

(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準備期・直前期の地震破壊域近傍の岩盤挙動の観測

(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

(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

(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

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-1) 地震準備過程

イ．非地震性滑りの時空間変化とアスペリティの相互作用

(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) 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：

震源核形成過程は、理論的・実験的に存在することが確認されている地震の直前過程の核心部分であり、それが実際に観測可能かどうかということが、短期的な予知の実現へ向けて解明すべき最重要課題であると考えられる。しかし、通常 of 自然地震を対象にする限り、大地震は滅多に発生しない。また、中小地震の震源から至近距離で観測することは難しい。したがって、南ア金鉱山における半制御地震発生実験によって、観測事例を増やすこと、及び、より詳細像を得ることは非常に重要である。本課題では、主に高感度・広ダイナミック・レンジの石井式ひずみ計の連続収録によって地震発生準備期のひずみ変化の詳細を観測する。次の 5 か年の目標は、観測周波数帯域において、また、観測ダイナミック・レンジで盲点がより少ない観測をより多くのサイトで行うことである。

(6) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21 年度では下記の活動を行う。

Mponeng 金鉱山地下 3.5km のサイト付近での採掘があと数か月間続く予定で、この間は地震活動が比較的活発であり続けると予想される。AE・ひずみ観測を継続しより多くの事例の解析を行う。

水没金鉱山 (Buffelsfontein 鉱山地下 2km と ERPM 鉱山地下 2.5 ~ 3.5km) のひずみ・地震観測を継続する。ERPM 鉱山は閉山したため、採掘活動がない場合の比較的 Dry な領域と Wet な領域の地震活動を比較できると期待される。

石井式ひずみ計 2 台と複数の加速度計とによる観測を、複数の鉱山で新たに始める準備を行う。候補の鉱山は South Deep 金鉱山, Driefontein 金鉱山, Kloof 金鉱山である。三次元配置でより多くの石井式ひずみ計、AE センサー、加速度計などからなる総合観測網を、2 ~ 3 年の間に $M > 2$ の地震の発生が予測されている既存の断層の周囲に展開する準備を行う。候補の鉱山は Moab Khotsong 鉱山である。

平成 22 年度は、既存の観測を継続しつつ、新しい総合観測網の構築を開始する。

平成 23 年度は、既存の観測を継続しつつ、年度の前半には新しい観測網の構築を完了し、データ解析を始める。

平成 24 年度までには、新しい観測網の中で 2 ~ 3 個の $M2$ 級の地震発生を至近距離で収録できると予想され、その詳細を解析する。

平成 25 年度は、成果をまとめる。

(7) 平成 24 年度成果の概要 :

観測網の構築が上記 (6) に比べて遅れたがほぼ完成し、ターゲット地震の発生を待つことができている。

(7 - 1) 地震の震源の至近距離でのひずみ変化観測

観測状況 (金鉱山名、深さ、台数、観測状況 (観測開始年/月)、サンプリング周波数、観測開始後のひずみ変化量) は以下の通りである。これらには、 1×10^{-5} strain を超える発破や地震によるひずみステップ等の短期変動も収録されている。:

Cooke 4、地下約 1km、2 台、2010/12、40-100Hz、最大約 1×10^{-3} strain。

KDC West、地下約 3km、3 台、OL; 2011/12、100Hz、最大約 3×10^{-4} strain。

South Deep、地下約 3km、1 台、OL; 2011/12、100Hz、最大約 1×10^{-4} strain。

Moab Khotsong、地下約 3km、3 台、OL; 2012/11、1-100Hz、N/A。

KDC East、地下約 2km、2 台、FY2013?, 100Hz (予定)、N/A。

なお、Cooke 4、KDC West、及び、East 鉱山は、それぞれ、Ezulwini、Driefontein、及び、Kloof 鉱山から名称が変わっている。OL: レコーダーがオンライン接続され、日本からも遠隔操作が可能。AR: 自動報告システムによって岩盤変形の様子をいつでも地震活動と比較することが可能。Cooke 4 でも自動報告システムが坑内で稼働しているが、縦坑ケーブルに障害があり、復旧を待っている。Moab Khotsong も近々同様な自動報告システムが稼働し始める。平成 24 年 9 月 ~ 11 月にかけての前例のない長期の鉱山ストとその余波のために、多くの金鉱山では採掘活動が止まり、地震活動も低調になったが、平成 25 年になって採掘活動が回復し始め、地震活動も回復し始めている。今後、まず、Cooke 4 や KDC West が地震活動のピークを迎え、地震発生に関連するひずみ変化を至近距離で観測できるものと期待される。

(7 - 2) 地震発生場の応力の実測

東北地方太平洋沖地震では、事後の解析からは、本震前に、 $Mw9.0$ の地震の発生を予想させるような現象がいくつか発生していたことが報告されているが、これらを事前のデータ解析で検知することはできなかった。このことは、観測データに基づいて、想定外の $Mw9.0$ の発生を予見できるほど地震とその発生場を理解できていなかったことを示している。一方、南アフリカ金鉱山の震源至近距離のひずみ観測では、圧倒的多数の事例は、前駆的なひずみ変化が観測できないまま本震発生を迎えるというパターンである。明瞭な前駆を伴って本震発生に至る例も観測されるが少数である。しかし、観測されたひずみ変化だけから、本震の発生時期や規模を予見することのできる経験則を提案することも容易でないように見える。

