

(1) 実施機関名：

立命館大学

(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微小破壊・微小地震観測

(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

(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

(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

(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

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

室内実験では、岩石の破壊に先行して、AE の発生が活発になることや、応力 - ひずみ関係の線形性が失われることが知られている。固着 - 滑り実験においても、高速滑りに先行して、局所的な滑りが生じる(破壊核形成)ことが知られている。自然地震では、地震発生に先行して、このような現象が観測されたことはない。破壊核形成に伴うと思われる現象が観測されていない理由の一つとして、自然地震の破壊核がきわめて小さいことが考えられる。一般に、通常の観測網と震源断層は数十 km 以上離れているので、破壊核がきわめて小さい場合、その形成に伴う異常を検出することは困難であろう。南アフリカ大深度金鉱山では、震源断層から数m以内にセンサーを配置して断層の変形や微小破壊を観測することも、条件次第では可能である。そのため、破壊核が本当に存在するならば、例えそれが小さくても検出できるはずである。そこで本課題では、南アフリカ大深度金鉱山における多項目観測と室内岩石破壊実験における高周波 AE 計測により、地震破壊現象の物理過程を明らかにし、そのスケールリング則の確立を目標とする。

a:南アフリカ金鉱山

岩石実験により蓄積された破壊力学の知見を自然地震の発生過程に適用することの妥当性を検証するために、岩石実験と自然地震の中間的規模 (cm 級 ~ 数百 m 級) の破壊現象である鉱山地震を南アフリカ大深度金鉱山において観測する。同一サイトにおいて、ひずみ計や、AE センサー、地震計をもちいた多項目広帯域観測を行い、種々の地震破壊現象の規模と継続時間に関するスケールリングを確立する。同時に、高感度ひずみ観測やコア計測の結果に基づき、震源の物理的環境を推定し、地震破壊の物理モデルの構築を目指す。

b:室内実験

主たる地殻構成岩石である花崗岩などを用いた三軸圧縮破壊試験を行い、mm～cm程度の破壊現象の素過程を明らかにし、断層形成の物理モデルの構築を試みる。具体的には、微小破壊に伴うAEの高周波数帯域計測技術を利用し、大小さまざまなAEの広帯域波形を長時間連続収録により取得する。主として経験的グリーン関数法に準じた手法によってAEの相対規模とその継続時間を推定する。また、センサーの特性を明らかにし、記録を速度のような物理量に変換することにより、AEの絶対規模推定も行う。これらの実験・計測により、現象論や経験則ではなく、物理モデルに基づいた破壊・摩擦現象のスケーリング則の確率を目指す。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

a:南アフリカ金鉱山

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解析を行う。現在観測を行っているサイトでは、 $M > 2$ の比較的大きな地震とその前後に発生したAEが記録されている。AEの震源を決定し、その分布や活動度の評価を行うとともに、周辺で記録された地震記録をもとに本震の断層面解の推定も行い、本震とAEの発生の関係を調べる。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、AEの震源を決定し、その分布や活動度の評価を行うとともに、周辺で記録された地震記録をもとに本震の断層面解の推定も行い、本震とAEの発生の関係を調べる。また観測サイトの維持を行う。

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。

b:室内実験

平成21年度は、解析の際に収録波形を較正するために、広帯域AEセンサー用の耐圧アセンブリを用いて、広帯域AEセンサーの応答特性を推定する。収録される波形記録は膨大な量となるため、効率的なデータ処理方法について検討を行う。

平成22年度は、並行して実施するトリガー収録記録をもとにAEの発生を同定するとともにトリガー収録のためのノイズレベルを決定する。三軸圧縮試験下での広帯域AEの連続計測を実施する。

平成23年度は、トリガー収録データを用いた震源決定を行い、震源パラメタの推定を行う。連続収録記録から、イベント波形の抽出を行う。

平成24年度は、主として経験的グリーン関数法に準じた手法によってAEの規模とその継続時間を推定し、AEのスケーリングについて検討を行う。

平成25年度は、データ解析を進めるとともに、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：

a:南アフリカ金鉱山

地震発生過程における微小破壊の役割を調べるため、 $M2$ 級以上の人工誘発地震が多発する南アフリカ、ムポネン金鉱山とイズルウィニ鉱山において、AE観測を行った。これらの解析を通じて、鉱山における微小破壊観測特有の問題(例えば、1日あたり数万個に及ぶ大量のデータの処理、周波数特性が未知のセンサを使った M_w 推定の方法、鉱山でのworking noiseによる影響の除去)をクリアし、震源・ M_w のカタログを作る方法が確立できた。AEセンサの押し引き校正も可能になり(課題1420)、微小破壊のメカニズム推定も可能になった。

