



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	近年の強震動記録に基づく計測震度の距離減衰式
Author(s)	森川, 信之; MORIKAWA, Nobuyuki; 神野, 達夫 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 73, 149-158
Issue Date	2010-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.73.149
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/44470
Type	departmental bulletin paper
File Information	73_14_p149-158.pdf



近年の強震動記録に基づく計測震度の距離減衰式

森川 信之

防災科学技術研究所

神野 達夫

広島大学大学院工学研究科

成田 章

三菱スペース・ソフトウェア

藤原 広行

防災科学技術研究所

福島 美光

原子力安全基盤機構

(2010年1月6日受理)

A New Attenuation Relation of Seismic Intensity for Japan Based on Recent Strong-Motion Records

Nobuyuki MORIKAWA

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

Tatsuo KANNO

Graduate School of Engineering, Hiroshima University

Akira NARITA

Mitsubishi Space Software, Co., Ltd.

Hiroyuki FUJIWARA

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

and

Yoshimitsu FUKUSHIMA

Japan Nuclear Energy Safety Organization

(Received January 6, 2010)

We obtain a new attenuation distance-relation of seismic intensity for Japan using the strong-motion data-base constructed by Kanno et al. (2006). We also obtain additional correction terms corresponding to the site amplification, anomalous seismic intensity and event type (plate-boundary or intra-slab). Although we used strong-motion data until the 2003 Tokachi-oki earthquake, the attenuation relation agrees to observed records during recent large earthquakes.

I. はじめに

距離減衰式は、多数の地震観測記録の統計的な回帰分析によって求められており、地震動の平均的な強さとばらつきという形で表現され、簡便に地震動予測を行うための手法として古くから広く用いられている。現在、地震調査研究推進本部による地震動予測地図や気象庁による緊急地震速報の震度予測では、最大速度の距離減衰式を用いてはじめに最大速度を求めた後に、最大速度と計測震度の経験的關係式によって計測震度に換算されている。これは、最大速度に関しては表層 30 m の平均 S 波速度（以後、AVS 30 と呼ぶ）による地盤増幅特性の評価法が確立されており、面的な地震動予測が可能であるということが要因の一つにある。1995 年の兵庫県南部地震以後、防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net (Kinoshita, 1998, Aoi et al., 2004) をはじめとして、気象庁および地方公共団体の震度計など、日本全国に展開された強震観測網による記録が最近になり多数蓄積されるようになった。これにより、松崎・他 (2006) は、震源近傍まで適用可能な震度の距離減衰式を導出している。ただし、彼らは地盤増幅特性の評価は 4 つの地盤種別によるもののみである。また、それ以前にも震度の距離減衰式がいくつか提案されているが、松崎・他 (2006) でまとめられているのでそちらを参照願いたい。

一方、Kanno et al. (2006) は、約 90,000 の記録からなる強震動波形データベースを構築し、それをもとに最大加速度、最大速度、加速度応答スペクトル（減衰 5%, 周期 0.05~5 秒）の距離減衰式を導出するとともに、AVS 30 による地盤増幅特性の補正と異常震域に対応するための補正項を提示したが、計測震度は対象としていなかった。そこで、本検討では Kanno et al. (2006) と同じデータセットを用いて計測震度の距離減衰式と AVS 30 による地盤増幅特性、および異常震域に対応するための補正項を導出する。

II. データ

先に述べたとおり、ここでは、Kanno et al. (2006) と同じデータセットを用いる。すなわち、モーメントマグニチュード (M_w) が 5.5 以上で、かつ強震動記録が 5 点以上得られている地震による地表での波形記録で、K-NET, KiK-net のデータについては平成 16 年 (2003 年) 十勝沖地震の本震まで、その他の観測網等によるデータは 2002 年末までに得られたものである。計測震度は海外のものも含めて波形記録より気象庁 (1996) に従って算出した。また、トリガーしな

