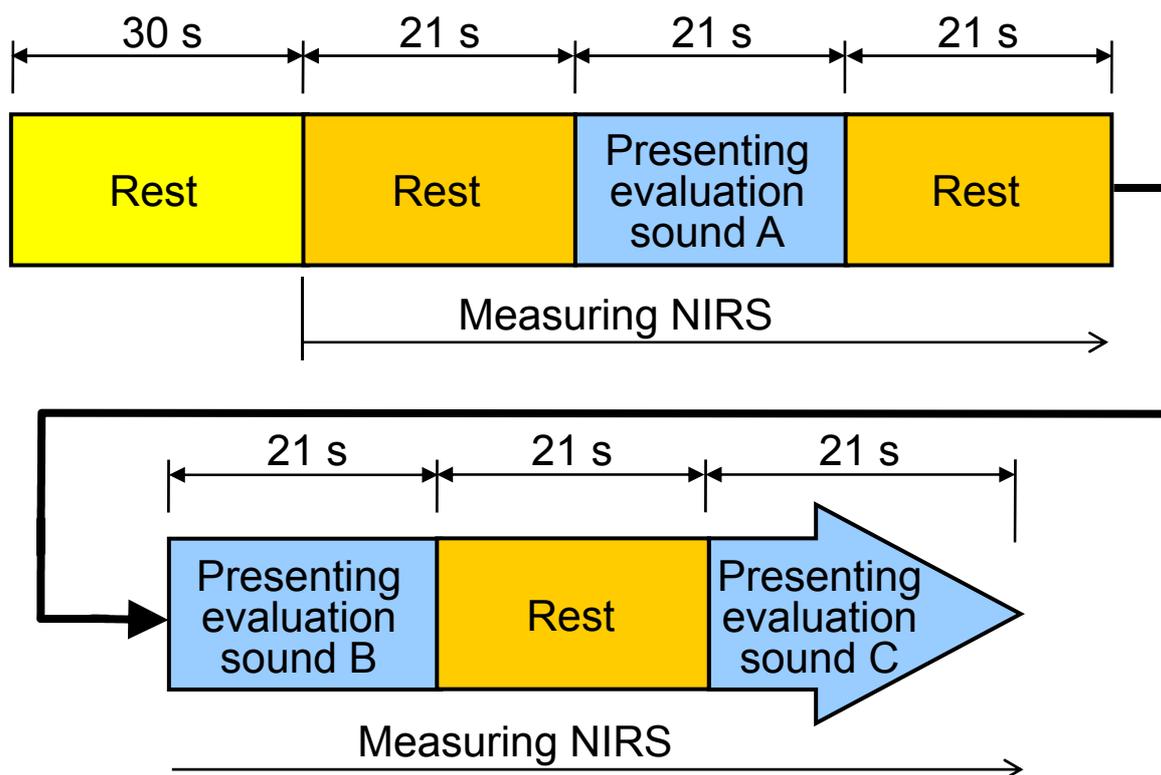


Fig. 2-10 Time protocol for sound quality evaluation by using NIRS

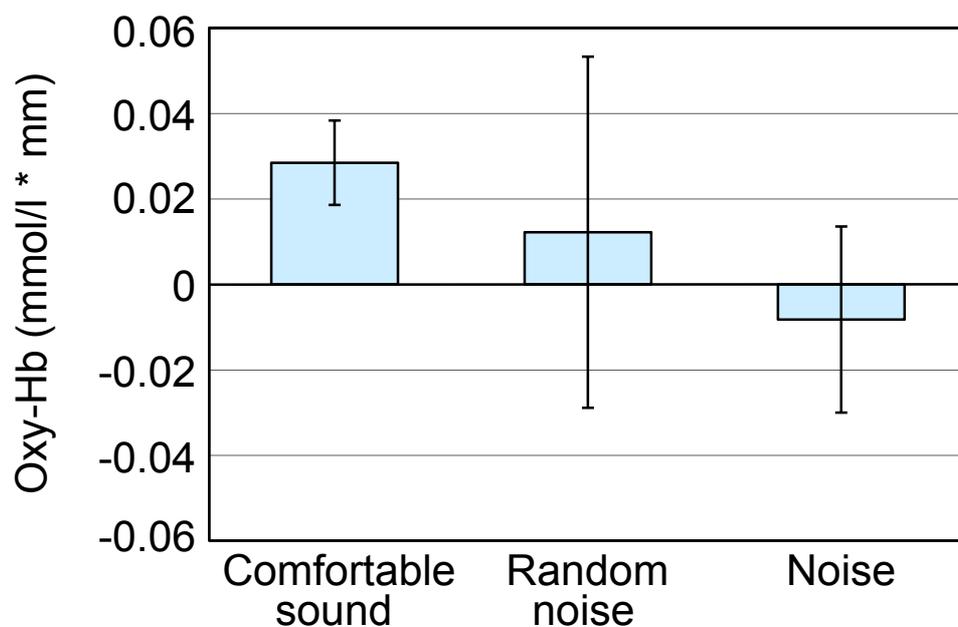


Fig. 2-11 Evaluation result of sound quality by using NIRS

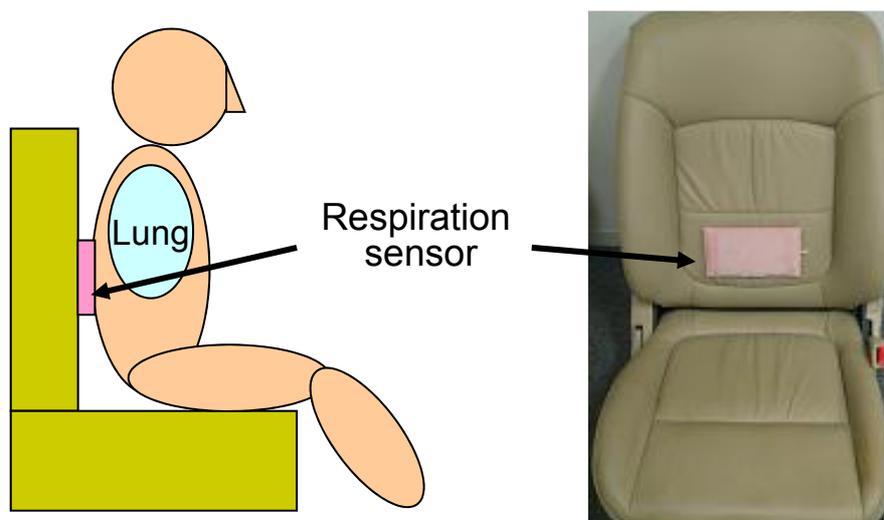


Fig. 2-12 Respiration sensor

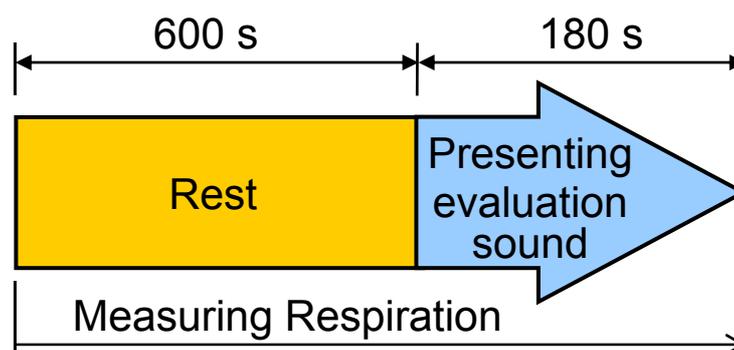


Fig. 2-13 Time protocol for sound quality evaluation by using respiration

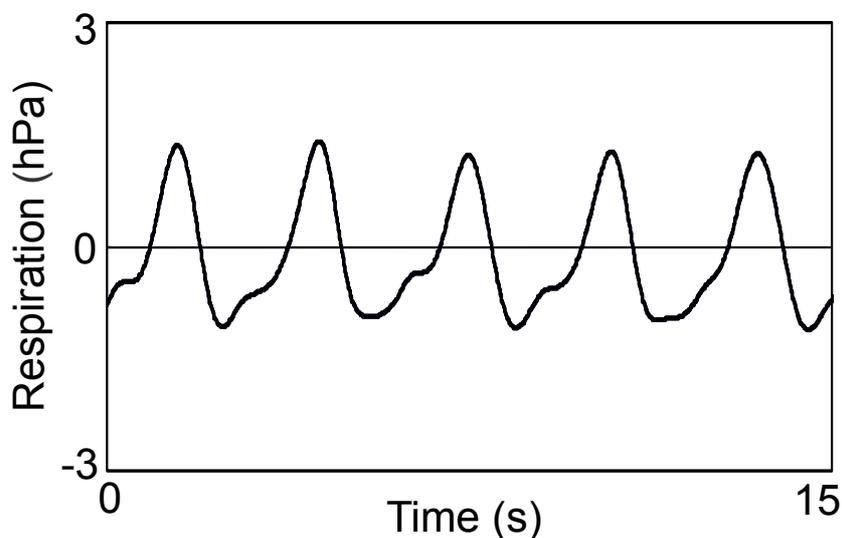


Fig. 2-14 Time series data of respiration

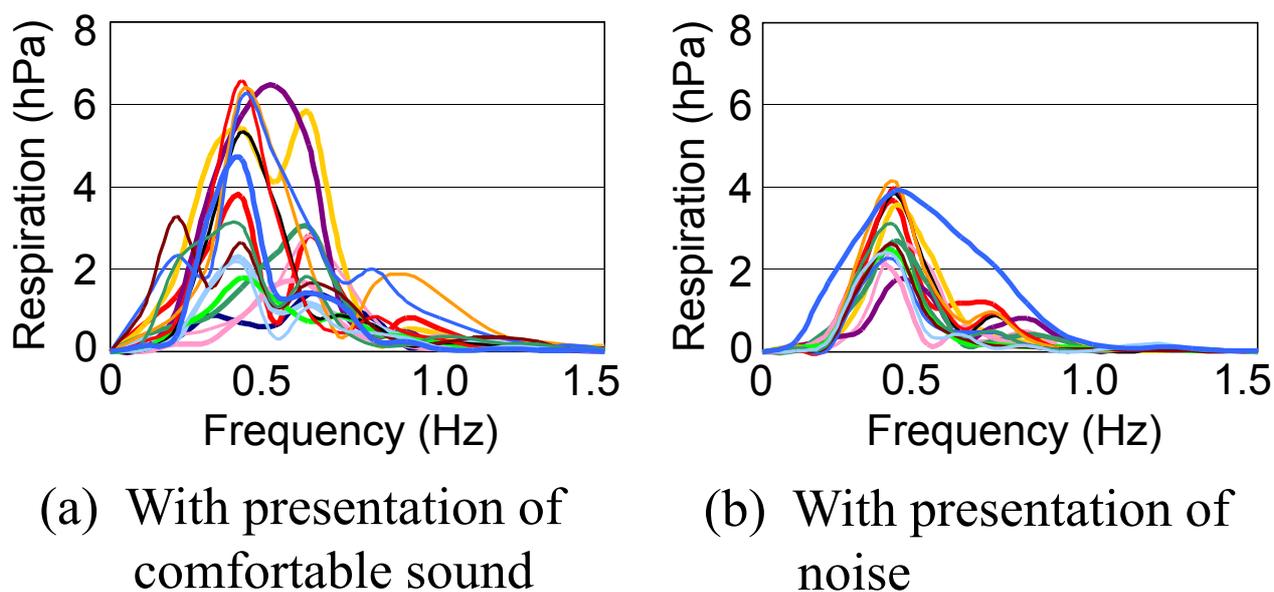


Fig. 2-15 Frequency characteristics of respiration movement with presentation of comfortable sound and noise

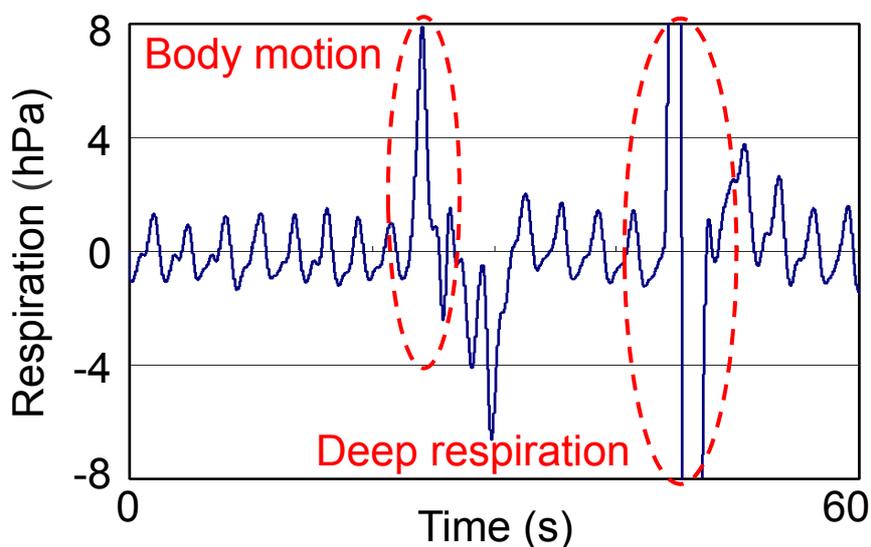


Fig. 2-16 Anomalous measurement data of respiration

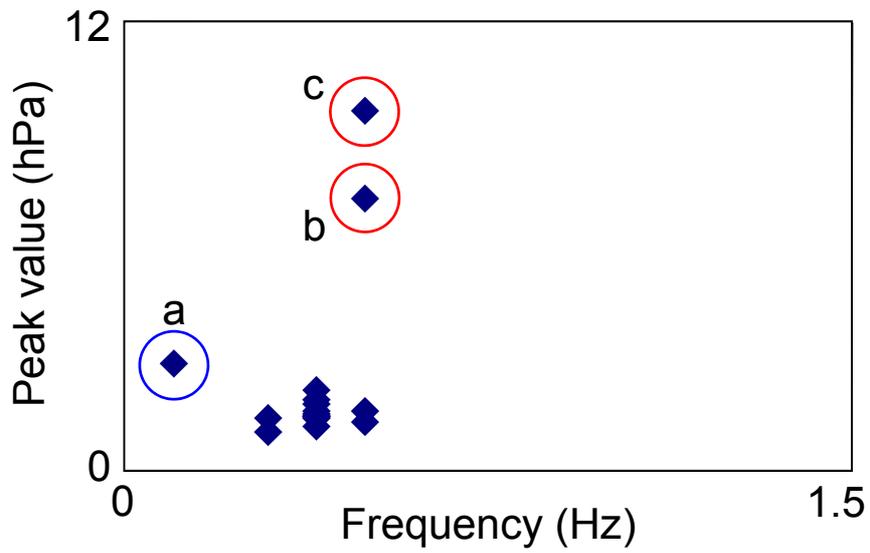


Fig. 2-17 Peak value of respiration data

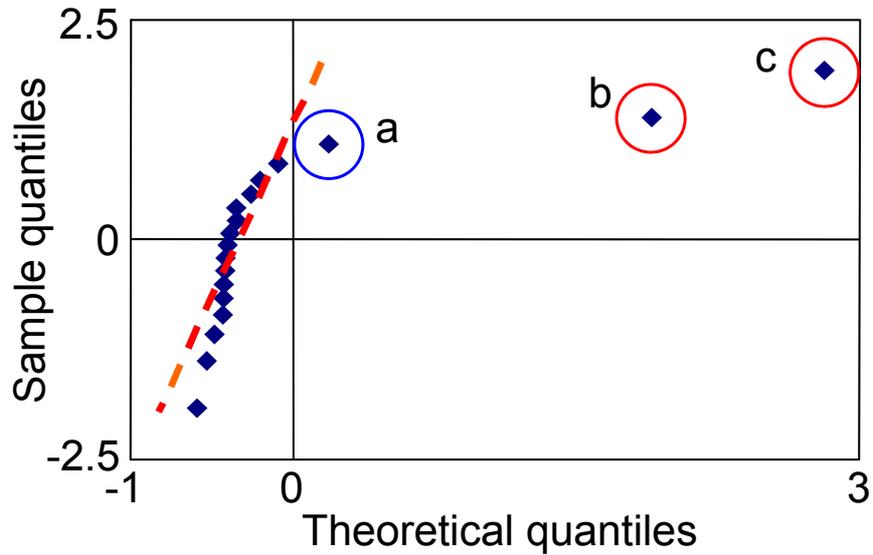


Fig. 2-18 Normal probability plot of peak value

Table 2-1 Result of factor analysis of evaluation sounds whose differences of sound quality are large

	Comfortable factor	Light factor	Realistic factor
Like(好き) - Dislike(嫌い)	0.91	0.25	-0.18
Comfortable(心地よい) - Uncomfortable(不快な)	0.88	0.37	-0.16
Healing(癒される) - Painful(苦痛な)	0.88	0.38	-0.19
Clean(きれいな) - Annoying(汚い)	0.85	0.22	-0.33
Clear(澄んだ) - Muddy(濁った)	0.84	0.42	-0.16
Bright(鮮やかな) - Sober(ぼけた)	0.82	0.24	0.01
Impressed(心が動く) - Unimpressed(無感動な)	0.81	0.08	0.36
Clamorous(騒々しい) - Quiet(静かな)	-0.79	-0.39	0.34
Spatial(広がりのある) - Constrained(窮屈な)	0.77	0.50	-0.16
Rich(豊かな) - Poor(貧弱な)	0.77	0.34	-0.02
Light(軽快な) - Heavy(重々しい)	0.06	0.84	0.11
Powerful(迫力のある) - Not enough(物足りない)	-0.46	-0.75	0.27
Warm(暖かみのある) - Cool(冷たい)	0.29	0.74	0.22
Shrill(甲高い) - Calm(落ち着いた)	-0.54	-0.69	-0.17
Delicate(きめの細かい) - Rough(粗い)	0.64	0.57	-0.03
Resonant(響きのある) - Not resonant(つまった)	0.20	0.54	0.01
Realistic(臨場感のある) - Fake(偽りの)	-0.15	0.18	0.80
Contribution ratio	47.0 %	22.9 %	7.0 %
Cumulative contribution ratio	47.0 %	69.9 %	76.9 %

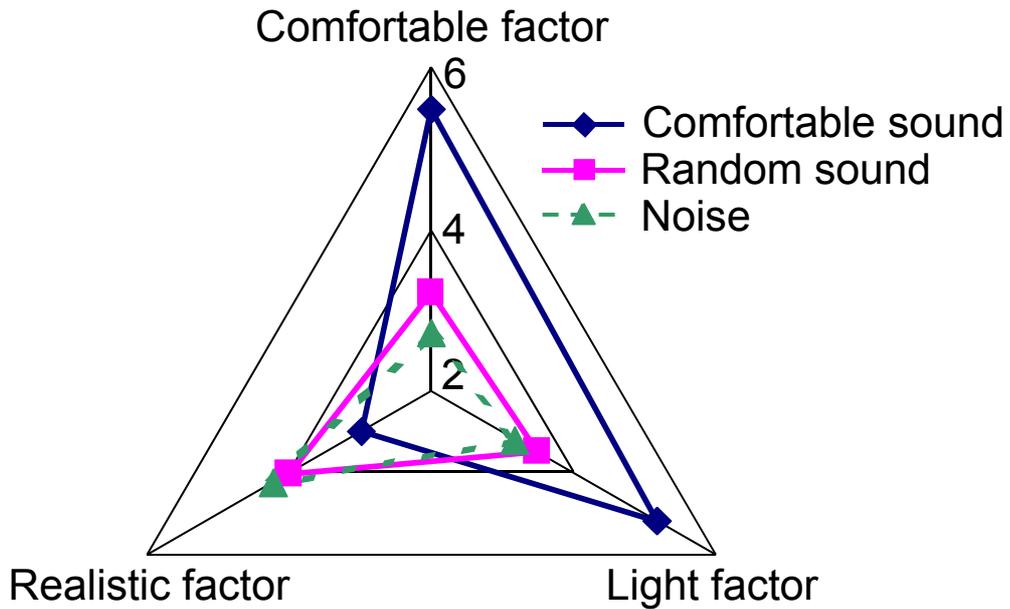


Fig. 2-19 Factor score of evaluation sounds whose differences of sound quality are large

