

摩擦構成則と余震活動を用いた本震の滑り分布推定：マグニチュードの情報を用いたベイズモデル
Inference of a slip distribution from aftershock data and friction law: a Bayesian model with a prior of magnitude

岩田 貴樹^{1*}
IWATA, Takaki^{1*}

¹ 常磐大学
¹Tokiwa University

An statistical method to estimate a fault slip distribution of a mainshock with the spatial distribution of its aftershocks and rate- and state-dependent friction law [Dieterich, 1994] has been suggested [Iwata, 2008]. In this method, the fault plane of a mainshock is divided into subfaults, and then the amplitudes of slip in each of the subfaults are optimized to fit the real spatial distribution of the aftershock activity with the distribution expected from the rate- and state-friction law. Because we optimize a large number of parameters simultaneously in this approach, a roughness penalty is imposed to stabilize the optimization; for this purpose, a Bayesian model with a smoothness prior for the spatial slip distribution is constructed and the estimation is carried out.

One of the problems in this method is how to determine the strength of the roughness penalty objectively. In many cases of seismological/geophysical studies, the strength is determined by the principle of the minimization of Akaike's Bayesian Information Criterion [ABIC; Akaike, 1980] and ABIC is computed through the Laplace approximation [Tierney and Kadane, 1986]. However, because of some technical reasons originated from the formula of the friction law, the Laplace approximation is not applicable to this method and the computation of the value of ABIC is impractical.

This study proposes that the information on the magnitude of a mainshock is incorporated in the Bayesian model. This is because it has been empirically found that the amplitudes of the estimated slip in the subfaults or the corresponding magnitude to the estimated slip distribution much depends on the strength of the roughness penalty; if we impose a constraint on the magnitude, then the appropriate strength could be chosen objectively. To implement this idea, a prior distribution of the magnitude of a mainshock is constructed. It is supposed to be a normal distribution of which mean is retrieved from the Global CMT catalogue and standard deviation is given from Kagan [2010]. Then, the posterior distributions of the strength and the spatial slip distribution are computed simultaneously through the Markov chain Monte Carlo method. This framework provides the practical computational method to estimate the spatial slip distribution of a mainshock inferred from its aftershock data.

References:

- Akaike, in Bayesian Statistics (eds. Bernardo et al.), pp.143-166, 1980.
- Dieterich, J. Geophys. Res., 99, 2601-2618, 1994.
- Iwata, 2008 JPGU Meeting, S142-009, 2008.
- Kagan, Tectonophys., 490, 103-114, 2010.
- Tierney and Kadane, J. Am. Stat. Assoc., 81, 82-86, 1986.

キーワード: 滑り分布, 余震, ベイズ推定, 事前分布, マルコフ連鎖モンテカルロ法

Keywords: slip distribution, aftershocks, Bayesian estimation, prior distribution, Markov chain Monte Carlo method

2011年東北地方太平洋沖地震後の地球潮汐による地震トリガー作用 Tidal triggering of earthquakes after the 2011 Tohoku earthquake

田中 佐千子^{1*}
TANAKA, Sachiko^{1*}

¹ 防災科研
¹ NIED

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.1) では、破壊開始点近傍の震源域北側の領域において、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)。本研究では、太平洋沖地震の震源域を含む、東日本の太平洋沿岸域に注目し、太平洋沖地震発生後の約4年間における地球潮汐と地震発生との関係を調査した。

2. データ・解析方法

用いた地震データは、房総沖から十勝沖にかけての太平洋沿岸域における、Mw 5.0以上、深さ70 km以浅のグローバルCMT解である (1976年から2014年まで、1521個、2014年11~12月は暫定解)。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。応力成分は断層面上の剪断応力成分に着目した。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

太平洋沖地震発生後の約4年間について、p 値の空間分布を調べた結果、破壊開始点近傍の震源域北側の領域では、p 値は30%以上の高い値をとり、本震発生直前に見られた地球潮汐と地震発生との相関は、本震の発生に伴い消滅していたことが確認できる。一方、さらに北側の岩手沖では、p 値の小さい領域が存在し、特に海岸線近傍で顕著である。この領域は、余効すべりの大きい領域に対応し (Ozawa et al., 2012)、関連性が示唆される。最も小さい p 値 (2.8%) が得られた200 km四方の領域に注目し、太平洋沖地震の発生前に遡り、p 値の時間変化を調べた結果、1976年以降、本震発生前までの約35年間にわたり、p 値は40%以上の高い値をとり、地球潮汐と地震発生は無相関の状態が継続していたことが確認された。また、太平洋沖地震後の期間についても p 値の時間変化を調べた結果、p 値は太平洋沖地震の発生直後が最も小さく (1.4%)、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。余効すべりの変動も本震直後に特に大きく、次第に小さくなっていることが報告されている (Ozawa et al., 2012)。余効すべりの加速に伴い、地球潮汐の影響が顕著に現れた可能性が示唆される。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 地球潮汐, 地震トリガー作用, 余効すべり

Keywords: the 2011 Tohoku earthquake, Earth tides, earthquake triggering, postseismic afterslip

東北地方太平洋沖地震後の福島-山形県境地域における地震活動と地震波減衰構造 Seismic activity and attenuation structure around the Fukushima and Yamagata Prefec- tures' border after Tohoku earthquake

宮垣 敬一郎¹; 津村 紀子^{1*}
MIYAGKI, Keiichiro¹; TSUMURA, Noriko^{1*}

¹ 千葉大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science Chiba University

