

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249137

研究課題名(和文) 南アフリカ大深度鉱山でのAE計測による岩盤破壊規模と時期の予測に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Prediction of Rock Failure Scale and its Timing by Observation of Acoustic Emission at Africa Deep Mine

研究代表者

森谷 祐一 (Moriya, Hirokazu)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：60261591

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 28,200,000円

研究成果の概要(和文)：南アフリカ金鉱山の深度約1kmにおいて、採鉱により岩盤内で発生するAEを高分解能観測網により至近距離で計測し、様々な規模(数cm～100m)の岩盤破壊を検出した。AE源の高精度決定により、厚さ数m、長さ約10-30mで傾斜する板状のダメージ構造を抽出できた。比較的緩やかな応力場変化に起因する大規模破壊は、広範な領域において岩盤が一気にせん断破壊を起こすのではなく、ダメージゾーンの形成が大規模破壊に至る重要な過程と考えられる知見が得られた。また、断層上の定常微小破壊活動、ゆっくり滑りの発生を示唆する活動、超微小繰り返し地震の活動など、これまで知られていなかった様々な微小破壊活動を発見した。

研究成果の概要(英文)：We observed around 300 thousand of AE (Acoustic Emission) events by a high-resolution monitoring network close to the active front of a tabular mining stope being advanced northward at 1 km depth in the Cooke 4 Gold Mine in South Africa. The application of the double-difference relative location algorithm resolved seemingly continuous, dense cloud of AEs that extend about 20 m ahead of the stope front into several discrete, steeply dipping tabular clusters a few meters thick and 10-30 m in dip extent, separated by quiet intervals a few meters thick. The tabular clusters had a strike parallel to the stope face and a dip of around 65°, resembling commonly observed large shear fractures along the plane of maximum shear. These observations suggest that discrete tabular clusters of AEs represent macroscopically localized damage structures that formed in the highly stressed intact rock ahead of the stope face and may culminate in dynamic shear events.

研究分野：地下情報計測工学

キーワード：地殻工学 地震 資源 AE

1. 研究開始当初の背景

岩盤の破壊規模と発生時期の予測は学術的にも社会的にも極めて重要である。岩盤の破壊は、鉱山内の山跳ねからプレート境界地震まで幅広いスケールで関係し、人命に関わる場合も多い。南アフリカでは山跳ね等により毎年人的被害が発生しており、その被害提言につながる知見の獲得が求められている。

2. 研究の目的

南アフリカ(以下南ア)の金鉱山では、深度 1~3.6 km で採鉱が行われており、採鉱による応力変化に起因して大きな地震(岩盤破壊)が起きている。1992 年以来、日本の学者有志による南ア半制御地震発生実験グループ(以下南ア G)は、複数の金鉱山内に地震計・歪計等を事前に設置して、100m 規模の地震破壊を数 m ~ 数十 m の至近距離で観測し、世界的に注目される成果を上げている。この中で申請者らは、AE(Acoustic Emission: 岩盤の破壊時に放射される弾性波で微小地震と呼ばれることもある)源の高精度標定による破壊構造面抽出で成果を上げている。本研究の目的は、前駆現象から大規模破壊に至るまで様々なスケール(数 cm ~ 100m)の岩盤破壊を、AE 観測網により至近距離で計測し、観測される膨大な数の AE に着目して、大規模破壊に至るプロセスを明らかにすることにある。最終目標は、AE を用いた大規模岩盤破壊の規模と時期の予測法の構築である。

3. 研究の方法

研究サイトは、南アの Cook4 金鉱山(旧 Ezulwini 鉱山)である。深度約 1km の坑内に既存の断層面を囲むように AE 観測網を展開し、2011 年以来膨大な数の AE(20 万個/月、500 個/m³)を観測した。Cook4 金鉱山は広範なスケールの岩盤破壊を密な観測網で検出できる世界で唯一のサイトである。本研究では以下のように観測・解析を進めた。

- (1) AE 観測とデータ蓄積システムの構築、
- (2) AE マルチプレート検索ソフトの開発、
- (3) AE 源高精度標定による岩盤内破壊面の抽出、
- (4) AE から見た大規模破壊準備過程と他の原位置計測からみた準備過程の比較検討、
- (5) AE を用いた大規模岩盤破壊の規模と時期の予測法の構築。

