

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

南アフリカ大深度金鉱山における断層破壊面極近傍の精細な動力学的破壊過程の推定

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

(3-2) 地震破壊過程と強震動

ア．断層面の不均質性と動的破壊特性

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

(3-1) 地震発生先行過程

ア．観測データによる先行現象の評価

イ．先行現象の発生機構の解明

(4) 地震発生・火山噴火素過程

ウ．摩擦・破壊現象の規模依存性

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

大きな地震ほど破壊成長抵抗 (G_c) が大きいことが震源インバージョンなどから示唆されているが、室内実験からは G_c はスケールに依存しない物性値であることが示されている。自然地震から示唆されている G_c のスケール依存性が、マルチスケールな不均質場の中で破壊が動的に成長することで現れるのか、あるいは、既存断層中のダメージゾーン等の成熟度の差によって場の固定的な性質として現れるのかは、地震のサイズ予見性にも関わる根本的な問題である。前者では地震破壊は常に停まるか停まらないかのぎりぎりのところで進行していることになり、後者では地震はその地震にとっての断層全面を壊すまで途中で停まることはないということになる。

本課題では、 $-3 < M < 3$ までの活発な地震活動が起こっている南アフリカ大深度金鉱山(以下、南ア金鉱山)において、M3 クラスのラブチャーが予想される大規模な地質弱面(ダイク境界面や地質断層)の超至近距離に地震計アレイ(以下、on-fault 地震観測網)を構築し、100-200m 級のラブチャーを破壊面から数メートル以内の複数点で観測し、地震破壊の動的成長過程を直接観測することを一つの目標とする。

断層至近距離で観測される地動の長周期成分からは断層滑りの時間履歴が高い確度で得られ、地震の成長途上での断層構成則や破壊成長抵抗が得られる。また、媒質の影響をほとんど受けずに観測される短周期地震波からは、その成長過程における破壊の複雑さの程度と素性が分かるだろう。これらの情報からより大きな地震の破壊過程に内包されるより小スケールの部分破壊の役割を明らかにし、冒

頭で述べた破壊のスケーリングの問題に対して実証的な立場からのモデルを提示することが本課題の最大の到達目標である。

また、計画している on-fault 地震観測網は予想される最大級の地震ラプチャーの数割を覆う程度の大きさであるが、これによって最大級の地震ラプチャーの最中を観察するだけでなく、同じ場所で起こるより小規模な地震の開始や停止を間近で観察することも期待でき、 $-3 < M < 3$ までの幅広いスケールの破壊を、高い分解能で観察することができる。

本課題は、南ア金鉱山で展開される関連課題と有機的に最大限連携し、同一サイトで多項目の観測を行い、観測網、計器設置作業、データなどを共有することで、費用対効果の向上を目指す。各関連課題の主たる観測目的は異なるが、現地調査や計器の設置などで効率化が図れる上、互いに異なる周波数帯を対象とした観測が同一サイトで展開されるため、地震発生場の理解に対して相補的な役割を果たすことが期待される。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

平成21年度は、現行観測の維持、現行観測で得られたデータの初期解析、及び多項目の観測を行うための観測網の構築準備の期間と位置付ける。現在観測が実施されているサイトの維持に努めるとともに、得られた波形データの初期解析を行い、比較的遠方で発生した地震記録を用いて解析に使用する全地震計の方位・極性の確認、較正を行う。また、新規に展開する観測サイトの候補地を現地調査し、サイトの構築に向けての準備を始める。

平成22年度は、波形データの初期解析及び方位補正を継続的に行うとともに、新規に展開する観測サイトの構築を開始する。

平成23年度は、前半に新規に展開する観測サイトの構築を完了し、後半にデータの解析に着手する。

平成24年度は、新規サイトにおけるデータの解析を実施し、幅広いスケールの震源過程を高分解能で抽出する。

平成25年度は、地震発生場の理解に向けて、断層破壊面極近傍の精細な動力学的破壊過程の推定の観点から、研究課題の取りまとめを行う。

(7) 平成24年度成果の概要：

昨年度計画していた、高い周波数まで感度を持つ AE センサの記録を用いた source controlled fmax の検討については一度棚上げとし、fmax と同様に、滑り弱化距離を反映して存在すると予測されている Gutenberg Richter 則 (以下 GR 則) が成立する下限マグニチュード (Aki, 1987) が、Cooke4 鉱山 (旧称 Ezulwini 鉱山) に展開した AE 観測網で観察できているか検討を行った。解析には 2011 年 8 月から 10 月の二ヶ月間のデータから作成した 365,237 イベントからなる AE カタログを用いた。