本研究対象地域である福島-山形県境地域は東北地方太平洋沖地震後に地震活動が活発化した領域である。本研究では対象地域における地震活動を理解するために震源決定とメカニズム解の決定を行った。また、先行研究では地震波速度構造から対象地域における地震活動に流体が関与していることを示唆されている。地震波の減衰を表す Q 値のうち Q_p/Q_s 値や Q_s 値は流体の存在により大きく変化するため、本研究ではこれらの値を推定し、対象地域のより詳細な物性を推定することを試みた。 Q 値の解析には P 波と S 波の速度振幅スペクトルの比をとって Q_p/Q_s 値を推定する方法を用いた。

解析の結果、震源分布からは、研究対象地域での地震活動は狭い範囲の中で4つのクラスターに分かれて発生していることが分かった。このことは、震源集中域とそれ以外の領域で地下の物理的状態が異なる可能性を示唆している。また、3つのクラスターで地震の発生深度が時間経過に従って浅くなる現象が見られた。決定したメカニズム解からは、逆断層型の地震が卓越し、特に高角な節面をもつ地震が多く分布していることがわかった。流体圧が静岩圧を超えれば、傾斜が 50° を超えるような逆断層運動も可能となるため、このような高角度な逆断層での滑りには流体の存在が関与しているかもしれない。推定した Q_p/Q_s 値、 Q_s 値からは、震源域から水平方向に 20 km 以内の相対的に近い観測点に向かう経路で高 Q_p/Q_s 値、低 Q_s 値を示すことが明らかになった。一方、それより遠い観測点に向かう場合は低 Q_p/Q_s 値を示す波線が多いため、この地震活動が活発化した領域付近に高減衰をもたらす要因があると考えた。そして、同じような経路を通る2つの波線の組み合わせから求めた2つの震源間の Q_p/Q_s 値の空間分布を明らかにするために、震源が集中している領域周辺を11個のブロックに分割し、それぞれのブロックを通る波線のもつ値を平均して、ブロック毎の Q_p/Q_s 値、 Q_s 値とした。その結果、震源集中域を含むブロックで相対的に低い Q_s 値と高 Q_p/Q_s 値を示すことが分かった。他の物理学的データと比較した結果、低 Q_s 領域には流体が存在している可能性が高いと考えた。時間経過に従って地震の発生深度が浅くなる現象も周囲の岩石より密度の低い流体の上部への移動によって、群発的な地震活動が促進されたと考えれば説明できる。 Q_s 値がクラスターを含むブロックで大きく低下することは、流体が震源域に沿って上昇したことを反映していると考えた。総合的に解釈した結果、本研究地域での特徴的な地震発生は流体が関与している可能性が高い。

キーワード: 減衰構造, 地震活動, 群発地震, 震源の移動, 流体

Keywords: attenuation structure, Seismic activity, swarm, hypocenter migration, fluid

東北地方太平洋プレート沈み込み帯におけるプレート間地震の発生割合 Changes in frequency ratio of inter-plate vs intra-plate earthquakes in the source area of the 2011 Tohoku earthquake

井元 政二郎^{1*}; 森川 信之¹; 藤原 広行¹
IMOTO, Masajiro^{1*}; MORIKAWA, Nobuyuki¹; FUJIWARA, Hiroyuki¹

¹ 防災科学技術研究所
¹ NIED

全国地震動予測地図の作成では、海洋プレートにおける震源断層を予め特定しにくい地震を、プレート間地震とプレート内地震とに区別し、それぞれの寄与を評価している。このため、沈み込みにかかわる地震活動度を予め定めた比率を用いてプレート間地震およびプレート内地震の活動度として評価する。現行の比率は、地震の深さ分布に基づいて見積もられたものであり、各地震の発震機構の情報は反映されていない。

本報告では、発震機構解によるプレート間地震の判別を上記比率に反映させることを検討する。ここでは、太平洋プレートのプレート境界面上 5km より深部に発生した地震を太平洋プレートの沈み込みに関する地震と見なし、観測された発震機構解を期待されるプレート間地震の解と比べることによりプレート間地震を判別し、その結果に基づきプレート間地震割合を見積もる。判別には、観測された発震機構解と期待される発震機構解との隔たりを表す最小回転角 (Kagan, 1991, GJI: Kagan 角) を用いることとする。対象区域における Kagan 角の小さい地震をプレート間地震と見なすことにより、プレート間地震の割合を求めることができる。

期間 1997 年～2014 年、北緯 36 度～41 度、東経 139 度～144 度に発生した M4.0 以上の地震の発震機構解 (3663 個) を使用した。防災科学技術研究所 J-SHIS によるプレート形状と、東北地方太平洋沖地震 (2011.3.11 M9.0) の発震機構解から得たプレート相対運動方向を用いて、各地点の発震機構解を算出した。

プレート境界面上方 5km～下方 20km の範囲に発生した地震をプレート間地震の候補とし、その中からプレート間地震の発震機構解と調和する地震をプレート間地震として計数する。東西南北 0.1 度刻みの区域毎に得られたプレート間地震の割合から、ベイズ型赤池情報量基準 (Akaike Bayesian Information Criterion, ABIC) を指標とした平滑化により調査領域全域でのプレート間地震割合を算出した。調査対象域では東北地方太平洋沖地震 (2011 年 3 月 11 日 M9.0) の余震活動が活発であり、この地震を境に二つの期間に分けそれぞれの期間に対して、プレート間地震割合を求めた。

