

南海トラフ巨大分岐断層の暗灰色ガウジ試料における摩擦発熱履歴の再検討 Re-evaluation of frictional heat recorded in the dark gouge of a megasplay fault at the Nankai Trough

増本 広和^{1*}; 廣野 哲朗¹; 石川 剛志²; 亀田 純³; 藪田 ひかる¹; 向吉 秀樹⁴
MASUMOTO, Hirokazu^{1*}; HIRONO, Tetsuro¹; ISHIKAWA, Tsuyoshi²; KAMEDA, Jun³; YABUTA, Hikaru¹; MUKOYOSHI, Hideki⁴

¹ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, ² 海洋研究開発機構高知コア研究所, ³ 北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻, ⁴ 早稲田大学教育・総合科学学術院

¹Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, ²Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³Graduate School of Science, Hokkaido University, ⁴Faculty of Education and Integrated Arts and Sciences, Waseda University

南海トラフ地震発生帯掘削によって、1944年東南海地震時に活動したと推定される巨大分岐断層の試料が採取された。この試料には、局所化した剪断帯(暗灰色ガウジ)を含み、先行研究によって、そこでの高いビトリナイト反射率(390℃の摩擦発熱に相当)とイライト-スメクタイト混合層におけるイライト含有量の増加が報告されている。一方で、微量元素・Sr同位体比分析では、同ガウジにおいて300℃を超える有意な高温異常が検出されていない。これらの先行研究間の矛盾を解決するために、本研究では、暗灰色ガウジを含む8試料において、粉末X線回折-RockJock解析を用いた鉱物の定量分析、微量元素・Sr同位体比データにおける高温流体-岩石相互作用のモデル計算、および炭質物の赤外分光分析を行った。その結果、暗灰色ガウジでは250℃を超える発熱を履歴してないことが明らかになった。さらに、スメクタイト-イライト反応が地震時に起きえるかどうかを検証するために、速度論的解析を実施した結果、約400℃のピーク温度をもつ発熱パルスでは、イライト化はほとんど進行しないことが確認できた。また、ビトリナイト反射率の変化については、温度のみならず、剪断による変化も別の先行研究によって明らかにされつつある。以上、すべての情報を総合的に判断する限り、暗灰色ガウジの履歴温度は250℃未満であると結論づけることが妥当であろう。この250℃未満の発熱履歴は、0.01-1 m/sの滑り速度を仮定した場合、最大で80 mの滑り距離に相当する。更なる正確な温度の見積もりが極めて重要であるが、現時点では、100-200℃の温度領域における有効な温度プロキシが存在しないため、難しい。これは今後の大きな課題と言える。

キーワード: 南海トラフ地震発生帯掘削, 東南海地震, 流体岩石相互作用, 微量元素, X線回折, 赤外分光分析

Keywords: NanTroSEIZE, Tonankai earthquake, fluid-rock interactions, trace elements, X-ray diffraction, infrared spectroscopy

ナノからミリスケールにおける断層面の形状特性 Roughness of fault surfaces over a length-scale range from nano- to millimeters.

岸田 実紀^{1*}; 溝口 一生²; 高橋 美紀³; 廣瀬 丈洋⁴

KISHIDA, Minori^{1*}; MIZOGUCHI, Kazuo²; TAKAHASHI, Miki³; HIROSE, Takehiro⁴

¹ 広島大学院・理学研究科, ² 財団法人 電力中央研究所, ³ 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター, ⁴ 独立行政法人 海洋研究開発機構 高知コア研究所

¹Hiroshima University, ²Central Research Institute of Electric Power Industry, ³Geological Survey of Japan, AIST, ⁴Kochi, JAMSTEC

断層表面の形状は断層の力学と地震の発生に非常に大きな影響をおよぼす。よって、断層の形状特性を理解することは、地震発生の過程を解明していく上で非常に重要である。そこで本研究では、断層表面の形状特性と断層の力学挙動の対応関係を明らかにすることを最終目的として、まず天然および実験の断層面のナノからミリスケールまでの形状特性を定量的に記述するための手法の確立を試みた。形状特性解析には、(1) サンフランシスコのカストロ地域に位置する Corona Heights 断層、(2) 東北地方太平洋沖地震後に内陸側での正断層運動によって地表に現れた井戸沢断層の2つの試料を用いた。試料(1)は、先行研究によって断層表面の構成鉱物や微細組織が詳しく調べられており、素性がはっきりわかっている試料である。試料(2)は、地震発生直後に採取されたものであり、地震時の断層面の形状情報がよく保存されていると考えられる。どちらの試料にも、光沢のある断層表面に様々な幅と長さの条線が観察された。

