

山口県における過去および将来の最大地震加速度の推定

三浦 房紀*・村元 浩二**・佐貫 重文***

Estimation of Seismic Activity in Yamaguchi Prefecture

Fusanori MIURA, Koji MURAMOTO and Shigefumi SANUKI

Abstract

The purpose of this paper is to make clear the seismic activity in Yamaguchi Prefecture in the past and the future.

First, we collected earthquake data in Yamaguchi, Tokyo and Osaka Prefectures and set up a data base of the data. Based on the data base, the maximum ground acceleration in these prefectures were estimated using commonly used attenuation laws.

Then, we estimated the expected maximum ground acceleration in the future with the aid of a probabilistic technique. The maximum value in Yamaguchi Prefecture was from one-third to a half of those in Tokyo and Osaka Prefectures.

1. まえがき

昭和53年6月に、「大規模地震対策特別措置法」が制定され、翌年8月に東海地域が地震防災対策強化地域の第1号に指定された。この他にも、全国に観測強化地域、特定観測地域が指定されており、世界の地震活動度から見れば、わが国はその全土が地震活動域であると言っても決して過言ではない。このような地震国においては、各種構造物、施設、あるいは人命をも含めて、地震によって引き起こされるあらゆる種類の被害に対して十分な対策を講じておく必要がある。

しかしながら、地震の予知が完全には行えない今日の現状を考えると、確率的あるいは統計的手法を用いて将来の地震動を推定しておくことは、対策を立てる上において極めて重要である。いわゆるサイズミックゾーンーション、あるいは地震危険度解析の必要性が高いわけである。

震害データの収集と分析から始まったわが国における地震危険度に関する研究は、その先駆者とも言える

河角によって、河角マップと呼ばれる日本地図上に示された地震震度期待値の分布図にまとめられている¹⁾その後、多くの研究者によって、改良、修正が加えられて今日に至っているが、これらの研究は日本全体を対象としているものがほとんどである²⁾しかしながら、きめ細かな防災対策・軽減対策を策定するに当ってはこれでは不十分で、局所的な地域、たとえば県単位、あるいは都市圏を対象とした研究も始められている。いわゆるマイクロゾーンーションである。ところが、これは始められて間もないこともあって、全国的にみてもかなり限られた地域で行なわれているに過ぎず、ここ山口県も未だ行なわれていないのが現状である。

ただ、山口県は他の地域に比較して、地震活動が低いことは一般に地震学者、あるいは地震工学者にも認められており、その一つの現れが耐震設計に用いる地域係数が全国で最も低い地域に属していることである。従って、ここでは単に山口県の地震危険度を評価するだけでなく、他の地域、例えば東京、大阪と比較してどの程度山口県が“安全か”という観点からも考察を進めて行く。

本研究は、まず過去100年間の山口県、東京、大阪における有感地震のデータを収集し、それを用いて過去100年間の最大地動加速度を推定する。次に、確率論に

*建設工学科
**福岡県
***中国水工(株)

基づいて、将来の最大地動加速度を推定し、東京、大阪との比較を行うとともに、山口県内における地域差についても考察を加える。

2. 過去100年間における最大地動加速度の推定

2.1 有感地震の収集とそのデータファイル化

福岡管区気象台、および下関地方気象台へ行き、山口県、東京都、大阪府における有感地震の記録を調査収集した。収集した資料は、気象庁の地震観測業務が始められて以降、今日に至るまでの約100年間におけるものである。

収集した資料を、気象庁の震度階毎に整理したものをTable 1に示す。ここで、下段Bは今回収集した地震の数であり、上段Aはそのうちデータベース化した数である。東京、大阪は地震数が多いので東京は震度階Ⅲ以上、大阪はⅡ以上のものをデータベース化した。AとBとに差があるのは、Bには震源位置、マグニチュード(以下Mと略記)の不明なものがあり、これらは本研究の資料としては使えないので削除したためである。

なお、ここで分類整理した地震データは、一般の利用にも便利なように、Table 2に示す形式で山口大学情報センターのデータファイルに入力している。書式Formatは以下の通りである。

FORMAT(20X, F10. 2, F10. 2, F10. 1, I5, I4)

Table 1 List of earthquake data.

震度階 場所	震度階 の不明 なもの	I	II	III	IV	V	VI	総数
東京A	0	0	0	265	58	9	2	334
B	0	4028	1021	368	67	14	2	5500
大阪A	0	0	79	32	11	1	0	123
B	0	641	82	71	20	1	0	815
山口A	19	62	29	9	1	1	0	121
B	19	89	34	10	1	1	0	154

Table 2 Input formation of the data base.

地震 番号	発生年月日 年 月 日	震源位置 経度 緯度	マグニ チュード	震源 深さ	判 別	震 度 階
4.	1889. 2.18	139.40 35.25	6.2	0	1	5
5.	1889. 3.28	139.40 35.35	5.8	0	1	3
6.	1889. 8. 2	139.40 36.05	5.9	0	1	3
7.	1889.10.13	140.00 36.35	6.0	0	1	3
8.	1889.10.28	139.10 34.50	6.0	0	1	3

また、ファイル名はTable 3に示す通りである。

Table 3 File names of the data base.

