

12-13 長期・短期注水による誘発地震に関する研究

Studies on seismicity induced by long- and short-term injections

産業技術総合研究所 (雷 興林)

Geological Survey of Japan, AIST (Xinglin Lei)

流体の地下深部圧入は地熱開発・シェールガス生産・CO₂地下貯留・工業廃水の地下処分などの分野で利用されている。近年、これらの産業アプリケーションの急発展に伴い、注水と関連する誘発地震活動が顕著な増加傾向を示した。マグニチュード5クラスの被害性誘発地震の例も数件報告された。その代表的な例として、中国四川盆地の注水誘発地震活動が挙げられる(1-3)。

中国内陸の中心部に位置する四川盆地には、多数の天然ガス田が発見された。四川盆地の西境界は有名な地震帯であるが、盆地の内部は天然地震活動が低く、安定的な地域である。1970年代から、ガス生産に伴い出てきた汚染水を断続的に枯渇ガス田に圧入した(長期注水)。また、2014年からシェールガスの開発が急展開され、水圧破碎のため高压注水(短期注水)が複数サイトで行われてきた。これらの注水活動に伴い、地震活動が多発し始めた。これまで、M5クラスの地震は4回、M4クラスは十数回観測され、世界範囲においても、稀なケースとなった。産総研は、2006年ごろから四川盆地の注水誘発地震活動に注目しはじめ、中国地震局及び中国科学院関連研究機関の協力のもとで注水誘発地震について包括研究を展開してきた。今まで、重要な実例として、重慶市の榮昌¹⁾と自貢市の黄家場²⁾の二つの枯渇ガス田における廃水注入(長期注水)による誘発した地震(第1図CとD)及びシェールガス開発のための水圧破碎(短期注水)による誘発した地震³⁾(第1図AとB)に対し、包括的な研究を行った。これらの地震活動と注水活動との関係を明らかにし、地震活動の統計的な特徴と被害性誘発地震の発生条件も解明しつつある。

第2図は、代表的な長期注水による誘発地震例(Dサイト)に対するETASモデル解析結果を示す。第3図は、シェールガス開発のための水圧破碎による誘発地震例(Aサイト)のETASモデル解析結果である。通常の自然地震に比べ、大森式に従う余震の発生率は非常に低いことが分かる。地震の発生頻度は注水履歴に強く依存し、注水が停止或いは終了すると、地震頻度が急減することが認められる。

