

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：12501

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：21107004

研究課題名(和文) 巨大地震断層の力学的・水理学的特性の解明

研究課題名(英文) Mechanical and hydrological properties of mega-earthquake thrusts

研究代表者

金川 久一(KANAGAWA, Kyuichi)

千葉大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40185898

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 108,000,000円、(間接経費) 32,400,000円

研究成果の概要(和文)：南海トラフ付加体浅部、日本海溝プレート境界断層浅部、およびコスタリカ沖ココスプレート表層部の掘削試料について変形・透水実験を行った結果、力学・水理特性が粘土鉱物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。すなわち、粘土鉱物含有量の増加に伴い摩擦強度が低下し、摩擦に対する流動の影響が大きくなる。また、粘土鉱物に富む堆積物は難透水性でゆっくりと破壊する性質がある。

日本海溝プレート境界断層浅部は、粘土鉱物に富み摩擦強度が著しく小さいため地震性すべりが伝播しやすく、また難透水性で地震性すべりによって熱加圧が起こって強度がさらに低下したため、東北地方太平洋沖地震時に大きく変位したと考えられる。

研究成果の概要(英文)：We conducted mechanical and hydrological tests on materials cored from the shallow Nankai Trough accretionary prism, the shallow plate-boundary fault along Japan Trench, and the sedimentary cover on the Cocos plate off Costa Rica. The results revealed that their mechanical and hydrological properties systematically change according to the amount of clay minerals. With increasing amount of clay minerals, frictional strength decreases and the flow component in friction sliding increases. Sediments rich in clay minerals are rather impermeable, and fail slowly.

The shallow plate-boundary fault along Japan Trench is found to be rich in clay minerals and very weak in frictional strength so that seismic slip is easy to propagate through. In addition, it is impermeable so that thermal pressurization likely occurs during seismic slips, which further weakens the fault. These well explain the large slip of the shallow plate-boundary fault during the Tohoku-oki earthquake in 2011.

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

キーワード：南海トラフ付加体 日本海溝プレート境界断層 ココスプレート表層堆積物 掘削試料 摩擦実験 破壊実験 透水実験

1. 研究開始当初の背景

沈み込みプレート境界の固着域では周期的に海溝型巨大地震が起こっており、南海トラフプレート境界における東南海地震(1944年)や南海地震(1946年)はその代表的な例である。また2011年には、日本海溝プレート境界において東北地方太平洋沖地震が発生した。このような海溝型巨大地震の準備・発生過程の解明は、地球科学のみならず、科学の第一級の研究課題である。統合国際深海掘削計画(IODP)の一環として、掘削船「ちきゅう」による東南海地震震源域に達する超深度(海底下約5.2 km)掘削(南海トラフ地震発生帯掘削; NanTroSEIZE)が2007年に開始され、東北地方太平洋沖地震の震源断層浅部(海底下約1 km)掘削(日本海溝緊急掘削プロジェクト; JFSAT)が2012年に実施された。また、コスタリカ沖でも掘削船JOIDES Resolutionによる沈み込み帯掘削(コスタリカ地震発生帯掘削プロジェクト; CRISP)が2011年から実施されている。2009年度に開始した本新学術領域研究は、これらのIODP地震発生帯掘削と同時進行で連携し、海溝型巨大地震の準備・発生過程の解明を目指すものである。

2. 研究の目的

NanTroSEIZEは2007年から現在に至るまで10航海が実施され、紀伊半島沖の15地点で掘削が行われている。本計画研究の主たる目的は、これらの掘削により得られた南海トラフ付加体浅部掘削試料の変形・透水実験に基づいて、付加体浅部の力学的・水理学的性質を明らかにし、沈み込み帯における海溝型巨大地震の準備・発生過程の解明に貢献することである。

また、2012年に実施されたJFASTでは、三陸沖の海底下約820 mのプレート境界断層とその上・下盤の掘削試料が得られており、これらの掘削試料の変形・透水実験に基づいて、東北地方太平洋沖地震で海溝付近まで大きく変位した原因究明も目指す。

