

炭質物を用いた断層における摩擦発熱指標の構築 Vitrinite reflectance and Raman spectra of carbonaceous material as indicators of frictional heating on faults

古市 裕之^{1*}; 氏家 恒太郎¹; 纈纈 佑衣²; 斎藤 翼¹; 堤 昭人³; ウォリス サイモン⁴
FURUICHI, Hiroyuki^{1*}; UJIE, Kohtarō¹; KOUKETSU, Yui²; SAITO, Tsubasa¹; TSUTSUMI, Akito³;
WALLIS, Simon⁴

¹ 筑波大学, ² 東京大学, ³ 京都大学, ⁴ 名古屋大学

¹University of Tsukuba, ²The University of Tokyo, ³Kyoto University, ⁴Nagoya University

断層における摩擦発熱指標の構築は、地震性すべりの地質学的証拠を見出すとともに、得られた温度情報をもとに地震時の摩擦抵抗を求める上で重要である。ビトリナイト反射率(以下、 R_o)と炭質物ラマンスペクトルは、地質体の被った最高温度を見積もるための地質温度計として利用されてきた。これらは、温度上昇によって炭質物が熟成するのに伴い、 R_o が増加し、炭質物ラマンスペクトルが系統的に変化することを用いている。本研究では、 R_o と炭質物ラマンスペクトルが断層における摩擦発熱指標に成り得るのか探るべく、南海トラフ巨大分岐断層から採取した粘土質ガウジ試料95 wt%に炭質物5 wt%を混ぜ、摩擦実験を行なった。実験は、窒素ガス充填下で無水・含水条件のもと、高速(1.3 m/s)摩擦実験(実験時間約9秒)と低速(0.15 mm/s)摩擦実験(実験時間約32分)を行なった。実験後、微細構造観察、2次元有限要素法によるガウジ内温度分布の算出、 R_o 測定、炭質物のサイズ測定、ラマン分光分析を行なった。その結果、約9秒間の高速すべりにおいて炭質物が温度上昇と粉碎の影響を受けると、 R_o と炭質物ラマンスペクトルは明瞭に変化することが明らかとなった。一方で、低速すべり時の非常に小さな温度上昇と粉碎の効果では、 R_o と炭質物ラマンスペクトルは変化しなかった。つまり、断層における R_o と炭質物ラマンスペクトル変化は、摩擦発熱の指標と成り得る。一方で、従来用いられてきた R_o や炭質物ラマンスペクトルの地質温度計は、断層における摩擦発熱温度計としては直接利用できないことが明らかとなった。断層における摩擦発熱温度計を構築するためには、高速すべり時の急速加熱と粉碎の効果を考慮した新たなカインेटクスモデルの構築が必要である。

キーワード: 摩擦発熱, ビトリナイト反射率, ラマンスペクトル, 炭質物, 摩擦実験

Keywords: frictional heating, vitrinite reflectance, Raman spectra, carbonaceous material, friction experiments

炭質物の熱分解による断層ガウジ黒色化 Blackening of fault gouge by pyrolysis of carbonaceous mineral

金木 俊也^{1*}; 廣野 哲朗¹

KANEKI, Shunya^{1*}; HIRONO, Tetsuro¹

¹ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

¹Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

地震性すべりによって断層では摩擦発熱と鉱物の破碎が生じ、地震後の物理化学的過程を経て断層ガウジが形成される。断層ガウジは時に様々な色(白色～桃～緑～灰～黒色)を呈するが、特に堆積岩に発達しているものは灰～黒色であることが多い。しかし断層ガウジの色に関する研究はあまり行われておらず、摩擦仕事や摩擦発熱といったすべりパラメータとの関係性も不明である。したがって本研究では、堆積岩起源の断層ガウジ黒色化の原因について探るべく、粘土鉱物(モンモリロナイト)と石炭(瀝青質)を混合させたサンプルについて高速摩擦実験と粉碎ミル実験を実施し、可視・赤外・ラマン分光法を用いて解析を行った。その結果、実験前の石炭含有量が多いほど摩擦実験後のサンプルは黒色化しており、また粘土鉱物の表面からラマンG・Dバンドが検出された。以上を考察すると、摩擦発熱によって炭質物の熱分解反応が進行し、熱分解ガスが鉱物粒子の表面に吸着し、黒色化を引き起こしたと考えられる。よって、天然の黒色断層ガウジも300℃以上の高温を経ている可能性がある。

キーワード: 炭質物, 熱分解, 摩擦発熱, 断層ガウジ

Keywords: carbonaceous material, pyrolysis, frictional heating, fault gouge

断層摩擦発熱に伴う炭質物熟成の特徴：断層岩中の炭質物のラマン分析より Characteristics of frictional heating related thermal maturation of CM: Raman analysis of CM in the fault rocks

向吉 秀樹^{1*}; 廣野 哲朗²

MUKOYOSHI, Hideki^{1*}; HIRONO, Tetsuro²

¹ 島根大学大学院総合理工学研究科地球資源環境学領域, ² 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

¹Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University, ²Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

地震時の断層面での摩擦発熱履歴の評価は、地震の滑り挙動およびメカニズムの理解において極めて重要である。近年、過去に活動した断層の摩擦発熱履歴の評価手法として炭質物ラマン温度計を断層摩擦発熱の評価に応用する試みがなされつつある。

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）、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）、1999 年台湾集集地震で活動したチェルンプ断層の 3 つの断層を対象に、断層岩中に含まれる炭質物および段階加熱処理を施した断層近傍の母岩中に含まれる炭質物のラマン分光分析を実施し、断層摩擦発熱のような瞬間加熱に伴う炭質物のラマンスペクトルの変化について調べた。またこれらのスペクトルの変化と、続成作用に伴う炭質物の熱熟成におけるラマンスペクトルの変化との比較も行った。

断層摩擦発熱のような短時間の被熱と、続成作用に伴う炭質物の熱熟成とは、ラマンスペクトルの変化の仕方、すなわち炭質物の分子構造の変化の仕方が異なることが明らかとなった。このことは、近年開発されつつある炭質物のラマン地質温度計を断層中の炭質物の摩擦発熱温度の評価には応用できないことを示している。

本発表では、断層摩擦発熱のような短時間の被熱による炭質物のラマンスペクトルの特徴について紹介する。また、断層岩中の炭質物の摩擦発熱レベルを評価する方法として、断層母岩中に含まれる炭質物を出発物質として、その炭質物の加熱実験を行う方法を提案する。加熱した母岩中炭質物のラマンスペクトルの変化を定量的に評価することにより、断層摩擦発熱レベルを評価できると考えられる。

キーワード: ラマン分光分析, 炭質物, 摩擦発熱

Keywords: Raman spectroscopy, carbonaceous material, frictional heat

赤外・ラマン分光および熱分解GC/MSを用いた断層中の炭質物変化の検出 Changes in carbonaceous materials from the fault rock detected by IR-Raman spectroscopies and Py-GC/MS

廣野 哲朗^{1*}; 藪田 ひかる¹
HIRONO, Tetsuro^{1*}; YABUTA, Hikaru¹

¹ 大阪大・理・宇宙地球科学

¹Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

To understand the mechanism of fault lubrication during the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake, we developed a new temperature proxy for carbonaceous materials by using infrared and Raman spectroscopies together with heating and friction experiments. We found marked anomalies in the infrared and Raman spectra of carbonaceous materials retrieved from the primary slip zone of the earthquake: the infrared spectra exhibited very weak aliphatic CH₂ and CH₃ peaks and aromatic C=C absorbance peaks, and the Raman spectra exhibited very weak disordered and graphitic bands and a high ratio of disordered band area to graphitic band area. Those weak peaks and bands and the band area ratio were reproduced by heating carbonaceous materials from the nearby host rock to 700 C. These results suggest that the frictional heat in the slip zone reached approximately 700 C. We characterized the host rock carbonaceous materials by means of elemental analysis, pyrolysis?gas chromatography?mass spectrometry, and simultaneous thermogravimetry?differential scanning calorimetry and found that the H/C and O/C ratios were 0.108 and 0.400, respectively (which are close to the ratios for lignin) and that the volatile fraction was as high as 48 wt %. The pyrolysates obtained by heating from 100 to 400 C were dominated by phenols, fatty alcohols, and n-alkanes. When the residue from pyrolysis at 100?400 C was rapidly heated to 700 C, the resulting pyrolysate was dominated by phenols, aromatic compounds, heterocyclic compounds, and n-alkenes. This information suggests that changes in the infrared and Raman spectra with increasing temperature may have been due to decomposition and aromatization reactions during pyrolysis. Rapid heating during earthquake slip may promote reactions of carbonaceous materials that are different from the reactions that occur during long-term metamorphism.

キーワード: 炭質物, 赤外分光, ラマン分光

Keywords: carbonaceous material, IR spectroscopy, Raman spectroscopy

断層摩擦に対する鉱物粒子の形状と吸着水の影響 Effects of morphology of minerals and adsorbed water on the friction in faults

佐久間 博^{1*}; 河合 研志²; 片山 郁夫³; 末原 茂¹; 田村 堅志¹
SAKUMA, Hiroshi^{1*}; KAWAI, Kenji²; KATAYAMA, Ikuo³; SUEHARA, Shigeru¹; TAMURA, Kenji¹

¹ 物質・材料研究機構, ² 東京大学, ³ 広島大学

¹National Institute for Materials Science, ²University of Tokyo, ³Hiroshima University

岩石・鉱物間の摩擦は、地震に関連した断層すべりや地滑りを理解する上で重要である。本研究では断層の最大摩擦係数に着目する。多くの岩石・鉱物の最大摩擦係数は0.6~0.8の範囲にあることが知られている [1]。しかしながら雲母・粘土鉱物は例外的に小さな最大摩擦係数 (0.1~0.8) を示し [1]、吸着水の影響を強く受ける [2]。断層には雲母・粘土鉱物が存在する場合があるため、これらの雲母・粘土鉱物がなぜ低摩擦係数を示し、吸着水の影響を強く受けるのかを知る必要がある。

これまで層状の雲母・粘土鉱物の低摩擦係数の要因は、層間結合エネルギー (interlayer bonding energy, ILBE) と相関があると考えられていた [2,3]。しかしながら、まだこの仮説は議論が続いており、結論が出ていない [4]。本研究では、代表的な雲母・粘土鉱物に関して ILBE を第一原理電子状態計算から導出し、この仮説の妥当性を検証する。また単結晶の白雲母を用いた摩擦すべり実験から、粉末の白雲母結晶のすべり面が (001) に集中するかについて考察する。

これまで湿度制御下の摩擦すべり実験から、ごく微量の吸着水が摩擦すべりに大きな影響を与えたと考えられており、Morrow et al. (2000) [2] が種々の鉱物粉末に関して最大摩擦係数に対する吸着水の影響を考察している。しかしながら、直接吸着水の存在を確認しつつ、その影響を調べた実験はない。吸着水は鉱物表面に吸着した数分子層程度の水であり、厚みは 1 nm 以下である。このような吸着水の物性は、鉱物表面の状態に依存する。本研究では、白雲母表面に接する塩水の組成を変えることにより、吸着水が最大摩擦係数に影響を与えるかを直接計測することを目指した。また吸着水の安定性を電子状態計算から評価した [5]。

以上の研究結果をもとに、雲母・粘土鉱物の最大摩擦係数を規定する要因を議論する。

References

- [1] Byerlee, J. (1978) *Pure Appl. Geophys.* **116**, 615-626.
- [2] Morrow et al. (2000) *Geophys. Res. Lett.* **27**, 815-818.
- [3] Moore, D.E. and Lockner, D.A. (2004) *J. Geophys. Res.: Solid Earth* **109** B03401.
- [4] Behnsen, J. and Faulkner, D.R. (2012) *J. Struct. Geol.* **42**, 49-61.
- [5] H. Sakuma (2013) *J. Geophys. Res.: Solid Earth* **118** 6066-6075.

キーワード: 層間結合エネルギー, 最大摩擦係数, 粘土鉱物, 雲母, 水

Keywords: Interlayer bonding energy, maximum friction coefficient, clay minerals, mica, water

チャート中の断層におけるシリカゲル層の形成過程 Formation process of a silica gel layer along a fault in chert

堤 昭人^{1*}; 三宅 亮¹
TSUTSUMI, Akito^{1*}; MIYAKE, Akira¹

¹ 京都大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Kyoto University

Previous experimental studies have demonstrated that fault weakening in siliceous material occurred at relatively low slip velocities ($V > 0.01$ mm/s) [Goldsby and Tullis, 2002; Di Toro et al., 2004; Hayashi and Tsutsumi, 2010], under which conditions transformation reactions (e.g., melting, decomposition, etc) are unable to proceed because of low temperatures. Formation of a silica gel (hydrated amorphous silica) layer within a siliceous rock has been suggested for a possible cause of the weakening behavior [Goldsby and Tullis, 2002]. However, there exists only limited information on the frictionally generated material on faults in quartz-rocks. To get a better understanding of fault zone process in siliceous material, we have performed intermediate-velocity friction experiments on chert samples and have performed transmission electron microscope (TEM) studies of the fault surface material.

