

地球規模課題対応国際科学技術協力(SATREPS)

防災分野「開発途上国のニーズを踏まえた防災に関する研究」領域

「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)

終了報告書

期間 平成21年4月～平成27年3月

代表者氏名:小笠原 宏

立命館大学理工学部 教授

§ 1 プロジェクト実施の概要

1.1 背景

自然大地震や誘発地震(鉱山や油田などでの採掘、あるいは、水やCO₂の圧入などによる)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。

1970年代は南アフリカ(以下南ア)の金の年間生産量が全世界の2/3を占めたこともあり、現在までの南アの金の累積生産量は全世界のその約4割を占める(2007年時点;Beach and Smith 2007)。また南アの確認済みの金埋蔵量は、今なお世界の約3割を占める(2007年時点;Beach and Smith 2007)。しかし、採掘現場の深度や堅坑からの距離、岩盤応力が増して採算性が下がり、南アの金生産量は年々減っている。このため、より安全で採算性がよりよい採掘技術確立し、南アの主要産業と労働者の雇用をどう持続できるかが社会的に大きな課題となっている。

南アの金鉱山の坑内では、発生のタイミングと場所が悪いとマグニチュード(M)1.5程度の地震でも犠牲者が出る場合があるため、地下坑内に約500m以下の間隔で高感度速度型地震計(4.5HzGeophone)が埋設され地震の常時監視が行われている。大きな鉱山の場合は年間約十万个(検出限界はM=-2~-1程度まで;震央決定精度数十m)がカタログされ、これに基づくハザード評価が安全管理業務ルーチンに取り込まれている。しかし、本震発生直前に異常な地震活動が検知されても、本震がなかなか起こらないことがある。また、異常な地震活動が先行せずに本震が発生することもあり、確実に役に立つ形で地震情報を活用する方法が未だに確立されていない。

1.2 実施内容と成果

本プロジェクトは、震源の至近距離における高感度の微小破壊(AE)や歪(ひずみ)・傾斜の観測、絶対応力の測定、および、強震の観測などに基づいて、現存する世界水準の鉱山地震観測網でも見ることのできない地震の準備と発生の様子を詳しく観察して、その理解を深め、地震被害を低減させることができる成果を得ようとするものである。この様な試みを行うことができるのは南ア金鉱山のみである。なぜならば、採掘前に、採掘計画と地質情報に基づいてM2級(断層破壊域約100m)の震源位置を特定でき、あとは、2~3年間至近距離観測を行えば成果を出せるからである。SATREPSによって、2009年度の条件付き採択からの6年間に、本プロジェクトに投じられた人的物的資源の規模(短期専門家派遣延べ人数65名、派遣期間延べ1064日間、坑内技師FullTime雇用最大5名、ドリリング80本以上総延長2.8km以上、供与機材100台以上)は、1992年以来続けられている南アとの共同研究のそれより一桁多く、世界的に見てもまれなものであった。坑内の観測は、5つの鉱山会社が所有する南アの6つの金鉱山の地下1.0~3.4kmで行われた。これらの鉱山には、世界で最も深い十大鉱山の第一、二、四、六、七位に位置する5つが含まれる。

本プロジェクトでは、これまで検知できなかった既存弱面を微小破壊活動として鮮明に描き出すことができただけでなく、そこでの準静的な破壊の成長や、本震直前の前震活動の加速を捉えることに成功した。また、応力と地震の規模別頻度分布の関係など、自然地震の観測や室内岩石破壊実験では得ることができない学術的に非常に貴重な成果を多く得ることができた。正確に描き出されたモーメント・マグニチュード(Mw) 2.2の地震破壊面では、計算機応力予測と比較して地震を計算機上で再現することや応力と強度のありうる範囲を絞り込むことにも成功した。これらの成果に触発されて、ある鉱山では、自立運用できる規模で、微小破壊観測を始めた。

大深度で岩盤応力を測定することは一般に困難で、本プロジェクト以前に印刷公表された信頼できる岩盤応力測定結果は、地表下2.7km以浅あるいは最大圧縮応力100MPa以下に限られていた。しかし、本プロジェクトによって、日本の技術を導入することによって、最大圧縮応力が百数十MPaに達する場合であっても、採掘活動を妨げることなく、ルーチン的に応力測定ができることを実証できた。得られた結果に基づいて鉱山の初期応力モデルを較正し、地震の震源域の応力や強度のありうる範囲を絞り込むことにも成功した。南アの鉱山会社や土木コンサル会社が、自力で測定ができるように、この技術を移転し、彼らによって計算機応力予測が困難な場所や地震リスクが高い場所での応力測定が行われ始めた。採掘が進むと岩盤応力の計算機予測は困難になるため、岩盤応力の実測が容易になったインパクトは非常に大きい。例えば、地下1kmであるが周囲が広範囲にわたり採掘されM2.8の地震が発生した岩体では、地震発生の約10ヶ月前に百数十MPaの最大主応力を測定することができ、事前の注意を喚起することができた。

南アの国立地表地震観測網の観測点は金鉱山地区に全部で2、3点しかなかったが、4大金鉱山地区のうちの1つにおいて、本プロジェクトが10台の強震計を2010年に提供した。同時に、南アの公的機関が他の2つの金鉱山地区にさらに42台の強震計を増強した。しかし、導入した米国製の地震解析システムの地震波到来時刻自動読み取りアルゴリズムの能力が低かったため、日本のアルゴリズムを本プロジェクトが提供し、3つの金鉱山地域の国立地表地震観測網全体の震源決定精度が抜本的に改善された。この様な中で、2014年8月5日にM5.5の地震が発生した。これは金鉱山地域でおこったものとしては過去最大であった。鉱山は、主に4.5 Hz Geophoneで構成された独自の地震観測網を坑内に持つが、これらの波形データから大きな地震の破壊過程を解析したり地表の強震動を評価することは難しい。今回増強された国立地表地震観測網の強震計の記録によって、南アの鉱山地区の地震の研究の歴史の上ではじめてとなる、非常に重要な解析がM5.5の地震に対して行えると期待されている。このM5.5の地震は、左横ずれ型で、鉱山よりも有意に深く地震活動がなかった地点で発生し、通常の鉱山の誘発地震とは特徴が大きく異なる。鉱山内の地下2.9km(余震域上端の数百m上)で実測された正断層型の応力場とも矛盾する。この地震では地下でこそ犠牲者が出なかったが地表で犠牲者や建物被害が出たため、この様な地震の将来のハザード評価を的確に行う必要がある。そのために、この地震断層に対してドリリングを行い、震源の応力や間隙水圧、強度回復などを観測してこの地震が発生した理由をつきとめることが望ましい。国際陸上科学掘削計画(International Continental Scientific Drilling Program; ICDP)と立命館大学がこの研究計画を議論するためのワークショップを開催する計画である。〈注:p.5の注を参照〉

本プロジェクトが提供した日本の高感度ボアホール歪計は、長期にわたる大きな応力変化(数ヶ月間に数十MPa)を記録し、採掘による地震発生域への载荷の計算機予測の較正に役立つことがわかった。3台の歪計が、上述のM5.5の余震域の数百m上の地下2.8~2.9kmに埋設されており、貴重な本震ニア・フィールドの100 Hz 歪変化を得ることができた。また、この歪計は高感度であり、M5.5の震源から数十km以上離れた地下約3kmでは、ファー・フィールドのきれいな記録が得られた。この歪計は広帯域でフラットな特性を有するためこれらの記録はM5.5の地震の発生メカニズム解明に貢献すると期待される。

1.3 成果発信とインパクト

2012年以降、本プロジェクトは鉱山街でSATREPSセミナーを毎年開催し、以上の成果を、研究者だけでなく岩盤工学や地震安全管理に関わる技術者達、計50~70名で共有している。

これらの成果はまた、岩盤応力や誘発地震の国際ワークショップや日本地球惑星科学連合大会(それぞれ、2013年8月、2015年3月と5月)にて講演を招待されるなど、学術的に高く評価されている。

世界の鉱山でも大深度化が進んでおり、南アにおける大深度での採掘の長い歴史と経験は世界から注目されている。本プロジェクトの南ア研究代表者は、カナダ・スウェーデン・オーストラリア・チリ・中国などで開催された鉱山に関連する国際学会やシンポジウム・ワークショップから招待され、本プロジェクトが南アの鉱山の採掘と地震研究の長い歴史の中で非常に重要な貢献をしていることを招待講演の中で報告している。この様な形でも大きなインパクトで世界に広まりつつある。

2013年の経産省・JOGMEC 日アフリカ国際資源ビジネスセミナー(J-SUMIT)の際には、日本の経産相と南ア資源相の懇談会において進捗のよいプロジェクトとして紹介された。また、成功を祝福し、本プロジェクトの継続を要望する公的書簡を、2014年6月に南アフリカ国立岩盤工学協会から受け取った。南ア科学技術省と在南ア日本大使館が2014年12月に出版した日・南ア科学技術協力10周年記念ブックレットでは、約一割のページにわたって成果が紹介された。2015年5月のGlobal Research Council およびJ-SUMIT2(共に東京)でも成果を発信し、南ア資源省次官らと、両国研究代表者らが懇談を行い、成果を共有できた。2015年5~6月にJICA 終了時評価を受け、効率性とインパクトで最高評価、妥当性と有効性はそれに準ずる評価を得た。政府方針の変化のため持続性の総合評価は中であつたが、鉱山が移転技術を自力運用し始めている点が高く評価され、評価団長は「総合評価としては、成功プロジェクト」という所感を報告書に記している。

〈注:ICDP計画は、欧米豪インドなど8カ国以上のプロジェクトに発展すると期待される。応力測定技術は、世界最大のチリ銅山で試みる交渉が始まった。〉

以下右肩付き番号は §.5(1)の原著論文の通し番号に対応する。

§ 2. プロジェクト構想(および構想計画に対する達成状況)

(1) 当初のプロジェクト構想^{2, 3, 5)}

南アフリカの金鉱山の坑内では、500m 程度の間隔で設置された 20 点前後の主に短周期高感度の速度型地震計からなる観測網によって、地震監視とハザード評価とがルーチン的に行われている。しかし、検知能力や震源決定精度、あるいは、観測周波数帯域に限界があり、既存の観測では見ることができないものを詳しく総合的に見ようというのが本プロジェクトの基本である。そして地震学や岩盤力学・工学の新しい知見を得て地震の準備や発生について理解を深めようというものである。一方、地表では、国立地震観測網の観測点が金鉱山地域には 2~3 点しかないため増強が必要であった。地表にも被害が出うるマグニチュード 5 程度以上の地震は、坑内の短周期高感度の速度型地震計の波形では全容を解明することができないため、解析に資するより長周期の波形も記録できる強震計を増強し、地表の強震動予測を高度化することも目指した。技術移転や社会実装が可能な成果についてはそれらを実現しつつ人材育成も目指した。

図 2.1.1 は、我々が計画した坑内と地表の活動と期待される成果との関係を模式的に示したものである。坑内での活動計画は、まず、大深度金鉱山で、M2 級の地震の発生場所を事前に予測し、ドリリングを行って震源の岩石の性質を明らかにし(期待される成果1)、高感度センサを想定断層の近辺に埋設して観測して地震の準備と前駆変化の理解を深め(同成果2)、坑内の地震データの高度解析をし、成果1および2を合わせ、地震発生予測を高度化し(同成果3)、強震動を観測して坑内の地震被害予測を高度化する(同成果4)ことであった。地表での活動は、地表国立地震観測網を増強し、地表被害予測を高度化(同成果5)することを目指す、というものであった。

これらの成果1~5は、2010 年 2 月に JICA と南ア政府の間で調印された覚え書きの中のマスタープランに記載されているもの(以下、MoU 中の成果と表記)である。一方、JST 全体計画では、観測項目毎に観測グループを作った。坑内では実績のある岩盤変形と微小破壊を軸に、新しい試みもすることにした。MoU 中の成果と JST 全体計画中のグループとの対応は、表 2.1.1 の通りである。

南アフリカ共和国、ウィットワータースランド盆地のヨハネスブルグの近郊および西方には、5つの金の採掘地区(セントラル・ランド(図 2.1.2 の Goldfields 地域3)、ファー・ウェスト・ランド(同地域5-7)、クラークスドープ(同地域8)、ウェルコム(同地域9)など)がある。本プロジェクトでは、主観測サイトを、現在も盛んに採掘が行われている、ファー・ウェスト・ランドのクック・フォー鉱山(旧称イズルウィニ鉱山;図 2.1.2 の地域 5)、ドリーフォンテイン鉱山シャンガナニ(第5)堅坑(図 2.1.2 の地域 7)、モアブ・コツォン鉱山(図 2.1.2 の地域 8)に構築することにした。また、イズルウィニ鉱山とモアブ・コツォン鉱山のサイトで、微小破壊観測などを含む相対的に大規模な多項目総合観測をめざした。上記以外の鉱山においても、これまでに実績のある歪観測などを、鉱山が自力運用することに協力することを目指した。

プロジェクト開始当初、5年のプロジェクト期間の前半は物的・人的資源を観測網構築に投じ¹⁾、後半は、発生するターゲット地震の収録と解析を行い、成果の社会実装を行うという計画であった。

日本人研究者のコアメンバーが、南アフリカで多くの時間を過ごすため、南アの若手を長期に日本に招き日本の大学で指導するという形は取ることができない。そこで、南アの若手や技術者の指導は現地で行うこととし、必要があれば、短期間日本に招聘して指導することにした。

いずれの鉱山も、計画開始の時点で約 10 年の研究交流があるキー・パーソンと協力しながら準備を進めた。プロジェクトの成否は、多くのセンサを、現地のドリラーが坑内で日常掘り慣れている口径の孔に計画通りに埋設できるかどうかにかかっているため、これまでの観測経験を踏まえて特注センサを設計し、埋設工程も綿密に計画することにした。国立地表地震観測網については、計画開始の時点で約 15 年の研究交流のあるキー・パーソンと協力しながら、ファー・ウェスト・ランド(図 2.1.2 の Goldfields 地域 4,5,6,7)に 10 点の強震計を増強することにした。

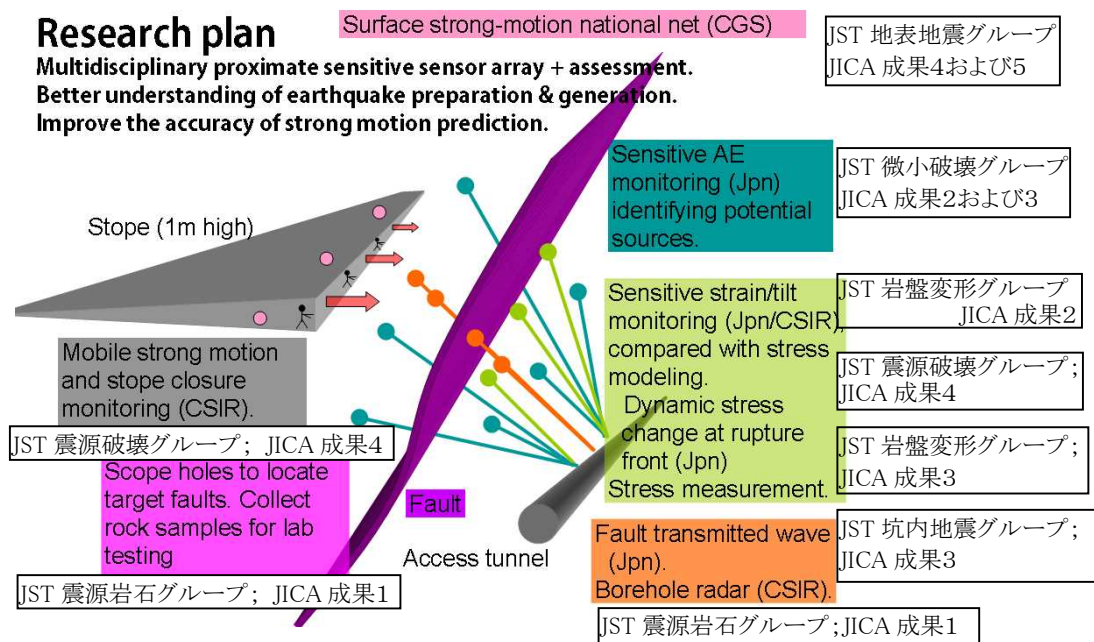


図 2.1.1 当初研究プランの模式表示。

表 2.1.1 JICA と南ア政府との間で 2010 年 2 月に調印された覚え書きに記載された成果と、JST 全体計画に記載された観測グループ①～⑥との主な対応。

JICA-南ア MoU 中の成果	JST 全体計画における観測グループ
成果1: 震源の岩石の性質が明らかになる	⑤震源の岩石分析
成果2: 金鉱山内地震の準備と前駆変化への理解が深まる	①震源の岩盤変形、②震源の微小破壊
成果3: 金鉱山内地震の発生を予測する精度が向上する	①震源の岩盤変形、②震源の微小破壊、③坑内観測地震高度解析
成果4: 金鉱山内地震による採掘坑内での地震被害を予測する精度が向上する	③震源の動的破壊過程、⑥地表地震観測
成果5: 金鉱山周辺の地表部における地震情報が公的機関によって迅速に発信され、鉱山地震による地表被害予測の精度が高まる	⑥地表地震観測

(2)新たに追加・修正など変更したプロジェクト構想

2011 年の東北地方太平洋沖地震や新燃岳噴火などによって、日本人研究者の一部が南ア研究に時間を割けなくなったり、2012 年にはストライキが南ア全土で長期間続き、実質 3～4 ヶ月間坑内の観測網設営・メンテナンスができなくなったりすることもあった。しかし、これらの悪影響は限定的で済んだ。2014 年 M5.5 の地震の研究は本プロジェクト終了後も続くことになるが、本プロジェクト当初のメンバーの力を多く結集できる予定である。

2014 年 8 月 5 日にクラークスドープ地区(図 2.1.2 の Goldfields 地域 8)に発生した M5.5 の地震は、規模も発生場所も本プロジェクトの想定外であった。しかし、貴重なデータが得られ、また、M5.5 の震源断層上の応力も測定可能なレベルと予想されるため、本プロジェクトのコアメンバーが中心となり、欧米と連絡を取りながら国際陸上科学掘削計画(ICDP)ワークショップ開催提案書(代表者小笠原)を 2015 年 1 月 15 日に提出し、6 月に条件付き採択となった。

<注:ワークショップは本プロジェクト終了後に正式採択され、2015 年 10 月 31 日から 11 月 3 日の 4 日間、ICDP と立命館大学の共催で開催された。欧米豪やインドを含む 7 ヶ国から 70 名(日本からは SATREPS メンバーを中心に 13 名)の参加があり、将来計画が議論された。議論を踏まえた計画を 2016 年 1 月 15 日に ICDP に提出する予定である。本プロジェクトの成果を世界と共有し発展させることができると期待される。>

残念ながら、採掘計画が変わったために、本プロジェクト期間中にターゲットの地震が本プロジェクトの観測サイトに発生しなかったケースが一部あった。また、地震が発生したが観測装置が不調であったケースも一部にはあった。詳細は § 4 に述べる。

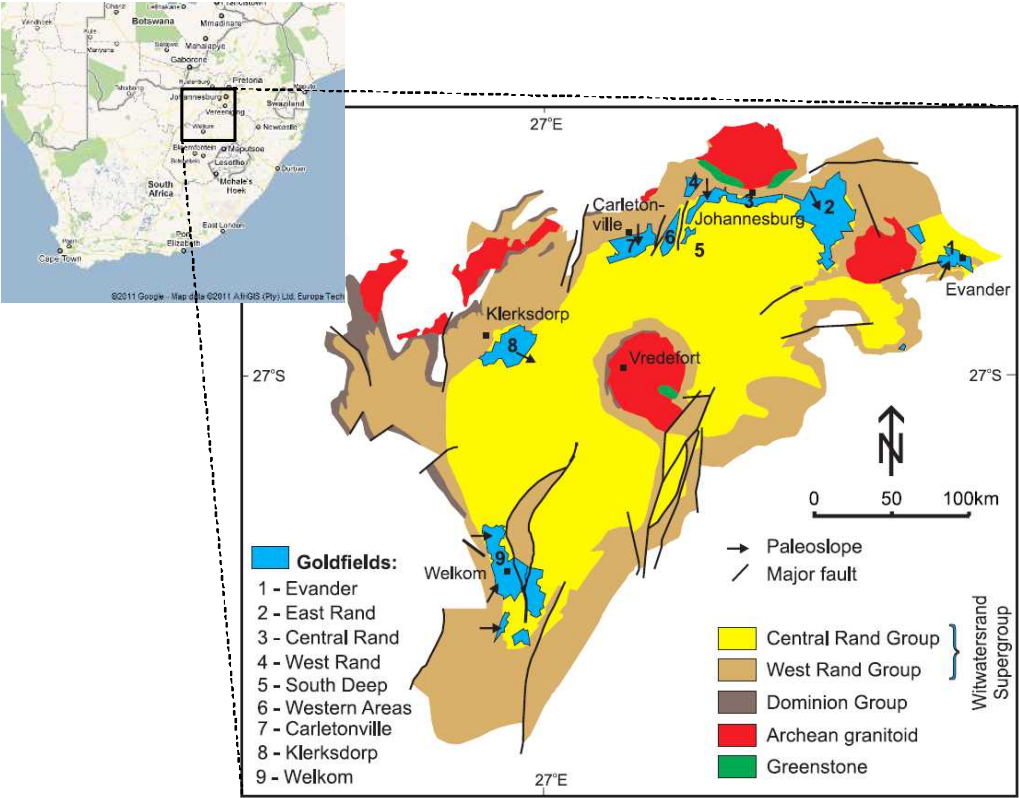


図 2.1.2 南アフリカ ウィットワータースランド盆地の地質 (Google Map と Frimmel and Minter, 2002 より)。約 30 億年前に形成された盆地のヨハネスブルク近郊 (図中の Goldfields 地域 3) で、金鉱床が最初に発見された。金鉱床は深部へと続いているが、採掘は地表下約 10,000 フィート (約 3.3～3.4km) で止まり、この地区の金鉱山のほとんどは現在閉山し水没している。本プロジェクトは、現在でも採掘が盛んなファー・ウェスト・ランド (図中の Goldfields 地域 5, 6, 7)、および、クラークスドープ (図中の Goldfield 8) で行われ、成果は、セントラル・ランド (図の Goldfields 地域 3,4) や、図の範囲外の北に位置する白金鉱山まで拡大しつつある。

(3) 活動実施スケジュール (実績)

