

緊急地震速報の震源情報を用いた地震動強度予測の 不確定性に関する考察

Uncertainties of Seismic Intensities Predicted by Use of Seismic Source Information Provided by Earthquake Early Warning

能島 暢呂¹

Nobuoto NOJIMA¹

¹岐阜大学工学部 社会基盤工学科

Department of Civil Engineering, Gifu University

In Japan, “Earthquake Early Warning (EEW)” has been put into operation for first response prior to the arrival of strong motions. However, the uncertainties of the provided information are still in problem for practice of emergency decision making. This study evaluates the error propagation from the estimated seismic source parameters (earthquake magnitude, focal depth and epicenter) to the predicted seismic intensities (PGV and JMA seismic intensities) in an analytical form based on the attenuation law and several conversion formula. Evidence-based approach has been also employed. Probability distributions of realistic seismic intensity conditional on the estimated seismic intensity are modeled on the basis of EEW records actually issued by Japan Meteorological Agency.

Keywords: Earthquake Early Warning, uncertainty, error propagation, attenuation law, source parameters, seismic intensity

1. はじめに

近年、各種の「リアルタイム地震防災システム¹⁾」が実用化されており、供給系ライフラインの供給遮断、交通系ライフラインの車両制御、プラント施設の運転制御など、実時間制御による二次災害防止や被害軽減の有力な手段となっている。中でも気象庁が運用する緊急地震速報²⁾は「地震の発生直後に、震源に近い地震計でとらえた観測データを解析して震源（震源深さ、北緯、東経）や地震の規模（マグニチュード）を直ちに推定し、これに基づいて各地での主要動の到達時刻や震度を推定し、可能な限り素早く知らせる情報」であり、揺れの到達前に行動を起こすことを可能とする情報として、期待が高まる中、平成19年10月1日に本格運用が始まった。

その有効活用のための取り組みは、本格運用前から進められてきており³⁾、現在に至るまで、利用者の対応行動・制御の適正化と、提供情報の迅速化・高精度化に関して、多くの研究が行われている。

緊急地震速報の利用者側に関する研究課題としては、プラントの緊急制御の起動基準の検討^{4), 5)}、大学キャンパスにおける避難対策の検討⁶⁾、ドライバーの挙動を考慮した高速走行車両への影響評価⁷⁾、などが挙げられる。緊急地震速報の提供者側の研究課題としては、構造物の応答解析や被害推定に有用な周波数マグニチュードなど提供情報の高度化⁸⁾などが挙げられる。また、緊急地震速報の利用者側が積極的に情報の高度化に関与する動き

も見られる。例えば、事前の理論的解析を活用した長周期地震動到達前の超高層ビルのエレベータ制御⁹⁾、独自の前線地震観測や構造物ヘルスマonitoringと連動した統合システムによる地震情報の高度化¹⁰⁾などである。これらの研究成果を活かした適切な直前対応によって被害軽減につながることを期待される。

一方、緊急地震速報により提供される震源情報や震度情報の精度には限界があることから、そのことを踏まえた対応が必須である。安全側の対応により万全を期すことも一つの解決策ではあるが、不要不急の対応によって損失が拡大したり、いわゆる「狼少年効果」によって不信感が醸成されることが懸念される。独自の技術的取り組み⁹⁾⁻¹⁰⁾により高度化を図る方向性もあるが、現在の広い利用形態を考えると、利用者側が緊急地震速報の予測精度を適切に認識して対応を検討することは、本質的な重要性を持つといえる。

緊急地震速報の震源情報や予測震度の不確定性に関する評価は、本格運用開始前から継続的に行われている¹¹⁾⁻¹³⁾。しかしこれらは、データ処理方法やアルゴリズムの改良を主眼としたものであり、必ずしも利用者側の意思決定支援という観点から開示された情報ではない。干場ら¹⁴⁾は、地震規模と震源位置が類似した地震の震度分布に注目して、地震のペア間での観測震度の差からRMS誤差を評価している。ただし、緊急地震速報の予測震度を扱ったものではない。

不確定性を明示的に取り入れた研究として、中村ら⁴⁾は、緊急地震速報に基づく石油精製施設の緊急停止において、そのトリガーレベルを最適化するにあたって、地震動予測の不確実性を考慮している。同様に浅原・大角⁵⁾は、緊急地震速報の震源情報の誤差と、地震動予測でのばらつきを考慮して、所定の遮断しきい値に対する誤判定の可能性について検討している。

しかし現状では、緊急地震速報の震度予測手順に従って、解析的にばらつきを評価し、系統的に分析した例は見られない。ばらつきの解析解を得るメリットは大きい。結果が汎用性を持つので、条件変更による再評価や比較が容易であるばかりではなく、ばらつきの内部構造を明示でき、その低減に向けての検討に有用だからである。

以上を踏まえて本研究では、緊急地震速報による震源情報（マグニチュード、震源深さ、震央）のばらつきが地震動強度（最大速度および震度）予測に与える影響について、誤差伝播に基づく解析的アプローチにより定量的評価を行うとともに、推定精度に関する現状把握と解析解の検証を目的として、実績データに基づく分析を行うものである。

以下、2.では、震源情報の不確実性が地震動強度の予測精度に与える影響を定量評価するため、最大速度の距離減衰式に基づく定式化を行って、ばらつきの解析解を導く。3.では、2.で導いた解析解の数値計算例を示し、その特性について考察を行う。4.では、地盤増幅度を考慮して最大速度から求められる予測震度の不確実性について評価する。5.では、緊急地震速報の実績データに基づいて、実証的アプローチにより予測震度のばらつきを評価し、解析解の検証を行うとともに、震度予測の確率モデルの構築を試みる。最後に6.では、本研究の成果をまとめる。

2. 緊急地震速報による震源情報のばらつきが地震動強度の予測精度に与える影響の定式化

(1) 緊急地震速報の概要

気象庁は平成18年8月1日、本格運用前に先行的に活用できる分野を対象として、「高度利用者向け緊急地震速報」の提供を開始した。地震の発生時刻、地震の発生場所（震源）、地震の規模（マグニチュード）の推定値に加えて、推定最大震度が3以下のときは推定最大震度が発表される。さらに、推定最大震度が4以上のときは、震度5弱以上と推定される地域の予測震度と主要動到達予測時刻も発表される。

さらに気象庁は平成19年10月1日、「一般向け緊急地震速報」の発表を開始した。これは「地震波が2点以上の地震観測点で観測され、最大震度が5弱以上と推定された場合」に、「地震の発生時刻、発生場所（震源）の推定値、地震発生場所の震源地名、震度5弱以上および震度4が推定される地域名（全国を約200地域に分割）」が発表される。具体的な推定震度や猶予時間については発表されず、「強い揺れ」と表現される。震度4を含めるのは、予測誤差や続報^{補注(1)}による変更の可能性を考慮するためである。

これらの緊急地震速報における地震動予測は、次の手順によって行われる¹⁵⁾。

- i) 震源位置・深さ・マグニチュード等より最大速度の距離減衰式を適用し、対象となる地点（全国震度観測点：約4000点）の基準基盤（S波速度600 m/sec相当の硬質地盤）における最大速度を求める。

