

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に関する研究」)

鉦山での地震被害低減のための観測研究

(相手国:南アフリカ共和国)

平成 25 年度実施報告書

代表者氏名 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概要

自然大地震や鉱山の誘発被害地震について、その発生や強震動の予測の精度を高めることが世界で強く望まれている。このためには地震の準備の発生過程の理解を深めることが必要である。そこで、本課題では、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、震源の至近距離で、高感度・高精度の微小破壊(AE)や歪(ひずみ)・傾斜、強震を観測すべく、複数の鉱山で2~3年の間にM2級の地震(100mサイズの断層破壊)が発生しうる場所を特定し、その至近距離に坑内観測網を展開した。この様な取り組みは南ア金鉱山以外では不可能である。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。

平成22(H22)年8月に本課題(5ケ年)が始まった。H23年の新燃岳噴火や東日本大震災、H24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、H22年8月以降、延べ36名の短期専門家が延べ約115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、H22年度中に、地表と、坑内の一部の観測が始まり、それらのデータはH25年3月の時点で3年間以上蓄積されている。H26年3月現在、断念せざるを得なくなったり、開始が遅れたりしている観測項目が一部にあるが、微小破壊、震源の応力や強度、強震動、震源貫通孔やコアのダメージ応力解析など、学術的価値が高く、前例のない成果が得られつつある。主要な全観測サイトで、数百m以内でM2地震が発生し始めており、1つの主要サイトではH26年3月に100 μ strain近い地震歪ステップも観測された。

取り組みや成果は、日本と南アのメディアでも報道され、アフリカだけでなく欧米やアジアの関連学会(招待講演含む)、H25年5月の国際資源ビジネスフォーラム(J-SUMIT)などでも発信された。J-SUMIT時の日本経産大臣と南ア資源大臣との懇談では進捗のよいプロジェクトとして紹介された。

日本の岩盤応力や歪の観測技術や、震源自動決定の技術、室内岩石破壊実験技術は、南ア機関が自立運用できるよう移転中である。今後、更に活発化する地震活動のデータを蓄積し、データや資料の解析を南アや日本の若手とともに更に進め、目標を達成させたい。

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生産量も年々減り、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、Ventersdorp 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 間隔の Strike stabilizing pillar(幅 20 m; 走向方向の長さ 120 m; 図 1 中の⑩)が導入されつつあった。今日、この鉱山では、Shaft Pillar(図 1 中の⑫)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 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1⑩)などの掘り残し部を採掘している、あるいは、採掘を試みようとしている。しかし、応力集中が大きいと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、鉱業部門の総付加価値額は南ア経済全体の約1割を占め、重要な雇用の受け皿である。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

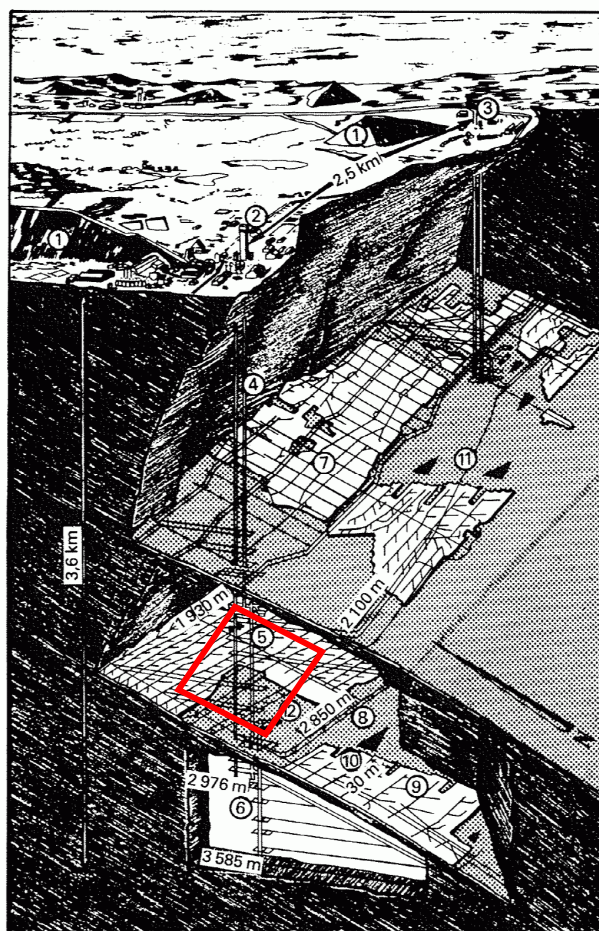


図1 南アで最も金の生産量が多い鉱山の薄板状金鉱脈(厚さ数十cm)と堅坑・坑道・採掘によって広がる薄板状採掘跡などの様子を示す模式図(Tanton et al. 1984)。薄板状の採掘跡の天井高は採掘前線では1 m数十cmあるが採掘前線が遠ざかり年月が経つと薄板状採掘跡は完全に閉塞する。1:ずり山; 2: 第二堅坑; 3: 第三堅坑; 4: Main Shaft; 5: Sub shaft; 6: Tertiary shaft; 7: Vendersdorp Contact Reef; 8: Carbon Leader Reef; 9: Lower Carbon Leader Reef; 10: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

