

近距離に注目した既往の距離減衰式の検討 —緊急地震速報の震度予測への適用性評価—

Study on Attenuation Relationships Focused on Small Hypocentral Distances
-Evaluation of their applicability to Earthquake Early Warnings-

岩切一宏¹, 干場充之², 大竹和生¹

Kazuhiro IWAKIRI¹, Mitsuyuki HOSHIBA² and Kazuo OHTAKE¹

(Received October 22, 2010; Accepted January 14, 2011)

ABSTRACT: In the current Earthquake Early Warning (EEW) system of the Japan Meteorological Agency (JMA), predictions of seismic intensity are based on attenuation relationships for peak ground velocity (PGV). This prediction method uses some empirical relationships such as conversion from JMA magnitude (M_j) to moment magnitude (M_w) and conversion from PGV to seismic intensity. Therefore, predicted seismic intensities contain the uncertainties of the empirical relationships. Using an attenuation relationship for seismic intensity with M_j as a parameter would most likely improve the accuracy of seismic intensity predictions, as these two empirical relationships are not used. We evaluate the applicability of the attenuation relationship for seismic intensity to the prediction of small hypocentral distances by comparing it with the current EEW method. For areas within about 30 km of the source region of M6 or larger earthquakes, the seismic intensities predicted by the attenuation relationship for seismic intensity have the same accuracy as those predicted by the current method. The distance dependence of the seismic intensity residual of the current method is larger than that of the method using attenuation relationships for seismic intensity. The two empirical relationships, i.e., conversion from M_j to M_w and conversion from PGV to seismic intensity, affect the accuracy of seismic intensity prediction.

1 はじめに

気象庁の緊急地震速報の強震動予測では、地震動の強さを支配する要素を単純化したモデルとして、震源特性をマグニチュード (M) で、伝播特性を距離減衰式で、地盤特性を微地形区分に基づいた增幅率で表現している(中村, 2007; 気象庁地震火山部, 2008)。このような経験的手法を採用しているのは、地震検知直後に地震動の強さを迅速に予測し、被害を生じる地震動が到達する前に発表するためである。距離減衰式は伝播特性を表す簡便な手法として、強震動予測に広く用いられている(例えば、地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2009)。その中でも、標準的に用いられている最大速度の距離減衰式(司・翠川, 1999)は、気象庁の緊急地震速報にも採用されている。気象庁の緊急地震速報では、地震

検知直後に震源の位置、気象庁 M (M_j) 相当値を迅速に求め、これらの情報をもとに最大速度の距離減衰式と地盤増幅率から震度を予測する。その際に、 M_j からモーメント M (M_w) への換算、最大速度から震度への換算などを行うため、これらの換算式の誤差が、 M_j 相当値の推定誤差や距離減衰式の誤差とともに予測震度に含まれる。より精度の高い震度予測には、距離減衰式からの予測値と観測値との適合が良いだけでなく、距離減衰式以外の経験式を出来るだけ用いない方が有利であろう。近年、 M_j や震度をパラメータとする距離減衰式が導出されている(例えば、松崎・他 (2006), 森川・他 (2007))。これらを震度予測に用いれば、前述のような換算式が不要になり誤差要因が減るため、震度予測の精度向上が期待される。

¹ 気象研究所地震火山研究部, Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute

現所属: 地震火山部地震予知情報課, Earthquake Prediction Information Division, Seismological and Volcanological Department

² 気象研究所地震火山研究部, Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute

表1 断層モデルに基づく断層最短距離を用いる地震。

No.	Date (yyyy.mm.dd)	Source region	Mj	Mw *4	References of fault model
1	1997.03.26	NW KAGOSHIMA PREF	6.6	6.1	Kikuchi and Yamanaka (1997a), Miyamachi et al. (1999) *1
2	1997.05.13	NW KAGOSHIMA PREF	6.4	6.2	Kikuchi and Yamanaka (1997b), Miyamachi et al. (1999) *1
3	1997.06.25	YAMAGUCHI PREF	6.6	5.9	Kikuchi and Yamanaka (1997c) *1
4	1998.09.03	NORTHERN IWATE PREF	6.2	5.9	Matsusaki et al. (2006)
5	2000.07.30	NEAR MIYAKEJIMA ISLAND	6.5	6.5	Matsusaki et al. (2006)
6	2000.10.06	WESTERN TOTTORI PREF	7.3	6.8	GSI *2
7	2003.07.26	NORTHERN MIYAGI PREF	6.4	6.1	GSI *2
8	2004.10.23	MID NIIGATA PREF	6.8	6.7	GSI *2
9	2004.10.27	MID NIIGATA PREF	6.1	6.0	GSI *2
10	2004.12.14	RUMOI REGION	6.1	5.8	GSI *2
11	2005.03.20	NW OFF KYUSHU	7.0	6.7	GSI *2
12	2007.03.25	OFF NOTO PENINSULA	6.9	6.6	GSI *2
13	2007.07.16	OFF S NIIGATA PREF	6.8	6.7	GSI *2, *3
14	2008.06.14	SOUTHERN IWATE PREF	7.2	7.0	GSI *2

*1 Location of fault model was read from aftershock distribution.

*2 GSI: Geospatial Information Authority of Japan (<http://www.gsi.go.jp/cais/HENDOU-hendou.html>)

*3 Southeast dip fault model was adopted.

*4 Japan Meteorological Agency CMT catalog

そこで、震度予測の精度向上を検討するため、本論文では、緊急地震速報の震度予測に用いる距離減衰式の適用性について、最大速度の距離減衰式と最大速度から震度への換算式とを組み合わせた現行の手法と、震度を直接求める距離減衰式の手法について比較検討した。その際、特に緊急地震速報で重要な、断層から近距離のデータを対象に解析を行った。なお、緊急地震速報で決定している M は必ずしも Mj と同じではないが、本論文では Mj を用いて議論を進める。

2 データ

緊急地震速報の震度予測では、M の大きな浅い地震、震源に近い予測地点の評価が特に重要である。そこで、解析には、1997 年から 2009 年の間に深さ 30 km 以浅の内陸地殻内で発生した Mj 5.0 以上の地震を対象とした。多くの距離減衰式は震源距離ではなく断層最短距離を用いることが多い。そこで、Mj 6.0 以上の地震は、断層の広がりを考慮して、距離減衰式に用いる断層最短距離の計算に、既往の研究による断層パラメータ（走向、傾斜、長さ、幅、深さ）を用いた。Mj 5.0 ~ 5.9 の地震は、点震源を仮定して震源距離とした。表 1 に断層パラメータに基づいて断層最短距離を計算した地震を、引用した断層モ

