

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21107005

研究課題名(和文) 巨大地震断層の物質科学的研究によるすべりメカニズムの解明

研究課題名(英文) Materials and slip processes of seismogenic faults

研究代表者

木村 学(Kimura, Gaku)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80153188

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 128,100,000円、(間接経費) 38,430,000円

研究成果の概要(和文)：海溝型巨大地震・津波を発生させる沈み込み帯プレート境界断層の分析を南海トラフ、日本海溝において実施した。また、地震発生域の断層については、陸上に露出する過去のプレート境界岩の構造組織、鉱物、化学分析を実施した。その結果、断層を構成する構造組織、鉱物化学組成は多様ではあり、その多様性に依存して地震・津波発生性のプレート境界断層であるかどうかが決まる可能性が大きい事が明らかとなった。またプレート境界に存在する水は断層のすべりメカニズムを決めていることも分析の結果明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：We conducted the detailed analysis of the plate boundary faults in the Nankai Trough and the Japan Trench, where are located at the subduction zone producing devastating earthquakes and tsunamis. We moreover investigated structural, mineralogical, and chemical aspects of fault rocks, which were once deeply situated in the subduction zone but exhumed later on land. As the result, the aspects of fault rocks are quite variable and controlling factors for the seismicity and tsunami-genesis are considered to be dependent upon the variability. Addition to the variability, it is clarified that existence of fluid in the plate boundary fault zone is quite important to determine the slip mechanisms of the plate boundary.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学、地質学

キーワード：固体地球物理学 地震 大深度地下 地球変動予測 地質学 南海トラフ 付加体 断層

1. 研究開始当初の背景

これまで地震発生、その原因となる断層の破壊・すべり伝搬の物理過程を解明するという目的で本格的に行われた断層の掘削による研究は、日本の野島断層(1995南部兵庫県地震)、米国のサンアンドレアス断層(1906 サンフランシスコ地震)、台湾の車籠埔断層(1999集集地震)がある。しかし、巨大地震を引き起こし、津波とともに大規模な自然災害を起こすポテンシャルを持つ、海溝型地震断層において断層を掘削し、その物質科学的研究を行うのは、本研究が日本ではもちろんのこと世界においても初めてである。

陸上ではあるが地震発生の場合が海溝と類似する台湾の車籠埔断層の掘削は2001年から実施され、津波発生型を伴う断層のすべりメカニズムの解明に本チーム分担者は大きく貢献した。また、かつて海溝下数km深度の地震発生帯に位置していたが、地質学的長時間の間に隆起し地表に露出するに至った化石プレート境界断層の研究も、本チーム分担者が世界をリードしている。

2008年に実施された南海トラフ分岐断層浅部および海溝近傍のプレート境界断層からは、浅部ではあるが良質の断層物質の回収に成功している。これらの、これまでの研究の結果、断層運動に伴う破壊と岩石・水の反応プロセスが明らかとなりつつある。

2. 研究の目的

掘削によって得られる断層試料の変形組織解析・鉱物学的、化学的分析を通して、すべりに伴う諸反応を明らかにし、地震性、津波発生性、非地震性すべりについて、滑りのメカニズムと破壊伝搬過程、エネルギー散逸過程を解明することを目的とする。

また、掘削による断層試料の分析に加えて、断層の上盤と下盤を構成する岩石の変形機構-岩石・流体相互作用を明らかにし、ひずみエネルギー蓄積・開放の物質科学的過程について解明することを目的とする。

3. 研究の方法

本計画研究では、掘削によって得られる断層の組織構造解析、熱履歴分析、組成分析(鉱物、主要元素、微量元素、同位体)、磁気特性分析を実施する。それらの分析を、超低周波地震・微動が観測されている浅い部分から地震性すべりが起こると見なされている深い断層に対して、系統的に実施する。

