

Contents

- 水の注入による誘発地震 (Injection-Induced Earthquakes) の実験的研究 … 1
- 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines (RaSiM8) 参加報告 … 4
- 外部委員会活動報告 2013年11月 … 5



水の注入による誘発地震 (Injection-Induced Earthquakes) の実験的研究

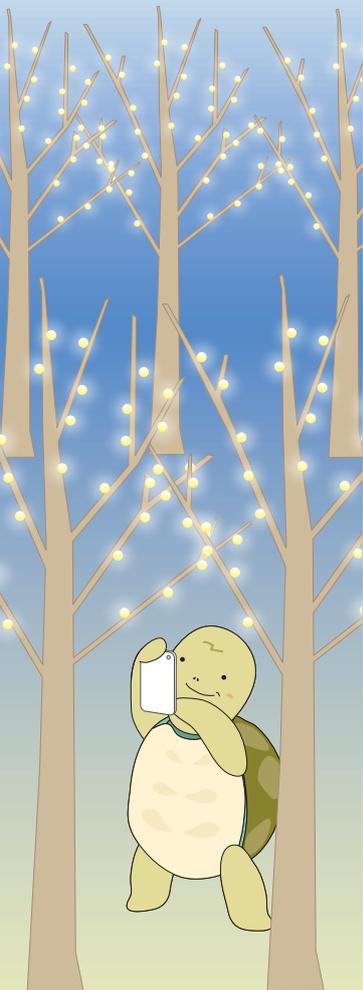
増田幸治 (地震素過程研究チーム)

はじめに

昨今、特に北米やヨーロッパにおいて、工業的な活動が被害地震を誘発する可能性について議論になっています (例えば, Ellsworth, 2013; Zoback, 2012; National Research Council, 2013). アメリカ中部で起きるマグニチュード (M) 3 以上の地震が、10 年前に比べて 6 倍以上に急増していることが米国地質調査所 (USGS) によって報告されています. これらの地震はシェールガスなどの採掘作業に伴って発生した地震とされており、シェールガスや石油採取の際に使われた大量の廃水を井戸から高圧で地下に戻している (注入している) ために地震を誘発していると指摘されています. このような人為的に誘発された地震と自然界の地殻応力の変化による地震活動について、現時点では、地震観測によって区別することができないとされています (Ellsworth, 2013). 私たちは地震発生機構や地震の素過程を解明する目的で、室内での岩石実験を行っています. 今回、私たちの使っている「実験地震学」の手法を用いて、この誘発地震 (Injection-Induced Earthquakes) の震源プロセスを推定する研究を実施しました (Masuda, 2013).

メカニズム

地震は地下の岩石に急激な運動 (断層運動) が起こり、そこから弾性エネルギーが放出される現象です. 断層に加えられている力が、断層の強度 (断層がせん断運動を始めるのに必要な応力) に達するまでは、断層は動きませんが、せん断応力 (断層をずらそうとする力) が増加したり、法線応力 (断層面をおさえつけようとする力) が減少したりすると、地震を誘発する (断層をうごかす) こととなります. 地下に高圧水を注入した際、断層や地下のクラック内部に流体が浸入することによって、断層面での間隙水圧が上昇し、結果として断層に加えられている法線応力が減少して断層運動を誘発する場合と、断層帯内部には直接浸入はしないが地下の帯水層においてその体積や質量が変化することによって、断層へ加わる応力状態を変化させることで断層運動を誘発する場合があります (Ellsworth, 2013, Fig. 3). 高圧水を地下に注入することによって、断層に加わっている応力状態が変化して、地震を誘発するのです.



室内実験による再現と検証

私たちは、実験室内で岩石試料に応力を加えることによって岩石内部に発生する地震と、水を注入することによって発生する地震の地震波を記録・分析し、それら2種類の地震のプロセスに違いがあるか、地震波の解析によってそれが検出できるかどうかを検討しました。

地震波のパルス幅の変化

実験では岩石試料（花崗岩、直径 50 mm、長さ 100 mm の円柱形）を地下約 1.5 km に相当する圧力下（封圧 40MPa）において、岩石の破壊強度の約 70% に相当する応力を加えます。その際に発生した地震を応力によって誘発された地震として、ここでは自然地震とみなします。その後、試料に高压水を注入することで、新たに試料内部で微小地震が発生しますが、これらの地震をここでは水の注入（より正確には間隙水圧の変化）によって発生した地震（高压水による誘発地震）とみなします。図 1 はこれら 2 種類の地震の震源分布を示しています。試料の中央部あたりに地震がかたまっているようにみえます。地震波形を解析する際、センサーに対する入射角度の違いなどの震源プロセス以外の要因をあらかじめできるだけ取り除くために、この地震の集まりのなかから地震の震源が精度よく決められたものを選んで、図の三角印で示す位置のセンサーでとらえた地震波形を調べました。図 2 に記録された地震波形の例を示します。地震波形のなかで初動部分の幅と振幅に着目しました（図 3）。