4. 研究成果

6 個の 3 成分加速度計と 24 個の 1 軸 AE センサーからなる観測網を構築した。観測され

た AE は磁気記録装置に蓄積され、定期的に搬出し解析を行えるようになった。金鉱山の掘削により応力場が変化し、岩盤内に破壊が発生する。破壊に伴って AE が発生するが、掘削前面の岩盤内で発生した AE を計測し、大規模破壊に至る過程の検出を行った。観測は長期にわたって行われたが、本研究で詳細に解析を行った約 50 日間の AE 震源分布を図 1 に示す。ここでは、マグニチュードが 4 程度の微小イベントを含む約 30 万個の AE が検出され、震源決定されている。震源位置高精度決定法である Double-Differential 法を適用したところ、掘削面前方の岩盤内で AE クラスタが検出され、掘削が進むにしたがって AE 発生位置も前方に移動し、長軸の長さが 10~30m、厚さ 2~3m で約 65° の傾斜を有する新たな AE クラスタが形成されていくことがわかった(図 2)。同鉱山内での地質断層面で発生した AE の分布が、約 30cm の厚さであることと対照的であった。AE クラスタが形成された領域は、掘削前面の岩盤内で形成される高せん断応力領域と一致している。

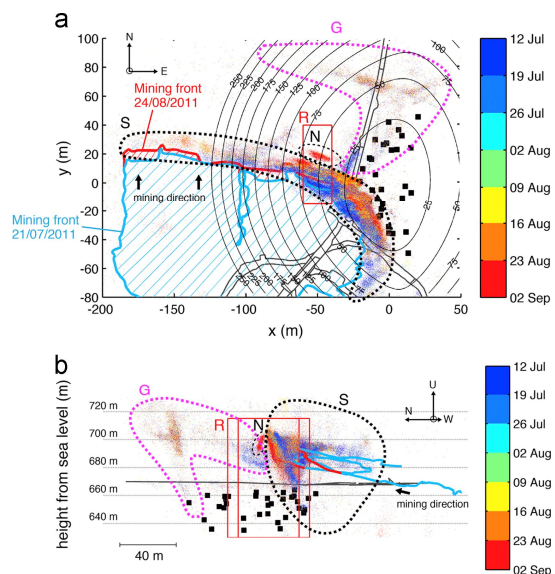


図 1: 金鉱石掘削中に発生した AE 源分布。

AE 源分布を詳細に調べたところ、AE クラスタは板状の構造をしていること(図 3)、時空間分布から分析すると、板状構造は切羽から一定の距離で規則的に始まるわけではないことや、ある場所から徐々に広がるような活動を示すのではなく、最初から最終的な活動域全体で始まることがわかった。さらに、時間とともに b 値が顕著に低下する傾向も確認され、大規模の破壊が発生しやすい傾向になることもわかった。板状構造間には、AE

が発生しない空白域も見られることが明らかになった(図3, 4). この現象は, 応力場の変化により岩盤がダメージを受けた現象を表しているが, より大規模な危険な事象の形成段階を反映していると考えられる.

当初想定していた領域で大規模破壊は発生しなかったため最終的な結論を下すことはできないが, 採掘面前面で多数観測されたAEの解析から考えると, 大規模破壊は, 岩盤が一気にせん断破壊を起こすのではなく, 岩盤内ダメージゾーンの形成が大規模破壊に至る重要な過程であると考えられるとの知見が得られた. すなわち, 初期破壊から最終的な大規模破壊に至るまでの時間スケールは様々であり, 短時間の場合には明確に確認できない場合もあると思われるが, 本フィールドでのAEの発生状況から考えると, 岩盤内のダメージゾーンは, 岩盤内で一様に成長していくのではなく, 強度が相対的に弱いと思われる領域で微小破壊が多数発生することでゾーンが形成され, 最終的に大規模破壊に至ると推定される. また, 研究計画にも記したように, 鉱山以外のフィールドについても検討を行ったところ, 注水により人工貯留層造成を伴う地熱フィールドにおいては, き裂内間隙水圧上昇領域の拡大が大マグニチュードイベント発生に重要な役割を果たしていることが明らかとなった.

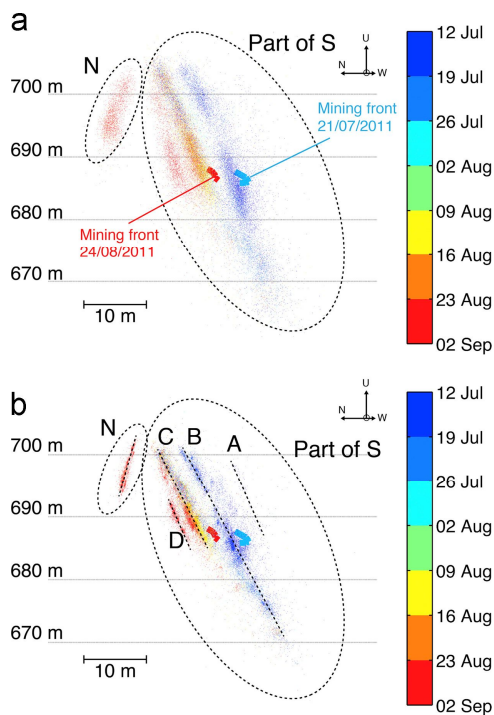


図2: Double-Differential 法による AE 源分布.

