

(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、通常の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、および、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・レンジの石井式歪計の連続収録によって地震発生準備期の歪変化の詳細を観測する。次の 5 ケ年の目標は、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ヶ月間続く予定で、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・歪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) の歪・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。

石井式歪計 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歪計、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 2 2 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 2 3 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 2 4 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 2 5 年度は、成果をまとめる。

(7) 平成 23 年度成果の概要 :

平成 23 年度の成果は、観測網構築の完成が計画 (上記 (6)) よりやや遅れているがそれ以外は計画と一致する。

南アフリカ金鉱山 (以下南ア) では、昨年度までに、石井式歪計によって震源域への歪の蓄積や解放、地震やゆっくり地震に先行する歪変化など、至近距離観測でしか得られない結果が得られている。

これからすべきことの一つは、新しい観測網を構築し観測事例を増やすことである。今年度は、2012 年 2 月 17 日現在、3 つの鉱山で 6 台の石井式歪計の埋設を終え、2 つの鉱山で 4 台の歪計の観測を始めることができた。昨年度観測が始まったイズルウィニ鉱山の 2 台は、約 1 年間のデータが蓄積した (Durrheim et al., 2012)。

もう一つすべきことは、歪変化が観測された場の応力や強度の理解を深めることである。南アではこれらの測定・拘束が不可能ではなく、それに向けた取り組みを始めた。

まず、過去に得られたデータの Back analysis として、応力モデリングに基づき、Mponeng 金鉱山の 2007 年 12 月にダイクで発生した $ML2.1$ の地震の震源断層における強度の拘束を試みた。世界の鉱山では境界要素法による静的弾性応力モデリングや安全評価が広く行われている。モデリングには、応力が与えられた強度に達すると、塑性変形する断層を組み込むことができる。鉱山の地震観測網では検知能力や震源決定精度が低いためこのような試みはこれまで困難であったが、JAGUARS による AE 観測によって震源断層が克明に描き出されたため、その強度を評価した。その結果、地震前に凝着力 12.2 MPa 摩擦係数 0.47、と設定すれば、採掘に伴って 12 月にイベントが発生することや、地震後に強度が約 10MPa 低下すると設定すれば、その地震のモーメントが再現できることがわかった。周辺の過去の地震活動歴や、採掘前線近傍などの非弾性変形を考慮していないため、モデリングで推定される滑り域は、実際と完全には一致しなかった。しかし、この様なアプローチが、応力モデリングのよいキャリブレーションになることや、震源断層の応力場や強度の平均像を知る手段になる可能性があることがわかった (小笠原・他, 2011)。

このような応力モデリングには、採掘前の応力のより正確な値を入力せねばならない。南アでは、高品質のドリリングが困難だが比較的小型の多数のマシンで探鉱ドリリングが行われ、多数の応力測定が出来る可能性がある。しかしながら、南アで最も多く行われている応力測定には、大口径で高品質のドリリングを必要とするため、測定例が一般に非常に少ない。この現状を打開するために、探鉱に多く用いられている小型マシンでも応力測定ができるように、日本で実用化されている口径 76mm の円錐孔底オーバーコアリング (CCBO) 法を、口径 60mm でもできるように小型化し、高品質なドリリングに必要なツールを開発して応力測定することに成功した。現場へのアクセスに時間を要する南アでも、数日で複数回の応力測定結果を得ることができるようになった (Ogasawara and Kato, 2012)。

水没鉱山の地震活動の研究については、世界の研究者達との交流 (Ogasawara et al., 2011) や、南

ア国内の水没鉱山上に展開される国立地震観測網との共同研究に向けた研究交流を深めた (Ogasawara, 2011)

- (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) :
- Ogasawara, H., C. Srinivasan, A. Cichowicz, O. Goldbach, K. Bosman, 2011, Water-ingress induced seismicity in mines in Japan, India and South Africa, ICDP Workshop "Scientific Deep Drilling to Study Reservoir Triggered Earthquakes at Koyna, India", 21 March 2011, Hyderabad, India.
- Ogasawara, H., 2011, Multidisciplinary monitoring of flooding induced seismicity in Japan and what we can do in South Africa, Council for Geoscience 4th Annual Seismology Workshop on Fluid-induced seismicity, 16 August 2011, Council for Geoscience, Pretoria, South Africa.
- 小笠原宏・G. Hofmann・D. Roberts・中尾 茂・加藤春實, 2011, 南アフリカ金鉱山の地震発生場における応力・強度拘束の試み, 日本地震学会 2011 年秋季大会講演予稿集, C22-03, 2011 年 10 月 13 日, 静岡.
- Durrheim, R. J., H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, A.M. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, O. Murakami, M. Naoi, N. Yoshimitsu, and T. Kgarume, 2012, Establishment of SATREPS experimental sites in South African gold mines to monitor phenomena associated with earthquake nucleation and rupture, Sixth International Seminar on Deep and High Stress Mining, 30 March 2012, Perth, Australia.
- Ogasawara, H. and H. Kato, 2012, A modified CCBO technique optimized for regular geological drilling procedures in South African gold mines, ACG Stress Measurement Workshop, 31 March 2012, Perth, Australia.

- (9) 平成 24 年度実施計画の概要 :

新しい観測網の構築は 23 年度の前半にすべての鉱山において完了する予定であったが遅れている。3つの鉱山においては完了しているが、残り二つの鉱山の構築完了は 24 年度の前半になる見込みである。観測が始まったサイトについては、震源域への歪の蓄積や解放を監視しつつ、地震やゆっくり地震に先行する歪変化の検出を試みる。応力測定や観測された歪変化と比較することによって応力モデルをキャリブレートし、モデリングによる応力場と強度の拘束の試みも続ける。

- (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.ritsumei.ac.jp
URL : http://www.ritsumei.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