

戸建て住宅及び小規模な集合住宅の水平振動に関する
居住性能に対する心理的反応に基づく評価方法

2020年3月

埼玉大学大学院理工学研究科（博士後期課程）

理工学専攻 環境科学・社会基盤コース

（主指導教員 松本 泰尚）

林 健太郎

要 旨

都市部では戸建て住宅の高層化が進み、3階建て以上の戸建て住宅の全国の新築棟数の約8割を占めている。道路や鉄道などの社会基盤が高密度に整備されている都市部では、住宅やオフィスなどの居住空間と道路や鉄道といった振動源となり得る社会基盤との距離が十分に確保できないことが多い。特に戸建て住宅や小規模の集合住宅は、大規模な建築物と比較して建物や敷地面積の規模が小さいため、大型車が前面道路を走行するといった日常的な外部振動と建物の共振現象による振動増幅によって振動問題が引き起こされる。本研究が対象とする戸建て住宅及び小規模な集合住宅は、とりわけ水平振動の共振現象による振動問題が多いことから環境振動に関する性能設計は重要であると考えられる。

国内の建物内の振動に関する性能設計や評価は、2004年に改定された「建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説」を参照することが多い（研究開始後の2018年に「建築物の振動に関する居住性能評価規準・同解説」へ改定された）。居住性能評価指針による評価方法は、1/3オクターブバンドの加速度の最大値を評価曲線に照らし合わせる接線法を採用している。評価曲線は人の正弦振動に対する知覚確率に基づき規定されており、評価値は何パーセントの人が評価対象の振動を知覚するかを表している。しかしながら、知覚確率のみの評価であることから、評価対象の振動を居住者が振動知覚した後に、“振動の大きさ”や“不快感”などの心理的反応をどの程度感じているかを評価することができない。また、評価曲線の根拠となった知見が正弦振動に基づいたものであることから、時々刻々と振幅や振動数に変化する実振動波形への適用性などの課題がある。

このような背景から、本研究は、道路交通、鉄道、建設作業などの外部振動による建物内における振動に関する居住性に対して、“振動の大きさ”、“気になり具合”、“不快感”の心理的反応に基づく評価方法を提示することを目的とした。

まず、加振台実験Ⅰでは、加振台を用いた主観評価実験によって心理的反応を測定し、様々な国内外の環境振動の分野の評価方法との対応関係を検討した。その結果、心理的反応と対応の良い評価方法として、振動の継続時間を1/4乗で考慮するV_{DV}が適当な評価方法であることを明らかにした。一方、加振台実験Ⅰから以下の課題が得られた。1つ目は心理的反応の測定に用いた7段階の評定尺度は、各カテゴリーを適切に表す程度の表現語に関する知見が十分ではなかったことから、中間の2～6段目のカテゴリーを空白としたが、実務的な利用の場面を想定するとすべてのカテゴリーの程度を適切に示す表現語を付し、振動刺激に対して絶対的な評価できる評定尺度が望ましいとした点。2つ目は、加振実験に用いた入力刺激は、実際の建物内の実測波形の入手が困難であったことから、屋外で計測した加速度波形に一般的な戸建て住宅を想定した1自由度系モデルによる応答波形を利用した

が、実際の建物内における実測波形による入力刺激を用いた加振台実験による検討が必要であるとした点であった。

評定尺度に関する課題では、騒音のうるささに関する国際的な評定尺度の構成方法を参考に、振動に対する心理的な程度の表現語 23 種類に関するアンケート調査を実施し、5 段階及び 7 段階それぞれに相応しい程度の表現語を絞り込み、心理学的尺度の構成をした。ただし、厳密に言えばアンケート調査はいわば文字による概念的な方法であることから、アンケート調査によって構成された心理学的尺度と人が直接振動を感じた時の反応との関係は解明できない。入力刺激に関する課題では、実際の建物内で計測した振動波形を収集して、正弦振動を加えた 76 パターンの入力刺激を作成した。

これらの課題を解決するために加振台実験Ⅱでは、構成した評定尺度と実測波形を中心とした 76 パターンの入力刺激を用いた加振台実験を実施した。その結果、構成した評定尺度が直接的な振動刺激に対しても等間隔性を有していることを確認するとともに、加振台実験Ⅰと同様に“振動の大きさ”、“気になり具合”、“不快感”を 1 つの評価値で評価すると考えた場合、1/4 乗で振動の継続時間を考慮する VDV が最も適切な評価値であることが明らかになった。

加振台実験による心理的反応と振動の評価方法との対応関係や相関係数の比較から最も適切な評価値を明らかにしたが、心理的反応の評価に対して加速度の最大値や振動の継続時間がどの程度の影響を与えているかは不明である。そこで、二項ロジスティック回帰分析を採用して、目的変数を心理的反応の期待値としたときの説明変数群の影響を把握することとした。説明変数群を「加速度の最大値」、「振動の継続時間」、「クレストファクタ」の 3 つで検討した結果、「加速度の最大値」、「振動の継続時間」が有意な変数であり、“振動の大きさ”と比べて“気になり具合”と“不快感”では、「振動の継続時間」の影響が相対的に大きいことが明らかになった。また、「振動の継続時間」は、1/2 乗よりも 1/4 乗の方が大きな影響を示す傾向を確認することができた。「クレストファクタ」は変数としての有意性を確認することができなかった。すなわち、波形の形は心理的反応への影響が小さいことが示唆された。二項ロジスティック回帰分析の結果からも、心理的反応との対応の良い評価方法は振動の継続時間を考慮することが重要であることを確認することができた。

以上の検討結果から、外部振動源による建物水平振動に関する居住性能に対する心理的反応に基づく評価には、振動の継続時間を 1/4 乗で考慮する VDV が本研究で検討した評価方法の中で最も適していることを示した。さらに学術的な検討に基づき 5 段階及び 7 段階の評定尺度を構成した。本研究で提示した評価方法及び評定尺度は、道路交通や鉄道などの外部振動源による建物内における振動に関する居住性能の評価に用いることができると考える。また、環境振動に対する性能設計に資するデータの収集に貢献できるものとする。

目 次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	既往の研究	3
1.3	本研究の目的と本論文の構成	4
	参考文献	6
第2章	心理的反応に対する評価方法に関する実験的検討 (加振台実験Ⅰ)	11
2.1	はじめに	11
2.2	実験概要	11
2.2.1	実験装置	11
2.2.2	入力刺激	12
2.2.3	心理的反応及び評価尺度	15
2.2.4	参加者	15
2.2.5	実験方法	16
2.3	評価方法	17
2.4	実験結果	21
2.4.1	尺度変換	21
2.4.2	心理的反応に対する振動の継続時間の影響	22
2.4.3	各評価値と心理的反応との対応関係	24
2.5	まとめ	28
	参考文献	29
第3章	環境振動に関する評価尺度の構成	33
3.1	はじめに	33
3.2	評価尺度における程度の表現語に関する予備的検討	34
3.3	アンケート調査	35

3.3.1	調査概要	35
3.3.2	程度の表現語	39
3.3.3	調査内容	41
3.3.4	程度の表現語の心理的な強さ	44
3.3.5	程度の表現語の選定基準	47
3.3.6	アンケート調査結果に基づく評定尺度	50
3.3.7	年代, 地域別などによる表現語への影響	52
3.4	調整法による加振台実験	58
3.4.1	調査概要	58
3.4.2	入力刺激	58
3.4.3	実験方法	59
3.4.4	調整法の手続きの確認	60
3.4.5	加振台実験の結果	60
3.5	まとめ	63
	参考文献	64

第4章 住宅内の実測波形を用いた加振台実験による評価

方法の検討 (加振台実験 II) 69

4.1	はじめに	69
4.2	実験概要	69
4.2.1	実験装置	69
4.2.2	入力刺激	70
4.2.3	心理的反応と評定尺度	79
4.2.4	実験方法	80
4.3	評価方法	80
4.4	予備実験	82
4.4.1	予備実験概要	82
4.4.2	カテゴリー数の検討	82
4.5	本実験	86
4.5.1	本実験概要	86
4.5.2	異なる実験参加者数による心理的反応の比較	86
4.5.3	心理的反応の分布	88
4.5.4	評定尺度の等間隔性の確認	89
4.5.5	周波数重み付けの検討	94

4.5.6	各評価値と心理的反応との対応関係	97
4.6	既往の研究における評価方法の検討	102
4.7	まとめ	105
	参考文献	106
第5章	心理的反応の評価に対する説明変数の影響の検討	109
5.1	はじめに	109
5.2	心理的反応の目的変数の2値化	110
5.3	回帰モデルに用いた説明変数	111
5.4	回帰モデルにおける変数の選択	113
5.5	交互作用項の検討	114
5.6	偏回帰係数及び切片の推定	117
5.6.1	各モデルの説明変数の有意性の確認	117
5.6.2	各モデルの説明変数のオッズ比の比較	121
5.7	まとめ	123
	参考文献	124
第6章	結論	127
6.1	本研究の結論	127
6.2	今後の課題	130
	謝辞	131

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 背景

近年、戸建て住宅の高層化が進み、3階建て以上の戸建て住宅の棟数は増加している。総務局統計局が5年ごとに調査を行っている住宅・土地統計調査結果¹⁻¹⁾から、2001年1月から2018年9月までに3階建て以上の戸建て住宅の新築棟数を主要な地域別でまとめた結果を図1-1に示す。図から、東京都、大阪府及びその近郊都市の総数が全国の約8割を占めており、3階建て以上の戸建て住宅が、道路や鉄道などの社会基盤が高密度に整備されている都市部に集中していることがわかる。土地の高度利用が進む都市部であるからこそ、戸建て住宅の高層化のニーズがあるとも言えるが、住宅やオフィスなどの居住空間と道路や鉄道といった振動源となり得る社会基盤との距離が十分に確保できないことが多く、特に戸建て住宅や小規模の集合住宅は大規模な建築物と比較して建物や敷地面積の規模が小さいため、前面道路と日常の居住空間が隣接していることが少なくない。そのため、大型車が前面道路を走行するといった日常的な外部振動によって建物振動が励起されてしまい、振動問題となることがある。

東田ら¹⁻²⁾は、戸建て住宅の居住者より建物内で揺れを体感すると申し入れのあった210棟において外部振動源の内訳について調査した結果、道路交通が65%や鉄道24%を占めることを報告している。平尾ら¹⁻³⁾は木質系または鉄骨系の2階建て、3階建て戸建て住宅の120棟において、道路交通振動などの外部振動源による3成分の振動加速度の計測を行い、建物の振動増幅は鉛直方向より水平方向、2階より3階の方が大きいことや、共振ピークが1/3オクターブバンド中心周波数で鉛直方向では31.5 Hz以上、水平方向では4~6.3 Hzにあることを報告している。戸建て住宅で問題となることが多い道路交通振動を例にすると、道路交通振動の主な振動源である大型車のばね上の共振振動数¹⁻⁴⁾が、建物増幅特性の水平方向の共振振動数と近いことから、屋外では振動知覚するかしないか程度の大きさの振動にも関わらず、建物と外部振動源の共振現象による振動増幅によって振動問題が引き起こされる。

このようなことから、外部振動源による建物内振動への懸念がある敷地に住宅を計画する際には、環境振動に対する性能設計が必要であり、とりわけ水平振動は建物の共振現象によることが多いことから性能設計は重要であると考えられる。

国内の建物内の振動に関する評価では、日本建築学会から建築物の振動に関する居住性能評価指針が1991年に制定¹⁻⁵⁾された後、2004年に改定¹⁻⁶⁾され多くの設計実務者に利用された。しかしながら、同指針は、最大加速度を評価量としているため道路交通振動のような時間変動性を有する振動源への適用性に問題があることや、正弦振動の知覚閾に基づいた評価曲線を採用しているため気になり具合や不快感などの直接的に建物の居住性能を示す反応には対応できないといった課題があった。そこで、時間変動性を有する振動源に対しても床面振動の居住性能に関する心理的反応の程度が具体的に把握できる規準の制定を目

第1章 序論

指して2回目の改定作業が進められた。建物内の鉛直振動に対する心理的反応に関する研究成果と比べて、水平振動に関する研究が少なく、評価方法も確立されていないことから、鉛振動の研究成果を基本に検討がなされた。

このような背景から、外部振動源による水平方向の建物振動を評価方法の確立が必要であると考える。

加振台実験によって振動に対する心理的反応を測定し、振動の物理的評価値との対応性についての研究が多く行われている(例えば1-7)~1-13)が、建物振動の居住性に関する心理的反応を測定する評定尺度の構成に着目して詳細に検討された研究は行われておらず、この分野では評定尺度が確立されていない。今後の様々な研究成果との横断的な検討を進める上で、学術的な知見に基づく評定尺度の確立は必要であると考えられる。

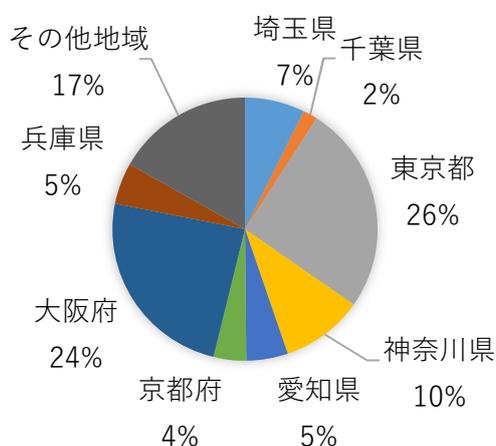


図 1-1 3階建て以上の戸建ての棟数の全国総数に対する割合
(「令和元年住宅・土地統計調査結果」(総務省統計局)から
2001年1月~2018年9月の期間の結果を利用)

1.2 既往の研究

振動に対する心理的反応に関する研究としては、正弦振動を用いて振動の継続時間が心理的反応に与える影響について研究が古くから行われている。三輪ら¹⁻¹⁴⁾は、振幅が一定で継続時間が1サイクル相当の時間から6sまでの範囲で異なる正弦振動に対する感覚上の大きさは、鉛直及び水平振動のいずれに対しても、振動の継続時間とともに増大するが、本研究で対象とする振動数範囲を含む2~60 Hzでは2s以上で継続時間の影響が無くなる傾向を報告している。また、Griffinら¹⁻¹⁵⁾は、鉛直正弦振動の継続時間を1/32~32sまで変化させ、振動の継続時間が不快感に与える影響について検討しており、不快感は振動の継続時間に依存することを報告している。振動の継続時間の依存は、1/4乗によるRMQ (Root-Mean-Quad) による評価を提案している。Kjellbergら¹⁻¹⁶⁾も鉛直正弦振動の継続時間を0.1~128sを変化させ、振動の継続時間が長くなるほど不快感が増加すること報告している。RMS (Root-Mean-Square) 値と振動の継続時間の回帰係数が0.5を大きく下回ることから、1/2乗のRMSは振動に対する不快感を過小評価する可能性を述べている。Howarthら¹⁻¹⁷⁾は、1自由度減衰波形の固有振動数を1, 4及び16Hz, 減衰定数を0.125, 0.250及び0.707とした入力刺激を用いた実験を行い、衝撃振動の不快感に対して、振動の継続時間を1/2乗で考慮する評価値よりも1/4乗のVDVの方が良い対応を示すことを報告している。

近年では道路交通振動や建設作業などの実振動源に対する研究が行われている。鉛直振動に対する心理的反応に関する研究として、横山ら¹⁻⁷⁾は木造2階建ての試験家屋を用いて、試験車両走行時に発生した振動に対して被験者実験を行い、振動レベルの最大値が大きさに対する評価と良い対応を示すことを示している。また、松下¹⁻¹⁰⁾らは、建物内外の様々な振動源に対する大きさ、気になり具合の心理的反応に対する性能値として、時定数25msの振動レベルの最大値に振動レベルが60dB以上となっている継続時間の要因を加味した評価値を提示している。さらに、松田ら¹⁻¹²⁾は鉄道や道路交通振動が日常的に発生している実際の住宅を対象に振動感覚評価実験を実施しており、大きさ度合は「加速度最大値」、不快度合は「振動発生時間内のエネルギー平均値に振動知覚時間の時間補正項を加算することによって対応性が高まる」ことを報告している。

水平振動の心理的反応に関する研究として、鈴木、石川¹⁻¹³⁾は、FFT分析による卓越振動数と加速度最大値を用いた心理評価の可能性を示すと同時に、知覚特性と比べ不安感や不快感は個人差が若干大きくなることを報告している。

振動に対する心理学的測定には、尺度構成に評定尺度法を採用する方法があり、これまで多くの研究が報告されている(例えば1-7)~1-13)。前述のとおり振動に関する評定尺度について詳細に検討された研究は行われていない。騒音のうるささに関する尺度では、矢野ら¹⁻¹⁸⁾の研究によって国際的に合意された共通の手法に基づいた他の言語と比較可能な日本語の5段階尺度が構成されている。

第1章 序論

1.3 本研究の目的と本論文の構成

本研究は、道路交通、鉄道、建設作業などの外部振動による建物内における水平振動に関する居住性に対して、“振動の大きさ”、“気になり具合”、“不快感”の心理的反応に基づく評価方法を提示することを目的とする。評価対象とする建物は、第1節で述べたとおり外部振動との共振現象で水平振動が問題となることが多い戸建て住宅と小規模な集合住宅とする。加振台を用いた主観評価実験によって、人の振動に対する心理的反応と国内外の環境振動の分野の評価値との対応関係を検討する。

人の心理的反応を測定する方法には評定尺度法がある。しかしながら、環境振動の分野では評定尺度に用いられる程度の表現語やカテゴリー数が確立されていない。そこで、アンケート調査によって、環境振動に関する5段階及び7段階の心理学的尺度の構成を試みる。

さらに、二項ロジスティック回帰分析¹⁻¹⁹⁾によって、心理的反応の評価を目的変数、振動に関する物理的評価値を説明変数とする回帰モデルにおけるオッズ比の比較から、心理的反応に対する説明変数の影響を明らかにする。

以上の検討結果から、戸建て住宅や小規模な集合住宅における水平振動に対する心理的反応と対応関係とその要因を明らかにした評価方法を提示する。

本論文は、以下の6章から構成されている。

第1章「序論」では、都市部の戸建て住宅における環境振動問題とその発生メカニズム、そして現在の建物振動の評価方法に関する課題点などの本研究背景、既往の研究、本研究の目的を述べ、本論文の構成を示している。

第2章「心理的反応に対する評価方法に関する実験的検討（加振台実験Ⅰ）」では、加振台を用いた主観評価実験によって心理的反応を測定し、様々な国内外の環境振動の分野の評価方法との対応関係を検討し、心理的反応と対応の良い評価方法を明らかにしている。一方、心理的反応の測定に空白のカテゴリーが含まれた評定尺度を用いたが、実務的な利用の場面を想定すると各カテゴリーにその段階の程度を適切に示す表現語を付した評定尺度が必要であることや、加振台実験に用いた入力刺激に一般的な戸建て住宅を想定して1自由度系モデルによる応答波形を利用したが、最終的な評価方法を提示するために実際の建物内における実測波形が必要であることを課題としている。

第3章「環境振動に関する評定尺度の構成」では、第2章の評定尺度に関する課題を解決するために、すべてのカテゴリーに適切な程度の表現語が付された評定尺度の構成を行う。環境振動の分野ではカテゴリー数や各カテゴリーに用いる程度の表現語に関する検討を行い評定尺度の構成を試みた研究が行われていないことから、振動に対する心理的な程度の表現語23種類に関するアンケート調査を実施し、5段階及び7段階のそれぞれに相応

しい程度の表現語を絞り込み、心理学的尺度を構成する。そして、アンケート調査による概念的な尺度と人が振動刺激から受ける感覚が対応していることを確認するために調整法を用いた加振台実験を行う。

第4章「住宅内の実測波形を用いた加振台実験による評価方法の検討(加振台実験II)」では、第2章で課題とした実際の建物内で計測した振動波形を中心に正弦振動を加えた76パターンを入力刺激と第3章で構成した心理学的尺度を用いた参加者25名による加振台実験を行う。まず、5段階若しくは7段階のカテゴリー数の影響の検討し、評定尺度の等間隔性や周波数重み付け特性を検討した後に、実際の建物内で計測した振動を用いた加振台実験によって、心理的反応と対応の良い振動の評価方法を明らかにする。

第5章「心理的反応の評価に対する説明変数の影響の検討」では、第4章で心理的反応と振動の評価方法との対応関係や相関係数の比較検討から振動の継続時間を考慮するVDVが最も適した評価値であることを明らかにした。しかしながら、心理的反応に対する評価値の対応性において、加速度の最大値や振動の継続時間がどの程度の影響を与えているかは不明である。そこで、二項ロジスティック回帰分析を採用して、目的変数を心理的反応としたときの説明変数群の影響を把握する。

第6章「結論」では、本研究で得られた結論をまとめ、今後の課題を述べる。

第1章 序論

参考文献

- 1-1) 総務省統計局：令和元年住宅・土地統計調査結果
- 1-2) 東田豊彦, 平尾善裕, 国松直：居住者の体感振動を基にした戸建て住宅の振動に関わる申し入れ事例の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.373-374, 2017
- 1-3) 平尾善裕, 国松直, 東田豊彦：地盤振動に起因する木質系・鉄骨系戸建て住宅の振動増幅特性, 日本建築学会技術報告集 19(42), pp.631-634, 2013
- 1-4) 林健太郎, 長船寿一, 吉田裕介, 岩吹啓史, 佐野泰之, 深田幸史, 濱博和：高架道路走行時における各種車両の振動特性, 日本騒音制御工学会秋季研究発表講演論文集, pp.147-150, 2016.11
- 1-5) 日本建築学会：建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説, 1991.4
- 1-6) 日本建築学会：建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説, 2004.5
- 1-7) 横山裕, 天野豊章：道路交通振動の感覚上の大きさを表示する物理量の設定, 日本建築学会構造系論文集, 第 563 号, pp. 37-44, 2003.1
- 1-8) 野田千津子, 石川孝重：居住者意識に基づいた水平振動に対する居住性能のグレード化に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 648 号, pp.131-137, 2010.2
- 1-9) 井上竜太, 横山裕, 松下仁士：振動の継続時間が居住性能評価に及ぼす影響に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.377-378, 2014.7
- 1-10) 松下仁士, 長沼俊介, 井上竜太, 横山裕：種々の加振源による鉛直振動に適用できる性能値, 日本建築学会環境系論文集, 第 81 巻, 第 720 号, pp.153-162, 2016.2
- 1-11) 冨田隆太, 井上勝夫, 坂元美沙希：振動暴露時間の変化による物理量と振動感覚との対応, 床振動測定用標準衝撃源としてのボールの有用性に関する研究: その 16, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.369-370, 2015.7
- 1-12) 松田貫, 井上勝夫, 冨田隆太：鉛直振動の振動暴露時間が振動感覚に及ぼす影響（交通振動に対する住宅床の体感振動評価に関する研究：その 3）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.379-380, 2015.9
- 1-13) 鈴木千尋, 石川孝重：不安感・不快感からみたランダム水平振動に対する心理評価に関する検討, 日本建築学会環境系論文集, 第 79 巻, 第 704 号, pp.841-848, 2014.10
- 1-14) 三輪俊輔, 米川善晴：衝撃振動の評価方法（振動の評価法 3）, 日本音響学会誌, 27 巻, 1 号, pp.33-39, 1971

- 1 -15) Griffin, M.J. and Whitham,E.M. : Discomfort produced by impulsive whole-body vibration, Journal of Acoustical Society of America, Vol.68, No.5, pp.1277-1284, 1980
- 1 -16) Kjellberg, A. and Wikström, B.-O.: Subjective reactions to whole-body vibration of short duration, Journal of Sound and Vibration, Vol.99, Issue 3, pp.415-424,1985
- 1 -17) Howarth, H.V.C. and Griffin, M.J. : Subjective reaction to vertical mechanical shocks of various waveforms, Journal of Sound and Vibration, 147(3), pp.395-408, 1991
- 1 -18) 矢野隆, 五十嵐寿一, 加来治郎, 神田一伸, 金子哲也, 桑野園子, 新居洋子, 佐藤哲身, 荘美知子, 山田一郎, 吉野泰子: 騒音の社会反応の測定方法に関する国際共同研究—日本語のうるささの尺度の構成—, 日本音響学会誌, 58 卷, 2号, pp.101-110, 2002
- 1 -19) 川端一光, 岩間徳兼, 鈴木雅之: R による多変量解析入門 データ分析の実践と理論, オーム社, 2018.7

第2章

心理的反応に対する評価方法に関する実験的検討

(加振台実験 I)

第2章 心理的反応に対する評価方法に関する実験的検討（加振台実験Ⅰ）

2.1 はじめに

本論文では、心理的反応に基づく評価方法を提示するために、加振台を用いた主観評価実験によって心理的反応を測定し、様々な国内外の環境振動の評価方法との対応関係を検討する。まず、心理的反応を測定するためには心理学的評定尺度を用いるが、第1章で述べたとおり環境振動の分野では学術的な知見に基づく評定尺度が確立されていない。そこで、本章では基礎的な実験の位置づけとして、7段階の評定尺度の1段目に反応が最も強い「非常に・・・」、7段目には反応が最も弱い「まったく・・・ない」の表現語を付けて、2段目から6段目は空白とした評定尺度を用いる。入力刺激には、実際の建物内の計測データの入手が困難であったことから、1自由度系モデルに地盤面の実測波形を入力して求めた応答波形を採用した加振台実験を行い、心理的反応と環境振動の評価値との対応関係を検討する。

2.2 実験概要

2.2.1 実験装置

実験に用いた加振装置は、水平一方向加振が可能な人体全身振動実験用加振装置（旭製作所：VSR-S150H）であり、800 mm×800 mmの振動台上にアルミニウム製の座席を設置したものである。加振装置を図2-1に示す。



図 2-1 加振装置

第2章 心理的反応に対する評価方法に関する実験的検討（加振台実験Ⅰ）

計測装置は、座席の側面の水平1方向の振動加速度を加速度ピックアップ（リオン社製：PV-87）と振動計（リオン社製：UV-06）を用い、振動台の中心の鉛直及び水平の3成分の振動加速度を振動レベル計（リオン社製：VM-53A）のピックアップを用いた。座席の計測は、振動台と一体で加振されていることを確認するためであり、振動台の3成分の計測は、評価対象方向以外の交差軸の加速度が実験に影響のないことを確認するためである。各計測器からの加速度信号をPCベースの計測システム（National Instruments社製：NI cDAQ-9178, NI 9234）を用いて記録した。なお、本研究は「国立大学法人埼玉大学におけるヒトを対象とする研究に関する倫理委員会」の承認を受けて実施したものである。

2.2.2 入力刺激

加振台実験で提示した振動は、一般的な戸建て住宅の水平方向の1次振動モードを想定した1自由度系モデルに、地盤上で計測した道路交通振動などの実測振動波形を入力して求めた応答波形とした。戸建て住宅において水平振動が問題となる場合、振動源、地盤や建物の振動特性が複雑に関係した共振現象ではあるが、本研究では簡単のため建物を単純な1自由度系モデルで表し、過去の実測波形の中からモデルが共振するものを入力波形として採用した。

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega\dot{u} + \omega^2u = -\ddot{u}_g \quad (2.1)$$

ここで、 u 、 ζ 、 ω は、系の変位、減衰定数、非減衰固有円振動数、 \ddot{u}_g は支点入力の加速度を表す。

支点入力の加速度には、前述の通り、実際に地盤面で計測した道路交通や建設作業の振動加速度を入力した。また、実振動に加えて継続時間が1.5(0.5)、3(2)、6(5)、12(11)、24(23) sと異なる5 Hzの正弦振動を入力し、振動の継続時間による影響を検討した。なお、括弧内の数値は、一定以上の加速度振幅となる継続時間を表している。固有振動数は、例えば文献^{2-1), 2-2)}から、戸建て住宅の水平方向の増幅特性のピークが4~6.3 Hzに多く見られることから、3、5、7 Hzとした。減衰定数は、木造建築物の減衰定数に関するデータが示されている文献²⁻²⁾から代表値として、2、5、10%に設定した。S造3階建て住宅に関する文献²⁻³⁾からも設定した減衰定数は妥当な範囲の値と考えるが、戸建て住宅の環境振動における減衰定数の知見が少ないことから、今後の検討課題とする。

入力刺激の目標振幅は、振動知覚閾付近から非常に大きく感じる程度までを想定し、振動レベルで約55~80 dBとなるように、加速度振幅を約6 dB（2倍）間隔で3~5段階で設定した。入力刺激の振幅に、参加者間で振動レベルの最大値で1 dB程度のばらつきが生じることを確認した。その原因は、振動台上の椅子に座った参加者の姿勢等によるものであり、

加速度振幅が小さいものほど顕著であった。そこで、振動台の加速度データに後述する評価方法を適用して評価値を算出する際は、代表値として中央値を採用した。

以上の組み合わせから提示した振動は74パターンとした。提示した振動の概要を表 2-1、加速度波形の代表例を図 2-2 示す。なお、入力刺激に相当する加振装置への入力信号は最長で25sとした。

表 2-1 入力刺激の一覧

振動源	加速度振幅 の調整	1自由度モデル	
		固有振動数[Hz]	減衰定数[%]
道路交通（平面）	4	7	5
道路交通（高架）	3	3	5
建設作業	4	7	5
建設作業(衝撃)	4	7	5
道路交通（衝撃）	5	5	5
大型車(段差通過)	3	3	5
	4	5	2
	5	5	5
	4	5	10
	5	7	5
大型車両(段差通過) 5台想定 of 繰り返し	5	5	5
大型車両(段差通過) 10台想定 of 繰り返し	4	5	5
正弦振動 (継続時間 5段階)	5	5	

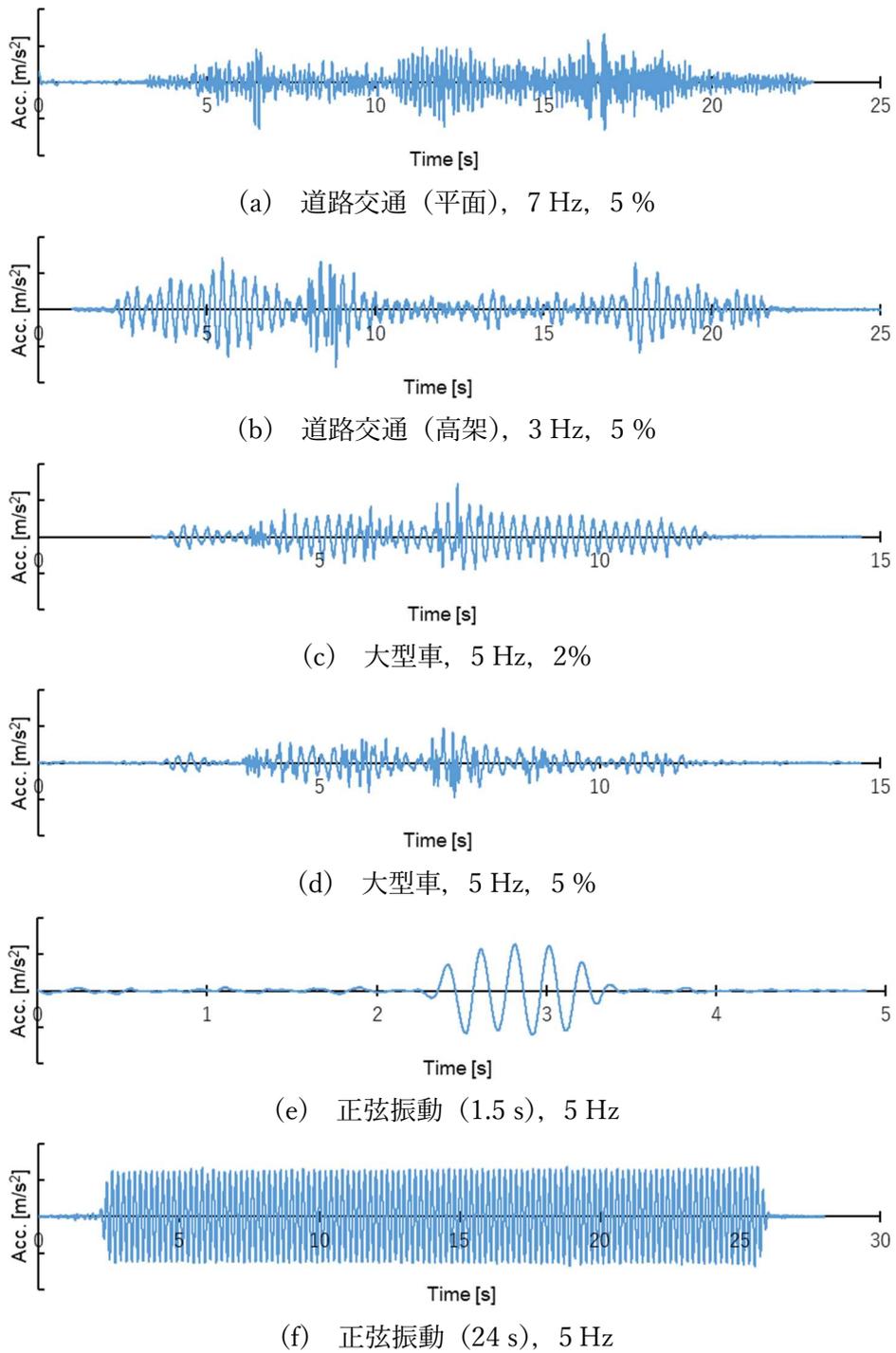


図 2-2 入力刺激の加速度波形の代表例

2.2.3 心理的反応及び評定尺度

心理学的測定方法に用いた尺度構成手法は、評定尺度法²⁻⁴⁾を採用し、構成尺度は振動の感覚上の大きさを表す“振動の大きさ”と、居住空間における快適性を表す“不快感”の2種類とした。構成尺度を2つのみとした理由は、国松、石川らの研究²⁻⁵⁾で、知覚と大きさの観点と、不快感と不安感の観点では類似した特性と示すと判断されたことによる。

本実験で用いた判断カテゴリーの数は表 2-2 に示すとおり7段階に設定し、入力刺激1パターン毎に参加者に質問し回答を得た。なお、II～VIまでを空白とした理由は、程度を表す副詞の解釈の参加者による個人差を考慮したためである。

表 2-2 加振台実験 I に用いた評定尺度

構成尺度	振動の大きさ	不快感
判断カテゴリー	I 非常に大きく感じる	I 非常に不快である
	II	II
	III	III
	IV	IV
	V	V
	VI	VI
	VII まったく感じない	VII まったく不快ではない

2.2.4 参加者

参加者は埼玉大学の学生 20 名（男性 10 名，女性 10 名）を対象とした。参加者の年齢，身長，体重の中央値と範囲はそれぞれ 21 歳（19～24 歳），166.8 cm（149.6～183.0 cm），58.0 kg（44.0～67.0 kg）であった。

2.2.5 実験方法

振動台に設置された椅子に一人ずつ座らせ、住宅のリビングの椅子に座っていることを想定してもらった上で、入力刺激に対しての心理的な評価を求めた。実験前に参加者に図2-3の教示内容を説明し、実験の目的と方法について理解を求めた。参加者の姿勢は、椅子座位として、背もたれには寄りかからず、上半身をリラックスした状態で自然な姿勢を保つように教示した。椅子に座る際は、足の裏は振動台に触れる状態とした。なお、参加者に対して視覚・聴覚に対する制約は加えていない。振動台の加振方向は、参加者の左右方向とした。入力刺激の提示の順序を参加者毎にランダムとして、入力刺激の順序による結果への影響を極力無くすようにした。参加者20名×入力刺激74パターンのうち、参加者の挙動が影響してしまったものや計測ミスを除くと有効データ数は1461となった。

実験目的

本実験は、様々な振動に対して人が感じる大きさや不快感を調査するものです。

実験方法

- ・ 振動台上に固定された椅子の上に座り、提示する振動に対する印象を下記に示すような7つのカテゴリーでそれぞれ判断して、その数字を実験者に伝えてください。
- ・ 振動を受ける状況として、住宅のリビングの中で椅子に座っていることを想定してください。
- ・ 各振動の提示時間や振動間隔は様々ですが、その一部ではなくスタートからストップの合図があるまでの全体の印象で判断してください。
- ・ 判断は首尾一貫する必要はなく、あくまで各々の振動に対する判断をしてください。

図 2-3 実験に用いた教示内容

2.3 評価方法

加振台実験で得られた”振動の大きさ”と”不快感”の心理的反応と，国内外の環境振動の評価方法による評価値の適用性を検討する。評価値は，振動台上の加速度データに以下に示す評価方法を適用して求めた。

(1) *AIJES 2004* (居住性能評価指針)

居住性能評価指針²⁻⁶⁾の評価方法の考え方に準じた評価で，1/3 オクターブバンド毎の最大加速度を求め，各バンドの値を評価曲線に照らし合わせ，評価が最大となるバンドの値で評価を決定する。評価曲線を図 2-4 に示す。本研究では，1/3 オクターブバンド毎の最大加速度を評価曲線の周波数特性で逆補正し，最大となるバンドの加速度を評価値として採用することとした。すなわち，得られる評価値は，評価曲線上で値が最小となる 1.5~2.5 Hz の加速度の等価値となる。

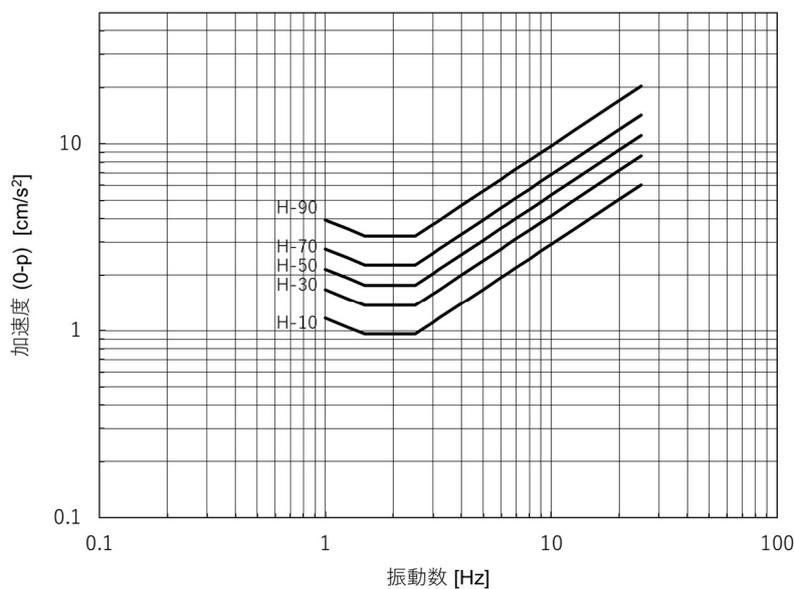


図 2-4 水平振動の性能評価曲線

(2) *AIJES 2018* (居住性能評価規準)

居住性能評価規準²⁻⁷⁾の評価方法の考え方に準じた評価で，前述の居住性能評価指針の改定版である。1/3 オクターブバンド毎の最大加速度求め，さらに下式に示す方法で時定数 10 ms の振動レベル 55 dB 以上の値となる振動の継続時間に応じて加速度振幅を低減した後に非定常的な水平振動の性能評価図の周波数特性で逆補正し，最大となるバンドの加速度を評価値として採用した。得られる評価値は，評価曲線上で値が最小となる 1.5~2.5 Hz の加速度の等価値となる。なお，居住性能評価規準では定常的な振動に対しては振動の継続時間

