

## 南アフリカ金鉱山における M2 震源域での地震の準備と発生過程の総合観測

Multidisciplinary monitoring of preparation and generation of earthquakes at M2 sources in South African gold mines

小笠原 宏 (OGASAWARA HIROSHI)

立命館大学・理工学部・教授



### 研究の概要

5 年の研究期間内に、100m サイズの地震の発生を予見し、至近距離稠密総合観測網を構築し、地震を捉える。2 つの鉱山で観測網が完成済みで、もう 1 つも平成 24 年に完成。既にターゲット断層上で剪断歪の蓄積と微小破壊活動が確認され始めている所も。平成 24 年度から地震が活発になり、透過波による断層状態変化、地震発生時には破壊前線の動的応力変化も捉えられる。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地震現象、地殻変動、地震動

### 1. 研究開始当初の背景

震源サイズが数十 km を超える自然の大地震の震源で起こることを理解するには、サイズがせいぜい数十 cm までの岩石試料の室内実験の知見をどのように外挿すべきか？それを知るために、中間サイズの地震の前や発生時に、震源域で起こっていることを至近距離でできるだけ詳細に観察したい。

平成 20 年度までの十数年間の取り組みでは、南アフリカ金鉱山の地下 2~3.5km の複数の観測サイトにおいて、自然地震の地表観測では不可能な分解能で、地震の準備と発生プロセスの詳細が観測され始めていた。これらの結果は、鉱山の地震や岩盤変形のルーチン観測に用いられているものよりも桁違いに高感度、あるいは、大容量なセンサーを用い、広い周波数帯域がカバーされた観測によって得られたものであった。また、最大で 100m サイズの地震を含む地震活動域の中で得られたものでもあった。

### 2. 研究の目的

本計画では、従来の 2~3 倍の数の観測計器をより広範囲に 3 次元的に配置し、より大規模な総合観測網を震源の至近距離に展開し、地震の準備と発生プロセスのより詳細を明らかにする。具体的には、(1)DC~数十 Hz の観測帯域で、前駆を伴う非地震性歪イベントや前震が多発している時の震源域の岩

盤の非地震性挙動を高解像度で観測する。また、(2)数十 Hz~数十 kHz の観測帯域で、100m サイズの断層の地震（高速破壊）にともなう動的応力変化を破壊前線で直接計測する。さらに(3)100m サイズの地震発生やゆっくりした非地震性断層すべりと、数 cm スケールの微小破壊(AE)とがどのように関連しながら活動するかを詳しく描き出す。

2011 年東北地方太平洋沖地震では、列島上の稠密観測では詳細を見ることができない太平洋沖で、我々の知見を超える巨大な断層破壊が発生してしまった。次の巨大地震が発生する前に、至近距離観測ならば何が見えるかを、本プロジェクトで示さねばならない。

### 3. 研究の方法

観測候補地は、南アフリカ共和国の金鉱山の地下 1~3km である。まず、採掘計画と地質図を精査し、採掘に伴って応力が集中し、2011~2013 年に M>2 の地震を伴う活発な地震活動が予見される断層を見つけ出す。そして、ターゲット領域に理想的な計器アレイが構築できるように、坑道配置を熟慮して、ドリリングを行い、計器を埋設して観測を始める。ドリリングの難易や、採掘計画の変更にも対応できるように、予備の観測候補地にも予備の計画を用意する。観測開始までに二年前後の時間を要する。

地震活動が活発化すると、2~3 年の間にマグニチュード (M) が 2~3 程度（震源サイズ

が約百～数百 m) の誘発地震が 2～3 個発生する。それらとそれに付随する現象を漏れなく収録することを目指す。

小笠原 (立命大) が岩盤変形を、中谷 (東京大) が AE、矢部 (東北大) が破壊前線動的応力、川方 (立命大) が断層透過波を統括し、東京大学、東北大、京都大学、産業総合技術研究所、東濃地震科学研究所、鹿児島大学、南アフリカ金鉱山 (Anglogold Ashanti 社、First Uranium 社、Goldfields 社) や鉱山地震監視会社 (IMS 社) などのメンバー達との国際産学協同研究として行われている。