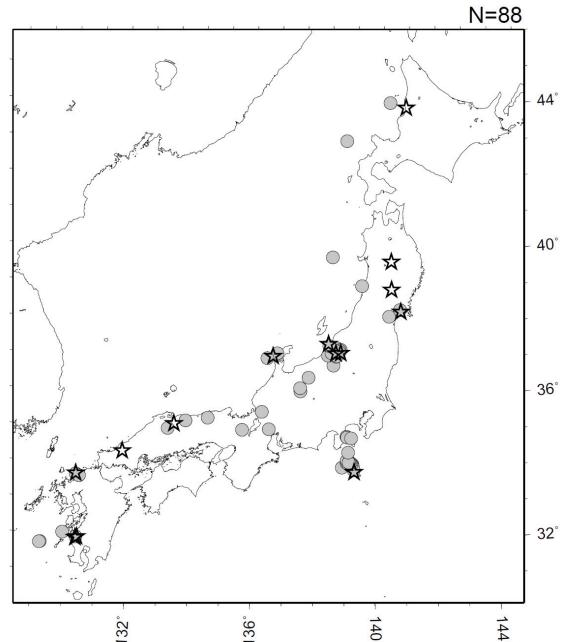


図 1 解析に用いた地震の震央分布。星は表 1 に示した 14 地震、丸は $5.0 \leq Mj \leq 5.9$ の 74 地震を示す。

ルの文献と共に示す。震源要素は、気象庁一元化震源カタログの値を用いた。Mw は気象庁による CMT 解析の結果を用いた。図 1 は解析に用いた地震の震源分布を示す。震度データは、震度予測地点である全国約 4,200 の気象庁、地方公共団体、防災科学技

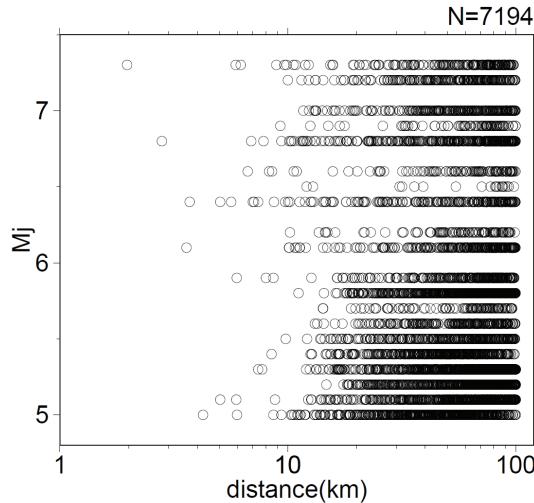


図2 解析に用いたデータの断層最短距離または震源距離に対する M_j の関係。横軸は、 $M_j \geq 6.0$ の地震は表1の地震の断層パラメータから計算した断層最短距離、 $5.0 \leq M_j \leq 5.9$ の地震は震源距離を示す。

術研究所の震度観測点における観測値のうち、断層最短距離または震源距離が 100km 以内の観測値を用いた。図2は解析に用いたデータの断層最短距離または震源距離と M_j の関係を示す。

3 評価する震度予測手法

緊急地震速報の震度予測への適用性の評価は、最大速度の距離減衰式と最大速度から震度への換算式とを組み合わせた現行手法と、震度の距離減衰式による予測手法について行う。

3.1 現行手法による震度予測

緊急地震速報の実際の処理では、地震が発生すると、震源近くの1地点から数地点の地震観測点で地震を検知し、震源要素（位置、時刻、M）を決定する。地震波の検知及び震源要素の決定に用いる観測データは緊急地震速報の処理に対応した気象庁の多機能型観測点（原田, 2007）、防災科学技術研究所の高感度地震観測網 Hi-net（Okada, et al, 2004）のデータである。Mは、P波部分の最大変位振幅から求めるP波M（明田川・他, 2010）、波形全体の最大変位振幅から求める全相Mを組み合わせて推定される（Kamigaichi, 2004；中村, 2007）。どちらのM推定式も回帰モデルは M_j をパラメータとしているため、推定されるMは M_j 相当値として求められて

いる。推定したMは宇津（1982）の経験式((1)式)により M_w へ換算する。

$$M_w = M_j - 0.171 \quad (1)$$

推定された M_w を用いて(2)式の距離減衰式（司・翠川, 1999）により平均S波速度 600m/sec の工学的基盤上の最大速度（PGV600）を求める。

$$\log_{10}(\text{PGV600}) = 0.58M_w + 0.0038D + d - \log_{10}(X + 0.0028 \cdot 10^{0.5M_w}) - 0.002X - 1.29 \quad (2)$$

ここで、 M_w はモーメントマグニチュード、Dは震源の深さ、dは地震タイプ別の係数（内陸地殻内地震:0、プレート間地震:-0.02、プレート内地震:0.12）、Xは断層最短距離である。なお、(2)式が導出された際のデータベースは、1968年から1997年までの21地震であり、 M_w 5.8以上、震源の深さ 120km 以浅、震源距離 300km 以内のデータを対象としている（司・翠川, 1999）。

震度予測地点である震度観測点における地盤特性には、最大速度の地盤増幅率（ARV）を用いている。ARVは全国 1km メッシュの微地形区分を基に推定された平均S波速度より求められる（松岡・翠川, 1994）。ARVを(2)式で得られた工学的基盤上の最大速度にかけて地表の最大速度（PGV）とする。地表の予測震度（I）は次式（翠川・他, 1999）により PGV から換算する。

$$I = 2.68 + 1.72 \log_{10}(\text{PGV}) \quad (4.0 \leq I \leq 7.0) \quad (3-1)$$

$$I = 2.54 + 1.82 \log_{10}(\text{PGV}) \quad (0.0 \leq I \leq 7.0) \quad (3-2)$$

但し、緊急地震速報では(3-1)式のみを用いる。以上は、緊急地震速報における震度予測手法である。地震発生直後の実際の処理では迅速性が優先されるため、(2)式において、断層最短距離は宇津（2001）の経験則による断層の長さ ($L=0.5M_w - 1.85$) とバイラテラルの断層破壊を仮定して震源距離RからLの半分を差し引いた長さ ($X=R-L/2$) としている。また、地震タイプ別係数は内陸地殻内の係数である0を全タイプの地震に適用し、 M_w は(1)式により M_j から換算している。本論文の目的は、距離減衰式そ

のものの震度予測精度の評価であるため、断層パラメータの仮定や換算式の誤差が予測結果に影響するのを避けたい。そのため、この解析における現行手法による震度予測では、上述の緊急地震速報の震度予測手法を基本とし、CMT 解析による Mw を用い、Mj6.0 以上の地震は断層の広がりを考慮して断層モデルに基づいて断層最短距離を計算した。ここでは、あらかじめ観測震度が分かっているデータを評価するので、PGV から震度への換算式は、観測震度 4.0 以上のデータに対する予測では(3-1)式を、観測震度 4.0 未満のデータに対する予測では(3-2)式を用いた。また、近年の多数のデータで回帰された次式で表わされる藤本・翠川（2005）の PGV から震度への換算式を用いた場合の震度予測も行った。

$$I = 2.002 + 2.603 \log_{10}(\text{PGV}) \quad (4.0 \leq I \leq 7.0) \quad (4-1)$$

$$- 0.213 \log_{10}(\text{PGV})^2$$

$$I = 2.165 + 2.262 \log_{10}(\text{PGV}) \quad (0.0 \leq I \leq 7.0) \quad (4-2)$$

