

## 12-11 地震の発生における応力と流体の役割

### Roles of tectonic stress and pore fluid pressure controlling earthquake generation

名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター  
Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

地中への注水は地震活動を誘発する。誘発地震の発生は、断層面に働いている応力状態とクーロンの破壊規準で記述される断層（剪断）強度との関係によって支配され、この点において一般の地震と変わらない。注水による地震の誘発への寄与は、流体の荷重による応力状態の変化と有効法線応力の減少に伴う断層強度の低下に大別される。特に後者の効果について、標準的な摩擦係数（0.6）を基に考えれば、10 MPaオーダーの圧力による注水は断層強度を数MPa程度も低下させる。これは、1回の地震の応力降下量に相当し、大地震によるクーロン破壊関数の変化（ $\sim 0.1$  MPa）よりもはるかに大きく、注水による断層強度の低下が誘発地震の発生に重要な役割を果すことを示唆する。

我々は、地震のメカニズム解から地殻内の間隙流体圧場を三次元的に推定する新しい手法、地震メカニズムトモグラフィー法（FMT法）<sup>1),2)</sup>を開発した。FMT法では、地震時に剪断応力と断層強度が一致することに着目し、断層運動様式（断層面の向き、すべりベクトル）とテクトニック応力場の関係から地震を駆動した間隙流体圧を求め、これを発震時の震源での間隙流体圧の観測値（観測データ）であると見なす。最新のFMT法では、間隙流体圧場の空間変化及び時間変化のroughnessをそれぞれ導入し、ベイズ的統計推論とモデル選択規準であるABICを用いたインバージョン法<sup>3)</sup>を応用し、間隙流体圧場の時間発展を推定することができる<sup>2)</sup>。

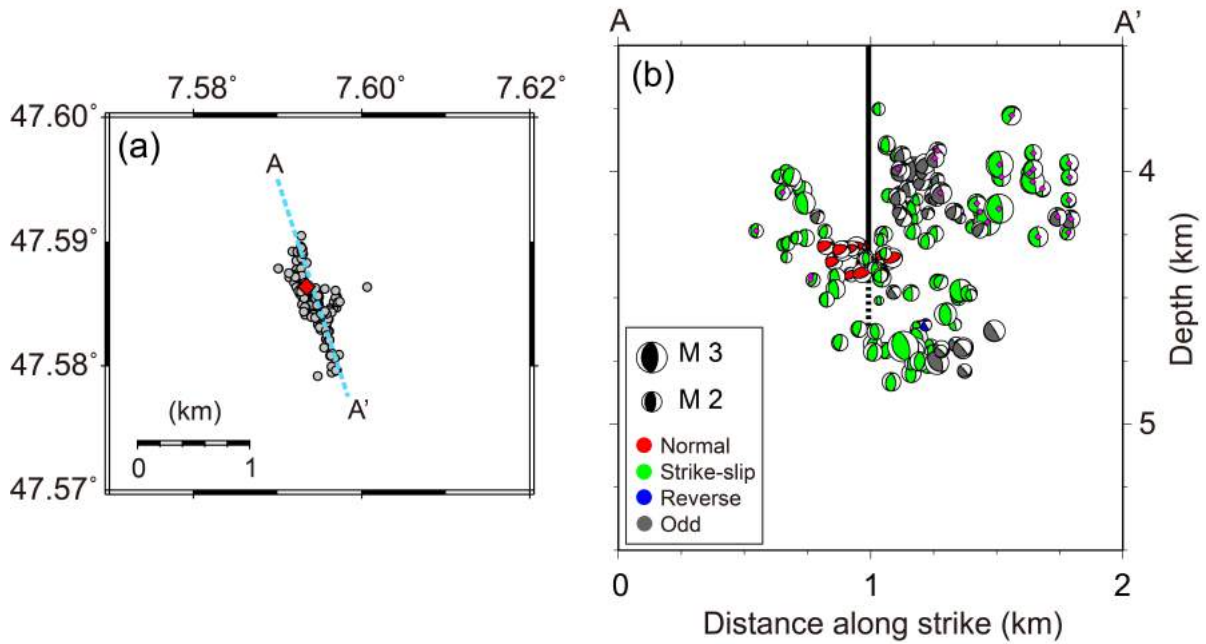
本手法を、スイス・バーゼルの地熱貯留層で実施された注水実験による誘発地震のデータ<sup>4)</sup>に適用し（第1図）、注水開始から約10日間の貯留層内の間隙流体圧場の時間発展を推定した（第2図）。注水開始から6日後にシャットインするまでの間は、間隙流体は注水井の周りから時間とともに広がり、主に井戸の南東方向へ伸びる。シャットイン後は、主な流路の先端に形成された高压流体域が孤立し、そこで地震を起こしながら、間隙流体圧は低下してゆく。発震時における震源での間隙流体圧の時間変化を調べると、多くの地震は間隙流体圧の上昇、つまり断層強度の低下によって引き起こされていることがわかる（第3図）。これは、断層強度の低下が誘発地震の主な原因であることを示しており、これまでの理論的考察をデータ解析により実証したものである。一方、最大地震（ $M_w$  2.95）の発生は、断層強度の低下では説明できないこともわかった。最大地震の発生する2日ほど前から、震源域で前震活動に相当する地震が発生する。これらは、メカニズム解から判断すると、最大地震とほぼ同じ断層面上の地震であった。このような現象は、震源周辺域の応力状態が高速動的すべりを引き起こすための臨界状態に近づく過程をみているのかもしれない。