JICA と南ア政府によって調印された MoU には、プロジェクト開始は最初の JICA 専門家上陸日と規定されていた。最初の JICA 専門家上陸は 2010 年 8 月であったため、実績 (表 2.3.1 のすべての赤矢印) が、当初計画 (同表中の*印) に比べて右にずれている。坑内観測は、予定よりも早く構築が完了した鉱山があるため、観測開始が予定よりも早まっている。

表 2.3.1 JST 全体計画中の各観測グループの活動実施スケジュール (*) と実績 (赤矢印)

項目	H21 年度 (12 ヶ月)	H22 年度 (2010)	H23 年度 (2011)	H24 年度 (2012)	H25 年度 (2013)	H26 年度 (2014)
①. 震源の岩盤変形						
・ 観測網の構築		*****	*****			
・ 観測			*****	*****	*****	
・ 解析				*****	*****	*****

②. 震源の微小破壊 ・観測網の構築 ・観測 ・解析		*****	*****			
			*****	*****	*****	
				*****	*****	*****
③. 震源の動的破壊過程 ・観測網の構築 ・観測 ・解析		*****	*****			
			*****	*****	*****	
				*****	*****	*****
④. 坑内観測地震高度解析 ・鉦山の地震データ再評価 ・評価システムのアップグレード				****	*****	*****
				****	*****	*****
⑤. 震源の岩石分析 ・現場での観測・採取 ・室内実験・解析			****	*****	*****	*****
				*****	*****	*****
⑥. 地表地震観測 ・観測網の展開 ・データセンターのアップグレード ・地表の強震動予測		*****	*****			
			*****	*****	*****	
				*****	*****	*****

§ 3 プロジェクト実施体制

(1) グループ1 震源の岩盤変形グループ

【日本側】

グループリーダー	氏名	所属	役職	参加期間
○	小笠原 宏	立命館大学	教授	2009/6～2015/8
	石井 紘	東濃地震科学研究所	所長	2009/6～2015/8
	中尾 茂	鹿児島大学	准教授	2009/10～2015/8
	大久保 慎人	高知大学	准教授	2009/10～2015/8
	加納 靖之	京都大学	助教	2009/10～2015/8
	直井 誠	京都大学	助教	2009/6～2015/8
	山口 照寛	北海道大学	技術職員	2014/4～2015/8
	平野 史朗	東京大学	D3	2009/10～2013/3
	桂 泰史	立命館大学	M2	2009/6～2011/3

【相手国側】

グループリーダー	氏名	所属	役職	参加期間
○	A. Milev	CSIR	Principal Researcher	2009/6～2015/8
	O. Goldbach	CSIR	Principal Scientist	2009/6～2011/6
	P. Share	CSIR	Researcher	2011/5～2015/8

	R. Masethe	Sibanye Gold (Gold Foelds) /Wits Univ.	GDE student	2009/10～2015/8
	J. Machake	CSIR	Technician	2009/6～2015/8
	P. de Bruin	Moab Khotsong mine	Rock Engineering Manager	2009/6～2012/11
	J. Oelofse	Moab Khotsong mine	Rock Engineering Manager	2012/11～2015/8
	C. W. Miller	Mponeng mine	Rock Engineering Manager	2009/6～2011/3
	J. Wienand	(KDC West mine) Driefontein mine	Rock Engineering Manager	2009/6～2015/3
	A. K. Ward	Cooke 4 (Ezulwini) mine	Rock Engineering Manager	2009/6～2015/8
	J. Gainsford	(KDC West mine) Driefontein mine	Rock Engineering Manager	2014/5～2015/3
	T. Moaise	Driefontein mine	Rock Engineering Manager	2015/3～2015/8
	A. Brink		Senior Researcher	2015/3～2015/8
	G. Ferreira	CSIR	Senior Researcher	2015/3～2015/8

(2)グループ2 震源の微小破壊グループ

【日本側】

グループリーダー	氏名	所属	役職	参加期間
○	中谷 正生	東京大学	准教授	2009/6～2015/8
	矢部 康男	東北大学	准教授	2009/6～2015/8
	川方 裕則	立命館大学	教授	2009/6～2015/8
	平野 史朗	東京大学	D3	2009/10～2013/3
	宮川 幸治	東京大学	技術職員	2009/10～2015/8
	渡邊 篤志	東京大学	技術職員	2009/10～2015/8
	直井 誠	京都大学	助教	2009/6～2015/8
	坂 守	東京大学	技術職員	2011/4～2015/8
	森谷 祐一	東北大学	准教授	2009/6～2015/8
	吉田 真吾	東京大学	教授	2010/10～2015/8
	村上 理	立命館大学	専門研究員	2010/4～2015/8

	太田 和晃	東京大学	PD	2014/4～2015/3
	山形 直毅	京都大学	M1	2015/4～2015/8
	北代 雅明	京都大学	M1	2015/4～2015/8

【相手国側】

グループリーダー	氏名	所属	役職	参加期間
○	A. Milev	CSIR	Principal Researcher	2009/6～2015/8
	D. Birch	CGS	Scientific Officer	2009/6～2015/8
	R. Masethe	Sibanye Gold (Gold Fields) /Wits Univ.	GDE student	2009/10～2015/8
	J. Machake	CSIR	Technician	2009/6～2015/8
	B. Kagezi	CSIR	Electronics Engineer	2013/3～2015/8
	P. de Bruin	Moab Khotsong mine	Rock Engineering Manager	2009/6～2012/11
	J. Oelofse	Moab Khotsong mine	Rock Engineering Manager	2012/11～2015/8
	C. W. Miller	Mponeng mine	Rock Engineering Manager	2009/6～2011/3
	J. Wienand	(KDC West mine) Driefontein mine	Rock Engineering Manager	2009/6～2015/3
	A. K. Ward	Cooke 4 (Ezulwini) mine	Rock Engineering Manager	2009/6～2015/8
	P. Share	CSIR	Researcher	2013/3～2015/8
	T. Kgarume	CSIR	Research Seismologist	2009/10～2015/8
	J. Gainsford	(KDC West mine) Driefontein mine	Rock Engineering Manager	2014/5～2015/3
	F. Brovko	CSIR	Research Geophysicist	2014/5～2015/8
	T. Moaise	Driefontein mine	Rock Engineering Manager	2015/3～2015/8

(3)グループ3 震源の動的破壊過程グループ

【日本側】

グループリーダー	氏名	所属	役職	参加期間
○	矢部 康男	東北大学	准教授	2009/6～2015/8
	亀 伸樹	東京大学	准教授	2009/6～2015/8
	渡辺 貴善	東北大学	M2	2009/6～2011/3
	三宅 弘恵	東京大学	助教	2009/6～2015/8
	中山 貴史	東北大学	技術職員	2010/10～2015/8
	飯田 拓郎	東北大学	M2	2012/5～2014/3

【相手国側】

グループリーダー	氏名	所属	役職	参加期間
○	A. Milev	CSIR	Principal Researcher	2009/6～2015/8
	O. Goldbach	CSIR	Senior Seismologist	2009/6～2011/6
	A. Cichowicz	CGS	Senior Specialist Scientist	2009/6～2015/8
	R. Durrheim	CSIR/ Wits Univ.	Fellow/ Professor	2009/6～2015/8
	L. Linzer	Wits Univ.	Honorary Lecturer	2009/10～2015/8
	R. Masethe	Sibanye Gold (Gold Fields)/Wits Univ.	GDE student	2009/10～2015/8
	A. Yenwong-Fai	Wits Univ.	Lecturer	2009/10～2015/8
	H. Uzoegbo	Wits Univ.	Professor	2009/10～2015/8
	S. Spossiswoode	Individual Consultant	Consultant	2009/10～2015/8
	J. Machake	CSIR	Technician	2012/5～2015/8
	B. Kagezi	CSIR	Researcher	2012/5～2015/8
	G. Ferreira	CSIR	Researcher	2012/5～2015/8
	F. Brovko	CSIR	Research Geophysicist	2014/5～2015/8
	C. Mkhize	Wits Univ.	Graduate student	2015/3～2015/8
	S. Sebothoma	Wits Univ.	Graduate student	2015/3～2015/8

(4)グループ4 坑内観測地震高度解析グループ

【日本側】

グループ リーダー	氏名	所属	役職	参加期間
○	川方 裕則	立命館大学	教授	2009/6～2015/8
	森谷 祐一	東北大学	准教授	2009/6～2015/8
	五十嵐 俊博	東京大学	助教	2009/10～2015/8
	加藤 愛太郎	名古屋大学	准教授	2009/10～2015/8
	今西 和俊	産業技術 総合研究所	研究グループ 長	2009/10～2015/8
	加納 靖之	京都大学	助教	2009/10～2015/8
	井出 哲	東京大学	教授	2009/6～2015/8
	大久保 慎人	高知大学	准教授	2009/10～2015/8
	土井 一生	京都大学	助教	2010/4～2015/8
	直井 誠	京都大学	助教	2009/6～2015/8
	村上 理	立命館大学	専門研究員	2010/4～2015/8
	太田 和晃	東京大学	PD	2014/4～2015/3
	和田 直也	立命館大学	M2	2010/4～2012/3
	今川 祥太	立命館大学	M2	2012/5～2014/3

【相手国側】

グループ リーダー	氏名	所属	役職	参加期間
○	R. Durrheim	CSIR/ Wits Univ.	Fellow/ Professor	2009/6～2015/3
	M. Singh	CGS	Research Officer	2009/10～2010/12
	O. Goldbach	CSIR	Principal Scientist	2009/6～2011/6
	T. Kgarume	CSIR	Candidate Researcher	2009/10～2015/3
	R. Masethe	Sibanye Gold (Gold Fields) /Wits Univ.	GDE student	2009/10～2015/3
	S. Spottiswoode	Individual consultant	Consultant	2009/10～2015/3
	S.K. Murphy	Anglold Ashanti ltd.	Vice President Geotechnical	2009/6～2015/3
	G. Hoffman	Anglold Ashanti ltd.	Senior Mine Seismologist	2009/6～2015/3
	K. Riemer	Sibanye Gold (Gold fields) ltd.	Head of seismic department	2009/6～2015/3

	P. Lenegan	Sibanye Gold (Goldfields) ltd.	Seismic System Specialist	2009/6～2015/3
	N. Naicker	Sibanye Gold (Gold fields) ltd.	Chief Seismologist	2009/6～2015/3
	S. Zulu	CGS	Seismologist	2010/4～2015/3
	P. Share	CSIR	Researcher	2012/5～2015/3
	F. Kwangwari	SRK/Wits Univ.	Graduate student	2013/3～2015/3
	L. Scheepers	Anglogold Ashanti ltd.	Manager Rock Engineering SA Region	2014/5～2015/3
	B. Watson	Goldfields	Rock Engineering Manager	2014/5～2015/3
	J. von Ketelhodt	Wits Univ.	Honours Student	2014/5～2015/3

(5)グループ5地表地震観測グループ

【日本側】

グループリーダー	氏名	所属	役職	参加期間
○	佐藤 隆司	産業技術総合研究所	主任研究員	2009/6～2015/8
	雷 興林	産業技術総合研究所	主任研究員	2009/6～2015/8
	大槻 憲四郎	東北大学	名誉教授・客員研究者	2009/10～2015/8
	矢部 康男	東北大学	准教授	2009/6～2015/8
	中谷 正生	東京大学	准教授	2009/6～2015/8
	川方 裕則	立命館大学	教授	2009/6～2015/8
	玉井 雅人	立命館大学	任期制講師	2010/4～2015/3

【相手国側】

グループリーダー	氏名	所属	役職	参加期間
○	R. Durrheim	CSIR/Wits Univ.	Fellow/Professor	2009/6～2015/3
	J. Kuijpers	CSIR	Senior Researcher	2009/10～2015/3
	G. Henry	CSIR	Senior Researcher	2009/10～2015/3

	D. Roberts	Anglogold Ashanthi ltd.	Technical Assistant to the Rock Engineering Applied Research Manager	2009/10～2015/3
	H. Yilmaz	Wits Univ.	Lecturer	2009/10～2015/3
	G. van Aswegen	ISS International ltd.	Consultant	2009/6～2015/3
	S. K. Murphy	Anglogold Ashanthi ltd.	Vice President Geotechnical	2009/6～2015/3
	G. Oniyide	Wits Univ.	Graduate student	2012/5～2015/3
	T. Zvarivadza	Wits Univ.	Junior Lecturer	2012/5～2015/3
	P. Mosakoa	Wits Univ.	Graduate student	2012/5～2015/3
	T. Kgarume	CSIR	Research Seismologist	2012/5～2015/3
	S. Letlotla	CSIR	Graduate student	2012/5～2015/3
	S. Mngadi	Wits Univ.	Graduate student	2013/3～2015/3
	L. Scheepers	Anglogold Ashanthi ltd.	Rock Engineering Manager	2014/5～2015/3
	M. van Schoor	CSIR	Researcher	2015/3～2015/8

(6)グループ6 地表地震観測グループ

【日本側】

グループリーダー	氏名	所属	役職	参加期間
○	小笠原 宏	立命館大学	教授	2009/6～2015/8
	五十嵐 俊博	東京大学	助教	2009/10～2015/8
	加藤 愛太郎	名古屋大学	准教授	2009/10～2015/8
	三宅 弘恵	東京大学	助教	2009/6～2015/8
	大久保 慎人	高知大学	准教授	2009/10～2015/8
	山口 照寛	北海道大学	技術職員	2014/4～2015/8

【相手国側】

グループリーダー	氏名	所属	役職	参加期間
○	A. Cichowicz	CGS	Senior Specialist Scientist	2009/6～2015/8

	J. Steyn	CGS	Specialist Technical Officer	2009/10～2011/2
	I. Saunders	CGS	Senior Analyst	2009/10～2013/3
	M. Singh	CGS	Scientific Officer	2009/10～2010/12
	Scientist A	CGS		2009/10～2015/3
	E. Kgaswane	CGS	Scientific Office	2009/10～2015/8
	D. Birch	CGS	Scientific Officer	2009/10～2015/8
	G. van Aswegen Jnr	CGS	Leader of Electronic lab	2009/10～2015/8
	F. Delpont	CGS	Senior Technical Officer	2009/10～2013/3
	P. Adamos	CGS	Technical Officer	2009/10～2015/8
	R. Kometsi	CGS	Technical Officer	2009/10～2015/8
	L. Tabane	CGS	Technical Officer	2009/10～2015/8
	L. Akromash	CGS	Senior Analyst	2009/10～2015/8
	L. Brink	CGS	Analyst	2009/10～2015/8
	B. Sutherland	CGS	Analyst	2009/10～2013/3
	T. Molea	CGS	Analyst	2009/10～2015/8
	B. Zulu	CGS	Seismologist	2011/4～2015/8
	L. Linzer	Wits. Univ.	Honorary Lecturer	2009/10～2015/8
	S. Spottiswoode	Individual Consultant	Consultant	2009/10～2015/8
	T. Songawane	CGS	eLab technician	2012/5～2015/8
	A. Mangongolo	CGS	Seismologist	2012/5～2015/8
	D. Ngobeni	CGS	Seismologist	2013/3～2015/8
	M. Ntsuku	CGS	Analyst	2013/3～2015/8
	S. Dlamini	CGS	Intern Researcher	2014/5～2015/8

§ 4 プロジェクト実施内容及び成果

4.0 プロジェクト全体⁴⁰⁾

(1) グループを統合した全体の成果

坑内観測については、掘削された総延長 2.8km 以上、80 本以上の孔に、100 台以上の本プロジェクトの供与観測機材を埋設することができた⁴⁰⁾。日本人研究者の短期専門家派遣は 2015 年 8 月 4 日のプロジェクト終了時点で、延べ 65 名、1064 日間に達した。そして、南ア金鉱山での観測網構築の現場では、日本と南アの若手研究者・技術者を育てることができた。

プロジェクトの成果の達成度を模式的に示すと図 4.0.1 の様になる。また、表 4.0.1 は地域別の成果の概要をまとめたものである。表 4.0.1 では当初想定していなかった成果を太下線で強調してある。例えば、南ア国立地表観測網については、本プロジェクトがファー・ウェスト・ランドに 10 点増強したが、南ア鉱山保健安全協会がセントラル・ランドに 17 点、南ア資源省がクラークスドープ地域に 25 点増強した。本プロジェクトが日本の優れた P 波 S 波到着時刻自動読み取りアルゴリズムを 2013 年度末に提供し、これら 3 つの地域の地震監視能力が大幅に増強されたため、表 4.0.1 においてセントラル・ランドとクラークスドープ地区も太下線を付している。また、移転した技術が鉱山や土木コンサル会社によって自主運用され始めた成果についても太下線で強調している。特筆すべき成果(表 4.0.1 中の◎)の概略については既に § 1 で述べているが、詳細は 4.1～4.5 をご参照頂きた

い。

また、表 4.0.2 は 2015 年 4 月現在の坑内の主観測サイトの特徴と成果を一覧表にまとめたものである。

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	
日本政府、社会、産業への貢献	地震発生予測高度化のための重要な知見。白金族の安定供給。
科学技術の発展	微小破壊観測。地震発生場レベルの応力測定技術の確立。地震発生場レベルの応力モデリングの高度化。
知財の獲得、国際標準化の推進、生物資源へのアクセス等	世界最深の南アフリカ金鉱山における未着手の深度や応力レベルでの採掘の安全性向上に貢献する安全管理スキーム構築に貢献。欧米を含む他国への波及も期待される。
世界で活躍できる日本人人材の育成	若手については助教採用1。中堅層は教授昇進1、准教授昇進3。
成果物(提言書、論文、プログラム、マニュアル、データなど)	南ア関係組織への提言書(作成予定)、論文(別紙参照)。南ア金鉱山でしか得られない貴重な震源至近距離観測データ。M5.5関係については、ICDP計画が認められれば欧米とも成果やデータを共有できると期待される。

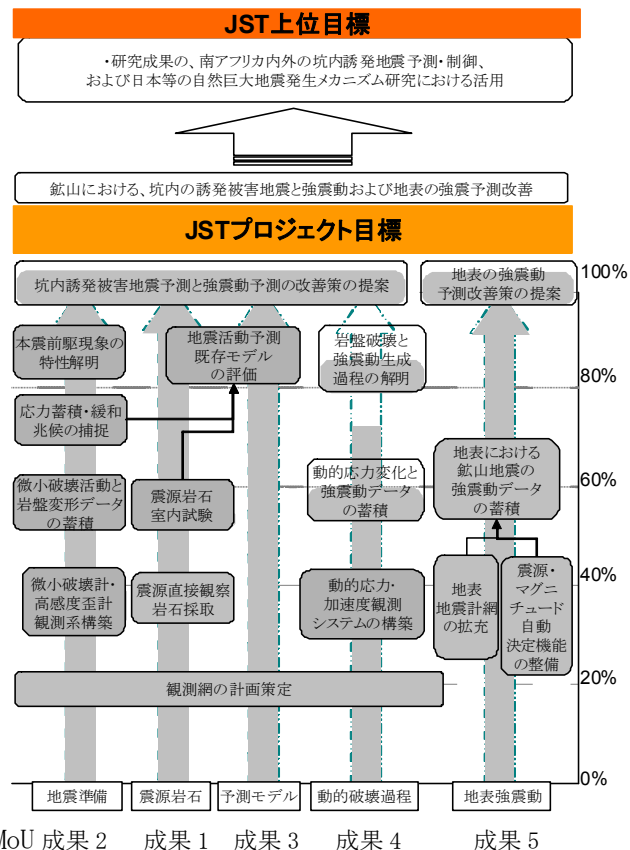


図 4.0.1 JST 成果目標シートで示した到達度の模式表示

表 4.0.1 地域別の成果一覧。◎:特筆すべき成果あり、○:一部に特筆すべき成果あり、o:観測網構築と観測実績あり、-:当初から計画なし。太下線付きは当初計画外の成果、あるいは、社会実装が進んだ成果。成果 5 の列の数値は増強した地表強震計の数。

地 域	JICA-南ア MoU	成果1	成果2	成果3	成果4	成果5
セントラル・ランド(図 2.1.2 の地域 2)		-	-	-	-	◎、17
ファール・ウェスト・ランド(地域 4-7)		-	-	-	-	◎、10
クック・フォー鉱山(地域 5)		◎	◎	○	o	o
ドリーフォンテイン鉱山(地域 7)		◎	◎	○	o	o
サウス・ディープ鉱山(地域 5)		-	o	-	-	o
ムボネン鉱山(地域 7)		◎	◎	◎	-	-
タウトナ鉱山(地域 7)		-	○	◎	-	-
クラークスドープ(地域 8)		-	-	-	-	◎、25
モアプコツオン鉱山(地域 8)		○	○	-	o	o
白金鉱山地区(図 2.1.2 右下表示域より北)		-	-	○	-	-

表 4.0.2 鉱山別の主観測サイトでの当初活動計画と結果の一覧

金鉱山名 (旧称)	クック・フォー (イズルウィニ)	モアプ・コツォン	ドリーフォンテイン (KDC West)
所有会社			
2015 年 4 月現在 2013 年中間評価時 計画開始当初	シバニエ・ゴールド ゴールド・ワン ファースト・ウラニウム	アングロゴールド・アシャ ンティ	シバニエ・ゴールド シバニエ・ゴールド ゴールド・フィールズ
鉱脈の特徴	数枚の薄板鉱脈が 重なった 20-30m 厚 のパッケージ。多数 の断層。	一枚(層厚<数十 cm)。多 数の断層。	数十m以上離れた 三枚(層厚<数十 cm)。小数の断層。
採掘	直径 400m の堅坑鉱 柱以外はすべて採 掘済み。	断層で切断された 100m オーダーの広がり鉱 セグメント毎に、Longwall 採掘が広範囲で進行中。	百数十m間隔、数十 m 幅の鉱脈傾斜鉱 柱を残し、Long wall 採掘が広範囲で進 行中。
観測サイトの深さ ターゲット	約 1km 堅坑鉱柱中の断層 (ガウジ数十 cm 厚)。	約 3km 数十 m 厚の大きな断層 帯。	約 3km 傾斜鉱柱を斜めに 横断する数 cm 厚の 断層。
成果実装対象。	最終段階の採掘。 例: 鉱柱の採掘。	複雑な断層帯中の、広範 囲の分散した採掘。	断層構造が比較的 単純な、標準的な採 掘。
日本が担当した観測項目			
微小破壊 (他 2 金鉱山: 安全監 視中もしくは学術的 成果)	3 次元的に 20~30 のセンサを配置。	20~30 のセンサを 3 次元 配置。が、寿命が期待し たほど長くなく、採掘計画 の変更もあり観測断念。 改良センサ試験中。	-
高感度歪計 (他 2 金鉱山: 監視中 もしくは学術的成果)	2 台。約 4 年間の載 荷、遠地巨大地震等 を記録。	3 台。直下の M5.5 等を記 録。	3 台。採掘載荷(含む 長期スト期)、直近の M~2 等を記録。
断層透過地震波	送信器 1、受信器 3 で数年間観測。	微小破壊観測が必要な ため、断念。	-
破壊前線動的応力 変化	断層直近 3 センサ。	-	断層直近 4 センサ。
断層ゆっくりすべり	1 センサ埋設。		-
岩盤応力測定(他の 2 金鉱山と 1 白金鉱 山でも実施)。	M2.8 震源付近。	M5.5 の直上。	鉱山最深部。残柱。
南ア CSIR 担当			
ボアホール・レーダー	-	実施済み。	-
傾斜	-	2 台埋設。	2 台埋設。
薄板状採掘跡閉塞	-	1 セット設置。	1 セット設置。
採掘跡強震動	-	1 セット設置。	1 セット設置。

