

# 硬質地盤における地震動の予測モデル

江尻 讓嗣 後藤 洋三

## Prediction Model of Earthquake Accelerograms on Stiff Ground

Joji Ejiri Yozo Goto

### Abstract

This paper presents a procedure for synthesizing strong motion accelerograms to be used in structural response analysis. At first, the authors modeled accelerograms with a stochastic time series model based on the non-stationary second-order autoregressive-moving average (AR-MA) process. Using this model, the non-stationary characteristics of accelerograms were examined in detail as AR-MA parameters. Using the records on stiff ground obtained in Japan from 1964 to 1980, attenuation laws were proposed employing regression analysis. The constructed prediction model generates an earthquake accelerogram for a given magnitude ( $M$ ) and epicentral distance ( $d$ ). The applicability of the attenuation laws was also examined using mean response spectra obtained from predicted accelerograms.

### 概 要

硬質地盤上で観測された地震観測記録から、自己回帰—移動平均過程により地震動の非定常特性を抽出し、それらとマグニチュード( $M$ )、震央距離( $d$ )の関係を回避解析により求め $M \cdot d$ が与えられた時に耐震設計用の非定常地震動を予測することを試みた。

この研究により以下の結果を得た。(1) 想定した地震の $M$ 、注目地点からの $d$ に対し、時間的空間的に平均的な特性をもつ地震動を予測するモデルが求められた。(2) 予測される地震動ならびにその絶対加速度応答スペクトルの $M \cdot d$ に対する定性的傾向は、既往の研究成果と良い一致を示した。(3) 計器特性の補正により、最大加速度は、平均で、1.5倍程度大きくなり、スペクトルの卓越周期も短周期側に移り、0.10~0.15秒程度になる。

### 1. まえがき

構造物のみならずそれを支持する周辺地盤の震動特性を考慮した線形あるいは非線形の動的応答解析を実施するためには、入力地震動の特性として、最大強度特性のみではなく、非定常な強度特性や周波数特性、継続時間などの諸特性を明確にすることが必要である。従来の動的応答解析には、複数個の代表的な地震記録(例えば、ElCentro1940NS, Taft1952EW)の最大強度や周波数特性を目的に応じて、適当に調整した波形が入力として一般に用いられる。しかし、このような地震記録にはそれが観測された地点に固有の地盤の震動特性が強く反映されていたり、 $M \cdot d$ などの地震動パラメータの地震動への影響を特定してしまうことになるために、構造物の建設予定地点に襲来するであろう地震動の特性を十分に有

した適切な入力地震動とは、言い難い。以上の理由から、地震動特性に影響を及ぼす地震規模、距離、地盤条件などの要因を確率統計的手法により考慮して地震動を予測する試みが行なわれてきた。

既往の研究は<sup>1),3)</sup>、大半が、地震動をスペクトルとして予測している。しかし、動的応答解析(特に非線形)には地震動波形が不可欠であるから、地震動波形が直接予測される方が好ましい。そこで、本研究では、まず、自己回帰—移動平均過程(AR-MA)により地震動を時間軸上でモデル化する。つぎに硬質地盤上で観測された加速度記録から、地震動の非定常特性を、AR-MAモデルパラメータの形で抽出し、それらと $M \cdot d$ との関係を回避解析により求めることにより、 $M \cdot d$ が与えられた時に非定常な地震動を予測するモデルを形成する。最後に、予測される地震動の特性について、波形および絶対

加速度応答スペクトルにより検討を加える。

### 2. 地震動のモデル化<sup>4)</sup>

地震動（加速度波形）は、式(1)に示す1次元2次の自己回帰—移動平均過程によりモデル化する。

このことは、観測された地震動  $y_t$  を、非定常な白色雑音  $\varepsilon_t$  が入力する線形フィルターの出力と考えることに相当する。

$$y_t = -\alpha_1(t)y_{t-1} - \alpha_2(t)y_{t-2} + \varepsilon_t + \beta_1(t)\varepsilon_{t-1} + \beta_2(t)\varepsilon_{t-2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