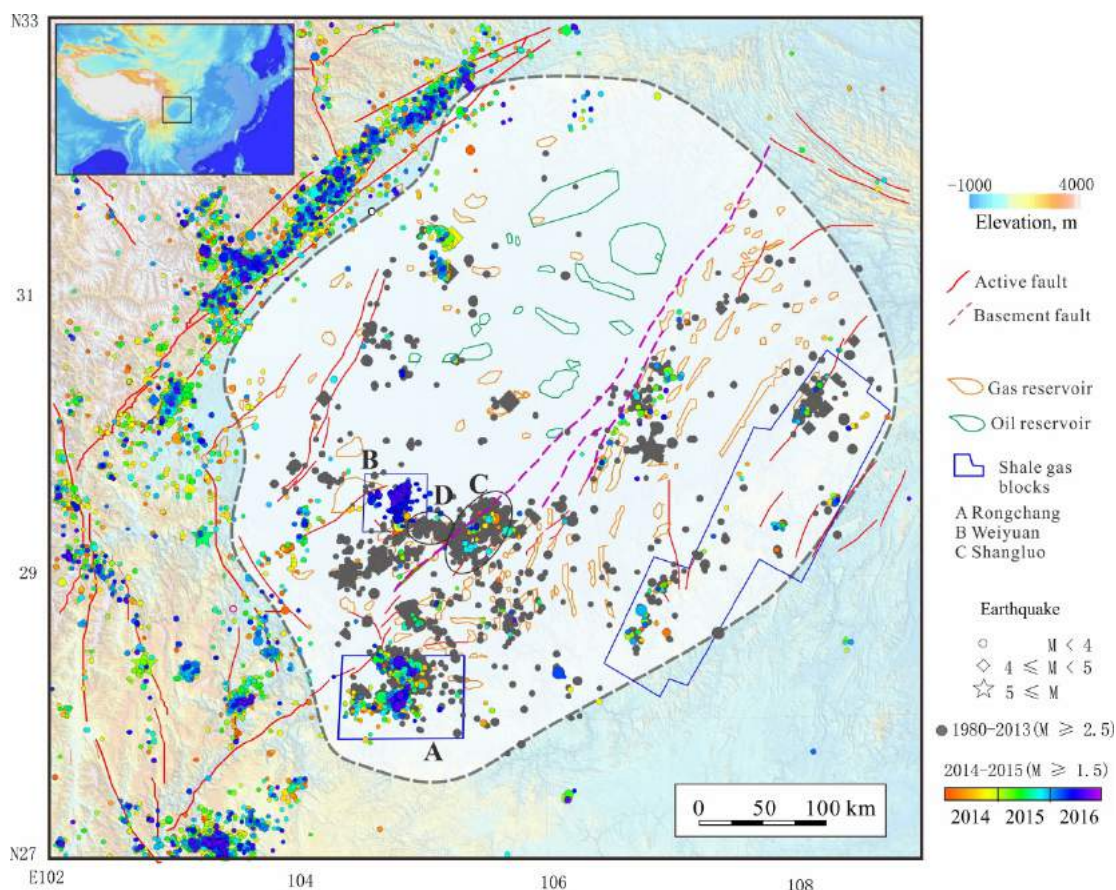
第4-5図は、相対震源決定手法を用いて再決定した地震の震源分布である。地震の多くは、注水ターゲット層、その上部及び下部の脆性的な堆積層に集中し、主に既存断層の再活動によるものであることが分かった。マグニチュード3.5以上の地震に対し、広帯域地震計の波形データを使用して地震の震源メカニズムテンソルを求めた。殆どの地震は断層のせん断破壊によるもので、得られた震源メカニズム解は既存断層系と調和的である。また、これらの断層は現在の応力場において、破壊しにくい産状を持ち、地震を引き起こすため、間隙圧または断層に働くせん断応力の増加が必要であることが示される。

また、注入圧と注入量の他、既存断層の密度、規模、成熟度、そして、差応力のレベルは誘発地震の規模を支配することが分かった。地震のグーテンベルグ・リヒター則のb値は、断層の成熟度及び差応力差応力のレベルの指針であることを示唆する結果が得られた。盆地中心に位置するBサイトでは、地殻の変形が弱く、被害性もなく、高いb値を示す。盆地境界の褶曲帯

