



心理量に基づく床衝撃音の評価指標に関する研究

野島，僚子

(Degree)

博士（工学）

(Date of Degree)

2023-03-25

(Date of Publication)

2024-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8634号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100482382>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

心理量に基づく床衝撃音の評価指標に関する研究

2023 年 1 月

神戸大学大学院工学研究科

野 島 僚 子

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 既往研究	2
1.2.1 床衝撃音遮断性能の評価	2
1.2.2 騒音の心理評価	3
1.2.3 衝撃音の心理評価	3
1.2.4 音の周波数特性と心理評価	5
1.2.5 聴取者の生理量に対する心理実験の影響	5
1.3 本研究の位置づけ	6
1.3.1 研究の目的	6
1.3.2 論文の構成	7
第2章 床衝撃音の心理評価	10
2.1 実験1：周波数特性とレベルに着目した検討	10
2.1.1 実験方法	11
2.1.2 結果と考察	19
2.1.3 まとめ	22
2.2 実験2：大きさ感に着目した検討	23
2.2.1 実験方法	23
2.2.2 結果と考察	26
2.2.3 まとめ	30
2.3 実験3：レベル減衰の時間変動特性に着目した検討	31
2.3.1 実験方法	31
2.3.2 結果と考察	35
2.3.3 まとめ	37
2.4 結論	38

第3章 心理評価の重みづけを考慮した補正方法	39
3.1 補正方法の考え方	39
3.2 心理評価と対応のよいラウドネス時間変動積分値 N_{int} の定義	41
3.3 A 特性音圧レベル最大値の補正	43
3.3.1 補正方法 1：周波数特性とレベルに着目した検討	44
3.3.2 補正方法 2：時間変動特性に着目した検討	47
3.3.3 補正方法 3：周波数ごとの時間変動特性に着目した検討	53
3.4 実床衝撃音への適用	60
3.5 補正 L 等級曲線の可能性	62
3.6 結論	63
第4章 心理実験における生理量	65
4.1 実験 4：床衝撃音の聴取および評価時の生理量に着目した検討	65
4.1.1 実験方法	65
4.1.2 結果と考察	66
4.2 実験 5：床衝撃音の聴取時の生理量に着目した検討	70
4.2.1 実験方法	70
4.2.2 結果と考察	70
4.3 脈波のピーク間隔に着目した検討	73
4.3.1 分析方法	73
4.3.2 結果と考察	74
4.4 結論	89
第5章 総括	91
文献	93
本研究に関する発表論文等一覧	96
謝辞	97

第1章 序論

本章では、建物の居住性能の一つである床衝撃音遮断性能の評価における本論文の意義を述べ、次に、従来の評価手法および従来の研究を概説し、それらの問題点をまとめ、本論文で解決する課題を提示する。

1.1 はじめに

床衝撃音遮断性能は、建物の居住性能を評価するための重要な評価要件の一つであり、集合住宅やホテル等の居住空間において重要視されてきた。建築物の提供者である開発事業者や設計者および施工者にとっては、床衝撃音遮断性能を比較可能な形で定量化することが重要である。現在、床衝撃音の測定・評価方法については、JIS（日本産業規格 [1][2][3]）規定される方法が広く用いられている。要求される性能については、建築学会が設計指針の中で定める、建物の室用途と遮音性能の水準に対応する適応等級 [4]を拠り所としている。このように、床衝撃音遮断性能に対して物理量を用いて客観的に比較可能な形で性能を評価する取り組みがなされている。しかしながら、近年では、居住者の間でも床衝撃音に対する意識が高まっており、近隣問題や訴訟に発展するケース [5]も見られる。阿部ら[6]は、集合住宅購入時の音環境に関する消費者要求についてアンケート調査を実施し、調査対象とした消費者においては音環境の性能を重視する割合が高く、床衝撃音は気になる音の中で外部騒音に次いで 2 番目に要求が高い項目であることを報告している。井上 [7]は、建物性能の良否を判断するのは居住者自身であると位置付けている。井上ら [8]は、居住者反応からみた重量床衝撃音遮断性能の生活実感による表現方法について検討し、重量床衝撃音の音源側つまり加振源側にあたる集合住宅の上階居住者の世帯構成によって、受音側つまり床衝撃音の聴取者にあたる下階居住者の生活実感は、建築学会の「表示尺度と住宅における生活実感との対応例」 [4]に示される生活実感とは異なることを指摘している。このように、床衝撃音遮断性能は居住者の関心が高い項目であるとともに、その性能を評価する場合は、聴取する側の居住者が床衝撃音に対して心理的にどのように感じるかが重要である。

第 1 章

1.2 既往研究

1.2.1 床衝撃音遮断性能の評価

既往の床衝撃音評価は、JISA1419 [3]に規定され、標準軽量衝撃源または標準重量衝撃源を用いる場合に適用可能な等級曲線を用いた接線法での評価である。

この JISA 1419 による評価（以下、L 値評価と記す）方法と聴感による評価の関係について、財団法人新住宅普及会（現一般財団法人住総研）の床衝撃音の聴感評価研究委員会により検討 [9]がされている。この中で、L 値評価の問題点として、次の二つを最も重要な問題として取り上げている：(1) 床衝撃音レベルの周波数特性と遮音等級の対応に関する問題、(2) 低音領域、とくに 63 Hz 周波数帯域における床衝撃音レベルの空間的な分布に関する問題。前者 (1) については、実床衝撃音と模擬床衝撃音に対する聴感評価実験をもとに、1 dB ごとの床衝撃音評価値である L 数と床衝撃音の主観評価量（大きさ、うるささなど）との相関が高いことを示し、L 値評価が床構造の性能評価量として妥当と結論付けている。ただし、L 数よりも相関の高い物理量についても報告している。委員会が検討対象とした中で最も主観評価量と対応がよい物理量は、Stevens の Mark VII [10]であるが、L 値評価のうち 63 Hz の 1 オクターブバンドを無視して L 数を評価する場合に相関が高くなることを示している。また、周波数領域と時間領域の相互作用の検討の必要性について言及しており、周波数帯域別にレベルに対するウェイトと時定数を変化させた評価量を設定するべきであることを指摘している。後者 (2) については、L 値評価の 63 Hz 帯域の値が床衝撃音の主観評価に対して決定的な影響を与えているとは認めがたいと結論付けているものの、63 Hz 帯域における空間分布の偏りや海外の性能評価曲線を参考にできる可能性を挙げ、63 Hz 帯域において他の評価対象周波数帯域より大きな超過許容巾の採用の可能性と、標準重量衝撃源の妥当性については検討の余地があることを提言している。また、橘 [11]は、L 値評価の接線法は特定の周波数帯域で評価値が決定されるために、遮音性能の評価と実現場での実感が必ずしも一致せず、場合によってはコスト面で無駄な開発努力が必要になるなどの批判も出ていることを指摘している。

このように、重量床衝撃音遮断性能の評価において、63 Hz 帯域が L 値評価の決定帯域となることが多く性能評価における影響が大きいことが認識されているものの、63 Hz 帯域のような低周波数成分が、床衝撃音の心理評価において重要な意味を持つかどうかは明らかにされていない。また、前述の床衝撃音の聴感評価研究委員会の検討から示唆されるように、床衝撃音遮断性能を客観的に比較可能かつ定量的に表すことができる指標は、建築物の提供者が用いる前提であることから、音響の実務者であれば誰もが容易に測定・分析・評価可能であることが求められる。具体的には、騒音計と汎用の分析ソフトウェアを用いて求めることができる物理量が望ましい。

1.2.2 騒音の心理評価

騒音の心理的不快感の属性として、ラウドネス（音の大きさ）、アノイアンス（うるささ、邪魔感）、ノイジネス（やかましさ、騒々しさ、喧噪感）が挙げられる。ラウドネスやノイジネスは音そのものの性質に依存した属性であるのに対し、アノイアンスは人間関係や恐怖感など非音響的な要因も関与し、騒音レベルなどの音の物理量と必ずしも対応しないこと、また状況に依存することから実験室で真のアノイアンスの判断を求めることが難しい[12]とされている。難波[13]は、多くの研究においてラウドネスからノイジネスあるいはアノイヤンス（原文まま）を区別する必要性が論じられていることを指摘し、ノイジネスおよびアノイヤンスがラウドネスとは異なる騒音の側面を示していると述べている。また、アノイヤンスには、情報特性、嗜好、慣れ、状況、音源との関係[]といった非音響学的要因が影響することから、物理量のみでアノイヤンスを予測しうる騒音評価法を作成することは困難である一方で、音響的にも非音響的にも（例 慣れ）騒音から解放される条件のメカニズムの追求の重要性も指摘している。

このことから、床衝撃音の心理評価に着目した検討に際しては、非音響的な要因を除いた検討が可能なラウドネスやノイジネスが適すると考えられる。しかしながら、1.1 で述べたように床衝撃音遮断性能を評価する場合は、聴取する側の居住者が心理的にどのように感じるかが重要であることから、アノイアンスのように妨害感等について総合的に評価させることを検討する必要があると考えられる。

1.2.3 衝撃音の心理評価

1.2.1 で述べたように、L 値評価と心理評価について実用上はある一定程度の対応が見られるものの、より心理評価と対応の良い物理量があることは知られており、さまざまな研究が行われている。

岩本、矢野、橘 [15]は、L 値評価の標準重量床衝撃源であるタイヤを標準的な鉄筋コンクリート床スラブに落下させた場合の床衝撃音を収録し、周波数変調したものを試験音としてラウドネスを判断させる心理評価実験を行った。その結果、オクターブバンドの 31.5 Hz 帯域から 500 Hz 帯域の算術平均値がラウドネスと良く対応することを報告するとともに、既往の評価尺度の中では A 特性音圧レベルの最大値 L_{AFmax} （原文中では騒音レベルの Fast ピーク値と表記）が L 値評価よりも適当であること示唆する結果を報告している。また、服部、矢野、橘 [16]は、L 値評価の標準軽量床衝撃源であるタッピングマシンで 4 種類の床構造を連続打撃および単発打撃させ、さまざまな周波数特性の床衝撃音を収録し、このうちの一つを周波数変調したものを加えた 5 種類の試験音についてラウドネスを判断させる心理評価実験を行った。その結果、オクターブバンドの 63 Hz 帯域から 4k Hz 帯域の算術平均値がラウドネスと良く対応することを報告するとともに、既往の評価尺度の中では A 特性音圧レベルの最大値 L_{AFmax} （原文中では騒音レベルの Fast

第 1 章

ピーク値と表記)が L 値評価よりも主観評価量と対応が良いことを報告している。このように、L 値評価のための標準衝撃源による検討であるが、オクターブバンドの 31.5 Hz 帯域や 63 Hz 帯域といった低音域の周波数成分を多く含む床衝撃音および 125 Hz 帯域以上の中高音域の周波数成分を多く含む床衝撃音について、既往の評価尺度の中では L 値評価よりも時間重み付け特性を FAST とした A 特性音圧レベルの最大値 L_{AFmax} の方が、対応が良いことを示している。また、Jeon ら [17]は、実建物において、大人の飛び跳ねと走り回りおよび標準衝撃源のタイヤ、ボールならびにタッピングマシンによって生じる床衝撃音を用いて心理評価実験を行い、JIS [3]に規定される逆 A 特性重みつき床衝撃音レベル $L_{i,Fmax,AW}$ は心理評価と対応がよく、Zwicker ラウドネスと高い相関があることを報告している。

Preis ら [18]は、ラウドネスの暴露量 SEN を定義し、床衝撃音のラウドネスの最大値 N_{max} およびラウドネスの暴露量 SEN と L_{AFmax} の相関が高いことを報告している。Preis らは、標準重量床衝撃源であるタイヤおよびボールを衝撃源に用いて、A 特性音圧レベルの最大値 L_{AFmax} 、単発騒音暴露レベル L_{AE} 、Zwicker ラウドネスの最大値 N_{max} およびラウドネスの暴露量 SEN の相関関係を検討している。ただし、ラウドネスの暴露量 SEN と心理評価の対応については、詳細な検討は行われていない。

佐藤ら [19] [20] [21]は、Zwicker ラウドネスと心理評価の関係を検討し、 L_{AFmax} の値を用いたラウドネスのデシベル値の予測式 [21]を提案している。佐藤らは、標準重量床衝撃源であるタイヤおよびボールならびに成人男性の飛びはねを衝撃源に用いて 5 段階のカテゴリー評価による心理評価実験を行い、床衝撃音の心理評価と Zwicker ラウドネスの対応が良いことを示した。さらに、A 特性音圧レベルの最大値 L_{AFmax} (参考文献中で最大 A 特性音圧レベルと表記)は Zwicker ラウドネスと対応が良く、心理評価と対応しない領域はみられるものの実用的に用いることは可能と位置付けた。ただし、佐藤ら[20]は、デシベル表記のラウドネスが 0.4 dB 変化するとうるさは明らかに変化し、2.3 dB 変化すると気になる程度のカテゴリーが変化することを指摘し、ラウドネスによりうるさを推定することが心理評価との誤差が最も少ない方法であると結論づけている。

床衝撃音に限定しなければ、J. Schlittenlacher ら [22]は、ハンマー等の衝撃音を対象として、ラウドネスレベルと心理評価の関係を検討している。ラウドネスの印象に合う線の長さを判断させるクロスモダリティマッチングによる心理実験を行い、ISO 532-1 (DIN 45361/1)により算出されるラウドネスレベルの 5 パーセンタイル値である N_5 と、ISO 1996-1 のエネルギー平均の手法をラウドネスレベルに適用した LL_p を比較した。その結果、 LL_p は N_5 よりもラウドネスの印象と高い相関があることを示し、特に、パーセンタイル値を超えるラウドネスレベルが広範囲にわたる場合や、ラウドネス分布がパーセンタイル値を境に非常に急勾配になる場合に、 N_5 での評価が適さない可能性があると考えしている。ラウドネスのエネルギー平均値である LL_p と心理評価の対応が良いことを考慮すると、Preis らが提案するラウドネスの総エネルギー積分値にあたる SEN [18]についても心理評価と対応が良いと推測される。

以上のように、ラウドネスと衝撃音の心理評価の対応が良いことは多くの研究より明

らかである。しかしながら、1.2.1 で述べたように、床衝撃音遮断性能を「音響の実務者であれば誰もが容易に測定・分析・評価可能」な指標で評価する場合に、その指標としてラウドネスは不向きと言わざるを得ない。佐藤ら[21]が検討した A 特性音圧レベルの最大値 L_{AFmax} と Zwicker ラウドネスの関係のように、容易に測定・分析可能な物理量と心理量の対応関係について、より心理評価の予測精度が高い実務上の適用可能性が期待される方法の提案が求められる。

1.2.4 音の周波数特性と心理評価

森本ら [23]は、200 Hz 以下の低周波数成分を含む場合、両耳間相互相関度 (IACC) が一定でも空間の広がり感の心理評価が大きくなることを示した。また、森本ら [24]は、ノイズに含まれる周波数成分と見かけの音源の幅 ASW の関係を検討し、側方反射音に 300 Hz 以下の低周波数成分を含む場合に ASW の心理評価が増大することを報告している。この報告では、100 Hz から 8000 Hz のピンクノイズを帯域制限したものを用いており、試験音が床衝撃音ではないものの、低周波数成分が心理評価に影響することを示唆する結果と言える。

米村ら [25]は、40 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz の純音成分を含むノイズのわずらわしさについて検討し、同レベルの広帯域ノイズのみの場合よりも、広帯域ノイズに純音成分を含む方がわずらわしさは高くなり、純音の周波数が高い方がわずらわしさの増分が大きくなることを報告している。

Jongkan ら [26][27]は、重量床衝撃音の周波数特性がアノイアンスに及ぼす影響を一对比較法により検討し、500 Hz 以上を遮断するにアノイアンスが低減することを報告している。

このように、床衝撃音に限定しなければ、低周波数成分を含む音の心理評価については様々な検討がされており、オクターブバンド中心周波数で 63Hz, 125 Hz, 250 Hz 帯域に低周波数成分を含む場合と含まない場合では心理評価に違いがあると推測される。

1.2.5 聴取者の生理量に対する心理実験の影響

音の心理評価の分野では、刺激と聴取者の生理量の関係について、特に刺激が生理量に及ぼす影響および心理評価と生理量の対応について議論されてきた。

前者については、K. D. Kryer [28]は講演の中で、音が聴覚系を刺激し、聴覚系が中枢神経系と自律神経系に連結することから、聴覚系（耳）からの信号が脳に送られると同時に自律神経系の交感神経を介して血管等に作用し、交感神経は内分泌系とも連携してホルモン分泌することに触れ、騒音に繰り返し暴露されるとストレスとなる一方で、暴露が繰り返されると心拍数の増加や血液成分の変化等の影響は起こらなくなることを指

第 1 章

摘し、音を聴取する際の生理量の変動は、音の物理的刺激に対する反射ではなく、心理的作用（予期しない音刺激を受けることによる心理作用）であるとしている。

後者については、辻村ら[29]は、精神作業時に聴覚刺激が入力されたときに生じる妨害感の発生要因の検討において、心理実験において呈示された聴覚刺激の判断・評価等の感覚情報処理の出力と実際の妨害感を切り分けるため、進行脳波に着目した検討を行っている。その結果、聴覚刺激によって作業への集中力が低下し、妨害感が大きく評価されるものの、聴覚刺激による影響で作業量が低下しない場合があると述べている。また、音の発生予測が可能である場合に、注意が刺激に向くことで作業への集中力が低下することも指摘している。

1.3 本研究の位置づけ

1.3.1 研究の目的

本研究の目的は、床衝撃音の物理特性と聴取者の心理評価および生理量の対応を明らかにし、既往の研究で心理評価と対応が良いとされる A 特性音圧レベルの最大値に対して、心理評価の予測精度をさらに向上させる補正方法を提案することである。なお、この補正方法は実務適用可能な方法とすることを想定し、心理量に基づく補正を行う物理量として一般的に実務で用いられる騒音計で測定・分析可能である A 特性音圧レベルの最大値を選定している。

既往の研究の問題として、心理評価実験が床衝撃音遮断性能の評価方法と結び付けられて行われていることが挙げられる。JIS の測定・評価手法では、床衝撃音を重量床衝撃音と軽量床衝撃音に分類し、実際には様々に異なる床衝撃音を 2 種類の標準衝撃源に代表させることによって、比較可能な床衝撃音遮断性能の評価を行うことを主眼としている。しかし、床衝撃音そのものの心理評価においてはこの分類は必須ではない。本研究では、重量および軽量床衝撃音といった分類によらず、床衝撃音の音圧レベル、周波数特性、時間変動特性をパラメータとして幅広く変化させた刺激を用いた聴取実験を行い、A 特性音圧レベルの最大値との対応を明らかにする。

また、佐藤ら [21]も指摘したように、心理評価は床衝撃音の物理的要因だけでなく、聴取時の行動やその室空間に対する期待度によって変わることが容易に想像されるが、このような聴取者側の要因まで統制した研究事例は少ない。また、床衝撃音の心理評価においてはアノイアンスのように非音響学的要因が影響することも想定される。本研究では、非音響学的な聴取者側の要因を統制することを想定し、リビングルームでの読書時を想定する場合の床衝撃音の心理評価を主たる研究対象とする。

本研究では A 特性音圧レベルの最大値の補正方法は心理評価に基づいて検討するが、心理評価を裏付ける客観的な指標として生理量の計測も試みる。生理量は種々のストレ

スの評価指標として用いられているが、床衝撃音に対するストレスの評価に用いられた例は見当たらない。また、心理実験における音の聴取・評価といったイベントが生理量や床衝撃音の評価と対応するか否かをもとに、生理量による床衝撃音評価の可能性検討も研究目的の1つとする。

1.3.2 論文の構成

本論文は、本章を含め5章で構成される。

第2章で述べる実験の概要を Table 1.3 に示す。第2章の2.1（実験1）では、床衝撃音の周波数特性とレベルについて心理評価への影響を明らかにすることを目的とし、同一の床衝撃音を周波数変調したオクターブバンド毎のレベルのピークが異なる床衝撃音を刺激として、「気になる」程度を評価する実験を行う。2.2（実験2）では、床衝撃音の「気になる」程度における大きさ感の影響を明らかにすることを目的とし、実生活で生じると想定する床衝撃音を刺激として、床衝撃音の大きさを評価する実験を行う。2.3（実験3）では、床衝撃音の時間変動特性について心理評価への影響を明らかにすることを目的とし、同一の床衝撃音の継続時間を調整することにより時間変動特性を変化させた床衝撃音を刺激として、「気になる」程度を評価する実験を行う。

なお、本検討では、リビングルームでの読書時を想定する場合の床衝撃音の評価を対象とするため、床衝撃音が「気になる」と評価される場合には床衝撃音が読書を妨害しているとも言え、1.2.2 で述べたアノイアンスに関連する評価語を採用する可能性も考えられる。しかし、実生活で床衝撃音を聴取する場合、リビングルーム等で何も行為をせずに寛いでいるときに床衝撃音を聴取し、音に注意が向くということも考えられる。このような場面を想定するとき、評価語が妨害感と対応させると、「何も行為をしない状態を妨害する」か否かを評価するという矛盾が生じるため、床衝撃音の聴取が想定される実生活の状態を包括的に評価できると考えられる、床衝撃音が「気になる」程度を評価語として用いることとした。

Table 1.3 Summaries of experiments performed in the present study.

節	実験	実験のパラメータ		
		周波数特性	音圧レベル	時間変動特性
2.1	1	10 種類	2 種類	なし
2.2	2	11 種類	1 種類	なし
2.3	3	2 種類	2 種類	6 種類

第 1 章

第 3 章では、床衝撃音の「気になる」程度の心理評価と対応が良くなるように、A特性音圧レベル最大値を補正する方法を検討する。3.1 では、本研究で提案する補正方法を概念的に提示する。まず、3.2 において、第 2 章の実験結果をもとに床衝撃音の心理評価と対応の良いラウドネス時間変動積分値 N_{int} を定義する。3.3 では、補正方法の詳細を検討する。3.3.1 では、特定の周波数においてレベルが大きい周波数特性の床衝撃音に適用可能な、周波数特性とレベルの大小に着目した補正方法を検討する。3.3.2 では、3.3.1 と同様に特定の周波数においてレベルが大きい周波数特性の床衝撃音に適用可能な、時間変動特性に着目した補正方法を検討する。3.3.3 では、実際の床衝撃音を含む多様な周波数特性および時間応答特性の床衝撃音を対象に、オクターブバンド毎の時間応答特性に着目し、適用可能な床衝撃音の範囲を広げた補正方法を検討する。3.4 では、実際の床衝撃音に対して 3.3 で検討した補正方法を適用する場合のフローを検討する。3.5 では、既往の床衝撃音遮断性能評価に用いる L 値の等級曲線に対して、「気になる」程度の心理評価との対応を向上させる方法を検討する。

第 4 章では、心理実験に参加する聴取者の実験中の生理量の変動を明らかにすることを目的として心理実験中の聴取者の脈拍数を計測し、刺激を聴取する際の聴取者の生理量と心理評価の関係、ならびに心理実験における刺激の聴取・評価が聴取者の生理量に影響するか否かについて検討する。

最後に、第 5 章では、本研究で得られた成果を総括する。

第2章 床衝撃音の心理評価

聴取者側の要因を統制するためにリビングで読書をしている状況を設定し、床衝撃音の気になる程度を評価する心理評価実験を行った。

床衝撃音の提示レベル、周波数特性および時間変動特性をパラメータとして変化させた刺激を、室中央に着座して読書している聴取者に提示し、床衝撃音の気になる程度を5段階で評価させた。

2.1 実験1：周波数特性とレベルに着目した検討

床衝撃音の評価において、床衝撃音のA特性音圧レベル最大値 (L_{AFmax}) のレベルの大小と床衝撃音遮断性能の決定周波数帯域が重要と考え、 L_{AFmax} のレベルの大小と、 L_{AFmax} に対する寄与度の大きい周波数帯域（以下、「 L_{AFmax} の決定帯域」と記す）をパラメータとし、床衝撃音の「気になる」程度について心理評価実験を行った。

2.1.1 実験方法

A. 聴取者

正常な聴力を有する若齢者7名とした。

B. 実験装置

実験は無響室で行った。実験装置の模式図を Figure 2.1 に示す。中・高音域用スピーカ (DENSO TEN, ECLIPSE TD307MK2) を聴取者の頭上に、低音域用スピーカ (DENSO TEN, ECLIPSE TD316SWMK2) を聴取者の背後に設置し、刺激を提示した。低音域用スピーカで出力させた周波数範囲は、30 Hz～200 Hz であり、中・高音域用スピーカとのクロスオーバー周波数は 120 Hz とした。なお、低周波数成分の音の方向感は両耳間時間差により得られる[30] ため、音源から両耳に到達する時間が等しければ方向感は生じないと考え、低音域用スピーカは聴取者の両耳からの距離が等しく、聴取者から見えない聴取者の背後に設置することとした。受聴位置において、中・高音域用と低音域用の両スピーカから同時に提示する際の応答特性を確認したところ、クロスオーバー周波数での提示レベル落ち込みや、室モードの影響等はなかった。また、受聴点にあたる聴取者の頭部中心と各スピーカの距離を考慮し、受聴点において各スピーカからの信号の時間遅れを補正して提示した。聴感上も2つのスピーカからの音が分離せず、上方から一体化して聞こえた。

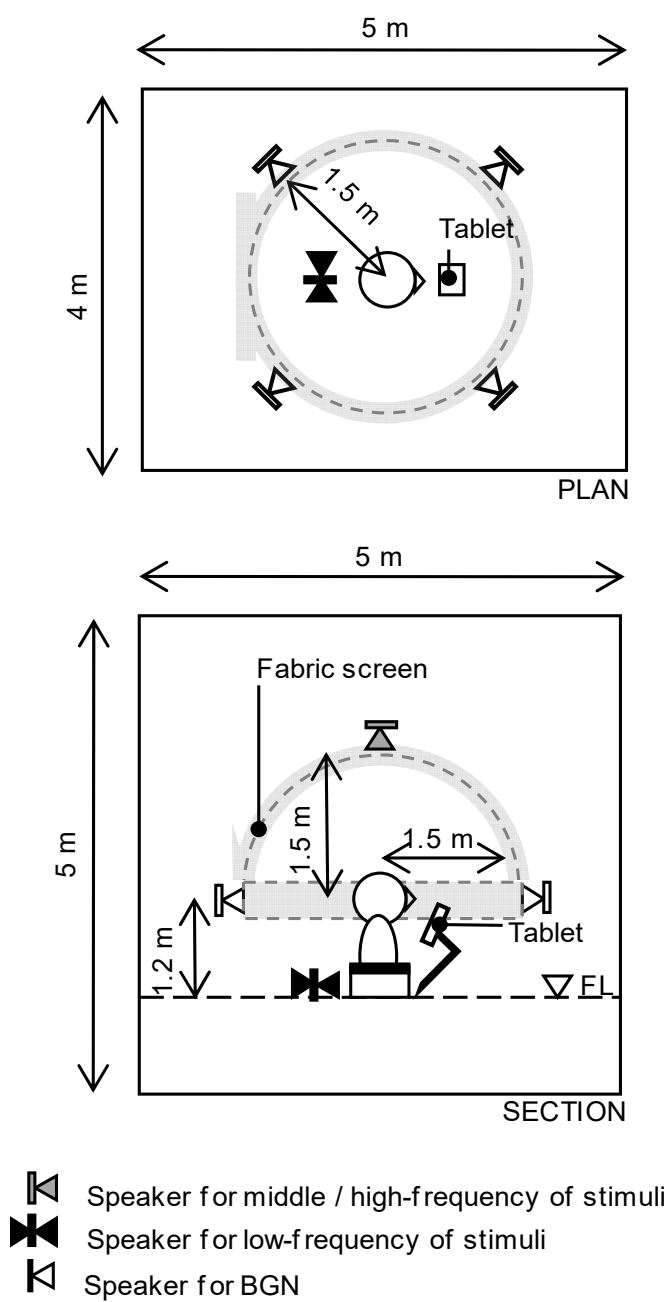


Figure 2.1 Schematic diagram of experimental apparatus

第 2 章

C. 実験音場

暗騒音として、空調騒音を模擬した Hoth ノイズ[31]を用いた。互いに無相関な 4 つの Hoth ノイズを、聴取者の正面を 0° として $\pm 45^\circ$ と $\pm 135^\circ$ に配置した 4 つのスピーカーからそれぞれ提示した。提示レベルは、聴取者の頭部中心の位置において等価騒音レベルで 30 dB とした。暗騒音は実験開始から終了まで連続して提示した。

D. 刺激

L_{AFmax} のレベルの大小と、寄与度の大きい周波数帯域（以下、「 L_{AFmax} の決定帯域」と記す）をパラメータとする計 10 種類の刺激を作成した。以下では 1/1 オクターブ幅を帯域幅の単位とする。

すべての刺激は同一の床衝撃音 A から作成した。刺激のもととした床衝撃音 A の周波数特性を Figure 2.2 に示す。この床衝撃音は、インパクトハンマーで上階躯体床（厚さ 160 mm の軽量コンクリートスラブ）を加振し、下階での発生音を収録したものであり、広帯域の周波数成分を持つ。この床衝撃音の周波数成分について、位相特性を変えずに振幅特性のみを増減することにより各刺激を作成した。なお、同一の床衝撃音を周波数変調することにより、周波数特性がさまざまな刺激を作成するため、床衝撃音の収録にあたってはできる限り広帯域かつ平坦な周波数特性の床衝撃音を収録する必要があるため、加振源にインパクトハンマーを用いた。また、収録を行った下室は壁がボード下地、天井および床がコンクリート躯体であり、天井による低周波数帯域の増幅や高音域の低減が少ない条件を選定した。

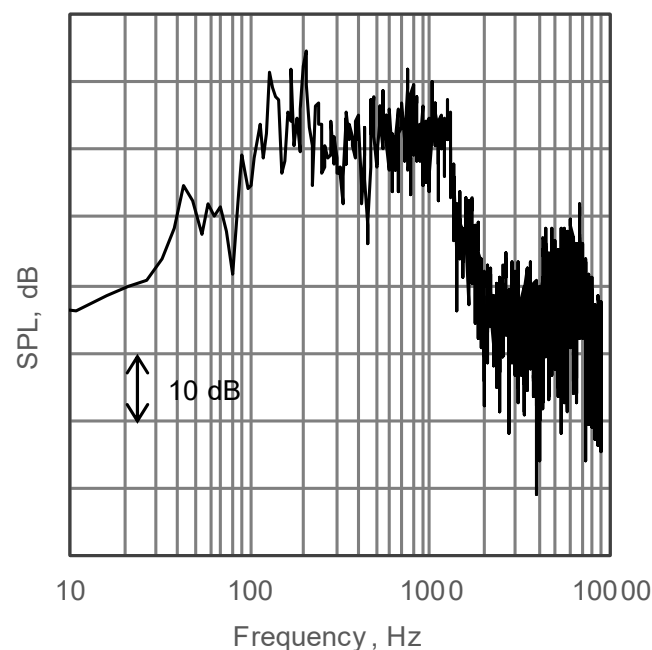


Figure 2.2 Frequency characteristic of the original floor impact sound A used to generate stimuli.

