

SIGNAL データの統計解析に基づく 最大加速度の空間的確率分布

茂木秀則¹・川上英二²

¹正会員 博(工) 埼玉大学助手 工学部建設工学科(〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保 255)

²正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科(〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保 255)

最大加速度は確率変数と考えられるため、信頼性解析などの工学的な利用に際してその確率分布、特に散布度について検討が必要である。本論文では、千葉、台湾 SMART-1 のアレー観測記録を用いて最大加速度比の確率分布を検討した著者らの従来の研究を発展させ、より広範囲の検討が可能な SIGNAL のデータベースを用いて最大加速度比の統計解析を行った。まず、本データベースの 54 地震の観測記録を用いて、最大加速度比の平均値、標準偏差などを求め、二点間で生じる最大加速度の差違について論じた。また、アレー観測記録と SIGNAL による最大加速度比の平均値、標準偏差を比較し、両者で二点間距離が著しく異なるにも拘わらず、連続した関係が得られることを示した。

Key Words : SIGNAL database, peak ground acceleration, measure of dispersion, probability density, lognormal distribution

1. はじめに

地震被害の検討や耐震設計を行う際には、最大加速度や SI 値などの地震動の強度指標が広く用いられている。中でも最大加速度は観測波形に直接関連した指標であり、震度法に基づいた耐震設計では地震外力として直接扱われることや、距離減衰式をはじめとする研究の蓄積が多いことなどの理由からよく用いられている。

一方、地震動は空間的に一様ではない。たとえば、距離減衰式によって推定される最大加速度などの地震動の強度指標は平均的な値であり、各々の観測点ではばらついた値が観測される。このことは信頼性解析において特に重要な要素となる。すなわち、信頼性解析では構造物の地震耐力と地震外力の確率密度関数を用いて、耐力と外力の大小関係に基づいて構造物の破壊確率が評価されるが、この場合、平均値や中央値などの代表値だけでなく、標準偏差や変動係数などの散布度が構造物の破壊確率に著しい影響を与える^{1), 2)}。特に、地震動の強度指標として最大加速度を用いる場合、他の指標を用いる場合と比べてその散布度が大きいために、信頼性解析手法の重要性が増すものと考えられる。

最大加速度の散布度は、従来は最大加速度の距離減衰式の推定誤差として評価されてきた。しかし、距離減衰式の推定誤差は地震ごとに各々の観測点で得られる最大加速度の散布度ではなく、マグニチュードや震央距離などを用いて得られる推定値からの散布度であり、同一地震における最大加速度のばらつきとの関係は明

らかでない。例えば、マグニチュードが同一の地震であれば、従来の距離減衰式では同じ集合として扱っているが、地震によって地域全体で最大加速度が大きい地震もあれば、小さい地震もある。また、震央距離が同じであれば、震源を挟んで向かい合う二地点であっても、或いは、震源からの方位がほぼ等しいと見なされるようなごく近接した二地点であっても、同じ集合として散布度が検討されている。しかし、二地点間の距離によってその最大加速度の差違(散布度)は大きく異なると考えられる。

以上の理由から著者らは、各観測点において、同一の地震に対して生じる最大加速度の差違に着目し、東京大学生産技術研究所千葉アレーと台湾・羅東の SMART-1 アレーの二つの高密度アレー観測記録を用いて、同一の地震に対してアレー各点で観測された最大加速度の比(最大加速度比)を求め、比を求める二点間の距離(二点間距離)をパラメータとしてその確率分布について検討を行った³⁾。なお、最大加速度比を用いる本手法の特徴は同一地震によって生じた最大加速度の違いから直接その散布度を検討することができる点であり、結果として得られる散布度は、距離減衰式の推定誤差としての散布度とは意味が異なるものである。

上記の検討の結果から著者らは、二点間距離が 40m 以下の極めて近い二点においても最大加速度比の平均値が 0.9 程度、二点間距離が 4km 程度の場合には 0.7 程度の値を示すこと、さらに、二点間距離の増加に対して最大加速度比の平均値が単調に減少することなど

を指摘した³⁾。しかし、上記の研究では比を求める二点間の距離が数 km までの範囲に限定されており、より離れた二点間に生じる最大加速度の差違については十分に検討されていない。

ところで、二点間の距離が大きい場合には、地盤条件や震源の放射特性などの様々な要因が地震動の差違(散布度)に影響を与えることも考えられる。このため、地盤条件などの違いによる影響も考慮して、最大加速度の散布度を検討することも可能である。しかし、最大加速度では短周期成分が支配的であるため、最大加速度と地盤条件との関係は必ずしも明確とは言えない。例えば、Fukushima等は最大加速度が軟弱地盤において平均的な地盤よりも大きい値を示すことを報告している⁴⁾が、一方で、Trifunac等は地盤の違いによる差が明らかでないことを示している⁵⁾。また、あえてこれらの要因による影響を取り除こうとする場合には、何らかのモデル化が必要であるが、研究者により定式化は異なっており、解析上のモデル化によるばらつきが新たに混入することを避けられない。いたずらに解析を複雑にすることは解析結果の意味を不明確にする可能性があるものと考えられる。このため、まず本論文では地盤条件などの諸要因についてはあえて考慮せずに検討を行い、これらの影響も含めた散布度を評価しておくことも重要と考えた。

このような立場から、地盤条件が比較的均一な高密度アレーによる観測記録を用いた前報³⁾における検討に加えて、より広範囲の領域、そのため若干の地盤条件の変化が見られるような領域における最大加速度比の確率分布について検討を行うこととした。そこで本研究では、東京ガス株式会社による地震時導管網警報システム「SIGNAL」⁶⁾⁻⁸⁾の観測記録を用いて解析を行った。なお、本論文は構造物の信頼性解析への活用結果までも示すことを目的とするものではない。本論文では最大加速度の空間的確率分布を、信頼性解析において重要なパラメータとなる散布度に注目し、これを観測結果に基づき定量的に示すものである。

