

小標本論対数正規分布モデルの問題点と改良について

Modification of the log-normal distribution model based on the small sample theory

*岡田 正実¹*Masami Okada¹

1.気象庁気象研究所

1.Meteorological Research Institute

1. はじめに

相似地震を事前予測し、観測結果で検証する実験を、気象研及び東北大学の関係者と共同で、2006年～2011年に5回実施した (Okada et al., 2012)。発生確率の計算はBayes統計対数正規分布モデルLN-Bayesと小標本論対数正規分布モデルLN-SSTである。3.11巨大地震前の528予測の集計では、249回の予測に対し該当地震が発生した。一方、予測確率の合計は、LN-Bayesで観測値の90%、LN-SSTで86%にしか相当せず、予測は個数検定で棄却される。ここでは、発生確率が過小となる理由をLN-SSTについて考察し、モデルの修正を検討する。

2. 小標本論対数正規分布モデルLN-SST

過去に $n+1$ 個の地震の発生時が判明しており、今後起きる $n+2$ 番目の地震の発生時を予測するものとする。 n 個の発生間隔 T_i の対数を $X_i=\log(T_i)$ とし、 X_i の平均を X_{mean} 、標準偏差を S とする。対数正規分布モデルでは、 X_i は正規分布に従うので、正規分布の性質 (統計学の「小標本論」) から、確率変数

$$Z=\sqrt{(n-1)/(n+1)}*(X_f - X_{\text{mean}})/s$$

は自由度 $n-1$ の t -分布に従う。したがって、最後の地震から次の地震までの間隔の対数 X_f は、期待される分布が、正規分布のパラメータに依存することなく確定する。 X_f の分布から条件付き確率の式で、予測期間内の発生確率が求まる。

乱数実験を行ったところ、上のようにして得られた発生確率に明瞭な過小傾向があることが確認された。偏りの要因として、

- ① t -分布が標準正規分布より横に広がり、山が低いこと。
- ② 条件付き確率の式は、非線形であること。

が考えられる。

3. モデル修正

LN-SSTは、発生間隔の対数が正規分布に従うことのみを想定し、分布の母数に依存しないし、事前分布を必要としないなど、優れた特長を持っている。一方では、過小予測を緩和し、予測成績を向上させるために、部分的修正を施すことが考えられる。方策としては、

- ① 上記の Z の定義をそのままにし、自由度を少し大きくする。

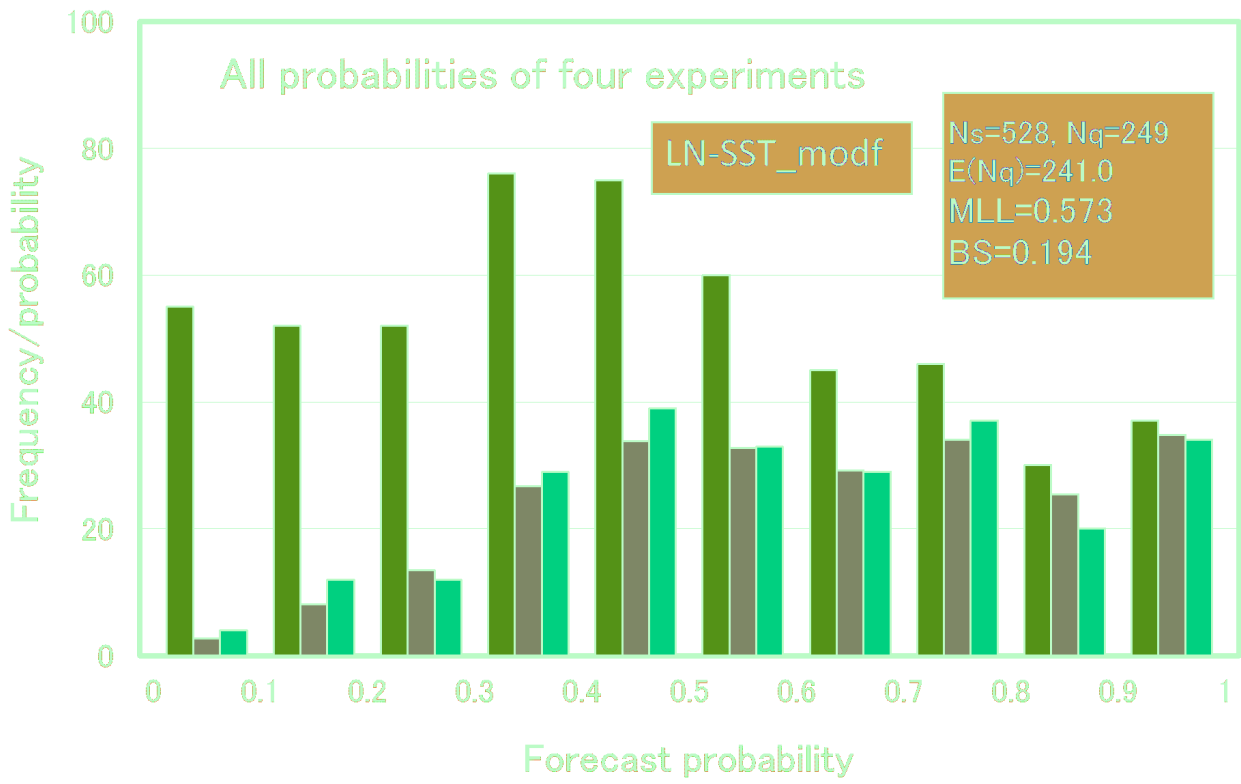
予測実験のデータでは、自由度を1だけ大きくすると、発生確率の合計が212.9から217.0に増え、予測成績もいくぶん向上する。