- ii) 各観測点での地盤増幅度を乗じることで対象となる地点での増幅特性を考慮し、地表での最大速度を算出する。

- iii) 地表での計測震度に換算する。

こうした地震動強度の予測結果には、距離減衰式を持つ本来のばらつきや、地盤増幅に関するばらつきに加えて、震源情報のばらつきの影響が付加されると考えなければならない。上記の手続きのうちii)およびiii)については4.で扱うこととして、本章ではまず、i)の最大速度の予測における震源情報のばらつきの影響を、解析的に評価するための定式化を行う。

(2) 最大速度の距離減衰式

緊急地震速報で実際に適用されているのは司・翠川¹⁶⁾による最大速度の距離減衰式で、断層最短距離をパラメータとした予測式である。

$$\log V = b - \log(R+c) - kR \quad [1]$$

$$b = aM_w + hD + \sum_i d_i S_i + e + \varepsilon$$

$$c = c_1 10^{c_2 M_w}$$

ここに、 V はS波速度600 m/sec相当の硬質地盤における最大速度[cm/sec]、 M_w はモーメントマグニチュード、 D は震源深さ[km]、 R は断層最短距離[km]、 S_i は断層タイプ（地殻内地震、プレート間地震、プレート内地震）を表す二値変数、 d_i は断層タイプに応じた係数、 e は定数項、 ε は誤差項である。またlogは常用対数を表す。係数の具体的な値は、 $a=0.58$ 、 $h=0.0038$ 、 $k=0.002$ 、 $d_i=0.0, 0.01, 0.22$ （前述の断層タイプ S_i の順）、 $c_1=0.0028$ 、 $c_2=0.5$ 、 $e=-1.29$ と与えられている¹⁶⁾。これらのうち d_i および e は、本研究における不確実性評価の範囲においては無関係となる。

式[1]のモーメントマグニチュード M_w は、次式の変換により気象庁マグニチュード M から求められている（以下では単にマグニチュードと表記する）。

$$M_w = M - 0.171 \quad [2]$$

緊急地震速報では断層走向など正確な断層パラメータを決定することはできず、点震源としての諸元のみが推定対象となっている。震源域の広がりや考慮せずに点震源を仮定して距離減衰式[1]を適用すると、大断層の地震では明らかに地震動強度が過小評価となる。これを避けるため、式[1]に適用する断層最短距離 R の算出に際しては、震源域の広がりを考慮するための処理がされている¹⁵⁾。すなわち、相似則

$$\log L = 0.5M - 1.85 \quad [3]$$

によりマグニチュード M から予測される断層長さ L の1/2を半径とした球を、震源を中心として設定し、対象地点から球面までの最短距離（文献¹⁵⁾では「震源最短距離」と表現）をもって式[1]の断層最短距離 R とみなしている。従って、震央距離を Δ とすると、

$$R = \sqrt{\Delta^2 + D^2} - \frac{10^{0.5M-1.85}}{2} = R_0 - c_3 10^{c_4 M} = R_0 - c' \quad [4]$$

と表せる。ただし、 $R_0 = \sqrt{\Delta^2 + D^2}$ 、 $c' = c_3 10^{c_4 M}$ 、

$c_3=0.00706$, $c_4=0.5$ である。また $c'=L/2$ であり、震源域を表す球の半径に相当するパラメータである。また、震源距離が断層長の 1/2 よりも近い場合は一律に最短距離を 3km と設定しているため、式[4]で評価される R の下限値を 3km とする。

以上より、距離減衰式[1]は、気象庁マグニチュード M 、震源深さ D 、震央距離 Δ の 3 パラメータによる推定式として、次式のように書き換えられる。

$$\log V = aM + hD - \log(R+c) - kR + e' \quad [5]$$

$$R = \begin{cases} R_0 - c' & ; R_0 - c' \geq 3 \\ 3 & ; R_0 - c' < 3 \end{cases}$$

ただし e' は、以下の解析で微分により消滅する定数項をまとめたものである。

図 1 は、いくつかのマグニチュード、震央距離、震源深さの組み合わせについて、最大速度の距離減衰式を図示したものである。(a)でマグニチュードが大きくなるにつれて徐々に急勾配になるのは、式[4]の c' 項で断層の広がりやを考慮した効果である。(a)(b)で近距離において最大速度が飽和するのは、 R に 3km の下限値が設けられていることと、式[5]の c 項による飽和効果によるものである。

図 2 に示すように、 c 項と c' 項には、 $c'=2.52c$ の関係が成り立つ。

なお、式[3]は松田式 $\log L=0.6M-2.9$ よりも断層長さ L を長く評価する傾向にある。これを用いた c' 項は、断層の幾何形状や破壊開始点などの影響を簡略化し、安全側をみて球面震源とするものであるから、地震動強度を大きめに評価する可能性があることに留意する必要がある。こうした系統的誤差については、5.で検証する。

(3) 不確定性評価のための定式化

式[5]を規定する震源パラメータ（気象庁マグニチュード M 、震源深さ D 、震央距離 Δ ）のばらつきを表す標準偏差をそれぞれ σ_M 、 σ_D 、 σ_Δ とする。簡単のため、震源パラメータの推定値のばらつきが統計的に独立と仮定すると、推定値 $\log V$ の標準偏差 $\sigma_{\log V}$ は近似的に次式のように求められる。

$$\sigma_{\log V}^2 \cong \sigma_M^2 \left\{ \frac{\partial \log V}{\partial M} \right\}^2 + \sigma_D^2 \left\{ \frac{\partial \log V}{\partial D} \right\}^2 + \sigma_\Delta^2 \left\{ \frac{\partial \log V}{\partial \Delta} \right\}^2 \quad [6]$$

$$\frac{\partial \log V}{\partial M} = a - \frac{\partial \log(R_0 - c' + c)}{\partial (-c' + c)} \frac{\partial (-c' + c)}{\partial M} + k \frac{\partial c'}{\partial M} \quad [7]$$

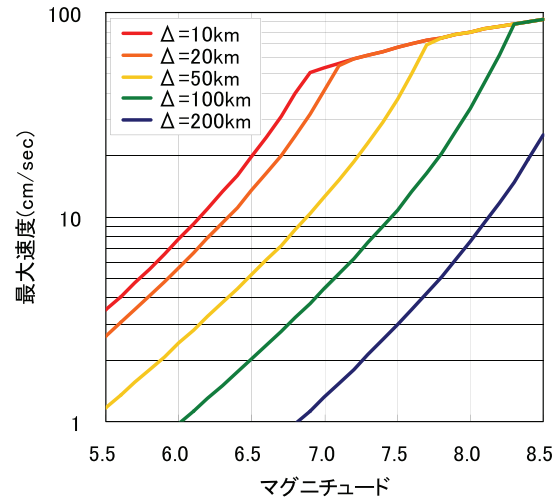
$$= a + \frac{c_4 c' - c_2 c}{R_0 - c' + c} + k c_4 c' \ln 10$$

$$\frac{\partial \log V}{\partial D} = h - \frac{\partial \log(R_0 - c' + c)}{\partial R_0} \frac{\partial R_0}{\partial D} - k \frac{\partial R}{\partial D} \quad [8]$$

