

平成 21 年 6 月 26 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18403007

研究課題名（和文） 南アフリカとインドの水没金鉱山の岩盤挙動観測

研究課題名（英文） Behavior of Rock Mass Behavior in flooded gold mines
in South Africa and India

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

研究成果の概要：

高応力の岩盤内に間隙水が存在すると、間隙水圧や応力の変化に対し、地震活動が敏感に反応する。その詳細を至近距離で観察するために、南アフリカの ERPM 鉱山と Buffelsfontein 鉱山において、地下 2～3km の水没境界から数十 m 以内の非水没域から、地震・歪・地下水圧・自然電位などの項目について、岩盤挙動の観測を行った。インドの水没鉱山については、インドから研究者を招聘し、今後の進め方について議論した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	9,400,000	0	9,400,000
2007 年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	13,900,000	1,350,000	15,250,000

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：地震活動、岩盤歪変化、間隙水、水没鉱山、至近距離観測、国際研究者交流、南アフリカ；インド

1．研究開始当初の背景

室内実験で何度も再現できる小サイズの破壊準備過程が、自然の巨大地震でどう現れるか？またそれを観測することができるか？この疑問に対し重要な情報を得ることができるのは、中間サイズの地震の観察である。また、巨大地震の起こる沈み込み帯では、間隙水圧が高いと予想されているが、その影響を観察することができれば、より理想的である。

至近距離で地震の準備と発生の過程を観察しようとする試みは、南アフリカ金鉱山半制御地震発生実験研究グループによって、本計画が始まるまでの 12 年間に南アフリカの 6 つ金鉱山、8 つのサイトにおいて マグニチュードが約 2 を超える地震の震源を対象にし

て行われてきた。しかし、その観察は、主に比較的 Dry な環境である観測サイトにおけるものであった。残された、興味ある大きな課題の一つは、比較的 Wet な環境における地震の準備・発生過程の研究であった。

2．研究の目的

南アフリカの多くの金鉱山では、採算のよい深度の鉱脈を掘り終わりはじめている。図 1 は、右に傾く薄板状の金鉱脈が断層で断ち切られている状況を模式的に示したものである。左側は、比較的浅い部分の採掘が終了し、排水を止めたために水没した状況を模式的に示している。右側は排水を続けながら採掘を続けている隣接鉱区を模式的に示している。中央の黒色の部分は、隣接する鉱山の

境界に計画的に掘残される干渉地帯 (Boundary pillar) で、幅は数十m以上、長さは2~3km以上になる。隣接鉱山への避難路として使われていた水平坑道は、数十mの厚さコンクリート壁 (水止め坑道壁) で塞がれる。水没に伴う断層沿いの激しい地震活動 (大きな星印; 最大 M~4) と、間隙水圧勾配が高い黒色部における地震活動 (小さな星印; M~2) と岩盤応答が観測対象である。

比較的ドライな採掘域の地震活動は、鉱山によって24時間監視が行われており、これから得られる採掘区の地震活動と、本計画で得られる水没区の地震活動とを比較する。

3. 研究の方法

ERPM 鉱山: 採掘対象の鉱脈は、南南西に約30度で傾斜し、東西幅約10km、南北幅約6kmである。採掘の歴史は百年を超え、鉱脈はそのほとんどが採掘済みで、2008年度には採掘済みの部分の下半分が水没していた。この水没にともない顕著な地震活動 (M<3) が誘発されていた。図2は、ERPM 鉱山の東側のほぼ半分 (東西幅約5km) の採掘・水没状況を模式的に示したものである。採掘が終了した西側 (図では左側) の深さ約3.5kmまでの鉱区が水没中である。2006~2008年の間は最大で一日あたり1mくらいずつ水位が上昇していた。一方、水没鉱区の東側では採掘が行われ、排水が行われているためにアクセス可能である。水没域と非水没域との境界 (Boundary pillar; 地下約2~3.5km) では、間隙水圧が10~20MPaであると予想される。58レベル (地下約2.6km) と68レベル (地下約3.1km) には、水没域につながる運搬坑道があり、水止め坑道壁 (図2では黄緑色の立方体; plug) によって水の進入が防がれている。鉱山は、8個の地震計からなる観測システムを持っており、24

