

# 被験者実験による地震の揺れに対する人の感覚の定量化に関する研究

岡沢 理映 神原 浩 猿田 正明  
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

## QUANTIFICATION OF HUMAN RESPONSE TO SEISMIC MOTION USING HUMAN SUBJECTS

Rie Okazawa Hiroshi Kambara and Masaaki Saruta

地震時の揺れが人に与える影響により建物の耐震性能を評価するため、地震の揺れを体験できる振動台を用いて被験者実験を行い、揺れ(正弦波)の特性と人の感覚の関係を分析した。得られた結論は以下の通りである。1) 50%以上の人 $SI \geq 5.2$ で身の危険を感じ、避難行動をとろうと感じ、計測震度 $SI \geq 5.6$ で不安を感じる。2) 不安や行動難度を感じる人の割合は、揺れの大きさを加速度 $A$ または加速度 $A \times$ 速度 $V$ から定めた震度 $SI$ を指標とした正規分布関数で表すことができる。3) 不安度への影響が大きいのは加振方向、家具の転倒の有無(VRにより表現)である。家具の転倒が無いと不安度は低くなり、室内の明るさは不安度への影響が小さい。4) 施設見学者向けの地震体験プログラム(VR付)において実地震の揺れに対する人の感覚を調査したところ、不安を感じる割合は正弦波を用いた被験者実験より高く、その差は継続時間の長い揺れほど大きい傾向にある。

The purpose of this study is to evaluate the seismic performance of buildings in terms of the influence that seismic motion has on a person. Experiments with human subjects are performed using a shaking table able to simulate seismic motion. The relationship between vibration characteristics (sinusoidal waves) and human senses is analyzed. The results obtained are as follows. 1) Over 50% of people feel a sense of danger and attempt to take protective action at  $SI$  (instrumental seismic intensity)  $\geq 5.2$ . They become anxious at  $SI \geq 5.6$ . 2) The ratio of people who feel anxious or have difficulty taking action can be express by a normal distribution with acceleration or  $SI$  (determined as  $A \times V$ ) of the motion as an index. 3) Anxiety levels are greatly influenced by the direction of the vibration and the sight of overturning furniture in VR images. However, anxiety is reduced when furniture remains in place. The level of anxiety is affected somewhat by light level. 4) A higher proportion of participants subjected to real earthquake motion in an earthquake experience program (using VR) become anxious than in these experiments using sinusoidal waves. The difference in anxiety tends to increase as the duration of the motion becomes longer.

### 1. はじめに

従来、建物の耐震性能は大地震に対して構造安全性が確保されることが目標とされ、設計・施工されてきた。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震の際は、建物損傷はないものの建物が長時間揺れ、居住者が不安を感じたという報告がいくつか挙げられている(例えば1)。高層建物が林立する大都市では避難場所が限られているため、高層建物では構造安全性が確保されていれば、居住者は建物内に居続けることが求められるようになってきている。ただ、揺れによる不安を抱きながら建物内に居続けることは居住者にとって心理的負担が大き

くなる恐れがあるため、地震の揺れに対しては、構造安全性だけでなく居住者が安心していられる空間を確保することが望ましい。安心していられる空間の評価や設計のためには、揺れの大きさと人の感覚の関係を明らかにする必要がある。揺れに対する人の感覚の定量化については従来から環境振動や風などの比較的小さい揺れに対して行われてきた(例えば2)が、近年は地震動を対象とした大きな揺れに対する検討も行われている(3)。(4)

Takahashiらは揺れの大きさや周期を幅広く変えて被験者実験を行い、揺れの特性と人の感覚の関係を表す性能評価曲線を提案している(3)。実験では揺れに対する感覚を5ランクに分け、それぞ

れの加振に対して被験者の回答したランクを被験者全体で平均値をとり、その結果を基に評価曲線を提案している。肥田・永野らは、関東・関西に立地する超高層建物を対象に東北地方太平洋沖地震時における居住者の不安度や行動難度のアンケート調査を実施している。そして同じ揺れを振動台で再現し、実際の地震と被験者実験との対応を確認している<sup>4),5)</sup>。金子・福島は肥田・永野らと同様に東北地方太平洋沖地震時に超高層建物居住者を対象に揺れに対する不安度、行動難度のアンケート調査を実施している。また、振動台を用いた被験者実験を行い、より広範囲な周期や振動レベルを対象とした揺れに対する人の感覚の定量化を試みている<sup>6)</sup>。このように、既往の研究では評価曲線がいくつか提案されているが、単純な関数で表されているものは少なく、定量的な評価で使用する際、図から値を読み取る必要がある。また、実験条件の違いを考慮した評価曲線の事例も少ない。そこで本研究では、ある揺れに対して同じレベルの感覚を感じる人の割合を揺れの大きさに対する確率分布関数で単純に表すことを試みた。また、揺れの大きさ以外に被験者の姿勢、加振方向、室内環境を変えた時の揺れの大きさに対する感覚の違いを確率分布のパラメータの違いで表した。さらに、施設見学者向けの地震体験プログラムにおいて実地震の揺れに対する感覚についてアンケートを実施し、性能評価曲線との対応を分析した。

## 2. 被験者実験結果と性能評価曲線

### 2.1 実験概要

実験では、図-1に示す広さ4m×4mの室内を



図-1 振動台キャビン外観



図-2 VR映像例

表-1 実験条件

	実験1	実験2	実験3	
	基本条件	姿勢による影響	明るさによる影響	映像による影響
被験者数	72	47	32	32
加振方向	左右	左右・前後	左右	
姿勢	座位	立位	座位	
加振ケース (被験者1人あたりの実験ケース)	36 (18)	左右:16 前後:14 (左右8 前後7)	明るい環境:7 暗い環境:7	家具転倒有:7 家具転倒無:7