なお、床衝撃音の心理評価実験において、しばしば子どもの飛び降りや歩行時の床衝撃音を対象としたそっくり音源[32][33]が検討される。本研究では特定の行為等により生じる床衝撃音に限定しない、適用範囲の広い一般化した評価・補正方法を検討したいため、同一の広帯域の周波数特性を持つ床衝撃音を変化させ、実際の床衝撃音の物理特性と、実験に用いた刺激の物理パラメータを対応させることで、実際の床衝撃音の評価や心理評価との対応を高める補正を行うことを想定した。

また、下室での床衝撃音について、時間重み付け特性が Fast の場合の A 特性音圧レベルの瞬時値の時間変動を Figure 2.3 に示す。インパクトハンマーの結果は前述の刺激のもととした床衝撃音である。比較のために、同図に、ゴルフボールおよび JIS[2]の標準衝撃源のボールとタイヤ（バングマシン）の場合の結果を示す。これらの3つの衝撃源の場合は、インパクトハンマーの場合と異なる建築で収録したが、床スラブの構造と下室の条件は一般的な集合住宅の居室を模擬したものである。4種類の衝撃源を比較すると、床衝撃音の継続時間はいずれも 1.4 s 程度であり、本報で刺激の作成に用いた床衝撃音は、一般的な床衝撃音の時間減衰特性とやや乖離はあるもの、類似の特性であることを確認した。床衝撃音のレベル減衰に着目すると、ボールおよびバングマシンの方が、ゴルフボールよりも減衰の傾きが緩やかである。一般的に、ボールおよびバングマシンによる床衝撃音は JIS[2]の重量床衝撃音に分類され、低周波数が卓越する周波数特性をもつ。床衝撃音に低周波数成分を多く含む場合に減衰の傾きが緩やかであるという特徴は、ピークに近い値がある程度の時間において持続されることを意味し、床衝撃音の周波数特性が聴感印象に影響する可能性を示唆している。

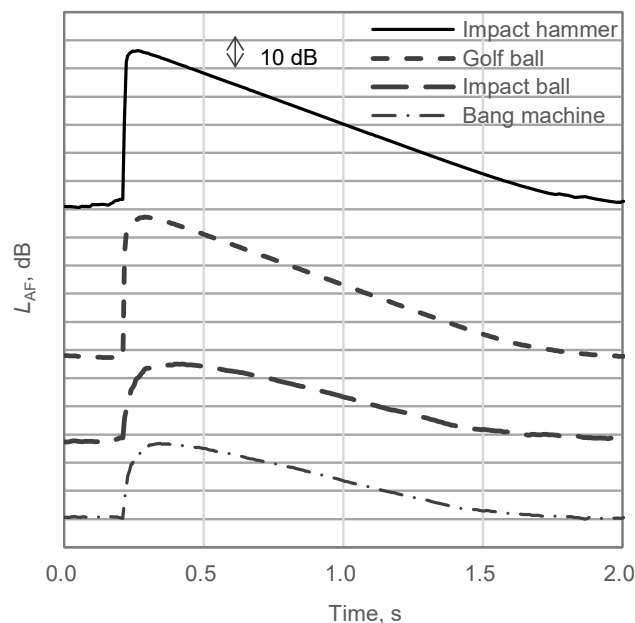


Figure 2.3 Time sequences of L_{AF} (instantaneous sound pressure level with A frequency-weighting and Fast time-weighting) for representative floor impact sounds

第2章

刺激のオクターブバンドごとの L_{AFmax} を Figure 2.4 および Figure 2.5 に示す。Figure 2.4 に示す刺激 No. 1 から No. 6 の周波数特性は比較的狭帯域であり、 L_{AFmax} の決定帯域はオクターブバンドで 1 から 2 帯域である。Figure 2.5 に示す刺激 No. 7 から No. 10 の周波数特性は比較的広帯域であり、 L_{AFmax} の決定帯域はオクターブバンドで 2 から 3 帯域である。No. 1 から No. 3 は比較的低周波数帯域が卓越する周波数特性であり、仕上げ床の固有値の影響が出やすい乾式二重床仕上やスラブの一次固有周波数の特徴が強く表れやすい鉄筋コンクリート造のスラブに対して、重量物を落下させたり歩行したりする場合を想定する。No. 4 から No.6 および No. 9 と No. 10 は、比較的中高音域を多く含む周波数特性であり、防振対策の施されていない石やタイル、フローリング仕上等に対して、軽量物を落下させたり底の硬い靴で歩行したりする場合を想定する。また、No. 7 と No. 8 は比較的広帯域かつ低周波数成分を含む周波数特性であり、軽量床衝撃音対策品による防振対策が施されている石やタイル、フローリング仕上等に対して、軽量物を落下させたり底の硬い靴で歩行したりする場合を想定する。

提示レベルは、聴取者の頭部中心の位置において L_{AFmax} で 40 dB、50 dB の 2 種類である。集合住宅における床衝撃音遮断性能の目標水準は事業者等により異なるが、JIS の評価で重量床衝撃音遮断性能が $L_{i,Fmax,rH(1)}-55$ 、軽量床衝撃音遮断性能が $L_{i,r,L}-45$ とされることが多い。これは、日本建築学会の設計指針[4]において、重量床衝撃源に対する 2 級、軽量衝撃源に対する 1 級に相当する。この性能の場合の L_{AFmax} の値は 45 dB から 55 dB 程度[15][16]となることから、代表値として L_{AFmax} が 50 dB を設定し、さらに比較のために 40 dB を設定した。本報で用いた床衝撃音は JIS[1][2]の標準衝撃源によるものではないが、各刺激に対して JIS[3]の評価曲線を適用すると L-40~55 に相当する。

実験条件は Table 2.1 に示す全 24 条件である。聴取者は条件 1-9、1-15 および 1-24 以外の条件では 1 条件につき 1 回評価し、実験全体で 7 回の回答を得た。条件 1-9 と 1-15 は 14 回（1 条件につき 2 回）、条件 1-24 は 35 回（1 条件につき 5 回）の回答を得た。

条件 1-1 から 1-15 は、衝撃音を 1 回のみ提示する条件であり、 L_{AFmax} が 50 dB のとき、Figure 2.4 および Figure 2.5 で示した刺激 No.1 から No. 10 の 10 条件、 L_{AFmax} が 40 dB のとき、刺激 No. 1, 3, 5, 7, 9 の 5 条件である。条件 1-16 から 1-23 は同一刺激を 3 回提示する条件であり、 L_{AFmax} が 50 dB、40 dB とともに、刺激 No. 1, 3, 5, 7 の 4 条件である。なお、実験は単発提示と複数回提示の条件を分離せずに、すべての条件をランダムな順序で提示した。なお、同一刺激を 3 回提示する場合については、3 つの床衝撃音の提示が 1 つのイベントとして認識されるように 3 つの床衝撃音の提示間隔を設定した。

なお、条件 1-24 は暗騒音のみを提示する条件である。

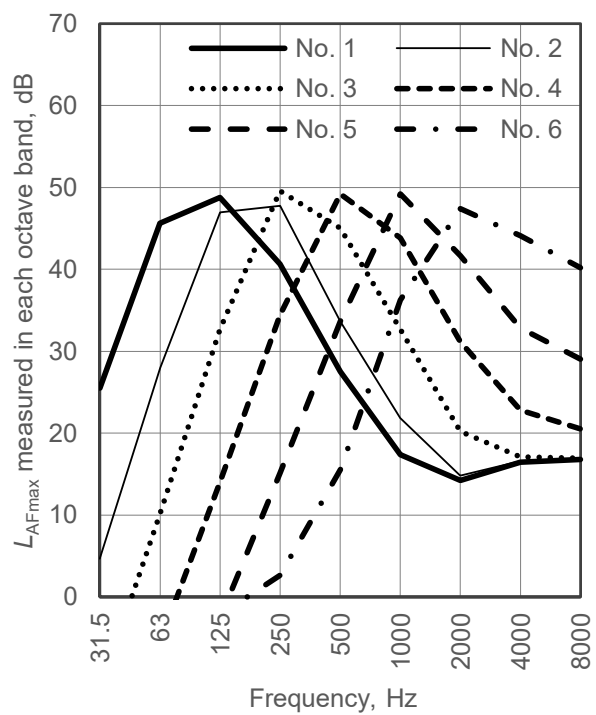


Figure 2.4 Frequency characteristics of impact sounds No. 1 to No. 6.

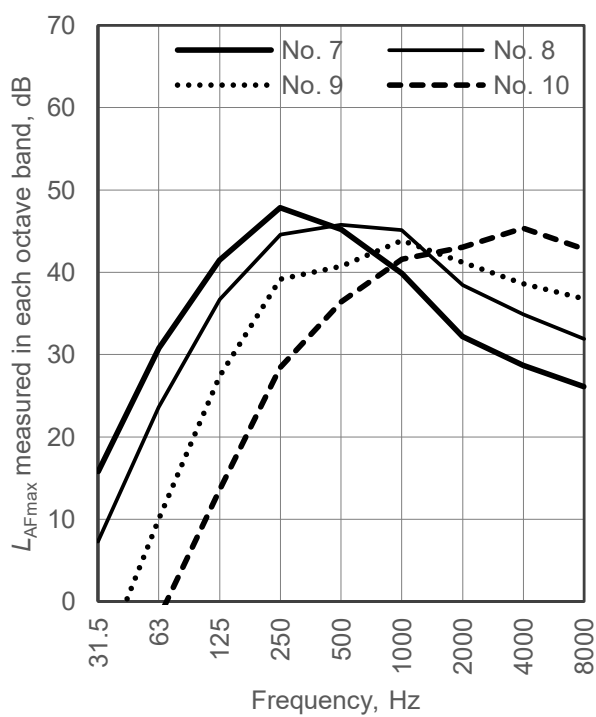


Figure 2.5 Frequency characteristics of impact sounds No. 7 to No. 10.

Table 2.1 Experimental conditions of the experiment 1

Case	Impact sound	L_{AFmax} dB	Number of stimuli	Trials for each listener
1-1	No. 1	50	Single	1
1-2	No. 2	50	Single	1
1-3	No. 3	50	Single	1
1-4	No. 4	50	Single	1
1-5	No. 5	50	Single	1
1-6	No. 6	50	Single	1
1-7	No. 7	50	Single	1
1-8	No. 8	50	Single	1
1-9	No. 9	50	Single	2
1-10	No. 10	50	Single	1
1-11	No. 1	40	Single	1
1-12	No. 3	40	Single	1
1-13	No. 5	40	Single	1
1-14	No. 7	40	Single	1
1-15	No. 9	40	Single	2
1-16	No. 1	50	Multiple	1
1-17	No. 3	50	Multiple	1
1-18	No. 5	50	Multiple	1
1-19	No. 7	50	Multiple	1
1-20	No. 1	40	Multiple	1
1-21	No. 3	40	Multiple	1
1-22	No. 5	40	Multiple	1
1-23	No. 7	40	Multiple	1
1-24	Background noise only			5

E. 実験手順

実験フローを Figure 2.6 に示す。実験者は、最初の実験の前のみ各聴取者の安静時脈拍を血圧計（OMRON, HEM-7511T）で計測する。聴取者は、実験室入室前に上腕に光学式脈拍センサー（Polar, OH1）を装着し、実験室中央の椅子に着座する。実験者は聴取者の脈拍が安静時脈拍に落ち着いたことを確認したのち、実験を開始する。実験を開始すると、タブレット端末の画面で読書が可能になる。読書に集中するために必要な一定時間が経過した後、床衝撃音を模擬した刺激が提示され、しばらくしてタブレット端末の画面が読書画面から回答画面に切り替わる。なお、回答と読書用のタブレット端末は兼用し、タブレット端末をスタンドに載せて固定することで聴取者の頭部の動きをある程度抑制し、頭部中心位置での提示レベルが保てるように配慮した。

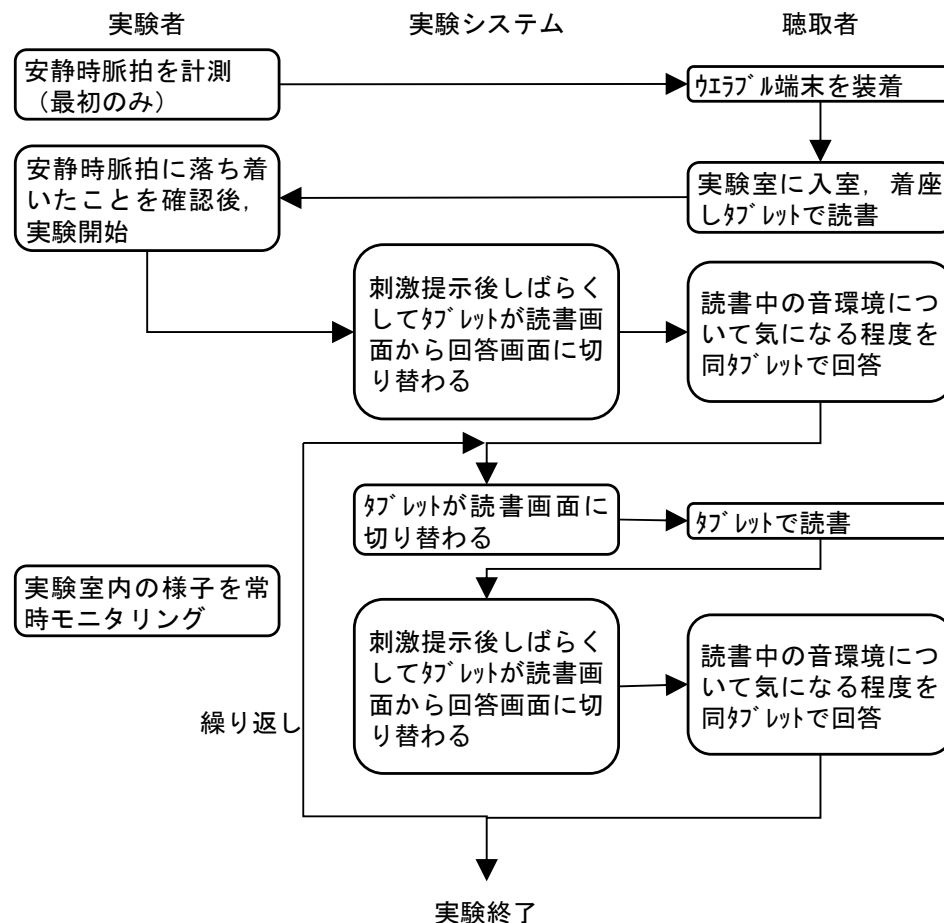


Figure 2.6 Experimental flowchart.

F. 聴取者のタスク

聴取者のタスクと刺激提示の時系列を Figure 2.7 に示す。

聴取者は、読書中の「室内の音環境」を Table 2.2 に示す 5 段階で評価する。その後、タブレット端末の画面が読書画面に切り替わり、聴取者は読書と回答を繰り返す。なお、聴取者は、前回の回答が終了してから（初回は実験開始から）次の回答画面が表示されるまでの間の音環境を評価した。

なお、実験前に聴取者に教示文を提示し、マンション・アパート等の集合住宅に居住し、上下・左右の住戸に住人がいることを前提として、リビングで読書している条件を想定させた。

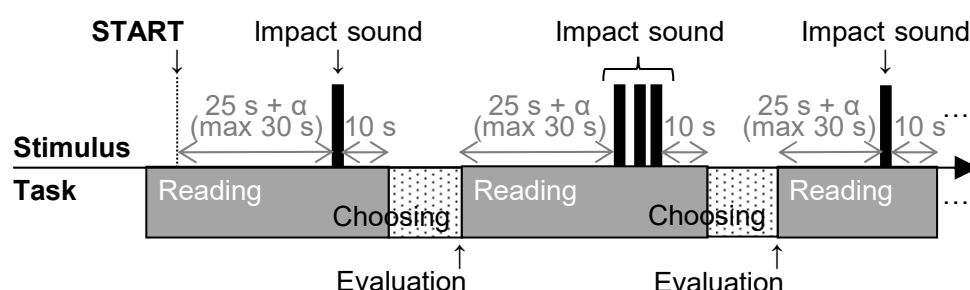


Figure 2.7 Time sequence of listener's task and stimulus presentation.

Table 2.2 Evaluation categories

1. 全く気にならない (not distracting at all)
2. あまり気にならない (not too distracting)
3. 多少気になる (a little distracting)
4. だいぶ気になる (quite distracting)
5. 非常に気になる (extremely distracting)

2.1.2 結果と考察

単発提示の条件における気になる程度の評価を Figure 2.8 に示す。ここでは 5 段階評価の各カテゴリ間の心理的距離が等しいと仮定し、全聴取者の評価の平均値を各条件における評価とする。本稿では全聴取者の評価が正規分布すると仮定して統計的検定を行う。以降の検定では全て有意水準を 5% とする。また、効果量は Choen's の d により確認した。なお、サンプル数が異なる刺激の検定にあたり、F 検定により等分散と仮定できることを確認している。

聴取者の評価の信頼性の確認のため、刺激 No. 9 は L_{AFmax} が 40 dB, 50 dB とともに聴取者 1 人につき 2 回評価させた。Figure 2.9 に刺激 No. 9 における聴取者ごとの評価結果を示す。 L_{AFmax} が 40 dB, 50 dB いずれの場合においても、1 回目と 2 回目が同じ評価となった聴取者は約半数であり、異なる場合でもその差は最大で 1 カテゴリである。各回の評価に統計的に有意な差があるか確認するため t 検定を行った。その結果、1 回目と 2 回目の評価について、 L_{AFmax} が 40 dB の場合には両側検定 : $t(6) = 0.55, p = 0.604, d = 0.24$, L_{AFmax} が 50 dB の場合には両側検定 : $t(6) = 0.55, p = 0.604, d = 0.29$ となり、統計的に有意差は認められなかった。以上から、各聴取者の評価は安定しており、信頼性における結果であると言える。

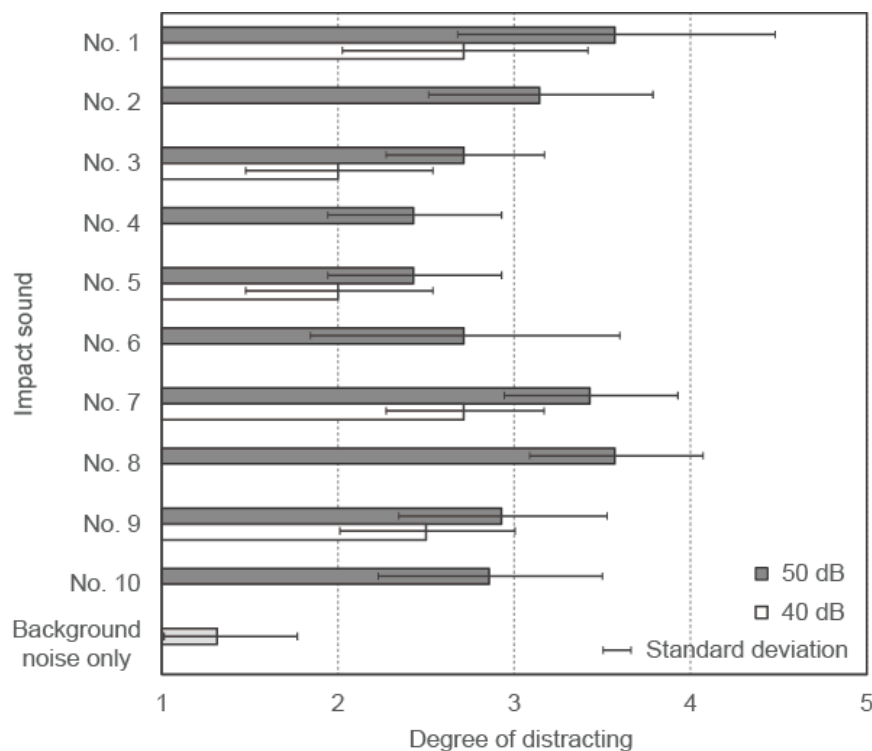


Figure 2.8 Averaged degree of distracting for each stimulus of experiment 1. Error bars show the standard deviation.

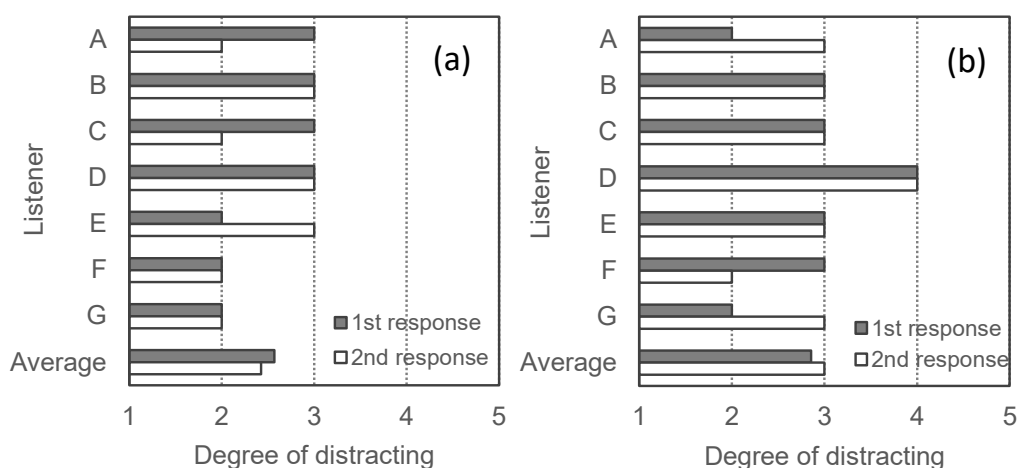


Figure 2.9 Degree of distracting for each listener: (a) L_{AFmax} 40 dB, (b) L_{AFmax} 50 dB.

周波数特性の影響

L_{AFmax} が 50 dB の結果について刺激の周波数特性に着目する。Figure 2.8 に示すように、刺激 No. 1, No. 2, No. 7, No. 8 において、評価 3 以上であり、「気になる」と評価された。これらの刺激は、63 Hz と 125 Hz 帯域を含む周波数特性であり、床衝撃音の周波数特性によって、「気になる」程度の評価に異なる傾向が見られた。この結果が統計的に有意であるか確認するため、周波数特性が比較的狭帯域であり 63 Hz と 125 Hz 帯域を含む刺激 No. 1, No. 2 と、63 Hz と 125 Hz 帯域を含まない刺激 No. 5 の評価について t 検定を行った。その結果、刺激 No. 1 と刺激 No. 2 は両側検定: $t(6)=1.16, p=0.289, d=0.55$ となり、統計的に有意な差は認められないが、刺激 No. 1 と刺激 No. 5 は両側検定: $t(6)=4.38, p=0.005, d=1.57$ 、刺激 No. 2 と刺激 No. 5 は両側検定: $t(6)=3.87, p=0.008, d=1.25$ となり、統計的に有意な差が認められた。同様に、周波数特性が比較的広帯域であり、63~125 Hz 帯域を含む刺激 No. 7, No. 8 と、 L_{AFmax} に対する 63 Hz と 125 Hz 帯域の寄与度が小さい刺激 No. 10 の評価について t 検定を行った。その結果、刺激 No. 7 と刺激 No. 8 は両側検定: $t(6)=0.55, p=0.604, d=0.29$ 、刺激 No. 7 と刺激 No. 10 は両側検定: $t(6)=1.92, p=0.103, d=1.00$ となり、統計的に有意な差は認められないが、刺激 No. 8 と刺激 No. 10 は両側検定: $t(6)=2.50, p=0.047, d=1.25$ となり、統計的に有意な差が認められた。以上から、特に周波数特性が比較的狭帯域の床衝撃音において、63 Hz と 125 Hz 帯域の低周波数成分を含む方が「気になる」と評価する傾向が示された。

Jongkan ら[26][27]は、重量床衝撃音の周波数特性がアノイアンスに及ぼす影響を対比較法により検討し、500 Hz 以上を遮断する場合にアノイアンスが低減することを示している。Jongkan らの結果と本稿の結果は対応しないが、これは実験に用いられた刺激の範囲が異なるためだと考えられる。Jongkan らは重量床衝撃音を対象としており、本稿で用いたような低音域成分が弱い床衝撃音との比較は検証されていない。

提示レベルの影響

L_{AFmax} が 40 dB と 50 dB の評価を比較すると、対象としたすべての刺激において提示レベルが大きいくほど「気になる」程度が大きいく傾向がみられた。 L_{AFmax} が 40 dB の条件では、対象としたすべての刺激において評価 3 未満であり「気にならない」と評価された。この結果が統計的に有意であるか確認するため、各刺激の L_{AFmax} が 40 dB と 50 dB の評価について t 検定を行った。刺激 No. 1 は両側検定： $t(6)=2.52, p=0.045, d=1.06$ 、刺激 No. 3 は両側検定： $t(6)=2.50, p=0.047, d=1.44$ 、刺激 No. 7 は両側検定： $t(6)=2.50, p=0.047, d=1.51$ 、刺激 No. 9 は両側検定： $t(13)=2.48, p=0.028, d=0.78$ となり、統計的に有意な差が認められたが、刺激 No. 5 は両側検定： $t(6)=2.12, p=0.078, d=0.83$ となり、統計的に有意な差は認められなかった。

以上のように、特に低周波数成分を含まない床衝撃音において、 L_{AFmax} の値が 40 dB と 50 dB と異なる場合であっても「気になる」程度に統計的な有意差が見られないことから、 L_{AFmax} は必ずしも「気になる」尺度に対応できていないことが示唆される。

提示回数の影響

単発提示と複数回提示の評価を比較した結果を Figure 2.10 に示す。いずれの提示レベルにおいても、「気になる」と評価する傾向が大きかったのは、単発提示よりも複数回提示であった。また、刺激の種類に着目すると、単発提示では「気にならない」と評価された L_{AFmax} が 40 dB の条件のうち、63 Hz と 125 Hz 帯域を含む周波数特性である刺激 No. 1, No. 7 については複数回提示の場合は評価 3 以上となり「気になる」と評価された。

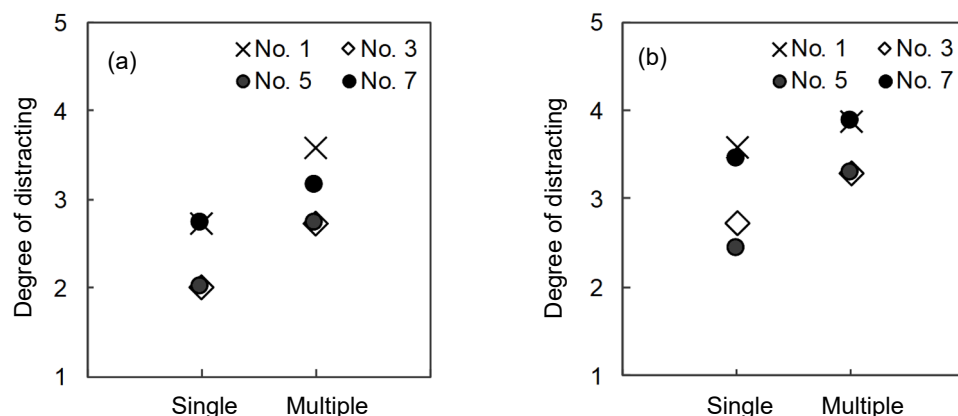


Figure 2.10 Degree of distracting for each number of stimuli. “Single” means one stimulus present. “Multiple” means that the same floor impact sound is present three times.: (a) L_{AFmax} 40 dB, (b) L_{AFmax} 50 dB.

第2章

2.1.3 まとめ

床衝撃音について、既往の重量・軽量という分類ではなく、ピーク周波数をパラメータとしてモデル化した床衝撃音を用いて聴感実験を行い、心理評価と L_{AFmax} が対応するかを検討した。その結果、 L_{AFmax} が等しい値であっても、床衝撃音の周波数成分に 63 Hz から 125 Hz 帯域を含む場合、「気になる」と評価されることを示した。心理評価と L_{AFmax} の対応が良くなるように L_{AFmax} を補正する場合に、 L_{AFmax} の周波数特性が補正のパラメータとなるとなる可能性を示した。

また、 L_{AFmax} の値が 40 dB と 50 dB と異なる場合であっても「気になる」程度に統計的な有意差が見られない場合があり、 L_{AFmax} は必ずしも「気になる」尺度に対応できていないことを示唆する結果を得た。

なお、同一の1つのイベントとして認識されるように床衝撃音を連続して提示する場合の方が、1回だけ提示する場合よりも「気になる」と評価されることを示した。

2.2 実験 2：大きさ感に着目した検討

L_{AFmax} の補正に用いるパラメータの検討を目的とし、刺激の対象を実際の衝撃源による床衝撃音（実床衝撃音）に広げた。実床衝撃音は、実生活での聴取経験等の聴取者側の要因によって「気になる」程度の個人差が大きくなることが予想される。そこで、個人差を小さくするために「気になる」程度を構成する基礎的な要素と考えられる「音の大きさ」に着目し、聴取者の評価を単純化して検討する。

2.2.1 実験方法

刺激はヘッドホンから提示し、実験は静かな室内で行った。聴取者は正常な聴力を有する若齢者 9 名である。実建物の各種床構造における実床衝撃音を刺激とし、2 つの床衝撃音の大きさが等しくなるように聴取者に調整させた。Table 2.3 に示す 11 種類の刺激を用いた。各刺激の床構造と衝撃源を表 1 に併せて示す。No. 1, 3, 4, 7, 8 は 2.1（実験 1）で用いた刺激であり、No. 25 から No. 30 は実建物の各種床構造を実際の衝撃源で加振して収録した刺激である。

各刺激の L_{AFmax} が 50 dB の場合におけるオクターブバンド毎の A 特性音圧レベル最大値を Figure 2.11 に示す。刺激の周波数特性を考慮し、Table 2.4 に示す、18 個の基準刺激と比較刺激からなる刺激対を作成した。聴取者は、 L_{AFmax} が 50 dB の基準刺激と同じ大きさに感じるように比較刺激の音圧レベルを調整した。実験は 9 名の聴取者について 3 試行とし、27 回答を平均して基準刺激と同じ大きさに感じる比較刺激の L_{AFmax} の値を得た。

Table 2.3 Condition of floor impact sounds of experiment 2.

No.	Impact source	Upstairs		Lower level	
		Floor finish	floor slab thickness, mm	Ceiling	Wall finish
1, 3, 4, 7, 8	Impact hammer	Concrete	160 lightweight concrete	No	Gypsum board
25	Walking in heels	Concrete	150	Yes	Gypsum board
26	Walking in slippers	Concrete	150	Yes	Gypsum board
27	Golf ball	Carpet	120	Yes	Wallpaper
28	Golf ball	Flooring	120	Yes	Wallpaper
29	Golf ball	Concrete	150	Yes	Gypsum board
30	Golf ball	Dry double floor	150	Yes	Gypsum board

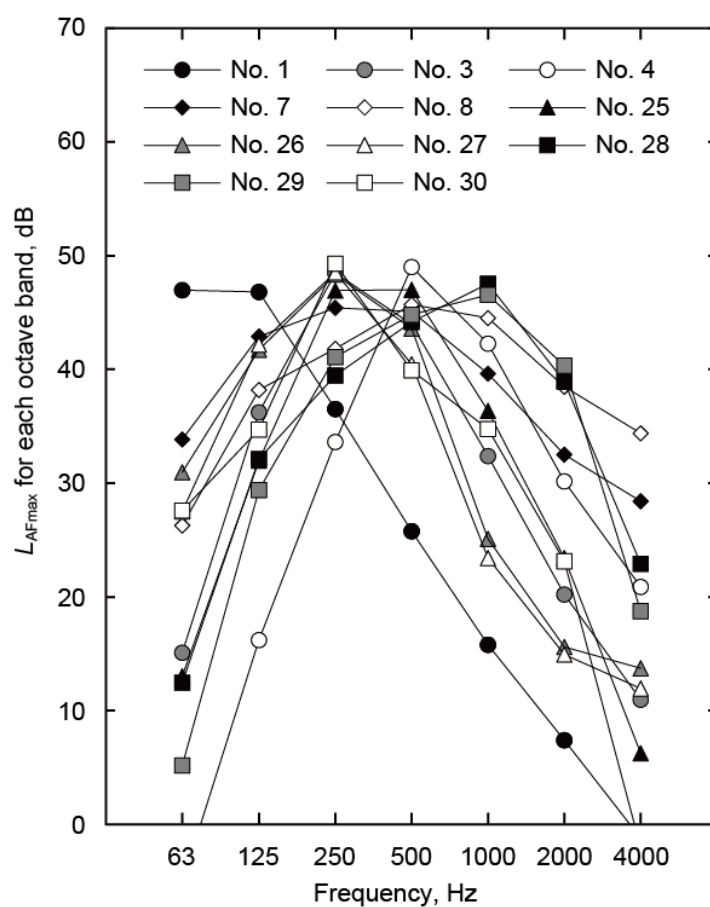


Figure 2.11 Frequency characteristics of impact sounds No. 1, 3, 4, 7, 8 and No. 25 to No. 30.