SIGNALの観測地点は関東平野南部に位置しており、地盤条件が場所によって全く異なるような極度の不整形地盤ではなく、逆に全く均質と言えるような地盤でもない、現実的な地盤に設置されている。このような地盤で得られた観測記録を用いて最大加速度比を求め、二点間距離をパラメータとして最大加速度比の平均値や標準偏差、%位値などの特性値を算定した。そして、得られた特性値に基づいて、より離れた二点で生じ得る最大加速度の差違について論じた。また、千葉アレーとSMART-1アレーの高密度アレー観測記録とSIGNALの統計解析によって得られた最大加速度比の平均値と標準偏差を二点間距離の対数値をパラメータに用いて

比較した。その結果、これら三者で二点間距離が分布する範囲が大きく異なるにも拘わらず、ほぼ一連の、直線的な関係が得られることを示した。

2. 解析手法³⁾

本節では、記号の定義と最大加速度の統計的なモデル化を明らかにすることを目的に、文献(3)に示した定式化の要点を示す。なお式(3)~(11)では、文献(3)よりも簡便な別解法を示している。

(1) 最大加速度比

本研究では、二地点間で観測される最大加速度の違いを示す値として、同一地震に対する任意の二観測点における最大加速度比³⁾を考え、比を求める二点間の距離をパラメータとして統計解析を行った。

最大加速度比 R は最大加速度の大きい方を常に分母とするものと定義し、 $0 < R \leq 1$ の範囲の値をとるものとした。この定義から、最大加速度比が1の近くに分布する場合には最大加速度の散布度が低く、最大加速度比が小さい範囲まで分布が及ぶ程最大加速度の散布度が高いことを表している。

なお、本論文中では必要に応じて正規分布と対数正規分布の両方を用いており、平均値と中央値(50%位値)などの定義の異なる類似の特性値を用いる。このため特にこれらを区別する必要がない場合には、何らかの意味で分布の中心である値を代表値、分布の散らばりの度合いを表す値を散布度と呼ぶ。

(2) 最大加速度と最大加速度比の確率密度

a) 最大加速度の確率密度関数

同一地震に対する二点の最大加速度 X_1, X_2 が二次元対数正規分布に従うものとする。このとき、 X_1, X_2 の対数 Z_1, Z_2 の結合確率密度関数は次式で表される⁹⁾。

$$f_{Z_1, Z_2}(z_1, z_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_z^2\sqrt{1-\rho^2}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_z^2(1-\rho^2)} \left\{ (z_1 - \mu_Z)^2 - 2\rho(z_1 - \mu_Z)(z_2 - \mu_Z) + (z_2 - \mu_Z)^2 \right\} \right] \quad (1)$$

ここで、 ρ は Z_1, Z_2 の相関係数である。また、本研究では比を求める二点の震央距離の違いによる影響を取り除くため、震央距離に基づいてデータを二つに層別化し、震央距離の差が1km未満の組合せについて最大加速度比の確率分布を検討した。このため式(1)では、二点における平均値 μ_{Z_1}, μ_{Z_2} と標準偏差 $\sigma_{Z_1}, \sigma_{Z_2}$ がそれぞれ等しく μ_Z, σ_Z であることを想定している。

$$\mu_Z = \mu_{Z_1} = \mu_{Z_2}, \quad \sigma_Z = \sigma_{Z_1} = \sigma_{Z_2} \quad (2)$$

b) 最大加速度比の確率密度関数

二点における最大加速度の比の対数値が各点における最大加速度の対数値の差であることから、式(1)を用いて $Z_1 - Z_2$ の確率密度関数を求める。

恒等式

$$(z_1 - \mu_Z)^2 - 2\rho(z_1 - \mu_Z)(z_2 - \mu_Z) + (z_2 - \mu_Z)^2 = \left(\frac{1+\rho}{2}\right)(z_1 - z_2)^2 + \left(\frac{1-\rho}{2}\right)(z_1 + z_2 - 2\mu_Z)^2 \quad (3)$$

を用いると式(1)は次のように表すことができる。

$$f_{Z_1, Z_2}(z_1, z_2) = 2 \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Z}\sqrt{2(1-\rho)}} \exp\left\{-\frac{(z_1 - z_2)^2}{2\sigma_Z^2 2(1-\rho)}\right\} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Z}\sqrt{2(1+\rho)}} \exp\left\{-\frac{(z_1 + z_2 - 2\mu_Z)^2}{2\sigma_Z^2 2(1+\rho)}\right\} \quad (4)$$

ここで、 Z_1, Z_2 の差と和

$$P' = Z_1 - Z_2 \\ Q = Z_1 + Z_2 \quad (5)$$

を考え、確率変数の変換を行う。ここで、 P' は Z_1, Z_2 の大小関係を考慮しない場合の差を表しており、式(13)で表される、大小関係を考慮する場合の差 P と区別するために'を付けている。

式(5)のヤコビアン $|J|$ が、

$$|J| = \begin{vmatrix} \frac{\partial z_1}{\partial p'} & \frac{\partial z_1}{\partial q} \\ \frac{\partial z_2}{\partial p'} & \frac{\partial z_2}{\partial q} \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \quad (6)$$

で与えられることから、式(4)は次式のように表される。

$$f_{Z_1, Z_2}(z_1, z_2) dz_1 dz_2 = f_{P'}(p') f_Q(q) dp' dq \quad (7)$$

ここで、 $f_{P'}(\cdot), f_Q(\cdot)$ はそれぞれ、 Z_1, Z_2 の差 P' と和 Q の確率密度関数であり、 P', Q の標準偏差 $\sigma_{P'}, \sigma_Q$ を用いて次式で表される。

$$f_{P'}(p') = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{P'}}} \exp\left\{-\frac{p'^2}{2\sigma_{P'}^2}\right\} \quad (8)$$

$$\sigma_{P'} = \sigma_Z \sqrt{2(1-\rho)} \quad (9)$$

$$f_Q(q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Q}} \exp\left\{-\frac{(q-2\mu_Z)^2}{2\sigma_Q^2}\right\} \quad (10)$$

$$\sigma_Q = \sigma_Z \sqrt{2(1+\rho)} \quad (11)$$

式(7)に示されるように、二点における最大加速度の対数値の差と和は最大加速度の対数値の相関の有無に拘わらず、互いに独立な正規分布に従う。また、和の分布の平均値が $2\mu_Z$ であるのに対して、差の分布では平均値が 0 となるため、同一地震ごとに最大加速度の比を求める限り、地震ごとに異なる平均値について考慮する必要がないという利点がある。式(9)に示されるように、最大加速度比の対数の分散 $\sigma_{P'}^2$ は相関係数 ρ の増加に対して線形的に減少する関係にある。

