

2004年スマトラ地震(Mw9.1)と2005年ニ阿斯地震(Mw8.6)に先行した地震活動度の長期静穏化と活発化 Long-term seismic quiescence and activation anomalies preceding to the 2004 Sumatra and the 2005 Nias earthquakes

勝俣 啓^{1*}
KATSUMATA, Kei^{1*}

¹ 北海道大学理学研究院附属地震火山研究観測センター
¹ Inst. Seismology and Volcanology, Hokkaido University

2004年スマトラ地震と2005年ニ阿斯地震に先行して、地震活動度が長期的に静穏化し、同時に活発化していたことが分かった。ISCの震源カタログを用いて、1964年から2004年までに研究領域(80E-110E, 10S-20N)で発生した深さ100km以浅、実体波マグニチュード $5.0 \leq M \leq 6.0$ の地震1153個を解析した。研究領域に東西0.5度×南北0.5度間隔で格子点を置き、ZMAPを使用して地震活動度の変化を詳細に調べた結果、1987年12月から静穏化が開始し、1989年7月から活発化が開始していたことが明らかとなった。静穏化領域と活発化領域は南緯2度から北緯6度の間に位置し、2004年スマトラ地震の震源域南部(破壊開始点付近)、及びその南東側に接する2005年ニ阿斯地震の震源域を覆っている。さらに、double-difference法によりISCの震源を再決定したPesicek *et al.* (2010)の結果及びGlobal CMTの震源メカニズム解を用いて、静穏化領域及び活発化領域の位置関係を調べると、海溝寄りではプレート境界面上の地震が活発化し、陸寄りでは地殻内地震と沈み込むプレート内地震が静穏化していることが分かった。この特徴的な空間パターンは、Kato *et al.* (1997)の数値シミュレーションから予想される海溝型プレート境界地震の本震発生数年から数10年前の状況とよく一致している。すなわち、本震の発生が近づくと、固着域の下端付近のプレート境界面上で前兆滑り(preseismic sliding)が開始し、その範囲が徐々に浅部に向かって広がって行く。それに伴い、プレート境界面上の小さなアスペリティが破壊されて低角逆断層型地震が活発化するが、上盤内(陸側の地殻内)では応力が一部解放されるので静穏化する。さらに、沈み込むプレート内ではdown dip extension型の地震は起きにくくなり、発生数が減少する。

Kato, N., M. Ohtake, and T. Hirasawa (1997), Possible mechanism of precursory seismic quiescence: Regional stress relaxation due to preseismic sliding, *Pure Appl. Geophys.*, 150, 249-267.

Pesicek, J.D., C.H. Thurber, H. Zhang, H.R. DeShon, and E.R. Engdahl (2010), Teleseismic Double-difference Relocation of Earthquakes along the Sumatra-Andaman Subduction Zone using a Three-Dimensional Model, *J. Geophys. Res.*, 115, B10303, doi: 10.1029/2010JB007443.

キーワード: 2004年スマトラ地震, 2005年ニ阿斯地震, 地震活動の静穏化, 地震活動の活発化, ZMAP, ISC

Keywords: The 2004 Sumatra earthquake, The 2005 Nias earthquake, seismic quiescence, seismic activation, ZMAP, ISC

北海道南東沖の太平洋プレート面上の摩擦の空間不均質性の検討：中規模地震の応力降下量の解析 Spatial heterogeneity of the frictional property on the Pacific plate off south-east of Hokkaido, Japan

齋藤 悠¹; 山田 卓司^{1*}; 谷岡 勇市郎¹
SAITO, Yu¹; YAMADA, Takuji^{1*}; TANIOKA, Yuichiro¹

¹ 北大地震火山センター

¹ ISV, Hokkaido Univ.

1. はじめに

地震の応力降下量は、断層面の強度と動摩擦応力の差を表す指標である。本研究では、北海道南東沖の太平洋プレートの沈み込み境界面の強度と動摩擦応力差の不均質性の空間分布を明らかにすることを目的として、北海道南東沖で発生した330個の中規模地震の応力降下量を解析した。解析対象の北海道南東沖では、オホーツクプレートの下に沈み込む太平洋プレート面上でくり返し大地震が発生している。例えば、北海道の南東に位置する十勝沖において、2003年十勝沖地震(Mw8.0, 以下、2003年本震と表記する)が発生した。この地震の大すべり域は、1952年十勝沖地震の大すべり域と重なっている(Yamanaka and Kikuchi, 2003)。また、2003年本震後には、本震でのすべりを囲むような顕著な余効すべりが観測されている(Miyazaki *et al.*, 2004)。このことは、太平洋プレートの沈み込み境界面における強度や応力、摩擦特性に空間的不均質性があることを示唆している。一方、先行研究により、大地震の大すべり域では恒常的に強度と動摩擦応力の差が大きく、小地震の応力降下量の解析により、大すべり域を事前に予測できる可能性が示唆されている(例えば、Allmann and Shearer, 2007, Yamada *et al.*, 2010)。本研究の解析結果にも先行研究で見られるような応力降下量と本震でのすべり域との相関関係が得られることが期待される。

2. 解析手法

本研究では、2002年6月から2010年12月までに北海道南東沖(緯度40.5°Nから43.5°N, 経度141.0°Eから146.5°E)で発生した $4.2 \leq M \leq 5.0$ の地震の応力降下量を解析した。具体的な解析は、以下の手順で行った。まず $3.0 \leq M \leq 3.2$ の小地震のうち、解析対象の地震に最も近い地震の波形を経験的グリーン関数(EGF)とする。そして、解析対象の地震とEGFとして用いる地震それぞれについて、S波の伝播時間の2倍の時刻から、1秒ごとにずらして取った3つのタイムウィンドウ(長さ5.11秒)について、Sコーダ波のスペクトルを求めた。そしてこれらのスペクトル比を計算することにより、観測波形に含まれる伝播の効果や観測点の特性をキャンセルし、解析対象の地震とEGFとの震源スペクトル比を得た。次に、震源スペクトルがBoatwright(1978)の ω^{-2} モデルに従うと仮定してコーナー周波数 f_c を求めた。さらに、Madariaga(1976)の円形クラックモデルを用いて、コーナー周波数から応力降下量を推定した。

3. 解析結果と考察

応力降下量は 3.0×10^{-1} MPaから 2.0×10^2 MPaと求められた。図は、応力降下量の空間分布を示している。図から明らかなように、2003年十勝沖地震の余効すべり領域と2004年釧路沖地震の震源域において、中規模地震の応力降下量の値に差が見られた。それぞれの領域の応力降下量の平均値は、1.2 MPaと2.0 MPaであった。この結果は、摩擦特性の空間不均質性を反映していると考えられる。さらに、1973年根室半島沖地震のすべり域の浅部と深部では、応力降下量の値がそれぞれ2.1 MPaおよび1.0 MPaとなり、有意な差があった。これは、1973年根室半島沖地震のすべり域内においても、太平洋プレート面上の強度や動摩擦応力に空間不均質性があることを反映しているのかもしれない。

謝辞:

本研究では、Hi-netのデータ(<http://www.hinet.bosai.go.jp/>)とEIC地震学ノート(http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/)で公開されているすべり分布のデータを使わせていただきました。記して感謝いたします。

キーワード: 太平洋プレート, 摩擦, 空間不均質性, 応力降下量

Keywords: Pacific plate, Friction, Spatial heterogeneity, Stress drop

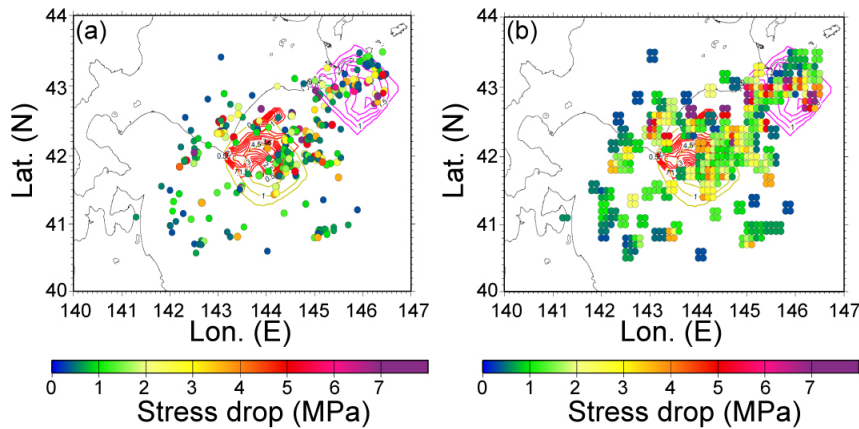


Fig. (a) Estimated stress drops of analyzed 330 middle-size earthquakes ($4.2 \leq M \leq 5.0$). Each circle shows the stress drop for each earthquake. Contours indicate slip distributions of past four large earthquakes off south-east of Hokkaido (EIC seismic note, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/index.html). (b) Spatial pattern of the averaged stress drop. Individual circles indicate averaged values of stress drop for every 0.1 degree, which were calculated from the values of earthquakes in areas with 0.2×0.2 degrees.

3次元強震動・2.5次元遠地理論波形により地震波波形データから推定される東北地方太平洋沖地震の破壊過程 Seismically inferred rupture process of the 2011 Tohoku-Oki earthquake by using 3D and 2.5D Green's tensor waveforms

岡元 太郎^{1*}; 竹中 博士²; 原 辰彦³; 中村 武史⁴; 青木 尊之⁵
OKAMOTO, Taro^{1*}; TAKENAKA, Hiroshi²; HARA, Tatsuhiko³; NAKAMURA, Takeshi⁴; AOKI, Takayuki⁵

¹ 東京工業大学 地球惑星科学専攻, ² 岡山大学 地球生命物質科学専攻, ³ 建築研究所国際地震工学センター, ⁴ 海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト, ⁵ 東京工業大学学術国際情報センター

¹Dep. Earth Planet. Sci., Tokyo Institute of Technology, ²Dep. Earth System Sci. Okayama University, ³IIEE, Building Research Institute, ⁴Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ⁵GSIC, Tokyo Institute of Technology

The March 11, 2011 Tohoku-Oki earthquake (GCMT Mw9.1) generated strong ground motions and large tsunamis, and caused devastating damages in the northeastern Japan. The rupture process of this event provides important clues for understanding the geophysical condition of the generation of mega-thrust earthquakes and the mechanism of the excitation of the large tsunamis.

We analyze "seismic" rupture process of this event by using a non-linear full-waveform inversion method. We incorporate the effect of the near-source laterally heterogeneous structure on the synthetic Green's tensor waveforms because the analysis can result in erroneous solutions if the effect is not considered [1]. Also, in order to increase the resolution we use the teleseismic and the strong-motion seismograms jointly: the distribution of strong-motion station is one-sided and analysis with only the strong-motion records may result in reduced resolution near the trench axis [2]. For the teleseismic P-wave synthetics we use a 2.5-dimensional finite-difference method [3]. For the strong-motion synthetics we use a full three-dimensional finite-difference method that incorporates topography, oceanic water layer, three-dimensional heterogeneity and attenuation. Our simulation is accelerated by GPUs used in parallel [4]: we use the TSUBAME GPU supercomputer in Tokyo Institute of Technology.

In the previous study [5] we used only a single structure model (i.e., a single vertical slice of the 3D heterogeneous structure) to generate all the 2.5D Green's functions. In this paper we have updated the 2.5D structure models. That is, we extracted twenty-three vertical slices from the 3D structure model: each slice was (nearly) perpendicular to the trench axis and was taken along the nodes of the grid that formed the fault plane. By using these new models the 2.5D Green's functions and 3D Green's functions are now "consistent" with each other.

We computed Green's tensor synthetic waveforms for 31 teleseismic and 32 strong-motion components. We used 640 GPUs of the TSUBAME supercomputer for the calculation of each strong-motion synthetics. The inferred slip distribution has large slips near the JMA epicenter with the maximum slip of about 32 m. The amount of slips at the areas close to the trench axis is smaller than that of the land-ward area (i.e., near the JMA epicenter). Inversion results similar to these features have been obtained by previous study [2] but it is remarkable that our joint "seismic" inversion using 2.5D-teleseismic and 3D-strong-motion Green's tensor waveforms resulted in the solution with these features (i.e., land-ward large slips and trench-ward small slips). These features have important implications for tsunami studies because large slips near the trench axis are expected for large tsunamis. In order to verify the solution we will inspect the resolution by using simulations of inversion and the effect of the choice of the Green's tensor waveforms on the solutions.

[1] Okamoto and Takenaka, *Earth Planets Space*, 61, e17-e20, 2009.

[2] Yokota et al., *Geophys. Res. Lett.*, 38, doi:10.1029/2011GL050098, 2011.

[3] Takenaka and Okamoto, in *Seismic Waves, Research and Analysis*, ed. K. Masaki, Intech, 2012.

[4] Okamoto et al, in *GPU Solutions to Multi-scale Problems in Science and Engineering*, ed. D.A. Yuen et al., Chapter 24, 375-389, Springer, 2013.

[5] Okamoto et al., *Seismological Society of Japan, 2013 Fall Meeting*, P1-62, Yokohama, Japan, October 7, 2013.

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 破壊過程, GPU 計算, 地震波波形

Keywords: Tohoku-Oki earthquake, rupture process, GPU computing, seismic waveforms

2011年東北沖巨大地震域の地震波速度と減衰構造 Seismic velocity and attenuation tomography of the source zone of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0)

趙 大鵬^{1*}; Liu Xin¹; Huang Zhouchuan¹
ZHAO, Dapeng^{1*}; LIU, Xin¹; HUANG, Zhouchuan¹

¹ 東北大学・理

¹Tohoku University, Department of Geophysics

Detailed 3-D P and S wave velocity (V_p , V_s) and attenuation (Q_p and Q_s) tomography of the crust and upper mantle under the entire Northeast Japan arc from the Japan Trench to the Japan Sea coast is determined (Zhao et al., 2011; Huang and Zhao, 2013; Liu et al., 2014). The suboceanic earthquakes under the Pacific Ocean and the Japan Sea are used in this work and they are relocated precisely using sP depth phases. V_p and V_s tomography is determined using a large number of high-quality arrival times, whereas the Q_p and Q_s tomography is obtained using a large number of t^* data measured precisely from P and S wave spectra of local earthquakes. Our results reveal the high-V and high-Q subducting Pacific slab, and significant low-V and low-Q anomalies in the crust and mantle wedge under the volcanic front and the back-arc area. Large megathrust earthquakes ($M > 6.0$) during 1900-2013 including the great 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0) sequence are generally located in high-V and high-Q patches which are surrounded by low-V and low-Q anomalies in the megathrust zone. The high-V/high-Q patches in the megathrust zone generally exhibit large coseismic slips of megathrust earthquakes and large slip deficit on the plate interface. We think that these high-V/high-Q patches represent asperities in the megathrust zone, whereas the low-V/low-Q anomalies reflect weakly coupled areas. These results suggest that structural heterogeneities in the megathrust zone control the interplate seismic coupling and the nucleation of megathrust earthquakes.

