



瞬間計測震度を用いた揺れ最中の避難行動可能時間の定量化

鋤田泰子¹⁾、齊藤 栄²⁾

1) 正会員 神戸大学大学院工学研究科 准教授 博(工学)

e-mail: kuwata@kobe-u.ac.jp

2) 非会員 神戸大学大学院工学研究科

要 約

本文は、想定地震において地震動強度だけでなく地震の揺れ最中に避難行動が可能な時間を定量的に示し、持ち時間に応じた最適な避難対策につなげることを目的としている。地震時の人間行動に関する研究には震度と関連づけられたものが多いことから、地震の揺れ最中の避難行動可能時間は時々刻々の計測震度の推移を評価できる瞬間計測震度を用い、過去の地震記録を地震のタイプごとに定量的に整理した。本研究により地震揺れ最中の行動可能な時間を震源距離と地震規模で推定することが可能となった。

キーワード： 避難行動可能時間、瞬間計測震度、地震タイプ、リアルタイム地震防災

1. はじめに

平成19年10月1日から気象庁により一般向けにテレビ・ラジオ等による緊急地震速報の報知が開始された¹⁾。緊急地震速報は地震発生後に震源に近い地震計でP波を検知し、遠方でS波が到達する前にこれから揺れることを伝達する情報である。交通輸送ライフラインや産業施設、危険物取扱施設の自動制御の他に、人間の危険回避のための時間確保など、各方面での被害軽減が期待される。一般への地震の情報提供では断層の長期評価や数十年、数百年単位の地震危険度評価などが進められてきたが、緊急地震速報は、情報発信から足元で揺れるまでの短時間における地震情報の提供となる。地震情報の提供内容や提供方法には対象となる時間間隔に応じた工夫が必要である。

地震ハザードマップや緊急地震速報などを含め、これまでの地震学・地震工学の研究成果は、加速度や震度などの地震動強度指標を用いて評価されてきた。地震動の揺れやすい地域やそのレベルを示し、住民に地震被害をイメージさせることによって防災対策につなげることは重要である。しかし、地震多発国である日本の住民でも、一生に震度7の地震動を経験し、さらに次の大地震に遭遇するケースは稀である²⁾。一般の住民が、被害想定等で提供される未経験の地震動強度の情報を理解し、個々の防災対策に活用するまでには限界がある。住民に分かりやすい言葉で説明し、理解を得るための一つの方法として、地震動情報をそのまま伝えるのではなく、地震動情報とともに住民に与えられた揺れ最中の避難行動可能な持ち時間情報を付加し、避難行動に直接反映できる具体的な方策を提示することが考えられる。さらに、避難訓練で避難行動可能な持ち時間中に行動できることを予め体験すれば、個人レベルで地震対策を考える機会を与えることができる。地震の揺れ体験は震動台がなければできないが、持ち時間の体験は特別な機材やお金を必要としない。住民に災害の恐怖心を与える強震動や甚大な被害などの被害想定の情報提供よりも、住民が地震時に積極的に行動するための情報提供の方が、防災対策に取り組む

ための姿勢として建設的である。

本研究では、想定地震の地震動マップにおいて地震動強度だけでなく地震の揺れ最中に行動可能な時間を具体的に示し、時間に応じた最適な避難対策につなげることを目的としている。まず、人間が揺れを覚知して行動支障に至るまでの時間を地震の揺れ最中の避難行動可能時間として定義をする。揺れ最中の人間行動に関する研究は後述するように震度と関連づけられたものが多い^{(3)・(11)}ことから、避難行動可能時間の評価には時々刻々の計測震度の推移を評価できる瞬間計測震度を用い、地震のタイプごとに過去の地震の観測記録の整理を行う。想定地震におけるそれぞれの場所での持ち時間が明らかになれば、避難訓練などで許された持ち時間内にできることを試し、個々が身の安全を守るための有効な避難手段を考え、対策をとる機会を与えられる。結果として地震時の死傷軽減につながると期待できる。

現在、緊急地震速報は地震波形の収録・解析と情報発信の時間のために震源距離30km圏内ではS波到達までに届かないことが指摘されている⁽¹²⁾が、本研究の避難行動可能時間の定量化によって緊急地震速報のおかげで1秒でも避難行動時間に余裕ができることが明確になれば、速報の長所の明確化と今後の効率的な活用にも寄与できる。

2. 瞬間計測震度による揺れ最中の人間行動の計測

2.1 揺れ最中の死傷危険フェーズと避難行動可能時間の定義

避難行動のできる時間を計測するには、揺れ最中における人間行動や人間周辺の状況を整理することが第一である。地震時の死傷に関わる人間行動・人間周辺環境は段階的に変化するものと考え、人間の死傷危険に関わる状態を「死傷危険フェーズ」として定義することを試みる。死傷危険フェーズの状態を説明するための条件には、(1)地震の揺れに対する人間の覚知、(2)人間の避難行動の可否、(3)生存空間の確保が挙げられる。地震時にはこれらの条件が段階的に変化する、条件の組み合わせによって死傷危険フェーズを説明できると考えられる。人間の避難行動が、揺れの感じ、危険を認知し、避難行動を選択するプロセスの下で行われると仮定すると、(1)の揺れに対する覚知の条件は、避難行動開始のトリガーといえる。揺れを覚知しなければ、外的環境条件のみに死傷危険状態に支配される。(2)の人間の避難行動の可否は、ある地震動の下で人間の避難行動が能動的に可能であるための条件である。避難行動が不可能になれば身を守れず、外的環境条件に死傷危険は支配される。(3)の生存空間の確保は、外的環境条件であり、本研究では外的環境が乱されなければ死傷危険はないと考えた。

死傷危険フェーズは表1に示す 避難行動可能フェーズ(フェーズ1)、避難行動支障フェーズ(フェーズ2)、外的要因支配フェーズ(フェーズ3)の3つのフェーズに分類される。エレベータの中や地下街などの居場所や、睡眠時などの時間帯、さらに年齢などの個人属性によって条件は変わるが、起床時の自宅内での被災ケースを主として、死傷危険フェーズは基本的に、の順に発生するものとする。また、フェーズ1からフェーズ3へと遷移する段階には遷移点が存在し、地震の揺れに対する人間の感覚や行動、物体の応答の状態変化を示す限界によって示される。

表1 地震揺れ最中の死傷危険フェーズ

死傷危険フェーズ	揺れの覚知 (○:覚知、 ×:無)	避難行動の可否 (○:可能、 ×:不可能)	生存空間の確保 (○:確保、 ×:無)	説明
日常状態: (フェーズ0)	×		○	人間が地震に気づかず日常通りの生活を行っている
避難行動可能フェーズ: (フェーズ1)	○	○	○	人間が地震の揺れを覚知し、死傷回避のために避難行動をとれる
避難行動支障フェーズ: (フェーズ2)	○	×	○	人間が地震の揺れを覚知しているが、能動的に避難行動を行えず、行動に支障を来している
外的要因支配フェーズ: (フェーズ3)	○	×	×	地震の揺れ以外の外的要因(例えば、家の倒壊、家具転倒)により、避難行動が抑制されている

