

(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) 計画期間中 (平成 21 年度 ~ 25 年度) の成果の概要 :

地震の前駆ひずみ変化を捉えることができた (7-1 ; 平成 22 年度成果の概要)。当初計画 (上記 (6)) より大規模に震源近傍でのひずみ観測網を展開することができ (7-2)、地震発生場の応力を測定・拘束できることがわかり、応力と強度を当初計画 (上記 (6)) より明らかにすることができた (7-3)。

(7-1) 地震の前駆ひずみ変化とその発生場の応力と強度の理解の進展

Mponeng 金鉱山地下 3.3km のサイトで、2008 年までに観測されていたひずみデータの精査から、 $M_w 0.3$ の地震の前駆と思われる明瞭な変化が見つかった (桂, 2011、立命館大修士論文 ; 平成 22 年度成果の概要)。これほど明瞭な前駆の観測事例は他にないが、この前駆データだけから、どの規模の地震がいつ起こるかをすることは困難であった。理解をより進めるためのデータを更に得るためには、後述する観測網の極至近距離の地震が発生するのを待たねばならない。しかし、後述するように地震発生場の応力や強度の知見が得られ始め、議論のための下地はできつつある。

例えば、この前駆が観測された同じサイトの極近傍で発生した $M2$ の地震は、AE 観測 (他課題 2402) によって、震源断層が鮮やかに描き出されたため、断層とその付近の応力の時間発展とピーク強度や残留強度を、より十分な信頼度で拘束することができた (Hofmann et al., 2012, 南半球岩盤工学シンポ ; 図 1、2 左)。この震源の貫通孔が掘削され、そのブレイクアウトとコア・ディスクの解析から震源付近の応力分布 (図 2 右) が拘束された (Yabe et al. 2013)。それは、計算機応力モデリング (図 2 左) の結果と調和的であった (小笠原・他, 2014)。調和的であった中になお見られた有意な差は、ひずみの連続観測に基づいて震源付近の非弾性変形を評価すれば、説明可能であった (桂, 2011、立命館大学修士論文 ; 小笠原・他、日本地球惑星科学連合 2014 年大会 ; Ogasawara et al., 2014 南ア岩盤工学シンポ)。

(7-2) 前例のない規模での南ア金鉱山でのひずみ観測網の構築

3 成分石井式ひずみ計の観測網の構築は、他予算で多くの物的・人的資源を投入することができたため、当初計画以上の規模で進んだ。2014 年 2 月現在の観測状況 (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 :

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

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

South Deep、地下約 3km、2 台、OL; 2011/12 2013/11、100Hz、最大約 1×10^{-4} strain。

Moab Khotsong、地下約 3km、3 台、OL; 2012/11、1-100Hz、 5×10^{-4} strain。

OL は、オン・ライン準リアルタイム連続収録中であることを示す。2013 年 11 月には South Deep 鉱山に石井式ひずみ計が増設された。これらの観測は、平成 20 年度以前の観測に比べ、よく維持されており、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。2011 年東北地方太平洋沖地震 ($M_w 9.0$) や 2012 年 4 月のスマトラ沖地震 ($M_w 8.6$, $M_w 8.2$)

など遠地巨大地震のひずみ地震動が記録されているサイトもあり、ひずみ計に近い断層面の過渡的応答の予備解析が始まった(大久保・他、日本地球惑星科学連合 2014 年大会)。Ezulwini 鉱山は地表下 1km であるが、南北幅約 400m 東西幅約 200m の範囲以外は掘り尽くされているため、残柱の岩盤応力が地下 3km の鉱山よりも大きいことが、2013 年 12 月の現場測定によって確かめられた。ターゲット断層の西側は採掘済みで、東側の採掘は 2014 年から本格化する。他にも含むすべてのサイトでひずみ計から 2~300m 以内に M2 級の地震も発生しはじめている。より近くで地震が近々発生すると思われる。