References

Huang, Z., D. Zhao (2013) Mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0) and tsunami: Insight from seismic tomography. *J. Asian Earth Sci.* 70, 160-168.

Liu, X., D. Zhao, S. Li (2014) Seismic attenuation tomography of the Northeast Japan arc: Insight into the 2011 Tohoku earthquake (Mw 9.0) and subduction dynamics. *J. Geophys. Res.* 119, doi:10.1002/2013JB010591.

Zhao, D., Z. Huang, N. Umino, A. Hasegawa, H. Kanamori (2011) Structural heterogeneity in the megathrust zone and mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0). *Geophys. Res. Lett.* 38, L17308.

キーワード: 地震, スラブ, 流体

Keywords: earthquakes, slab, fluids

稠密海底地震計アレイ観測データを用いた2011年東北沖地震発生前後の震源南限域における地震活動に関する研究 A Study on Seismicity before and after the Tohoku Earthquake around its Southern Boundary Using Dense OBS Array Data

仲谷 幸浩^{1*}; 望月 公廣¹; 篠原 雅尚¹; 山田 知朗¹; 日野 亮太²; 伊藤 喜宏³; 村井 芳夫⁴; 佐藤 利典⁵
NAKATANI, Yukihiro^{1*}; MOCHIZUKI, Kimihiro¹; SHINOHARA, Masanao¹; YAMADA, Tomoaki¹; HINO, Ryota²; ITO, Yoshihiro³; MURAI, Yoshio⁴; SATO, Toshinori⁵

¹ 東京大学地震研究所, ² 東北大学災害科学国際研究所, ³ 京都大学防災研究所, ⁴ 北海道大学大学院理学研究院, ⁵ 千葉大学大学院理学研究科

¹Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, ²International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, ³Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, ⁴Graduate School of Science, Hokkaido University, ⁵Graduate School of Science, Chiba University

日本海溝域茨城県沖には、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域南限・最大余震域・沈み込む海山やその痕跡が位置しており、それらの相互関係や周辺域の地震活動との関係を理解することは、非常に重要である。しかし、対象域から遠く離れた陸上観測網データだけでは地震活動をよく拘束することはできず、解決すべき問題となっている。そこで重要となるのが、対象直上付近の海底地震観測データである。本研究では、茨城県沖で東北沖地震の発生を含む期間に展開された稠密海底地震計(OBS)アレイデータを用いて、東北沖地震前後における茨城県沖周辺の地震活動を推定した。

観測データには、東北沖地震の発生に伴い膨大な数の地震が記録されており、慣例的に行われているP波/S波走時の手動検測は極めて困難である。さらに海中ノイズや厚い堆積層の影響を受けたS/N比の小さいOBSデータを、東北沖地震後の雑音レベルの高い状況で処理する上で、ノイズに対して安定かつ有効なデータ解析手法が必要である。そこで、波形を足し合せてエネルギー放出領域を求めるバックプロジェクション法(BP法)をOBSデータに適用した。具体的な手法手順は、まず対象領域を小領域に分割し、各観測点までのP波走時を計算した。この際、計算走時の精度向上のために、既存の海域構造探査結果を参照して独自に三次元P波速度構造を構築した。この走時と周波数フィルター処理した観測エンベロープ波形とから、各時刻・各小領域でのセンブランス値を計算し、その最大値から震央を求めた。ここで深さ方向はプレート境界面を仮定している。一連のセンブランス解析に、STA/LTAアルゴリズムを組み合わせることで、計算時間の減少や各イベント認定の向上に成功した。

推定した震央分布の妥当性・精度については、本研究で求めた震央と既知の気象庁一元化震央とのずれ、さらにS/N比および震源深さを変えて理論計算した波形や実際のイベント波形を用いたテストを評価することで、定性的かつ定量的に見積もった。その結果、アレイから数10km以内の範囲では議論が十分可能であることを確認した。

得られた震央分布から、まず地震の個数密度分布のイメージングを行った。その結果、東北沖地震前後で地震活動が非常に活発になった領域と大きな変化の見られない領域とがあることが分かった。活発化した領域は、沈み込む海山の前方に位置し、過去の地震活動解析結果と整合的な空間分布であった。さらに、アレイ南西端に位置する活発な地震活動領域は、東北沖地震の最大余震滑り域周辺に位置していた。一方、本震前から変わらず地震活動が非活発な領域も存在し、これは海域構造探査で明らかとなった地震活動非活発帯とも対応していた。さらに本震直後の地震活動の詳細な時空間推移をセンブランス値から見ると、沈み込んだ海山周辺域では本震発生後から最大余震発生前までに比べ、最大余震発生後にそれらの地震活動が活発化したと考えられ、東北沖地震の震源域南限との関係が示唆される。

キーワード: 稠密海底地震計アレイデータ, 地震活動, 2011年東北沖地震震源南限域

Keywords: dense OBS array data, seismicity, the southern boundary of the 2011 Tohoku earthquake

プレート境界断層掘削と高速摩擦実験により明らかとなった2011年東北沖地震浅部
巨大滑りメカニズム
Large shallow slip during the 2011 Tohoku-Oki earthquake: New insights from JFAST
and high-velocity friction experiments

氏家 恒太郎^{1*}; 田中 英恵¹; 斎藤 翼¹; 堤 昭人²; Mori James²; 亀田 純³
UJIE, Kohtarō^{1*}; TANAKA, Hanae¹; SAITO, Tsubasa¹; TSUTSUMI, Akito²; MORI, James²; KAMEDA, Jun³

¹ 筑波大学, ² 京都大学, ³ 北海道大学

¹University of Tsukuba, ²Kyoto University, ³Hokkaido University

これまでプレート境界断層浅部は、固着が弱く、歪みをそれほど蓄えず、地震性滑りが起こりにくい領域であると考えられてきた。しかし、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では日本海溝近くのプレート境界断層浅部が約50mも滑り、その結果巨大津波を引き起こした。この浅部巨大地震性滑りの成因を明らかにするために、地球深部探査船「ちきゅう」による日本海溝緊急掘削 (Japan Trench Fast Drilling Project: JFAST) が実施された。掘削の結果、震源域のプレート境界断層は遠洋性粘土岩中に局所化して発達しており、断層を特徴づける剪断帯の厚さは僅か5m未満であることが明らかとなった。プレート境界断層の約8割はスメクタイトで構成されており、遠洋性粘土層におけるスメクタイトの濃集がプレート境界断層の局所化した発達をもたらしていると考えられる。プレート境界断層における変形は、鱗片状面構造に沿った分散した剪断と赤茶色と黒茶色粘土境界に沿った局所化した剪断で特徴づけられる。このうち後者に伴って、注入構造や色の異なる粘土鉱物のミキシングなど流動化 (fluidization) に特徴的な変形構造が認められた。プレート境界断層から採取された試料を用いて、高速 (1.3 m/s) 摩擦実験を含水条件下で行ったところ、小さい応力降下量、非常に低い剪断応力、短い滑り弱化解距離が得られた。剪断応力が非常に低い原因として、プレート境界断層物質が低摩擦粘土であるスメクタイトを大量に含むことと、摩擦発熱による間隙流体圧上昇 (Thermal Pressurization: TP) が効果的に起こったことが考えられる。また、定常状態剪断応力は垂直応力依存性を持たず、実験後の試料には流動化に特徴的な変形構造が認められることから、高速滑り時に生じた TP により断層物質が流体のように振る舞ったことが示唆される。本研究により、地震時に日本海溝のようなスメクタイトに富むプレート境界断層において TP が効果的に起これば、断層物質は流体のように振る舞い、ほとんど抵抗なしに深部からの破壊伝播を促進することが明らかとなった。これが東北地震時にプレート境界断層浅部において巨大滑りを引き起こした要因であると考えられる。また、天然の局所化した剪断と実験での高速剪断に伴って形成された変形構造の類似性は、地震時に断層物質が流動化したことを示唆している。

JFAST コア試料の微量元素・同位体組成から見た日本海溝地震断層帯の地球化学的特徴 Trace element and isotope characteristics of core samples from the Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST)

石川 剛志^{1*}; 松岡 淳²; 亀田 純³; Mori James⁴; Chester Frederick⁵
ISHIKAWA, Tsuyoshi^{1*}; MATSUOKA, Jun²; KAMEDA, Jun³; MORI, James⁴; CHESTER, Frederick⁵

¹ 海洋研究開発機構, ² マリンワークジャパン, ³ 北海道大学, ⁴ 京都大学, ⁵ テキサス A&M 大学
¹JAMSTEC, ²Marine Works Japan Ltd., ³Hokkaido University, ⁴Kyoto University, ⁵Texas A&M University

統合国際深海掘削計画 (IODP) 第 343 次研究航海 (JFAST: Japan Trench Fast Drilling Project) では, 2011 年東北地方太平洋沖地震で非常に大きな断層滑りが生じたと考えられる日本海溝付近において掘削調査が行われ, C0019E 孔では主として 650 mbsf~840 mbsf の間で, 計 53.3 m のコア試料が採取された。本研究では, 820 mbsf 付近のプレート境界断層試料を含む, これらのコア試料についての微量元素分・同位体分析の結果について報告する。

C0019E 孔における岩相は, Unit 1~Unit 7 の 7 つに区分される (Chester et al., 2013)。Unit 1~Unit 3 は上盤プレートの堆積物であり, Unit 4 がプレート境界断層, Unit 5~Unit 7 は下盤プレートの堆積物である。これらの岩石について ICP-MS を用いた微量元素分析, TIMS, MC-ICP-MS を用いたストロンチウム・ネオジウム・鉛同位体分析を行った。

プレート境界断層 (Unit 4) の試料は, 肉眼的には黄褐色~暗褐色で非常に粘土鉱物に富む岩石であるが, 微量元素組成から見るとかなり変化に富んでいる。しかしながら, それらはいずれも希土類元素 (REE), HFS 元素, トリウム等に富む顕著な特徴を示し, 他の JFAST コア試料から識別される。下盤プレートの褐色泥質堆積物 (Unit 5) は, 上盤プレートの堆積物 (Unit 1~Unit 3) とおおよそ類似した微量元素組成を示すが, 両者はアルカリ金属やストロンチウム等の濃度がやや異なる。Unit 5 の堆積物の下に存在する色彩変化に富む遠洋性堆積物 (Unit 6) は, 非常に変化に富む微量元素組成を示し, REE パターンには顕著なセリウム異常が見られる場合がある。ストロンチウム・ネオジウム・鉛同位体組成の変化も各 Unit の微量元素組成の特徴と整合的であり, 岩相区分とよく対応する。

JFAST コア試料の岩相と微量元素・同位体組成および微化石年代の間にはよい対応関係があり, 東北地方太平洋沖地震の浅部地震断層帯やフロントルウェッジを構成する岩石の起源を理解するための手がかりを与えてくれる。プレート境界断層試料の微量元素・同位体組成は, 近傍のインプットサイトである DSDP Site 436 下部に見られるスメクタイトに富む堆積物と類似しており, 同様な堆積物を原岩とする可能性が高いと考えられる。プレート境界断層試料の分析値からみた地震時/非地震時の諸過程についても議論を行う。

キーワード: 地震, 断層岩, 微量元素, 同位体, IODP

Keywords: Earthquakes, Fault rocks, Trace elements, Isotopes, IODP

JFAST 航海で得られた日本海溝プレート境界試料の古地磁気分析 Paleomagnetic analyses of core samples from the plate-boundary thrust obtained during the IODP JFAST

三島 稔明^{1*}; Yang Tao²; 氏家 恒太郎³; Kirkpatrick James⁴; Chester Frederick⁵; Moore Casey⁶; Rowe Christie⁷; Regalla Christine⁸; Remitti Francesca⁹; 亀田 純¹⁰; Wolfson Monica¹¹; Bose Santanu¹²; 石川 剛志¹³; Toy Virginia¹⁴
MISHIMA, Toshiaki^{1*}; YANG, Tao²; UJIE, Kohtarō³; KIRKPATRICK, James⁴; CHESTER, Frederick⁵; MOORE, Casey⁶
; ROWE, Christie⁷; REGALLA, Christine⁸; REMITTI, Francesca⁹; KAMEDA, Jun¹⁰; WOLFSON, Monica¹¹; BOSE,
Santanu¹²; ISHIKAWA, Tsuyoshi¹³; TOY, Virginia¹⁴

¹ 大阪市大, ²China Earthquake Administration, ³ 筑波大, ⁴Colorado State University, ⁵Texas A&M University, ⁶University of California Santa Cruz, ⁷McGill University, ⁸Pennsylvania State University, ⁹Universita di Modena e Reggio Emilia largo, ¹⁰ 北大, ¹¹University of New Hampshire, ¹²University of Calcutta, ¹³JAMSTEC, ¹⁴University of Otago

¹Osaka City University, ²China Earthquake Administration, ³University of Tsukuba, ⁴Colorado State University, ⁵Texas A&M University, ⁶University of California Santa Cruz, ⁷McGill University, ⁸Pennsylvania State University, ⁹Universita di Modena e Reggio Emilia largo, ¹⁰Hokkaido University, ¹¹University of New Hampshire, ¹²University of Calcutta, ¹³JAMSTEC, ¹⁴University of Otago

IODP 第 343 次航海 (Japan Trench Fast Drilling Project, JFAST) では, 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震で大きな滑りが生じたと考えられる日本海溝浅部でプレート境界断層を貫く掘削が行われた。プレート境界断層内部での cm スケールの変形を復元するため, コア試料の古地磁気分析を行った。

プレート境界断層コア試料は鱗片状面構造が発達し, 赤茶色・黒茶色の遠洋性粘土がシャープな境界面で接する構造をもつ。この境界面を含むように切り出された 3x3x5 cm³ の薄片用スラブを用いた。高知大学海洋コア総合研究センターの 2G755 パススルー型超伝導岩石磁力計を利用し, 80 mT までの段階交流消磁と 0.5-1 cm 間隔での磁化測定を組み合わせた。

段階交流消磁測定により, 2つの古地磁気成分を取り出すことができた。そのうち一方 (低保磁力成分) は 20-30 mT で消磁される成分であり, もう一方 (高保磁力成分) は 80 mT での交流消磁でも消磁されなかった。高保磁力成分の方位は, 同一のホールラウンド試料から切り出された複数のスラブではほぼ同一であった。一方, 低保磁力成分は隣接するスラブ間や, 同一スラブ内でも測定位置によって, 異なる方位を示した。

低保磁力成分の磁化方位の不一致は, プレート境界断層スラブ試料中の cm スケールの変形・回転を反映していることが考えられる。一方, 高保磁力成分の磁化方位の整合性は, 変形中または変形後に獲得されたためとすれば説明でき, 変形時に磁性鉱物が生成されたとすればそれが高保磁力成分を担った可能性がある。

間隙水圧観測から検出した2011年東北地方太平洋沖地震による透水性変化 Change of permeability caused by 2011 Tohoku earthquake detected from pore pressure monitoring

木下 千裕^{1*}; 加納 靖之²; 伊藤 久男²
KINOSHITA, Chihiro^{1*}; KANO, Yasuyuki²; ITO, Hisao²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 京都大学防災研究所附属地震予知研究センター
¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²DPRI

地震に伴う地下水変化(水位, 流量, 自噴量, 化学成分など)はコサイスマックな変化として, あるいは前兆現象として昔から広く観測されている. 京都大学防災研究所附属地震予知研究センターでは, 2005年から岐阜県神岡鉱山において間隙水圧と気圧の連続観測を行い, 地震による地下水変化を調べている. 間隙水圧の測定には探鉱のために掘られた既存のボアホールのうち湧水のあるものから, 2つのボアホールを選び使用している.