さらに、CRISP掘削で得られた海洋プレート(ココスプレート)表層堆積物の変形実験に基づいて、これらが沈み込んだプレート境界断層の力学的特性の予想も行う。

3. 研究の方法

本計画研究では、三軸試験機を用いて変位速度10 $\mu\text{m/s}$ 以下の低速変形実験を、回転剪断試験機を用いて変位速度10 $\mu\text{m/s}$ ~1 m/s の中~高速変形実験を、透水試験機を用いて透水実験を、それぞれ掘削試料原位置相当の温度・圧力・間隙水圧条件で行い、力学・水理学データを得る。

4. 研究成果

(1)南海トラフ付加体浅部堆積物の水理・力学特性

NanTroSEIZEにより南海トラフ付加体浅部(海底下945~1580 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試料の5試料について、微細構造観察、粉末X線回折分析、孔隙率測定を行い、さらに試料原位置に近い条件で透水実験、三軸圧縮実験および三軸摩擦実験を行い、水理・力学特性の評価を行った。

砂岩試料(C2571)は方解石によってセメントされているため孔隙率が0.7%と極めて小さい砂岩で、また粘土鉱物含有量は5.7 wt%と少ない(表1)。凝灰岩試料(C9087)は細粒ガラス質の凝灰岩で、粘土鉱物を17.2 wt%含み、孔隙率は27.4%である(表1)。シルト質泥岩試料(C2652, C9073)は石英・長石などの碎屑粒子を比較的多く含むが、粘土鉱物も29~34 wt%含み、孔隙率は30~39%である(表1)。粘土質泥岩試料(C2516)は細粒均質で粘土鉱物に富み(42.0 wt%)、孔隙率が11.2%とかなり小さい(表1)。

Sample	Clay (wt%)	ϕ (%)	P_c (MPa)	P_p (MPa)	k (m^2)
C2516	42.0	11.2	36	28	2.9×10^{-19}
C2571	5.7	0.7	37	29	N/A
C2652	34.1	38.5	38	29	2.3×10^{-18}
C9073	29.4	29.5	57	43	N/A
C9087	17.2	27.4	57	43	3.4×10^{-19}

表1. 南海トラフ付加体浅部堆積物試料の粘土鉱物含有量、孔隙率 ϕ 、実験封圧 P_c ・間隙水圧 P_p 、および浸透率 k 。

これらの試料について、室温、および試料原位置相当の封圧・間隙圧条件(表1)で透水実験を行った結果、凝灰岩試料(C9087)で $3.4 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 、シルト質泥岩試料(C2652)で $2.3 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 、粘土質泥岩試料(C2516)で $2.9 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ という浸透率が得られた(表1)。凝灰岩試料の浸透率は粘土質泥岩試料と同程度であるが、前者は測定有効圧が後者より6 MPa大きいので、同一有効圧条件では粘土質泥岩試料の浸透率が最も小さいと考えられる。一方、砂岩試料(C2571)とシルト質泥岩試料(C9073)からは浸透率データが得られなかった(表1)。

これらの試料について、透水実験と同じ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(C2571)が約300 MPaと非常に大きく、凝灰岩試料(C9087)が48 MPa程度、シルト質泥岩試料(C2652)が20 MPa程度、粘土質泥岩試料(C2516)が14 MPa程度であった(図1)。また、砂岩、凝灰岩、シルト質泥岩試料の破壊時間が20秒以内と比較的短いに対し、粘土質泥岩試料は約40秒かかってゆっくりと破壊した。シルト質泥岩のうち1試料(C9073)は破壊せず、15 MPa程度の強度で延性的に変形した(図1)。砂岩試料(C2571)

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 (C9073) 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 (C2516) は粘土鉱物に富むため強度が小さかったことに加えて、孔隙率が小さく透水性も低かったため (表 1)、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。

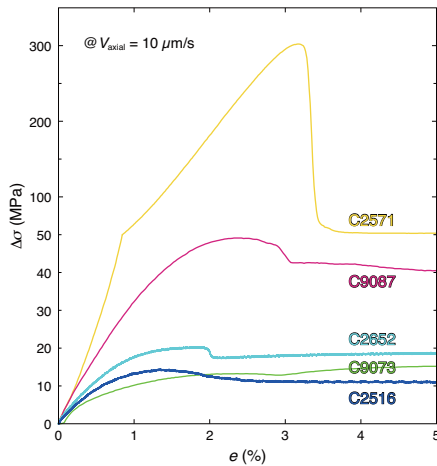


図 1. 南海トラフ付加体浅部堆積物試料の差応力 $\Delta\sigma$ – 歪 e 曲線 (Takahashi *et al.* (2013, *Tectonophysics*) に加筆).