場 所	ファイル名
東 京	DA-TOKYO
大 阪	DA-OSK
山 口	DA-YJPLQ

2.2 アテニュエーション式

震央距離ΔとMを使って最大加速度Amaxを求めるためのアテニュエーション式は、多くの研究者によって提案されているが、本研究では岩盤(第1種地盤)と洪積地盤(第2種地盤)に対して与えられている次式を用いることとする。

$$\text{第1種地盤: } A_{max} = 4.60 \times 10^{0.208M} \times (\Delta + 10)^{-0.686} \quad (1)$$

$$\text{第2種地盤: } A_{max} = 24.5 \times 10^{0.333M} \times (\Delta + 10)^{-0.924} \quad (2)$$

Mを6, 7, 8としたときのAmaxの値をFig. 1に示す。実線が第1種地盤、破線が第2種地盤に対するものである。

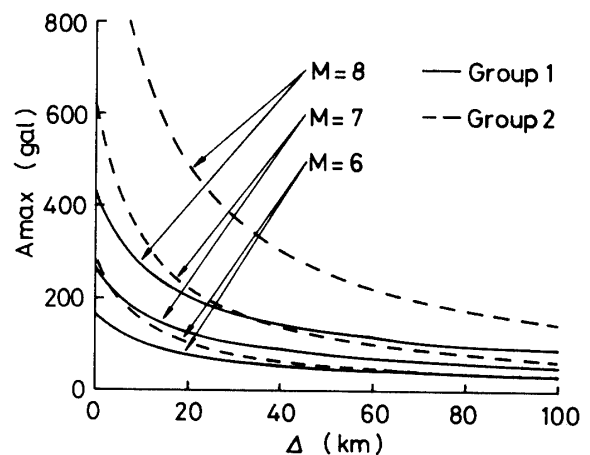


Fig. 1 The relationships of the maximum acceleration, Amax, and the epicentral distance, Δ.

2.3 最大加速度の地域特性の比較

2.1で説明した地震データおよび2.2で示したアテニュエーション式を用いて山口県、東京都、大阪府の過去100年間における最大加速度の推定を行う。具体的には、各地域を経度、緯度それぞれ0.1°間隔でメッシュ切りする。そして、その各メッシュの中心点から当

該地震の震央までの距離 Δ とマグニチュード M とを用いて、その点における A_{max} を算定する。各点毎に地震の数だけ A_{max} は求まるが、その点における最大値を地図上にプロットして、等加速度曲線を描いたのが、Fig. 2, 3, 4である。Fig. 2は山口県、3は東京都、4は大阪府、(a)は第1種地盤、(b)は第2種地盤に対するものである。

まず、山口県における第1種地盤、すなわち岩盤上 (Fig. 2 (a)) をみると、萩市沖合、徳地町、熊毛町付近の3点で約190galと他の場所よりも高い値を示している。これは、過去100年間に於いてここを震央とする $M 6$ 程度の地震が発生したからである。第2種地盤 (Fig. 2 (b)) であれば、これらの値は約300galに増幅される。一般に県西部になるほど加速度は小さくなり、岩盤上では100gal以下、下関市の一部では60gal程度、第2種地盤上では150gal以下、下関市、宇部市では100gal以下ということになる。

次にFig. 3の東京都を見ると、一般に東部が高く、都心においては岩盤上で200~250gal、第2種地盤上では400~600galとなり、山口県に比べて非常に高くなっている。Fig. 4に示した大阪は岩盤上 (図(a)) ではほぼ全域にわたって100gal程度であり、一部奈良県境側に150galの地域があるものの山口県と同程度かやや低い値となっている。第2種地盤についても同様のことが言える。しかしながら、これは過去100年の間に大阪付近には大きな地震が生じていないためであるが、それ以前には大地震がいくつか発生していることを考えると、大地震の記録のない山口県に比較して地震活動度のポテンシャルは大阪府の方が高いものと考えられる。

3. 将来におこる最大地動加速度の推定

3.1 解析手法

ここでは、辰巳によって提案された応答スペクトルの推定法⁴⁾を応用して、将来における地表面上の最大加速度の推定を行う。地震応答スペクトルは、地震が入力された際の1自由度系の最大応答値で定義されるが、本研究では地震入力点が基盤に、1自由度系が表層地盤に対応する。詳しい解析手法は文献⁴⁾に譲ることにし、ここでは以下に解析手法の概略を述べるに止める。

3.1.1 1自由度線形系の最大応答加速度

1自由度線形系の最大応答加速度 α の確率分布関数 $P_0(\alpha)$ は次式で与えられる。

$$P_0(\alpha) = \exp \left\{ -\frac{\omega_0 T_A}{\pi} \exp \left(-\frac{h\alpha^2}{\pi\omega_0 K} \right) \right\} \quad (3)$$

ここに、 ω_0, h は1自由度系 (ここでは表層地盤) の固有円振動数および減衰定数である。また、 T_A および K はそれぞれ外乱 (基盤における地震入力) の継続時間およびパワースペクトル密度であり、以下の様に定められる。