Friction experiments were performed on chert at intermediate velocity ($V = 104$ mm/s) and at low normal stress of 1.5 MPa. As has been reported preliminary in Hayashi and Tsutsumi (2010), fault weakening in chert samples occurred in association with the formation of a 0.1-mm-thick fault gouge layer. SEM observations on the fault surfaces revealed that the fault surfaces consisted of smooth and rough parts, with the smooth parts probably corresponding to the area with vitreous luster. On the smooth part of the surfaces, rod-shaped particles (1 to 5 μm long with a diameter of ~ 0.5 μm), aligned perpendicular to the sliding direction, probably indicating that they were rolled during the experiment [Hayashi and Tsutsumi, 2010]. These particles have been termed "rolls".

The samples for TEM studies were prepared with an application of a focused ion beam (FIB) system. Cross-sections of the fault surface were prepared so that rolls and the substrata interface could be observed using TEM. During the preparation, we paid attention to the cutting direction; rolls were cut perpendicular to their long axes. TEM observations revealed the following characteristics of the experimentally generated fault surface material in chert: (1) the smooth fault surface consist of several hundred-nm-thick amorphous silica layer. (2) Rolls exist on the smooth fault surface and are in contact with the amorphous silica layer. (3) Rolls are made of amorphous silica. The result from TEM observation implies that the rolls observed on the smooth fault surface are formed via a process of consuming the thin amorphous silica layer.

Hayashi and Tsutsumi (2010) showed that the fault gouge consists of a mixture of hydrated amorphous silica and quartz grains. The thin, several hundred-nm-thick amorphous silica layer formed on the fault surface would be a likely candidate for the source of the hydrated amorphous gouge material (silica gel layer).

References

- Goldsby and Tullis, 2002, *Geophys. Res. Lett.*, 29(17), 1844, doi:10.1029/2002GL015240.
Di Toro et al., 2004, *Nature*, 427, 436-439, doi:10.1038/nature02249.
Hayashi and Tsutsumi, 2010, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L12305, doi:10.1029/2010GL042943, 2010.

キーワード: シリカゲル, 非晶質シリカ, 岩石摩擦, チャート

Keywords: silica gel, amorphous silica, rock friction, chert

コスタリカ沖プレート沈み込み帯に持ち込まれる生物起源堆積物の摩擦特性に関する実験的研究 Experimental study on frictional properties of biogenic sediments entering the Costa Rica subduction zone

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

プレート沈み込み帯において、巨大地震をはじめ、スロースリップやサイレント地震など様々なタイプの地震が観測されている。プレート境界断層物質の摩擦特性は、このような様々なすべり挙動に大きく影響すると考えられている (Bilek and Lay 1998 など)。近年、特に南海トラフの粘土質堆積物については研究が進み、その摩擦特性が明らかになってきた (Brown et al. 2003 など)。しかし、粘土質堆積物以外の沈み込み帯のプレート境界断層物質の摩擦特性はほとんど明らかになっていない。本研究では、海洋底の広い地域に分布する生物起源堆積物に着目し、コスタリカ沖の中米海溝に持ち込まれる珪質・石灰質軟泥の摩擦特性を明らかにすることを目的とした研究を行った。

これまでの研究で、珪質・石灰質軟泥は、粘土質堆積物とは異なる以下のような摩擦特性を示すことが明らかになってきた：①0.6—0.8 という高い摩擦係数の定常値を示す。②0.0028—0.28 mm/s の速度域で摩擦が負の速度依存性を、0.28—2.8 mm/s の速度域で正の速度依存性を示す。③のように、摩擦が負のすべり速度依存性を示すという特徴は、珪質・石灰質軟泥中の断層部分で開始するすべりが不安定すべりとなる可能性を示唆しており重要である (Namiki et al. 2014)。

このような特徴的な摩擦特性を示す要因を探るため、珪質・石灰質軟泥の組成の端成分である非晶質シリカを用いた摩擦実験を行うことを試みた。ここでは、天然試料中の粒径や生物の殻の複雑な形状を再現するため、酸処理により珪質・石灰質軟泥中のカルサイトを除去することで非晶質シリカを抽出し、実験試料とした。非晶質シリカは以下の摩擦特性を示した：①およそ 0.6 という高い摩擦の定常値を示す。②0.0028—2.8 mm/s の速度域で摩擦が負の速度依存性を示す。③すべり速度ステップ時の摩擦応答において、速度が速い程 D_c の値が大きくなるという点が珪質・石灰質軟泥と類似している。しかし、速度ステップ時のピークは見られない。

上記の結果より、非晶質シリカは珪質・石灰質軟泥に近い摩擦強度を示すことが明らかになった。摩擦の速度依存性について、珪質・石灰質軟泥が数 mm/s で正の速度依存性を示すのは、非晶質シリカとカルサイトの混合による影響であると考えられる。

珪質・石灰質軟泥の実験後の試料には、珪質および石灰質な生物殻の非対称構造や定向配列といった変形構造が見られた。すべりの局所化はなく、断層帯全体に渡って変形構造が分布している。これは、Ikari et al. (2011) でモデルが示されている正の速度依存性を示す断層の構造に類似している。観察したのは 0.28—2.8 mm/s の速度域において正の速度依存性を示した試料であり、先行研究と矛盾しない。

キーワード: 沈み込み帯, 摩擦実験, CRISP

Keywords: subduction zone, frictional experiment, CRISP

スメクタイトの昇温摩擦実験による不安定すべりの検証 Verification of unstable frictional behavior for smectite as elevated temperature

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

¹ 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻
¹Hiroshima 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、防災の観点から重要である。沈み込み帯における地震発生帯の上限領域は温度にして 150°C までで起こるとされている。地震発生帯の上限を決めている要因は諸説あるが、その中の一つに粘土鉱物の脱水により未固化の断層ガウジ物質が固化することによって上盤側のプレートと沈み込む海洋プレートを接着させる役割を果たし、非地震性の安定すべりから地震性の不安定すべりへとすべり挙動を変化させることが原因ではないかという説がある。沈み込み帯の深さで実現される最初のもっとも重要な相転移は 100°C – 200°C の間で起こるスメクタイト-イライト相転移である。スメクタイトは膨潤性の高い鉱物として知られ、水に飽和した環境下では体積が約8倍になる。Marone and Scholz (1988) は水に飽和し未固化の断層ガウジ物質が浅部での非地震発生に関係していることを報告しており、Ikari et al. (2007) では粘土鉱物の層間に含まれる水が摩擦の速度依存性や強度に影響を与えることを報告している。先行研究では層間に含まれる水の存在により安定すべりを示すことが調べられたが、脱水が起こるような昇温時の実験は行われておらず、また脱水にいたるまでの過程の中でどのように不安定な摩擦挙動に遷移していくのかを調べたものはない。

そこで本研究では、昇温時の粘土鉱物の層間水の脱水が摩擦特性に与える影響を調べ、粘土鉱物の脱水が地震性のすべりの挙動を起こし地震発生帯の上限となるかどうかを議論した。

[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ブ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。擬似断層物質に用いた試料は東北地方の凝灰岩層から採取された Ca-smectite で、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 60MPa の一定垂直応力下で実験を行った。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。鉛直方向の変位速度は $0.4\ \mu\text{m/s}$ に設定し、摩擦試験中上記の速度を一定に保ち、温度は $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の一定速度及び $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の一定速度の2種類の速度で昇温させ、昇温とともに遷移する摩擦挙動の変化をモニタリングした。

[結果, 考察] 定常状態に達するまで試料周りの温度を室温に保ったまま剪断を行い、定常状態に達したところで昇温を開始した。低温から高温になるに従って、摩擦挙動は3つの領域に分けられる遷移を示した。1. 摩擦強度が減少する領域、2. 摩擦強度が上昇する領域、3. 持続的なスティック-スリップ (不安定すべり) が観察される領域の3つである。1. 摩擦強度が減少する領域の領域では層間に存在する水が膨張することによってガウジの層間の結合が弱まり結果的に摩擦挙動が減少したのではないかと考えられる。2. 摩擦強度が上昇する領域の領域では層間の水が蒸発し結合が強くなったことによるのではないかと考えられる。3. の領域では温度の上昇に伴い、持続的なスティック-スリップの挙動を観察したが、Rabinowicz (1956) で示されるすべりの不安定条件を満たすことによって、すべりの不安定は起こすことが可能だが、持続的なスティック-スリップを示すシステムは摩擦がすべり速度弱化を示さなければならないことが知られている。本実験ではストレスドロップを伴う不安定な摩擦挙動が減衰することなく持続的に現れたことから、高温域で地震性の摩擦に遷移したと考えられる。以上のことから、断層物質、主に粘土鉱物に温度が与える影響は大きくすべりの挙動を不安定なものへと遷移させていき、また同時に層間に存在する水が摩擦特性に与える影響が大きいと考えられる。

キーワード: 昇温摩擦実験, 沈み込み帯における地震発生帯の上限, スメクタイト-イライト相転移, 粘土鉱物の摩擦特性, 摩擦特性に与える温度効果, 摩擦特性に与える層間水の効果

Keywords: frictional experiments under rising temperature, the updip limit along subducting plate, smectite-illite transformation, frictional property for clays, the effect of temperature, the effect of interlayer water

摩擦発熱が断層ガウジの高速弱化の原因：ホスト試料の熱伝導率を変えた実験からの類推
Frictional heating causes high-velocity weakening of gouge; inference from specimens with different thermal conductivity

嶋本 利彦^{1*}; Yao Lu¹; Ma Shengli¹; Niemeijer Andre²
SHIMAMOTO, Toshihiko^{1*}; YAO, Lu¹; MA, Shengli¹; NIEMEIJER, Andre²

¹ 中国地震局地質研究所, ² ユトレヒト大学地球科学部

¹Institute of Geology, China Earthquake Administration, ²Department of Earth Sciences, Utrecht University

断層ガウジが高速ですべる時に摩擦強度が著しく低下する原因として、(1) 摩擦加熱による温度上昇、(2) 粉体潤滑 (powder lubrication)、(3) シリカゲルなどの弱い物質の形成、などが提唱されてきた。ガウジを挟むホスト試料として岩石を使った実験では、摩擦すべり中のガウジの温度を変えるためには、すべり速度・垂直応力などの変える必要があった。しかしそれによってガウジの変形機構も変わってしまう可能性があり、摩擦発熱による温度上昇の影響を分離することが難しかった。講演では、異なる熱伝導率をもつホスト試料を使うことによって同じ速度・垂直応力下でガウジのスリップ・ゾーン中の温度を変えることが可能であり、実験結果は摩擦発熱がガウジの高速弱化において重要であることを論じたい。

高速摩擦実験では岩石の強度は熱破壊によって数 100 分の 1 に減少してしまうために、数 MPa 以上の垂直応力下で高速摩擦実験をすることは難しい (ホスト試料が破壊してしまう)。岩石をアルミウム管で補強すると 30MPa 程度の垂直応力下で実験をすることが可能だが、金属の摩擦または溶融の影響がはいつてくる。我々は、より高速摩擦実験を高圧条件下に拡張するためのサンプル・セルの開発を模索していたが、岩石とよく似た挙動をする材料をみつけることが課題であった。共著者の AN によって TiAlV 合金が岩石に近い熱伝導率をもつことを見いだされたので、熱伝導率の異なる物質でホスト試料を作り、龍門山断層ガウジ (Hongkou 露頭から採取; イライト 47%, 石英 41%, スメクタイト 3%, カオリナイト 3%, 緑泥石 2%) を使って摩擦挙動を比較することにした。実験は中国地震局地質研究所の回転剪断式低速～高速摩擦試験機を使用して、0.5, 1.0, 2.1 m/s のすべり速度、1 MPa の垂直応力下でおこなった。ホスト試料としては、ガブロ (熱伝導率 3.3 W/mK)、TiAlV 合金 (同 5.8 W/mK)、ステンレス鋼 (同 15 W/mK)、真鍮 (同 123 W/mK) を用いた。その結果、熱伝導率の低いガブロと TiAlV 合金は著しいすべり弱化を示すのに対して真鍮はほとんどすべり弱化を示さず、ステンレス鋼はそれらの中間的な挙動を示すことがわかった。ホスト試料中の温度測定および COMSOLE による有限要素法解析によって、それらの 4 種類のホスト試料を用いることによって、外側半分のガウジのスリップ・ゾーンでは 90 から 300 °C にいたる平均温度が達成できたことがわかった。実験終了時の摩擦係数は平均温度の上昇にともなって 0.65 から約 0.1 に系統的に減少することが判明した。この実験結果は温度上昇が本質的にガウジの高速弱化をもたらす上で重要であることを示している。粉体潤滑では結果を説明できない。我々は改良された flash heating 理論 (Rice, 2006, JGR; Noda, 2008, JGR; Proctor et al., 2014, JGR; Platt et al., 2014, AGU) と実験結果の比較を始めている。また、TiAlV 合金は高圧用のサンプル・セルを作る材料として有望である。

キーワード: 断層ガウジ, 断層の摩擦, 断層の高速弱化, 高速摩擦実験

Keywords: fault gouge, friction of fault, high-velocity weakening of fault, high-velocity friction experiments

Thin share localization in matured mylonitic rock Thin share localization in matured mylonitic rock

高橋 美紀^{1*}; van den Ende Martijn²; Niemeijer Andre²; Spiers Chris²
TAKAHASHI, Miki^{1*}; VAN DEN ENDE, Martijn²; NIEMEIJER, Andre²; SPIERS, Chris²

¹産総研活断層・火山研究部門, ²HPT Lab., Faculty of Geosciences, Utrecht University

¹IVGE, GSJ, AIST, ²HPT Lab., Faculty of Geosciences, Utrecht University

Textures of deformation in fault rock are the results from every history of deformation they had been conducted, and the textures correspond to these deformation conditions, such as pressure, temperature and strainrate. In nature, deformation mechanism at earthquake preparation (aseismic) stage is of ductile forming the mylonite. Therefore, to reproduce more realistic fault behavior at the brittle-ductile transition regime, we carried out large jump experiment in the sliding velocity on brine saturated halite (80 wt.%) - muscovite (20 wt.%) mixed gouges after making the mature mylonitic texture in the gouges, using a rotary shear testing machine set at Utrecht University, Netherlands.

