

## コロンビアにおけるSWIFTを用いたCMT解の推定と複雑な沈み込みに伴う地震活動の特徴

## Operation of the SWIFT CMT analysis system in Colombia and characteristic of seismicity in the complex subduction zones

\*吉本 昌弘<sup>1</sup>、熊谷 博之<sup>1</sup>、Blanco José<sup>2</sup>、前田 裕太<sup>1</sup>、Dionicio Viviana<sup>2</sup>

\*Masahiro Yoshimoto<sup>1</sup>, Hiroyuki Kumagai<sup>1</sup>, José Faustino Blanco<sup>2</sup>, Yuta Maeda<sup>1</sup>, Viviana Dionicio<sup>2</sup>

1.名古屋大学、2.コロンビア地質調査所

1.Nagoya University, 2.Servicio Geológico Colombiano

南米コロンビアは、ナスカプレート、カリブプレート、南アメリカプレートの沈み込み境界に位置し、その複雑なプレート沈み込み相互作用によって多様な地震活動を示している。プレート境界では過去に1906年にエクアドル-コロンビア地震(Mw8.8)や1979年にコロンビア南西部トゥマコ地震(Mw8.2)などの巨大地震が発生しているが、その北部においては巨大地震の記録はなく、その発生ポテンシャルについてもよくわかっていない。一方で内陸側では、稍深発地震が頻発するBucaramanga nestが存在し、1967年にはM6.3の地震によってその震央付近に甚大な被害をもたらした。しかしながら、このnest内部の地震はほとんどがM5未満の小規模な地震であるためGCMTカタログに記載されたイベント数も少なく、またそれらのメカニズムは多様なパターンを示している。このnest付近は3つのプレート境界近傍の複雑な構造に位置するため、その発生メカニズムに関しては様々なモデルが提案されているのが現状である。その発生メカニズムや3つのプレートの相互作用を理解する上で、より小さな地震も含めた詳細な震源メカニズムを明らかにすることは重要である。

2015年度よりJST/JICAのSATREPSプロジェクト「コロンビアにおける地震・津波・火山災害の軽減技術に関する研究開発」が始まり、我々はプレート境界及び内陸側の複雑なプレート相互作用による地震活動の監視とモデリングを行っている。既に現地コロンビア地質調査所には即時的にCMT解と震源時間関数を決定する高度即時震源解析システム(SWIFT: Nakano et al., 2008)を導入し、運用を開始している。我々のグループでは現在、1) 地震活動の低調なプレート境界において、未だ発見されていない超低周波地震・微動の検出、2) SWIFTを用いたより小さな地震も含めた詳細な震源メカニズムの決定、に関する研究を進めている。いまのところ超低周波地震・微動の検出はできていないが、SWIFT解析については、コロンビア地質調査所が展開する広帯域地震観測記録を使用し最近2年間のCMT解の決定を進めている。その結果浅部の地震であれば最小でMw4.3程度まで、深さ約150 kmの稍深発地震ではMw4.6程度までの小さい地震のCMT解を決めることができた。最も特徴的なBucaramanga nestについては、GCMTカタログでは多様なメカニズム解を示していたが、我々の解析結果では南西-北東方向にP軸を持つ横ずれ成分が卓越するメカニズムの地震が多く、またその正反対のメカニズムの横ずれ断層型の地震も存在する。このnest内部では、繰返し地震及び極性の反転した繰返し地震の存在を指摘している研究もあり(Prieto et al., 2012)、彼らが指摘するようにこのnestの地震は体積的な地震活動ではなく面的な活動であることを我々の結果は支持している。しかしながら求められたイベント数が少ないため今後はさらに過去のイベントの解析を行う予定である。また波形インバージョンでの推定が難しいM4.5以下の小規模な地震についても、P波の押し引き分布でさらなるメカニズム推定も行っていく、このnestの発生メカニズムや3つのプレートの複雑な沈み込み過程の解明を目指していく。

キーワード：SWIFT、コロンビア、地震活動

Keywords: SWIFT, Colombia, seismicity

## 2015年ネパール・ゴルカ地震 (Mw 7.8) 震源域中央部における稠密余震観測

A dense seismic array observation across the central focal area of the 2015 Gorkha earthquake (Mw 7.8), Nepal

\*蔵下 英司<sup>1</sup>、佐藤 比呂志<sup>1</sup>、酒井 慎一<sup>1</sup>、平田 直<sup>1</sup>、八木 浩司<sup>2</sup>、Gajurel Ananta<sup>3</sup>、Adhikari Danda<sup>3</sup>、Subedi Krishna<sup>4</sup>、Upreti Bishal<sup>4</sup>

\*Eiji Kurashimo<sup>1</sup>, Hiroshi Sato<sup>1</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>1</sup>, Naoshi Hirata<sup>1</sup>, Hiroshi YAGI<sup>2</sup>, Ananta Prasad Gajurel<sup>3</sup>, Danda Pani Adhikari<sup>3</sup>, Krishna Subedi<sup>4</sup>, Bishal Nath Upreti<sup>4</sup>

1.東京大学地震研究所、2.山形大学、3.トリブバン大学、4.ネパール科学技術院

1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.Yamagata University, 3.Tribhuvan University, 4.Nepal Academy of Science and Technology

2015年4月25日に発生したネパール・ゴルカ地震 (Mw7.8) は、カトマンズをはじめとして約9000人の死者を伴う甚大な被害を発生させた。この地震はインド-オーストラリアプレートとユーラシアプレートの境界で発生した逆断層型の地震である。ヒマラヤ地震発生帯は、典型的な大陸衝突型のプレート境界であり、地表地質などを拘束条件としてメガスラストの形状を含む地殻構造断面が描かれてきた (例えば、Cattin and Avouac, 2000, JGR)。しかしながら、地球物理学的な裏付けに極めて乏しい。大陸衝突境界のテクトニクス・ダイナミクスを理解する上で、地殻構造は基本的に極めて重要である。また今回の地震では地表地震断層は出現せず、この地震は前縁断層沿いに地表まで変位が到達する巨大地震の前駆的活動であるとの指摘もある (Bilham, 2015)。こうした背景から、震源の詳細分布やトモグラフィー解析による地殻構造解明を目的として、震源域における大規模な余震観測を実施した。調査測線は、西北西-東南東方向に長さ約200km、幅約80kmの広がり分布している余震域の中央部を横切るシャブルバシからカトマンズを経てヘトウラに至る約90kmの区間に設定した。観測点は、3-10kmの間隔で35箇所に設置し、各観測点では、固有周波数4.5 Hz の地震計によって上下動及び水平動の3成分観測を行った。収録は、Geospace社製の独立型レコーダであるGSX-3を用い、サンプリング周波数を250Hzに設定して、約1ヶ月間の連続収録ができる仕様で実施した。余震観測は 2015年8月15日から11月28日からの2回、実施した。

