

【カテゴリーII】

日本建築学会構造系論文集 第551号, 37-44, 2002年1月
J. Struct. Constr. Eng., AJJ, No. 551, 37-44, Jan., 2002

高密度アレー観測記録に基づく応答スペクトル比の確率分布

DETERMINATION OF SPATIAL DISTRIBUTION OF RESPONSE SPECTRAL RATIOS
FROM DENSE ARRAY DATA川上 英二^{*1}, 茂木 秀則^{*2}

Hideji KAWAKAMI and Hidenori MOGI

Acceleration response spectral ratios were analyzed to examine their statistical characteristics. First, the probability distribution of the ratios was analyzed, and equations for the probability density functions, mean values, standard deviations, and percentiles were shown. Second, the above-mentioned statistics were estimated using accelerometer arrays of the Chiba and SMART-1 databases. Then, the relationships between these statistics and the station separations, frequencies and damping ratios were analyzed. Finally, based on the 50th and 95th percentiles, the differences between the response spectra at two different sites due to future earthquakes were discussed.

Keywords: response spectra, probability density, lognormal distribution, dense array database

応答スペクトル, 確率密度, 対数正規分布, 高密度アレー

1 はじめに

地震被害の検討や耐震設計は最大加速度や応答スペクトルなどの地震動の強度指標に基づいて行われることが多い。この理由として、複雑な地震動波形を扱わずに、地震動波形の最大値、あるいは構造物の特性を反映した応答波形の最大値（応答スペクトル）など、単一の数値によって設計や検討が可能となる利便性が挙げられる。

ところで、同一地震による極めて近い二点における地震動でも決して同じものではない。このため、隣接した観測点やアレー観測における地震記録から最大加速度や最大速度、コヒーレンスなどを検討した研究¹⁾⁻³⁾がなされている。さらに、地震動がこのように確率的な要素を伴うために、地震動の強度指標も確率変数として扱う必要となる。このことから、耐震設計の方法として信頼性解析⁴⁾に基づく方法がよく用いられる。信頼性解析では、地震外力と構造物の地震耐力の確率分布に基づいて、その大小関係から破壊確率が評価されるため、構造物の地震耐力だけでなく地震外力の確率分布、特にその散布度（ばらつき）が重要な意味を持っている。例えば、同一設計の構造物が隣接し、それぞれの地震被害の程度が異なる場合には構造物の地震耐力の確率分布、特に地震耐力の平均値と散布度が問題となるが、地震耐力の散布度を検討するためには地震外力の散布度を予め把握している必要がある。また、長大構造物の設計においては、想定される平均的な地震動

強度に地震動の空間分布特性を加味した地震外力を作用させる必要があるが、この場合、構造物に沿った地震動の位相の分布特性と共に、最大加速度や応答スペクトルなどの空間分布も考慮することで、より合理的な耐震設計が可能になると考えられる。

地震動強度指標の散布度を検討している研究として、最大加速度や応答スペクトルなどの地震動強度の距離減衰式とともにその確率分布⁵⁾⁻⁷⁾を求める統計的な研究や、応答スペクトルの平均値や確率分布を解析的に評価する理論的な研究^{9),10)}などが挙げられる。しかし、これらの統計的な研究では、推定された地震動強度指標からの誤差の確率分布が論じられており、「同一の地震に対してある領域で生じ得る地震動強度指標の差異」という意味とは異なった散布度が評価されている。また、観測記録から直接、上記の「差異」を評価した研究は著者の知る限り存在しない。

このことから、著者らは地震動の強度指標として最大加速度を取り上げ、その空間的な確率分布について、高密度アレーや地震動モニタリングシステムの観測記録を用いて最大加速度の比（最大加速度比）の統計解析を行った^{11),12)}。その結果最大加速度は、数十m離れた二点においても最大で（95%の確率で）互いに0.7~1.4倍程度の範囲の違いまで観測され得ること、数km離れた二点では0.2~5倍程度の範囲の違いまで観測され得ること、二点間の距離の対数値の増加に伴い最大加速度比の（対数）標準偏差が線形的に増加することなどを明らかにしている。また、著者らによつ

*¹埼玉大学地圈科学研究所センター 教授・工博
*²埼玉大学工学部建設工学科 讲師・博士(工学)

Prof., Geosphere Research Institute, Saitama Univ., Dr. Eng.
Lecturer, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Saitama Univ., Dr. Eng.

て、加速度応答スペクトルの場合についても同様に、比を用いた検討が行われている¹³⁾。しかし、この研究では、マグニチュードや震央距離など様々なパラメータが応答スペクトル比に与える影響を多変量解析によって評価することを主たる目的としており、応答スペクトルの確率分布とそれを特徴付ける代表値、散布度などの統計量そのものの評価という目的からは不十分である。

以上のことから本研究では、最大加速度に対して展開された半区間対数正規分布に基づく統計解析の方法を応答スペクトル比（同一地震による二点での地震動の応答スペクトルの比）に適用し、二点間の距離、振動数、減衰比をパラメータとして、応答スペクトル比の代表値、散布度、%位値などの特性値や確率密度関数を評価した。そしてこれらの特性値に基づいて、離れた二点において想定される応答スペクトルの差異について論じた。

地震動は地震規模、震源距離、断層との位置関係、観測点の地盤構成等の物理的要因や波動の周期などによって影響を受け、極めて近い観測点間の地震動でも、互いに著しい差異が認められる場合がある。例えば、観測点近傍の地盤条件は測定が可能であり、顕著な不整形が認められる場合には、地震動強度の違いを物理的要因の違いに基づいて波動論的に考察することは重要である。しかし、現在でも測定が困難な要因が多く考えられる。例えば、震源に対する観測点の僅かな方位の違いに伴う放出波形の違い、震源から観測点に至るパスの全経路に沿った地盤物性の詳細な違いなどであり、これらの原因によっても応答スペクトルが強く支配されているものと考えられる。将来、これらの物理量が余すところなく測定できる場合には、各地点における応答スペクトルの値が全て説明しえるようになることも考えられる。しかし、実際本論文の4章、5章で示すように、現在観測できる物理量から見た場合には不整形性が小さい（明らかでない）と考えられる千葉とSMART-1の二つの各アレー内においても、応答スペクトルの比較的大きい違いが観測されている。この違いを観測している物理量だけから説明することは難しく、この違いの程度に関する統計量を検討することは重要であると考えられる。このことから本研究では、地震動の場所による変動を確率分布で定量的に提示することを目的としている。

