Wed. Sep 18, 2019

Room B | General session：S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

9:15 AM - 10:30 AM JST | 12:15 AM - 1:30 AM UTC | ROOM B Symposium Hall, International Science Innovation Building

[S08]AM-1

chairperson:Takuji Yamada(Ibaraki University), Nana Yoshimitsu(University of Tokyo)

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[S08-18] Slip inversion using empirical Green's function considering radiation patterns

*Ritsuya Shibata[1], Genki Oikawa[1], Naofumi Aso[1], Junichi Nakajima[1], Satoshi Ide[2] (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo)

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[S08-19] Source mechanism and triggering process for the April 12th and 13th 2014 earthquake doublet in Solomon Islands

*Calvin Luiramo Qwana[1], Masatoshi Miyazawa [2], James Jiro Mori[2] (1. Graduate School Science Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute Kyoto University)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S08-20] **Evaluation of source parameters in the Bayesian framework by Markov Chain Monte Carlo method**

*Nana Yoshimitsu[1], Takuto Maeda[2], Tomonari Sei[3] (1. ERI, UTokyo, 2. Hirosaki Univ., 3. IST, UTokyo)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S08-21] Spatiotemporal characteristic of frictional properties on the subducting Pacific Plate off the Tohoku region, Japan

*Takuji Yamada[1], Meitong Duan[1], Jun Kawahara[1] (1. Ibaraki University)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S08-22] Possible aseismic phenomena causing the precursory activity and aftershocks of the 2017 M 5.3 Kagoshima Bay earthquake, Kyusyu, SW Japan

*Yoshiaki Matsumoto[1], Keisuke Yoshida[1], Toru Matsuzawa[1], Akira Hasegawa[1] (1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, Japan)

Room B | General session：S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

10:45 AM - 12:00 PM JST | 1:45 AM - 3:00 AM UTC | ROOM B Symposium Hall, International Science Innovation Building

[S08]AM-2

chairperson:Toshiko Terakawa(Nagoya University), Keisuke Yoshida(Tohoku University)

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[S08-23] **Stress release process along a crustal fault during the foreshock-mainshock-aftershock sequence of the 2017 M5.2 Akita-Daisen earthquake**

*Keisuke Yoshida Yoshida[1], Tatsuhiko Saito[2], Taka'aki Taira[3], Kentaro Emoto[1], Toru Matsuzawa[1] (1. Tohoku University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. UC Berkeley)

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

[S08-24] CMT inversion of aftershocks of the Yufu, Oita earthquake triggered by the 2016 Kumamoto earthquake using 3D FDM Green functions

*Hirofumi Kowari[1], Masanao Komatsu[1], Hiroshi Takenaka[1], Taro Okamoto[2], Takeshi Nakamura[3] (1. Department of Earth Sciences, Okayama University, 2. Tokyo Institute of Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[S08-25] **Stress field in and around the aftershock area of the 2018 Northern Osaka Prefecture earthquake**

*Yoshihisa Iio[1], Hiroshi Katao[1], Kazuhide Tomisaka[1], Masayo Sawada[1], Takuo Shibutani[1], Airi Nagaoka[1], Jun Nakagawa[1], Shukei Ohyanagi[1], Shota Hara[1], Mitsu Sakaguchi[1], Abuyama Supporters[1], Satoshi Matsumoto[2], Takeshi Matsushima[2], Megumi Kamizono[2], Shin-ichi Sakai[3], Masataka Masuda[3], Shin-ichi Tanaka[3], Yoshinari Hayashi[4] (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[S08-26] A new energetics-based failure criterion for understanding the spatial pattern of aftershocks

*Toshiko Terakawa Terakawa[1], Mitsuhiro Matsu'ura[2], Akemi Noda[3] (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. ISM, 3. NIED)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[S08-27] Metrics for Aftershock Generation Based on the Energetics of Shear Faulting

*Mitsuhiro Matsu'ura[1], Toshiko Terakawa[2], Akemi Noda[3] (1. Institute of Statistical Mathematics, 2. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univerisity, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Room B | General session：S12. Rock Mechanics, Crustal Stress

2:30 PM - 3:15 PM JST | 5:30 AM - 6:15 AM UTC | ROOM B Symposium Hall, International Science Innovation Building

[S12]PM-1

chairperson:Muneyoshi Furumoto(Tono Research Institute of Earthquake Science), Kentaro Omura(NIED)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S12-01] Applications of DCDA method to rock core samples from NIED seismic observation wells -Attempt for in-situ crustal stress measurement-

*kentaro Omura[1], Weiren Lin[2], Takatoshi Ito[3], Akio Funato[4] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. Institute of Fluid Science, Tohoku University, 4. Fukada Geological Institute)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[S12-02] Correlation of frictional property on volcanoclastic sediment with changes in its mineral assemblage and microstructure

*Akari Fuke[1], Tetsuro Hirono[1], Shunya Kaneki[2] (1. Science, Osaka University, 2. DPRI, Kyoto University)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[S12-03] Experimental investigation of cumulative effect on thermal maturation of carbonaceous material as a proxy for earthquake slip

*Yutaro Shimamura[1], Tetsuro Hirono[1] (1. Osaka University)

Room B | General session：S11. Various Phenomena Associated with Earthquakes

3:15 PM - 4:15 PM JST | 6:15 AM - 7:15 AM UTC | ROOM B Symposium Hall, International Science Innovation Building

[S11]PM-1

chairperson:Muneyoshi Furumoto(Tono Research Institute of Earthquake Science), Kentaro Omura(NIED)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[S11-01] What are Posibilities of Influencing of the Strong Vertical Impulsive Seismic Motions on the Occurrence of Grate Landslides ?

*Hroshi Mehara[1] (1. Geosystem Research Institute)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[S11-02] Tomographic study of 3D distribution of the ionospheric electron density anomalies before and after the 2011 Tohoku-oki eq.

*Kosuke Heki[1], Ihsan Naufal Muafiry[2] (1. Dept. Earth Planetary Sci., Hokkaido University , 2. Dept. Natural Hist. Sci., Hokkaido University)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[S11-03] Geomagnetic variations coincident with the passage of longer period surface waves

*Muneyoshi Furumoto[1], Osamu Murakami[1], Yasuhiro Asai[1] (1. Tono Research Institute of Earthquake Science)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[S11-04] Reality of "swirling clouds" associated with earthquakes

*Yuji Enomoto[1], Tsuneaki Yamabe[1], Shigeki Sugiura [2], Hitoshi Kondo[2] (1. Shinshu University, 2. Genesis Research Institute, INC.)

Room B | General session：S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

Wed. Sep 18, 2019 9:15 AM - 10:30 AM JST | Wed. Sep 18, 2019 12:15 AM - 1:30 AM UTC | ROOM B Symposium Hall, International Science Innovation Building

[S08]AM-1

chairperson:Takuji Yamada(Ibaraki University), Nana Yoshimitsu(University of Tokyo)

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[S08-18] Slip inversion using empirical Green's function considering radiation patterns

*Ritsuya Shibata[1], Genki Oikawa[1], Naofumi Aso[1], Junichi Nakajima[1], Satoshi Ide[2] (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo)

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[S08-19] Source mechanism and triggering process for the April 12th and 13th 2014 earthquake doublet in Solomon Islands

*Calvin Luiramo Qwana[1], Masatoshi Miyazawa [2], James Jiro Mori[2] (1. Graduate School Science Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute Kyoto University)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S08-20] **Evaluation of source parameters in the Bayesian framework by Markov Chain Monte Carlo method**

*Nana Yoshimitsu[1], Takuto Maeda[2], Tomonari Sei[3] (1. ERI, UTokyo, 2. Hirosaki Univ., 3. IST, UTokyo)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S08-21] Spatiotemporal characteristic of frictional properties on the subducting Pacific Plate off the Tohoku region, Japan

*Takuji Yamada[1], Meitong Duan[1], Jun Kawahara[1] (1. Ibaraki University)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S08-22] Possible aseismic phenomena causing the precursory activity and aftershocks of the 2017 M 5.3 Kagoshima Bay earthquake, Kyusyu, SW Japan

*Yoshiaki Matsumoto[1], Keisuke Yoshida[1], Toru Matsuzawa[1], Akira Hasegawa[1] (1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, Japan)

Slip inversion using empirical Green's function considering radiation patterns

*Ritsuya Shibata[1], Genki Oikawa[1], Naofumi Aso[1], Junichi Nakajima[1], Satoshi Ide[2]

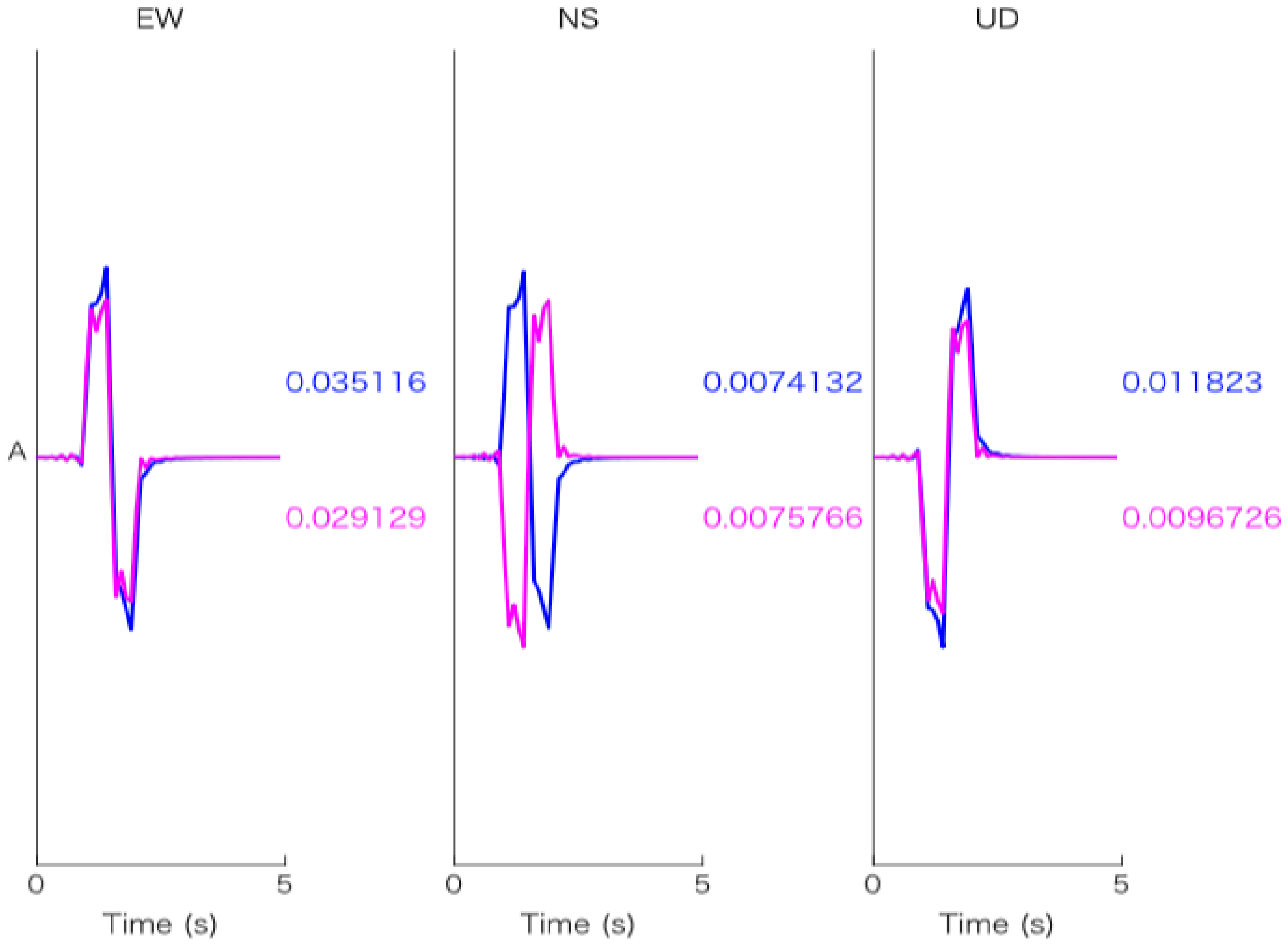
1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