おもな結果は次のとおりである。三陸沖中部から福島県沖の地域では、東北地方太平洋沖地震後は地震前に比べプレート間地震の割合が小さい。三陸沖北部では、プレート間地震の割合が大きい。ここで得られたプレート間地震の割合は、現行の値に比べ小さい。

キーワード: 地震動予測地図, 東北地方, プレート間地震, Kagan 角, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: seismic hazard maps for Japan, Tohoku, interplate earthquake, Kagan angle, 2011 Tohoku earthquake

月山・大井沢（山形県）の群発地震の震源メカニズム Focal mechanism of earthquake swarms in Gassan and Ooisawa, Yamagata Prefecture

大嶋 篤¹; 岩田 尚能¹; 長谷見 晶子^{1*}
OSHIMA, Atsushi¹; IWATA, Naoyoshi¹; HASEMI, Akiko^{1*}

¹ 山形大学理学部
¹ Faculty of Science, Yamagata University

2011年東北地方太平洋沖地震の6日後から、月山付近（山頂の南西2.5km付近）の1-8kmの深さで群発地震活動が発生した。太平洋沖地震前は活動が非常に低かった地域である。この活動域の約15km南の大井沢付近は地震活動が活発な領域で、最近では2003年、2006年にそれぞれ10-15km、5-10kmの深さで群発地震が起きているが、誘発地震活動は起きていない。月山、大井沢はともに棚倉構造線の北方延長とみられる構造線付近に位置している。また、大井沢から月山にかけての下部地殻には地震波低速度域が広がっている（Okada et al., 2015）。地下構造に共通点がある領域で太平洋沖地震の後の活動に違いがある原因を探ることを目的に、月山と大井沢の群発地震の震源メカニズムを調べた。対象とした地震は群発地震域とその周辺で起きたマグニチュード2.0以上で深さが30kmより浅い地震である。メカニズム解はP波初動の押し引きから求めた。2002年6月以降の地震はHi-netの波形をダウンロードし、winにより初動方向を読みとった。それ以前の地震については地震月報に記載されている初動方向を用いた。

月山の活動については33個のメカニズム解が得られた。断層型ごとの個数は横ずれ断層7、横ずれを含む逆断層20、逆断層2、横ずれを含む正断層4であった。Okada et al.(2011)は4月4日のM2.2の横ずれ型の地震について断層面を推定し、この面に対して太平洋沖地震により Δ CFFが0.29MPa増加したことを指摘している。今回求めたメカニズム解はこの地震と類似する横ずれ成分を含むものが多いので、月山付近の活動は Δ CFFの増加が寄与していると思われる。また、活動が太平洋沖地震の6日後から始まったこと、下部地殻に低速度域が存在することを考えると、震源域に流体が流入したことによる断層強度の低下も考えられる。

大井沢の2003年、2006年の群発域は月山の活動域からそれぞれ20km、13kmの距離にある。2003年の活動について決定したメカニズム解は14個で、すべてP軸が西北西-東南東方向の逆断層、2006年の活動は12個のメカニズム解を決定し、すべてP軸がほぼ東西方向を向く逆断層だった。2006年の活動域の下部地殻では低周波地震が起きているが、地殻上部への流体の移動はなかったのかもしれない。また、誘発活動がなかった原因として大井沢付近は太平洋地震によって発生が抑制される逆断層型の断層が卓越している可能性も考えられる。

文献

Okada et al.(2011) EPS,63,749-754
Okada et al.(2015) Geofluids,15, 293?309

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 誘発地震, 震源メカニズム, 月山, 大井沢
Keywords: 2011 Tohoku-Oki earthquake, induced seismicity, focal mechanism, Gassan, Oisawa

日本海溝北部-千島海溝で発生した $M > 7.5$ の地震の顕著な前震活動 Active foreshocks of $M > 7.5$ earthquakes in the northern Japan to Kuril Trenches

原田 智也^{1*}; 横井 佐代子¹; 佐竹 健治¹
HARADA, Tomoya^{1*}; YOKOI, Sayoko¹; SATAKE, Kenji¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo

日本海溝北部から千島海溝にかけて発生する大地震・巨大地震には顕著な前震活動を伴うものがある。本研究では、この地域で発生した $M > 7.5$ の地震に対して、顕著な前震活動を伴ったかどうかを区別するために、地震の余震域と同程度の大きさの領域における本震前1年間の地震活動の推移をM-T図や地震の積算回数によって調べた。数個程度の前震を伴った地震があったとしても、定常的な地震活動と前震との区別が難しいので、本研究では、数10個以上の多数の前震を伴う地震を対象とした。

顕著な前震活動を伴った $M > 7.5$ の地震は、2006年シムシル島沖のプレート間地震 ($M_w 8.3$) とそれに続く2007年のアウターライズ地震 ($M_w 8.1$)、1963年エトロフ沖地震 ($M_w 8.6$)、1991年ウルップ島沖の地震 ($M_w 7.6$)、1995年択捉島沖の地震 ($M_w 7.9$)、1978年択捉島沖の地震 ($M_w 7.8$)、1969年北海道東方沖地震 ($M_w 8.2$)、1989年岩手沖の地震 ($M_w 7.4$) である。逆に、1973年根室半島沖地震 ($M_w 7.8$)、1952年と2003年の十勝沖地震 ($M_w 8.1$, $M_w 8.1$)、1968年十勝沖地震 ($M_w 8.3$) と1994年三陸はるか沖地震 ($M_w 7.8$) といった $M > 7.5$ のプレート間地震や、1958年エトロフ沖地震 ($M_w 8.4$)、1978年国後水道地震 ($M_w 7.8$)、1993年釧路沖地震 ($M_w 7.7$)、1994年北海島東方沖地震 ($M_w 8.3$) については、前震が数個あるか、あるいは全く無かった。

