

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340125

研究課題名(和文)沈み込みプレート境界における有効摩擦係数の地震サイクルに伴う時空間変化

研究課題名(英文)Time-spacio change in effective friction coefficient with seismic cycle in subduction zones

研究代表者

橋本 善孝 (Hashimoto, Yoshitaka)

高知大学・自然科学系・准教授

研究者番号：40346698

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は沈み込みプレート境界における応力および有効摩擦係数の地震サイクルに伴う変化を時空間的に明らかにすることである。陸上付加体を対象に古応力の推定、弾性波速度物性の測定、流体包有物による温度圧力の推定を行った。

その結果、地震時の水平圧縮応力方向と調和的な古応力のみならず、同方向に水平伸張応力場も普遍的に見られた。有効摩擦係数が低く後者は高い。また流体圧では前者が高く後者が低い。この変化は地震時の応力降下に伴う主応力のスイッチに起因すると解釈される。境界断層における弾性物性差や、流体包有物による温度圧力は、流体圧が高いことを示しており、古応力における地震時(前)の結果と調和的である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to examine a time-spacio change in paleo-stress and effective friction coefficient with seismic cycle. We conducted paleo-stress estimation, elastic wave velocity measurements and estimation of fluid temperature and pressure.

In the results, we obtained the horizontal compressional principal stress in the direction of plate convergence as expected. And the horizontal extensional principal stress was also detected generally. Effective friction coefficient is larger in former and smaller in latter, which corresponds larger fluid pressure in former than that in latter. The changes in paleo-stress and others can be explained by the stress switch associated with stress drop at the time of seismogenesis. Elastic properties at boundary faults and temperature and pressure of fluid indicate the high fluid pressure along the fault, which is coincident with the state before or at the time of seismogenesis.

研究分野：地質学

キーワード：沈み込みプレート境界地震 付加体 古応力 有効摩擦係数

1. 研究開始当初の背景

陸上付加体を対象にした付加作用に関する研究は構造地質学的手法を中心に沈み込みプレート境界における変形イベントの変遷を明らかにしてきた。これらの変形構造の中には液化化やシュードタキライトといった地震性弱体化プロセスの物質証拠が確認されており、過去の地震断層と認定できる。一方、現世の海洋底に発達する付加体の、海底斜面傾斜角の変化や反射断面による内部構造の解析から海洋付加体の領域区分がなされ、海側低角付加体をアウターウェッジ、ほぼ水平な陸側前弧海盆をインナーウェッジ、そして両者の間をやや高角につなぐ遷移帯の3つに分類された (Kimura et al., 2007)。遷移帯はちょうど地震発生フロントに位置しており、また現世のアウトオブシークエンスラストが表層に発達する領域でもある (Park et al., 2002)。Wang and Hu (2006)はこの海底斜面の角度の変化が付加体内部の破壊面角、プレート境界上面の摩擦係数、および両者にかかる流体圧のパラメータから決定され、海底斜面の角度が領域ごとに違うのはそれぞれの領域でこれらのパラメータが異なるためであるとした。さらにこれらのパラメータが地震サイクルに伴って変化するモデルを提案した。この海洋付加体から提案されたモデルを検証するには現状では陸上付加体を対象とするほかない。

天然の岩石から物理量を得る研究が飛躍的に進んでいる。小断層解析による応力方位および応力比の検討もなされてきている (Hashimoto et al., 2010)。これに付随して Angelier et al. (1989) の手法から小断層解析による有効摩擦係数の推定もなされつつある (Eida et al., 2012)。さらに弾性波速度測定と地震波反射面における反射係数との比較から断層面上および付加体内部の流体圧の推定もなされつつある (Tsuji et al., 2011)。これらを用いることによって dynamic critical taper model に関わるパラメータを陸上の付加体から推定し、その時空間的な変化を議論することが可能になりつつある。