再現したキャビンを載せた振動台<sup>7)</sup>を用いた。キャビン内の明るさやスクリーンのVR映像(図-2)は振動台の動きに連動して制御することができる。本実験の安全管理を図-3に示す。被験者は事前問合せ表に基づき、加振に適さない持病を有さず健康であると産業医が判断したものとした。また、1回の実験での加振数や時間は事前に予備実験を行い<sup>8)</sup>、被験者の体調に影響しないように定めた。

被験者実験は、揺れの特性、被験者の姿勢、加振方向、室内環境を変え、3回に分けて行った。実験条件を表-1に示す。入力波はいずれも継続時間が5秒または3波長分の時間の正弦波である。実験1では揺れの特性として正弦波の最大加速度・最大速度を変え、他の実験条件は被験者の姿勢を座位、加振方向を左右、室内環境は明るい状態でスクリーンのVR映像はなしとした(以後、この条件を基本条件と記す)。加振レベルについてはTakahashiらの実験結果<sup>9)</sup>および予備実験<sup>8)</sup>を参考に被験者に大きな負担がかからないように定めた。実験2,3では加振レベルを絞り、実験2では被験者の姿勢および加振方向、実験3では室内環境を変えて実験を行った。尚、実験1,2では加振ケースが多いため、被験者1人につき全ケースの半分のケースで実験を行い、被験者2人で全ケースのサンプルを得た。

本実験の加振レベルをTakahashiらの不安度の性能評価曲線<sup>9)</sup>(周期 $T$ を $A=2\pi VT$ に変換)と比較したものを図-4に示す。本実験では正弦波の加速度 $A$ と速度 $V$ を変え、周期と振幅の異なる揺れを表した。また、被験者には表-2に示すように、揺れに対する感覚としてTakahashiらの研究を参考に不安度、行動難度を5段階、避難行動の可否を4

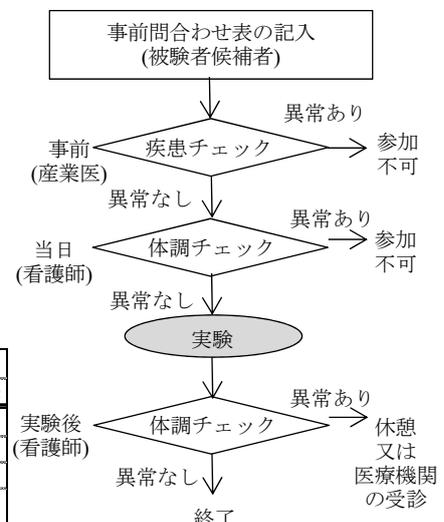


図-3 被験者実験の安全管理

段階で回答してもらった。不安度、行動難度についてはそれぞれの感覚のイメージを括弧書きで示した。尚、座位での行動難度については、立位の場合を想像して回答してもらった。

## 2.2 実験結果

実験結果の一例として、基本条件(実験1)での揺れの大きさと感覚の関係を示す。各加振ケースでの被験者の回答を表-2に示すレベルの値で集計し、その平均値を図-5に示す。尚、同図には(1)式<sup>9)</sup>で求められる震度(SI)およびTakahashiらの評価曲線(不安度2、行動難度3)についても併せて描いている。

$$SI = \log_{10} AV + 1.5 \quad (1)$$

図-5(a)、(b)より、不安度、行動難度はAに応じて大きくなるのが分かる。揺れのレベルが大きい範囲(不安度は $A \geq 500 \text{ cm/s}^2$ かつ $V \geq 80 \text{ cm/s}$ 、行動難度は $A \geq 400 \text{ cm/s}^2$ かつ $V \geq 60 \text{ cm/s}$ )ではVによる差はほとんどみられないが、それよりもレベルの小さい範囲ではVに応じて不安度、行動難度は大きくなる傾向にある。震度に対しては、不安

度、行動難度ともにレベル2,3の境界は震度6弱と6強の境界に対応している。Takahashiらの評価曲線と比較すると、不安度は、加速度の大きい範囲では実験の方がやや大きい傾向にあるが、不安度2の曲線付近の平均値は1.5~2.5程度と概ね同じレベルとなっている。行動難度についてはTakahashiらの評価曲線の方が実験結果よりも大きめに評価している。これは、実験1の行動難度は被験者が座位の状態而立位の状態を想像して回答しているためであると考えられる。避難行動については図-5(c)より、入力波の $A \geq 200 \text{ cm/s}^2$ かつ $V \geq 40 \text{ cm/s}$ の場合、身の危険を感じ、 $A \geq 300 \text{ cm/s}^2$ かつ $V \geq 60 \text{ cm/s}$ の場合、揺れのレベルが大きくて避難行動がとれないと感じる人の割合が増える。

## 2.3 性能評価曲線の構築

2.2節に示した基本条件下の実験結果を用いて

表-2 アンケート調査

レベル	不安度
0	全く不安を感じなかった (なんともなかった)
1	やや不安を感じた (一瞬どきどきしたが、冷静でいられた)
2	不安を感じた (なんとか冷静でいられたが、好ましくない状況と感じた)
3	かなり不安を感じた (これまでに経験したことがない状況で冷静でいらなかった、身構えることで精一杯だった)
4	非常に不安を感じた (二度とこのような体験したくないほど恐怖を感じた)
レベル	行動難度
0	普通に立っていられる
1	体が少し揺られるが立っていられる (歩幅を広げればバランスが取れて立っていられる)
2	体が大きく揺られるが立っていられる (足を前後左右に踏み出せばバランスが取れて立っていられる)
3	どこかに捕まっていなければ立ってられない
4	立ってられない(倒れる)
レベル	避難行動
0	身の危険は感じない
1	身の危険を感じ、避難行動をとる
2	身の危険を感じ、安全を確保しようと思うが、揺れが大きくて避難行動はとれない
3	身の危険を感じるが、恐怖でどうすることもできない