い観測点のために遠方で見かけ上減衰が小さくなることを防ぐため、Fukushima and Tanaka (1990) の距離減衰式で予測される最大加速度が 2 cm/s/s (ただし、機械式強震計による観測点の場合は 10 cm/s/s) 以上となる距離以内に含まれる観測点記録のみを対象とした。ここで、 M_w は以下の優先順位で求められているものを採用している。(1)断層パラメーター・ハンドブック (佐藤, 1989) に記載されている値, (2)防災科学技術研究所の F-net によって公開されている値 (福山・他, 1998), (3)ハーバード大学によるカタログに記載されている値, (4)気象庁マグニチュード (M_j) から Fukushima (1996) による経験的關係式により得られる値。ただし、海外の地震については Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation System (COSMOS) による値を採用した。震源からの距離は断層最短距離を用いる。このとき、 M_w が 6.0 以上で、既往の研究等で断層モデルが示されている地震ではそのモデルを用い、それ以外の場合は点震源とした。結果として、194 地震の 11,919 記録を用いている。データに関して、震央分布を Fig. 1 に、マグニチュードと震源距離および震源の深さとの関係を Fig. 2 に示す。後述のように、震源の深さ 30 km を境とした二つの距離減衰式を導出するため、図では両者を区別している。

III. 基本式の導出

Kanno et al. (2006) では、はじめにできるだけ単純な形の基本式を導出し、その後に必要な補正項を求めており、本検討でも同じ方針をとる。深い地震では浅い地震と比べて減衰が大きいという特徴 (例えば、翠川・大竹, 2002) を考慮して、基本式として震源の深さ 30 km を境界とした二種類の式でモデル化する。ここで、気象庁 (1996) による計測震度の算出において

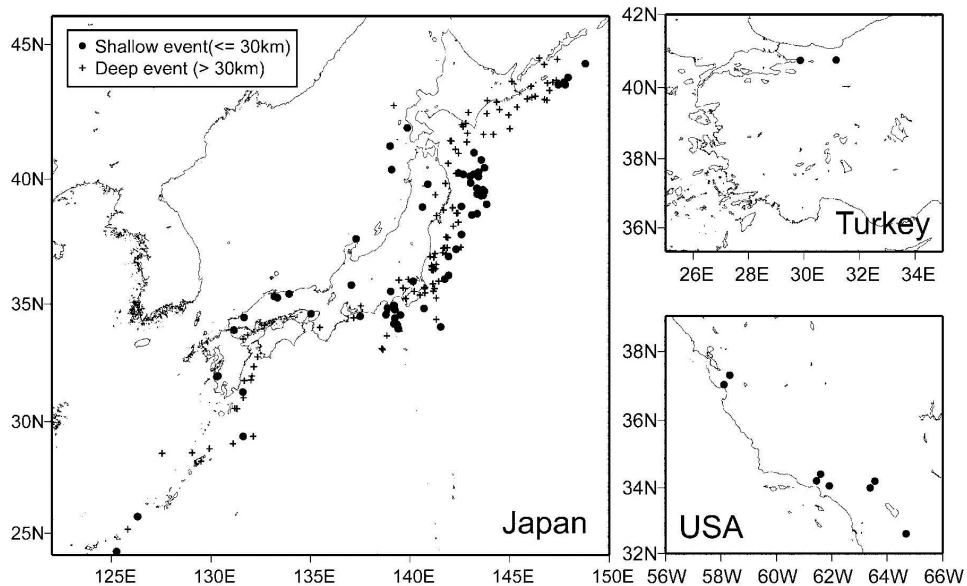


Fig. 1. Epicenters of earthquakes used in this regression analysis (after Kanno et al., 2006).

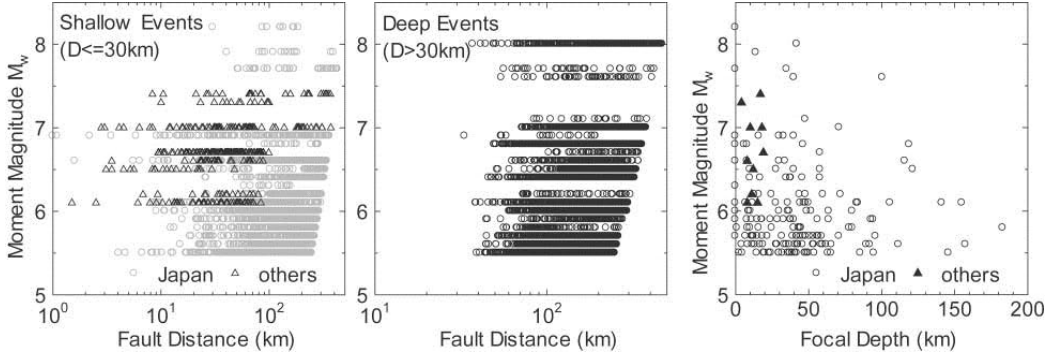


Fig. 2. Magnitude-distance and magnitude-focal-depth distribution (after Kanno et al., 2006).