第2章 心理的反応に対する評価方法に関する実験的検討（加振台実験Ⅰ）

に応じた加速度振幅の低減を行わないが、本研究では正弦振動の評価に対しても、振動の継続時間が短く、過渡的な非定常的な振動として扱うこととした。

非定常な水平振動の性能評価図を図 2-5, 評価レベルの説明を表 2-3, 下式に示す A^*/A と T の関係を図 2-6 に示す。

$$10 \text{ s} \leq T \text{ の場合} \quad : A^* = A \quad (2.2)$$

$$1 \text{ s} \leq T < 10 \text{ s} \text{ の場合} \quad : A^* = A \times 10^{(\log T - 1)/4} \quad (2.3)$$

$$T < 1 \text{ s} \text{ の場合} \quad : A^* = A \times 10^{-1/4} \quad (2.4)$$

A : 各バンドの加速度の最大値

A^* : 評価に用いる加速度の最大値

T : 時定数 10 ms の振動レベル 55 dB 以上の値となる振動の継続時間

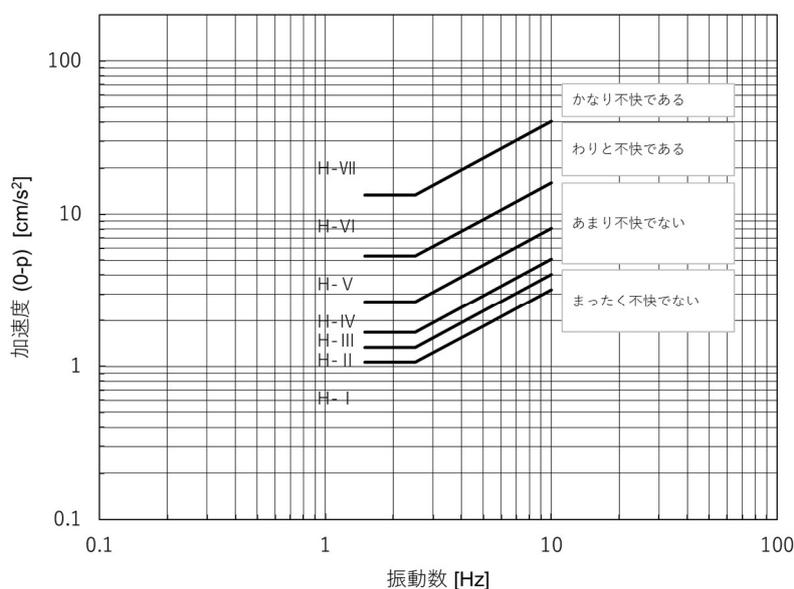
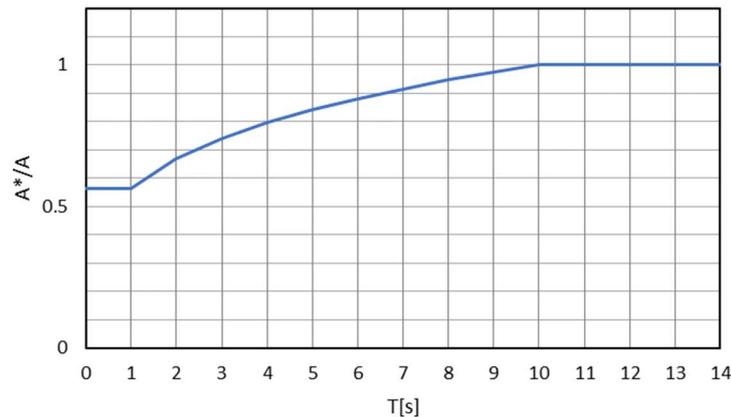


図 2-5 非定常な水平振動の性能評価図

表 2-3 非定常な水平振動の評価レベル

評価レベル	不快感
H-VII	かなり不快である
H-VI	わりと不快である
H-V	あまり不快でない
H-IV	
H-III	まったく不快でない
H-II	
H-I	

図 2-6 A^*/A と T の関係(3) L_{Vmax} (振動レベルの最大値)

振動レベルは、JIS C 1510²⁻⁸⁾で規定されている周波数重み付特性や時間重み付け特性によって評価される。振動規制法では、鉛直方向のみの評価基準を定めており、水平方向については法的な評価基準は無いが、建築以外の分野も含めると、国内の環境振動の分野において最も多く使用されている評価値である。ここでは、以下の式のように時々刻々算出される振動レベルの最大値を評価値とする。

$$L_{Vmax} = \max[L_V(t_0)] \text{ [dB]} \quad (2.5)$$

$$L_V(t_0) = 20 \log_{10} \frac{a_w(t_0)}{a_0} \quad (2.6)$$

$$a_w(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{t_0} \{a_w(t)\}^2 \exp\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right) dt \right\}^{1/2} \quad (2.7)$$

$L_V(t_0)$: 振動レベル [dB]

$a_w(t_0)$: JIS 水平特性周波数補正加速度の実効値 [m/s^2]

$a_w(t)$: JIS 水平特性周波数補正加速度の瞬時値 [m/s^2]

a_0 : 基準の加速度 ($1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$)

τ : 時定数 0.63 [s]

(4) $MTVV$ (最大過渡振動値)

建物内における振動の測定・評価方法を規定している国際規格 ISO 2631 シリーズでは、Part1²⁻⁹⁾で全身振動評価に関する一般的な事項に関する規定、Part2²⁻¹⁰⁾で特に建物内の振動評価に関する規定がそれぞれ示されている。これらの ISO 2631 シリーズでは、周波数補正した加速度の実効値を基本評価値としている。さらに、クレストファクタが高い振動、衝撃を時折含む振動や過渡的振動の場合には、基本評価法では振動の影響を過小評価する可

能性があるため、2種類の補足評価法による評価も実施するよう規定されている。その補足評価法の一つである Maximum Transient Vibration Value (MTVV) は一過性の衝撃や過渡振動の最大値を評価値とする方法である。

$$MTVV = \max \left[\left[\frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} \{a_w(t)\}^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \right] \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (2.8)$$

$a_w(t)$: ISO W_d 周波数補正加速度の瞬時値 [m/s²]

τ : 移動平均の積分時間 1 [s]

(5) VDV (四乗則暴露量値)

前述の ISO2631 シリーズでの補足評価法である Vibration Dose Value (VDV) は加速度の4乗を採用することでピーク値に敏感になり、かつ時間積分により振動の継続時間の影響が時間の1/4乗で考慮される方法である。

$$VDV = \left[\int_0^T \{a_w(t)\}^4 dt \right]^{\frac{1}{4}} \text{ [m/s}^{1.75}\text{]} \quad (2.9)$$

$a_w(t)$: ISO W_d 周波数補正加速度の瞬時値 [m/s²]

ここで、本研究では、振動の継続時間の効果を検討するために、加速度2乗を時間積分して平方根を求めた評価値を VDV_{square} として用いた。

$$VDV_{square} = \left[\int_0^T \{a_w(t)\}^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \text{ [m/s}^{1.5}\text{]} \quad (2.10)$$

$a_w(t)$: ISO W_d 周波数補正加速度の瞬時値 [m/s²]

2.4 実験結果

2.4.1 尺度変換

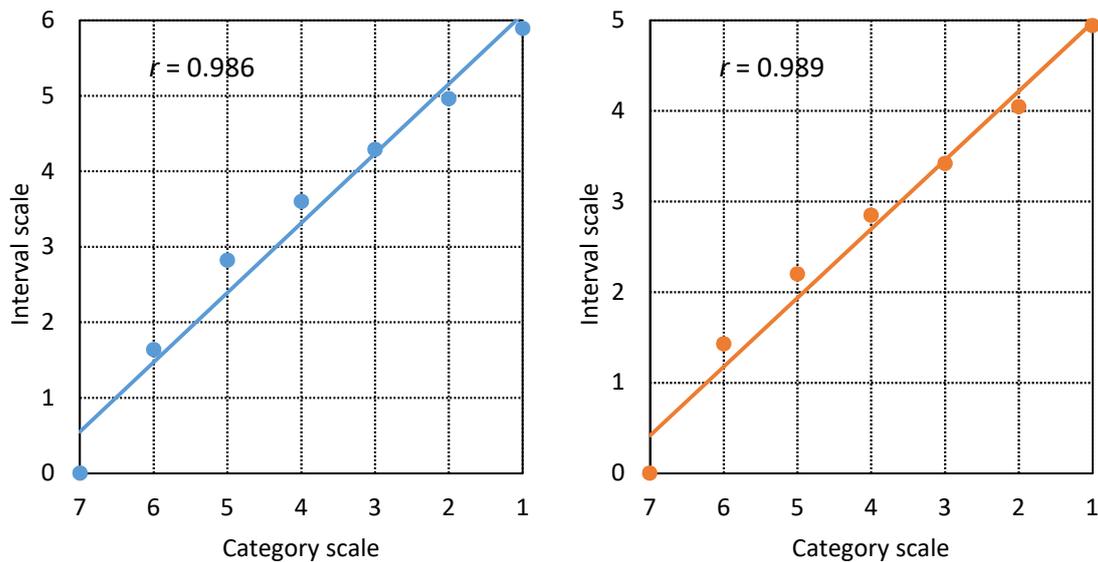
加振台実験の際に計測した振動台の加速度データに各評価方法を適用して評価値を算出し、“振動の大きさ”と“不快感”の心理的関係との関係を検討する。

まず、評定尺度によって得られたカテゴリー尺度は序数尺度であるため、範疇判断の法則（系列カテゴリー法）²⁻¹¹⁾によって、間隔尺度に変換を行った結果を表 2-4 に示す。また、横軸に元のカテゴリー尺度、縦軸に尺度変換後の間隔尺度として、“振動の大きさ”と“不快感”のそれぞれの尺度変換前後の関係を図 2-7 に示す。図 2-7 から、カテゴリー尺度と間隔尺度との相関は、“振動の大きさ”で 0.986，“不快感”で 0.989 であり、直線関係が見られることを確認した。

以降本章では、心理的反応の尺度を表 2-4 に示す尺度変換後の間隔尺度を用いて、各評価値との対応関係を検討する。

表 2-4 尺度変換後の間隔尺度

Category scale	Subjective response	I	II	III	IV	V	VI	VII
Interval scale	Magnitude	5.89	4.96	4.29	3.60	2.82	1.64	0.00
	Discomfort	4.94	4.05	3.42	2.85	2.20	1.43	0.00



(a) 振動の大きさ

(b) 不快感

図 2-7 もとの尺度と変換後の間隔尺度の関係

2.4.2 心理的反応に対する振動の継続時間の影響

振動の継続時間が“振動の大きさ”と“不快感”の心理的反応に与える影響について検討を行うために、正弦振動のみの評価値と心理的反応との関係を図 2-8 に示す。図中の(a)～(c)は“振動の大きさ”，(d)～(f)は“不快感”との対応を表す。図中の横軸は評価値，縦軸は心理的反応の間隔尺度を示しており，値が大きくなるほど心理的反応が強いことを表している。なお，縦軸の右側は評定尺度のカテゴリー尺度を表している。

最大値評価の代表として $MTVV$ と振動の継続時間を考慮する評価値である VDV ， VDV_{square} の3種類の評価値について示している。なお，これらの算出に用いた周波数重み付け特性はすべて W_d である。

“振動の大きさ”では，5段階それぞれの加速度において継続時間が1.5 sから24 sまで長くなるほど参加者が振動を大きく感じる傾向を，最大値評価の(a) $MTVV$ では適切に評価できないことが認められる。一方，振動の継続時間の影響を1/4乗で考慮している(b) VDV では，“振動の大きさ”との対応が良く，継続時間の影響を適切に評価できていることが認められる。1/2乗で振動の継続時間を考慮している(c) VDV_{square} は，同程度の尺度に対して評価値が大きくばらついていることから，継続時間を過大に評価している傾向がある。

“不快感”では，最大値評価である(d) $MTVV$ は，“振動の大きさ”と同様に，継続時間が長くなるほどより不快と感じる傾向を適切に評価できていない。なお，この継続時間の影響は，“振動の大きさ”より“不快感”により顕著に表れていることが，同等の評価値に対する縦方向のばらつき大きさからわかる。一方，“振動の大きさ”では継続時間を過大に評価していた(f) VDV_{square} が適切に継続時間の影響を考慮した評価値となっており，(e) VDV よりも良い対応が認められる。これらのことから，“不快感”では“振動の大きさ”と比較して振動の継続時間の影響が大きいことが推察される。

以上は，正弦振動による知見ではあるが，建物内の水平振動では共振現象によって，正弦波に近い振動が発生し得ることから実現象としても想定される。

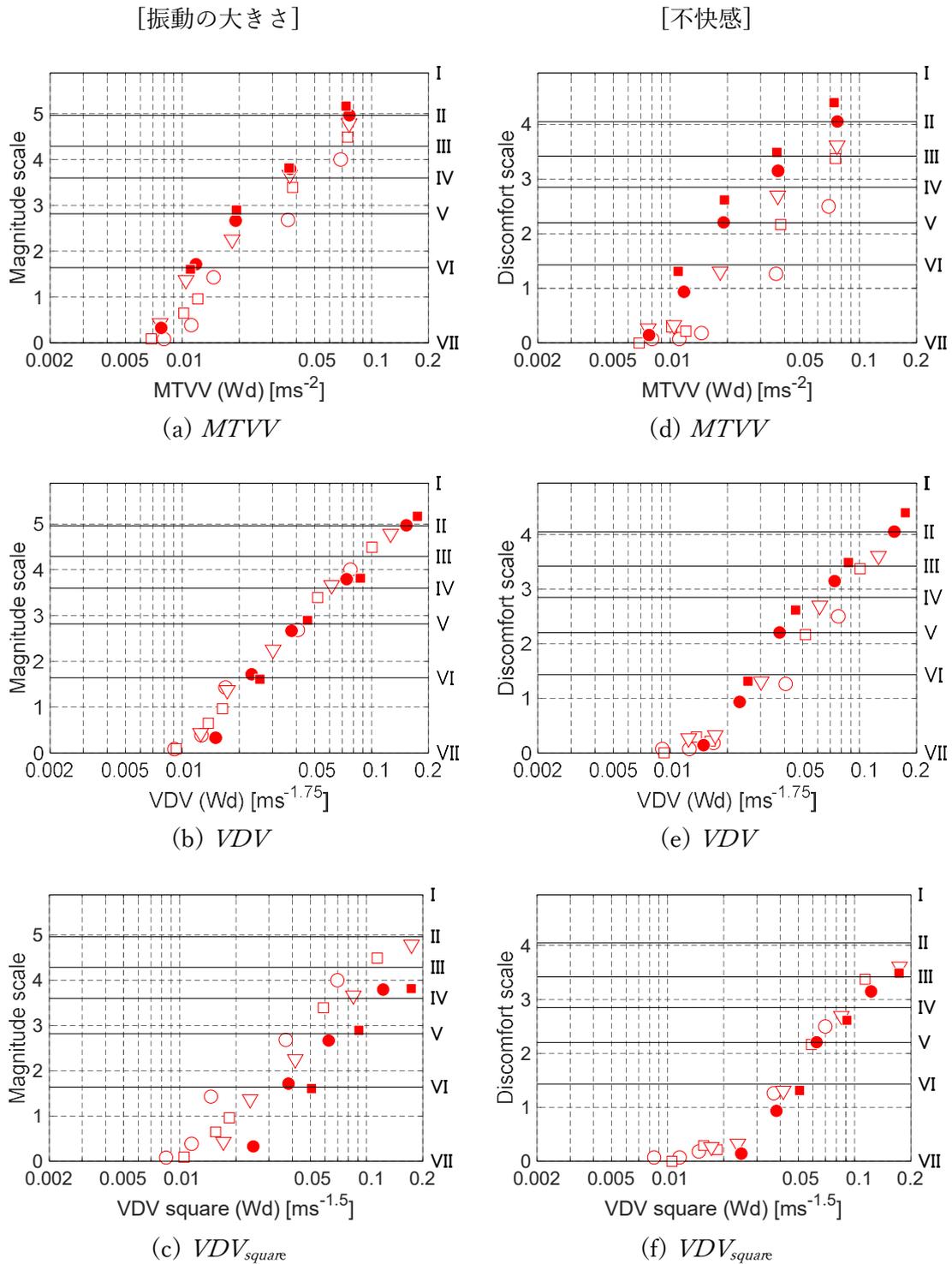


図 2-8 正弦振動による評価値と心理的反応の関係

(○:1.5 s; □:3 s; ▽:6 s; ●:12 s; ■:24 s)

2.4.3 各評価値と心理的反応との対応関係

次に、実振動も含めた評価値と心理的反応との関係を“振動の大きさ”は図 2-9, “不快感”は図 2-10 に示す。評価値と心理的反応との相関を確認するために、スピアマンの順位相関係数 (ρ) を求め図 2-9 及び図 2-10 の図中と一覧を図 2-11, 表 2-5 に示す。

図 2-9 に示す“振動の大きさ”では、すべての評価値において全体として良い対応が認められる。詳細に見ると、正弦振動と同様に実振動においても最大値評価である(a) *AIJES 2004*, (c) L_{Vmax} , (d) *MTVV*では、振動の継続時間を考慮できないことから縦軸方向にばらつきが大きい。一方、振動の継続時間を 1/4 乗で考慮している(e) *VDV*では、実振動及び正弦振動ともに対応が良く、継続時間の影響を適切に評価できていることが認められる。同様な傾向が、最大値評価の(a) *AIJES 2004* に対して、最大値評価に加えて振動の継続時間を 1/4 乗で考慮する(b) *AIJES 2018* の方が良い対応を示していることに確認できる。(f) VDV_{square} は、継続時間を過大に評価している傾向が実振動においても認められ、相関は 6 種類の評価値の中で最も弱い。

図 2-10 に示す“不快感”では、実振動も含めた最大値評価である(a) *AIJES 2004*, (c) L_{Vmax} , (d) *MTVV*と比較して、振動の継続時間を考慮する(e) *VDV*, (f) VDV_{square} の方が良い対応であることがわかる。同様に(a) *AIJES 2004* と(b) *AIJES 2018* の比較においても、振動の継続時間を考慮する(b) *AIJES 2018* の方が“不快感”との対応が良く相関も強いことがわかる。

以上から、振動の継続時間を考慮している評価値は、“振動の大きさ”と“不快感”の心理的反応との良い対応が得られることがわかった。異なる心理的反応でも同一の評価値で評価できることが実用的であると考えた場合、図 2-9 及び図 2-10 に示した評価値と心理的反応との関係や、図 2-11 に示す相関係数から、加振台実験Ⅰで検討した中では *VDV* が適当と言える。

[振動の大きさ]

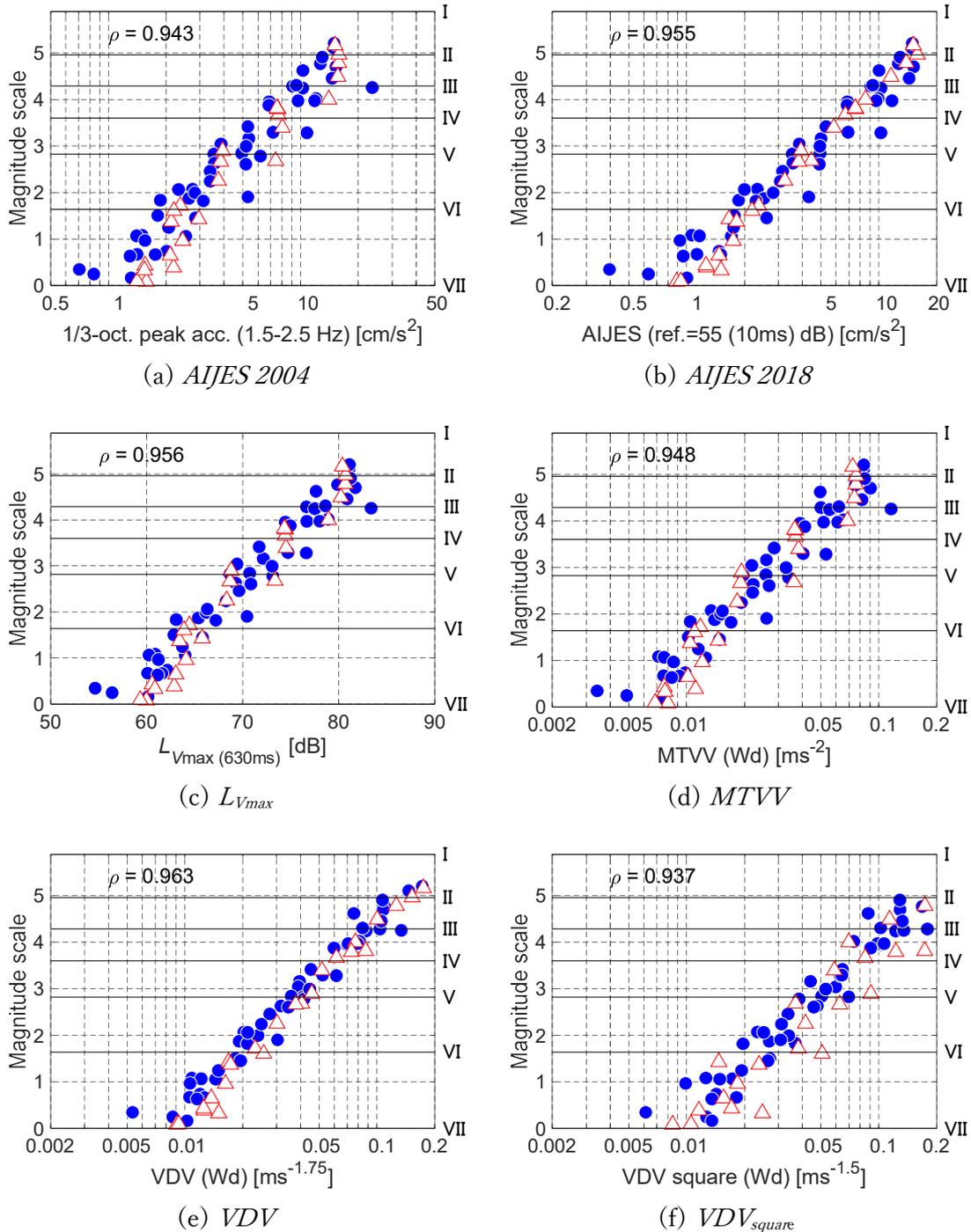


図 2-9 “振動の大きさ”と各評価値の関係

(●:実振動源; △:正弦振動)

[不快感]

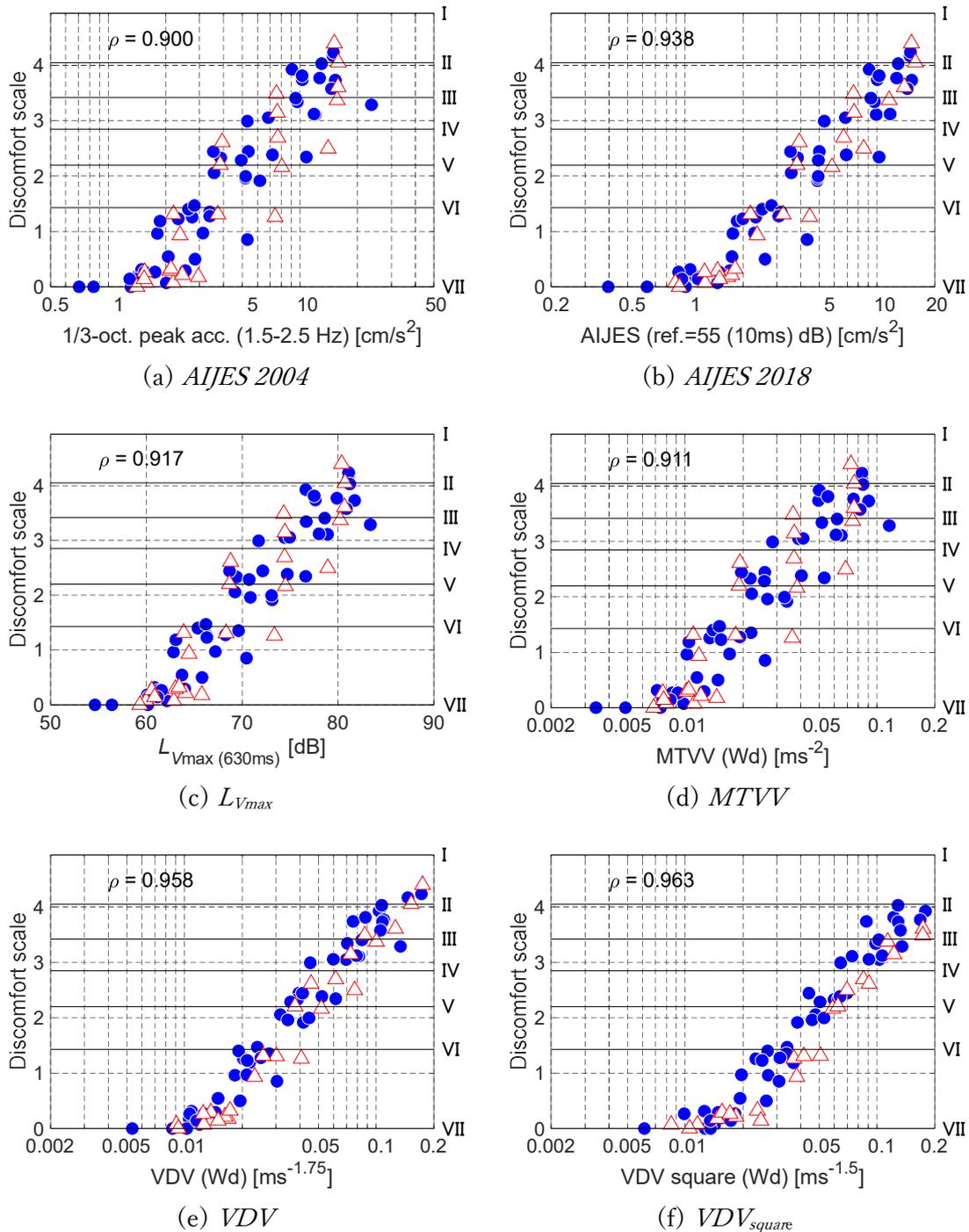


図 2-10 “不快感”と各評価値の関係

(●:実振動源; △:正弦振動)

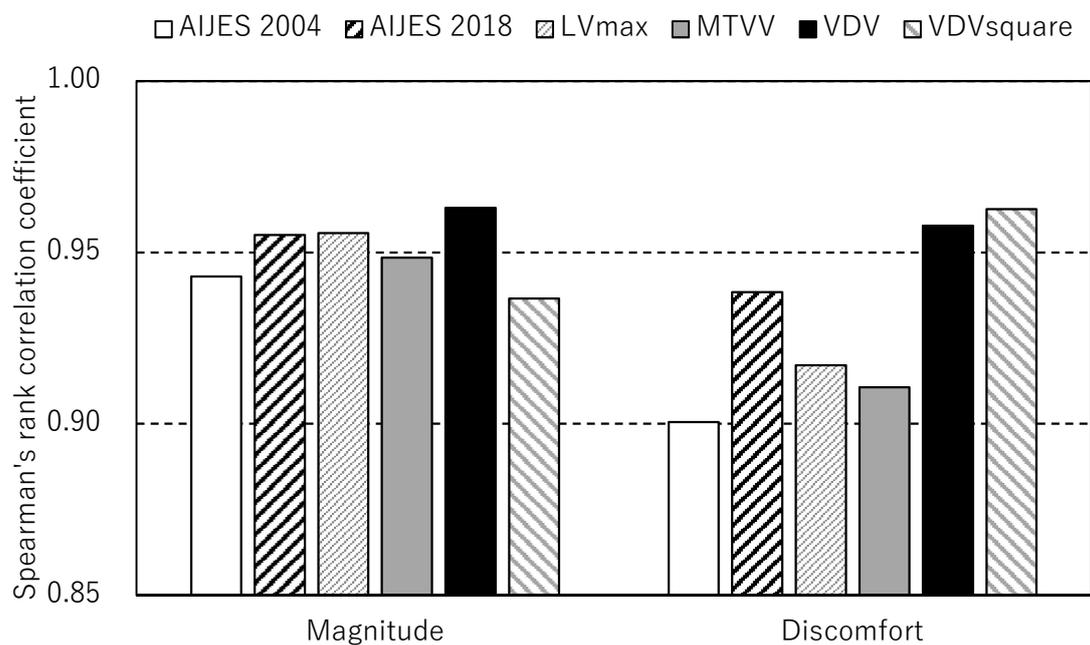


図 2-11 各評価値の相関係数の比較 (すべての入力刺激)

表 2-5 各評価値の相関係数の一覧

Evaluation	All input stimuli		Real vibration		Sinusoidal	
	Magnitude	Discomfort	Magnitude	Discomfort	Magnitude	Discomfort
<i>AIJES 2004</i>	0.943	0.900	0.942	0.909	0.961	0.894
<i>AIJES 2018</i>	0.955	0.938	0.947	0.932	0.980	0.942
L_{Vmax}	0.956	0.917	0.951	0.923	0.969	0.904
<i>MTVV</i>	0.948	0.911	0.942	0.915	0.956	0.889
<i>VDV</i>	0.963	0.958	0.963	0.958	0.979	0.956
<i>VDVsquare</i>	0.937	0.963	0.946	0.965	0.922	0.969

2.5 まとめ

第2章では、加振台を用いた主観評価実験によって、心理的反応と国内外の環境振動の評価方法との対応関係を検討した結果、得られた結論を以下に示す。

- 1) 心理的反応に対する振動の継続時間の影響を検討するために、正弦振動のみの評価値で心理的反応との対応を確認したところ、最大値評価よりも振動の継続時間を考慮する評価値の方が良い対応を示すことがわかった。
- 2) 正弦振動に加えて実振動も含めた検討では、1)の結果と同様に振動の継続時間を考慮する評価値が心理的反応との対応が良いことがわかった。“振動の大きさ”では、振動の継続時間を1/4乗で考慮する VDV が最も対応が良かった。“不快感”では、 VDV と振動の継続時間を1/2乗で考慮する VDV_{square} の対応が良かった。
- 3) “振動の大きさ”と“不快感”の異なる心理的反応に対して、実用的に同一の評価を採用することを考えると、 VDV が最も適切である。
- 4) 以上の結論から、第2章で検討した入力刺激と国内外の環境振動の評価方法では、振動の継続時間を1/4乗で考慮する VDV が適当な評価方法であることを明らかにした。

以上の結論を得たが、検討を進める上で以下の課題が明確になった。

- 1) 心理的反応の測定に用いた評定尺度には空白のカテゴリがあった。実際に振動苦情を訴えている居住者へのヒアリングや竣工時の性能評価など、実務的な利用の場面を想定すると各カテゴリは空白ではなく、その段階の程度を適切に示す表現語を付し、振動刺激に対して絶対的な評価できる評定尺度が望ましい。
- 2) 振動と心理的反応の関係に関する研究では、心理的反応の種類やカテゴリ数など様々な評定尺度が用いられているため、横断的な検討をする上では直接的な比較が難しい。学術的な知見に基づく環境振動の分野の評定尺度が必要である。
- 3) 今回の知見は、入力刺激には、一般的な戸建て住宅を想定して1自由度系モデルを利用したものである。最終的な評価方法を提示するためには、やはり実際の建物内における実測波形による入力刺激を用いた加振台実験によって、心理的反応と評価値との対応関係を検討することが必要である。

参考文献

- 2-1) 平尾善裕, 国松直, 東田豊彦: 地盤振動に起因する木質系・鉄骨系戸建て住宅の振動増幅特性, 日本建築学会技術報告集, 第 19 巻, 第 42 号, pp.631-634, 2013.6
- 2-2) 宮澤健二: 目でみる木造住宅の耐震性, 東洋書店, pp.312-313, 2007.1
- 2-3) 日本建築学会: 建物の減衰, 丸善, pp.174-177, 2000
- 2-4) 難波精一郎, 桑野園子: 音の評価のための心理学的測定法, コロナ社, 1998.7
- 2-5) 国松直, 石川孝重, 露木美奈, 野田千津子, 松本泰尚: 戸建住宅における交通による水平振動の心理評価と知覚に影響を及ぼす要因ーランダム振動に対する振動感覚の評価に向けて(その 11)ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.363-364, 2009.8
- 2-6) 日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説, 2004.5
- 2-7) 日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能評価規準・同解説, 2018.11
- 2-8) 日本工業規格: JIS C 1510 振動レベル計, 1995
- 2-9) ISO 2631-1: Mechanical Vibration and Shock – Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration – Part 1: General Requirements. International Standard, 1997
- 2-10) ISO 2631-2: Mechanical Vibration and Shock – Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration – Part 2: Vibration in Buildings (1 Hz to 80 Hz), 2003
- 2-11) 田中良久: 心理学的測定法 (第 2 版), 東京大学出版会, pp.151-158, 1977.3

第3章

環境振動に関する評定尺度の構成

第3章 環境振動に関する評定尺度の構成

3.1 はじめに

第2章では、実振動源や正弦振動で構成された入力刺激を用いた加振台実験によって、“振動の大きさ”と“不快感”と国内外の環境振動分野の評価値との対応関係について検討を行った。その結果、振動の継続時間を1/4乗で考慮する評価値が、心理的反応との対応が良いことが明らかになった。一方で、心理的反応を計測するための評定尺度に空白のカテゴリがあることから、各カテゴリが意味する居住性能が明示されておらず、各カテゴリの心理的な強さがはっきりしていない点を課題とした。

評定尺度法は、各カテゴリに「非常に」、「とても」、「すこし」などの程度の表現語を用いて表現されるものであり、日常生活で行っている判断に近い言葉で判断を求めため、一般的に参加者にとって比較的判断はやさしいと言われている³⁻¹⁾。一方で、各カテゴリに用いる表現語の程度については明確でないことが多いことから、参加者によっては、カテゴリ間の境界がはっきりしないことやカテゴリの感覚上の間隔を等しく感じないことがある。騒音のうるささに関する尺度では、矢野ら³⁻²⁾の研究によって5段階尺度が構成されているが、環境振動の分野ではカテゴリ数や各カテゴリに用いる程度の表現語についての検討を行い評定尺度の構成を試みた研究は行われていない。

第3章では、振動に対する心理的な程度の表現語23種類に関するアンケート調査を実施し、5段階及び7段階それぞれに相応しい程度の表現語を絞り込み、心理学的尺度の構成を試みる。ただし、厳密に言えばアンケート調査はいわば文字による概念的な方法であることから、アンケート調査によって構成された心理学的尺度と人が直接振動を感じた時の反応との関係は解明できない。そこで、加振台実験を行い、程度の表現語と加振台から受け取る感覚の等価値を調整法³⁻¹⁾で求め、アンケート調査による心理学的尺度の妥当性を検討する。

3.2 評定尺度における程度の表現語に関する予備的検討

アンケート調査に先立ち、評定尺度の中間カテゴリーが加振台実験Ⅰのように空白の場合と、大半のカテゴリーに程度の表現語がある場合で、予備的な加振台実験を行った。各カテゴリーに程度の表現語が示された評定尺度は、横山らの研究³⁻³⁾を参考にした。検討した評定尺度を表 3-1 に示す。実験参加者は埼玉大学の学生 5 名、入力刺激は 4 Hz の正弦振動で加速度振幅を振動レベルで約 55～85 dB になるように約 6 dB 間隔で 6 段階、振動の継続時間を倍間隔で 1.5, 3, 6, 12, 24, 48 s の 6 段階で設定し、計 36 パターンとした。

2 つの評定尺度で測定した心理的反応の相関をスピアマンの順位相関係数で確認したところ、いずれの心理的反応においても高い相関を確認できた。36 パターンの入力刺激に対して 2 つの評定尺度で測定した心理的反応の中央値に、ウィルコクソンの符号付順位検定を行った結果、有意水準 5% で有意な差を確認することができなかった。これらの相関係数や統計的な有意差から、評定尺度の各カテゴリーを表す程度の表現語の有無は、心理的反応の順序や反応の強さの中央値に大きな影響を与えないことを示唆する結果が得られた。しかしながら、加振台実験後に参加者に評定尺度についての感想を聞いたところ、5 名全員が各カテゴリーに程度の表現語が示された評定尺度 (表 3-1(b)) の方が、答えやすいとの回答を得た。この点がまさに第 2 章で課題としたところである。少人数の参加者であることや 4Hz の正弦振動のみを用いた検討結果であるものの、評定尺度の各カテゴリーに程度の表現語を示した評定尺度が必要であるとの結論に至り、各カテゴリーを適切に示す程度の表現語で構成された評定尺度を作成するために、アンケート調査による検討を実施することとした。

表 3-1 検討に使用した評定尺度

(a) 各カテゴリーが空白の場合

振動の大きさ	気になり具合	不快感
I 非常に大きく感じる	I 非常に気になる	I 非常に不快である
II	II	II
III	III	III
IV	IV	IV
V	V	V
VI	VI	VI
VII まったく感じない	VII まったく気にならない	VII まったく不快ではない

(b) 各カテゴリーに程度の表現語が示された場合

振動の大きさ	気になり具合	不快感
I 非常に大きく感じる	I 非常に気になる	I 非常に不快である
II やや大きく感じる	II	II
III はっきり気づく	III かなり気になる	III かなり不快である
IV かすかに気づく	IV	IV
V 気付くか気付かないかの境界	V やや気になる	V やや不快である
VI ほとんど気付かない	VI	VI
VII まったく感じない	VII まったく気にならない	VII まったく不快ではない

3.3 アンケート調査

3.3.1 調査概要

建物内の振動に対する心理的反応として、既往の研究^{3-4)~3-10)}でも多く用いられている“振動の大きさ”，“気になり具合”，“不快感”の3種類に着目し，それらに関する程度の表現語を調査対象とした。尺度のカテゴリー数は，これも既往の研究^{3-4)~3-10)}を参考に，5段階と7段階の2種類とした。

アンケートは，インターネット調査によって，性別，年齢等を問わず全国的に実施した。アンケートの構成は，属性項目と本調査の2部とした。属性項目の設問を表3-2に示す。属性項目の性別，年齢，住まいの地域，国籍でスクリーニングを行い，条件を満たす対象者のみ本調査に回答できるシステムとした。属性の中で最も重要な条件である住まいの地域は，外部振動源による建物内の振動暴露の経験者が，調査対象者の一定の割合を占めることが必要と考え，環境省から報告されている全国の振動に係る苦情件数^{例えば3-11)}の2011年からの5か年のデータを集計した。集計結果を図3-1に示す。苦情件数の多い地域を選定した結果，北海道，埼玉県，千葉県，東京都，神奈川県，静岡県，愛知県，大阪府，兵庫県，岡山県，福岡県の11の地域が調査対象地域となった。苦情件数の観点から選定を行ったが，結果として一部の地方除き，方言を含めた程度の表現語の日本の地方性についても検討できる地域が選定されたとも考える。

各地域の調査対象者数は，20代から60代まで各年代の男女が5名ずつで計50名が最小の人数構成として，地域ごとの苦情件数に応じて案分した。本調査の回答者数は5段階，7段階でそれぞれ1,700名，そのうち有効回答者数は5段階で851名，7段階で857名であった。なお，建物内の振動暴露経験者の有効回答者に対する割合は，55.9%，60.6%であった。7段階の調査対象者の内訳を表3-3に示す。なお，インターネット調査は，株式会社クロスマーケティングに委託し，2017年12月に2回実施した。

