

可搬型振動体感装置の開発と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

Development of Portable Shaking Table and Evaluation Index Based on Vibration Level in Consideration of Duration

井上 竜太 Ryouta Inoue*¹

吉岡 宏和 Hirokazu Yoshioka*²

梗概

設備機器や、エアロビクス、コンサートの人の動作により発生する振動は、継続時間が長いという特徴を有している。一方、学会指針等の規基準では、加速度、振動数の2要素での評価が主であり、継続時間の影響については考慮されていない。本報では、まず、振動数および体感者の体重差に関係なく所定の振動を発生させることができる、小型かつ軽量で可搬性のある振動体感装置の開発について述べる。次に、同装置を用いた官能検査により振動の継続時間が評価に及ぼす影響を定量的に把握した経過、結果について述べる。

キーワード：可搬性、振動台、心理学的尺度、振動レベル、時定数、継続時間

Summary

The evaluation method of floor vibration in consideration of duration time has not been established. Firstly, we have developed the portable shaking table that can cause a variety of vibration. Secondly, the psychological scale is constructed by the sensory test using the shaking table. Finally, the evaluation index is presented based on the relationship between the psychological scale and the frequency, amplitude and duration of the sample vibration. As the result, the human evaluation on the continuous vibration is influenced by not only the maximum amplitude but also the duration of the vibration.

Keywords: portable, shaking table, psychological scale, vibration level, time constant, duration

1 はじめに

居住性、快適性の観点において、建築物で日常的に発生する振動“環境振動”は、重要な性能の一つである。環境振動は、人間、設備機器、道路交通、鉄道、建設工事、風などを振動源としており、これら振動源の種類や、建築物、伝搬経路などの条件によって、振幅、振動数、継続時間などの特性が種々異なる振動が発生する。特に、設備機器や、エアロビクス、コンサートなどの人間の動作により発生する振動は、継続時間が長くなる特徴があるが、人間の歩行などでも、減衰が小さい床では数歩分の振動が繋がった連続的な振動が発生し、継続時間が長くなる場合がある。このような振動は、短時間ではほとんど問題とはならない程度の振幅であっても、苦情などが発生することが報告されている¹⁾。しかし、このような振動の評価方法は未だ確立されているとはいえず、正弦振動を対象とした研究成果に基づき設定された振幅、振動数の二つの要素からなる評価指標を、十分な検討なしに適用しているのが現状である。

その一例として、国内における振動評価の拠り所となる日本建築学会「建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説」²⁾が挙げられる。同指針では、継続時間70秒の正弦波を被験者に体感させた時の実験結果から求めた被験者の知覚確率を基に評価曲線が設定されており、V-○という評価値を“○%の人が感じるレベル”と定義している。しかしながら、実験条件が指針中に示されていないため、“継続時間70秒の正弦波”という条件に辿り着くためには、参考文献の研究報告³⁾を紐解かなければならない状況となっている。このため、建築物の建築主、エンドユーザーはもちろんのこと、性能を設定する役割を担っている設計者に至っても、そのほとんどが居住性能評価に及ぼす継

*1 技術研究所 研究主任 博士(工学) Associate Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

*2 技術研究所 主任研究員 博士(工学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

続時間の影響を考慮することなく、V-○という評価値を使用しているのが実情である。

このような現状を鑑み、筆者らは、振動台を用いた実験的検討を行い、継続時間が振動を感じる、感じないといった感覚に与える影響よりも、不快度合などの評価に与える影響の方が大きいことなどを明らかにしてきた⁴⁾。しかし、検討に用いた振動台は、被験者に知覚される程度の動作音が発生するものであったため、実際の居住空間を想定した官能検査の実施には、被験者に動作音を知覚されず静穏に動作する振動台が必要であった。一方、振動台は、建築主に振動を体感させるなど、検査以外の目的で振動台を用いる機会も少なくない。しかし、従来の振動台は据置き型で移動することができず、体感者に振動台のある場所まで来てもらわなければならないという問題があった。これらの問題を解決し、動作音が小さく、気軽にどこでも振動を体感することができる小型、軽量で運搬可能な振動台を新たに開発することとした。

本報では、まず、新たに開発した振動体感装置の概要について述べる。次に、RC造、S造建築物の床などにおいて発生する周期的な振動、あるいは連続的な振動を対象に、同装置を用いた官能検査により振動の継続時間が評価に及ぼす影響を定量的に把握した経過、結果について述べる。

2 既往の研究

人間の動作により発生する床振動を対象に、人間の感覚、評価との関係を検討した最初の研究例として、小野ら^{5)~9)}の体育館の床の弾力性に関する研究が挙げられる。小野らは、床の弾力性に関する運動競技者の判断に影響する要因の1つとして振動の続き具合を抽出するとともに、跳躍着地時に発生した振動が所定の振幅まで減衰するのに要する振動減衰時間で、運動競技者が感じる振動の続き具合を表示できることを明らかにした。小野らの研究は、振幅の時間変化を伴う振動に対する人間の感覚、評価を表示するのに、振動減衰時間、すなわち振動の継続時間の概念を初めて導入した研究と位置付けられる。その後、小野、横山ら^{10)~18)}の歩行など日常的な動作による振動を対象とした研究でも、居住者の感覚、評価を表示するための要因の1つとして振動減衰時間を用いている。

一方、本研究と同様の振動を対象とした研究例として、高橋ら^{19)~21)}の研究が挙げられる。高橋らは、おもに大スパン構造の床を対象に、床構造の減衰性能と歩行により発生する振動、および居住者の感覚、評価との関係に関する検討を行い、以下の事項などを明らかにしている。

- ・床構造の減衰定数の小ささは、歩行のような周期的な衝撃加振に対して、振動の重複・増幅現象を引き起こす。また、歩行時の共振現象は、衝撃振動が重複するモデルにより説明できる。
- ・床構造の減衰定数が小さいほど、より小さい振幅の振動でも知覚できるようになる。この原因として、振動の継続時間が長いことが考えられる。
- ・JIS C 1510に定められた振動レベルは、振動数、エネルギー、継続時間などが感覚、評価に与える影響を考慮しており、感覚、評価と相関の高い物理量である。

