

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400440

研究課題名(和文) 動的地震破壊の包括的理解 破碎、摩擦発熱、熱・流体拡散、脱水反応に焦点をあてて

研究課題名(英文) Comprehensive understanding of dynamic rupture : effects of dilatancy, shear heating, fluid and heat flows and dehydration reaction

研究代表者

山下 輝夫 (YAMASHITA, Teruo)

東京大学・地震研究所・名誉教授

研究者番号：10114696

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：流体の効果に焦点を当て、物理過程のみならず化学過程をも考慮に入れて、動的地震破壊過程についての数理的・数値的解析を行った。ここで、物理過程としては、摩擦発熱、破碎、流体・熱拡散を、化学過程としては、脱水反応を仮定した。特に、上記の効果が地震発生の多様性にどのように関与するかという事について検討を行った。計算によると、脱水反応が滑りにより生成したダイラタンシーと相互作用する際に、持続的なゆっくり滑りが生じ、ダイラタンシーがほとんど生じない場合、通常の地震滑りが起こることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Focusing on the effect of fluid, we theoretically studied dynamic fault slip taking account of not only physical process but also chemical reaction. As the physical process, we assumed slip-induced dilatancy, shear heating and heat and fluid flows. We consider dehydration reaction as the chemical reaction. We specifically studied how the above effects give rise to apparently diversity in fault slip phenome, as found in the difference between slow slip events (SSEs) and ordinary earthquakes, through fluid pressure change. Our calculations show that sustained slow slip events occur when the dehydration reaction is coupled with slip-induced dilatancy. Specifically, slow slip is favored by a low initial stress drop, an initial temperature of the medium close to that of the dehydration reaction equilibrium temperature, a low permeability and overall negative volume change associated with the reaction. Ordinarily earthquakes are shown to occur for negligible slip-induced dilatancy.

研究分野：地震学

キーワード：地震 流体 脱水反応 破碎

1. 研究開始当初の背景

「地震は、断層に沿う滑りである」という大まかな地震像は、すでに前世紀中葉には確立していた。その後の地震の動的破壊についての数理的研究は、主として、断層規模より小さなスケールの力学現象の動的破壊への影響についての理解の方向へ進んでいった。そのため、モデルを観測から十分制約できず、様々な震源モデルの乱立を招いている。さらに研究は個別的となり包括的理解の方向への進展は十分ではない。また、ほとんどのモデルが力学的な視点しか持っていないため、他の研究分野（例えば、地質学、地球化学など）との連携も十分ではない。

そのような中、この10年のうちに、スロースリップイベント、余効滑り、低周波地震など（総称して、「ゆっくり地震」と呼ぶ）と呼ばれる新たな地震現象が発見されてきた。このような「ゆっくり地震」の発生機構の解明は、地震の起こり方の多様性の包括的理解への大きなステップとなる可能性がある。さらに、「ゆっくり地震」が多く発生する、沈み込み帯近傍の領域では、流体圧が大きく高まっていることが、近年の高精度地震観測により報告されているが、このような現象の解明は、他の研究分野との連携のきっかけにもなりうる。特に、この高圧化の原因が脱水反応にあると指摘する研究者は多い。これが妥当だとすると、実験分野・地球化学分野との連携が重要となる。

2. 研究の目的

上で述べたとおり、沈み込み帯近傍での流体高圧化の原因は、主として脱水反応にあると広く考えられている。本研究では、数理的・数値的モデル化により、脱水反応が、どのようにして「ゆっくり地震」を起こすかということの理解や、通常の地震となぜ発生様式が違うのかということの理解を目指した。特に、素過程の理解に焦点を当てた。その応用として、冷たい沈み込み帯に比べて、なぜ暖かい沈み込み帯で「ゆっくり地震」が起こりやすいかということの検討もあわせて行った。