本研究では、これまで連続的に解析されてこなかった1 nm から 3000 μm のスケールでの断層面の形状を、共焦点顕微鏡(計測スケール: 0.15 ~ 3000 μm)と走査型プローブ顕微鏡(1 ~ 50000 nm)を組み合わせることで計測した。形状計測は条線に平行と直交する方向でおこなった。また形状特性の解析には、パワースペクトル密度法を用い、ハースト指数 H という指標によって形状特性を定量的に解析した。その結果、Corona Heights 断層からは条線に直交方向で $H_N = 0.73 \pm 0.010$ 、平行方向で $H_P = 0.81 \pm 0.012$ 、井戸沢断層からは $H_N = 0.87 \pm 0.013$ 、 $H_P = 0.94 \pm 0.014$ という結果がえられた。一般に、条線に平行な方向の方が直交する方向より小さな H を示すことが知られている(e.g., Sagy et al., 2007)。これは断層変位が大きくなるにつれて、線構造に平行な方が表面の凸凹がなめらかになることによることに起因する。本研究で形状特性を解析した Corona Heights 断層や井戸沢断層は、 H_N と H_P がほぼ同じ値を示すことから、これまで形状特性が解析されてきた断層と比較すると、断層の変位がまだ大きくない未成熟な断層である、もしくは先行研究では解析されてこなかった1 nm から 3000 μm のスケールでは、すべりが進行しても H_N と H_P におおきな差が生じないといえるかもしれない。Candela et al., (2012)は、天然の13箇所の断層から、50 μm ~ 50 km までのスケールにおける断層面形状を解析し、このスケールで断層面形状特性はフラクタルであり、ほぼ同じ次元をとること示している。この結果に本研究で解析したデータをコンパイルすると、異なる断層でありかつ観察スケールが異なるにもかかわらずよい一致を見せた。このことから、天然の断層面の形状特性は nm から km スケールまでフラクタル特性を有することが明らかとなった。

キーワード: 断層面, 粗さ, フラクタル, ハースト指数

Keywords: fault surface, roughness, fractal, Hurst exponent

続成作用にともなう玄武岩の透水性の変化：四万十付加体物質を用いた考察 Evolution of fluid transport property by diagenesis in basaltic rocks from the Shimanto belt, Southern Shikoku

谷川 亘^{1*}; 山口 飛鳥²; 亀田 純³; 多田井 修⁴; 畠田 健太郎⁴; 北村 真奈美⁵
TANIKAWA, Wataru^{1*}; YAMAGUCHI, Asuka²; KAMEDA, Jun³; TADAI, Osamu⁴; HATAKEDA, Kentaro⁴; KITAMURA, Manami⁵

¹ 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 株式会社マリン・ワーク・ジャパン, ⁵ 広島大学
¹JAMSTEC/Kochi, ²Atomosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, ³Graduate School of Science, Hokkaido University, ⁴Marine Works Japan Ltd., ⁵Hiroshima University

2011年の東北地方太平洋沖地震では、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き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として、(1)地震時のプレート境界断層の動的弱化機構、(2)プレート境界深部における間隙水圧の増加に伴う強度の低下が挙げられる。(2)の間隙水圧を上昇させるメカニズムとして、沈み込みに伴うプレート境界近傍の物質の脱水反応と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。そこで、本研究では南海トラフ地震断層のプレート境界下部の海洋プレート物質を対象として、続成作用にともなう水理特性の変化と間隙水圧発達の関係について考察した。

本研究では高知県の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と久礼の玄武岩を用いた。興津と久礼の間隙率、およびP波速度はそれぞれ1.4%と6.4 km/s および2.1%と5.9 km/sを示し、また、S波速度の違いは認められなかった。水銀圧入法により間隙径分布を測定した結果、0.01 μm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。透水係数の測定は、室温下で封圧1~160 MPaまで変化させて行った。間隙流体として窒素ガスを用いて、ガス流量法からにより値を算出した。

同じ封圧下で間隙差圧を変化させてガス浸透係数を測定すると、間隙圧の増加に対して透水係数が減少し Klinkenberg効果が認められた。そこで、測定した「ガス浸透係数」は間隙圧依存性を基に Klinkenberg の式を用いて「透水係数」に補正した。補正した「透水係数」は「ガス浸透係数」と比較して約1/2~1/4低い値を示した。有効圧1MPa時の透水係数は試料ごとの違いは認められず、 $10^{-15} \sim 10^{-16} \text{m}^2$ の値を示した。透水係数は圧力増加に伴い減少し、有効圧100MPaにおいて $10^{-18} \sim 10^{-21} \text{m}^2$ を示し、試料の違いによる透水性の違いが顕著に現れた。また、久礼の玄武岩試料が一番低い透水係数を示し、100MPaで 10^{-21}m^2 を示した。一方興津の玄武岩試料は100MPaで $3 \times 10^{-19} \text{m}^2$ で一番高い透水係数を示した。高い透水係数の試料以外はおおむね透水係数の有効圧変化はべき乗曲線で近似できて、係数は-2~-3を示した。一方、高い透水性を示した試料は、Gangi (1978) が紹介しているヘルツの接触理論を基にした理論式で近似できる。高い透水性を示す試料は割れ目が発達していることから、有効圧増加に対する透水係数の減少は間隙の変化よりも割れ目の凹凸形状の変化が大きく影響しているものと考えられる。