図 3 は、(3-1), (3-2), (4-1), (4-2) 各式の計測震度と PGV の関係を示す。計測震度 4.0 以上が対象となる(3-1)式と(4-1)式はほぼ同じ関係であるが、計測震度

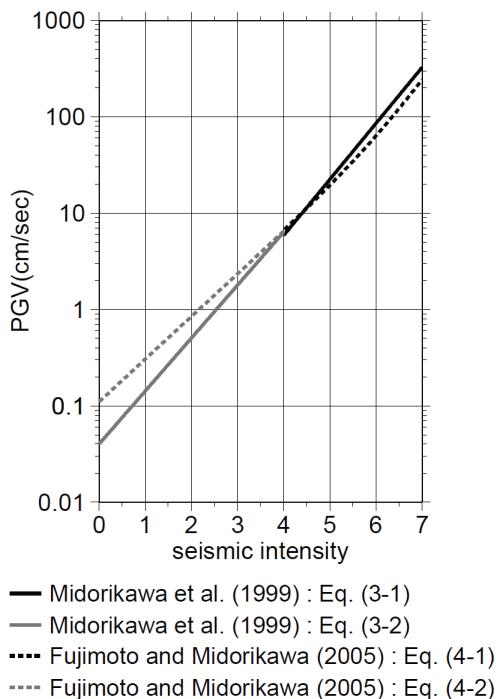


図 3 震度と PGV の関係。実線は翠川・他(1999)、点線は藤本・翠川(2005)を示す。

4.0 未満が対象となる(3-2)式と(4-2)式では傾きが異なっている。

3.2 節で述べるように、現行手法との比較に用いる震度の距離減衰式は、地表で観測された震度で回帰されているため、予測震度には多くの観測点（予測地点）の平均的な地盤特性が含まれていると考えられる。一方、現行手法の距離減衰式は工学的基盤上の最大速度で回帰されており、地表における震度予測には個々の観測点（予測地点）の ARV が用いられている。本論文では、個々の観測点の地盤特性には注目せず距離減衰式による平均的な予測震度に着目するため、現行手法に用いる地盤特性は、観測点ごとの ARV ではなく、全国約 4,200 の震度観測点の ARV の幾何平均値（2.061）とした。

3.2 震度の距離減衰式による震度予測

現行手法（3.1 節）では、(1)式、(3)式のような経験式の誤差が(2)式の距離減衰式の誤差とともに予測震度に含まれる。Mj や震度をパラメータとした距離減衰式を震度予測に用いれば、距離減衰式以外の経験式の誤差要因が減るため、予測の精度向上が期待される。そこで、現行手法の予測精度と比較するため、森川・他（2007）と松崎・他（2006）の震度の距離減衰式による震度予測を行う。

森川・他（2007）は深さ 30km より浅い地震と深い地震に分けて、それぞれの震度の距離減衰式を導出している。ここでは深さ 30km 以浅の次式を用いる。

$$I/2 = 0.63Mw - 0.0018X$$

$$- 0.24 - \log_{10}(X + 0.003 \cdot 10^{0.5Mw}) \quad (5)$$

ここで、I は地表における計測震度、Mw はモーメントマグニチュード、X は震源距離である。(5)式が導出された際のデータベースは、1963 年から 2003 年までの日本の 73 地震に加えて、トルコとカリフォルニアの 10 地震となっている。Mw5.5 以上、震源の深さ 30km 以浅、断層最短距離で概ね 400km 以内のデータを対象としている。計測震度は強震記録より算出している。

松崎・他（2006）は、次式で表される。

$$I = 1.36M_j - 4.03 \log_{10}(X + 0.00675 \cdot 10^{0.5M_j}) + 0.0155D + 2.05 \quad (6)$$

ここで、 I は地表における計測震度、 M_j は気象庁マグニチュード、 X は断層最短距離、 D は震源の深さである。(6)式が導出された際のデータベースは、1926 年から 2002 年までの気象庁の震度データベースのうち、 $M_j 5.0$ 以上、震源の深さ 200km 以浅、断層最短距離または震源距離 500km 以内のデータを対象とし、さらに、2003 年以降に発生した 2004 年新潟県中越地震などの規模の大きな 6 地震が追加されている。

震度予測に特化した M 推定の手法として、山本・他 (2007) は、震度から推定する M と震度をパラメータとする距離減衰式を提案し、 M の推定と震度の推定を同一の距離減衰式で行うと、現行の緊急地震

速報の手法よりも震度予測の精度が向上することを示した。これに対し、現行手法 (3.1 節) では、 M の推定と震度予測はそれぞれ別の推定式を用いている。本論文の震度予測においても、 M 推定そのものには、この現行手法の考え方に基づき、 M は震源カタログの値を用い、震度予測は距離減衰式を用いることとする。

4 震度予測結果の比較

前節で述べた 4 つの震度予測手法は、それぞれ、司・翠川 (1999) と翠川・他 (1999) を合わせた手法は「現行式 A」、司・翠川 (1999) と藤本・翠川 (2005) を合わせた手法は「現行式 B」、森川・他 (2007) の式は「震度式 A」、松崎・他 (2006) の式は「震度式 B」と呼ぶ。それぞれの予測手法に用いる式は次の通りである。

