

強震動が人間行動および心理面に与える影響の継続時間の評価

Assessment of the Effects of Strong Motions on Human Behavior and Psychological Aspects

能島 暢呂
Nobuoto Nojima

岐阜大学工学部社会基盤工学科
Department of Civil Engineering, Gifu University

1. はじめに

地震時の強い揺れは、人間の活動空間における危険性を高めるのみならず、その危険性から身を守るための回避行動を、身体的・精神的側面から阻害する恐れがある。地震動が人間行動や心理状態に与える影響を明らかにするため、高橋らの研究グループ^{1)・3)}では、建築室内にいる人間が地震時に安全確保のためにとる種々の避難行動に着目し、行動しづらくなる揺れのレベルや、その際の心理状態を調べる振動台実験を行っている。その結果は、振動の周期ごとの振幅レベルで表された「避難行動限界曲線」としてまとめられている。

しかしこうした研究では、揺れの継続時間の影響はあまり考慮されていない。地震動の物理的特性は、振幅特性、周期特性、継続時間の3要素によって特徴づけられるものであり、振幅レベルが同じであれば、強震動の継続時間が長い方が、人間行動に対してより大きな影響を与える可能性が高い。気象庁⁴⁾は2011年東北地方太平洋沖地震の強震記録を用いて、10秒間ごと（本来は60秒間）の計測震度を求め、その時間変化より、震度4以上の継続時間が約180秒に達した例を報告している。南海トラフ巨大地震においても同様に長い継続時間の影響が特に危惧されており、地震調査研究推進本部⁵⁾は、南海地震を想定した長周期地震動シミュレーションにおいて、最大速度や速度応答スペクトルとともに、速度1cm/s以上の継続時間の予測地図を公表している。このことから、継続時間の評価は地震防災上の重要課題であるといえる。

強震記録を用いた地震動継続時間の測定方法は数多く提案されているが、文献⁶⁾を参考にすると、次のように分類される。

- ・ Significant（地震動の累積パワーの主要部の占有時間）
- ・ Bracketed（地震動が所定の閾値を最初に超過してから最後に下回るまでの時間）
- ・ Uniform（地震動が所定の閾値を超過した正味の時間）

これらに関して派生的に、次の分類が挙げられる。

- ・ Relative（地震動強度の閾値を最大値指標などに対する相対値で定義）
- ・ Absolute（地震動強度の閾値を絶対値で定義）

・ Frequency-dependent (地震動の周波数帯域に依存した定義)

筆者はこれらのうち、特に“Uniform/Absolute”の定義による継続時間（以下、UA継続時間とする）に注目して研究を行ってきた⁷⁾⁻¹⁰⁾。振幅レベルが直接規定されるため、上記の「避難行動限界曲線」と関連付けて人間への影響を論じる際に、最も適切な定義であると考えている。文献⁸⁾では、線形1自由度系の速度応答包絡線に基づく閾値超過継続時間とそのスペクトル表現法を提案した。本稿第2～4章では、その評価方法の概要を説明するとともに、行動難度継続時間および不安度継続時間に関する評価結果を報告する。また文献¹⁰⁾では、気象庁長周期地震動階級の算出に用いられる線形1自由度系の絶対速度応答（固有周期1.6～8秒）にUA継続時間を適用して、長周期地震動階級の継続時間スペクトルを提案した。本稿第5～6章ではその評価方法の概要を説明するとともに、2011年東北地方太平洋沖地震の広域評価の事例を報告する。

2. 速度応答包絡線の閾値超過継続時間とそのスペクトル表現

質量 m 、剛性 k の線形1自由度系の振動において、時刻 t における全エネルギー $Q(t)$ は、次式のように運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの和で表される¹¹⁾。

$$Q(t) = \frac{1}{2}mj^2(t) + \frac{1}{2}ky^2(t) \quad (1)$$

ここに $j(t)$: 速度応答時刻歴, $y(t)$: 変位応答時刻歴である。これより、速度応答包絡線 $E(t)$ は次式で求めることができる。

$$E(t) = \sqrt{\frac{Q(t)}{m/2}} = \sqrt{j^2(t) + \omega_0^2 y^2(t)} \quad (2)$$

ここに $\omega_0 = (k/m)^{1/2}$ は固有円振動数である。Trifunac¹²⁾ は変位応答包絡線を“Response Envelope Spectrum (RES)”として提案しているが、本研究では速度応答包絡線を RES とする。

図1は、図2(a)に示す1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台（JMA神戸）で観測された加速度記録（NS成分）を用いて、周期 $T=1.0s$ 、減衰定数 $h=5\%$ の速度応答と変位応答 $\times \omega_0$ を算出し、式(2)の速度応答包絡線とともに図示したものである。得られた速度応答包絡線に対して閾値 E^* を設定し、これを超える時間の総和を「速度応答包絡線閾値超過継続時間 D_{VRE} 」と定義する。あらゆる固有周期 T に対して D_{VRE} を表示すると「閾値超過継続時間スペクトル $S_{Dur-VRE}(T, E^*)$ 」が得られる。

1995年兵庫県南部地震 ($M_J=7.3$) の神戸海洋気象台 (JMA神戸) における加速度記録 (NS成分) と、2011年東北地方太平洋沖地震 ($M_w=9.0$) のK-NET 築館 (MYG004) における加速度記録¹³⁾ (EW成分) をとりあげ、継続時間のスペクトル表現の例を示す。図2に加速度時刻歴波形を示し、図3の実線で速度応答スペクトル (減衰定数 $h=5\%$) を示す。JMA神戸では周期1sを中心に周期0.3～3sの広い範囲で速度応答が100cm/sを上回るのに対して、K-NET 築館では周期1s付近の応答レベルは相対的に低く、周期0.2s付近の短周期成分が卓越している。図3の破線は、速度応答包絡線 (減衰定数 $h=5\%$) の最大値であり、ほぼ速度応答スペクトルと一致している。

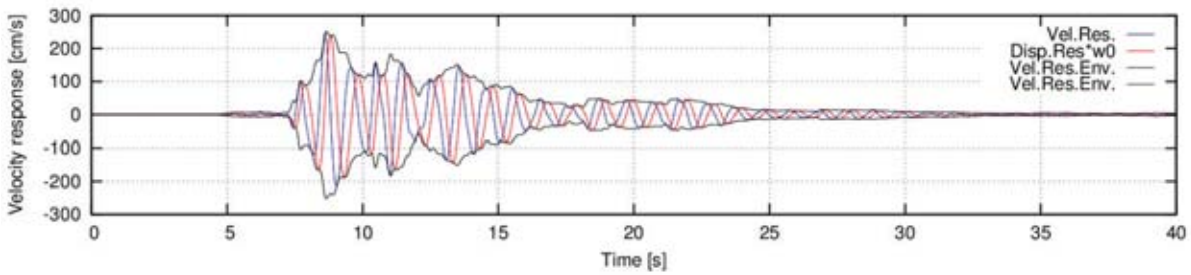
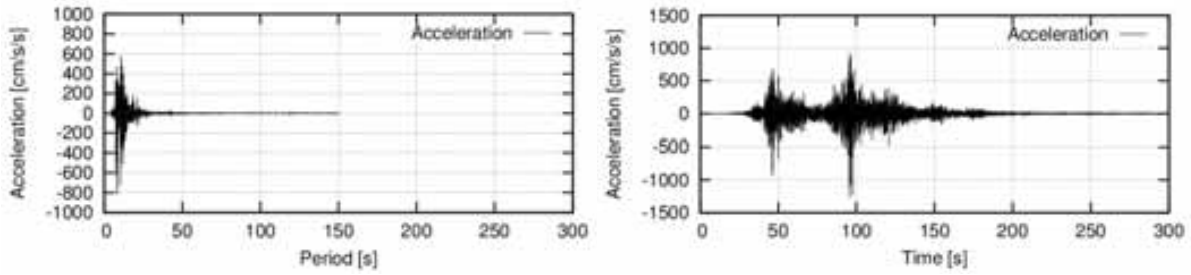


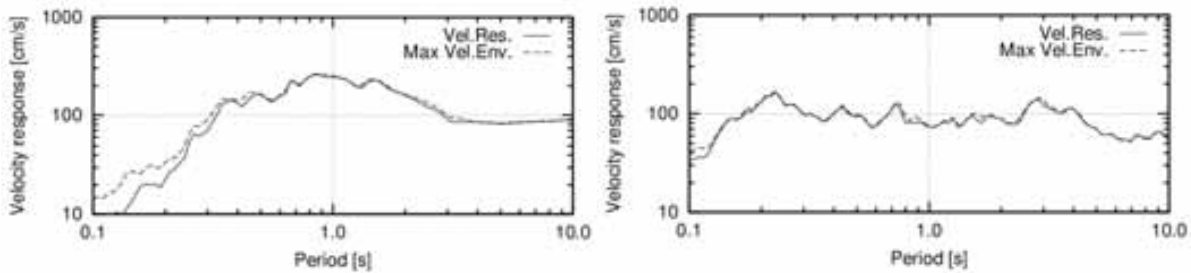
図1 速度応答包絡線と閾値超過継続時間 D_{VRE} の算定例
(1995年兵庫県南部地震 JMA 神戸(NS成分), 周期 $T=1.0s$, 減衰定数 $h=5\%$)