表 3-2 属性項目に関する設問

<p>Q.1 あなたの性別をお答えください。</p> <p>A.1 1 男性, 2 女性</p> <p>Q.2 あなたの年齢をお答えください。</p> <p>A.2 () 歳</p> <p>Q.3 あなたの職業をお答えください。</p> <p>A.3 1 会社勤務 (一般社員), 2 会社勤務 (管理職), 3 会社経営 (経営者・役員) 4 公務員・教職員・非営利団体職員, 5 派遣社員・契約社員 6 自営業 (商工サービス), 7 SOHO, 8 農林漁業 9 専門職 (弁護士・税理士等・医療関連), 10 パート・アルバイト 11 専業主婦/主夫, 12 学生, 13 無職, 14 その他の職業</p> <p>Q.4 あなたの出身地をお答え下さい</p> <p>A.4 1 日本, 2 日本以外の国</p> <p>Q.5 あなたのお住まいの地域をお答えください。</p> <p>A.5 都道府県(47 都道府県プルダウンで選択), 市町村 (自由記述)</p> <p>Q.6 あなたのお住いの地域の郵便番号をお答え下さい</p> <p>A.6 (郵便番号入力)</p> <p>Q.7 現在までに、最も長く住んでいた地域をお答えください。</p> <p>A.7 都道府県(47 都道府県プルダウンで選択), 市町村 (自由記述)</p> <p>Q.8 現在のお住まいについてお答えください。</p> <p>A.8 1 戸建て住宅 (持家), 2 戸建て住宅 (借家) 3 集合住宅 (持家), 4 集合住宅 (借家)</p> <p>Q.9 現在の住宅の階数についてお答えください。(実際にお住いの階数ではありません)</p> <p>A.9 () 階</p> <p>Q.10 現在までに、最も長く住んでいたお住まいについてお答えください。</p> <p>A.10 1 戸建て住宅 (持家), 2 戸建て住宅 (借家) 3 集合住宅 (持家), 4 集合住宅 (借家)</p> <p>Q.11 現在までに、最も長く住んでいた住宅の階数についてお答えください。(実際に住んでいたの階数ではありません)</p> <p>A.11 () 階</p> <p>Q.12 "これまで、住居やオフィスなどで、地震によるもの以外による振動を感じたことがありますか。(例えば車や電車の通過時など。)</p> <p>A.12 1 はい, 2 いいえ</p>
--

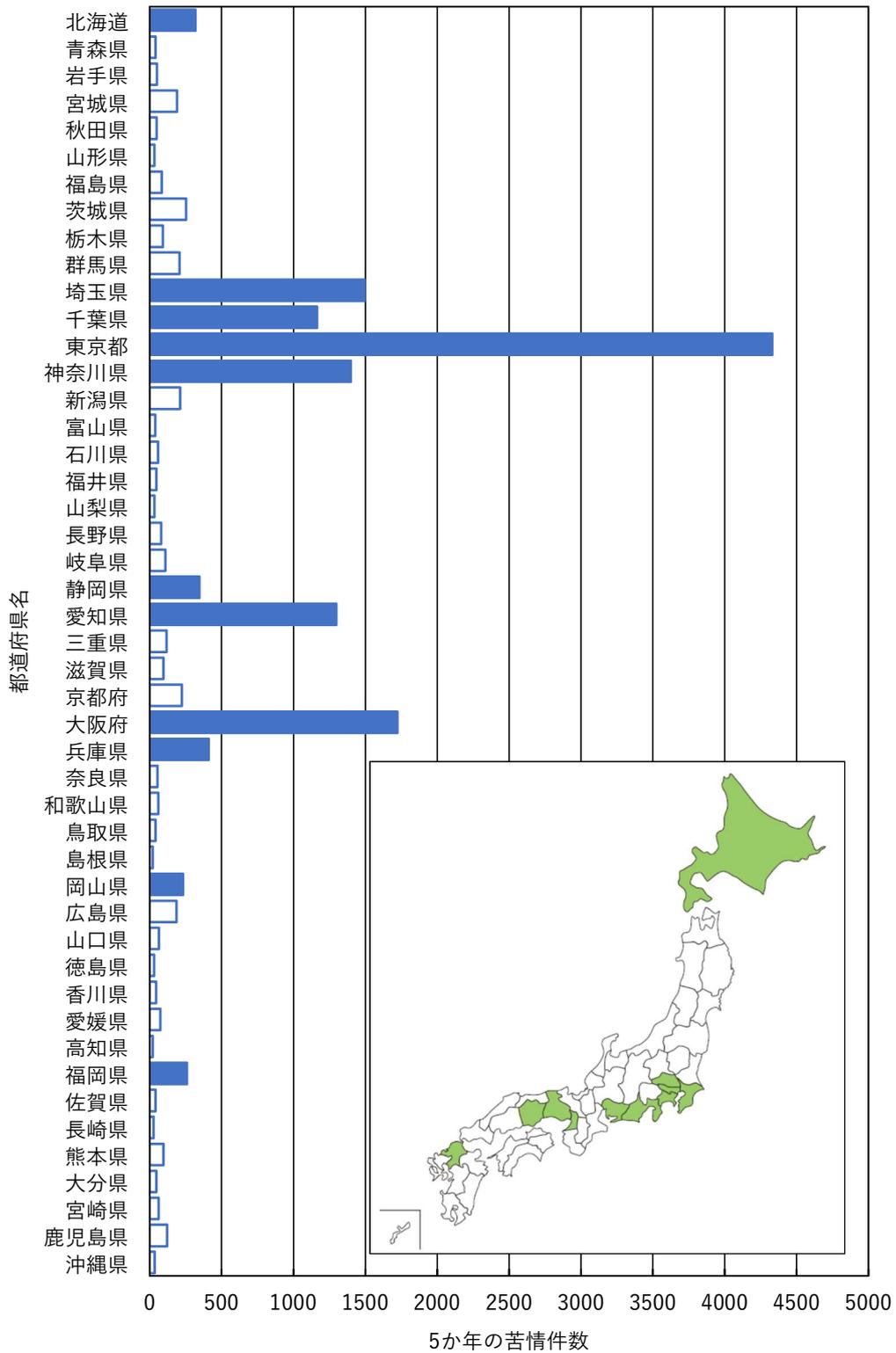


図 3-1 5か年（2011年-2015年）の振動苦情件数
 (棒グラフ及び日本地図で色付けされた地域が、調査対象であることを表す)

表 3-3 アンケート調査の調査対象者の内訳

(a) 5段階の調査対象者

地域	20代		30代		40代		50代		60代		計
	男	女	男	女	男	女	男	女	男	女	
北海道	5	3	4	4	5	5	5	4	5	5	45
千葉	7	9	9	8	9	9	7	10	7	9	84
埼玉	8	7	6	8	10	10	7	10	10	9	85
東京	17	20	21	23	17	21	20	24	18	22	203
神奈川	5	10	7	8	10	8	9	10	10	9	86
静岡	4	4	5	5	4	5	4	5	5	5	46
愛知	5	10	7	9	8	9	10	7	10	10	85
大阪	8	9	5	7	9	7	10	10	7	10	82
兵庫	2	4	3	5	5	5	4	5	5	5	43
岡山	4	5	5	5	5	5	4	4	5	5	47
福岡	1	5	5	5	4	5	5	5	5	5	45
合計	66	86	77	87	86	89	85	94	87	94	851

(b) 7段階の調査対象者

地域	20代		30代		40代		50代		60代		計
	男	女	男	女	男	女	男	女	男	女	
北海道	3	5	5	5	2	5	5	5	5	5	45
千葉	7	9	10	10	9	9	8	10	8	10	90
埼玉	8	10	5	9	6	10	5	10	8	7	78
東京	19	19	15	20	17	24	21	22	24	22	203
神奈川	7	9	7	8	9	10	10	8	10	10	88
静岡	5	5	5	5	3	5	5	5	5	5	48
愛知	7	8	10	9	8	9	10	9	10	10	90
大阪	8	9	5	7	9	10	7	10	8	7	80
兵庫	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	50
岡山	5	4	3	5	4	4	5	4	5	5	44
福岡	4	3	4	3	5	3	5	5	4	5	41
合計	78	86	74	86	77	94	86	93	92	91	857

3.3.2 程度の表現語

調査に用いた程度の表現語は、騒音のうるささに関する5段階尺度の検討³⁻¹²⁾に用いられた21種類の表現語を基本とした。この21種類の表現語の騒音のうるささに関する言葉の強さを図3-2に示す。これら21種類の表現語の強さを等間隔の7段階の尺度に適合させた時、強い方から3段目のカテゴリーに該当する表現語(図中の「だいぶ(DB)」から「わりに(WR)」の間の表現語が空白の部分)が存在しなかったことから、その他の程度の表現語に関する先行研究^{3-13), 3-14)}を参考に、適当な強さを有すると思われる2つの表現語(「ずいぶん(ZB)」と「けっこう(KK)」)を加えた。本研究で検討した23種類の程度の表現語の一覧を表3-4に示す。

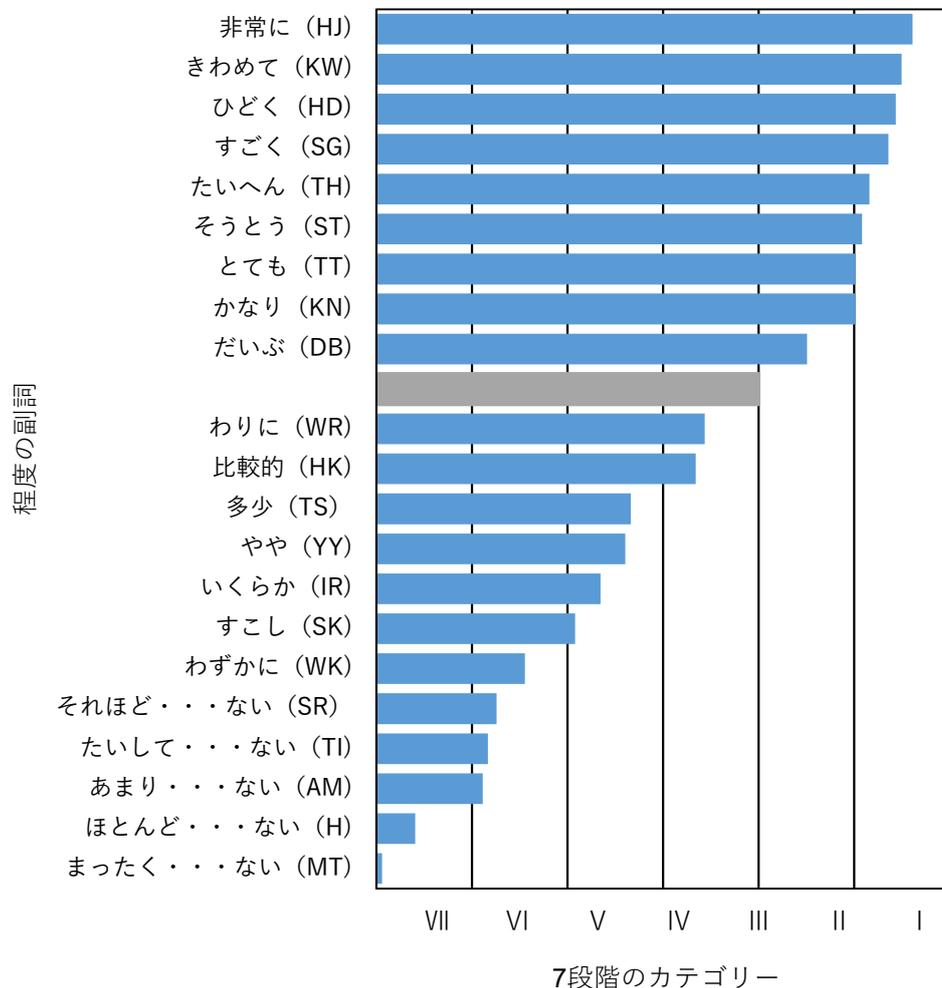


図 3-2 騒音のうるささに関する表現語の強さ
(最上位のカテゴリーはI, 最下位はVII)

表 3-4 23種類の程度の表現語

Code	振動の大きさ	気になり具合	不快感
HJ	非常に大きく感じる	非常に気になる	非常に不快である
KW	きわめて大きく感じる	きわめて気になる	きわめて不快である
HD	ひどく大きく感じる	ひどく気になる	ひどく不快である
TH	たいへん大きく感じる	たいへん気になる	たいへん不快である
SG	すごく大きく感じる	すごく気になる	すごく不快である
ST	そうとう大きく感じる	そうとう気になる	そうとう不快である
TT	とても大きく感じる	とても気になる	とても不快である
KN	かなり大きく感じる	かなり気になる	かなり不快である
ZB	ずいぶん大きく感じる	ずいぶん気になる	ずいぶん不快である
DB	だいぶ大きく感じる	だいぶ気になる	だいぶ不快である
KK	けっこう大きく感じる	けっこう気になる	けっこう不快である
WR	わりに大きく感じる	わりに気になる	わりに不快である
HK	比較的大きく感じる	比較的気になる	比較的不快である
YY	やや大きく感じる	やや気になる	やや不快である
TS	多少大きく感じる	多少気になる	多少不快である
IR	いくらか大きく感じる	いくらか気になる	いくらか不快である
SK	すこし大きく感じる	すこし気になる	すこし不快である
WK	わずかに大きく感じる	わずかに気になる	わずかに不快である
SR	それほど感じない	それほど気にならない	それほど不快ではない
AM	あまり感じない	あまり気にならない	あまり不快ではない
TI	たいして感じない	たいして気にならない	たいして不快ではない
HT	ほとんど感じない	ほとんど気にならない	ほとんど不快ではない
MT	まったく感じない	まったく気にならない	まったく不快ではない

3.3.3 調査内容

アンケートの各設問に入る前に以下の説明文を示し、調査の目的と調査対象としている床振動が地震によるものではなく、いわゆる環境振動が取り扱う範囲の振動であることを教示した。

本アンケートは、自宅やオフィスなど建物内で座っている際に、床振動が発生したときの“振動の大きさ”、“気になり具合”、“不快感”の程度を適切に表す言葉を調査することを目的としています。

本調査で対象としている床振動とは、地震による揺れではなく、日常生活の身の回りに存在する振動源、例えば、建物内の人の歩行や建物外の建設工事・道路交通などによるものを想定しています。

建物内で座っている状態は、椅子やソファに腰かけている場合や畳など床に直接座っている場合などが想定されるが、説明文では状態を特定する表現を用いなかった。また、実際の建物内の振動は、鉛直方向及び水平方向が時々刻々と変化していることから、説明文では振動方向を特定する表現を用いず、想定している振動源のみを明示した。これは、座っている状態や振動方向によって、程度の表現語が表す強さは変わらないという仮定を前提としたからである。

最初の設問 Q.1 では、程度の表現語の心理的な強さを把握するために、調査対象者毎にランダムに並んだ 23 種類の表現語について最小の程度を 1、最大の程度を 5 段階の場合は 5（7 段階の場合は 7、以下同様）として、それぞれの言葉が表す程度を 1～5（1～7）の各カテゴリーを表す数値で回答してもらった。例として、“振動の大きさ”の 7 段階のアンケートの説明文を以下に示し、回答 WEB 画面を図 3-3(a)に示す。図に示すように該当するカテゴリーのマークをチェックしてもらう方法を採用した。23 種類の程度の表現語の並び順は、調査対象者毎にランダムとしたが、Q.1～Q.4 の並びは同じとした。なお、心理的反応毎には並びは異なるように設定し、並びの順が程度の表現語の強さや選択性に与える影響を排除した。

あなたが感じる振動の気になり具合についてお聞きします。

自宅やオフィスなどで座っている際に、床振動が発生したときに感じる「振動の大きさ」についてお答えください。ここに振動の気になり具合の程度を表す言葉が 23 種類あります。この振動の気になり具合の表現の中で最小の程度を 1、最大の程度を 7 とした場合、それぞれの言葉が表す程度をご回答下さい。

次の設問 Q.2 以降では、程度の表現語の選択性を把握するための質問をした。以下に、その手順について 7 段階を例として示す。

第3章 環境振動に関する評定尺度の構成

- Q.2 最大のカテゴリー7 の表現語を1つ選択 (図 3-3 (b))
- Q.3 「まったく・・・ない (MT)」を最小のカテゴリー1 とした場合に、7 段階の真ん中のカテゴリー4 に適する表現を1つ選択 (図 3-3 (c))
- Q.4 最後に、残りのカテゴリーに等間隔に当てはまる適当な表現語をそれぞれ1つずつ選択し、7 段階の等間隔な程度の表現語を完成させる (図 3-3 (d), Q.2, Q.3 で選択した最大と真ん中のカテゴリーの表現語には初期値として選択されているが、再選択ができる設計とした)

この一連の手順で振動に関する 3 種類の心理的反応に対して調査を実施した。なお、これら 3 種類の心理的反応に関する質問の順序も調査対象者毎にランダムとした。

3.3 アンケート調査

Q1
 あなたが感じる**振動の大きさ**についてお聞きします。
 自宅やオフィスなどで座っている際に、床振動が発生したときに感じる「振動の大きさ」についてお答えください。
 ここに振動の大きさの程度を表す言葉が23種類あります。
 この振動の大きさの程度の中で最小の程度を1、最大の程度を7とした場合、それぞれの言葉が表す程度をご回答下さい。(それぞれひとつずつ)

								
		1	2	3	4	5	6	7
1	非常に大きく感じる	1	2	3	4	5	6	7
2	たいへん大きく感じる	1	2	3	4	5	6	7
3	多少大きく感じる	1	2	3	4	5	6	7
4	とても大きく感じる	1	2	3	4	5	6	7
5	まったく感じない	1	2	3	4	5	6	7
6	それほど感じない	1	2	3	4	5	6	7
7	たいてい感じない	1	2	3	4	5	6	7
8	かなり大きく感じる	1	2	3	4	5	6	7
9	ひどく大きく感じる	1	2	3	4	5	6	7
10	比較的大きく感じる	1	2	3	4	5	6	7
11	きわめて大きく感じる	1	2	3	4	5	6	7
12	やや大きく感じる	1	2	3	4	5	6	7
13	いくらか大きく感じる	1	2	3	4	5	6	7
14	わずかに大きく感じる	1	2	3	4	5	6	7
15	そうとう大きく感じる	1	2	3	4	5	6	7
16	あまり感じない	1	2	3	4	5	6	7
17	すこし大きく感じる	1	2	3	4	5	6	7
18	ほとんど感じない	1	2	3	4	5	6	7
19	すごく大きく感じる	1	2	3	4	5	6	7
20	だいぶ大きく感じる	1	2	3	4	5	6	7
21	わりに大きく感じる	1	2	3	4	5	6	7
22	けっこう大きく感じる	1	2	3	4	5	6	7
23	ずいぶん大きく感じる	1	2	3	4	5	6	7

(a) Q.1 の WEB 画面

Q2
 この表現の中で、**振動の大きさ**の最大の程度7を表す言葉として適切と感じるものを選択して下さい。

- 1 ○ 非常に大きく感じる
- 2 ○ たいへん大きく感じる
- 3 ○ 多少大きく感じる
- 4 ○ とても大きく感じる
- 5 ○ まったく感じない
- 6 ○ それほど感じない
- 7 ○ たいてい感じない
- 8 ○ かなり大きく感じる
- 9 ○ ひどく大きく感じる
- 10 ○ 比較的大きく感じる
- 11 ○ きわめて大きく感じる
- 12 ○ やや大きく感じる
- 13 ○ いくらか大きく感じる
- 14 ○ わずかに大きく感じる
- 15 ○ そうとう大きく感じる
- 16 ○ あまり感じない
- 17 ○ すこし大きく感じる
- 18 ○ ほとんど感じない
- 19 ○ すごく大きく感じる
- 20 ○ だいぶ大きく感じる
- 21 ○ わりに大きく感じる
- 22 ○ けっこう大きく感じる
- 23 ○ ずいぶん大きく感じる

(b) Q.2 の WEB 画面

Q3
 この表現の中で、**振動の大きさ**を「まったく感じない」を最小の程度1とした場合に、7段階の真ん中の程度4に適する言葉を選択してください。

- 1 ○ 非常に大きく感じる
- 2 ○ たいへん大きく感じる
- 3 ○ 多少大きく感じる
- 4 ○ とても大きく感じる
- 5 ○ まったく感じない
- 6 ○ それほど感じない
- 7 ○ たいてい感じない
- 8 ○ かなり大きく感じる
- 9 ○ ひどく大きく感じる
- 10 ○ 比較的大きく感じる
- 11 ○ きわめて大きく感じる
- 12 ○ やや大きく感じる
- 13 ○ いくらか大きく感じる
- 14 ○ わずかに大きく感じる
- 15 ○ そうとう大きく感じる
- 16 ○ あまり感じない
- 17 ○ すこし大きく感じる
- 18 ○ ほとんど感じない
- 19 ○ すごく大きく感じる
- 20 ○ だいぶ大きく感じる
- 21 ○ わりに大きく感じる
- 22 ○ けっこう大きく感じる
- 23 ○ ずいぶん大きく感じる

(c) Q.3 の WEB 画面

Q4
 この表現の中で、**振動の大きさ**の最大の程度7、「まったく感じない」を最小の程度1とした場合に、各段階に等しい割合に当てはまる適切な言葉の表現を、一つずつ選んでください。(それぞれひとつずつ)

									
		1	2	3	4	5	6	7	
非常に大きく感じる		1	0	1	0	1	0	1	0
たいへん大きく感じる		2	0	2	0	2	0	2	0
多少大きく感じる		3	0	3	0	3	0	3	0
とても大きく感じる		4	0	4	0	4	0	4	0
まったく感じない		5	0	5	0	5	0	5	0
それほど感じない		6	0	6	0	6	0	6	0
たいてい感じない		7	0	7	0	7	0	7	0
かなり大きく感じる		8	0	8	0	8	0	8	0
ひどく大きく感じる		9	0	9	0	9	0	9	0
比較的大きく感じる		10	0	10	0	10	0	10	0
きわめて大きく感じる		11	0	11	0	11	0	11	0
やや大きく感じる		12	0	12	0	12	0	12	0
いくらか大きく感じる		13	0	13	0	13	0	13	0
わずかに大きく感じる		14	0	14	0	14	0	14	0
そうとう大きく感じる		15	0	15	0	15	0	15	0
あまり感じない		16	0	16	0	16	0	16	0
すこし大きく感じる		17	0	17	0	17	0	17	0
ほとんど感じない		18	0	18	0	18	0	18	0
すごく大きく感じる		19	0	19	0	19	0	19	0
だいぶ大きく感じる		20	0	20	0	20	0	20	0
わりに大きく感じる		21	0	21	0	21	0	21	0
けっこう大きく感じる		22	0	22	0	22	0	22	0
ずいぶん大きく感じる		23	0	23	0	23	0	23	0
		1	2	3	4	5	6	7	

(d) Q.4 の WEB 画面

図 3-3 インターネットによるアンケート調査の WEB 画面 (振動の大きさ)

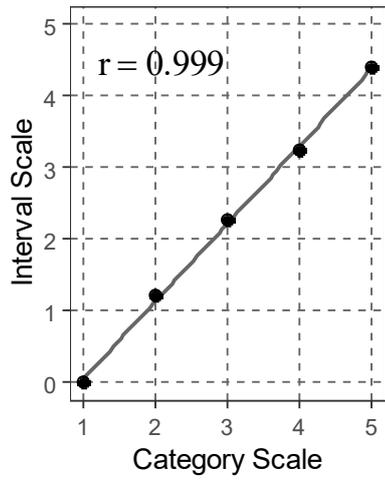
3.3.4 程度の表現語の心理的な強さ

程度の表現語の心理的な強さを表す指標については後述するが、上述の方法で得られた回答の平均値や標準偏差を取り扱う。図 3-3 (a)に示す Q.1 の程度の強さを表す数字は序数尺度であることから、間隔尺度のように平均値を扱えない。序数尺度を間隔尺度に変換する方法として、範疇判断の法則（系列カテゴリー法）³⁻¹⁵⁾がある。もとの序数尺度と変換後の間隔尺度の相関が 1 に近い関係であれば、もとの序数尺度を間隔尺度として処理しても差し支えないとされている³⁻¹⁾。例として、“気になり具合”について、序数尺度を間隔尺度に変換し、横軸に元のカテゴリー尺度、縦軸に尺度変換後の間隔尺度として両尺度の相関を確認した結果を図 3-4 に示す。図 3-4 の 5 段階及び 7 段階の相関係数 r は、0.999, 0.997 と高い相関を示している。図は示していないが、“振動の大きさ”の相関係数は、0.999, 0.996, “不快感”は 0.999, 0.998 であったことから、すべての心理的反応の両尺度の相関が 1 に近いことが確認できた。したがって、Q.1 の程度の強さを表す数字を間隔尺度と同様に扱い、程度の表現語の心理的な強さを表す指標を平均値で求めた。

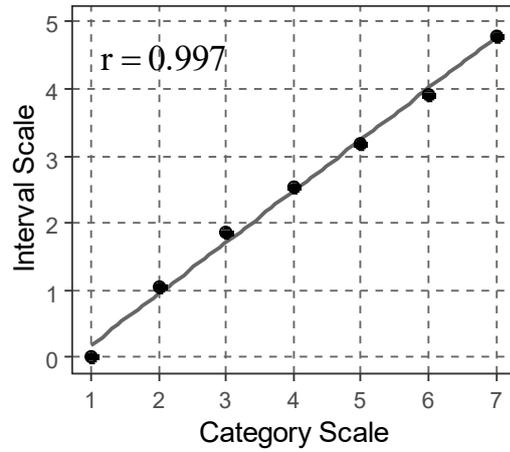
次に、5 段階及び 7 段階と異なるカテゴリー数を用いたことによる程度の表現語の心理的な強さへの影響を確認するために、横軸に 5 段階、縦軸に 7 段階のカテゴリーによる Q.1 の程度の表現語の強さの平均値の比較を図 3-5 に示す。すべての心理的反応において異なるカテゴリー数の間に高い相関が認められることから、カテゴリー数が程度の表現語の心理的な強さに与える影響は小さいものとする。

3 種類の心理的反応に対する程度の表現語の強さを、図 3-6 に示す。図では、縦軸の表現語が“気になり具合”の強さの順となっている。それぞれの心理的反応の程度の表現語の強さの序列に大差がないことがわかる。特に、“気になり具合”と“不快感”は、程度の強さも同様な傾向が認められる。“振動の大きさ”の、「それほど感じない (SR)」と「わずかに大きく感じる (WK)」の間の程度の強さの変化が大きく、他の心理的反応と比較して傾向が異なる。これは、表 3-4 に示す“振動の大きさ”の程度の表現語において、例えば「それほど感じない (SR)」といった否定と共起する表現語に「大きく」という形容詞が含まれていないことによる影響だと考えられる。

また、3 種類の心理的反応に共通して、「わりに (WR)」と「けっこう (KK)」の間の程度の強さの変化が大きい。3.3.2 で述べたように、本研究で主に参考にした騒音のうるささに関する既往の研究結果³⁻¹²⁾から、「わりに (WR)」と「だいたい (DB)」の間での強さの変化が大きくなることが想定されたため、その他の先行研究^{3-13), 3-14)}を参考に、適当な程度の強さを有する表現語として「ずいぶん (ZB)」と「けっこう (KK)」を追加した。その結果、「けっこう (KK)」が「わりに (WR)」と「だいたい (DB)」の間に順位付けられたものの、「だいたい (DB)」の強さに近く、程度の強さの変化の大きい箇所を補間するほどではなかった。以上から、「わりに (WR)」と「けっこう (KK)」の間の強さの変化が大きいということは、この間に該当する程度の強さを有する表現語は存在しないものとする。

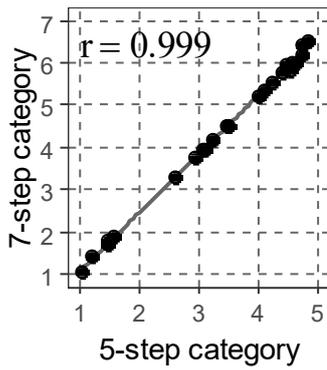


(a) 5段階

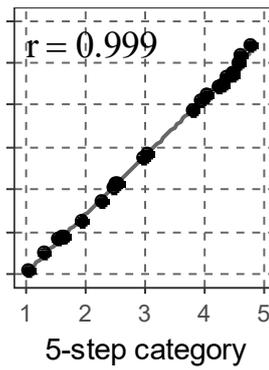


(b) 7段階

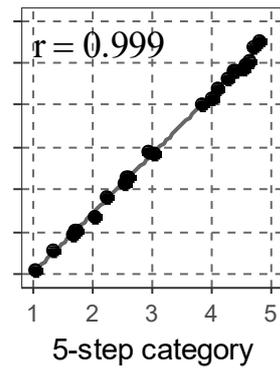
図 3-4 もとのカテゴリ尺度と変換後の間隔尺度の関係 (“気になり具合”)



(a) 振動の大きさ

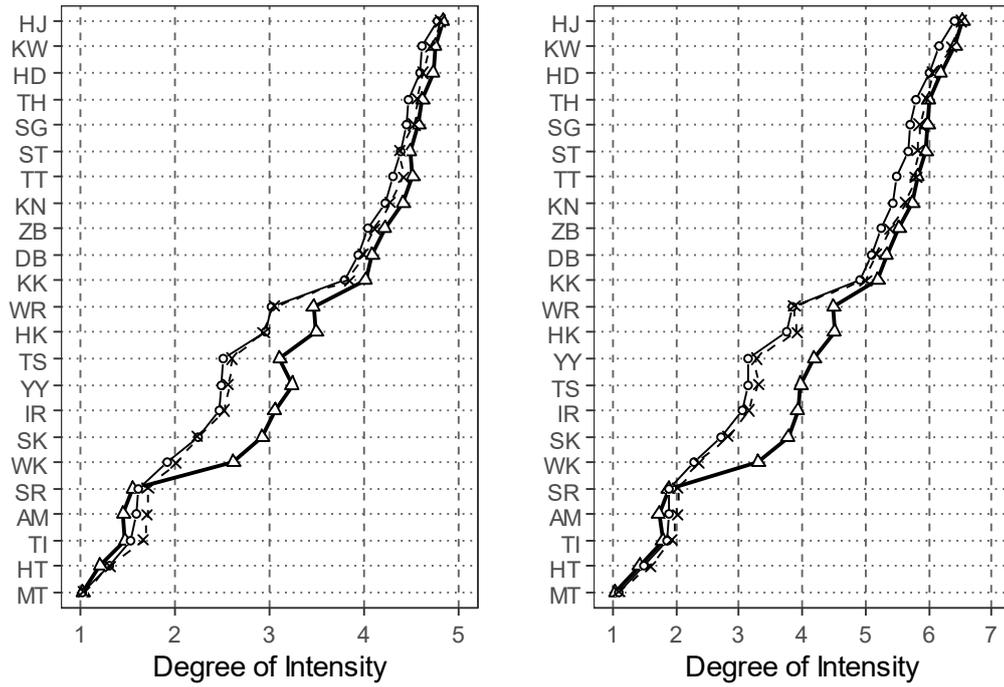


(b) 気になり具合



(c) 不快感

図 3-5 カテゴリ数の影響



(a) 5段階

(b) 7段階

図 3-6 程度の表現語の心理的な強さ

(△：振動の大きさ，○：気になり具合，×：不快感)

3.3.5 程度の表現語の選定基準

程度の表現語の選定基準は、ICBEN (International Commission on Biological Effects of Noise) Team6 から提案されている³⁻²⁾。要約すると以下のとおりである。

- ① 心理的な強さに関して等間隔に並ぶこと
- ② 各カテゴリーの程度の表現語として好まれて選択されること
- ③ 言葉の強さと選択性に関する評価のばらつきが小さいこと

Q.1 で得られた程度の表現語の強さの回答から、最大を 100、最小を 0 にする正規化をし、全回答者の平均値から程度の表現語の心理的な強さを表す指標 (Intensity Score) を求め、等間隔な基準値 (5 段階では 100, 75, 50, 25, 0, 7 段階では 100, 83.3, 66.7, 50, 33.3, 16.7, 0) と照合した。強さが基準値に近いものが等間隔性を有する程度の表現語となる。強さのばらつきは標準偏差とした。

$$\text{Intensity Score} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(100 \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \right) \quad (3.1)$$

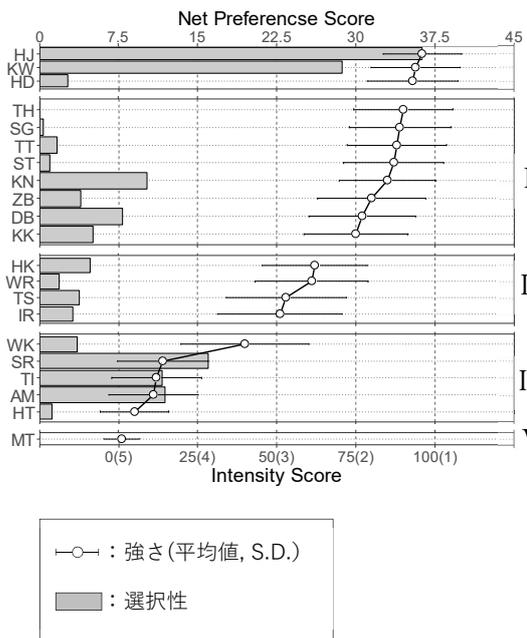
ここで、 x_i : 回答者 i が選択したカテゴリーを表す数値

x_{max}, x_{min} : 最大, 最小のカテゴリーを表す数値

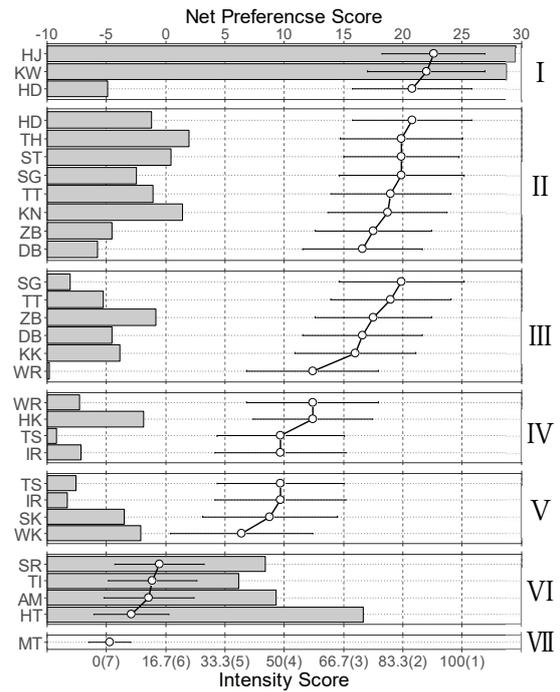
Q.4 の程度の表現語の選択性に関する設問から、特定のカテゴリーに対応するものとして選ばれる選択度数とそれとは別のカテゴリーとしての選択度数の差を、全回答者数に対する比で表した指標、選択性 (Net Preference Score) を求めた。例えば、100 名の回答者のうち 30 名がある特定のカテゴリーに選択した程度の表現語の場合、その他のカテゴリーには一切選択されないと選択性は 30 %となるが、その他のカテゴリーに 30 名が選択すると 0 %となるようにペナルティを加えた。

最初に程度の表現語を各カテゴリーに分類する際に、そのカテゴリーとしてあまり好まれて使われない、すなわち、選択性が低いものを除外するために、5 段階では 0 %以上、7 段階では -10 %以上の基準を設けた。一部の表現語には、2つのカテゴリーに分類されるものがあった。先述の強さの平均値及びばらつき、選択性の結果を、カテゴリー分類して図 3-7~図 3-9 に示す。図中の最上段が最も程度が強いカテゴリー I の結果を示し、下へ順に各カテゴリーの結果を表している。

第3章 環境振動に関する評定尺度の構成

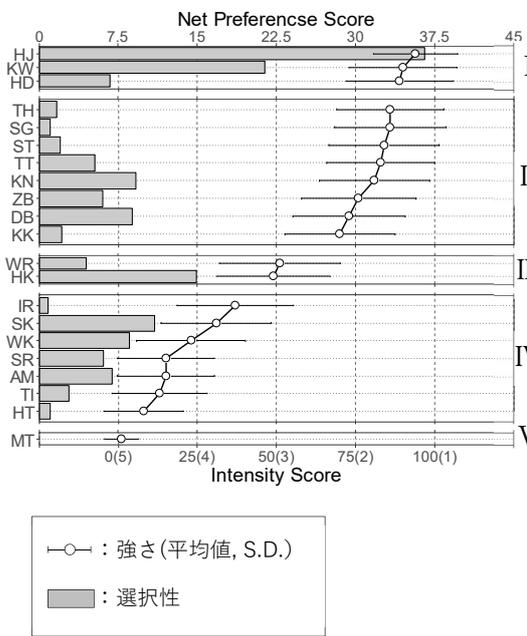


(a) 5段階

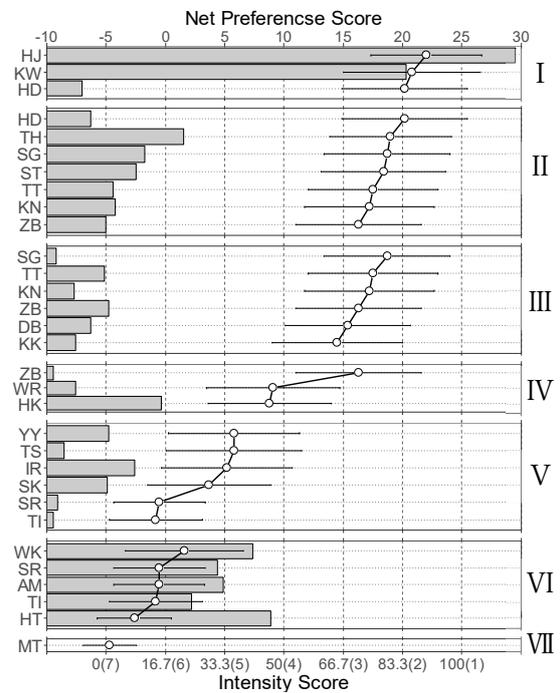


(b) 7段階

図 3-7 程度の表現語の心理的な強さと選択性 (振動の大きさ)

