

# ダイク - 断層系と低周波地震の発生

西村太志 (東北大・理)

## A study on tensile-shear dislocation seismic source

Takeshi Nishimura (Geophysics, Science, Tohoku University)

### 1. はじめに

活動的火山の浅部からモホ面までの地殻内部、沈み込むプレートの海溝付近で、古くから低周波地震と呼ばれる地震が報告されてきた。また、近年の稠密観測により、沈み込み帯のやや深部で発生する低周波微動や、地震断層付近の地殻内部で発生する低周波地震が報告されている。これら低周波が卓越する地震や微動は、マグマ活動やプレート運動に関係して発生していると考えられているため、その発生位置や活動が詳しく調べられてきた。また、その発生には水やマグマなどの流体の関与が大きい、と考えられてきた。

### 2. 発生場

火山性地震や群発地震の発生場は、しばしばダイクと断層が複数組み合わせられた状況がしばしば想定される (Hill のモデル)。ダイクは最大圧縮軸方向に長軸が伸び、断層はダイクの先端部から約 45 度方向に伸びている。そして、このようなダイクと断層が火山地域などでは多数組み合わせたり、いわゆる火山構造性地震や低周波地震などを引き起こしていると考えられる。このような発生場は、火山性の低周波地震の中には比較的明瞭な S 波を励起しているものも多く、S 波を効率的に励起できる断層運動が関与していることから示唆されることから支持される。ただし、“通常地震”のスケーリング法則に照らし合わせると、規模に比べて卓越周波数が極めて小さい。また、共鳴現象を生じる構造が震源付近に存在していることを示唆するように、S 波のあとに単色のコーダ波が続く地震もしばしば観測されることから尤もらしいであろう。

このような発生場においては、ダイクの伸長方向をきめている広域応力場の他に、ダイク内のマグマ圧力が低周波地震の励起源として考えられる。前者が卓越するような場合は、通常の構造性地震と同じように、断層面にはほぼ一定の応力が働くと考えられ、その発生過程は通常地震と似ているかも知れない。一方、後者が主な励起源となった場合、ダイクに近い位置の断層面には比較的大きな剪断応力が働き、離れるに従ってその大きさは小さくなるため、応力場は不均一となる。本報告では、このような発生場、つまり Tensile-Shear クラックが存在し、ダイク内の圧力が主要な地震の励起源であるような場合、低周波振動が生じるかどうかについて考察する。

### 3. Tensile-Shear Source Model

一つのダイクと一つの断層からなる Tensile-Shear

Crack を考える (図 1)。深部からの新たな流体の流入やマグマ内揮発性物質の発泡により、ダイク内の流体圧力が増加することを考える。この圧力増加に伴い、周辺岩体が歪み、断層面に働くせん断応力が摩擦による破壊強度を越えると、断層滑りが生じ地震波が励起される。同時に、断層に接するダイク先端部では、断層運動により体積増加が起こり、流体は急減圧を受ける。この減圧によりダイク内流体に圧力勾配が生じ、流体移動や圧力波伝播が励起され、地震波が励起される。

以上のような Tensile Shear Crack による地震波の励起を考え、上述した 2 つの部分、つまり断層滑りと火山性流体の移動について、簡単なモデルを構築し、数値計算を行った。

### 4. 断層滑り

通常地震との発生環境の違いを考慮した複数のブロックがバネで連結されたバネ・スライダモデルを考える。まず、一番端のブロックは、ダイクが連結していることを模擬するために、ピストンと繋がっている。ピストン内には圧縮性流体があり、ピストンが引っ張られたときには体積変化に応じて流体の圧力が低下する。このブロックのもう一方の端はバネを通して 2 番目のブロックと繋がっている。2 番目以降のブロックは、隣り合うブロックとバネを介して繋がっている。各ブロックの床面には、変位依存構成則で表される摩擦が働く。具体的には、滑り量が微小なうちは滑り量に比例した摩擦力が働き、最大値に達した後は、滑り量に比例して摩擦力が減少する。そして、滑り量が臨界滑り量 ( $D_c$ ) となったとき、摩擦力がゼロになると仮定する。

断層滑りは、ピストン内流体の圧力増加により励起される。ピストン内の圧力をゆっくりと増加させていくと、ピストンに繋がったブロックが力を受けて滑り出す。その結果、2 番目、3 番目以降のブロックもバネを介して押される。このプロセスを数値的に計算した。ピストン内の圧力増加率や流体の圧縮性の効果を変えて計算したところ、圧力増加率が大きく、圧縮性が大きい場合、通常地震と同じようにブロックが次々と摩擦ゼロの滑りに遷移し、高速で断層滑りが伝播することがわかった。それに対し、圧力増加率、圧縮性を小さくすると、ゆっくりとした滑りが起きることがわかった。この滑りは、断層が滑る際にダイク内の流体を膨張させる必要があるために生じたと解釈できる。以上の結果は、ダイクに繋がった断層運動

は、ゆっくりと滑り、地震波としてはより低周波を励起する可能性があることを示している。

### 5. 流体の振動

これまで提案されている多くの共鳴体モデルは、流体の移流項を取り入れず、流体運動を微小振幅波で表現されてきた。Chouet (1986)のクラックモデルには移流項が考慮されているものの、密度一定の流体を仮定している。しかし、実際のマグマや熱水などの火山性流体には無視できない圧縮性が存在することが期待できるので、Nishimura and Chouet (2003)のアルゴリズムを利用し、圧縮性流体の共鳴体内の振動の様子を調べた。