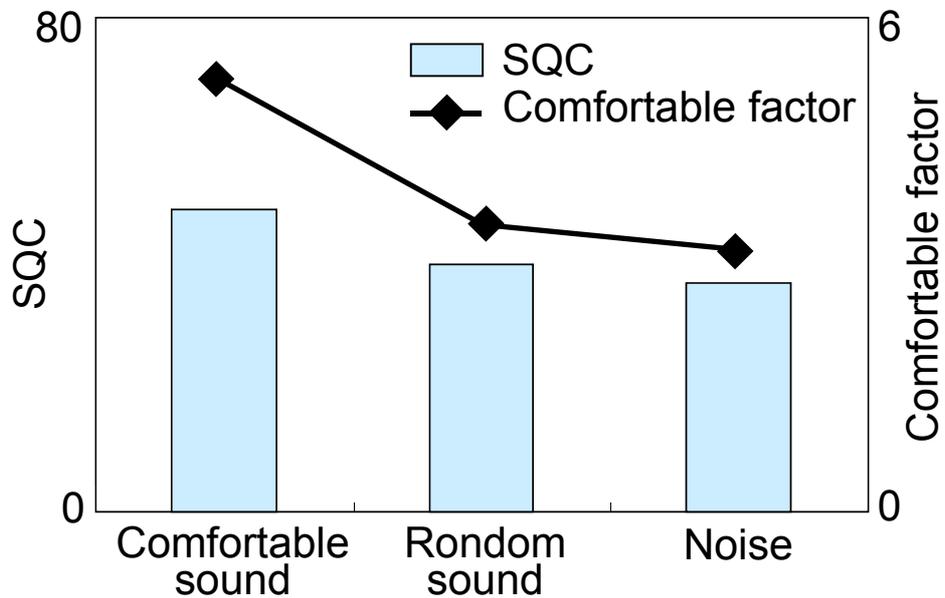


Fig. 2-20 Factor score and SQC of evaluation sounds whose differences of sound quality are large

Table 2-2 Result of factor analysis of evaluation sounds whose differences of sound quality are small

	Comfortable factor	Spatial factor	Quiet factor
Clean(きれいな) - Dirty(汚い)	0.88	0.32	-0.19
Healing(癒される) - Annoying(苦痛な)	0.88	0.33	-0.14
Like(好き) - Dislike(嫌い)	0.88	0.37	0.02
Shrill(甲高い) - Calm(落ち着いた)	-0.83	0.03	0.29
Comfortable(心地よい) - Uncomfortable(不快な)	0.79	0.50	-0.36
Realistic(臨場感のある) - Fake(偽りの)	0.78	0.47	0.20
Rich(豊かな) - Poor(貧弱な)	0.76	0.39	-0.04
Impressed(心が動く) - Unimpressed(無感動な)	0.75	0.58	0.10
Clear(澄んだ) - Muddy(濁った)	0.72	0.41	-0.35
Spatial(広がりのある) - Constrained(窮屈な)	0.17	0.99	-0.19
Bright(鮮やかな) - Sober(ぼけた)	0.44	0.86	0.05
Resonant(響きのある) - Not resonant(つまった)	0.39	0.74	-0.27
Powerful(迫力のある) - Not enough(物足りない)	0.63	0.64	0.35
Quiet(騒々しい) - Clamorous(静かな)	-0.22	-0.02	1.00
Warm(暖かみのある) - Cool(冷たい)	0.23	0.02	-0.64
Light(軽快な) - Heavy(重々しい)	0.52	0.27	0.61
Contribution ratio	42.7 %	25.6 %	14.7 %
Cumulative contribution ratio	42.7 %	68.3 %	83.0 %

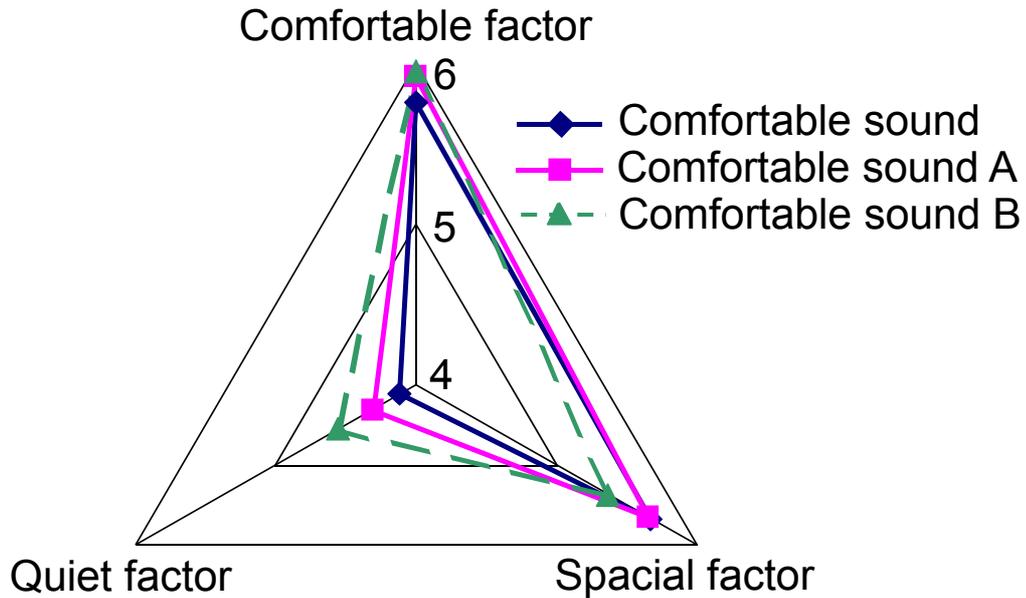


Fig. 2-21 Factor score of evaluation sounds whose differences of sound quality are small

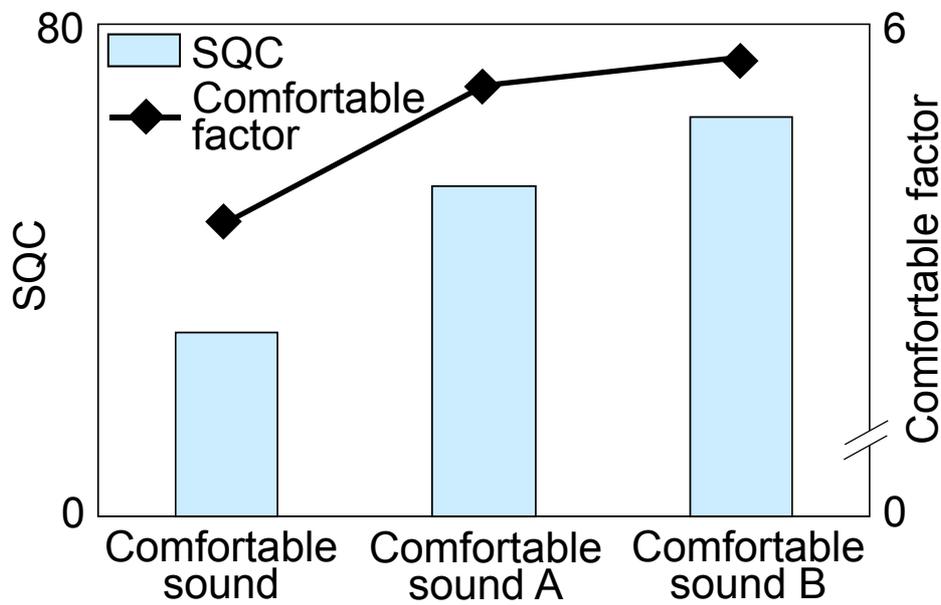


Fig. 2-22 Factor score and SQC of evaluation sounds whose differences of sound quality are small

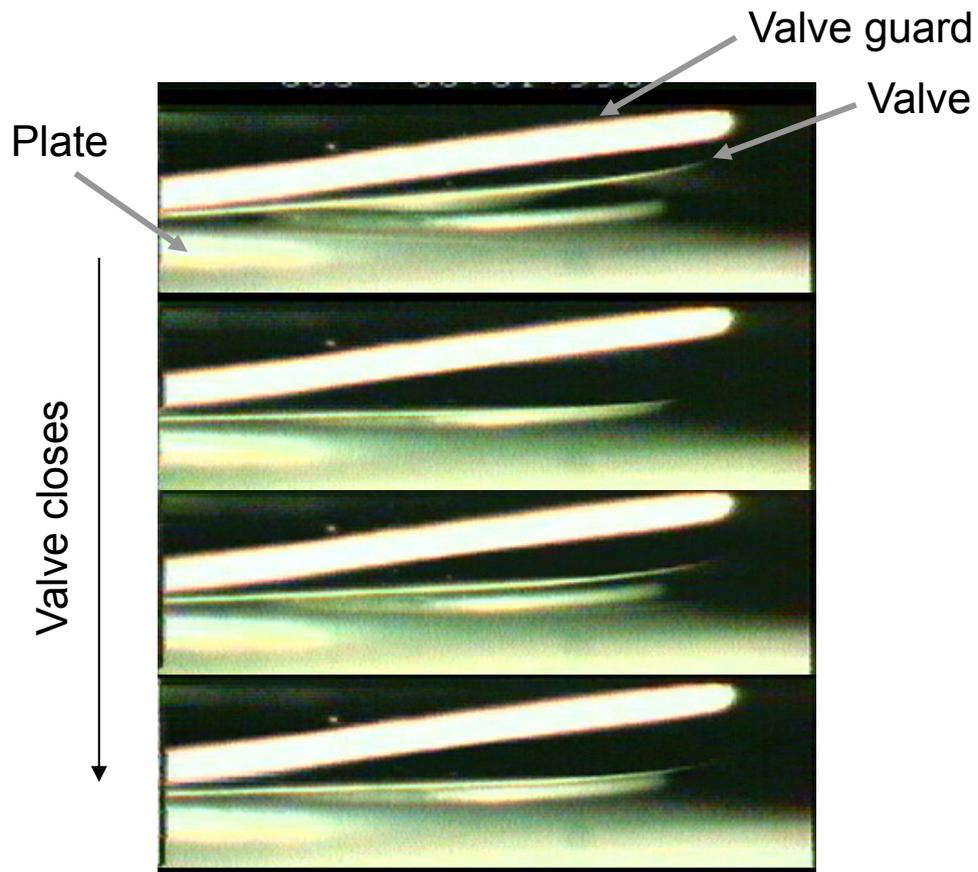


Fig. 2-23 A motion of valve taken by high speed camera

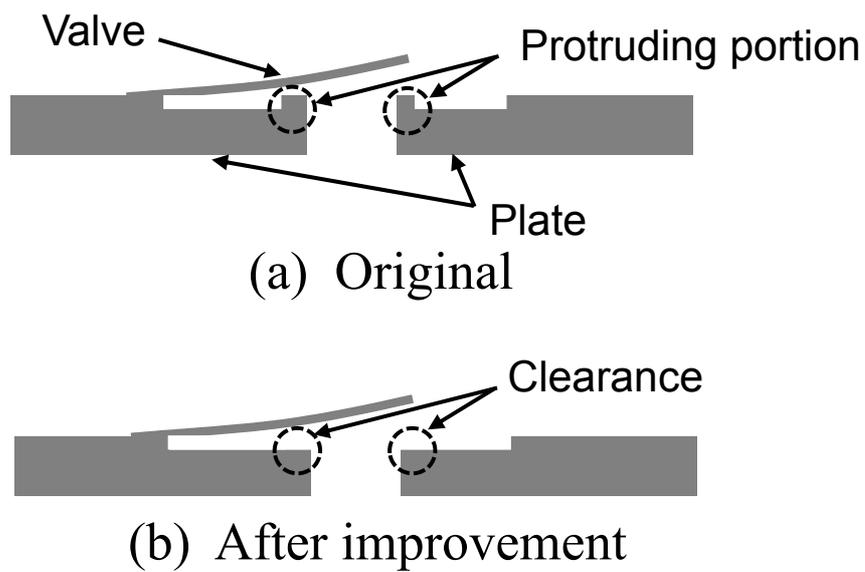


Fig. 2-24 Improvement of sound quality emitted by medical equipment

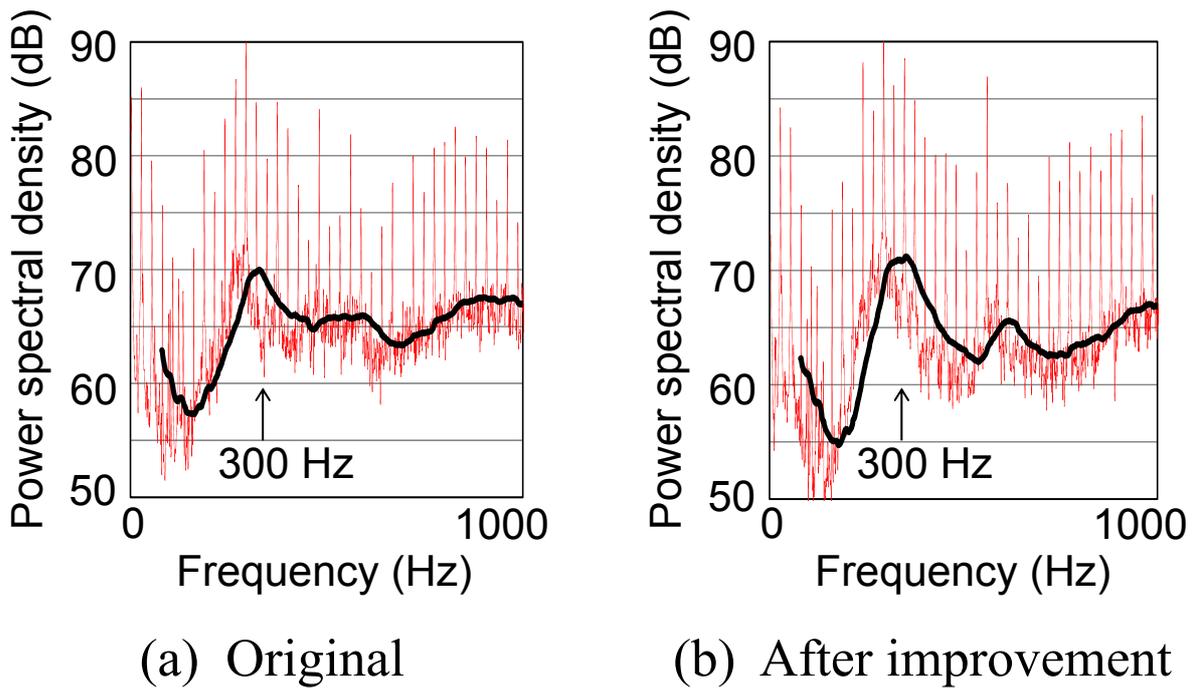


Fig. 2-25 Frequency characteristic of compressor noise of medical equipment

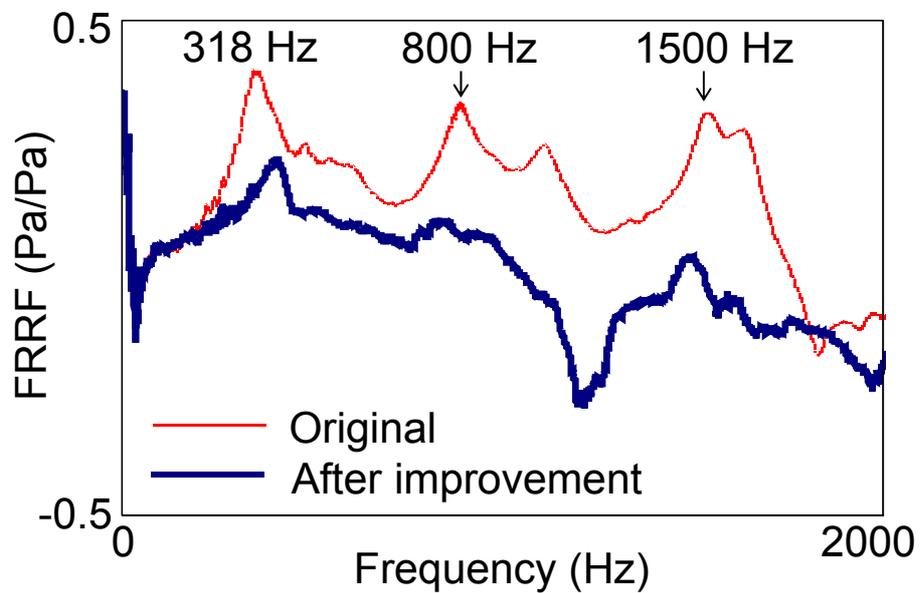


Fig. 2-26 FRRF of sound emitted by medical equipment

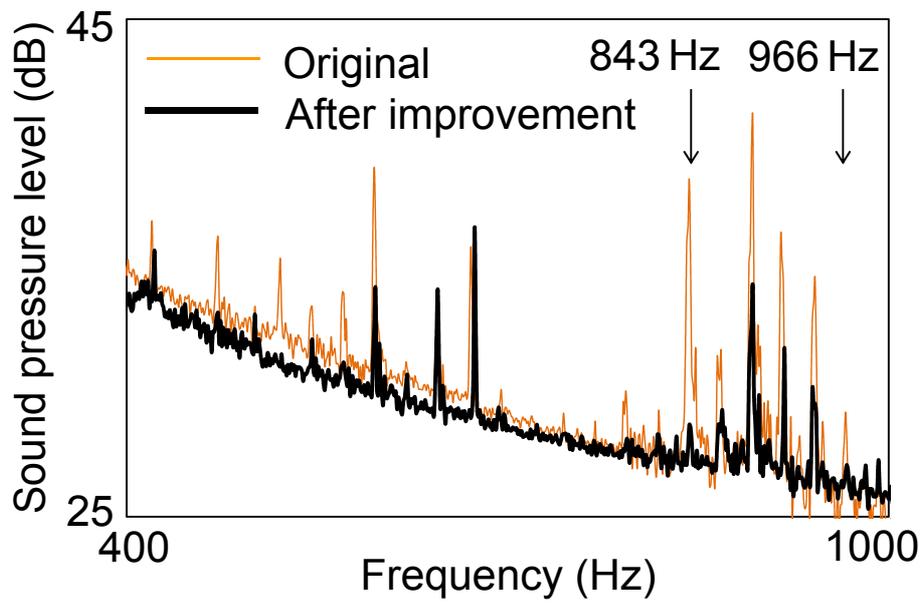


Fig. 2-27 Frequency characteristic of sound emitted by medical equipment

Table 2-3 Result of factor analysis of sound emitted by medical equipment

	Comfortable factor	Calm factor	Warm factor
Rough(荒々しい) - Delicate(穏やかな)	-0.81	0.02	-0.53
Bothered(気になる) - Unbothered(気にならない)	-0.81	-0.02	0.08
Clamorous(騒々しい) - Quiet(静かな)	-0.72	-0.22	-0.16
Comfortable(心地よい) - Uncomfortable(不快な)	0.64	-0.30	-0.51
Smooth(滑らかな) - Harsh(粗い)	0.62	-0.40	0.08
Calm(落ち着いた) - Shrill(甲高い)	0.16	1.04	0.23
Cheerful(明るい) - Gloomy(暗い)	0.11	-0.74	0.90
Heavy(重々しい) - Light(軽快な)	-0.23	0.64	0.00
Weak(弱々しい) - Powerful(力強い)	0.05	0.43	0.20
Rich(高級な) - Rich(安っぽい)	-0.04	-0.14	-0.90
Warm(暖かみのある) - Cool(冷たい)	-0.05	0.13	-0.63
Contribution ratio	20.4 %	18.9 %	14.3 %
Cumulative contribution ratio	20.4 %	39.3 %	53.6 %