この地震波の最初の部分の幅（時間）をパルス幅とって、震源における断層運動の情報を含んでいます。記録された地震波から、地震ごとの大きさ（イベントサイズ）の効果と、震源からセンサーまでの伝播距離による減衰の効果とを、モデル計算によって取り除き、震源での破壊の継続時間についての情報を得ました。それによると、水によって誘発された地震と応力によって誘発された地震の、震源での継続時間の比は約 0.5 となることわかりました。水によって誘発された地震の方が震源での継続時間が有意に短いといえます。これは、水によって誘発された地震の破壊伝播速度が速くなっているか、

震源での断層の長さが短くなっているか、あるいはその両方が変化していると推定できます。したがって、水の注入によって発生した地震は破壊の素過程が変化している可能性が高いということが検出されました。断層内に水が存在するとクラック面の摩擦が低下し破壊の伝播速度が速くなる可能性、あるいは水の存在によってクラックの接触面が動きやすくなり応力分布がより一様になるために断層形状がより等方的になる可能性などが考えられます（Masuda, 2013）。

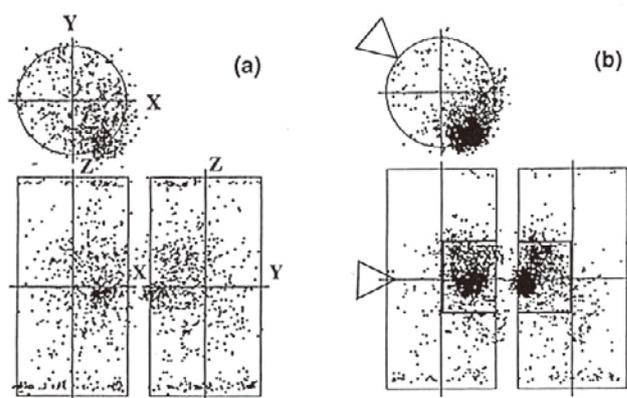


図1 岩石試料中に発生した地震の震源分布. (左) 応力の変化によって発生した地震 (右) 水の注入によって発生した地震.

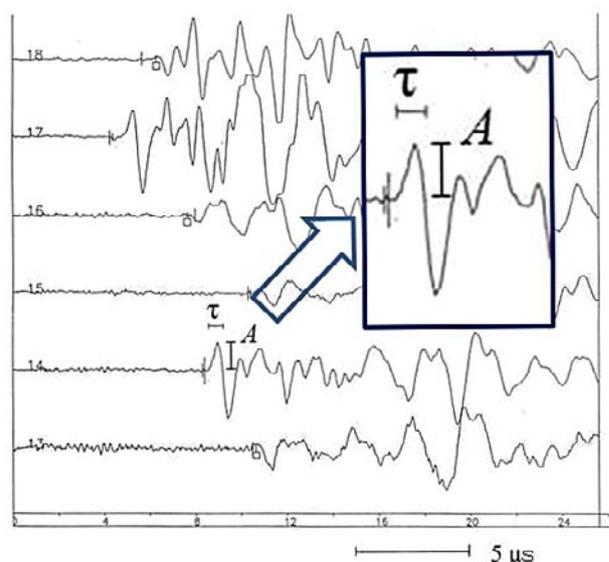


図2 記録した地震波の例. 最初の部分の時間幅（パルス幅、 τ ）と振幅（ A ）を読み取った。

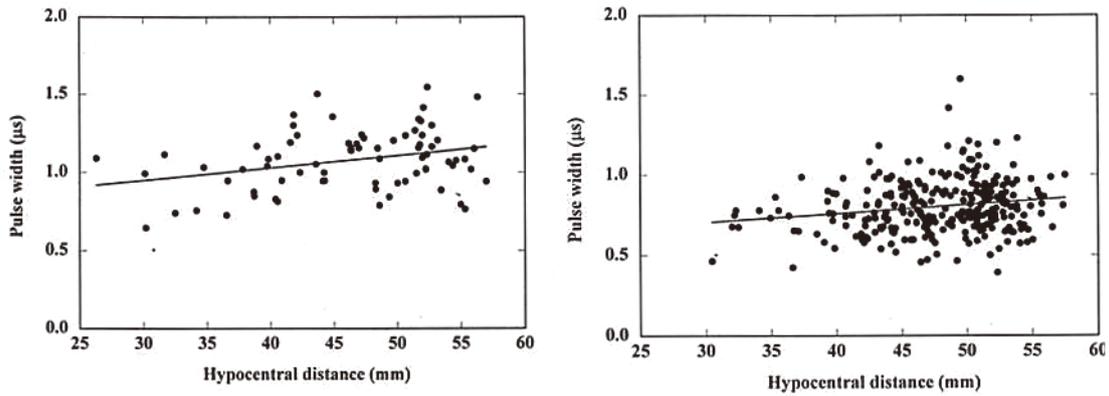


図3 検出した地震波のパルス幅と震源距離との関係。(左) 応力の変化によって発生した地震 (右) 水の注入によって発生した地震.