(a) 1995年兵庫県南部地震
JMA 神戸(NS成分)

(b) 2011年東北地方太平洋沖地震
K-NET 築館 (MYG004) (EW成分)

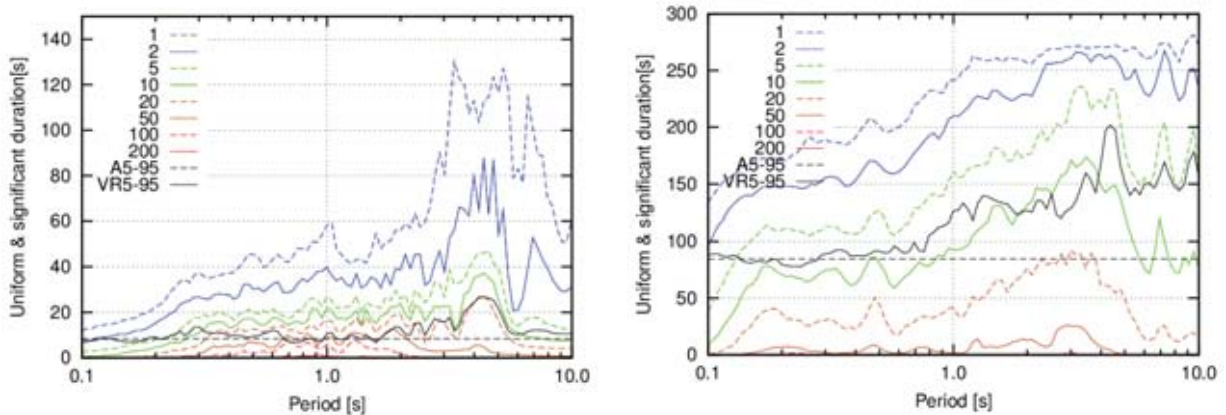
図2 用いた加速度時刻歴波形の比較



(a) 1995年兵庫県南部地震
JMA 神戸(NS成分)

(b) 2011年東北地方太平洋沖地震
K-NET 築館 (MYG004) (EW成分)

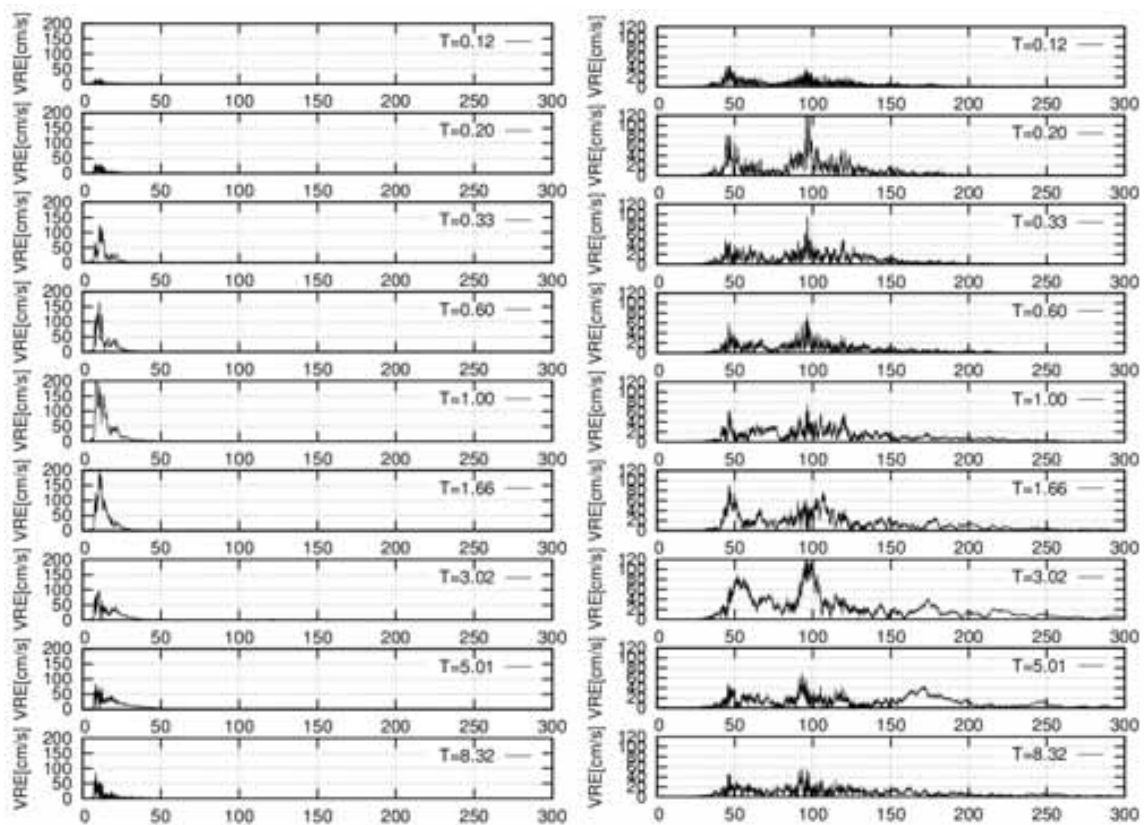
図3 速度応答スペクトルと速度応答包絡線の最大値の比較 (減衰定数 $h=5\%$)



(a) 1995年兵庫県南部地震
JMA 神戸(NS成分)

(b) 2011年東北地方太平洋沖地震
K-NET 築館 (MYG004) (EW成分)

図4 速度応答包絡線閾値超過継続時間スペクトル $S_{Dur-VRE}$



(a) 1995年兵庫県南部地震

(b) 2011年東北地方太平洋沖地震

JMA 神戸(NS成分)

K-NET 築館 (MYG004) (EW成分)

図5 速度応答包絡線スペクトル RES (減衰定数 $h=5\%$)

図4は応答速度の閾値を $E^*=1\sim 1000\text{cm/s}$ とした閾値超過継続時間スペクトル $S_{\text{Dur-VRE}}$ であり, 図5はそのもととなった速度応答包絡線 RES である. 図4の全般的な傾向としては, 閾値が高いレベル (例えば $E^*=50\text{cm/s}$ や 100cm/s) では, 図3に示した速度応答スペクトルあるいは速度応答包絡線の最大値が, 各閾値を上回る部分とほぼ相似形の傾向が見て取れる. また閾値が低くなるに従って長周期側 (4~5s程度) の継続時間が長くなっており, 表面波などによる後揺れが影響していると考えられる. 2地点で比較すると, 20cm/s 以下の閾値では, K-NET 築館が JMA 神戸を大幅に上回っている. これに対して, 閾値 50cm/s では部分的に逆の傾向を示し, 100cm/s 以上の閾値になると K-NET 築館の継続時間は極めて短く, JMA 神戸が大きく上回っている. 参考までに, 図4中の水平な破線は加速度累積パワー曲線の 5~95%相当の継続時間 $D_{5.95}$ であり, 黒実線は, 速度応答累積パワー曲線の 5~95%相当の継続時間 $D_{5.95}$ である.

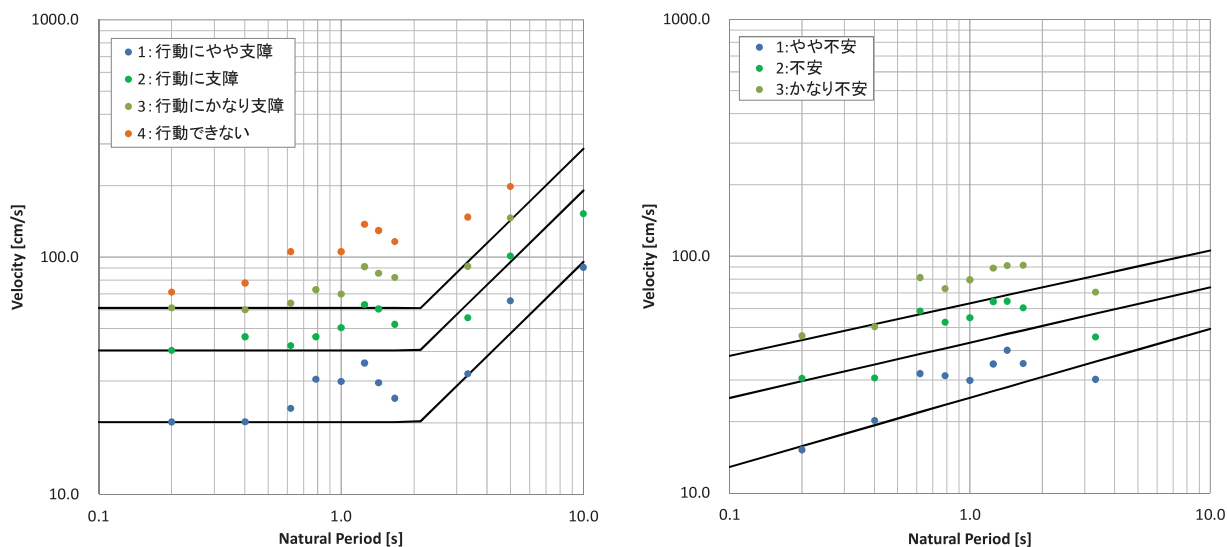
3. 行動難度・不安度の継続時間とそれらのスペクトル表現

ここでは高橋らの振動台実験¹⁾⁻³⁾により求められた「避難行動限界曲線」を用いて閾値を設定し, 行動難度・不安度継続時間とそのスペクトル表現を定義する. 振動台実験は,

