

Thu. Oct 14, 2021

ROOM C

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-1

chairperson: Naofumi Aso (Tokyo Institute of Technology), Taku Ueda (University of Tokyo)

9:00 AM - 10:30 AM ROOM C (ROOM C)

[S09-01] **Spatio-temporal clustering of successive earthquakes: analyses of global CMT and F-net catalogs**OThystere Matondo Bantidi¹, Takeshi Nishimura¹
(1.TOHOKU UNIVERSITY)

9:00 AM - 9:15 AM

[S09-02] Long-term probability earthquake forecasts based on the ETAS model

OJiancang ZHUANG¹ (1.The Institute of Statistical Mathematics)

9:15 AM - 9:30 AM

[S09-03] Extracting Diffusional Characteristics in Stationary Clusters without Migration

ONaofumi ASO¹ (1.Tokyo Institute of Technology)

9:30 AM - 9:45 AM

[S09-04] Seasonal variations in crustal seismicity and surface load estimated from GNSS displacement

OTaku Ueda¹, Aitaro Kato¹, Christopher W Johnson², Toshiko Terakawa³ (1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2.Los Alamos National Laboratory, 3.Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

9:45 AM - 10:00 AM

[S09-05] Development of an ETAS model that explicitly incorporates the triggering effect of slow slip events on seismicity

OTomoaki NISHIKAWA¹, Takuya Nishimura¹
(1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

10:00 AM - 10:15 AM

[S09-06] Spatio-temporal relationship between intraplate seismicity and long-term slow slip events along the Nankai Trough

OYuta MITSUI¹, Keiji UEHARA¹, Issei KOSUGI², Koji MATSUO³ (1.Faculty of Science, Shizuoka University, 2.Graduate School of Science, Shizuoka University, 3.Geospatial Information Authority of Japan)

10:15 AM - 10:30 AM

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-2

chairperson: Shinji Toda (Tohoku University), Kota Fukuda (University of Tokyo)

11:00 AM - 12:15 PM ROOM C (ROOM C)

[S09-07] Statistical Evaluation of Occurrence Time of Forthcoming Event Estimated Based on Bayesian Updating for Inter-Event Times in Time-Series of ETAS Model

OHiroki TANAKA¹, Ken Umeno¹ (1.School of Informatics, Kyoto University)

11:00 AM - 11:15 AM

[S09-08] Long-term features of the 2011 Tohoku-oki aftershocks: Central shutdown and surrounding activation

OShinji TODA¹, Ross S Stein² (1.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2.Temblr, Inc.)

11:15 AM - 11:30 AM

[S09-09] Event size distribution of deep low-frequency tremors in the Nankai Trough modelled with a mixture distribution

OTakaki IWATA¹, Yoshihiro Hiramatsu² (1.Prefectural University of Hiroshima, 2.Kanazawa University)

11:30 AM - 11:45 AM

[S09-10] Evaluating the crustal strength based on seismic moment tensor ratios

OSatoshi MATSUMOTO¹, Ayaho Mitsuoka², Yoshihisao Iio³, Shinichi Sakai⁴, Aitaro Kato⁵ (1.Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 2.Graduate School of Science, Kyushu University, 3.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4.The University of Tokyo Interfaculty Initiative in Information Studies Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, 5.Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

11:45 AM - 12:00 PM

[S09-11] Seismic modeling with cellular automata considering competing time constants

OKota FUKUDA¹, Takahiro HATANO², Kimihiro MOCHIZUKI¹ (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Department of Earth and Space Science Osaka University)

12:00 PM - 12:15 PM

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

PM-1

chairperson: Yuki Noda (Kyoto University), Masaru Nakano (JAMSTEC)

1:30 PM - 3:00 PM ROOM C (ROOM C)

[S09-12] Seismic activity around lake of Ryujin-ko

○Shin'ichi SAKAI^{1,2}, Takahiro Akiyama² (1. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The Univ. of Tokyo)

1:30 PM - 1:45 PM

[S09-13] Foreshock activity of a M3.7 earthquake in the western Nagano Prefecture region and the occurrence factor

○Yuki NODA¹, Hiroshi KATAO², Yoshihisa IIO² (1. Kyoto University Graduate School of Science, 2. Kyoto University Disaster Prevention Research Institute)

1:45 PM - 2:00 PM

[S09-14] Spatio-temporal change in seismicity and waveform correlation of an earthquake swarm at Moriyoshi volcano

○Yuta Amezawa¹, Takuto Maeda¹, Masahiro Kosuga¹, Tomoya Takano¹ (1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

2:00 PM - 2:15 PM

[S09-15] Intraplate repeating earthquakes in the Fukushima-Ibaraki border region following the 2011 Tohoku-Oki earthquake and their factors

○Rina IKEDA¹, Keisuke Yoshida¹, Ryo Takahashi³, Yo Fukushima², Toru Matsuzawa¹, Akira Hasegawa¹ (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. Japan Meteorological Agency)

2:15 PM - 2:30 PM

[S09-16] DAS observations of earthquakes and airgun signals around Kikai caldera

○Masaru NAKANO¹, Hiroko Sugioka², Eiichiro Araki¹, Tomoya Nakajima¹, Aki Ito¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Takashi Yokobiki¹, Takashi Tonegawa¹, Yojiro Yamamoto¹, Toshinori Kimura¹, Gou Fujie¹, Satoru Tanaka¹ (1. IMG, JAMSTEC, 2. KOBEC, Kobe University)

2:30 PM - 2:45 PM

[S09-17] Seismic activity (D>10km) around the summit of Mt. Ontake (1)

○Yoshiko YAMANAKA¹ (1. Univ. of Nagoya)

2:45 PM - 3:00 PM

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-1

chairperson: Naofumi Aso (Tokyo Institute of Technology), Taku Ueda (University of Tokyo)

Thu. Oct 14, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM C (ROOM C)

[S09-01] Spatio-temporal clustering of successive earthquakes: analyses of global CMT and F-net catalogs

○Thystere Matondo Bantidi¹, Takeshi Nishimura¹ (1.TOHOKU UNIVERSITY)

9:00 AM - 9:15 AM

[S09-02] Long-term probability earthquake forecasts based on the ETAS model

○Jiancang ZHUANG¹ (1.The Institute of Statistical Mathematics)

9:15 AM - 9:30 AM

[S09-03] Extracting Diffusional Characteristics in Stationary Clusters without Migration

○Naofumi ASO¹ (1.Tokyo Institute of Technology)

9:30 AM - 9:45 AM

[S09-04] Seasonal variations in crustal seismicity and surface load estimated from GNSS displacement

○Taku Ueda¹, Aitaro Kato¹, Christopher W Johnson², Toshiko Terakawa³ (1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2.Los Alamos National Laboratory, 3.Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

9:45 AM - 10:00 AM

[S09-05] Development of an ETAS model that explicitly incorporates the triggering effect of slow slip events on seismicity

○Tomoaki NISHIKAWA¹, Takuya Nishimura¹ (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

10:00 AM - 10:15 AM

[S09-06] Spatio-temporal relationship between intraplate seismicity and long-term slow slip events along the Nankai Trough

○Yuta MITSUI¹, Keiji UEHARA¹, Issei KOSUGI², Koji MATSUO³ (1.Faculty of Science, Shizuoka University, 2.Graduate School of Science, Shizuoka University, 3.Geospatial Information Authority of Japan)

10:15 AM - 10:30 AM

Spatio-temporal clustering of successive earthquakes: analyses of global CMT and F-net catalogs

*Thystere Matondo Bantidi¹, Takeshi Nishimura¹

1. TOHOKU UNIVERSITY

The present study systematically examined the characteristics of successive earthquakes that are not so-called aftershocks but closely occur in space and time after the occurrence of a small, moderate or large earthquake in order to understand the triggering process. We use the Global Centroid Moment Tensor catalog for the period from 1976 to 2016. Shallow earthquakes with a moment magnitude, M_w , of larger than or equal to 5 are analyzed. We also use F-net catalog provided by NIED, Japan, for the period from 2001 to 2010 and analyze the earthquakes occurring around Japan islands with $M_w < 5.5$. We separately analyze these two data set to clarify the characteristics of successive earthquake occurrence for a wide magnitude range of $M_w \geq 3.5$. We search the earthquakes that occur within a horizontal distance (D) and a lapse time (T_a) from a source event, and group them as a cluster. We then count the number of the clusters, which represents the successive earthquakes, for different D and T_a . To examine whether or not these successive earthquakes occur randomly, we compare the results with simulations in which earthquakes are set to randomly occur in time (but at the locations same with the estimated centroid). The results show that the number of clusters for the simulation for a given T_a and a magnitude range rapidly increase with D and merge with those for real data at a short distance called triggering distance. The triggering distance increases with increasing the magnitude of source event and decreases as the lapse time increases. This implies that the seismic activity turns to become the normal condition in which the occurrence time intervals of large earthquakes obey a Poisson distribution. From the analysis of both global CMT and F-net catalogs, we found that the triggering distance increases with being almost proportional to about $1/5$ to $1/4$ of the seismic moment of source earthquake. Such moment dependency is reconstructed from the simulated data that follow ETAS model. We further derive empirical scaling relations between the seismic moment and triggering distance from the equations in ETAS model, and the observed exponent of $1/5$ to $1/4$ are well predicted from the estimated ETAS parameters reported at various regions around the world. These consistencies suggest that we may evaluate the triggering probability of earthquakes by ETAS model.

Key words: Spatio-temporal clustering, successive occurrence, triggering distance, ETAS model.

