

## 東北地震の震源域に分布すると考えられる藍閃石片岩の高温・高圧下における摩擦挙動

### Effects of temperature and fluid pressure on the frictional behaviors of glaucophane schist

澤井 みち代<sup>1\*</sup>, 高橋 美紀<sup>2</sup>, 廣瀬 丈洋<sup>3</sup>

Michiyo Sawai<sup>1\*</sup>, Miki Takahashi<sup>2</sup>, Takehiro Hirose<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 広島大学・院・理学研究科, <sup>2</sup> 産総研 活断層・地震研究センター, <sup>3</sup> JAMSTEC・高知コア研究所

<sup>1</sup>Hiroshima University, <sup>2</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>3</sup>Kochi, JAMSTEC

2011年3月11日、深さ約24kmを震源として東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)が発生し、甚大な被害をもたらした。この巨大地震の発生機構を理解するための要素として、東北プレート境界域の地質から予想される岩石を用いて実験を行い、東北日本における沈み込みプレート境界の摩擦の性質を決めることは重要である。しかしながら、今まで沈み込み帯で重要な構成物質を用いた高温含水条件下での摩擦実験は、蛇紋岩を例外とし、ほとんど行われていない。そこで本研究では、東北沈み込み帯の地震発生域に存在すると考えられる変成岩の震源環境条件における摩擦の性質を調べ、断層の力学の立場から東北地方太平洋沖地震はじまりのメカニズムを検討することを試みた。

実験には産業技術総合研究所所有の高温・高圧三軸試験機を使用し、試料にはフランス産の藍閃石片岩を直径20mm、長さ40mmの円筒形に加工したものに30°に傾斜した模擬断層面を入れたものを用いた。実験は、温度100-300°C、軸変位速度0.1-1 μm/s、封圧150 MPa、間隙水圧1-149 MPaの条件下で行なった。実験では、特に摩擦の速度依存性を示すパラメータ a-b が、温度と間隙水圧の上昇に伴ってどのように変化するかを調べた。

まだ予想的研究段階であるが、100°Cでの実験において、低間隙水圧(高有効応力)条件では正の値をとった a-b が、間隙水圧の上昇とともに正の値から負の値に変化していくことが明らかになった。これは、プレート境界浅部や深部の非地震発生域においても、間隙水圧が上昇することで地震を起こす性質をもつということを示している。しかしながら200°Cと300°C条件下では、間隙水圧によらず a-b は正の値を示し、速度急変時のすべり挙動は粘弾性的な性質を示すことが分かった。この温度条件下におけるジャケットの変形挙動を今後検討する必要があるが、従来岩石摩擦の a-b が負となる温度領域において藍閃石片岩の a-b は正になる可能性が出てきた。

沈み込み帯の地震発生モデル(e.g., Scholz, 1998)では、100-300°Cにおいて岩石摩擦の速度依存性パラメータ a-b が負になることから、この温度領域を地震発生域と定義している。ただし、これは沈み込み帯には存在しない花崗岩の高温摩擦実験の結果に基づくモデルである。今後、沈み込み帯深部の地震発生域に存在する岩石の摩擦の性質に基づいて、特に間隙水圧(有効応力)を考慮した新しい沈み込み帯地震発生モデルを構築する必要があるかもしれない。講演では組織観察も合わせたより詳細な結果を報告する。

キーワード: 藍閃石片岩, 間隙水圧, 高温・高圧実験, 摩擦挙動

Keywords: Glaucophane schist, Pore pressure, High temperature and high pressure, Frictional behavior

## 模擬断層ガウジの圧密に関する実験的研究 Experimental study about compaction of simulated fault gouge

平田 萌々子<sup>1\*</sup>, 武藤 潤<sup>1</sup>, 長濱 裕幸<sup>1</sup>, 大槻 憲四郎<sup>1</sup>  
Momoko Hirata<sup>1\*</sup>, Jun Muto<sup>1</sup>, Hiroyuki Nagahama<sup>1</sup>, Kenshiro Otsuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, Tohoku University

模擬断層ガウジの摩擦すべり実験より、すべり不安定性はガウジ層内の微細構造発達と密接に関係していることが知られている (Byerlee et al., 1978; Logan et al., 1979; Marone and Kilgore, 1993; Onuma et al., 2011)。ガウジ層の剪断変形の初期段階では、圧密が発生し、剪断変形が十分に進行すると不安定すべりが発生することが明らかになった (Marone et al., 1990)。しかし、計測点がガウジ層から離れており、データ収録速度が遅いため不安定すべりに至るまでの詳細なガウジの変形過程は明らかにされていない。そこで本研究では、歪ゲージを用いて、不安定すべりに至るまでのガウジの挙動をより詳細に調べるとともに、封圧が摩擦の不安定性に及ぼす影響について明らかにした。