種々の加振周波数と振幅レベルの組み合わせの正弦波を振動台に入力し、被験者はその上で起立動作と歩行動作を行って、実験終了後、行動難度・不安度ランクに関する表 1 のアンケートに回答するものである。文献¹⁴⁾よりデータを読み取ったものが図 6 の点プロットである。本研究では図 6 に示すように、この結果にほぼ等価な折れ線で単純に関数化した。表 1 には次章 4. で採用する 3 種類の周期に相当する閾値を図 6 より求めて掲載している。以上により定めた閾値の超過する時間を「行動難度継続時間 D_{Dif} 」および「不安度継続時間 D_{Anx} 」と定義し、そのスペクトル表現として「行動難度継続時間スペクトル $S_{Dur-Dif}$ 」および「不安度継続時間スペクトル $S_{Dur-Anx}$ 」を定義する。

表 1 行動難度および不安度に関するランク¹⁾⁻³⁾と速度閾値

ランク	アンケート回答選択肢	本研究での略称	周期 T に対する速度閾値 [cm/s]			
			$T=0.33s$	$T=1.0s$	$T=3.0s$	
行動難度	0	行動できる	-	-	-	
	1	やや乱れるが、滞りなく行動できる	行動にやや支障	20.2	20.2	28.8
	2	乱れるが、滞りなく行動できる	行動に支障	40.4	40.4	57.7
	3	かなり乱れ、滞りなく行動できない	行動にかなり支障	61.1	61.1	86.5
	4	行動できない				
不安度	0	全く不安を感じない	-	-	-	
	1	やや不安を感じる	やや不安	18.3	25.2	34.8
	2	不安を感じる	不安	33.4	43.2	55.9
	3	かなり不安を感じる	かなり不安	49.5	63.3	80.9
	4	非常に不安である				

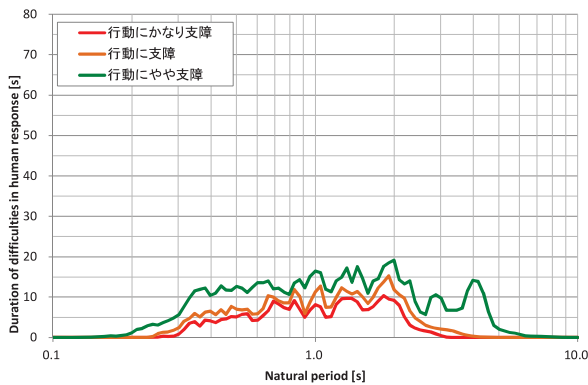


(a) 行動難度 (実線：下からランク 1~3) (b) 不安度 (実線：下からランク 1~3)

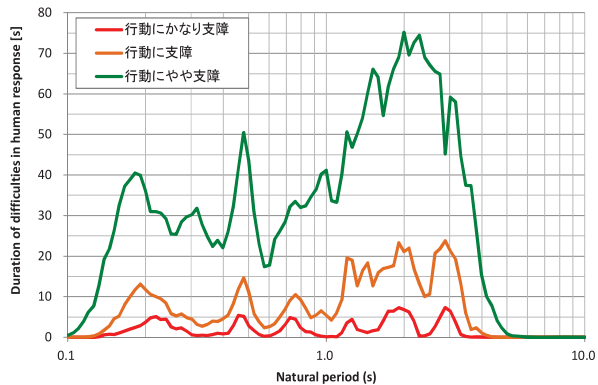
図 6 行動難度・不安度に関する実験データ¹⁴⁾と本研究で定めた速度閾値 (実線)

図 7 は図 6(a)の行動難度に関する速度閾値を適用して得られた行動難度継続時間スペクトル $S_{Dur-Dif}$ である。揺れにより行動困難となる継続時間を、周期ごとに読み取ることができる。JMA 神戸では行動難度ランク 1~3 の継続時間の差が小さく、短時間の激しい地震動であったことを反映している。周期 0.3~3s に注目すると、「行動にやや支障」が 10~20s,

「行動にかなり支障」が 5~10s 継続したことがわかる．これに対して K-NET 築館では行動難度ランク 1~3 の継続時間の差が大きい．広い周期帯で「行動にやや支障」が 20~75s 継続した一方、「行動にかなり支障」は 8s 以下である．同様に図 8 は図 6(b)の不安度に関する速度閾値を適用して得られた不安度継続時間スペクトル $S_{Dur-Anx}$ である．ほぼ図 7 と同様の傾向を示すが，速度閾値の若干の相違に伴って，K-NET 築館では，短周期側で図 7 よりもやや伸長し，長周期側でやや短縮している．一律の速度閾値を適用して得られた図 5 に対して，図 7 と図 8 はそれぞれ人間の行動と心理に関する周期依存のフィルターを通した結果であるといえる．

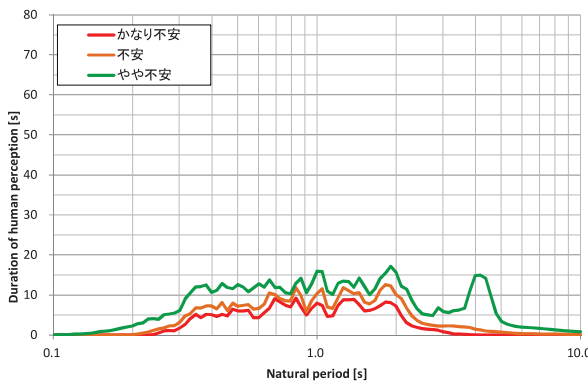


(a) 1995 年兵庫県南部地震
JMA 神戸(NS 成分)

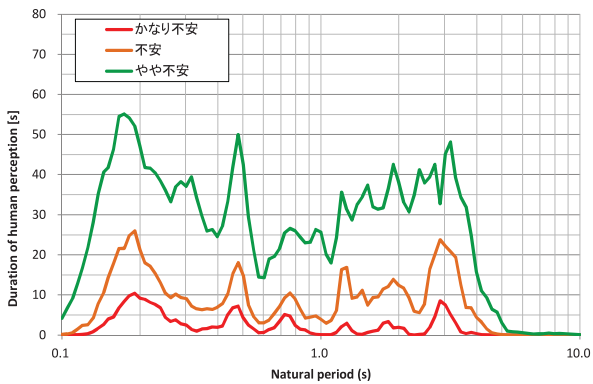


(b) 2011 年東北地方太平洋沖地震
K-NET 築館 (MYG004) (EW 成分)

図 7 行動難度継続時間スペクトル $S_{Dur-Dif}$



(a) 1995 年兵庫県南部地震
JMA 神戸(NS 成分)



(b) 2011 年東北地方太平洋沖地震
K-NET 築館 (MYG004) (EW 成分)

図 8 不安度継続時間スペクトル $S_{Dur-Anx}$

4. 東北地方太平洋沖地震における速度応答・行動難度・不安度継続時間のマップ表現

2011 年東北地方太平洋沖地震における広域評価を行い，結果のマップ表現を試みる．ここでは(独)防災科学技術研究所の K-NET 観測点 697 地点における加速度記録¹³⁾(EW 成分)を用いて，周期を $T=0.33, 1.0, 3.0s$ の 3 種類に絞って評価結果を示す．減衰定数は $h=5\%$ とする．速度応答スペクトルの分布を図 9 に示す．図 10 は速度閾値 1, 10, 100cm/s に対する

速度応答包絡線超過時間 D_{VRE} の分布を示す。図 10 (a)-(c)の閾値 1cm/s では、周期 0.33s で東北から関東にかけて 60s を超えているが、中部地方や北海道に至るとごく短くなる。これに対して周期 3s では 180s を超える範囲はかなり広く、濃尾平野など遠方にも達しており、深部地盤構造による長周期成分の増幅効果と継続時間の伸長効果が見て取れる。震源近傍では各周期とも 180s を超えている。図 10 (d)-(f)の閾値 10cm/s 以上の観測点は、周期 0.33s では東北地方の太平洋側と関東地方に限定される。関東地方では周期 0.3s の継続時間はごく短い、周期 1s で 30s、周期 3s では 60s を超えるのが特徴的である。周期 0.33 秒で 10cm/s に達していない東北地方の日本海側や北海道の一部でも同様の傾向がある。図 10 (g)-(i)の閾値 100cm/s を超えた地点はどの周期でもわずかである。周期 0.33s では茨城県、周期 3s では宮城県などに点在するが、継続時間はいずれも短い。以上のように、最大応答に加えて閾値超過継続時間に関する情報を付与することで、速度応答時刻歴をイメージしやすくすることが可能である。