南ア CGS 担当

国立地表強震計観測網との位置関係	本プロジェクト強震計増強地域内。	南ア資源省強震計増強地域内。	本プロジェクト強震計増強地域内。
------------------	------------------	----------------	------------------

本プロジェクトは日本の優れた自動 P 波 S 波検出アルゴリズムを提供し、本プロジェクトが強震計を増強した一つの金鉱山地域だけでなく、南ア資源省や南ア鉱山健康安全協会が強震計を増強した他の2つの金鉱山地域を含む、国立地震観測網全体の地震情報処理能力が当初構想以上に増強された。

(2)今後期待される効果

鉱山の坑内地震観測で今まで見えなかった岩盤内の微小破壊が見えるようになったこと、および、これまで容易に測ることができなかった震源での岩盤応力が計画通りに測れると期待できるようになったことは、今後、地震学に対して大きな学術的な波及効果があると期待される。

南アの金の生産量は 1970 年をピークに年々減少している。図 4.0.2 の■は、1983 年以降の年間生産量(ton)の変化であり、単純に外挿すれば 2020 年頃にはゼロになる(実際は一部の長寿命な金鉱山があるためその採掘が終わるのはもっと先だが)。確認されている金資源を採掘しつくすのにかかる年数(▲)は、1980 年代は約 80 年と停滞し、その後、金生産量の落ち込みとともに増加している。これは、南アが今もなお多くの埋蔵金資源を有しながら、採掘の深度や堅坑からの距離、高岩盤応力などの原因によって採算性がよく安全な採掘が年々困難になっているからである。

金鉱山の年間の犠牲者は、1986 年は 700 名を超えた。その後、技術、教育や安全管理の進歩によって、金の年間生産量の減少よりも速く犠牲者数が減ったが、最近数年間は犠牲者数の減少は停滞気味である。最近の金鉱山の労働者数は十数万人で、その数が減り続けているのが犠牲者数減少の主原因である。年々増している採掘の困難さが、減少を妨げる主原因である。

南アは、採掘前線で多くの人手を必要とする採掘方法を、百年を超える期間、伝統的に採用しているため犠牲者数が多い。機械化を進め坑内の労働者数を減らせれば犠牲者の数は減るが、十分な教育を受けることができず収入の少ない層の雇用が激減する。

これまで不可能であったことを可能にし、鉱山の自力運用が始まるという形で社会実装されつつある本プロジェクトの成果は、より安全な採掘と多くの雇用をより長期間持続させることに貢献するのではないかと願っている。§ 1 で触れた南ア国立岩盤工学協会からの公式書簡はその証の一つである。

2014 年 8 月 5 日に発生した M5.5 は特異であり、これを理解し、このような地震による被害の将来予測をすることは、南アの地震ハザード評価の高度化にさらに貢献すると期待される。新たなエフォートと資源投入が必要であるが、ICDP 計画が進めば、地震学の進歩を世界で共有することもできると期待される。

大深度の金鉱山が閉山をすると、水没に伴って採掘中と同じくらい大きな地震が誘発されるが、水没してしまう坑内の地震観測網ではこの過程を何も観測することができない。この数年間に増強できた金鉱山地区の国立地表地震観測網は、水没誘発地震の監視と将来の被害予測に重要な役割を果たし続けると期待される。間隙水圧と地震発生との関係を理解することは、自然地震だけでなく、石油採掘や地熱発電、CO₂ 地中貯留などによる誘発地震をよりよく理解し、発生予測やハザード評価を高度化するために非常に重要である。今回増強された国立地震観測網は、非常にユニークなデータセットを記録し続けることができると期待される。

ICDP 計画への発展の可能性と、世界最大のチリの銅山における応力測定技術移転計画については、p.3 と p.5 に述べた通り。

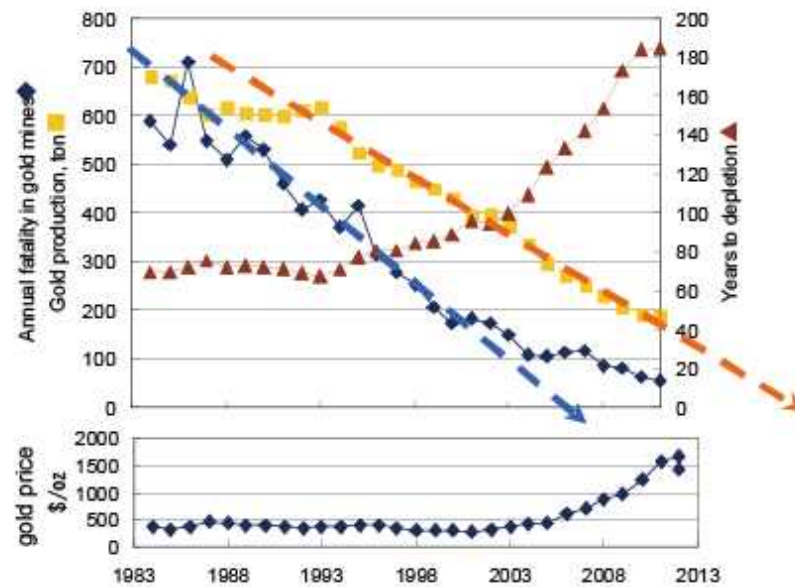


図 4.0.2 南ア金鉱山の犠牲者数(◆)、金生産量(■)、確認されている埋蔵量とその年の生産量とで単純計算される金の採掘の続行可能年数(▲)の変化。データは南ア資源省。

以下では、実施内容、成果、および今後期待される効果について JICA-南ア MoU 中の成果番号ごとに記述する。

4. 1 JICA-南ア MoU 成果1「震源の岩石の性質が明らかになる」(JST グループ⑤震源の岩石分析) (1)研究実施内容及び成果

JICA-南ア MoU「活動 1-1: 想定震源域を観察し岩石コア試料を採取する」

2012 年度までに、クック・フォー鉱山、ドリーフォンテイン鉱山、および、モアブ・コツオン鉱山において、総延長約 2.8 km、合計約 70 本を超えるボアホールが掘削された。南ア坑内技師を中谷正生や矢部康男らが指導してボアホールカメラで孔内を観察し、またコアを観察することによって、いくつかのボアホールで想定震源断層を貫通していることを確認し、10cm のオーダーの精度でターゲット断層の位置が決定された¹¹⁾。このような規模の取り組み事例は世界になく、この観察と得られたコアは、「活動 1-1」の直接的成果である。

2012 年度にはクック・フォー鉱山のボーリングコア約 6.5m 分が日本に輸出された。また、矢部康男らが 2008 年にムポネン鉱山の地下 3.3km で行った、 M_w 2.2 の地震の震源を貫通する約 90m のドリリングのコア試料も日本へ輸出された。このコアはこのプロジェクトの前に得られていたものであったが、貴金属鉱石や放射性元素を含まないという証明を得て、諸関連部署から許可を得ないと輸出ができないが、手続きの手違いから長い間輸出できずにいたものである。本プロジェクト期間中に南ア研究代表者と鉱山会社の共同研究者が関係部署に強く働きかけてくれてこの輸出が実現した。

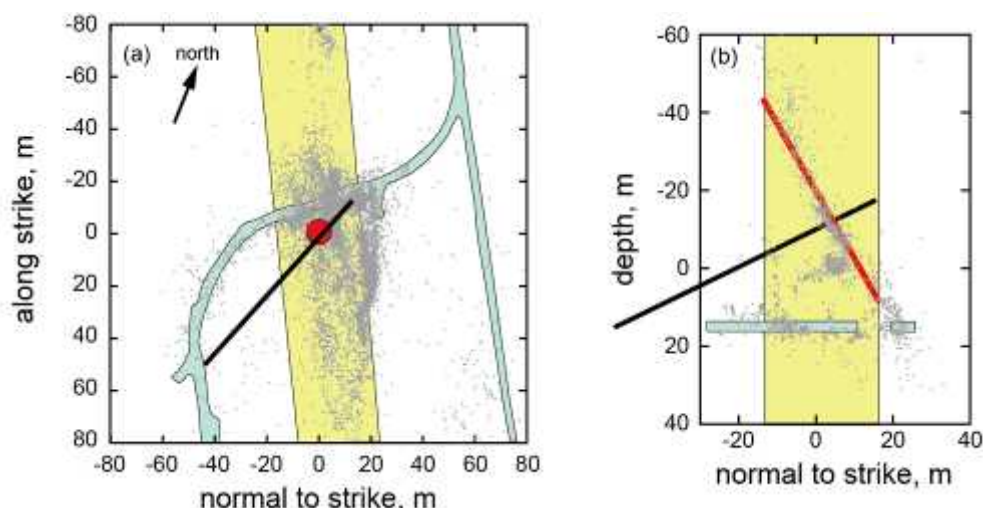


図 4.1.1 2007 年 12 月 27 日に地下 3.3km の dyke (黄色) を斜めに断ち切るように発生した Mw 2.2 の地震の震央 (赤丸)、Nakatani et al. (2008) の微小破壊観測で描き出された余震 (ドット) と余震面 (赤線)、震源を貫通する 90m のドリリング (黒実線) (Yabe et al. 2013)²⁴⁾。a) 平面図、b) ダイクや Mw2.2 断層面の走向に直交する鉛直断面。

JICA-南ア MoU 活動 1-2「実験室で岩石試料の物性を調査する」

クック・フォー鉱山の岩石試料は、ウィットワータースランド大学の実験室で物性が調査され、同大学の学部学生 Siyanda Mngadi の卒業論文にまとめられた。彼自身の修士論文や他の研究者の今後の応力モデリングや安全評価の際の基礎データとして使われる。

ムボネン鉱山の地下 3.3km で発生した Mw2.2 の地震 (本震) の震源を貫通するボアホール (図 4.1.1) のコアは、東北大学矢部康男およびウィットワータースランド大学の Halil Yilmaz の実験室で行った一軸試験により、弾性率および一軸圧縮強度、引張強度といった物性が調査され、震源域の応力場の拘束の成功に貢献した (Yabe et al. 2013)²⁴⁾。このような例は世界的に珍しい。また、ドイツ GFZ と共同して行った物質解析では、Mw2.2 本震断層面に太古の熱水活動を示唆する痕跡が認められ、Mw2.2 本震がダイク中の既存の弱面上で発生したことが示唆された。

産業技術総合研究所の佐藤隆司らは、ムボネン鉱山の Mw2.2 の地震の震源近傍から採取した試料を用いて、深度 3.3km に相当する封圧下での三軸圧縮破壊実験を行い、最終破壊に至る微小破壊の時空間分布をアコースティック・エミッション (AE) を用いて調べた (図 4.1.2b; Satoh et al. 2013)³⁰⁾。封圧の制御には JST 予算で導入したシリンジポンプを用いた。ダイクから採取した試料を用いた実験では、フォリエーションなどの弱面構造が断層面形成に影響を及ぼすことを明らかになった。これらの実験では、ウィットワータースランド大学の準講師 Tawanda Zvarivadza を産総研に約 2ヶ月間招聘し、三軸圧縮破壊条件下での微小破壊計測技術について指導をした。また、東北大学の修士院生飯田拓郎は実験試料の準備や計測プログラムの作成を担当した。ドリーフォンテイン鉱山のコアは、立命館大学の修士院生内浦大海が、ウィットワータースランド大学の Halil Yilmaz の実験室で同大学の教職員や学生と協力して行った一軸試験により、弾性率と強度が測定された。

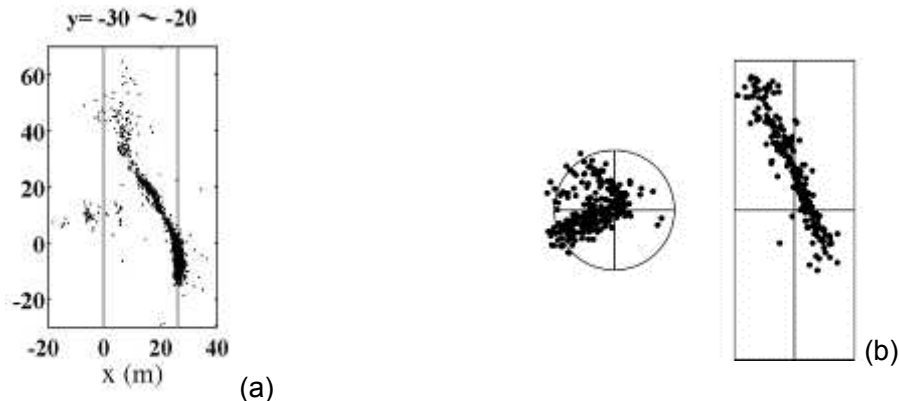


図 4.1.2 a) Nakatani et al. (2008)の微小破壊観測で描き出された、ダイクを斜めに断ち切る Mw2.2 の余震面(ダイクと地震断層の走向に直交する鉛直断面; Naoi et al. 2011⁸⁾より)。b) ダイクの岩石から作った直径 40mm 長さ 100mm の円柱計試料を室内三軸圧縮して得られた微小破壊の分布(Satoh et al. 2013)³⁰⁾。(a)と(b)の破壊のサイズはほぼ 1000 倍異なる。室内圧縮試験では最終破断直前に微小破壊活動に加速が見られた。この加速は、4. 2の「活動 2-4」(g)で述べる Mw2.2 の前震活動と比較すると面白い。

(2)研究成果の今後期待される効果

一連の実験には南アおよび日本の学生、若手研究者が参加し、実験技術の習得を行った。現在立案中のモアブ・コツォン鉱山などにおける ICDP 予算による研究が実現した場合、これら若手研究者が M5.5 の震源断層ドリリングのコア管理やコアを用いた実験において活躍することが期待される。

<注:この活動は、ICDP 計画では、先進国やインドも含む国際プロジェクトとして発展すると期待される。>

4. 2 JICA-南ア MoU 成果2「金鉱山内地震の準備と前駆変化への理解が深まる」(JST グループ①および②: 震源の岩盤変形および微小破壊の観測)

(1)研究実施内容及び成果

JICA-南ア MoU「活動 2-1: 想定震源域の周辺で微小破壊観測システム、岩盤変形観測装置、及び高感度長周期地震計を設置する」

微小破壊観測網は、一部に遅れや断念せざるを得ない観測項目が生じたが、想定断層を 3 次元的に取り囲む、世界に例のない高密度の観測網(図 4.2.1)を築くことができた。

高感度ボアホール歪計は、4つの金鉱山の地下 1.0~3.0km のターゲットの想定地震断層や地震発生危険度が高い鉱柱において、地震滑りを促進する剪断応力の増加と地震滑りを抑制する断層を締め付ける応力の低下とを監視できるように合計 10 台を埋設した。経過は p.6~7 の表 2.3.1 に示すとおりである。

断層ゆっくりすべりを検出するための高感度長周期地震計1台をクック・フォー鉱山に埋設した。

JICA-南ア MoU「活動 2-2: 想定震源域での微小破壊活動を観測する(図 4.2.1)」

中谷正生らはクック・フォー鉱山において約 30 台の高感度センサ(以下 AE センサ)で構

成される観測網を展開し、2010 (H22) 年度に運用を開始した(図 4.2.1)。従来型の鉱山地震観測に比べて、検知限界がマグニチュードにして4程度向上し、これまでの100倍以上の震源が得られるようになった³²⁾。例えば、図 4.2.2 は微小破壊観測網から上方にはずれた微小破壊活動と坑内地震観測網の規模別頻度分布を比較したものである。2014 年 9 月までのトリガ数は合計 4500 万回以上であり、得られた波形データは 2 TB のハードディスク約 100 台に及ぶ。これは、自然地震観測では経験のない大量のデータであり、新たなスキームを開発して高品質のカatalogを作成した。また、観測の後半では、毎週回収されたハードディスクのデータを現地の研究者が分析しトラブルの発見・対処を迅速化する方法が実現した。

高密度・高サンプリングの観測データは、森谷祐一や直井誠ら^{20, 26)}が数 cm 精度の相対震源決定を達成し、地下の岩盤観察で物理的な割れ目を追うレベルで、100m にわたる微小破壊の連なりとして断層を追うことができた⁴¹⁾。さらに、AE センサ感度の現位置較正により、個々の微小破壊の絶対的な規模が押えられた³²⁾。ここまで具体的なレベルで地震活動と岩盤状態の対応がつけられたのは、鉱山・自然地震を問わず世界初であり、大きな山はね・地震の発生プロセスの研究に新たな地平を開いた。

同様の微小破壊観測は、クック・フォー鉱山以外に、モアプ・コツオン鉱山でも実施する計画であり、実際にセンサの埋設も行ったが、これらが埋設後一年を待たずに動作不良となったため、観測を断念せざるを得なくなった。クック・フォー鉱山に埋設したセンサも埋設後一年後以降、順次動作不良となっており、2015 年 3 月時点でほぼ全ての AE センサが使用不能となっている。この問題は、最短でも1年程度の運用を行った後に顕在化するため、本計画において対処するのは困難であったが、解決が必要な問題である。不良化したセンサに対して現場での電氣的試験を行い、埋設されたセンサ筐体内への水の侵入による内部電子基板の劣化(単純なショートではない)が原因であると推察された。センサ製造元のドイツ GMuG 社と協力して防水を強化した新たなセンサを数個試作し、うち2つをモアプ・コツオン鉱山に掘削したボアホール内に埋設して長期安定性を検証中である。

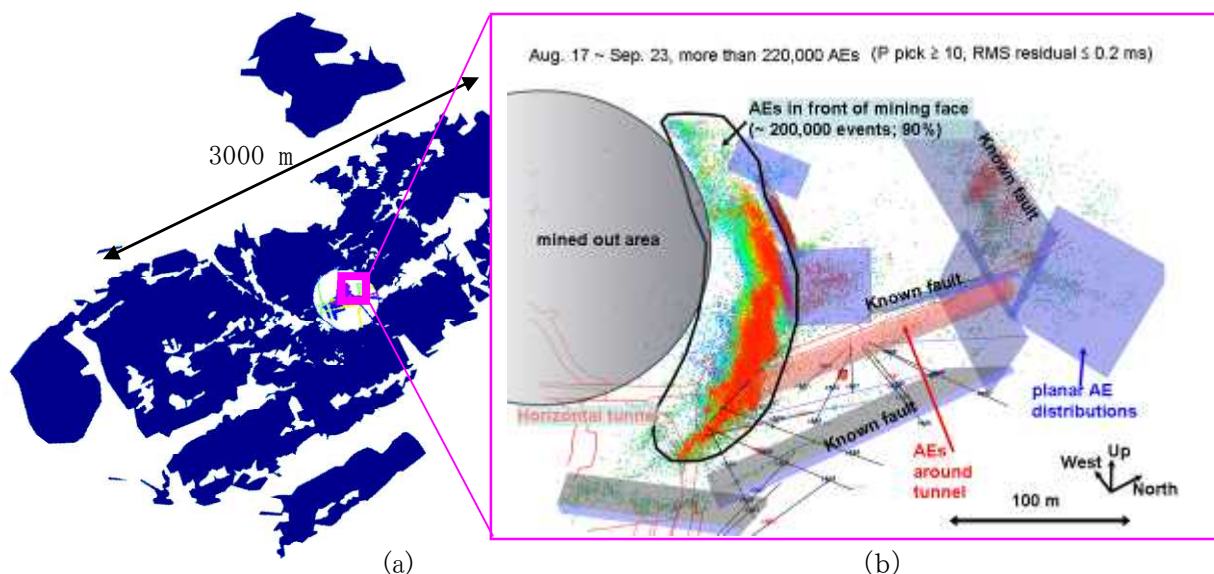


図 4.2.1 (a)クック・フォー鉱山(平面図)⁴⁰⁾。青:本プロジェクト開始当初採掘済みであった薄板状空洞域。中央の円形の掘残し(堅坑鉱柱)が観測期間中採掘されていた。(b) 掘削した十数本の孔と埋設した観測センサ、微小破壊、採掘の3次元透視図表示。既存の鉱山の地震観測網では、採掘前線前方の地震活動がぼんやりと見えているだけであったが、今まで見えなかった未知の弱面も含む多数の面状構造を微小破壊観測で描き出すことができた^{32,41)}。

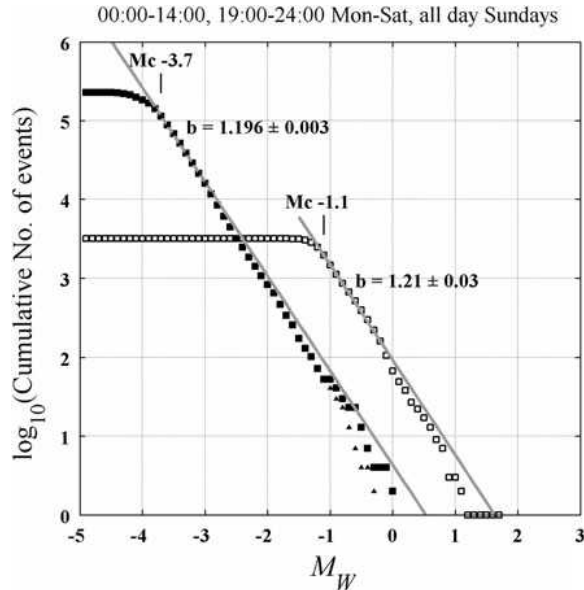


図 4.2.2 採掘前線前方の微小破壊の規模別分布(黒四角)と、鉾山地震観測網の規模別頻度分布(白四角)³²⁾。

＜注：最近タウトナ鉾山において鉾山が独自に開始した微小破壊観測では、長期間坑壁がダメージを受けにくい方向に上向きに孔を掘削し、新しく開発された、1つの孔に2台設置できるセンサを用い、センサ寿命の問題を回避している。＞

