

(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 22 年度成果の概要：

平成 22 年度の成果の概要は以下の通りである。

(a : 南アフリカ金鉱山):

南アフリカ、ムポネン金鉱山に展開した AE 観測網で記録された、 $M_w 1.9$ の地震に続く余震群の M_w の推定をおこなった。AE センサは複雑な周波数特性を持っており、直接振幅を物理量に変換することができない。そこで、狭帯域の信号を使い加速度センサの記録と比較することで、AE センサのデータから M_w を推定することに成功した。規模別頻度分布は G-R 則に従っており、観測網の中心から 100 m 以内の領域では $M_w -4$ までの地震が漏れなく検知できていると推定された。また、この余震群は余震が起こったところと起こらなかったところがはっきりと分かれており、明瞭な 5 つのクラスタが定義できた。それぞれのクラスタに対して b 値の推定を行ったところ、本震破壊面を描き出す 2 次元的な分布を示したクラスタのみ、高い b 値 (1.41) を示すことがわかった。

これらの解析と並行して、南アフリカ、イズルウィニ鉱山と、モアブ・コツオン鉱山において、前述のムポネン鉱山の観測に比べて大規模な新規観測網を展開し始めている。イズルウィニ鉱山では数台のセンサを埋設し、データの収録が始まっている。モアブ・コツオン鉱山でもインストール用ボアホールの掘削がほぼ終了し、近々センサ埋設をスタートできる見込みである。

(b: 室内実験):

花崗岩試料と砂岩試料の一軸圧縮、三軸圧縮、三軸伸張試験をおこない、試料の微小破壊に伴う AE を集録することを目的として、試験開始から終了までの長時間弾性波連続集録をおこなった。三軸伸張試験では、全て押しの開口型 AE だけではなく、押し引きが混ざった AE が集録され、せん断型の微小破壊の発生が示唆された(図 1)。一軸圧縮試験では、これまでおこなわれたことのない、広帯域センサを用いた長時間連続集録に成功した。

(8) 平成 22 年度の成果に関連の深いもので、平成 22 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):

Kwiatek, G., K. Plenkens, M. Nakatani, Y. Yabe, G. Dresen, and JAGUARS-Group, 2010, Frequency-Magnitude Characteristics Down to Magnitude -4.4 for Induced Seismicity Recorded at Mponeng Gold Mine, South Africa, Bull. Seism. Soc. Am., **100**, 1165-1173.

Plenkens, K., G. Kwiatek, M. Nakatani, G. Dresen the JAGUARS Group, 2010, Observation of Seismic Events with Frequencies $f > 25$ kHz at Mponeng Deep Gold Mine, South Africa, Seism. Res. Lett., **81**(3), 467-479, DOI: 10.1785/gssrl.81.3.467.

(9) 平成 23 年度実施計画の概要:

(a: 南アフリカ金鉱山):

引き続き、ムポネン金鉱山における AE データの解析を行う。また、イズルウィニ鉱山とモアブ・コツオン鉱山における観測網の展開が終了し、データが蓄積される見込みである。

(b: 室内実験):

岩石試料の破壊試験をおこない、多点での広帯域 AE の連続計測を実施する。取得した連続データからイベント波形を効率的に抽出するアルゴリズムを考案するとともに、AE のスケールリング解明に向けた解析をおこなう。

(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.ritsumei.ac.jp

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

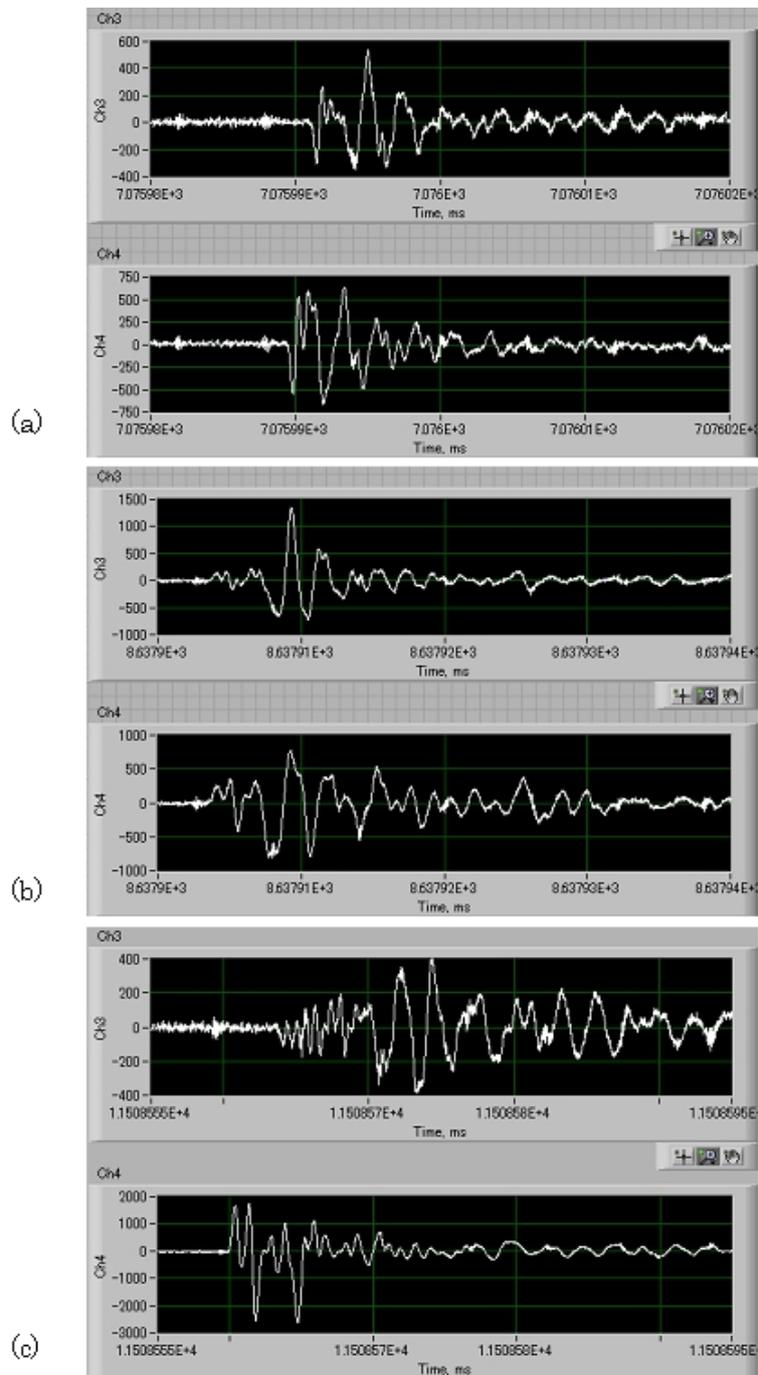


図 1 . AE 波形の例 .

3 番目 (2 段に配置したうちの試料上段) と 4 番目の素子 (対面する試料下段) で集録されたもの . 時間幅はすべて 40 マイクロ秒 . (a)3 番目と 4 番目の素子で得られたともに引きの波形 . (b)3 番目と 4 番目の素子で得られたともに押しの波形 . (c)3 番目の素子で引き , 4 番目の素子で押しの波形 .