クラスター活動の中で続いてさらに大きな地震が発生する現象を用いた $M5$ 以上の地震の発生予測

気象研究所地震火山研究部* 高山 博之

東京管区気象台** 吉田 明夫

Forecasting $M5$ or Larger Earthquakes on the Basis of a Phenomenon that Larger Earthquakes than the Preceding Ones Occur Successively in Clustered Activities

Hiroyuki TAKAYAMA

Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute, Nagamine 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan

Akio YOSHIDA

Tokyo District Meteorological Observatory, 1-3-4 Ote-machi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-0004, Japan

(Received October 29, 2003; Accepted December 14, 2004)

When a larger earthquake than the preceding ones occurs successively in a clustered activity, it seems a further larger earthquake is apt to be observed afterwards (Yoshikawa *et al.*, 2000). We investigate alarm rate, success rate, and probability gain for the occurrence of an earthquake with $M5$ or larger in such sequential activities. We use the JMA catalogue during the period from 1995 to 2000. First, we select out clusters of shallow (depth ≤ 30 km) earthquakes with $M \geq 2.5$ in and around Japanese islands. We name the first earthquake in a cluster E_0 , and the one larger than E_0 that occurs first in the succeeding activity E_1 , and term such clusters that contain E_1 earthquake E_1 -class clusters. E_2 earthquake and E_2 -class clusters are defined in the similar way. We calculate the alarm rate, the success rate and the probability gain, when $M \geq 5$ earthquakes are forecasted using E_1 -class clusters and E_2 -class clusters, respectively. We also examine how the alarm and success rates change when criterion of selecting clusters and upper limit of distance and time interval are varied. It is shown that, for E_1 -class clusters, the alarm rate is 24 to 30% and the success rate is about 5%. For E_2 -class clusters, the alarm rate is 10 to 15% and the success rate is 10 to 14%, and we get a value as large as 5702.2 for the probability gain in the best case that both the criterion and the upper limit of selecting clusters are set to be 5 km-5 days. The large values of the alarm and success rates and the probability gain indicate that the algorithm for forecasting $M5$ earthquakes proposed in this paper is practically effective as well as statistically significant.

Key words: Clustered activity, Forecasting $M5$ earthquakes, Success rate, Alarm rate, Probability gain

§ 1. はじめに

群発的な地震活動が発生したとき、その活動の中で将来、さらに大きな地震が発生する可能性があるかどうか

は、科学的な問題としてばかりでなく、防災上の観点からも多大な関心をもたれるところである。吉川・他 (2000) は、気象庁の地震監視業務において、群発的活動の中でしだいに M の大きな地震が発生してきた場合は経験的に注意したということを述べている。

Fig. 1 は 1998 年飛騨山地で発生した群発活動の例

* 〒305-0052 つくば市長峰 1-1

** 〒100-0004 東京都千代田区大手町 1-3-4

Fig. 1. Epicentral distribution (top panel) and M - T diagram (bottom panel) for the 1998 Hida swarm activity. SEIS-PC (Ishikawa *et al.*, 1997) is used in making the maps.

で、このときは M 2.5 以上の地震で見て M 3.9 の地震が最初に起き、その 2 日後に M 4.3、その 3 日後に M 4.8 としだいに地震の規模が大きくなって、 M 3.9 の地震の 10 日後に M 5.4 の地震が発生した。

一連の活動の中で、さらに大きな地震が発生する可能性があるかという問いは、いま起きている活動が前震と見なしうるかどうかということと関係する。ある地震群が前震活動であるかないかを識別する手法に関しては、これまで種々の考え方が提案されてきた [例えば、宇津 (1999)]。その中で、本論の調査と密接に関連するのは、地震のマグニチュードの時系列に注目する宇津 (1978) や Yamashina and Miura (1980), Yamashina (1981) の手法である。

宇津 (1978) は、前震と群発地震を識別する手がかりを得るため、選び出した前震系列と群発地震それぞれのグループの活動について、その中の最大地震 (M_1) と 2