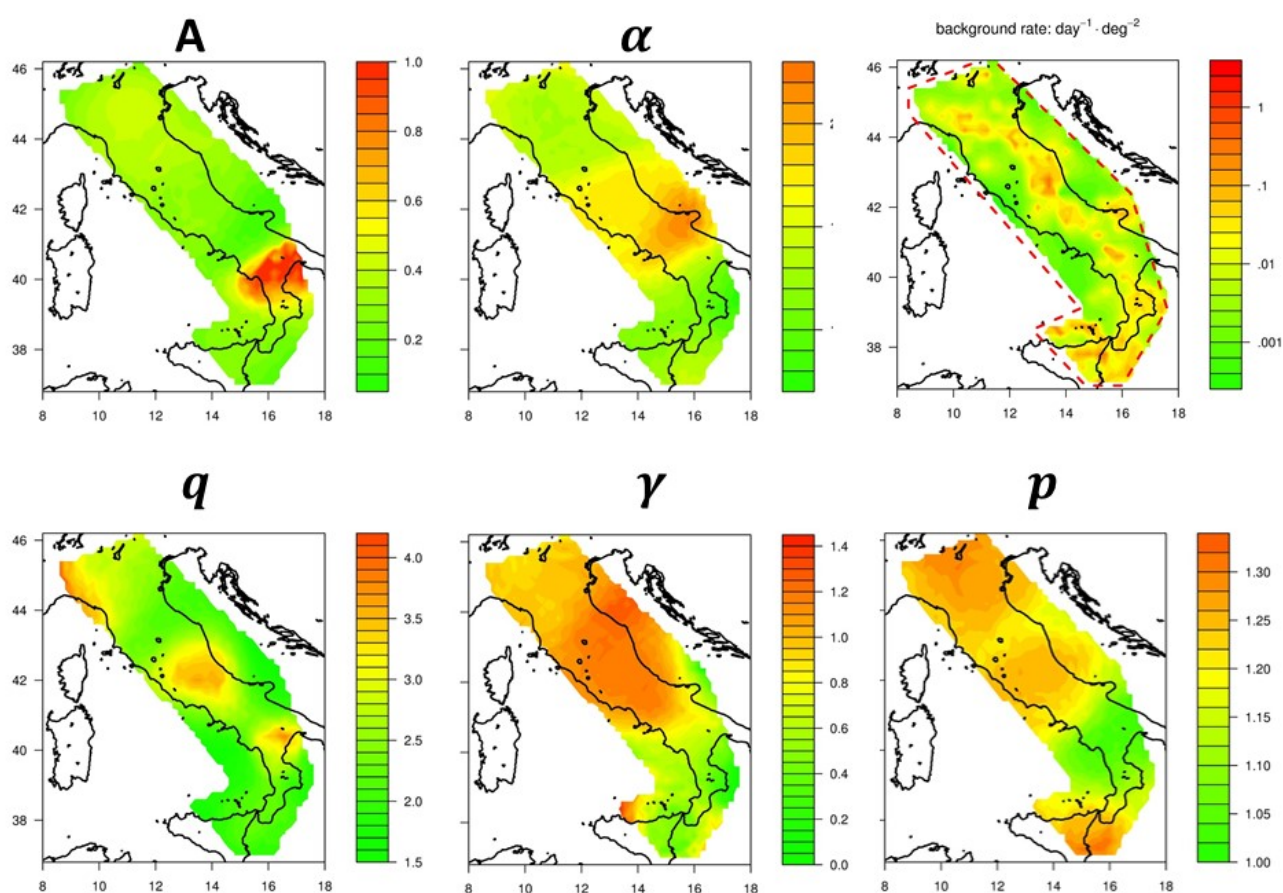
Long-term probability earthquake forecasts based on the ETAS model

*Jiancang ZHUANG¹

1. The Institute of Statistical Mathematics

Based on the ETAS (epidemic-type aftershock sequence) model, which is used for describing the features of short-term clustering of earthquake occurrence, this paper presents some theories and techniques related to evaluating the probability distribution of the maximum magnitude in a given space-time window, where the Gutenberg-Richter law for earthquake magnitude distribution cannot be directly applied. It is seen that the distribution of the maximum magnitude in a given space-time volume is determined in the long-term by the background seismicity rate and the magnitude distribution of the largest events in each earthquake cluster. The techniques introduced were applied to the seismicity in the Italy and Southern California regions.

Figure: Spatial variations of the ETAS parameters in the Italy region.



Extracting Diffusional Characteristics in Stationary Clusters without Migration

*Naofumi ASO¹

1. Tokyo Institute of Technology

震源分布の時空間的な特徴から、あたかも震源が移動しているように見えることをマイグレーションと呼ぶ。その物理的実体は、岩石や流体がその速度で移動しているのではなく、応力や流体圧がいわば群速度として伝わっていることによるものだと考えられる。こうしたマイグレーションは、拡散的な物理現象が背後にあることを示唆しており、地球物理学的に重要な知見を与える。しかしながら、マイグレーションの特定には、高い時空間分解能をもつ地震カタログが必要になる。本研究では、ETASモデル [Ogata, 1988] の改良を行うことにより、点状クラスターなど、マイグレーションの見られないような場合においても、拡散的な物理現象を示唆する特徴を抽出できる方法を提案する。

余震活動に関するマクロな経験則である大森則により、地震間のミクロな相互作用が与えられるという仮定のもと、地震活動を説明するモデルがETASモデルである。しかしながら、群発的な活動は、うまくETASモデルでは説明できないことが知られている。その本質的な原因は、群発的な活動に潜む拡散的な物理現象がETASモデルでは説明できないからであると考えられる。そこで、ETASモデルに指数関数的な項を加えることで、拡散的な物理現象も説明できる改良ETASモデルを提案する。実際に、群発的な活動として代表的な島根県東部の準火山型深部長周期地震に適用した。もとのETASモデルとAICを指標として比較すると、パラメータ数が増えるデメリットよりも、対数尤度が改善するメリットの方が大きく、より妥当なモデルとして示された。改良ETASモデルに基づくシミュレーションも行うことで、地震発生間隔分布などの特徴も再現することができた。以上のように、群発的な活動も説明できるような改良ETASモデルを提案した。この方法を用いれば、時空間的なマイグレーションが見えなくても拡散的な特徴を抽出できるため、地震学や火山学においてさらなる活用が期待される。

Seasonal variations in crustal seismicity and surface load estimated from GNSS displacement

*Taku Ueda¹, Aitaro Kato¹, Christopher W Johnson², Toshiko Terakawa³

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Los Alamos National Laboratory, 3. Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

地震活動度は、降水量や灌漑などの地表や地下浅部に応力変化や強度変化をもたらす現象と相関があることが既往研究で指摘されている(e.g., Heki, 2003; Amos et al., 2014)。例えば、カリフォルニアでは地下水荷重の年変動に対応して、地震活動が季節変動を示す(e.g., Amos et al., 2014; Johnson et al., 2017)。Johnson et al. (2017)ではGPSの鉛直変位から地下水荷重が断層面に与える応力変化を計算し、カリフォルニアでの地震活動が剪断応力が増加するときに発生しやすいことを示した。日本でも地震活動の季節変動性が指摘されており、積雪荷重や降水との関係が議論されているが(e.g., Heki, 2003; Ueda and Kato, 2019)、原因として考えられる表層荷重による応力変化と直接比較した研究はほとんど行われていない。

本研究では東北地方内陸部において、地表の上下動変位データから荷重の空間分布を推定し、表層荷重による地下での応力変化と地震の発生時期との比較・検討を行った。まず、GEONETのF5解(2003/08/14-2010/12/31)の上下動成分をBedford and Bevis (2018)の手法を用いてトレンド成分、地震等による過渡的な変化、季節変動成分、残差に分離した。その後、各観測点における季節変動成分と残差を足し合わせた時系列データから、それらの中央値をcommon mode errorとして抽出した。上下動変位のデータからcommon mode errorを除いたデータに対して、再度Bedford and Bevis (2018)の手法を適用し、季節変動成分の推定を行った。推定した季節変動成分を基に、Johnson et al. (2017)の手法を用いて、月ごとの表層荷重の空間分布を推定した。その結果、積雪量の大きな日本海側の地域において冬に増加し、春に減少する荷重分布が得られた。

地殻内地震発生域の応力場(Terakawa and Matsu'ura, 2008; 2010)における最大せん断応力面をレシーバー断層として表層荷重が生み出すクーロン応力の地震発生時の変化を計算し、地震発生のタイミングと比較した。気象庁一元化処理震源カタログの1980-2010年のM3以上の地震を使用した。HIST-ETASモデル(Ogata, 2004)を用いて、各地震が背景地震活動度として発生した確率で重み付けすることで、余震活動を取り除いた背景地震活動と表層荷重による応力変化との関係を評価した。その結果、東北地方内陸部における背景地震活動はクーロン応力が高い時に発生しやすいことがわかった。

謝辞：GNSSの上下動変位のデータは国土地理院のGEONETのF5解を使用しました。上下動変位の季節変動成分の抽出にGRATSID (Bedford and Bevis, 2018)を使用しました。気象庁の一元化処理震源カタログを使用しました。HIST-ETASモデルのパラメータ推定にOgata et al. (2021)のコードを使用しました。記して感謝いたします。

Development of an ETAS model that explicitly incorporates the triggering effect of slow slip events on seismicity

*Tomoaki NISHIKAWA¹, Takuya Nishimura¹

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

世界各地の沈み込み帯プレート境界では、スロースリップイベント（Slow slip event; SSE）と呼ばれる低速な断層滑り現象が発生する（Obara & Kato, 2016）。スロースリップイベントは、ときに大地震や群発的な地震活動を誘発することが知られており（Ozawa et al., 2003; Radiguet et al., 2016）、各地の沈み込み帯では、SSEと地震活動の因果関係の解明が進められている（Kato et al., 2012; Nishikawa et al., 2021）。

その一方、現在、世界で標準的に使用されている地震活動統計モデルであるEpidemic-type aftershock-sequence (ETAS) モデル（Ogata, 1988）には、SSEが地震活動に及ぼす影響（誘発効果等）が全く考慮されていない。そのため、プレート境界でSSEが発生した際、ETASモデルに基づく地震発生確率予測の結果と、実際に観測される地震活動が大きく乖離するという問題がある（Llenos et al., 2009）。この問題を回避するため、Okutani & Ide (2011)は、SSE発生期間と非SSE発生期間に、それぞれ異なるETASパラメータを割り当てることで、SSEに起因する地震発生レートの上昇を既存のETASモデルの枠組みの中で表現した。しかし、このモデルにはSSEの震源特性（モーメントマグニチュードやモーメントレートなど）が組み込まれていないため、SSEのモーメントレートと地震発生レートの関係や、SSEのマグニチュードと誘発される地震数の関係等に関する重要な関係式は、このモデルからは直接は得られない。つまり、「あるマグニチュードのSSEが発生した際、いくつの地震が誘発されるか？」という基本的な問いに、このモデルは答えることができない。

そこで、本研究は、既存のETASモデル（Ogata, 1988）にGlobal Navigation Satellite System (GNSS) 観測データから推定したSSEのモーメントレートを陽に組み込み、新たなモデル（SSE-informed ETAS model）を作成した。このモデルは、SSEのモーメントレートと地震発生レートに線形な関係（或いはべき乗の関係）を仮定し、SSEのモーメントレートと地震発生レートの比例定数（或いはSSEの地震モーメントと地震発生数の比例定数）を新たなETASパラメータとして直接推定する。

我々は、新たなモデルをニュージーランド・ヒ克蘭ギ海溝浅部で発生した3つのSSE（2006年8月Mw 6.8、2008年3月Mw 6.6、2011年6月Mw 6.7）とそれらの周辺で発生したM 2.5以上の地震に適用した。2006年と2011年のSSEはヒ克蘭ギ海溝中央部南より（南緯40.5度付近）に、2008年のSSEは中央部北より（南緯39度付近）に位置する。各SSEのモーメントレートはGeoNetが公開しているGNSS座標時系列データとTDEFNODE（McCaffrey, 2009）を用いて事前に推定した。

