

平成 21 年 5 月 27 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007 -2008

課題番号：19540439

研究課題名（和文） スロースリップの発生機構 間隙水圧の効果

研究課題名（英文） Generation mechanism of slow slip - effects of pore pressure

研究代表者

氏名（アルファベット） 山下 輝夫（YAMASHITA TERUO）

所属機関・所属部局名・職名 東京大学・地震研究所・教授

研究者番号 10114696

研究成果の概要：多孔質媒質を仮定し、さらに流体の移動を考慮に入れてスロースリップの発生機構を理論的・数値的に調べた。これによると、透水係数が異なる媒質境界に断層が存在する場合に、もっとも大規模な余効すべりが起こりうるということがわかった。また、低周波地震などのいわゆるゆっくり地震は、摩擦発熱による流体圧の上昇と空隙生成に伴う流体圧の減少の間の相互作用および流体拡散により説明可能であることがわかった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地震現象

1. 研究開始当初の背景

スロースリップイベント、余効滑り、低周波地震などのゆっくりとした滑り（総称して、「スロースリップ」と呼ぶ）の発生機構の解明は、地震の起こり方の多様性の理解という観点からきわめて重要かつ基本的な課題である。すなわち、どのような条件の下でゆっくりとした地震や通常の地震（高速断層すべり）が起きるのか、また、ゆっくりとした地震すべりが高速断層すべりへと転移することがあるのかなどということについての理解は、地震発生予測の問題にもつながりうる。さらに、このような理解は、沈み込み帯で頻発し大きな被害を引き起こす大規模

地震によるエネルギー解放量の見積もりにも寄与しうる。すなわち、沈み込み帯では海洋性プレートの沈み込みにより歪みエネルギーが蓄積されるが、その解放は通常の地震だけではなくゆっくりとしたすべりによっても起きると考えられているからである。

2. 研究の目的

本研究では、間隙流体圧の役割に焦点をあてて、スロースリップの発生の基本的メカニズムの理論的立場からの理解を目指した。そのため、定性的比較に重点を置き、取り扱いが相対的に容易な二次元変形を仮定した。研究課題を(a)余効滑りの理解および(b)ゆっ

くりとした地震の理解の二つに分けることとした。その理由は、余効滑りの発生については、本震の発生が主要因であると考えられるのに対し、ゆっくりとした地震は、それ自身で完結したメカニズムが存在すると考えられるからである。(a)については、どのような条件下で大規模な余効滑りが起きうるのかということの理解が主目標であった。余効滑りが、比較的長期間にわたって継続するためには、何らかの形で断層すべりと間隙流体圧の変化の間に、正の非線形フィードバックが生じる必要があると思われる。そのようなフィードバックが起きうる条件の検討が課題(a)における大きな目的である。

課題(b)のゆっくりとした地震の理解においては、これらの地震が、わずかとは言え、地震波を放出するため動的枠組みで取り扱うこととし、ゆっくりとした断層の成長が起きうる条件の理解が主要な目的であった。

3. 研究の方法

課題(a)については、多孔質媒質の2次元面内変形を仮定して境界積分方程式法を用いることとし、そのため断層すべりと応力テンソル成分や間隙流体圧の関係についての積分方程式を、研究計画期間中の早い時期に求めることとした。境界積分方程式は、任意の形状をした断層を扱うことができるという大きな利点がある。この積分方程式を数値的に解くことにより、間隙流体圧と断層すべりの間の相互作用を考察した。

課題(b)については、動的枠組みを仮定することとし、摩擦発熱および動的すべりによる空隙生成を考慮にいれこととした。なお、断層は均質等方熱多孔質弾性体中に存在するものとした。変形モードは面外変形とする。なお、流体拡散については差分法により計算を、動的すべりについては境界積分方程式法に基づいて計算を実行するものとした。

4. 研究成果

まず、課題(a)についての成果を記述する。断層すべりと間隙流体圧の間に正のフィードバックが生じる有力な候補として、断層をはさんで両側の媒質の透水係数が異なるモデルを想定することができる。実際、大規模な断層の露頭観察によれば、このようなモデルは十分に妥当性がある。まず、予備的考察として瞬間的に断層が出現した場合(本震断層の出現に対応)の断層端でのクーロン破壊応力の時間変化を考察した。これによると、一方の断層端では、時間とともに大きく増加するものの、多端では単調に減少することがわかった。これは、本震発生後ゆっくりと断層が一方に成長していく可能性を示唆する。実際、断層の成長を考慮に入れた計算で