$$I = 2 \cdot \log A + 0.94 \quad (1)$$

と定められていることから, Kanno et al. (2006) の最大加速度等の式と同じ形になるように

$$\frac{I}{2} = a_1 M_W + b_1 X + c_1 - \log(X + d_1 \cdot 10^{0.5 M_W}) + \sigma_1 \quad (D \leq 30) \quad (2)$$

$$\frac{I}{2} = a_2 M_W + b_2 X + c_2 - \log X + \sigma_2 \quad (D > 30) \quad (3)$$

と仮定した。ここで, I は計測震度, A は継続時間が 0.3 秒となるフィルター処理済み波形の振幅の最大値, X は断層最短距離 (単位は km), D は震源の深さ (単位は km), $a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, c_2$ は回帰係数, σ_1, σ_2 は標準偏差である。また, 本検討では, \log は常用対数を表す。

回帰においては, Kanno et al. (2006) と同様に断層最短距離に応じた重みを付け, Fukushima and Tanaka (1990) による二段階回帰分析を適用した。得られた各係数の値は,

$$a_1 = 0.63, b_1 = -0.0018, c_1 = -0.24, d_1 = 0.0030, \sigma_1 = 0.36$$

$$a_2 = 0.48, b_2 = -0.0031, c_2 = 1.08, \sigma_2 = 0.36$$

である。Fig. 3 に得られた式および観測記録との比較の一部を示す。本検討で得られた式はおおむね観測記録と対応している。観測記録との比較では参考のため既往の式として Shabestari・山崎 (1997), 松崎・他 (2006) による距離減衰式を合わせて示してあるが, 浅い地震 ($D \leq 30$) については松崎・他 (2006) の結果と大きな違いはないが (Fig. 4 a), 深い地震 ($D > 30$) では既往の式と比べて傾きが大きく異なっており, 遠方の記録については本検討の結果の方が観測記録とよく対応している (Fig. 4 b)。

回帰に用いた 2003 年の十勝沖地震よりも後に発生した大きな地震による記録との比較の例を Fig. 4 に示す。本検討で得られた距離減衰式は, いずれの地震の観測記録ともおおむね対応していると言える。

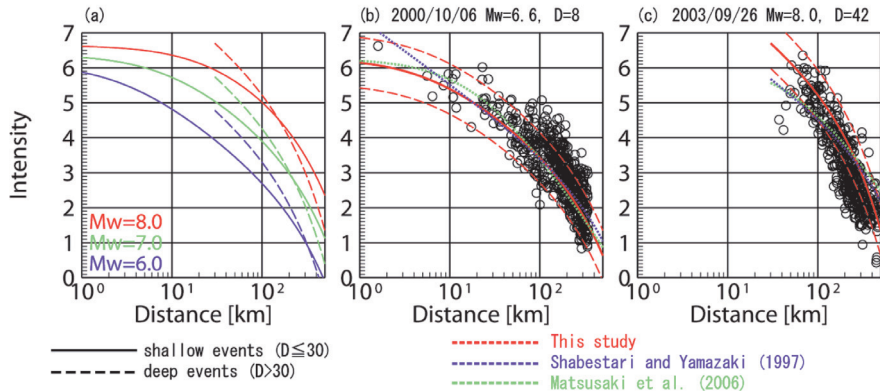


Fig. 3. (a) : Obtained attenuation relation. (b) and (c) : examples of comparison between attenuation relations and observed records (circles).