本研究で測定した玄武岩の透水係数は Kato et al. (2004) で報告されている興津の断層帯内部の玄武岩よりも低い値を示した。また、Juan de Fuca と Tonga-Kermadec の玄武岩 (Christensen and Ramanantoandro, 1988) と比較してもやや低い透水性を示した。

現時点では、続成作用に伴う玄武岩の透水性およびその他の物性の変化について系統的な傾向は得られていない。ただし、いずれの玄武岩試料も非常に低い透水係数を示したことから、地下深部もしくは脱水反応に伴う流体の供給による間隙水圧が発生する可能性は十分に考えられる。

キーワード: 透水係数, 流体圧, 続成作用, 沈み込み帯, 南海トラフ地震, 玄武岩

Keywords: permeability, fluid pressure, diagenesis, subduction zone, Nankai Trough earthquake, basalt

玄武岩、斑レイ岩および花崗岩の弾性波速度およびポアソン比への熱クラッキングの影響 Effects of thermal cracking on elastic wave velocities and Poisson's ratio of basalt, gabbro and granite

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

¹ 東邦大学理学部, ² 財団法人 電力中央研究所
¹Faculty of science, Toho University, ²Central Research Institute of Electric Power Industry

地震波を用いた物理探査により、沈み込み帯の海洋地殻中にポアソン比の高い領域 (> 0.35) が存在することが知られている。Christensen (1984) は海洋地殻を主に構成する岩石である玄武岩について、高封圧・高間隙圧条件下で弾性波速度およびポアソン比を測定した室内実験を行い、この高ポアソン比は高間隙圧 (低有効圧) で説明できることを示した。このような高間隙圧の分布は、沈み込み帯のプレート境界断層の運動にも影響を与えられ、注目を浴びている。Christensen (1984) の実験では無垢な岩石試料が用いられた。しかしながら、天然の岩石、特に断層周辺では一般的に亀裂等が含まれることが考えられる。こういった内部構造を持つ岩石の弾性波速度 (P 波、S 波速度、それぞれ V_p 、 V_s) およびポアソン比 σ について評価することは、地震波速度から地下の間隙圧分布を推定する上で重要である。これを検証するには、 V_p 、 V_s と高間隙圧との関係を実験により検証する必要がある。そこで本研究では、沈み込み境界の速度異常を説明する物理モデルの構築を将来的な目標として見据え、その第一歩として海洋地殻を構成する主要な岩石である斑レイ岩、玄武岩、および大陸地殻を構成する代表的な岩石である花崗岩について、加熱して (100 °C、300 °C、500 °C、700 °C) 内部に亀裂を生成させた (熱クラッキング) 岩石試料の大気圧下での弾性波速度測定実験を行い、弾性波速度への熱クラッキングの影響について検証した。このとき、試料は乾燥している。また、700 °C で加熱した各々の岩石を水で飽和させ、弾性波速度測定実験を行い、弾性波速度の間隙流体依存性についての検討も試みた。

実験の結果、各岩石について高温で加熱するにつれて V_p 、 V_s が遅くなるということが分かった。また、密度も高温で加熱するにつれてごくわずかであるが小さくなり、特に 500 °C から 700 °C への密度の変化が顕著であることが分かった。これより、高温で加熱するにつれて岩石の内部の亀裂密度が増加し空隙が増え、この空隙の増加が弾性波速度を減少した原因であると考えられる。また、ポアソン比の値は 0.05~0.25 程度の値を示し、観測された高ポアソン比領域の指していた値よりも小さい結果が得られた。また、岩石試料を水で飽和させた実験では、全体的に速度が速くなる傾向は見られたが、出力波形の立ち上がりを読み取りにくく、実験システムおよび波形読み取り方法の改良が必要だと考えられる。

キーワード: ポアソン比, 弾性波速度, 高間隙圧, 玄武岩, 斑レイ岩, 花崗岩
Keywords: Poisson's ratio, Elastic wave, High pore pressure, Basalt, Gabbro, Granite

伊豆-ボニン-マリアナ弧を構成する岩石の高温高压摩擦特性 Frictional property of rocks in the Izu-Bonin-Mariana Forearc under high temperature and pressure conditions

兵東 玄威^{1*}; 高橋 美紀²; 斎藤 実篤³; 廣瀬 文洋⁴

HYODO, Geni^{1*}; TAKAHASHI, Miki²; SAITO, Saneatsu³; HIROSE, Takehiro⁴

¹ 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, ² 独立行政法人 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター, ³ 独立行政法人 海洋研究開発機構, ⁴ 独立行政法人 海洋研究開発機構 高知コア研究所 地震断層研究グループ

