

# 地震活動度・危険度の確率論的な考え方

Fundamentals of Probabilistic Evaluation of Seismic Activity and Seismic Risk

片山 恒雄\*

Tsuneo KATAYAMA

## 1. はじめに

構造物の設計には、設計条件の決定が必要である。耐震設計においても地震荷重の設定が重要な問題であるが、構造解析・振動解析の手法の発展により設計の実際的な方法が近年大幅に進歩したにもかかわらず、合理的な地震荷重の決定法はまだ確立されていない。

地震荷重を考える場合の2つの重要な要素は、地震発生（または地震動来襲）の不規則さと注目地点に生ずる地震動そのものの不規則さである。後者に関しては、特に最近の発展に注目した小文をすでに発表した<sup>1)</sup>ので、ここでは前者について考えてみる。

地震発生や地震動来襲の不規則さを検討するための基礎資料は、過去の地震の記録である。日本は世界でも最も地震活動の盛んな地帯にあるが、それでも大きな地震の発生や強い地震動の来襲は稀である。したがって、過去の資料も十分ではなく、いくら観測網を整えても工学的に意味のある新しい資料の蓄積ははかどらない。この点が、地震荷重を考える際の最も困難な要素の1つである。

これまでの研究の多くは、数少ない過去の資料（しかもその中には信頼性の低いものも含まれている）をどのように解釈し、将来の予測をたてるかという基本的な命題と取り組んできたものである。本稿は、それらを概観し、地震活動度・地震危険度がどのような量で判断できるか、統計確率理論のどの部分が応用されてきているか、解析された結果はどう解釈できるか、などの問題について解説を試みようとするものであり、将来の研究の方向についても若干の私見を求べる。

## 2. 地震活動度と地震危険度

### 2・1 地震活動度と地震危険度の区別

地震活動度 (Seismic activity) とは、ある地域にどの程度の規模の地震がどれ位の頻度で発生するかを表わすものである。地域としては平面的な広がりがあることが多いが、震源の深さまで含めた3次元的な領域を考えてもよい。個々の地震にはそれぞれの特性があり、地震そのものの特性が規模だけで表わしえないことは明らかであるが、現時点では、工学的に意味

のある地震として、ある程度以上のマグニチュードの地震というあいまいな捉え方をするのが普通である。M=5~6以上の地殻内に発生する地震は断層運動そのものであると考えられているから、地震の発生域は点ではない。しかし、少なくとも工学的な応用面では、地殻内の破壊の初期発生点（震源）を地震の位置と考えている。

地震危険度 (Seismic risk) は、ある地域にどれ位の激しさの地震動がどの程度の頻繁さで来襲するかを表わすものである。地震動の激しさを何で表わすかは問題であるが、震度階や地震動の最大加速度などが指標とされることが多い。地震危険度という言葉からは、地震による被害発生の可能性の度合という印象を受けるが、種々の構造物に生ずる地震被害の度合は構造物の特性を含めた多くの因子の影響を受ける。したがって、地震危険度をより一般的に理解するためには、いくつかのレベルでの地震危険度を区別しておくことが重要である。例えば、

- 1) ある地域の地震危険度
- 2) ある地点の地震危険度
- 3) ある構造物の地震危険度
- 4) 人間または生活に対する地震危険度

というような区別が可能であろう。本稿では、以上のうち1)に入る狭義の地震危険度を扱う。これに対し、ある地点の地震危険度\*\*という場合には、その地点の表層地盤や地形の特性が考慮されなければならない、また構造物の地震危険度はその動特性や地盤との相互作用などの影響を受ける。さらに、生活に対する地震危険度を考える場合には、都市形態・産業構造・地震による2次の災害の問題などが重要となる。

国土が広大で、大部分の地震が陸上に発生することが明らかであれば、地震活動度と地震危険度の区別はそれ程重要ではない。アメリカ合衆国やインドなどでは、地震活動度すなわち地震危険度という立場が取られる場合がある。しかし、日本では、過去に被害を及ぼした巨大地震の多くが海底に震源をもち、地震危険度を地震活動度と区別して考えることが特に必要であ

\*\*この意味での地震危険度による地域分割は Microzonation または Microzoning と呼ばれる。研究の現状および将来の方向に関しては、Proc. of the Int. Conf. on Microzonation for Safer Construction Research and Application. Vols. 1 and II (1972)が参考になる。

る。

## 2・2 地震活動度

地震活動度に関する情報の基本は、歴史期間に実際に発生した地震の資料である。過去の記録が示す地震の規模を地図上の震央位置に異なる記号でプロットすれば、少くとも歴史期間における地震発生頻度の相対的な差が明らかになる。工学的には、例えばマグニチュード6以上の地震の分布などが意味をもつ。地図上のプロットで地震活動度を表わすことは多くの研究者によって行なわれてきた<sup>2)</sup>。過去の資料に基づけば、ある地域について、例えばマグニチュード6以上の地震の平均年間発生率が推定できる。この場合、過去の資料に必然的に含まれている記録もれ、すなわち資料の完全性の問題が生じる(3.2, 5.1および5.3で述べる)。

ある地域に発生する地震のマグニチュードの分布に関しては、有名なGutenberg-Richterの経験則があり、マグニチュードM以上の地震の個数を $N_M$ 、aとbを定数として

$$\log N_M = a - bM \quad (1)$$

が成り立つ。地震の発生に対してある種の確率過程を仮定し、平均発生率と式(1)を組合せて用いることにより、地震活動度を定量的に評価することが可能となる。

ところで、地震の発生は断層運動に由来するから、地殻の構造と地殻に加わっている力の性質が地震活動度に関係する。茂木<sup>3)</sup>は不均質媒質の破壊実験の結果から、式(1)の頻度曲線の形状が地下の構造に関係していることを類推した。式(1)の関係は、横軸に普通目盛でMを、また縦軸に対数目盛で $N_M$ を取れば右下りの直線となるが、一般にMの大きいところでは、この直線からはずれて発生頻度の減少が著しい場合がある。茂木<sup>4)</sup>は、この折れ曲がり点に対応するマグニチュード( $M_c$ )が地域の地下構造と符合することを示した。一般に地殻の破碎度が進んでいる地域では $M_c$ が小さく、地殻構造が均質に近いほど $M_c$ は大きい。 $M_c$ の値はその地域に発生する地震の最大マグニチュードの近似値とみなされるが、日本列島を8つの区域に分けて検討した結果によれば、この値は5.5から8以上と大きな差を示している。

Welkner<sup>5)</sup>は、日本とその周辺を $1^\circ \times 1^\circ$ の網目区画に分割し、1926年から1956年に発生したマグニチュード5.5以上、震源の深さ60km以内の地震約600個を用いて、式(1)のaとbの値を各区画について計算した。計算結果からaとbの等値線を描くと、平均発生頻度(例えば、各区画における $M \geq 0$ の地震の年間発生個数)の指標であるaの分布は、頻度曲線の傾きを表わすbの分布に類似しており、bの値の大きい地域は一般に地震の多発地帯にあっている。他方、bの値の大小は、その地域での大きな地震の相対発生頻度を示すものであり、bの値が小さいほど全体の地震個数の