イズルウィニ金鉱山においては約10か月、100万イベント以上の震源・ M_w カタログの作成が完了

している．観測網直近では M_w -5 程度まで，観測網周辺 100 m 程度の領域で M_w -4 程度までの震源が検知できている．観測された AE の 90 % 以上が，差応力が極端に高いとみられる採掘前線直近 10 m 程度の領域に集中している一方で，残る 10 % のほとんどは採掘前線から離れた場所に平面状の震源分布を形成しており，定常的な活動を示していた．それら以外の場所で起こる AE はほとんどみられない．平面状分布の一部は，採掘空洞などで対応する断層が確認できており，採掘による载荷を受けた既存の弱面で定常的に微小破壊が起こっているとみられる．一方，同じような場所にあるにもかかわらずこのような微小破壊を伴わない断層もあった．断層方位の違いによる剪断応力の大きさの違いや強度の違いが微小破壊活動の有無を支配しているのかもしれない．相対震源決定結果から評価した AE 面の厚みと P 波初動押引分布を考えると，平面状分布を示す AE の多くは面上の滑りイベントのようである．弱面の微小な噛み合わせ部で高応力状態が生じ，定常的な破壊が生じていると推察される．これらは 99.8 % が M_w -2 以下という，非常に小さい AE ばかりで構成されており，1.4 から 2 程度の高い b 値を示した．その一方で採掘空洞直近に密集する AE は，より低く一般的な b 値（約 1.2）を示す傾向にあった．既存弱面上で起こる微小破壊は断層面の不均質を反映したサイズ分布を持つために，通常の地震活動で典型的に見られるものとは異なる b 値を示すのかもしれない．

また，本年度の解析により，イズルウィニで観察された平面状分布を示す AE のうち，既存断層に対応することが確認されたものの一つで， M_w -5.1 から -3.6 の繰り返し地震が見つかった（図 1）．繰り返し地震は，応力降下量一定則から予想されるよりも 1 サイクルの間に大きな滑りを起こすというスケール則に従うことが知られており [Nadeau and Johnson, 1998]，このスケール則を今回見つかった繰り返し地震の規模にそのまま当てはめると，GPa オーダーの非常に高い応力降下量を持つことが予想される．しかし，スペクトル比を用いた方法でこれらの応力降下量を推定すると数 MPa から数十 MPa 程度の，一般的な地震と同程度の応力降下量を示すことがわかった．また，断層を貫通するケーブルが切断されていないことから求めたこの断層が観測期間中に滑った量の上限は，Nadeau and Johnson [1998] のスケール則から予想される滑り量よりずっと小さいこともわかった．すなわち，プレート境界の滑り量推定にしばしばつかわれている Nadeau and Johnson [1998] のスケール則はこの繰り返し地震系列には適用できないということである．

本課題の目的の一つは大きな地震に先行する微小破壊活動の特徴を調べることであったが，イズルウィニ鉱山では，いまのところそのような解析に適した観測記録は得られていない．一方，ムポネン鉱山における観測では，観測網直近で $M2$ の地震が起こった例があり，1 週間で 2 万個を超える余震が観測され，その一部が薄い（真の厚み 1 m 以下）2 次元状の分布を示す様子が見られた．本震のモーメントテンソル解とこの面の方位は調和的であり，より大きな地震で頻繁に観察されるような，本震破壊面を描き出すように発生した余震とみられる．また，本震発生の少なくとも 6 か月前から本震破壊面の一部に当たる領域で AE 活動がおこっていたことが確認できている．しかし，本震直前数日間は鉱山が長期休業に入り，低ノイズの高品質なデータが欠測なく得られていたにもかかわらず，本震発生につながるような前兆的な活動レートの増加は確認できなかった．

b: 室内実験

これまで地震の模擬として岩石破壊実験がおこなわれていたが，岩石内部で発生する微小破壊（AE）の破壊様式が自然地震と同様なのか否かという課題が残されていた．AE を自然地震と同様の手法で評価するためには，広帯域で波形を集録し，スペクトル解析から地震モーメントとコーナー周波数を推定し，震源の特性を破壊パラメータとして得る必要がある．そのためには，高い封圧下でも使用できる広帯域トランスデューサを開発したうえで花崗岩中の圧縮破壊試験を実施し，大小さまざまな規模の AE を多数解析する必要があった．