このほか、継続時間が十分に長い正弦振動の振動数、振幅と感覚、評価との関係に関する研究は古くから比較的多くなされているが、このうち最新の成果としては石川ら^{3), 22)}の研究が挙げられ、1章で述べた日本建築学会「建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説」の評価曲線の設定にその成果が反映されている。

3 振動体感装置の開発

3.1 装置概要

開発した振動体感装置の全景写真をPhoto 1に示す。振動体感装置は、振動台、アンプ、パーソナルコンピュータで構成される。

振動台の立面図をFig.1に示す。振動台は、テーブル（800mm×800mm）と駆動部からなる。動作音が体感者の振動感覚に影響しないよう、駆動部には動作音がほとんど発生しないリニアモータを使用した。動作方向は鉛直方向と水平1方向の2方向であり、方向ごとに4台ずつ計8台のリニアモータを搭載している。再現可能な振動の範囲は、鉛直方向で、振動数5~20Hz、最大変位振幅50 μ m（0-P）、最大加速度振幅8cm/s²（0-P）

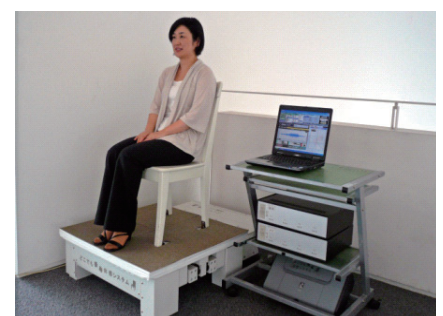


Photo 1 振動体感装置全景
Shaking table

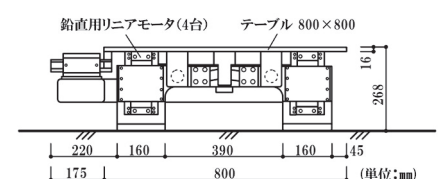


Fig.1 振動体感装置振動台（立面図）
Shaking table (Elevation)

(5Hz)～128cm/s² (0-P) (20Hz) であり、水平方向で、振動数1～5Hz、最大変位振幅2mm (0-P)、最大加速度振幅5cm/s² (0-P) (1Hz) ～125cm/s² (0-P) (5Hz) であり、パーソナルコンピュータのソフトウェアによって動作を制御する。

また、本振動台の最大の特徴は、総質量が270kgで、ハンドリフトなどにより運搬することができる点である。以降、3.2では運搬可能とするために振動台を小型化、軽量化する場合の課題について、3.3では課題を解決するために本振動台に施した工夫について、詳細に述べることにする。

3.2 振動台の小型化、軽量化への課題

小型化、軽量化を目指す中で、最も大きな技術的課題となったのは、振動台に体感者を載せた時に、その体重の違いにより、振動台のテーブルのアクセラランス（単位加振力当たりの揺れやすさ）が異なるため、体重の異なる体感者に同一の振動を体感させるには、体重別に制御出力を調整しなければならない、という点であった。

Fig.2に、防振ゴムなどで質量 M （=100kg）のテーブルを支持した振動台に質量 m の体感者を載せた場合の振動数とアクセラランスの関係を示す。図には、 $m=40\text{kg}$ 、 80kg の2種に加え、体感者が載っていない $m=0\text{kg}$ の状態の曲線も示した。3種の曲線はいずれも同じ形状をしており、その形状は主にA、B、Cの範囲に区分することができる。

範囲Aは、振動台の固有振動数よりも十分に高い振動数領域であり、振動数に関係なくアクセラランスが一定となるため、体感者の体重が変化しないという仮定においては、テーブル上に発生させたい加速度振動波形と同じ形状の電気信号をそのままアクチュエータに入力する、という簡単な制御で所定の振動を発生させることが可能となる。従来の大型振動台としては、体重差の影響を無視できるほどの質量を有しているため、制御のしやすさを重視して、この範囲Aを利用したものが一般的である。

しかし、小型化、軽量化を図る場合には、図示した通り、体感者の体重の違いによってアクセラランスにも差が生じてくる。この範囲では、アクセラランスの値は $(M+m)$ に反比例することから、体感者の体重が $m=40\text{kg}$ の場合に比べ、 $m=80\text{kg}$ の場合では $180\text{kg}/140\text{kg}=1.29$ 倍となり、29%もの差が生じることとなる。この差を制御手段で解決する場合、体感者の体重のセンシング機構を付加し、かつ、複雑な制御が必要となってくる。

範囲Bは、振動台の固有振動数の共振点を含み、振動数に対するアクセラランスの変化が急激な範囲であることから、体感者別に体重差を補正するには、範囲Aよりもより複雑な補正が必要で、振動台の制御に利用するには適していない。

範囲Cは、振動台の固有振動数よりも十分に低い振動数領域で、アクセラランスは振動数に伴い変化する領域となっている。一方、図中の3種の曲線が重なっている領域でもあり、体感者の体重によるアクセラランスの違いが発生しないという特徴を持っている。今回、小型化、軽量化に伴う必然的な問題である体感者の体重差の問題を解決するため、この特徴に注目し範囲Cを用いることとした。

3.3 可搬型振動台の開発

パーソナルコンピュータから振動台への送信信号のソフトウェアに、Fig.2の範囲Cの曲線と逆勾配のフィルタを通す出力信号調整機能を付加することとした。具体的には、振動数が n 倍になるとアクセラランスは n^2 倍になる特性となるため、2階積分フィルタを利用して、振動数が n 倍になると $1/n^2$ 倍にして信号を出力できるようにした。この機能により、テーブルに発生させたい加速度振動波形と同じ形状の電気信号をそのまま出力し、この出力信号調整を介してアクチュエータに入力することで、所定の振動波形を得ることができるようになった。

次に、本振動台で体感できる振動数範囲を設定することとした。体感装置としては、体感できる振動数範囲を可能な限り広く設定することが望ましいと考えられたが、範囲Cを用いる関係上、アクセラランスが小さいほど、同じ加速度を発生させるために必要となるアクチュエータの力は大きくなることは避けられなかった。小型化の観点で、アクチュエータの容量や台数には限界があるため、環境振動で問題となる振動数と加速度振幅の範囲を念頭に置き、振動