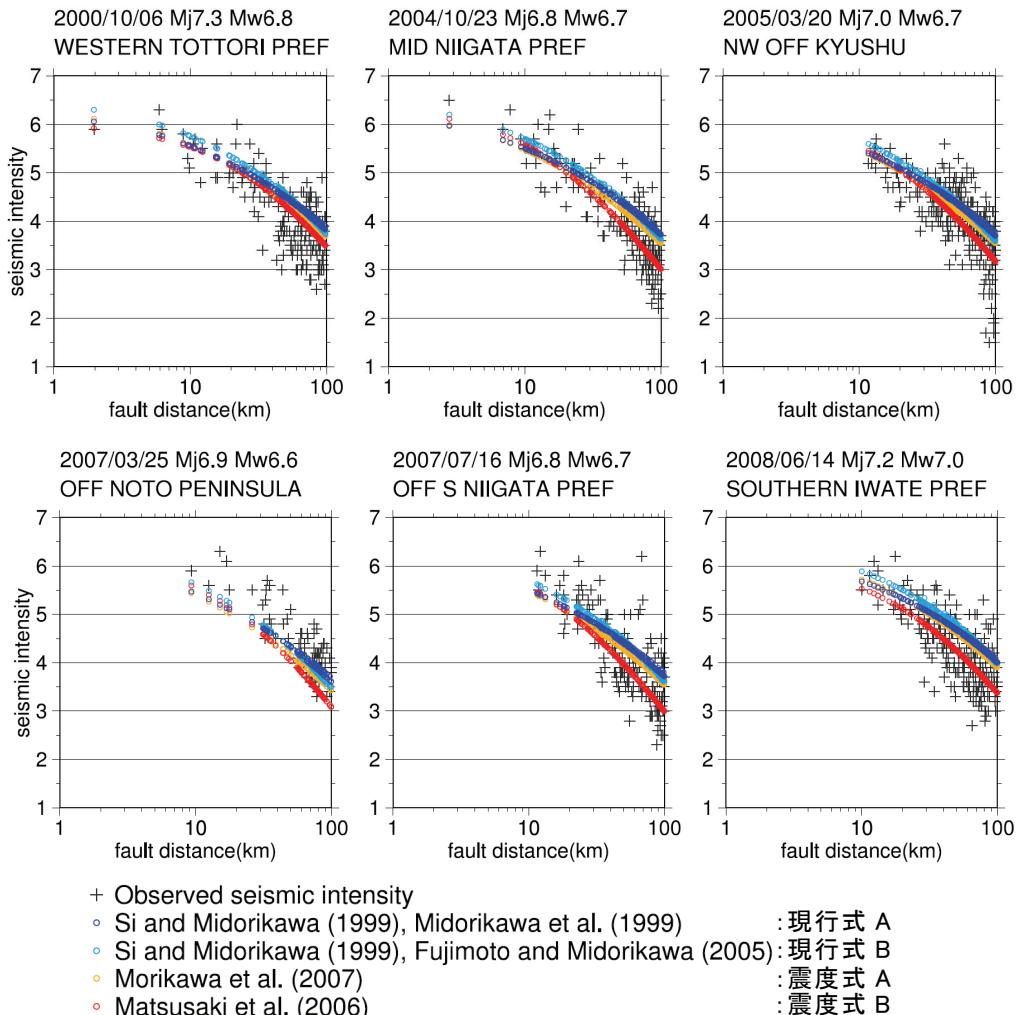


図 4 表 1 に示した $M_j \geq 6.8$ の 6 地震の断層最距離と震度の関係。十字は観測震度、色付きの丸は予測震度を示す。

現行式 A 距離減衰式 : (2)式, PGV から震度への換算式 : (3-1)式・(3-2)式

現行式 B 距離減衰式 : (2)式, PGV から震度への換算式 : (4-1)式・(4-2)式

震度式 A 距離減衰式 : (5)式

震度式 B 距離減衰式 : (6)式

なお、現行式と震度式 A の距離減衰式導出の際のデータセットはそれぞれ Mw5.8 以上, Mw5.5 以上であり、M5 クラスの地震の多くは適用範囲外であるため、ここでは Mj6.0 以上と Mj5.0~5.9 に分けて結果を示す。

表1の地震のうち Mj6.8 以上の地震 6 例について、図4に断層最短距離に対する観測値及び4手法からの予測値の関係を示す。断層近傍の距離 30km 程度以内では、4 手法とも予測値に大きな差はみられない

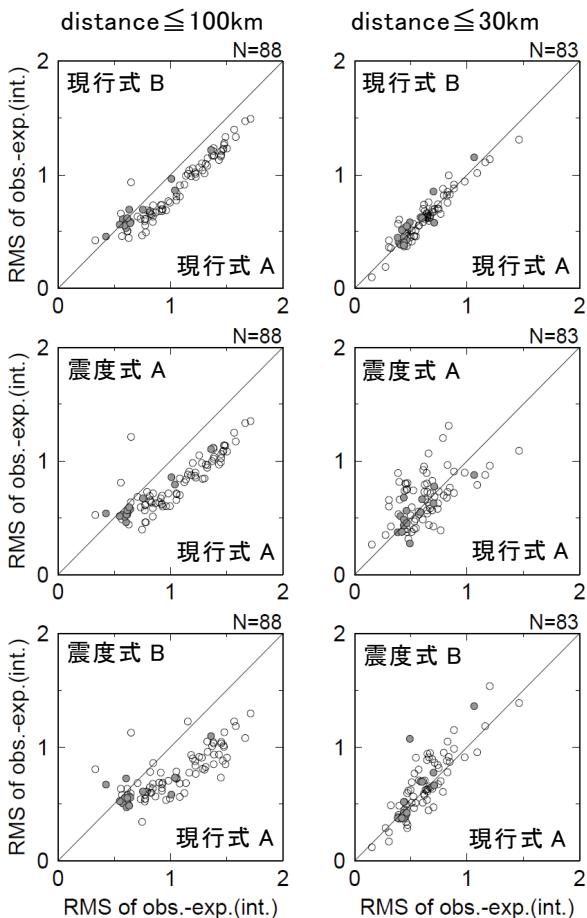


図5 現行式Aと他の手法についての観測震度と予測震度の残差のRMSの比較。灰丸は表1に示したMj \geq 6.0の地震。白丸は5.0 \leq Mj \leq 5.9の地震を示す。左図は断層最短距離または震源距離100km以内、右図は30km以内のデータを示す。

い。震度式 B の予測値は、断層から遠い所で、他の3手法よりも傾きが大きい。

図5は、表1の全ての地震 14 例 (Mj6.0 以上) と Mj5.0 ~ 5.9 の 74 地震を対象に、地震ごとの震度の観測値と予測値の残差 (観測値 - 予測値) の RMS (二乗平均平方根) について、現行式 A に対して他の3手法を比較した結果を示す。距離 100km 以内の RMS は、ほんどの地震で現行式 A の方が他の3手法よりも大きく、震度式 B は現行式 A に対する RMS の改善度が比較的大きい。距離 30km 以内では、現行式 A に対して震度式の RMS が大きい地震が多くみられるが、全体的にみると現行式 A との大きな違いはない。Mj6.0 以上と Mj5.0 ~ 5.9 の地震の残差は同程度である。

図6は、4 手法による震度の残差について、断層最短距離との関係、距離 100km 以内の頻度分布、距離 30km 以内の頻度分布を Mj6.0 以上と Mj5.0 ~ 5.9 の地震に分けて示す。Mj5.0 ~ 5.9 の地震は Mj6.0 以上に比べて、4 手法とも残差の距離依存性が大きい。現行式 A による残差には、距離 30km 程度以上では距離が大きくなるにつれて、負の方向に大きくなる距離依存性の傾向がある。現行式 B による残差では、現行式 A にみられた残差の距離依存性がやや改善されているが、これは、図3に示したように、PGV が 3cm/sec 程度より小さい場合、藤本・翠川 (2005) の PGV から震度への換算式は、翠川・他 (1999) の換算式よりも震度を小さく見積もることによる。距離 100km 以内の現行式 A による残差の平均値 (図6 中) が負側に大きいのは、断層から遠い距離にある多数のデータの残差によるものであり、図5にみられた現行式 A の RMS が比較的大きいことに対応している。震度式 A による残差には、現行式 B と同程度の残差の距離依存性がみられる。震度式 A, B による距離 100km 以内の残差の平均値 (図6 中) は、現行式 A, B よりも 0 に近くなっている。震度式 B による Mj6.0 以上の地震の残差は、距離依存性がほとんどなく、残差の平均値 (図6(a)中) はほぼ 0 である。一方、震度式 B による Mj5.0 ~ 5.9 の地震の残差 (図6(b)) には、距離が近いほど残差が負の方向に大きくなる距離依存性がある。特に距離 15km 程度以内では残差が負側に大きいが、このデータの多くは 2004 年新潟県中越地震の余震によるものである。

