

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26887022

研究課題名(和文)南アフリカ大深度鉱山での断層沿い微小地震発生パタン解析によるリスク評価の研究

研究課題名(英文) Risk evaluation of mining induced earthquakes by analyzing AE activity patterns on faults in deep gold mines in South Africa

研究代表者

直井 誠 (Naoi, Makoto)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10734618

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：南アフリカの大深度金鉱山においては、採掘で誘発される地震による被害が多発している。このような環境下で実施した微小破壊(Acoustic Emission)観測で得られたデータを元に、1年以上に渡るカタログを作成し、その活動パタンを調べた。その結果、既存断層面上の定常AE活動や、超微小Repeating Earthquake、切羽直近の損傷領域の形成過程を示唆するAE活動といった様々なタイプの活動を見出し、その時間変化を調べることができた。

研究成果の概要(英文)：We investigated AE activities in deep gold mines in South Africa, where many earthquakes are induced by mining. We made an AE-event catalog by using data obtained by more than 1-year observation, and found many interesting activities which have not been known in previous studies: steady AE activities on geological faults, very small repeating earthquakes, and AEs likely delineating macroscopic damage zone that newly emerged in front of the mining front.

研究分野：地震学

キーワード：Acoustic Emissions induced earthquakes repeating earthquakes microseismicity

## 1. 研究開始当初の背景

室内における岩石破壊実験及び摩擦滑り実験においては、最終イベントに先行して微小破壊が発生する例が多数報告されている。これらは特徴的な発生パターンを示すことが多く、同様の現象をフィールドで観察するために、我々の研究グループでは、南アフリカの2つの大深度金鉱山において、 $M_w -5$ まで検知できる微小破壊 (Acoustic Emission; 以下 AE) 観測網を構築し、観測データを取得してきた。本研究課題では、これらの観測で得られたデータについて、主に地震発生サイクルに関する有用な知見を得ることを目的とし、解析を実施した。

## 2. 研究の目的

活断層で大地震が一度起こってから再び起こるまでの間、すなわち地震の1サイクルの間におこる微小地震活動に特定の時空間パターンがあれば、微小地震活動の観察から大地震発生が近い断層とそうでない断層を見分けられる可能性がある。しかし、活断層で起こる大地震の繰り返し間隔は100年以上と長く、ある大地震1サイクルにわたって地震活動を観察し、パターンの有無を調べることはほぼ不可能である。

そこでこの問題を克服した解析として、天然の活断層に比べて応力蓄積速度が早く、時計を早回ししたような環境とみなせる南アフリカ大深度金鉱山内で得られた AE データに対してできるだけ長期に渡るイベントカタログを作成し、その活動パターンについて調査した。

## 3. 研究の方法

長期に渡る AE 活動パターン変化を調べるため、これまでの観測で得られた AE データを、出来る限り長期間にわたって処理し、解析を行った。

これまで2つの鉱山で行った AE 観測のうち、第二期の観測 (Cooke 4 金鉱山地表下 1 km で行った観測) では、約5年にわたって観測が継続しており、特に最初の 14 ヶ月間においては欠測やセンサの不調が少ない良質のデータが取得できている。この間、合計 1000 万を超えるトリガがかかっており、それに対応する全ての波形が保存できている。これまでは、主に計算機資源の不足により、これらの震源決定・規模推定を行い、カタログを作成する作業が実施できていなかったが、本研究課題で導入した高性能の計算機によって、この期間のデータ全てに対してカタログ作成を行うことができた。震源がよく決定されたもののみで 223 万個もの震源データが得られた。

こうして得た AE カタログを利用し、その時空間変化の解析を実施した。主に実施した

解析は、 $b$  値や空間相関長といった統計パラメタの時間変化や、類似波形イベントの抽出と、その活動様式の変化をみる、といったものである。

## 4. 研究成果

上記の解析によって、以下の成果を得た。

(1) 従来研究では鉱山内で起こる微小地震活動は必ずしも断層のある場所で多発しているわけではないと報告されていたが、鉱山の既存断層上では、主に  $M_w < -2$  という非常に小さいものが卓越した AE が定期的に発生していることがわかった。従来研究で断層と微小地震活動の相関が低かったことは、単に観測網の検知能力が不足していたからである可能性が高い。一方、このような活動を伴わない断層も存在していることがわかった。

(2) 上記のような断層上でおこる AE 活動は、採掘域が数十m以上離れている頃から定期的に発生しているケース以外に、切羽が 10-20 m 程度に近づいた頃に活動が始まるケースも存在することがわかった。また、後者では、時間とともに活動域が拡大する事例もみられた。この中には、ほぼおなじ場所で繰り返し起こる AE (Repeating Earthquake) も見つかっており、载荷の進行とともに、断層面上でゆっくり滑りが始まり拡大したことに対応している可能性がある。

