

# 対数正規分布の標準値を用いた相似地震の長期的発生確率予測

## Long-term Predictability for Repeating Earthquake using Standard Value of Lognormal Distribution

\*田中 昌之<sup>1</sup>、岡田 正実

\*Masayuki Tanaka<sup>1</sup>, Masami Okada

1. 気象研究所

1. Meteorological Research Institute

### 1. はじめに

気象研究所では、中規模の繰り返し相似地震について、準リアルタイム的に発生状況を追跡し、相似地震が発現したときは、適宜、長期的発生確率の予測計算を実施し、確率予測手法の精度評価をおこなっている。しかし、中規模以上の相似地震を扱う場合、再来間隔が長いこともあり、非常に少ないデータで計算するケースが多々ある。先行調査で、分布関数にt分布を用いた小標本論対数正規分布モデル(LN-SST)や、逆ガンマ事前分布を採用し、t分布の分布関数からなるベイズ統計対数正規分布モデル(LN-Bayes)などについて、相似地震や疑似乱数で長期的発生確率予測の検証実験をおこない、データが非常に少ないときは、事前分布が予測精度向上に役立つことを定量的に確認した。一方で、データが非常に少ない場合、安定的な予測を行うために、地震本部の長期評価のように、一部のパラメータに標準値を用いることがある。そこで、ばらつきパラメータに、相似地震で求めた対数正規分布モデルの標準値 $\sigma_0$ を採用し、対数正規分布の確率予測モデルで、相似地震の事後予測実験をおこなった。先行調査の結果と比較して、モデルの優劣などを調査した。

### 2. データと予測方法

東北大学作成の相似地震カタログから、Okada et al.(2012)が2006年から2010年の事前予測の実験用に編集したデータを再編して使用した。1993年から予測時点に5個以上の相似地震を含み、平均マグニチュードが2.75以上の166系列524予測を対象とした。予測時点に近い順から2個、3個、4個、5個、5個以上で地震を切り出し、それぞれ、発生間隔の対数の平均値を使用した。予測は、正規分布の分布関数を使い、分散には標準値 $\sigma_0$ を用いた二つのモデルで、一つは、平均に発生間隔の対数の平均値をそのまま使用した対数正規分布Plug-inモデル(LN-NORM)で、もう一つは、小標本論に基づき、平均値の不確実性を考慮した値を平均に使用した小標本論対数正規分布Plug-inモデル(LN-SST-Pin)である。標準値 $\sigma_0$ は、166系列の不偏分散の和に自由度の和の重みで加重平均し、平方根した値( $\sigma_0=0.581$ )を用いた。

### 3. 予測成績

平均対数尤度(MLL ; Mean log-likelihood)とROC曲線の指標を用い、予測期間内の相似地震の発現有無と比較して予測成績を求めた。MLLの結果について、先行調査のLN-Bayes、LN-SSTなどと比較した結果は図1のとおりである。計算に使用した発生間隔のデータが少なくなるにつれてどのモデルも成績は悪くなる。LN-SST-Pinに比べ、LN-NORMの成績は、データ2個以下になると悪化が急になる。LN-NORMとLN-SST-PinはLN-BayesやLN-SSTよりも成績は劣り、データ1個のときは、予測確率0.5の成績(MLL=-0.693)よりも下回る悪い成績である。ROC曲線の結果は図2のとおりである。この指標でもLN-NORMとLN-SST-PinはLN-BayesやLN-SSTよりも判別力が劣る。また、変動係数 $\alpha$ に地震本部の長期評価が採用している標準値( $\alpha_0=0.24$ )や、相似地震を使い各予測から地震5個切り出して求めた中央値( $\alpha_0=0.367$ )や平均値( $\alpha_0=0.52$ )を用いたBPT分布モデルの結果よりもやや劣る。

大会当日は、ブライアスコアの成績なども紹介予定である。

キーワード：繰り返し地震、発生予測、対数正規分布、標準値、平均対数尤度、ROC曲線  
 Keywords: Repeating earthquakes, Forecast, Log-normal distribution, Standard value, Mean log-likelihood, Receiver Operating Characteristic curve

