

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 —

山科健一郎*

東京大学地震研究所

Experimental prediction of the Izu Islands earthquakes in 2000

— Detailed description on the imminent and short-term predictions —

Ken'ichiro Yamashina*

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Abstract

During the seismic activity in 2000 in the Izu Islands region, Japan, an experimental study on earthquake prediction was carried out based on several empirical rules. For the imminent prediction, hypothesis A was applied from 15 to 28 July 2000: that is, when earthquakes with similar magnitudes were observed at intervals of less than 2 hours, a larger event would occur within about 4 hours. The alarm period was then changed to 12 hours (hypothesis B), and the intervals of a pair of earthquakes and the alarm period were changed to 24 and 48 hours, respectively (hypothesis C). According to these assumptions, 13 cases out of 25 imminent predictions were successful. Short-term predictions for an alarm period of several days to 21 days were also attempted from 7 July to 13 October 2000, with the following assumptions: when small earthquakes began to occur adjacent to the previously active area, it would be a precursory signal of a forthcoming larger event within several days (hypothesis D). In addition, when earthquakes with similar magnitudes occurred within 7 days, a larger event might be expected within 7 or 21 days (hypothesis E or E', respectively). Among the 13 short-term predictions, 8 were successful. Although the success rates were not high, such information would still be useful to prompt an examination of the available data from various observations or to prepare for the possible execution of a governmental disaster mitigation program. Accumulating such experience will also be useful for finding an effective prediction method and an appropriate expression to announce the forecast.

Key words: Izu Islands, earthquake prediction, imminent prediction, short-term prediction

1. はじめに

大地震の発生を前もって予測できるようになることは、地震研究の大きな目標のひとつといってよいであろう。さまざまな努力が傾けられているが、困難な課題であることは否めない。特に、大地震はめったに起こるわけではない。そのため、地震発生を予測して実際の活動でこれを検証しようとしても、その真偽を確かめることができるのが何年先、何十年先になるかわからないこと

も多い。そこで、過去にさかのぼって昔の大地震の起こり方を調べることや、日本中、あるいは世界中の広い地域の活動に目を向けることが行われる。しかし、過去の地震は、利用できる情報が初めから限られている。また、利用したい観測データが他地域でも得られているとは限らず、必要な観測を新たに広範囲に始めることは、簡単に実現できることではない。

こうした困難があるとはいえ、大きな被害を生じるよ

*e-mail: yama@eri.u-tokyo.ac.jp (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

うな地震がこれからも各地で起こり続けることは確実に、発生予測の実現や被害の軽減に向けての努力が、今後も傾けられることが望まれている。しかし、検証可能な作業を進めないと、科学的進展がなかなか得られないのも確かであろう。そのためには、上記のような模索と並んで、予測の対象を少し小さな地震にも広げ、地震発生に先立つ共通の特徴がないかどうか、追求する努力も必要と思われる。対象とする地震のマグニチュード M が小さくなれば、それだけ発生頻度が多く、予測や検証の機会を増やすことができる。

2000年6月26日に三宅島で始まった地震活動は、三宅島西海岸沖の小さな海底噴火(6月27日)や顕著な山頂噴火(7月8日以降)へ発展した。また、6月26日から27日にかけて三宅島の西～北西海域に延びた地震活動は、さらに北西の神津島付近まで広がり、 M 5～6を含む活動を繰り返した。活動は、北の新島・利島西海岸沖や南の三宅島南西沖～御蔵島西方沖へも拡大し、活動域のさし渡しは、全体で50 km以上に及んだ(Fig. 1)。2000年6～9月の間に、合計で M 6を5回、 M 5を37回も数えている。

M 5～6級が繰り返される活発な活動経過を見ていると、ある程度の活動予測が可能ではないかと思われた。そこで、1週間(後に3週間)くらいを想定した短期予測を2000年7月7日から開始するとともに、もう少し期間を限定した予測ができないか検討し、4時間(後に48時間)くらいの注意期間を想定した直前予測の試みを7月15日から開始した。

これらの予測は、参考として関係防災機関にファック

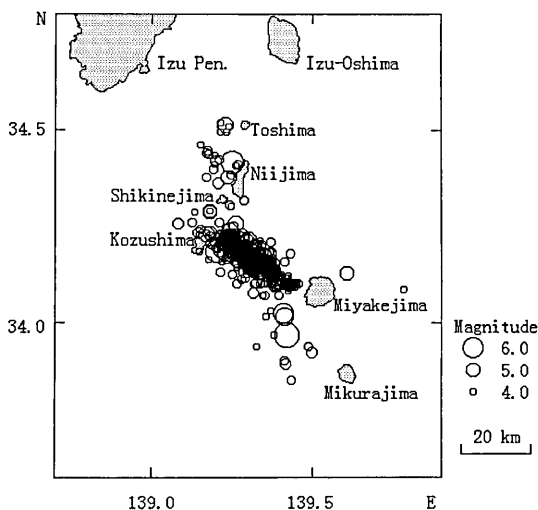


Fig. 1. Hypocentral distribution of the Izu Islands earthquakes ($M \geq 4.0$) in 2000, after the earthquake catalog prepared by the Japan Meteorological Agency.

スの形で送付されるとともに、試験的に作成しているホームページ上に掲載された。直前予測においては「予測の時刻」が記されたが、これは、ファックスの送信文書が作成された時刻、またはホームページへ掲載された時刻を示している。

今回の直前予測がどのくらい有効だったかについては別稿(山科, 2003)で議論されるが、直前予測、短期予測の具体的な内容を記録に残しておくことも、今後の参考になるのではないと思われる。本稿では、今回試みられた予測の内容をそのまま示すとともに、それらの予測の適中率を示し、また、別稿で議論しきれない事項について取り上げて検討する。