同鉱山の AE は、その空間分布や b 値の特徴から、採掘前線直近に集中する AE (stope cluster) と既存弱面を描き出すように起こっていると思われる薄い平面状の分布を示す AE (planar cluster) に分類できる (課題 2402)。このうち、stope cluster の AE については、採掘発破直後 1 分間であっても 1 日以上経過した後であっても、b 値がおよそ 1.3 の GR 則に従うことが示された。先行研究 (例えば、Richardson and Jordan, 2002) では、鉱山における地震の発破直後のサイズ分布は GR 則に従わないことが指摘されていたが、これは発破そのものをまとめて解析してしまっているためであり、発破そのものを除けば、採掘域直近で起こる AE のサイズ分布は GR 則に従うことが分かった。我々の AE 観測網の記録からは $M_w -3.7$ から 0 の範囲で、一方、解析領域・期間を広げた、鉱山がルーチン的に運用している地震観測網データ (ほとんどは stope cluster に属する地震であると思われる) の解析からは $M_w -1.2$ から 1 の範囲で $b=1.3$ の GR 則に従う分布が確認された。採掘前線直近で起こるイベントは、 $M_w -3.7$ から 1 の範囲で $b=1.3$ の単一の GR 則に従うサイズ分布を持つと考えられる。また、planar cluster の AE については、クラスタ毎に異なる b 値を持つものの、全てのクラスタにおいて GR 則 (あるいはベキ乗則) に従うサイズ分布を示す事が分かった (課題 2402)。

Stope cluster の AE や planar cluster の AE に対して見られる、GR 則が成り立つ下限マグニチュード

Mc が、観測網の検知限界を反映する見かけ上のものなのか、それ以外の物理的意味をもつのかを調べるため、観測網からの距離が異なる複数のデータセットに対して、Maximum Curvature 法 (Wiemer and Wyss, 2000; Woessner and Wiemer, 2005) を用いて Mc を求め、Mc の観測網からの距離依存性を調べた (図 1)。解析は、stope cluster の AE を空間的に 5 つに分割したものと、平面状 AE 分布を示すクラスタ 7 つに対して行った。Mc は観測網の中心からの距離に対して単調に増加しており、また、どちらのタイプのクラスタから示唆される Mc も同じ直線に乗っている。したがって、例えば Aki (1987) が提案したような地震のスケーリングの破れに対応するようなものではなく、単に距離減衰による観測網の検知限界に対応することが示唆された。これらのうち、最も小さいもので Mw -3.9 まで GR 則が成立することが確認されている。

昨年度の実施計画の通り、Moab Khotsong 鉱山における強震加速度計 (3a25k) の埋設と、ケーブリングの大半が完了し、データ収録機器の設置・調整を行っている。また、Cooke4 鉱山 (旧称 Ezulwini 鉱山) と Driefontein に設置した大容量高周波の応力・加速度ゾンデについては、データの収録を継続している。

- (8) 平成 24 年度の成果に関連の深いもので、平成 24 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :
- Naoi, M., M. Nakatani, J. Philipp, S. Horiuchi, K. Otsuki, T. Kgarume, G. Morema, S. Khambule, T. Masakale, K. Miyakawa, A. Watanabe, H. Moriya, O. Murakami, Y. Yabe, H. Kawakatai, N. Yoshimitsu, T. Ward, and H. Ogasawara, 2012, Magnitude-frequency distributions of AEs associated with the mining front and pre-existing faults-cases from SATREPS array operating in a South African gold mine, 36, ECGS Workshop 2012, October 3-5, 2012, Alvisse Parc Hotel, Luxembourg.
- 直井誠・中谷正生・Joachim Philipp・堀内茂木・大槻憲四郎・Thabang Kgarume・Gilbert Morema・Sifiso Khambule・Thabang Masakale・宮川幸治・渡邊篤志・森谷祐一・村上理・矢部康男・川方裕則・吉光奈奈・Tony Ward・Ray Durrheim・小笠原宏, 2012, 南アフリカ金鉱山における微小破壊 ($-3.7 \leq Mw \leq 1.3$) の規模別頻度分布と採掘発破前後の b 値の安定性, 日本地震学会 2012 年秋季大会講演予稿集, P1-50, 2012 年 10 月 17 日, 函館市民会館.