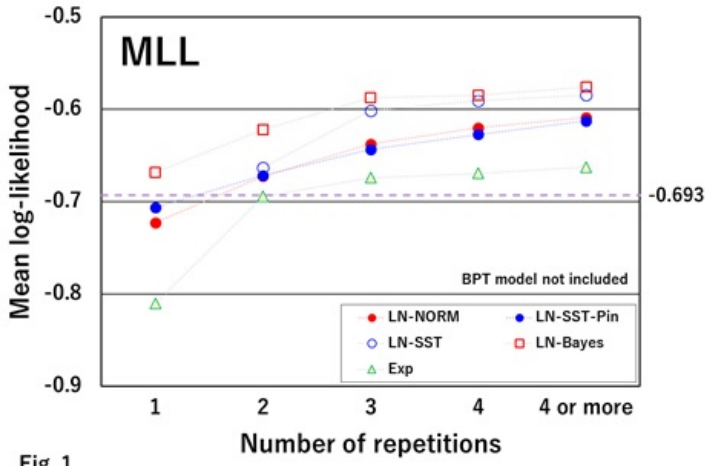


Fig. 1

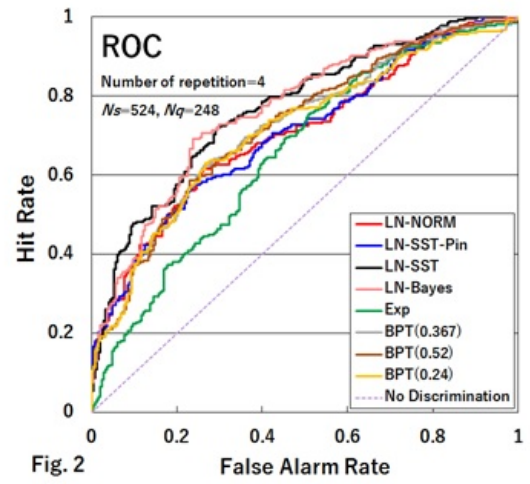


Fig. 2

## 2011年東北地方太平洋沖地震の震源域の応力は地震前に戻ったか？ Has the stress over the focal region of the 2011 Tohoku-Oki M9 earthquake recovered to the pre-earthquake state?

\*楠城 一嘉<sup>1</sup>、吉田 明夫<sup>2</sup>

\*Kazuyoshi Nanjo<sup>1</sup>, Akio Yoshida<sup>2</sup>

1. 静岡県立大学、2. 静岡大学

1. University of Shizuoka, 2. Shizuoka University

各マグニチュードの地震発生頻度を、横軸にマグニチュード( $M$ )、縦軸に頻度の対数をとってプロットすると、十分に検知できているマグニチュードの範囲で、地震頻度分布は直線で良く近似できる。グーテンベルグ-リヒターの法則として知られているこの分布式で、直線の傾きの値( $b$ 値)は、地震発生域の差応力の大きさと相関がみられることが知られており、一般に、断層のアスペリティのような応力の集中しているところでは  $b$ 値は小さく、一方、差応力が小さいところ、例えば、間隙水圧が大きなところ等では、 $b$ 値は大きい。こうした経験的知識を基に、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域の  $b$ 値の空間分布の変化を調べたTormann et al. (2015)は、2013年以降、 $b$ 値の空間分布が、ほぼ震源域全体に渡って東北地方太平洋沖地震発生前の  $b$ 値の分布に戻っているという結果を得たことから、東北地方太平洋沖地震の震源域の応力場は、わずか数年で地震発生前の状況に回復したとみなし、このことから、巨大地震は特徴的な再来周期を持たず、時間的にランダムに発生すると結論している。これは本当だろうか？もし、彼らの結果、及びその推論が正しければ、これまで文部科学省の地震調査委員会が進めてきた地震発生の長期予測の考え方を根本的に見直す必要が生じることになる。

我々は、こうした問題意識を持って、東北地方太平洋沖海域における  $b$ 値の時間的変化を詳細に解析した。Tormann et al. (2015)の解析方法と基本的には同じだが、プレート境界での地震と上盤の地震を分けたこと、地震活動度の空間分布の時間的な変化について考慮したことなど、いくつかの点で、手法に改善を加えた。

我々の解析で得た主要な結果は以下の通りである。2011年東北地方太平洋沖地震で大きくすべった領域では、 $b$ 値は地震直前の小さな値(Nanjo et al., 2012)に戻っていない。牡鹿半島沖合の想定宮城県沖地震の震源域付近でもM9地震の前に  $b$ 値が次第に小さくなっていった。三陸北部沖合の海域では  $b$ 値の小さい状態が継続しており、しかも最近、低  $b$ 値域の範囲が西側に広がってきている様子が見える。この低  $b$ 値域の北部は1994年三陸はるか沖地震の破壊開始域と重なるが、南部は過去の大地震の破壊域と重ならない。総じて、我々の結果では、Tormann et al. (2015)が主張するように震源域全体で  $b$ 値は東北地方太平洋沖地震前の状況に戻ったとは言えない。また、三陸北部沖合の低  $b$ 値域では、近い将来における大地震発生の可能性も考慮して注意深く推移を見守っていく必要があると考える。