震源過程を解析する手法として波形インバージョンが広く用いられている。この波形インバージョンは、グリーン関数と滑り量を時空間でコンボリューションして生成される理論波形で観測波形を再現するアプローチであり、その波形残差を最小にするような各小断層の時間ステップごとの滑り量を最小二乗的に求めるのが一般的である。このとき、グリーン関数として、仮定した速度構造から理論的に求められるグリーン関数 (例えばBouchon, 1981; 武尾, 1985) を用いる場合と、近傍で発生した同様のメカニズムの地震波形を経験的グリーン関数 (例えばHartzell, 1978) として用いる場合がある。経験的グリーン関数は、実際の複雑な速度構造の影響を説明できる一方で、両者の震源が十分に近いことやメカニズムの類似性が要求されるため、解析対象とする地震の震源近傍に本震と似たメカニズムの地震が存在しなければ適用できないという欠点がある。

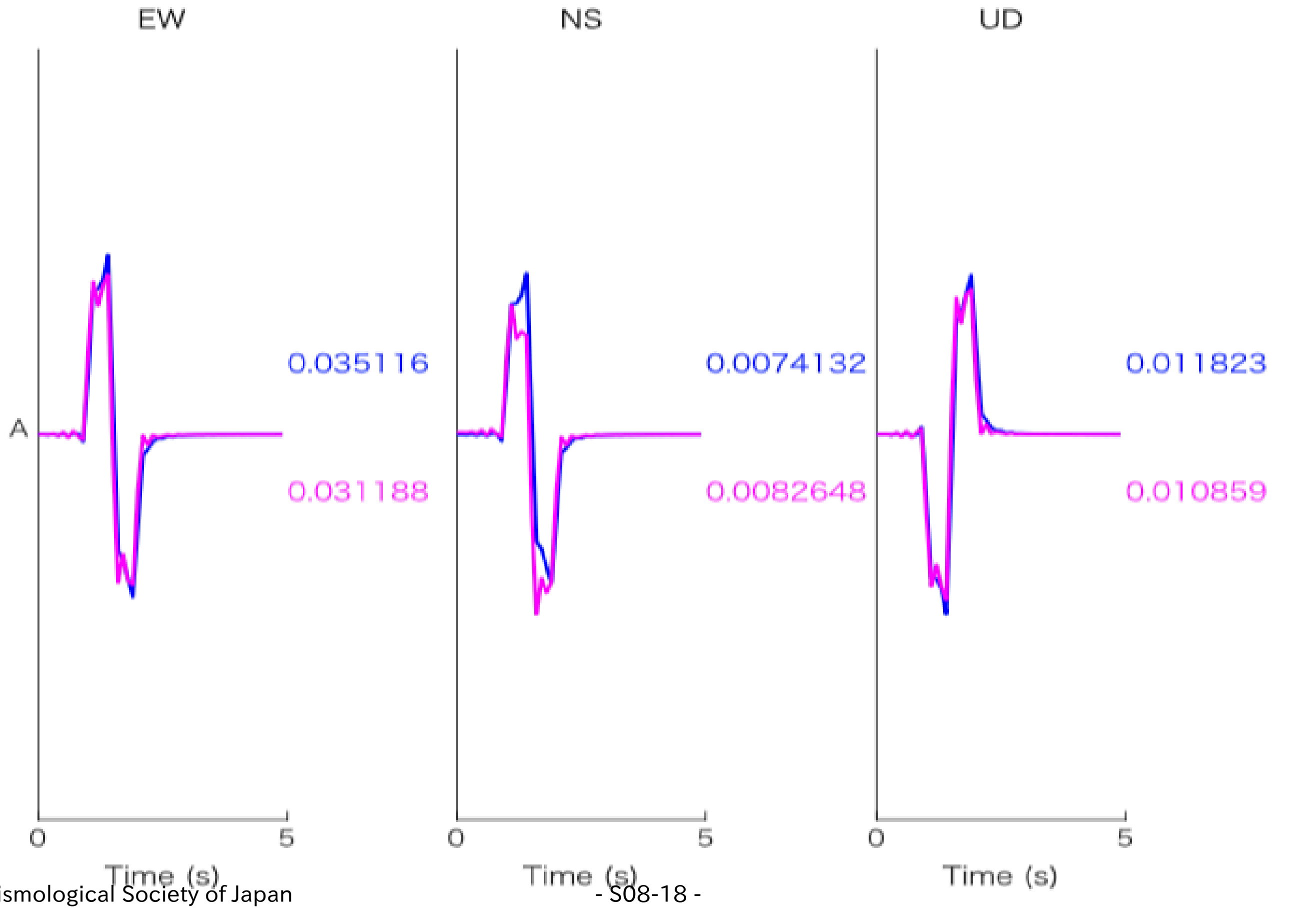
しかしながら、地震波形の複雑性に大きく寄与する観測点近傍の経路がほぼ共通であれば、震源位置やメカニズムが多少異なる地震の波形でも、放射パターンの影響を補正した上でグリーン関数として用いることができる可能性がある。そのような補正が実用的であれば、経験的グリーン関数の適用範囲を広げることが期待される。そこで本研究では、放射パターンを考慮した経験的グリーン関数を用いた波形インバージョン手法を開発し、理論波形を用いてテストを行った。

具体的には、波線理論を仮定して、射出角とモーメントテンソルの情報から、対象とする地震の小断層での滑りと経験的グリーン関数に用いる地震について理論的な放射パターン（Aki and Richards, 2002）を計算し、その比を用いてP波・SH波・SV波のそれぞれについて観測点毎に補正をおこなった。放射パターンには、メカニズムが異なることによる直接的な影響と、震源位置が異なることによるみかけ上の影響があるので、一番単純なケースとして、震源位置が同じでメカニズムが異なる点震源同士、メカニズムが同一で震源位置が異なる点震源同士について、本手法による補正の効果を確認した。後者の例として、北緯40度・東経141度で深さ50kmと200kmで発生し、北緯41度・東経141.5度の地表で観測される理論地震波形を、それぞれ赤色・青色で図に示す。なお、メカニズムは走向0度・傾斜90度の左横ずれ断層を仮定している。本研究で提案した補正により、振幅が正しく評価できていることが確認できる。今後、矩形断層でのテストを行ったうえで、実データへの適用を目指す。

© The Seismological Society of Japan



放射パターンによる補正をかけなかった場合の波形



© The Seismological Society of Japan

© The Seismological Society of Japan

Source mechanism and triggering process for the April 12th and 13th 2014 earthquake doublet in Solomon Islands

*Calvin Luiramo Qwana[1], Masatoshi Miyazawa [2], James Jiro Mori[2]

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

This abstract is the result of the study carried out on two earthquakes that occurred on 12th and 13th April 2014 in the Solomon Islands., The pair of earthquakes with magnitudes Mw 7.6 and Mw7.4, respectively, occurred near Makira Island (San Cristobal). The depth of the main event (Mw 7.6) was 27 km and depth of the second event (Mw 7.4) was 37 km (Global Centroid Moment Tensor (GCMT). The second event occurred 16 hours later after the Mw 7.6, approximately 20km southwest of the location of the hypocenter of the first event. our study aims to analyze and evaluate the source mechanism for the doublet earthquakes and evaluate the interrelation between the two events, especially to investigate "Why the Solomon Islands has a high rate of doublet earthquakes" (Lay and Kanamori, 1979; Schwartz et al., 1989; Felzer et al., 2004, Yamamoto et al., 2002 and Xu and Schwartz, 1993). The study aims to establish a framework in which to understand the mechanisms of the triggering process for these large doublet events. The study uses static Coulomb stress function to evaluate if the Mw 7.4 earthquake was triggered by static stress changes. Initially, the slip distributions of ruptured faults for the two events was determined to evaluate their source process. This was done by the inversion method of Kikuchi and Kanamori (1991). The teleseismic P waveform data from more than 20 stations Global Seismographic Network in a distance range of 30° *to* 90°, were used in the inversions for both events. The P-waveform data were band-passed filtered between 0.04 and 0.10 hz to obtain the best-fits between the observed waveform and the synthetic waveform. The Green's functions were calculated and used to determine the slip distribution on the fault planes. Based on an assumed fault plane with fixed strike and dip angles placed in the region of the earthquake hypocenter and divided into subfaults, a constant rupture velocity of 2.5 km/s is assumed and the telseismic data inverted for the slip of each subfaults

The results show that the mechanism for the Mw 7.6 first event is left-lateral strike-slip faulting for a fault plane of strike 116, dip 74, and rake 24 degrees. , The results for the mechanism of the Mw7.4 event indicates thrust faulting on a fault plane-oriented WNW –ESE with two dip angles, i.e. a south dipping fault plane with strike 104 degree, dip 46, rake 86 (Fig 1.7) and a north dipping fault with strike 279, dip 44 and rake 94.

We calculated the values for the Coulomb Failure Stress function at the hypocenter for the second event and obtained a value of +48.59 kPa for the north dipping fault and a value of +18.20.64 kPa for the south dipping plane.

The spatial distribution of aftershocks for 16 hours seems to be more consistent with the northern dipping fault for the triggered event. Both cases, however, show increase of stress changes which encourages the likelihood that the second event was triggered by static Coulomb stress. We proposed a model that might support the complexicity of the region to produce these doublet events.

© The Seismological Society of Japan

Evaluation of source parameters in the Bayesian framework by Markov Chain Monte Carlo method

*Nana Yoshimitsu[1], Takuto Maeda[2], Tomonari Sei[3]

1. ERI, UTokyo, 2. Hirosaki Univ., 3. IST, UTokyo

Stress drop is an important factor to express earthquake source characteristics, and it is utilized for the hazard assessment. To estimate the stress drop, we usually compare the theoretical source spectrum representation with the spectrum of the observed waveforms. In this process, we estimate seismic parameters (corner frequency and seismic moment) that are necessary to calculate the stress drop. Previously, the estimation error of these parameters decreased the reliability of the stress drop estimates. For evaluating the estimation accuracy and trade-off among parameters, we used Markov Chain Monte Carlo (MCMC) method in the Bayesian framework for stress drop analysis (Yoshimitsu et al., SSJ, 2018) instead of grid search.

In this study, we introduce F-distribution into MCMC as a probability density function instead of normal distribution. To estimate the stress drop, we use the spectral ratio of co-located two earthquakes to cancel the path effect. The ratio of power spectrum between observed and theoretical spectrum is represented by chi-square, and the ratio of two chi-squares is represented by F-distribution. Thus, the ratio of the observed power spectrum of two earthquakes divided by the ratio of the theoretical power spectrum of two earthquakes is represented by F-distribution.

We focused on a cluster consisted of 36 earthquakes that occurred from 2015 May to 2016 November in Oklahoma. The spectral ratios between the large event ($M_L = 4.1$) and co-located small events ($2.2 < M_L < 3.7$; < 2 km from the large event) were formed to remove path effects. We analyzed 5.12 seconds after twice the S-arrival time with the band-pass filter of 0.5 to 30 Hz. To examine the probability of corner frequencies and moment ratio of each event pair, we applied the Metropolis-Hastings algorithm of the Markov Chain Monte Carlo method that is a random walk adaptation. Each event observed a different number of stations, and we used as many stations as possible. To calculate the likelihood, we use all spectral ratios simultaneously. We update the value of moment ratio and two corner frequencies with 200,000 iterations.

Sampling distribution showed strong trade-off among all three parameters. Moment ratio has a negative correlation with f_{c1} and f_{c2}. f_{c1} has a positive correlation with f_{c2}. The histogram of the sampling showed a single peak in most cases, but some events showed multimodal histogram.

We compared the results obtained from MCMC with F-distribution and normal distribution. Both calculations showed almost similar estimates, but the sampling distribution was different. In this analysis, F-distribution is suitable for probability density function than normal distribution because sampling distribution is reasonable.

Acknowledgements : NY, TM and TS are supported by JST CREST Grant Number JPMJCR1763.NY is supported by JSPS KAKENHI, Grant Number 19K14812.