(7-3) 地震発生場の応力の実測

自然地震で震源の応力や強度を実測することは技術的・経済的に非常に困難である。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が、2011 年の取り組み (Ogasawara et al., 2012, J. SAIMM) 以降、円錐孔底ひずみ法による応力測定 (CCBO 法; Sugawara and Obara, 1999, Int. J. Rock Mech. Min. Sci.; 標準仕様は 76mm 径の応力解放) を 60mm 径 (BX 径; 以下 BX CCBO 法) 小型化し、南ア金鉱山での条件 (低品質なドリリング、限られた現場作業時間など) に最適な形で 2011 年に導入することに成功し、2013 年 1 月以降 3 つの金鉱山の延べ 6 カ所測定を行うことに成功した。M1.5 の地震被害現場に近い地点も含み、測定地点の地表下深度の範囲は 1.0~3.4km (世界で最深の金採掘域)、得られた最大主応力の範囲は 76~146MPa であった。これほどの最大主応力値や深度の範囲で、これだけの数の測定がシステムティックに行われたことは、世界ではない。Hofmann et al. (2013) が、応力測定データで校正した計算機応力モデリングで評価した 7 つの $M_L > 2.9$ の震源断層面上の地震発生時の法線応力と剪断応力、最大主応力の範囲は、それぞれ、25~65 と 45~86、100~177 MPa であり、我々が地震発生場の応力が原位置測定可能になったことを意味する。2013 年 11 月には、周囲の採掘がやや進んでいた地下 3km の最大主応力約 100~110MPa の現場の測定では、世界で最も多く用いられている応力測定法の一つである CSIRO 法との比較測定が行われ、BX CCBO 法が工程的に非常に容易であることと、その測定結果が CSIRO 法や、ともに弾性応力計算機モデリングの結果と調和的であることも確認できた。2013 年 12 月には、Ezulwini 鉱山の豎坑鉱柱の未採掘域の中央部で BX CCBO 法の測定が行われ、パイロット孔にブレイクアウトが発生し CSIRO 法では測定ができない条件でも BX CCBO 法では測定ができることがあることが実証された。

(7-4) 水没鉱山 (ERPM 鉱山と Buffelsfontein 鉱山) の誘発地震は、それぞれ 2009 年と 2013 年に閉山するまでの間、観測が継続された。

(8) 平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

Hofmann, G., L. Scheepers, and H. Ogasawara, 2013, Loading conditions of geological faults in deep level tabular mines, Proc. 6th Int. Symp. on In-Situ Rock Stress, Sendai, 558-580.

Yabe, Y., M. Nakatani, M. Naoi, T. Iida, T. Satoh, R. Durrheim, G. Hofmann, D. Roberts, H. Yilmaz, G. Morema, and H. Ogasawara, 2013, Estimation of the stress state around the fault source of a Mw 2.2 earthquake in a deep gold mine in South Africa based on borehole breakout and core discing, Proc. 6th Int. Symp. on In-Situ Rock Stress, Sendai, 604-613.

Ogasawara, H., H. Kato, G. Hofmann, P. Piper, T. Clements, and K. Sakaguchi, 2013a, In-situ stress measurements to constrain stress and strength near seismic faults in deep level South African gold mines, Proc. 6th Int. Symp. on In-Situ Rock Stress, Sendai, 614-623.

Ogasawara, H., G. Hofmann, H. Kato, M. Nakatani, H. Moriya, M. Naoi, Y. Yabe, R. Durrheim, A. Cichowicz, T. Kgarume, A. Milev, O. Murakami, T. Satoh, and H. Kawakata, 2013b, In-situ monitoring and modelling of the rock mass response to mining: Japanese-South African collaborative research, Proc. 8th Int. Symp. Rockburst and Induced Seismicity in Mines, Russia, 51-60.

小笠原宏・加藤春實・Gerhard Hofmann・矢部康男・坂口清敏, 2014, 南アフリカ金鉱山大深度における震源近傍での現位置多点応力測定の可能性, 月刊地球, No. 366, in press.

