

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 29 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340150

研究課題名（和文） 摩擦発熱による粘土鉱物の脱水が地震すべりに与える効果の解明

研究課題名（英文） Effects of dehydration of clay minerals on seismic slip

研究代表者

氏名 恒太郎 (UJIIE KOHTARO)

筑波大学・生命環境系・准教授

研究者番号：40359188

研究成果の概要（和文）：断層にはしばしば粘土鉱物が多く含まれている。このような断層に沿って地震破壊が伝播するとどうなるのか明らかにするために、回転式摩擦試験機を用いて地震すべりの再現実験を行った。地震時に断層が高速（毎秒約 1 m）ですべると、摩擦によって断層内部の温度が上昇する。これによって粘土鉱物に含まれていた水が脱水し、摩擦を大きく引き下げ、地震破壊域を拡大するとともに、津波の発生ポテンシャルを高めることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：Faults are commonly dominated by clay minerals. To understand frictional response associated with rupture propagation from deep depths, we conducted high-velocity friction experiments on clay-rich fault material. The results show that the frictional strength decreases with displacement due to dehydration of clay minerals. This would enhance rupture propagation toward seafloor and tsunami generation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	5,200,000	1,560,000	6,760,000

研究分野：構造地質学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：地震すべり、摩擦発熱、粘土質断層ガウジ、すべり弱化、流動化

1. 研究開始当初の背景

地震すべりの唯一完全な地質学的証拠といえば摩擦融融物が固化して出来たシュートタキライトであり、それ以外の地震すべりの明確な証拠は天然の断層から未だ見出されていない。一方、高速摩擦実験は地震すべりを再現し、その際の摩擦特性を知るうえで極めて有効であるが、実験は主に斑糲岩や花崗岩などの結晶質岩石またはそのガウジを対象に行われてきた。これまで多くの陸上地

質調査や断層掘削により、天然の断層、とりわけ付加体中のプレート境界断層や分岐断層には、主として粘土鉱物からなる幅狭い（数 mm～数 cm）すべり集中帯が、深度約 0.3 km から 14 km に渡って分布することが明らかになっている。一般に地震時の不安定すべりは幅狭いゾーンに局所化する傾向があることから、すべり集中帯は地震すべりを記録しているポテンシャルが高いといえる。事実、すべり集中帯から摩擦融融物が固化して出

来た地震の化石シュードタキライトが報告されている。しかし、すべり集中帯全体で見ると、シュードタキライトの産出は極めて稀である。したがって、すべり集中帯に地震すべりが及んでいたとすれば、摩擦熔融とは異なる別の地震すべりメカニズムが機能していた可能性が高い。この未知のメカニズムを特定し、その際の摩擦特性を明らかにすることは、地震時の断層強度低下、破壊伝播の促進、津波の発生ポテンシャルを評価するうえで極めて重要である。しかし、摩擦熔融に至らなかった場合の粘土鉱物に富む物質の高速摩擦特性はこれまで検討されていない。したがって、断層において摩擦熔融以外の地震すべりメカニズムは未だ特定できておらず、地震すべり挙動も解明されていないのが現状である。

