

地震発生の予測可能性があるかないか? ~前震活動の統計的性質に着目した検討
Statistical investigation of spatio-temporal densities of foreshocks to understand earth-
quake predictability

鴨川 仁^{1*}; 田中 利佳¹; 織原 義明¹; 橋本 哲¹

KAMOGAWA, Masashi^{1*}; TANAKA, Rika¹; ORIHARA, Yoshiaki¹; HASHIMOTO, Satoshi¹

¹ 東京学芸大学教育学部物理学科

¹Dpt. of Phys., Tokyo Gakugei Univ.

The relation between the size of earthquake preparation zone and the magnitude of forthcoming earthquake is different between nucleation and domino-like cascade models. The former model indicates that the magnitude is predictable before the mainshock of the earthquake, because the preparation zone is proportional to the rupture area. On the other hand, the latter indicates that the magnitude is unpredictable, because the rupture consisting of sequence of tiny earthquakes is unknown to terminate. Since this issue is still controversial, we would like to verify the two models using the methodology proposed by Lippiello et al. (Scientific reports, 2012). In the analysis, spatial occurrence rates of the foreshock and the aftershock are statistically compared. The results show that both the rates are similar and the distribution of the rates versus the epicentral distance depends on the magnitude of the mainshock. From the interpretation of these results, the nucleation model seems reliable.

キーワード: 地震, 前震, 余震

Keywords: Earthquake, Foreshock, Mainshock

稀な現象の確率予測にも使える適切な採点法 Proper scoring systems available for probability forecasts targeting rare phenomena

林 豊^{1*}
HAYASHI, Yutaka^{1*}

¹ 気象研究所
¹ Meteorological Research Institute

新たな手法を導入して予報を確実に改善できるためには、予報精度を適正に評価する採点法が存在し、新手法を導入した場合に出すであろう予報の採点結果（スコア）が従来の方法による予報のスコアを上回ることが必要条件である。「適正な」採点ルールは、予報者が自分の判断通りに予報を出すことを奨励する必要がある（Murphy and Epstein, 1967）。降水確率予報などの評価に用いられているブライアスコア（Brier, 1950）はこの数学的な条件を満たすが、カルバック・ライブラー情報量（Kullback and Leibler, 1951）などはこの条件を満たさない。「不適正な」採点ルールの下では、予報を細工した方が高いスコアを得られることがあるので、スコアを高める努力は、一般にはよりよい予報手法を目指す正直な行為とはいえない。このため、特に地震予知の分野で広く適用されている情報量等を尺度とした「不適正な」予報精度の測定や比較の意義の解釈には、慎重になるべきである。

ところで、ブライアスコアは予報値と実況値の平均自乗誤差の期待値で、現象の有と無に等しい重みを置いている。一方、稀な現象を対象の予報利用者にとっては、予報値が高い確率の場合や現象が実際に発生した場合の予報が重要な情報である。以下に、地震予測のように稀な現象を対象とした確率予報を適切に評価できる採点法を導出する。

予想値（予報者の真の信念に基づく確率）を p 、予報値を f 、実況値 i （現象が発生すれば 1、発生しなければ 0）、基準予報値（例えば統計値に基づく単純な予報値）を c 、スコアを $S_i(f,c)$ と定義する。適正な採点ルールでは、期待値 $E_s(x,c) = pS_1(x,c) + (1-p)S_0(x,c)$ (式 1) について、 $E_s(p,c) > E_s(x,c)$ for all $x \neq p$ (式 2) が必要である。また、稀な現象をより重視する場合でも、基準値から考えられる予報の難易度について公正な条件 $S_0(c,f) \equiv S_1(1-c,1-f)$ (式 3) と、難易度が高い予報ほど高いスコアが得られる条件 $\partial S_1 / \partial f|_{c=const} \geq 0$, $\partial S_1 / \partial c|_{c=const} \leq 0$ (式 4) の成立が必要である。