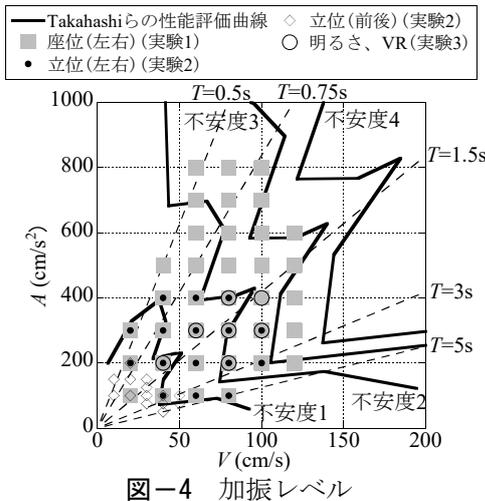


図-4 加振レベル

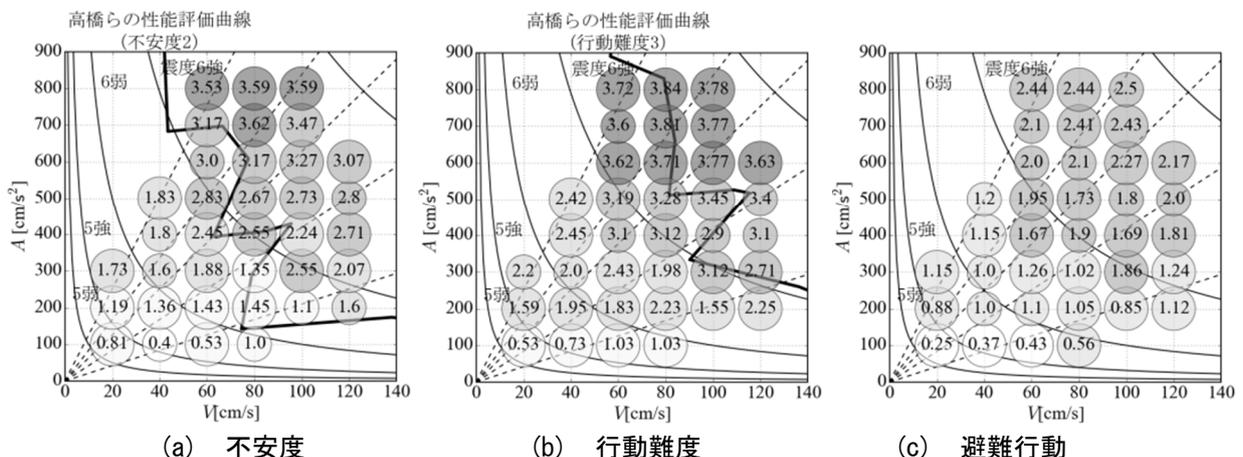


図-5 基本条件(座位、左右)時の各加振ケースの平均値

基本となる性能評価曲線を構築する。各加振ケースにおいて、全被験者に対してあるレベル以上(例えば不安度 2 以上)と答えた人の割合  $P_R$  で実験結果を集計する。ある揺れの大きさ  $x$  に対して人の感覚の超過確率  $P_R(x)$  は標準正規分布の累積分布関数  $\Phi(x)$  を用いて(2)式で表せると仮定した。揺れの大きさ  $x$  は、SI、 $A$ 、 $V$  の 3 種類の指標で表す。ただし、 $A$ 、 $V$  は正の値をとるため、対数( $\ln A$ 、 $\ln V$ )とする。

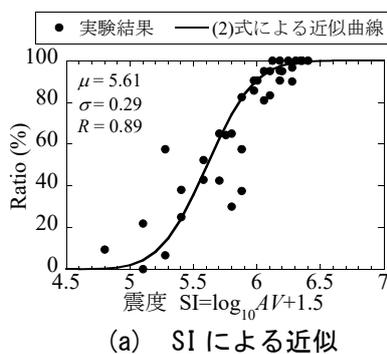
$$P_R(x) = \Phi((x-\mu)/\sigma) \quad (2)$$

$\mu$ 、 $\sigma$  は平均値、標準偏差であり、最小二乗法より導いた。(2)式による近似は、 $P_R(x)=0$  と  $P_R(x)=1.0$  のデータを除くため、実験結果の近似範囲をレベル 2 以上、レベル 4(避難行動はレベル 1 以上、レベル 3)でそれぞれ  $SI \leq 6.3$ 、 $SI \geq 5.5$  とした。実験結果と(2)式による近似の比較の例を図-6に示す。図中の  $R$  は相関係数である。最小二乗法により推定した不安度、行動難度、避難行動の各レベルの正規分布パラメータを表-3に示す。相関係数  $R$  は、 $V$  による近似が最も低く、 $A$  による近似が最も高くなる。SI による近似は  $A$  に比べ相関係数は低いものの、揺れのレベルが小さい範囲で見られた不安度、行動難度の  $V$  による影響を Takahashi らの性能評価曲線と同様に考慮するこ

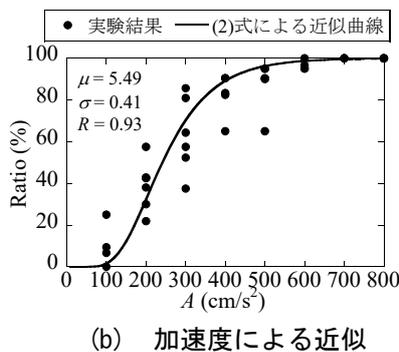
とができる。以上のことから、表-3 で示した近似曲線のうち、実験結果を良く表している、揺れの大きさを地震動の SI もしくは  $A$  で表したものを揺れに対する人の感覚の評価曲線とする。尚、以後の検討は揺れの周期を反映できる SI を用いた評価曲線を用いる。

