

地球規模課題対応国際科学技術協力

(防災研究分野「開発途上国のニーズを踏まえた防災科学技術」領域)

鉱山での地震被害低減のための観測研究

(南アフリカ)

平成 24 年度実施報告書

代表者：小笠原 宏

立命館大学 理工学部・教授

<平成 21 年度採択>

1. プロジェクト全体の実施の概要

自然大地震や、鉱山採掘などに伴って発生する誘発被害地震について、その発生予測や強震動予測の精度を高めることが世界で強く望まれている。本研究では、南アフリカ(以下南ア)の地下約1~3kmの大深度金鉱山において、震源の至近距離における高感度・高精度の微小破壊(AE)や歪(ひずみ)・傾斜、および、強震の観測などに基づいて、地震の準備と発生の様子を詳しく観察し、その理解を深めたい。このような試みを行うことができるのは南ア金鉱山のみである。2~3年の間にM2級の地震(100mサイズの断層破壊)が発生する場所を特定しその至近距離に観測網を展開した。また、鉱山地域の地表においては南ア国立地震観測網を増強した。これらに基づき、地震発生と強震動の予測を高度化したい。2011年東北日本太平洋沖地震(M9.0)を予見できなかった事実を重く受け止め、今後のできるだけ短い期間に地震研究が地震被害の低減にどう貢献できるかをこの研究を通じて示したい。

平成22年8月の最初の専門家の南ア上陸をもって5ケ年計画の本事業が始まった。平成23年の新燃岳噴火や東日本大震災、平成24年の前例のない長期の鉱山ストの影響などで当初計画からの変更が専門家派遣にあったが、延べ33名の短期専門家が延べ約105週にわたり現地活動を行った。約70本、総延長約2.8kmのドリリングが行われた。そのうち十数本以上は想定地震断層を貫通し、他の孔と合わせ、想定地震断層至近距離観測網が構築されている。供与機材は100台を超える。これらの結果、クック・フォー鉱山(旧称イズルウィニ鉱山)における観測網の構築および地表国立観測網の増強は完了しデータ収録が始まった。他の一部に観測が始めることができていない項目があるが、来年度上半期には完了する見込みである。いずれの鉱山も、これから地震活動のピークを迎える。一方、ムポネン鉱山の深さ約3.3kmで発生したM2地震の震源断層貫通掘削で採取した掘削コアの全試料とクック・フォー鉱山およびKDC West(旧称ドリーフォンテイン)鉱山で採取した掘削コア試料の一部を日本に輸入した。震源の応力場の推定や岩石物性測定のため、これらのコア試料を用いた室内実験を開始した。収録され始めたデータや試料を用いた南ア若手育成活動や、日本の技術移転も本格化し始めた。2013年2-3月JICA中間レビューを受けた。

2. 研究グループ別の実施内容

2.1 全体像

①研究のねらい

南アの金の生産量は、1970 年には世界の約 2/3 (第1位)であったが、多くの古い金鉱山が閉山し始めると減り始め、2007 年には第一位の座を中国に譲り、生産量は世界の約1割にまで落ちた。2011 年の生産量は世界の約 7 % (第 5 位)であった。

図 1 は、南アフリカで金の生産量が現在最も多い鉱山における 1980 年代の採掘の様子を模式的に示したものである。この鉱山では 2 枚の薄板状金鉱脈、Vendersdorp Contact Reef (VCR; 図 1 中の⑦) および Carbon Leader Reef (図 1 中の⑧) が採掘対象である。1980 年代の当時、鉱脈の Dip 方向に百数十 m 間隔で Strike stabilizing pillar (幅 20m、走向方向に長さ 120 m にわたって計画的に掘残され鉛直荷重を支え続ける部分; pillar は日本では鉱柱と呼ばれる; 図 1 中の⑩) が導入されつつあった。今日、この鉱山では、Shaft (堅坑) pillar (図 1 中の⑫; 一辺約 1km の赤枠部) と Strike stabilizing pillar を残し、図 1 に示された範囲はほぼすべて掘り尽くされ、採掘は図 1 の右の外に位置する VCR の 120 レベル (地下約 3.4 km) におよび、さらに大深度で採掘を行うために、130 レベル (地表下約 3.6 km) に達する斜坑を展開中である。地表下約 4.3 km に達する新 Sub shaft の掘削計画もあるが、地震リスク評価や地震マネジメント法が高度化されねばならない。

他の鉱山では、深部も掘り尽くされた場合、Shaft pillar (図1赤枠⑫) や Strike stabilizing pillar (図2⑩) などの掘り残し部を採掘している、あるいは、採掘を試みようしている。しかし、応力集中が大きいため被害地震が誘発されることもある。例えば、2005 年には M5 の地震が誘発され、最寄りの堅坑が使用できなくなり、地表にも被害が発生した。

最近の南ア鉱山での犠牲者数は毎年百数十名であり、その約半数が金鉱山、約 1/4 がプラチナ鉱山である。また死亡事故の原因の四割弱を占めるのが落盤で、その多くが地震発生に伴うものである。プラチナ鉱山の採掘深度は金鉱山に比べ概して浅いが、採掘深度は年々増大しているため、地震リスクも年々増大している。

鉱業は南ア国内経済における主要産業で、鉱業部門の総負荷価値額は南ア経済全体の約1割を占め、重

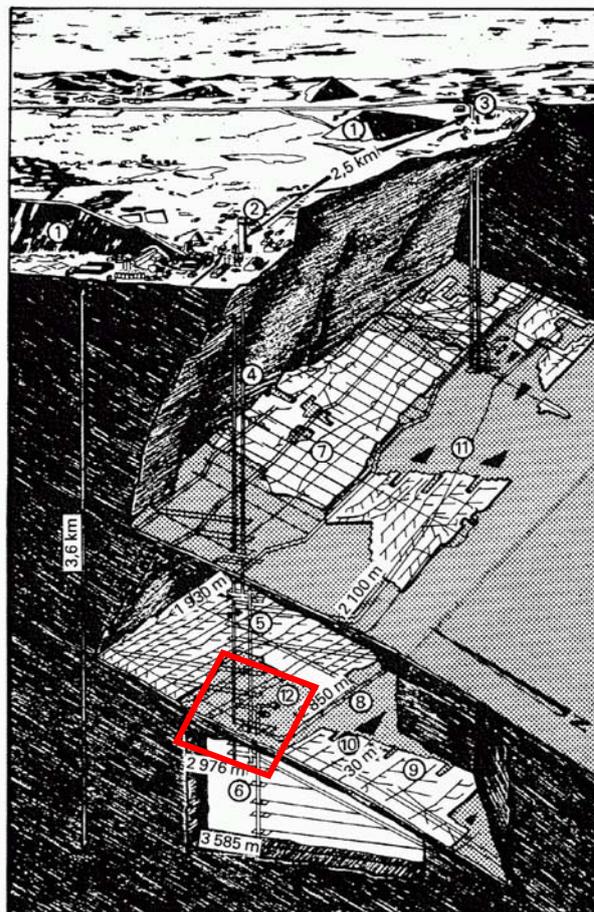


図1 南アで最も金の生産量が多い鉱山の薄板状金鉱脈(厚さ数十cm)と堅坑・坑道・採掘によって広がる薄板状採掘跡などの様子を示す模式図(Tanton et al. 1984)。薄板状の採掘跡の天井高は採掘前線では1 m数十cmあるが採掘前線が遠ざかり年月が経つと薄板状採掘跡は完全に閉塞する。①:ずり山; ②:第二堅坑; ③: 第三堅坑; ④: Main shaft; ⑤: Sub shaft; ⑥: Tertiary shaft; ⑦: Vendersdorp Contact Reef; ⑧: Carbon Leader Reef; ⑨: Lower Carbon Leader Reef; ⑩: Formation of strike stabilizing pillars; ⑪: Direction of mining face; ⑫: Shaft pillar。

