

$$\delta_1 = \sum_{i=1}^n u(e^{-p_i}) \cdot p_i^2, \quad \delta_2 = \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n p_i^2 - \frac{1}{6} \sum_{i=1}^n \frac{p_i^3}{1-p_i} \right] \right\}^{1/2},$$

$$\delta_3 = \left\{ 1 - e^{-\lambda} \prod_{i=1}^n [(1-p_i)^{1/2} + p_i]^2 \right\}^{1/2} + \bar{\gamma}_{n+1, \lambda},$$

である。

$$u(t) \equiv \frac{5(1+t^{1/3})^3(1+t^{1/3}+t^{2/3})(1+12t^{1/3}+t^{2/3})}{61+436t^{1/3}+686t^{2/3}+436t+61t^{4/3}} \quad (t > 0),$$

$$\gamma_{n+1, \lambda} = \frac{\exp \left[ -\left( \lambda + \frac{1}{12(n+1)} \right) \right]}{\sqrt{2\pi(n+1)}} \left( \frac{e\lambda}{n+1} \right)^{n+1} \left( 1 + \frac{\lambda}{n+2} \right) \quad (\lambda > 0),$$

$$\bar{\gamma}_{n+1, \lambda} = \frac{\exp \left[ -\left( \lambda + \frac{1}{12(n+960/907)} \right) \right]}{\sqrt{2\pi(n+1)}} \left( \frac{e\lambda}{n+1} \right)^{n+1} \left( 1 + \frac{\lambda}{n+1-\lambda} \right) \quad (0 < \lambda < n+1),$$

$$\gamma_{n+1, \lambda} < \frac{1}{\Gamma(n+1)} \int_0^\lambda e^{-x} x^n dx = P^{Tn}(A^c) < \bar{\gamma}_{n+1, \lambda}.$$

さらに、

$$(ii) \quad D(S_n, T_n; \mathbf{B}) \leq \max_{1 \leq i \leq n} p_i$$

が成立する。右辺の係数「1」は  $D(S_n, T_n; \mathbf{B}) \leq c \max_{1 \leq i \leq n} p_i$  ( $c$ : 絶対定数;  $0 \leq p_i \leq 1$ ) の型の評価に於ける最良の値である。

## 巨大地震と相対的静穏期

尾形良彦

大地震の前に或る期間、震源域付近の常時地震活動が低下し、震央分布図に空白域が認められた例(第2種地震空白域)は、1952年十勝沖地震や1964年新潟地震について井上(1965)が報告して以来多数の例が報告されており、1979年までの研究は大竹(1980)で解説されている。しかし空白域は期間やマグニチュードの下限などに依存し、はっきりしないことが多い。微小地震の震源データで北海道近辺を調べた本谷(1984)では、空白域が明確でなくとも全体的な静穏化ははっきりしている。井上で述べられている様に震源域の数倍以上(500 km 前後)で静穏が見られるのならば、M8クラスの巨大地震については、相当広い地域の地震活動を「残差」解析しても相対的静穏期が検出されるに違いないと考える。

通常時の地震活動を表現するETASモデル(Epidemic Type Aftershock Sequence model: 尾形(1985, 1987)参照)を地震時系列データにあてはめ地震活動の同定をおこない、その地域および期間の標準モデルとし、点過程「残差」解析をすることによって、日本と世界の主な巨大地震の前に有意な相対的地震活動の低下が明瞭に見られる。ここで言う相対的静穏期とはETASモデルで予測される発生率に比して有意に地震発生数が少ない期間で、「残差」過程で検出される。これは、「静穏期は単に余震活動の衰えがもたらしたものであり、それをもって来るべき地震の前兆としての情報の意味はない」とするLomnitz(1982)の批判にも応えたものである。活発な余震活動中でも相対的静穏期は存在する(Matsu'ura(1986))。他方、ずいぶん長い間地震が無くとも、それが標準モデルによる予測活動度に見合っていれば、異常とはならないのである。

残差過程のレベルがどこから有意に下がっているのか? という問題は変化点問題(change point problem)と呼ばれ、その有意水準は通常平均差検定より高水準になっている。これは、直観的にせよ、一番ありそうな変化点を探してその差を問題にするからである。「残差」データの累積関数は、もしそれが標準ポアソン過程にしたがっていけば、傾き1の直線に近い形になっている。しかし、もし途中から傾

きが有意に減ったままの状態がしばらく続けば、これは予測している変動より地震が少ない状況が積み重なっていることを示している。たとえ高活動であろうとも低活動であろうとも、「残差」過程で見ての低下であるので、我々はこれを相対的静穏期 (*relative quiescence*) と呼ぶことにする。