ガス圧式圧縮試験機を用いて模擬断層ガウジの摩擦実験を行った。直径 20 mm、長さ 40 mm の斑れい岩の円柱状試料を長軸に対して 50° で切断し、プレカット面に模擬断層ガウジとして石英粉を 0.1 g もしくは 0.2 g 挟んだ。封圧 140?180 MPa、歪速度  $10^{-3}$  /s で実験を行った。外部ロードセル及び、試料の圧縮軸方向に歪ゲージを設置し、軸応力を測定した。また、ガウジを跨ぎガウジに対して 45° の向きに歪ゲージを設置し、すべり変位の測定を行った。これらを収録速度 2 MHz で収録した。模擬断層ガウジの圧密過程を詳細に明らかにするために、載荷時、軸応力がある目標値 (190, 450, 640, 800 MPa) に到達したときに載荷を一時停止した。適当な時間経過後、次の目標値まで載荷した。この操作を不安定すべりが発生するまで繰り返し行った。

ガウジを跨いで設置した歪ゲージは、軸応力を増加させている間は常に伸張した。これはポアソン効果とガウジの剪断変形による当然の結果である。載荷を一時停止している間に、軸応力の大きさに応じてガウジに 3 つの異なる変形挙動がみられた。挙動 1: 最低軸応力 (190 MPa) で載荷を一時停止したときに共通して現れるもので、軸応力の微小な低下に対応して歪ゲージがごくわずかに短縮する。この応力レベルではガウジが弾性的に振る舞うことを示唆する。挙動 2: 軸応力 450, 640 MPa のとき、軸応力低下を伴いつつ歪ゲージが伸長し、その後軸応力は低下し続けるが歪ゲージは短縮に反転する。挙動 3: 載荷を繰り返した後、載荷しつづけても軸応力の増加率が小さくなったときにみられるもので、軸応力低下に対して大きく歪ゲージが伸長する。不安定すべりが発生するのは挙動 3 の後であることが多い。これらの挙動は軸応力の増加に応じながら挙動 1 から挙動 3 へと進展した。さらに、不安定すべりが発生するときの応力は、すでにそれまでに経験した最大応力よりも低いこと、載荷を繰り返す毎にガウジの永久変形が蓄積し、軸応力が増加しなくなることが明らかになった。本研究では、繰り返し載荷されることにより、ガウジが圧密して最密充填に至った後 (挙動 1, 2)、高応力下でガウジ粒子の破壊・すべりが発生したことが力学データから推定される (挙動 3)。これまでのガウジを用いた摩擦不安定性と組織発達に関する研究から、ガウジが圧密により局所的な R1 シアーが形成され、Y シアーへと発展することで不安定すべりに至ることが知られている (Logan et al., 1979; Onuma et al., 2011)。挙動 3 が R1 シアーの形成段階に相当すると考えられ、R1 シアーの発達によってガウジ内部にすべり面が形成され、すべりが開始される。このような過程は高封圧であるほど促進されることから高封圧下では不安定すべりに至るまでの永久変位が小さくなることも明らかになった。以上より、封圧が摩擦不安定性に及ぼす影響と、ガウジが不安定すべりに至るまでの過程をより詳細に、高い時間応答性のもとで力学データと結びつけながら明らかにすることができた。

キーワード: 模擬断層ガウジ, 圧密, 摩擦不安定性

Keywords: simulated fault gouge, compaction, frictional instability

## 一軸圧縮試験および一面せん断試験における花崗岩の粉碎粒子特性 Properties of comminuted granite subjected to uniaxial compression and direct shear tests

角田 裕一<sup>1</sup>, 滝沢 茂<sup>2\*</sup>

Yuuichi Kakuta<sup>1</sup>, Shigeru Takizawa<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学生命環境学群地球学類, <sup>2</sup> 筑波大学大学院生命環境系

<sup>1</sup>University of Tsukuba Life and Environmental Sciences Geosciences, <sup>2</sup>Graduate of School of Life and Environmental Sciences

### 一軸圧縮試験および一面せん断試験における花崗岩の粉碎粒子特性

本研究では花崗岩の一軸圧縮試験と一面せん断試験を行い、粉碎粒子の形状が粉碎様式の違いを反映するか否かについて検討した。また、弾性ひずみエネルギー密度 ( $J/cm^3$ ) と粉碎粒子の比表面積 ( $m^2/cm^3$ ) の関係について明らかにした。

一軸圧縮試験では高さ 2~5 cm, 直径 1.2~1.7 cm の円柱状試料を作製し、破壊応力 91~137 MPa を与えた。一面せん断試験では垂直応力 1.125~4.5  $kgf/cm^2$  を与えて、30 分間で水平変位量 10 mm せん断した。

粉碎粒子の形状特性について、一軸圧縮試験で生成された粉碎粒子の形状は、破壊応力の大きさに関わらず、鋭い稜を有した不規則形状、棒状、針状、板状を呈する。一面せん断試験後の粉碎粒子の形状は、垂直応力 3.375  $kgf/cm^2$  以上の場合、半数を超える 100  $\mu m$  以上の粉碎粒子で稜が丸みを帯びた形状を呈する。しかしながら、垂直応力 2.25  $kgf/cm^2$  以下の場合、一部の 100  $\mu m$  以上の粉碎粒子で稜が丸みを帯びる程度である。これらの観察結果より、粉碎粒子の形状は粉碎様式の違いを反映すると考えられる。