JICA-南ア MoU「活動 2-3:想定震源域での応力蓄積、緩和を観測する」

- (a) 4つの鉾山の想定断層のごく近傍で合計10台の高感度歪計を埋設することができ、最も早い観測は2010年度に始めることができた¹¹⁾。クック・フォー鉾山の歪計は坑内LAN障害のためにオンライン・データ転送ができていないが、ドリーフオンテイン鉾山、モアプ・コツオン鉾山、サウス・ディープ鉾山の歪計はオンラインで地上にデータが転送され、毎日定時に長期、最近1ヶ月間、最近一週間、および昨日の岩盤歪変化の自動Web報告システムが稼働している。サウス・ディープ鉾山では、1週間の歪変化が準リアルタイムに岩盤工学部の大形ディスプレイに常時写し出され、地震情報を写し出す隣の大形ディスプレイと同時比較できる様になっている(図4.2.3、図4.2.3)。クック・フォー鉾山、ドリーフオンテイン鉾山、モアプ・コツオン鉾山、サウス・ディープ鉾山の岩盤歪観測のデータ蓄積期間は、それぞれ、約3年、約2年、約1年、および、約2年になった。

歪計は、過度に応力が集中せず弾性応答する岩盤に埋設されており、採掘発破や誘発地震に続く弾性応答だけでなく、計算機モデリングが困難な採掘域や破壊域などの非弾性領域の準静的応力再配分など、地震観測だけでは見ることが困難な現象を記録し続けている。歪の蓄積と緩和が大きいサイトでは1000 μ strainに近い歪変化が観測され、100 μ strain(数MPaの応力変化に相当)に近い地震に伴う歪ステップも観測されたサイトもある。M8に近い遠地巨大地震や、2015年8月5日のM5.5などの近地M>4地震の歪変化波形などを100Hzのサンプリングレートで収録できた観測点もある³⁵⁾。

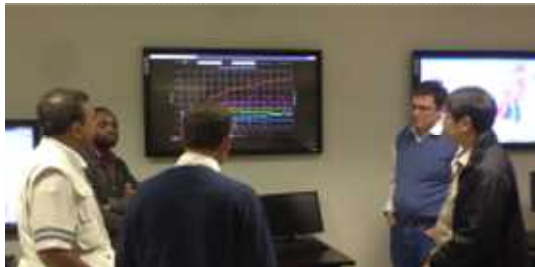


図 4.2.3 サウス・ディープ鉱山岩盤工学部オフィスに常時表示されているオンライン準リアルタイム歪変化の画面（左）と地震速報画面（右）。

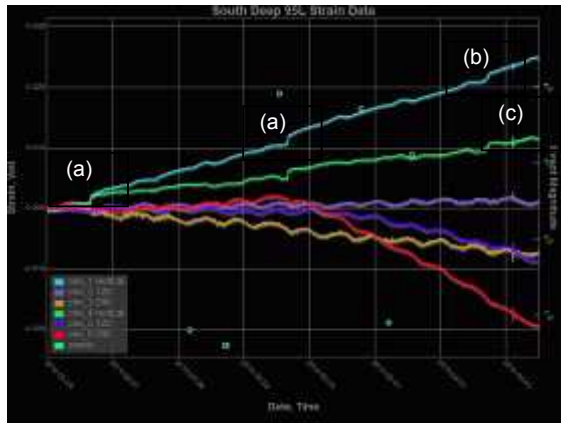


図 4.2.4 サウス・ディープ鉱山岩盤工学部の常時 default（一週間）表示の歪変化の画面の例（2014/3/26 - 4/2）。地球潮汐、採掘発破によるステップ状の速い変化とそれに続く余効変動(a)、ゆっくり歪変化(b)、坑内地震(○; $1 < M < 4$)、遠地巨大地震(チリ地震 M8.2)のリップル(c) も見える。

- (b) 震源域の応力レベルは高く、3次元絶対応力の測定は一般に困難であるが、3D地科学研究所の加藤春實氏の助力を得ることができ、日本の技術を南ア金鉱山の事情に合わせて導入^{13, 18, 21)}することによって、出版済みの世界の既存の例よりも地表下の深度が有意に大きい地点で、既往例よりも有意に大きい応力を測定することに成功した^{25, 37, 38)}。南ア人だけによる測定が出来るように技術移転も行った。

図 4.2.5 は、世界で最も深く、南アで最も大きい金鉱山であるムポネン鉱山とタウトナ鉱山の薄板状採掘の様子^{23, 37, 38)}を示している。両鉱山は、上下に 800m ほど離れた 2 枚の薄板状の金鉱脈の採掘が地下 3.4km まで進んでいる。しかし、本プロジェクトで日本の応力測定技術を導入する前は、83 レベル(地下 2.2km; 図中の L83)で 2000 年にたった一度応力測定が行われたただけであった。その測定が大きな口径のドリリングを必要とし、南ア鉱山内では非常に困難であったため、以後この測定が行われていなかったからである。日本で多用され、短時間でオーバーコアリングを完了でき、一つの孔で複数回の測定を繰り返すことも容易な円錐孔底ひずみ法(Sugawara and Obara 1999; ISRM suggested; Compact Conical-ended Borehole Overcoring technique; CCBO 法)を、南アの作業・ドリリング事情に合わせるために、76mm のオリジナルのオーバーコアリング孔径を、60mm (BX サイズ)にダウンサイズした(BX CCBO 法)^{13 18)}。

モアブ・コツォン鉱山の地下 2.9km での測定に成功した^{13, 18, 27)}後、ムポネン鉱山の L120 とタウトナ鉱山の L115 の周囲の採掘の影響が小さい地点で測定することにも成功した。前者は、世界最大深度でのオーバーコアリングによる応力測定であった。これらの結果は、初期主応力(採掘前の応力)勾配の推定結果(図 4.2.6 の実線)と調和的であることがわかった。

犠牲者が出た M1.5 の被害現場(図 4.2.6 inset)の近くで、地震発生の 2 ヶ月後に BX CCBO 法での測定を行った^{25, 35)}。一週間以内に 3 回のオーバーコアリングを完了させたがいずれも最大主応力が百数十 MPa であることを示した。異なる条件で追加測定を行った結果、測定結果が大きかったのは、坑道から十分離れていないところで測定されたためとわかった。また、坑道から十分離れたところでは最大主応力は約 100MPa で、採掘の影響を考慮に入れた弾性応力解析の結果と調和的であるとわかった。BX CCBO 法の測定の倍の時間を要し、一回のオーバーコアリングしかできなかったが、CSIRO 法の比較測定も行われ、上記の結果が正しいことも確認された^{35, 37)}。

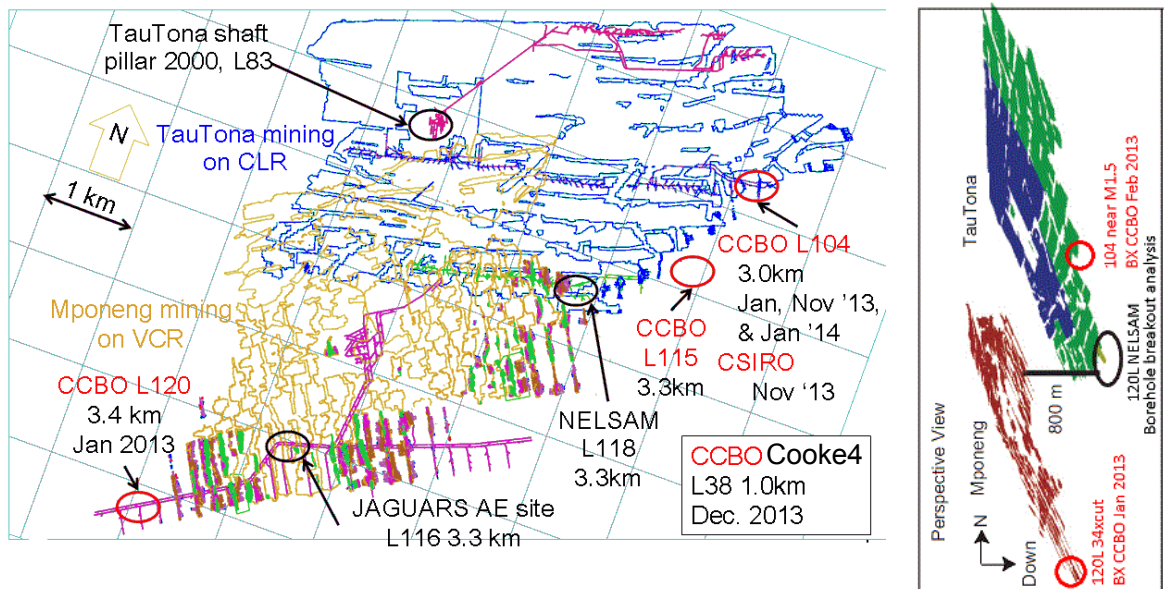


図 4.2.5 ムポネン鉱山とタウトナ鉱山とそこでの応力測定^{35,37)}。左：平面図、右：東から西を見た鉛直断面図的透視図。2000 年 L83 (83 レベル)：従来法 CSIRO 法による 2000 年の応力直接測定位置。NELSAM L118：米国チームが 2009 年に出版したボアホール・ブレイクアウト解析（間接応力推定）の場所。CCBO L120, L115, L104：移転された日本の技術（BX CCB0 法）で応力が測定された場所。測定された年と月、地表からの深度も示されている。

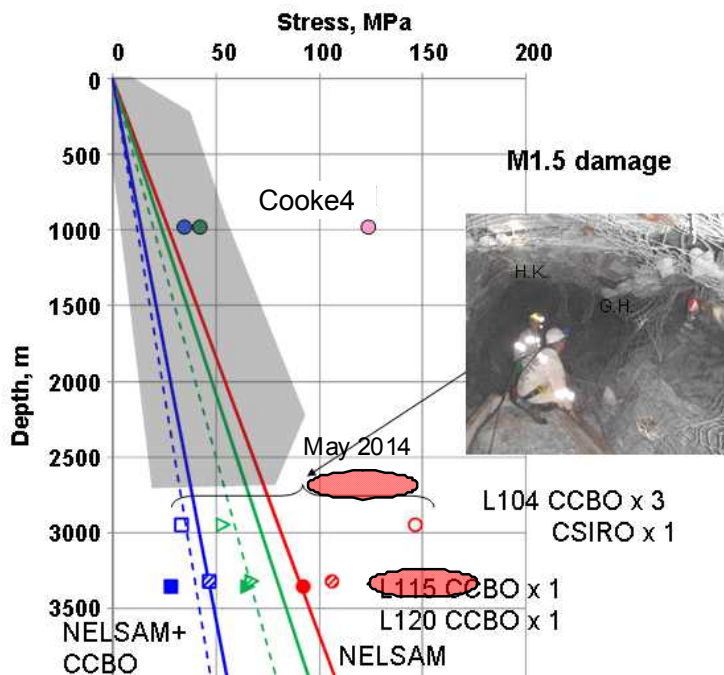


図 4.2.6 南アで測定された主圧縮応力と深さとの関係^{35,37)}。灰色部：本プロジェクト以前の出版済み主応力の範囲。赤、緑、青：最大、中間、最小圧縮主応力。実線：タウトナ鉱山 L118 でのボアホール・ブレイクアウト解析による推定初期主応力勾配 (Lucier et al. 2009)。最大主応力はかぶり圧に等しく、他の主応力も深さに比例すると仮定された。Cooke4：図 4.2.1(a)の堅坑鉱柱の測定結果。タウトナ L104：M1.5 の地震被害現場のすぐ近くで地震の 2 ヶ月後に最初の CCB0 測定が行われ、追加測定や CSIRO 法との比較も行われた。深さ 2.7km の楕円は、タウトナ堅坑鉱柱の実測結果。深さ 3.3km の楕円は 2007 年ムポネン地下 3.3km の Mw2.2 の震源に予想される応力範囲。

移転した技術を鉱山の技師が使用して、タウトナ鉱山の地下 2.7km の堅坑鉱柱で、高い応力の岩盤に掘られた一本の孔の中を 1m 間隔で 8 カ所の応力を連続で測定することに成功した。得られた最大主応力の範囲は、図 4.2.6 の深さ 2700km の楕円の範囲であった。坑道による応力集中や弱い地層の非弾性変形による複雑な応力分布を実測によって明らかにすることができたことになる。

クック・フォー鉱山の堅坑鉱柱(図 4.2.1(a)の円形の掘り残し部)では、128MPa の最大主応力(図 4.2.6 の Cooke4)が 2013 年 12 月に測定され、2014 年 10 月には M2.8 の地震が

発生した。

地質構造が応力場を乱す場合や、採掘がかなり進み破碎されて非弾性的に応答する領域が多い場合は、計算機による応力モデリングは困難になる。しかし、上記の2例は、そのような場合でも、岩盤応力の実測によって安全を評価し、それに基づいてしかるべく対策を講じることができる可能性を示した。

JICA-南ア MoU 「活動 2-4: 観測結果を解析し、本震発生前の前駆現象とその特性を明らかにする」

活動 2-2 の報告で述べたように、検知イベント数と震源決定精度が著しく向上する微小破壊観測網を天然の地質断層直近に展開したことで、これまでの知見の外挿では得られない、全く新たな知見が得られた。

- (a) 観測のメインターゲットと設定していたものを含むいくつかの地質断層において、従来型の鉱山地震観測網では検知できない規模の微小破壊 ($M_w < -2$) が多数、定常的に発生していることが明らかになった。さらに、震源の断層への密集度と波形解析から、これらの多くが面上の滑りであることが示唆された。すなわち、これらは将来大きな地震として滑るまさにその部分(断層コア)でのダメージ蓄積であるから、大きな地震の発生準備過程を把握する上で、直接的な情報を提供すると考えられる。一例として、普通の微小地震に比べて断層面上の微小破壊は小さな規模のものの割合が極端に高い傾向があり、断層面外でおこる一般の地震活動とは違って、大きな地震のおこる断層面そのものの状態を反映しているからだろうと解釈している。また、今回の観測では、活発に微小破壊を起している断層と一見同様の条件にありながら、ほぼ微小破壊活動のない断層も多数確認しており、その違いを生む原因を探ることが、微小破壊活動の監視を、鉱山における断層位置の推定、並びに断層状態の監視(強度・応力状態)業務に位置付ける上で重要である。

一方、ほとんどの天然の内陸活断層では、断層沿いに並ぶ微小破壊活動はそもそも観察されないし、そのような活動が観察される少数の断層においても、近年の研究ではそのほとんどが断層面外の岩盤内部で起こっていると指摘されている。本観測では、非常に小さなものに限られた微小破壊が盛んに断層面上でおこっていることがわかったわけだが、このことは、逆に、天然環境下の活断層においても、非常に小さなものばかりなので観測にかからないだけで、実は同様の微小破壊が多数起こっている可能性を示唆する。莫大なコストがかかるが、活断層直近のボアホールで微小破壊を観測する試みは、内陸断層の危険度評価の観点から考慮に値するだろう。

なお、これらの成果は § 5(1)原著論文発表の論文 41 において出版済みである。

- (b) メインターゲットとしていた地質断層上では、同じ場所で、ほぼ同じ規模で繰り返し発生する、 M_w -4 級(典型的破壊サイズ数cm)の微小繰り返し地震が起こっていることが明らかになった。プレート境界ではこのような観察事例が多くあり、断層上の小さな固着部が周囲のゆっくり滑りによって載荷され繰り返し破壊される現象と解釈されている。このような小繰り返し地震の発生レートは断層の巨視的なゆっくりすべりの速度に比例するはずなので、プレート境界での大地震発生準備過程モニタへの応用を目指して世界中で盛んに研究されており、鉱山内の断層でも同じような手法によるリスク評価ができる可能性がある。

さらに、今回鉱山で観測された微小繰り返し地震は、従来観察されたものに比べて非常に小さいため、繰り返し地震の規模と周囲のゆっくり滑り量の関係(Nadeau and Johnson (1998))に対して重要な知見が得られた。プレート境界で繰り返し確かめられてきたこの法則は、今回発見された鉱山の微小繰り返し地震には全くあてはまらない。環境の違い等何らかの理由で、繰り返し地震をおこす小さなパッチの固着の程度が、鉱山の地震ではほぼ 100%であるのに対して、プレート境界ではずっと低い(数%オーダー)

のだろうと解釈できるが、この発見は、鉱山や内陸地震での地震発生準備過程モニタに対して重大な可能性を示唆している。固着度の高いパッチでおこる繰り返し地震は、今回示されたように繰り返し一回あたりの周囲滑り量が格段に小さいため、これを用いれば、従来は困難と考えられてきた内陸断層等の非常にゆっくりとしたクリープが検知できることになる。簡単な試算では、 $M_w -4$ の微小繰り返し地震が検知できる場合、プレート境界に対して確かめられているスケーリング則に従うケースでは検知に 70 年程度かかる量のクリープが、今回観察されたタイプの繰り返し地震では、わずか 1 年程度で検知できることになる。

なお、これらの成果は § 5(1)原著論文発表の論文 48 として受理された。

- (c) 採掘前線のすぐ前方の、時間とともに応力が大きく増大したと見られる場所にあった断層上において、微小破壊の小さな集中域があらわれ、2ヶ月かけて同一平面内で 10-20 m スケールに拡大していく様子が、約 7500 個の AE によって描き出された(図 4. 2.7)。大きな地震をおこしうる岩盤・応力の条件下で準静的な滑り域が 20 m まで拡大できることを示唆する、極めて貴重な例である。大規模脆性破壊を起こす領域で準静的滑りがどれだけ大きく成長できるかは、地震の前駆的現象がどれだけ大きなシグナルを発するかを規定する重要なテーマであるが、実験室においてこのような大きな準静的滑りを再現することはほぼ不可能で、鉱山における観測ならではの成果である。

また、この活動では、時間とともに大きな破壊の割合が増加する傾向(b 値の低下; 2ヶ月で 2.5 から 1.5 まで低下)が明瞭に確認された。このような現象は、室内 AE 実験、あるいは大地震発生前(例えば 2011 年東北太平洋沖地震や 2004 年スマトラ沖地震)の微小地震活動に対していくつも報告例があり、震源域での応力の増大や破壊の相互作用の促進が原因とみられている。このような現象は、鉱山における断層のリスク評価に有用である可能性がある。

なお、これらの成果は § 5(1)原著論文発表の論文 42 において出版済みである。

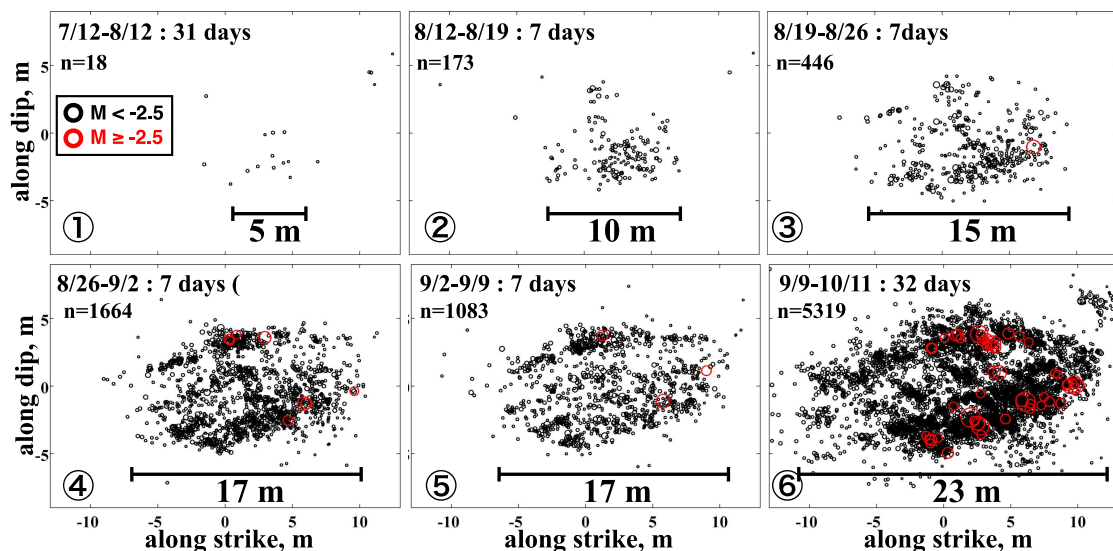


図 4.2.7 進行する採掘域の前方約 30 m にある地質断層上で新たに現れ、活動域が 20 m 程度まで拡大した微小破壊活動の震源分布。

- (d) 微小破壊活動が盛んにおこっている自然断層面の一部で $M_w -1$ (破壊域サイズ数 m) の地震が発生し、その 17 日後にすぐそばで 2 つの $M_w 0$ の地震 (破壊域サイズ 10 m 程度) が 10 分間隔で連発した。余震分布と地震波の解析から、 $M -1$ の破壊端で次の $M 0$ 破壊が始まり、そのまた破壊端で次の $M 0$ 地震の破壊が始まったことが、かなり明瞭に

示された。自然地震について同様の相互作用で誘発されるイベントが多数存在することが、連発する地震破壊間の最短距離と地震の規模の関係から間接的に主張されていたが、より直接的な例をみつけたことになる。M-1 から 0 級の破壊において、マクロスコピックな相互作用によって決定論的な破壊の連鎖が起こったということだが、その一方で、これらの地震の破壊開始点付近で起こっていた多数のより小さな微小破壊活動については、本震発生に先行する特徴的な変化は特に示さず、大きな地震はいきなり起こったようにみえた。