本講演では、各観測点で得た稠密余震観測データに対して、トモグラフィー解析を行うことによって得た詳細な震源分布と地震波速度構造について報告する。

キーワード：2015年ゴルカ地震、インド-ユーラシア衝突帯、稠密自然地震観測、余震分布

Keywords: The 2015 Gorkha earthquake, India-Eurasia Plate Collision Zone, dense seismic array observation, aftershock distribution

## Monitoring of Background Seismicity and Induced Earthquakes Associated with Enhanced Geothermal Systems in Ilan, Taiwan

\*ShueiHuei YOU<sup>1</sup>, Laetitia Mozziconacci<sup>2</sup>, Yuancheng Gung<sup>1</sup>, MengChieh Tsai<sup>1</sup>, ChingYu Lu<sup>1</sup>

1.National Taiwan University, 2.National Taiwan Ocean University

Hydro-fracturing stimulation is one of the key steps in the development of EGS. It aims to create a subsurface system full of cracks and fractures, thus providing an efficient water channel network to enhance the thermal energy extraction. Since small earthquakes are triggered by the occurrence of rock fracture, the distribution of hydro-fractures can be delineated by locations of these induced earthquakes. In this project, we have deployed 6 bore-hole seismometers to accurately capture the weak signals from these micro events. The influence on local seismicity from water-pumping is another important issue in this project. Preliminary analysis of data from our own borehole network indicates that many recorded local micro events are not reported in the CWB catalogue, thus, we need to rely on the borehole data to better evaluate the local background seismicity. We have also analyzed data during the stimulation experiments conducted in 11/09, 11/13 and 11/14, 2014. After various examinations, we noticed two major signals during the stimulations, the tremors, which are likely induced by water-pumping, and the free-oscillations of the water-filled cracks, which are obviously enhanced during the pumping period. However, probably because the energy from the induced rock failure is too weak, these signals were only recorded by the nearest borehole station, and there is no clear arrival time in the tremor signals. During the period from October 2014 to November 2015, 1313 local earthquakes were recorded by the bore-hole seismic network. We first determined the seismic velocity of the shallowest layer (depth < 500 m) with applying ambient noise technique on seismic records of local earthquakes, and inverted a minimum velocity model and preliminary locations of earthquakes by using the package VELEST developed by Kissling. We then relocated local earthquakes using "HYPODD" technique, and calculated local magnitude (ML) of these events. Most of these events are located at depth less than 5 km with rather small magnitudes (ML<1.0). Our results have well demonstrated that we are able to improve local micro-earthquake monitoring by using the bore-hole seismic network. During the stimulation experiments, no apparent variations of seismicity were noticed. Interestingly, the seismicity right beneath the injection well (2 -5 km) was clearly increased 3 days after the pumping, and such phenomena lasted for about 10 days. Besides the seismic swarm related to the stimulation experiments, we also identified several seismic swarms at shallow depth which imply relatively active geological structures in the study area.

Keywords: borehole seismometer, induced earthquakes, focal mechanism of micro-earthquake

## Focal Mechanisms and Seismicity in the Region of Induced Earthquakes of Song Tranh Dam, Vietnam

\*Cuong Quoc Nguyen<sup>1</sup>

1.DPRI Kyoto University

Vietnam is located in South East Asia and bounded by the Pacific and Mediterranean-Himalaya seismic belts on its eastern, western and southern sides, respectively. The dynamic tectonic processes in this region cause the territory of Vietnam and adjacent areas to have intensive differential movement, making the regional tectonic structure very complicated. The tectonics have led this territory to have moderate seismic activity and complicated geological structures, such as the Lai Chau-Dien Bien fault zone, Red River fault zone, and others. Southern Vietnam was considered to be a region with low seismicity, compared to the North. However, the sequence of earthquakes that occurred at Song Tranh Dam during the last several years surprised many scientists because the southern region of Vietnam was not expected to have major tectonic activity. This region where many induced earthquakes are now occurring is associated with the filling of a new reservoir. There have been four M4 earthquakes (maximum earthquake was 4.7 in November, 2012), so it is one of the most active induced earthquakes examples in the world. It is important to determine the strong motion attenuation relations for this area since damaging earthquakes may be expected in the near future. We collect and process data from 5 seismic stations around Song Tranh dam, include more than 300 events larger than 1.5 and more than 2000 seismic waveforms to determine arrival times and locate the earthquakes in the Song Tranh dam region. In this study we use time domain analyses to determine focal mechanisms. We use software of Dreger and Ford (2011) modified for the Song Tranh Dam region. Induced earthquakes processed by this software include events with magnitudes larger than 3.5 and recorded on 4 or more stations.

We also compare our results with mechanisms for tectonic earthquakes in the region (Hung Nhuong Tavi and Tra Bong faults). The results show a difference in focal mechanism between tectonic earthquakes and induced earthquakes which may be related to the increased fluid pressure from filling of the reservoir. To confirm this result, we will need to process the many smaller events with magnitude less than 3.0, which have occurred around Song Tranh Dam.

We used a genetic algorithm method to estimate the local velocity structure. We applied this method to determine a layered model for the Song Tranh dam region. Our results obtained a new 1D model of 7-8 layers. The shallow P wave velocity of 4.6 km/s is slower than 5.9 km/s for previous studies in northern VietNam. For a deeper layers from 6 to 12 km, P wave velocity becomes larger, 5.4 km/s - 5.9 km/s. The Vp/Vs shows relatively higher values of 1.75-1.77 for the depth around 12 km. When layer thickness changes from 21 km to 28 km, the P wave velocity increases and changes from 6.5 km/s to 7.3 km/s, however, Vp/Vs ratio decreases from 1.77 to 1.67. Finally, the depth of the Moho surface changes from 28 to 35 km and the P wave velocity changes from 7.8 to 8.2 km/s, with Vp/Vs value of about 1.78. Earthquakes still occur at Song Tranh dam (a recent M3.3 occurred on August, 26<sup>th</sup> 2015), and more than a thousand earthquakes with magnitude less than 1.5 have not yet been processed. We continue to update the seismic analyses with information from smaller earthquakes to improve our results.