番目 (M_2) および 3 番目 (M_3) に大きい地震のマグニチュード差およびそれらの発生順序に注目した。宇津 (1978) によれば、1926~1977 年の日本付近の地震活動において、 M_1 と M_2 の差が 0.6 以内の群を選び出すと、群発地震が 232 回、前震系列が 13 回あったが、そのうち、「 M_1 - M_2 が 0.4~0.6 で M_1 - M_3 が 0.7 以上、かつ M_1 が M_2 の後に起こる」という 3 つの条件を満たすものは、前震系列で 10 回、群発地震で 17 回あった。これは、上の 3 条件を満たす地震群の $10/(10+17)=37\%$ が前震系列であることを示す。

Yamashina (1981) は、地震系列の中で現在までの最大地震のマグニチュードを M_1 、 M_1 以前の最大マグニチュードを F_1 、 M_1 以後の最大マグニチュードを A_1 としたとき、 M_1 - F_1 、 M_1 - A_1 の大きさと、現在以後により大きい地震の発生する確率 P の関係について調べた。それによると、 M_1 - $F_1 \leq 0.4$ の時 $P=25\sim 30\%$ 、 $0.3 \leq M_1$ - $F_1 \leq 0.4$ で $P=20\%$ 、また M_1 - $A_1 \leq 0.2$ の場合で $P=20\%$ という結果を得ている。

山科 (2002, 2003) は、2000 年三宅島および新島・神津島近海の地震活動に対して同様な手法を適用し、リアルタイムの予測を試みた。その結果、 M 5 級の地震の発生を約 50% 予測することに成功している。

本論文では、日本の内陸とその沿岸で発生した浅いクラスターの地震活動を対象として、一群の活動の中で M がしだいに大きくなっていった場合にはさらに大きな地震が発生する恐れがあるという経験的、直感的判断に関して、その統計的な有意性、特に M 5 以上の地震発生の予知率、適中率、確率利得についての検討を行う。なお、この予測アルゴリズムは、言うならば、宇津 (1978), Yamashina (1981) の手法の単純化版に相当する。

§ 2. データと解析手法

気象庁の震源データを基に、1995 年 1 月 1 日から 2000 年 12 月 31 日までの期間に日本列島の内陸および沿岸で発生した深さ 30 km 以浅かつ M 2.5 以上の地震について解析を行った。対象とした領域を Fig. 2 に示す。この間に条件を満たす地震は 4855 個数えられる。これらのうち、 M 5 以上の地震は 34 個発生している (Fig. 3)。なお、気象庁の地震マグニチュードは 2003 年 9 月に改訂されたが、本論文はそれ以前に行った研究に基づいているため、改訂以前のマグニチュードを用いている。

クラスター活動の識別としては、二つの地震がある距離以内ある期間以内に起きていれば、同じクラスター地震の群に属するというアルゴリズムを用いた。このアルゴリズムでは活動が長期に及んでいる場合、最初の地震

Fig. 2. Epicentral distribution of shallow (depth ≤ 30 km) earthquakes with $M \geq 2.5$ during the period from 1995 through 2000. Seismic activities inside the polygon are investigated.

と最後の地震では、時空間的に相当な距離を隔ててしまうということもありうる。 $M5$ 以上の地震の発生確率を評価するにあたって、クラスターの活動の定義時空間が制限なく広がるのは、発生予測時空間が不定になることを意味し、都合が悪い。そこで、最初の地震からの震央距離と経過期間についてそれぞれ上限を決め、その範囲外の地震は、別のクラスターに属するとみなした。また、ある地震が両方のクラスターに属する可能性がある場合は、最初の地震の発生時刻が早い方のクラスターに属するとした。このようにして選び出したクラスターは、それに含まれる地震間の距離および期間の上限が押さえられているため、地震発生の予測時空間の大きさを定めることができる。なお、クラスター活動の最小単位は2個の地震である。