本研究は主にフェーズⅠの避難行動可能な時間に着目しており、揺れの覚知限界と避難行動支障に至る限界を定義して、避難行動可能時間で定量的に示すことが必要である。地震時の揺れの感じやすさや揺れ最中の人間行動と地震動強度とを関連付けた既往の研究はいくつかある。太田ら^{3), 4)}は、地震時の人間行動と震度の関係について先駆的に調査・分析を行い、震度に応じて覚知や避難行動が変化すること示している。岡田・鏡味⁵⁾が提案しているバルナラビリティ関数の一つに揺れ最中の行動支障の関数があり、行動支障時の平均震度は5.08と示されている。小坂⁶⁾は地震時の行動量と震度との関係について分析し、行動量のピークを行動制約震度とした場合、地震時の出火防止行動（ストーブを止める、ガスを消すなどの行動）の制約震度は震度4と示している。気象庁震度階級関連解説表⁷⁾では、「多くの人が行動に支障を感じる」ことが始まる計測震度は5.0、「屋内にいる人の多くが、揺れを感じる」ことが始まる計測震度は1.5と規定されている。高田ら⁸⁾は、ドライバーの自動車走行時の揺れの感じやすさについて調査した結果、震度5弱の時に走行中に運転支障を感じるドライバーが多いことを示している。岡田⁹⁾は太田らの研究^{3), 4)}を発展させて、ヒアリング調査から地震動の時間帯域で住民の行動種別が異なることを示している。人間行動と加速度を関連づけた実験研究¹⁰⁾もあるが、周波数ごとに整理されていることから加速度のみで評価することは難しく、高木¹¹⁾が指摘するように震度の方が人間行動を評価するには良いと考えられる。

地震時の人間行動に関する研究には震度と関連付けた研究が多い点、広く社会に認知された震度で説明できれば一般住民の理解が得やすいという点を考慮して、本研究では評価指標に計測震度を用いる。地震時の人間の避難行動開始（地震動の覚知）避難行動限界はそれぞれ計測震度1.5、4.0～5.0と設定し、地震時の人間の避難行動可能時間の分析を行う。避難行動限界に4.0～5.0の幅を持たせているのは、限界値には揺れ最中の人間行動条件による曖昧さを有しており、現在の研究段階で一つの値には決められないためである。また、避難行動可能時間を決める計測震度は揺れ最中の人間の感覚や行動限界の平均像として設定したもので、人間の年齢や性別、身体能力、揺れ最中の行動などの要因によって限界となる震度にはばらつきが生じる。人間属性のばらつきについては本稿では取り扱わないが、人間属性と震度と人間の感覚や行動に関する研究が定量的に示されれば、本研究と関連づけられる可能性はある。

2.2 瞬間計測震度による計測

平成8年から気象庁の震度は体感震度から観測波形に基づいて算出される計測震度に変更された。計測震度の算出方法は平成8年気象庁告示第4号⁷⁾で以下通りに示されている。まず、一定時間蓄積された3成分の加速度波形をそれぞれ周波数領域でフィルタ処理を施し、3成分フィルタ波形をベクトル合成して振幅時系列 $v(t)$ を得る。この振幅時系列から振幅 a 以上の継続時間 $\tau(a)$ の関数を求め、 $\tau(a) \geq \tau_0$ ($\tau_0 = 0.3$ 秒)となる振幅 a_0 を求め、河角の式に代入することにより計測震度は算出される。この算出手法では60秒（気象庁の運用上の波形時間）の波形から一つの計測震度が算出されるが、地震時の人間の避難行動可能時間の評価を行うには、時々刻々と変化する計測震度の推移を把握する必要がある。

計測震度の時間的推移の評価に関する研究は、震度を監視対象とした警報・制御システムの構築を目的として数多く行われている。功刀ら¹³⁾は時間領域の近似フィルタを用いることによる震度のリアルタイム演算法を提案している。リアルタイム震度は最新の60秒間の波形における計測震度の最大値の時間的な推移を示すため、最終的には計測震度に収束し、本研究が目的とするピーク後の計測震度の減少を評価できない。石垣は¹⁴⁾加速度と加速度から漸化式によって求められる速度とその他のパラメータの組み合わせで回帰式を用いて直接震度を概算する方法を提案している。この手法は本来の計測震度の演算方法の簡略法であり、その計算精度や適用範囲については限界があると考えられる。

本研究は現段階ではリアルタイム性を追求しておらず、観測波形から計測震度の推移を精度よく評価することが必要である。そこで、著者らが提案している瞬間計測震度（Instantaneous instrumental seismic intensity、IISI）¹⁵⁾を用いる。著者らは既往の観測波形で試行的に検討したが、指標の精度や地震規模・地震タイプの特性を十分考慮したものではなかった。気象庁の計測震度はフィルタ処理されたベクトル合成波 $v(t)$ の全時間帯から算出された一つの計測震度であるが、瞬間計測震度 $IISI(t|\Delta t)$ はベクトル合成波 $v(t)$ のある単位時間帯 $[t, t + \Delta t]$ から算出される計測震度としている。

計測震度の算出方法の表記に従い瞬間計測震度の算出方法をまとめる。一定時間蓄積された3成分の加速度波形をそれぞれ周波数領域でフィルタ処理を施し、3成分フィルタ波形をベクトル合成して振幅

時系列 $v(t)$ を得る。この振幅時系列から $[t, t + \Delta t]$ の単位時間帯における振幅 a 以上の継続時間 $\tau(a | t, \Delta t)$ の関数を下式で求める。

$$\tau(a | t, \Delta t) = \int_{[t, t + \Delta t]} w(x, a) dx \quad (1)$$

$$w(t, a) = \begin{cases} 1 & (v(t) \geq a) \\ 0 & (v(t) < a) \end{cases} \quad (2)$$

計測震度と同様に、継続時間 $\tau(a | t, \Delta t) \geq \tau_0 (=0.3 \text{ 秒})$ となる振幅 $a_0(t | \Delta t)$ を求め、河角の式(3)に代入することにより計測震度は算出される。

$$HSI(t | \Delta t) = 2 \log a_0(t | \Delta t) + 0.94 \quad (3)$$

なお、 $HSI(t | \Delta t) > 0.0$ となる時間 t を瞬間計測震度の開始時刻とする。 t を微小時間ごとに算出すれば $HSI(t | \Delta t)$ の推移を捉えることができる。

3. 地震タイプと避難行動可能時間の分析

3.1 地震記録データベース

分析に用いた地震記録は 2000 年以降に発生したマグニチュード M_j 6.0 の 38 地震において防災科学技術研究所の強震ネットワーク (K-NET) の地震計で観測された震央距離 100km 以内の 1,030 記録である。表 2 に本研究で用いた 38 地震を示す。地震の諸元は気象庁地震火山月報 (防災編)¹⁶⁾ を参照し、地震は地殻内地震 (Crustal)、プレート境界地震 (Inter-plate)、スラブ内地震 (Intra-plate) の 3 種類の地震タイプに分類した。図 1 に分析に用いた地震のタイプと震源深さの関係を示す。地殻内地震の震源深さは 20km 以内に、プレート境界地震の大部分の震源深さは 50km 以内に分布しているが、スラブ内地震の震源深さのばらつきは大きく、100km 以上の震源深さもある。分析では震源距離を指標にして分析を行う。地殻内地震で断層面が明らかな場合、震源距離は断層面までの最短距離とした。図 2 は各記録の震源距離と計測深度との関係を示している。多くの地震は計測震度 4.0 以下にある。スラブ内地震では遠方でも大きい震度が観測されている。表 3 は本研究に用いる地震動記録を整理したものである。1,030 記録のうち、瞬間計測震度 4.0 に到達した地震動記録は 346 記録、瞬間計測震度 5.0 に到達した地震記録は 79 記録であった。表 3 に示す地盤種別は K-NET で提供されている表層 20m の地盤のせん断波速度から道路橋示方書¹⁷⁾ に基づいて地盤の周期を算出し、種、種、種に記録を分類したものである。

表 2 分析に用いた地震のデータベース (防災科学技術研究所の強震ネットワーク (K-NET) の記録に基づく)