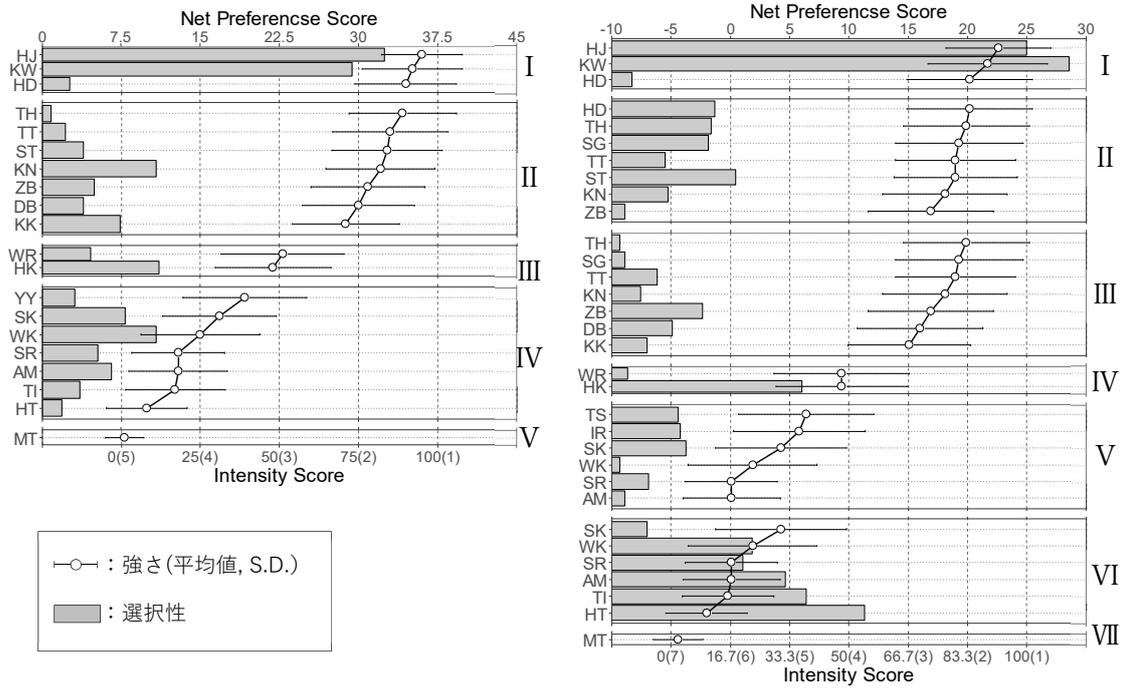


(a) 5段階



(b) 7段階

図 3-8 程度の表現語の心理的な強さと選択性 (気になり具合)



(a) 5段階

(b) 7段階

図 3-9 程度の表現語の心理的な強さと選択性（不快感）

3.3.6 アンケート調査結果に基づく評定尺度

図 3-7～図 3-9 (a)の5段階のカテゴリーIでは、すべての心理的反応に同じ3種類の程度の表現語が分類された。その中で「非常に (HJ)」の強さの平均値が基準値の100を下回るものの最も値が高く、選択性も高い割合を示すことから、このカテゴリーに適切な表現語であることがわかる。

カテゴリーIIでは、図 3-7 (a)の“振動の大きさ”を例に見ると、「けっこう (KK)」の強さが基準値とほぼ一致するが、選択性では「かなり (KN)」が最も高い値となっている。このように、強さの基準を満たす表現語が必ずしも選択性が高いわけではないことが他でも認められたことから、強さの等間隔性を重視して候補を絞り込むこととした。その結果、“振動の大きさ”と“不快感”では、「だいぶ (DB)」と「けっこう (KK)」，“気になり具合”では「ずいぶん (ZB)」と「だいぶ (DB)」が候補となる。この評定尺度による評価を行うときに、使用者にとってわかりやすいものになるように、できる限り共通の程度の表現語による尺度構成を試みると、カテゴリーIIは「だいぶ (DB)」が適切と考える。

カテゴリーIIIでは、前節で述べたように“振動の大きさ”は形容詞「大きく」の影響によって他の心理的反応と傾向が異なる。これまでの手順で表現語を絞り込むと、“振動の大きさ”では「いくらか (IR)」となり、その他は「比較的 (HK)」となる。

カテゴリーIVの“振動の大きさ”では、基準値とほぼ一致する強さ有する程度の表現語が存在しない。そのため、心理的な強さが小さいものの基準値に最も近く選択性が最も高い「それほど・・・ない (SR)」が適切な表現語とした。その他の心理的反応では強さの等間隔性から「わずかに (WK)」となる。

カテゴリーVは、Q.3で最小の程度1を前提とした「まったく・・・ない (MT)」となる。

以上をまとめた5段階の評定尺度の結果を、表 3-5 (a)に示す。さらに、以上の手順を図 3-7～図 3-9 (b)に示す7段階の結果にも適用して得られた7段階の評定尺度の結果を表 3-5 (b)に示す。

5段階及び7段階の最上位、中間、最下位のカテゴリーが同一の表現語で構成され、また、“気になり具合”と“不快感”は同じ尺度構成となった。

図 3-7 (a)の“振動の大きさ”の5段階のカテゴリーIII、IV間に対して図 3-7 (b)の7段階のカテゴリーIV、VI間の方が心理的な強さの間隔が離れているにもかかわらず、「いくらか (IR)」と「それほど・・・ない (SR)」の同じ表現語で構成された。これは、「それほど・・・ない (SR)」の心理的な強さは、図 3-7 (b)に示す7段階ではカテゴリーVIの基準値とほぼ一致しているが、先述のとおり図 3-7 (a)に示す5段階ではカテゴリーIVでは基準値を下回っていることが原因である。心理的な強さの等間隔性という点で、“振動の大きさ”の5段階は7段階と比べて劣る結果となっている。

カテゴリーの表示順であるが、線分に沿って与えられたカテゴリーを手掛かりとして、線上の評定位置を記入するグラフ尺度法では、縦線の場合は上端、横線の場合は右端に良い方

若しくは高い方のカテゴリーをおくことが自然とされている³⁻¹⁶⁾。表 3-5 では、心理的反応の強いカテゴリーの順で縦方向に表示したが、実際の使用の際には評価の目的や様式に応じて適切な表示方法を考える必要がある。

表 3-5 建物内の振動に対する心理学的反応の評定尺度

(a) 5段階

	振動の大きさ	気になり具合	不快感
I	HJ 非常に大きく感じる	HJ 非常に気になる	HJ 非常に不快である
II	DB だいぶ大きく感じる	DB だいぶ気になる	DB だいぶ不快である
III	IR いくらか大きく感じる	WR 比較的気になる	WR 比較的不快である
IV	SR それほど感じない	WK わずかに気になる	WK わずかに不快である
V	MT まったく感じない	MT まったく気にならない	MT まったく不快ではない

(b) 7段階

	振動の大きさ	気になり具合	不快感
I	HJ 非常に大きく感じる	HJ 非常に気になる	HJ 非常に不快である
II	TH たいへん大きく感じる	TH たいへん気になる	TH たいへん不快である
III	KK けっこう大きく感じる	KK けっこう気になる	KK けっこう不快である
IV	IR いくらか大きく感じる	WR 比較的気になる	WR 比較的不快である
V	WK わずかに大きく感じる	IR いくらか気になる	IR いくらか不快である
VI	SR それほど感じない	AM あまり気にならない	AM あまり不快ではない
VII	MT まったく感じない	MT まったく気にならない	MT まったく不快ではない

3.3.7 年代，地域別などによる表現語への影響

表 3-5 に示した心理学的尺度は，表 3-3 に示す様々な年齢や地域に住まいの方から成るアンケート結果によって構成したものである。ここで，表 3-2 に示す属性に関する設問 Q.1 の性別，Q.2 の年代（20 歳代～50 歳代），Q.5 の住まいの地域や Q.12 の建物内の振動暴露経験の有無によって，心理的尺度の各カテゴリーの程度の表現語の心理的な強さに違いがあるのかを把握するために，まず有意差検定を行った。結果を表 3-6 に示す。

統計的な検定は，アンケートの序数尺度を検定対象とすることからノンパラメトリック手法を採用した。有意差検定に先立ってばらつきの検定を実施し，2 群若しくは多群のばらつきが同じであるという帰無仮説が受容された場合に有意差検定，棄却された場合に中央値検定の結果を採択した。ばらつきの検定は，性別及び振動暴露経験の有無にはシーゲル・テューキー検定，年代及び地域にはルービン検定を用いた。有意差検定は，前者はマン・ホイットニーの U 検定，後者はクラスカル・ウォリス検定とした。

表 3-6 有意差検定の結果

(A: 年代 G: 性別, R: 住まいの地域, V: 建物内の振動暴露経験)

(a) 5 段階 (* p<0.05)

	Magnitude				Concern				Discomfort						
	Code	A	G	R	V	Code	A	G	R	V	Code	A	G	R	V
①	HJ					HJ					HJ				
②	DB		*			DB	*				DB	*		*	
③	IR		*			HK	*				HK	*			
④	SR					WK					WK				
⑤	MT					MT					MT				

(b) 7 段階 (* p<0.05)

	Magnitude				Concern				Discomfort						
	Code	A	G	R	V	Code	A	G	R	V	Code	A	G	R	V
①	HJ					HJ					HJ				
②	TH					TH					TH		*		
③	KK				*	KK					KK				
④	IR					HK					HK				
⑤	WK					IR	*				IR	*			
⑥	SR		*		*	AM			*		AM		*		*
⑦	MT					MT					MT				

年代別では、“振動の大きさ”の5段階及び7段階のいずれの程度の表現語にも、有意水準（危険率）5%以下で有意差があるとはいえない結果であった。一方，“気になり具合”と“不快感”では、5段階で「だいぶ（DB）」「比較的（HK）」、7段階で「いづらか（IR）」に有意水準（危険率）5%以下で有意差があることが認められた。そこで、どの年代間で有意差があるのかを多重比較法であるスティーラ・ドゥワス法によって確認を行った。その結果の一部を表 3-7 に示す。心理的反応やカテゴリー数によって検定結果は異なるが、20 歳代と 60 歳代の間で有意差が認められる傾向にある。ここで、統計的な有意差が、心理学的尺度の構成に影響を与えるほどの差であるのかを確認するために、20 歳代と 60 歳代の程度の強さを比較した結果を図 3-10 に示す。有意差が認められた表現語（5段階では「DB」「HK」、7段階では「IR」）の年代間における強さの差は、強さの等間隔性を損なわせるほどのものではないことがわかる。

図 3-11 に示す性別や図 3-12 に示す建物内の振動暴露の有無の属性における有意差も同様な結果を確認することができる。住まいの地域では、どこの地域間で有意差があるのかを、年代間の検討と同様にスティーラ・ドゥワス法による多重比較法で確認を行った結果、7段階では静岡県と兵庫県のみに有意差が認められ、5段階では地域間の有意差を確認することが出来なかった。

以上のことから、表 3-5 に示す心理学的尺度は、年代、性別、住まいの地域や建物内の振動暴露経験の有無に関わらず様々な人が利用したとき、一定の整合性を有した心理的反応を得ることが可能な尺度であると考えられる。

表 3-7 年代間の有意差検定の結果 (* p<0.05)

(a) 5段階 “気になり具合” 「DB」

	20's	30's	40's	50's
30's				
40's				
50's				
60's	*		*	

(b) 5段階 “不快感” 「DB」

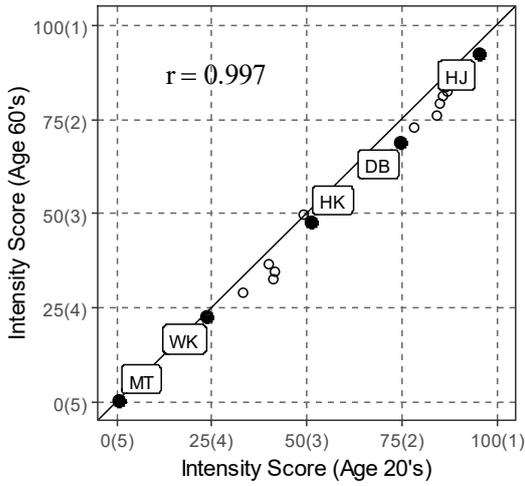
	20's	30's	40's	50's
30's				
40's				
50's				
60's	*		*	*

(c) 7段階 “気になり具合” 「IR」

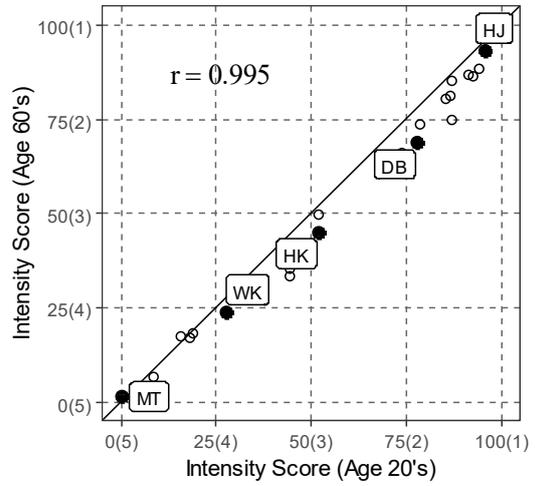
	20's	30's	40's	50's
30's				
40's				
50's	*			
60's	*			

(d) 7段階 “不快感” 「IR」

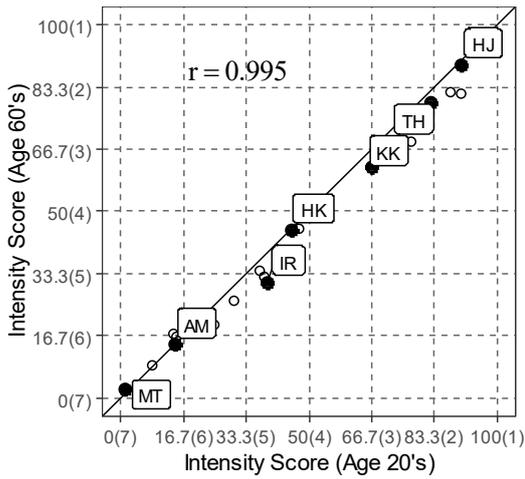
	20's	30's	40's	50's
30's				
40's				
50's				
60's	*			



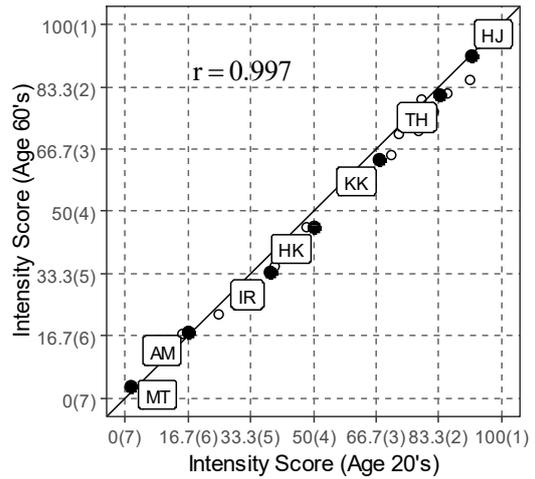
(a) 5段階 20's-60's “気になる具合”



(b) 5段階 20's-60's “不快感”



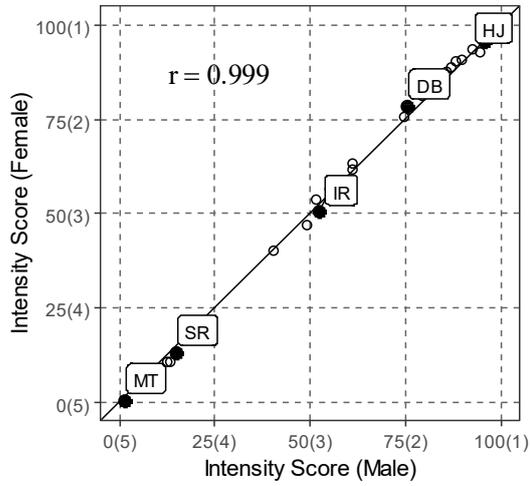
(c) 7段階 20's-60's “気になる具合”



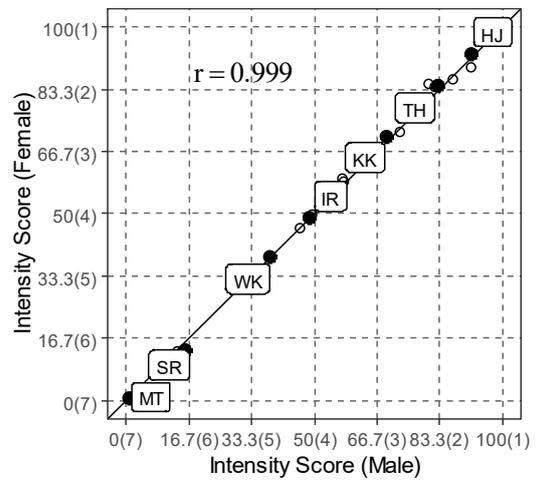
(d) 7段階 20's-60's “不快感”

図 3-10 年代間における程度の表現語の強さの比較

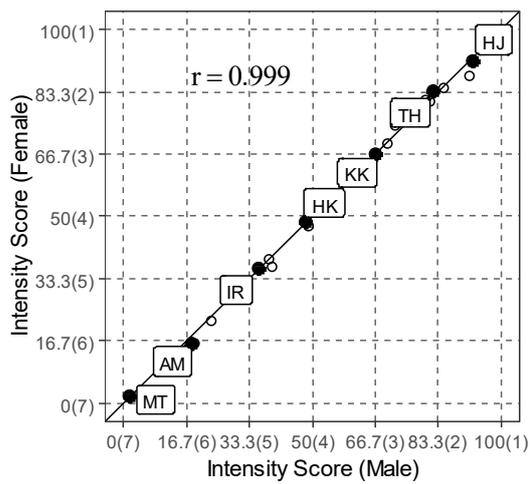
(● : 5段階及び7段階の評定尺度の表現語の強さ ; ○ : その他の表現語)



(a) 5段階 “振動の大きさ”



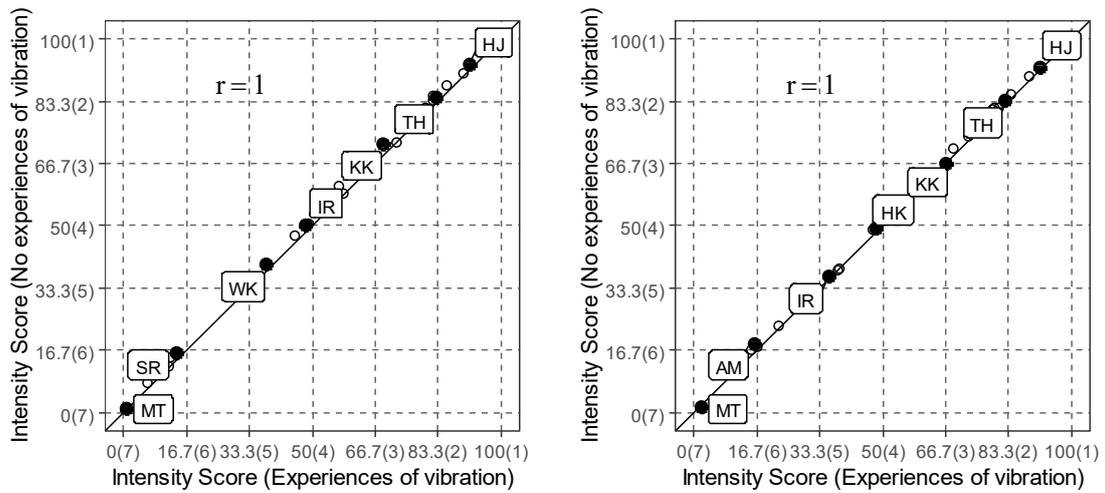
(b) 7段階 “振動の大きさ”



(c) 7段階 “不快感”

図 3-11 性別間における程度の表現語の強さの比較

(● : 5段階及び7段階の評価尺度の表現語の強さ ; ○ : その他の表現語)



(a) 7段階 “振動の大きさ”

(b) 7段階 “不快感”

図 3-12 建物内の振動暴露経験の有無による程度の表現語の強さの比較

(● : 5段階及び7段階の評定尺度の表現語の強さ ; ○ : その他の表現語)

3.4 調整法による加振台実験

3.4.1 調査概要

インターネット調査によるアンケート結果から得られた尺度は概念的なものである。振動刺激に対する心理学的尺度として利用するためには、この概念的な尺度と人が振動刺激から受ける感覚が対応していることを確認する必要があると考えた。そこで、人が振動刺激から受ける感覚を把握する方法として、第2章の加振台実験に調整法を採用し、程度の表現語と振動から受ける感覚が同じになるように参加者に振動振幅を制御するリモートコントローラーを調整してもらうことによって、23種類の程度の表現語の強さを振動振幅により計測した。上述のアンケートによる程度の表現語の心理的な強さが、“気になり具合”と“不快感”で概ね一致していたことから、加振台実験では、“振動の大きさ”と“気になり具合”に関する程度の表現語を調査対象とした。

参加者は、埼玉大学の学生12名（男性7名、女性5名）とした。刺激の物理量の変化が明瞭な精神物理学的測定法の場合、ノンパラメトリック検定にかけられる最低の人数は6名、できれば10名程度が望ましいと言われている³⁻¹⁾。程度の表現語間の相対的な関係を確認する上では、参加者数は条件を満たしているものとする。年齢、身長、体重の中央値と範囲は21歳（19～26歳）、168.3 cm（156.0～183.0 cm）、59.5 kg（45.0～85.0 kg）であった。地震以外の建物内の振動暴露経験者の割合は58.3%であった。なお、年齢は主に20歳代であるが、前節の結果から程度の表現語に対応する振動の物理的な強さの順序を確認する範囲において、特定の年齢層による実験は問題ないものと判断した。

3.4.2 入力刺激

調整法では、刺激をできるだけ連続的に変化させることが必要であり、また変化の速さも参加者自身が適切に決めることができることが望ましいことから³⁻¹⁵⁾、入力刺激は過渡的な非定常振動ではなく、連続正弦振動を用いることとした。入力刺激の目標振幅の初期値は、人の振動知覚閾の境界付近の 0.01 m/s^2 （最大加速度）とした。振動数は、建物内の水平振動を想定し、鉄骨造の戸建て住宅の水平方向の1次固有振動数に多く見られる 4 Hz ^{3-17), 3-18)}とした。加振台の加振方向は参加者に対して左右の水平方向とした。本研究では、程度の表現語の強さの順序が、連続正弦振動や非定常振動などの振動の種類や振動刺激の方向によっては変わらないという仮定を前提条件として、連続正弦振動による水平方向の知見によって検討を行うが、非定常振動や鉛直方向による検討は今後の課題とする。

3.4.3 実験方法

実験に先立ち実験者から参加者に以下の説明文を提示し、実験目的の理解を求めた。

本実験は、自宅で座っている際に、床振動が発生したときに感じる「振動の大きさ」「気になり具合」を調査するものです。

本実験で対象としている床振動とは、地震による揺れではなく、日常生活の身の回りに存在する振動源、例えば、建物内の人の歩行や建物外の建設工事・道路交通などによるものを想定しています。

測定の順序は、“気になり具合”に関する23種類の程度の表現語の調査の後に、“振動の大きさ”の調査を実施した。この理由は、事前の予備実験において、“振動の大きさ”を先に実施したときに、振動台の振動に慣れてしまい“気になり具合”への反応が鈍感になる傾向が認められたためである。23種類の程度の表現語の提示順は参加者ごとにランダムとした。本実験の前に、リモートコントローラーによる調整に慣れてもらうために、3種類の程度の表現語で練習を行った。調整法で用いたリモートコントローラーを図3-13に示す。参加者は、リモートコントローラーのダイヤルによって加振台の振動の大きさを直感的に調整した。

振動計測には振動レベル計（リオン社製：VM-53A）を用いて、ピックアップを振動台中心に設置し、実験中の鉛直水平3成分の振動加速度レベルを100msのサンプリングで記録した。参加者から程度の表現語と振動台から受ける感覚が等価となった時点で合図をもらい、合図後の振動加速度レベルが安定している数秒間のパワー平均値（rms）を程度の表現語の心理的な強さに対応する物理量とした。参加者が自ら振動を調整した様子を時系列の振動加速度レベルで表現したものを図3-14に示す。



図 3-13 リモートコントローラー

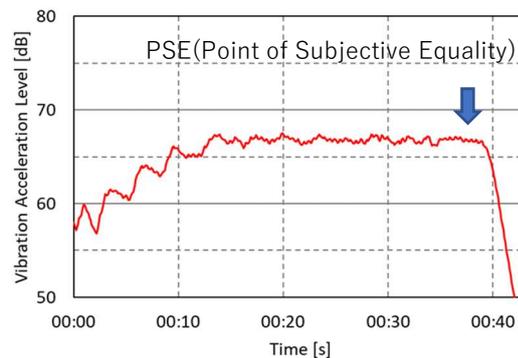


図 3-14 振動の調整の様子

3.4.4 調整法の手続きの確認

調整法は、実験的手続きをすべて参加者に委ねてしまう、すなわち全知手続きであることから、参加者の理解によって成果が左右されやすい欠点がある。表 3-5 に示す心理学的尺度の最上位の「非常に (HJ)」の第3四分位点と最下位の「まったく・・・ない (MT)」の第1四分位点の範囲を、参加者が実験の趣旨を理解して想定した環境振動の範疇における建物内振動とすると、“振動の大きさ”は63.2～81.6 dB、“気になり具合”は59.9～80.0 dBであった。振動加速度の最大値に換算すると、2.04～17.0 cm/s²、1.40～14.14 cm/s²となり、居住性能評価規準³⁻¹⁹⁾の定常的な水平振動の評価に照らし合わせると、評価レベル H-II～H-VI (4Hz で 1.54 cm/s²以上 19.43 cm/s²未満) に概ね該当する。したがって、参加者は調査の目的の趣旨を理解し、適切に調整法の手続きを行ったものとする。

3.4.5 加振台実験の結果

それぞれの程度の表現語に対応する物理的な強さ(振動加速度レベル)の代表値は全参加者の中央値とした。その値とアンケートによる概念的な強さとの関係を図 3-15 に示す。図中の縦軸は5段階のアンケートによる概念的な強さ、横軸は加振台実験による物理量である振動加速度レベルを表す。図中の ρ はスピアマンの順位相関係数を表している。“振動の大きさ”、“気になり具合”のいずれも高い相関を示していることから、アンケート結果による概念的な強さと振動刺激から受ける感覚と対応が良いことが認められる。また、“振動の大きさ”、“気になり具合”の概念的な強さと物理量の振動加速度レベルの間の回帰直線から対数法則が認められる。

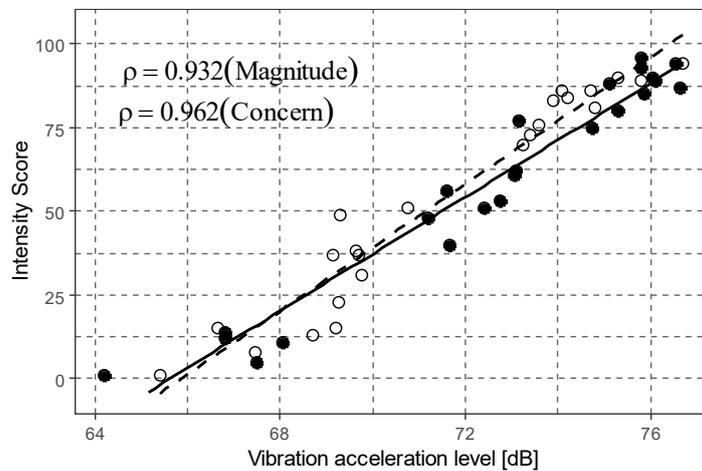
次に、表 3-5 に示す心理学的尺度を構成する程度の表現語に対応する振動加速度レベルのばらつきについて考察する。5段階及び7段階の心理学的尺度を構成する程度の表現語の実験結果を図 3-16 に示す。程度の表現語の1つ1つが持つ物理的な強さは、一義的にあるものではなく、人の主観的判断に委ねられるものであることから、そこに個人差が生じていることがわかる。四分位範囲で、“振動の大きさ”は3.9～8.5 dB、“気になり具合”は5.8～9.3 dB であり、表現語によってばらつきの幅は様々である。中央値の分布は必ずしも等間隔ではないが、ばらつき範囲を重ねながら順に5段階及び7段階の尺度を構成している傾向が認められる。図 3-16 (a), (c)に示す“振動の大きさ”の「それほど感じない (SR)」と1つ上の表現語の間で強さの間隔が、「大きい」という形容詞の有無の影響によって広がる傾向が、アンケート調査(図 3-6)と同様に認められる。

さらに、このような個人差によるばらつきによって、図 3-16 に示した結果において、異なる表現語間で物理的な強さの差異が必ずしも明確でなかった表現語の組み合わせに着目する。まず、“振動の大きさ”の5段階(図 3-16 (a))の「だいたい (DB)」と「いづらか (IR)」に相当すると判断された振動加速度レベルは、同程度に分布している。これらの振動加速度レベルの差異について有意差検定(ウィルコクソンの符号付順位検定、有意水準

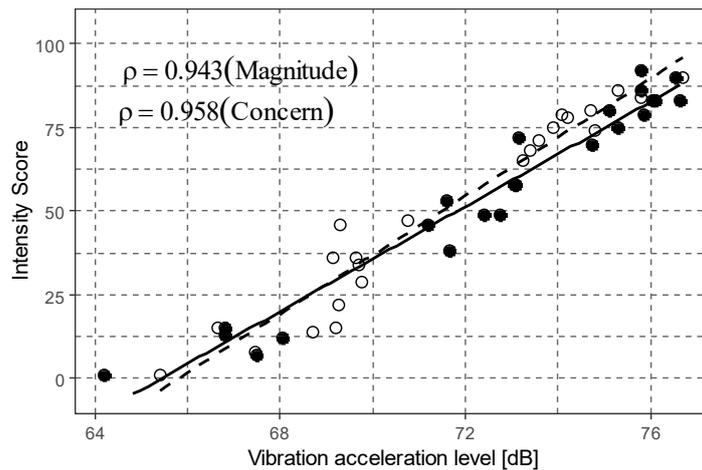
5%) を行った結果、統計的に有意な差であることが確認できた。同様に、7段階 (図 3-16 (c)) の「いくらか (IR)」と「わずかに (WK)」についても、有意差があることを確認した。

一方、“気になり具合”の5段階 (図 3-16 (b)) で「比較的 (HK)」と「わずかに (WK)」の中央値がほぼ同じ値を示しているが、統計的有意差があるとはいえない結果であった。また、7段階 (図 3-16 (d)) の「比較的 (HK)」は1つ下のカテゴリーの「いくらか (IR)」と比べて中央値がわずかに小さい。図 3-8 に示すアンケート調査では、これらの2つの表現語の強さは1カテゴリーの間隔があることから、「比較的 (HK)」は振動刺激から受ける感覚がアンケート調査による概念的な強さと比べて弱い結果となっている。

以上のように、概念的な強さと振動刺激から受ける感覚との関係は、整合しない部分があるものの一定の対応が確認できた。



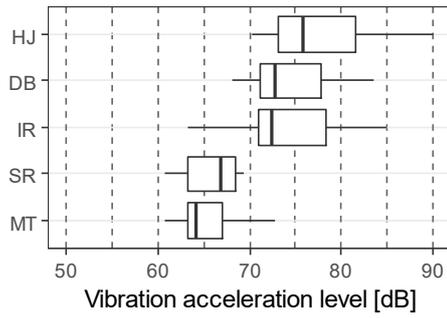
(a) 5段階



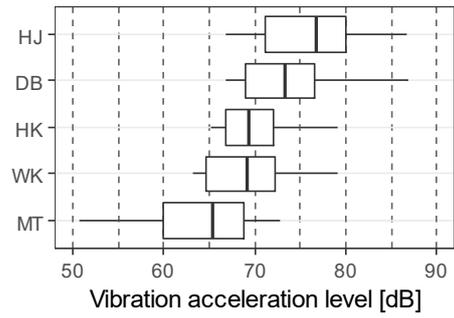
(b) 7段階

図 3-15 程度の表現語に対する強さと振動加速度レベルの関係
(●と実線：“振動の大きさ”，○と破線：“気になり具合”)

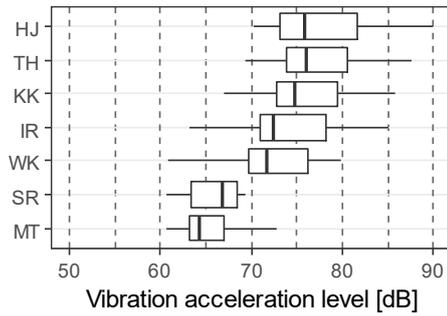
第3章 環境振動に関する評定尺度の構成



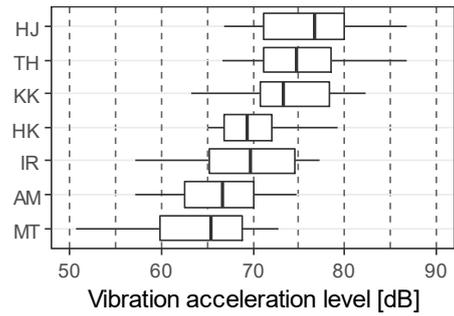
(a) 5段階 “振動の大きさ”



(b) 5段階 “気になり具合”



(c) 7段階 “振動の大きさ”



(d) 7段階 “気になり具合”

図 3-16 程度の表現語の強さのばらつき

(箱の中央線：中央値，箱の幅：四分位範囲，

ひげ：四分位範囲の 1.5 倍以下の最大値及び最小値の範囲)

3.5 まとめ

本章では建物内の振動に対する居住性に関する心理学的尺度の構成を目的に、インターネットを利用してアンケート調査を全国的に実施した。そして、アンケート調査による概念的な尺度と人が振動刺激から受ける感覚が対応していることを確認するために調整法を用いた加振台実験を行った結果、得られた結論を以下に示す。

- 1) 本研究で用いた3種類の心理的反応に関する23種類の程度の表現語の強さの順に大きな違いは認められなかった。特に、“気になり具合”と“不快感”は、程度の強さも同様な傾向が認められた。
- 2) 程度の表現語の強さの等間隔性、選択性の基準を満たす、5段階及び7段階の心理学的尺度を構成することができた。
- 3) 年代や地域など回答者の属性の違いにより、表現語が表す心理的強さに統計的な有意差が認められたものの、程度の表現語の強さの等間隔性を損なわせるほどの差は認められなかった。このことから、様々な人の利用に一定の整合性を有する心理的反応が得られる心理学的尺度であることを示した。
- 4) アンケート調査による振動感覚に対する概念的な程度の強さと、加振台実験による振動刺激から受ける感覚の対応関係が確認できた。
- 5) 振動の心理的反応と物理量に対数法則があることが示唆された。

以上の結論を得たが、以下を課題として検討を進める。

- 1) 心理学的尺度と振動物理量の間に対応関係の確認のために補助的に実施した実験は、4Hzの連続正弦振動のみを用いた比較的少数の参加者によるものである。
- 2) 1) から、実際の建物内で計測した振動などを用いた加振台実験によって、構成した心理学的尺度の妥当性の確認を行う必要がある。
- 3) 1) から、参加者を増やした加振台実験による検討が必要である。
- 4) 5段階若しくは7段階の心理学的尺度のカテゴリー数の影響について検討する必要がある。

第3章 環境振動に関する評定尺度の構成

参考文献

- 3-1) 難波精一郎, 桑野園子: 音の評価のための心理学的測定法, コロナ社, pp.72-86, 1998.7
- 3-2) 矢野隆, 五十嵐寿一, 加来治郎, 神田一伸, 金子 哲也, 桑野園子, 新居 洋子, 佐藤 哲身, 荘 美知子, 山田 一郎, 吉野泰子: 騒音の社会反応の測定方法に関する国際共同研究—日本語のうるささの尺度の構成—, 日本音響学会誌, 58巻, 2号, pp.101-110, 2002
- 3-3) 横山裕, 井上竜太, 池田文乃, 八木豊: 歩行により発生する周期的および連続的な床振動の評価指標, 日本建築学会環境系論文集, 第74巻, 第636号, pp.125-132, 2009.2
- 3-4) 野田千津子, 石川孝重: 居住者意識に基づいた水平振動に対する居住性能のグレード化に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第648号, pp.131-137, 2010.2
- 3-5) 井上竜太, 横山裕, 松下仁士: 振動の継続時間が居住性能評価に及ぼす影響に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.377-378, 2014.7
- 3-6) 松下仁士, 長沼俊介, 井上竜太, 横山 裕: 種々の加振源による鉛直振動に適用できる性能値, 日本建築学会環境系論文集, 第81巻, 第720号, pp.153-162, 2016.2
- 3-7) 冨田隆太, 井上勝夫, 坂元美沙希: 振動暴露時間の変化による物理量と振動感覚との対応, 床振動測定用標準衝撃源としてのボールの有用性に関する研究: その16, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp.369-370, 2015.7
- 3-8) 松田貫, 井上勝夫, 冨田隆太: 実住宅床を用いた鉄道・自動車走行時の鉛直振動が人の振動感覚に及ぼす影響, 日本建築学会技術報告集, 第22巻, 第51号, pp.573-578, 2016.6
- 3-9) 高橋良典, 吉岡宏和, 井上竜太, 田中利幸: 床振動に対する振動感覚, 不快感評価に関する実験的研究, その1 継続時間のもたらす影響, 日本建築学会環境系論文集, 第620号, pp.1-7, 2007.10
- 3-10) 林健太郎, 松本泰尚, 嘉納裕人: 水平振動の心理的反応に対する継続時間を考慮した評価方法の適用性に関する実験的検討, 日本建築学会環境系論文集, 第83巻, 第743号, pp.11-19, 2018.1
- 3-11) 環境省水・大気環境局大気生活環境室: 平成27年度振動規制法施行状況調査, 2017.3
- 3-12) 神田一伸, 田畑亨, 矢野 隆: 心理評価に用いる程度副詞の感性工学的検討. 感性工学研究論文集, Vol.2, No.2, pp.49-56, 2002

- 3-13) 山下俊雄, 矢野隆, 小林朝人: 騒音のうるささの尺度構成に関する実験研究, 日本音響学会誌, 50 巻, 3 号, pp.215-226, 1994
- 3-14) 長野和雄: 日本語の程度用語と頻度用語の高さに関する調査, 日本建築学会環境系論文集, 第 81 巻, 第 719 号, pp.9-17, 2016.1
- 3-15) 田中良久: 心理学的測定法 (第 2 版), 東京大学出版会, pp.151-158, 1977.3
- 3-16) 田中良久: 心理学的測定法 (第 2 版), 東京大学出版会, pp.118-119, 1977.3
- 3-17) 平尾善裕, 国松直, 東田豊彦: 地盤振動に起因する木質系・鉄骨系戸建て住宅の振動増幅特性, 日本建築学会技術報告集, 第 19 巻, 第 42 号, pp.631-634, 2013.6
- 3-18) 東田豊彦: 戸建て 3 階建て住宅の環境振動設計の現状, 第 34 回環境振動シンポジウム, 日本建築学会, pp.21-30, 2016.2
- 3-19) 日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能評価規準・同解説, 2018.11

第4章

住宅内の実測波形を用いた加振台実験による評価方法の検討

(加振台実験II)

第4章 住宅内の実測波形を用いた加振台実験による評価方法の検討

(加振台実験II)

4.1 はじめに

第3章では、建物内の振動に対する居住性に関する心理学的尺度の構成を目的に、インターネットを利用して振動に関する程度の表現語についてのアンケート調査を全国的に実施した。程度の表現語の強さの等間隔性、選択性の基準を満たす5段階及び7段階の心理学的尺度を構成した。さらに、アンケート調査による概念的な評定尺度が、実際に人が振動刺激から受ける感覚が対応していることを確認するために、補助的に調整法を用いた加振台実験を行った。補助的な加振台実験は、4 Hzの連続減振動のみの比較的少数の参加者によるものであった。

そこで第4章では、第3章で構成した心理学的尺度と、第2章で課題とした実際の建物内で計測した振動波形を中心に正弦振動を加えた76パターンを入力刺激を用いた25名の参加者による加振台実験を行う。まず、5段階若しくは7段階のカテゴリ数の影響の検討をする。そして、評定尺度の等間隔性や周波数重み付け特性に関する検討をした後に、心理的反応と対応の良い振動の評価方法を明らかにする。

4.2 実験概要

4.2.1 実験装置

実験に用いた実験装置は、第2章と同じ構成である。加振装置は、同じ水平一方向加振が可能な人体全身振動実験用加振装置（旭製作所：VSR-S150H）であり、800 mm×800 mmの振動台上にアルミニウム製の座席を設置したものである。