- (e) 断層上で起こる微小破壊以外にも、高応力状態が予想される採掘空洞直近において、大量の AE が発生していることが明らかになった。よく震源が決定されたものだけでも一ヶ月あたり数十万個以上の記録が得られている。これらは一見、3次元的に雲状に分布しているように見えるが、精密な相対震源決定によって、採掘域前方の巨視的な弱面のない岩盤内部に、微小破壊が厚さ2m程度の平板状に集中する、数十m規模の損傷ゾーンが平均数m間隔で順次形成することがわかった。いまのところ、これらの損傷ゾーンが被害を及ぼすような M2 級地震(典型的破壊サイズ 100 m 程度)につながった例は見つかっていないものの、先行研究では、今回観察されたものと同様の方位・サイズ・位置をもつ M2 級地震に対応する亀裂の報告例があり、採掘域周辺の岩盤内部の剪断破壊で起こる大きな山はねの準備過程に対応している可能性がある。採掘による岩盤損傷の様子と、その安定性評価の新たな方法に繋る発見である^{20,26)}。
- (f) 採掘域直近で誘発される大量の微小破壊は、非常に小さいものまで、また、採掘直後に誘発されているものも含めて、自然地震と似た大きさ頻度分布をもつことがわかった(図 4.2.2)。他国グループはそうではないと主張していたが、採掘発破自体を誘発地震と誤認したのが原因らしいことをほぼ決定的に示せた³²⁾。
- (g) ムポネン鉱山地下 3.3 km で起こった Mw2.2 の地震(本震)の震源断層を貫通する孔(図 4.1.1 の黒太線)から得たコアの解析により、本震がダイク内の既存弱面で起こったことが明らかになった(活動 1-2)。本震前には震源断層に沿った微小地震活動(前震活動)が明瞭にみられた(図 4.2.8)。これは、大きな地震の発生リスクをもつ断層を、定常的な微小破壊活動の監視によって検出することができることを示す好例である。前震活動は空間的に分離した3つのクラスタ(図 4.2.8 の F1, F2, F3)を成し、そのなかで最大のクラスタ F2 が本震発生の直前に顕著な活動率の増加(図 4.2.9)を示すことがわかった。しかし、本震の破壊開始点(図 4.2.10 の星印)は、F2 の隣の小クラスタ F1 に位置していた。これは、本震の準備過程が、ひとつの震源核(ゆっくり滑り域)が徐々に拡大し、臨界サイズまで成長して動的破壊に移行するという、室内実験で典型的に観察される単純なシナリオでは理解できないことを示唆する。そこで、クラスタが既存弱面上の低強度域で生じたと仮定すると、一つの解釈として以下のようなシナリオが考えられる。すなわち、本震発生直前に F2 から高応力域(図 4.2.10 で赤く塗った領域)に沿って、周辺の高強度域を蚕食するように拡大したゆっくり滑りが隣の低強度域(F1)に達し、2つのゆっくり滑り域が結合した結果、震源核のサイズが臨界サイズにまで急速に成長して本震が発生した。これは、現実の地質構造の複雑さゆえに、そこで発生する地震の準備過程は室内実験に比べてはるかに複雑になるが、内包する素過程は震源核形成理論に基づいて理解できること示しており、地震予知研究の歴史上非常に重要な成果である。なお、終了報告書 4.2「活動 2-4」(a)で報告した既存断層面上の微小地震活動と同種のものと考えられ、今後のこの活動の推移が注目される。

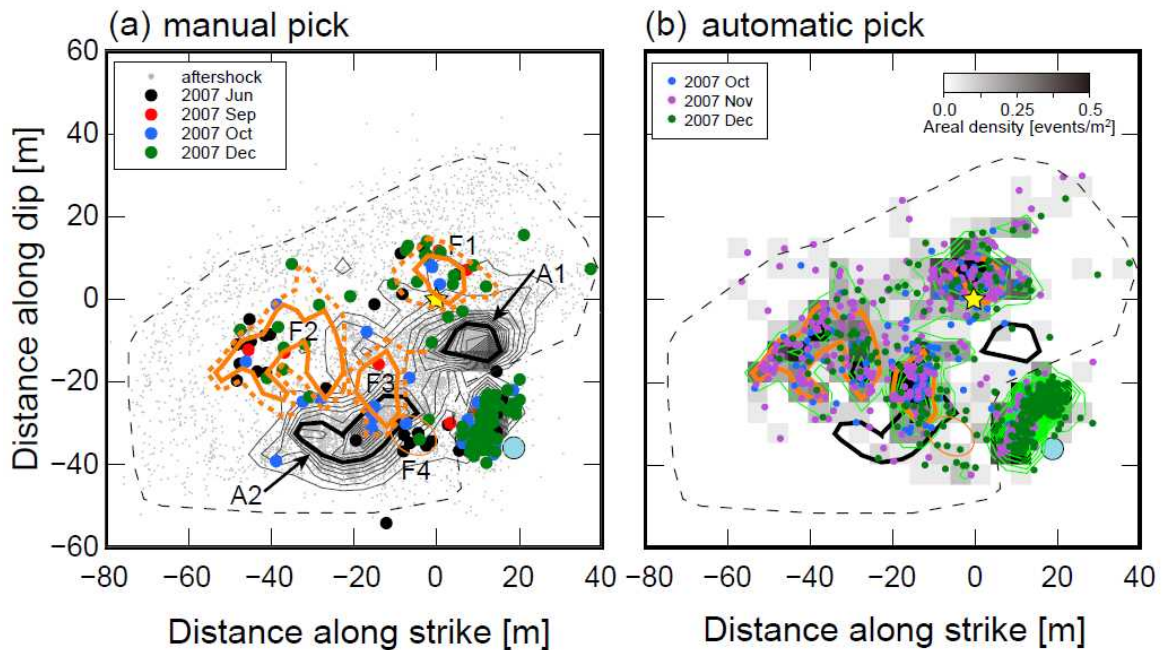


図 4.2.8 2007 年にムボネン鉱山地下 3.3km のダイクで発生した Mw2.2 の地震の前震、本震、余震の震源分布 (Yabe et al. JGR 2015⁴³)。黄色の☆: Mw2.2 の地震 (本震) の震源。黒、赤、青、紫、緑の丸: 2007 年 6、9、10、11、12 月 (本震の 6、3、2、1 ヶ月前の月と本震が起こった月) の前震の震源。灰色のドット: 本震発生後 150 時間の余震。オレンジの線で囲まれた領域 F1, F2, F3: 前震活動が活発だったクラスター。黒の実線で囲まれた領域 A1, A2: 余震活動が活発であった領域。a) 約 6 ヶ月間の観測波形から P 波および S 波の初動を手動検出して決定された前震、b) 観測現場の収録システムの自動検出により決定した前震の震源。背景の灰色の濃淡は前震数の面積密度を表す。

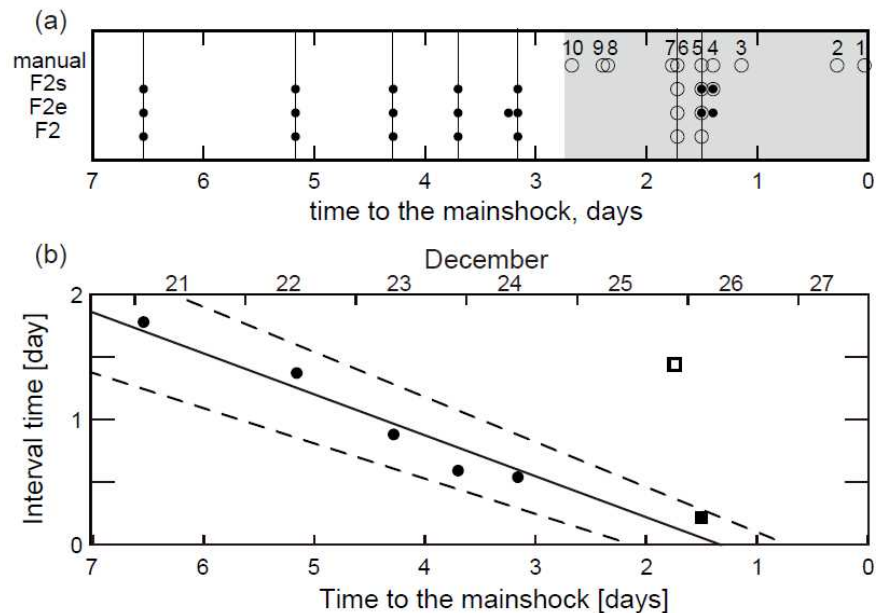


図 4.2.9 クリスマス休暇中にクラスター F2 で発生した前震の発生時間間隔 (Yabe et al. JGR 2015⁴³)。 (a) 自動震源決定されたイベント (黒丸) とマニュアルで震源決定されたイベント (白丸) の発生タイミング。 (b) 前震の発生間隔。黒丸・黒四角: 自動震源決定されたイベント、白四角・黒四角: マニュアル震源決定されたイベント。自動震源決定された前震も、マニュアルで決定された前震も、クラスター F2 で発生したものは本震に近づくにつれその間隔が短くなっていった。

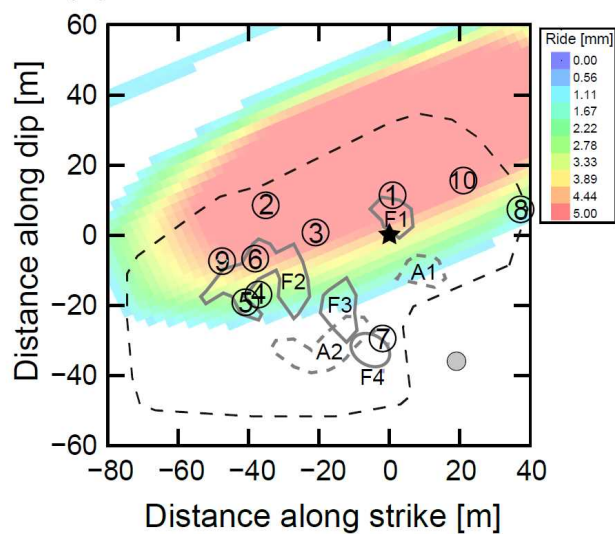


図 4.2.10 クリスマス休暇に入り採掘活動が止まっている本震前 64 時間に発生した前震①～⑩の震源分布 (Yabe et al. JGR 2015⁴³⁾より)。点線で囲まれた領域は Mw2.2 の地震の余震域。灰色の破線は余震クラスター (A1, A2)。星印: Mw2.2 の本震の震源。背景の色は、強度を仮定し、採掘による応力擾乱をモデリングして再現された本震の断層滑り量の分布 (Hofmann et al. 2012; 4.2「活動 3-1」(b)参照)。灰色実線で囲まれた領域は、本震前 6 ヶ月間に見られた前震活動のクラスター F1, F2, F3, F4。

- (h) 本プロジェクト以前に非地震性歪ステップに先立つ前駆変化が複数の鉱山で複数例観測されていたが、地震性の歪ステップに先立つ準静的な歪変化は観測されていなかった。2008 年 10 月に、ムポネン鉱山で発生した Mw 0.3 の震源の恐らく数 m 以内で、前駆歪変化が観測されていたことがわかった (図 4.2.11)。このように明瞭な歪変化が地震に先立って観測されたのは、世界で初めてである。あいにく、その時に微小破壊 (AE) の観測が行われていなかったため、その Mw 0.3 の震源断層は、それ以前の AE 観測データ (2007 年の Mw2.2 の余震分布) から震源を想像することしかできないが、同図右の AE 分布 (鉛直断面図) のほぼ中央、歪計 (赤のダイヤモンド印) に隣接する長さ 10 m の部分付近で断層すべりが発生したとすると、観測された地震歪ステップをよく説明できることが確かめられた。

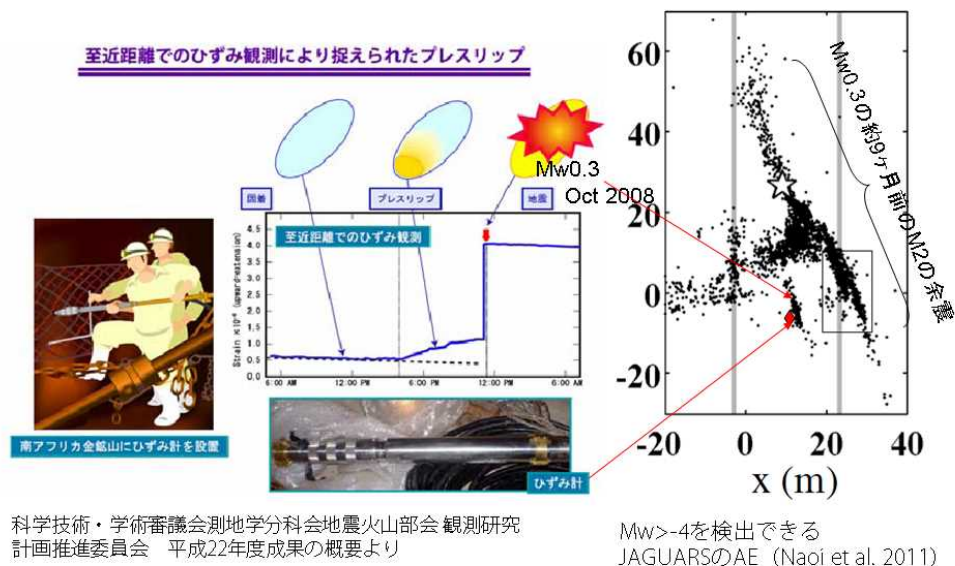


図 4.2.11 ムポネン鉱山で観測された地震の前駆歪変化

(2)研究成果の今後期待される効果

微小破壊観測によって、鉱山内の断層位置の把握⁴¹⁾や新しく形成するダメージ構造²⁰⁾が明瞭に描き出せることがわかり、これらの成果に触発されて、南アフリカの複数の鉱山に

において同様の観測の導入が検討されはじめた。そのうちタウトナ鉱山においては、GMuG社の協力のもとに、鉱山による自力観測が実現している。同鉱山では、堅坑周辺に存在する高品質の鉱床の採掘が始まっているが、この部分の採掘で大きな地震が誘発され、堅坑がダメージを受けると鉱山の操業継続が難しくなるため、誘発地震の発生は従来の採掘に比べて大きなリスクとなる。そのリスク把握の一助として、微小破壊観測の実施が決定された。南アフリカには、同様に堅坑周辺に大きな掘り残し部がある鉱山が数多くあり、これらの採掘において、微小破壊観測の導入が大きな役割を果たす可能性がある。

微小破壊観測によって見つかった2つの破壊の集合、1)断層面上の微小破壊活動^{41, 42)}、2)採掘空洞直近に密集する2次元状のダメージ集中を示唆する活動^{20,26)}、はいずれも本観測ではじめて同定された破壊の集合であり、いずれも解析は始まったばかりである。どちらも鉱山内の被害につながる大きな地震の発生に深く関連していると推察され、このような観測が鉱山内の地震リスクが高い場所の評価に有効であることは明らかと思われる。今後さらなる解析を行うことで、鉱山・自然地震を含めた地震の準備過程の理解、並びに採掘空洞直近の岩盤損傷過程の理解、あるいはそれらのモニタリングについて、重要な知見が得られると期待できる。

なお、本観測で得られた微小破壊データについては南ア・日本側で共有しており、カタログ作成については日本側の研究者が行っているが、作成したカタログはWebを通じて共有している。これらについては、本プロジェクト終了後も同体制で管理を行う。

4.3 JICA-南ア MoU 成果3「金鉱山内地震の発生を予測する精度が向上する」(JST グループ①、②、および④：震源の岩盤変形、微小破壊の観測、坑内観測地震高度解析)

(1)研究実施内容及び成果

JICA-南ア MoU「活動 3-1 多数の小さな金鉱山内地震のデータから想定震源域の詳細な応力の時空間分布や岩盤の安定度を評価する。」

室内岩石破壊実験では、最終破壊に至る直前には弾性波速度が特徴的に低下し、透過弾性波振幅が顕著に低下することが知られている。また、岩石試料を用いた室内摩擦すべり実験でも、地震に相当する不安定すべりの直前に断層透過波振幅が顕著に減少することが知られている。このような現象がフィールドスケールでどのように観察されるかを知るために、クック・フォー鉱山の地質断層の付近に能動人工震源と受振用加速度計を2010年に埋設した。モニタリングは現在も継続中である。受振用加速度計は、能動人工震源から見て断層の手前に1台、奥に2台埋設されているが、これは能動震源から届いた透過波信号を比較することで、断層周辺に起因する透過波の変化か否かを判断することができるようにするためである。モニタリング初期の地震活動が静穏な期間において、いずれの加速度計の記録においても、観測される透過弾性波形は酷似しており、断層帯におけるゆっくりとした変形の進行を反映する地震波到達の遅れを10 μ 秒以内の高精度で検出できることが確認された。年月の経過にともない、能動人工震源と岩盤のカップリング状態の低下に起因すると思われる高周波帯域の信号強度の低下が確認されたが、信号強度が十分に高い周波数帯域に絞って解析を実施すれば、地震波到達の遅れの検出能力は低下しないことが明らかにされた。地下の電源システムのトラブルなどにより、欠測期間を多く含むことにはなったが、2013年半ば以降において、断層を透過した2台の加速度計の記録で手前の観測点よりも到達時刻の遅れが顕著に(相対的に約30 μ 秒)大きくなったことが分かった。現在のところ、対象となる断層領域で大規模な地震の発生は確認されておらず、今後のモニタリングの継続と地震活動の関係を注視する必要がある。

また、クック・フォー鉱山では、本プロジェクトの微小破壊観測網によって、採掘域近傍で互いにごく近くで発生した地震が数多く観測された。これらの地震の波形記録を用いることで、マグニチュードの差が1程度あれば、地震波のスペクトル比から応力降下量が推定可能

であることを明らかにした。応力降下量の地震規模依存性の有無には留意する必要があるが、これにより微小破壊発生域における応力指標の時間変化をモニタリングできる可能性が高まった。

JICA-南ア MoU「活動 3-2 3-1 及び微小破壊・岩盤変形観測結果を用いて、南アフリカ金鉱山で用いられている地震危険度評価を校正し、リスク評価手法を改善する。」

(a) クック・フォー鉱山の微小破壊観測網の約 40m 北に、微小破壊震源が面状に分布することが見出された。この面状分布が発見された当時、これに該当する地質構造は、クック・フォー鉱山から提供された地質図に記載されていなかった。そこで、2012 年 12 月に現地調査を行ない、当該個所に弱面があることを確認した。最近、この弱面の上方延長部が採掘によって掘り出されたが、その前に微小破壊観測によってその弱面の 3 次元構造を浮き彫りにできていたことになる。微小破壊観測によって岩盤の状態をモニタできることを示す好例である。他にも断層上で発生したとみられる微小破壊の記録は多数得られている。これらの記録から得られた知見・リスク評価に対する寄与については 4.2 節の活動 2-4 の記述を参照されたい。

(b) 鉱山全体の地震ハザード・アセスメントの高度化をするためには、問題箇所の応力や、地震の震源の強度を知ることが非常に重要である。本プロジェクト以前は問題箇所の応力を実測することが技術的・体制的・経済的に不可能であったが、本報告書の 4.2 「活動 2-3b」に述べた様に、本プロジェクトの取り組みによってそれが可能になった。

また、採掘前の応力(初期応力)も校正することができたため、それを入力して計算機モデリングによって推定される鉱山の色々な場所、とりわけ、震源での応力についても研究が進み、次の成果が得られた：

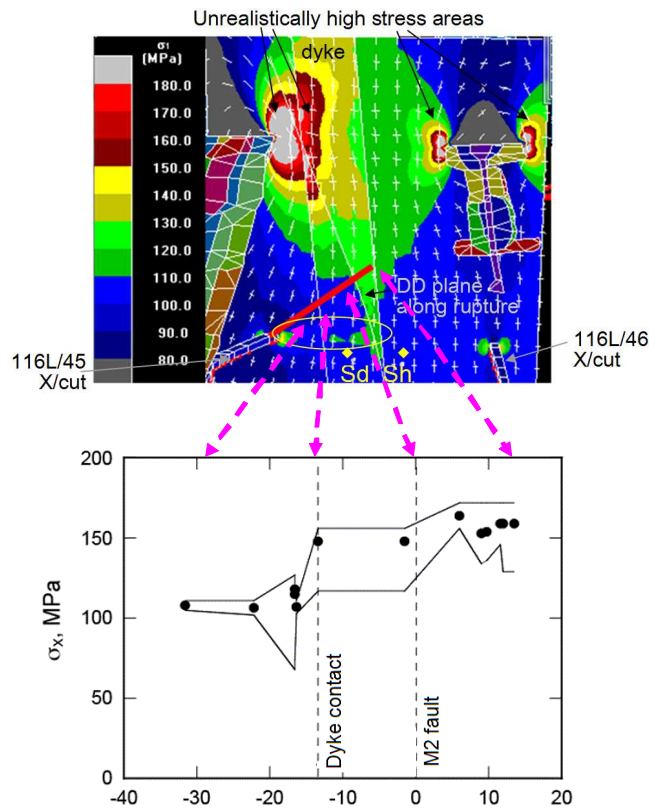


図 4.3.1 上) 計算機モデリングによる Mw2.2 発生後の最大主応力の分布 (Hofmann et al. 2012¹⁶⁾; 断層とダイクの走向に直交する鉛直断面)。ストレス・フリーの薄板状採掘跡が採掘前線の移動とともに広がることによる応力変化を計算した。ダイクは母岩より固いと仮定した。与えた強度に達すると塑性滑りする変位不連続面(図中の DD plane)を Mw2.2 の断層面上に設定した。赤実線: Mw2.2 の震源を貫通するドリリング。黄色楕円: 8 個の微小破壊センサの埋設範囲。Sd, Sh: ダイクと母岩中に埋設された高感度ボアホール歪計の位置。

下) 断層貫通ドリリングの孔とコアのダメージと、岩石の強度から拘束された、孔軸に直交する面内の最大主応力の変化 (Yabe et al. 2013)²⁴⁾。横軸は孔沿いの距離[m]で原点は断層交叉部。実線は、誤差範囲。

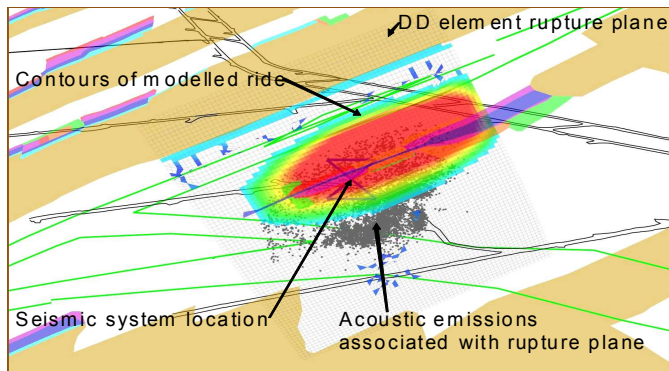
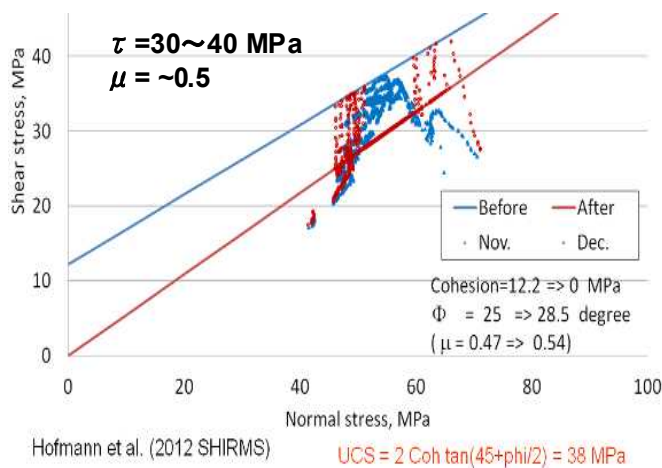