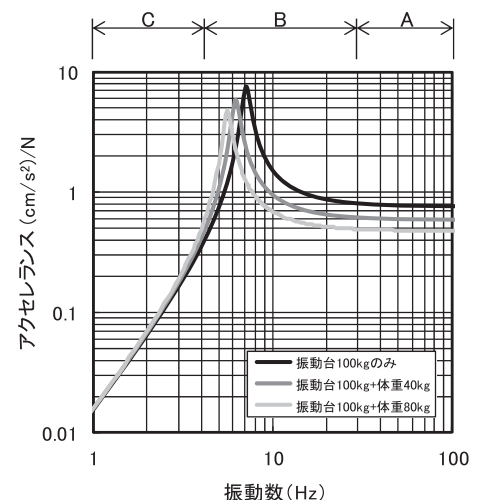


Fig.2 振動数とアクセランスの関係例
Example of relationship
between acceleration and frequency

特性とアクチュエータのバランスを考慮しながら、再現可能な振動の範囲を3.1に示したように、鉛直方向で、振動数5～20Hz、最大加速度振幅 8cm/s^2 (5Hz)～ 128cm/s^2 (20Hz)、水平方向で、振動数1～5Hz、最大加速度振幅 5cm/s^2 (1Hz)～ 125cm/s^2 (5Hz)、と設定した。

最終的な仕様の一例として、鉛直方向の振動数とアクセラランスの関係を図3に示す。振動数範囲として設定した20Hz以下において、3種の曲線がほぼ重なっており、体重差の影響がほぼ無視できることがわかる。なお、テーブルを支持する弾性体には、鉛直方向には防振ゴムを、水平方向には積層ゴムを用いた。

以上の工夫により、振動数および体感者の体重差に関係なく所定の振動を発生させることができる、小型かつ軽量の振動台を実現した。Photo 2の振動台運搬状況を示す。振動台はハンドリフトで運搬できるようになり、トラックでの搬送と併せることで、どこでも振動を体感することができる装置を提供できるようになった。

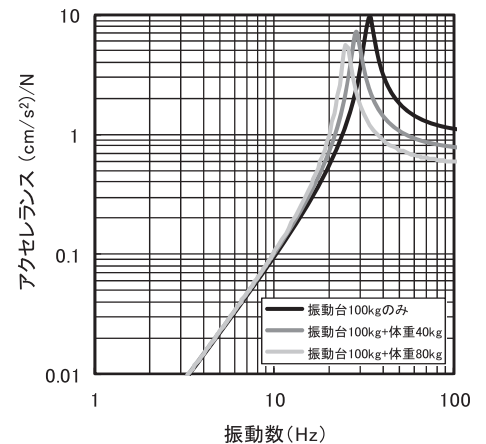


Fig.3 振動数とアクセラランスの関係
(鉛直方向、最終仕様)
Relationship between acceleration and frequency (Vertical, Final specification)

4 床振動に関する官能検査および心理学的尺度の構成

4.1 官能検査概要

官能検査の概要を、Table 1に示す。以下に、主な事項について説明を加える。

4.1.1 構成する尺度および尺度構成手法

構成する尺度は、振動の感覚上の大きさ（認知の度合いやどの程度大きく感じるか）を表す“認知大きさ尺度”と、住居の居室としてどの程度気になるかを表す“気になり具合評価尺度”とした。このうち、気になり具合に関する検査では、検査員に、住居の居室で食事、読書などをしているときを想定して判断するよう指示した。ここで、評価の観点を気になり具合のみとしたのは、気になり具合と他の観点からの評価（差し障り具合、不安感の感じ具合）に関する判断を求めた小野、横山¹²⁾の研究で、これらはいずれも同程度と判断されることが明らかとなっていることによる。

尺度構成手法は、同様の刺激を対象とした小野、横山^{11)～13)}の研究で適用の妥当性が確認されている、系列範ちゅう法²³⁾とした。判断範ちゅうは、Table 1に示す通りである。

4.1.2 検査試料

所定の固有振動数、減衰定数を有する床モデルに、人間が歩行時に床に与える典型的な荷重^{14)～17), 24)}を入力して応答を解析的に求め、この応答を振幅が所定の値となるよう調整したものを検査試料とした。以降、これら歩行により発生する振動を模擬した検査試料を“歩行波”と記す。また、歩行波との比較の目的で、いくつかの正弦波も検査試料に加えた。以下に、具体的事項を記す。

- ・通常のRC造、S造建築物床の範囲をおおむね包含するよう、歩行波設定の際の床の固有振動数は5Hz、7.4Hz、10Hz、12.5Hz、16Hzの5種、減衰定数は1.5%、5%、10%の3種とした。一方、正弦波の振動数は、歩行波の範囲と一致するよう5Hz、10Hz、16Hzの3種とし、検査員に疲労、倦怠を感じさせない検査試料数とする必要上、7.4Hz、



Photo 2 振動台運搬状況
Situations of carrying shaking table

Table 1 官能検査の概要
Outline of the sensory test

構成する尺度	認知大きさ尺度	気になり具合評価尺度
尺度構成手法	系列範ちゅう法	
判断範ちゅう	この床振動は、住居の居室で感じたとしたら、 ⑦非常に大きく感じる ⑥やや大きく感じる ⑤はっきり気付く ④かすかに気付く ③気付くか気付かないかの境界 ②ほとんど気付かない ①全く気付かない	この床振動は、住居の居室で感じたとしたら、 ⑦非常に気になる ⑥・・・・・・・・ ⑤かなり気になる ④・・・・・・・・ ③やや気になる ②・・・・・・・・ ①全く気にならない
検査試料	Table 2に示す113種	
検査員	成人男女21名（性：男19名・女2名、年齢：22～46歳、体重46～94kg）	
姿勢	椅子腰掛位（振動台に固定された椅子に座り足裏を床につけた姿勢）	
履物	くつ下	