要な雇用の直接・間接の受け皿である。全鉱山の労働者数は約 50 万人で、金とプラチナ鉱業がともに、それぞれ、鉱山労働者総数の約 3 割を占める。プラチナの生産量は最近でも世界の約 3/4 を占めており、これからも比較的安定な雇用の受け皿で有り続けると予想されるが、金鉱業は衰退傾向が顕著であるため、安全な採掘が今後何年継続できるかが南ア経済にとって大きな関心事である。

南ア金鉱山でしかできない震源の至近距離での観測研究によって地震の準備と発生の物理プロセスの理解を深め、鉱山地震だけでなく自然大地震のリスク評価の高度化に貢献することは、とりわけ東北地方太平洋沖地震(M9.0)を予見できなかった地震学界にとって極めて重要である。南ア金鉱山が、1991 年に国際地震学地球内部物理学協会で地震の実験場として承認され、1992 年から続いている日本との地震の研究協力関係をベースとして、これまでに、自然大地震を対象にした研究に比べて桁違いに短い観測期間で、比較的大きい鉱山誘発地震の準備と発生の詳細像が世界に前例のない解像度で得られつつある。これらは、南アの鉱山が坑内に展開している地震観測網で描き出せないものである。震源の極近傍でしか得られないデータも得られつつあり、このような知見が地震の理解を深めリスク評価の高度化に貢献すると期待される。

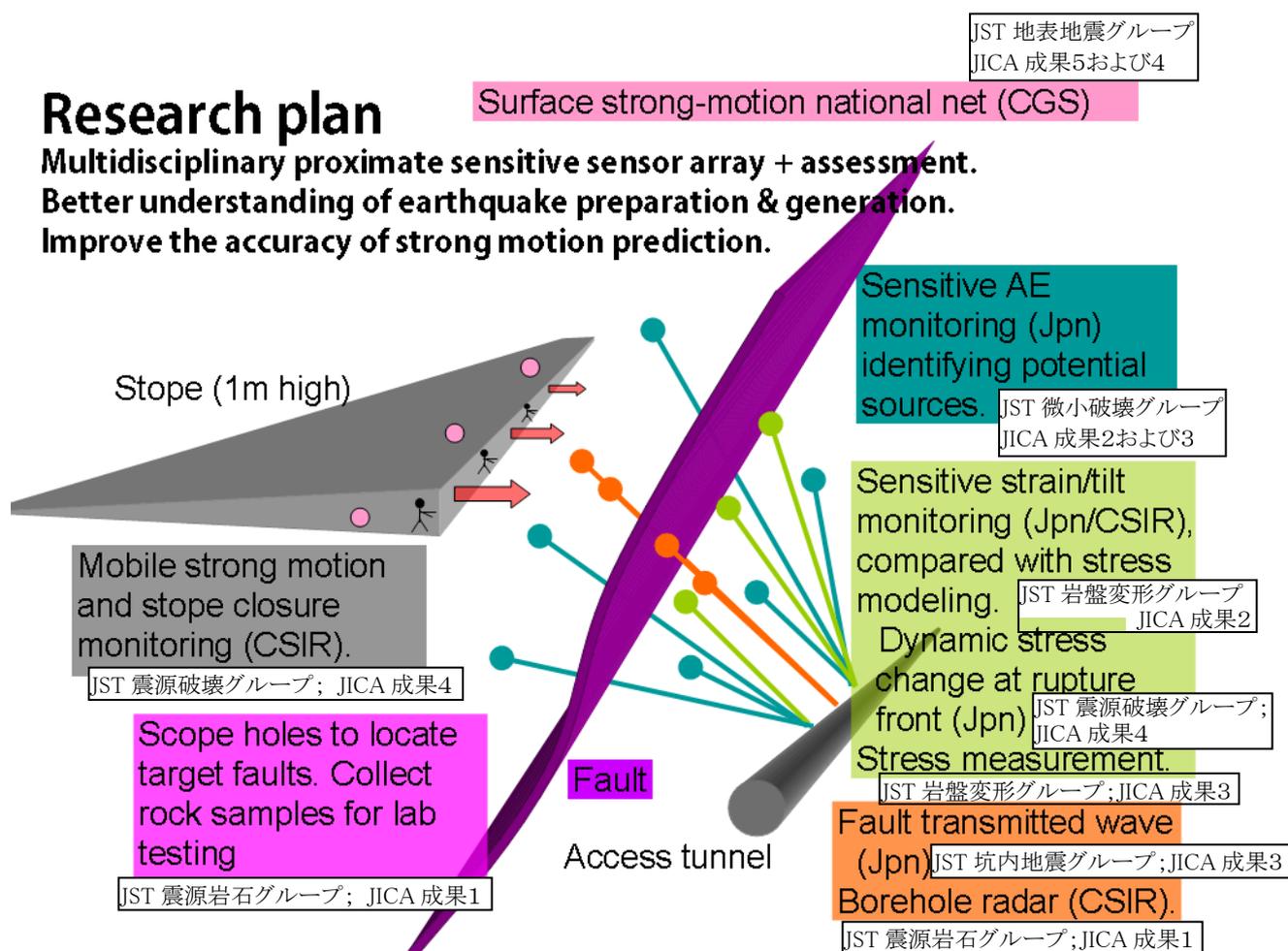


図 2 研究実施方法を示す模式図。

②研究実施方法および現在の進捗状況。

図2は、研究実施方法を模式的に示している。南アフリカ鉱山の坑内には、多いところで数百m間隔で地震計が配置され、1990年以降、Institute of Mine Seismology (IMS) 社や鉱山によって地震監視とハザード評価がルーチン的に行われている。このスキームは欧米の鉱山でも利用されており、成果もあるが、限界もある。この既存のハザード評価をどれだけ高度化できるかが南アフリカの近未来を大きく左右する。この高度化に必要な、地震のより深い理解を得るために、想定地震断層近傍に非常に稠密な SATREPS 総合観測網を構築する。得られた震源の岩石の性質を調べ(JICA 成果1)、地震の準備(JICA 成果2)と強震動の発生(JICA 成果4)の詳細を調べる。得られた知見に基づき地震発生予測を高度化する(JICA 成果3)。地表には国立地震観測網を増強(JICA 成果5)し、坑内だけでなく地表の地震動評価精度も向上させる(JICA 成果4)。得られた知見に基づき、技術移転しながら、鉱山が自力運用できる形の観測形態を鉱山に対して提案する。得られた知見や成功事例を、鉱山局に対し Code of Practice として採用されるための参考情報として推薦する。これは、過去に南アフリカでの研究成果が社会実装された道筋に沿うものである。

