

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K20865

研究課題名(和文)誘発地震リスクアセスメントのための“Slip-able area”法の創出

研究課題名(英文)Development of "Slip-able area" model for risk assessment of induced seismicity

研究代表者

棕平 祐輔 (MUKUHIRA, Yusuke)

東北大学・流体科学研究所・教育研究支援者

研究者番号：60723799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、現在の誘発地震情報から将来発生しうる誘発地震活動を評価する Possible Seismic Moment (PoSeMo) modelを開発した。PoSeMo modelでは、単位岩体あたりの発生しうる地震モーメントと、注水によって微小地震を発生しうる状態に達した岩体の体積を乗ずることにより、現時点での微小地震情報に基づいた総地震モーメントを推定する。その結果と、実際に観測した地震モーメントの総和の差が、PoSeMo modelにより評価された将来発生しうる誘発地震の総地震モーメントとなる。これは、将来起こりうる地震の最大マグニチュードに変換することも可能である。

研究成果の概要(英文)：We have developed a seismic evaluation method called the possible seismic moment (PoSeMo) model to assess the potential seismic moment that could be released in the future based on current seismic activity. The PoSeMo model assumes the existence of a representative parameter that can describe the seismic characteristics of a given field. This parameter is defined as the seismic moment density, which quantifies the seismic moment able to be released per rock volume. The rock volume presumed to be in critical condition because of stimulation is defined as the stimulated rock volume. The current stimulation condition for the PoSeMo model can be estimated from the product of these two parameters. The difference between the output of the PoSeMo model and the observed cumulative seismic moment corresponds to the cumulative seismic moment that could be released in the future. This value can be transformed into the possible maximum magnitude that has clear physical meaning.

研究分野：地球物理学・資源工学

キーワード：誘発地震 地震リスク 微小地震 間隙水圧 水圧刺激 能動的地熱開発 シェールガス・オイル開発

1. 研究開始当初の背景

(1) 能動的地熱開発、シェールガス・オイル開発、二酸化炭素地下貯留等は持続可能な社会実現の為に不可欠であるが、地下に流体を注入する開発工程が誘発地震を引き起こし、その中には、有感地震となるものもあることが問題として顕在化してきた。例えば、シェールガス開発が盛んな米国中南部では、この10年で地震被害リスクが、自然地震地帯である米国西部と同程度となった。

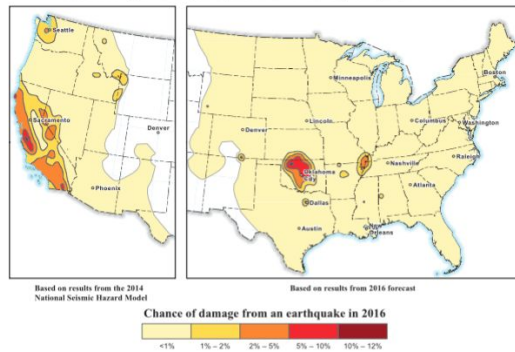


図1 2016年のアメリカ中東部の地震被害確率

(2) 誘発有感地震を抑制した地下流体エネルギー開発を実現する為に、鍵となる研究課題は、過去の誘発微小地震データから将来の誘発有感地震による地震リスクのアセスメント手法の確立である。図1を含め誘発有感地震のリスク評価は地震統計学的手法を用いて行われるが、この手法では、注水量等の物理的データを考慮できない他、統計学的な評価結果をリアルタイムに開発工程にフィードバックすることが難しいという難点がある。

2. 研究の目的

(1) 一方で、近年の微小地震モニタリングの需要増加や、計測機器・解析技術の発達は、ほぼリアルタイムでの微小地震の基本的情報(震源位置、マグニチュード)の決定を可能にしてきた。そこで、本研究では、既往の誘発有感地震発生リスク評価法とは異なるアプローチを取り、微小地震データより得られる物理パラメータの情報を最大限に生かした、物理的な根拠が明らかな誘発有感地震発生リスク法の開発を目的とした。

(2) 微小地震の時空間分布・地震モーメントから、単位岩体あたりの地震モーメント D を導出し、微小地震の時空間分布から求められる水圧刺激体積 V_{stim} と乗ずる事により、各時での放出しうる地震モーメント V_{stim} の総和 (Slip-able area・Possible seismic moment) を求め(図2)、実際に観測された地震モーメントの総和との差をとることで、誘発有感地震発生リスクを評価する(図3)。

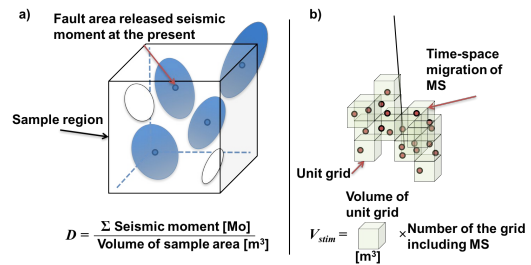


図2 a) 単位岩体あたりの地震モーメントと b) 水圧刺激体積の概念図

Definition of the Possible Seismic Moment : Cumulative seismic moment ready to release

$$M_{o\text{possible}} = D \times V_{stim}$$

$M_{o\text{possible}}$: Possible Seismic Moment [Nm]
 K : Seismic moment density [Nm/m³]
 V_{stim} : Stimulated rock volume [m³]

