

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2013

課題番号：21224012

研究課題名(和文)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

研究課題名(英文)Multidisciplinary monitoring of preparation and generation of earthquakes at M2 sources in South African gold mines

研究代表者

小笠原 宏(Ogasawara, Hiroshi)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：40213996

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 149,900,000円、(間接経費) 44,970,000円

研究成果の概要(和文)：南アフリカの6金鉱山の地下約3kmあるいは相当する応力を有する岩盤で、80本以上総延長2.8km以上のドリリングが行われ、誘発地震活動の至近距離総合観測がかつてない規模で行われた。微小破壊観測はかつてない詳細さで破壊面の成長とその地震学的特徴を描き出した。高精度で描出されたマグニチュード(M)2の震源を貫通するドリリングは震源周囲の応力の拘束を成功させた。この震源付近に発生したM0の地震では先駆的な歪変化が明瞭に観測された。同国の印刷公表された既往の応力測定の実験限界と応力限界を有意に超える条件でも測定に成功し、応力モデリングが高度化された。その他至近距離観測でしか得られない成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：Drilling > 80 holes with a total length > 2.8 km in earthquake prone areas, conducted were multi-disciplinary studies at sites (at depths > 3km or with equivalent stress) at six South African gold mines in ever-larger scale. Microfracturing associated with a magnitude (M) 2 event as well as those in highly stressed rock mass at 1.0km depth at another mine were finely delineated and seismologically analyzed in ever-greater detail. A hole intersecting an M2 hypocenter allowed the constraint of stress. A technology was introduced that allowed to measure stress at ever-larger depths or in ever-larger magnitudes, which calibrated elastic stress modelling. Pre-seismic strain change was observed for a M0 event, which was one of the other outcomes that can be obtained only from our monitoring at the closest proximity of hypocenters.

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：南アフリカ金鉱山 誘発地震 至近距離観測 微小破壊 準静的ひずみ変化 動的破損過程 絶対応力 断層強度

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2~3.4km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、これまでの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ひずみ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。(4)事後に震源をドリリングして直接観測・比較する。

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想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)が全体統括と岩盤変形を担当し、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)が断層透過波を担当し、東京大学、東北大学、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、CSIR, Witwatersrand大、南アフリカ金鉱山(Anglogold Ashanti社、First Uranium社、Goldfields社、Gold One社やSibanye Gold社)や鉱山地震監視会社(IMS社)、土木コンサル会社(OHMS社、Seismogen社、Groundwork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. 研究成果

新燃岳噴火や東北地方太平洋沖地震のために研究者の渡航予定を変更せざるを得なかったり、長期のストライキ等の悪影響もあったりしたが、以下に述べる様に世界的に学術的に貴重な成果を得ることができた。

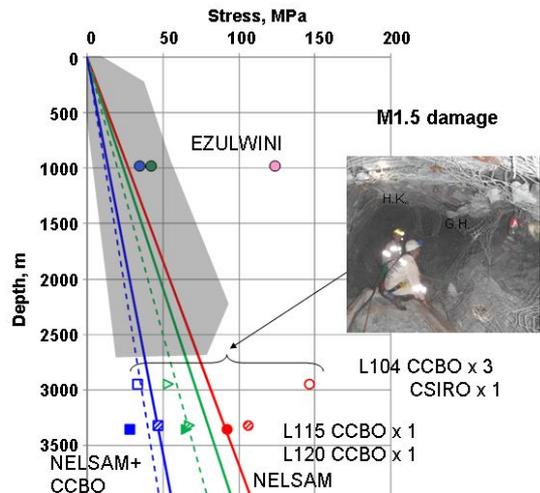


図1 出版済みの既往研究(ハッチ)よりも大深度・高応力での応力測定に成功し、既往研究の初期応力モデル(実線)を修正することができた。写真はM1.4の地震被害現場。その近くでも応力測定が行われた(論文)。

(1) ムボネン鉱山の地下3.3kmのサイトでは、8個のセンサーからなる微小破壊観測によって、約2万個の微小破壊の余震を捉え、Mw2.2の地震の破壊面を詳細に描き出すことに成功し、非常に詳細な微小破壊の解析が行われていた(例えば Yabe et al. 2009, Earth Planets Space; Naoi et al. 2011, Bulletin of Seismological Society of America)。描き出された破壊面を貫通するドリリングが行われ、孔崩れやコアの皿状破壊様式を解析することによって震源付近の絶対応力を拘束することに成功した(論文)。南アフリカ