本論文での最大加速度比 R は次式のように二点の観測値の大きい方の値を常に分母とする。

$$R = \begin{cases} X_1/X_2 & (X_1 < X_2) \\ X_2/X_1 & (X_1 \geq X_2) \end{cases} \quad (12)$$

このため、その対数 $P = \ln R$ は

$$P = \ln R = -|\ln X_1 - \ln X_2| = -|P'| \quad (13)$$

で表される。前述したように、 P' は二点の最大加速度の大小関係を考慮しない場合、 P は考慮する場合の確率変数である。

式(8)で表されるように、差 P' の確率密度関数は $p' = 0$ の軸に関して対称であるから、 P の確率密度関数は $f_{P'}(p')$ の $p' \leq 0$ の範囲を 2 倍し、他を 0 とおくことで求められる。さらに変数変換 $P = \ln R$ を施すことで、最大加速度比 R の確率密度関数が次式のように求められる。

$$f_R(r) = \frac{2}{\sqrt{2\pi\sigma_{P'}}} \exp\left(-\frac{\ln^2 r}{2\sigma_{P'}^2}\right), \quad 0 < r \leq 1 \quad (14)$$

前述のように式(14)は元になる正規分布の $p' \leq 0$ の半区間から導かれる確率密度関数である。このため、本研究では確率密度関数が式(14)で与えられる確率分布を半区間対数正規分布と呼ぶ。

(3) 最大加速度比の特性値

a) 最大加速度比の平均値 μ_R と標準偏差 $\sigma_{P'}$ の関係
最大加速度比の平均値 μ_R は式(14)を用いて次式のように求められる。

$$\mu_R = \exp\left(\frac{\sigma_{P'}^2}{2}\right) \left\{1 - \text{Erf}\left(\frac{\sigma_{P'}}{\sqrt{2}}\right)\right\} \quad (15)$$

ここで、 $\text{Erf}(\cdot)$ は次式の誤差関数である。

$$\text{Erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-t^2) dt \quad (16)$$

最大加速度比の平均値 μ_R と標準偏差 $\sigma_{P'}$ は式(15)によって互いに関連付けられており、最大加速度比の平均値も最大加速度の散布度を表す特性値の一つである。

b) 最大加速度比の%位値

最大加速度比 R が

$$1 \geq R \geq r_\gamma > 0 \quad (17)$$

の範囲にある確率が $\gamma\%$ であるときの最大加速度比の値 r_γ を $\gamma\%$ 位値とする。この条件は式(14)から次のように表される。

$$\frac{\gamma}{100} = \int_{r_\gamma}^1 \frac{2}{\sqrt{2\pi\sigma_{P'}}} \exp\left(-\frac{\ln^2 r}{2\sigma_{P'}^2}\right) dr \\ = \int_{-\tau_\gamma}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{P'}}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_{P'}^2}\right) dt \quad (18)$$

ここで、

$$\ln r = -t, \quad \ln r_\gamma = -\tau_\gamma \quad (19)$$

である。

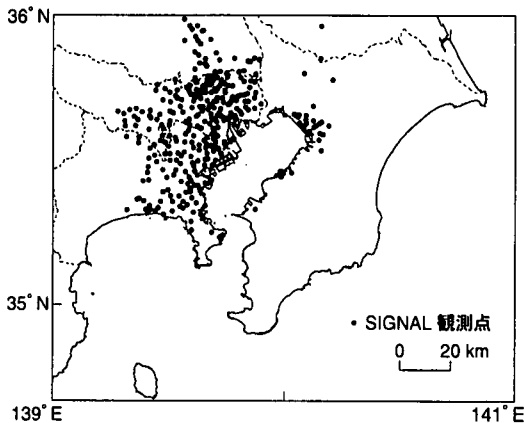


図-1 SIGNAL システムの観測点の分布⁷⁾

求める確率 γ を式(18)に与え、正規分布表を用いて標準正規分布 ($\sigma_P=1$) に対する τ_γ/σ_P を求めれば、式(19)より、次式で%位値を求めることができる。

$$\tau_\gamma = \exp(-\tau_\gamma) \quad (20)$$

3. 地震時導管網警報システム「SIGNAL」

(1) システムの概要

本研究では最大加速度の広範囲にわたる分布を調べるために、東京ガス株式会社による地震時導管網警報システム「SIGNAL」⁶⁾⁻⁸⁾によるデータを用いた。本システムは、地震被害を地震発生と同時に高精度に推定することを目的に開発されたもので、供給地域内の31点の地震計と低圧ブロック毎に3点(計300点)の地震動モニタリング用SIセンサー(SI値と最大加速度の測定)と無線通信システム、解析用システムから構成されている。図-1は観測点の分布を示したもので、東京都東部、神奈川県東部を中心に広範囲かつ高密度に設置されている。

(2) 記録の概要

1994年5月27日以降に観測されたSI値と最大加速度のデータベースが同社のWWWシステムによって公開されている⁷⁾。本研究では、本データベースに含まれる1994年5月27日23:53(M4.0)から1998年7月15日7:15(M4.6)までの54地震による最大加速度記録を用いて最大加速度比の統計解析を行った。

データベースに含まれる最大加速度は水平二成分のベクトル和の最大値である。また、データベースは cm/s^2 単位の0以上の整数値で記録されており、センサーの異常などで信頼できない値と判断された場合には-1が与えられている⁷⁾。解析に用いた地震の震央を図-2