4. 研究成果

本計画研究の断層メカニズムの理解を大きく前進させた主要な研究成果は3つである。

南海トラフ海溝近傍のプレート境界断層、分岐断層浅部の掘削によって世界初のすべりの断層面を含む断層試料が回収された。それらの被熱履歴分析、鉱物学的分析、および水理学的分析の結果、津波を発生させる程度の高速滑りが起こったと推定する

事ができた。この結果は南海トラフでの予想最大マグニチュードの変更へとつながった。

日本海溝で起こった東日本大震災の津波発生域でプレート境界を貫く掘削を実施し、断層が回収された。その断層の分析の結果、本質的に極めて摩擦係数の小さいスメクタイト主体の粘土層がすべりに関与した事が明らかとなった。加えて残留熱の測定より、すべり弱化メカニズムとして脱水熱圧化が重要な役割を果たしたと推定された。

陸上部の付加体の中に残されている地下10km超深度での化石プレート境界断層岩の分析を実施した。その結果、すべり弱化メカニズムは極めて多様であり、摩擦溶融弱化、固液共存断層における摩擦熱の間隙流体熱圧化による弱化、粉碎液状化による弱化、滑り面のナノスケール薄膜アモルファス化による弱化などが起こったと推定された。これらは基本的にドライな環境で起こる大陸地殻内部での地震断層弱化メカニズムと異なり固液共存系におけるメカニズムであることが明らかとなった。

以上の他に以下の重要な成果もあった。

これまでが含水鉱物脱水領域は地震発生帯で浅もしくは深と見なされていた。しかし、南海トラフ基準点掘削および陸上部付加体における玄武岩分析より、海溝から沈み込む以前の玄武岩海洋地殻には変質によってサポナイト粘土鉱物系の大量の含水鉱物を含んでいることが判明した。それらは地震発生帯において主要な水源として機能することが発見された。

日本海溝堆積物の分析を実施、含水鉱物系構成比を明らかにし、その分析脱水計算を実施した。その結果、日本海溝津波発生域において脱水のピークとなることが判明した。さらに透水性の実験的測定によって、この脱水は異常間隙水圧を発生させ、有効摩擦を大きく下げる事が推定された。

化石プレート境界断層岩破碎帯の断層系解析より、主断層に沿ってのダイナミックなすべりの摩擦係数は小さい事が推定された。

化石プレート境界断層岩破碎帯の引張裂罅系を充填する鉱物脈(石英脈・方解石脈)の希土類元素などの分析より、動的滑り時に沈殿した断層内の鉱物脈は還元的環境で沈殿したのに対し、ホストの裂罅を充填するものは酸化環境で沈殿したことが判明、酸化状態がプレート境界において動的に変化していることが推定された。

断層帯の検層結果を断層組織と照合させた結果、定性的な断層核、断層角礫帯、ダメージ帯などが物性値によって定量的に記述できることが判明した。

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 104 件)

Kameda, J., Kawabata, K., Hamada, Y., Yamaguchi, A. and Kimura, G., Quartz deposition and its influence on deformation process of megathrust in subduction zone, *Earth, Planets and Space*, 査読有, 66, 2014, <http://www.earth-planets-space.com/content/66/1/28>.

Kimura, G., Hamahashi, M., Okamoto, S., Yamaguchi, A., Kameda, J., Raimbourg, H., Hamada, Y., Yamaguchi, H. and Shibata, T., Hanging wall deformation of a seismogenic megasplay fault in an accretionary prism: The Nobeoka Thrust in southwestern Japan, *J. Structural Geology*, 査読有, 52, 136-147, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2013.03.015>.

Kogure, T., Drits, V. A. and Inoue, S., Structure of mixed-layer corrensite-chlorite revealed by high-resolution transmission electron microscopy (HRTEM), *Am. Mineral.*, 査読有, 98, 1253-1260, 2013, doi:10.2138/am.2013.4314.

Fulton, P. M., Brodsky, E. E., Kano, Y., Mori, J., Chester, F., Ishikawa, T., Jarris, R. N., Lin, W., Eguchi, N., Toczko, S. and the Exp.343/343T and KR13-08 Scientists, Low coseismic friction on the Tohoku-oki fault determined from temperature measurements, *Science*, 査読有, 342, 1214-1217, 2013, doi:10.1126/science.1243641.