その結果、2006年と2011年のイベントでは、赤池情報量規準（Akaike information criterion; AIC）が従来のETASモデルと比べて大きく減少し、新たなモデルがより良いモデルであることが示された。また、新たに導入したパラメータ η （SSEのモーメントレートと地震発生レートの比例定数）から、ちょうど1つの地震を誘発するのに必要なSSEのマグニチュードが計算でき、2006年のSSEではMw 6.0/event（95% CI: Mw 5.8/event ~ Mw 6.3/event）、2011年のSSEではMw 5.5/event（95% CI: Mw 5.4/event ~ Mw 5.7/event）と推定された。その一方、2008年のSSEでは、AICはむしろ増加し、従来のETASモデルのほうが良いモデルであった。

ヒ克蘭ギ海溝沿いの群発地震活動に関する先行研究（Nishikawa et al., 2021）では、SSEとそれに伴う群発地震活動に数日から1ヶ月程度の発生時間のずれがあることが報告されている。これをふまえ、SSEのモーメントレートに対する地震発生レートの時間遅れを許容したモデルと許容しないモデルを比較した。その結果、2006年のSSEでは、18日の時間遅れがあるモデルが、時間遅れのないモデルと比べてAICが2.7減少

し、時間遅れを許容したモデルがより良いモデルあることが示唆された。加えて、SSEのモーメントレートと地震発生レートを結ぶ関係式のべき指数を1（線形）としたモデルと、べき指数を1以外としたモデルの比較も行なったが、べき指数1（線形）のモデルに比べ、AICが顕著に減少（2以上の減少）することはなかった。

本研究の新たなモデルによって、SSEに起因する地震発生レートの上昇を考慮した地震発生確率予測が可能となった。また、本モデルによって、SSEのモーメントレートと地震発生レートの関係や、SSEのマグニチュードと誘発される地震数の関係等に関する重要な関係式を得ることができた。加えて、本モデルは、SSEのモーメントレートに対する地震発生レートの時間遅れや、SSEのモーメントレートと地震発生レートを結ぶ関係式の関数形（べき指数等）に関する定量的な議論を可能にした。今後、本モデルを各地の沈み込み帯沿いのSSE及びそれに伴う地震活動に適用することで、各地の地震活動の予測精度向上や、SSEに伴う地震活動の特徴の定量化及びその地域差の解明につながると期待される。

Spatio-temporal relationship between intraplate seismicity and long-term slow slip events along the Nankai Trough

*Yuta MITSUI¹, Keiji UEHARA¹, Issei KOSUGI², Koji MATSUO³

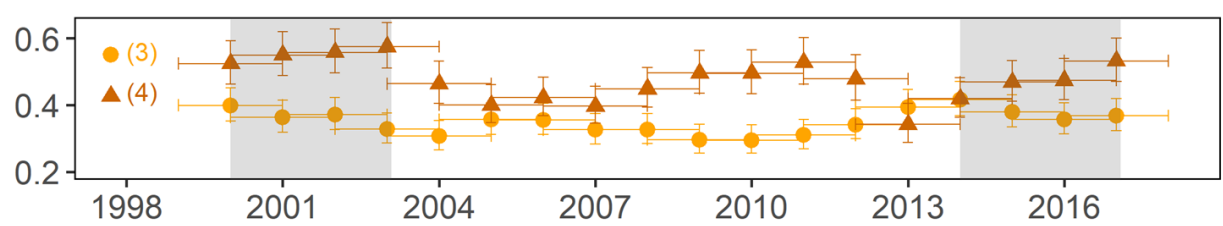
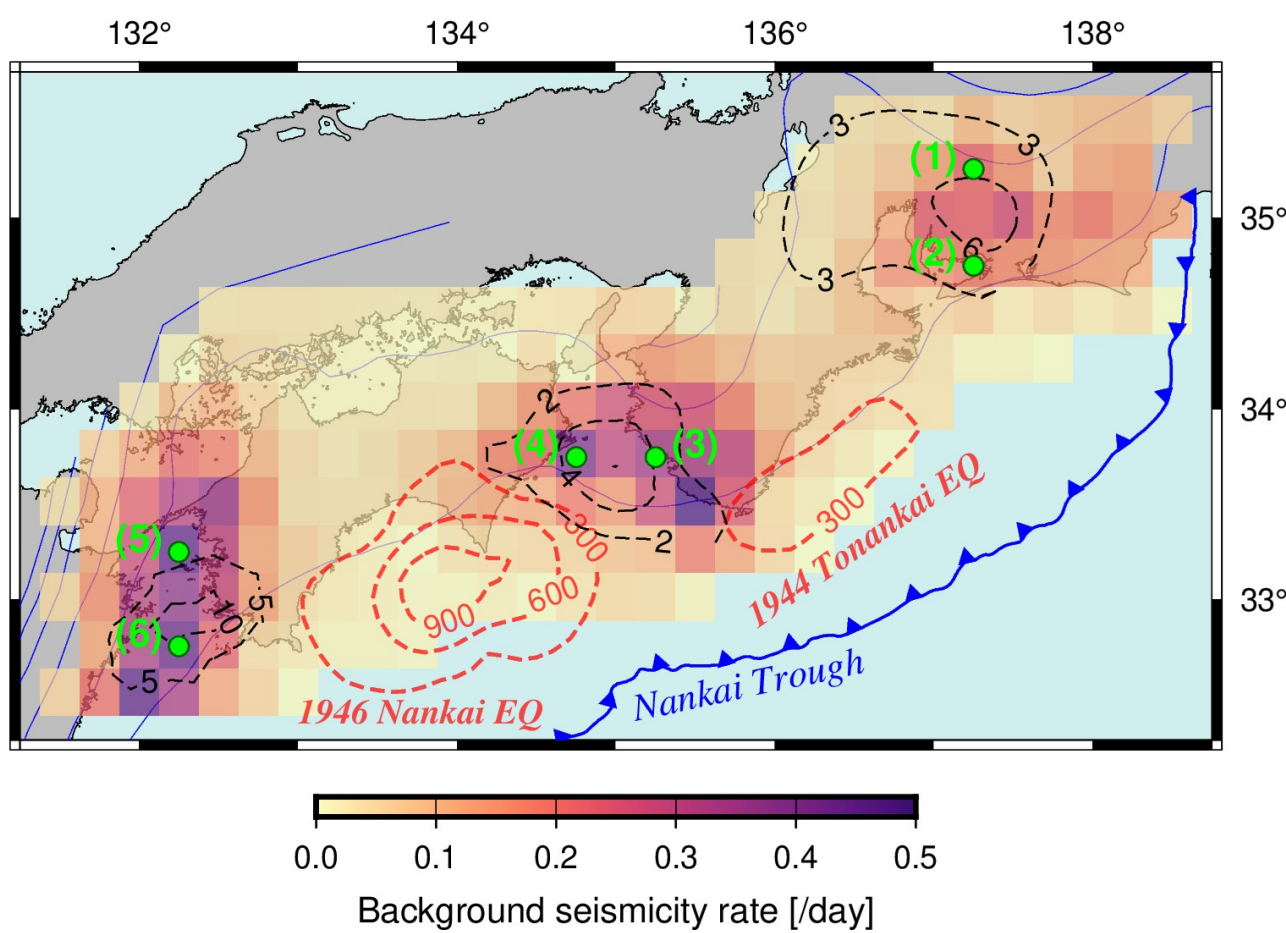
1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Graduate School of Science, Shizuoka University, 3. Geospatial Information Authority of Japan

沈み込み帯でのファスト地震とスロースリップとの間には、多種類の関係があると考えられる。一例として、スロースリップ発生時に地震活動が活発化することが報告されてきた(Hirose et al., 2012; Passarelli et al., 2021)。この性質には沈み込み帯による多様性があること、また、プレート境界地震に限らずプレート内地震まで考慮すべきであることも、指摘されてきた(e.g., Nishikawa et al., 2021)。

本研究では、南海トラフ沈み込み帯を対象として、ファスト地震とスロースリップの関係を探る。まず、気象庁の震源カタログ(1998-2017年)より、沈み込むプレート境界から鉛直方向15km以内にある地震を抽出した。M1以上の地震でG-R則が成り立っていることを確認した(b値0.82)。M3以上の初動発震機構解がほとんどプレート内地震と判断できるものだったため、M1以上の地震もほぼプレート内地震と仮定できる。これらの地震に対して、ETASモデル(Ogata, 1988)に基づく背景地震活動率の推定を行った。

全期間を通しての背景地震活動率には、along-strike方向の不均質が見られた。具体的には、浜名湖から岡崎平野の下、紀伊水道から紀伊半島南端の下、豊後水道下の3箇所で、高い値となった。この3か所は、M6.5を超える長期的スロースリップイベント(L-SSE)の発生域(Ochi and Kato, 2013; Kobayashi, 2017; Yoshioka et al., 2015)と空間的に良く対応している。これらはまたフリーエア重力異常(Matsuo and Kuroishi, 2020)の低重力域とも対応している。さらに、背景地震活動率の時間変化についても推定を行ったところ、紀伊水道の西部で、2回のL-SSE期間中と2010年頃に地震活動率が増大していた。岡崎平野の北部でも若干ながら同様の傾向があった。一方で、L-SSEとの時間的対応が明確でない場所も存在し、短波長不均質が見られた。

本結果は、第一に「プレート内地震が活発な領域でL-SSEが発生する」こと、細かく見ると「L-SSE発生に伴ってプレート内地震活動が揺らぐ」場合もあることを表す。前者については、低重力異常から想定される断層荷重の減少やスラブ傾斜角変化によるせん断応力擾乱(Mitsui and Hirahara, 2006)、後者についてはスラブ流体(圧)移動の影響が考えられる。



Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-2

chairperson: Shinji Toda (Tohoku University), Kota Fukuda (University of Tokyo)

Thu. Oct 14, 2021 11:00 AM - 12:15 PM ROOM C (ROOM C)

[S09-07] Statistical Evaluation of Occurrence Time of Forthcoming Event Estimated Based on Bayesian Updating for Inter-Event Times in Time-Series of ETAS Model

○Hiroki TANAKA¹, Ken Umeno¹ (1.School of Informatics, Kyoto University)

11:00 AM - 11:15 AM

[S09-08] Long-term features of the 2011 Tohoku-oki aftershocks: Central shutdown and surrounding activation

○Shinji TODA¹, Ross S Stein² (1.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2.Temblor, Inc.)