12.5Hzは省略した。

- ・振幅は、歩行波、正弦波ともに、気付かない程度から大きく感じられる程度までをできる限り包含するよう、振動数、減衰定数ごとに数段階設定した。
- ・歩行波の歩数は7歩を基本としたが、一部に5歩、3歩、1歩のみの検査試料も設定した。また、7歩中4歩目まで振幅が増加し、以降減少する検査試料も設定した。以降、これらを“歩行波（7歩）”、“歩行波（5歩）”、“歩行波（3歩）”、“歩行波（1歩）”、“歩行波（増減）”と記す。
- ・歩行波の歩調は0.5s（2Hz）を基本としたが、固有振動数5Hzおよび7.4Hzの床では、歩調の倍調波による床の固有振動数での共振現象を再現する目的で、0.6s（1.67Hz=5Hz÷3）および0.54s（1.85Hz=7.4Hz÷4）とした。
- ・正弦波の継続時間は12s、6s、3sの3種とした。また、5sを1周期として振幅が増減する継続時間15s（3周期）のうなり波も設定した。以降、これらを“正弦波（12s）”、“正弦波（6s）”、“正弦波（3s）”、“正弦波（うなり）”と記す。

以上の結果、Table 2に示す通り、歩行波83種、正弦波30種を検査試料として設定した。

Fig.4に、検査試料の例を示す。図の（1）～（4）は歩行波、（5）、（6）は正弦波の例である。正弦波の場合、図に示すように、所定の継続時間の振動の前後に、1sの間に振幅が0から所定の値まで増幅（所定の値から0まで減衰）する前置波（後置波）をつなげた。また、（4）は、7歩の歩行波ではあるが、歩調の倍調波による床の固有振動数での共振が発生し、他の歩

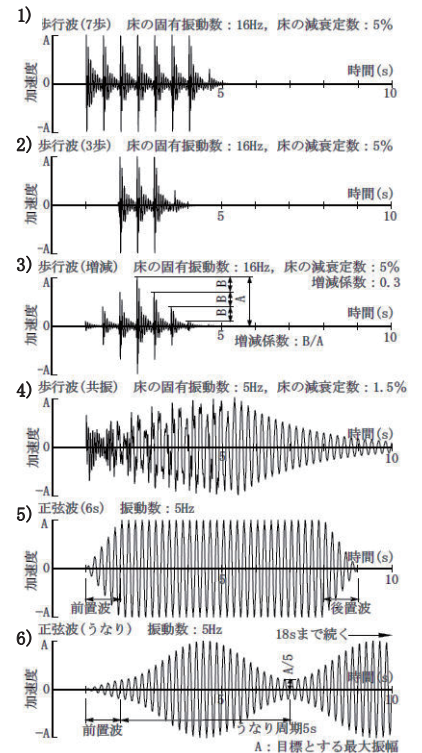


Fig.4 検査試料の例
Vibration samples

Table 2 検査試料の概要
List of vibration samples

No.	振動の種類	振動数 (Hz)	目標振幅 (cm/s ²)	減衰定数 (%)	No.	振動の種類	振動数 (Hz)	目標振幅 (cm/s ²)	減衰定数 (%)	No.	振動の種類	振動数 (Hz)	目標振幅 (cm/s ²)	減衰定数 (%)	
1	歩行波（共振）	5.0	5.0	1.5	43	歩行波（5歩）	12.5	15.0	5.0	84	正弦波（12s）	5.0	5.0		
2	歩行波（7歩）			5.0	44	歩行波（3歩）				85	正弦波（6s）				
3	歩行波（7歩）			10.0	45	歩行波（1歩）				86	正弦波（3s）				
4	歩行波（共振）			3.0	46	歩行波（増減 ^{※1} ）				87	正弦波（うなり）				
5	歩行波（共振）			1.5	47	歩行波（増減 ^{※2} ）				88	正弦波（12s）	5.0	2.0		
6	歩行波（7歩）	2.0	5.0	48	歩行波（7歩）	10.0	10.0	5.0	89	正弦波（6s）					
7			10.0	49					90	正弦波（3s）					
8			1.5	50					91	正弦波（うなり）					
9	歩行波（共振）	1.5	51	7.0		5.0	1.5	92	正弦波（12s）	10.0	2.0				
10	歩行波（7歩）	10.0	5.0					52	93				正弦波（12s）		
11			10.0					53	94				正弦波（6s）		
12			7.0					54	95				正弦波（3s）		
13	歩行波（共振）	1.5	55	3.0		5.0	1.5	96	正弦波（うなり）				1.0		
14	歩行波（7歩）	5.0	5.0					56	97	正弦波（12s）	5.0				
15			10.0					57	98	正弦波（6s）					
16			3.0	58		99	正弦波（3s）								
17	歩行波（共振）	1.5	59	50.0		10.0	5.0	100	正弦波（うなり）	2.0					
18	2.0	5.0	60					101	正弦波（12s）						
19		10.0	61					102	正弦波（12s）						
20		1.5	62	103		正弦波（6s）	1.0								
21	1.5	63	104	正弦波（3s）											
22	10.0	20.0	5.0	64	歩行波（5歩）	16.0		5.0	105	正弦波（うなり）					
23			10.0	65	歩行波（3歩）				106	正弦波（12s）					
24			5.0	66	歩行波（1歩）		107		正弦波（6s）						
25			1.5	67	歩行波（増減 ^{※1} ）		108		正弦波（3s）						
26			10.0	5.0	5.0	68	歩行波（増減 ^{※2} ）	20.0	5.0	109	正弦波（うなり）	5.0			
27					10.0	69	歩行波（7歩）			15.0	5.0		110	正弦波（12s）	
28					7.0	70							111	正弦波（6s）	
29			1.5	71	112	正弦波（3s）									
30			歩行波（7歩）	5.0	5.0	72	10.0	5.0	113	正弦波（うなり）	2.0				
31					10.0	73			歩行波（5歩）						
32					3.0	74			歩行波（3歩）						
33			2.0	1.5	5.0	75	歩行波（1歩）	10.0	5.0	No.：検査試料のナンバー 振動数の種類：Fig.4参照 振動数：歩行波の場合、床の固有振動数 目標振幅：目標とする最大振幅 減衰定数：床の減衰定数					
34					5.0	76	歩行波（増減 ^{※1} ）								
35					10.0	77	歩行波（増減 ^{※2} ）								
36	1.5	78	歩行波（7歩）	7.0	5.0	5.0	10.0								
37	12.5	30.0													
38								5.0	80						
39								10.0	81						
40	20.0	5.0						5.0	82						
41			1.5	83											
42			5.0												

