

地震動強さの年最大値の確率分布を求めるための距離減衰式に関する検討

壇 一男

(技術研究所)

Relationship of Intensity of Strong Motions to Earthquake Magnitude and Fault Distance for Theoretical Examination of Probability Distribution of Annual Maxima in Seismic Risk Analysis

by Kazuo Dan

Abstract

Earthquake magnitude must be represented by intensity of seismic motions, such as seismic intensity, peak ground acceleration, or peak velocity, for theoretical examination of the probability distribution of annual maxima of the intensity in seismic risk analysis of structures. This paper proposed this kind of attenuation relationships between the earthquake magnitude, the distance to the fault, and the intensity of the seismic motions in Japan. The relationships were formulated to represent not only the far-field motions but also the near-field motions, because earthquakes close to a specific site affect the level of the seismic risk of a structure there more than those far from the site in general. The results by the proposed relationships were comparable to those by other researchers and to the data obtained during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake.

概 要

構造物の地震危険度解析において、地震の発生モデルを設定して、地震動強さの年最大値の確率分布を理論的に求めようとするとき、地震動強さの距離減衰式はマグニチュードについて解けている必要がある。本論文では、そのような距離減衰式を地震の震度や最大加速度および最大速度について考えた。提案した距離減衰式は震源近傍まで適用できるような関数形とし、既往の式や平成7年兵庫県南部地震のデータと比較した結果、よい対応が見られた。マグニチュードについて解けている距離減衰式を用いることにより、地震動強さの年最大値の確率分布を理論的に求めることができ、地震危険度解析の結果の要因分析が容易になる。

§ 1. はじめに

地震記録が蓄積されるにともない、地震の震度や地震動の最大加速度、最大速度あるいは応答スペクトルといった地震動強さに関する距離減衰式が多く提案されてきている。地震危険度解析では、その目的に最も適した距離減衰式を採用するのであるが、多くの場合、敷地に近い地震がその敷地の地震危険度を左右することとなる。したがって、距離減衰式は震源近傍に適用できるものを用いる必要がある。そのような式が、例えば、震度について嶋¹⁾や宇津²⁾により、最大加速度について福島・田中³⁾により、最大速度についてMidorikawa⁴⁾により提案されている。

一方、地震のマグニチュードと発生個数の関係を表すグーテンベルグ・リヒター式⁵⁾などをもとに地

震の発生モデルを設定し、地震危険度解析を理論的に行った研究がCornell⁶⁾や壇・神田⁷⁾などによりなされている。これらの研究では、地震の震度の年最大値はグンベル分布(極値I型分布)に、最大加速度や最大速度の年最大値はフレシェ分布(極値II型分布)に、そして距離減衰式に上限値が設定されている場合もしくは地震のマグニチュードに上限値が設定できる場合には、最大加速度や最大速度の年最大値は上下限値を有する極値分布にしたがうことが解析的に示されている。

このように地震危険度解析を理論的に行うとき、あるいは地震動強さの年最大値の確率分布に関する理論的背景を検証しようとするときには、距離減衰式がマグニチュードについて解けていなければならない。しかしながら、上述した距離減衰式はマグニチュードについて一般的には解けない。

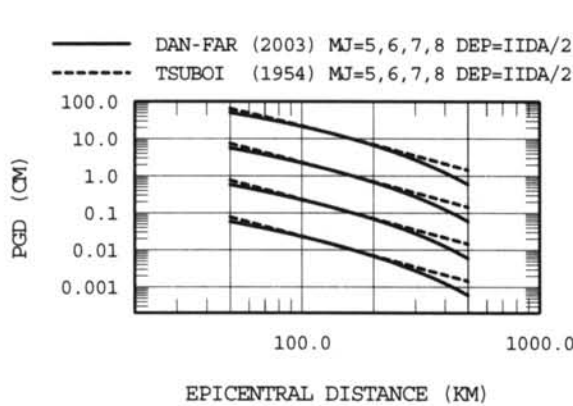


図-1 本論文での遠方場における最大変位の距離減衰と坪井式によるものとの比較
 実線は本論文の式(5)によるもので、点線は式(6)の坪井式によるものである。マグニチュードは下から5、6、7、8である。震源深さは式(8)のDとした。

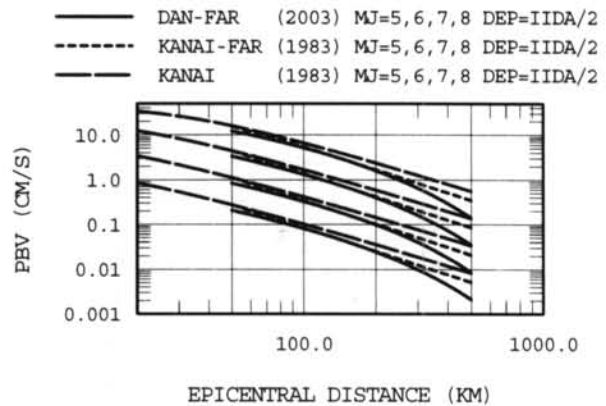


図-2 本論文での遠方場における最大基盤速度の距離減衰と旧金井式および金井式によるものとの比較
 実線は本論文の式(1)によるもので、点線は式(9)の旧金井式によるもの、破線は式(10)の金井式によるものである。マグニチュードは下から5、6、7、8である。

そこで、本論文では、はじめに Kanai⁸⁾ の式展開を参考に遠方場における最大加速度や最大速度の距離減衰式を求め、次にその式と上述した距離減衰式とをもとに震源近傍まで適用でき、かつ、マグニチュードについて解ける最大加速度、最大速度、および震度の距離減衰式を考えた。また、提案した距離減衰式を、既往の距離減衰式や平成7年兵庫県南部地震のデータと比較した。