11:15 AM - 11:30 AM

[S09-09] Event size distribution of deep low-frequency tremors in the Nankai Trough modelled with a mixture distribution

○Takaki IWATA¹, Yoshihiro Hiramatsu² (1.Prefectural University of Hiroshima, 2.Kanazawa University)

11:30 AM - 11:45 AM

[S09-10] Evaluating the crustal strength based on seismic moment tensor ratios

○Satoshi MATSUMOTO¹, Ayaho Mitsuoka², Yoshihisa Iio³, Shinichi Sakai⁴, Aitaro Kato⁵
(1.Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 2.Graduate School of Science, Kyushu University, 3.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4.The University of Tokyo Interfaculty Initiative in Information Studies Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, 5.Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

11:45 AM - 12:00 PM

[S09-11] Seismic modeling with cellular automata considering competing time constants

○Kota FUKUDA¹, Takahiro HATANO², Kimihiro MOCHIZUKI¹ (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Department of Earth and Space Science Osaka University)

12:00 PM - 12:15 PM

Statistical Evaluation of Occurrence Time of Forthcoming Event Estimated Based on Bayesian Updating for Inter-Event Times in Time-Series of ETAS Model

*Hiroki TANAKA¹, Ken Umeno¹

1. School of Informatics, Kyoto University

地震の時間間隔分布のマグニチュード閾値依存性を検討する上で、異なるマグニチュード閾値での時間間隔の間の条件付き確率 $p_{mM}(\tau_m|\tau_M)$ を用いる方法が提案されている[1]. この条件付き確率は、マグニチュードの時系列に異なる二つの閾値($M, m(<M)$)を設定したとき、上部閾値(M)における長さ τ_M の時間間隔に含まれるという条件のもとで下部閾値(m)において長さ τ_m の間隔が見出される確率密度関数である。

この条件付き確率についてのベイズの定理を考えることで、下部閾値においてある長さ τ_m の間隔が見出された時に、それを含む上部閾値での間隔の長さについての逆確率密度関数 $p_{Mm}(\tau_M|\tau_m)$ を導ける。さらに、イベント間に相関のない重み付き点過程（ETASモデルにおけるバックグラウンドサイズシシティ）について、このベイズの定理をベイズ更新に拡張し、複数の下部閾値での間隔 $\{\tau_m^{(1)}, \dots, \tau_m^{(n)}\}$ が見出された場合の逆確率密度関数 $p_{Mm}(\tau_M|\tau_m^{(1)}, \dots, \tau_m^{(n)})$ とその近似関数が導ける。後者の近似関数は条件付き確率の積の形を含む主要な項と補正項からなり、特に主要な項は数値計算する上で便利な形をしている[2].

本発表ではこれらの結果に基づいて、イベント間に相関のあるETASモデルの時系列にベイズ更新の方法を適用して、下部閾値での間隔の情報から上部閾値の長さを推定する。その推定値と実際の発生時刻との比較を行い、ベイズ更新の方法が予測を行う上でどの程度有効であるかについて統計的に検討した結果について報告する。

まず生成したETASモデル[3]の時系列にベイズ更新を適用することで、逆確率密度関数の近似関数における補正項は最頻値にあまり影響しないことを示す。このことから、数値計算のしやすい近似関数の主要項について、その最頻値を上部閾値の推定値として用いる。この推定値と実際の発生時刻との間の相対誤差を用いて各更新時点における推定の良さを決め、良い推定が実際の発生時刻よりも十分に前から続いていることを予測の有効性として評価を行った。その結果、予測の有効性は時系列の定常性と関係があり、時系列中で定常的な活動が支配的である大イベントの直後または十分時間が経過した場合により有効な予測ができることが示された。

[1] H. Tanaka and Y. Aizawa, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 024004 (2017).

[2] 田中宏樹, 梅野健, 日本地震学会秋季大会, S09-25 (2020).

[3] Y. Ogata, J. Am. Stat. Assoc. 83, 9 (1988).

Long-term features of the 2011 Tohoku-oki aftershocks: Central shutdown and surrounding activation

*Shinji TODA¹, Ross S Stein²

1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Temblor, Inc.

2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）から10年が経過したにもかかわらず、依然として余震と考えられる地震活動が続いている。特に、2月13日には福島県沖でM7.3のスラブ内地震（深さ55km）が発生し、蔵王町、国見町などで最大震度6強を記録した（気象庁、2021）。その後も、3月20日に宮城県沖でM6.9（深さ59km）、5月1日に同じく宮城県沖でM6.8（深さ51km）のプレート境界型地震が発生した。東北沖震源域周辺の今後の地震ハザード評価に資するため、本発表では余震活動の継続性について検討する。

【最近5年間（2016-2021）と東北沖地震前の比較】 まず東北沖地震からの10年を5年区切りで前半（2011/3/11-2016/3/10）と後半（2016/3/11-2021/3/10）に分け、余震活動の継続性の観点から、後半の活動に注目した。特に東北沖地震前（1998/1/1-2011/3/10）を常時地震活動（background seismicity）と仮定し、後半の活動の変化を検討した。その結果を図1aに示す。常時地震活動に比べて数倍～数十倍の余震活動域が震源域を囲むようにドーナツ状に広がる。特に、三陸沖～福島沖近海と海溝軸～その東側（アウターライズ）が顕著である。対称的に、東北沖地震の震源域でも特に大すべり域（例えば、Iinuma et al., JGR, 2012）で顕著に地震活動が低下している。この震源域での活動低下については、Kato & Igarashi (GRL, 2012)による報告もあるが、後半の活動では静穏化がより明瞭になっている。また、プレート境界だけではなく震源域のスラブ内にも広がっているようにみえる（図1c）。

【東北沖本震と大規模余震によるクーロン応力モデル】 次に、これらの地震活動度変化を説明するために、クーロン応力変化と速度および状態依存摩擦則（Dieterich, JGR, 1994）を組み合わせた地震活動予測モデル（以下、クーロン応力モデル。Toda et al., JGR, 1998）を適用した。クーロン応力変化は本震直後の地震活動を概ね説明するが（Okada et al., EPS, 2011; Toda et al., EPS, 2011）、今回は応力-地震活動応答の地域性や時系列を検討するため、前段のモデルを改良したToda & Stein (BSSA, 2020)の手法を導入した。同手法の特徴は、レシーバ断層として常時地震活動時のメカニズム解（ここでは防災科研、F-net）を用い、本震だけではなく前半5年間に発生したM6.5余震による応力変化も考慮して、状態変数を時空間的に時々刻々に変化させることにある。また、実際に観測された余震発生レートから摩擦則パラメータ・常時地震レートを学習・最適化するなどの工夫を行っている。さらに、同モデルではDieterich (1994)の余震継続期間 τ_a を一定にしても（ここでは20年）、多様なレシーバ断層上の応力変化の不均質分布により、地域によってこの初期値が大きく変動するのも特徴である。前半5年間までの震源データを用いて後半5年間の地震活動度変化をレトロスペクティブ（retrospective）に予測したものを図1bに示す。実際の観測結果（図1a）と概ね整合することがわかる。三次元的にみると、例えば福島県～福島県沖を横断する断面図（図1c）では、震源域の全面的静穏化とスラブ内地震、アウターライズ地震の継続的な活発化がわかる。スラブ内地震、アウターライズ地震の活動の持続化は、応力載荷速度（secular stressing rate）の速いプレート境界に比較して、プレート内の載荷速度が遅いことによる応力伝播効果の長期化とも考えられる（Stein & Liu, Nature, 2009; Toda & Stein, BSSA, 2018）。本年2月13日のスラブ内地震もこの長期的余震域で発生した。また、1896年明治三陸地震（プレート境界型）と1933年昭和三陸地震（アウターライズ型）のペアにみられるように今後長期にわたって大規模なアウターライズ地震の発生も危惧される。

謝辞：地震活動の解析・モデリングにあたっては気象庁一元化震源カタログ（暫定も含む）、防災科学技術研究所F-netメカニズム解を使用した。

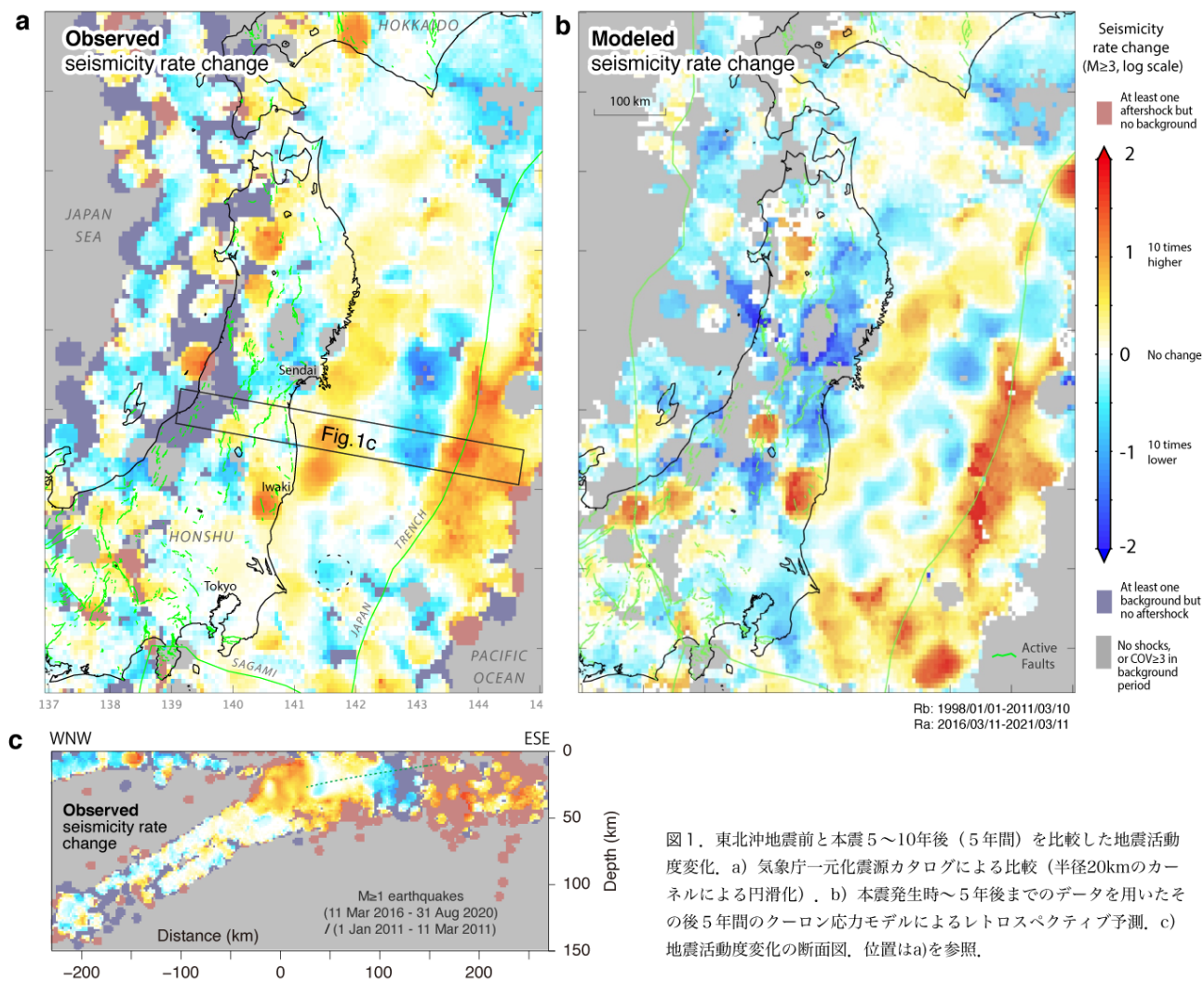


図1. 東北沖地震前と本震5～10年後（5年間）を比較した地震活動度変化. a) 気象庁一元化震源カタログによる比較（半径20kmのカーネルによる円滑化）. b) 本震発生時～5年後までのデータを用いたその後5年間のクーロン応力モデルによるレトロスペクティブ予測. c) 地震活動度変化の断面図. 位置はa)を参照.