3. 研究の方法

脱水反応の数学的定式化については、Brantut et al. (2010) に基づき、これを Suzuki & Yamashita (2009) の定式化に組み込んだ。さらに、室内実験での知見に基づき、沈み込み帯で、どのような脱水が起こりうるかということについての検討を行った。上に述べたとおり素過程の理解に焦点をあてるため、1次元モデルを仮定した（図1）。具体的には流体と熱は、滑り面に直交する方向（y軸方向）に流れるとし、滑りは面外方向（z軸方向）に起きる。そのため、滑り面上の境界条件をとおしてのみ、滑りと熱・流体との相互作用は起こる。

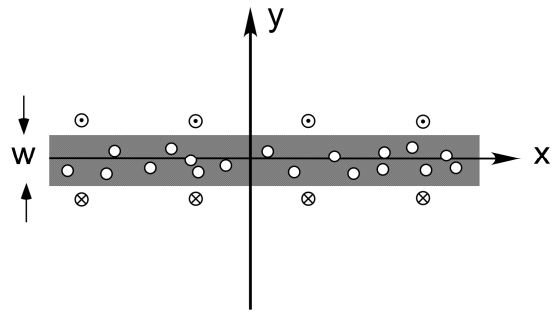


図1 滑りのモデル。厚み w のせん断帯内部の白丸は滑りにより生成した空隙を表す。

また、きわめて薄いものの有限の厚み w を持つせん断帯を仮定した。一般に、滑りは、滑り面近傍に非弾性的に空隙を生成するので、その効果を取り入れるために、せん断帯内部において連結した空隙の生成を仮定する（これを、以下、ダイラタンシーと呼ぶ）。ダイラタンシーは、滑りと共に増加するが、上限の存在を仮定する。なお、せん断帯内部での変形は一樣とした。媒質は、流体で飽和した多孔質弾性体であるとする。このような仮定の下、滑り成長に関わる主要因は、(1)摩擦熱の発生、(2)滑りに伴う非弾性的空隙生成、(3)脱水反応、(4)熱・流体の拡散、の四つがあげられる。これらの相互作用を理解するために、無次元量を導入する。これにより地震滑り現象の包括的理解が可能となる。このような取扱いは、より現実的な2次元、3次元モデル化においての重要な基礎となりうる。

脱水反応については、アレニウスの法則を仮定し、そのモデルパラメタについては、沈み込み帯下部で起こりうるものを想定する。その際、脱水反応は空隙を増加させようということに注意が必要である。そのため、非弾性的な空隙の生成は、滑りによるもの（ダイラタンシー）、脱水反応によるもの、の二つがある。注意すべきは、脱水反応により生成された空隙空間が、脱水で生じた流体が占める空間よりも大きい場合もありうるし、小さい場合もあるということである。前者の場合には、ダイラタンシーと同様に、滑り成長を抑制しうるしうる。もう一つ、注意すべきは、鉱物の脱水反応は吸熱的であるということである。これも滑り成長を抑制しうる。

4. 研究成果

ダイラタンシーと脱水反応が相互作用することにより、持続的なゆっくり滑りが生じることが、数値計算により示された。特に、(1)ダイラタンシーの効果が、摩擦発熱の効果よりもはるかに大きい場合、(2)流体拡散速度が遅い場合、(3)脱水反応により生成された空隙空間が、脱水で生じた流体が占める空間よりもはるかに大きい場合、(4)応力降下量が小さい場合、(5)初期温度が、脱水開