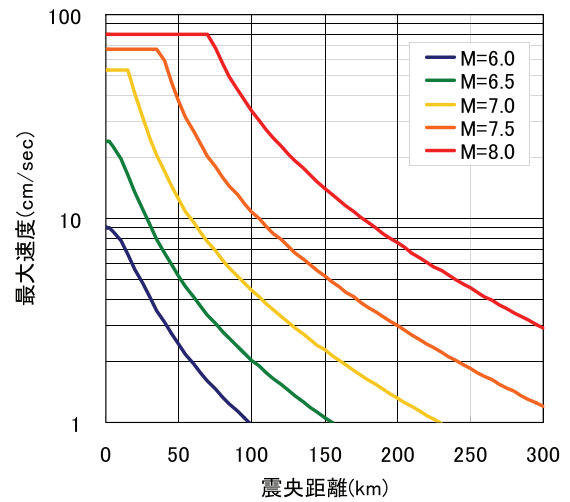
$$= h - \left\{ \frac{1}{(R_0 - c' + c) \ln 10} + k \right\} \frac{D}{R_0}$$

$$\frac{\partial \log V}{\partial \Delta} = \frac{\partial \log V}{\partial R_0} \frac{\partial R_0}{\partial \Delta} \quad [9]$$

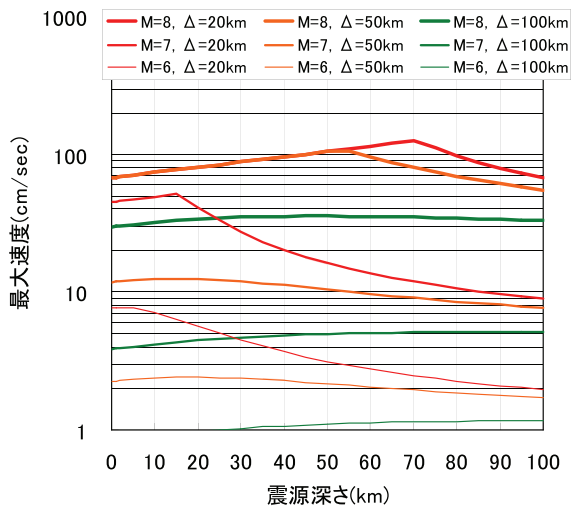
$$= - \left\{ \frac{1}{(R_0 - c' + c) \ln 10} + k \right\} \frac{\Delta}{R_0}$$



(a) マグニチュード M と最大速度 V (震源深さ $D=20$ km)



(b) 震央距離 Δ と最大速度 V (震源深さ $D=20$ km)



(c) 震源深さ D と最大速度 V

図1 緊急地震速報で用いられている最大速度の距離減衰式の特徴

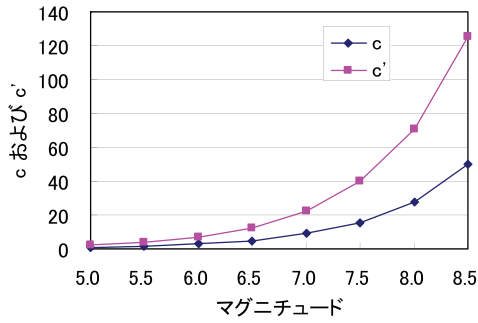


図2 距離減衰式の飽和効果を表す c 項および震源域を球で近似した場合の半径を表す c' 項の比較

ただし以上は $R_0 - c' > 3$ の場合である。 $R_0 - c' < 3$ の場合には $R=3\text{km}$ に固定されるため、距離減衰項 (式[5]の第3項と第4項) の震央距離および震源深さに関する微係数は0になる。従って式[7]~[9]は次式のようになる。

$$\frac{\partial \log V}{\partial M} = a + \frac{c_4 c' - c_2 c}{3 + c} + k c_4 c' \ln 10 \quad ; R_0 - c' < 3 \quad [7']$$

$$\frac{\partial \log V}{\partial D} = h \quad ; R_0 - c' < 3 \quad [8']$$

$$\frac{\partial \log V}{\partial \Delta} = 0 \quad ; R_0 - c' < 3 \quad [9']$$

ここで、 x - y 平面座標系における注目サイトの座標を (x_0, y_0) 、震央の座標を (x, y) とすると、震央距離は

$$\Delta = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad [10]$$

となるから、震央の座標 (x, y) の推定値の標準偏差を σ_x, σ_y とすると、

$$\sigma_{\Delta}^2 \cong \sigma_x^2 \left(\frac{\partial \Delta}{\partial x} \right)^2 + \sigma_y^2 \left(\frac{\partial \Delta}{\partial y} \right)^2 = \sigma_x^2 \cos^2 \theta + \sigma_y^2 \sin^2 \theta \quad [11]$$

$$\text{ただし、} \cos \theta = \frac{x - x_0}{\Delta}, \sin \theta = \frac{y - y_0}{\Delta}$$

本来、震央距離は座標軸のとり方には依存しないので、平面座標系における震央の x 成分と y 成分の推定精度は、交換可能として良いと考えられる^{補注(2)}。加えて、地震発生前の段階では θ は未知であるから、2成分のばらつきを次式のように平均化処理するのが妥当と考えられる。

$$\sigma_{\Delta}^2 = \frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}{2} \quad [12]$$

ところで、震央は経度・緯度[deg]で与えられるので、経度単位の距離 x_{long} [deg]および緯度単位の距離 y_{lat} [deg]を次式で距離[km]に近似換算する。

$$x = \alpha \cdot x_{\text{long}}, \quad y = \beta \cdot y_{\text{lat}} \quad [13]$$

ただし α, β は変換パラメータ[km/deg]である。これより、震央の経度・緯度の推定値の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{x_{\text{long}}}, \sigma_{y_{\text{lat}}}$ として、

$$\sigma_{\Delta}^2 = \frac{\alpha^2 \sigma_{x_{\text{long}}}^2 + \beta^2 \sigma_{y_{\text{lat}}}^2}{2} \quad [14]$$

以上の結果より、式[7]~[9], [7']~[9'], [14]を式[6]に代入すれば、最大速度の予測値の不確定性を評価することができる。

3. 最大速度の予測精度に関する数値計算

本章では、2. で導いた解析解の数値計算例を示して、その特性について考察を行う。

(1) 震源情報の不確定性

中村ら⁴⁾は、緊急地震速報の試験運用中(2006年1月25日~2月28日)に配信された地震のうち、マグニチュード3.5以上の45地震を対象として、震源情報(マグニチュード、震源深さ、震央位置)に含まれる推定誤差について検討を行った。第2報目^{補注(1)}の震源情報を用いた分析の結果、真値との差(推定値-真値)は正規分布でほぼ近似され、その平均値と標準偏差は表1のように算出されている。