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の際には震央距離がおよそ523kmであるにもかかわらず, 顕著な間隙水圧の減少が観測された. これは東北地方太平洋沖地震により震源域西側の地殻が伸びたこと, あるいは地震動によって水が間隙中を通りぬけやすくなり, 地下水が流出したことで説明できる. そこで, 本研究は東北地方太平洋沖地震に伴う透水性変化について潮汐応答(潮汐による間隙水圧変化)を用いて明らかにすることを目的とした. 間隙水圧は気象や地球潮汐, 地殻変動などの外的要因により日々変化する. 気象や地殻変動は一定ではないため, 「地震による地下水変化」のみを検出することは難しい. そこで, 地球潮汐による変形をほぼ一定と見なし, 帯水層内の状態が変化しない限り同じ応答を示すと仮定し, 地震前後の潮汐応答を比較した. 間隙水圧データから潮汐応答を抜き出すために, 潮汐解析ソフトBAYTAP-Gを使用した. 潮汐解析の中で着目した分潮はM2, O1分潮であり, 半日周期と1日周期をもつ. 解析より, M2, O1分潮の振幅は東北地方太平洋沖地震後共に減少し, 位相変化もみられた. この結果は地震後帯水層内の岩盤の状態あるいは物性が変化したことを示唆する. さらに, 線形間隙弾性理論と拡散方程式を用いて地震前後の水理拡散率を見積もった. 2本のうち1本のボアホールにおいて, 体積弾性率を一定と仮定した場合, 水理拡散率は地震前8.9 m²/sから地震後65.0 m²/sに増加したことがわかった. この結果は地震後に間隙水圧が減少したこととよく一致している. また震央距離やマグニチュードの違いによる地震前後の透水性変化の有無について調べるため, 2007年に発生した能登半島地震(M6.9)に対して同様の手法を用いて解析を行った. 観測点までの震央距離はおよそ112kmであったが, 地震前後で水理拡散率変化はみられなかった. 震度は同程度であるにもかかわらず, 東北地方太平洋沖地震では水理拡散率が増加し, 能登半島地震では変化しなかったのかを調べるため①静的ひずみ変化, ②動的ひずみ変化, ③地震波の卓越周波数, ④方位角の4つの項目について水理拡散率変化との相関について検証した.

キーワード: 水理拡散率, 間隙水圧, 地球潮汐

Keywords: hydraulic diffusivity, pore pressure, Earth tide

海洋潮汐に先行する間隙水圧変動の謎：室戸沖南海トラフ付加体先端部の孔内長期観測 11+年の成果 Enigmatic phase lead of pore pressure: 11+ years of ACORK monitoring at the frontal decollement of Nankai Trough

木下 正高^{1*}; 加納 靖之²
KINOSHITA, Masataka^{1*}; KANO, Yasuyuki²

¹JAMSTEC, ²京都大学防災研究所

¹JAMSTEC, ²Kyoto Univ. DPRI

2001 年来 11 年半にわたって、室戸沖南海トラフ付加体先端部付近のデコルマとその上部の水圧を、孔内で継続観測している。10 インチケーシングの外側の annulus 部分で、海底下 100-900m の 6 か所の水圧をモニターしている。その中に潮汐応答も記録されている。応答の様子が深度によって異なることから、地層中の力学・水理特性を推定することが可能であるが、これまでの分析から annulus 付近の compliance が（設計よりも）大きいため、記録される変動が地層中の潮汐変動から歪んでしまい、地層中の特性を正確に推定することが困難と指摘された。

一方応答特性（振幅と位相）が 11 年間に徐々に変動していることが分かった。振幅比-位相差ダイアグラム上で 808 のほぼすべての圧力が同じカーブ上にのることを発見した。振幅比が 0.3 よりも大きい範囲では、振幅比が減少するとともに位相が徐々に遅れる（最大約 45°）（A）が、振幅比が 0.2 よりも小さい範囲では、振幅比が一定のまま位相が徐々に先行する（最大 40°）（B）。一方 1173 では概して変化が少なく、808 のような顕著な傾向は見られなかった。我々は、808ACORK に記録された潮汐応答には、メカニズムの異なる 2 種類の変動 A と B が含まれると仮定する。変動 A が卓越する状態においては B が隠されていると考えれば説明できそうである。チャンネルによっては、変動 B の領域に入らないものもあるが、これは何等かの原因で A の振幅が大きいままであるためと考えれば説明できるだろう。

A のメカニズムとして、Annulus 部分に徐々に孔が崩落して annulus を埋めることで、ACORK システムに対する地層のコンプライアンス比が減少、または水理拡散率が減少し、地層中の圧力変動が減衰したため、と解釈できる。「スクリーンの回りがパッキングされていく状態」を想定する。

一方 B のメカニズムは謎である。Wang and Davis (1996) の不均質多層構造モデルではこれほど大きな位相先行を生じることにはできない。また固体潮汐の理論値は海洋潮汐と位相がほぼ反転しており、位相先行波形を構築できない。孔底が地層にオープンとなっている 808 孔に特有の現象であることから、孔底からケーシングを通じた流体移動による熱膨張が有望かもしれないが、単純な拡散過程では、見かけ上の位相先行=実は大きな位相遅れ（330°）と振幅比 0.1 を説明することはできない。CSG 内部の複雑な流れ場等により、他の現象との組み合わせで見かけ上の先行が起こっているのかもしれない。

キーワード: Nankai Trough, ACORK, ODP

Keywords: Nankai Trough, ACORK, ODP

2004年紀伊半島沖地震に先行したF-net連続波形画像の欠測増加 The increase in missing waveform images of the F-net seismographs preceding the 2004 off Kii peninsula earthquake

末芳樹^{1*}
SUE, Yoshiki^{1*}

¹ 所属なし

¹ No institution affiliation

1. はじめに

広帯域地震観測網 F-net は、地震計 STS-1 および 2 型、73 観測点により構成される観測網である。地震計の固有周期は 120 秒 (STS-2) より長く長周期の振動を捉えることが出来る。F-net のホームページでは連続波形画像が提供されており、画像の容量解析の結果として長周期の振動が報告されている (末, 2010)。

2. 解析

連続波形画像の容量が変動を示すのは地表面の状態が変動している事による。そこで F-net の稼動状況を調べた。稼動状況を示す情報は 2 つある。

a. 欠測データ情報: 瞬断から長期までの欠測を示す公式情報であり、欠測の理由も示される。一方、情報の更新は不定期である。

b. 連続波形画像の欠測: 連続波形画像の統括頁に「画像無し」が示される。これは 1 日 (Daily plot) あるいは 1 時間 (Hourly plot) を越す不具合を示すと推測される。欠測の理由は示されないが、更新は毎日および毎時なされる。

このうち「連続波形画像の欠測」に関しては、2011 年東北地方太平洋沖地震前の欠測数の増加に関する報告がなされている (末, 2013)。そこで今回は南海トラフを対象として、2004 年 9 月 5 日に発生した主題地震 (M7.4) の状況を調べた。具体的には、2004 年 6 月 1 日より同年 9 月 10 日までの凡そ 3 ヶ月間の糸魚川-静岡構造線と沖縄島の間 (但し能登半島を除く) に位置する観測点の連続波形画像 (Daily plot) の欠測数を調べた。

3. 結果

図 1 に結果を示す。本震の凡そ 1.5 ヶ月以前にあたる 2004 年 6 月 - 7 月前半の欠測最頻値は 1 でほぼ一定の状態であった。7 月後半以降は欠測数の変動があった。

本震 6 日及び 5 日前の 8 月 30 日および 31 日に大きな増加があり、それぞれ九州南部および東岸で集中した欠測があった。

本震前日の 9 月 4 日には四国から九州にかけて南海トラフに沿った欠測があった (図 2)。

本震後、欠測は漸次減少し消滅した。

欠測の原因は、network trouble および electric power supply trouble が主体であった。

4. 議論

本震に先駆けて F-net 連続波形画像の欠測が増える。この時、欠測は震源域に限られず震源域を囲む広い領域に現れる。これらは 2011 年東北地方太平洋沖地震にも見られた現象であり、大地震前に一般的に見られる現象かもしれない。発生が懸念される南海トラフの巨大地震の際には、本報告に示すような F-net 観測点の不調が先行することがあるかもしれない。

全数欠測状態が、本震の凡そ 1.5 ヶ月前の 7 月 23 日 - 25 日に発生した (図 1)。この現象は 2011 年東北地方太平洋沖地震前にも見られ、F-net 網の不安定さの増大を示すものかもしれない。

大地震前の欠測の増加は、発生した地表面の変動が F-net の許容値を超えた為と推測している。network trouble および electric power supply trouble は、これを示す指標であるかも知れない。高感度地震観測網 Hi-net ではこのような現象は見られないが、これは周波数特性 (固有周期 = 1 秒) により長周期振動に反応しないためと推測する。

地震・津波観測監視システム DONET において異常が検出される場合には、F-net 連続波形画像にも同時期あるいは先駆けて欠測が発生するかもしれない。

欠測観測点の出現は影響を受ける範囲を示しており、その出現面積は発生地震の規模 (マグニチュード) と相関するかもしれない。

謝辞

防災科学技術研究所の F-net 観測網のデータを使用させて頂きました。記して感謝致します。

文献

末芳樹, 2010, F-netの連続波形画像に観測される長周期振動(その1), 日本地震学会講演予稿集, D31-12.
 末芳樹, 2013, 2011年東北地方太平洋沖地震に先行したF-net連続波形画像の欠測増加, JpGU2013, S-SS30-P01.

キーワード: F-net, 広帯域, 地震網, 長周期, 連続波形, 南海トラフ

Keywords: F-net, broadband, seismograph network, long period, waveform, Nankai trough

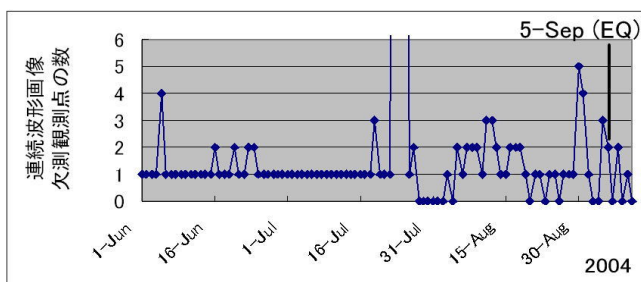


図1. 2004年6月1日より同年9月10日までのF-net連続波形画像欠測観測点の数. 7月23-25日は全数欠測. 日にちはUT.

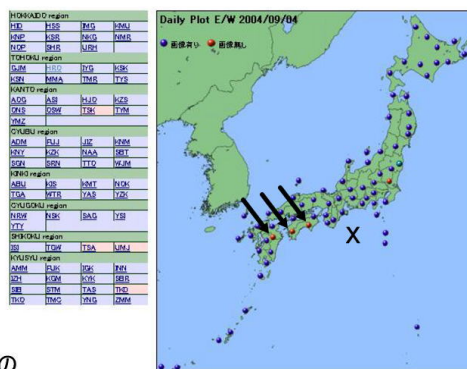


図2. 2004年9月4日の連続波形画像の欠測観測点(矢印)及び震央(X印) (出典: NIED).

紀伊半島沖～四国沖南海トラフ底の熱流量分布：四国海盆の地殻構造が温度構造に及ぼす影響 Heat flow distribution along the Nankai Trough: Influence of the structure of the Shikoku Basin oceanic crust

山野 誠^{1*}; 川田 佳史¹; 後藤 秀作²; 濱元 栄起³
YAMANO, Makoto^{1*}; KAWADA, Yoshifumi¹; GOTO, Shusaku²; HAMAMOTO, Hideki³

¹ 東京大学地震研究所, ² 産業技術総合研究所, ³ 埼玉県環境科学国際センター
¹Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, ²Geol. Surv. Japan, AIST, ³Center Environ. Sci. Saitama

南海トラフにおいて沈み込むフィリピン海プレート（四国海盆）上層部の温度構造は、プレート境界近傍の温度構造を支配する要素の一つであり、地震発生帯におけるさまざまな物理・化学過程に影響を及ぼす。南海トラフ底で観測される熱流量は、この沈み込むプレートの温度構造を反映すると考えられる。これまでの調査結果は、室戸沖から潮岬南方（東経 135～136 度付近）ではトラフ底における熱流量が海底年齢に比べて異常に高いのに対し、その東方（熊野沖）では年齢にほぼ応じた値であることを示している。熱流量が変化する場所は、1944 年東南海地震と 1946 年南海地震の震源域境界に近く、また陸側の地震活動が大きく変化する付近であり、地震発生過程と温度構造との関連を示唆している。

このような熱流量分布の東西方向の変化を詳しく調べ、その原因を解明することを目指して、2011～2013 年に紀伊半島沖～四国沖の南海トラフ海域で熱流量測定を実施した。特に重点的な対象としたのは、トラフ底の高熱流量が通常の値に遷移する地域（東経 136 度付近）、過去の測定データが乏しい四国南方のトラフ底である。これにより、南海トラフ底で計 39 点の新たな測定値が得られ、熱流量分布の変化を明瞭に捉えることができた。最も顕著な変化を示すのは東経 136 度付近（潮岬南方）であり、136 度より西では海底年齢に比べて異常に高く、ばらつきが大きい（130～250 mW/m²）のに対し、136 度の東ではばらつきが小さく、東に向かって急激に減少する（50 km で約 200 から約 100 mW/m² まで変化）。一方、134.5 度付近より西では、全般に値のばらつきが小さい。ここでは海底年齢が西に向かって古くなるが、これに対応した熱流量の減少は見られず、足摺沖（133.5～134 度）では年齢に対して有意に高い値（～130 mW/m²）を示す。

このトラフ底の熱流量分布には、沈み込む四国海盆海洋地殻の構造との対応が認められる。東経 134.5～136 度付近（室戸沖～潮岬南方）の高熱流量でばらつきが大きい地域は、四国海盆拡大末期の北東－南西方向の拡大で形成された部分にあたる。その東側及び西側のばらつきが小さいところは、東西方向の拡大で形成された部分である。両者の東側の境界付近（～136 度）では、海洋地殻の厚さや基盤地形も東西に変化することが知られている。一方、室戸沖トラフ底の高熱流量については、沈み込んだ海洋地殻上部の透水層内における間隙流体循環が、深部から熱を効率的に輸送してトラフ底を加熱するというモデルが提唱されている（Spinelli and Wang, 2008）。これらを合わせて考えると、四国海盆の拡大方向変化による構造境界で海洋地殻の透水率構造が変化しており、それが流体循環の強度やパターンの違いを生じ、熱流量分布の差をもたらしていると推測することができる。流体循環による深部からの熱輸送は、プレート境界付近を冷却する働きをするから、トラフ底熱流量の東西方向の変化は、地震発生帯の温度構造の変化と対応すると考えられる。

キーワード: 南海トラフ, 熱流量, 間隙流体, 海洋地殻, 温度構造, 地震発生帯

Keywords: Nankai Trough, heat flow, pore fluid, oceanic crust, temperature structure, seismogenic zone

南海地震発生帯における巨大分岐断層固着域周辺の現場温度の再評価: NanTroSEIZE Site C0002 長期孔内温度計測データからの制約
Reevaluation of temperature at the updip limit of locked portion of Nankai megasplay, inferred from IODP Site C0002 tem

杉原 孝充^{1*}; 木下 正高²; 荒木 英一郎³; 木村 俊則³; 許 正憲¹; 難波 康広¹; 木戸 ゆかり¹; 真田 佳典¹; Moe Kyaw Thu¹

SUGIHARA, Takamitsu^{1*}; KINOSHITA, Masataka²; ARAKI, Eiichiro³; KIMURA, Toshinori³; KYO, Masanori¹; NAMBA, Yasuhiro¹; KIDO, Yukari¹; SANADA, Yoshinori¹; MOE, Kyaw thu¹

¹ 海洋研究開発機構 地球深部探査センター, ² 海洋研究開発機構 高知コア研究所, ³ 海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト

¹CDEX/JAMSTEC, ²KCC/JAMSTEC, ³DONET/JAMSTEC

Temperature near the updip limit of the locked zone still has large uncertainties due to lack of knowledge about thermal and hydrological properties at depth.