次に、顕著な前震活動に対して、前震の活動度の時間推移を調べるためのETASモデル (Epidemic Type Aftershock Sequence; Ogata, 1988, 1992) による解析、前震活動の空間分布の時間推移を調べるための前震・本震の震源分布の比較、前震域と本震の破壊域との関係を調べるための前震の震源分布と本震のすべり量分布との比較を行った。

以上の解析の結果、現在のところ、以下のことが分かっている。顕著な前震活動は、マグニチュードの大きな前震とその余震によって構成され、本震直前における活発化や静穏化などは見られなかった。また、2007年シムシル島沖のアウターライズ地震に先行した前震は、2006年のアウターライズ域での余震活動で説明でき、本震直前の活発化や静穏化は見られなかった。前震活動は、時間と共に一定の方向へ広がる傾向にあった。しかしながら、拡大の方向は地震により様々であり、本震直前に拡大速度が顕著に変化することもなかった。前震活動域は本震のすべりが大きかった領域とは棲み分けているようである。2007年シムシル島沖のアウターライズ地震に関しても、地震時のすべりが大きかった場所では、前震活動 (2006年のプレート間巨大地震の余震活動) の活動度は低かった。今後、前震域の拡大についてさらに検討するために、 Δ CFFによる解析なども行う予定である。

以上の解析において、本震と前震は、改良連携震源決定法 (MJHD法) と地震間の走時差を用いたグリッドサーチによる震源決定法との併用 (Hurukawa and Harada, 2015) によって高精度に相対震源再決定された。また、本震のすべり分布は、Kikuchi and Kanamori (2003) による遠地実体波インバージョンによって推定された。

キーワード: 日本海溝北部-千島海溝, 顕著な前震活動, ETASモデル, 改良連携震源決定法, 走時差グリッドサーチ震源決定, 遠地実体波インバージョン

Keywords: northern Japan Trench to Kuril Trench, Remarkable foreshock activity, ETAS model, Modified Joint Hypocenter Determination method, time-difference grid search method, teleseismic body-wave inversion

1968年十勝沖地震(Mw8.2)の震源域周辺の先行地震活動 Precursory seismic activity surrounding the source region of the 1968 Tokachi-oki earthquake

平塚 晋也^{1*}

HIRATSUKA, Shinya^{1*}

¹ 北大・理・地震火山研究観測センター

¹ ISV, Faculty of Science, Hokkaido Univ.

The 1968 Tokachi-oki earthquake (Mw8.2) occurred off the Pacific coast of Aomori prefecture and ruptured northern and southern asperities. 26 years later, the 1994 Sanriku-haruka-oki earthquake (Mw7.7) occurred near the epicenter of 1968 event and ruptured only its southern asperity [Nagai et al. (2001)]. According to Sato et al. (1996), the rupture process of the 1994 event was very similar to the earlier stage rupture process of the 1968 event. The question arises, "Why did the 1994 event not rupture the northern asperity of 1968 event"? In order to address this question, we investigated the long-term seismicity pattern with reference to the slip distribution of the 1968 Tokachi-oki (Mw8.2) and 1994 Sanriku-haruka-oki (Mw7.7) earthquakes. We used the earthquake catalogue compiled by the Japan Meteorological Agency (JMA) for the past 90 years since 1923.

There are two major clusters that are considered to be important for characterizing the spatio-temporal seismicity pattern in and around the source region of the 1968 event. The one is a cluster of events located off the Pacific coast of Iwate prefecture between the Japan Trench and the southern asperity of the 1968 event. We call this cluster the "east-west trending seismic activity", because it is distributed along the east-west direction. The other is a cluster of events located off the Pacific coast of Iwate prefecture between the 10 and 20km depth contours of the upper interface of the subducted Pacific plate. We call this cluster the "southern seismic activity", because it is located southern side of the southern asperity of the 1968 event. The epicentral area of the southern seismic activity include the rupture zone of the 1989 and 1992 Sanriku-oki earthquakes, which are regarded as the ultra-slow earthquake by Kawasaki et al. (1995, 1998, 2001).

The 1931 Iwate-oki earthquake (M7.2) occurred off the Pacific coast of Sanriku and ruptured the southern asperity of the 1968 event [Yamanaka and Kikuchi (2004)]. The 1931 event was preceded three years earlier by a M7.0 event that occurred about 30km to the west. 4 years later, a M6.9 earthquake occurred very close to the epicenter of the M7.0 event in 1935. The 1933 activity in the zone of east-west trending seismic activity consists of nine large earthquakes (M>6.0) with the largest of M7.1. Three of the events initially occurred in the eastern part of the zone, then expanded into the west. The 1933 Sanriku-oki earthquake (M8.1) occurred in the outer-rise region off the Pacific coast of Iwate prefecture. The 1941 activity in the zone of southern seismic activity consists of four large earthquakes (M>6.0). Two of the events occurred in the eastern part of the zone, then the other two events occurred in the western part of the zone. A strong swarm activity (including eight M>6.0 earthquakes) occurred in the zone in 1952. The 1960 Iwate-oki earthquake (M7.2) occurred off the Pacific coast of Sanriku and ruptured the southern periphery of the southern asperity of the 1968 event. The rupture propagated to the deep direction from the hypocenter [Yamanaka and Kikuchi (2004)]. A 1945 event (M7.1) occurred off the Pacific coast of Aomori prefecture and ruptured the northern asperity of the 1968 event. The 1945 event was preceded two years earlier by a M7.1 event that occurred about 40km to the east. On March 22, 1944, M6.1 event occurred in the region sandwiched by the northern and southern asperities of the 1968 event. This event may contribute to weaken the strength of this region and allowed to propagate the rupture from the southern to northern asperities when main shock of the 1968 event occurred.