生成された粉碎粒子の比表面積は Ar ガスによるガス吸着法で測定した。一軸圧縮試験の結果、弾性ひずみエネルギー密度は粉碎粒子の比表面積の増加に比例する。一面せん断試験の結果、垂直応力 3.375  $kgf/cm^2$  以上の場合、せん断応力は粉碎粒子の比表面積増加量に比例する。これら二つの破壊実験の結果より、弾性ひずみエネルギー密度と粉碎粒子の比表面積の間には、Rittinger の粉碎法則に基づいた関係式が成り立つと考えられる。

キーワード: Rittinger の粉碎法則, 粉碎粒子, 弾性ひずみエネルギー密度, 比表面積

Keywords: Rittinger's hypothesis, comminuted particles, elastic strain energy density, specific surface area

## 断層におけるビトリナイト反射率異常の成因

### What is the factor controlling the increase in vitrinite reflectance along faults?

古市 裕之<sup>1\*</sup>, 氏家 恒太郎<sup>1</sup>, 坂口 有人<sup>2</sup>, 堤 昭人<sup>3</sup>

Hiroyuki Furuichi<sup>1\*</sup>, Kohtarō Ujii<sup>1</sup>, Arito Sakaguchi<sup>2</sup>, Akito Tsutsumi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学・生命環境, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構, <sup>3</sup> 京都大学・理学

<sup>1</sup>Life and Env. Sci., Univ. Tsukuba, <sup>2</sup>JAMSTEC, <sup>3</sup>Sci., Kyoto Univ.

断層における摩擦発熱の検出は、地震性すべりダイナミクスを理解するうえで重要である。近年、ビトリナイト反射率地質温度計を用いて断層における摩擦発熱を検出する試みがなされており、断層からビトリナイト反射率異常を見出して、それを EASY%Ro 法と呼ばれるアレニウス則を基礎としたカイネティクスモデルに適用し、摩擦発熱時の到達温度を推定している。しかし、断層におけるビトリナイト反射率異常の成因は良く分かっていない。また、EASY%Ro 法が断層における摩擦発熱のような短時間急速加熱に適用できるかは定かではない。そこで本研究では、南海トラフ巨大分岐断層から採取した粘土質物質に熊野前弧海盆から採取した石炭物質を混ぜ、wet (water-saturated) と dry (room humidity) 条件下で高速 (1.3 m/s) 摩擦実験を実施し、実験後にビトリナイト反射率測定と微細構造観察を行った。実験の結果、wet, dry 条件とも急激なすべり弱化和温度上昇を示した。しかし、実験前後でのビトリナイト反射率を比較したところ、dry 条件でのみビトリナイト反射率増加が認められた。このビトリナイト反射率増加は、粉碎により細粒化したビトリナイト粒子で顕著であった。一方、粉碎の影響が少なく、主として急激な温度上昇のみを受けた wet 条件の実験では、ビトリナイト反射率の増加は認められなかった。また、高速すべり時間と実験時の最高到達温度から EASY%Ro 法で求めたビトリナイト反射率は、実験後に測定したビトリナイト反射率より高かった。これらの結果は、短時間急速加熱のみの効果ではビトリナイト反射率は増加せず、粉碎による細粒化が必要であることを示している。EASY%Ro 法を使用して求めた断層における摩擦発熱時の到達温度は過剰評価しており、正確な温度見積には今後粉碎の効果を考慮した新しいビトリナイトのカイネティクスモデルを構築する必要がある。

キーワード: ビトリナイト反射率, 摩擦発熱, 粉碎, 南海トラフ

Keywords: vitrinite reflectance, frictional heating, comminution, Nankai Trough

## 断層比抵抗分布と断層岩微細組織との比較 - 跡津川断層における事例研究 - Comparison between the resistivity profile and fault rock microstructure in fault zones -Case study at Atotsugawa fault-

小村 健太郎<sup>1\*</sup>Kentaro Omura<sup>1\*</sup><sup>1</sup> 防災科学技術研究所<sup>1</sup>Nat'l Res Inst Earth Sci Disaster Prev

地震を引き起こす活断層では、断層面の構造や摩擦特性は一樣ではなく、不均質になり、それがアスペリティとして観測される場合がある。しかし、その断層面の不均質性の本体については、まだわからないことが多い。地震探査や電磁気探査など地球物理的な観測と断層を構成する断層岩の微細組織や鉱物組成との比較から不均質の本体を考察することが有効だと考えられる。本発表では、走向方向の不均質の明瞭な跡津川断層について（断層走向に沿って微小地震が線状に分布するなかで、中央部の浅部地震活動の不活発な領域とその両脇の活発な領域に明瞭に区分される）、微小地震多発域と非地震域それぞれの断層帯を横断する電磁気探査の結果と、両測線内の断層帯のなかをボーリングによって得られた断層岩の観察を比較した結果を報告する。