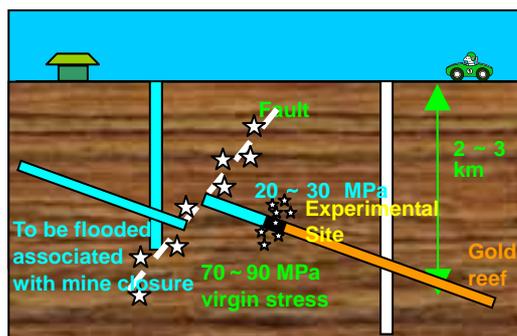


図1 水没する大深度鉱山の応力・間隙水や断層、地震発生 (星印) の関係を示す模式図。

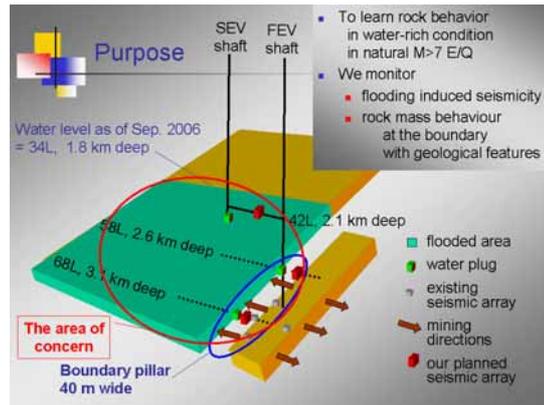


図2 ERPM 鉱山の水没域 (水色) と地震観測アレイ (赤と灰色の立方体) との位置関係を示す模式図。地下で約30度で傾斜する薄板状の金鉱脈の採掘跡が薄い板で模式的に示されている。

時間監視を行っている。本計画では、Geophone (固有周期 4.5Hz3 成分、および、固有周期 14Hz1 成分) を増設し、58レベルと68レベルの水止め坑道壁付近に小アレイ (観測点間隔 100~200m) を構築し、水没域を約1km下に見下ろす34レベル (地下約1.8km) にも小アレイを構築し、これらを合わせて、水没域と水没境界の地震活動を観測する。

Stilfontein 鉱山/Buffelsfontein 鉱山境界: 図3に示すように、すでに閉山されているStilfontein 鉱山では、一部が水没しており、約2MPaの間隙水圧がBuffelsfontein 鉱山との境界 (図3黄色線) にかかっている。水没域および境界は、上下落差が100~200mの断層で断ち切られており、間隙水圧にさらされた断層の挙動を観察するのに適している。この境界から距離数km以内では、マグニチュードが4を超える地震が年に1個程度起こるため、強震動に対する岩盤の過渡応答を観察するサイトとしても適している。

図4に示すように、この鉱山境界の数十m下に水平坑道があり、鉱山境界をStilfontein 鉱山側に約100m入った地点に水止め坑道壁が設置されている。この坑道沿いに、5台の

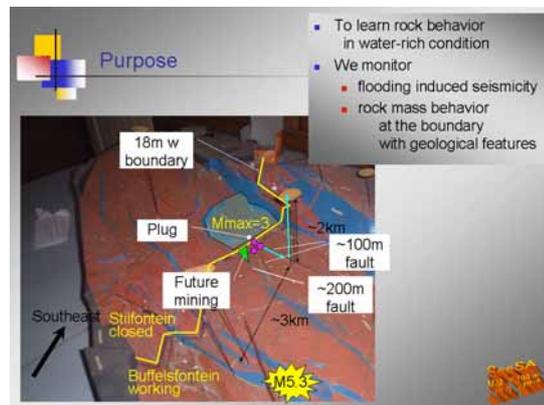


図3 閉山している Stilfontein 鉱山(左上の領域)鉱山の水没域(水色域)と、採掘中の Buffelsfontein 鉱山(右下の領域)との位置関係、鉱山の水没域と観測アレイの位置関係を示す模式図。ERPM 鉱山とは異なり、多くの断層(青)が、薄板状の鉱脈(茶色)や鉱山の境界(黄色の線)を断ち切っている。ピンクの丸の地点は本計画のアレイ・サイト。