Keywords: Song Tranh Dam, Focal Mechanism, Velocity structure, induced earthquake

2013年と2014年に栃木県北西部で発生した2つの地震(Mj6.3,Mj5.1)に先行する  
b値の時間変化の検出可能性

Detectability of temporal variation of b-value prior to two earthquakes (Mj6.3 in 2013,  
Mj5.1 in 2014)  
in Northern Tochigi Prefecture

\*米田 直明<sup>1</sup>、川方 裕則<sup>1</sup>、平野 史朗<sup>1</sup>

\*Naoaki Yoneda<sup>1</sup>, Hironori Kawakata<sup>1</sup>, Shiro Hirano<sup>1</sup>

1.立命館大学理工学部物理科学科

1.Department of physical Science, College of Science and Engineering Ritsumeikan University

It has been reported that the b-value decreases prior to large earthquakes in nature (e.g., Imoto, 1991) and failure of a rock sample in laboratories (e.g., Scholz, 1968). To discuss a temporal variation of the b-value, a sufficient number of earthquakes is required. In general, calculation of b-value prior to large earthquakes requires long-term data because seismic activity is not always high at that term. In other words, the temporal resolution of b-value variation before a large earthquake is usually low. Therefore, sufficiently high seismic activity before the large earthquake is required to evaluate the b-value variation precisely.

For example, two major earthquakes occurred in northern Tochigi Prefecture: Mj6.3 in 2013 and Mj5.1 in 2014. The two events followed the increase of seismic events. One possible cause of this increase is the Mw9.0 Tohoku earthquake in 2011 (e.g., Aketagawa, 2011).

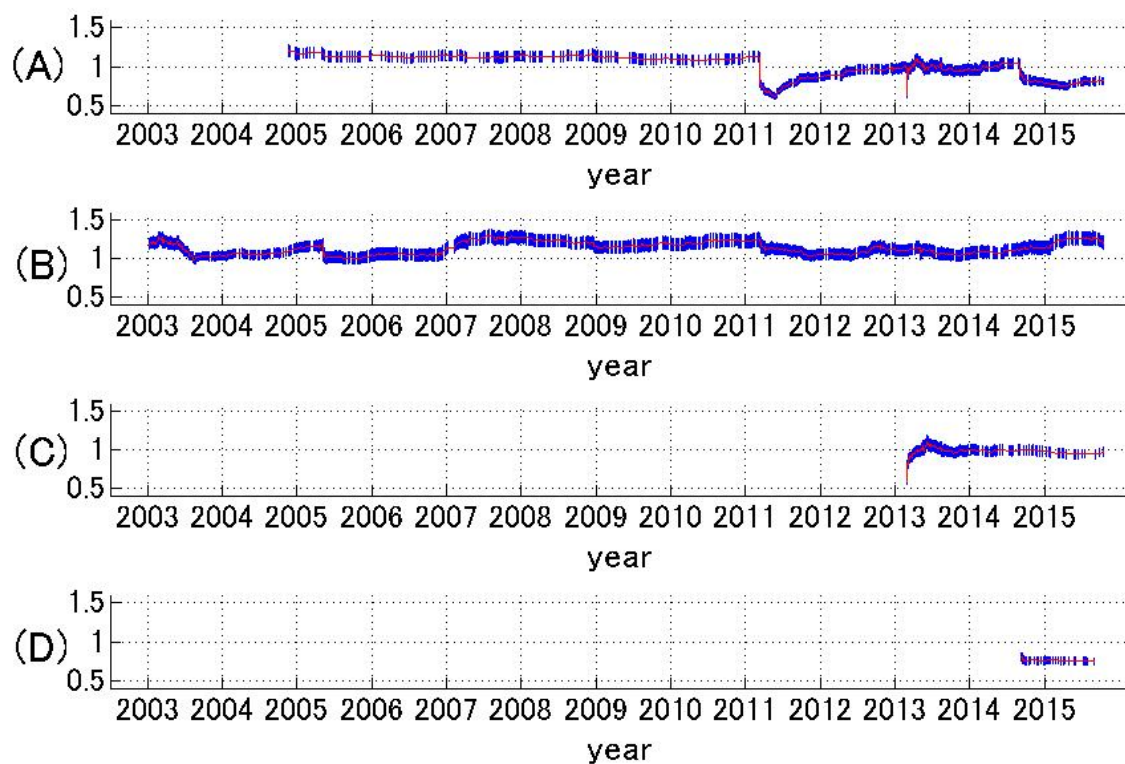
In this study, we try to detect the temporal variation of the b-value in northern Tochigi Prefecture where a large number of earthquakes could be observed in a short period prior to the two major events. First, to increase the temporal resolution, we calculate the b-value for a circular region with 20km radius from the epicenter of the Mj6.3 event; the result is shown in Figure A. While the b-value was greater than 1.0 and stable before March 2011, it dramatically decreased to  $\sim 0.6$  after the occurrence of the Tohoku earthquake in 2011 and recovered to around 1.0 almost within one year. After that, it decreased to  $\sim 0.7$  again following the Mj6.3 event in 2013 and recovered to  $\sim 1.0$  within a small period. Although it decreased to  $\sim 0.75$  again following the Mj5.1 event in 2014, it did not recover but continued, at least, one year. Regarding these different variations in each sequence, we considered the seismic activity in northern Tochigi precisely. We consider regions 1, 2, and 3. The region 1 is located south of the source region of the Mj6.3 event and includes an active fault. The regions 2 and 3 include the source areas of the Mj6.3 and Mj5.1 events, respectively. The temporal variation of b-value for each region is shown in Figure B, C, and D. In region 1, constant seismic activity has continued for the whole term and the b-value was stable and greater than 1.0. The b-values are also stable but  $\sim 1.0$  in region 2 and  $\sim 0.75$  in region 3. On the basis of these results, we found that the temporal variation of the b-value of the entire region is affected by the temporarily activated one of the three regions. However, in regions 2 and 3, the numbers of events to calculate the b-value precisely are insufficient despite their activation. So we found that we cannot detect temporal variation of the b-value prior to the major events. This finding tells us that we need to consider the target region carefully when we research the temporal variation of the b-value.

Acknowledgments

In this study, we used the JMA unified hypocenter catalogue.