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。

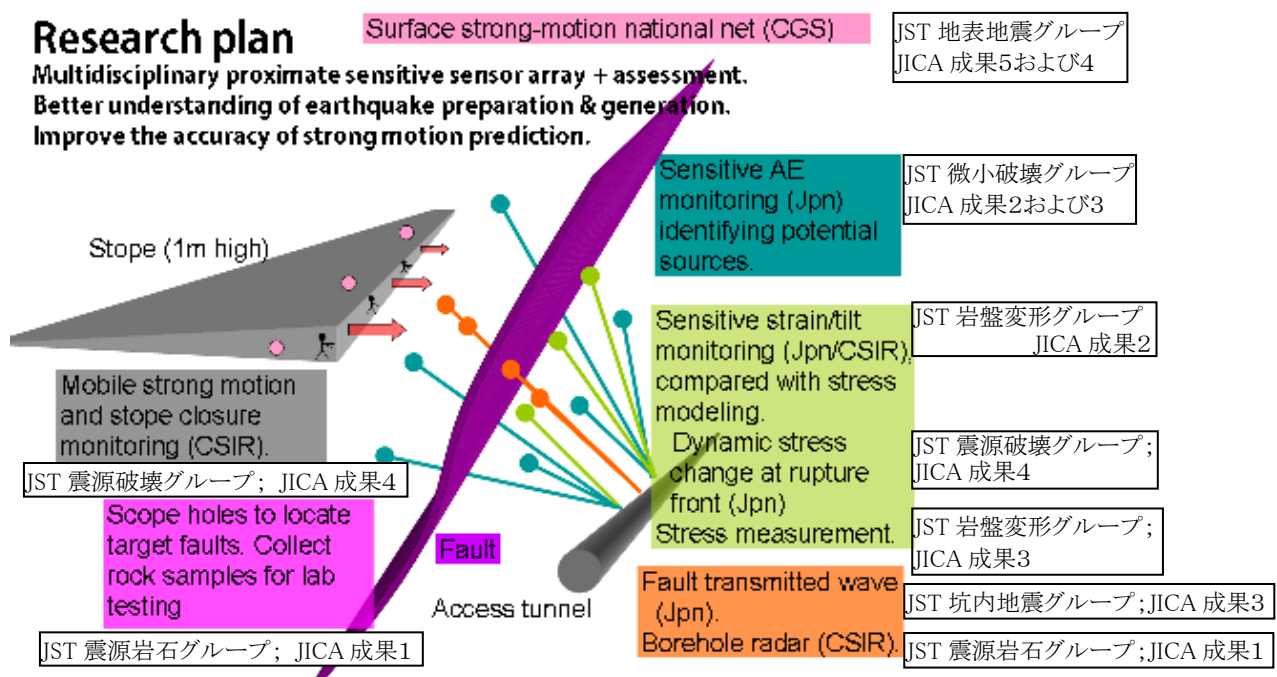


図2 研究実施方法を示す模式図。想定地震断層近傍に観測網を展開して地震の準備と強震動の発生の詳細を知る。地表には国立地震観測網を増強し、地表の地震動評価精度を向上させる。

研究課題名	鉱山での地震被害低減のための観測研究
研究代表者名 (所属機関)	小笠原 宏 (立命館大学 理工学部 教授)
研究期間	H21条件付採択 H22年2月MoU 本契約H22年4月からH27年3月31日まで(5年間)
相手国名	南アフリカ共和国
主要相手国研究機関	科学産業技術協議会 (CSIR)

JST従たる評価項目

希少データ(*)へのアクセス	地下1~3kmの地震至近距離観測網と地上観測網による総合観測データの入手方法の確立 同データの持ち帰り
地震研究における日本のプレゼンス向上	希少データを元にした招待講演 関連学会等での運営委員・座長
希少データを元にした査読付論文掲載	震源の岩石、準備過程に関する論文 地震活動予測・制御に関する論文 動的破壊過程に関する論文 強震動予測に関する論文
アウトリーチ	希少データ獲得に関する新聞報道
人材育成	希少データ観測のノウハウを有する若手研究者の育成