2. 研究の目的

本研究の目的は沈み込みプレート境界における有効摩擦係数の地震サイクルに伴う変化を時空間的に明らかにすることである。空間的には非地震領域と言われる浅部から地震発生帯中部程度を対象とし、浅部のアウターウェッジ、中部の遷移帯、深部のインナーウェッジの3つの領域に分類する。その上で、それぞれの領域につい

て地震サイクルに伴う有効摩擦係数の時間変化を検討する。これまでの研究で沈み込みプレート境界に沿った上記の領域区分に対応した変形構造が地質学的に明らかにされており、その中から地震を伴う変形イベントを分離することに成功している。

3. 研究の方法

本研究の手法は3つに分けられる。(1) 小断層逆解法による古応力と有効摩擦係数の推定、(2) 断層境界における弾性波物性の測定、(3) 流体包有物マイクロサーモメトリによる流体温度圧力の測定、である。これらの手法を陸上付加体を対象に行う。対象地域は房総半島四万十帯、四国四万十帯および台湾中軸部付加体である。これらの地域では先行研究から沈み込みプレート境界における変形領域・変形ステージが詳細に区分されている。すべての変形領域・変形構造を含む地域はなく、同じ変形区分を異なる地域で相補的に検討し、地域特性をできるだけ排除する。また地震に伴うものとそうでないものとを区分し、地震サイクルに伴う変化も検討する。以上を総合し、地震サイクルに伴う沈み込みプレート境界の有効摩擦係数の時空間変化を明らかにする。

4. 研究成果

房総半島四万十帯において小断層解析を行い、応力場、応力比、有効摩擦係数および流体圧の推定を行った。房総半島四万十帯は浅部付加体であり、断層群の位置づけがはっきりしている。広域的な剪断帯では、応力比が高く、有効摩擦係数が低く、流体圧の高い結果が得られ、局所的な断層群では逆の結果が得られた。これらは地震サイクルに伴う変化を見ていると考えられ、付加体浅部においても地震性のすべりを起こしたことを示唆している。房総半島四万十帯の弾性波速度解析用サンプルを採取し弾性波速度測定を行った。

四国白亜系四万十帯メランジュ相を対象に、やはり小断層データを取得し、応力逆解法を行った。四国白亜系四万十帯は房総半島に比べてやや深部に位置しており、通常地震発生帯浅部の状態を示していることが期待できる。房総半島と同様に地震性の断層では応力比が小さく、有効摩擦係数が高く、流体圧が低い一方、非地震性の断層ではその逆の結果が得られ、やはり地震サイクルに伴う応力および断層強度の変化が見られた。さらに流体包有物マイクロサーモメトリから流体圧・流体温度を推定したところ、およそ150MPa、200°C前後の条件であったことが明らかとなった。

台湾中軸部において、チェルンブー断層の表層露頭を対象に小断層データを取得し、応力逆解法を行った。この結果を精査したところ最大圧縮方向が北西南東方向の低角軸生圧縮場と高角軸生伸張場を得た(図1)。これまで地震性の応力を示すのみと考えていたが、この応力状態の違いは東北地方太平洋沖巨大地震で見られた、地震前後の応力変化、すなわち水平圧縮場から垂直圧縮場への変化と対比できる可能性がある。

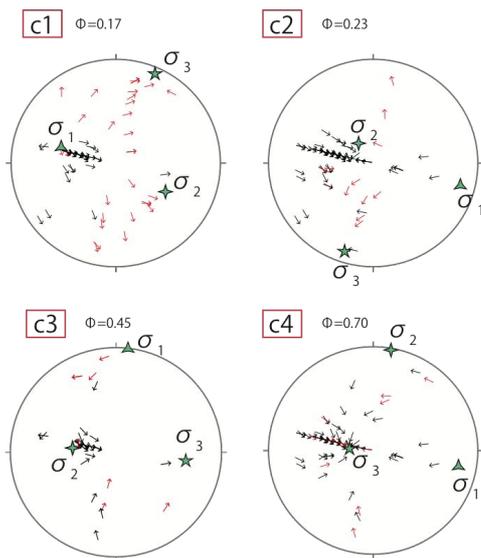


図1：台湾チェルンブー断層近傍の小断層群から得られた古応力場。c1, c3は東北東方向に低角な最小および中間主応力が、c2, c4では同方向に最大主応力が見られ、主応力の交換が起こっている。