に位置するAとDサイトでは、断層が発達し、被害性が多く、低いb値を示す（第6図）。

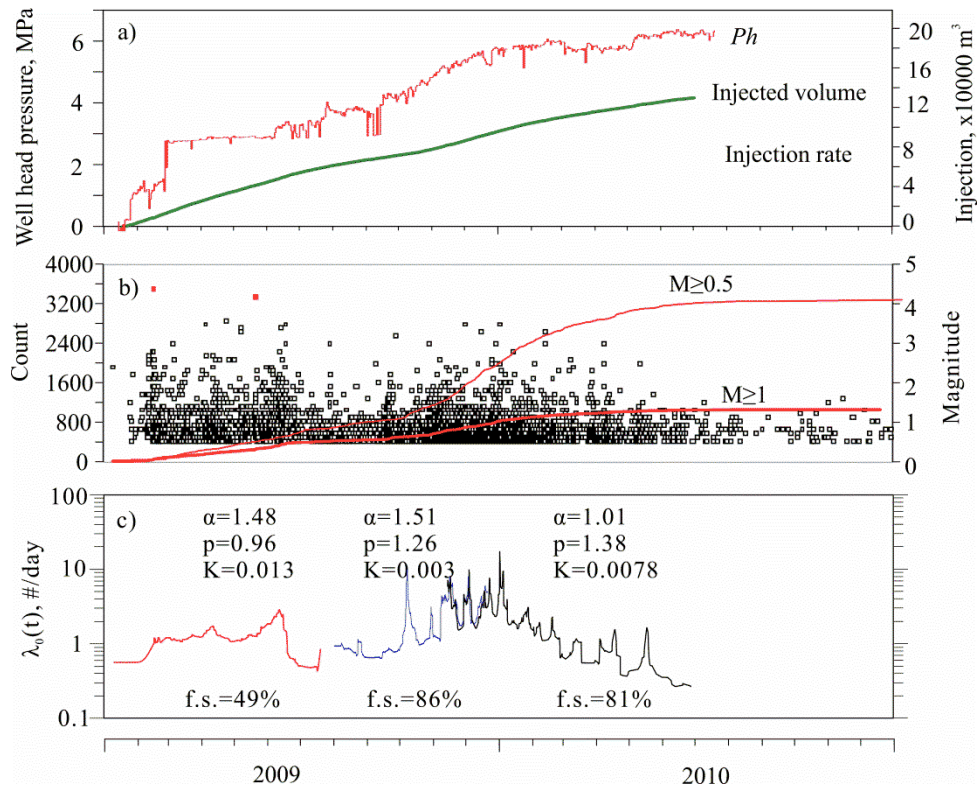
参考文献

- 1) Lei, X., et al. (2008), Earthquakes induced by water injection at ~3 km depth within the Rongchang gas field, Chongqing, China, JGR, 113(B10310), doi:10.1029/2008jb005604.
- 2) Lei, X., et al. (2013), A detailed view of the injection-induced seismicity in a natural gas reservoir in Zigong, southwestern Sichuan Basin, China, JGR, 118(8), 4296-4311, doi:10.1002/jgrb.50310.
- 3) Lei, X., et al. (2017), Fault reactivation and earthquakes with magnitudes of up to Mw4.7 induced by shale-gas hydraulic fracturing in Sichuan Basin, China, Scientific Reports, 7(1), 7971, doi:10.1038/s41598-017-08557-y.

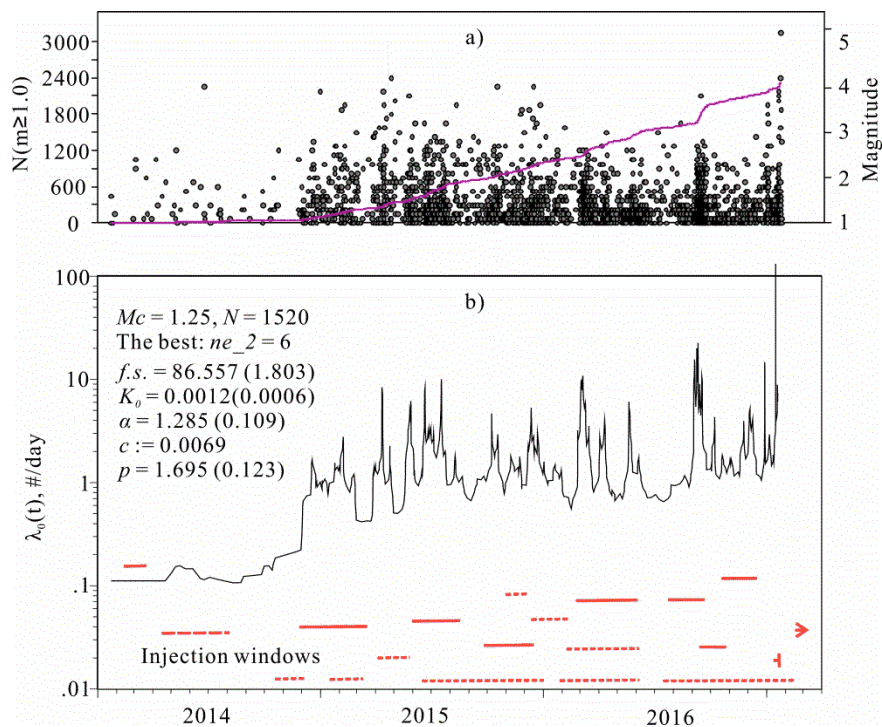


第1図 中国四川盆地における重要な注水誘発地震。AとBはシェールガス開発のための水圧破砕（短期注水）による誘発した地震で、CとDはそれぞれ榮昌と黄家場枯渇ガス田における廃水注入（長期注水）による誘発した地震である。