まず，三軸条件下での実験に備えて，解析の際に集録波形を較正するための広帯域トランスデューサ（感度帯域：100 - 2000 kHz）用の耐压アセンブリとその較正手法を開発した．さらに，AE の長時間連続集録システムの開発，AE 波形の同定システムの作成，連続データからのイベント抽出手法の検討などをおこなった．そして，ウェスタリー花崗岩試料を用いて封圧 10 MPa 下で三軸圧縮破壊試験を実施した．試料表面に貼り付けた複数の広帯域トランスデューサを用いて，圧縮に伴って発生する AE

を高分解能(14 bit)で集録した。数度の短い欠測を除いて、実験の続いた6時間程度の間、AEデータは連続的(20 MS/s)に集録された。破壊を準安定的に成長させ、ピーク強度後、1割の応力低下を確認したところで高速除荷して試料を回収したところ、試料表面に明瞭な断層が確認された。回収した試料のX線CTスキャン撮影からは、明瞭な一枚の成長途上の断層の形状と位置が特定された。集録された連続波形からAE信号を抽出して震源決定をおこなったところ、断層に対応する位置に震源が分布しており、波形相関が高い近接したイベントで構成される2つのクラスタが見つかった。トランスデューサの較正後、これらのクラスタに含まれるAEの地震モーメントとコーナー周波数を推定したところ、地震モーメントは M_w -8から-7程度に相当し、コーナー周波数の-3乗に比例することが明らかになった。さらに、このスケーリング則は既往の研究によって知られている自然地震のスケーリング則の延長上に位置しており、AEから自然地震に至るまで震源サイズにして8桁程度に渡り、応力降下量が規模に依存しない自己相似な関係にあることが示された。これは、岩石試料内で発生する数mm~数cm規模の微小破壊と自然地震の間にスケーリング関係があることを意味し、微小な破壊の一部は一種の地震とみなせることが示唆された(吉光他, 2013; Yoshimitsu et al., 2013a)。

平成25年度は前年度までに得た広帯域AEデータを用いて、地震活動について評価をおこなった(Yoshimitsu et al., 2013b)。 b 値は地震の規模と頻度の関係を定義する上で用いられるパラメータで、大きな地震と小さな地震の発生比率を表し、一般的に1前後の値を示すことが知られているが、AEを用いて評価した各クラスタの b 値は、2.3と2.0という高い値を示した(図2)。さらに、波形に対して帯域幅100 kHzの狭帯域フィルタをかけることによって、従来の研究におけるデータと同様のものを疑似的に作り、最大振幅の値から b 値($m-1$ 値)を評価した結果、得られた b 値は2.4と3.3というさらに高い値となった。このことから、狭帯域トランスデューサを用いた岩石実験から得られた b 値には過大評価の可能性があり、扱いに注意が必要であることが示唆された。また、一般的に得られる値よりも高い b 値となった点については、地震活動が特に活発な領域のイベントのみを使用している点、クラスタ化したイベントを使用している点、などが原因として考えられる。

新たに、より実際の地下数kmの圧力条件に近い状態での実験を目指して、封圧50 MPa, 100 MPaでの圧縮破壊試験をおこない、数時間にわたって連続的に複数チャンネルのAEデータを集録することに成功した。今後は、これらのデータの解析を通して、自然地震とAEのスケーリング関係が、封圧に影響されるか否かを検討する必要がある。

5年間の実験・解析を通して、これまで計測が難しかった広帯域AEデータを連続的に安定して集録することができるシステムが開発され、データの質が飛躍的に高まった。さらに、このシステムで集録されたAEデータから、自然地震とAEのスケーリング関係が明らかになったことから、自然フィールドで興味を持たれていたが詳細に観察することが難しかった b 値等のテーマについて、実験スケールでの観察をおこなえる可能性が広がった。

- (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): 吉光奈奈, 川方裕則, 高橋直樹, 三軸条件下における広帯域連続集録から得られたAEのコーナー周波数と地震モーメントの関係, 日本地球惑星科学連合2013年大会, SSS28-15, 千葉, 幕張メッセ国際会議場, 2013.5.23.

Yoshimitsu, N., H. Kawakata, N. Takahashi, The frequency-magnitude relation of broadband recorded AE under a triaxial compressive condition, IAHS - IAPSO - IASPEI Joint Assembly in Gothenburg, S101S2.07, Gothenburg, Sweden, 2013.7.23.

直井誠, 中谷正生, 大槻憲四郎, T. Kgarume, J. Philipp, T. Masakale, L. Ribeiro, 森谷祐一, 村上理, 矢部康男, 川方裕則, A. Ward, R. Durrheim, 小笠原宏, 南アフリカ金鉱山地下1 km深において、載荷される断層上で観察された-5.1 M_w -3.6の繰り返し地震, 日本地震学会秋季大会, A11-09, 神奈川県民ホール, 2013.10.7.