In 2010, the first Long-Term Borehole Monitoring System was deployed at ~900 m below sea floor (mbsf) above the updip limit of seismogenic fault zone in the Nankai Trough off Kumano (Site C0002). Four temperature records show that the effect of drilling diminished in less than 2 years and they all reached thermal equilibrium by 2012. From in-situ temperatures and thermal conductivities measured on core samples, the temperature and heat flow at 900 mbsf are determined as 37.9 °C and 56.1 mW/m², respectively. This heat flow value is in excellent agreement with that from shallow borehole temperature corrected for rapid sedimentation in the Kumano Basin. We use these values to constrain the temperature below 900 mbsf to the mega-splay and plate boundary fault zones.

To extrapolate temperature downward, we use LWD bit resistivity data as a proxy for porosity and the thermal conductivity is modeled from this porosity using a geometrical mean model. Upon integration by the 1-D thermal conduction we included the radioactive heat and frictional heat production. Estimated temperature at the megasplay ranges between 132 to 149 °C, depending on thermal conductivities and radioactive heat. It is significantly higher, by up to 40 °C, than previous 2-D numerical model predictions that can account for the heat flow across the deformation front. The discrepancy may be explained either by increasing the effective frictional coefficients along the fault zones or by introducing a lateral fluid flow along the permeable layers somewhere in the sedimentary layer. Revision of 2-D simulation by introducing our new boundary conditions will also be useful. Ultimately, reaching the megasplay fault and in-situ temperature measurement in the drilled hole is required to understand seismogenesis in the Nankai subduction zone.

キーワード: 地震発生帯, 南海トラフ, 巨大分岐断層, 温度構造, 統合国際掘削計画, 南海トラフ地震発生帯掘削計画
Keywords: Seismogenic zone, Nankai Trough, Megasplay fault, Thermal regime, IODP, NanTroSEIZE

IODP Expedition 348 南海付加体内部への超深部ライザー掘削：科学結果速報 Preliminary Scientific Results of IODP Expedition 348: Ultra-deep Riser Drilling into the Nankai Accretionary Prism

廣瀬 丈洋^{1*}; Tobin Harold²; Saffer Demian³; Toczko Sean¹; 前田 玲奈¹; 久保 雄介¹; Expedition 348 乗船研究者⁶
HIROSE, Takehiro^{1*}; TOBIN, Harold²; SAFFER, Demian³; TOCZKO, Sean¹; MAEDA, Lena¹; KUBO, Yusuke¹; EXPEDITION 348, Scientists⁶

¹ 海洋研究開発機構, ²University of Wisconsin-Madison, ³Pennsylvania State University, ⁴千葉大学, ⁵東京大学, ⁶IODP Expedition 348

¹JAMSTEC, ²University of Wisconsin-Madison, ³Pennsylvania State University, ⁴Chiba University, ⁵The university of Tokyo, ⁶IODP Expedition 348

The Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment (NanTroSEIZE) is a multi-disciplinary scientific project designed to investigate fault mechanics and seismogenesis along subduction megathrusts through seismic imaging, direct sampling, in situ measurements, and long-term monitoring in conjunction with laboratory and numerical modeling studies. International Ocean Discovery Program (IODP) Expedition 348, the latest advance of the NanTroSEIZE project, started on 13 September 2013 and was completed on 29 January 2014. During Expedition 348, the drilling vessel *Chikyu* advanced the ultra-deep riser hole at Site C0002, located 80 km offshore of the Kii Peninsula, from a depth of 860 meters below sea floor (mbsf) to 3058.5 mbsf, the world record for the deepest scientific ocean drilling, and cased it for future deepening. The drilling operation successfully obtained data on formation physical properties from logging while drilling (LWD) tools, as well as from lithological analyses of cuttings and core from the interior of the active accretionary prism at the Nankai Trough. IODP Site C0002 is the currently only borehole to access the deep interior of an active convergent margin.

Preliminary scientific results of Expedition 348 include:

(1) Fine-grained turbiditic mudstones with coarser silty and sandy interbeds, exhibiting steep dips (between ~60 and 90 degrees) are predominant in the prism down to ~3000 mbsf. The biostratigraphic age of the sediments in the lowermost part of the hole is thought to be 9-11 Ma, with an assumed age of accretion of 3-5 Ma.

(2) Slickenlined surfaces, deformation bands and mineral veins are present throughout the drilled interval, while well-developed scaly clay fabrics are increasingly observed below ~2200 mbsf. A substantial fault zone with well-developed foliation was successfully cored from the deep interior of the prism at ~2205 mbsf.

(3) Porosity generally decreases from ~60% to ~20% from the seafloor to 3000 mbsf. However, physical properties including grain density, electrical conductivity and P-wave velocity suggest fairly homogeneous properties in the interior of the prism between ~2000 and 3000 mbsf.

(4) Drilling mud gas analysis during the riser drilling indicates that a source of hydrocarbon gas shifts from microbial origin to thermogenic at around 1700-2300 mbsf.

Lithological and structural characterizations, the style of deformation, and downhole physical properties all indicate a complex structural evolution and will provide unprecedented insights into the mechanical state and behavior of the prism at depth.

キーワード: IODP, NanTroSEIZE, Nankai Trough, accretionary prism

Keywords: IODP, NanTroSEIZE, Nankai Trough, accretionary prism

巨大分岐断層深部 - 浅部における摩擦発熱レベル：炭質物のラマン分光からの推定 Levels of frictional heat along deep to shallow parts of the megasplay fault : a Raman spectroscopic analyses of CM

向吉 秀樹^{1*}; 廣野 哲朗²; 増本 広和²
MUKOYOSHI, Hideki^{1*}; HIRONO, Tetsuro²; MASUMOTO, Hirokazu²

¹ 早稲田大学教育・総合科学学術院, ² 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

¹Faculty of Education and Integrated Arts and Sciences, WASEDA University, ²Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

現在のプレート境界断層および巨大分岐断層において、どのような断層弱化機構 (thermal pressurization, melt lubrication 等) が機能しうるかを理解するためには、化石巨大分岐断層の深部から浅部にいたる摩擦発熱レベルの評価が極めて重要である。そこで、本研究では、海底下 2.5-5.5 km で形成された化石巨大分岐断層 (四国南西部四万十帯久礼アウトオブシーケンススラスト) と海底下 1-4 km で形成された大規模逆断層 (房総半島江見層群) を対象とし、光学顕微鏡による微小変形構造観察に加え、断層に含まれる炭質物のラマン分光分析を実施した。炭質物の分子構造変化は、熱に対して不可逆的に変化するため、温度履歴を敏感に反映するプロキシとなることが期待される。また、温度による炭質物のラマンスペクトルの変化を実験的に評価するため、これらの断層近傍の母岩から採取した炭質物における嫌気環境下における加熱実験を実施した (昇温速度 20 K/min)。

その結果、両断層に含まれる炭質物のラマンスペクトルは、400~600 °Cの加熱実験で得られたスペクトルに類似していることが確認された。これは、両断層がそのような高温を履歴したことを意味するであろう。但し、滑りに伴う剪断歪は炭質物の分子構造変化に影響を与えうることが予想されるため、加熱実験と併せて剪断実験の実施が不可欠であろう。

キーワード: 化石巨大分岐断層, 加熱実験

Keywords: ancient megasplay fault, heating experiment

上盤プレートの地質と沈み込み帯地震破壊領域のセグメント形成—南海トラフの例— Upper plate geology controls the rupture area segmentation -A case study of the Nankai Trough

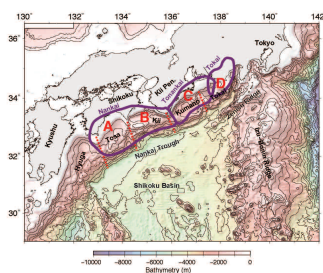
木村 学^{1*}; 橋本 善孝²; 北村 有迅³; 山口 飛鳥⁴; 浜橋 真理¹; 高下 裕章¹; 森田 澄人⁵

KIMURA, Gaku^{1*}; HASHIMOTO, Yoshitaka²; KITAMURA, Yujin³; YAMAGUCHI, Asuka⁴; HAMAHASHI, Mari¹; KOGE, Hiroaki¹; MORITA, Sumito⁵

¹ 東京大学, ² 高知大学, ³ 鹿児島大学, ⁴ 東京大学大気海洋研究所, ⁵ 産業技術総合研究所

¹Dept. Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, ²Kochi University, ³Kagoshima University, ⁴Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, ⁵AIST

What controls the earthquake rupture area of megathrust is one of the most fundamental questions in geodynamic research of subduction zone. In the case of the Nankai Trough, Japan, three major controlling factors have proposed so far, surface topography of the subducting plate like seamount, locally strong rigidity of upper plate due to igneous rock composition, and friction property of the plate boundary megathrust including abnormal pore fluid pressure distribution. Such controlling factors are applicable to other subduction zone in general. For example, the topographic high like seamount is proposed to control the location of asperity due to stronger coupling. The topographic-high worked as an asperity contacts with upper plate and rupture could be propagated when the contact breaks. The topographic-high also works as a barrier in the difficult case to be broken. From the geological point of view, plate boundary megathrust in the seismogenic zone must be composed of fault rock in brittle regime because of its temperature range from ~150 °C to ~350 °C, which is cooler than the temperature for the plastic deformation of quartz, feldspar and other rock forming minerals of oceanic crust except for clayey phyllosilicates. In this temperature range, tectonic melange like fault rock with highly pressurized interstitial fluid is expected. Seismic observation showing a reflector with intensive amplitude of negative reflection coefficient suggests a plate boundary fault layer with abnormal fluid pressure. The friction behavior of the fault rock and pore fluid effect is a recent main concern in the subduction zone. The third factor is the mechanical property of the upper plate for the plate boundary megathrust in subduction zone. It is used to treat that the upper plate is a mechanical uniform media saving the elastic energy for theseismic slip along the megathrust. The mechanical property of the upper plate changes for a geological long time scale due to the growth of accretionary prism or tectonic erosion. In addition to such subduction mode of accretion vs erosion, some peculiar tectonic events (e.g. change in convergent direction, some obstacle collision, spreading ridge collision and rapid magmatic accretion etc.) modify the mechanical property of the upper plate and its heterogeneity in space. In the case of the Nankai Trough, a plutonic body is situated beneath the place of epicenter and is suggested to have been functioned as an asperity of 1944 Tonankai and 1946Nankaido Earthquakes. We examined the on-land geology of the Shikoku island and the Kii Peninsula, SW Japan, basement structure and composition beneath the forearcKumano Basin on the basis of recent results of ocean drilling by IODP (Integrated Ocean Drilling Project) and other investigations to infer the geologic composition of the upper plate. As a result we conclude that the key geologic event was middle to late Miocene episodic and rapid growth of forearc crust, mainly due to the magmatic intrusion and extrusion. This event was casued by the eastward migration of the T-T-T triple junction. Such ancient event now controls therupture area of the great earthquake in the subduction zone.



**「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」が目指す連動型巨大地震災害の軽減
The research project on the extended Nankai seismogenic zones towards disaster mitigation of the mega-thrust earthquakes**

金田 義行^{1*}; 福和 伸夫²; 古村 孝志³
KANEDA, Yoshiyuki^{1*}; FUKUWA, Nobuo²; FURUMURA, Takashi³

¹ 海洋研究開発機構, ² 名古屋大学, ³ 東京大学

¹Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ²Nagoya University, ³The University of Tokyo

The recurrence of Nankai trough mega thrust earthquakes and tsunamis are the very severe problem to Japan. Therefore, MEXT of Japanese government has implemented the research project during a period from FY2008 to 2012 to evaluate seismic linkage around the Nankai trough mega thrust earthquake seismogenic zones. We have obtained many significant scientific results, such as the extended seismogenic zone, in this previous research project. In the 2013 fiscal year, a new project launched aiming mitigation of disaster caused by the Nankai trough earthquakes in the extended seismogenic zone. This new project is composed of three research fields which are the disaster mitigation research field, observational research field and the simulation research field. According to lessons learned from the 2011 East Japan Earthquake, the disaster mitigation research field are progressing 5 sub-themes which are precise seismic hazard estimation, providing research results to local government/community for disaster measures, investigating recovery and revival methodologies based on social environmental changes, and constructing redundant hazard information database. The observational research field reveals structures of crust and plate, seismicity, and historical tsunami events in the Nankai trough. In the simulation research field, investigations will be conducted for recurrence cycle simulation of mega thrust earthquakes, data assimilation method that improves reliability of the simulation, seismic and tsunami wave simulations for disaster mitigation. We must surely progress each sub-theme at the beginning and finally integrate them for disaster mitigation around the extended Nankai trough seismogenic zones. In this talk, we will introduce the outline of new project and the present progress.

Keywords: Nankai trough seismogenic zone, Seismic linkage, Disaster mitigation

小笠原スラブの沈み込みとマントル対流 Ogasawara Bending Slab and Mantle Convection

新妻 信明^{1*}
NIITSUMA, Nobuaki^{1*}

¹ 静岡大学地球科学教室

¹Inst. GeoSciences, Shizuoka Univ.