図3は JICA の各成果の到達状況を模式的に示したものである。地表の観測網の展開は完了した。坑内の観測網の展開も完了しつつあり、得られたデータの解析から新たな知見が得られ始めている。

SATREPS 計画の取り組みでは、1992年来の南アフリカとの共同研究では実現できなかった規模の坑内震源至近距離観測網が構築され、また、前例のない試みが行われている。主観測サイトはクック・フォー鉱山、KDC West 鉱山、モアプ・コツオン鉱山である(図4参照)。また、SATREPS 以前は、CGS 南ア地表国立地震観測網(National Seismograph Network; NSN)は南ア全土で23点に過ぎず、4つの主鉱山地区には合計数点以下しかなかったが、SATREPS でファー・ウェスト・ランド地区に10点(図4中の10 JICA)が増強され、鉱山資源省(Department of Mineral Resources)や鉱山健康安全協会(Mine Health and Safety Council; MHSC)の予算によるCGS観測点も大幅に増強された(図3中のNSN)。これらの観測網の特徴と現在の進捗状況は表1に示す通りである。

以下、2.2~2.6には個別グループの活動に関する補足情報を示す。

表1 SATREPS 各主要観測サイトの特徴と2013年3月22日現在の進捗状況。

金鉱山名	クック・フォー	モアプ・コツオン	KDC West
所有会社	ゴールド・ワン	アングロゴールド・アシャンティ	シバニア・ゴールド
実験サイトの鉱体	何枚かの鉱脈(総厚数十m)。	単一鉱脈(厚さ<1m; 多数の断層で分断)	単一鉱脈(厚さ<1m; 少数の断層で分断)
採掘シナリオ	縦坑鉱柱の採掘(鉱山ライフの最終段階)	断層によって複雑に断たれた鉱脈の採掘	Sequential grid mining
地表からの深さ	約1km	約3km	約3km
懸念	縦坑鉱柱内の断層の不安定化	比較的大きな断層の不安定化	傾斜鉱柱の不安定化
ターゲット断層の特徴	厚さ20-30cmのガウジ	厚さ20-30mの断層帯	厚さ2-3cmのガウジ
日本人研究者主導の活動			
微小破壊観測	センサー数十個稼働中。	予定のセンサー数十個の約2/3埋設済み。	-
高感度歪(ひずみ)観測	予定の歪計2台稼働中。	予定3台を埋設済み。2台のデータ収録中。	予定の2台稼働中。

表1 (続き)

金鉱山名	クック・フォー	モアプ・コツオン	KDC West
断層透過波観測; Tx: 発振器, Rx:受信機	1 Tx, 3 Rx 稼働中。	2 Tx, 3 Rx 埋設予定。	-
破壊前線動的応力観測	ターゲット断層直近で3 センサー設置済稼働	-	ターゲット断層直近で4 センサー設置済稼働
ゆっくり断層すべり観測	予定の1計器稼働中。	2 計器埋設予定。	-
応力測定	計画中。	実施済。	計画中。
南ア研究者主導の活動			
Borehole radar	-	探査完了。	-
高感度傾斜観測	-	予定の2傾斜計の1台稼働中。1台埋設予定。	予定の2台稼働中。
採掘現場閉塞観測	-	1組調達済み。埋設予定	1組調達済み。埋設予定
採掘現場強震観測	-	1組調達済み。埋設予定	1組調達済み。埋設予定
地表国立地震観測網	SATREPS観測網稼働	CGS 独自観測網稼働中	SATREPS観測網稼働
2013年3月現在の進捗状況	監視継続中。データ蓄積期間>1年。地震活動が活発化しつつある。	計器埋設の1/4要完了。	採掘現場の閉塞・強震観測以外のすべての予定観測項目稼働中。

プロジェクト終了後の上位目標 南アや世界の鉱山に、プロジェクトで高度化されたスキームを適用する

	震源の岩石の性質を明らかにする	地震の準備の理解の高度化	地震ハザード評価(SHA)の高度化	強震予測の高度化	地表国立地震観測網の高度化
プロジェクト目標	地震活動予測、および強震予測(坑内と地表)のスキームを高度化する				

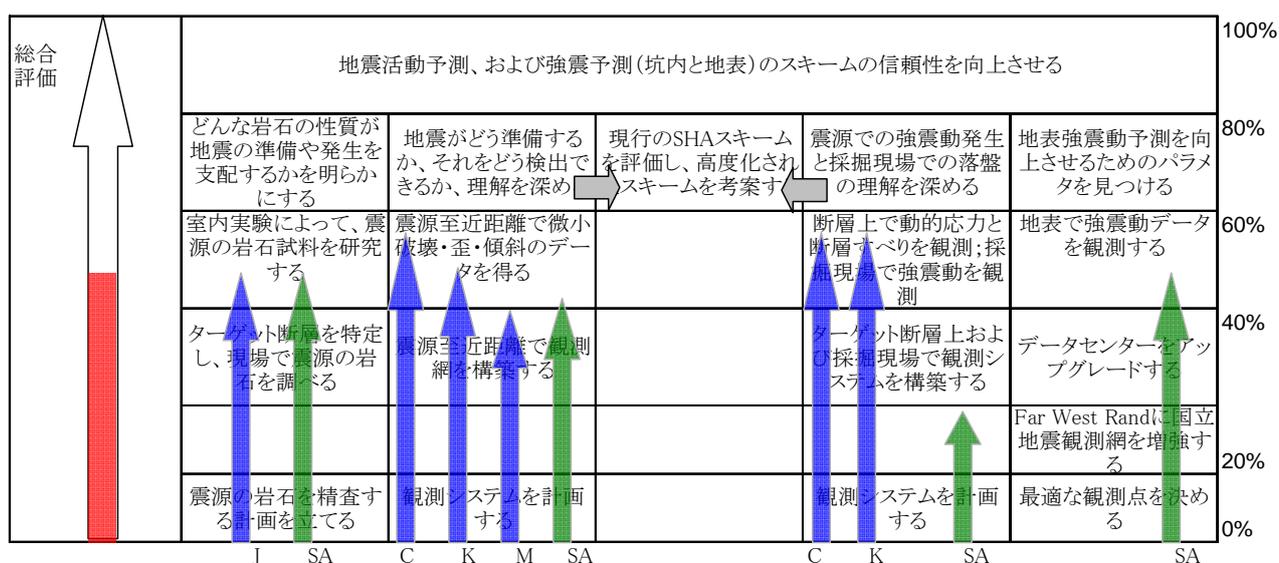


図 3 JICA の5つの成果の達成度の自己評価の模式的表示。青矢印:日本主導の活動、緑矢印:南ア主導の活動。矢印の下の J:日本、SA:南アフリカ、C: クック・フォー鉱山、K:KDC West 鉱山、M:モアプ・コツオン鉱山。