SI を用いた評価曲線を図-7に示す。50%の人が  $SI=5.2$  で身の危険を感じ避難行動をとろう(避難行動 1 以上)とし、 $SI=5.6$  で不安を感じ始める(不安度 2 以上)。また、立ってられないと感じる(行動難度 3 以上)揺れのレベルは、不安を感じる(不安度 2 以上)揺れのレベルと同程度となっている。同じような状況を想定した不安度 4 の曲線と避難行動 3 の曲線はほぼ重なっている。

基本条件から実験条件を変えた際の評価曲線について検討する。まず、実験 2,3 の結果を用いて実験条件の違いによる影響について分析する。姿勢・加振方向による影響の 1 例を図-8、室内環境による影響の 1 例を図-9に示す。近似曲線も併せて描いているが、これらの曲線は(2)式で近似するとき基本条件と標準偏差  $\sigma$  を同じと仮定し、基本条件との違いを平均  $\mu$  で表せるようにした。図-8より、不安度は座位に比べ立位の方がやや大きい、行動難度は立位の方がやや小さい。座位の行動難度については、立位の場合を想像して答えてもらっていたため、実際より行動難度を大き



(a) SI による近似

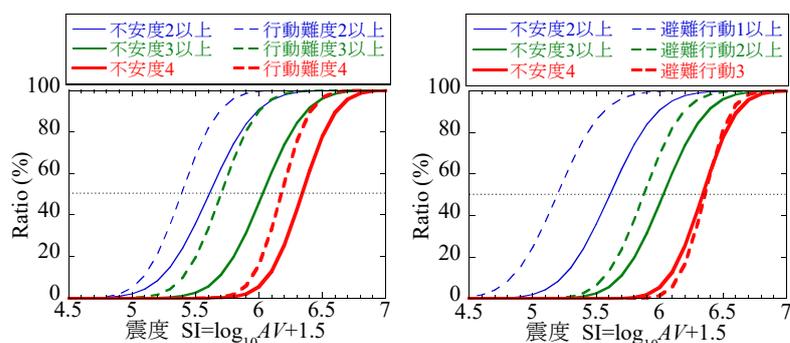


(b) 加速度による近似

図-6 正規分布関数による近似 (不安度 2 以上)

表-3 近似曲線の諸元 (基本条件)

項目	レベル	SI			A			V		
		$\mu$	$\sigma$	R	$\mu$	$\sigma$	R	$\mu$	$\sigma$	R
不安度	2以上	5.61	0.29	0.89	5.49	0.41	0.93	3.58	0.85	0.57
	3以上	6.03	0.27	0.92	6.07	0.37	0.93	4.62	0.69	0.43
	4	6.34	0.21	0.82	6.54	0.32	0.93	16.48	8.29	0.41
行動難度	2以上	5.39	0.23	0.86	5.10	0.37	0.93	3.24	0.51	0.53
	3以上	5.70	0.23	0.89	5.60	0.34	0.93	3.84	0.50	0.52
	4	6.18	0.18	0.89	6.36	0.35	0.94	4.86	0.61	0.38
避難行動	1以上	5.19	0.28	0.85	4.86	0.42	0.97	2.64	0.70	0.44
	2以上	5.88	0.24	0.92	5.86	0.37	0.90	4.22	0.51	0.52
	3	6.36	0.16	0.80	6.68	0.31	0.93	5.72	0.68	0.19



(a) 不安度と行動難度

(b) 不安度と避難行動

図-7 SI を用いた評価曲線 (基本条件)

く感じる人が多いことを示している。行動難度については本来、立位の状態の結果を用いるべきではあるが、地震時に座位の状態にあり、立位の状態を想像して行動するかを判断することを考慮して、行動難度の基本となる評価曲線についても基本条件は座位とした。加振方向については、超過確率50%時の前後と左右の $\mu$ の差は不安度が0.44、行動難度が0.61と非常に大きくなっている。図-9(a)は室内が明るい環境(標準的な室内の明るさ(照度454lx)、基本条件と同じ)と暗い環境(暗闇(照度0lx))で不安度2以上と答えた人の割合を比較している。室内の明るさが不安度に与える影響は小さい。図-9(b)は振動台の動きに連動してスクリーンに写す映像で家具が転倒する場合と転倒しない場合を比較したものであり、家具が転倒しない場合の方が不安度は小さい傾向にある。各項目について、図-8、9と同様に $\mu$ を求め、実験条件の違いを $\mu$ の差で表すと表-4のようになる。

ここで、基本条件の50%に対応する揺れの大きさ $x$ において、超過確率の差が5%以上あれば実験条件の差が有意と考える。超過確率の差が5%になるときの $\mu$ の差はおおよそ0.05であることから、表-5では差が有意となる条件を網掛けで区別した。姿勢を変えると0.1~0.2程度、加振方向を変えると0.5程度の差があることが分かる。室内環境については、明るさは不安度にほとんど影響がなく、行動難度、避難行動でわずかにあり、家具転倒の影響については0.1~0.2程度差がある。そこで姿勢、加振方向、室内環境が変わった場合、基本条件下で設定した評価曲線の平均 $\mu$ に、それぞれ表-5の $\Delta\mu$ の値を加算し、評価曲線を補正することとする。表-5のそれぞれの値については表-4の値を小数点以下2桁丸めて定めた。加振方向が前後の場合の補正值は立位の状態での左右と前後を比較した数値ではあるが、座位の場合でも同様であると仮定し、設定した。また、家具転倒