(*) 至近距離でとらえられた地震の準備と発生とのデータ
および、比較・議論できる地下と地上の強震動データ等

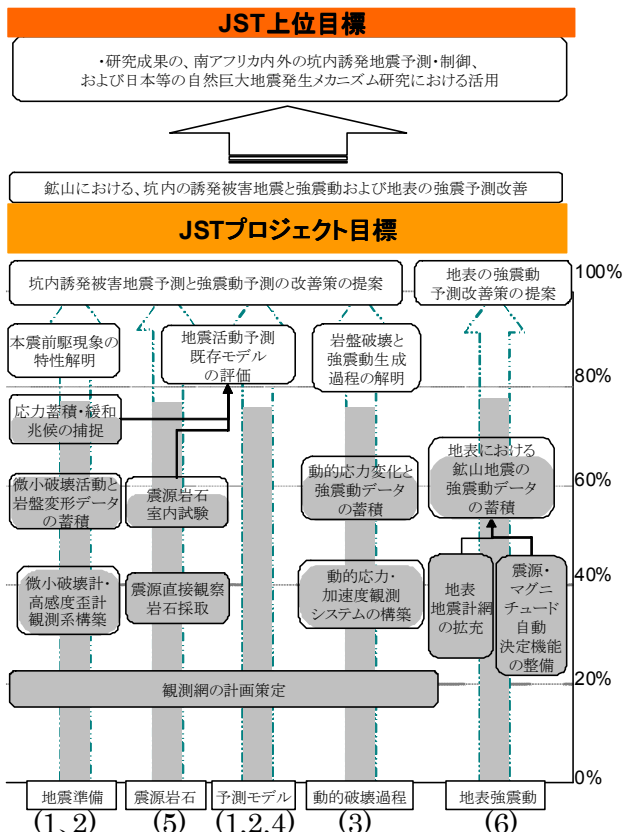


図3 JST 成果目標と、H25 (2013)年度末の時点の到達度の模式表示 (灰色塗りつぶし部)。括弧付きの数字は、2.2に記載されているJST各研究グループの番号。

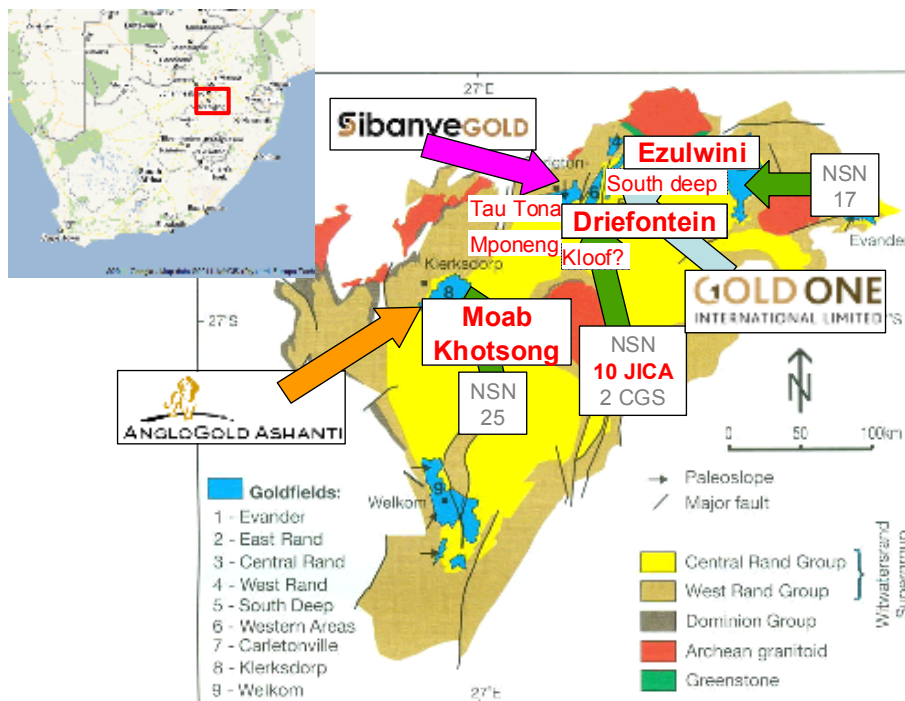


図4 南アの金鉱床 (青) の分布と SATREPS の主観測サイトを持つ鉱山 (黒枠付き赤ゴシック太字; アングロゴールド・アシャンティ社モアブ・コツォン鉱山、シバニア・ゴールド社ドリーフオンテイン鉱山、ゴールド・ワン社クック・フォー (イズルウィニ) 鉱山)、SATREPS と同時に増強された CGS の地表国立地震観測網 (National Seismograph Network; NSN)、および、移転した技術によって、鉱山が中心となり、当初計画にはなかった活動があった鉱山 (サウス・ディープ鉱山、ムポネン鉱山、タウ・トナ鉱山) およびクルーフ鉱山 (予定)。