#### 参考文献

- 1) Terakawa, T., A. Zoporowski, B. Galvan, and S.A. Miller (2010) High pressure fluid at hypo-central depths in the L'Aquila region inferred from earthquake focal mechanisms. *Geology* 38, 995-998
- 2) Terakawa, T. (2014) Evolution of pore fluid pressures in a stimulated geothermal reservoir inferred from earthquake focal mechanisms. *Geophysical Research Letters* 41, 7468-7476

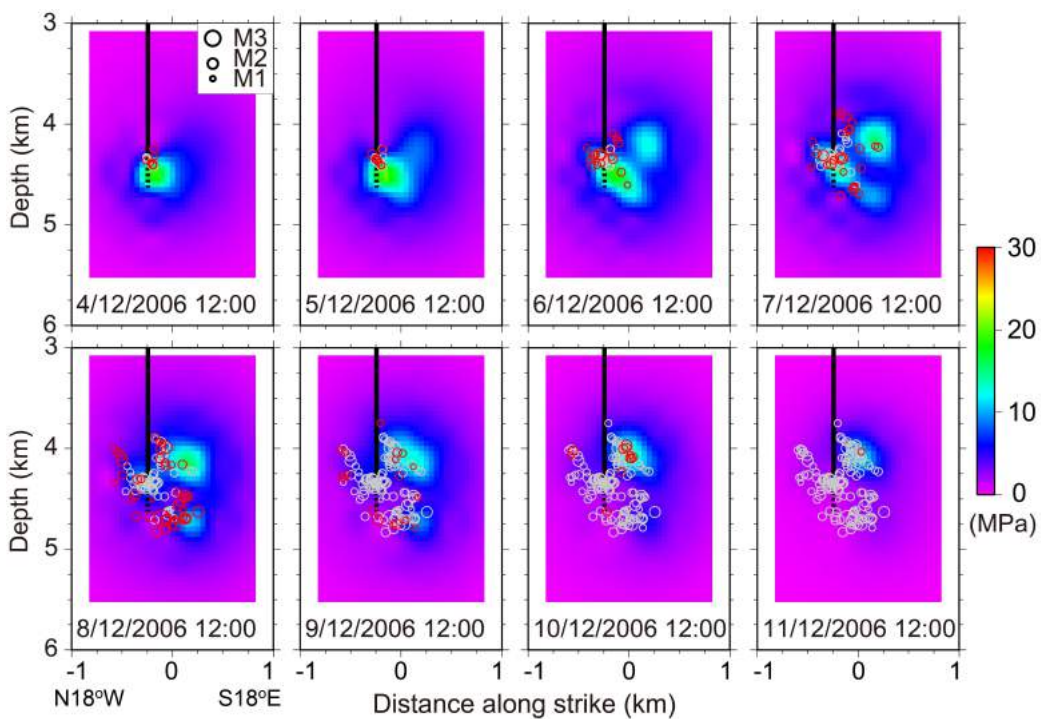
- 3) Fukahata, Y., A. Nishitani, and M. Matsu'ura (2004), Geodetic data inversion using ABIC to estimate slip history during one earthquake cycle with viscoelastic slip-response functions, *Geophys. J. Int.*, 156(1), 140-153
- 4) Deichmann, N., T. Kraft, and K. F. Evans (2014), Identification of faults activated during the stimulation of the Basel geothermal project from cluster analysis and focal mechanisms of the larger magnitude events, *Geothermics*, doi:10.1016/j.geothermics.2014.04.001

(寺川寿子)



