

## (9) クラスタ分析に基づく地震活動度の分析について

鹿島建設(株) 砂坂善雄

鹿島建設(株) 清水保明

### 1. はじめに

地震活動の空間的・時間的分布特性の把握は、地震活動度の分析あるいは地震危険度の解析において重要である。これらの検討の基礎データとなる地震カタログには、本震とその前震及び余震が混在しているが、大量のデータを効率的に処理し、本震と前震・余震に層別することが困難であったために、本震と前震・余震の空間的・時間的分布特性については、十分な検討が行われていないのが現状である。

Veneziano and Van Dyck<sup>1)</sup>は、発生過程が非定常であり、空間的にも一様でない記録地震を本震と前震・余震に層別する手法(1次クラスタ分析手法)を提案している。また、Veneziano and Shimizu<sup>2),3)</sup>は、ある1つの余震群をさらに二次的な地震群に分割する手法(2次クラスタ分析手法)を提案している。本報告では、これらの手法の概要について述べた後、2, 3の地域を対象に選び、気象庁の地震カタログを用いて本震及び前震・余震の活動度を検討する。

### 2. 解析手法の概要

#### (1) 1次クラスタ分析

Veneziano and Van Dyckの提案したクラスタ分析手法は、以下の仮定に基づいて記録地震を本震と前震・余震に層別する手法である。

- a. 各地震群(クラスタ)中でマグニチュードが最大の地震のうち発生時刻が最も早い地震を本震とみなす。
- b. 本震の発生は、震央位置と発生時刻に関する領域内でポアソン過程に従うものとする。

本手法では、経度-緯度-時間空間内で本震として仮定した地震の周辺に想定した前震・余震領域内の地震発生率とその領域周辺の地震発生率(本震の発生率に相当)とに有意な差があれば、その領域を一つの前震・余震領域とみなし、その領域内の地震を前震あるいは余震として層別する。(図1)

解析は次のようなステップに沿って行われる。

#### ① 記録地震の順序付け

マグニチュードの大きい順及び年代順に、記録地震を並べる。

#### ② 前震・余震の有意差検定

すべての地震についてその近傍領域の地震発生率と周辺領域の地震発生率の間に有意な差があるかどうか検定する。

#### ③ 前震・余震領域の決定

前震・余震領域の形状と大きさを、上記ステップ②において、有意と検定される最も大きな領域として決定する。

#### ④ 各クラスタの前震・余震の決定

前震・余震領域に含まれる地震のうち、周辺領域の平均発生率をもつポアソン過程でシミュレートした地震に最も近い地震は本震とし、それを除いた残りをそのクラスタの前震・余震とする。なお、この操作はマグニチュード毎に行う。

手順②, ③, ④は、解が安定するまで繰り返す。

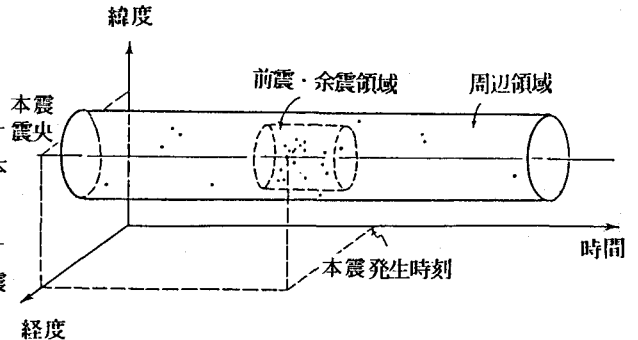


図1 1次クラスタ分析の概念図

(2) 2次クラスター分析

上記の1次クラスター分析によって層別された前震・余震群が、さらにいくつかの顕著な地震群から成る場合がある。Veneziano and Shimizu のクラスター分析手法は、経度-緯度-時間空間において複数の確率密度関数が重なった合成確率密度関数 (Finite Mixture Distribution) を想定し、記録地震をその合成確率密度関数を有する母集団から得られたサンプルであるものとみなして、1次クラスター分析により識別された前震・余震領域内の地震群をさらに2次的な地震群 (2次クラスター) に分割する手法である。本手法の主な手順は以下の通りである。