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, ²Geological Survey of Japan-Advanced Industrial Science and Technology, ³Japan Agency Marine-Earth Science and Technology, ⁴Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency Marine-Earth Science and Technology

関東平野の位置する北米プレートの下には、フィリピン海プレートと太平洋プレートが沈み込んでいる。特に東北日本弧や西南日本弧の沈み込み帯と違い、関東にはフィリピン海プレートに太平洋プレートが沈み込むことによって形成された伊豆・ボニン・マリアナ島弧 (IBM) が衝突・沈み込んでいるのが大きな特徴である。これら3つのプレート境界およびプレート内部では、関東大震災を引き起こした巨大地震から房総半島沖でのスロー地震まで、多様な地震活動が確認されている。スロー地震は、巨大地震震源域の浅部及び深部の沈み込むプレート境界に沿った比較的幅の狭い領域で発生するが、関東周辺ではこのような地震性と非地震性のすべり挙動が比較的近い場所のほぼ同じ深度 (等温等圧条件) で発生している可能性がある。地震の発生には、間隙水圧や断層面の形状などの様々な要因が寄与しているが、本研究では関東に沈み込む IBM 弧を構成する様々な岩石の摩擦特性に着目し、その違いによって関東で発生する多様な地震発生機構を解明することを目指している。

そこで本研究では、ODP (Ocean Drilling Program) Leg125 (Site784, 786) で採取された IBM 弧を構成する主要な5種類の岩石 (marl, boninite, andesite, sheared serpentinite and serpentinitized dunite) を $10\sim 50\ \mu\text{m}$ の粒径になるように粉碎し、その摩擦特性を産業技術総合研究所に設置されている高温高压ガス圧式三軸試験機をもちいて調べた。実験条件は、温度 $300\ ^\circ\text{C}$ 、封圧 156MPa 、間隙水圧 60MPa 、軸変位速度 0.1 および $1\ \mu\text{m/s}$ である。摩擦実験の結果、sheared serpentinite と serpentinitized dunite は定常摩擦係数がそれぞれ 0.55 と $0.35\sim 0.41$ であり、摩擦の速度依存性は正であることがわかった。粉末 X 線回折とラマン分光分析によって同定した主含有鉱物が、sheared serpentinite は antigorite, serpentinitized dunite は chrysotile と iowaite であることから、これらの摩擦特性は serpentinite に関する既存の実験結果とよく一致することがわかった。一方、marl, boninite, andesite は、すべり速度 $1\ \mu\text{m/s}$ においてスティック・スリップが現れることがわかった。ただし、これらスティック・スリップは常温で見られる挙動とは異なり、平均ライズタイムがそれぞれ $3.9, 9.3, 10.8\ \text{sec}$ と非常に長く、スロースティック・スリップとよぶことができるようなすべり挙動である。このようなスロースティック・スリップは、これまで岩塩や蛇紋岩の高温下における摩擦実験で確認されているが、本研究のような堆積岩や火成岩で確認されたのははじめてである。実験条件が限られているため、本実験結果にのみ基づいて関東で発生する地震の多様性を議論するのは難しいが、今後このような特徴的なすべり挙動がどのような条件、特に温度条件によって現れるかを明らかにすることによって、関東で発生する地震の発生機構を物質学的に探っていきたい。

キーワード: 摩擦, 伊豆-ボニン-マリアナ弧, スロー地震, スティック・スリップ, 地震

Keywords: Friction, Izu-Bonin-Mariana Forearc (IBM), slow earthquake, stick-slip, earthquake

窒素雰囲気下におけるドレライトの摩擦強度の温度変化と摩耗物質中の非晶質物質含有量との関係
Temperature-dependent frictional strength of dolerite in a nitrogen atmosphere and its relation to amorphous material

田中 伸明^{1*}; 和田 純一¹; 金川 久一¹
TANAKA, Nobuaki^{1*}; WADA, Jun-ichi¹; KANAGAWA, Kyuichi¹

¹ 千葉大学大学院理学研究科

¹Graduate School of Science, Chiba University

Noda et al. (2011, JGR) による背景温度を制御したドレライト試料の回転剪断実験（垂直応力 1 MPa、変位速度 1 cm/s、室温～1000 °C）では、摩耗物質中の非晶質物質含有量と含鉄鉱物の高温酸化がドレライトの摩擦強度の複雑な温度変化と相関のあることが判明した。しかし、地下の断層は大気中にはないため、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、Noda et al. (2011) と同じドレライト試料を、同じ条件（垂直応力 1 MPa、変位速度 1 cm/s、室温～1000 °C）、窒素雰囲気下（酸素濃度 0.1% 程度）で回転剪断実験を行い、Noda et al. (2011) の結果と比較した。実験では試料面が定常状態になるまで 100 m 程度変位させた後に 20 m 程度変位させ、後者の力学データを取得した。また、実験で得られた摩耗物質を 250 μm のふるいにかけた後、X 線回折プロファイルのピーク強度を用いて鉱物組成の定量分析を行った。

