

(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 に歪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、応力パラメー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・応力逆解析パラメータ・Energy Index 等の推定をおこない、応力パラメー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、応力パラメー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つとめるとともに、得られた波形データの整理をおこなう。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、データの確認がおこなわれていない。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と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おこなう。また、研究成果のとりまとめをおこなう。

(7) 平成23年度成果の概要：

21年度までに、採掘に伴う応力集中による地震発生が予測された南アフリカ Mponeng 金鉱山地下 3.3 km のダイク周辺において、25 kHz まで応答がフラットな加速度計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い、至近距離 (< 150 m) で発生した $-3 < M < 0$ の極微小地震の波形を収録した。これを用いて22年度に行ったコーダ波スペクトル比法によるコーナー周波数推定結果の安定性を確かめるため、直達S波による推定結果との比較検討をおこなった。その結果、コーダ波スペクトル比法では破壊伝播の効果を平均化できるため、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がわかった。また、大きな地震を含まない14日間に発生した地震を用いて、コーナー周波数と地震モーメントの関係を調べた結果、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(図1)。このように標準偏差が小さく応力降下量が安定して求められるということは、地震発生場の応力状態のモニタリングツールとして、従来よりも敏感に検知できる可能性を示唆している。なお、Mponeng 鉱山の観測網は、地震活動が低調であるため閉鎖した。

Ezulwini 鉱山における新規観測網の展開がほぼ完了した。また、Moab Khotsong 鉱山において加速度計の埋設を開始した。Ezulwini の観測網は、Mponeng に比べて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、地震活動が圧倒的に高いため、主応力軸の向きを推定するのに必要な地震メカニズム解が多くの地震に対して決定できることが期待できる。本年度は、Ezulwini 観測網の条件で地震メカニズム解を決定するための解析方法を検討した。まずネットワークに組み込まれている三軸加速度計6台を使った波形解析でメカニズム解の決定を試みた。ネットワーク内のイベントでは特に感度のよい3つのセンサでは、M-4級のイベントでも波形解析が可能なS/Nをもつデータが収

録できている．実際， $M_w = -3.3$ のイベントに対して，5 観測点の P 波，1 観測点の S 波を使った波形解析で，MT 解が求まることが確認できた．応力場の推定のためには，なるべく多くのメカニズム解を求める必要がある．より小さなイベントの解析や，解の拘束を向上させるための更なるデータとして，AE センサの P 波初動を使用できることを確認した．解析には隣接した AE センサと加速度計のペアを用い（センサ間隔 2 m - 10 m），センサ間隔に比べて十分に遠いイベントの初動極性を加速度計記録から読み取り，同じ波に対して AE センサ出力の極性を確認し（図 2）良好な再現性を確認した．結果，波形合わせの残差が小さい断層面解候補のなかで，押し引き分布とも調和的なものを見つけることができた（図 3）．

当初計画から一部前倒して進化した．

(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. Kwiatek, T. Igarashi, and K. Plenkers, 2011, Twenty thousand aftershocks of a very small (M_2) earthquake and their relation to the mainshock rupture and geological structures, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **101** (5), 2399-2407, doi: 10.1785/0120100346.

Kwiatek, G., K. Plenkers, G. Dresen, and JAGUARS Research Group, 2011, Source Parameters of Picoseismicity Recorded at Mponeng Deep Gold Mine, South Africa: Implications for Scaling Relations, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **101**(6), 2592-2608, doi: 10.1785/0120110094.

Wada, N., H. Kawakata, O. Murakami, I. Doi, N. Yoshimitsu, M. Nakatani, Y. Yabe, M. Naoi, K. Miyakawa, H. Miyake, S. Ide, T. Igarashi, G. Morema, E. Pinder, and H. Ogasawara, 2011, Scaling relationship between corner frequencies and seismic moments of ultra micro earthquakes estimated with coda-wave spectral ratio -the Mponeng mine in South Africa, Abstracts S41B-2190, 2011 Fall Meeting, AGU, 8 December 2011, San Francisco.

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, 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：

Ezulwini 鉱山の観測維持．Moab Khotsong 鉱山の観測開始．Ezulwini 鉱山のデータについての断層面解解析数を増やすと同時に応力パラメタの推定をはじめめる．

(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 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