クラスタ的活動として取り出される地震群の数は、距離と期間についての基準と上限により変わってくる。Fig. 4 に、基準と上限の期間をそれぞれ 30 日まで 5 日

ごとに、また距離を 30 km まで 5 km ごとに変えていったときのクラスター活動の数の変化を示す。なお、ここで距離については深さを考慮に入れていない。クラスターを選び出す基準として距離を 5 km 以内、期間を 5 日以内と固定した場合は、Fig. 4a に見るように、時空間の上限の設定にはその数はそれほどよらないことがわかる。ここで上限を大きくすると数が減少する傾向が見られるのは、長期にわたる群発活動などで二つ以上のクラスターに分けられていたものが合併することによる。一方、クラスターを選び出す上限を一定にし、距離と期間の基準を大きくすると、クラスター内の地震として同定される地震数が多くなるとともに、クラスターの数そのものも多くなる (Fig. 4b)。いずれにしても、この方法によってクラスターを選び出した場合は、たとえ距離、期間に上限を設定しなかったとしてもクラスターの時空間領域が大きく広がってしまうことはほとんどないと言てよい。

Fig. 3. Epicentral distribution of earthquakes with $M \geq 5$ during the period from 1995 through 2000.

§3. 解析結果

以上のようにして選び出したクラスターに含まれる地震の M の時系列を基に、最初の地震よりも大きい地震が起きて、その後、 $M 5$ 以上の地震が発生しているクラスターがどのくらいあるかを調べ、予知率と適中率および確率利得を計算した。また、最初の地震よりも大きい地震が起きた後にそれよりも大きい地震が起き、その後で $M 5$ 以上の地震が発生した場合の、 $M 5$ 以上の地震の予知率と適中率および確率利得についても計算した。予知率は、 $M 5$ 以上の全地震数を分母に、予測できた $M 5$ 以上の地震数を分子とした値で定義され、適中率は $M 5$ 以上の地震の発生を予測したクラスター数を分母に、実際に予測できた $M 5$ 以上の地震数を分子とした値で与えられる。確率利得 [Aki (1981)] は、予測の対象になる全地震数を全時空間で割ったものを分母とし、予測できた地震数を予測時空間の大きさと割ったものを分子にした値として定義される。予測時空間に用いる時

間は、最初の地震よりも大きい地震が起きたときからクラスターを選び出す上限までの期間とした。確率利得が大きければ大きいほど、その統計的予測手法の性能が良いことを示す。なお、同じクラスターに予測できた $M 5$ 以上の地震が複数ある場合は、 $M 5$ 以上の地震の数だけそれらすべてについて予測が成功したとした。ただし、実際には、選び出しの条件が 5 km 5 日、上限が 5 km 5 日の場合、同一クラスター内に $M 5$ 以上の地震を 2 個以上含む事例はなかった。上限を 30 km 30 日にしても、なかった。選び出しを 30 km 30 日、上限を 30 km 30 日としたとき、 E_2 級クラスターで 1 例、 E_3 級クラスターで 2 例見られた。

調査の対象とした期間内に、 $M 5$ 以上の内陸の浅い地震は 34 個発生した (Fig. 3 参照)。これらの地震を予測対象として、ある期間ある範囲内に $M 2.5$ 以上の地震が 2 個以上含まれるクラスターで、かつ、期間および領域について上限を定めたもののうち、 $M 5$ 以上の地震の前

Fig. 4. Number of clusters of earthquakes with $M \geq 2.5$ for each of the following space-time criterion and condition of selecting clustered activities.

- Criterion of selecting clusters is fixed to 5 km-5 days, while upper limit is varied.
- Upper limit of distance and time interval is fixed to 30 km-30 days, while criterion of selecting clusters is varied.

Fig. 5. Number of earthquakes of $M \geq 5$ in E_1 -class clusters for each of the following criterion and condition of selecting clustered activities.

- Criterion of selecting clusters is fixed to 5 km-5 days, while upper limit is varied.
- Upper limit of distance and time interval is fixed to 30 km-30 days, while criterion of selecting clusters is varied.