本研究で用いたアレー観測記録は二つのアレーで48地震の観測記録であり十分に多い数ではないが、二点間距離などの関数として連続的な結果が得られており、整形地盤とみなせる地盤における応答スペクトルのばらつきの一般的な傾向は評価できているものと考えられる。ただし、近地の大地震のデータが欠けているため、このような地震に伴う応答スペクトルのばらつきを本研究の結果から論じるには注意が必要である。

2 解析手法¹¹⁾⁻¹³⁾

2.1 応答スペクトル比の定義

本研究では、二地点間で観測される応答スペクトルの違いを示す値として、同一地震による任意の二観測点における地震動の応答スペクトルの比（応答スペクトル比）を考え、比を求める二点間の距離（二点間距離）、振動数、減衰比をパラメータとして統計解析を行った。

応答スペクトル比 R は応答スペクトル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、応答スペクトル比が 1 の近くに分布する場合には応答スペクトルの散布度が低く、応答スペクトル比が小さい範囲まで分布が及ぶ程応答スペクトルの散布度が高いことを表している。

2.2 応答スペクトル比の確率分布と特性値

本節では、記号の定義と応答スペクトルの統計的なモデル化を明らかにすることを目的に、文献 11), 12) に示した定式化の要点を示す。

片山らは応答スペクトルの実測値と距離減衰式の比の確率分布を対数正規分布に近似し、この近似が妥当であることを χ^2 検定によって示している⁷⁾。また、McGuire も疑似速度応答スペクトルの実測値と距離減衰式による推定値の比の確率分布が対数正規分布に従うものとしている⁸⁾。本研究では隣接する二点の組合せにおいて同一地震で生じる応答スペクトルの違いを検討しており、このような二点の震央距離の違いは殆どなく、応答スペクトルの推定値はアレー内の全ての点で同一の値と見做すことができる。このため、応答スペクトルの実測値と距離減衰式による推定値との比が対数正規分布する場合には、応答スペクトルそのものも対数正規分布に従うものと考えてよい。

上記のことから本研究では、

- 任意の地点の地震動強度（応答スペクトル）分布は対数正規分布であること、
- 比をとる二点は同一の地震動強度が期待される二点、すなわち同一の対数正規分布（平均と分散が同一）を有する二地点であること、

を仮定し、比を求める二点の応答スペクトルの対数値 Z_1, Z_2 の同時確率密度関数を次の二次元正規分布の同時確率密度関数¹⁴⁾で表す。

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

ここで、 ρ, μ_Z, σ_Z はそれぞれ、 Z_1, Z_2 の相関係数、平均値、標準偏差である。

式(1)から応答スペクトル比 R の確率密度関数を求めると次式が得られる^{11), 12)}。

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

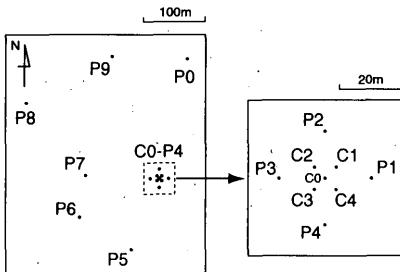
$$\sigma_{P'} = \sigma_Z \sqrt{2(1-\rho)} \quad (3)$$

ここで、 P' は Z_1, Z_2 の差 $P' = Z_1 - Z_2$ であり、応答スペクトル比 R は $R = \exp(-|P'|)$ で表される。式(2)に示されるように、確率密度関数には地震ごとの平均値 μ_Z が含まれない。従って、同一地震ごとに応答スペクトルの比を求める限り、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。本研究では、確率密度関数が式(2)に示される確率分布を半区間対数正規分布と呼ぶ¹²⁾。

応答スペクトル比 R の平均値 μ_R は式(2)から次式のように求められる。

$$\mu_R = \exp \left(\frac{\sigma_{P'}^2}{2} \right) \left\{ 1 - \text{Erf} \left(\frac{\sigma_{P'}}{\sqrt{2}} \right) \right\} \quad (4)$$

ここで、 $\text{Erf}(\cdot)$ は誤差関数である。式(2)(4)に示されるように、標準偏差 $\sigma_{P'}$ が応答スペクトル比 R の確率分布の唯一のパラメータであり、応答スペクトル比の平均値 μ_R も標準偏差 $\sigma_{P'}$ と同様に、応答スペクトルの散布度を表す特性値の一つである^{11), 12)}。

図 1 千葉アレーの平面図¹⁵⁾

応答スペクトル比の%位値を、応答スペクトル比 R が $1 \geq R \geq r_\gamma > 0$ の範囲にある確率が $\gamma\%$ であるときの値 r_γ と定義する。このとき%位値は次式で算定される。

$$r_\gamma = \exp(-\tau_\gamma \sigma_{P'}) , \quad \frac{\gamma}{100} = \int_{-\tau_\gamma}^{\tau_\gamma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (5)$$

3 アレー観測記録の概要

3.1 千葉アレー¹⁵⁾

3.1.1 アレー施設の概要

本アレー記録は東京大学生産技術研究所千葉実験所構内の三次元高密度アレー観測¹⁵⁾によるもので、震災予防協会強震動アレー観測記録データベースに蒐集されている。本研究では簡単のため、このアレーを「千葉アレー」と略記する。

図 1 に千葉アレーの平面図を示す。千葉アレーは 1982 年から観測が開始され、当初は C0~C4, P1~P6 の 11 点（地中埋設分を含めると 36 点）で観測が行われていた。1985 年から P7~P9, P0 の 4 点が新たに設置され、現在 15 点（地中埋設分を含めると 44 点）で観測が行われている。

C0, P5~P9, P0 の柱状図¹⁵⁾によれば、地盤は地表面から深さ約 10m までの N 値 10 以下の層とそれ以深の N 値 30 以上の層から構成されている。この特徴はアレー内の観測点に共通するものであり、地盤構造は平行成層構造を成している。本アレーにおけるサンプリングレートは 200Hz である。

3.1.2 地震記録の概要

図 1 に示す C0~C4, P0~P9 のすべての観測孔において、地下 1m に加速度計が設置されており、本研究ではこの深度における地震記録を地表面における記録と考え、これらを用いて検討を行った。