キーワード：東北地方太平洋沖地震、応力回復、グーテンベルグ・リヒターの法則

Keywords: the 2011 Tohoku-Oki earthquake, stress recovery, the Gutenberg-Richter law

## イタリアの地震と地震空白域

### Recent seismic activity in Italy and seismic gaps

\*石川 有三<sup>1</sup>

\*Yuzo Ishikawa<sup>1</sup>

1. The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

1. The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

地震予知に結びつく地震空白域の概念を最初に提案したのは大森房吉で、イタリアの地震帯の中に未破壊域が二カ所あることを指摘した（大森、1909）。これは8万2千人の犠牲を出したメッシナ地震のあとに書かれた。その後、指摘した2カ所の内の北側の空白域で1915年アベツアーノ地震M7.0が起きた。この地震では、残念ながら3万人を超える死者が出ている。ただ、大森(1909)は世界で始めて被害をもたらすような大地震の発生場所の予測に成功したと言える。しかし、未破壊域として指摘していたもう一カ所は、今に至るもまだ大地震は起きていない。指摘からすでに100年以上も経過しており、こちらは予測の失敗と考えるべきであろう。

近年、アペニン山脈に沿ったイタリア中部で中規模地震の発生が続いている。1984年4月29日にこの正断層帯の北部でM6.1の地震が起き、同じ年の5月7日にM6.0の地震がやや南部で起きた。その後、これらの震源域の間で1997年M6.4、2009年M6.3、2016年8月24日M6.2、同10月26日にM5.9、2017年1月18日M5.9の地震が立て続きに起きて、一部は大きな被害を引き起こしている。ここでは、これらの震源域の分布から、この地域の地震空白域を推定する。

ここではイタリア国立地球物理・火山研究所(INGV)のItalian Seismic Instrumental and parametric Data-base(ISIDe)、米国地質調査所の震源データと宇津の世界被害地震カタログを主に用いた。震源域の推定は、本震後一ヶ月間のマグニチュード2.5以上の余震分布で求めた。

この条件で地図に余震域を描いていくと1997年M6.4の震源域から2009年M6.3の震源域までの地域はほぼ隙間無く余震域で埋め尽くされる。従って、この地帯では余震は起きることはあるが、大きな地震は起きないのではないかと推定される。しかし、1984年4月M6.1と1997年M6.4の間にはややギャップが見られる。ただ、INGVの地震観測網が1984年当時それほど稠密ではなかったようで、1984年4月M6.1の余震数はそれほど多くはない。そのため、両者の間のギャップが地震空白域なのでどうかは断定できないが、注意を要する場所である。

次に南の2009年M6.3と1984年5月M6.0の間に大きなギャップが見られる。このギャップの中では、1915年にアベツアーノ地震M7.0が起きている。歴史地震を含めた過去の地震活動から考えられるこの地域の地震の繰り返し発生間隔は数100年と考えられる。この大きなギャップを1915年アベツアーノ地震の震源域がどれだけ埋めているかが地震空白域が存在するのかわかっている。さらに南の1984年M6.0地震と1980年M6.9イルピニア地震の間にも地震空白域が存在する可能性もある。

キーワード：地震予知、地震空白域、イタリア

Keywords: prediction, seismic gap, Italy

## 東海地域における地下水温の長期的変動

### Long-term increasing and decreasing changes in groundwater temperature in the Tokai region

\*佃 為成<sup>1</sup>

\*Tameshige Tsukuda<sup>1</sup>

1. なし

1. none

大地震の準備過程では、地下岩盤の収縮領域(圧力上昇)と膨張領域(圧力降下)が隣り合って生成される。それに伴う間隙流体圧変化により、微小クラック群から成る流体移動のパスが存在すれば、地表へ向かう上昇流体の増加や減少が起こる。深部流体は高温なので、上昇深部流体が浅層地下水に混入すると、地下水温を上昇させる。また、移動流体の量の変化によって水温変化が起こる。直下に流体パスの存在が推定される焼津と静岡の12年に及ぶ地下水温観測データに基づき、東海地域の地下深部の歪や応力の変化を窺ってみる。