2. 予測の方法

今回の地震活動予測は、気象庁から示される地震情報、特にそのマグニチュード M を参照することによって実現した。気象庁では、有感地震が発生してからおおむね数分くらいで、震源位置や M の値を速報する。本稿ではこれを速報 M 値と呼び、?を付けて表示する。また気象庁では、これらの地震のデータをさらに精査し、観測された他の全ての地震の解析結果とともに、地震発生の翌日にはほぼ最終に近い震源(一元化震源)や M 値の詳しいリストを作成する。必要があればその後も修正が加えられるが、こうして決められる M の値をここでは再決定 M 値と呼び、単に0.1刻みの M の値を記したときには、それが再決定 M 値であることを意味する。速報 M 値が決められなかった地震の M について再決定 M 値と呼ぶのは正確でないが、本稿では速報 M 値が示された地震を主に扱っており、対比がわかりやすいようにこのように表現した。なお、本稿に示す再決定 M 値は、2002年10月時点の気象庁資料に基づいている。

一方、 M の大きな地震や特に必要の生じた地震について、地震発生からやや時間をおいて、暫定的に修正された M 値が気象庁から示されることがある。例えば7月15日の M 6.3の地震は、直後には M 5.9?と速報されたが、やや時間をおいて M 6.2と修正され、さらにその後の詳しい検討で M 6.3と再決定された。このような暫定的な修正値が報道を通じて広く流布する場合があるが、議論が複雑になるため、本稿では、地震発生直後に示された M だけを速報 M 値と呼び、暫定的な修正値は取り扱わないことにする。

小さい地震が起きて、その後にこれを上回る大きさの地震が起きたとき、「さらに大きな地震が起こるかもしれない」と考えるのは、ごく素朴な発想であろう。そこで Yamashina (1980) は、1978年伊豆大島近海地震や1980

年伊豆半島東方沖地震など、伊豆半島沖地域の活動例について議論し、さらに、気象庁による日本全域、国際地震観測センター (ISC) による世界全域の地震カタログについても、統計的な検討を行った (Yamashina, 1981 a, b).

一連の地震活動について、予測を行う時刻までに起きた最大と次に大きな地震の M の差に注目すると、例えば Fig. 2 のような結果が得られる。ここでは、ある M 差の地震が近接して発生したとき、その後さらに大きな地震が起こる危険度がどのくらいあるかが示される。ただし最大地震の M を M_1 とし、2 番目に大きな地震は、最大の地震よりも前に起きたもの (F_1) と後に起きたもの (A_1) をそれぞれ選び、小→大の順番で起きた組み合わせは 0 よりも左側、大→小の順番で起きたそれは 0 よりも右側に表示されている。これらの結果から、次のような結論が得られた。

(1) 小さい地震が起きてその後これより大きな地震が起きたとき、その M の差が 0.0~0.4 くらいだと (両者の M が同じ場合も含む)、引き続いてさらに大きな地震が起こる可能性がある (およそ 20~30%)。 (2) 先に起きた地震の方が大きいとき、その M の差が 0.0~0.2 くらいなら、上記と同じように、引き続いてさらに大きな地震が起こる可能性がある (およそ 20~30%)。 (3) 上記よりも M の差が大きいとき、引き続いてさらに大きな地震が起こる可能性は低い (おおむね 5~10% 以下)。

ここで、例えば M 差 0.4 と 0.5 の間に著しい不連続があるわけではない。 M 差 0.5~0.6 (後続の地震の方が大) や 0.3~0.4 (先行する地震の方が大) の場合、上記に準じた注意を与えることも考えられる (もっと大きな地震が起こる割合は 10~15% くらい)。しかし今回は、なるべ

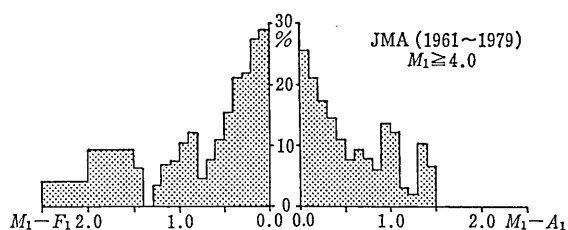


Fig. 2. Probability of an impending major earthquake after Yamashina (1981 a) based on the earthquake catalog prepared by the Japan Meteorological Agency. Horizontal axis represents a magnitude difference of M_1-F_1 (left) or M_1-A_1 (right). In the respective sequence of seismic activity, M_1 is defined as the magnitude of the main shock, or the largest event before time T when a major event occurs with a magnitude larger than M_1 . F_1 and A_1 are the largest magnitudes before and after M_1 (up to the time T), respectively.

く単純化してとらえるため、上記の (1)~(3) だけを予測の基準として利用することとした。

このような経験則を当てはめると、“群発地震”と呼ばれる活動の多くは、要注意とみなされることになる。これよりも前に宇津 (1978) は、最大と 2 番目の地震の M の差だけでなく、2 番目と 3 番目の地震の M の差も組み合わせて、群発地震で終わるものと前震活動とを区別する経験則を得ようとした。ただし、制限を強くすると当てはまる事例の数が減り、予測機会が減少する。今回は、3 番目に大きい M の値を議論に取り入れることはせずに、予測作業を進めた。

予測を行うとき、予測の幅を少しでも狭めることができれば、その方が好ましいことはいうまでもない。今回の直前予測においては、実際の活動経過を検討した結果、以下に示す仮説 A をまず適用した。以後、活動の低下傾向が進んでからは、B、B' や C というように、その内容を修正した。また、7 月 1 日に起きた最初の M 6 級の地震は、それまでの活動域の北西方で新たな活動が始まり、その近くで起きた地震であった。類似した活動経過はこれまでも知られており (例えば 1998 年 8 月から 9 月にかけて活動域を広げた長野・岐阜・富山県境の M 4~5 級の地震など; 気象庁地震予知情報課, 1999), ここでは数日程度の注意期間を想定し、仮説 D として加えた。一方、1 週間程度の期間を想定した仮説 E は再び M の差に注目した予測で、これは後に、注意期間を 21 日間に拡大した仮説 E' へ変更された。今回用いた仮説 A~E (A', B', E' を含む) は、以下の通りである。

仮説 A: 2 時間以内に同程度の大きさの地震が近接して起きたとき、一段と大きな地震が 4 時間以内に起こる (7 月末まで適用; 想定確率 60~80% → 後述のように 40~60% くらいが適当か)。