ここでは北緯を 35° とした場合について示すこととする。式[13]の係数は $\alpha=91.1 \text{ km/deg}$, $\beta=111.2 \text{ km/deg}$ と求められ、震央距離の標準偏差は $\sigma_{\Delta}=7.39 \text{ km}$ となる。本研究では、距離減衰式の感度分析の観点で不確定性評価を行うことから、表1の標準偏差のみを用いることとする。マグニチュードの推定精度についてはマグニチュード依存性¹³⁾が指摘されている。表1は中小地震を中心とした結果であり、マグニチュード全域の傾向を反映したものではないことに注意する必要がある。

表1 震源情報の平均値と標準偏差⁴⁾

	平均値	標準偏差
マグニチュード	$\mu_M = -0.0933$	$\sigma_M = 0.3467$
震源深さ[km]	$\mu_D = -7.78$	$\sigma_D = 13.50$
経度[deg]	$\mu_{x_{\text{long}}} = 0.01420$	$\sigma_{x_{\text{long}}} = 0.10211$
緯度[deg]	$\mu_{y_{\text{lat}}} = 0.00189$	$\sigma_{y_{\text{lat}}} = 0.04282$

(2) 最大速度の不確定性評価

以上の条件を式[6]に代入し、マグニチュード M 、震源深さ D 、震央距離 Δ を変数として $\sigma_{\log V}$ を評価した結果を図3に示す。本来であれば、断層タイプ別(地殻内地震、プレート間地震、プレート内地震)に諸元がとりうる値を合理的に定めるべきであるが、ここでは区別せず一括表示している。図1に示した距離減衰特性と関連付けて結果を考察する。

まず、マグニチュードが小さい場合、震源近傍で $\sigma_{\log V}$ が大きい。これは震源近傍で飽和効果がなく、距離に対する減衰効果が急激で、パラメータの不確定性が推定結果に大きく影響するためであり、震源が浅い場合に特に顕著である。震央距離および震源深さの増加とともに $\sigma_{\log V}$ は急激に小さくなっている。

マグニチュードが大きくなると、一般的に $\sigma_{\log V}$ が大きくなる。これは式[7]の第2項と第3項によるものである。式[4]に示したように、震源域の広がり半径を表す c' 項はマグニチュードの関数であり、図2で見たようにマグニチュードとともに増大するためである。距離減衰の飽和

効果を表す c 項も同様であるが、 c' 項よりも常に小さいため、式[7]の第2項と第3項ともにマグニチュードの増大とともに増加する。これは、マグニチュードのばらつきが断層最短距離のばらつきに影響し、結果として最大速度の予測値を大きくばらつかせるものと解釈できる。震源近傍では一定値で頭打ちとなり、マグニチュードが大きく震源が浅いほどその範囲は広い。これは、震源域が広がることによって断層最短距離が下限値3kmに達して、図1(b)に示すように地震動強度が震央距離に対して飽和し、微係数が式[7]~[9]となるためである。

最後に、マグニチュードが小さく震央距離が大きい場合には、 $\sigma_{\log V}$ は約0.2に漸近することがわかる。十分に遠方では距離減衰の勾配が緩やかになるため、震源深さや震央位置の変動の影響を受けにくく、マグニチュードの変動の影響が相対的に支配的になるためである。このことは、式[6]で M を小さく、 R および Δ を大きくとると、式[15]になることから確認できる。

$$\sigma_{\log V}^2 \cong (a \cdot \sigma_M)^2 + (h \cdot \sigma_D)^2 + (k \cdot \sigma_\Delta)^2 \quad [15]$$

$$= 0.201^2 + 0.051^2 + 0.014^2 = 0.208^2$$

以上、図3の結果をまとめると、地震諸元の組み合わせによってばらつきをとる範囲は広いものの、被害発生が懸念される領域に注目すると、 $\sigma_{\log V}=0.2\sim 0.5$ 程度のばらつきが見込まれ、マグニチュードが大きいほどばらつきが大きいと結論付けられる。

(3) 最大速度の不確実性への寄与率

図3に示した最大速度の不確実性に、マグニチュード、震源深さ、震央距離のばらつきがどのように関わっているかを分析する。ここでは、式[6]の右辺の3項の内訳を示すことにより、分散値 $\sigma_{\log V}^2$ への寄与を確かめた。ここでは、 $M=6, 7, 8$ に対して $\Delta=10, 40\text{km}$ とした6ケースについて図4に示す。

一般的にマグニチュードのばらつきの影響が支配的であり、マグニチュードが大きいほどその傾向が顕著であることがわかる。式[7]の右辺第1項のみならず、前述のように断層最短距離のばらつきを介した影響が加わるためである。一方、断層最短距離が下限値3kmに達しない(a)(d)(e)では、震央距離が震源深さに匹敵する程度の範囲内で、震源深さのばらつきの寄与も認められ、図3で見られた震源近傍のばらつき増大を説明する要因となっている。また、震央距離のばらつきは、あまり寄与していない。

(4) 解析解と既往研究による結果の比較と考察

図3の結果を既往研究による結果と比較する。中村ら⁴⁾は、表1の震源パラメータの不確実性の評価結果に基づいて、モンテカルロシミュレーションにより最大加速度 A の常用対数 $\log A$ のばらつき $\sigma_{\log A}$ を評価した。注目サイトを東経139.5°、北緯36°、震央を東経140.0°、北緯36°に固定し、マグニチュードを7.0, 7.5, 8.0、震源深さを10, 20, 30, 40, 50kmと変化させた15パターン(震源距離は46~67km)についてそれぞれ1000回の試行がなされた。その結果、 $\sigma_{\log A}$ の範囲は0.111から0.167で、平均0.138という値が得られている。

また浅原・大角⁵⁾は、最大加速度 A の距離減衰式を簡略化してその感度分析を行い、マグニチュード誤差を $\Delta M=0.4$ 、震源位置誤差 $\Delta X=25\text{km}$ として、 $\sigma_{\log A}$ 相当の値を0.20と試算している。

本研究と既往研究では、前提条件に違いがあるため単純に比較できないが、地震動強度指標の違い(最大速度と最大加速度)については、式[15]ベースで比較したところ、最大速度の標準偏差は最大加速度のその1.08倍で大差は無いことを確認した。この違いを差し引いて考えても、明らかに本研究の方が大きなばらつき($\sigma_{\log V}=0.2\sim 0.5$)を与えている。その主たる要因は、前述のように、本研究では気象庁の方式にならって震源域の広がりを考慮した断層最短距離を導入した点にあり、マグニチュードの推定誤差が距離の推定誤差に伝播しているためである。しかしこれは精度の悪化を意味するのではない。式[1]では震源距離ではなく断層最短距離を用いるべきであるから、平均的にはむしろ推定精度の向上が期待されるからである^{補注(3)}。式[15]に示したように、距離の影響が小さい遠方の地震では約0.2となり、既往研究に近くなる。

中村ら⁴⁾による結果がさらに小さな値を与えているのは、震央と注目サイトを固定した限定的な条件化での分析であるためと考えられる。距離減衰式のばらつきについても、地震内・地震間のばらつき¹⁷⁾を分離して地震内のばらつきを除去している。逆にいえば、特定サイトで緊急速断などの防災対策を検討するような場面では、予測に伴うばらつきを低減できることを示唆している。