① 記録地震の初期分類

経度-緯度-時間空間をメッシュ分割し地震の発生確率がピークとなるメッシュ内の最大・最早の地震を2次本震と設定する。その他の地震は、次式で定義される距離が最小となる2次本震の前震・余震群 (2次クラスター) へ分類する。

$$d_{ij} = \left[ \frac{|X_i - X_j|^2}{D_X^2} + \frac{|Y_i - Y_j|^2}{D_Y^2} + \frac{|T_i - T_j|^2}{D_T^2} \right]^{1/2}$$

ここに、 $d_{ij}$  : 対象地震*i*と2次本震*j*の距離  
 $X, Y, T$  : 地震の経度、緯度、発生時刻  
 $D_X, D_Y, D_T$  : 定数

② 2次クラスターの統計量の算定

対象とする地震群が*k*個の2次クラスターから成るとき、記録地震を次のような合成確率密度関数を有する母集団から得られたサンプルと見なして、最尤法によりその統計パラメータを推定する。

$$P(\underline{x} | \underline{\phi}) = \sum_{j=1}^k \pi_j f_j(\underline{x} | \underline{\theta}_j)$$

ここに、 $\underline{x}$  : 経度-緯度-時間空間の座標ベクトル  
 $\pi_j$  : 重み ( $\pi_j \geq 0, \sum_{j=1}^k \pi_j = 1$ )  
 $f_j$  : 2次クラスター*j*の確率密度関数  
 $\underline{\phi}, \underline{\theta}_j$  : 統計パラメータを表すベクトル

2次クラスター*j*の確率密度関数は、経度-緯度平面ではガウス分布、時間領域では指数分布と仮定する。すなわち、

$$f_j(\underline{x} | \underline{\theta}_j) = \frac{1}{m_{Tj}} \exp\{-|\Delta t_j| / m_{Tj}\} \frac{1}{2\pi \det[\underline{\Sigma}_j]^{1/2}} \exp\{-\frac{1}{2} \Delta \underline{x}_j^T (\underline{\Sigma}_j)^{-1} \Delta \underline{x}_j\}$$

ここに、 $\Delta t_j = T - T_j^*$ ,  $\Delta \underline{x}_j = \{X - X_j^*, Y - Y_j^*\}^T$   
 $X_j^*, Y_j^*, T_j^*$  : 2次クラスター*j*の2次本震の経度、緯度、発生時刻  
 $m_{Tj}$  :  $\Delta t_j$ の平均値  
 $\underline{\Sigma}_j$  : 経度-緯度平面における震央位置の共分散マトリクス

③ 重要でない2次クラスターの消去

各2次クラスターの重要度を、2次本震が他の2次クラスターの前震又は余震である尤度及びその2次クラスターに分類される地震の期待個数を指標として判定し、重要でない2次クラスターを消去する。

④ 記録地震の分類

各記録地震を尤度の最も大きい2次クラスターに分類する。

手順②、③、④は、消去すべき2次クラスターが無くなり、解が安定するまで繰り返す。

## 2. 解析例

### (1) 1次クラスター分析結果

関東地方を対象として、記録地震のクラスター分析を行ない地震活動度について検討した<sup>4)</sup>。解析の対象とした記録地震は、気象庁の地震記録のうち、1983年1月から1987年3月までに観測されたマグニチュード3以上、震源深さ100km以浅、新宿から震央距離200km以内の2756個の地震である。

これらの地震の震央分布を図2に示す。また、これらの地震の月ごとの発生個数を示すと図3(a)のようである。1984年9月と1986年11月の地震の発生数が著しく多くなっている。この地震データを1次クラスター分析し、本震と前震・余震に層別した。その結果、全体の48%が前震・余震に層別された。層別された前震・余震及び本震について月ごとの発生個数を示すと図3(b)及び(c)のようになった。前震・余震の月ごとの発生数の変動は大きく、とくに1984年9月と1986年11月は著しく多い。他方、本震の月ごとの発生個数の変動は小さい。

1次クラスター分析で層別された本震及び前震・余震について、b値の分布を図4に示す。(a)はすべての地震から求めたもの、(b)は本震のみから求めたものである。図中の値は、その点を中心に半径100km以内の地震を用いて求めたb値を示す。また、図中には、このようにして求めたb値の等値線も示す。本震のみから求めたb値はすべての地震から求めたb値より小さくなる傾向にある。