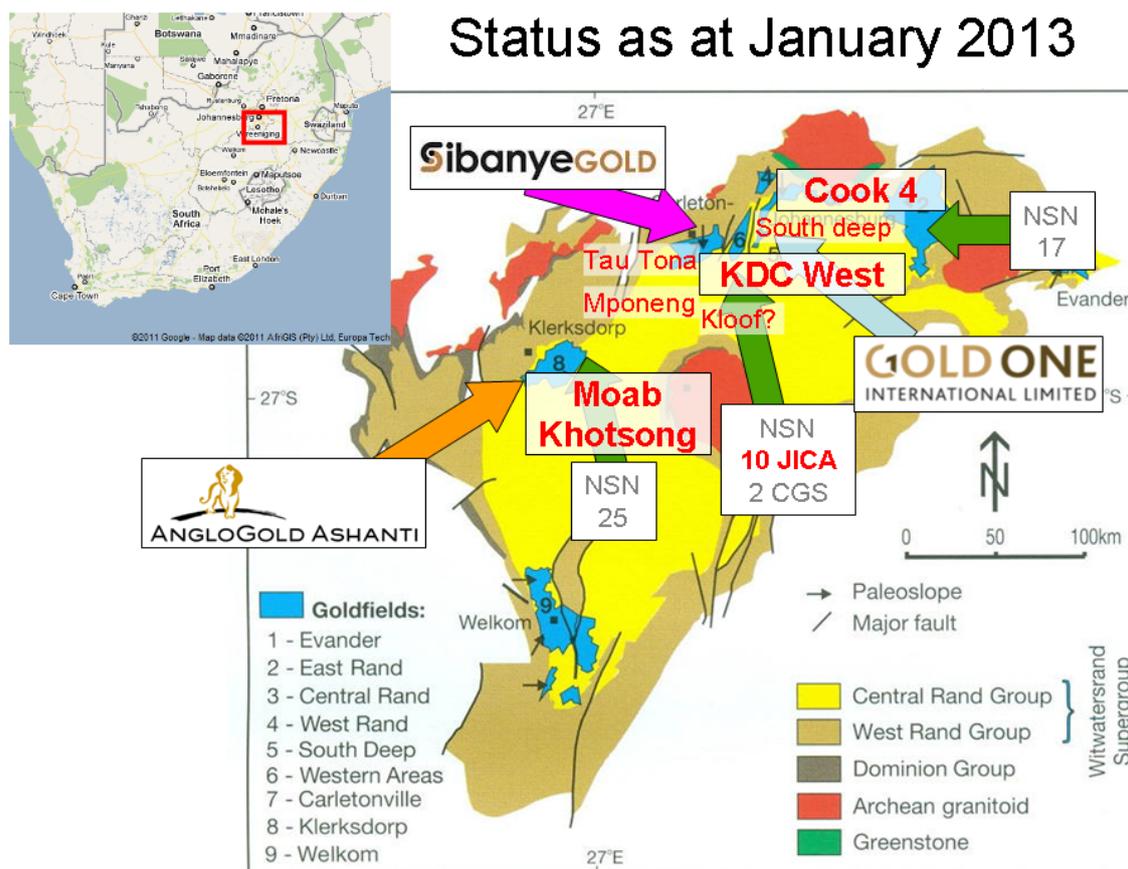


図4 SATREPSの主観測サイトを持つ鉱山(黒枠付き赤ゴシック太字; アングロゴールド・アシャンティ社モアブ・コツオン鉱山、シバニャ・ゴールド社 KDC West 鉱山、ゴールド・ワン社クック・フォー鉱山)、SATREPSと同時に増強されたCGSの地表国立地震観測網(National Seismograph Network; NSN)、および、移転した技術によって、鉱山が中心となり、当初計画にはなかった活動があった鉱山(サウス・ディーブ鉱山、ムポネン鉱山、タウ・トナ鉱山)およびクローフ鉱山(予定)。

2013年2月23日～3月15日にかけてJICA中間レビューが行われ、5項目の評価の概略は以下の通りであった。Relevance: High; Effectiveness: Medium; Efficiency: High; Impact: Still low with respect to the Overall Goal, but some other significant impacts have already been achieved; Sustainability: relatively high. 詳細は、JICA Mid-term Review Report を参照されたい。

2.2 震源の岩盤変形グループ

① 研究のねらい

震源での応力蓄積・緩和を監視し、地震リスク評価の精度を向上させる。

② 研究実施方法

坑内の震源の近傍(数十m以内)での歪や傾斜などの観測を行い、そのデータで採掘による応力変化の数値予測を較正し、応力状態と地震活動の時間発展の予測精度を向上させる。

③ 当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

ゴールド・ワン社クック・フォー鉱山(計画開始当初はファースト・ウラニウム社イズルウィニ鉱山)では、全体計画よりも1年以上早く、平成22年12月に2台の歪計の観測が始まり、以後約2年が経過した。平成24年5月に自動解析・報告システムを完成させたが、同年の半ばからの堅坑の通信ケーブル障

害のために自動解析報告システムの運用はできていない。この間、坑内のレコーダーに収録されているデータを1~3ヶ月に一度の割合で回収し、解析結果を鉱山の岩盤工学部に報告・議論している。

シバニア・ゴールド社(平成25年2月以前はゴールド・フィールズ社所有)KDC West 鉱山では、ほぼ全体計画通り、平成23年12月から3台の歪計の観測が始まり約1年が経過した。カウンターパートの傾斜計は予定より約1年遅れ平成24年11月から2台の観測が始まった。これらのデータは、インターネット経由で、地上の地震監視部の岩盤変形データ処理専用のPCに自動転送されている。自動処理・報告システムの運用が平成25年1月に始まり、鉱山による地震観測との比較が始まった。同社の他の鉱山では、SATREPS 主導の観測とは別に、鉱山が自力で歪観測とデータ活用ができるように技術移転する取り組みも行っている。サウス・ディーブ鉱山には1台の歪計が平成23年12月に埋設された。坑内と地上のネットワーク通信問題のために安定した観測は、平成24年11月からであったが、このデータも地震監視部で処理され、地震活動と比較検討されている。同社 KDC East 鉱山の2台の歪計による観測は、平成24年9-10月の長期のストライキの影響を受け埋設孔掘削を段取りするところで止まっているが、平成25年度の上半期には観測を開始できる見込みである。

アングロゴールド・アシャンティ社のモアプ・コツオン鉱山では、全体計画から遅れ、3台の歪計の埋設が平成24年8月に完了し、2台については12月からデータ収録が始まった。このデータは、同社の岩盤工学部門(応力モデリングで採掘計画の安全性を評価する部署)に同社のLAN経由で自動転送されている。自動解析報告システムも近々運用が始まり、応力モデリングとの比較を始める。カウンターパートの1台の傾斜計も平成25年3月に収録が始まった。2台の広帯域地震計とカウンターパートの残る1台の傾斜計については、埋設孔の掘削が完了しており、近々埋設が完了する。データ収録は、残り1台の歪計も含め、平成25年度の上半期には予定のすべてが始まる見込みである。

上記のいずれの鉱山も、地震活動の活発化はこれからであり、採掘に伴って岩盤が様々に変形する様子が観察できると期待される。カウンターパートの薄板状の採掘跡の閉塞の監視も、地震活動の活発化の前に始められるよう努力している。