電磁気探査はリモートリファレンス方式によるAMT探査を断層を横断して3側線で実施した（小村他地震学会2005）。そのうち岐阜県飛騨市宮川町の宮川側線が微小地震多発域にあたり、同神岡町跡津川近傍大多和地区の大多和測線が非地震域にあたる。それぞれ測線長（測点数）は1.8km（9点）、0.9km（8点）である。インピーダンス・ストライキは周波数によらずほぼ一樣で、宮川測線ではNE-SW(or NW-SE)走向で跡津川断層の主要な走向に比べて南北方向による一方、大多和測線では跡津川断層に沿うNNW-SSE(or ENE-WSW)走向が卓越した。2次元解析では、低比抵抗領域が断層下地下深さ200m以深の、数100mの幅に分布し、断層の運動に伴う破碎や剪断の進んだ断層帯に相当すると考えられた。また、宮川測線では低比抵抗領域の抵抗値が、大多和測線に比べて高く、幅も狭く、地下の断層帯の破碎度が跡津川測線に比べて低く、間隙率が低くなっていることが示唆された。

一方、それぞれの測線の断層帯に対応すると見なされる地点で、深さ200mの宮川井（廣川他連合大会2007）、350mの跡津川井（小村他合同大会2005）が断層帯のなかを掘削され、連続した断層岩コアが採取された。どちらも、弱破碎変質岩や断層角礫が多く分布し、そのなかに薄いすべり面や厚いガウジ層が多数観察された。両断層岩の微細組織観察や鉱物組成から以下のような特徴が見いだされた（廣川他連合大会2007）。弱破碎変質岩中の薄いすべり面においては、宮川井では粉碎帯内の基質は炭酸塩鉱物（2次鉱物）を多量に含み、長石の双晶にキックバンドが見られない、一方跡津川井では粉碎帯内の基質は層状ケイ酸塩鉱物（2次鉱物）を多量に含んで面構造が発達し、長石の双晶にキックバンドが見られた。また、断層角礫に挟まれた厚いガウジにおいては、宮川井では断層角礫、破碎帯内の粒間は主に炭酸塩で満たされ、クラスト内のみ石英が析出した、一方、跡津川井では断層角礫、破碎帯内の粒間は主に層状ケイ酸塩で満たされ、破碎帯中に石英脈ができた。

両測線で、比抵抗分布に違いが見られ、対応する断層岩にも、組織、面構造の発達、粒間を埋める鉱物などに違いが見られた。例えば、跡津川井の断層岩に特徴的に見られる層状ケイ酸塩鉱物（粘土鉱物）の面状分布が、両測線で比較して、断層帯内の低比抵抗値や、インピーダンス・ストライキの走向の違いに相関しているようである。比抵抗分布と断層岩微細組織との定量的な相関関係は、断層岩自体の比抵抗測定などの結果と併せて、考察する必要があるが、断層帯の組織、構成、面構造の発達の違いが、比抵抗分布の差になって表れ、さらに、地震活動の違い地震活動/非活動領域の違いの要因になることが想像される。

キーワード: 比抵抗, 電磁気探査, 断層岩, 微細組織, 鉱物組成, 地震発生

Keywords: resistivity, electromagnetic survey, fault rock, microstructure, mineral composition, earthquake generation

## 台湾チェルンブ断層における炭質物のラマン分光分析および赤外分光分析 Characterization of carbonaceous materials in the Taiwan Chelungpu fault by micro Raman- FTIR spectroscopies

前川 由佳<sup>1\*</sup>, 廣野 哲朗<sup>1</sup>, 藪田 ひかる<sup>1</sup>, 谷川 亘<sup>2</sup>, 石川 剛志<sup>2</sup>  
Yuka Maekawa<sup>1\*</sup>, Tetsuro Hirono<sup>1</sup>, Hikaru Yabuta<sup>1</sup>, Wataru Tanikawa<sup>2</sup>, Tsuyoshi Ishikawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, <sup>2</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構高知コア研究所

<sup>1</sup>Department of Earth & Space Science, Graduate School of Science, Osaka Univ., <sup>2</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Kochi Institute for Core Sample Research

地震発生時には、断層での滑りによって摩擦発熱が生じる。この発熱による温度上昇から地震時の剪断応力や滑り距離を推定する事が出来るため、断層が履歴している温度情報を調べることは重要である。1999年台湾集集地震で動いたチェルンブ断層では、周囲の未変形な岩石と比較して、断層における顕著な化学変化（炭酸塩鉱物の熱分解、粘土鉱物の脱水、磁性鉱物の生成など）が検出されているが、これらの反応は可逆的であるため、地震後の断層回復過程での影響を除去し、地震時のみにおける情報を抽出することは難しい。