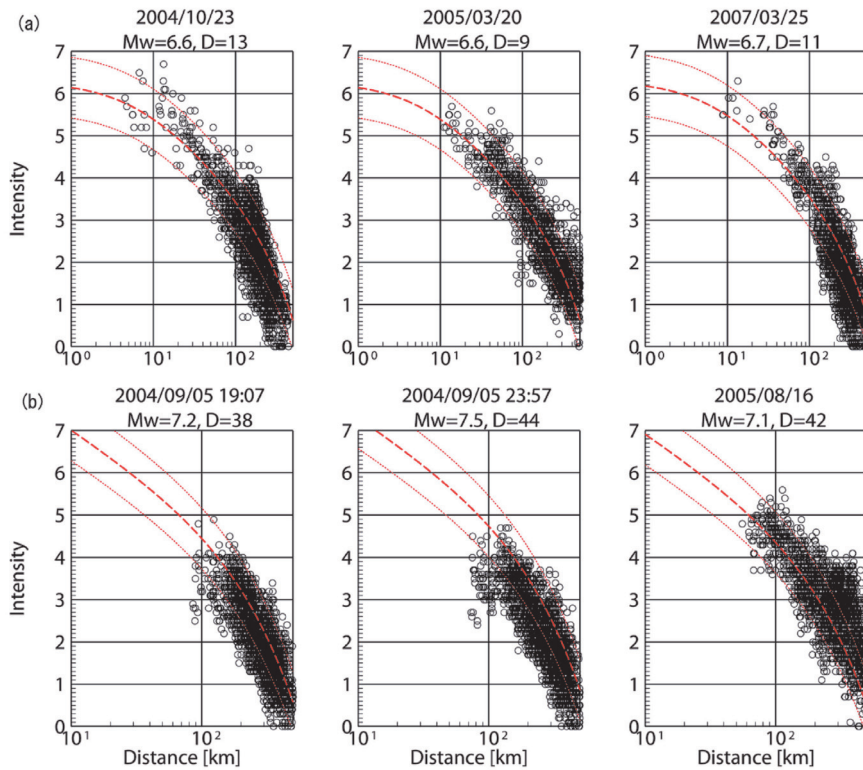


Fig. 4. Examples of comparison between our attenuation relation (red dashed line) and observed records (circles) during recent large earthquakes. (a) shallow events and (b) deep events.

IV. 補正項の導出

先に得られた基本式に対して、より地震動予測の精度を向上させるための補正項を求める。

1. 地盤増幅特性

地震動は表層地盤により大きな影響を受け、震度で1階級程度の違いを生じさせる場合もある。ここでは、地震動の面的な予測にも対応できるように、AVS 30を用いた表層地盤による震度の増幅特性の補正項を導出する。AVS 30のデータは、KiK-netおよび港湾空港技術研究所の観測点におけるボーリングデータより求めている。さらに、深さ20mまでのボーリングデータがあるK-NET観測点についてKanno et al. (2006)で求められた表層20mまでの平均S波速度(AVS 20)とAVS 30との経験的關係式

$$AVS30 = 1.13AVS20 + 19.5 \quad (4)$$

によって求められた観測点を加えている。増幅度 (G) と AVS 30 との關係式として

$$G = (obs - pre) = p \cdot \log(AVS30) + q \quad (5)$$

を仮定した。ここで、 obs は観測値、 pre は基本式より求められる予測値で、 p 、 q は回帰係数である。Kanno et al. (2006)と同様に、あるAVS 30を中心とした範囲のデータについて ($obs - pre$) の平均値をはじめに求め、その値を用いて(5)式による回帰を行った (Fig. 5)。結果として、