図 4.3.2 上) Mw2.2 断層面上の応力 (ドット) と仮定した強度 (線) (Ogasawara et al. 2013)²⁷⁾。青と赤:地震発生前と後。

下)ピーク強度 (上図の赤線) と残留強度 (上図の青線) を仮定し、計算機で再現された滑り (コンター; 最大滑り 0.8cm) と、微小破壊観測で得られた Mw2.2 の余震 (ドット) の分布 (Hofmann et al. 2012)¹⁶⁾。東から西に向き、震源断層のやや上から見下ろした透視図。左に傾斜する薄板状採掘跡や鉱脈下を走る 116 レベル (地下 3.3km) の水平坑道 (灰色の線)、鉱脈とダイクの交線 (緑線) も示されている。

- (b-1) ムポネン鉱山の地下 3.3km のダイクで 2007 年 12 月 27 日に発生した Mw2.2 の震源付近の最大主応力を弾性境界要素法で推定したものが図 4.3.1 (上) である¹⁶⁾。この Mw2.2 を貫通するドリリングの孔とコアのダメージ解析から推定される応力分布は図 4.3.1 (下) である²⁴⁾。母岩に比べダイクの応力が高いことや、震源断層を境に応力が急変している様子が計算機モデリングでも再現されていることが確認できた。
- (b-2) 上記の計算機予想応力 (図 4.3.1 上) はダメージから拘束された応力 (図 4.3.1 下) よりも小さかった。図 4.3.1 の S_d と S_h で実測された岩盤歪変化も、計算機で推定された歪変化よりも小さかった³⁵⁾。実測された岩盤歪変化で計算応力モデルを較正することで、これらの不一致を解消できる可能性があることがわかった³⁵⁾。
- (b-3) 微小破壊観測は、鉱山の地震観測網に比べ、余震を非常に多く検出し、また、非常に精度よく震源決定することができ、Mw2.2 の断層面を鮮やかに描き出すことができた^{4,8)}。計算機応力モデリングと比較すると、Mw2.2 の断層面は、クーロンストレスが最も大きい面であることがわかった¹⁶⁾。また、図に示すピーク強度と残留強度を仮定すると、実際に地震が発生した 2007 年 12 月の採掘が完了した時に、実際に観測された地震モーメントに近い滑り量と滑り範囲を計算機上で再現できることもわかった¹⁶⁾。
- (b-4) これらの成功に触発され、タウトナ鉱山の他の 7 つの $2.9 \leq M \leq 4.0$ の地震の震源の応力と強度を計算機応力モデリングで検討したところ、地震発生時の断層面上の最大主応力は約 100~180MPa であり、また、上記の Mw2.2 とほぼ等しい強度を与えると、地震を計算機上で再現できることを確認できた²³⁾。

- (c) 歪と傾斜データについては、ゴールド・フィールズ(現シバニエ・ゴールド)社の4つの鉱山の地震を監視している部署への自動転送・解析・報告システムが2013年1月に動き始めた。アングロゴールド・アシャンティ社については応力モデリングでハザード評価をする部署への自動転送・解析報告システムが2014年度に動き始めた。クック・フォー鉱山は、堅坑のケーブル障害のため現在運用できていないが、岩盤工学部門への自動報告システムは完成している。歪観測については、サウス・ディープ鉱山が自力で監視システムを構築することを援助し、自動報告システム(図 4.2.3, 図 4.2.4)が2013年1月に動き始めた。これらと、鉱山自身が行っている地震監視やそれに基づく安全評価と連携させることによって、地震ハザード・アセスメントの高度化を目指す準備ができた。

(2)研究成果の今後期待される効果

これまで、非弾性効果が顕著な場合(例えば採掘が進んだ場合や応力が高く降伏域が広い場合)、計算機モデリングは応力を正確に再現できず、応力が高い場合は実測することもできなかった。震源域の応力レベルを拘束することができ、そのレベルの応力が確実に測定できるようになったことは非常に重要である。

震源での応力レベルや強度、そしてそれらの不均質がわかれば、前駆変化から動的破壊に至るプロセスの解釈も容易になるだろう。

このような知見をさらに得るために、南ア金鉱山の震源付近の広範囲をカバーする応力測定を行うという計画をICDPに提案しようと考えた³⁴⁾。これは、2014年4月27日のJ-DESC(日本地球科学掘削コンソシアム)総会でJ-DESCとしてサポートすることが承認された。また、7月31日には、前ICDP南ア課題PIであったオクラホマ大 Ze'ev Reches 教授と南ア鉱山地震研究所 Gerrie van Aswegen 博士を招聘し、SATREPS J-DESC 南ア金鉱山応力多点測定ワークショップを開催し、議論を深める事ができた。さらに、M5.5の発生を受けて、研究対象をM5.5にも広げ、2015年1月15日にICDPにワークショップ・プロポーザルを提出することができた。本プロジェクトの成果を更に発展させ、世界と共有できると期待される。

<注:プロポーザルは同年9月にICDPに採択され、10/31-11/3にワークショップを開催することができた。>

活動的だったのが太古代であった南アの大断層付近や背斜・向斜構造とその周囲は、現在でも少なくとも数百mスケールで局所的に特異な応力場になっていることが知られている。例えば、図 4.3.3 はファー・ウェスト・ランド(図 2.1.2 の Goldfields 地域 7)地震反射波探査の結果とその地質的解釈であり、バンク断層とウェスト・ランド断層とその近辺の背斜・向斜構造では、主応力が局所的に水平である場合がある。このような場合も、応力場を計算機で予測することが困難である。

南アは、岩盤工学の基礎を築いた国であり、例えば、南アで開発された応力測定法は、オーストラリアで改良されて世界で広く使われている。しかし、南ア金鉱山の地下で多用されている小さなドリリングマシンではこの方法で測定するのはもともと困難で、応力が高い岩盤の場合は更に困難が増し、測定地点の深度や測定された応力範囲が十分ではなかった(図 4.2.6 の灰色領域)。本プロジェクトで技術移転した方法によって、これまでに困難であった測定がより容易になった意義は非常に大きい。

<注:世界最大のチリの銅山での応力測定技術の移転に関わる交渉が JOGMEC を通じて2015年12月から始まった。>

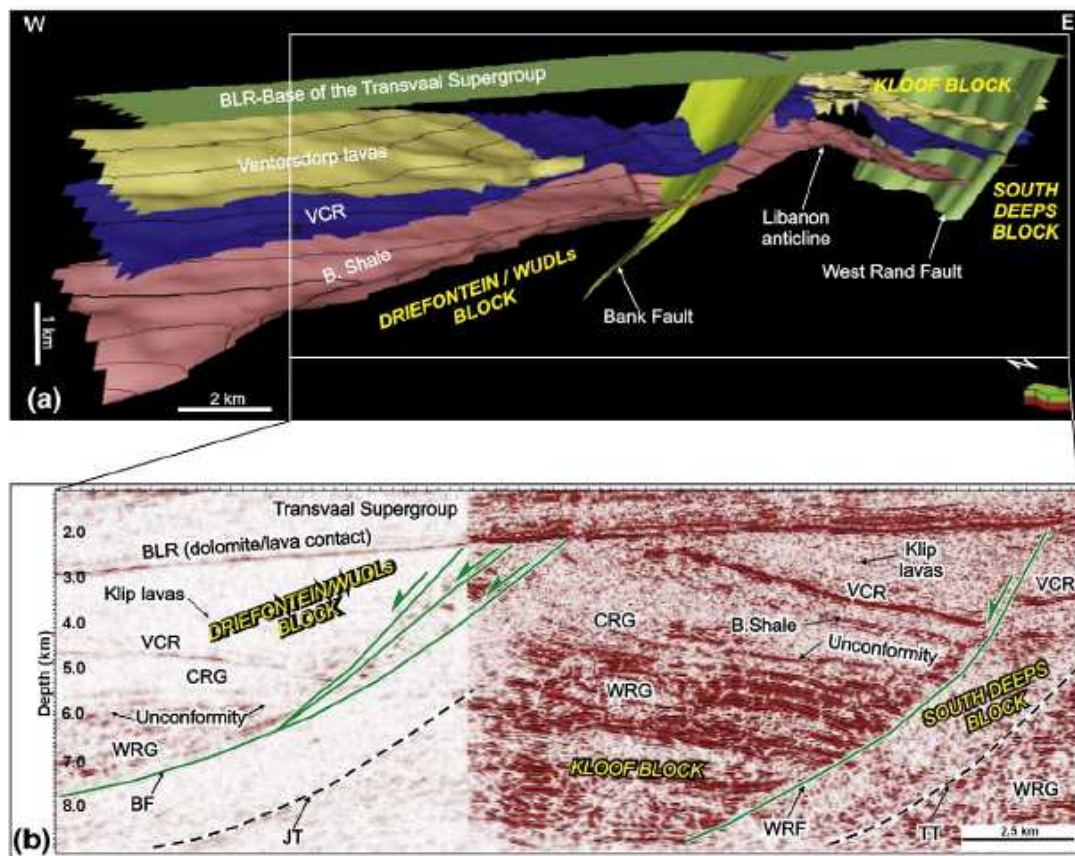


図 4.3.3 ファー・ウェスト・ランドの地震反射波探査の結果(b)と地質学的解釈(a) (Manzi et al. 2013)。バンク断層 (BF) 近傍の東側と西側とで、金鉱脈 (VCR) が顕著に褶曲していることがわかる。

4.4 JICA-南ア MoU 成果4「金鉱山内地震による採掘坑内での地震被害を予測する精度が向上する」(JST グループ③、④:震源の動的破壊過程、地表地震観測)

(1) 研究実施内容及び成果

JICA-南ア MoU「活動 4-1:想定震源域の極近傍に、断層すべりと応力の急激な変化を観測する加速度計、高容量の歪計を設置する。」:予定していた2つの鉱山(クック・フォー鉱山、および、ドリーフォンテイン鉱山)でH23年度に設置完了し、観測が始まった。

採掘計画及び地質構造に基づいて、2つの鉱山(クック・フォー鉱山、および、ドリーフォンテイン鉱山)で、本プロジェクト実施期間中にM2級の地震発生が予想された断層沿いに高容量の加速度計とひずみ計を2011年度に設置完了し、観測を開始した¹¹⁾。2015年7月現在、予想された地震は発生していない。

ドリーフォンテイン鉱山とモアブ・コツオン鉱山の採掘現場に、スタンドアロン型の強震動計を設置し、観測を開始した。

JICA-南ア MoU「活動 4-2:上記 4-1 による観測データを解析し、震源での岩盤の破壊と強震動の生成の過程を明らかにする」、および、「活動 4-4:動的応力変化、断層変位の観測結果と既存の室内実験結果を比較し、動的破壊過程の相似則を解明する。」。

クック・フォー鉱山で発生した M 1.3 の地震を震源距離約 100m で観測した加速度波形の解析を行った。観測された加速度波形の両振幅は最大で数十 m/s^2 と、非常に大きなものであった。このような大振幅の加速度波形の成因を調べるため、スペクトル解析から推定された震源パラメータを用いたモデリングを行った。その結果、ハスケルモデルや佐藤・平澤の円形クラックモデルのような、なめらかに破壊が広がる震源モデルでも、観測された加速度振幅を再現できることが示された。このことは、今回観測された大振幅強震動の生成に対する破壊過程の不均質の寄与はあまり大きくないことが示唆する。また、高容量ひずみ計で実測した、この強震動の伝播に伴う動的応力変化は 200-300MPa に達していた。これは岩石の典型的な一軸圧縮強度よりも大きく、地震動により山跳ねが発生するメカニズムを理解する上で有用なデータである。

ドリーフオンテイン鉱山で発生した M1.8 の地震による強震動を加速度計およびジオフォンで観測した。加速度計で記録した波形を積分して求めた速度波形と、ジオフォンで記録した速度波形を比較したところ、震源距離はいずれも約 260m でほぼ同じであるにもかかわらず、後者の振幅は前者の2倍程度であった。加速度計は坑道から 30m 以上離れた位置に埋設されているのに対して、ジオフォンは坑道から数 m しか離れていないので、振幅の違いは、坑道が空洞であることによる自由表面の効果および坑道周辺の損傷した岩盤の実効的な弾性定数が小さいことにより強震動が増幅された結果であると考えられる。

採掘域で観測された最大加速度振幅は、観測点を設置した地点の地質に依存していた。具体的には、ダイクの中や断層近くに設置した観測点の最大加速度振幅は、それ以外の地質環境に設置した観測点での最大加速度振幅よりも数倍大きかった。

(2)研究成果の今後期待される効果

高容量の加速度計とひずみ計をごく近傍に埋設した断層で M2 級の地震が発生していないため、断層破壊に伴う強震動生成過程のその場観察や断層変位の直接観察は実現していない。しかし、100-300m の震源距離で M1-2 の地震に伴う強震動を、損傷のない岩盤内に設置した加速度計で記録することができた。この記録を、カウンターパートである CSIR が、坑道から数 m 以内の損傷のある岩盤に設置したジオフォンの記録と比較したところ、ジオフォンで計測した振幅が岩盤中に比べて2倍程度に増幅されていることが明らかとなった。また、CSIR が採掘域において記録した最大加速度振幅が、その場の地質に依存することも明らかとなった。これらのデータは、岩盤の損傷や地質の違いといった岩盤性状が採掘空洞での強震動の増幅に強く影響することを示しており、強震動予測の精度向上に資すると期待される。さらに、強震動の伝播により生じる動的応力変化も計測されているので、強震動だけでなく、動的応力の増幅過程もあわせて考慮することで、山跳ねの誘発機構に関する理解が深まると期待される。

4. 5 JICA-南ア MoU 成果5「金鉱山周辺の地表部における公的機関による鉱山地震観測が強化され、地震情報が迅速に発信される」

(1) 研究実施内容及び成果

JICA-南ア MoU 活動 5-1「公的機関による地表地震観測網(SANSN)を強化し、金鉱山内地震等による地表の地震動を観測する。」および活動 5-2「Council for GeoScience (CGS) のシルバートン・データ・センターをアップグレードする。」

これらの活動は 2011 年度に完了した。これらと並行して、南ア政府による CGS の南ア国立地表観測網の増強が、本プロジェクトが強震計を増強したのとは別の地域でも完了し、当初の本プロジェクト単独によるものよりも、大幅な増強となった(表 4.0.1 参照)。しかし、データ量が米国製自動震源決定システムの処理能力を超え、震源決定は人手に頼らざるを

得ない状況にあり、地震波形処理が一名でしかできないシステムであったため、迅速な処理と情報発信が困難な状況であった。このため、日本の自動走時読み取りアルゴリズム (Horiuchi et al. 2011) が本プロジェクトによって導入され、本プロジェクトが観測点を増強したファー・ウェスト・ランド地区だけでなく、CGS が南ア政府予算によって観測点を増強されたセントラル・ランド地区やクラークスドープ地区の地震監視能力も大幅に向上させることができた (図 4.5.1)⁴⁰⁾。2014 年 4 月に CGS の若手研究者 Denver Birch を日本に短期招聘し日本の自動走時読み取りアルゴリズムを直接指導し、同年 5 月にはアルゴリズム開発者 Homeseismo 社の堀内茂木が CGS を訪れ動作状況を確認・調整した。

JICA-南ア MoU 活動 5-3「地表での強震動予測モデルを構築し、評価する。」

2014 年 8 月 5 日に南アの鉱山地区で過去最大の地震 M5.5 がクラークスドープ地区に発生し、本震と多数の余震が観測された (図 4.5.2-4.5.4)。ファー・ウェスト・ランド地区については 2014 年 8 月 22 日に発生した $M_{USGS}4.5$ 、セントラル・ランド地区については 2013 年 11 月 18 日に発生した $M_{CGS}4.0$ の地表強震記録を得ることができた。これらは、活動 5-3「地表での強震動予測モデルを構築し、評価する。」を行うための貴重なデータとなり、CGS において報告書がまとめられた^{7, 22)}。

この M5.5 の地震の研究は本プロジェクト期間終了後も続くため、データ共有と研究交流を続けることができる様に、CGS と立命館大学は 2015 年 3 月に MoU を交わした。

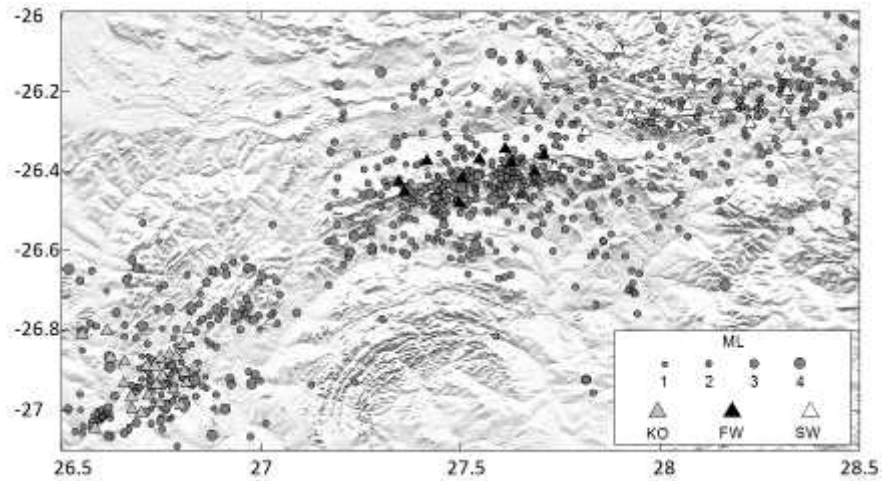
(2)研究成果の今後期待される効果

2014 年 8 月 5 日の M5.5 は、鉱山の坑内地震観測網 (主に 4.5Hz Geophone) でも観測されていたが、振りきれたり周波数帯域が狭かったりしたため、震源過程の解析には使用できない。地表の CGS の強震計と地下の本プロジェクトのボアホール石井式歪計の記録は震源過程の解明に貢献すると期待される。

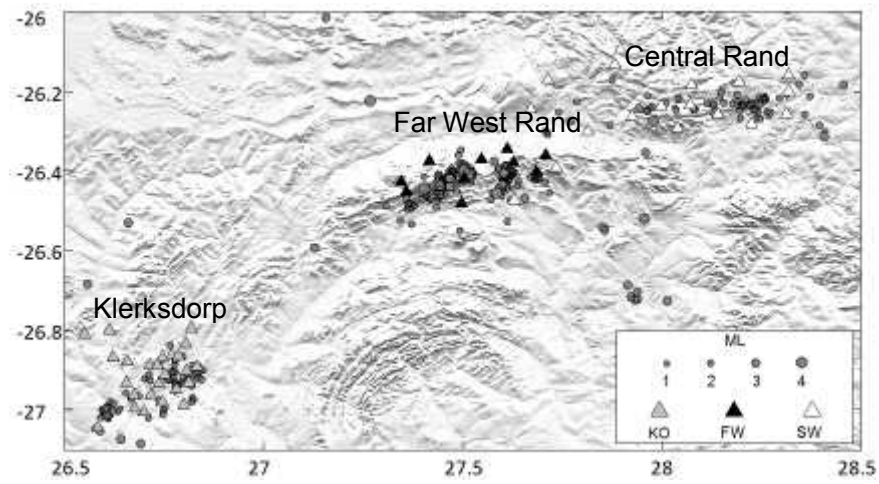
また、この M5.5 と余震は、地表の 17 台の強震計、地下 2~3km の 30 点の Geophone、地下 2.8km と 2.9km の 3 台の歪計で記録されたため、地震のメカニズムの解明を進めるために、質・量ともに十分な極めて貴重なデータセットとなった。

この M5.5 の地震は、通常の鉱山誘発地震 (正断層型; 採掘深度で発生) と大きく性質が異なっており、その発生原因と、このような地震による将来の地震ハザードを評価することは非常に重要である。地下 2.9km で 2011 年に測定された応力は正断層場であり、M5.5 が左横ずれ型であったことと矛盾する。鉱山のルーチン地質探鉱のドリリングマシンで、この震源断層まで到達する掘削を行うことが可能である。M5.5 の断層面近傍で予想される応力は、本プロジェクトが技術移転した方法で測定ができるレベルである。そこで、断層ドリリングと応力測定、ロギングや間隙水圧・歪・地震観測をしようという計画について議論する ICDP ワークショップ・プロポーザルを 2015 年 1 月に提出した。この計画が進めば、本プロジェクトの成果を、欧米を含めた世界と共有できると期待される。

<注: 同年9月に ICDP に採択され 10/31-11/4 にワークショップを開催することができた。>



(a) 導入前



(b) 導入後

図 4.5.1 本プロジェクトが供与した日本の自動走時読み取りアルゴリズム導入前(a)と後(b)の、決定された震央分布の比較。期間は2014年3月。本プロジェクトが強震計10台を供与したファー・ウェスト・ランド地区だけでなく、クラークスドープ地区やセントラル・ランド地区の震源決定精度も大幅に向上した。

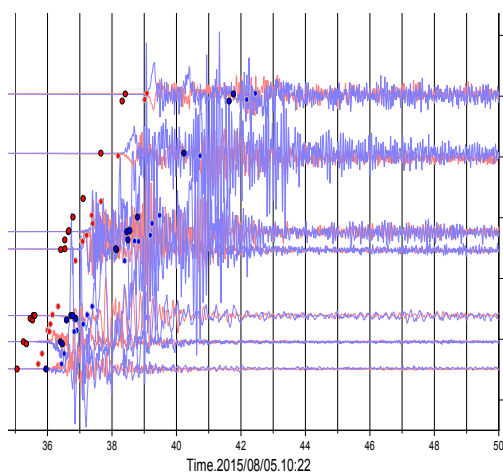


図 4.5.2 2014 年 8 月 5 日に発生した M5.5 の強震波形（南ア国立地表観測網）。大小の 2 つの丸：初期および主フェーズの到来時刻、赤と青：P 波と S 波の到来時刻。

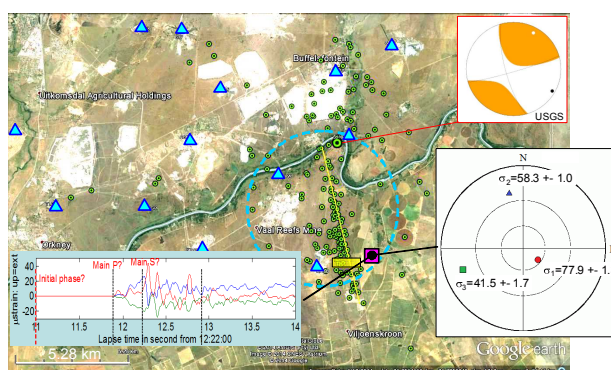
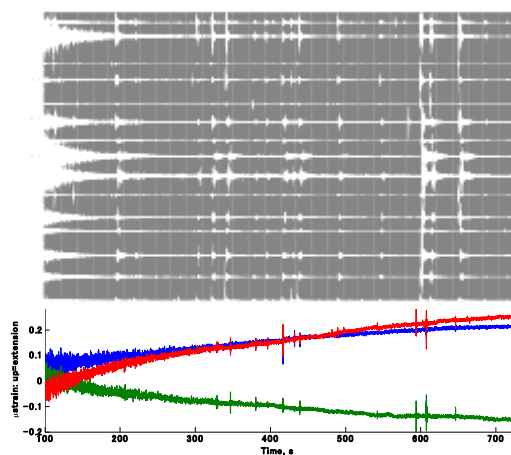


図 4.5.3 CGS 国立地表強震計観測点(▲)、左横ずれ型 M5.5 の本震と余震(大小の●)、震源断層走向(黄色線)、絶対応力測定が行われと石井式ボアホール歪計が 2 台埋設されている地点(■)と、応力・歪変化の記録。地下 3km の水平坑道(黄色長方形)から数百m以内に M5.5 の断層面があるため、それを科学掘削する計画を議論するワークショップを ICDP に提案した。

図 4.5.4 地表の CGS 強震計(上)と、地下 2.9km の石井式ボアホール三成分歪計(下;赤緑青)の余震記録の例。

§ 5 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 3 件, 国際(欧文)誌 45 件)

- 1) 【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, pp.S563-S573, 2009.
- 2) 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, pp.115-134, 2009.
- 3) 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, pp.73-79, 2009.
- 4) 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, pp.e49-e52, 2009.
- 5) 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, pp.215-226, 2010.
- 6) Kwiatak, 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, pp.1165-1173. EDOC: 15721 10.1785/0120090277, 2010.
- 7) 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.
- 8) Naoi, M., M. Nakatani, Y. Yabe, G. Kwiatak, 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), pp.2399-2407, doi: 10.1785/0120100346, 2011.
- 9) Hirano, S and T. Yamashita, Analysis of the static stress field around faults lying along and intersecting a bimaterial interface, Geophys. J. Int., 187, pp.1460-1478, 2011.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) **【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.
 - 13) 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.
 - 14) 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.
 - 15) 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.
 - 16) 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.
 - 17) **【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), pp.228–249, 2012.
 - 18) 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.
 - 19) 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*, vol. 191(3), pp.1317–1324, doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05678.x, Oct., 2012.
 - 20) 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, pp.181–186, 2012.
 - 21) 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.
 - 22) 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.
 - 23) 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, pp.558–580, 2013.

