

(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、南アフリカ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) 計画期間中(平成21年度～25年度)の成果の概要：

震源近傍の応力状態を推定するために、M2級以上の誘発地震が発生する南アフリカ金鉱山における微小地震観測網の維持・構築ならびに、観測された微小地震の解析を行った。

ムボネン鉱山地下3.3 kmでは、厚さ約20 mで垂直に貫入しているダイク周辺において、加速度計7台(うち4台は3成分)を埋設し、48 kS/s 集録という他に例のない高周波数帯域までをカバーした観測を行った。その結果、至近距離(< 150 m)で発生した $-3 < M < 0$ の極微小地震がとらえられた。そこで、収録された波形記録を用いて、地震モーメント、コーナー周波数などの震源パラメタの推定を試みた。埋設されたボアホール型加速度計には、25 kHzまで応答がフラットなエレメントが組み込まれているが、躯体の形状の影響などにより、3成分加速度計としては孔軸方向の成分の応答が他の2成分と異なることが判明した。つまりエレメントの応答特性が分かっているにもかかわらず、埋設後の加速度計の応答が正確には推定できないことが明らかになったため、直達S波のスペクトルから直接的にコーナー周波数を推定することは困難であった。したがって、とらえられた極微小地震について、直達S波のスペクトル比法とコーダ波スペクトル比法といったスペクトル比を利用する推定手法を適用し、コーナー周波数の推定を行った。その結果、これらの地震は、地震モーメントがコーナー周波数の3乗に比例する応力降下量一定の関係を満たし、また多くの地震で応力降下量がほぼ100 MPaであるという結果が得られた。コーダ波スペクトル比法は、震源ペアが同一視できるほどには近くなくても適用可能であり、破壊伝播の効果を平均化できるため、多くの地震について推定することができるうえ、観測点ごとのコーナー周波数のばらつきが抑えられ、標準偏差の小さい値として推定できることもわかった。ムボネン鉱山の観測網は、地震活動が低調になったため、すでに閉鎖した。

また上述の通り、ボアホール加速度計の応答に課題が見つかったため、躯体形状を改良するとともに、一部の加速度計の応答周波数帯域の上限を10 kHzに下げる等の変更を加え、加速度計を再設計し

た．再設計された加速度計は，イズルウィニ鉱山などの観測網で使用された．

イズルウィニ鉱山においては，AE センサと加速度計を併用した観測網を展開した．本観測網はセンサの展開が立体的で，広範囲（約 100 m）にわたっており，また，近傍での地震活動度が高い．AE センサの出力は振動方向が特定されない 1 成分であり，応答特性もフラットではないが，AE センサの P 波初動応答特性を隣接している加速度計の P 波初動応答と比較することで校正することにより，AE 波形記録から読み取った P 波初動極性を AE の震源メカニズム解析に使えるようになった．平面状の分布を示すいくつかの AE クラスタ（課題 2402）に対して，各クラスタ内の AE 数十個に対して読み取った P 波初動極性を一つの震源球解にプロットすると，面上の滑りと調和的な震源球解が得られることがわかった．このことは，面状クラスタの多くのイベントが，面上の滑りイベントであることを示唆する．また，AE 記録から読み取った P 波初動極性の分布と，加速度計で得られた波形に対する理論波形のモデリングとを組み合わせることで，個々のイベントのメカニズム解を求めることができることもわかった．プロジェクト期間中に多数のイベントに対してメカニズム推定を行い，応力場推定を行うことはできなかったため，今後の課題としたい．

平成 25 年度は，イズルウィニ鉱山における AE 観測で得られた，採掘前線から 10-20 m 前方で新規に現れた平面状 AE クラスタの AE 活動の記録について，2011 年 7 月から 10 月の間，約 3 ヶ月の時間発展を調べた．採掘が進行しクラスタ周囲の差応力が上昇するにつれてこのクラスタの活動域が徐々に広がり，初期には 5 m 程度の広がりしかなかった活動域が最終的には差し渡し 20 m まで拡大した（図 1）．クラスタ内で起こるイベントの Mw は徐々に大きくなる傾向にあり，b 値は時間とともに大きく減少した（2.5 から 1.5；図 2）．採掘前線が近づいたことによる差応力の上昇と共に b 値が低下したということであり，室内岩石実験や自然地震の観察で指摘されている結果と調和的である．また，この平面状クラスタ内で，近接して発生した AE イベントの応力降下量の，コーダ波スペクトル比法を用いた推定を行った．上記 3 ヶ月間の初期には，概ね数 MPa の応力降下量だったが，後半には 10 MPa 程度の応力降下量を持つイベントも現れはじめていた．ただし，上述のように発生イベントの規模の変化もあるため，震源近傍の応力状態の推定には，さらなる検討が必要である．

（ 8 ）平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

Nakatani, M., Microfractures on natural faults stressed by mining (invited), The International Summer School on Earthquake Science "Diversity of Earthquakes" organized by the Earthquake Research Institute of the University of Tokyo and the Southern California Earthquake Center, 25 September 2013, Hakone, Japan.

R.J. Durrheim, H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, A.M. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, H. Moriya, M. Naoi, T. Kgarume, O Murakami and The Satreps Research Group (2013), Observational Studies In South African Mines To Mitigate Seismic Risks: A Mid-project Progress Report, Proceedings of SAGA 13th Biennial Conference, accepted.