上式において、 $\alpha_i(t)$ ,  $\beta_i(t)$  ( $i=1, 2$ ) は、非定常なAR-MAパラメータである。このように、時刻  $t$  とともにパラメータが変化する過程を合理的に推定することは容易でないために、図-1に示すように観測された地震動に、周期  $T_m$  の長方形ウィンドウを乗じて求めたデータ列から定常なAR-MAパラメータを計算し、それをウィンドウの中央点時刻  $\tau_m$  における非定常なパラメータの推定値と考えた。

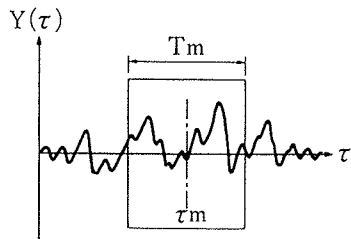


図-1 時刻  $\tau_m$  における解析域

このような方法によるとパラメータの推定値は、周期  $T_m$  によって左右され、 $T_m$  が短いほど、地震動の非定常構造がより詳細に推定できる。解析には、原則として  $T_m=1$  秒を用いた。ただし、特に顕著な非定常性を示す数波については、 $T_m=0.5$  秒とした。

また、白色雑音が入力する線形/自由度系の出力を、 $T_s$  でサンプリングしたデータ列は、2次のAR-MA過程となるので、 $\alpha_i$  は、線形/自由度系の固有円振動数  $\omega$  ならびに減衰定数  $h$  との間に次式の関係が成立する。

$$\lambda^2 + \alpha_1\lambda + \alpha_2 = 0 \quad \left. \begin{matrix} \lambda \\ \lambda^* \end{matrix} \right\} = \exp(-\omega h T_s \pm i\omega T_s \sqrt{1-h^2}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $i = \sqrt{-1}$ 、 $\lambda^*$  は  $\lambda$  の共役複素数である。なお解析には、 $T_s=0.02$  秒を用いた。

### 3. 解析の対象とした記録<sup>5), 6)</sup>

解析の対象とした地震記録は1964年から1980年の17年間に日本およびその周辺に発生した34個の地震において、工学的な解放基盤に相当すると考えられる日本各地の硬質地盤上（第1種地盤）で観測された88成分の水平加速度記録である。図-2に、地震記録の  $M$  と  $d$  に対する分布を示す。同図から、 $M \cdot d$  がともに大きいか、逆にともに小さい記録が大部分を占めていることがわかる。

硬質地盤で観測された地震動には、高振動数の波動成分が卓越することから、高振動数域で著しく感度の低下する機械式強震計により観測された記録には、何らかの補正を加える必要がある。

そこで、ここでは、計器特性の補正（振幅と位相）と高・低振動数の誤差除去のための常域フィルター処理を実施した。図-3にSMAC-B

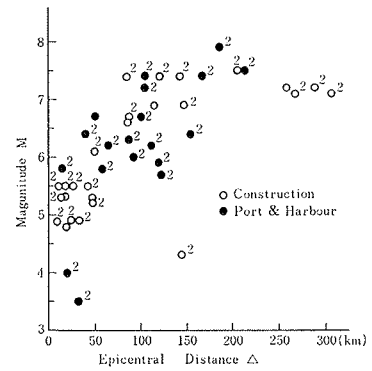


図-2 マグニチュードと震央距離の分布

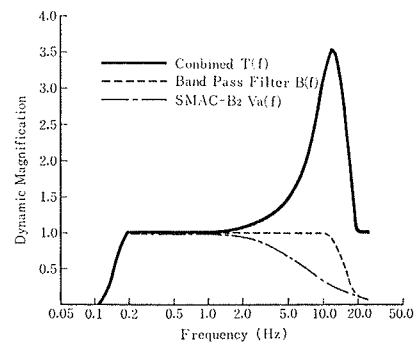


図-3 SMAC-B<sub>2</sub> の動特性とその補正

の振幅の感度特性、帯域フィルター、総合補正特性を示した。20Hz以上では、振幅の補正は行なわず、原記録の特性が保存されるようフィルターを工夫してある。他種のSMAC型強震