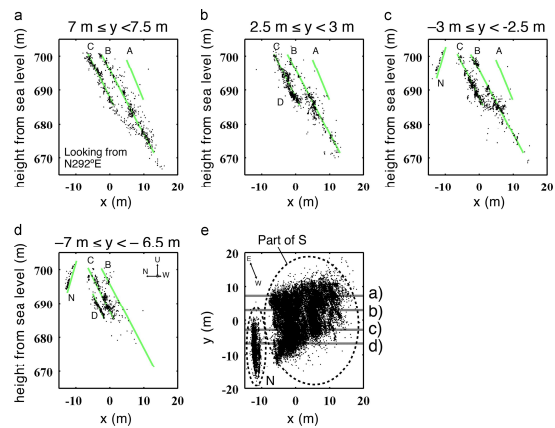


図3: AE 源分布をスライスして観察したもの.

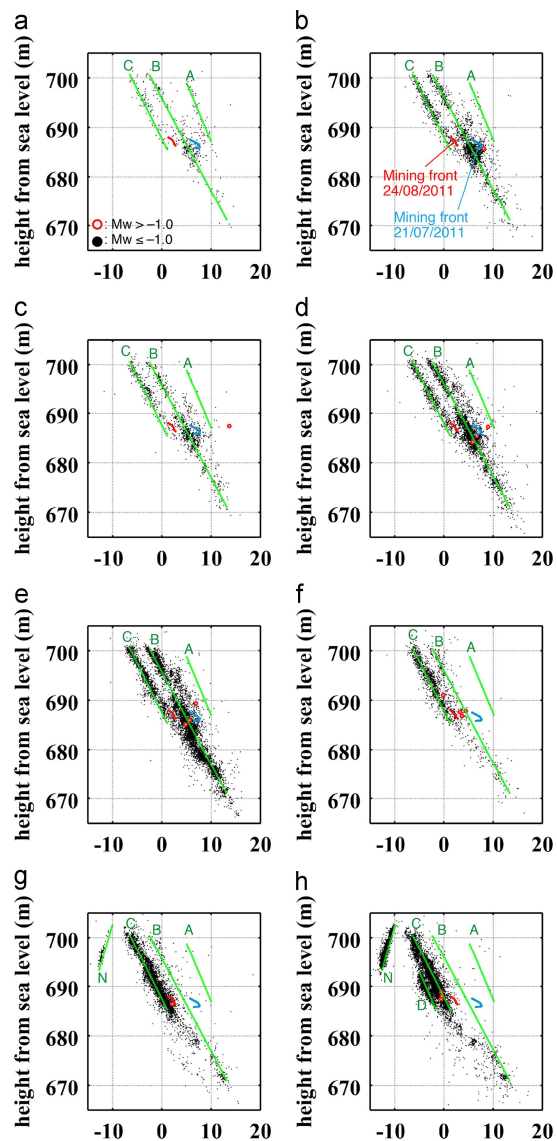


図4: AE 源分布の時間依存.

本研究で用いた AE 観測網では, 既存の地質断層上で発生する AE 活動の検知にも成功した. 検知された AE の約 90% は採掘前線に密集して発生したが, 残る 1% は地質断層上で発生したものとみられ, これらは厚み数十

cm 以下という極度に集中した二次元分布を示す。また、これらを構成する AE の約 99.7% は M_w -2 という非常に小さいものであったことが判明した。一般に内陸活断層は微小地震の定常的活動を伴わないものも多く、定常的活動を伴う場合でも断層面外の岩盤損傷域での活動と指摘されていた。また、鉱山で行われていた観測(検知限界 $M \sim -1$)においても、断層と微小地震活動に明瞭な関係はみられないと指摘されていた。しかし、本研究を通じて、微小破壊活動を伴う断層が多数存在していること、これらは b 値が高く M -3 以下まで観測しないとほぼ気付くことが不可能であることなどが明らかになった。その一方で、微小破壊活動を全く伴わない断層も確認されており、微小破壊活動と載荷状況・断層状態の関係をより深く理解する必要性があらためて示された。

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 13 件)

直井誠(2018)南アフリカ大深度金鉱山での微小破壊観測による震源の物理の研究、地震第 2 輯, 第 71 巻 5 月号(2016 年地震学会若手学術奨励賞受賞記念論文)(査読有)

H. Moriya, 2018, Identification of similar seismic events using a phase-only correlation technique, Construction and Build. Materials, 168, 984-987. (査読有)