Yabe, Y., M. Nakatani, M. Naoi, T. Iida, T. Satoh, R. Durrheim, G. Hofmann, D. Roberts, H. Yilmaz, G. Morema, and H. Ogasawara, 2013, Estimation of the stress state around the fault source of a Mw 2.2 earthquake in a deep gold mine in South Africa based on borehole breakout and core discing, Proc. 6th Int. Symp. on In-Situ Rock Stress, Sendai, 604-613.

（ 9 ）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

(10) 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

(11) 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

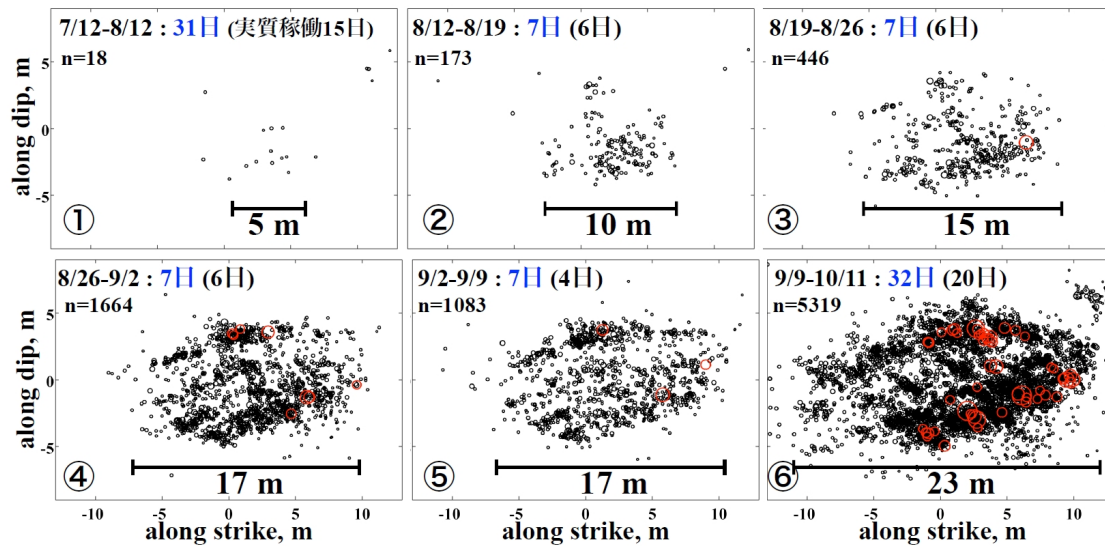


図 1 . 顕著な拡大を示した平面状 AE クラスターの震源分布の時間変化 .

図中の 1 - 6 の期間は図 2 下部に示した 1 - 6 に対応している .

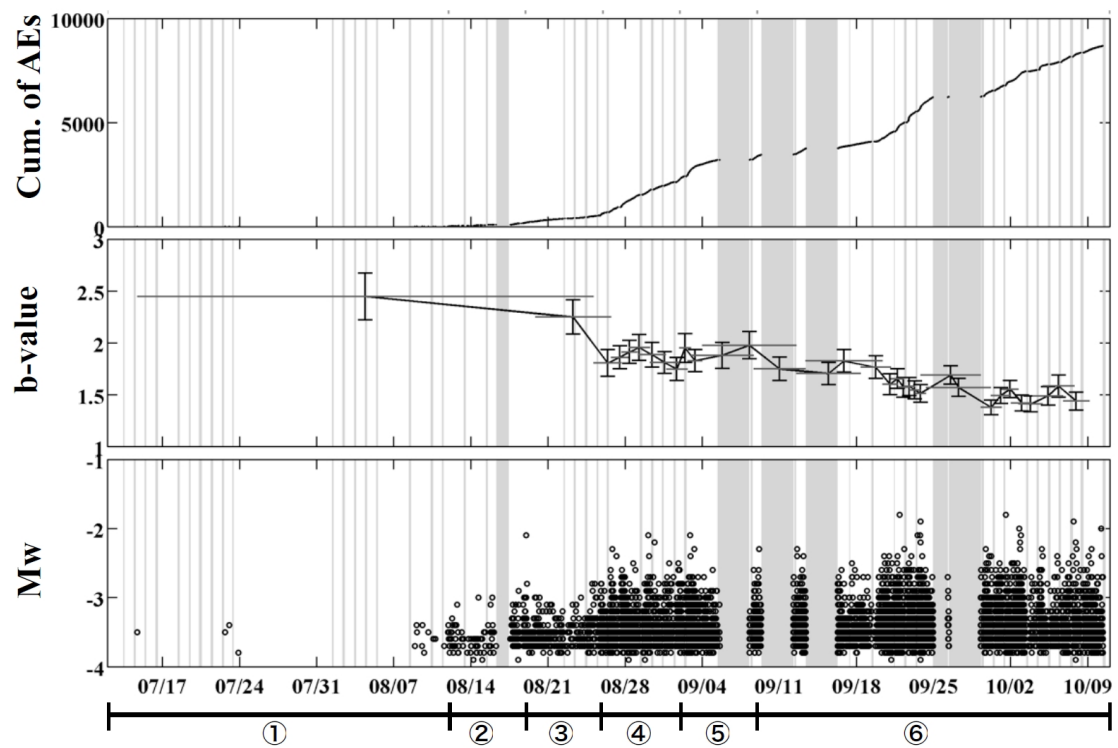


図2．図1に震源分布を記した AE クラスターの積算個数・b 値・Mw の推移．