

地震群の統計的解析

統計数理研究所 尾形 良彦

ogata@ism.ac.jp

<http://www.ism.ac.jp/~ogata.html>

1. 目的

ある所で地震活動が始まる。それは間違いに大きな地震の前震かもしれないし、ほぼ同規模の地震が続く群発型地震かもしれない。単なる本震・余震型の場合も多い。これらのいずれの型であるかはその地震活動が終息してからでないとは決定的には分からないが、活動中にどの程度の統計的な識別ができるのであろうか。

気象庁震源カタログに載っているM4以上の地震に関して、ある客観的な規準で「群れ (cluster)」を同定すると千組以上の群れが得られるが、その大多数が数個の地震からなる (ただし前震型の群れの場合は本震と余震を除いた数である)。

「本震」「前震」「群発型地震」などを常識に沿って定義すると、群れ全体の中で複数の前震を持つ群れの数は6%強、群発型地震群はその数倍、残りは本震・余震型の群れで全体の70~80%を占める。

この研究の目標は、最初のいくつかの地震が起きた時点で、その発生時刻・位置・マグニチュード列に関する情報を使うことによって、群れの型 (特に前震型) を出来るだけ有効に予測するような統計モデル (条件付き確率) を見いだすことである。

2. 本震に至る時空間パターン

そこで、それぞれの型の地震群の時間および空間のパターンの統計的特性を調べることから始めた。まず各群れを本震が時・空間座標の原点になるように平行移動し、前震や群発型地震を重ね合わせると次のような規則性が見られる。本震時刻から遡ると発生頻度は改良大森公式に従って減衰し、空間的には本震からの距離に関して頻度が逆ベキの減衰を示す。

さらに時空間の同時分布として、前震の「相対的ドーナツ型パターンの収束現象」(図1参照)が見られる。この特徴は群発型地震の場合には明瞭でない。この様に、群発型と前震型では重ね合わせの時空間分布が微妙に違うので、それらの割合の時間的および空間的变化を推定した。

3. 群れにおける地震間の統計的性質

しかし本震を基準にした重ね合わせの性質は予測にはあまり適さない。これに対して各地震の発生時刻を時間軸の原点に据えて、後に続く地震の時点を重ね合わせることによって推定されるPalm型条件付き強度関数を調べてみた。同様の強度関数を震央間の距離やマグニチュードの増減列の重ね合わせによって調べた。

かくして、それぞれの型の群れの Palm 型強度関数の割合（寄与率）について、次のような有意な特性がみられた。(1) 前震型の群れの時間的寄与率は数日以内に集中し、群内の地震発生時間差が半日位をピークとしてその前後は小さくなる、(2) 空間的には 10km 程度以内にまとまっており、群内の震央位置の相互距離が小さくなる（群の集中度が高くなる）にしたがって増大する、(3) 最初の数個でマグニチュード列が増加すれば寄与率は大きくなり、減少すれば小さくなる。

4. Logistic モデルによる確率予測とその客観的評価

以上の統計的特徴を考慮し単位立方体 $[0, 1]^3$ 上に基準化した三次元データを基に Logistic モデルを構成し推定した。このモデルを使って推定に使ったデータとは異なる新しいデータに対して確率予測を行うと、それぞれのクラスターに応じておよそ 1% ~ 10% の変動がみられた。この確率予測の有効性は相対エントロピーの比較や分割表の AIC 比較によって示すことができた。

さらに、最初の地震が起きた時点でも、それが前震である確率を予測することができる。ただしこのためには単発の地震もデータに含めなければならない。気象庁地震カタログ（M 4 以上）によると相対頻度は 4% 弱であるが、単発の地震が前震である地域性の確率（震央位置の関数）がベイズ型平滑法によって推定され（図 2）、この条件付確率は 1.4 ~ 10% の変動がある。推定に使ったデータとは異なる新しいデータに対して予測の有効性が同様の意味で示された。

連発の地震に関しては以上の 2 つの条件つき確率を組み合わせれば更に有効な確率予測になっていることが相対エントロピー値がはるかに小さくなることによって確かめられた。

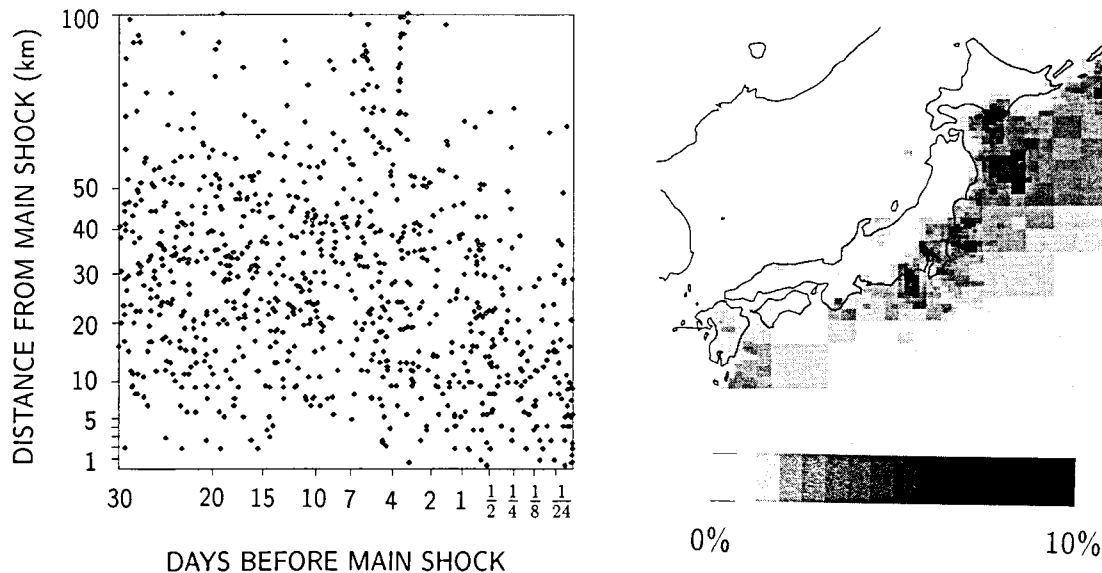


図 1。前震の時空間的重ね合わせ図。右下隅が本震の位置。時間軸、空間軸はそれぞれ推定された改良大森公式と距離に関する逆ベキ法則にかんしてスケーリングされている。

図 2。最初の地震が前震である推定確率