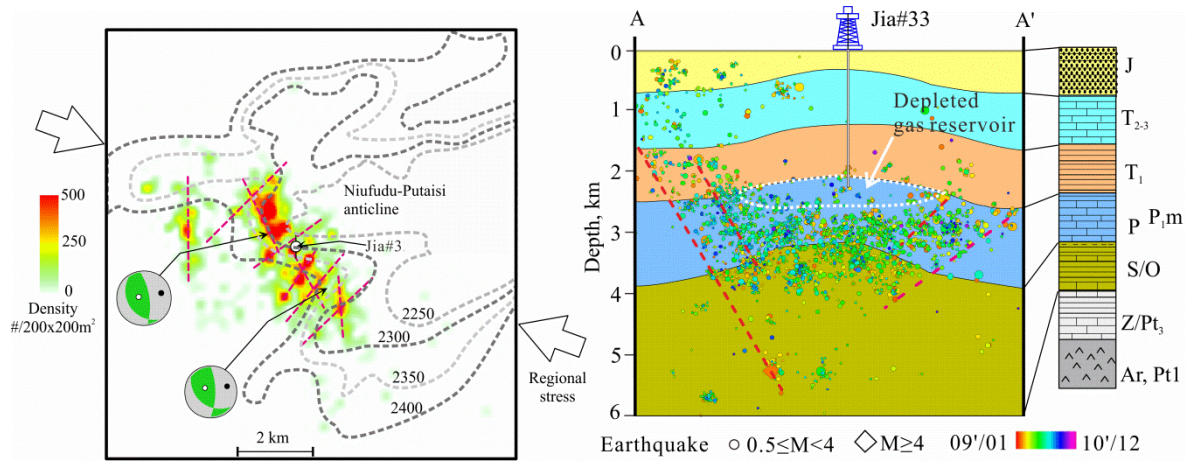
Fig. 1 Significant cases of injection-induced seismicity in the Sichuan Basin, China. A and B indicate earthquake clusters induced by short-term injections for shale gas fracking in Shangluo and Weiyuan sites, respectively. C and D indicate earthquake clusters induced by long-term injections of wastewater at Rongchang-Longchang and Huanjiachang depleted gas reservoirs, respectively.



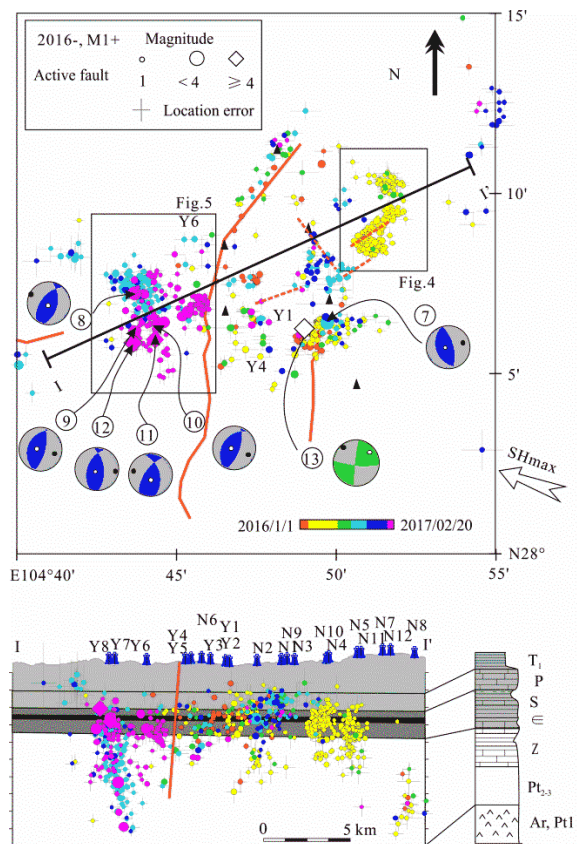
第2図 黄家場注水誘発地震 (Dサイト) のETAS解析結果.
 Fig. 2 ETAS parameters estimated for Huangjiachang injection-induced seismicity (D site).



