

(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22年度成果の概要：

本年度は、on-fault 地震観測網の構築を行った。まず、昨年度に予備調査をした Ezulwini 鉱山内のターゲット断層に対して、鉱山内の複数のトンネルや採掘空洞などでのサンプル採取を含む露頭調査をより詳細に行った。また、われわれの総合観測網のために30本ものボーリングを行い、コア試料(図1)とボアホールカメラの映像(図2)から、露頭で観察した断層物質と同様のものをさがした。その結果、連続性、平面性の高い(すなわち大きな地震をおこしやすい)断層の位置をcm精度で完全に捉えることができた。われわれが決めた断層面をそのまま北方に5-10km延長すると、隣の鉱山での広大な過去の採掘域をつらぬく断層にぴったり一致する。一方、われわれのサイトの南端あたりでターゲット断層がリンク断層を生じてステップオーバーしていることも明らかになった(図3)。地震破壊の開始や停止は、このような場所でおこる例が多いので、この点からも、on-fault 地震観測網を設置する価値が特に高いサイトである。

断層による地層のずれ量からみて、ターゲット断層は、最低でも変位数百m、延長数十kmであり、過去にM7以上の地震を繰り返しておこしていたメジャーなものである。しかも、これといった損傷の認められない珪岩が厚さ数十センチ以下の断層物質で隔てられた、非常にくっきりとした構造をもつ断層であるので、採掘応力で誘発される地震も、この断層物質の部分ですべりを起す蓋然性が高く、断層破壊を数m以内の距離で観測するという、本課題のねらいに非常に適したものである。実際、断層物質の変質後に、この断層が再すべりをした歴史をもつことが、露頭調査で多数確認された条痕からも示唆された。

断層がはっきりしていることに加えて、われわれのサイトは直径400mのシャフトピラーの採掘という高い差応力を被る条件下にあるので、M2クラスの地震がターゲット断層でおこる可能性は非常

に高く、断層面極近傍に強震計を複数台設置することを第一優先事項として、観測網の構築を進めた。理論的には、断層からの距離 1m 程度では破壊フロントの通過時の数 ms のあいだ数百 g におよぶ加速度が生じることが予想されているので、大容量 (500g)、高速応答 (25kHz) の 3 成分加速度計ゾンデを新たに開発製作した (図 3)。ゾンデ設計の際には、ゾンデの形状に由来する感度や周波数特性の異方性を避けるため、縦横比を 1 に近づけるよう配慮した。巨大な岩石試料に埋めて、打撃を加え、素直な応答をすることを確かめた上で、ターゲット断層沿いの 3 点、断層からの距離が数 m のところに埋設した。観測を開始したばかりで、12 月の 1 日分のデータしか解析していないが、震源距離 60m 程度でおこった地震によると思われる、振幅 0.2g 程度の波形が記録されていた (図 4)。この超強震計のネットワークは 3 点しかない上に、断層沿い 60m の範囲にしか分布していないため、ターゲットとする M2 級の地震の破壊の全体を見ることができない。そこで、断層から数 m-数十 m 離れた位置に、より安価な、容量 50g と 10g の加速度計 6 台を追加埋設する作業を現在行っており、埋設済みのものは観測を開始している。図 5 に、これら計 9 台の加速度計の位置と、断層面の関係を示す。波形の記録周波数は、いずれも 500kHz である。高周波までの観測を、減衰の影響を強く受けない距離範囲で発生する、規模の異なる複数の地震に対して行うことは、地震破壊の複雑さのスケールリング構造に対して新たな実証的拘束を与えると期待される。

- (8) 平成 22 年度の成果に関連の深いもので、平成 22 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :
- Durrheim, R. J., A. M. Milev, H. Ogasawara, H. Kawakata, M. Nakatani, Y. Yabe, A. Cichowicz, H. Moriya, and the SATREPS research group, 2010, The proceedings of the fifth International Seminar on Deep and High Stress Mining, 6-8 October, Santiago, Chile, Australian Centre for Geomechanics, 215-226.
- Milev, A. M., Y. Yabe, M. Naoi, M. Nakatani, R. J. Durrheim, H. Ogasawara, and C. H. Scholz, 2010, Coseismic and aseismic deformations of the rock mass around deep level mining in South Africa - Joint South African and Japanese study, Abstracts S34B-05 presented at 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, California, 13-17 Dec. AGU Fall Meeting.
- 小笠原宏・R. Durrheim・中谷正生・矢部康男・A. Milev・A. Cichowicz・川方裕則・森谷祐一・佐藤隆司・S. Murphy・A. Ward・G. Morema・M. Kataka・R. Vermeulen・G. van Aswegen・Research Group of SATREPS, 2010, 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 2010 年大会予稿集, SSS020-13.
- Watanabe, T., Y. Yabe, H. Moriya, M. Nakatani, H. Kawakata, and H. Ogasawara, 2010, Development of a measurement system of dynamic stress change associated with a 100-m scale faulting in a South African deep gold mine, G-COE Symposium 2010 Dynamic Earth and Heterogeneous Structure.
- 渡辺貴善, 2010, 動的応力変化計の開発 - 鉱山地震のすべり弱化過程の解明に向けて -, 東北大学大学院理学研究科修士論文.