にしたいに M の大きな地震が発生した事例を調べる。ここでクラスターの級を次のように定義した。クラスターの活動の中で、

- その最初の地震を E_0 とする。
- 次に、 E_0 よりマグニチュードが大きいものが E_0 の後に起きているかどうか調べ、あればその中で最も早く起きたものを E_1 とする。そして、 E_1 を含むクラスターを E_1 級のクラスターと呼ぶことにする。
- ii) と同様な作業を E_1 に対して行い、 E_2 が存在するかどうか調べる。 E_2 が存在すれば同様にそれをを含むクラスターを E_2 級のクラスターと定義する。こうしたことを、 E_n が存在しなくなるまで繰り返す。以上

の定義により、 E_n 級のクラスターは $E_k (k \geq n+1)$ 級のクラスターを含む。また、例えば、ここで $M \geq 5$ 以上の地震が E_2 級のクラスターに属していれば、「クラスターの最初の地震より M の大きな地震が、 $M \geq 5$ 以上の地震の前に少なくとも一つは発生した事例」に該当することになる。

クラスターを選び出す基準を 5 km 以内 5 日以内とし、 E_1 級のクラスターを用いた場合に上限の距離と期間を変化させていったとき、クラスターに含まれる $M \geq 5$ 以上の地震の数は Fig. 5a のようになった。上限の条件を緩くしたときに予測できる地震の数は少し減っており、特に、空間の上限を 10 km にしたときに数が少なく

Fig. 6. Number of earthquakes of $M \geq 5$ in E_2 -class clusters for each of the following criterion and condition of selecting cluster activities.

- Criterion of selecting clusters is fixed to 5 km-5 days, while upper limit is varied.
- Upper limit of distance and time interval is fixed to 30 km-30 days, while criterion of selecting clusters is varied.

なっている。これについて、5 km 10 日と 10 km 10 日の場合のクラスターを構成する地震を調べたところ、10 km とすることによって、二つのクラスターに分かれていた地震群が一つのクラスターにまとまり、そのため予測できた地震の数が減っていることがわかった。

Fig. 5b は、上限の条件を距離 30 km 期間 30 日と固定して、クラスターを選び出す基準を変えていったときの $M \geq 5$ 以上の地震の数である。この場合は、選ぶ条件を緩くするとクラスターの数が増えるとともに、予測できる地震の数も増える。

E_2 級のクラスターを用いて同様な解析をしたときの結果を、Fig. 6a と 6b に示す。予測できる $M \geq 5$ 以上の地

Table 1. Alarm rate for forecasting $M \geq 5$ earthquakes on the basis of E_1 -class clusters.

- Criterion of selecting clusters is fixed to 5 km-5 days, while upper limit is varied.
- Upper limit of distance and time interval is fixed to 30 km-30 days, while criterion of selecting clusters is varied.

a

radius (km) \ period (day)	5	10	15	20	25	30
5	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4
10	26.5	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6
15	29.4	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5
20	29.4	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5
25	29.4	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5
30	29.4	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5

b

radius (km) \ period (day)	5	10	15	20	25	30
5	23.5	26.5	26.5	23.5	23.5	23.5
10	17.6	23.5	23.5	20.6	20.6	20.6
15	17.6	29.4	32.4	26.5	29.4	29.4
20	17.6	32.4	32.4	29.4	29.4	29.4
25	17.6	32.4	32.4	29.4	29.4	29.4
30	17.6	32.4	32.4	29.4	29.4	29.4

震の数は、 E_1 級のクラスターを用いた場合に比べて半分ほどになる。なお、 E_3 級のクラスターを用いた場合についても調べたが、予測の対象となる E_4 級のクラスターに含まれる $M \geq 5$ 以上の地震の数は極めて少なくなって有意な予測とはならなかったため、その解析結果については省略した。

