

8. 前 震

〔I〕はじめに

大地震の発生直前に、その震源域で起きる前兆的な地震活動が前震である。Mogi (1963 a) は地震系列を、a) 本震-余震型、b) 前震-本震-余震型、c) 群発地震型の3つのタイプに分け、岩石破壊実験の結果 (Mogi, 1963 a) から、地殻が比較的均質な地域では a) のタイプ、逆に不均質な地域では c) のタイプになりやすく、b) はその中間的なものであるとした。このように必ずしも総ての地震が前震を伴うわけではなく、〔II〕で述べるようにむしろ前震を伴う地震のほうが多い。

ところで、1963 年 Kurile Islands 地震 (Santo, 1964)、1975 年 Haichen 地震 (Xu *et al.*, 1982)、1978 年伊豆大島近海地震 (気象庁地震予知情報室, 1978; 津村他, 1978) のように極めて顕著な前震活動を伴った例を別とすると、どの地震を前震としてよいか必ずしも明確ではないことが多い (〔II〕参照)。さらに地震予知の観点からは、前震が発生した時点でそれが前震であると判断する必要があるが、これは一層困難である。現在、b 値、ストレスドロップ、スペクトル、地震波形、Q 値等の時間変化を見る方法が考えられているが、これらはそれぞれ別個に論じられるので、ここではそれ以外の方法について述べる。

〔II〕前震の定義と発生確率

前震を議論する上で、前震をどう定義し、前震か否かを如何にして判断するかは、非常に重大な問題である。考えうる前震の条件を列举すると、

- (1) 本震よりマグニチュードが小さいこと
- (2) 本震の直前であること
- (3) 本震の震源の近傍であること
- (4) 定常的な地震活動でないこと

の4つが挙げられる。

これらの条件は異論のないところであろうが、実際に前震を探す場合には (2)、(3) ではそれぞれ直前、近傍をどう定義するか、(4) では地震活動が定常的でないことを如何にして判断するかが問題となる。現在のところこれに対する明確かつ普遍的な基準はなく、各研究者がその目的やデータの性質に応じ適当に設定している。従ってその研究者がどのようにして前震を選び出しているかに注意を払う必要があると同時に、地震予知に適した前震判定の基準を確立する必要があると思われる。

Mogi (1963 b) は、本震前に震源域で地震活動が活発化したか否かという基準で、前震活動の

有無を日本付近の地震約 1500 個について調べた。その結果、明らかに前震が認められる地震は 45, 前震活動がやや不明瞭な地震が 19, 前震の発生する確率は 4 %としている。

Yamakawa (1968) は (4) の条件を客観的に判断するため、Tompthon の検定を用いて地震活動が異常であることを判定する方法を提案し、宮崎県沖の地震に適用した。また、Von Seggern *et al.* (1981) は余震を除いた地震の時系列は Poisson 過程に近い (Gardner and Knopoff, 1974) ことを利用して、本震とその直前の地震との発生時間間隔が Poisson 過程から期待されるより短いときに前震と判定する方法を用いた。その結果で注目されるのは、strike slip のとき前震が起りやすいというもので、これは Jones (1984) の結果と一致する。Bowman and Kisslinger (1984) は、同様の方法を Aleutian Islands の地震に適用した。いま、ある領域での単位時間当りの平均地震発生数を λ とすると、その領域である地震が発生してから t_c 時間内に次の地震が発生する確率が P であるような時間 t_c は、もし地震の時系列が Poisson 過程に従うなら、

$$t_c = (1/\lambda) \ln(1/(1-P))$$

である。彼らは $P=0.2$ として、本震とその直前の地震との発生時間間隔が t_c より短い地震の割合を、考える領域の大きさを色々に変え求めた。もし本震前の地震活動が Poisson 過程に従う(つまり前震が存在しない)ならば、この割合は 20 %になることが期待される。領域の大きさを 20 km から 40 km であるとき割合が 20 %を超えていることから、これは前震が発生しているからであり、前震の発生確率は peak の割合から 20 %を引いたもの(この場合は約 10 %)であると解釈した。

この方法は十分に客観的であるが、地震発生の時系列を Poisson 過程とみなして良いか、地震活動の活発化の判定を単に本震とその直前の地震との発生時間間隔だけでしてよいかの問題の他に、この方法では発生確率が漠然と分るだけで、どの地震に前震が発生したか特定できない欠点がある。

