

摩擦実験からみた断層面の形状と地震断層運動

Topography of Fault Surface and Earthquake Faulting : Laboratory Experiment

乗原保人*

Yasuto Kuwahara

はじめに

地震断層運動には様々な形態があることが知られている。例えばSan Andreas断層では、California州のHollisterの近くにあるぶどう酒庫の床、壁などに徐々にひび割れ、食い違いが起こり、断層クリープという現象が発見された。一方同じSan Andreas断層でも、San Francisco地震(1906)やFort Tejon地震(1857)の時大きく動いた部分ではクリープ現象は認められない。ここでは、この例のように断層運動の形態を、断層クリープのような安定的なゆっくりしたすべりと、地震波を発生させるような不安定で急激なすべりの二つに分けて考える。断層運動がいかなる場で不安定で、またいかなる場で安定であるのかを知ることは地震学における重要な課題の一つである。本報告では、これを明らかにするための室内実験からのアプローチ例を紹介する。

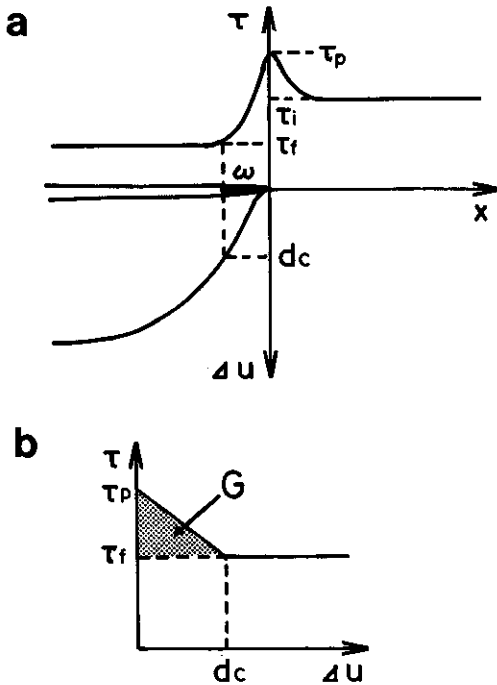
スティックスリップ(stick-slip)と ステイブルスライディング(stable sliding)

実験室で、あらかじめ切れ目(既存断層面)を入れた岩石試料に断層面に対して法線応力をかけた状態で差応力をかけると、断層は間欠的

なすべりを起こす場合がある。この現象をスティックスリップといい、既存の活断層のすべりによって起こる地震に対応するものと考えられている(Brace & Byerlee, 1966)。一方、同じ法線応力、温度の下でも断層面の粗さを粗くした場合には、断層は間欠的ではなく、ずるずると連続的にすべるようになる。これをステイブルスライディングといい、断層クリープはこれに相当するものと考えられている。室内実験でのすべりがスティックスリップ(不安定)になるかステイブルスライディング(安定)になるかを決める要因は様々あり、乗原(1989)は断層面の粗さ、法線応力の大きさ、圧縮機の固さ(剛性)、温度、断層粘土の状態等の因子をあげている。自然の断層ですべりがいかなる形態を取るのかを室内実験を通して探るためには、室内での不安定、安定すべりの発生条件を明らかにし、その結果を地震に外挿するための適当な法則を導くという手段を取る。そのために、破壊(すべり)の基本法則に立ち返って、実験室内での破壊現象と自然の場での破壊現象である地震を調べ、それぞれの共通点と相違点を明らかにする。次にその相違点が何に起因するのかを追及し、室内実験と自然地震とを結ぶ法則を確立する。

断層運動の基本モデル

物質が破壊する際にはどんな場合であれ、破壊面上での変位の食い違いの増加と共に破壊先端域の強度が低下する。この破壊に関する基本過程は室内でのスティックスリップ実験で確認されている(例えば, Okubo & Dieterich, 1984)。一般にせん断破壊における破壊先端域でのすべり量と強度の関係は第1図のスリップウィークニング(slip-weakening)モデルによって表される(例えば, Andrews, 1976)。第1図(a)に示すように物質にせん断型亀裂が存在する場合を考える。亀裂先端域での応力値は、応力集中により遠方応力値 τ_i よりも大きくなり、 τ_p に達すると破壊(すべり)が始まる。すべり量がある臨界