- ② 予測発生確率に応じた補正を加える。

得られた発生確率 ($0 \leq p \leq 1$) を、 $y=\log(p/(1-p))$ で無限区間に移し、適当な値 ($c=0.3$) を加える。逆変換で補正後の確率を得る。発生確率の合計が241.0となり、成績はかなり向上する (図1)。

キーワード：相似地震、地震予測、対数正規分布、小標本論

Keywords: repeating earthquake, forecast of earthquake, log-normal distribution, small sample theory



DEMETER衛星の観測データを用いた地震先行電離圏擾乱の統計的研究

Statistical investigation of pre-seismic ionospheric disturbance from the in-situ plasma observation of the DEMETER

*新田 英智¹、東郷 翔帆¹、鴨川 仁¹、ベトリエール ジャン・ジャック²、児玉 哲哉³、長尾 年恭⁴
*Hidetoshi Nitta¹, Shoho Togo¹, Masashi Kamogawa¹, Jean-Jacques Berthelier², Tetsuya Kodama³,
Toshiyasu Nagao⁴

1.東京学芸大学教育学部物理学科、2.フランス ラトモス、3.宇宙航空研究開発機構宇宙利用ミッション本部
地球観測研究センター、4.東海大学地震予知研究センター

1.Department of Physics, Tokyo Gakugei University, 2.LATMOS, France, 3.Earth Observation Research,
4.Earthquake Prediction Research Center, Tokai University

地震に先行する電離圏擾乱の研究のためにフランスCNESよりDEMETERが2004年より打ち上げられ2010年まで運用された。電子密度を始めとした複数の地球電磁気データが取得され、地震先行現象の統計的研究がなされたが、夜間VLF帯電波強度減少現象(Nemec et al., GRL, 2008)のような明瞭な地震先行的変動が得られた一方、電子密度等のプラズマパラメーターの研究では複数の結果が報告されたが、いずれも明瞭な結果とはいえない。本研究では、前者の現象についてはおおむね同一の手法による検証、後者については、前者の解析手法を使い統計的検証を行った。その結果、前者については、良好な結果が得られたが、後者については、明瞭な結果が得られなかった。

キーワード：地震、人工衛星、電離圏

Keywords: Earthquake, DEMETER, Ionosphere

DEMETER衛星で検知された地震先行的電離圏擾乱発生後の地震発生率

Earthquake occurrence rate after pre-seismic-like ionospheric disturbance appearance using the DEMETER data

*東郷 翔帆¹、新田 英智¹、鴨川 仁¹、ジャン・ジャック ベトリエール²、児玉 哲哉³、長尾 年恭⁴

*Shoho Togo¹, Hidetoshi Nitta¹, Masashi Kamogawa¹, Jean-Jacques Berthelier², Tetsuya Kodama³, Toshiyasu Nagao⁴

1.東京学芸大学教育学部物理学科、2.フランス ラトモス、3.宇宙航空研究開発機構宇宙利用ミッション本部地球観測研究センター、4.東海大学地震予知研究センター

1.Department of Physics, Tokyo Gakugei University, 2.LATMOS, France, 3.Earth Observation Research, 4.Earthquake Prediction Research Center, Tokai University