No.	Hypocenter	Date	M_j	Depth (km)	Fault Type	Record	No.	Hypocenter	Date	M_j	Depth (km)	Fault Type	Record
1	千葉県東方沖	2000.06.03	6.1	50	Inter	52	20	留萌支庁南部	2004.12.14	6.1	9	Crustal	33
2	茨城県沖	2000.07.21	6.4	50	Inter	26	21	釧路沖	2005.01.18	6.4	50	Inter	22
3	鳥取県西部	2000.10.06	7.3	10	Crustal	46	22	福岡県北西沖	2005.03.20	7.0	9	Crustal	38
4	安芸灘	2001.03.24	6.4	51	Intra	54	23	千葉県北東部	2005.04.11	6.1	52	Inter	56
5	岩手県内陸南部	2001.12.02	6.4	122	Intra	43	24	宮城県沖	2005.08.16	7.2	42	Inter	4
6	宮城県沖	2003.05.26	7.1	72	Intra	24	25	茨城県沖	2005.10.19	6.3	48	Inter	30
7	宮城県中部	2003.07.26	6.4	12	Crustal	35	26	種子島近海	2005.11.22	6.0	146	Intra	21
8	十勝沖	2003.09.26	8.0	45	Inter	4	27	宮城県沖	2005.12.17	6.1	40	Inter	10
9	十勝沖	2003.09.26	7.1	21	Inter	7	28	大分県西部	2006.06.12	6.2	146	Intra	35
10	十勝沖	2003.09.26	6.1	27	Inter	3	29	十勝沖	2007.02.17	6.2	40	Inter	7
11	釧路沖	2003.09.29	6.5	43	Inter	8	30	能登半島沖	2007.03.25	6.9	11	Crustal	24
12	釧路沖	2003.10.08	6.4	51	Inter	13	31	新潟県上中越沖	2007.07.16	6.8	17	Crustal	35
13	新潟県中越地方	2004.10.23	6.8	13	Crustal	48	32	福島県沖	2007.11.26	6.0	44	Inter	10
14	新潟県中越地方	2004.10.23	6.3	9	Crustal	44	33	岩手県内陸南部	2008.06.14	7.2	8	Crustal	49
15	新潟県中越地方	2004.10.23	6.0	12	Crustal	37	34	岩手県沿岸北部	2008.07.24	6.8	108	Intra	34
16	新潟県中越地方	2004.10.23	6.5	14	Crustal	43	35	十勝沖	2008.09.11	7.1	31	Inter	4
17	新潟県中越地方	2004.10.27	6.1	12	Crustal	14	36	十勝沖	2009.06.05	6.4	31	Inter	9
18	釧路沖	2004.11.29	7.1	48	Inter	19	37	駿河湾	2009.08.11	6.5	23	Intra	47
19	釧路沖	2004.12.06	6.9	46	Inter	15	38	薩摩半島西方沖	2009.09.03	6.0	167	Intra	28

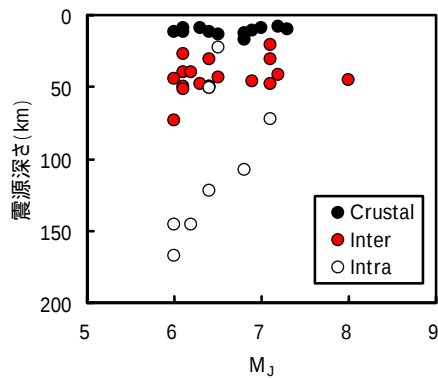


図1 地震タイプと震源深さの分布

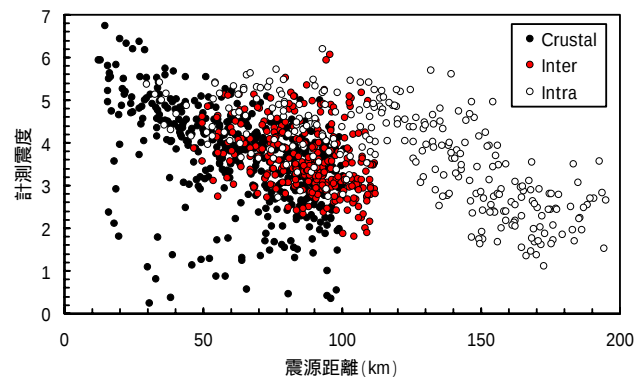


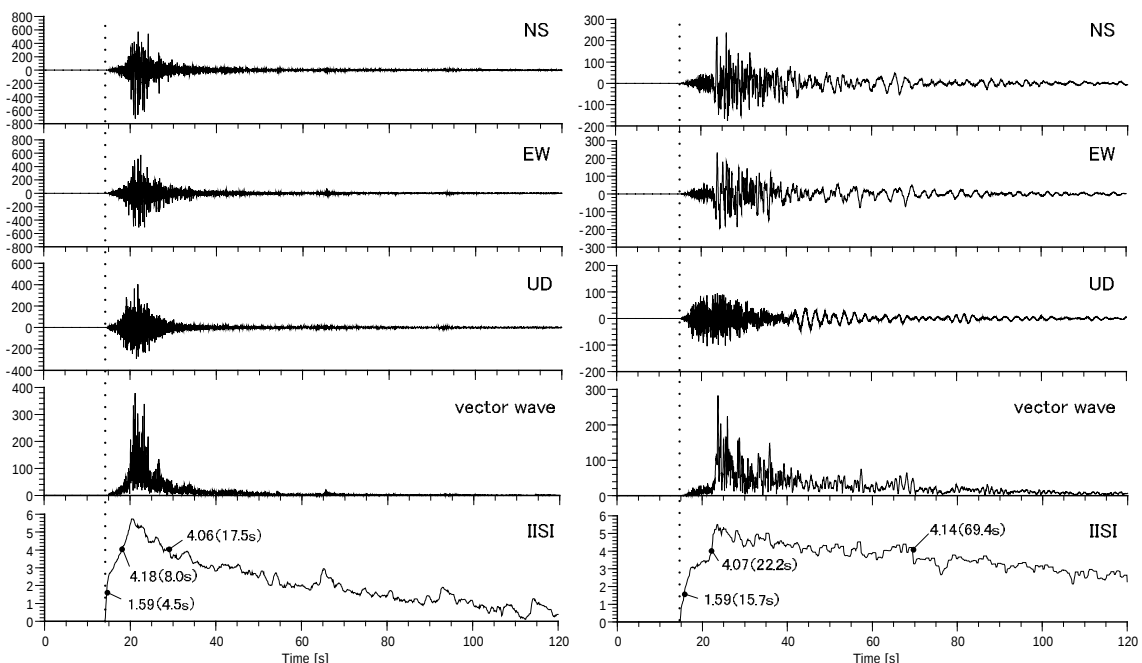
図2 震源距離と計測震度との分布

表3 地震記録データベース

地震タイプ	地震記録	地盤種別による分類			IISImax 4.0	IISImax 5.0
		I 種	種	種		
地殻内地震	446	52	83	16	151	35
プレート境界地震	298	12	57	6	75	10
スラブ内地震	286	55	57	8	120	34
合計	1,030	119	197	30	346	79

3.2 瞬間計測震度による避難行動可能時間の評価

瞬間計測震度の一例として、図3に2000年鳥取県西部地震におけるK-NETの江府観測点（TTR007）の記録と、2008年岩手・宮城内陸地震における古川観測点（MYG006）の記録を用いて、3成分の加速度波形と計測震度フィルタで処理されたベクトル合成波、瞬間計測震度を示す。単位時間帯は1.0秒とした。例に挙げた2つの地震動について、震度開始時刻からピークに到達するまでの推移を比較した場