そこで本研究では、温度に対して不可逆的な反応を示す炭質物に着目し、チェルンブ断層の掘削試料に含まれる炭質物を分離、ラマン分光分析および赤外分光分析による構造の解析を実施した。また、母岩試料を用いた加熱実験および高速摩擦実験後の試料を同様に分析し、地震時の瞬間的な被熱による炭質物の変化について実験的に検証を行った。

ラマン分光分析では、PSZ から分離した炭質物で G バンド ( $1600\text{ cm}^{-1}$ ) の半値幅の低下と D バンド ( $1350\text{ cm}^{-1}$ ) の肩のピーク群の減少が認められた。また、赤外分光分析では、 $-\text{CH}_3$  ( $2960\text{ cm}^{-1}$ ) や  $-\text{CH}_2$  ( $2850\text{ cm}^{-1}$ ,  $2925\text{ cm}^{-1}$ ) に対応するピークに変化が見られた。これらは地震時の摩擦発熱による、炭質物の分子構造の変化を反映しているのかもしれない。

キーワード: 台湾チェルンブ断層, 炭質物, ラマン分光分析, 赤外分光分析

Keywords: Taiwan Chelungpu fault, carbonaceous materials, Raman spectroscopy, FTIR spectroscopy

## 台湾チェルンブ断層における粘土鉱物のコサイスミックな変化 Coseismic reaction of clay minerals in the Taiwan Chelungpu fault

神田 大樹<sup>1\*</sup>, 廣野 哲朗<sup>2</sup>, 亀田 純<sup>3</sup>, 谷川 亘<sup>4</sup>, 石川 剛志<sup>4</sup>

Hiroki Kanda<sup>1\*</sup>, Tetsuro Hirono<sup>2</sup>, Jun Kameda<sup>3</sup>, Wataru Tanikawa<sup>4</sup>, Tsuyoshi Ishikawa<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学理学部物理学科, <sup>2</sup> 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, <sup>3</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>4</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構高知コア研究所

<sup>1</sup>School of Science, Osaka University, <sup>2</sup>Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University,

<sup>3</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, <sup>4</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Kochi Institute for Core Sample Research

地震時の断層すべり挙動の解明において、地震を引き起こす震源断層の鉱物組成や物理的および物理化学的特性の定量的な評価は極めて重要である。最近の研究によって、断層岩に多く含まれる粘土鉱物は、他の鉱物に比べて強度が低く小さな摩擦係数を持つため、そのすべり挙動を支配する可能性が示唆されている。

そこで、本研究では、1999年台湾集集地震を引き起こしたチェルンブ断層の滑り面に含まれる粘土鉱物に着目した。この分析にあたり、粉末 X 線回折法を用いるが、これには幾つかの解析方法がある。そこで、母岩の試料および断層を模擬するためにミルで粉碎した試料において、全岩バルクおよび粘土フラクション (<2 μm) での RockJock 法および Biscaye 法による鉱物組成分析を実施、その結果の比較を行った。そして、この検討結果をもとに、チェルンブ断層の掘削コア試料における分析を実施した結果、地震時の滑り面における有意な粘土鉱物の減少 (粉碎によるアモルファス化) を検出することが出来た。

キーワード: 粘土鉱物, 粉碎, XRD, RockJock

Keywords: Clay minerals, comminution, XRD, RockJock

## Hi-net 高感度加速度計によって推定された東北地方太平洋沖の超低周波地震活動 Very low frequency earthquakes off the Pacific coast of Tohoku located by Hi-net high-sensitivity accelerometers

松澤 孝紀<sup>1\*</sup>, 浅野 陽一<sup>1</sup>, 小原 一成<sup>2</sup>  
Takanori Matsuzawa<sup>1\*</sup>, Youichi Asano<sup>1</sup>, Kazushige Obara<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>NIED, <sup>2</sup>ERI, Univ. of Tokyo

南海トラフの沈み込み帯で発生する深部低周波微動の発見以降 (Obara, 2002), 通常地震に比べ低周波帯域に卓越する様々なスロー地震が, 世界各地の沈み込み帯において報告されるようになった。このうち, 超低周波地震は周期 20 秒付近に卓越するスロー地震である。十勝沖や南海トラフでは海溝軸付近において, 超低周波地震の顕著な活動が報告されており (例えば, Obara and Ito, 2005; Asano et al., 2008), 最近の研究では, 琉球弧においても超低周波地震の活動が報告されている (Ando et al., 2012)。また Sugioka et al. (2012) は海底地震計データを用いて海溝軸付近で発生する超低周波地震の震源及びメカニズム解を高精度に求め, これらがデコルマ付近で発生していることを指摘しており, 超低周波地震はプレート浅部の応力蓄積状態を考える上でも重要な現象と考えられる。東北地方太平洋沖の海溝軸付近では, これまで超低周波地震の発生は報告されていなかったが, 松澤他 (2012) は F-net 広帯域地震計データの解析から, この地域においても超低周波地震が発生していることを示した。以下では, 詳細な活動の特徴を調べるため, より稠密な観測点分布をもつ Hi-net 高感度加速度計を用いて東北地方太平洋沖の超低周波地震の推定を行った。

