

微小破壊計測に基づく掘削由来の岩盤損傷過程の理解と山はね退避基準作成

Investigation of mining-induced damage development process and creation of warning and evacuation criteria based on acoustic emission measurement

京都大学防災研究所地震予知研究センター 助教 直井 誠

(研究計画ないし研究手法の概略)

土被りが1200mを越えた清水トンネルや新清水トンネル、1000m近い関越トンネルの掘削では、地圧により切羽の岩盤が破壊して飛び出す「山はね」が発生し、工事の安全性の確保の大きな障害となった。国内外の炭鉱でも採掘深度が1000mを越えるとトラブルが頻発し、閉山を余儀なくされることが多い。また、建設が開始されたリニア中央新幹線では、地表までの土被りが1400mにも及ぶ南アルプストンネルにおける工事が必要となり、山はねの発生が危惧される。

山はねの予測には、岩盤の微小破壊に伴う振動(AE: Acoustic Emission)の測定が有効である。本研究では、掘削に伴うものとしては類を見ない良質な記録が得られている、南アフリカの大深度金鉱山地表下1 kmと3.6kmでの2サイトにおける観測で得られたAE測定データを整理し、採掘起因の岩盤損傷過程の解明、及びAEを用いた高度な退避基準の作成を最終目的とした研究を行った。上記の計測では、採掘起因の数cm規模の微小破壊を200 mという広範囲にて検知し、数百万個に及ぶAE震源、並びにそれらに対応する多チャンネル(16 chもしくは48ch)の16bit, 500kS/sの波形データという、極めて良質な記録を蓄積している。

本研究では、いくつかのスキームの元に、これまでに得られた成果を発展させる形で研究を進めたが、本稿では、小繰り返し地震解析による断層のリスク評価手法の研究についての成果を報告する。同じ場所で繰り返し発生する「小繰り返し地震」は、主にプレート境界断層で見つかっており、断層の載荷状態・応力蓄積状況の監視に用いられている。申請者は、上記観測の3ヶ月分のデータ解析によって、同様の現象が掘削によって載荷される断層でも起こることを世界で初めて明らかにした(Naoi et al. 2015; JGR)。本研究では解析期間を14ヶ月に延長し、断層面の状態変化に対応するとみられる長期変動が起こっていることを明らかにした。また、別鉱山では実際に大きな山はね(100 m規模)が誘発されており、その前後に起きた2万個に及ぶAEが収録できている。また、この本震発生前にはその破壊面上で微小破壊活動が起こっていることが報告されていたが、震源決定処理が不十分であり、より完成度の高いカタログを作成して解析を行うことが課題となっていた。本計画では、これらの課題を解決することを試みた上で、これらの本震前後の活動に対して、小繰り返し地震の探索を実施した。

(実験調査によって得られた新しい知見)

1. 南アフリカCooke 4金鉱山地表下1 kmにおける微小破壊観測データの解析

Naoi et al. 2015(JGR)で報告した小繰り返し地震活動に関しては、本課題の開始に先立って14ヶ月分のデータを解析することで、発生規模の低下や活動そのものの出現・消失などが起こっていることが明らかになっていた。本研究では、これらに対して統計的検定手法を適用してこのMwの低下が有意であることを確認すると共に、震源間隔が非常に近く、隣接した場所で発生した別のパッチでの破壊ではないことを示した。統計検定においては複数グループに対する多重比較問題となるた

め、偽陽性を多く検出することを防ぐために、Benjamini-Hochberg法で偽発見率が5%以下になるようにして解析をおこなった。この結果は、Tectonophysics誌に投稿・出版された。

また、本研究では、断層上の定常AE活動とおもわれる複数の二次元状分布を示すクラスタがみつかっており、その1つにおいては、 M_w -0.7から0.7の比較的大きい4つの地震が、短い期間に連続して発生した。これらの地震の波形からそれぞれの破壊サイズを推定して断層面上にマッピングしたところ、各イベントはその前に起こった大きなイベントの破壊域の端で発生しており、断層すべりによる破壊域の端への応力集中が、次の大きな地震をトリガしていることが示唆された(図1)。本課題において、これらの活動前後のAE活動に対して小繰り返し地震の探索を行ない、これらの大きなイベントの推定破壊域内部でも小繰り返し地震が多数発生しており(図2)、地震性の破壊を起こすアスペリティが、このような小さなスケールでも階層構造を持つことが示唆された。このことは、このような小さいスケールにおいても、パッチの配置・強度・ならびに応力状態によっては、大きな震源核の形成なしに、小さなパッチから破壊が開始し連鎖的に大きな地震に発展しうる(カスケード的破壊成長)可能性を示唆する。