(a) 2000年鳥取県西部地震 TTR007 観測点の記録 (b) 2008年岩手・宮城内陸地震 MYG006 観測点の記録

図3 瞬間計測震度と加速度波形との関係

(上から加速度波形南北成分、東西成分、鉛直成分、ベクトル合成波、瞬間計測震度)

合、江府観測点では震度 2.5 程度まで急速に立ち上がった後、5 秒程度かけて緩やかにピークに到達しているのに対し、古川観測点では震度開始時刻から緩やかに震度 3.5 に到達した後、2 秒程度でピークに到達していることが分かる。震源からの距離が短く、P 波、S 波の到達時間に大きな時間差が無い場合は、瞬間計測震度の立ち上がりは急であるが、震源からの距離が長く、到達時間に時間差がある場合には P 波と S 波の影響による二段階の瞬間計測震度の立ち上がりが現れる。また、瞬間計測震度のピーク後の推移に着目した場合、江府観測点では 10 秒程度で震度 4.0 以下の揺れに収束するのにに対し、古川観測点では震度 4.0 以上の揺れが 50 秒程度継続していることが分かる。計測震度算出に用いられるフィルタは人間の震動感覚・構造物の固有周期を考慮し、0.4～1.0Hz の利率が高く設定されている。古川での観測記録には後続の波形に周期 1.0～2.0 秒程度が卓越した表面波が含まれており、本研究で避難行動限界と定義する震度 4.0 以上の継続時間が長くなる。

さらに、本計算手法の特徴として、ある時刻における瞬間計測震度はその時刻からの単位時間帯の震度を算出しているために、単位時間帯 1.0 秒、継続時間 0.3 秒とすると、ベクトル波が単調増加の場合には地震波形よりも 0.7 秒早く震度はピークを迎えることになり、単調減少の場合その時間とピークの時間は整合することになる。計測震度が全時間帯におけるピークの値を算出しているのに対し、瞬間計測震度はマルチパルスを持つ地震波形でも連続的に計測震度を評価できる利点が挙げられる。また、瞬間計測震度により計測震度の時間的推移を把握することが可能になるが、単位時間帯の計測震度であるためベクトル波形のピークが複数ある場合は、瞬間計測震度の最大値は計測震度よりも小さくなる。その震度差は単位時間帯により変化するため、適切な時間帯を設定する必要がある。

本分析に用いる 1,030 地震動記録のうち、瞬間計測震度 4.0 に到達した 346 記録について、0.5、1.0、1.5、2.0 秒の 4 つの時間帯で瞬間計測震度を求め、その最大値（HISImax）と計測震度の差の平均、標準偏差を求めた（表 4 参照）。図 4 は震度差の頻度分布と、対数分布と仮定した震度差の確率分布を示している。時間帯 0.5 秒の場合、震度差は 0.2 以上になるが、1.0 秒以上になると震度差は 0.1 程度となり、分散も小さくなる。時間帯を広くすると計測震度との差は小さくなるが、瞬間計測震度のピーク周辺での震度変化を過大評価することが懸念されるため、本研究では単位時間帯を 1.0 秒として以降の分析を行う。本研究は緊急地震速報のように緊急性を求めるのではなく、震度の精度を重視しているため、緊急地震速報のように推定と観測の震度が同一階級（0.5）以内にある確率 24%と比べて遙かに推定精度は高いものであるといえる¹⁸⁾。

表 4 震度差の平均と標準偏差

単位時間帯	0.5sec	1.0sec	1.5sec	2.0sec
平均 μ	0.24	0.09	0.05	0.04
標準偏差 σ	0.12	0.07	0.06	0.05

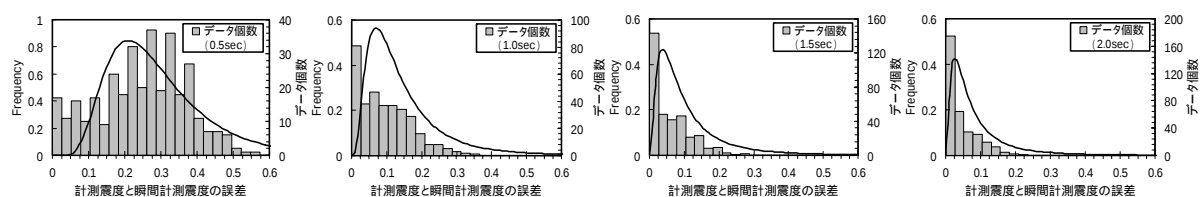


図 4 震度差の確率分布

3.3 地震タイプによる避難行動可能時間の評価

本研究では、震度開始時刻から最初に瞬間計測震度が 4.0 に達した時刻までの時間を震度 4.0 の到達時間と定義して分析する。他の瞬間計測震度 1.5、5.0 の到達時間についても同様である。震度開始時刻は $HISI(t) > 0.0$ となる時間であるため、必ずしも P 波到達時刻と一致しないことを留意されたい。

地震時の避難行動可能時間を定量化するにあたり、地震規模や地震タイプなどの震源特性、震源距離による経時特性、表層地盤の地震動増幅などのサイト特性による影響を把握する必要がある。瞬間計測震度 4.0、5.0 の到達時間を目的変数、震源距離、地震規模、地震タイプ、地盤種別を説明変数とし、モデ

ル式を下記のように設定して重回帰分析を行った。地震規模については、 $M_j 6.0$ 以上の地震規模の差を扱い、震源特性は、地殻内地震、プレート境界地震、スラブ内地震に分類した。表5は重回帰分析により得られた各回帰係数と標準偏差、標準化係数、5%有意確率を示している。

$$T_{ijk}=a_j D+b_j(M_j-6.0)+\sum c_{ij} \delta_i+\sum d_{jk} \delta_k+e_j \quad (4)$$

ここで、 T_{ijk} :地震タイプ i 、地盤種別 k の場合の計測震度の開始時刻から計測震度 j に至るまでの時間(sec)、 D :震源距離(km)、 M_j :気象庁マグニチュード、 δ_i :地震タイプのクロネッカーデルタ(プレート境界地震の場合 $i=p$ 、スラブ内地震の場合 $i=s$)、 δ_k :地盤種別のクロネッカーデルタ(種地盤の場合 $k=2$ 、種地盤の場合 $k=3$)、 a_j 、 b_j 、 c_{ij} 、 d_{jk} 、 e_j :震源距離、地震規模、地震タイプ、地盤種別による回帰係数(表5参照)

瞬間計測震度の到達時間は、震源距離と強い正の相関があり、種地盤とも表層地盤による地震動増幅の影響がみられる正の相関がある。また、プレート境界地震・スラブ内地震の回帰係数からこれらの変数と到達時間には負の相関があり、地殻内地震よりも震度の到達時間が短くなることがいえる。一方、地震規模、種地盤については瞬間計測震度4.0、5.0到達時間の条件によって、正負が異なり、目的変数に対する一定の法則性が確認できない。回帰係数は説明変数の値の大きさとばらつきに影響されるため、データの値の大きさとばらつきの標準化(平均0、標準偏差1)を行い、各説明変数の影響度と有意性を比較する必要がある。説明変数の標準化によって得られた標準化係数で目的変数に対する説明変数の影響度を比較すると、震源距離、地震タイプとの相関性が高いことがわかる。また、いずれの変数についても5%以下の有意確率が確保されており、目的変数に対して有意な関係を有している。一方、地震規模、地盤種別については有意確率が高いことがわかる。標準化係数の値から計測震度5.0に至るまでの時間に対する種地盤の影響は地震タイプよりも強いと考えられるが、説明変数の目的変数に対する有意性を考慮し、本研究では震源距離、地震タイプによる避難行動可能時間の分析・定量化を行う。