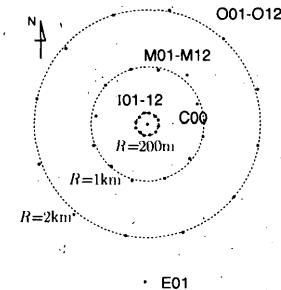
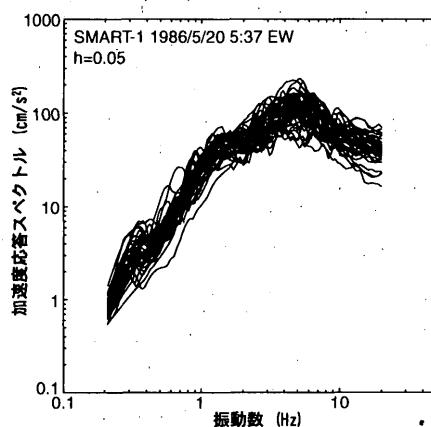
後述するように、本研究では半数以上の観測点で鉛直成分の最大加速度が 10 cm/s^2 以上の地震の観測記録を用いるものとした。記録中の最大加速度は 400.0 cm/s^2 (1987 年千葉県東方沖地震, M6.7, 震央距離 45km)，また、最大のマグニチュードは 7.3 (震央距離 373km)，最小のマグニチュードは 3.9 (震央距離 38km) である。

3.2 SMART-1 アレー¹⁶⁾⁻²⁰⁾

3.2.1 アレー施設の概要

SMART-1 アレーは 1980 年から 1982 年にかけて台湾・羅東に設置されたアレー観測システムである。図 2 に示すように、地震計は C00 を中心として半径 200m, 1,000m, 2,000m の同心円上にそれぞれ 12 箇所ずつ設置されている。また、C00 から 2,800m, 4,800m 南方に 2 つの地震計 E01, E02 が設置されている。

表層の地盤構造¹⁹⁾は、アレー円環部分では地表から 3 ~ 18m までの S 波速度 $120 \sim 160 \text{ m/s}$ の層と深さ $30 \sim 60 \text{ m}$ までの S 波速度 $190 \sim 360 \text{ m/s}$ の層の二層からなる冲積層、さらに、それ以深の層厚 $170 \sim 540 \text{ m}$ の洪積層 (S 波速度 $700 \sim 850 \text{ m/s}$) から構成され

図 2 SMART-1 アレーの平面図^{16),20)}図 3 同一地震に対する加速度応答スペクトルのばらつきの例 (SMART-1 アレー, 1986/5/20 5:37, EW 成分, 減衰比 $h = 0.05$)

ている。東西断面についてはほぼ水平な成層構造を成しているが、南北断面では洪積層の上面が傾斜しており、E02 の南側で洪積層が地表に現れている。このため、E02 の観測記録を除外して統計解析を行った。また、本アレー記録のサンプリングレートは 100Hz である。

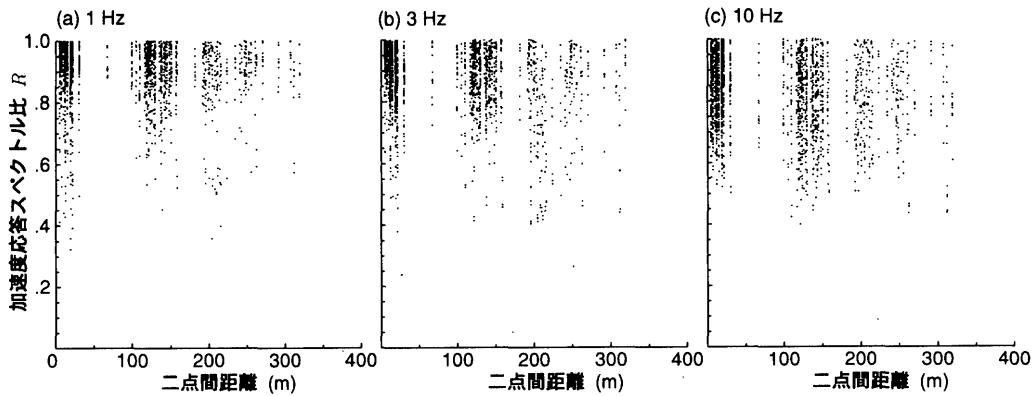
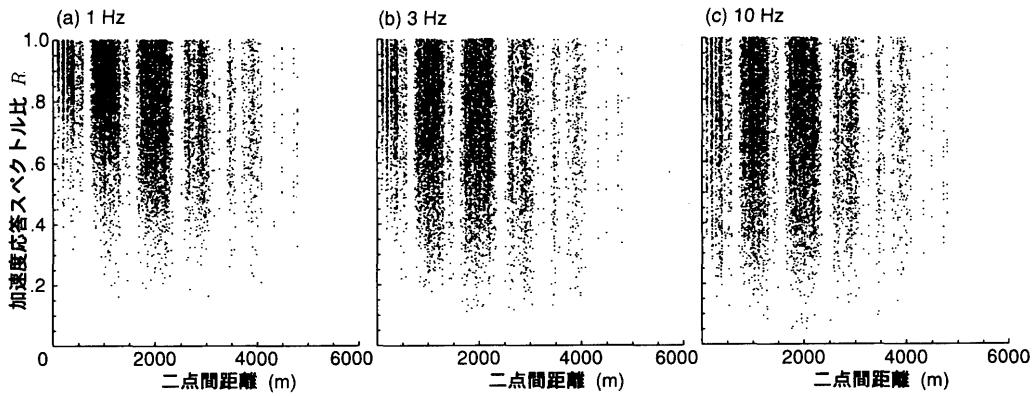
3.2.2 地震記録の概要²⁰⁾

千葉アレーの場合と同様に、アレーの半数以上の観測点において鉛直成分の最大加速度が 10 cm/s^2 以上の 24 地震を用いて統計解析を行った。これらの地震は 1980 年 10 月 14 日から 1986 年 11 月 14 日までに観測されたものである。記録地震にはマグニチュード $M_L 6$ 程度の地震が多く含まれており²⁰⁾、千葉アレーの観測記録と比べて、最大加速度が大きい記録が比較的多い。観測記録中の最大加速度は 375 cm/s^2 ($M_L 6.5$, 震央距離 22 km)，最大マグニチュードは 7.0 (震央距離 79 km)，最小マグニチュードは 3.6 (震央距離 3 km) である。

