

## 高圧流体に基づく地震現象の包括的理解 – “Involvement of Fluids in Earthquake Ruptures” で述べたかったこと

山下輝夫（元東大・地震研）

### 1. 本の内容と執筆意図

2017年8月に、Springer社より”Involvement of Fluids in Earthquake Ruptures”が刊行された。これは、下記のとおり全6章からなり、山下と京大の堤昭人さんとの共著である。

- 1 Laboratory and Field Evidence for the Involvement of Fluids in Earthquake Faulting
- 2 Seismological Implications of Fluid Effect on Earthquake Occurrence
- 3 Fluid Flow Properties of Fault Zones
- 4 Basic Equations for Linear Thermoporoelasticity
- 5 Poroelastic Effects on Earthquake Rupture
- 6 Effects of Fluid Migration on the Evolution of Seismicity

震源の物理学についての著書としては、焦点がやや狭いと思われるかもしれないが、執筆の意図は、地下流体が地震破壊現象（比較的震源の浅いもの）の包括的理解の鍵になる可能性がある、というところにある。まずは、観測や実験に基づき、流体の関わりについての多種多様な根拠の提示・検討（1章～3章）、モデル化についての数学的枠組みの説明（4章）を行った。この4章では、線形弾性体力学にある程度の知識がある人たちを対象として、熱多孔質弾性体理論をわかり易く説明したつもりである。それに引き続いて、5章～6章では、動的地震破壊（ゆっくり地震を含む）、準静的すべり、群発地震、余震などの包括的理解を試みた。ここでの解析は、4章の定式化に基づいている。5章は主として、これまでの研究の取りまとめであるが、6章はこれまでの山下自身の研究に基づき新たなモデルの提案を行っている。

最近の震源のモデリングでは、複雑な現象を説明するのに、複雑なモデルを想定する傾向があるように思える。しかし、仮定したモデルが良いモデルか、そうでないかは、観測データとの適合性とモデルの単純さのバランスから判断すべきである（大野、2009）。さらに、あまりに複雑なモデルについては、基本的過程についての深い理解が無い限り意味をなさない。すなわち、モデル化において必要とされるのは観測・実験に基づく抽象化という作業である。5章。6章では、このようなことを念頭に、できるだけ概念的に単純なモデルを想定したつもりである。本稿では、例として6章の一部を紹介したい。

### 2. 6章で提示・検討した群発地震のモデルについて

群発地震に対する流体の関与の可能性については、多種多様な根拠がある（第2章第8節）。群発地震のモデル化に際しては、トリガー機構と駆動機構を区別して考える必要があ

る。トリガー機構として流体の局所的高圧化が想定されることが多い(Yamashita, 1999)が、地殻応力が広い領域で臨界状態に近ければ、滑り発展は容易に不安定(高速)化することがありうる(つまり、通常の地震が起きる)。したがって、流体の局所的高圧化が群発地震のトリガー機構として成立するためには、低応力状態である必要がある。しかし、このような応力状態の下で、十分長期間にわたって群発地震が継続するためには、十分高圧な流体が長期間にわたって供給されるという前提条件が必要となる。このモデルでは、地震活動の駆動機構としては、高圧流体の拡散と滑り間の相互作用が考えられる。このモデルに基づき群発地震と関係した断層帯の流体拡散率を見積もる研究も多い(例えば Hill&Prejean 2006; Yukutake et al., 2011)。

滑り発展を抑制する機構がモデルに内在していれば、地殻応力状態がたとえ臨界状態に近くても群発地震のモデル化は可能になる。例として、速度強化型の摩擦法則をあげることができる。しかし、流体存在下での効果的な抑制機構としては、流体拡散と連動した slip-induced dilatancy があげられる。これにより、全体としてゆっくりとした滑り発展が得られる。この滑りの成長速度は、流体拡散速度に比例することになる。いくつかの群発地震観測では、地震活動が準静的滑り発展と連動していることが示されており(例えば Vidale et al. 2006; Lohman &McGuire 2007; Takada&Furuya 2010)、これと調和的な結果となる。また、このモデルでは、トリガー機構として、流体の局所的高圧化を考える必要がないという特徴がある。例えば、流体で飽和した媒質中の小規模脆性破壊でも、群発地震をトリガーしうる。このモデルでは、地震活動は、流体拡散による流体圧上昇と準静的滑り発展の二つに関係する。

## 参考

- 大野克嗣 (2009) 非線形な世界、東京大学出版会
- Hill DP, Prejean SG (2005) Magmatic unrest beneath Mammoth Mountain, California. *J Volcanol Geotherm Res* 146:258-283
- Lohman RB, McGuire JJ (2007) Earthquake swarms driven by aseismic creep in the Salton Trough, California. *J Geophys Res* 112:B04405. doi:10.1029/2006JB004596
- Takada Y, Furuya M (2010) Aseismic slip during the 1996 earthquake swarm in and around the Onikobe geothermal area, NE Japan. *Earth Planet Sci Lett* 290:302-310. doi:10.1016/j.epsl.2009.12.024
- Vidale JE, Boyle KL, Shearer PM (2006) Crustal earthquake bursts in California and Japan: Their patterns and relation to volcanoes. *Geophys Res Lett* 33:L20313, doi:10.1029/2006GL027723
- Yamashita T (1999) Pore creation due to fault slip in a fluid-permeated fault zone and its effect on seismicity: generation mechanism of earthquake swarm. *Pure Appl Geophys* 55:625-647
- Yamashita T. and Tsutsumi A (2017), *Involvement of Fluids in Earthquake Ruptures: Field/Experimental Data and Modeling*, Springer
- Yukutake Y, Ito H, Honda R, Harada M, Tanada T, Yoshida A (2011) Fluid-induced swarm earthquake sequence revealed by precisely determined hypocenters and focal mechanisms in the 2009 activity at Hakone volcano, Japan. *J Geophys Res* 116:B04308. doi:10.1029/2010JB008036