このような静穏期の統計的有意性をどの様に調べたら良いのだろうか？ とりあえず「残差」データの累積曲線を目で見て、その中で変化点と見受けられる時点  $\tau_0$  を探し、対応する時点  $T_0$  を境に時間区間  $(0, T_0)$ ,  $(T_0, T)$  そして全時間区間  $(0, T)$  のそれぞれのデータに対して ETAS モデルの AIC を計算する。ただし分区間のモデルに対する AIC は、ETAS モデルのもの以外に、パラメータ  $T_0$  を見込んだベナルティによる修正を施す。これは全区間の地震数に依存しており 2~3 の値になる。もし分区間のモデルの AIC がより小さいとき、時点  $T_0$  を境に量的または質的に地震活動パターンが変わっている可能性が高いことを示す。

この変化が相対的静穏期として有意かどうかは次の様にして調べる。まず前者の時間区間  $(0, T_0)$  で ETAS モデルをあてはめたパラメータの推定値で「残差」過程を残りの区間  $(\tau_0, S)$  に延長する。前の区間でモデルの適合が良ければ「残差」データの累積曲線は傾き 1 の直線に沿って増加するが、後半の区間で変化していれば、延長した直線から外れる。相対的静穏は下の方に外れるのだが、その有意性を見るために、外れぐあいの統計量  $\Delta N(\tau_0, \tau) \equiv N_\tau - N_{\tau_0} - (\tau - \tau_0)$  を考える。そこで帰無仮説として、 $\tau_0$  以降  $S$  まで変化が無かったものとすれば、 $\{N_\tau; \tau > \tau_0\}$  は標準ポアソン過程であり、統計量  $\Delta N(\tau_0, \tau)$  は近似的に  $\mathcal{N}(0, \Delta\tau)$  なる平均値 0 分散  $\Delta\tau = \tau - \tau_0$  の正規分布にしたがうものと考えて良い。しかしながら、前半の区間  $(0, \tau_0)$  の「残差」過程を作るときに使った推定量は区間の中の点の数  $N_{\tau_0}$  に依存してバラついている。このことを考慮すると  $\Delta N(\tau_0, \tau)$  の分布は、上記の正規分布の分散を修正して  $\mathcal{N}(0, \Delta\tau + (\Delta\tau)^2/N_{\tau_0})$  と考えなければならない。相対的静穏の一応の目安としての有意曲線としては、全データ数  $N$  に依存して決まる以下の統計量  $\xi = \xi(N)$  の 1% 有意点をつないだものとする。

標準ポアソン過程のシミュレーションによって、単位区間  $[0, 1]$  上に 200 個の点を一様乱数でばらまき、小さいものから順番に並べたときの配置に関して累積曲線をとったとき、任意の 2 点  $\tau_0$  と  $\tau_1$  に関して  $\Delta N(\tau_0, \tau_1) \equiv N_{\tau_1} - N_{\tau_0} - \hat{\lambda}(\tau_1 - \tau_0)$  を計算して、以下の最小値

$$\xi = \min_{\tau_0, \tau_1} \frac{\Delta N(\tau_0, \tau_1)}{\sqrt{\hat{\lambda}(\tau_1 - \tau_0) + \hat{\lambda}^2(\tau_1 - \tau_0)^2/N_{\tau_0}}}$$

を見つける。ただし  $\hat{\lambda} = N_{\tau_0}/\tau_0$  である。これを 1 万回繰り返したときの  $\xi$ -値の下から 1% はほぼ -2.4 になっている。同様にして例えば標本数 500 および 1000 の場合の  $\xi$ -値の下から 1% は、各々ほぼ -2.8 と -3.1 である。

以上の解析法を使って、本研究では、これまで報告されたものを含めて M8 クラスの巨大地震に先行する静穏期について調べた。また空白域として挙げられて予定されている巨大地震に対応する相対的静穏期が見られるか、最近までのデータを使って調べてみた。

## 参 考 文 献

- 井上宇胤 (1965). 新潟地震前における震央付近および隣接地域の地震活動について, 験震時報, **29**, 139-144.  
 Lomnitz, C. (1982). What is a gap?, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **72**, 1411-1413.  
 Matsu'ura, R.S. (1986). Precursory quiescence and recovery of aftershock activities before some large aftershocks, *Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, **61**, 1-65.  
 本谷義信 (1984). 北海道とその周辺の地震活動の研究: 地震予知に関連して, 理学博士学位論文, 北海道大学 理学部 地球物理学科.  
 尾形良彦 (1985). マグニチュード付き点過程モデルの地震系列への適合とノイズ分析による巨大地震の予測, 統計数理, **33**, 21-25.  
 尾形良彦 (1987). 地震活動の標準モデル, 統計数理, **35**, p.179.  
 大竹政和 (1980). 地震空白域にもとづく地震予知, 国立防災科学技術センター研究報告, **23**, 65-110.