

最大加速度の空間的なばらつき

茂木秀則¹・川上英二²

¹正会員 博(工) 埼玉大学講師 工学部建設工学科(〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保 255)

²正会員 工博 埼玉大学教授 地圏科学研究センター(〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保 255)

最大加速度やSI値などの地震動強度指標は耐震設計や信頼性解析などの工学的な目的に広く用いられている。特に、信頼性解析においては、構造物の地震耐力の確率分布とともに地震外力の確率分布を与える必要があり、地震外力の平均値だけでなく、標準偏差などのばらつきも重要な意味を持っている。このことから本研究では、千葉アレー(東京大学生産技術研究所千葉実験所)、SMART-1アレー(台湾・羅東)の強震観測記録、並びに地震時導管網警報システムSIGNALの観測記録を用いて、二点間で観測され得る最大加速度の差異について検討を行った。

Key Words : peak ground acceleration, measure of dispersion, probability density, lognormal distribution, array seismogram

1. はじめに

最大加速度やSI値などの地震動強度指標は耐震設計や信頼性解析などの工学的な目的に広く用いられている。特に、信頼性解析においては、構造物の地震耐力の確率分布とともに地震外力の確率分布を与える必要があり、地震外力の平均値だけでなく、そのばらつき(標準偏差など)が構造物の破壊確率に大きな影響を及ぼす。

本研究では同一地震で生じる最大加速度の違いに着目し、千葉アレー(東京大学生産技術研究所千葉実験所)、SMART-1アレー(台湾・羅東)の二つの高密度アレーの強震観測記録、並びに地震時導管網警報システムSIGNALの観測記録を用いて検討した。

統計解析では、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、同一地震における二つの観測点の最大加速度の比(最大加速度比)^{1),2)}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最大加速度比の平均値や標準偏差を求めた。その結果、最大加速度の違いを表す、最大加速度比の(対数)標準偏差が比を求める二点間の距離の対数に対してほぼ直線的に増加することなどを示した。

2. 最大加速度比^{1),2)}

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する。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す。

3. 最大加速度比の確率密度関数と統計量^{1),2)}

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仮定すると、最大加速度比 R の確率密度関数は次式のように表される。

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

ここで、 ρ は比を求める二点の最大加速度の対数値 $Z_1 = \ln(X_1), Z_2 = \ln(X_2)$ の相関係数、 μ_Z, σ_Z はそれぞれ、 Z_1, Z_2 共通の平均値と標準偏差、 $\sigma_{P'}$ は $P' = Z_1 - Z_2$ の標準偏差である。式(1)に示されるように、差 $P' = Z_1 - Z_2$ は平均値0の正規分布に従う。このように最大加速度比を用いる方法には、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 μ_Z を評価する必要がないという利点がある。確率密度が式(1)で表される分布を半区間対数正規分布と呼ぶ²⁾。

最大加速度比の平均値 μ_R は次式のように表すことができる。

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

式(1)(2)より、標準偏差 $\sigma_{P'}$ と平均値 μ_R のどちらも最大加速度のばらつきを表す量であることがわかる。

最大加速度比 R が

$$1 \geq R \geq r_\gamma > 0 \quad (3)$$

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 $\gamma\%$ 位値と定義する。この値は標準正規分布表から容易に求められる。