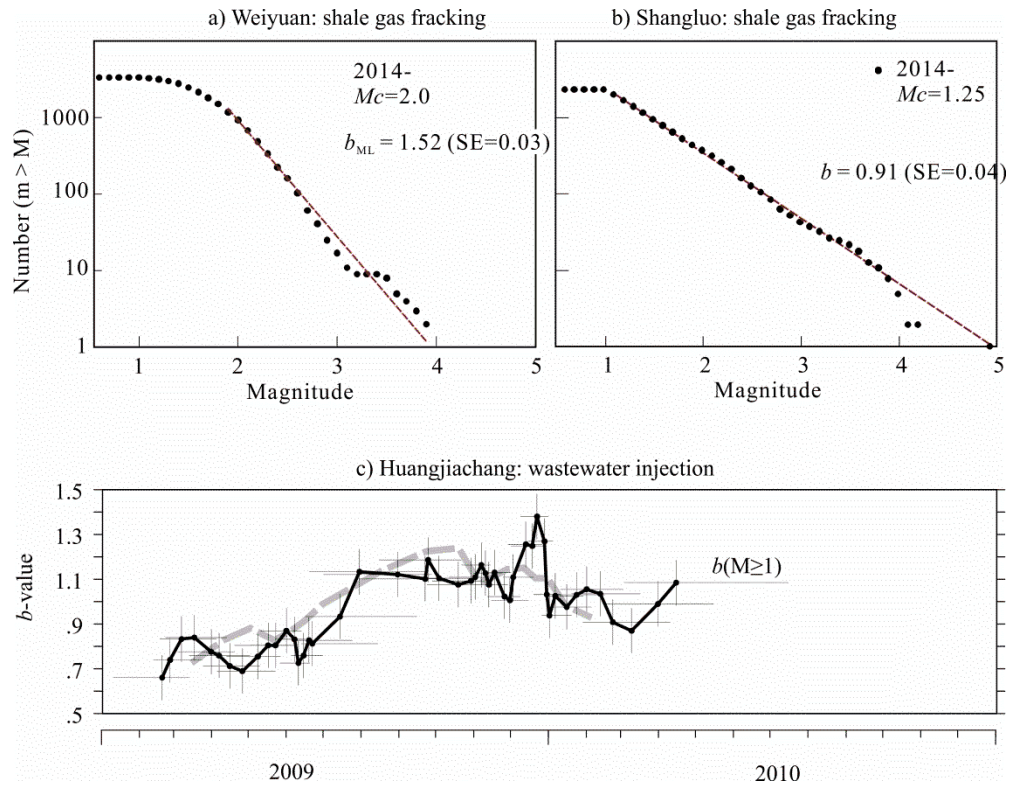
第3図 シェールガスAサイトの注水誘発地震のETAS解析結果.
 Fig. 3 ETAS parameters estimated for Shangleuo fracking-induced seismicity (A site).



第4図 黄家場 (Dサイト) 注水誘発地震の震源分布. 左: 水平面上震源密度と推定した主な断層の分布図で, 等間線貯留層の上部の深さを示す. 右: 断面上の震源分布.
 Fig. 4 Distributions of earthquake hypocenters and estimated faults in Huanjiachang depleted gas reservoir (D site).



第5図 シェールガス (Aサイト) において, 2016年以降に観測された誘発地震の震源分布とM3.5以上の地震の震源メカニズム解.
 Fig. 5 Hypocenter distributions of earthquakes induced by injections for shale gas in A site since 2016. Mechanism solutions of M3.5+ earthquakes are also plotted.



第6図 Bサイト(a)及びAサイト (b) の地震のグーテンベルグ・リヒター則とb値, Dサイトのb値の時間変化.
 Fig. 6 The Gutenberg–Richter frequency-magnitude distribution and seismic b-values estimated for three sites: a) Weiyuan shale gas site (B in Fig. 1); b) Shangluo shale gas site (A in Fig.1); c) Huangjiachang wastewater injection site.