Event size distribution of deep low-frequency tremors in the Nankai Trough modelled with a mixture distribution

*Takaki IWATA¹, Yoshihiro Hiramatsu²

1. Prefectural University of Hiroshima, 2. Kanazawa University

深部低周波微動（DLF）を含むスロー地震の規模が従う分布としてはベキ分布 [例えばBostock et al., 2015, JGR, doi:10.1002/2015JB012195] や指数分布 [例えばChestler & Creager, 2017, JGR, doi:10.1002/2016JB012717] が提案されている。さらにより複雑な分布としてベキ分布と指数分布を掛け合わせたtapered Gutenberg-Richter (GR)則 [Vere-Jones et al., 2001, GJI, doi:10.1046/j.1365-246x.2001.01348.x] を用いた研究もある [Nakano et al., 2019, GRL, doi:10.1029/2019GL083029]。これらの分布に対し、本研究では南海トラフの深部低周波微動に対して、ベキ分布と指数分布を適当な比率で足し合わせた混合分布を適用した例を示す。

適用した確率分布は以下の通りである：

$$(\text{モデルA}) \quad p_A(M_0) \propto [\gamma M_0^{-b}/C_1 + (1-\gamma)\exp(-\beta M_0)/C_2]q(M_0)$$

$$(\text{モデルB}) \quad p_B(M_0) \propto [\gamma(1-r(M_0))M_0^{-b}/C_1 + (1-\gamma)r(M_0)\exp(-\beta M_0)/C_2]q(M_0)$$

ここで M_0 は地震モーメントである。 C_1 および C_2 は各項の γ あるいは $1-\gamma$ を除いた部分を M_0 で積分して1になるようにするための正規化定数である。 γ はベキ分布と指数分布に従うイベントの個数比である。モデルAではベキおよび指数分布の混合比が M_0 に依存しておらず γ がそのまま混合比に相当する。これに対し、モデルBでは混合比自体が M_0 に依存して変化することが仮定されている。 $r(M_0)$ は正規分布の累積分布関数であり M_0 が小さければ0、大きければ1に近づく。これにより M_0 の小さい方でベキ分布、 M_0 の大きい方で指数分布に近づくような確率分布を表現することが出来る。さらに $q(M_0)$ はある M_0 におけるイベント検知率であり、Ogata & Katsura [1993, GJI, doi:10.1111/j.1365-246X.1993.tb04663.x] やIwata [2013, GJI, doi:10.1093/gji/ggt208]と同様、これも正規分布の累積分布関数を用いることとする。通常の解析ではSSEが完全に取れている M_0 以上の範囲のみを解析するが、 $q(M_0)$ を導入することでSSEの記録が不完全である M_0 の小さな範囲も含めた解析が可能となる。

解析に用いたデータはDaiku et al. [2018, Tectonophys., doi:10.1016/j.tecto.2017.11.016] (以下D2018) によって得られたものに基づいた。D2018では南海トラフに沿った東海地方から四国地方を5つの領域に分け、各領域で観測されたDLFのapparent momentを求めた。期間は2002年4月から2013年7月までであり、各領域で219～663個のDLFのapparent momentが得られている（領域分けについてはD2018のFigs.2および3を参照されたい）。本研究ではNakamoto et al. [2021, JGR, doi:10.1029/2020JB021138] に倣い、D2018によるDLFのapparent momentに $4\pi\rho V_s^3$ （ ρ は媒質密度、 V_s はS波速度）を掛けS波の平均的なradiation pattern係数で割ったものを M_0 として解析を行う。なお、apparent momentを M_0 に変換する際に必要となる値はMaeda and Obara [2009, JGR, doi:10.1029/2008JB006043] のものを用いた。

各領域のデータに対して上に示した2つのモデル（確率分布）を適用した。合わせて従来研究で用いられたベキ分布・指数分布・tapered GR則も適用した。各モデルのパラメータは最尤法で推定し、得られた最大対数尤度の値からAIC（赤池情報量規準）[Akaike, 1974, IEEE Trans. Auto. Control, doi:10.1109/TAC.1974.1100705] を求めて計5つのモデルに関するモデル比較を行った。

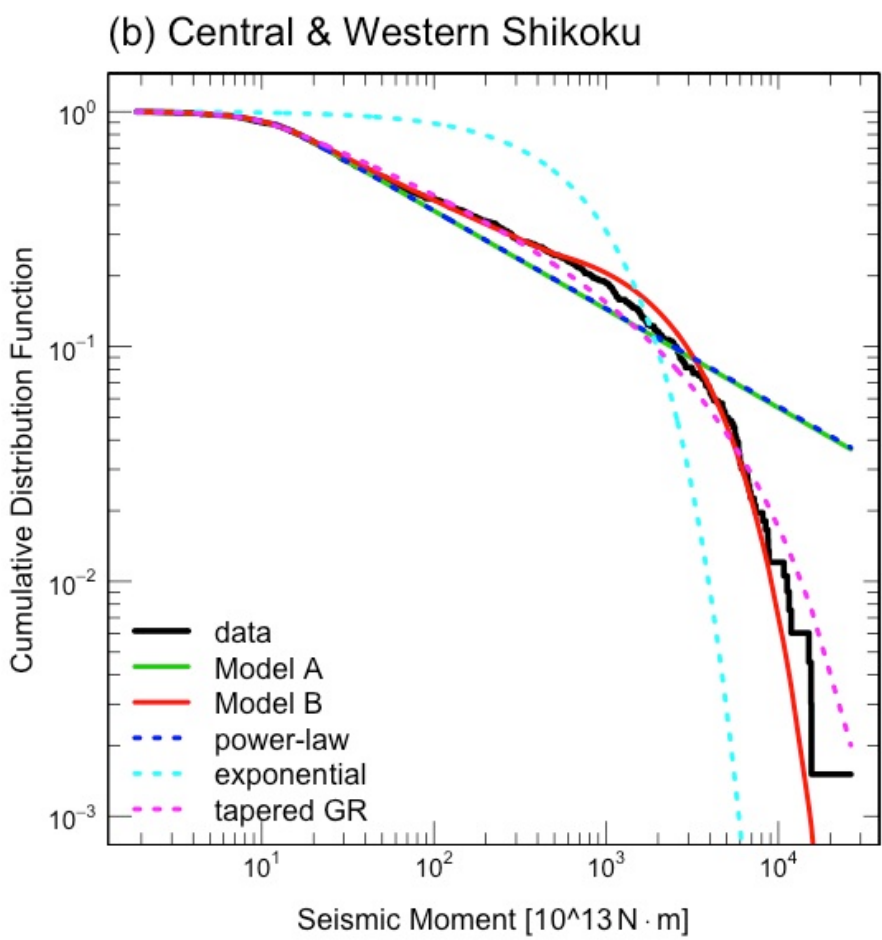
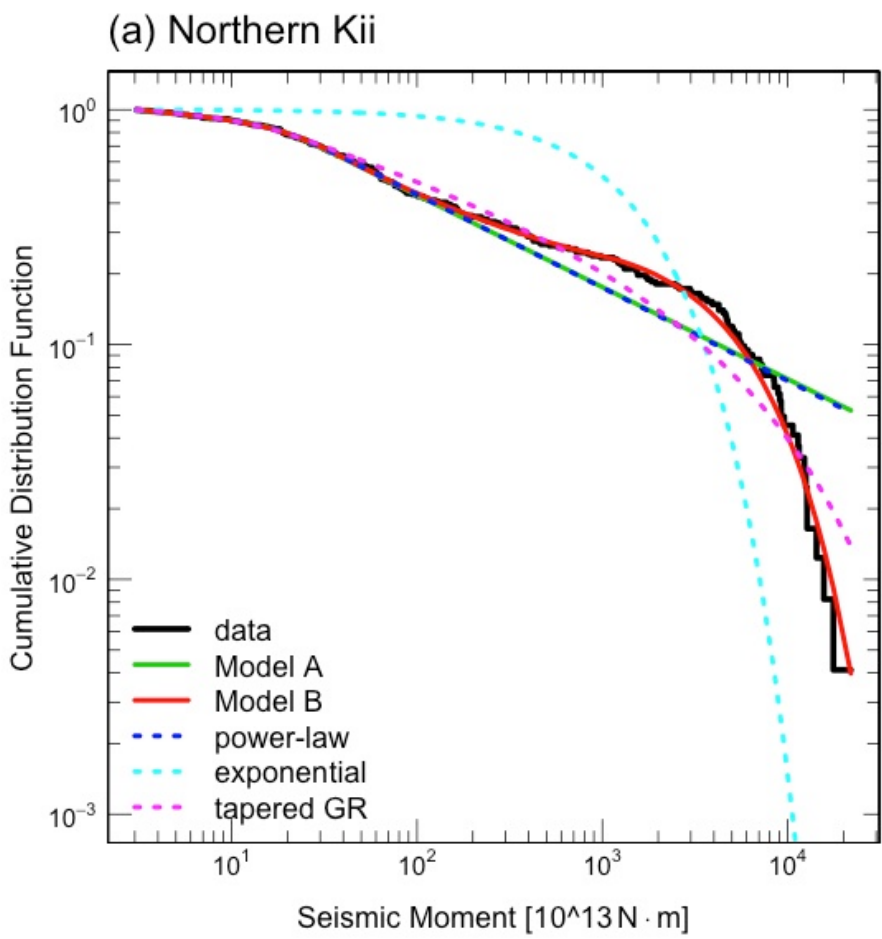
結果例として紀伊半島北部および中央・西四国に対する結果を図に示す。紀伊半島北部（図(a)）については従来研究の3モデル（青・水色・紫点線）および本研究のモデルA（緑実線）は観測された M_0 の（相補）累積分布関数（黒実線）全体には合っていない。それに対し、モデルB（赤実線）は観測された M_0 の累積分布関数に比較的良く適合している。実際、AICの値でも2番目に良かった（小さかった）tapered GR則に比べて22.0小さく、有意に優れていると言える。中央・南紀伊および東四国でも同様の結果となった。