小笠原海溝から沈み込む小笠原スラブは急に深度を増し、急斜している。しかし、2013年5月14日 M7.3 深度 619km のマリアナ海溝域最深地震、および 1998年2月7日 M6.4 深度 552km の小笠原海溝域地震の震央は海溝側に近付いており、小笠原スラブが同心円状屈曲したまま上部マントル下底まで沈み込んでいることを示している。

東太平洋海膨で拡大形成された太平洋プレートは、日本列島に沿って沈み込み、上部マントル底に達している。プレートの下に接するマントルも含めて考えると、東太平洋海膨域ではプレート拡大のためにマントルが不足し、日本列島域では沈み込んだマントルが過剰になる。マントル量の定常状態を保つためには、過剰な沈み込みマントルを拡大域へ環流させるマントル対流が必要である。

スラブが同心円状屈曲したまま上部マントル底に到達すると、スラブ上面が下部マントル上面に接する。上部マントル内でスラブ上面が最も低温なので、スラブ上面は下部マントルへ相転移できず、下部マントル上面に浮いた状態でプレート運動と逆方向に移動する。この海嶺へ向かうスラブ移動は、最速最大の太平洋プレート運動を支えるマントル対流に重要な役割を担っているであろう。

小笠原スラブの北側の伊豆スラブも同心円状屈曲して沈み込むが、深度 410km 付近で平面化するため、同心円状屈曲のまま沈み込む小笠原スラブとの間にスラブの不連続が存在するはずである。この不連続部で 2013年11月に西之島が噴火した。この不連続部で起こる地震の発震機構は、東日本大震災の前後で変化している。

キーワード: 小笠原スラブ, 同心円状屈曲, マントル対流, 上部マントル下底, 西之島噴火

Keywords: Ogasawara Slab, Concentric Bending, Mantle Convection, Upper Mantle Bottom, Nishinoshima Eruption

整流潮汐载荷：微動が明らかにする地震発生メカニズム Rectified tidal loading: Control on earthquakes manifested by deep tremors

井出 哲^{1*}; 田中 愛幸²
IDE, Satoshi^{1*}; TANAKA, Yoshiyuki²

¹ 東京大学大学院理学系研究科, ² 東京大学地震研究所

¹Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, ²Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地震はプレート運動によっておきるが、何がプレート運動を支配しているのか必ずしも明らかでない。この問題への手掛かりを与えるのが、西日本で発見された深部微動である。ある微動のクラスターの発生レートは観測される潮汐変化に極端に依存している。両者の関係から、プレート境界における速度依存型の応力とすべりの非線形関係が導かれる。この経験的法則と観測潮位によって過去9年間の微動活動はかなり正確に説明できる。振動する潮汐応力変化は非線形摩擦法則によって整流化され、潮汐振幅のわずかな変化が沈み込み帯深部で大きなスロースリップの変化を生み出すことがわかる。この変化はさらに浅部の地震活動に影響するかもしれない。実際に過去50年間の定常地震活動と潮汐の変化は同期しており、さらに過去1000年以上の南海地震の弱い周期性とも関係している可能性が高い。

キーワード: 微動, 潮汐, 整流効果, スロースリップ, 地震活動, 南海地震
Keywords: tremor, tide, rectification, slow slip, seismicity, Nankai earthquakes

沈み込み帯でのプレート境界面破壊に関する構造力学モデル Structural mechanics model of plate-interface fracture at subduction zones

江口 孝雄^{1*}
EGUCHI, Takao^{1*}

¹ 防衛大学校 地球海洋学科
¹ National Defense Academy, Japan

There are unidentified and unveiled properties concerning the physical process of greater inter-plate earthquakes at subduction zones. We, here, present a stochastic fracture model of the plate-interface with dynamic discrete interaction blocks. The stochastic treatment in this study is mainly based on structural mechanics. Here, in the four-dimensional point of view, regarded as significant long-wavelength components of the mechanical inter-plate coupling, we assign several discrete lattice-like blocks being connected each other on a hypothesized plate boundary system. The representative mechanical interaction vector (or tensor) for each discrete block should be variable on the plate boundary system. The total number of the discrete blocks and their nesting pattern should also vary with time during the long-term subduction process with intermittent greater seismic events.

Hereafter, we treat the inter-plate coupling at discrete blocks, using parameters such as failure probability (P_{sf}) and safe probability (P_{ss}) of the total system of the plate boundary. Here, $P_{sf} + P_{ss} = 1$.

The system fracture for the case of parallel connecting blocks is defined as the breakdown of all parallel blocks. Whereas, for the case of a series connecting block system, the system fracture is defined as the failure of one of the series block, or more. The system failure probability of a simple mechanical system being coupled in parallel N blocks is given as a product of $p(i)$ from $i = 1$ to $i = N$. Here, $p(i)$ is the failure probability of the i -th block of the system. For the case of a mechanical system connected in series N blocks, the system safe probability becomes a product of $\{1-p(i)\}$ from $i = 1$ to $i = N$. For a mechanical system composed of both parallel and series blocks, the system failure probability and system safe probability can be estimated with the above definition. Then, we assume that the inter-plate shear coupling of the plate-interface progresses only at discrete blocks of brittle fracture.

We consider two different configuration models for a two-by-four matrix (2×4) system of discrete coupling blocks, consist of four columns in the trench-parallel direction and two rows of deep side and a shallow side in the dip direction, as follows.

Configuration model A is a series-connected system of both the shallower parallel-connected column blocks and the deeper parallel-connected ones.

Configuration model B is a parallel-connected system of the four columns of the shallower and deeper rows being directly series-connected in the dip direction.

By setting the failure probability, $p(i,j)$, of (i,j) -th block, we can estimate the system failure probability (P_{sf}) and system safe probability (P_{ss}) for the configuration models, A and B . For the configuration models A and B , the system safe probability, $P_{ss}(A)$ and $P_{ss}(B)$ can be obtained. In the case of $p(i,j)$ less than 0.5 for all blocks, $P_{ss}(A)$ becomes larger than $P_{ss}(B)$, indicating that the configuration model A is safer than the model B . When the representative pattern of the inter-plate coupling changes from the configuration model A to B , or vice versa, we should carefully estimate the system probabilities.

We also demonstrated the detailed hypothetical expression form of $p(i,j)$ by considering the effect of preceding larger seismic ruptures at blocks and the subsequent healing process, etc.

キーワード: 沈み込み帯, プレート間相互作用, 構造力学, 系の破壊確率, 系の安全確率

Keywords: subduction zone, inter-plate coupling, structural mechanics, system failure probability, system safe probability

沈み込み帯における地震発生数と前弧地形の関係 Seismicity rate variations in subduction zones related to forearc topography

西川 友章^{1*}; 井出 哲¹
NISHIKAWA, Tomoaki^{1*}; IDE, Satoshi¹

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

¹ Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

世界の沈み込み帯の地震活動には、地震発生数や最大地震サイズなど様々な点において違いがある。このような地震活動の違いはそれぞれの沈み込み帯のプレート相対速度や、沈み込むプレートの浮力などによって説明されてきた。とくに地震発生数は、Ide (2013) によりプレート相対速度との比例関係が指摘されている。これは地震がプレートの歪みに起因することを考えれば自然な関係である。

その一方、沈み込み带上盤も地震発生を支配する重要な要素である。これまでの地震観測やテクトニクスの研究では、上盤前弧の地形がプレート境界の固着や間隙流体圧などの摩擦特性と関係することが指摘されている。このことから、世界の沈み込み帯の前弧地形の違いは沈み込み帯ごとの摩擦特性の違いを反映していると考えられる。しかし、このような上盤地形の違いが世界の沈み込み帯の地震活動と具体的にどのように対応しているかは明らかではない。そこで本研究では、Smith and Sandwell (1997) による海底地形データを用いて、世界の沈み込み带上盤における海溝斜面の傾斜を計算し、それらと ETAS モデル (Ogata, 1988) から計算される沈み込み帯における定常地震発生数 (余震を除いた地震発生数) を比較した。その結果、海溝斜面の傾斜と定常地震発生数に正の相関が見られた。上盤の海溝斜面が急斜面になっている沈み込み帯ほど定常地震発生数が多く、緩斜面では少ない。また、海溝斜面と定常地震発生数の関係は、前述のプレート速度と地震発生数の比例関係 (Ide, 2013) に従わない沈み込み帯 (カスカディア、南チリなど) も説明することができるように思われる。

上盤地形とプレート境界の摩擦の関係を説明する臨界尖形モデル (Davis et al., 1983; Dahlen, 1984) や沈み込み帯のアナログ実験 (Gutscher et al., 1996 など) によれば、海溝斜面が急斜面であることは前弧域のプレート間摩擦が大きいことを意味する。本研究の結果と合わせて考えると、急斜面でプレート境界の摩擦が大きい沈み込み帯では定常地震発生数が多いということになる。このことは浸食・付加作用とプレート境界における凹凸を考えることで理解できる。海溝斜面が急斜面である沈み込み帯は浸食作用が卓越した沈み込み帯と考えられている (Clift and Vanucchi, 2004)。そのような沈み込み帯では堆積物の厚さが薄く海底面の凹凸がそのまま沈み込み、上盤ウェッジ先端部で大きな摩擦を生む。地震発生領域 (サイスマジェニックゾーン) ではそれらの凹凸は無数の小さなアスペリティーとして働き、多くの地震が発生する。逆に緩斜面の沈み込み帯は付加作用の卓越した沈み込み帯である。底面の凹凸は堆積物によって滑らかなになり、上盤ウェッジ先端部での摩擦は小さい。地震発生領域では滑らかなプレート境界は一つの大きなアスペリティーとして働き、結果として地震数が少なくなる。また、このようなアスペリティーの数や大きさの違いは沈み込み帯における巨大地震の発生様式の違いにも関連があると思われる。

本研究は上盤地形と地震活動の対応を明らかにするとともに、地震発生数がプレート相対速度と歪みのような力学的要因のみならず、浸食・付加作用や堆積物、プレート境界の凹凸などの物質的要因にも支配されていることを示すものである。

キーワード: 地震発生数, 沈み込み帯, 前弧地形, 浸食・付加作用, アスペリティー

Keywords: seismicity rate, subduction zone, forearc topography, erosion and accretion, asperity

地震発生に先行する断層強度低下の地震波モニタリング可能性の検討 Feasibility of acoustic monitoring of strength drop precursory to earthquake occurrence

亀 伸樹^{1*}; 永田 広平²; 中谷 正生¹; 日下部 哲也¹
KAME, Nobuki^{1*}; NAGATA, Kohei²; NAKATANI, Masao¹; KUSAKABE, Tetsuya¹

¹ 東京大学地震研究所, ² 文部科学省

¹Earthquake Res. Inst., Univ. of Tokyo, ²Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology

Rate- and state-dependent friction law (RSF), proposed on the basis of laboratory experiments, has been extensively applied to modeling of earthquake stick-slip cycles. A simple spring-slider model obeying RSF predicts a significant decrease of the frictional strength Φ (the state of contact) that is localized within a few years preceding the earthquake occurrence. On the other hand, recent laboratory experiments successfully monitored the history of the strength by simultaneously measuring P-wave transmissivity $|T|$ across the frictional interface using a 1MHz transducer. This suggests a possibility of earthquake forecast by monitoring the strength of a natural fault by acoustic methods.

The present paper explores the feasibility of such monitoring in the field on the basis of the physics of RSF combined with the linear slip model (LSM) employed in the classical acoustic methodology for monitoring an imperfectly welded interface. The characteristic frequency f_c , around which $|T|$ (or reflectivity $|R|$) has a good sensitivity to the interface strength, is shown to be proportional to the strength and inversely proportional to the representative scale of real contacts. For natural faults f_c is estimated to be 1 to 100Hz, which is practicable in the field. The changes of $|T|$ and $|R|$ depend on the ratio of the strength drop to the absolute strength level, the latter of which is not constrained by RSF simulations. Expected changes in wave amplitude in the preslip period would be several percent for strong faults and several tens percent for weak faults, which may be detectable by acoustic methods such as seismic reflection surveys.

キーワード: 断層強度, 地震サイクル, 速度・状態依存摩擦則, 地震先行現象, 線形すべりモデル, 地震波モニタリング
Keywords: fault strength, earthquake cycle, rate- and state-dependent friction, precursor, linear slip model, acoustic monitoring

台湾車籠埔断層における古応力状態の変化と半定量化 Semi-quantitative analysis of change in stress state in Chelung-pu Fault, Taiwan

橋本 善孝^{1*}; 戸部 航太¹; 葉 恩肇²
HASHIMOTO, Yoshitaka^{1*}; TOBE, Kota¹; YEH, En-chao²

¹ 高知大学, ² 国立台湾師範大学

¹Kochi University, ²National Taiwan Normal University

地震にともなう応力の変化を理解することは、地震の規模や性質を理解する上で重要である。台湾チェルンブ断層では1999年に発生した集集地震の詳細な地震波記録がとられ、地震直後に Taiwan Chelung-pu Fault Drilling Project(TCDP)による掘削が行われている。世界でもこのような断層は稀である。本研究の目的は、チェルンブ断層から得られた構造データを用いて、小断層に記録されている過去の応力状態を推定し、地震と応力の関係を時空間的に検討することである。地震後の応力状態は TCDP によって得られているが、地震前あるいは地震時の応力状態は地質学的な情報に保存されていることが期待できる。TCDP による掘削は 40m 間隔を空け 2 箇所で行われており本研究ではホール A のコアを対象としている。得られたコアの範囲は深度 400m から 2000m までである。地震断層は深度およそ 1120m で確認された。コアの観察から、ほぼ全域に渡って小断層やオープンクラック、断層岩等の変形構造が確認された。このうち小断層面上のスリッケンラインのレイクとスリッケンステップからスリップデータを得た。スリップデータの数は 195 個である。また、コアと比較するために地表の露頭から小断層のスリップデータを測定した。調査地点は 2 地点あり、TCDP 掘削地点からおおよそ 2km 程度傾斜方向西方に離れている。岩相は主として灰色の頁岩からなる。スリップデータの数は 146 個である。

小断層解析には多重逆解法 MIM (Yamaji et al., 2000) と k-means clustering (Otsubo et al., 2006) を使用した。小断層解析の結果、コアと地表からそれぞれ 4 つの応力解が得られた。それぞれ、コアの応力を c1-c4、地表の応力を s1-s4 とし、 $\Phi = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3)$ で表される応力比の小さいものからナンバリングした。解析の結果得られた応力解がどのような応力状態を取るかを推定するため Anderson の断層運動論に従って stress polygon を描き、解析の結果得られた応力解を SHmax、Shmin、SV の 3 成分に分解することで stress polygon に投影した。投影した結果 c1 と c3 は SHmax、Shmin がともに比較的小さい範囲にあり、c1 が正断層型、c3 は全ての断層運動タイプをとり得る範囲を示した。c2 は c1 と c3 に比べて SHmax、Shmin がともに大きい範囲にあり、逆断層型を示した。c4 は stress polygon に投影することができなかった。c1 と c3 は Lin et al. (2007) で示されている地震後の現在の応力状態と調和的な結果となり、c2 は集集地震時にチェルンブ断層が逆断層成分の滑りをしていたことと調和的な結果となった。この応力状態の違いは地震サイクルに伴う応力状態の変化を表している可能性がある。地表の結果では s1 と s3 は SHmax、Shmin がともに比較的小さい範囲にあり、s1 は正断層型、s3 は正断層型と横ずれ断層型の応力状態をとった。s2 は stress polygon に投影することができなかった。s4 は s1、s3 に比べて大きい SHmax、Shmin の範囲にあり、逆断層型であった。地表でも同様に地震サイクルに伴う応力状態の変化と見られる結果が得られた。これらを地震前後の応力とし応力降下量を計算すると、コアでは最大 13.71MPa、地表では 0~0.08MPa 程度となった。Ma et al. (2000) は地震波解析から集集地震北部大変位域の応力降下量を平均 10MPa と報告しており、おおむね一致している。