東海地方の水温観測点の内、焼津市立大富小学校内井戸(OT)(機器故障により2014年9月5日以降欠測)と静岡市中島下水浄化センター内自噴井(NK)には精密水晶温度計、焼津市元焼津公園内井戸(YZ)には白金抵抗温度計が設置されている(佃, 2008)。これら3カ所の観測点は松村(2005)による、プレート沈み込みの固着域の直上付近に位置する。

OT(焼津)の水温(深さ30m)は平均上昇率 $24\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{year}$ の単調増加が、2009年8月11日の駿河湾地震(M6.5)以降、 $44\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{year}$ に上昇、2011年3月11日の東北の地震(M9.0)の頃から以前の上昇率に戻り、2012年末から上昇が緩やかになってきた。深さ10mでは2007年10月27日から29日にかけて $0.17^{\circ}\text{C}$ 上昇するなど、最近でも、パルス的な水温上昇イベントが度々観測されている。

NK(静岡)では、2006年は $34\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{year}$ 、2007年春から $67\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{year}$ 、同年秋から年末までは $14\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{year}$ の上昇であったが、2008年初めから上昇率は鈍化、9月頃から $-40\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{year}$ の率で下降(岩盤膨張)に転じた。2009年の駿河湾地震以降、下降率が大きく( $-117\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{year}$ )なり、2011年8月1日の駿河湾地震(M6.2)後、さらに下降率が増加したが、その後減少し、2012年末に水温一定となり、2013年5月下旬から上昇( $66\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{year}$ )、2014年に入り一時加速したが、2015年に入り上昇は緩やかになり、2016年10月からやや急激に下降へ向かいつつある。静岡直下では再び岩盤膨張へ転換した。

YZ(元焼津)では、自噴をしている期間のみの水温データを考察する。2010年4月以降、現在まで $8\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{year}$ の率で上昇中。2011年東北地震(M9.0)の影響による上昇変化も見える。OT, YZのデータは、焼津直下で岩盤圧縮、収縮歪を示す。

OTとNKの水温データには、気象庁の体積歪計では検出されなかったトレンド変化がある(佃, 2012)。最近の下降トレンドは新たな地殻変動が始まったことを示しているに違いない。

なお、最近では、NPO法人地下からのサイン測ろうかいによって東海地方西部に新たな観測点が建設されつつある。

参考文献：

松村正三, 東海地域推定固着域における地震活動変化(その9), 地震予知連絡会会報, 74, 300-303, 2005.

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, 東海地方の水温上昇変化, 地震予知研究ノート No.3, 41-42, 2008.

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年度秋季大会, D12-03, p.120, 2012.

キーワード：地殻活動、地震予知、地下水温

Keywords: crustal movement, earthquake prediction, groundwater temperature

# 海水位変化の調査から推定される1946年南海地震の断層モデル

## A fault model of the 1946 Nankai earthquake estimated from the survey on sea level Changes

\*梅田 康弘<sup>1</sup>、板場 智史<sup>1</sup>

\*Yasuhiro Umeda<sup>1</sup>, Satoshi Itaba<sup>1</sup>

1. 産業技術総合研究所

1. Advanced Industrial Science and Technology

1946年南海地震の断層モデルを測地学的データから求める際には、当時の地理調査所（現在の国土地理院）の測量データに基づく場合が多い。上下変動は水準測量から求められるが、地震前の測量は1930年前後、地震後は1953年であり、1944年東南海地震による変動と1946年南海地震のそれとの区別が出来ない。一方、当時の水路部（現在の海上保安庁海洋情報部）では南海地震の直後に現地調査を行い、漁業会や役所の報告をもとに、両地震それぞれの上下変動量を調査値として求めている（水路部、1948）。この調査値は港湾や漁港などにおいて、地震前後の海水位の変化を目視で求めたものであり、誤差は最大で0.3mとされているが、誤差を超える変動があったところでは有意な変動値として用いることが出来る。紀伊半島に関しては1944年東南海地震と1946年南海地震それぞれの上下変動と断層モデルを提案した（梅田・板場、2016）。今回は紀伊半島から四国にかけて、水路部の調査値（図1）に基づいて、1946年南海地震の断層モデルを推定した（図2）。図中4つの逆断層は、Hirose (2016) から推定されるフィリピン海プレート境界面上に仮定されている。紀伊半島東岸では1946年南海地震の際にも運動があったこと、また調査結果として足摺岬付近の隆起は知られていたが、当時は水準測量の路線がなかったため不明だった同地域においても図2に示すように断層運動があったことが示された。断層モデルの計算にはMICAP-Gを利用した。以下参考文献：水路部、1948、昭和21年南海大地震報告、地変及び被害編、水路要報、201号。、Hirose,F, 2016, Fuyuki Hirose's HP, [http://www.mri-jma.go.jp/Dep/sv/2ken/fhirose/en/en.research\\_index.html](http://www.mri-jma.go.jp/Dep/sv/2ken/fhirose/en/en.research_index.html)。、梅田康弘、板場智史、2016、1946年南海地震の破壊域は紀伊半島東岸まで伸びていたのか、日本地震学会2016年秋季大会、S14-04、p30。