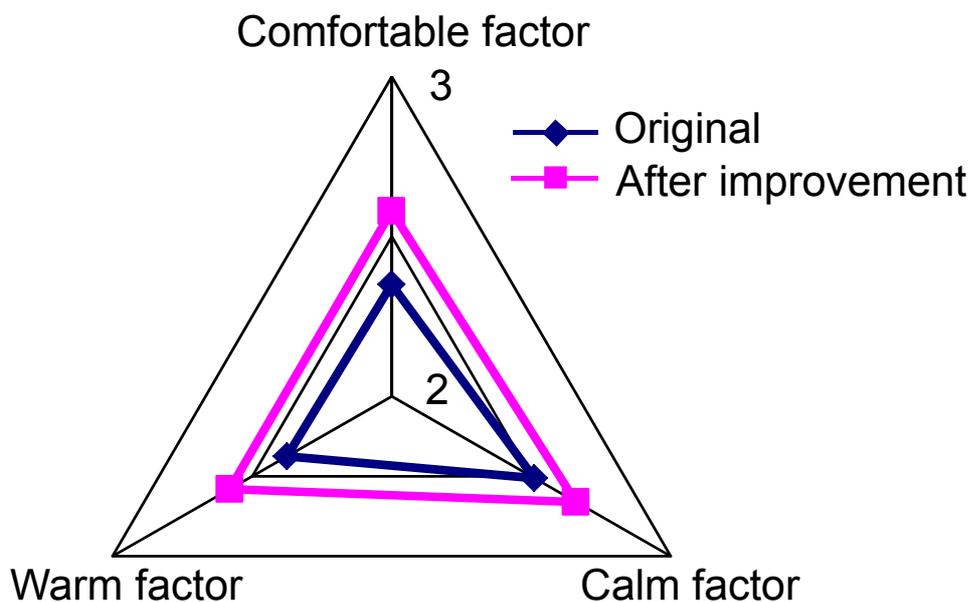


Fig. 2-28 Factor score of sound emitted by medical equipment

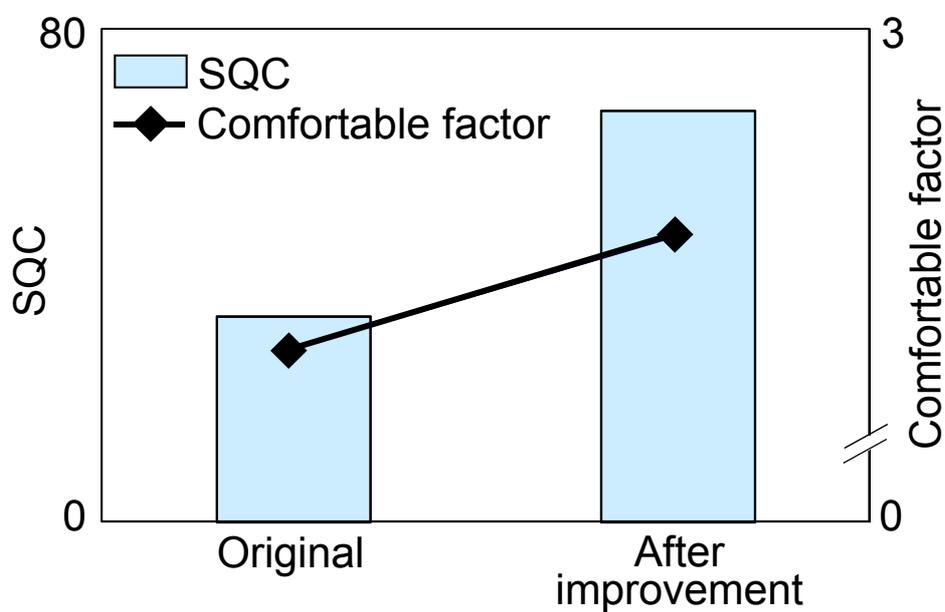


Fig. 2-29 Factor score and SQC of sound emitted by medical equipment

第3章

機能音の音質安定化手法に基づく 快適性と知的生産性の向上

3.1 はじめに

環境の感性価値を向上させる機能音として、オフィスでは快適性や知的生産性の向上が望まれている。機械音の快適性を向上させる指針については、定常音の事例は多く報告されているが、複数の定常音や過渡音で構成される非定常音については殆どなされていない。非定常音で形成される周期音を発生する機械には、オフィス向けの多機能複合機（MFP：Multi-Function Peripheral）がある。MFPはコピー、プリンタ、ファックス、スキャナなどの複数の機能を一つの機器に統合した複合的な事務機で、複数のモータ、ギア、クラッチ、紙など様々な音源があり、定常音や非定常音が含まれていて、その快適化手法の開発が望まれている^{[139],[140]}。

そこで第3章では、まずMFPの稼働音の音響特性を把握する。そして、非定常音を主観的に音質評価する手法について検討する^{[141]-[144]}。ここでは、音響シミュレーションを用いて各音部分に変化を与えた評価音を個別に作成し、それぞれの評価音について音質評価を行い、音質に寄与が高い音部分を特定することを検討する。

次に、複数の過渡音で構成される周期部が繰り返して発生することで形成されるリズム感の聞き心地を、主観的に評価する手法について検討する^{[145],[146]}。ここでは、音響シミュレーションを用いて周期部の時間長さ、各過渡音の発生間隔や音質を変更し、音質評価を行う手法を検討する。そして、好まれるリズム感を検討する。

さらに、リズム感の聞き心地についても生体情報を用いた客観的な評価が望まれており^{[147],[148]}、ここでは、心拍と唾液アミラーゼを用いた評価手法を検討する^[149]。そして、快適性と生体情報との関係についても検討する。

また、製品の製造時に稼働音を快適にしても、時間経過に伴い稼働音は変動し、快適性が低減することが懸念される。そこで、リズム感を形成する過渡音の時間経過に伴うばらつきや経時変化の影響を検討し、音質を安定させる指針を見出す。そして、非定常音を対象として、ばらつきや経時変化を考慮した“音質安定化手法”を提案する^{[150]-[154]}。

一方、リズム感が店舗内のお客のカートを押すスピードや、食事を食べる速度へ与える影響が報告されており、MFP稼働音のリズム感により人の行動を変えることが期待できるが、検討は殆どなされていない^[155]。そこで、周期音のリズム感を用いて知的生産性を向上させることを検討する^{[156],[157]}。ここでは、リズム感を変更した周期音を被験者に提示した際に簡単な計算タスクを与え、リズム感と計算の解答率

の関係を把握する。そして、リズム感が知的生産性へ与える影響を検討する。

3.2 周期音のリズム感を考慮した客観的な快適性評価

本節では、まず、非定常音を主観的に音質評価する手法について検討する。次に、好まれるリズム感を推定する音質評価手法を検討する。

3.2.1 非定音の音質評価

MFPの稼働音の音響特性を把握し、非定常音を主観的に音質評価する手法について検討する。そして、音質に寄与が高い音部分を特定することを検討する。

(a) 事務機稼働音の概要

MFPの音響特性を把握するために稼働音を計測する。Fig. 3-1に示すように、マイクロフォンはEcma74, ISO 7779およびJIS X 7779に基づき、起立したオペレータの耳の位置を想定した床から高さ1.5 m, MFP本体の前面から0.25 mの位置に設置して計測する。評価に使用したMFPはフルカラー機で、Fig. 3-2に示す音圧時間軸波形は、A4横モノクロモードの連続10枚コピー時の稼働音で、スタートボタンを押した直後から計測し、コピー速度は毎分45枚である。

連続コピー時の稼働音は非定常音であり、現象ごとに区切ると起動部(Start-up)、過渡部1(T1)、定常部(Steady)、過渡部2(T2)、過渡部3(T3)、過渡部4(T4)、過渡部5(T5)の7つの音部分に分けることができる。また、2枚目コピー以降の稼働音には、過渡部3~5を含む周期部(Cyclic)が印刷枚数分あり、印刷枚数に応じて繰り返されリズム感を形成している。さらに、Fig. 3-3に示すように過渡部3は過渡音3-1(T3-1)、過渡音3-2(T3-2)から構成される。

(b) 事務機稼働音の主観的な音質評価

連続10枚コピー時の稼働音において、どの音部分が音質に寄与が高いかを把握できれば、効率の良い快音化が可能となる。そこで、計測した原音(Original)の各音部分に変化を与えた評価音を個別に作成し、それぞれの評価音と原音との相対的な音質評価を行う。ここで、最も聞き心地に変化を感じた音部分が最も音質に寄与が高いとして、その音部分を変更して音質を向上させる。評価音は、原音を基準に音響シミュレーションを用いて、以下の①~③の作業を行い作成する。

- ① Fig. 3-4 に示すように、不規則に変化する起動部音を規則的に変化する音部分に置き換える。
- ② Fig. 3-5 に示すように、過渡部 1 を定常音とみなせる音質に置き換える。過渡部 2～5 も同様に定常音とみなせる音質に置き換える。
- ③ Fig. 3-6 に示す定常部の周波数解析から得られたピーク音の 612 Hz を Notch filter で下げる。

音質評価は SD 法を用いて行い、被験者は無響室内で椅子に座り、スピーカから評価音を聞きアンケートに回答する。被験者は聴覚が正常な 20 歳代の 16 名であり、評価は原音を基準として各評価音を相対評価する。

SD 法は Table 3-1 の形容詞対を用い、得られた回答を因子抽出は主因子法、回転はバリマックス回転法によって因子分析を行う。第 1 因子から順に「好き (Like) - 嫌い (Dislike)」などで代表される快適因子 (Comfortable factor), 「落ち着いた (Calm) - ガチャガチャした (Clattery)」などで代表される衝突因子 (Collision factor), 「動作感のある (Sense of operation : Strong) - 動作感のない (Sense of operation : Weak)」などで代表される動作因子 (Operation factor), 「変化がわからない (Unchanged) - 変化がわかる (Changed)」などで代表される変化・リズム因子 (Changed & Rhythmical factor) の 4 つの因子が抽出でき、各因子の寄与は (快適因子, 衝突因子, 動作因子, 変化・リズム因子) = (18.0%, 16.8%, 15.3%, 14.0%) である。

連続 10 枚コピー音において、どの音部分を変化させたときに音の印象が大きく変化するかを分析するため、Fig. 3-7 に快適因子と変化・リズム因子の因子得点の散布図を示す。得られた結果より、過渡部 3 が最も原音からの距離が離れ、音質への寄与が高いことがわかる。ここで、快適因子に着目すると、因子得点が大きくなるほど聞き心地の良い音になり快適性が増すので、過渡部 3 を定常音に変えたときの評価音が最も不快な音となることがわかる。また、変化・リズム因子に着目すると、因子得点が大きくなるほどリズム感が悪くなるので、過渡部 3 を定常音に変えた評価音が最もリズム感が悪い音となることがわかる。

さらに快適因子と動作因子の関係を分析するため、Fig. 3-8 に快適因子と動作因子の因子得点の散布図を示す。ここで、動作因子に着目すると、因子得点が大きくなるほど動作感が良い音になるので、最も音質に寄与が高い過渡部 3 を定常音に置き換えると動作感が低減し、さらに聞き心地も悪くなることがわかる。同様の傾向は、

過渡部 5 にもある。よって、音質への寄与が高い過渡部はリズム感や動作感に与える影響が大きく、過渡部 3 をなくすことは必ずしも良い音質とはいえない。そこで連続コピー時の稼働音の快音化手法として、リズム感を改善する。

以上のように、各音部分に変化を与えた評価音を個別に作成し、それぞれの音質を評価することで非定常音の音質評価が可能となり、音質に寄与が高い音源を特定することができる。そして、寄与が高い音源の対策をすることで機器の音質向上が可能となる。

3.2.2 周期音のリズム感評価

リズム感は、過渡音を含む複数の過渡部で構成される周期部が繰り返されることで形成されるが、この改善により稼働音の聞き心地が良くなることがわかったので、好まれるリズム感を推定する音質評価手法を検討し、好まれるリズム感を見出す。

(a) 周期部の時間長さを変更したリズム感評価

連続コピー時の稼働音において、Fig. 3-3 に示した 2 枚目コピー以降に発生する周期部の時間長さは 1.3 秒である。リズム感に影響を与える要因は、繰り返される周期部の時間長さ、および周期部を構成する各過渡部の時間間隔や音質であると予測される。そこで、まず周期部の時間長さが聴感に与える影響について検討する。

評価音は原音の周期部の時間長さを音響シミュレーションで加工して作成し、リズム感評価を行う。原音の 1 周期部の時間長さは 1.3 秒であるが、その時間長さを 1.0 秒、1.1 秒に短縮した周期部、および 1.5 秒、1.9 秒に拡張した周期部をそれぞれ 5 周期繰り返す評価音を作成し、その音圧 (SP) 時間軸波形を Fig. 3-9 に示す。そして、原音を含めた 5 種の周期音について、シェッフェの一対比較法を用いた主観的なリズム感評価を行う。被験者は無響室内で椅子に座り、スピーカから順次評価音の対を聞き、「リズム感の良い方を選んで下さい」というアンケートに回答する。被験者には音質ではなくリズム感のみを評価するように教示する。

リズム感評価の結果を Fig. 3-10 に示し、グラフの縦軸は値が大きいほどリズム感が良いことを表す。得られた結果より、リズム感は繰り返される周期部の時間長さの影響を受けることがわかる。そして、周期部の時間長さは 1.1 秒～1.3 秒が好まれ、原音の時間長さ付近が良いことがわかる。

(b) 周期部を構成する過渡部の音質と発生間隔の寄与の把握

好まれるリズム感は、周期部内を構成する各過渡部の時間間隔と音質の影響を受けるか評価する。

作成する評価音は Fig. 3-11 に示すように、まず各過渡部の時間間隔と音質が変わるように過渡部の順番を並び替える。過渡部の発生順番は、隣り合う各過渡部が原音と異なり、そして、加工した各過渡部間の接続部が違和感なく聞こえるように音部分を選択して作成する。次に、変更した周期部を用いて、3.2.2 (a) 節と同様に周期部の時間長さを 1.0 秒、1.1 秒に短縮した周期部、および 1.5 秒、1.9 秒に拡張した周期部をそれぞれ 5 周期繰り返す評価音を作成する。そして、これら 5 種の周期音について 3.2.2 (a) 節と同じ方法で、一対比較法を用いたリズム感評価を行う。被験者は聴覚が正常な 20 歳代の 17 名である。

リズム感評価の結果を Fig. 3-12 に示す。得られた結果より、周期部の時間長さは原音の周期部を用いた評価結果と同じ 1.3 秒程度が好まれることがわかる。しかし、グラフの傾向は原音の周期部を用いた評価結果と異なっているため、好まれる周期部の時間長さは、周期部を構成する各過渡部の時間間隔または音質の影響を受けることがわかる。

(c) 周期部を構成する過渡部の発生間隔を変えたリズム感評価

周期部内を構成する各過渡部の時間間隔または音質は、聴感に影響を与えることが 3.2.2 (b) 節でわかったので、ここでは、周期部内の過渡部の発生タイミングを変更し、各過渡部の時間間隔を変えてリズム感を向上させることを検討する。

過渡部の発生タイミングを変更してリズム感を向上させるためには、被験者がどの過渡部を基準にリズムを感じているかを把握する必要がある。そこで、連続コピー時の快適性およびリズム感に寄与が高い過渡部 3 を基準にリズムを感じていると仮定する。検討する周期部の時間長さは 3.2.2 (a), (b) 節で好まれていることがわかった 1.3 秒とする。評価音の過渡部は、時間間隔の変更時間を長くとれることを考慮し、隣り合う過渡部との時間間隔が最も長い過渡部 4 とする。評価音は、評価結果の分析をしやすくするために、Fig. 3-13 に示すように周期部内を 8 等分した位置に各過渡部を合わせ、等間隔化した過渡部と過渡音をそれぞれ過渡部 3' (T3'), 過渡音 3-1' (T3-1'), 過渡音 3-2' (T3-2'), 過渡部 4' (T4'), 過渡部 5' (T5') と定

義する。そして、T4'を a, b, c の位置にした周期部をそれぞれ 5 周期繰り返す評価音を作成する。ここで、T3', b の位置の T4', T5'は、それぞれ原音の T3, T4, T5 とほぼ同じ位置である。3 種の等間隔化した評価音に原音を加えた計 4 種について、3.2.2 (a) 節と同じ方法で一対比較法を用いたリズム感評価を行う。被験者は聴覚が正常な 20 歳代の 17 名である。

リズム感の評価結果を Fig. 3-14 に示す。得られた結果より、T4'を b の位置にしたときの周期音が最もリズム感が良いことがわかる。被験者の声を聞くと、T4'を移動させるとリズムを感じる過渡音や過渡部が変わり、a の場合は、T3-1', T3-2'と T4'が連続して発生し、まとまって聞こえる。そして、T3-1'と T4'の発生間隔でリズムを感じ、この間隔は短くせわしく感じる。c の場合は、T4'は T5'の直前に発生し、T5'よりも T4'が目立ち印象が強いため、T3-1'と T4'の発生間隔でリズムを感じ、この間隔は短く、リズム感がやや速いという意見であった。

一方、b の場合は、T4'は T3-2'や T5'との間隔が大きく T4'の印象が弱くなるため、T3-1'と T5'の発生間隔でリズムを感じ、この間隔は適度で良いという意見であった。3.2.1 節で行った周期音の評価結果は、リズム感に寄与が高い過渡部は T3 と T5 であった。本節の周期音でも殆ど同じ位置にある T3-1'と T5'でリズムを感じる結果となり、両者の結果は一致している。

以上より、過渡部の発生間隔を変えることでリズム感を向上できることを示した。また、被験者はリズム感に寄与が高い過渡部を基準にリズムを感じるということがわかり、適切な速さのリズム感があることを示した。リズム感に寄与が高い過渡部の適切な発生間隔については、3.3 節で検討する。

(d) 一般的なランダム波を用いたリズム感評価

過渡部の音質の違いによりリズム感は変わるか検討する。今までの評価は MFP の実際の稼働音を用いていたが、本節では過渡部を広帯域周波数のランダム波に変更して、音質を変えた周期部のリズム感評価を行う。さらに、被験者の評価音の聞き慣れが懸念されるため、従来の被験者と、今まで用いた MFP 稼働音の評価音を 1 度も聞いたことがない新たな被験者の双方で評価を行う。

Fig. 3-15 に 10 Hz~8000 Hz のランダム波で模擬過渡部を作成した周期部を示す。各模擬過渡部の位置は、3.2.2 (c) 節の評価音の位置と同じ配置にする。ここで、過

渡部 3, 過渡音 3-1, 過渡音 3-2, 過渡部 4, 過渡部 5 の位置に配置したランダム波の過渡部と過渡音をそれぞれ模擬過渡部 3 (Virtual T3), 模擬過渡音 3-1 (Virtual T3-1), 模擬過渡音 3-2 (Virtual T3-2), 模擬過渡部 4 (Virtual T4), 模擬過渡部 5 (Virtual T5) と定義する. そして, 模擬過渡部 4 を 3.2.2 (c) 節の a, b, c と同じ位置の Va, Vb, Vc に配置した 3 種の周期部をそれぞれ 5 周期繰り返す評価音を作成し, これらの周期音について前節までと同じ方法でリズム感評価を行う.

得られた結果を Fig. 3-16 に示す. 3.2.2 (c) 節の評価結果と同様, 模擬過渡部 4 が模擬過渡音 3-2 と模擬過渡部 5 の中央の Vb の位置にある周期音が, 最もリズム感が良いことがわかる. この傾向は従来の被験者も新たな被験者も同様であることから, 聞き慣れの影響はなく, 模擬過渡部 4 が Vb の位置のリズム感が好まれているといえる.

以上より, 今回の評価で用いた装置のリズム感を向上させるためには, 過渡部の音質に依存せず, 発生間隔を変更した方が有効であることを示した. また, 音響シミュレーションを用いて周期部の時間長さ, 各過渡音の発生間隔や音質を変更した評価音の音質評価を行うことで, リズム感の聞き心地を評価できることを示した.

3.3 周期音のリズム感を考慮した客観的な音質評価

本節では, 生体情報に基づく客観的な音質評価の検討を行う. ここで用いる生体情報は, 評価数が多く評価時間が長くなることから, 被験者の評価の負担を考慮して, 計測時に同じ姿勢を保つ必要がない心拍と唾液アミラーゼを用いる. そして, これらの生体情報はリズム感の聞き心地を評価できるか検討する.

また, 複数の過渡音で構成される周期音のリズム感と人間の心拍数との関係に着目し, 各過渡音の発生間隔の周波数 (以後, 過渡音の発生周波数) を変更してリズム感を変えたときに, 聞き心地に与える影響を評価する.