式 1,3 を満たす解は式 (5) を満たす。ここで A は任意の関数である。

$$S_1(f,c) = -(i-f)B'(f,c) + (i-x)B'(x,c) - B(f,c) + B(x,c), \quad A = d^2B/df^2 \quad (\text{式 5})$$

適当な境界値と A の関数形で式 5 を解き、 S_i が不等式 2 と 4 を満たせば、適正な採点ルールを満たし、かつ、都合のよい性質を持つ評価法を得られる。

例えば、基準値予報のスコア $S_i(c,c) \equiv 0$ 、完全な予報のスコア $S_i(i,c) \equiv 1$ の境界条件で解くと、 $A = -2$ で $S_i(f) = 1 - (i-f)^2$ (式 6) を得る。ここで、 $1 - S_i(f)$ はブライアスコアに一致する。

もう一例として、基準となる予報値でのスコア $S_i(c,c) \equiv 0$ 、完全な予報の期待スコア $E_{s,p} \equiv 1$ を境界条件として A が f の 0 次式の解を求めると、 $A = -2 / c(1-c)$ から $S_i(f,c) = \{(i-c)^2 - (i-f)^2\} / c(1-c)$ (式 7) を得られる。これも適正な採点ルールを満たす。 $c = 1/2$ の時、 $(1 - S_i(f))/4$ はブライアスコアであるから、式 7 は基準値予報の選択の任意性に関してブライアスコアを拡張した評価式と解釈してよい。

以上のように、基準予報値を参照した採点式にすることで、地震予測のように稀な現象を対象とした確率予報の適正な採点法の一般解と、特に、稀な現象により重みを置いて適正に評価できるいわゆる拡張ブライアスコアと呼ぶべき解を導いた。

大会では、式の導出の詳細と、これら採点法の具体的な適用に向けての課題も議論したい。なお、津波警報のように現象の有無を対象とする二値予報の一種を適切に評価する採点法は、効用理論から導出し議論済みである（林, 2014, JpGU）。

キーワード: 基準値予報, 地震予測, 拡張ブライアスコア, 情報利得, 確率予報, 適正な採点ルール

Keywords: benchmark forecast, earthquake prediction, extended Brier's score, information gain, probability forecast, proper scoring rule

大地震前の地殻活動に伴う異常現象の物理的解釈と検知 Physical interpretation and detection of anomalies associated with crustal processes leading to large earthquakes

末広 潔^{1*}; サックス セルウィン²; 高波 鐵夫²; ライデレク ポール²; スミス デボラ²; 波多野 恭弘³
SUYEHIRO, Kiyoshi^{1*}; SACKS, Selwyn²; TAKANAMI, Tetsuo²; RYDELEK, Paul²; SMITH, Deborah²;
HATANO, Takahiro³

¹ 海洋研究開発機構, ² 米国ワシントン市カーネギー研究所, ³ 東京大学地震研究所

¹Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ²Carnegie Institution of Washington, ³Earthquake Research Institute, University of Tokyo

自然地震の経験則、観測を説明するセルラーオートマタモデル（サックスとライデレク、1995）の考えに基づき、地震予知（短期予知）への観測的アプローチを提案する。このアプローチはプレサイスミックスリップの検出とは異なってダイラタンシー現象の捕捉を考える。これまでに報告されているマグニチュードに依存する地震活動静穏化（たとえば1982年浦河沖地震、1994年ノースリッジ地震、2008年四川地震など）は、ダイラタンシー硬化過程の進行を、このモデルに組み込むと再現できる。しかし、この情報は直前の変化ではなく年オーダーの変化であるので、注意の喚起までである。この変化は、地震域を囲む大きな領域に現れる傾向にあることが特徴である。ダイラタンシーの考えを進めると、地震直前の観測異常はダイラタンシーによる微小な割れ目群に流体が移動する過程に加速的な作用が加わって現れると解釈できるが、物理モデルに照らして量的に検討したうえで、観測の方法として垂直歪成分観測を新たに注目すべき観測パラメータとなる可能性を示す。