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 (図 2)。軸方向変位速度 1 $\mu\text{m/s}$ における定常摩擦係数 μ_{ss} は、粘土鉱物含有量の増加に伴って低下し、砂岩試料 (C2571) が 0.87、凝灰岩試料 (C9087) が 0.71、シルト質泥岩試料 (C2652, C9073) が 0.53~0.56、粘土質泥岩試料 (C2516) が 0.25 であった (図 2)。変位速度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 (C2571) 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 (図 2)。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 (図 2)、定常摩擦強度の変位速度依存性 $\Delta\mu_{ss}/\Delta\ln V_{sliding}$ に対する摩擦構成則パラメータ ($a - b$) 値の割合は、粘土鉱物含有量の増加に伴って減少する (図 3)。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。

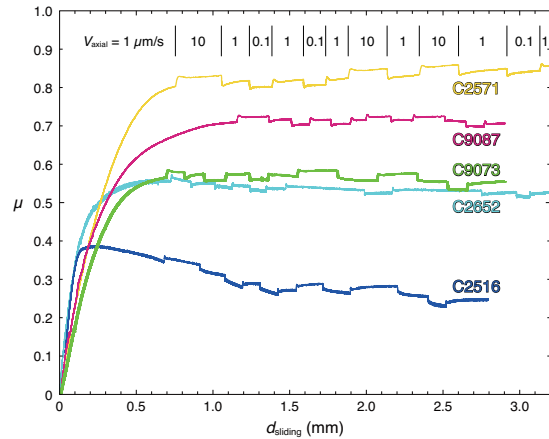


図 2. 南海トラフ付加体浅部堆積物試料の摩擦係数 μ – 変位量 $d_{sliding}$ 曲線 (Takahashi *et al.* (2013, *Tectonophysics*) に加筆). 砂岩試料 (C2571) については軸方向の変位速度 V_{axial} の変化が示してあるが、他の試料についても変位速度は異なるが同じ順序の変化を与えている。

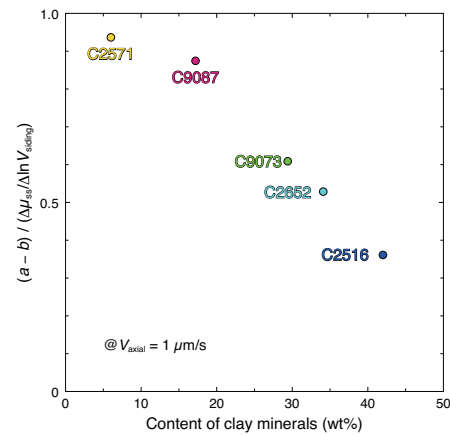


図 3. 軸方向変位速度 $V_{axial} = 1 \mu\text{m/s}$ における南海トラフ付加体浅部堆積物試料の、定常摩擦強度の変位速度依存性 $\Delta\mu_{ss}/\Delta\ln V_{sliding}$ に対する摩擦構成則パラメータ ($a - b$) 値の割合の、粘土鉱物含有量による変化。

(2) 日本海溝プレート境界断層およびその上・下盤の摩擦・水理特性

JFAST 掘削により得られた、海底下約 820 m のプレート境界断層浅部、およびその上・下盤の泥質堆積物試料について、室温、原位置深度相当の有効垂直応力 10 MPa (垂直応力 20 MPa、間隙水圧 10 MPa)、変位速度 2.5 $\mu\text{m/s} \sim 1.25 \text{ m/s}$ の条件で摩擦実験を、有効圧 0~40 MPa の下で定差圧 (0.1~0.8 MPa) 流量法により透水実験を、それぞれ行った。