References:

Kawasaki et al., 1995, JPE, 43, 105-116.

Kawasaki et al., 1998, zisin 2, 50, 293-307.

Kawasaki et al., 2001, Tectonophysics, 330, 267-283.

Nagai et al., 2001, zisin 2, 52, 267-289.

Sato et al., 1996, GRL, 23, 33-36.

Yamanaka Y. and M. Kikuchi, 2004, JGR, 109,B07307,doi:10.1029/2003JB002683.

キーワード: 1968年十勝沖地震, 1994年三陸はるか沖地震, 1933年三陸沖地震, 先行地震活動, アスペリティー

Keywords: 1968 Tokachi-oki earthquake, 1994 Sanriku-haruka-oki earthquake, 1933 Sanriku-oki earthquake, precursory seismic activity, asperity

関東地方下における太平洋プレート境界付近の地震活動 Seismic activity around the upper surface of the Pacific slab beneath Kanto

疋田 雅大^{1*}; 中島 淳一¹
HIKITA, Masahiro^{1*}; NAKAJIMA, Junichi¹

¹ 東北大学
¹Tohoku University

関東地方では、北米プレートの下にフィリピン海プレートと太平洋プレートが沈み込み、フィリピン海プレートおよび太平洋プレート上面ではプレート境界地震が数多く発生している (e.g., Uchida et al., 2007). その中でも、東京湾北部から茨城県南部にかけての深さ 60km から 90km で発生する地震活動が特に活発であり、南北方向に伸びる地震活動の帯が形成されている。この領域において気象庁の一元化震源分布をみると、プレート境界付近に厚みを持った地震クラスターが複数存在することがわかる。そこで本研究では、これらのクラスターの発生原因を解明することを目的に、Double-Difference法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000) を用いて相対震源決定を行い、プレート境界周辺の地震活動の空間的特徴を考察した。

震源再決定の結果、地震クラスターの厚さは 5km から 10km 程度であること、クラスターの深い側に小繰り返し地震と低角逆断層型地震が分布すること、クラスターの浅い側に逆断層型以外の地震が多く存在することなどが明らかになった。さらに、一部の領域では、プレート境界面と直交する方向に震源が並ぶクラスターも存在する。今後は波形相関から計算した走時差を用いた相対震源決定を行い、プレート境界付近のクラスターの微細構造を明らかにしていく予定である。

キーワード: 小繰り返し地震, 関東, 地震活動
Keywords: repeating earthquakes, Kanto, activity of earthquakes

Matched Filter Methodによる群発地震解析の試み～飛騨山脈の群発地震活動の例～ Matched Filter Method implemented as an automatic hypocenter location system

大見 士朗^{1*}
OHMI, Shiro^{1*}

¹ 京都大学防災研究所

¹ Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

§ はじめに:

岐阜県と長野県の県境に位置する飛騨山脈では、従来より微小地震活動が活発であり、しばしば群発地震活動が発生する。従来は、地震活動の特徴の報告の際には、検測者の個別チェックを経たカタログを使用するのが常套手段であったが、昨今の観測点数の増加および熟達した検測者の減少により、特に速報的な報告を要する際にはそれが次第に困難となりつつある。そのため、本報告では群発地震の自動処理手法として Matched Filter Method (MFM) を試験的に実装し、飛騨山脈南部の群発地震活動を対象としてこの手法の有用性を検証する。

§ MFMによる自動処理の概要:

始めに、MFMで使用するためのテンプレートとなる地震波形を用意する。ここでは、飛騨山脈南部近傍の岐阜側及び長野側の観測点10点程度を選び、3成分波形データから適宜テンプレート地震波形を作成した。テンプレート地震は手動検測により震源決定を行い、P波・S波の到着時刻、最大振幅等の情報を波形とともに利用する。別途運用中の旧来の自動処理システムの結果を参照しながら、MFMで検知できていない地震活動が発生した際にはその地震活動に適用できる新規のテンプレートを適宜手動で作成する。

1時間ごとの準実時間処理の最初に、テンプレート地震の波形と、連続収録された地動波形の相関係数の時系列CC(t)を計算することにより、イベントの検出を行う。CC(t)の中で、相関係数がある閾値min_cceを越えるものについて、同様の波形が出現したと考える。この操作をすべての観測点・成分の波形に対して行った後、すべてのCC(t)を合算する。この合算値の標準偏差を求め、合算値を標準偏差と総成分数で割った時系列データをNetwork Correlation Coefficient (NCC)と定義する。NCCが一定の閾値を超えると、イベントが発生したと判断する。ここでは、min_cceを0.4とし、また、NCCが8.0を超えるとイベントが発生したと判断した。もしも、テンプレート地震と検出されたイベントが全く同じ位置で発生しているのであれば、NCCが最大値を取る時刻と、各CC(t)が最大値を取る時刻は一致するはずであるが、一般にはそうはならない。これらの時刻の差を、検出されたイベントの各観測点での走時の補正值として使用することで検出されたイベントの走時データを構築する。また、CC(t)計算時に、テンプレート地震と連続波形データの振幅比の時系列も保存しており、これを用いて検出されたイベントの最大振幅の近似値を算出し、マグニチュードの算出に使用する。これらの情報を用いて、過去1時間の連続データ中に検出されたイベントの震源決定を個別に行う。