キーワード：b値、栃木県北部、地震活動度

Keywords: b-value, Northern Tochigi Prefecture, seismic activity



## 2011年東北地方太平洋沖地震後における地震活動の潮汐関連の時空間変化

## Spatiotemporal variation of earthquake-tide correlations after the 2011 Tohoku earthquake

\*田中 佐千子<sup>1</sup>、浅野 陽一<sup>1</sup>\*Sachiko Tanaka<sup>1</sup>, Youichi Asano<sup>1</sup>

1.防災科学技術研究所

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

## 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.1) では、本震の破壊開始域近傍の大すべり域周辺において、本震発生直前の約10年間に、地球潮汐と地震発生の間に明瞭な相関が現れていたことが明らかになっている (Tanaka, 2012)。ただし、この相関は、規模の小さい地震を対象とすると確認できない (田中・浅野, 2012)。一方、太平洋沖地震後の期間については、Mw 5.0以上のグローバルCMT解の解析から、岩手県沖の特に海岸線近傍の領域で有意な相関が確認され、余効すべりとの関連性が示唆されている (田中, 2015)。本研究では、高感度・広帯域地震観測網を利用して高精度に推定したCMT解を用い、規模の小さい地震も含め、太平洋沖地震後における地震活動の潮汐関連の時空間分布を改めて評価した。

## 2. データ・解析方法

用いた地震データは、Asano et al. (2011) の方法によるCMT解 (太平洋沖地震発生直後~2015年12月、房総沖~三陸沖の太平洋沿岸域、Mw 4.0以上) で、これらの地震からプレート境界型の地震 (プレート境界面から深さ20 km以内の逆断層型の地震で、走向195度、傾斜角13度、すべり角90度のダブルカップル解との最小回転角 (Kagan角) が35度以内のもの、1068個) のみを選択した。地球潮汐による応力変化は、Tanaka et al. (2002) の方法に従い、海洋荷重の効果も含めて理論的に計算した。応力成分は、陸側傾斜の節面を断層面とし、クーロン破壊応力 (摩擦係数0.2) に着目した。計算した理論地球潮汐から地震発生時刻の潮汐位相角を読み取り、Schuster (1897) の方法を用いて位相選択性の有無を検定した。この検定で得られるp値は、帰無仮説「地震発生は地球潮汐の位相角によらない」を棄却する危険率を表す。

## 3. 解析結果

太平洋沖地震後の約5年間について、200 km四方の空間ウィンドウを用いてp値の空間分布を調べた結果、本震の大すべり域の南側でp値の小さい領域が確認された。最も小さいp値 (0.52%) が得られたウィンドウは、茨城県沖から房総沖北部にかけてのウィンドウである。このウィンドウについて、p値の時間変化を調べた結果、太平洋沖地震の発生直後は10%以上の値が続いていたが、2013年頃から徐々に低下し、直近もp値の低下は継続していることが明らかになった。直近700日間のp値は0.09%である。この大すべり域南側の相関は、対象とする地震のマグニチュードの下限が小さいほど顕著であり、マグニチュードの下限が4.8以上の場合は、この領域で5%以下のp値は得られていない。

一方、対象とする地震のマグニチュードの下限を大きくすると、本震の大すべり域の北西側にp値の小さい領域が確認された。この領域は、グローバルCMT解の解析で有意な相関が得られた領域に対応するが、マグニチュードの下限を4.5以下とした場合には、5%以下のp値は確認できない。マグニチュードの下限が4.8の場合に相関は最も顕著となり、岩手県沖の陸寄りに位置するウィンドウで最も小さいp値 (0.63%) が得られた。このウィンドウについて、p値の時間変化を調べた結果、太平洋沖地震の直後が最も小さく (0.12%)、その後、徐々に回復する傾向を示すことが明らかになった。2014年以降、この領域で有意な相関は検出されていない。

キーワード：2011年東北地方太平洋沖地震、地球潮汐、地震誘発現象

Keywords: the 2011 Tohoku earthquake, earth tides, earthquake triggering

## 時空間スムージングカーネル法による東日本の地震活動予測

## Retrospectively forecasted seismicity in eastern Japan using spatio-temporal kernel smoothing

\*大久保 祐一<sup>1</sup>、遠田 晋次<sup>1</sup>\*Yuichi Ohkubo<sup>1</sup>, Shinji Toda<sup>1</sup>

1.東北大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Tohoku University

現在、地震活動を記述・予測する統計モデルとして最も一般的なものはETAS (Epidemic Type Aftershock Sequence) モデル (Ogata, 1988) である。ETASモデルは改良大森公式を全ての地震に当てはめて重ね合わせたものであり、本震-余震系列は高い精度で予測することが出来るが、群発地震活動など、改良大森公式で記述できないような地震活動には推定精度は必ずしも良くない。Helmstetter and Werner (2014) は、このようなETASモデルの欠点を踏まえ、改良大森公式を用いず、時空間スムージングを用いたモデル (Kernelモデル) を考案した。Kernelモデルは改良大森公式に基づいていない為、ETASモデルでは上手く推定できない地震活動にも適用できるという長所がある。本研究では、東北地方太平洋沖地震 (2011.3.11 M9.0) と岩手・宮城内陸地震 (2008.6.14 M7.2) のような本震-余震型の地震や、伊豆半島での群発地震のような東日本の地震活動についてETASモデルとKernelモデルによる予測精度の比較を行った。その結果、Kernelモデルは本震-余震型の地震では本震発生直後の予測発生数が低くなることを除いてはETASモデルとほぼ同様の精度で予測する事ができ、改良大森公式に従うように余震発生数の減少を再現できた。この予測結果は観測結果と整合的であった。また、前震が観測された東北地方太平洋沖地震では、前震 (2011.3.9 M7.3) 発生から本震発生までの期間は予測発生数が通常時の数百倍になっている様子が再現できた。岩手・宮城内陸地震では本震発生後数日は確率利得の値が数百という非常に高い値だったが、東北地方太平洋沖地震では岩手・宮城内陸地震に比べ確率利得の値が低かった。本研究では深さ30km以浅の地震のみを対象とした二次元モデルを使用したため、プレート境界地震では内陸地震に比べ精度が落ちてしまったと考えられる。Kernelモデルの3次元化が今後の課題である。一方で、2000年に発生した伊豆半島における群発地震ではETASモデルよりも観測値への当てはまりが良かったが、本震-余震型の地震に比べると予測精度の低下が著しい。