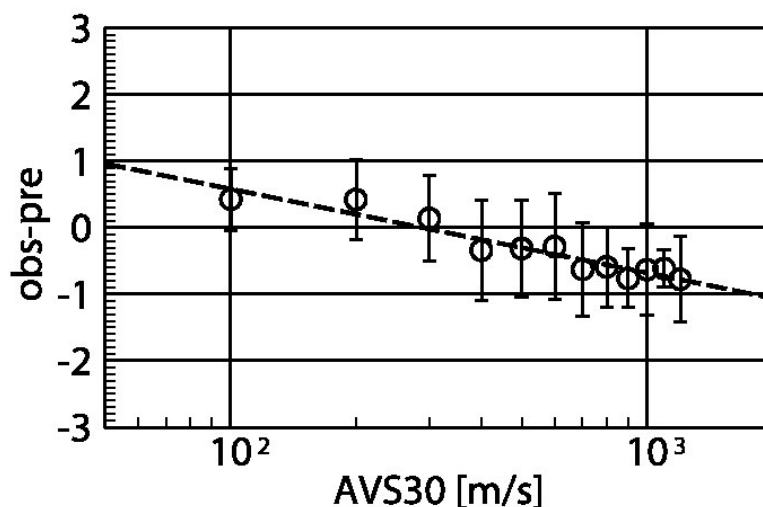


Fig. 5. Relation between residual ($obs - pre$) and AVS 30 for seismic intensity.

$$p = -1.26, q = 3.10$$

が得られた。なお、深い地震においては、後述のように異常震域が現れる場合があるため、ここでは浅い地震の記録のみを用いて回帰した。また、AVS 20 および表層 10 m までの平均 S 波速度 (AVS 10) を指標として同様の検討を行ったが、AVS 30 の場合に相関係数が最も大きくなったことから、ここでは省略する。

2. 異常震域

島弧地域における特異な減衰 (Q 値) 構造により、やや深発地震や深発地震では震源よりも遠い地域で震度が大きくなる異常震域が現れる。このような異常震域を考慮した距離減衰式は、高井・岡田 (2002) でも提案されているが、本検討では、基本となる距離減衰式に補正項を付すという森川・他 (2006 a) の方針をとる。東北日本については、基本式の回帰に用いたデータのうち、太平洋プレートの沈み込みにもなる地震 (プレート間地震およびスラブ内地震) における東経 138 度以東の地域を対象とした。用いたデータおよび解析方法の詳細については、森川・他 (2006 a) を参照願いたい。補正項は最大加速度等と同じになるよう、

$$A_{NE} = obs - pre = \alpha_{NE}(X_{vf} - 5.57) \times (D - 30) \quad (6)$$

を仮定した。ここで、 X_{vf} は火山フロントから対象となる観測点までの最短距離 (単位は km) で、火山フロントよりも海溝側で正、大陸側で負の値をとるパラメータである。

一方、西南日本 (東経 137 度以西のフィリピン海プレート) で発生する地震については、森川・他 (2006 b) が提案した異常震域の補正と同じ

$$A_{SW} = \begin{cases} \alpha_{SW}(X_{vf} - 5.57) \times (D - 30) & (X_{vf} \leq 75) \\ \alpha_{SW} \times 69.43 \times (D - 30) & (X_{vf} > 75) \end{cases} \quad (7)$$

と仮定した。西南日本においては、 X_{vf} が 75 km 以上で頭打ちする傾向が明瞭に見られることから、(7)式ではそのことが取り入れられている。そのため、回帰においては X_{vf} が 75 km 以下の観測点による記録のみで行っている (森川・他, 2006 b)。結果として、回帰係数 α_{NE} および α_{SW} はそれぞれ以下の通り得られた。

$$\alpha_{NE} = 1.42 \times 10^{-4}, \alpha_{SW} = 1.07 \times 10^{-4}$$

求められた補正項を適用した結果の例を Fig. 6 に示す。基準式のみ (Fig. 6 b) と比べて補正項を適用した結果 (Fig. 6 c) は異常震域が明瞭に表現できていることが分かる。これらの異常震域に対応するための補正項は、震源の深さが 30 km 以上の地震に対してのみ適用する。ただし、深さが 200 km を越える地震については、本検討で用いたデータに含まれていないことから、現時点において適用は望ましくないと考えられる。

3. 地震種別（プレート間地震／スラブ内地震）

森川・他（2006 a）では，異常震域のための補正項を求める際に「震源特性係数」を定義し，プレート間地震とスラブ内地震で違いがあることを示した．そこで，本検討でも東北日本（太平洋プレート）の地震を対象としてプレート間地震とスラブ内地震に対する補正項（それぞれ S_{pb} および S_{is} と表す）を森川・他（2006 a）を同じ手法により検討した（Fig. 7）．「震源特性係数」のマグニチュードや震源の深さへの依存性が明瞭ではないことから，ばらつきは大きいものの最大加速度等と同様にプレート間地震およびスラブ内地震それぞれの平均値をもって補正項とすることとした．結果として，