(3) 定常的な AE 活動が見つかった断層のうち、AE 観測網によって非常によく取り囲んでいる断層沿いで起こった活動に対して、詳細な Repeating Earthquake 解析を行った。見つかった Repeater の規模は、 $-5 < M < -3$  で、天然の地質断層上で見つかったものとしては、既往最小のものである。これらの Repeater は、この断層がクリープしたことで誘発されたとみられる。

(4) この Repeating Earthquake の活動様式を詳しく調べたところ、プレート境界で起こる Repeating Earthquake に対して提案されている発生頻度と規模の関係 (Nadeau and Johnson, 1998) とは異なる関係を持つことがわかった。プレート境界に比べて、より小さいクリープ量で多くの Repeater が発生するということであり、これらの Repeater を用いれば、非常にゆっくりとしたクリープを短い時間で検知できると考えられる。例えば、 $0.03\text{mm/year}$  という非常にゆっくりとしたクリープが発生している断層で  $M_w -4$  の Repeater が検知できているとすると、Nadeau and Johnson (1998) のスケーリング則が成立するケースでは検知に最低 76 年かかるが、今回見出した発生頻度と規模関係をもつ Repeater であれば、0.4 年の観測で検知できる可能性があることがわかった。

(5) また、上記の Repeater の中には、新規に現れるものや消失するもの、 $M_w$  の時間変化を示すものなど、多彩な時間変化を持つものが含まれることを発見した。断層面上のマクロスコピックなクリープが停止、開始したケースに対応しているとみられる場合もあるが、アスペリティの摩耗といった、断層面の状態変化に起因するとみられるケースも存在した。

(6) 第一期観測 (Mponeng 金鉱山における AE 観測) で得た、 $M_w$  2 の地震発生後に大量に観察された余震 AE データ (1 週間で 2 万個以上) の中にも、割合としては非常に小さいものの、Repeating Earthquake が含まれることがわかった。しかし、相似な波形を持つ多くのイベントは、誤差を考慮しても震源が重なっておらず、同じ場所の繰り返し破壊とはみなせない可能性が高いこともわかった。

(7) Cooke 4 鉱山における観測で得られた AE の約 90% は、切羽直近に集中していた。これらについて、Collapsing 法や Double Difference 法といった、震源が描き出す構造を効果的に抽出する手法や、震源決定精度を改善する手法を適用し、その詳細な空間分布を調べた。切羽直近では、採掘の進行とともに厚み 2–3 m 程度の二次元状ダメージ集中域が規則的に形成されること、これらが普遍的に現れることを明らかにした。また、採掘前線の形状が複雑な場所では、AE 分布も非常に複雑な構造を持つことも明らかになった。

(8) 上記の 2 次元状分布、あるいは断層面上でおこる AE 活動について、その活動レートの変化、 $b$  値、空間相関長の時間変化などを調べた。切羽前方の応力上昇レートが高いとみられる場所では、 $b$  値の低下がかなり普遍的に確認されたが、空間相関長については明瞭な関係は確認できなかった。

(9) 主に切羽直近でおこる、大きなイベントに先行する AE レート変化を詳しく調べたが、多くのイベントに対しては、先行研究でみられる AE 発生率の加速といった現象が確認できず、むしろ先行する AE の発生頻度は一定であるケースが多いことがわかった。

## 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)

- ① M. Naoi, M. Nakatani, T. Igarashi, K. Otsuki, Y. Yabe, T. Kgarume, O. Murakami, T. Masakale, L. Ribeiro, A. Ward, H. Moriya, H. Kawakata, S.

Nakao, R. Durrheim, H. Ogasawara (2015), Unexpectedly frequent occurrence of very small repeating earthquakes ( $-5.1 \leq M_w \leq -3.6$ ) in a South African gold mine: implications for monitoring intraplate faults, *J. Geophys. Res.*, 120, 8478–8493, doi: 10.1002/2015JB012447, 査読有り.

