

(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応力パラメタの先行変化の発生機構の解明

(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

(3-1) 地震発生先行過程

イ. 先行現象の発生機構の解明

(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

(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) 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：

地震発生を司る根幹を成すパラメタとして、応力とひずみが挙げられる。種々の応力に関する直接的な測定手法が提案され高度化されつつあるが、日本の内陸やその周辺地域においては震源域近傍、すなわち地殻深部の応力場の直接計測は非常に困難である。そこで、応力逆解析パラメタや応力降下量、Energy Index などの地震波形から推定される応力パラメタを用いて、震源近傍の応力状態を推定する手法が提案されている。対象とする震源領域でこれらの応力パラメタを推定することで、事後的にはあるが、先行現象が示唆された例はある。しかしながら、これら応力パラメタと絶対応力の比較は上述の理由により困難である。

本課題で研究を遂行するフィールドである南アフリカ金鉱山(以下、南ア金鉱山)では、地震は主として、採掘による応力擾乱が原因で発生している。そのため、このフィールドには、上記の応力パラメタの変化の原因を解明する上で、3つの大きな利点がある。

1. 採掘は計画に基づいて行われており、また、鉱山内の坑道など、応力場の不均質性を生み出す構造はすべて既知であるため、応力モデリングを行うことができる。鉱山でも採掘前や採掘前線近傍においては、応力モデリングが行われている。適切に安全性を評価し、採掘計画を検討することによって、甚大な被害をもたらす大規模な地震の発生を抑制している。

2. 応力と密接に関係するひずみの連続観測が、関連課題で計画されている。南ア金鉱山では、採掘が行われている地下約3kmにひずみ計を埋設できるため、地震発生深度でひずみの直接観測が可能である。複数点観測を実施することにより、ひずみ場の時空間分布の推定が可能となる。

3. 関連課題で、同一サイトにおいて断層から数メートル以内での強震計アレイの展開が計画されている。このアレイで得られるデータを用いて、応力パラメタ推定の肝となる微小地震の震源情報を高い精度で推定することができる。

そこで本課題では、南ア金鉱山における微小地震観測網の維持・構築を進めるとともに、微小地震の震源ならびにメカニズム解・応力逆解析パラメタ・Energy Index 等の推定をおこない、応力パラメタの時空間分布を明らかにする。その後、応力モデリングや直接観測結果との比較を通して、応力パラメタの感度や有効性などについて検討することを5か年の到達目標とする。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

平成21年度は、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整理を行う。現行のサイトでは、地震発生が予測される断層のすぐそばに地震計が埋設されており、既存の鉱山の地震計とともに観測ネットワークを形成している。地震記録はすでに取得されているが、対象とした断層及びその周辺で発生した地震記録がどの程度存在するかなど、データの確認が行われていない。対象とする断層及びその周辺の地震活動とそれら地震に対応する波形記録の有無などを調べるなど、解析の準備を進める。並行して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進める。

平成22年度は、既存のデータ解析を進めるとともに、現行観測サイトの維持、新規観測サイトの構築を開始する。

平成23年度は、既存のデータ解析を取りまとめるとともに、現行観測サイトの維持、新規観測サイトの構築を完了する。

平成24年度は、新規観測データに関し、対象とする断層及びその周辺の地震活動とそれら地震に対応する波形記録の有無などを調べるなど、解析の準備を進める。また観測サイトの維持をおこなう。

平成25年度は、データ解析を進めるとともに、観測サイトの維持を行う。また、研究成果の取りまとめを行う。

(7) 平成24年度成果の概要：

昨年度は、Cooke4 (旧名 Ezulwini) 金鉱山に展開した AE 観測網の記録を用い、加速度計記録に対する波形合わせと、AE センサの波形記録から読み取った P 波初動極性を組み合わせて、比較的大きい AE のメカニズム解推定が可能である事を確かめたが、本年度は、AE センサの初動記録のみを用いて、平面状クラスタ上で起こる多くのイベントの初動極性を一つの震源球上に投影し、断層上の滑りを示すメカニズム解が求まるかを確認した。仮に、面状クラスタのあちこちで起こる個々の AE が、すべて同じ向きのメカニズム解を持っていたとすると、そのメカニズムから期待される押し引き分布の象限わけに対応したものが、あちこちで起こる多数の AE の押し引き分布から浮かびあがるはずである。平面状分布を示す AE クラスタのうち、最もカバレッジのよい Zebra 断層に対応する AE クラスタで発生した Mw -4 から -3.4 の AE 50 個を用いた結果では、同断層上で起こる正断層滑りと調和的なメカニズム解に対応する押引分布が得られ、これらの AE は Zebra 断層の一部の正断層滑りである可能性が強いということになる。また、他の4つの平面状 AE クラスタに関しては、震源球上のデータの分布範囲が狭いので強いことは言えないが、各クラスタの示す Dip, Strike の面上の正断層滑りと矛盾しない押引分布が得られた (図1)。課題 2402 では、これらの平面状クラスタが、対応する岩盤内の巨視的弱面 (断層やジョイント) をもち、自然地震や採掘前線周辺の雲状の AE 集団とはちがって、非常に微小な破壊の頻度が極端に卓越した $b \gg 1$ の GR 則に従う等のが示されている。これらを考えあわせると、平面クラスタに強く集中した AE 活動は、断層やジョイントといった巨視的破断面の粗さに起因する微細な組み合わせの不安定剪断であり、個々の断層面内部の情報を反映していると考えられる。