E_1 級および E_2 級のクラスターの数と、Fig. 5 および Fig. 6 に示したそれぞれのケースで予測できる $M \geq 5$ 以上の地震の数を使って、予知率と適中率を計算することができる。 E_1 級のクラスターを用いて予測した場合の予知率を Table 1、適中率を Table 2 に示す。クラスターを選び出す基準を 5 km 以内 5 日以内とし、上限の距離と期間を変化させていったとき、上限の条件を緩くすると予知率は 29.4% から 23.5% に下がる (Table 1 a)。一方、同様の基準で、適中率は上限の条件にはほとんどよらず 5% 前後の値をとる (Table 2a)。Table 1b は、クラスターの上限を 30 km 以内 30 日以内と設定してクラスターを選び出す基準を変えて行った場合の予知率を示したものである。このときは、選び出す条件を緩

Table 2. Success rate for forecasting $M \geq 5$ earthquakes on the basis of E_1 -class clusters.

- a. Criterion of selecting clusters is fixed to 5 km–5 days, while upper limit is varied.
b. Upper limit of distance and time interval is fixed to 30 km–30 days, while criterion of selecting clusters is varied.

a

radius (km) \ period (day)	5	10	15	20	25	30
5	4.6	5.1	5.3	5.5	5.6	5.6
10	4.5	3.9	4.1	4.3	4.3	4.3
15	5.0	4.5	4.8	4.9	5.0	5.0
20	5.0	4.5	4.8	4.9	5.0	5.0
25	5.0	4.5	4.8	4.9	5.0	5.0
30	5.0	4.5	4.8	4.9	5.0	5.0

b

radius (km) \ period (day)	5	10	15	20	25	30
5	5.0	5.1	4.7	4.0	3.7	3.6
10	3.6	4.4	4.0	3.1	2.8	2.7
15	3.4	4.9	4.9	3.8	3.9	3.8
20	3.1	5.1	4.6	4.0	3.6	3.5
25	2.9	4.8	4.3	3.7	3.4	3.3
30	2.9	4.5	4.0	3.4	3.2	3.0

Table 3. Alarm rate for forecasting $M \geq 5$ earthquakes on the basis of E_2 -class clusters.

- a. Criterion of selecting clusters is fixed to 5 km–5 days, while upper limit is varied.
b. Upper limit of distance and time interval is fixed to 30 km–30 days, while criterion of selecting clusters is varied.

a

radius (km) \ period (day)	5	10	15	20	25	30
5	8.8	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
10	11.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
15	14.7	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8
20	14.7	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8
25	14.7	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8
30	14.7	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8

b

radius (km) \ period (day)	5	10	15	20	25	30
5	11.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
10	5.9	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
15	11.8	8.8	14.7	11.8	14.7	14.7
20	11.8	11.8	14.7	14.7	14.7	14.7
25	11.8	11.8	14.7	14.7	14.7	14.7
30	11.8	11.8	14.7	14.7	14.7	14.7

くしたほうが、予知率が高くなる傾向がある。これに対して、適中率は選び出す基準を緩くすると低くなる (Table 2b)。

Table 3, Table 4 はそれぞれ、 E_2 級のクラスターを用いて予測した場合の予知率と適中率である。クラスターを選び出す基準を 5 km 以内 5 日以内に設定したときの予知率は、上限の条件が 5 km 以内でかつ 10 日以内かもしくはそれ以上の場合、あるいは 5 日以内で 15 km 以内かもしくはそれ以上の場合に 14.7% となり、他は 10% 程度であった (Table 3a)。適中率は、5 日以内で 15 km 以内もしくはそれ以上の場合 13.5% となり、他は 10% 程度であった (Table 4a)。クラスターを選び出す基準の距離と時間を変化させ、上限を 30 km 以内 30 日以内と固定した場合は、 E_1 で予測したときと同様に、選び出す基準を緩くしたほうが、予知率 (Table 3b) が高く、適中率 (Table 4b) は低くなる傾向がある。