パワースペクトル密度 K はフーリエスペクトルの絶対値 $FS(T_0)$ を用いて次式で与えられる。

$$K(T_0) = \frac{FS(T_0)^2}{2\pi T_A} \quad (4)$$

ここに、

$$FS(T_0) = \exp(b_1 + b_2 M + b_4 Y_s) R^{b_3} \quad (5)$$

係数 $b_1 \sim b_4$ は周期 $T_0 = 2\pi/\omega_0$ が0.04~5.0秒の間について表形式でMcGuireによって与えられている。 M はマグニチュード、 R は震源距離である。 Y_s は地盤条件であり、ここでは地震入力レベルは基盤であるから硬質 $Y_s = 0$ を用いる。

次に、継続時間 T_A は強震動と等価な一樣強さのホワイトノイズの継続時間として、Estivaによって与えられている次式を用いる。

$$T_A = 0.02 \exp(0.74M + 0.3R) \quad (6)$$

ここで、式(5)、(6)で用いられる震源距離 R はデータが乏しいので、震央距離 Δ より飯田によって与えられた余震体積の半径 D を用いて求める。すなわち、

$$R = \sqrt{\Delta^2 + D^2} \quad (7)$$

ここに、

$$D = 10^{0.353M - 1.134} \quad (8)$$

以上より、 M と Δ が与えられると T_A と K が定まり、式(3)より地表面の最大加速度 α の確率分布 $P_0(\alpha)$ が求まる。以下において M と Δ を確率的に評価 (従って $P_0(\alpha)$ も確率量となる) する方法を述べる。

3.1.2 地表面最大加速度の確率分布

Gutenberg-Richterによって与えられたマグニチュード M とその生起回数との関係、すなわち地震活動度より、地震生起時の M の確率密度関数 $f_M(m)$ は次式で与えられる。

$$f_M(m) = \beta \exp \{-\beta(m - m_0)\} \quad (9)$$

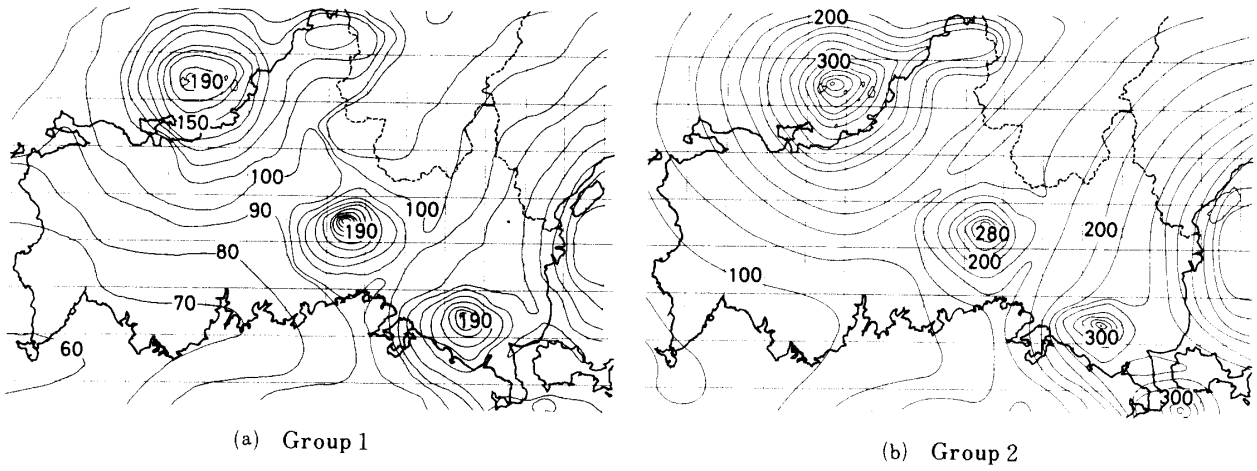


Fig. 2 Contour maps of the past maximum ground acceleration in Yamaguchi Prefecture.

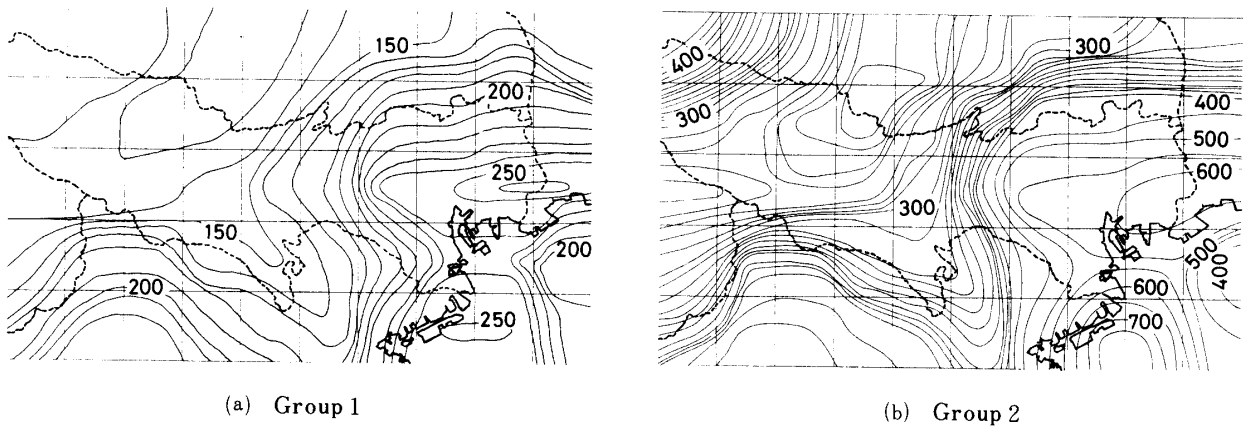


Fig. 3 Contour maps of the past maximum ground acceleration in Tokyo Prefecture.