2. 南アフリカMponeng金鉱山地表下3.3 kmにおける観測で得られたM2地震前後のAE活動の解析

南アフリカMponeng金鉱山地表下3.3 kmにおいて実施したAE観測では、鉱山地震としては比較的大きいモーメント・マグニチュード(M_w) 2.2の地震が観測網直近で発生し、その後約1週間で、2万個を超えるAEが観察された。これらのAEは本震で破壊された面を描き出すように、薄く二次元状に分布し、本震発生前にもこの面上で定常的なAE活動が観察された(図3)。本研究では、このAEデータの中に小繰り返し地震が存在するかの検討を行った。

本研究では、M2.2破壊面周辺で発生したAEに対してDouble difference法による精密震源決定(相対震源決定)を行った後、波形がよく似たイベントを抽出する作業を行った。解析に用いたAEの数は、 M_w 2.2発生前が32個、後が9404個である。イベント抽出に用いるパラメータの値に依存するが、解析の結果、全体の4-36%が複数イベント間で類似した波形を持つことが明らかになった(図4)。

上記の類似波形を持つAEのグループ中には、個々のAEに対して推定された破壊域がよく重なるものが存在することが確かめられた。これらは本震破壊面におけるゆっくりすべりで駆動された小繰り返し地震と考えられる。その一方で、震源決定誤差を考慮しても推定破壊域が明らかに重ならないものも多数存在した。このようなイベントは、震源が近く同じメカニズムを持つ破壊ではあるが、同じ場所の繰り返し破壊とは言い難い。このようなイベントが見つかった原因としては、これらはそれぞれ別の小繰り返し地震のグループであり、個々のグループにおいては、例えば解析期間が短く、実際には繰り返しが起こっていたが、本研究の解析期間内におこらなかった、という可能性が考えられる。

また、本研究では M_w 2発生前のAEに対しては、本震後に起こったAEが付近に多数存在するにも関わらず、類似波形グループを構成するイベントはほとんど見つからなかった。本震の発生により、AEを起こしていたアスペリティが破壊され、保存されなかったことを示唆する結果である。