© The Seismological Society of Japan

Spatiotemporal characteristic of frictional properties on the subducting Pacific Plate off the Tohoku region, Japan

*Takuji Yamada[1], Meitong Duan[1], Jun Kawahara[1]

1. Ibaraki University

1. はじめに

東北地方東方沖では、太平洋プレートの沈み込みに伴う大地震が繰り返し発生している。本研究では、2003年1月から2018年12月に東北地方東方沖で発生した中規模地震（4.4 Mw 5.0）のうち、2.で説明するとおり、プレート境界面の摩擦特性を反映していると考えられる1735地震を選び出し、応力降下量の解析を行った。さらに、2011年東北地方太平洋沖地震（Mw 9.0；以下では2011年東北地震と略す）を含む過去のMw 7.0 の地震時すべり分布との関連を議論することにより、応力降下量の空間分布が示唆するプレート境界面の摩擦特性の時空間分布およびその物理的背景について考察を行った。

2. 解析地震の選択基準

本研究では深さ方向の震源決定精度を考慮して、Nakajima and Hasegawa (2006)の推定した太平洋プレート境界面から±15 km の深さで起きた中規模地震（4.4 Mw 5.0）を選び、解析対象とした。なお本研究では、気象庁によって決定されたマグニチュードMjmaがモーメントマグニチュードMwに等しいと仮定しているが、この仮定の妥当性についても検討済みである。また、解析対象地震のうち、防災科学技術研究所によってメカニズム解が求められている地震については、太平洋プレートの沈み込み角度と調和的な節面を持つことを確認済みである。

3. 応力降下量解析

Yamada *et al.* (2010, 2015, 2017) の手法を用いて、応力降下量の解析を行った。まず、2012年から2018年に発生したMw3.5の地震のうち、解析対象の中規模地震（4.4 Mw 5.0）の震源から最短距離にある地震の観測波形を経験的グリーン関数とした。次に、解析対象の地震の観測波形スペクトルを経験的グリーン関数のスペクトルでデコンボリューションし、震源スペクトルがオメガ2乗モデルに従うとの仮定のもと、解析対象地震のコーナー周波数を求めた。最後に、断層面が円形であり、かつ破壊伝播速度がS波速度の90%であると仮定して、Madariaga (1976) のモデルを用いてコーナー周波数から応力降下量を計算した。

4. 結果および考察

各地震の応力降下量の解析結果をもとに、緯度・経度それぞれ0.1度ごとに平滑化した応力降下量分布をFig. 1に示す。Fig.1aより、応力降下量の解析結果には空間的な不均質性がみられ、Iinuma *et al.* (2012)による2011年東北地震の地震時すべり分布と比較すると、地震時すべり域周辺に大きな応力降下量が分布していることがわかる。この結果は、摩擦強度の大きい領域が2011年東北地震時にバリアとして働いたことを示唆している。2011年東北地震前後での時間変化を調べると（Fig.1bc）、宮城県沖および福島県沖におい

© The Seismological Society of Japan

て、2011年東北地震後に応力降下量が低下した領域が見られる。現時点でこれらの原因は不明だが、より詳細な時間変化の調査から原因究明を図りたい。なお、本研究の解析対象領域については、Uchide *et al.* (2014)が2011年東北地震前の応力降下量の空間分布を求めている。本研究とは解析手法が異なるが、本研究はUchide *et al.* (2014)の結果と調和的である（Fig. 1b）。このことは、本研究の解析結果の信頼性の高さを示唆している。

謝辞：本研究では、Hi-net（防災科学技術研究所）、気象庁、北海道大学、東北大学、東京大学の観測点の地震波形データと、気象庁の一元化震源およびP, S検測値を使用しました。記して感謝いたします。

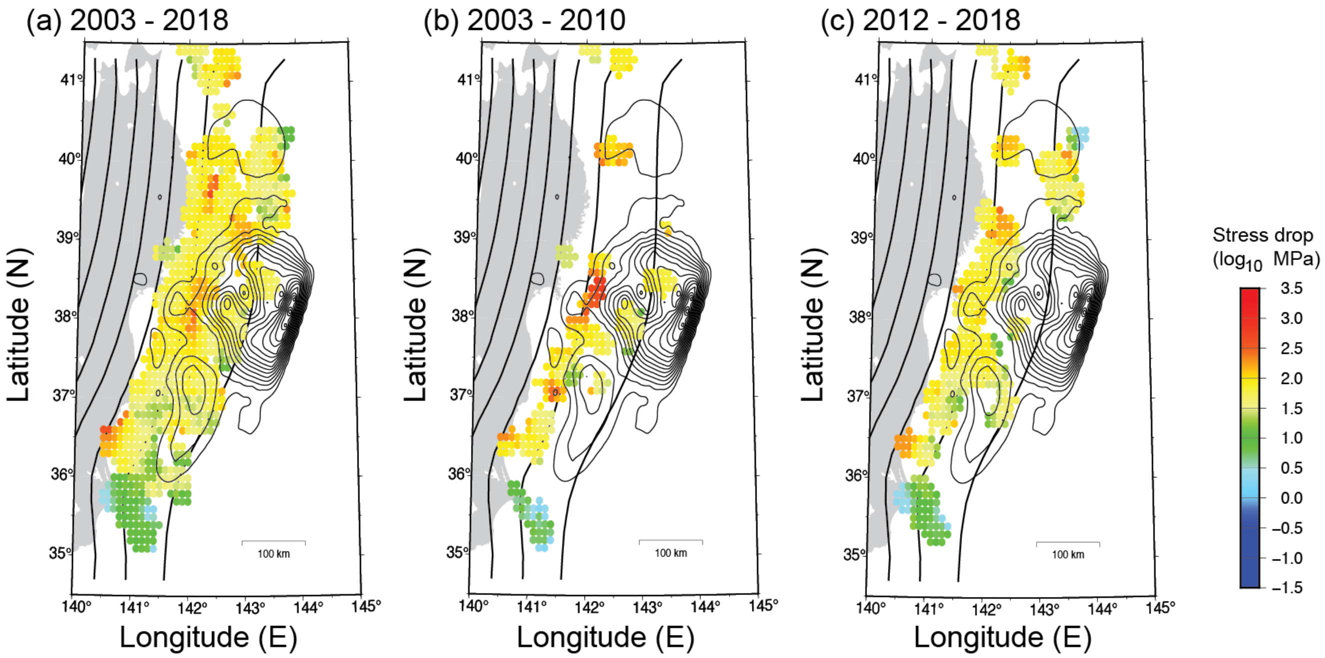


Figure 1. Spatial pattern of stress drops estimated from moderate-sized earthquakes with 4.4 ≤ Mw ≤ 5.0 that occurred (a) in 2003 through 2018, (b) from 2003 to 2010, and (c) from 2012 to 2018. Contours indicate the coseismic slip distribution of the 2011 Tohoku earthquake with Mw 9.0 (Iinuma *et al.*, 2012) at intervals of 2 m. Bold lines in NS direction express the depth of the upper surface of the subducting Pacific Plate (Nakajima and Hasegawa, 2006) at intervals of 20 km.

© The Seismological Society of Japan

Possible aseismic phenomena causing the precursory activity and aftershocks of the 2017 M 5.3 Kagoshima Bay earthquake, Kyusyu, SW Japan

*Yoshiaki Matsumoto[1], Keisuke Yoshida[1], Toru Matsuzawa[1], Akira Hasegawa[1]

1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, Japan

地震の発生要因としては，断層上のせん断応力の増加の他に，摩擦強度の低下が考えられる．このことは，地震の発生に間隙水圧の変化が深く関わっていることを示唆する (例えば，Hasegawa, 2017; Hubbert and Rubey, 1959; Nur and Booker, 1972; Sibson, 1992)．従って，地下の流体の挙動を調べることは地震の発生メカニズムを考える上でとても重要である． 震源 migration は，地下に存在する流体の移動や面に沿っての非地震性の滑りのような非地震的な現象に起因するとよく説明される．このように，詳細な震源の時空間分布は，地殻や上部マントルで生じている非地震的な現象を調べるための重要な手がかりとなる．

2017 年 7 月 11 日 11:56 (JST) に，鹿児島湾の深さ約 10 km を震源とする M 5.3 の地震が発生した．本震震源の周辺では，前年の2016 年 12 月頃を境に地震活動が活発化していたことがわかっている．本研究では，M 5.3 の地震の前後で発生した地震について，波形相関を用いた精密な震源再決定により求めた詳細な震源分布を用いて，振幅比によって決定されたメカニズム解との比較や本震の断層サイズとの比較等を行うことで，一連の地震活動活発化の原因について調べた．

まず，気象庁一元化震源カタログに記載されている 2010 年1月から2018年4月の期間において鹿児島湾南部の本震震源周辺で発生した地震を対象にして，波形相関を用いることで精密な到達時刻差を求めた．この波形相関を用いて得られた到達時刻差データとカタログ記載の検測値の到達時刻差データに対し，Double-Difference 震源決定法 (Waldhauser & Ellsworth, 2002) を適用した．初期震源としては，気象庁一元化震源カタログデータを用いた．

震源再決定により，気象庁一元化カタログデータでは雲状にばらついていた震源が，複数枚の面上に集中した．それらのうちの主要な面の方向は，気象庁による本震や余震の初動発震機構解や波形の振幅比を用いた手法 (Dahm, 1996) によって推定された多くの余震のメカニズム解の節面の一つと整合的であることから，これらの地震は震源のならぶ面上を破壊したと考えられる．

特に，前駆的活動の震源の多くは 1 枚の面上に集中し，震源が時間と共に面上を広がるような明瞭な震源 migration の特徴を示した．震源 migration の原因として，非地震性すべり (e.g. Lohman & McGuire, 2007) や流体の移動 (e.g. Parotidis, 2003)，地震発生準備過程 (e.g. Kato et al. 2016) 等が考えられているが，この震源 migration は，水頭拡散率が 0.05 (m^2/s) の流体拡散モデルによる流体の移動で説明できる． 余震の震源は複数枚の面状構造を示し，その活動が時間とともに浅部から深部へと移動する傾向がみられる．このような深部から浅部へと向かう震源移動の特徴は，流体の関与が指摘されている，東北沖地震後にstress shadowである東北地方中部で発生した群発地震活動の特徴 (Yoshida & Hasegawa, 2018) と良く似ている．

次に，Lin & Shearer (2007) の手法により，波形相関を計算して求めたイベント間の到達時刻差を使用して震源域におけるP波とS波の地震波速度比 Vp/Vs の推定を行った．その結果，前駆的活動について推定した Vp/Vs の値は，早期の余震よりも高い値を示す傾向がみられた．また，本震発生から 20 日以降の余震についての Vp/Vs も前駆的活動と同じような高い値を示した．これらの結果と震源分布や地震活動の時間変化との比較から，Vp/Vs の時間変化は本震発生による流体圧の変化を反映していることが示唆される．以上の結果から，鹿児島湾の地震活動の発生には，流体による関与が考えられる．

© The Seismological Society of Japan

さらに，前駆的活動の震源が形成する「面」の中には震源の空白域がみられ，本震震源は空白域の端に位置する．余震の震源もまた空白域を避けるように分布することから，本震の主要なすべり域がこの空白域に対応する可能性がある．スペクトル比法を用いて推定した本震震源スペクトルのコーナー周波数から求めた本震の断層サイズはこの空白域の大きさと整合的であった． このことは，本震のすべり域が空白域に位置することを支持し，断層上の摩擦強度の不均質を示しているのかもしれない．

以上の前駆的活動と余震活動にみられた震源の空白域および震源の migration などの特徴は，次のように考えると説明できるかもしれない．(1) 本震の発生に先立ち既存の亀裂等の弱面に流体が浸入し，弱面の摩擦強度が減少することで，活発な前駆的活動が生じた．そして，流体が弱面に沿って移動することに伴い，前駆的活動の発生場所も徐々に移動した. この際，トリガーされた非地震性すべりや本震の前駆的すべりも生じて地震発生・震源移動に貢献したかもしれない．(2) 前駆的活動がさらに進行し，前駆的活動では地震すべりが生じなかった空白域においてもついに本震すべりに至った． (3) 本震に伴う応力変化により広範囲で余震が生じた．また前駆的活動や本震に関与した流体が複数枚の弱面を伝わりながら浅部へ移動していった結果，震源も深部から浅部へと移動した．

