

## 予測震度または観測震度を与件とする震度継続時間予測式の提案

岐阜大学工学部 正会員 ○能島 暢呂

### 1. はじめに

地震動の継続時間は振幅特性や振動数特性とともに重要な地震動特性の一つである。気象庁は2011年東北地方太平洋沖地震について、10秒ごとの計測震度から震度4以上の継続時間が約180秒に達した例を報告している<sup>1)</sup>。強震記録を用いた継続時間の評価方法としては、“Bracketed”（地震動が閾値を最初に超過してから最後に下回るまでの時間）や“Significant”（地震動の相対累積パワーの所定の上下限値の占有時間）、“Uniform”（地震動が閾値を超過した正味の時間）などが挙げられ<sup>2)</sup>、様々な予測式が提案されている<sup>2)</sup>。わが国で多用される震度については、距離減衰式による簡便な推定法が確立されている一方、継続時間については有効な予測方法がない。本研究では、観測震度または予測震度が得られた場合に、それを与件として継続時間を予測する簡便な手法の確立を目的として、近年の主要地震の強震記録<sup>3),4)</sup>をもとに、震度継続時間予測式を構築する。

### 2. 震度継続時間の算出方法と対象とする35地震

気象庁の計測震度は、3成分の加速度波形に補正フィルター処理を施して得られた波形をベクトル合成し、合計の継続時間が $\tau_0=0.3$ 秒以上となる補正加速度値 $a_0$ より $I=2\log_{10}a_0+0.94$ として求められる<sup>5)</sup>。本研究では時間区間0.5秒で $\tau_0=0.1$ 秒を満たす計測震度相当値を連続的に求め、“Uniform”の定義に基づいて8種類の計測震度レベル( $I^*=0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0$ )を超過する時間を震度継続時間 $D_{UAI}[s]$ とする。

分析対象としてまず1996年～2013年に気象庁で震度6弱以上を観測した33地震（新島や三宅島など島しょ部で発生した6地震を除外）を選定し、南海トラフ沿いの地震として2004年9月5日に発生した紀伊半島沖の地震( $M_w6.9$ )および東海道沖の地震( $M_w7.4$ )を追加した全35地震を扱う。対象地震の震源モデルを図2に示す。強震記録としては、(独)防災科学技術研究所のK-NETの観測記録（延べ10411地点）に気象庁および都道府県震度情報ネットワークの観測による震度6弱以上の強震記録（全35地震のうち20地震、延べ239地点）を加えて、延べ10650地点×3成分を使用した。観測点から各地震の断層最短距離 $R$  [km]とモーメントマグニチュード $M_w$ との関係を図2に示す。震度継続時間 $D_{UAI}$ と観測震度 $I$ および $M_w$ との関係の例をそれぞれ図3と図4に示す。低震度の閾値 $I^*$ の一部で記録長の制限（300, 360, 600秒付近）の影響を受けているものの、閾値 $I^*$ との差が大きく $M_w$ が大きいほど、継続時間が長くなる傾向が見て取れる。