§ 2. 遠方場における距離減衰式

ここでは、Kanai⁸⁾と同じく地震基盤での地震動の最大速度 v_0 (cm/s)を考え、これをマグニチュード M と震源距離 r (km)とを用いて式(1)のようにおいた。式中、 b_1 は定数項、 b_2 はマグニチュード係数、 b_3 は Q 値に対応する距離減衰係数である。

$$v_0 = b_1 \exp[b_2 M - b_3 r] / r \quad (1)$$

表層地盤の卓越周期を T_G (sec)とおくと、地表での最大速度 v (cm/s)と最大加速度 a (cm/s/s)は、Kanai⁸⁾によれば、それぞれ

$$v = 5 (T_G)^{0.5} v_0 \quad (2)$$

$$a = (2\pi/T_G) v = 10\pi v_0 / (T_G)^{0.5} \quad (3)$$

となる。一方、地震基盤での変位 d_0 (cm)は、地震動の周期を T (sec)として、下のようになる。

$$d_0 = (T/2\pi) v_0 \quad (4)$$

さらに、地震動の変位波形の卓越周期を T_m (sec)とお

くと、 T_m は T_G よりもかなり長くなるために、地震基盤での最大変位と地表での最大変位はほぼ等しくなる。このとき最大変位 d_m (cm)は、

$$d_m = (T_m / 2\pi) v_0 \quad (5)$$

と表される。この最大変位は、震源深さが60 km以浅の地震の場合、気象庁マグニチュードの決定に使われる坪井式⁹⁾に一致するから、次のように書ける。ここに、坪井式の最大変位の単位はミクロンであるので、これをセンチメートルに換算した。

$$\log d_m = M - 1.73 \log r - 3.17 \quad (6)$$

変位波形の卓越周期 T_m は、Kanai⁸⁾によると $r=100$ kmにおいて、

$$\log T_m = 0.39M - 1.70 \quad (7)$$

と表される。したがって、 $r=100$ kmにおいて式(5)と式(6)のマグニチュードの係数を同じとすると、 $b_2=1.40$ を得る。また、式(6)の $r=100$ kmと $r=200$ kmにおける最大変位の比率が式(5)のそれと同じとおくと、 $b_3=0.00506$ となる。さらに、式(6)の $r=100$ kmにおける最大変位が式(5)のそれと同じとおくと、 $b_1=0.0122$ を得る。

§ 3. 遠方場における距離減衰式の比較

前章の結果から、遠方場における最大変位 d_m と最大基盤速度 v_0 が算定でき、さらに地震危険度解析の対象とする敷地の表層地盤の卓越周期 T_G がわかれ

ば、式(2)と式(3)により最大地表速度 v と最大地表加速度 a が求められる。ここでは、そのうち、最大変位 d_m と最大基盤速度 v_0 について見てみる。

図-1は、本論文の式(5)による最大変位の距離減衰と式(6)の坪井式による最大変位の距離減衰を比較したものである。ここではいずれの式においても震源深さを、Hisada *et al.*¹⁰⁾にしたがい、Iida¹¹⁾の余震体積を球で表したときの半径の半分 D (km)、すなわち

$$\log D = 0.353 M - 1.435 \quad (8)$$

とした。この式は設計用の応答スペクトルを算定することを目的に提案されたものであるので、計算される震源深さは、実際の地震の震源深さよりも浅めに評価されることが多い。したがって、遠方場ではその影響は小さいが、震源近傍では、この式による震源深さをを用いたときには、地震動強さは大きめの値になると推測される。

図-1より、前章では式(5)と式(6)が $r=100$ kmと $r=200$ kmで一致するようにしたので、マグニチュードによらずそうなっていることがわかる。また、距離減衰項の形状が異なっている影響が $r=300$ kmより遠い領域で現われているが、地震危険度解析では一般に敷地に近い地震の影響が大きいことから、この差はあまり問題にはならないと推測される。

もう一方の最大基盤速度についてであるが、これは本論文で参考にしたKanai⁸⁾により、2つの式が提案されている。そのうちのひとつは式(6)の坪井式と連結している

$$\log v_{0Kfar} = 0.61 M - 1.73 \log r - 0.67 \quad (9)$$

である。もうひとつは、近距離の記録をもとに式(9)を改訂した

$$\log v_{0K} = 0.61 M - (1.66 + 3.60/r) \log r - (0.631 + 1.83/r) \quad (10)$$

である。前者は $M=4.3 \sim 5.9$ の $r=35 \sim 197$ kmの記録を用いて得られたものなので遠方場における式と考えるとよく、本章では添字に far をつけて旧金井式と呼ぶこととする。後者は1966年松代群発地震の $M=4.9$ で $r=4.2$ kmにおける記録および $M=5.1$ で $r=4.3$ kmにおける記録を考慮して式(9)を改訂し、近距離にも適用できるようにした式である。本章では、これを金井式と呼んで区別することとする。以上の記述は主に田中¹²⁾によった。

図-2は、本論文の式(1)による最大基盤速度の距離減衰と、式(9)の旧金井式および式(10)の金井式による最大基盤速度の距離減衰を比較したものである。ここでも、震源深さは式(8)の D とした。旧金井

式は変位波形の卓越周期 T_m を介して坪井式とつながっているために、図-1で示した本論文での最大変位と坪井式での最大変位との関係がそのまま図-2にも表れていることがわかる。一方、金井式は、本論文での式の値よりも数割程度大きくなっている領域もあるが、 $r=50 \sim 100$ km付近ではほぼ一致している。

§ 4. 震源近傍における距離減衰式

次に、§ 2.で得られた遠方場における最大地表速度 v と最大地表加速度 a をもとに、震源近傍まで適用できるような式について考えてみる。

岡本¹³⁾は、強震記録あるいは墓石の転倒や構造物の破壊状況などから推定される最大加速度を整理し、震央部における上限値として $12 M^2$ 、下限値として $6 M^2$ となることを示した。ここに、 M は地震のマグニチュードで、加速度の単位は cm/s^2 である。また、表・他¹⁴⁾も同様に墓石の転倒から、震央域における最大加速度を推定し、1948年福井地震($M 7.3$)で 510 cm/s^2 、1974年伊豆半島沖地震($M 6.9$)で 500 cm/s^2 、1962年宮城県北部地震($M 6.5$)で 450 cm/s^2 、1975年大分県中部地震($M 6.4$)で 420 cm/s^2 の値を得た。さらに、Hisada *et al.*¹⁰⁾は、岡本¹³⁾と表・他¹⁴⁾の研究を引用し、震央域における岩盤上での最大加速度とマグニチュードの平均的な関係として $9 M^2$ を提案した。

これらの研究では、震源近傍における強震記録がほとんど得られていないときに、墓石の転倒などから推定された最大加速度を主に用いている。したがって、地震計で観測される高周波数成分を含んだ最大加速度とは異なり、数ヘルツまでの成分のみを評価していると推測されるが、構造物の被害とは比較的よく対応すると考えられる。