3.3.1 音質評価に用いる周期音

評価は 2 種の周期音を用いる. 1 つ目は, 基本的な周期音として過渡音が規則的に発生するメトロノーム音を用いる. そして, 過渡音の発生周波数を被験者の心拍と同じ周波数, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ にしてリズム感を変える. 2 つ目の評価音は, 3.2 節の MFP 稼働音のリズム感評価で使用した周期音を用いる. ここでは, Fig. 3-9 に示

す周期部の時間長さを変更した評価音，Fig. 3-13 に示す周期部内の過渡部の時間間隔を変更した評価音を用いる。

3.3.2 心拍とアミラーゼを用いた客観的な音質評価

リズム感が聞き心地に与える影響を心拍と唾液アミラーゼを用いて客観的に評価する。そして、これらの生体情報はリズム感の聞き心地を評価できるか検討する。

(a) 心拍とアミラーゼを用いた客観的な音質評価方法

メトロノーム音の聞き心地の客観的な評価は，Fig. 3-17 に示す手順で行う。まず，被験者は無響室内で椅子に座り，精神的，肉体的に落ち着かせるために1分間安静を保つ。次に急な生体反応を避けるために，全被験者の心拍の平均と同じ周波数のメトロノーム音を1分間スピーカから聞いた後に，1つの評価音を1分間聞く。同時に心拍を計測する。評価後に，得られた心拍のデータを周波数解析して心拍変動を算出する。一方，唾液アミラーゼは，安静時と各評価音の提示時にテストストリップを40秒間口にくわえて唾液を採取し，その後，ストレスモニターの本体で唾液アミラーゼ活性値を計測する。評価の最後に，評価音を聞いたときに「ストレスを感じないーストレスを感じる」かを，質問用紙に5段階評価で回答する。被験者は聴覚が正常で，口腔内疾患が認められない20歳代の6名である。

一方，MFP稼働音の聞き心地の客観的な評価は，以下の手順で行う。まず，被験者は無響室内で40秒間安静を保つ。次に，原音を1分間聞いた後に，1つの評価音を1分間聞く。同時にメトロノーム音の聞き心地の評価と同様に心拍と唾液アミラーゼ活性値を計測する。被験者は聴覚が正常で，口腔内疾患が認められない20歳代の5名である。主観的な評価は，3.2.2 (a)，(c) 節の結果を用いる。

(b) メトロノーム音の音質評価結果

Fig. 3-18 にメトロノーム音を提示した際の主観的および心拍を用いた客観的な評価結果を，Fig. 3-19 に主観的および唾液アミラーゼを用いた客観的な評価結果を示す。各グラフの横軸は，リズムを感じる2つの過渡音の発生周波数を心拍の周波数に対する増分量で示し，値が大きいほどリズム感が速いことを表す。

一方，縦軸の主軸は主観的な評価結果を示し，値が大きいほど快適性が高いことを表す。主観的な評価結果は，各被験者が回答した聞き心地の得点を正規化した後

に、全被験者の平均値を算出する。そして、各結果の比較をしやすいように、過渡音の発生周波数が心拍の周波数と同じときの結果を 0 としている。

縦軸の第 2 軸は客観的な評価結果を示す。LF/HF は 2.3 節に示したように交感神経の活性度を示し、値が大きいほどストレスを感じていることを表す。アミラーゼ活性値も 2.4 節に示したように交感神経の活性度を示し、値が大きいほどストレスを感じていることを表す。客観的な評価結果は、各被験者のデータを正規化した後に、全被験者の平均値を算出する。そして、各結果の比較をしやすいように、過渡音の発生周波数が心拍の平均周波数と同じときの結果を 0 としている。

得られた結果より、過渡音の発生周波数が高く、リズム感が速いほどストレスを感じる事がわかる。そして、心拍よりもやや遅いリズム感の評価音は聞き心地が良いが、リズム感が極端に遅いとストレスを感じる場合がある。また、主観的および客観的な評価結果の両者の相関係数は、心拍変動が-0.87、唾液アミラーゼ活性値が-0.99 で負の強い相関があり、心拍と唾液アミラーゼは周期音のリズム感の評価に適切であることを見出した。

(c) 事務機稼働音の音質評価結果

Fig. 3-20 と Fig. 3-21 に、3.2.2 (a) 節で使用した MFP 稼働音の周期部の時間長さを変更した評価音 (Fig. 3-9) を提示したときの主観的および客観的な音質評価の結果を示す。また、Fig. 3-22 と Fig. 3-23 に、3.2.2 (c) 節で使用した MFP 稼働音の過渡音の発生間隔を変更した評価音 (Fig. 3-13) を提示したときの主観的および客観的な音質評価の結果を示す。

各グラフの横軸は、リズムを感じる 2 つの過渡音の発生周波数を心拍の周波数に対する増分量で示し、値が大きいほどリズム感が速いことを表す。3.2.2 (a), (c) 節の結果より、被験者は、Fig. 3-9 の周期部の時間長さを変更した評価音では T3-1 と T5 でリズムを感じ、Fig. 3-13 の過渡音の発生間隔を変更した評価音では、T4' が a と c の位置にあるときは T3-1' と T4' で、T4' が b の位置にあるときは T3-1' と T5' でリズムを感じる。

一方、縦軸の主軸は主観的な評価結果を示し、Fig. 3-10 と Fig. 3-14 と同じ結果を示している。縦軸の第 2 軸は、心拍変動と唾液アミラーゼ活性値を示し、各被験者のデータを正規化した後に、全被験者の平均値を算出する。そして、各結果の比較

をしやすいように、最小の値を 0 としている。

得られた結果より、3.3.3 (b) 節と同様に過渡音の発生周波数が高く、リズム感が速いほどストレスを感じる事がわかる。そして、心拍よりもやや遅いリズム感の評価音は聞き心地が良いが、リズム感が極端に遅いとストレスを感じる事がわかる。また、Fig. 3-20, Fig. 3-21, Fig. 3-22, Fig. 3-23 の主観的および客観的な評価結果の相関係数は、それぞれ-0.82, -0.96, -0.93, -0.92 で、いずれも負の強い相関があることを把握した。以上より、心拍と唾液アミラーゼは周期音のリズム感の評価に適切であることを見出した。

3.4 周期音のリズム感を考慮した音質安定化手法

本節では、時間経過に伴うばらつきや経時変化に着目し、まず、印刷枚数に応じた過渡音の音圧レベルおよび時間ばらつきを実際の装置を用いて評価する。次に、ばらつきが聴感に与える影響を定量的に示すために、ばらつきを与えた評価音を音響シミュレーションで作成し、音質評価を行う。そして、ばらつきの影響を定量化する手法を確立する。

3.4.1 特異な過渡音を含む周期音が聴感に与える影響

連続コピー時に非定常的に発生する特異な過渡音を含む周期部が、聴感に影響を与えるか評価する。Fig. 3-24 に示す周期部の過渡部 3 は、前述したように 2 つの過渡音 3-1 (T3-1), 3-2 (T3-2) で構成され、この周期部を基準周期部とする。ここで、Fig. 3-25 に示すように、過渡部 3 が過渡音 3-3 (T3-3) を含む 3 つの過渡音で構成される特異な周期部が発生する場合がある。この特異な周期部の発生頻度を実際の装置を用いて計測し、各印刷枚数において 30 周期部のデータから発生率を算出した。本実験では、4,000 枚ずつの連続コピーを繰り返し行い、通常より厳しい使用条件で印刷させて評価した。印刷枚数が 30 万枚まで評価した結果は、特異な周期部の発生率は最大約 17 %で、印刷枚数に依存しないことを把握した。

(a) 特異な周期部が連続的に発生する場合

特異な過渡音を含む周期部の発生率は 30 万枚まで印刷した時点では印刷枚数に依存しないことがわかったが、印刷枚数をさらに増加させると発生率が増える可能

性がある。そこで、特異な周期部がどの程度の比率で混在すると聴感に影響を与えるか、音質評価を行い検討する。

Fig. 3-24 に示す過渡部 3 が 2 つの過渡音 T3-1, T3-2 で構成される基準周期部を 10 周期繰り返す評価音を作成し、これを基準音とする。そして、Fig. 3-26 に示すように、基準音の 1 周期部を特異な周期部に置き換えた評価音 A, 連続する 2 周期部を置き換えた評価音 B, 3 周期部を置き換えた評価音 C, 5 周期部を置き換えた評価音 D, 7 周期部を置き換えた評価音 E を作成する。

本実験では、ばらつきが聴感に与える影響を評価するため、ばらつきのない基準音と比較する。音質評価は毎回、基準音を提示した後に各評価音を提示し、聞き心地に影響があるかを Fig. 3-27 に示す評定尺度法で回答する。被験者は無響室内で椅子に座り、スピーカから評価音を聞き、音質の印象を回答する。提示する評価音は、被験者の耳の位置における音圧レベルが、MFP の実機前に起立したオペレータの耳の位置における稼働音の音圧レベルにほぼ等しい 60 dB になるように設定し、提示時間は 13 秒とする。被験者は聴覚が正常な 20 歳代の 20 名である。

集計した回答結果の中で、基準音に比べて評価音が「かなり不快」および「非常に不快」と回答した被験者の割合をまとめ、その結果を Fig. 3-28 に示す。これより、特異な周期部の発生率が破線で示す実験で使用した装置に相当する 17% の場合、基準音と比較して不快と感じる人の割合は 1 割以下であり、発生率が 70% となった場合でも 3 割程度で、聴感に与える影響は発生率が 50% の場合と同じであることがわかる。これは、特異な周期部が増えても、被験者はこれを新たな音質として聞き、違和感なく聞こえるためと予測される。

(b) 特異な周期部が非連続的に発生する場合

3.4.1 (a) 節では特異な過渡音を含む周期部を連続的に発生させたが、実際の装置では特異な周期部が様々なパターンで発生する。そこで本節では、発生パターンを変化させたときの影響を評価する。

過渡部 3 が 2 つの過渡音 T3-1, T3-2 で構成される基準周期部を 10 周期繰り返す評価音を作成し、これを基準音とする。そして、Fig. 3-29 に示すように、特異な周期部を 5 つ連続して並べた評価音 F, 10 周期全てに配置した評価音 G, 1 つ飛ばしで 5 つ配置した評価音 H, 1 つまたは 2 つ飛ばしで 5 つ配置した評価音 I と J を作成

する。評価音 F, H, I, J は、特異な周期部の発生率がそれぞれ 50% である。

音質評価で使用する回答用紙は 3.4.1 (a) 節の評価と同じ Fig. 3-27 を用いる。評価手順も 3.4.1 (a) 節と同様に毎回、基準音を提示した後に各評価音を提示し、聞き心地に影響があるかを回答する。評価音の提示方法、音圧レベルおよび提示時間も 3.4.1 (a) 節と同様である。被験者は聴覚が正常な 20 歳代の 20 名である。

集計した結果の中で、基準音に比べ評価音が「かなり不快」および「非常に不快」と回答した被験者の割合をまとめ、その結果を Fig. 3-30 に示す。全周期部を置き換えた評価音 G を不快と回答した被験者は、特異な周期部の発生率が 50% の J より少なかった。この理由は、特異な周期部が基本リズムと認識され、各周期部間でリズム感のばらつきがないためと考えられる。また、評価音 F を不快と回答した被験者は殆どいなかった。この理由は、被験者は特異な周期部が全く含まれていない音を聞いた後に各評価音を聞いているので、前半に特異な周期部がない F は、他の評価音よりも違和感なく聞こえるためと考えられる。一方、特異な周期部の発生率が 50% の評価音 J は、多くの被験者が「かなり不快」と回答している。しかし、同じ発生率 50% の評価音 F, H, I は、不快と感じる被験者の割合は 3 割以下であり、J より少ない。これは、被験者は先頭の周期部を基準の音としてリズムを感じる傾向があり、評価音 J のように先頭の周期部が特異な周期部の場合は、違和感があると考えられる。

3.4.1 (a) 節と本節の結果から、特異な周期部の発生率が 30% 程度までは、基準音と比較して不快と感じる被験者は 1 割程度で、他の評価音と比較すると聴感に与える影響が少ないが、特異な周期部の発生率が 50% 程度まで増えると、その発生パターンによっては聴感に与える影響が大きく、音質安定化を図る際に考慮すべき要因といえる。本実験より、音響シミュレーションを用いて評価音を作成し、音質評価を行うことで、特異な過渡音を含む周期部がどの程度の比率で混在すると聴感に影響を与えるか把握できる。

3.4.2 周期音に含まれる過渡音のばらつきが聴感に与える影響

印刷を繰り返したときの過渡音の音圧レベルのばらつきと発生タイミングのばらつきを評価し、聴感に与える影響を把握する。今回は、連続コピーをしたときに音質への寄与が大きい過渡部 3 に着目して、経時変化の影響を検討する。

(a) 過渡音の音圧レベルのばらつき評価

実際の装置における過渡音の音圧レベルのばらつきを把握するため、Fig. 3-31 に示す過渡音 3-1、過渡音 3-2 の音圧レベルを各印刷枚数において計測し、その平均と標準偏差を各印刷枚数において算出する。ここで、音圧レベルは、過渡音の最大音圧を含む 0.01 秒の範囲のデータから算出し、音圧レベルの平均と標準偏差は、25 周期部のデータから算出する。印刷枚数 30 万枚までの過渡音 3-1、過渡音 3-2 の音圧レベルの平均と標準偏差は印刷枚数に依存した傾向がみられず、標準偏差は最大約 1.5 dB であった。そして、音質評価を行った結果、音圧レベルのばらつきが聴感に与える影響はないことを把握した。

(b) 過渡音の発生タイミングのばらつき評価

次に、過渡音の発生タイミングのばらつきを把握する。Fig. 3-31 に示す過渡音 3-1 と次の周期部の過渡音 3-1 が発生するまでの時間間隔を Δt_{T31} 、 Δt_{T31} のばらつきを周期間ばらつきと定義し、同じ周期部内の過渡音 3-1 と 3-2 の時間間隔を $\Delta t_{T31-T32}$ 、 $\Delta t_{T31-T32}$ のばらつきを周期内動作ばらつきと定義する。

実際の装置を用いて過渡音 3-1 と過渡音 3-2 の最大音圧の発生時間を各印刷枚数において計測し、20 周期部の最大音圧のデータから Δt_{T31} と $\Delta t_{T31-T32}$ の標準偏差を算出する。 Δt_{T31} と $\Delta t_{T31-T32}$ の標準偏差は、印刷枚数 30 万枚までは共に最大 0.025 秒以下で、印刷枚数に依存した傾向がみられないことを把握した。これより、どの程度の過渡音の発生タイミングのばらつきが聴感に影響を与えるか、音質評価により定量的に検討する。

(c) 過渡音の発生タイミングのばらつきが聴感に与える影響

過渡音の発生タイミングのばらつきが聴感に与える影響を 2 種類の音質評価により、定量的に検討する。

まず、周期間ばらつきについて評価を行う。評価音は、周期部の時間長さが変わるように作成する。実際の装置を用いて計測した原音の周期部を基準周期部とし、Fig. 3-32 (a) に示すように、基準周期部の過渡音 3-2 と過渡部 4 の間の定常音を 0.01 秒、0.03 秒、0.05 秒、0.07 秒、0.09 秒切り取り、周期部の時間長さを短縮した周期音 K を作成する。続いて Fig. 3-32 (b) に示すように、基準周期部の過渡部 4 と過渡部 5 の間の定常音を周期音 K と同じ間隔でコピーし、過渡音 3-2 と過渡部 4 の間に

挿入して周期部の時間長さを拡張した周期音 L を作成する．最後に Fig. 3-32 (c) に示すように，基準周期部の過渡部 4 と過渡部 5 の間の定常音を 0.015 秒，0.045 秒，0.070 秒，0.100 秒，0.130 秒コピーし，過渡部 5 の後ろに挿入して周期部の時間長さを拡張した周期音 M を作成する．基準周期部を 10 個連続で並べた評価音を基準音とし，Fig. 3-33 に示すように周期音 K, L, M を配置する．そして，10 周期部の周期間ばらつきの標準偏差が，それぞれ 0.01 秒，0.03 秒，0.05 秒，0.07 秒，0.09 秒となるように，Table 3-2 に示す 5 つの評価音を作成する．被験者は，これら 5 つの標準偏差が異なる評価音を基準音と比較し，聞き心地を相対評価する．

次に，周期内動作ばらつきについて評価を行う．評価音は周期部の時間長さは変えずに，過渡音 3-2 のみが移動するように作成する．原音の周期部を基準周期部とし，Fig. 3-34 (a) に示すように，基準周期部の過渡音 3-1 と過渡音 3-2 の間の定常音を 0.01 秒，0.03 秒，0.05 秒，0.07 秒，0.09 秒切り取り，過渡音 3-2 と過渡部 4 の間の定常音を同時間拡張することで，過渡音 3-2 を本来の位置から前に移動した周期音 N を作成する．続いて Fig. 3-34 (b) に示すように，基準周期部の過渡音 3-1 と過渡音 3-2 の間の定常音を周期音 N と同じ間隔で拡張し，過渡音 3-2 と過渡部 4 の間の定常音を同時間切り取ることで，過渡音 3-2 を本来の位置から後ろに移動した周期音 O を作成する．最後に Fig. 3-34 (c) に示すように，基準周期部の過渡音 3-1 と過渡音 3-2 の間の定常音を 0.015 秒，0.045 秒，0.070 秒，0.100 秒，0.130 秒拡張し，過渡音 3-2 と過渡部 4 の間の定常音を同時間切り取ることで，過渡音 3-2 を本来の位置から後ろに移動した周期音 P を作成する．基準周期部を 10 個連続で並べた評価音を基準音とし，Fig. 3-35 に示すように周期音 N, O, P を配置する．そして，10 周期部の周期内動作ばらつきの標準偏差が，それぞれ 0.01 秒，0.03 秒，0.05 秒，0.07 秒，0.09 秒となるように，Table 3-3 に示す 5 つの評価音を作成する．被験者は，これら 5 つの標準偏差が異なる評価音を基準音と比較し，聞き心地を相対評価する．

本実験では，ばらつきが聴感に与える影響を評価するため，ばらつきのない基準音と比較する．音質評価で使用する回答用紙は 3.4.1 (a) 節の評価と同じ Fig. 3-27 を用いる．評価手順も 3.4.1 (a) 節と同様に毎回，基準音を提示した後に各評価音を提示し，聞き心地に影響があるかを回答する．被験者は聴覚が正常な 20 歳代の 20 名である．

集計した結果の中で，基準音に比べて評価音が「かなり不快」および「非常に不

快」と回答した人の割合をまとめた結果を Fig. 3-36 に示す。

得られた結果より、周期間ばらつき Δt_{T31} に関しては、標準偏差が一点鎖線で示す実験で使用した装置の 0.025 秒では、基準音と比較して不快と感じる被験者は殆どいなく、標準偏差が 0.07 秒でも不快と感じる被験者は 3 割以下である。

一方、周期内動作ばらつき $\Delta t_{T31-T32}$ に関しては、標準偏差が一点鎖線で示す実験で使用した装置の 0.025 秒では、基準音と比較して不快と感じる被験者は 4 割程度で、標準偏差が 0.03 秒になると 5 割弱の被験者が不快に感じる事がわかる。周期間ばらつき Δt_{T31} は、周期内動作ばらつき $\Delta t_{T31-T32}$ と比較すると聴感に与える影響が小さいことがわかる。この理由は、周期部の時間長さが 1.3 秒であるので、周期間ばらつきは、周期部の時間長さに対して、対象としている過渡音の時間間隔のばらつきが小さいためと考えられる。

過渡音のばらつきは、挙動の制御が難しい紙の衝突音や反り返り音などが主な原因である。今回の実験で使用した装置のように、リズム感が安定していると感じられることが望ましいといえる。

以上より、実験より得られた稼働音を基に、音響シミュレーションを用いて評価音を作成し音質評価を行うことで、過渡音の発生タイミングのばらつきが聴感に与える影響を定量的に評価できることを示した。そして、非定常音を対象として、ばらつきや経時変化を考慮した“音質安定化手法”を提案した。

3.5 周期音のリズム感を考慮した知的生産性の評価

本節では、被験者に周期音を提示しながら簡単な計算タスクを与え、リズム感と計算の解答率との関係性を評価して、周期音が知的生産性に与える影響を検討する。

3.5.1 知的生産性に与える影響の評価音

評価音は、3.3 節で使用したメトロノーム音と 3.2.2 (a) 節で使用した MFP 稼働音を用いる。メトロノーム音は、過渡音の発生周波数を被験者の心拍と同じ周波数、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ にしてリズム感を変更した評価音を用いる。MFP 稼働音は、Fig. 3-9 に示す周期部の時間長さを変えて、リズム感を変更した評価音を用いる。