に示す。図に示されるように、記録地震の多くは関東近辺の $M=4\sim 5$ の規模の地震である。

4. 最大加速度比の分布

(1) 最大加速度比の分布

図-3は横軸に二点間距離を用いて、SIGNALデータにおける最大加速度比 R の分布を示したものである。データベースには最大加速度が0以上の整数値で与えられているが、本研究では比を用いて検討を行うため、 1cm/s^2 以上の記録を用いて最大加速度比を求めた。また、図-3では、0.5、0.33のような一定の値に集中しているデータが見受けられるが、これはSIGNALのデータが整数値で与えられていることに関連して、観測値が小さい場合にその比が $1/2, 2/4, \dots, 1/3, 2/6, \dots$ のような値になる確率が高くなるためである。

図-1、図-2に示すように、最大加速度比の解析が可能な二点間距離が数km～数十kmの範囲にあるのに対して、震央距離も数十km程度のものが大半を占める。一般に平均的な地震動強度は震央距離に強く支配されることから、比を求める二点の震央距離の違いが最大加速度比に対して与える影響は後述するように少なくない。図-3は、この震央距離の差に伴う平均的な地震動強度の違いの影響を取り除くために、まず各観測点の震央距離を求め、可能な二点の組合せのうち、震央距離の差が1km未満の二点の組合せに対してのみ最大加速度比を求めたものである。

図-3を見ると、最大加速度比が1から0に近い値までの広い範囲に分布しており、最大加速度が著しくばらついた値として観測されることがわかる。また、二点間距離ごとに最大加速度比のデータ数が異なることから、二点間距離の変化に対する最大加速度比の分布の変化を図-3から正確に読みとることは困難と思われるが、二点間距離が小さい場合には、最大加速度比は0.3～0.4以上の範囲に多く分布し、二点間距離が増加するにつれて、最大加速度比がより小さい値を示す確率が増加していることが窺える。

最大加速度比の最小値について着目すると、二点間距離によらずに0.1以下の値も生じている。このことは、震央距離がほぼ等しい二点において、二点間距離が数km以内の場合であっても二点の最大加速度は10倍以上異なることさえあり得るということである。このような地震外力のばらつきの一部は地盤条件の差違によって説明が可能であるものと考えられる。しかし、前報³⁾で示したように地盤条件の比較的均一な高密度アレーにおいても最大加速度のばらつきは大きく、確率的に扱わざるを得ない。このことから、最大加速度の散布度を考慮した地震被害の検討や信頼性解析など

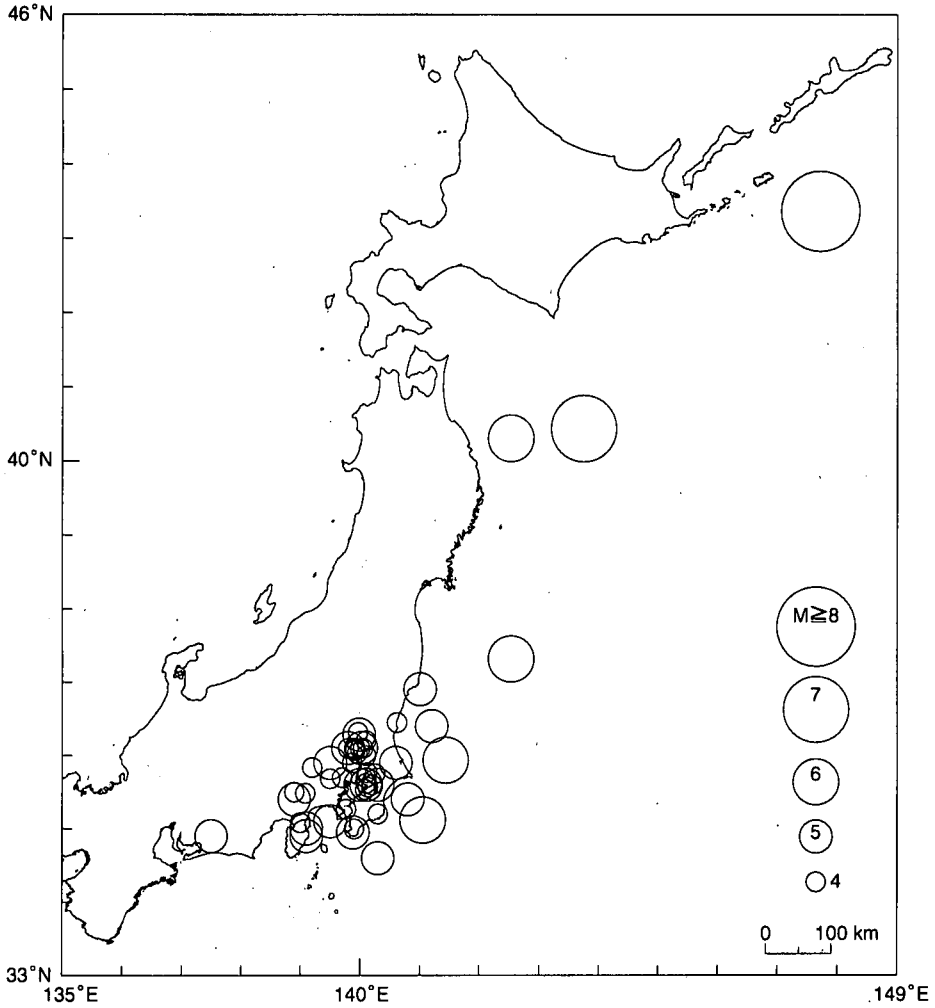


図-2 記録地震の震央分布

の耐震設計の重要性が理解できる。ただし、図-3では二点間距離が小さい場合と大きい場合のデータ数が著しく異なっており、後述の確率密度関数や平均値、%位値に基づいた検討が必要である。