計測装置は、座席の側面の水平1方向の振動加速度を加速度ピックアップ（リオン社製：PV-87）と振動計（リオン社製：UV-06）を用い、振動台の中心の鉛直及び水平の3成分の振動加速度を振動レベル計（リオン社製：VM-53A）のピックアップを用いた。座席の計測は、振動台と一体で加振されていることを確認するためであり、振動台の3成分の計測は、評価対象方向以外の交差軸の加速度が実験に影響のないことを確認するためである。各計測器からの加速度信号をPCベースの計測システム（National Instruments社製：NI cDAQ-9178, NI 9234）を用いて記録した。なお、本研究は「国立大学法人埼玉大学におけるヒトを対象とする研究に関する倫理委員会」の承認を受けて実施したものである。

4.2.2 入力刺激

第2章で課題とした実際の建物内で計測した振動波形を収集するために、いくつかの竣工後の建物で計測を行った。また、本研究室が収集した計測データも併せて整理した。時刻歴の加速度波形の変動パターンや卓越振動数から14種類の外部振動源に絞り込んだ。実測データの概要一覧を表4-1、それぞれの建物の水平方向の卓越振動数をFFT分析で求めた結果を図4-1に示す。

表 4-1 実測データの概要一覧

ID	振動源	階数	建物の種類	構造	代表的な卓越振動数 [Hz]	振幅調整	クリストファクタ
1	平面道路	3	戸建て住宅	鉄骨造	4.2	4	5.8
2	平面道路	3	不明*	木造	6.8	4	5.1
3	平面道路	2	不明*	鉄骨造	4.9	4	4.5
4	平面道路	2	不明*	木造	6.9	4	5.9
5	高架道路	3	戸建て住宅	鉄骨造	4.1	4	6.3
6	高架道路	3	戸建て住宅	鉄骨造	4.2	4	3.1
7	貨物列車	3	小規模な集合住宅	鉄骨造	4.2	4	3.7
8	在来鉄道	3	小規模な集合住宅	鉄骨造	3.9	4	4.3
9	在来鉄道	3	小規模な集合住宅	鉄骨造	3.9	4	3.7
10	在来鉄道	2	不明*	木造	8.0	4	5.4
11	新幹線	2	戸建て住宅	RC造	5.6	4	6.3
12	新幹線	2	戸建て住宅	木造	8.2	4	4.9
13	建設作業	3	小規模な集合住宅	鉄骨造	3.8	4	6.1
14	建設作業	3	小規模な集合住宅	鉄骨造	3.8	4	3.8

*収集した計測データの中で、建物の種類について把握できなかったものは「不明」と表記した。

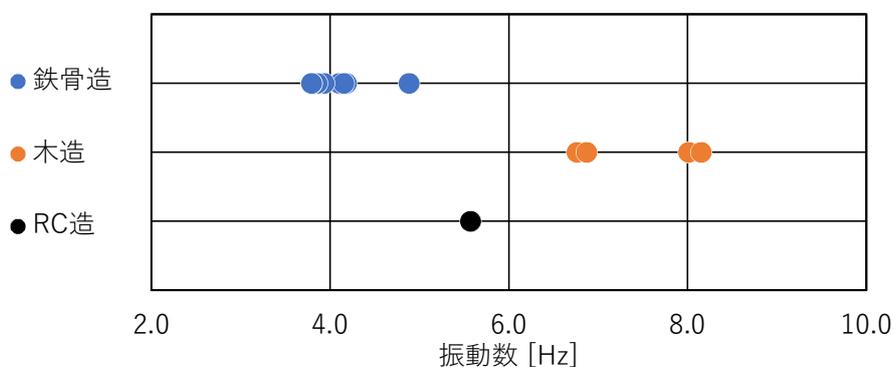


図 4-1 計測した建物構造別の水平方向の代表的な卓越振動数

図 4-1 から外部振動源による建物の水平方向の代表的な卓越振動数が、鉄骨造では 4 Hz 付近、木造では 7~8 Hz であることがわかる。平尾ら⁴⁻¹⁾は 3 階建ての戸建て住宅の鉄骨造 33 棟、木造 29 棟における計測から外部振動による建物の直交 3 成分の振動増幅特性を 1/3 オクターブバンド毎の平均値で求めており、水平方向の共振のピークが木造で 4 Hz と 5 Hz、鉄骨造では 6.3 Hz であることを報告している。また、東田ら⁴⁻²⁾はハウスメーカーの各社が実施した戸建て住宅における振動調査結果を整理し、図 4-2 に示す水平方向の卓越振動数の分布を報告している。構造形式及び階数で整理が行われており、鉄筋 3 階建ての卓越振動数は平均値で 4.3 Hz、鉄筋 2 階建ては 6.2 Hz、木造 2 階建ては 7.6 Hz であることが示されている。これらの報告結果から、入力刺激に用いる 14 種類の実測データは、一般的な戸建て住宅や小規模な集合住宅の振動特性を有しているものと判断した。

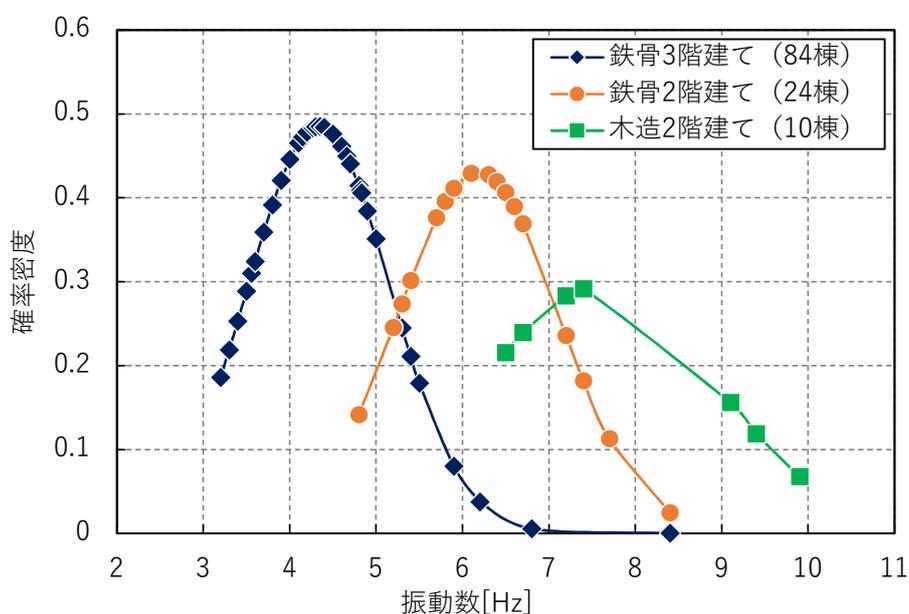


図 4-2 戸建て住宅の卓越振動数分布⁴⁻²⁾

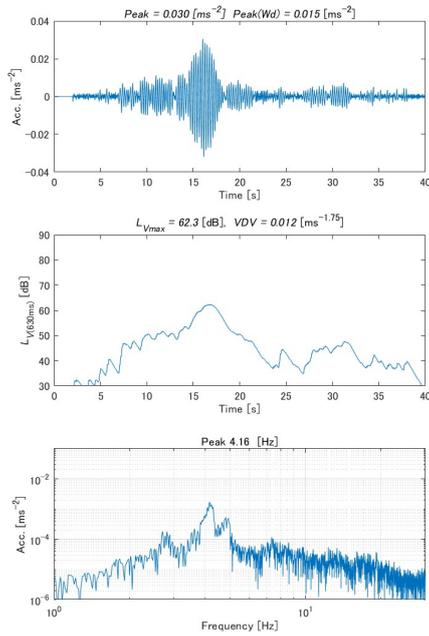
実測データに加えて、振動の継続時間の影響を検討するために正弦振動を用いることとした。正弦振動の振動数は、上述の建物の水平振動の卓越振動数を考慮して、4 Hz と 8 Hz の 2 種類とした。道路交通、鉄道及び建設作業を外部振動源とした実際の建物内で計測した 14 種類の実測振動と 4 Hz 及び 8 Hz の連続正弦振動の加速度波形を図 4-3~図 4-7 に示す。図には併せて、振動レベルの時刻歴波形とフーリエスペクトルを示す。

第 2 章で、VDV が検討した評価値の中で心理的反応との対応が最も適当である知見を得たことから、それぞれの入力刺激を VDV で評価したときに、対数法則で等間隔になるように加速度振幅を調整した。具体的には、連続正弦振動が振動レベルの最大値で約 55 dB となる加速度が 2 秒間継続したときの VDV による評価値 $0.005 \text{ m/s}^{1.75}$ を基本として、 $\sqrt{2}$ 倍

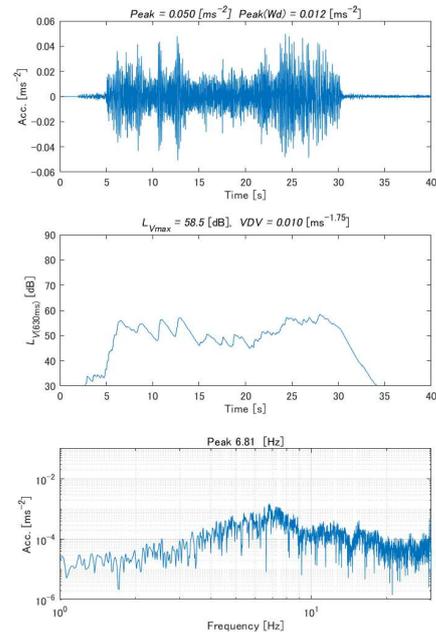
第4章 住宅内の実測波形を用いた加振台実験による評価方法の検討（加振台実験Ⅱ）

間隔の 0.005, 0.007, 0.010, 0.015, 0.021, 0.029, 0.041 $\text{m/s}^{1.75}$ のいずれかになるように、加速度振幅を調整した。連続正弦振動では、加速度振幅を 2 倍間隔 (4 Hz で 0.011, 0.022, 0.043, 0.086 m/s^2)、継続時間を 4 倍間隔 (0.5, 2, 8 s) で調整した。加速度振幅の大きさは、実際の建物内で発生し得る範囲の加速度振幅を想定して、居住性能評価規準⁴⁻³⁾の評価レベルで H- I ~VI の範囲となるように調整したものである。水平方向の居住性能評価規準の評価方法に準じて評価した結果を図 4-8 に示す。入力刺激の振幅に、後述する本実験の参加者間で振動レベルの最大値で 1 dB 程度のばらつきが生じることを確認した。第 2 章と同様に振動台の加速度データに後述する評価方法を適用して評価値を算出する際は、代表値として中央値を採用した。

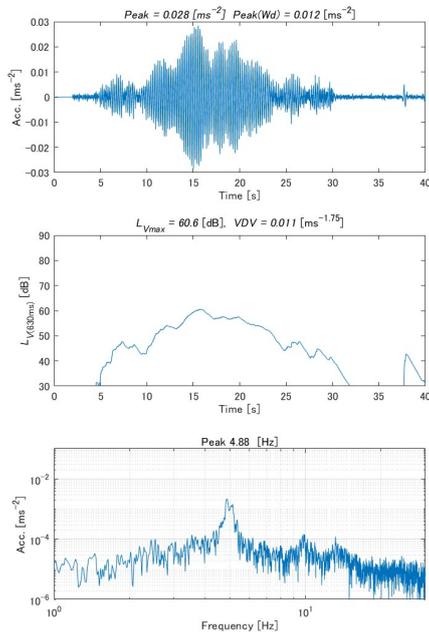
以上の調整を行い入力刺激は、正弦振動で 20 パターン、実振動で 56 パターン、合計 76 パターンを作成した。



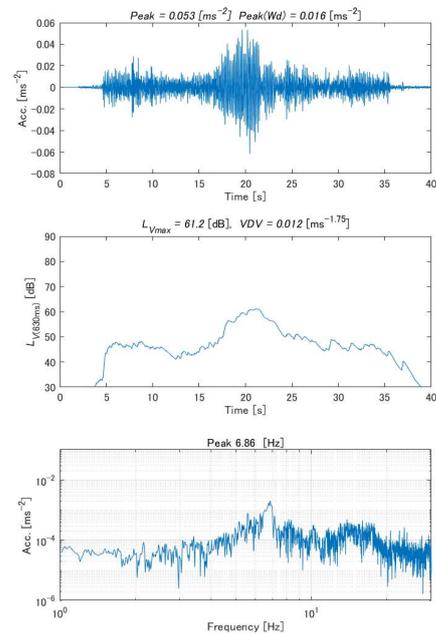
(a) ID1 平面道路, 鉄骨造 3 階,
4.2 Hz, CF 5.8



(b) ID2 平面道路, 木造 3 階,
6.8 Hz, CF 5.1



(c) ID3 平面道路, 鉄骨造 2 階,
4.9 Hz, CF 4.5

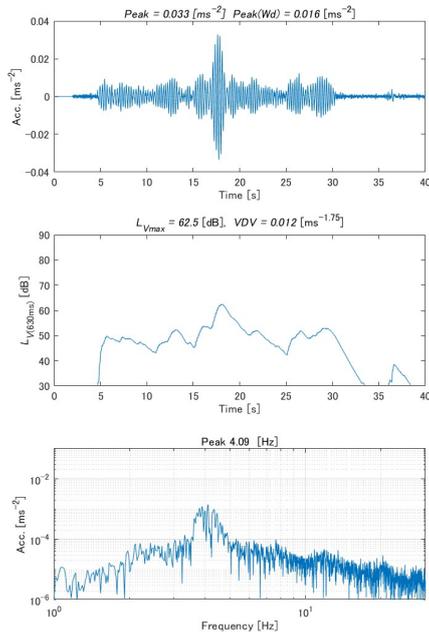


(d) ID4 平面道路, 木造 2 階,
6.9 Hz, CF 5.9

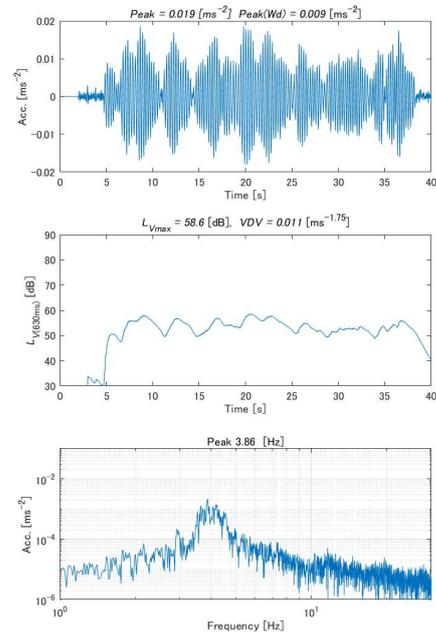
図 4-3 入力刺激の加速度波形(1)

(上段：加速度波形, 中段：振動レベル, 下段：フーリエスペクトル)

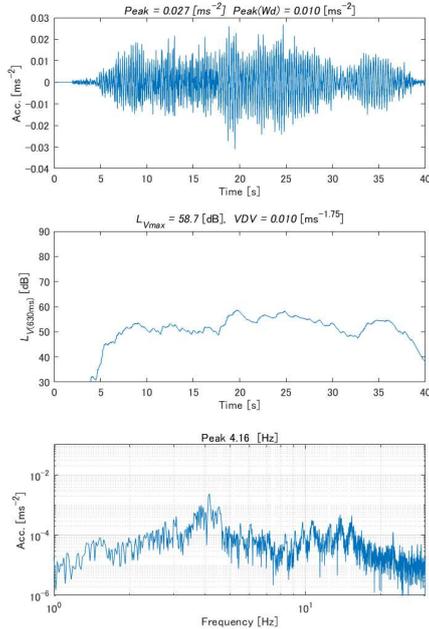
第4章 住宅内の実測波形を用いた加振台実験による評価方法の検討（加振台実験II）



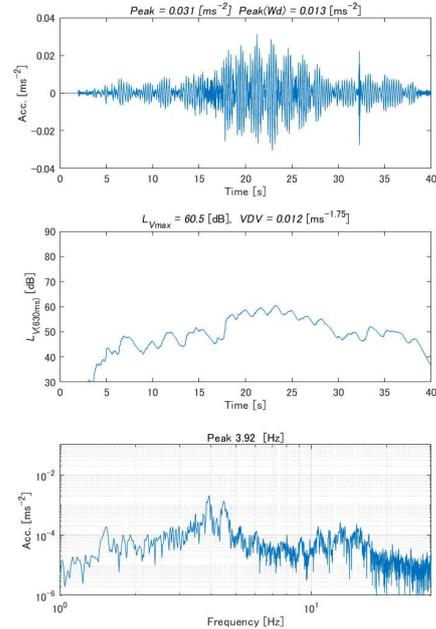
(e) ID5 高架道路, 鉄骨造 3 階,
4.1 Hz, CF 6.3



(f) ID6 高架道路, 鉄骨造 3 階,
4.2 Hz, CF 3.1



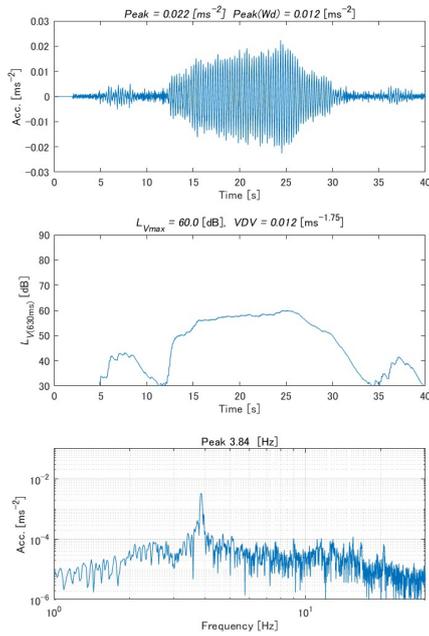
(g) ID7 貨物列車, 鉄骨造 3 階,
4.2 Hz, CF 3.7



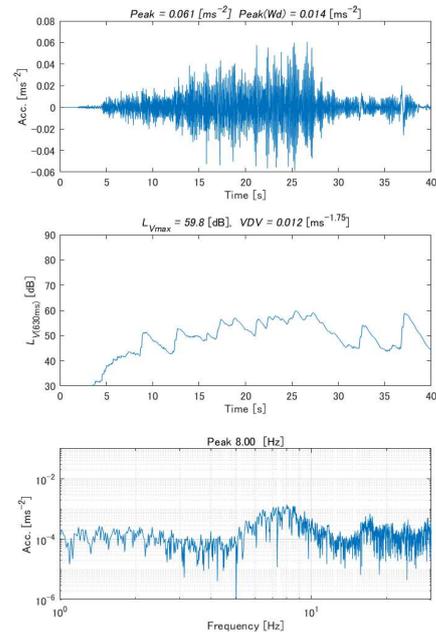
(h) ID8 在来鉄道, 鉄骨造 3 階,
3.9 Hz, CF 4.3

図 4-4 入力刺激の加速度波形(2)

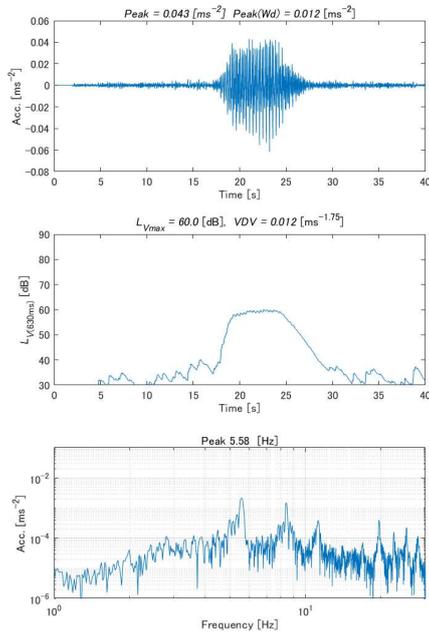
(上段：加速度波形, 中段：振動レベル, 下段：フーリエスペクトル)



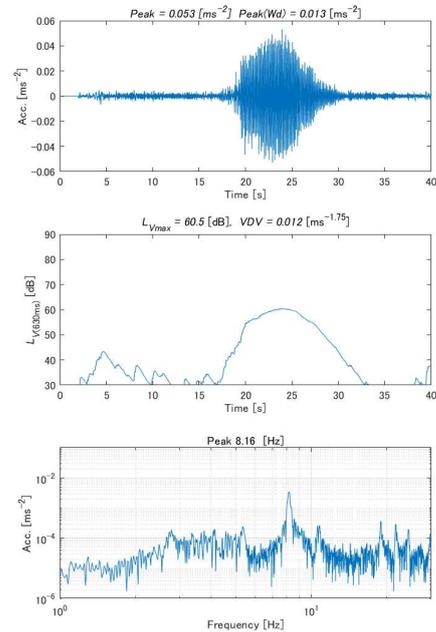
(i) ID9 在来鉄道, 鉄骨造 3 階,
3.9 Hz, CF 3.7



(j) ID10 在来鉄道, 木造 2 階,
8.0 Hz, CF 5.4



(k) ID11 新幹線, RC 造 2 階,
5.6 Hz, CF 6.3

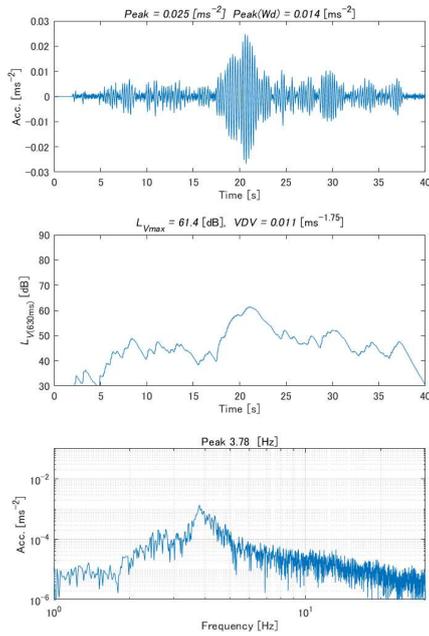


(l) ID12 新幹線, 木造 2 階,
8.2 Hz, CF 4.9

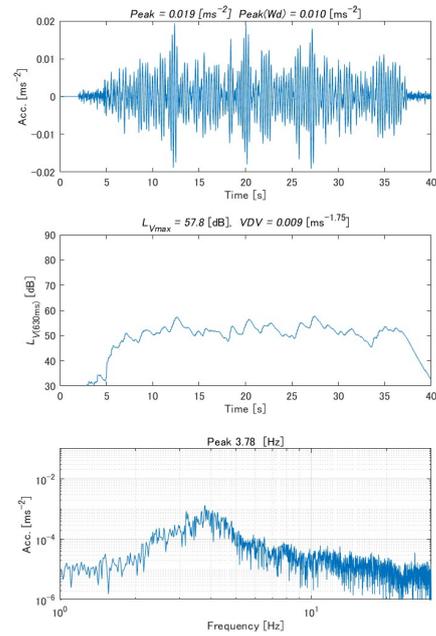
図 4-5 入力刺激の加速度波形(3)

(上段: 加速度波形, 中段: 振動レベル, 下段: フーリエスペクトル)

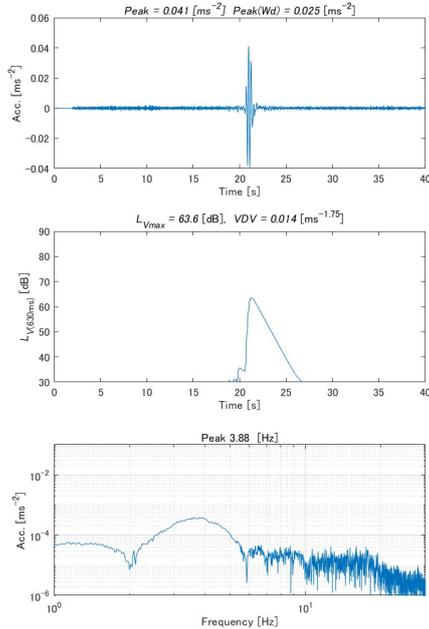
第4章 住宅内の実測波形を用いた加振台実験による評価方法の検討（加振台実験II）



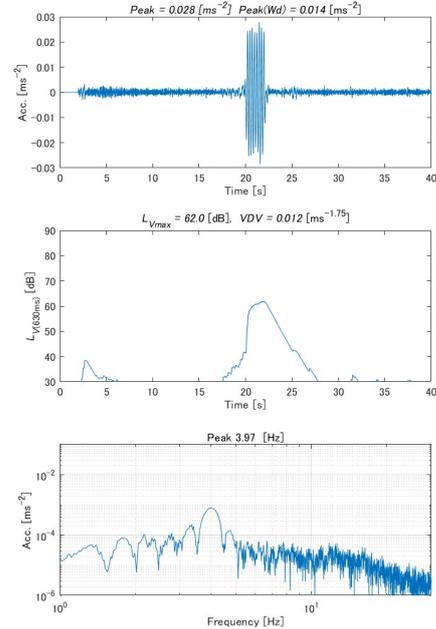
(m) ID13 建設作業，鉄骨造3階，
3.8 Hz，CF 6.1



(n) ID14 建設作業，鉄骨造3階，
3.8 Hz，CF 3.8



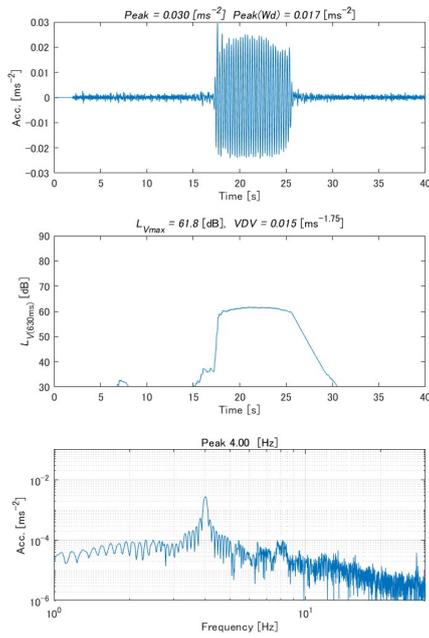
(o) ID15 正弦振動，0.5s，
4.0 Hz，CF 14.2



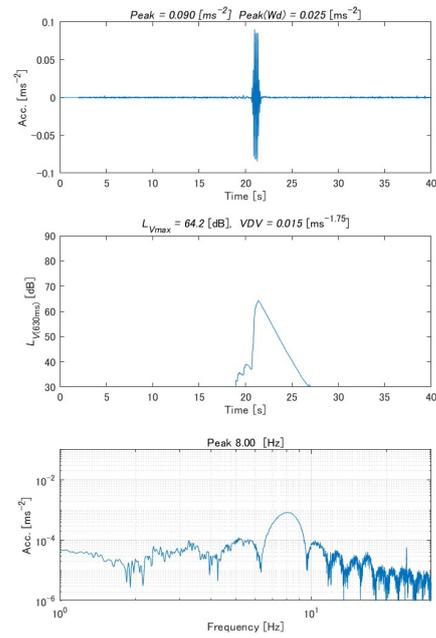
(p) ID16 正弦振動，2.0s，
8.0 Hz，CF 7.4

図 4-6 入力刺激の加速度波形(4)

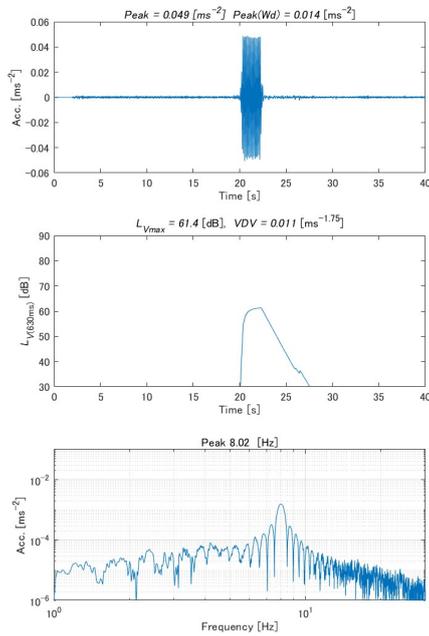
(上段：加速度波形，中段：振動レベル，下段：フーリエスペクトル)



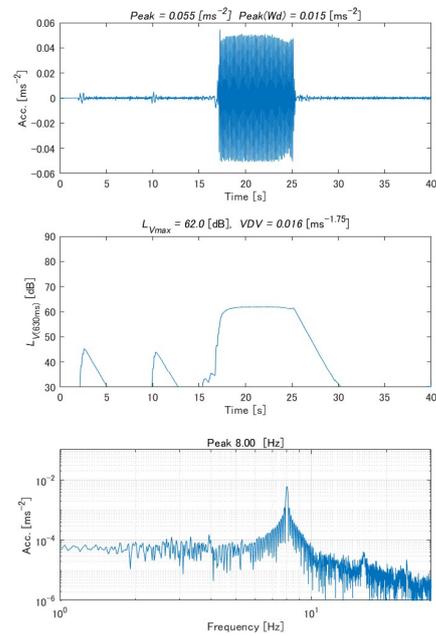
(q) ID17 正弦振動, 8.0s,
4.0 Hz, CF 4.1



(r) ID18 正弦振動, 0.5s,
8.0 Hz, CF 13.7



(s) ID19 正弦振動, 2.0s,
8.0 Hz, CF 7.3



(t) ID20 正弦振動, 8.0s,
8.0 Hz, CF 4.3

図 4-7 入力刺激の加速度波形(5)

(上段：加速度波形, 中段：振動レベル, 下段：フーリエスペクトル)

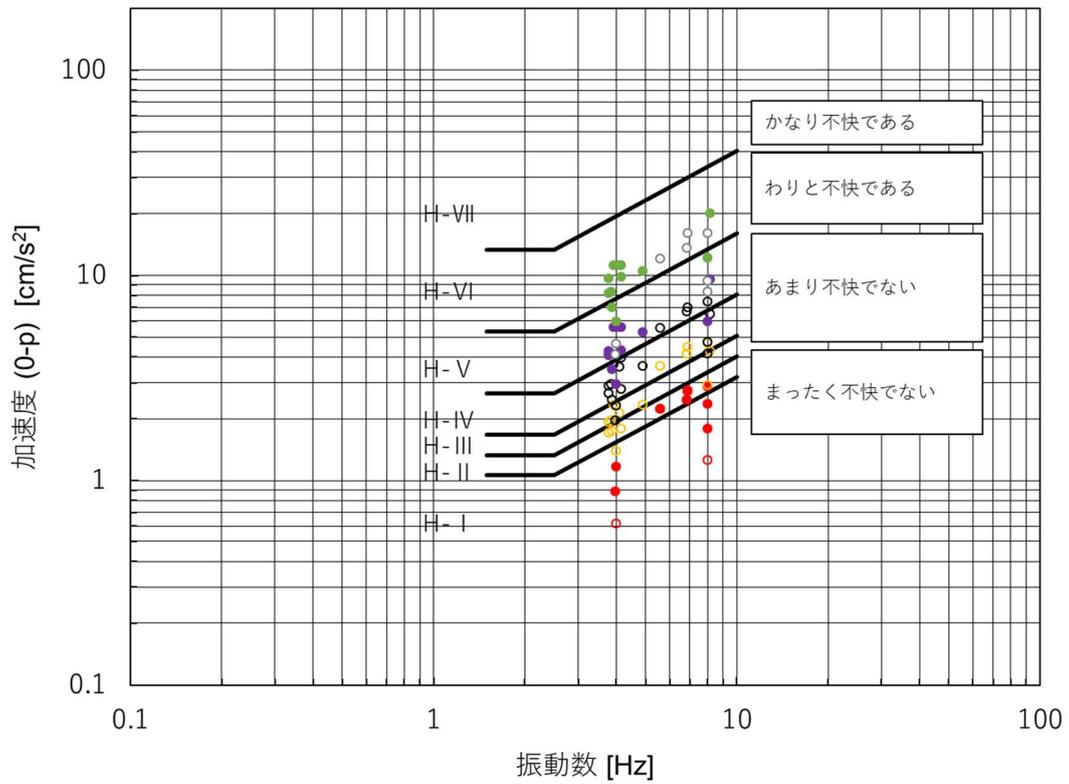


図 4-8 居住性能評価規準における入力刺激の大きさ

(入力刺激の目標値 VDV 別にプロット 単位は $m/s^{1.75}$)

○ : 0.005, ● : 0.007, ○ : 0.01, ○ : 0.015, ● : 0.021, ○ : 0.029, ● : 0.041)

4.2.3 心理的反応と評定尺度

心理的反応は、建物内の振動に対する“振動の大きさ”，“気になり具合”，“不快感”の3種類とした。主観的評価の計測に用いたのは、第3章で構成した5段階と7段階の心理学的な評定尺度である。評定尺度を表4-2に示す。アンケート調査において程度の表現語の強さの等間隔性，選択性の基準を満たすことを確認したものであるが，加振台による直接的な振動刺激に対してどの程度の等間隔性を有しているのかを確認する。

加振実験の際に提示した評定尺度のカテゴリーの順は，第2章の加振台実験Iと同じく表4-2に示すとおり心理的反応が強い方を上端においた。

表 4-2 建物内の振動に対する心理学的反応の評定尺度

(a) 5段階

	振動の大きさ		気になり具合		不快感	
I	HJ	非常に大きく感じる	HJ	非常に気になる	HJ	非常に不快である
II	DB	だいぶ大きく感じる	DB	だいぶ気になる	DB	だいぶ不快である
III	IR	いくらか大きく感じる	WR	比較的気になる	WR	比較的不快である
IV	SR	それほど感じない	WK	わずかに気になる	WK	わずかに不快である
V	MT	まったく感じない	MT	まったく気にならない	MT	まったく不快ではない

(b) 7段階

	振動の大きさ		気になり具合		不快感	
I	HJ	非常に大きく感じる	HJ	非常に気になる	HJ	非常に不快である
II	TH	たいへん大きく感じる	TH	たいへん気になる	TH	たいへん不快である
III	KK	けっこう大きく感じる	KK	けっこう気になる	KK	けっこう不快である
IV	IR	いくらか大きく感じる	WR	比較的気になる	WR	比較的不快である
V	WK	わずかに大きく感じる	IR	いくらか気になる	IR	いくらか不快である
VI	SR	それほど感じない	AM	あまり気にならない	AM	あまり不快ではない
VII	MT	まったく感じない	MT	まったく気にならない	MT	まったく不快ではない

4.2.4 実験方法

振動台に設置された椅子に一人ずつ座らせ、住宅のリビングの椅子に座っていることを想定してもらった上で、床振動が発生したときに感じる“振動の大きさ”、“気になり具合”、“不快感”について、5段階及び7段階の心理学的評定尺度を用いて評価を求めた。実験参加者の全員が道路交通振動などの外部振動源によって建物が揺れた経験を有してはいるわけではないので、本実験で対象としている床振動とは、地震による揺れではなく、日常生活の身の回りに存在する振動源、例えば、建物内の人の歩行や建物外の建設工事・道路交通などによるものを想定してもらうように説明を加えた。

参加者の姿勢は、椅子座位として、背もたれには寄りかからず、上半身をリラックスした状態で自然な姿勢を保つように教示した。椅子に座る際は、足の裏は振動台に触れる状態とした。なお、参加者に対して視覚・聴覚に対する制約は加えていない。振動台の加振方向は、参加者の左右方向とした。入力刺激の提示の順序を参加者毎にランダムとして、入力刺激の順序による結果への影響を極力無くすようにした。

各振動の評価対象とする時間は、加速度振幅の大きさや継続時間に関わらずすべて統一に約40秒になるように設定をした。実験参加者は、約40秒間の提示振動の一部ではなくスタートからストップの合図があるまでの全体の印象で判断してもらうようにした。さらに、判断は首尾一貫する必要はなく、あくまで各々の振動に対する判断をしてもらった。

4.3 評価方法

加振台実験で心理学的評定尺度によって得られた“振動の大きさ”、“気になり具合”、“不快感”と、第2章で検討した(1)～(5)に(6)RMSを加えた6種類の国内外の環境振動の評価方法による評価値を検討する。RMSは、振動の評価対象時間を約40秒に統一したことから第2章で検討した VDV_{square} で評価した場合と心理的反応との関係は等価な評価値である。(1)～(5)の算出式は第2章に示すとおりである。振動台上の加速度データに以下に示す評価方法を適用した。

(1) *AIJES 2004*（居住性能評価指針）

日本建築学会の居住性能評価指針⁴⁻⁴⁾と等価な評価値で、1/3オクターブバンドの加速度最大値によって評価する。

(2) *AIJES 2018*（居住性能評価規準）

日本建築学会の居住性能評価規準と等価な評価値で、1/3オクターブバンドの加速度最大値を振動の継続時間に応じて低減する。なお、加速度最大値の低減率は振動の継続時間が10s未満のとき1/4乗則で求める。

(3) L_{Vmax} (振動レベルの最大値)

JIS C 1510⁴⁻⁵⁾で規定された国内の環境振動の分野で最も多く使用されている評価値。本研究では振動レベルの最大値を評価値とした。

(4) $MTVV$ (最大過度振動値)

建物内などにおける人の全身振動評価に関する方法を規定している国際規格 ISO 2631-1⁴⁻⁶⁾に規定された一過性の衝撃や過渡振動を最大値で評価する。

(5) VDV (四乗則暴露量値)

$MTVV$ と同様に ISO 2631-1 に規定された一過性の衝撃や過渡振動を評価する。加速度の4乗を採用することでピーク値に敏感になり、時間積分により振動の継続時間の1/4乗が考慮される。

(6) RMS (二乗平均平方根値)

ISO 2631-1 では、周波数重み付けした加速度の Root-Mean-Square(RMS)が基本評価値としてされている。本章の加振台実験は、振動の評価対象時間を約40秒に統一したことから、計測時間 T による平均時間は同じであり、 VDV の振動の継続時間の1/2乗で考慮した評価値(第2章の VDV_{square})と考えることができる。

$$RMS = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad [m/s^2] \quad (4.1)$$

$a_w(t)$: ISO W_d 周波数重み付け加速度の瞬時値 $[m/s^2]$

T : 計測時間 $[s]$

4.4 予備実験

4.4.1 予備実験概要

アンケート調査で構成した5段階及び7段階の心理学的評定尺度のカテゴリー数による心理的反応の評価への影響の検討を行った。

実験参加者は、埼玉大学の学生10名（男性9名，女性1名）を対象とした。参加者の年齢，身長，体重の中央値と範囲はそれぞれ22歳（21～24歳），173 cm（164～179 cm），64 kg（52～92 kg）であった。5段階と7段階のカテゴリーを用いた実験は別日に行い，10名のうち4名は5段階を実施した後日に7段階，その他6名はその逆の順で実施し，実験の順序による結果への影響を極力小さくするようにした。