4 応答スペクトル比の分布

4.1 応答スペクトルの算定

広い振動数帯域の応答スペクトルを精度良く求めるため、以下の点に留意して応答スペクトルを算定した。まず、千葉アレーと SMART-1 アレーは共に AD 変換器のビット数が少なく、かつ強震観測を目的とするため、小さい振幅の地震動の場合に記録の精度が相対的に低いものとなる。このため、両アレーともに鉛直動成分の観測記録の半数以上で 10 cm/s^2 以上の最大加速度が観測されていることを記録地震の採否の基準として設けた。また、一部

図 4 千葉アレーにおける加速度応答スペクトル比の分布 ($h = 0.05$, EW 成分)図 5 SMART-1 アレーにおける加速度応答スペクトル比の分布 ($h = 0.05$, EW 成分)

の記録では波形のオフセットなどの低振動数成分のノイズが含まれているため、0.2–0.3Hz で低振動数成分を遮断するチェビシェフフィルタ²¹⁾に通した後に応答スペクトルを求めた。統計解析を行った振動数は 0.5 Hz~15 Hz の範囲の 13 振動数、また、減衰比 h は 0.01, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2 の 5 通りである。

図 3 に、同一アレー内で見られる加速度応答スペクトルのばらつきの例として、SMART-1 アレーにおける 1986 年 5 月 20 日 5 時 37 分、 $M_L 6.2$ 、震央距離 71 km の地震の加速度応答スペクトルを示す。SMART-1 アレーの領域はそれほど大きいものではないにも拘わらず、図 3 に示すように応答スペクトルは各振動数で 4~5 倍程度の範囲に分布しており、その散布度は決して小さいとは言えない。また、スペクトルの対数値はほぼ同じ幅で分布すること、ただし、スペクトルピークを与える 5 Hz 以上ではごくわずかながら分布範囲が広くなる傾向が窺われることなども指摘できる。この傾向に関しては 5.2 で詳しく述べる。

4.2 応答スペクトル比の算定と二点間距離グループの導入

図 4、図 5 に減衰比 $h=0.05$ に対する千葉アレーと SMART-1 アレーの EW 成分の加速度応答スペクトル比の分布を示す。横軸は二点間距離 L である。

図 4 を見ると、千葉アレーにおける二点間距離が数十 m の場合のように極めて近い二点においても、0.3 (1 Hz) ~ 0.5 (10 Hz) のような小さい値を示すことがある、応答スペクトルが非常に大きい散布度を示すことがわかる。また、データ数があまり多くない千葉アレー (図 4) ではあまり明瞭に見ることはできないが、SMART-1 アレーの場合 (図 5) では 1, 3, 10 Hz と振動数が変化するにつれて、応答スペクトル比の最小値がより小さい値を示しており、振

動数が応答スペクトル比の散布度に与える影響が窺われる。

一方、二点間距離の変化に対する応答スペクトル比の分布の変化については、二点間距離の値によってデータ数の偏りが大きいこと、さらに応答スペクトル比の散布度が非常に大きいことなどから、散布図を一見ただけでその統計的な性質を把握することは難しい。本研究では、このようなアレー内の地震計の配置に伴うデータ数の偏り (二点間距離の分布) を考慮して、表 1、表 2 に示すように、千葉アレーでは 3 グループ、SMART-1 アレーでは 5 グループに分割し、それぞれのグループ内では応答スペクトル比が同じ確率分布に従うものとして、平均値 μ_R 、標準偏差 $\sigma_{P'}$ などの統計量を算定した。

5 加速度応答スペクトル比の平均値 μ_R と標準偏差 $\sigma_{P'}$

5.1 二点間距離の影響

図 6 に減衰比 $h = 0.05$ の場合の加速度応答スペクトル比の平均値 μ_R と標準偏差 $\sigma_{P'}$ を示す。横軸は各グループごとの二点間距離の単純平均である。図 6 から、検討を行ったすべての振動数において、二点間距離の増加に対し平均値 μ_R が減少、標準偏差 $\sigma_{P'}$ が増加する傾向を示すことがわかる。そしてこの傾向は、若干の不連続性は見られるものの、条件が大きく異なる二つのアレーに共通の連続的な関係と言える。

この二点間距離の増加に対する応答スペクトル比の散布度の増加は、式(2)(3)に基づいた場合、二点の応答スペクトルの対数値の相関係数 ρ の減少によるものと考えることができる。図 6 に示される標準偏差 $\sigma_{P'}$ から、式(3)において二点間距離が十分に大きい場合に相関係数 ρ を 0 として σ_Z を求め、 ρ を二点間距離の関数として推定することが可能である。しかしながら、図 6 におけ

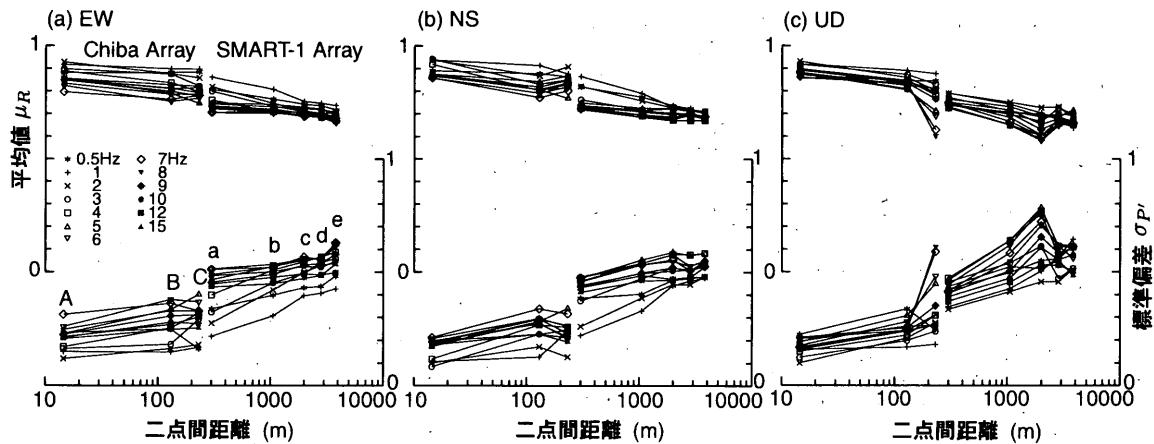


図 6 減衰比 $h=0.05$ の場合の加速度応答スペクトル比の平均値 μ_R 、標準偏差 $\sigma_{P'}$ と二点間距離の関係、(a) EW 成分、(b) NS 成分、(c) UD 成分