中で大きな地震の数が相対的に大きい。このような意味から、日本周辺で総体的に地震活動度の高い地域は $b > 0.8$ の地域に一致するが、大きな地震の危険性に関しては $b < 0.6$ の地域が要注意であると述べている。しかし、この最後の判断の正当性には検討の余地があると思われる<sup>6)</sup>。

地域の地震活動度を表わす指標として、単位面積および単位期間あたりに地震により放出されるエネルギーが考えられる<sup>5)7)8)</sup>。マグニチュードMの地震のエネルギーE(erg)は通常

$$E = \alpha + \beta M \quad (2)$$

で計算され、 $\alpha = 11.8$ 、 $\beta = 1.5$ が取られることが多い。ある地域の平均放出エネルギーは過去の地震のマグニチュードを直接用いて式(2)から求めることもできるが、Welkner<sup>5)</sup>は式(1)と式(2)を組合せて得られる理論式から、先に各区画について求めたa、bの値を用いて年平均地震放出エネルギーを計算し、等値線図の形で示した。一般に放出エネルギーの高い地域は、式(1)のa、bの値が大きく全体的に地震活動度の高い地域と一致する。

さて、これまでのところでは、地震発生の周期性を無視している。最近、特に日本付近の太平洋側の海溝に沿って発生する浅い大地震についての研究が進展しつつあり、海底大地震の起り方の時間的・空間的分布の規則性が論議されている<sup>9)10)</sup>。例えば、「大地震の余震域分布は、数十年内至数百年の間に地震帯全域を、すき間なく、また相互にあまり重なることなく埋めつくす」という性質が指摘されており、過去に大地震が1回以上発生したことが記録されていながら、最近の地震活動が空白なすき間(Seismic gap)がいくつか存在することが注目されている。「地震活動の空白地域」という概念は、従来の地震活動度の検討では無視されていたことである。比較的最近の期間における地震発生の記録から地震活動度を評価する場合には、空白地域の地震活動度は低く見積られるが、大きな地震の発生には周期性があるものとすれば、むしろこのような地域こそ将来における地震発生の危険性は高いと考えなければならない。この新しい概念を工学的にどう評価するかは、今後の課題の1つである。

## 2・3 地震危険度

地震危険度に関しても、基本となる情報は過去の地震の資料である。ある地域にどれ位の激しさの地震動がどれ位の頻度で発生するかをもって、地震危険度を定義したが、地震の激しさを表わす尺度はいろいろと考えられる。これまでの研究者が用いた尺度を列挙すれば次のようである。

気象庁震度階 (JMA震度階)  
修正メルカリ震度階 (MM震度階)  
最大加速度

最大速度  
 基盤における最大速度  
 最大変位

用いる尺度を決めたとしても、過去の地震の際に注目する地域でどんな値が観測されたかという情報は極めて少ない。したがって、地震のマグニチュードと震源の位置から、なんらかの関係式を用いて、上記の諸量を推定することが必要となる。すなわち、地震動の激しさを推定する方法の信頼性が、地震危険度を定量化するときに極めて大きな影響を及ぼす。

このようにして、地震動の激しさを表わすと考えられる尺度の1つについて、過去の地震資料から例えば日本各地における大きさと発生回数の分布が求められるわけであるが、結果の利用の仕方にもまたさまざまである。適当な確率過程の仮説が導入される場合もあれば、なまの資料を最小限に整理した結果をそのまま表示する場合もある。

比較的手を加えない表示法の1つは、地図上に過去の最大値の分布のみを示すことである。例えば、Algermissen<sup>7)</sup>はアメリカ合衆国の各地で過去に経験された最大MM震度の分布を示しており、Carmona<sup>8)</sup>は南アメリカ大陸西岸について過去の最大速度の分布を求めている。もちろん、これらの結果からは発生頻度に関する情報は得られない。岡本<sup>13)</sup>は過去の大地震1つ1つについて日本各地における地震動の最大変位振幅を計算し、それぞれの地点について時間軸上に変位振幅を棒グラフの形にして表示したが、これは発生頻度に関する情報を最もなまに近い形で提供したものと見える。

確率論的な考え方については以下の各節で述べる。

### 3. 河角の最高震度期待値の分布図

#### 3・1 河角マップの考え方

「河角マップ」の名前で呼ばれている河角の最高震度期待値の分布図<sup>12-14)</sup>は、1951年に発表されて以来今日に至るまで、日本における地震危険度の分布の基本的資料として耐震工学に大きな影響を及ぼし続けてきた。地震動の激しさを表わす指標は異なるが、河角と同様の考え方に従って、地震危険度の分布が求められた例もあり<sup>15,16,17)</sup>ここで河角マップの成り立ちを見直しておくことは、地震危険度評価の問題点のいくつかを明らかにするためにも有用である。

用いられた過去の資料は599年から1949年の今市地震に至るまで1350年の343個の地震である。これらは、マグニチュード6程度以上の被害地震であるが、記録期間は東海以西で1350年、北部で1120年、北海道ではわずかに160年である。河角は、日本全国の陸地と近海の経度・緯度0.5°ごとの網目点345点について、次式を用いてそれぞれの地震によって発生したと思われる

るJMA震度階の値Iを算出した。

$$\Delta \geq 100^{km} \quad e^I = \left(\frac{100}{\Delta}\right)^{e^{M_k - 0.00183(\Delta - 100)}} \quad (3)$$

$$\Delta \leq 100^{km}$$

$$I = M_k + 2 \log \frac{R_0}{R} - 0.0384(R - R_0) \log e \quad (4)$$

上式において、 $\Delta$ は震央距離(km), Rは震源距離(km),  $R_0$ は $\Delta=100$ におけるRの値であり、震源の深さは18kmと仮定された。また;  $M_k$ (河角のマグニチュード)は $\Delta=100$ におけるJMA震度であり、いわゆる(Richterの)マグニチュードとの間に

$$M = 4.85 + 0.5M_k \quad (5)$$

なる関係がある。

このようにして、各網目点について震度I以上の地震動の来襲回数 $N_i$ が求められる。その点の過去の記録年数をT年とすれば、1年間あたりに震度I以上の地震動が生ずる回数の期待値は $N_i/T$ と考えられ、その逆数 $T_k(I) = T/N_i$ が再現期間をあたえる。また、将来のt年間を考え、

$$t \frac{N_i}{T} = 1 \quad (6)$$

を満足する $N_i$ に対する震度Iを求めれば、この値はt年間にそれ以上の震度の地震動の来襲回数の期待値は1に達しないという限界震度となる。河角は、この限界震度をもってt年間に来襲の可能性のある最高震度期待値とした。

上述の手順を1つの例で示す。表1の第2欄に、818年から1956年までの1139年間に東京に来襲したと

表1 東京における地震動来襲回数の資料と各種の考え方による再現期間

(1)	震度I以上の地震動回数			再現期間(年)				
	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
震度I	$N_i$ (818~1956)	$N_i$ (1757~1956)	$N_i$ (818~1756)	式(31) $T_k(I)$	式(32) $T_k(I)$	式(33) $T_k(I)$	式(49) $T_0 = 200$	式(49) $T_0 = 1139$
5	38	16	22	30	13	13	12	29
5.5	17	5	12	67	40	28	33	63
6	8	2	6	143	100	60	67	127
6.5	5	1	4	227	200	95	100	190