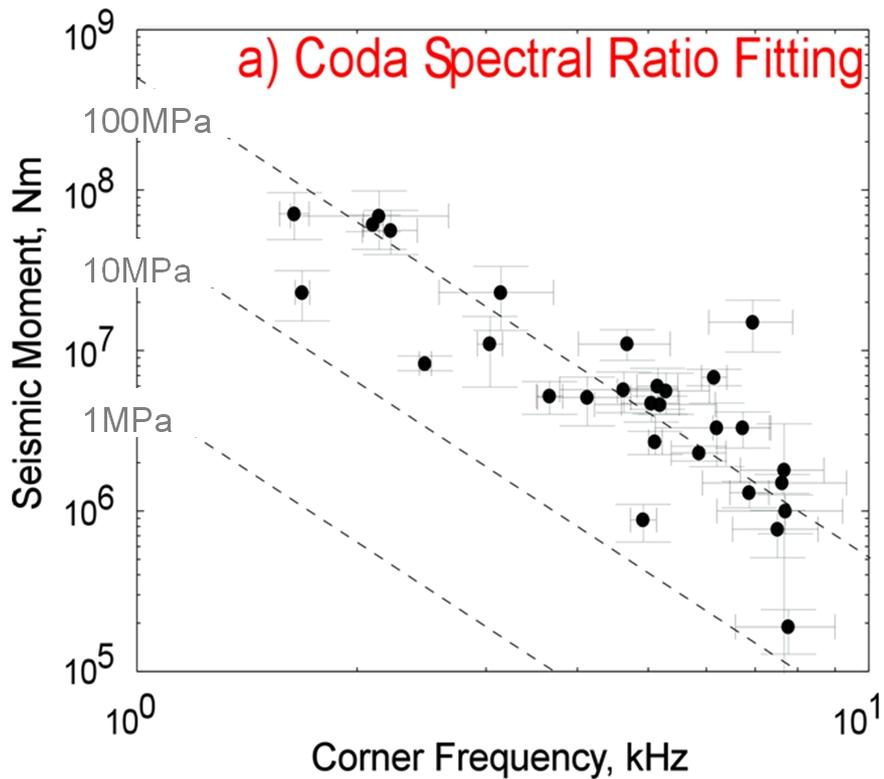


図 1 .
コーダ波スペクトル比法を用いて求めたコーナー周波数と地震モーメントの関係 . y 軸上の灰色で記した値は Brune(1970) による応力降下量を示している .

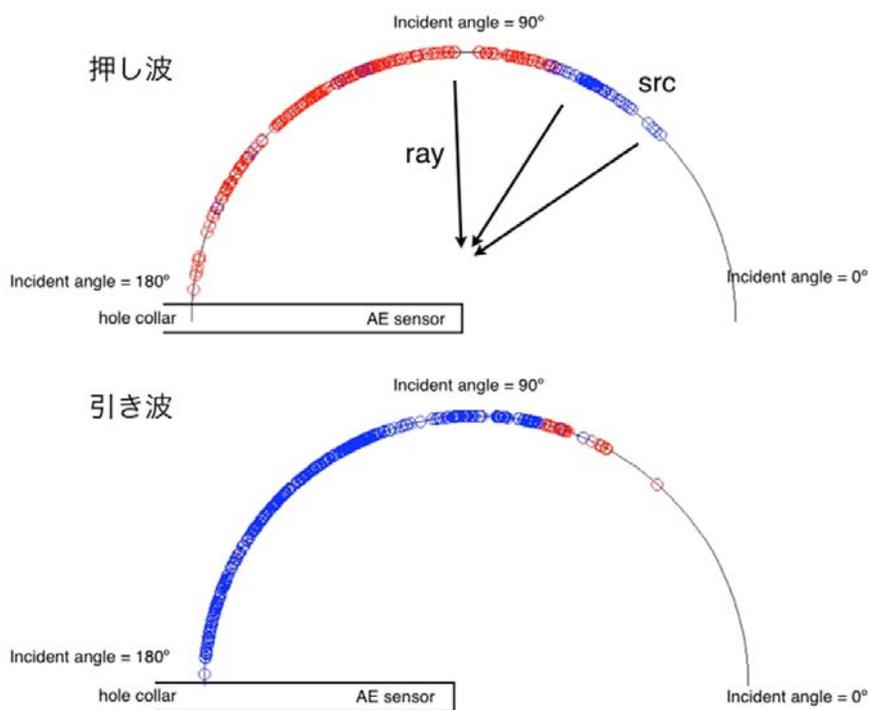


図 2 .

AE センサ出力の初動極性の確認．押し波が入射した場合 (上側の図), 前方から入射すれば AE センサ出力はマイナス (青丸), 後ろから入射すればプラス (赤丸) となり, 引き波 (下側の図) では逆になる．極性の反転は, センサ正面の入射角を 0 度, 真後ろを 180 度としたとき, 70-75 度でおこる．

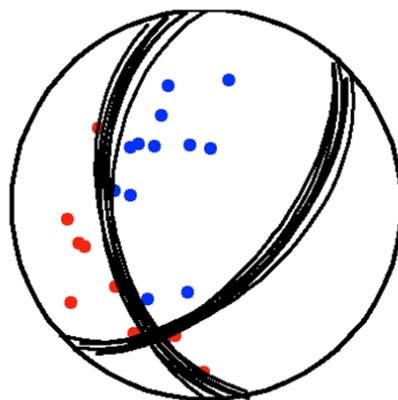


図 3 .

$M_w = -3.3$ イベントのメカニズム解: 押しが赤, 引きが青. 断層面解のラインは波形合わせの残差が小さく, かつ AE センサの押し引き分布がよく説明できるところ. 下半球投影.