沖縄県四万十帯嘉陽層において小断層解析から古応力の推定を行った。沖縄県四万十帯嘉陽層は、過去の研究から引きはがし付加体と考えられており、沈み込み帯浅部の変形を記録していることが期待されている。本結果からもやはり、水平圧縮場と垂直圧縮場の両方の結果が得られた。このことは、付加体浅部においても、東北で見られたような応力変化があったことを示唆しており、巨大地震に伴う応力降下の影響であることが予想される。

四国白亜系四万十帯横浪メランジュ北縁断層(五色ノ浜断層)において、上盤下盤の弾性波速度を測定した。上盤は砂岩主体の整然相であり、下盤が泥岩主体の横浪メランジュである。この境界における弾性物性の差を検討した。その結果、上盤が下盤に対して弾性物性が大きい傾向が得られた。これは、五色ノ浜断層が反射法断面のデコルマで見られるような負の極性を持つ反射面として捉えられることを示している。Amplitude variation of offset (AVO) 解析によって反射断面から得られる反射係数と対比したところ、現在の南海トラフ

を説明できるような物性差ではなかった。より深部の結果を見ていることを示唆している。

四国白亜系四万十帯横浪メランジュ北縁境界断層における物性差の検討からは、より深部の地震発生帯内部における物性境界の結果を見ている。この物性差は予想に反して上盤と下盤での差がそれほど小さく、現在得られている深度での反射法断面データと対比できるものではなかった。沈み込み帯における物性変化の岩相依存性をより詳細に検討する必要があることを示している。砂岩と泥岩といった岩相の依存性すら、これまで物理観測では検討されていないことから、天然で見られる物性境界の岩相依存性を取り入れることで、より現実的な解釈とメカニズムの理解が可能になることが期待できる。台湾チェルンブー断層コア試料の応力変化が地震サイクルに伴う変化であると解釈する主著論文を投稿した。

沖縄県四万十帯嘉陽層において昨年度行った小断層解析から古応力の推定により得られた水平圧縮場と水平伸張場の露頭での産状を観察したところ、これまでよく知られていた巨大な逆断層褶曲帯とともに、リストリックな正断層系列の存在を発見した。流体包有物による温度圧力解析により逆断層と正断層の両者が同じような温度圧力条件下で形成されており、沈み込み帯深部で共存していたことを示している。

四国白亜系四万十帯横浪メランジュ北縁断層(五色ノ浜断層)において、古応力解析による有効摩擦係数の変化が地震サイクルに伴う水平圧縮場から水平伸張場への変化に対応すると解釈する主著論文が国際雑誌Tectonicsに掲載された。また、メランジュ形成から小断層形成に至る変形機構の変化を流体包有物の温度圧力条件とともに議論し、浅部塑性—脆性遷移帯の地質学的な産状に対応するとする主著論文が国際雑誌に掲載された。さらに小断層解析によって推定された有効摩擦係数と流体包有物の温度圧力条件の両者から小断層の流体圧比を定量的に推定した主著論文を国際雑誌に投稿した(査読中)。

<引用文献>

- Angelier, J., 1989. Journal of Structural Geology 11, 37-50.
 Eida, M., Hashimoto, Y., 2012. AGU Fall Meeting Abstracts, p. 2609.
 Kimura, G., Kitamura, Y., Hashimoto, Y., Yamaguchi, A., Shibata, T., Ujiie, K., Okamoto, S., 2007. Earth and Planetary Science Letters 255, 471-484.
 Park, J.O., 2002. Science 297, 1157-1160.
 Tsuji, T., Dvorkin, J., Mavko, G., Nakata, N., Matsuoka, T., Nakanishi, A., Kodaira, S., Nishizawa, O., 2011.

