

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ネティ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、Site C0002 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、こうした測地学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