思われる強い地震動の回数を示した<sup>18)</sup>(この資料は河角マップの作成に直接使われたものとは異なる),表1の資料を半対数方眼紙にプロットして図1に示す。式(6)から $N_i = T/t$ であるから、縦軸の値が $T/t$ にあたるIが上述の限界震度にあたる。この例では $T=1139$ であり、仮に $t=75$ とすれば、75年間に東京に来襲する回数の期待値が1となる限界震度は5.6となる。

さて、河角は求められた震度を次式によって地震動

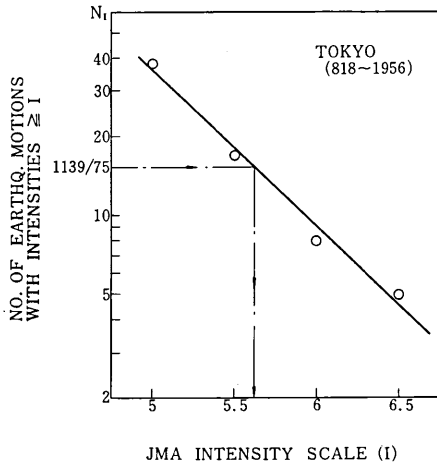


図1 東京における震度I以上の地震動回数 $N_I$ と震度の関係

の最大加速度に換算した。

$$A = 0.45 \times 10^{0.5I} \text{ (gal)} \quad (7)$$

最終的な河角マップは  $t = 75, 100, 200$  に対して式(7)により最大加速度値に換算した日本全域の地震危険度の分布を等値線図の形であてている。

後に河角<sup>19)</sup>は、以上の考え方の骨子を整理して、次のように説明した(文献(19)とは記号も式も異なる)。図1の例からもわかるように、 $N_I$ と $I$ の間には、

$$N_I = a_1 e^{-a_2 I} \quad (8)$$

なる経験則が成り立つ。また、式(7)は

$$A = b_1 e^{b_2 I} \quad (9)$$

と表わせる。式(8)、(9)から $I$ を消去すれば、最大加速度 $A$ 以上(すなわち震度 $I$ 以上)の地震動来襲の再現期間が

$$T_r(A) = T_r(I) = \frac{T}{N_I} = \frac{T}{a_1} \left( \frac{A}{b_1} \right)^{\frac{a_2}{b_2}} \quad (10)$$

となる。また、 $p = 1/T_r(A)$ が十分小さい場合には、 $t$ 年間に最大加速度が $A$ よりも大きな地震動に襲われる確率 $F(A, t)$ は

$$F(A, t) = 1 - (1-p)^t \approx tp = \frac{t}{T_r(A)} \quad (11)$$

となる。すなわち、構造物の耐用年数 $t$ とその間に許容する危険率 $F(A, t)$ を指定すれば、設計に用いるべき最大加速度の値 $A$ が定められる。

### 3・2 河角マップの問題点

河角マップには、地震危険度の解析の際に常に遭遇する2つの問題点が含まれている。それらは、歴史期間の地震発生の資料の信頼性と、地震の規模と発生位置から注目地点の地震動の強さを計算する方法の妥当性である。

まず、過去の資料の完全性であるが、本州以西の地域についてさえも、少なくとも江戸時代より前の資料にはかなりの記録もれがあったと考えられる<sup>15, 20)</sup>した

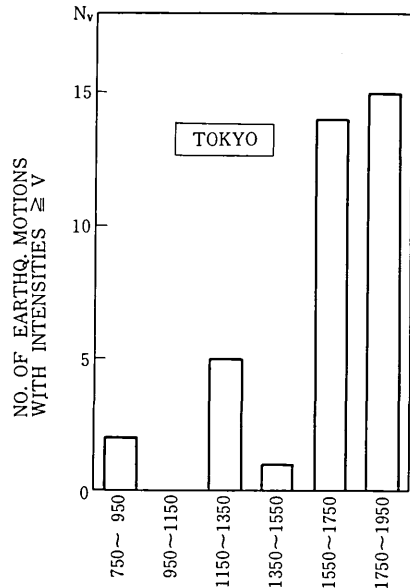


図2 東京における震度V以上の地震動回数の時代による相違

がって、河角の方法で推定した頻度は実際よりも小さな値をあたえる。図2は、前述の資料<sup>18)</sup>を用いて、歴史期間200年毎に震度V以上の地震動が東京を襲ったと推定される回数を示したものである。最近400年とそれ以前とは発生頻度に相当な差が認められる。全歴史期間の資料の信頼性を同一とみるかみないかによって、地震危険度の推定結果が大きく異なるが、この点については5.1, 5.3で述べる。

次に、河角マップの最大加速度は式(3)、(4)と式(7)の組合せで計算されている。特に式(7)の関係は、本郷に設置された石本式加速度地震計(固有周期0.15秒)の記録から石本<sup>21)</sup>が求めた関係を、後に河角<sup>22)</sup>が資料を加えて修正したものにに基づいている。本郷台は地盤の固有周期が約0.3秒の特定の地点であることも注意すべきであるが、式(7)を求める際の資料には震度IVまでの観測結果しか含まれていないことが特に重要である。すでに指摘されているように<sup>20)</sup>、河角の方法で計算した最大加速度は震度VIの中間以上に対して極めて大きな値となる。式(3)、(4)、(7)から、河角が用いた関係式は結局

$$\Delta \geq 100^{km} \quad \log A = M - 0.000915\Delta - 2.30 \log \Delta - 0.5 \quad (13)$$

$$\Delta \leq 100^{km} \quad \log A = M + \log(R_0/R) + 0.00834 \times (R_0 - R) - 5.20 \quad (14)$$

となる。図3には、1963年から1970年の間に起った46個の地震により日本各地の強震計で記録された最大加

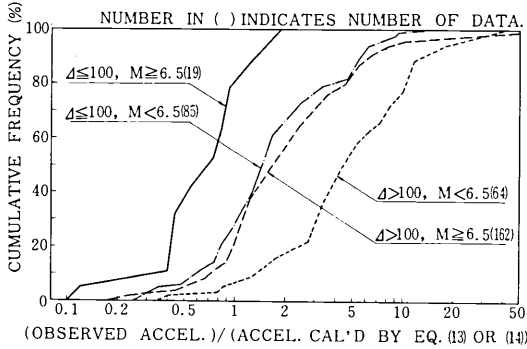


図3 強震計による実測最大加速度と河角の式による計算最大加速度の比の分布。

速度(水平2方向最大加速度の平均)330個の値を震央距離とマグニチュードによって4つのグループにわけ、それぞれのグループに関して、実測値と式(13)または(14)による計算値との比の分布を示した。図3によれば、河角が用いた式は一般に近くで起った大きな地震による最大加速度を過大に評価していることがわかる。片山<sup>23)</sup>は、実測資料から最小二乗法により2つの異なった形の経験式を求めている。

$$\log A = 0.982 - 1.290 \log \Delta + 0.466M \quad (15)$$

$$\log A = 2.308 - 1.637 \log (R + 30) + 0.411M \quad (16)$$

後者は震央付近でも一応適用できる式である。表2は、いくつかのMとΔの組合せに対し、式(15)による値と式

表2 強震計記録から推定される平均的最大加速度と河角式(13)、(14)による最大加速度の比較

マグニチュード	震央距離 Δ (km)	最大水平加速度(gal)	
		式(15)	式(13), (14)
M = 7	50	113	306
	100	46	64
	200	19	11
M = 7.5	50	193	968
	100	79	203
	200	32	33
M = 8	50	330	3060
	100	135	643
	200	55	106