Table 2.4 Experimental conditions of the experiment 2.

Pair	Reference stimuli	Comparative stimuli
1	No. 3	No. 25
2	No. 8	No. 25
3	No. 7	No. 26
4	No. 8	No. 26
5	No. 7	No. 27
6	No. 8	No. 27
7	No. 3	No. 28
8	No. 7	No. 29
9	No. 1	No. 29
10	No. 4	No. 29
11	No. 7	No. 30
12	No. 3	No. 30
13	No. 1	No. 7
14	No. 1	No. 4
15	No. 4	No. 7
16	No. 3	No. 7
17	No. 3	No. 8
18	No. 7	No. 8

第 2 章

2.2.2 結果と考察

同じ大きさに感じる場合の、基準刺激と比較刺激の関係 Figure 2.12 に示す。基準刺激はすべて L_{AFmax} が 50 dB としたが、同じ大きさに感じる比較刺激の L_{AFmax} の値は 45 dB から 55 dB の範囲でばらついた。同じ大きさに感じる場合の基準刺激と比較刺激の L_{AFmax} の差（差 A）が大きいほど、 L_{AFmax} を補正しなければ床衝撃音の大きさを評価できないことになる。

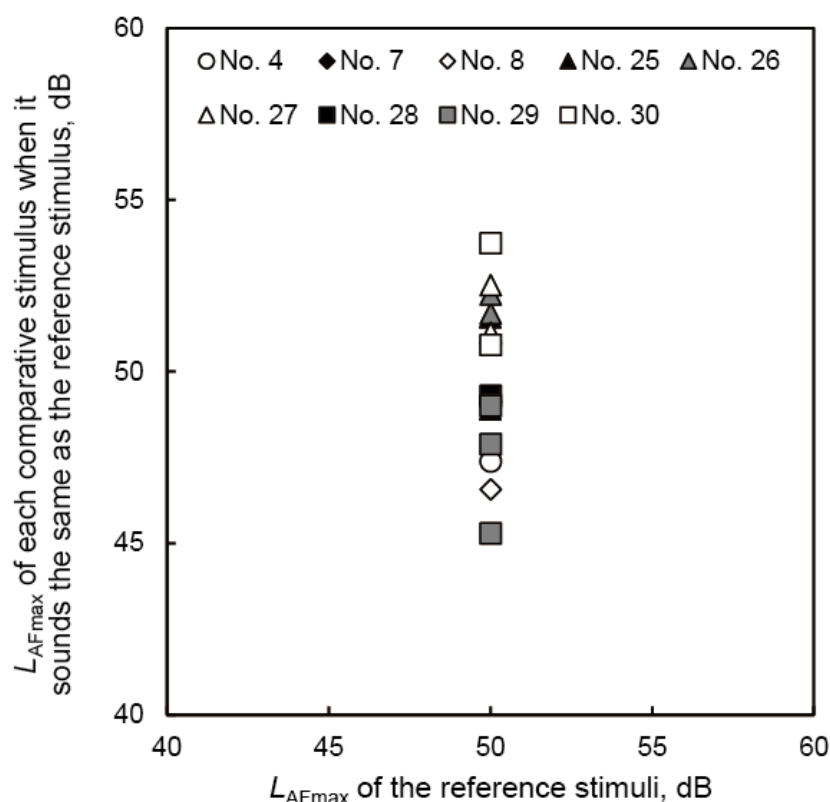


Figure 2.12 L_{AFmax} of reference stimulus and comparison stimulus when feeling the same loudness of sound.

周波数特性の影響

ここで、心理評価の重みづけを考慮した床衝撃音の A 特性音圧レベル最大値の補正のパラメータとして周波数特性の違いに着目し、Figure 2.12 に示した L_{AFmax} が 50dB の場合のオクターブバンド毎の A 特性音圧レベル最大値の差（差 B）を用いることを考える。横軸に差 B、縦軸に差 A をとった散布図を Figure 2.13 に示す。差 A と差 B はいずれも比較刺激のレベルから基準刺激のレベルを引いた値である。図中の直線は線形回帰直線で

ある。

中心周波数が 63 Hz から 500 Hz 帯域では、回帰直線で予測する場合の決定係数は 0.5 以下であった。一方、中心周波数が 1000 Hz 以上の帯域では、決定係数の値が 0.69～0.85 と比較的大きい。これらの周波数帯域における L_{AFmax} の差が、同じ大きさに感じる場合の L_{AFmax} の差に影響していると考えられる。また、中心周波数が 1000 Hz 以上の帯域では、オクターブバンド毎の L_{AFmax} の差が大きいほど、同じ大きさに感じる場合の L_{AFmax} の差は小さくなる負の相関がみられる。これは、この 1000 Hz 帯域以上の周波数成分を多く含む床衝撃音の方が、心理的に大きな音として感じることを意味する。

2.1（実験 1）では、 L_{AFmax} の決定帯域が 63～125 Hz 帯域の低音域の場合に「気になる」と評価される傾向があった。実験 2 では、1000 Hz 帯域以上の高音域を含む場合に「音の大きさ」が大きく感じる傾向があった。つまり、床衝撃音の心理評価は、63～125 Hz 帯域の低音域を多く含む場合に「気になる」が、1000 Hz 帯域以上の高音域を多く含む場合に「大きく聞こえる」ことになる。ただし、2.1（実験 2）により、同じ周波数特性の床衝撃音でも L_{AFmax} が大きい方が「気になる」傾向があることも明らかになっている。

以上を考慮すると、床衝撃音の「気になる程度」を L_{AFmax} で評価する場合に、 L_{AFmax} の決定帯域をパラメータとするだけでは、「気になる程度」の心理評価と L_{AFmax} の対応が良くなるように L_{AFmax} を補正することは出来ないと言える。

そこで周波数特性とレベルの大小以外の、床衝撃音の物理量の特徴を考慮して、心理評価と L_{AFmax} の対応が良くなるように別のパラメータを考慮する必要があると考えられる。

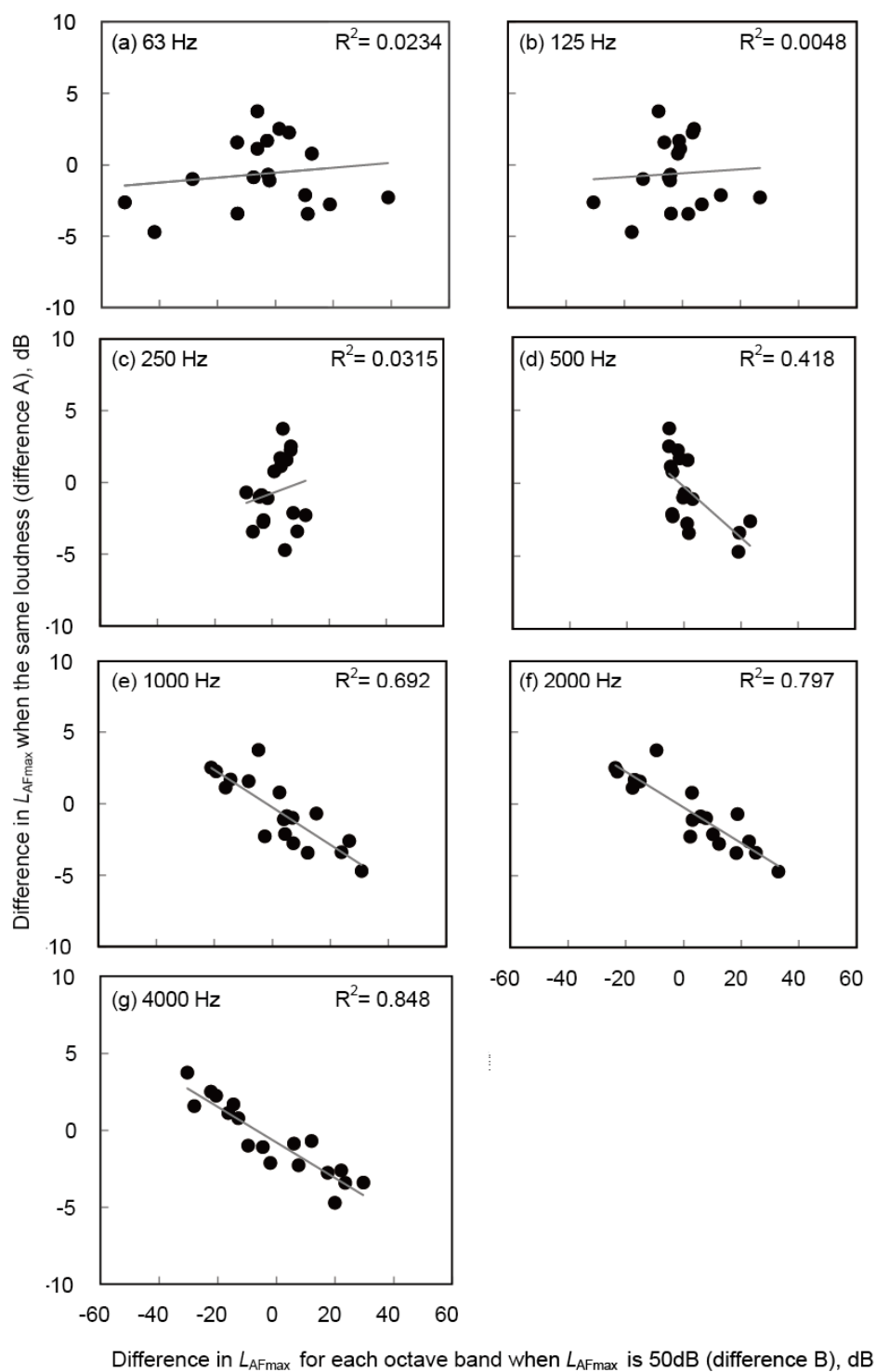


Figure 2.13 Relationship between difference of reference stimulus and comparison stimulus in L_{AFmax} and frequency characteristics when both same loudness: (a) is 63 Hz, (b) is 125Hz, (c) is 250 Hz, (d) is 500 Hz, (e) is 1000 Hz, (f) is 2000 Hz, (g) is 4000 Hz in octave band.

時間変動特性の影響

周波数特性とレベルの大小以外の、心理評価の重みづけを考慮した床衝撃音の L_{AFmax} を補正するためのパラメータの候補としては床衝撃音の時間変動特性が想定される。特に低音域の周波数成分を多く含む床衝撃音では、レベル減衰の傾きが緩やかという特徴がある。

床衝撃音の時間変動特性をあらわす物理量として L_{AFmax} のレベル減衰の傾きに着目し、床衝撃音の L_{AFmax} を 0.1 s ごとに分析する場合の L_{AFmax} のピーク値を取る時間区間を基準として、この区間より 0.1 s から 0.2 s 区間、0.2 s から 0.3 s 区間、0.3 s から 0.4 s 区間のレベル減衰の傾きを求めた。同じ大きさに感じる場合の、基準刺激と比較刺激の L_{AFmax} のピーク値からのレベル減衰の傾きの差（差 C）により、床衝撃音の時間変動特性と心理評価の関係を考察する。横軸に差 C、縦軸に差 A をとった散布図を Figure 2.14 に示す。差 A と差 B はいずれも比較刺激のレベルから基準刺激のレベルを引いた値である。図中の直線は線形回帰直線である。

減衰の傾きを分析したすべての時間区間において、差 C が大きいほど差 A が大きい。これは、差 C が負の値となりレベル減衰の傾きがより緩やかな場合において、差 A は小さくなり L_{AFmax} の値が小さくとも床衝撃音は大きく感じることを意味する。回帰直線で予測した場合の決定係数は、0.1 s から 0.2 s 区間で 0.3165、0.2 s から 0.3 s 区間で 0.2372、0.3 s から 0.4 s 区間で 0.1709 であり、床衝撃音の大きさ感と L_{AFmax} のレベル減衰の関係において、0.1 s から 0.2 s 区間のレベル減衰の傾きが最も決定係数の値が大きい。なお、プロットの分布の横軸方向の広がりに着目すると、0.1 s から 0.2 s 区間が最も広がり大きく、0.3 s から 0.4 s 区間が最も広がり小さく差 C が 0 に近い。心理評価の重みづけを考慮した床衝撃音の L_{AFmax} を補正するためのパラメータとして時間変動特性を用いる場合、心理評価と床衝撃音毎の差 C の分布の広がり大きい 0.1 s から 0.2 s 区間の L_{AFmax} のピーク値からのレベル減衰の傾きが、パラメータの候補として考えられる。

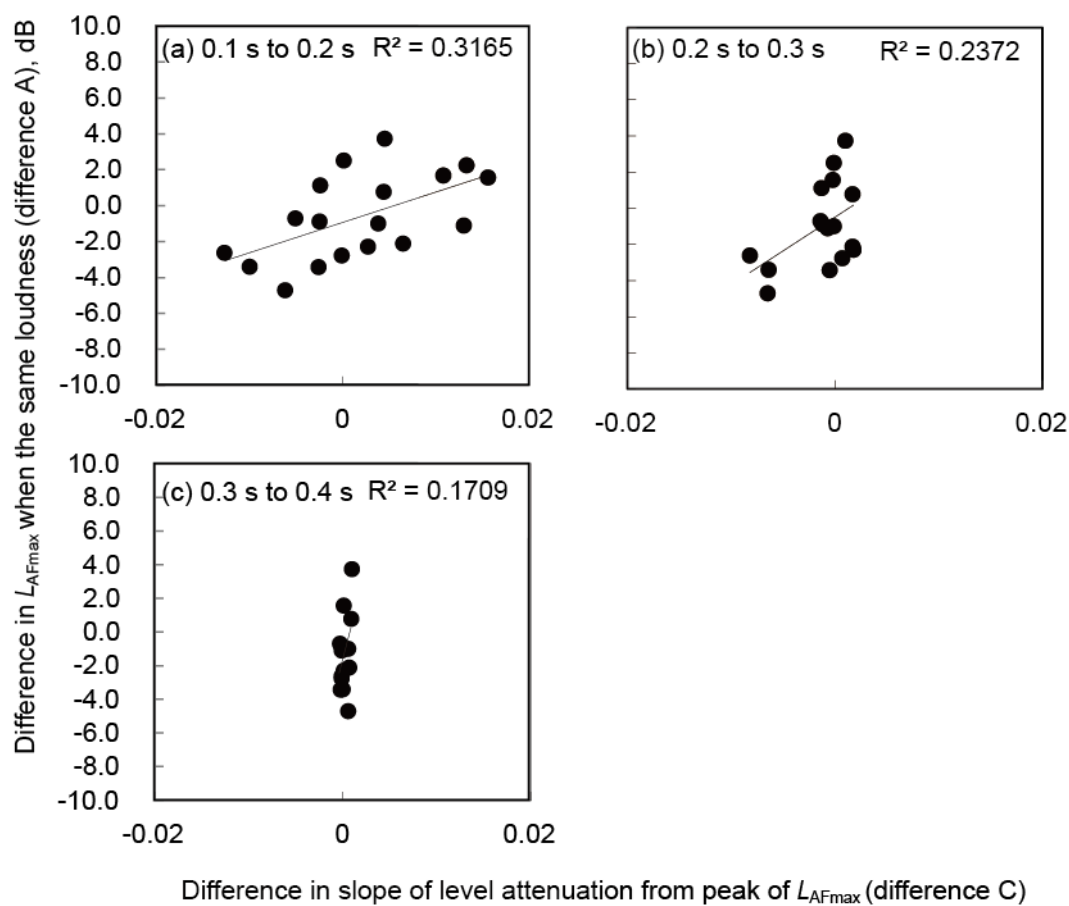


Figure 2.14 Relationship between difference of reference stimulus and comparison stimulus in L_{AFmax} and slope of level attenuation from peak of L_{AFmax} when the same loudness: (a) slope of 0.1 s to 0.2 s from peak of L_{AFmax} , (b) slope of 0.2 s to 0.3 s, (c) slope of 0.3 s to 0.4 s.

2.2.3 まとめ

床衝撃音について、2つの床衝撃音の大きさが等しくなるように聴取者にレベルを調整させる聴感実験を行い、ある2つの床衝撃音について、同じ大きさに感じる L_{AFmax} は異なる場合があることを示した。また、同じ大きさに感じる L_{AFmax} の差は、1000 Hz 帯域以上の周波数帯域における L_{AFmax} の差と相関が高かった。

2つの床衝撃音を同じ大きさに感じる場合について L_{AFmax} のピーク値からのレベル減衰の傾きが影響する可能性を示した。心理評価と L_{AFmax} の対応が良くなるように L_{AFmax} を補正する場合に、 L_{AFmax} の周波数特性をパラメータとするだけでは補正できない可能性があり、 L_{AFmax} のピーク値からのレベル減衰の傾きをパラメータの候補として提示した。

2.3 実験 3：レベル減衰の時間変動特性に着目した検討

実験 1 と 2 より、床衝撃音の評価において、A 特性音圧レベル最大値 (L_{AFmax}) のレベル大小と L_{AFmax} の決定周波数帯域に加え、時間変動特性が重要と考え、 L_{AFmax} のピーク値からのレベル減衰の傾きをパラメータとし、床衝撃音の「気になる」程度について心理評価実験を行った。

2.3.1 実験方法

A. 聴取者

正常な聴力を有する若齢者 14 名とした。

B. 実験装置

実験 1 と同様とした。

C. 実験音場

実験 1 と同様とした。

D. 刺激

A 特性音圧レベル最大値 (L_{AFmax}) のレベル大小と周波数特性、時間変動特性をパラメータとする計 7 種類の刺激を作成した。以下では 1/1 オクターブ幅を帯域幅の単位とする。刺激は 7 種類であり、Figure 2.15 に周波数特性を、Table 2.5 に時間変動特性として L_{AFmax} のピーク値より 0.1 s から 0.2 s 区間のレベル減衰の傾き（以降、「 L_{AFmax} のレベル減衰の傾き」とする）を示す。

床衝撃音 A から C の 3 種類の床衝撃音から作成した。床衝撃音 A は、実験 1 の刺激の作成で用いた床衝撃音と同一であり、上階においてハンマーで床を打撃する場合に、下階で生じる床衝撃音である。2.1（実験 1）と同一の刺激 No. 2 を用いた。

刺激のもととした床衝撃音 B と C の周波数特性を Figure 2.16 に示す。Table 2.5 に示すように模擬的に床衝撃音の L_{AFmax} のレベル減衰の傾きを変調し、時間変動特性が異なる各刺激を作成した。床衝撃音 B から作成した刺激 No. 32 と No. 33 については、波形編集ソフトウェア（Audacity）を用いてピッチを変えずに継続時間をそれぞれ元音源の 67% と 20% として調整した。床衝撃音 C から作成した刺激 No. 35 と No. 36 については、波形編集ソフトウェア（Audacity）を用いてピッチを変えずに継続時間をそれぞれもと音源の 133% と 50% とし、No. 34 は元音源に残響時間 1.4 秒の残響音を付加して N_{int} を調整した。刺激 No. 34 は No. 32 と、刺激 No. 35 は No. 33 とそれぞれ同程度の N_{int} となるように設定した。Table 2.5 に示すように模擬的に床衝撃音の L_{AFmax} のレベル減衰の傾きを変調し、時間変動特性が異なる各刺激を作成した。Figure 2.14 で示す通り、同一の床衝撃音から作成

第2章

した刺激の周波数特性はほとんど差がない。

床衝撃音 B は、上階においてゴムボールを床から 1 m の点から自由落下させる場合に、下階で生じる床衝撃音であり、低周波数成分を多く含むとともに、 L_{AFmax} のレベル減衰の傾きが緩やかである。ゴムボールは JIS[2]に規定される標準重量衝撃源 (2) を用いた。床衝撃音 B をもとに、刺激 No. 31 から No. 36 を作成した。

床衝撃音 C は、上階においてゴルフボールを床から 1m の点から自由落下させる場合に、下階で生じる床衝撃音であり、決定帯域は 500 Hz から 1000 Hz であり、 L_{AFmax} に対する低周波数成分の寄与度は小さい。刺激 No. 34 は残響の付加により L_{AFmax} のレベル減衰の傾きが緩やかであり、低周波数成分を多く含む刺激 No. 31 と No. 32 と近い値である。床衝撃音 C をもとに、刺激 No. 34 から No. 36 を作成した。

実験条件は Table 2.6 に示す全 15 条件である。聴取者は条件 15 以外の条件では 1 条件につき 2 回評価し、実験全体で 28 回の回答を得た。条件 15 では 1 条件につき 4 回評価し、は 56 回の回答を得た。

条件 1 から 14 は、衝撃音を 1 回のみ提示する条件である。条件 1 から 7 は L_{AFmax} が 50 dB であり Figure 2.14 に示す刺激 No.1 から No. 7 の 7 条件、条件 8 から 14 は L_{AFmax} が 40 dB であり Figure 2.14 に示す刺激 No. 8 から No. 14 からの 7 条件である。条件 15 は暗騒音のみを提示する条件である。

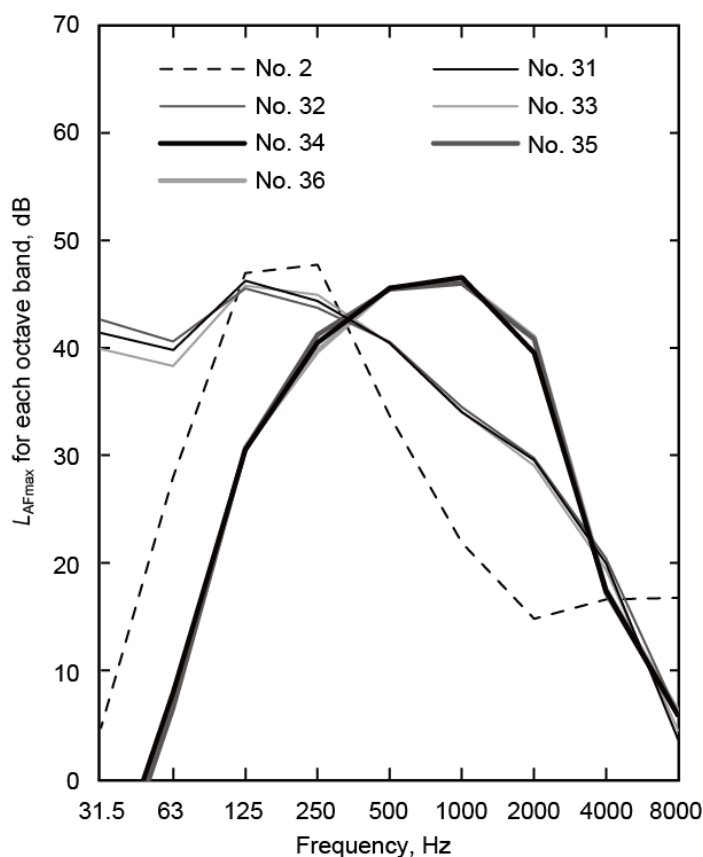


Figure 2.15 Frequency characteristics of impact sounds No. 31 to No. 36 and No. 2.

Table 2.5 Condition of floor impact sounds of experiment 3.

Impact sound	Slope of level attenuation from 0.1s to 0.2 s after peak level of L_{AFmax}
No. 31	-12.0
No. 32	-19.5
No. 33	-30.1
No. 34	-7.1
No. 35	-24.5
No. 36	-34.4
No. 2	-18.2

Table 2.6 Experimental conditions of experiment 3.

Case	Impact sound	L_{AFmax} (dB)	Number of stimuli	Trials for each listener
3-1	No. 31	50	Single	2
3-2	No. 32	50	Single	2
3-3	No. 33	50	Single	2
3-4	No. 34	50	Single	2
3-5	No. 35	50	Single	2
3-6	No. 36	50	Single	2
3-7	No. 2	50	Single	2
3-8	No. 31	40	Single	2
3-9	No. 32	40	Single	2
3-10	No. 33	40	Single	2
3-11	No. 34	40	Single	2
3-12	No. 35	40	Single	2
3-13	No. 36	40	Single	2
3-14	No. 2	40	Single	2
3-15	Background noise only			4

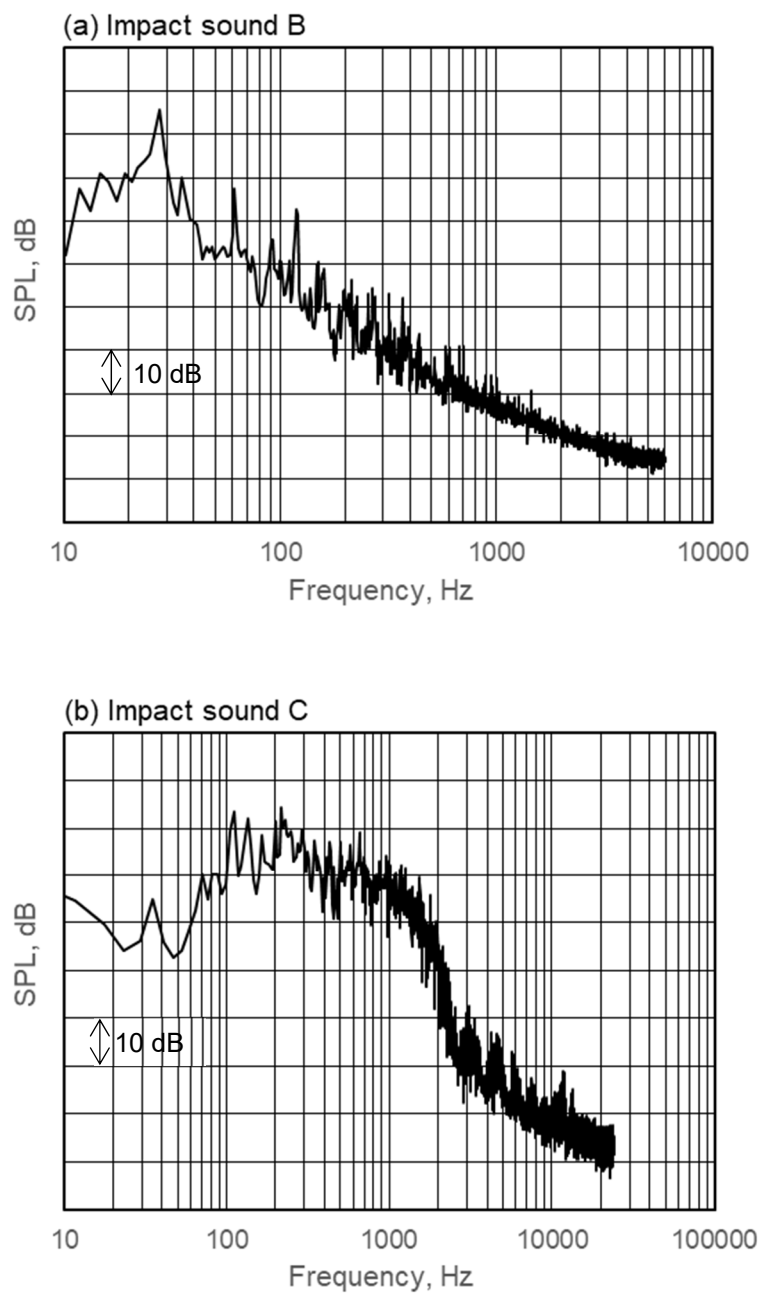


Figure 2.16 Frequency characteristics of the original floor impact sound B and C used to generate stimuli: (a) is impact sound B, (b) is impact sound C.

2.3.2 結果と考察

気になる程度の評価を Figure 2.17 に示す。ここでは 5 段階評価の各カテゴリ間の心理的距離が等しいと仮定し、全聴取者の評価の平均値を各条件における評価とする。ここでは全聴取者の評価が正規分布すると仮定して統計的検定を行う。以降の検定では全て有意水準を 5% とする。また、効果量は Choen's の d により確認した。

周波数特性の影響

L_{AFmax} が 50 dB の結果について刺激の周波数特性に着目する。刺激 No. 2 を除くすべての刺激において評価 3 以上であり「気になる」と評価され、低周波数成分を多く含む刺激 No. 31 と No. 32 は評価が 4 以上であり「だいぶ気になる」と評価された。この結果について刺激 No. 2 とそのほかの刺激の評価について t 検定を行った。結果を Table 2.7 に示す。

Table 2.7 Statistical significance for stimulus No. 2 and other stimuli.