図 11 は行動難度の継続時間の分布を示す。図 10 と類似の傾向が見て取れるが、表 1 に示した閾値 20.2~86.5cm/s に対応した結果となっている。図 11(a)-(c)の「行動にやや支障」についてみると、周期 1s では、岩手・宮城・福島で 30s 以上、茨城・千葉で 10s 以上の継続時間が多く見られる。東京付近では、短いながらも行動にやや支障を生じたレベルである。また、遠方の平野部でも周期 1~3s の継続時間が長かったことを図 9(b),(c)で確認したが、図 11(b),(c)より、その揺れは行動に支障を生ずるレベルではなかったと推察される。図 11(g)-(i)の「行動にかなり支障」についてみると、周期 0.33s および 1s では岩手~茨城にかけての一部の観測点で数秒程度の短い継続時間ながらも、かなりの支障が出たことが推察される。一方、周期 3s では宮城・福島のごく一部にとどまる。図 12 は不安度の継続時間の分布を示す。表 1 の閾値 18.3~80.9cm/s に対応しており、閾値関数の相違による若干の違いはあるが、行動難度に関する図 11 とほぼ同様の分布傾向が見られる。

なお、継続時間算定のための閾値設定においては、実験環境と実環境との違い¹⁵⁾（地震動の不規則性、3方向の揺れ、揺れの非予見性、振動音の影響など）に関して注意する必要があると考えられる。

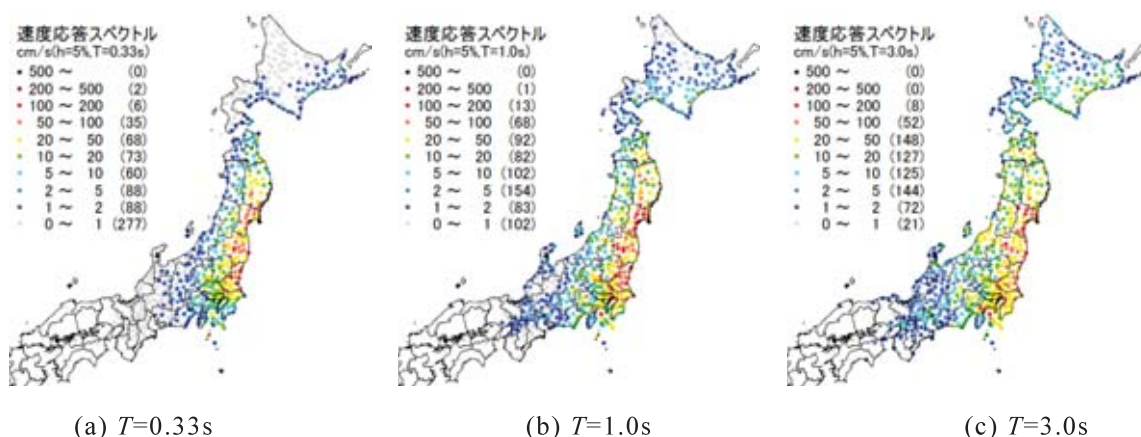
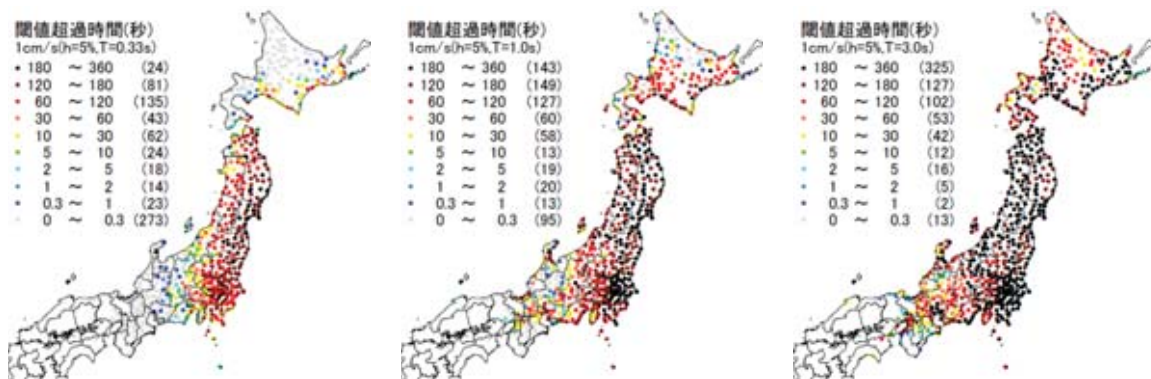
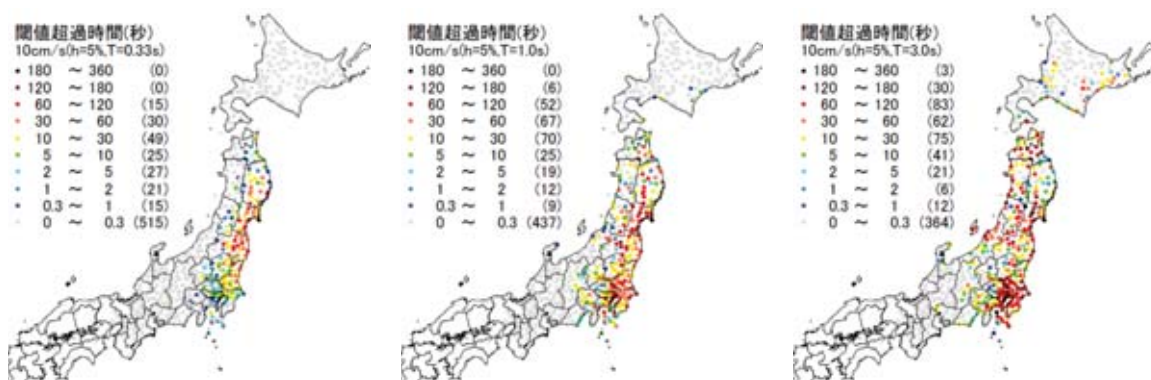


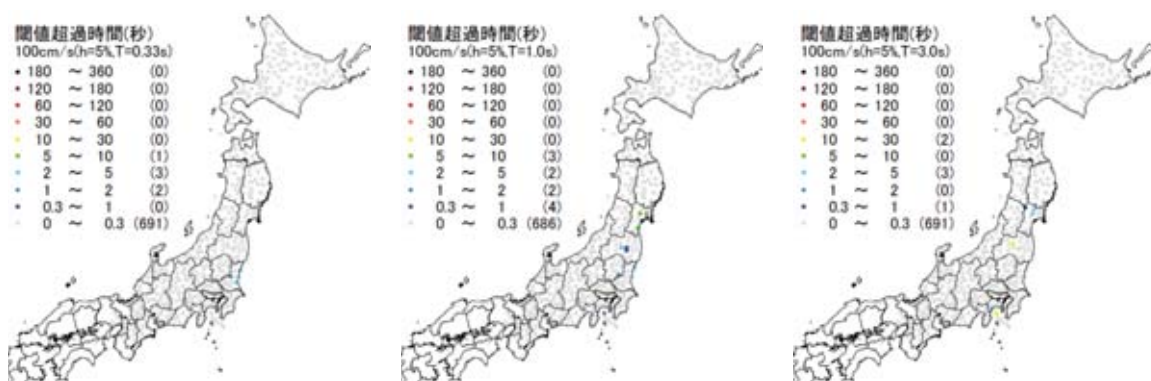
図9 速度応答スペクトルの分布 (h=5%)



(a) 1cm/s超過時間($T=0.33s$) (b) 1cm/s超過時間($T=1.0s$) (c) 1cm/s超過時間($T=3.0s$)

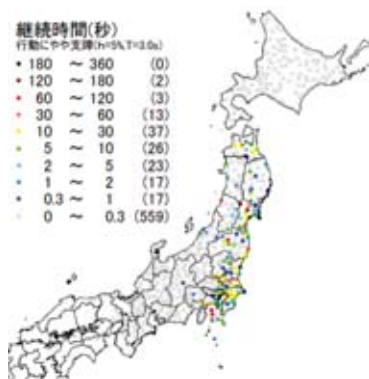
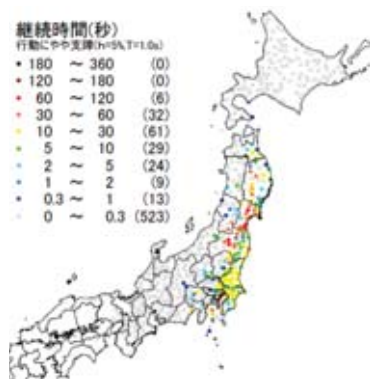
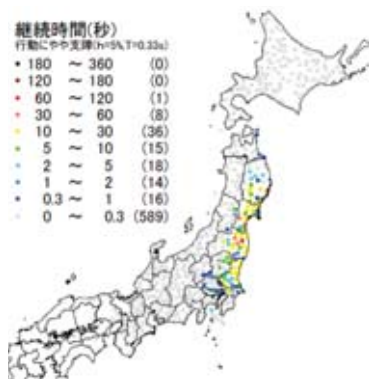


(d) 10cm/s超過時間($T=0.33s$) (e) 10cm/s超過時間($T=1.0s$) (f) 10cm/s超過時間($T=3.0s$)