- 24) 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, pp.604–613, 2013.
- 25) 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, pp.614–623, 2013.
- 26) 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*, pp.597–602, 2013.
- 27) 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, pp.51–60, 2013.
- 28) 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, pp.67–73, 2013.
- 29) 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, pp.387–393, 2013.
- 30) 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, pp.51–60, 2013.
- 31) 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 International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines*, 2–7 September 2013, St. Petersburg–Moscow, Russia, 67–73, GWDMS JHB Central General 23450, 2013.
- 32) 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.
- 33) 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), pp.787–793, 2013.
- 34) 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), pp.146-151, 2014.
- 35) Ogasawara, H., T. Katsura, G. Hofmann, Y. Yabe, M. Nakatani, M. Naoi, H. Ishii, D. Roberts, S. Nakao, M. Okubo, J. Wienand, P. Lenegan, A.K. Ward, 'In-situ monitoring of rock mass response to mining in South African gold mines using the Ishii strainmeters', Proceedings of the Sixth South African Rock Engineering Symposium 2014, Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, pp. 21-34, 2014.
 - 36) Durrheim, R.J., H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, A.M. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, H. Moriya, M. Naoi, T. Kgarume, O. Murakami, A.V.Z Brink, G. Ferreira, G. Henry, R. Teleka, J. Kuijpers, S. Mngadi, A Ward, J. Wienand, the SATREPS Research Group, Observational studies in South African mines to mitigate seismic risks: a mid-term review of the five-year SATREPS project, Proceedings of the Sixth South African Rock Engineering Symposium 2014, Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, pp. 241-250, 2014.
 - 37) Ogasawara, H, H. Kato, G. Hofmann, D. Roberts, T. Clements, P. Piper, Y. Yabe, In situ stress measurement at earthquake prone areas in South African gold mines, Proceedings of the Sixth South African Rock Engineering Symposium 2014, Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, pp. 349-359, 2014.
 - 38) Ogasawara, H, H. Kato, G. Hofmann, D. Roberts, P. Piper, T. Clements, A.K. Ward, Y. Yabe H. Yilmaz, 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, Minneapolis, on CD-ROM, paper no. 14-7438, 2014.
 - 39) Durrheim, R. J., 2014, Keynote address: Has research and development contributed to improvements in safety and profitability of deep South African mines? Proceedings of 7th International Congress on Deep and High Stress Mining, Sudbury, Canada, 16-18 September 2014, M. Hudyma and Y. Potvin (eds), Australian Centre for Geomechanics, pp.23-40, 2014.
 - 40) Ogasawara, H., M. Nakatani, R.J. Durrheim, M. Naoi, Y. Yabe, H. Moriya, G.F. Hofmann, C. Stander, D.P. Roberts, P. de Bruin, J. Oelofse, H. Kato, A. Cichowicz, D. Birch, D. Ngobeni, A. Milev, T. Kgarume, T. Satoh, S. Horiuchi, H. Kawakata, O. Murakami, N. Yoshimitsu, A.K. Ward, J. Wienand, P. Lenegan, H. Yilmaz, S. Mngadi, P.S. Piper, T.N. Clements, S. Nakao, M. Okubo, H. Ishii, A.V. Visser, Observational studies of the rock mass response to mining in highly stressed gold mines in South Africa, Proceedings of 7th International Congress on Deep and High Stress Mining, Sudbury, Canada, 16-18 September 2014, M. Hudyma and Y. Potvin (eds) , Australian Centre for Geomechanics, pp.123-137, 2014.
 - 41) Naoi, M, Nakatani, M, Otsuki, K, Yabe, Y, Kgarume, T, Murakami, O, Masakale, T, Ribeiro, L, Ward, A, Moriya, H, Kawakata ,H, Durrheim, R and Ogasawara, H, Steady activity of microfractures on geological faults loaded by mining stress, Tectonophysics, doi: 10.1016/j.tecto.2015.02.025, 2015.
 - 42) Naoi, M., M. Nakatani, T. Kgarume, S. Khambule, T. Masakale, L. Ribeiro, J. Philipp, S. Horiuchi, K. Otsuki, K. Miyakawa, A. Watanabe, H. Moriya, O. Murakami, Y. Yabe, H. Kawakata, N. Yoshimitsu, A. Ward, R. Durrheim, and H. Ogasawara, Quasi-static slip patch growth to 20 m on a geological fault inferred from acoustic emissions in a South African gold mine, J. Geophys. Res., doi: 10.1002/2014JB011165, 2015.
 - 43) Yabe, Y., M. Nakatani, M. Naoi, J. Philipp, C. Janssen, T. Watanabe, T. Katsura, H. Kawakata, D. Georg, and H. Ogasawara, Nucleation process of an M2 earthquake in a deep gold mine in South Africa inferred from on-fault foreshock activity, J. Geophys. Res., 120 (8), 5574-4495, doi: 10.1002/2014JB011680, 2015.

- 44) Kgarume, T.E., Spottiswoode, S.M. and Durrheim, R.J., Assessing the seismic hazard posed by aftershocks following a mine tremor, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. Accepted.
- 45) Kgarume, T., A. Milev, M. Nakatani, M. Naoi, Y. Yabe, J. Philipp, R.J. Durrheim, H. Ogasawara, T. Ward, Determination of shear wave Q_c and its frequency dependency ahead of a mining stope, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. Accepted.
- 46) Moriya, H, Naoi, M, Nakatani, M, Van Aswegen, G, Murakami, O, Kgarume, T, Ward, AK, Durrheim, R, Philipp, J, Yabe, Y, Kawakata, H and Ogasawara, H, Delineation of large localized damage structures forming ahead of an active mining front in the Cooke 4 Mine, South Africa, by using advanced acoustic emission mapping techniques, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 79, pp.157-165, doi: 10.1016/j.ijrmms.2015.08.018, 2015.
- 47) Okubo, M., H. Ogasawara, S. Nakao, O. Murakami, H. Ishii, and A.K. Ward, Dynamic strain in a South African gold mine produced by the 2011 Tohoku Earthquake, Proc. Int. Assoc. Geodesy Symp., Springer International Publishing, Switzerland, doi: 10.1007/1345_2015_207, 2015.
- 48) Naoi, M., M. Nakatani, T. Igarashi, K. Otsuki, Y. Yabe, T. Kgarume, O. Murakami, T. Masakale, L. Ribeiro, A. Ward, H. Moriya, H. Kawakata, S. Nakao, R. Durrheim, H. Ogasawara, Unexpectedly frequent occurrence of very small repeating earthquakes ($-5.1 \leq MW \leq -3.6$) in a South African gold mine: implications for monitoring intraplate faults, J. Geophys. Res., 120, doi: 10.1002/2015JB012447, 2015.

(2) 研修コースや開発されたマニュアル等

① 研修コース概要(コース目的, 対象, 参加資格等), 研修実施数と修了者数

総延長約 2.8km 以上合計 70 本以上のドリリングとコアの管理、孔内カメラ観察、様々な計器の埋設や維持・管理に関して、南ア若手研究者2名と雇用した技師延べ 8 名に対して、日本人の立ち会いがなくても作業が進められるように綿密に講習(2010~2012;地上および坑内)

BX Compact Conical-ended Borehole Overcoring technique course (2013/1/23; 於アングロワールドアシヤンティ社岩盤工学部, Western Levels;講師:小笠原宏):

南ア金鉱山の坑内での作業環境に最も適するように、ドリリング口径を 60mm (BX サイズ)にダウンサイズした応力解放法(Compact Conical-ended overcoring technique; BX CCBO 法)を、3 社(鉱山会社1、コンサル会社2)の 8 名に対して講習。

Strain monitoring course (2014/8/12; Waenhuis Guest House, Fochville;講師:大久保慎人・山口照寛・小笠原宏):

日本の大学の地殻変動観測所の地殻変動観測を統合処理する CrustDB システム(山口・他 2010)を、3つの鉱山会社の岩盤工学・地震監視部に設置するにあたり、その操作方法を4つの鉱山、および、2つの土木コンサル会社の約 30 名に講習。

② 開発したテキスト, マニュアル類

Ogasawara, H. and H. Kato, Conical-ended BX borehole overcoring procedure, pp.12, 2012.

(3) その他の著作物(総説, 書籍など)

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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リング則ー南アフリカ Mponeng 金鉱山, 立命館大学修士論文, pp.48, 2012.
 - 4) Denver Birch, Identifying instability in the rock mass caused by water ingress into abandoned mines, MSc Thesis, Graduate School of Natural and Agricultural Sciences, Pretoria University, 2013.
 - 5) Fungai Kwangwari, Regional Pillar Monitoring at South Deep Gold mine, South Africa, Graduate School of Mining, University of the Witwatersrand, pp.103, 2013.
 - 6) 今川祥太, コーダ波を用いた坑道検出の試みー南アフリカ Cooke4 鉱山観測サイト, 立命館大学大学院修士論文, pp.30, 2014.
 - 7) Ogasawara, H., R. Durrheim and the research group for SATREPS, Observational studies to mitigate seismic risks in mines, a poster presented at OECD Global Science Forum "Workshop on Opportunities, Challenges and Good Practices in International Research Cooperation between Developed and Developing Countries", Pretoria, South Africa, 20-22 September 2010.
 - 8) 直井誠, 南アフリカ大深度金鉱山における微小破壊観測, 水曜会誌談話室, 第 24 巻, 第 7 号, 2014.
 - 9) 小笠原宏, 南アフリカ金鉱山の大深度からマグニチュード2~5の震源を掘削し地震の謎に迫る, J-DESC ニュースレター2015, p.12, 2015 年 4 月.

(4)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 5 件、国際会議 13 件)

- 1) 小笠原宏, 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地震活動の監視, 予測, 制御, 日本地震学会秋季大会予稿集, D11-06, 京都, 2009 年 10 月 21 日.
- 2) 中谷正生, 南アフリカの大深度金鉱山における半制御地震発生実験, 第 124 回深田研談話会, 財団法人深田地質研究所, 東京, 2010 年 1 月 15 日.
- 3) Ogasawara, H., C. Srinivasan, A. Cichowicz, O. Goldbach, and K. Bosman, Water-ingress induced seismicity in mines in Japan, India and South Africa, ICDP Workshop "Scientific Deep Drilling to Study Reservoir Triggered Earthquakes at Koyna, India", Hyderabad, India, 21 March 2011.
- 4) Ogasawara, H., Keynote: the great eastern Japanese earthquake and tsunami of 11 March 2011 and the research we are doing in South African gold mines, AfricaArray Workshop 2011, University of Witwatersrand, Johannesburg, South Africa, 21 November 2011.
- 5) Durrheim, R.J., A keynote address: Observational studies in South African mines to mitigate seismic risks, The Fourth International Conference on New Development in Rock Mechanics & Engineering (NDRM2012), Shenyang, China, 14-17 September 2012.
- 6) Ogasawara, H., Observational Studies to Mitigate Seismic Risks in Mines, Institute of Mine Seismology 23th Seminar on Monitoring & Modelling the Seismic Rock Mass Response to Mining, Hobart, Australia, 19 March 2013.
- 7) 小笠原宏, 南アフリカ金鉱山 大深度高応力下での採掘と地震の監視と制御, 材料学会岩石力学部門委員会, 京都, 2013 年 8 月 9 日.
- 8) 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 Symp. In-situ Rock Stress, Sendai, Japan, 19 August 2013.
- 9) 小笠原宏, 南アフリカ金鉱山における地震震源の応力研究の現状と展望, ICDP 国内ワークショップ, 2013 年 9 月 22 日, 東京, JAMSTEC 東京事務所.
 - 10) 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, Hakone, Japan, 25 September, 2013.
 - 11) Durrheim, R.J., The risks to the public posed by large seismic events in the gold mining districts of South Africa, South African Institute for Engineering and Environmental Geologists, Midrand, South Africa, 24 April 2013.
 - 12) Durrheim, R.J., D. Vogt and M. Manzi, Keynote address: Advances in geophysical technologies for the exploration and safe mining of deep gold ore bodies in the Witwatersrand basin, South Africa. 12th Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Uppsala, Sweden, 12-15 August 2013.
 - 13) Durrheim, R.J., 2014. Keynote address: Has research and development contributed to improvements in safety and profitability of deep South African mines? 7th International Congress on Deep and High Stress Mining, Sudbury, Canada, 16 September 2014.
 - 14) Ogasawara, H. and R. Durrheim, KEYNOTE: Observational studies in South African gold mines to mitigate seismic risks - What do Japanese seismologists hope to learn? 9th annual AfricaArray Workshop, 19-31 January 2014, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa, 21 January 2014.
 - 15) Durrheim, R. H. Ogasawara, and the SATREPS Research Group, Keynote address: Observational studies in South African mines to mitigate seismic risks, Bergmekanikdagen (Rock Mechanics Day), Rock Engineering Research Foundation and Swedish National Group of International Society for Rock Mechanics, Stockholm, Sweden, 9 March 2015.
 - 16) Yabe, Y., M. Nakatani, M. Naoi, H. Moriya, J. Philipp, C. Janssen, H. Kawakata, R. Durrheim, G. Dresen, and H. Ogasawara, Monitoring of Microseismicity in Deep Gold Mines in South Africa, Induced Seismicity Workshop, Davos, Switzerland, 12 March 2015.
 - 17) Durrheim, RJ, Ogasawara, H. and the SATREPS Research Group, Keynote address: Observational studies in South African mines to mitigate seismic risks, Stress & Seismicity Workshop, Eastern Australia Ground Control Group, Launceston, Australia, 19-20 March 2015.
 - 18) 小笠原宏, 矢部康男, 伊藤高敏, G. ファンアスウェヘン, A. チホビッチ, R. ダーハイム, ICDP 準備諸会議参加者, 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 (DSeis), 日本地球惑星科学関連学会連合 2015 大会, MIS32-14, 千葉, 2015 年 5 月 24 日.

② 口頭発表 (国内会議 23 件、国際会議 53 件)

- 1) Nakatani, M., M. Naoi, Y. Yabe, H. Ogasawara, and JAGUARS, Acoustic Emission Measurements in the Vicinity of a M2 Earthquake Rupture in a Deep Gold Mine in South Africa, French-Japanese International Workshop on Earthquake Source, Paris, 5 October 2009.
- 2) Ogasawara, H., R.J. Durrheim, M. Nakatani, Y. Yabe, A. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, H. Moriya, T. Satoh, and SATREPS, A Japanese-South African Collaboration for Observational Study to Mitigate Seismic Risks in Mines, 日本地震学会秋季大会予稿集, A31-01, 京都, 2009 年 10 月 23 日.

- 3) Naoi, M., M. Nakatani, G. Kwiatek, K. Plenkers, Y. Yabe, and JAGUARS group, Aftershock activity of a M2 EQ in a deep South African gold mine – spatial distribution and magnitude–frequency relation –, 日本地震学会秋季大会予稿集, A31-02, 京都, 2009 年 10 月 23 日.
- 4) 小笠原宏, R. Durrheim, 中谷正生, 矢部康男, A. Milev, A. Cichowicz, 川方裕則, 森谷祐一, 佐藤隆司, S. Murphy, A. Ward, G. Morema, M. Kataka, R. Vermeulen, G. van Aswegen, and Research Group of SATREPS, 鉱山での地震被害低減のための観測研究 – 日本と南アフリカの共同研究, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会予稿集, SSS020-13, 千葉, 2010 年 5 月 26 日.
- 5) Durrheim, R.J., H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, A.M. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, H. Moriya, and the 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, Santiago, Chile, 6-8 October 2010.
- 6) Ogasawara, H., M. Nakatani, Y. Yabe, H. Kawakata, and SATREPS Research Group, Fault instability monitoring at South African mines, ISS Mini Seminar at Western Levels, South Africa, 19 November 2010.
- 7) 小笠原宏, R. Durrheim, 中谷正生, 矢部康男, A. Milev, A. Cichowicz, 川方裕則, 村上理, 直井 誠, 森谷祐一, 佐藤隆司, SATREPS 研究グループ, 南アフリカ金鉱山半制御地震発生実験(2010 年), 鉱山での地震被害低減のための観測研究 – 日本と南アフリカの共同研究, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿集, SSS029-07, 千葉, 2011 年 5 月 23 日.
- 8) Ogasawara, H., Monitoring of Stress Build-up and Instability on Faults, Institute of Mine Seismology, 2011 Seminar on the future of monitoring seismic rock mass response to mining, Hermanus, South Africa, 23 May 2011.
- 9) Ogasawara, H., R. Durrheim, M. Nakatani, Y. Yabe, A. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, O. Murakami, M. Naoi, H. Moriya, T. Satoh, and SATREPS research group. Observational studies of earthquake preparation and generation to mitigate seismic risks in mines, IUGG, IUGG, Melbourne, 3 July 2011.
- 10) Ogasawara, H., Multidisciplinary monitoring of flooding induced seismicity in Japan and what we can do in South Africa, Council for Geoscience 4th Annual Seismology Workshop on Fluid-induced seismicity, Council for Geoscience, Pretoria, 16 August 2011.
- 11) 川方裕則, 吉光奈奈, 中谷正生, J. Philipp, 土井一生, 直井 誠, T. Ward, G. Morema, V. Visser, S. Khambule, T. Masakale, A. Milev, R. Durrheim, L. Ribeiro, M. Ward, 小笠原宏, M $\sim$ 2 の鉱山地震の発生が見込まれる断層を透過する弾性波のモニタリング – 南アフリカ Ezulwini 金鉱山, 日本地震学会 2011 年秋季大会講演予稿集, D21-08, 静岡, 2011 年 10 月 13 日.
- 12) 小笠原宏, G. Hofmann, D. Roberts, 中尾 茂, 加藤春實, 南アフリカ金鉱山の地震発生場における応力, 強度拘束の試み, 日本地震学会 2011 年秋季大会講演予稿集, C22-03, 静岡, 2011 年 10 月 13 日.
- 13) Durrheim, R.J., H. Ogasawara, M. Nakatani, A. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, Y. Yabe, O. Murakami, M. Naoi, H. Moriya, and T. Satoh, Observational Studies of Earthquake Preparation and Generation to Mitigate Seismic Risks in Mines, Abstracts S41D-058 presented at AGU 2011 Fall Meeting, San Francisco, December 2011.
- 14) 小笠原宏, 地震活動予測の現状と課題 – 南アフリカ金鉱山の誘発地震研究からのアプローチ –, 防災フロンティア研究センター第三回防災情報シンポジウム, 草津市, 2012 年 1 月 27 日.
- 15) Durrheim, RJ, Functional specifications for in-stope support based on seismic and rockburst observations in South African mines. The Sixth International Seminar on Deep

- and High Stress Mining, Perth, Australia, 28 March 2012.
- 16) Durrheim, R.J., H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, A.M. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, O. Murakami, M. Naoi, N. Yoshimitsu, and T. Kgarume, Establishment of SATREPS experimental sites in South African gold mines to monitor phenomena associated with earthquake nucleation and rupture, The Sixth International Seminar on Deep and High Stress Mining 2012, Perth, Australia, 30 March 2012.
 - 17) Ogasawara, H., H. Kato, G. Hofmann, P. de Bruin, A modified CCBO technique optimized for regular geological drilling procedures in South African gold mines, ACG Stress Measurement Workshop, Perth, Australia, 31 March 2012.
 - 18) Durrheim, R.J. and Riemer, K.L., 2012, History of Endeavours to Mitigate the Rockburst Risk in South African Mines, International Mining History Congress, Johannesburg, South Africa, 17–20 April 2012.
 - 19) Milev, A., R. Durrheim, M. Nakatani, Y. Yabe, H. Ogasawara, and M. Naoi, Seismic risk mitigation in deep level South African mines by state of the art underground monitoring – Joint South African and Japanese study, EGU General Assembly 2012, Vienna, Austria Center Vienna, Austria, 26 April 2012.
 - 20) Durrheim, R.J., Can rockbursts ever be prevented or predicted? Testing the hypotheses, Institute of Mine Seismology 22nd Seminar - The Future of Monitoring the Seismic Rock Mass Response to Mining, Stellenbosch, South Africa, 10 May 2012.
 - 21) Ogasawara, H., In-situ monitoring of rock mass response to mining at the pillars in South African gold mines, Institute of Mine Seismology 22nd Seminar - The Future of Monitoring the Seismic Rock Mass Response to Mining, Stellenbosch, South Africa, 11 May 2012.
 - 22) 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, pp. 169–179, Sun City, South Africa, 15 May 2012.
 - 23) 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, pp. 327–343, Sun City, South Africa, 16 May 2012.
 - 24) 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, pp. 436–450, Sun City, South Africa, 16 May 2012.
 - 25) 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, Sun City, South Africa, 16 May 2012.
 - 26) 直井誠, 中谷正生, J. Philipp, 堀内茂木, 大槻憲四郎, T. Kgarume, G. Morema, S. Khambule, T. Masakale, 宮川幸治, 渡邊篤志, 森谷祐一, 村上理, 矢部康男, 川方裕則, 吉光奈奈, 小笠原宏, 南アフリカ金鉱山地下 1km 深における多点 AE 観測と 2 つの M0 級地震に関連する AE 活動, 2012 年日本地球惑星科学連合大会, SSS28-07, 幕張メッセ, 千葉, 2012 年 5 月 24 日.
 - 27) 小笠原宏, 南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験, 地震及び火山噴火研究の将来構想シンポジウム, 東京大学鉄門記念講堂, 東京, 2012 年 7 月 5 日.