Impact sound	No. 31	No. 32	No. 33	No. 34	No. 35	No. 36
$t(13)$	10.2	11.7	4.84	5.63	2.02	1.15
p	1.39×10^{-7}	2.90×10^{-8}	0.00032	8.16×10^{-5}	0.065	0.272
Choen's d	0.10	0.10	0.05	0.06	0.03	0.02
Statistical significance	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No

評価が 4 以上で「だいぶ気になる」と評価された刺激は、Figure 2.16(a)に示す床衝撃音 B から作成された 63 Hz から 125 Hz 帯域の低周波数成分を多く含む周波数特性である。この結果は、2.1（実験 1）と同様であり、床衝撃音が低周波数成分を多く含むほうが、「気になる」程度の評価の値が大きく、床衝撃音の気になる程度が強まる傾向が見られた。この結果が統計的に有意であるか確認するため、低周波数成分を多く含む刺激 No. 31 から No. 33 と、63 Hz 帯域の成分が比較的少ない床衝撃音 C からつくられた刺激のうち、最も「気になる」程度の評価の値が小さかった刺激 No. 36 の評価について t 検定を行った。その結果、刺激 No. 31 と No. 36 は両側検定： $t(13)=7.64, p=3.70 \times 10^{-6}, d=0.09$ 、刺激 No. 32 と No. 36 は両側検定： $t(13)=8.75, p=8.30 \times 10^{-7}, d=0.08$ 、刺激 No. 33 と No. 36 は両側検定： $t(13)=2.37, p=0.034, d=0.03$ となり、統計的に有意な差が認められた。

なお、刺激 No. 2 について、実験 3 では評価が 3 未満であったが、2.1（実験 2）では評

第 2 章

価は 3 以上で「気になる」と評価されており、結果が異なった。刺激 No. 2 の評価の結果について、2.1（実験 1）と実験 3 で F 検定を行ったところ等分散と仮定することができた。そこで、両者について等分散を仮定した 2 標本による t 検定を行った。その結果、両側検定： $t(19)=-0.61, p=0.55, d=0.01$ となり、統計的に有意差は認められなかった。このことから、刺激 No. 2 については、評価のばらつきが起りやすい傾向にあると考えられる。また、刺激 No. 2 と比べて刺激 No. 31 から No. 33 のほうが 63 Hz 帯域の周波数成分が多いことを鑑みると、この結果は、床衝撃音の「気になる」程度の評価において、低周波数成分のなかでも 63 Hz 帯域の周波数成分が心理評価に影響することを示唆している。

時間変動特性の影響

L_{AFmax} が 50 dB の結果について刺激の時間変動特性に着目する。同じ周波数特性の刺激 No. 31 から No. 33 に着目すると、「気になる」程度の評価の値は、 L_{AFmax} のレベル減衰の傾きが緩やかなほうが多く、より「気になる」傾向にあると言える。同様に、周波数特性が同じ刺激 No. 34 から No. 36 についても同様の傾向が見られる。この結果が統計的に有意であるか確認するため、同じ周波数特性で 63 Hz 帯域の低周波数成分を多く含む刺激のうち、最も L_{AFmax} のレベル減衰の傾きが緩やかな No. 31 と、No. 32 および No. 33 の評価について t 検定を行った。その結果、刺激 No. 31 と No. 32 は両側検定： $t(13)=0.520, p=0.612, d=0.01$ で有意差は認められず、刺激 No. 31 と No. 33 は両側検定： $t(13)=8.63, p=9.68 \times 10^{-7}, d=0.11$ で統計的に有意差が認められた。同様に、同じ周波数特性で 63 Hz 帯域の低周波数成分が少ない刺激のうち、最も L_{AFmax} のレベル減衰の傾きが緩やかな No. 34 と、No. 35 および No. 36 の評価について t 検定を行った。その結果、刺激 No. 34 と No. 35 は両側検定： $t(13)=3.89, p=0.00185, d=0.04$ 、刺激 No. 34 と No. 36 は両側検定： $t(13)=3.62, p=0.00306, d=0.05$ で統計的に有意差が認められた。

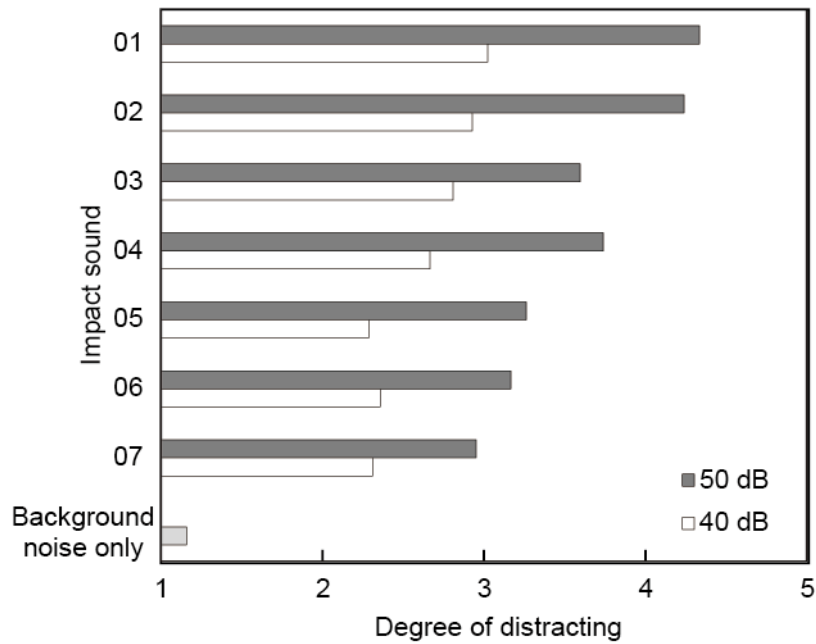


Figure 2.17 Averaged degree of distracting for each stimulus of experiment 3.

2.3.3 まとめ

床衝撃音について、既往の重量・軽量という分類ではなく、床衝撃音の時間変動特性に着目し、 L_{AFmax} のピーク値より 0.1 s から 0.2 s 区間のレベル減衰の傾きをパラメータとした床衝撃音を用いて聴感実験を行い、心理評価と L_{AFmax} のレベル減衰の傾きが対応するかを検討した。その結果、同じ周波数特性であっても L_{AFmax} のレベル減衰の傾きが緩やかなほうが「気になる」と評価されることを示した。

心理評価と L_{AFmax} の対応が良くなるように L_{AFmax} を補正する場合に、 L_{AFmax} のピーク値からのレベル減衰の傾きが補正のパラメータとなる可能性を示した。

第2章

2.4 結論

床衝撃音について、既往の重量・軽量という分類ではなく、ピーク周波数(周波数特性)あるいはピークレベルからのレベル減衰の傾き(時間変動特定)をパラメータとしてモデル化した床衝撃音、および実生活で想定される実際の衝撃源による床衝撃音を用いて聴感実験を行い、心理評価と A 特性音圧レベル最大値 (L_{AFmax}) の対応を検討した。その結果、以下のことを明らかにした。

- (1) L_{AFmax} が等しい値であっても、床衝撃音の周波数成分に 63 Hz から 125 Hz 帯域を含む場合、「気になる」と評価される。
- (2) L_{AFmax} の値が 40 dB と 50 dB と異なる場合であっても「気になる」程度に統計的な有意差が見られない場合があり、 L_{AFmax} は必ずしも「気になる」尺度に対応できていないことを示唆する結果を得た。
- (3) ある 2 つの床衝撃音について、同じ大きさに感じる L_{AFmax} は異なる場合があることを示した。
- (4) 同じ大きさに感じる L_{AFmax} の差は、1000 Hz 帯域以上の周波数帯域における L_{AFmax} の差と相関が高かった。
- (5) 同じ周波数特性であっても、 L_{AFmax} のピーク値より 0.1 s から 0.2 s 区間の L_{AFmax} のレベル減衰の傾きが緩やかなほうが「気になる」と評価される。
- (6) 心理評価と L_{AFmax} の対応が良くなるように L_{AFmax} を補正する場合に、 L_{AFmax} の周波数特性と時間変動特性が補正のパラメータとなる可能性を示した。

第3章 心理評価の重みづけを考慮した補正方法

本章では、2章で床衝撃音の心理評価との対応を明らかにした床衝撃音の「 L_{AFmax} のレベルの大小」、「刺激の周波数特性」および「刺激の時間変動特性」をパラメータとして、A 特性音圧レベルの最大値に対して、心理評価の予測精度をさらに向上させる補正方法を提案する。

3.1 補正方法の考え方

本研究で提案する補正方法の概要を Table 3.1 に示す。

各項で示す補正方法において、パラメータとして用いる床衝撃音の物理量の概念図を Figure 3.1 に示す。3.3.1 では、レベルの大小と周波数特性に着目した補正方法 1 を検討する。パラメータは L_{AFmax} および Figure 3.1 (a- i) に示す L_{AFmax} の決定帯域である。補正方法 1 は、特定の周波数においてレベルが大きい周波数特性の床衝撃音において適用可能である。3.3.2 では、時間変動特性に着目した補正方法 2 を検討する。パラメータは L_{AFmax} および Figure 3.1 (b- i) に示す L_{AFmax} のレベル減衰の特徴である。補正方法 2 は、床衝撃音の周波数特性をパラメータに用いないが、補正方法 1 よりも適用範囲を広げた補正方法である。3.3.3 では、最も適用範囲と心理評価との対応を高めた補正方法 3 を検討する。パラメータは L_{AFmax} ならびに、Figure 3.1 (b- ii) に示すオクターブバンドの 63Hz 帯域の L_{AFmax} および 63Hz 帯域のレベル減衰の特徴である。

Table 3.1 Summaries of correction methods of L_{AFmax} to improve correspondence with psychological evaluation.

項	補正 方法	パラメータ		
		音圧レベル	周波数特性	時間変動特性
3.3.1	1	L_{AFmax}	L_{AFmax} の決定帯域	なし
3.3.2	2	L_{AFmax}	なし	全帯域の L_{AFmax} の ピークからの傾き
3.3.3	3	L_{AFmax}	63 Hz 帯域	63 Hz 帯域の L_{AFmax} のピークからの傾き

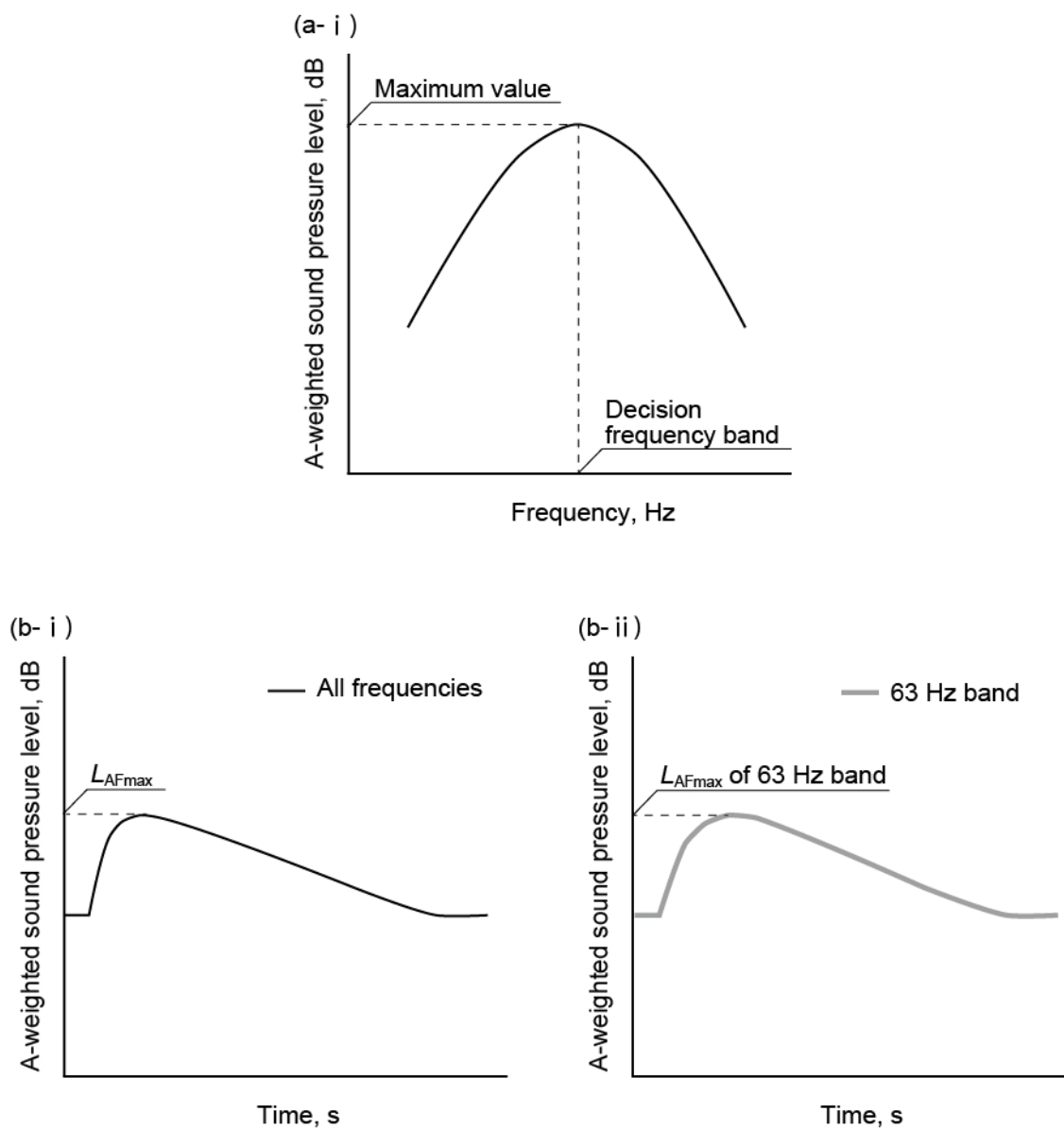


Figure 3.1 Parameters of correction methods of L_{AFmax} . Diagrams that (a- i) Decision frequency band of L_{AFmax} , (b- i) Peak level of L_{AFmax} , (b- ii) Peak level of L_{AFmax} of 63 Hz band.

3.2 心理評価と対応のよいラウドネス時間変動積分値 N_{int} の定義

補正方法を検討するにあたり、既往研究 [15][16][19][20]で心理評価と対応が良いことが示されているラウドネスについて Time-varying loudness [34]を分析した。

J. Schlittenlacher ら [35]はラウドネスレベルと心理評価の関係を検討している。ハンマー等の衝撃音を対象として、ラウドネスの印象に合う線の長さを判断させるクロスモダリティマッチングによる心理実験を行い、ISO 532-1 (DIN 45361/ 1) により算出されるラウドネスレベルの 5 パーセンタイル値である N_5 と、ISO 1996-1 のエネルギー平均の手法をラウドネスレベルに適用した LL_p を比較した。なお、J. Schlittenlacher らは LL_p の算出にあたって 100 ms ごとのラウドネスレベル計算値を用いている。その結果、 LL_p は N_5 よりもラウドネスの印象と高い相関があることを示し、特に、パーセンタイル値を超えるラウドネスレベルが広範囲にわたる場合や、ラウドネス分布がパーセンタイル値を境に非常に急勾配になる場合に、 N_5 での評価が適さない可能性があると考察している。

この研究を参考に、本研究の 2.1 の実験 1 で用いた 10 種類の刺激について N_5 と LL_p を分析し、15 条件の衝撃音のカテゴリ評価の平均値と比較した。条件 9 と 15 の評価については 2 試行分をまとめて平均した値を比較に用いた。 LL_p は式(3.1)により求めた。

$$LL_p = 10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{LL_i/10} \quad (3.1)$$

ただし、 LL_i は 2 ms ごとの Time-varying loudness [phon]である。 n は平均する時間長を決定するパラメータであるが、ここではすべての刺激のラウドネスが十分に収束する 687 サンプル（約 1.4 s）とした。

N_5 および LL_p とカテゴリ評価の平均値を比較した結果を Figure 3.2 の(a)に示す。図中の直線は線形回帰直線である。 N_5 と LL_p を比較すると、 LL_p の方が回帰直線で予測した場合の決定係数が高く、J. Schlittenlacher らの報告と同様の傾向がみられた。

以上の結果は、衝撃音の気になる程度が、ラウドネスの最大値よりもその時間平均あるいは総暴露量によって決定される可能性を示唆する。ただし、 LL_p は等価騒音レベルと同様の計算方法であり、衝撃音のように測定区間内でダイナミックにラウドネスが変わる場合、その値はラウドネスの最大値にも大きく左右される。

総暴露量に着目して、刺激の単発暴露騒音レベルを同じ時間長で求めた結果、刺激間の差は最大で 1 dB 程度と小さかった、そこでエネルギーではなくラウドネスを用いることとし、Time-varying loudness をゾーン尺度のまま積分し、カテゴリ評価の平均値と比較した。式(3.2)のように N_{int} を定義した。

$$N_{\text{int}} = \sum_{i=1}^n N_i \Delta t \text{ [sone}\cdot\text{s]} \quad (3.2)$$

ただし、 N_i は2 ms ごとの Time-varying loudness [sone]であり、 $\Delta t = 0.002$ s, n は LL_p と同様である。結果を Figure 3.2 の(b)に示す。図中の直線は線形回帰直線である。本稿で用いた刺激の範囲では、 N_{int} の方が LL_p よりも回帰直線で予測した場合の決定係数が高かった。これは、聴取者はラウドネスの最大値よりも総暴露量に基づいて「気になる」程度を回答するという可能性を支持する。ただし、本稿では衝撃音の時間特性と周波数特性をパラメトリックに制御できていないため、心理的な評価構造の詳細について結論付けることはできない。

なお、Preis ら[30]は、ラウドネスの暴露量の計算値である SEN を定義し、 SEN と $L_{AF\text{max}}$ の相関が高いことを報告している。ただし、ラウドネスの暴露量 SEN と心理評価の対応についての詳細な検討は行われていない。 SEN はある時刻 t におけるラウドネス $N(t)$ の時間積分値であり、式(2)で定義した N_{int} と同義であるが、 $N(t)$ の計算方法は明記されていない。 N_{int} は $N(t)$ を DIN45631/A1:2010-03 に基づく Time-varying loudness とした場合の SEN である。

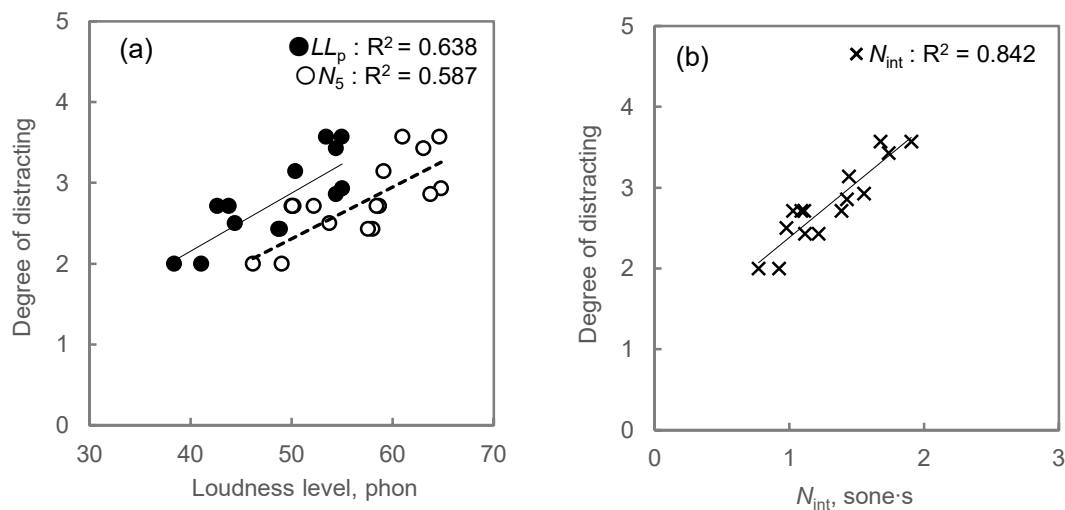


Figure 3.2 Averaged degree of distracting as function of objective measures: (a) LL_p and N_5 (b) N_{int} .

3.3 A 特性音圧レベル最大値の補正

第2章で述べた心理実験では、床衝撃音について時間重み付け特性を FAST とした A 特性音圧レベルの最大値 (L_{AFmax}) をパラメータとして検討し、床衝撃音の心理評価において、「 L_{AFmax} のレベルの大小」、「周波数特性」、「時間変動特性」が影響することを示した。また、3.2 において定義したラウドネス時間変動積分値 N_{int} は心理評価と対応が良いことを明らかにした。したがって、 N_{int} を床衝撃音の評価に用いた方が良いと考えられるが、 L_{AFmax} のように一般的な騒音計で測定可能な指標の方が簡便で、実務の上で有用である。そこで、 L_{AFmax} を N_{int} と対応するように補正することを考える。

Figure 3.3 に、2.1 (実験1) で用いた刺激 No. 1 から No. 6 について計算機上で求めた N_{int} と L_{AFmax} の関係を例として示す。全ての刺激において、 L_{AFmax} が大きいほど N_{int} は大きい。また、 L_{AFmax} が同じであっても刺激の周波数特性が異なると N_{int} の値は異なる。

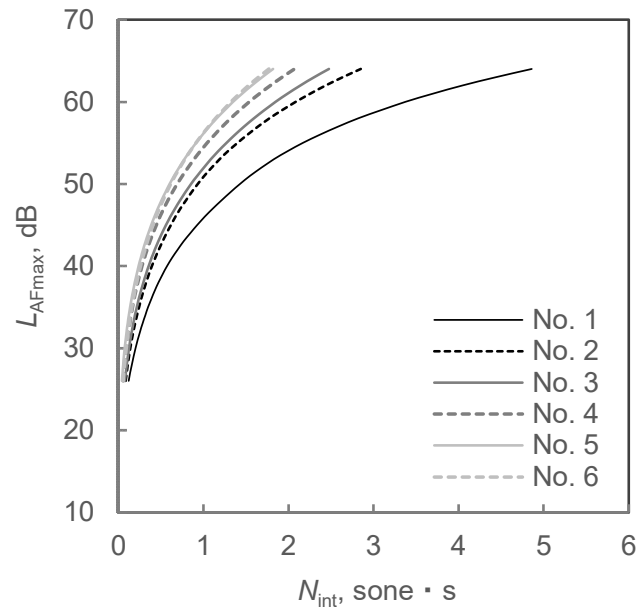


Figure 3.3 Relationship between N_{int} and L_{AFmax} for each frequency characteristic of stimulus.

3.3.1 補正方法1：周波数特性とレベルに着目した検討

2.1（実験1）における Figure 2.8 の結果より，周波数特性が比較的狭帯域の刺激 No. 1 から No. 6 については，「 L_{AFmax} の決定帯域」が低くなるほど N_{int} が大きくなる傾向が見られる。補正方法 1 では，特定の周波数においてレベルが大きい周波数特性の床衝撃音を対象とし，「 L_{AFmax} の決定帯域」をパラメータとして， N_{int} が等しくなるように「 L_{AFmax} のレベルの大小」を補正することで，心理評価の重み付けを考慮した床衝撃音レベルを求める補正を提案する。

「 L_{AFmax} の決定帯域」をパラメータとする心理評価の重みづけ値を算定するにあたり， L_{AFmax} が 50 dB の場合に N_{int} が 1 となる関係を，基準曲線として式(3.3)のように定義する。この基準曲線は Figure 3.3 に示した各刺激の N_{int} と L_{AFmax} の関係の平均的な曲線となるように定めた。

$$L_{AFmax}(N_{int}) = 10\log_2 N_{int} + 50 \quad (3.3)$$

同様に， L_{AFmax} の決定帯域によって異なる値をとる定数 a_k および b_k を用いて，刺激 No. 1 から No. 6 の床衝撃音における N_{int} と L_{AFmax} の関係は式(3.4)のように表現できる。

$$L_{AFmax}(a_k, b_k, N_{int}) = a_k \log_2 N_{int} + b_k \quad (3.4)$$

各刺激における定数 a_k および b_k は，Figure 3.3 に示す刺激 No. 1 から No. 6 における N_{int} と L_{AFmax} の関係から回帰分析により求めた。Table 3.2 に各刺激に対する a_k および b_k を示す。なお， k は刺激番号である。ここでは，各刺激の決定帯域は，刺激 No. 1 が 63 Hz 帯域，刺激 No. 2 が 125 Hz 帯域，刺激 No. 3 が 250 Hz 帯域，刺激 No. 4 が 500 Hz 帯域，刺激 No. 5 が 1000 Hz 帯域，刺激 No. 6 が 2000 Hz 帯域とした。これらの帯域の中心周波数を f_k とする。式(3.4)における定数 a_k は刺激 No. 1 から No. 6 すべてに対し近い値をとることから，式(3.5)のように平均することによって各刺激に共通する単一の定数 a とする。式(3.4)における定数 b_k は， f_k をパラメータとした回帰分析により式(3.6)で推定する。この回帰分析における決定係数は 0.892 である。

Table 3.2 Constants for each stimulus.

Impact sound	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
a_k	7.4	7.7	7.7	7.4	7.2	7.8
b_k	48.1	49.8	51.6	53.4	55.2	57.0

$$a = \sum_{k=1}^6 a_k / 6 = 7.5 \quad (3.5)$$

$$b_k = 1.8 \log_2 f_k + 37.3 \quad (3.6)$$

式(3.4)における定数 a_k を前述の定数 a に置き換えると、式(3.3)と式(3.4)の関係から、床衝撃音の決定帯域によって変わる心理評価の重みづけ値 $\Delta L_{AFmax}(f_k)$ は、式(3.7)により求めることができる。

$$\Delta L_{AFmax}(f_k, L_{AFmax}) = (10 - a) \left(\frac{L_{AFmax} - 50}{10} \right) + (50 - b_k) \quad (3.7)$$

実測した L_{AFmax} に $\Delta L_{AFmax}(f_k)$ を加えることにより、 N_{int} との関係が式(3.3)で一位に定まる補正 L_{AFmax} を求めることができる。

ここまで求めた L_{AFmax} の決定帯域をパラメータとする心理評価の重みづけ値を用いて、心理評価の重みづけを考慮した L_{AFmax} の補正值を算出する。補正前の床衝撃音レベルは、1 dB 刻みで L_{AFmax} が 26 dB から 64 dB とした。また、各床衝撃音の L_{AFmax} が 50 dB の場合のオクターブバンド毎の A 特性音圧レベル最大値は Figure 2.4 により明らかになっている。 L_{AFmax} の決定帯域は、前述の通り刺激 No. 1 から No. 6 に対し、63 Hz から 2000 Hz のオクターブバンド中心周波数を設定した。 L_{AFmax} の決定帯域によって定まる心理評価の重みづけ値は、式(3.7)から求まる。最後に、心理評価の重みづけ値を実測の L_{AFmax} に加えることにより、心理評価の重みづけを考慮した補正 L_{AFmax} を求めることができる。各刺激における N_{int} と補正 L_{AFmax} の関係を Figure 3.4 に示す。

Figure 3.3 に示す N_{int} と補正前の L_{AFmax} の関係と、Figure 3.4 に示す N_{int} と補正後の L_{AFmax} の関係を比較すると、 N_{int} と補正後の L_{AFmax} の関係の方が、各刺激における N_{int} の差は小さい。このことは心理評価が等しくなるよう L_{AFmax} が補正されていることを意味する。決定帯域が 63 Hz 帯域の刺激 No. 1 は、他の刺激と比較して N_{int} の乖離が大きいため、次項では 63 Hz 帯域の周波数成分を多く含む床衝撃音においても、適用可能な補正方法を検討する。

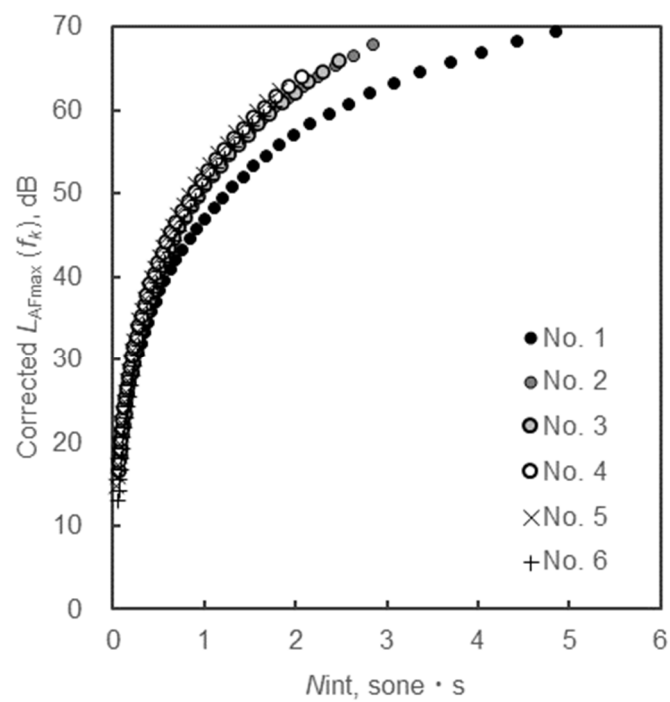


Figure 3.4 Relationship between N_{int} and correction value of L_{AFmax} for each frequency characteristic of stimulus.

3.3.2 補正方法 2：時間変動特性に着目した検討

補正方法 2 では、低周波数成分を多く含む床衝撃音に対して、心理評価の重み付けを考慮した床衝撃音レベルを求める補正を提案する。周波数特性以外のパラメータとして、床衝撃音の時間変動特性に着目した。Figure 3.5 に 2.1（実験 1）で用いた刺激について、 L_{AFmax} の時間変動特性を示す。

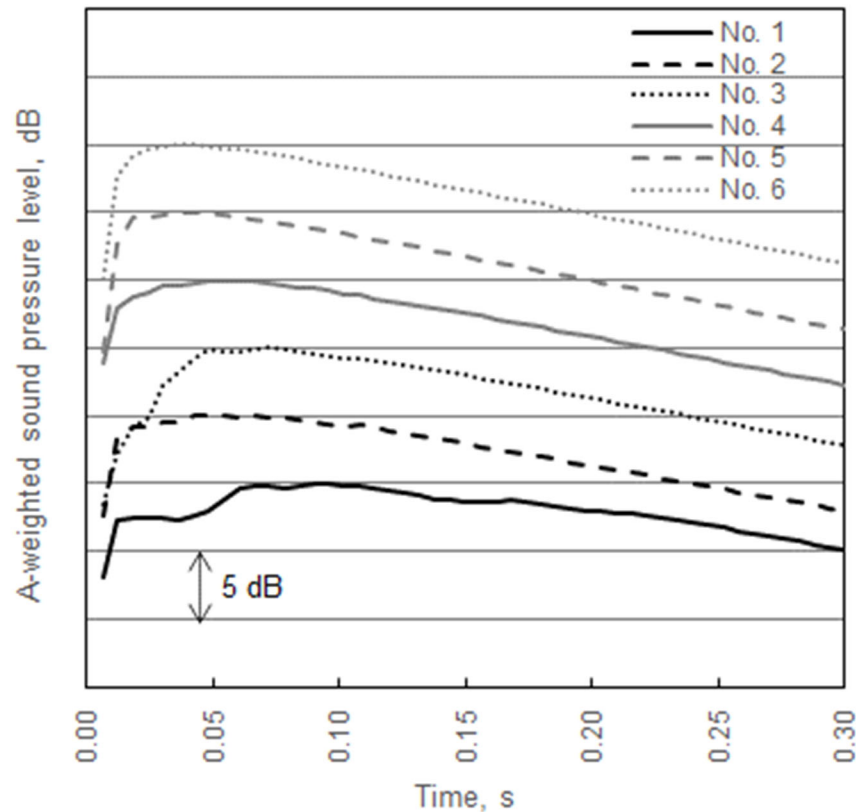


Figure 3.5 Time variation characteristics of stimuli of the experiment 1.

周波数特性の異なる刺激 No.1 から No.6 において L_{AFmax} の時間変動特性は異なる。すべての刺激において、刺激が提示されてから 0.1 s までの間に L_{AFmax} は最大値を取るが、最大値に達するまでのレベル上昇の時間変動特性は刺激ごとに異なる。刺激が提示されてから 0.1 s から 0.2 s の間は、全ての刺激において時間変化とともにレベルが減衰するが、減衰の時間変動特性は特に低周波数成分を多く含む場合とそれ以外で異なり、低周波数成分を多く含む刺激 No. 1 では他の刺激と比較してレベル減衰が緩やかな傾向にある。

補正方法 2 では、パラメータとして、低周波数成分を多く含む場合とそれ以外で異なる特徴を持つ、0.1 s から 0.2 s の間の「 L_{AFmax} のレベル減衰の傾き」を用いる。「 L_{AFmax} のレ

第 3 章

「レベル減衰の傾き」をパラメータとして、 N_{int} が等しくなるように「 L_{AFmax} のレベルの大小」を補正することで、心理評価の重み付けを考慮した床衝撃音レベルを求める補正を提案する。

Table 3.3 に各刺激 No.1 から No.6 における L_{AFmax} のピークから 0.1 s から 0.2 s の間のレベル減衰の傾きを示す。傾きは、汎用分析ソフトウェア (RION, AS-70) を用いて 0.1 s ごとに分析した L_{AFmax} のうち、 L_{AFmax} のピークを含む分析時刻から、0.1 s 後の値 $L_{0.1}$ と同時刻から 0.2 s 後の値 $L_{0.2}$ を用いて、式(3.8)により算出した。

Table 3.3 Slopes of decay L_{AFmax} between 0.1 to 0.2 sec. from peak level.