(2) 二点間距離をパラメータとした最大加速度比の平均値と標準偏差

最大加速度比の分布に対する二点間距離の影響を定量的に評価するために、表-1に示すように二点間距離を0kmから10kmごとにA~Hの8グループに分け、各グループ内の最大加速度比の平均値 μ_R と標準偏差 σ_{p_i} を求めた結果が図-4である。図中の●が図-3に示した、震央距離の差が1km未満の二点の組合せによる最大加速度比に対するものである。また、表-2はこの組合せによる最大加速度比の平均値 μ_R と、式(9)で与えられる(対数)標準偏差 σ_{p_i} と最大加速度比 R そ

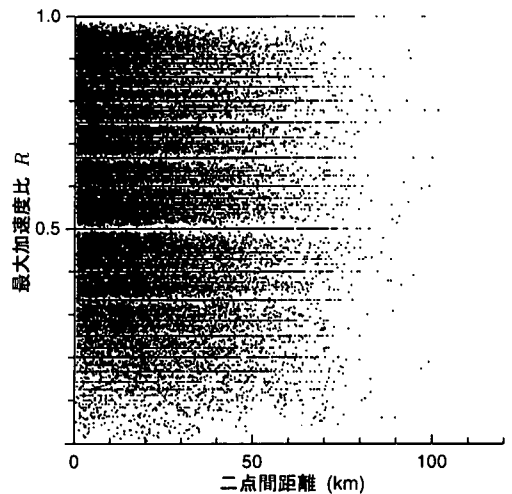


図-3 最大加速度比 R の分布

表-1 二点間距離で分けたグループごとの平均二点間距離と最大加速度比のデータ数(震央距離の差が1km未満の組合せのみ)

グループ	二点間距離 L (km)		データ数
	範囲	平均値	
A	$0 < L \leq 10$	5.0	31,235
B	$10 < L \leq 20$	14.6	20,847
C	$20 < L \leq 30$	24.6	12,634
D	$30 < L \leq 40$	34.7	7,663
E	$40 < L \leq 50$	44.4	4,223
F	$50 < L \leq 60$	54.4	2,053
G	$60 < L \leq 70$	64.2	834
H	$70 < L$	76.1	325
計			79,814

のものの標準偏差 σ_R の二種類の標準偏差, 後述する50, 95%位値をまとめたものである。

これらの図表から, 二点間距離の増加に従い, 最大加速度比の平均値 μ_R が単調に減少すること, 二つの標準偏差 σ_{P1} , σ_R はそれぞれ, ほぼ単調に増加することがわかる。平均値 μ_R の変化は二点間距離の変化に対して安定した, 単調な変化を示しており, 結果の信頼性を示すものである。また, 二点間距離に対する平均値 μ_R と標準偏差 σ_{P1} の変化は式(8), (9)に含まれる最大加速度の二点間の相関係数 ρ の変化によるものと解釈することができる³⁾。なお, μ_R と σ_{P1} が最大加速度の散布度に関する直接的なパラメータであるのに対して, σ_R は散布度の更にそのばらつきを示すパラメータであるため, 以降では σ_R については言及しない。

データベースに含まれる多くの地震が近地の地震であり, 震央距離が数kmから数十kmの範囲にあるものが多いため, 比を求める二点の震央距離の違いが最大加速度比に影響を与えることが考えられる。このため, 震央距離の違いによる影響を検討する目的で, SIGNALの全観測点で可能な全ての二点の組合せに対して求めた最大加速度比の平均値 μ_R と標準偏差 σ_{P1} を図-4に■で示している。図-4を見ると, 震央距離差が1km未満の組合せでは二点間距離の対数の増加に対してほぼ線形的に平均値が減少, 標準偏差が増加しているのに対し, 全ての二点の組合せでは二点間距離の増加に対する平均値 μ_R と標準偏差 σ_{P1} の変化が大きく, かつ, 非線形的である。このことから最大加速度の違いを与える要因として, 震央距離の違いの影響が強いことがわかる。また, 図-5に示されるように, 震央距離が1km未満の組合せ(図中●)と震央距離の違いによる影響が含まれている全ての二点の組合せ(図中■)の何れの場合においても, 平均値 μ_R と標準偏差 σ_{P1} の関係は式(15)に示される関係によく一致しており, 最大加速度比の確率分布は2節で述べた半区間対数正規

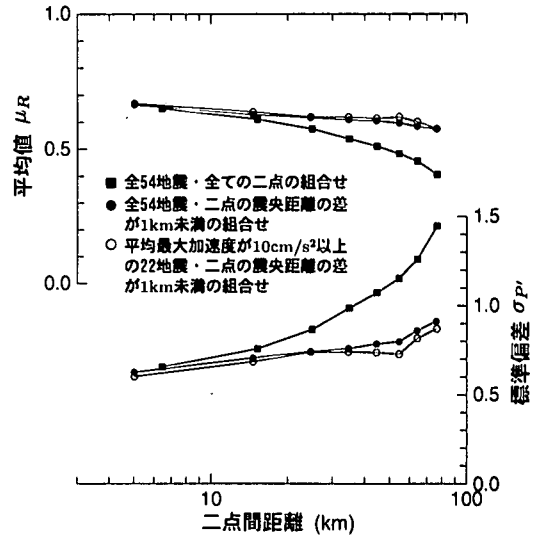


図-4 二点間距離ごとの最大加速度比の平均値 μ_R と標準偏差 σ_{P1}

表-2 グループごとの最大加速度比の特性値

グループ	平均値	標準偏差		50%位値	95%位値
	μ_R	σ_{P1}	σ_R	r_{50}	r_{95}
A	0.664	0.626	0.217	0.656	0.293
B	0.629	0.707	0.228	0.621	0.250
C	0.617	0.742	0.232	0.606	0.233
D	0.610	0.760	0.232	0.599	0.226
E	0.606	0.786	0.240	0.589	0.214
F	0.597	0.799	0.238	0.584	0.209
G	0.585	0.860	0.252	0.560	0.185
H	0.575	0.912	0.246	0.541	0.167