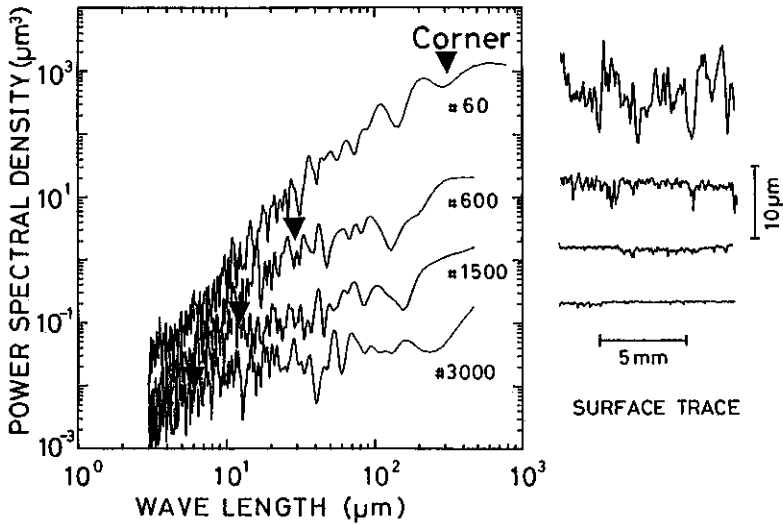


第1図. スリップウィークニングモデル。(a) X軸上に亀裂が存在するときのせん断応力(τ)と亀裂面上でのくい違い量(Δu)の空間分布。(b) Δu と τ の関係。 d_c は臨界変位量、 G は破壊エネルギー。このモデルは破壊を記述する際の一般的なモデルであるといえる。

値 d_c に達するまでは断層強度が低下し、その後は一定値 τ_f となる。破壊先端域において応力値が τ_p から τ_f に減少する領域を破損領域(図中の ω)と呼ぶ。すべり量と断層面上の応力との関係は第1図(b)のようになり、スリップウィークニング曲線と呼ばれる。図中の影の部分の面積が破壊エネルギー G を表す。このスリップウィークニング過程は、室内での微小な破壊から断層の長さが1000kmにもおよび、またその破壊面が非常に複雑であると予想される地震断層運動まで一般的に成立していると考えられる。

破壊現象の寸法依存性

第1図に示されるすべりの進行とともに強度が減少するという破壊の基本的性質は破壊の寸法にはよらないであろうが、スリップウィークニング関係の中で現われるパラメーターの値は必ずしも寸法に依存しない量であるとはかぎらない。地震断層運動で推定された破壊エネルギー G 、臨界変位量 d_c の値は、室内実験で測定された値よりも3オーダー程度大きい(例えば, Wong, 1982)。このように、これらの量は媒質が持つ特有の物理量ではなく、見かけ上、寸法効果をもつ量である。この見かけ上現われる寸法効果は何に起因するのであろうか。Dieterich(1978)やOkubo & Dieterich(1984)の実験によれば、これらの量は断層面の粗さに依存した量であり、粗さが粗くなるほど G や d_c は大きくなる。このことから、地震と室内での破壊の G や d_c の違いは、地震断層面の粗さが室内での人工断層面の粗さに比べて非常に粗いか、地震断層の主破壊面近傍に副次的破壊面が発達しているなど、断層の不均質性の違いに起因していると考えられる。岩石の破壊強度も寸法効果を持つ量であるといわれ、これは媒質内での強度分布の不均質性の観点から説明されているが(Pratt et al., 1972)、一般に破壊現象の持つ寸法効果は媒質の持つ様々な波長の不均質性に依存した現象であるといえる。これらの議論をふまえて、栗原・他(1987)は断層運動の形態を支配する因子として断層面の形状に着目し、これを制御し



第2図. 人工断層面の1次元形状(右図)とそのパワー・スペクトル. 黒三角はスペクトルにみられるコーナー波長を示す.