表1 H25(2013)年度末の時点の進捗状況。下線:H25(2013)年度の進捗

金鉱山名 (過年度名称)	クック・フォー (イズルウィニ)	モアプ・コツオン	ドリーフォンテイン (KDC West)	当初計画外その他鉱山 ムポネン・タウトナ; サウスディーブ
現在の所有会社 (過年度); →:来年度所有会社	ゴールド・ワン (ファースト・ウラニウム) → シバニエ・ゴールド	アングロゴールド・ アシヤンティ	シバニア・ゴールド (ゴールドフィールズ)	アングロゴールド・ アシヤンティ; ゴールドフィールズ
2014年3月現在の採掘と 観測の進捗	監視継続中。データ蓄 積期間>3年。監視断層 の西側の採掘が完了し 岩盤変形と誘発地震を 観測。歪に遠地大地震 記録。想定断層の東側 採掘開始に伴い地震活 動がピークになる見込。	監視断層付近が採掘さ れないことになり、微小破 壊・断層透過波・ゆっく りすべり観測は断念。他の 断層付近に歪・傾斜計を 埋設。データ蓄積約1 年。採掘域閉塞計と強震 計は設置予定。	監視断層に地震を誘 発する2つの採掘域 の1つの採掘がほぼ終 了。観測網直近に M1.9発生。歪データは 約2年間蓄積中。歪に 遠地大地震記録。	技術移転によって、鉱 山が独自に応力測定 や歪観測を始めた。歪 に遠地大地震記録。前 例のない深さ、応力(震 源レベル)で応力測定 に成功。
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)	世界最深の鉱山; 鉱脈 は例外的に厚く南アで 余命最長の鉱山
採掘シナリオ	堅坑鉱柱の採掘 (全採 掘計画の最終段階)	断層によって複雑に断た れた鉱脈の採掘	Sequential grid mining	Sequential grid mining; Massive mining
地表からの深さ	約1km	約3km	約3km	最深3.4km; 3.0km
採掘安全管理上の懸念	堅坑鉱柱の断層 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	高応力; Massive mining の影響。
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(AE)	センサー数十個稼働 中。	予定のセンサーの約 2/3 を埋設。が、 <u>短寿命が発 覚し、観測断念。寿命延 長と確認のみ実施予定。</u>	-	-
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。 データ収録中。	予定の2台稼働中。 <u>100 μ strain近いステッ プを観測。</u>	<u>サウス・ディーブ鉱山に 2台目を埋設</u>
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 埋設予定を断 念。	-	-
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中	-	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計器埋設予定を断念	-	-
応力測定	<u>2013年12月に実施</u>	H23(2011)年実施済	計画中	ムポネン、タウトナ各鉱 山で実施(世界最深・ 地震直近など出版前例 のない測定に成功)
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傾斜計の埋設完 了。稼働中。	予定の2台稼働中	-
採掘現場閉塞観測	-	1組調達済。埋設予定。	<u>予定2鉱区の一方の採 掘が終了。計器移動 中。</u>	-
採掘現場強震観測	-	1組調達済。埋設予定。	-	-
地表国立地震観測網	SATREPS観測網稼働 中。 <u>自動震源決定能力 上の問題を日本の技術 の導入で解決中。</u>	CGS 独自観測網増強。 <u>自動震源決定能力上の 問題を日本の技術の導 入で解決中。</u>	SATREPS観測網稼働 中。 <u>自動震源決定能 力上の問題を日本の 技術の導入で解決中。</u>	ヨハネスブルグ南近郊 にCGS 独自観測網増 強。 <u>自動震源決定能力 上の問題を日本の技術 の導入で解決中。</u>

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たものであり、また、図 4 は各鉱山のおおよその位置、表1は各鉱山の特徴と進捗状況を簡略にまとめたものである。

南アフリカ鉱山の坑内には、密なところでは数百m間隔で地震計が配置され、Institute of Mine Seismology 社 (IMS; 坑内地震監視機器のハード・ソフトの製造権や監視に基づく地震ハザード評価スキームを ISS International 社から、2010 年に譲渡されてできた新しい会社) や鉱山によって、1990 年以降、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金産業の近未来を大きく左右するが、この高度化には、地震のより深い理解を得ることが必要不可欠である。このために、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-南ア MoU に記載され、図 2 に示されている成果1; 以下 JICA 成果1; 図 3 では震源岩石に対応)、地震の準備 (図 2 の JICA 成果 2; 図 3 の地震準備) と強震動の発生 (図 2 の JICA 成果4; 図 3 の動的破壊過程) 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 (図 2 の JICA 成果 5; 図 3 の地表強震動) 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。

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、あるいは前例のない試みの坑内震源至近距離観測網が、クック・フォー鉱山、ドリーフォンテイン鉱山、モアプ・コツオン鉱山で展開され、南ア地表国立地震観測網が Far West 地域に増強されている (図 4)。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。進捗状況は、また、図 3 (p.5 の成果目標シート) の灰色の棒の高さによっても模式的に示されている。観測網の展開が完了しつつあり、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。

2013 年度は、11 人・週の短期専門家が派遣されて観測や測定が進み、データが増え、このプロジェクトからしか得ることができない学術的に重要な成果が増えた。技術移転によって鉱山が自立発展的に行い始めている観測や測定もある。それを用いて修士論文や博士論文を書こうとする南アの研究者が現れ始め、短期専門家による修論指導や修論副査も行われた。2013 年 5 月には博士号取得を目指す Wits 大准講師を約1ヶ月招聘した。2014 年 4 月に CGS の職員 (プレトリア大修士号取得見込み) を短期招へいする段取りも完了した。

2.2 各研究グループの実施内容

(1) 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(表1の 2014 年 3 月現在の採掘と観測、高感度歪観測、応力測定参照)