解析にあたっては, 2 段階のテンプレートイベントを用いた波形相関解析を行った。まず F-net 広帯域地震計データを用い, 高精度な解析の対象とする候補イベントの抽出を行った。プレート境界でのすべりと整合的なメカニズム解および深さを持つ通常地震をテンプレートイベントとし, 0.02-0.05Hz の帯域でバンドパスフィルターをかけた F-net 広帯域地震計の連続波形記録に対して, テンプレートイベントとの相関係数を計算した。このとき, テンプレートとしたイベントを中心とした 1 度の範囲内で震央位置のグリッドサーチを行い, 90 秒の時間ウィンドウ内で相関係数の平均値が 0.5 以上かつ最大となるものを, 候補イベントとして抽出した。この候補イベントに対し, テンプレートイベントから震央距離 300km 以内に位置する Hi-net 高感度加速度計のデータを用い, テンプレートイベントを用いた同様な震源決定を 0.02 度間隔の空間グリッドにおいて行った。ただし, 得られる結果には通常地震が含まれるため, 通常地震の震源カタログとの照合を行うとともに, 2-6Hz の帯域におけるエンベロープ振幅比を用いて, 高周波にエネルギーの卓越する通常地震の除去を行った。また遠地地震による表面波到来時には, 相関係数が高くなる傾向がみられる。この影響を除くため, Hi-net 高感度加速度計を用いたマルチアレイ解析 (Asano et al., 2008) の結果を用いて, 日本列島全体を伝播する地震波が到来している時間帯を除外した。最後に遠地地震の表面波のコーダ波部分や脈動等による影響の有無を目視で確認し, 超低周波地震を決定した。

東北地方太平洋沖の超低周波地震のうち, 最も活動が顕著な福島・茨城沖については, F-net 広帯域地震計による解析から東西方向に延びる震央分布が得られていた (松澤他, 2012) が, Hi-net 高感度加速度計を用いることで東西方向の広がりは半分程度となり, 超低周波地震はより集中した領域で発生していることが明らかになった。また, 福島・茨城沖では, 少なくとも 3 つのクラスターが南北に並んで存在することが明らかになった。北側のクラスターでの活動は, 2011 年東北地方太平洋沖地震後に静穏化した一方, 中央と南側クラスターでは, 活動が地震後に活発化した。これは, 北側のクラスターは地震時のすべりによってある程度応力を解放した領域に位置する一方, これより南側の領域では地震すべりによる応力集中, あるいは余効すべりの影響が顕著であることを示唆する。このような超低周波地震活動の時間変化は, 大地震前後のプレート境界でのすべり挙動の変化の指標としても有用であると期待される。また, この波形相関を用いた解析では, 通常地震の震央位置も推定することができる。通常地震は超低周波地震の周辺や 3 つのクラスターの間でも発生しており, とくに最も活発な活動を示す中央のクラスター周辺では, 通常地震と超低周波地震の発生領域が相補的な位置関係にある。これは, プレート境界面における摩擦特性の空間分布を考える上でも重要な情報と考えられる。

キーワード: 超低周波地震, 東北地方太平洋沖, 2011 年東北地方太平洋沖地震, スロー地震

Keywords: very low frequency earthquake, off the Pacific coast of Tohoku, 2011 Tohoku Earthquake, slow earthquake



## レイテ島におけるフィリピン断層のクリープ変位 Creep on the Philippine fault in northern Leyte Island

福島 洋<sup>1\*</sup>, 堤 浩之<sup>2</sup>, Jeffrey S. Perez<sup>3</sup>

Yo Fukushima<sup>1\*</sup>, Hiroyuki Tsutsumi<sup>2</sup>, Jeffrey S. Perez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所, <sup>2</sup> 京都大学理学研究科, <sup>3</sup> フィリピン火山地震研究所

<sup>1</sup>DPRI, Kyoto University, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>3</sup>Philippine Institute of Volcanology and Seismology

フィリピン断層は、フィリピン列島を 1250 km に渡り縦断する世界最大級の横ずれ断層である。変位の向きは左横ずれで、GPS 観測に基づく相対速度は 20 mm/year を超える。北端に位置するルソン島中部や南端のミンダナオ島では、断層は大きな地表変位を伴う M7 以上の大地震で破壊するのに対し、中部のマスバテ島やレイテ島では、フィリピン断層沿いにおいて過去 400 年間に M7 以上の地震は知られておらず、レイテ島の一部では断層クリープが確認されている (Tsutsumi and Perez, 2011)。本発表では、合成開口レーダ干渉法 (InSAR) を用いてクリープ変位を検出した結果と、現地の構造物の変位量と建造年代から明らかとなったクリープの証拠と変位レートについて報告する。