一方、断層面に働く実効応力をステップ関数として、断層近傍の波動方程式を解いたBrune¹⁵⁾の結果によれば、断層の近傍における加速度や速度は、断層の大きさ(マグニチュードに対応する)によらず断層面に働く実効応力に比例する。具体的には実効応力を σ_e 、媒質の密度を ρ 、剪断剛性率を μ 、剪断波速度を β とし、対象とする地震動の時刻刻みを Δt とすると、加速度は $2\sigma_e/(\rho\beta\Delta t)$ となり、速度は $(\sigma_e/\mu)\beta$ となる。この実効応力が応力降下量(地震の前後における断層面上の応力差)に等しいとすると、かなりのバラツキはあるものの実効応力の最頻値はマグニチュードによらず一定値の50 bar程度

となる¹⁶⁾。そこで、Brune¹⁵⁾の示した例と同じように現実的な値として、 $\mu=3 \times 10^{11}$ dyne/cm²、 $\beta=3$ km/sとし、工学的な観点から対象とする地震動の周期の最小値を0.1秒とすると、加速度は1000 cm/s/sとなり、速度は50 cm/sとなる。ここに、 $\rho = \mu / \beta^2$ の関係式を用いた。

実際の地震では実効応力にはかなりのバラツキがあり、その値は地震によらず一定値とはいえない。また、これらの値は断層面のごく近傍におけるものなので、地形の影響や表層地盤の増幅あるいは減衰効果の影響なども考慮されていない。しかしながら、このような観点から、本論文では、地表での最大速度と最大加速度が、遠方場において v と a に一致し、震源近傍においてマグニチュードによらず一定値 w_{vel} (cm/s)と w_{acc} (cm/s/s)に収束するような v' と a' を考え、それぞれ下のようにおいてみる。

$$v' = w_{vel} / [1 + w_{vel} / v] \quad (11)$$

$$a' = w_{acc} / [1 + w_{acc} / a] \quad (12)$$

さらに、最大地表加速度が算定できれば、震度 I' は気象庁による現行の計測震度のもととなった河角式¹⁷⁾により、次のように求めることができる。

$$I' = 2 \log[a' / 0.45] \quad (13)$$

上記の式(11)～式(13)で未定パラメータは T_G 、 w_{vel} 、 w_{acc} の3つである。そこで、本論文では、Midorikawa⁴⁾を参考に $w_{vel}=100$ cm/s、福島・田中³⁾を参考に $w_{acc}=650$ cm/s/s、そして標準地盤ではほぼ $a/v=10$ であること¹⁸⁾を考慮して $T_G=0.63$ secとしてみる。したがって、最大加速度にしても最大速度にしても、本論文では周期が0.6秒前後の成分の地震動を対象にしていることになる。なお、式(1)の r は震源距離としていたが、式(11)～式(13)では、これを福島・田中³⁾と同じく断層破壊領域までの最短距離と読みかえることとする。

最大地表速度、最大地表加速度、および震度が、上記の式(11)～式(13)で表されるとき、それぞれの式をマグニチュードについて逆に解くと、下に示す式(11')～式(13')ようになる。ただし、 $f(r) = b_3 r + \ln r$ 、 $g_{vel}(T_G) = 5(T_G)^{0.5}$ 、 $g_{acc}(T_G) = 10\pi / (T_G)^{0.5}$ である。

$$M = \{f(r) - \ln [b_1 (1/v' + 1/w_{vel}) g_{vel}(T_G)]\} / b_2 \quad (11')$$

$$M = \{f(r) - \ln [b_1 (1/a' + 1/w_{acc}) g_{acc}(T_G)]\} / b_2 \quad (12')$$

$$M = \{f(r) - \ln [b_1 (10^{0.347 - I'/2} - 1/w_{acc}) g_{acc}(T_G)]\} / b_2 \quad (13')$$

したがって、地震危険度解析を、グーテンベルグ・リヒター式などをもとにして理論的に行う場合には、これらの式を用いて、震源距離 r に関する条件付確率を求めればよいことになる。

なお、最大地表加速度は、いまの場合、650 cm/s/sを越えることはないので、計測震度も6.32を越えることはない。したがって、本論文でのパラメータの設定では、気象庁震度階の7とはならない。本論文における最大地表加速度と、計測震度を算定する最大加速度とは直接には対応していないが、このことのひとつの解釈としては、震度は「平均的な」条件では、6(強)が上限で、7となるのは、震源や地形や地盤、あるいは気象官署建物の何か特別な条件のもとに観測されるものと推測される。

さて、本論文では震源近傍という言葉で震源に近い場所を表現しているが、そのような領域を岡本¹³⁾は震央部、表・他¹⁴⁾は震央域、そして後で述べる宇津²⁾は震源域と呼んでいる。このうち、震源域は宇津¹⁹⁾によれば、1回の地震、すなわち1回の断層運動によって地震波が放出された領域をさすが、これは地震学的に見た定義である。震源域の大きさを表す式はいくつかあるが、そのうちのひとつとして後述の式(29)の震源半径 R_s がある。一方、地震工学的には前述したような最大加速度あるいは最大速度が頭打ちとなる領域を震央部あるいは震央域と呼ぶことが多い。このような意味で震央域の大きさを表した式としては下に示す大崎²⁰⁾による震央域外縁距離 Δ_{NEAR} (km)が唯一のものであろう。

$$\Delta_{NEAR} = \begin{cases} 5 \times 2^{(M-6)} & (M \leq 7) \\ 10 \times 2.5^{(M-7)} & (M > 7) \end{cases} \quad (14)$$

この式は設計用の応答スペクトルを算定することを目的に、震央域もしくはその周辺で記録あるいは推定された最大加速度、および式(8)の余震体積半径の半分 D を参考に決められたものである。