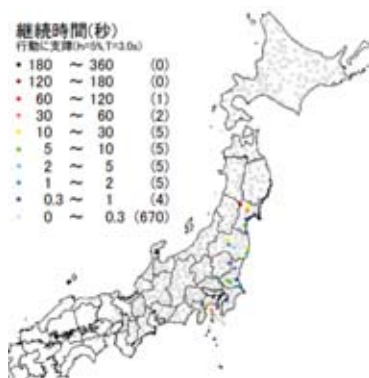
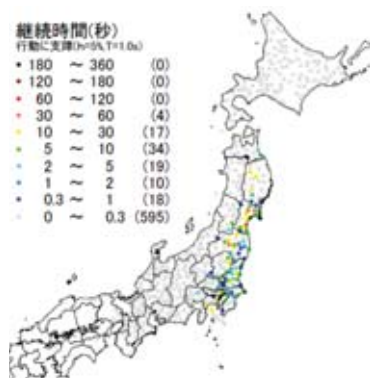
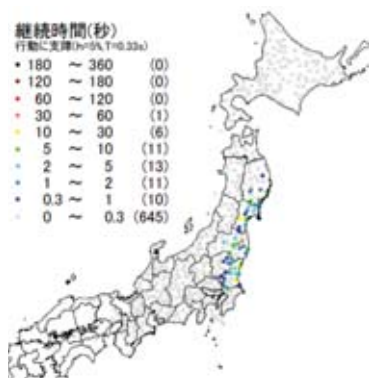


(g) 100cm/s超過時間($T=0.33s$) (h) 100cm/s超過時間($T=1.0s$) (i) 100cm/s超過時間($T=3.0s$)

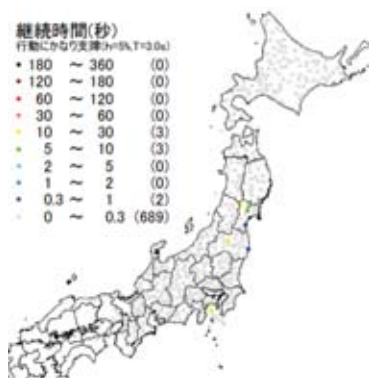
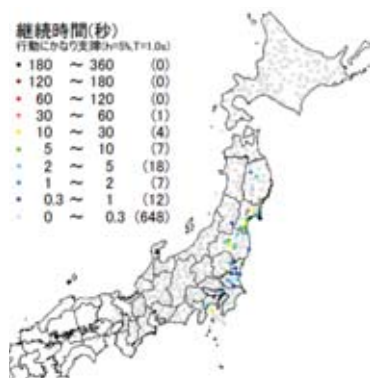
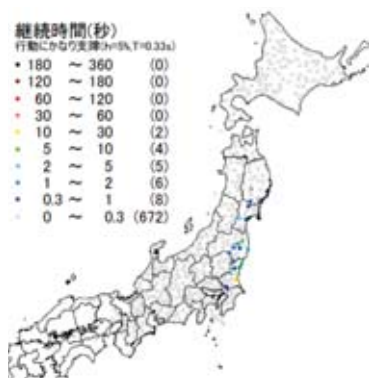
図10 速度応答包絡線の閾値超過時間 D_{VRE} の分布 ($h=5\%$)



(a) 行動にやや支障($T=0.33s$) (b) 行動にやや支障($T=1.0s$) (c) 行動にやや支障($T=3.0s$)



(d) 行動に支障($T=0.33s$) (e) 行動に支障($T=1.0s$) (f) 行動に支障($T=3.0s$)

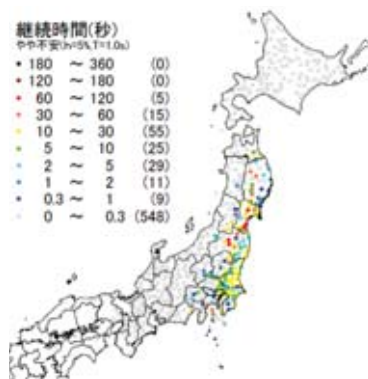


(g) かなり支障($T=0.33s$) (h) かなり支障($T=1.0s$) (i) かなり支障($T=3.0s$)

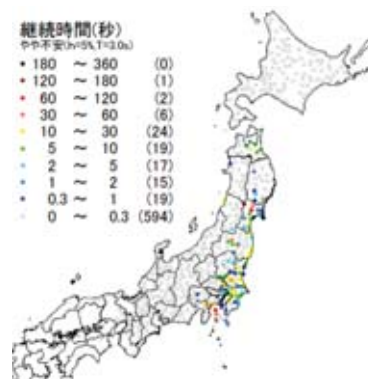
図11 行動難度継続時間 D_{Dif} の分布 ($h=5\%$)



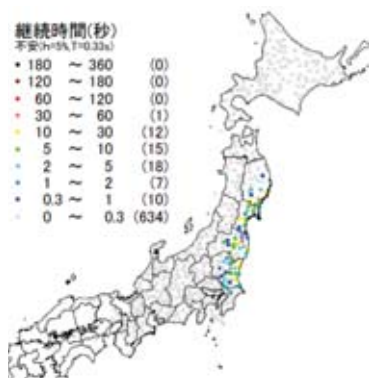
(a) やや不安($T=0.33s$)



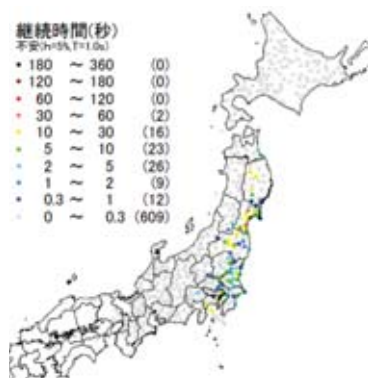
(b) やや不安($T=1.0s$)



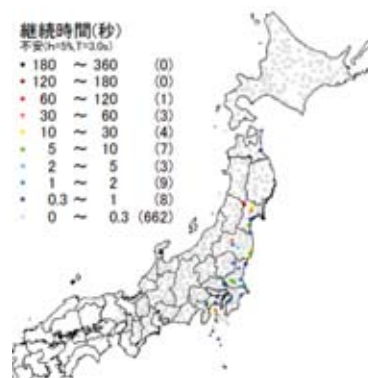
(c) やや不安($T=3.0s$)



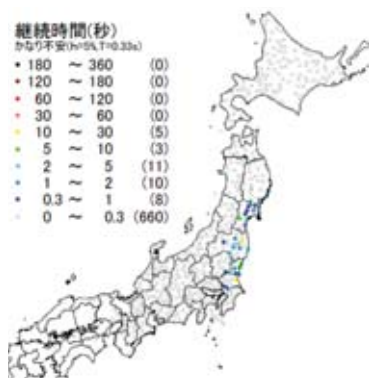
(d) 不安($T=0.33s$)



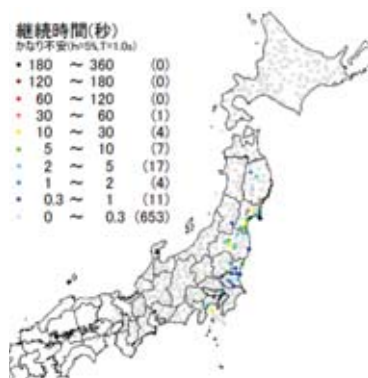
(e) 不安($T=1.0s$)



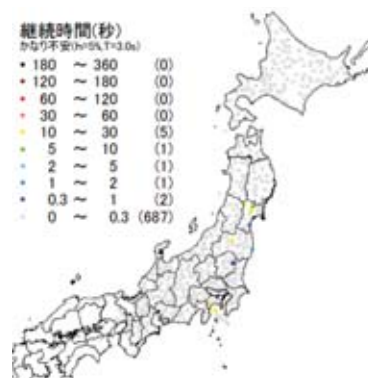
(f) 不安($T=3.0s$)



(g) かなり不安($T=0.33s$)



(h) かなり不安($T=1.0s$)



(i) かなり不安($T=3.0s$)

図12 不安度継続時間 D_{Anx} の分布 ($h=5\%$)

5. 長周期地震動階級の継続時間スペクトルの評価方法

気象庁は、長周期地震動に関する観測情報として「長周期地震動階級」を試行的に発表している。長周期地震動階級とは「固有周期が1～2秒から7～8秒程度の揺れが生じる高層ビル内における、地震時の人の行動の困難さの程度や、家具や什器の移動・転倒などの被害の程度から4つの段階に区分した揺れの大きさの指標」である¹⁶⁾。具体的には、強震観測データを用いて、減衰定数 $h=5\%$ の絶対速度応答スペクトル S_{va} を固有周期 $T=1.6\sim 7.8\text{s}$ の範囲で0.2s刻みで求め、その最大値に対し5, 15, 50, 100cm/sを下限閾値として階級1～4を割り当てたものを「長周期地震動階級」と定義している¹⁶⁾。表2は、高層ビルにおける人の体感・行動、室内の状況、予想される被害等を記述した「長周期地震動階級関連解説表」であり、当該観測点に高層ビルが立地した場合に高層階で予想される揺れの様子を表したものである¹⁶⁾。