© The Seismological Society of Japan

Room B | General session：S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

Wed. Sep 18, 2019 10:45 AM - 12:00 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 1:45 AM - 3:00 AM UTC | ROOM B Symposium Hall, International Science Innovation Building

[S08]AM-2

chairperson:Toshiko Terakawa(Nagoya University), Keisuke Yoshida(Tohoku University)

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[S08-23] **Stress release process along a crustal fault during the foreshock-mainshock-aftershock sequence of the 2017 M5.2 Akita-Daisen earthquake**

*Keisuke Yoshida Yoshida[1], Tatsuhiko Saito[2], Taka’aki Taira[3], Kentaro Emoto[1], Toru Matsuzawa[1] (1. Tohoku University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. UC Berkeley)

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

[S08-24] CMT inversion of aftershocks of the Yufu, Oita earthquake triggered by the 2016 Kumamoto earthquake using 3D FDM Green functions

*Hirofumi Kowari[1], Masanao Komatsu[1], Hiroshi Takenaka[1], Taro Okamoto[2], Takeshi Nakamura[3] (1. Department of Earth Sciences, Okayama University, 2. Tokyo Institute of Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[S08-25] **Stress field in and around the aftershock area of the 2018 Northern Osaka Prefecture earthquake**

*Yoshihisa Iio[1], Hiroshi Katao[1], Kazuhide Tomisaka[1], Masayo Sawada[1], Takuo Shibutani[1], Airi Nagaoka[1], Jun Nakagawa[1], Shukei Ohyanagi[1], Shota Hara[1], Mitsu Sakaguchi[1], Abuyama Supporters[1], Satoshi Matsumoto[2], Takeshi Matsushima[2], Megumi Kamizono[2], Shin-ichi Sakai[3], Masataka Masuda[3], Shin-ichi Tanaka[3], Yoshinari Hayashi[4] (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[S08-26] A new energetics-based failure criterion for understanding the spatial pattern of aftershocks

*Toshiko Terakawa Terakawa[1], Mitsuhiro Matsu'ura[2], Akemi Noda[3] (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. ISM, 3. NIED)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[S08-27] Metrics for Aftershock Generation Based on the Energetics of Shear Faulting

*Mitsuhiro Matsu'ura[1], Toshiko Terakawa[2], Akemi Noda[3] (1. Institute of Statistical Mathematics, 2. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univerisity, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Seismological Society of Japan Fall Meeting

Stress release process along a crustal fault during the foreshock-mainshock-aftershock sequence of the 2017 M5.2 Akita-Daisen earthquake

*Keisuke Yoshida Yoshida[1], Tatsuhiko Saito[2], Taka’ aki Taira[3], Kentaro Emoto[1], Toru Matsuzawa[1]

1. Tohoku University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. UC Berkeley

Stress release process ongoing along a crustal fault examined through the foreshock-mainshock-aftershock sequence of the 2017 M5.2 Akita-Daisen, NE Japan, earthquake

Keisuke Yoshida, Tatsuhiko Saito, Taka’ aki Taira, Kentaro Emoto, Toru Matsuzawa

Stress accumulation and release processes in the crust are less understood compared to those in the plate boundary. One difficulty in examining the temporal evolution of stress along a crustal fault comes from weakness of geodetic signal due toaseismic slip possibly proceeding along a crustal fault. Spatiotemporal variations in foreshock and aftershock activities can provide key constraints on time-dependent stress and deformation processes in the crust.

The 2017 M 5.2 Akita-Daisen intraplate earthquake in NE Japan was preceded by an intense foreshock activity and triggered a remarkable sequence of aftershocks. In this study, we examine the spatiotemporal distributions of foreshocks and aftershocks and determine the coseismic slip distribution of this earthquake. In this study, we examine the spatiotemporal distribution of precisely relocated hypocenters of foreshocks and aftershocks and the coseismic slip distribution of the 2017 M5.2 Akita-Daisen earthquake in NE Japan, to shed light on processes that release stress in the crust.

Our result indicates that the seismicity concentrates forming a planar distribution with N-S strike dipping slightly eastward consistent with their focal mechanisms. We find a migration of foreshocks towards the mainshock rupture area, suggesting that they were triggered by aseismic phenomena such as fluid migrations and episodic aseismic slip events. Alternatively, the foreshock migration might be related to the quasi-static expansion of the slow slip associated with the nucleation phase of the mainshock.

The mainshock rupture was propagated primary toward north with lower coseismic slip in foreshock regions. Aftershocks were intensely triggered near the edge of large coseismic slip regions where shear stress increased after the mainshock. The aftershock region expanded along the fault strike with the logarithm of time, which would be attributed to the post-seismic slip of the mainshock.

The postseismic slip possibly triggered repeating earthquakes with M ˜3. We applied the relationship between fault slip and earthquake magnitude proposed by Nadeau & Johnson (1996, BSSA) to the observed repeating earthquakes in this study for exploring post-seismic slip. The resultant post-seismic slip amount is comparable or slightly larger than the maximum coseismic slip amount of 28 cm. Our observation is consistent with previous work for California micro-earthquakes (Hawthorne et al.. 2016, JGR).

© The Seismological Society of Japan

As a whole, foreshocks, the mainshock, aftershocks and post-seismic slip released stress at different segments on the fault, which might reflect the difference in frictional properties. Furthermore, there are probably aseismic slip behind the occurrences of aftershocks and foreshocks, which also contributed to the redistribution of stress. Such observations are similar to those observed for interplate earthquakes, which is consistent with the model that the deformation processes along plate boundaries and the crustal fault are not essentially different.

The static stress drop of the mainshock is estimated to be 4.7 MPa, the apparent stress is 1.3 MPa, and the radiation efficiency is 0.55. The radiation efficiency might be relatively high compared to recent observations of crustal earthquake. It might suggest that the present earthquake occurred on a rather mature fault. The similarity to interplate earthquake might be relevant to the maturity of the fault.

© The Seismological Society of Japan

CMT inversion of aftershocks of the Yufu, Oita earthquake triggered by the 2016 Kumamoto earthquake using 3D FDM Green functions

*Hirofumi Kowari[1], Masanao Komatsu[1], Hiroshi Takenaka[1], Taro Okamoto[2], Takeshi Nakamura[3]

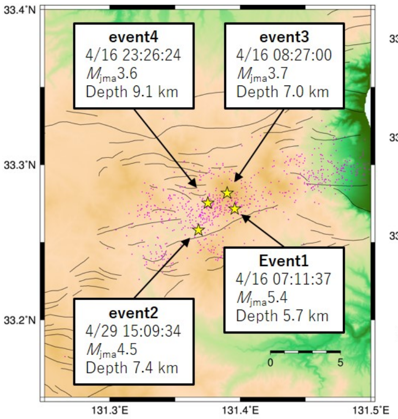
1. Department of Earth Sciences, Okayama University, 2. Tokyo Institute of Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2016年4月16日1時25分に熊本県を震源とするM_{JMA}7.3の熊本地震が発生し, 約32秒後に大分県の由布を震源とするM_{JMA}5.7の地震を誘発した。誘発地震発生後1ヶ月以内に, 大分県由布から別府湾にかけて, 誘発地震の余震と考えられるM_{JMA}3.6からM_{JMA}5.4のイベントが4回発生した（図1）。我々はこれらの余震のうち規模の大きい2つのイベント：2016年4月16日7時11分（event1, M_{JMA}5.4）, 4月29日15時9分（event2, M_{JMA}4.5）の強震波形記録に3次元構造モデルを用いたCMTインバージョンを適用した（小割・他, 2018, JpGU）。本研究では, 先の2つのイベントの再解析の他に, 残り2つのイベント：2016年4月16日8時27分（event3, M_{JMA} 3.7）, 同日23時26分（event4, M_{JMA}3.6）の解析を行い, 地震の位置, 規模, 震源メカニズムを推定する。インバージョンにはOkamoto *et al.*（2017）のコード, グリーン関数の計算には陸上・海底地形を考慮できるNakamura *et al.*（2012）の3次元差分法コードを用いる（計算領域は, 図2 a）。このとき3次元構造モデルには, 地震基盤より上は地形とともに3次元地盤構造モデル（吉見・他, 2017）, 地震基盤より下は地震調査研究推進本部の全国1次地下構造モデル（暫定版）を使用する（図2 b）。本研究で使用した波形データは, 気象庁の震度観測計と防災科学技術研究所のK-NETとKiK-netの観測点で記録された加速度波形を積分した速度波形のうち, 3点以上の観測点（×3成分）の波形を使用した。小割・他（2018, JpGU）では帯域を一律周期10秒から30秒としたが, 本研究で対象としたイベントは規模が小さいことを考慮して, 周期数秒のより短周期の成分までインバージョンに含めた。

ここで, 結果の例として, event3（4月16日8時27分のM_{JMA}3.7のイベント）の結果を記す。帯域は周期4秒から30秒を用い, 観測記録は別府市鶴見（気象庁）, 別府市天間（同）, 湯布院（OIT009, K-NET）の3観測点を用いた。セントロイドの位置は, 気象庁一元化震源の震央位置より南西方向約2 kmで, 海水準からの深さ2 km（地表面からの深さ2.5 km）と求まった。セントロイドの深さは, 気象庁一元化震源（7.0 km）, F-net CMT（5 km）と比較して浅い。この地域は火山の影響で地震発生層の下限が非常に浅いと考えられている（例えば Matsumoto *et al.*, 2016, EPS）ことと整合的である。この地震の規模はM_W3.8と推定された。発表ではこの他のイベントの結果も示し, これらの地震の発生位置, 震源メカニズムや周辺の断層分布の関係から, 応力場及び誘発地震のメカニズムについて議論する。

謝辞：本研究では気象庁, 防災科学技術研究所の強震記録を使用しました。

© The Seismological Society of Japan



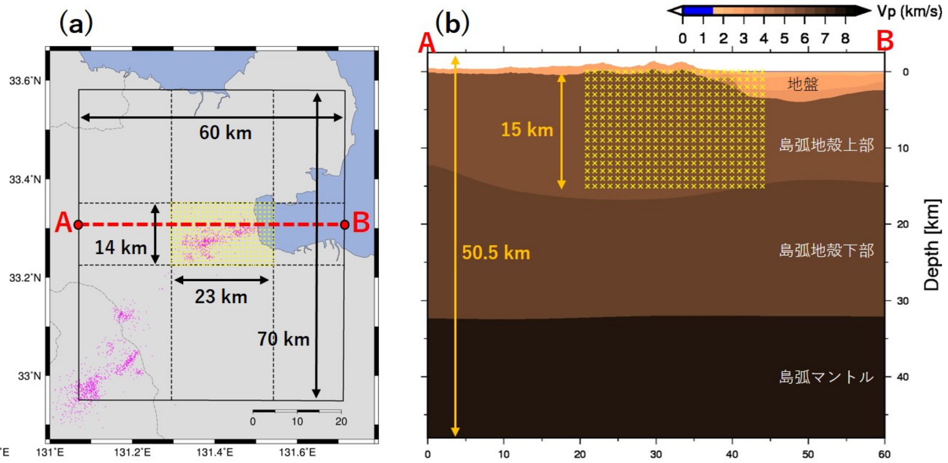


図1. 解析イベントの震央分布（星印）。紫点は2016年熊本地震の発震後24時間以内に発生した地震の震央，黒線は活断層の地表トレースを表す。

図2. (a) 計算領域（黒実線）。紫点は2016年熊本地震の発震後24時間以内に発生した地震の震央，黄色×印はセントロイド位置の候補点を表す。(b)(a)におけるA-B直下の構造モデルの断面。

Stress field in and around the aftershock area of the 2018 Northern Osaka Prefecture earthquake

*Yoshihisa Iio[1], Hiroshi Katao[1], Kazuhide Tomisaka[1], Masayo Sawada[1], Takuo Shibutani[1], Airi Nagaoka[1], Jun Nakagawa[1], Shukei Ohyanagi[1], Shota Hara[1], Mitsu Sakaguchi[1], Abuyama Supporters[1], Satoshi Matsumoto[2], Takeshi Matsushima[2], Megumi Kamizono[2], Shin-ichi Sakai[3], Masataka Masuda[3], Shin-ichi Tanaka[3], Yoshinari Hayashi[4]