§ 結果と考察:

最初に、MFMによる自動震源決定結果と手動の再検測結果を2013年4月から10月に飛騨山脈南部で現地有感を記録した23個の地震を用いて比較した。その結果、これら23個の地震の再検測による震源移動量は、震央については最大2.8km平均0.6km、深さについては最大0.8km平均0.36kmであった。また、マグニチュードについては両者の差が0.4になったもの1個、同0.3が2個のほかは、すべて差が0.2以下の値に収まった。さらに震央位置の変化が小さく高精度に震源が決定できたのは、使用した10点程度の観測点のうち、CC(t)がmin_cceを超える観測点数が60%程度以上になる場合であることも判明した。

次に、飛騨山脈南部穂高岳近傍の群発地震活動が活発であった2013年10月8日20:00から15分間のデータを用いて、同地域のMFMおよび従来のイベント検出手法であるSTA/LTA法を、公式カタログである気象庁カタログと比較したところ、気象庁カタログに記載されたイベントは18個であったのに対し、STA/LTA法による検出数は11個、MFMによる検出数は68個であった。試験期間とした2013年4月から2013年10月末までのデータでは、MFMによる検出数は約3000個、そのうち比較的高精度に震源を決定できた地震は約800個であり、同期間の気象庁カタログに記載された地震は約550個であった。

このように、MFMによる自動震源決定結果を速報値として使用する価値は十分に高いものと考えられる。速報として本手法を用いる場合の欠点としては、テンプレート地震を設定していない地域で発生したイベントには、原理上対処できないという点があげられる。そのような地域にあらたに地震活動が発生した場合には、手動で新たなテンプレート地震を導入する手間を要する。しかしながらその点を差し引いても、MFMは今回のような比較的狭い地域に地震活動が局在化するようなケースでは、有効に機能することが期待される。

Japan Geoscience Union Meeting 2015

(May 24th - 28th at Makuhari, Chiba, Japan)

©2015. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS32-P09

会場:コンベンションホール

時間:5月26日 18:15-19:30

キーワード: 群発地震, 自動処理, 飛騨山脈, Matched Filter Method

Keywords: Swarm activity, Hida Mountain range, Matched Filter Method

1944年東南海地震の余震震源再決定：本震断層面推定と地震活動の特徴 Relocation of the 1944 Tonankai earthquake and its aftershocks: The fault plane and characteristics of the seismicity

古川 信雄^{1*}; 原田 智也²
HURUKAWA, Nobuo^{1*}; HARADA, Tomoya²

¹ 建築研究所国際地震工学センター, ² 東京大学地震研究所
¹Building Research Institute, ²Earthquake Research Institute, University of Tokyo

1. はじめに

フィリピン海プレートの沈み込みにより南海トラフで発生した1944年東南海地震(M7.9)については、地震波・地殻変動・津波データ等の解析から多くの断層モデルが提唱されている。

岩田・浜田(1986)は気象庁のデータを用いて、本震と余震の震源を再決定した。主な結果は以下である。1)本震は断層面西端の深部(35-40km)で発生。2)志摩半島沖の余震の密集。3)潮岬沖の余震活動(上部地殻か?)。4)天竜川河口付近の余震活動(上部地殻か?)。5)上記震源分布と津波波源域に最もよく調和しているモデルは、地殻変動を説明するために考えられたInouchi and Sato(1975)モデルである。

岩田・浜田(1986)の余震分布に関しては、震央については詳しい議論がなされているが、深さ精度が悪いため、深さの議論はあまり深くなされていない。近い将来発生が予測されている、次の東南海地震直後の余震・誘発地震活動を予測するためには、1944年東南海地震の余震について深さも含めて震源を精度よく決定する必要がある。そこで、本研究では、1944年東南海地震について、本震と余震の震源を、改良連携震源決定法(Hurukawa, 1995)を用いて再決定した。

2. データ

震源域が海域であるために、気象庁(JMA)データだけでは、深さが精度よく求まらない。そこで、JMAに国際地震サマリー(ISS)が報告している国外の観測点データを統合し、P波とS波の両者の初動走時を用いた。

本震発生(世界標準時で1944年12月7日)から1945年1月31日までに、北緯32.5°-35.5°、東経135.0°-138.5°の範囲に発生した全ての深さの地震を解析した。JMAが報告している地震数は632であるが、この内、読取値が20個以上の382地震を解析した。なお、同一観測点でP波とS波の読取値がある場合は、あたかも異なる独立な観測点とみなして取り扱った。JMAについては、最終的に走時残差(O-C)が8秒未満の読取値が50個以上の観測点を、ISSについては同じく(O-C)が8秒未満の読取値が4個以上の観測点を用いて震源決定した。用いた走時はIASP91である。その結果、75観測点(JMA-Pが30点、JMA-Sが24点、ISS-Pが20点、ISS-Sが1点)を用いて234の震源を決定した。なお、7割以上の地震が1945年三河地震(M6.8)の余震である。

3. 結果

再決定震源分布の特徴はおおむね岩田・浜田(1986)に一致する。震源精度、特に深さ精度が向上したために、更に以下のことが明らかになった。

- 1) 本震の深さは30km程度である。
- 2) 余震分布からプレート境界が断層面であることが確かめられた。例えば、本震と24時間以内の余震で本震断層面上に発生したと思われる5余震から最小二乗法で求めた最適平面は、はN30°W方向に18°傾斜であり、多くの断層モデルと整合的である。
- 3) 志摩半島沖では、本震断層面上の余震と地殻上部の誘発地震が発生している。
- 4) 潮岬沖から紀伊半島東南海岸付近の余震は地殻上部に発生した誘発地震と思われる。
- 5) 天竜川河口付近の余震活動は断層面東端に位置するプレート境界地震と地殻上部に発生した誘発地震の両者があると思われる

(参考文献)

- Hurukawa, N., 1995, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 3159-3162.
岩田孝仁、浜田信生、1986、*地震第2輯*、39、621-634。
Inouchi, N. and Sato, H., 1975, *Bull. Geogr. Sur. Inst.*, 21, 10-18.