このような観点で本論文で提案している最大地表速度や最大地表加速度あるいは震度の距離減衰式を見てみると、例えば、最大地表加速度 a' は、 r が小さいときには w_{acc} に、 r が大きときには a に漸近する。そこで、 w_{acc} と a が交わる距離を R_{cacc} と書くと、 $0 \leq r \leq R_{cacc}$ の領域では $a' = w_{acc}$ 、 $R_{cacc} \leq r$ の領域では $a' = a$ と近似できる。このとき R_{cacc} は M の関数として表されるが、陽には解けず次のようになる。

$$M = \{f(R_{cacc}) - \ln [b_1 g_{acc}(T_G) / w_{acc}]\} / b_2 \quad (15)$$

この R_{cacc} は、最大地表加速度 a' の距離減衰特性が、一定値の w_{acc} から a のもつ距離減衰特性へ変わる遷移点であり、一種の臨界距離と呼ぶことができる。具体的には、 M が6、7、8のとき、 R_{cacc} は3.25 km、12.6 km、43.6 kmとなる。次章では、既往の距離減衰式と本論文で提案した距離減衰式との比較を行うが、そのうちのいくつかについて、同様に臨界距離を求めてみる。

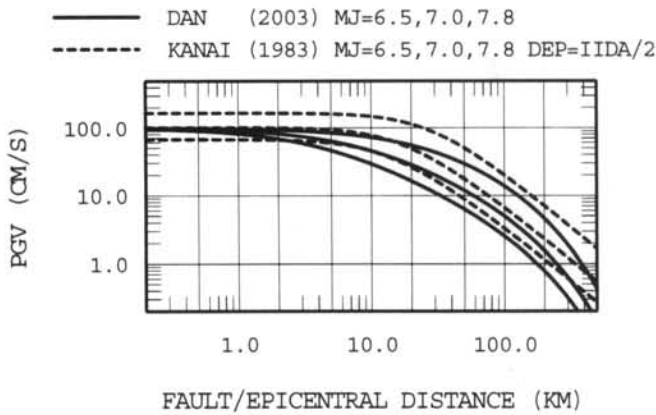


図-3 本論文での最大地表速度の距離減衰と金井式によるものとの比較
 実線は本論文の式(11)によるもので、点線は式(16)の金井式によるものである。マグニチュードは下から6.5、7.0、7.8である。

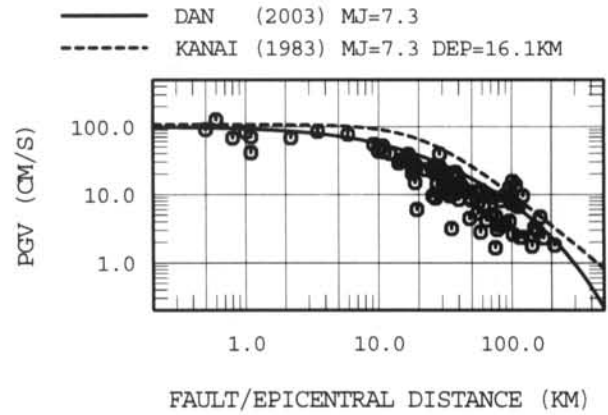


図-4 平成7年兵庫県南部地震の最大速度の距離減衰と本論文での式および金井式による最大地表速度との比較
 実線は本論文の式(11)によるもので、点線は式(16)の金井式によるものである。兵庫県南部地震のデータは Fukushima *et al.*¹⁸⁾による。

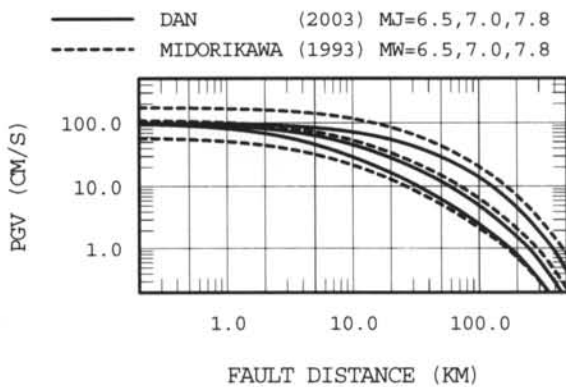


図-5 本論文での最大地表速度の距離減衰と翠川式によるものとの比較
 実線は本論文の式(11)によるもので、点線は式(17)の翠川式によるものである。マグニチュードは下から6.5、7.0、7.8である。

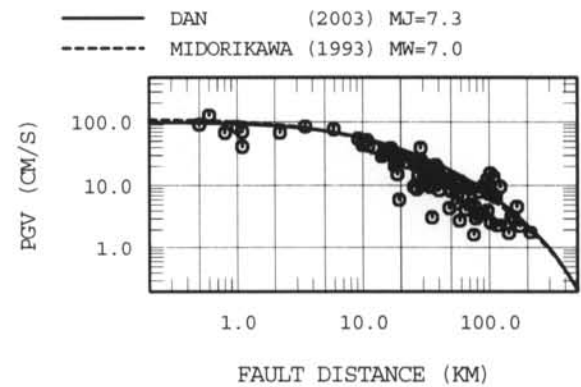


図-6 平成7年兵庫県南部地震の最大速度の距離減衰と本論文での式および翠川式による最大地表速度との比較
 実線は本論文の式(11)によるもので、点線は式(17)の翠川式によるものである。兵庫県南部地震のデータは Fukushima *et al.*¹⁸⁾による。

§ 5. 震源近傍における距離減衰式の比較

5.1 最大地表速度

最大地表速度に関する距離減衰式は数多いが、ここではKanai⁸⁾によるものとMidorikawa⁴⁾によるものとを、本論文の式(11)と比較してみる。

Kanai⁸⁾による最大地表速度は、式(10)の v_{0K} を用いて次のように表される。

$$v_K = 5 (T_G)^{0.5} v_{0K} \quad (16)$$

一方、Midorikawa⁴⁾による最大地表速度の距離減衰式は、下のよう表される。

$$\log v_M = -0.22M_w^2 + 3.94M_w - \log[r + 0.01 \times 10^{0.43M_w}] - 0.002r - 11.9 - 0.71 \log V_S \quad (17)$$

ここに、 v_M は水平2成分の速度波形のベクトル和の最大値で、データの範囲は0.4~32 cm/sであり、 M_w はモーメントマグニチュードで、データの範囲は6.5~7.8である。また、 r は断層破壊領域までの最短距離で10~200 km程度、 V_S (m/s)は敷地における深さ30 m以浅の表層地盤の平均剪断波速度で100~1500 m/sである。