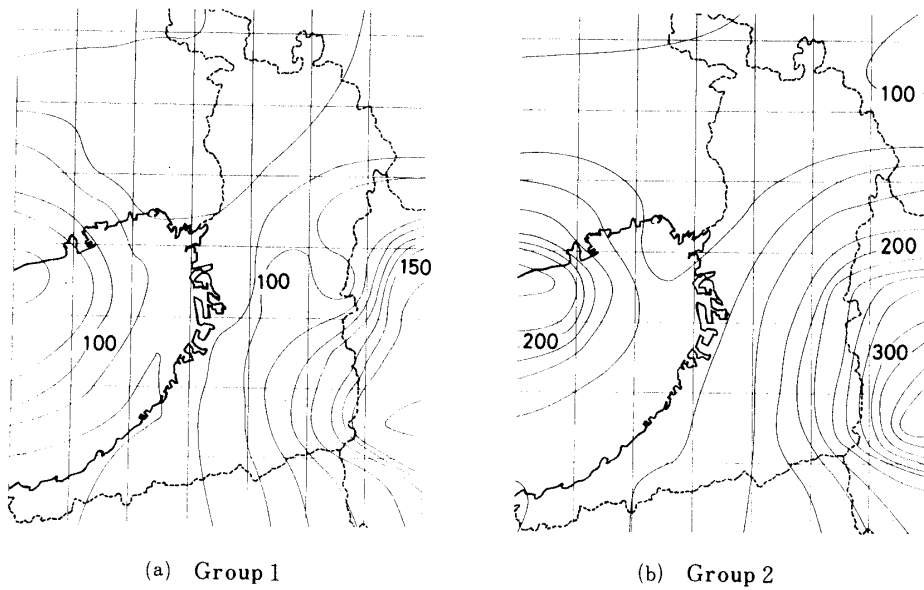


Fig. 4 Contour maps of the past maximum ground acceleration in Osaka Prefecture.

ここに、 m_0 はマグニチュード m の最小値であり、 $\beta = b_0 \ln 10$ である。 b_0 は地震活動度より定まる定数であり、普通1前後の値をとるが、ここでは最小自乗法により定める。

次に、地震の発生確率が一様であると仮定できる震央領域 R_i を設定すると、 R_i についての震央距離 Δ の確率分布関数 $F_{\Delta}^{(i)}(\Delta)$ は次式となる。

$$F_{\Delta}^{(i)}(\Delta) = \int_{R_i(\Delta)} \frac{ds}{S_{R_i}} = \frac{S\{R_i(\Delta)\}}{S_{R_i}} \quad (10)$$

ここに、 S_{R_i} は R_i 領域の全面積、 $S\{R_i(\Delta)\}$ は R_i 領域内で震央距離が Δ 以内にある部分の面積である (Fig. 5 参照)。従って、 R_i についての震央距離 Δ の確率密度関数は $dF_{\Delta}^{(i)}(\Delta)/d\Delta$ となる。

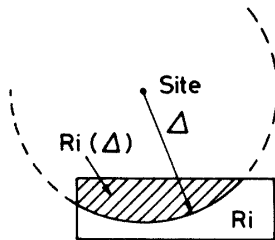


Fig. 5 Schematic drawing of the relationship between seismic zone, R_i , and epicentral distance, Δ .

以上の議論より、 R_i において地震が発生したとき、注目地点の地表面最大加速度 S_d が α を超えない確率 $F_{S_d}^{(i)}(\alpha)$ は、式(3)、(9)、(10)を用いて次式で与えられる。

$$F_{S_d}^{(i)}(\alpha) = \int_{R_i} \int_{m_0}^{m_1} P_0(\alpha; m, \Delta) f_M^{(i)}(m) \frac{dF_{\Delta}^{(i)}(\Delta)}{d\Delta} dmd\Delta \\ = \int_{R_i} \int_{m_0}^{m_1} P_0(\alpha; m, \Delta) f_M^{(i)}(m) \frac{1}{S_{R_i}} dmdS \quad (11)$$

ここに、 $P_0(\alpha; m, \Delta) = P_0[S_d \leq \alpha | M=m, \Delta=\Delta]$ である。また、 m_0, m_1 は R_i における M の実際上の最小値と最大値であり、 $f_M^{(i)}(m)$ は $m_0 \leq m \leq m_1$ の面積が1になるように式(9)を定数倍して補正したものである。