山の悪条件下であっても絶対応力を測定する技術が確立され（論文）複数箇所での計算機応力推定値の精度が検証された（論文；図1）。それによってM2の断層付近のより広範囲の応力・強度を知ることができた。計算機推定応力は、震源貫通孔で拘束された応力より小さかったが、断層直近に埋設されていたひずみ計の実測変化を再現するように採掘域の非弾性変形の効果を加味すればよいことがわかった（図2；論文）。

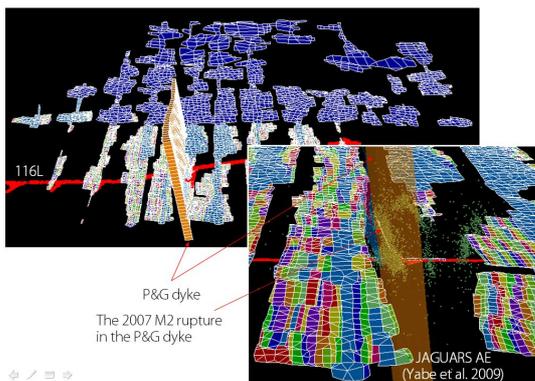


図2 左：ムボネン鉱山の地下3.3kmの応力計算のための採掘・地質構造境界要素モデル。手前に傾斜する鉱脈の薄板状採掘跡、地下3.3kmの坑道(116L)、および、M2が発生したダイクが示されている。右：ダイク(右图中の縦の帯)中で、AEによってM2破壊面が詳細に描きだされ、応力と強度が評価された（論文）。

(2) イズルウィニ鉱山では、3次元配置された数十のセンサーからなるかつてない規模の微小破壊観測網が構築された（図3）。月あたり数十万個に達する微小破壊が検知され、震源決定できている（図4；論文）。発生する微小破壊の9割は、採掘前線に沿うように分布しており、採掘空洞周辺の高差応力域でものすごい量の微小破壊が起こっていることがわかった。これらの規模分布は、鉱山全体で起こる地震のサイズ分布が示す自己相似則に従っており、先行研究で提案されていた、発破によって新規にできる微小破壊の影響で自己相似則が破れる、という現象は見られないことが明らかになった（論文）。

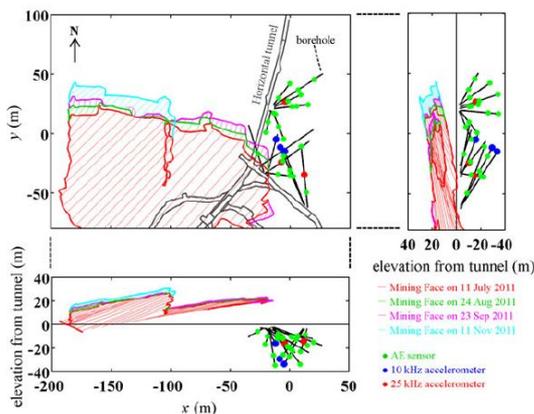


図3 イズルウィニ鉱山に展開された多数のAEセンサー（黄緑）と、AEセンサーの周波数特性の較正などをするための加速度センサー（青と赤）。これらによって、鉱

山の地震観測網では検出できなかった微小破壊活動を捉えることができ、その地震学的な特徴を詳細に議論できるようになった（論文より）。この鉱山を含む3つの鉱山の想定震源域において総本数70本、総延長2.8kmを超えるドリリングが行われた。