まとめ

水の注入によって誘発された地震と、応力変化によって発生した地震とでは、その震源過程に違いがあり、地震波を観測・分析することで、その違いを検出できる可能性があることが室内実験でわかりました。地震観測とくに地震波の初動部分の観測は、資源開発の際のモニタリングや断層過程の分析に応用できる可能性が考えられます。

参考文献

- Ellsworth, W.L., Injection-induced earthquakes, *Science*, 341, 142, 2013.
- Zoback, M.D., Managing the seismic risk posed by wastewater disposal, *Earth Magazine*, 57 (4), 38-43, 2012.
- National Research Council, Induced Seismicity Potential in Energy Technologies, The National Academies Press, 2013.
- Masuda, K., *Geophys.Res.Lett.*, 40, 3567-3571, 2013.



8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines (RaSiM8) 参加報告

佐藤隆司（地震素過程研究チーム）

2013年9月1日から7日までロシアで開催された標記シンポジウムに参加した。RaSiMは、1982年に南アフリカのヨハネスブルグで第1回が開催されて以来、4~5年おきに開催されている、山はねと鉱山地震に関する国際シンポジウムである。筆者は2005年にオーストラリアのパースで開催されたRaSiM6に参加して以来2度目の参加である。

今回のRaSiM8は、サンクトペテルブルグを出発し、川といくつかの湖を遡ってモスクワまで向かう客船の中で開催された。途中、世界遺産として有名なキジ島などにも立ち寄った。参加者は約90名で、ロシアからの参加者が最も多かったが、深部鉱山での採掘がさかんなオーストラリアや南アフリカからも多くの参加があった。日本からは私の他に立命館大学の小笠原 宏さん、産総研地圏資源環境研究部門の雷 興林さんが参加した。小笠原さんはJSTとJICAが共同で実施している地球規模課題対応国際科学技術協力(SATREPS)の課題のひとつで、南アフリカと共同で実施している「鉱山での地震被害低減のための観測研究」の研究代表者で、雷さんと私もこのプロジェクトに参加している。

発表は8件のキーノート・レクチャーを含めて全部で45件あった。その中で、採掘に伴って現れる変形・破壊現象の様々なパターンについて数多くの写真を用いて紹介し、また、それらの破壊パターンが震源メカニズム解や地震波形としてどのように観測されるかを紹介した。南アIMS社のvan Aswegenさんのレクチャーが印象的だった。

山はねや大規模な鉱山地震の発生予測では、自然地震の場合に比べて、1) 予想される震源のそばまで行くことが出来る、2) 採掘計画に基づき応力変化をある程度把握することが出来る、などの有利な点がある。このような考えに基づき、1) 複数の地点で応力測定を行い、現在の応力場を把握し、2) 採取した岩石試料の変形・破壊特性を室内実験で測定し、3) 応力シミュレーションにより、地震の起こりやすい場所を抽出し、採掘計画の変更や必要なサポートの設計に役立てる取り組みが紹介された。小笠原さんは、同様な考えに基づき、SATREPSにおいて、多くの点で応力測定を可能にするため、鉱山内でも比較的容易に応力開放法地殻応力測定を行うことが出来る手法の技術開発を進めており、本シンポジウムでもこの取り組みについて紹介した。

雷さんと私はそれぞれオーストラリア及び南アの鉱山から採取された岩石試料を用いた室内岩石破壊実験の結果を報告し、破壊過程における岩石試料の持つフォリエーションの重要性を指摘した。雷さんはこのことについての理論的考察を加えた。私は、SATREPSの地震観測ネットワークが捉えた岩石試料採取地点近傍で発生したM2クラスの地震の前震及び余震の詳細な震源分布から推定される地震発生過程と、実験室で得られた岩石試料の破壊過程とを比較した。

なお、発表内容はプロシーディング (ISBN 978-5-903258-28-4) にまとめられている。

外部委員会等 活動報告 (2013年11月)

2013年11月1日

原子力発電所の新規制基準適合性に関わる審査会 (岡村出席 / 原子力規制委員会)
小浜湾とその周辺の活断層について

2013年11月5日

南海トラフ巨大地震・首都直下地震モデル検討会 (岡村出席 / 内閣府)
南海トラフ及び首都直下地震の想定と長周期地震動について

2013年11月12日

地震調査委員会 (岡村出席 / 文部科学省)
10月の地震活動についてほか

2013年11月19日

地震防災対策強化地域判定会 (小泉、松本出席 / 気象庁)
訓練の判定会に参加した。東海地方周辺の最近の1ヶ月のデータを持ち寄って検討し、東海地震発生可能性について協議した。

2013年11月25日

地震本部調査観測計画部会 (岡村出席 / 文部科学省)
海溝型地震に関する調査観測計画について

2013年11月28日

南海トラフ巨大地震・首都直下地震モデル検討会 (岡村出席 / 内閣府)
首都圏で想定する地震モデルについて