2. 研究の目的

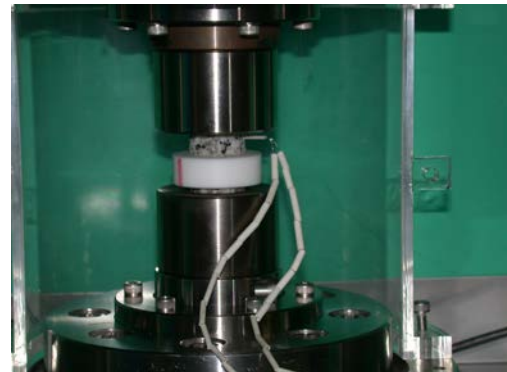
本研究では、付加体中の断層すべり集中帯とその母岩から採取した試料を用いて、地震に相当するすべり速度 (1.3 m/s) で高速摩擦実験を実施し、粘土質断層ガウジの高速摩擦特性を明らかにする。実験後、試料を回収し、微細構造観察、化学組成分析、X線回折分析を行い、新たな高速すべり特有の微細構造と摩擦発熱の検出を試みる。そして高速摩擦実験で見出された新たな知見に基づいて付加体中の断層すべり集中帯を分析し、地震時の摩擦発熱による粘土鉱物脱水の証拠を導き出す。つまり本研究では、粘土質断層ガウジの高速摩擦実験と付加体中の断層すべり集中帯分析を融合させることにより、摩擦発熱による粘土鉱物の脱水が地震すべりに与える効果を解明すると同時に、それに特有の地質学的証拠を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 四国東部と九州東部の四万十付加体に露出する過去のプレート境界断層のすべり集中帯調査を行う。また、実験結果を主として粘土鉱物で構成される天然の断層すべり集中帯に適用させることを考慮して、断層のすべり集中帯及びその母岩から高速摩擦実験用試料を採取する。更に地球深部探査船「ちきゅう」によって掘削採取された南海トラフ付加体の分岐断層 (1944年東南海地震震源域) と前縁断層のコア試料からも高速摩擦実験用試料を採取する。

(2) 回転式高速摩擦実験機を用いて、室温、垂直応力一定制御、すべり速度一定制御、無水・含水状態のもとで粘土質断層ガウジの高速摩擦実験を実施する。実験は、すべり集中帯とその母岩から採取した試料を粒径 0.1 mm 以下に整えたうえで上下を花崗岩 (間隙率

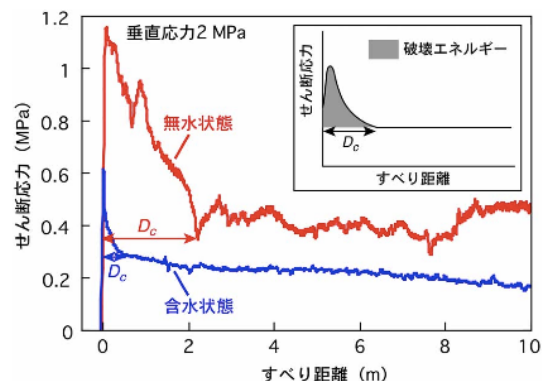
数%以下) で挟み、外側をテフロンリングでシールして行う。これにより実験機からのガウジ試料の流失を防ぐ。実験の際、試料に熱電対と高精度温湿度計を設置し (下図)、摩擦発熱による粘土鉱物の脱水が起こった際の温度変化と湿度変化をモニターする。更に、実験試料を小領域に分割し、実際に計測した実験データと物性データを用いて有限要素法による数値解析を行い、断層ガウジ内部の温度変化・分布を求める。



(3) 高速摩擦実験後回収した試料を用いて、光学顕微鏡・電子顕微鏡による微細構造観察を行い、摩擦発熱や高速すべり特有の微細構造が見い出せるか検討する。また、電子プロブマイクロアナライザーによって断層ガウジマトリックスの化学組成と粘土鉱物の脱水量を定量する。更に、X線回折分析により、粘土鉱物の特定と脱水・熱分解に伴うX線回折ピークの消失の有無を検討する。