ゴールド・ワン社クック・フォー鉱山では、2 台の歪計データ蓄積が約 3 年になった。平成 24 年 5 月に自動解析・報告システムが完成したが、その後、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、坑内スタンド・アロン・ロガーに収録されたデータを1~3ヶ月毎に回収し、解析結果を鉱山の岩盤工学部に報告し、議論している。採掘に伴い1000 μ strain 近い歪変化(50-70MPa の応力変化に相当)が記録された。東北地方太平洋沖地震の歪地震動も記録された。平成 25 年 12 月に応力測定を行い、地表下 1km であるにもかかわらず、後述する地表下 3km の未採掘域よりも最大圧縮応力が有意に大きいことが明らかになった。

シバニエ・ゴールド社ドリフオンテイン鉱山では、予定の 3 台の歪計の観測が平成 23 年 12 月から始まり約 2 年が経過した。カウンターパートの傾斜計は予定の 2 台の埋設が完了し平成 24 年 11 月から観測が始まった。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、毎日定時に速報レポートが Web 上に自動的に表示されている。平成 25 年 12 月と、平成 26 年 3 月には、 M_L 1.8 および M_L 1.9 の地震が歪計の付近で発生し、後者では 100 μ strain 近い歪ステップが観測された。

アングロゴールド・アシャンティ社のモアプ・コツオン鉱山では予定の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平成 25 年 12 月に運用が始まった。2 台の広帯域地震計とカウンターパートの 2 台の傾斜計も予定の 3 台の観測が始まった。

サウス・ディープ鉱山では、日本の技術援助で、鉱山が自前で調達した1台の歪計が平成 23 年 12 月に埋設されていた。シバニエ・ゴールド社クルーフ鉱山(過年度の名称はKDC East 鉱山)では、歪観測をする予定であった鉱柱を採掘しないことになったため、埋設予定の歪計を平成 25 年 11 月にサウス・ディープ鉱山に増設した。これらのデータは、岩盤工学部で地震活動と共に常時監視されている。平成 25 年 11 月に Mw7.8 遠地地震の歪波形が観測されていることが常時監視画面に映し出され、この発見を契機に他鉱山のデータを再精査したところ、平成 23 年の東北地方太平洋沖地震、平成 24 年のスマトラ地震(Mw8.4, Mw8.2)などが観測されていることもわかった。

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。

日本で多用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、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、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 において測定が行われた。前者は南ア最大の金鉱山であるが、以前には応力測定が一度も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、 M_L 1.5 の被害地震の近くの測定であった。後者は最大圧縮応力が 146MPa と非常に大きかったため、非弾性の影響や、応力が大きい原因の検討や、世界で広く使用されている方法との比較測定が平成 25 年 8 月から 26 年 1 月にかけて行われた。上述の 146MPa は、測定地点が坑道に

近かったためであろうということ、146MPa の応力下でも強度の寸法効果のために岩盤ダメージの影響が少ないことがわかり、他の研究によって明らかになった地震の震源で期待される最大主応力 (100MPa 以上) でも測定ができることが実証できたことになる。

歪観測や応力測定を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することも出来た。

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やシバニエ・ゴールド社の地震部門・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。

応力測定の到達点と課題は、2014 年 2 月 13 日にイズルウィニ鉱山で開催された mini-Workshop(5 社と 4 つの研究機関から 20 名が参加)で共有された。

歪・傾斜観測データについては、北海道大学が取り組んでいる「全国ひずみ・傾斜データの流通と一元化」の中で開発されているデータベース・解析システムを利用し、南アや日本などの地震監視や地震ハザード評価に携わっている多くの人達や、研究者に利用してもらうために何が必要かを日本側で検討し始めた。平成 26 年度の南アでの実装を目指す。

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、必ずしも熟練していない地質ドリラーでも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、予想以上の反応が南ア側からあった。7つ以上の鉱山から測定ができないか打診があり、技術移転を進め、平成 26 年 3 月現在、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がほぼ完了し、必要資材の現地調達も可能になっている。

(2) 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ー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ーによる観測が始まり 2 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 (図 5 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。平成 24 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

ができています。平成 25 年度は学術的に重要な成果が増えた。

モアプ・コツォン鉱山においては、微小破壊観測用のセンサーの 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が、探鉱が進んだ結果、断層で細かく断ち切れ鉱脈の品位も高くないため、観測網周囲の採掘が行われないことになってしまった。また、同鉱山では、センサーの寿命が短いこともわかったため、改良したセンサーの寿命を調べるだけにして、残りの資源をクック・フォー鉱山に集中させることにした。