次に、 R_i で生起する地震により、最大加速度が t 年間に n_s 回 α を超える確率 $P^{(i)}(n_s)$ は、この事象がポアソン過程に従って生起すると仮定すると、

$$P^{(i)}(n_s) = \frac{\exp(-P_{\alpha}^{(i)} \nu_i t) \cdot (P_{\alpha}^{(i)} \nu_i t)^{n_s}}{n_s!} \quad (12)$$

となる。ここに、

$$P_{\alpha}^{(i)} = P_{R_i}[S_d > \alpha] = 1 - F_{S_d}^{(i)}(\alpha) \quad (13)$$

ν_i は R_i における $m_0 \leq M \leq m_1$ の地震の年間平均生起回数である。これより、 R_i で生起する地震に対して、 t 年間に1度も最大加速度が α を超過しない確率 $P^{(i)}(0)$

は次式となる。

$$P^{(i)}(0) = \exp(-P_{\alpha}^{(i)} \nu_i t) \quad (14)$$

以上をもって、注目点に影響を及ぼすと考えられる R_i の全て ($i=1 \sim n_R$) で生起する地震について、 t 年間に1度も地表面最大加速度が α を超えない確率 $F_{S_d, t}(\alpha)$ は次式で与えられる。

$$F_{S_d, t}(\alpha) = \prod_{i=1}^{n_R} P^{(i)}(0) = \prod_{i=1}^{n_R} \exp[-\{1 - F_{S_d}^{(i)}(\alpha)\} \nu_i t] \quad (15)$$

式(15)より、まず最大加速度を変化させて、それに対応する非超過確率を算定する。また、これを逆算することにより与えられた非超過確率に相等する最大加速度を求めることができる (Fig. 7 参照)。

3.2 解析条件

解析結果に影響を及ぼす項目としては以下のものが考えられる。(a)地震カタログ、(b)震央領域、(c)地震影響半径、(d)地盤条件、(e)再現期間の5つである。これらの各項目が結果に及ぼす影響のパラメトリックスタディは別の機会に譲ることにして、本研究ではこれらを以下のように設定した。

(a)地震カタログ

宇佐美竜夫による416~1982年の571個、宇津徳治による1885~1980年の1304個、気象庁による599~1982年の701個、理科年表による416~1982年の331個、飯田による684~1945年の57個、これらに最近のデータを加えた416~1983年の1878個のカタログを作成し、⁵⁾ このうちデータのもれの少いと考えられる1873年以降の記録を用いることとした。

また、地震活動度を最小自乗法で求めるときの M の最小値 m_0 は6とした。

(b)震央領域

地震が系統的によく発生する領域を四角形で囲んで、各領域毎に地震の発生度数および M の発生割合を計算する。辰巳は6つの領域を設定しているが、本研究ではこれに加えて合計19個の領域を設定した。これをFig. 6に示す。

(c)地震影響半径

これは、注目点に影響を及ぼすと考えられる領域の半径であり、 Δ の最大値を意味する。ここでは300kmとした。

(d)地盤条件

辰巳の研究における地盤は本研究では基盤に対応するので硬質地盤 $Y_s=0$ とし、減衰定数 h は0.1と仮定した。

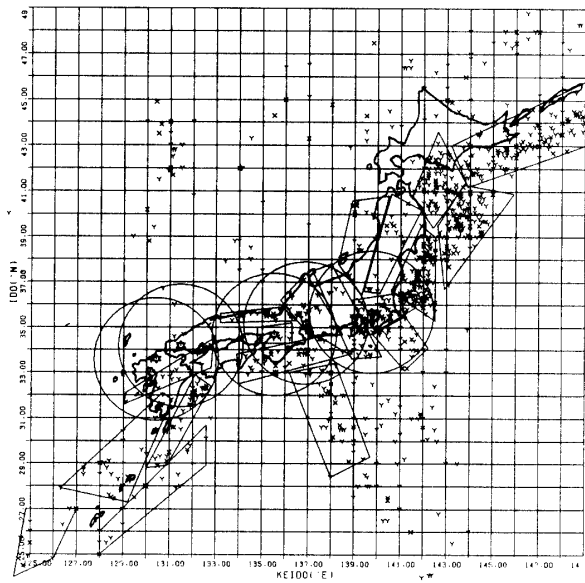


Fig. 6 Seismic zones used in this study.