Impact sound	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
Slope of L_{AFmax}	-18.2	-28.7	-28.1	-30.9	-33.6	-34.1

$$a_{L_{\text{AFmax}}} = \frac{L_{0.2} - L_{0.1}}{0.1} \quad (3.8)$$

Table 3.3 と Figure 3.3 を照らすと、「 L_{AFmax} の決定帯域」が低くなるほど、「 L_{AFmax} のレベル減衰の傾き」は緩やかになり、 N_{int} が大きくなる傾向がある。

「 L_{AFmax} の減衰の傾き」をパラメータとする心理評価の重みづけ値を算定するにあたり、心理評価と対応の良い N_{int} と「 L_{AFmax} の減衰の傾き」の関係に着目した。Figure 3.6 に、Figure 3.3 に示す N_{int} と、Table 3.3 に示す 0.1 s から 0.2 s の間の L_{AFmax} のレベル減衰の傾きの関係を L_{AFmax} ごとに示す。 L_{AFmax} の減衰の傾きが緩やかなほど N_{int} が大きく、 L_{AFmax} の値が大きいほど N_{int} の増分が大きい傾向が見られる。このときの刺激 No. 1 から No. 6 における N_{int} と L_{AFmax} の減衰の傾き $a_{L_{\text{AFmax}}}$ の関係は式(3.9)のように表現できる。

$$a_{L_{\text{AFmax}}}(A_{L_{\text{AFmax}}}, B_{L_{\text{AFmax}}}, N_{\text{int}}) = A_{L_{\text{AFmax}}} \log_2(N_{\text{int}}) + B_{L_{\text{AFmax}}} \quad (3.9)$$

各 L_{AFmax} の値における定数 $A_{L_{\text{AFmax}}}$ および $B_{L_{\text{AFmax}}}$ は、Figure 3.6 に示す N_{int} と L_{AFmax} のレベル減衰の傾きの関係から回帰分析により求めた。Figure 3.7 に L_{AFmax} が 40 dB から 50 dB の場合の 1 dB ごとの $A_{L_{\text{AFmax}}}$ および $B_{L_{\text{AFmax}}}$ を示す。

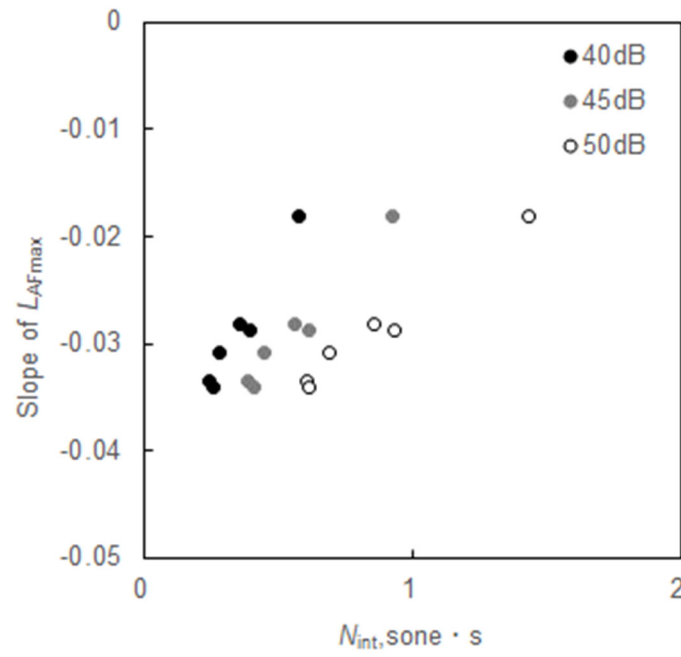


Figure 3.6 Relationship between N_{int} and L_{AFmax} .

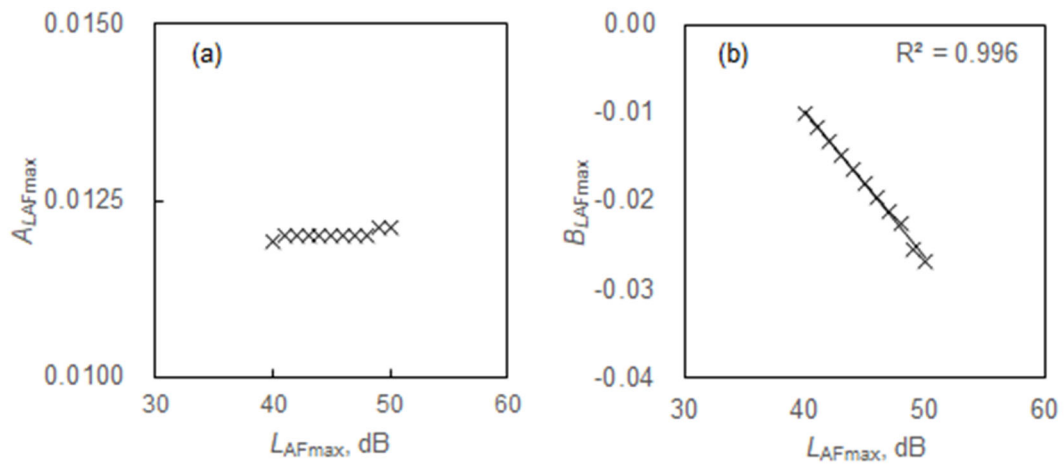


Figure 3.7 Relationship between L_{AFmax} and constants. (a) $A_{L_{\text{AFmax}}}$ and (b) $B_{L_{\text{AFmax}}}$.

第3章

式(3.9)における定数 $A_{L_{AFmax}}$ は L_{AFmax} に対し近い値をとることから、式(3.10)のように平均することによって共通する単一の定数 A とする。式(3.9)における定数 $B_{L_{AFmax}}$ は、 L_{AFmax} をパラメータとした回帰分析により式(3.11)で推定する。この回帰分析における決定係数は0.996である。

$$A = \sum_{i=1}^{10} A_{L_{AFmax},i} / 10 = 0.012 \quad (3.10)$$

$$B_{L_{AFmax}} = -0.0016L_{AFmax} + 0.056 \quad (3.11)$$

式(3.9)、式(3.10)および式(3.11)の関係から、 L_{AFmax} は N_{int} と L_{AFmax} の減衰の傾きを用いて式(3.12)のように表される。

$$L_{AFmax}(a_{L_{AFmax}}, N_{int}) = 7.5 \log_2(N_{int}) - 0.625a_{L_{AFmax}} + 35 \quad (3.12)$$

式(3.3)と式(3.12)の関係から、床衝撃音のレベル減衰の傾きによって変わる心理評価の重みづけ値 $\Delta L_{AFmax}(a)$ は、式(3.13)により求めることができる。

$$\Delta L_{AFmax}(a_{L_{AFmax}}, L_{AFmax}) = 0.25(L_{AFmax} - 50) - 0.625a_{L_{AFmax}} + 15 \quad (3.13)$$

実測した L_{AFmax} に $\Delta L_{AFmax}(a)$ を加えることにより、 N_{int} との関係が式(3.3)で一位に定まる補正 L_{AFmax} を求めることができる。

ここまで求めた L_{AFmax} のレベル減衰の傾きをパラメータとする心理評価の重みづけ値を用いて、心理評価の重みづけを考慮した L_{AFmax} の補正值を算出する。補正前の床衝撃音レベルは、1 dB 刻みで L_{AFmax} が26 dB から 64 dB とした。各床衝撃音の L_{AFmax} のレベル減衰の傾きは Table 3.3 により明らかになっている。 L_{AFmax} の決定帯域によって定まる心理評価の重みづけ値は、式(3.13)から求まる。最後に、心理評価の重みづけ値を実測の L_{AFmax} に加えることにより、心理評価の重みづけを考慮した補正 L_{AFmax} を求めることができる。

「 L_{AFmax} のレベル減衰の傾き」をパラメータとする場合の、各刺激における N_{int} と補正 L_{AFmax} の関係を Figure 3.8 に示す。

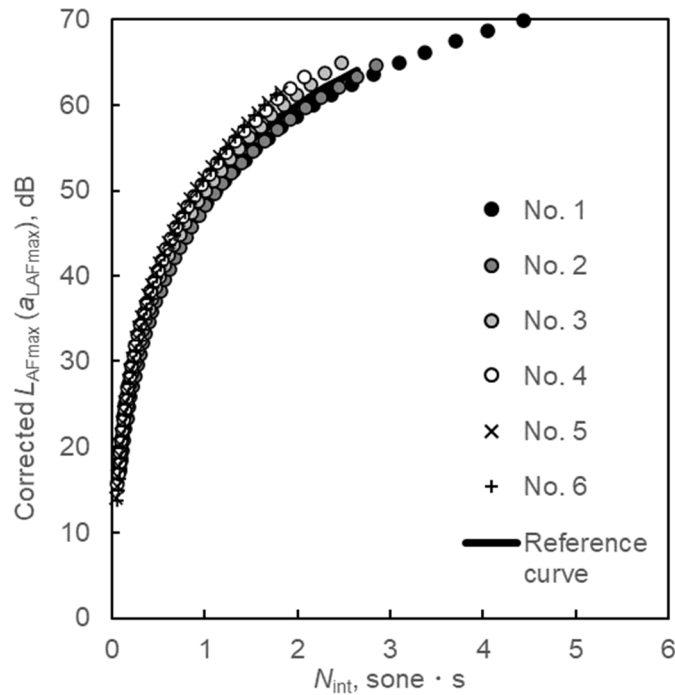


Figure 3.8 Relationship between N_{int} and correction value of L_{AFmax} of slopes of level attenuation from peak of L_{AFmax} between 0.1 to 0.2 sec. from peak level that of stimuli No. 1 to No. 6 and reference curve.

Figure 3.3 に示す N_{int} と補正前の L_{AFmax} の関係と、Figure 3.8 に示す N_{int} と補正後の L_{AFmax} の関係を比較すると、 N_{int} と補正後の L_{AFmax} の関係の方が、各刺激における N_{int} の差は小さい。このことは心理評価が等しくなるよう L_{AFmax} が補正されていることを意味する。補正方法 2 では、補正方法 1 と比較して特に決定帯域が 63 Hz 帯域の刺激 No. 1 において心理評価の予測精度が向上しており、心理評価との対応を高める L_{AFmax} の補正を行う上で、周波数特性以外のパラメータとして時間変動特性が適当であることが明らかになった。一方で、高周波数成分を多く含む刺激 No. 3 から No. 6 については、補正方法 1 と比較して予測精度が悪化しており、周波数特性と時間変動特性の両方を考慮する必要があると考えられる。

Figure 3.9 に、広帯域の周波数成分を持つ刺激 No. 7 から No. 10 について、補正方法 2 を適用した結果を示す。Figure 3.8 で示した狭帯域の周波数特性を持つ刺激 No. 1 から No. 6 の場合と比較して、Figure 3.9 の広帯域の周波数特性を持つ刺激 No. 7 から No. 10 では、基準曲線と補正後の L_{AFmax} の乖離が大きく心理評価の予測精度が劣る。実際の床衝撃音は様々な周波数成分を含むことが想定される。以上を踏まえ、次項では、高周波数成分を多く含む場合と、広帯域の周波数成分を含む床衝撃音にも適用可能な補正方法を検討する。

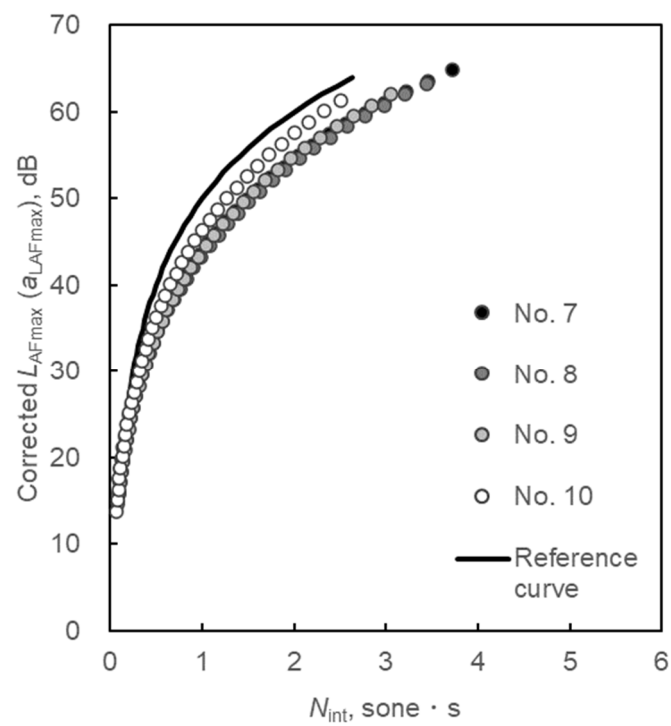


Figure 3.9 Relationship between N_{int} and correction value of L_{AFmax} of slopes of level attenuation from peak of L_{AFmax} between 0.1 to 0.2 sec. from peak level that of stimuli No. 7 to No. 10 and reference curve.

3.3.3 補正方法 3：周波数ごとの時間変動特性に着目した検討

補正方法 3 では、周波数特性と時間変動特性の両方に着目し、これらの特徴が様々な実際の床衝撃音に適用可能な、心理評価の重み付けを考慮した床衝撃音レベルを求める補正を提案する。Figure 3.10 に 2.1（実験 1）で用いた刺激 No.1, No.4, No.7 および No.9 について、オクターブバンド毎の L_{AFmax} の時間変動特性を示す。

ひとつの刺激であってもオクターブバンド毎の L_{AFmax} の時間変動特性は異なり、特に補正方法 2 で補正のパラメータとした全周波数帯域の「 L_{AFmax} のレベル減衰の傾き」と 63 Hz 帯域の L_{AFmax} のレベル減衰の傾きの特徴は異なる。なお、低周波数成分を多く含む刺激 No. 1 および No. 7 と、高周波数成分を含む刺激 No. 4 および No. 9 を比較すると、周波数成分によって、全周波数帯域の L_{AFmax} に対する寄与度が異なると推察されるが、まず 2.1（実験 1）でのべた、心理評価に影響する 63 Hz 帯域の成分に着目し、63 Hz 帯域の「 L_{AFmax} のレベル減衰の傾き」をパラメータとした補正を行う。

Table 3.4 に各刺激 No.1 から No.10 における、オクターブバンド中心周波数の 63 Hz 帯域における L_{AFmax} のピークから 0.1 s から 0.2 s の間のレベル減衰の傾きを示す。傾きは、汎用分析ソフトウェア（RION, AS-70）を用いて 0.1s ごとに分析した L_{AFmax} のうち、63 Hz 帯域の L_{AFmax} のピークを含む分析時刻から、0.1 s 後の値 $L_{0.1}$ と同時刻から 0.2 s 後の値 $L_{0.2}$ を用いて、式(3.8)により算出した。

補正前の床衝撃音レベルは、1 dB 刻みで L_{AFmax} が 26~64 dB とし、各床衝撃音の 63 Hz 帯域の L_{AFmax} のレベル減衰の傾きは Table 3.4 により明らかになっている。 L_{AFmax} の決定帯域によって定まる心理評価の重みづけ値は、式(3.13)から求める。2.1（実験 1）より、床衝撃音の低周波数成分が心理評価に影響することから、補正方法 2 と同じ式(3.13)により心理評価の重みづけを考慮した L_{AFmax} の補正值を求めることとする。

最後に、心理評価の重みづけ値を実測の L_{AFmax} に加えることにより、心理評価の重みづけを考慮した補正 L_{AFmax} を求めることができる。63 Hz 帯域の「 L_{AFmax} のレベル減衰の傾き」をパラメータとする場合の、各刺激における N_{int} と補正 L_{AFmax} の関係を Figure 3.11 に示す。

広帯域の周波数特性を持つ刺激 No. 7 から No. 10 において、63 Hz 帯域の「 L_{AFmax} のレベル減衰の傾き」をパラメータとした補正方法 3 のほうが、全周波数帯域の「 L_{AFmax} のレベル減衰の傾き」をパラメータとした補正方法 2 よりも、 N_{int} と補正 L_{AFmax} の関係の関数が基準曲線に近く、心理評価の予測精度が高いことが窺える。

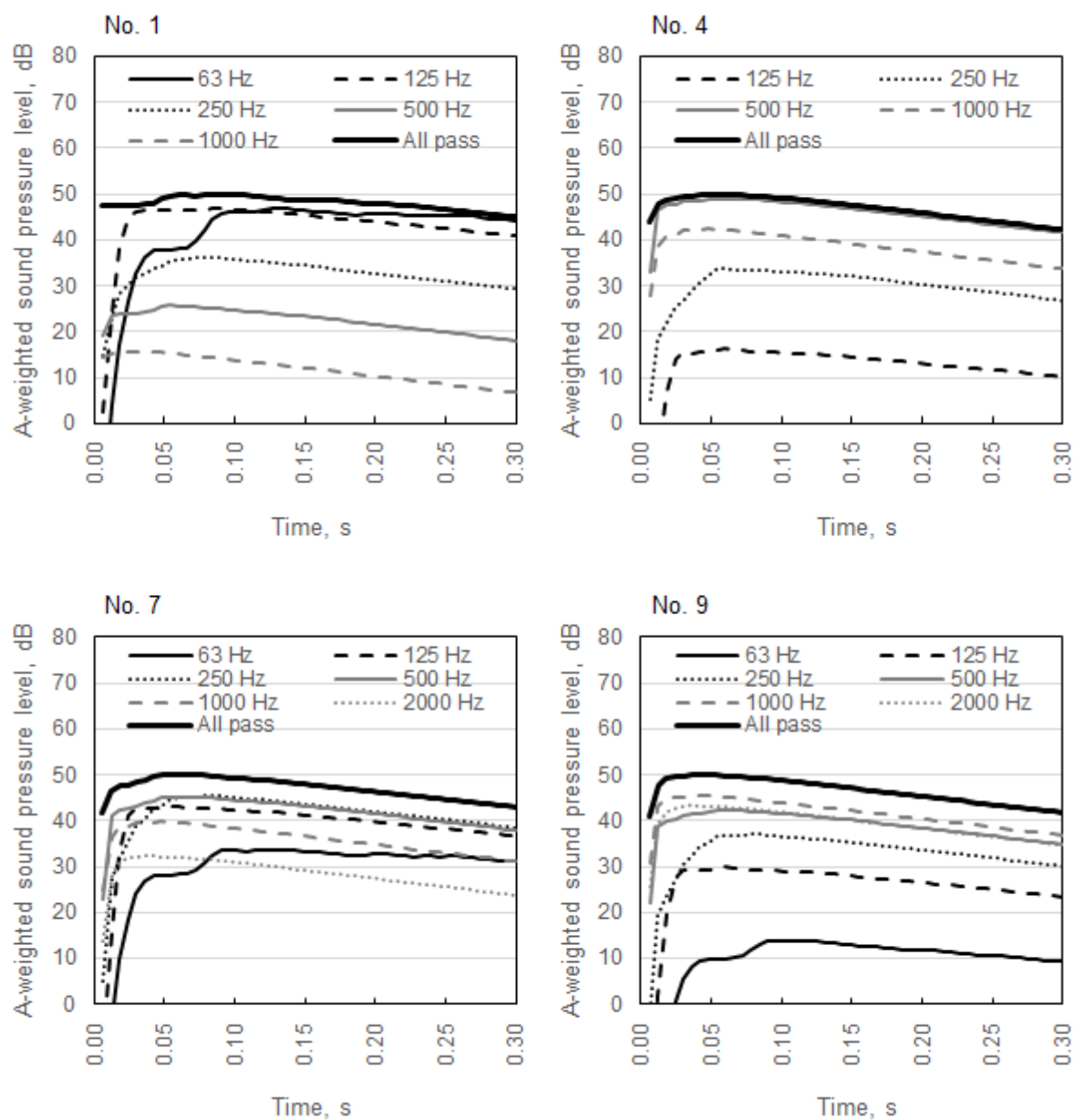


Figure 3.10 Time variation characteristics for each octave band of stimuli of the experiment 1.

Table 3.4 slopes of level attenuation from peak of L_{AFmax} of octave band 63 Hz between 0.1 to 0.2 sec. from peak level.

Impact sound	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10
Slope of L_{AFmax}	-12.2	-26.9	-26.8	-26.6	-2.75	-2.75	-11.4	-15.5	-22.4	-22.4

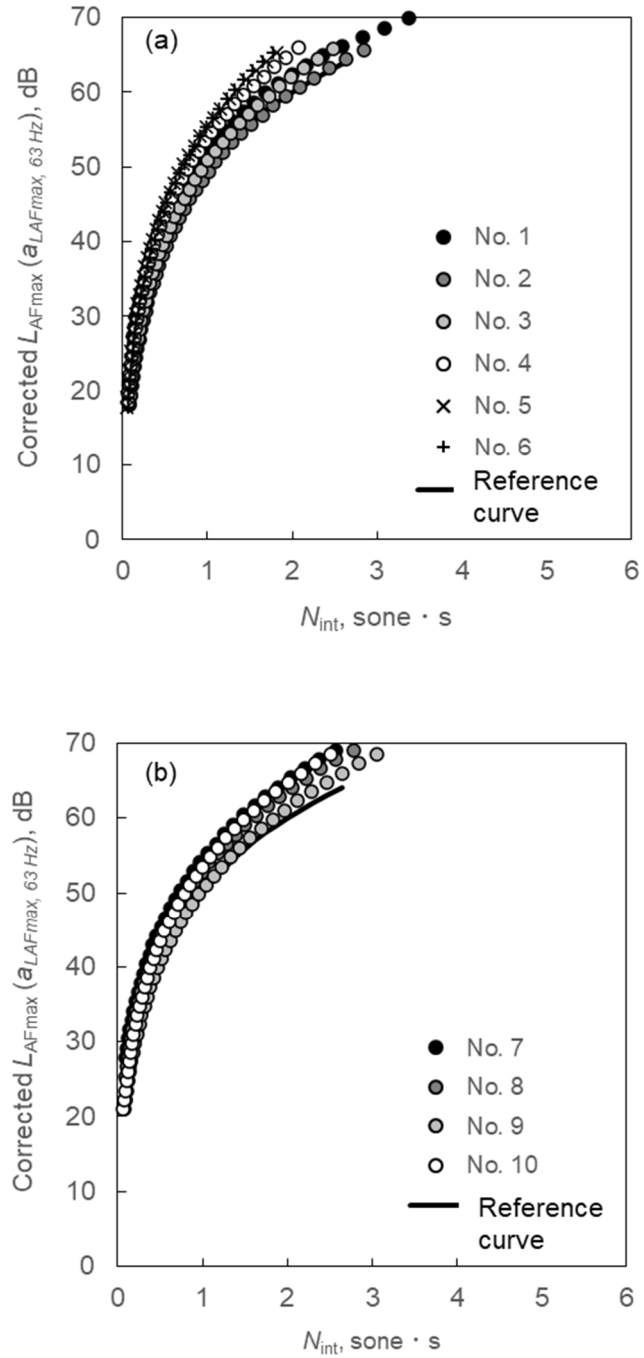


Figure 3.11 Relationship between N_{int} and correction value of L_{AFmax} of slopes of level attenuation from peak of L_{AFmax} of octave band 63 Hz between 0.1 to 0.2 sec. from peak level that of stimuli No. 1 to No. 10 and reference curve: (a) stimuli No. 1 to No. 6 and (b) stimuli No. 7 to No. 10.

第3章

Figure 3.12 において、63 Hz 帯域の「 L_{AFmax} のレベル減衰の傾き」をパラメータとした Figure 3.11 と、全周波数帯域の「 L_{AFmax} のレベル減衰の傾き」をパラメータとした Figure 3.8 と Figure 3.9 について、心理評価の予測精度を比較する。予測精度は、補正 L_{AFmax} と実測の L_{AFmax} の差から求め、差が小さい方が予測精度は高い。ここでは、床衝撃音の心理評価実験のパラメータとした L_{AFmax} が 40 dB から 50 dB を対象とする。刺激 No. 1 と No. 7 では補正方法 2 のほうが予測精度は高いが、そのほかの刺激では補正方法 3 のほうが予測精度は高い。63 Hz 帯域の周波数成分を多く含む刺激 No. 1 と No. 7 において、補正方法 2 のほうが補正方法 3 よりも予測精度が高かった理由として、2.2（実験 2）でのべたように、1000 Hz 以上の周波数成分を多く含む場合に「大きく聞こえる」傾向にあるとともに、2.1（実験 1）でのべたように、 L_{AFmax} が大きい方が「気になる」傾向にあることが考えられ、床衝撃音の「気になる」程度は低周波数成分の影響だけでは評価されないことと対応する。一方で、補正方法 3 のほうが補正方法 2 のよりも全体に予測精度が高い傾向にあることから、低周波数成分のレベルが小さい場合であっても、その時間変動特性が床衝撃音の心理評価に影響すると考えられる。

2.2（実験 2）で用いた刺激 No. 25, No. 28, No. 29 および No. 30 について補正方法 3 により L_{AFmax} を心理評価との対応が良くなるように補正するときの補正 L_{AFmax} と N_{int} の関係を Figure 3.13 に示す。No. 25 と No. 29 において、補正值が式(3.3)で表される基準曲線に近く、心理評価の予測精度が良い。No. 25 はコンクリートスラブ素面をヒール靴で歩行する場合、No. 29 はコンクリートスラブ素面にゴルフボールを自由落下させる場合に生じる床衝撃音であり、実生活で生じる床衝撃音に対しても本研究で提案する補正方法は適用可能であると言える。No. 25 と No. 29 と比較して心理評価の予測精度が劣る No. 28 はコンクリートスラブ素面をスリッパで歩行する場合、No. 30 は乾式二重床にゴルフボールを自由落下させる場合であり、実測した床衝撃音のレベルが大きではなく、暗騒音とのレベル差が十分でなかったことが要因として考えられる。

Figure 3.14 に、心理評価の重み付けを考慮した補正 L_{AFmax} のチャートを示す。この補正值は、式(3.13)により、「 L_{AFmax} のレベル減衰の傾き」と「 L_{AFmax} のレベルの大小」をパラメータとして 1 dB ごとの L_{AFmax} について計算して求めた。なお、3.3.3（補正方法）でのべたように、全周波数帯域の「 L_{AFmax} のレベル減衰の傾き」を対象とする場合と、オクターブバンドの 63 Hz 帯域の「 L_{AFmax} のレベル減衰の傾き」を対象とする場合の双方において、Figure 3.13 のチャートを用いることができる。

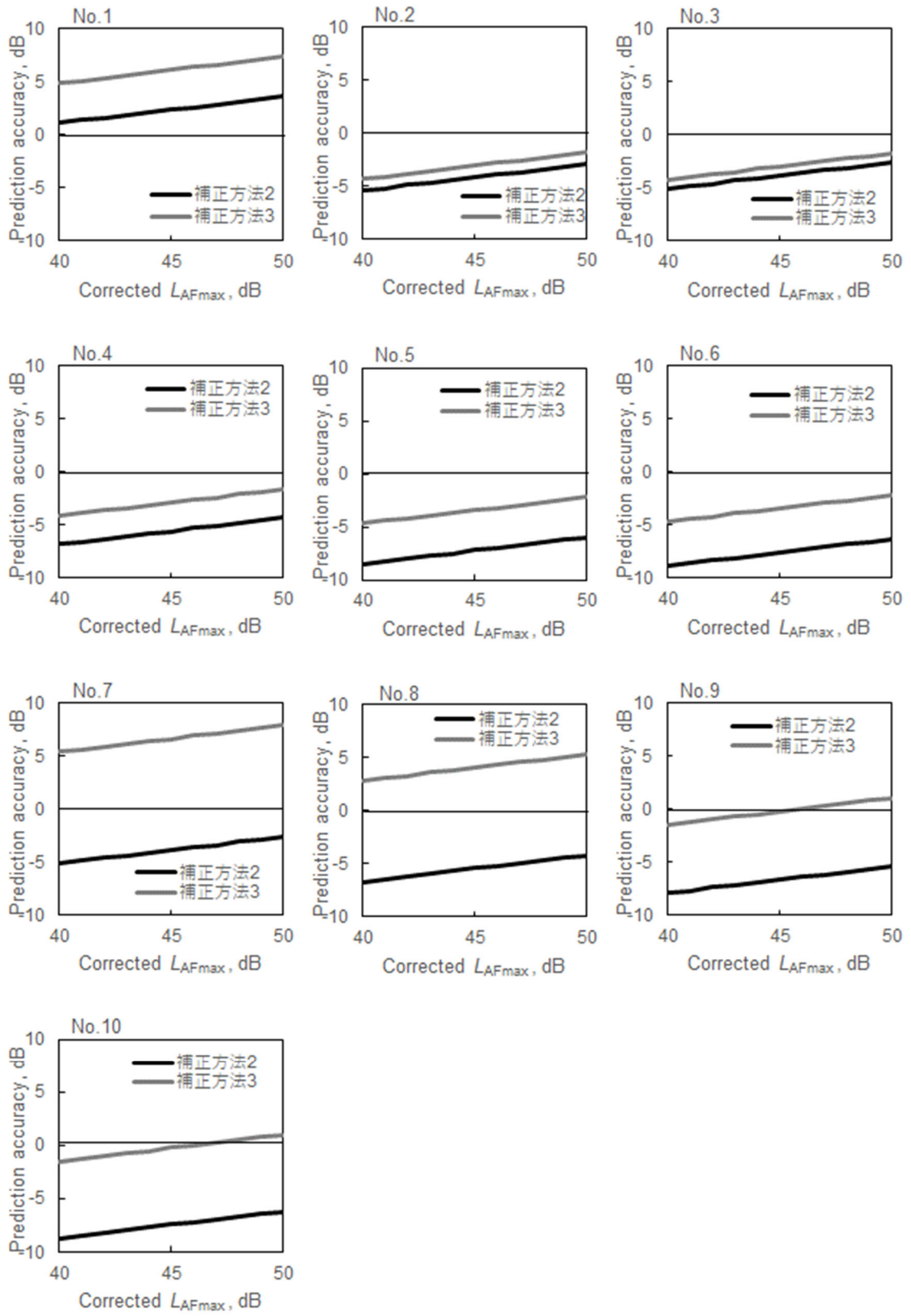


Figure 3.12 Prediction accuracy of correction method 2 and correction method 3 at each stimulus.

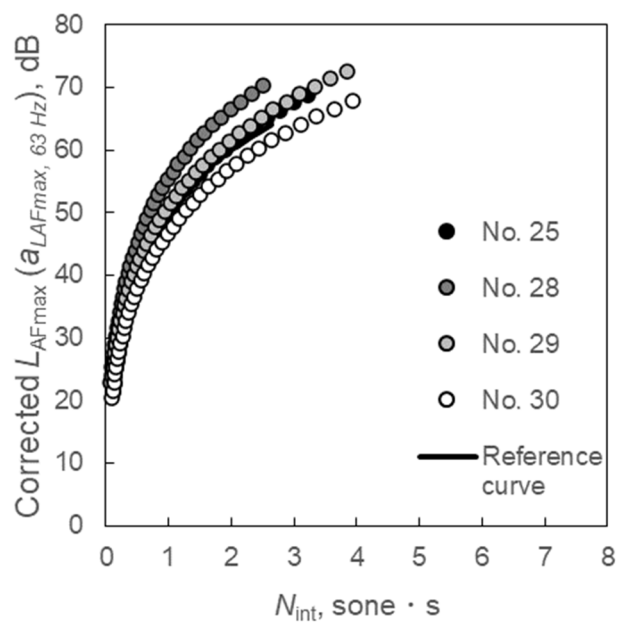


Figure 3.13 Relationship between N_{int} and correction value of L_{AFmax} of slopes of level attenuation from peak of L_{AFmax} of octave band 63 Hz between 0.1 to 0.2 sec. from peak level that of stimuli No. 25, No. 28, No. 29 and No. 30 which are impact source assumed in real life and reference curve.