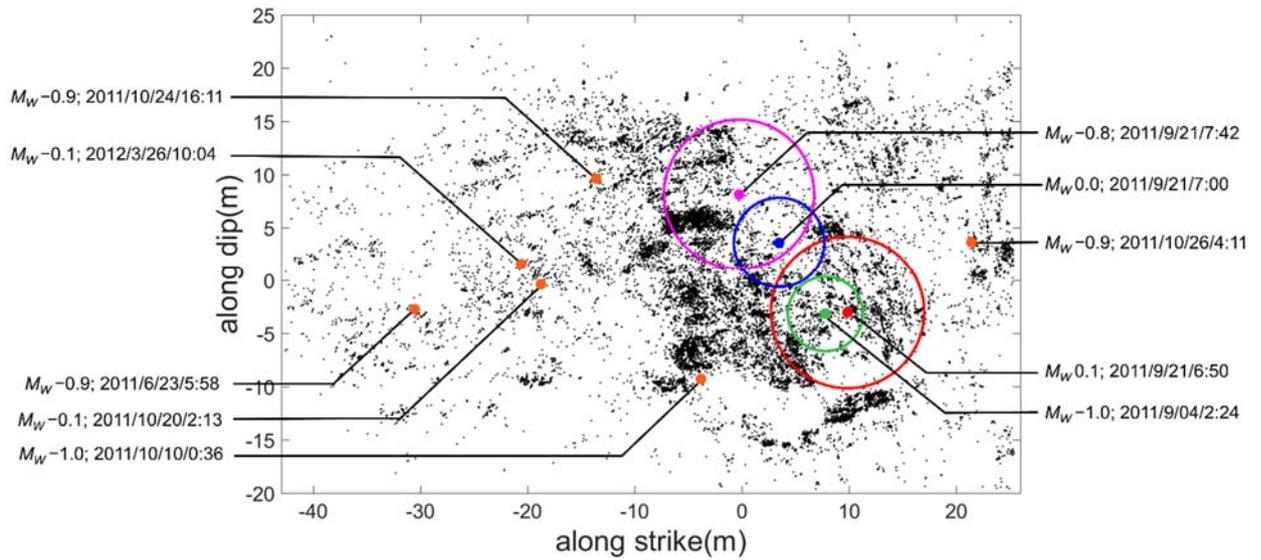


図1 ある平面状分布を示すAEクラスタ内で発生したAE29,590個の震源分布図 (along strike - along dip面投影). 2011年9月~10月にかけて連発した比較的大きなイベント (Event A-D) の震源位置をそれぞれ緑, 赤, 青, 紫の点で示す. 参考のため, Event A-D以外の $M_w \geq -1.0$ 以上のイベントの震源位置をオレンジの点で示している. 円は, Event A-Dの推定した破壊サイズに対応しており, それぞれ震源位置の丸と同じ色で示している.

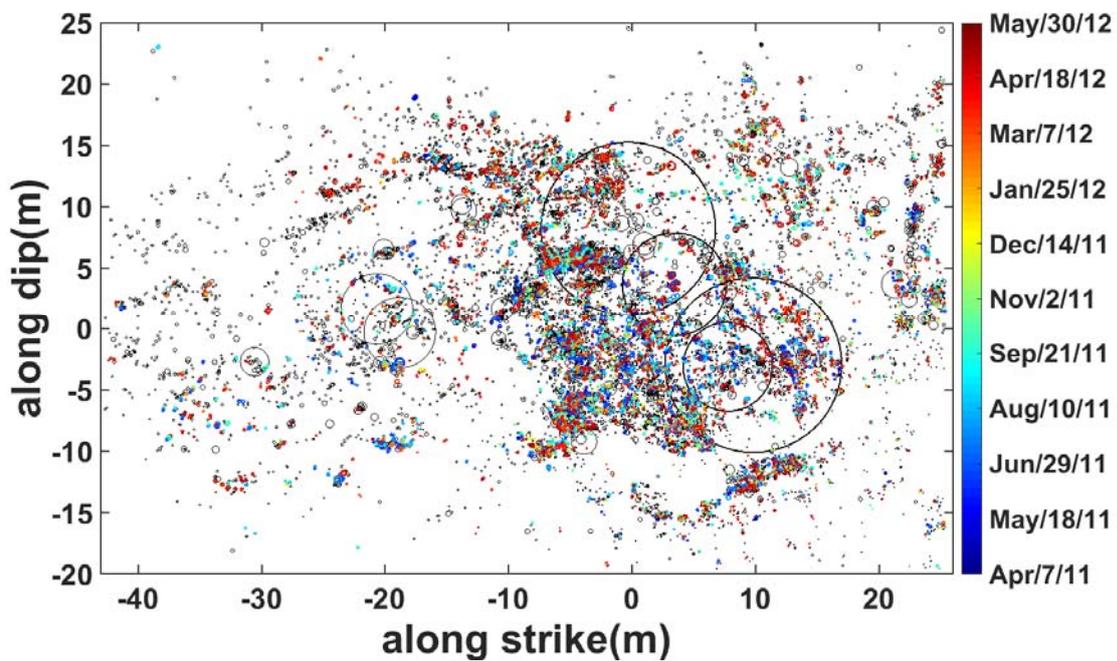


図2. 図1に示した平面状分布を示すクラスタ内で見つかった小繰り返し地震の空間分布 (along dip - along strike面投影). 各震源は対応する破壊サイズの円で示している. 小繰り返し地震として認定されたものは発生時期に応じた色で示し, それ以外のAEは黒の円で示している. M_w が求まらなかったAEは黒点で示した.

