

## 大深度南アフリカ金鉱山のM2-M5.5震源域の科学掘削計画 Drilling into seismogenic zones of M2.0 - M5.5 earthquakes in deep South African gold mines (DSeis)

小笠原 宏<sup>1\*</sup>; 矢部 康男<sup>2</sup>; 伊藤 高敏<sup>2</sup>; ファンアスウェヘン ヘリ<sup>3</sup>; チホビチ アルトゥール<sup>4</sup>;  
ダーハイム レイモンド<sup>5</sup>; 関連会議 参加者<sup>6</sup>  
OGASAWARA, Hiroshi<sup>1\*</sup>; YABE, Yasuo<sup>2</sup>; ITO, Takatoshi<sup>2</sup>; VAN ASWEGEN, Gerrie<sup>3</sup>; CICHOWICZ, Artur<sup>4</sup>;  
DURRHEIM, Raymond<sup>5</sup>; PARTICIPANTS, Related meeting<sup>6</sup>

<sup>1</sup>立命館大学, <sup>2</sup>東北大学, <sup>3</sup>鉱山地震研究所, 南アフリカ, <sup>4</sup>Council for Geoscience, South Africa, <sup>5</sup>CSIR / Witwatersrand Univ., South Africa, <sup>6</sup>J-DESC SATREPS WS と関連会議の参加者

<sup>1</sup>Ritsumeikan Univ., <sup>2</sup>Tohoku Univ., <sup>3</sup>Inst. Mine Seismology, South Africa, <sup>4</sup>Council for Geoscience, South Africa, <sup>5</sup>CSIR / Witwatersrand Univ., South Africa, <sup>6</sup>Participants of J-DESC SATREPS WS and related meetings

野島、San Andreas、集集地震、四川地震、Alpine などの断層、Gulf of Corinth、南海トラフ、日本海溝、Costa Rica など、断層ドリリングが世界各地で行われ、2013年ICDP科学会議では、これらの大きな成果を鑑みてもなお次の10年には以下のトピックに集中すべきだと提言している (Mori and Ellsworth 2013) :

- どう破壊核が形成され破壊が伝播するのか? なぜ破壊が止まるのか?
- 何が地震の頻度と規模を決めるのか?
- 地震時に断層の透水性や流体圧がどう変化するのか?
- 地震再来周期の間に、応力の大きさと向きがどう変わるのか?

これらの地震学の重要な問題の議論は、震源から遠い観測のデータでは困難であり、ドリリングによる至近距離の観測データでしかできない。しかし、地震核形成深度まで地震発生帯をドリリングすることは容易ではない。

金の採掘が最深で地表下3.4kmに達する南アフリカ(南ア)の金鉱山は、年に数回の頻度でM2かそれ以上の地震が採掘現場から数十m以内で発生するため、地震活動域に容易に直接アクセスできる世界でも非常に限られた場所である。古くは、McGarr et al. (1975) や Gay and Ortlepp (1979) などの先駆的研究があり、最近でもユニークな地震発生場の至近距離観測結果が得られている (e.g. Ogasawara et al. 2002, 2009, and 2014; Nakatani et al. 2008)。その様な中、南アの金採掘地域における過去最大のM5.5の地震がOrkney市近郊で2014年8月5日に発生した(以下M5.5 Orkney地震)。この震源断層の上端は、付近の金鉱山の最深部(地表下約3km)のわずか数百m下であり、地下の坑内Geophoneやひずみ計や地表の強震記録など、かつてない多くのデータがSATREPSなどの取り組みによって得られた。このようなまれにしか得られないデータで詳しい地震解析を行い、地震発生帯での直接観測を比較して地震発生帯の物理学を議論するために、この震源をできるだけ早くドリリングする計画を議論するためのICDP workshopを我々は提案した。我々はまた、M2の震源に数十mで到達できるドリリング候補地も見つけており、規模依存性を議論できるデータも得たいと考えている。この様なドリリングは、従来の他の自然地震のドリリング計画よりも地震発生帯の有意に広い範囲(震源核、強震源、滑り量が大い地点、断層端)をカバーすることができ、ドリリング・リスクやコストは小さくて済む可能性がある。

応力が臨界状態の地震発生帯では、3次元絶対応力の空間分布の直接測定は一般に困難であり、現場への往復に時間がかかる南ア金鉱山でも確実に十分な数の測定ができる技術・経験・体制がなかった。しかし、我々はこの困難を克服した。改善された数値応力モデリングに基づき、高応力によるボアホールやコアのダメージが小さくて済むドリリング方向を見つけ、より高い成功率で3次元絶対応力を測定できることを実証した。コアの回収率も高い。この成果を踏まえ以下の取り組みを行いたい:

- (1) 地震発生帯における3次元絶対応力分布の直接測定。
- (2) 水圧破砕や他のボアホールやコアのダメージから応力を推定する方法との総合解釈や比較。
- (3) 地震データ解析から得られる、地震時および地震後の破壊プロセス、強震発生過程、応力逆解析、応力降下量やb値、間隙水圧の空間分布などと、孔やコアのロギングや測定で得られる地質・物性・間隙水圧や応力分布との比較。
- (4) M5.5 Orkney地震の謎の解明: 通常の鉱山誘発地震は正断層型で鉱山採掘深度で発生するのに対し、M5.5 Orkney地震は横ずれ型で採掘域よりも有意に深い地点で発生した。M5.5の断層直上の地下約3kmの実測応力は、横ずれ型の地震発生を説明できなかった。
- (5) ドリリング後に、地震後の地震活動、間隙水圧、歪などを連続観測し、バックグラウンド载荷速度や断層载荷源、断層強度回復過程などを議論。

本連合大会では、南ア金鉱山での採掘と誘発地震、および、SATREPS計画のインパクトや、M5.5 Orkney地震の破壊過程の予備解析の結果も報告されるので、参考にされたい。

MIS32-14

会場:304

時間:5月24日 12:30-12:45

今回紹介する計画は、立命大、東大、東北大、鹿児島大、北大、産総研、東濃地震科学研、CSIR, Wits 大、 Council for Geoscience の研究者、および、鉱山や関連会社 (Anglogold Ashanti, Sibanye, Goldfields, GoldOne, First Uranium, Seismogen, OHMS, Groundwork, 3D 地科学研究所, 明間ボーリング, ホームサイズモメータ, テクノ菅谷) の技術者達による成果に基づく。研究資金は JST-JICA SATREPS、科研費 (No. 21224012, 21246134)、地震・火山噴火予知のための観測研究計画、立命館大学、東北大 21 世紀 COE プログラム、南ア科技省、Research Chair initiative などによる。

図の説明：M5.5 の本震と余震 (緑丸)、地表強震計 (水色三角)、地下約 3km のひずみ計と応力測定地点 (桃四角) およびドリリングが可能と思われる地下 3km の坑道 (白細四角)。

キーワード: 地震発生場へのドリリング, 大深度南アフリカ金鉱山, 地震発生の物理, 応力と強度, 地震解析との比較  
Keywords: Drilling into seismogenic zones, Deep South African gold mines, Physics of earthquakes, Stress and Strength, Comparison with seismological analyses

