



# HOKKAIDO UNIVERSITY

|                  |                                                                                   |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Title            | 新しい地下利用に伴う誘発地震リスク                                                                 |
| Author(s)        | 高橋, 慧; 藤井, 義明                                                                     |
| Description      | 平成25年度資源・素材学会北海道支部総会および春季講演会、2013年6月15日(土)、北見工業大学、北見市                             |
| Citation         | 資源・素材学会北海道支部春季講演会講演要旨集, 2013, 3-4                                                 |
| Issue Date       | 2013-06-15                                                                        |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/52822">https://hdl.handle.net/2115/52822</a> |
| Type             | conference paper                                                                  |
| File Information | MMIJ-H, 2013, 3-4. pdf                                                            |



## 新しい地下利用に伴う誘発地震リスク

北大工 ○高橋慧・藤井義明

### 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、CCS (Carbon dioxide Capture and Storage、二酸化炭素の地下貯留)といった地下の新しい利用が進められている。しかし、例えば地熱開発や石油の EOR (Enhanced oil Recovery、増進回収法)、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、新しい地下利用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

ダム建設の場合は上載圧と間隙水圧の上昇、流体注入の場合は間隙水圧の上昇、流体抽出の場合は有効封圧の増加による空隙崩壊(Zaman et al., 1994)により地震が誘発される。

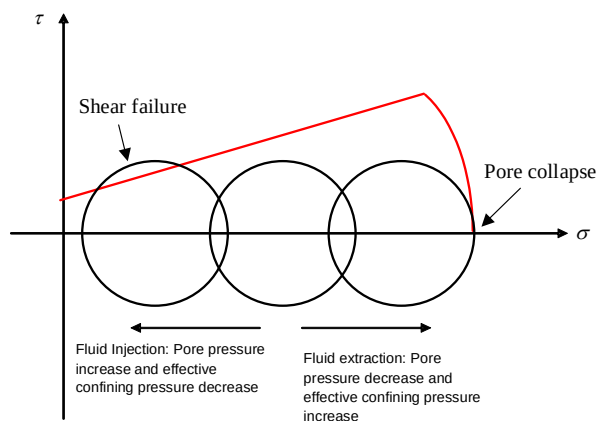


Fig.1 Mechanism of induced seismicity by injection or extraction of fluid

### 3. 誘発地震の規模の推定式

流体の注入・抽出体積と誘発地震の最大マグニチュードとの関係は既に Nicol et al. (2011)が求めているが、データの詳細がわからないので、これまで発生した誘発地震のデータ(Table 1)に基づいて流体の注入体積と最大マグニチュードとの関係式 (式(1)、Fig. 2)を求めた。

$$M = 0.99 \log(V) - 1.38 \quad (1)$$

$M$  : Maximum magnitude  
 $V$  : Total volume of fluid injection ( $\text{m}^3$ )

震度を推定するために、2004 年～2012 年に日本で生じた地震のうちランダムに選んだ 40 事象のマグニチュー

ド・深度・震度の関係式 (式(2)、Fig. 3)を求めた。なお、計算にあたっては震度 5 強などは 5.5 とした。

$$SIS = 1.36M - 1.12 \log d - 1.11 \quad (2)$$

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

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

| Location                  | Fluid                    | Injection volume ( $\text{m}^3$ ) | Max. magnitude | Reference               |
|---------------------------|--------------------------|-----------------------------------|----------------|-------------------------|
| Rocky mountain(2009-2011) | Injection of waste water | 501286                            | 3.9            | Horton et al. (2012)    |
| Rocky mountain(2009-2011) | Injection of waste water | 266157                            | 4              | Horton et al. (2012)    |
| Germany(KTB)(1994)        | Injection of waste water | 200                               | 1.2            | Nishigami et al. (2002) |
| Denver(1961-1965)         | Injection of waste water | 168000                            | 4.4            | Healy et al. (1968)     |
| Denver(1961-1965)         | Injection of waste water | 151000                            | 3.9            | Healy et al. (1968)     |
| Basel(2006-2009)          | Injection of brine (EGS) | 4838                              | 1.8            | Lader et al. (2009)     |
| Basel(2006-2009)          | Injection of brine (EGS) | 8438                              | 2.2            | Lader et al. (2009)     |
| Basel(2006-2009)          | Injection of brine (EGS) | 11764                             | 3.4            | Lader et al. (2009)     |
| Paradox Valley(1996)      | Injection of waste water | 270000                            | 4.3            | Horton et al. (2012)    |
| Soultz GPK2(1987-2007)    | Injection of brine (EGS) | 25488                             | 2.5            | Nicolas et al. (2011)   |
| Soultz GPK4(1987-2007)    | Injection of brine (EGS) | 28771                             | 2.7            | Nicolas et al. (2011)   |