キーワード：スムージング、余震、群発地震

Keywords: smoothing, aftershock, earthquake swarm



## 相互相関を用いた地震波形解析の検出基準の設定

## Quantification of the cross-correlation criteria for small foreshock detection

\*豊本 大<sup>1</sup>、川方 裕則<sup>2</sup>、平野 史朗<sup>2</sup>、土井 一生<sup>3</sup>

\*Yutaka Toyomoto<sup>1</sup>, Hironori Kawakata<sup>2</sup>, Shiro Hirano<sup>2</sup>, Issei Doi<sup>3</sup>

1.立命館大学理工学研究科、2.立命館大学工学部物理科学科、3.京都大学防災研究所

1.Graduate School of Physical Science and Engineering, Ritsumeikan University, 2.Department of Physical Science, College of Science and Engineering, Ritsumeikan University, 3.Disaster Prevention Research Institute

Recently, small foreshocks have been frequently detected using a cross-correlation technique (e.g., Bouchon et al., 2011, Science). For inland earthquakes, foreshocks whose hypocenters were estimated to be adjacent to the mainshock hypocenter were detected from several tens of minutes before the main shock occurrence (Doi and Kawakata, 2012, GRL; 2013, EPS). Toyomoto et al. (2015, SSJ) tried to detect foreshocks of an M 5.4 earthquake in central Nagano prefecture on June 30, 2011, in a similar manner to Doi and Kawakata (2013). Using the continuous waveforms of the vertical component at N.MWDH (Hi-net) station (the epicentral distance of the mainshock is 4.5 km), they newly detected 14 foreshocks with a cross-correlation criterion of 0.6, in addition to 27 foreshocks listed in the JMA (Japan Meteorological Agency) unified hypocenter catalogs. To efficiently detect small foreshocks for other inland earthquakes, it is necessary to design how to set the cross-correlation detection criterion for foreshock detection.

In this study, we carried out foreshocks detection of the same earthquake in the same method as Toyomoto et al. (2015, SSJ) using the waveform record of N.MNYH (Hi-net) station (epicentral distance of main shock is 5.3km). In this case, the maximum correlation coefficients during one minute tended to be higher than those for records at N.MWDH station, and the result of detection strongly depends on a threshold employed in a cross-correlation method. This indicates that we should not use a universal threshold independent of data. One of alternative way is to use the standard deviation of cross-correlation coefficients. Then, we made a histogram of the cross-correlation coefficients of 1-day data. The histogram of N.MWDH data is Gaussian and the cross-correlation coefficients obey a normal distribution with the average of zero. Although the histogram of N.MNYH data is not Gaussian, so the cross-correlation coefficients have a large-deviation. In such a case, a criterion depending on the standard deviation is inadequate.

## Acknowledgments:

We used continuous waveform records of NIED high-sensitivity seismograph network in Japan (Hi-net) and the JMA unified hypocenter catalogs.

キーワード：前震、相互相関、検出基準

Keywords: foreshock, cross-correlation, detection criteria

## 自己浮上式海底地震計の観測による小笠原諸島周辺の震源決定精度向上について

## Improvement of determination of hypocenters by pop-up type ocean bottom seismographs near Ogasawara Islands

\*中田 健嗣<sup>1</sup>、小林 昭夫<sup>1</sup>、木村 一洋<sup>1</sup>、馬場 久紀<sup>2</sup>、長岡 優<sup>3</sup>、対馬 弘晃<sup>1</sup>、勝間田 明男<sup>1</sup>、前田 憲二<sup>1</sup>  
\*Kenji Nakata<sup>1</sup>, Akio Kobayashi<sup>1</sup>, Kazuhiro Kimura<sup>1</sup>, Hisatoshi Baba<sup>2</sup>, Yutaka Nagaoka<sup>3</sup>, Hiroaki Tsushima<sup>1</sup>, Akio Katsumata<sup>1</sup>, Kenji Maeda<sup>1</sup>

1.気象庁気象研究所地震津波研究部、2.東海大学海洋学部、3.気象庁気象研究所火山研究部

1.Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2.Department of Marine and Earth Science, Tokai University, 3.Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

小笠原諸島近海にある定常地震観測点は、気象庁の父島と母島、防災科学技術研究所のF-net小笠原（父島に設置）の3点である。次に近い観測点は青ヶ島であり、小笠原諸島近海の地震について、疎らな観測点で震源を決定しているのが現状である。2013年1年間のM4以上の地震5つについて、USGSの震源と気象庁の地震カタログ（以下、一元化震源）を比較すると、USGS震源の方が一元化震源よりも、約30'西へ決まっている。この理由の一つとして、一元化震源は、震源に近い観測点は父島・母島の南北に2点であり、東西方向の震央の位置精度が低く、東西方向は本州の観測点における走時差の影響を強く受けていることが考えられる。

そこで、気象研究所では、自己浮上式海底地震計(OBS)を本海域へ設置して一時的に密な観測網を形成し、正確な震源（以下、OBS震源）を求めることにした。OBSは、2015年6月に設置し同年10月に回収した。観測期間は2015年7月15日から10月10日までの約3か月である。観測網は、既存の父島および母島の観測点をカバーするように、東経140.8°、141.6°、142.65°の3つの南北のラインに2~3点を配置した（この他、火山観測を兼ねるため、西之島火山周辺に5点配置した）。西之島火山周辺の1点とその他7点の計8点のOBSの連続波形に対して、STA/LTAでトリガーをかけ、P波、S波を検出して震源決定を行った。ここで、P波の速度構造は、Kodaira et al. (2011) を参考にして海の構造を鉛直1次元で与え、S波の速度構造はP波速度との比から与えた。

北緯26°~29°、東経140°~143°内を比較範囲として、得られたOBS震源を一元化震源と比較した。ここで、震源時の差が3秒以内の31個の地震を同一イベントと判定して比較した。その結果、震源の水平位置は、全体的にみて、OBS震源は一元化震源よりも、約30'~1°西に決まることが分かった。また、本期間中の比較範囲で一元化震源と同一イベントと判定できたUSGSの震源は14個あり、この場合も全体として一元化よりも約30'西に決まり、OBS震源と傾向が似ていた。OBS震源の深さについては、一元化震源よりもプレート沈み込みに伴う面状の震源分布がみられる。これは今回の密な観測網により、より精度よく震源が求まっていることの現れであると考えられる。このことは、決定できた全OBS震源をプロットするとより明瞭に見える。