図1 対象35地震の震源モデル

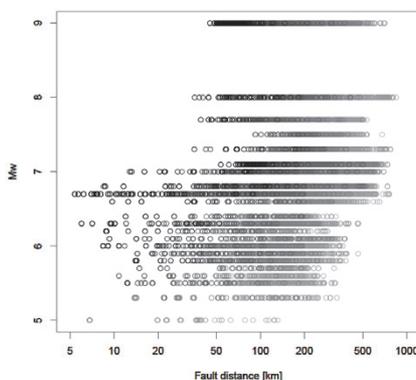


図2 断層最短距離 $R$ と $M_w$

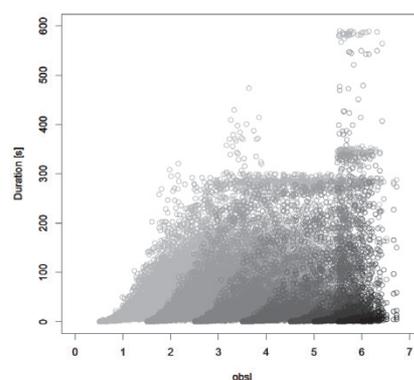


図3 観測震度 $I$ と震度継続時間 $D_{UAI}$

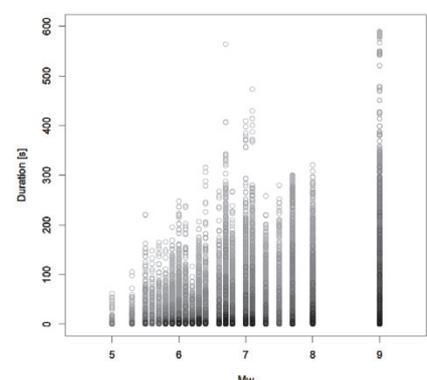


図4  $M_w$ と震度継続時間 $D_{UAI}$

(図2～4の説明は横軸-縦軸の関係を意味する。プロットのグレースケールは計測震度の閾値 $I^*=0.5\sim 6.0$ を淡～濃で表す。)

キーワード 震度継続時間, 計測震度, 閾値超過, 予測式

連絡先 〒501-1193 岐阜市柳戸1-1 岐阜大学工学部 Tel 058-293-2416

### 3. 震度継続時間の予測式のモデル化

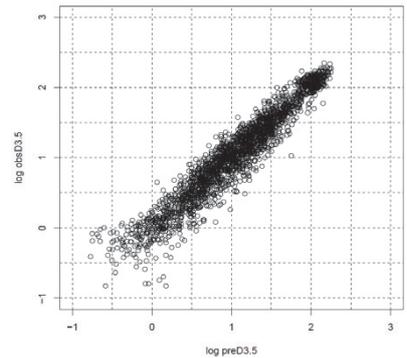
まず震度継続時間  $D_{UAI}$  を、観測震度  $I$  と計測震度レベル  $I^*$  との差  $\Delta I = I - I^*$  およびモーメントマグニチュード  $M_w$  で説明する重回帰モデル (式(1)の右辺第 1~3 項と定数項) を作成した. このモデルによる予測値に対して, 断層最短距離  $R$  [km], 着目地点における平均 S 波速度  $AVS_{30}$  [m/s] および S 波速度  $V_s=1400$ m 上面深さ  $Z_{1.4}$  [m], 地震タイプを表す二値ダミー変数  $F_1$  (内陸地殻内),  $F_2$  (プレート境界),  $F_3$  (プレート内) をパラメータとして残差分析を行ったところ, 低震度の閾値  $I^*$  の多くに有意な因果関係が認められた. そこでこれらを加えた式(1)で重回帰分析を行った ( $i_1, i_2, m, r, v, z, f_2, f_3$ : モデル係数,  $f_1=0$  は固定,  $c$ : 定数項,  $\sigma$ : 標準誤差).

$$\log_{10} D_{UAI} = i_1 \cdot \log_{10} \Delta I + i_2 \cdot (\log_{10} \Delta I)^2 + m \cdot M_w + r \cdot \log_{10} R + v \cdot \log_{10} AVS_{30} + z \cdot \log_{10} Z_{1.4} + \sum_k F_k \cdot f_k + c \pm \sigma \quad (1)$$

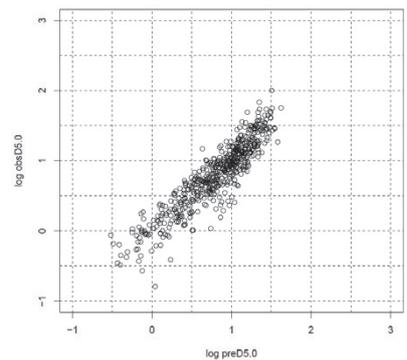
さらに変数減少法を適用して AIC 最小化基準により求めたモデル係数を表 1 に示す.  $I^*=4.5$  以下に関しては全説明変数を採用したモデルで AIC 最小となり, 自由度調整済決定係数  $\text{adj-R}^2$  は 0.876 以上と適合性は高い. 一方  $I^*=5.0$  では地震タイプ  $F_k$  が除外され,  $I^*=5.5$  ではさらに  $V_s=1400$ m 上面深さ  $Z_{1.4}$  が除外された. なお  $I^*=6.0$  に関してはデータが少なく安定なモデルが得られなかったため, 当初のモデル ( $i_1, i_2, m, c$  のみ) とした. 決定係数は徐々に低下するものの, あてはまりは良好といえる. 全般的に標準誤差は 0.2 を下回っており, 2/3 倍~3/2 倍の推定精度となっている. 実測値と推定値の関係の例を図 5 に示す. ほぼ 1:1 の 45 度線上に分布しており, 残差の偏りは小さい. 図 6 は標記の条件 ( $AVS_{30}=300$ m/s,  $Z_{1.4}=200$ m は全記録の中央値にほぼ相当) で予測式を図示したものであり, 震度継続時間 1~250 秒程度の広いレンジを対象とした予測式が得られた.