仮説 A': 先行する地震よりもひととき大きな地震が起きたとき (M 差 0.5 以上)、引き続いてこれより大きな地震が起こる可能性は小さい (7 月末まで適用; 起こらない確率 90~95% くらいを想定するが、活動の状況によって増減)。

仮説 B: 2 時間以内に同程度の大きさの地震が近接して起きたとき、一段と大きな地震が 12 時間以内に起こる (8 月上旬に適用; 想定確率 60~80% → 後述のように 40~60% くらいが適当か)。

仮説 B': B と同内容 (8 月中旬から適用; 想定確率を 20~30% に変更)。

仮説 C: 24 時間以内に同程度の大きさの地震が近接して起きたとき、一段と大きな地震が 48 時間以内に起こる (8 月上旬から適用; 想定確率 20~30%)。

仮説 D: 活発な活動域の近くで小地震が起き始めたとき、その付近や既存の活動域との間で一段と大きな地震が起こる(全期間を通して適用; 数日くらいの間の想定確率 20~30%)。

仮説 E: 7 日程度の間と同程度の大きさの地震が近接して起きたとき、これよりも大きな地震が数日~10 日くらいのうちに起こる(9 月 1 日まで適用; 想定確率 20~30%)。

仮説 E': 7 日程度の間と同程度の大きさの地震が近接して起きたとき、これよりも大きな地震が 21 日くらいのうちに起こる(9 月 8 日以後適用; 想定確率は 20~30%)。

ただし、ここで「同程度」というのは、 M 差が 0.4 以内(後続の地震の方が大)、または 0.2 以内(先行する地震の方が大)を指す。また、「近接して」というのはおおむね数 km 以内(実際の予測作業では、震源の速報位置が緯度経度とも 0.1 度以内)、「一段と大きな地震」というのは M 差 0.5 くらいを主に念頭に置いた。しかし、震源位置をきちんと確認する時間がとれないまま予測作業を行ったこともあった。また、 $M4$ 級の速報 M 値は、その後の再検討によって 0.2~0.5 くらい下方修正されることも多く、実際の作業では、 M 差 0.3 以上くらいを目安にして、そのつど適当と思われる M の範囲を与えた。

同程度の地震が続発する期間として、仮説 A では、「2 時間以内」という時間幅を考えることにした。これは、予測の可能性を模索した 7 月 14 日までの試行期間の検討から仮定されたもので、事前の予測を開始してからも特に不都合はなく、仮説 B、B' でもそれを踏襲した。一方、注意を必要とする期間は、仮説 A ではその 2 倍をとって「4 時間」と仮定した。今回の活動では、集中的に地震が起こる期間とやや落ち着く期間が交互したが、特に活発な状態は、1~数時間くらいで一段落することが多いように思われた。ここで用いた 2 時間、4 時間という時間幅は、こうした傾向を反映している。

一般に、ここで注目するような要件に当てはまる地震が短い時間間隔で発生したとき、注意を必要とする期間も短時間に限定される傾向があるように見受けられる。特に、その間隔が数分しかなかったり、極端には 1 分を切るような場合、その傾向が顕著かもしれない。しかし今回の試みでは、予測の基準を少しでも単純化したいと考え、同程度の地震が起きた時間間隔に応じて予測の内容を変更することは見送った。もっとも、有感級の地震が短い時間間隔で続いたときは、データ処理の限界や報道現場の混乱のため、しばしば速報から漏れることがあった。このため、ごく短い時間に連発した地震は、検

討の対象から事実上除外されることが少なくなかった。

なお、大きな地震が発生した後、小さな地震が余震的に続発することは珍しくない。そのため、大きな地震に先行された活動については、仮説の適用に多少の制限を設ける必要があると思われた。7 月 14 日までの試行期間における活動状況を検討した結果、ここでは、「仮説 A に当てはまる地震については、大きい方の地震が 2 時間以内にもっと大きな地震に先行されている場合、仮説を適用しない」という補足を加えた。仮説 B、B' についても、この補足事項を準用した。

一方、試行期間の経過を見ていると、活発な活動が始まってから長時間経っているときは、もっと大きな地震が起こる可能性があまり大きくないように思われた。そこで、目安となる時間を 4 時間とし、「一連の活動が始まってから 4 時間以上経過しているときは、仮説 A が満たされても適用しない」とした。ここで「一連の活動」というのは、速報 M 値 4.0? 以上の地震が 2 時間(120 分)以上の間隔を開けずに起きている期間を指す。2 時間以上の休止がある場合や、震度分布などから地震の発生場所が明らかにずれている場合は、別の活動とみなすことにした。ただし、6 月 29 日 19 時 10 分頃の $M 4.2?$ と 21 時 13 分頃の $M 4.5?$ (時間差 123 分)の間に $M 3.9?$ が 2 回起きた事例については、その実態に合わせて、一連の活動が続いているものとみなした。

仮説 A においては、注意期間内に予測通りの大きな地震が発生したとき、新たな予測を再提出できるかどうか、その時点で判断する。一方、予測された大きさには達しなかったものの、注意期間内に、仮説 A を再び満たす別の地震が起きたとき、その地震から 4 時間を取り直して注意期間を延長することが考えられる。しかし、いったん提出した予測の内容を途中でわずかばかり変更して短時間のうちに周知し直すことは、実用的には好ましくないであろう。そこで今回は、想定された大きな地震が起きない限り、注意期間の終了までは、予測内容の修正を出さないことにした。注意期間が終了した時点で、さらに注意を延長するかどうか判断するが、一連の活動が既に 4 時間以上継続しているときは、新たな予測の提出は見送る。

事前の予測では、仮説を満たす地震が起きてから実際に予測を提出するまで、どうしても多少の時間差が生じる。そのため、事前予測を提出する時点で仮説 A を満たす地震が既にいくつも起きているときには、その「最後のものから 4 時間」を注意期間とすることにした。このため、作業をいつ行うかによって予測内容に差が生じることになり、任意性が残る。そこで、注意期間は初めに仮