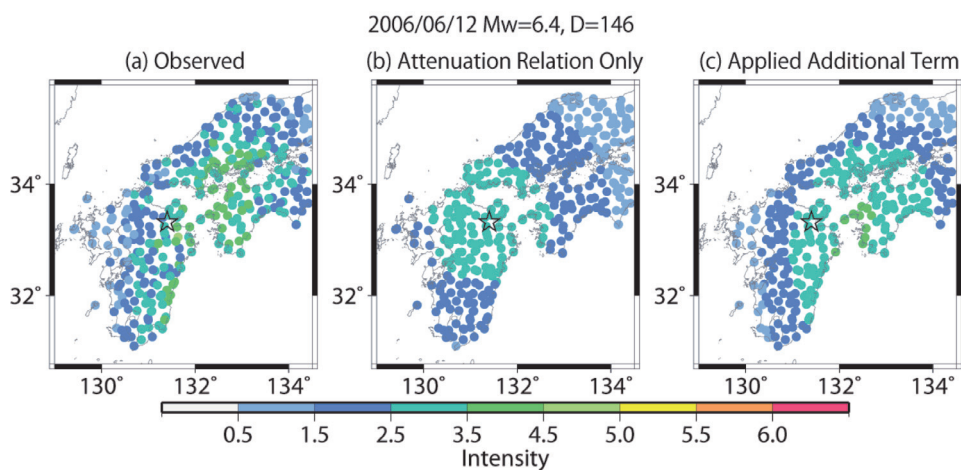


Fig. 6. An example of applying additional term to correct anomalous seismic intensity. A star indicates the epicenter of the earthquake.

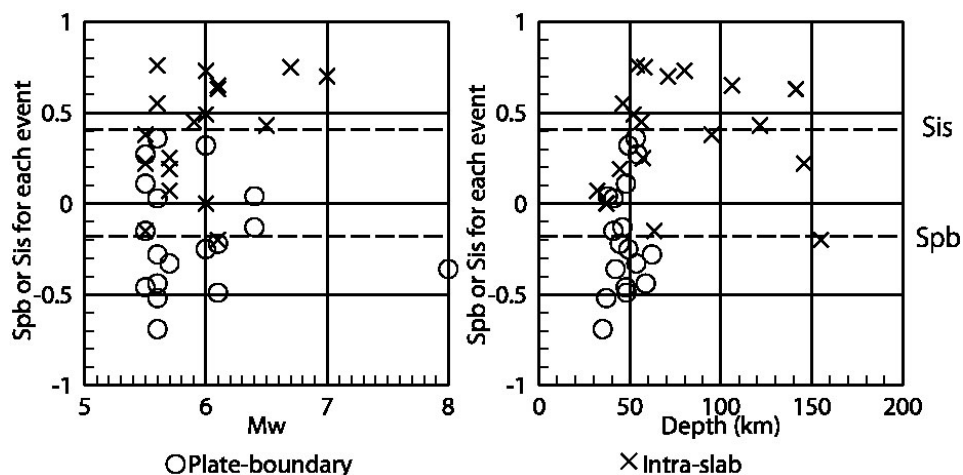


Fig. 7. Additional term to correct event type (plate-boundary or intra-slab) for northeast Japan.

$$S_{pb} = -0.18, S_{is} = 0.41$$

が得られた。このことは、スラブ内地震においては同じ規模のプレート間地震よりも0.6程度大きい計測震度が観測されることを表わしており、既往の指摘（例えば、森川・笹谷，2000）とも整合する。なお、西南日本の地震に関しては、まだ十分な数の地震によるデータが得られていないために地震種別による補正項を求めることが困難であり、今後の課題としたい。

V. ま と め

Kanno et al. (2006) と同じデータセットを用いて計測震度の距離減衰式（基準式）を導出し、あわせて地盤増幅、異常震域および地震種別（東北日本のプレート間地震／スラブ内地震）の補正項を求めた。結果として、震源の深さが30 km以浅の地震に対しては

$$I = 1.26M_w - 0.0036X - 0.48 - 2\log(X + 0.0030 \cdot 10^{0.5M_w}) + G \quad (8)$$