No.：検査試料のナンバー
振動数の種類：Fig.4参照
振動数：歩行波の場合、床の固有振動数
目標振幅：目標とする最大振幅
減衰定数：床の減衰定数

※1：Fig.4に示す増減係数0.15の波形
※2：Fig.4に示す増減係数0.30の波形

行波とは明らかに異なる、正弦波（うなり）に近似した波形となった例である^{1), 19)~21)}。以降、このような検査試料を“歩行波（共振）”と記す。Table 2に示すように、固有振動数5Hz, 7.4Hz, 減衰定数1.5%の床では、応答が歩行波（共振）となった。

なお、設定した検査試料のうち歩行波（7歩）,（5歩）,（3歩）,（1歩）,（増減）は周期的な振動、歩行波（共振）と正弦波（12s）,（6s）,（3s）,（うなり）は連続的な振動に分類できるものである。

4.1.3 検査員

住居の居室における一般的な判断を求めることを目的としていることから、一般的な成人男女21名（性：男19名・女2名、年齢：22~46歳、体重：46~94kg）とした。なお、男女の検査員数に大きな差があるが、小野、横山^{10)~13)}の研究で振動の感覚上の大きさや気になり具合に関する判断に男女による大きな差はないことが明らかとなっていることから、大きな問題はないとみなした。

4.1.4 姿勢、履物

検査員の姿勢は、小野、横山^{11), 13)}の研究および予備検査の結果、立位と振動台に固定された椅子に座り足裏を床につけた“椅子腰掛位”とで判断に大きな差はみられないことが明らかとなったことから、椅子腰掛位とした。ここで、使用する椅子は、脚が振動台テーブルに固定され、かつ座面などにクッション材などが施されていないものとした。なお、テーブル上と座面上の振動を測定、比較し、増幅、減衰はないことを確認した。

一方、履物は、住居の居室で一般的で、素足と近似した装着感を有し、かつ床のすべりや表面温度などの要因をできるだけ一定に保つことができる、くつ下とした。なお、検査員の足裏が触れる振動台の表面には、カーペットを敷設した。

4.2 官能検査経過、結果および心理学的尺度の構成

4.1で述べた条件に加え、振動以外の要因は判断に入れないこと、住居の居室を想定して判断すること、疲れたら休憩をとるのでいつでも申し出ることを検査員に教示したうえで、官能検査を実施した。検査試料の提示順序は、検査員ごとにランダムに変化させた。検査員が1つの検査試料に対する判断に要した時間は、5~30s程度であった。また、検査中、振動台制御用パーソナルコンピュータに表示されるテーブル上の振動レベルの最大値を記録、比較することにより、いずれの検査試料でも検査員による差が1dB以内であることを確認した。

Table 3に、官能検査の結果得られた基礎データの分散分析結果を示す。振動の感覚上の大きさ、および気になり具合のいずれの検査でも、検査試料の刺激による差を表す主効果の分散比が高度に有意であり、かつ寄与率も非常に大きいことから、設定した検査試料群が検査員に十分差異のある刺激を与えていたこと、本検査自体が有効であることがわかる。一方、個人差もいずれも有意となっているが、寄与率が主効果と比較してきわめて小さいことから、構成される尺度には検査員間に本来内在している個人差が内包されるものの、各検査試料に対する判断の中心傾向の差異が明瞭に反映されるといえる。

以上より、尺度構成理論²³⁾にしたがって、2つの心理学的尺度（認知大きさ尺度、気になり具合評価尺度）を構成した。

4.3 心理学的尺度相互の関係の検討

Fig.5に、認知大きさ尺度と気になり具合評価尺度との関係を示す。図中の記号は、振動の種類で分類したものである。また、①~⑦の破線は、尺度上の判断範囲の位置を表す。さらに、正弦波（12s）の回帰直線を実線で、（3s）の回帰直線を点線で示す。

図中、白抜きの記号で示した周期的な振動では、振動数、減衰定数、振幅、歩数にかかわらず両者はほぼ一律に対応しており、

Table 3 分散分析結果
Result of variance analysis

振動の感覚上の大きさに関する 官能検査結果			振動の気になり具合に関する 官能検査結果		
	分散比	寄与率		分散比	寄与率
主効果	131.4690**	81.14%	主効果	96.8262**	77.03%
個人差	52.2321**	5.69%	個人差	42.4109**	5.94%

※※：危険率1%以下で有意

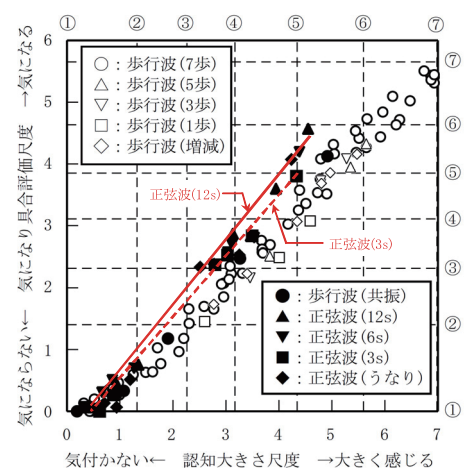


Fig.5 認知大きさ尺度と気になり具合評価尺度の関係
Relationship between psychological scales

感覚上大きい振動ほど気になり具合も大きくなっていることがわかる。一方、中黒の記号で示した連続的な振動は、周期的な振動と比較して、感覚上の大きさが同程度でも気になり具合が大きくなっている。また、この大きくなる度合いは継続時間により異なっており、継続時間が長いほど気になり具合が大きくなる傾向がみられる。さらに、この傾向は、認知大きさ尺度値が大きいほど顕著に現れている。

以上より、以下の事項が明らかとなったといえる。

- ・振動の感覚上の大きさと評価の関係は、周期的な振動と連続的な振動で基本的に異なる。
- ・周期的な振動では評価は感覚上の大きさでほぼ決定するのにに対し、連続的な振動では感覚上の大きさに加え継続時間が影響する。

なお、正弦波において継続時間が感覚より評価により大きく影響する点は、筆者らの既往⁴⁾の結果と一致する。

5 振動の感覚上の大きさを表す物理量の検討

5.1 1/3オクターブバンド分析に関する考察

筆者らは既報²⁵⁾にて、4章で得られた検査結果と加速度の時刻歴波形から求めた最大値を基に検討を行い、心理学的尺度と振動量が良好な対応を示す評価指標を提示している。しかし、物理量を求める際、波形に複数の振動数成分が含まれる場合の波形処理等に分析者の判断が必要となる他、波形の振動数や継続時間に依りて独自の補正係数を乗じる等の作業が必要となるため、実務に即適用することは容易ではないと思われる。そこで本報では、現在広く使用されている分析方法を基に検討し、実務での運用面を考慮した評価指標を提示することとした。