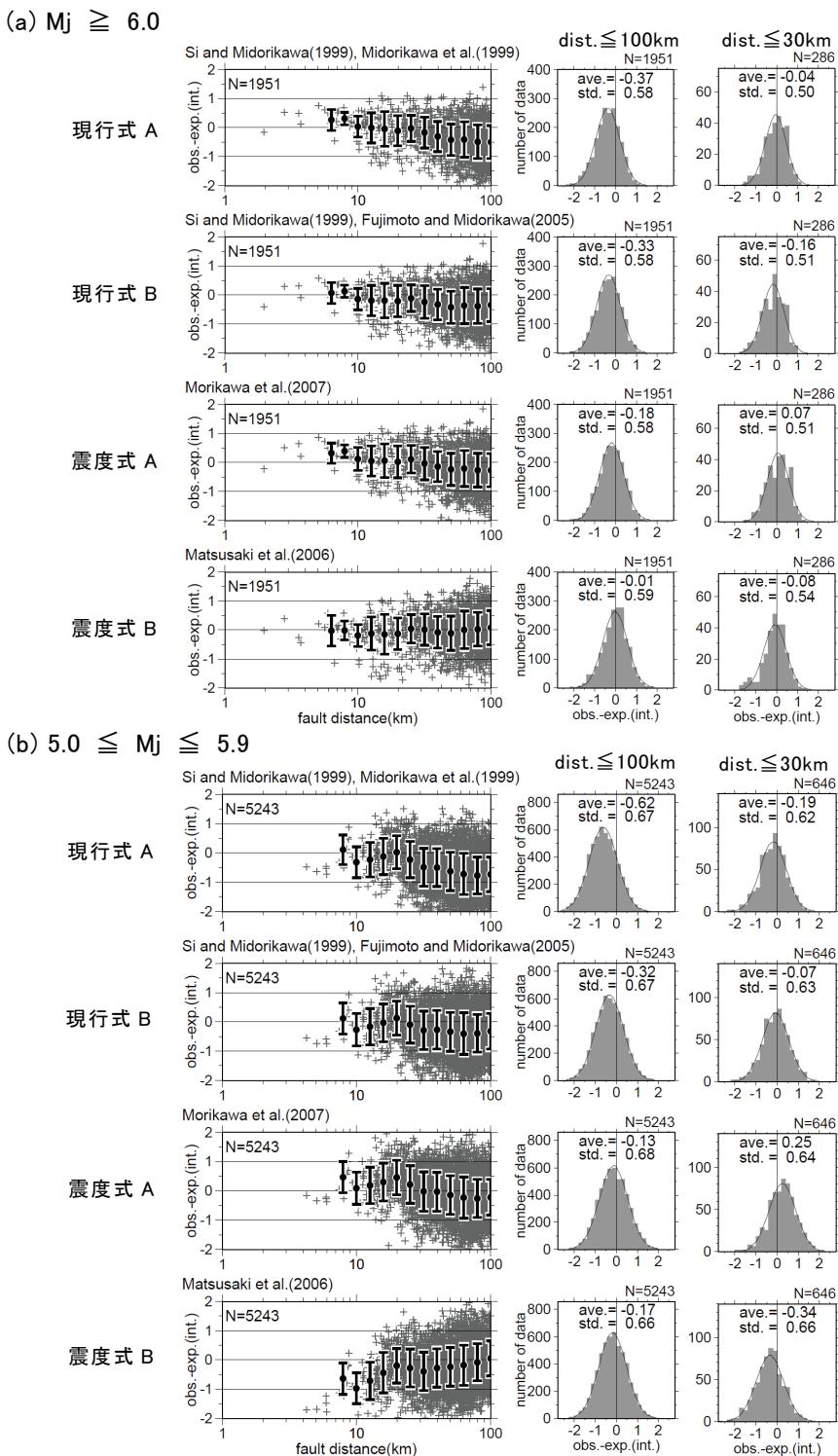


図6 観測震度と予測震度の残差の分布. (a) は表1に示した $M_j \geq 6.0$ の地震, (b) は $5.0 \leq M_j \leq 5.9$ の地震を示す. 左図は, 断層最短距離または震源距離と残差の関係であり, 黒丸は各々の距離での残差の平均値, エラーバーはその標準偏差 ($\pm \sigma$) を示す. 中央図, 右図はそれぞれ, 距離100km以内, 距離30km以内の残差のヒストグラムであり, 実線で描かれた曲線は正規分布関数を示す.

5 議論

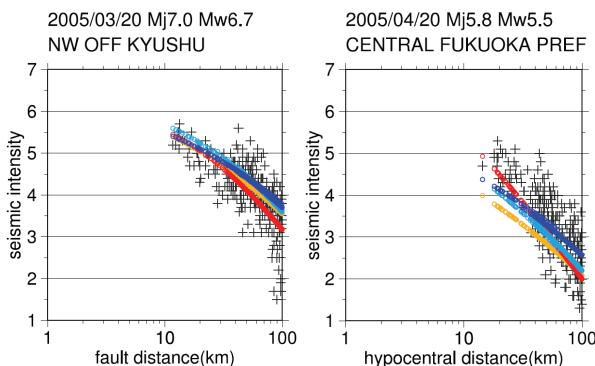
5.1 残差の距離依存性の影響

震度予測において、予測地点の地盤特性は地震動の強さを決める重要な要素である。地盤特性を求める簡便な方法として、観測値と距離減衰式からの予測値との残差や比から求めた経験的な地盤特性を、観測点（予測地点）での距離減衰式による震度予測に適用すると、微地形区分に基づく地盤特性を適用するよりも予測精度が向上する（森川, 2008, Iwakiri et al., 2011）。経験的な地盤特性は、相対的に数の多い断層から離れた場所のデータの影響を強く受けるため、4節でみられたような残差の距離依存性があると誤差が大きくなる。Iwakiri et al. (2011) は、Mj4.0 以上、断層最短距離 150 km 程度までの過去の観測震度を用いて、「司・翠川 (1999) ((2)式) からの PGV700」と「翠川・他 (1999) ((3)式)」により観測震度から換算した PGV の比を評価して、全国の 3 割にあたる約 1,200 の震度観測点における地盤特性の補正値を求めた。その際に用いた観測値は、4 節でみられたような現行式 A による残差の距離依存性が補正値に影響するのを避けるために、計測震度 2.5 以上としている。

一般に、観測値と距離減衰式からの予測値との残差は、地震内のはらつきと地震間のはらつきに分けられる (Young et al., 1995; 翠川・大竹, 2003)。同じ M の地震でも地震動の平均的な強さが異なる場合があるが、これは地震間のはらつきと呼ばれ、応力降下量の違いなどが原因との考察もある (翠川・大竹, 2003)。経験的な地盤特性は、距離減衰式