In mylonite, one of the fault rocks formed under ductile deformation condition (high temperature and low strainrate), we often found narrow strain localized zones, such as pseudotakylite with mm-scale of width. Our question from the nature is how to generate the strain localization in the mylonite, in order to know how deformation style changed from ductile (aseismic) to brittle (co-seismic). Here we experimentally investigated the strain localization process in rocks having ductile, matured mylonitic structure. We carried out rotary shear experiments on brine saturated halite - muscovite mixed gouges (5 g in weight, c.a. 1 mm in thickness) under 5 MPa in normal stress, room-temperature and various strainrate (from $3 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ to 0.1 sec^{-1}) conditions, which were well-known analog of the fault rock consisting of quartz and phyllosilicate (e.g., Bos and Spiers, 2002; Niemeijer and Spiers, 2006). Additionally, deformation features on the mixed gouges were well-known to show very various on both the strength and the texture, depending on the strainrate. At lower strainrate ($< 1 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$), the deformation feature was characterized by velocity-strengthening and mylonitic texture. On the other hand, at higher strainrate ($> 1 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$), that showed velocity-weakening and chaotic texture.

In our experiments, we gave a large jump in sliding velocity after forming matured mylonitic texture on the mixed gouge. That large jump of 2.5- or 3.5-digit increases in the sliding velocity simulated earthquake nucleation or propagation in the mylonite. Microstructural observations on the experimental products indicated possible evidences of the strain localization caused by the high-speed rotation. The strain localization occurred only at $10 \mu\text{m}$ zone near a boundary surface of the ring shear. In that thin localized zone, grains of halite were crushed. Except the thin localized zone, the mylonitic texture has been completely remained. It was similar to the natural mylonite associated with narrow zones of the pseudotakylite.

We also measured changes in frictional strength after the velocity jump, showing abnormally large increase in the strength at instantaneous response and some delay to start evolutionally-weakening in the strength. It means that the rate and state friction law (RSF law) could not hold for a case changing the deformation style from the ductile to the brittle.

The strainrate during long term aseismic period is very low. Therefore domestic texture controlling mechanical behavior in a seismic-aseismic cycle is "mylonite" at the brittle-ductile transition regime. We revealed, in this experiment, that the matured mylonite texture never be completely broken (not chaotic), but localizes the deformation in one or several narrow shear zones at earthquake nucleation or rupture propagation. This feature is consistent with the natural observation, narrow pseudotakylite zones developed in the mylonite. The mechanical behavior of the mylonite at the earthquake would not obey the RSF law.

南海付加体内部の粘弾性特性：掘削カッティングス試料を用いたインデンテーション試験による解析
Viscoelasticity of the Nankai accretionary prism: Indentation test on sediments from NanTroSEIZE Expedition 348

北村 真奈美^{1*}; 曾根 大貴²; 北島 弘子³; 廣瀬 丈洋⁴
KITAMURA, Manami^{1*}; SONE, Hiroki²; KITAJIMA, Hiroko³; HIROSE, Takehiro⁴

¹ 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学, ² ドイツ地球科学研究センター, ³ テキサス A&M 大学, ⁴ 海洋研究開発機構高知コア研究所

¹Hiroshima University, ²German Research Centre for Geosciences, ³Department of Geology and Geophysics, Texas A&M University, ⁴JAMSTEC/Kochi

沈み込み帯地震の発生場である付加体を構成する堆積物の粘弾性的挙動は、プレート境界および付加体内部での地震ひずみエネルギーの蓄積過程を規定している可能性がある。IODP NanTroSEIZE 第 348 次研究航海では、超深度ライザー掘削孔 Site C0002 において、熊野海盆及びその下部に位置する中新世付加体について海底面下 3058m (以下, mbsf) まで掘削に成功し、カッティングス試料とコア試料が採取された。本研究では、本航海より採取されたカッティングス試料を用いて、南海付加体の堆積物の粘弾性的性質(応力歪み曲線・弾性率・降伏応力・応力緩和係数等)が深度方向約 2km にわたって連続的にどのように変化するかをインデンテーション試験から調べた。

インデンテーション試験は、直径 4mm のサファイアの球状圧子を用いて、載荷速度は秒速 0.5N, 最大荷重は 180N とした。試験は、室温・大気圧下において、人工海水で飽和させた試料について排水条件下でおこなった。試料は、SiteC0002 において 870mbsf~3058 mbsf で得られたカッティングス試料の中から、固結したもののみを取り出した hand-picked intact cuttings 試料を用いた。試験の結果、Site C0002 におけるヤング率は、870mbsf~2000mbsf にかけて 0.1GPa から 1.5GPa 程度まで増加し、その後 3000mbsf まで 1.5GPa 程度とほぼ値が変わらないことが明らかになった。また得られた荷重-軸変位曲線より、堆積物は 1200mbsf 程度までは降伏応力が数 MPa 程度であり延性的な挙動をするのに対し、深くなるにつれて降伏応力が 3000mbsf では 40MPa 程度まで増加し、2000mbsf 以深では降伏後の破壊に伴って顕著な応力降下が観察された。間隙圧も海底面では 60%を示すものが、深くなるにつれて 1500-2000mbsf では 30 %程度、3000mbsf では 18 %まで減少することから、力学挙動の変化は主に堆積物の圧密によるものと考えられる。このような力学的性質は、南海付加体では地下 1km から 2km の間に、塑性-脆性遷移帯が存在する可能性を示唆している。南海地震の歪みは、このような地下 2km 以深の脆性域で蓄積されていると考えられる。

キーワード: 粘弾性, 付加体, インデンテーション試験, IODP, 第 348 次研究航海
Keywords: Viscoelasticity, accretionary prism, Indentation, IODP, Expedition 348

跡津川断層近傍における変形運動と応力蓄積過程 Crustal deformation and stress accumulation process in and around the Atotsugawa fault system

高田 陽一郎^{1*}
TAKADA, Youichiro^{1*}

¹ 京都大学防災研究所

¹ Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

跡津川断層は岐阜・富山県境付近を走る横ズレ型活断層で、明瞭な地震列や断層地形により古くから研究の対象となっている。私は近年跡津川断層で行われた（あるいは行われている）2つの大規模な観測プロジェクトに関わっている。一つは2004年から2008年まで行われた大学合同の微小地震観測である。私はこのデータからメカニズム解を決定し、それらを用いて応力場とその蓄積メカニズムを推定している。もう一つのプロジェクトは、GNSS観測とInSAR解析を併用することで、この地域の地震間地殻変動を面的に捉えることを目指すものである。これら2つのプロジェクトは同じ現象の異なる側面を見ているようでいて、実はその保障は無い。一般に、応力場は長い時間スケールの断層運動の蓄積によって形成されるのに対し、GNSSやInSARで捉えられる変位場はより短い時間スケールの断層すべりの不均質性を反映するからである。しかし、世界を見渡すと、こうした測地的な変位速度パターンとより長い時間スケールの地形発達過程の間には強い相関があることが知られている。そこで、本発表では、まず応力蓄積過程を説明するような物理モデルを提示し、それとGNSSやInSARデータとの整合性と矛盾点を議論したい。私は跡津川断層の浅部や中央部がより深い部分、および断層両端の火山地域（白山・立山）に対してすべり遅れていると仮定し、粘弾性ディスロケーションモデルから応力を計算した。その結果、応力インバージョンから得られた応力軸の回転は数十メートルのすべり遅れで説明できることが明らかになった。一方、ALOS/PALSARを用いたInSAR時系列解析の結果をGNSSデータで補正した結果は、牛首断層近傍に歪速度が集中していることを示しており、局所的には断層モデルと整合的でない。しかし、これは平均速度場を直接GNSSデータで補正した結果であり、本来は個々の干渉画像を補正してから時系列解析を行った結果で置き換える必要がある。こうして得られた最新の成果について、モデルとの整合性を検討する。

キーワード: 跡津川断層, 応力場, GNSS, 干渉合成開口レーダー
Keywords: Atotsugawa Fault, Stress Field, GNSS, InSAR

2011年東北地方太平洋沖地震の発生直後の震央海底水温の急上昇 An abrupt seafloor water-temperature increase in the epicentral region of the 2011 Tohoku earthquake

稲津 大祐^{1*}; 伊藤 喜宏²; Saffer Demian³; 日野 亮太⁴
INAZU, Daisuke^{1*}; ITO, Yoshihiro²; SAFFER, Demian³; HINO, Ryota⁴

¹ 東京大学, ² 京都大学, ³ ペンシルバニア州立大学, ⁴ 東北大学

¹The University of Tokyo, ²Kyoto University, ³The Pennsylvania State University, ⁴Tohoku University

東北沖地震時に震源直上において海底圧力が8点で計測されていた。これらの海底圧力計には計測の温度補償のための温度計が内蔵されている。その温度記録は外部温度(海底水温)に対し、10-20分程度の遅れ時間で応答しており、海底水温のよい proxy として使える。前回の連合大会では以下のことを紹介した(稲津ほか 2014 JpGU)。東北沖地震の発生から数時間してから、海溝に近い3000-6000m水深の2観測点において、ほぼ同時に海底水温が上昇し始め、さらに数時間かけて0.1°C上昇した。この異常は短くとも10日ほど継続していた。それより水深の浅いところでは、同様な異常は計測されなかった。今回、その温度異常を説明するシンプルな地球物理学モデルを考察した。まず、2点で温度上昇したことから、大雑把に必要な熱量を見積もると $4 \times 10^{16} \text{J}$ であった。さらに数時間かけて温度上昇したことからフラックスは $2 \times 10^{12} \text{J/s}$ であった。これらの数字は、プレート拡大軸でよく見られる hydrothermal vent system における mega plume (爆発的噴火)と類似しているため、似たような爆発的現象が起こったと考え、hydrothermal plume model (Wilcock 1997 JGR) を当てはめた。ここで、東北沖地震における分岐断層を熱流路(Tsuji et al. 2013 EPSL)としてモデル化した。すると熱の噴出口での温度が約200°Cと見積もられた。そして、東北沖地震のプレート境界の地震時すべりを代表パラメータとする摩擦熱(Kano et al. 2006 GRL)を熱源とする移流拡散モデルを当てはめると、海底における200°Cが無理なく説明できる。JFASTによるプレート境界の温度計測に基づく東北沖地震の地震時摩擦熱(Fulton et al. 2013 Science)を踏まえ、この摩擦熱の一部が分岐断層を伝って海底に漏出したと考えた。

キーワード: 東北沖地震, 海底, 水温

Keywords: Tohoku earthquake, seafloor, water temperature

H行列法を適用した大規模準動的地震発生サイクルシミュレーション Large-scale earthquake cycle simulations with Hierarchical Matrices Method

大谷 真紀子^{1*}; 平原 和朗¹
OHTANI, Makiko^{1*}; HIRAHARA, Kazuro¹

¹ 京大・理
¹Sci., Kyoto University

近年、地震計・GPS(Global Positioning System)観測網の発達により、沈み込み帯プレート境界では巨大地震やスロースリップを含む様々な時空間スケールのすべりが発生していることが分かってきた。これらはプレート境界面上で密に分布しており、互いに影響を及ぼし合っていると考えられる。例えば Ariyoshi et al. (2014) では、南海トラフを想定し、深部・浅部低周波地震の活動度が巨大地震発生域のプレート境界の固着状態を示すバロメータとなりうる可能性を示した。このように、プレート境界面上で発生する様々なすべり現象の相互作用を検証することで、巨大地震の発生予測に関する知見が得られる可能性がある。すべり現象の相互作用の検証には地震発生サイクルシミュレーション (ECS: Earthquake Cycle Simulation) が有効である。ECS とは、プレート境界面上での摩擦を仮定し、「プレートの沈み込みによる応力蓄積→地震等による応力の解放→応力蓄積」をくりかえす地震発生サイクルを計算機上でシミュレートする。地震の応力蓄積過程から破壊に至るまでの期間を対象とするため、様々な時空間スケール・タイミングで発生する多様なすべり現象を同時に考慮することができる。本講演では、実際の巨大地震発生領域を対象に大規模 ECS を行う際の課題及びそれに対する取り組みについて議論する。

マルチスケールなすべり現象を考慮するには広い計算領域及び細かい解像度が必要となり、計算量の点で問題がある。このような大規模問題に対しては、通常計算量の少ない境界要素法が用いられ、また慣性の項を近似した準動的スキームが用いられる。このとき総離散断層セル数 N に対して計算量は $O(N^2)$ であり、大規模問題の実現にはさらなる計算の省メモリ化・高速化が必要となる。