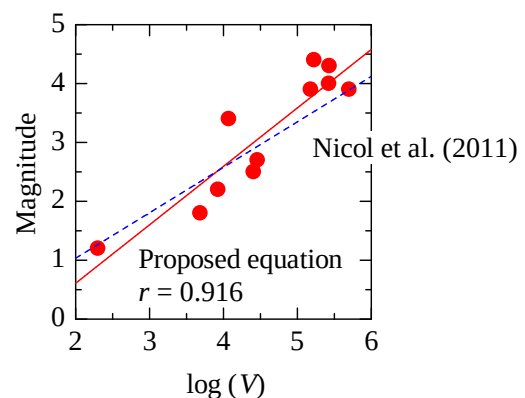


Fig. 2 Injected fluid volume and maximum magnitude of induced seismicities

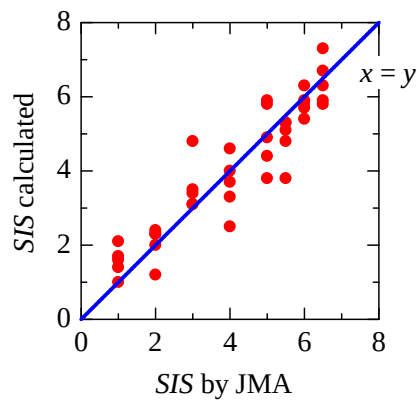


Fig. 3 Seismic intensity scale by JMA and that calculated by using Eq. 2

#### 4. 推定結果

日本の  $\text{CO}_2$  排出量は約 12 億トン/年で、密度  $469 \text{ kg/m}^3$  より地中に注入される超臨界流体としての体積は  $2.56 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{年}$  となる。 $\text{CO}_2$  の超臨界条件 ( $P > 7.4 \text{ MPa}$ ,  $T > 304\text{K}$ )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、式(2)より最大マグニチュードは 3.94 以下にしなければならない。したがって、式(1)が使えれば超臨界  $\text{CO}_2$  の注入体積は 1 サイトあたり 23 万  $\text{m}^3$  以下に抑える必要がある。これは日本の  $\text{CO}_2$  年間排出量のたった 1/10000 である。この条件を基に計算すると、たとえば日本の  $\text{CO}_2$  排出体積の 1/10 を注入し、サイトの運用年数を 30 年と仮定すると、CCS サイトは約 3.3 万基必要となり非現実的である。

シェールガス採掘による誘発地震は最大マグニチュード 5.0~5.7、最大震度 2.4~3.4 という結果(Table 2)になり、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と調和的となった。

#### 5. まとめ

式(1)が超臨界  $\text{CO}_2$  にも適用できるとすれば、CCS による誘発地震の震度を 1 未満に抑えようとした場合、1 つのサイトには日本の  $\text{CO}_2$  年間排出量の 1/10000 しか注入できず  $\text{CO}_2$  削減への寄与は非常に小さい。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 5.4 が予想され危険である。

今後は、これから増加するであろうシェールガス採掘を含むより多くの誘発地震の事例を調べ、式(1)を随時改善する予定である。また、式(1)の超臨界  $\text{CO}_2$  への適用性を検証するために、増加が予想される CCS のパイロットプラントにおける  $\text{CO}_2$  注入時の地震記録も詳細に調査したい。

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

| Site                  | Water volume<br>t/year | • Maximum<br>magnitude a year | • Maximum<br>magnitude for 30 years |
|-----------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
|                       |                        | • Max intensity               | • Max intensity                     |
| Barnett TX            | $7.12 \times 10^6$     | 5.4<br>3.0                    | 6.9<br>5.0                          |
| Fayetteville          | $5.10 \times 10^6$     | 5.3<br>2.8                    | 6.7<br>4.8                          |
| Haynesville AR        | $2.69 \times 10^6$     | 5.0<br>2.4                    | 6.4<br>4.4                          |
| Marcellus<br>NY/PA/WV | $1.36 \times 10^7$     | 5.7<br>3.4                    | 7.1<br>5.4                          |

#### 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
- Charley, J., Cuenot, N., Dorbath, L., Dorbath, C., Haessler, H., and Frogneux, M. (2007), Large Earthquakes during Hydraulic Stimulations at the Geothermal Site of Soultz-sous-Forêts, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 44, pp. 1091-1105.
- 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, MO. (2009), Hydraulic Characteristics of the Basel 1 Enhanced Geothermal System. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 33, pp. 199-203.
- Nicol, A., Carne, R., Gerstenberger, M. and Christophersen, A. (2011), Induced Seismicity and Its Implication for  $\text{CO}_2$  Storage Risk, *Energy Procedia*, Vol. 4, pp. 3699-3706.
- Zaman, M., Roegiers, J.-C., Abdulraheem, A., and Azeemuddin, M. (1994), Pore Collapse in Weakly Cemented and Porous Rocks, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 116, No. 2, pp. 97-103, doi:10.1115/1.290602.