本研究の InSAR 解析には、2007 年 2 月と 2011 年 1 月の 4 年間に西上空から撮像された 20 枚の ALOS 衛星の PALSAR 画像を用いた。垂直基線長が短い 39 組のペアで計算した干渉画像を用いてその後の解析を行った。まず、軌道誤差や電離層ノイズに起因する位相トレンドを一次関数で仮定し、それぞれの干渉画像から除去した。この際、解析領域内で適当にサンプリングしたピクセルにおける変動時系列のばらつきが最も抑えられるように位相トレンドを推定した。最終的に、各ピクセルにおける変動時系列から平均変位速度を算出した。

InSAR 解析の結果、レイテ島の北部から中部にかけて、平均変位速度の不連続が得られた。その位置がフィリピン断層のトレースと一致していることから、フィリピン断層がクリープしていることが示唆される。クリープ速度は、衛星視線方向で最大 2.5mm/yr、断層走向方向に換算すると 11mm/yr である。一方、現地調査からは、レイテ島北部において 12~26mm/yr の変位速度が推定された。InSAR 解析から得られた変位速度の方が小さいが、これは一定領域での平均値として求めたものであり、必ずしも矛盾しているとは限らない。また、変位速度が一定でない可能性もあり、今後詳しい調査が必要である。レイテ島南部においては、InSAR 解析からも現地調査からもクリープの証拠は現在のところ見つかっていない。

キーワード: フィリピン断層, レイテ島, 断層クリープ, 合成開口レーダ干渉法

Keywords: Philippine fault, Leyte Island, fault creep, InSAR

## 東北地方太平洋沖地震の前後で観測された間隙水圧とその潮汐・大気圧応答の時間変化

### Time dependent changes of pore pressure before and after the 2011 Tohoku earthquake

木下 千裕<sup>1\*</sup>, 加納 靖之<sup>1</sup>, 伊藤 久男<sup>2</sup>

Chihiro Kinoshita<sup>1\*</sup>, Yasuyuki Kano<sup>1</sup>, Hisao Ito<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所, <sup>2</sup> 独立行政法人 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <sup>2</sup>JAPAN MARINE SCIENCE & TECHNOLOGY CENTER

これまで地震の前後あるいはコサイスマミックな地下水位の変化、流量の変化、自噴水など様々な水理学的現象が観測されており、地震と地下水は密接な関係にあるとされている (Roeloffs, 1996)。

我々は神岡鉱山 (岐阜県) において応力変化の測定をめざし、間隙水圧の連続観測を行っている。応力自体はとても測定しにくい量であるが、線形間隙弾性理論より、岩盤の間隙水圧変化を測定することができれば、間隙水圧がスカラー量であるという制約はあるが、岩盤と間隙水のあいだの力のつりあいから、応力変化に換算することができる。つまり、地震に伴う応力変化を間隙水圧測定から推定できる可能性がある。間隙水圧の時系列変化については応力変化の他に、気象 (特に大気圧や長期の降水) の変化や固体地球及び、海洋潮汐などの外的要素の影響を強く受ける。降水量が多いと地下に流れる水量が増え、それに応じて間隙水圧も上昇する。また、融雪により例年3月から4月にかけて間隙水圧が上昇のピークを迎える。一方で、2011年の観測記録では3月から4月にかけて間隙水圧が大きく減少した。これは東北地方太平洋沖地震 (M 9.1) によって、地殻全体が東側 (海側) に引っ張られ地殻が伸びたこと、あるいは地震時の振動によって水が通りぬけやすくなったことが考えられる。

今回は神岡鉱山のボアホール井戸 (K2、K5) の観測データを用いて、東北地方太平洋沖地震の前後にどのような変化が見られたかを考察する。解析にあたって、1Hz サンプリングのデータを1時間ごとの値にリサンプリングする。これを東北地方太平洋沖地震が起きた日を境に1ヶ月ごと (データ数 744 個ずつ) に区切る。気象や地球潮汐による変動を抽出して調べるため、潮汐解析プログラム BAYTAP-G (Tamura, 1995) を適用し、主要分潮の振幅と位相、および気圧変化に対する応答係数を求め地震前後の変化をみた。今回はその中でも M<sub>2</sub> 分潮 (周期:12.42 時間)、O<sub>1</sub> 分潮 (周期:25.82 時間) の振幅変化に着目した。すると、東北地方太平洋沖地震を境に M<sub>2</sub>、O<sub>1</sub> 分潮の振幅は共に減少する結果となった。これは、地震によって透水性が増大したこと、岩盤の弾性定数変化したことで説明可能である。また、水理拡散率を計算すると地震前は 0.03m<sup>2</sup>/s だったものが地震後 0.09m<sup>2</sup>/s の増加するという結果が得られた。2007年3月25日に起きた能登半島沖地震 (M 6.9) についても同様の解析を行ったが、東北地方太平洋沖地震ほど明確な振幅変化は認められず、東北地方太平洋沖地震がいかに大きい地震であったかを裏付けるものとなった。