本研究では、準動的 ECS の高速化手法として H 行列法を用いる。H 行列法とは Hackbush (1999) により考案された密行列圧縮手法であり、対角部に大きい値を持ちそこから離れるに従って小さな値をもつような行列に適用できる。対象となる行列を、対角部は小さな小行列・対角部から離れるに従って大きな小行列となるように階層的に分割し、各小行列内で低ランク近似を行うことで、効率的な圧縮を実現する。準動的 ECS では、断層面上の応力を算出する際にすべり応答行列 \times すべりを計算する。すべり応答行列は、行・列方向それぞれに一次的にならべた断層セル列を source, receiver として対応させたときの、行・列方向断層セル j, i に対するすべり応答関数 K_{ij} を要素とする。 K_{ij} は j, i セル間の距離に従って減衰するため、断層セルが距離順に並べられている場合に H 行列法適用可能な行列となる。本研究ではライブラリ HLib を用いて H 行列を作成している。H 行列法の適用により、計算量は $O(N^2)$ から $O(N) \sim O(N \log N)$ へと削減された。

また、現状の ECS では取り入れられていない効果も多い。実際の巨大地震発生領域を対象とする際には、どれだけ現実的なモデル設定が必要であるのかを知るためにも、これらの効果を検証する必要がある。本研究では形状の効果に注目し、準動的 ECS への任意の地表面形状の導入を行った。すべり応答関数として解析解が存在するのは全無限または半無限弾性体中における弾性問題のみに対してであり、これらの仮定下での ECS しか行われていない。しかしながら実際の沈み込み帯では地表面は平坦でなく、例えば 2011 年東北地方太平洋沖地震の発生した宮城沖では、海溝軸は最大で 7km 落ち込んだ位置にあり、地表面は平坦であるとはいえない。

そこで本研究では、Hok and Fukuyama(2011) の動的破壊モデルにおいて地表面を考慮する方法を用いて、任意の地表面形状が存在するときのすべり応答関数を解析的に求める方法を構築し準動的 ECS における地表面形状の効果を検証した。沈み込み帯海溝付近で一般的な、海溝軸から陸地に向かって上に凸な地表面形状を設定すると、海溝軸の位置に平坦な地表面を設定した場合にくらべて、地表面の効果は小さくなる。これは主に断層面から地表面への距離が変化することによるといえる。また問題によってはすべりの様相が変化する場合があるので注意が必要であるということが分かった。すべりの様相が変化する任意の地表面形状の導入により、複数のプレートにまたがるような広い領域をモデル領域とすることが可能となった。本研究により解析的に求めたすべり応答関数においても H 行列法を適用することができ、大規模問題への適用も可能であると考えられる。

キーワード: 準動的, 地震発生サイクル, H 行列法
Keywords: quasi-dynamic, earthquake cycle, Hierarchical Matrices method

沈み込み形状を考慮したスロースリップイベントの数値モデル—南海トラフにおけるモデルの Cascadia 地域への適用の試み—
Numerical model of slow slip events with plate configuration -A tentative application of the Nankai model to Cascadia-

松澤 孝紀^{1*}; 芝崎 文一郎²
MATSUZAWA, Takanori^{1*}; SHIBAZAKI, Bunichiro²

¹ 防災科学技術研究所, ² 建築研究所

¹National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ²Building Research Institute

スロースリップイベント (SSE) や深部低周波微動の発生は、南海トラフだけでなく北米 Cascadia 地域など多くの沈み込み帯で報告されている。これまで我々は、南海トラフにおいて繰り返し発生する SSE のモデル化を行い、その特徴をある程度再現することに成功している (例えば, Matsuzawa et al., 2013)。しかしながら、この数値モデルが SSE を再現するモデルとして普遍的なものであるかについては、他地域の活動に対しても同様にモデル化し、その結果を検討していくことが重要である。現在、南海トラフでのモデル化と同様のアプローチにより、Cascadia 地域における SSE の再現を試みており、本発表ではその結果を報告する。

数値モデリングにおいては、Shibazaki et al. (2012) や Matsuzawa et al. (2013) と同様に、境界の摩擦係数としてカットオフ速度を考慮したすべり速度・状態依存摩擦則を仮定した。また南海トラフと同様に実際の微動分布に基づいて、SSE 領域を設定しており、微動のカタログについては、Wech (2010) のシステムによって決定され配布されている、2012-2013 年の微動を用いた。Matsuzawa et al. (2013) と同様に SSE の発生する深さでは、有効法線応力が低くかつカットオフ速度が SSE のすべり速度程度になることを仮定し、また SSE 領域内ではすべり速度・状態依存摩擦則における a-b の値が負、領域外では正となるようなパラメータ分布を仮定した。沈み込むプレートの形状は、McCroery et al. (2004) をもとに約 20 万個の三角形要素を用いて与えており、対象領域は沈み込みに垂直な方向に 1000km の長さをとった。

数値計算結果においては、約 1 年間隔で繰り返し発生する SSE が再現された。また、バンクーバー島南部からオリンピック半島付近では SSE が活発に発生し、その南側領域では比較的活発でないといった地域的な特徴についても、実際の活動と類似している。バンクーバー島南部からオリンピック半島付近ではプレートが湾曲しており、dip 方向の微動域の幅が広がっている。この領域では、up-dip 側と down-dip 側の活動が分離し、up-dip 側の活動の間に down-dip 側で小さな活動が発生している様子がみられた。同様の挙動は、実際の観測においても報告されている (Wech and Creager, 2012)。この特徴は南海トラフでもみられたが、さらに明瞭なものとなっており、Cascadia の結果は、この領域において微動発生域の幅が dip 方向に長くなっていることに起因している可能性が考えられる。以上のように、Cascadia 地域においても、本モデルは SSE の活動の特徴をある程度説明可能であることが示唆される。

キーワード: スロースリップイベント, カスカディア, 数値シミュレーション, すべり速度・状態依存摩擦則
Keywords: Slow slip event, Cascadia, Numerical simulation, Rate- and state-dependent friction law

Shenxigou 地域の龍門山断層帯における炭質物のラマン分光分析 Raman spectroscopic analysis of carbonaceous material in Longmenshan fault zone at Shenxigou

瀨瀬 佑衣^{1*}; 清水 以知子¹; YAO Lu²; MA Shengli²; 嶋本 利彦²
KOUKETSU, Yui^{1*}; SHIMIZU, Ichiko¹; YAO, Lu²; MA, Shengli²; SHIMAMOTO, Toshihiko²

¹ 東京大学大学院 理学系研究科, ² 地震動力学国家重点実験室 中国地震局・地質研究所
¹Graduate School of Science, The University of Tokyo, ²State Key Laboratory of Earthquake Dynamics Institute of Geology, China Earthquake Administration

On 12th May 2008, Wenchuan M_W 7.9 earthquake occurred along the Longmenshan thrust belt between the Tibetan plateau and the Sichuan basin. Shenxigou area is located at the western end of the coseismic faults during the Wenchuan earthquake. The fault zone consists of fault gouge, fine fault breccia, and fault breccia. The gouge zone consists of grayish gouge (GG) and blackish gouge (BG). The breccia zone consists of grayish breccia (GB), blackish breccia (BB), and mixtures (Mix) of GB and BB. The concentrations of organic carbon are reported as less than 1 wt.% in GG and GB, while those in BG and BB are 28 and 36 wt.%, respectively (Wang et al. 2014; Earthquake Science). In the present study, we performed the Raman spectroscopic analysis of carbonaceous material (CM) included in these fault rocks and host sedimentary rocks. In addition to the natural samples, we also analyzed the gouge samples after high-velocity frictional experiment to detect the structural change of CM by frictional heating.

Raman spectroscopic analysis was carried out using 532 nm Nd-YAG laser. The laser power was limited to 0.2 mW to avoid the damage to CM. The CM Raman spectrum was fitted using four peaks (D1, D2, D3, and D4 bands) following the method of Kouketsu et al. (2014; Island Arc). The Raman spectra of CM in GG, BG, GB, BB, and Mix were similar, and all Raman spectra indicated that the structure of CM corresponds to amorphous carbon. This result suggests that the carbons were originated from the organic materials in the host rocks and not concentrated by hydrothermal precipitation. The Raman band width (full width at half maximum; FWHM) of these fault rocks was larger than that of the host rock, and it means that the degree of coalification of CM in the fault rock is lower than the host rock. The estimated metamorphic temperatures using Raman CM geothermometer proposed by Kouketsu et al. (2014) are around 200-230 °C in the fault rocks and 280-300 °C in the host rock. The Raman spectra of CM in the sample conducted on the frictional experiment that was carried out at constant slip rate of 1.4 m/s and normal stresses 0.8 MPa under room humidity conditions using BG also showed no obvious change compare to those of CM before the experiment. In the present study, frictional heating was not detected by the Raman spectroscopy in natural and experimental fault samples. These results indicate that the heating duration of the coseismic slip was insufficient for the studied CM to mature enough.

キーワード: 四川大地震, 龍門山断層帯, 炭質物, ラマン分光分析, 摩擦加熱

Keywords: Wenchuan earthquake, Longmenshan fault system, Carbonaceous material, Raman spectroscopy, Frictional heating

炭質物のラマンスペクトルを用いた断層における摩擦発熱の検出 Detection of past frictional heating on fault from Raman spectra of carbonaceous material

田畑 皓輝^{1*}; 氏家 恒太郎¹; 瀬瀬 佑衣²; 鍵 裕之²
TABATA, Hiroki^{1*}; UJIIE, Kohtarō¹; KOUKETSU, Yui²; KAGI, Hiroyuki²

¹筑波大学, ²東京大学 大学院理学系研究科

¹University of Tsukuba, ²Graduate School of Science, The University of Tokyo

炭質物のラマンスペクトルは、温度上昇に伴って炭質物の構造が変化することにより系統的に変化する。この炭質物の構造変化は圧力に依存せず不可逆的に進行するとされており、炭質物のラマンスペクトルを用いて堆積岩や変成岩が被った最高到達温度を見積もる試みがなされてきた。我々は炭質物のラマンスペクトルが断層における摩擦発熱のような短時間急速加熱の証拠検出に適用できるか探るべく、犬山地域に分布するジュラ紀付加体チャート-碎屑岩シーケンスのスラストシート境界断層を対象に炭質物のラマン分光分析を行った。この断層では、ジュラ系珪質泥岩の上位に三畳系チャートが衝上しており、断層中軸部には厚さ数ミリの暗色層と厚さ5センチのカタクレーサイトが発達する。このうち前者では、断層脈とそこから派生する注入脈、融食・湾入構造、非晶質マトリックス中に晶出した白雲母マイクロライトが認められることから、摩擦熔融物が固化して出来たシュードタキライトであると考えられる。一方、後者は炭素質の黒色粘土マトリックス中に黒色チャートの破碎岩片を含むことで特徴付けられる。炭質物のラマン分光分析は、シュードタキライトとカタクレーサイトを対象に励起光514.5 nmで行った。その結果、シュードタキライトとその近傍2 mmの母岩(チャート)においてD1とD2ラマンバンドの強度比(I_{D1}/I_{D2})の減少とD1バンドの半値幅の減少が認められ、炭質物の熟成度の増加が検出された。一方、シュードタキライトから2 mm以上離れたチャート及びカタクレーサイトとその周囲では I_{D1}/I_{D2} ・D1バンドの半値幅の変化は認められなかった。シュードタキライトとその近傍2 mmのチャートから見出された炭質物の熟成度増加は、摩擦発熱に伴う温度上昇を反映している可能性があり、熱モデリング結果とも調和的であった。以上のことから、炭質物のラマンスペクトルは断層における摩擦発熱の検出に有効であると考えられる。

キーワード: 炭質物, ラマンスペクトル, シュードタキライト, カタクレーサイト, チャート-碎屑岩シーケンス
Keywords: carbonaceous material, Raman spectra, pseudotachylyte, cataclasite, chert-clastic sequence

モンモリロナイトの摩擦ヒーリング効果における湿度の影響 Effect of humidity on frictional healing of montmorillonite

手塚 寛^{1*}; 片山 郁夫¹
TETSUKA, Hiroshi^{1*}; KATAYAMA, Ikuo¹

¹ 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University

同じ震源域から周期的に発生する地震について、地震の繰り返し発生モデルが提唱されている (Shimazaki and Nakata, 1980)。その一つに、非地震時に一定の割合で応力が増加し、ある一定の応力に達すると地震が発生するというモデル (時間予測モデル) がある。このモデルは、南海地震などの長期予測にも使用されている。非地震時の応力増加の割合は、摩擦ヒーリング効果 (摩擦面が静止しているとき、時間の経過とともに摩擦強度が回復する効果) に支配される。海溝型地震の発生する沈み込み帯での摩擦挙動を考えると、海洋性堆積物に特徴的で低い摩擦係数を示すスメクタイトの性質が重要となる (Ikari et al., 2007; Ujiie et al., 2013)。また、沈み込み帯では、流体の分布の不均質が想定されるので、湿度の影響を考慮することが必要である (Zhao et al., 2009)。石英岩や石英・アルミナ・ソーダ石灰ガラスの粉末を試料に用いた研究では、湿度の上昇に伴い摩擦ヒーリング効果が強まるという結果が得られている (Dieterich and Conrad, 1984; Frye and Marone, 2002; Scuderi et al., 2014)。しかし、先行研究では、スメクタイトなどの粘土鉱物については調べられていない。そこで、本研究では、高温二軸摩擦試験機を用いて、スメクタイトの一種であるモンモリロナイトの摩擦ヒーリング効果における湿度の影響を調べた。