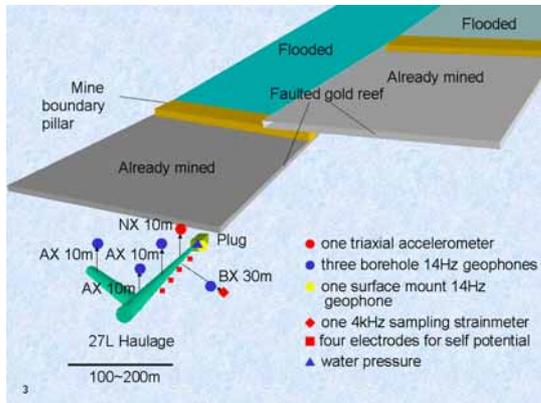


図4 Buffelsfontein 鉱山の水没境界の数十m下を通る水平坑道(27レベル運搬坑道;地表下約2km)に展開された観測網と、地質、採掘、水没状況を示す模式図。

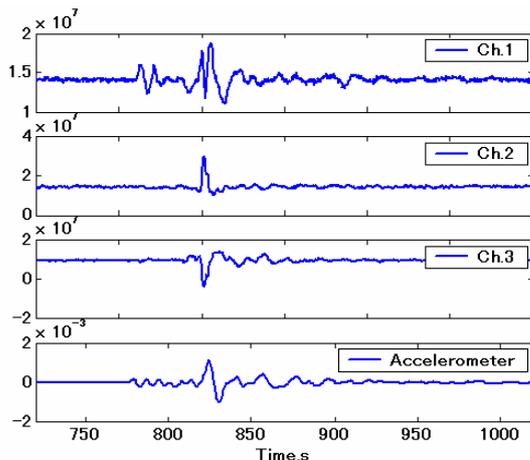


図5 歪計から距離約400mのM0.9の地震記録。Chs.1-3:歪計(4kHz sampling)、Accel.:歪計から30mの加速度計(2kHz sampling)、ジオフォン、1台の加速時計、1台の歪計、1台の水圧計を設置し、間隙水の変化に伴う地震活動と歪みの変化を観測する。自然電位をはかる電極を4本埋設し、間隙水流の変化に伴う自然電位の変化を観測する。

ERPM 鉱山、Buffelsfontein 鉱山、いずれも、平成18年度はサイト設置準備を行い、19年度までに計器設置を完了させて観測を始め、20年度までに得られるデータを解析する計画であった。

4. 研究成果

ERPM 鉱山は、鉱山の収支が悪化し、平成20年度末には閉山となってしまった。計画の

期間を通じ、観測インフラの整備に人手がまわりにくい状況であったが、それまでの間、水没域や水没境界付近に発生する地震活動を、一部の観測点についてはオフライン収録し、オンライン観測点については閉山後も収録を継続できるようにした。現在、地下への通電だけは続いており、水没域と採掘域(採掘中と閉山後)の地震活動を比較できるデータが入手できている。

Buffelsfontein 鉱山では、落盤による収録中断や、データ収録・転送装置の問題による収録中断があったが、2009年1月に鉱山が観測網の更新を行った際に問題を解決でき、以後、オンライン連続収録も安定に行われている。観測網付近2~3km以内でM3~4の地震が年に2~3個発生し、水没域の水位が1ヶ月以内に10m以上変化することも確認され、今後、これらに伴う岩盤挙動のデータを蓄積する。

歪計は、地震動によるダイナミックな歪変化がその後の歪変動にどのように影響を与えるかを知るために、4kHz イベント・トリガーと4Hz連続観測が可能なものを新たに設計し、その評価も行うことにした。平成19年度、歪計は、設計上の問題のために不安定であったが、平成20年度にその問題を解決し、安定化させることができた。そして、2008年6月にBuffelsfontein 鉱山の地下2kmの水没境界の数十m下に埋設することができた。4kHz イベント・トリガー収録では、地震動による歪変化が良好に記録でき(図5はその一例)、連続収録では地球潮汐を明瞭に記録できた。