実務で用いられている分析方法として、まず、1/3オクターブバンド分析が挙げられる。同分析は、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」²⁾やISO2631^{26), 27)}で規定されており、振動量と振動数の両方を概ね把握することができる方法である。しかし、既往の研究例^{1), 28)}で指摘されているように、波形の卓越振動数が1/3オクターブバンドフィルタの帯域端周波数付近となる場合には、振動量を20~30%程度も過小評価してしまいう可能性があるにも関わらず、特に留意されぬまま使用されているのが現状である。新たに評価指標を提示するに際し、1/3オクターブバンド分析による方法とは別の方法で検討することとした。

5.2 心理学的尺度と振動レベルの関係の検討

1/3オクターブバンド分析のように振動量を過小評価しないためには、振動をオールパスで評価する方法が考えられる。そこで、JIS C 1510²⁹⁾にて規定され振動規制法等で用いられている振動レベル(時定数630ms)と、心理学的尺度との関係について検討することとした。

Fig.6に、5章の結果から構成した認知大きさ尺度と、振動レベルの関係を示す。図には、同程度の継続時間の検査試料と比較するため、歩行波7歩のうち、「増減波」と振動数5Hzの試料を除く60種の結果をプロットし、振動数ごとに回帰曲線を示した。なお、5Hzの試料は官能検査で被験者によって回答が大きくばらついたことから本報では検討の対象外とした。図より、振動数が高い試料ほど上方に、振動数が低い試料ほど下方に位置する傾向が顕著に表れていることがわかる。この結果は、人間の感覚に対して振動レベルの時定数630msが遅いために、振動数が高く振幅の変動が速い波形にレベル値が追従していないことを示唆している。

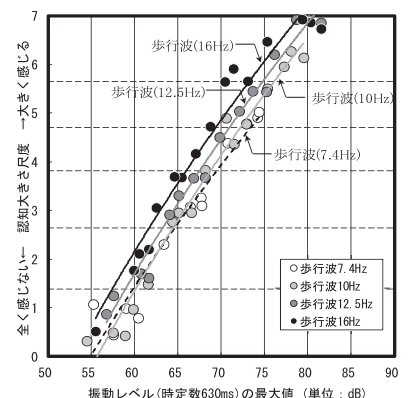


Fig.6 振動レベル(630ms)と認知大きさ尺度の関係
Relationship between psychological scale and vibration level (630ms)

5.3 振動レベルの時定数に関する検討

振動レベルの時定数を630msよりも速くした場合について検討を行った。Fig.7, Fig.8に、心理学的尺度と振動レベル(時定数125ms, 10ms)の関係を示す。図には、Fig.6と同様、歩行波7歩60種の結果をプロットし、振動数ごとに回帰曲線を示した。いずれの図も、Fig.6と比べて、振動数別のプロットが適度に混在するとともに、回帰曲線同士の間隔が狭まっており、心理学的尺度とより良い対応を示す結果となった。すなわち、歩行波については、振動レベルの時定数を630msとするよりも、125ms, 10msとする方が人間の感覚と良く対応することがわかった。

次に、歩行波以外の試料も加え、全113種の検査試料のうち、5Hzの試料を除く96種を対象に、時定数の影響について検討を行った。Fig.9に、時定数630msと125ms, 10msの振動レベル同士の関係を示す。図中の記号は、●,

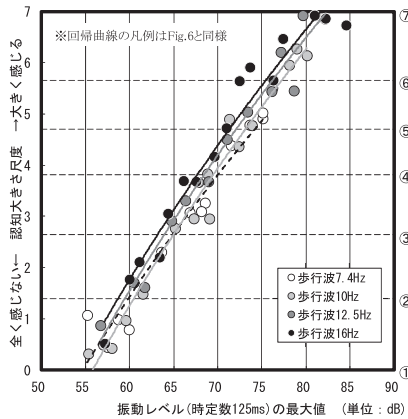


Fig.7 振動レベル (125ms) と認知大きさ尺度の関係
Relationship between psychological scale relating to amplitude and vibration level (125ms)

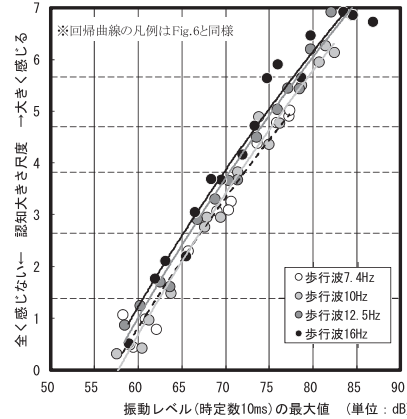


Fig.8 振動レベル (10ms) と認知大きさ尺度の関係
Relationship between psychological scale relating to amplitude and vibration level (10ms)

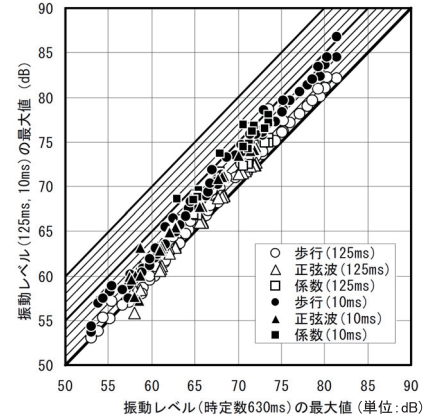


Fig.9 振動レベル630msと125ms, 10msの関係
Relationship between vibration level (125ms, 10ms) and vibration level (630ms)

○が歩行波7歩68種を, ▲, △が正弦波とうなり波を, ■, □が歩行波7歩増減波, 5歩, 3歩, 1歩を表している。また図には, 1dB刻みにラインも示した。波形の種類によりばらつきはあるものの, あえて時定数ごとの差をいうと, 時定数125msは630msに比べて約2dB, 時定数10msは630msに比べて約4dB, 振動レベルが大きくなっている。なお, 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」^[2]の付録に掲載されている時定数を変化させた分析例でも, 125msと10msの差は1.1倍~1.7倍と示されており, 今回の125msと10msの相対レベル差2dB (1.3倍) はその範囲の中心にあるといえる。