Jones and Molnar (1976) は、本震から 100 km, 40 日前以内に発生した地震を前震とするという簡単な定義により、1950 年より 1973 年の $M \geq 7$ の地震のうち 44 %が前震を伴っているとした。Jones and Molnar (1979) でも同じ定義により $M_s \geq 7.0$ の地震の前震発生の確率を 1914 年-1949 年では 11.3 %, 1950 年-1973 年では 42.2 %としている。これは前震というよりも本震発生前の地震活動というほうがふさわしいが、前震の選び方が客観的であるので系統的に前震の性質を調べたり、これを使って地震予知をする場合には却て都合が良いと思われる。Jones (1984) はまた San Andreas の地震について、震源の時空間分布から本震から 5 km, 1 日以内という条件ではほぼ前震が同定できるとして、その発生確率を逆断層は 0 % (4 個中 0 個), 横ずれ断層は 44 % (16 個中 7 個) としている。これは Von Seggern *et al.* (1981) の結果と調和的である。

山科 (1978) は、期間 t , 距離 r 以内に発生した地震を次々に結びつけることにより地震の集団

を考え、その中でマグニチュードが最大のものを本震、それより前に発生した地震を前震と定義した。Yamashina (1978 a, b) はこの定義を使い、前震を使った地震予知のための経験的な法則を導いている。([IV] 参照)

以上の結果は、前震の定義、どの程度の規模の本震を議論するか、また使用したデータ（地震カタログ）が異なっているので、定量的には当然一致しない。従ってこれらをまとめるのは困難であるが、大体の傾向を探ると、

- (1) 通常の方法で観測するかぎり、前震が観測される確率はかなり甘くみても 50 % 以下である。
- (2) 本震のマグニチュードが大きいほど前震は観測されやすい。
- (3) 本震の fault type によって違いがあり、横ずれ断層のほうが前震を伴いやすい。
- (4) 前震が発生する確率は地域によってかなり差がある。

などである。

〔Ⅲ〕 前震の統計的性質

〔Ⅲ-1〕 前震の時間分布

前震は余震に比べ発生数が限られているので、個々の地震について前震の時間分布を求めるのは困難である。Jones and Molnar (1979), Von Seggern *et al.* (1981) は、地震発生数と本震発生までの時間の関係を、多数の本震について重ね合わせることで調べた。何れも本震発生一日前に、際立って多数の地震が発生しているという結果を得ている。

Jones and Molnar (1979) はさらに、本震発生の数日前から通常より高いレベルの地震活動が始まっているとして、単位時間当りの地震発生数 n と、本震発生までの時間 t との間に、

$$n = at^{-k}$$

という関係があり、 k は本震のマグニチュードによらずほぼ 1 に近い値であるとした。この大森公式に類似した形は、Kagan and Knopoff (1974), Papazachos (1974) によっても導かれている。また Papazachos (1975) は最大前震の発生確率密度 p も $p = ct^{-1}$ の形によく合うとしている。

一方 Von Seggern *et al.* (1981) は、地震発生数を何日間かの平均地震発生数で割った地震発生割合を重ね合わせた結果では、本震発生 1 日前の活発な活動以外は目立った活動の変化は見られないとして、Jones and Molnar (1979) の結果は、単純に地震数を重ね合わせたことによる見掛け上のものであると述べている。

前震の継続時間（最初の前震が発生してから本震が発生するまでの時間）と最大前震のマグニチュード (Jones, 1984), 本震のマグニチュード (力武, 1986) は共に関係がないという結果が得られているが、Jones (1984) は前震の継続時間と本震の震源の深さに関係があると主張し、その理由として次のような説明を試みている。

Coulomb-Navier の理論によれば、剪断強度が S である媒質は剪断応力 τ が

$$\tau = S + \mu\sigma$$

なるとき破壊する。ここで σ は破壊面の法線応力、 μ は内部摩擦係数である。震源域で最初に前震を起こす場所の剪断強度を S_f 、本震発生場所の剪断強度を S_m とすれば、両者の破壊を起こす剪断応力の比

$$\tau_m/\tau_f = (S_m + \mu\sigma)/(S_f + \mu\sigma)$$

が大きいほど前震の継続時間は長くなると考えてよいだろう。 $S_m > S_f$ であるから τ_m/τ_f は σ の単調減少関数であり、 σ は深さに対し線形に増大すると考えてよいから、 S_m 、 S_f が一定とみなせる領域においては前震の継続時間は震源の深さが浅いほど長くなる。

この説明はともかく、データが7つしかない上、深さに関しこれだけの分解能をもつほどの震源決定精度があるか疑問であり、直ちにこの結果が普遍的なものであるとは言い難い。

【III-2】 前震の空間分布

前震が本震の震源の近傍で発生していることは前震の定義から言っても間違いないところとして、さらに微細な構造に関しては、震源決定精度の制約から、地震カタログを使った総合的な研究はない。