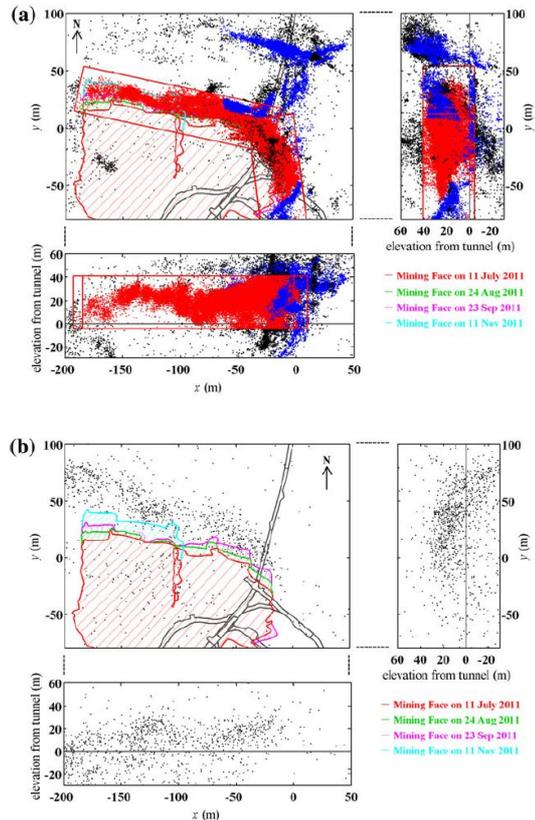


図4 イズルウィニ鉱山の稠密微小破壊観測網で検出された微小破壊(a)と鉱山の地震観測網で同じ期間に検出された地震(b)との比較（論文）。赤：破壊前線前方に多発する微小破壊、青：それ以外の面状に分布する微小破壊。

地表下1.0kmの観測サイトであったが、周囲の採掘が進んでいたため、本研究で確立された技術で測定された応力は、地下3kmの応力をしのぐ大きさであり、得られた知見を、南アフリカ金鉱山の他の大深度の地震発生の理解や解釈に生かすことができることが明らかになった（論文）。

(3) ムボネン鉱山地下3.3kmのM2の地震の震源に非常に近い所で発生したM0の地震の前駆ひずみ変化を明瞭に観測することができた（図5）。しかし、最終破壊に先立つひずみの加速は見られなかった。

(4) 地震発生域を透過する地震波の地震前後の変化の検出に成功した（論文）。

(5) 新規に設置したいずれの観測サイトにおいても、数百m以内ではM2級地震が既に発生しているが、モアブ・コツオン鉱山とイズルウィニ鉱山では観測網から約100m以内にはまだ発生していない。ドリーフォンテイン鉱山では2013年3月にM2級の地震が至近距離で発生し、現在解析を行っている。

至近距離でのひずみ観測により捉えられたプレスリップ

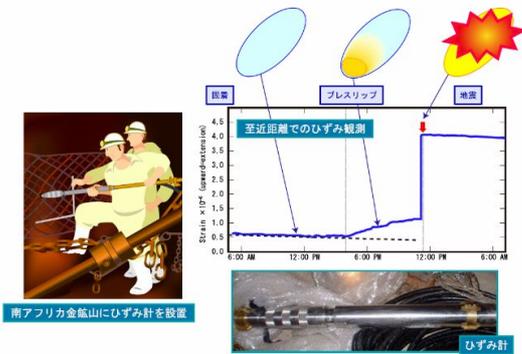


図5 MOの地震の前駆ひずみ変化

http://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/tou shin/_icsFiles/afieidfile/2012/05/17/1320842_02.pdf (文部科学省学術審議会測地学分会「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」平成22年度 年次報告(成果の概要))

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌等論文〕(計24件)

うち主な論文

Ogasawara, H., H. Kato, G. Hofmann, D. Roberts, P. Piper, T. Clements, A.K. Ward, Y. Yabe, H. Yilmaz, and R.J. Durrheim, BX CCBO in-situ stress measurements at earthquake prone areas in South African gold mines – a summary of mini-workshop on 13 Feb 2014, Proceedings of ARMA2014, Minnesota University, Minneapolis, June 2014, 査読あり, 2014, CD-ROM, 11 pages.

Ogasawara, H., H. Kato, G. Hofmann, D. Roberts, T. Clements, P. Piper, and Y. Yabe, In situ stress measurement at earthquake prone areas in South African gold mines, Proceedings of 6th South African Rock Engineering Symposium SARES, Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 査読あり, 2014, 349-358.

Ogasawara, H., T. Katsura, G. Hofmann, Y. Yabe, M. Nakatani, M. Naoi, H. Ishii, D. Roberts, S. Nakao, M. Okubo, J. Wienand, P. Lenegan, and A.K. Ward, In-situ monitoring of rock mass response to mining in South African gold mines using the Ishii strainmeters, Proceedings of 6th South African Rock Engineering Symposium SARES, Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 査読あり, 2014, 21-34.

Naoi, M., M. Nakatani, S. Horiuchi, Y. Yabe, J. Philipp, T. Kgarume, G. Morema, S. Khambule, T. Masakale, L. Ribeiro, K. Miyakawa, A. Watanabe, K. Otsuki, H. Moriya, O. Murakami, H. Kawakata, N. Yoshimitsu, A. Ward, R. Durrheim, and H. Ogasawara, Frequency-magnitude distribution of $-3.7 < M_w < 1$ mining-induced earthquakes around a mining front and b value invariance with post-blast time, Pure and Applied Geophysics, 査読あり, 2013, doi: 10.1007/s00024-013-0721-7.