4. 震源情報のばらつきを考慮した予測震度の不確実性の評価

緊急地震速報では、硬質地盤での最大速度を予測した後、地盤増幅度を考慮して地表速度に変換し、さらに計測震度に変換して震度予測を行う。本章では予測震度の不確実性について評価する。

(1) 予測最大速度に基づく震度予測

前章までで扱ったS波速度600m/sec相当の硬質地盤(基準地盤)上での最大速度 V を、ここでは PGV_{600} と表しておく。速度増幅度は、松岡・翠川¹⁸⁾に基づき、次式で求められる¹⁵⁾。

$$\log ARV = 1.83 - 0.66 \log AVS \quad [16]$$

ただし、 AVS は地表から地下30mまでの平均S波速度(m/sec)、 ARV はS波速度600m/secを基準とする速度増幅度である($AVS=600\text{m/sec}$ で $ARV=1$ となる)。式[16]の標準偏差は $\sigma_{\log ARV}=0.16$ と評価されている。地表面における最大速度 PGV_S は、

$$PGV_S = ARV \cdot PGV_{600} \quad [17]$$

で求められる(実際の手続きでは、いったんS波速度700m/secの工学的基盤面での PGV_{700} への変換を行った後に地表面 PGV_S に変換されている)。さらに地表面の最大速度から計測震度への変換式¹⁹⁾を適用して、地表面における予測震度 I_{INSTR} が求められる¹⁵⁾。

$$I_{INSTR} = 2.68 + 1.72 \log PGV_S \quad [18]$$

式[18]の標準偏差は、 $\sigma_{I_{INSTR}}=0.21$ と評価されている。

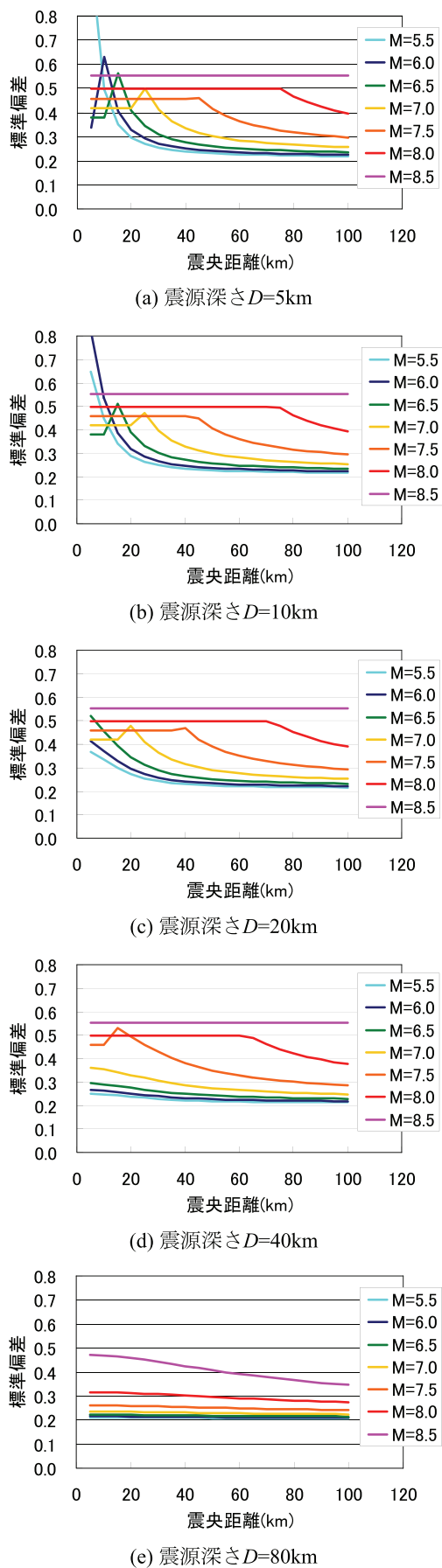


図3 最大速度 V の推定値の標準偏差 $\sigma_{\log V}$ の評価結果

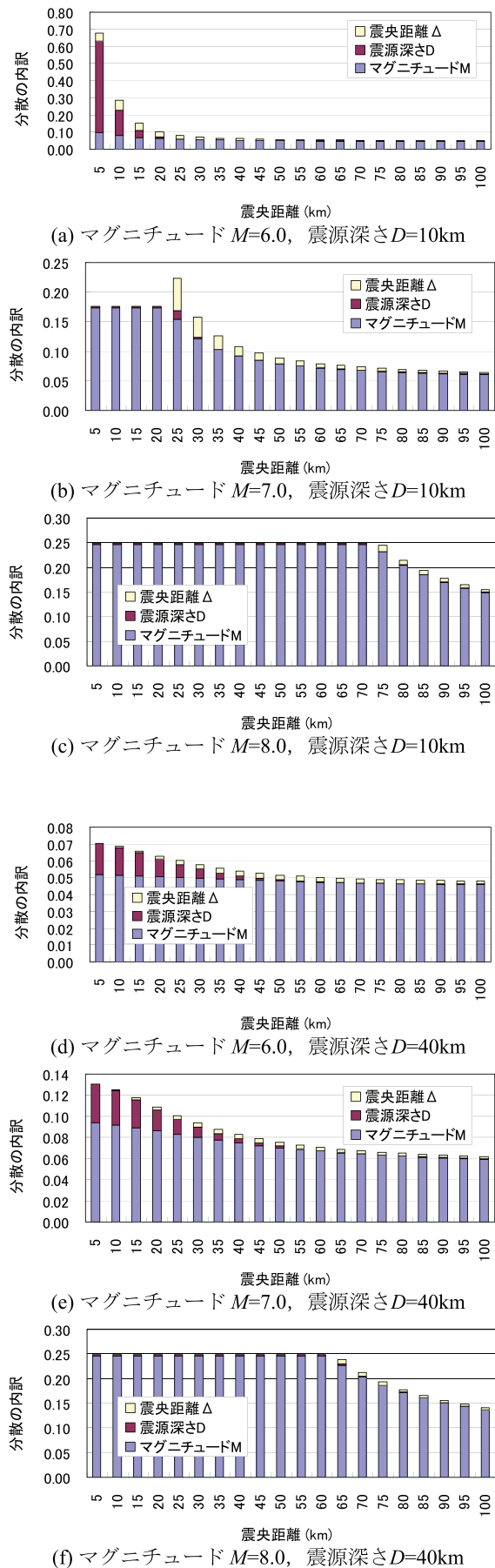


図4 最大速度 V の推定値の分散 $\sigma_{\log V}^2$ への寄与率

(2) 予測震度のばらつき

前章までの手続きを含めて、緊急地震速報を用いた震度予測におけるばらつきの要因をまとめると、次のように5種類になる。

- a) 距離減衰式[1]の持つ本来のばらつき $\sigma_{\log V_{atte}}=0.23$
 - b) 震源情報の不確定性に伴うばらつき $\sigma_{\log r}=0.2\sim 0.5$
 - c) 速度増幅度の評価におけるばらつき $\sigma_{\log ARV}=0.16$
 - d) 震度変換式[18]の変換係数1.72によるばらつきの増幅
 - e) 震度変換式[18]の持つ本来のばらつき $\sigma_{\log I_0}=0.21$
- なお、対数正規変量についてはすべて常用対数標準偏差としている。