キーワード: 応力, 小断層解析, 応力解放量, チェルンブ断層

Keywords: stress, micro-fault inversion, stress drop, Chelung-pu fault

美濃帯チャートの透水性と続成組織 Fluid transport property and diagenetic microstructure of chert in the Mino Belt

山口 飛鳥^{1*}; 谷川 亘²; 亀田 純³; 清水 麻由子⁴; 濱田 洋平⁵; 木村 学⁴
YAMAGUCHI, Asuka^{1*}; TANIKAWA, Wataru²; KAMEDA, Jun³; SHIMIZU, Mayuko⁴; HAMADA, Yohei⁵; KIMURA, Gaku⁴

¹ 東京大学大気海洋研究所, ² 海洋研究開発機構高知コア研究所, ³ 北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻, ⁴ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, ⁵ 海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域

¹ Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo, ² JAMSTEC/Kochi, ³ Graduate School of Science, Hokkaido University, ⁴ Department of Earth and Planetary Science, the University of Tokyo, ⁵ JAMSTEC/IFREE

Pore fluid pressure along plate boundary megathrust is controlled by both fluid supply and fluid transport property, and it affects on faulting and earthquake mechanics. In the case of subduction zones where relatively old (older than 50 m.y. in age) oceanic plate subducts, oceanic crust is covered with thick pelagic siliceous sediments composed of diatomic and/or radiolarian oozes. In the Japan Trench, Kimura et al. (2012) pointed out that the volume of dehydrated fluid during silica diagenesis from opal-A to quartz through opal-CT is significant compared to that from clay mineral (smectite-illite) transition. However, fluid transport property of siliceous sediments has not been well-understood yet. In this study we conducted both permeability measurement and microstructural/microchemical observation of bedded chert from Inuyama-section in the Mino belt, Jurassic accretionary complex in Japan, as an on-land analog of subduction zone where old oceanic plate subducts.

Initial porosity of chert samples at atmospheric pressure is 0.4 to 2.2 %. Permeability was measured at room temperature under isostatic confining pressures of 5 to 120 MPa, by the steady state flow method with nitrogen gas as a pore fluid. Water permeability was then obtained by using Klinkenberg equation. At effective pressure of 5 MPa converted water permeability is 10^{-17} to 10^{-19} m², decreases with increasing effective pressure down to the ranges of 10^{-20} to 10^{-21} m².

Optical and electron probe microanalyzer (EPMA) analyses show that chert is composed of radiolarian fossils filled with quartz and chalcedony, and red-colored matrix. Red matrix shows ~95 wt.% of SiO₂, whereas >99 wt.% of SiO₂ are commonly observed from inside part of the radiolarian fossils. Such high concentration of SiO₂ within radiolarian fossils indicates that dissolved silica was precipitated into cavities maintained by radiolarian tests. This process would be related with silica diagenesis, occurring as dissolution-precipitation processes.

Silica mineral precipitation onto pore spaces would contribute to construct characteristic low porosity and permeability of chert. Our result shows that silica diagenesis works as not only a fluid source but also as a process for porosity/permeability reduction in convergent margins characterized by old subducting oceanic plate.

キーワード: 沈み込み帯, 続成作用, 浸透率, チャート

Keywords: subduction zone, diagenesis, permeability, chert

南海トラフ付加体浅部堆積物の力学的特性 Mechanical properties of the shallow Nankai Trough accretionary sediments

金川 久一^{1*}; 高橋 美紀²; 東 修平¹; 伊東 英紀¹; 井上 厚行¹
KANAGAWA, Kyuichi^{1*}; TAKAHASHI, Miki²; AZUMA, Shuhei¹; ITO, Hidenori¹; INOUE, Atsuyuki¹

¹ 千葉大学大学院理学研究科, ² 産業技術総合研究所活断層・地震研究センター

¹ Graduate School of Science, Chiba University, ² Active Fault and Earthquake Research Center, Geological Survey of Japan

IODP 掘削地点 C0002 および C0009 において南海トラフ付加体浅部(海底下約 1000-1500 m)から採取された、砂岩、凝灰岩、シルト質泥岩および粘土質泥岩 5 試料について、室温および試料原位置相当の圧力・間隙水圧条件で、三軸圧縮・摩擦実験を行った。

上記の条件で、軸方向変位速度 10 $\mu\text{m/s}$ で三軸圧縮実験を行った結果、破壊強度は砂岩試料が約 300 MPa と非常に大きく、凝灰岩試料が 48 MPa 程度、シルト質泥岩 1 試料が 20 MPa 程度、粘土質泥岩試料が 14 MPa 程度であった。砂岩、凝灰岩、シルト質泥岩試料の破壊時間は 20 秒以内と比較的短く、一方粘土質泥岩試料は約 40 秒かかってゆっくりと破壊した。シルト質泥岩のもう 1 試料は破壊せず、15 MPa 程度の強度で延性的に変形した。砂岩試料は方解石でセメントされていて非常に硬く固結しているため、破壊強度が非常に大きかったと考えられる。一方、延性的に変形したシルト質泥岩試料は十分に固結していなかったと考えられる。粘土質泥岩試料は粘土鉱物に富む(約 42 wt%) ため強度が小さかったことに加えて、孔隙率が小さく(約 11%) 透水性も低かった(約 10^{-19} m^2) ため、圧縮により間隙水圧が上昇して強度がさらに低下し、またゆっくり破壊したと考えられる。このような粘土質泥岩の破壊は、南海トラフ付加体浅部で観測されているスロースリップの発生源となっている可能性がある。

さらに、上記の条件で軸方向変位速度を 0.1, 1, 10 $\mu\text{m/s}$ の間でステップ状に変化させながら三軸摩擦実験を行った結果、これらの試料の摩擦特性が、粘土鉱物の含有量によって系統的に変化することが明らかとなった。5 試料の粘土鉱物の含有量は、砂岩試料が約 6 wt%、凝灰岩試料が約 17 wt%、シルト質泥岩試料が 29-34 wt%、粘土質泥岩試料が約 42 wt% である。変位速度 1 $\mu\text{m/s}$ における定常摩擦係数は、粘土鉱物の含有量の増加に伴って低下し、砂岩試料が 0.87、凝灰岩試料が 0.71、シルト質泥岩試料が 0.53-56、粘土質泥岩試料が 0.25 であった。変位量に依存した摩擦挙動も粘土鉱物含有量の増加に伴って系統的に変化し、粘土鉱物含有量が少ない砂岩試料がすべり硬化を示すのに対し、粘土鉱物含有量の増加に伴ってすべり軟化に転じ、それが明瞭になる傾向が認められた。全試料とも、変位速度の増加に伴って摩擦強度が増加する速度強化の挙動を示すが、定常摩擦強度の変位速度依存性に対する ($a - b$) 値の割合は、粘土鉱物含有量の増加に伴って減少する。これは、粘土鉱物含有量の増加に伴って摩擦成分が低下し、流動成分が増加することを意味している。このように、南海トラフ付加体浅部の断層運動は堆積物中の粘土鉱物含有量によって支配されていると考えられる。

キーワード: 南海トラフ, 付加堆積物, 破壊特性, 摩擦特性

Keywords: Nankai Trough, accretionary sediments, failure properties, frictional properties

沈み込み帯浅部における断層の摩擦速度依存性 Velocity weakening behavior observed for friction of the shallow subduction zone fault material

堤 昭人^{1*}; 並木 由香¹; 中野 龍二¹; 河合 智章¹
TSUTSUMI, Akito^{1*}; NAMIKI, Yuka¹; NAKANO, Ryuji¹; KAWAI, Tomoaki¹

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

¹ Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

Recent observations of slow earthquakes along faults within shallow part of subduction zones, for example the very low frequency earthquakes at the Nankai Trough [Ito and Obara, 2006; Sugioka et al., 2012], has demonstrated that faulting there is slow yet seismic; suggesting that frictional velocity dependence along the fault at the shallow portion must be negative. However, previous experimental results have repeatedly shown that velocity dependence of the expected fault zone material is generally estimated to be positive. Here, we present our recent experimental results showing that velocity dependence of the friction of the shallow subduction zone faults are not necessarily be positive.

We have performed a series of rotary-shear large displacement (>150 mm) friction experiments on the following shallow fault simulating material: clayey fault material from the shallow megasplay fault zone within the Nankai accretionary prism, input pelagic siliceous to calcareous sediments to the Costa Rica subduction zone, and simulated artificial gouge of montmorillonite/quartz mixtures (20-40 wt% of montmorillonite). Experimental results reveal that these material do exhibit velocity weakening behavior at a range of velocities from 0.003-0.3 mm/s. Velocity weakening of these material is mostly characterized by a small degree of the friction velocity dependence (the absolute value of (a-b) is typically <0.005).

The SSEs are often described as conditionally stable sliding of faults [e.g., Shelly et al., 2006]. High pore fluid pressure could alter a velocity-weakening fault with a small value of (a-b) to conditionally stable regions by reducing the effective normal stress [Scholz, 1998]. The presented velocity weakening property with a small value of (a-b) could be responsible for generating shallow slow seismic slip events in subduction zones. Textural observation reveals the importance of studying effects of both the clay content and shear-induced deformation textures on the frictional velocity dependence.

キーワード: 南海トラフ, 沈み込み帯, 摩擦速度依存性, ゆっくり地震

Keywords: Nankai Trough, subduction zone, frictional velocity dependence, slow earthquakes

非晶質シリカ及びカルサイトから成る断層模擬物質の摩擦特性 Frictional properties of simulated faults containing amorphous silica/calcite mixtures

並木 由香^{1*}; 堤 昭人¹
NAMIKI, Yuka^{1*}; TSUTSUMI, Akito¹

¹ 京都大学大学院理学研究科
¹ Graduate School of Science, Kyoto University

Various seismic behaviors such as large earthquakes, episodic slow slip events, or silent earthquakes are observed in subduction zones. Knowledge of the frictional properties of input material to subduction zones would help to understand the complicated seismic behaviors. On the Cocos plate, which subducts beneath the Caribbean Plate at Middle America Trench offshore Costa Rica, input sediments containing clay, silty clay sediments and silicic to calcareous ooze were collected during the IODP expedition 334. We have been studying the frictional properties of the collected input material to the Costa Rica subduction zone. In order to better understand frictional processes of a fault in silicic to calcareous ooze, we have performed a series of friction experiments on a simulated fault gouge containing mixtures of amorphous silica and calcite.

Frictional experiments were performed at a constant slip velocity of $v = 0.28$ mm/s, and also under a velocity-stepping condition. The silicic to calcareous ooze sample showed the following characteristic behavior. The friction coefficients at 0.28 mm/s showed initial peaks at 0.4-0.6 and subsequent little decrease, followed by a gradual increase to attain a constant friction value at 0.6-0.8. The analogue gouge containing 40-80 wt% of calcite reproduced such frictional behavior well. The experimental samples of the input ooze material required only about 40 mm of displacement to attain constant steady-state friction level. However, the calcite/amorphous silica mixtures needed larger displacement to attain steady-state friction. Furthermore, the calcite/amorphous silica mixtures could not reproduce friction velocity dependence observed for the collected ooze samples. The result suggests the importance of studying effects of grain size distribution and the grain morphologies on the frictional properties of the silicic to calcareous ooze material.

キーワード: 沈み込み帯, 摩擦実験, CRISP
Keywords: subduction zone, frictional experiment, CRISP

スメクタイト及びイライトの摩擦挙動の温度効果：沈み込み帯での地震発生帯の上限としての可能性 Effect of temperature on frictional behavior of smectite and illite: Implication for the updip limit for seismogenic zone

久保 達郎^{1*}; 片山 郁夫¹
KUBO, Tatsuro^{1*}; KATAYAMA, Ikuo¹

¹ 広島大学地球惑星システム学

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University

[はじめに] 浅部の非地震発生領域と地震発生帯との境界は地震発生上限 (updip limit) と呼ばれ、津波発生に関わるなど、何がこの上限を決定しているかは防災の観点などから大変重要である。沈み込み帯における地震発生領域の上限領域は主に温度に強く依存し、150 °Cで起こるとされている。地震発生上限を決めている要因は諸説あるが、その中の一つにスメクタイト-イライト相転移による摩擦特性の違いによるという仮説がある。一方で、Saffer and Marone(2003) ではスメクタイト、イライトの速度依存性の詳細な実験が行われ、スメクタイト、イライトともに安定すべりをすることからスメクタイト-イライト相転移が沈み込み帯における地震発生上限となり得ないと報告した。しかし、Saffer and Marone(2003) の実験はすべて室温で行われたもので、天然の温度環境を再現しながらの実験がなされていないという問題点がある。そこで今回、広島大学理学部にある高温二軸摩擦試験機を用いて高温でのスメクタイトとイライトの摩擦挙動を調べ、スメクタイト-イライト相転移が地震発生上限になりうるかどうかの議論を行うことを目的とした。

[実験手法] 高温二軸摩擦試験機を用いて、粉末状の擬似断層物質を二つのガプロブロックの間にはさみ摩擦実験を行う double-direct shear といわれる手法をとった。垂直応力は油圧式手押しポンプで制御しながら加重をかけていき、鉛直方向(剪断方向)の加重はモーターとギアシステムを用いており、ギアシステムにより様々な速度比で減速された回転運動を、ボールネジを用いて鉛直方向の往復運動に変換することで載荷した。摩擦特性の地震性か非地震性の評価は、速度依存性の式によって行った。速度依存性は次式で与えられ:

$$(a-b)=d \mu / (d \ln V) \text{ (ただし, } a, b \text{ は摩擦パラメータ, } V \text{ は滑り速度)}$$

この、 $a-b$ が正を示せば地震性、負を示せば非地震性となることが知られており、地震性か非地震性かを知る上で重要なパラメータとなっている。摩擦強度と速度依存性を算出し、高温下でスメクタイト及びイライトが安定すべりをするか、不安定すべりをするかの評価を行った。

[結果, 考察] 摩擦係数は室温で行われた先行研究と同様にスメクタイトはイライトよりも低くなる傾向が見られた。温度を上げるとスメクタイトとイライトの摩擦強度の差はわずかになるが、垂直応力が 60MPa の条件下では約 2 倍の差があり、スメクタイトはイライトに比べ歪みエネルギーを溜めにくい特性を持っていると言える。また、速度依存性については、温度の上昇により変化せず、垂直応力が 40MPa 以上の条件下では、すべり強化 ($a-b > 0$) の非地震性の摩擦挙動を示した。これらのことから、スメクタイトは天然の沈み込み帯における温度・圧力条件下においても非地震性の安定すべりをしていると期待される。一方で、イライトはスメクタイトに比べ大きな摩擦係数の値を示した。このことに加え、温度環境が 200 °C、垂直応力が 40MPa 以上の条件下ですべり弱体化(地震性)の摩擦挙動を示した。温度効果によって、天然の沈み込み帯における温度・圧力下で、地震性の不安定すべりをしている可能性があると考えられる。

Saffer and Marone(2003) の先行研究において、室温の温度環境下でイライトがすべり強化(安定すべり)したために、スメクタイト-イライト相転移による鉱物の変化が摩擦特性の変化と結びつかず、地震発生上限になり得ないと報告をした。しかし、本研究において温度を上昇させ天然の地震発生上限領域の温度環境下に近い条件ではイライトがすべり弱体化を示したことで、スメクタイト-イライト相転移が、十分に非地震性-地震性の変化を支配している可能性が有力であると言える。

キーワード: 地震発生帯の上限, スメクタイト-イライト相転移, 温度効果, 速度依存性

Keywords: updip limit, smectite-illite transformation, effect of temperature, velocity dependence

玄武岩起源断層物質の摩擦特性と海溝型地震 Frictional properties of basalt-derived fault rocks and implications for subduction earthquakes

斎藤 翼^{1*}; 氏家 恒太郎¹; 堤 昭人²
SAITO, Tsubasa^{1*}; UJIE, Kohtarō¹; TSUTSUMI, Akito²

¹ 筑波大学・生命環境, ² 京都大学・理学
¹Life and Env. Sci., Univ., Tsukuba, ²Sci., Kyoto Univ.