一方、中央・西四国については、モデルBが観測された M_0 の累積分布関数に対して部分的に合っていない。tapered GR則（紫点線）も同様であるが、AICの値ではtapered GR則の方が3.7小さく、こちらの方が有意により。東海地域においてもtapered GR則のAICの値がモデルBのものよりも小さかった（但し、値の差は

0.7であり「有意に差がある」とまでは言えない）。

以上のように，本研究で提案した混合分布が優れている場合とtapered GR則が優れている場合とが混在している．現段階では5領域を調べただけであり，今後は解析事例を増やすなどして差異が生じる要因を調べるといったより踏み込んだ解析が必要と考えられる．

図：観測された M_0 および最尤推定値に基づく5モデルとの比較．比べやすくするため（相補）累積分布関数に直してある．(a) 紀伊半島北部，(b) 中央・西四国に対するもの．



Evaluating the crustal strength based on seismic moment tensor ratios

*Satoshi MATSUMOTO¹, Ayaho Mitsuoka², Yoshihisa Iio³, Shinichi Sakai⁴, Aitaro Kato⁵

1. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 2. Graduate School of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. The University of Tokyo Interfaculty Initiative in Information Studies Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, 5. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地震は地殻に蓄積された弾性ひずみを解放するが、解放の仕方はさまざまであると考えられる。例えば、成熟した断層帯においては断層走向に沿ったすべりが卓越するであろう。一方、未成熟の場合は走向方向だけでなく様々な方向のすべりが発生すると考えられる。こういったすべり方向の多様性と断層の成熟度・強度には関係があることはある意味、明らかである。媒質がある応力状態にあった時、弾性ひずみは主応力と45度をなす最大せん断方向の面で滑りが発生するとき最も“効率的”にひずみエネルギーが解放される。一方、クーロンの破壊基準によれば内部摩擦角は摩擦係数によって変化する。そのため、最適面（最大圧縮応力軸に対して±30度、ただし摩擦係数0.6のとき）で滑りを起こす。この場合、圧縮軸に対して共役な2つの面で滑りを起こすと、結果的に弾性ひずみを減少させるが、その効率は低下する。具体的には、最大せん断方向で滑った地震のメカニズム解を考えると、このメカニズム解をもつ地震で解放されるモーメント M_0 とした場合、±30度の面を持った地震2つで解放されるモーメントは、 $2M_0$ となるはずであるが、和をとるとモーメントテンソルはその形は45°滑りと同じになり、その大きさは $2M_0$ より小さくなる（摩擦係数=0.6の時、比はおおよそ0.74）。これは、よりすべりやすい面で多数滑ることによって弾性ひずみを解放していくプロセスを示している。摩擦係数が小さくなると徐々に比は1に近づいてゆく。一方、既存の亀裂が非最適面であつ流体圧が高い場合、モーメント比は徐々に低下する。このように地震で解放されるモーメントと解放される弾性ひずみの比は地殻の成熟度・強度を示していると考えられる。ここでは、このモーメント比を実際の地震データから求めてその特性について検討する。2017年3月から2018年4月まで鳥取県西部地震震源域で行われた”0.1満点地震観測”は1000点の地震観測点をおおよそ1km間隔で展開し、余震域を取り囲んだ地震観測である。これによって余震のメカニズム解が詳細に推定された。これらを $3 \times 3 \times 2.5$ kmのブロックごとにモーメント比を求めた。その結果、1に近いところは余震域が水平に広がる部分に対応している。一方、場所によっては0.6程度以下になるブロックも存在している。位置としては鳥取県西部地震の先駆的地震活動震源位置に対応している。これは流体圧が高い可能性を示唆している。2016年熊本地震前後の地震活動について同様の解析をした。ここでは $0.05^\circ \times 0.05^\circ \times 5$ kmのブロックで見積もった。その結果、摩擦係数が低いような場所は見られなかった。一方で、モーメント比が0.6程度以下の場所が断層周辺に存在している。さらに、地震発生後にはその部分が広がっているように見える。これは、応力場の不均質が影響している可能性はあるものの、流体が貫入したことによる影響を見ているとも解釈できる。以上のようにモーメント比を用いると、地殻の強度情報が抽出できる可能性がある。この比を用いることによって地殻の力学的応答をモデル化できる可能性があり、地殻活動のシミュレーションに将来的に貢献すると考えられる。

Seismic modeling with cellular automata considering competing time constants

*Kota FUKUDA¹, Takahiro HATANO², Kimihiro MOCHIZUKI¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Department of Earth and Space Science Osaka University

従来のセルオートマトンモデルを用いた地震研究では、統計性質に主眼が置かれていた為、点過程に議論が限定されてきた。本研究では、Olami et al.,(1992)によって提案された、GR則を再現するOFCモデルに対し、破壊現象を扱えるような拡張を行った。このモデルでは、最小破壊の時定数を導入することで、モーメントレートの時系列を扱うことができる。さらに、本研究では、この最小破壊の時定数に対する応力蓄積や強度回復の時定数の比をパラメータとする事で、時定数の競合によって生じる、破壊描像と統計性質の変化に注目する。

強度回復や応力蓄積に対し、破壊伝播の遅い現象を表すパラメータ領域では、周波数の-1乗に比例したモーメントレートスペクトルが得られ、一方、破壊伝播の速い現象を表すパラメータ領域では、自己相似的な破壊と、周波数の-2乗に比例したモーメントレートスペクトルが再現される。また、応力蓄積の時定数に対し強度回復の時定数が大きくなるにつれて、微動や群発地震のような永続的なイベントを発生させるレジームから、GR則を満たす通常地震的なレジーム、繰り返し地震的挙動のレジームへの遷移が生じる。強度回復の時定数の増加は、定性的には塑性から脆性への遷移と捉えることもできる為、脆性領域に近づくことで、通常地震的な挙動や繰り返し地震的な挙動が得られることを意味している。

これらの結果は、スロー地震、群発地震、通常地震、繰り返し地震などの多様な地震活動の特徴が、「時定数の競合」という観点である程度統一的に理解できる可能性を示唆しており、この点について議論する。

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

PM-1

chairperson: Yuki Noda (Kyoto University), Masaru Nakano (JAMSTEC)

Thu. Oct 14, 2021 1:30 PM - 3:00 PM ROOM C (ROOM C)

[S09-12] Seismic activity around lake of Ryujin-ko

○Shin'ichi SAKAI^{1,2}, Takahiro Akiyama² (1. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The Univ. of Tokyo)

1:30 PM - 1:45 PM

[S09-13] Foreshock activity of a M3.7 earthquake in the western Nagano Prefecture region and the occurrence factor

○Yuki NODA¹, Hiroshi KATAO², Yoshihisa IIO² (1. Kyoto University Graduate School of Science, 2. Kyoto University Disaster Prevention Research Institute)

1:45 PM - 2:00 PM

[S09-14] Spatio-temporal change in seismicity and waveform correlation of an earthquake swarm at Moriyoshi volcano

○Yuta Amezawa¹, Takuto Maeda¹, Masahiro Kosuga¹, Tomoya Takano¹ (1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

2:00 PM - 2:15 PM

[S09-15] Intraplate repeating earthquakes in the Fukushima-Ibaraki border region following the 2011 Tohoku-Oki earthquake and their factors

○Rina IKEDA¹, Keisuke Yoshida¹, Ryo Takahashi³, Yo Fukushima², Toru Matsuzawa¹, Akira Hasegawa¹ (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. Japan Meteorological Agency)

2:15 PM - 2:30 PM

[S09-16] DAS observations of earthquakes and airgun signals around Kikai caldera

○Masaru NAKANO¹, Hiroko Sugioka², Eiichiro Araki¹, Tomoya Nakajima¹, Aki Ito¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Takashi Yokobiki¹, Takashi Tonegawa¹, Yojiro Yamamoto¹, Toshinori Kimura¹, Gou Fujie¹, Satoru Tanaka¹ (1. IMG, JAMSTEC, 2. KOBEC, Kobe University)

2:30 PM - 2:45 PM

[S09-17] Seismic activity ($D > 10$ km) around the summit of Mt. Ontake (1)

○Yoshiko YAMANAKA¹ (1. Univ. of Nagoya)

2:45 PM - 3:00 PM

Seismic activity around lake of Ryujin-ko

*Shin'ichi SAKAI^{1,2}, Takahiro Akiyama²

1. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The Univ. of Tokyo

長野県大町市龍神湖（大町ダム）周辺において、2021年3月下旬から、地震活動が続いている（図1）。この活動中の最大規模の地震は、4月13日22時53分に発生したM3.6の地震で、約6km離れた大町市役所で震度3を観測した。発震機構解は、北西－南東方向に圧縮軸を持った横ずれ型の地震で、震源の深さが約2kmと浅かったため、大町ダム周辺の道路や林道では、小規模な土砂崩れが確認されたが、人的な被害は報告されていない。この約5か月間（3月21日～7月31日）に、大町市役所では、23個の有感地震が観測されていて、無感も含めると約300個の地震が報告されている（気象庁の暫定解による）。