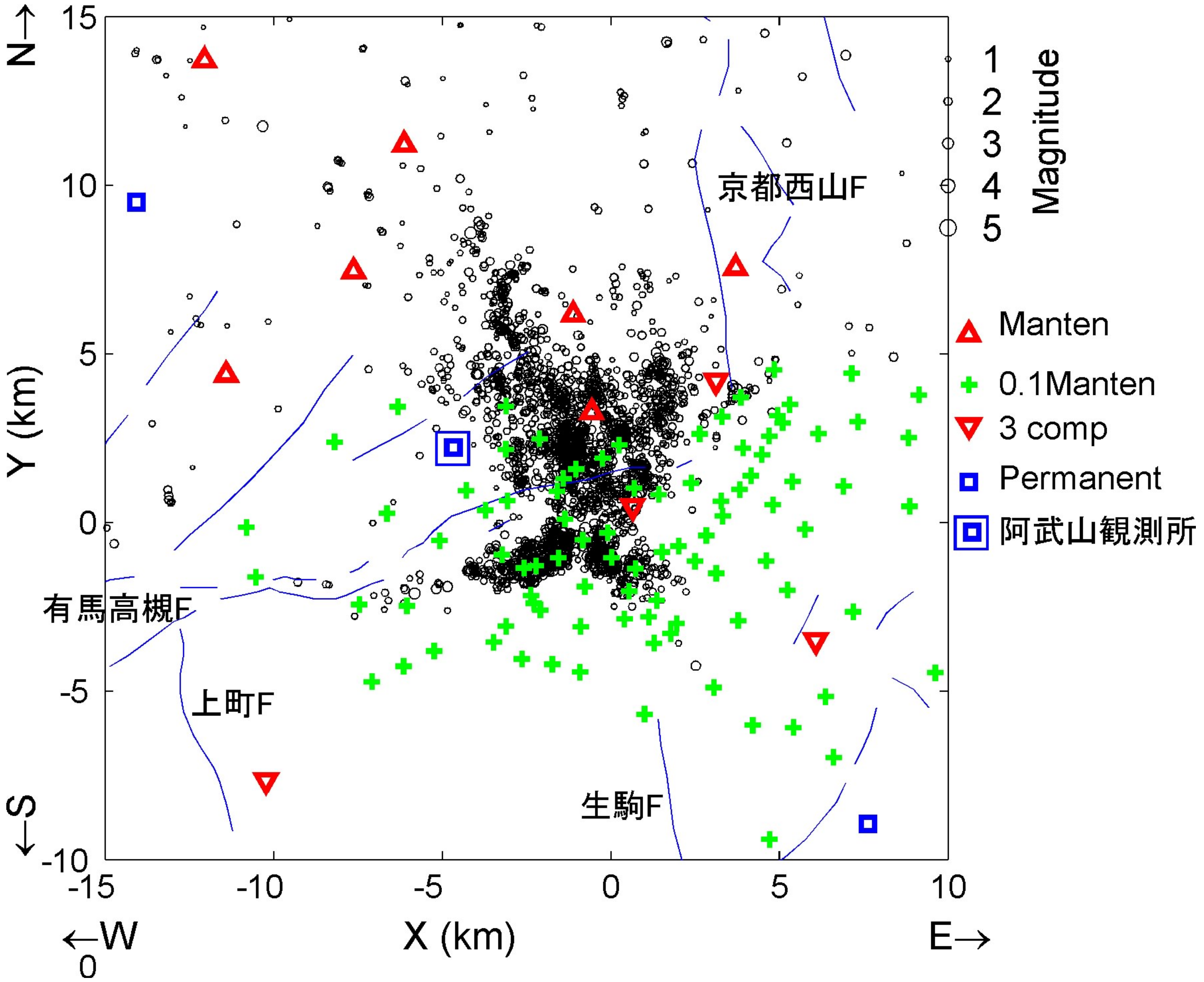
1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University

1.　はじめに
大阪府北部の地震（Mj 6.1）は、有馬高槻断層帯(ATL)の東端部付近、京都西山断層帯(KNF)、生駒断層帯、宇治川断層など活断層が集中する地域で2018年6月18日に発生した。余震域とその周辺の104か所において臨時地震観測を行い、周辺の「満点計画」の観測点および定常観測点のデータと統合して、詳細な余震の震源分布、地震メカニズム解の空間分布、および応力場を推定した。さらに、地震発生の約10年前から継続している満点計画による地震データを用いて、震源域周辺の広域の応力場を推定した。これらの推定結果と、浅野(2018)による震源モデルから推定される今回の地震による応力変化を組み合わせて、震源断層の両端部等における応力状態の推定を試みた。

2.　結果
余震の震央分布(2018年6月18日～9月1日)と観測点の分布を図に示す。余震は、阿武山観測所の直下、ATLとKNF付近に広く分布している。ATLの南側には微小地震のリニアメント(線状分布)が知られていたが(京都大学, 1995)、分布の南西端付近では、余震はそれに沿って延びているように見える。ATLの北方にも広く延びている。これらは、水平成層構造を用いて観測点補正値を考慮して決定されたものであるが、ATLとKNFを境にして浅部の速度構造が大きく異なっているため、震源の絶対位置については、３次元の速度構造を考慮して検討する必要がある。地震のメカニズム解は、基本的には南部で横ずれ型、北部で逆断層であり、２枚の断層が関係している震源モデル(例えば、浅野,2018)と調和的である。
余震のメカニズム解を用いた応力逆解析によると、余震域の応力場は、最大圧縮応力の向きが西北西-東南東の横ずれ型であり、近畿地方で一般的な東西方向より時計回りに回転している。余震域の北部では逆断層型となっている。満点計画データによる広域の応力場もこれと調和的であり、ATLの深部延長のすべりによる応力集中の可能性が示唆される。余震域の南部と北部における典型的なメカニズム解を示す地震(南部は横ずれ型、北部は逆断層型)に着目すると、その下限は、余震活動が延びている南西方向および北方に向かって浅くなるお椀型を示しており、これらの端部において応力集中が発生していない可能性が示唆される。
謝辞：地元の皆さまには臨時観測に際して大変お世話になっております。記して感謝申し上げます。

図　余震の震央分布と観測点の分布 余震分布は2018年6月18日から9月1日まで。
＋と▽が104カ所の臨時点、＋は0.1満点の1成分観測点(松本・他, 2018)、▽はオンラインの3成分観測点。△は満点計画の3成分観測点、□は高感度の定常観測点。

© The Seismological Society of Japan


N→
S
←S
Y (km)
X (km)
←W
E→
15
10
5
0
-5
-10
-15
10
京都西山F
有馬高槻F
上町F
生駒F
1
2
3
4
5
Magnitude
Manten
0.1Manten
3 comp
Permanent
阿武山観測所

A new energetics-based failure criterion for understanding the spatial pattern of aftershocks

*Toshiko Terakawa Terakawa[1], Mitsuhiro Matsu'ura[2], Akemi Noda[3]

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. ISM, 3. NIED

最近，社会のあらゆる分野において，機械学習や深層学習（Deep Learning, DL）を取り入れた人工知能技術が活躍の幅を広げている．地震学の分野では，DLにより世界中で発生した多数の本震一余震活動のペアをトレーニングデータとした余震分布の推定が行われ，その推定能力は古典的なクーロン破壊応力変化（Δ*CFS*）よりも高精度であるという衝撃的な結果が報告された（DeVries et al., 2018）．さらに，余震の発生は，Δ*CFS*よりも地震時の偏差応力変化の最大剪断応力（$\Delta\tau_{max}$）や2次不変量（ΔJ_2）に支配されているという物理的な解釈が示された．これらの物理量を理論的に分析すると，$\Delta\tau_{max}$とΔJ_2は共に地震時偏差応力テンソルから計算される剪断歪エネルギーと結びつき，これは剪断歪エネルギーがゼロである等方応力状態から地震によって引き起こされた剪断歪エネルギー変化（増加）に相当する．したがって，DLによる余震分布の推定結果は本震の発生によって剪断歪エネルギーが至る所で増加することを意味し，地震の発生原理に矛盾する．その背景には，地震は絶対応力を反映して発生するにも拘らず，トレーニングデータが地震による応力変化に関する量に限られていたという根本的な問題がある．

本研究では，絶対応力場を考慮して余震の発生を理解するために，弾性歪エネルギー $E=E_s$（剪断歪エネルギー）+ E_v（体積ひずみエネルギー）に基づく新しい地震破壊規準（Energetics-based Failure Stress, *EFS*）を提案する（Terakawa, Matsu'ura & Noda, in prep.）：

$EFS = \mathrm{sqrt}(2GE_s) - \mu\{\mathrm{sqrt}(2\kappa E_v) - P_f\}$ (1)

ここでG，κ，μ，P_fは剛性率，体積弾性率，岩石の摩擦係数，間隙流体圧を表す．本式の第一項は偏差応力の2次不変量J_2の平方根と一致し，剪断応力のスカラー計量である．第二項の $\mathrm{sqrt}(2\kappa E_v)$ は応力の1次不変量I_1の1/3（平均垂直応力）であり，第二項全体は断層強度に相当する．つまり，本震によるE_s及びE_vの増減は，それぞれ剪断応力及び断層強度の増減を意味し，絶対偏差応力場及び絶対等方応力場を反映する（Matsu'ura, Noda & Terakawa, under review）．従って，式(1)で定義される*EFS*の本震前後の変化（Δ*EFS*）が正ならば余震を促し，負ならば余震を抑制すると考えることは合理的である．*EFS*の特長は，剪断応力と断層強度を不変量であるエネルギーを用いて記述した点にある．このため，従来のΔ*CFS*のように特定の面を対象とすることなく，3次元応力空間内の任意の点で地震破壊を評価することが可能となる．

Δ*EFS* の余震発生推定能力を調べるために，1992年ランダース地震に続く1年間の余震データ12673個に対して，震源周辺域の現実的な絶対応力場（Terakawa & Hauksson, 2018）を設定して Δ*EFS* を計算し，ROC（Receiver Operating Characteristic）解析を実施した．まず，理論から予想される通り，ΔE_s及びΔE_vは余震の発生に正及び負の相関があること，双方の影響を取り入れたΔ*EFS* はΔE_sの推定能力を上回ることが確認された．次に，地震前の偏差応力レベルを現実的な値よりも低くすると，AUC値と真陽性率（正しく余震発生を推定した割合）が上昇するが，同時に偽陽性率（余震発生と推定したが実際にはない割合）も上昇することがわかった．これは，地震前の偏差応力が低いと，地震後にE_sの増加する領域が本震断層近傍で顕著に増え，その結果Δ*EFS* を過大評価してしまうことに原因がある．一方，本震前後の間隙流体圧場の変化を評価し（Terakawa et al., 2010），Δ*EFS* の計算に取り入れてROC解析を実施すると，AUC値と真陽性率は上昇し，偽陽性率は低下した．これらの結果は，本震断層近傍の応力変化では説明できない多数の余震の発生には，間隙流体圧の上昇が重要な役割を果たした可能性があることを示している．

また，$\Delta\tau_{max}$とΔ*EFS*のROC解析の結果を比較したところ，真陽性率も偽陽性率も$\Delta\tau_{max}$の方がΔ*EFS*より高

© The Seismological Society of Japan

かった．Δτ_{max}は，地震前の絶対応力場を等方的（偏差応力ゼロ），地震による応力変化を純粋剪断であるとした場合のΔ*EFS*の特殊ケースである．つまり，DLによる余震分布の推定では，暗に，地震前の偏差応力の絶対レベルを非現実的に低く（ゼロ）仮定していたことになり，これが見かけの余震推定的中率を上げるものの，同時に余震の発生を過大評価する結果を招いたことがわかった．

© The Seismological Society of Japan

Metrics for Aftershock Generation Based on the Energetics of Shear Faulting

*Mitsuhiro Matsu'ura[1], Toshiko Terakawa[2], Akemi Noda[3]