以上のばらつきがすべて独立であると仮定すると、予測震度の標準偏差 σ_I は次式で求められる。

$$\sigma_I^2 = 1.72^2 (\sigma_{\log V_{atte}}^2 + \sigma_{\log r}^2 + \sigma_{\log ARV}^2) + \sigma_{\log I_0}^2 \quad [19]$$

$\sigma_{\log r}=0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ と変化させて、まず硬質地盤上の最大速度に関する項 $\sqrt{\sigma_{\log V_{atte}}^2 + \sigma_{\log r}^2}$ を計算すると、それぞれ0.31, 0.38, 0.46, 0.55となった。式[19]を用いて震度のばらつきを評価すると、それぞれ $\sigma_I=0.63, 0.74, 0.87, 1.01$ となった。かなり大きな値であるが、森川ら²⁰⁾が提案した地表面計測震度の距離減衰式では標準偏差は0.72と評価されており、震源情報のばらつきを付加的に考慮した上記の結果は、必ずしも過大とはいえない。

以上の結果をまとめると、緊急地震速報による予測震度のばらつきは、 $\sigma_I=0.6\sim 1.0$ 程度と結論付けられる。

5. 一般向け緊急地震速報で発表される予測震度を用いた検証

ここまで、解析的なアプローチによって、緊急地震速報の予測震度のばらつきの評価を行った。本章では、緊急地震速報の実績データに基づいて、実証的アプローチによって予測震度のばらつきを評価し、前章までの考察の検証を行うとともに、震度予測の確率モデルの構築を試みる。

(1) 予測震度と観測震度の比較データ

気象庁に設置された「緊急地震速報の本運用開始に係る検討会」¹¹⁾および「緊急地震速報評価・改善検討会」¹²⁾⁻¹³⁾では、緊急地震速報において予測された震度(推定値)と、実際の観測震度(真値)を比較することで誤差評価を行ってきている。

表2は、2004年2月25日の試験運用開始から2009年12月31日までの間に、一般向け緊急地震速報の発表条件(2.参照)を満たした地震における予測震度と観測震度とを比較したものである²¹⁾。なお、対象地震数については52例である²²⁾。予測震度が震度4のサンプル数は多いが、震度5弱~6弱については少なく、震度6強と7に至っては速報の事例がない。緊急地震速報では、震度3以下の予測震度は対象外なので、空欄となっている。

推定震度と観測震度の一致状況を表3に示す^{補注(4)}。(a)は全486データの集計で、震度階で一致した割合は22%、±1階級以内となった割合は76%となっている。(b)は予測震度が4以上となった312データの集計で、震度階での一致は35%、±1階級以内は82%である。以下では、予測震度が4以上のデータを分析対象とする。

表2 予測震度と観測震度の対応²¹⁾

		緊急地震速報での予測震度							
		2以下	3	4	5弱	5強	6弱	6強	7
観測された震度	1以下			12					
	2			15					
	3			94	1	1			
	4	38	113	95	17	3			
	5弱	1	19	27	11	2			
	5強		3	12	6	2			
	6弱			4	2	1	1		
	6強			2		2	1		
7				1					
小計		39	135	261	38	11	2	0	0

表3 推定震度と観測震度の一致状況
(a) 全データ

	観測数	割合	累積割合
一致	109	22.4%	22.4%
±1階級	261	53.7%	76.1%
±2階級以上	116	23.9%	100.0%
計	486	100.0%	

(b) 予測震度4以上のデータ

	観測数	割合	累積割合
一致	109	34.9%	34.9%
±1階級	148	47.4%	82.4%
±2階級以上	55	17.6%	100.0%
計	312	100.0%	

(2) 予測震度の不確定性評価のための定量化

予測震度の精度を検証するため、所与の予測震度のもとでの実際の観測震度の確率分布特性について考察する。表2にあるように、緊急地震速報では震度階が用いられており、震度4以下については強弱の区別がなされていない。震度階は「順序尺度」であり、統計処理を行うには「間隔尺度」にする必要がある。

この目的で本研究では観測震度のみについて、震度区分の刻み幅を0.5に揃え、震度1~4と震度7についても強弱を区別することとした。つまり、強弱に対応する記号UとLを用いて、観測震度を便宜的に1L, 1U, 2L, 2U, ..., 6U, 7L, 7Uの14段階とした^{補注(5)}。強弱への分離にあたっては、便宜的に観測数の半数ずつを割り当てた。図5(a)-(d)に予測震度と観測震度の対応状況を図化した。赤色のバーが一致した震度階である。緊急地震速報による予測震度は、観測震度よりも平均的にはやや大きい傾向を示す。3.で述べたように、マグニチュードの推定精度のマグニチュード依存性、式[3]による断層長さLの評価、球面震源近似による影響などが一部要因と考えられる。これは現行方式での推定精度の限界を示す一方、それを安全側にカバーしているものと解釈できる。

さらに、各震度階を数値化するため、上記の14段階に相当する計測震度のレンジ中央値(例えば震度5強では5.25、震度6弱では5.75)を代表値とした。そのうえで、サンプルの存在する予測震度4~6弱について、観測震度の平均値と標準偏差を求めた。その結果を表4のμ(観測値)およびσ(観測値)の欄に示す。

平均値については、予測震度4, 5弱, 5強, 6弱の順にそれぞれ3.57, 4.56, 4.84, 6.00となり、レンジ中央値と比較すると0.25程度小さめである。しかし各震度区分の下限值、つまり安全側の端点に相当していることを考慮すると、防災目的では概ね妥当な結果と考えられる。平均値周りの標準偏差については、震度4で1.08、震度5弱で0.55、震度5強で0.99となった。前章での検討により得られた目安である $\sigma_I=0.6\sim 1.0$ は、これらの値とほぼ調和的といえる。

表4 観測点震度の評価結果とベータ分布のパラメータ

	緊急地震速報により推定された震度					
	4	5弱	5強	6弱	6強	7
サンプル数	261	38	11	2	0	0
μ (観測値)	3.57	4.56	4.84	6.00	-	-
σ (観測値)	1.08	0.55	0.99	-	-	-
μ (モデル)	3.50	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
σ (モデル)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
下限値 a	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.50
上限値 b	6.00	6.75	7.25	7.25	7.25	7.25
p	5.88	7.09	7.09	5.92	4.49	2.40
q	5.34	4.91	4.91	3.19	1.73	0.60

(3) 予測震度による観測震度の推定モデル

最後に、上記の確率分布特性に基づいて、所与の予測震度（震度4, 5弱, 5強, 6弱, 6強, 7）のもとで実際の観測震度を推定するためのモデル化を試みる。震度階には上下限があるので、本研究では上下限を持つベータ分布を用いる。ベータ分布に従う連続確率変数 X の確率密度関数は、次式で与えられる。

$$f(x) = \frac{(x-a)^{p-1}(x-b)^{q-1}}{\int_a^b (u-a)^{p-1}(u-b)^{q-1} du} \cdot \frac{1}{(b-a)^{p+q-1}} \quad [20]$$