表 1 千葉アレーデータベースにおける二点間距離で分けたグループごとの応答スペクトル比のデータ数

| グル ープ | 二点間距離 L (m) | | 比のデータ数 | | |
|----------|-------------------|-------|--------|-------|-------|
| | 範囲 | 平均 | EW | NS | UD |
| A | $0 < L \leq 40$ | 14.4 | 900 | 900 | 900 |
| B | $40 < L \leq 160$ | 129.3 | 617 | 617 | 617 |
| C | $160 < L$ | 230.3 | 252 | 252 | 252 |
| 計 | | | 1,769 | 1,769 | 1,769 |

表 2 SMART-1 アレーデータベースにおける二点間距離で分けたグループごとの応答スペクトル比のデータ数

| グル ープ | 二点間距離 L (m) | | 比のデータ数 | | |
|----------|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 範囲 | 平均 | EW | NS | UD |
| a | $0 < L \leq 650$ | 299.2 | 1,368 | 1,389 | 1,357 |
| b | $650 < L \leq 1,600$ | 1055.0 | 3,628 | 3,628 | 3,583 |
| c | $1,600 < L \leq 2,400$ | 1988.5 | 3,803 | 3,777 | 3,787 |
| d | $2,400 < L \leq 3,200$ | 2826.1 | 1,315 | 1,297 | 1,305 |
| e | $3,200 < L$ | 3809.9 | 571 | 563 | 571 |
| 計 | | | 10,685 | 10,654 | 10,603 |

る $\sigma_{P'}$ が大きな二点間距離に対して一定値に明らかに漸近していると見做すには少し問題がある。実際、前報における最大加速度に対する著者らの同様の検討において、その比の標準偏差 $\sigma_{P'}$ を式(2)(3)によって良く近似できたが、一方で、標準偏差 σ_Z と相関係数 ρ を一意に精度良く分離して評価するには至っていない¹¹⁾。本研究における応答スペクトルの場合においても相関係数 ρ を分離し、これと二点間距離の関係を作図することは現状では問題があると考えられる。今後の問題点としたい。

図 6 の、互いによく似た形状の水平二成分について着目すると、0.5~2 Hz 程度の低振動数で比較的小さい散布度、5~7 Hz の振動数で大きい散布度を示すことがわかる。そして、二点間距離の変化に対して、この大小関係が大きく入れ替わることはない。なお、水平成分の標準偏差 $\sigma_{P'}$ の最小値は千葉アレー A グループの NS (3Hz) における 0.084、また、最大値は SMART-1 アレー e グループの EW, 7Hz における 0.63 である。鉛直成分の場合も、水平二成分の場合と同じような傾向を示している。

ところで、応答スペクトル比が半区間対数正規分布に従う場合には、その標準偏差 $\sigma_{P'}$ と平均値 μ_R は式(4)で示される関数関係にある。図 7 は、千葉アレーと SMART-1 アレーにおける加速度応答スペクトル比（減衰比 $h=0.05$, EW 成分）の平均値 μ_R と標準偏差 $\sigma_{P'}$ の関係を示したものである。図中の実線が式(4)の関係を示す。著者らは、最大加速度の場合にこの関係がよく満たされることを示しているが、図 7 から応答スペクトルの場合においてもこの関係がよく満たされることがわかる。

5.2 振動数と減衰比の影響

図 8 に千葉アレー A, B, C グループ、SMART-1 アレー a, c, e グループの加速度応答スペクトル比（減衰比 0.05, EW 成分）の平均値 μ_R と標準偏差 $\sigma_{P'}$ の振動数との関係を示す。

各グループごとの平均値 μ_R と標準偏差 $\sigma_{P'}$ の全体的な形状に着目すると、二つのアレーのすべてのグループで同じような形状を示しており、標準偏差 $\sigma_{P'}$ の場合には 1, 2 Hz 付近の極小値と 5~7 Hz 付近の極大値、平均値 μ_R の場合、1, 2 Hz 付近の極大値、5~7 Hz 付近の極小値で特徴付けられる。

図 9 は本解析で用いた SMART-1 アレー記録から C00 観測点の記録が存在する 20 地震の EW 成分、減衰比 0.05 の加速度応答スペクトルを重ね書きしたものである。図 9 に見るように、それぞれの加速度応答スペクトルはマグニチュードに応じたスペクトル形状を示しているが、5~7 Hz に極大値を持つ地震記録が多いことがわかる。また、千葉アレーにおいても同様の傾向が見られることから、地震動の卓越振動数の周辺で加速度応答スペクトル比のばらつきが大きくなることも考えられる。ただし、マグニチュードや震央距離などの地震諸元は応答スペクトル比の散度に対して単調増加、減少のような単純な影響を与えるわけではないこと¹³⁾、また、地震諸元の影響だけでなく地盤の增幅特性の影響についても考察する必要があることなどの理由から、このメカニズムを明らかにするためには、地盤条件の異なる他のアレーにおける、広範囲のマグニチュードの地震記録の統計解析が今後必要であると考えられる。

図 10 は、減衰比 h が加速度応答スペクトル比の平均値 μ_R と標準偏差 $\sigma_{P'}$ に与える影響を示したものである。この図から、検討を行った $h=0.01 \sim 0.2$ までの広い範囲の減衰比の対数の增加に対して、平均値 μ_R と標準偏差 $\sigma_{P'}$ はほぼ直線的にそれぞれ増加、減少することがわかる。ただし、この変化量は二点間距離や振

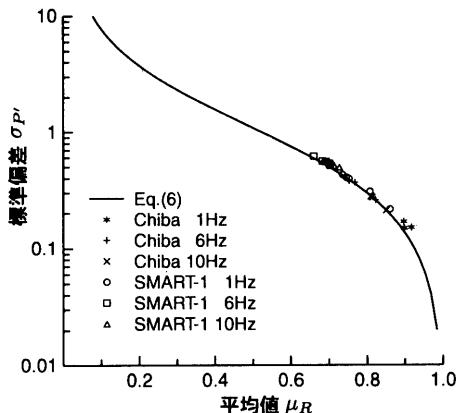


図 7 加速度応答スペクトル比の平均値 μ_R と標準偏差 $\sigma_{P'}$ の関係 (減衰比 $h=0.05$, EW 成分)