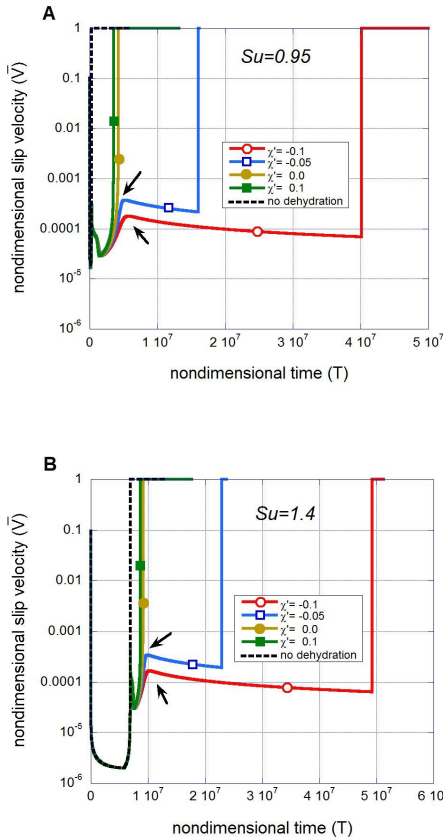


図2 滑り速度の時間発展のダイラタンシー依存性。AよりもBの方が、ダイラタンシーの効果が大きい。矢印は、脱水反応の開始時刻を表す。

始温度に近い場合に、ゆっくりとした持続的な滑りが生じることがわかった。図2に、上記(1)と(3)について例示する。ここで、 Su は、摩擦発熱に対するダイラタンシーの相対的卓越度を表す。 χ' は、脱水反応により生成された空隙空間の大きさと脱水により生じた流体が新たに占める空間の大きさの差を表す。 $\chi' < 0$ なら、脱水反応により生成された空隙空間のほうが、脱水により生じた流体が占める空間よりも大きいことになる。なお、図2には比較のため、脱水反応が起こらない場合の解も示してある。この図から、上記、(1)と(3)で述べたことが明確に理解できよう。なお、すべての曲線で最終的に滑り速度が急上昇しているのは1次元特有の現象である。2次元や3次元モデルでは、破壊面先端の存在により滑りの成長が大きく抑制されるため、図2に見られる滑り速度の急上昇は起こりえない。

(2)については、図3に示す。ここで、 Su' は流体の拡散速度に比例する無次元パラメータである。断層帯の透水係数については数ケタ程度変化する可能性があるため、 Su' の

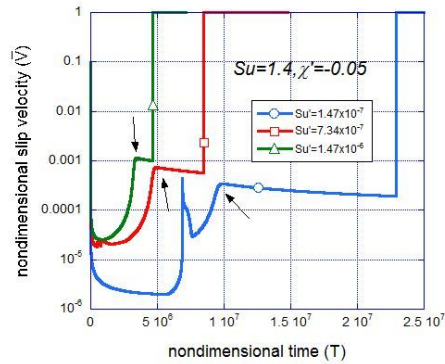


図3 滑り速度の時間発展の流体拡散速度依存性。矢印は、脱水反応の開始時刻を表す。

効果についての不確定性は大きい。

条件(3)は、暖かい沈み込み帯での antigorite+talc の脱水が、持続的なゆっくり滑りの生成にもっとも効果的であるという事を示す。実際、このような鉱物の脱水は、「ゆっくり地震」が観測される深さで発生し、 $\chi' < 0$ という性質を持つ。

(1)-(5)で述べたことのいくつかは、観測事実と調和的である。例えば、(4)は、「ゆっくり地震」は通常の地震に比べかなり小さい応力降下量をもつという観測事実(例えば、Obara, 2010)と整合する。暖かい沈み込み帯の下部では脱水反応が頻繁に起こりうるため、大規模なダイラタンシーは、比較的容易に起こりうるであろう。冷たい沈み込み帯が下部で「ゆっくり地震」の発生が無いことは、ダイラタンシーがゼロに近い事に原因を帰することができよう。

なお、脱水反応を仮定しなくても、(1)を仮定すれば、「ゆっくり地震」を定性的にモデル化することは可能ではある(Yamashita, 2013)が、本研究での重要な発見は、脱水反応を考慮に入れる事により、滑りがさらに抑制され持続的になるということである。

これまでに述べたことは、「ゆっくり地震」の発生機構のモデル化についてであるが、通常の高速度地震は、 $Su \ll 1$ の範囲でモデル化できる。図4は、ダイラタンシーがまったく生じない($Su=0$)とした場合の滑り速度発展の図であるが、図2や図3に比べて滑り速度がはるかに大きいことがわかる。 $\chi' > 0$ なら古典解と同様に時間と共に一様に加速する滑りが得られるが、 $\chi' < 0$ の場合にはスティック・スリップ型の滑りとなる。これは、脱水反応が滑りの複雑化の一要因になっていることを示唆する。