Hirono, T., Tanikawa, W., Honda, G., Kameda, J., Fukuda, J. and Ishikawa, T., Importance of mechanochemical effects on fault slip behavior during earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 40, 2988-2992, 2013, doi:10.1002/grl.50609.

Ujii, K., Tanaka, H., Saito, T., Tsutsumi, A., Mori, J., Kameda, J., Brodsky, E. E., Chester, F. M., Eguchi, N., Toczko, S. and Exp.343 and 343T Scientists, Low coseismic shear stress on the Tohoku-oki megathrust determined from laboratory experiments, *Science*, 査読有, 342, 1211-1214, 2013, doi:10.1126/science.1243485.

Yamasaki, S., Zwingmann, H., Yamada, K., Tagami, T. and Umeda, K., Constraining the timing of brittle deformation and faulting in the Toki granite, central Japan, *Chem. Geol.*, 査読有, 351, 168-174, 2013, doi:10.1016/j.chemgeo.2013.05.005.

Sato, K., Fujimoto, K., Nakata, M. and

Shikazono, N., Evidence for Enhanced Matrix Diffusion in Geological Environment, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, 82, 0149011-0149014, 2013, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.82.014901>.

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

廣野哲朗, 小村賢太郎, 藤本光一郎, 伊藤久男, ジェームズ モリ ジロウ, 佐藤比呂志, 断層掘削研究によって明らかになった地震時の断層滑り挙動とその物理化学的側面, *地学雑誌*, 査読有, 122, 323-342, 2013, doi:10.5026/jgeography.122.323.

Vannucchi, P., Ujii, K., Stroncik, N. and IODP Exp.334 Scientific Party, IODP Expedition 334: An investigation of the sedimentary record, fluid flow and state of stress on top of the seismogenic zone of an erosive subduction margin, *Scientific Drilling*, 査読有, 15, 23-30, 2013, doi:10.2204/iodp.sd.15.03.2013.

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

Kimura, G., Hina, S., Hamada, Y., Kameda, J., Tsuji, T., Kinoshita, M. and Yamaguchi, A., Runaway slip to the trench due to rupture of highly pressurized megathrust beneath the middle trench slope: The tsunamigenesis of the 2011 Tohoku earthquake off the east coast of northern Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 査読有 339-340, 32-45, 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2012.04.002>.

Inoue, S. and Kogure, T., Electron backscatter diffraction (EBSD) analyses of phyllosilicates in petrographic thin sections, *Am. Mineral.*, 査読有 97,755-758, 2012, doi:10.2138/am.2012.4061.

石川剛志, 廣野哲朗, 断層岩の微量元素組成・同位体組成からみた地震時の流体岩石相互作用, *地球化学*, 査読有, 46, 217-230, 2012, http://www.geochem.jp/journal_j/content

nts/046.html.

〔学会発表〕(計 216 件)

Tagami, T., Thermochronological investigation of seismogenic fault zones: an overview and examples from Japanese Islands, AGU Fall Meeting, 2013.12.12, San Francisco(アメリカ)

Kimura, G., Hamahashi, M., Fukuchi, R., Yamaguchi, A, Kameda, J., Kitamura, Y., Hashimoto, Y., Hamada, Y., Saito, S. and Kawasaki, R., Evolving seismogenic plate boundary megathrust and mega-splay faults in subduction zone, AGU Fall Meeting, 2013.12.11, San Francisco(アメリカ).

廣野哲朗, 谷川 亘, 亀田 純, 福田淳一, 石川剛志, 鉱物におけるメカノケミカル効果が地震時の断層滑り挙動に与える影響について, 日本地震学会 2013 年度秋季大会, 2013.10.9, 神奈川県民ホール(神奈川県).