日本で実用化されている応力測定方法(円錐孔底ひずみ法)を、より小さい口径で、より容易に行うことができるようにしてモアプ・コツオン鉱山で試みた。最初の試み(平成23年1月)では失敗したが、南アの悪いドリリング条件でも成功するように改良を加えた結果、平成23年9月に成功することができた。以後、南アの多くの鉱山関係者から引き合いがあり、平成25年1~2月に南アのコンサル会社と鉱山関係者に広く呼びかけ、技術移転をするための共同測定が、ムポネン鉱山の地下約3.4km およびタウ・トナ鉱山の地下約3km において行われた。前者は南ア最大の金鉱山であるが、以前には応力測定が行われていなかった。また、後者は、タウ・トナ鉱山で2つ目の測定例であるが、M1.5の被害地震の近くの測定であった。このため、これらの結果は非常に貴重である。南ア金鉱山で広く用いられている方法は、時間がかかり、高応力下での測定には相対的に不向きであった。測定に必要な特注ドリリング用具も南アで調達できるよう業者を指導した。より多くの絶対応力データが得られるようにし、様々な岩盤や採掘の条件での岩盤変形データと比較することによって、応力モデリングに基づく安全評価を高度化させるための下準備がほぼ整った。

④カウンターパートへの技術移転の状況(日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む)

CSIR、アングロゴールド・アシャンティ社岩盤工学応用研究部、同社系鉱山の岩盤工学部、ゴールド・フィールズ社(2013年2月からシバニア・ゴールド社)地震部門・同社系鉱山の岩盤工学部門、および、クック・フォー鉱山岩盤工学部門と、上記の情報・技術・経験以外にも、現有データの Back Analysis の

結果や、各鉱山の諸情報の詳細も共有している。

⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況(あれば)

応力は、安全な採掘にとって非常に重要な基本情報であるが、場所による違いが大きいことや、測定には熟練の技術や、長い現場作業時間、高額な費用を要することなどから、必ずしも数多く行われていない。今回南ア金鉱山で成功した応力測定法の工法は、読み書きが怪しく、必ずしも熟練していない地質ドリラーとも協力して測定を行うことができるように考慮され、現地で用いられている方法よりもはるかに短時間で測定を完了できるため、成功後、7つ以上の鉱山から測定ができないか打診があった。日本人技術者が南ア渡航しなくても、現地の人間だけで応力測定を行えるようになるための体制作りと必要資材の現地調達が課題であった。実現に向けてキーパーソンを見つけ、必要資材の現地調達にも可能になり、鉱山主導の測定も可能になった。

応力モデリングと比較することによって、震源断層上の応力と強度を従来よりも精度良く拘束出来る可能性があることがわかった。観測データを増やし、より多くの事例について検討を加えたい。

2.3 震源の微小破壊グループ

①研究のねらい

本震断層の詳細な形状を特定し、地震発生リスク評価精度を向上させる。

②研究実施方法

想定震源を取り囲む領域に、高感度の微小破壊観測用のセンサを三次元的に埋設し、監視を行う。同時に行われる岩盤変形や強震動の観測と比較し、研究のねらいを達成させる。

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

クック・フォー鉱山においては、二十数台の微小破壊観測用センサによる観測が始まり1年半以上が経過した。月に20万個を超えるイベントが収録されることもあり、予備解析が始まった(下図参照)。微小破壊の震源位置自動解析プログラムの性能を同鉱山のデータで評価し、震源位置カタログ作成の具体的流れを決定した。日本での微小破壊データの基礎的カタログ作成も、順調に進んでおり、CSIR研究者へのデータの共有とカタログ供給も始まった。2012年半ばから堅坑内通信ケーブルの損傷により微小破壊観測のメンテナンスを、地表からの監視なしで行う困難な状況が続いているが、現地技術者と、CSIR研究者が週に3回程度地下に降りて直接メンテナンスを行うことで、データ収録ができていく。

モアプ・コツオン鉱山においては、微小破壊観測用のセンサの7割程度の埋設が完了し、ケーブルも半分以上は敷設された。収録システムも現場に設置されているので、平成25年度前半にはデータ収録が開始できる予定である。

高密度AEモニタリングシステムを用いたAEの震源決定により掘削面前方岩盤内のダメージゾーンとダメージゾーンの移動を明確に検出できるようになり、社会実装に向け、モニタリングシステム(ハードウェア)と自動震源決定システム(ソフトウェア)を合わせた総合システムを構築するための道筋が見え始めた。

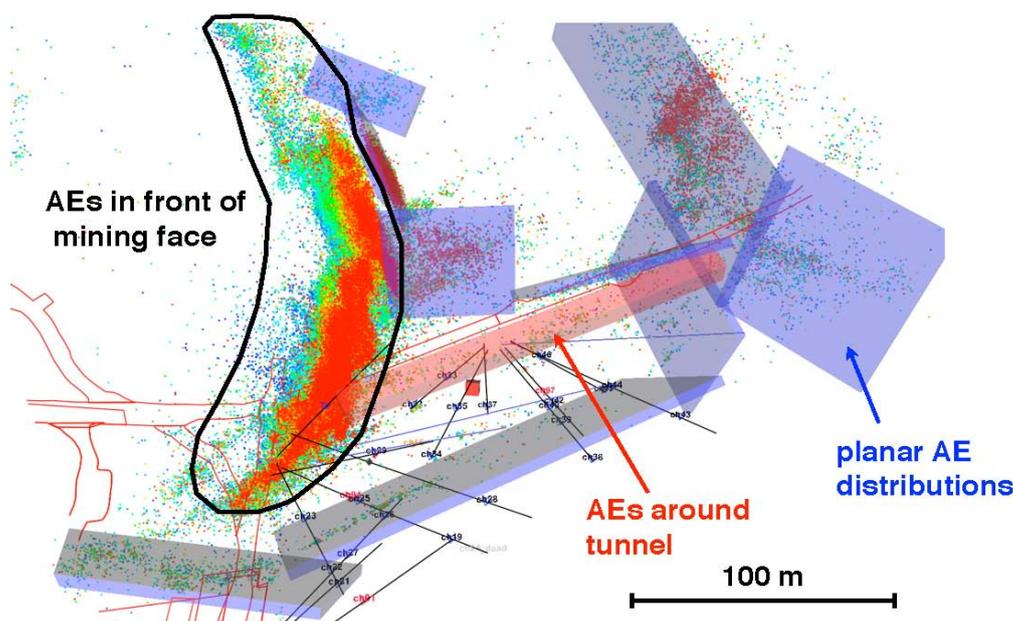


図 4 クック・フォー鉱山の微小破壊観測網(小さい文字はセンサー位置と名前)と、決定された微小破壊の分布(2011/8/17~9/23)。P 波の走時読み取り数が 10 個以上, RMS 走時残差が 0.2 ms 以内という基準をみたした 22 万イベントの震源分布が示されている (<http://yotikyo.eri.u-tokyo.ac.jp/h23/pdf2/2402.pdf>)。

④カウンターパートへの技術移転の状況(日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む)