震源近傍、すなわち $r=0$ km付近では、式(17)は

$$\log v_M = -0.22 M_w^2 + 3.51 M_w - 9.9$$

$$-0.71 \log V_S \quad (18)$$

に漸近する。上式によれば、例えば $V_S=400$ m/s のとき、 $M_w=6.5$ で 59.2 cm/s、 $M_w=7.0$ で 110 cm/s、 $M_w=7.8$ で 176 cm/s となる。したがって、これらの値は、式(17)を求めるために用いられたデータを外挿した領域にはいる。また、§4の式(15)で行ったのと同様の計算で、式(17)の臨界距離 R_{cM} (km) と M_w の関係を求めると次のようになる。

$$M_w = (\log R_{cM} + 0.002 R_{cM} + 2) / 0.43 \quad (19)$$

上式によれば、 M_w が 6.5、7.0、7.8 のとき、 R_{cM} はそれぞれ 6.07 km、9.79 km、20.6 km となる。

本節では、式(16)は式(10)の金井式をもとにしているの、同じく金井式と呼び、また式(17)を翠川式と呼ぶこととする。

図-3には、本論文の式(11)による最大地表速度と、式(16)の金井式による最大地表速度とを比較して示す。マグニチュードは翠川式との比較を念頭に、6.5、7.0、7.8とした。また、金井式では、震源深さを式(8)の D とし、 T_G を 0.63 秒とした。図より、最大基盤速度で見たときと同じく、 $r=50 \sim 100$ km では両者は近い値となっていることがわかる。一方、 r が小さくなると、本論文による値は一定値に収束するが、金井式による値はマグニチュードに依存しているために、特にマグニチュードが 7.8 のときに両者のレベルに隔たりが見られる。ただし、これは、金井式での震源深さを式(8)の D で与え、 T_G として 0.63 秒を設定した結果であり、これらのパラメータの設定値を変えれば、この傾向は変わるはずである。

図-4には、丸印で平成7年兵庫県南部地震 ($M_J 7.3$ 、震源深さ 16.1 km) の最大速度の距離減衰¹⁸⁾を示す。同図には、式(11)による値と金井式による値も示している。ただし、金井式では震源深さを 16.1 km とした。図-3では、2つの距離減衰式は相当異なっていたが、この図では、両式は近い値となっており、いずれの式も観測値をほぼ表現している。

一方、図-5には、本論文の式(11)による最大地表速度と、式(17)の翠川式による最大地表速度とを比較して示す。ただし、翠川式では、 V_S を 400 m/s とした。翠川式のもととなった最大地表速度のデータの範囲が 0.4 ~ 32 cm/s であることを考慮すると、両者はほぼ等しいものとなっていることがわかる。また、直接の比較は示していないが、図-3と図-5とから、翠川式による最大地表速度は、金井式によるものと近い値となっていることがわかる。

図-6には、図-4と同じく、丸印で平成7年兵庫県南部地震の最大速度の距離減衰を示す。同図に

は、式(11)による値と翠川式による値も示している。ただし、翠川式では M_w を 7.0 とした。図より、式(11)による最大地表速度と翠川式による最大地表速度とはほぼ完全に一致していること、およびいずれの式とも観測値をよく表現していることがわかる。

5.2 最大地表加速度

最大地表加速度に関する距離減衰式も数多いが、ここでは Kanai⁸⁾ によるものと福島・田中³⁾ によるもの、本論文の式(12)と比較してみる。

Kanai⁸⁾ による最大地表加速度は、式(16)の v_K あるいは式(10)の v_{OK} を用いて下のように表される。

$$a_K = (2\pi/T_G) v_K = 10\pi v_{OK} / (T_G)^{0.5} \quad (20)$$

一方、福島・田中³⁾ による最大地表加速度の距離減衰式のうち気象庁マグニチュードを用いたものは、下式である。

$$\log a_F = 0.51M - \log [r + 0.006 \times 10^{0.51M}] - 0.0033r + 0.59 \quad (21)$$

ここに、 r (km) は断層破壊領域までの最短距離で、 $r=0$ km のときマグニチュードによらず $a_F = 648.4$ cm/s とする。ただし、 a_F は水平2成分の最大加速度振幅を平均したもので、式(21)が有する偏差 (a_F に関する対数標準偏差) は 0.28 である。したがって、距離減衰式を求めるときに用いられた地震記録の最大加速度振幅そのものに上限値が存在しているのではなく、水平2成分の最大加速度振幅の平均値の最頻値に上限値が設定されていることになる。なお、福島・田中³⁾ の論文では震源域における値は約 650 cm/s と記載されている。また、距離減衰式を求めるときに用いられた M の範囲は 5.0 ~ 7.8、 r の範囲は 1 km 程度から数百 km である。

§4の式(15)で行ったのと同様の計算で、式(21)の臨界距離 R_{cF} (km) と M の関係を求めると次のようになる。

$$M = (\log R_{cF} + 0.0033 R_{cF} + \log 648.4 - 0.59) / 0.51 \quad (22)$$

上式によれば、 M が 6.0、7.0、7.8 のとき、 R_{cF} はそれぞれ 6.56 km、19.3 km、41.6 km となる。

本節では、式(20)は式(16)あるいは式(10)の金井式をもとにしているの、同じく金井式と呼び、また式(21)を福島・田中式と呼ぶこととする。

図-7には、本論文の式(12)による最大地表加速度と、式(20)の金井式による最大地表加速度とを比較して示す。マグニチュードは福島・田中式との比較を念頭に、6.0、7.0、7.8とした。また、金井式で