表5 瞬間計測震度4.0、5.0の到達時間の回帰分析結果

	計測震度 j	a_j	b_j	c_{pj}	c_{sj}	d_{j2}	d_{j3}	e_j	R^2
回帰係数	4.0	0.12	-0.02	-2.13	-2.05	-0.29	0.04	2.96	0.78
標準偏差 σ		32.00	0.34	0.40	0.48	0.50	0.29		
標準化係数		1.03	-0.002	-0.24	-0.27	-0.04	0.04		
有意確率		3.1E-93	0.95	4.0E-12	8.2E-11	0.18	0.91	4.7E-15	
回帰係数	5.0	0.11	0.29	-2.43	-3.03	0.26	0.83	2.87	0.85
標準偏差 σ		33.00	0.33	0.34	0.50	0.48	0.37		
標準化係数		1.16	0.03	-0.26	-0.47	0.04	0.96		
有意確率		2.7E-24	0.63	7.0E-05	1.6E-07	0.52	0.11	1.8E-05	

図5に瞬間計測震度の開始時刻から1.5、4.0、5.0に到達するまでの到達時間と震源距離の関係を地震タイプごとに示す。さらに、到達時間と震源距離との回帰直線を図5に併せて示す。瞬間計測震度1.5の到達時間はいずれの地震タイプについても1秒程度であり、震源距離によらずほぼ一定である。一方、瞬間計測震度4.0、5.0到達時間は震源距離と正の相関があり、震源から遠方に位置するほど到達時間は長くなる。また、いずれの地震タイプについても瞬間計測震度4.0と5.0の勾配はほぼ同じであり、計測震度4.0から5.0に至るまでの時間は震源距離によらず地殻内地震の場合に1.0秒、プレート境界・スラブ内地震の場合に2.0～3.0秒程度である。地殻内地震の図5(a)において遠方で瞬間計測震度4.0の近似直線の勾配が5.0のそれよりも大きいのは、遠方では地震動が減衰するために観測された計測震度5.0以下の地震動記録が少ないことが影響していると考えられる。しかし、地殻内地震の瞬間計測震度4.0と5.0の到達時間の時間差は非常に小さい。震源距離50km近傍では3つの地震タイプにおいて瞬間計測震度5.0の到達時間に大

きな差異はなく、プレート境界・スラブ内地震の場合のみ瞬間計測震度4.0の到達時間が短くなる。一方、震源距離100km近傍では、いずれの瞬間計測震度でもプレート境界・スラブ内地震の場合の方が地殻内地震より到達時間が短くなる。この原因には、地殻内地震の場合はP波の振幅が卓越するために図3(a)のように震度開始時刻が明瞭に現れ、S波の到達によって瞬間計測震度4.0、5.0の到達がほぼ同時に現れるため到達時間差が小さくなる。一方、プレート境界・スラブ内地震で震源が遠方の場合は、P波の振幅が小さいためにP波到達と同時に計測震度0.0に至らず、P波よりも瞬間計測震度の開始時刻が遅くなり、結果的に瞬間計測震度4.0と5.0の到達時間が短くなる傾向があると考えられる。

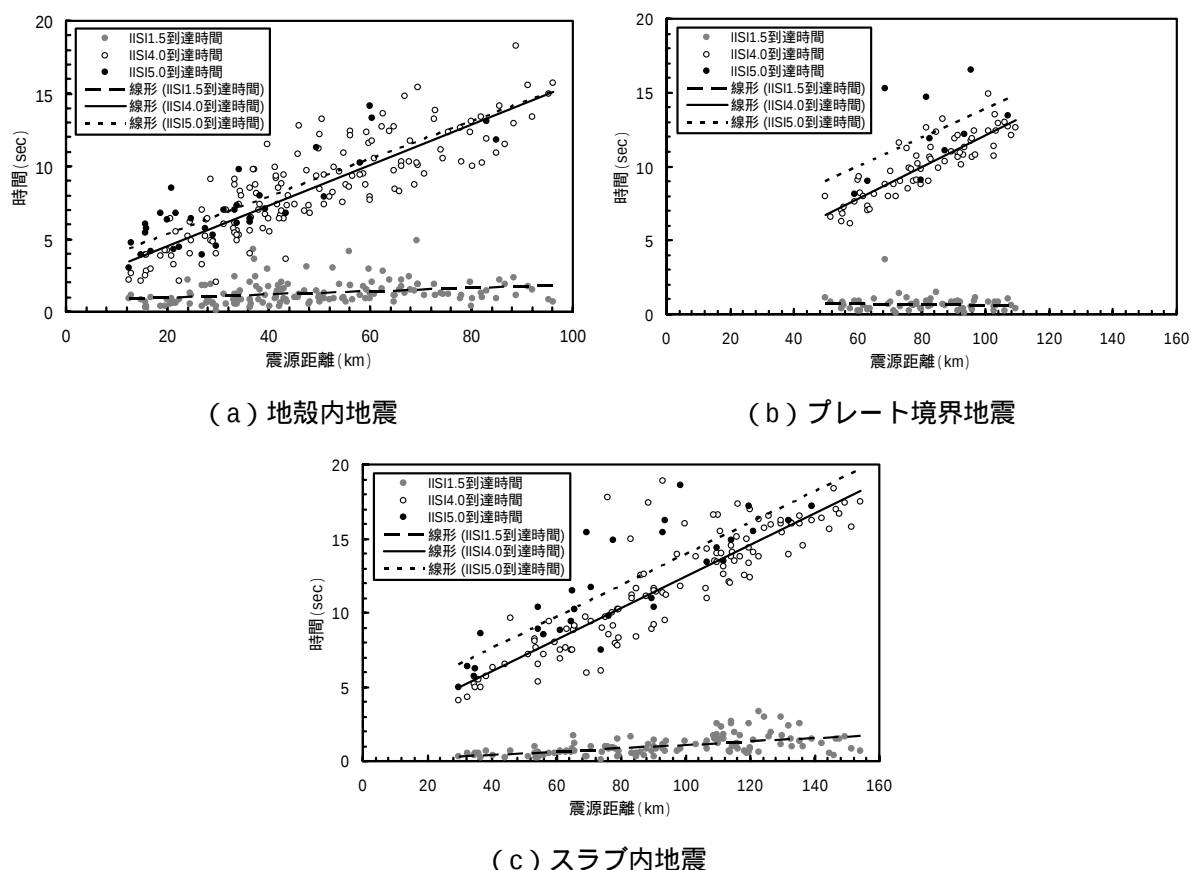


図5 震源距離と瞬間計測震度の到達時間との関係

以上の分析より、揺れ最中における避難行動可能時間は人間が地震の揺れを覚知し、身動きが取れなくなるまでの時間として、瞬間計測震度1.5から4.0、5.0の到達時間の差として定義すれば、地震タイプ、震源距離を用いることで下式による評価が可能となる。

$$T_{ij} = a_{ij}D + b_{ij} \quad (5)$$

ここで、 T_{ij} ：地震タイプ*i*の場合の計測震度*j*に至るまでの避難行動可能時間（sec）、 D ：震源距離（km）、 a_{ij} 、 b_{ij} ：地震タイプ*i*、計測震度*j*による係数（表6参照）

表6は、瞬間計測震度5.0、4.0に到達した記録のみで算定した避難行動可能時間の回帰分析の結果も示している。例えば、震源距離50kmの地点における避難行動可能時間（瞬間計測震度4.0が行動支障限界の場合）は地殻内地震の場合7.5秒、プレート境界地震の場合5.9秒、スラブ内地震の場合6.6秒程度であり、震源距離10kmにつきそれぞれ1.3秒、1.1秒、1.0秒程度の時間的余裕が生じる。