による平均的な地震動の強さの観測値からはずれに基づいている場合がある。そこに地盤特性以外の要素である地震間のはらつきが混入すると、経験的な地盤特性の誤差が大きくなると考えられる。Iwakiri et al. (2011) は地震間のはらつきへの対応として、経験的な地盤特性を求める際に、観測値と距離減衰式からの予測値の残差の地震ごとの平均値が最小となるように M の補正を行った。図 7 は、2005 年福岡県西方沖の地震 (Mj7.0) とその最大余震 (Mj5.8) について、観測値と予測値の残差の平均値が最小となるように、それぞれの地震で M を補正した例を示す。Mj7.0 の地震は 4 手法とも、M の補正によってデータ全体の予測値は同程度となり、観測値に概ねフィットしている。一方、Mj5.8 の地震は、現行式 A、現行式 B、震度式 A では観測値に対する予測値の距離依存性がみられ、M の補正の際に数が多い遠距離のデータの影響を強く受けるため、補正後でも震源に近い予測値は観測値から外れている。このように、残差の距離依存性がある予測手法の場合、M の補正によって地震間のはらつきを小さくすることは難しい。図 8 は、距離 100 km 以内のデータについて、補正後の M から求めた残差の分布である。M の補正には観測値が 5 個以上ある地震を用いた。図 8 の現行式 A、現行式 B、震度式 A による残差は、平均値は 0 に近いが、図 6 にみられた残差の距離依存性は M の補正後でも依然としてみられ、Mj 5.0~5.9 の地震の残差が Mj6.0 以上に比べて距離依存性が大きい傾向も改善されていない。一方、図 6(b) にみられた震度式 B の M5 クラスの地震による残差の距離

(a) Before adjustment



(b) After adjustment

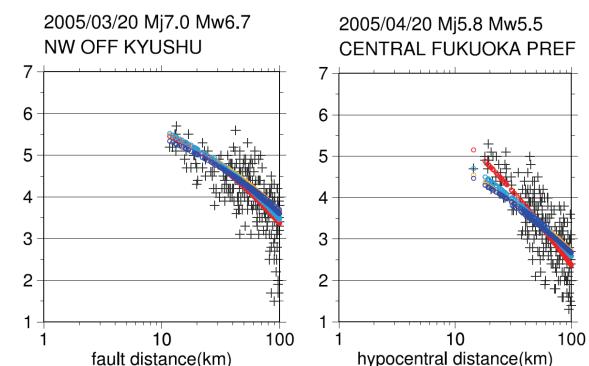


図 7 2005 年福岡県西方沖の地震の本震 (Mj7.0) とその最大余震 (Mj5.8) の断層最短距離と震度の関係。

シンボルは図 4 と同じである。予測震度の計算には、(a) は補正前の M、(b) は補正後の M を用いた。

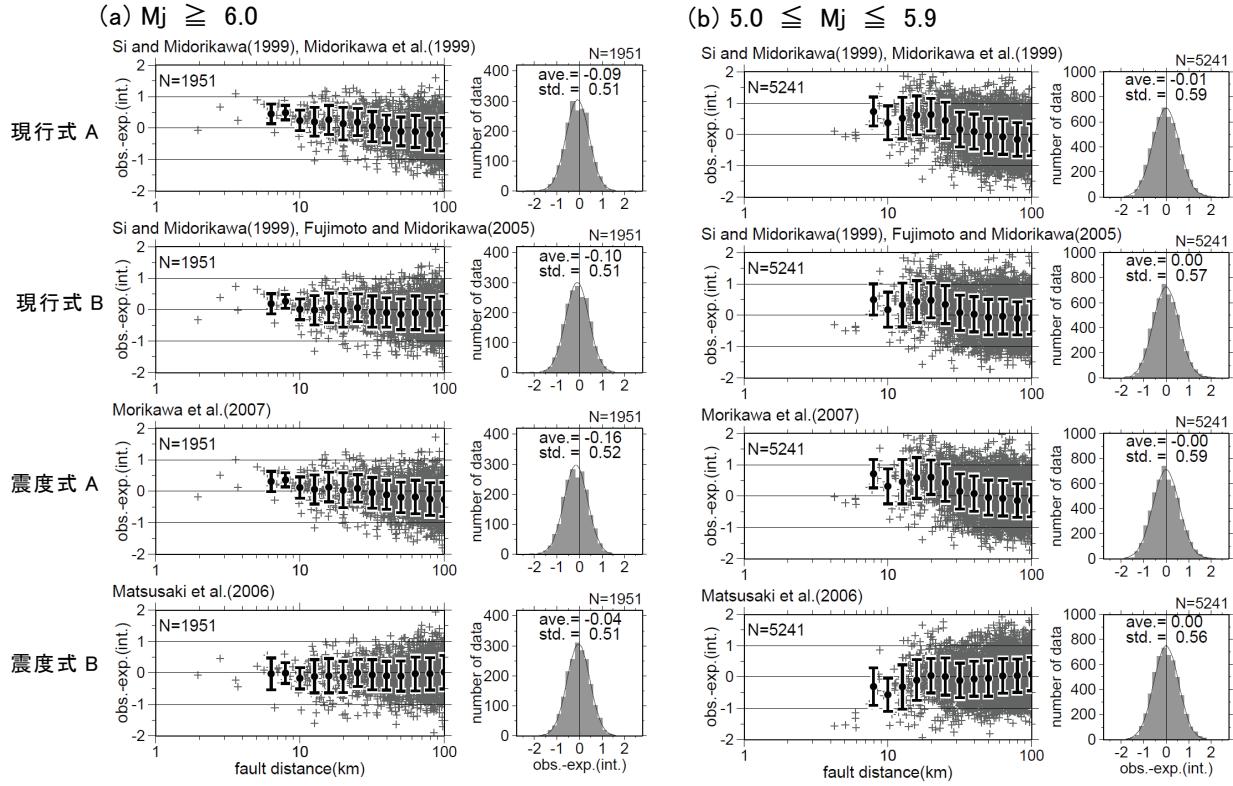


図 8 観測震度と、補正後の M から求めた予測震度の残差の分布。(a) は表 1 に示した $M_j \geq 6.0$ の地震、(b) は $5.0 \leq M_j \leq 5.9$ の地震を示す。左図は、断層最短距離または震源距離と残差の関係であり、黒丸は各々の距離での残差の平均値、エラーバーはその標準偏差 ($\pm \sigma$) を示す。右図は残差のヒストグラムであり、実線で描かれた曲線は正規分布関数を示す。

依存性は、図 8(b)に示すように M の補正により改善されている。これらのことから現行式 A, 現行式 B, 震度式 A では個々の地震に残差の距離依存性があるのに対し、震度式 B の残差の距離依存性は地震ごとの平均的な地震動の強さの違いによる影響が大きいと考えられる。

現行式では PGV から震度への換算式として、翠川・他 (1999) (現行式 A) よりも藤本・翠川 (2005) (現行式 B) を適用した方が残差はやや改善されたが、残差の距離依存性はまだ残っている (図 5)。原因として、換算式の誤差や (2) 式の距離減衰式そのものの誤差が考えられるが、いずれにせよ、換算式の誤差は予測精度に影響を与えることを示している。