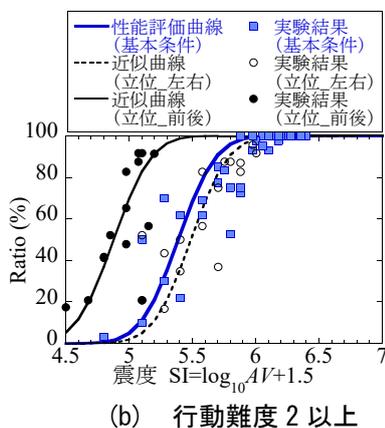
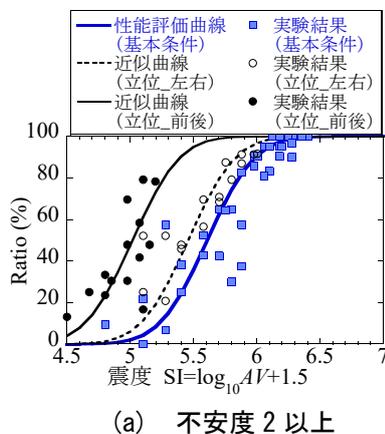


図-8 姿勢・加振方向による影響

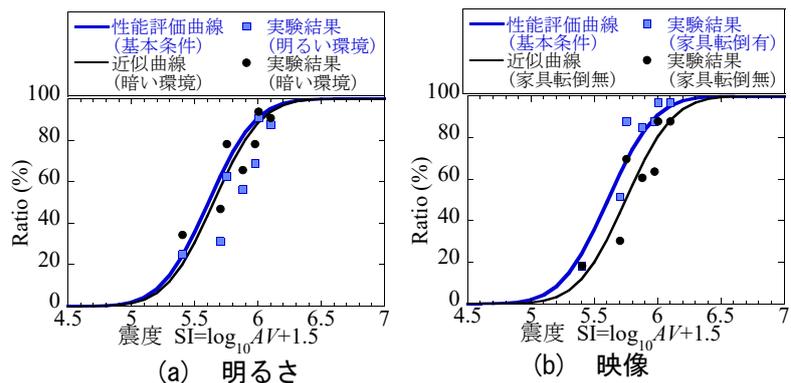


図-9 室内環境による影響 (不安度2以上)

表-4 実験条件の違いによる平均(・)の差

項目	レベル	座位-立位	左右-前後	明-暗	家具転倒有-転倒無
不安度	2以上	0.15	0.44	-0.04	-0.14
	3以上	0.13	0.40	0.01	-0.05
	4	0.19	0.47	-0.05	-0.07
行動難度	2以上	-0.10	0.61	-0.09	-0.15
	3以上	-0.06	0.40	-0.08	-0.18
	4	0.26	0.47	0.13	-0.04
避難行動	1以上	0.02	0.45	-0.26	-0.24
	2以上	0.08	0.40	-0.03	-0.29
	3	0.19	0.62	0.15	-0.11

表-5 実験条件の違いによる評価式の補正

項目	レベル	基本条件		実験条件の違いによる $\Delta\mu$			
		$\mu$	$\sigma$	立位	前後	暗い環境	家具転倒無
不安度	2以上	5.61	0.29	-0.2	-0.5		+0.1
	3以上	6.03	0.27	-0.2	-0.5		+0.1
	4	6.34	0.21	-0.2	-0.5		+0.1
行動難度	2以上	5.39	0.23		-0.5		+0.2
	3以上	5.70	0.23		-0.5		+0.2
	4	6.18	0.18	-0.2	-0.5	-0.2	
避難行動	1以上	5.19	0.28		-0.5		+0.2
	2以上	5.88	0.24	-0.1	-0.5		+0.2
	3	6.36	0.16	-0.2	-0.5	-0.2	+0.1

の影響については、基本条件下(VR映像を流さない)と家具転倒無の場合でほとんど差がなかったため、家具転倒無の補正值は基本条件下の評価曲線に直接加算することができる。

## 2.4 既往の研究との比較

図-10は本研究の評価曲線とTakahashiらの振動台実験に基づく性能評価曲線<sup>3)</sup>、肥田・永野らのアンケート調査に基づく評価曲線<sup>4)</sup>を比較している。同図では、本研究の評価曲線において不安度2以上、行動難度3以上の超過確率が90%となるSI、Aの値から、 $T$ と $V$ の関係を計算し曲線を描いている。既往の研究の評価曲線について、Takahashiらの評価曲線については不安度2(anxious)、行動難度3(much unstable and hard to action)に該当する曲線、肥田・永野らの評価曲線については不安度が『3.怖かった』、行動難度が『3.立っていることができなかった』に該当する曲線を描いている。本研究のSIを用いた評価曲線はTakahashiらの評価曲線と傾きが概ね同様であることが確認できる。肥田・永野らの評価曲線と比較すると、肥田・永野らの評価曲線の不安度、行動難度は、同じ揺れのレベルにおける本研究およびTakahashiらの評価曲線の値よりも高くなる。本研究の評価曲線、Takahashiらの評価曲線ともに1方向正弦波加振の実験結果を基に作成しているのに対し、実地震時には3方向かつ不規則に揺れていること、揺れることが分かっている振動台実験と予期していなかった実地震時の心理状態の差などが原因として考えられる。次に、肥田・永野らが提案する避難行動不可能率<sup>5)</sup>と本研究の評価曲線の比較を図-11に示す。尚、避難行動不可能率は加速度 $A$ を用いて表されているため、本研究の評価曲線も $A$ を用いた評価曲線で比較している。肥田・永野らは『揺れに翻弄され、

自分の意志で何もできなかった』および『立っていることができなかった』と回答した場合を避難行動が不可能であったと考え、回答者に占める割合を避難行動不可能率と定義している。このレベルは、本研究の評価曲線における行動難度3以上、避難行動2以上と同等であると考えられる。図-11より、避難行動不可能率は本研究の評価曲線の行動難度2以上と避難行動1以上とほぼ同程度であり、超過確率50%時の $A$ は行動難度3以上が約2倍、避難行動2以上が約2.5倍である。避難行動不可能率の方が本研究の評価曲線で同等のレベルよりも高くなった要因として、避難行動不可能率を算出した振動台実験では東北地方太平洋沖地震の強震記録を用いて3方向加振を行っていること、継続時間が長いこと等が考えられる。これらの結果より、実地震時の心理状態を評価曲線に考慮する方法を今後検討していく必要がある。