1. Institute of Statistical Mathematics, 2. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univerisity, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震の発生は地殻に蓄えられた弾性歪みエネルギーを断層運動によって解放する過程である。弾性歪みエネルギーは，一般に，体積歪みエネルギー＝(応力テンソルの第１次不変量)^2/18κ と 剪断歪みエネルギー＝(偏差応力テンソルの第２次不変量)/2μ の和として表せる。但し，κは体積弾性率，μは剛性率である。Terakawa, Matsu'ura & Noda (in preparation) は，応力テンソルの第１次不変量は平均垂直応力の３倍であり，偏差応力テンソルの第２次不変量の平方根は剪断応力のスカラー計量（例えば，法線応力が平均垂直応力に等しい面に働く剪断応力の (3/2)$^{1/2}$ 倍）であることに着目して，既存断層の剪断破壊に関するモール・クーロンの規準 (Mohr-Coulomb fracture criterion) に擬えたエネルギー論的考察に基づく断層破壊応力 (Energetics-based Failure Stress)，EFS = (2μ×剪断歪みエネルギー)$^{1/2}$ − μ_r×[(2κ×体積歪みエネルギー)$^{1/2}$ −P_f]，を導入した。ここで，μ_r 及び P_f はそれぞれ岩石の摩擦係数及び間隙流体圧である。従って，EFS の右辺第２項は断層の実効的な摩擦強度に相当する。

大地震の発生は震源断層周辺域の応力場及び間隙流体圧場の変化を引き起こす。Matsu'ur, Noda & Terakawa (under review) は，地震発生前の地殻応力場（背景応力場）と地震時の応力変化から剪断歪みエネルギーと体積歪みエネルギーの変化を分離して個別に評価する一般公式を導いた。この公式により，地震発生に伴う断層破壊応力 EFS の変化分 ΔEFS は，間隙流体圧の変化を ΔP_f として，ΔEFS = [(2μ×地震後の剪断歪みエネルギー)$^{1/2}$ −(2μ×地震前の剪断歪みエネルギー)$^{1/2}$] − μ_r×[(2κ×地震後の体積歪みエネルギー)$^{1/2}$ −(2κ×地震前の体積歪みエネルギー)$^{1/2}$ − ΔP_f] と書き表すことができる。本講演では，この ΔEFS を剪断破壊のエネルギー論的考察に基づく新しい余震発生評価規準量として，それがこれまで提案されてきた様々な余震発生評価規準量（良く知られているクーロン破壊応力変化量から最近の深層学習解析の結果が推奨する最大剪断応力変化量或いは偏差応力変化テンソルの第２次不変量の平方根まで）を特殊ケースとして包含する合理的一般化であることを数学的に解説する。

例えば，あまりに非現実的ではあるが，背景応力場の等方成分も偏差成分もゼロの場合，つまり解放すべき弾性歪みエネルギーが全く無いにも拘らず地震が起きてしまった場合，地震による等方応力成分の変化も間隙流体圧の変化も無視すれば，ΔEFS の表現式は偏差応力変化テンソルの第２次不変量の平方根に帰着する。ちなみに，偏差応力変化テンソルの第２次不変量は常に至るところで正となるので，それを余震発生評価規準量として採用すると (e.g., Devries et al., 2018)，本震発生後の地震活動の活性化は説明できても，静穏化は説明できない。更に，地震時の偏差応力変化テンソルが純粋剪断的であると仮定すれば，ΔEFS の表現式は最大剪断応力変化量に帰着する。一方，地殻の背景応力レベルはある程度以上深いところでは地震による応力変化に比べて充分に高いと考えられる。そのような場合，地震時の偏差応力変化テンソルが純粋剪断的で，間隙流体圧変化が断層法線応力変化に比例すると仮定すれば，ΔEFS は近似的に古典的なクーロン破壊応力変化量 ΔCFS に帰着する。但し，その場合のターゲット断層としては背景応力場の最大剪断面を選ばなければならない。

© The Seismological Society of Japan

Room B | General session：S12. Rock Mechanics, Crustal Stress

Wed. Sep 18, 2019 2:30 PM - 3:15 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 5:30 AM - 6:15 AM UTC | ROOM B Symposium Hall, International Science Innovation Building

[S12]PM-1

chairperson:Muneyoshi Furumoto(Tono Research Institute of Earthquake Science), Kentaro Omura(NIED)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S12-01] Applications of DCDA method to rock core samples from NIED seismic observation wells -Attempt for in-situ crustal stress measurement-

*kentaro Omura[1], Weiren Lin[2], Takatoshi Ito[3], Akio Funato[4] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. Institute of Fluid Science, Tohoku University, 4. Fukada Geological Institute)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[S12-02] Correlation of frictional property on volcanoclastic sediment with changes in its mineral assemblage and microstructure

*Akari Fuke[1], Tetsuro Hirono[1], Shunya Kaneki[2] (1. Science, Osaka University, 2. DPRI, Kyoto University)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[S12-03] Experimental investigation of cumulative effect on thermal maturation of carbonaceous material as a proxy for earthquake slip

*Yutaro Shimamura[1], Tetsuro Hirono[1] (1. Osaka University)

Applications of DCDA method to rock core samples from NIED seismic observation wells -Attempt for in-situ crustal stress measurement-

*kentaro Omura[1], Weiren Lin[2], Takatoshi Ito[3], Akio Funato[4]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. Institute of Fluid Science, Tohoku University, 4. Fukada Geological Institute

地震発生過程やテクトニック変動を理解する上で，重要な物理量である地殻の原位置の絶対応力に関するデータは，陸域においても，地震観測や地殻変動観測データに比べて乏しい状況にある．主要な原位置地殻応力測定手法では，掘削と特殊な孔内計測が必要で，広域にわたる系統的な測定が難しいという要因がある．本研究では，掘削で採取された岩石コアの計測から原位置地殻応力値を推定する方法である「コア変形法(DCDA法, Diametrical Core Deformation Analysis法)」を既存の岩石コアに適用して，原位置地殻応力を推定することを試みた．コア変形法は，掘削孔内で特殊な計測をする必要がなく，既存の岩石コアに適用できることから，例として足尾で採取された深部岩石コアに適用することで，原位置地殻応力データの得られることが示された(小村他，2018年地震学会秋季大会S11-03)．コア変形法では，コア周にそった形状を計測するとともに，応力値の推定には岩石の弾性定数が，応力方位の推定には岩石コアの方位つけが必要である．
今回，防災科研の7地点のHi-net観測井で深度が100m～200m（1地点だけ2000m）から採取した硬岩の岩石コアを利用した．無定方位の岩石コアのため，応力方位の推定はできなかった．Funato and Ito (2017, IJRMMS)で設計された装置でコア外周にそった直径を測定した．測定された岩石コアは，採取後，10年以上経過したものではあるが，外周にそって直径がサインカーブ状に変化した．これは，岩石コア断面が応力開放にともない楕円状に弾性変形していることが推測され，コア変形法の適用可能性がみられた．一方で，堆積岩コアのように，明確に層理面がある場合には，層理面に相対した楕円状の断面形状が計測され，岩石コアの性状を考慮する必要があることがわかった．地殻応力値を推定するため，コア岩石の弾性定数は，直接岩石試験によるデータがないため，同じ掘削井で実施されたPS検層による地盤のP波速度，S波速度から，密度を仮定して計算される弾性定数を適用することを試みた．定性的には既存観測井岩石コアにコア変形法を適用して，広域的に原位置地殻応力を推定できる見込みがあることが示された．

Correlation of frictional property on volcanoclastic sediment with changes in its mineral assemblage and microstructure

*Akari Fuke[1], Tetsuro Hirono[1], Shunya Kaneki[2]

1. Science, Osaka University, 2. DPRI, Kyoto University

先行研究において，主要岩石及び鉱物の摩擦係数は，1 nm/sの低すべり速度から1 m/sの高すべり速度まで，広いすべり速度範囲で系統的に調べられてきた (Di Toro et al., 2011)．多くの岩石の最大摩擦係数は，Byerlee則にならい0.6-0.85の間に収まるが，0.1 m/s以上の高速域での定常摩擦係数は0.1-0.4程度にまで低下する．このような高速域での断層の動的弱化は，地震時における応力降下量を増加させ，地震時のモーメントマグニチュードの増大に繋がることから，非常に重要な現象である．
断層の動的弱化機構については，サーマルプレシャライゼーションやシリカゲル潤滑などの様々なメカニズムが先行研究により提案されている（例えばSibson, 1973; Goldsby and Tullis, 2002）．しかし，これらの弱化メカニズムも含め，断層岩の摩擦係数及び動的弱化機構が作用した場合の寄与の程度は，厳密な意味では断層岩を構成する鉱物種に依存すると考えられる．例えば，タルクやスメクタイトなどの層状ケイ酸塩鉱物は，動的弱化を伴わない低速域においても，Byerlee則から外れた低い摩擦係数を示すことが室内摩擦実験から報告されている（Moore and Lockner, 2004）．同様に，日本海溝のように層状ケイ酸塩鉱物を含む天然の断層から採取した試料においても，顕著に低い摩擦係数を示すことが確認されている（Remitti et al., 2015）．
さらに，前述のような弱い鉱物だけでなく，断層滑りによって生成された非晶質物質が水和したものも，摩擦強度の低下をもたらすと考えられている（Nakamura et al., 2012）．また，回転摩擦実験においても，非晶質ナノシリカの形成に起因した動的弱化が確認されている（Rowe et al., 2019）．このような非晶質物質は，火山ガラスとして火山灰に多く含まれており，一部の地層群において火山砕屑性堆積物を形成しているが，火山砕屑性堆積物の摩擦特性は未だ不明となっている．
そこで本研究では，非晶質物質（火山ガラス）の影響を考慮することによって，火山砕屑性堆積物の摩擦特性及びその微小構造の変化との依存性を調べた．過去の房総沖プレート境界断層の天然試料について0.0002–1.0 m/sの速度領域で摩擦実験を行った．その結果，乾燥条件では，0.1 m/s以下の速度領域において定常摩擦係数が0.48–0.65という値を示していたが，1.0 m/sにおいて0.16-0.21にまで弱化した．一方，湿潤条件では，0.001 m/s以下の速度領域において定常摩擦係数が0.44-0.65という値を示していたが，0.1 m/s以上の速度領域において0.14–0.30にまで弱化した．乾燥状態の結果は，従来までの他の主要鉱物を用いた実験結果の傾向に準拠しているが，湿潤状態において0.01 m/sで弱化するという結果は，極めて特異である．
これらの剪断摩擦実験前後試料についてX線粉末回折を行った結果，スペクトルから非晶質物質の存在を示す2θ=20–30°のハローピークの存在が確認された．また，XRDプロファイルからRockJockソフトを用いて鉱物組成定量解析を行った結果，母岩には，どの鉱物にも分類されない鉱物（Unfiited component）が50.0±2.0 wt.%含まれていることが明らかになった．これは火山ガラスに由来するものと考えられる．摩擦実験後の試料では，Unfitted componentが5.0–18.0 wt.%増加しており，低速滑りであるほどその増加量は大きかった．また，湿潤状態よりも乾燥状態における増加量の方が大きかった．次に，剪断摩擦実験前後の試料について薄片を作成し，微小構造観察を行ったところ，摩擦係数の低下に伴いY面の形成が確認され，高速すべりはせん断応力の局所集中を引き起こしうることが明らかになった．このすべり速度と応力集中の関係は，水和した火山ガラスの存在により，他の鉱物と比較してより低速域にシフトしている可能性がある．
以上，火山性砕屑物では火山ガラスの水和や摩耗による強度低下が起こっている可能性を示唆し，これは，火山性弧に位置するプレート沈み込み断層での地震時の破壊伝播及びそのすべり挙動に影響を与えているかもしれない．

© The Seismological Society of Japan

Experimental investigation of cumulative effect on thermal maturation of carbonaceous material as a proxy for earthquake slip

*Yutaro Shimamura[1], Tetsuro Hirono[1]