氏家恒太郎, 日本海溝緊急掘削(JFAST)で明らかになった震源域プレート境界断層の特徴と高速摩擦特性, 日本地震学会 2013 年度秋季大会, 2013.10.8, 神奈川県民ホール(神奈川県).

藤本光一郎, 福地里菜, 粘土鉱物のメカノケミカルな挙動, 日本鉱物科学会 2013 年年会, 2013.9.11, 筑波大学(茨城県).

Kogure, T., Real Structures of Clay Minerals Revealed by HRTEM, 2nd International Conference- CMLM2013, 2013.9.11, St. Petersburg(ロシア).

石川剛志, 微量元素・同位体分析が明らかにする地震断層のすべりメカニズム, プラズマ分光分析研究会第 88 回講演会, 2013.6.14, 徳島大学工業会館(徳島県).

山本由弦, 林 為人, 臼井洋一, 齋藤実篤, 橋本善孝, 坂口有人, 氏家恒太郎, V. Paola, H. Robert, Exp.334 344 乗船研究者, コスタリカ沈み込み帯における応力場と歪みの時空間変化: IODP Exp. 334, Exp. 344 速報, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013.5.22, 幕張メッセ(千葉県).

木村 学, 齋藤実篤, 山口飛鳥, 亀田 純, 浜橋真理, 福地里菜, 柴田美緒, 濱田洋平, 橋本善孝, 藤本光一郎, 比名祥子, 北村有迅, 巨大地震の物理化学岩石流体相互作用と破壊伝播-露出した化石地震発生プレート境界断層から学ぶ-, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013.5.22, 幕張メッセ(千葉県).

小暮敏博, 粘土の原子配列を電顕で見る, 第 11 回高分子ナノテクノロジー研究会講座, 2013.2.1, 産業技術総合研究所臨海副都心センター(東京都).

Ujiie, K., Nakakoji, T. and Tsutsumi, A., Experimental and microstructural

constraints on thermal pressurization and fluidization in fault gouge, Asia Oceania Geosciences Society, 2012.8.16, 2012, Resorts World Convention Center(シンガポール).

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, 2012.8.6, Brisbane(オーストラリア).

木村 学, 比名祥子, 濱田洋平, 亀田 純, 辻 健, 木下正高, 山口飛鳥, プレート境界断層の高間隙水圧による海溝域までの破壊の暴走-2011 東北沖地震による津波発生メカニズム, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012.5.22, 幕張メッセ(千葉県).

藤本光一郎, 加熱と粉碎による粘土鉱物の非晶質化と断層すべり, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012.5.22, 幕張メッセ(千葉県).

田上高広, 熱年代学を用いた断層帯の活動史と熱過程研究, 日本地質学会第 116 年学術大会, 2009.9.6, 岡山理科大学(岡山県).

〔図書〕(計 5 件)

Kogure, T., Handbook of Clay Science (2nd Ed). Part B: Techniques and Applications, Elsevier, 813, 2013.

木村 学, 木下正高, 付加体と巨大地震発生帯 南海地震の解明に向けて, 東京大学出版会, 296, 2009.

〔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:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ：超深度海溝掘削
<http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/nantoro/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 学 (KIMURA, Gaku)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号： 80153188

(2) 研究分担者

小暮 敏博 (KOGURE, Toshihiro)
東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号： 50282728

石川 剛志 (ISHIKAWA, Tsuyoshi)
独立行政法人海洋研究開発機構・高知コア
研究所・グループリーダー
研究者番号： 30270979

藤本 光一郎 (FUJIMOTO, Koichiro)
東京学芸大学・教育学部・准教授
研究者番号： 80181395

廣野 哲朗 (HIRONO, Tetsuro)
大阪大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号： 70371713

氏家 恒太郎 (UJIE, Kohtaro)
筑波大学・大学院生命環境科学研究科・
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

田上 高広 (TAGAMI, Takahiro)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号： 80202159

東 垣 (AZUMA, Wataru)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球深部
探査センター・センター長
研究者番号： 90183847