表6 避難行動可能時間算定のための係数

地震タイプ <i>i</i>	計測震度 <i>j</i>	a_{ij}	b_{ij}	σ	R^2
Crustal	4.0	0.13	0.95	1.72	0.70
	5.0	0.12	2.18	1.44	0.70
Inter -plate	4.0	0.11	0.39	0.97	0.78
	5.0	0.12	1.51	2.03	0.40
Intra -plate	4.0	0.10	1.81	1.77	0.75
	5.0	0.09	3.68	2.16	0.64

3.3 避難行動支障の継続時間評価

地震動は揺れの開始から瞬間計測震度4.0または5.0に到達した後、ある継続時間後に収束する。本研究では、震度開始後、最初に瞬間計測震度が4.0に達した時刻から最後に4.0以上の値を記録した時刻までの時間を震度4.0以上の避難行動支障の継続時間として検討を行った。瞬間計測震度5.0についても同様である。継続時間は表1のフェーズ2に関連したものであるが、ここでは外的環境の変化については考慮していない。図6は地震タイプを地殻内地震とプレート境界・スラブ内地震に分類し、震源距離と継続時間との関係を地盤種別ごとに示したものである。

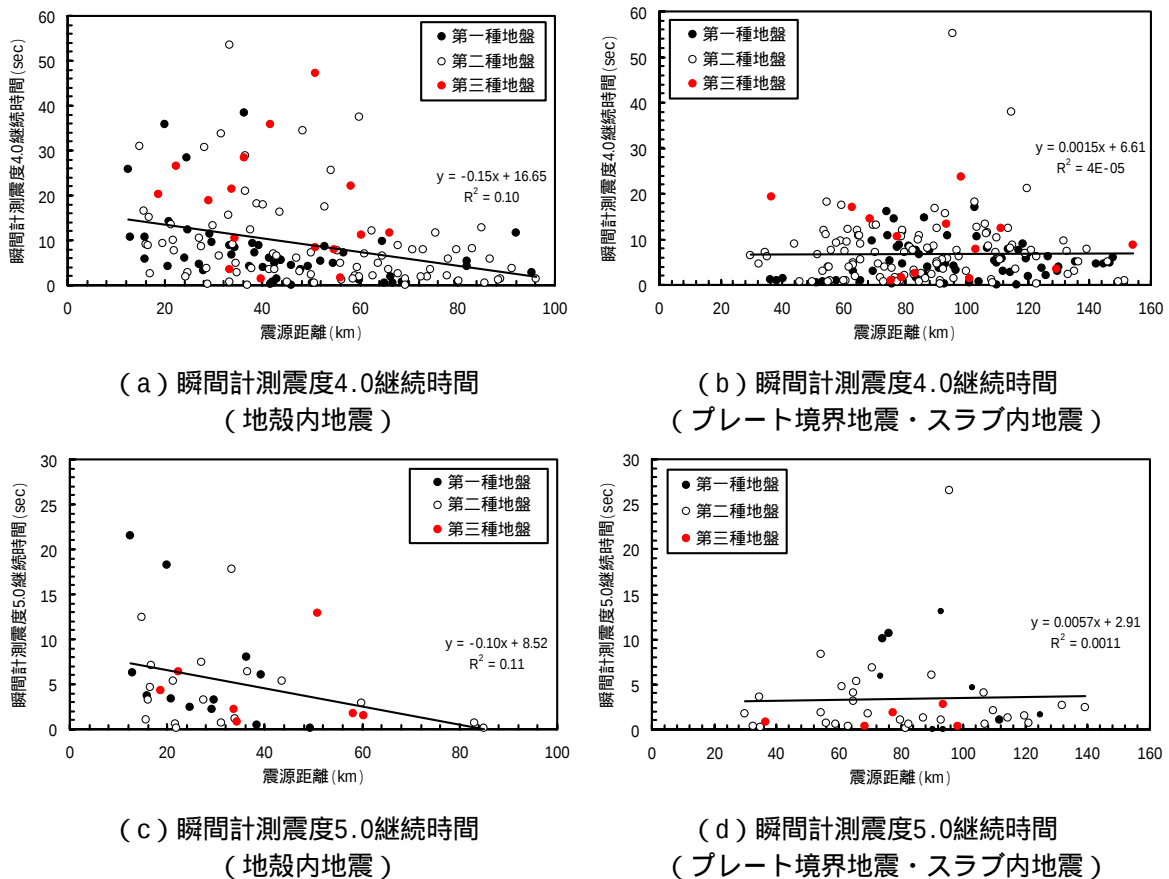


図6 瞬間計測震度の継続時間と震源距離との関係

地殻内地震では、瞬間計測震度4.0、5.0ともに震源距離に対して継続時間は減少する傾向にある。一方で、プレート境界・スラブ内地震では、地殻内地震ほど震源距離の範囲は短くないが、40～140kmの範囲の震源距離に関係なく分散している。また、地盤種別によらず瞬間計測震度4.0継続時間が20秒を超える記録が散在することから、地表近くの浅層地盤の増幅特性による影響はそれほど大きくない。継続時

間が20秒を超える地震動記録に着目した場合、前節に示した古川観測点（図3（b）参照）と同様に後続に周期1.0～2.0秒程度の表面波が励起されて長周期成分により高く震度評価される地震記録が多いことから、これらには表面波が影響したものと考えられる。

行動支障の継続時間を計測することを試みたが、前節のように震源距離のみで説明するのは難しいと判断される。一旦、行動支障に陥ってから地震動が小さくなっても、住民がすぐに避難を再開できるとは考えにくく、継続時間による避難行動支障時間の説明は適切ではないと考えられる。

3.4 瞬間計測震度 4.0、5.0 の到達限界

避難行動支障に至ればそれ以降は避難行動できないとすれば、行動支障限界を明らかにすることも重要である。震源距離が長くなるにつれて地震動は減衰するため、避難行動限界である瞬間計測震度4.0～5.0が現れにくくなる。そこで、地震タイプの違いによる避難行動限界に陥る可能性について検討を行う。

地震記録の統計分析に基づいて導かれる距離減衰式は地震動の強さを推定する経験的かつ簡便手法として数多く研究されている。既往の研究では最大加速度を目的変数とした距離減衰式が一般的であるが、近年では震度を目的変数とするものも多い。本研究では震源距離20km以下の震源断層ごく近傍の地震動記録を扱っている点から、松崎ら¹⁹⁾の震度の距離減衰式を瞬間計測震度との比較ベンチマークとして扱う。この距離減衰式には説明変数に震源深さが組み込まれており、本稿で扱う3タイプの地震の減衰特性も考慮することができる。下式は松崎らの震度の距離減衰式である。

$$I = 1.36M_J - 4.03 \log(X + 0.00675 \cdot 10^{0.5M_J}) + 0.0155h + 2.05 \quad (6)$$

ここで、 I ：計測震度、 X ：距離（km）、 h ：震源深さ（km）、震源深さが100kmよりも深い場合は100kmとする。距離は主に震源距離が採用されているが、断層モデルが得られた地震についてのみ断層最短距離が採用されている。

分析に用いた地震記録と距離減衰式の整合性について述べる。図7は1,030記録の瞬間計測震度4.0または5.0の到達状況を M_J と震源距離を軸にして記したものである。地震規模が小さくなれば震源近くの記録