近年の南海トラフをはじめとする沈み込み帯における反射法地震探査結果は、海溝型地震震源域の大部分が海洋地殻上部の玄武岩にあることを示唆しており (Bangs et al., 2009 など)、海溝型地震の発生過程を理解するうえで、玄武岩は鍵となる物質であると考えられる。しかし、これまで玄武岩の摩擦特性を検討した研究はほとんどない。四国東部に分布する四万十付加体上部白亜系牟岐メランジュでは、底付け付加に伴うデュプレックス構造形成によって、玄武岩とテクトニックメランジュがスラストにより複数回繰り返す (Ikesawa et al., 2005)。スラストは玄武岩中に発達しており、ウルトラカタクレーサイト、面状カタクレーサイトなどで構成され、ウルトラカタクレーサイトからは断層物質の流動化 (fluidization) や摩擦発熱による鉱物変化など地震性すべりの証拠が報告されている (Ujii et al., 2007; 2008; Kameda et al., 2011 など)。本研究では、ウルトラカタクレーサイト、面状カタクレーサイト、及びそれらの母岩である枕状玄武岩から採取した試料を用いて、含水条件下ですべり速度 0.0028-2.8 mm/s 下での摩擦の速度依存性と高速 (1.3 m/s) 摩擦特性を検討した。実験の結果、摩擦の速度依存性は、枕状玄武岩起源のガウジで速度弱化、ウルトラカタクレーサイト、面状カタクレーサイト起源のガウジで速度強化の挙動を示した。一方、高速摩擦実験ではすべての試料がピーク摩擦から 0.1-0.2 への定常摩擦へと至るすべり弱化的挙動を示すが、ウルトラカタクレーサイト起源のガウジは、応力降下量、すべり弱化的距離、破壊エネルギーが枕状玄武岩や面状カタクレーサイト起源のものに比べて顕著に小さいという結果が得られた。XRD 解析と微細構造観察の結果、速度弱化を示した試料は粘土鉱物に乏しく (21 wt.%)、粉碎に伴う粒子の細粒化が見られた一方、速度強化の挙動を示した試料は粘土鉱物により富んでおり (29-50 wt.%)、せん断帯に沿った粘土鉱物の配列が認められた。これらの結果は、海洋地殻を構成する枕状玄武岩は不安定すべりの発生ポテンシャルを有するが、断層岩形成に伴ってすべりが安定化することを示唆する。これは、断層運動に伴う粘土鉱物の配列や、熱水変質の進行に伴う粘土鉱物の含有量増加に起因しているのかもしれない。高速摩擦実験の結果は、ウルトラカタクレーサイトにおいて、地震破壊が伝播しやすいことを示している。このことは、ウルトラカタクレーサイトにおいて地震性すべりの痕跡が認められることと調和的である。

キーワード: 海溝型地震, 玄武岩, 摩擦速度依存性, 高速摩擦

Keywords: subduction earthquakes, basalt, frictional velocity dependence, high velocity friction

粘土鉱物の湿式および乾式粉碎による非晶質化 Amorphization of clay minerals by wet and dry grinding

藤本 光一郎^{1*}; 福地 里菜²

FUJIMOTO, Koichiro^{1*}; FUKUCHI, Rina²

¹ 東京学芸大学, ² 東京大学理学系研究科

¹Tokyo Gakugei University, ²Tokyo University

Nanoparticles in fault zones are recently paid much attention since they give significant influences on the frictional properties (Ma et al., 2006). Nanoparticles are considered to be formed not only by mechanical grinding but also by mechanochemical processes. Amorphous nanoparticles were found in Iida-Matsukawa fault, Central Japan (Ozawa and Takizawa, 2007). It is well known that clay minerals are easily transformed into amorphous phase by mechanochemical processes. We conducted pulverization experiments of some clay minerals under both dry and wet conditions to clarify the characteristics of the pulverized materials and the mechanism of amorphization.

We used kaolinite saponite and sericite as starting materials. Pulverization experiments were conducted using planetary ball mill and characterization of run products were conducted by XRD, FT-IR, TG-DTA and FE-SEM. Three minerals were completely transformed into amorphous materials by dry grinding. XRD peaks were weakened but still remain after one day wet drying as for kaolinite and sericite. On the contrary, as for saponite, XRD peaks do not show remarkable change under wet condition. Probably amorphization rate is reduced because impact energy in the ball mill is decreased in the presence of water. Presence of interlayer water affects on the behavior of saponite.

キーワード: 粘土鉱物, カオリナイト, セリサイト, サポナイト, 非晶質

Keywords: clay minerals, kaolinite, sericite, saponite, amorphous

地震発生帯の流体の化石としての流体包有物, その捕獲メカニズムと断層科学への
解釈
Fluid inclusion as fossil fluid in seismogenic zone, trap mechanism and interpretations for
fault science

坂口 有人^{1*}; 柳澤 和道²
SAKAGUCHI, Arito^{1*}; YANAGISAWA, Kazumichi²

¹ 山口大学大学院・理工学研究科/海洋研究開発機構, ² 高知大学・総合科学系
¹Yamaguchi Univ./JAMSTEC, ²Kochi Univ.

A fluid inclusion, fluid-fill capsule within rigid crystal, preserves density and chemical composition of fluid in deep crust. This records pressure, temperature and other information of the fluid when the fluid trapped. Pore fluid pressure drop due to rapid fluid ejection along the fault was discussed in Kodiak accretionary complex (Vrolijk et al., 1988). CH₄-H₂O fluid inclusions are reported at pseudotachylyte bearing Nobeoka Thrust, Shimanto accretionary complex (Kondo et al., 2005). Thermal stretching of fluid inclusions due to seismic frictional heating were found at seismogenic Mugi Melange, Shimanto accretionary complex (Ujiié et al., 2008). Though fluid inclusion tells us fluid condition in deep crust, trapping mechanism within crystal is still uncertain. The fluid inclusion is one of crystallographic defect, but general size from sub-micron meter to several mm is much greater than crystal lattice. A crystal tend to growth without large defect, and it seems irregular process to be formed a fluid inclusion. The trap mechanism is significant to interpret the fluid inclusion data.

We succeeded to make artificial fluid inclusion in calcite during hydrothermal experiment. A calcite crystals are nucleated and grown with temperature decrease in autoclave. Fluid inclusions were never formed in simple cooling procedure, but many large fluid inclusions were found at the overgrowth zone formed by re-heating process. Surface condition of artificial calcite of re-heating and overgrowth process were observed using SEM. Etched pattern covers the surface of re-heated calcite crystal. Some depressions are wide shallow and others are small deep. Many growth steps were found on surface of over-growth calcite. The calcite surface may have been advanced with lateral motion of growth steps. This growth step covers most of the etched depressions except small deep one. These small deep depressions are surrounded by new grown surface and became increasingly deep. Some depressions may make large pore within overgrowth zone in this process.

This observation shows that the fluid inclusion were made during overgrowth after surface etching, and this requires temporary solubility change in crystal growth process. The fluid inclusions may record pore-fluid condition after the event of pressure, temperature and/or chemical change in deep crust.

Keywords: Fluid inclusion, trap mechanism, artificial calcite

地震発生深度における新しい流体移動メカニズム New fluid flow mechanism at seismogenic depth in subduction zone

岳 孝太郎^{1*}
TAKE, Kotaro^{1*}

¹ 山口大学地球圏システム科学科
¹Dept. of Geosphere, Yamaguchi Univ.

Since pore fluid pressure may concern with seismogenesis, large amount of articles are published for fluid flow research, and -previous researches have been focused only crack flow in deep crust. In general, a pore between sedimentary grain decreases with depth, and fluid flows only within crack in deep crust. This study shows new fluid flow mechanism that doesn't depend on crack in the rocks. This produces new perspective of fluid flow of seismogenic depth in subduction zone.

The Shimanto accretionary complex at SW-Japan, formed at seismogenic depth suffers pressure solution deformation and generally includes brittle failure of web structure and crack-filled veins. The carbonate matrix is lacked in the sediments due to deposition below CCD.

Some sandstones in the late Cretaceous Nonokawa Formation, includes spotted carbonate deposit. This carbonate deposit occurs limited area less than several meters square within sandy layer without crack-filled vein. Microscopic observation shows following features as below.

The spotted carbonate minerals overprint with embayment structure in pressure-solution deformed sandy grains, and these are cut by web structure and crack-filled veins. The fluid may have dissolved the sandy grains, and carbonate minerals were deposited at latest stage of lithification process between pressure solution deformation and brittle failure. These occurrences suggest that fluid can flow with dissolution of rock-forming grains in rigid crust without crack.

キーワード: 流体移動, 付加体

Keywords: fluid flow, accretionary complex

化石巨大分岐断層における高温流体発生の痕跡とその空間的分布 Generation of high-temperature fluid and its spatial distribution in an ancient megasplay fault

増本 広和^{1*}; 廣野 哲朗¹; 石川 剛志²; 谷川 亘²; 向吉 秀樹³

MASUMOTO, Hirokazu^{1*}; HIRONO, Tetsuro¹; ISHIKAWA, Tsuyoshi²; TANIKAWA, Wataru²; MUKOYOSHI, Hideki³

¹ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, ² 海洋研究開発機構高知コア研究所, ³ 早稲田大学教育・総合科学学術院
¹Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, ²Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³Faculty of Education and Integrated Arts and Sciences, Waseda University

四万十付加体久礼地域には、かつて海底下 2.5 – 5.5 km で活動したとされる化石巨大分岐断層の露頭が存在し、先行研究によって、シュードタキライトの産出や 350 °C に達する高温流体の発生と摩擦熔融による不適合元素の濃集が報告されている。しかし、これらの結果は局所的な試料採取によるものであり、露頭全体のスケールにおいて、シュードタキライトや高温流体の痕跡がどのように分布しているのかは未だ明らかにされていない。また、現在のプレート境界断層および巨大分岐断層において、地震時に高温流体が一樣に発生し、thermal pressurization が大規模に起きうるかどうかを理解するためには、化石巨大分岐断層における高温流体発生の痕跡とその空間的分布の情報が極めて重要である。そこで、本研究では、露頭における変形構造解析、広範囲サンプリングによる試料採取(全 46 試料)、ベトリナイト反射率測定、粉末 X 線回折 - RockJock による鉱物組成定量分析、微量元素分析を実施した。その結果、スリップゾーンの黒色ガウジには高温流体の痕跡が再確認されたが、そこに近接する下盤の砂岩には石英の増加や希土類元素濃度の減少などが明らかになった。これらの変化は、スリップゾーンで発生した高温高圧の流体が、ある程度、周囲の母岩に浸透し、元素移動を生じさせたことを意味するかもしれない。

キーワード: 南海トラフ, 巨大分岐断層, 四万十付加体, 断層岩, 流体岩石相互作用, X 線回折

Keywords: Nankai trough, megasplay fault, Shimanto accretionary complex, fault rocks, fluid-rock interactions, X-ray diffraction

沈み込み帯化石分岐断層における multiple damage zone system について Multiple damage zone system of an exhumed subduction zone megasplay fault

浜橋 真理^{1*}; 川崎 令詞¹; 福地 里菜¹; 斎藤 実篤²; 橋本 善孝³; 濱田 洋平²; 北村 有迅⁴; 山口 飛鳥¹; 木村 学¹
HAMAHASHI, Mari^{1*}; KAWASAKI, Ryoji¹; FUKUCHI, Rina¹; SAITO, Saneatsu²; HASHIMOTO, Yoshitaka³; HAMADA,
Yohei²; KITAMURA, Yujin⁴; YAMAGUCHI, Asuka¹; KIMURA, Gaku¹

¹ 東京大学, ² 独立行政法人海洋研究開発機構, ³ 高知大学, ⁴ 鹿児島大学

¹The University of Tokyo, ²Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³Kochi University, ⁴Kagoshima University

More than 90% of the major earthquakes and tsunamis are known to occur at plate convergent margins, along plate boundary faults and megasplay faults. Investigating the mechanical properties and deformation patterns of these megathrusts are important to understand the generation of earthquakes and the dynamics on the subduction plate interface. Large displacement faults contribute to the reduction of steady-state strength at mid-crustal levels, and cause the frictional-viscous deformation at depth. As the candidate for such weak faults, foliated, phyllosilicate-rich fault rocks have been prevalently recognized in many tectonic settings. However, whether foliated fault rocks behave as weak structures in the longer terms and their roles in the strain localization and fault evolution, are poorly understood.

Exhumed fault zones are helpful to constrain fault strength and deformation process of foliated cataclasites formed at upper-midcrustal depths over geological time. One of the well-studied exhumed major fault zones in subduction settings is the Nobeoka Thrust, a fossilized megasplay fault in Kyushu Shimanto Belt, southwest Japan, which exposes foliated fault rocks that were formed under the temperature range of ~180-350 °C (Kondo et al., 2005). During the Nobeoka Thrust Drilling Project in 2011, core samples were retrieved containing both consolidated fault rocks and less consolidated, brecciated fault rocks, preserved from surface weathering and less likely to be drilling-induced. The core samples are expected to provide a different aspect on fault rock strength from previous geological studies on exposed, consolidated outcrops. In the current study, given the unique opportunity to determine the coexistence of cohesive and less cohesive fault rocks in a single fault system, we conduct macroscopic and microscopic structural observation and physical property measurements on the core samples, synthesizing with geophysical logs obtained from the drilling of the Nobeoka Thrust to characterize the damage zone architecture of the fault rocks formed in the frictional-viscous regime along the megasplay fault.