キーワード: 地震活動静穏化, ダイラタンシー, セルラーオートマタ地震モデル

Keywords: seismic quiescence, dilatancy, cellular automata earthquake model

体積歪みによる群発地震の予測 Predicting changing rates of swarm activity by volumetric strain

熊澤 貴雄^{1*}; 尾形 良彦¹; 木村 一洋²; 前田 憲二²; 小林 昭夫²
KUMAZAWA, Takao^{1*}; OGATA, Yoshiko¹; KIMURA, Kazuhiro²; MAEDA, Kenji²; KOBAYASHI, Akio²

¹ 統計数理研究所, ² 気象研究所

¹The Institute of Statistical Mathematics, ²Meteorological Research Institute

Near the eastern coast of Izu peninsula is an active submarine volcanic region in Japan, where magma intrusions have been observed many times. The forecast of earthquake swarm activities and eruptions are serious concern particularly in nearby hot spring resort areas. It is well known that temporal durations of the swarm activities have been correlated with early volumetric strain changes at a certain observation station of about 20 km distance apart. Therefore the Earthquake Research Committee (2010) investigated some empirical statistical relations to predict sizes of the swarm activity. Here we looked at the background seismicity rate changes during these swarm periods using the non-stationary ETAS model (Kumazawa and Ogata, 2013, 2014), and have found the followings. The modified volumetric strain data, by removing the effect of earth tides, precipitation and coseismic jumps, have significantly higher cross-correlations to the estimated background rates of the ETAS model than to the swarm rate-changes. Specifically, the background seismicity rate synchronizes clearer to the strain change by the lags around a half day. These relations suggest an enhanced prediction of earthquakes in this region using volumetric strain measurements. Hence we propose an extended ETAS model where the background rate is modulated by the volumetric strain data. Here we have also found that the response function to the strain data can be exponential functions with the same decay rate, but that their intersects are inversely proportional to distances between the volumetric strain-meter and the onset location of the swarm. Our numerical results by the same proposed model show consistent outcomes for the various major swarms in this region.

キーワード: 非定常 ETAS モデル, 常時地震活動, 群発地震, 体積歪み, 予測

Keywords: nonstationary ETAS model, background seismicity, swarm, volumetric strain, prediction

Seismo-ionospheric precursor monitoring system based on near-real-time spaceborne and ground GPS observation

Seismo-ionospheric precursor monitoring system based on near-real-time spaceborne and ground GPS observation

TSAI, Ho-fang^{1*}; LIU, Jann-yenq²; CHEN, Chia-hung¹; SUN, Yang-yi²; HO, Tiffany³
TSAI, Ho-fang^{1*}; LIU, Jann-yenq²; CHEN, Chia-hung¹; SUN, Yang-yi²; HO, Tiffany³

¹Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, ²Institute of Space Science, National Central University, Jhongli City, Taiwan, ³Taiwan Analysis Center for COSMIC, Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan
¹Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, ²Institute of Space Science, National Central University, Jhongli City, Taiwan, ³Taiwan Analysis Center for COSMIC, Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan

Recently, the global ionosphere map (GIM) has been used to study the seismo-ionospheric precursors (SIPs) intensively. In order to shorten the data latency, an SIP monitoring system is built up based on the near-real-time GIM processing. The GIM data is derived from the combination of the ground-based and spaceborne total electron content (TEC) observation by means of the spherical harmonic function, where the data is retrieved from a global GPS observational network and the FORMOSAT-3/COSMIC radio-occultation (RO) experiments. The temporal statistical analysis is developed to detect the SIPs at several important metropolitans such as Tokyo. Some new finding and results are to be further discussed. The spatial analysis will be introduced to finding the repeat, duration and distribution of worldwide SIPs to estimate the possibility of forthcoming large earthquakes in the future.