(13)、(14)による値を比較したものである。河角が用いた関係式によると、震央距離が100km程度以下では、強震計による平均実測値よりも常に大きな値が得られ、その差はマグニチュードが大きいほど大きい。M ≥ 7.5、Δ ≤ 100kmの範囲では、式(13)または(14)による計算値が実測による平均的な値の2.5倍から10倍位にもなっている。

過去の地震発生の記録から地震危険度を推定する場合、対象となる地震はかなり大きなものに限られるから、大きな地震の震央付近での最大地動の激しさを見積る経験式の性質が、最終の解析結果に極めて大きな影響を及ぼすことになる。

#### 4. ポアソン過程と極値分布

##### 4.1 ポアソン過程の応用

ある地域における地震の発生またはある地域に地震動が来襲する過程をポアソン過程と考えることによって地震活動度・危険度を解析した例は多い。ある注目した事象の平均年間発生率をν(回/年)とすれば、この事象の発生がポアソン過程であるとすると、t年間にn回発生する確率は

$$p(n, t) = \frac{(\nu t)^n e^{-\nu t}}{n!} \quad (17)$$

であたえられる。

ある事象の発生がポアソン過程とみなされるためには、次の3つの仮定が成立していなければならない<sup>24)</sup>

- 1) tとt + Δtの間の短い期間に事象が発生する確率は、tに無関係にν・Δtである。
- 2) 短い期間に事象が2回以上発生する確率はν・Δtにくらべて無視できるほど小さい。
- 3) ある期間における事象の発生回数は、他のどの期間における発生回数とも無関係である。

これらの仮定が、地震の発生・地震動の来襲について完全に成立しているという保証はない<sup>25)</sup>が、ポアソン過程の導入によって、地震活動度・危険度のある程度定量的な解析が可能になる。

式(17)によれば、注目する事象がt年間に1回も発生しない確率は

$$p(0, t) = e^{-\nu t} \quad (18)$$

となり、少なくとも1回発生する確率は

$$1 - p(0, t) = 1 - e^{-\nu t} \quad (19)$$

となる。また、t年間に発生する回数の期待値は

$$\sum_{i=0}^{\infty} i \cdot p(i, t) = \nu t \quad (20)$$

となるから、再現期間は

$$T_R = \frac{t}{\nu t} = \frac{1}{\nu} \quad (21)$$

で求められる。式(21)は河角の式(6)に対応する。

ここで、ある地域にマグニチュードM以上の地震が発生する(または震度I以上の地震動が来襲する)事象を考える。再現期間T<sub>R</sub>年に対応する限界マグニチュードをT<sub>R</sub>年確率マグニチュードと呼ぼう。式(19)と(21)によれば、T<sub>R</sub>年間にT<sub>R</sub>年確率マグニチュード以上の地震が発生する確率は

$$1 - e^{-\nu T_R} = 1 - e^{-1} = 0.632 \quad (22)$$

となる。再現期間内に、それに対応する事象が発生す

る確率が約63%であることは十分認識しておく必要がある。

地震活動度・危険度の検討においては、一定マグニチュード以上の地震の発生や一定震度以上の地震動の来襲といった事象が重要な意味をもつ。いま、マグニチュードまたは地震動の激しさを表わす指標の限界値を一般に $Y$ とし、 $Y$ 以上の地震または地震動の発生の再現期間を $T_R(Y)$ 年、その平均年間発生率を $\nu_r$ とすれば、 $t$ 年間に限界値以上の地震または地震動が発生する確率 $F(Y, t)$ は、式(19)と(21)より

$$F(Y, t) = 1 - e^{-\nu_r t} = 1 - \exp[-t/T_R(Y)] \quad (23)$$

となる。 $\nu_r$ が十分小さければ、式(23)は河角の式(11)と同じ結果をあたえる。過去の資料から $\nu_r$  (または $T_R(Y)$ )が推定できれば、式(23)によって地震活動度・危険度をいろいろな形で表示できる。 $\nu_r$  (または $T_R(Y)$ )は $Y$ によって決まるはずの量であるから、式(23)は3個の変量 $Y, t, F(Y, t)$ を関係付ける式である。したがって、2つの量を固定すれば第3の量が定まるわけであり、基本的に次の3種類の表示法が可能である。

- 1)  $t$  と  $F(Y, t)$  を固定した  $Y$  の分布図
- 2)  $Y$  と  $F(Y, t)$  を固定した  $t$  の分布図
- 3)  $Y$  と  $t$  を固定した  $F(Y, t)$  の分布図

河角マップは、 $Y$ として地震動の最大加速度をとり、 $T_R(Y)=t$ となるような $Y$ の分布を日本全体に対してあたえている。これは結局、 $t$ と $F(Y, t)=0.632$ をあたえて $Y$ の分布を求めることと同じであり(式(22)参照)、1)の形の表示法である。金井ら<sup>17)</sup>は基盤における地震動最大速度の分布図を、また村松<sup>15,16)</sup>は地表面における地震動最大速度の分布図を河角と類似の考え方であたえており、Milneら<sup>26-28)</sup>はやはり $F=0.632, T_R=t$ として、カナダにおける最大加速度の分布図を求めている。

2)の形の分布図としては、暗黙のうちに危険率を $F=0.632$ と仮定した再現期間の分布図が大部分である。河角マップに至る中間結果として、河角<sup>12-14)</sup>は震度 $V$ 以上、 $VI$ 以上、 $VII$ 以上のそれぞれについて、日本全国の再現期間の分布を求めた。Milne<sup>27,28)</sup>は、カナダについて、最大加速度が一定値以上となる地震動の再現期間の分布を、またKaila<sup>9)</sup>はインドについて $M \geq 6$ の地震発生の再現期間の分布を求めている。

Lomnitz<sup>29)</sup>は $t=30$ 年として、チリの各地域に $MM$ 震度階で $VI$ 以上の地震動が来襲する確率 $F$ の地域的分布図を求めており、Carmonaら<sup>8)</sup>は南アメリカ大陸について、 $t$ と最大速度の値を指定して危険率 $F$ の分布図を求めた。これらは3)の形の分布図であるが、Welkner<sup>25)</sup>が日本全体を9つの地域に分割し、いくつかの $t$ の値に対して $M \geq 7.5$ の地震が発生する確率 $F$ を求めているのも3)の形の検討の1例である。

上述のように、ポアソン過程を導入すれば、唯一の

パラメータ $\nu_r$  (または再現期間)を知ることによって、地震活動度・危険度の定量的な検討が可能になるが、数少ない過去の資料からどの程度適切な $\nu_r$ の推定ができるかという難しい問題が生ずる(5.1, 5.3参照)。