The hanging wall consists of the shale-dominant intervals of dense development of phyllitic cleavages, the sandstone-dominant intervals of disturbed foliations, and the damage zone above the fault core characterized by cataclastically broken phyllite with thick abundant sandstone blocks. The observed density of brittle fractures, breccias, and mineral veins is increased at the sandstone-dominant intervals and near the fault core, whereas brecciated and less brittle/ductile structures are abundant within the shale dominant intervals. The brittle deformation near the fault core may have caused the wearing away of the shale-rich zones by abrasion, and as a result, the sandstone-rich zones that have relatively larger strength, remained and deformed cataclastically near the fault core. On the other hand, the footwall in the drilled range consists of six sets of fracture zones, all of which include a "brecciated zone" intensively broken in the center, sandwiched by a "surrounding damage zone" with abundant cohesive faults, mineral veins, and sandstone blocks. The surrounding damage zone is characterized by the increase in fault and fractures with distance from the fault core, and interestingly associate with the increase in resistivity, P-wave velocity, and density and decrease in porosity. The deformation in the surrounding damage zone is inferred to occur in a strain-hardening manner, strengthening with distance from the fault core. Shear localization may initiate more easily in the sandstone-rich area later forming the surrounding damage zone, and eventually develop an intensively deformed fault core in the center. These insights would enable to reinterpret the deformation processes and weakening mechanisms that occur in foliated fault rocks along the megathrust in subduction zones.

キーワード: 沈み込み帯, 巨大分岐断層, 岩石物性, 断層帯, 構造観察, 変形破壊

Keywords: subduction zone, megasplay fault, physical property of rock, damage zone, structural observation, rock deformation

延宝五年十月九日(1677-XI-7)房総沖地震津波の被災範囲 Damaged coasts of the tsunami of the Enpo Boso-Oki Earthquake of November 7, 1677

矢沼 隆^{1*}; 都司 嘉宣²; 平畑 武則¹; 馬淵 幸雄³; 大家 隆行³; 岡田 清宏³; 今井 健太郎⁴; 岩渕 洋子⁵; 今村 文彦⁴
 YANUMA, Takashi^{1*}; TSUJI, Yoshinobu²; HIRAHATA, Takenori¹; MABUCHI, Yukio³; OOIE, Takayuki³; OKADA, Kiyohiro³; IMAI, Kentaro⁴; IWABUCHI, Yoko⁵; IMAMURA, Fumihiko⁴

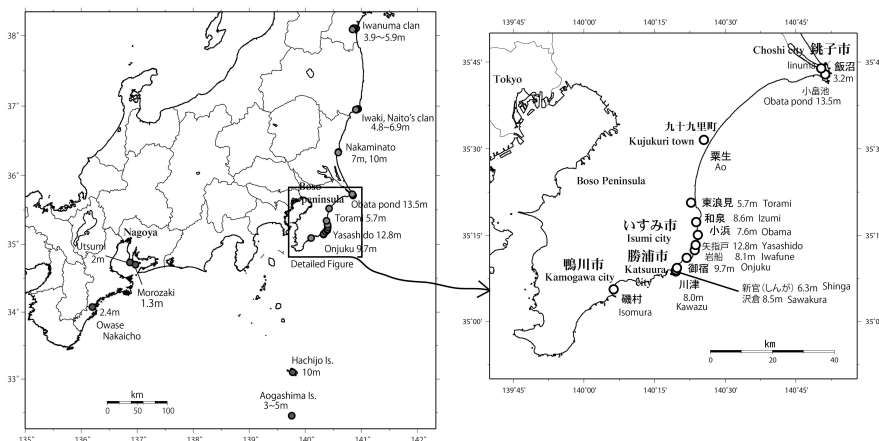
¹(株)パスコ, ²深田地質研究所, ³パシフィックコンサルタンツ(株), ⁴東北大学災害科学国際研究所, ⁵原子力安全基盤機構

¹Pasco., ²Fukada Geolog. Inst., ³Pacific Consultant, ⁴IRIDeS, Tohoku Univ., ⁵JNES

江戸時代前半の延宝五年十月九日(1677-XI-7)の夜五ツ時(20時頃)に房総沖海域に発生した地震は、揺れによる被害は起きていない。また有感地震の範囲は、房総半島と江戸に限られる。このように地震の揺れが小さかった割に津波被害が大きかった。この津波による最大被災地となったのは房総半島の勝浦・銚子間であった。江戸時代初期の幕府の根本史料の一つである『玉露叢』に房総半島の津波被害の詳細が記録されている。現在の勝浦市域にある川津村で倒家19軒、死者3人、沢倉村では倒家11軒、死者2人、新宮村では倒家17軒、死者2人の津波被害を生じた。流失家屋が総家屋数の10%かそれ以上生じた場合、その場所の地上冠水厚さは2.0mと推定されることから(羽鳥、1984、越村ら、2009など参照)、この3村での津波浸水高さはそれぞれ8.0m、8.5m、6.3mであった。御宿浦はこれら3村より被害が大きく、倒家30軒で63人もの死者を生じた(津波高9.7m)。現在はいすみ市に属する岩船も津波被害が大きく倒家40軒に対して死者57人を生じた(8.1m)。矢指戸(やさしど)は現在でも総戸数30戸ほどの小集落である。ここで、倒家25軒、溺死13人が記されている。ほぼ、集落全体の全戸消滅に近い(12.8m)。一宮町東浪見(とらみ)は、倒家50軒で97人もの死者を出した最大被災地の一つであるが、この現地文書には「潮は権現堂前まで」とあり、この地点の標高を測定して5.7mの浸水高を得た。銚子市の小島池には外洋から津波によって海水が浸入したとされる。外洋と池を隔てる峠部の標高から13.5mを得た。この津波の特徴は、被害が房総半島からみて遠方にまで及んでいることである。福島県いわき市で4.8~6.9m、宮城県岩沼でも3.9~5.9mの浸水高さがあった。八丈島では島の南西海岸の八戸(やと、現在の八重根港の集落)で居住地の被害を生じており、筆者の一人である今井の現地調査により約10mに達したと推定される。津波は西方にも遠く伊勢湾の知多半島にまで及んでいる。すなわち南知多町内海では『柳營日記』に「内海浦にて漁船廿四、五艘破船つかまつり」と記され、ここで2m程度の水位上昇があったと推定される。さらに知多半島先端の師崎(もろざき)でも、「九日夜尾州知多郡師崎浦江高潮十四五度差引有之」と記され、この「高潮」を天文潮位の満潮の潮位と理解して1.3m(TP)の津波であったと判断される。津波は紀伊半島の尾鷲に及んでいる(『見聞闕疑集』)。この文から尾鷲は居住地に浸水したと判断され、津波浸水標高は2mとする。本研究は、(独)原子力安全基盤機構からの委託業務「平成25年度津波痕跡データベースの高度化—確率論的津波ハザード評価に係る痕跡記録の調査および波源モデルのデータベース化」(代表:東北大学 今村文彦)の成果の一部として行われたものである。

キーワード: 歴史地震, 歴史津波, 房総沖地震, 首都圏, 伊勢湾, 紀伊半島

Keywords: historical earthquake, historical tsunami, the 1677 Boso-Oki earthquake, metropolotan area, Ise bay, Kii peninsula



1703年元禄地震に伴う地盤変動：東京湾沿岸域の隆起・沈降 Crustal movement associated with the 1703 Genroku earthquake

中西 一郎^{1*}
NAKANISHI, Ichiro^{1*}

¹ 京都大学 理学部 地球物理学教室
¹Dept. Geophysics Kyoto University

元禄地震(元禄16年11月23日;1703年12月31日)による東京湾沿岸での地盤変動を推定することを目的として、当時開発された新田及び塩田に関する史料の調査を行った。神奈川県、千葉県については関連史料を得ることができたが、東京都については発見していない。

神奈川県に関しては、東京湾入口から東京湾西岸に開発された4新田又は塩田史料が得られた。史料の概要を南から北に向けて、以下に示す。

- 内川新田(1660年完成)(横須賀市)。元禄地震から9年後に書かれた。
「乍恐以返答書申上候事」(正徳二年六月)(1712年)(横須賀市蔵)の記述を示す。
(前略)然所拾ヶ年以前未ノ年大地震より以来右之場所干かたニ罷成候(後略)。
この地域(浦賀水道西岸)が隆起したことを示している。
- 泥亀新田(1668年完成)(横浜市)。元禄地震の1年後に書かれた。
「可納申御年貢割付」(宝永元年十月)(1704年)(神奈川県立金沢文庫蔵・永島家文書)の記述を示す。
(前略)去未地震潮入取米なし(後略)。
この後に書かれた史料によると、この状態は長期間続いた。
- 吉田新田(1667年完成)(横浜市)。元禄地震から8年後に書かれた。
「乍恐書付を以御訴訟申上候」(宝永七年二月)(1710年)(吉田家文書)の記述を示す。
(前略)八年以前未之年地震津浪二吉田新田潮留堤震崩
(中略)地震以来亡所同前二罷成り候間(後略)
- 大師河原新田・塩田(1695年完成)(川崎市)。地震後50年経って書かれた。
「一札之事」(宝暦四年二月)(1754年)(川崎市立中原図書館蔵・池上家文書)の記述を示す。
(前略)先年地震変地仕御運上御免之場所二御座候所(後略)。

千葉県に関しては、東京湾最奥に位置する行徳塩田に関する史料を示す。中世から続く歴史のある塩田であり、江戸幕府に引き継がれた。

- 行徳塩田(? ~1624年)(市川市)。
書かれた年月は不詳である。記載中の年号に寛延三年があり、元禄地震後約50年後に書かれたものと推定される。
「行徳領塩浜由来書」(国文学研究資料館蔵)の記述を示す。
(前略)元禄十六年未年十一月廿三日夜大地震平岡三郎右衛門様御支配之節二而
地形ゆり下ヶ塩浜海面塩除堤保チ不申荒浜致出来候(後略)。
地面が下がり、塩浜が海になったと書かれている。

東京都、特に江東区には、元禄地震前に多くの新田が開発されたが、地震に関連する史料はまだ見つからない。また行徳塩田以東の新田・塩田についても調査を続けて行く必要がある。

キーワード: 元禄地震, 東京湾, 地盤変動
Keywords: 1703 Genroku earthquake, Tokyo Bay, crustal movement

宝永地震の津波の再現—東日本大震災を参考に広い海底面隆起域が時間的に変動した場合 A Reproduction of 1707 Hiei Tsunami with long rupture duration, referring to 2011 East Japan Pacific Ocean Earthquake

松浦 律子^{1*}; 安重 晃²; 庄司 正弘²
MATSU'URA, Ritsuko S.^{1*}; ANJU, Akira²; SHOJI, Masahiro²

¹ (公財) 地震予知総合研究振興会地震調査研究センター, ² (株) 構造計画研究所
¹ADEP, ERC, ²Kozo Keikaku Engineering Inc.

1. 宝永地震について

1707年宝永地震は、伊豆半島以西の太平洋岸で広域に津波被害を与えた江戸時代で最大の地震であった。これまで宝永地震には、安政東海地震と安政南海地震とで破壊した領域が、非常に短時間の間に引き続いて発生したという説 [e.g. 宇佐美 (2003)] や、安政の二地震の領域が一度に破壊した、謂わば“アスペリティ連動地震”という説 [e.g. Ishibashi (2004)] があったが、安政の二地震から類推できる地震という扱いを受けてきたようである。最近詳細な史料の検討によって明らかになった震度と地殻変動、津波到達時間とからは、宝永地震がその震源域の東端と西端とでは安政の二地震とは重ならず、従来言われてきたような駿河湾内や足摺岬の下は震源域に含まれず、江戸時代の“西日本太平洋沖地震”とも言うべき、別格の超巨大地震であったことが判ってきた [e.g. 松浦 (2012)]。

一方、津波波高から宝永地震を検討すると、相田 (1981) は足摺沖に他より二倍のすべり量を設定し、Furumura et al. (2011) は日向灘まで震源域を拡大して、西日本各地の高い津波を説明するのに苦労している。宝永地震の津波を再現できる波源を追求する際に重要なのは「震源域の設定範囲」や、「すべり量」では無さそうである。これまでの M8 クラス以下の地震の解析と同様に、半無限弾性体中の矩形断層による地表面の地殻変動の理論計算プログラム [e.g. Sato and Matsu'ura (1973)] を用いて、瞬時に波源全域の海底が永久変位の値に変形して津波が発生する、という前提で計算する従来手法を、M9 に近い超巨大地震に適用するために生じる「手法の限界」が影響しているのではないだろうか。矩形の逆断層による理論地殻変動は、震源域の縁が特異点となるので、M9 地震では震源域の端が陸に近くなって計算手法由来のモデル化誤差が当然大きくなる。海溝近くの浅い部分も震源域になれば、弾性定数が大きく異なる深部と物性を変えずに地殻変動を計算することによる「設定モデルの乖離」も加わる。

2. 用いた方法

そこで、我々はまず断層面でのすべりから海底変形を出すことを棚上げして、宝永地震の津波を説明可能な海底の時間変化する変動量分布の例を求めることにした。そのために、宝永地震と同じように広範囲に大津波をもたらした東日本大震災の場合で、手法の妥当性を吟味した。参考として、Saito et al. (2011) が求めた東日本大震災の海底面変動量を、最終変動値として、既知の震源から破壊が伝播し、GPS 観測で捉えられた 20 秒の変動停滞の後に、再び破壊が広がるモデルを計算した。「地震発生の物理」を考慮して、変動は破壊フロントが到達した時点から、変形域の縁に破壊が到達するまで、全ての点が動き続ける設定とした。このような計算によっても、大きい隆起域と岩手沖に角のように飛び出た部分に隆起をおけば、GPS プイなど沿岸から離れた津波観測波形を再現できることが確認できた。

3. 宝永地震の津波計算結果

そこで、松浦ら (2011) の宝永地震の震源域モデルの範囲を隆起域として、同様に破壊に要する時間を考慮した津波計算を行った。計算には、現在の海底地形から、例えば大阪付近の計算には、関西空港や天保山のような明らかに宝永以降の埋め立て地や、大和川が運んだ堺沖の堆積物の埋積部分等を取り除く、など当時の地形に近づける工夫をした。破壊開始点を、銭洲近くと、熊野灘付近とに変えてみたが、津波の傾向に大きい変化は見られず、歴史地震の津波高という、大まかなデータから破壊開始点を特定することは、少なくとも宝永地震に関しては無理なようである。今回のような概略モデルによっても、十分大阪市中の堀川への浸水や、大分県間越への浸水などが再現できた。巨大津波をシミュレーションする際には、現在津波計算に標準で利用されている 40 年も前の「半無限弾性体中の矩形断層による地殻変動の理論式」ではなく、現在手軽に高機能な計算機が使える状況を活かした方式に、そろそろ切り替えるべきではないだろうか。

キーワード: 1707 年宝永地震, 2011 年東北太平洋沖地震, 矩形断層モデル, 超巨大地震の津波計算, 歴史地震

Keywords: Hiei Earthquake in 1707, East Japan Pacific Ocean Earthquake in 2011, rectangular source fault model, huge tsunami, historical earthquakes