今回の観測で得られた震源の東西方向の正確な位置により、定常観測網における実際の速度構造に対応する走時差を求めることができ、その結果を適用すれば、定常観測網での震源位置を補正することができると考えられる。

キーワード：震源決定、海底地震計、小笠原諸島

Keywords: Determination of hypocenters, Ocean Bottom Seismographs (OBSs), Ogasawara Islands

## 焼きなまし法を用いた初動発震機構解の決定

## Determination of focal mechanism solution using simulated annealing

\*小松 正直<sup>1</sup>、竹中 博士<sup>1</sup>\*Masanao Komatsu<sup>1</sup>, Hiroshi Takenaka<sup>1</sup>

1.岡山大学大学院自然科学研究科

1.Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University

地震の初動発震機構解を決定するために、グリッドサーチ(例えば、中村・望月, 1988, 駿震時報)や遺伝的アルゴリズム(genetic algorithms, 例えば, Kobayashi and Nakanishi, 1994, GRL)を用いたパラメータの探索が行われてきた。一方、最適な解を効率よく探索する手法として、焼きなまし法(simulated annealing, 以下SAと略す)が存在する。この手法は乱数と「温度」という指標を組み合わせることにより、解が理論値と観測値の残差の局所的な最小値(local minimum)に収束することを防ぎ、真の解を示す大域的な最小値(global minimum)に収束することを可能としている。SAを用いた効率的な初動発震機構解の決定はこれまで行われていない。そこで本研究ではSAを用いて初動発震機構解の決定を行い、その能力を検証する。そのために、震源球におけるNull軸, P軸(主圧力軸), T軸(主張力軸)のオイラー角による表現(例えば、中村・望月, 1988)を採用する。P波初動の極性(押し引き)の分布を説明する最適なオイラー角を、SAを用いて探索することで、初動発震機構解を決定する。検証に使用したデータは2014年3月14日に伊予灘で発生した $M_{JMA}6.2$ の稍深発地震の押し引き分布である。震源から観測点に向けての射出角は気象庁のJMA2001速度モデルによる射出角表toff2001を用いた。計算の比較のために、グリッドサーチによる初動発震機構解の決定も行った。Intel Core i7-3520M (2.90 GHz)搭載のパソコンで計算を行った結果、SAによる探索はわずか0.06秒で終了し、グリッドサーチの場合と比較して約1278分の1の計算時間で済んだ。探索回数も2430分の1という非常に少ない探索で済んでいる。オイラー角の最適値を用いて断層の走向、傾斜角、滑り角を求めたところ、気象庁により報告されている値とほぼ一致した。

謝辞：P波初動の押し引きは気象庁一元化処理震源データを使用しました。SAのソース・コードはオーストラリアのCSIROのWebサイトで公開されているsimann.f90を使用しました。記して感謝致します。

キーワード：初動発震機構解、焼きなまし法、グリッドサーチ

Keywords: focal mechanism solution, simulated annealing, grid search

## The 2011 M6.4 Shizuoka earthquake sequence: triggering process investigation

\*Anca Opris<sup>1</sup>, Bogdan Enescu<sup>2</sup>, Yuji Yagi<sup>2</sup>, Sachiko Tanaka<sup>3</sup>, Katsuhiko Shiomi<sup>3</sup>

1.Earth Evolution Sciences, Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, 2.Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

Many inland areas in Japan were seismically activated following the 2011 M9.0 Tohoku-oki earthquake. The activation mechanism includes triggering by dynamic, static or fluid-induced stress changes (e.g., Toda et al., 2011; Miyazawa et al., 2011; Shimojo et al., 2014). In this study we aim to understand the triggering processes associated with the 2011 M6.4 Shizuoka earthquake sequence; the mainshock of the sequence occurred on March 15, close to Mt. Fuji.

To improve the detection of smaller earthquakes, we have applied the Matched Filter Technique (MFT; Peng and Zhao, 2009) for the time interval from the Tohoku-oki earthquake until seven hours after the Shizuoka earthquake. We used Hi-net (NIED) continuous waveform data and seismograms of 1126 template events with  $M \geq 1.0$ , which occurred in the study area between 2001 and 2014. The total number of Hi-net stations used was 25, selected within a 40 km radius from the main shock.

No foreshock activity was detected prior to the March 15 Shizuoka earthquake, which contrasts with other similar inland seismicity activations following the Tohoku-oki earthquake (e.g., Kato et al., 2013; Shimojo et al., 2014). Since the co-seismic static stress change due to the Tohoku-oki earthquake on the Shizuoka fault plane was significant ( $\sim 0.5$  bar), we argue that this is likely the most significant triggering mechanism and the delay of this sequence could be explained by the rate-and-state friction law (Dieterich, 1994).

The aftershock detection for the first 7 hours following the M6.4 event was significantly improved. When looking at the space-time distribution of the MFT detections, we observe that the earliest aftershocks (first minutes after the Shizuoka earthquake) occur to the north, close to Mt. Fuji, likely due to a stress increase from the Shizuoka mainshock. Indeed, by comparing the locations of these events with the slip model of Shizuoka earthquake derived from strong-motion data (JMA, 2011), we observe that they occur at the tip of the mainshock rupture.

The largest earlier aftershocks ( $M \geq 4.0$ ) occur as well in the north region. Aftershock distribution and focal mechanism data suggest that the northernmost earthquakes may have occurred on a different fault segment.

We also detect a rather gradual expansion of the aftershock distribution to shallower depths; the delay of activation in the shallow part remains to be further explored.

Keywords: seismicity, 2011 Shizuoka earthquake, triggering

## 1914年桜島大正噴火時地震の震源位置の再評価

## Re-evaluation of Hypocenter of the Sakurajima Earthquake on January 12, 1914

\*緒方 誠<sup>1</sup>、岩田 訓<sup>2</sup>、後藤 和彦<sup>3</sup>

\*Makoto Ogata<sup>1</sup>, Satoshi Iwata<sup>2</sup>, Kazuhiko Goto<sup>3</sup>

1.気象庁鹿児島地方気象台、2.気象庁福岡管区気象台、3.鹿児島大・理工・南西島弧

1.Kagoshima Local Meteorological offices, JMA, 2.Fukuoka Regional Headquarters, JMA, 3.NOEV, Kagoshima Univ.