表2 長周期地震動階級関連解説表¹⁶⁾

長周期地震動階級	人の体感・行動	室内の状況	被害
長周期地震動階級1	室内にいたほとんどの人が揺れを感じる。驚く人もいる。	ブラインドなど吊り下げものが大きく揺れる。	—
長周期地震動階級2	室内で大きな揺れを感じ、物に掴まりたいと感じる。物につかまらなさと歩くことが難しいなど、行動に支障を感じる。	キャスター付き什器がわずかに動く。棚にある食器類、書類の本が落ちることがある。	—
長周期地震動階級3	立っていることが困難になる。	キャスター付き什器が大きく動く。固定していない家具が移動することがあり、不安定なものは倒れることがある。	両仕切壁などにひび割れ・電裂が入ることがある。
長周期地震動階級4	立っていることができず、はわないと動くことができない。揺れにほんろうされる。	キャスター付き什器が大きく動き、転倒するものがある。固定していない家具の大半が移動し、倒れるものもある。	両仕切壁などにひび割れ・電裂が多くなる。

長周期地震動の特徴の一つに長い継続時間が挙げられるが、現時点では公表の対象外であり、当面は中長期課題とされている。そこで、まず長周期地震動階級の継続時間として、前述の2つの定義(“Bracketed”および“Uniform”)に基づく継続時間 D_B および D_U を評価してそれをスペクトルで表現する。以下に評価手順を示す。なお t は時刻[s]を表す。

- 1) 下記2)-4)を減衰定数 $h=5\%$ の線形1自由度系 ($T_i=1.6\sim 7.8\text{s}$ で0.2s刻みで32種類) に適用する
- 2) 直交水平2成分の地動加速度波形 $A_x(t)$, $A_y(t)$ [cm/s²]を入力し、それぞれによる絶対速度応答波形 $V_{xj}(t)$, $V_{yj}(t)$ [cm/s]を求め、ベクトル合成波形 $V_j(t) = \sqrt{V_{xj}^2(t) + V_{yj}^2(t)}$ [cm/s]を求める。
- 3) $V_j(t)$ が各階級の下限閾値 V_j^* ($j=1,2,3,4$) を最初に上回ってから最後に下回るまでの継続時間を D_{Bj} [s]とする (Bracketed duration)。
- 4) $V_j(t)$ の各時刻 t から遡って過去 t_w [s]における最大値をピークホールドした包絡波形 $V_{Ej}(t_w; t)$ を算出し、これが V_j^* ($j=1,2,3,4$) を上回る正味の時間を $D_{Uj}(t_w)$ [s]とする (Uniform)

duration).

5) 周期 T_i と D_{Bij} ならびに $D_{Uij}(t_w)$ の関係を継続時間スペクトルとして図示する.

Uniform duration の算出においては、時刻歴波形の周期変動や不規則変動のために波形閾値に達しない時間帯が小刻みに多数出現するため継続時間が過小評価される. 上記手順 4) ではこれを避けるために、最大値をピークホールドした包絡波形を用いている. ピークホールドするための矩形時間窓は、各固有周期の半分の時間、すなわち $t_w=T/2$ とする.

2011 年東北地方太平洋沖地震で観測された K-NET 仙台(MYG013)の加速度波形を用いた適用例を示す. 図 13 は水平 2 成分の加速度波形を示し、図 14 は $T=2, 4, 6$ s の絶対速度応答波形のベクトル合成波形を示す. 図 15 には相対速度応答スペクトル S_v と絶対速度応答スペクトル S_{va} を示す. 全域で階級 2 ($V_2^*=15$) に達しており、周期 4s 未満では階級 3 ($V_3^*=50$) に、周期 2s 以下では階級 4 ($V_4^*=100$) に達している. 図 16 は $T=2, 4, 6$ s に対して求めた絶対速度応答の包絡波形である (最大振幅を示す時間付近を拡大表示). 図 17 は長周期地震動階級の継続時間スペクトルである. D_B が D_U よりもかなり長く評価されるのは、 D_B では閾値の始点から終点までを連続的に捉えるためであり、図 13 のように波群や応答波形が明確に分離している場合に D_B と D_U の差が顕著となる.

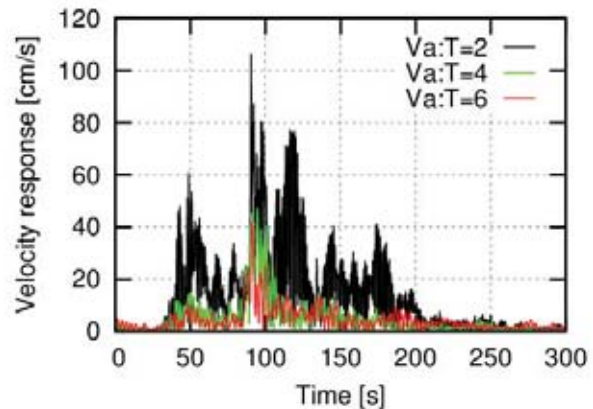
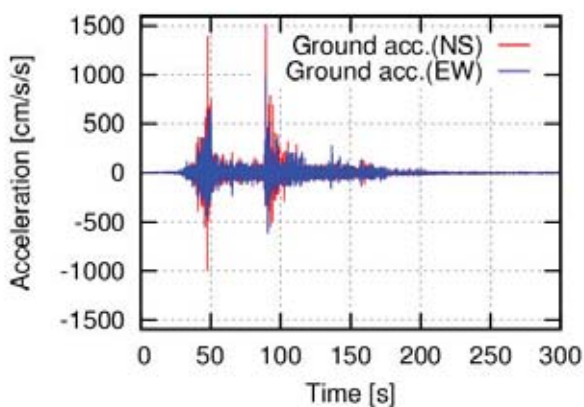


図 13 加速度波形 (K-NET 仙台 MYG013) 図 14 2 成分合成絶対速度応答波形 ($h=5\%$, $T=2,4,6$ s)

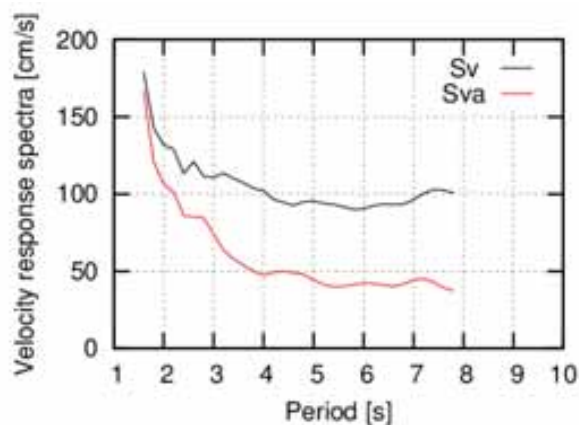
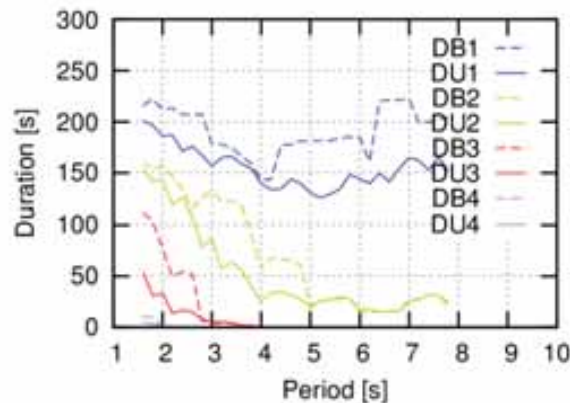
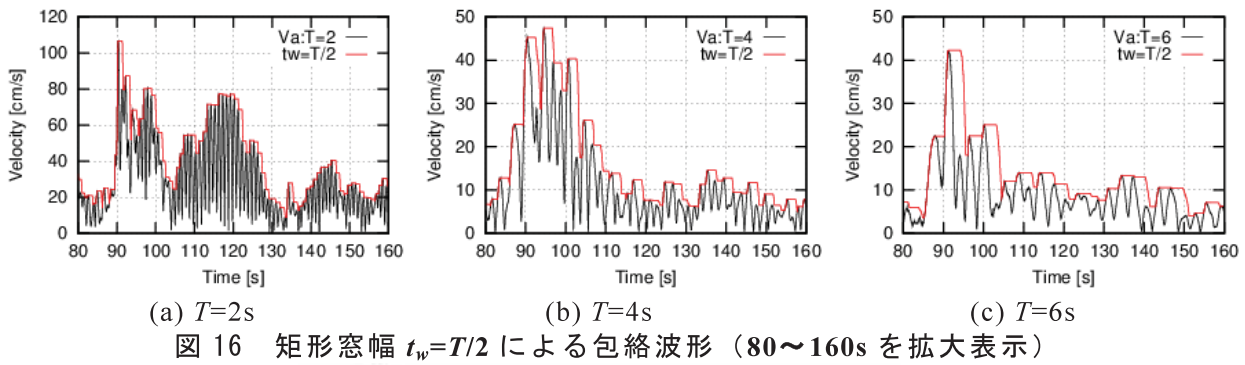
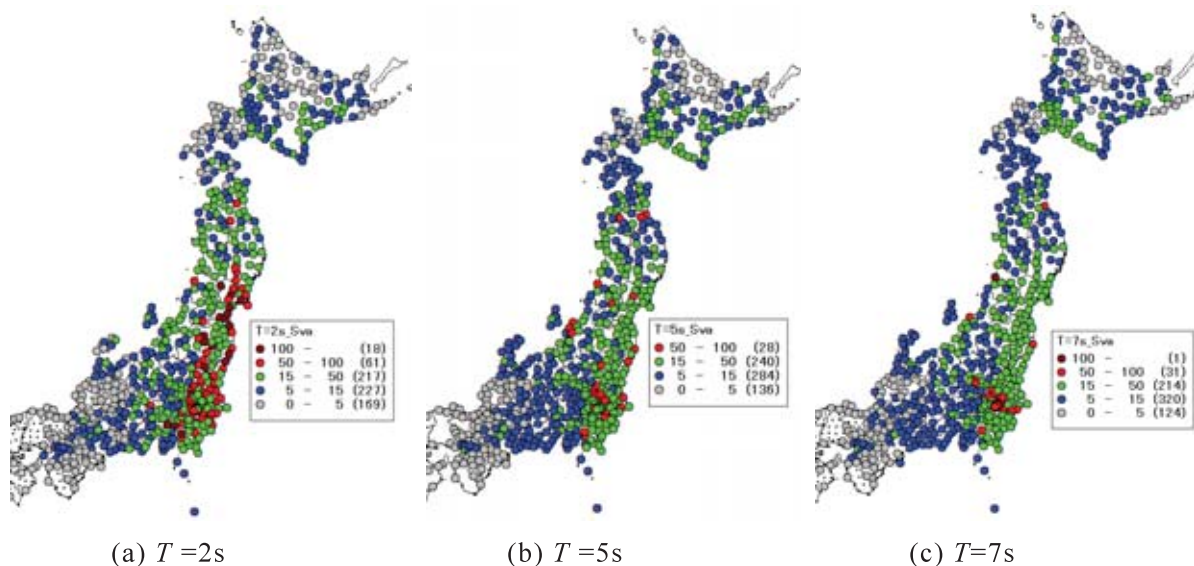