地震に関連する電磁気現象として大気圏および電離圏擾乱は1980年代後半ごろから指摘されてきた。これらの擾乱は、比較的大きなマグニチュードの地震前でも変動が微小であるので、先行現象の存否を示すには大量なイベント収集による統計的な評価が求められる。その意味で2004年6月にフランスCNESによって地震電磁気衛星DEMETERが打ち上げられ、地震に先行する夜間VLF帯電磁波強度減少現象がM4.8以上の地震、震央距離が500 km以内、地震発生前4時間前に見いだされた。本研究では、これらの統計的な検証の別解析で得られた結果を利用して、この現象の地震との相関を調べた。相関は、予知率・適中率を算出する手法で得た。適中率とはある条件（期間や範囲、マグニチュードなど）の地震すべてに対するある異常が発生し決められたリードタイム内に発生した地震数の割合である。一方、予知率は全異常数に対する地震を伴った異常数の割合となる。言い換えれば、適中率は異常が現れる地震の割合で、予知率は地震が発生する異常の割合である。それぞれを以下の方法で算出した。DEMETERが夜間に地球の半球を南から北へ通過する半周の軌道を1軌道と定義する。Němecらの報告したように地震発生4時間前以内に震央から330km以内上空の軌道データについて重ね合わせを行い、震央付近で電場強度の減少していることを確認できた。そのような変化を示すものを異常な軌道データと考えることができる。その異常なデータと地震発生4時間前以内で震央から330km以内上空のすべての軌道データについて相関をとり、相関の良さの程度に応じてそれぞれ適中率を計算した。予知率は、地震とは関係なくDEMETERの運用期間中のすべてのデータそれぞれを前述した異常な軌道データと相関をとり、相関の良さの程度に応じて算出された。地震先行現象として有用なものは、適中率予知率ともに高いものである。さらに、適中率はある閾値が高くなるにつれて低くなり、予知率はある閾値が高くなるにつれて高くなることが望ましい。つまり今回の場合閾値の高さが相関の良さに対応している。本講演では適中率と予知率について算出し、この先行現象についての地震予知の可能性を考える。

キーワード：地震、 DEMETER衛星、 電離圏

Keywords: Earthquake, DEMETER , Ionosphere

地下深部流体上昇仮説の証拠

Evidence for the hypothesis of upwelling fluid from deep underground

*佃 為成¹*Tameshige Tsukuda¹

1.なし

1.none

2005年頃、筆者は地震などに伴う地表異常現象を説明するため地下深部流体上昇仮説を提唱した。異常現象には1) 地下から高温水侵入、2) 海底での高圧水噴出(状況証拠による)、3) 地震時の水温上昇証言の事後観測による長期的水温降下、4) 人工衛星赤外線観測による地温上昇検知などがあった。仮説の骨子は、深部岩盤の亀裂系に存在すると考えられる流体が地下岩盤にかかる圧力によって上部へ押し上げられ地表付近に達するとし、流体移動の仕組みは油圧ポンプモデルで説明した。深部流体は地下水に混入することが多いと考え、この仮説の検証のため、これまで地下水温の観測に力を入れてきた。地下水温観測点は福岡、山口、島根、岡山、兵庫、京都、和歌山、静岡、神奈川、長野、新潟の各府県の28カ所以上に展開した。

仮説提出当時、上昇流体のパスを形成する亀裂系の存在は希有だろうと予想していた。偶々存在したパスの上の地点で異常現象が観測されたと考えた。しかし、水温観測を展開していくうち、そのようなパスは希な存在ではなく、かなりの地点の地下に存在するのではないかと考えるようになった。実際、長期的に水温変化のトレンドがほぼ不変な観測点は1ヶ所しかない。大抵の観測点では10年~20年の間には地殻変動と関係すると考えられるトレンドの変化を示す。

また、2009年の駿河湾の地震(M6.5)の際、地下水温データと歪計データとの比較を試みた。M6.5地震前後のトレンド変化が水温データには検知されているが、東海地方に展開されている気象庁の体積歪計にはその様子がまったく窺われない。深度約100mに埋設設置の歪計では検出されない深部岩盤の歪変化を水温データがつかまえている可能性がある。

そのほか、水温データには仮説を支持するように、応力の緩和や増加を示すデータ、2011年3月11日の東北の超巨大地震など大地震や顕著地震の前後の変動が観測されている。

参考文献：

Tsukuda T., K. Gotoh and O. Sato, Deep groundwater discharge and ground surface phenomena, B.E.R.I., Univ. Tokyo, 80, 105-131, 2005.

佃 為成, 深部流体上昇仮説とその検証, 月刊地球, 28, 813-822, 2006.

佃 為成, 地下水温変化から地下深部の応力変化をさぐる, 日本地震学会講演予稿集2012年秋季大会D12-03, p120, 2012.