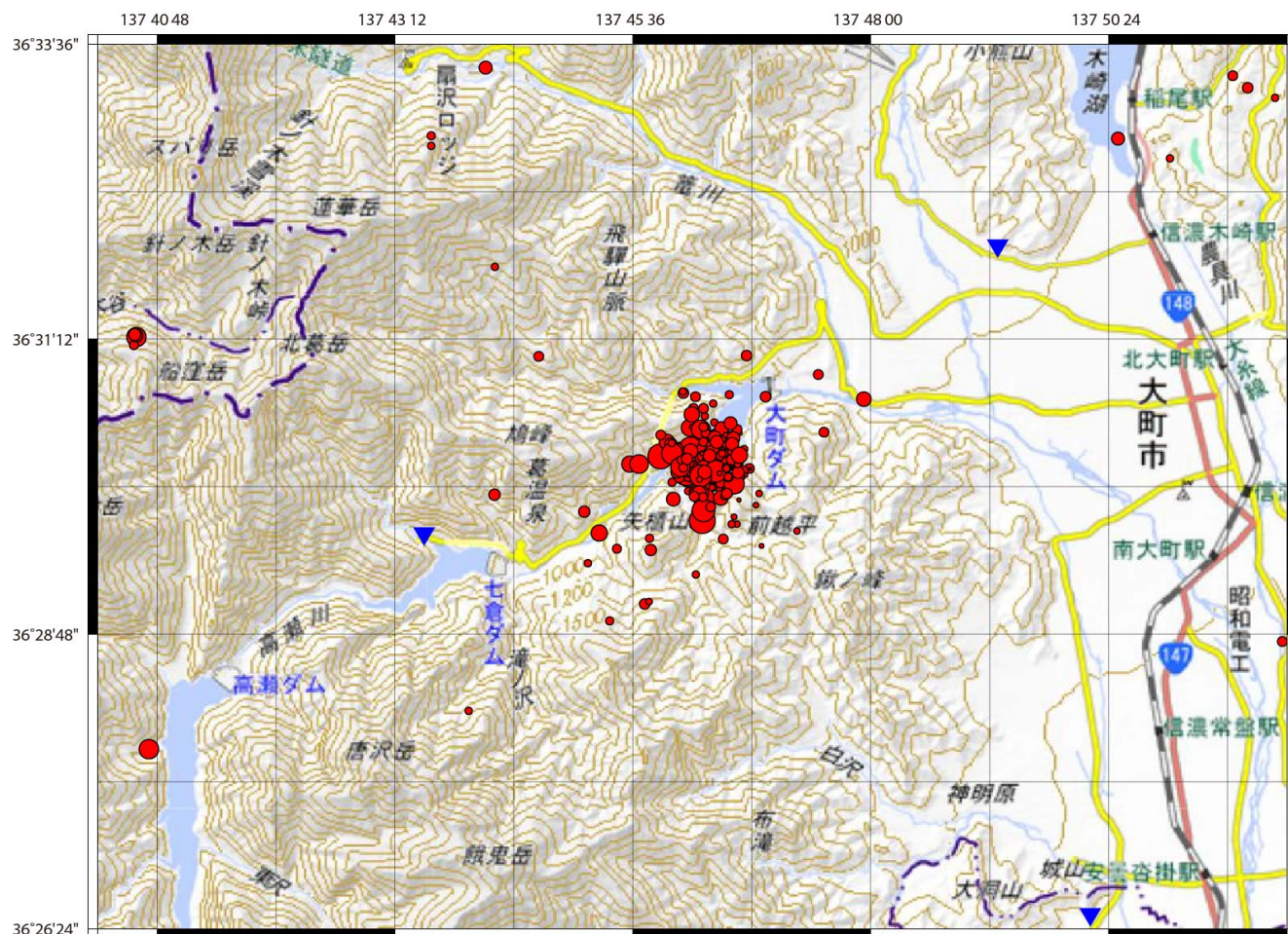
これまで、この付近に大きな活断層は知られていないが、大町市では、1918年（大正7年）11月11日に「大町地震」と呼ばれる地震が発生している。この地震では、M6.5の地震が、約13時間の間隔で続けて2回発生していた。そのときの震源地は、今回の地震活動領域から東に約10km離れたJR大糸線信濃大町駅付近で、家屋の全壊が6棟、半壊が2852棟の被害を生じさせていた。今回の地震活動が、大正時代の大町地震とどのように関係するのかは、不明であるが、この地震活動が続く原因は何なのか、周辺で発生した2014年11月の白馬の地震や糸魚川－静岡構造線と関係するのか、今後の地震活動の拡大や周辺の活動への影響等、様々な疑問が生じている。

そこで、これらを解明することを目的として、震源地の直上および震源域を取り囲む数ヶ所に地震計を設置した（2021年4月21日から）。観測機器は、固有周期1秒の地震計（レナーツ社製MK-III）とその記録を収録する装置（白山工業社製LS-8800）である。それらは、小さなボックス（約40cm程度）に収め、道路わき等に設置した。現地は携帯電話の通話圏外のため、テレメータできず、SDカードに現地収録した。単1乾電池32個で約3ヶ月稼動するため、8月に電池交換と記録媒体の交換を行った。地震活動は、何度か活発化したものの、全体としては、低調になってきた。

今回は、この3か月分の記録を用いた解析の一部を紹介する。新たな臨時観測点の読み取り値を含めて震源を決め直したところ、震源の深さは2km前後に集中していた。切り出した記録の中には、規模の小さな地震波形がたくさん見られたため、臨時観測点の波形で自動処理を行ったところ、4月21日から5月31日の約40日間で841個の地震を検知した。同じ期間の気象庁一元化震源が67個であるため、10倍以上検知された。今後は、小さな地震も含めた震源分布から、この地震活動の全体像を解明することが目的である。

図1 震源分布（2021年3月21日～4月19日）国土地理院地図に加筆

謝辞：国土交通省大町ダムおよび千年の森自然学校に臨時の観測点を設置させていただきました。この観測研究では、東京海上各務記念財団から助成をいただきました。



Foreshock activity of a M3.7 earthquake in the western Nagano Prefecture region and the occurrence factor

*Yuki NODA¹, Hiroshi KATAO², Yoshihisa IIO²

1. Kyoto University Graduate School of Science, 2. Kyoto University Disaster Prevention Research Institute

長野県西部地域では1995年6月から稠密地震観測網が展開されていて、観測点は1984年に発生した長野県西部地震の余震域の東部を中心に設置されている。その中で10kHzのサンプリング周波数でデータを記録しているものが最大で57ヶ所に設置された。この地域で発生する地震は震源が浅いものが多く、さらに観測点の周囲が静かでノイズレベルが小さいため、多数の微小地震データが得られている。

1999年4月5日に、この観測網の内側でM3.7の地震が発生した。また、その震源付近ではその発生の10日以上前から活発な地震活動が見られた。

各地震の破壊開始点について高精度な相対震源決定を行うために、この稠密地震観測で得られた10kHz波形データを使用し、各観測点における2つの地震のP波到達時刻の差を、P波初動のみを含むような0.01秒幅のウィンドウを使って相互相関により求めた。そのようにして求めたP波到達時刻の差を用いて、Ito (1985) を参考に相対震源決定を行った。

震源再決定の結果、M3.7の地震の震源に向かって地震活動が移動していく様子が確認された。また、その震源分布には空間的なギャップがあり、この地震活動は地震の発生に伴う応力変化だけでは説明できない可能性がある。さらに、これらの地震は平面的には発生しておらず、非地震性すべりがこの地震活動の原因である可能性は低い。

Spatio-temporal change in seismicity and waveform correlation of an earthquake swarm at Moriyoshi volcano

*Yuta Amezawa¹, Takuto Maeda¹, Masahiro Kosuga¹, Tomoya Takano¹

1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

背景と目的

群発地震は、本震と呼べる様な最大地震を持たず、非大森則的な地震活動が一定期間継続する現象である。これまでの研究で、群発地震の震源マイグレーションの拡散係数と活動継続時間の間に負の相関があることが判明した (Amezawa et al., 2021)。しかし、活動の推移に伴って地震波形がどのように変化するか系統的に調べた研究は少ない。地震波形の時間変化は群発地震の発生メカニズムが時間的に変化したことに関する可能性がある。ゆえに、地震活動の推移と地震波形の変化の対応を調べることは重要である。本研究では、地震活動が長期に渡っている例として、発生から10年以上継続している東北日本北部の森吉山での群発地震について、地震波形がどのように変化したかを波形相関に着目して調べた。

震源再決定

近接する地震間の波形相関の時空間変化を調べるためには、高精度に決定された震源位置が必要である。そこで、波形の相互相関データを用いたDouble-Difference法により、震源再決定を行なった。解析には気象庁一元化震源カタログに記載されている2011-2019年に発生した $M \geq 0$ の地震のうち、群発地震の周囲60 km以内で比較的S/N比の良い16定常観測点の半数以上において、P・S波の観測走時が得られた7213地震を用いた。気象庁検測値に加えて、弘前大学によって実施された臨時観測記録の手動検測値も用いた。さらに、気象庁・Hi-net・東北大学の観測点で記録された地震波形の相互相関係数から相対走時データを作成して用いた。相関は2-12 Hzの帯域通過フィルタをかけた波形に対し、P・S波の理論走時 ± 1 秒の時間窓で計算した。

震源再決定の結果、初期震源数の99%が再決定され、RMS残差は手動検測値では117 msから35 msへ、相対走時データでは138 msから6 msへ減少した。再決定震源の空間分布から、群発地震の震源は複数の小クラスタに分かれ、水平面内では4 km程度にひろがり、厚さ1-2 kmの東傾斜の面状分布を示すことなど、これまで以上に詳細な特徴が判明した。

波形相関の時空間変化

次に、再決定された震源位置に基づき、近接する地震間の波形相関の時空間変化を調べた。ある地震を起点とし、そこから1年以内に発生した地震が震源距離0.3 km以内に10個以上ある場合、これを地震のグループとした。全ての再決定震源を起点としてグループ化を行い、得られた全てのグループについて、グループの起点とした地震とグループ内の各地震のP・S波の相互相関係数を求め、その平均をAverage Cross Correlation (ACC) とした。ACCの計算には、S/N比が12 dB以上かつ使用観測点の半数以上でP・S波が記録された波形を使用した。

得られた全ACCの分布は、平均 $\mu = 0.39$ 、標準偏差 $\sigma = 0.11$ のやや左に歪んだ正規分布となった。今回は、 $ACC \geq \mu + 1.5\sigma$ の地震グループを特に波形の類似性が高いグループとし、ACCの時空間変化と地震活動の対応を述べた。森吉山の群発地震はクラスタの南東深さ10 km付近（クラスタ底部）から始まり、約200日間はここから水平・深さ方向に約1 kmの狭い領域で活動が続いた。この活動では、ACCが高いグループが特に多くみられた。その後、地震活動の中心が北東へ移動し、約500日後には複数のバースト的な活動を伴いつつ活動中心は南西へ移動した。約1500日後になるとクラスタサイズがほぼ確定し、活動が比較的低調になった。これらの活動移行期と停滞期についてのACCは活動初期に比べて全体的に低く、波形の類似性が高いグループはほとんどみられなかった。

議論

森吉山における群発地震の初期の活動が比較的狭い領域内に限られていることは既知であったが、本研究に

より、その初期の活動においてのみ地震波形が互いに類似していることが判明した。このことから、活動初期においては近接する位置での同じような断層運動で地震が起きたことが示唆される。しかし、その後の活動では、クラスタのほとんどの領域で、震源が近接していてもACCは低い。その理由として、近接していても断層運動の仕方が微妙に異なること、震源周辺の不均質が非常に強く震源位置の僅かな違いにより波形が異なることの、一方または両方が考えられる。これらの原因が群発地震活動にあるのか、元々存在したのかは、今回の結果だけでは判然としないが、森吉山の群発地震の時空間発展が単純ではなかったことを考慮すると、群発地震域は群発地震以前から不均質な状態であった可能性がある。

謝辞

気象庁一元化震源カタログ、気象庁・防災科学技術研究所Hi-net・東北大学の観測点で観測された地震波形記録を使用しました。記して謝意を表します。

Intraplate repeating earthquakes in the Fukushima-Ibaraki border region following the 2011 Tohoku-Oki earthquake and their factors

*Rina IKEDA¹, Keisuke Yoshida¹, Ryo Takahashi³, Yo Fukushima², Toru Matsuzawa¹, Akira Hasegawa¹