ここで得られた残差の大きさや距離依存性は、距離減衰式や経験式を回帰した際のデータセットにも依存すると考えられる。震度式 B による残差が比較的小さい結果となったのは、式を回帰したデータセットに近年の規模の大きな地震が比較的多く含まれることが影響したとも考えられる。

5.2 M_j から M_w への換算式の影響

3.1 節で述べたように現行の震度予測では、 M_w は M_j から換算する必要がある。この節では、この換算式が予測震度へ与える影響をみる。図 9 は、表 1 の 14 地震の M_j と M_w の関係を示す。地震 14 例中 11 例は点線で表した宇津 (1982) の換算式 ((1)式) に概ねのっているが、灰色丸の 3 例は大きく外れている。この 3 例は、換算式を用いると M_w を過大評価してしまう。図 10(a), (b) は、この 3 例について、CMT 解析による M_w の場合、(1)式により M_j から換算した M_w の場合のそれぞれの予測値と観測値の残差の頻度分布を示す。ここで用いた予測手法は、現行式 A と震度式 A である。換算式を用いた場合 (図 10(b))、 M_w が過大評価となるため、CMT 解析による M_w を用いた場合 (図 10(a)) よりも残差が負の方向に大きく外れている。図 10(c) は、同じく 3 例について、震度式 B の場合の残差の頻度分布を示す。震度式 B は M_j をパラメータとしているので、 M の換

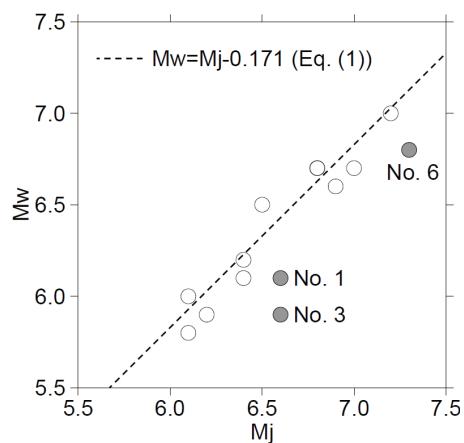


図9 表1に示した地震の M_j と M_w の関係。
番号付きの灰丸は、図10の地震を示す。

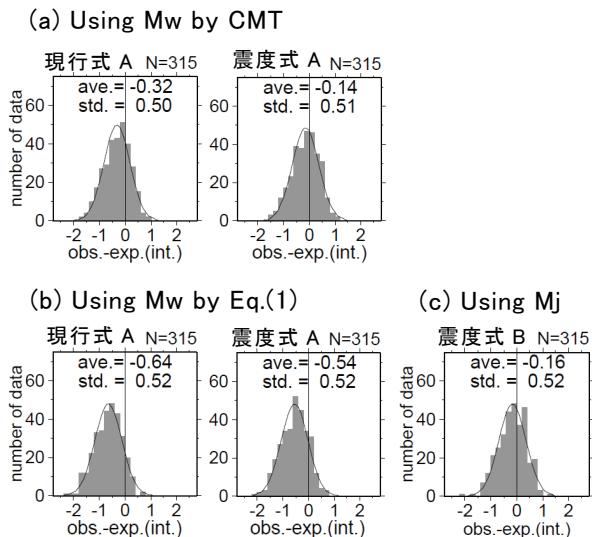


図10 図9に灰丸で示した3地震（No. 1, 3, 6）の観測震度と予測震度の残差のヒストグラム。震度予測で用いたMは、(a)はCMT解析による M_w , (b)は式(1)を用いて M_j から変換した M_w , (c)は M_j である。実線で描かれた曲線は正規分布関数を示す。

算式は不要である。得られた残差の平均値は、CMT解析による M_w を用いた震度式Aの場合（図10(a)）と同程度である。このように、現行の震度予測では、 M_j から M_w への換算式から大きく外れる地震では予測誤差が大きくなるため、 M_j をパラメータとする距離減衰式が有利といえる。

5.3 M8クラスの地震による評価

前節までの解析では、浅い地震に注目して、30km

より深い地震を対象とした。その結果、最大で M_j 7.3までの地震を解析した。本節では、M8クラスの地震に対しても4手法の適用性を確認するため、震源の深さが今回の解析対象よりもやや深いものの、2003年十勝沖地震（ $M_j8.0$, $M_w8.0$, 深さ 45km）を用いて評価した。断層最短距離の計算には、国土地理院による断層モデル（<http://www.gsi.go.jp/cais/HENDOU-hendou.html>）を用いた。震度式Aによる予測では、森川・他（2007）による30kmよりも深い地震に適用する次式を用いる。

$$I/2 = 048M_w - 0.0031X + 1.08 - \log_{10}(X) \quad (7)$$

ここで、各変数は(5)式と同じである。また、(7)式では、地震タイプ別に、予測震度に加算する補正係数（プレート間地震：-0.18, プレート内地震：+0.41）が導入されている。2003年十勝沖地震はプレート間地震のため、(7)式ではプレート間地震の補正係数（-0.18）を予測震度に加算する。また、(2)式の係数 d は-0.02とする。図11に、4手法による2003年十勝沖地震の震度の残差について、断層最短距離との関係、距離200km以内の頻度分布、距離100km以内の頻度分布を示す。残差の平均値は、距離100km以内、200km以内ともに、震度式Bが最も0に近い。距離50kmから100km程度までは4手法とともに残差の絶対値は同程度であるが、断層に近い距離40km付近では震度式Bによる残差の絶対値が最も小さい。このように、2003年十勝沖地震では、断層に最も近い距離40km付近を除けば、本論文で注目している距離100km以内では4手法とも予測精度は同程度であった。M8クラスの地震は事例が少ないので、今後の観測データの蓄積により、さらなる検討が必要である。

6 結論

緊急地震速報の震度予測への距離減衰式の適用性について検討した。特に断層または震源から100km以内のデータを対象に、現行の予測手法と、より経験式の少ない震度の距離減衰式による全部で4つの予測手法について予測精度（観測値と予測値の残差）を調べた。現行手法として、距離減衰式は司・翠川（1999）を用い、その際のPGVから震度への換算式には翠川・他（1999）と藤本・翠川（2005）を適用