説を満たした時点から計ることとし、そのかわり、その後要件を満たす活動が続く可能性をあらかじめ考慮して、注意期間の長さを6時間くらいに延ばすことも検討された。しかし注意期間は、少しでも短く限定できればそれに越したことはない。期間を一律に6時間に広げても、予測が当たる割合をそれほど大きく改善できるわけではないようなので、今回は実行しなかった。ちなみに、今回の試みを紹介した山科(2000)は、その要旨の中で、仮説Aによる注意期間を「6時間」と記したが、実際に試みられた予測は、上記のように「4時間」であった。

なお、要件を満たす小活動が起きたとき、もっと大きな地震が起こる範囲として、先行する活動から25kmくらいまでの距離を想定した。これは、同程度の大きさの地震が続発するときには、その場所だけでなく、周辺一帯で地震が起きやすくなっているのではないかと考えられることによる。今回の活動についていえば、活動域の中心部で要件を満たしたときは北、南の端までのほぼ全域が想定範囲となるが、端に近い場所で要件を満たしたときは、他方の端は想定範囲から除外される。ただし、仮説Dの場合には場所をもっと限定し、先行する活動が起きている場所かその隣接域を対象範囲とした。

直前予測には、有感地震発生直後に報道機関を通じて示される気象庁の速報M値を利用した。ただし今回の伊豆諸島の地震活動では、速報される地震は、活動がやや落ち着く9月半ばまで、震度3以上のものに限られた。震度3が観測された地震の多くは速報M値が4.0?以上で、一部M3級が含まれるにとどまった。M3.9?以下になると、観測点に近いところで起きたもの以外は速報されないことが多い。そのため今回の試みでは、活動度が下がってきた8月23日の予測(M3.9?ほかの発生に注目)と10月23日の予測(M3.3?ほかに注目)を除いては、M4.0?以上の地震に議論を限定した。また、気象庁の震度3以上の地震リストだけでは情報が不十分と思われた8月27日の予測(M4.9?の発生に注目)などでは、活動状況を確認するため、東京大学地震研究所の地震計記録を参照した。

3. 予測の表現

今回の試みは、適切な予測が実際にどこまで可能かを確かめる試みであると同時に、どのような表現によって予測を提示するのがよいかを検討する機会でもあった。予測の試みは、当面は研究者間や関係防災機関などの間で検討する段階であろうが、さらに進めば、防災対策に直接携わる地方自治体の関係窓口など、必ずしも専門的な知識を有している者ばかりではない先へ、参考として

提示されることも考えられる。

そこで予測の文章は、専門家以外にもその内容がわかりやすく伝わるものになることを目指した。このため、多少の説明や補足を加えるにしても、予測の中心部分はなるべく短く表現し、また、主文で細かい数値を用いることはできるだけ避けることにした。例えばその一例として、直前予測の注意期間は分の端数をおおむね切り上げ、1時間単位で示された。

Mの予測値は、「M5近く」、「M5」、「M5前後」、「M5半ば近く」、「M5半ば」、「M5後半」などのように表現し、0.1刻みの細かい数値を示すことは避けた。Mの値に対する専門家外の理解はかなり漠然としたものであろうと思われ、この程度の表現の方が、耳にしたときや反復して誰かに伝えるときの抵抗が少ないのではないかと思われたからである。上記の表現は、具体的には順に「M4.8~4.9」、「M5.0~5.9」、「M4.8~6.1」、「M5.2~5.3」、「M5.3~M5.7」、「M5.5~5.9」くらいの値をここでは想定した。

なお、懸念されるM値の上限を限ることは、今回の事例ではなかなか難しかった。短期予測では、その頃の活動の活発さに基づいて、Mの上限を限った予測が何度か提出されたが、はっきりした判断の基準を作成できていたわけではない。直前予測では、活動が低下してきた8月15日と10月23日の2回の予測を除いて、他は上限を限らず、「~以上」という表現がとられた。

それぞれの予測で想定される確率の値についても、数値を予測の本文に直接書き込むことは避けた。本文では「~ではないか」、「可能性が大きい」、「~かもしれない」、「可能性がある」、「もしかすると」、「可能性は小さい」などの表現を使い分け、具体的な確率値は補足の中で示した。これらはそれぞれ順に、「95%」、「80~90%」、「60~80%」、「20~30%」、「10~20%」、「5%」くらいの値に対応するものとされたが、人によって受け取り方に差があると思われ、検討の必要があるかもしれない。

4. 直前予測の実施とその当否(仮説A~C)

今回の試みで特に力を注いだのは、注意期間を4時間に絞った仮説Aによる直前予測であった。直前予測は、2000年7月14日までを試行期間とし、7月15日から、実際に事前に予測を提出することを試みた。その経過は、試行期間と事前予測期間に分けて、それぞれFig.3と4、Appendix1と2に示される。