1. Osaka University

地震発生時に断層で開放されるエネルギーの大部分が熱であり(Chester et al.2005)、この摩擦熱が断層弱化メカニズムや地震のエネルギー収支に直接関係している。そのため、断層に記録されている摩擦熱の検出は、これらの理解において極めて重要である。摩擦熱の検出手法の1つとして、炭質物の熱熟成に伴う有機化学的特性の変化が注目を集めている。これまでに、赤外分光法・ラマン分光法(Hirono et al.2015; Kaneki et al.2016,2018)や質量分析法(Savage et al.,2014)元素組成分析(Kaneki et al.2016)、ビトリナイト反射率測定(Sakaguchi et al.2011)などを使用することによる様々なアプローチが行われてきた。しかし、摩擦熱のより定量的に推定するためには、剪断により促進されるメカノケミカル効果だけのみならず、繰り返し加熱を考慮した化学反応速度論を検討する必要がある。地震イベントは、地質学的タイムスケールでは何度も繰り返すため、断層における多数の加熱イベントが断層に含まれる炭質物の熱熟成反応に与える影響はいまだ未解決である。そこで、本研究では炭質物の熱熟成反応における繰り返し加熱の影響の解明を目的とし、複数の地震イベントを模擬した室内実験および実験前後試料の分光分析を実施した。

研究手法として、まず瀝青炭と無煙炭の炭質物2種類をそれぞれガラス管に真空封入、そのガラス管を管状電気炉の中に挿入し、100, 300, 500, 600, 700, 900,1100, 1300℃の温度で40秒間、繰り返す地震イベントを模擬して、10, 100回の加熱を行なった。また、瀝青炭のみ上記の実験に加え、500℃における8,16時間加熱を、600℃における8時間加熱を行なった。その後、実験前後試料において、赤外分光分析およびラマン分光分析を行なった。

結果、各温度において赤外・ラマン両分光分析ともに加熱回数による熱熟成度の有意な差は認められなかった。但し、500℃における長時間加熱では脂肪族CH鎖の吸収帯が8時間では消失せず、16時間でようやく消失することが確認できた。地震時の短いタイムスケールの滑り事象では何度繰り返しても化学反応速度的制約より熱熟成が促進されることはないと結論づけることが出来る。すなわち、断層に保存されている炭質物の最高到達温度は、かつてその断層が履歴した最大規模の地震イベントを示していると言える。

© The Seismological Society of Japan

Room B | General session：S11. Various Phenomena Associated with Earthquakes

Wed. Sep 18, 2019 3:15 PM - 4:15 PM JST | Wed. Sep 18, 2019 6:15 AM - 7:15 AM UTC | ROOM B Symposium Hall, International Science Innovation Building

[S11]PM-1

chairperson:Muneyoshi Furumoto(Tono Research Institute of Earthquake Science), Kentaro Omura(NIED)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[S11-01] What are Posibilities of Influencing of the Strong Vertical Impulsive Seismic Motions on the Occurrence of Grate Landslides ?

*Hroshi Mehara[1] (1. Geosystem Research Institute)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[S11-02] Tomographic study of 3D distribution of the ionospheric electron density anomalies before and after the 2011 Tohoku-oki eq.

*Kosuke Heki[1], Ihsan Naufal Muafiry[2] (1. Dept. Earth Planetary Sci., Hokkaido University , 2. Dept. Natural Hist. Sci., Hokkaido University)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[S11-03] Geomagnetic variations coincident with the passage of longer period surface waves

*Muneyoshi Furumoto[1], Osamu Murakami[1], Yasuhiro Asai[1] (1. Tono Research Institute of Earthquake Science)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[S11-04] Reality of "swirling clouds" associated with earthquakes

*Yuji Enomoto[1], Tsuneaki Yamabe[1], Shigeki Sugiura [2], Hitoshi Kondo[2] (1. Shinshu University, 2. Genesis Research Institute, INC.)

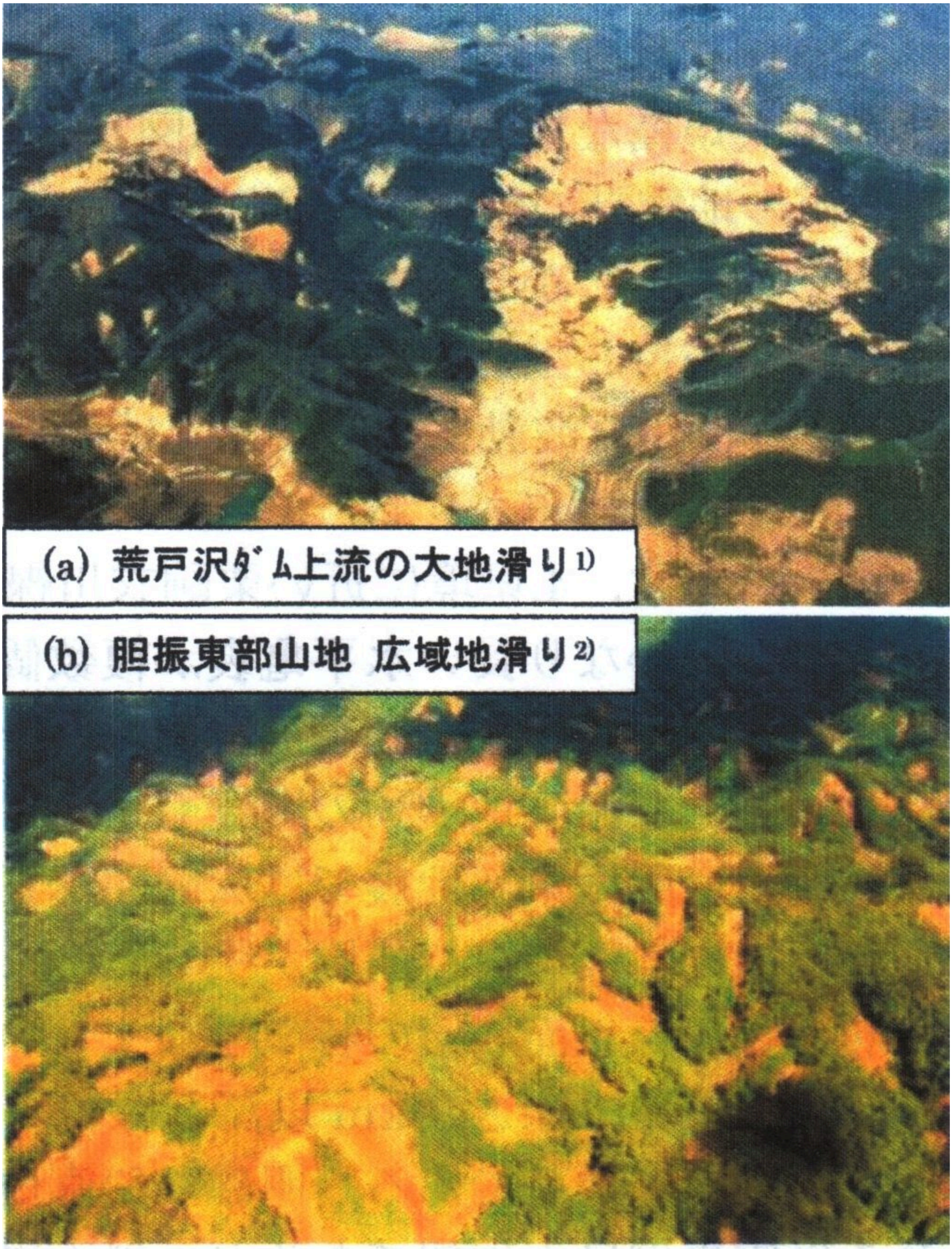
What are Posibilities of Influencing of the Strong Vertical Impulsive Seismic Motions on the Occurrence of Grate Landslides ?

*Hroshi Mehara[1]

1. Geosystem Research Institute

強力な鉛直地震動が構造物を損壊させる事は，120年程も前に海震の震度階表（ルドルフの表[1898]，シーベルグの表[1923]）が作られていたことから知られていた筈だが，ここ60年程陸の地震関係者はそのことを忘れていたようで，船舶工学者から「地震で船舶が損壊する時の地震波は疎密波であることは常識である．」と，兵庫県南部地震の被害事例を見直している時にこの指摘を受けた．
それまで，構造物の破壊経過と体験証言を基に，構造物を破壊する強力な鉛直地震動が存在することを証明しようと活動していたが，問題の地震波形がまだ正確には観測できていない事から，なかなか理解が浸透しにくかった．ところが海震度階級表と船舶工学者の指摘を紹介すると雰囲気は大きく変わり始めた．しかしながら，構造物を破壊する威力を持つ鉛直地震動による被災事例を調べるにつれ，その現象の複雑さと捉えにくさも明らかになってきた．最近感じている視点から，問題の波の特徴を掻い摘んで表すと次のようになる．
1. 従来の地震計では捉えられない高周波だが破壊力も持つ疎密波の地震動である．
2. 地震の主体的な面と随伴的な面の両面性を持つ現象である．
3. 被害形態が線状で百ｍ程の場合もあるが，多くは局在波の突き上げ力による被害形態を示す．
4. 波形頭部の外形が平坦な場合とか，釣鐘型の場合もある．
5. 衝撃的な鉛直波動と構造物の状態により被害形態は多様性を示す．
6. 強力な鉛直波動が主震動より3分程後に生じる場合等（後発鉛直キラーパルス）がある．
7.発震原因は岩盤の割れでなく，物質の相変化によると予想される．
以上のような特徴を踏まえて，大規模な地滑りの被害が生じた事例を見直してみる．岩手・宮城内陸地震では荒砥沢ダム上流で大規模な地滑りが生じた(図1(a))．この地震では，1.一の関西の地震計の鉛直震動は3866galの過去最大の記録値が得られた．しかしこの記録の解釈には，ある地層幅を持って地盤が持ち上がるトランポリン効果が想定されている．2.それは鉛直波動による突き上げ作用が地表近くで増幅されたことを連想させる．3.震源断層は鉛直に近い形状で逆断層の動きを示す．4.県境に近い栗駒衣川線沿い河川のブロック護岸に，かなり長い水平亀裂が複数個所ある．以上の事象から軽石層の存在だけが被害の規模を大きくしたのではなく、巨大な威力の鉛直地震動の影響が加わった事が予想される．
次に北海道胆振東部地震では広範囲に亘り，一定の方向性が見られない，山の斜面の滑り崩壊が生じた(図1(b))．ここでは火山灰層の存在が斜面崩壊の特徴をなすものと考えられている．しかし震源断層は深さ16km以深と深いものの，鉛直面に近い状況で，逆断層の動きが顕著である．明確な鉛直地震動によるとみられる災害事例は未確認であるが，斜面崩壊の形態と震源断層の特性から，強力な鉛直地震動が散在的に作用した可能性は高いと思われる．
このような大規模な地滑りを起こすことに関与する，鉛直地震動の威力は大きいことが予想され，安全対策上，観測体制を工夫することはもちろん，詳しい調査と解析が望まれる．

© The Seismological Society of Japan



(a) 岩手・宮城内陸地震（2008. M7.2)

1) なゐふる No.114,p4,井上先生の報文写真1を加工

(b) 北海道胆振東部地震（2018. M6.7)