前震の数が比較的多かった個々の地震の結果から見ると、前震域は震源域に比べかなり狭い範囲に集中している。例えば1963年 Kuril Islands 地震では約35 km (Santo, 1964), 1975年 Haicheng 地震では約6 km (Jones *et al.*, 1982), 1978年伊豆大島近海地震では約10 km (津村他, 1978)の範囲内に起きており、またこれらの数字は震源決定の誤差を含んだものであるから、実際はこれより小さい可能性が高い。またこれらに共通したことは、本震が前震域に隣接した場所に発生していることである。これらの結果は以前から知られていたことで、かなり普遍的な性質であるように思われる。

これに対し Bowman and Kisslinger (1984) は、本震発生前地震活動が活発となる領域は、マグニチュードから予想される震源域よりかなり広いという結果を得ている。

【III-3】 前震のマグニチュード分布

前震のマグニチュードが本震のマグニチュードに対してどのような分布になるかについて、例えば Papazachos (1975) は最大前震のマグニチュード M_f と本震のマグニチュード M_m の間に

$$M_m - M_f = 1.9$$

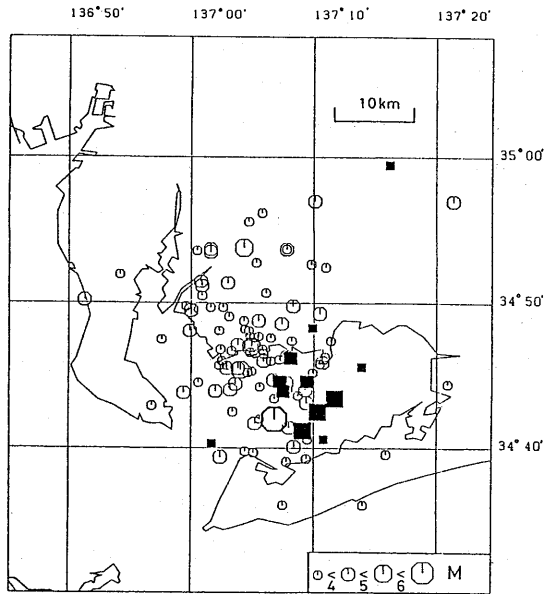


図8-1 1945年三河地震の前震（黒ぬり）と余震（白ぬき）。前震が本震の震央の周辺に集中して発生していることがわかる。浜田（1985）による。

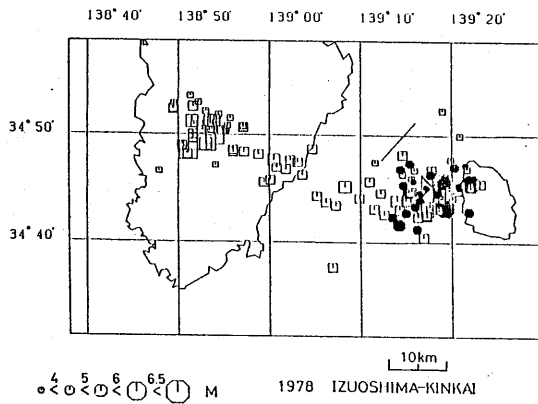


図8-2 1978年伊豆大島近海地震の前震（黒ぬり）と余震（白ぬき）。前震活動が本震の震央の近くに集中しているのは著しい前震活動を伴った大地震に共通した特徴である。浜田（1985）による。

という関係があるとしている。しかし他の研究 (Jones and Molnar, 1979; Jones, 1984) ではこれに否定的で、 $M_m > M_f$ 以外の関係はみられないとしており、また Von Seggern *et al.* (1981) は最後の前震と本震のマグニチュードに関してやはり特別な関係はみられないとした。

岡田 (1980) は、本震とのマグニチュードの差が d 以下の前震数が N である確率 p が負の二項分布に従うというモデルを提唱している。このモデルを使って岡田 (1981) は、最大前震のマグニチュードから本震のマグニチュードの確率分布を求める式を導いている。

【IV】 前震による地震予知

前震により地震予知をするためには、まず本震発生前にそれが前震活動であることを知ること、次に前震活動から本震のマグニチュード、発生する時間、場所を推定する必要がある。本震発生の時間と場所は、前震の定義から言っても、また実際の前震の時空間分布からも、推定は困難ではないように思える。マグニチュードに関しては確実な推定方法はないが、例えば岡田 (1981) や後述する Yamashina (1981 a) の方法である程度の推定は可能と思われる。