本実験では、静止時間を 10・30・100・300・1000・3000 秒と変化させてヒーリング効果を確認した。垂直応力は 15MPa、せん断すべり速度は 3 μ m/s で一定に保ち、定常摩擦に達した後、スライド - ホールド - スライド試験を行った。試料にはモンモリロナイトを用いた。また、比較のために石英を用いた実験も行った。実験は 4 つの異なる湿度の条件で行った。(1) 常温下で水槽を用いて純水の中で行った実験、(2) 常温常湿下での実験、(3) 試料を 100 $^{\circ}$ C で 24 時間乾燥させた後、常温常湿下で行った実験、(4) 試料を 100 $^{\circ}$ C で 24 時間乾燥させた後、実験中もヒーターで 100 $^{\circ}$ C を維持しながら行った高温摩擦実験の 4 つである。それぞれの相対湿度は (1) 100%、(2) 20-60%、(3) (2) よりも小、(4) 0% 程度である。

実験の結果、モンモリロナイトにおける摩擦ヒーリング効果は、湿度が高いほど小さくなることが分かった。モンモリロナイトのヒーリング速度 β は、乾燥状態では 0.008 程度であったが、水に飽和した状態では 0.0005 程度となり、ほぼ 1 桁の差が見られた。モンモリロナイトの摩擦ヒーリング効果が湿度と負の相関を示す原因として、湿度が高いほどモンモリロナイトの層間が広がり、層間の結合力が弱まって、真の接触部のせん断強度が低下することが考えられる。

湿度が高くモンモリロナイトが多く存在する領域では、摩擦ヒーリング効果が小さいため、非地震時の応力回復量が著しく小さい。水に飽和している条件で有効垂直応力を 100MPa とした場合、100 年間静止したとしても応力の回復量は、 \sim 0.5MPa と予想される。これは石英の 1/25 程度となる。このため、湿度が高くモンモリロナイトが多く存在する領域では地震の再来周期が長いことが予想される。

キーワード: スメクタイト, 摩擦のヒーリング効果, 湿度
Keywords: smectite, frictional healing, humidity

SEM-EBSDを用いた結晶方位解析における試料前処理条件の検討：花崗岩中の石英結晶を例に Sample preparation condition for SEM-EBSD: An example of quartz minerals in granite

金井 拓人^{1*}; 向吉 秀樹²; 高木 秀雄³

KANAI, Takuto^{1*}; MUKOYOSHI, Hideki²; TAKAGI, Hideo³

¹ 早稲田大学大学院創造理工学研究科, ² 島根大学大学院総合理工学研究科地球資源環境学領域, ³ 早稲田大学教育・総合科学学術院

¹Graduate school of creative science and engineering, Waseda University, ²Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University, ³Faculty of Education and Integrated Arts and Sciences, Waseda University

後方散乱電子回折法 (EBSD) は、結晶性の試料に電子線を照射し、後方散乱する回折電子像のパターン (EBSP) を解析することにより結晶方位を特定する手法である。近年、地質学分野においても、走査型電子顕微鏡 (SEM) に取り付けられた EBSD を用いた岩石試料の結晶方位解析や、層状物質の積層構造の解析などが行われている。岩石試料の SEM-EBSD 解析では、主に薄片を用いる。EBSD 分析では、EBSP に寄与する入射電子の進入深さが数 10 nm までとされており、硬い研磨剤の使用によるダメージ層の存在は、EBSP のコントラストを大きく減少させる。そのため、SEM-EBSD 用の試料は、通常の薄片作製によるダイヤモンドペースト鏡面研磨を行った後に、イオンミリングやコロイダルシリカを用いた振動研磨によりダメージ層を除去する測定面の仕上げが推奨されている (小暮・立川, 2002; Prior et al., 1999)。なお、一般的な岩石薄片表面のダメージ層除去の仕上げには、コロイダルシリカを用いた振動研磨が最も適しているとされている (例えば Lloyd, 1987)。ただし、コロイダルシリカを用いた EBSD 用試料の研磨については、具体的な処理手順および最適な処理方法に関する報告はあまり知られていない。また、岩石薄片を作製する際に、作製者の技量により薄片が片減りすることがある。片減りした薄片も EBSD 分析に影響を及ぼす恐れがあるが、片減りの影響に関する報告もない。

そこで、岩石薄片におけるコロイダルシリカによる SEM-EBSD 用試料の前処理条件を検討することを目的とし、造岩主要鉱物の 1 つである石英を多く含む花崗岩を例に、コロイダルシリカの最適研磨条件に関する検討を行った。具体的には、コロイダルシリカ振動研磨の研磨時間および研磨時に試料にかかる荷重について検討を行った。また、意図的に片減りさせた薄片を用意し、片減りがどの程度 EBSD 分析に影響を及ぼすかについての検討も行った。

コロイダルシリカによる振動研磨は、BUEHLER 社製 VibroMet2 研磨装置を用いた。またコロイダルシリカ溶液は PRECISION SURFACES INTERNATIONAL (PSI) 社 (代理店 株式会社 三啓) コロイダルシリカ最終仕上げ用 (型番: 5904-S-64, pH: 9.8, 粒径: 40 nm) を使用した。コロイダルシリカを用いた振動研磨の最適条件を決めるうえで、重要となるパラメータとして、①振動研磨時間、②試料にかかる荷重、③振動強度、がある。今回の報告では、これらのパラメータのうち、①および②に対して検討を行った。具体的には、①については、振動研磨を 1 時間、2 時間、3 時間行った場合の研磨具合の違いについて検討した。②については、装置に付属の錘 (約 200g) を 1 個使用した場合と 3 個使用した場合の研磨具合の違いについて検討した。③の振動強度については、中間値である 50% に固定して振動研磨を行った。EBSD 測定は、早稲田大学所有の SEM (日立ハイテクノロジー製 S-3400N) および、同 SEM に取り付けられている EBSD 検出器 (Oxford Instruments 製 HKL CHANNEL5) を使用した。入射電子用の SEM フィラメントにはタンゲステンを用いた。測定用の試料は蒸着を行わず、試料表面の帯電を防ぐために、SEM 試料室の真空度を低真空 (30Pa) に設定して測定した。また、照射電圧: 25 kV, ワーキングディスタンス (WD): 30 mm の条件で SEM 観察および EBSD 分析を行った。測定の手順としては、まず、それぞれの薄片試料において、後方散乱電子像 (BEI) 観察により、目視で石英粒子を識別し、ターゲットとする石英結晶に対し、250 倍の倍率で、70 μ m 四方の範囲を 2 μ m 間隔で面分析 (1 つの結晶につき 1225 点測定) した。1 つの薄片につき 20 個の石英結晶の面分析を行った。EBSD の評価方法は、面分析の総分析点数に対して、正しく指数付けされた測定点の数をヒット率として定義し、ヒット率が大きいほど EBSD での測定に適した試料調整ができているとした。

解析の結果、ダイヤモンド鏡面研磨のみの試料ではヒット率の平均値が 55% 未満であったのに対し、コロイダルシリカ処理を施した試料はすべて 70% 以上の値を示し、明らかな違いが見られた。コロイダルシリカ処理を施す時間に関しては、処理時間が長い程よい結果が得られたが、最も時間の短い 1 時間の試料でも、平均値が 70% 以上の値を示し、1 時間の処理で十分であることが明らかとなった。錘の違いによる変化は見られなかった。本結果は、結晶サイズが数 100 μ m 程度の石英粒子の EBSD 分析を行う場合にのみ適している可能性があり、その他の試料については、目的とする試料に合わせて、最適処理時間を評価する必要があると思われる。

キーワード: 走査型電子顕微鏡後方散乱電子回折法, コロイダルシリカ, 振動研磨, 薄片

Keywords: SEM-EBSD, colloidal silica, vibratory polishing, thin section

岩石磁気から見た断層ガウジ中の波状褶曲構造と地震時の摩擦強度減少 Fault Lubrication and Billow-like Wavy Folds in a Seismic Slip Plane of Nojima Fault Gouge: Rock Magnetic Perspective

福沢 友彦^{1*}; 中村 教博¹

FUKUZAWA, Tomohiko^{1*}; NAKAMURA, Norihiro¹

¹ 東北大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Tohoku University

An earthquake can occur only if friction decreases rapidly as slip proceeds and the shear stress on its fault planes surpasses the frictional strength of faults, indicating frictional coefficients significantly decrease (0.7→0.1) in proportion to a displacement. High-velocity friction experiments have proposed thermal pressurization and fluidization as weakening mechanism of a frictional strength of faults, but few geological traces for this mechanism are left behind in a natural fault zone. Asymmetric folding and fluttering structures have been found in a natural fault zone, such as in Nojima active fault and in Kodiak accretionary prism. In Nojima fault gouge, it is well known that there are billow-like wavy folds along slip planes, being similar to the pattern of Kelvin Helmholtz (KH)-instability which normally occurs in fluid. This instability generates at the interface between two fluids of different densities shearing at different velocities (Thorpe, 2005). Therefore, the presence of billow-like wavy folds in Nojima fault gouge suggests the fluidization of gouge materials. If a temperature range for the generation of such billow-like folds could be determined, one can give a constraint to the weakening mechanism of frictional strength of faults. Here I show rock magnetic studies to prove the temperature rise in the generation of billow-like folds in cohesive blackish gouges, using a custom-made scanning magneto-impedance magnetic microscope. The results showed the billow-like folds and the sharp slip zones experienced at least a 375 °C heating during its formation from the incohesive grayish gouges, because of the magnetite formation through thermal decomposition of siderite in the grayish gouge. The upper limit of temperature rises can be constrained as at maximum 800 °C by the preservation of microfold textures because high viscosity fluid, such as melt, can't generate a shear flow forming KH-instability. Based on these results, these two zones had been experienced a frictional heating (375 °C ~800 °C). From the temperature condition and the one-dimensional diffusion model, I estimated the frictional coefficient of a fault zone in Nojima fault gouge is approached to be 0.02~0.04 during coseismic slip. These results indicate that thermal pressurization-induced fluidization occurred in the fault slip.

岐阜県南東部に位置する屏風山断層の破碎・変質履歴 The fragmentation and alteration history of fault rocks in the Byobuyama fault, Gifu Prefecture, central Japan.

香取 拓馬^{1*}; 小林 健太¹; 安江 健一²; 丹羽 正和²; 小松 哲也²; 細矢 卓志³; 笹尾 英嗣²
KATORI, Takuma^{1*}; KOBAYASHI, Kenta¹; YASUE, Ken-ichi²; NIWA, Masakazu²; KOMATSU, Tetsuya²;
HOSOYA, Takushi³; SASAO, Eiji²

¹ 新潟大学理学部地質化学科, ² 独立行政法人日本原子力研究開発機構, ³ 中央開発株式会社

¹Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University, ²Japan Atomic Energy Agency, ³Chuo Kaihatsu Corporation

中部地方には数多くの活断層が存在し、日本でも有数の活断層密集地帯である。これらは、大局的にNE-SW走向とNW-SE走向の直交する断層帯に大別でき、複雑な断層幾何学系を構成している。その中でも屏風山断層は、三河高原と美濃高原の境界に位置し、長さ32 km、確実度I、活動度B級の活断層であり(活断層研究会編, 1991)、周辺に分布する新第三紀鮮新統の瀬戸層群土岐砂礫層に、約500 mの垂直変位を与えている。また、同断層北東端は、A級活断層の阿寺断層の南端部と接し、互いに止め合う関係を示す。以上より、屏風山断層の運動は現地形発達史に大きな影響を与え、中部地方の複雑な断層幾何学系の一端を担う重要な活構造であると考えられる。そこで本研究では、屏風山断層を事例に、その運動史を解明する調査技術開発を目的とした断層岩の構造解析および化学分析を行った。

対象とした露頭は、岐阜県瑞浪市東部の論析地域沢沿いに露出する断層露頭で、既存報告のない新露頭である。この露頭では、土岐砂礫層(新第三紀鮮新統)と、伊奈川花崗岩(後期白亜紀)が断層関係で接し、幅広い脆性破碎帯を観察することができる。断層面の姿勢は、N42E50SEである。本研究では、断層面の姿勢、破碎帯の規模、土岐砂礫層と花崗岩が接していること、活断層トレースに一致することなどから、本露頭が屏風山断層の中軸(Master fault)であると考えた。本露頭は下盤より、幅30 cm以上明褐色を呈す土岐砂礫層起源の断層角礫、幅約30 cmの茶褐色?暗灰色を呈す土岐砂礫層起源の断層ガウジ、幅約5 cmの赤褐色を呈す土岐砂礫層起源の断層ガウジ、幅約40 cmの白濁色を呈す花崗岩起源の面状カタクレーサイト、幅約30 cmで白色を呈すカタクレーサイト、その上盤には花崗岩起源の弱破碎岩が連続する。花崗岩起源の面状カタクレーサイトには、濃緑色の断層ガウジが流動的に入り込む。本露頭において断層岩の定方位試料の採取および分析用試料の採取を行った。断層岩試料は多量の膨潤性粘土を含み、大変脆弱なため取り扱いには細心の注意を要する。試料の採取、固化および切断・研磨においては高木・小林(1996)および大橋ほか(2008)を参考にした。化学分析では、粘土鉱物の同定を目的としたXRD分析、化学組成の比較を目的としたXRF分析を行った。XRD分析では、沈降法(Sedimentation method)により抽出した粘土試料を自然乾燥させ、秤量したものをスライドガラスに塗布し定方位試料を作成した。この定方位試料を無処理・エチレングリコール処理・加熱処理を施し、分析値のピークシフトにより粘土鉱物の同定、積分強度・半値幅の比較を行った。さらに、粒度ごとの構成鉱物の違いを把握するため、粒度ごとに分離した試料のXRD分析を行った。XRF分析では、ガラスビードを作成し主要および微量元素の全岩化学分析を行った。