Geophysics 76, WA71-WA82.

Wang, K., Hu, Y., 2006. *Journal of Geophysical Research* 111, B06410.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 35 件 すべて査読あり)

Yoshitaka Hashimoto and Natsuko Yamano, Geological evidence for shallow ductile-brittle transition zone along subduction interfaces: Example from the Shimanto Belt, SW Japan, *Earth, Planets and Space*, 2014, **66**:141, doi:10.1186/s40623-014-0141-7.

Yoshitaka Hashimoto, Mio Eida, and Yodai Ueda, Changes in paleostress state along a subduction zone preserved in an on-land accretionary complex, the Yokonami Mélange, in the Cretaceous Shimanto Belt, Kochi, southwest Japan, *Tectonics*, 2014, **33**, doi:10.1002/2013TC003487.

Gaku Kimura, Yoshitaka Hashimoto, Yujin Kitamura, Asuka Yamaguchi, and Hiroaki Koge, Middle Miocene swift migration of the TTT triple junction and rapid crustal growth in southwest Japan: A review, *Tectonics*, 2014, **V. 33**, **7**, DOI: 10.1002/2014TC003531.

Ujiie, K., and G. Kimura, Earthquake faulting in subduction zones: insights from fault rocks in accretionary prisms, *Progress in Earth and Planetary Science* **1**, 1-30, doi:10.1186/2197-4284-1-7, 2014.

Yamamoto, Y., 2014. Dewatering structure and soft-sediment deformation controlled by slope instability: examples from the late Miocene to Pliocene Miura–Boso accretionary prism and trench-slope basin, central Japan. *Marine Geology*, **356**, 65-70, doi: 10.1016/j.margeo.2014.05.016.

Gadanne, L., Raimbourg, H., Champallier, R., and Yamamoto, Y., 2014. Mechanical properties and processes of deformation in shallow sedimentary rocks from subduction zones: An experimental study. *Geochemistry Geophysics Geosystems* **12**/2014; DOI: 10.1002/2014GC005580

Hashimoto, Y., Doi, N., and Tsuji, T., Difference in elastic properties at seismogenic fault along a subduction interface: Application to estimation of effective pressure and fluid pressure ratio, *Tectonophysics*, 2013, **600**, 134-141, doi:10.1016/j.tecto.2013.03.016.

Ujiie, K., H. Tanaka, T. Saito, A. Tsutsumi,

J. J. Mori, J. Kameda, E. E. Brodsky, F. M. Chester, N. Eguchi, S. Toczko, and Expedition 343 and 343T Scientists, 2013, Low coseismic shear stress on the Tohoku-Oki megathrust determined from laboratory experiments, *Science*, **342**, 1211-1214, DOI:10.1126/science.1243485, 2013

Chester, F. M., C. Rowe, K. Ujiie, J. Kirkpatrick, C. Regalla, F. Remitti, J. C. Moore, V. Toy, M. Wolfson-Schwehr, S. Bose, J. Kameda, J. J. Mori, E. E. Brodsky, N. Eguchi, S. Toczko, and Expedition 343 and 343T Scientists, 2013, Structure and composition of the plate-boundary slip zone for the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, **342**, 1208-1211, DOI:10.1126/science.1243719, 2013

Tao Y., T. Mishima, K. Ujiie, F. M. Chester, J. J. Mori, N. Eguchi, S. Toczko and Expedition 343 Scientists, 2013, Strain decoupling across the decollement in the region of large slip during the 2011 Tohoku-Oki earthquake from anisotropy of magnetic susceptibility, *Earth and Planetary Science Letters*, **381**, 31-38.