定常状態における摩擦係数は、室温および 200 °C では約 0.47、400 °C および 600 °C では約 0.7、800 °C では試料の破壊が著しく定常状態が得られず、1000 °C では約 0.9 であった。摩耗物質中の非晶質物質含有量は、室温で約 65 wt%、200 °C で約 70 wt%、400 °C で約 60 wt%、600 °C で約 45 wt%、800 °C で約 15 wt%、1000 °C で 0 wt% で、Noda et al. (2011) と同様な温度変化が得られた。一方、摩耗物質中の鉄酸化物含有量には温度による有意な変化は認められなかった。

Noda et al. (2011) の大気中の実験では、800 °C 以下の温度で摩擦強度と非晶質物質含有量との間に負の相関が認められたが、今回の実験でも温度上昇に伴って摩擦強度が増大し、非晶質物質含有量が減少する傾向が認められた。しかしながら、非晶質物質含有量が約 5 wt% しか変わらない室温と 400 °C で摩擦係数に 0.2 以上の差が認められ、また摩擦係数がほぼ同じ 400 °C と 600 °C との間で非晶質物質含有量に 15 wt% 程度の差が認められた。従って、ドレライトの摩擦強度と非晶質物質含有量の間には直接的な関係はないと考えられる。摩擦強度の温度変化が実際には何に起因しているのかについては、現在検討中である。

キーワード: ドレライト, 摩擦強度, 摩耗物質, 窒素雰囲気, 回転剪断試験

Keywords: Dolerite, Frictional strength, Wear material, Nitrogen atmosphere, Rotary shear experiment

大型二軸摩擦実験におけるスティック・スリップ・イベントの二次元的破壊伝播 Observation of 2-D rupture propagation for stick-slip events during large-scale biaxial frictional experiments

土田 琴世^{1*}; 川方 裕則¹; 福山 英一²; 山下 太²; 溝口 一生³

TSUCHIDA, Kotoyo^{1*}; KAWAKATA, Hironori¹; FUKUYAMA, Eiichi²; YAMASHITA, Futoshi²; MIZOGUCHI, Kazuo³

¹ 立命館大学, ² 防災科学技術研究所, ³ 電力中央研究所

¹Ritsumeikan University, ²National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ³Central Research Institute of Electric Power Industry

地震発生過程のモデルとして期待される一つに Ohnaka and Kuwahara(1990) によって提案されたプレスリップモデルがある。このモデルでは、破壊伝播速度が亀裂(破壊)の成長に伴い加速することが示されている。しかし、観測からは地震に先行するプレスリップ現象は明瞭には捉えられていない。Ohnaka and Kuwahara(1990) は、試料端(表面)で計測した歪の記録を用いて、破壊伝播速度を一次元的に調べた。一次元の破壊伝播速度は、空間的広がりを考えた際に見かけの破壊伝播速度を示す。さらに、試料表面における計測であるため、表面が存在することによって与える破壊への影響は無視できない。したがって、破壊を二次元的に捉えることで、なぜプレスリップが地震に対して捉えられていないのかを再検討する必要がある。

福山ほか(2012, 2013, 地震学会)は、メートルスケールの大型岩石試料を用いたせん断すべり実験を行った。本研究では、特に、破壊を二次元的に捉えるため、AE センサー及び歪ゲージを試料内部に面状に配置させるという新たな試みをした第二期の実験(福山ほか, 2013, 地震学会)のうち、最も低速(0.025 m/s)で実施された実験(LB03-008)で計測された微小破壊による弾性波及び歪の記録を扱い、繰り返し発生するスティック・スリップ・イベントの二次元的な破壊伝播を検討するとともに、イベントの特徴について調べた。

実験は、防災科学技術研究所所有の大型振動台を用いて、上側に $1.5W \times 0.5D \times 0.5H$ m³、下側に $2.0W \times 0.5D \times 0.5H$ m³ のインド産ギャブロ試料を配置し、せん断方向に滑らせた(福山ほか, 2013, 地震学会)。計測には、AE センサーと歪ゲージを用いた。AE センサーは、下側試料の内部に長さ(W)方向 150 mm 間隔で 8ヶ所、奥行き(D)方向 125 mm 間隔で 3列の計 24ヶ所に埋め込まれ、両側の側面 8ヶ所ずつに 75 mm 間隔で貼り付けられた。また、歪ゲージは AE センサー同様に下側試料の内部 24ヶ所に埋め込まれ、両側の側面 12ヶ所ずつに 75 mm 間隔で貼り付けられた。また、同時にロードセルを用いてバルクの法線応力とせん断応力も計測された。