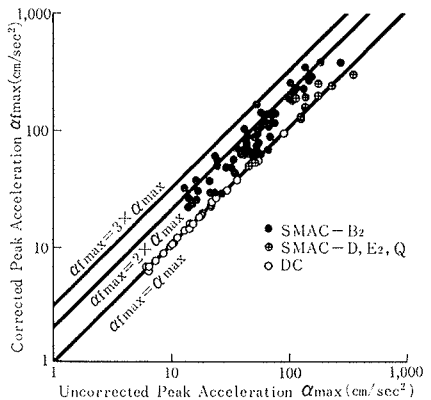


図-4 補正前後の最大加速度の比較

計による記録にも、同様の手法で補正を実施した。なお電磁式強震計による記録には、ハイパスフィルター処理のみを実施してある。このような補正は、最大加速度に、敏感に影響を与える。図-4には補正の前後における最大加速度の関係を示した。

SMAC-B<sub>2</sub> 以外の強震計で観測された記録は、補正前後で、ほとんど最大加速度の変化はないが、SMAC-B<sub>2</sub> のそれでは、補正後は、補正前に比べて、最大で約3倍、平均すると1.5倍程度大きくなる。

### 4. 非定常特性の抽出とモデル化<sup>7)</sup>

図-5には、AR-MA過程により抽出した地震動の非

定常特性の一例を示す。対象試録は、1978年2月20日の宮城県沖の地震 (M=6.7) の大船渡防地 (L=49 km, vs=1 km/sec の岩盤上) における加速度記録の S49E 成分である。

それぞれ(a)補正記録波形, (b) AR-MA 過程による模擬地震動波形, (c)入力強度を表わす標準偏差  $\sigma(t)$ , (d)卓越振動数  $f(t)$ , (e)減衰定数  $h(t)$  を示している。

(a), (b)を比較すると、模擬地震動波形は試録波形の全体的な包絡線形状などの強度および非定常特性を、ほぼ忠実に再現することがわかる。 $\sigma(t)$  は、地震動の包絡線関数に相当するものであるが、震動開始時刻から急激に立上がるがその減衰も早い。時間とともに、 $f(t)$  は減少

