

(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) 平成24年度成果の概要：

a:南アフリカ金鉱山

クック・フォー(旧名イズルウィニ)鉱山におけるAE観測を継続した。2012年4月から12月の期間中、1484万回分のトリガ記録が得られた。この9か月の間、システムが完全に停止していた期間は合計80日であったが、センサの電氣的トラブルにより、システムの限界収録レートでトリガがかかり続けていた期間が55日あった。この期間はSeismic eventの捕捉率が低下している可能性がある。このような期間を除いた、正常にデータ収録が行なわれた期間は140日(51%)であり、この間に得られたトリガ記録は合計605.6万個であった。2012年5月17日までのデータに関して、他の研究予算によって開発された震源決定プログラムを適用し、1,044,416個の信頼性の高い震源が求められた。昨

年度解析した分を含めると、10 か月間、1,509,568 個の信頼できる震源のカatalogが作成できている。平成 23 年度に報告した採掘前線以外に存在する薄い面状の AE クラスタのうち、既知の地質断層との対応が分かっていなかった 2 つの面状分布についても、AE クラスタに対応する弱面が坑道で確認された。これらの薄い面状のクラスタを示す AE に対して相対震源決定を行ったところ、それぞれの AE クラスタは薄いもので 50 cm 程度の、非常に面に密集した分布を示すことが分かった(図 1)。いくつかのクラスタでは、面のオフセットやブランチなど、より細かな構造を AE 分布から確認する事ができた。これらの薄い面状のクラスタを構成する AE の 99.8%は M_w -2 以下であり、通常の鉱山地震観測網(検知限界 M_w -1 程度)では検知できない非常に小さいイベントである。さらに、面状 AE クラスタについてもべき乗則に従うサイズ分布を持つことが確認され、これらはクラスタ毎に異なる b 値(1.34 から 2.19)を示すことが分かった。全ての面状クラスタにおいて、採掘前線直近の AE に対する b 値(1.3 程度)に比べて高い値を示している。大規模な地震(本震)が発生していないため、大規模な地震と AE の発生の関係についてはまだ調べられていないが、それ以外については計画通りに進展した。

b:室内実験

ウェスタリー花崗岩試料を用いて、封圧 10MPa 下で三軸圧縮破壊試験を実施した。試料表面に 7 つの広帯域トランスデューサ(感度帯域:100-2000 kHz)を貼り付け、AE の高分解能(14 bit)・多チャンネル・連続集録(20 MS/s)を行った。実験は 6 時間程度継続したが、途中数回の 1 分以内の欠測を除いて、AE 波形の連続集録に成功した。載荷はピーク強度(296 MPa)以降、約 24 MPa の応力低下を確認したところで高速除荷し、試料を回収した。回収後の試料に対して、X 線 CT スキャンを行い、試料内に明瞭な一枚の成長途上の断層を確認した。集録された連続波形から AE 信号を抽出し、震源決定を行ったところ、断層に対応する位置に震源が分布しており、その中に 2 つのクラスタが見つかった。トランスデューサの感度校正を行った後、これらの AE クラスタの地震モーメントとコーナー周波数を推定したところ、AE の地震モーメントは 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。

- (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):
- Kawakata H., T. Okuno, I. Doi, N. Yoshimitsu, N. Takahashi, and M. Takahashi, 2013, Three dimensional structure of a fault generated during a triaxial compressive test with a granite sample, Proceedings of The 13th Japan Symposium on Rock Mechanics and The 6th Japan Korea Joint Symposium, 979-982.
- 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.
- 直井誠, 中谷正生, Joachim Philipp, 堀内茂木, 大槻憲四郎, T. Kgarume, G. Morema, S. Khambule, T. Masakale, 宮川幸治, 渡邊篤志, 森谷祐一, 村上理, 矢部康男, 川方裕則, 吉光奈奈, 小笠原宏, 2012, 南アフリカ金鉱山地下 1 km 深における多点 AE 観測と 2 つの M_0 級地震に関連する AE 活動, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会予稿集, SSS028-07, 2012 年 5 月, 千葉.
- 直井誠, 中谷正生, J. Philipp, 堀内茂木, 大槻憲四郎, T. Kgarume, G. Morema, S. Khambule, T. Masakale, 宮川幸治, 渡邊篤志, 森谷祐一, 村上理, 矢部康男, 川方裕則, 吉光奈奈, T. Ward, R. Durrheim, 小笠原宏, 2012, 南アフリカ金鉱山における微小破壊(-3.7 M_w 1.3)の規模別頻度分布と採掘発破前後の b 値の安定性, 日本地震学会 2012 年度秋季大会, P1-50, 2012 年 10 月, 北海道.
- 吉光奈奈, 川方裕則, 高橋直樹, 2012, 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(2), 日本地球惑星科学連合 2012 年大会予稿集, SSS028-06, 2012 年 5 月, 千葉.