土田ほか(2013, 地震学会)は、弾性波の記録から S 波速度よりも遅い速度で伝播する波を確認した。この波がイベントによって放射されたものであると考え、実験を行った全時間帯の記録を眺めた。イベント群は、法線応力に対するせん断応力の比がもっとも低下したイベントを境に、前半と後半で、数 10 ms 程度の時間間隔で数回認められる場合と、20 ms 程度以内に密集して 1つだけ存在する場合に大別されることが分かった。

そこで本研究では、イベントのある時間帯に着目し、その際の歪変化について検討した。まず、全時間帯、全 ch の歪変化の概要を把握するため、1024[sp] で平均することでノイズを低減させ、各 ch 毎の時間変化を調べた。どの ch においても、バルクの値から求めた摩擦係数の変化と同様に、イベントのタイミングに著しい歪低下が見られた。また、幅 100 mm の試料において確認された(福山ほか, 2013 地震学会; 溝口ほか, 2013 地震学会)のと同様に、その直前に弾性波を伴わないゆっくりとした歪の低下も確認出来た。一方、バルクのせん断応力に変化が見られないイベントに関しては、歪ゲージの記録でも顕著な変化は見られず、弾性波でしか捉えられないような極めて小さな破壊があったことが推察される。また、実験後半においては slip 直前の摩擦係数の最大値がほぼ一定となるのに対し、実験後半の歪の蓄積量はほぼ一定となる場合、増加し続ける場合、減少する場合と様々で、蓄積量の大きさ自体も位置によって異なることが分かった。

次に、イベント付近の歪変化を詳しく見るため、イベントを含む 1 秒間の歪変化を見た。顕著な歪変化が見られない時間帯の歪の記録に対して自己相関関数を調べたところ、およそ 4~8[sp] で相関値が上がるのがわかり、これをノイズの卓越周期であると判断し、平均をとるデータ数を 300[sp] まで絞った。イベントごとに各 ch の変化を比べたところ、弾性波を用いて大別された 2 パターンのイベントの内、前半のあるイベントにおいて、緩やかにせん断歪が低下する(およそ $1\sim 3\mu\text{strain}$) イベントが試料前面付近から奥行き方向へとゆっくりと伝播しているのが見られた。このタイプのゆっくりとしたイベントを繰り返し、最終的には伝播が加速し、高速なせん断歪の低下、すなわち、動的なイベントに達している。弾性波の観測される時間は、この高速なせん断歪の低下の際及びその後の不安定な歪変化に対応している。今後、この加速の開始点、及び、加速する方向と試料表面の亀裂(破壊)の成長、弾性波との関係について検討する。

本研究は、防災科学技術研究所プロジェクト研究「地殻活動の観測予測技術開発」、科学研究費補助金基盤研究(B) 23340131 の助成を受けた。

キーワード: スティック・スリップ・イベント, 破壊伝播, 大型二軸試験

Keywords: stick-slip event, rupture propagation, large-scale biaxial frictional experiment

エネルギー比の観点からみた摩擦不安定性に関する実験的研究 The experimental study about frictional instability of fault gouges in terms of Rowe's energy ratio

平田 萌々子^{1*}; 武藤 潤¹; 長濱 裕幸¹
HIRATA, Momoko^{1*}; MUTO, Jun¹; NAGAHAMA, Hiroyuki¹

¹ 東北大学・理・地学

¹Dept. Earth Science, Tohoku University

1. Introduction

The stress-dilatancy relationship for granular materials in a dense packing state was introduced by Rowe (1962). He used the energy ratio (K), which was the ratio of rate of energy dissipation in the direction of minimum principal stress to energy supply in that of maximum principal stress. According to the concept, K shall be a minimum and constant value (Rowe, 1962). However, there are many questions about the physical meaning of K. Therefore, the Rowe's law has not been applied much for fault mechanics until now. Nevertheless the stress-dilatancy relation is related to the onset of frictional instability, it has not been clear yet. So, we conducted friction experiments using simulated fault gouges in order to confirm whether Rowe's law can be applied to fault situation or not.

2. Methods

The friction experiments using simulated fault gouges were conducted in a gas-medium apparatus. The confining pressure was ranging from 140 to 180 MPa. We used a cylindrical gabbroic forcing blocks (20 mm in a diameter, 40 mm in a length, and cut by a 50 degree from their cylindrical axis) and quartz gouges were sandwiched by them. The sample sustained loading initially and holding at several values of axial stresses at 190, 450, 640 and 800 MPa. The strain rate was 10^{-3} /s. In order to measure strain, three strain gauges were glued onto a gouge layer through the Teflon jacket. Another one was placed to a forcing block in a vertical direction and far from a gouge layer. Data were recorded at 2 MHz.