た実験を行った. 以下にこの結果について紹介する.

人工断層面の形状に着目したスティックスリップの実験

1. 人工断層面形状の定量化

自然に存在する破壊面の形状がフラクタル的性質を持っていることは最近多くの文献で紹介されている(例えば, Brown & Scholz, 1985). 破壊面形状の性質がフラクタルであるとは, 形状のパワースペクトル P が波長 λ と

$$P(\lambda) \propto \lambda^{-n} \quad (1)$$

なる関係を持つことを言う. またその形状のフラクタル次元 D_f は, $D_f = (5-n)/2$ で与えられる.

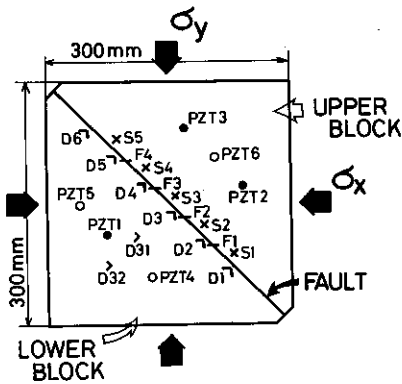
それでは人工的に研磨された岩石試料のすべり面はいかなる特長を持つのであろうか. #60~#3000の研磨材によって研磨された岩石表面の形状とそのパワースペクトルを第2図に示す. その特長は, それぞれのスペクトルにそれぞれ異なるコーナー波長 λ_c が存在し, λ_c より

も短波長域では(1)式の関係があり, 長波長域では P はほぼ一定値をとることである. すなわち, λ_c よりも長波長側では形状のフラクタル性が失われている. また, 短波長域における振幅値と n の値は自然の破壊面について報告されている値とほぼ一致している. これらのことから人工断層面の形状の特徴量として, λ_c を用いることができる.

2. 実験方法と結果

40cm長の人工断層面を有する花崗岩, または安山岩試料を用いて2軸せん断試験を行った. 断層面の形状については5-1で述べた通りである. 第3図に試料の形状と用いたセンサーの配置を示す. 断層は試料の対角線上にあり, 応力 σ_x, σ_y を適当に変化させてスティックスリップを発生させた. すべりの際, センサーD,Fによって断層沿いのせん断歪(応力)とすべり量を0~200kHzの周波数帯域で測定した.

第4図に, 断層面形状の, λ_c が $107\mu\text{m}$ と $5\mu\text{m}$ の面で, 法線応力が10MPaの時のすべりによるせん断応力の記録例を示す. すべりの伝播が明瞭に観察でき, λ_c が $107\mu\text{m}$ の時の破壊伝播速



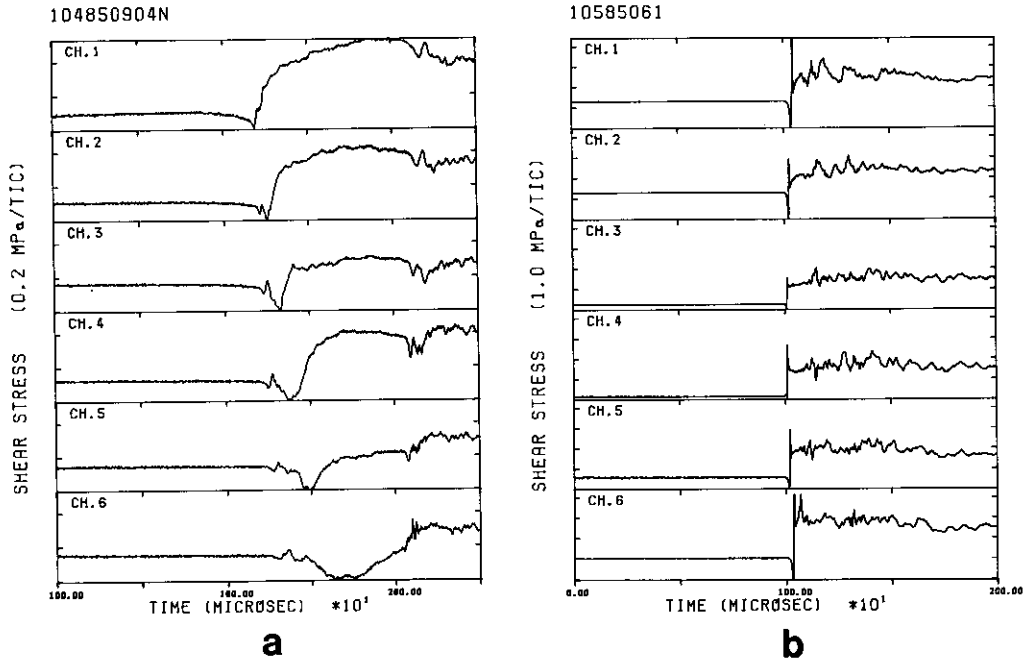
第3図. 岩石試料とセンサーの配置図. D;せん断歪測定用ゲージ, F;すべり量測定用ゲージ, PZT;圧電素子.