### (2) 2次クラスター分析結果

日本海中部地震(1983年5月26日、M=7.7)の余震群の2次クラスター分析を行った。解析の対象とした地震は、気象庁の地震記録のうち、1983年5月26日から1984年12月31日までに観測されたマグニチュード3.5以上の地震719個である。この余震群の2次クラスター分析を行った結果、図5(a)及び表1

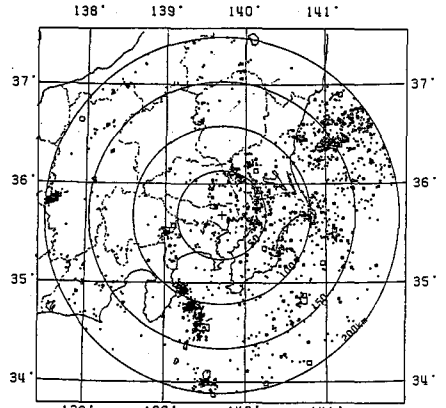


図2 関東地方の震央分布

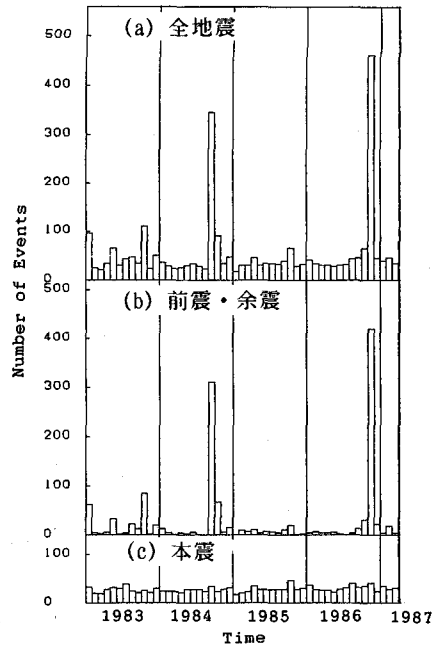
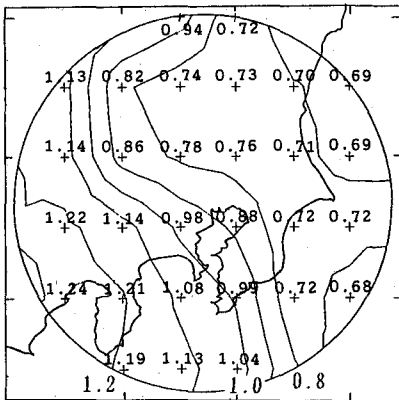
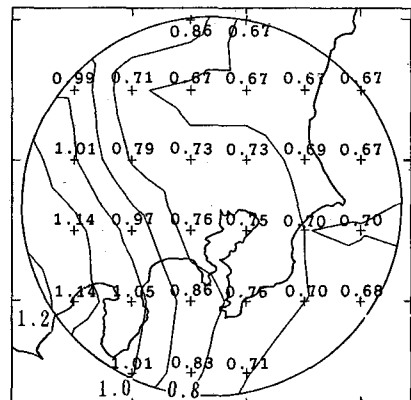