- (9) 平成 25 年度実施計画の概要 :

平成 25 年度も引き続き、Cooke4 鉱山 (旧称 Ezulwini 鉱山) と Driefontein 鉱山における観測維持に努める。Moab Khotsong 鉱山においては、データ収録を開始する。大きな地震が至近距離で起こった場合にはその解析を行う。また、fmax の解析も試みる予定である。

- (10) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

東京大学地震研究所 三宅弘恵・中谷正生・五十嵐俊博
他機関との共同研究の有無 : 有
東京大学大学院理学系研究科 井出哲
立命館大学総合理工学研究機構 川方裕則・小笠原宏
東北大学大学院理学研究科 矢部康男・大槻憲四郎
京都大学防災研究所 飯尾能久

- (11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東京大学地震研究所地震・火山噴火予知協議会
電話 : 03-5841-5712
e-mail : yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp
URL : <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/>

- (12) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名：三宅弘恵

所属：東京大学地震研究所

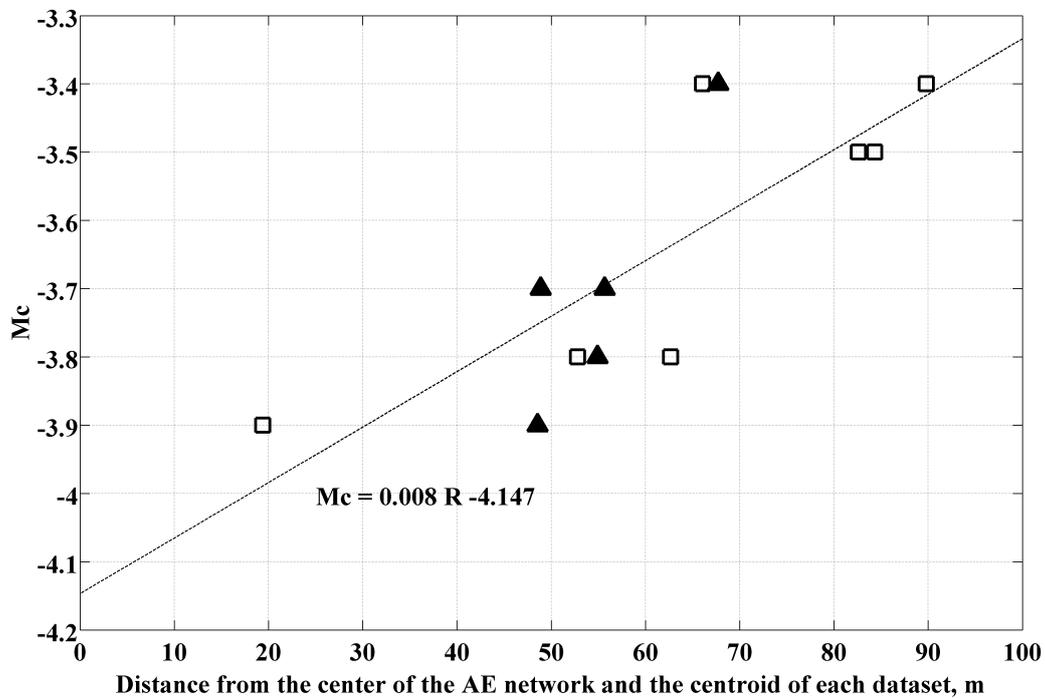


図1 . Mc の AE 観測網からの距離依存性 .

黒三角は stope cluster に対して評価した Mc を , 白抜きの方角は planar cluster に対する結果を示す .