度は約1km/sであり、 λ_0 が5 μm の時は約2.3km/sである。 λ_0 が360 μm の時にはステイブルスライディングとなり、スティックスリップは発生しなかった。不安定すべり発生条件に関する実験結果を1回のすべりでの最終すべり量Dと断

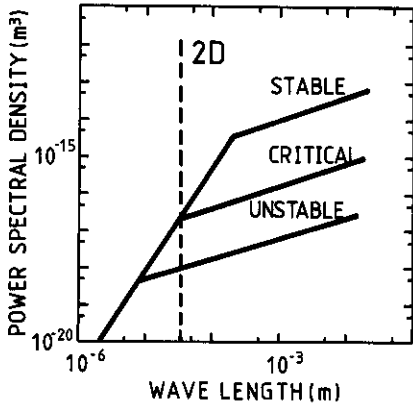
層面の形状の、 λ_0 との関係でまとめると第5図のようになる。図は断層面形状のスペクトルとすべり量の関係を示す。実験によると $2D > \lambda_0$ では不安定すべりが、 $2D < \lambda_0$ では安定すべりが発生する。また $2D \sim \lambda_0$ のときには、顕著な前兆的すべりがみられる。これまでの実験的研究では、法線応力が大きいほど、また圧縮機の剛性が小さいほど不安定すべりが発生し易い、という結果が得られている(栗原, 1989)。このように不安定すべり発生条件として種々のパラメーターが用いられてきたが、実は法線応力および圧縮機の剛性の効果はどちらもすべり量Dというパラメーターの中に含まれ、不安定すべり発生条件はすべり量と、 λ_0 の関係によって一般化できる。

破壊のスケーリング仮説

以上の結果に基づき次のような破壊に関するスケーリング則が提唱された。



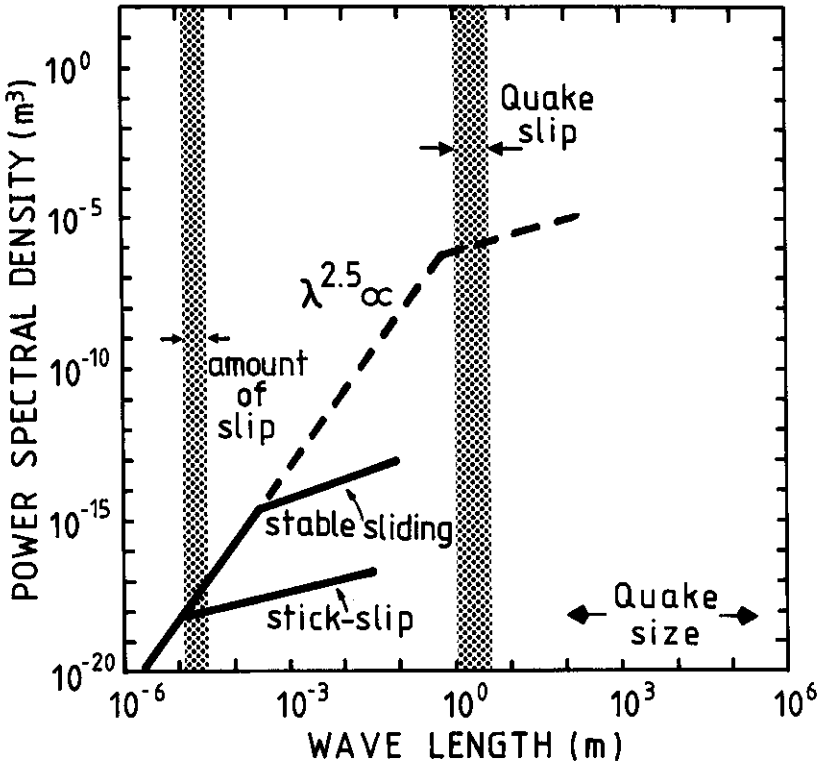
第4図. λ_0 が107 μm (a)と5 μm (b)の粗さの面で得られたせん断歪の記録。(a)のほうがすべり伝播速度が小さいことがわかる。