(9) 平成 25 年度実施計画の概要 :

a:南アフリカ金鉱山

データの解析を進めるとともに、観測サイトの維持を行う。大規模な地震(本震)が発生した場合には、本震の断層面解を推定し、本震と AE の発生の関係を調べる。また、研究成果の取りまとめも行う。

b:室内実験

平成 24 年度に集録された AE 記録を用いて、クラスタ以外の AE についても解析を進める。また、研究成果の取りまとめも行う。

(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.ritsumeit.ac.jp

URL : http://www.ritsumeit.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

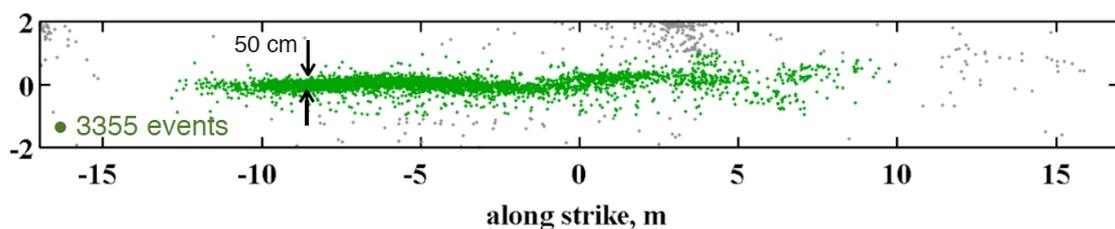


図 1 . クック・フォー鉱山で確認された薄い面状の AE クラスタの例 .
AE が描き出す面の Dip 方向に垂直な面のスライス (3m 厚) を示している .

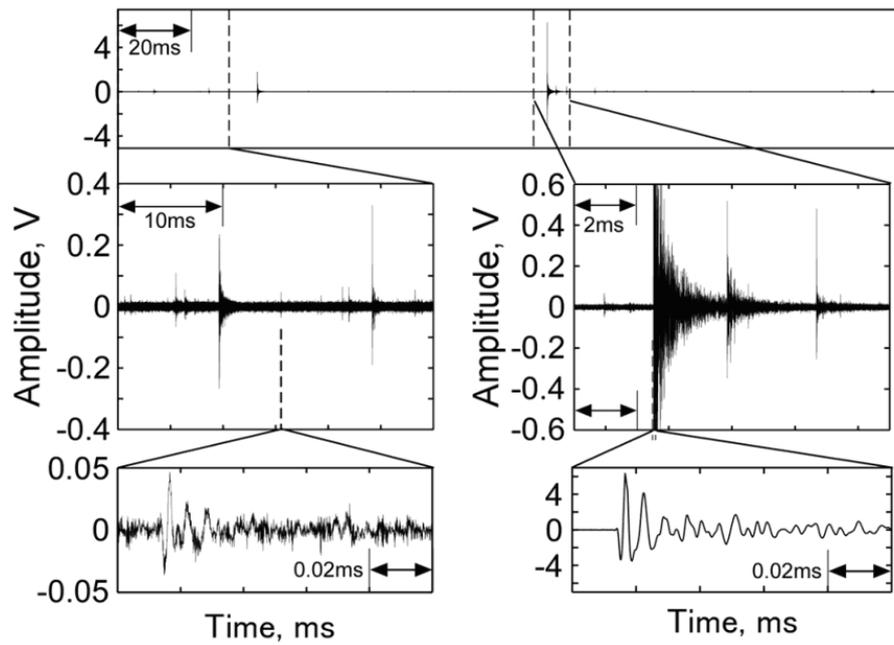


図 2 . 三軸圧縮破壊試験の連続集録波形から抽出された AE 信号の例 .
 大小さまざまな振幅を持つ AE 信号が記録されている .

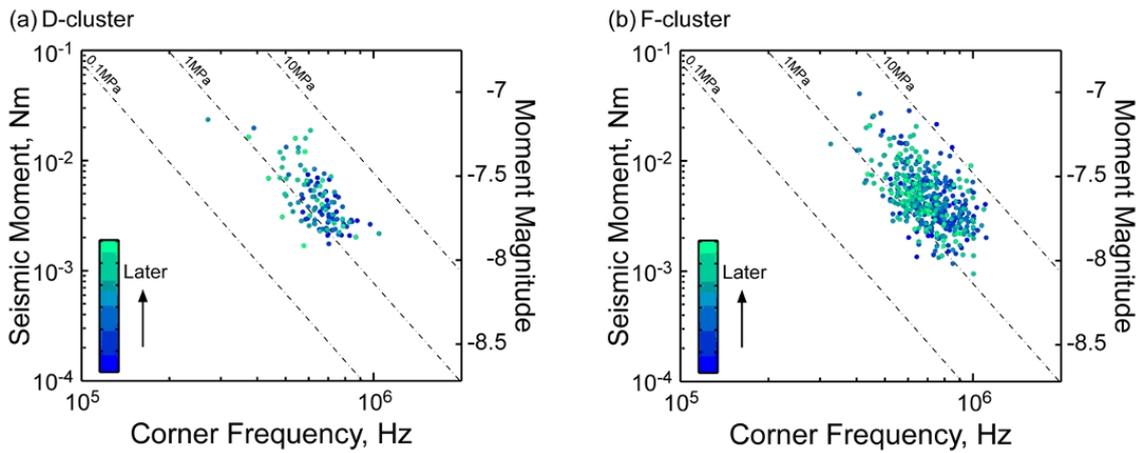


図 3 . 三軸圧縮破壊試験の 2 つの AE クラスタに対して推定された地震モーメントとコーナー周波数の関係 .
 いずれも AE 単独で , 地震モーメントがコーナー周波数の 3 乗に比例するスケーリング則を満たしている .