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。

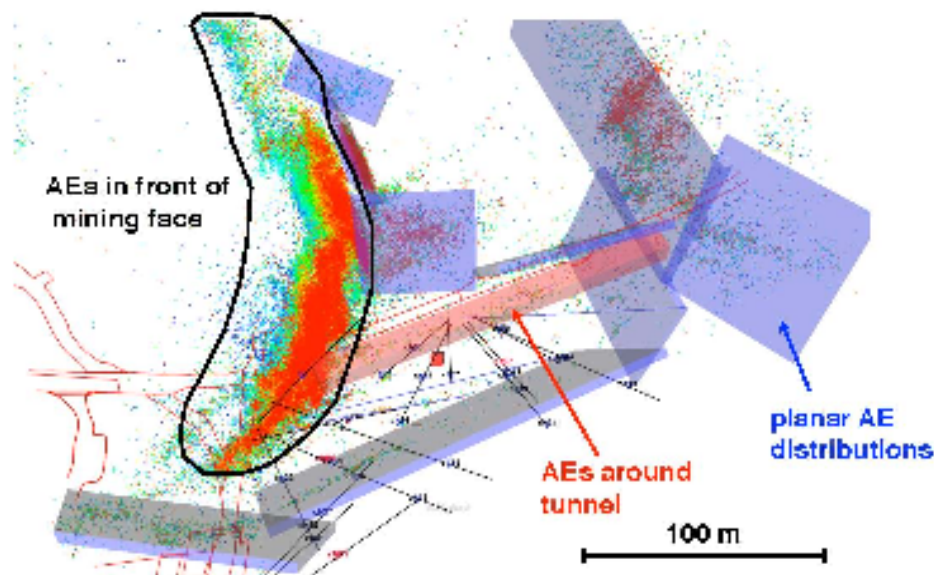


図 5 クック・フォー鉱山の微小破壊観測網と、決定された微小破壊の分布。P 波の走時読み取り数が 10 個以上、RMS 走時残差が 0.2 ms 以内という基準をみたした 22 万イベントの震源分布が上図に示されている(<http://yotikyo.eri.u-tokyo.ac.jp/h23/pdf2/2402.pdf>)。

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。

平成 24 年度、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)

モアプ・コツォン鉱山の計画変更(上で説明済み)。

(3) 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、ドリーフォンテイン鉱山においては4本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、ドリーフォンテイン鉱山では平成 24 年 1 月から観測を開始した。クック・フォー鉱山とドリーフォンテイン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。

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。観測された大きな加速度の成因を明らかにするため、スペクトル解析および簡単なモデリングを行った。

ドリーフォンテイン鉱山では、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。ドリーフォンテイン鉱山の岩盤工学部長が交代したのに伴い、本計画の目的とこれまでの成果、鉱山の安全に対する貢献をあらためて説明した。

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最初の大きな採掘ステージの際に、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りれるようにした。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。

(4) 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鉾山地震などのデータに適用し、現行の鉾山地震のリスク・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

鉾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イズルウィニ鉾山への設置が完了し、2011 年 4 月よりモニタリングを開始した。現在までに、数ヶ月間に渡る幾度かの欠測を含みつつも、2012 年 11 月までの 1.5 年に渡るモニタリングが実施された。電源系統の問題により欠測状態が続いていたが、2013 年度に日本人短期専門家がサイトのメンテナンスを実施し、その後も短期的な欠測を含みつつも観測は継続されている。能動震源を用いたモニタリングにおいては、年月の経過とともに高周波帯域の信号強度が落ちていくことが確認されたが、これは震源と地殻とのカップリングの低下によるものと考えられる。低周波帯域においては、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・コツォン鉾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が、(2)に記されたように、AE 観測網の大幅な縮小され、地震活動度の指標が得られなくなったために、能動震源をもちいたモニタリングは計画を中止した。

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。

イズルウィニ鉾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おこない、時間変化の検討を開始した。

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、システム状態のレポートとデータ集録用のディスクの交換、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)

モアプ・コツォン鉾山の計画変更(上で説明済み)。

(5) 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・フォー鉾山、および、モアプ・コツォン鉾山において、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。平成 23 年は、KDC West 鉾山(現在の鉾山名称はドリーフォンテイン)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・フォー鉾山および KDC West 鉾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 M_L 2.1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、Witwatersrand 大学において、圧裂試験により一軸引張強度を測定した(写真1)。また、東北大学においても一軸圧縮試験および圧裂試験を行い、 M_L 2.1の震源断層貫通孔のブレイクアウトとディスキングの情報と合わせ、平成25年度に震源近傍の応力場を拘束することに成功した(図6)。

平成24年度は、また、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 M_L 2.1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。

平成25年度には、クック・フォー鉱山のコアが、Wits大の卒業研究として室内試験がシステマティックに行われ、卒業論文にまとめられた。ブレイクアウトやディスキングの解析や、応力モデリングの基礎データとして使用される予定である。

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)

平成24年度までに、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。また、Witwatersrand大学の博士課程学生の日本への派遣について協議した。平成25年5月27日-7月12日、博士号取得を目指すWits大准講師を産業技術総合研究所に招聘し、室内岩石実験におけるAE計測実験手法を指導した(写真2)。