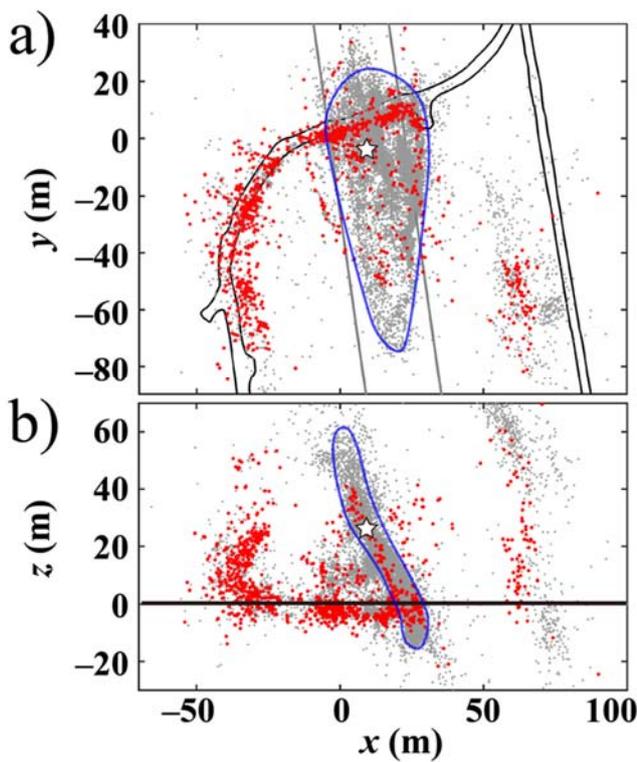


図3. MW 2.2の地震発生前後に観測されたAEの震源分布. 灰色のドットは, 本震(MW 2.2)発生から150時間以内に発生したイベントを, 赤のドットは, 本震前に発生したイベントを表す. 青のContourは, 本震破壊面を描き出すように発生したAEの集合を表す. a) 平面図. b) 南から見た断面図. Naoi et al. (2016)より引用.

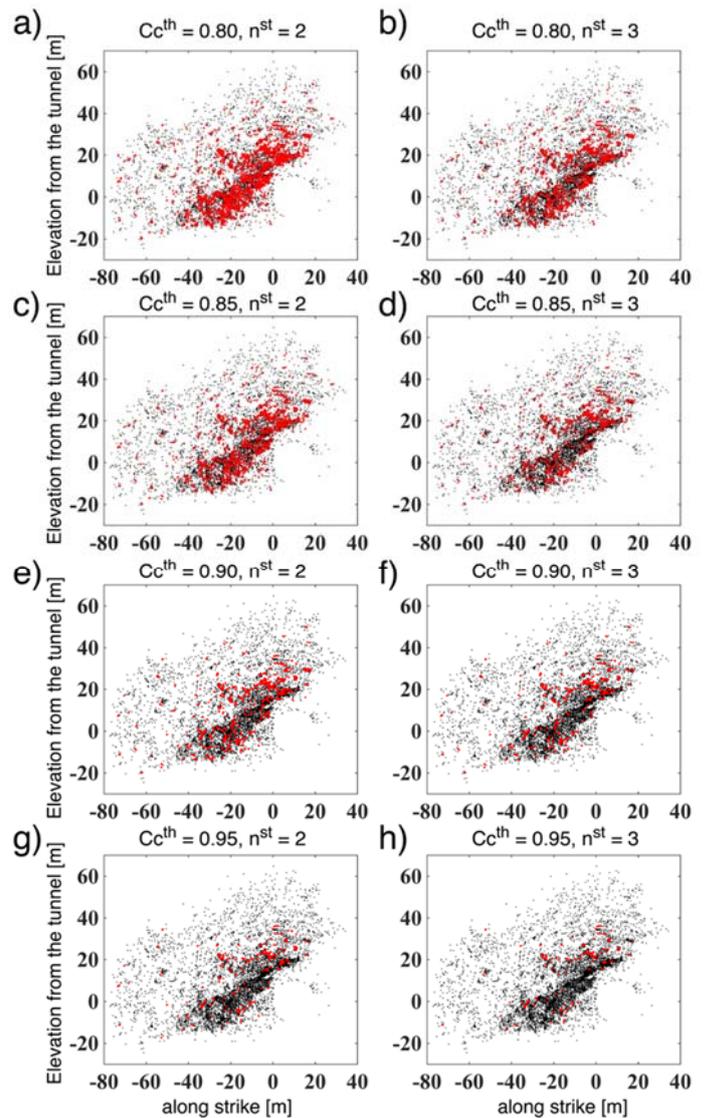


図4 類似波形グループの震源分布 (表4.1の結果に対応). グルーピングに使用したパラメータ別に結果を示している. 赤点がグループイベント, 黒色がその他のイベントを示す.