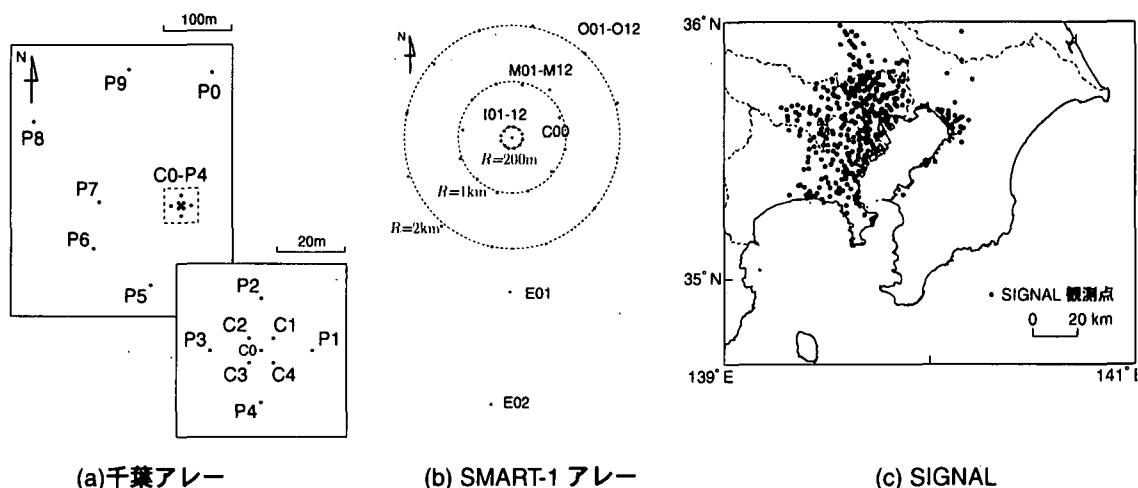


図-1 本研究で記録を用いたアレー観測施設の平面図³⁾⁻⁷⁾

4. アレー観測施設³⁾⁻⁷⁾

本研究で用いたアレー観測記録の地震計配置を図-1に示す。最も密に配置された千葉アレー³⁾では数mから数100mまで、SMART-1アレー^{4),5)}では数100mから数kmまで、最も広範囲に設置されたSIGNAL^{6),7)}では数kmから数10km程度の範囲で検討が可能である。

5. 最大加速度比の分布

図-2は横軸に二点間距離を用いて、最大加速度比 R の分布を示したものである。各図の(a)~(c)はそれぞれ、千葉アレーNS成分、SMART-1アレーNS成分、SIGNALに対するものである。

千葉アレーにおける最大加速度比では、二点間距離

表-1 各観測システムにおける二点間距離のグループと最大加速度比のデータ数

(a) 千葉アレー

グループ	二点間距離 $L(m)$	データ数		
		EW	NS	UD
A	$0 < L \leq 40$	1,368	1,368	1,368
B	$40 < L \leq 160$	819	819	819
C	$160 < L$	108	108	108
計		2,295	2,295	2,295

(b) SMART-1 アレー

グループ	二点間距離 $L(m)$	データ数		
		EW	NS	UD
D	$0 < L \leq 650$	1,771	1,804	1,752
E	$650 < L \leq 1,600$	4,555	4,587	4,483
F	$1,600 < L \leq 2,400$	4,791	4,762	4,685
G	$2,400 < L \leq 3,200$	1,657	1,638	1,623
H	$3,200 < L \leq 4,200$	718	704	697
I	$4,200 < L \leq 5,100$	296	297	295
J	$5,100 < L$	147	145	145
計		13,935	13,937	13,680

(c) SIGNAL

グループ	二点間距離 $L(km)$	データ数 (水平2成分ベクトル和)
K	$0 < L \leq 10$	31,235
L	$10 < L \leq 20$	20,847
M	$20 < L \leq 30$	12,634
N	$30 < L \leq 40$	7,663
O	$40 < L \leq 50$	4,223
P	$50 < L \leq 60$	2,053
Q	$60 < L \leq 70$	834
R	$70 < L$	325
計		79,814

が数十～数百mと隣接している地点にも拘わらず、最大加速度のばらつきによって最大加速度比が0.5以下である場合も生じている。さらに二点間距離が大きいSMART-1アレーの場合では0.1以下の最大加速度比も生じていることがわかる。このように、最大加速度は比較的近い二点においてもばらつきが大きいことがわかる。