Cooke4 金鉱山において観察された平面状分布を示す AE クラスタのうち、2011 年7月から11月にかけて、クラスタと採掘前線の距離が 10m 程度まで近づいたクラスタ上で起こる AE の応力降下量に時間変化が見られるかを検討する解析に着手した。このクラスタ周囲では、顕著な背景応力の時間変

化があると予測されるので、応力と応力パラメタの関係の検証が可能である。現在、震源距離の近いイベント間でのスペクトル比法によって応力降下量が求まることが確認できており、今後より詳細な検討を行なっていく予定である。

Cooke4 金鉱山で使用中、また現在観測網展開中の Moab Khotson 鉱山で使用予定の観測システムは、微小破壊の観測に特化したものであるために、大きな地震で支配的になる低周波帯の強い信号が入力されると、出力信号に強い非線形性がのることが確認された。電気回路の再設計・作成・交換作業を行い、システム全体をより低周波の信号にも対応するよう調整したところ、周期 10 秒程度の強震波形まで対応できるようになった。

(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. Nakatan i, 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.

(9) 平成 25 年度実施計画の概要：

平成 24 年度には、平面状分布を示す AE クラスタ内で起こる AE のうち、比較的大きいものは、弱面の正断層滑りと調和的なメカニズムを持つ事を示唆する結果が得られた。来年とはより小さなイベントまで用いて同様の解析を行い、断層の不均質構造を反映した応力のスケール依存性が見られるかどうかについて検討を行う。また、採掘域の進行による応力場の変化と応力降下量の時間変化について報告できる見込みである。平面状クラスタと雲状クラスタの間での比較も試みる。これらについて結果を論文としてまとめる予定である。

(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 加藤愛太郎・中谷正生・五十嵐俊博

他機関との共同研究の有無：有

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推進センター

電話：03-5841-5712

e-mail：yotik@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/index-j.html

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：加藤愛太郎

所属：東京大学地震研究所

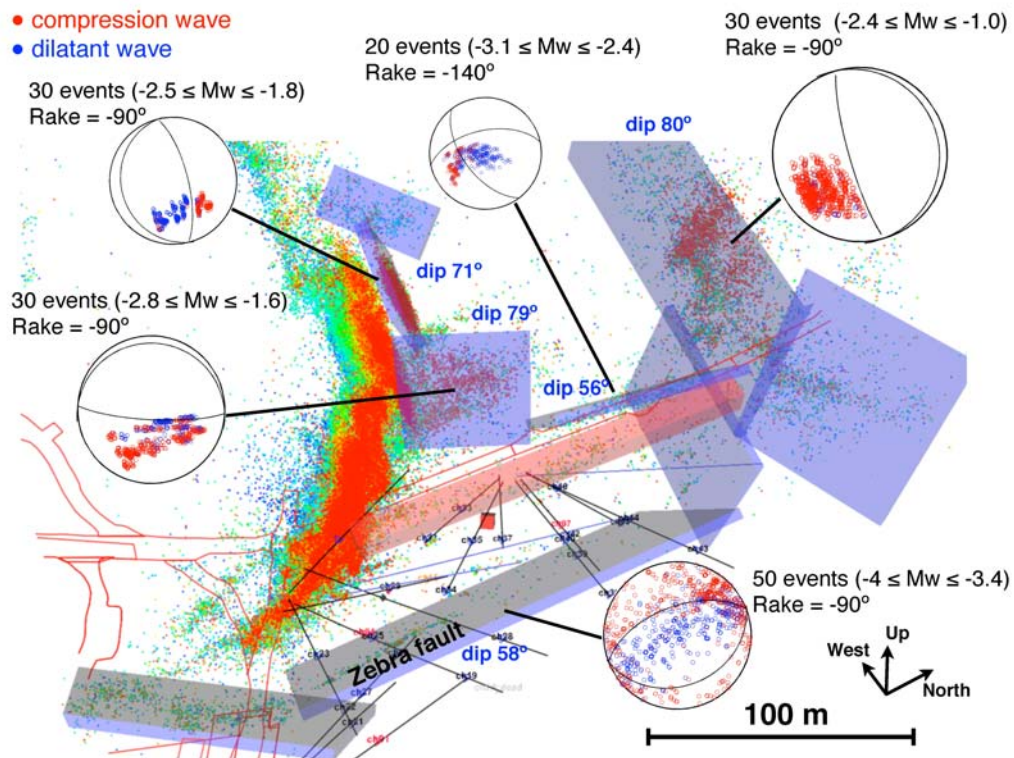


図1．平面状 AE クラスタを構成する複数のイベントの初動極性を一つの震源球上にプロットした結果。
 節線は、クラスタを近似する平面内において正断層が卓越した滑りが起った場合に期待されるものを引いてある．