カウンターパート組織の研究者が微小破壊観測の日常的監視とデータ回収、日本へのデータ送付を担当するようになった。

博士号取得を目指している CSIR の研究者とその指導研究者を日本に招き、東北大学において、微小破壊の精密震源決定法の技術移転を行った。

⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況(あれば)特になし。

2.4 震源の動的破壊過程グループ

①研究のねらい

断層破壊の動的破壊過程のスケール依存性を明らかにする。震源極近傍や伝播経路上で観測される強震動波形と採掘現場で観測される強震動波形を比較し、強震動の生成メカニズムを明らかにするとともに、採掘現場に生じる強震動の予測精度を向上させる。

②研究実施方法

動的破壊過程を明らかにするため、震源断層極近傍(数 m 以内)で、破壊前線の通過に伴う動的応力変化と断層変位を計測する。このために必要な動的応力変化計を開発する。動的応力変化計や伝播経路上に埋設した地震計で記録した強震動波形と採掘現場や地表で観測される強震動波形を比

較議論し、研究のねらいを達成する。

- ③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況 クック・フォー鉱山では3本の、KDC West 鉱山においては4本の計器埋設孔の掘削を行った。コア試料及び孔内カメラによる孔壁の観察にもとづいて、掘削孔と断層の交差部を特定し、断層直近に動的応力変化計を埋設した。クック・フォー鉱山では平成 22 年 12 月から、KDC West 鉱山では平成 24 年 1 月から観測を開始した。

クック・フォー鉱山の観測網では、平成 23 年 12 月に、M1.3 の地震を震源距離約 100m で観測した。この地震波形の解析から、本プロジェクトで開発した動的応力変化計により約 20kHz までの加速度波形およびひずみ波形を観測できることを確認した。クック・フォー鉱山と KDC West 鉱山のいずれにおいても観測が継続されており、データが蓄積されている。

KDC West 鉱山では、カウンターパートにより、伝播経路上の地震波を観測するための地震計が設置された。この地震計は、鉱山会社の観測網が手薄な地域にあるので、鉱山会社が保守作業を行い、データを共有することとなった。

- ④カウンターパートへの技術移転の状況(日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む)

クック・フォー鉱山で観測対象とした断層周辺で活発化しはじめた M=1~2 級の地震活動について情報共有を行った。KDC West 鉱山の断層位置に関する情報共有を行った。

- ⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況(あれば)

断層破壊に伴う強度変化だけではなく、断層強度の絶対値を推定するため、地震時の断層すべりに伴う摩擦発熱を測定するための白金温度計を、動的応力変化計とともに埋設した。

クック・フォー鉱山においては採掘が最終ステージに入り、微小破壊データから大きな断層の広い部分が活動していることが確認され、予期していた M2 程度の地震(ターゲット地震)が発生する可能性が高い。そこで、微小地震観測の収録装置で収録されている加速度計の信号を、より長時間の記録がとれる別のタイプの記録装置でも同時に収録し、ターゲット地震の記録を完全に取れるようにした。きれいな波形が収録されているが、データ通信の不調で安定した運用には至っていない。

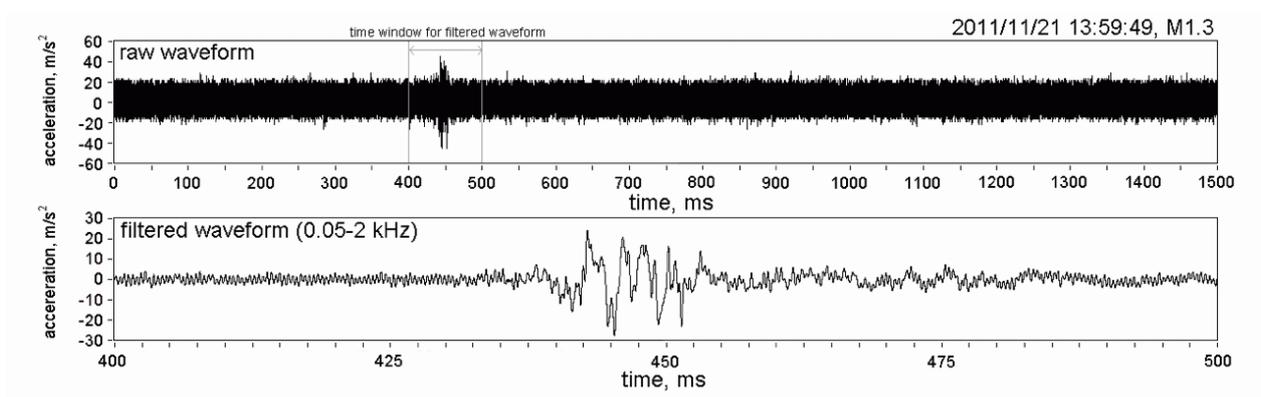


図 5 クック・フォー鉱山において、震源距離約 100m で観測した M1.3 の地震の加速度波形例。

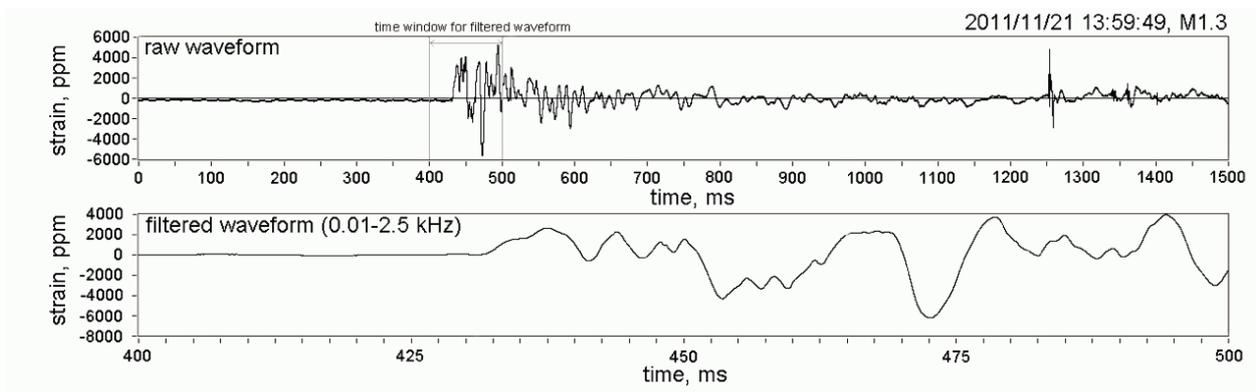


図 6 クック・フォー鉱山において、震源距離約 100m で観測した M1.3 の地震のひずみ波形例。

2.5 坑内観測地震高度解析グループ

①研究のねらい

現存の鉱山の地震観測データに基づく応力推定の精度を向上させ、地震活動推移の予測精度を向上させる。

②研究実施方法

最近、日本などで行われている、高度な地震波解析手法を鉱山地震などのデータに適用し、現行の鉱山地震のハザード・アセスメント結果と比較・議論することによって、研究のねらいを達成させる。

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

鉱山地震の波形記録だけではなく、雑微動や能動信号を用いて断層の状態をモニタリングするためのシステムのクック・フォー鉱山への設置が完了し、モニタリングを開始した。能動震源を用いたモニタリングにおいては、地震活動が静穏な期間において、記録された透過弾性波形が酷似しており、速度などの微小変化を検出できる能力をもつことが確認された。モアプ・コツォン鉱山では計器埋設のデザインが完成し、埋設用の孔の掘削が行なわれた。