紀伊半島南方沖の南海トラフの南側でのフィリピン海プレート内の微小地震活動の南限について

Southern Extent of Seismicity in the Philippine Sea plate south of the Nankai Trough

中田 健嗣^{1*}; 小林 昭夫¹; 平田 賢治²; 山崎 明³; 対馬 弘晃¹; 馬場 久紀⁴; 牛田 堯⁴; 一ノ瀬 里美⁴;
石原 昂典⁴; 稲村 嘉津也⁴; 蓮澤 豪⁴; 勝間田 明男¹; 前田 憲二¹
NAKATA, Kenji^{1*}; KOBAYASHI, Akio¹; HIRATA, Kenji²; YAMAZAKI, Akira³; TSUSHIMA, Hiroaki¹;
BABA, Hisatoshi⁴; USHIDA, Takashi⁴; ICHINOSE, Satomi⁴; ISHIHARA, Takanori⁴; INAMURA, Kazuya⁴;
HASUZAWA, Tsuyoshi⁴; KATSUMATA, Akio¹; MAEDA, Kenji¹

¹ 気象庁気象研究所, ² 防災科学技術研究所, ³ 気象庁地磁気観測所, ⁴ 東海大学

¹Meteorological Research Institute, JMA, ²National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ³Kakioka Magnetic Observatory, JMA, ⁴Tokai University

気象研究所では、紀伊半島南方沖において自己浮上式海底地震計 (OBS) による海底地震観測を行っている。2005 年から 4 年間の観測では南海トラフ軸周辺で深さ 10km から 25km の範囲で微小地震活動が起きていること確認した (山崎ほか, 2011, 気象研技術報告)。平田ほか (2012 及び 2013, 連合大会, 2012, 地震学会) は、紀伊半島沖 (潮岬沖) のトラフ軸の南側から南へ約 90km に至る海域で 2010 年に観測を行い、回収した OBS22 台で構成される観測網から、M1 以下の極微小地震が深さ 10km 付近に集中して発生していることを明らかにし、これは、Obana et al.(2005, JGR) によるフィリピン海プレート内部の地震活動の分類において、海洋性地殻内部で発生しているものが続いていると考察した。

これらの極微小地震は、さらに南側までどの程度続いているのであろうか。これを調べるため、2013 年及び 2014 年の観測では、2010 年よりもさらに南側の、北緯 31.5~32 度付近の海域に OBS を等間隔に投入して、観測網を構成した。2013 年、2014 年とも、10 台の OBS を回収後、投入時と回収時の GPS 時計との時間差から時刻補正を行い、連続波形データからイベントトリガにより、地震イベントの可能性のあるものを抽出し、そのデータを検出して、震源決定 (Hirata and Matsu'ura, 1986) を行った。用いた速度構造は、2010 年観測の解析で平田ほか (2012, 2013) が用いたものと同じ (観測網近傍の構造探査 (Kodaira et al., 2000) の結果から作成された 1 次元速度構造モデル) である。また、海洋堆積層による速度低下分を補正するため、青木ほか (2003, 地震第 2 輯) と同様な方法で、PS 波変換波を検出して P 波との到達時刻差から求まる堆積層の厚さを考慮した補正を実施した。

2013 年及び 2014 年の OBS 観測データの解析により、観測網付近で精度良く求めた震源は、M0.0~0.5 を中心に分布し深さ約 10km で、2010 年と同様の極微小地震が確認された。震源の数は、現在までの解析の結果であるが、2013 年が 36 個、2014 年が 23 個で、両者を合わせても 2010 年の 112 個 (平田ほか, 2013) の約半分である。観測時期が異なるものの、2010 年、2013 年、2014 年のそれぞれの観測網内で、極微小地震は北側ほど活動度が高く南側ほど低調になっている。また、地震活動の南限をみるため、位置の精度が落ちるが観測網の外側に求まった M1~2 程度の震源を確認したところ、観測網の北側と異なり、南側では震源が求まっていない。そのため、フィリピン海プレート内部の M1 以上の地震活動は、2013 年及び 2014 年に観測を実施した東経 135.3 度~136.3 度付近において、北緯 31.6~31.9 度付近の海域が南限であると考えられる。

なお、観測に用いた OBS は速度型 4.5Hz, 3 成分で、設置及び回収は気象庁観測船 (啓風丸及び凌風丸) で実施した。OBS 観測データの期間、台数及び海域は以下のとおりである。

