



Title	CCSやシェールガス採掘は深刻な地震活動を誘発する可能性がある
Author(s)	高橋, 慧; 藤井, 義明
Citation	資源・素材学会春季大会講演集, 2014, 25-1
Issue Date	2014-03-26
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/58275
Type	proceedings
Note	資源・素材学会 平成26年度春季大会、2014年3月26日（水）～28日（金）、東京大学 生産技術研究所、東京都
File Information	MMIJ2014,Spring Meeting,25-1.pdf



[Instructions for use](#)

CCSやシェールガス採掘は深刻な地震活動を誘発する可能性がある CCS and Shale Gas Extraction may Induce Severe Seismicity

高橋 慧(北大院) **実講演者**

藤井 義明(北海道大学)

汚染水注入6事例($200 \sim 501286 \text{ m}^3$)、地熱回収5事例(塩水、 $4838 \sim 28771 \text{ m}^3$)について、注人体積と誘発地震の最大マグニチュードとの関係を求めた。これと並行して、我が国のM 1.8~7.0の40個の地震についてマグニチュード・深度と最大震度との関係を求め、これらの式から、注入流体体積と最大震度との関係式を導いた。この関係式を米国のシェールガス採掘にも適用できるとすれば、一つのサイトにつき2.69~13.6 Mt/年の水が注入されているので、予想される最大震度は1年間で1.7~2.4、30年間で3.3~4.0となり、社会的に容認される震度を1とすればこれを超える。また、この式が超臨界二酸化炭素の注入にも適用できるとすれば、IPCCにおけるCCSでの世界のCO₂削減目標が2050年時点で17%なので、サイトの運転年数を30年と仮定した場合、我が国で発生するCO₂の17%を一箇所のCCSサイトに注入すると、予想される最大震度は5.0となり、社会的に容認されない。最大震度を1以下に保ちつつ上記と同じ量のCO₂を貯蔵するためのサイト数は2.2万基となり非現実的である。

1. 研究の背景と目的

最近、シェールガスなど新たな資源の採取やCCS (Carbon dioxide Capture and Storage)といった地下の新しい利用が進められている。たとえば、アメリカの天然ガス生産量約7000億 m³うちシェールガスの探掘量は約1400億 m³となっており、シェールガスの開発により2009年以降アメリカの天然ガス生産量は世界1位となっている(Source: BP Statistical Review of World Energy 2012, http://www.bp.com/assets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2011/STAGING/local_assets/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2012.pdf)。また、IPCCによると2050年までにCO₂を50%削減することを目標とし、そのうちCCSによる削減目標は17%とされている(Source: CO₂削減長期目標と実現可能性をめぐって、http://www.rite.or.jp/news/events/pdf/Kaya_ALPSII_2013.pdf)。しかし、例えば地熱開発や石油のEOR (Enhanced Oil Recovery)、ダム建設等が原因の誘発地震が世界中で発生している。そこで、CCSやシェールガス採掘に伴う誘発地震の規模がどのくらいになるのか推定した。

2. 誘発地震の規模の推定式

誘発地震は、地熱開発や石油の EOR などでは流体注入による間隙水圧の上昇、ダム建設では上載圧増加より生じる (Fig. 1)。

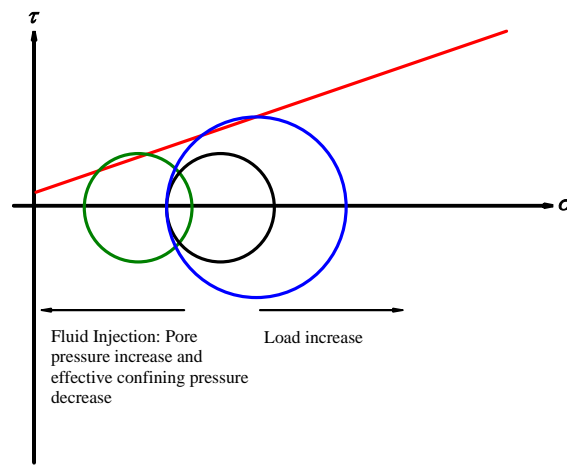


Fig. 1 Mechanism of induced seismicity

汚染水注入 6 事例、地熱回収 3 事例 (塩水)、地震調査 1 事例 (Table 1) について、注入体積と誘発地震の最大マグニチュードとの関係を求めた (Fig. 2, Eq. 1)。

$$M = 0.715 \log V - 0.0655 \quad (1)$$

M : Maximum magnitude
 V : Total volume of fluid injection (m³)