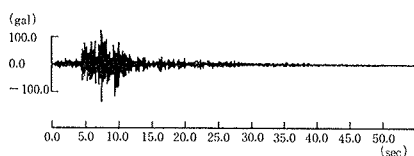


図-5(a) 計器特性補正後の原加速度波形

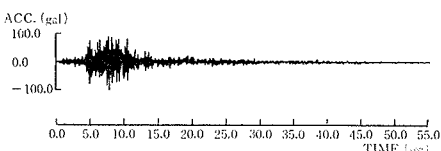


図-5(b) シュレートされた加速度波形

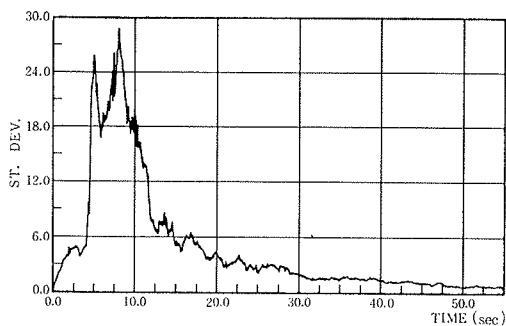


図-5(c) 入力強度パラメータ  $\sigma(t)$

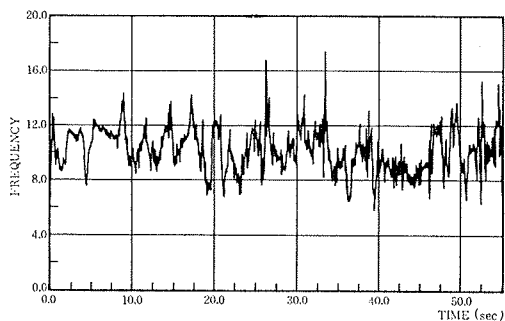


図-5(d) 卓越振動数パラメーター  $f(t)$

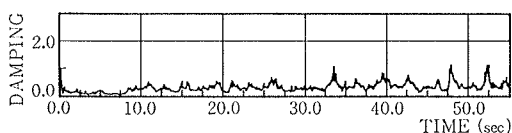


図-5(e) 減衰定数パラメーター  $h(t)$

し、 $h(t)$  は、増加する傾向が見られる。このように、代表的な地震記録から抽出した AR-MA パラメータの非定常特性を検討した結果、各パラメータを、表-2 に示す単純な時間関数でモデル化し、それを構成するパラメータを、88成分の地震記録から計算により求めた。

表-1 AR-MA パラメータの時間関数

$$\sigma(t) = \sigma_{\max}(t/tp) \cdot \exp(1-t/tp)$$

$$f(t) = f_A \cdot \exp(-f_B \cdot t)$$

$$h(t) = h_A \cdot \exp(h_B \cdot T)$$

$$\beta_1(t) = \bar{\beta}_1 = \frac{1}{T} \int_0^T \beta_1(t) dt \text{ (const.)}$$

$$\beta_2(t) = \bar{\beta}_2 = \frac{1}{T} \int_0^T \beta_2(t) dt$$

T: 各地震記録について同一の規準で求められた地震動継続時間<sup>8)</sup>

## 5. 地震動予測モデルの作成と予測地震動特性

地震動の非定常特性を表わす時間関数を構成する各パラメータと  $M \cdot L$  の関係を求めるために以下の回帰式を設定し、回帰分析を実施した。

$$\left. \begin{aligned} &\sigma_{\max}, f_A, h_A \text{ について} \\ &\log P = B_1 + B_2 \cdot M + B_3 \cdot \log(L+20) \\ &t_p, f_B, h_B, \bar{\beta}_1, \bar{\beta}_2, T \text{ について} \\ &P = B_1 + B_2 \cdot M + B_3 \cdot \log(L+20) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

表-1 には、各パラメータの回帰係数  $B_1, B_2, B_3$  と回帰式に対するバラツキを示す標準偏差  $\sigma_p$  を示す。

図-6 (a)~(d) には、 $\sigma_{\max}, f_A, h_A, T$  と  $M \cdot L$  の関係を示す。実線は、回帰式による値

回帰係数	B1	B2	B3	$\sigma_p$
$\log \sigma_{\max}$	2.30	0.23	- 1.29	0.33
$t_p$	-26.55	2.46	8.70	6.82
$\log f_A$	1.10	0.04	- 0.25	0.13
$f_B$	0.03	0.02	- 0.08	0.07
$\log h_A$	- 1.00	0.04	0.03	0.29
$h_B$	0.33	0.02	- 0.21	0.12
$\bar{\beta}_1$	0.37	0.001	- 0.007	0.26
$\bar{\beta}_2$	0.07	0.02	- 0.12	0.07
T	-49.51	4.07	22.06	10.41

表-1 回帰係数  $B_1, B_2, B_3$  と標準偏差  $\sigma_p$

を、プロットは、地震記録から求められた値である。 $\sigma_{\max}$  は、地震動の最大強度と同様のアテニュエーションの傾向を示す。

$f_A$  は、 $M$  に比例し  $L$  に逆比例する。 $L$  が長くなると  $f_A$  は、低下するが、これは、伝播経路の内部減衰が高振動数の波動成分に大きく効くことや特定の距離以上になると波動中に表面波が卓越してくるためと考えられる。

$h_A$  は、 $M$  に比例して大きくなるが、 $L$  に対しては、あまり変化しない。1自由度系の加速度応答倍率からわかるように、 $h$  は波動を透過するフィルターの幅に関するパラメータであるから、 $M$  が大きいほどフィルターが