ここで、 a と b はそれぞれ X の下限値と上限値で、 p と q はパラメータである。

モデル化にあたって、ベータ分布の平均値については、前項(2)の検討結果を踏まえて、各予測震度階に対応する計測震度の下限値を割り当てる。標準偏差については、前章で目安として示した $\sigma_{\log r} = 0.2 \sim 0.5$ の中央値 $\sigma_{\log r} = 0.35$ に対応する値が $\sigma_I = 0.77$ であることと、表4の σ (観測値) の範囲が $\sigma_I = 0.55 \sim 1.08$ であることを参考に、値を丸めて0.75を一律に適用することとした。その結果を表4の μ (モデル) および σ (モデル) の欄に示す。

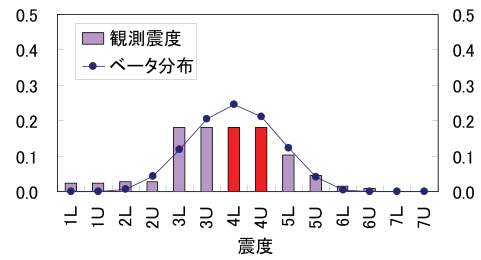
次に、ベータ分布の下限値 a については、0.75を下回らない範囲で、予測された震度階区分のレンジ中央値-3.5を割り当てた。また、ベータ分布の上限値 b については、7.25を上回らない範囲で、予測された震度階区分のレンジ中央値+2.0を割り当てた。パラメータの設定結果を表4に示す。

以上の設定のもとで、ベータ分布のパラメータ p および q を、 μ (モデル) および σ (モデル) との関係を表す次式を用いてモーメント法により逆算した。

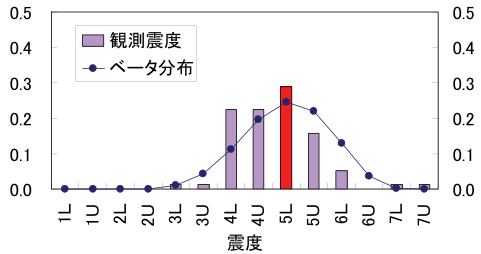
$$\mu = \frac{p}{p+q} \cdot (b-a) + a = \frac{pb+qa}{p+q} \quad [22]$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{pq}{(p+q)^2(p+q+1)} \cdot (b-a)} \quad [23]$$

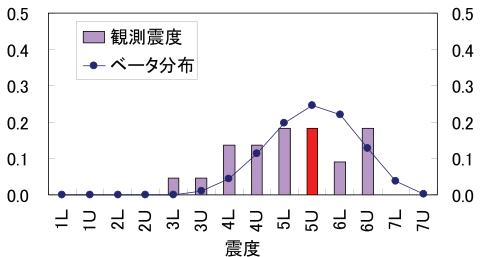
図5に、推定モデルを元データに重ねて示す。ただし速報実績がない(e)と(f)についてはモデルのみを示しており、(d)もサンプルが少ないため、これらはあくまで参考値とする。ベータ分布による推定モデルは、元データの大略的な傾向を捉えることができている。分布は左側やや裾が広がっており、全般的には防災上安全側の情報を与える傾向を表現している。しかし逆に、観測震度が推定震度を上回る場合もあることから、被害回避を重視する場合には安全側の行動ルールを定める必要があるといえる。



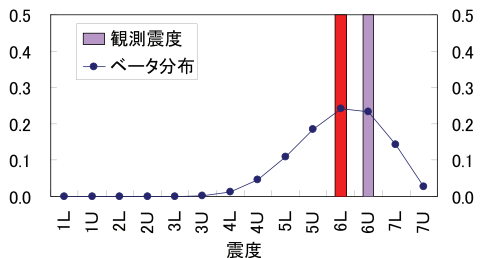
(a) 予測震度4



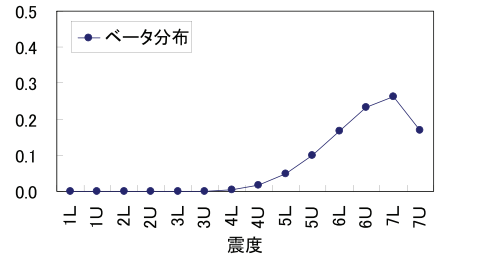
(b) 予測震度5弱



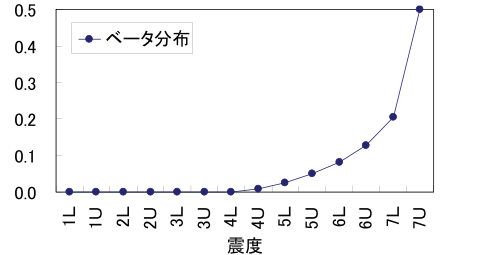
(c) 予測震度5強



(d) 予測震度6弱



(e) 予測震度6強



(f) 予測震度7

図5 予測震度と観測震度との対応およびベータ分布による推定モデル (U/Lは強/弱に対応、震度1~4および7についてもU/Lの区分を設定)

今回のモデル化においては、確率分布の選択とパラメータ設定に関して任意性があるため、暫定モデルと位置づけ、データ蓄積に応じて再検討したい。

6. おわりに

本研究では、緊急地震速報の震源情報を用いた地震動強度予測の不確定性について、解析面と実証面の両面から考察を行った。得られた成果を以下に要約する。

- 1) 緊急地震速報において用いられる最大速度の距離減衰式に基づいて、震源情報のばらつきが予測最大速度に与える影響について、標準偏差の解析解を導出した。
- 2) 上記の解析解を用いた数値計算を行った。 $V_s=600\text{m/sec}$ 程度の硬質地盤での最大速度の予測において、震源情報のばらつきの影響で付加されるばらつきは、常用対数標準偏差で0.2~0.5程度となることを示した。またマグニチュードが大きいほどばらつきが大きくなる傾向を明らかにした。
- 3) 震源情報のばらつきの影響について、マグニチュード、震源深さ、震央位置の寄与度合いを算出し、マグニチュードの影響が支配的であることを明らかにした。一因として、マグニチュード依存の震源域の広がり considering 断層最短距離を定めている点を指摘した。
- 4) 地盤増幅特性を考慮して、最大速度を変換して推定される予測震度のばらつきを評価し、 $\sigma_I=0.6\sim 1.0$ 程度であることを明らかにした。
- 5) 緊急地震速報の試験運用開始後の約6年間の実績に基づいて、予測震度に対する観測震度のばらつきを分析した。観測値は予測値より平均的に0.25程度小さく、平均値周りの標準偏差は、震度4で1.08、震度5弱で0.55、震度5強で0.99と得られた。これにより、解析解の数値計算によるばらつき評価 ($\sigma_I=0.6\sim 1.0$) の妥当性が確認された。
- 6) ベータ分布を用いて、所与の予測震度のもとで観測震度を推定する確率モデルを提案した。