地震発生場の応力や強度などの基本情報があれば、地震の予見、せめて起きうる地震の最大規模の予見くらいは、従来の観測項目によるデータから出来るようにならないだろうか? しかし、この問

いの答えを得るために自然地震で震源の応力や強度を実測することは現実的に非常に困難で、南アフリカ金鉱山でもこれまでは技術的に困難であった。

このような課題の解決に貢献できるかもしれない前進が昨年度にあった。それは、円錐ひずみ法による応力測定（標準仕様は 76mm 径の応力解放）を、Moab Khotsong 鉱山の地下約 3km において現地条件（低品質なドリリング、限られた現場作業時間）に最適になる様に小型化し必要な補助資材を用いることによって、同鉱山での初めての応力測定に成功したことによる（BX 円錐ひずみ法）。測定現場付近は、採掘が進んでおらず、測定結果は南ア金鉱山の標準的な応力モデルの応力場と調和的であったため、良質の測定であったことが示唆される。

今年度は更に大きい前進があった。平成 25 年の 1 月と 2 月に、Mponeng 鉱山（南ア最大の金鉱山）の地下約 3.4km 及び Tau Tona 鉱山の地下約 3.0km においても測定に成功した。前者は、同鉱山で初めての応力測定結果であり、また、南アで最も深い地点の応力解放法による測定結果でもあった。測定現場付近の採掘は進んでおらず、標準的な応力モデルを地表下 3.4km に外挿した結果と調和的な結果と思われる。後者は、2 月前に発生した M1.5 の被害地震の震源の数十 m 以内での応力測定で、得られた最大主応力は、相対的に約 400m 深い Mponeng よりも有意に大きいものであった。この地震は、鉱山の標準応力モデルと採掘レイアウトから応力が高くないと予測される領域に発生したため、この応力実測結果は、地震リスク評価をどのように行うべきかを考える上で非常に貴重である。昨年度の測定はすべてを日本から輸入した用具で行ったが、今年度はほとんどの消耗品の製作・調達を南アで行った。今年度、2 つの鉱山において、3 社の岩盤工学コンサル及び 2 社のドリリング会社に測定現場作業を経験させることができたので、来年度以降、より多くの応力測定を南ア金鉱山の地震発生場で行い、震源断層周辺の応力状態の一般的な特徴を把握するための下地を作ることができたと考えられる。

- (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）：
- Durrheim, R.J. and H. Ogasawara, Can mine tremors be predicted? Observational studies of earthquake nucleation, triggering and rupture in South African mines, Proc. 2nd Southern Hemisphere Int. Rock Mech. Symp., SAIMM, pp. 327-343, 2012.
 - Hofmann, G., H. Ogasawara, T. Katsura, and D. Roberts, An attempt to constrain the stress and strength of a dyke that accommodated a ML2.1 seismic event, Proc. 2nd Southern Hemisphere Int. Rock Mech. Symp., SAIMM, pp. 436-450, 2012.
 - 小笠原宏，南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験，地震及び火山噴火研究の将来構想シンポジウム，2012 年 7 月 5 日，東京大学鉄門記念講堂，東京．
 - Ogasawara, H., H. Kato, G. Hofmann, and P. de Bruin, Trial of the BX conical ended borehole overcoring stress measurement technique, Proc. 2nd Southern Hemisphere Int. Rock Mech. Symp., SAIMM, pp. 169-179, 2012 (同シンポジウム論文集中から選ばれた論文として J. SAIMM, 102 (8), pp.479-753, 2012 にも出版された).
 - 小笠原宏，加藤春實，地震発生場においてより多くの応力測定を実現するための南アフリカ金鉱山の取り組み，日本地震学会 2012 年秋季大会講演予稿集，A32-03. 2012 年 10 月 19 日，函館市民会館．
 - 小笠原宏，加藤春實，G. Hofmann，P. de Bruin，坂口清敏，大深度・高応力の南アフリカ金鉱山の諸条件に最適な形で円錐孔底ひずみ法応力測定を行う試み，第 13 回岩の力学シンポジウム論文集，pp.465-470, 2013.

- (9) 平成 25 年度実施計画の概要：

(7) で記述した様に、過去にはなかった数の石井式ひずみ計の観測が南ア金鉱山で進行中である。採掘活動の遅れに伴って、ひずみ計付近の地震活動のピークは平成 25 年度に遅れたが、共通の監視・解析ツールを整備し、ターゲット地震の発生を待ち、震源至近距離のひずみ変化の効率的な監視・解析を進めたい。

BX 円錐ひずみ法による応力測定の場合が増えるように、鉾山に働きかけ、得られたデータをより良く説明できる様に、応力計算機モデルの改良を試みる。破碎後の岩盤や、降伏し始めている岩盤の非弾性的挙動をどのようにモデル化できるかが鍵になる。

(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 小笠原宏・川方裕則

他機関との共同研究の有無 : 有

東濃地震科学研究所 石井 紘・大久保慎人

東京大学地震研究所 中谷正生

東北大学大学院理学研究科 矢部康男・大槻憲四郎

鹿児島大学大学院理工学研究科 中尾 茂

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 : 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 : 小笠原宏

所属 : 立命館大学理工学部