以上の解析・分析の結果、花崗岩起源のカタクレーサイトでは左ずれ、花崗岩起源の断層ガウジおよび土岐砂礫層起源の断層ガウジ・断層角礫では右ずれの剪断センスを示し、屏風山断層が複数の応力場で活動していたことが明らかとなった。破碎帯にはスメクタイト(Sm)・イライト(III)・カオリナイト(Kln)を全体に含み、花崗岩起源の断層岩では沸石(Zeo)がみられた。積分強度について花崗岩起源の断層岩の傾向をみると、Smは弱破碎岩で、IIIはカタクレーサイトで、Klnは断層ガウジにおいて最大値をとる。土岐砂礫層起源の断層岩では、Sm・III・Klnともに茶褐色?暗灰色断層ガウジで最大値をとり、赤褐色断層ガウジで最小値をとるよう段階的な変化がみられる。半値幅について花崗岩起源の断層岩の傾向をみると、Sm・IIIともにカタクレーサイトにおいて最大値をとる。土岐砂礫層起源の断層岩では、Sm・IIIともに赤褐色断層ガウジで最大値をとる。XRF分析結果から、Mg・Ca・LOIの顕著な増加がみられ、元素変動率は中軸部に近づくほど大きい傾向にある。

断層岩ごとの形成レジームを考慮すると、左ずれセンスを示す花崗岩起源のカタクレーサイトやその外縁部の弱破碎岩は、南北圧縮東西引張応力場で形成されたと考えられる。その後、東西圧縮南北引張応力場で屏風山断層は右ずれを伴う逆断層運動を開始し、土岐砂礫層に垂直隔離を与え、断層ガウジが形成されたと考える。本発表では、屏風山断層の活動史と、それに伴う破碎・変質履歴について議論する。

なお、本研究は、平成26年度地層処分技術調査等事業「地質環境長期安定性評価確証技術開発」(経済産業省資源エネルギー庁)で得られた成果の一部を使用した。

キーワード: 屏風山断層, 断層岩, 破碎, 変質, 粘土鉱物

Keywords: Byobuyama fault, fault rocks, fragmentation, alteration, clay mineral

沈み込みに伴う海洋地殻物質の透水性の変化：四万十陸上付加体物質を用いた検討 Permeability evolution of oceanic basalt at Nankai subduction zone: implication from on shore basalt at Shimanto belt

谷川 亘^{1*}; 山口 飛鳥²; 濱田 洋平¹; 亀田 純³; 多田 井 修⁴; 畠田 健太郎⁴
TANIKAWA, Wataru^{1*}; YAMAGUCHI, Asuka²; HAMADA, Yohei¹; KAMEDA, Jun³; TADAI, Osamu⁴;
HATAKEDA, Kentaro⁴

¹ 独立行政法人海洋研究開発機構高知コア研究所, ² 東京大学大気海洋研究所, ³ 北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻, ⁴ マリン・ワーク・ジャパン

¹JAMSTEC/KCC, ²Tokyo University, ³Hokkaido University, ⁴Marine Works Japan. LTD

2011年の東北地方太平洋沖地震は、プレート境界断層浅部で断層が50mにもわたる大きな変位を伴うすべりが生じたことにより大規模な津波災害を引き起こされたと考えられている。大変位を引き起こした原因のひとつとして、プレート境界近傍・深部における異常間隙水圧の発達に伴う強度の低下が挙げられる。この異常間隙水圧の発生要因として、沈み込みに伴う海洋プレート物質の脱水反応、深部流体の流入、続成作用に伴う孔隙体積および透水性の変化が挙げられる。同様のプロセスは東北沖だけでなく南海トラフ地震発生帯でも発生することが予想される。いずれのメカニズムも間隙水圧が実際にどの程度発達しうるかは、沈み込みに伴う海洋プレート物質の水理特性の変化が大きく影響する。そこで、本研究では南海トラフ沖プレート境界下部の海洋プレート物質を研究対象として、本対象の模擬物質である西南日本の陸上四万十帯付加体の試料を用いて、続成作用にともなう水理特性の変化を調べた。

本研究では、西南日本の陸上四万十帯付加体中の続成状態が異なると考えられる興津（小鶴津）、久礼、牟岐、および槇峰メランジュ中の4地点5種類の玄武岩を用いた。ビトリナイト反射率から推定した続成度（最大被熱温度）は下部牟岐メランジュが一番低く、槇峰メランジュが一番高い。本研究は、大気圧室温下において間隙率、弾性波速度、岩石比抵抗、および水銀圧入法による間隙径分布の測定を行った。透水係数は封圧1~160 MPaまで変化させて、窒素ガスを間隙流体として用いて行った。試料上流側のガス圧を一定に制御（0.05~2.0 MPa）したガスを試料に流して、試料下流側から大気圧下に排気されたガス流量を測定して透水係数を算出した。

下部牟岐メランジュの間隙率は3~5%、槇峰は0.5~1%を示し、続成度が大きくなるにしたがって間隙率が小さくなる傾向が認められた。岩石比抵抗は下部牟岐メランジュが一番低い値を示したが、その他の玄武岩は違いが認められなかった。弾性波速度についても続成度による違いは明瞭に認められなかった。

同じ封圧条件で測定したガス浸透係数は、間隙率の逆数に比例する Klinkenberg 効果が認められた。そこで、Klinkenberg の式を用いて「ガス浸透係数」から「透水係数」に変換した。また、ほとんどの実験で「透水係数」と Klinkenberg 式の「比例係数」が累乗則でフィッティングできたため、Klinkenberg の式で変換できなかったガス浸透係数は経験的に求めた累乗則を用いて推定した。いずれの試料も有効圧の増加に伴い透水係数は減少した。5MPa から 120 MPa の封圧の変化に対して約3桁減少し、またその変化は指数関数で近似できた。続成度の高い試料ほど低い透水性を示し、有効圧 20MPa において下部牟岐玄武岩は $7 \times 10^{-18} \sim 9 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ を示したのに対して、槇峰玄武岩は $2 \times 10^{-22} \text{ m}^2$ を示した。また同じメランジュから採取した試料では、1~2桁ほど透水係数のばらつきが認められた。測定した間隙径は測定装置の測定限界付近の $0.01 \mu\text{m}$ 以下の非常に低い間隙構造を持っていることが確認された。

続成作用に伴う透水係数の減少は間隙率の減少と相関を示したことから、沈み込みにともなう力学的・化学的圧密作用による間隙径と間隙体積の減少により透水性が徐々に減少したことを示唆する。また、 μX 線CT画像の解析によると、同一種類の玄武岩の岩石物性のばらつきはメソスケールの割れ目の発達の程度が影響していることがわかった。

沈み込み帯プレート境界近傍の間隙水圧の上昇メカニズムは、これまで主に鉱物の脱水反応や地下深部からの流体の供給が主な原因として考えられてきた。しかし本研究結果は続成作用に伴う間隙体積と透水係数の減少が間隙水圧の増加に大きく寄与していることが明らかとなった。そのため、南海トラフ沈み込み帯の高間隙水圧帯の発生領域は、本研究で求められた透水係数と間隙率の減少速度に依存している可能性が高い。

キーワード: 透水係数, 変質, 間隙水圧, 南海地震, 四万十帯, 玄武岩

Keywords: permeability, diagenesis, pore pressure, Nankai earthquake, Shimanto belt, basalt

南海トラフに沈み込む海洋地殻最上部の岩相と水理特性 Lithology and fluid transport property of the topmost part of the oceanic crust subducting into the Nankai Trough

山口 飛鳥^{1*}; 谷川 亘²; 多田井 修³; 亀田 純⁴
YAMAGUCHI, Asuka^{1*}; TANIKAWA, Wataru²; TADAI, Osamu³; KAMEDA, Jun⁴

¹ 東京大学大気海洋研究所, ² 独立行政法人海洋研究開発機構高知コア研究所, ³ マリン・ワーク・ジャパン, ⁴ 北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻

¹ Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo, ² Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Kochi Institute for Core Sample Research, ³ Marine Works Japan, ⁴ Earth and Planetary System Science Department of Natural History Sciences, Graduate School of Scienc

Fluids in subduction plate boundaries play important roles for both mechanical and chemical aspects. Recently, oceanic crust has been recognized as a source of water along seismogenic subduction plate boundary (Kameda et al., 2011). For documenting hydration state of topmost part of subducting oceanic crust, we performed visual, optical and Electron Probe Micro Analyzer (EPMA) observations and powder X-ray Diffraction (XRD) analyses of basaltic rocks retrieved from the Site C0012 of Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Expedition 333. We also measured porosity and permeability of samples selected from each lithology. We further interpreted Logging-while-drilling (LWD) data of Hole C0012H obtained during the IODP Expedition 338 to estimate the thickness of seafloor alteration.

The IODP Site C0012 is located at the top of Kashinozaki Knoll, tectonically uplifted topographic high on the Philippine Sea Plate coming into the Nankai Trough. Basaltic rocks in Holes C0012A, E, F, G occurring below 520 mbsf, are mainly composed of upper pillow basalts and lower massive basalts. The pattern of alteration is lithology-dependent: in pillow basalts, volcanic glasses and vesicles were replaced by clay minerals; while alteration of massive basalt showing doleritic texture is characterized by red-colored Fe-oxyhydroxide veins with alteration halos. Potassium-bearing alteration minerals (K-feldspar and celadonite) occur in places.

Permeability measurement of representative samples of each lithology was performed at JAMSTEC-Kochi, under the room temperature conditions with effective pressures of 5 to 120 MPa. Permeability was measured by using N₂ gas as a pore fluid, and calculated by steady-state gas flow method. Gas permeability decreases with increasing effective pressures and pore pressures, following the Klinkenberg equation. Klinkenberg-corrected permeability of pillow basalt ranges 10-19 to 10-20 mD at effective pressure of 5 MPa, while that of massive basalt ranges 10-17 to 10-19 mD. Permeability contrast between the two lithologies would reflect microtextural difference between two lithologies, because of the absence of significant difference in porosity.

LWD data of basaltic rocks were obtained from Hole C0012H of the IODP Expedition 338. Low resistivity and velocity intervals are corresponding to pillow basalts, whereas high resistivity and velocity intervals are corresponding to massive basalts. Contrastingly, gamma ray trend is independent from resistivity and velocity trends: positive at around lithological boundaries. Positive peaks of gamma ray would reflect potassium-bearing alteration caused by permeability contrast between each lithology. Below 680 mbsf, all logging data become constant and non-fluctuated, suggesting that lithology become homogeneous below this depth without strong alteration. Therefore the thickness of hydrated part of oceanic crust at Site C0012 is roughly estimated to be ~100 m.

岩石を用いた動的破壊伝播に関する室内実験 Laboratory experiments on dynamic rupture propagation using rocks

溝口 一生^{1*}
MIZOGUCHI, Kazuo^{1*}

¹ 電力中央研究所
¹ Central Research Institute of Electric Power Industry

Around pre-existing geological faults in the crust, we have often observed off-fault damage zone where there are many fractures with various scales, from $\sim\mu\text{m}$ to $\sim\text{m}$ and their density typically increases with proximity to the fault. One of the fracture formation processes is considered to be dynamic shear rupture propagation on the faults, which leads to the occurrence of earthquakes. Although much work on such off-fault damage associated with dynamic rupture in homogeneous material (ex. polymers) have been done in the past decades (Rosakis et al., 2007), the rupture-induced damaging behavior of rocks, that constitute the faults in nature and of which frictional properties controlling the dynamic rupture might be different from the polymers, is still experimentally unexamined.

Recently, I have worked on laboratory experiments on dynamic rupture propagation along contacting surfaces of two metagabbro blocks from Tamil Nadu, India, simulating a fault of 30 cm in length. For the experiments, the similar uniaxial loading configuration to Rosakis et al. (2007) is used. Axial load σ is applied to the fault plane with an angle θ to the loading direction. Changing the angle makes the ratio of shear to normal stress on the fault a critical level close to the maximum static frictional strength beyond which the fault begins to slip spontaneously. For the critically stressed fault, the triggering of rupture is archived by striking the one edge of the fault with a hammer and the subsequent increase in shear load for a short duration. The load cell attached to the tip of the hammer head can provide us the magnitude and time duration of the impact stress. In this presentation, I introduce the experimental set-up and some preliminary results for the dynamic rupture propagation on rocks. This work is supported by the JSPS KAKENHI (26870912).