3.5.2 知的生産性に与える影響の評価

周期音のリズム感と計算の解答率との関係性を評価し、周期音の提示が知的生産の活動に与える影響を検討する。

(a) 知的生産性に与える影響の評価方法

被験者は、Fig. 3-37 に示すように無響室内で椅子に座り、各評価音を1分間聞きながら、問題用紙に記載された2桁の足し算を計算し、解答を問題用紙に記入する。そして、過渡音の発生周波数と解答数との相関性を評価する。本評価では解答速度への影響のみを評価し、正答率は対象としない。被験者は聴覚が正常な20歳代の5名である。

(b) 知的生産性に与える影響の評価結果

Fig. 3-38 に各メトロノーム音を提示したときの解答数の平均を、心拍数と同じ発生周波数の評価音(0%)を提示したときの解答数との比率で示す。Fig. 3-39 に各MFP稼働音を提示したときの解答数の平均を、基本周期部を提示したときの解答数との比率で示す。各グラフの横軸は、リズムを感じる2つの過渡音の発生周波数を心拍の周波数に対する増分量で示し、値が大きいほどリズム感が速いことを表す。得られた結果より、過渡音の発生周波数が高くリズム感が速くなると、解答数が増えることがわかる。特に心拍よりも20%程度速くなると、計算の解答数が増えている。以上より、周期音は知的生産性を向上させる可能性があるといえる。

3.6 まとめ

第3章では、非定常音を対象とし、機能音の音質安定化手法として周期音で形成されるリズム感を考慮した快適性の向上、時間経過に伴う周期音の経時変化について検討した。また、周期音のリズム感を考慮した知的生産性の向上を検討した。

まず、定常音と過渡音が含まれる事務機の稼働音の周期音について、音質変更に寄与が高い音源を明確にした。次に、周期音のリズム感について主観的および心拍と唾液アミラーゼを用いて客観的に音質評価を行い、これらの生体情報は周期音のリズム感の評価に適切であるか検討した。さらに、実際の装置を用いて得られた稼働音の原音を基に、任意のばらつきを与えた評価音を作成し音質評価を行うことで、

過渡音のばらつきが聴感に与える影響を把握し、時間経過に伴う経時変化を考慮した音質安定化手法を提案した。提案した手法を用いることで、複数の過渡音で形成される周期音のリズム感を向上させ、快適な環境を創生する機能音を生成できるといえる。

また、周期音のリズム感により知的生産性を向上させる機能音を検討した。ここでは、リズム感を変更した周期音を被験者に提示した際に簡単な計算タスクを与え、両者の関係性を評価し、リズム感が知的生産性に与える影響を検討した。そして、周期音は知的生産性を向上させる可能性があることを示した。以下、結果をまとめる。

1. 定常音と過渡音が含まれる周期音について主観的な音質評価を行い、音質変更により寄与が高い音源を明確にした。そして、特定の過渡音をなくすとリズム感が悪化し、快適性が低減することを把握した。また、周期音のリズム感を改善する必要性を示し、快適性を向上させる指針を見出した。
2. 被験者に周期音を提示したときの心拍と唾液アミラーゼを計測し、リズム感について客観的な音質評価を行った。そして、主観的な音質評価と客観的な音質評価の強い相関を見出し、心拍と唾液アミラーゼは周期音のリズム感の評価に適切であることを把握した。また、人間の心拍よりもやや遅い機能音を提示すると快適性が向上する可能性を見出した。
3. 事務機稼働音の計測データを加工して任意のばらつきを与えた評価音を作成し、音質評価を行うことで過渡音のばらつきが聴感に与える影響を把握した。そして、周期間ばらつきと周期内動作ばらつきを定義し、これらの影響を定量的に評価し、経時変化を考慮した音質安定化手法を提案した。
4. リズム感を変更した周期音を被験者に提示したときに簡単な計算タスクを与え、リズム感と計算の解答率との関係性を評価した。そして、人間の心拍よりもやや速い機能音を提示すると計算の解答率が向上することを把握し、知的生産性が向上する可能性を示した。

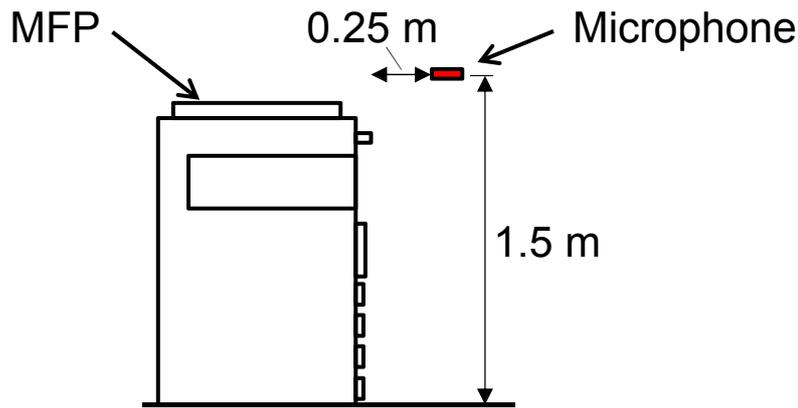


Fig. 3-1 Measurement setup of sound emitted by MFP

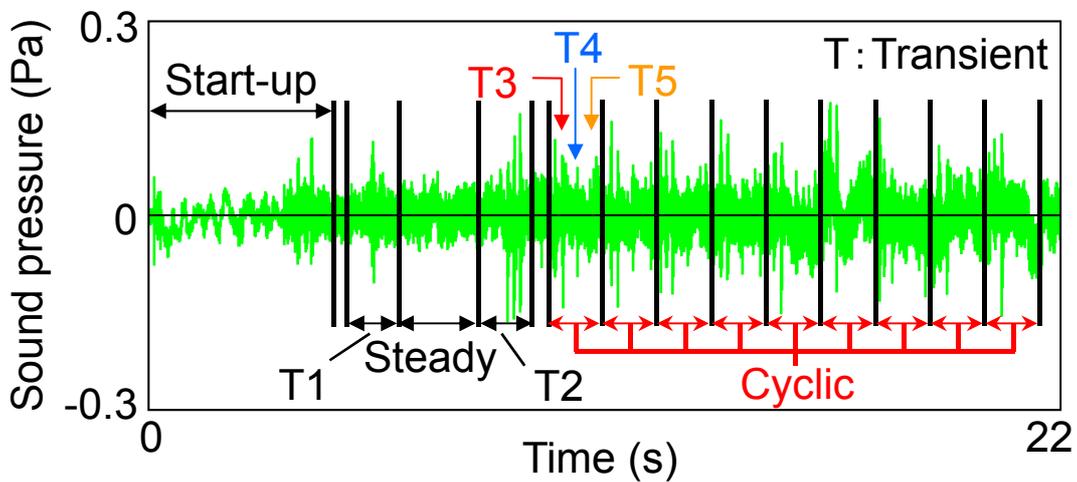


Fig. 3-2 Sound pressure of 10 times consecutive copies mode

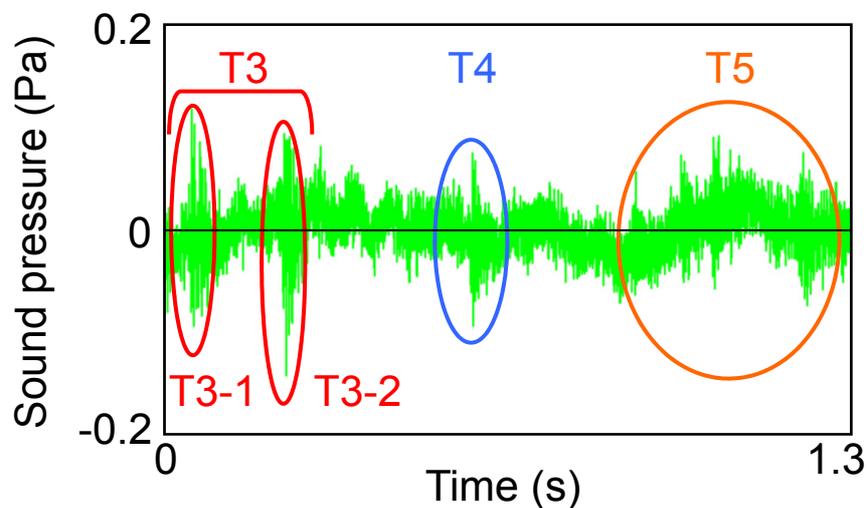


Fig. 3-3 Cyclic period of each copy except for a first copy

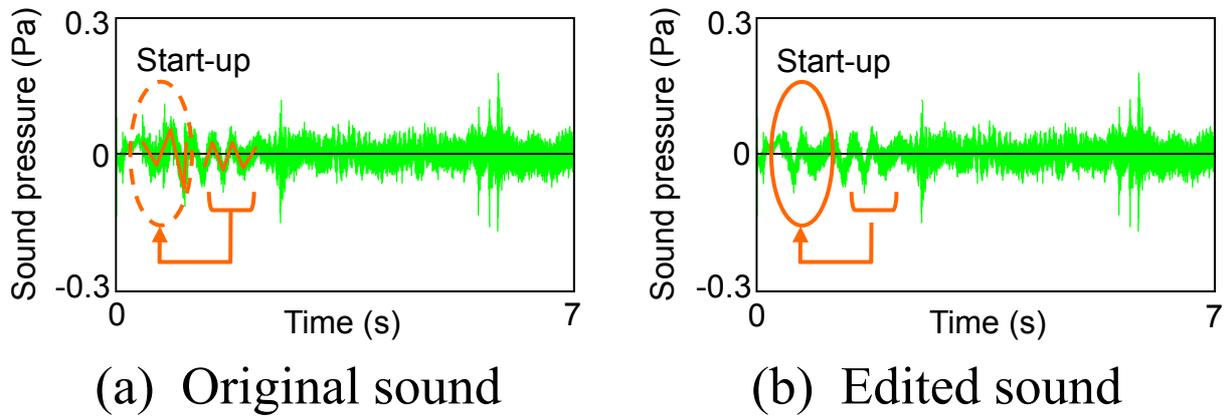


Fig. 3-4 Editing start-up sound

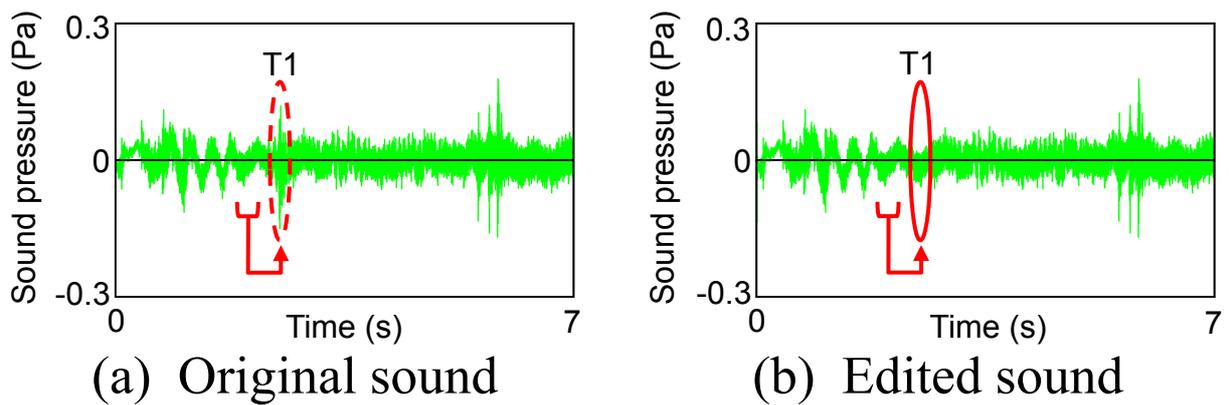


Fig. 3-5 Editing T1 sound

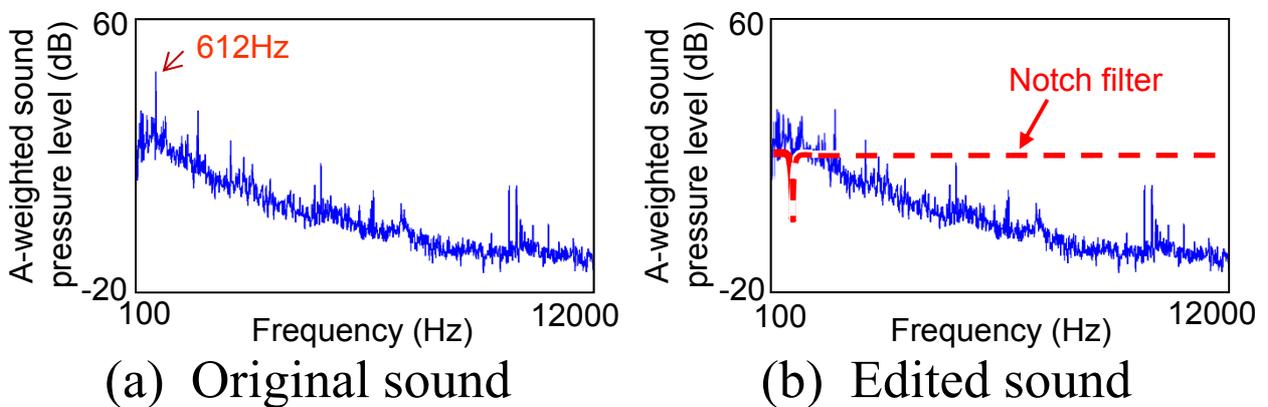


Fig. 3-6 Editing frequency characteristics of steady part

Table 3-1 Result of factor analysis of evaluation sounds which are cyclic periods

	Comfortable factor	Collision factor	Operation factor	Changed & Rhythmical factor
Like(好き) - Dislike(嫌い)	0.80	0.19	-0.14	0.12
Healing(癒される) - Annoying(苦痛な)	0.77	0.09	-0.11	0.02
Comfortable(心地よい) - Uncomfortable(不快な)	0.74	0.35	0.18	0.14
Calm(落ち着いた) - Clattery(ガチャガチャした)	0.20	0.77	-0.30	-0.16
Clear(澄んだ) - Muddy(濁った)	0.28	0.70	0.03	-0.28
Meek(おとなしい) - Wild(はげしい)	0.20	0.69	-0.35	-0.27
Sense of operation : Strong (動作感がある) - Sense of operation : Weak (動作感のない)	0.05	-0.08	0.68	0.29
Sense of printing : Weak (印刷感がない) - Sense of Printing : Strong (印刷感がある)	-0.14	0.28	-0.61	-0.06
Weak(弱々しい) - Strong(力強い)	0.01	0.05	-0.60	-0.27
Same impression (印象が変わらない) - Different impression (印象が変わる)	0.08	-0.27	0.30	0.74
Unchanged(変化がわからない) - Changed(変化がわかる)	0.16	-0.26	0.44	0.71
Un-rhythmical(リズム感の悪い) - Rhythmical(リズム感が良い)	-0.40	0.26	-0.25	-0.51
Contribution ratio	18.0 %	16.8 %	15.3 %	14.0 %
Cumulative contribution ratio	18.0 %	34.8 %	50.1 %	64.1 %

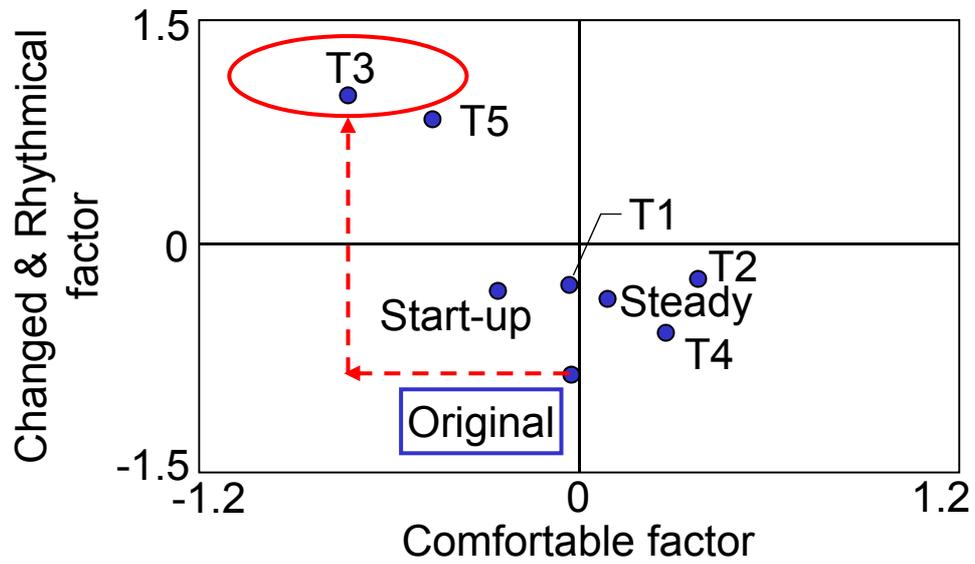


Fig. 3-7 Comfortable factor vs. Changed & Rhythmical factor

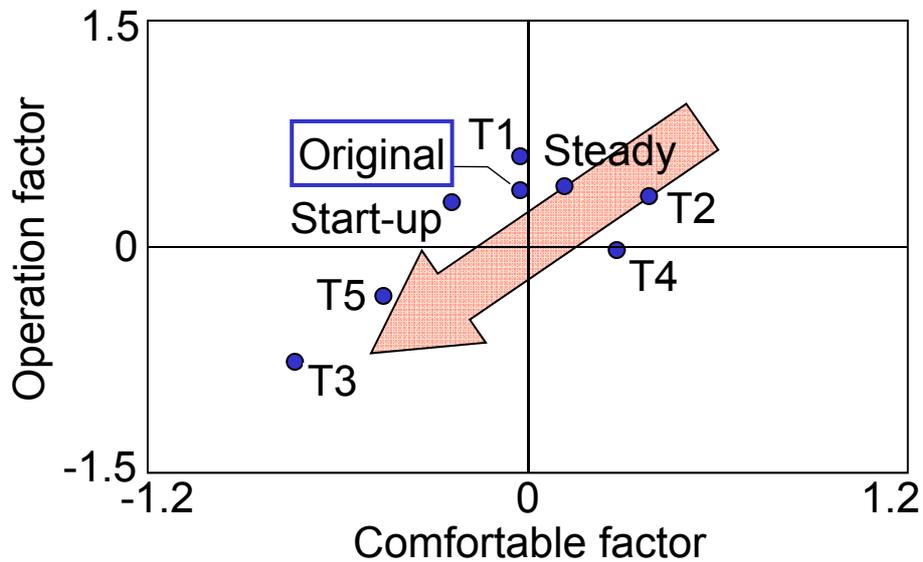
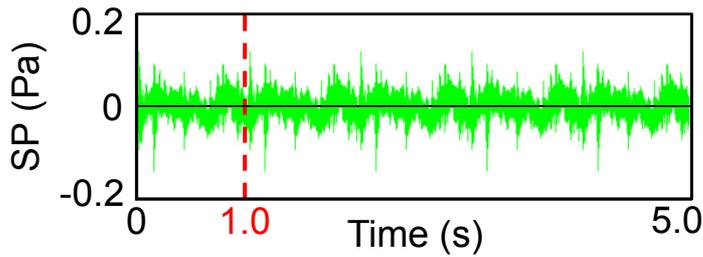
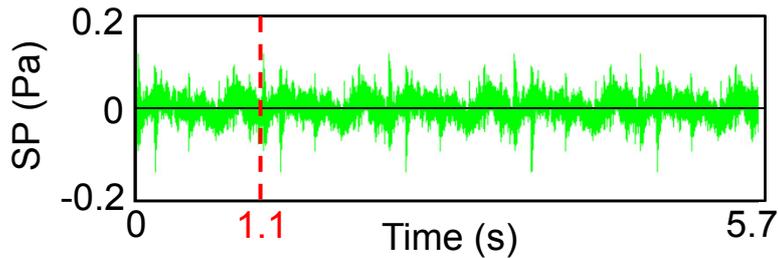