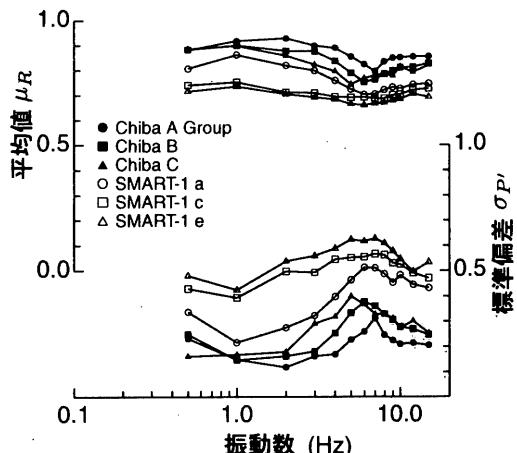


図 8 加速度応答スペクトル比の平均値 μ_R , 標準偏差 $\sigma_{P'}$ と振動数の関係 (減衰比 $h=0.05$, EW 成分)

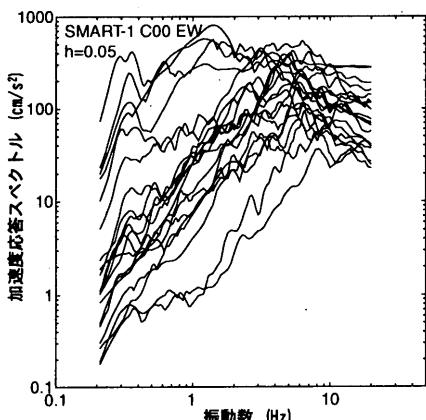


図 9 SMART-1 アレーの C00 観測点における 20 地震の加速度応答スペクトル (EW 成分, $h=0.05$)

動数が与える影響に比べて小さい。また、減衰比が加速度応答スペクトル比の分布に与える影響は、二点間距離の各グループのそれぞれに対して成り立つものであり、加速度応答スペクトルの非空間的な確率分布の性質を表している。

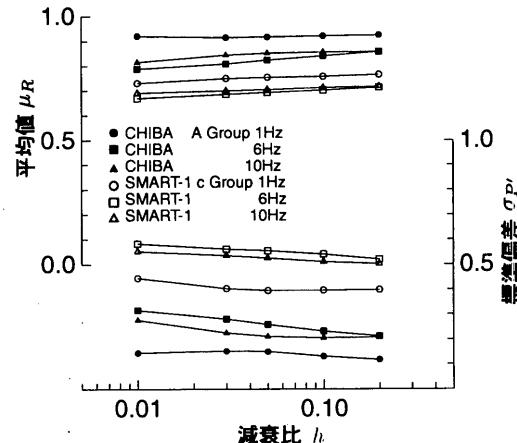


図 10 加速度応答スペクトル比の平均値 μ_R , 標準偏差 $\sigma_{P'}$ と減衰比 h の関係 (千葉アレー A グループ, SMART-1 アレー c グループ, EW 成分)

6 加速度応答スペクトル比の確率密度関数と%位値

6.1 確率密度関数

図 11, 図 12 はそれぞれ、千葉アレーと SMART-1 アレーにおける、減衰比 $h = 0.05$ に対する EW 成分の加速度応答スペクトル比の確率密度関数を示したものである。図中、●, ■などの記号付きの線は発生頻度から求めた確率密度関数を示している。また、推定した標準偏差 $\sigma_{P'}$ を式(2)に代入して求めた半区間対数正規分布の確率密度関数を、発生頻度から求めた確率密度関数と同種の線で示している。発生頻度による確率密度関数は、 $0 < R \leq 1$ の範囲を 20 等分して算定した。示した三つの振動数 1Hz, 6Hz, 10Hz のうち、1Hz, 6Hz はそれぞれ、標準偏差 $\sigma_{P'}$ の極小値、極大値を与える振動数にほぼ対応している (図 8 参照)。

発生頻度から求めた確率密度関数を見ると、二点間距離が小さい千葉アレーにおける 1 Hz の場合には三つのグループともに 1 に近いスペクトル比を示す確率が高く、小さなスペクトル比を与える確率は急速に減少する。これに対して 6 Hz, 10 Hz の場合には、最頻値が 0.9~0.8 程度を示し、また、0.5 程度の応答スペクトル比を示す確率も認められるように変化していることがわかる。

発生頻度から求めた確率密度関数と半区間対数正規分布の確率密度関数を比較すると、半区間対数正規分布の確率密度関数は、A グループの 1 Hz の場合に大きい加速度応答スペクトル比を与える確率を過小評価する傾向を示しているものの、その他のグループや、6 Hz, 10 Hz の場合などでは発生頻度から求めた確率密度関数をよく近似するものとなっていることがわかる。

SMART-1 アレーの場合には、千葉アレーよりも二点間距離が大きいことを反映して、0.5 以下のスペクトル比をとる確率は千葉アレーの場合と比べてより大きい値を示す。また、これに対応して大きいスペクトル比を示す確率が低減するため、確率密度関数は明瞭な最頻値を示さない平坦な形状に変化している。なお、SMART-1 アレーにおいても、振動数の変化による確率密度関数の変化が顕著であること、発生頻度による確率密度関数が半区間対数正規分布でよく近似されることなどは千葉アレーの場合と同様である。

6.2 %位値

ある確率変数 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・指數を求めるだけで相互の変換が可能である。このため、対数正規分布に近似される確率分布を検討する