ところで、二点間距離は一様に分布せず、アレー内の地震計の配置に対応して不均一な分布を示す。この分布を考慮して、統計解析では表-1に示すように二点間距離に基づいて、千葉アレーでは3グループ、SMART-1アレーでは7グループ、SIGNALでは8グループに最大加速度比のデータを層別化し、それぞれのグループ内では最大加速度比が同一の確率分布に従うものとして、平均値 μ_R や標準偏差 σ_{P_i} を算定した。なお、SIGNALの場合では、震央距離の違いによる最大加速度の違いの影響を取り除くため、震央距離の違いが1km以下の二点の組合せの最大加速度比だけを用いている。

6. 平均値 μ_R 、標準偏差 σ_{P_i}

図-3はグループごとの最大加速度比 R の平均値 μ_R 、標準偏差 σ_{P_i} と二点間距離との関係を示したもの

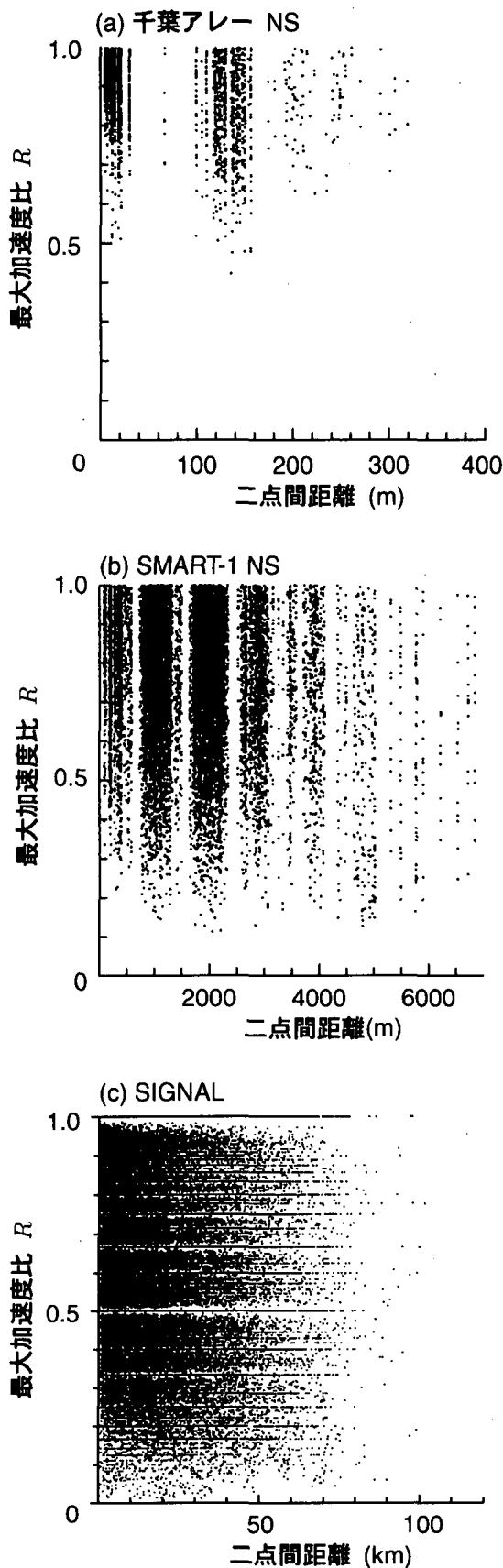


図-2 最大加速度比 R の分布

である。横軸の値はグループごとの二点間距離の単純平均である。

この図から、最大加速度比の平均値 μ_R 、標準偏差

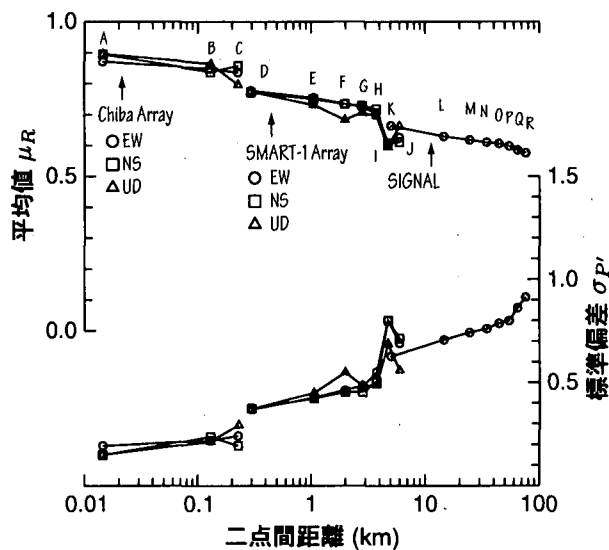


図-3 最大加速度比の平均値 μ_R 、標準偏差 σ_{P_i} と二点間距離の関係