4. 研究成果

(1) 無水・含水状態下で行った典型的な実験結果を以下の図に示す。



実験の結果、粘土質断層ガウジを高速 (1.3 m/s) ですべらせると、無水・含水状態とも強度が劇的に低下することが明らかとなった。

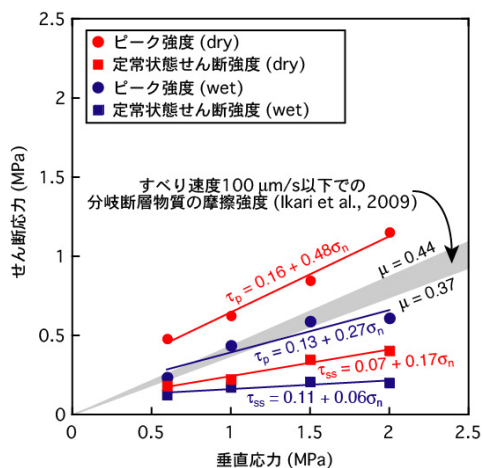
無水状態で行った実験では、すべり距離の増加とともに断層ガウジ内の温度が摩擦発

熱により 600°C 近くまで上昇し、粘土鉱物から脱水した水が気化する。この水の気化に伴って断層ガウジは膨張し、強度低下を引き起こしていることが明らかとなった。

一方、含水状態で行った実験では、すべり開始直後から強度が急速に低下しており、強度低下に必要なすべり距離 (Dc) と破壊エネルギーは、無水状態時と比較して遙かに小さく、地震破壊はより伝播しやすいことが明らかとなった。

無水状態で行った実験と比較して含水状態で行った実験では摩擦発熱時の温度上昇量は低く、300°C 強までである。急速な強度低下時の温度は水が気化する温度より低く、断層ガウジの膨張も起こっていない。含水状態での急速な強度低下の原因は、摩擦発熱と非排水せん断に伴う流体圧上昇であることが明らかとなった。

(2) 垂直応力を変化させ、高速 (1.3 m/s) 摩擦時の無水状態と含水状態でのせん断応力の垂直応力依存性を検討した。結果を以下の図に示す。

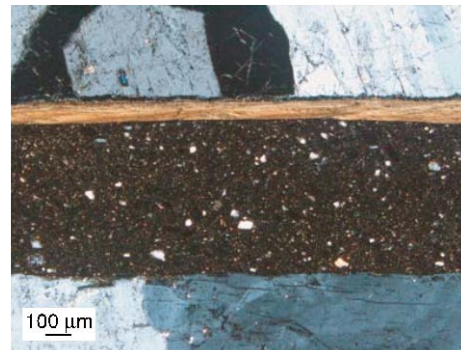


低速 (≤ 0.1 mm/s) での摩擦強度と比較すると、無水状態でのピークせん断応力はやや高いが、含水状態ではほぼ同等である。一方、定常状態せん断応力は、高速では無水・含水状態とも低速時の摩擦強度より顕著に低下する。無水状態では、定常状態せん断応力は垂直応力の増加とともに増加し、摩擦則が成り立つ。一方、含水状態では、定常状態せん断応力の垂直応力依存性はほとんどない。このことは、含水状態で高速ですべらせた際に、断層ガウジは流体として挙動していたことを示している。

(3) 高速摩擦実験後、試料を回収して微細構造観察、化学組成分析、X 線回折ピークの検討を行った。

無水状態で行った実験試料の微細構造は、

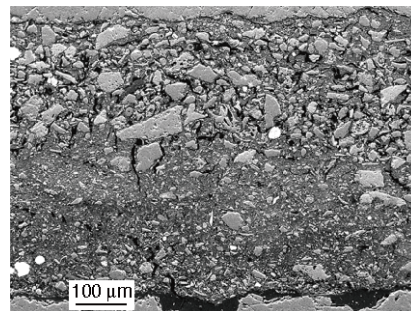
断層ガウジの境界に沿ったすべりの局所化 (下図) と火山豆石様構造の発達によって特徴づけられる。



すべりの局所化部分では、粉碎して細粒化したスメクタイト、イライト、緑泥石からなる粘土鉱物が断層ガウジと平行な方向に配列する。火山豆石様構造は、石英や長石粒子の周囲を細粒化した粘土鉱物を取り囲むことで特徴づけられる。この構造は、毛管力と静電気力により、粘土鉱物が粒子の回りに引きつけられ吸着することで形成される。静電気力による吸着はクーロン力によるものであるが、クーロン力は水が気化すると急激に増加する。また、水の気化が起こると断層ガウジは膨張するので、吸着をよりしやすくする効果があると考えられる。これらのことから、火山豆石様構造の断層ガウジに占める割合増加は、摩擦減少によるガウジ物質の mobility 増加ないし摩擦発熱による温度上昇を反映していることが明らかとなった。