図3 地震の月別発生個数



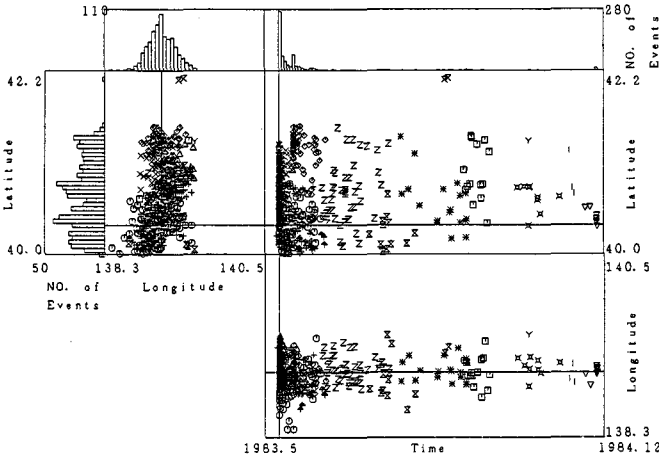
(a) 全地震



(b) 本震

図4 b値の分布

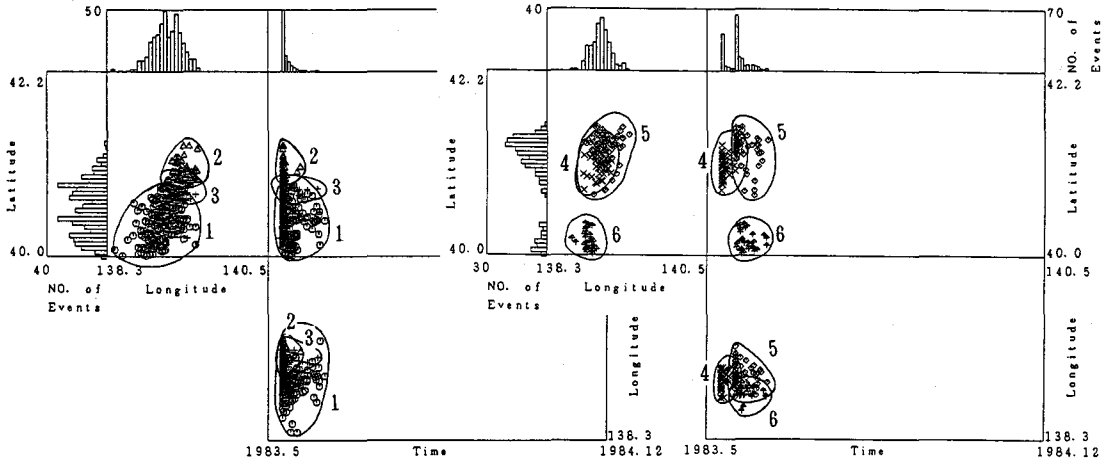
に示すように15個の2次クラスターに分類された。このうち、No. 1~6の2次クラスターを示すと図5 (b)、(c)の通りである。また表1には、地震数が10個以上の2次クラスターについて b値を示した。これより、日本海中部地震の余震群は、経度-緯度-時間空間で発生領域が異なり、b値も異なる2次的な地震群から構成されていることが示された。



(a) 全2次クラスター

表1 2次クラスター分析結果一覧

No.	2次本震		地震数	b値	図5記号
	M	発生年月日時分			
1	7.7	1983. 5.26 11:59	292	0.68	○
2	5.3	1983. 5.26 12:39	58	0.74	△
3	6.1	1983. 5.26 12:56	60	0.75	+
4	5.3	1983. 5.28 11:29	60	0.60	×
5	7.1	1983. 6.21 15:25	96	0.61	◇
6	5.2	1983. 6.23 5:15	34	0.57	+
7	3.8	1983. 9.23 16:34	45	1.03	Z
8	3.8	1983.11.22 6:44	12	0.80	×
9	3.9	1984. 3. 6 22:46	19	0.81	*
10	4.0	1984. 3.18 23:00	2	-	×
11	4.1	1984. 6. 5 23:28	14	0.86	□
12	3.6	1984. 8.11 12:32	1	-	Y
13	3.8	1984. 8.21 21:00	9	-	×
14	3.5	1984.11. 5 19:57	3	-	!
15	3.9	1984.12.18 17:56	14	0.80	▽



(b) 2次クラスター No.1,2,3

図5 2次クラスター分析結果

(c) 2次クラスター No.4,5,6

#### 4. おわりに

本研究では、1次クラスター分析手法を用いて関東地方の記録地震を本震と前震・余震に層別し、地震活動度について検討した。また、2次クラスター分析手法を用いて日本海中部地震の余震群を、2次的な地震群に分類した。その結果、本手法が地震活動度を検討するにあたって、有用な知見を提供するものであることが示された。

参考文献 1) Veneziano, D. and Van Dyck, J. "Statistical Discrimination of Aftershocks and Their Contribution to Seismic Hazard," Consulting Report to Dames & Moore Golden, Colorado, 1984. 2) Shimizu, Y. "Earthquake Clustering in the Utah Region," S.M. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1987. 3) Veneziano, D., 清水保明 "記録地震のクラスター分析手法," 土木学会第43回年次学術講演会 (昭和63年10月) 4) Shimizu, Y. and Sunasaka, Y. "Earthquake Clustering in the Kanto District," ICOSSAR'89, 1989.