図では、発生した地震の速報M値(ただしM4.0?以上)が○で、予測されたMの範囲(縦幅)と注意期間(横幅)の長さが□で表されている。また、7月23~25日

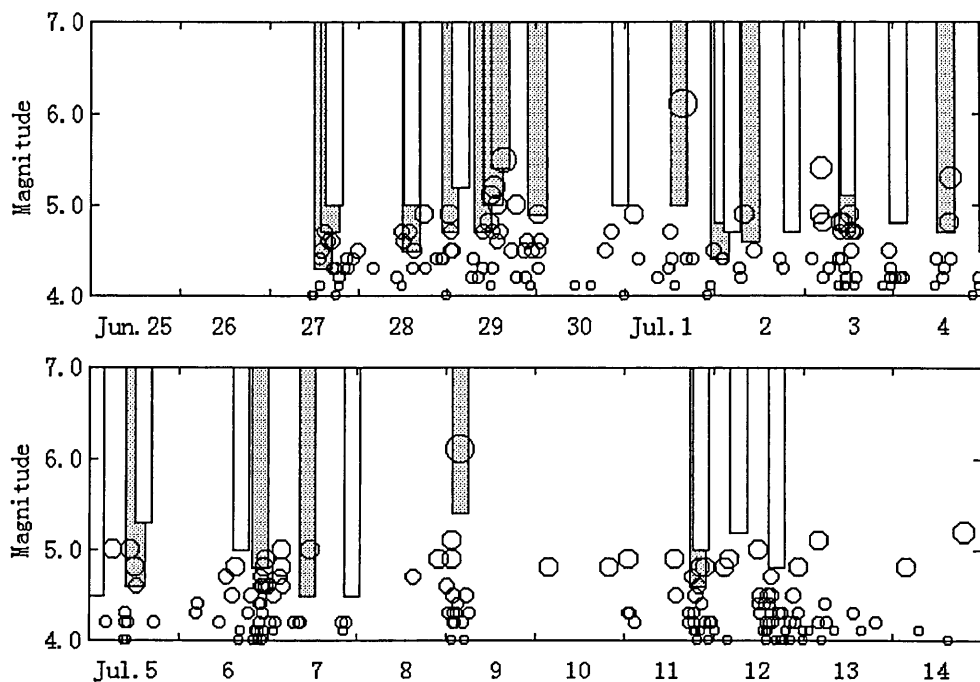


Fig. 3. Imminent prediction of seismic activity in the test period from 27 June to 14 July 2000. Each rectangular strip represents a range of expected magnitude and an alarm period for an impending larger earthquake. Among these, a shaded strip is a successful prediction based on preliminary magnitudes ($M \geq 4.0$) announced immediately after earthquake occurrence (circles).

に示した3つの横線は、仮説A'に基づいて、これ以上大きな地震はしばらくの期間起きないと予測したことを表している。なお、直前予測は原則として速報M値に基づいて行われたため、Figs. 3-4にも速報M値を示すことにした。再決定M値を表示した図は、別稿(山科, 2003)で取り上げられている。

試行期間における予測の詳細はAppendix 1に示されるが、1行目に個々の予測の通し番号、仮説を満たす地震が起きた時刻とその速報M値(仮説を満たすペアの地震のうち、後続のもの)および発生領域、2行目に予測の内容が示される。また、3行目には速報M値に基づいた予測の当否(○, △, ×)と該当する地震の発生時刻や速報M値、4行目には同じく再決定M値に基づくそれが示される。ただし、予測の試行を行った当時、細かい基準を初めから仮定できていたわけではない。Fig. 3やAppendix 1には、後日、予測の基準を統一的に当てはめ直して再作成したものが示されている。

試行期間における最初の予測は、6月27日11時44分頃と12時04分頃にM 4.0?が起きたことを受けたものであるが、仮説Aにしたがうと、「27日17時頃までにM 4.3以上」という予測が立てられる。ただし試行期間には、先行する地震のMよりも一律に0.3以上大きい地震を想定した。この後、やや時間を置いて14時01分頃

にM 4.1?が起こり、続いて、予測通りにM 4.4?が14時05分頃に起きた(再決定M値では14時25分頃に4.4)。M 4.1?と4.4?の発生を組み合わせると、この時点で今度は「27日19時頃までにM 4.7以上」という新たな予測を提出できるが、実際に、15時11分頃になってM 4.7?が発生した(ただし再決定M値は4.6にとどまる)。

6月27日~7月14日の試行期間の間、予測機会は合計34回あった。そのうち、予測通りに大きな地震が起きたのは、速報M値によれば18回(53%)、それに準じるのは8回(24%)あった。再決定M値に基づく判定もこれに近いが、それぞれ順に16回、8回だった。ただしここで「準じる」としたのは、予測された地震の発生が注意期間の終了から少し遅れた場合(3時間以内)、または懸念された大きさよりもMが少しだけ小さかった場合(M差0.2以内、またはM差0.3のものが複数回)を目安とした(以下、仮説B~Cに対しても同様)。

直前予測を実際に行ったのは7月15日07時30分が最初で、06時27分頃のM 4.5?(報道による速報では06時25分頃)ほかに注目して、「7月15日11時頃までにM 5近く以上」とされた。この後、10時30分頃になってM 5.9?(M 6.3)が発生している。以後、活動の推移に応じて予測は随時作成され、かなり落ち着いてき

た10月23日まで、合計25回提出された。これらの経過はFig. 4に、詳細な内容やその当否に関するコメントはAppendix 2に示される。

ここで、Appendix 2に示された25回の直前予測には(1)と(2)が抜けて、(3)~(27)の整理番号が付けられた。これは、7月7日と14日に提出された短期予測を予測の(1)と(2)にしたことを引き継いでいる。一方、Appendix 2の[]の中には、想定確率の大きさが数値で示される。これは、当時の原文に加えられた補足文の中から必要部分だけを取り出したものであるが、わかりやすくするために、それぞれの予測がA~Cのどの仮説に基づいていたかを追記した。「→」以降は予測の当否に関する記述で、Appendix 1同様にまず速報M値、次いで再決定M値に基づく判断が示される。なお、これらの予測には、その当時の地震活動の概要についても言

及されているが、活発な状態が始まった時刻の紹介など、一部、必ずしも正確でない説明も含まれる。しかし、予測内容そのものを変更する事項ではないので、ここで逐一指摘し補足するようなことは省略する。

7月15日の予測(3)から7月28日の予測(16)まで、仮説Aによる予測は11回あった(Appendix 2)。速報M値によれば、予測通りの地震が起きたのは6回(55%)、それに準じるのは1回(9%)あった(再決定M値では、それぞれ順に5回と2回)。

仮説Aでは、想定確率を初め60~80%とみなした。7月15日から予測作業を実際に開始してみると、7月末に2回続けて予測が外れて仮説Aを適用するのを取り止める前まで、3回のうち2回くらいの適中率を保つことができた。そのため、想定確率を途中で変更することはしなかったが、全体を通して見るとその値はやや過大