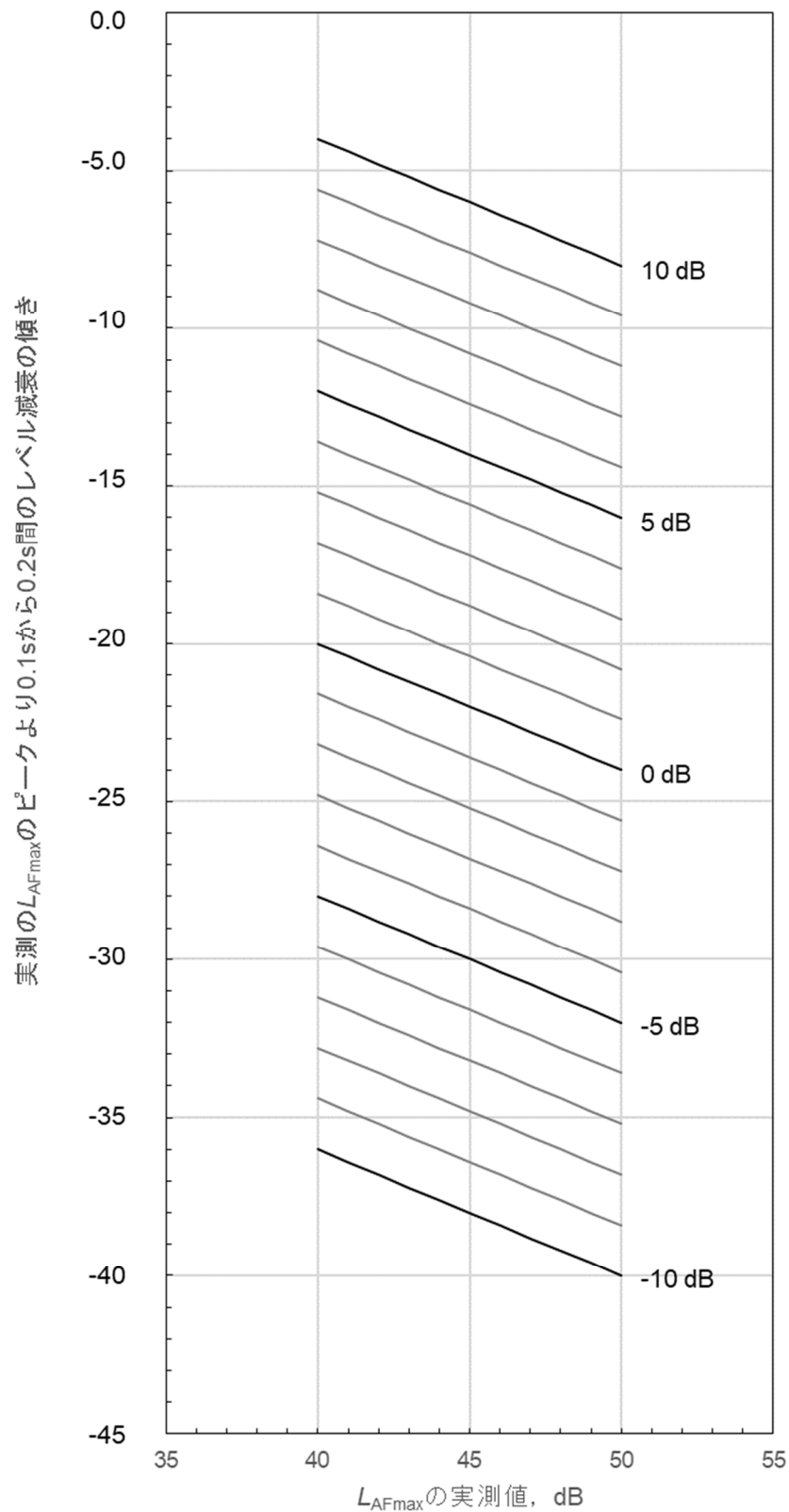


Figure 3.14 Correction values of actual value of L_{AFmax} considering correspondence with psychological evaluation.

第3章

3.4 実床衝撃音への適用

心理評価の重み付けを考慮した床衝撃音レベルを算出する場合に、Figure 3.15 に示す手順が想定される。実務上の床衝撃音の測定では、 L_{AFmax} とオクターブバンド毎の A 特性音圧レベル最大値を分析する。0.1 s 毎の L_{AFmax} の時間変動特性の分析を行わない場合と行う場合で用いる補正方法が異なる。

L_{AFmax} の時間変動特性の分析を行わない場合、床衝撃音の L_{AFmax} の決定帯域を選定し、3.3.1（補正方法 1）により、 L_{AFmax} の決定帯域によって定まる L_{AFmax} の補正値を算出し、実測の L_{AFmax} に補正値を加えることにより、心理評価の重み付けを考慮した床衝撃音レベルを求める。この場合、最も簡便に心理評価を考慮することができるが、その予測精度は L_{AFmax} の時間変動特性を考慮する場合よりも劣る。

L_{AFmax} の時間変動特性について全帯域の床衝撃音の L_{AFmax} の時間変動特性を分析する場合、3.3.2（補正方法 2）により、 L_{AFmax} のレベル減衰の傾きによって定まる L_{AFmax} の補正値を算出し、実測の L_{AFmax} に補正値を加えることにより、心理評価の重み付けを考慮した床衝撃音レベルを求める。

L_{AFmax} の時間変動特性についてオクターブバンド毎の L_{AFmax} の分析を行う場合、3.3.3（補正方法 3）により、オクターブバンド毎の L_{AFmax} のレベル減衰の傾きによって定まる L_{AFmax} の補正値を算出し、実測の L_{AFmax} に補正値を加えることにより、心理評価の重み付けを考慮した床衝撃音レベルを求める。この場合、最も精度よく心理評価を考慮することができる。

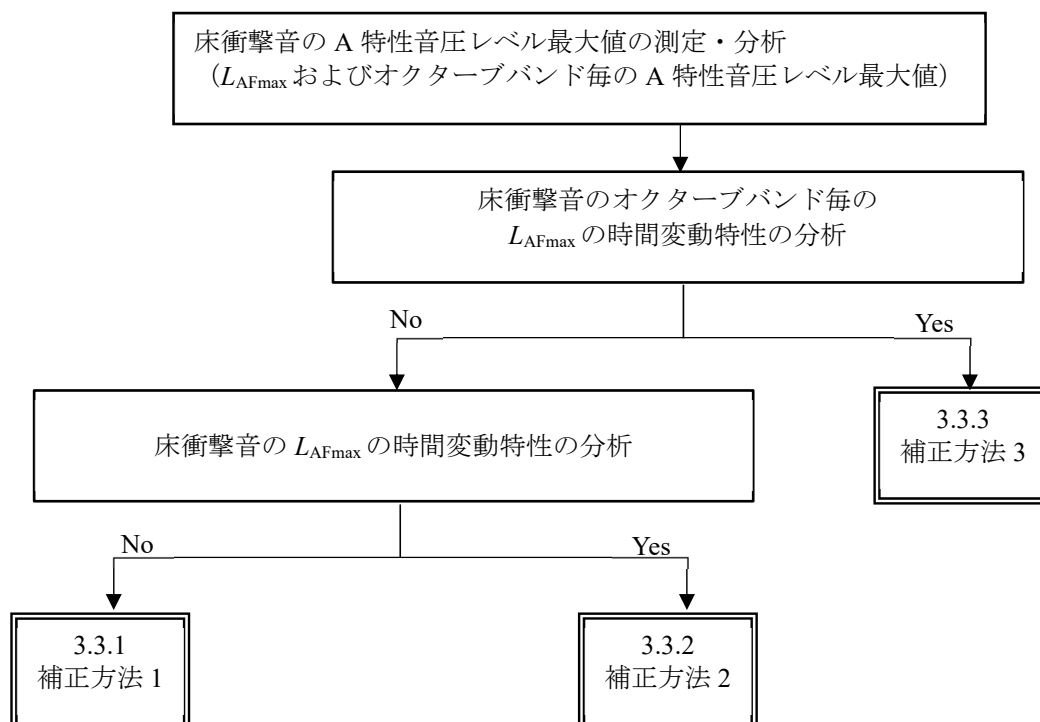


Figure 3.15 Calculation procedures of correction values of actual value of L_{AFmax} considering correspondence with psychological evaluation.

第3章

3.5 補正 L 等級曲線の可能性

ここでは、床衝撃音遮断性能の評価において、広く用いられてきた JIS に規定される L 等級曲線に対し、心理評価を考慮した補正を行うことが可能か考察する。

床衝撃音遮断性能は建築物の物理的特性であり、その性能を客観的に評価したり、比較したりできる必要がある。その中で、測定の再現性の観点から、現行の JIS に規定される標準衝撃源は、測定における加振力を統一するという点で変えることはできない。また、L 等級曲線で評価されるのは建築物の物理特性であることから、その測定・評価値そのものは心理評価と分離するべきという意見も想定される。しかし、本研究で示したように、床衝撃音の時間変動特性が心理評価に影響することから、現行の L 等級曲線に対し、どのように心理評価との対応を考慮するかは議論の余地があると思われる。

3.3.2 によれば、床衝撃音の時間変動特性のみで心理評価との対応をよくする L_{AFmax} の補正が可能であるとも言える。一方で、L 等級曲線はオクターブバンド毎の値を用いて接線法により評価することから、心理評価との対応を考慮した補正を行うには、オクターブバンド毎の補正量が必要であろう。本研究の検討をもとに、床衝撃音の時間変動特性と周波数特性の対応関係についてさらに深めた検討を行い、明らかにすることができれば、補正 L 等級曲線の可能性は期待できると考えられる。

3.6 結論

A 特性音圧レベルの最大値 (L_{AFmax}) に対して、2 章で床衝撃音の心理評価との対応を明らかにした、床衝撃音の「 L_{AFmax} のレベルの大小」、 L_{AFmax} の「周波数特性」および「時間変動特性」をパラメータとして、心理評価の予測精度をさらに向上させる補正方法を提案した。その結果、以下のことを明らかにした。

- (1) 床衝撃音の周波数特性において、オクターブバンド毎で特定の周波数帯域のレベルが卓越する場合、「 L_{AFmax} のレベルの大小」、 L_{AFmax} の「周波数特性」をパラメータとして L_{AFmax} に対して心理評価の予測精度を向上させる補正が可能である。
- (2) 周波数特性の制限なく、床衝撃音の「時間変動特性」として L_{AFmax} のピーク値より 0.1 s から 0.2 s のレベル減衰の傾きをパラメータとし、 L_{AFmax} に対して心理評価の予測精度をさらに向上させる補正が可能である。
- (3) 床衝撃音の時間変動特性を用いた補正において、床衝撃音のオクターブバンドの 63 Hz 帯域の L_{AFmax} のピーク値より 0.1 s から 0.2 s のレベル減衰の傾きをパラメータとし、 L_{AFmax} に対して心理評価の予測精度をさらに向上させる補正が可能である。
- (4) 「 L_{AFmax} のレベルの大小」、 L_{AFmax} の「周波数特性」および「時間変動特性」といった、実務上一般的に用いられる、騒音計や汎用の分析ソフトウェアで求まる物理量を用いて心理評価を予測することが出来る。
- (5) 本研究で提案する心理評価の重みづけを考慮した補正 L_{AFmax} のチャートにより、実測の床衝撃音の時間変動特性とレベルの大小を用い、床衝撃音の L_{AFmax} の心理評価の予測精度を高めることが出来る。

第4章 心理実験における生理量

本章では、心理実験あるいは音の聴取が人の生理量に及ぼす影響を対象とする。

心理実験は、実験室で行われること、ならびに刺激の評価・回答といったタスクがあることから、聴取者が日常生活において音を聴取する場合とは異なる環境であり、その違いが人の生理量に影響する可能性も容易に想定される。1.2.5 で述べたように、実験室での心理実験における脈拍等の生理量への影響を検討した既往研究は多くはない。また、ストレス下では自律神経への影響があることが知られており、自律神経に影響され変動する心拍・呼吸・血圧を用いた緊張・単調作業ストレス時の評価手法の検討[37]などが行われている。

ここでは、心理実験に参加する聴取者の、実験中の生理量の変動を明らかにすることを目的として、実験 4 と実験 5 において心理実験中の聴取者の脈拍数を計測し、音響刺激を聴取する際の聴取者の生理量と心理評価の関係を検討する。心理実験中に生じると想定される生理量の変動は、純粋に、聴取する音響刺激に起因する場合と、刺激に対する評価と回答タスクに起因する場合が考えられる。実験 4 では、刺激に対する評価と回答タスクを聴取者に課す通常の心理実験における生理量の影響を検討する。しかし、心理実験における評価と回答のタスクが生理量に影響するならば、聴覚刺激に対する日常生活での評価構造と心理実験での評価構造が異なる可能性も想定される。この可能性の有無を検討するため、実験 5 では、聴取者に心理実験における評価と回答タスクを課さずに、純粋に音響刺激を聴取するのみとする場合の聴取者の生理量に着目する検討とした。実験 4 と実験 5 の比較より、心理実験における刺激の聴取および評価と回答のタスクが聴取者の生理量に影響するかを考察する。

4.1 実験 4：床衝撃音の聴取および評価時の生理量に着目した検討

2.3 で述べた床衝撃音の「気になる」程度を評価する心理実験と同時に行った。

4.1.1 実験方法

A. 聴取者

実験 3 と同一の正常な聴力を有する若齢者 14 名とした。

第 4 章

B. 実験装置

実験の前に、床衝撃音の聴取者の安静時脈拍数を血圧計（OMRON, HEM-7511T）で計測した。実験者は、聴取者が実験室へ入室する前に上腕に光学式脈拍センサー（Polar, OH1）を装着させ、入室から実験終了までの脈拍数を計測した。なお、聴取者の脈拍数と、心理実験における刺激提示、聴取、評価といったイベントは、実験制御用 PC の内部時刻で統一したタイムスタンプと共に記録し、各種イベントと脈拍数の時間軸上での比較ができるようにした。

日常活動を妨げない長時間の生理量モニタリングの検討[38]がされているように、生理量を計測する測定器の装着そのものが生理量に影響すると考えられる。本研究では、心理実験下の生理量を対象としていることから、心理実験への影響がより少ないと想定される装着性に優れた測定器を採用することとし、測定する生理量は脈拍数とした。

実験中、聴取者は実験室中央の椅子に着座した。実験者は実験室外で聴取者の脈拍数を観察し、安静時脈拍数に落ち着いたことを確認したのち実験を開始した。本研究では、実験中の聴取者の条件を統制するため、床衝撃音の評価時以外はタブレットで読書するというタスクを与えた。

C. 実験音場

実験 3 と同一とした。

D. 刺激

実験 3 と同一とした。

4.1.2 結果と考察

Figure 4.1 から Figure 4.3 に、実験中の脈拍数変動の一例を示す。刺激の提示がされてから回答を開始するまでの区間の脈拍数に着目すると、上昇する場合、下降する場合、変動が小さい場合と様々であり、実験中の刺激提示および回答といったイベントと脈拍数の変化が対応する傾向はみられなかった。

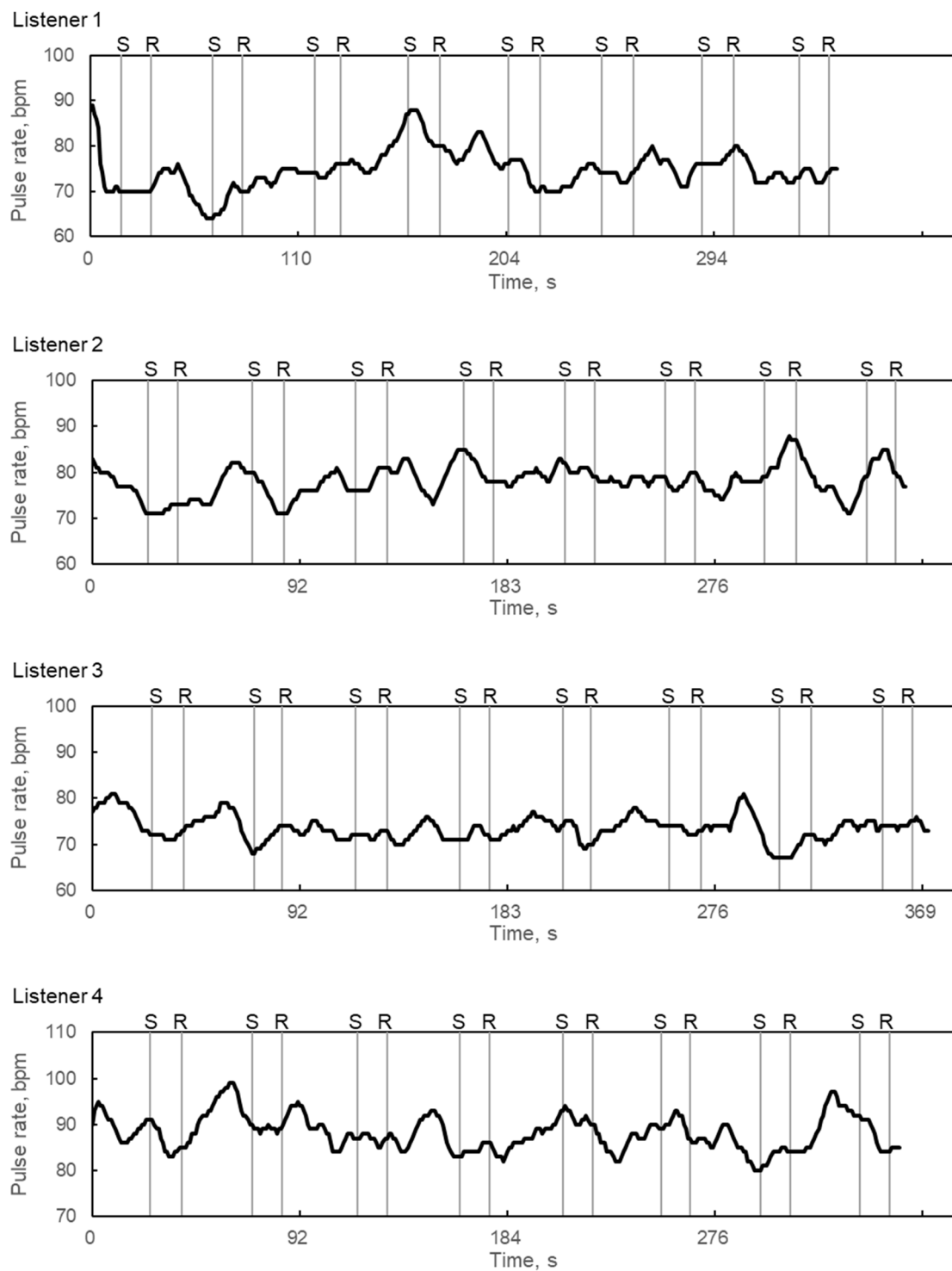


Figure 4.1 Example of pulse rate variability of Listener 1 to 4 during experiment 4: S means start stimulus and R means response for evaluation.

第 4 章

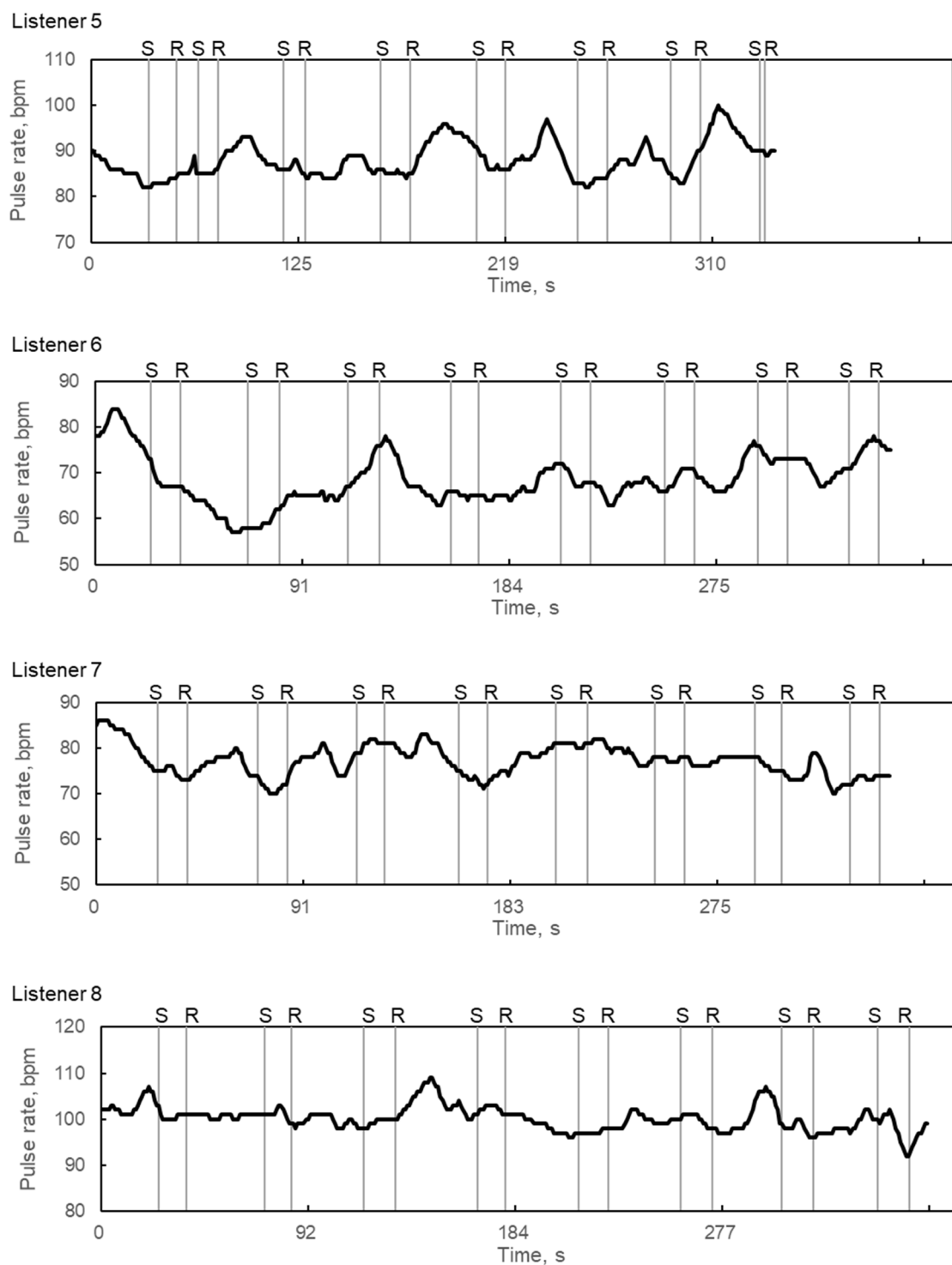


Figure 4.2 Example of pulse rate variability of Listener 5 to 8 during experiment 4: S means start stimulus and R means response for evaluation.

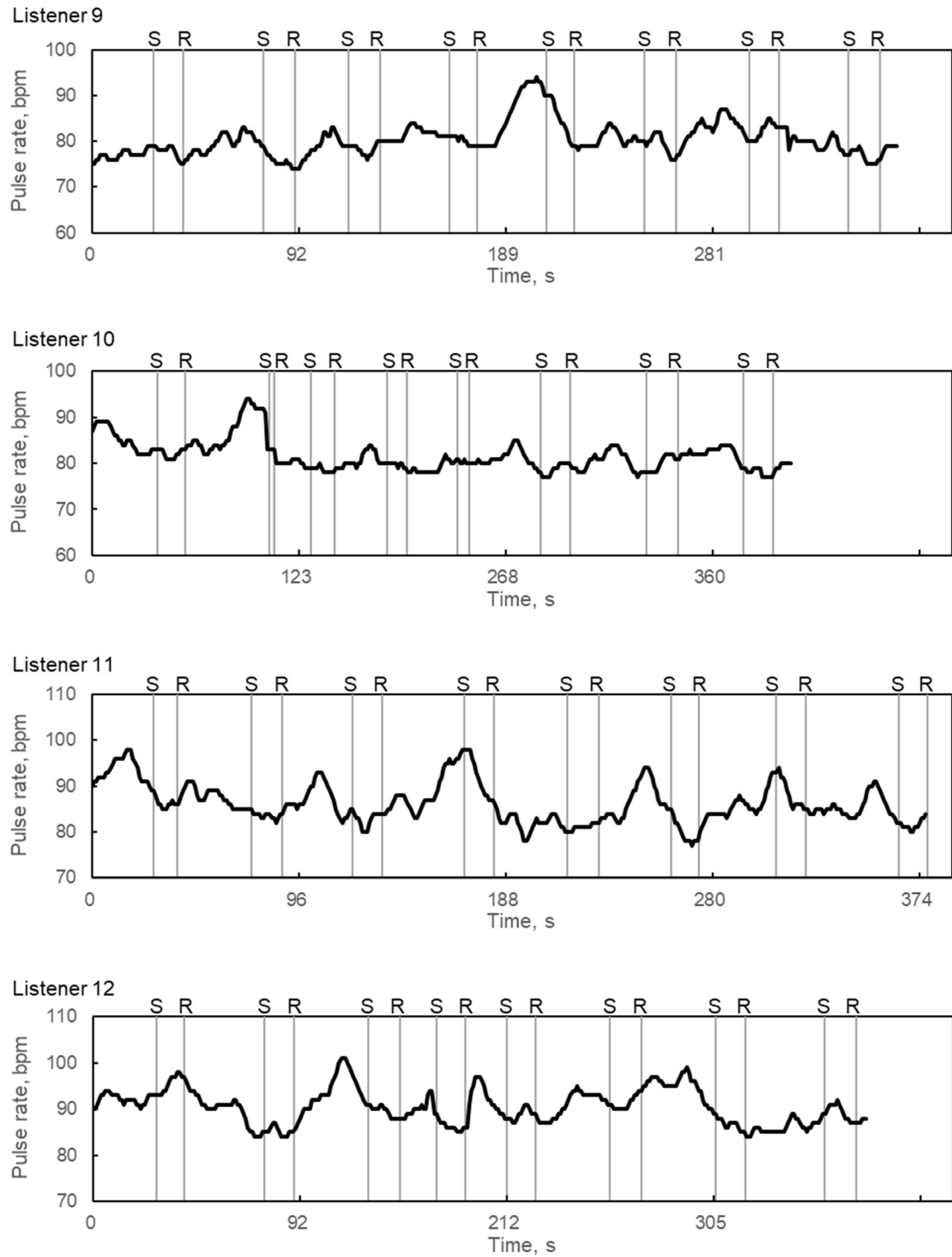


Figure 4.3 Example of pulse rate variability of Listener 9 to 12 during experiment 4: S means start stimulus and R means response for evaluation.

第 4 章

4.2 実験 5：床衝撃音の聴取時の生理量に着目した検討

実験 4 では、聴取者に床衝撃音に対する「気になる」程度を評価させたが、このタスクが日常生活とは異なる心理状態を生じさせ、生理量に影響を及ぼした可能性がある。そこで、聴取者が床衝撃音に対する評価を行わず、聴取のみを行う条件で生理量を測定する実験を行った。実験 3 と同時に行った実験 4 と異なり、実験 5 のみを単独で実施した。

4.2.1 実験方法

A. 聴取者

正常な聴力を有する若齢者 9 名とした。このうち 8 名は、実験 4 と実験 5 の両方に参加した。

B. 実験装置・実験音場・刺激

脈拍の計測方法を含む実験装置、実験音場、刺激は実験 4 と同様とした。

実験 5 においても実験中の聴取者の条件を統制するため、タブレットで読書するというタスクを与えた。刺激提示後に「気になる」程度の評価の回答画面に切り替わるのではなく、聴取者は実験開始から終了まで読書を連続して続けた。実験開始から最初の刺激が提示されるまでの時間間隔は $25+\alpha$ s であり、それ以降の刺激と刺激の時間間隔は $50+\alpha$ s とした。 α は 0 から 5 の範囲で刺激の提示ごとにランダムに変えた。最後の刺激の提示後に 50 s の脈拍データを測定してから実験を終了した。

4.2.2 結果と考察

Figure 4.4 と Figure 4.5 に実験中の脈拍数変動の一例を示す。刺激の提示がされてから回答を開始するまでの区間の脈拍数に着目する。4.1（実験 4）と同様に、脈拍数が上昇する場合、下降する場合、変動が小さい場合と様々であり、実験中の刺激提示および回答といったイベントと脈拍数の変化が対応する傾向はみられなかった。

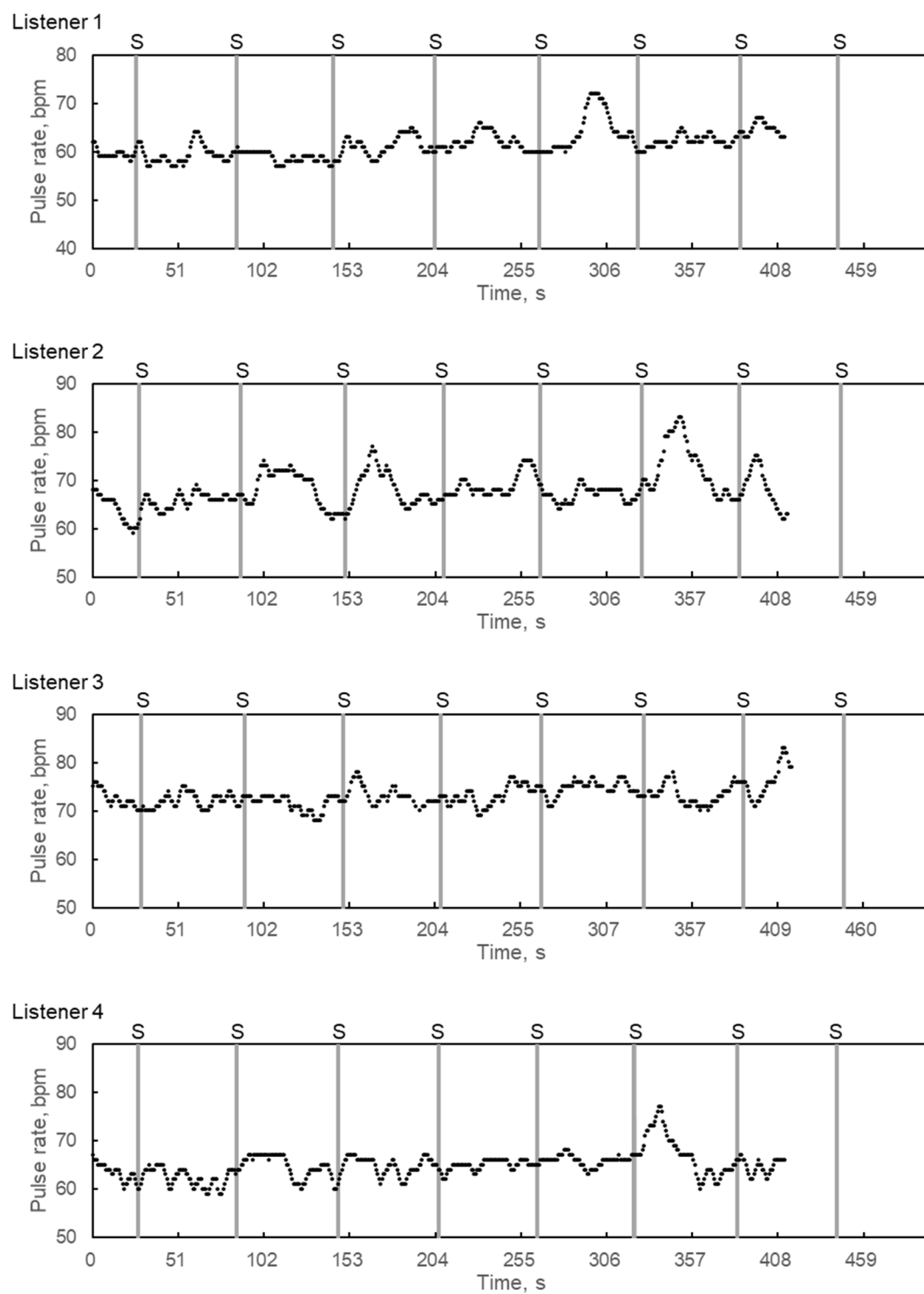


Figure 4.4 Example of pulse rate variability of Listener 1 to 4 during experiment 5: S means start stimulus.