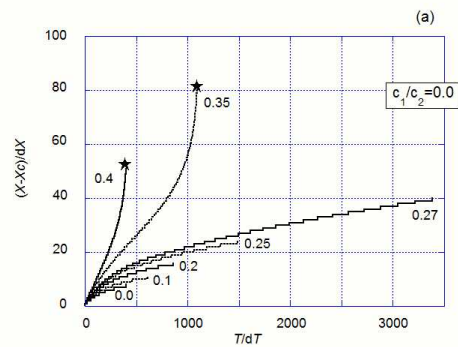


図 1a

は、そのような成長が起りうることを確認

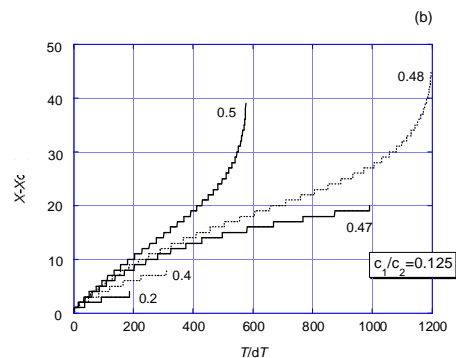


図 1b

された。また、片側の透水係数がゼロの場合(すなわち、透水係数のコントラストが最大になる場合)に成長距離は最大になることもわかった(図1)。なお、図1は、断層右端の成長の様子を表し、縦軸は断層の右端の成長距離、横軸は時間を表す。また、 c_1 は、断層の下側の透水係数、 c_2 は上側の透水係数である。また、星印は不安定(動的破壊への転移)の発生を、図中のパラメタは断層面上での応力降下量の大きさを無次元量であらわしたものである。応力降下量や破壊強度の分布について様々な可能性を考慮に入れて断層すべりの継続時間と解放モーメントの関係を計算したが、この両者に間にほぼ線形の関係があることがわかった(図2)。なお、図2の縦軸が余効すべりにより解放されたモーメント、横軸が余効すべりの継続時間を表す。これは、均質線形弾性体中に置かれた古典的動的亀裂のふるまい(2次元では、解放モーメントは断層すべりの継続時間の2乗に比例)とは大きく異なる。なお、上に述べた線形の関係は、ゆっくりとした地震についての最近の観測事実と調和的である。

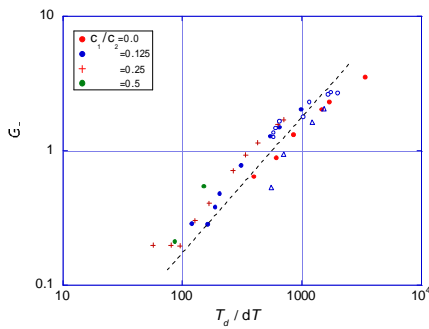


図2

次に、課題(b)についての成果を述べる。厳密に求められた基本方程式系に基づき、1次元および2次元の断層モデルについて数値計算を実行した。ここでは、課題(a)とは異なり、動的変形を仮定し、摩擦発熱および滑り速度に比例する非弾性空隙の生成を仮定した。まず、基本方程式系についての定性的考察により、非線形性に起因する2種類のフィードバックが断層滑りに作用し、そのため滑りが加速する場合と、減速する場合があることがわかった。

1次元断層モデルの解析は、断層滑りの基本的機構の解明に有用である。支配方程式の解析により、システムのふるまいは無次元数

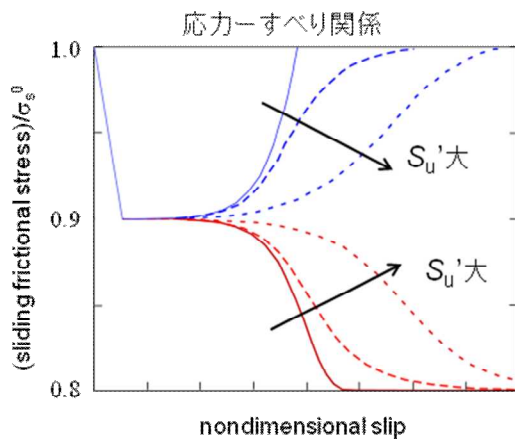


図3

S_u および S_u' により決まることがわかった。摩擦発熱よりも空隙生成が卓越する場合、 S_u はより大きな値をとる。また、流体拡散の程度が摩擦発熱よりも卓越する場合、 S_u' はより大きな値をとる。なお、 S_u' は透水係数に比例する量である。数値解析により、 S_u がある閾値より大きい場合(図3の青線)は滑り強化が、小さい場合(図3の赤線)は滑り弱화가起きることがわかった。滑り弱化解離および

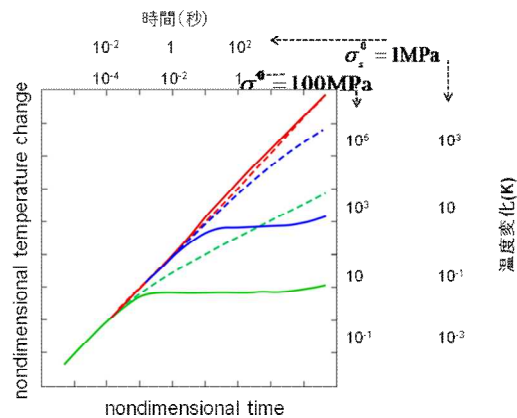


図4

滑り強化距離は、 S_u' に比例して大きくなる傾向がある(図3)。この図から、 S_u と S_u' が十分大きく初期剪断応力 σ_s^0 が十分小さい場合、ゆっくりとした滑りが生ずると期待される。他方、 S_u が上に述べた閾値より小さい場合は、滑りが不安定化し高速滑りが生ずる。