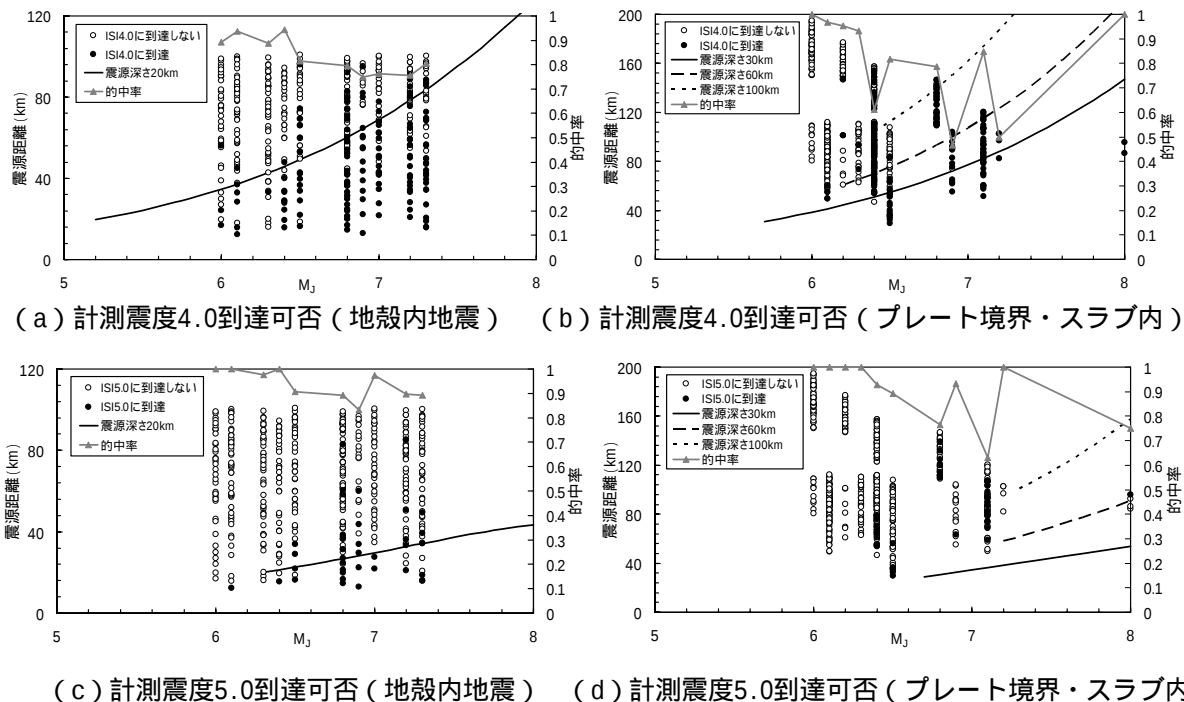


図7 避難行動限界の到達状況と距離減衰式との関係

しか該当震度に達しておらず、地震規模が大きくなるにつれて遠方でも強震動が得られる一般的な傾向が得られている。図中の曲線は距離減衰式の目安として式(6)に平均的な震源深さを与えた時の震度4.0、5.0の関係を示している。地震記録によって震源深さは異なるが、曲線より下側には該当の瞬間計測震度は達しているものが多いことがわかる。距離減衰式を条件に該当瞬間計測震度の到達可否を判断し、分析結果が条件通りに的中している比率を的中率として地震規模ごとに併せて示している。

地殻内地震については計測震度5.0では80%以上、計測震度4.0でも少なくとも70%以上の的中率が確保されており、松崎らの距離減衰式と整合的である。プレート境界地震・スラブ内地震については特定の地震規模のみの中率の低い記録が存在している。海域に震源を有する場合の震源決定精度の低さによる距離減衰式との整合性や、観測点の震源距離の範囲が限定的であり地域的な地震動増幅による影響が原因していると考えられる。今後、観測点の表層地盤の増幅特性などを考慮する必要があるが、松崎らの距離減衰式を用いることにより M_J 、震源深さに応じて避難行動限界を評価することが可能である。

4. 避難行動可能時間の利用

本研究の分析結果を用いて地震時の揺れ最中の避難行動可能時間を一般にも分かりやすく、個々の具体的な避難対策に役立てるために、地震タイプごとの避難行動可能時間と避難行動限界の関係をj用いて、図8に示すように避難行動可能時間の全体像の図化を試みる。一例として、地震規模は $M_J7.0$ 、震源深さ20kmの地殻内地震、震源深さ80kmのスラブ内地震の場合の避難行動可能時間を設定している。震度4.0、5.0以上の継続時間評価は困難であるため、行動支障に至ればそれ以降は行動限界時間が継続するとして距離減衰式より限界距離を決めている。縦軸の原点は、震源から地表までの最短距離(震源深さ)、横軸の原点は、地震動の覚知時刻(瞬間計測震度1.5)の時間を示している。図中の実線は覚知から計測震度4.0、5.0に到達するまでの時間と震源距離の関係を表しており、図中の波線は距離減衰式から求められる震度到達限界として、計測震度4.0、5.0に至らない限界線を示している。すなわち、避難行動可能時間は地震動覚知からグレーゾーンに至るまでの白領域に該当する。避難行動支障に計測震度4.0、5.0のいずれを使用するか判断は、利用目的に応じて使用すればよい。

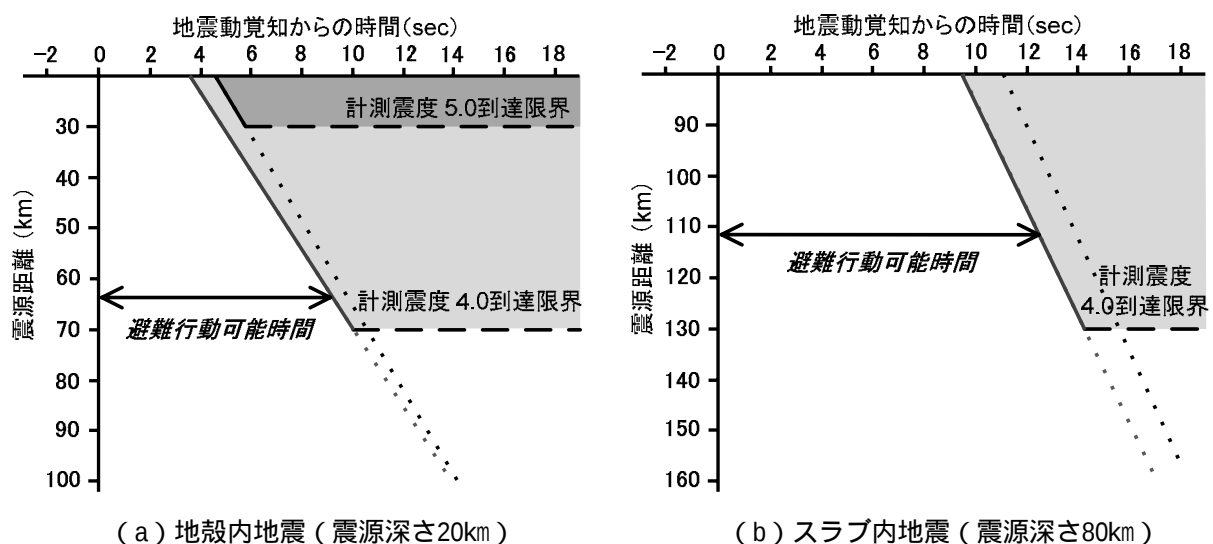


図8 地震動覚知からの避難行動可能時間の図化事例 ($M_J7.0$ の場合)

$M_J7.0$ の地殻内地震を想定した場合、震源から30km範囲内では5秒以内と避難行動可能時間が短い、スラブ内地震の場合には震央においても10秒程度の避難行動可能時間を有することがわかる。一方、避難行動限界に着目した場合、いずれの地震タイプについても震央から50km範囲内で行動支障に至る可能性があるが、スラブ内地震の場合には震度5.0に至らないことも図化によって明らかになる。このように想定地震の震源位置が設定されれば、距離に応じて地震動予測とともに避難行動可能時間予測の提供も