キーワード: global ionosphere map, seismo-ionospheric precursor, total electron content
Keywords: global ionosphere map, seismo-ionospheric precursor, total electron content

2014年長野県北部地震に先行した長期的温泉水温変化 Long-term groundwater temperature change at a hot spring preceding the 2014 Nagano-ken Hokubu earthquake of M6.7

佃 為成^{1*}
TSUKUDA, Tameshige^{1*}

¹ なし

¹ None

2014年11月22日の長野県北部地震(長野県神城断層地震)は、1986-90ごろからその地震像が描き出されていた(地震予知総合研究振興会, 1990, 地震テクトニクスに関する総合研究 第3章 北部フォッサマグナ周辺に発生可能な地震像, 83-142.)。その主な根拠は、

- 1) 歴史上の地震(1714年 M6.3)の存在。
- 2) 活動度Aの活断層(神城断層)の存在。
- 3) 1714年の地震以後、白馬付近では目立った地震活動はない。長期の空白域である。
- 4) この糸魚川・静岡構造線に沿った地帯は、連鎖的に地震が発生する(1714, 1858, 1890, 1918年の各地震)。
- 5) 1986年の地震(M5.9)が前駆的な地震活動である可能性がある。
- 6) 90年間の三角測量(三辺測量)によると地殻歪が集中的に蓄積している。最大せん断歪は $4\sim 6\times 10^{-5}$ ($5\sim 7\times 10^{-7}$ /yr)。先の地震(1714年)から蓄積したとすると、緩和された分を考慮しても、地震がもうすでに発生してもよいという確率が高い。東西方向の縮みが確認されている。歪蓄積の範囲から規模を推定するとM6~7。

白馬地域を主なターゲットとした1995-2008年の東京大学地震研究所の共同研究プロジェクト「内陸直下地震の予知-地震研究所特定共同研究A」では種々の観測がおこなわれた。その中で、白馬倉下の湯温泉の源泉(白馬鉱山HR-1号泉)に於いては1998年10月から現在まで水温の連続観測がおこなわれている。源泉からガス圧で自噴した温泉水は、まず4tタンクに貯蔵されてガス抜きされる。このタンクから90tタンクへ向けてポンプアップが行なわれる。4tタンクからのオーバーフローの水を流す排水路のマンホール(湯溜)に白金抵抗体水温計を設置している。

水温グラフのだいたいの傾向に注目すると、地震の5年ほど前から、それまではほぼ一定(若干下降 -0.17 °C/year)だった水温に明瞭な下降傾向が見える(-1.5 °C/year)。これは、震源域の神城断層付近では地震の前からねじれ歪が生じ、断層の西側、下盤側に位置する倉下の湯直下では引っ張りが働き、岩盤膨張、圧力低下、上昇流体の量減少、そして水温低下となったと考えると理解できる。温泉は地震後自噴が停止した(12月18日には回復)。これも地震による、より大きな岩盤膨張のためと理解できる。

キーワード: 2014年長野県北部地震, 地震予知, 前兆, 水温, 岩盤膨張, 岩盤収縮

Keywords: the 2014 Nagano-ken Hokubu earthquake of M6.7, earthquake prediction, precursor, water temperature, dilatation, contraction

前震活動に基づく地震発生の経験的予測—長野県北中部地域への適用— Empirical forecast of mainshocks based on foreshock activities - Application to the north-central Nagano prefecture -

前田 憲二^{1*}; 弘瀬 冬樹¹
MAEDA, Kenji^{1*}; HIROSE, Fuyuki¹

¹ 気象研究所

¹ Meteorological Research Institute

【はじめに】 2014年11月22日22時08分に長野県北部の神城断層付近でM6.7の地震が発生し(最大震度6弱)、負傷者や住家全半壊などの被害を生じた。気象庁の一元化カタログによると、この地震の約4日前の11月18日から19日にかけて、本震のごく近傍でM3クラス以下の地震が40個程度発生しており、小規模ながら活発な前震活動があったことを示している。しかし、こういった前震活動と本震との因果関係は物理的には解明されておらず、本震発生前に前震を識別し、本震発生を高い精度で予測することは一般に困難である。一方で、統一的に地震が発生しやすい特定の地域では、本震前に活発な地震活動がみられる場合があり、その統計的性質から本震発生を経験的に比較的効率よく予測できる場合がある。そのような地域として、Maeda (1996, BSSA)、前田・弘瀬 (2012年秋、地震学会) や Maeda & Hirose (2014年春、合同大会) は日本海溝沿いの3領域や伊豆地域を指摘し、これらの領域における前震を基にした予測効率を明らかにしてきた。本発表では、これまで提案してきた手法を上記の長野県北部の地震を含む長野県北中部の領域に適用し、この地域ではどのようなまとまった地震活動を前震活動とみなせば、過去の事例から経験的に本震(ここではM5以上とした)の予測に効率的であるかについて調査したので報告する。