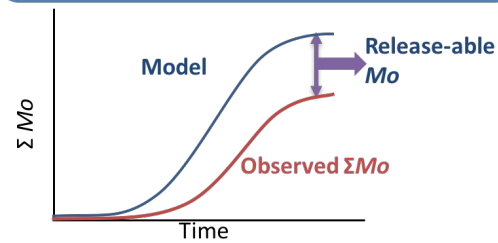


図3 a) Possible Seismic Moment (PoSeMo) Model の定義(上)と b) 誘発地震リスク評価の概念図(下)

3. 研究の方法

本研究は以下の(1)-(2)のフェーズごとに実施した。

(1) Possible Seismic Moment (PoSeMo) model の理論構築・物理的意味の明確化

D [Nm/m³]: 単位岩体あたりの地震モーメントは、ある領域内で発生した誘発微小地震の地震モーメントの和を対象岩体の体積で除すことで求めた。 D の推定の為にサンプリングを行う領域の大きさ、時間ステップ等はフィールド毎に適当な値を用いる。ここでは様々な物理的な意味を持つ D を検討し、それぞれ各シナリオとして $M_{o\text{possible}}$ を評価する事とした。

V_{stim} [m³]: 水圧刺激体積は、任意の誘発微小地震の時空間分布から求める。微小地震の震源位置を基に、透水性が改善された岩体体積を推定する為に、各々の震源間の平均距離を一辺の長さとしたグリッドで V_{stim} を求める事とした。これは、一つのグリッドに二つイベントが含まれる時の物理的な意味の曖昧さを避けるためである。

$M_{o\text{possible}}$: 抽出により放出しうる地震モーメントの総和は、 D 、 V_{stim} の積により求める。 D 、 V_{stim} の物理的意味を基に、

それらに乗じて得られる $M_{0,possible}$ は、現在の水圧刺激体積から予想される全地震モーメント放出量という物理的意味を持つ。よって、実際に観測された誘発地震の地震モーメントの総和と比較し、差をとることで、本モデルが予想する今後発生し得る誘発地震の地震モーメントの和と解釈することができる。これはマグニチュードに変換可能である。

(2) 実データを用いた PoSeMo model の妥当性・性能評価

スイス、バーゼル地熱フィールドの誘発微小地震データを用いて(1)で検討した条件、理論より $D, V_{stim}, M_{0,possible}$ を推定する。推定条件等をパラメータとした感度解析を行い、 $D, V_{stim}, M_{0,possible}$ の推定条件が結果に与える影響を評価し、最適な推定条件を検討する。

微小地震実データより A_{slip} を推定し、実際の微小地震の断層面積の総和(観測値)と比較し、必要であれば導出法のチューニングを行う。観測値との差より誘発有感地震の発生リスク評価を行い、実際の誘発有感地震の発生状況と比較して、その性能を評価する。

4. 研究成果

(1) 実データへの応用結果

本モデルをバーゼル地熱フィールドで発生した誘発地震データに適用した。まず、 D は、注水点に最も近いグリッドから求めたものと、最も多くのイベントを含むグリッドから求めたものの2通りのシナリオを想定した(図4b 赤線・青線)。また、 V_{stim} は一辺25mのグリッドから求めた(図4a 赤線)。これらを元にして求めた Possible Seismic Moment は本フィールドで発生した、最大のイベントのマグニチュードを、発生前のデータからよく再現することに成功した(図4d 赤線)。

(2) 他の地震リスク予想モデルとの比較

本手法の性能を評価するために、本研究分野で用いられている物理データを比較の基にした地震リスク評価モデルと比較を行った。このモデルが地震モーメントの総和を過大評価しているのに対し、本モデルは観測値に極めて近い現実的な値を示した(図4c, d)。よって、本モデルは従来のモデルに比して、より地震リスクを現実的に評価することに成功したと言える。

(3) 研究成果の学術的・社会的意義

地震統計学モデルでは、微小地震の発生時系列とマグニチュードという最小限のデータを基にした統計学的なリスク評価を事後解析で行うが、本研究は微小地震の震源位置、時空間分布、地震パラメータという物理情報に基づいて今後起こりうる誘発地震の総モ

ーメントと最大誘発地震のマグニチュードという物理的意味が明確なリスク評価を行う。このような観測物理データに基づいた誘発有感地震のリスク評価法はこれまでに世界的に前例がなく先進的である。さらに、本モデルは、ある限られた情報から全体の物理現象の説明を試みるものであり、地球科学全体の中でも野心的なアプローチと言える。今後、ビッグデータ解析等でさらなる展開が望まれる。