#### 4・2 極値分布の考え方

ある地域に発生する地震のマグニチュードに関しては式(1)が、また、ある地域に来襲する地震動の激しさに関しては式(8)が成立することが経験的に知られている。これらの式は全く類いの関係を表わしており、4.1で定義した記号を用いれば、

$$\nu_r = a_1 e^{-a_2(Y-Y_0)} \quad (24)$$

とまとめられる。ここでは、 $Y_0$ は工学的に意味のある $Y$ の下限値であり、マグニチュードで6程度、震度で $V$ 程度と考えられる。また、 $a_1$ は $Y_0$ 以上の地震または地震動の平均年間発生回数である。式(24)を式(18)に代入し、 $t=1$ (年)とおけば、1年間に $Y$ 以上の地震または地震動が1回も発生しない確率が

$$p(0, 1) = \exp[-a_1 \exp\{-a_2(Y-Y_0)\}] \quad (25)$$

の形に求められる。

式(25)はよく知られたI形の極値分布(最大値分布またはグンベル分布)に他ならない<sup>24)</sup>すなわち、

$$\alpha = a_2 \quad u = Y_0 + \frac{\ln a_1}{a_2} \quad (26)$$

とおけば、式(25)は

$$p(0, 1) = \exp[-\exp\{-\alpha(Y-u)\}] \quad (27)$$

と標準的な極値分布の式をあたえる。式(27)を

$$Y = u - \frac{1}{\alpha} \ln(-\ln p(0, 1)) \quad (28)$$

と書き直してみれば明らかのように、 $Y$ と $\ln(-\ln p)$ の関係は二重指数確率紙上で直線となる。過去の資料からこの直線が定められれば、任意の $Y$ の値に対して、その再現期間の近似値が

$$T_R(Y) = \frac{1}{1 - p(0, 1)} \quad (29)$$

で求められる。また、 $\ln(-\ln p) = 0$ に対応する $Y$ の値として $u$ を求めると、 $u$ は年最大値の分布のモードとなり、さらに $u$ と $d$ を知ることにより年最大値の平均と分散が推定できる<sup>24)</sup>。

式(28)を実際に使う場合の手順は次のようである(グンベルの方法)。例えば、ある地域に発生した地震のマグニチュードの年最大値の資料が $N$ 個( $N$ 年間分)あるとする。これらの資料を大ききの順にならべ、大きい方から $j$ 番目の標本 $Y_j$ の経験的非超過確率として

$$p_j(0, 1) = \frac{N+1-j}{N+1} \quad (30)$$

を採用し、 $N$ 組の $Y_j$ と $p_j(0, 1)$ を二重指数確率紙にプロットする。これらの実測点から最小二乗法で直線を定める。

$N$ 個の資料のうち大きい方から $j$ 番目の標本が母集

団分布で超過確率(または非超過確率)のどのような値に対応すると考えるべきかについては多くの提案があり,必ずしも式(30)による当てはめが最適ではない<sup>30)</sup>しかし,従来の地震工学における応用例では,式(30)が使われている。

Dick<sup>31)</sup>はニュージーランドの,またCaputo<sup>32)</sup>はイタリアの各地域の地震発生に対して極値分布の考えを応用しており, Milne<sup>26~28)</sup>はカナダの各地域に襲撃する地震動の最大加速度の値について同様の解析を行なった。Milneらの研究では,式(24)に対応する関係式として  $\nu_r = a_1 I^{-a_2}$  を仮定しているが,本質的には上述の方法と同じである。

## 5. 過去の資料の不完全性とベイズの定理

### 5・1 過去の資料の不完全性と再現期間

過去の資料から平均年間発生率  $\nu$  (または再現期間) が定まれば,ポアソン過程の仮説によって,地震活動度・危険度の一応の定量的解析が可能である。しかし,大地震の発生は稀であり,過去の資料は不十分で,記録の信頼性も時代により異なる。

仮に,過去の時代を比較的最近に近い  $T'$  年間とそれ以前の  $T''$  年間にわけ,それぞれの期間に襲撃した震度  $I$  以上の地震動の記録回数を  $N_i'$  および  $N_i''$  とする。河角マップ作成の際の基本的仮定は

$$T_R(I) = \frac{T' + T''}{N_i' + N_i''} \quad (31)$$

である。すなわち,河角は過去の資料はすべて同一の信頼度をもつと考えた。村松<sup>15,16)</sup>は,過去の資料には一般に古い時代ほど記録もれの可能性が大きいことを考慮して,最近の資料のみに基づく解析を行なった。この場合の再現期間は

$$T_R(I) = \frac{T'}{N_i'} \quad (32)$$

となる。

これに対し,後藤・亀田<sup>20)</sup>は,ある地域に震度  $I$  以上の地震動が襲撃する過程をベルヌイ試行列の実現値であると仮定した。将来  $t$  年間の地震活動は最近  $T'$  年間 ( $T' > t$ ) の中の  $t$  年間と同じであるとし,この  $t$  年間に1回のベルヌイ試行で震度  $I$  以上の地震動が襲撃する確率を  $Nt/NT'$  とした。 $N$  と  $N'$  はそれぞれ ( $T' + T''$ ) 年間および最近  $T'$  年間における工学的に意味のある震度以上の地震動の襲撃の総数である。この考え方は,全体の個数の中で最近  $T'$  年間の個数が占める割合  $N'/N$  によって,最近の期間における資料の信頼度を加重に評価しようとするもので,再現期間は

$$T_R(I) = \frac{N}{N'} \frac{T'}{N_i' + N_i''} \quad (33)$$

となる<sup>20)</sup> 一般に古い過去の資料には記録もれが多いことから,3つの再現期間の間の関係は

$$T_R(I) \geq T_R'(I) \geq T_R''(I) \quad (34)$$

となる。

表1の第5~7欄には,式(31)~(33)によって計算した東京における一定震度以上の地震動襲撃の再現期間を示した。表1では,工学的に意味のある震度の下限值として  $V$  をとっており,式(33)において  $N = 38$ ,  $N' = 16$  である。 $T_R(I)$  と  $T_R'(I)$  の差は記録もれの可能性の大きい比較的震度の小さい場合において特に大きく, $T_R(I)$  または  $T_R'(I)$  と  $T_R''(I)$  の差は特に震度が大きい場合に大きくなっていることがわかる。

### 5・2 ベイズの定理とその応用

事象  $B$  が起つたとして事象  $A$  が起る条件つき確率を  $P[A|B]$  とすれば

$$P[A|B] = \frac{P[A \cap B]}{P[B]} \quad (35)$$

が成り立つ。ここで,  $P[B]$  は事象  $B$  が起る確率であり,  $P[A \cap B]$  は事象  $A$  と  $B$  がともに起る確率である。さらに,事象  $B$  が  $m$  個の排反する事象  $B_i$  からなり,その中の1つは必ず起るものとすれば,

$$P[A] = \sum_{i=1}^m P[A \cap B_i] \quad (36)$$

が成り立つ。式(35)と(36)から

$$P[A] = \sum_{i=1}^m P[A|B_i]P[B_i] \quad (37)$$

となるから,  $P[B_i \cap A] = P[A \cap B_i]$  を考慮すれば,式(35)と(37)から,ベイズの定理 (Bayes' theorem) が次のように導かれる。

$$P[B_j|A] = \frac{P[A|B_j]P[B_j]}{\sum_{i=1}^m P[A|B_i]P[B_i]} \quad (38)$$

右辺の分母は  $\sum_{i=1}^m P[B_i|A] = 1$  とするための正規化定数と考えられる。

事象  $B_i$  のかわりに,連続な確率密度  $f(\theta)$  をもつ確率変数  $\theta$  を考えれば,式(38)に対応して

$$f(\theta|A) = \frac{P[A|\theta]f(\theta)}{\int_{-\infty}^{\infty} P[A|\theta]f(\theta)d\theta} \quad (39)$$