種々の観測データを包括的に管理、共有するために必要となるデータサーバーの拡張を進めた。

クック・フォー鉱山で観測された微小地震記録を用いて、地震時の応力降下量推定を開始した。

④カウンターパートへの技術移転の状況(日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む)

カウンターパートと計測技術を共有できるようにするために、稼働中のシステムと英文マニュアルを用いて、解説を行なった。計測用プログラミング言語に関する簡単な説明も実施した。カウンターパート組織の研究者が日本へのデータ送付を担当するようになった。

⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況(あれば)特になし。

2.6 震源の岩石分析グループ

①研究のねらい

震源の岩石の性質を明らかにする。

②研究実施方法

震源域で採取した岩石コア試料の物性や破壊特性を室内実験によって計測し、研究のねらいを達成する。

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

2010-2011年、クック・フォー鉱山、および、モアプ・コツオン鉱山において、観測のターゲットとなる断層の位置を特定するための探査ドリリングの岩石コア試料と孔内の観察が行われ、ターゲットとする断層の位置決定や応力集中域の推定が行われた。2011年は、KDC West 鉱山において、観測のターゲットとなる断層の位置を特定するための探査ドリリングの岩石コア試料と孔内観察を行い、断層の位置決定を行った。各種試験を行うため、クック・フォー鉱山および KDC West 鉱山で採取した掘削コア試料の一部は日本に輸出され、残りの全部はカウンターパートの倉庫に保管されている。

ムポネン鉱山において、2007年にM2.1の地震が発生した断層を貫通する掘削によりえられた岩石コア試料の物性解析のため、岩石コア試料が平成24年5月14日に日本に輸入され、5月15日に東北大学に納品された。10月29日に関係者の集会を行い、各試験に必要な試料の配分を行った。12月には、その一部を南アに持ち込み、ウィットワータースランド(Wits)大学において、圧裂試験により一軸引張強度を測定した。また、東北大学において一軸圧縮試験および圧裂試験を行うための試料を加工中である。さらに産総研において三軸圧縮試験を行うための試料の加工を行った。2007年にM2.1の地震が発生したムポネン鉱山のダイクを挟む母岩から採取した硅岩の岩石試料を用いて三軸圧縮破壊試験を行い、弾性波速度およびアコースティック・エミッションの計測を行った。

④カウンターパートへの技術移転の状況(日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む)

カウンターパートの実験室を訪問して使用可能な機材についての情報交換をするとともに、日本と南アで行う実験の分担について協議した。平成24年12月に、ムポネン鉱山で採取した岩石試料を用いた圧裂試験を、Wits大学で行った(下写真1参照)。また、Wits大学の博士課程学生の日本への派遣について協議し、平成25年5-7月の間の約一ヶ月間に実験指導をすることになった。

⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況(あれば)特になし。

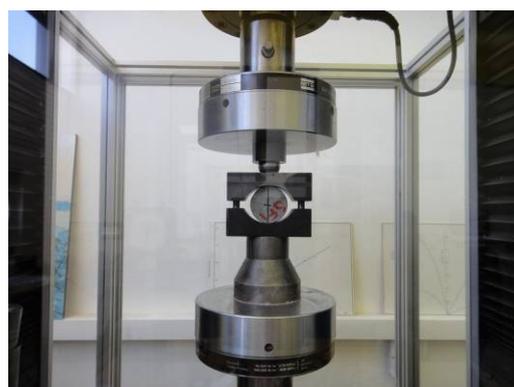


写真1 Wits大学における圧裂試験の様子。

2.7 地表地震観測グループ

①研究のねらい

地表に被害を与える規模の地震による地表の強震動評価精度を向上させる。

②研究実施方法

鉦山地域の国立地震観測網を増強し、観測される強震動記録と坑内の強震動記録を比較することによって、研究のねらいを達成する。

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

南ア政府の予算によって、閉山して水没した金鉦山地域の地震観測網が CGS によって展開されつつあり、臨時観測も始まっていた。さらなる予算でクラークスドープ地区の地震観測が増強されることが平成 22 年度に決まった。これと同じ仕様の地表観測網を、SATREPS の坑内観測も行われるファー・ウェスト・ランド地区に増強させるため、調達手続きは、仕様が決まるまで待たねばならなかった。調達手続きには困難な部分もあったが予定よりも早く完了し、10 点の観測点の設置、バックグラウンド・ノイズレベル実測調査、表層の速度構造調査も完了した。

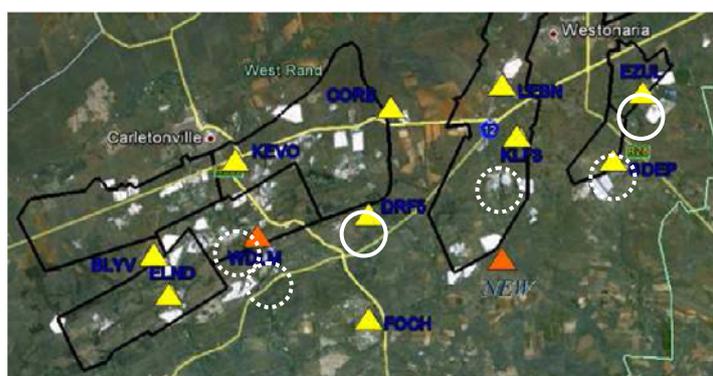


図 7 ファー・ウェスト・ランド地区の東西差し渡し約 30km の範囲の金採掘区(黒枠)、および、SATREPS によって大幅に増強された国立地表地震観測点(黄色三角;間隔は約 2~7km)。この増強の前には、国立地表地震観測点は左側の橙色の三角(WDLM)のみで、 $M > 2$ の地震しか検知できなかった。CGS 自身で一点(橙色三角;NEW)を増設し、合計十二点で地震が地表観測できるようになった。この範囲には、鉦山会社による地下地震観測網(各黒枠内に地震計 10~30 点)が展開されていて、非常に小さな地震活動まで検知できるが、比較的大きな地震(例えば $M > 2$)は近い観測点では振りきれてしまい正しく評価できなかった。閉山域には地震計は設置されておらず、北東域の水没に伴う地震活動も正しく評価できなかった。この増強された地表観測網は比較的大きな地震でも振りきれない地震計が設置されており、大きな地震の解析や地表の強震動予測が大幅に高度化できる。ちなみに白実線丸印は SATREPS の地下観測網が展開されている堅坑の場所を示す。白点線丸印は SATREPS が関連する活動がある堅坑の場所を示す。



写真 2 各観測点(図 7 参照)では、岩盤に達するまで、あるいは、最低 2m の表土が取り除かれ、地震計が設置された。データは GPRS 無線電話通信によってプレトリアの CGS まで転送されている。

3. 成果発表等

(1) 原著論文発表

① 本年度発表総数(国内 1 件、国際 10 件)

② 本プロジェクト期間累積件数(国内 5 件、海外 20 件)

③ 論文詳細情報

【招待論文】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), 第 61 巻, S563-S573, 2009.

Ogasawara, H., R.J. Durrheim, M. Nakatani, Y. Yabe, A. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, H. Moriya, JST-JICA SA research group, a Japanese - South African collaboration to mitigate seismic risks in deep gold mines, Proceedings of 1st Hard Rock Safe Safety Conference, South African Institute of Mining and Metallurgy, 115-134, 2009.