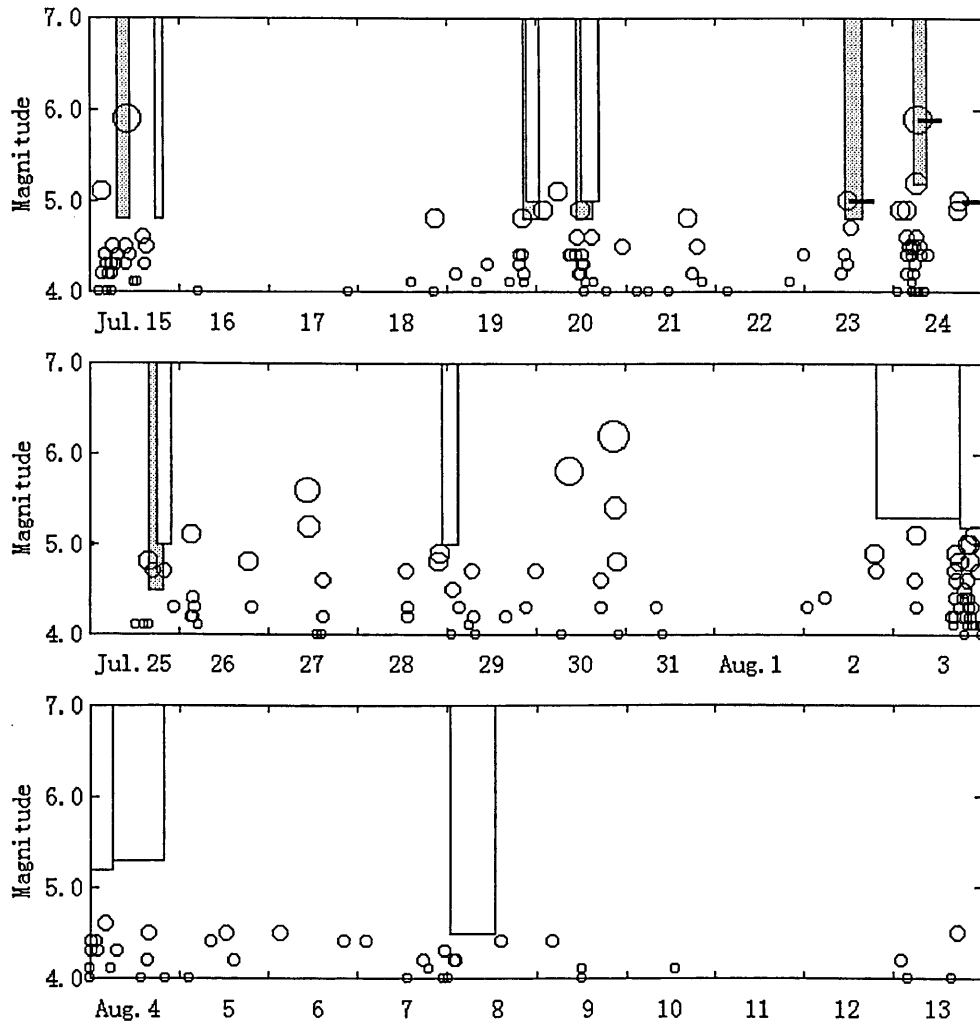


Fig. 4. Experiment on imminent prediction of seismic activity in the Izu Islands region from 15 July to 12 September 2000. The meanings of strips and circles are the same as in Fig. 3. Horizontal bars on 23-25 July represent periods in which no larger events were predicted to occur.

で、後述の仮説 B も合わせて、40~60% くらいの確率を想定した方がよかったように思われる。

活動の活発さがやや下がってきたことを反映し、8月からは、前記の仮説 B や C を用いることにした。また、8月中旬からは仮説 B の想定確率を変更し、これを仮説 B' とした。Appendix 2 を見ると、仮説 B, B', C による予測機会は順に 2 回, 3 回, 6 回あり、予測が当たったのは、速報 M 値によればそれぞれ 0 回 (0%), 2 回 (67%), 2 回 (33%), それに準じるのは 2 回 (100%), 1 回 (33%), 2 回 (33%) あった (再決定 M 値では、順に 1 回, 1 回, 3 回, および 0 回, 1 回, 1 回)。もっと大きな地震が起きないことを予測した 3 回 (仮説 A'; いずれも予測通り) も含め、仮説 A~C による事前の予測を全部合わせると、25 回中、速報 M 値による予測の成功は 13 回 (52%), それに準じるのは 6 回 (24%) あった (再決定 M 値では、それぞれ 13 回と 4 回)。

なお、仮説 C においては、予測の地震が起これるとしたら、仮説を満たした地震から 6 または 12 時間以内、あるいはしばらく時間をおいて、24~48 時間の間に起こる可能性が大きいのではないかと思われた。予測時に一部の点も注釈されたが、実際に予測が当たった 3 回についてその発生時刻を見ると、25 時間目, 3 時間目, および 48 時間の期限切れ直前であった (ただし再決定 M 値による)。何か意味があったのかどうかはわからない。

今回の試みでは、一部、懸念される震度についても言及された (Appendix 2)。これは、予測された M の大きさと各震度観測点までの距離から、震度のおよその幅を推測したものである。7 月 15 日の最初の予測では、先行する地震で震度 4 が出ていることも参考にして「神津島ほかで震度 4~6」としたが、実際に新島で震度 6 弱、神津島で震度 4 (M 6.3) を記録した。「式根島, 神津島ほかで震度 5~6」とした 7 月 20 日の 2 回目の予測では、 M