桜島の大正大噴火の際、1914年（大正3年）1月12日18時28分頃に発生した地震については、当時の震度分布や被害等から鹿児島湾に震源があり、その規模はM7.1というのが現在の通説となっている(Omori (1922)、宇津 (1982: 気象庁カタログ採用) や、阿部 (1981))。今般、大正噴火から100年が経過し、次の大正級噴火が近づく中、現存する地震記象紙や原簿・文献等を再点検し、現在気象庁で使用している速度構造 (JMA2001) を用いて震源位置の再評価を試みることにした。

この地震については、当時、鹿児島測候所に設置されていたグレー・ミルン・ユーイング式地震計の地震記象紙が現存しており、強震動の初動部分のみ記録し、その後は記録針が振り切れて記録は途絶えている。今回の調査では波形をデジタイズし、初動部分の解析を行った。その結果、初動から期待される震央の方向は、鹿児島測候所（鹿児島市坂元町）から見て南東象限であることが明らかとなった。

次に、文献や原簿等に記載された日本国内（一部当時の統治領含む）のS-P時間（初期微動継続時間とされているもの）について収集・整理を行った。この際、地震記象紙が現存しているものについては、可能な限りP相、S相の読み取りを行った。そして、収集したS-P時間データを用いて震源決定を行った。S-P時間を収集した観測点数は20数点となったが、原簿や文献、読み取り値により同一観測点で複数の値が存在し、その値が大きく異なる場合もあるため、後藤(2013)が1911年喜界島近海の巨大地震の震源再評価で用いた手法を参考に震源計算に使用する観測点やS-P時間の選別を行った。最終的には、9観測点のS-P時間データで震源計算を行い、鹿児島市付近に震源が求められた。なお、震源計算には、気象庁カタログ(過去部分)の改訂作業に使用しているツール（走時表は、気象庁が現行の震源計算に用いているJMA2001準拠であるが、観測点の距離による重みは観測網を考慮しJMA2001前に使用していたもの）を使用している。

本調査には、気象官署が保管している地震記象紙を地震調査研究推進本部が（公財）地震予知研究振興会に委託して行っている強震波形収集事業で高解像度スキャンしたファイルのほか、国立国会図書館、東京大学地震研究所所有の資料を使用しました。

キーワード：桜島大正噴火時地震、地震記象紙、初動解析、S-P時間（初期微動継続時間）、震源決定

Keywords: The Sakurajima Earthquake on January 12, 1914, smoked-paper seismogram record, first motion analysis, S-P time (Duration of Preliminary Tremor), hypocenter determination

2011年長野県北部の地震( $M_w$  6.2)の核形成過程

## Nucleation Process of the 2011 Mw6.2 Northern Nagano Earthquake

\*下條 賢梧<sup>1</sup>、Enescu Bogdan<sup>2</sup>、八木 勇治<sup>2</sup>、武田 哲也<sup>3</sup>

\*Kengo Shimojo<sup>1</sup>, Bogdan Enescu<sup>2</sup>, Yuji Yagi<sup>2</sup>, Tetsuya Takeda<sup>3</sup>

1.筑波大学大学院生命環境科学研究科地球進化科学専攻、2.筑波大学生命環境科学研究科、3.防災科学技術研究所

1.Graduate School of Life and Environmental Sciences Doctoral Program in Earth Evolution Sciences University of Tsukuba, 2.Faculty of Life and Environmental Sciences University of Tsukuba, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED)

Introduction. Previous research.

An Mw6.2 inland earthquake occurred in northern Nagano region, central Japan, about 13 hours after the Mw9.0 Tohoku-oki megathrust earthquake. The regional seismic activity recorded in the Japan Meteorological Agency (JMA) catalog in the first hours following the megathrust event was highly incomplete, thus not allowing a detailed analysis of triggering mechanisms. By applying a Matched Filter Technique (MFT) to the continuous Hi-net (NIED) waveform data, Shimojo et al. (2014) revealed an immediate post-Tohoku seismicity activation in an area located about 10 km south of the Mw6.2 Northern Nagano source region. They also detected a few foreshocks close to the hypocenter of the Mw6.2 mainshock, within one hour before the occurrence of the moderate-size event. However, the physical processes that led to the occurrence of the Mw6.2 earthquake remained unclear. In this study we take advantage of the data recorded by a dense temporary seismic network operated by NIED from 2008 to 2012 to reveal with an unprecedented resolution the nucleation process that culminated with the occurrence of the Northern Nagano earthquake.

Data and Method

We use the waveform data of the NIED "Hizumi" temporary network, with station spacing of about 5 km or less in the study area. The data recorded by the permanent Hi-net stations (spacing of about 20 km) complements that of the dense regional network. We have first picked P- and S-wave arrivals of earthquakes on the continuous seismograms and use the pick data to locate the events. The earthquakes were then relocated using the tomoDD software (Zhang and Thurber, 2003) and a 3D velocity structure in the region (Sekiguchi et al., 2013). The newly located earthquakes were further used as MFT templates to search for new events within the 13-hour time interval, in the hypocentral region of the Mw6.2 earthquake.

Results and Discussion

We have detected a total of 286 earthquakes in the source region of the Mw6.2 event. The earthquakes are relatively small, with magnitudes less than 3.0, and distribute within two spatially distinct clusters: one of these clusters was located close to the hypocenter of the Mw 6.2 event ("West" area), the other about 5 km to the east ("East" area).

In the "East" the seismicity starts within one hour after the Tohoku-oki earthquake. The events occur off the Mw6.2 fault and expand with time from shallow towards deep locations. In the "West" the seismicity starts immediately after the passage of surface waves excited by a moderate earthquake in the Tohoku-oki aftershock area, which occurred 21 minutes after the Mw9.0 megathrust; the majority of these events distribute along the fault line of the Mw6.2 mainshock. The seismicity (in the "West") that occurred in the immediate vicinity of the Mw6.2 hypocenter was activated about 3 hours before the mainshock and continued until its occurrence.

In both "West" and "East" regions the seismicity activation pattern shows correlation with the amplitude of the low-frequency waveforms observed at a nearby Hi-net seismic station. Such a

correlation may indicate that dynamic stress changes caused by the aftershocks of the Tohoku-oki megathrust event effect the seismicity in both areas. The triggering "sensitivity" might be enhanced by excitation and circulation of fluids, which are abundant both within the shallow thick sediment as well as the lower crust of the Nagano basin, as revealed by high-resolution tomography studies (Sekiguchi et al., 2013).