より詳細に調べるため、解析の時系列幅を変化させ、同じような振幅変化が見られるか検討した。

キーワード: 間隙水圧, 水理拡散率, 東北地方太平洋沖地震, 地球潮汐

Keywords: pore pressure, hydraulic diffusivity, Tohoku earthquake, Earth tide

## 地震時の粉碎によりダメージを受けた石英粒子の間隙水への溶解現象について Dissolution process of quartz grains damaged by earthquake slip

上田明広<sup>1</sup>, 廣野 哲朗<sup>1\*</sup>, 神田 大樹<sup>1</sup>, 谷川 亘<sup>2</sup>, 石川 剛志<sup>2</sup>

Akihiro Ueda<sup>1</sup>, Tetsuro Hirono<sup>1\*</sup>, Hiroki Kanda<sup>1</sup>, Wataru Tanikawa<sup>2</sup>, Tsuyoshi Ishikawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学理学研究科, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構 高知コア研究所

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Osaka University, <sup>2</sup> JAMSTEC-Kochi

天然の断層露頭において、断層沿いに発達する石英や方解石の鉱物脈が普遍的に観察される。地震時には、断層滑りによって、断層を構成する鉱物は著しい粉碎を受け、細粒化することが多い。そこで、本研究では、断層滑りにおける鉱物の粉碎と溶解沈殿の関係に焦点をあて、断層を模擬するためにミルで粉碎した石英粒子を用いた溶解実験を実施した。

実験は、粉碎した石英粒子を milliQ とともにテフロンボトルに入れ、30~180 °C にて、0~72 時間加熱し、経過時間ごとに取り出すバッチ法で実施した。また、実験後の溶液中の Si の濃度分析には ICP-AES 装置を使用した。さらに、濃度分析結果より、見かけの溶解速度と溶解の活性化エネルギーの評価を行った。結果、石英を粉碎すると、水に対する溶解度が増加し、同時に見かけの活性化エネルギーが減少することが明らかになった。これは、地震時に粉碎された鉱物は間隙水にすぐに溶解し、その後、鉱物脈として析出する、すなわち天然の断層にて多くの鉱物脈が発達している現象を説明できるかもしれない。

## グラファイトを含むシュードタキライトによる地震性断層の潤滑作用 Seismogenic fault lubrication by graphite: Evidence from graphite-bearing pseudotachy- lyte and cataclasites

中村 佳博<sup>1\*</sup>, Madhusoodhan Satish-Kumar<sup>2</sup>, 豊島 剛志<sup>2</sup>, 赤井 純治<sup>2</sup>  
Yoshihiro Nakamura<sup>1\*</sup>, Satish-Kumar Madhusoodhan<sup>2</sup>, Tsuyoshi Toyoshima<sup>2</sup>, Junji Akai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>新潟大学 大学院自然科学研究科, <sup>2</sup>新潟大学 理学部地質科学科

<sup>1</sup>Graduate School of Science & Technology, Niigata University, <sup>2</sup>Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University

We report the occurrences of basal-slip graphite derived from pseudotachylyte in the upper sequence of Hidaka metamorphic belt, Hokkaido, Japan. Melt-induced textures such as biotite microlites, shell textures of Fe-oxide, spherulites and vesicles in Fe-oxide are observed in the graphite-bearing pseudotachylyte. These matrix have two important features. Firstly, hydrous minerals, biotite and muscovite, have completely disappeared and albite, quartz and oxide minerals including graphite have survived as fragments. These results suggest that pseudotachylyte was generated at least above 650 - 700 degree Celsius by dehydration melting of biotite and muscovite. Secondly, graphite shows lower degree of graphitization than those in the cataclasite, and is closely associated with other oxide minerals along the shear planes, and their aggregations have striation and smooth surface. In particular, the deformed graphite in the pseudotachylyte matrix records valuable information of degree of graphitization during seismogenic faulting. However, the Fe-oxide spherules have formed in the matrix by the oxidation during melt-quenching, where a part of original graphite might have been converted to CO<sub>2</sub> by oxidation. In the Micro-Raman spectroscopy and XRD study, graphite in the pseudotachylyte show amorphization by basal slip. The Lc values decrease from over 40 nm to 9-15 nm and the scatter plots between R1 ratio and G band FWHM display a different trend with higher R1 ratios than that in the host rocks. In addition, HRTEM observations indicate that microstructures are mainly observed in interlayer delamination of stacking. Moreover, carbon isotopic composition of graphite in both host rocks ( $\delta^{13}\text{C} = -24.8$  to  $-25.9$  per mil) and pseudotachylyte-bearing cataclasite ( $\delta^{13}\text{C} = -22.5$  to  $-27.8$  per mil) show clearly biogenic isotope signatures, and considered to have formed through metamorphism and deformation process of organic matter in sedimentary rocks. Thus, these data suggest that the differences of crystal size by slip rate might be the driving force of deformation process.

Therefore, the presence of small amount of graphite by residual assimilation during frictional melting has the potential for fault lubrication. Our finding of deformed striated graphite is a direct evidence of fault lubrication on the slip surface during seismogenic faulting.

Keywords: pseudotachylyte, graphite, frictional melting, amorphization, lubrication