無水状態の実験前後で試料を採取して X 線回折分析を行ったところ、実験後の試料ではイライト、緑泥石などの粘土鉱物や炭酸塩鉱物の X 線回折ピークが消失していた。このことから、粘土鉱物に加え炭酸塩鉱物も摩擦発熱により熱分解していたことが明らかとなった。

一方、含水状態で行った実験試料の微細構造は、逆級化構造の発達で特徴づけられる (下図)。



この逆級化構造の発達するすべり速度、せん断歪み速度を調べたところ、それぞれ $\geq 0.62 \text{ ms}^{-1}$ 、 $\geq 10^3 \text{ s}^{-1}$ でのみ形成されていることが分かった。これは、せん断歪み速度が大きい条件下で大きい粒子と小さい粒子が衝突すると、分散圧力の差が大きく、それによって出来た間隙を重力に従って小さい粒子が埋めるため、相対的に大きい粒子が上方に移動し、結果逆級化構造が形成されることを反映している。今回含水状態の実験で見出された逆級化構造は、断層ガウジ内で粒子の偏析が起こったことを示しており、流動化の証拠となり得る。これは、含水状態ではせん断応力の垂直応力依存性はなく、ガウジは流体として振る舞っていたとする実験結果と調和的である。今回の研究により、逆級化構造は、高速せん断の際の断層ガウジの流動化を反映していることが明らかとなり、新たな地震すべりの指標を見出すことに成功した。事実、本研究結果を受けるかたちで、同様の逆級化構造が、1999年台湾集集地震の際にすべったと考えられている断層ガウジから報告されている。

(4)本研究結果をまとめると、粘土質断層ガウジを高速ですべらせると、摩擦発熱によって粘土鉱物から脱水した水が気化して、断層ガウジの膨張を引き起こし、摩擦を引き下げることが分かった。また、粘土質断層ガウジを含水状態で高速ですべらせると、流体圧増加に伴って流動化して摩擦を引き下げ、逆級化構造という高速すべり特有の構造が形成されることが明らかとなった。これら高速すべり時に生じる摩擦発熱や流体圧上昇に伴う断層強度低下は、地震破壊伝播を促進し、津波の発生ポテンシャルを高めることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計13件)

① Ujiie, K., A. Tsutsumi, and J. Kameda, Reproduction of thermal pressurization and fluidization of clay-rich fault gouges by high-velocity friction experiments and implications for seismic slip in natural faults, Geological Society, London, Special Publications, 359, 267-285, 2011. 査読有

② Ujiie, K., and A. Tsutsumi, High-velocity frictional properties of clay-rich fault gouge in a megasplay fault zone, Nankai subduction zone, Geophysical Research Letters, 37, L24310, doi:10.1029/2010GL046002, 2010. 査読有

〔学会発表〕(計13件)

① Ujiie, K., Experimental and microstructural investigations of frictional heating and fluidization in clay-rich fault gouge, American Geophysical Union Fall Meeting, December 7, 2011, Moscone Convention Center, San Francisco, USA

② Ujiie, K., High-velocity frictional properties and microstructures of clay-rich fault gouge in megasplay fault zone, Nankai subduction zone, American Geophysical Union Fall Meeting, December 14, 2010, Moscone Convention Center, San Francisco, USA

③ 氏家恒太郎、南海付加体における巨大分岐断層の高速せん断摩擦特性と微細構造、日本地質学会第117年学術大会、2010年9月19日、富山大学

④ 氏家恒太郎、断層ガウジにおける thermal pressurization に関する実験的研究と特徴的の微細構造、日本地球惑星科学連合2010年度連合大会、2010年5月26日、幕張メッセ国際会議場

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.life.tsukuba.ac.jp/topixarchive/index.html>

<http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~kohtaro/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

氏家 恒太郎 (UJIIE KOHTARO)
筑波大学・生命環境系・准教授
研究者番号：40359188

(2) 研究分担者

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

平野 伸夫 (HIRANO NOBUO)
東北大学・大学院環境科学研究科・助教
研究者番号：80344688

(3) 連携研究者

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