【予測手法】 前震識別の手順は、1) 震源カタログから本震とのマグニチュードの差が1以上の余震活動を除去し、2) 特定の大きさ(緯度 D° × 経度 D°)のセグメントの中で、特定の規模(M_f)以上の地震が特定の期間(T_f 日)の間に特定の数(N_f)だけ発生した時、前震(群)の候補とみなし、3) その後特定の期間(T_a 日)内に本震が発生した場合に真の前震(群)であったと判定する。4) この前震(群)の定義において、 D , M_f , T_f , N_f , T_a をパラメータとして、本震を予測するために効率のよい前震(群)のパラメータをグリッドサーチにより求める。予測効率の指標としては、本震は時空間的に一定の発生率を持ってランダムに発生すると仮定したモデルを基準とし、前震候補による予測時空間における本震発生率が他の時空間より高いとする予測モデルとのAICの差($dAIC$)を主に用い、その他、予知率(AR : 予測された本震の割合)や適中率(TR : 真の前震の割合)、確率利得(PG : 背景確率に対する予測時空間の発生確率の比)も補助的に用いた。

【データおよび解析結果】 1998年から2014年までの気象庁の震源カタログからM1以上、深さ30km以浅の地震に対し、 D (0.1, 0.2, 0.3), M_f (1, 1.5, 2, 2.5, 3), T_f (1, 2, 3, 5, 10), N_f (1, 2, ..., 20), T_a (1, 2, ..., 30)の45000ケースについてグリッドサーチを行った結果、長野県北中部地域(35.6° N - 37.1° N, 137.2° E - 139.0° E)のM5以上の本震を予測するには、一辺0.1°の大きさの矩形領域内に1日間にM2以上の地震が5個発生した場合を前震候補とし、その後5日間にM5以上の地震(余震は除く)が発生するという予測が予測効率として最も良いことが分かった。このパラメータ値を選択した場合、予知率は約45% (=5/11)、適中率は約12% (=8/69)、 $PG=333$ 、 $dAIC=66$ であり、冒頭の長野県北部の地震も予測された地震に含まれる。言い換えると、長野県北中部においては、2014年11月22日の本震の約4日前からみられたような(上記のパラメータで定義される)地震活動がM5.0以上の本震に至る割合は約12%であり、M5.0以上の地震の約45%はそのような(上記のパラメータで定義される)前震活動を伴う、といえる。これまでの調査で予測効率が比較的高いことが分かっている日本海溝沿いの3領域[予知率=約38% (=11/29)、適中率=約30% (=13/44)]や伊豆地域[予知率=約68% (=44/65)、適中率=約23% (=46/196)]に比べると、予測効率は、特に適中率の点であまり高くないことがわかる。このように、前震活動に基づく本震発生の予測効率は地域によって差がみられる。

キーワード: 地震予測, 予測効率, 前震, 長野県, 地震統計, 経験則

Keywords: earthquake prediction, performance, foreshocks, Nagano prefecture, statistics, empirical relation

地震発生の1サイクルの間に生じる断層の非弾性変位 Estimation of inelastic displacement of a fault zone during an earthquake cycle

山本 清彦^{1*}
YAMAMOTO, Kiyohiko^{1*}

¹なし

¹none

1. はじめに: 破砕帯/アスペリティーモデルは震源パラメータを断層帯の物理的性質として解釈することを目的に提案された(Yamamoto & Yabe, 2003, 2006 地震学会). このモデルでは, アスペリティーを完全弾性体と見なして変形と破壊を扱うことによって, 見かけの破壊エネルギーを見積もっている. さらに, 破砕帯の回転によって生じる断層面に垂直な変位を一次近似で計算しているが, この近似は破壊エネルギーを過大評価することがわかった. ここでは, この垂直変位をアスペリティーの非弾性変形を考慮してより正確に再計算した. この結果に基づき, プレート境界の地震について, 地震に伴う変位および再来時間と地震の規模との関係を検討した.