摩擦実験では、250 $\mu\text{m/s}$ 以下の変位速度においてプレート境界断層上・下盤泥質堆積物試料の摩擦係数が 0.3~0.5 程度であるのに対し、プレート境界断層試料の摩擦係数が約 0.15 程度と著しく小さいことが明らかとなった (図 4)。プレート境界断層試料には粘土鉱物が約 70 wt% も含まれており、上・下盤の堆積物試料 (40~50 wt%程度) に比べてはるかに多く (図 5b)、それがプレート境界断層の摩擦強度が著しく小さい原因と考えら

れる。

透水実験では、原位置深度相当の有効圧下の浸透率が、プレート境界断層上・下盤の堆積物試料では $10^{-17} \sim 10^{-18} \text{ m}^2$ 程度であるのに対し、プレート境界断層試料では 10^{-20} m^2 程度と2桁以上も小さかった (図 5a)。このような透水性の違いも粘土鉱物含有量の違いを反映している可能性が大きい。また、プレート境界断層は難透水性のため、地震時の高速断層運動時には、摩擦発熱により間隙水が熱膨張して間隙圧が上昇する、熱加圧が起こる可能性が大きい。

以上のように、日本海溝付近のプレート境界断層は摩擦強度が著しく小さく、地震性すべりが伝播しやすかったと考えられる。また難透水性で地震性すべりが伝播した際に熱加圧によってさらに強度が低下したため、大きく変位したと考えられる。