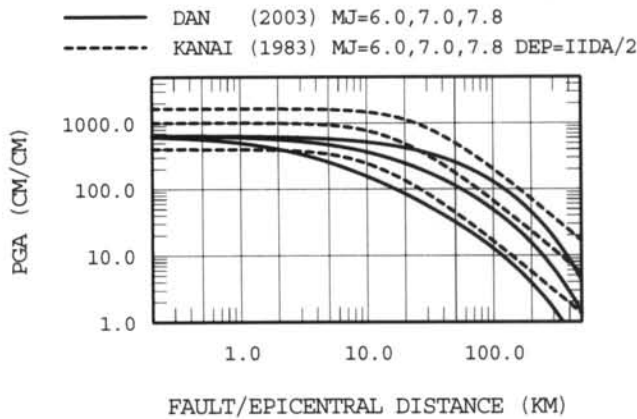


図-7 本論文での最大地表加速度の距離減衰と金井式によるものとの比較

実線は本論文の式(12)によるもので、点線は式(20)の金井式によるものである。マグニチュードは下から6.0、7.0、7.8である。

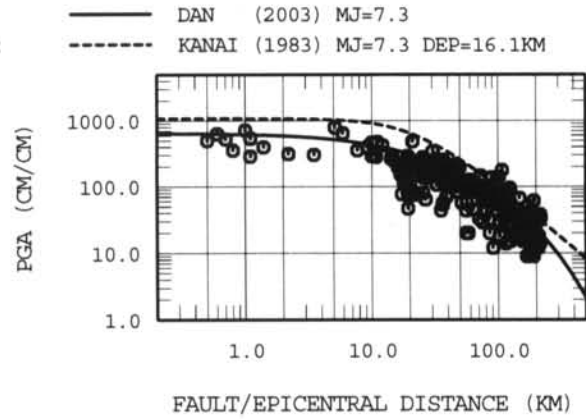


図-8 平成7年兵庫県南部地震の最大加速度の距離減衰と本論文での式および金井式による最大地表加速度との比較

実線は本論文の式(12)によるもので、点線は式(20)の金井式によるものである。兵庫県南部地震のデータは Fukushima *et al.*¹⁸⁾による。

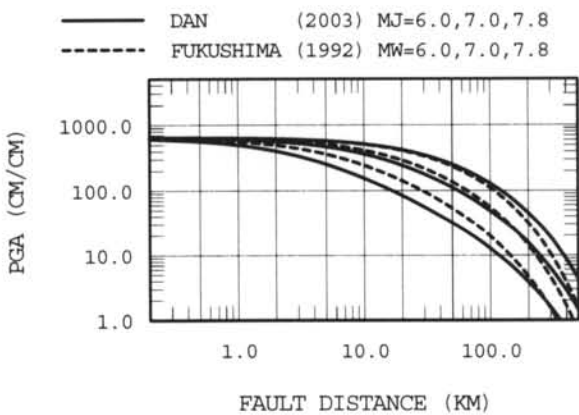


図-9 本論文での最大地表加速度の距離減衰と福島・田中式によるものとの比較

実線は本論文の式(12)によるもので、点線は式(21)の福島・田中式によるものである。マグニチュードは下から6.0、7.0、7.8である。

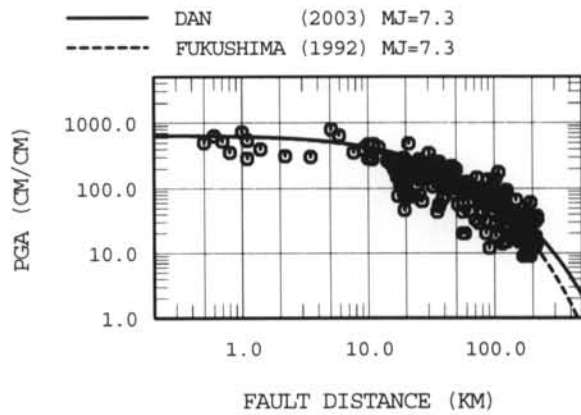


図-10 平成7年兵庫県南部地震の最大加速度の距離減衰と本論文での式および福島・田中式による最大地表加速度との比較

実線は本論文の式(12)によるもので、点線は式(21)の福島・田中式によるものである。兵庫県南部地震のデータは Fukushima *et al.*¹⁸⁾による。

は、震源深さを式(8)の D とし、 T_G を0.63秒とした。図より、最大地表速度で比較したときと同じく、 $r=50\sim 100$ kmでは両者は近い値となっていること、および r が小さくなると特にマグニチュードが7.8のときに両者のレベルの差が大きくなるのがわかる。

図-8には、丸印で平成7年兵庫県南部地震の最大加速度の距離減衰¹⁸⁾を示す。同図には、式(12)による値と金井式による値も示している。ただし、金井式では震源深さを14 kmとした。図より、式(12)によ

る最大地表加速度は記録の中央を、金井式による最大地表加速度は記録の上側を通っていることがわかる。

一方、図-9には、本論文の式(12)による最大地表加速度と、式(21)の福島・田中式による最大地表加速度とを比較して示す。図より、両者は同等の値となっていることがわかる。また、図-10には、図-8と同じく、丸印で平成7年兵庫県南部地震の最大加速度の距離減衰を示す。図より、式(12)による最大地表加速度と福島・田中式による最大地表加速度と

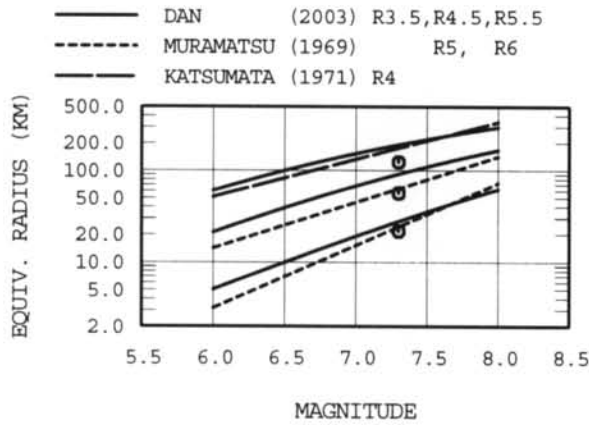


図-11 等震度曲線の囲む面積に等価な円の半径とマグニチュードとの関係

実線は本論文の式(13)によるもので、点線は式(25)と式(26)の村松式によるもの、破線は式(28)の勝又・徳永式によるものである。震度は上から4、5、6である。丸印は村松²³⁾による平成7年兵庫県南部地震のデータである。