3. Results and Discussion

From our friction experiments, we obtained K of gouges at different confining pressures. K is given by the ratio of rate of energy dissipation in σ_3 direction to energy supply in σ_1 direction, so it can be represented by the ratio of output energy to input one. We obtained strain of σ_3 direction from three strain gauges glued onto a gouge layer. Similarly, σ_1 and strain of σ_1 direction were obtained from another gauge. σ_3 was the confining pressure. Our results showed that the output energy was the linear function of input one. K increased with confining pressure and showed a certain constant value at each loading and holding stage. Moreover, the change in K was remarkable at the final loading stage. In other words, the output energy increased suddenly because gouge particles began to slip. So, the change in K is large under high stress, including just before unstable slip. It matched shear localization (e.g. Logan et al., 1992; Marone, 1998).

Because K is represented by a function of internal friction angle, we suggest that the change reflects the process of microstructural development. It implied that the statistical particle arrangements of gouges changed at each stress level. After gouges become a closest packing state at the peak stress, the grain size reduction (GSR) of gouges occurs leading to the development of shear structure. Under GSR occurrence, K became a new state. From previous study, it is known that the microstructural development has a close relation with frictional instability (e.g. Logan et al., 1992; Marone, 1998; Onuma et al., 2011). During progressive shear, the angle of R1-shear developed in gouges decreases with cumulative slip (Gu and Wong, 1994). Hence, the change in K, that is to say the change in internal friction angle must be connected with not only microstructural development but also frictional instability.

4. Summary

From our experiments using simulated fault gouges, we obtained relationships among microstructural development, frictional instability and energy ratio of it. We confirmed that the Rowe's law could be applied to simulated fault gouges. Therefore, we can assess frictional instability in terms of the energy ratio based on Rowe's law. Systematic laboratory observation provides better understanding on energetical or microstructural consideration on the shear localization and seismogenic process.

Keywords: frictional instability, simulated fault gouge, Rowe's minimum constant energy ratio, friction experiments

繰り返すスリップイベントの発生確率の時間発展 -房総半島沖・八重山諸島沖スローイベントを例として-
Temporal evolution of slip event probability -Case study of slow slip off the Boso Peninsula and the Yaeyama Islands

三井 雄太^{1*}
MITSUI, Yuta^{1*}

¹ 静岡大学理学研究科
¹Grad. Sci., Shizuoka Univ.

特にプレート境界において、空間的に孤立して発生するすべりイベント (地震・スロースリップ) は、準周期的に発生する場合があると知られている (e.g., Nadeau and McEvilly [1997], Matsuzawa et al. [2002], Rogers et al. [2003])。これは、プレート境界に蓄積されたひずみがある程度溜まると解放される、という単純な弾性反発の概念が近似的に成り立っていることを示している。

もちろん、イベントの繰り返し間隔に数学的な意味で厳密な周期性があるわけではない。天然の現象である以上、まったく同じ様式のすべりイベントが二度起きることはないためと考えられる。特に動的な断層破壊を伴う地震の場合にこの傾向は強いはずであり、実際に、過去の繰り返し履歴から推定されていた発生時期から大きく外れて地震が起こったという事例も存在する (Bakun et al. [2005])。また、普段は孤立して活動しているように見えるイベントでも、周辺地域の巨大地震に大きく影響を受けるといことが起こり得るので (e.g., Uchida and Matsuzawa [2013])、決定論的物理モデルに基づいてイベントの繰り返し間隔を定量的に議論するのは極めて困難である。このことから、イベントの繰り返し間隔を評価するために確率分布が用いられてきた。

イベント繰り返しを確率分布で評価する際に、実際にイベントが発生したとき発生確率はどうかであったか、という点が重要であろう。この点については、従来あまり活発な議論はされてこなかった。本研究ではこれに取り組む。対象として、繰り返し間隔が短いスロースリップイベントを選ぶこととした。具体的には、2014 年に入ってから発生した房総半島沖のスロースリップイベント (Hirose et al. [2012]) と八重山諸島沖のスロースリップイベント (Heki and Kataoka [2008]) を選んだ。確率分布として、ひとまず簡単なポアソン分布を仮定し、イベント回数が 0 である累積確率を 100% から引く、という形で発生確率を評価することとした。さらに、1 回イベントが起こるごとに累積確率は 100% に戻るとした。ポアソン分布のパラメータである平均繰り返し間隔は、前回までのイベント繰り返しの標本平均の値を使うこととした。以上の設定から、房総半島沖と八重山諸島沖におけるスロースリップイベント発生確率の時間発展を追うことができるようになった。これを実際のイベント発生と照らし合わせることで、**結果を検証可能**である。