広帯域となり、幅広い振動数域の波動成分を含むようになることを示している。Tは、 $M \cdot \Delta$ の両者に比例して長くなる。このことは、Mが大きくなると断層の破壊領域も大きくなり、断層の形成に時間を要すること、また、 $\Delta$ が長くなると、P波S波の到達時間差が大きくなりさらに、伝播経路における複雑な反射・屈折の影響を受けるようになるなどの理由で説明できる。

図-7には、 $M=6.5$ とした時に $\Delta$ を変化させた場合の地震動予測モデルによる予測地震動波形を示す。

図-8(a), (b)には、それぞれ、 $\Delta$ とMを変化させた時の絶対加速度応答スペクトルを示す。 $\Delta$ が短くなると応答量は、周期に無関係にほぼ一様の割合で大きくなり、応答の卓越する周期も、0.10~0.15秒の間でほとんど変化がない。Mが大きくなると応答量が大きくなり、応答が卓越する周期もやや長周期側に移る。応答の変化は、0.10~0.15秒を境として長周期側で著しいことがわかる。図-9に

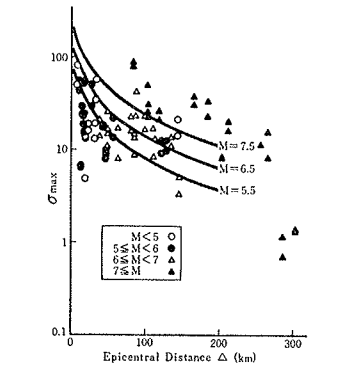


図-6(a)  $\sigma_{max}$ とマグニチュード、震央距離の関係

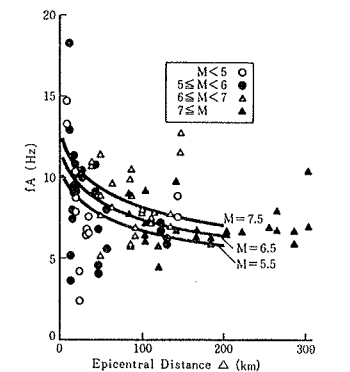


図-6(b) fAとマグニチュード、震央距離の関係

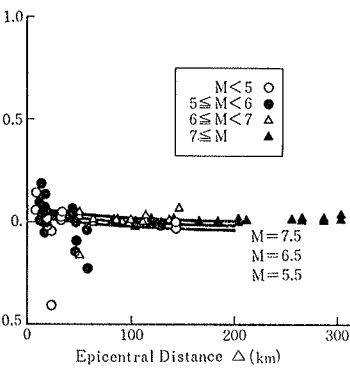


図-6(c) fBとマグニチュード、震央距離の関係

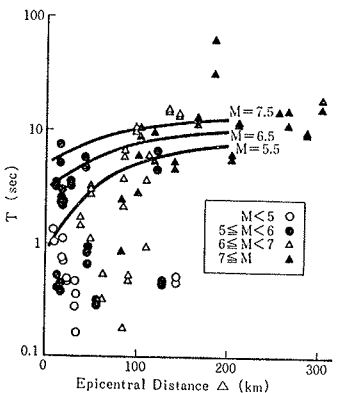


図-6(d) Tとマグニチュード、震央距離の関係

は、硬質地盤における既往アテニュエーションとの比較を示す。地震動予測モデルのアテニュエーションは、距離による減衰が小さく、同一の $M \cdot \Delta$ では、最大加速度が大きい。この差は、計器特性の補正、観測地点の地盤物性などの相異なるものと思われる。図-10には、大崎