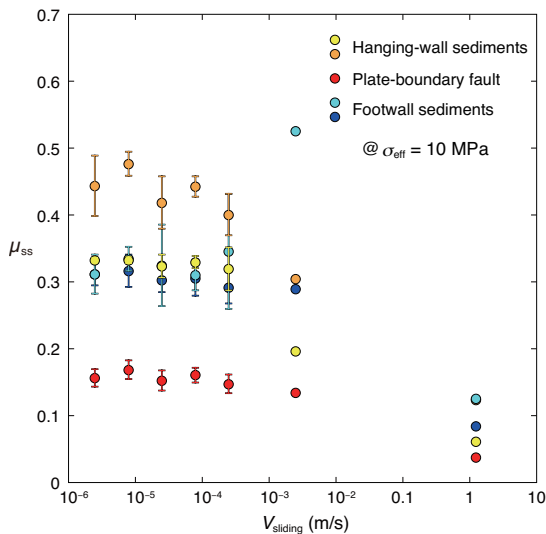


図 4. 日本海溝プレート境界断層試料およびその上・下盤泥質堆積物試料の、定常摩擦係数 μ_{ss} の変位速度 $V_{sliding}$ 依存性。

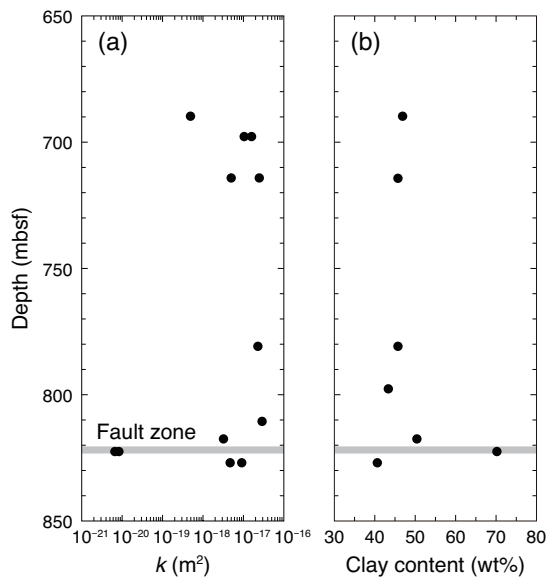


図 5. JFAST 掘削地点における掘削試料の浸透率 k (a) と粘土鉱物含有量 (b) の深度変化。

(3) コスプレート表層堆積物の摩擦特性

CRISP 掘削により採取された、沈み込む海洋プレート (コスプレート) 表層約 100 m の遠洋性泥質堆積物 11 試料について、垂直応力 5 MPa、含水条件、0.03~3 mm/s の変位速度で摩擦実験を行った結果、上位 (Unit I) の粘土質試料と下位 (Unit II) の珪質~石灰質軟泥試料には、摩擦特性の著しい相違があることが明らかとなった。変位速度 0.3 mm/s の場合、Unit I の粘土質試料はいずれも定常摩擦係数 μ_{ss} が 0.2 以下と非常に小さいのに対し、Unit II の軟泥試料は μ_{ss} が 0.6~0.8 と大きい (図 6)。また、摩擦強度の変位速度依存性の指標である $(a-b)$ 値は、Unit I の粘土質試料が実験した速度範囲において常に正であるのに対して、Unit II の軟泥試料は変位速度 0.3 mm/s 以下では明瞭に負となる (図 7)。Unit I の粘土質試料は粘土鉱物に富むのに対し、Unit II の軟泥試料には粘土鉱物が全く含まれていないことから、このような摩擦特性の相違も粘土鉱物含有量の相違に起因していると考えられる。

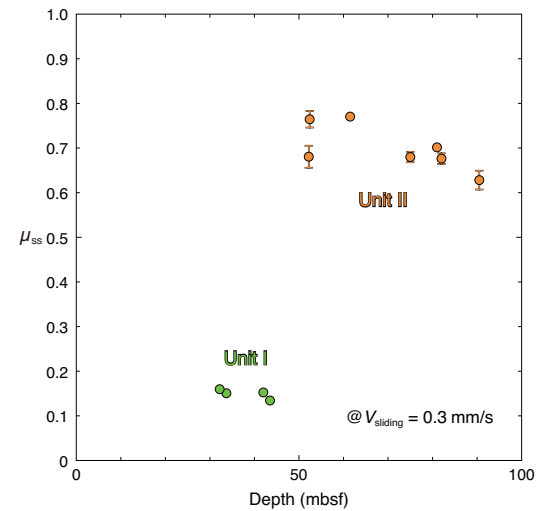


図 6. コスプレート表層堆積物の変位速度 $V_{sliding} = 0.3 \text{ mm/s}$ における定常摩擦係数 μ_{ss} の深度変化。

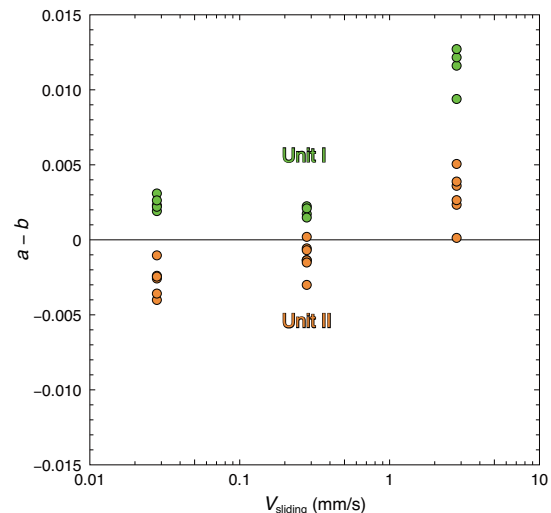


図 7. コスプレート表層堆積物の $(a-b)$ 値の変位速度 $V_{sliding}$ による変化。

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 11 件)