(9) 平成 23 年度実施計画の概要 :

平成 23 年度は、現在の on-fault network の完成と、観測維持に努める。大きな地震が至近距離でおこった場合には、もちろんその解析を行うが、すでに多数発生している小さな地震の波形についても、震源距離の特に近いものを選んで高周波至近距離観測の利点をいかして、理論的に Dc の指標とされている fmax の解析を試みる。また、大きな地震を観測するチャンスを増やすため、現在試掘の段取りをしている他の鉱山にも、500g 超強震計を断層至近距離に設置する予定である。

(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/



図1．Ezulwini 鉱山のわれわれの観測孔のコア
断層の位置がはっきりわかる．

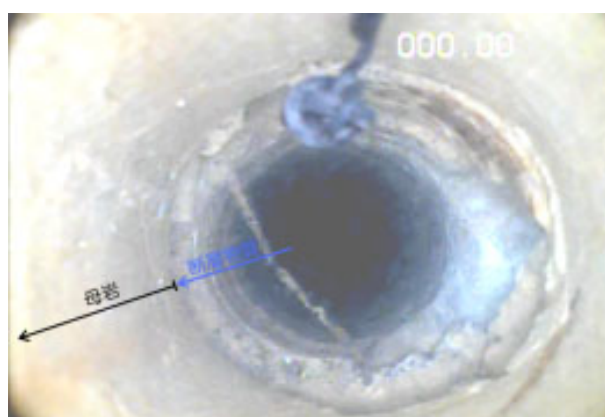


図2．Ezulwini 鉱山のわれわれの観測孔のボアホールカメラ映像
断層物質と母岩の境界がはっきりみえる．孔径は 60mm.

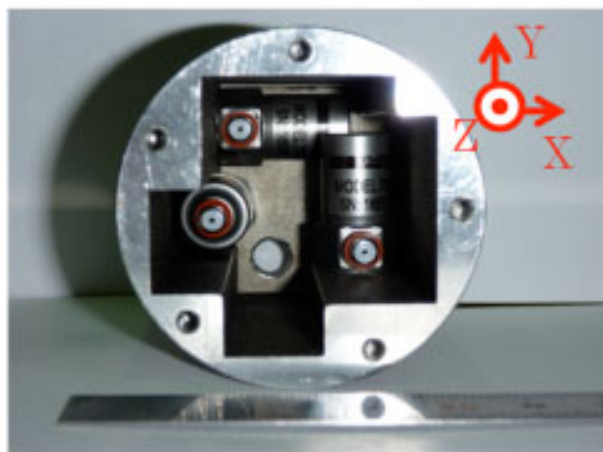


図3．新規開発した 25kHz, 500g の超強震計の内部構造
長さを抑えつつ剛性を高める設計方針がうかがわれている．

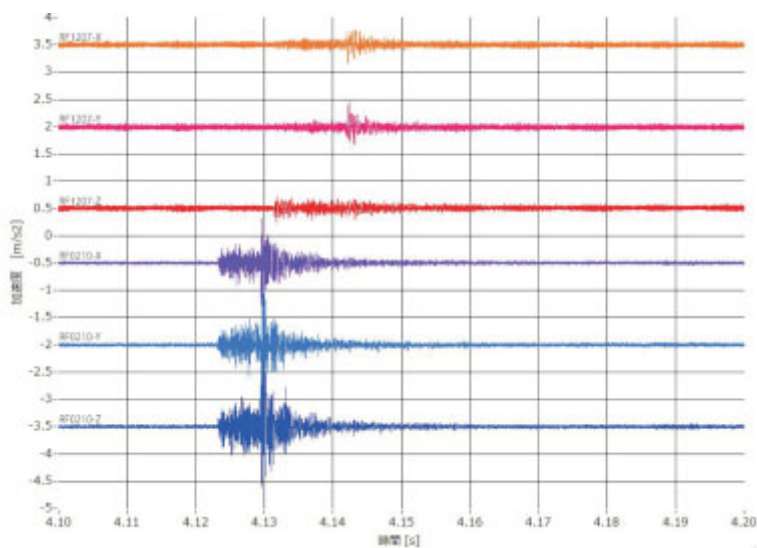


図4．新規開発して Ezulwini 鉱山に埋設した 25kHz, 500g の超強震計による観測波形例
震源は決まっていないが，S-P 時間から，震源距離は約 60m と推定される．

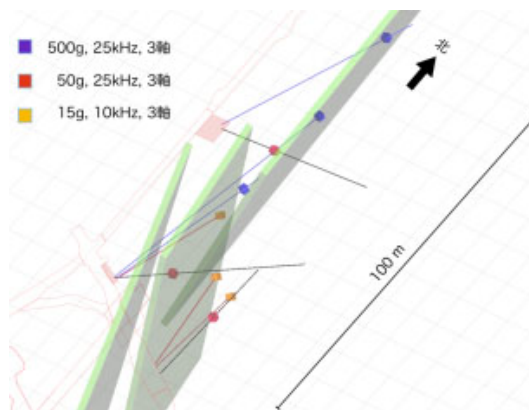


図5．Ezulwini 鉱山の on-fault 地震観測網と断層（緑色の板）の位置関係
断層面の傾斜にほぼそって見下ろした．