Yoshimitsu, N., H. Kawakata, N. Takahashi, A scaling relationship between AE and natural earthquakes, American Geophysical Union 2013 Fall Meeting, S33D-2474, USA, San Fransisco, Moscone Center,

2013.12.11.

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

立命館大学総合科学技術研究機構 川方裕則・小笠原宏

他機関との共同研究の有無 : 有

東京大学地震研究所 中谷正生・五十嵐俊博

東北大学大学院理学研究科 矢部康男

京都大学防災研究所 飯尾能久

東濃地震科学研究所 石井紘

産業技術総合研究所 佐藤隆司・雷興林

(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 : 立命館大学 研究部 リサーチオフィス (BKC)

電話 : 077-561-2802

e-mail : t-taka-a@st.ritsumei.ac.jp

URL : http://www.ritsumei.ac.jp/research/center/sci_eng/

(11) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 川方裕則

所属 : 立命館大学工学部

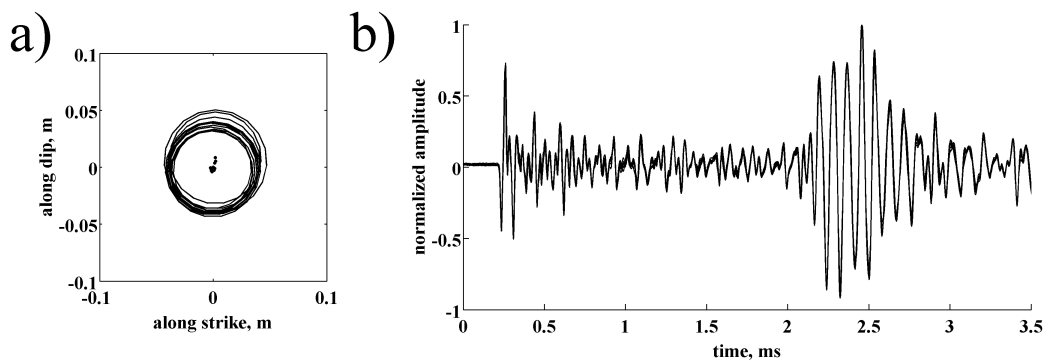


図 1 . Mw -4.4 から -4.2 の AE 12 個からなる繰り返し地震のグループ .

a) AE 12 個の震源位置 . 相対震源決定によって求めた震源位置を黒点で示している . それぞれの黒点を中心とする円は , 応力降下量 3 MPa を仮定して評価した断層サイズに対応する . b) a) で示した 12 イベントの最大振幅で規格化した波形 . 12 個の波形を重ねて描いている . デジタルフィルタはかけておらず , 収録した波形をそのまま表示している .

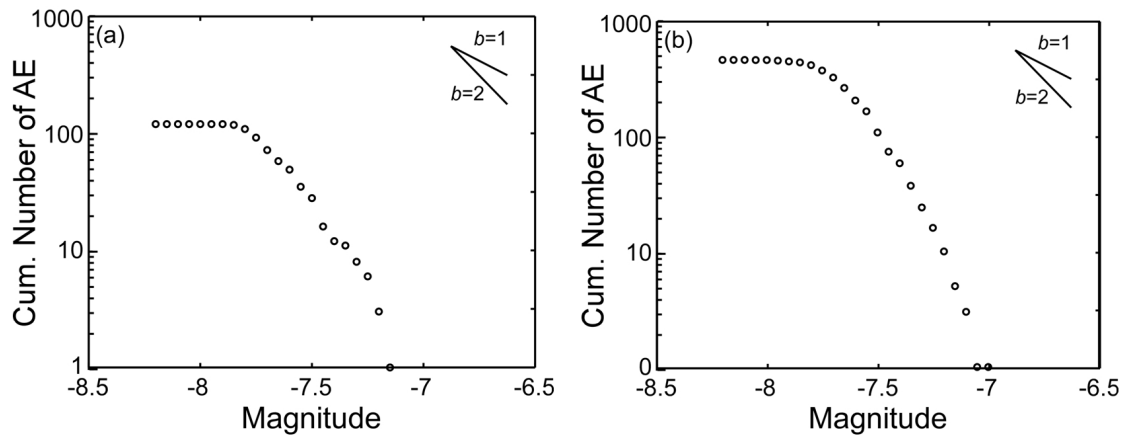


図2．広帯域計測によって Mw が推定された AE を用いて評価された b 値．

(a) ピーク強度付近で発生した AE クラスタに対する値．(b) ピーク強度から 1 割程度，軸差応力が低下した後に発生した AE クラスタに対する値．