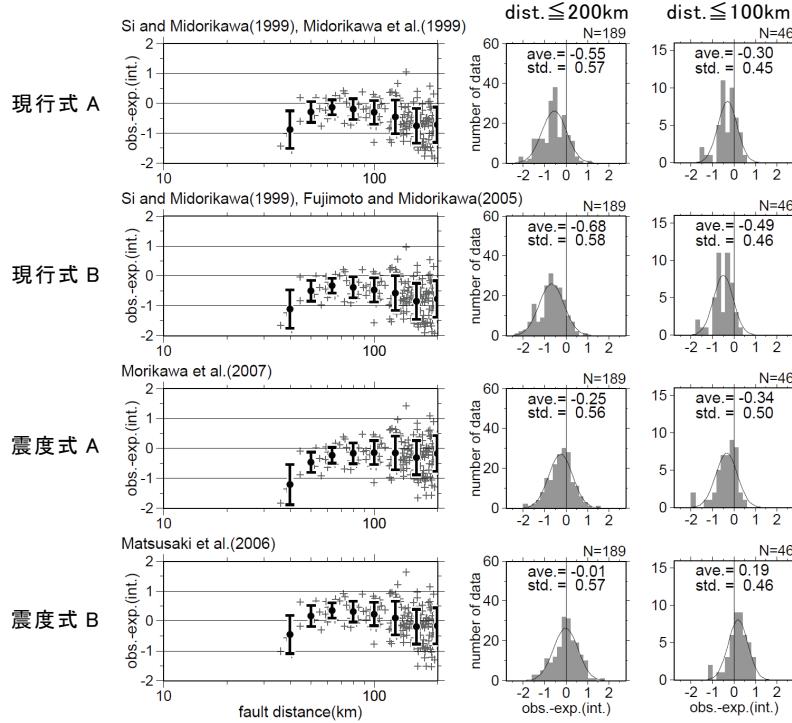


図11 2003年十勝沖地震（Mj8.0）の観測震度と予測震度の残差の分布。左図は、断層最短距離と残差の関係であり、黒丸は各々の距離での残差の平均値、エラーバーはその標準偏差 ($\pm \sigma$) を示す。中央図、右図はそれぞれ、距離200km以内、距離100km以内の残差のヒストグラムであり、実線で描かれた曲線は正規分布関数を示す。

した。また、震度の距離減衰式には、森川・他（2007）と松崎・他（2006）を用いた。次に、得られた主な結果を記述する。

1. 距離 100km 以内の予測精度は現行手法の方が悪く、距離 30km 以内では 4 手法とも同程度であった。距離 30km 以遠では現行手法と森川・他（2007）の式には残差の距離依存性がみられた。松崎・他（2006）の式は、M5 クラスの地震で距離依存性がみられた
2. 経験的な地盤特性の算出、地震間のばらつきを除く処理には、残差の距離依存性が小さい予測手法が有効である。松崎・他（2006）の距離依存性は、地震間のばらつきに起因するものと考えられ M の補正により小さくなるが、その他の手法では補正後も距離依存性がみられた
3. 現行手法で用いられている PGV から震度への換算式に藤本・翠川（2005）を適用すると、距離依存性はやや改善された。このことは換算式の誤差が予測精度に影響することを示している。

4. 現行の震度予測手法では、Mj から Mw への換算式から大きく外れる地震の場合には、予測誤差が大きくなるため、Mj をパラメータとする距離減衰式が有利である。

以上より、距離減衰式以外の経験式を減らした予測手法は、現行の手法よりも予測精度が高いことが確かめられた。また、地震ごとの観測値と予測値の残差の距離依存性が小さいことが、距離減衰式を用いた経験的なサイト特性を求める上で重要であることが示された。一方、断層近くの予測精度は、ここで評価した予測手法ではどれも同程度であった。現在の緊急地震速報では、予測された震度が発表条件の一つとして用いられており、断層近くで予測が過小であれば、観測された震度が発表条件を超える場合でも、緊急地震速報が発表されない、または、発表が遅れる可能性がある。逆に、予測された震度が過大であれば、防災上あまり有効でない情報を発表してしまう恐れもある。これらを考慮して、将来的には、特に観測値が少ない断層近くの予測精度の改善を目指し、今後も蓄積される観測値により距離減

衰式を改良していくことで、緊急地震速報の発表の迅速性や予測精度の向上を図る必要がある。

謝辞

査読者である気象庁地震火山部の東田進也博士、編集担当の尾崎友亮津波予測モデル開発推進官には本稿改善に有益なご助言をいただいた。震度データは、地方公共団体、防災科学技術研究所、気象庁のデータを使用した。震源要素は気象庁一元化震源カタログを使用した。記して感謝いたします。

文献

- 明田川保・清本真司・下山利浩・森脇健・横田崇(2010)：緊急地震速報におけるP波マグニチュード推定方法の改善、験震時報、73, 123-134.
- 宇津徳治(1982)：各種マグニチュード間の関係、地震研究所彙報、57, 465-497.
- 宇津徳治(2001)：地震学（第3版）、共立出版、376pp.
- 菊池正幸・山中桂子(1997a)：EIC 地震学ノート、No. 18, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/EIC_News/970326.html.
- 菊池正幸・山中桂子(1997b)：EIC 地震学ノート、No. 22, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/EIC_News/970513.html.
- 菊池正幸・山中桂子(1997c)：EIC 地震学ノート、No. 24, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/EIC_News/970625.html.
- 気象庁地震火山部(2008)：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、http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/Whats_EEW/reference.pdf.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2009)：全国地震動予測地図 技術報告書。
- 司宏俊・翠川三郎(1999)：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、523, 63-70.
- 中村浩二(2007)：緊急地震速報について、物理探査、60, 5, 367-374.
- 原田智史(2007)：多機能型地震観測装置の概要、験震時報、70, 73-81.
- 藤本一雄・翠川三郎(2005)：近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法、地域安全学会論文集、7, 241-246.
- 松岡昌志・翠川三郎(1994)：国土数値情報とサイスマップ

クマイクロゾーニング、第22回地盤震動シンポジウム資料集、23-34.

翠川三郎・大竹 雄(2003)：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、3-1, 59-70.

翠川三郎・藤本一雄・村松邦栄(1999)：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、1, 51-56.

松崎伸一・久田嘉章・福島美光(2006)：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、604, 201-208.

森川信之・神野達夫・成田 章・藤原広行・福島美光(2007)：強震動記録に基づく計測震度の距離減衰式、日本地震学会2007年秋季大会講演予稿集、B31-05.

森川信之・藤原広行(2008)：経験的サイト增幅特性および異常震域補正の震度予測への適用、第6回日本地震工学会大会-2008 梗概集、228-229.

山本俊六・堀内茂木・中村洋光・吳長江(2007)：緊急地震速報における震度マグニチュードの有効性、物理探査、60, 5, 407-417.

Iwakiri, K., M. Hoshiba, K. Nakamura, N. Morikawa(2011) : Improvement in the accuracy of expected seismic intensities for earthquake early warning in Japan using empirically estimated site amplification factors, Earth Planets Space, 63, 57-69.

Kamigaichi, O.(2004) : JMA earthquake early warning, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, 4, 134-137.

Miyamachi, H., K. Iwakiri, H. Yakiwara, K. Goto, and T. Kakuta(1999) : Fine structure of aftershock distribution of the 1997 Northwestern Kagoshima Earthquakes with a three-dimensional velocity model, Earth Planets Space, 51, 233-246.

Okada,Y., K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sekiguchi, H. Fujiwara, and A. Yamamoto (2004) : Recent progress of seismic observation networks in Japan Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net, Earth, Planets and Space, 56, xv-xxviii.

Youngs, R. R., N. Abrahamson, F. I. Mkdisi, and K. Sadigh, Magnitude Dependence Variance of Peak Ground Acceleration (1995) : Bull. Seism. Soc. Am., 85, 1161-11.