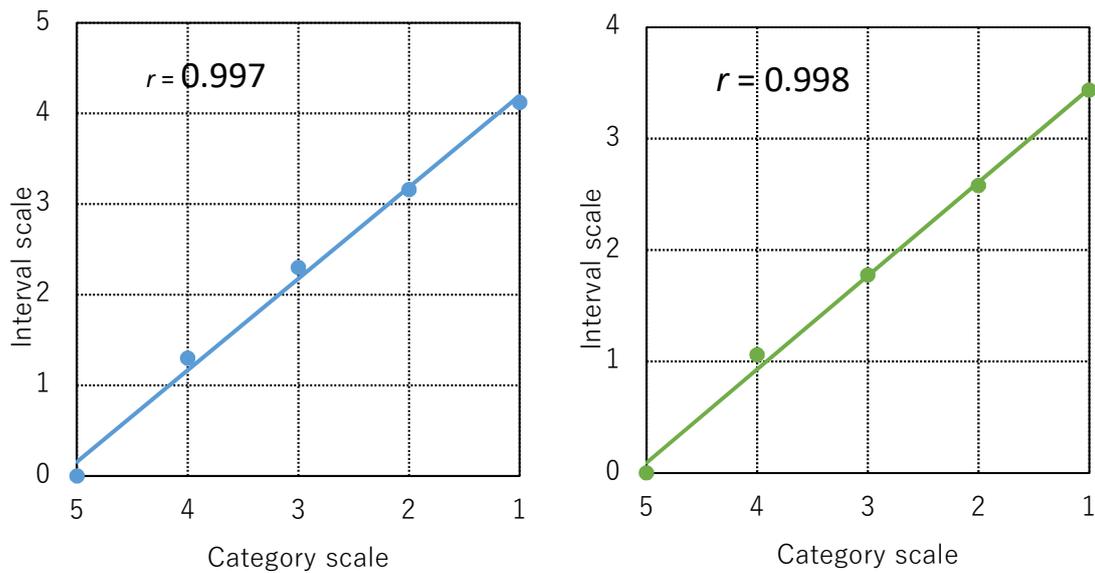
異なるカテゴリー数による心理的反応の結果を比較するためには，カテゴリー間の間隔を把握する必要があるが，評定尺度の各カテゴリーに付した数字は序数尺度で序列関係だけでありカテゴリー間の間隔は与えられていない。そこで，尺度の等間隔性を確認する上で範疇判断の法則⁴⁻⁷⁾による序数尺度から間隔尺度への尺度変換を行う。範疇判断の法則は心理的反応の判断が正規分布をしていることを前提としており，一般的には50名程度の実験参加者が必要とされているが，音の大きさの判断では20名程度で多くの実験参加者と同様の結果が得られると言われている⁴⁻⁸⁾。この考えに従えば予備実験の10名の参加者数は十分ではないが，ここでの目的は5段階と7段階の異なるカテゴリー数の評定尺度で得られる心理的反応の比較を把握することであり，厳密な間隔尺度を求めることではない。この後に実施する7段階の評定尺度を用いた25名（内，10名は予備実験の参加者）の結果と比較し，予備実験の10名による間隔尺度の妥当性を確認する。

4.4.2 カテゴリー数の検討

5段階と7段階のカテゴリーを用いた実験の順序による実験参加者の心理的反応に与える影響を確認するために，実験の順序の異なる4名と6名の76パターンの入力刺激に対する心理的反応の中央値の差について有意差検定（ウィルコクソンの順位和検定，有意水準5%）を行った。76パターンのうち有意差が認められたのは，“振動の大きさ”，“気になり具合”，“不快感”の順に5段階では1パターン，3パターン，2パターン，7段階では1パターン，0パターン，4パターンであった。この結果から，実験の順序による結果への影響は限定的であり，実験全体への影響は小さいと判断した。

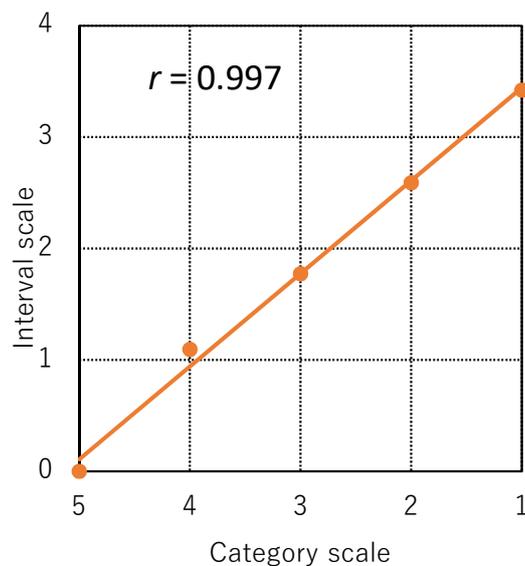
第3章で5段階と7段階の異なるカテゴリー数による程度の表現語の心理的な強さへ影響を検討した結果，その影響は小さいことは既に確認している（図 3-5）。ここでは，直接的な振動刺激による心理的反応における異なるカテゴリー数の影響を検討する。5段階と7段階の実験結果から範疇判断の法則によって間隔尺度へ変換し，もとの序数尺度と間隔尺度の関係と相関係数を図 4-9 及び図 4-10 に示す。どちらの図からもすべての心理的反応において，1に近い相関が確認できる。このような場合，前述したようにもとの序数尺度を間隔尺度として処理しても差し支えないとされている⁴⁻⁸⁾ことから，心理的反応をそのま

ま間隔尺度として扱い、5段階と7段階における76パターンへの入力刺激に対する心理的反応を平均値で求めた。異なるカテゴリ数による心理的反応の対応関係を図4-11に示す。図から近似直線から外れるデータがあるものの、全体的には直線的な関係が確認でき、いずれの心理的反応においても高い相関があることから、5段階と7段階の評定尺度には一定の互換性を有しており、調査の目的に応じたカテゴリ数の評定尺度を用いることができるものとする。本研究では、心理的反応の測定には分解能が高い7段階の評定尺度を用い、更に実験参加者を25名まで増やして検討を進めることとした。



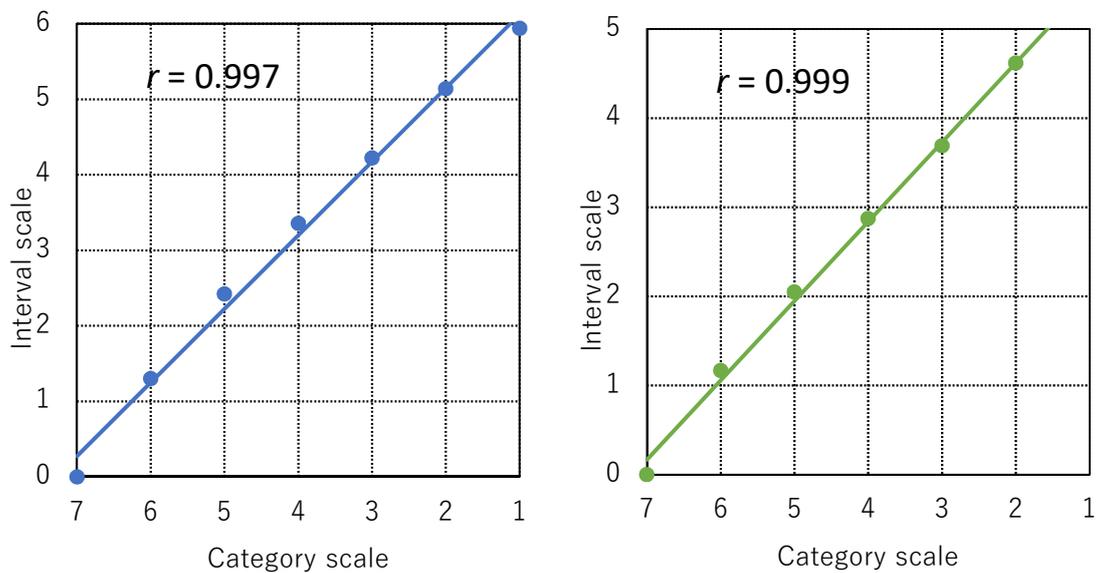
(a) “振動の大きさ”

(b) “気になり具合”



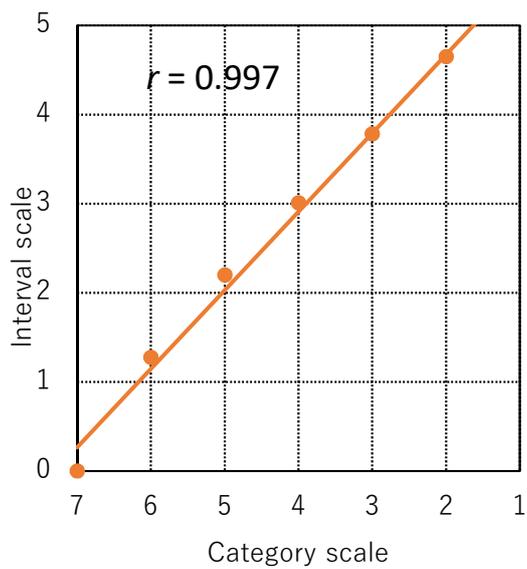
(c) “不快感”

図 4-9 もとの尺度と変換後の間隔尺度の関係 (5段階)



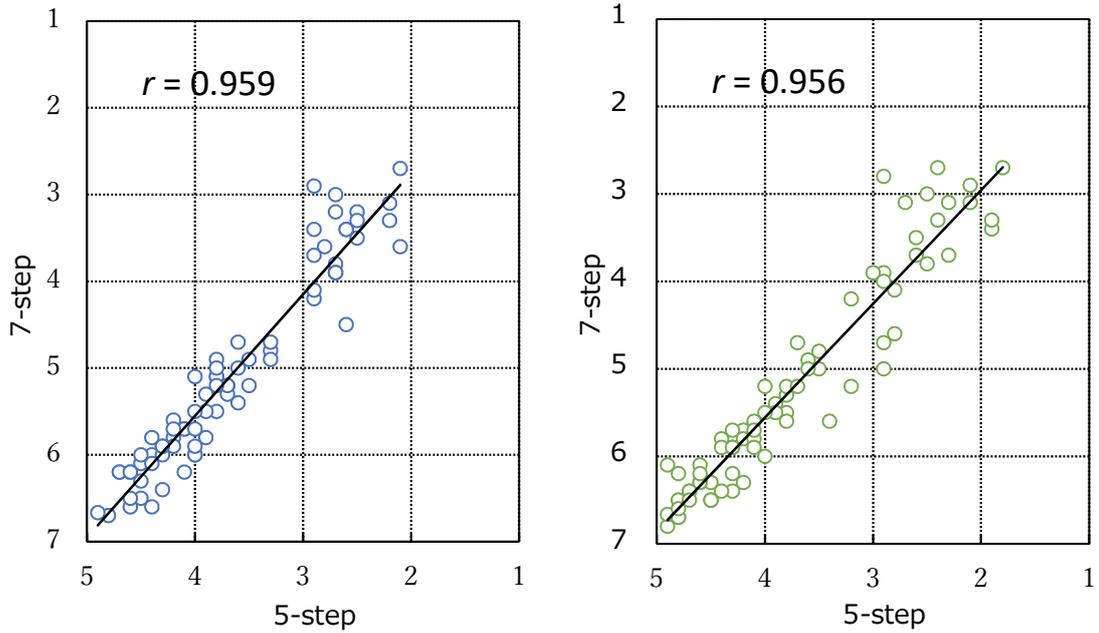
(a) “振動の大きさ”

(b) “気になり具合”



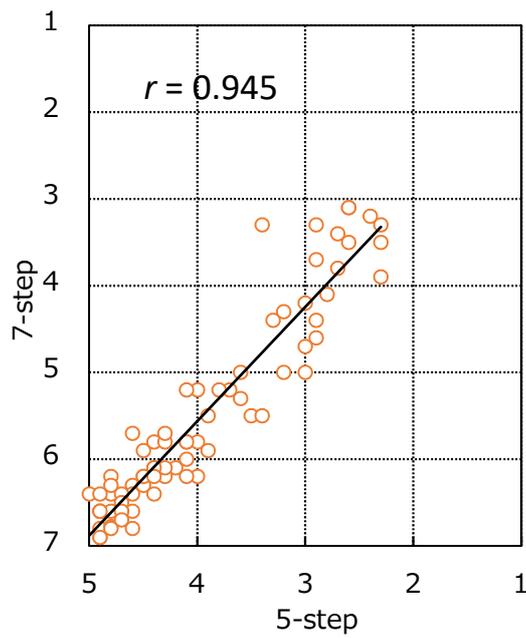
(c) “不快感”

図 4-10 もとの尺度と変換後の間隔尺度の関係（7段階）



(a) “振動の大きさ”

(b) “気になり具合”



(c) “不快感”

図 4-11 異なるカテゴリー数の心理的反応

4.5 本実験

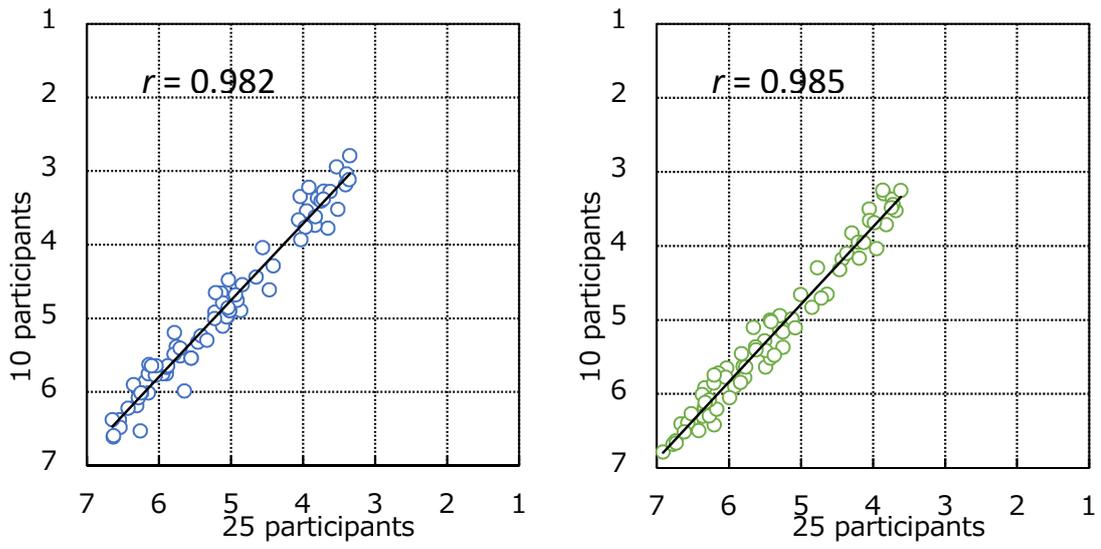
4.5.1 本実験概要

前項の結果を受けて、7段階の評定尺度を用いて、実験参加者を増やして加振台実験を進めた。予備実験に参加した10名の参加者の結果に、新たに埼玉大学の学生15名を加え、計25名（男性14名、女性11名）を対象とした。参加者の年齢、身長、体重の中央値と範囲はそれぞれ22歳（20～24歳）、168 cm（151～179 cm）、56 kg（43～92 kg）であった。

4.5.2 異なる実験参加者数による心理的反応の比較

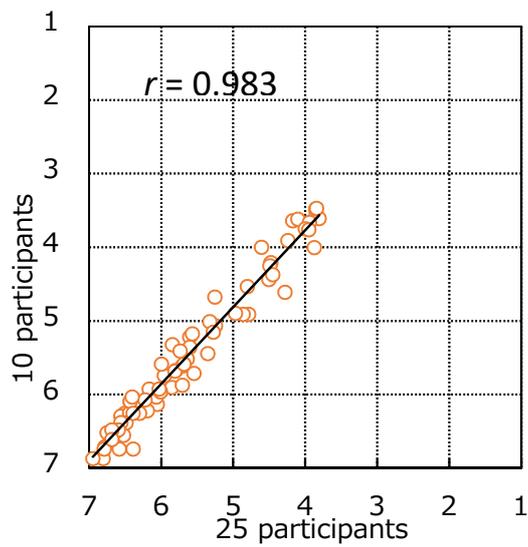
予備実験の10名と本実験の15名の76パターンへの入力刺激に対する心理的反応の中央値の差について、有意差検定（ウィルコクソンの順位和検定、有意水準5%）を行った。その結果、76パターンのうち有意差が認められたのは、それぞれの心理的反応において1パターンのみであった。

次に、予備実験に参加した10名と本実験ではさらに15名を追加した計25名の実験結果を比較して、異なる実験参加者数による心理的反応への影響を検討する。それぞれの心理的反応の7段階の序数尺度を範疇判断の法則により間隔尺度に変換し平均値を求めた結果を図4-12に示す。図からいずれの心理的反応においても、10名の反応が強い傾向にあるが25名との相関が高く直線的な関係であることがわかる。このことから、前節の予備実験の参加者10名による範疇判断の法則による間隔尺度は妥当であったと判断する。



(a) “振動の大きさ”

(b) “気になり具合”



(c) “不快感”

図 4-12 異なる実験参加者数の心理的反応の比較

4.5.3 心理的反応の分布

76 パターンの入力刺激に対する 25 名の実験参加者の心理的反応について、度数分布と累積比率を求めた結果を図 4-13 に示す。前述したとおり、入力刺激の加速度振幅の大きさは実際の建物内で発生しうる範囲を想定して調整した。しかしながら、図 4-13 に示すように、下から 2 番目のカテゴリーにおいて累積比率が 50%を上回っており、下位のカテゴリーに判断が偏り、上位のカテゴリーほど判断回数が少ない結果となった。実際の建物内で発生し得る範囲の加速度振幅を想定し、図 4-8 に示す居住性能評価の範囲の中で入力刺激の振幅調整をしたが弱い反応に偏った。その原因の一つとして、実居住環境と実験室環境の違いによるものと思われる。主観的評価を行った環境が振動に対する心理的反応に与える影響については、今後の課題とする。振動暴露された環境による心理的反応の分布への影響があるとしても、振動に対する反応の序列が大きく異ならないという前提で考察を進める。

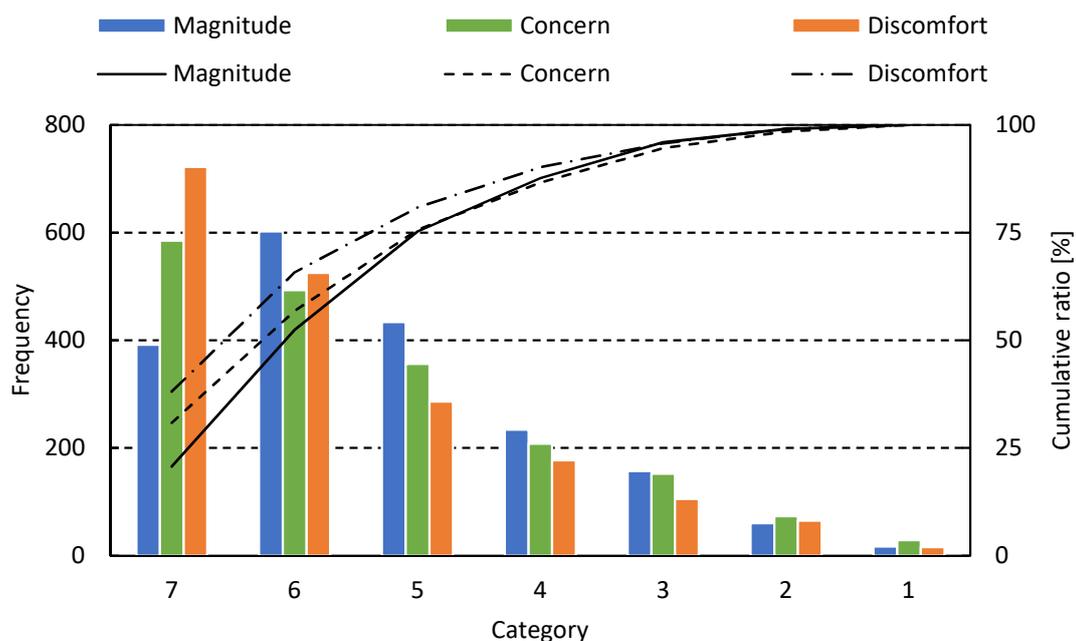


図 4-13 心理的反応の分布

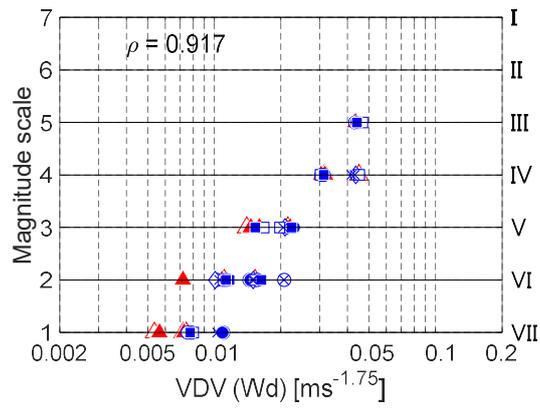
4.5.4 評定尺度の等間隔性の確認

第2章の心理的反応と評価値の対応関係に関する加振台実験Iにおいて、最も対応が適当であった評価値のVDVを用いて、評定尺度の等間隔性を検討する。ここで、評定尺度に付した数字を、(a)本来の序数尺度として扱う場合、(b)範疇判断の法則により間隔尺度に変換した場合、(c)数字をそのまま間隔尺度として扱う場合の3つのケースで心理的反応を求め、どのようなケースであってもVDVとの間に同等の対応性を確認することができれば、評定尺度は等間隔性を有していると考えられる。

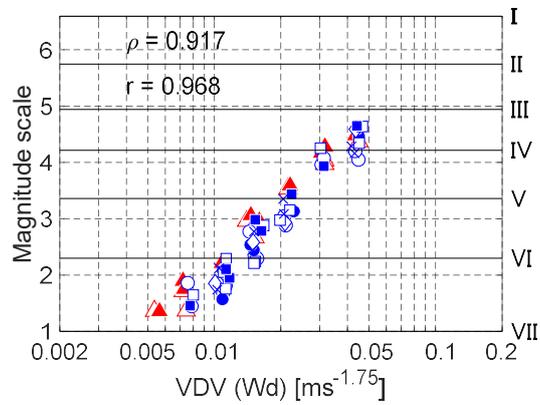
心理的反応の評価を(a)の序数尺度は中央値、(b)(c)の間隔尺度は平均値、振動の評価値のVDVは中央値で求め、それぞれの対応関係を図4-14～図4-16、相関係数の一覧を表4-3に示す。図中の ρ はスピアマンの順位相関係数、 r はピアソンの積率相関係数を表す。

図4-14～図4-16から、評定尺度をどのようなケースで扱っても、VDVの値が大きくなるにつれて心理的反応が強くなる同様の傾向が確認でき、特に(b)(c)のケースで間隔尺度として求めた心理的反応とVDVとの対応性はほぼ一致している。図4-14～図4-16及び表4-3から、評定尺度をどのようなケースで扱っても、2変数間の順序に関する相関を表す ρ のスピアマンの順位相関係数に変化は生じないことがわかる。2変数間の直線的な相関を表す r のピアソンの積率相関係数について(b)と(c)を比較すると、間隔尺度に変換した(b)の方が高い数値を示しているが相関係数の差の検定では5%水準で差があるとは言えない結果となった。これらのことから、評定尺度の数値を今回検討した3つケースのいずれの尺度としても、心理的反応と評価値との対応性の順序に影響はなく、さらに(b)と(c)が同等であることから、評定尺度は等間隔性を有しているものと解釈できる。

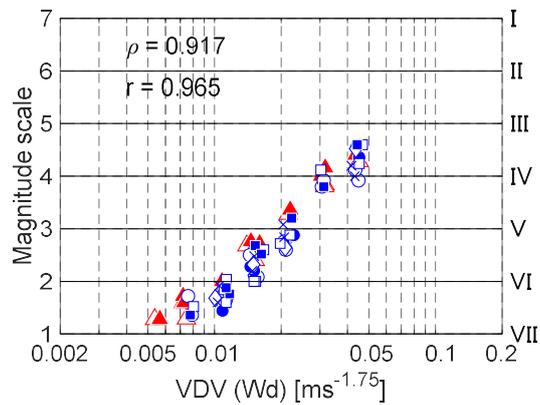
今後の検討では(c)の評定尺度の数字をそのまま間隔尺度として扱うこととする。その理由は、範疇判断の法則の手続きを経て間隔尺度に変換するには、振動に対する心理的反応の分布が正規分布であるかどうかは不明であるにも関わらず、入力刺激に対する心理的反応は平均値を中心として正規分布をしていることを前提としなければならないことにある。また、仮に心理的反応の分布が正規分布であるとしても範疇判断の法則による尺度変換は煩雑な計算を要し、実務的な観点から煩雑な手続きは避けたい。(c)のそのまま間隔尺度とすることは扱いが容易で、(b)と同程度の高い相関を示すことから、今後の検討では(c)のそのまま間隔尺度として扱うこととする。



(a) 序数尺度



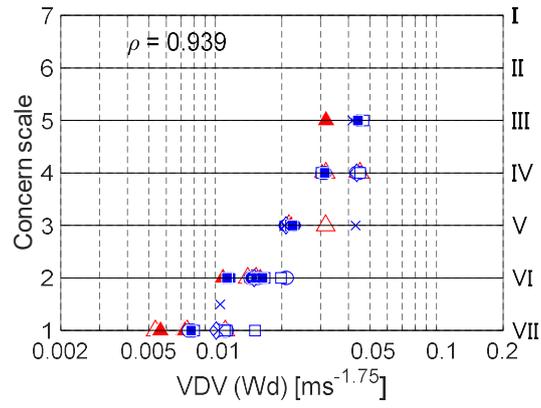
(b) 間隔尺度に変換



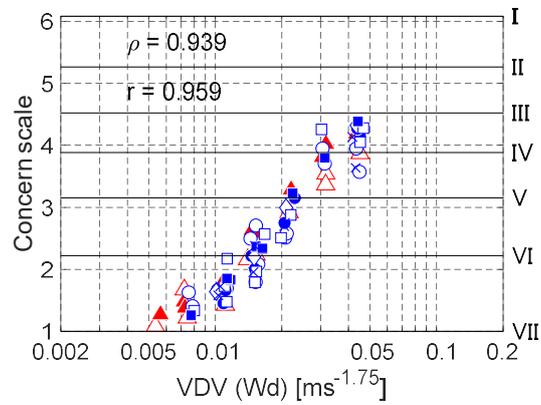
(c) そのまま間隔尺度

図 4-14 異なる尺度で求めた心理的反応との関係（振動の大きさ）

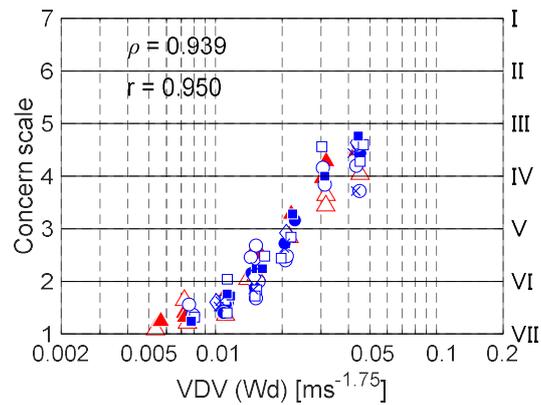
(○:平面道路, ●:高架道路, □:在来鉄道, ■:新幹線, ◇:貨物列車,
×:建設作業, △:4 Hz, ▲:8 Hz)



(a) 序数尺度



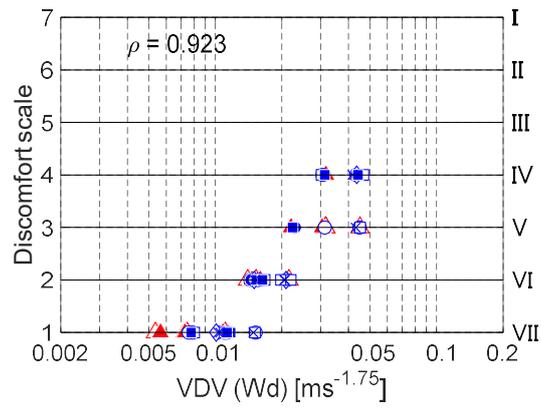
(b) 間隔尺度に変換



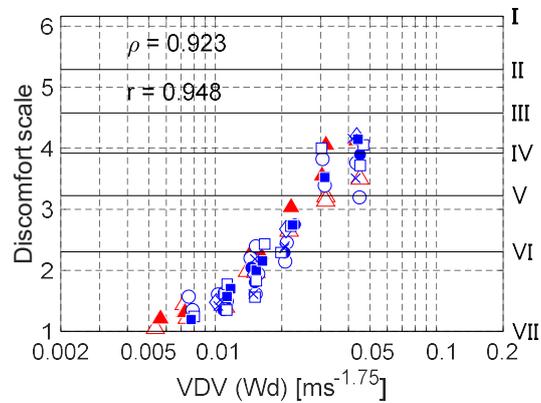
(c) そのまま間隔尺度

図 4-15 異なる尺度で求めた心理的反応との関係 (気になり具合)

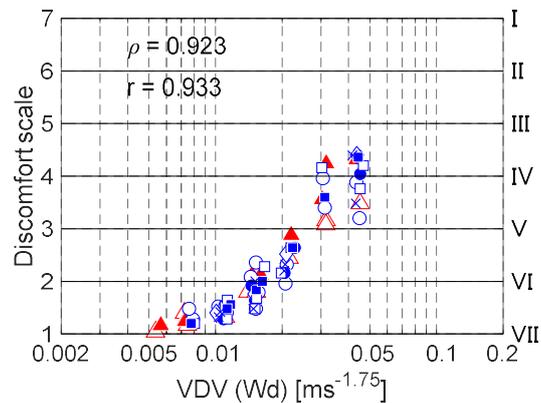
(○:平面道路, ●:高架道路, □:在来鉄道, ■:新幹線, ◇:貨物列車,
×:建設作業, △:4 Hz, ▲:8 Hz)



(a) 序数尺度



(b) 間隔尺度に変換



(c) そのまま間隔尺度

図 4-16 異なる尺度で求めた心理的反応との関係（不快感）

(○:平面道路, ●:高架道路, □:在来鉄道, ■:新幹線, ◇:貨物列車,
×:建設作業, △:4 Hz, ▲:8 Hz)

表 4-3 相関係数の比較

(a) : スピアマンの順位相関係数, (b)(c) : ピアソンの積率相関係数)

尺度の扱い方のケース	振動の大きさ	気になり具合	不快感
(a) 序数尺度	0.917	0.939	0.923
(b) 間隔尺度に変換	0.968	0.959	0.948
(c) そのまま間隔尺度	0.965	0.950	0.933

4.5.5 周波数重み付けの検討

各評価値と心理的反応との対応関係を検討する前に、周波数重み付け特性が評価値と心理的反応との対応関係に与える影響について、補足的な検討を行う。本研究で検討した評価方法で用いられている周波数重み付け特性は、JIS C 1510 で規定されている L_{Vmax} の水平方向の振動補正、ISO 2631-1⁴⁻⁶⁾で規定されている RMS 、 $MTVV$ 、 VDV の水平方向の W_d である。これらの規格では、振動の方向別に周波数重み付け特性が示されている。ISO 2631-2⁴⁻⁹⁾では、建物内の振動に対する評価の方法が示されており、建物内では人が直交3成分のうち特定の方向の振動だけに暴露されているとは考えにくいことから、振動の方向に関係なく安全側に評価するために、鉛直と水平の特性を複合した W_m 周波数重み付け特性が規定されている。以上の周波数重み付け特性と参考に *AIJES2018* と周波数依存性が等価な補正曲線を図 4-17 に示す。図から JIS の水平特性と ISO の特性 W_d が等価であることがわかる。 W_m 重み付け特性は、前述したように鉛直の特性を複合しているため W_d に対して 2 Hz 以上振動数において過大に振動を評価する特性であり、今回検討した入力刺激の振動数帯域では相対的に高い振動数ほど評価値が過大になる。具体的に正弦振動の 4 Hz 及び 8 Hz で確認すると、 W_m と W_d の重み付けの差は約 4 dB と約 7 dB である。仮に W_d の 4 Hz 及び 8 Hz が同じ加速度振幅のとき、 W_m では 8 Hz の方が相対的に 3 dB 大きな評価値となる。

図 4-18 に、周波数重み付け特性が異なる ISO の W_d と W_m を用いた VDV と各心理的反応との対応関係を示す。図から、周波数重み付け特性によって VDV の値が異なるものの、どちらを使用しても心理的反応との対応関係は同程度であることがわかる。本研究で用いた加振台は水平1方向のみの振動であるが、 W_m と W_d のどちらを採用しても心理的反応との対応性が同程度で得られることを示唆する結果を得た。しかしながら、本実験で用いた入力刺激と評価値 VDV のみによる補足的な検討であるため、周波数重み付け特性の検討は継続検討課題とする。本研究では、水平方向の入力刺激に対する検討であることから、JIS 及び ISO の規定に従い W_d 周波数重み付け特性及び JIS の水平方向の振動補正を用いることとする。

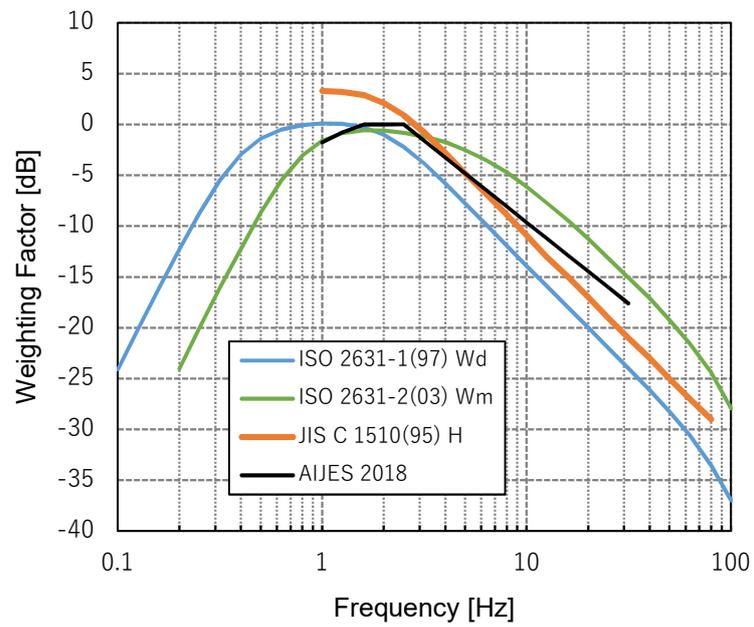


図 4-17 ISO 2631-1,-2 の W_d , W_m の周波数重み付け特性

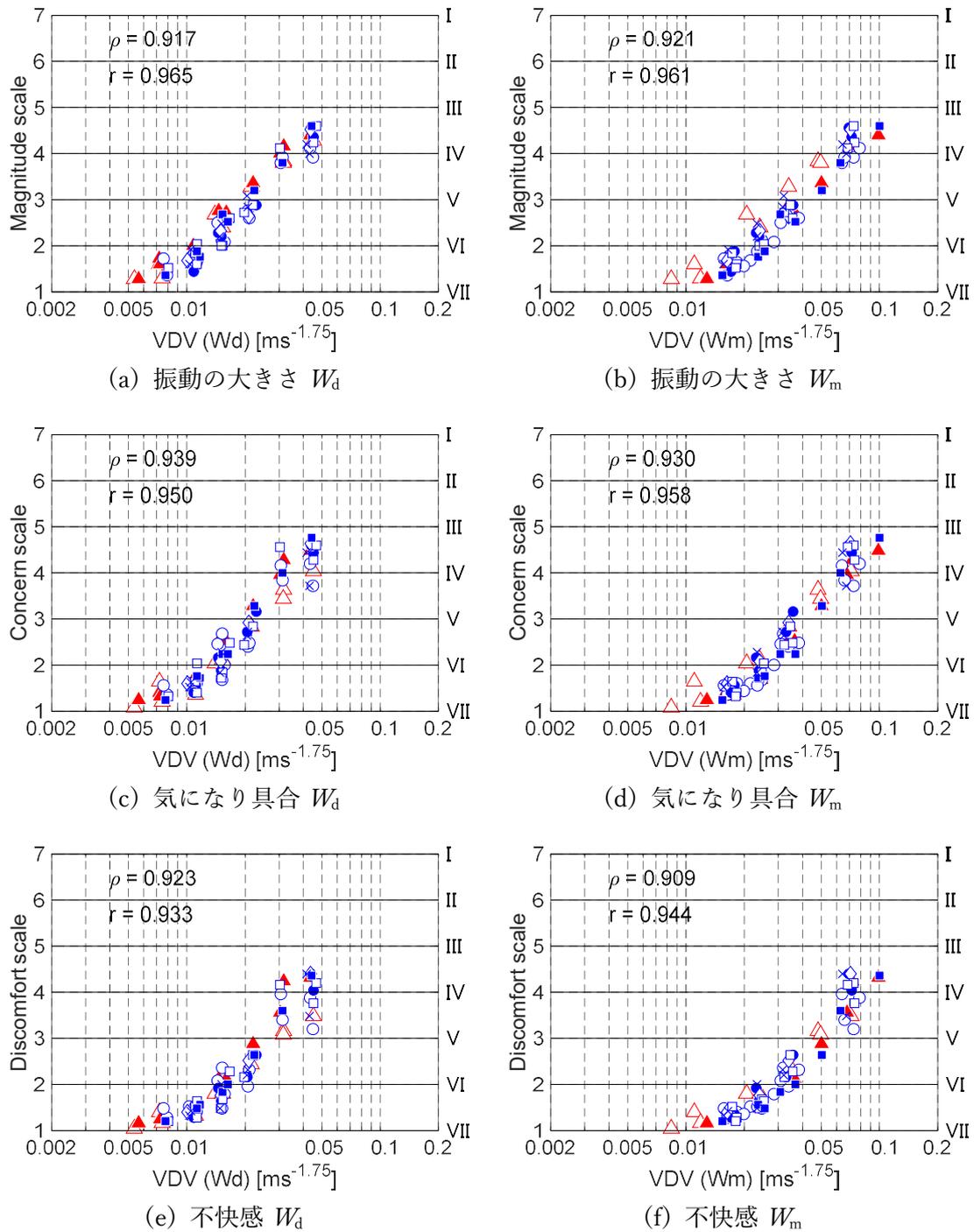


図 4-18 異なる周波数重み付け特性による VDV と心理的反応との対応関係

(○: 平面道路, ●: 高架道路, □: 在来鉄道, ■: 新幹線, ◇: 貨物列車,
 ×: 建設作業, △: 4 Hz, ▲: 8 Hz)

4.5.6 各評価値と心理的反応との対応関係

実際の建物内で計測した振動波形も含めた76パターンを入力刺激による評価値と心理的反応との対応関係を、“振動の大きさ”は図4-19、“気になり具合”は図4-20、“不快感”は図4-21に示す。評価値と心理的反応の順序関係の相関を確認するためにスピアマンの順位相関係数(ρ)と直接的な関係の強さを確認するためにピアソンの積率相関係数(r)も併せて示す。スピアマンの順位相関係数及びピアソンの積率相関係数の一覧を図4-22及び表4-4に示す。なお、表4-4は、図4-22に示す76パターンすべての入力刺激の相関係数に加え、実振動のみと正弦振動のみの入力刺激の相関係数を示している。

図4-19に示す“振動の大きさ”では、1/3オクターブバンドの最大となるバンドの加速度を評価する(a) *AIJES 2004*と、振動の継続時間を考慮する(b) *AIJES 2018*との比較では、(a) *AIJES 2004*の相関係数の方が高く、心理的反応との対応がわずかであるが良い結果となった。周波数重み付けした加速度の最大値を評価する(c) L_{Vmax} と(d) *MTVV*や1/4乗で振動の継続時間を考慮する(e) *VDV*が“振動の大きさ”と良い対応を示し、相関も高い。一方、1/2乗で振動の継続時間を考慮する(f) *RMS*は最も相関が低く、とりわけ正弦振動の評価値が“振動の大きさ”に対応していない。先述のとおり正弦振動は加速度振幅を2倍間隔で、それぞれ加速度振幅が大きい順に振動の継続時間を4倍間隔で0.5、2、8秒としたことから、*RMS*の評価値で等価となる入力刺激が複数できるように調整をした。*RMS*の評価値が同じ値の時に異なる心理的反応を示すことから、振動の継続時間を1/2乗を考慮する評価値が“振動の大きさ”を適切に評価できないことが示唆された。