図 15 相対・絶対速度応答スペクトル ($h=5\%$) S_v と S_{va}



6. 東北地方太平洋沖地震における長周期地震動階級継続時間のマップ表現

2011年東北地方太平洋沖地震で得られた K-NET 観測記録を用いた広域評価の結果¹⁷⁾を示す。固有周期については $T=2, 5, 7s$ を対象とする。絶対速度応答スペクトル S_{va} の分布を図 17 に示す。振幅レベルを周期間で比較すると、全般的に周期 2s が最も大きい。 S_{va} は、宮城県から茨城県にかけて広い範囲で 100cm/s を超過し、静岡県や神奈川県の一部(SZO010, KNG013)でも超過した。



長周期地震動階級 1~4 の継続時間 $D_{U1} \sim D_{U4}$ の結果をそれぞれ図 18~図 21 に示す。図 18 より、広範囲にわたって長周期地震動階級 1 の継続時間が 5s 以上現れたことがわかる。関東平野を中心に、青森や新潟の日本海側でも長時間化し 200s を超えている。最大で 250s を超過した地点もあるが、観測記録長の制限(300s)のため頭打ちになっており、実際にはさらに長時間であった可能性がある。

長周期地震動階級 2 では、図 19(a)より周期 2s で震源付近で継続時間が 100s を超過した。周期 5s, 7s に関しては、図 19(b)(c)より主に平野部で継続時間は 100s を超過しており、震源近くよりもむしろ震源から離れた石狩平野や日本海側の平野部、関東平野などの方が長時間化している。周期 5s では、関東平野からさらに数百 km 離れた濃尾平野の津島(AIC003)で継続時間 50s, 大阪平野の堺(OSK006)で継続時間 20s を超過した。また周期 7s では 2003 年十勝沖地震でも被害があった、北海道南西部の苫小牧(HKD129)で 100s を超過した。

図 20 より、長周期地震動階級 3 の周期 2s では福島沿岸部など震源に近い太平洋沿岸の広範囲にわたって継続時間が 20s 以上みられた。これに対し、5s や 7s では震源付近では階級 3 に達した地点は少なく、関東平野付近で階級 3 に達した。関東平野の観測地点では周期が長くなるほど継続時間が長くなる傾向がみられた。日本海側でも階級 3 に達した地点がみられた。

また図 21 より、長周期地震動階級 4 に達したのは、ほぼ周期 2s に限られ、宮城や福島、静岡県東部(御殿場 SZO010)など 18 箇所である。それ以外では唯一、周期 7s で K-NET 酒田(YMT001)で継続時間 3.9s となった。