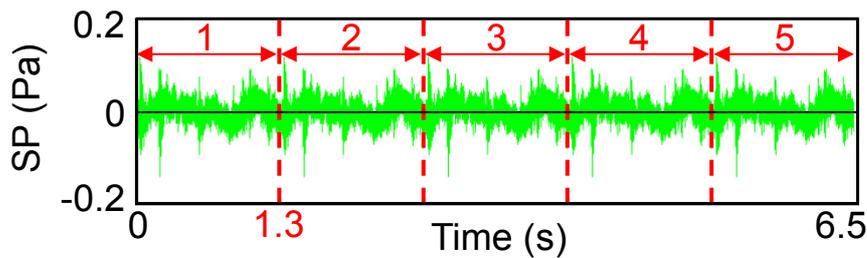
Fig. 3-8 Comfortable factor vs. Operation factor



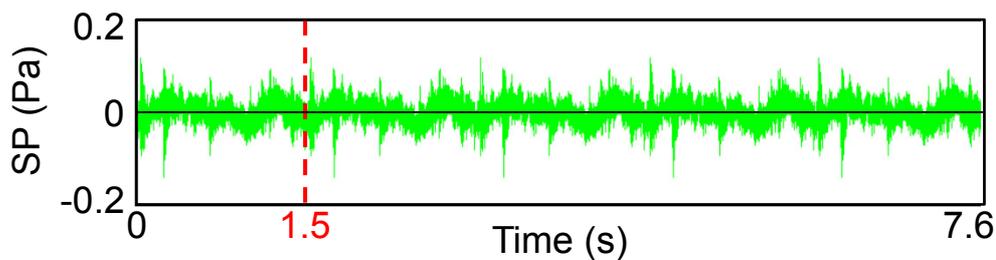
(a) Cyclic period is 1.0 s



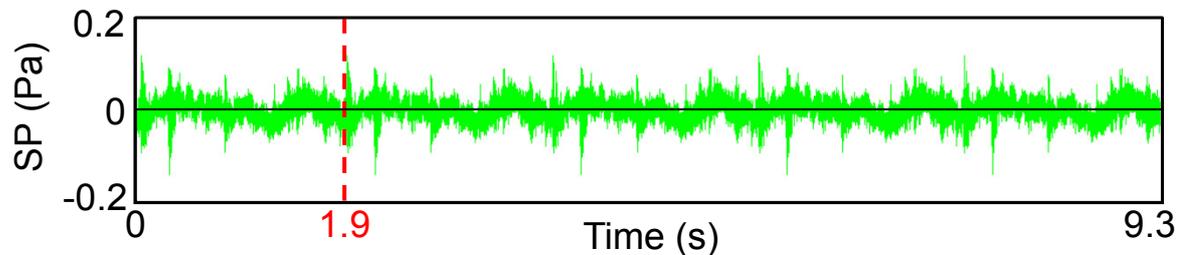
(b) Cyclic period is 1.1 s



(c) Cyclic period is 1.3 s (Original cyclic period)



(d) Cyclic period is 1.5 s



(e) Cyclic period is 1.9 s

Fig. 3-9 Sound pressure (SP) of rhythmical cyclic sounds whose periods are contracted or expanded

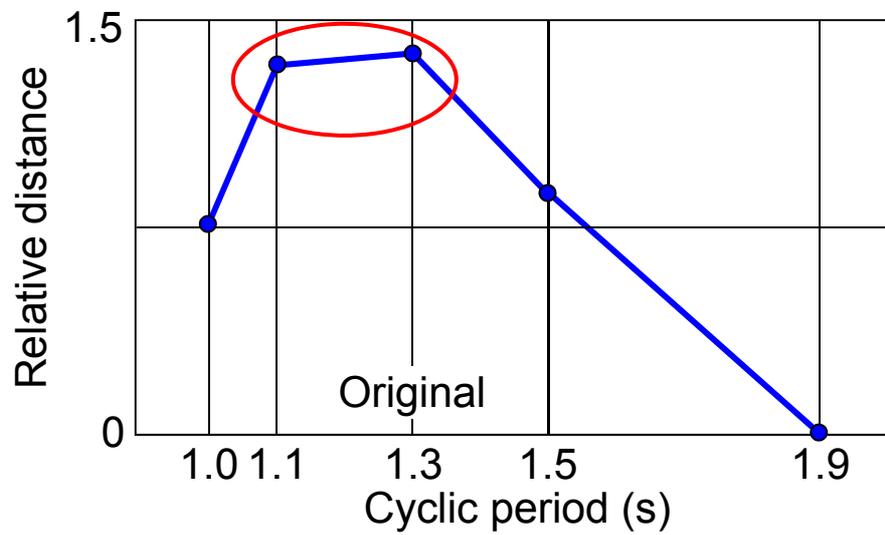


Fig. 3-10 Evaluation result of rhythmical cyclic sounds whose periods are contracted or expanded

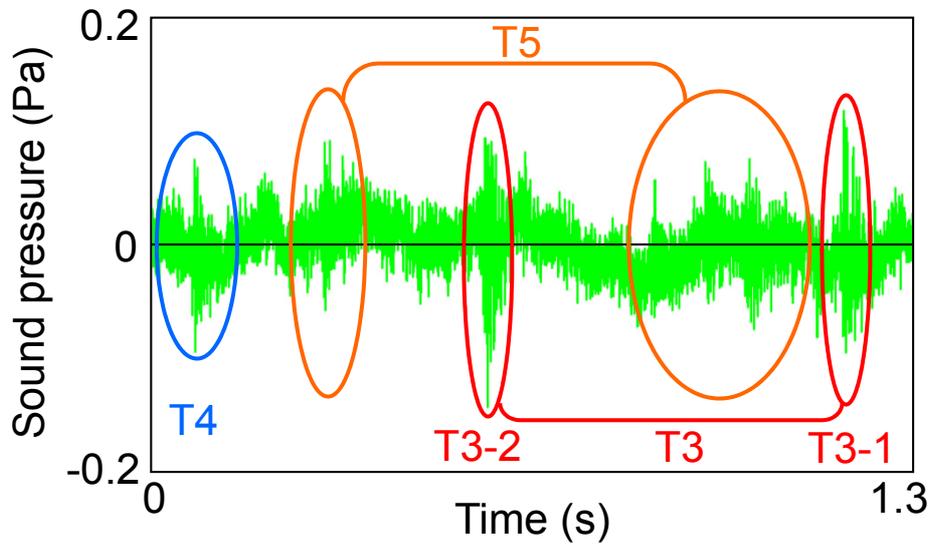


Fig. 3-11 Rhythmical cyclic sounds whose transient sounds are shifted

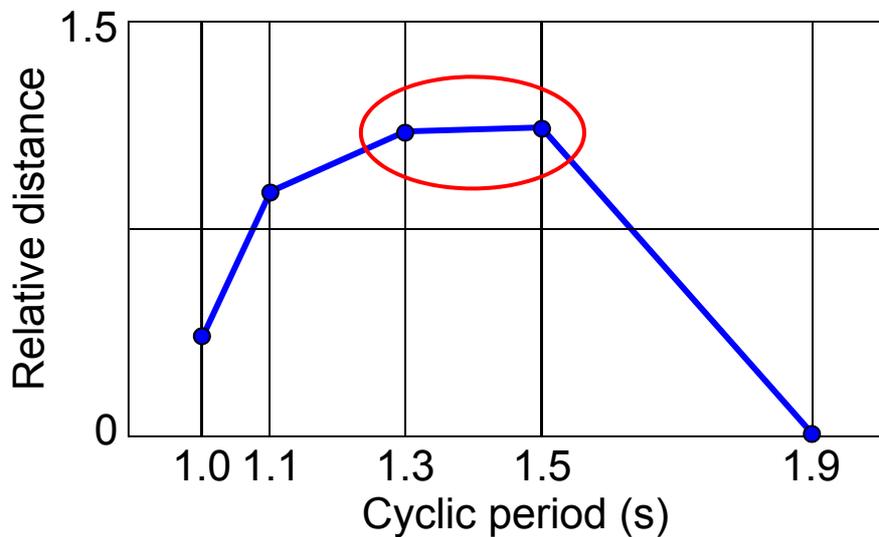


Fig. 3-12 Evaluation result of rhythmical cyclic sounds whose transient sounds are shifted

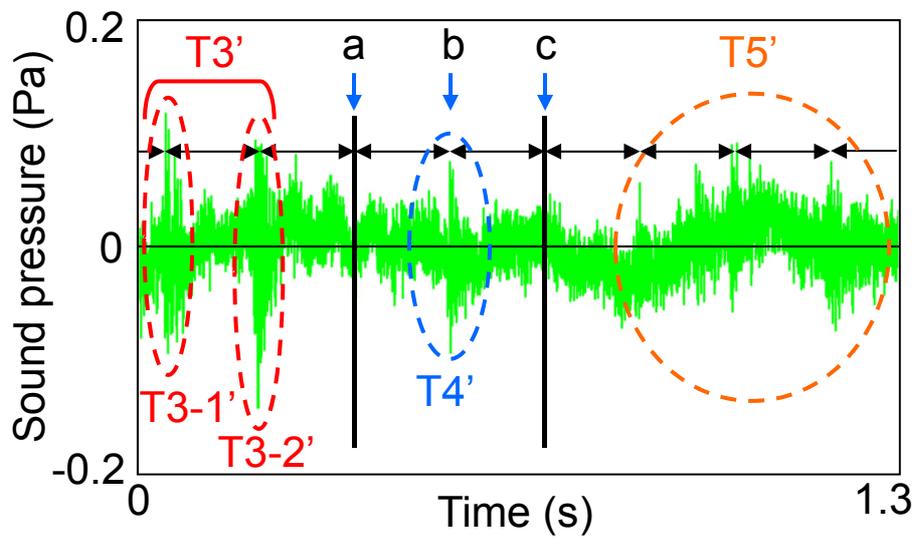


Fig. 3-13 Rhythmical cyclic sounds whose transient sounds are placed at positions which are equally divided by 8 of cyclic period

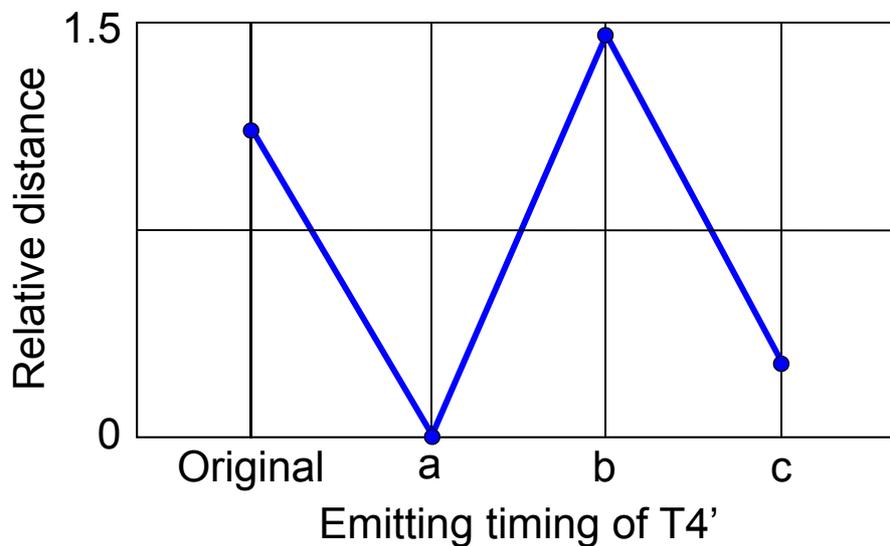


Fig. 3-14 Evaluation result of rhythmical cyclic sounds whose transient sounds are placed at positions which are equally divided by 8 of cyclic period

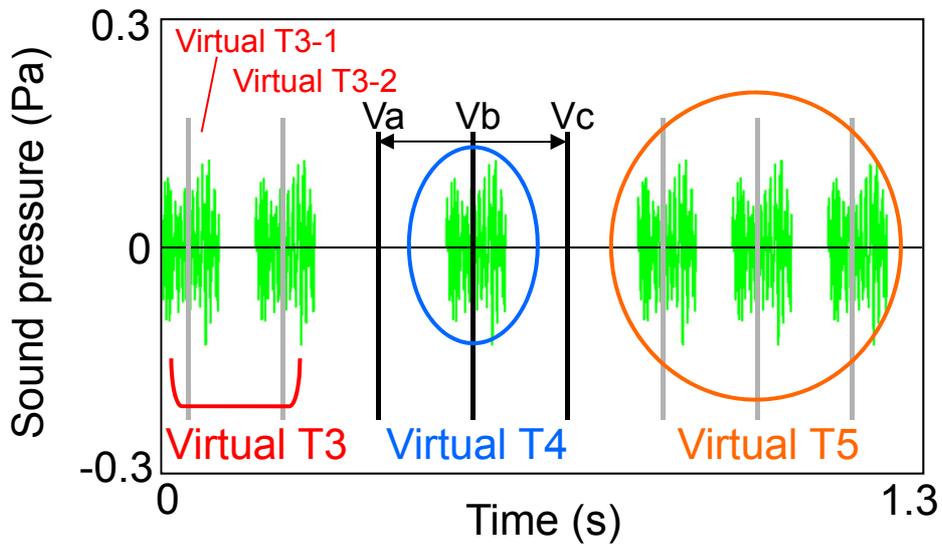


Fig. 3-15 Rhythmical cyclic sounds whose transient sounds are random noise

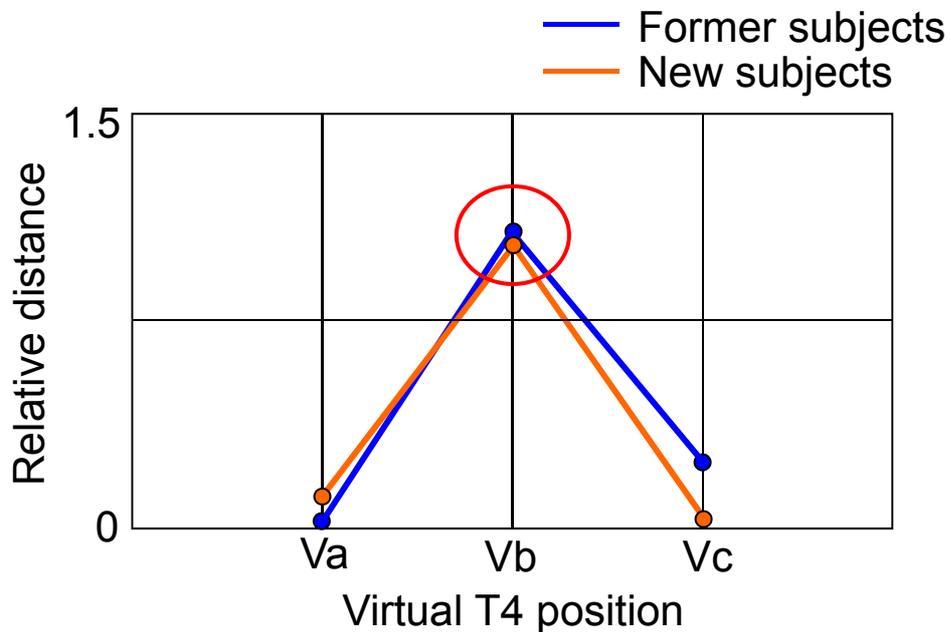


Fig. 3-16 Evaluation result of rhythmical cyclic sounds whose transient sounds are random noise

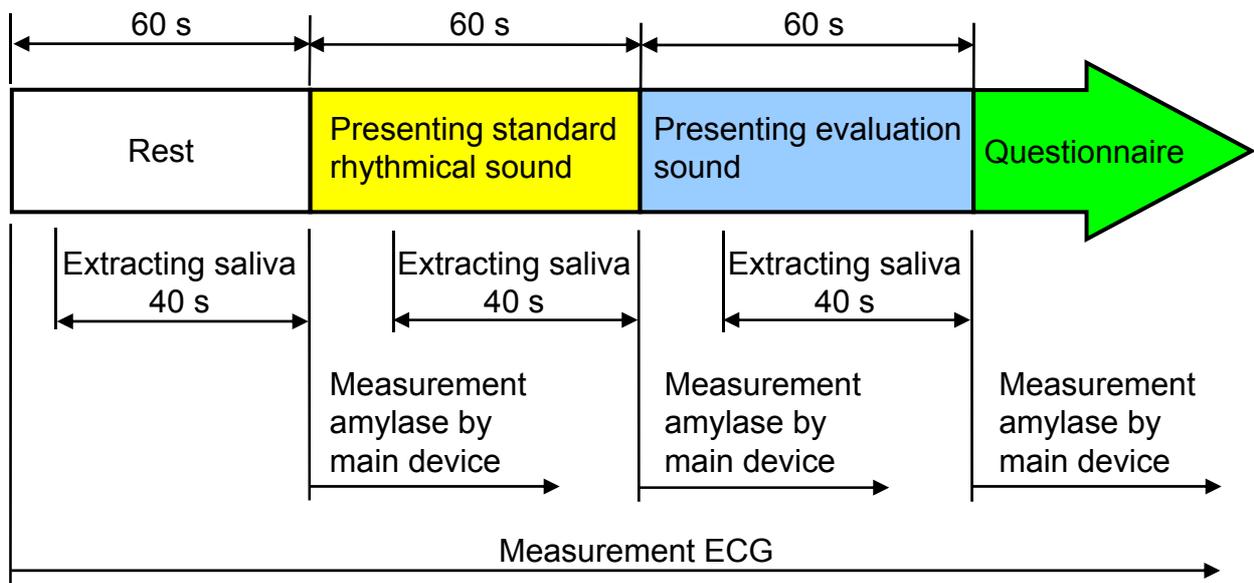


Fig. 3-17 Time protocol for evaluation of the influence on comfort due to the sensation of rhythm with presentation of metronome sound

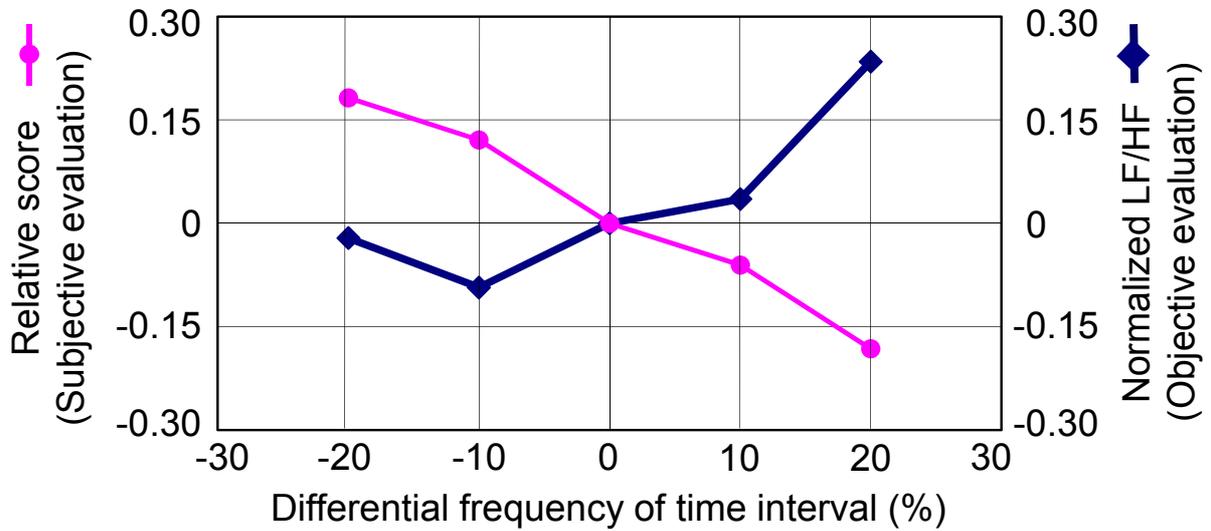


Fig. 3-18 Evaluation result by subjective evaluation, and objective evaluation by using HRV, with presentation of metronome sound