はほぼ完全に一致していること、およびいずれの式とも観測値をよく表現していることがわかる。

5.3 震度

震度に関する距離減衰式は、最大速度や最大加速度の距離減衰式ほどには多くない。その中でよく知られているのが、等震度曲線の囲む面積に関する式である。

村松²¹⁾は、震度5以上となった地域の面積 S (km^2)と震度6以上となった面積 S_6 (km^2)を、マグニチュードの関数として、次のように表した。

$$\log S_5 = M - 3.2 \quad (23)$$

$$\log S_6 = 1.36 M - 6.66 \quad (24)$$

このうち S_6 は、余震面積および地震時の地殻変形面積とほぼ等しくなっていると述べている。本節では、村松²¹⁾と同じく、 S_5 および S_6 を面積が等しい円におきかえて、下に示す半径 R_5 および R_6 で震度に関する距離減衰式の一種とした。

$$\log R_5 = 0.5 M - 1.849 \quad (25)$$

$$\log R_6 = 0.68 M - 3.579 \quad (26)$$

本節では、上の2つの式を村松式と呼ぶこととする。

勝又・徳永²²⁾は同様に、震度4以上となった地域の面積 S_4 (km^2)に関して、

$$\log S_4 = 0.82 M - 1.0 \quad (27)$$

を得ている。これも、面積が等しい円におきかえると次のようになる。

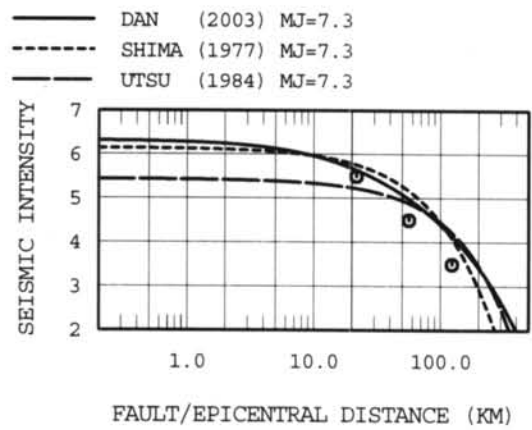


図-12 平成7年兵庫県南部地震の震度の距離減衰と本論文での式と嶋式および宇津式による震度との比較

実線は本論文の式(13)によるもので、点線は式(31)と式(32)の嶋式によるもの、破線は式(33)の宇津式によるものである。丸印は村松²³⁾による平成7年兵庫県南部地震のデータである。

$$\log R_4 = 0.41 M - 0.7486 \quad (28)$$

本節では、上の式を勝又・徳永式と呼ぶこととする。

本論文の式(13)の震度 I の距離減衰式をこれらと同じ表現をするには、震度6に対しては I が5.5、震度5に対しては4.5、震度4に対しては3.5になるような r と M の関係を求めればよい。

一方、村松²³⁾の平成7年兵庫県南部地震に関する報告をもとに計算すると、この地震の震度分布から R_6 として21.8 km、 R_5 として56.4 km、 R_4 として123.4 kmとなる。ここに、村松²³⁾では震度分布の面積から推定されたマグニチュードが記載されているので、面積および等価円の半径を逆算した。

以上述べた等震度曲線の囲む面積に等価な円の半径とマグニチュードとの関係、および兵庫県南部地震の震度分布のデータを比較したものが、図-11である。図より、本論文の式(13)による等震度曲線の囲む面積に等価な円の半径とマグニチュードとの関係は、村松式や勝又・徳永式とほぼ同じになっていること、およびいずれの式とも兵庫県南部地震の震度分布のデータをほぼ説明できていることがわかる。

震度に関する距離減衰式を求めた研究は、Kawasumi¹⁷⁾によるものが有名であり、古い地震資料からマグニチュードを決めたり、日本各地の地震危険度を推定するのに用いられた。嶋¹⁾は、Kawasumi¹⁷⁾の式が震源近傍には適用できないことより、震

中央距離 Δ (km) を震源半径 R_s (km) すなわち、

$$\log R_s = 0.51 M - 2.27 \quad (29)$$

で割って、

$$R = \Delta / R_s \quad (30)$$

とした新しい変数で、震度に関する距離減衰のデータを整理した。その結果、海に起こる巨大地震に対しては、

$$I_{Ssea} = 6.74 - 0.723 R + 0.009 R^2 \quad (7.9 \leq M \leq 8.3) \quad (31)$$

を得た。また、内陸に起こる地震に対しては、

$$I_{Sland} = 6.14 - 0.503 R + 0.007 R^2 \quad (6.4 \leq M \leq 7.5) \quad (32)$$

を得た。ここに、いずれの式も震度の適用範囲は、3以上であり、遠方場ではKawasumi¹⁷⁾の式と同等となる。本節では、これらの2つの式を嶋式と呼ぶこととする。嶋式では震央距離 Δ を0とすると、海に起こる巨大地震の場合、マグニチュードによらず6.74となり、内陸に起こる地震の場合、こちらもマグニチュードによらず6.14となる。これらの値は、本論文の式(13)において断層最短距離 r を0とすると、マグニチュードによらず6.32となることとよい対応を示している。

宇津²⁾は、東日本太平洋沿岸沖合を除く浅発地震181個のデータをもとに、震源近傍まで適用できるような、下式で示される震度の距離減衰式を提案した。

$$I = I_{100} - b(\Delta - 100) \quad (33)$$

$$I_{100} = 1.5 M - 6.5$$

$$b = 0.0767 - 0.015 M + 0.0008 M^2$$

ここに、 Δ (km) は震央距離であるが、マグニチュードが約7.5以上の特に大きい地震については震源域の中心からの距離をとっている。また、距離減衰式を求めるために用いたマグニチュードの範囲は5.0~8.0である。本節では、式(33)を宇津式と呼ぶこととする。

宇津式は、震央距離 Δ を0とすると、

$$I = 0.08 M^2 + 1.17 \quad (34)$$

となり、例えば、マグニチュードが7のとき震度は5.09、マグニチュードが8のとき震度は6.29となる。したがって、震源域における震度はマグニチュードの関数であるが、その値は、距離減衰式を求めるために用いられたマグニチュードの範囲、すなわち $M=5.0 \sim 8.0$ では気象庁震度階で7となることはない。

なお、嶋¹⁾および宇津²⁾が震度の距離減衰式を求

めた時点では、気象庁震度階で7となる地震は一度も観測されていなかったもので、嶋式および宇津式で震度が6.5以上となるマグニチュードと震央距離の組合せの領域は、外挿領域である。

図-12には、マグニチュードを7.3としたときの、本論文の式(13)による震度と嶋式および宇津式による震度の距離減衰を示す。図より、宇津式で r が小さい領域を除いては、3つの式は近い値となっていることがわかる。図には先に述べた村松²³⁾による兵庫県南部地震のデータも示しているが、これについては3つの式ともおおむねよい対応を示している。