インドの水没鉱山の誘発地震活動の観測は、予算の関係で行うことはできなかった。しかし、インド国立岩石力学研究所のスリニバサン博士を、2008年11月のアジア国際地震学会(つくば市)に招聘し、将来の共同研究に関する代表者らと会議では、共同観測をすることに対して前向きに臨むことを確認することができた。博士は、完全に水没している深さ3kmのインドのKolar Gold Fields 金鉱山でも活発な地震活動が観測されていることを学会で報告した。

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)

[雑誌論文](計2件)

小笠原宏・川方裕則・石井 紘・中谷正生・矢部康男・飯尾能久・南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験国際共同研究グループ、南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験 - 至近距離観測による地震発生過程の解明に向けて -、地震2(日本地震学会60周年記念特集号) 掲載決定。査読有

Ogasawara, H. and the Research Group for Semi-controlled Earthquake-generation Experiments in South African gold mines, Monitoring of rock mass behavior at the closest proximity to hypocenters in South African gold mines, Scientific Drilling, Special Issue No.1, 2007, 88-91 (doi: 10.2204/iodp.sd.s01.11.2007)。査読無

[学会発表](計3件)

Ogasawara, H., H. Kawakata, G. Yasutake, A. Yamamoto, N. Yoshimitsu, T. Yamauchi, K. Tadokoro, V. Visser, R. Weyers, A. Rossouw, K. Bosman, K. Nesbitt, G. van Aswegen, A. Cichowicz, N. Oshiman, Y. Iio, M. Nakatani, S. Yoshida, S. Nakao and the Research Group for Semi-controlled Earthquake-generation Experiments in South African gold mines, Monitoring of difference in behavior in stressed areas at flooded, deep gold mines in South Africa, 日本地震学会 2007 年度秋季大会講演予稿集, A32-02, 2007. 10.
Ogasawara, H., M. Nakatani, Y. Iio, H. Ishii, T. Yamada, M. Naoi, G. Yasutake, H. Kawakata, A. Yamamoto, T. Yamauchi, S. Nakao, Y. Yabe, K. Otsuki, T. Satoh, A. Kato, Y. Shinya, K. Nagata, O. Kuwano, T. Igarashi, H. Miyake, S. Ide, G. van Aswegen, A. Mendecki, T. Ward, SeeSA Research Group, Near-field monitoring of seismic source behavior at South African deep gold mines, Eos Trans. AGU, 88(52), Fall Meet. Suppl., Abstract S33D-01, 2007.
Ogasawara, H., G. Yasutake, M. Naoi, H. Ishii, G. van Aswegen, H. Kawakata, M. Nakatani, Y. Iio and SeeSA, Strain change in rock mass in M ~ 2 mining-induced seismicity, IASPEI 2009, 13 Jan 2009, Cape town, IASPEI 2009 abstract CD.

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

なし

(3) 連携研究者

山内常生 (YAMAUCHI TSUNEO)
名古屋大学大学院・環境学研究科・准教授
研究者番号: 80022713
川方裕則 (KAWAKATA HIRONORI)
立命館大学・理工学部・准教授
研究者番号: 80346056
大志万直人 (OSHIMAN NAOTO)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号: 70185255
飯尾能久 (IIO YOSHIHISA)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号: 50159547
中尾 茂 (OSHIMAN NAOTO)
鹿児島大学・理学部・准教授
研究者番号: 90237214
田所敬一 (TADOKORO KEIICHI)
名古屋大学大学院・環境学研究科・准教授
研究者番号: 70324390
吉田真吾 (YOSHIDA SHINGO)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号: 20202400

(4) 研究協力者

Koos Bosman, Open House Management Solution, CC, South Africa.
Vlok Visser, Open House Management Solution, CC, South Africa.
Andre Roussouw, Open House Management Solution, CC, South Africa.
Bertie Vender, Open House Management Solution, CC, South Africa.
Dr. Srinivasan Chinappa, National Institute of Rock Mechanics, India.