キーワード：1946年南海地震、海水位変化、断層モデル

Keywords: 1946 Nankai earthquake, sea level change, fault model

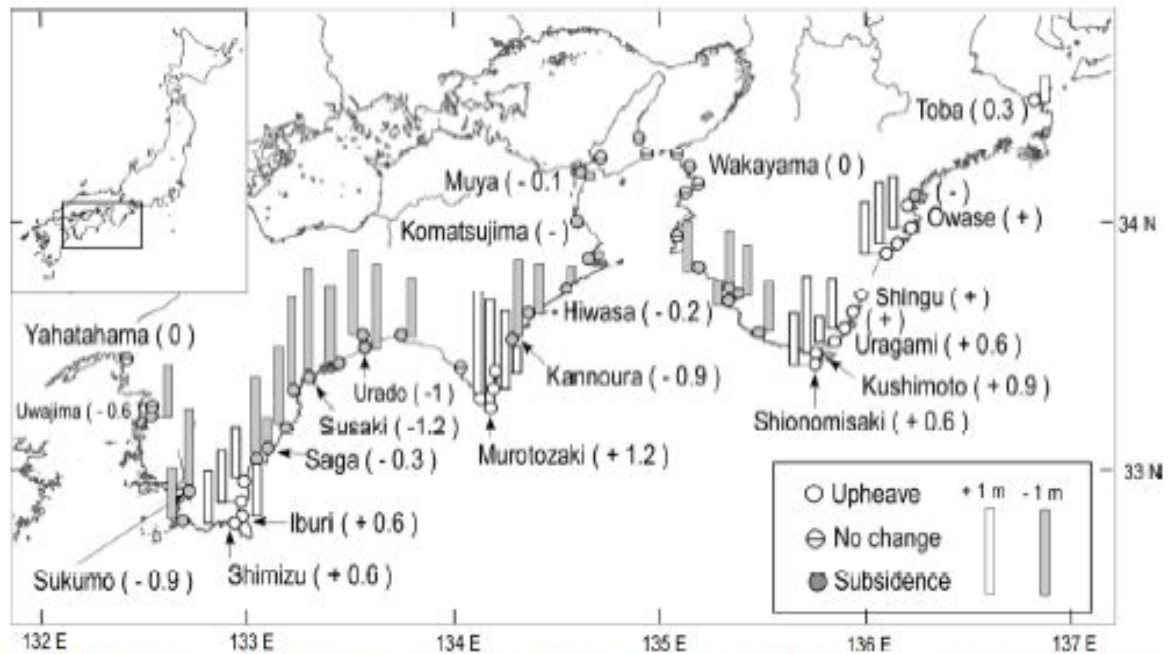


Fig.1 Co-seismic vertical variations of 1946 Nankai earthquake. Variation was obtained from the change of the sea level before and after the earthquake (Hydrographic bureau, 1948). An upheaval area is seen on the east coast of the Kii peninsula.