同様の試みは Nicol et al. (2011) によって行われており、ほぼ同じ式が得られている。また、ランダムに抽出した我が国で 2004~2013 年に発生した震度 1~6 強の 96 個の地震についてマグニチュード・深度と最大震度との関係を求めた (Fig. 3, Eq. 2)。

$$SIS = 1.17M - 0.67 \log d - 1.02 \quad (2)$$

SIS : JMA seismic intensity scale
 M : JMA magnitude
 d : depth (m)

これらの式から、注入流体体積と最大震度との関係式を導いた (Eq. 3)。

$$SIS = 0.84 \log V - 0.67 \log d - 1.10 \quad (3)$$

Table 1 Injected fluid volume and maximum magnitude of induced seismicities (EGS: Enhanced Geothermal System)

Location	Fluid	Injection depth (m)	Injection volume (m ³)	Max. magnitude	Reference
Rocky mountain(2009-2011)	Injection of waste water	2000	501286	3.9	Horton (2012)
Rocky mountain(2009-2011)	Injection of waste water	3200	266157	4	Horton (2012)
Germany(KTB)(1994)	Injection of waste water	9000	200	1.2	Nishigami et al. (2002)
Denver(1961-1965)	Injection of waste water	3700	168000	4.4	Healy et al. (1968)
Denver(1961-1965)	Injection of waste water	3700	151000	3.9	Healy et al. (1968)
Basel(2006-2009)	Injection of brine (EGS)	4700	11764	3.4	Ladner & Haring. (2009)
Paradox Valley(1996)	Injection of waste water	4500	270000	4.3	Horton (2012)
Soultz GPK2(1987-2007)	Injection of brine (EGS)	5000	165000	1.7	Nicolas et al. (2011)
Ninofudu-Putaisi (in China)	Unwanted water	2400-2500	130000	4.2	Lei & Ma (2009)
Yanaizu-Nishiyama	Fluid(unknown) (EGS)	unknown	4000000	4.3	Eto et al. (2013)

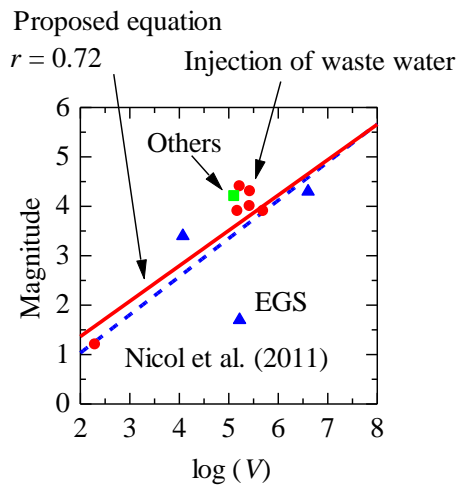


Fig. 2 Injected fluid volume and maximum magnitude of induced seismicities

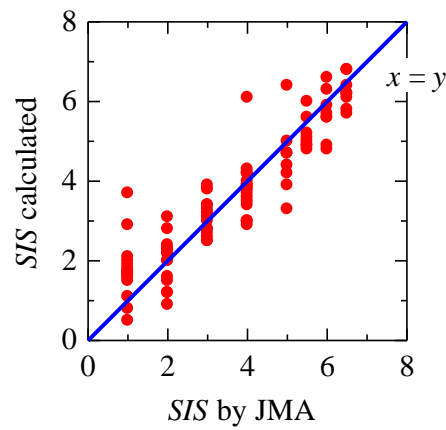


Fig. 3 Seismic intensity scale by JMA and that calculated using Eq. 2

3. シェールガス採掘

シェールガス採掘では大量の水が注入される (Table 2)。Eq. 2 がアメリカの事例にも準用できるとすれば、1 年の採掘で誘発地震の最大マグニチュード 4.5~5.0、最大震度 2.2~2.8 となり (Table 2)、アメリカのコロラド州やオクラホマ州で報告されている事例(BBC NEWS, <http://www.bbc.co.uk/news/science-environment-21952428>)と調和的となった。もし今後 30 年継続して採掘を続けた場合、最大震度 4.0 が予想される。

Table 2 Calculated maximum magnitude and maximum seismic intensity by actual water injection volume associated with shale gas extraction

Site	Water volume Mt/year	Max. magnitude Max. seismic intensity	
		For a year	For 30 years
Barnett TX	7.12	4.8	5.9
		2.6	3.8
Fayetteville	5.10	4.7	5.8
		2.4	3.7
Haynesville AR	2.69	4.5	5.6
		2.2	3.4
Marcellus NY/PA/WV	13.6	5.0	6.1
		2.8	4.0