σ_{P_i} は、二点間距離の対数値の増加に対してほぼ直線的に、それぞれ減少、増加する関係があることがわかる。また、三つのアレーでは地盤条件などがそれぞれ異なっているにも拘わらず、数 m から数 10 km の非常に広い範囲ではほぼ連続的な結果が得られていることは興味深い。なお、各アレーの二点間距離が大きいグループで多少の乱れが見られるが、これはデータ数が少ないことによるものである。

7. 確率密度関数

図-4 はそれぞれ、千葉アレー NS 成分、SMART-1 アレー NS 成分、SIGNAL の最大加速度比の頻度分布から求めた確率密度関数と式 (1) の半区間対数正規分布の確率密度関数、各グループの 50、95% 位値（各図上部矢印）を示したものである。

発生頻度と半区間対数正規分布に基づく確率密度関数を比較すると両者で互いに近い形状を示しており、最大加速度比の確率分布が半区間対数正規分布で近似できることがわかる。また、二点間距離が増加するにつれて標準偏差 σ_{P_i} が増加することに対応して、確率密度関数がより平坦な形状に推移していく様子を見ることができる。

8. %位値

図-5 に、三つのアレーにおける最大加速度比の 50%、80%、95% 位値を示す。なお、正規分布の性質から標準偏差 σ_{P_i} は 68% 位値に相当する。

図-5 の 50% 位値を見ると、二点間距離が最も小さい数 10 m 程度のグループでは 0.9 (1.1) 倍程度、二点間距離が 1 km 程度の場合には 0.75 (1.3) 倍程度、70 km 以上の場合には 0.55 (1.8) 程度である。このことから、数 10 m 程度離れた二点においては、1/2 の確率で 1 割