§ 6. まとめ

本論文では、地震危険度解析を地震の発生モデルを設定して理論的に行うために、震源近傍に適用でき、かつマグニチュードについて解けている地震動強さの距離減衰式を提案した。提案した距離減衰式を用いることにより、地震動強さの年最大値の確率分布を理論的に求めることができ、地震危険度解析の結果の要因分析が容易になる。

本論文の内容および課題をまとめると、以下のようになる。

- 1) Kanai⁸⁾の式展開を参考に、地震基盤における最大速度を、マグニチュードと震源距離の関数として表現した。このとき、遠方場における最大変位が、気象庁マグニチュードを決めるために用いられている坪井式⁹⁾に一致するようにした。同様に、地表における最大速度および最大加速度を、地震基盤における最大速度と表層地盤の卓越周期の関数として表現した。
- 2) 次に、地表における最大速度および最大加速度が、震源近傍ではマグニチュードによらず一定値に収束するように距離減衰式の形状を変更した。震度に関しては、気象庁の現行の計測震度のもととなった河角式¹⁷⁾により、最大地表加速度から求めることとした。
- 3) このようにして求めた最大地表速度、最大地表加速度、および震度の距離減衰式を、これまでに提案されているいくつかの式と比較した結果、ほぼ同等の値となることが示された。ただし、表層地盤の卓越周期を0.63秒と設定したために、この周期付近の成分の地震動を対象とした距離減衰式となっている。また、提案した距離減衰式による値を平成7年兵庫県南部地震の

データと比較した結果、よい対応が見られた。

- 4) 本論文では、距離減衰式が震源近傍の地震動にも適用でき、かつマグニチュードに関して解けるようにするために、震源近傍でマグニチュードによらず地震動強さが一定値に収束するという強い拘束条件をつけた。この仮説については、いくつかの傍証を示したが、そのような一定値が存在するかどうか、存在するとしたらどのような値になるかについて、今後、観測記録の蓄積と分析および理論地震動による検証が必要である。
- 5) また、一般的にいえることであるが、地震動強さの距離減衰式は、その式を算定したときのデータの平均的な値を表しているのであるか

ら、特定の敷地においては、敷地付近の地形や地盤あるいは周辺で発生する地震に固有な諸特性を考慮した距離減衰式を用いる必要がある。この場合には、距離減衰式のマグニチュード係数や距離減衰係数のみならず、上述の震源近傍における地震動強さに関しても再考しなければならない。

謝辞

本論文で用いた平成7年兵庫県南部地震の最大速度と最大加速度のデータはFukushima *et al.*¹⁸⁾より引用しました。貴重な観測値を公表していただいた各機関に記して謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 嶋悦三: “地震時における地盤の振動.” 計測と制御, 第16巻, 第9号, pp. 685-693, 1977.
- 2) 宇津徳治: “震度-震央距離-マグニチュードの関係.” 地震研究所彙報, 第59号, 第2冊, pp. 219-233, 1984.
- 3) 福島美光, 田中貞二: “新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂.” 地震学会講演予稿集, 秋季大会, p. 116, 1992.
- 4) Saburoh Midorikawa: “Preliminary analysis for attenuation of peak ground velocity on stiff site,” Proceedings of the International Workshop on Strong Motion Data, 2, pp. 39-48, 1993.
- 5) B. Gutenberg and C. F. Richter: “Frequency of earthquakes in California,” Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 34, No. 4, pp. 185-188, 1944.
- 6) C. Allin Cornell: “Engineering seismic risk analysis,” Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 58, No. 5, pp. 1583-1606, 1968.
- 7) 壇一男, 神田順: “地震危険度解析で用いられる上下限值を有する極値分布の理論的背景,” 日本建築学会構造系論文集, 第506号, pp. 57-65, 1998.
- 8) Kiyoshi Kanai: “Engineering Seismology,” University of Tokyo Press, 1983.
- 9) 坪井忠二: “地震動の最大振幅から地震の規模 M を定めることについて,” 地震, 第2輯, 第7巻, 第3号, pp. 185-193, 1954.
- 10) T. Hisada, Y. Ohsaki, M. Watabe, and T. Ohta: “Design spectra for stiff structures on rock,” Proceedings of the 2nd International Conference on Microzonation, Vol. III, pp. 1187-1198, 1978.
- 11) Kumizi Iida: “Earthquake magnitude, earthquake fault, and source dimensions,” Journal of Earth Sciences, Nagoya University, Vol. 13, No. 2, pp. 115-132, 1965.
- 12) 田中貞二: “「金井式」に関する調査,” ORI 研究報告 85-02, 1985.
- 13) 岡本舜三 著: “耐震工学,” オーム社, 1971.
- 14) 表俊一郎, 三宅昭春, 檜橋秀衛: “震央域における地震動最大加速度,” 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 549-550, 1978.
- 15) James N. Brune: “Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes,” Journal of Geophysical Research, Vol. 75, No. 26, pp. 4997-5009, 1970.
- 16) 佐藤良輔 編著: “日本の地震断層パラメーター・ハンドブック,” 鹿島出版会, 1989.
- 17) Hiroshi Kawasumi: “Measures of earthquake danger and expectancy of maximum intensity throughout Japan as inferred from the seismic activity in historical times,” Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 29, pp. 469-482, 1951.
- 18) Y. Fukushima, T. Watanabe, T. Uetake, and H. Matsumoto: “Attenuation characteristics of observed peak amplitude from 1995 Hyogo-ken Nanbu event,” Transactions of the 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol. 7, 83-90, 1997.
- 19) 宇津徳治 総編集: “地震の事典,” 朝倉書店, 1987.
- 20) 大崎順彦: “原子力発電所設計用の基準地震動評価に関するガイドライン,” ORI 研究報告 84-01, 1984.
- 21) 村松郁栄: “震度分布と地震のマグニチュードとの関係,” 岐阜大学教育学部研究報告, 自然科学, 第4巻, 第3号, pp. 168-176, 1969.
- 22) 勝又護・徳永規一: “地震の規模と震度 IV 以上の範囲および震度と加速度,” 気象庁技術報告, 第76号, pp. 39-41, 1971.
- 23) 村松郁栄: “震度について,” 地震工学振興会ニュース, No. 145, pp. 57-63, 1995.