(e)再現期間

土木構造物の耐用年数を考慮して100年とした。

3.3 等確率最大加速度スペクトル

式(15)より最大加速度に対応する非超過確率を算定し、次にこれから0.1~0.999の非超過確率に相当する最大加速度を逆算して求めた等確率最大加速度スペクトル(等確率応答スペクトル)をFig. 7に示す。(a)下関市、(b)宇部市、(c)山口市、(d)萩市、(e)徳山市、(f)岩国市、(g)東京都、(h)大阪市に対するものである。

山口県内の各都市に対するものと、東京、大阪市に対するものを比較すると、前者は非超過確率によって最大加速度の値が大きく変動するのに対し(各非超過確率ごとの4本の曲線が離れている)、後二者はあまり大きく変動せず、中でも東京に対するものが最も変動幅が狭い。

今後100年間ではまず起こり得ないと考えて良い非超過確率0.999の加速度の最大値を比較すると、いずれも地盤の固有周期0.2~0.4で生じ、山口県内の各市では700~800gal、東京、大阪市では約950galとあまり大きな差はない。しかしながら、工学的に重要な意味を持つのは今後100年間に1度超える確率と超えない確率が共に50%である非超過確率0.5に対応する加速度である。

そこで、各地点における非超過確率0.5に対応する加速度を地盤の固有周期、0.34秒、0.5秒、1.0秒ごとに示したのがFig. 8である。ほぼどの地点でも最大値となった固有周期0.34秒における値をみると、東京で

は約620gal、大阪市では約520galと非常に高いのに対し、山口県内において最も高い岩国市で250gal、他の都市においては160~200galと低く、東京都、大阪市に比べて $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{3}$ の値である。固有周期0.5秒では、東京400gal、大阪市300galに比べ、山口県内各市は100~150galとなっている。さらに、固有周期1秒では山口県内各市は40~60galと非常に低い値となっている。これらより山口県における地震危険度は、東京、大阪に比べてはるかに低い、換言すれば、山口県は地震に対して非常に安全性が高いことが定量的にも明らかになったといえよう。

4. 結 論

本研究は、まず過去100年間の山口県、東京都、大阪府における有感地震のデータの収集を行い、それに基づいてアテニュエーション式から過去100年間における最大加速度を推定した。次に、確率的手法を用いて将来の最大加速度の推定を地盤の固有周期の関数として推定した。

その結果、過去100年間における最大加速度の推定値と、将来における非超過確率0.5の最大加速度とはほぼ整合性があった。

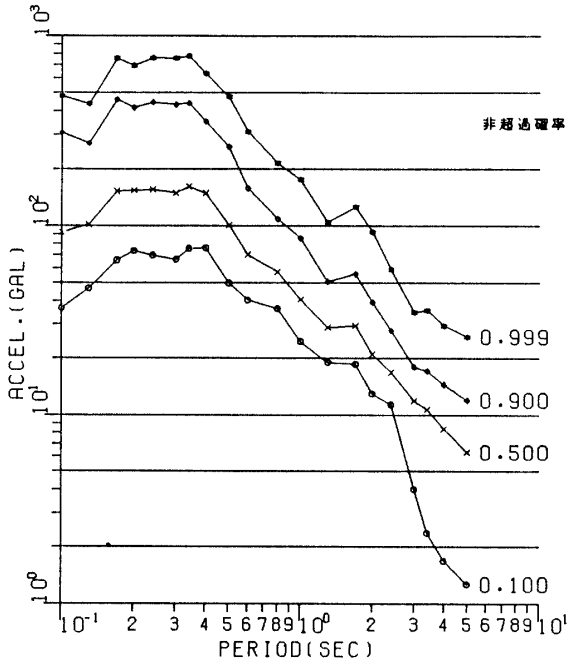
非超過確率0.5における加速度は、山口県各市、東京、大阪市いずれも地盤の固有周期0.34秒でほぼ最大値となり、東京、大阪市ではそれぞれおよそ620、520gal、山口県では岩国市で約250gal、他の都市は160~200gal程度であった。異なる地盤の固有周期に対しても大小関係は同様であり、山口県は東京、大阪に比べて $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{3}$ 程度の加速度値であることが定量的に示された。

なお、山口県下においては、一般に東高西低の傾向が認められた。

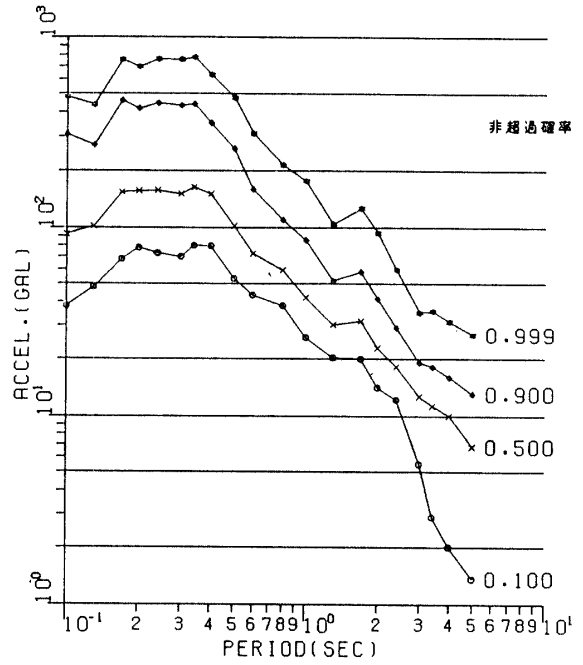
以上、ここで述べた結果は、本文3.2の解析条件下におけるものであり、これらの条件が異なった場合には上記の数値は異なってくることは明らかである。しかしながら、詳しいことは別の機会に譲るが、数値は多少異なっても大勢は変わらないようである。