分布によって近似することが可能であるものと考えられる。

SIGNALデータベースが整数値で公開されていることから, 最大加速度が小さい場合に小数点以下の丸め誤差の影響が最大加速度比の分布に現れることが考えられる。この検討の目的で, SIGNALの観測点における最大加速度の単純平均が 10 cm/s^2 以上の22地震の観測記録を用い, 震央距離の差が1km未満の組合せに対して求めた最大加速度比の平均値 μ_R と標準偏差 σ_{P1} を図-4に○で示している。図-4に見るように, 最大加速度の単純平均が 10 cm/s^2 以上の場合でも全地震を用いた場合(図中●)と目立った違いは生じておらず, 小数点以下の丸め誤差の影響はそれ程顕著なものではないことがわかる。このことより, 最大加速度が大きな散布度を示すものとは言い、二組の異なる統計資料に対して類似した結果が得られており, 解析結果が信頼できるものであることがわかる。

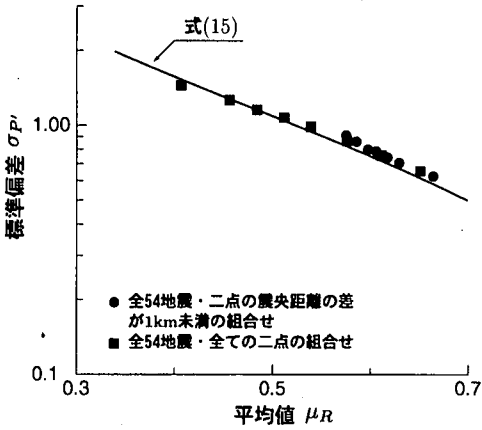


図-5 最大加速度比の平均値 μ_R と標準偏差 σ_{P_i} の関係

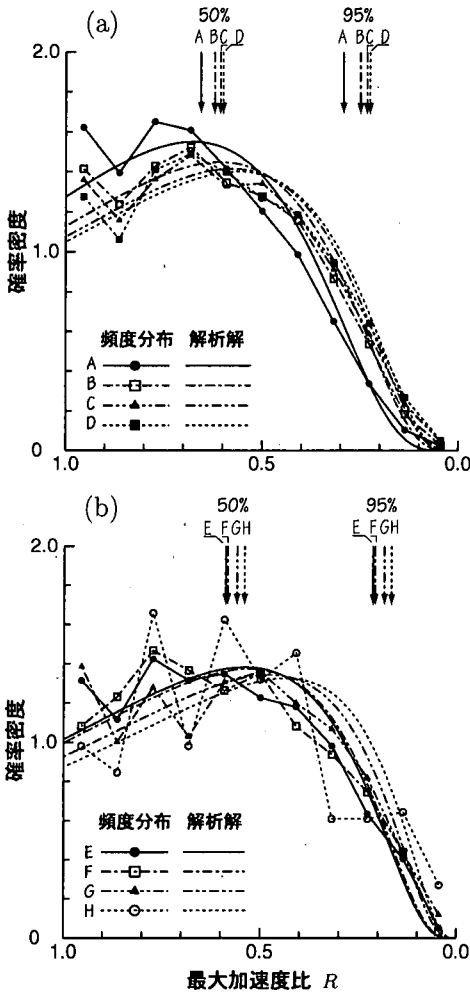


図-6 最大加速度比の頻度分布から求めた確率密度関数と半区間対数正規分布の解析解

(3) 最大加速度比の確率密度関数

図-6は図-3に示した最大加速度比の発生頻度から求めた確率密度関数と、表-2に示した標準偏差 σ_{P_i} を式(14)に代入して求めた半区間対数正規分布の解析解を示したものである。A~D, E~Hグループの二つに分けて図-6(a), (b)に示している。なお4.(1)節で述べたように、最大加速度比は0.5 (1/2, 2/4, ...)、0.33 (1/3, 2/6, ...)のような一定の値に集中することがある。このため、発生頻度を数える最大加速度比の級間隔を大きく設け、また級限界を上記の値に極力一致させないように配慮して、最大加速度比の取り得る0~1の範囲を11階級に等分割して発生頻度を求めた。

発生頻度による確率密度関数と半区間対数正規分布の解析解を比較すると、解析解によって最大加速度比の頻度分布がよく近似されていることがわかる。従って、半区間対数正規分布に基づく平均値 μ_R や標準偏差 σ_{P_i} 、%位値などの特性値によって最大加速度比の確率分布を論じることが可能である。なお、G, Hグループの発生頻度による確率密度関数は不安定な傾向を示しているが、これは表-1に示されるように、このグループのデータ数が少ないことによるものである。このことは、近距離の地震と遠距離の地震では震央距離の差が最大加速度の平均的な大きさに対して及ばず影響が異なることを考慮し、遠距離の地震に対しては許容する震央距離の差を大きくすることによって改善されることも考えられる。しかし、本論文では震央距離の差が最大加速度比に及ばず影響を重視し、許容する震央距離の差を1kmに設定したまま統計解析を進めた。

確率密度関数の概形に着目すると、確率密度の最大値はあまり明瞭なものではなく、最大加速度比が1から0.4~0.3程度範囲では、同じような確率密度で分布するということができる。また、二点間距離の増加に従って確率密度関数の形状の変化が見られ、最大加速度比が1に近い値を示す確率密度が低下すること、それに伴って、最大加速度比が小さな値を示す確率が増加すること、また、確率密度関数がより平坦な形状に移ることなどがわかる。

(4) 最大加速度比の%位値

確率分布の%位値は統計的な意味付けが明確であるだけでなく、最大加速度 X とその対数値 Z の二つの確率分布における%位値は、単にその対数(指数)を求めるだけで相互の変換が可能であり、最大加速度比の分布を検討する上で有効な指標と考えられる。本研究では、最大加速度比の代表値として50%位値、また、危険率を5%とした場合に最大加速度比の生じ得る最小値と見做すことができる95%位値を求めた。