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。

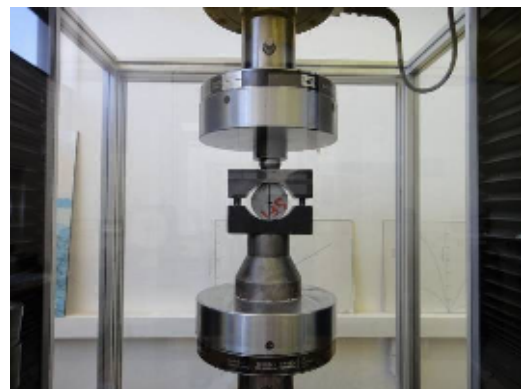


写真1 Witwatersrand 大学における圧裂試験の様子。

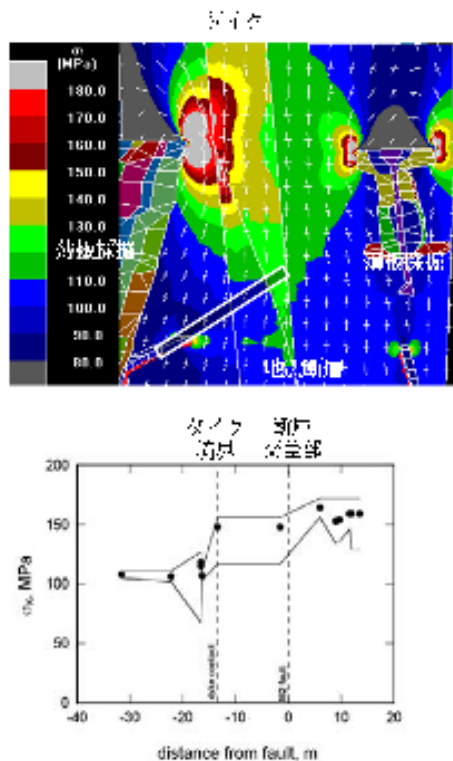


図6 上:応力モデリングで推定された、2007年12月のM_L2.1の震源断層付近の最大主応力の分布(コンター)と震源貫通ドリリング(白四角)。下:圧裂試験(写真1)や一軸圧縮試験で得られた強度と、震源貫通ドリリングのボアホールブレイクアウトとコアディスキングの解析から拘束された、孔軸に垂直な面内の最大応力 σ_x の分布。



写真2 H25年度、(独)産業総合科学技術研究所、佐藤博士・雷博士によって、Witwatersrand大 Zvarivadza 準講師に岩石破壊実験中のAE観測技術が指導された。東北大学矢部准教授と院生(飯田君)も参加。

(6) 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

鉾山地域の国立地震観測網を増強し(図 7)、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鉾山地域の国立地震観測網(National Seismic Network; NSN)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(図 4 の NSN17 点)。さらなる予算でクラークスドープ地区(図4の NSN25 点)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・ウェスト地区に増強させる(図 7)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(写真 3, 4)。

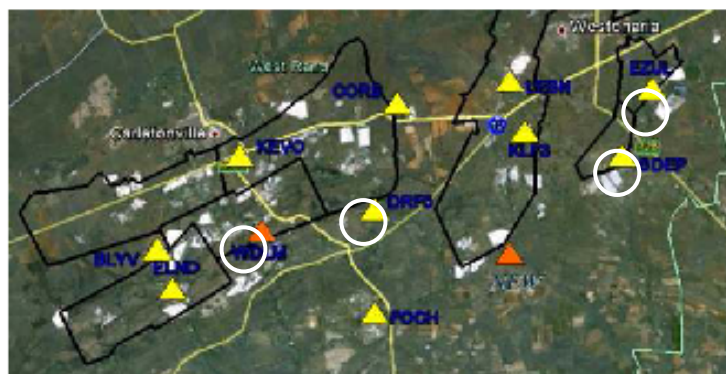


図 7 Far West Rand 金鉾区の東西差し渡し約 30km の範囲の金採掘区(黒枠)、および、SATREPS によって大幅に増強された地表地震観測点(黄色三角;観測点間隔は約 2~7km)。この増強の前には、国立地表地震観測点は左側の橙色の三角(WDLN)のみで、 $M>2$ の地震しか検知できなかった。ちなみに白丸は日本の地下観測網が展開されている堅坑の場所を示す。Council for Geoscience 自身で一点(橙色三角;NEW)を増設し、合計十二点で地震が地表観測できるようになった。この範囲には、鉾山会社による地下地震観測網(各黒枠内に地震計 10~30 点)が展開されていて、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。閉山水没域には地震計は設置されておらず、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。



写真3 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Council for Geoscienceまで転送されている。



写真4 左および中央：平成24年5月8日、南ア科学技術省、日本大使館、JST、JICA南ア事務所の方々をお迎えし、Council for Geoscience(Pretoria)が観測点設置の状況を説明し(写真左)、データ解析センター(中央)を披露した。右：平成25年1月24日、JICA本部財務部長(右端)、JICA南アフリカ事務所長(中央)に、稼働後2年近く経過したCGSの国立地震観測網を紹介することができた。

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)