2. 破砕帯/アスペリティーモデル: このモデルでは, アスペリティーを含む破砕帯を断層帯, 断層とそれを囲む母岩との境界面を断層面とよぶ. アスペリティーは断層面間の変位が u^*_{fc} , $u^*_{fc} = u_c + u_{fc} = t(e_c + e_{fc})$ になった時に破壊する. ここで u_c と u_{fc} は u^*_{fc} の弾性および非弾性成分であり, t は断層帯の厚さである. また, これらの変位はそれぞれ歪み e_c と e_{fc} に対応している. u_c は臨界変位であり, アスペリティーの変位の弾性成分である. アスペリティーが破壊すると断層面には新たに u_b が生じ地震を起こす. また, この時, 断層帯の中にすべり面ができる. スリップ面での相対変位は $u_c + u_b$ になり, 地震に伴う変位よりも大きい.

すべり面は断層帯中に伝播して拡大してゆくが, これに伴って, 破砕帯中に回転が生じ断層面に垂直な変位 v を生じる. この変位は断層面に働く法線応力 s_n に対して仕事をし, 断層面の単位面積当たりの仕事を仕事密度 w とよぶと, 仕事密度 w は, $w = (s_n v) \approx s_n(1+2a)e_c u_c / 2$ と書ける. ここで $a = e_{fc} / e_c$ である. 見かけの破壊エネルギーはこの仕事にほぼ等しい. 震源の深さを約 10 から 20km とし, s_n をその深さの静岩圧, 岩石の剛性率を 30GPa とすると, 破壊時の弾性歪みは約 10^{-2} である. これを使って得られる臨界変位と見掛けの破壊エネルギーの関係を大中と松浦 (2002) によって纏められた実験結果と比較すると $(1+2a)/2 \approx 1$ が得られる. これから, $e_{fc} \approx e_c / 2$, すなわち, アスペリティーが破壊するときには弾性歪みの 1/2 の大きさの非弾性歪みがあることを示している.

3. プレート境界に発生する大きな地震の再来時間: 1923 年関東地震と 1703 年元禄地震は相模トラフ沿いに起こった大地震として知られている. この間は 220 年である. 前者の規模は $M8.1 \pm 0.2$ とされるが, ここでは, $M8.0$ を採用する. 1703 年元禄地震の規模は 7.9 から 8.5 で, 研究者によって異なる. $M8.0$ の地震を伴う平均断層変位は約 5.1m, 臨界変位は約 2.56m である. 元禄地震を基準にすると, 断層帯の変位増加率として 11.6mm/year が求まる. 非弾性成分が, 常時, 弾性成分の 1.5 倍あるとすると, 全体の変位増加率は 17.4mm/year で Loveless, J.P. and Meade, B.J. (2010) のものにはほぼ一致する.

プレート境界での弾性的な変位増加率を 11.6mm/year とすると, 再来時間 400 年の地震の臨界変位は約 4.6m, 断層変位の平均は約 9.2m, 滑り面上の平均変位は約 16.1m になる. また, 断層長は約 288km になり, 相模トラフの全長にはほぼ一致する. この地震の規模は約 $M8.5$ になる.