2) 国際航業(株)提供写真資料を加工

© The Seismological Society of Japan

© The Seismological Society of Japan

Seismological Society of Japan Fall Meeting

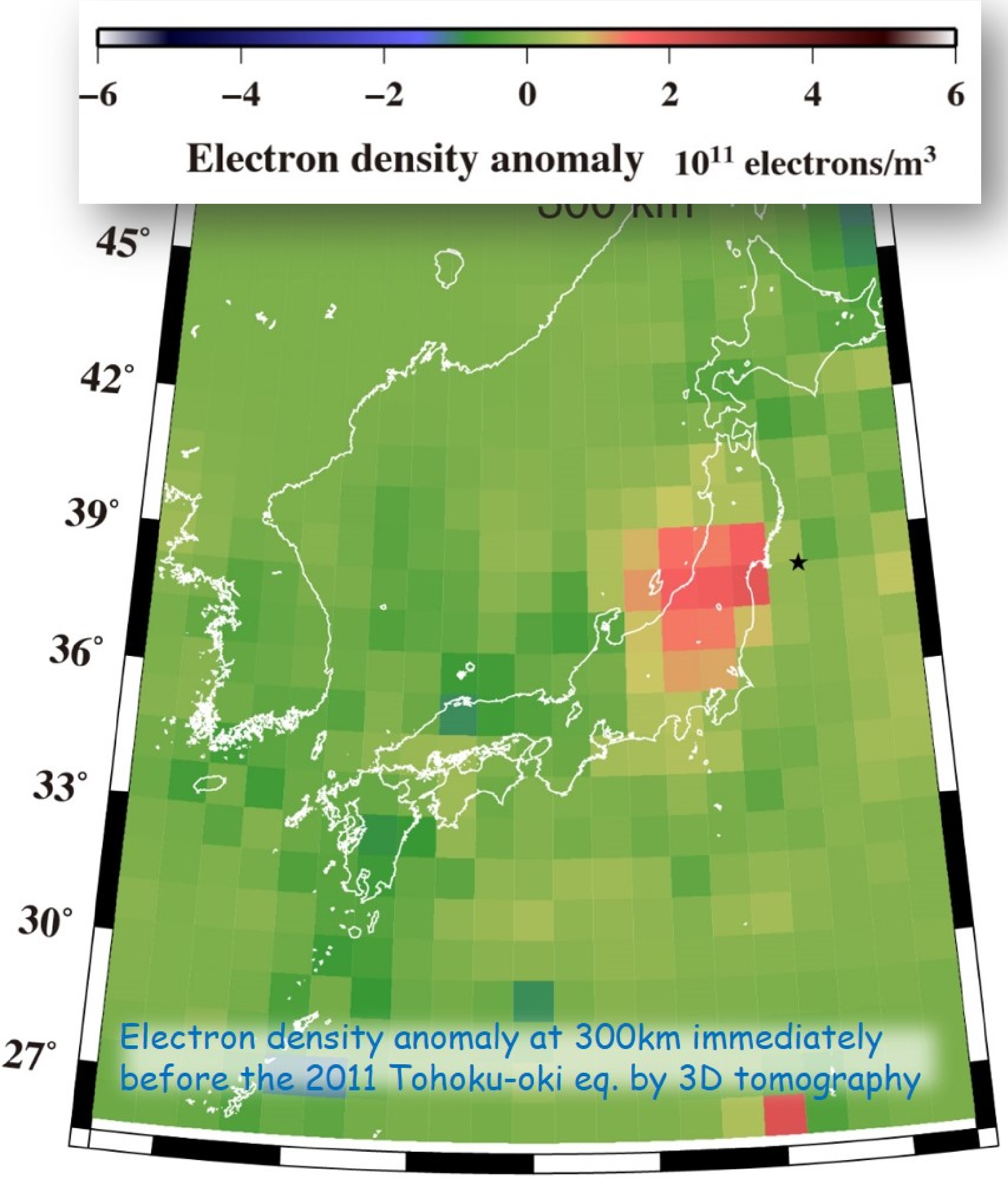
Tomographic study of 3D distribution of the ionospheric electron density anomalies before and after the 2011 Tohoku-oki eq.

*Kosuke Heki[1], Ihsan Naufal Muafiry[2]

1. Dept. Earth Planetary Sci., Hokkaido University , 2. Dept. Natural Hist. Sci., Hokkaido University

Based on the ionospheric total electron content (TEC) observations using Global Navigation Satellite System (GNSS) satellites, we reported that TEC showed anomalies immediately before large earthquakes (Heki, 2011GRL; Heki & Enomoto, 2013JGR; 2015JGR). The leading times and the intensities of the anomalies in the 18 earthquakes of Mw7.3-9.2 (He & Heki, 2017JGR) showed clear scaling laws, i.e. they scale with the fault lengths and fault areas, respectively, suggesting that large earthquakes know their final sizes when the fault ruptures start. He & Heki (2018JGR) studied the three-dimensional (3D) distribution of the electron density anomalies before the 2015 Illapel earthquake (Mw8.3), Central Chile, and showed that the positive/negative electron density anomalies emerged in lower/upper ionosphere along the geomagnetic field. This let us hypothesize that the ionospheric electrons were redistributed in response to electric fields made by positive electric charges that appeared on the subaerial surface above the epicenter. These charges would have been mobilized by micro-scale cracks and dislocations as positive holes.
Here we apply the 3D tomography technique using the slant-TEC residual data in Japan and South Korea for the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0). We found that the positive electron density anomaly appeared ~300 km above NE Japan (the anomaly does not extend to the sea, see attached figure). At the same time, a diffuse negative electron density anomaly appeared in the higher ionosphere. The electric current that flowed upward along the geomagnetic field makes an eastward geomagnetic field change of a few nT to the south of the epicenter, which is consistent with the change started ~40 minutes before the earthquake in Kakioka, NE Japan (Heki & Enomoto, 2013JGR). We also try to identify the 3D structure of the tsunamigenic ionospheric hole made by the 2011 Tohoku-oki earthquake.

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Seismological Society of Japan Fall Meeting

Geomagnetic variations coincident with the passage of longer period surface waves

*Muneyoshi Furumoto[1], Osamu Murakami[1], Yasuhiro Asai[1]

1. Tono Research Institute of Earthquake Science

地震波通過に伴い電磁気変動が発生することについて，これまでにも多くの報告がなされている．それらの発生機構として，地殻内を起源とするものについては，岩体の圧電現象や圧磁現象，導電性を持つ物質としての岩体の運動による電磁誘導，そして空隙弾性体内の界面動電現象など，様々な性質や現象が提案されてきている．

これまでに報告されている地殻内を起源とする電磁場の変動現象は，主に周波数1Hz 程度やそれ以上の短周期帯域のものである．一方周期数十秒程度の帯域の変動としては，大気音波を経由した電離層の擾乱に伴うものなどについては報告されているが，地殻内を起源とするものはほとんどない. 地殻内を起源とする電磁気変動の機構や関連する地下構造を知る上で，より広い帯域での検出は重要であると考えられる．本研究では2011年東北地方太平沖地震およびその余震などを利用して，大振幅のやや長周期表面波に同期した磁気変動が見られることを報告する．

地震動と地磁気の観測計器は，東濃地震科学研究所により岐阜県瑞浪市に設置された，水圧計（瑞浪超深地層研究所立穴，深度200m)と３成分磁力計（ボアホール，深度500m)である．両計器の水平方向の距離は約200mであり，ほぼ同一の観測点と見なすことができる．データのサンプリング間隔は両者とも1/20秒である．なお，地震動の計測に地震計を利用していないのは，コイル等を内蔵する地震計自体が磁気変動を混入させる可能性を持つためである．

解析に利用した地震波は，東北地方太平洋沖地震の本震（Mw=9.0)と直後に発生した最大余震（Mw=7.8)，およびM=7クラスの前震１個と余震5個である．各地震からの直達Rayleigh波(以下R波）の振幅は大きいが，対象とした周波数帯域では通常の地磁気変動そのものが大きい．そのため本震においても波形同士の直接比較では，地震動と地磁気変動には明確な対応は見られない．特に本震時には磁気嵐が発生しており地磁気変動が大きい．そこで，各地震の地震動と磁気変動の相互相関関数により，同期した信号が含まれているかを検討した．使用したデータは，直達R波以降のコーダ部分20分間を利用した．コーダ部分を用いることで，安定した相互相関関数を求めるのに適した，ある程度定常的な波動場になっていると期待される．また直達R波部分を除いたのは，振幅が突出して大きいため，定常性が保てなくなると考えたからである．使用したコーダ部分には，周期20秒程度のR波を主として，より長周期成分が含まれていると考えられる．なお，地震波データとして水圧を利用しているので，地震波データ中にSH波やLove波成分は含まれていないことになる．

地震波と磁気変動データについて周波数15 mHz程度より高周波側でいくつかのバンドパスフィルターをかけ，各帯域の出力時系列間で相互相関関数を計算した．図１に示したのは　本震後のコーダ部分の水圧と地磁気の鉛直成分の25 - 30 mHz帯域の相互相関関数である．横軸のlagが正の値は，地震波に対して磁気変動が遅れることを表している．図から明らかなように，相互相関関数はlag=0 においてピークを持っている．このことは地震波と磁気変動には同期した成分があることを示している．同様のピークは　15 ~ 40 mHz の帯域で見られる．しかし，40 mHz より高周波帯域ではlag=0 で明瞭なピークは現れない．一方15 mHz より低周波側でもピークはlag=0 にはない．

最大余震　(Mw=7.8) についても，相互相関関数は同様の帯域でlag=0 にピークを持っており，大きな振幅の場合での再現性はあるように見える．一方，それより小さい振幅になる前震(Mw=7.2) やMw<7.5クラスの余震では，lag=0 における明瞭なピークは見られない．

© The Seismological Society of Japan

本震と最大余震においては，鉛直以外の地磁気水平２成分においても水圧と同期した変動が見られる．地磁気の３方向成分との相互相関関数から地震動と同期した磁気変動の偏光の様子を知ることができる．偏光は直線的で，南東下向き一北西上向きとなる．そして地下水圧が最大（= 岩盤の最大圧縮時）の時，地磁気は南東下向きで最大になる．

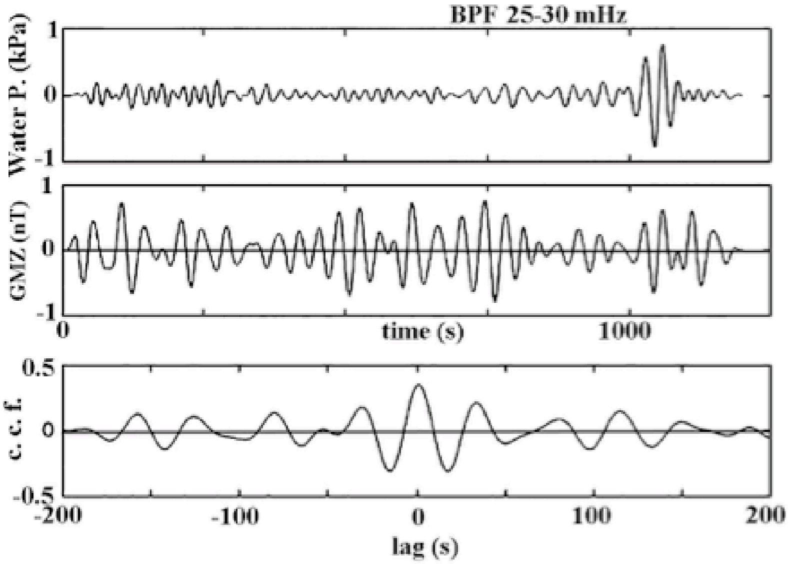


図1　本震コーダ波の相互相関関数
水圧(上段)，地磁気(中段)にバンドパスフィルターをかけたもの．サンプリングは 14h55m-15h15m の 20 分間．
下段はそれらの相互相関関数．

Reality of "swirling clouds" associated with earthquakes

*Yuji Enomoto[1], Tsuneaki Yamabe[1], Shigeki Sugiura [2], Hitoshi Kondo[2]

1. Shinshu University, 2. Genesis Research Institute, INC.

歴史地震史料で辿ると”渦巻く雲", ”白気立つ”など竜巻状の雲に関連すると推測される記述が多い．例えば887年五畿七道の地震では「有気，如煙非煙，如虹非虹，飛上蜀天」『三大実録』や1847年善光寺地震では，「真の闇空，飯綱山の方に火の如き雲出候間，不思議に存見つめて居り候処，其雲くるくると廻り消える否山鳴致し..」『時雨の袖』などである．史料に見られるこれらの記述に加え，最近では写真や衛星画像でも捉えられ，さまざまな観測とも関連づけられる可能性がでてきて，その実体を明らかにできる情報が揃ってきた．これらの史料の記述と最近の情報を集約して見えてきた”渦巻く雲”の実体は」次のようである．1)渦巻きながら突然空に屹立する，2)地震前後に観察されることが多い，3)雲のできる高度（約1km)から渦巻く，4)夜であれば光って見える，5)陸上に限らず海上でも発生する．以上の事実と既知の物理現象とを比較参照し，”渦巻く雲”の生成原因は，地殻の亀裂や断層に沿って浸入してきた深層流体に含まれるRn222誘起のプラズマが大気電場で加速されて上昇，”ウイルソンの霧箱”効果で雲を形成し，Kink Instability効果で渦を巻いたものと考察した．2011年東北沖地震の約10分後に生じた震源上空の電離層電子の急な濃集は、この帯電した”渦巻く雲”による静電気誘導効果の可能性がある．

© The Seismological Society of Japan