表 1 震度継続時間  $D_{UAI}$  の予測式のモデル係数

$I^*$	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.0	5.5	6.0
$i_1$	1.1614	1.2561	1.2697	1.2645	1.2963	1.3613	1.5882	1.1149
$i_2$	-0.1311	0.1127	0.1645	0.2109	0.2886	0.3218	0.4809	0.2284
$m$	0.1365	0.1440	0.1661	0.1978	0.2283	0.1459	0.0627	0.0310
$r$	0.1647	0.1762	0.1271	0.0888	0.0708	0.0705	0.0990	
$v$	-0.1200	-0.2022	-0.2012	-0.2230	-0.1991	-0.1723	-0.2110	
$z$	0.1273	0.1299	0.0992	0.0485	-0.0140	-0.0214		
$f_2$	0.0318	0.0357	0.0395	-0.0111	-0.0981			
$f_3$	0.0166	0.0022	-0.0004	-0.0605	-0.0614			
$c$	0.2537	0.2452	0.1527	0.0906	-0.0992	0.3732	1.0116	0.7517
$\sigma$	0.162	0.187	0.184	0.189	0.187	0.197	0.181	0.193
$\text{adj-R}^2$	0.876	0.909	0.917	0.916	0.897	0.835	0.806	0.701
$\text{adj-R}^2$	0.936	0.954	0.957	0.957	0.947	0.914	0.898	0.837
$p$	< 2.2E-16							
AIC	-8144.634	-4283.981	-2642.860	-1047.587	-436.202	-213.436	-182.950	-24.628



(a) 計測震度の閾値  $I^*=3.5$



(b) 計測震度の閾値  $I^*=5.0$

図 6  $\log_{10} D_{UAI}$  の推定値(横軸)と実測値(縦軸)との比較

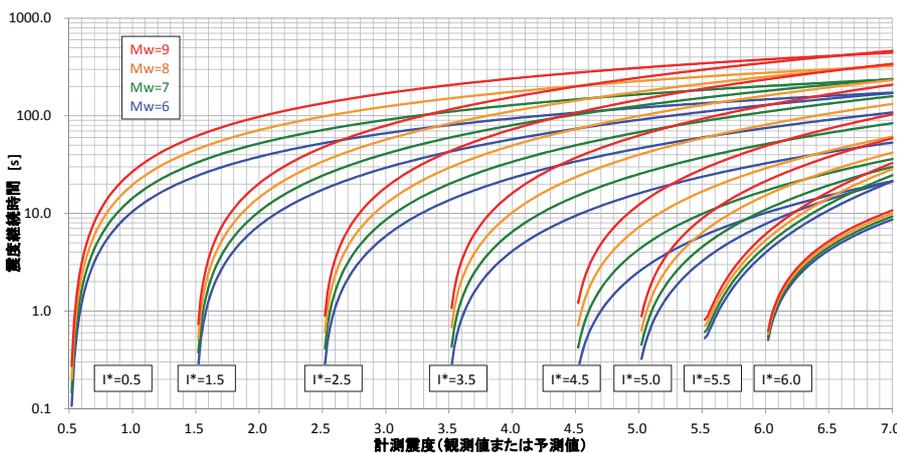


図 5 予測式による震度継続時間  $D_{UAI}$  ( $R=50$ km,  $AVS_{30}=300$ m/s,  $Z_{1.4}=200$ m)

謝辞:本研究では(独)防災科学技術研究所 K-NET および気象庁の強震記録を使用させていただきました. 記して謝意を表します.  
 参考文献 1) 気象庁:平成 23 年 3 月地震・火山月報(防災編), 2011.3.  
 2) Bommer, J. J. et al.: Empirical Equations for the Prediction of the Significant, Bracketed, and Uniform Duration of Earthquake Ground Motion, BSSA, Vol.99, No. 6, pp.3217-3233, Dec.2009.  
 3) (独)防災科学技術研究所:強震観測網 (K-NET, KiK-net) <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>  
 4) 気象庁:主な地震の強震観測データ, <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/>  
 5) 気象庁監修:震度を知る -基礎知識とその活用-, ぎょうせい, 238p, 1996.