

(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、 $M3$ クラスのラプ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 級のラプ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わかるだろう。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

頭での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、同じ場所でお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おこない、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、および多項目の観測をおこなうための観測網の構築準備の期間と位置づける。現在観測が実施されているサイトの維持につとめるとともに、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およ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、研究課題のとりまとめを行う。

(7) 平成23年度成果の概要：

強震動の生成過程を理解するため、Driefontein 金鉱山の深さ約 3.2km において、9 本（総延長約 300m）の掘削を行い、坑道を横切る Leeupoort 断層の直近（断層から 1 m 程度）に 3 成分強震計 4 台を埋設した（図 1）。断層面の位置及び姿勢は、坑道壁や掘削コア、掘削孔壁の観察から推定した。強震計は、0.5Hz – 25kHz の帯域でフラットな特性を持ち、最大 500g の振幅を観測することができる。観測波形はトリガー方式で現地収録を行い、現地雇用技術者が定期的に回収する。インターネット経由で日本から観測装置の状態を監視することができ、トリガーパラメーターの設定も可能である。また、動摩擦の絶対レベルを知るために課題 1427 においておこなっている精密温度観測のセンサは、強震計と同じ掘削孔に設置した。

昨年度観測を開始した Ezulwini 鉱山では、予定していた容量 50g と 10g の加速度計 6 台の埋設が終了し、本格的な観測がスタートしている。同じシステムには 28 台の AE センサを接続しており、これと連携して震源決定・Mw 推定が可能となり、地震カタログを作成できる体制が整った（課題 2402）。1 週間分程度、約 4 万イベントのカタログからは、本課題最大の目的である、観測点から 1 断層長以内でおこったような地震は見つかっていないが、ボーリング・コア調査で同定した断層面上での AE 活動が確認されており、その中には我々が埋設した加速度計から 10m 以内で発生したものも存在する。観測の継続・カタログ作成の進行につれて、M0~M2 級地震の破壊面から 10m 以内での地震波動記録が得られと期待される。

また、本年度は、破壊物性のランダム不均質の特徴スケール、あるいは、断層滑り時に面上の摩擦係数が動摩擦レベルまで落ちるのにかかる距離（すべり弱化解距離）を反映することが理論的に期待される source-controlled fmax の解析も試みた。25 kHz 加速度計を用い、センサから 70m 以内に震源が

求まっているおよそ百イベントについてスペクトルを観察し、また、解析条件の良い数イベントペアに対してスペクトル比法による $f_{\max}$ 解析を行ったが、媒質の減衰と明確に区別できる高周波成分のオメガ 2 乗モデルからの不足は確認できなかった（図 2）。

なお、本研究は計画予定通り進んだ。

（8）平成 23 年度の成果に関連の深いもので、平成 23 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

Naoi, M., M. Nakatani, Y. Yabe, G. Kwiatak, T. Igarashi, and K. Plenkens, 2011, Twenty thousand aftershocks of a very small (M2) earthquake and their relation to the mainshock rupture and geological structures, Bull. Seism. Soc. Am., 101(5), 2399-2407, doi: 10.1785/0120100346.

小笠原宏, R. Durrheim, 中谷正生, 矢部康男, A Milev, A Cichowicz, 川方裕則, 村上 理, 直井誠, 森谷祐一, 佐藤隆司, SATREPS 研究グループ, 2011, 南アフリカ金鉱山半制御地震発生実験（2010 年）, 鉱山での地震被害低減のための観測研究—日本と南アフリカの共同研究, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿集, SSS029-07, 2011 年 5 月 23 日, 千葉.

Ogasawara, H., R. Durrheim, M. Nakatani, Y. Yabe, A. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, O. Murakami, M. Naoi, H. Moriya, T. Satoh, SATREPS research group et al, 2011, Observational studies of earthquake preparation and generation to mitigate seismic risks in mines, IUGG, 3 July 2011, IUGG, Melbourne, Australia.

Durrheim, R.J., H. Ogasawara, M. Nakatani, A. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, Y. Yabe, O. Murakami, M. Naoi, H. Moriya, and T. Satoh, 2011, Observational Studies of Earthquake Preparation and Generation to Mitigate Seismic Risks in Mines, Abstracts S41D-058 presented at 2011 Fall Meeting, AGU, December 2011, San Francisco.