謝 辞

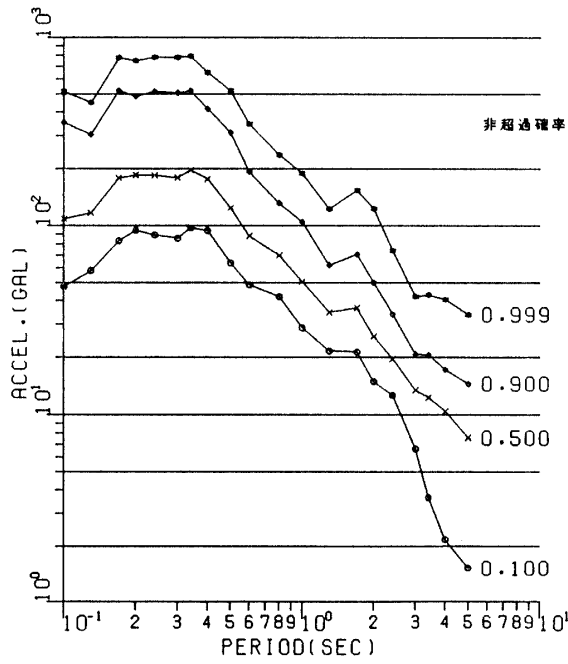
本研究を遂行するに際し、地震のデータベースの作成には福岡管区気象台観測課地震班の高橋道夫氏に多大の便宜を計っていただいた。また、後半の地震危険度解析には、竹中工務店技術研究所の辰巳安良氏開発のプログラムを修正して用いさせていただき、あわせて有益な助言もいただいた。最後に両氏に深謝の意を表する次第である。