標準正規分布に対する見知より、式(18)で示される

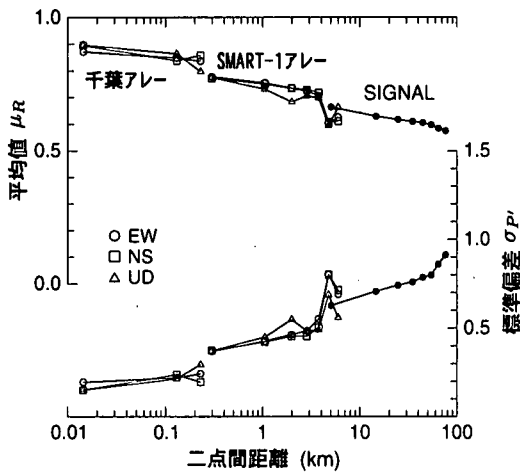


図-7 千葉アレー，SMART-1アレー，SIGNALにおける最大加速度比の平均値 μ_R ，標準偏差 σ_{PI} と二点間距離の関係

τ_{50}/σ_{PI} ， τ_{95}/σ_{PI} がそれぞれ 0.674，1.96 であることから，50，95%位値が表-2 に示すように求められる。また，これらの値は図-6 の上部にも確率密度関数と同線種の矢印で示している。

50%位値を見ると，二点間距離が10km以下のAグループで0.65程度，また，70km以上のHグループでは0.55程度になっており，二点間距離の増加とともに単調に減少する。そして上記の値から，一般に最大加速度は数十km程度の範囲では1/2に近い確率で「倍半分」の値を示すものと考えて良いものと言える。また，AグループとHグループの50%位値の違いは明確ではあるものの，二点間距離の数kmから数十kmまでの著しい違いと比較するとそれ程顕著なものとは言えない。

一方，95%位値はAグループで0.3程度，Hグループでは0.15程度の値を示しており，10km以下の二点間距離に対して3倍，70km以上離れた二点においては6~7倍程度の値まで観測され得ることになり，二点間距離が数kmから数十kmの変化に対して，最大加速度の分布し得る範囲は著しく変化することがわかる。

5. 高密度アレーとSIGNALにおける最大加速度比の分布の比較

著者らはSIGNALのデータベースの検討に先立って，高密度強震アレー観測記録を用いてより近距離の二点間の最大加速度比の統計解析を行っている³⁾。

図-7は，東京大学生産技術研究所千葉実験所高密度アレー（千葉アレー）¹⁰⁾，並びに台湾羅東のSMART-1アレー¹¹⁾における二点間距離と最大加速度比の平均値

μ_R ，標準偏差 σ_{PI} の解析結果³⁾とSIGNALデータベースの解析結果を合わせて示したものである。千葉アレーでは二点間距離が5mから200m程度まで，また，SMART-1アレーでは100mから5km程度までの二点間距離に対する最大加速度比の分布の検討が可能である。なお，千葉アレーとSMART-1アレーにおける最短の二点間距離はそれぞれ，5m，100mであるが，最短グループをそれぞれ， $0 < L < 40$ m， $0 < L < 650$ mに設定して解析しており³⁾，図-7にはグループ毎の二点間距離の平均値を用いてプロットしている。

地盤条件は，千葉アレーではほぼ一様と見なされる¹⁰⁾こと，また，SMART-1アレーにおいても若干の基盤層の傾斜が認められる¹²⁾ものの顕著なものではないと考えられる³⁾。一方，SIGNALは東京都，神奈川県東部を中心とした，地盤の多様な変化が含まれるデータベースである。このように，統計解析に用いた三つのデータベースでは，地盤の条件が著しく異なっている。しかしながら図-7では，アレーの切り替わる点で若干の不連続性が見られるものの余り顕著なものではなく，三つのアレーを通し，二点間距離の対数値の増加に対して，最大加速度比の平均値 μ_R ，標準偏差 σ_{PI} は連続的に，かつ，線形的にそれぞれ減少，増加することがわかる。このことから，図-7の傾向はアレーの違いに敏感に依存するものとは言えず，最大加速度の散布度は主に二点間距離によって支配されていると言えることがわかる。これは，地盤条件などの諸要因のばらつきも，その多くが統計的には二点間距離の関数として与えられるために，最大加速度の散布度が間接的に二点間距離に対して関数関係を示すためと考えられる。つまり，「二点間距離」と「地盤条件などの差違」は完全に独立な関係にあるのではなく，前者は後者の要因も含めて単一指標で表現したものと考えられる。そして，最大加速度の差違に関する特性値が数十mから数十kmの極めて広い範囲において，二点間距離をパラメータとすることで統一的に与えることが可能であることは興味深い。もとより，このようなメカニズムは十分に明確ではなく，今後更に多くの観測と解析が必要であると考えられる。

6. 結論

本論文では，千葉，台湾（SMART-1）の高密度アレー観測記録を用いて隣接二地点間の最大加速度の比（最大加速度比）の確率分布を検討した著者らの従来の研究を進展させ，より広い範囲における検討が可能な東京ガス株式会社によるSIGNALデータベースを用いて最大加速度比の統計解析を行った。

まず，SIGNALデータベースの54地震を用い，同

一地震に対する二観測点間の最大加速度比とその平均値 μ_R や標準偏差 σ_{P_i} , 50, 95%位値, 確率密度関数を求め, 二点間の距離をパラメータとした検討を行った。さらに, 前述の高密度アレー観測記録を用いた結果を加え, 数十 m から数十 km までのより広範囲の二点間距離に対する最大加速度比の平均値 μ_R と標準偏差 σ_{P_i} について検討を行った。