Vannucchi, P., P. B. Sak, J. P. Morgan, K. Ohkushi, K. Ujiie, and the IODP Expedition 334 Shipboard Scientists, 2013, Rapid pulses of uplift, subsidence, and subduction erosion offshore Central America: Implications for building the rock record of convergent margins, *Geology*, **41**, 995-998, DOI: 10.1130/G34355.1, 2013

Yamamoto, Y., Lin, W., Oda, H., Byrne, T., Yamamoto, Y., 2013, Stress states at the subduction input site, Nankai Subduction Zone, using anelastic strain recovery (ASR) data in the basement basalt and overlying sediments. *Tectonophysics*, **600**, 91-98, DOI: 10.1016/j.tecto.2013.01.028.

Hashimoto, Y., Eida, M., Kirikawa, T., Iida, R., Takagi, M., Furuya, N., Nikaizo, A., Kikuchi, T. and Yoshimitsu, T., A large amount of fluid migration around shallow seismogenic depth preserved in tectonic melange, the Cretaceous Shimanto Belt, Kochi, Southwest Japan, *Island arc*, 2012, 53-56.

Yamamoto, Y., Tonogai, K., and Anma, R., 2012. Fabric-based criteria to distinguish tectonic from sedimentary mélanges in the Shimanto accretionary complex, Yakushima Island, SW Japan. *Tectonophysics*, **568-569**, 65-73, doi:10.1016/j.tecto.2011.10.018.

Yamamoto, Y., Chiyonobu, S., Kurihara, T., Yamaguchi, A., Hina, S., Hamahashi, M., Raimbourg, H., Augier, R., and Gadanne, L., 2012. Unconformity between a Late Miocene–Pliocene accretionary

prism (Nishizaki Formation) and Pliocene trench-slope sediments (Kagamigaura Formation), central Japan. *Island Arc*, **21**, 231-234.

[学会発表] (計 48 件)

Yoshitaka HASHIMOTO, Kota TOBE, En-Chao YEH, Semi-quantitative Stress State Before and After Earthquake in Chelung-pu Fault, Taiwan, Asia Oceania Geoscience Society Meeting, Sapporo, July 29, 2014.

Yoshitaka Hashimoto, Geological signature of slow slip in on-land accretionary complex using vitrinite reflectance, Workshop on Slow Earthquakes, Kyoto, September 9, 2014.

Ujiie, K., H. Tanaka, T. Saito, A. Tsutsumi, J. J. Mori, and J. Kameda, Very low coseismic fault strength determined from high-velocity friction experiments on the Japan Trench plate-boundary material, Asia Oceania Geoscience Society Meeting, Royton Sapporo Hotel, July 31, 2014, Invited talk.

Ujiie, K., K. Noguchi, T. Saito, and A. Tsutsumi, Possible coseismic laminar and non-laminar flow along subduction megathrusts, AGU Fall Meeting, Moscone Convention Center, (San Francisco, USA), December 18, 2014.

Yamamoto, Y., Chiyonobu, S., Hamada, Y., Saito, S. Structural characteristics of young and non-metamorphosed onland accretionary wedge in the Miura and Boso peninsulas, central Japan, Asia Oceania Geoscience Society Meeting, Sapporo, July 29, 2014.

Yamamoto, Y., Lin, W., Usui, Y., Zhao, X., Saito, S., Malinverno, A., Vannucchi, P., Expeditions 334 and 344 Scientists. Time and spatial variation of stress states in Costa Rica Subduction margin: IODP Expeditions 334 and 344, Costa Rica Seismogenesis Project (CRISP). Asia Oceania Geoscience Society Meeting, Sapporo, July 29, 2014.

Yamamoto, Y., Lin, W., Yamamoto, Y., Kevin Brown, Ana Crespo-Blanc, Otsubo, M., Sone, H., Henry, P., and Expeditions 348 Scientists. AGU Fall meeting, Moscone Convention Center, (San Francisco, USA), December 17, 2014.

Yoshitaka Hashimoto, Mio Eida, Shear Veins Under High Pore Pressure Condition Along Subduction Interface: Yokonami Mélange, Cretaceous Shimanto Belt, Shikoku, Southwest Japan, AGU Fall meeting, Moscone Convention Center, (San Francisco,

USA), December 10, 2013.