E_1 級のクラスターを用いた場合と E_2 級のクラスターを用いた場合を比較すると、予知率は前者で高く後者で低い、適中率は逆に前者で低く後者が高い。

クラスターの数と予測できる地震の数がわかり、クラスターの活動の時空間領域が限定されているので、これらを用いて確率利得を計算することができる。 E_1 級のクラスターを用いたときの結果を Table 5a, b に示す。Table 5a は、クラスターを選び出す基準を 5 km 5 日に固定し、上限の条件を変えて計算した場合である。上限の条件を変えることによって、予測時空間の範囲が変わっても予測できる地震の数があまり変わらないため、上限を小さく設定した方が確率利得は大きな値となる。最大値は、上限の条件とクラスターを選び出す基準とともに 5 km 5 日とした場合で、3937.0 という大きな値が得られた。Table 5b は、上限を距離 30 km 期間 30 日に固定し、クラスターを選び出す基準をその上限の範囲内で変化させて計算した場合である。この場合は、選び出す基準に関係なく、確率利得は 11~20 程度に求まった。

Table 6a, b は、 E_2 級のクラスターを用いたときの結果で、上限を固定した場合は、確率利得は 40 前後となり、 E_1 級のクラスターを用いたときよりも大きな値と

Table 4. Success rate for forecasting $M \geq 5$ earthquakes on the basis of E_2 -class clusters.

- a. Criterion of selecting clusters is fixed to 5 km-5 days, while upper limit is varied.
 b. Upper limit of distance and time interval is fixed to 30 km-30 days, while criterion of selecting clusters is varied.

a

radius (km) \ period (day)	5	10	15	20	25	30
5	6.3	10.0	11.4	11.1	11.4	10.6
10	10.8	6.8	8.6	8.1	8.6	8.6
15	13.5	9.5	11.8	11.1	11.8	11.8
20	13.5	9.5	11.8	11.1	11.8	11.8
25	13.5	9.5	11.8	11.1	11.8	11.8
30	13.5	9.5	11.8	11.1	11.8	11.8

b

radius (km) \ period (day)	5	10	15	20	25	30
5	11.8	7.3	6.3	6.1	6.3	6.1
10	6.7	7.3	6.7	6.4	6.5	6.8
15	12.9	7.1	10.4	8.2	10.4	10.2
20	12.5	8.3	9.6	9.1	9.6	10.0
25	12.5	7.7	8.6	8.3	8.5	8.8
30	12.1	7.7	8.2	8.3	8.3	8.5

なった。予測できる $M 5$ 以上の地震の数は減るが、それ以上にクラスターの数が減るため、予測時空間の範囲が狭くなり、結果として大きな確率利得の値が得られた。クラスターを選び出す基準を固定したときに確率利得が最大となるのは、 E_1 級のクラスターを用いたときと同じく、クラスターを選び出す基準と上限の条件をともに 5 km 5 日とした場合で、その値は 5702.2 となった。

ところで、クラスターを選び出す基準をゆるめても、確率利得は大きくならない。それは、これによって予測時空間が拡大されるのに対して予測できる地震の数がほとんど増えないためである。結局、基準および上限の距離を大きくするとその 2 乗に比例して予測時空間が大きくなるのに対し、予測できる地震の数はほとんど変わらないため、ほぼ距離の 2 乗に逆比例して確率利得が小さくなる。期間については、線型的に予測時空間が大きくなるので、期間の長さにはほぼ反比例して確率利得が小さくなる。

なお、以上の $M 5$ 以上の地震に対しと同様の解析を $M 6$ 以上の地震に対して行ったところ、この手法が予測

Table 5. Probability gain when a warning for an $M \geq 5$ earthquake is issued on the basis of E_1 -class clusters.