## 2.5 大地震の揺れとの対応

性能評価曲線と過去の大地震で観測された揺れの対応について考察するため、不安度、行動難度の超過確率が50%となるときの $A$ ・ $V$ 関係、兵庫県南部地震での地表の揺れおよび東北地方太平洋沖地震での地表の揺れ、建物応答を併せて図-12に示す。兵庫県南部地震については地表(地盤)で計測震度6以上が観測された地点の最大値の範囲、東北地方太平洋沖地震については、仙台と東京の気象庁観測点で観測された最大値を示している。建物応答については、東北地方太平洋沖地震において、宮城県、首都圏および大阪の咲洲庁舎で観測された建物の最上階の応答を中高層、超高層に分けて示している<sup>4)10)11)</sup>。地表の揺れをみると、東北地方太平洋沖地震については、首都圏では不安度2以上を感じる人の割合は50%に届かないが、宮城では50%以上の人が不安度2以上と感じる揺

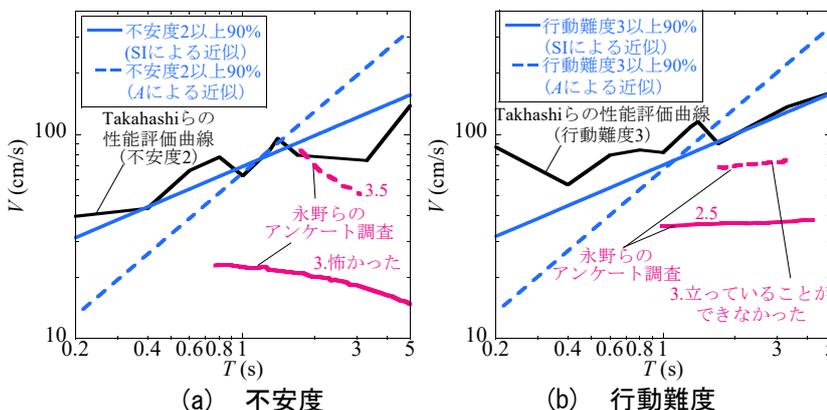


図-10 既往の研究との比較

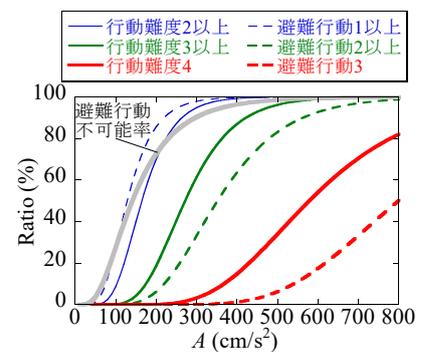


図-11 肥田・永野らの避難行動不可能率との比較

れとなっている。東北地方太平洋沖地震と同じく震度7が観測された兵庫県南部地震については、東北地方太平洋沖地震よりも揺れが大きく、不安度のレベルは3~4となっている。東北地方太平洋沖地震時の建物応答に着目すると、首都圏では中高層建物に比べ超高層建物の応答が大きい。超高層建物の応答にはばらつきがあり、大きいところでは不安度のレベルは3以上である。一方、宮城では超高層建物、中高層建物ともに50%以上の人不安度4を感じる揺れのレベルとなっており、特に中高層建物の応答が大きいところでは90%の人が不安度4を感じる揺れのレベルに対応している。大阪の咲洲庁舎については、50%の人が不安度2以上を感じる揺れのレベルになっている。尚、評価に用いた性能評価曲線は継続時間の影響を考慮できていないため、特に超高層建物については不安度が過小評価となっている恐れがある。行動難度に着目すると、東北地方太平洋沖地震時の建物応答は、宮城の中高層、超高層建物で50%以上の人行動難度4を感じる揺れのレベルであり、首都圏の超高層建物も50%以上の人行動難度3以上を感じる揺れとなっている。

### 3. 地震体験の揺れに対する感覚

技術研究所では、来訪者向けに大振幅振動台「E-Spider」による地震体験プログラムを提供している。このプログラムでは、ウォーミングアップ(東京で観測された震度4の揺れ)、兵庫県南部

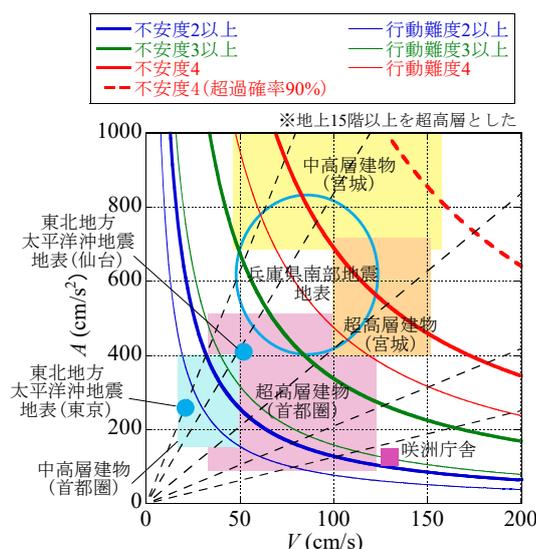


図-12 性能評価曲線の超過確率50%時の揺れの大きさと大地震の揺れの比較

地震による耐震マンションと免震マンションの揺れ(振幅を半分にした震度6強、5弱)、東北地方太平洋沖地震で観測された超高層建物の揺れ(震度6弱)の5種類の揺れ(水平2成分+上下)を提供している。本章では、同じ地震体験プログラムを当社OB、学協会からの見学者、社内関係者を対象に実施した際に得られたアンケート結果と性能評価曲線との対応を考察するとともに、地震時に観測された3方向の揺れ(地震体験)と1方向の正弦波(被験者実験)に対する人の感覚を比較する。