以上の長周期地震動の振幅・周期・継続時間特性は、震源過程、伝播経路、深部地盤・浅部地盤の複合的影響によるものと考えられ、今後、詳細な分析を行う方針である。

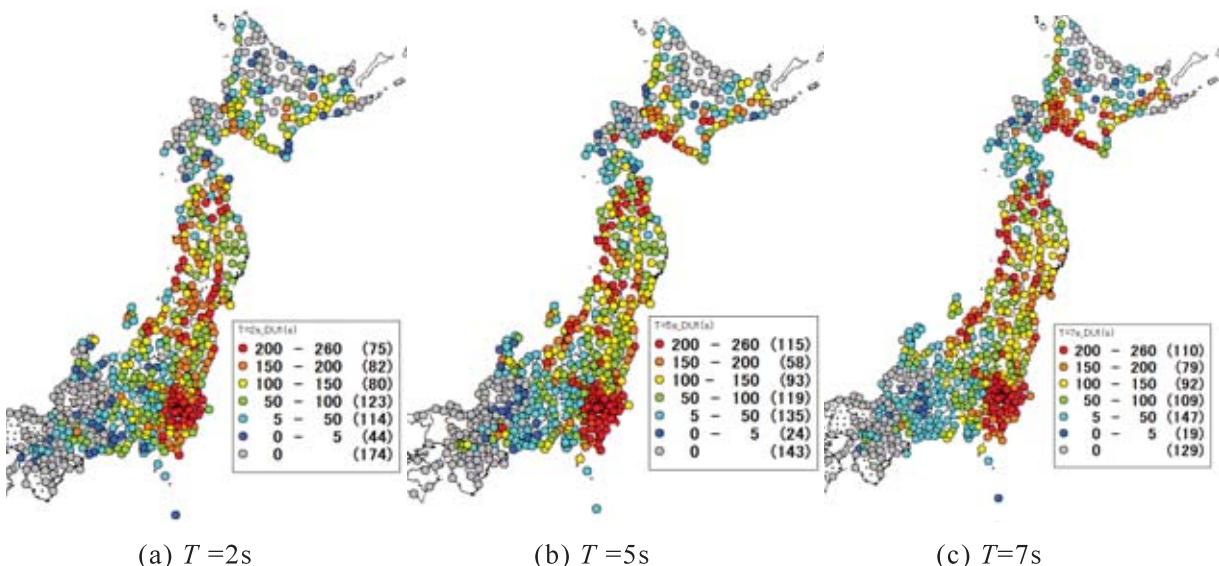


図 18 長周期地震動階級 1 の継続時間 D_{U1} の分布

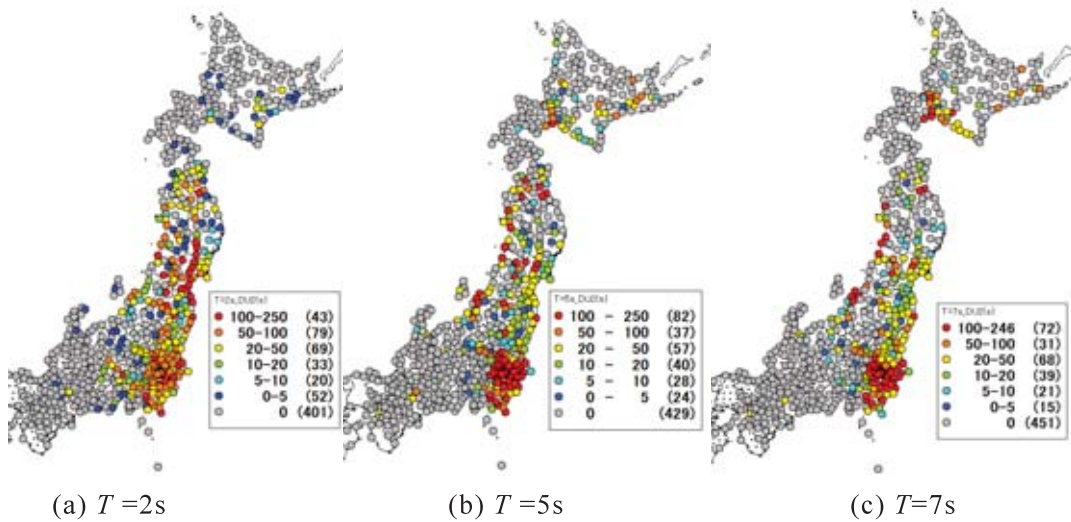


図 19 長周期地震動階級 2 の継続時間 D_{U2} の分布

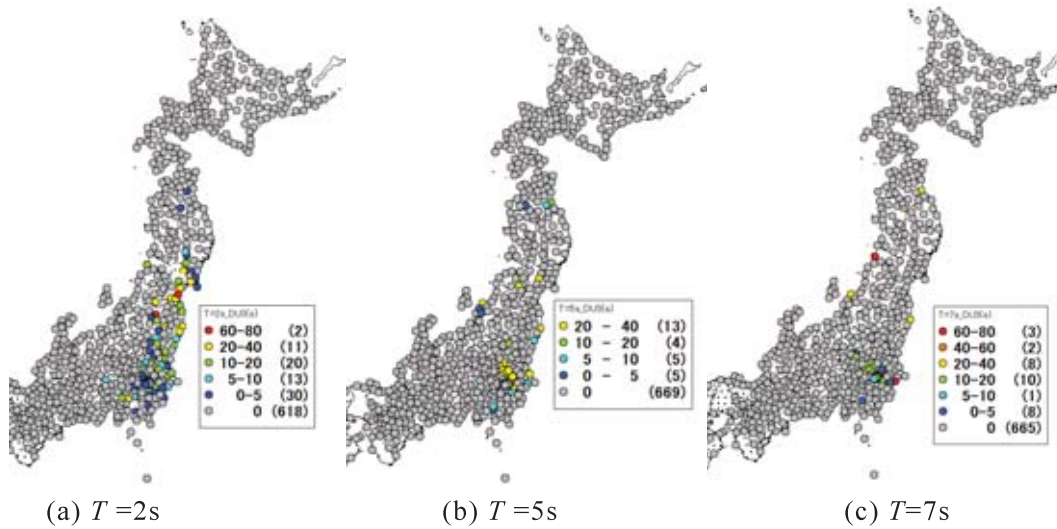


図 20 長周期地震動階級 3 の継続時間 D_{U3} の分布

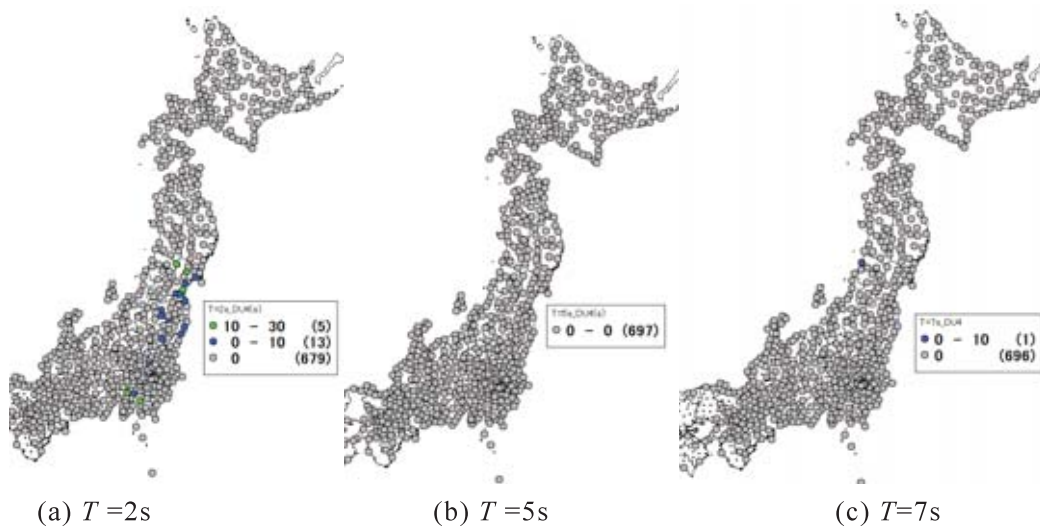


図 20 長周期地震動階級 4 の継続時間 D_{U4} の分布

7. 結論

本研究により得られた成果を以下に要約する。

- 1) 線形 1 自由度系の速度応答包絡線を用いて、所定の速度閾値を超過する "Uniform duration" を評価する手法を示し、周期依存の「速度応答包絡線閾値超過継続時間スペクトル $S_{Dur-VRE}$ 」を提案した。これにより任意の閾値に対する地震動継続時間を固有周期ごとに評価することを可能と、1995 年兵庫県南部地震の JMA 神戸および 2011 年東北地方太平洋沖地震 K-NET 築館を取り上げ、数値計算例を示した。
- 2) 高橋らによる行動限界曲線¹⁾⁻³⁾を周期関数としてモデル化し、周期依存の「行動難度継続時間スペクトル $S_{Dur-Dif}$ 」と「不安度継続時間スペクトル $S_{Dur-Anx}$ 」を提案した。人間行動および知覚に関する周期依存のフィルター特性を考慮し、強い揺れによる避難行動への支障や心理的不安感の継続時間の簡便な計測が可能となった。
- 3) 2011 年東北地方太平洋沖地震における広域的評価を行い、周期 $T=0.33, 1.0, 3.0s$ 、速度閾値 1, 10, 100cm/s に対する超過継続時間マップを作成した。最大応答に加えて継続時間の情報を付与することで、速度応答時刻歴をイメージしやすくなる。同様に、周期 $T=0.33, 1.0, 3.0s$ に対する行動難度継続時間マップおよび不安度継続時間マップを作成した。
- 4) 長周期地震動階級の継続時間スペクトルの算出方法を提案した。直交水平 2 成分の地動加速度波形を、減衰定数 $h=5\%$ の線形 1 自由度系 (固有周期 1.6~7.8s で 0.2s 刻みで 32 種類) に入力して、絶対速度応答の 2 成分合成時刻歴波形を求め、長周期地震動階級 1~4 に対応した 4 つの閾値 (5, 15, 50, 100cm/s) を超える "Bracketed duration" D_B および "Uniform duration" D_U を算出してスペクトル表示するものである。
- 5) 2011 年東北地方太平洋沖地震における広域評価を行い、周期 $T=2, 5, 7s$ に対する長周期地震動階級 1~4 の継続時間マップを作成した。関東平野では長周期地震動が長時間継続したことが可視化された。今後、震源過程、伝播経路、深部地盤・浅部地盤との関連性について、詳細な分析を行う方針である。

謝 辞

本研究では、(独)防災科学技術研究所 K-NET の強震記録を使用した。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Takahashi, T., Saito, T., Azuhata, T. and Ohtomo, K.: Shaking Table Test on Indoor Human Response and Evacuation Action Limit in Strong Ground Motion, *Proc. of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 2004, Paper No.1320. (on CD-ROM)
- 2) 高橋徹・間崎明彦・斉藤大樹・小豆畑達哉・野口和也：強震に対する人間の屋内避難行動限界に関する実験的研究，第 12 回日本地震工学シンポジウム，論文番号 0322，pp.1394-1397，2006.11.
- 3) Takahashi, T., Suzuki, T., Saito, T., Azuhata, T. and Morita, K.: Shaking Table Test for Indoor Human Response and Evacuation Limit, *Proc. of the 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering and the 5th International Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan, pp.187-194, March 2010.
- 4) 気象庁：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震時に震度計で観測した各地の揺れの状況について，報道発表資料（平成 23 年 3 月 25 日），2011.3.

- 5) 地震調査研究推進本部：南海地震（昭和型）の長周期地震動予測について（2012年試作版），2012.1.
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/index.htm
- 6) Bommer, J. J., Stafford, P. J. and Alarcón, J. E.: Empirical Equations for the Prediction of the Significant, Bracketed, and Uniform Duration of Earthquake Ground Motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.99, No.6, pp.3217-3233, 2009.
- 7) 能島暢呂：観測震度または予測震度を与件とする震度継続時間の条件付予測式，日本地震工学会論文集，第14巻，第5号，pp.50-67，2014.11.
- 8) 能島暢呂：速度応答包絡線を用いた閾値超過継続時間のスペクトル表現とその応用，日本地震工学会論文集，第15巻，第1号，pp.1-17，2015.2.
- 9) 能島暢呂：震度と震度継続時間の一貫した経験的予測体系の提案，日本地震工学会論文集，第15巻，第2号，pp.59-76，2015.5.
- 10) 能島暢呂：長周期地震動階級の継続時間スペクトル，日本地震工学会論文集，第15巻，第6号，pp.142-147，2015.11.
- 11) 亀田弘行：強震地震動の非定常パワースペクトルの算出法に関する一考察，土木学会論文報告集，第235号，pp.55-62，1975.3.
- 12) Trifunac, M. D.: Response Envelope Spectrum and Interpretation of Strong Earthquake Ground Motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.61, No.2, pp.343-356, 1971.
- 13) (独)防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET, KiK-net)，2013.12.
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 14) 国土交通省国土技術政策総合研究所：高強度鋼等の革新的構造材料を用いた新構造建築物の性能評価手法の開発，国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告，No.32，2010.2.
- 15) 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，第77巻，第677号，pp.1065-1072，2012.7.
- 16) 気象庁：長周期地震動階級および長周期地震動階級関連解説表について，
http://www.data.jma.go.jp/svd/cew/data/ltpgm_explain/about_level.html
- 17) 池田翔平：長周期地震動の振幅・周期・継続時間特性の評価，岐阜大学工学部社会基盤工学科，平成27年度卒業論文，2016.2.