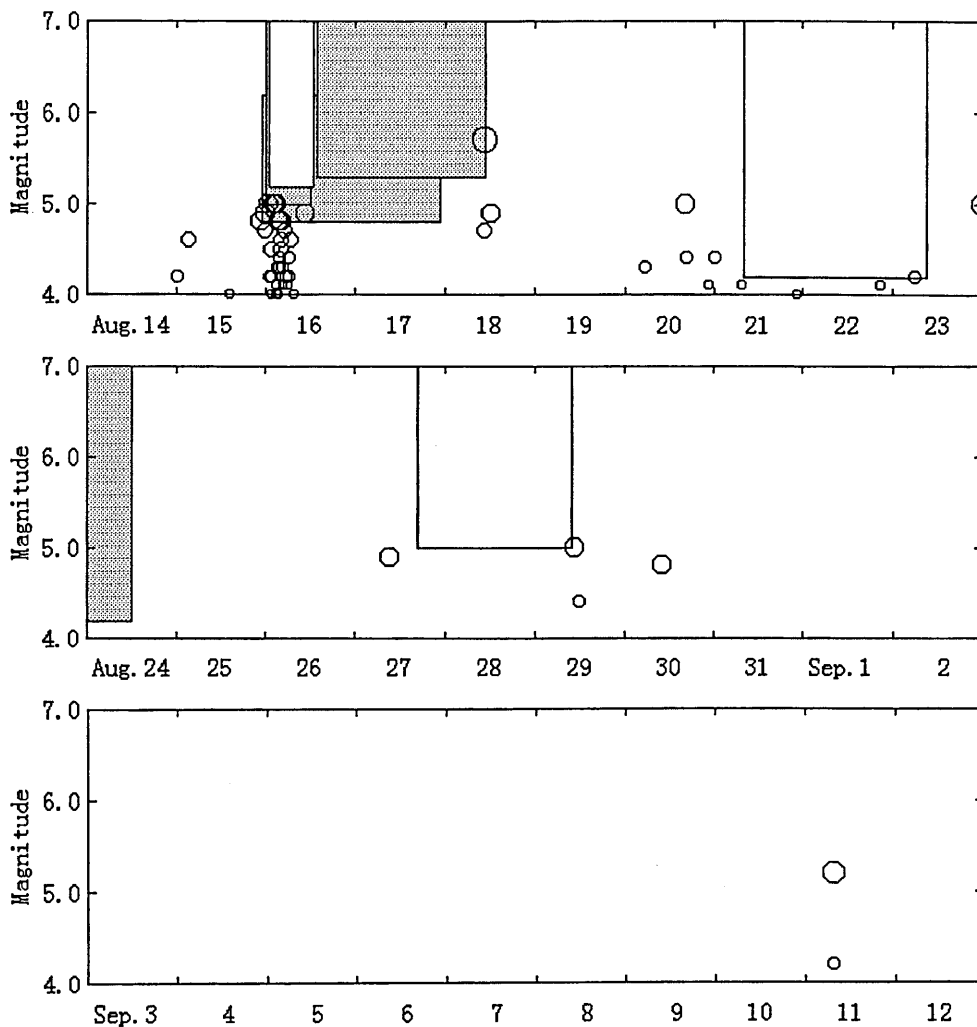


Fig. 4. (continued)

は4.2にとどまったものの、式根島で震度5弱の地震が起きている。同様に「式根島、神津島ほかで震度5~6」とした7月24日1回目や8月3日の予測でも、式根島でそれぞれ震度5強 (M 5.5 と M 5.2) が起きて予測通りとなった。これと同内容の8月16日2回目の予測や「利島ほかで震度4以上」とした8月21日の予測には、式根島で震度5弱 (M 4.8), 震度4 (M 4.0) の地震がそれぞれ対応した。

一方、「神津島ほかで震度4~6」とした7月15日の2回目の予測、「式根島、神津島ほかで震度5~6」とした7月25日の2回目や7月28日、8月8日の予測では、これらに当てはまるような目立つ地震は起きなかった。結局、震度に言及した予測は全部で10回あり、6回(60%)までは予測された強い震度が記録された。今回の震度の予測にはかなりの幅があり、一番揺れる島を必ずしも的確に指摘できたわけではないが、注意期間を短く限定した予測がこのくらい当たれば、それなりに意義があったのではないと思われる。

震度の予測は、地震の発生場所の遠近に大きく左右される難しさがある。しかし、情報の受け手にとってはわかりやすい表現と思われる、こうした試みをもっと進められるとよかったかもしれない。

5. 短期予測 (仮説 D, E)

数日~21日くらいの期間を想定した短期予測の試みでは、時間的にやや余裕があり、作業は、可能な限り再決定 M 値やより正確な震源位置情報を参照しながら進められた。短期予測の具体的な内容やその当否に関するコメントは Appendix 3 に示されているが、当否の判断は、再決定 M 値についてのみ記されている。なお、直前予測では8月中旬まで M 4級以上に限定して検討が加えられたが、短期予測では、初めから M 3級や一部 M 2級の活動経過も参照されている。

7月1日16時01分頃、神津島に近いところで M 6.4 が発生し、崖崩れによる人命の犠牲を出した。6月26日に三宅島付近で始まった今回の一連の地震活動であるが、神津島近くでも6月29日頃から活動が目立っていた。この地震は、 M の差に注目した仮説 A でも予測可能であったが (Appendix 1), 活動経過の時空間的特徴からも、事前に注意を喚起できる可能性があったのではないかと考えられた。そこで、前述のように仮説 D を設け、予測の機会を待つことにした。

仮説 D による予測は、7月14日に最初に提出された。これは、7月9日頃から新島の西海岸沖での活動が目立ち始めたことに注目したもので、「新島付近で、7月14~

20日に M 4後半以上 (想定確率 20~30%)」という内容であった (Appendix 3)。翌日の7月15日に起きた M 6.3 は、先行する活動が起きていたほぼその場所に位置していた。8月2日には、さらに北方の利島付近の活動が目立ち始めていたことに注目し、「数日中に M 5 近くかそれ以上 (想定確率 20~30%)」という予測を別の直前予測 (17) と同時に提出した。しかしこれは、その後特に大きな活動に発展することはなかった。一方、三宅島南西沖の海域では、7月30日に M 5.8, 6.5, 5.7 の地震が続いた。近くでは、これよりも前の7月26日頃から、 M 2~3級の小さな地震がやや目につき始めていた。 M 5~6級が起る可能性を事前に指摘することはできなかったが、仮説 D に当てはまる事例の一つだったかもしれない。

一方、仮説 E は、Yamashina (1981 a, b) によって指摘された一般的傾向を参考に作成されたもので、これに基づいた予測は、7月7日から開始された。期間を7日間に限ったこのときの予測は、活発な状態がいつまで続くのかという見通しが不確かなため、通常よりも小さな確率を想定し、「7月7~13日に M 5以上 (想定確率 10~20%)」という内容にとどめられた。しかし、7月1日に M 6.4 が発生し、その後も7月6日までに M 5級が4回起きていたから、これは、控え過ぎるものだったかもしれない。7月14日の予測からは想定確率を 20~30% とし、9月1日まで、7日ごとに予測を繰り返したが、 M の範囲は、活動状況に応じて変更を加えることがあった。そこまで、仮説 E による予測は8回で、予測通りの活動が起きた事例が5回 (63%)、懸念よりも M が少しだけ小さかった事例 (M 差 0.2) が1回 (13%) あった (ただしここでは、仮説 D と同時に適用された7月14日の新島付近の活動予測は入れずに数えた)。