地震体験のアンケートは89名分を集計した。質問項目と回答者の内訳をそれぞれ表-6, 7に示す。

揺れに対する不安感・恐怖感および行動難度について集計した結果を図-13に示す。SIは、水平2成分の最大値で表している。不安・恐怖を感じた割合(不安度2以上)、かなり不安・恐怖を感じた割合(不安度3以上)、体が大きく振られたが立っていられた(行動難度2以上)、両手で手摺を強く握らないと立っていられなかった(レベル3以上)の割合について、被験者実験から定めた性能評価曲線と比較している。揺れが最も小さいウォーミングアップの揺れに対して不安・恐怖を感じた人や立っていられなかった人の割合は低く、被験者実験結果と整合している。免震マンションの揺れに対しては、不安・恐怖および行動難度の割合はともに被験者実験より高い。これは、水平より上下の振幅値が大きいことが影響していると考えられる。継続時間の長い超高層の揺れに対しては、不安・恐怖を感じた割合は被験者実験より高いが、行動難度の割合は同等である。このことから、不安・恐怖は揺れの大きさだけでなく、継続時間が影響することが推察される。揺れが最も大きい耐震マンションの揺れに対しては、両手で手摺を強く握らないと立っていられない(行動難度3以上)の割合を除くと、地震体験時の行動難度は被験者実験より同じかやや低いレベルである。行動難度

表-6 質問項目

質問	回答方法
揺れに対する不安感・恐怖感	5レベル(全く感じなかった~非常に感じた)から選択
揺れに対する行動難度	5レベル(普通に立っていられた~立っていられなかった)から選択
震度からイメージする揺れとの違い	5レベル(小さい~大きい)から選択
揺れの最中に考えたこと	8つの例について該当するものを全て選択
自宅が同じように揺れたらどうなるか	6つの例について該当するものを全て選択
防災力向上に役に立つか	3つの例について該当するものを全て選択

表-7 回答者の内訳

回答数		89
性別	男性	85
	女性	4
年齢	20代	2
	30代	4
	40代	19
	50代	25
	60代	22
	70以上	17
姿勢	座位	42
	立位	46

3 以上については被験者実験よりかなり低く、座位で立ってられるかを想像するより、実際に立位で体験した場合の方が性能評価曲線との差が最も大きい。耐震マンションの揺れは、直下地震の応答波形であり、被験者実験で用いた正弦波のように特性の周期成分が連続してないため、人の体が大きく振られる時間は被験者実験より短かった可能性がある。

震度からイメージする揺れとの比較を図-14に示す。不安度や行動難度の割合が高かった超高層建物と耐震マンションの揺れに対して、震度からイメージする揺れより大きいと感じた割合が高かった。体験者の姿勢で比べると、揺れが大きいと感じた割合は、超高層建物の揺れでは立位の方が高く、耐震マンションの揺れでは座位の方が高かった。これは、体が大きく振られる超高層建物の周期の長い揺れでは座位の方が体を安定しやすく、加速度が大きくても周期が短い耐震マンションの揺れでは、立っていても両足でバランスが取れ、座位では座面で滑って

両足の踏ん張りがきかなくなると体が振られる傾向があったことが要因として考えられる。

揺れの最中に考えたこと・自宅が同じように揺れたらどうなるかについての回答結果を図-15に示す。「自宅で体験したら大変になりそう」と回答した割合は、超高層建物の揺れより耐震マンションの揺れで高かった。また、100秒間揺れが続く超高層建物の揺れに対しては「早く揺れがおさまって欲しい」と回答した割合が高い。自宅が同じように揺れた場合「今回より不安や恐怖が増す」と回答した割合は高くなかった。安全については「問題ない」より「ものが動いたり倒れたりして危険」や「建物が損傷する」と回答した割合が高かった。

地震体験の効果を図-16に示す。半数以上の人々が「これまでより冷静に対応できる」や「地震対策の見直しのきっかけにしたい」など地震の対応力の向上に役立てたいと回答しており、地震体験の効果を示している。