キーワード: 破砕帯/アスペリティーモデル, 非弾性変位, 破壊エネルギー, 臨界変位, 1923 年関東地震, プレート境界
Keywords: damage zone/asperity model, inelastic displacement, fracture energy, critical displacement, 1923 kanto earthquake, plate boundary

発震機構オイラー回転による東日本大震災の本震判定 Euler Rotation of Focal Mechanism to determine the main shock of the East Japan Super Earthquake, March 2011

新妻 信明^{1*}
NIITSUMA, Nobuaki^{1*}

¹ 静岡大学地球科学教室、仙台

¹ Institute of Geosciences, Shizuoka University, Sendai

震源域の応力場変動を解明するために、観測された地震の発震機構の変化を定量的に検討する方法として、発震機構回転角の算出方法を考案し (<http://www.niitsuma-geolab.net/> 特報 4), 2011 年 3 月東日本大震災の本震域で起こった発震機構変動から、応力場の変遷を解析した。

解析に使用したのは、気象庁がホームページで公開している、東日本大震災本震域で 2011 年に起こった地震の CMT 発震機構解である。

発震機構解として主応力軸 (圧縮主応力 P 軸・引張主応力 T 軸・中間主応力 N 軸) の下半球方位が公開されている。これらの主応力軸は互いに直交し、主応力軸間の角距離が 90° と一定しているので、主力軸方位の手系が一致していれば、二つの地震について 1 組の主応力軸方位を用いて、主応力軸方位の変化を球面上の 1 点であるオイラー極の回りの回転として表現可能である。二つの地震について主応力軸 PT・TN・NP の 3 組を用いて 3 組のオイラー極と回転角が算出できる。公開されている発震機構の主応力軸方位は度単位で公開されているので、算出されたオイラー極と主応力軸組について算出される回転角は必ずしも一致しない。そこで、主応力軸組の回転角差が最小となるオイラー極と回転角を採用した。最小回転角差は 0.1° 程度である。

算出されたオイラー回転極が、海溝軸方位に直交する線よりも南側に位置すれば、発震機構座標頂が島弧側へ回転し、北側に位置すれば海溝側へ回転したことになる。島弧側への回転を「正」、海溝側への回転を「負」と、符号を付けて発震機構回転角に回転極性も表現できるように定義する。

東日本大震災の本震の発震機構を基準に、本震域で 2011 年に起こった地震の発震機構回転角を算出した。本震が基準なので本震の発震機構回転角は 0 となるが、2 月 16 日から開始して本震直前まで続いた 18 個の前震は全て正回転角であるのに対し、本震後の 35 個の余震は負回転角であることが判明した。発震機構回転角符号が本震を境に前震と余震で急変することは、それまで蓄積されてきた歪が本震によって解放されたことに対応する。日本海溝に沿う太平洋スラブ上面では、スラブ上面に沿う西傾斜の剪断応力とスラブ上面に直交する法線応力の合力が圧縮主応力 P 軸方位となるので海溝側に傾斜する。前震の発震機構が島弧側への正回転であることは、前震の圧縮主応力軸圧縮軸傾斜が本震の傾斜 (36°) よりも小さいことを意味しており、最も破壊し難く法線応力が最大の破壊が本震であり、破壊し易く法線応力の小さい破壊が前震であることを示している。余震の発震機構が海溝側への負回転であるのは、本震によって剪断応力は解放されたが、静岩圧はそのまま保持され応力場の主体となるため、圧縮主応力軸が垂直方向に向けて島弧方向に回転して正断層型になるためである。このように東日本大震災の発震機構回転方向の変化は、破壊力学的に説明できる。

3 月 9 日の最大前震 M7.3 の本震誤認が防災対策に深刻な影響を与えたが、発震機構回転角の符号に基づけば、前震と判定でき、本震が近付いていると予報可能であった。最大前震が前震であることは、翌 3 月 10 日の M5.2-6.8 地震 7 個の発震機構回転角絶対値がそれまでの前震と同様に 25° 以内に収まっていることから前震と判定できるが、符号付き発震機構回転角を用いれば明確に判別できる。ちなみに、最大前震の発震機構回転角は $+2.0^\circ$ と本震の発震機構と殆ど同じであり、本震後の余震の発震機構回転は -25° よりもずっと大きな負回転である。

キーワード: オイラー極, 回転角, 発震機構, 手系, 本震判定, 東日本大震災

Keywords: Euler pole, rotation angle, focal mechanism, hand system, determination of main shock, East Japan Super Earthquake