Yabe, Y., M. Nakatani, M. Naoi, T. Iida, T. Satoh, R. Durrheim, G. Hofmann, D. Roberts, H. Yilmaz, G. Morema, and H. Ogasawara, Estimation of the stress state around the fault source of a M_w 2.2 earthquake in a deep gold mine in South Africa based on borehole breakout and core discing, Proceedings of 6th International Symposium on In-Situ Rock Stress, 20-22 August 2013, Sendai, Japan, 査読なし, 2013, pp.604-613.

Moriya, H., M. Naoi, M. Nakatani, O. Murakami, T. Kgarume, A.K. Ward, R. Durrheim, J. Philipp, Y. Yabe, H. Kawakata, and H. Ogasawara, Detection of mining-induced fractures around a stope in Ezulwini gold mine, South Africa, by using AE events with similar waveforms, Proceedings of 21th International Acoustic Emission Symposium, Jap. Soc. for Non-Destructive Inspection, Tokyo. 査読あり, 2012, pp.181-186.

Yoshimitsu, N., H. Kawakata, A. Yamamoto, H. Ogasawara, and Y. Iio, Temporal changes in attenuation of S waves through a fault zone in a South African gold mine, Geophysical Journal International, 査読あり, Vol.191, 2012, pp.1317-1324, doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05678.x.

〔学会等発表〕(計69件)

うち主な招待講演

Nakatani, M., Microfractures on natural faults stressed by mining, The International Summer School on Earthquake Science "Diversity of Earthquakes" organized by the Earthquake Research Institute of the University of Tokyo and the Southern California Earthquake Center, Laforet Gora, Kanagawa, Japan, 25 September, 2013.

Ogasawara, H., H. Kato, Y. Yabe, G.

Hofmann, D. Roberts, and K. Sakaguchi,
A provisional plan of multiple stress
measurements at a seismic source at
great depth at South African gold mines,
“Workshop on Earthquake and Stress” in
association with 6th International
Symposium on In-situ Rock Stress,
Sendai International Center, Miyagi,
Japan, 19 August 2013.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

2013年8月26日、朝日新聞、朝刊、科学面
「震源直近、動き探る 南アの金鉱、日本
人チーム挑戦」。

2010年11月22日、読売新聞 とれたて!
科学 Monday 「南ア鉱山地震を観測 - 地
下3000メートル超震源断層に迫る」

2010年1月12日(火)「地震を掘り出す」
東京新聞・東京中日新聞朝刊。

2009年10月31日(土)「南アとの共同予
知研究」、読売新聞朝刊。

ホームページ等

<http://www.mineseis.se.ritsumei.ac.jp/JSPS/JSPS-HOME.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小笠原 宏 (OGASAWARA, Hiroshi)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号: 40213996

(2) 研究分担者

中谷 正生 (NAKATANI Masao)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号: 90345174

矢部 康男 (YABE, Yasuo)
東北大学・理学研究科・准教授
研究者番号: 30292197

川方 裕則 (KAWAKATA, Hironori)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号: 80346056

(3) 連携研究者

石井 紘 (ISHII, Hiroshi)
(公財)地震予知総合研究振興会・東
濃地震科学研究所・所長
研究者番号: 30004386

中尾 茂 (NAKAO, Shigeru)

鹿児島大学・理学部・准教授

研究者番号: 90237214

大久保 慎人 (OKUBO, Makoto)

(公財)地震予知総合研究振興会・東濃

地震科学研究所・主任研究員

研究者番号: 50462940

井出 哲 (IDE, Satoshi)

東京大学・理学研究科・教授

研究者番号: 90292713

飯尾 能久 (IIO, Yoshihisa)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号: 50159547

加納 靖之 (KANO, Yasuyuki)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号: 30447940

亀 伸樹 (KAME, Nobuki)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号: 90304724

佐藤 隆司 (SATO, Takashi)

(独)産業技術総合研究所・主任研究員

研究者番号: 90357161

雷 興林 (LEI, Xinglin)

(独)産業技術総合研究所・主任研究員

研究者番号: 70358357

加藤 愛太郎 (KATO, Aitaro)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号: 20359201

五十嵐 俊博 (IGARASHI, Toshihiro)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号: 10334286

今西 和俊 (IMANISHI, Kazutoshi)

(独)産業技術総合研究所・研究員

研究者番号: 70356517

森谷 祐一 (MORIYA, Hirokazu)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 60261591