- < 2010 年 > 期間: 2010/6/12~9/14 (約 3 ヶ月間)、台数: 22 台、
海域: 紀伊半島沖 (潮岬沖) (北緯 31.9~32.8 度、東経 135.6~136.2 度の範囲内)
- < 2013 年 > 期間: 2013/7/1~9/30 (約 3 カ月間)、台数: 10 台、
海域: 紀伊半島沖 (2010 年のさらに南) (北緯 31.8~32.3 度、東経 135.8~136.3 度の範囲内)
- < 2014 年 > 期間: 2014/8/7~10/30 (約 3 ヶ月間)、台数: 10 台、
海域: 紀伊半島沖 (2013 年の西側) (北緯 31.6~32.3 度、東経 135.3~135.8 度の範囲内)

キーワード: 地震活動, 微小地震, OBS, 南海トラフ, アウターライズ
Keywords: seismicity, microearthquake, OBS, Nankai trough, outer rise

Imaging an active fault in the eastern Guadalquivir basin (Southern Spain) with high-resolution seismic tomography

Imaging an active fault in the eastern Guadalquivir basin (Southern Spain) with high-resolution seismic tomography

SERRANO, Inmaculada^{1*}; TORCAL, Federico²; MARTIN, Jose benito¹
SERRANO, Inmaculada^{1*}; TORCAL, Federico²; MARTIN, Jose benito¹

¹Andalusian Institute of Geophysics, Granada University, Spain, ²Pablo Olavide University, Seville, Spain

¹Andalusian Institute of Geophysics, Granada University, Spain, ²Pablo Olavide University, Seville, Spain

The Torreperogil seismic series took place in the Guadalquivir Basin (Southern Spain), a large flexural foreland basin with a linear ENE-WSW trending bounded to the north by the Iberian Massif and to the south by the Betic Cordillera and filled from a middle Miocene to Plio-Quaternary sedimentary sequence characterized by a large number of low magnitude (below Mw 3.7 or Md 3.9) and very shallow microearthquakes. We calculated the high resolution seismic velocity, Poisson's ratio, crack density and saturation ratio structures in and around the source areas of the Torreperogil seismic series (October 2012-April 2013).

In the upper layers of the crust, strong low-velocity anomalies are extensively distributed under the central zone, which together with high Poisson's ratio and crack density values may correspond to rocks which are less likely to fracture, perhaps due to the accumulation of tectonic and seismic stress. 93% of the earthquakes occurred at depths of up to 8 km, which could indicate that the base of the seismogenic zone lies at this depth. The seismic series was concentrated in layers of strong structural heterogeneities (in the boundary area between low and high anomalies), which were likely to generate earthquakes due to differential strain accumulation beneath the region. The high velocity areas are also considered to be strong yet brittle parts of the fault zone, which are likely to generate earthquakes (at depths of between 5 km and 9 km). In contrast, low velocity areas are probably less likely to fracture, allowing seismic slippage to take place (from 2 to 4 km depth).

The best estimate of the depth of the main shock (mbLg: 3.9) is 7.6 km, which could tend to nucleate at the base of the seismogenic zone, at the "fault end" on the boundary between a low velocity zone to the east and a high velocity zone to the west, indicating the fault plane which separates both areas laterally. Assuming that this seismic contrast is one of the main Torreperogil faults it could imply that stress has accumulated in an existing fault zone with lateral heterogeneity in velocity.

キーワード: Seismic tomography, Seismicity, Tectonic, Spain, Betic Cordilleras

Keywords: Seismic tomography, Seismicity, Tectonic, Spain, Betic Cordilleras

2013年3月台湾南投地震に先立つ地震活動変化の空間的特徴 Precursory seismicity change of the 2013 Nantou, Taiwan earthquake sequence revealed by ETAS, PI, and Z-value methods

河村 将^{1*}; 陳建志²; 吳逸民³

KAWAMURA, Masashi^{1*}; CHEN, Chien-chih²; WU, Yih-min³

¹ 国立台湾師範大学地球科学系, ² 国立中央大学地球科学系, ³ 国立台湾大学地質科学系

¹Dep. of Earth Sciences, National Taiwan Normal Univ., ²Dep. of Earth Sciences, National Central Univ., Taiwan, ³Dep. of Geosciences, National Taiwan Univ.

2013年3月27日に台湾中部南投県で $M_L 6.2$ の地震(南投地震)が発生した。地震活動時間変化は、地下の応力速度変化を反映したものである。よって、大規模地震発生に先立つ地震活動変化(静穏化・活発化)を統計的に評価することは、地震発生メカニズムを解明する上で重要である。本動機に基づき、南投地震に先立つ台湾内陸部およびその周辺の地震活動変化を評価するため、Epidemic-Type Aftershock-Sequences (ETAS) モデルを台湾中央気象局の地震カタログに適用した。この際、結果の信頼性を高めるために、(1)異なる下限マグニチュードおよび南投地震発生に先立つ異なる期間に対して ETAS モデルを当てはめ、さらに(2) Pattern informatics (PI) 法・ZMAP 法を用いて地震活動変化を評価することにより、得られる地震活動静穏化・活発化空間分布の共通の特徴に注目した。解析の結果を総合すると、地震発生に先立つ約1年間に、震源域の周辺領域で、地震活動静穏化が発生していたことがわかった。このような震源域周辺領域における地震活動静穏化は、1999年台湾集集地震に先立つ地震活動でも見られた(Kawamura and Chen, 2013)ことから、本研究結果が地震発生準備過程を反映したものであることが示唆される。

キーワード: 地震活動静穏化, 南投地震, 応力蓄積, ETAS モデル, パターンインフォマティクス, ZMAP

Keywords: Seismic quiescence, The Nantou earthquake, Stress accumulation, ETAS model, Pattern informatics, ZMAP