第5図. 不安定すべりの発生条件. D は断層が1回すべったときのすべり量. $2D$ が形状スペクトルのコーナー波長, λ_c を越えたときにすべりは不安定となる.

i) 地震断層面とフラクタル: 破壊面にみられるフラクタルの性質を外挿することが許されるなら, 地震断層面の形状スペクトルも λ_c ($2 < n < 3$) に比例すると考えられる. 一方室内実験の結果は, 不安定すべり発生の条件として断層面の形状スペクトルにコーナー波長, λ_c が存在し, すべり量 D が, $\lambda_c/2$ 以上であることが必要であることを示す. 地震とは地下岩石の大規模な不安定すべりであるといえるから, 室内実験の場合と同様に, 地震断層面にも, λ_c が存在すると考えられる. 例えば, すべり量が数mの地震断層の形状スペクトルは第6図の破線のようものが考えられ, 長波長側では断層形状のフラクタル性が失われているであろう.

ii) 寸法に依存するパラメーター: 実験室に



第6図. 地震断層で予想される断層面の形状スペクトル(破線). 太線は人工断層面の形状スペクトルである. 例えばマグニチュード6程度の地震(すべり量は約1m)ならばその断層の, λ_c は1m以下である.

おけるせん断破壊のパラメターの値と地震における値を比較すると、破壊伝播速度、すべり速度、応力降下量、は寸法に依存しないパラメターと考えられる。破壊エネルギー G 、スリップウィークニング過程における臨界変位量 d_c は寸法に依存し、それらは、 λ_c によってスケーリングできる。

文献

- Andrews, D. J., 1976: Rupture velocity of plane strain shear cracks. *J. Geophys. Res.*, v.81, 5679-5687 .
- Brace, W. F. and J. D. Byerlee, 1966: Stick-slip as a mechanism for earthquakes. *Science*, v.153, 990-992 .
- Brown, S. R. and C. H. Scholz, 1985: Broad Bandwidth study of the topography of natural rock surfaces. *J. Geophys. Res.*, v.90, 12575-12582.
- Dieterich, J.H., 1978: Time-dependent friction and the mechanics of stick-slip. *Pure and Appl. Geophys.*, v.116, 790-806, 1978.
- 柔原保人, 1989: 岩石の摩擦特性と地震断層運動論. *地震2*, v.42, 105-116 .
- · 大中康譽 · 山本清彦 · 平澤朋朗, 1987: 断層面の形状と断層運動. *数理地震学(II)*, 36-48.
- Okubo, P.G., and J.H. Dieterich, 1984: Effects of physical properties on frictional instabilities produced on simulated faults. *J. Geophys. Res.*, v.89, 5817-5827 .
- Pratt H. R., A. D. Black , W. S. Brown and W. S. Brace, 1972: The effect of specimen size on the mechanical properties of unjointed diorite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, v.9, 513-529.
- Wong, T., 1982: Shear fracture energy of Westerly granite from post-failure behavior. *J. Geophys. Res.*, v.87, 990-1000.

(受理：1990年4月11日)