まず、数の多い八重山諸島沖の結果を考察する。八重山諸島沖では、計 26 回のうち、発生確率が 50% に満たない段階で発生したイベントは 5 回であった。例外的イベントは存在するものの、全体の約 8 割は発生確率が 50% を超えてから発生したことになる。一方、房総半島沖では、計 5 回のうち 2 回のイベントが、発生確率が 50% に満たない段階で発生した。この 2 回ともが 2011 年東北地震の後に発生したイベントである。このことは、Hirose et al. [2012] が指摘したように、東北地震による擾乱の影響と解釈できる。以上のことをまとめると、上記のポアソン分布に基づく発生確率評価では、確率が 50% を超えない段階でイベントが実際に起きることは少ない、ということがわかった。また、八重山諸島沖イベントに関しては、イベント発生時点での発生確率が徐々に増大している傾向があることが見出された。

キーワード: 繰り返すスロースリップイベント, 発生確率, 統計的アプローチ, 房総半島沖, 八重山諸島沖
Keywords: Repeating slow slip event, Event probability, Statistical approach, Off Boso Peninsula, Off Yaeyama Islands

浅部超低周波地震と長期的スロースリップイベントの同期発生の数値モデリング Numerical modeling of concurrent occurrence of shallow very low frequency earthquakes and long-term slow slip events

松澤 孝紀^{1*}; 芝崎 文一郎²; 小原 一成³; 廣瀬 仁⁴

MATSUZAWA, Takanori^{1*}; SHIBAZAKI, Bunichiro²; OBARA, Kazushige³; HIROSE, Hitoshi⁴

¹ 防災科学技術研究所, ² 建築研究所, ³ 東京大学地震研究所, ⁴ 神戸大学都市安全研究センター

¹National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ²Building Research Institute, ³Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ⁴Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

豊後水道で発生する長期的スロースリップイベント (SSE) と、足摺岬沖で発生する浅部超低周波地震の活発化が過去 3 回にわたって同期していることが、Hirose et al. (2010, Science) によって報告されている。この領域は、予想されるプレート間大地震のすべり域の西端部に位置しており、歪み蓄積過程と大地震の関係を理解する上でも重要である。我々はこれまで、短期的 SSE と長期的 SSE の数値モデルに取り組んできたが (例えば、Matsuzawa et al., 2013, GRL), ここでは浅部超低周波地震と長期的 SSE の同期した発生を、数値的に再現することを目指した。

数値モデリングにあたっては、Matsuzawa et al. (2010, JGR) と同様に、半無限弾性媒質中に置かれた平板の沈み込みプレート を仮定し、境界の摩擦力としてはカットオフ速度を考慮したすべり速度・状態依存摩擦則を用いた。長期的 SSE を再現するために、このモデルにおいても、周囲より有効法線応力が低く、 $10^{-6.5}$ m/s のカットオフ速度をもつ長期的 SSE 領域を 10 km 以深に設定した。一方、浅部超低周波地震の発生域については、岩石実験から低速側ですべり速度弱 化、高速側ですべり速度強化を示す摩擦則が得られている (Saito et al., 2013, GRL)。また、Ito and Obara (2006, GRL) は地震波の解析から、超低周波地震の半径を 5-10 km と推定している。これらに基づき、深さ 10 km 以浅の領域に、周囲よりも低い有効法線応力をもつ半径 6 km の円形の浅部超低周波地震領域を設定し、この領域内では、 10^{-4} m/s のカットオフ速度を仮定した。さらに、足摺岬沖の西側の日向灘の領域では、浅部超低周波地震の活動が活発となっており、長期的 SSE の観測されていない時期においても断続的に活発化している。このことは、この付近のプレート境界が足摺岬沖の領域よりも連続的にすべっていることを示唆するため、長期的 SSE 領域の隣に、安定すべり領域を持つモデルを検討した。以上のように設定したモデルを以下 Model 1 と呼ぶ。また、日向灘の安定すべり領域を仮定しない場合についても検討した (Model 2)。さらに、長期的 SSE 領域の上端の深さによる影響を検討するため、上端が深さ 18 km となる場合についても検討した (Model 3)。

数値計算の結果、Model 1,2,3 のいずれにおいても、長期的 SSE および超低周波地震領域でのイベント発生がそれぞれ再現された。Model 1 および 2 では、長期的 SSE の発生時に、超低周波地震領域での同期したすべりがみられたものの、Model 3 では明瞭なすべりの同期はみられなかった。また、Model 2 では、長期的 SSE 以外の時期にも超低周波地震領域で大きなすべりが発生している一方、Model 1 では顕著なすべりイベントは長期的 SSE 時にほぼ限られた。これらの結果は、長期的 SSE のすべり域が、浅部超低周波地震域付近まで到達している場合や、近傍における安定すべり域の存在によってより定常的なローディング状態にある場合の方が、観測事実を再現しやすいことを示唆する。

キーワード: 超低周波地震, スロースリップイベント, 数値シミュレーション, 豊後水道

Keywords: very low frequency earthquake, slow slip event, numerical simulation, Bungo Channel