- a. Criterion of selecting clusters is fixed to 5 km-5 days, while upper limit is varied.
 b. Upper limit of distance and time interval is fixed to 30 km-30 days, while criterion of selecting clusters is varied.

a

radius (km) \ period (day)	5	10	15	20	25	30
5	3937.0	2193.7	1522.5	1185.2	963.7	802.8
10	965.3	418.2	294.7	229.0	185.3	153.4
15	479.1	214.8	151.5	117.7	95.3	79.4
20	269.5	120.8	85.2	66.2	53.6	44.7
25	172.5	77.3	54.5	42.4	34.3	28.6
30	119.8	53.7	37.9	29.4	23.8	19.9

b

radius (km) \ period (day)	5	10	15	20	25	30
5	19.9	20.2	18.8	15.9	14.9	14.4
10	14.4	17.6	15.8	12.3	11.3	10.9
15	13.5	19.6	19.6	15.1	15.7	15.0
20	12.2	20.5	18.4	15.9	14.5	13.9
25	11.4	19.2	17.2	14.9	13.5	13.0
30	11.3	18.1	15.9	13.5	12.8	11.9

に有効との結果は得られなかった。このことの意味については、次節で若干考察する。

§ 4. まとめと議論

$M 2.5$ 以上のカタログを用い、一つの地震が起きて、続いてその近くでそれよりも大きい地震が起きたとき (E_1 級のクラスター)、その後 $M 5$ 以上の地震が起きると予測した場合の確率利得は最大で 3934.3、続いてもう一つさらに大きな地震が起きたという条件を加えたとき (E_2 級のクラスター) の確率利得は最大で 5805.8 という値が得られた。また、この手法によって、 E_1 級のクラスターを用いた場合は約 30%、 E_2 級のクラスターを用いたときは約 15% の $M 5$ 以上の地震を予測できることがわかった。適中率は、それぞれ約 5% と約 10% であった。

なお、気象研究所 (1993) では、1926~1985 年に日本付近で発生した $M 6$ 以上の JMA 地震カタログを用いて、続発地震に関する統計的な検討を行っている。その結果を見ると、 $M 6$ 以上の地震の後に、それと同じかそ

Table 6. Probability gain when a warning for an $M \geq 5$ earthquake is issued on the basis of E_2 -class clusters.

- a. Criterion of selecting clusters is fixed to 5 km-5 days, while upper limit is varied.
b. Upper limit of distance and time interval is fixed to 30 km-30 days, while criterion of selecting clusters is varied.

a

radius (km) \ period (day)	5	10	15	20	25	30
5	5702.2	4429.3	3327.4	2423.1	1975.7	1536.0
10	2474.9	757.3	630.8	443.5	373.7	310.5
15	1377.5	471.4	385.4	270.4	228.2	189.5
20	774.8	265.2	216.8	152.1	128.4	106.6
25	495.9	169.7	138.8	97.3	82.2	68.2
30	344.4	117.9	96.4	67.6	57.1	47.4

b

radius (km) \ period (day)	5	10	15	20	25	30
5	47.4	30.1	25.6	24.7	25.2	24.7
10	26.9	30.4	27.5	26.0	26.5	27.8
15	52.1	29.8	43.6	33.6	43.0	42.1
20	50.4	34.6	40.1	37.4	39.6	41.3
25	50.4	31.8	35.8	34.2	34.8	36.0
30	48.8	31.8	33.9	34.2	34.2	34.8

れより大きい地震が 10 日以内に発生する割合は 4.2% と求まっている。本研究で E_1 級のクラスターを用いて $M 5$ 以上の地震を予測した場合の適中率と、これはほぼ同じ値である。

本論文で提案した手法が、統計的に見て有効かどうかをさらに確認する意味で、単に $M 5$ 未満の地震が 2 個および 3 個起きた後で、 $M 5$ 以上の地震が起きた場合の確率利得、予知率、適中率を計算してみた。その結果、クラスターを選び出す条件と上限をとともに 5 km 5 日にした場合の確率利得、予知率、適中率は、それぞれ 2180.6, 29.4%, 2.0% と、4515.6, 26.5%, 4.0% と求まった。確率利得は、 E_1 級および E_2 級のクラスターを用いて予測した場合の確率利得の最大値のほぼ 3/4 (地震 3 個の場合) ないしそれ以下の値である。また、予知率については、 E_2 級クラスターを用いた場合と比べると同程度、 E_3 級クラスターを用いた場合には 2 倍に近いものの、適中率についてはこの二つの場合のそれぞれ数分の 1 である。したがって、最初の地震よりも大きな地震が発生したという事象に注目する本論の手法は、単にク

Fig. 7. Change of the ratio between number of E_{n+1} clusters and that of E_n clusters, when criterion of selecting clusters is fixed to 5 km-5 days and upper limit is fixed to 30 km-30 days.