が証明される。右辺の分母は正規化定数であるから,

$$N = \frac{1}{\int_{-\infty}^{\infty} P[A|\theta]f(\theta)d\theta} \quad (40)$$

とおき,さらに  $f(\theta|A)$  を  $f^*(\theta)$ ,  $f(\theta)$  を  $f'(\theta)$  と表わせば次式が得られる。

$$f^*(\theta) = N \cdot P[A|\theta]f'(\theta) \quad (41)$$

上式で,  $f'(\theta)$  を事前 (prior) 確率密度,  $f^*(\theta)$  を事後 (posterior) 確率密度という。

ここで,事象  $A$  を支配する確率過程は既知であるが,その過程のパラメータ  $\theta$  の値が未知であると仮定する。また,  $\theta$  の確率密度が事前に  $f'(\theta)$  と推定されているものとする。例えば,地震の発生はポアソン過程とみ

なされるが、平均年間発生率  $\nu$  が未知であるような場合である。いま、この過程に関して、 $m$  個の独立な観測値が得られたとし、未知パラメータ  $\theta$  を含む既知の確率過程が  $p(x|\theta)$  なる probability mass function をもつものとする (以後の応用例を考え、離散型の分布だけを考える)。この場合、式(41)は次のようになる:<sup>24)</sup>

$$f''(\theta) = N \cdot \prod_{i=1}^m p(x_i|\theta) f(\theta) \tag{42}$$

実際の問題では、事前確率密度  $f'(\theta)$  が未知であることが多く、この場合には  $f'(\theta)$  は一定である (diffuse-prior) として、正規化定数に含めてしまえば、式(42)は次のようになる。

$$f''(\theta) = N' \cdot \prod_{i=1}^m p(x_i|\theta) \tag{43}$$

ところで、もし事前確率密度  $f'(\theta)$  が適切に選ばれたならば、新しい観測値  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) による情報を加えて式(42)により修正された事後確率密度  $f''(\theta)$  は、 $f'(\theta)$  と同種の分布に従うものと考えられる。このように、 $f'(\theta)$  と  $f''(\theta)$  が同種の確率分布に従うような  $f'(\theta)$  を共役な事前確率密度 (conjugate prior) と呼び、例えば  $p(x|\theta)$  がポアソン分布である場合には、共役な事前確率密度はガンマ分布であることが知られている:<sup>24)</sup>

ある地域に  $t$  年間に発生する一定マグニチュード以上の地震の個数  $x$  というような問題を考える。まず、地震の発生過程の確率モデル (例えばポアソン過程) から  $p(x|\theta)$  を仮定する。  $x$  の分布はパラメータ  $\theta$  (例えば平均年間発生率  $\nu$ ) の関数であるが、 $\theta$  の値を固定したとしても確率的なものである。実際には、さらに  $\theta$  そのものが確率量であり、将来における  $x$  の値を予測しようとする、結局二重の不確定さが含まれる。このような場合には、複合分布 (Compound distribution) の概念が適用でき、 $x$  の確率密度を

$$p'(x) = \int p(x|\theta) f(\theta) d\theta \tag{44}$$

で定義できる:<sup>24)</sup> この新しい分布は、 $\theta$  のすべての値に対するすべての可能な分布  $p(x|\theta)$  の重みつき平均と解釈することができる。

### 5・3 地震危険度の検討への応用

仮に、ある地域に来襲したと思われる震度  $I$  以上の地震動の回数が過去  $T_1$  年間に  $n_1$  回であったとする。地震動の来襲はポアソン過程と仮定し、平均年間発生率  $\nu$  の事前分布は未知であるとする。したがって、式(43)を用いるが、この場合の観測値は 1 組だけであるから ( $m=1$ ),

$$f''(\nu) = N' \frac{(\nu T_1)^{n_1} e^{-\nu T_1}}{n_1!}$$

となる。  $\int_0^\infty f''(\nu) d\nu = 1$  となるように正規化定数  $N'$  を定めれば、

$$f''(\nu) = \frac{\nu^{n_1} T_1^{n_1+1} e^{-\nu T_1}}{n_1!} \tag{45}$$

なるガンマ分布が得られる。その後  $T_2$  年間の観測を続けたところ、震度  $I$  以上の地震動が  $n_2$  回来襲したとする。いま、事前確率密度が式(45)であたえられるものとし、この新しい情報を用いて式(42)により  $\nu$  の分布を改良する。この場合も  $m=1$  であるから、

$$f''(\nu) = N' \frac{(\nu T_2)^{n_2} e^{-\nu T_2}}{n_2!} \frac{\nu^{n_1} T_1^{n_1+1} e^{-\nu T_1}}{n_1!}$$

となるが、正規化することにより

$$f''(\nu) = \frac{\nu^{n_1+n_2} (T_1+T_2)^{n_1+n_2+1} e^{-\nu(T_1+T_2)}}{(n_1+n_2)!} \tag{46}$$

が得られる。前節で述べたように、これもガンマ分布である。(45)と(46)を比較してみると、式(46)の結果は、 $(T_1+T_2)$  年間に  $(n_1+n_2)$  回の観測値があったとして式(43)を直接用いた結果と同じである。すなわち、式(46)では、たとえ  $T_1$  年間と  $T_2$  年間の観測に質の差があったとしても、その差は考慮されていない。

以上の結果を、表 1 に示した資料に応用してみる。  $T_1$  としては 818 年から 1756 年までの 939 年をとり、 $T_2$  としてはそれ以後の 200 年をとる。図 4 には、震度  $V$  以上の地震動 ( $n_1=22, n_2=16$ ) および震度  $VI$  以上の

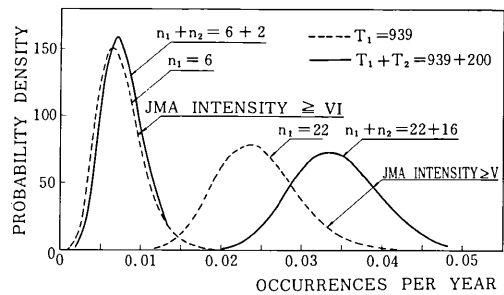


図 4 東京における震度  $V$  および  $VI$  以上の地震動の平均年間発生率の確率密度

の地震動 ( $n_1=6, n_2=2$ ) の平均年間発生率の確率密度を式(45)および(46)で求めた結果を示した。図 4 によれば、震度  $V$  以上の場合については、最近 200 年間の資料の追加によって確率密度がかなり変化しており、 $T_1$  年間の資料に相当数の記録もれがあったことがうかがわれる。しかし、震度  $VI$  以上の場合については、式(45)と(46)による結果には大きな差はなく、非常に激しい地震動の来襲 (すなわち、その原因となった非常に大きな地震の発生) に関しては、最近 200 年間とそれ以前 939 年間の資料にあまり大きな質の差がないといえる。

