

(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 - すべり実験においても、高速すべりに先行して、局所的なすべりが生じる(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、たと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応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おこない、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 の絶対規模推定もおこなう。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つとめるとともに、得られた波形データの解析をおこなう。現在観測をおこな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おこなうとともに、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おこない、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、AE の震源を決定し、その分布や活動度の評価をおこなうとともに、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おこない、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。

(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おこなう。

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おこない、震源パラメタの推定をおこなう。連続収録記録から、イベント波形の抽出をおこなう。

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おこなう。

平成 25 年度は、データ解析を進めるとともに、研究成果のとりまとめをおこなう。

(7) 平成 23 年度成果の概要：

(a : 南アフリカ金鉱山)

イズルウィニ鉱山における観測網がほぼ完成した。地震活動は高く、ドリリングノイズや S/N の高いデータが得られた観測点が少ないものを除いて、月あたり 10 万個オーダーのイベントが収録されている。他予算で開発した自動検測プログラムを一ヶ月分のデータに適用して試験的に震源決定を行った。数百イベントの目視確認では、P 波の走時読み取り数が 10 個以上、RMS 走時残差が 0.2 ms 以内のイベントでは、ほぼ誤検測はなかった。図 1 にこの基準をみたく 22 万イベントの震源分布を示す。90 % 以上は採掘前線の活動であるが、それ以外に、20 - 100 m 程度の広がりをもつ薄い面状のクラスタが 9 個みつかった。そのうち 3 つは、既知の地質断層と一致した。課題 1423 の加速度計を用いて、AE センサーのその場感度特性を較正し、スペクトルレベルからこれらの 9 個の面状クラスタ (それぞれ 200 ~ 6000 個の AE で構成されている) に属する 16055 個の AE の M_w を暫定したところ、 M_w は -5.2

から 0 であった。99.9% は M_w -2 (破壊サイズの目安 1 m) 以下であり、非常に小さな破壊によってその構造が浮かび上がっていることが確認できた。 M_w -1 以上のイベントは 3 個しかなかった。クラスタの活動には比較的大きな地震の余震も含まれるが、多くは定常的な活動とみられ、地質断層は、最近に大規模な破壊をおこしたことがなくても、活発な微小破壊活動を伴うことが示唆される。別の鉱山の地下 3 km にも AE 観測網を構築中で、AE センサーの埋設は 4 割方完了した。

5 年計画の一部を前倒して進行させることができた。

(b: 室内実験)

花崗岩試料を用いて一軸圧縮破壊試験をおこない、8 つの広帯域トランスデューサ (感度帯域; 100 - 1000 kHz) と比較用の 2 つの狭帯域圧電センサーを用いて AE の連続計測 (20MS/s) を実施した。試験中に数回、各トランスデューサに矩形波を与えて透過波を計測し、試料内の速度推定をおこなった。さらに、レーザードップラー振動計で広帯域トランスデューサ表面の振動を計測し、その感度特性を推定した。AE と思われる波形の P 波初動を読み取り、震源決定をおこなった。S 波部分のスペクトルから広帯域トランスデューサの感度補正をおこない、S 波変位スペクトルを得た。S/N が高く、記録が複数のトランスデューサで得られているイベントについて、地震モーメントとコーナー周波数を推定した。得られたコーナー周波数と地震モーメントの値は、自然地震に対して見つかっている 3 乗則との間に大きな相違は見られなかった。