4. CCS

日本の CO₂ 排出量は約 12 億トン/年で、密度 469 kg/m³ より地中に注入される超臨界流体としての体積は 2.56×10⁹ m³/年となる。CO₂ の超臨界条件 ($P > 7.4$ MPa, $T > 304$ K) より、注入深度は最小でも 800 m となる。社会的に容認できる震度を 1 と仮定すると、Eq. 2 より最大マグニチュードは 3.4 以下にしなければならない。したがって、Eq. 1 が使えるとすれば超臨界 CO₂ の注人体積は 1 サイトあたり 6.7 万 m³ 以下に抑える必要がある。これは日本の CO₂ 年間排出量のたった 1/266000 である。IPCC における CCS による世界の CO₂ 削減目標が 2050 年時点で 17%なので、サイトの運用年数を 30 年と仮定し、我が国で発生する CO₂ の 17%を一箇所の CCS サイトに注入すると仮定すれば、予想される最大震度は 5.4 となり、社会的に容認されない。最大震度を 1 以下に保ちつつ上記と同じ量の CO₂ を貯蔵するためのサイト数は 19 万基となり非現実的である。

なお、Zoback & Gorelick (2012), Zoback (2013)では、大規模な CCS により誘発された微小地震が CO₂ の貯留槽を破壊し、漏れ出した大量の CO₂ により大規模な地震が発生する可能性がある指摘している。この他にも CCS において貯留槽やキャップロックが破壊する可能性を指摘する研究はいくつかある(Cappa & Rutqvist, 2012, 2011)。

5. まとめ

シェールガス採掘では、もし今後 30 年継続して採掘を続けた場合、最大震度 4.0 が予想され危険である。今後明らかになるであろうシェールガス採掘時の誘発地震について調査を続ける予定である。CCS についても危険性を指摘したが、ノルウェーの北海に位置する Sleipner オイルフィールドでは 15 年間の CCS の実施に伴う民間に被害が及ぶような地震の発生は記録されていない(Zoback & Gorelick, 2012)。Eq. 1 の超臨界 CO₂ への適用性を検証するために、Sleipner オイルフィールドの事例とともに、今後増加が予想される国内や海外の CCS のパイロットプラントにおける CO₂ 注入時の地震記録を詳細に調査する予定である。

引用文献

- 西上欽也・田所敬一・永井悟・水野高志・加納靖之・平松良浩(2002)、注水に伴う誘発地震の発生特性、*Journal of Geography*, Vol. 111, No. 2, pp. 268-276
- Cappa, F. and Rutqvist, J. (2011), Impact of CO₂ Geological Sequestration on the Nucleation of Earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 38, doi:10/1029/2011GL048487
- Cappa, F. and Rutqvist, J. (2012), Seismic Rupture and Ground Accelerations Induced by CO₂ Injection in the

- Shallow Crust, *Geophys. J. Int.*, Vol. 190, No. 3, pp. 1784-1789
- Eto, T., Asanuma, H., Adachi, M., Saeki, K., Aoyama, K., Ozeki, H. and Mukuhira, Y. (2013), Seismostatistical Modeling of Earthquakes from Geothermal fields, 6th Symp. on In-Situ Rock Stress, RS2013, August 20-22, 2013, Sendai, Japan, p214-221
- Healy, J.H., Rubey, W.W., Griggs, D.T. and Raleigh, C.B. (1960), The Denver Earthquakes, *Science, New Series*, Vol. 161, No. 3848, pp. 1301-1310.
- Horton, S. (2012), Disposal of Hydrofracking Waste Fluid by Injection into Subsurface Aquifers Triggers Earthquake Swarm in Central Arkansas with Potential for Damaging Earthquake, *Seismological Research Letters*, Vol. 83, No. 2, pp. 251-260.
- Ladner, F. and Haring, M.O. (2009), Hydraulic Characteristics of the Basel 1 Enhanced Geothermal System, *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 33, pp. 199-203.
- Lei, X. and Ma, S. (2009), Insights Gained from the Injection-Induced Seismicity in the Southwestern Sichuan Basin, China, 6th Symp. on In-Situ Rock Stress, RS2013, August 20-22, 2013, Sendai, Japan, pp. 177-187
- Nicol, A., Carne, R., Gerstenberger, M. and Christophersen, A. (2011), Induced Seismicity and Its Implication for CO₂ Storage Risk, *Energy Procedia*, Vol. 4, pp. 3699-3706.
- Nicolas, C., Michel, F., Catherine, D. and Marco, C. (2011), Induced Microseismic Activity During Recent Circulation Tests At The Egs Site of Soultz-Sous-Forest (France), *Proc. Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, January 31 - February 2, 2011, SGP-TR-191
- Zoback, M.D. (2013), Earthquake Risk Associated with Shale Gas Development and Carbon Sequestration, http://www2.kankyo.tohoku.ac.jp/RS2013/WS_files/download.html
- Zoback, M.D. and Gorelick, S.M. (2012), Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide, *PNAS*, Vol. 109, No26, pp. 10164-10168