- ② H. Moriya, M. Naoi, M. Nakatani, G. van Aswegen, O. Murakami, T. Kgarume, A. K. Ward, R. J. Durrheim, J. Philipp, Y. Yabe, H. Kawakata, and H. Ogasawara (2015) Delineation of large localized damage structures forming ahead of an active mining front by using advanced acoustic emission mapping techniques, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 79, 157–165, doi: 10.1016/j.ijrmms.2015.08.018, 査読有り.
- ③ Y. Yabe, M. Nakatani, M. Naoi, J. Philipp, C. Janssen, T. Watanabe, T. Katsura, H. Kawakata, D. Georg, and H. Ogasawara (2015) Nucleation process of an  $M_2$  earthquake in a deep gold mine in South Africa inferred from on-fault foreshock activity, *J. Geophys. Res.*, 120, 5574–5594, doi:10.1002/2014JB011680, 査読有り.
- ④ M. Naoi, M. Nakatani, K. Otsuki, Y. Yabe, T. Kgarume, O. Murakami, T. Masakale, L. Ribeiro, A.K. Ward, H. Moriya, H. Kawakata, R.J. Durrheim, H. Ogasawara (2015) Steady activity of microfractures on geological faults loaded by mining stress, *Tectonophysics*, 649, 100–114, doi: 10.1016/j.tecto.2015.02.025, 査読有り.
- ⑤ M. Naoi, M. Nakatani, T. Kgarume, S. Khambule, T. Masakale, L. Ribeiro, J.

Philipp, S. Horiuchi, K. Otsuki, K. Miyakawa, A. Watanabe, H. Moriya, O. Murakami, Y. Yabe, H. Kawakata, N. Yoshimitsu, A. Ward, R. Durrheim, H. Ogasawara (2015), Quasi-static slip patch growth to 20 m on a geological fault inferred from acoustic emissions in a South African gold mine, *J. Geophys. Res.*, 120, 1692–1707, doi: 10.1002/2014JB011165, 査読有り.

- ⑥ 直井誠 (2014) 南アフリカ大深度金鉱山における微小破壊観測, 水曜会誌談話室, 第24巻, 第7号, 830-834, 査読無し.

[学会発表] (計19件)

- ① M. Naoi, M. Nakatani, H. Moriya, K. Otsuki, T. Kgarume, J. Philipp, O. Murakami, T. Masakale, L. Ribeiro, Y. Yabe, H. Kawakata, A. Ward, R. Durrheim, H. Ogasawara (2015) Acoustic emission monitoring in Cooke 4 gold mine in South Africa -summary of the main findings of a 5-year SATREPS project-, AGU Fall Meeting, S51E-07, 18 December, San Francisco (USA)
- ② 直井誠, 中谷正生, 森谷裕一, Thabang Kgarume, 村上理, 大槻憲四郎, Joachim Philip, Thabang Masakale, Luiz Ribeiro, 矢部康男, 川方裕則, Anthony Ward, Raymond Durrheim, 小笠原宏 (2015) 南アフリカ金鉱山地表下1 kmにおける薄板状鉱脈の採掘で誘発されるアコースティック・エミッションの観測, 資源素材学会春季大会, 3月28日, 東京大学(東京都・文京区).
- ③ 直井誠, 中谷正生, 森谷裕一, 大槻憲四郎, Thabang Kgarume, Joachim Philipp, 村上理, Thabang Masakale, Luiz Ribeiro, 矢部康男, 川方裕則, Anthony Ward, Ray Durrheim, 小笠原宏 (2015) 南アフリカ

Cooke 4 金鉱山における微小破壊観測 — SATREPS 計画5カ年のまとめ—, 日本地震学会秋季大会, S08-08, 10月26日, 神戸国際会議場(兵庫県・神戸市).

- ④ M. Naoi, M. Nakatani, H. Moriya, K. Otsuki, Y. Yabe, O. Murakami, H. Kawakata, H. Ogasawara, S. Horiuchi, T. Kgarume, R. Durrheim, S. Khambule, T. Masakale, L. Ribeiro, A. Ward, J. Philipp (2014) Acoustic Emissions Down to Magnitude  $M_w = -5$  Delineating Damages Around Mining Stopes and Pre-existing Faults: Spatial Distribution, Temporal Change and Source Parameters, Institute of Mine Seismology 24th Seminar on Monitoring & Modelling the Seismic Rock Mass Response to Mining, 05 May, Asara Wine Estate, Stellenbosch (South Africa).
- ⑤ 直井誠, 森谷祐一, 中谷正生, 村上理, Thabang Kgarume, Thabang Masakale, Luiz Ribeiro, 矢部康男, 川方裕則, Anthony Ward, Ray Durrheim, 小笠原宏 (2014) 採掘空洞前方の岩盤中での大規模亀裂の形成を示唆する微小破壊の震源分布, 2014年日本地球惑星科学連合大会, SIT38-02, 4月30日, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市).

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)  
○取得状況 (計0件)

[その他]

無し

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

直井 誠 (NAOI Makoto)  
京都大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 10734618