第 4 章

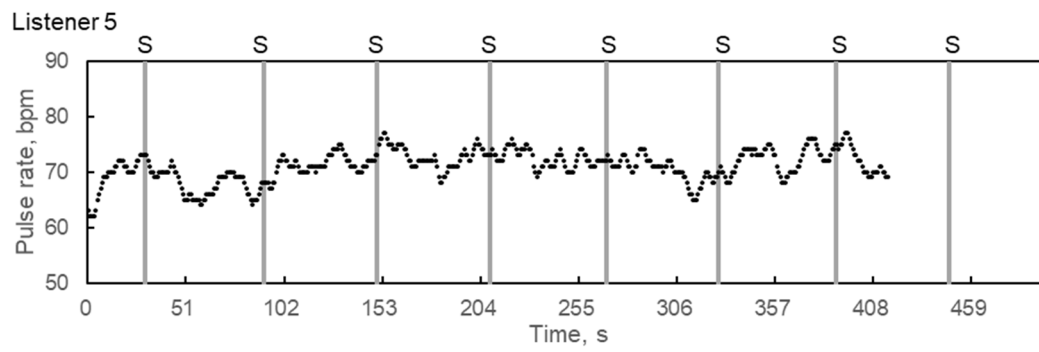


Figure 4.5 Example of pulse rate variability of Listener 5 during experiment 5: S means start stimulus.

4.3 脈波のピーク間隔に着目した検討

心拍については、心電図に現れる R 波と R 波の間隔である心拍 R-R 間隔 (R-R interval: *RRI*) は身体的・精神的ストレスの指標になることが既往研究[39]から示されている。また、より簡便に計測可能な脈拍に着目し、ストレス評価する試み[40]もなされている。本研究では、脈拍を測定対象としており厳密には心拍と一致しないが、心拍変動と脈拍変動については、立位動作時および安静座位時には対応が見られることを前田ら[41]が明らかにしている。そこで、心拍 R-R 間隔のゆらぎを表す心拍 R-R 間隔変動係数 (Coefficient of Variation for the R-R interval, *CVR-R*) を参考に、本検討では脈波のピーク間隔とその変動係数を心理実験における生理量の影響を検討する指標として用いる。なお、*CVR-R* が大きいほど副交感神経優位でリラックス状態にある[42]とされている。

4.3.1 分析方法

自律神経の働きを評価する指標として、*RRI* を用いて心拍のゆらぎの大きさを評価する *RRI* の変動係数に相当する *CVR-R* が用いられている。*CVR-R* (%)は式(4.1)により求まる。

$$CVR - R = \frac{(RRI100 \text{ 点間標準偏差})}{(RRI100 \text{ 点間平均値})} \times 100 \quad (4.1)$$

本研究では、脈拍を測定対象としたため、厳密には心拍と一致しないが、*CVR-R* を参考に、式(4.2)により脈波のピーク間隔 (Pulse interval: *PI*) の変動係数 *CV* (%)を求めた。

$$CV = \frac{(T \text{ 秒間}PI\text{標準偏差})}{(T \text{ 秒間}PI\text{平均値})} \times 100 \quad (4.2)$$

なお、脈波のピーク間隔 *PI* (s)の値は、実験で得られた約 0.9 秒ごとの脈拍数から式(4.3)により求めた。

$$PI = \frac{60}{\text{脈拍数}} \quad (4.3)$$

ただし、*CVR-R* の算出時にサンプル数を 100 点と統制していることからわかるように、変動係数 *CV* は分析対象サンプル数が値に影響することに注意が必要である。本検討では、可能な限り分析区間を揃えた検討を行ったが、自然な活動下を想定した計測である都合上、分析区間により分析対象サンプル数が異なる場合が多いため、次項で述べる考

第 4 章

察においては心理実験の生理量への影響の傾向について触れるにとどめる。本研究のような日常生活を想定した生理量の計測において、人の行動やイベントと対応する分析区間をどのように設定するかは議論の余地があると考えられる。

4.3.2 結果と考察

各実験におけるイベントと聴取者の生理量の分析区間の関係を Figure 4.6 に示す。また、Table 4.1 に各分析区間のサンプル数の平均と標準偏差を示す。分析区間について、実験 4 では、区間 4-1「床衝撃音開始から評価開始まで」、区間 4-2「評価開始から確定まで」、区間 4-3「評価確定から次の床衝撃音まで」とし、実験 5 では、区間 5-1「床衝撃音聴取から 15 秒間」、区間 5-2「床衝撃音聴取の 15 秒後から次の床衝撃音まで」とした。

各分析区間のサンプル数と生理量の関係について、Figure 4.7 に PI との関係を、Figure 4.8 に CV との関係を示す。サンプル数および各生理量は提示する刺激ごとの平均値である。Figure 4.7 より、全分析区間を対象とするとサンプル数と PI には負の相関がみられる。回帰直線により予測する場合、Figure 4.7 (a)に示す実験 4 で決定係数の値が 0.0966, Figure 4.7 (b)に示す実験 5 で決定係数の値が 0.0564 となり、予測精度は低くほぼ無相関である。Figure 4.8 より、全分析区間を対象とするとサンプル数と PI には負の相関がみられる。回帰直線により予測する場合、Figure 4.8 (a)に示す実験 4 で決定係数の値が 0.943, Figure 4.8 (b)に示す実験 5 で決定係数の値が 0.759 となり、予測精度は高く相関が強い。このように、各分析区間の CV は分析対象サンプル数の影響を受ける。

以降では、心理実験における刺激の聴取あるいは刺激の評価といったタスクが心理量に影響するか詳細に考察する。

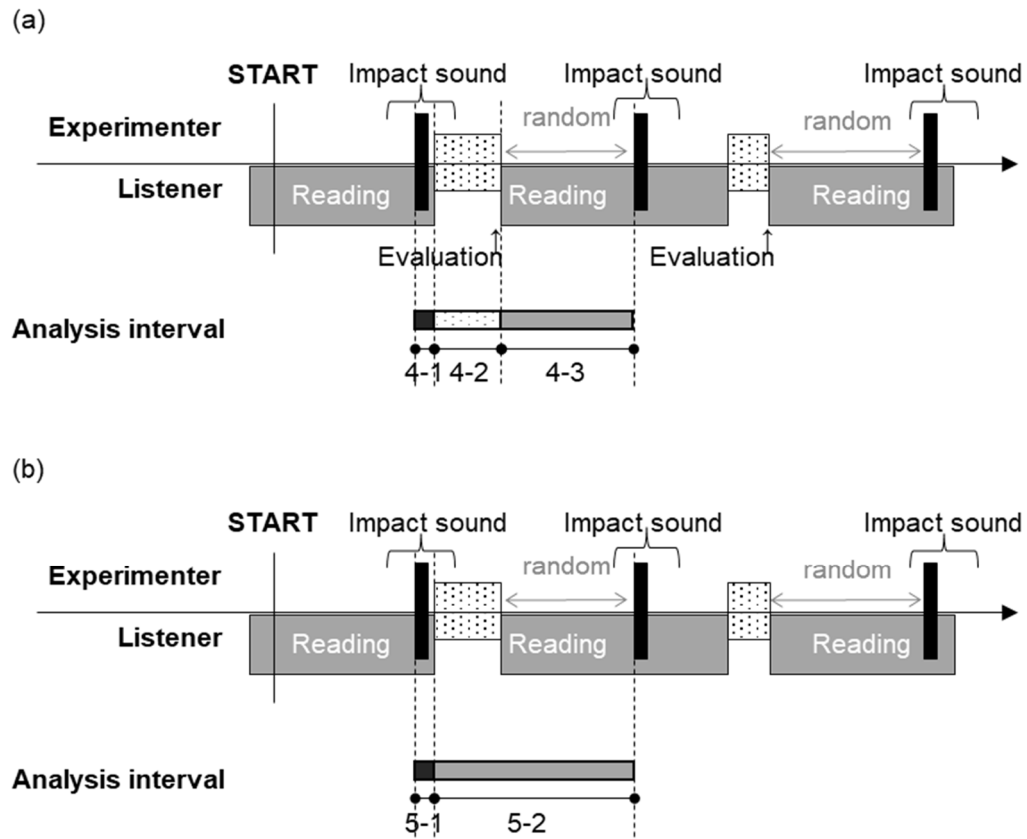


Figure 4.6 Relationship between the event in each experiment and the analysis interval of the listener's physiological quantity: (a) Experiment 4 and (b) Experiment 5.

Table 4.1 Statistics on the number of samples of PI in each analysis interval.

Analysis interval	4-1	4-2	4-3	5-1	5-2
Average	11.1	4.5	22.1	15	43
Standard deviation	3.4	2.5	11.1	0	3.7

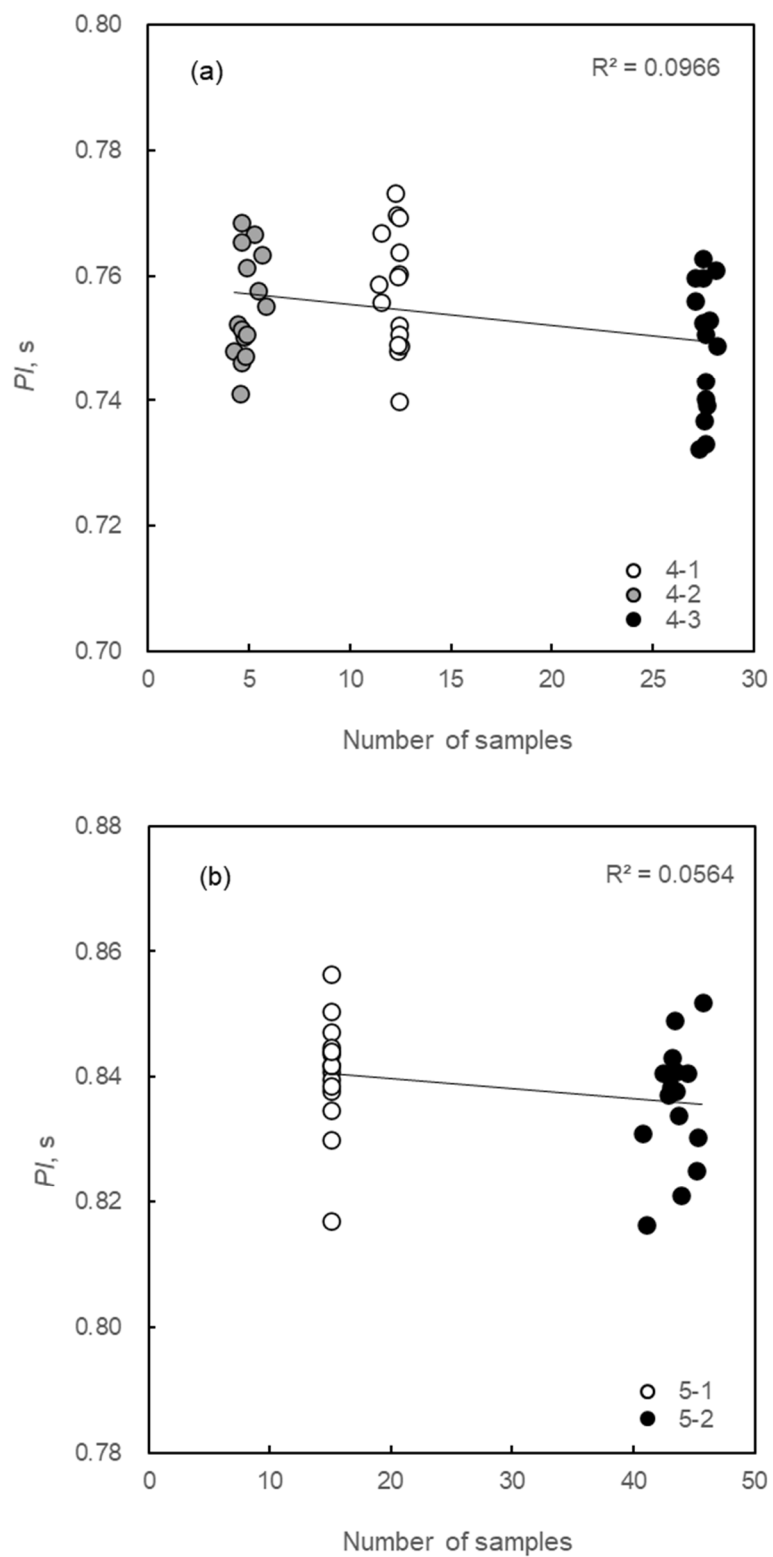


Figure 4.7 Correspondence between PI and number of samples in each analysis interval:
(a) Experiment 4 and (b) Experiment 5.

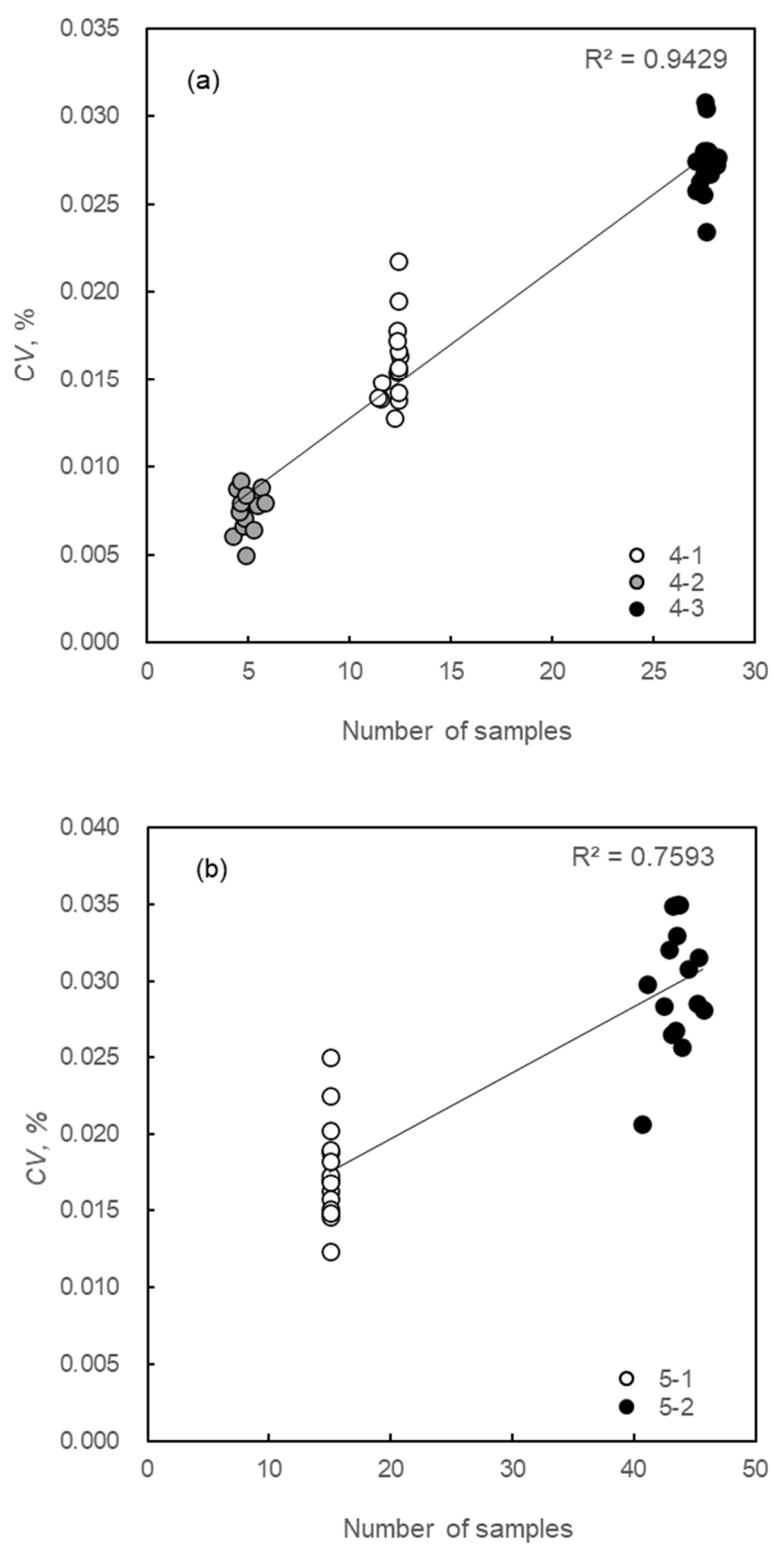


Figure 4.8 Correspondence between *CV* and number of samples in each analysis interval:
(a) Experiment 4 and (b) Experiment 5.

刺激のカテゴリ評価と生理量

はじめに、心理実験におけるイベントが生理量に影響するか検討する。2.3（実験 3）で述べた床衝撃音の気になる程度のカテゴリ評価と、生理量の関係に着目する。全分析区間について、Figure 4.9 に各分析区間および Table 2.6 で示した条件ごとの *PI* の平均値とカテゴリ評価の平均値の対応を、Figure 4.10 に同様に *CV* の平均値とカテゴリ評価の平均値の対応を、実験 4 と実験 5 について示す。床衝撃音に対する心理評価のカテゴリに着目すると、心理評価と聴取者の生理量に顕著な対応関係はみられなかったが、Figure 4.10 (a)に示す区間 4-1 に着目すると、カテゴリ評価と *CV* に正の相関があるようにも見受けられる。そこで、分析区間ごとに生理量とカテゴリ評価の対応を検討する。Figure 4.11 に *PI* とカテゴリ評価の対応を、Figure 4.12 に *CV* とカテゴリ評価の対応を、実験 4 と実験 5 について示す。また、Figure 4.9 と Figure 4.10 を見ると各分析区間の生理量とカテゴリ評価の対応には外れ値があることから、外れ値の影響を受けにくいスピアマンの相関係数を求めた。相関係数の算出に用いるサンプル数は Table 2.6 に示す 15 条件で $n=15$ である。結果を Table 4.2 に示す。なお、前述の通り *CV* とサンプル数は比較的強い相関がある。この影響を除くため、スピアマンの相関係数による検定では、Table 4.1 に示す平均値をもとに、ここでは区間 4-1 の生理量は刺激提示開始から 11 サンプルに統一した。Table 4.2 より、いずれの区間においても、カテゴリ評価と *CV* あるいは *PI* の間のスピアマンの相関係数の絶対値は $n=15$ の場合の有意水準 5%の検定値である 0.521 を下回っており、帰無仮説を棄却できないため統計的に有意な相関は認められない。このことから、床衝撃音の聴取・評価そのものは生理量に影響しないと考えられる。

Table 4.2 Statistical significance in Spearman's correlation coefficient between *PI* or *CV* and psychological assessment for each analysis interval.

Analysis interval	4-1		4-2		4-3		5-1		5-2	
Physiology	<i>PI</i>	<i>CV</i>	<i>PI</i>	<i>CV</i>	<i>PI</i>	<i>CV</i>	<i>PI</i>	<i>CV</i>	<i>PI</i>	<i>CV</i>
Spearman's correlation coefficient	0.275	0.411	-0.418	-0.100	-0.154	0.243	-0.275	0.196	-0.111	-0.268
Statistical significance	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No

続いて、暗騒音のみを評価する場合に着目する。Figure 4.10 (b)に示すカテゴリ評価の値が 1 に近い場合が暗騒音のみの聴取で床衝撃音は提示されない場合である。定常的に暗騒音が提示され実験室内の音場に変化がない場合であっても、 CV は区間 5-1 と区間 5-2 で異なることがわかる。暗騒音のみを聴取する場合には、区間 5-1 と区間 5-2 で実験室内の音場は変化しないことから生理量に差がないことが想像されるが、今回の実験では両者に差が見られた。これは、本項の冒頭で述べたように、人の生理量が絶えず変化しており、 CV を算出する際に用いる PI の標準偏差が、対象サンプル数がわずかに異なるだけで異なる値を取るためと推測される。

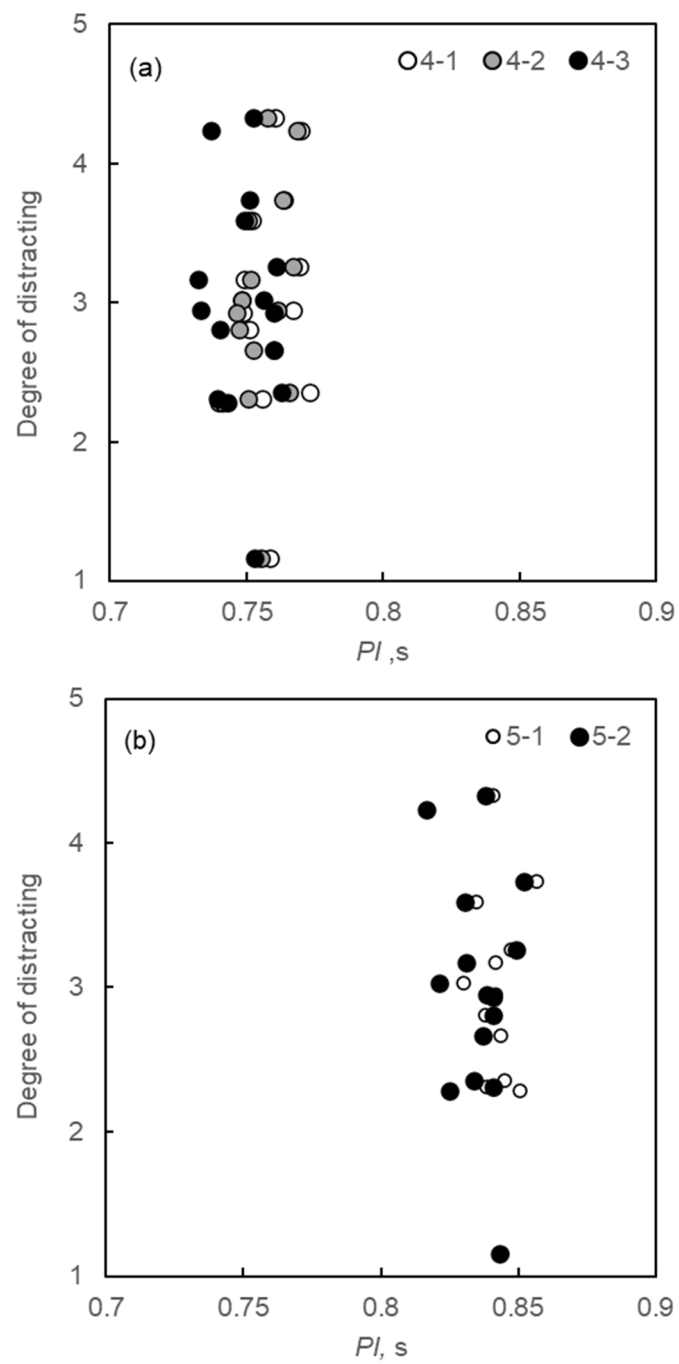


Figure 4.9 Correspondence between PI and psychological evaluation in each analysis interval: (a) Experiment 4 and (b) Experiment 5.

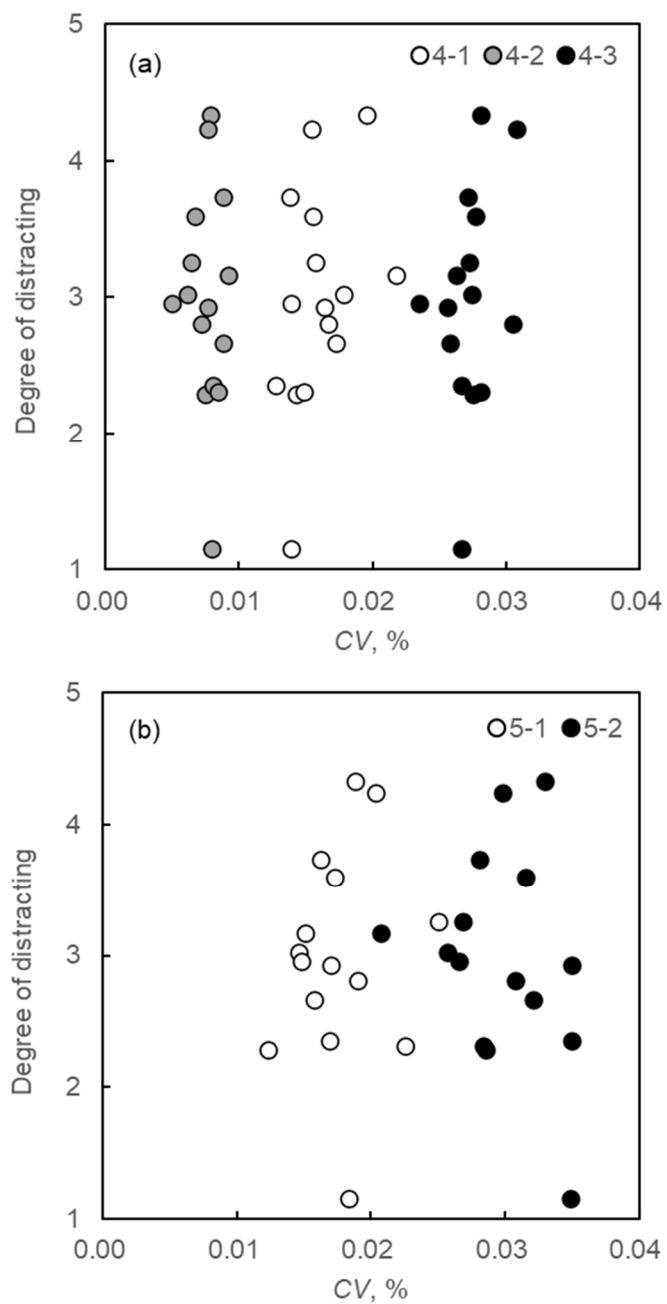


Figure 4.10 Correspondence between *CV* and psychological evaluation in each analysis interval:
(a) Experiment 4 and (b) Experiment 5.

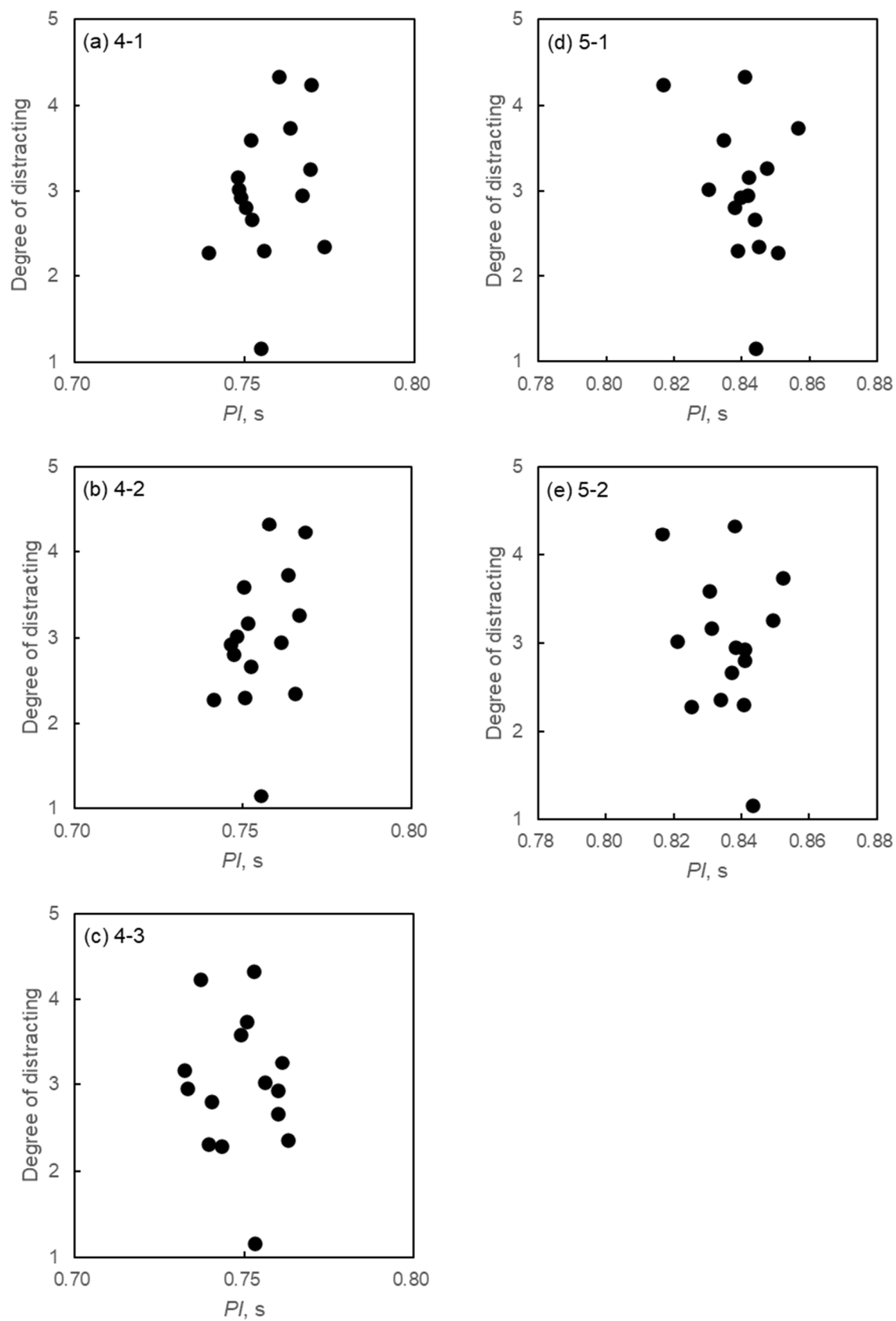


Figure 4.11 Correspondence between average of PI and psychological evaluation: (a) interval 4-1, (b) interval 4-2, (c) interval 4-3, (d) interval 5-2 and (e) interval 5-2.

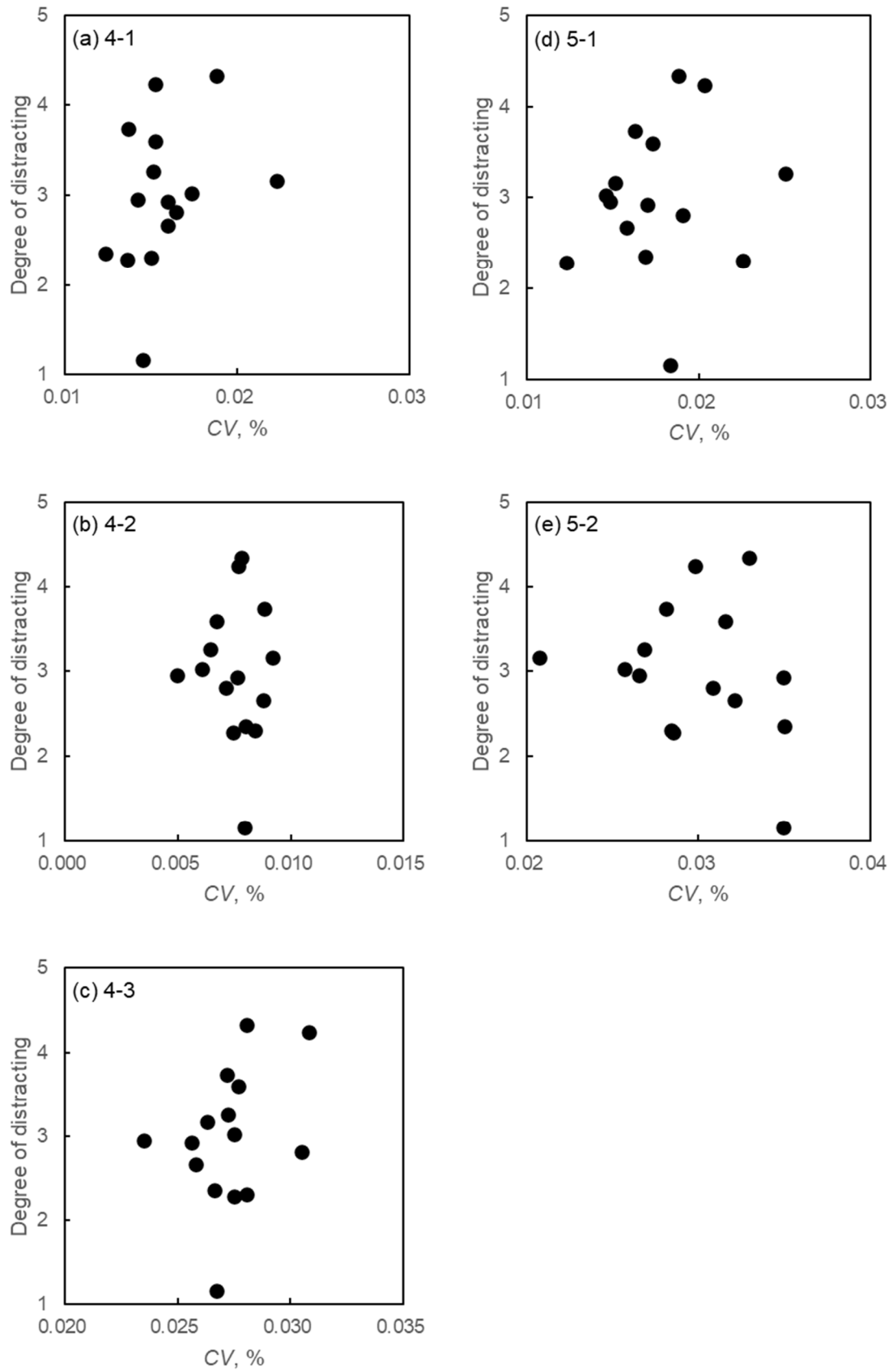


Figure 4.12 Correspondence between average of CV and psychological evaluation: (a) interval 4-1, (b) interval 4-2, (c) interval 4-3, (d) interval 5-2 and (e) interval 5-2.