図4-20に示す“気になり具合”や図4-21に示す“不快感”では、(a) *AIJES 2004*と(b) *AIJES 2018*の心理的反応との対応や相関係数に大きな差異は認められない。(c) L_{Vmax} と(d) *MTVV*といった最大値評価と比べて、1/4乗で振動の継続時間を考慮する評価値(e) *VDV*の方が適切である結果が得られた。1/2乗の(f) *RMS*は、“振動の大きさ”と同様に正弦振動の評価値が“気になり具合”や“不快感”と対応していない。実振動のみに着目すれば対応は良く、表4-4の実振動の相関係数は高い。第2章の加振台実験Iでは、1/2乗で振動の継続時間を考慮する VDV_{square} は“不快感”との対応が良い傾向を示していたが、(d) *RMS*では良い対応が認められない。(d) *RMS*の全体の分布から外れている正弦振動は、継続時間が0.5sの入力刺激であった。これらの継続時間の短い入力刺激を *RMS*では過小評価しているのは、第2章の VDV_{square} とは異なり本章では統一した評価対象時間の約40秒で平均したことが理由として考えられる。

以上のことから、“振動の大きさ”では最大値による評価値、若しくは振動の継続時間を1/4乗で考慮する *VDV*が適切な評価値であり、“気になり具合”、“不快感”では *VDV*が心理的反応を適切に評価できることがわかった。異なる心理的反応を同一の評価方法で評価すると考えた場合、*VDV*が適当であると考えられる。

[振動の大きさ]

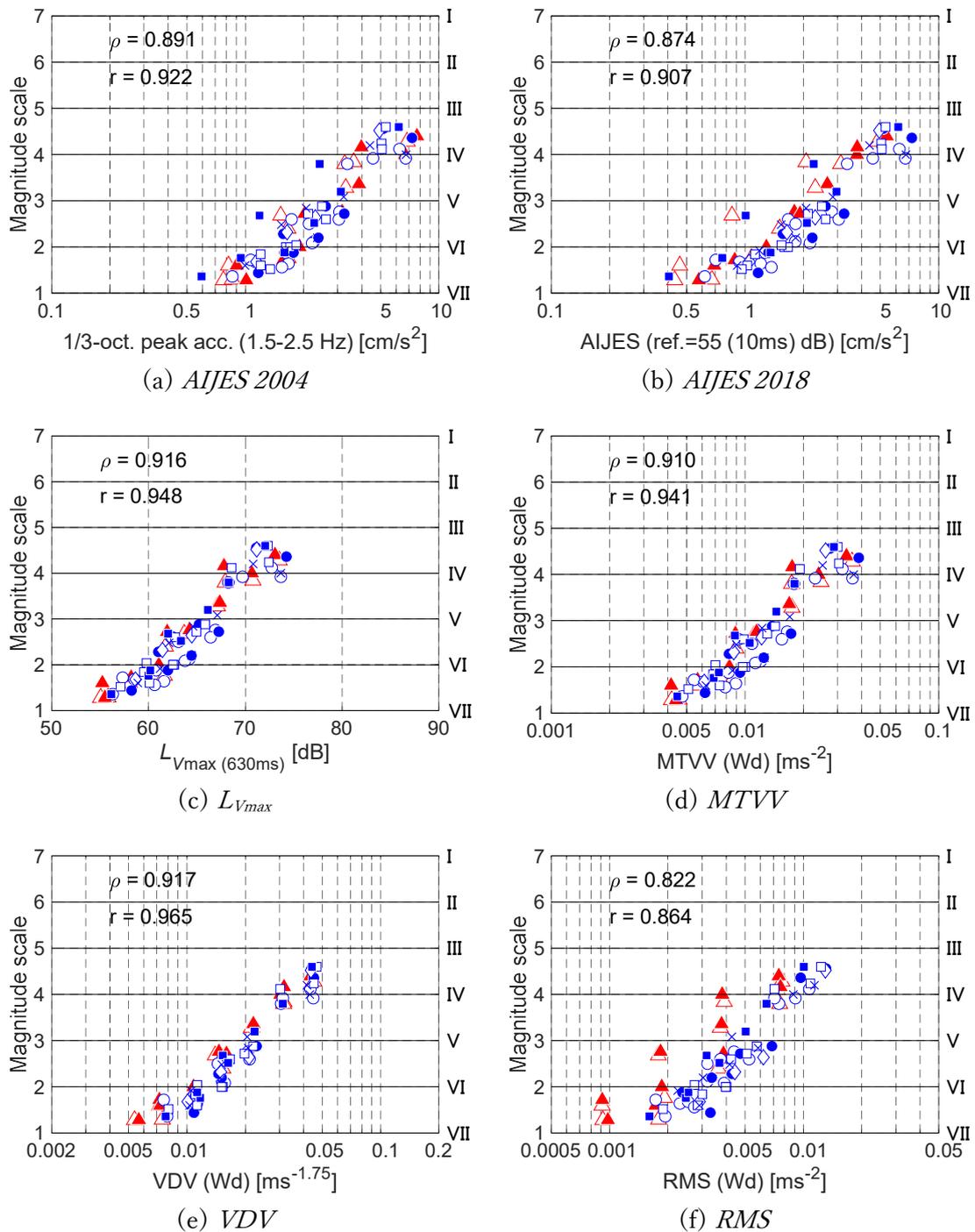


図 4-19 “振動の大きさ”と各評価値の関係

(○:平面道路, ●:高架道路, □:在来鉄道, ■:新幹線, ◇:貨物列車,
×:建設作業, △:4 Hz, ▲:8 Hz)

[気になり具合]

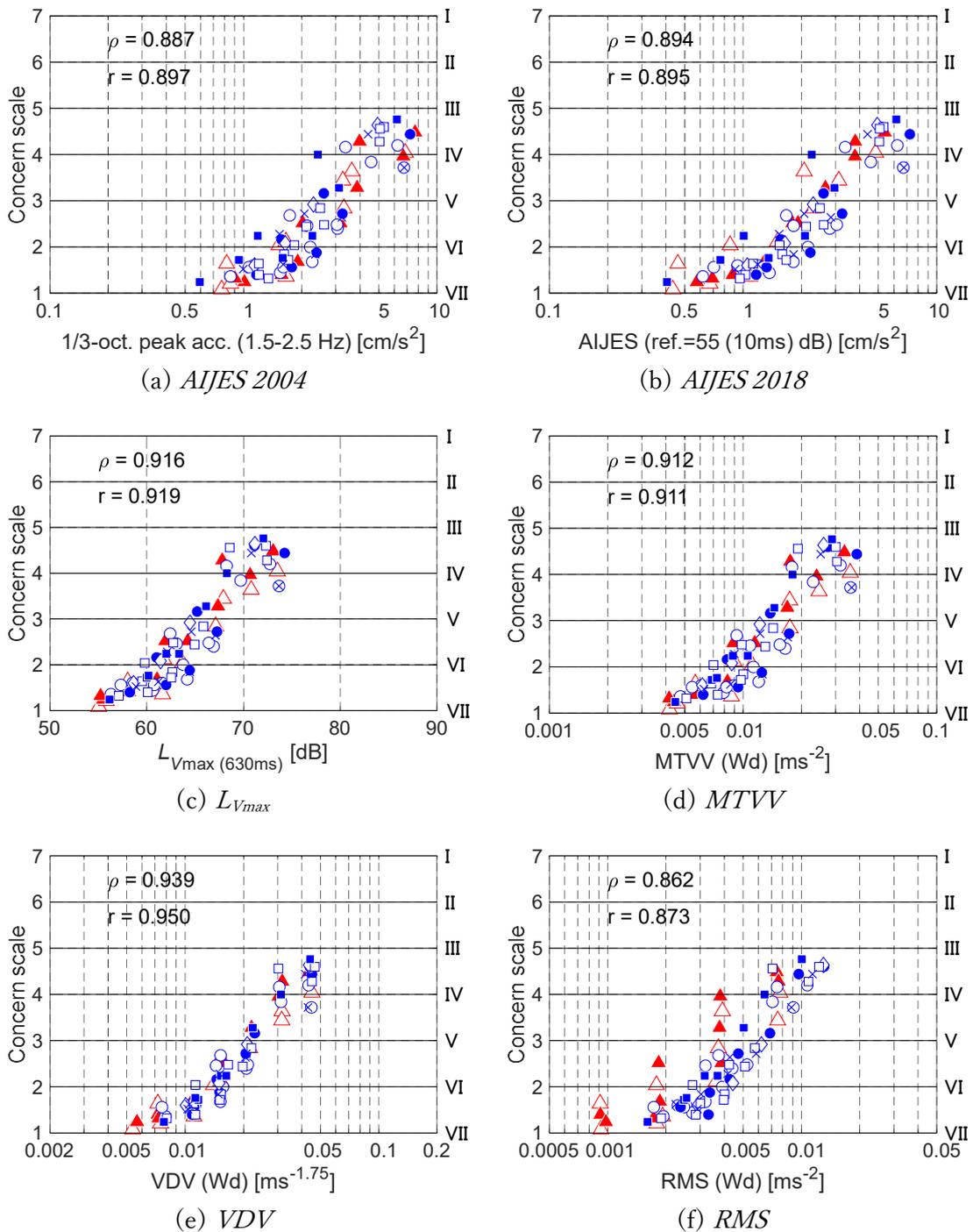


図 4-20 “気になり具合”と各評価値の関係

(○:平面道路, ●:高架道路, □:在来鉄道, ■:新幹線, ◇:貨物列車,
 ×: 建設作業, △: 4 Hz, ▲: 8 Hz)

[不快感]

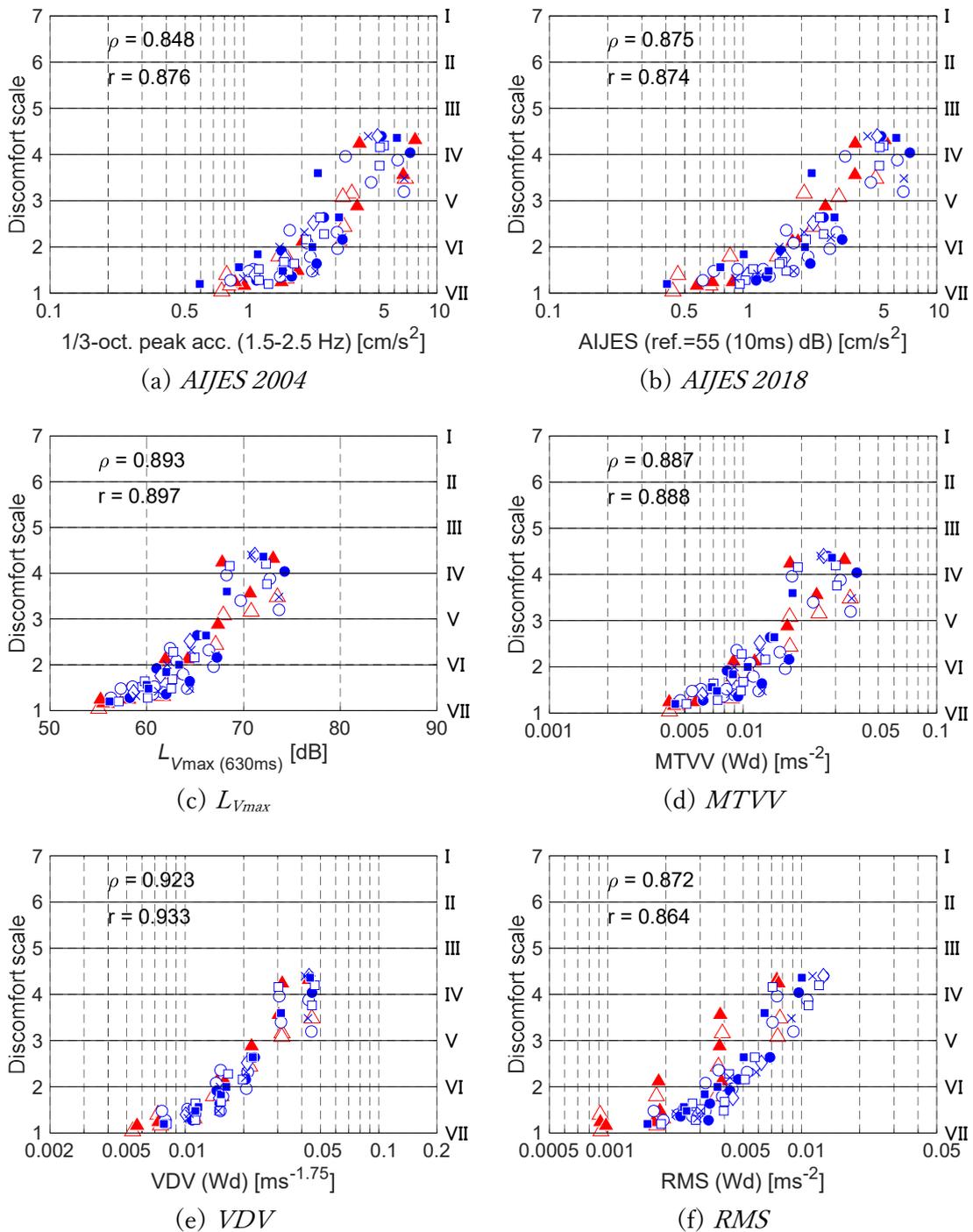
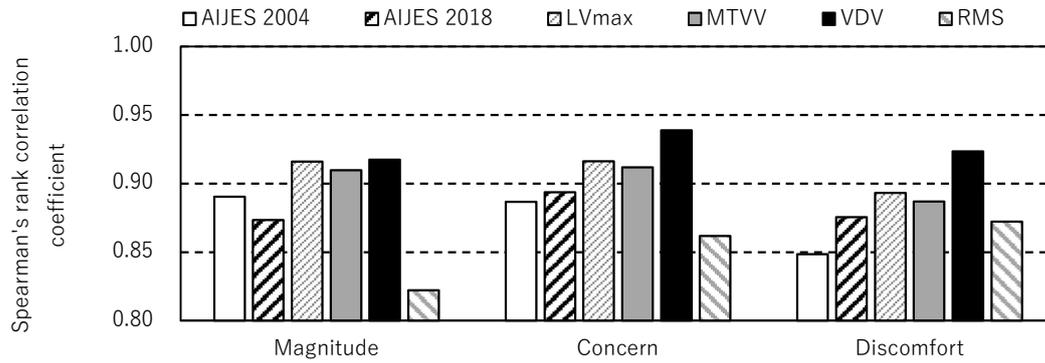
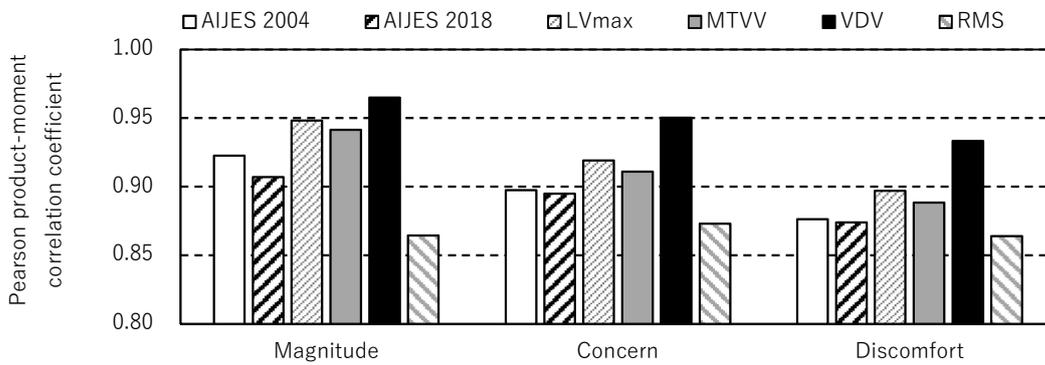


図 4-21 “不快感”と各評価値の関係

(○:平面道路, ●:高架道路, □:在来鉄道, ■:新幹線, ◇:貨物列車,
×:建設作業, △:4 Hz, ▲:8 Hz)



(a) スピアマンの順位相関係数



(b) ピアソンの積率相関係数

図 4-22 各評価値の相関係数の比較 (すべての入力刺激)

表 4-4 各評価値の相関係数の一覧

(a) スピアマンの順位相関係数

Evaluation	All input stimuli			Real vibration			Sinusoidal		
	Magnitude	Concern	Discomfort	Magnitude	Concern	Discomfort	Magnitude	Concern	Discomfort
AIJES 2004	0.891	0.887	0.848	0.866	0.868	0.835	0.922	0.920	0.88
AIJES 2018	0.874	0.894	0.875	0.870	0.888	0.874	0.930	0.923	0.90
L_{Vmax}	0.916	0.916	0.893	0.894	0.903	0.879	0.969	0.931	0.92
MTVV	0.910	0.912	0.887	0.887	0.893	0.871	0.954	0.941	0.91
VDV	0.917	0.939	0.923	0.917	0.938	0.920	0.934	0.943	0.94
RMS	0.822	0.862	0.872	0.875	0.904	0.923	0.868	0.884	0.86

(b) ピアソンの積率相関係数

Evaluation	All input stimuli			Real vibration			Sinusoidal		
	Magnitude	Concern	Discomfort	Magnitude	Concern	Discomfort	Magnitude	Concern	Discomfort
AIJES 2004	0.922	0.897	0.876	0.914	0.885	0.864	0.945	0.935	0.91
AIJES 2018	0.907	0.895	0.874	0.916	0.892	0.870	0.949	0.939	0.92
L_{Vmax}	0.948	0.919	0.897	0.945	0.911	0.893	0.971	0.946	0.91
MTVV	0.941	0.911	0.888	0.936	0.901	0.882	0.968	0.943	0.91
VDV	0.965	0.950	0.933	0.973	0.956	0.942	0.985	0.964	0.94
RMS	0.864	0.873	0.864	0.943	0.940	0.932	0.903	0.890	0.88

4.6 既往の研究における評価方法の検討

前節で，“振動の大きさ”，“気になり具合”，“不快感”の心理的反応の評価が，1/4 乗で振動の継続時間を考慮する VDV が最も適していることが明らかになった。近年，居住性能評価規準⁴⁻⁴⁾の改定を機に，道路交通や鉄道の外部振動源を対象とした建物振動に関する居住性能の評価方法についていくつか研究がなされている。水平方向の振動の検討では，山添ら⁴⁻¹⁰⁾が下式に示すように振動レベルの最大値に 1/4 乗で振動の継続時間を加味する評価値である VLT を提案している。山添らは，下式の時定数や参照値を様々に組み合わせて，水平方向の外部振動と対する心理学的尺度との対応を検討した結果，振動レベルの最大値のみの評価よりも，振動の継続時間を考慮する評価値の方が心理学的尺度との対応が良いことを示している。さらに，松下ら⁴⁻¹¹⁾による鉛直方向の外部振動による検討結果との整合性を図り，時定数 630 ms，参照値は 60 dB による $VLT_{(630ms, 60dB)}$ が評価値として有効であると報告している。

$$VLT = L_{Vmax} + 20 \cdot \log_{10} T^{1/4} [\text{dB}] \quad (4.2)$$

L_{Vmax} : 時定数 τ の振動レベルの最大値 [dB]

T : 所定の参照値以上となっている時間 [s]

τ : 時定数 [s]

ここでは，最大値評価のみの評価値よりも 1/4 乗で振動の継続時間を考慮する評価値の方が，心理的反応に対して有効とする山添らの報告を，本実験結果を使用して確認する。本検討の目的は，1/4 乗で振動の継続時間を考慮する評価値の妥当性の確認である。

時定数 630ms の振動レベルの最大値と $VLT_{(630ms, 60dB)}$ の心理的反応との対応関係を図 4-23 に示す。スピアマンの順位相関係数の比較を図 4-24 に示す。図 4-23 及び図 4-24 から，振動の継続時間を考慮した $VLT_{(630ms, 60dB)}$ の方がわずかであるがスピアマンの順位相関係数の相関が高い。山添らの研究と比べて，本実験の方が相関係数の変化が若干大きい結果となったが，“振動の大きさ”の変化が最も小さく，“気になり具合”，“不快感”の順に相関係数の変化が大きい傾向は同じであった。本実験に用いた入力刺激と評定尺度においても，差異はわずかであるものの振動レベルの最大値のみの評価よりも振動の継続時間を 1/4 乗で加味する $VLT_{(630ms, 60dB)}$ の方が心理的反応との対応が良いことを確認できた。

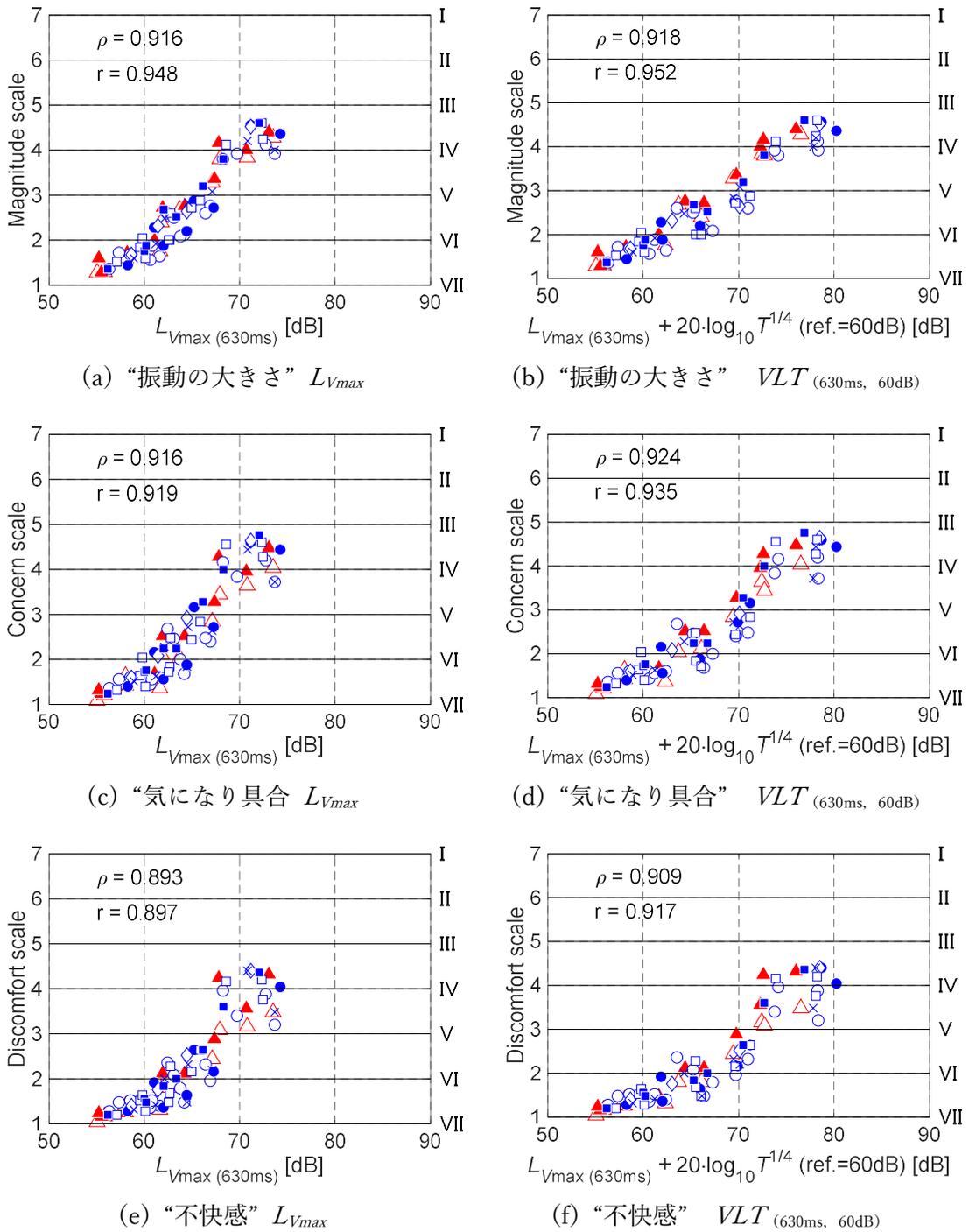


図 4-23 心理的反応と L_{Vmax} , $VLT_{(630ms, 60dB)}$ の関係

(○:平面道路, ●:高架道路, □:在来鉄道, ■:新幹線, ◇:貨物列車,
 ×: 建設作業, △: 4 Hz, ▲: 8 Hz)

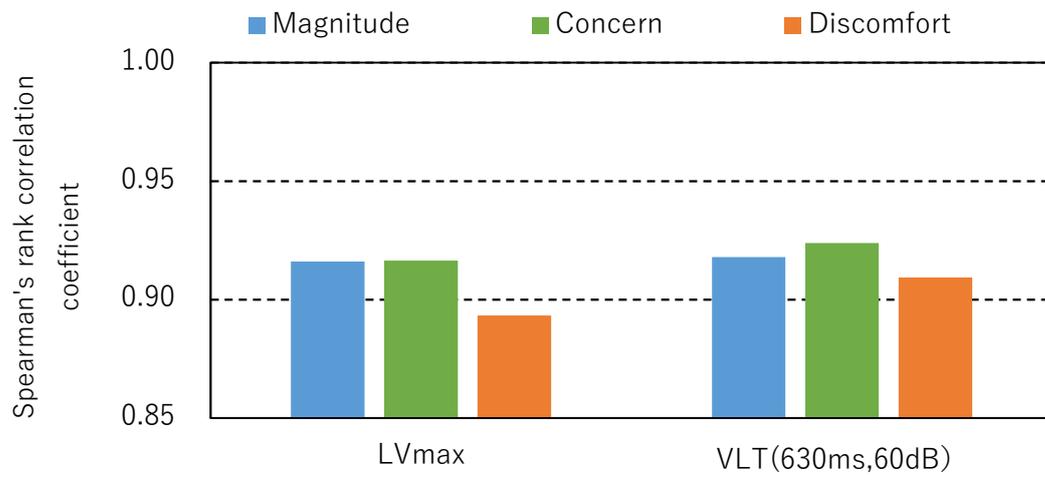


図 4-24 スピアマンの順位相関係数の比較

4.7 まとめ

本章の加振台実験Ⅱで得られた結論を以下に示す。

- 1) 5段階と7段階の評定尺度を用いた予備実験結果から、評定尺度のカテゴリー数が“振動の大きさ”、“気になり具合”、“不快感”に対する主観的評価への影響は小さいことがわかった。
- 2) 7段階の評定尺度を用いた本実験結果から、評定尺度に付された数値の扱いを検討した結果、そのまま間隔尺度として扱えることが明らかになった。このことから、3章で構成した評定尺度は、直接的な振動刺激においても等間隔性を有するものと判断できる。
- 3) 本研究で検討した評価値では、“振動の大きさ”、“気になり具合”、“不快感”を1つの評価値で評価すると考えた場合、1/4乗で振動の継続時間を考慮する VDV が“最も適切な評価値である”。
- 4) 既報の研究で検討されている振動レベルの最大値に振動の継続時間を1/4乗で加味する評価値 VLT を検討した結果、最大値評価と比べて1/4乗で振動の継続時間を考慮する評価値の妥当性を確認することができた。

以上のことから、3章で構成した5段階及び7段階の評定尺度は直接的な振動刺激に対して心理的反応である“振動の大きさ”、“気になり具合”、“不快感”を等間隔に測定することが可能であることと、振動の継続時間を1/4乗で考慮する VDV は、本研究で検討した評価方法のなかで最も心理的反応と対応の良い評価方法であることが明らかになった。

最終的な評価方法を提示するために、以下の課題点とした。

- 1) 環境振動の居住性に関する心理的反応に対する相関の強い評価値は明らかになったが、心理的反応の評価に対する加速度の振幅、振動の継続時間などの影響は不明である。
- 2) とりわけ、振動の継続時間を考慮することはどの程度の影響を与えているのかを把握することが必要である。

参考文献

- 4 -1) 平尾善裕, 国松直, 東田豊彦: 地盤振動に起因する木質系・鉄骨系戸建て住宅の振動増幅特性, 日本建築学会技術報告集 19(42), pp.631-634, 2013
- 4 -2) 東田豊彦, 平尾善裕, 杉本健一, 国松直: 戸建て住宅の環境振動における性能評価レベル推定の考え方, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.469-470, 2019.4
- 4 -3) 日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能評価規準・同解説, 2018.11
- 4 -4) 日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説, 2004.5
- 4 -5) 日本工業規格: JIS C 1510 振動レベル計, 1995
- 4 -6) ISO 2631-1: Mechanical Vibration and Shock – Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration – Part 1: General Requirements. International Standard, 1997
- 4 -7) 田中良久: 心理学的測定法 (第2版), 東京大学出版会, pp.151-158, 1977.3
- 4 -8) 難波精一郎, 桑野園子: 音の評価のための心理学的測定法, コロナ社, pp.72-86, 1998.7
- 4 -9) ISO 2631-2: Mechanical Vibration and Shock – Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration – Part 2: Vibration in Buildings (1 Hz to 80 Hz), 2003
- 4 -10) 山添宜人, 小山雄平, 福田眞太郎, 横山裕: 水へ方向の交通振動の居住性からみた評価方法に関する基礎的研究, 日本建築学会環境系論文集, 第84巻, 第758号, pp.367-376, 2019.4
- 4 -11) 松下仁士, 横山裕: 床振動の被暴露経験が許容可否判断に与える影響に関する基礎的実験, 日本建築学会環境系論文集, 第82巻, 第732号, pp.105-111, 2017.2

第5章

心理的反応の評価に対する説明変数の影響

第5章 心理的反応の評価に対する説明変数の影響の検討

5.1 はじめに

第4章の加振台実験Ⅱによって、環境振動の居住性に関する心理的反応に対する対応の良い評価値が、心理的反応の対応関係や相関係数の比較から振動の継続時間を1/4乗で考慮するVDVであることを評価値と明らかにした。しかしながら、振動の継続時間が心理的反応に対してどの程度影響しているかは不明である。これまでの検討結果から、心理的反応の評価に影響する変数として、人の振動感覚の周波数依存性を考慮した「加速度の最大値」と「振動の継続時間」は明白である。また、ISO 10137⁵⁻¹⁾では、クレストファクタ(加速度の最大値と実効値の比)が6を超える振動の場合には、実効値のRMS評価が適切でない可能性があり、VDVによる評価が利用できるとしていることから、「クレストファクタ」も検討する変数に加え、目的変数を「心理的反応」としたときの3つの説明変数群の影響を多変量解析⁵⁻²⁾で検討する。

目的変数は7段階の心理学的評定尺度によって測定された序数尺度で質的変数であることから、多変量解析手法としてロジスティック回帰分析⁵⁻³⁾を採用する。ロジスティック回帰分析は、1つのカテゴリカル変数を目的変数とし、説明変数によるモデルを使って分析する手法である。ロジスティック回帰分析は、目的変数が2値の場合を想定して開発されたものであるが、現在では3つ以上のカテゴリーをもつ変数の場合やさらにはカテゴリー間に順序がある場合にも適用できる手法が開発されている。本研究で扱う目的変数は7段階の序数尺度であることから、目的変数が3つ以上のカテゴリーでかつ順序のある場合に用いられる順序ロジスティック回帰分析による検討が可能である。順序ロジスティック回帰分析は、7段階の目的変数を扱う場合は6つモデルのオッズを推定するが、各モデルの偏回帰係数が同じで切片のみが異なる比例オッズモデルを当てはめる。すなわち、心理的反応が最も弱いモデルから強いモデルまでのオッズの間には比例関係があり、その切片は説明変数に影響されないという前提で組み立てる。しかしながら、この前提が本研究の7段階の心理的反応にそのまま適用できるかはわからない。そこで、7段階の心理的反応を2値化することによって、回帰モデルの解釈が容易な二項ロジスティック回帰分析で検討し、心理的反応と説明変数群の影響を把握する。

5.2 心理的反応の目的変数の2値化

7段階の心理的反応を二項ロジスティック回帰分析の目的変数とするために、2値化をおこなった。第4章の加振台実験IIで用いた7段階の評定尺度を表5-1、同実験の心理的反応の分布を図5-1に示す。7段階のうち上位の3カテゴリーを強反応とした。これらのカテゴリーは中間の4段階より上位であり、表5-1の程度の表現語が、「非常に」、「たいへん」「けっこう」であることから上位3カテゴリーとすることを妥当と判断した。よって、強反応であるか否かが目的変数となる。

表 5-1 建物内の振動に対する心理学的反応の評定尺度

	振動の大きさ		気になり具合		不快感	
I	HJ	非常に大きく感じる	HJ	非常に気になる	HJ	非常に不快である
II	TH	たいへん大きく感じる	TH	たいへん気になる	TH	たいへん不快である
III	KK	けっこう大きく感じる	KK	けっこう気になる	KK	けっこう不快である
IV	IR	いくらか大きく感じる	WR	比較的気になる	WR	比較的不快である
V	WK	わずかに大きく感じる	IR	いくらか気になる	IR	いくらか不快である
VI	SR	それほど感じない	AM	あまり気にならない	AM	あまり不快ではない
VII	MT	まったく感じない	MT	まったく気にならない	MT	まったく不快ではない

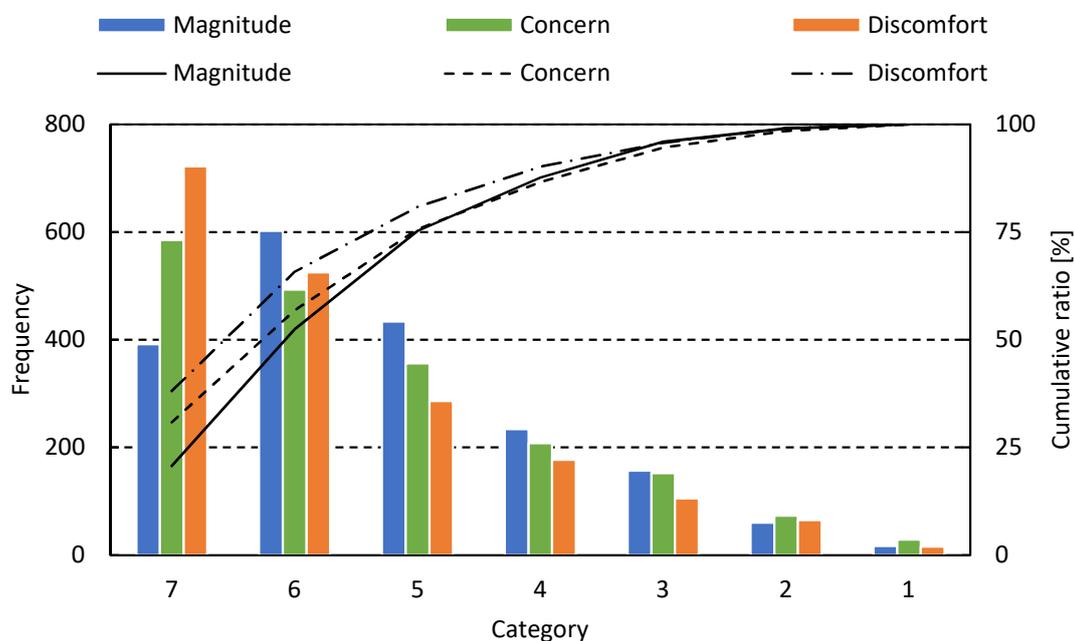


図 5-1 心理的反応の分布

5.3 回帰モデルに用いた説明変数

目的変数を強反応であるか否かの 2 値であることから、強反応となる期待値を π とする二項ロジスティック回帰式は以下の式で表される。

$$\log\left(\frac{\pi}{1-\pi}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \quad (5.1)$$

x_1 : 加速度の最大値 [cm/s²]

x_2 : 振動の継続時間 [s]

x_3 : クレストファクタ

β_0 : 切片

β_1 : 加速度の最大値の偏回帰係数

β_2 : 振動の継続時間の偏回帰係数

β_3 : クレストファクタの偏回帰係数

続いて、各説明変数の内訳と組み合わせについて説明する。まず、1 つ目の目的変数の「加速度の最大値」は、第 4 章で検討した国内外の評価方法の中から加速度の最大値評価である *MTVV*⁵⁻⁴⁾、*AIJES 2004*⁵⁻⁵⁾、及び L_{Vmax} ⁵⁻⁶⁾ を評価値とした。異なる単位の加速度の最大値を比較するために、*MTVV* は m/s² から cm/s² へ、*AIJES 2004* は規格のとおり cm/s²、 L_{Vmax} は dB から cm/s² へ変換し単位を統一した。

2 つ目の目的変数の「振動の継続時間」は、「加速度の最大値」との組み合わせによって異なる算出方法で振動加速度の参照値を求め、この参照値以上となる時間の合計を 1/2 乗及び 1/4 乗で求めた値とした。「加速度の最大値」が *MTVV* のときは、同じ周波数重み付け特性を用いた ISO の W_d による補正加速度とした。 W_d 補正加速度の参照値は、ISO 10137 で規定されている建物用途ごとの評価基準を参考にした。ISO 10137 の基本曲線の周波数特性の逆補正が W_d 周波数重み付け特性と等価であることから W_d 補正加速度をそのまま評価基準値に読み替えることができる。建物用途ごとに規定されている評価基準を加速度実効値が下回るときは、振動苦情の可能性が低いとされている。本研究では最も厳しい評価基準値である 0.0036 m/s² (r.m.s.) から、加速度最大値換算で $\sqrt{2}$ 倍した 0.00504 m/s² を参照値とした。「加速度の最大値」が *AIJES2004* のときは、居住性能評価規準⁵⁻⁷⁾ で採用されている振動の継続時間を算出する方法に準じて、時定数 10 ms の振動レベル L_V (10 ms) で参照値を 55dB とした。「加速度の最大値」が、 L_{Vmax} のときは、既往の研究で提案されている *VLT*^{5-9), 5-10)} の評価方法に準じて時定数 630 ms の振動レベル L_V (630 ms) で、参照値は人の振動感覚閾値とされている⁵⁻⁸⁾ 55 dB とした。以上から、「振動の継続時間」は、入力刺激の加速度振幅が振動苦情になる可能性、若しくは人が振動知覚する大きさ以上になってきた時間の合計と定義される。

最後の3つ目の説明変数である「クレストファクタ」は、 W_d の補正加速度の最大値と実効値の比から求め、入力刺激の波高率を表すものである。過渡的な振動になるほど値が大きくなる。前述のとおり ISO 10137 ではクレストファクタが6を超える場合には、実効値の評価が適切でない可能性があり、VDVによる評価が利用できるとしており、クレストファクタの値によって適切な評価方法が変わることが規定されている。クレストファクタを算出する際の振動加速度に周波数重み付けは、図 4-17 に示すとおり ISO の W_d と JIS の水平特性は重み付けの特性は等価で、どちらの特性を用いても最大値と実効値の比は同じ結果が得られることから、すべての組み合わせにおいて W_d を採用した。