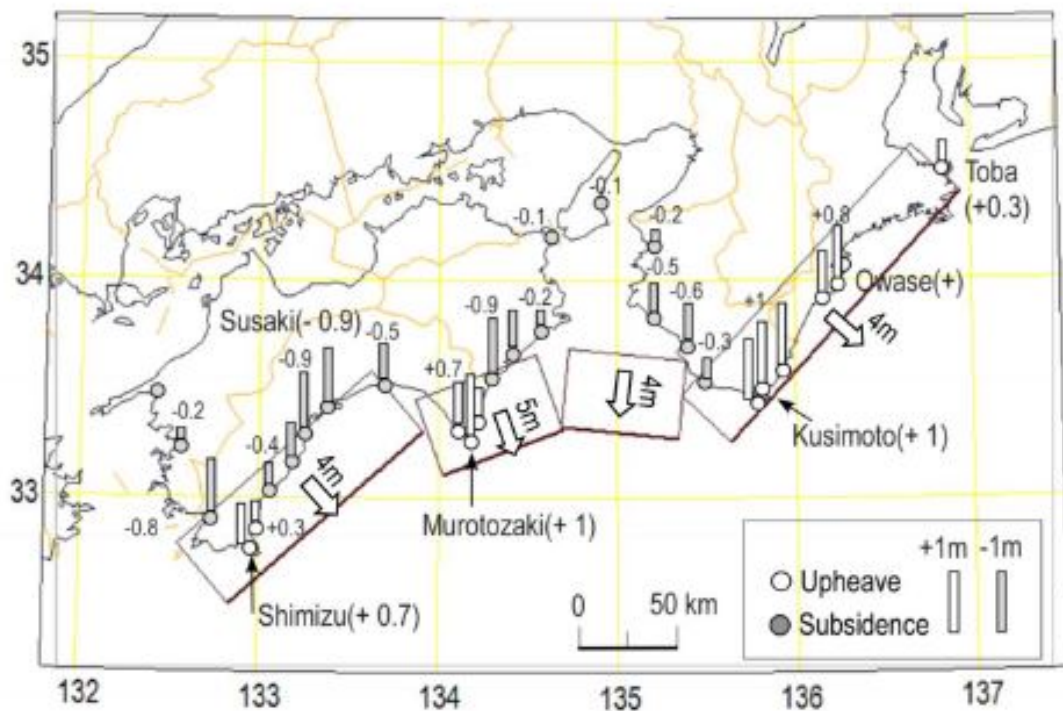


Fig.2 Four assumed faults and displacements of the 1946 Nankai earthquake. Vertical bars indicate the calculated value of upheave and subsidence. The fault extends to the east coast of Kii peninsula and the southwest of cape Ashizuri (Shimizu).



# 地震前兆現象の統計的検定に関するいくつかの問題

## On Statistical Hypothesis Testing of Earthquake Precursory Phenomena

\*加藤 護<sup>1</sup>

\*Mamoru Kato<sup>1</sup>

1. 京都大学大学院人間・環境学研究科

1. Graduate School of Human and Environmental Studies Kyoto University

過去に提案された地震の前兆現象の中には地震とその現象とが関連する物理機構が定量的に解明されていない現象が含まれる。機構が明らかでない場合でも関連性が十分高ければその現象の観測結果を地震の予知・予測に用いることはできると考えるとこの種の研究に意義はある。関連性は統計的に検討することとなる。本発表ではこの統計的検証手法について考察する。過去に報告された地球電磁気学的な地震前兆現象候補の研究事例を取り上げ、その中に妥当とは言いにくい統計的検定手法が使われた例があることを紹介する。なお本発表で取り上げる統計的検証手法の問題は地球電磁気学的以外の現象を扱うときにも適用されるであろう。

### 閾値の設定：

物理機構が定量的に解明されていない現象では地震に対する先行時間や信号の大きさを理論的に知ることができないため、地震との関係では閾値が探索的に考察される。閾値の設定には過去のデータの検証が必要となるが、この際結果を知ってから仮説を設定する誤謬（data snooping）を避ける必要がある（例えばLove and Thomas [2013]）。具体的には仮説の設定とその検証において同じデータを繰り返し用いてはいけぬ。独立なデータで仮説の検証が行われていないならば得られた結論は保留するのがよいであろう。

### 多重検定に伴う補正：

統計的検定で用いる有意水準は帰無仮説が正しいにも関わらず仮説検定で棄却してしまう確率（第一種の誤りを犯す確率）である。同じ水準を設定しても同時に多くの統計的検定を行うと第一種の誤りを犯す可能性が大きくなる。これは試行回数を増やすとそれに伴って偶然有意水準より小さなp値を得る回数の期待値が大きくなるためである。Love and Thomas(2013)による太陽活動と地震との関係の検討では小さなp値が得られる閾値の組み合わせがあるが、複数の検定を同時に行う際の補正を行うと統計的に有意ではないと判断できる。

過去の事例には多重検定を行ったことが陽に示されていないものもある。閾値の設定の理論的根拠が明示されていない場合、統計的に有意になる閾値を探索的に探した可能性を念頭に置き、その結論の採用を保留することが賢明であろう。

キーワード：地震前兆現象

Keywords: Earthquake Precursory Phenomena