

時空間的な非一様性を有する広域の地震カタログに対するHIST-ETASモデルの修正推定

Modified estimation of the HIST-ETAS model for earthquake catalogs possessing long- and short-term incomplete data

*尾形 良彦¹、桂 康一¹

*Yosihiko OGATA¹, Koichi Katsura¹

1. 統計数理研究所

1. The Institute of Statistical Mathematics

1. 要約：本研究では、階層型時空間ETAS (HIST-ETAS) モデルを用いて、日本全国や内陸部などの広領域で、地域依存の地震活動を短期予測するとともに、背景地震率を分離する。予測や背景地震率の分解能を高めるためには、気象庁震源カタログの下限マグニチュード値を適切に下げることが考えられる。しかし、これによって長期的には人為的なデータの時空間的不均一性を考慮する必要がある。同時に、大地震の直後には数多くの連発余震が発生し、余震の波形が重なり、小さめの余震の欠落が起こる。それゆえ大地震発生後に低下する余震検出率を推定することによってHIST-ETASモデルの偏りのないパラメータを再推定できる。結果、地震活動度の大地震後の地震活動がどのように補正されるかを可視化し、時空間の地震発生率を準リアルタイムで予測し、アニメーションで示すことができる。

2. 階層ベイズ型時空間ETASモデルと地震予測の補正：震源データベースから階層ベイズ型的時空間 Epidemic-Type Aftershock Sequence (HIST-ETAS) モデルを推定する。ここで、準リアルタイム (例えば1時間以内) で検出地震群からAICで、余震や群発地震の非等方性の短期空間予測を近似する。時間経過に依存しない常時活動度は地域的に数桁の違いで変化し、大地震の長期的予測に有用である。すなわち常時活動度の高い地域は、大地震の予測結果や歴史地震の多発域と調和的である。余震生産性のパラメータは短期確率予測に必須である。この他にもHIST-ETASモデルの主要パラメータは、地震活動パターンの地域的非一様性を表すために地震の位置に依存する。これは任意の位置での主要パラメータの値が、デロネ三角形網の各頂点での値 (デロネ係数) によって線形的に補間 (区分的線形関数) されるものである。地震の数に比例して係数の数が膨大になるので、適切な推定には区分線形関数に滑らかさの制約を課して、「罰則付き対数尤度」を最大化する逆問題 (インバージョン) として、ベイズ最適解 (MAP解) を求める。宇津カタログを準備データとし、1926年以降の気象庁カタログをターゲットのデータとして使った対数尤度は、次節で求められる下限マグニチュード M_c 地震検出率関数を重みに使う。

3. 時空間地震検出率：下限マグニチュードを十分下げてデータを増やし、予測の解像度を上げたい。その場合、長期的なデータの非一様性を補うと同時に、大きな地震直後の余震検出率の低下によるバイアスを補正して、正しいHIST-ETASモデルの推定と予測が出来るようにしなければならない。そのために震源から作ったドロネ (Delaunay) 4面体ネット上での時空間検出モデルを準備する。ここでマグニチュード分布係数 b 値の時空間変化の指数関数と次の正規分布の累積分布関数を掛け合わせる。すなわち平均パラメータが50%検出のマグニチュードに対応し、標準偏差は部分的に検出されるマグニチュードの範囲を示す。かくして下限マグニチュード M_c の検出率を全ての時空間で補間できる。1926年以降の気象庁カタログの震央と発生時刻に関する結果を示す。そのため地震カタログデータを頂点としたドロネ4面体の時空間分割を効果的に構成する。とくに、一元化後の膨大なデータを克服するドロネ4面体分割の作成や、大地震の直後に発生する急激な検出率低下を定量化できるように工夫し、尤度関数が設計される。各ドロネ4面体上で線形な多面体スプライン関数でG-R則の、検出率のおよびの時空間関数を表現し、平滑化の空間的制約と時間的制約の其々の重みを

最適化する赤池ベイズ情報量基準（ABIC）で決定する。こうして求めた日本内陸部と沖合周辺部のマグニチュード時空間検出率や b 値変化の計算結果を動画で可視化できる。

参考文献およびソフトウェアとマニュアル：

- 1) Ogata, Y. and Katsura, K. (1993). Analysis of temporal and spatial heterogeneity of magnitude frequency distribution inferred from earthquake catalogues, *Geophys. J. Int.*, **113**, 727-738.
- 2) Ogata, Y. and Katsura, K. (2006). Immediate and updated forecasting of aftershock hazard, *Geophys. Res. Lett.*, **33** (10), L10305, doi:10.1029/2006GL025888.
- 3) Ogata et al. (2021) Hierarchical Space-Time Point-Process Models (HIST-PPM): Software Documentation and codes, *Computer Science Monographs*
https://www.ism.ac.jp/editsec/csm/index_j.html No. 35, The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo;
or temporally available in <http://bemlar.ism.ac.jp/ogata/HIST-PPM-V3/>.

図の説明： 階層ベイズ型時空間ETASモデルの地震活動がどのように補正されているかを可視化している。HIST-ETASの時空間intensity rateの比の時空間等高面（左）と東経141度38分で切った緯度変換時間の平面上のintensity ratesの比の画像と等高線（右）。いずれも対数スケール。