5.4 継続時間に関する検討

Fig.10に, 振動レベル (時定数125ms) の最大値と気になり具合評価尺度の関係を示す。図より, 両者は概ね対応しているものの, 図中■で示した点の一部 (継続時間が短い歩行波3歩, 1歩の試料) がプロット群の下方に, ▲, ▲で示した点の一部 (継続時間が長い正弦波の試料) が上方に位置していることがわかる。この結果は既往の研究^[4), 25]と同様であり, 振動の評価には継続時間が影響することを示唆している。

以上を踏まえ, 振動レベルの最大値 VL_{max} (dB) に, $VL_{max} - \Delta VL$ 以上の振動レベルが維持される時間 TL (s) を加味する方法で, 継続時間の影響に関する既往の研究^{[4)}等を参考に種々検討した結果, $\Delta VL = 6\text{dB}$ とした場合に下式 (1) で表される VLI (Vibration Level Index) を心理学的尺度と対応する物理量として設定した。

$$VLI = VL_{max} + \alpha \cdot \log (TL) \quad (1)$$

ただし係数 α は, 認知大きさ尺度の場合には $\alpha = 3$ を, 気になり具合評価尺度の場合には $\alpha = 6$ を採用することとし, $VL_{max} - \Delta VL$ が振動感覚閾値55dBを下回る場合には, 55dB以上の時間を TL とする。

Fig.11, Fig.12に, 認知大きさ尺度と

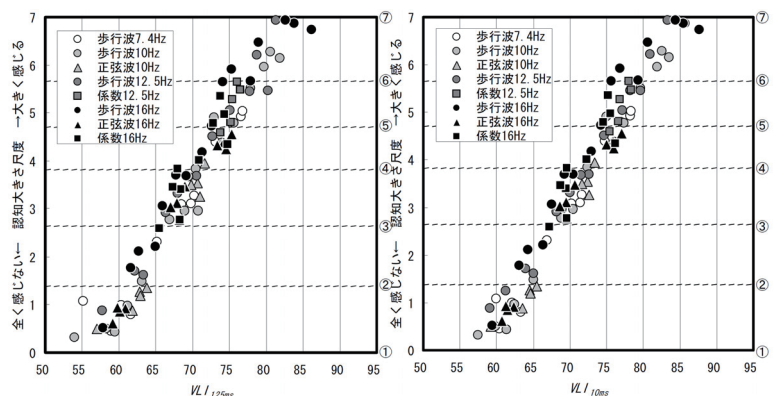


Fig.11 VLI_{125ms} と認知大きさ尺度の関係
Relationship between psychological scale relating to amplitude and VLI_{125ms}

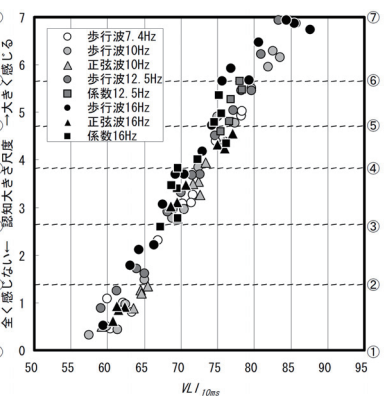


Fig.12 VLI_{10ms} と認知大きさ尺度の関係
Relationship between psychological scale relating to amplitude and VLI_{10ms}

VLI_{125ms} , VLI_{10ms} の関係を示す。図より、両者はよい対応を示していることがわかる。

また、Fig.13, Fig.14に、気になり具合評価尺度と VLI_{125ms} , VLI_{10ms} の関係を示す。図より、両者はよい対応を示しており、Fig.10のように顕著に対応から外れるプロットがないことがわかる。

6 おわりに

本報では、振動数および体感者の体重差に関係なく所定の振動を発生させることができる、小型かつ軽量で可搬性のある振動体感装置の開発について述べた。

従来の振動台は大型で移動できないため、建築主などの体感者に振動台のある場所まで来てもらう必要があったが、本装置の開発により、体感者が要望する場所で気軽に振動を体感することが可能となった。開発後、本装置は多数の物件で建築主の下に運搬され、設計段階における設計者と建築主の振動居住性能や振動対策選定に関する合意形成の一助として活用されている。さらに、研修会場、勉強会場に運び込まれ、多くの設計者に、振動の振幅や継続時間の違いによる感覚の違いについて、体験を通じて認識を深めることに役立てられている。

また本報では、RC造、S造建築物の床などにおいて発生する周期的な振動、あるいは連続的な振動を対象に、振動体感装置を用いた官能検査を行い、その結果から人間の振動感覚とよく対応する物理量 VLI を設定するとともに、 VLI を照合するための新たな評価指標を提示した。なお、本報の検討は振動数16Hz以下を対象に行ったものであり、より高い振動数での時定数や継続時間の影響度等については今後の課題と考えたい。また、将来的には、横山ら³⁰⁾により提案され木造、軽量S造床の振動評価に活用されている評価方法と、本報の結果との比較から、床構法に関係なく振動を評価できる方法についての検討も試みたい。

謝辞

計画、実施、結果のまとめに至るまで一連の研究内容について、東京工業大学横山裕准教授に種々御指導いただきました。また、官能検査、実験の実施にあたり、池田文乃氏（当時東京工業大学）、八木豊氏（当時東京工業大学大学院）に多大なる協力をいただきました。記してここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 横山 裕, 井上竜太, 西谷伸介, 松下仁士, 柴田昭彦, 塚田幸一, 小林裕明: 共振を考慮した人間の動作による床振動の測定, 評価ならびに対策に関する一考察, 日本建築学会技術報告集, 第24号, pp.197-202, 2006.12
- 2) 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
- 3) 石川孝重, 野田千津子: 知覚確率に基づいた床スラブの鉛直振動に対する居住性能評価, 構造工学論文集, Vol.50B, 2004.3
- 4) 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, 不快度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
- 5) 小野英哲: 体育館の床の弾力性に関する研究 (その1) 運動競技者が体育館の床にあたえる荷重の解析, 日本建築学会論文報告集, 第181号, pp.7-14, 1971.3
- 6) 小野英哲, 吉岡 丹: 体育館の床の弾力性に関する研究 (その2) 体育館の床の弾力性測定装置の設計・試作, 日本建築学会論文報告集, 第187号, pp.27-34, 1971.9
- 7) 小野英哲, 吉岡 丹: 体育館の床の弾力性に関する研究 (その3) 体育館の床の使用感および弾力性測定実験, 日本建築学会論文報告集, 第188号, pp.1-10, 1971.10
- 8) 小野英哲, 吉岡 丹: 体育館の床の弾力性に関する研究 (その4) 弾力性の使用感に関する心理学的尺度の構成, 日本建築学会論文報告集, 第226号, pp.9-19, 1974.12