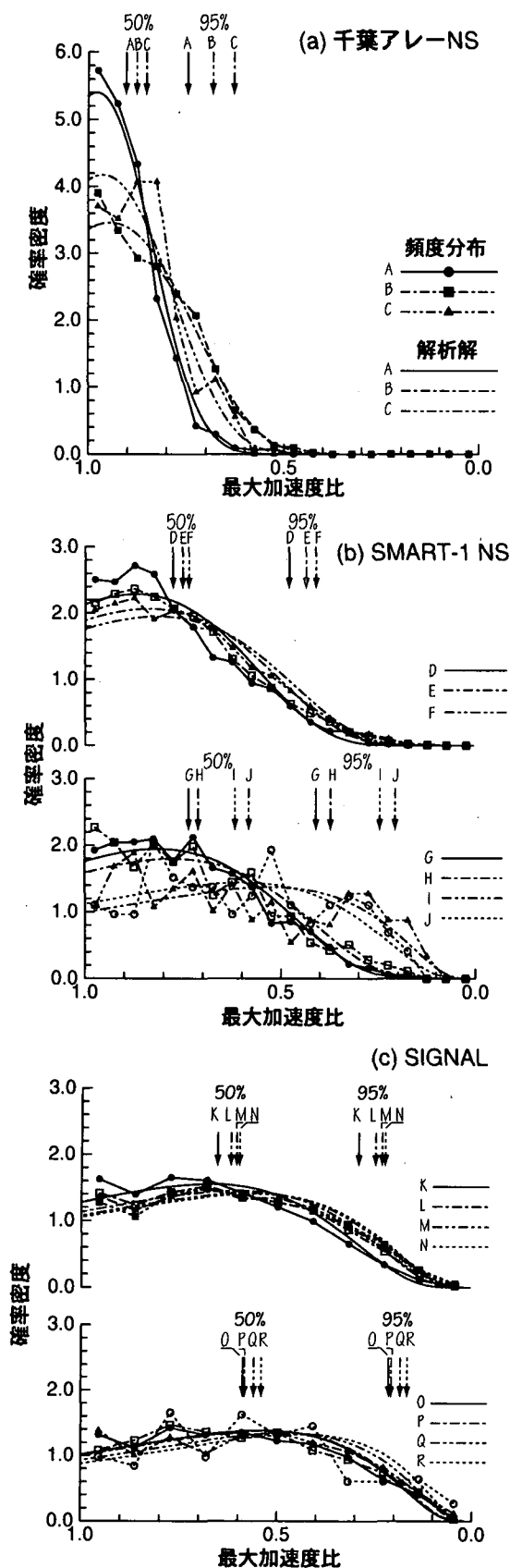


図-4 最大加速度比の確率密度関数

程度異なった最大加速度が観測されること、また、数10km程度の範囲では1/2に近い確率で「倍半分」の範囲に収まることなどがわかる。

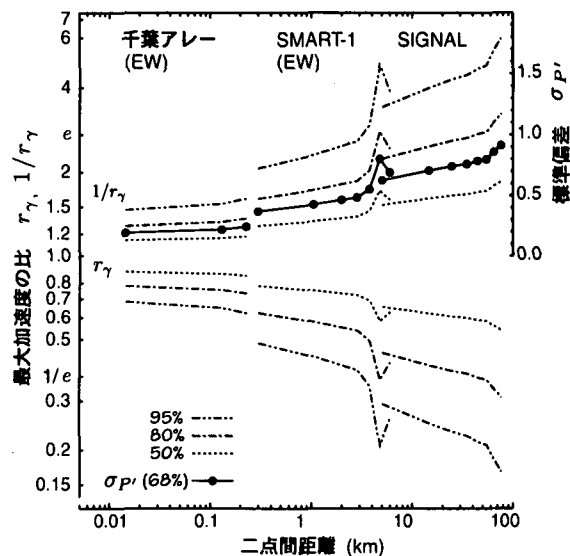


図-5 最大加速度比の標準偏差 $\sigma_{P'}$, %位値と二点間距離の関係

95%位値は二点間距離が数10m程度のグループで0.7 (1.5) 倍程度、1km程度では0.45 (2.2) 倍程度、また、70km以上の場合には0.15 (6.7) 倍程度の値を示している。このことから、数10m程度のごく近距離では最大加速度の違いが最大で(危険率5%で)3~5割程度に収まること、1km程度離れた二点では最大加速度が「倍半分」程度の範囲に収まること、さらに、数10km離れた場合には6~7倍程度の範囲まで最大加速度が分布し得ることなどがわかる。

9. まとめ

千葉アレー、SMART-1アレー、SIGNALの観測記録を用いて最大加速度比の平均値や標準偏差、%位値などの統計量を求め、二点間距離と発生確率をパラメータとして、二点間で生じ得る最大加速度の違いを明らかにした。

謝辞

東京大学生産技術研究所片山・山崎研究室による千葉アレー、SMART-1アレー、東京ガス株式会社によるSIGNALの観測記録を用いました。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 川上, 茂木: 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, 1999.
- 2) 茂木, 川上: 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, 土木学会論文集, No.647, 2000.
- 3) 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, 1992.
- 4) Bolt, B. A. et al.: Preliminary report on the SMART-1 strong motion array in Taiwan, Report No. UCB/EERC-82/13, University of California, Berkeley, 1982.
- 5) SM-TAI04 磁気テープ添付資料.
- 6) 山崎, 片山, 野田, 吉川, 大谷: 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, 1995.
- 7) 東京ガス株式会社: "What's SIGNAL" 他 (World Wide Web).