ラスターの活動に注目するよりも、 $M 5$ 以上の地震の発生予測に有効であると言ってよいだろう。

ところで、各級のクラスターの活動の中にそれよりも上位のクラスターがどのくらいの割合で含まれるかは、 $M 5$ 以上の地震に限定せずにさらに大きな地震の発生を予測するという観点で興味がある。それには、 E_{n+1}/E_n という比を求めればよい。選び出しの基準を 5 km 5 日、上限を 30 km 30 日にした場合について、この比をいくつかの n について調べてグラフにしたのが Fig. 7 である。 E_4/E_3 ではこの値が急激に小さくなることから、 E_3 の地震が起きた後でさらにそれより大きい地震が起こる比率は著しく下がることになる。

本稿で得た解析結果は、前震活動において解放されるエネルギーがしだいに加速していくという報告 [例えば、前田 (1998), Jaume and Sykes (1999)] と調和的である。ただし、本解析は地震破壊応力の増大がかなり短時日の間に進行すると推定されるクラスターの活動に関するものであり、その場合、しだいに M の大きな地震が発生するという事は、応力の増加が依然として続いている状況を反映しているのではないかと著者らは考えている。そうした視点から見ると、 $M 6$ 以上の地震の予測にこの手法が有効でないのは、内陸の大地震の場合には、応力の蓄積が長期間にわたってゆっくりと行われるために、直前での応力増大という現象を伴わないからとも考えられる。

謝 辞

本論文の改善にあたって、岡田正実氏ともう一人の匿

名の査読者および編集委員の松浦律子氏からいただいたコメントは非常に有益でした。ここに記して深く感謝します。

文 献

- Aki, K., 1981, A probabilistic synthesis of precursory phenomena, In *Earthquake Prediction: An International Review*, Maurice Ewing Series 4, D. W. Simpson and P. G. Richards (Editors), American Geophysical Union, Washington, D.C., 566-574.
- 石川有三・中村浩二, 1997, SEIS-PC for Windows95, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, 78.
- Jaume, S. C. and L. R. Sykes, 1999, Evolving towards a critical point: a review of accelerating seismic moment/energy release prior to large and great earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, **155**, 279-305.
- 気象研究所, 1993, 1992年7月三陸はるか沖地震活動の予測について—統発性からみた地震発生確率—, 地震予知連絡会会報, **49**, 60-66.
- 前田憲二, 1998, 本震直前の前震活動の時間分布, 月刊地球, **20**, 621-626.
- 宇津徳治, 1978, 前震と群発地震の識別に関する一調査, 地震 **2**, **31**, 129-135.
- 宇津徳治, 1999, 地震活動総説, 東京大学出版会, 391-420.
- Yamashina, K., 1981, A method of probability prediction for earthquakes in Japan, *J. Phys. Earth*, **29**, 9-22.
- 山科健一郎, 2002, 2000年伊豆諸島の地震で試みられた活動予測—直前予測・短期予測の詳細—, 地震研究所彙報, **77**, 343-358.
- 山科健一郎, 2003, 2000年伊豆諸島地域の地震活動直前予測とその検討, 地震 **2**, **56**, 189-198.
- Yamashina, K. and R. Miura, 1980, The $M=3.9$ Earthquake Sequence of May 1978 in Eastern Shikoku, Japan, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **55**, 621-633.
- 吉川一光・吉田明夫・山科健一郎・高山博之, 2000, さらに大きな地震の発生は予測できるか?, 地球惑星科学関連学会 2000年合同大会予稿集, Sk003.