以上の説明変数の組み合わせによる回帰モデルの一覧を表 5-2 に示す。次項で第4章の加振台実験で得られた76パターンの入力刺激に対する25名の被験者の心理的反応と各説明変数の1900データセットのうち、欠測を除いた1896データセットに対する二項ロジスティック回帰分析による偏回帰係数及び切片の推定や偏回帰係数の有意性検定の結果を述べる。

表 5-2 検討した説明変数の組み合わせ

モデル	加速度の最大値	振動の継続時間	クレストファクタ
A1	MTVV:1秒移動加速度平均値の最大値	TL4: W_d 補正加速度が 0.00504 m/s^2 以上となる合計時間の1/4乗	CF : Peak/r.m.s. (W_d 補正加速度)
A2		TL2: W_d 補正加速度が 0.00504 m/s^2 以上となる合計時間の1/2乗	
B1	AIJES 2004:1/3オクターブバンド毎の最大バンドの加速度最大値	TL4: 時定数 10 ms 振動レベルが 55 dB 以上となる合計時間の1/4乗	
B2		TL2: 時定数 10 ms 振動レベルが 55 dB 以上となる合計時間の1/2乗	
C1	$L_{V\max}$: 時定数 630 ms 振動レベルの最大値	TL4: 時定数 630 ms 振動レベルが 55 dB 以上となる合計時間の1/4乗	
C2		TL2: 時定数 630 ms 振動レベルが 55 dB 以上となる合計時間の1/2乗	

5.4 回帰モデルにおける変数の選択

まず、前節の説明変数群が有意な回帰モデルを作成するために適切な説明変数であるか否かを、ステップワイズ法（変数増減法）によって確認をする。ステップワイズ法は、切片だけの回帰モデルに1つずつ説明変数を加除して求めた統計指標を比較し、最も統計指標が小さくなった説明変数の組み合わせによる回帰モデルを推奨する方法である。ステップワイズ法によって、表 5-2 に示すモデルの説明変数の選択結果を表 5-3 に示す。表中の○はステップワイズ法により推奨された説明変数であることを表す。

表 5-3 が示すように、モデルによって推奨される説明変数の組み合わせが異なる結果となった。その中で、「加速度の最大値」と「振動の継続時間」の組み合わせによるものが推奨されるモデルとして多いことがわかる。「クレストファクタ」は、一部のモデルのみでしか推奨されない結果となった。

表 5-3 各モデルの説明変数の選択結果

(表中の○はステップワイズ法により推奨された説明変数であることを表す)

モデル	振動の大きさ			気になり具合			不快感		
	加速度の 最大値	振動の 継続時間	CF	加速度の 最大値	振動の 継続時間	CF	加速度の 最大値	振動の 継続時間	CF
A1	○	×	○	○	○	×	○	○	×
A2	○	×	○	○	○	×	○	○	×
B1	○	○	×	○	○	×	○	○	×
B2	○	○	×	○	○	×	○	○	×
C1	○	○	○	○	○	○	○	○	○
C2	○	○	×	○	○	○	○	○	○

5.5 交互作用項の検討

式5.1に示す二項ロジスティック回帰式の左辺のロジット関数(目的変数の期待値)は、 x_1 を1増やすと β_1 増え、 x_1 の値をはじめ x_2 、 x_3 の値や β_2 、 β_3 に無関係である。すなわち、ある説明変数が一定だけ変化したときの目的変数の期待値に与える影響は、他の説明変数がどんな値であるかには影響しないと想定している⁵⁻¹¹⁾。しかしながら、実際には、説明変数が目的変数の期待値に与える影響が他の説明変数に影響されることがある。この状況を交互作用と呼ぶ。この交互作用の項は式5.2に示すように説明変数の積で表現でき、説明変数に加えることでモデルを検討することができる。

前節のステップワイズ法による変数の選択の検討結果では、「クレストファクタ」を説明変数として組み込むことを推奨するモデルが少なかったことから、交互作用の検討は「加速度の最大値」と「振動の継続時間」の2つの説明変数とする。

表5-2に示すモデルについて強制投入法による二項ロジスティック回帰分析を行い、切片と係数を推定した。各モデルの偏回帰係数の有意性検定結果を表5-4に示す。表5-4から、「クレストファクタ」を除きその他の説明変数が有意であることがわかる。「加速度の最大値」と「振動の継続時間」の交互作用項の係数を確認すると、すべてのモデルにおいて負であることがわかった。係数が正の場合は、「振動の継続時間」の影響は、「加速度の最大値」に依存し、「加速度の最大値」が大きくなるほど「振動の継続時間」の影響も大きくなる相乗効果があると解釈できる。一方で、負の場合は相乗効果と相殺効果のいずれか、若しくは両方がある場合があり、係数からだけでは交互作用の解釈ができない。

$$\log\left(\frac{\pi}{1-\pi}\right) = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_1x_2 \quad (5.2)$$

x_1 : 加速度の最大値 [cm/s²]

x_2 : 振動の継続時間 [s]

x_3 : クレストファクタ

β_0 : 切片

β_1 : 加速度の最大値の偏回帰係数

β_2 : 振動の継続時間の偏回帰係数

β_3 : クレストファクタの偏回帰係数

β_4 : 加速度の最大値と振動の継続時間の交互作用の偏回帰係数

表 5-4 各モデルにおける偏回帰係数の有意性検定の結果

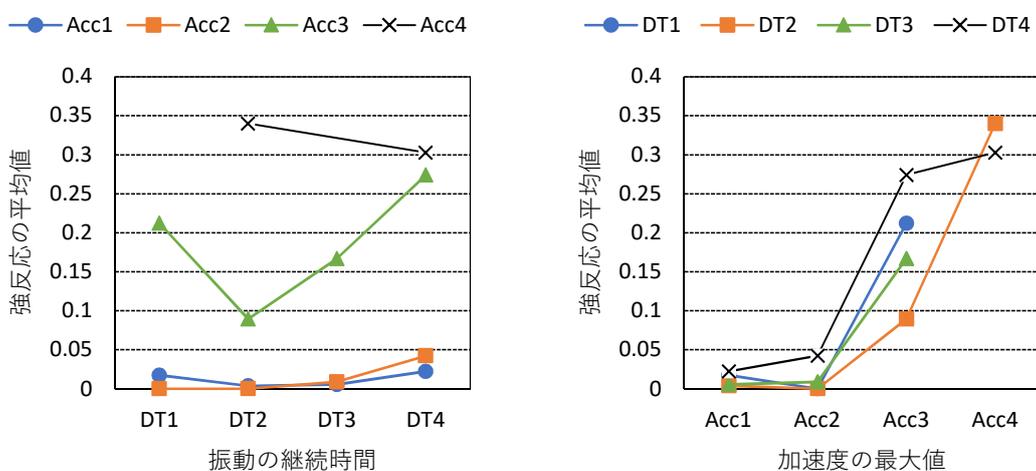
		A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
振動の大きさ	β_1 加速度の最大値	**	**	**	**	**	**	**	**
	β_2 振動の継続時間	*	**	**	**	**	**	**	**
	β_3 クレストファクタ	N.S.							
	β_4 交互作用項	**	**	*	**	**	**	**	**
気になり具合	β_1 加速度の最大値	**	**	**	**	**	**	**	**
	β_2 振動の継続時間	**	**	**	**	**	**	**	**
	β_3 クレストファクタ	N.S.							
	β_4 交互作用項	**	**	**	**	*	**	**	**
不快感	β_1 加速度の最大値	**	**	**	**	**	**	**	**
	β_2 振動の継続時間	**	**	**	**	**	**	**	**
	β_3 クレストファクタ	N.S.							
	β_4 交互作用項	**	**	**	**	*	**	**	**

N.S. : 非有意, * : $P < 0.05$, ** : $P < 0.01$

そこで、モデル A1 の場合の「加速度の最大値」と「振動の継続時間」の計測値を表 5-5 に示す水準に分けて強反応の平均値を求め、「加速度の最大値」と「振動の継続時間」の交互作用の確認をする。代表として、「不快感」の結果を図 5-2 に示す。図 5-2 の(a)及び(b) は同じデータについて、グラフの横軸を「加速度の最大値」と「振動の継続時間」の水準としたものである。図 5-2 (a)をみると、「振動の継続時間」が同じ水準の場合、「加速度の最大値」の値が大きい水準になるほど、強反応の平均値が大きくなっていることがわかる。傾きに注目すると、「加速度の最大値」の水準によってそれぞれ異なっているが、大局的には Acc1, Acc2 及び Acc3 では正の傾き、Acc4 では負の傾きであることがわかる。また、Acc3 の傾きが他の水準と大きく異なっている。また、図 5-2 (b)の「加速度の最大値」の水準が Acc3 の場合の強反応の平均値をみると、DT4, DT1, DT3, DT2 の順となっており、「振動の継続時間」の規則性が認められない。以上のことから、「加速度の最大値」と「振動の継続時間」の2つの変数間に明確な交互作用を確認することができない。本研究では、心理的反応に対する「加速度の最大値」、「振動の継続時間」及び「クレストファクタ」の定性的な影響を把握することを目的とすることから、次節以降、交互作用項を含めない主効果のみのモデルで検討を進める。交互作用については、今後の課題とする。

表 5-5 交互作用の確認時の各変数の水準

加速度の最大値	MTVV[cm/s ²]	振動の継続時間	TL4 [s]
Acc1	1.0 未満	DT1	1.0 未満
Acc2	1.0 以上, 1.4 未満	DT2	1 以上, 1.4 未満
Acc3	1.4 以上, 2.8 未満	DT3	1.4 以上, 1.73 未満
Acc4	2.8 以上	DT4	1.73 以上



(a) 横軸「振動の継続時間」

(b) 横軸「加速度の最大値」

図 5-2 “不快感”の交互作用の確認

5.6 偏回帰係数及び切片の推定

5.6.1 各モデルの説明変数の有意性の確認

前節の検討結果から交互作用項を含めない回帰モデルの偏回帰係数及び切片の推定し、各説明変数の有意性検定の結果の一覧を表 5-6 に示す。なお、各モデルの推定結果の詳細は表 5-7～表 5-12 に示す。また、二項ロジスティック回帰モデルの当てはまりの良さを評価するために、ROC（受信者操作特性）曲線下面積（AUC）を求めた。その結果、すべてのモデルにおいて AUC が 0.8 以上であった。AUC は 1 を上限に値が大きいほど回帰モデルの判断力が優れており、AUC に基づく判断力評価指針⁵⁻¹²⁾によると 0.8~0.9 であることは“十分な判断力”を有していることから、交互作用項を含めない回帰モデルが予測精度を十分有していることを確認した。

表 5-6 から、「加速度の最大値」がすべてのモデルにおいて有意であることが確認できる。「振動の継続時間」は、モデル A1 及び A2 を除き、その他のモデルは有意であることがわかる。一方、「クレストファクタ」はモデル C1 及び C2 のみしか有意性を確認することができない。これらのことから、「加速度の最大値」と「振動の継続時間」は、心理的反応へ影響を与える変数として考えることができる。また、「クレストファクタ」の有意性を確認することができないことから、波形の形を表す「クレストファクタ」は心理的反応を評価する上での影響は小さいことが示唆された。

表 5-6 各モデルの説明変数の有意性検定の結果

心理的反応	説明変数	A1	A2	B1	B2	C1	C2
振動の大きさ	β_1 加速度の最大値	**	**	**	**	**	**
	β_2 振動の継続時間	N.S.	N.S.	**	**	**	**
	β_3 クレストファクタ	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
気になり具合	β_1 加速度の最大値	**	**	**	**	**	**
	β_2 振動の継続時間	*	*	**	**	**	**
	β_3 クレストファクタ	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
不快感	β_1 加速度の最大値	**	**	**	**	**	**
	β_2 振動の継続時間	*	**	**	**	**	**
	β_3 クレストファクタ	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	*	*

N.S.: 非有意, *: P<0.05, **: P<0.01

表 5-7 偏回帰係数及び切片の推定結果 (モデル A1)

		非標準化推定値	標準誤差	オッズ比	95%CI	P値
振動の大きさ	$\beta 0$	-4.333	0.862	0.013	[0.0024, 0.0711]	0.000 **
	$\beta 1$ MTVV	1.349	0.093	3.852	[3.2177, 4.6332]	0.000 **
	$\beta 2$ TL4	0.222	0.378	1.248	[0.594, 2.619]	0.558
	$\beta 3$ CF	-0.086	0.059	0.918	[0.813, 1.0268]	0.148
気になり具合	$\beta 0$	-5.272	0.822	0.005	[0.001, 0.0256]	0.000 **
	$\beta 1$ MTVV	1.192	0.088	3.292	[2.7728, 3.9216]	0.000 **
	$\beta 2$ TL4	0.772	0.364	2.163	[1.0607, 4.43]	0.034 *
	$\beta 3$ CF	-0.007	0.054	0.993	[0.8903, 1.1007]	0.895
不快感	$\beta 0$	-5.898	0.926	0.003	[0.0004, 0.0167]	0.000 **
	$\beta 1$ MTVV	1.079	0.097	2.940	[2.4339, 3.5591]	0.000 **
	$\beta 2$ TL4	0.971	0.406	2.640	[1.1976, 5.8993]	0.017 *
	$\beta 3$ CF	0.007	0.062	1.007	[0.8868, 1.1332]	0.912

* : P<0.05 , ** : P<0.01

表 5-8 偏回帰係数及び切片の推定結果 (モデル A2)

		非標準化推定値	標準誤差	オッズ比	95%CI	P値
振動の大きさ	$\beta 0$	-4.311	0.533	0.013	[0.0047, 0.0383]	0.000 **
	$\beta 1$ MTVV	1.331	0.092	3.785	[3.1667, 4.5451]	0.000 **
	$\beta 2$ TL2	0.104	0.105	1.109	[0.9025, 1.3616]	0.323
	$\beta 3$ CF	-0.073	0.054	0.930	[0.8316, 1.0298]	0.180
気になり具合	$\beta 0$	-4.666	0.502	0.009	[0.0035, 0.0251]	0.000 **
	$\beta 1$ MTVV	1.182	0.088	3.261	[2.7511, 3.8787]	0.000 **
	$\beta 2$ TL2	0.242	0.101	1.274	[1.0457, 1.5525]	0.016 *
	$\beta 3$ CF	-0.009	0.049	0.991	[0.8971, 1.0878]	0.855
不快感	$\beta 0$	-5.146	0.571	0.006	[0.0019, 0.0178]	0.000 **
	$\beta 1$ MTVV	1.067	0.096	2.907	[2.4119, 3.5119]	0.000 **
	$\beta 2$ TL2	0.305	0.112	1.357	[1.0902, 1.6926]	0.006 **
	$\beta 3$ CF	0.006	0.057	1.006	[0.8953, 1.1191]	0.917

* : P<0.05 , ** : P<0.01

表 5-9 偏回帰係数及び切片の推定結果 (モデル B1)

		非標準化推定値	標準誤差	オッズ比	95%CI	P値
振動の大きさ	$\beta 0$	-5.830	0.854	0.003	[0.0005, 0.0156]	0.000 **
	$\beta 1$ AIJES	0.641	0.047	1.898	[1.7328, 2.0857]	0.000 **
	$\beta 2$ TL4	1.044	0.363	2.841	[1.3941, 5.804]	0.004 **
	$\beta 3$ CF	-0.040	0.061	0.960	[0.8496, 1.0776]	0.505
気になり具合	$\beta 0$	-6.558	0.820	0.001	[0.0003, 0.007]	0.000 **
	$\beta 1$ AIJES	0.583	0.045	1.792	[1.6428, 1.9591]	0.000 **
	$\beta 2$ TL4	1.453	0.352	4.274	[2.1478, 8.5528]	0.000 **
	$\beta 3$ CF	0.028	0.056	1.028	[0.9189, 1.1436]	0.618
不快感	$\beta 0$	-7.043	0.923	0.001	[0.0001, 0.0053]	0.000 **
	$\beta 1$ AIJES	0.556	0.050	1.744	[1.5825, 1.9251]	0.000 **
	$\beta 2$ TL4	1.539	0.390	4.660	[2.1813, 10.0897]	0.000 **
	$\beta 3$ CF	0.028	0.064	1.028	[0.902, 1.1615]	0.668

* : P<0.05 , ** : P<0.01

表 5-10 偏回帰係数及び切片の推定結果 (モデル B2)

		非標準化推定値	標準誤差	オッズ比	95%CI	P値
振動の大きさ	$\beta 0$	-4.962	0.528	0.007	[0.0025, 0.0196]	0.000 **
	$\beta 1$ AIJES	0.638	0.047	1.892	[1.7287, 2.0764]	0.000 **
	$\beta 2$ TL2	0.313	0.099	1.368	[1.1267, 1.6611]	0.002 **
	$\beta 3$ CF	-0.046	0.055	0.955	[0.8535, 1.0606]	0.410
気になり具合	$\beta 0$	-5.237	0.502	0.005	[0.002, 0.0141]	0.000 **
	$\beta 1$ AIJES	0.584	0.044	1.792	[1.645, 1.9576]	0.000 **
	$\beta 2$ TL2	0.413	0.096	1.511	[1.2528, 1.8234]	0.000 **
	$\beta 3$ CF	0.010	0.051	1.010	[0.9112, 1.1114]	0.848
不快感	$\beta 0$	-5.696	0.572	0.003	[0.0011, 0.0103]	0.000 **
	$\beta 1$ AIJES	0.555	0.049	1.742	[1.583, 1.9207]	0.000 **
	$\beta 2$ TL2	0.446	0.106	1.562	[1.271, 1.9234]	0.000 **
	$\beta 3$ CF	0.014	0.058	1.014	[0.8991, 1.1317]	0.817

* : P<0.05 , ** : P<0.01

表 5-11 偏回帰係数及び切片の推定結果 (モデル C1)

		非標準化推定値	標準誤差	オッズ比	95%CI	P値
振動の大きさ	$\beta 0$	-7.288	0.644	0.001	[0.0002, 0.0023]	0.000 **
	$\beta 1$ Lvmax	0.705	0.079	2.023	[1.7355, 2.3634]	0.000 **
	$\beta 2$ TL4	2.008	0.320	7.452	[4.0556, 14.2126]	0.000 **
	$\beta 3$ CF	0.078	0.043	1.081	[0.9917, 1.1738]	0.069
気になり具合	$\beta 0$	-6.886	0.589	0.001	[0.0003, 0.0031]	0.000 **
	$\beta 1$ Lvmax	0.618	0.076	1.856	[1.6013, 2.1546]	0.000 **
	$\beta 2$ TL4	1.988	0.300	7.299	[4.1294, 13.3863]	0.000 **
	$\beta 3$ CF	0.083	0.040	1.086	[1.0029, 1.1731]	0.038 *
不快感	$\beta 0$	-7.635	0.693	0.000	[0.0001, 0.0018]	0.000 **
	$\beta 1$ Lvmax	0.535	0.083	1.707	[1.4503, 2.0102]	0.000 **
	$\beta 2$ TL4	2.238	0.342	9.377	[4.8893, 18.6688]	0.000 **
	$\beta 3$ CF	0.106	0.046	1.112	[1.0131, 1.2135]	0.021 *

* : P<0.05 , ** : P<0.01

表 5-12 偏回帰係数及び切片の推定結果 (モデル C2)

		非標準化推定値	標準誤差	オッズ比	95%CI	P値
振動の大きさ	$\beta 0$	-5.581	0.394	0.004	[0.0017, 0.008]	0.000 **
	$\beta 1$ Lvmax	0.776	0.077	2.173	[1.8717, 2.5276]	0.000 **
	$\beta 2$ TL2	0.535	0.088	1.708	[1.4388, 2.035]	0.000 **
	$\beta 3$ CF	0.051	0.041	1.052	[0.9684, 1.1367]	0.212
気になり具合	$\beta 0$	-5.396	0.367	0.005	[0.0022, 0.0092]	0.000 **
	$\beta 1$ Lvmax	0.670	0.074	1.954	[1.6925, 2.2603]	0.000 **
	$\beta 2$ TL2	0.588	0.086	1.800	[1.5245, 2.1351]	0.000 **
	$\beta 3$ CF	0.071	0.038	1.073	[0.9943, 1.1537]	0.061
不快感	$\beta 0$	-5.892	0.424	0.003	[0.0012, 0.0062]	0.000 **
	$\beta 1$ Lvmax	0.588	0.081	1.800	[1.537, 2.1098]	0.000 **
	$\beta 2$ TL2	0.647	0.093	1.910	[1.595, 2.2963]	0.000 **
	$\beta 3$ CF	0.091	0.043	1.095	[1.0031, 1.1877]	0.034 *

* : P<0.05 , ** : P<0.01

5.6.2 各モデルの説明変数のオッズ比の比較

各モデルの推定結果を示す表 5-7～表 5-12 から、各モデルのオッズ比を比較したものを図 5-3 及び表 5-13 に示す。各説明変数が目的変数である強反応に与える影響の程度を把握する。

図 5-3 及び表 5-13 から、「加速度の最大値」と「振動の継続時間」のオッズ比は、すべて1倍以上であることから、「加速度の最大値」と「振動の継続時間」が1増加することによって強反応となるオッズが増加前のこれらの倍率で高くなることを示している。一方で、「クレストファクタ」はすべてのモデルにおいて約1倍であることから、「クレストファクタ」の変化は強反応にほとんど影響を与えないことがオッズ比からも確認できる。

「加速度の最大値」を1秒間の移動加速度平均値の最大値である $MTVV$ 、「振動の継続時間」を W_d 補正加速度が 0.00504 m/s^2 以上となる合計時間の $1/4$ 乗としたモデル A1 を例にオッズ比を相対的に比較する。「加速度の最大値」のオッズ比は、“振動の大きさ”では約 3.9 倍，“気になり具合”では約 3.3 倍，“不快感”では約 2.9 倍に対して、「振動の継続時間」は順に約 1.2 倍，約 2.1 倍，約 2.6 倍となっている。“振動の大きさ”に対して“気になり具合”や“不快感”では、相対的に「振動の継続時間」の影響が大きい傾向が確認できる。

「振動の継続時間」の時間の考慮を $1/2$ 乗としたモデル A2 では、「加速度の最大値」のオッズ比ではモデル A1 と同様な結果を示すが、「振動の継続時間」は約 1.1 倍，約 1.3 倍，約 1.4 倍となっており，モデル A1 と比べて「振動の継続時間」の影響が小さい傾向が確認できる。

このような傾向が，オッズ比の絶対値が異なるものの，モデル B や C においても確認することができる。

以上のことから、「加速度の最大値」と「振動の継続時間」の増加は強反応のオッズが高くなる方へ影響することがわかった。とりわけ、「振動の継続時間」の影響は，“振動の大きさ”と比べて“気になり具合”と“不快感”において大きく，さらに $1/2$ 乗よりも $1/4$ 乗の方が大きい影響を示すことがわかった。

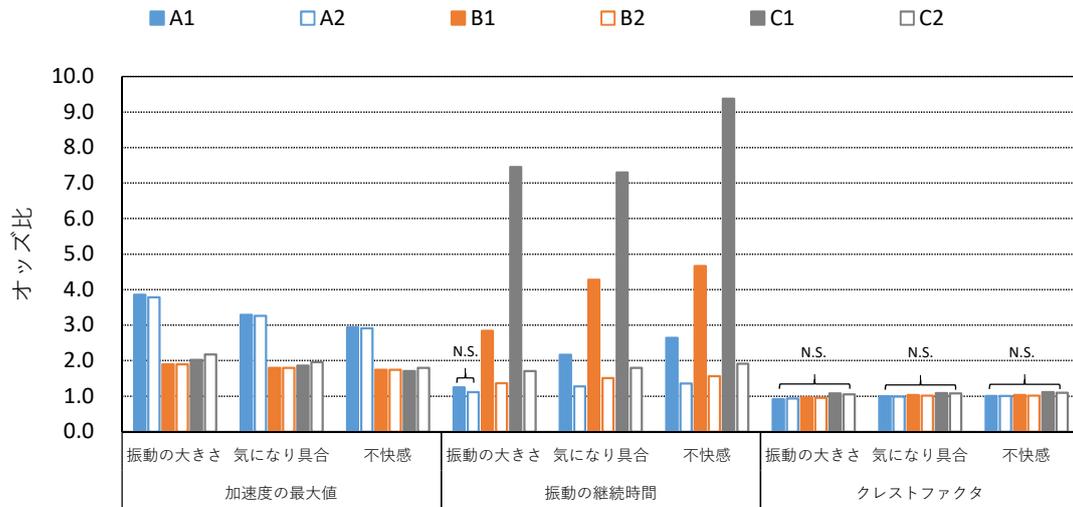


図 5-3 各モデルのオッズ比の比較

表 5-13 各モデルのオッズ比の一覧

	A1	A2	B1	B2	C1	C2	
加速度の最大値	振動の大きさ	3.852	3.785	1.898	1.892	2.023	2.173
	気になり具合	3.292	3.261	1.792	1.792	1.856	1.954
	不快感	2.940	2.907	1.744	1.742	1.707	1.800
振動の継続時間	振動の大きさ	1.248	1.109	2.841	1.368	7.452	1.708
	気になり具合	2.163	1.274	4.274	1.511	7.299	1.800
	不快感	2.640	1.357	4.660	1.562	9.377	1.910
クレストファクタ	振動の大きさ	0.918	0.930	0.960	0.955	1.081	1.052
	気になり具合	0.993	0.991	1.028	1.010	1.086	1.073
	不快感	1.007	1.006	1.028	1.014	1.112	1.095

5.7 まとめ

本章では、「加速度の最大値」、「振動の継続時間」、「クレストファクタ」の組み合わせによるモデルに二項ロジスティック回帰分析を行い、7段階の心理的反応のうち上位3カテゴリーを強反応とした目的変数に対する各説明変数の影響の大きさを把握し、以下の結論を得た。

- 1) 心理的反応の評価に対する説明変数のなかで「加速度の最大値」と「振動の継続時間」は有意な変数であり、これらの変数の増加は強反応のオッズを高くすることがわかった。
- 2) 一方で、「クレストファクタ」は、有意となるモデルが少なく、オッズ比も約1倍であることから、強反応への影響が小さいことがわかった。
- 3) 「振動の継続時間」の影響は、“振動の大きさ”と比べて“気になり具合”と“不快感”において相対的に大きい傾向が認められた。
- 4) さらに、「振動の継続時間」は1/2乗と比べて1/4乗の方が大きい影響を示す傾向を確認できた。
- 5) 回帰モデルの判断力を評価するAUCの値が0.8以上であったことから、上記の結論は妥当なものと判断できる。

第4章では本研究で検討した評価方法のなかで最も心理的反応と対応の良い評価方法はVDVであるとの結論に至った。本章では心理的反応に影響を与える説明変数の影響の検討を、二項ロジスティック回帰分析によって行った。その結果、心理的反応の評価において、「加速度の最大値」と「振動の継続時間」が影響の大きい変数であることがわかった。また、「振動の継続時間」を1/4乗で考慮する方が1/2乗よりも心理的反応への影響が大きいことがわかった。さらに、強反応を評価する上では、「クレストファクタ」の影響は小さい傾向が明らかになった。これらのことから、VDVは振動加速度の時間積分により振動の継続時間の1/4乗が考慮され、“振動の大きさ”、“気になり具合”及び“不快感”の評価値として適切であることを裏付ける結果を確認できた。

今回の検討では、「加速度の最大値」と「振動の継続時間」の交互作用を含まない回帰モデルでの結果である。交互作用の影響については、今後の課題とする。

参考文献

- 5 -1) ISO 10137 : Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations,2007
- 5 -2) 川端一光, 岩間徳兼, 鈴木雅之: Rによる多変量解析入門 データ分析の実践と理論, オーム社, 2018.7
- 5 -3) 栗原伸一: 入門 統計学-検定から多変量解析・実験計画法まで一, オーム社, 2011.7
- 5 -4) ISO 2631-1: Mechanical Vibration and Shock – Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration – Part 1: General Requirements. International Standard, 1997
- 5 -5) 日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説, 2004.5
- 5 -6) 日本工業規格: JIS C 1510 振動レベル計, 1995
- 5 -7) 日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能評価規準・同解説, 2018.11
- 5 -8) 松下仁士, 横山裕: 床振動の被暴露経験が許容可否判断に与える影響に関する基礎的実験, 日本建築学会環境系論文集, 第 82 巻, 第 732 号, pp.105-111, 2017.2
- 5 -9) 山添直人, 小山雄平, 福田眞太郎, 横山裕: 水へ方向の交通振動の居住性からみた評価方法に関する基礎的研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 84 巻, 第 758 号, pp.367-376, 2019.4
- 5 -10) 日本騒音制御工学会: 振動規制法の手引き—振動規制法逐条解説/関連法令・資料集一, 2003.5
- 5 -11) 粕谷英一: R で学ぶデータサイエンス 10 一般化線形モデル, 共立出版社, p.127, 2012
- 5 -12) David G. Kleinbaum, Mitchel Klein (著), 神田 英一郎 (監訳): 初心者のためのロジスティック回帰分析入門, 丸善出版, pp.301-303, 2012

第 6 章

結論

第6章 結論

6.1 本研究の結論

本研究は道路交通振動などの外部振動源による建物水平振動を戸建て住宅や小規模な集合住宅を対象として、居住性に対する心理的反応に基づく評価方法を提示したものである。本研究で得られた各章のまとめを整理し、結論を述べる。

第2章では、加振台を用いた主観評価実験によって、心理的反応と国内外の環境振動の評価方法との対応関係を検討した結果、得られた結論を以下に示す。

- 1) 心理的反応に対する振動の継続時間の影響を検討するために、正弦振動のみの評価値のみで心理的反応との対応を確認したところ、最大値評価よりも振動の継続時間を考慮する評価値の方が良い対応を示すことがわかった。
- 2) 正弦振動に加えて実振動も含めた検討では、1)の結果と同様に振動の継続時間を考慮する評価値が心理的反応との対応が良いことがわかった。“振動の大きさ”では、振動の継続時間を1/4乗で考慮するVDVが最も対応が良かった。“不快感”では、VDVと振動の継続時間を1/2乗で考慮する VDV_{square} の対応が良かった。
- 3) “振動の大きさ”と“不快感”の異なる心理的反応に対して、実用的に同一の評価を採用することを考えると、VDVが最も適切である。
- 4) 以上の結論から、第2章で検討した入力刺激と国内外の環境振動の評価方法では、振動の継続時間を1/4乗で考慮するVDVが適当な評価方法であることを明らかにした。

第3章では建物内の振動に対する居住性に関する心理学的尺度の構成を目的に、インターネットを利用してアンケート調査を全国的に実施した。そして、アンケート調査による概念的な尺度と人が振動刺激から受ける感覚が対応していることを確認するために調整法を用いた加振台実験を行った結果、得られた結論を以下に示す。

- 5) 本研究で用いた3種類の心理的反応に関する23種類の程度の表現語の強さの順に大きな違いは認められなかった。特に、“気になり具合”と“不快感”は、程度の強さも同様な傾向が認められた。
- 6) 程度の表現語の強さの等間隔性、選択性の基準を満たす、5段階及び7段階の心理学的尺度を構成することができた。
- 7) 年代や地域など回答者の属性の違いにより、表現語が表す心理的強さに統計的な有意差が認められたものの、程度の表現語の強さの等間隔性を損なわせるほどの差は認められなかった。このことから、様々な人の利用に一定の整合性を有する心理的反応が得られる心理学的尺度であることを示した。

第6章 結論

- 8) アンケート調査による振動感覚に対する概念的な程度の強さと、加振台実験による振動刺激から受ける感覚の対応関係が確認できた。
- 9) 振動の心理的反応と物理量に対数法則があることが示唆された。

第4章では、第2章で課題とした実際の建物内で計測した振動波形を中心に正弦振動を加えた76パターンを入力刺激と、第3章で構成した心理学的尺度を用いた加振台実験IIを行い得られた結論を以下に示す。

- 10) 5段階と7段階の評定尺度を用いた予備実験結果から、評定尺度のカテゴリー数が“振動の大きさ”、“気になり具合”、“不快感”に対する主観的評価への影響は小さいことがわかった。
- 11) 7段階の評定尺度を用いた本実験結果から、評定尺度に付された数値の扱いを検討した結果、そのまま間隔尺度として扱えることが明らかになった。このことから、3章で構成した評定尺度は、直接的な振動刺激においても等間隔性を有するものと判断できる。
- 12) ISOの W_d と W_m によるVDVと心理的反応との対応を比較し、周波数重み付け特性が評価値と心理的反応との対応関係に与える影響について検討した結果、どちらも“振動の大きさ”、“気になり具合”、“不快感”の心理的反応を評価できる周波数重み付け特性であることが明らかになった。
- 13) 本研究で検討した評価値では、振動の大きさ”、“気になり具合”、“不快感”を1つの評価値で評価すると考えた場合、1/4乗で振動の継続時間を考慮するVDVが“最も適切な評価値である。
- 14) 既報の研究で検討されている振動レベルの最大値に振動の継続時間を1/4乗で加味する評価値VLTを検討した結果、VLTが振動レベルの最大値による評価と比べてわずかであるが心理的反応との対応が良いことを確認した。

第5章では、第4章の加振台実験IIによって、環境振動の居住性に関する心理的反応に対する対応の良い評価値が、振動の継続時間を1/4乗で考慮するVDVであることを、評価値と心理的反応の対応関係を相関係数の比較から明らかにしたが、振動の継続時間が心理的反応に対してどの程度の影響をしているかは不明であったことから、二項ロジスティック回帰分析を行い、「加速度の最大値」,「振動の継続時間」,「クレストファクタ」の心理的反応の評価に対する影響の大きさを把握し、以下の結論を得た。

- 15) 心理的反応の評価に対する説明変数のなかで「加速度の最大値」と「振動の継続時間」は有意な変数であり、これらの変数の増加は強反応のオッズを高くすることがわかった。

- 16) 一方で、「クレストファクタ」は、有意となるモデルが少なく、オッズ比も約1倍であることから、強反応への影響が小さいことがわかった。
- 17) 「振動の継続時間」の影響は、“振動の大きさ”と比べて“気になり具合”と“不快感”において相対的に大きい傾向が認められた。
- 18) さらに、「振動の継続時間」は1/2乗と比べて1/4乗の方が大きい影響を示す傾向を確認できた。
- 19) 回帰モデルの判断力を評価するAUCの値が0.8以上であったことから、上記の結論は妥当なものだと判断できる。

以上により、振動の継続時間を1/4乗で考慮する評価値であるVDV、そして5段及び7段階の心理学的評定尺度は、道路交通や鉄道などの外部振動源による建物内における水平振動に関する居住性能の評価に用いることができると考えられる。また、これらは環境振動に対する性能設計に資するデータの収集に貢献できるものとする。

6.2 今後の課題

本研究に関する今後の課題を以下に示す。

1) 測定環境による心理的反応の違い

本研究は、実験室における加振装置を用いた実験的検討による知見に基づいている。実際の居住空間における振動暴露に対する心理的反応を測定した際に、実験室の結果とどの程度の乖離が生じるかを把握する必要がある。

2) 直交3成分の振動の評価

1)に加えて、実際の建物内の居住空間における振動は、当然のことながら直交3成分の振動が含まれている。本研究の知見は、1方向の水平振動の入力刺激による検討に基づいていることから、今後、直交3成分の振動に対する評価方法の検討が必要である。

3) 建物用途別の評価規準の確立

建物振動に対する心理的反応は、建物用途によって異なる可能性がある。日本建築学会の居住性能評価規準の鉛直振動の評価では、住居と事務所の床で性能評価を分けて規定している。1), 2)に加えて、建物用途別の振動性能評価の確立が必要である。

4) 長時間の振動評価

本研究では、振動の評価対象とする時間を最長で約40秒とした1つの入力刺激に対する心理的反応による知見に基づく評価方法であることから、連続的若しくは間欠的な複数の入力刺激による40秒を超える振動に対する心理的反応への適用性は不明である。また、加速度振幅の大きさと振動の継続時間の交互作用の影響についての検討も必要である。

5) 振動評価に対する騒音の影響

振動苦情の現場で振動を評価したときに人の振動知覚閾値を下回っていることが少なくない。このような場合、騒音暴露をきっかけに振動を感じていると訴えることがある。振動評価に対する騒音暴露の影響に関する検討が必要である。

謝辞

本論文は、埼玉大学大学院理工学研究科理工学専攻環境科学・社会基盤コースの博士後期課程において行った研究の成果をまとめたものです。

埼玉大学大学院理工学研究科環境科学・社会基盤部門教授 松本泰尚先生には、博士後期課程に在籍以前から学会の委員会活動等を通じて環境振動に関する課題に対して数々のご助言を頂いておりました。漠然とした研究テーマしか持ち合わせていなかった筆者の主旨指導教員を快く引き受けて頂き、本論文を取り組む貴重な機会を与えて頂きました。博士後期課程在籍の4年間は、研究の組み立て方、仮説の検証、結論までの構成など、細部にわたり懇切丁寧なご指導、ご教授を頂きました。社会人である筆者が実務に追われ研究が計画どおりに進まない時期は、筆者の業務や家族への心遣いを賜り、ご多忙のなか筆者の都合に合わせてご指導を頂きました。研究を通じて一人の社会人としても多くのことを学ばせて頂き、実りある充実した4年間で過ごすことが出来ました。ここに深謝の意を表します。

本論文の審査では、埼玉大学大学院理工学研究科環境科学・社会基盤部門教授 奥井義昭先生、同部門教授 齊藤正人先生、同部門准教授 小嶋文先生には、真摯なご指導とご指摘を頂きました。また、神奈川県環境科学センター 横島潤紀博士には、第5章の取りまとめでは最後まで貴重なご助言とご指導を頂きました。ここに深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、積水ハウス株式会社総合住宅研究所 東田豊彦博士には、実際の建物内での振動計測の機会の提供や実務的な観点からのご助言、終始暖かい励ましを頂きました。心より感謝いたします。

第2章の加振台実験のデータは、株式会社J R東日本建築設計 嘉納裕人氏の埼玉大学工学部建設工学科在籍時の実験データに基づいております。ここに感謝の意を表します。

埼玉大学大学院理工学研究科環境科学・社会基盤部門助教 党紀先生には、建設構造工学研究室の研究発表などを通して、日頃からご助言とご教授を頂きました。心から感謝申し上げます。

筆者の環境振動分野の研究の基礎は、恩師である元愛知工業大学工学部建築学科教授 成瀬治興先生のご指導によるものです。深く感謝申し上げます。

愛知工業大学工学部建築学科教授 佐野泰之先生には、学生時代から四半世紀にわたり様々な関りを持たせて頂き、コンサルタントとして日頃の実務の中で探求心を持ち続けることの重要性など多くのご助言を頂きました。心から感謝申し上げます。

筆者が所属する株式会社ベネック振動音響研究所 神谷俊行氏、廣田哲也氏には、研究活動のため筆者の不在が多くなった会社を支えて頂き、本研究を遂行へのご理解、ご協力を頂きました。ここに深い感謝の意を表します。

建設構造工学研究室に在籍した学生や秘書の皆様には、社会人である筆者を暖かく迎え入れて頂きました。特に研究テーマを共有した学生方々には加振台実験の準備、実施や計測データの整理など多くのご協力を頂き、深く感謝申し上げます。

本論文は、以上の多くの皆様方のご指導とご支援によって成しえました。ここに記して、深く感謝申し上げます。

最後に、大学院へ進学することを快諾し、4年間の研究活動を支えてくれた家族の協力がなければ、本論文を完成することは出来ませんでした。ここに深謝の意を表します。

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費 JP18H01518 の助成を受けたものです。

2020年3月

林 健太郎