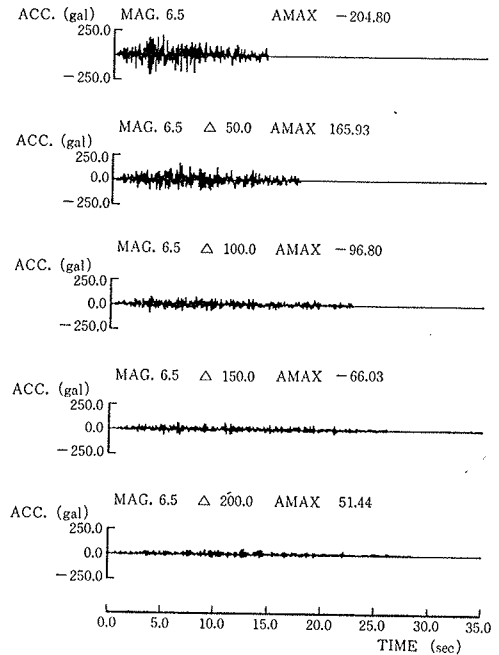


図-7 予測加速度波形に及ぼす震央距離の影響

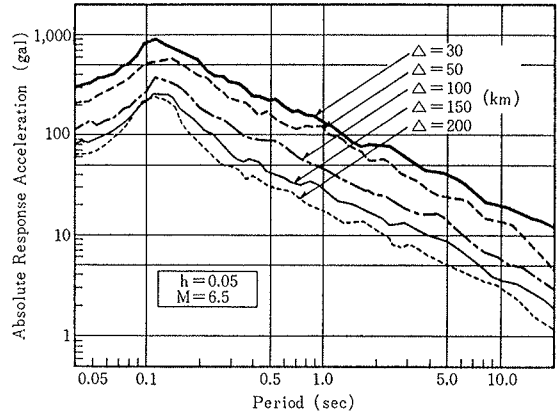


図-8(a) 予測波形の加速度応答スペクトルに及ぼす震央距離の影響

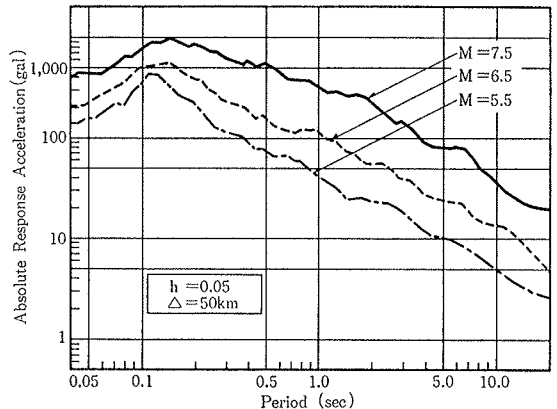


図-8(b) 予測波形の加速度応答スペクトルに及ぼすマグニチュードの影響

スペクトルと予測地震動のスペクトルとの比較を示す。(1)と(4), (3)と(5)のスペクトルは、短周期側では、比較的良い一致を示すが、0.5秒より長周期側では、予測地震動のスペクトルが大きくなる。(2)と(6)は応答にかなりの差があり0.10~0.15秒では、(2)が(6)の約2倍となっている。このことも、アテニュエーションの差で述べたのと同様の理由によるものと思われる。

## 6. まとめ

作成した地震動予測モデルに任意の  $M \cdot \Delta$  を与えて得られる予測地震動ならびにその絶対加速度応答スペクトルの傾向は、従来より定性的に指適されていた地震動の一般的傾向を良く反映している。定量的には、同一の  $M \cdot \Delta$  では、従来の成果に比較して、最大加速度、応答量ともに、若干、大きくなる。また、応答スペクトルにおいて応答の卓越する周期も短周期側にあり、その値は0.10~0.15秒程度である。