次に、式(44)を利用して将来の地震危険度を予測することを考える。式(44)の右辺に含まれる  $f(\theta)$  としては式(46)の  $f''(\nu)$  を用い、簡単のため

$$T_0 = T_1 + T_2 \quad n_0 = n_1 + n_2$$



と書く. また, 意味を明確にするため左辺を  $p(n | T_0, n_0, t)$  と書けば,

$$p(n | T_0, n_0, t) = \int_0^\infty \frac{(\nu t)^n e^{-\nu t}}{n!} \frac{\nu^{n_0} T_0^{n_0+1} e^{-\nu T_0}}{n_0!} d\nu$$

$$= \frac{(n+n_0)!}{n! n_0!} \frac{\left(\frac{t}{T_0}\right)^n}{\left(1 + \frac{t}{T_0}\right)^{n+n_0+1}} \quad (47)$$

が得られる<sup>24, 33, 34)</sup>式(47)は, 過去の資料  $(T_0, n_0)$  を知って, 将来  $t$  年間に  $n$  回発生する確率をあたえる.  $n$  の期待値は

$$E[n] = \sum_{i=0}^\infty i \cdot p(i | T_0, n_0, t) = \frac{t(n_0+1)}{T_0} \quad (48)$$

となるから, 再現期間は

$$T_R = \frac{t}{E[n]} = \frac{T_0}{n_0+1} \quad (49)$$

と簡単な形になる. 式(47)と(49)から, 再現期間中に  $n$  回発生する確率は

$$p(n | T_0, n_0, T_R) = \frac{(n+n_0)!}{n! n_0!} \frac{(n_0+1)^{n_0+1}}{(n_0+2)^{n+n_0+1}} \quad (50)$$

となり, 特に, 再現期間中に1回も発生しない確率は

$$p(0 | T_0, n_0, T_R) = \left(\frac{n_0+1}{n_0+2}\right)^{n_0+1} \quad (51)$$

と表わせる.

過去の資料が極めて多数ある場合には,  $T \rightarrow \infty, n_0 \rightarrow \infty, n_0/T_0 \rightarrow \nu$  とすることにより, 上の各式は4.1に示した対応する式と一致する. 例えば, 式(51)の右辺は  $e^{-1}$  となり, 式(22)の結果と同じになる.

従来の方法とベイズ流の方法 (Bayesian approach) の違いは, 過去の資料が少ない場合に顕著である. 例えば, 過去  $T_0$  年間に被害地震が1回も来襲しなかったという資料だけがある場合, 従来の方法では再現期間が無限大となり, 無限大の期間に被害地震が来襲する確率が0.632であるという結果をあたえる. これに対し, 式(49)によれば, 再現期間は  $T_0$  年と推定され, 式(50)から  $T_0$  年間に被害地震が来襲する確率が0.5となる.

ベイズ流の考え方を地震危険度の予測に応用する1つの方法は次のようなものとなる.

例えば, 図4の震度VI以上の場合のように, 最近  $T'$  年間とそれ以前  $T''$  年間の資料にあまり質の差がなければ,  $T_0 = T' + T'', n_0 = n' + n''$  として全歴史期間の資料を用いる. 仮に,  $T' = 200, n' = 1, T'' = 800, n'' = 4$  とする. 従来の方法では,  $T'$  年間のみを用いても, 全歴史期間を用いても同一の結果しか得られない. ベイズ流の考えに従えば, 未知パラメータ  $\nu$  の確率密度が異なり, 全歴史期間の資料を用いる方が確度の高い予測ができる. 図5はこの間の事情を説明するものである. 確率密度の山の位置はどちらも同じであるが, 全期間の資料を用いた方が山が鋭くなる. したがって,

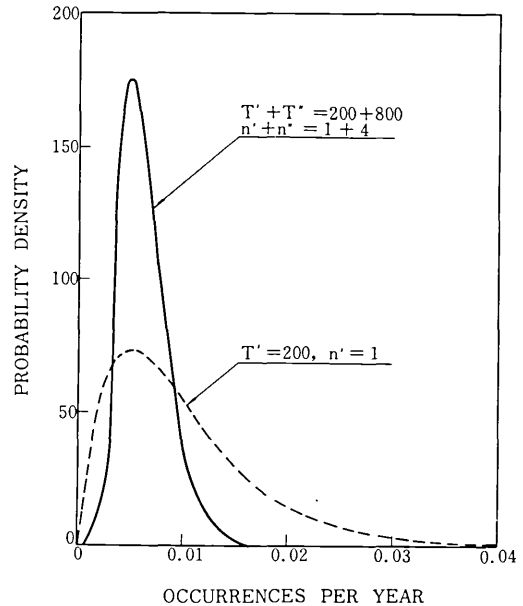


図5 資料の個数による平均年間発生率確率密度の変化

$\nu$  の確率密度を重みとした式(47)の推定には差が生じることになる. 再現期間は式(49)によって評価できるが, 最近の資料のみからの予測値100年よりも, 全期間の資料から得られる167年の方が信頼性が高いといえる.

逆に, 図4の震度V以上の場合のように, 2つの時期における資料に大きな差が明らかならば,  $T_0 = T'$  および  $n_0 = n'$  として, 最近の資料のみによる推定を行なうべきであろう. 対象としている資料の性質から, 過去の古い資料には記録もれがあると判断するものが最も自然だからである. 例として,  $T' = 200, n' = 10, T'' = 800, n'' = 20$  としよう. 全期間の資料を使えば  $T_R = 32$  年, 最近の資料のみを使えば  $T_R = 18$  年となるが, この場合は後者の方が信頼性が高いと考えるべきである. 式(47)~(49)では,  $T'$  期間と  $T''$  期間の資料の信頼性の差が無視されており, 古い期間の資料を含めることは, むしろ予測の確度を下げることになる.

表1の第8欄, 9欄には, それぞれ全期間および最近200年間の資料を用いて式(49)で計算した再現期間を示した. 上に述べた理由から, この場合には太字で示した値を考えるのが合理的であろう. 5.1で述べた後藤・亀田の方法では, 記録もれを考慮して, 結果的にはすべての震度に対する資料の数に同一の割増し係数を掛けることになっているが, 実際には極めて激しい地震動の来襲に関しては,  $T'$  期間の資料にも記録もれの可能性が低いという事実が無視されている. 表1の例では, この差が震度VI以上の地震動の再現期間に大きく現われている.

## 6. むすび

この報文では、地震活動度・危険度の確率論的な扱方の極めて基本的な部分のみを解説したが、さらに発展された高度な考え方も提案されている。後藤・亀田<sup>19)</sup>は、地震発生をポアソン過程とし、さらに1回の地震動による最大地動の確率分布を考慮した。その結果、期待値・再現期間からさらに進んで、将来の最大地動の確率分布を求める方法を示した。Cornell<sup>35-38)</sup>は、地震発生をポアソン過程とし、マグニチュード分布の経験則、地震動の激しさとMおよびRの関係、地震発生の可能性のある領域と注目地点の幾何学的な関係を考慮することにより、地震発生ランダム性と発生位置のランダム性の両者を考えて、注目地点の地震危険度を評価する方法を示している。また、Esteva<sup>39, 40)</sup>はベイズ流の手法をさらに発展的に応用している。

しかし、洗練された理論を実際に用いるには、現在手に入る情報(例えば、ポアソン分布における $\nu$ の値、地震のマグニチュードと震央の位置から注目地点の地震動の激しさを推定する式など)はあまりにも不確実すぎる。すなわち、高度な理論を用いた単一の危険度予測よりも、現時点で集めうる多くの資料をできるだけ異なった視点からながめ、集大成された各種の情報を総合的に判断することが重要である。