#### 4. これまでの成果、5. 今後の計画

計画期間である 5 年の前半は、主に観測網の企画・調査・折衝、および、ドリリングと計器埋設に費やされた。ドリリングの総延長は約 2.5km、総本数は 70 本近くになり、80 を超える計器が埋設された。かつてない規模の観測網が構築されつつある。

当初主実験サイトをモアブ・コツオン鉱山の地下約 3km とし、ドリリングは二十数本 (総延長約 1.3km) を完了させた。しかし、断層帯のドリリングと計器埋設で遅れが生じていたため、予備サイト、イズルウィニ鉱山においても観測を計画し先行させた、イズルウィニ鉱山では平成 22 年度に岩盤変形・AE・破壊前線動的応力・断層透過波の観測が始まった。

破壊前線動的応力の観測は、ドリーフォンテイン鉱山にもより好適な断層が見つかり、平成 23 年度に観測が始まった。

モアブ・コツオン鉱山も、平成 24 年度には観測網が完成する。

既に観測が始まっているサイトでは、ターゲット断層上に歪が蓄積し、既知の断層上以外にも面状の AE 活動が検出されている。地震活動は平成 24 年度に活発化し、これらに伴う断層状態変化が透過波で、また、地震発生時には破壊前線に動的応力が捉えられる予定である。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

Durrheim, R. J., H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, H. Kawakata, M. Naoi, A. K. Ward, S. K. Murphy, J. Wienand, P. Lenegan, A. M. Milev, O. Murakami, N. Yoshimitsu, T. Kgarume, A. Cichowicz, and the SATREPS Research Group. Establishment of SATREPS experimental sites in South African gold mines to monitor phenomena associated with earthquake nucleation and rupture. Proceedings of the sixth International Seminar on Deep and High

Stress Mining, 23-30 March 2012, Perth, Australia (ed. Yves Potvin), Australian Centre for Geomechanics, pp.173-187, 2012.

Ogasawara, H. Keynote: the great eastern Japanese earthquake and tsunami of 11 March 2011 and the research we are doing in South African gold mines. AfricaArray Workshop 2011, 21 November 2011, University of Witwatersrand, Johannesburg, South Africa, 2011.

Naoi, M., M. Nakatani, Y. Yabe, G. Kwiątek, T. Igarashi, and K. Plenkers. Twenty thousand aftershocks of a very small (M2) earthquake and their relation to the mainshock rupture and geological structures. Bulletin of the Seismological Society of America, 101 (5), 2399-2407, doi: 10.1785/0120100346, 2011.

Kawakata, H., N. Yoshimitsu, M. Nakatani, J. Philipp, I. Doi, M. Naoi, T. Ward, V. Visser, G. Morema, S. Khambule, T. Masakale, A. Milev, R. J. Durrheim, L. Ribeiro, M. Ward, and H. Ogasawara. Monitoring transmitted waves across a fault with a high potential for mining induced earthquakes -the Ezulwini gold mine in South Africa, Abstracts S31C-2257, 2011 Fall Meeting, AGU, 7 December 2011, San Francisco, 2011.

Durrheim, R. J., H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, A. M. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, H. Moriya, and SATREPS Research Group. Observational studies to mitigate seismic risks in mines: a new Japanese - South African collaborative research project. The Proceedings of the fifth International Seminar on Deep and High Stress Mining, 6-8 October 2010, Santiago, Chile, Australian Centre for Geomechanics, 215-226, 2010.

Yabe, Y., J. Philipp, M. Nakatani, G. Morema, M. Naoi, H. Kawakata, T. Igarashi, G. Dresen, H. Ogasawara, and JAGUARS. Observation of numerous aftershocks of an Mw 1.9 earthquake with an AE network installed in a deep gold mine in South Africa. Earth Planets Space, 61, e49-e52, 2009.