(発表論文)

- [01] SB. Mngadi, R.J. Durrheim, MSD Manzi, H. Ogasawara, Y. Yabe, H. Yilmaz, N. Wechsler, G. Van aswegen, D. Roberts, A. AK. Ward, M. Naoi, H. Moriya, M. Nakatani, A. Ishida, SATREPS Team, ICDP Dseis Team (2019) Integration of underground mapping, petrology, and high-resolution microseismicity analysis to characterise weak geotechnical zones in deep South African gold mines, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 114, 79-91, doi: 10.1016/j.ijrmms.2018.10.003.
- [02] J. Yamaguchi, M. Naoi, M. Nakatani, H. Moriya, T. Igarashi, O. Murakami, Y. Yabe, R. Durrheim, H. Ogasawara (2018) Emergence and Disappearance of Very Small Repeating Earthquakes on a Geological Fault in a Gold Mine in South Africa, *Tectonophysics*,

747-748, 318-326, doi: 10.1016/j.tecto.2018.10.014.

- [03] M. Naoi, J. Yamaguchi, M. Nakatani, H. Moriya, T. Igarashi, T. Kgarume, O. Murakami, T. Masakale, Y. Yabe, K. Otsuki, H. Kawakata, L. Ribeiro, A. Ward, R. Durrheim, H. Ogasawara (2018) Significance of Very Small Repeating Earthquakes Observed in a Deep Gold Mine in South Africa, 10th ACES International Workshop, Awaji Island, September 27.
- [04] M. Naoi, M. Nakatani, H. Moriya, Y. Yabe, H. Ogasawara (2018) Possible precursors implied from acoustic emissions and strain records in deep gold mines in South Africa, International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop of Earthquake Preparation Process, Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27, 2018.
- [05] 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, H. Ogasawara (2018) Large localized damage structures detected by acoustic emissions at an active mining front in South Africa gold mine, International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop of Earthquake Preparation Process, Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27, 2018.
- [06] Y. Yabe, M. Nakatani, M. Naoi, J. Philipp, C. Janssen, H. Kawakata, D. Georg, and H. Ogasawara (2018) Foreshock activity of Mw2.2 earthquake in a South African deep mine, International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop of Earthquake Preparation Process, Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27, 2018.
- [07] 松田幹生, 直井誠, 南隆太郎, 石田毅, 中谷正生, 矢部康男 (2018) 南アフリカMponeng金鉱山地表下3.3 kmで発生したM2地震前後のAcoustic Emission活動, 資源・素材学会 第15回若手研究者・学生のための研究発表会, 滋賀県立大学, 2018年12月7日.
- [08] 金子眞士, 直井誠, 石田毅 (2018) 南アフリカ金鉱山におけるAcoustic Emissionの測定データを用いたAEセンサの周波数特性・岩盤の減衰特性・震源スペクトルの推定, 資源・素材学会 第15回若手研究者・学生のための研究発表会, 滋賀県立大学, 2018年12月7日.
- [09] 直井誠, 中谷正生, 矢部康男, 森谷祐一 (2018) 南アフリカ大深度金鉱山における微小破壊観測, 2018年度地盤工学会, 2018年7月26日.
- [10] 松田幹生・直井誠・南隆太郎・石田毅・中谷正生・矢部康男 (2018) 南アフリカMponeng金鉱山地表下3.3 kmで発生したM2地震前後のAcoustic Emissionの震源位置標定と絶対規模推定, 日本地震学会秋季大会, 2018年10月10日.

※ 01, 02は査読付き国際誌. 03-10は学会発表概要集など.