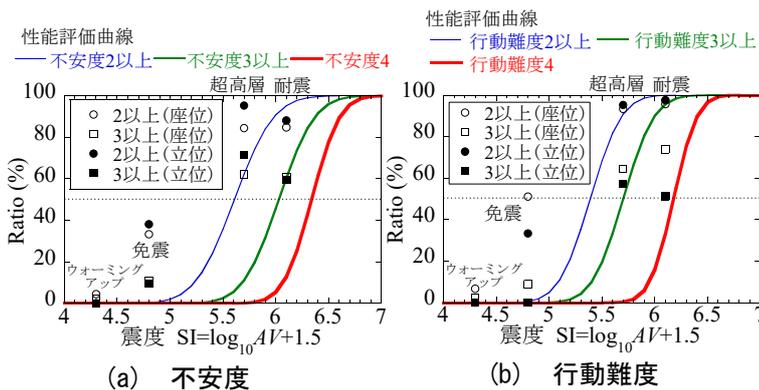


図-13 地震体験の揺れに対する不安度と行動難度

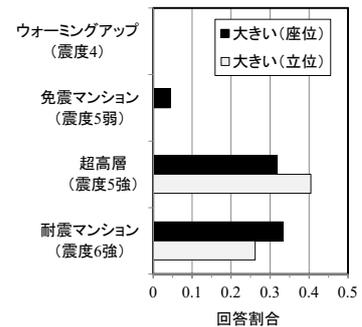
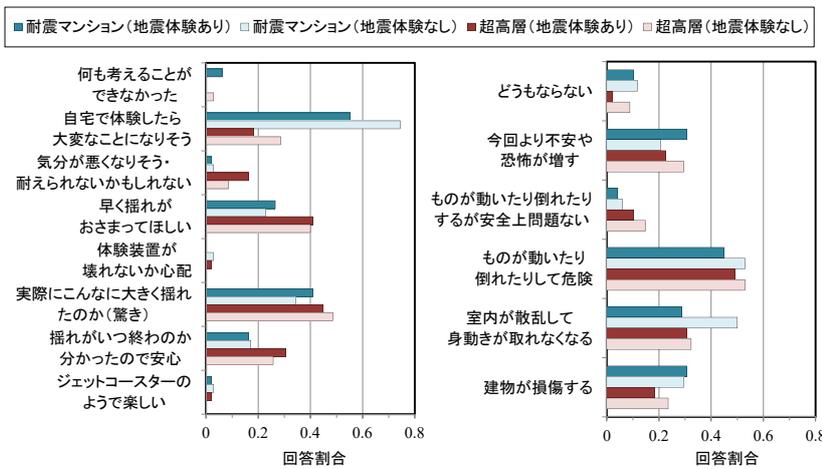


図-14 震度からイメージする揺れとの比較



(a) 揺れの最中に考えたこと (b) 自宅が同じように揺れたらどうなるか

図-15 揺れの最中に考えたこと・自宅が同じように揺れたらどうなるかに対する回答

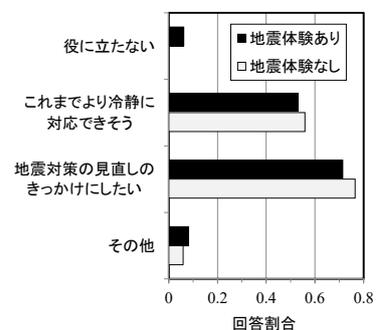


図-16 地震体験の効果

#### 4. まとめ

本研究では、既往の研究と同様の条件で被験者実験を行い、不安度・行動難度を感じる人の割合を揺れの大きさに対する正規確率分布関数で表すことにより、揺れの大きさと人の感覚の関係を表す性能評価曲線を単純な関数で定めた。また、揺れの大きさ以外に被験者の姿勢や室内明るさなど条件を変えた実験を行い、条件の違いを正規確率分布関数の平均値の違いで単純に表した。

被験者実験の結果から定めた評価曲線より以下のことが分かった。

- ・ 揺れの大きさを加速度または  $A \times V$  から定めた震度  $SI$  で表すと実験結果を良く表せる。
- ・ 50%以上の人々が  $SI=5.2$  で身の危険を感じ、避難行動をとろうと感じるようになり、 $SI=5.6$  で不安を感じ始めるようになる。
- ・ 揺れ以外の条件について、同じ揺れに対して不安度を高くする影響が大きいのは加振方向、家具の転倒の有無で、家具の転倒が無いと不安度を低くし、室内の明るさは不安度への影響は小さい。
- ・ 地震体験プログラムにおいて地震時に観測された揺れに対する人の感覚を調査したところ、不安を感じる割合は正弦波を用いた性能評価曲線より高く、その差は継続時間の長い揺れほど大きい傾向にある。行動難度は性能評価曲線と大きな差はない。

#### 謝辞

本研究では、被験者実験、地震体験において当社OB、学協会からの見学者、社内関係者、研究所内の多くの方々にご協力いただきました。ここに記して御礼申し上げます。

#### <参考文献>

- 1) 飯場正紀, 大川出, 斉藤大樹, 森田高市, 長谷川隆: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震において観測された強震記録に基づく建築物の地震時挙動の分析, 建築研究所資料, No.138, pp.(5-1)-(5-14), 2012.9
- 2) 後藤剛史: 居住性に観点を置いた高層建築物に生じる振動の評価に関する研究, 日本建築学会論文報告集, No.237, pp.109-119, 1975.11
- 3) Takahashi, T., Suzuki, T., Saito, T., Azuhata, T. and Morita, K.: Shaking Table Test for Indoor Human Response and Evacuation Limit, Journal of 5th International Conference on Earthquake Engineering, pp.187-193, 2010.3
- 4) 肥田剛典, 永野正行: アンケート調査と強震記録に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震時における超高層集合住宅の室内被害-不安度と行動難度および家具の転倒率の検討-, 日本建築学会構造系論文集, No.677, pp.1065-1072, 2012.7
- 5) 肥田剛典, 永野正行, 田沼毅彦, 金子宣行: 超高層集合住宅における 2011 年東北地方太平洋沖地震時のアンケート調査および振動台搭乗実験に基づく地震時避難行動不可能率, 日本建築学会技術報告集, No.45, pp.521-526, 2014.6
- 6) 金子貴司, 田上淳, 大類哲, 福島出, 鈴木芳隆, 阿部雅史: 大振幅振動下における行動難度及び心理的影響に対する実験的研究その 1, 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.859-862, 2015.9
- 7) 金子美香, 熊谷仁志, 岡田敬一: 三次元大型振動台と三次元大振幅振動台の開発, 日本地震工学会論文集, Vol.16, No.9, 2016.8.
- 8) 岡沢理映, 神原浩, 猿田正明: 被験者実験による揺れに対する人の感覚の定量化に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.909-910, 2016.8
- 9) 武村雅之: 地震動と被害の関係を探る-” 大加速度なのにどうして被害が出ないのか” の裏に隠された地震動の性質とは?- , 震災予防 No.191 pp.35-39, 2003.7
- 10) 日本建築学会東北支部: 東北地方で観測された 2011 年東北地方太平洋沖地震の建物・地盤系強震データ集
- 11) 鹿嶋俊英, 小山信, 大山出: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震における建物の強震観測記録, 建築研究資料, No.135