8月末頃には活動がかなり下降し、「9月1~7日に M 4後半以上」とした9月1日の予測も、 M 3.5 の発生にとどまって誤報となった。そのため、9月8日の予測からは、注意期間を「仮説を最後に満たしてから21日間」に広げ、これを仮説 E' と呼ぶことにした。仮説 E' による予測は3回で、2回は予測の活動が起き (ただしいずれも M 3級にとどまる)、10月13日に出された最後の1回 (「10月30日頃までに M 3半ば~ M 4」) は、1日遅れの10月31日になって M 4.7 の発生をみた。

仮説 D, E, E' による短期予測は、合計13回出された。そのうち、予測通りの活動が起きたのは合わせて8回 (62%) あり、また、 M が少しだけ小さかった場合や発生が1日だけ遅れた場合をそれに準じるものとみなすと、それらは2回 (15%) あった。活発な活動を反映して、

特に仮説 E では、一般的な傾向 (20~30%) よりも高い適中率を得たが、仮説 D や E' は事例数が少なく、もっと大きな想定確率を考えてよかったかどうかかわからない。

6. 結 論

「同程度の大きさの地震が連続したときは、さらに大きな地震への注意が必要」という考えに基づいて、2000年伊豆諸島の地震の活動予測を行った。提案された仮説 A では、連続とみなす期間は2時間、さらに大きな地震がおこるかもしれないとする注意期間は4時間と、いずれもかなり短く設定された。これによる事前の予測を試みた7月15日から月末まで、11回の予測機会うち、地震発生直後に速報されたマグニチュードによれば6回(55%)、後日に再決定されたマグニチュードによれば5回(45%)は、予測通りの大きさの地震が起きている。

7月末以後は、活動の集中度が低下したことを反映して、注意期間を12時間に延ばした仮説 B (後に B')、連続期間を24時間、注意期間を48時間に拡大した仮説 C を新たに作成して適用した。8月2日から10月23日まで、仮説 B, B', C を合わせて11回の予測機会があったが、速報されたマグニチュードによればそのうち4回(36%)、再決定されたマグニチュードによれば5回(45%)は、予測通りの大きさの地震が発生した。仮説 A による予測や、活動が低下することを予測した7月23日から24日にかけての3回の予測(仮説 A'; 3回とも予測通りに低下)もすべて合わせると、合計で25回提出された今回の直前予測の試みでは、速報されたマグニチュード、再決定されたマグニチュードとも、13回(52%)の適中率を得た。

数日~21日くらいの期間を想定した短期予測(仮説 D, E, E')は、合計で13回出された。そのうち予測通りの大きさの地震が起きたのは、再決定されたマグニチュードによれば、合わせて8回(62%)あった。

以前の検討では、同程度の地震が連続したときにさらに大きな地震の発生が懸念される割合は、一般的には20~30%くらいと考えられた。今回、特に直前予測の場合には、注意期間の長さをできるだけ短く限定し、想定されるマグニチュードの範囲もなるべく狭めることが試みられたが、活動の実態に合わせて予測のための基準を作成し、40~60%くらいの適中率を得ることができた。

マグニチュードに注目した予測と平行して、一部、懸念される震度の予測も試みられた。10回の予測機会のうち、短く限定された注意期間内に予測通りの大きな震度が記録されたのは、6回(60%)あった。その中には、震度6弱や2回の震度5強が含まれる。予測情報の利用を

考えると、マグニチュードの予測だけでなく、震度への言及も有意義と思われる。

現在の知識や手持ちのデータで、100%近く当たる実用的な予測を期待することは難しい。50%前後や20~30%くらいの適中率を想定した予測でも、他のデータを詳しく検討するきっかけとして、また、具体的な防災対応をとる必要が生じたときに備える予備的な情報として、それなりの意義があると考えられる。もちろん、予測の適中率が高いほど好ましいことはいうまでもない。機会をとらえて検証を積み重ね、注意期間や懸念されるマグニチュード、震度の幅などを絞り込むことや、予測の適中率を少しでも高めること、適切な表現を工夫することが望まれる。こうした努力によって有効な経験則を明らかにしていくことができれば、地震発生に至る物理過程の解明も進んでいくものと思われる。

謝 辞

気象庁の吉田明夫氏と吉川一光氏にはいろいろ議論していただくとともに、気象庁の地震データについてご教示いただいた。また、東京大学の鶴岡 弘氏、鷹野 澄氏にも地震データの閲覧について助力をいただき、防災科学技術研究所の井元政二郎氏、気象庁の上垣内修氏、東京大学の佐野 修氏、酒井慎一氏、笠原順三氏ほかの方々にも有意義な議論や指摘をいただいた。地震情報のすみやかな公表に力を尽くされている気象庁ほかの多くの方々と合わせ、厚く感謝したい。

文 献

- 気象庁地震予知情報課, 1999, 長野・岐阜県境(上高地~槍ヶ岳)と長野・富山県境(野口五郎岳)の地震活動, 地震予知連絡会会報, 61, 399-405.
- 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.
- Yamashina, K., 1980, Case study of probability prediction; the 1980 East off Izu Peninsula earthquake, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 55, 873-883.
- Yamashina, K., 1981 a, A method of probability prediction for earthquakes in Japan, *J. Phys. Earth*, 29, 9-22.
- Yamashina, K., 1981 b, Some empirical rules on foreshocks and earthquake prediction, in "Earthquake Prediction", ed. by D.W. Simpson and P.G. Richards, *Mourice Ewing Series*, 4, Am. Geophys. Union, 517-526.
- 山科健一郎, 2000, 2000年神津島・新島・三宅島周辺の地震活動予測の試み, 日本地震学会講演予稿集, 2000年度秋季, P 163.
- 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 (投稿中).

(Received November 27, 2002)

(Accepted February 18, 2003)