可能になる。

また、図8(a)からも明らかなように地殻内地震の場合、震源から40km圏内では地震動に気付き、すぐに避難行動をとれたとしても持ち時間は6秒もない。緊急地震速報が1秒でも覚知する前に地震情報を得られるのであれば、この図の意味するところは大きく、緊急地震速報の発信場所・方法の計画にも利用できる。さらに、緊急地震速報は震度5弱以上（計測震度4.5以上）の地域に発信されるが、避難行動確保の観点でみれば計測震度4.0から5.0の震度を受ける地域は震源から30～70kmと広範な範囲にあり、緊急地震速報を受けずに避難行動可能時間が10秒以下の地域も出てくることが分かる。

一般の人々が図8を利用する場合には、避難訓練や様々な生活空間の中で時間を「与えられた時間にできること」を認識するための基礎資料として本研究の結果を提供することができる。個人が自分の運動能力や生活の仕方、住まいの部屋や家具の配置などに応じて、与えられた時間内にできる最適な避難場所や避難方法を事前に考え、対策につなげることが防災対策のボトムアップになると考えられる。本稿は研究結果に基づいた提案をしているが、実際に避難行動可能時間の情報を住民に提供した場合の防災対策への影響をみて、本研究の有用性を評価することも重要である。

最後に本研究では地震の揺れ最中の避難行動可能時間を定量的に示すために、瞬間計測震度を用いて分析した。瞬間計測震度は周波数特性や継続時間を考慮したものであるが、指標の特性については他の地震動特性と併せてさらに検討する必要がある。揺れ最中の避難には人間行動の他に建物倒壊は大きな外的要因となる。建物倒壊を瞬間計測震度で定量的に説明できれば本研究で提案している地震揺れ最中の死傷危険フェーズが具体化できると期待される。

5. 結論

本研究は、地震時に人間が揺れを覚知して行動支障に至るまでの時間を避難行動可能時間として定義し、瞬間計測震度を用いて地震のタイプごとに評価を行った。本研究の結論は以下の通りである。

- ・ 瞬間計測震度4.0、5.0の到達時間は、震源距離と最も正の相関があることが分かった。遠地地震になれば、瞬間計測震度開始の感度が鈍りP波と瞬間計測震度開始時刻に差異が生じ、結果として遠地地震の場合は避難行動可能時間が短くなることが分かった。
- ・ 震源距離10kmにつき生じる避難行動可能時間は地殻内地震の場合で1.0秒間、プレート境界地震の場合1.1秒間、スラブ内地震の場合で1.3秒間であることがわかった。
- ・ 瞬間計測震度4.0、5.0の到達状況は既往の距離減衰式と整合的であり、ある震度以上の継続時間よりも震源距離を用いた震度到達限界で評価する方がよいと考えられる。
- ・ 本研究の結果を用いて地震タイプと震源距離に応じた避難行動の持ち時間を表す図を示した。一般の人々が避難訓練などで揺れ最中に「与えられた持ち時間」を認識するための基礎資料としての利用が期待できる。
- ・ 避難行動可能時間の利用においては、人間行動だけでなく外的環境に支配されるため、瞬間計測震度と建物倒壊との関係については今後検討すべきである。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、(独)防災科学技術研究所の強震ネットワークK-NETの観測記録を利用させて頂いた。ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) 上垣内修：一般への提供が開始された緊急地震速報、日本地震工学会誌、No.7、2008年、pp.3-7.
- 2) 能島暢呂、藤原広行、森川信之、石川 裕、奥村俊彦、宮腰淳一：震度曝露人口による活断層の地震リスク評価、日本地震工学会論文集 第10巻、第2号、2010年、pp.22-40.
- 3) 太田裕、大橋ひとみ：地震に伴う人間行動の実態調査(1) アンケートによる資料の収集と整理、地震、第2輯、第32巻、1979年、pp.399-413.
- 4) 大橋ひとみ、太田裕：地震に伴う人間行動の実態調査(2) 面接による資料の収集と整理、地震、第

- 2 輯、第 33 巻、1980 年、pp.199-214.
- 5) 岡田成幸、鏡味洋史：震度による地震被害系統評価のためのバルナラビリティ関数群の構成、地震第 2 輯、第 44 巻、1991 年、pp.93-108.
 - 6) 小坂俊吉：地震時の人間行動に関する研究 その 4：1987 年千葉県東方沖地震、総合都市研究、第 51 号、1993 年、59-75.
 - 7) 気象庁：震度を知る、ぎょうせい、1996 年、pp.1-238.
 - 8) 高田至郎、鍬田泰子、山本聡：新潟県中越地震の際のドライバー安全性の分析～アンケート調査と解析への反映～、神戸大学都市安全研究センター研究報告、第 9 号、2005 年、pp.353-634.
 - 9) 岡田成幸：地震時の室内変容に伴う人的被害危険度評価に関する研究 - その 2 1993 年釧路沖地震にみる揺れている最中の災害回避行動 - 、日本建築学会構造系論文集、第 481 号、1996 年、pp.27-36.
 - 10) 高橋徹、小豆畑達哉、野口和也、大友一利：大地震時における建築室内での人間挙動と避難行動可能性に関する振動台実験、日本建築学会関東支部研究報告集、No.2019、2001 年、pp.145-148.
 - 11) 高木聖：震度は加速度ではない（震度の人体実験）：気象研究所研究報告、第 23 巻、第 3 号、1972 年、pp.215-223.
 - 12) Kimiro Meguro: Strategy for taking full advantage of earthquake early warning system for earthquake disaster reduction, Proceedings of 14th World Conference on Earthquake Engineering6, Beijing, 2008, Paper no. S05-03-01.
 - 13) 功刀卓、青井真、中村洋光、藤原広行、森川信之：震度のリアルタイム演算法、地震、第 2 輯、第 60 巻、2008 年、pp.243-252.
 - 14) 石垣祐三：リアルタイム震度算出のための時系列解析、験震時報、第 69 巻、2006 年、pp.155-169.
 - 15) Yasuko Kuwata, Shiro Takada : Instantaneous instrumental seismic intensity and evacuation, Journal of Natural Disaster Science, Vol.24, No.1, 2002, pp.35-42.
 - 16) 気象庁：地震・火山月報（防災編） 気象庁ホームページ、
<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/gaikyo/index.html>
 - 17) 日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編・同解説、2002 年、pp.25-27.
 - 18) 気象庁：緊急地震速報評価・改善検討会（第 1 回）資料、2009 年
http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/Meeting_HYOUKA/01/shiryoku_3.pdf
 - 19) 松崎伸一、久田嘉章、福島美光：断層近傍まで適用可能な震度の距離減衰式の開発、日本建築学会構造系論文集、第 604 号、2006 年、pp.201-208.

（受理：2010年 6月14日）
（掲載決定：2010年10月 1日）

Quantification of Available Escape Time during an Earthquake Using Instantaneous Instrumental Seismic Intensity

KUWATA Yasuko ¹⁾ and SAITO Sakae ²⁾

1) Member, Associate Professor, Kobe University, Dr. Eng.

2) Graduate student, Kobe University

ABSTRACT

This paper attempts to measure the time available to escape during an earthquake. Because human behavior during a quake has been studied in terms of seismic intensity on the Japan Meteorological Agency (JMA) scale, we used instantaneous instrumental seismic intensity, which can evaluate a sequence of seismic ground motion by the seismic intensity. The available escape time was analyzed using records from different earthquake types and quantified by source distance, magnitude, and earthquake type.

Key Words: Available escape time, Instantaneous instrumental seismic intensity, Earthquake type, Real-time earthquake disaster mitigation