キーワード：地殻の変形、深部流体、地下水温、前兆的变化

Keywords: deformation of the crust, pore fluid deep underground, groundwater temperature, precursory change

モーメント保存則から推定される東日本周辺の海溝型地震の最大規模（その2）

Maximum Magnitude of Subduction-Zone Earthquake around Eastern Japan Estimated by Seismic Moment Conservation Principle: Part 2

*弘瀬 冬樹¹、前田 憲二¹、吉田 康宏²

*Fuyuki Hirose¹, Kenji Maeda¹, Yasuhiro Yoshida²

1.気象研究所地震津波研究部、2.気象大学校

1.Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute, 2.Meteorological College, Japan Meteorological Agency

Kagan & Jackson [2013, BSSA]は、地震モーメント保存則を1977/01/01-2010/12/31の地震データに適用し、全世界の沈み込み帯で発生する地震の最大規模を推定した。この手法のキーポイントは、総地震モーメントレートをテクトニックなモーメントレート M_T で置き換えることである。なお、 M_T を構成する要素のうち、プレート間カップリング率 χ の不確定性は特に強いいため、推定される最大規模は χ に依存して大きくバラつくことに注意が必要である。以下、混乱を避けるため、マグニチュードは小文字の m 、モーメントは大文字の M で表す。

彼らはモーメント別累積頻度分布として、切断G-R則、Tapered G-R則およびガンマ分布を仮定した。これらの分布は β ($=b/1.5$)と M_c (最大規模を表現する特徴的モーメント、対応する規模は m_c)の2つのパラメータで表現される。切断G-R則は、 m_c より大きな規模の地震は発生しない。一方、Tapered G-R則やガンマ分布は、 m が ∞ まで取り得るため、 m_c より大きな規模の地震の発生を許している。このことから、Tapered G-R則やガンマ分布による m_c を最大規模としてそのまま扱うのは問題がある。

弘瀬・他 [2014, SSJ]は切断G-R則に注目し、モーメント保存則を千島・カムチャッカ・日本海溝沿い地域で発生した地震（1977/01/01-2013/12/31）に適用し、 χ を60%と仮定した場合の東北沖の m_c を9.26と推定した。

マグニチュードが上限を持つ式としては、切断G-R則のほかに宇津の式がある。今回、宇津の式についてモーメント保存則の関係式を導出し、弘瀬・他 [2014, SSJ]と同じデータセットに対して適用した。その結果、仮定した M_T ($\chi=60\%$)が正しいとすると、東北沖で発生し得る最大規模は10.03と推定された。東北沖地震がこの地域の最大の地震とは必ずしも言えない可能性がある。

キーワード：地震モーメント保存則、最大規模、宇津の式

Keywords: Seismic moment conservation principle, Maximum magnitude, Utsu law

A Study on the Enhancing Earthquake Frequency in Northern Pakistan: Is the Climate Change Responsible?

*Muhammad Usman¹

1.Space Geodesy Research Section, Division of Earth and Planetary Dynamics, Department of Natural History Science, School of Science, Hokkaido University

In northern Pakistan, the collision between Indian and Eurasian plates has resulted in the formation of many faults. The concentration of ruptures, in this regime, probably makes it sensitive to the localized changes in the stress. The current climate changes have caused an increase in the rainfall and variation in the mass of glaciers, present in the northern Pakistan. The rainfall and glacial runoff has potential to erode and transport sediments thus can change the balance of load across faults. On the other hand, glacial mass loss or gain also has potential of iso-static rebound or compression of crust, respectively. All these factors have been observed in the northern Pakistan. The seismic data of the duration 1965 to 2004 has been obtained from Pakistan Meteorological Department (PMD) and the sedimentation data has been acquired from Tarbela Dam Project (TDP). The study indicates a gradual increase in the earthquake frequency for the magnitudes 4.1-5.0(Mb). The epicentral distributions show that these events gradually cluster in the central Karakorum and Hindukush areas. The depth analysis suggests the earthquakes with the foci 0-60km are gathering in the central Karakorum and shocks with depth 0-120 are clustering in the Hindukush areas. The FMS study exhibits the dominance of normal faulting in the central Karakorum after 1999 and these characteristics do not correspond with behavior of previous mapped Raikot Fault, lying in the vicinity. The known significant variables during the study period are the different geological processes associated with climate change, which have potential to alter the load across faults and can possibly result in enhancing earthquake frequency by releasing stresses at some local scale.

Keywords: Climate change, glacial mass change,, rising earthquake frequency