本モデルは、最先端の微小地震モニタリング、リアルタイム解析の結果を利用することを念頭に置いた手法であり、これらの発展に呼応した先進的なものである。本モデルがリアルタイムで出力する物理的な意味が明確な誘発地震リスクの評価結果は、注水作業を行うオペレーターに対してリアルタイムで誘発地震リスクをフィードバックすることを可能にするものであり、これは地下への流体圧入を伴う開発の安全性・信頼性を向上させるものである。また、既存の地震統計学を基にした誘発地震リスク評価と補完することにより、注水工程に対するプロトコル策定・法整備への貢献も期待できるものである。

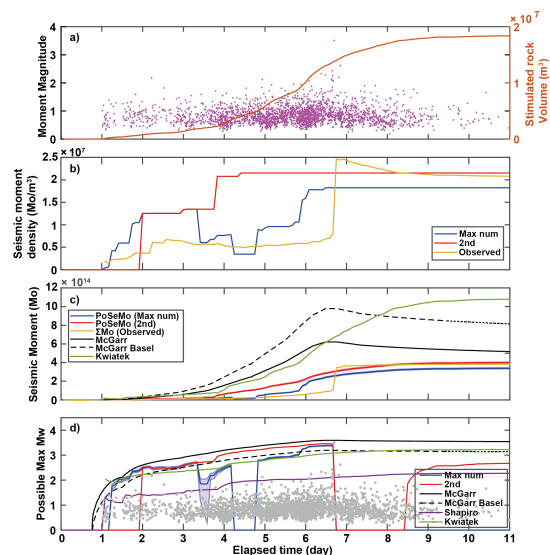


図4 Possible Seismic Moment (PoSeMo) Model の Basel EGS project で発生した誘発地震への適用結果。 a) 誘発地震の magnitude 時間変化と総注水体積, b) D の評価結果, c) V_{stim} の評価結果, d) 最大マグニチュードの推定結果

< 引用文献 >

Petersen, et al., 2017, Seismological Research Letters, 88(3).
 McGarr, A., 2014, Journal of Geophysical Research, 119, 1008-1019.
 Kwiatek, G., et al., 2015, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120, 7085-7101.
 Shapiro, S. A., et al., 2011, Geophysics, 76, no. 6, WC55-WC63.

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6件)

Y. Mukuhira, Hiroshi Asanuma, Takatoshi Ito, and Markus O. Häring, “Physics-based seismic evaluation method: Evaluating possible seismic moment based on microseismic information due to fluid stimulation” GEOPHYSICS, 81(6), KS195-KS205. doi: 10.1190/geo2015-0648.1, 2016. 査読有

Y. Mukuhira, T. Ito, H. Asanuma, M. Häring, “Stress state analysis of a fault plane with large induced seismicity”, Proceedings of the 50th U. S. Rock Mechanics Symposium, ARMA 16-0360, 2016. 査読有

Y. Mukuhira, H. Asanuma, T. Ito, M. Häring, “Causality between expansion of seismic cloud and maximum magnitude of induced seismicity in geothermal field”, Geophysical Research Abstracts Vol. 18, EGU2016-11106, 2016 EGU General Assembly 2016, 2016. 査読無

Y. Mukuhira, H. Asanuma, M. Häring, T. Ito, “New seismic risk assessment: evaluation of the cumulative fault area under critical state based on microseismic information”, Abstract Book Schatzalp Workshop on Induced Seismicity, S6P10, 2015. 査読無

椋平祐輔, 浅沼 宏, 伊藤高敏, M. Häring, 「Slip-able area」の概念に基づく水圧刺激時の誘発地震リスクアセスメント法の提案, 日本地熱学会平成 27 年学術講演会要旨集, A17, 2015. 査読無

[学会発表](計 5件)

Y. Mukuhira, T. Ito, H. Asanuma, M. Häring, “Stress state analysis of a fault plane with large induced seismicity”, The 50th U. S. Rock Mechanics Symposium, ARMA 16-0360, Huston, USA, June, 29, 2016.

Y. Mukuhira, H. Asanuma, T. Ito, M. Häring, “Causality between expansion of seismic cloud and maximum magnitude of induced seismicity in geothermal field”, European Geosciences Union General Assembly 2016, Vienna, Australia, April, 18, 2016.

Y. Mukuhira, H. Asanuma, M. Häring, T. Ito, “New seismic risk assessment: evaluation of the cumulative fault area under critical state based on microseismic information”, AGIS Workshop on Induced Seismicity. March, 11-12, 2015, in Davos Schatzalp, Switzerland.

椋平祐輔, 浅沼 宏, 伊藤高敏, M. Häring, 「Slip-able area」の概念に基づく水圧刺激時の誘発地震リスクアセスメント法の提案”, 日本地熱学会平成 27 年学術講演会, 別府国際コンベンションセンター B-ConPlaza(大分県・別府市), 10月22日, 2015.

[その他]

ホームページ等

個人ホームページ

<https://yusukemukuhira.wordpress.com/>

所属研究室ホームページ

<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/geo/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

椋平 祐輔 (MUKUHIRA Yusuke)

東北大学・流体科学研究所

教育研究支援者

研究者番号: 6 0 7 2 3 7 9 9

(4)研究協力者

伊藤 高敏 (ITO Takatoshi)

浅沼 宏 (ASANUMA Hiroshi)

Markus Häring