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. Japan Meteorological Agency

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震以降、福島-茨城県境周辺では非常に活発な地震活動が続いている。特に、茨城県北部においては2011年3月19日と2016年12月28日にM6程度の地震が発生しており、2つの地震が同一の断層の同じ場所を繰り返し破壊した可能性が指摘されている(Fukushima et al., 2018; Uchide, 2017, JpGU)。内陸断層で地震がこのような短期間で繰り返し発生する事例は極めて珍しく、この事例を調べることは内陸地震の発生サイクルや応力蓄積・解放過程を理解する上で極めて重要であるといえる。本研究では、福島-茨城県境周辺の地震活動中の小中地震に含まれる繰り返し地震を検出し、更にその情報を震源分布の時空間変化および地震活動の情報と組み合わせることにより、M6地震の繰り返しの原因について調べた。

最初に、2003年から2018年10月31日までに福島-茨城県境周辺で発生した気象庁マグニチュード1以上の地震45988個を対象に、Double-Difference法 (Waldhauser & Ellsworth, 2002)を用いた震源の再決定を行った。得られた震源分布は複雑な微細断層構造を示した。ただし茨城県北部地域では地震活動が西へ傾斜する一枚の面構造に集中しており、M6地震はこの断層上で発生したと考えられる。

次に、繰り返し地震の検出を行った。多くの先行研究では繰り返し地震の検出のために、波形の相互相関を用いているが、その方法では近傍で起こった地震群を繰り返し地震と見誤る可能性がある。本研究では、精密な震源再決定位置に基づき繰り返し地震の検出を行った。具体的には、全地震ペアの震源間距離を地震の断層サイズと比較することにより、次の条件に基づいて繰り返し地震の検出を行なった。(1) 地震間距離 < 平均断層半径、(2) マグニチュードの差が0.5以下となる地震ペアを繰り返し地震ペアとみなした。この際、断層サイズは、応力降下量20MPa (池田・他, 2020, JpGU)の円形断層を仮定して求めた。その結果、379個の地震ペアが見つかり、その多くが茨城県北部に分布することが分かった。これらの地震ペアの地震波形は近傍の観測点で見ても非常によく似ており、断層上の同一の場所を破壊した繰り返し地震である可能性が高いと思われる。震源再決定により得られた震源分布から、茨城県北部で2011年と2016年に発生したM6地震直後の余震の時空間分布を調べると、それぞれのM6地震の震源周辺から余震域が徐々に拡大している様子が見られた。2つのM6地震後の余効滑りに起因している可能性がある。Nadeau & Johnson (1998)による経験式に基づき、繰り返し地震間の周囲の非地震性すべり量を推定したところ、20cm前後の値が得られた。Fukushima et al.

(2018)は、2011年に発生したM6地震による余効滑り量を推定し、その大きさが数十 cm程度以上と非常に大きかったことを示しているが、研究で検出された繰り返し地震は、この余効滑りの影響により発生した可能性が考えられる。

茨城県北部で繰り返し発生したことが推定されている2つのM6地震のうち、2011年の地震の余震活動が2016年の地震のそれに比べて顕著に活発であったことが分かった。2011年の地震の余震の減衰率は通常の大森公式に比べても有意に小さかった。GPS観測点で計測された地震直後の余効変動も2011年のM6地震の場合の方が2016年の地震よりも大きかった。2011年のM6地震の余効滑り量が同規模の内陸地震に比べ異常に大きかったことが報告されているが(Fukushima et al., 2018)、その量は同じ場所で発生した2016年のM6地震に比べても大きかったことが示唆される。同一の場所にもかかわらず余効すべり量の大きさが異なった要因として、震源域の状態の時間変化が考えられる。ひとつに2011年東北沖地震による余効変動の減衰により応力増加レートが減少したことが影響しているかもしれない。あるいは、間隙水圧の時間変化が余効すべり量に影響を与えた可能性も考えられる。群発地震の解析から、東北日本のいくつかの地域では、東北沖地震後の地殻流体の上昇により間隙水圧が時間変化したことが推定されている (Yoshida et al., 2016)。茨城県北部地域においても、東北沖地震直後の2011年のM6地震の際には、上昇してきた地殻流体により地震・余効すべりが生じやすくなっていた可能性も考えられる。

DAS observations of earthquakes and airgun signals around Kikai caldera

*Masaru NAKANO¹, Hiroko Sugioka², Eiichiro Araki¹, Tomoya Nakajima¹, Aki Ito¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Takashi Yokobiki¹, Takashi Tonegawa¹, Yojiro Yamamoto¹, Toshinori Kimura¹, Gou Fujie¹, Satoru Tanaka¹

1. IMG, JAMSTEC, 2. KOBEC, Kobe University

鬼界カルデラは130ka、95ka、そして7.3kaにカルデラ形成を伴う巨大噴火を起こした火山として知られる。鬼界カルデラは九州南方に位置し、そのほとんどが海底下にあるため、火山の構造や活動については不明な点が多い。我々はその構造調査及び現在の活動把握のための新しい観測手法開発のため、鬼界カルデラ周辺に設置された光海底ケーブルを用いた分布型音響センシング（DAS）観測を行った。DASは光ケーブルにレーザー光を入射した際に生ずる後方散乱によって、ケーブルの軸方向の歪変化を検出する技術であり、ケーブルに沿った高密度多点の振動計測が可能なことから、近年地震観測への応用が進んでいる。海域火山において光海底ケーブルを用いたDAS観測が行われたのは、我々が知る限り本研究が初めてである。鬼界カルデラ周辺の海域には、鹿児島県三島村が保有、管理する、三島村の竹島、硫黄島、黒島と本土の枕崎を結ぶブロードバンド通信のための光海底ケーブルが設置されている。我々はこれを活用し、鬼界カルデラにおいてDASによる地震動観測を行った。測器を薩摩硫黄島および枕崎に設置し、それぞれと竹島、黒島を結ぶ光海底ケーブルでのDAS観測を行った。観測はこれまでに2021年4月と7月の二回行った。4月の観測ではトカラ列島や種子島沖で起きたマグニチュード2～4クラスの地震の記録が得られた。枕崎からの測線では地震動の振幅は比較的一様であった。一方、硫黄島から延びる鬼界カルデラに近いケーブルでは、振幅に大きな地域性が見られた。これはケーブル直下の減衰構造もしくはケーブルと海底のカップリングに大きな地域性があるためであると考えられる。7月の観測では、同時に鬼界カルデラ周辺海域で行われたエアガン探査のシグナルを観測した。エアガンのチームと協力し、鬼界カルデラを挟んでDAS測線の反対側でエアガンを発振することで、カルデラ内部を通る波線のシグナルの観測を試みた。観測が終了したのは本稿作成の直前であり、今後詳しく解析を進めていく予定である。また、観測開始からエアガンが始まるまでの期間に、種子島沖や九州西方で起きた地震を多数観測した。また気象庁一元化カタログに無いローカルと思われるイベントも複数観測した。これらのイベントの解析により、鬼界カルデラ周辺の構造や火山活動を調べていく予定である。謝辞：本研究にあたっては鹿児島県三島村の光海底ケーブルを利用させていただきました。記して感謝いたします。

Seismic activity ($D > 10\text{km}$) around the summit of Mt. Ontake (1)

*Yoshiko YAMANAKA¹

1. Univ. of Nagoya

<<はじめに>>

2007年と2014年の御嶽山噴火前後の地震活動を比較するため、御嶽山山頂周辺で発生する地震活動を調べていたところ、ある限られた領域（図1）でやや深い（深さ3-35km）地震が発生していることがわかった。御嶽山山頂周辺で発生する地震は $M < 1$ の地震が多いが、これらの地震は比較的規模の大きい（ $M2-M3$ ）ものも発生している。これらの地震の内、図1の領域Dはほぼ1984年長野県西部地震の断層（図1中の四角形）下限にあたる。また図1のハッチをつけた範囲では長野県西部地震以降群発的に地震が発生している。さらに御岳湖付近の深さ30-35km（領域E）では低周波地震が発生する。

そこでMatched Filter法を用いて御嶽山山頂周辺でのやや深い地震および山頂直下の地震活動を2006年まで遡って調べた。

<<手法>>

2014年御嶽山噴火の直前直後の地震活動を調べたKato et al. (2014)に従い、Matched Filter法を山頂周辺の観測点に適用した。解析には御嶽山周辺の名古屋大学、気象庁、Hi-net、長野県の定常観測点の連続データ3成分を用いた。年代によってかなり観測点数が異なるが、2006年頃でも最大9点（NU.KID1, NU.MKO1, NU.MUR, NU.TKN1, V.ONTA, V.ONTN, N.KADH, TKGS, ROPW）の観測点データが使えた。テンプレート地震としては図1に示した224個の地震を用いた。

<<結果>>

1. 御嶽山山頂直下での地震活動は日頃は低調であるが、時々集中的に深さ3kmより浅部で活発化することがあり、その活動が1週間以上連続したのは2007年と2014年の噴火前だけであった。
 2. 2015年7月中旬から9月にかけて領域Dで深さ10km前後の活動が活発化した。このとき気象庁田の原観測点では火山性地震が38回観測、継続時間3分の火山性微動も1回観測され、傾斜計も僅かに山上がりを示すなど、火山活動との関連性を示唆する現象が観測されている。領域Dでの活動は2007年の噴火前の地震活動でも見られた。このときの活動も2ヶ月程度続き、その後領域BやCでの群発的な活動が発生している。これらの深さは長野県西部地震の余震活動から見えた反射面の深さ(Inamori et al, 1992)ともよく一致することから、領域D付近が深部から流体上がり口で、そこから上がってきた流体がすでに流路ができているところでは地震を起こさず流路がないところでは群発的に地震を発生しながら広がっているようにも見える。2006年以前についてはデジタル記録がそろわないためMatched Filter法を用いた解析ができないが、気象庁の震源情報によると1988年や1993年頃にも活発化しているようである。ただし2000年以前のこの付近の震源決定精度はあまり良くない。
 3. さらに深部の深さ30-35kmの地震については2010年2月3日19時代に極めて活発な活動があった。その他の時期についてはパラパラと活動があることはわかったが、あまり相関が良くない。現在テンプレートが2010年と2015年の活動の5イベントしかなく、毎回活動の場所が少しずつ異なっていることを意味しているのかもしれない。気象庁の震源情報をみると2002年8月にも深さは22-30kmとやや浅めであるが群発的に発生している。
- 今後これらの活動についても調べ、御嶽山山頂周辺のやや深い地震の活動と噴火活動、群発地震との関係を明らかにしたい。

図1 御嶽山山頂周辺の地震活動（テンプレート地震）。赤星と太い線の長方形は1984年長野県西部地震の震央と断層の位置を示す。グレーの四角は観測点、オレンジ色のハッチは群発地震発生域を示す。