また、滑り強化が十分に強い場合は、断層面上の温度が融点に達することはない。対照

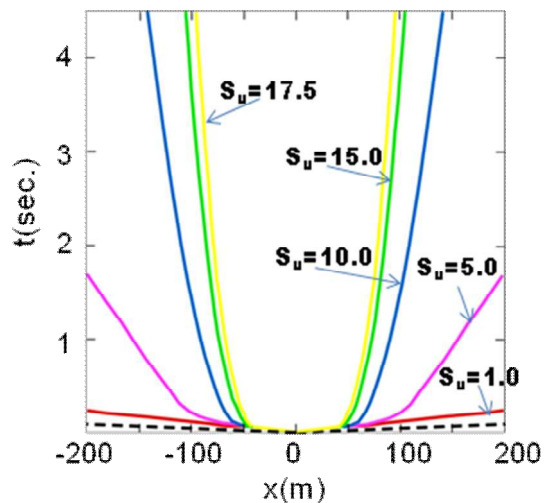


図5

的に、滑り弱화가起きる場合には、滑り開始後直ちに、融点に達する(図4)。なお、図4では、初期剪断応力が1MPaの場合の値と、100MPaの場合の値を記入している。青と緑の曲線が、滑り強化の場合、赤い曲線が滑り弱化的場合であるが、それぞれ点線の場合のほうが大きな S_u' の値を取る場合である。シェードタキライトが露頭断層で必ずしも一般的に観察されるわけではないという事実は、断層面の広い範囲で滑り強化が起きている可能性を示唆する。

2次元断層モデルの解析においては、クーロンの破壊基準を仮定して、断層端の動的成長を調べた。破壊面先端の成長の様子を図5に示す。なお、 S_u' には、ゼロでない適当な値を仮定した。黒い鎖線はS波のフロントを

表す。この図から、Suが大きいほどゆっくりとした断層の成長が起こり得ることがわかる。例えば、Su=15の場合は、断層先端の成長速度は20m/s程度である。なお、Su'=0とすると、Suが大きい場合は、破壊の成長は継続しない。例えば、Su=15の場合は30m進んだだけで成長は停止する。このことから、継続的かつゆっくりとした破壊成長には流体の拡散が決定的に重要な役割を果たすことがわかる。

以上の解析から、余効すべりの発生については断層が透水係数が異なる媒質の境界に存在することがもっとも効果的であり、余効すべりの一方向伝播や余効すべり域と本震すべり域が重ならないなどの観測事実とも調和的である。一方、低周波地震などのゆっくりとした地震については、流体の拡散と断層近傍の空隙生成が重要な役割を果たすということもわかった。この場合、断層端の成長速度は流体の拡散速度に支配される。

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2件)

1. Suzuki, T. and T. Yamashita (2009), Dynamic modeling of slow earthquakes based on thermoporoelastic effects and inelastic generation of pores, *J. Geophys. Res.* (査読有), in press.

2. Yamashita, T. and T. Suzuki (2008), Quasi-static fault slip on an interface between poroelastic media with different hydraulic diffusivity: a generation mechanism of afterslip, *J. Geophys. Res.* (査読有), 114, B03405, doi:10.1029/2008JB005930.

[学会発表](計6件)

1. Yamashita, T., Fault bending promotes postseismic fault growth, American Geophysical Union 2008 Fall Meeting, December 18, 2008 San Francisco.

2. Suzuki, T., Slow Earthquakes Induced by Fluid Flow and Inelastic Pore Creation, American Geophysical Union 2008 Fall Meeting, December 18, 2008, San Francisco.

3. Suzuki, T., Dynamic modeling of low-frequency earthquakes with fluid flow,

ASC-SSJ Fall meeting, November 26, 2008, Tsukuba.

4. 山下輝夫, 異種多孔性媒質境界での地震破壊 非地震性滑りのモデル化、日本地球惑星科学連合2008年大会、2008年5月30日、千葉市。

5. Yamashita, T., Quasistatic fault slip on an interface separating poroelastic media with different diffusivity, American Geophysical Union 2007 Fall Meeting, December 10, San Francisco..

6. 山下輝夫, 異種多孔性媒質境界での準静的地震破壊 拡散率の違いの効果、日本地震学会2007年秋季大会、2007年10月25日、仙台市。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山下 輝夫(YAMASHITA TERUO)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号:10114696

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

鈴木 岳人(SUZUKI TAKEHITO)

東京大学・地震研究所・特任研究員

研究者番号: 10451874