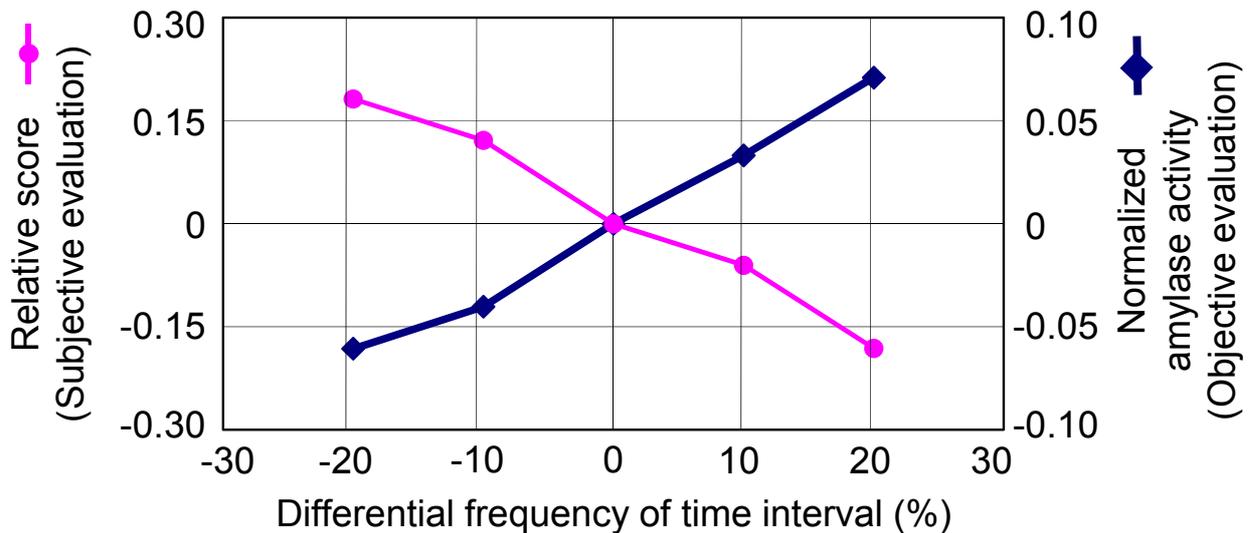


Fig. 3-19 Evaluation result by subjective evaluation, and objective evaluation by using amylase, with presentation of metronome sound

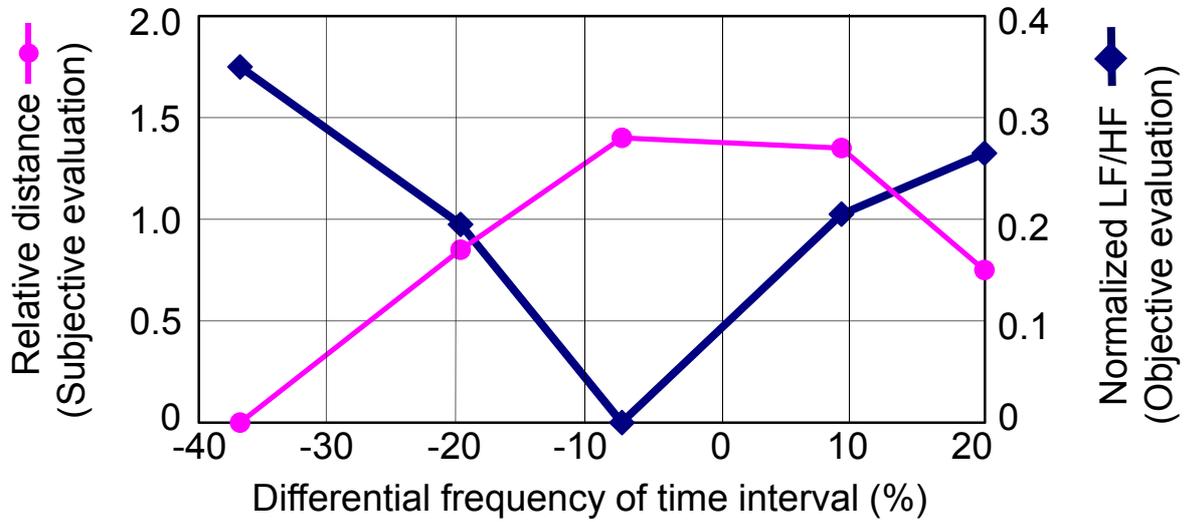


Fig. 3-20 Evaluation result by subjective evaluation, and objective evaluation by using HRV, with presentation of operation sound emitted by MFP, whose cyclic periods are changed

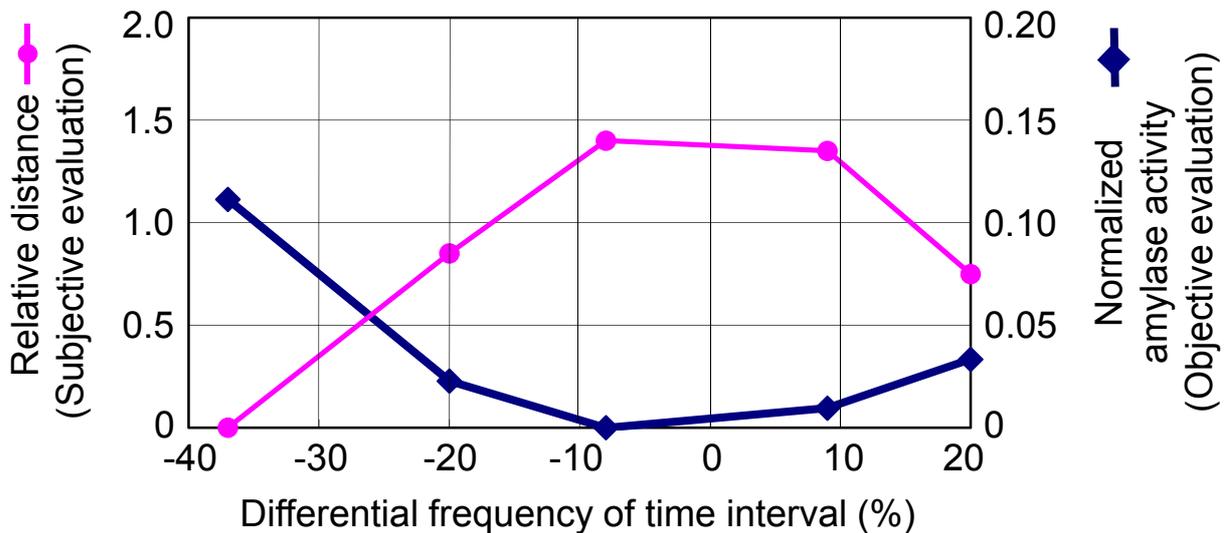


Fig. 3-21 Evaluation result by subjective evaluation, and objective evaluation by using amylase, with presentation of operation sound emitted by MFP, whose cyclic periods are changed

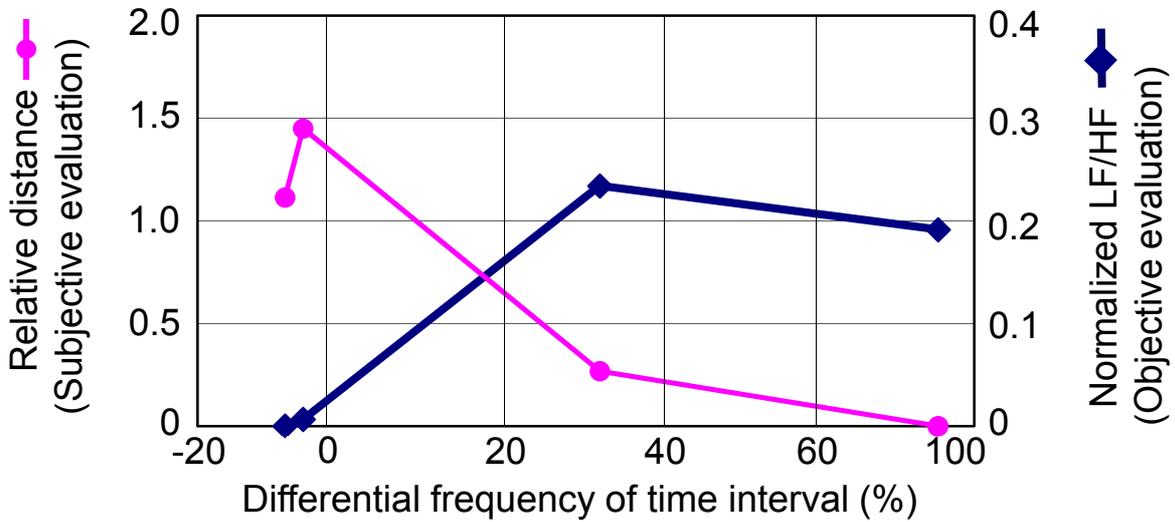


Fig. 3-22 Evaluation result by subjective evaluation, and objective evaluation by using HRV, with presentation of operation sound emitted by MFP, whose transient sounds are shifted

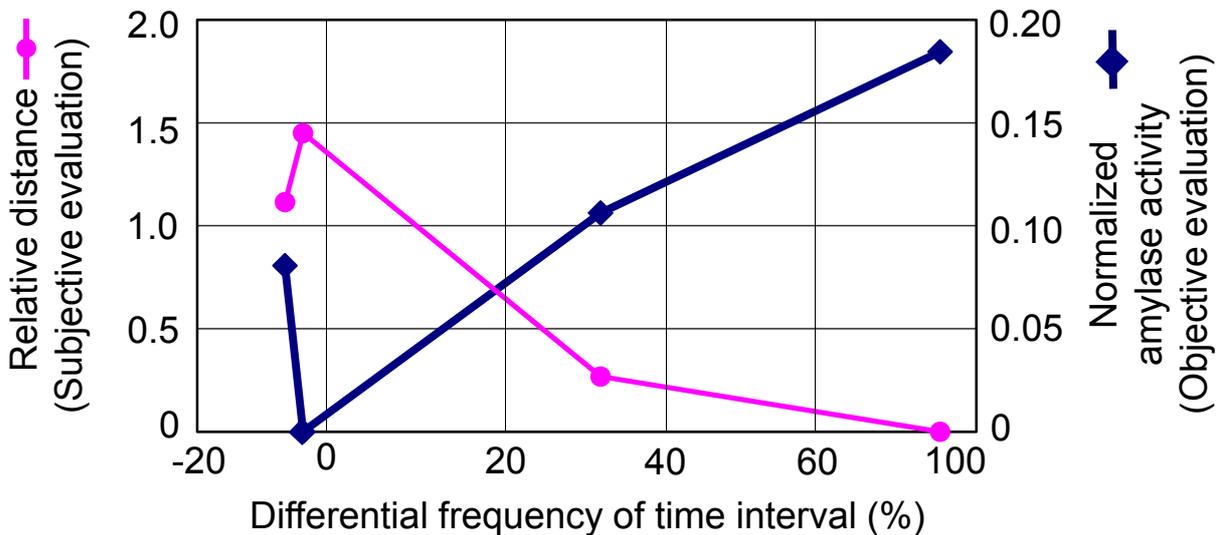


Fig. 3-23 Evaluation result by subjective evaluation, and objective evaluation by using amylase, with presentation of operation sound emitted by MFP, whose transient sounds are shifted

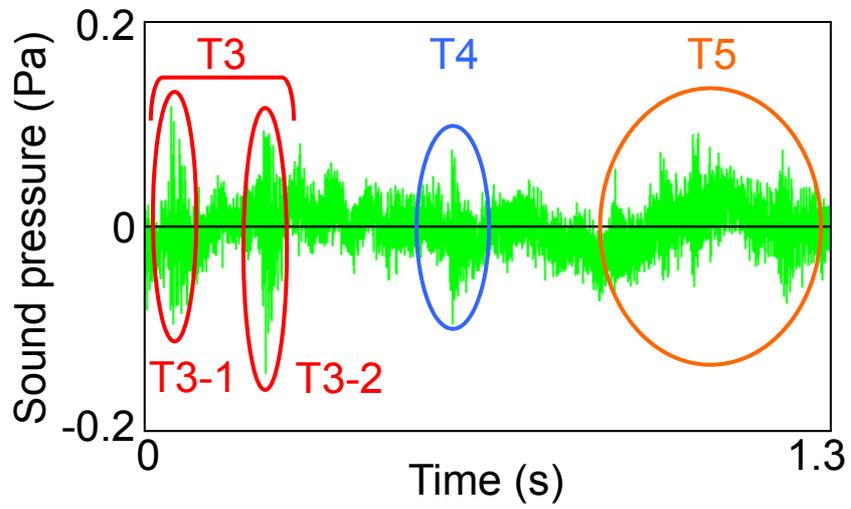


Fig. 3-24 Normal cyclic period

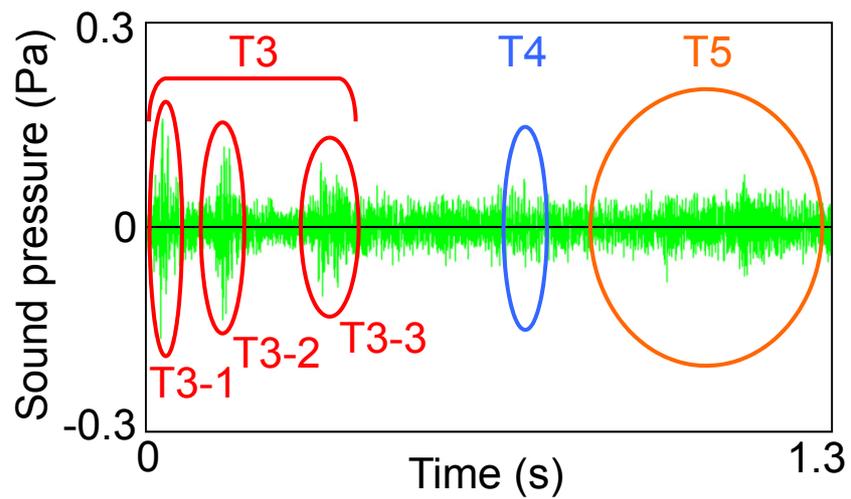


Fig. 3-25 Singular cyclic period

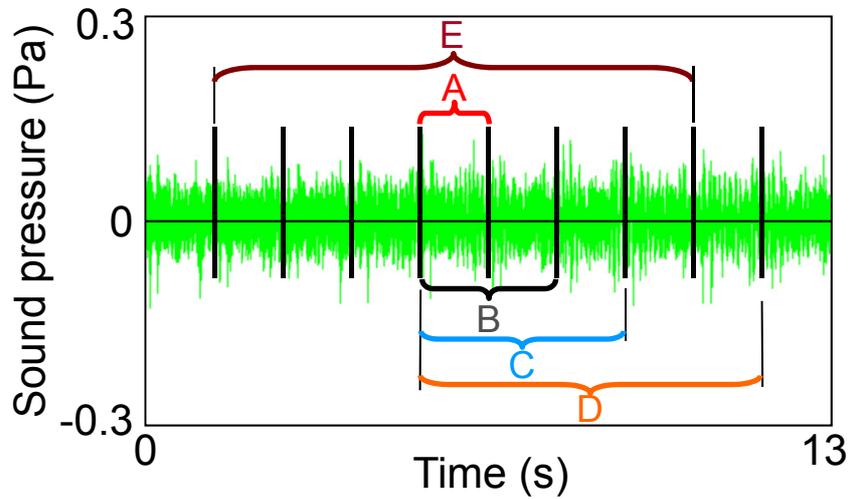


Fig. 3-26 Evaluation sounds including consecutive singular cyclic period

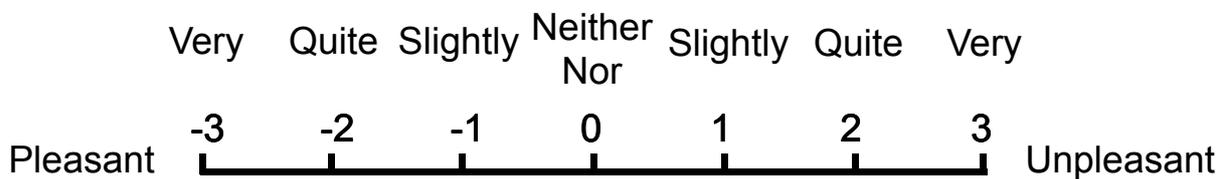


Fig. 3-27 Questionnaire for evaluation of sensation of rhythm

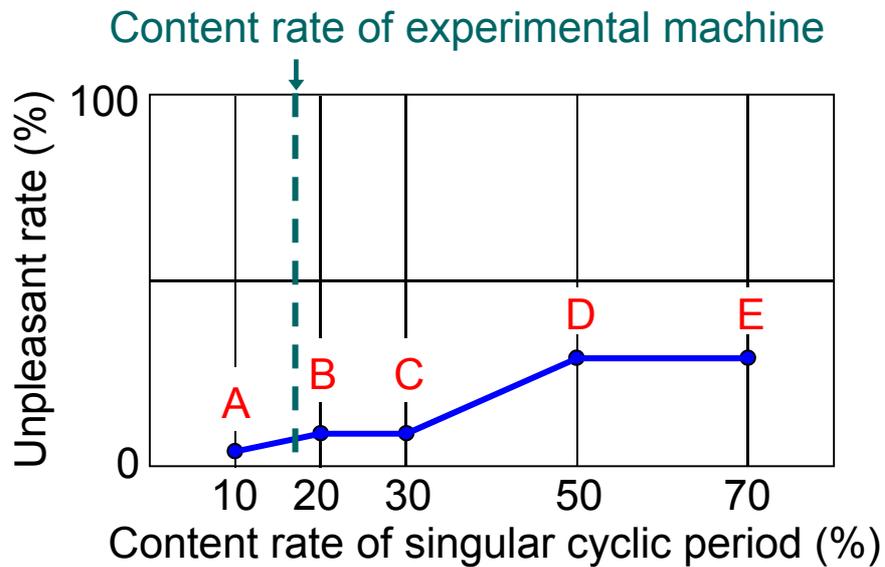


Fig. 3-28 Evaluation result of sounds including consecutive singular cyclic period

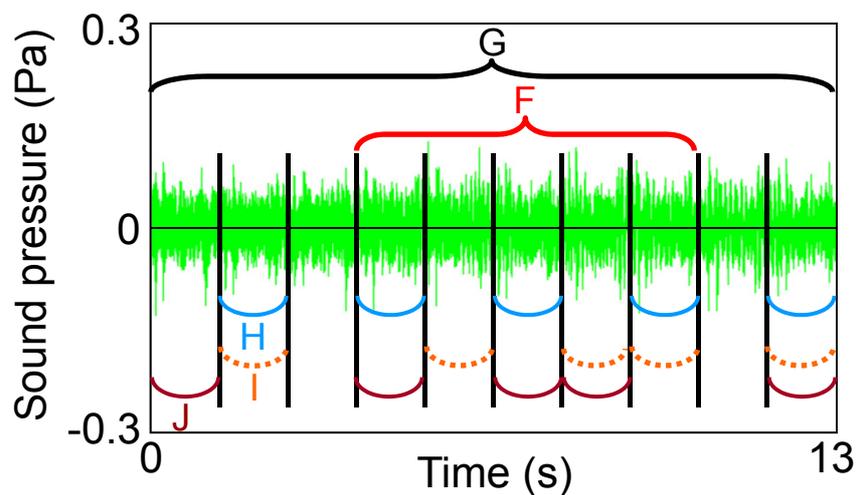


Fig. 3-29 Evaluation sounds including non-consecutive singular cyclic period

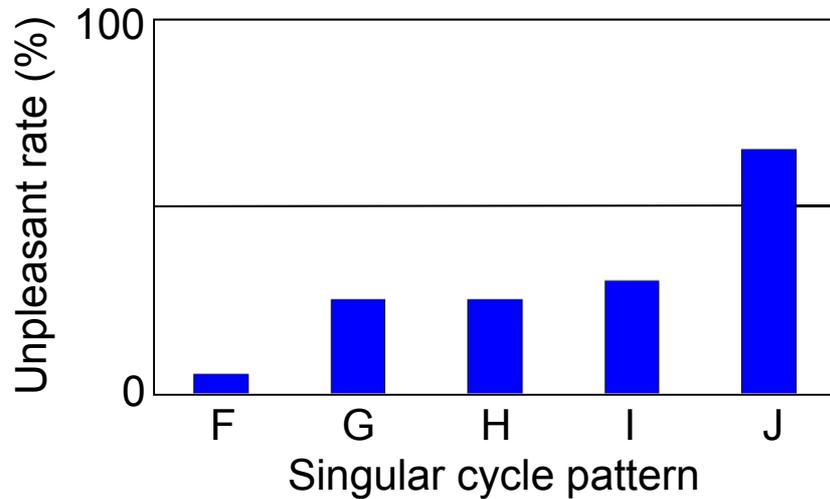


Fig. 3-30 Evaluation result of sounds including non-consecutive singular cyclic period