キーワード: 動的破壊伝播, 岩石, 断層, 実験
Keywords: Dynamic rupture propagation, Rock, Fault, Experiment

窒素雰囲気下におけるドレライトの摩擦強度の温度依存性 Temperature-dependent frictional strength of dolerite in a nitrogen atmosphere

田中 伸明^{1*}; 和田 純一²; 金川 久一¹
TANAKA, Nobuaki^{1*}; WADA, Jun-ichi²; KANAGAWA, Kyuichi¹

¹ 千葉大学大学院理学研究科, ² 応用地質

¹ Graduate School of Science, Chiba University, ² OYO Corporation

1990年代半ば以後、地震発生時に匹敵する高変位速度 (\leq 数 m/s) における様々な岩石試料の摩擦実験が行われ、高速域 (≥ 10 cm/s) では変位速度の増加に伴って摩擦強度が著しく低下することが明らかとなっている。しかし、従来の高速摩擦実験では摩擦発熱による温度上昇を制御できておらず、高速域における摩擦強度の低下が温度上昇の影響である可能性を排除できない。実際、背景温度を制御したドレライト試料の大気中の摩擦実験 (垂直応力 1 MPa、変位速度 1 cm/s、室温 \sim 1000 °C) では、高速域における摩擦強度の低下が温度上昇の影響によって説明し得ることが示されている (Noda et al., 2011, JGR)。この実験では、ドレライトの摩擦強度の温度変化が摩耗物質中の非晶質物質含有量と負の相関、含鉄鉱物の高温酸化による酸化鉄鉱物含有量と正の相関を示すことが示されているが、地下の断層は酸素に乏しい環境下にあるため、実験で観察されたような含鉄鉱物の高温酸化は現実的ではない。

そこで、酸素に乏しい窒素雰囲気下 (酸素濃度 0.1% 程度) で室温 \sim 600 °C の温度範囲で Noda et al. (2011) と同様の実験を行い、定常摩擦強度と非晶質物質含有量およびすべり面の摩耗物質被覆率との相関を調べ、大気中の Noda et al. (2011) の実験結果と比較した。その結果、定常摩擦係数は室温で約 0.52 であり、100 \sim 500 °C では約 0.70 とほぼ一定、600 °C では約 0.76 であった。非晶質物質含有量は室温 \sim 500 °C で 60 ± 6 wt% の範囲内であったのに対し、600 °C では約 38 wt% であった。また、摩耗物質被覆率は室温で約 0.78 であったのに対し、100 \sim 600 °C では約 0.9 とほぼ一定であった。窒素雰囲気下のドレライトの定常摩擦係数は、室温では大気中 (約 0.77) と比べてかなり小さく、逆に 100 \sim 600 °C では大気中 (約 0.61 ± 0.03) より大きくなっている。また、100 \sim 600 °C の温度範囲では非晶質物質含有量との間に大気中で認められたような負の相関関係が認められるが、一方、室温 \sim 500 °C の温度範囲では摩耗物質被覆率との間に正の相関関係が認められる。しかしながら、このような相関関係は、前者の場合室温 \sim 100 °C、後者の場合 500 \sim 600 °C の温度範囲で、それぞれ不明瞭になっている。

窒素雰囲気下のドレライトの室温の定常摩擦強度が大気中と比べて小さいのは摩耗物質に水分吸着の影響がないためと考えられるが、100 \sim 600 °C の定常摩擦強度が大気中と比べて大きくなる理由は現時点では不明である。また、定常摩擦強度と非晶質物質含有量およびすべり面の摩耗物質被覆率との相関・非相関が何に起因しているのかも、現時点では明らかになっていない。これらについて、今後検討を進めていく予定である。

キーワード: ドレライト, 窒素雰囲気, 回転剪断試験, 温度依存性, 非晶質物質含有量, 摩耗物質被覆率

Keywords: Dolerite, Nitrogen atmosphere, Rotary shear experiment, Temperature dependency, Amount of amorphous wear material, Ratio of wear material cover

震源及びメカニズム解分布に基づいた本震断層と余震との関係 Relation between mainshock rupture and aftershock sequence based on highly resolved hypocenters and focal mechanisms

行竹 洋平^{1*}; 飯尾 能久²
YUKUTAKE, Yohei^{1*}; IIO, Yoshihisa²

¹ 神奈川県温泉地学研究所, ² 京都大学防災研究所

¹ Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, ² Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

1. はじめに

大地震発生後の余震の発生過程を理解するために、余震が本震時に破壊された断層(本震断層)のすべり残しの破壊であるのか、あるいはその周辺に存在する破碎帯の破壊なのかを明らかにする必要がある。Liu et al. (2003)では、1992年 Landers 地震の余震位置とメカニズム解から、本震断層上で発生した余震は5%程度にすぎないと推定している。しかし、この研究で用いた余震の震源決定精度が最大で1kmに及ぶため、より高精度な震源位置やメカニズム解データに基づいて議論することが不可欠である。そこで本研究では、2000年鳥取県西部地震(Mw6.8)域に展開された稠密地震観測データから余震の震源位置およびメカニズム解を推定し、上記の問題について解明を試みた。

2000年鳥取県西部地震域では、本震発生後1週間から約2か月間にわたり、59点の稠密地震観測が実施された。行竹ほか(2005)では、本震断層を1枚の断層面に近似し、稠密地震観測から推定された震源位置及びメカニズム解をもとに、多くの余震は本震断層の周辺で発生したことを推定した。しかし、本震断層は複数のセグメントに分かれていることから(例えば、Fukuyama et al., 2003)、厳密に議論するにはより複雑な断層形状を考慮した解析が必要となる。

3. 震源及びメカニズム解決定

本研究では稠密余震観測により取得された地震波形データを使用し、2000年10月15日から11月31日までに発生した、約4,700イベントについて震源決定を試みた。最初に、Shibutani et al., (2005)により決定された一次元速度構造と観測点補正值を用い、hyps法(Hirata and Matsu'ura, 1987)によって初期震源位置を求めた。次に、Double Difference法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)を用いて、これらの震源の再決定を行った。各イベントの走時差を相互相関処理並びに手動検測走時から求め、約4,100イベントの余震の震源位置を得ることができた。このうち90%の地震について相対誤差が水平方向に0.08km、深さ方向に0.12km以内に求まった。

メカニズム解については、Imanishi et al., (2011)の手法を参考に、P波初動極性に加えてP波及びSH波の振幅値を用いて決定した。その結果、震源再決定された余震の8割にあたる、約3,300イベントの余震のメカニズム解について節面方向の精度が15度以内に決定できた。

4. 本震断層の推定

鳥取県西部地震では明瞭な地表断層があらわれなかったため(上田ほか, 2002)、余震分布に基づき本震断層を推定した。本震時に主要な破壊が生じた北緯35.35度より南側(例えば、Iwata and Sekiguchi, 2002)の領域を解析対象とした。この領域内でメカニズム解の節面方向が類似しているいくつかの地震群(クラスター)を見ることができ、余震及びメカニズム解分布をもとに5つのクラスターを抽出した。それぞれのクラスターでの余震の震源位置から、主成分分析を用いて(例えば、Shearer et al., 2003)、5つの最適な断層面の方向と位置を推定した。

5. 結果

本震震源周辺及び余震域南部では、最適な断層面はほぼ鉛直で、その走向は本震初動解の節面に近いN142°E及びCMT解の節面に近いN149°E方向にそれぞれ推定された。一方、本震震源の北側では、走向がN80°Eの共役断層系に対応する断層面が推定された。最適な断層面と余震位置との距離を調べると、すべてのクラスターにおいて余震は最適な断層面からおよそ1.2kmの幅を持って分布している。また、この分布幅は本震時に大きく滑った余震域南部で広がる傾向が見られた。次に、最適な断層面の走向・傾斜からリファレンスとなるメカニズム解を求め、余震メカニズム解との類似性についてKagan角(Kagan, 1991)を用いて評価した。リファレンス解のすべり方向は、本震の滑り方向を考慮し左横ずれ(共役断層は右横ずれ)を仮定した。その結果、メカニズム解誤差の上限である15度を上まわるKagan角を持つ余震は全体の90%をしめ、Kagan角の分布の幅は最大で100度に及ぶことが分かった。以上の結果は、余震の多くは本震時に破壊された断層面上ではなく、その周辺の破碎帯で起きていることを示している。またメカニズム解のばらつきは、破碎帯内の複雑な構造を反映していると考えられる。

謝辞

本研究では、鳥取県西部地震合同稠密余震観測により取得された地震波形データを使用させて頂きました。F. Waldhauser

SSS29-P11

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 18:15-19:30

博士から hypoDD プログラムコードを提供して頂きました。

キーワード: 余震, 震源分布, メカニズム解, 本震断層

Keywords: Aftershock, Hypocenter distribution, Focal mechanism, Mainshock fault

JFAST コアサンプルの摩擦実験結果を用いた地震サイクルシミュレーション Earthquake sequence simulations using measured frictional properties for JFAST core sample

野田 博之^{1*}; 澤井 みち代²; 芝崎 文一郎³
NODA, Hiroyuki^{1*}; SAWAI, Michio²; SHIBAZAKI, Bunichiro³

¹ 海洋研究開発機構, ² 広島大学, ³ 建築研究所
¹JAMSTEC, ²Hiroshima University, ³Building Research Institute

Parameters in a rate- and state-dependent friction law (RSF) are often determined by velocity-step tests in which the slip rate V is stepped typically by a factor of 3 to 10. The test may yield a set of parameter values such as a , b , and d_c , but it is often the case that those determined parameters depend on V if a logarithmically wide range of V is investigated. At this point, the originally assumed constitutive law is shown to be invalid, strictly speaking, and thus need to be modified. For example, the experiments by Dieterich [1978] show that the rate-dependency $\partial f_{ss}/\partial \ln(V)$ increases as V increases, which can be explained by introduction of a cut-off time for healing [Okubo, 1989]. Such a proposal of a new constitutive law with a corresponding microphysical interpretation is a great advance in technology which enables us to implement a complex rate-dependency into earthquake sequence simulations, as well as in understanding of physics of rock friction and earthquake generation process. However, not all experimental data showing complex rate-dependency have been digested and implemented in a rate- and state-dependent framework. In this study, we propose a simple modification to the logarithmic RSF which enables implementation of rate-dependencies ($\partial f/\partial \ln(V)$ and $\partial f_{ss}/\partial \ln(V)$) that change with $\ln(V)$.

Sawai et al. [2014, AGU fall meeting] conducted a series of velocity-step tests with a core sample obtained in JFAST project at 50 MPa effective normal stress σ_e , 50 MPa pore water pressure, various temperatures T from 20 °C to 200 °C, and V from 0.3 to 100 $\mu\text{m/s}$. They found that with increasing V , the rate-dependency $\partial f_{ss}/\partial \ln(V)$ increases from negative to positive at $T = 20$ °C, decreases from positive to negative at $T = 100$ °C and 150 °C, and decreases more remarkably but stays positive in the studied range of V at $T = 200$ °C. In order to account for these complex rate-dependencies, we modified the logarithmic RSF to a quadratic form:

$$f = f_0 + F_1 L_V + F_2 L_V^2 + G_1 L_W + G_2 L_W^2$$

where $L_V = \ln(V/V_0)$ and $L_W = \ln(d_c/V_0\theta)$, f_0 is a reference friction coefficient at a reference slip rate V_0 , F_1 , F_2 , G_1 , and G_2 represent rate-dependencies which are assumed to be given by quadratic functions of ambient temperature T , and θ is the state variable representing recent slowness which evolves with a characteristic slip d_c :

$$d\theta/dt = 1 - V\theta/d_c.$$

Note that at a steady-state, $L_V = L_W$ and

$$f_{ss} = f_0 + (F_1 + G_1)L_V + (F_2 + G_2)L_V^2.$$

This is a generalization of the aging law, the original version corresponding to $F_1 = a$, $F_2 = 0$, $G_1 = -b$, and $G_2 = 0$. We determined the rate-dependency functions by least-squares method from the experimental data by Sawai et al. [2014], and investigated the consequence by means of dynamic earthquake sequence simulations [e.g., Lapusta et al., 2003].

In preliminary simulations, we simulated earthquake sequences on a planer fault in 2-D (mode II) problems with depth-dependent T , depth-dependent σ_e , and a rotation axis to mimic intersection of the fault plane and the surface. Distributions of T and σ_e are determined to be consistent with the heat-flow measurement and modeling by Gao and Wang [2014].

Without additional complexity such as patch-like asperities and high-velocity weakening (e.g., thermal pressurization of pore fluid [Noda and Lapusta, 2013]), earthquakes are nucleated at about 30-50 km downdip from the trench where $\partial f_{ss}/\partial \ln(V)$ is negative regardless of V , and rupture only the shallowest part of the plate interface. The nucleation is preceded by slow slip in the shallower part of the plate interface where $\partial f_{ss}/\partial \ln(V)$ changes its sign with increases V and thus spontaneous acceleration to coseismic slip rate cannot occur. Effect of thermal pressurization and interaction of the system with embedded rate-weakening patches generating earthquakes shall be discussed in the presentation.