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

立命館大学総合科学技術研究機構 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

(10) 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 リサーチオフィス (BKC)
電話：077-561-2802
e-mail：t-taka-a@st.ritsumei.ac.jp
URL：http://www.ritsumei.ac.jp/research/center/sci_eng/

(11) 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：立命館大学工学部

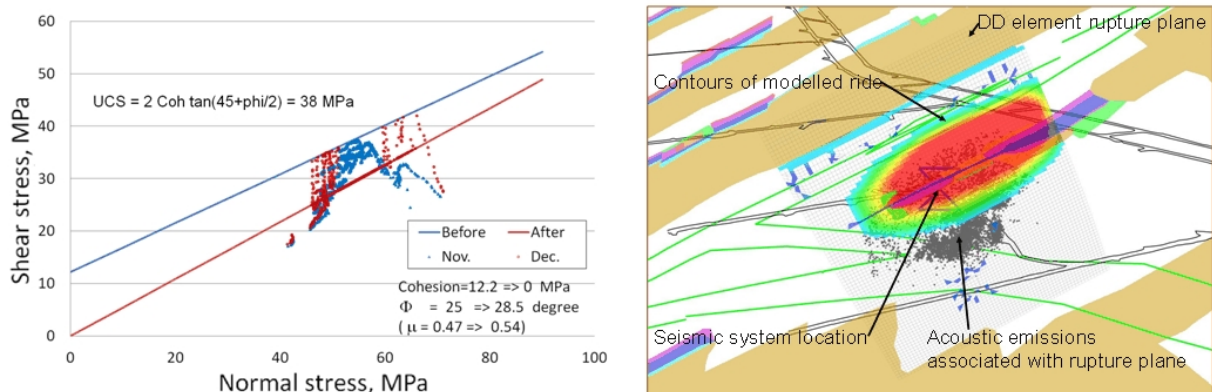


図 1

左：Mponeng 鉱山 116L で 2007 年 12 月 27 日に発生した M2 級地震の断層面上に推定される、剪断応力と法線応力。地震前 (青) に高かった剪断応力が、地震によって赤太線部まで最大約 10MPa 降下し、その周囲で地震後 (赤) 剪断応力が高まっている (Ogasawara et al., 2013b)。左図のピーク強度 (青線) と残留強度 (赤線) を仮定すると、右図のコンターで示された断層滑り (最大滑り量 0.8cm) を、地震が発生した 12 月に再現することができる (Hofmann et al. 2012)。黒のドットは JAGUARS の AE 震源 (Yabe et al., 2009)。この計算で仮定された初期応力場は、2013 年 1 月の現場応力測定で妥当であることが確かめられた (Ogasawara et al., 2013a)。

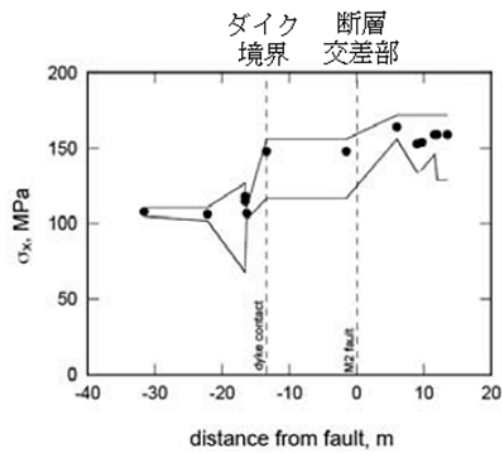
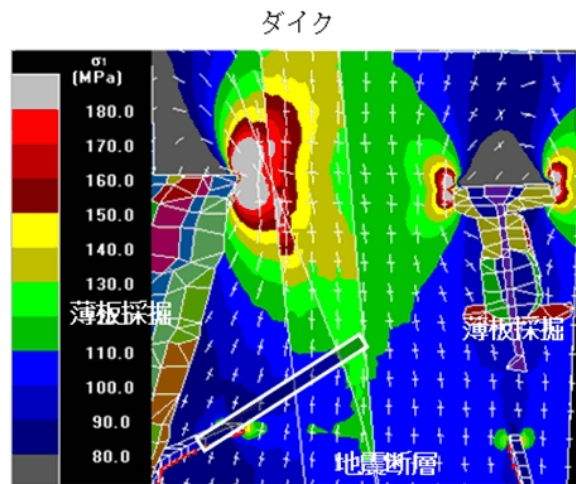


図 2

上：ML2.1 の地震断層およびダイクの走向にほぼ直交する鉛直断面上の最大主応力の分布（コンター）および震源貫通孔のおおよその位置（白四角；小笠原・他, 2014 を改変）。下：Yabe et al. (2013) がブレイクアウトとコア・ディスクングに基づいて拘束した、孔軸に垂直な面内の最大主応力。