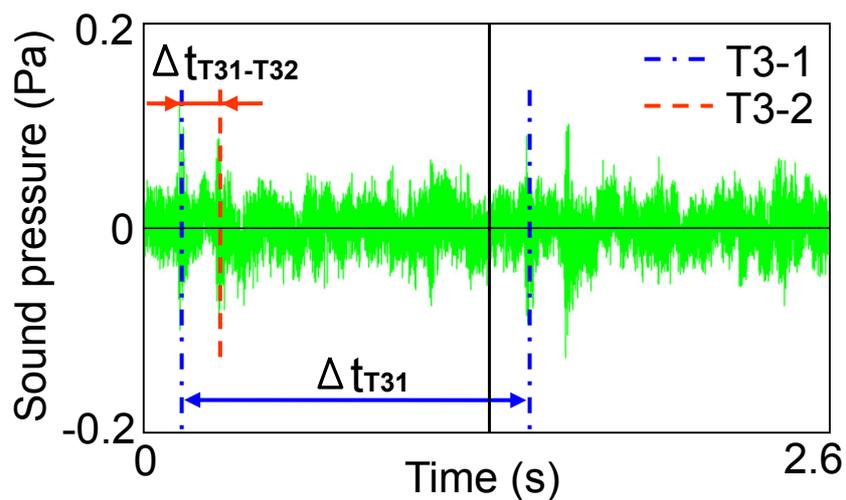
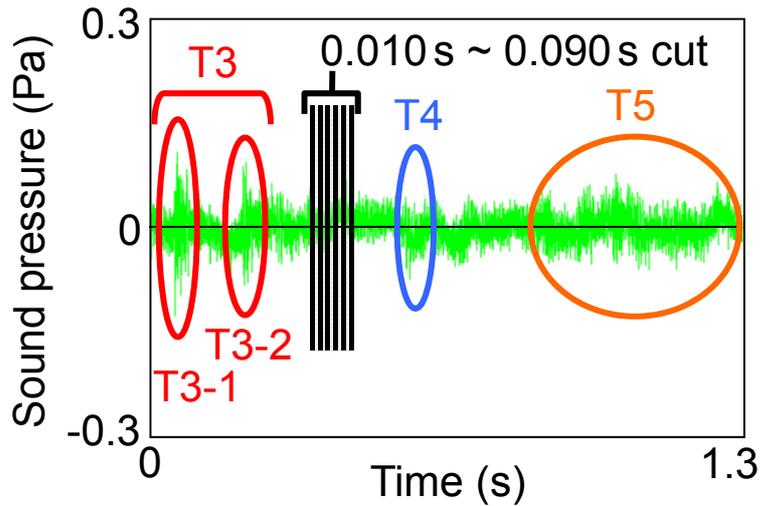
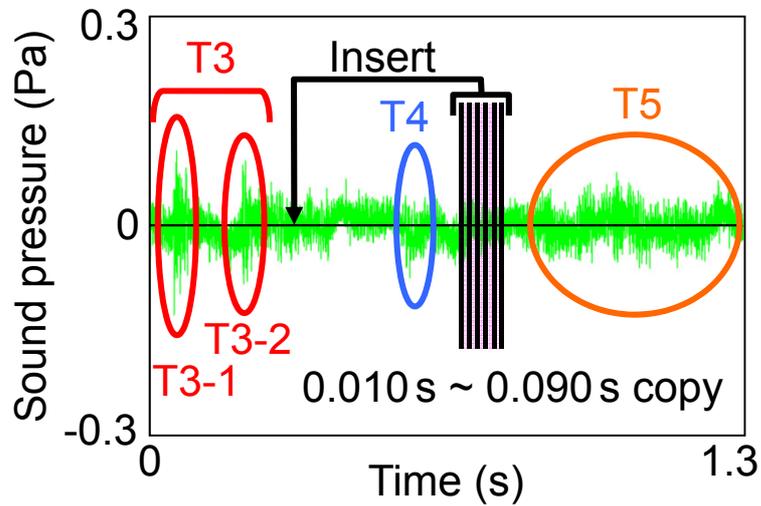


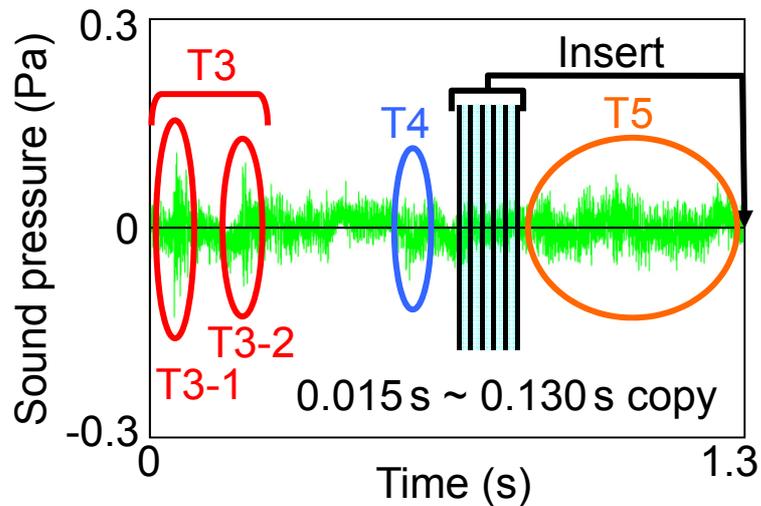
Fig. 3-31 Definition of dispersion of time interval of T3-1 and T3-2



(a) Cyclic period K



(b) Cyclic period L



(c) Cyclic period M

Fig. 3-32 Edited cyclic period K-M

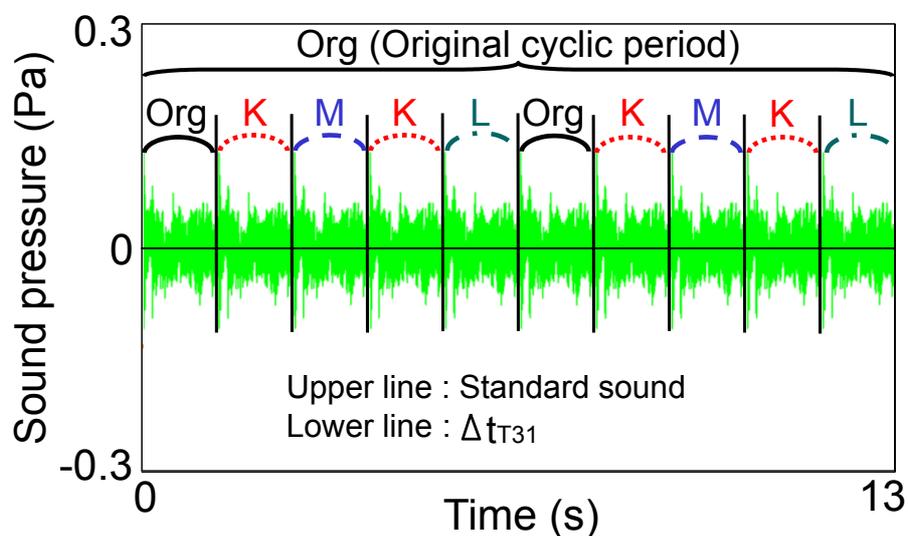
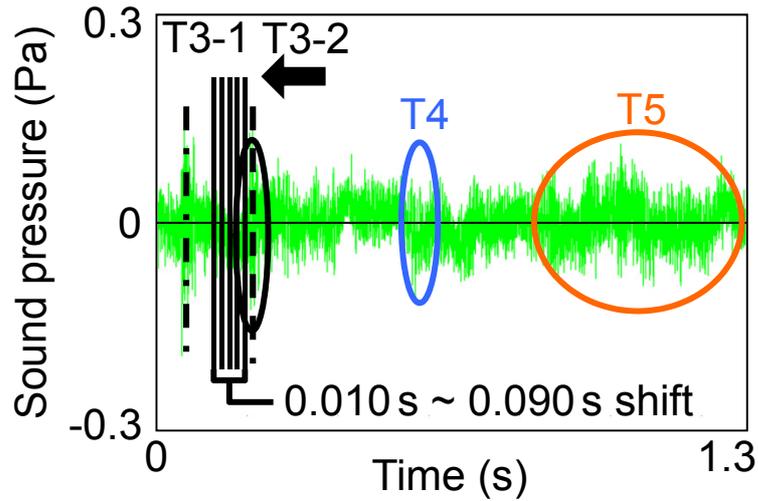


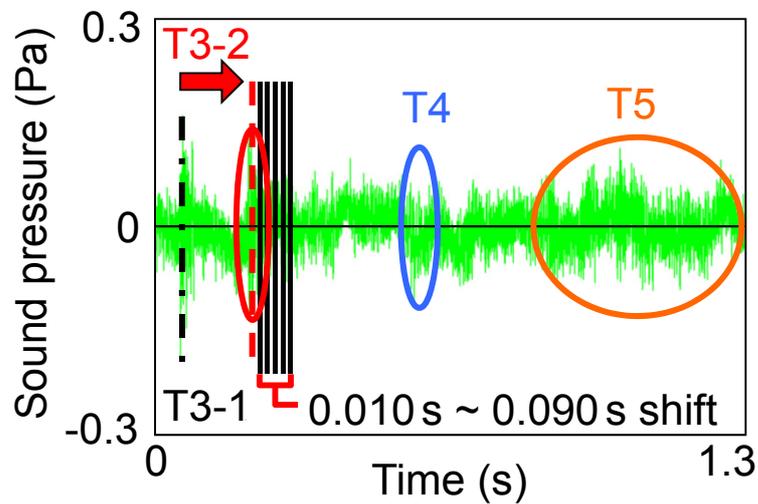
Fig. 3-33 Arrangement of cyclic period K-M

Table 3-2 Standard deviation of Δt_{T31}

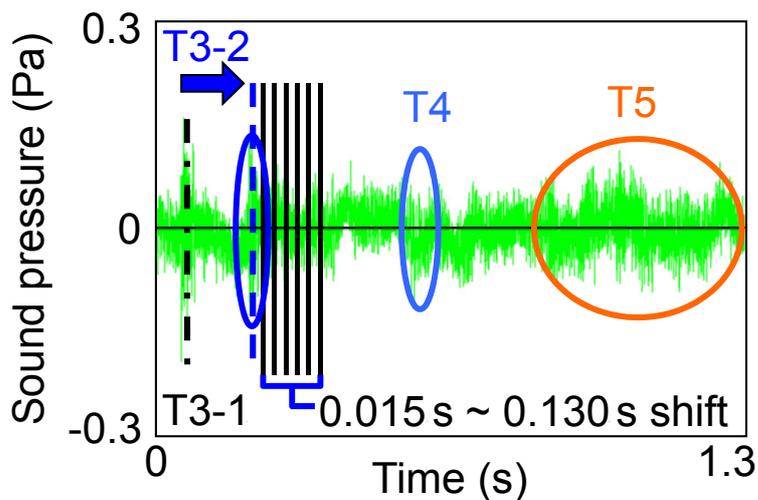
Standard deviation	1st cycle	2nd cycle	3rd cycle	4th cycle	5th cycle	6th cycle	7th cycle	8th cycle	9th cycle	10th cycle
	Org	Cycle K	Cycle M	Cycle K	Cycle L	Org	Cycle K	Cycle M	Cycle K	Cycle L
0.01	0.000	-0.010	0.015	-0.010	0.010	0.000	-0.010	0.015	-0.010	0.010
0.03	0.000	-0.030	0.045	-0.030	0.030	0.000	-0.030	0.045	-0.030	0.030
0.05	0.000	-0.050	0.075	-0.050	0.050	0.000	-0.050	0.075	-0.050	0.050
0.07	0.000	-0.070	0.105	-0.070	0.070	0.000	-0.070	0.105	-0.070	0.070
0.09	0.000	-0.090	0.135	-0.090	0.090	0.000	-0.090	0.135	-0.090	0.090



(a) Cyclic period N



(b) Cyclic period O



(c) Cyclic period P

Fig. 3-34 Edited cyclic period N-P

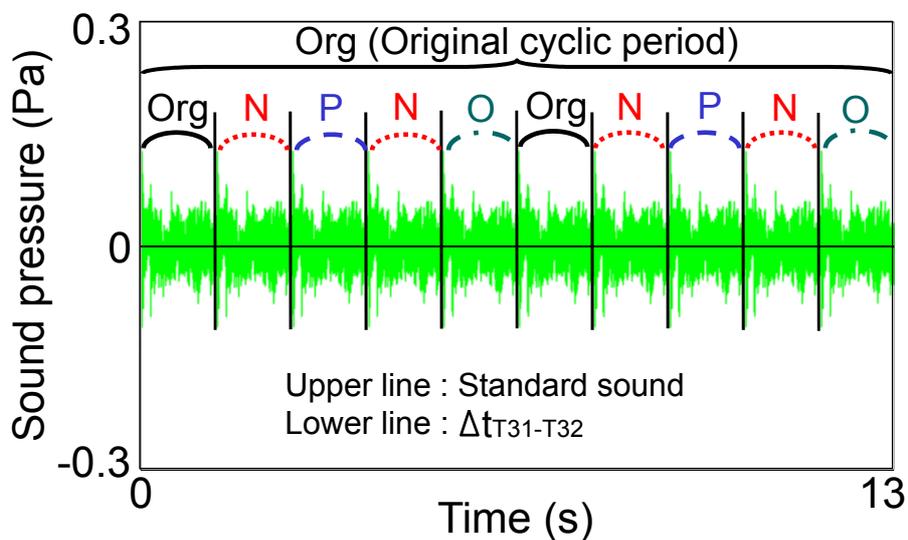


Fig. 3-35 Arrangement of cyclic period N-P

Table 3-3 Standard deviation of $\Delta t_{T31-T32}$

Standard deviation	1st cycle	2nd cycle	3rd cycle	4th cycle	5th cycle	6th cycle	7th cycle	8th cycle	9th cycle	10th cycle
	Org	Cycle N	Cycle P	Cycle N	Cycle O	Org	Cycle N	Cycle P	Cycle N	Cycle O
0.01	0.000	-0.010	0.015	-0.010	0.010	0.000	-0.010	0.015	-0.010	0.010
0.03	0.000	-0.030	0.045	-0.030	0.030	0.000	-0.030	0.045	-0.030	0.030
0.05	0.000	-0.050	0.075	-0.050	0.050	0.000	-0.050	0.075	-0.050	0.050
0.07	0.000	-0.070	0.105	-0.070	0.070	0.000	-0.070	0.105	-0.070	0.070
0.09	0.000	-0.090	0.135	-0.090	0.090	0.000	-0.090	0.135	-0.090	0.090

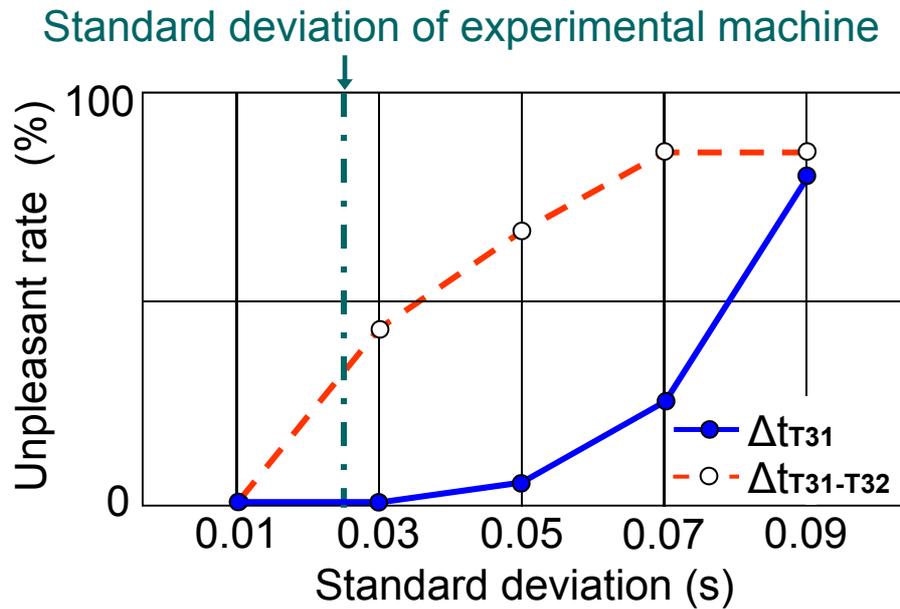


Fig. 3-36 Evaluation result of sounds changed the time interval of transient sounds



Fig. 3-37 Evaluation setup of whether the rhythmical sounds affect productivity

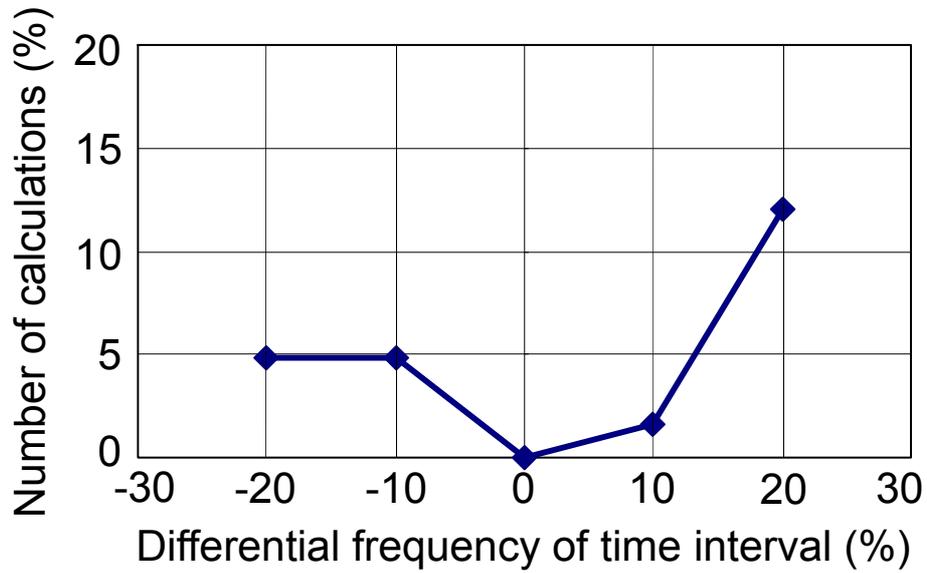


Fig. 3-38 Evaluation result of productivity with presentation of metronome sound

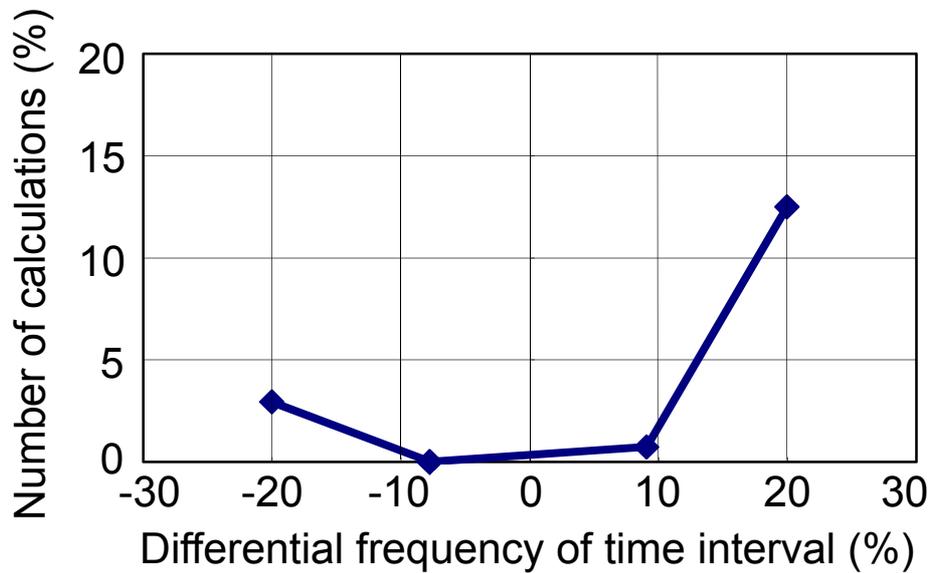


Fig. 3-39 Evaluation result of productivity with presentation of operation sound emitted by MFP