最も問題となるのが、それが前震活動であることを如何にして知るかである。現在のところ、本震発生前にそれを知る方法はない。特にこれを困難にしているのが、余震活動に比べ前震活動は地震発生数が非常に少ないことである。多くの場合前震は数個あるいはそれ以下であり、このようなわずかな材料から来るべき地震の予知を行うことは不可能と思われる。実際、前震が極めて多く発生した例 (1975 Haicheng 地震) では、前震活動より地震予知をある程度成功させている。

この事に関し現在の研究は、前震であるか否かを決定論的に知る方法ではなく、地震活動の状況から次に地震が発生する確率がどうであるかを経験的に求める方法に主力が注がれている。地震発生に至るまでの震源近傍での物理過程が明らかでない以上、このような approach が地震予知には現実的かも知れない。宇津 (1978) は、前震と群発地震の識別法として次のような方法を提案した。対象とする地震群でマグニチュードが大きい順に M_1 , M_2 , M_3 とする。このとき M_1 が 4.5-5.0 以上の地震群について、

- (1) $M_1 - M_2 = 0.4 - 0.6$
- (2) $M_1 - M_3 \geq 0.7$ or M_3 観測されない
- (3) M_1 が M_2 の後に起きる

の 3 条件を満たすもの、37 % の確率で前震活動である。一方、このような条件を付けないと、ある地震群が前震活動である確率は 5.3 % にすぎない。

Yamashina (1981 a) はこの考えを進め、日本付近の地震について次のような経験則を求めている。まず山科 (1978) の方法により地震の集団を選び、それは一連の地震活動であると考え。いま地震活動のある時点で、最大の地震のマグニチュードを M_1 , M_1 より以前に発生した最大の

地震のマグニチュードを F_1 , M_1 より以後に発生した最大の地震のマグニチュードを A_1 とする。
このとき、これ以後に M_1 より大きな地震が起きる確率は、

- (1) $M_1 - F_1 \leq 0.3$ であれば 25-30 %, $0.3 \leq M_1 - F_1 \leq 0.4$ であれば 20 %
- (2) $M_1 - A_1 \leq 0.2$ であれば 20 %
- (3) $M_1 - F_1 \geq 0.5$ かつ $M_1 - A_1 \geq 0.2$ であれば 10 %以下
- (4) (1) か (2) の条件を満たした後、1 日以内に M_1 より大きな地震が発生しないと 10-20 %, 1 週間以内に発生しないと 5 %に確率は落ちる。

となる。

また M_1 より大きな地震が発生したとして、その地震のマグニチュード M は、90 %以上の確率で $M - M_1 \leq 0.9$ である。

また Yamashina (1981 b) は ISC のカタログを使い同様な確率を求め、例として 1971 年 New Ireland 地震と、1975 年 Haicheng 地震についてそれを応用している。

狭義の前震を使ったものではないが、Keilis-Borok *et al.* (1980 a) は地震活動のパターンから “strong earthquake” の長期的な予知をする方法として、

1. “main shock” (“strong earthquake”よりは規模が小さい) の発生後一定期間内に発生した “aftershock” 数を利用する pattern B
2. 地震数の増加とそれが空間的に集中していることを利用する pattern S
3. 発生した地震のエネルギーの 2/3 (ほぼ破壊域の面積に対応すると思われる) の和を利用する pattern Σ

の 3 方法を提案し、Keilis-Borok *et al.* (1980 b) では色々な地域において pattern B の最適パラメータを求めている。

Sauber and Talwani (1980) は pattern S を South California の Lake Jocassee に発生した $ML \geq 2.0$ の地震の直前予知に利用した。その方法は、

- (1) 単位時間 (2 日間) に発生した余震を除く地震数が長時間平均の地震数 + 標準偏差より多い。
- (2) その内半数以上が半径 1 km 以内に集中している。
- (3) (2) の地震集中域が、先行して発生した地震の余震域の外にある。

の 3 つの条件を満たしたとき、10 日以内に $ML \geq 2.0$ の地震が (2) の地震集中域に隣接した場所で発生する、というアラームを発するものである。1975 年 11 月-1977 年 12 月の期間で 8 回アラームを発し 5 回地震が発生、またアラームなしに地震が発生したのが 2 回という結果であった。

Yamashina (1981 a, b) の方法は広い範囲で同一のパラメータを選んでおり、データは豊富なので結果は安定であろうが、予測の確率はさほど高くない。それに対し、Keilis-Borok *et al.* (1980 a, b) の手法は各地域でそれぞれパラメータを求めているので、見掛け上予測の確率は高くなる