以上の検討から得られた結果, 並びに, 重要と考えられる特性値について以下に列挙する。

- (1) 比を求める二点の震央距離の差が小さい場合, 二点間距離の対数の増加に対して, 最大加速度比の平均値 μ_R と標準偏差 σ_{P_i} はそれぞれ, ほぼ線形的に減少, 増加する。
- (2) 比を求める二点の震央距離の差が大きく, 二点の震央距離の違いが無視できない場合, 二点間距離の対数の増加に対する最大加速度比の平均値 μ_R の減少と標準偏差 σ_{P_i} の増加は顕著で, かつ非線形的である。
- (3) 上記(1), (2)の違いにも拘わらず, 震央距離の違いの影響を含まない場合と含む場合の何れの場合においても, 最大加速度比の平均値 μ_R と標準偏差 σ_{P_i} の関係は半区間対数正規分布に基づく両者の関係式(15)によく一致する。
- (4) SIGNAL のように, 地盤条件の違いを含む広範囲の観測に基づくデータベースから求めた最大加速度比の確率密度関数も半区間対数正規確率密度関数の解析解(14)によって近似できる。
- (5) 二点の震央距離の差が1 km 未満, かつ二点間距離が10 km 未満の組合せでは, 最大加速度はその比の平均値 μ_R で0.65程度, 標準偏差 σ_{P_i} で0.65程度の散布度を示す。また, 二点間距離が70 km 以上の組合せでは, 最大加速度はその比の平均値 μ_R で0.6程度, 標準偏差 σ_{P_i} で0.9程度の散布度を示す。
- (6) 最大加速度比の50%位値は10 km 以下の二点間距離に対して0.65 (1.5)倍程度, 70 km 以上の場合でも0.55 (1.8)倍程度である。このことから, 一般に最大加速度は数十 km 程度の範囲では1/2に近い確率で「倍半分」の値を示すものと考えてよい。また, 二点間距離の数 km から数十 km の変化に対して, 50%位値はあまり顕著な変化を示さない。
- (7) 最大加速度比の95%位値は二点間距離が10 km 以下の場合0.3程度, 70 km 以上の場合0.15程度である。95%位値が危険率5%とした場合の最大加速度比の最小値と考えられることから, このような二点では前者が3倍 (1/3倍)程度, 後者では6~7倍 (1/6~1/7)程度異なった最大加速度が観測され得るものと言え, 両者の違いは50%位値の場合

と比較して顕著である。

- (8) SIGNAL データベースによる二点間距離の対数値と最大加速度比の平均値 μ_R , 標準偏差 σ_{P_i} の関係と, 千葉アレー及び台湾の SMART-1 アレーにおける観測記録から求めた関係を図-7において比較した。その結果, 上記の三つの観測施設で二点間距離が著しく異なるにも拘わらず, 各データベースにおける最大加速度比の平均値 μ_R と標準偏差 σ_{P_i} は二点間距離の対数値に対して, ほぼ同一の連続的かつ線形的な関係が得られた。

謝辞: 本研究では東京ガス株式会社・地震時導管網警報システム「SIGNAL」による最大加速度のデータベースを用いた。また, 震災予防協会によるアレー観測記録データベースにおける東京大学生産技術研究所片山・山崎研究室による観測記録, 並びに SMART-1 アレーにおける観測記録の解析結果の一部を用いた。

本研究の数値計算の一部は加茂高史氏(当時埼玉大学工学部建設工学科)による。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) Schuëller, G. I.: 構造物の安全性と信頼性, 小西一郎, 高岡宣善, 石川 浩訳, 丸善, 1984.
- 2) 中村孝明, 岡田和明, 本間直樹: 統計手法による地震時斜面崩壊確率に関する研究, 土木学会論文集, No.570/I-40, pp.73-82, 1997.
- 3) 川上英二, 茂木秀則: 強震動アレーデータに基づく隣接二地点間の最大加速度比の確率分布, 土木学会論文集, No.626/I-48, pp.219-230, 1999.
- 4) Fukushima, Y. and Tanaka, T.: A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong ground earthquake motion in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 4, pp.757-783, 1990.
- 5) Trifunac, M. D. and Brady, A. G.: Correlations of peak acceleration, velocity and displacement with earthquake magnitude, distance and site conditions, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 4, pp.455-471, 1976.
- 6) 東京ガス株式会社: 東京ガスの地震対策, 1994.
- 7) 東京ガス株式会社: "What's SIGNAL" 他(東京ガス株式会社 World Wide Web).
- 8) 山崎文雄, 片山恒雄, 野田 茂, 吉川洋一, 大谷泰昭: 大規模都市ガス導管網の地震時警報システムの開発, 土木学会論文集, No.525/I-33, pp.331-340, 1995.
- 9) Hoel, P. G.: 入門数理統計学, 浅井晃, 村上正康訳, 培風館, 1978.
- 10) 東京大学生産技術研究所片山研究室: 東京大学生産技術研究所千葉実験所における地震動の3次元アレー観測, 強震動アレー観測記録データベース・推進委員会/作業部会報告書, 1991.
- 11) Bolt, B. A., Loh, C. H., Penzien, J., Tsai, Y. B. and Yeh, Y. T.: Preliminary report on the SMART-1 strong motion array in Taiwan, *Report No.UCB/EEERC-82/13*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1982.
- 12) Figueras, S., Roca, A., Goula, X. and Blàzquez, R.: Larger soil amplification for stronger ground motion

from SMART-1 records, *Tenth WCEE*, 2, pp.1043-1048, 1992.

(1999. 6. 7 受付)

SPATIAL DISTRIBUTION OF PEAK GROUND ACCELERATIONS ESTIMATED FROM 'SIGNAL' DATABASE

Hidenori MOGI and Hideji KAWAKAMI

Peak ground accelerations (PGAs) have been playing an important role in the earthquake resistant design and reliability analysis of structures as an intensity measure of earthquake motions. In this study, PGA ratios have been analyzed in order to examine the statistical characteristics of the PGAs. Firstly, the means, standard deviations, 50- and 95-percentiles and probability density functions of the PGA ratios have been estimated from the SIGNAL database. Secondly, based on these statistics, we have discussed on the expected differences of the PGAs between separated two sites. Finally, the means and standard deviations have been compared with those from the Chiba and SMART-1 dense array databases. This comparison has revealed that these statistics have an almost linear relation to the logarithm of separation distance.