Durrheim, R.J., H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, A. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, H. Moriya and the JST-JICA SA research group, Observational study to mitigate seismic risks in mines: a new Japanese -South African collaborative project, Proceedings of South African Geophysical Association Biennial Technical Meeting and Exhibition, 73-79, 2009.

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.

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.

Kwiatek, G., Plenkers, K., Nakatani, M., and Yabe, Y., Frequency-Magnitude Characteristics Down to Magnitude-4.4 for Induced Seismicity Recorded at Mponeng Gold Mine, South Africa. Bulletin of the Seismological Society of America, 100, 3, 1165-1173. EDOC: 15721 10.1785/0120090277, 2010.

渡辺貴善, 動的応力変化計の開発-鉱山地震のすべり弱体化過程の解明に向けて-, 東北大学修士論文, pp. 72, 2011.

桂 泰史, M2 級震源域での 2 台の歪計記録・AE 記録・弾塑性応力モデリングに基づく地震発生過程の解明 -南アフリカ Mponeng 金鉱山・地下約 3.3km 観測サイト-, 立命館大学修士論文, pp. 64, 2011.

Cichowicz, A., D. Birch, and H. Ogasawara, Multi-Channel Analysis of Surface Waves: Inversion Strategy, Proceedings of the thirteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Edited by: B.H.V. Topping and Y. Tsompanakis, Civil-Comp Press, Stirlingshire, 2011, doi:10.4203/ccp.96.205.

Naoi, M., M. Nakatani, Y. Yabe, G. Kwiatek, 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, 2011, doi: 10.1785/0120100346.

- Hirano, S and T. Yamashita, Analysis of the static stress field around faults lying along and intersecting a bimaterial interface, *Geophys. J. Int.*, 187, 1460-1478, 2011.
- 和田直也, コーダ波スペクトル比法によって推定された極微小地震のコーナー周波数と地震モーメントにおけるスケールリング則—南アフリカ Mponeng 金鉱山, 立命館大学修士論文, 2012, pp.48.
- Durrheim, R.J., 2012, Functional specifications for in-stope support based on seismic and rockburst observations in South African mines. In *Deep Mining 2012, Proceedings of the Sixth International Seminar on Deep and High Stress Mining*, Y Potvin (ed), Australian Centre for Geomechanics, ISBN 978-0-9806154-8-7, pp. 41-55.
- Durrheim, R.J., H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, A.M. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, O. Murakami, M. Naoi, N. Yoshimitsu, T. Kgarume, and the SATREPS Research Group, a Japanese - South African collaboration to mitigate seismic risks in mines: establishment of experimental sites, *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.
- 【Invited】**Durrheim, R.J., Mitigating the risk of rockbursts in the deep hard rock mines of South Africa: 100 years of research, In *Extracting the Science: a century of mining research*, J. Brune (editor), Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, ISBN: 978-0-87335-322-9, pp. 156-171, 2012.
- Ogasawara, H., H. Kato, G. Hofmann, and P. de Bruin, Trial of the BX conical ended borehole overcoring stress measurement technique, *Proceedings of the second Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium, South African Institute of Mining and Metallurgy, 15 May 2012, Sun City, South Africa*, pp. 169-179, 2012.
- Durrheim, R.J. and H. Ogasawara, Can mine tremors be predicted? Observational studies of earthquake nucleation, triggering and rupture in South African mines, *Proceedings of the second Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium, South African Institute of Mining and Metallurgy, 16 May 2012, Sun City, South Africa*, pp. 327-343, 2012.
- Ledwaba, L.S., J.B. Scheepers, R.J. Durrheim, and S. Spottiswoode, 2012, Seismic damage mechanism at Impala platinum mine. In *Proceedings of the Second Southern Hemisphere Rock Mechanics Symposium, Symposium Series S71, South African Institute of Mining and Metallurgy, ISBN 978-1-920410-27-8*, pp. 367-385.
- Hofmann, G., H. Ogasawara, T. Katsura, and D. Roberts, An attempt to constrain the stress and strength of a dyke that accommodated a ML2.1 seismic event, *Proceedings of the second Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium, South African Institute of Mining and Metallurgy, 16 May 2012, Sun City, South Africa*, pp. 436-450, 2012.
- 【Invited】**Riemer, K., and R.J. Durrheim, Mining seismicity in the Witwatersrand Basin: monitoring, mechanisms and mitigation strategies in perspective, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2012, 4 (3): 228-249.
- Ogasawara, H., H. Kato, G. Hofmann, and P. de Bruin, Trial of the BX conical ended borehole overcoring stress measurement technique, *J. South African Institute of Mining and Metallurgy*, 102 (8), pp.479-753, 2012.
- 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*, doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05678.x, 2012.

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, Proc. 21th Int. Acoustic Emission Sym., Jap. Soc. for Non-Destructive Inspection, Tokyo, 2012. 181-186.

小笠原宏, 加藤春實, G. Hofmann, P. de Bruin, 坂口清敏, 大深度・高応力の南アフリカ金鉱山の諸条件に最適な形で円錐孔底ひずみ法応力測定を行う試み、第 13 回岩の力学シンポジウム論文集、pp.465-470, 2013.

Cichowicz, A., D. Birch, and H. Ogasawara, Non-invasive method of estimation of stiffness of near surface material using surface wave, Geotechnical and Geophysical Site Characterization4 (Coutinho & Mayne, eds), Taylor & Francis Group, London, pp. 1321-1325, 2013.

(2) 特許出願

- ① 本年度特許出願内訳(国内 0 件、海外 0 件、特許出願した発明数 0 件)
- ② 本プロジェクト期間累積件数(国内 0 件、海外 0 件)

4. プロジェクト実施体制

(1) 「震源の岩盤変形」グループ

- ① 研究グループリーダー: 小笠原 宏(立命館大学・教授)
- ② 研究項目

震源での応力蓄積・緩和を監視し、地震リスク評価の精度を向上させる。

(2) 「震源の微小破壊」グループ

- ① 研究グループリーダー: 中谷 正生(東京大学・准教授)
- ② 研究項目

本震断層の詳細な形状を特定し、地震発生リスク評価精度を向上させる。

(3) 「震源の動的破壊過程」グループ

- ① 研究グループリーダー: 矢部 康男(東北大学・准教授)
- ② 研究項目

断層の動的破壊過程のスケール依存性を明らかにし、採掘現場での強震動予測精度を向上させる。

(4) 坑内観測地震高度解析グループ

- ① 研究グループリーダー: 川方 裕則(立命館大学・教授)
- ② 研究項目

現存の鉱山の地震観測データに基づく応力推定の精度を向上させ、地震活動推移の予測精度を向上させる。

(5) 震源の岩石分析グループ

① 研究グループリーダー：佐藤 隆司（(独)産業技術総合研究所・主任研究員）

② 研究項目

震源域で採取した岩石試料の物性や破壊特性を室内実験によって計測し、研究のねらいを達成する。

(6) 地表地震観測グループ

① 研究グループリーダー：小笠原 宏（立命館大学・教授）

② 研究項目

地表に被害を与える規模の地震による地表の強震動評価精度を向上させる。

以上