が、少数のデータからの結果であるので今後に発生する地震について同様の結果が得られるかは疑問である。このように現在のところ、前震による有効的な地震予知方法はない。経験的に、安定でかつ高い地震発生の予測確率を得るためには、できるだけ多くの地震について前震活動のパターンを調べると同時に、個々の地震に関し、活動パターンの精密な解析を行い、より精緻な判定基準を見出す必要がある。

(関田康雄)

参 考 文 献

- Bowman, J. and C.Kisslinger, 1984: A test of foreshock occurrence in the Aleutian Arc, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **74**, 181-198.
- Gardner, J.K. and L.Knopoff, 1974: Is the sequence of earthquake in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **64**, 1363-1367.
- Jones, L., 1984: Foreshocks (1966-1980) in the San Andreas system, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **74**, 1361-1380.
- Jones, L., 1985: Foreshocks and time-dependent earthquake hazard assessment in southern California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**, 1669-1679.
- Jones, L. and P.Molnar, 1976: Frequency of foreshocks, *Nature*, **262**, 677-679.
- Jones, L. and P.Molnar, 1979: Some characteristics of foreshocks and their possible relationship to earthquake prediction and premonitory slip on faults, *J. Geophys. Res.*, **84**, 3596-3608.
- Jones, L., Wang Biquan, Xu Shaoxie and T. J. Fitch, 1982: The foreshock sequence of the February 4, 1975 Haicheng earthquake ($M=7.3$), *J. Geophys. Res.*, **87**, 4575-4584.
- Kagan, Y. and L.Knopoff, 1978: Statistical study of the occurrence of shallow earthquakes, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **55**, 67-86.
- Keilis-Borok, V.I., L.Knopoff, and I.M.Rotvain, 1980a: Bursts of aftershocks, long-term precursors of strong earthquakes, *Nature*, **283**, 259-263.
- Keilis-Borok, V.I., L.Knopoff, I.M. Rotvain, and T.M. Sidorenko, 1980b: Bursts of seismicity as long-term precursors of strong earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **85**, 803-811.
- 気象庁地震予知情報室, 1978: 1978年伊豆大島近海地震について, 地震予知連絡会会報, **21**, 45-50.
- Mogi, K., 1963a: The fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena (second paper), *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **41**, 595-614.
- Mogi, K., 1963b: Some discussion on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms: the fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena (third paper), *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **41**, 615-658.
- 岡田正實, 1980: 前震と本震のマグニチュードの差の分布則, 地震学会講演予稿集, No.1, A 49.
- 岡田正實, 1981: 最大前震から推定される本震マグニチュードの確率分布, 地震学会講演予稿集, No.1, A 41.
- Papazachos, B.C., 1975: Foreshocks and earthquake prediction, *Tectonophysics*, **28**, 213-226.

- 力武常次, 1986: 地震前兆現象, 東京大学出版会, 232 pp..
- Santo, T., 1964: Shock Sequence of the southern Kuril Islands from October 09 to December 31, 1963, *Bull. Int. Inst. Seism. Earthquake Eng.*, **1**, 33-54.
- Sauber, J. and P. Talwani, 1980: Application of Keilis-Borok and McNally prediction algorithms to earthquakes in the Lake Jocassee area, South Carolina, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **21**, 267-281.
- 津村建四朗・唐鎌郁夫・荻野泉・高橋正義, 1978: 1978年伊豆大島近海地震前後の地震活動, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **53**, 675-706.
- 宇津徳治, 1978: 前震と群発地震の識別に関する一調査, 地震, **31**, 129-135.
- Von Seggern, D., S.S. Alexander, and C. Baag, 1981: Seismicity parameters preceding moderate to major earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **86**, 9325-9351.
- Xu, S. X., B. Q. Wang, L. M. Jones, X. F. Ma, and P. W. Shen, 1982: The Haicheng earthquake sequence and earthquake swarms: The use of foreshock sequences in earthquake prediction, *Tectonophysics*, **85**, 91-105.
- Yamakawa, N., 1966: Foreshocks, aftershocks and earthquake swarms (I). A definition of foreshocks, aftershocks and earthquake swarms and its application to seismicity, *Pap. Meteorol. Geophys.*, **17**, 157-189.
- Yamashina, K., 1981a: A method of probability prediction for earthquakes in Japan, *J. Phys. Earth*, **29**, 9-22.
- Yamashina, K., 1981b: Some empirical rules on foreshocks and earthquake prediction, in Earthquake Prediction: An International Review, Maurice Ewing Series, 4, D. Simpson and P. Richards, Editors, Am. Geophys. Union, Publ., Washington, D.C., 517-526.