- ① Ujiie, K., Tanaka, H., Saito, T., Tsutsumi, A., Mori, J. J., Kameda, J., Brodsky, E. E., Chester, F. M., Eguchi, N., Toczko, S. and Expedition 343 and 343T Scientists (2013) Low coseismic shear stress on the Tohoku-Oki megathrust determined from laboratory experiments, *Science* (査読有), **342**, 1211–1214, doi:10.1126/science.1243485.
- ② Tanikawa, W., Hirose, T., Mukoyoshi, H., Tadai, O. and Lin, W. (2013) Fluid transport properties in sediments and their role in large slip near the surface of the plate boundary fault in the Japan Trench. *Earth and Planetary Science Letters* (査読有), **382**, 150–160, doi:10.1016/j.epsl.2013.08.052.
- ③ Takahashi, M., Azuma, S., Uehara, S., Kanagawa, K. and Inoue, A. (2013) Contrasting hydrological and mechanical properties of clayey and silty muds cored from the shallow Nankai Trough accretionary prism. *Tectonophysics* (査読有), **600**, 63–74, doi:10.1016/j.tecto.2013.01.008.
- ④ Kitajima, H. and Saffer, D. M. (2012) Elevated pore pressure and anomalously low stress in regions of low frequency earthquakes along the Nankai Trough subduction megathrust. *Geophysical Research Letters* (査読有), **39**, L23301, doi:10.1029/2012GL053793.
- ⑤ Kitajima, H., Chester, F. M. and Biscontin, G. (2012) Mechanical and hydraulic properties of Nankai accretionary prism sediments: Effect of stress path. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* (査読有), **13**, Q0AD27, doi:10.1029/2012GC004124.
- ⑥ Tanikawa, W., Mukoyoshi, H., Tadai, O., Hirose, T., Tsutsumi, A. and Lin, W. (2012) Velocity dependence of shear-induced permeability associated with frictional behavior in fault zones of the Nankai subduction zone. *Journal of Geophysical Research* (査読有), **117**, B05405, doi:10.1029/2011JB008956.
- ⑦ Tsutsumi, A., Fabbri, O., Karpoﬀ, A. M., Ujiie, K. and Tsujimoto, A. (2011) Friction velocity dependence of clay-rich fault material along a megasplay fault in the Nankai subduction zone at intermediate to high velocities. *Geophysical Research Letters* (査読有), **38**, L19301, doi:10.1029/2011GL049314.
- ⑧ Faulkner, D. R., Mitchell, T. M., Behnen, J., Hirose, T. and Shimamoto, T. (2011) Stuck in the mud? Earthquake nucleation and propagation through accretionary forearcs. *Geophysical Research Letters* (査読有), **38**, L18303, doi:10.1029/2011GL048552.
- ⑨ Di Toro, G., Han, R., Hirose, T., De Paola, N., Nielsen, S., Mizoguchi, K., Ferri, F., Cocco, M. and Shimamoto, T. (2011) Fault lubrication during earthquakes. *Nature* (査読有), **471**, 494–498, doi:10.1038/nature09838.
- ⑩ Ujiie, K. and Tsutsumi, A. (2010) High-velocity frictional properties of clay-rich fault gouge in a megasplay fault zone, Nankai subduction zone. *Geophysical Research Letters* (査読有), **37**, L24310, doi:10.1029/2010GL046002.
- ⑪ Tanikawa, W., Sakaguchi, M., Tadai, O. and Hirose, T. (2010) Influence of fault slip rate on shear-induced permeability. *Journal of Geophysical Research* (査読有), **115**, B07412, doi:10.1029/2009JB007013.

[学会発表] (計 17 件)

- ① 亀田 純・清水麻由子・氏家恒太郎・廣瀬丈洋・イカリマツト・レミッティフランチェスカ・モリジム・チェスターフレッド・木村 学 (2014) 日本海溝プレート境界断層の鉱物学的特徴と発達過程. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, SSS32-13 (招待講演), 2014 年 5 月 1 日, パシフィコ横浜会議センター.
- ② 氏家恒太郎・田中英恵・斎藤 翼・堤 昭人・Mori James・亀田 純 (2014) 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. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, SSS30-06 (招待講演), 2014 年 4 月 28 日, パシフィコ横浜会議センター.
- ③ 氏家恒太郎・田中英恵・斎藤 翼・堤 昭人・James Mori・亀田 純 (2013) 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 年度秋期大会, C21-02 (招待講演), 2013 年 10 月 8 日, 神奈川県民ホール.
- ④ 北島弘子・Demian Saffer (2013) Stress states and physical properties along the Nankai Trough plate boundary. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, SCG66-05 (招待講演), 2013 年 5 月 24 日, 幕張メッセ国際会議場.
- ⑤ 亀田 純・氏家恒太郎・廣瀬丈洋・Matt Ikari・Francesca Remitti・清水麻由子・濱田洋平・木村 学・Frederick Chester・ジェームズモリ・江口暢久・Sean Toczko・

Exp 343 Scientists (2013) 日本海溝プレート境界断層の鉱物学的特徴. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, SCG63-04 (招待講演), 2013 年 5 月 22 日, 幕張メッセ国際会議場.