評価のタスクの有無

ここでは、心理実験の評価のタスクの有無が心理量に影響するかを考察する。心理実験は刺激に対する人の評価に関する知見を得ることを目的としていることから、心理実験では、実験の参加者に対して刺激の評価等のタスクを課するのが一般的であり、参加者は予め教示文などにより自身に課せられたタスクを自覚している。

Figure 4.13 に聴取者ごとの PI の平均値を示す。Figure 4.13 (b) に示す実験 5 については、実験に参加した聴取者 8 名のうち、生理量の有効な計測ができた 5 名について示す。 PI の平均値は、実験 4 と実験 5 とともに聴取者によりばらつく。全聴取者の平均値に着目すると、聴取者に対して刺激への評価のタスクが課せられる実験 4 のほうが、評価のタスクを課さずに純粋に刺激を聴取する実験 5 よりも、 PI の値は小さい。

Table 4.1 に示したように、比較的分析区間でのサンプル数が近い区間 4-1 と区間 5-1 について、聴取者ごとに CV の平均値を比較する。Table 4.1 より、区間 4-1 の脈拍数のサンプル数は平均 11.1 サンプル、標準偏差 3.4 であり、区間 5-1 はすべて 15 サンプルである。Figure 4.14 から CV の値は区間 4-1 と区間 5-1 でほとんど差がない。

以上の、刺激の床衝撃音の聴取を含む実験 4 の区間 4-1「床衝撃音開始から評価開始まで」と実験 5 の区間 5-1「床衝撃音聴取から 15 秒間」の間について、聴取者ごとの PI あるいは CV の平均値に有意差があるか検討する。実験 4 と実験 5 で有効なデータを取得できた聴取者数は異なり、実験 4 が 12 名、実験 5 が 5 名である。各実験の聴取者数が異なることから、聴取者ごとの生理量が正規分布すると仮定し、等分散を仮定した 2 標本による t 検定を行う。有意水準を 5% とする。統計的検定の結果、 PI の平均値は両側検定： $t(15)=2.63, p=1.88 \times 10^{-2}, d=0.01$ となり、区間 4-1 と区間 5-1 の間に統計的に有意な差が認められた。同様に、 CV の平均値に有意差があるか検討した結果、両側検定： $t(15)=1.16, p=0.264, d=1.24 \times 10^{-4}$ となり、区間 4-1 と区間 5-1 の間に統計的な有意な差は認められなかった。

区間 4-1 と区間 5-1 以外の分析区間の PI の平均値に着目すると、区間 4-1 と区間 5-1 と同様に、刺激への評価を課す実験 4 のほうが評価を課さない実験 5 よりも PI の平均値が小さい。このことから、生理量を一定のサンプル数で抽出することが難しい、心理実験のように連続的にイベントが変化する状況において PI が生理量の評価指標として適している可能性がある。

以上から、聴取者に対し刺激への評価を課すか否かという、一般的に心理評価実験で聴取者に課すタスクそのものが聴取者の生理量に影響することを示唆する結果を得た。なお、評価を課す場合は課さない場合よりも聴取者の脈波のピーク間隔は狭くなるが、刺激を聴取する際の脈拍変動のばらつきには統計的に有意な差はなかった。

床衝撃音の聴取・評価と平常状態

聴取者ごとの PI および CV の平均値について、心理実験のイベント対応する分析区間ごとに比較する。ただし、Table 4.1 に示すように、分析対象とした脈拍数のサンプル数が分析区間によっては大きく異なることに注意が必要である。

実験 4 では、Figure 4.13 (a) と Figure 4.14 (a) に示す、区間 4-1 「床衝撃音開始から評価開始まで」、区間 4-2 「評価開始から確定まで」、区間 4-3 「評価確定から次の床衝撃音まで」に着目する。Figure 4.13 (a) に示す、全聴取者の PI の平均値は、各分析区間で明確な差が見られない。一方で Figure 4.14 (a) に示す、 CV は各分析区間で異なる傾向にあり、刺激の評価を含む区間 4-2 において最も変動係数 CV の値が小さく、次いで刺激の聴取を含む区間 4-1、続いて読書のみ行う区間 4-3 の順に値が大きくなり、「刺激のカテゴリ評価と生理量」で述べたように、心理実験を通じて脈波のピーク間隔にばらつきがあること、あるいは分析区間の対象サンプル数の違いによる影響が考えられる。

実験 4 について、聴取者ごとの PI と CV の各平均値について各分析区間の間に統計的に有意な差があるか検討する。Table 4.3 に統計的検定の結果を示す。 PI はいずれの分析区間の組み合わせにおいても統計的に有意な差は認められなかった。一方で、 CV はすべての分析区間の組み合わせで統計的に有意な差が認められた。同様に、実験 5 について、聴取者の各聴取者の PI と CV の各平均値について各分析区間の間に統計的に有意な差があるか検討する。Table 4.4 に統計的検定の結果を示す。実験 4 と同様に、 PI は分析区間で統計的に有意な差は認められなかった一方で、 CV は統計的に有意な差が認められた。

以上より、心理実験のタスクである「刺激の聴取」を行う場合と、「刺激に対する評価」を行う場合と、どちらのタスクも含まない場合で生理量の特徴は異なり、「刺激に対する評価」を行う場合が刺激の聴取を行う場合と比べて CV の値が小さく、脈波のピーク間隔の変動が小さい状態となる傾向が窺える。ただし、心拍や脈拍は聴取者の体位等によって容易に変動する[33]こと、 CV が分析対象のサンプル数によって変化することから、一連の実験中のイベントが生理量に影響したかどうかを結論付けることはできない。ただし、前述の「評価のタスクの有無」で議論したように、分析対象のサンプル数が異なる場合であっても PI から心理実験における聴取者の生理量への影響を考察できることを勘案すると、同一実験下で PI に統計的な有意差は無かったことから、一連の実験下においては、「刺激の聴取」および「刺激に対する評価」のイベントは聴取者の生理量に影響しないと推測される。

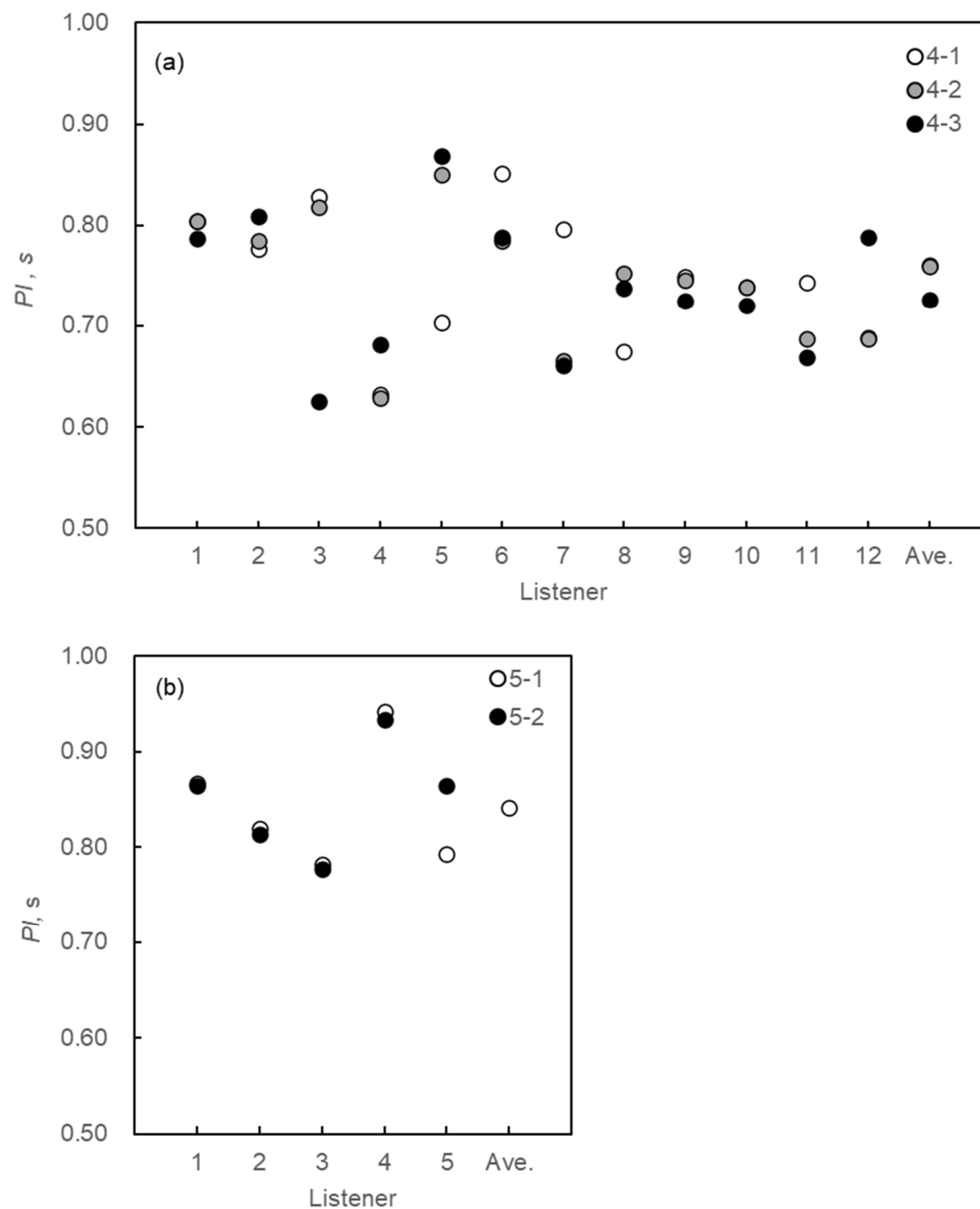


Figure 4.13 Average of PI in each listener: (a) Experiment 4 and (b) Experiment 5.

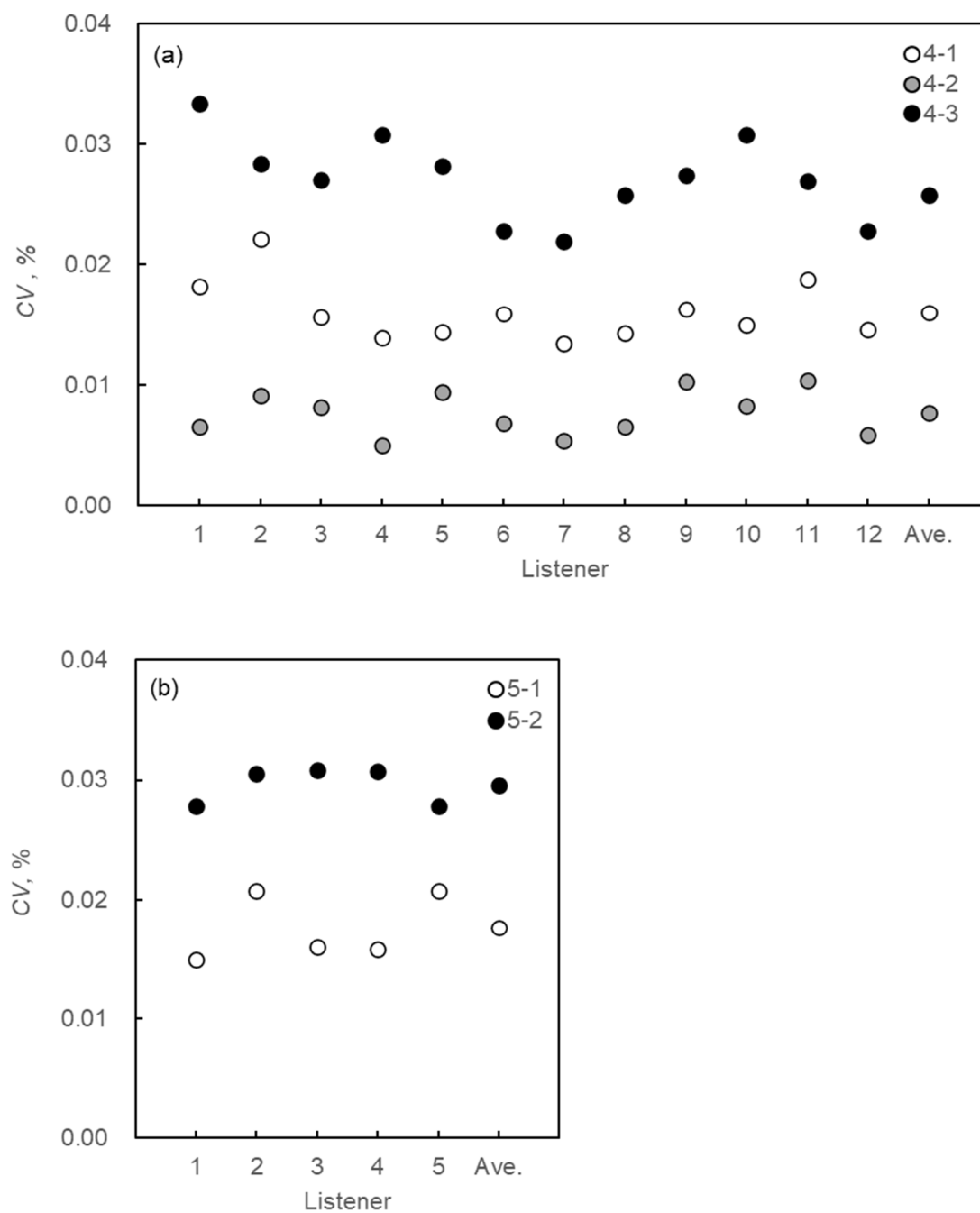


Figure 4.14 Average of CV in each listener: (a) Experiment 4 and (b) Experiment 5.

Table 4.3 Statistical significance in Student's t-test for each analysis interval of experiment 4.

Analysis interval	4-1 and 4-2		4-2 and 4-3		4-1 and 4-3	
Physiology	<i>PI</i>	<i>CV</i>	<i>PI</i>	<i>CV</i>	<i>PI</i>	<i>CV</i>
<i>t</i> (11)	1.21	13.0	0.315	25.2	0.411	15.0
<i>p</i>	0.251	4.99×10^{-8}	0.759	4.48×10^{-11}	0.689	1.12×10^{-8}
Choen's <i>d</i>	1.83×10^{-4}	7.01×10^{-4}	6.26×10^{-4}	1.68×10^{-3}	8.09×10^{-4}	9.78×10^{-4}
Statistical significance	No	Yes	No	Yes	No	Yes

Table 4.4 Statistical significance in Student's t-test for each analysis interval of experiment 5.

Analysis interval	5-1 and 5-2	
Physiology	<i>PI</i>	<i>CV</i> of <i>PI</i>
<i>t</i> (11)	0.625	7.82
<i>p</i>	0.566	1.44×10^{-3}
Choen's <i>d</i>	1.92×10^{-3}	2.38×10^{-3}
Statistical significance	No	Yes

4.4 結論

心理実験に参加する聴取者の、実験中の生理量の変動を明らかにすることを目的とし、音に対する評価および評価の回答を行う場合と、純粹に音のみを聴取する場合について聴取者の脈拍数に着目した実験を行った。その結果、以下のことを明らかにした。

- (1) 心理実験中の聴取者の脈拍数の変動は、実験にともなう「音の聴取」、「音の評価」、「評価の回答」といったイベントと必ずしも対応しない。
- (2) 聴取者に課すタスクそのものが、実験を通じて聴取者の生理量に影響することを示唆する結果を得た。
- (3) 心理実験において聴取者に対して、音の評価のタスクを課す場合と課さない場合で、聴取者の生理量に差がある。評価を課す場合は課さない場合よりも聴取者の脈波のピーク間隔は狭くなるが、刺激を聴取する際の脈波のピーク間隔のばらつきには統計的に有意な差はない。
- (4) 条件を統一した一連の心理実験下では実験における評価と生理量に相関関係は無い。
- (5) 心理実験のように複数種類のイベントが連続し、イベントに対応して聴取者がとる行為を明確に区分することが難しい場合において、生理量への影響の評価指標として脈波のピーク間隔を用いることが出来る可能性がある。
- (6) 脈波のピーク間隔と心理実験における聴取者の評価カテゴリの間には統計的に有意な相関関係は無い。

第5章 総括

本論文は、床衝撃音の物理特性と聴取者の心理評価および生理量の対応を検討し、心理評価と対応が良いとされる A 特性音圧レベルの最大値 (L_{AFmax}) に対して、心理評価の予測精度をさらに向上させる補正方法を提案した。

第 1 章では、まず、既存の床衝撃音遮断性能の評価方法について述べた。次に騒音、衝撃音の心理評価について既往の研究について概説し、衝撃音の心理評価とラウドネスは対応がよく、ラウドネスに着目した検討の必要性を述べた。また、音の周波数特性と心理評価について既往の研究を概説し、低周波数成分が心理評価に影響する知見を示した。さらに、生理量に対する心理実験の影響に着目し、本論文で対象とする問題として、次の 2 点を挙げた。

- ・ 床衝撃音の音圧レベル、周波数特性、時間変動特性をパラメータとして幅広く変化させた刺激を用いた聴取実験を行い、 L_{AFmax} との対応を明らかにする。
- ・ 心理評価を裏付ける客観的な指標として生理量の計測を試みる。

本論文では、第 2 章と第 3 章において前者の問題、第 4 章において後者の問題をそれぞれ検討した。以下、各章で得られた成果の概略を述べる。

第 2 章では、床衝撃音の音圧レベル、周波数特性、時間変動特性をパラメータとして、各パラメータによる心理評価への影響を検討した。その結果、 L_{AFmax} が等しい値であっても、床衝撃音の周波数成分に 63 Hz から 125 Hz 帯域を含む場合、「気になる」と評価されることを示した。また、 L_{AFmax} の値が異なる場合であっても「気になる」程度に統計的な有意差が見られない場合があり、 L_{AFmax} は必ずしも床衝撃音が「気になる」かどうかの心理評価の尺度に対応できていないことを示唆する結果を得た。また、同じ周波数特性であっても L_{AFmax} のピーク値からのレベル減衰の傾きが緩やかなほうが「気になる」と評価されることを示した。

第 3 章では、 L_{AFmax} に対して、心理評価の予測精度をさらに向上させる補正方法を検討した。補正方法の検討にあたり、心理評価と対応の良いことが知られているラウドネスについて、床衝撃音のような時変動性の音の評価に好適な Time-varying loudness をゾーン尺度のまま積分する、ラウドネス時間変動積分値 N_{int} を定義した。 N_{int} は心理評価と対応が良く、補正方法を検討する上で、心理評価と物理量の関係を繋ぐ心理量として位置付けた。本論文で提案する補正方法は 3 種類あり、周波数特性とレベルをパラメータとする補正方法 1、時間変動特性とレベルをパラメータとする補正方法 2、63 Hz 帯域の時間変動特性と L_{AFmax} のレベルをパラメータとする補正方法 3 である。このうち、補正方法 3 が最も心理評価の予測精度が良いが、実務での測定と分析の利便性を考慮し、3 種類の補正方法を提示した。また、補正方法 2 と 3 で用いることが可能な、時間変動特性を用いて L_{AFmax} と心理評価の重みづけを考慮した補正 L_{AFmax} を求めることが可能なチャートを提案した。

第 4 章では、心理評価実験における生理量の計測を試み、脈拍数、脈波のピーク間隔、脈波のピーク間隔の変動係数に着目した検討を行った。心理実験において聴取者に課すタスクの有無が、実験全体を通して脈波のピーク間隔に影響する傾向が見られた。一方で、心理実

第 5 章

験における音の聴取，音の評価，回答行為といった心理実験に伴うイベントと生理量の対応は見られず，条件を統一した一連の心理実験下においては，実験における評価と生理量に相関関係は無いことを示した。

本論文で得られた成果により，既に広く用いられる物理量の L_{AFmax} に対し，床衝撃音の気になる程度の心理評価の重みづけを考慮した補正を行うことで求まる補正 L_{AFmax} を新たな指標とする床衝撃音の評価が可能になったと考える。

客観性と利便性の観点から，物理量での音環境性能評価が支持される建築の実務の現場においても，音環境に対する実際の心理評価との関係を密にしていくことを今後の目標とし，本論文の結びとする。

文献

- [1] JIS A 1418-1：建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法－第一部：標準軽量衝撃源による方法，2000
- [2] JIS A 1418-2：建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法－第2部：標準重量衝撃源による方法，2019
- [3] JIS A 1419-2：建築物及び建築部材の遮音性能の評価方法－第2部：床衝撃音遮断性能，2000
- [4] 日本建築学会編，建築物の遮音性能基準と設計指針 [第二版]，技法堂出版，1997
- [5] 日本建築学会編，集合住宅の音の関する紛争予防の基礎知識，丸善出版，2016
- [6] 阿部今日子，井上勝夫，“音環境に関する集合住宅購入時の消費者要求と住宅供給者の説明，” 日本建築学会県境系論文集，70 (595)，pp. 9-16，2005
- [7] 井上勝夫，“床衝撃音遮断性能基準と居住者の生活実感の対応，” 日本音響学会誌，71 (4)，pp.181-188，2015
- [8] 井上勝夫，阿部今日子，“集合住宅の居住者反応からみた重量床衝撃音遮断性能の生活実感による表現方法の検討，” 日本建築学会環境系論文集，79 (701)，pp. 589-896，2014
- [9] 床衝撃音の聴感評価研究委員会，“床衝撃音遮断性能の聴感による評価，” 財団法人新住宅普及会住宅建築研究所報，1980
- [10] Stevens, S. S., “Perceived level of noise by Mark VII and decibels (E),” *Journal of the Acoustical Society of America*, 51, 575–601, 1972
- [11] 橘秀樹，“遮音性能評価法の整合化と今後の課題，” 日本音響学会誌，56 (4)，286，2000
- [12] 日本音響学会編，新版 音響用語辞典，コロナ社，2004.7
- [13] 難波精一郎，“ノイジネス・アノイヤンスについて，” 日本音響学会誌，44 (10)，775-780，1988
- [14] 泉清人，“騒音の心理的不快感に関する属性についての考察：騒音のやかましさに関する研究(13),” 日本建築学会北海道支部研究報告集，No. 46, 35-40, 1976
- [15] 岩本聖子，矢野博夫，橘秀樹，“重量床衝撃音のラウドネスに関する聴感評価実験，” 日本建築学会大会学術講演梗概集，1992. 8
- [16] 服部瑞穂，矢野博夫，橘秀樹，“軽量床衝撃音のラウドネスに関する聴感評価実験，” 日本建築学会大会学術講演梗概集，1993. 9
- [17] Jeon, J. Y., Ryu, J. K., Jeong, J. H., “Review of the Impact Ball in Evaluating Floor Impact Sound,” *Acustica*, 92, 777-786, 2006
- [18] Preis, A., Ishibashi, M., Tachibana, H., “Psychoacoustic studies on assessment of floor impact sounds,” *J. Acoust. Soc. Jpn.*, 21, 2, 69-77, 2000
- [19] 佐藤洋，廣田，田中，平光，辻村，泉，村上，“ラウドネスによる床衝撃音の評価－木造枠組壁工法住宅の床遮音工法に関する研究(5)－，” 日本建築学会大会学術講演梗概集，2010.9

- [20] 佐藤洋, 廣田, 田中, 平光, 泉, 村上, “ラウドネスによる床衝撃音の評価ー木造枠組壁工法住宅の床遮音工法に関する研究(7)ー,” 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2011.8
- [21] 佐藤洋, 「うるささ」感覚評価に基づいた床衝撃音遮断性能の計測及び評価方法の開発, 第7回(2010年度)坪井記念助成研究報告書, 一般社団法人日本ツーバイフォー建築協会
- [22] J. Schlittenlacher, T. Hashimoto, S. Kuwano, S. Nanba, “Overall judgment of loudness of time-varying sounds,” J. Acoust. Soc. Am. 142 (4), October 2017
- [23] Morimoto, M., Maekawa, Z., “Effect of Low Frequency Components on Auditory Spaciousness,” Acoustica., Vol. 66, 1988
- [24] Morimoto, M., Yamanaka, T., Sakagami, K., Iida, K., “CONTRIBUTION OF LOW FREQUENCY COMPONENTS OF A DIRECT SOUND AND LATERAL REFLECTIONS TO AUDITORY SOURCE WIDTH,” International Congress on Acoustics Trondheim, Norway 26-30 June 1995, pp. 585-588
- [25] 米村美紀, 佐々木奏子, 辻村壮平, 李孝珍, 坂本慎一, “低周波数純音成分を含む騒音の聴感評価に関する基礎的研究: 可聴性および大きさ感に関する評価実験,” 騒音・振動研究会資料, N-2018-11
- [26] R. Jongkwan, Hi.Sato, K. Kurakawa, A.Hiramitsu, M. Tanaka, T. Hirota, “Subjective rating of heavy-weight floor impact sounds in wood frame construction,” Acoust. Sci.&Tech. 31, 5, 2010
- [27] R. Jongkwan, Hi.Sato, K. Kurakawa, A.Hiramitsu, M. Tanaka, T. Hirota, “Relation between annoyance and single-number quantities for rating heavy-weight floor impact sound insulation in wooden houses,” J. Acoust. Soc. Am., 129 (4), April 2011
- [28] Kryter, K. D., 抄訳: 長田泰公, “心理学的並びに心理音響学の展望,” 日本音響学会誌, 42 巻 1 号, 1986
- [29] 辻村壮平, 山田由紀子, “脳波を用いた精神作業時の音の妨害感に関する基礎的研究,” 日本建築学会環境系論文集, 第 608 号, 67-74, 2006.10
- [30] J. Blauert, Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization, The MIT Press, Cambridge, Mass., 1997
- [31] Hoth, D. F., “Room Noise Spectra at Subscribers' Telephone Locations,” J. Acoust. Soc. Am, 12, pp. 499-504, 1941. 4
- [32] 稲留康一, 中澤真司, 平松友孝, 濱田幸雄, “生活行為に起因する床衝撃音の測定例と標準重量衝撃源との対応,” 日本建築学会学術講演梗概集, 263-266, 2013.8
- [33] 多喜翔一, 濱田幸雄, “幼稚園児の衝撃力特性,” 日本建築学会大会学術講演梗概集, 197-198, 2014.9
- [34] DIN 45631/ A1: 2010-03
- [35] Schlittenlacher, J., Hashimoto, T., Kuwano, S. and Nanba, S., “Overall judgment of loudness of time-varying sounds,” J. Acoust. Soc. Am. 142 (4), 1841-1847, 2017. 10

- [36] Preis, A., Ishibashi, M. and Tachibana, H., “Psychoacoustic studies on assessment of floor impact sounds,” J. Acoust. Soc. Jpn., 21, 2, 69-77, 2000
- [37] 下野太海, 大須賀恵美子, 寺下由美, “心拍・呼吸・血圧を用いた緊張・単調作業ストレスの評価手法の検討,” 人間工学 34-4, 107/115, 1998
- [38] 山越憲一, “無侵襲, 無高速, そして無意識計測へ,” 精密工学会誌, Vol. 62, No. 11, pp. 1525-1529, 1996
- [39] 林博史, 心拍変動の臨床応用, 医学書院, 1999
- [40] 佐々木真彦, 中野真哉, 高梨博之, 王鋒, 長南征二, 御室哲志, “脈拍によるストレス評価に関する検討,” 計測自動制御学会東北支部第 224 回研究集会, 2008.7
- [41] 前田祐佳, 関根正樹, 田村俊世, 水谷孝一, “脈波を用いた自律神経機能推定に向けた脈波伝搬時間の変動に関する検証,” 生体医工学 54 巻 6 号, 2016. 12
- [42] 布山美慕, 日高昇平, 諏訪正樹, “読書における熱中状態の定義・観測手法構築,” 人工知能学会全国大会論文集, 2014.5

本研究に関する発表論文等一覧

A. 原著論文

題目	掲載誌	共著者	本文の章
A 特性音圧レベルの最大値を用いた床衝撃音評価－心理評価に基づく補正方法の検討	日本建築学会環境系論文集, 86, 227-236, 2021	佐藤逸人	第2章
時間変動特性に着目した床衝撃音の A 特性音圧レベルの補正法	日本音響学会会誌 研究 速報(査読返却対応中)	佐藤逸人	第3章

B. 寄稿

題目	誌名	共著者
リビングルームにおける床衝撃音の心理評価	音響技術, No. 194, Vol. 50 no. 2, 日本音響材料協会, 2021.6	佐藤逸人

C. 学術講演

題目	発表会議名	共著者
リビング想定時の床衝撃音の心理評価	日本音響学建築音響研究会資料 (2019.11)	佐藤逸人
床衝撃音の大きさの心理評価と周波数特性の関係	日本建築学会大会学術講演会 (2021.9)	佐藤逸人

謝辞

本論文をまとめるにあたり，多くの方々にご指導およびご協力をいただきました。

神戸大学佐藤逸人准教授には，本研究を進めるにあたり，終始丁寧にご指導いただき，本研究の道筋を築く上で欠かすことのできない，数多くの議論とご助言をいただきました。神戸大学阪上公博教授には，ゼミナールを通じて，思いもよらない多様な視点からの貴重なご助言をいただきました。

神戸大学森本政之名誉教授には，学生時代より「研究の型」とも言える研究への取り組み方をご教示いただきました。

ここに記した先生方には，筆者が現役の学生の頃から社会人として博士課程に進んでからも終始懇切なご指導をいただきました。心より感謝いたします。

神戸大学環境音響学研究室の学生の皆様には，聴感実験の被験者としてご協力いただきました。

ここに記すことのできなかった多くの方々にお力添えをいただきました。

以上のすべての方々に，重ねて感謝いたします。

神戸大学博士論文「心理量に基づく床衝撃音の評価指標に関する研究」全 97 頁

提出日 2023年 1月20日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ **Kernel** にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当ページ上に掲載されます。

©野島僚子

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。