震源の深さが30 kmより深い東北日本（東経138度以東の太平洋プレート）の地震に対しては

$$I = 0.96M_w - 0.0062X - 2.16 - 2\log X + G + A_{NE} + (S_{pb} \text{ or } S_{is}) \quad (9)$$

震源の深さが30 kmより深い西南日本（東経137度以西のフィリピン海プレート）の地震に対しては

$$I = 0.96M_w - 0.0062X - 2.16 - 2\log X + G + A_{SW} \quad (10)$$

のように地表での計測震度の予測値が求められる。

本検討で回帰に用いた記録は2003年の十勝沖地震（本震）までのものであるが、その後に発生した大地震の記録との比較でもおおむね対応していることが確かめられた。近年の強震動記録の蓄積は、ここで求めた距離減衰式は、日本全国を対象とした場合の平均的な地震動（震度）の評価において有効である。今後は、より地域性を考慮した距離減衰式の構築が必要である。

謝辞 本検討で用いた強震動波形記録は、California Division of Water Resources, California Strong-Motion Instrumentation Program, Los Angeles Department of Water and Power, Southern California Edison, United States Geological Survey, University of Southern California, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, 電力中央研究所, 阪神高速道路, 本州四国連絡高速道路, JRグループ, 東京電力, 関西電力, 鴻池組, 前田建設工業, 松村組, NTTグループ, 大林組, 大阪ガス, 神戸市, 京都大学, 滋賀県立大学, 気象庁, 国土技術政策総合研究所, 防災科学技術研究所, 港湾空港技術研究所, 鉄道総合技術研究所, 滋賀県, 震災予防協会, 関西地震観測研究協議会（順不同）によるものです。また、十勝沖地震より後の震度データは、防災科学技術研究所, 気象庁, 新潟県, 福島県, 群馬県, 埼玉県, 福岡県, 大分県, 宮城県, 茨城県, 石川県,

長野県, 秋田県, 山形県(順不同)によるものです。上記各機関の関係各位によるデータの提供ならびに観測網の維持管理に対して深く感謝いたします。

文 献

- Aoi, S., T. Kunugi and H. Fujiwara, 2004. Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Journal of JAEE* (日本地震工学会論文集), 4(3), 65-74.
- Fukushima, Y., 1996. Scaling relations for strong ground motion prediction models with M^2 terms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**, 329-336.
- Fukushima, Y. and T. Tanaka, 1990. A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **80**, 757-783.
- 福山英一・石田瑞穂・D. S. Dreger・川井啓廉, 1998. オンライン広帯域地震データを用いた完全自動メカニズム決定, 地震Ⅱ, **51**, 149-156.
- Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara and Y. Fukushima, 2006. A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, 879-897.
- Kinoshita, S., 1998. Kyoshin net (K-net), *Seis. Res. Lett.*, **69**, 309-332.
- 気象庁, 1996. 気象庁告示第4号.
- 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.
- 翠川三郎・大竹雄, 2002. 震源深さによる距離減衰特性の違いを考慮した地震動最大加速度・最大速度の距離減衰式, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, 609-614.
- 森川信之・神野達夫・成田章・藤原広行・福島美光, 2006 a. 東北日本の異常震域に対応するための最大振幅および応答スペクトルの新たな距離減衰式補正係数, 日本地震工学会論文集, **6**(1), 23-41.
- 森川信之・神野達夫・成田章・藤原広行・福島美光, 2006 b. 西南日本の異常震域に対応するための距離減衰式補正係数, 日本地震学会講演予稿集 2006 年秋季大会, D 31.
- 森川信之・笹谷努, 2000. 1969年と1994年北海道東方沖地震による強震動記録の比較, 地震Ⅱ, **53**, 73-77.
- 佐藤良輔, 1989. 日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会, 390 pp.
- Shabestari, K. T.・山崎文雄, 1997. 気象庁 87 型地震計記録を用いた計測震度の距離減衰式, 第2回都市直下地震災害総合シンポジウム, 153-156.
- 高井伸雄・岡田成幸, 2002. 火山フロントを考慮した地震動の距離減衰式改善の試み, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, 605-608.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1998. New improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, **79**, 579.