CGSの南ア国立地震観測網は、SATREPSの10観測点だけでなく、南ア独自の努力によって抜本的に増強された(42点;図4のNSN17点と25点)。しかし、現有の自動震源決定システムの能力の限界に達し、既存の自動震源決定システムでは、採掘域から大きく離れた場所に震源が決められてしまうことが多々発生するようになってしまった。日本の優れた自動震源決定アルゴリズムを導入する検討を始め、4月に南アの若手が来日し、短期研修を受けることになった。このアルゴリズムで、SATREPSが増強した観測網だけでなく、南アが独自に増強した金鉱山地域の観測網の自動地震検出・自動震源決定能力の抜本的向上に、SATREPS開始当初よりも大きく貢献すると期待されている。

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)

上に記した国の予算による他の鉱山地区の地震観測の増強(平成22年度)。上記の自動震源決定能力の限界問題と、その解決のための日本の技術の追加支援。

3. 成果発表等

(1) 原著論文発表

- ① 本年度発表総数(国内 2件、国際 10件)
- ② 本プロジェクト期間累積件数(国内 7件、国際 30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. 66, 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, doi:10.4203/ccp.96.205, 2011.
- 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, doi: 10.1785/0120100346, 2011.
- 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, pp.48, 2012.

- Durrheim, R.J., Functional specifications for in-stope support based on seismic and rockburst observations in South African mines. In *Deepmining 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, 2012.
- 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, 2012.
- 【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, 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, 2012.
- 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*, 4 (3): 228-249, 2012.
- 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. 181-186, 2012.
- 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.
- Hofmann, G., L. Scheepers, and H. Ogasawara, Loading conditions of geological faults in deep level tabular mines, Proc. 6th Int. Symp. on In-Situ Rock Stress, 20-22 August 2013, Sendai, Japan, 558-580, 2013.
- 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 Mw 2.2 earthquake in a deep gold mine in South Africa based on borehole breakout and core discing, Proc. 6th Int. Symp. on In-Situ Rock Stress, 20-22 August 2013, Sendai, Japan, 604-613, 2013.
- Ogasawara, H., H. Kato, G. Hofmann, P. Piper, T. Clements, and K. Sakaguchi, In-situ stress measurements to constrain stress and strength near seismic faults in deep level South African gold mines, Proc. 6th Int. Symp. on In-Situ Rock Stress, 20-22 August 2013, Sendai, Japan, 614-623, 2013.
- Moriya, M., M. Naoi, M. Nakatani, T. Kgarume, A.K. Ward, R. Durrheim, P. Joachim, Y. Yabe, H. Kawakata, H. Ogasawara, Detection of mining-induced fractures associated with stress perturbation around a stope in Ezulwini gold mine, South Africa, by using AE events, Proceedings of the 6th International Symposium on In-Situ Rock Stress, 597-602, 2013.
- Ogasawara, H., G. Hofmann, H. Kato, M. Nakatani, H. Moriya, M. Naoi, Y. Yabe, R. Durrheim, A. Cichowicz, T. Kgarume, A. Milev, O. Murakami, T. Satoh, and H. Kawakata, In-situ monitoring and modelling of the rock mass response to mining: Japanese-South African collaborative research, Proc. 8th Int. Symp. Rockburst and Induced Seismicity in Mines, 2-7 September 2013, St. Petersburg-Moscow, Russia, 51-60, 2013.
- Share, P., A. Milev, R. Durrheim, J. Kuijpers and H. Ogasawara, Relating tilt measurements recorded at Mponeng gold mine, South Africa, to the rupture of an M2.2 event, Proc. 8th Int. Symp. Rockburst and Induced Seismicity in Mines, 2-7 September 2013, St. Petersburg-Moscow, Russia, 67-73, 2013.
- Durrheim, R.J., J. Kuijpers, G. Henry, A.V.Z. Brink, B. Kagezi, G. Ferreira, R. Telka, A. Milev, H. Ogasawara, A. Ward and J. Wienand, Mapping seismic vulnerability in stopes in deep South African gold mines, Proc. 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, 2-7 September 2013, St. Petersburg-Moscow, Russia, 387-393, 2013.
- Satoh, T., X. Lei, M. Nakatani, Y. Yabe, M. Naoi, G. Morema. Quasi-static fault growth in a gabbro sample retrieved from a South African deep gold mine revealed by multi-channel AE monitoring. Proc. 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, Moscow, Russia, September 2013, 51-60, 2013.
- 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 Appl. Geophys., DOI 10.1007/s00024-013-0721-7, 2013.

Share, P., A. Milev, R. Durrheim, J. Kuijpers, and H. Ogasawara, Relating high-resolution tilt measurements to the source displacement of an M2.2 event located at Mponeng gold mine, J. Southern African Inst. Min. Metallurgy, 113 (10), 787-793, 2013.

今川祥太, コーダ波を用いた坑道検出の試み —南アフリカ Cooke4 鉱山観測サイト, 立命館大学大学院修士論文, pp.30, 2014.

小笠原宏・加藤春實・Gerhard Hofmann・矢部康男・坂口清敏, 南アフリカ金鉱山大深度における震源近傍での現位置多点応力測定の可能性, 月刊地球, 36(3), 146-151, 2014.

(2) 特許出願

① 本年度特許出願内訳(国内 0 件、国際 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、国際 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