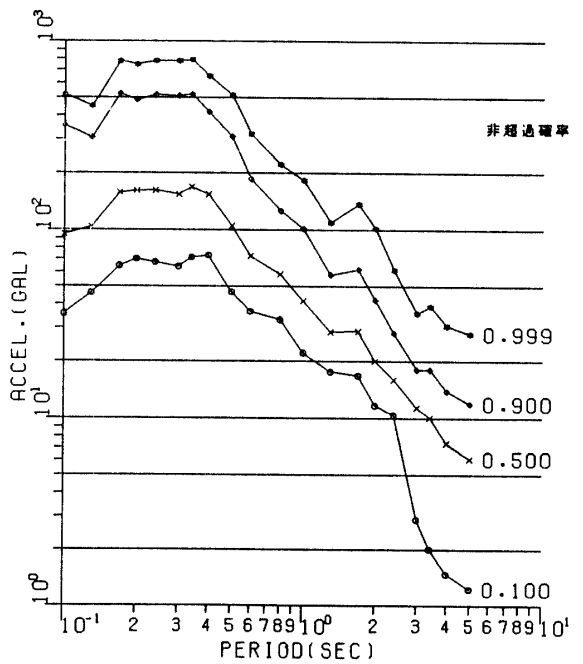
(a) Shimonoseki city



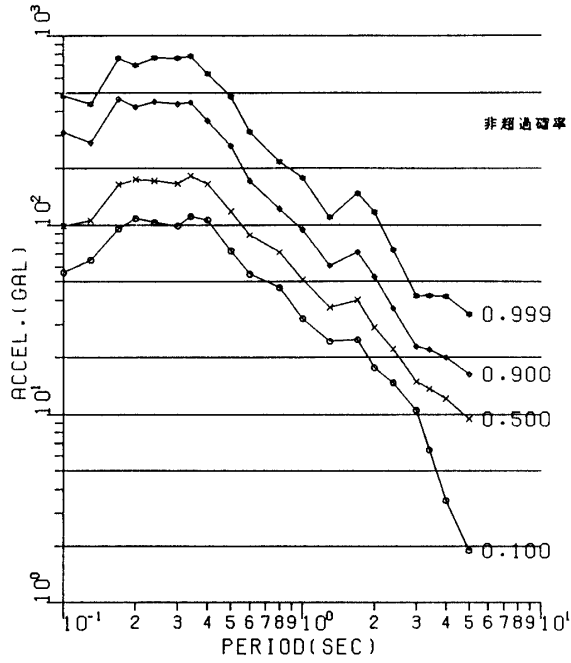
(b) Ube city



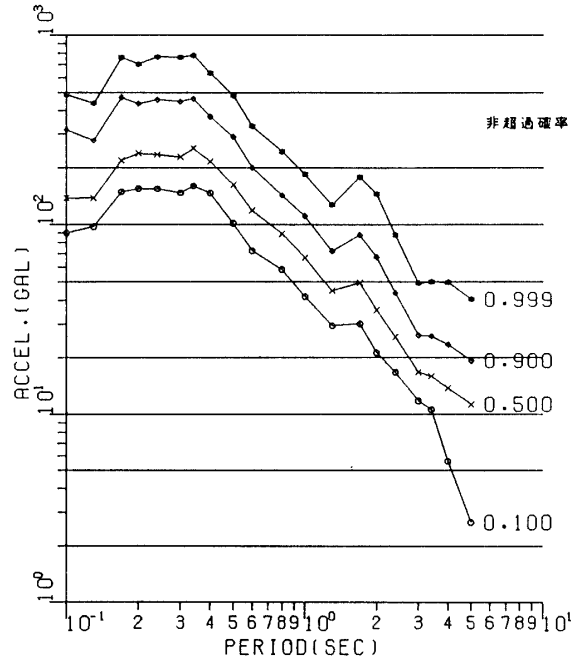
(c) Yamaguchi city



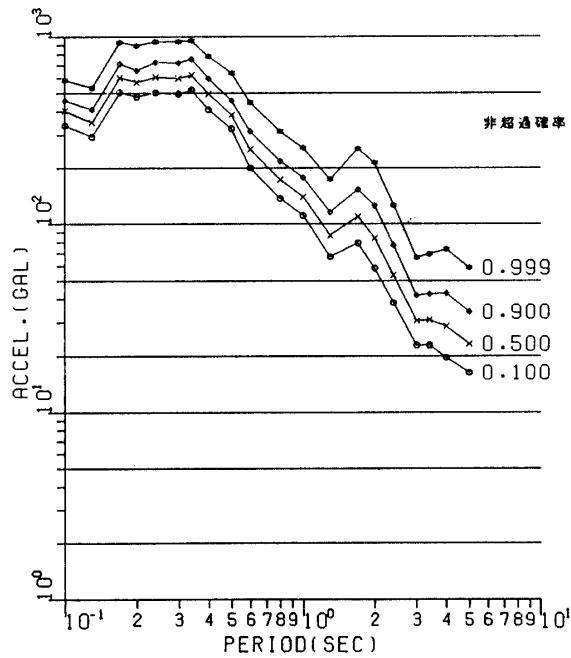
(d) Hagi city



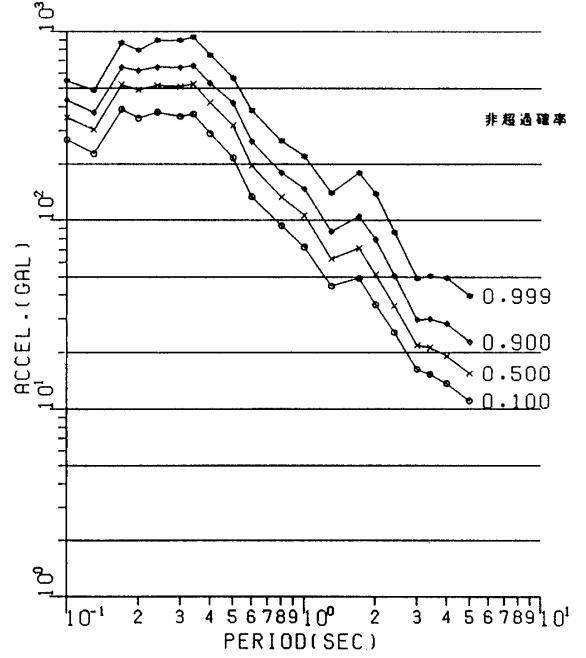
(e) Tokuyama city



(f) Iwakuni city



(g) Tokyo



(h) Osaka city

Fig. 7 Epi-probability maximum ground acceleration spectra.

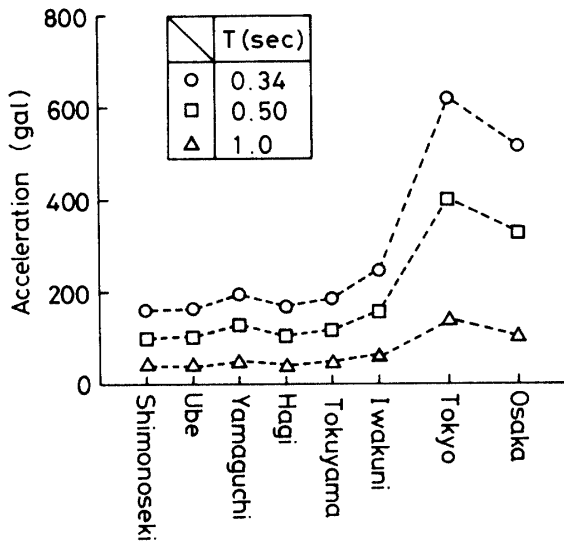


Fig. 8 Comparison of the expected maximum ground acceleration.

参 考 文 献

- 1) H.Kawasumi: Measures of Earthquake Danger and Expectancy of Maximum Intensity throughout Japan as Inferred from the Seismic Activity, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. of Tokyo, Vol.29, 469-482 (1951).
- 2) 日本建築学会：地震動と地盤—地盤震動シンポジウム10年の歩み—, Ch. 6, (1983).
- 3) 佐貫重文：山口県の地震データベースの作成とそれに基づく最大地震加速度の推定, 山口大学工学部建設工学科, 昭和60年度卒業論文, (1986).
- 4) 辰巳安良：地震応答スペクトルに関する確率論的考察, 土木学会論文集 I, 第356, 517-526 (1985).
- 5) 村元浩二：確率論に基づく山口県の地震危険度解析, 山口大学工学部建設工学科, 昭和60年度卒業論文, (1986).

(昭和61年4月15日受理)