キーワード：2011年長野県北部の地震、稠密地震観測網、マッチングフィルター法、動的誘発、間隙流体の流動

Keywords: the 2011 Northern Nagano earthquake, dense temporary regional network, Matched-Filter Technique, dynamic triggering, migration of pore-fluid

2011年東北地方太平洋沖地震前の3ヶ月間に観測された発生までの3段階の過程

The 3-stage earthquake generation process observed during 3 months before the 2011 Tohoku earthquake

\*末 芳樹<sup>1</sup>

\*Yoshiki SUE<sup>1</sup>

1.なし

1.none

## 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では種々の事象が観測された。広帯域地震観測網F-netでは欠測観測点の増加があった。即ち、2010年12月22日から2011年1月18日にかけて1度目の欠測の増加があり、一部観測点の正常状態復帰の後、2月16日から3月2日にかけて2度目の増加があった。再度の一部正常復帰の後、本震となった[1]。さて近年、GNSSに代表される計測器の精度向上が著しく有用な情報を与える。そこで前述のF-netの状況に関し、地震活動およびGNSS等の計測結果を加えて地殻の挙動を調べた。

## 2. 解析

解析の結果と観測された事象を示す。

### 2.1 解析結果のまとめ

地震発生までの凡そ3か月間に、地殻の状態は次の3段階の過程からなっていたと思われる。

#### <第1段階>

陸側プレートの広域でひずみの蓄積が限界に到達した。この結果、陸側プレートは弾性を失い広域で動きを示した。

#### <第2段階>

海側プレートである太平洋プレートは休みなく運動し続けるので、これによる応力の増大を吸収しきれずに陸側プレートと太平洋プレートの境界に部分的な破壊箇所が生まれた。

#### <第3段階>

この部分的な破壊箇所が広域の破壊（本震）に発展した。

具体的には、各段階で次の挙動を示したと考えられる。

### 2.2 第1段階

期間： 2010年12月下旬～2011年1月下旬

解析： 東北・中部地方でひずみの蓄積が限界に到達した。この時、日本列島の広い領域で振動や滑りが発生した。そして、永年に亘る太平洋プレートの西進が停止した。この振動は、単位が“日にち”となるような長周期であり、広域の滑りはクリープ様のものと想像する。これらは震源域から遠い領域で発生しており、この段階では震源域は形成されていなかったと推測される。

観測事象：

2010年12月 GNSS [2,3]、F-net [1]、岩手県沿岸部の地下水 [4] などで異常値が観測され始めた。12月22日に父島近海でM7.4のプレート内地震が発生した。

2011年1月 F-netの欠測は12月より増加し始めて2か所となったが、1月3日-18日に3か所、14日には最大の4か所に増えた [1]。これらは、三陸—北海道南部および能登—伊豆の2グループからなる。これは、東北沖に於ける太平洋プレートと陸側プレートの押し合いの結果、三陸から北海道南部の陸部、および構造的に繋がる伊豆—小笠原の火山フロントでF-netの稼働に影響を与える振動が発生したためと推測する。また、箱根直下で低周波地震が多数発生した [5]。

1月5日 GNSSによる観測では日本列島全域が南方および上方へ、1月23日には日本列島の広い地域が西方および下方へ動いた [2]。

1月27日 GNSSの観測によると太平洋プレートの西進が停止した [3]。

この段階および次の段階と重なる1月19日より2月14日まで九州南部にある新燃岳が活動し、1月27日には52年ぶりの爆発的噴火をした。



### 2.3 第2段階

期間： 2月中旬～3月初旬

解析： 前の段階で陸側プレートは弾性体から剛体へと変化した。そして、それまでの太平洋プレートに対する従属的で柔軟な動きから一変して太平洋プレートに対する反発力を増大させた。この反発力は両プレートの境界に於いて剪断力を増加させ、結果として構造的に最も弱い個所であった本震の破壊開始点の近くに割れが形成された。これに伴い近辺で振動が発生した。

観測事象：

2月13日～2月末日 本震の破壊開始点付近でM5以上の地震がまとまって発生した。

2月16日より3月2日 F-netの欠測増加があり、最大4か所の欠測となった。これらは、三陸沿岸～北海道南部および岐阜県（1か所）からなっている〔1〕。

### 2.4 第3段階

期間： 本震数日前～地震発生（3月11日）

解析： 第2段階で形成された割れの拡大が起き、陸側プレートの滑りが始まり本震に至った。

観測事象：

3月8日 GNSSによる観測では東北地方の東方および下方への動きが見られた〔2〕。

3月9日 三陸沖地震M7.3が発生し、その後もM6級の地震が続いた。

3月11日 東北地方太平洋沖地震M9.0が発生した。

## 3. 文献

- 〔1〕 末 芳樹, 2013, JpGU, SSS30, P01.
- 〔2〕 CH Chen, et al., 2014, Journal of Asian Earth Sciences, 80, 165-171.
- 〔3〕 武田文秀, 2011, 地震学会講演予稿集, 2011年度秋季大会, A32-11.
- 〔4〕 Y. Orihara et al., 2014, Nature, srep06907.
- 〔5〕 石川有三, 2015, <http://www.ab.cyberhome.ne.jp/~catfish/event/2015hakone.html>.

キーワード：東北地方太平洋沖地震、F-net、GNSS

Keywords: 2011Tohoku earthquake, F-net, GNSS

	2010/Dec	2011/Jan	/Feb	/Mar 3/11
東北地方の動き (Move. of Tohoku area)	(西へ移動)	X 父島近海 地震 M7.4	X 箱根直下 低周波地震	X 震源域付近 M5以上地震
地震・火山活動 (EQ and Volcano)		X 箱根直下 低周波地震	噴火) X 震源域付近 M5以上地震	X 震源域付近 M7.3-M9地震
GNSS (広域の動き)		X X 南,上方 西,下方		X (前兆滑り)
F-net (欠測)		三陸・北海道南部 及び能登・伊豆で欠測	三陸・北海道 南部で欠測	
解釈 (Analysis)		<b>第一段階 (1st stage)</b> 陸側プレートの広域で歪 の蓄積が限界に到達。 陸側プレートは弾性を失 い広域で動きを示した。	<b>第二段階 (2nd stage)</b> 陸側プレートと太平洋プ レートの境界に部分的な 破壊箇所が生まれた。	<b>第三段階 (3rd stage)</b> 部分的な破壊箇所が広 域の破壊 (本震) に発展 した。

図1 . 2011年東北地方太平洋沖地震発生までの3段階の過程

Fig1. 3-stage process before the 2011 Tohoku earthquake