なお気象庁では、緊急地震速報の高精度化を目指して、多面的な検討が進められている^{補注6)}。特に、予測精度に影響を及ぼすマグニチュードの推定方法、地盤増幅度の評価方法、震度への変換方法などの改善によって、本研究で示したばらつきも大きく低減されることが期待される。解析解を得たメリットを活かして、今後もばらつきの再評価を行って検証を行う方針である。

謝辞

本研究の一部に、日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究(C) (課題番号 22510196, 研究代表者: 能島暢呂) による研究費補助金を使用した。また、気象庁地震火山部管理課の方々には、緊急地震速報の公開資料に関する疑問点について丁寧にご回答いただいた。記して謝意を表す。

補注

- (1) 緊急地震速報では、地震動の広がりとともに利用可能なデータが増加すると計算を繰り返し、予測精度の向上が図られる。高度利用者向け緊急地震速報(予報)では、迅速性を優先す

る第1報の発表後も、ほぼ精度が安定したと判断されるまで数回発表される。一般向け緊急地震速報(警報)では、原則1回とされているが、続報が出される場合もある。

- (2) 地震観測網が偏在している場合や、地震発生位置が偏在する場合など、注目サイト周辺の観測環境および地震環境によっては、この仮定は必ずしも成り立たない。特定サイトを対象とする場合には、その固有の環境を考慮して、必要に応じてx成分とy成分を個別に評価した式[11]を直接的に適用することが望ましいといえる。
- (3) 震源域が100kmに及ぶようなM8級の海溝型巨大地震では、震源域の球面近似に基づく断層最短距離の設定が適切ではないことが認識されており、事前に評価した予測震度を発表するという対処方法が検討されている¹²⁾。
- (4) 一般向け緊急地震速報では全国を約200分割した地域内の最大予測震度に基づいて該当する地域名のみが発表される。表2はその「地域数」を集計したものであるが、各地域内において、予測震度が最大となった地点と、実際の観測震度で最大となった地点とは、必ずしも一致しない場合があるので、注意が必要である²²⁾。
- (5) 本研究では震度階を0.5刻みに離散化して数値化した。0.1刻みの計測震度を用いれば、ばらつきはやや低減される。例えば数値で示すと、4.0~7.0の範囲の連続な一様分布の標準偏差は0.87であるが、0.5刻みと0.1刻みの離散分布ではそれぞれ1.00, 0.90となり、標準偏差を10%小さくできる。
- (6) マグニチュード推定に関しては、P波M式(P波を用いた推定式)および全相M式(S波以降の最大振幅を用いた推定式)の改良が検討されている¹³⁾。また震度観測点のサイト特性については、微地形分類に基づくARVを用いた地盤増幅率に代えて、過去の観測データから求めた観測点補正値の適用が検討されている¹³⁾。これによって、震度残差(観測値-予測値)の平均値が0.25から0.13に減少、標準偏差が0.63から0.55に減少、震度残差のRMSが0.68から0.56に減少(18%)した、と報告されている。ちなみに、上記下線部の現行方式による評価結果は、本研究の結果とほぼ調和的である。

参考文献

- 1) 山崎文雄:リアルタイム地震防災システムの現状と展望, 土木学会論文集, No.577/I-41, pp.1-15, 1997.
- 2) 気象庁:緊急地震速報について,
<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/>, 2010.4
- 3) (独)防災科学技術研究所・日本地震工学会・NPOリアルタイム地震情報利用協議会:第6回国土セイフティネットシンポジウム-緊急地震速報の一般利用開始を迎えて, 第11地震災技術展, 横浜国際平和会議場, 2007.2.
- 4) 中村孝明・高木政美・志波由紀夫・坂下克之:緊急地震速報を利用したプラント施設の緊急停止に関する研究, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp.1330-1333, 2006.11.
- 5) 浅原裕・大角恒雄:緊急地震速報による自動制御のための、誤り確率を考慮した制御判定条件の作成, 日本地震工学会大会-2007梗概集, pp.352-353, 2007.11.
- 6) 酒井久和・山崎誠・八木康夫・伊津野和行・土岐憲三:想定東南海地震に対する大学キャンパスでの緊急地震速報の利用に関する基礎的検討, 日本地震工学会論文集, 第8巻, 第1号, pp.32-47, 2008.2.
- 7) 松本和貴・丸山喜久・山崎文雄:マルチエージェント・シミュレーションを用いた高速道路走行車両に与える緊急地震速

- 報の影響に関する検討, 地域安全学会論文集, No.10, pp.321-330, 2008.11.
- 8) 山本俊六・堀内茂木: 緊急地震速報における周波数情報の配信・利用の提案, 一周波数応答マグニチュード, 日本地震工学会論文集, 第9巻, 第2号(特集号), pp.17-30, 2008.2.
 - 9) 久保智弘・久田嘉章・堀内茂木・山本俊六: 緊急地震速報を活用した長周期地震動予測と超高層ビルのエレベータ制御への適用, 日本地震工学会論文集, 第9巻, 第2号(特集号), pp.31-50, 2008.2.
 - 10) 源栄正人・本間誠・セルダル クユク・フランシスコ アレシス: 構造ヘルスマニタリングと緊急地震速報の連動による早期地震情報統合システムの開発, 日本建築学会技術報告集, 第14巻, 第28号, pp.675-680, 2008.10.
 - 11) 緊急地震速報の本運用開始に係る検討会: 「緊急地震速報の本運用開始に係る検討会」最終報告, 気象庁, 2007.3.
 - 12) 緊急地震速報評価・改善検討会技術部会: 第1回(平成21年2月26日)技術部会資料, 気象庁, 2009.2.
 - 13) 緊急地震速報評価・改善検討会技術部会: 第2回(平成22年2月19日)技術部会資料, 気象庁, 2010.2.
 - 14) 干場充之・大竹和生・岩切一宏・明田川保・中村洋光・山本俊六: どこまで震度は正確に予測できるか? -現在の緊急地震速報の方法における予測震度のばらつきに関する一考察-, 日本地震工学会・大会-2008 梗概集, pp.198-199, 2008.11
 - 15) 気象庁地震火山部: 緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料, 2008.7.
 - 16) 司宏俊・翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp.63-70, 1999.9.
 - 17) 翠川三郎・大竹 雄: 地震動強さの距離減衰式にみられるバラツキに関する基礎的分析, 日本地震工学会論文集 第3巻, 第1号, pp.59-70, 2003.1.
 - 18) 松岡昌志・翠川三郎: 国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング, 日本建築学会第22回地盤震動シンポジウム, pp.23-34, 1994.
 - 19) 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄: 計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, 地域安全学会論文集, Vol.1, pp.51-56, 1999.
 - 20) 森川信之・神野達夫・成田 章・藤原広行・福島美光: 強震動記録に基づく計測震度の距離減衰式、B31-05(演旨), 日本地震学会講演予稿集秋季大会, 日本地震学会, p.62, 2007.
 - 21) 緊急地震速報評価・改善検討会技術部会: 第2回(平成22年2月19日)技術部会資料(PDF), 最近の事例及び予測震度の精度, 気象庁, 2010.2.
 - 22) 気象庁地震火山部: 私信による.

(原稿受付 2010.5.29)

(登載決定 2010.7.24)