なお、今回の解析結果には、以下の様な問題点や検討課題が残されている。

- (1) 解析に使用した地震記録には、近距離・大地震に

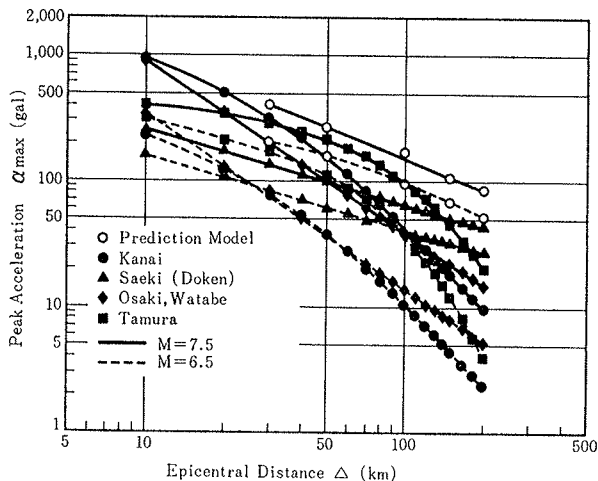


図-9 岩盤を対象とした各種アテニュエーションモデルとの比較

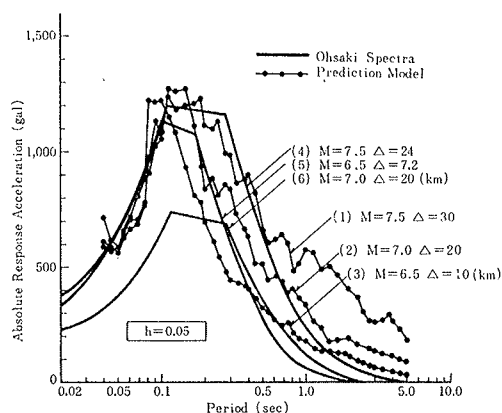


図-10 大崎スペクトルの比較

よるものがない。近距離・大地震を想定して予測した地震動のスペクトル特性は、大崎スペクトルと比較的良い対応を示したが、相対的に信頼性が低い。

(2) 時間関数を構成するパラメータの  $M \cdot \Delta$  回帰式に対するバラツキは、かなり大きい。この要因としては震源を点と考えていること、個々の地震の震源特性の相異、波動伝播経路の不均一性、観測点近傍の局所的地形や地盤構成・地盤物性の相異、観測方位の不統一、 $M \cdot \Delta$  の決定の際の不確定性など多くのものがある。これらについては、将来の質の良い観測記録の集積を待ってさらに検討を加える必要がある。

なお、本研究に用いた地震記録の大部分は、建設省土木研究所ならびに運輸省港湾技術研究所から公表されている資料より取ったものであり、両研究所に深謝する次第である。また、一部の記録は当所の振動研究室所有のものを使用させていただいた。

本研究は当所のテーマ研究として実施したものであるが、理論的手法は著者の一人、江尻が大学院在学中に京都大学防災研究所土岐憲三教授、佐藤忠信助教授の指導のもとに習得したものによっている。末尾ではあるが両先生に謝意を表したい。

## 参考文献

- 1) 片山, 岩崎, 佐伯: 地動加速度応答スペクトルの統計解析, 土木学会論文報告集, 第275号, (1978, 7), pp. 29~40
- 2) 翠川, 小林: 地震動の地震基盤からの入射波スペクトルの性質, 日本建築学会論文報告集, 第273号, (1978), pp. 43~54
- 3) T. Hisada, Y. Ohsaki, M. Watabe and T. Ohta: Design Spectra for Stiff Structures on Rock, Proc. 2nd. Int. Cont. on Microzonation Vol. III San Francisco, (Nov. 1978), pp. 347~358
- 4) 土岐, 佐藤, 江尻: 時系列理論による強震動のシミュレーション, 京都大学防災研究所年報, 23号B-2, (1980, 4), pp. 1~12
- 5) 建設省土木研究所: 土木構造物における加速度強震記録 (No. 1~8)
- 6) 運輸省港湾技術研究所: 港湾地域強震観測年報, No. 236~287
- 7) 土岐, 佐藤, 江尻: 時系列理論による強震動予測モデルとその応用, 第6回日本地震工学シンポジウム, (1982, 12), pp. 385~392
- 8) Trifunac, M. D. and A. G. Brady: A Study on the Duration of Strong Earthquake Ground Motion, BSSA, Vol. 65, No. 3, (1975), pp. 581~626
- 9) 軽水炉改良標準化耐震設計小委員会: 耐震設計の標準化に関する調査報告書 (総論), (1981, 6)