（9）平成 24 年度実施計画の概要：

平成 24 年度は、Ezulwini 鉱山と Driefontein 鉱山の on-fault network 観測維持に努める。また、現在課題 2402 で AE ネットワークを構築中の Moab Khotson 鉱山においても、数台の強震加速度計を設置する。大きな地震が至近距離でおこった場合には、その解析を行うが、すでに多数発生している小さな地震の波形についても、より高い周波数まで感度をもつ AE センサの記録も用いて $f_{\max}$ 等の解析をさらに進める。

（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

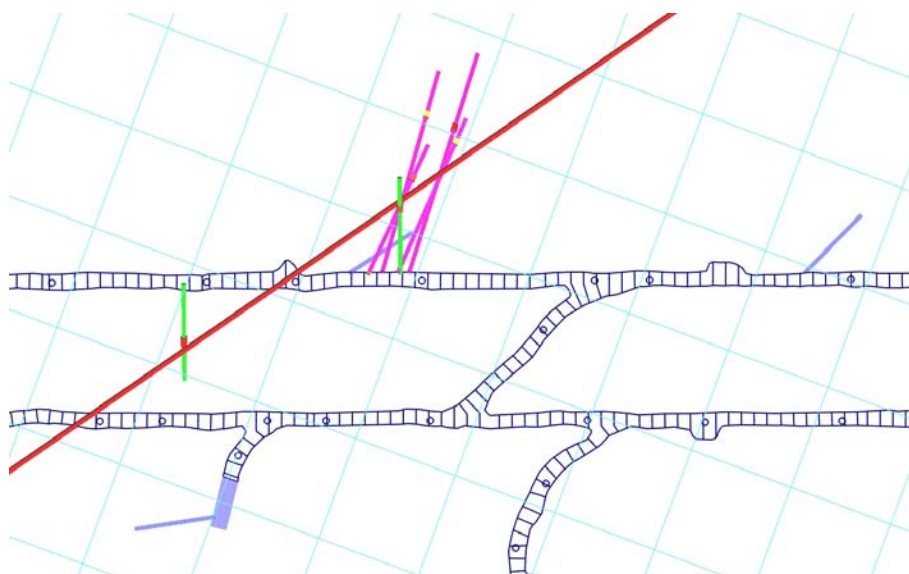


図1. Driefontein 金鉱山の深さ約 3.2km にある坑道の一部とその深さにおける Leeupoort 断層のトレース（赤線）。緑線は断層の位置を推定するためのパイロット掘削孔，紫線および青線はそれぞれ，強震計および石井式ひずみ計を埋設した掘削孔。掘削孔に付した赤あるいは黄色の点は，掘削孔の観察から推定された断層の位置。水色のメッシュの間隔は 25m。

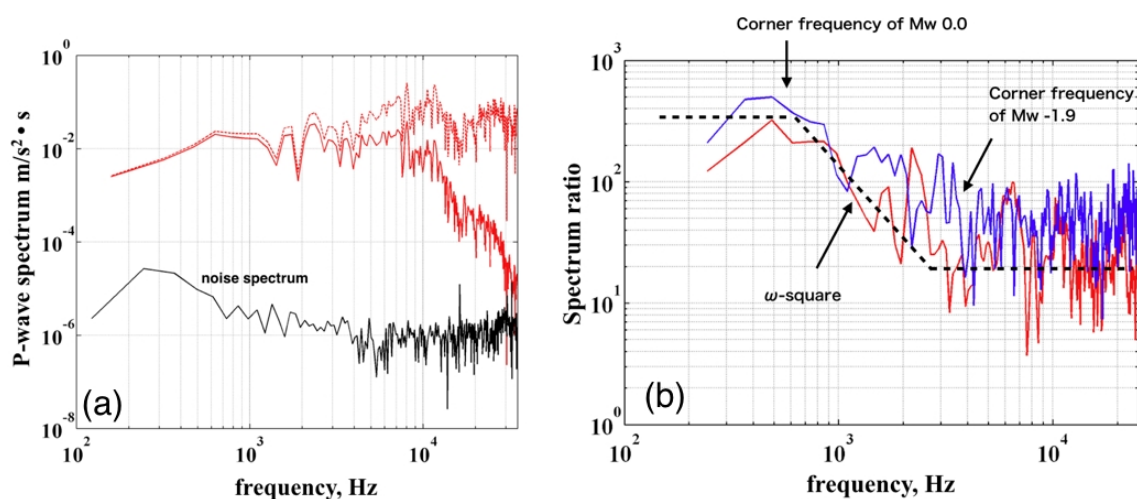


図2. fmax の検討。

(a) 観測点から 65m であった Mw0.0 の地震の P 波加速度スペクトル（実線）と $Q=150$ の減衰を仮定して補正したもの（点線）。補正前のスペクトルでは 12kHz 以上の高周波域で振幅が低下しているが，減衰の効果で説明可能である。なお， $Q = 150$ の値は同サイトで行っている能動的音波透過試験（課題 2909）による推定値と調和的である。(b) このイベントとそのすぐ近く（イベント間距離 2.9m）でおこった Mw-1.9 の地震とのスペクトル比。赤が P 波，青が S 波の結果。コーナー周波数が異なる 2 つのオメガ 2 乗モデルの比として説明でき，イベントサイズに依存する fmax の存在は示唆されない。