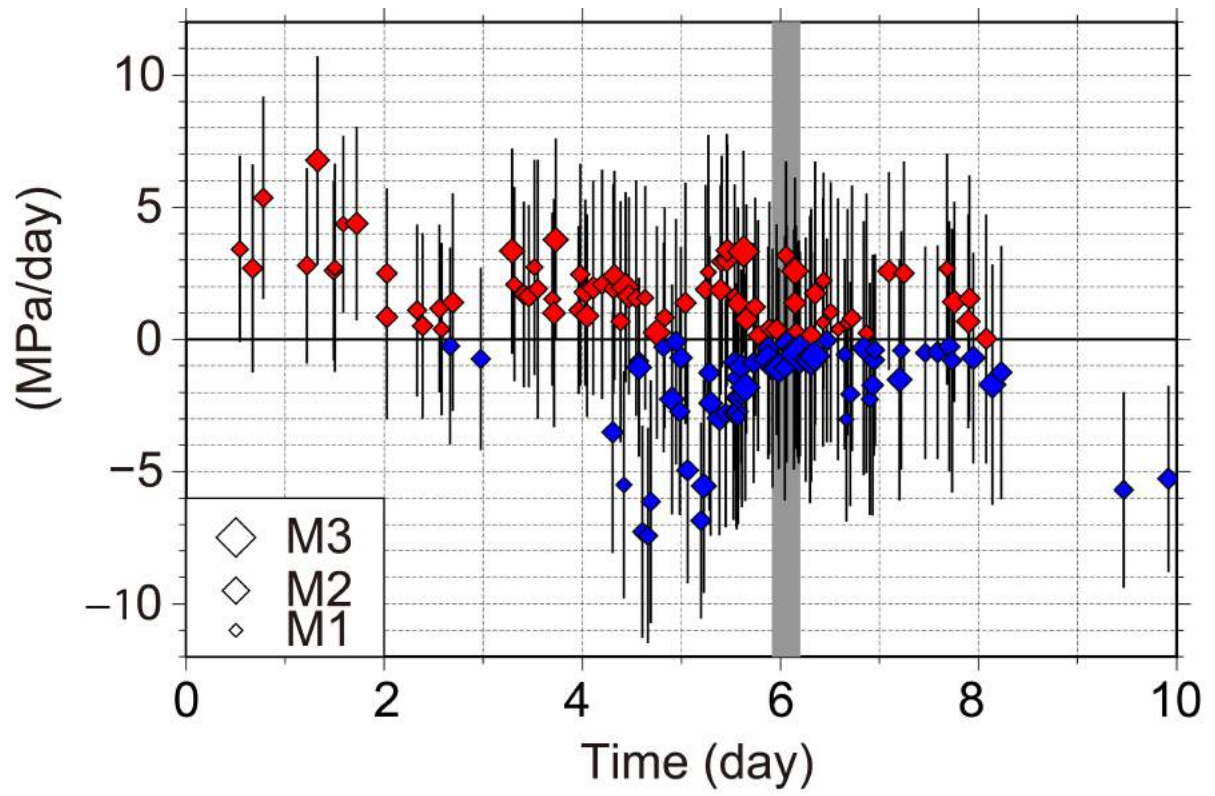
第1図 誘発地震の震源分布とメカニズム解 (2006年12月3日～2013年6月29日). (a) 震央分布. 赤い◆は注水井を示す. (b) メカニズム解. メカニズム解は(a) のA-A'断面の裏側に投影したもの. 黒線は注水井 (点線は開口部) の位置を示す. ◆は解析対象期間後 (2006年12月12日以降) に発生したイベント.

Fig. 1 Map of hypocenters and focal mechanisms of induced seismicity. (a) Map of epicenters. The red diamond shows the injection borehole. (b) Backside hemisphere projection of focal mechanisms. Focal spheres with pink diamonds are seismic events that occurred after 12 December 2006.



第2図 バーゼル地熱貯留層での間隙流体圧場の時間発展 (第1図のA-A'断面の結果). カラー・スケールは静水圧を超えた圧力を示す. 赤丸は表示時刻の半日以内に発生したイベント, 灰色の丸はそれ以降のイベントを示す.

Fig. 2 Spatiotemporal evolution of pore fluid pressure in the Basel EGS. The color scales show excess pore fluid pressure field on the macroscopic plane A-A' in Fig. 1. The red and gray circles denote seismic events within the time interval half day before and after the time indicated in each panel and the earlier events.



第3図 震源での発震時の間隙流体圧の時間変化.  
 Fig. 3 Temporal changes in pore fluid pressure field at hypocenters and at origin times.