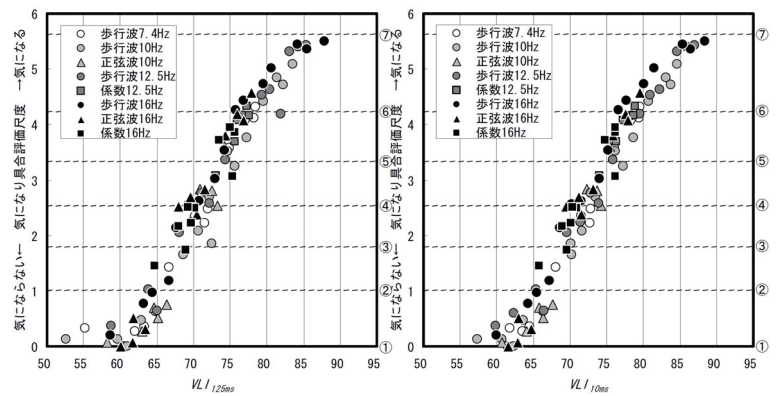


Fig.13 VLI_{125ms} と気になり具合評価尺度の関係
Relationship between psychological scale relating to habitability and VLI_{125ms}

Fig.14 VLI_{10ms} と気になり具合評価尺度の関係
Relationship between psychological scale relating to habitability and VLI_{10ms}

- 9) 小野英哲, 吉岡 丹: 体育館の床の弾力性に関する研究 (その5) 弾力性の使用感に関する心理学的尺度と床の物理量との対応および弾力性の評価式, 最適値の提示, 日本建築学会論文報告集, 第227号, pp.1-11, 1975.1
- 10) 小野英哲, 横山 裕: 人間の動作により発生する床振動の振動感覚上の表示方法に関する研究 —振動発生者と受振者が同じ場合—, 日本建築学会構造系論文報告集, 第381号, pp.1-9, 1987.11
- 11) 横山 裕, 小野英哲: 人間の動作により発生する床振動の振動感覚上の表示方法に関する研究 —振動発生者と受振者が異なる場合—, 日本建築学会構造系論文報告集, 第390号, pp.1-9, 1988.8
- 12) 小野英哲, 横山 裕: 人間の動作により発生する床振動の居住性からみた評価方法に関する研究 —振動発生者と受振者が同じ場合 (動作した人間自身が床振動を感じる場合) —, 日本建築学会構造系論文報告集, 第394号, pp.8-16, 1988.12
- 13) 横山 裕, 小野英哲: 振動発生者と受振者が異なる場合の床振動の評価方法の提示 人間の動作により発生する床振動の居住性からみた評価方法に関する研究 (第2報), 日本建築学会構造系論文報告集, 第418号, pp.1-8, 1990.12
- 14) 横山 裕: 歩行時に発生する床振動評価のための加振, 受振装置に関する研究 動的加振器, 受振器の設定および妥当性の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第466号, pp.21-29, 1994.12
- 15) 横山 裕, 佐藤正幸: 歩行時に発生する床振動評価のための加振, 受振装置に関する研究 衝撃的加振器の開発および振動減衰時間算出方法の妥当性の確認, 日本建築学会構造系論文集, 第476号, pp.21-30, 1995.10
- 16) 横山 裕, 佐藤正幸: 歩行時に発生する床振動評価のための加振, 受振装置に関する研究 仕上げ材が施された床に対する加振, 受振装置の適用方法の設定, 日本建築学会構造系論文集, 第490号, pp.17-26, 1996.12
- 17) 横山 裕, 松長健一郎: 小走り時の床振動測定用加振装置および振動減衰時間算出方法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第519号, pp.13-20, 1999.5
- 18) 横山 裕: 苦情発生の有無からみた実在住宅床振動の測定条件, 境界値の提示, 日本建築学会構造系論文集, 第546号, pp.17-24, 2001.8
- 19) 高橋良典, 村井信義: 床構造の減衰性能に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第387号, pp.89-97, 1988.5
- 20) 高橋良典, 片山和喜, 吉岡宏和, 今沢民雄: 床構造の減衰性能に関する実験的研究 (その2) 動制振器を適用した実構造体における振動実験, 日本建築学会構造系論文集, 第507号, pp.61-67, 1998.5
- 21) 高橋良典, 片山和喜, 吉岡宏和, 今沢民雄, 村井信義: 床構造の減衰性能に関する実験的研究 (その3) 歩行振動の最大振幅と振動感覚評価に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第529号, pp.81-88, 2000.3
- 22) 石川孝重, 野田千津子: 鉛直振動に対する知覚閾および感覚評価に関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, 第588号, pp.9-14, 2005.2
- 23) J. P. Guilford 著, 秋重義治監訳: 精神測定法, 培風館, 1969
- 24) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2004.9
- 25) 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636号, pp.125-132, 2009.2
- 26) International Organization for Standardization: Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements, ISO 2631-1, 1997.
- 27) International Organization for Standardization: Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz), ISO 2631-2, 2003.
- 28) 平松和嗣, 横島潤紀, 石橋敏久, 伊積康彦: 建築物の振動に関する居住性能評価指針の測定方法について (3) ~床振動に関する実測事例からの検討~, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.345~346, 2007.8
- 29) 日本規格協会: 振動レベル計, JIS C 1510, 1995.
- 30) 横山 裕: 苦情発生の有無からみた実在住宅床振動の測定条件, 境界値の提示, 日本建築学会構造系論文集, 第546号, pp.17~24, 2001.8