Kohtaro Ujiie, Laboratory experiments on the Japan Trench plate-boundary thrust material reveal very low co-seismic shear strength, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ (千葉県), May 21, 2013.

Kohtaro Ujiie, The huge shallow slip during the 2011 Tohoku-Oki earthquake as a result of very low coseismic shear strength of the Japan Trench decollement material, American Geophysical Union Fall Meeting, Moscone Convention Center, (San Francisco, USA), December 10, 2013.

Yamamoto, Y., Kurimoto, Y., Sakaguchi, H., Nishiura, T., Saeda, Y., Ho, C., Ujiie, K., Experimental study on the formation mechanism, IODP Exp. 333 Post-cruise meeting, SEOLANE (Barcelonnette, France), June 22, 2013.

Yamamoto, Y., and Kawakami, S., Along-strike migration of intermittent submarine slope failures at subduction margins: geological evidence from the Chikura Group, central Japan, 6th International Symposium on Submarine Mass Movements and Their Consequences. Kiel, Kiel University (Kiel, Germany), September 24, 2013.

Yoshitaka Hashimoto, Noriaki Doi and Takeshi Tsuji, Differences in Vp and Vs at a seismogenic subduction interface: application to fluid pressure estimation by AVO analysis, KANAME international conference, Kochi city, かるぼーと, February 29, 2012

Yoshitaka HASHIMOTO, Shun SAKAMOTO, Change in Physical Properties of Sediments in Seismogenic Depth Along Subduction Zone: the Cretaceous Shimanto Belt, Asia Oceania Geoscience Society Meeting, Resorts World Convention Center, Singapore, August 13, 2012.

Ujiie, K., T. Nakakoji, and A. Tsutsumi, Experimental and microstructural constraints on thermal pressurization and fluidization in fault gouge, Asia Oceania Geoscience Society Meeting, Resorts World Convention Center, Singapore, August 16, 2012.

Ujiie, K., K. Noguchi, T. Saito, A. Tsutsumi, T. Kuwatani, F. M. Chester, and O. Fabbri, Seismic slip propagation to shallow subduction thrust: Insights from the dark gouge and high-velocity frictional properties of the décollement zone in the Nankai subduction zone, AGU Fall Meeting, Moscone Convention Center, San Francisco, December 4, 2012.

Yamamoto, Y., Lin, W., Usui, Y., Kanamatsu,

T., Saito, S., Zhao, X., Hashimoto, Y., Stipp, M., Ujiie K., Vannucchi, P., Expedition 334 Scientists, Spatial and time variations in stress state in the Costa Rica subduction margin, IODP Expedition 334. International Geological Congress, Brisbane, Australia, August 5, 2012.

Yamamoto, Y., Stipp, M., Tsutsumi A., Huftile, G., Ujiie K., Vannucchi, P., CRISP1 summary presentations 1: Structural Geology. IODP Exp. 334 post-cruise meeting, San Jose, Costa Rica, March 11, 2013.

Yamamoto, Y., Lin, W., Usui, Y., Zhao, X., Saito, S., Ujiie K., Vannucchi, P., Time and spatial variation of stress state in the Costa Rica subduction margin: Exp. 334 and Exp. 344 preliminary results. IODP Exp. 334 post-cruise meeting, San Jose, Costa Rica, March 11, 2013.

〔図書〕(計 1件)

日本地質学会構造地質部会(橋本善孝、氏家恒太郎、山本由弦)(分担執筆)
日本の地質構造100選, 2012. 朝倉書店,
171pp.

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

橋本善孝 (HASHIMOTO, Yoshitaka)
高知大学・自然科学系・准教授
研究者番号: 40346698

(2)研究分担者

氏家恒太郎 (UJIIE, Kohtaro)
筑波大学・生命環境科学研究科(系)・准教授
研究者番号: 40359188

山本由弦 (YAMAMOTO, Yuzuru)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス領域・研究員
研究者番号: 10435753

(3)連携研究者

なし