- ⑥ 嶋本利彦・芝崎文一郎・野田博之 (2013) Mechanism of 2011 Tohoku-oki earthquake in view of fault mechanics. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, SSS01-07 (招待講演), 2013 年 5 月 19 日, 幕張メッセ国際会議場.
- ⑦ 北島弘子・Demian Saffer (2012) 南海トラフ沈み込み帯での応力状態と変形機構, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, SSS29-08 (招待講演), 2012 年 5 月 21 日, 幕張メッセ国際会議場.
- ⑧ Kanagawa, K., Tsutsumi, A., Takahashi, M., Hirose, T. and Tanikawa, W. (2012) Hydrological and mechanical properties of mud samples from the shallow Nankai Trough accretionary prism, *International Conference on a New Perspective of Great Earthquakes along Subduction Zones*, (招待講演), 2012 年 2 月 29 日, 高知市文化プラザかるぼーと.
- ⑨ Ujiie, K., Nakakoji, T. and Tsutsumi, A. (2011) Experimental and microstructural investigations of frictional heating and fluidization in clay-rich fault gouge. *American Geophysical Union 2011 Fall Meeting*, T32C-05 (招待講演), 2011 年 12 月 7 日, Moscone Center, San Francisco.
- ⑩ 嶋本利彦 (2011) Subduction-zone rheology: current status and future tasks. 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, U002-09 (招待講演), 2011 年 5 月 25 日, 幕張メッセ国際会議場.
- ⑪ 氏家恒太郎・堤 昭人 (2010) 断層ガウジにおける thermal pressurization に関する実験的研究と特徴的微小構造. 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, SSS020-18 (招待講演), 2010 年 5 月 26 日, 幕張メッセ国際会議場.
- ⑫ Tanikawa, W., Hirose, T., Sakaguchi, M. and Tadai, O. (2010) Influence of fault slip rate on shear-induced permeability. *European Geosciences Union General Assembly 2010*, EGU2010-4135 (招待講演), 2010 年 5 月 6 日, Austria Center, Vienna.
- ⑬ 嶋本利彦 (2009) 断層の力学と地震の発生機構: 研究の現状と展望. 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, I130-012 (招待講演), 2009 年 5 月 18 日, 幕張メッセ国際会議場.
- ⑭ 廣瀬丈洋・谷川 亘・坂口真澄・多田井 修 (2009) Fluid lubrication of faults during earthquakes: Evidence from high velocity experiments on fluid-saturated

gouge. 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, J169-008 (招待講演), 2009 年 5 月 17 日, 幕張メッセ国際会議場.

[図書] (計 2 件)

- ① 日本地質学会構造地質部会編 (金川久一・廣瀬丈洋分担執筆) (2012) 日本の地質構造 100 選. 朝倉書店, 171p.
- ② 金川久一 (2011) 現代地球科学入門第 10 巻『地球のテクトニクス II 構造地質学』. 共立出版, 253p.

[その他]

ホームページ等

<http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/nantro~/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金川 久一 (KANAGAWA, Kyuichi)
千葉大学大学院理学研究科・教授
研究者番号: 40185898

(2) 研究分担者

堤 昭人 (TSUTSUMI, Akito)
京都大学大学院理学研究科・助教
研究者番号: 90324607

高橋 美紀 (TAKAHASHI, Miki)
産業技術総合研究所活断層・地震研究センター・主任研究員
研究者番号: 40470033

廣瀬 丈洋 (HIROSE, Takehiro)
海洋研究開発機構高知コア研究所・主任研究員
研究者番号: 40470124

(3) 連携研究者

嶋本 利彦 (SHIMAMOTO, Toshihiko)
海洋研究開発機構高知コア研究所・招聘上席研究員
研究者番号: 20112170

谷川 亘 (TANIKAWA, Wataru)
海洋研究開発機構高知コア研究所・主任研究員
研究者番号: 70435840

北島 弘子 (KITAJIMA, HIROKO)
産業技術総合研究所活断層・地震研究センター・研究員
研究者番号: 60635796