具体的には、高温のマグマで加熱された高温水を考える。温度 400-800 °C、封圧 6MPa-88MPa を想定すると水は臨界流体として扱えるので、その特性を密度

圧力条件で記述した。そして、初期に与える圧力変動量の違いによる振動の様子を調べた。その結果、圧力変動量が小さい場合、流体の音速で定まる固有周期で振動する共鳴現象が現れ、これまでの共鳴体モデルと同じ結果が得られた。一方、大きい圧力変動を与えた場合、火山性流体内には衝撃波が形成されるため、衝撃波の伝播速度により固有周期が決まる。さらに、この場合、振動エネルギーが地震波として周辺弾性体に散逸しないとしても、振動が減衰することが明らかとなった(図2)。この減衰は、圧力変動箇所から伝播する圧縮波と膨張波の特性により生じると考えられる。つまり、圧縮波は階段関数的な波形を保ったまま反射を繰り返すのに対し、膨張波はその先端部と尾部の速度に差があるために次第に波形が緩やかになり波の振幅が時間とともに小さくなる。共鳴体内での振動は、これらの重ね合わせであるので、膨張波の振る舞いは圧力そのものの時空間的平均値を小さくしないものの、時間とともに圧力のふれを小さくする効果をもたらす。また、最終的な釣り合いの位置は圧縮性流体の圧力の釣り合い点となるので、片揺れのような減衰振動を示す。このような片揺れは、岩手山の長周期地震を歪み計で記録したときに記録されている(図3)。

### 6. おわりに

Tensile Shear Crack が低周波振動を励起するメカニズムを考察した。断層滑りについては、摩擦構成則の臨界滑り量を変えることでも低周波振動が励起されると考えられるが、今回挙げたモデルの方が単色なコーダ波が重長するような地震をも同時に説明できる。流体の圧縮性の効果は、歪み計などによる観測で調べられると考えられる。

「5. 流体振動」は山崎純氏の修士論文の結果をもとにした。

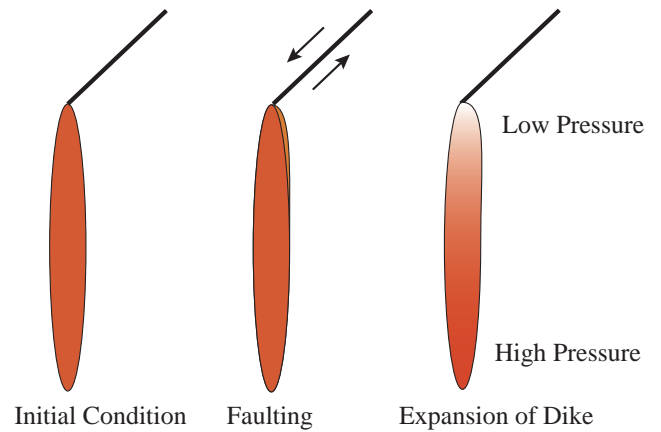


図1. Tensile Shear Dislocation 震源の概念図。

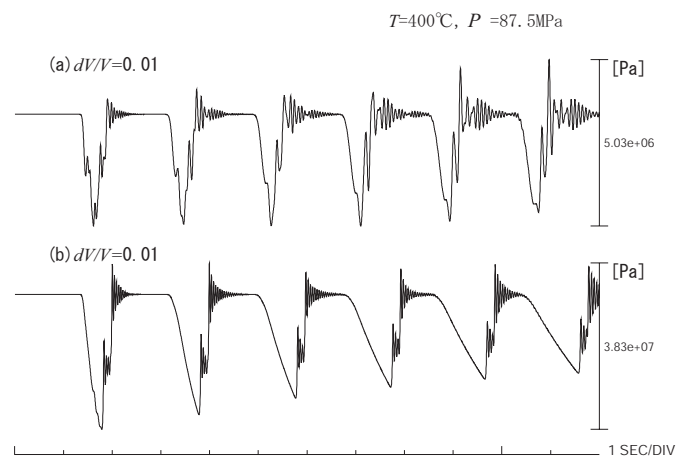


図2. 圧縮性流体の振動の数値計算結果。(a)圧力変動量が小さい場合。(b)圧力変動が大きい場合。短周期の振動は数値計算上のノイズ。

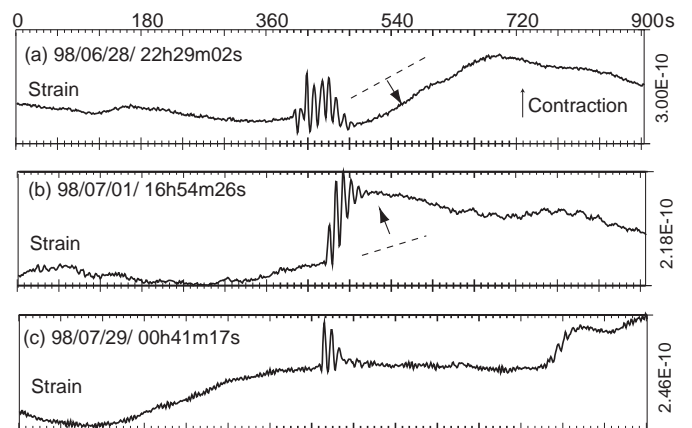


図3. 岩手山長周期地震の歪み波形。震動波形は片揺れの特徴を示す(特にbとc)。