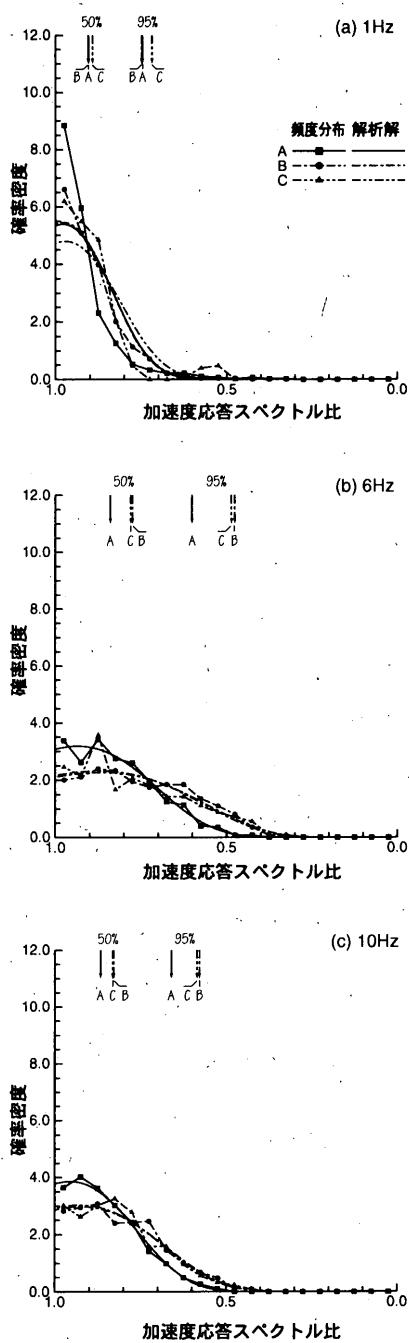


図 11 千葉アレーにおける加速度応答スペクトル比の確率密度関数

上では有効な指標である。本研究では、加速度応答スペクトル比の代表値として 50%位値、また、危険率を 5%とした場合に加速度応答スペクトル比の生じ得る最小値と見做すことができる 95%位値を式(5)に基づいて算定した。

得られた%位値を図 11、図 12 に各グループの確率密度関数と同種の線の矢印で示す。図 11 の千葉アレーでは、1 Hz の場合は三つのグループで顕著な違いは認められず、50%位値は 0.9 程度、95%位値は 0.7 程度を示している。また、比較的大きい散布度を示す 6 Hz の場合には、二点間距離が 40 m 以上の B, C グループにおける 50%位値は 0.78 程度、95%位値は 0.48 程度である。これらのことから、千葉アレーのように二点間距離が数十～数百 m

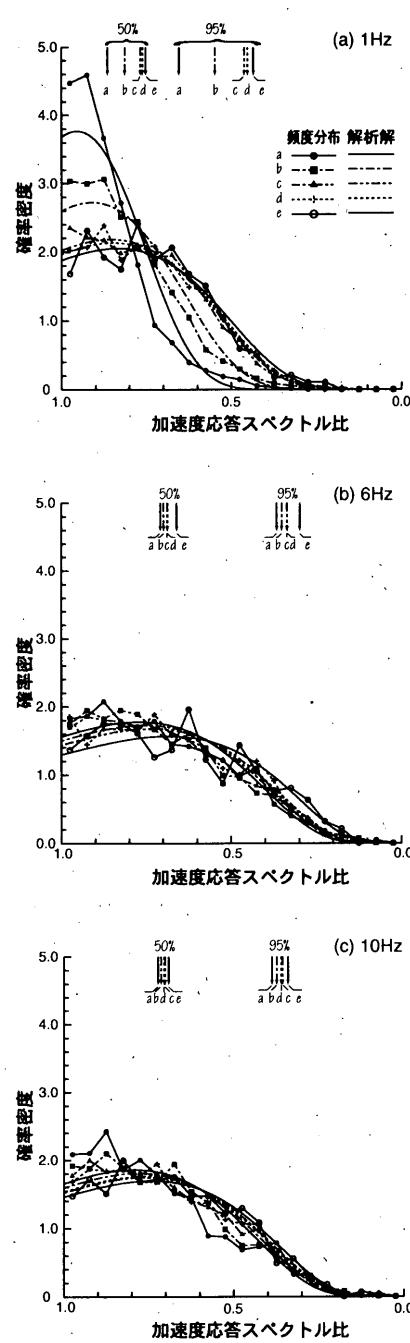


図 12 SMART-1 アレーにおける加速度応答スペクトル比の確率密度関数

の範囲にある場合には、応答スペクトルの散布度が比較的小さい振動数帯域に対しては、50%の確率で 0.9~1.1 倍程度、最大でも(95%の確率で) 0.7~1.4 倍程度の分布範囲にあることを想定すればよく、また、散布度の大きい振動数帯域においても 50%の確率で 0.8~1.25 倍程度、最大で 0.5~2 倍、すなわち「倍半分」程度の分布範囲を想定すればよいと言える。

図 12 の SMART-1 アレーの場合には、千葉アレーよりも大きい散布度を示すことに対応して 50%, 95%位値はより小さい値を示す。まず、1 Hz の場合には a, b グループと他のグループで明らかな違いがあり、a グループの 50%位値、95%位値がそれぞれ、0.85, 0.65 程度、b グループではそれぞれ 0.8, 0.55 程度を示している。

また, c, d, e グループでは顕著な違いは認められず, 50%位値, 95%位値はそれぞれ, 0.75, 0.45程度である。これに対して 6 Hz, 10 Hz の場合には、二点間距離の違いによる影響は小さく、全てのグループの 50%位値, 95%位値がそれぞれ, 0.65~0.7, 0.3~0.35程度の範囲にある。従って、加速度応答スペクトルの散布度が比較的小さい振動数帯域に対しては、二点間距離が 1km 程度以内の場合 (b グループ) では、50%の確率で 0.8~1.25 倍程度、最大でも 0.55~1.8 倍程度、数 km 程度離れた二点では多少の距離の違いにはあまりこだわらずに、50%の確率で 0.75~1.3 倍程度、最大で 0.45~2.2 倍程度の分布範囲を想定すればよいと言える。一方、大きい散布度を示す振動数帯域では二点間距離の違いにあまりこだわる必要はないが、50%の確率で 0.7~1.4 倍程度、最大で 0.35~3 倍程度の、より広い分布範囲を想定する必要がある。

7 結論

本研究では応答スペクトルの空間的な確率分布に着目し、応答スペクトルの比 (応答スペクトル比) を用いて、二点間で生じる応答スペクトルの差異について検討した。まず、最大加速度の空間的な確率分布を評価するために著者らが展開した半区間対数正規分布モデルについて簡単に説明した。次に、千葉アレー、SMART-1 アレーにおける観測記録を用いて、振動数、減衰比を変えて応答スペクトル比を求めた。そして、応答スペクトル比の平均値 μ_R 、標準偏差 $\sigma_{P'}$ 、確率密度関数、50, 95%位値を算定し、これらの結果に基づいて、以下の点を指摘した。