M. Naoi, M. Nakatani, H. Moriya, and Y. Yabe (2016) Acoustic Emission Monitoring for Mitigating Seismic Risks in Deep Gold Mines in South Africa, International Journal of the JSRM, 12, 19-22, doi: 10.11187/ijjrm.12.1_19 (not peer reviewed; 2015 年度岩の力学連合会フロンティア賞受賞記念論文). (査読無)

M. Naoi, M. Nakatani, et al. 2015, Steady activity of microfractures on geological faults loaded by mining stress, Tectonophysics, 649, 100-114. (査読有)

M. Naoi, M. Nakatani, et al., 2015, Quasi-static slip patch growth to 20 m on a geological fault inferred from acoustic emissions in a South Africa gold mine, Journal of Geophysical Research, 120, 1692-1707. (査読有)

H. Moriya, M. Naoi, M. Nakatani, et al., 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. (査読有)

M. Naoi, M. Nakatani, et al., 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, Journal of Geophysical Research, 120, 8478-8493. (査読有)

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 M2 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)

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)

M. Naoi, M. Nakatani, S. Horiuchi, Y. Yabe, J. Philipp, T. Kgarume, G. Morema, S. Khambule, T. Masakale, L. Ribeiro, K. Miyakawa, A. Watanabe, K. Otsuki, H. Moriya, O. Murakami, H. Kawakata, N. Yoshimitsu, A. Ward, R. Durrheim, and H. Ogasawara (2014) Frequency-Magnitude Distribution of $-3.7 \leq M_w \leq 1$ Mining-Induced Earthquakes around a Mining Front and b -Value Invariance with Post-Blast Time, Pure Appl. Geophys., 171, 2665-2684, doi: 10.1007/s00024-013-0721-7. (査読有)

H. Ogasawara, M. Nakatani, R.J. Durrheim, M. Naoi, Y. Yabe, H. Moriya, G.F. Hofmann, C. Stander, D.P. Roberts, P. de Bruin, J. Oelofse, H. Kato, A. Cichowicz, D. Birch, D. Ngobeni, A. Milev, T. Kgarume, T. Satoh, S. Horiuchi, H. Kawakata, O. Murakami, N. Yoshimitsu, A.K. Ward, J. Wienand, P. Lenegan, H. Yilmaz, S. Mngadi, P.S. Piper, T.N. Clements, S. Nakao, M. Okubo, H. Ishii, A.V. Visser (2014) Observational studies of the rock mass response to mining in highly stressed gold mines in South Africa, Proceedings of 7th International Congress on

Deep and High Stress Mining, Sudbury, Canada, 16-18 September 2014, M. Hudyma and Y. Potvin (eds), Australian Centre for Geomechanics, 123-137. (査読有)

H. Ogasawara, T. Katsura, G. Hofmann, Y. Yabe, M. Nakatani, M. Naoi, H. Ishii, D. Roberts, S. Nakao, M. Okubo, J. Wienand, P. Lenegan, A.K. Ward, H. Kawakata (2014) In-situ monitoring of rock mass response to mining in South African gold mines using the Ishii strain meters, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy 6th South African Rock Engineering Symposium (SARES 2014), Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, pp. 21-34. (査読有)

R. J. Durrheim, H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, A.M. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, H. Moriya, M. Naoi, T. Kgarume, O. Murakami, A.V.Z Brink, G. Ferreira, G. Henry, R. Teleka, J. Kuijpers, S. Mngadi, A Ward, J. Wienand, and the SATREPS Research Group (2014) Observational studies in South African mines to mitigate seismic risks: a mid-term review of the five-year SATREPS project, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy 6th South African Rock Engineering Symposium (SARES 2014), Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 241-250. (査読有)

〔学会発表〕(計20件)

H. Moriya, (2016), Identification of similar seismic events using a phase-only correlation technique, Progress in Acoustic Emission XVIII,(2016), 487-490, December 7, Kyoto.

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).

M. Naoi (2015) Acoustic Emissions delineating geological faults in the Cooke 4 (Ezulwini) mine, ICDP DSeis workshop, 01 November, Potchefstroom (South Africa).

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 2014, Asara Wine Estate, Stellenbosch, South Africa.

R. J. Durrheim, H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, M. Naoi, H. Moriya, A. Cichowicz, T. Satoh, H. Kawakata, A.Milev, T. Kgarume, V. Z. Brink, T. Ward, L. Ribeiro, M. Manzi, S. Mngadi, and the SATREPS Team (2017) Observational Studies in South African Mines to Mitigate Seismic Risks: Challenges and Achievements, MineSafe2017, 30-31 August, Johannesburg.

〔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〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

森谷 祐一 (MORIYA Hirokazu)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：60261591

(2)研究分担者

中谷 正生 (NAKATANI, Masao)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号：90345174

川方裕則 (KAWAKATA, Hironori)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号：80346056

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