- (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. Kwiatak, T. Igarashi, and K. Plenkens, 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, 2011, doi: 10.1785/0120100346.
- Plenkens, K., D. Schorlemmer, G. Kwiatak, and JAGUARS Research Group, 2011, On the Probability of Detecting Pico-seismicity, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **101** (6), 2579-2591, 2011, doi: 10.1785/0120110017.
- 堀内茂木, 堀内優子, 飯尾能久, 佐々木祐樹, 澤田義博, 関根秀太郎, 岡田知己, 日野亮太, 中谷正生, 直井誠, 中村洋光, 2011, 人間以上に高精度の地震波自動読み取りシステムの開発 (その 2), 日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿集, SSS028-01, 2011 年 5 月 26 日, 千葉。
- 吉光奈奈, 川方裕則, 柳谷俊, 2011, 岩石圧縮試験における広帯域連続集録から得られた AE の震源特性, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, SSS025-16, 2011 年 5 月 27 日, 千葉。
- 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.
- 吉光奈奈, 川方裕則, 高橋直樹, 2011, 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, 日本地震学会秋季大会, B32-09, 2011 年 10 月 14 日, 静岡。
- N. Yoshimitsu, H. Kawakata, N. Takahashi, 2011, Estimation of the seismic moment and the corner frequency with continuous broadband AE records in a fracturing rock sample, American Geophysical Union 2011 Fall Meeting, S41C-2204, 8 December 2011, San Francisco.
- 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, American Geophysical Union 2011 Fall Meeting, 8 December 2011, San Francisco.

(9) 平成 24 年度実施計画の概要 :

(a: 南アフリカ金鉱山)

イズルウィニ鉱山の観測を維持する。モアブ・コツオン鉱山での観測を開始する。AEの震源カタログ期間を延長し、精密な相対震源決定をおこなう。また、大規模 AE もしくは極微小地震の余震分布と余震の断層面解の関係を調べる。

(b: 室内実験)

実験条件を三軸圧縮試験に拡張し、広帯域 AE 計測を実施する。さまざまな時間帯に発生した AE の規模とコーナー周波数を推定し、諸条件下の AE のスケーリングについて検討をおこなう。

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

立命館大学総合理工学研究機構 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

(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 : 立命館大学 研究部 理工リサーチオフィス

電話 : 077-561-2802

e-mail : liaisonb@st.ritsumeai.ac.jp

URL : http://www.ritsumeai.jp/research/c05_03_14_j.html

(12) 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 : 立命館大学理工学部

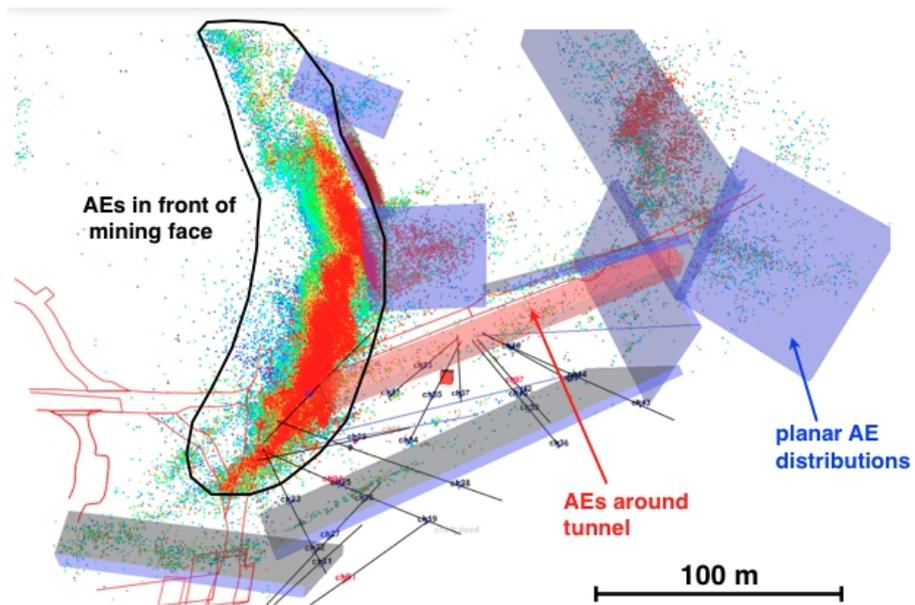


図 1 .

P 波の走時読み取り数が 10 個以上 , RMS 走時残差が 0.2 ms 以内という基準をみたした 22 万イベントの震源分布 .