1. 加速度応答スペクトル比の平均値 μ_R と標準偏差 $\sigma_{P'}$ は振動方向、振動数に拘わらずに、二点間距離の増加に従ってそれぞれ減少、増加する。そして、この傾向は条件が大きく異なる千葉アレー、SMART-1 アレーの二つのアレーで共通であり、ほぼ連続的な関係を示した。
2. 加速度応答スペクトル比は半区間対数正規分布に基づく標準偏差 $\sigma_{P'}$ と平均値 μ_R の関係式 (4) をよく満足する。
3. 両アレーにおける加速度応答スペクトル比の標準偏差 $\sigma_{P'}$ は二点間距離の違いに拘わらず、1, 2 Hz 付近の極小値と 5~7 Hz 付近の極大値で特徴付けられる形態を示す。また、これに対応して平均値 μ_R は 1, 2 Hz 付近の極大値、5~7 Hz 付近の極小値を示す。
4. 加速度応答スペクトル比の平均値 μ_R と標準偏差 $\sigma_{P'}$ は減衰比の対数の増加に対して、ほぼ直線的にそれぞれ増加、減少する。ただし、この変化量は二点間距離や振動数による影響に比べて小さい。
5. 加速度応答スペクトル比の確率密度関数は半区間対数正規分布によってよく近似することができる。
6. 上記 1, 3 に関連して、千葉アレーの場合 (二点間距離が数十~数百 m) では、加速度応答スペクトルは散布度が比較的小さい 1, 2 Hz において、50%の確率で 0.9~1.1 倍程度、最大 (95%位値) で 0.7~1.4 倍程度の範囲に分布する。また、散布度の大きい 5~7 Hz の振動数帯域では 50%の確率で 0.8~1.25 倍程度、最大で 0.5~2 倍程度の範囲に分布する。
7. SMART-1 アレーの場合、散布度が比較的小さい 1, 2 Hz の振動数に対して、二点間距離が 1 km 程度の場合 (b グループ) では、50%の確率で 0.8~1.25 倍程度、最大で 0.55~1.8 倍程度、数 km 程度離れた二点では多少の距離の違いにはあまり拘らずに、50%の確率で 0.75~1.3 倍程度、最大で 0.45~2.2

倍程度の範囲に分布する。また、散布度の大きい振動数帯域では二点間距離の違いによる影響は小さく、50%の確率で 0.7~1.4 倍程度、最大では 0.35~3 倍程度の範囲に分布する。

謝辞 本研究では、震災予防協会によるアーデータベースに収録された東京大学生産技術研究所によるアレー観測記録、並びに SMART-1 アレーにおけるアレー観測記録を用いました。本研究の数値計算の一部は Shaileendra Sharma 氏 (当時埼玉大学理工学研究科) によるものです。関係各位に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 武藤 清、菅野 忠、宮村正光、花島 実、源栄正人：1978 年の宮城県沖地震で観測された波形の分析 第一報近接地 3 点の波形比較、日本建築学会論文報告集, 291, pp.45-52, 1980. 5.
- 2) 和泉正哲、果田 哲、飯塚節夫、佐藤智美、相羽朋紀：アレー地震動記録を用いた地震波の相関性と伝達特性に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文報告集, 395, pp.28-39, 1989. 1.
- 3) 四幸史朗：高密度アレー観測データを用いた地震動の空間的相関構造の解明、日本建築学会構造系論文集, 490, pp.55-63, 1996. 12.
- 4) Schueller, 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.
- 5) Boore, D. M., Joyner, W. B., Oliver, A. A. and Page, R. A.: Peak acceleration, velocity, and displacement from strong-motion records, Bull. Seism. Soc. Am., 70, 1, pp.305-321, 1980. 2.
- 6) Campbell, K. W.: Near-source attenuation of peak horizontal acceleration, Bull. Seism. Soc. Am., 71, 6, pp.2039-2070, 1981. 12.
- 7) 片山恒雄、岩崎敏男、佐伯光昭：地震動加速度応答スペクトルの統計解析、日本学会論文集, No.275, pp.29-40, 1978. 7.
- 8) McGuire, R. K.: Seismic design spectra and mapping procedures using hazard analysis based directly on oscillator response, Earthquake Engng. Struct. Dyn., 5, pp.211-234, 1977.
- 9) Spanos, P.-T. D.: Response spectra of evolutionary earthquake models, 7th WCEE, 2, pp.387-390, 1980. 9.
- 10) 河野允宏、小堀義一：ランダム地震動モデルの平均応答スペクトラ特性、日本建築学会論文報告集, 338, 1984. 4.
- 11) 川上英二、茂木秀則：強震動ア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. 7.
- 12) 茂木秀則、川上英二：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/I-51, pp.369-378, 2000. 4.
- 13) Kawakami, H. and Sharma, S.: Statistical study of spatial variation of response spectrum using free field records of dense strong motion arrays, Earthquake Engng. Struct. Dyn., 28, pp.1273-1294, 1999. 11.
- 14) Hoel, P. G.: 入門数理統計学、浅井 見、村上正康訳、培風館、1978.
- 15) 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 1991 年度報告書, 1992. 10.
- 16) 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/EERC-82/13, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1982. 8.
- 17) Oliveira, C. S. and Penzien, J.: Spatial variation of seismic ground motions based on SMART-1 array data, Proceedings of the Trilateral Seminar-Workshop on Lifeline Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, pp.59-75, 1985. 11.
- 18) Loh, C.-H.: Analysis of the spatial variation of seismic waves and ground movements from SMART-1 array data, Earthquake Eng. Struct. Dyn., 13, pp.561-581, 1985. 9.
- 19) Figueras, S., Roca, A., Goula, X. and Blázquez, R.: Larger soil amplification for stronger ground motion from SMART-1 records, 10th WCEE, 2, pp.1043-1048, 1992.
- 20) SM-TAI04 磁気テープ添付資料。
- 21) 斎藤正徳：漸化式ディジタル・フィルターの自動設計、物理探査, 22, 6, pp.240-263, 1978. 8.

(2001年3月22日原稿受理、2001年9月14日採用決定)