このような意味から現在考えうる情報は次のようなものであろう。

- 1) 過去の資料と簡単な確率モデルから得られる定量的情報、いわゆる地震危険度の分布地図などを含む。
- 2) プレートテクトニクスの理論による日本列島に加わる巨視的な力の分布と地震発生との関係。
- 3) 地下構造、主として地殻の破砕度と最大地震マグニチュードの関係。
- 4) Gutenberg-Richterの経験式(式(1))におけるa, bの値の分布。
- 5) 地震放出エネルギーの分布。
- 6) 既知の活断層と地震発生との関係。
- 7) 地震空白地域(Seismic gap)の情報。

河角マップのように日本全国の地震危険度を等値線図で示した結果と、日本全国を大胆に数箇の地域にわけて地殻の破砕度を推定した結果とがある場合、技術者は一般に前者の信頼性の方が高いと判断しがちと思われる。しかし、情報の性質は両者で異なるが、少なくとも信頼度の面でそれほど大きな差があるとは考えられない。ただ、前者が工学的に利用しやすいというだけである。今後の設計における地震危険度の評価は、なるべく多くの異なった性質の情報を同時に勘案しながら行うことが特に重要であろう。

## 引用文献

- 略号: BERI = Bulletin of the Earthquake Research Institute (東京大学地震研究所集報)  
 BSSA = Bulletin of the Seismological Society of America  
 WCEE = World Conference on Earthquake Engineering
- 1) 片山恒雄: 地震動の性質, 第13回生研講習会テキスト「耐震工学の最近の発展」, 1974年10月。
  - 2) 例えば, T. Hiron: Seismicity of Japan, Proc. 2 WCEE, 1960.
  - 3) 茂木清夫: 不均質媒質の破壊に伴うElastic Shocksの発生及びそれに関連した地震現象の二, 三の問題の研究(英文), BERI, Vol. 40, 1962, pp. 125~173.
  - 4) 茂木清夫: 地震の規模別頻度分布の地域性(英文), BERI, Vol. 45, 1967, pp. 313~325.
  - 5) P. M. Welkner: On the space distribution of some seismic parameters in Japan, Part I, Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Vol. 4, 1967, pp. 1~18.
  - 6) K. L. Kaila, V. K. Gaur, and Hari Narain: Quantitative seismicity maps of India, BSSA, Vol. 62, No. 5, 1972, pp. 1119~1132.
  - 7) S. T. Algermissen: Seismic risk studies in the United States, Proc. 4 WCEE, 1969.
  - 8) J. S. Carmona and J. C. Castano: Seismic risk in South America to the south of 20 degrees, Proc. 5 WCEE, 1973.
  - 9) 茂木清夫: 大地震の時間-空間分布の規則性について, 関東大地震50周年論文集, 1973年9月, pp. 259~272.
  - 10) 南雲昭三郎: 日本近海における海底大地震の起り方, 関東大地震50周年論文集, 1973年9月, pp. 273~292.
  - 11) 岡本舜三: 「日本列島大地震図譜」, オーム社, 1968.
  - 12) 河角広: 有史以来の地震活動より見たる我国各地の地震危険度及び最高震度の期待値(英文), BERI, Vol. 29, 1951, pp. 469~482.
  - 13) 河角広: わが国における地震危険度の分布, 建築雑誌, Vol. 66, No. 773, 1951, pp. 3~8.
  - 14) 河角広: 我が国における地震危険度の分布, 資源データブック, 第6号, 1952.
  - 15) 村松郁栄: 50年間に予想される地震動速度最大値の日本全域における分布, 第2回災害科学総合講演会講演論文集, 1965, pp. 201~204.
  - 16) 村松郁栄: 50年間に予想される地震動速度最大値の全国分布(英文), Sci. Rep. Gifu Univ., Vol. 3, 1966, pp. 470~481.
  - 17) 金井清, 鈴木富三郎: 基盤における地震動の最高速度振幅の期待値(英文), BERI, Vol. 46, 1968, pp. 663~666.
  - 18) 河角広: 関東南部地震69年周期の証明とその発生の緊迫度ならびに対策の緊急性と問題点, 地学雑誌, Vol. 79, No. 3, 1970, pp. 115~138.
  - 19) 河角広: 鎌倉の地震力の期待値について, 「河角広博士論文選集」, 1974.
  - 20) 後藤尚男・亀田弘行: 地震時における最大地動の確率論的研究, 土木学会論文集, No. 159, 1968年11月, pp. 1~12.
  - 21) 石本巳四雄: 震度階と地震最大加速度(仏文), BERI, Vol. 10, 1932, pp. 614~626.

- 22) 河角広：震度と震度階，地震，Vol. 15, 1943, pp. 6~12.
- 23) 片山恒雄：地震記録最大加速度値の統計的解析(英文)，生産研究，Vol. 26, No. 1, 1974年1月，pp. 18~20.
- 24) J. R. Benjamin and C. A. Cornell：“Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers”，McGraw-Hill, 1970.
- 25) P. M. Welkner：Statistical analysis of earthquake occurrence in Japan—1926~1956，Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Vol. 2, 1965, pp. 1~27.
- 26) W. G. Milne and A. G. Davenport：Statistical parameters applied to seismic regionalization, Proc. 3 WCEE, 1965.
- 27) W. G. Milne and A. G. Davenport：Earthquake probability, Proc. 4WCEE, 1969.
- 28) W. G. Milne and A. G. Davenport：Distribution of earthquake risk in Canada, BSSA, Vol. 59, No. 2, 1969, pp. 729~754.
- 29) C. Lomnitz：An earthquake risk map of Chile, Proc. 4WCEE, 1969.
- 30) 菊地原英和：風速の再現期間計算法の比較考察—二重指数分布の当てはめにおける問題点—，天気，Vol. 18, No. 1, 1971年1月，pp. 21~34.
- 31) I. D. Dick：Extreme value theory and earthquakes, Proc. 3 WCEE, 1965.
- 32) M. Caputo：Analysis of seismic risk, “Engineering Seismology and Earthquake Engineering (ed'd by J. Solnes)”, Noordhoff-Leiden, 1974, pp. 55~85.
- 33) J. R. Benjamin：Probabilistic models for seismic force design, Proc. ASCE, Vol. 94, No. ST 5, 1968, pp. 1175~1196.
- 34) J. R. Benjamin：A probabilistic model for seismic force design, Proc. 4WCEE, 1969.
- 35) C. A. Cornell：Engineering seismic risk analysis, BSSA, Vol. 58, No. 5, 1968, pp. 1583~1606.
- 36) C. A. Cornell and E. H. Vanmarcke：The major influences on seismic risk, Proc. 4 WCEE, 1969.
- 37) C. A. Cornell：Probabilistic analysis of damage to structures under seismic loads, “Dynamic Waves in Civil Engineering”, Wiley-Interscience, 1971, pp. 473~488.
- 38) H. A. Merz and C. A. Cornell：Seismic risk analysis based on a quadratic magnitude-frequency law, BSSA, Vol. 63, No. 6, 1973, pp. 1999~2006.
- 39) L. Esteva：Seismicity prediction—a Bayesian approach, Proc. 4 WCEE, 1969.
- 40) N. M. Newmark and E. Rosenblueth：“Fundamentals of Earthquake Engineering”, Prentice Hall, 1971.