キーワード: 地震サイクル, 摩擦構成則, 数値シミュレーション, 摩擦実験

Keywords: Earthquake cycle, Friction constitutive law, Numerical simulation, Friction experiment

広域重力変動と地震活動の関係性 Relations between wide-area gravity changes and earthquake activity

山田 京平¹; 三井 雄太^{2*}
YAMADA, Kyohei¹; MITSUI, Yuta^{2*}

¹ 静岡大学理学部, ² 静岡大学理学研究科

¹Faculty of Science, Shizuoka University, ²Institute of Geosciences, Shizuoka University

衛星重力ミッション GRACE のデータから、2002~2014 年間の全世界における一月ごとの重力時系列変動データを作成した。この重力変動と地震活動の関係を調べるため、4つの地域(紅海・チリ・チベット・アラスカ)を選定した。これらの地域における地震活動データを USGS から入手し、一月ごとの地震発生回数をまとめた。重力変動と地震回数の相関分析を行い、両者の相関関係について調べた。結果、アラスカでのみ、弱いながらも正の相関があるという結果を得た。この相関から、アラスカにおいて、重力変動が地震を引き起こす何らかのメカニズムが存在すると考えた。そのメカニズムの候補として、Ellsworth(2013)を参考に、2つのパターン(地表付近の水の増大による断層への载荷/地下への水の浸透による断層摩擦の低下)について調べた。その結果、特に横ズレ断層の多い北緯 63 度以北では、地表付近の水(雪)による载荷が断層の応力に影響しているのではなく、水圧の浸透が間隙流体圧を上げ摩擦強度を下げることで地震を引き起こしていると考えられる。

キーワード: 重力, 地震活動, 誘発地震, 表面荷重, 間隙流体圧

Keywords: Gravity, Seismicity, Induced earthquake, Surface load, Pore fluid pressure

摩擦溶融時のシュードタキライト中の動的な酸化・還元状態について Dynamic fluctuation of redox state during frictional melting and crystallization of graphite-bearing pseudotachylites

中村 佳博^{1*}; Madhusoodhan Satish-Kumar²; 豊島 剛志²

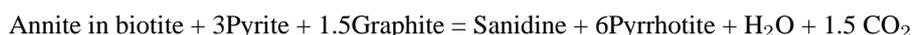
NAKAMURA, Yoshihiro^{1*}; MADHUSOODHAN, Satish-kumar²; TOYOSHIMA, Tsuyoshi²

¹新潟大学 自然科学研究科, ²新潟大学 理学部地質科学科

¹Graduate School of Science & Technology, Niigata University, ²Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University

We carried out a stable carbon isotopic study of graphite-bearing pseudotachylites to characterize the origin, role and behavior of different forms of carbon during frictional melting. The study area, located in the Hidaka Metamorphic belt, exposes metasedimentary rocks and various magmatic intrusions and are extensively deformed as evidenced by the presence of various types of fault rocks such as graphite-bearing cataclasite, ultracataclasite and pseudotachylites. In particular, graphite-bearing pseudotachylites are observed in the brittle shear zones, which are a few mm to maximum 5 cm in width. They are mainly divided into two types (Pst-I and Pst-II) based on the occurrences, microstructures and mineral assemblages of lithic fragments and secondary minerals. The graphite in each domain of Pst-I and Pst-II were separately analyzed for carbon isotopic composition. Disseminated graphite in protolith has a narrow range of $\delta^{13}\text{C}$ values between -23.6 and -25.8 ‰ (n = 13), and cataclasite, ultracataclasite and Pst I also have similar values between -24.1 and -27.0 ‰ (n = 25). On the other hand, the graphite separated from Pst II matrix on slab sections show values between -18.2 and -23.6 ‰ (n = 16), shifting the carbon isotope values to 2-3 ‰ higher from host metamorphic graphite. In particular, there is a clear correlation between stable carbon isotope composition and volume fraction of lithic fragments in each domain.

Our data indicate that metamorphic graphite in fault rocks were converted into $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ or $\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_4$ fluids under very-high temperature condition of frictional melting. Subsequently, a part of the COHS fluid re-precipitated as fluid-deposited graphite and the remaining was expelled as COHS fluids into fault zones during quenching stage. On the basis of chemical compositions and mineral assemblages in the pseudotachylites, we attempt to estimate the P-T- $f\text{O}_2$ - $f\text{S}_2$ phase diagram during frictional melting and crystallization of pseudotachylites. The thermal decomposition of biotite coexisting with graphite and sulfide minerals are deduced by following reaction;



The dehydration and decarbonation processes in this reaction are mainly driven by temperature, $f\text{S}_2$, and $f\text{O}_2$, and the breakdown of biotite that is ferromagnesian mineral change the redox state to the more oxidation state at ranges between $\Delta\text{FMQ} +0.5$ to $+3.0$. Such high $f\text{O}_2$ and $f\text{S}_2$ environments are only observed in the domains which show relatively low-temperature condition (Pst I matrix) during frictional melting. On the other hand, in the domains which show high temperature conditions (>1200 degree C) biotite microlite are observed in pseudotachylites instead of pyrrhotite. This suggests the negative jump to biotite stable field of ASM buffer by lowering $f\text{S}_2$ under high-temperature condition. In addition, we tried to estimate the redox state at precipitation stage using graphite-fluid fractionation model. The difference between disseminated graphite and fluid deposited graphite show the positive 2-3 ‰ shifting by carbon isotope fractionation, suggesting the presence of CH_4 -rich COHS fluid during precipitation stage. Under CH_4 - H_2O dominant fluid in COH diagram, we can explain the carbon isotope variation of fluid deposited graphite at around $\Delta\text{FMQ} -3.0$ by hydration reactions during the crystallization of titanite and hydroxyapatite. Such reducing conditions are only observed in the high temperature frictionally melted domains (Pst II matrix).

Thus, oxidation and precipitation processes of graphite are mainly controlled by the breakdown of ferromagnesian minerals and we revealed that the redox state and TOC values dynamically changed within each pseudotachylite matrix. In addition, our data imply that redox state in pseudotachylite sensitively change in melting domains at ranges of $\Delta\text{FMQ} -3.0$ to $+3.0$ as a function of melting temperature and bulk chemistry.

Keywords: Graphite, stable carbon isotope, pseudotachylite, redox state

スメクタイトの摩擦特性における温度と圧力の効果：南海トラフプレート境界地震への影響 Thermal and pressure effect on frictional property of smectite: application to the plate boundary earthquakes of Nankai

水谷 知世^{1*}; 平内 健一¹; 林 為人²; 澤井 みち代³
MIZUTANI, Tomoyo^{1*}; HIRAUCHI, Ken-ichi¹; LIN, Weiren²; SAWAI, Michiyo³

¹ 静岡大学大学院理学研究科地球科学専攻, ² 海洋研究開発機構 高知コア研究所, ³ 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻

¹Department of Geosciences, Graduate School of Science, Shizuoka University, ²Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³Department of Earthsciences, Graduate School of Science, Hiroshima University

海洋プレートが大陸プレートの下に潜り込む沈み込み帯では、逆断層による巨大地震が発生しやすい。この沈み込むプレート境界断層において、100-150℃の温度範囲においてスメクタイトがイライトに遷移することが地震発生帯上限を定義する1つの鍵となっている。もしこの仮定が正しければ、スメクタイトは100-150℃まで摩擦的に安定な挙動（速度強化）を示すことが示唆される。また、スメクタイトは含水し、膨潤する機能を持つため、これについて検証を行う場合、水に飽和した条件で実験を行う必要がある。しかし、モンモリロナイト標準試料を用いた先行研究（Saffer and Marone, 2003, EPSL; Ikari et al., 2007, JGR）は、室温湿潤条件のみで行われており、その摩擦の速度依存性（ $a-b$ ）は、30 MPa以下の法線応力下で速度弱化を示している。そこで本研究では、水に飽和した条件下において、モンモリロナイトガウジの摩擦実験を行い、摩擦強度とすべりの安定・不安定性に対する温度と法線応力の影響を調べた。

本実験で使用したガウジ試料はNa型モンモリロナイト標準物質である。実験には高知コアセンター設置の三軸圧縮試験機を用い、砂岩供試体にはさんだガウジを有効法線応力10-70 MPa、間隙流体圧10 MPaで、25-150℃、すべり速度0.03-3 μ m/sで剪断させた。摩擦係数（ μ ）は0.056-0.120の範囲をとり、25℃と60℃では有効法線応力の増加に伴って、摩擦強度が減少した。90℃と120℃では有効法線応力の増加に伴って、摩擦強度が増加した。 $a-b$ は、有効法線応力の増加に伴って、25-90℃では段階的に正から負へ、120℃では段階的に負から正になった。

モンモリロナイトの μ は、先行研究において湿度が高くなるにつれて値が小さくなることが示されていた。本実験結果は、相対湿度100%時の μ と調和的であった。このことはモンモリロナイトの μ は100 wt%以上の影響を受けないことを意味する。また、モンモリロナイトの $a-b$ は、先行研究において湿潤条件では、法線応力の増加に伴って負から正へと遷移する傾向をもつことが示されている。一方、本実験結果では、有効法線応力の増加に伴って、 $a-b$ 値が正から負へ遷移する傾向を示した。このことは、モンモリロナイトの $a-b$ は100 wt%以上の含水の影響を受けることを意味する。本実験結果から有効法線応力と $a-b$ の関係は各温度条件において線形に表されることが示された。これらの結果を考慮して、南海トラフのプレート境界浅部の非地震性領域に相当する温度圧力条件でスメクタイトの $a-b$ 値の推定を行った。その結果、 $\lambda = 0.4$ 以上の場合、 $\lambda = 0.4$ の一部領域を除き $a-b$ は速度強化を示した。このことから、南海トラフの非地震性域において、スメクタイトは非地震性物質として振る舞うことが示唆される。

キーワード: 沈み込み逆断層, デコルマ, 非地震性領域, スメクタイト, 室内実験, 摩擦の速度依存性

Keywords: subduction thrust fault, decollement, aseismogenic zone, smectite, laboratory experiment, velocity dependence of friction

熱クラックを生成した斑レイ岩の弾性波速度および V_p/V_s 比の間隙圧依存性 Dependences of pore pressure on elastic wave velocities and V_p/V_s ratio for thermally cracked gabbro

西村 佳也^{1*}; 上原 真一¹; 溝口 一生²
NISHIMURA, Kaya^{1*}; UEHARA, Shin-ichi¹; MIZOGUCHI, Kazuo²

¹ 東邦大学 大学院 理学研究科, ² 電力中央研究所
¹Graduate School of Science, Toho University, ²Central Research of Electric Power Industry

地震波探査により、沈み込み帯の海洋地殻に V_p/V_s 比の高い領域が存在することが知られている。例えば、Cascadia 沈み込み帯 (2.0~2.8) (Audet et al., 2009)、南海トラフ沈み込み帯 (≥ 2.03) (Kodaira et al., 2004)、チリ沈み込み帯 (>1.8) (Marcos et al., 2012) などが挙げられる。Christensen (1984) は海洋地殻を構成する岩石である玄武岩およびドレライトについて、高封圧・高間隙圧条件下で弾性波速度を測定した室内実験を行い、間隙圧が4%の玄武岩に関しては、観測結果で得られた高い V_p/V_s 比は高間隙圧 (低有効圧) で説明できることを示した。一方、間隙圧が1%だったドレライトでは十分に説明できない。また、Peacock et al., (2011) は、間隙率が高く、低有効圧であるほど V_p/V_s 比が高くなるという関係を示している。しかし、海洋地殻を構成する岩石について、内部の亀裂分布が V_p および V_s 、ならびに V_p/V_s 比にどのように影響するかについて詳しく調べられていない。また、沈み込んだプレートの亀裂挙動も、天然の海洋プレートでは脆性破壊などによって複雑だと考えられる。本研究では、海洋地殻を構成する岩石である斑レイ岩について、熱クラックを生成した岩石試料の弾性波速度を大気圧下で測定後、封圧および間隙圧を制御した状態で弾性波速度実験を行い、 V_p/V_s 比と間隙圧、亀裂分布との関係について検討した。

試料は、インドタミル・ナドゥ斑レイ岩を高さ 40 mm、直径 40 mm の円柱形に整形したものをを用いた。本研究では、500、700 °C で 24 時間加熱することによって、亀裂密度の異なる試料を用意した。また、加熱していない試料についても測定を行った。弾性波速度測定は透過法で行った。パルスジェネレータで矩形波 (周波数 0.001 MHz、振幅最大 300 V) の電圧信号を発生させ、試料の側面に接着した入力側の圧電素子を振動させ、試料反対側の圧電素子からの電圧信号と入力信号の時間差から、弾性波速度を測定した。容器内三軸圧縮試験機で測定する前に、加熱していない試料および 500 °C で加熱した試料について 45 度間隔に圧電素子を接着し、大気圧下で試料の 4 方向で弾性波速度を測定して岩石の異方性について検討した。その結果、500 °C で加熱した試料については、直交方向に最大約 10 % の違いがあった。その結果をもとに、4 方向について容器内三軸圧縮試験機での弾性波速度実験を行った。この時封圧は 50 MPa で一定とし、間隙圧は 49 から 0.1 MPa まで下げ、その後 49 MPa まで上げる応力経路の何点かで弾性波速度を測定した。その結果、500 °C で加熱した試料については、間隙圧 49 MPa のとき、 V_p/V_s 比は 2.0~2.1 を示した。この値は、地震波速度の観測結果で測定された高 V_p/V_s 比の値に近い値をとった。間隙圧が高いときに高 V_p/V_s 比となるのは、試料内部の間隙が間隙圧の作用で広がったからと考えられ、間隙率が高いほど間隙圧の影響も大きくなると考えられる。また、間隙圧 40 MPa 以下のときの V_p/V_s 比は約 1.8~2.0 を示し、大気圧下での実験よりも高くなった。これは、封圧により、試料内部の間隙が圧縮され、間隙の割合を小さくしたことが原因であると考えられる。一方、加熱していない試料は、間隙圧の変化に対して V_p/V_s 比は顕著な変化は見られず、約 1.5 でほぼ一定だった。

発表時には、700 °C で加熱した玄武岩の容器内三軸圧縮試験機での実験結果についても示す予定である。また、薄片観察により、亀裂密度や開口幅などの亀裂分布に関する情報を取得し、実験結果と比較する予定である。

本研究は JSPS 科研費 26400492 の助成を受けたものである。

キーワード: 斑レイ岩, V_p/V_s 比, 弾性波速度, 高間隙圧
Keywords: Gabbro, V_p/V_s ratio, Elastic wave velocity, High pore pressure