- 28) Fai, Y.W., A. R.J. Durrheim, and A. Every, A guided elastic waves in a periodically joined interface in a rock mass, Eighth South African Conference on Computational and Applied Mechanics (SACAM2012), Johannesburg, South Africa, 3 September 2012.
- 29) 直井誠, 中谷正生, J. Philipp, 堀内茂木, 大槻憲四郎, T. Kgarume, G. Morema, S. Khambule, T. Masakale, 宮川幸治, 渡邊篤志, 森谷祐一, 村上理, 矢部康男, 川方裕則, 吉光奈奈, T. Ward, R. Durrheim, 小笠原宏, 南アフリカ金鉱山地下1km 深で観察された, クラックが準静的に 20m まで成長したことを示唆する AE 活動, 日本地震学会 2012 年秋季大会講演予稿集, A21-12, 函館市民会館, 2012 年 10 月 18 日.
- 30) 小笠原宏, 加藤春實, 地震発生場においてより多くの応力測定を実現するための南アフリカ金鉱山での取り組み, 日本地震学会 2012 年秋季大会講演予稿集, A32-03, 函館市民会館, 2012 年 10 月 19 日.
- 31) 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, 21th Int. Acoustic Emission Symp., Jap. Soc. for Non-Destructive Inspection, Okinawa, 30 November 2012.
- 32) 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, 沖縄, 2013 年 1 月 9 日.
- 33) Milev, A., P.E. Share, R. Durrheim, M. Naoi, M. Nakatani, Y. Yabe, and H. Ogasawara, Joint interpretation of high-precision tilt data and mining induced seismic events recorded underground in deep level gold mine in South Africa, EGU2013-633, Vienna, Austria, 12 April 2013.
- 34) Durrheim, R.J., 2013. The risks to the public posed by large seismic events in the gold mining districts of South Africa, South African Institute for Engineering and Environmental Geologists, Midrand, 24 April 2013.
- 35) Ogasawara, H., Scientific and technological cooperation to mitigate earthquake risk in SA gold mines, Japan Sustainable Mining, Investment and Technology business forum 2013, Tokyo, 17 May 2013.
- 36) 直井誠, 中谷正生, 大槻憲四郎, 矢部康男, T. Kgarume, G. Morema, J. Philipp, S. Khambule, T. Masakale, L. Ribeiro, 森谷祐一, 村上理, 堀内茂木, 川方裕則, 吉光奈奈, 宮川幸治, 渡邊篤志, T. Ward, R. Durrheim, 小笠原宏, 南アフリカ金鉱山地下 1km 深で観察された既存弱面に密集する高 b 値の微小破壊, 日本地球惑星科学連合大会, SSS28-16, 千葉, 2013 年 5 月 23 日.
- 37) 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, 21 August 2013.
- 38) 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, 21 August 2013.
- 39) 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, pp.614-623, 21 August 2013.
- 40) 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, 21 August 2013.
- 41) 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, pp.51–60, 2 September 2013.
 - 42) 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, pp.387–393, 2 September 2013.
 - 43) 川方裕則, 吉光奈奈, 中谷正生, J. Philipp, 土井一生, 直井 誠, 村上 理, A. Ward, G. Morema, V. Visser, S. Khambule, T. Masakale, A. Milev, R. Durrheim, L. Ribeiro, Mike Ward, 小笠原宏, 2013, 断層透過弾性波のモニタリングー南アフリカ Cooke4 金鉱山, 日本地震学会 2013 年秋季大会講演予稿集, A11-08, 函館市民会館, 2013 年 10 月 7 日.
 - 44) 直井 誠, 中谷正生, 大槻憲四郎, T. Kgarume, J. Philipp, T. Masakale, L. Ribeiro, 森谷祐一, 村上 理, 矢部康男, 川方裕則, A. Ward, R. Durrheim, 小笠原宏, 2013, 南アフリカ金鉱山地下 1km 深において, 載荷される断層上で観察された $-5.1 \leq Mw \leq -3.6$ の繰り返し地震, 日本地震学会 2013 年秋季大会講演予稿集, A11-08, 函館市民会館, 2013 年 10 月 7 日.
 - 45) 矢部康男, 小笠原宏, 佐藤隆司, 中谷正生, 直井 誠, R. Durrheim, H. Yilmaz, G. Hofmann, D. Roberts, 2013, 南アフリカ大深度金鉱山における $Mw2.2$ の地震の震源域掘削に基づく応力推定, 日本地震学会 2013 年秋季大会講演予稿集, D31-09, 函館市民会館, 2013 年 10 月 9 日.
 - 46) Durrheim, R., H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, A.M. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, H. Moriya, and the SATREPS research Group, Observational studies in South African mines to mitigate seismic risks: a mid-project progress report, Extended Abstract, 13th SAGA Biennial Conference & Exhibition, Kruger National Park, South Africa, 9 October 2013.
 - 47) Kgarume, T, A. Milev, M. Nakatani, M. Naoi, Y. Yabe, J. Phillip, R.J. Durrheim, H. Ogasawara, T. Ward, Effect of face fracturing on shear waves CODA quality factor estimated from acoustic emission events, Extended Abstract, 13th SAGA Biennial Conference & Exhibition, Kruger National Park, South Africa, 9 October 2013.
 - 48) Milev, A., P. Share, R. Durrheim, M. Naoi, M. Nakatani, Y. Yabe, H. Ogasawara, Coseismic And Aseismic Deformations Associated With Mining-induced Seismic Events Located In Deep Level Mines In South Africa, Extended Abstract, 13th SAGA Biennial Conference & Exhibition, Kruger National Park, South Africa, 9 October 2013.
 - 49) Durrheim, R.J., H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, A.M. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, H. Moriya, M. Naoi, T. Kgarume, O Murakami and the SATREPS Research Group, Observational studies in South African mines to mitigate seismic risks: implication for mine safety, MineSafe 2013, Johannesburg, 23 October 2013.
 - 50) Durrheim, R.J., H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, A.M. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, H. Moriya, M. Naoi, T. Kgarume, O Murakami and the SATREPS Research Group, Observational studies in South African mines to mitigate seismic risks: advances in rock engineering knowledge and technology, South African National Institute of Rock Engineering, 2013 Symposium, 7–8 November 2013, Plokwane, South Africa, 7

November 2013.

- 51) Durrheim, R., H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, A. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, H. Moriya, M. Naoi, T. Kgarume, O. Murakami, and S. Mngadi, Observational studies in South African mines to mitigate seismic risks: implications for mine safety and tectonic earthquakes, EGU2014-13713, Vienna, Austria, 29 April 2014.
- 52) 直井誠, 森谷 祐一, 中谷 正生, 村上 理, Thabang Kgarume, Thabang Masakale, Luiz Ribeiro, 矢部 康男, 川方 裕則, Anthony Ward, Ray Durrheim, 小笠原 宏, 採掘空洞前方の岩盤中での大規模亀裂の形成を示唆する微小破壊の震源分布, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, SIT38-02, 横浜, 2014 年 4 月 30 日。
- 53) 大久保慎人, 小笠原宏, 中尾茂, 村上理, 石井紘, 2011 年東北地方太平洋沖地震の表面波による南アフリカ金鉱山における断層の挙動, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, S-SS32-01, 横浜, 2014 年 5 月 1 日。
- 54) 小笠原宏, 加藤春實, Hofmann Gerhard, Roberts Dave, Clements Trevor, Piper Phil, 矢部康男, 中谷正生, 直井誠, 南アフリカ金鉱山の震源の応力場と強度の研究の到達点, 課題, 将来, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, SCG65-08, 横浜, 2014 年 5 月 2 日。
- 55) Horiuchi, S., M. Naoi, M. Nakatani, and H. Ogasawara, Development of automatic hypocenter location with accuracy compared to manual picking, Institute of Mine Seismology, the 24th Seminar, Stellenbosch, South Africa, 5 May 2014.
- 56) Naoi, M., M. Nakatani, H. Moriya, K. Otsuki, Y. Yabe, O. Murakami, H. Kawakata, H. Ogasawara, S. Horiuchi, T. Kgarume, R. Durrheim, S. Khambule, T. Masakale, L. Ribeiro, A. Ward, and J. Philipp, Acoustic emissions down to magnitude $M_w = -5$ delineating damages around mining stopes and pre-existing faults: spatial distribution, temporal change and source parameters, Institute of Mine Seismology, the 24th Seminar, Stellenbosch, South Africa, 5 May 2014.
- 57) Kawakata, H., N. Yoshimitsu, M. Nakatani, O. Murakami, Y. Sasaki, J. Philipp, I. Doi, M. Naoi, A. Ward, L. Ribeiro, V. Visser, T. Masakale, S. Khambule, T. Kgarume, A. Milev, R. Durrheim, and H. Ogasawara, Monitoring seismogenic regions of mines through acoustic properties of active transmitted waves and seismic stress parameters, Institute of Mine Seismology, the 24th Seminar, Stellenbosch, South Africa, 5 May 2014.
- 58) Cichowicz, A., Estimation of spectral parameters of mining related events by a surface network installed in the mining region, the 24th Seminar, Stellenbosch, South Africa, 5 May 2014.
- 59) Ogasawara, H. and R. Durrheim, Observational Studies to Mitigate Seismic Risks in South African Mines, Institute of Mine Seismology, the 24th Seminar, Stellenbosch, South Africa, 6 May 2014.
- 60) Yabe, Y., In-situ stress estimation from borehole breakout and core diskings, institute of mine seismology, the 24th Seminar, Stellenbosch, South Africa, 6 May 2014.
- 61) Ogasawara, H., T. Katsura, G. Hofmann, Y. Yabe, H. Ishii, D. Roberts, S. Nakao, M. Okubo, A.K. Ward, and H. Kawakata, In situ monitoring of rock mass response to mining in South African gold mines using the Ishii strainmeters, South African Rock Engineering Symposium 2014, Cradle of Humankind, South Africa, 12 May 2014.
- 62) Durrheim, R.J., H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, A.M. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, H. Moriya, M. Naoi, T. Kgarume, O. Murakami, A. v.z. Brink, G. Ferreira, G. Henry, R. Teleka, J. Kuijpers, S. Mngadi, A. Ward, and J. Wienand, Observational studies in South African gold mines to mitigate seismic risks: a mid-term review of the 5-year project SATREPS, Cradle of Humankind, South Africa, 13 May 2014.
- 63) 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,

- Cradle of Humankind, South Africa, 14 May 2014.
- 64) Ogasawara, H., H. Kato, G. Hofmann, D. Roberts, P. Piper, T. Clements, A.K. Ward, Y. Yabe, H. Yilmaz, R.J. Durrheim, 2014, 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, on CD-ROM, paper no. 14-7438, Minneapolis, USA, 2 June 2014.
 - 65) Ogasawara, H., H. Kato, G. Hofmann, C. Stander, P. Piper, T. Ward, D. Roberts, T. Clements, and Y. Yabe, In-situ stress measurements and calibration of stress modeling to mitigate seismic hazard at deep-levels South African gold mines, Int. Symp. Geodesy Earthq. Natural Hazards, Matsushima, 26 July 2014.
 - 66) Ogasawara, H., T. Katsura, G. Hofmann, Y. Yabe, M. Nakatani, M. Naoi, H. Kawakata, And Hiroshi Ishii, In-situ monitoring of strain change in seismogenic volumes to calibrate fault loading at deep-levels South African gold mines to mitigate seismic hazard, Int. Symp. Geodesy Earthq. Natural Hazards, Matsushima, 26 July 2014.
 - 67) Durrheim, R. J., 2014, Keynote address: Has research and development contributed to improvements in safety and profitability of deep South African mines?, 2014, Proceedings of 7th International Congress on Deep and High Stress Mining, M. Hudyma and Y. Potvin (eds), Australian Centre for Geomechanics, pp. 23-40, Sudbury, Canada, 16-18 September 2014.
 - 68) Ogasawara, H., M. Nakatani, R.J. Durrheim, M. Naoi, Y. Yabe, H. Moriya, G.F. Hofmann, C. Stander, D.P. Roberts, P. de Bruin, J. Oelofse, H. Kato, A. Cichowicz, D. Birch, D. Ngobeni, A. Milev, T. Kgarume, T. Satoh, S. Horiuchi, H. Kawakata, O. Murakami, N. Yoshimitsu, A.K. Ward, J. Wienand, P. Lenegan, H. Yilmaz, S. Mngadi, P.S. Piper, T.N. Clements, S. Nakao, M. Okubo, H. Ishii, A.V. Visser, 2014, Observational studies of the rock mass response to mining in highly stressed gold mines in South Africa, Proceedings of 7th International Congress on Deep and High Stress Mining, M. Hudyma and Y. Potvin (eds), Australian Centre for Geomechanics, 123-137, Sudbury, Canada, 16-18 September 2014.
 - 69) 川方裕則, 吉光奈奈, 中谷正生, J. Philipp, 直井誠, A. Ward, 土井一生, T. Masakale, R. Durrheim, L. Ribeiro, S. Morema, 小笠原宏, 断層透過波モニタリングで観測された透過弾性波の変化ー南アフリカ Ezulwini 鉱山, 日本地震学会, A32-08, 新潟, 2014 年 11 月 26 日。
 - 70) 堀内茂木, 堀内優子, 飯尾能久, 澤田義博, 関根秀太郎, 中山貴史, 平原聡, 河野俊夫, 長谷川昭, 小原一成, 加藤愛太郎, 中野優, 高橋成実, 小笠原宏, D. Birch, A. Cichowicz, A. Pinar, M. Comoglu, 人間以上に高精度の地震波自動読み取り システムの開発(その7)ー理論エンベロープ波形と観測波形との比較による解析結果の評価ー, 日本地震学会, C32-04, 新潟, 2014 年 11 月 26 日。
 - 71) Ogasawara, H., A. Cichowicz, M. Okubo, R. Durrheim, and the SATREPS research team, Stress and strength at seismic event hypocenters in deep South African gold mines and the M5.5 Orkney Earthquake, AfricaArray Workshop, Johannesburg, 20 January 2015.
 - 72) Milev, A., P.E. Share, M. Naoi, R. Durrheim, Y. Yabe, H. Ogasawara, and M. Nakatani, Evidence of post-seismic creep type deformations derived by tilt and acoustic emission monitoring of mining induced seismic events, EGU2015-12371, Vienna, Austria, 13 April 2015.
 - 73) Ogasawara, H., Overview of the Japanese - South African collaboration in mine seismological research since 1992, 25th Mine Seismology Seminar, Stellenbosch, South Africa, 20 April 2015.
 - 74) Okubo, M., Cichowicz, A. D. Birch, H. Ogasawara, O. Murakami, S. Horiuchi, Source

Process of the 2014 ML5.5 Orkney earthquake, South Africa, JpGU 2015 Meeting, SSS30-27, Chiba, 26 May 2015.

- 75) Durrheim, R., A. Milev, T. Kgarume, V. Brink, A. Cichowicz, H. Ogasawara, Mitigation of the rockburst risk in deep South African gold mines, JpGU 2015 Meeting, SSS30-28, Chiba, 26 May 2015.
- 76) Cichowicz, A., D. Birch, H. Miyake, S. Horiuchi, H. Ogasawara, R. Durrheim, CGS Technical Team, and the SATREPS Research Group, Routine Estimation of Source Parameters of Mining-Related Earthquakes, JpGU 2015 Meeting, SSS30-29, Chiba, 26 May 2015.

③ ポスター発表 (国内会議 14 件, 国際会議 13 件)

- 1) Naoi, M., M. Nakatani, G. Kwiatak, K. Plenkers, and Y. Yabe, Aftershock activity of a M2 earthquake in a deep South African gold mine - spatial distribution and magnitude-frequency relation - AGU Fall Meeting 2009, San Francisco, USA, Dec. 15, 2009.
- 2) 渡辺貴善, 直井誠, 矢部康男, 中谷正生, JAGUARS, 南アフリカ大深度金鉱山で発生した地震(M2.1)に先行する AE の震源再決定(2), 日本地震学会秋季大会予稿集, P1-65, 京都, 2009 年 10 月 21 日.
- 3) 桂泰史, 小笠原宏, 安武剛太, 川方裕則, 山本覚仁, 中谷正生, 直井誠, 矢部康男, 石井紘, E. Pinder, G. Morema, JAGUARS, 歪計から 20m で発生した M2 の断層滑り方向延長部で続発した M~2 地震に関連する歪変化 - 南アフリカ Mponeng 金鉱山, 日本地震学会秋季大会予稿集, P1-66, 京都, 2009 年 10 月 21 日.
- 4) 和田直也, 中谷正生, 矢部康男, 直井誠, 宮川幸治, 小笠原宏, 川方裕則, 安武剛太, 吉光奈奈, 三宅弘恵, 井出 哲, 五十嵐俊博, 南アフリカ金鉱山震源域における高周波数サンプリングでの至近距離 3D アレー観測, 日本地震学会秋季大会予稿集, P3-45, 京都, 2009 年 10 月 21 日.
- 5) 和田直也, 小笠原宏, 川方裕則, 中谷正生, 矢部康男, 直井 誠, 宮川幸治, 安武剛太, 吉光奈奈, 三宅弘恵, 井出 哲, 五十嵐俊博, G. Morema, E. Pinder, 48kHz サンプリング距離 200m 以内に観測された $-3 < M < 0$ の地震の応力降下量, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会予稿集, SSS011-P05, 千葉, 2010 年 5 月 26 日.
- 6) 桂 泰史, 小笠原宏, 川方裕則, 中谷正生, 直井誠, 矢部康男, 安武剛太, 山本覚仁, 石井紘, E. Pinder, G. Morema, JAGUARS, 2 台の歪計から約 100m で続発した Mw ~2 の震源メカニズムと周辺領域の長期的な応力変化 - 南アフリカ Mponeng 金鉱山, 日本地震学会 2010 年秋季大会講演予稿集, P3-33, 広島, 2010 年 10 月 29 日.
- 7) 和田直也, 川方裕則, 村上 理, 小笠原宏, 土井一生, 中谷正生, 矢部康男, 直井誠, 宮川幸治, 吉光奈奈, 三宅弘恵, 井出 哲, 五十嵐俊博, G. Morema, E. Pinder, コーダ波スペクトル比法による極微小地震 ($-3 < M < -1$) のコーナー周波数の推定, 日本地震学会 2010 年秋季大会講演予稿集, P3-34, 広島, 2010 年 10 月 29 日.
- 8) 吉光奈奈, 川方裕則, 中谷正生, J. Philipp, 直井 誠, 土井一生, T. Ward, V. Visser, G. Morema, S. Khambule, T. Masakale, A. Milev, R. J. Durrheim, L. Ribeiro, M. Ward, 小笠原宏, 南アフリカ金鉱山の断層近傍における地震波干渉法により推定したグリーン関数と透過弾性波記録の比較, 日本地震学会 2010 年秋季大会講演予稿集, P2-57, 静岡, 2011 年 10 月 13 日.
- 9) Kawakata, H., N. Yoshimitsu, M. Nakatani, J. Philipp, I. Doi, M. Naoi, T. Ward, V. Visser, G. Morema, S. Khambule, T. Masakale, A. Milev, R. J. Durrheim, L. Ribeiro, M. Ward, and H. Ogasawara, Monitoring transmitted waves across a fault with a high potential for mining induced earthquakes - the Ezulwini gold mine in

- South Africa, Abstracts S31C-2257, 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, 7 December 2011.
- 10) Wada, N., H. Kawakata, O. Murakami, I. Doi, N. Yoshimitsu, M. Nakatani, Y. Yabe, M. Naoi, K. Miyakawa, H. Miyake, S. Ide, T. Igarashi, G. Morema, E. Pinder, and H. Ogasawara, Scaling relationship between corner frequencies and seismic moments of ultra micro earthquakes estimated with coda-wave spectral ratio -the Mponeng mine in South Africa, Abstracts S41B-2190, 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, 8 December 2011.
 - 11) Naoi, M., M. Nakatani, J. Philipp, S. Horiuchi, K. Otsuki, T. Kgarume, G. Morema, S. Khambule, T. Masakale, K. Miyakawa, A. Watanabe, H. Moriya, O. Murakami, Y. Yabe, H. Kawakata, N. Yoshimitsu, T. Ward, and H. Ogasawara, Magnitude-frequency distributions of AEs associated with the mining front and pre-existing faults-cases from SATREPS array operating in a South African gold mine, 36, ECGS Workshop 2012, Alvisse Parc Hotel, Luxembourg, October 3-5, 2012.
 - 12) 直井誠, 中谷正生, J. Philipp, 堀内茂木, 大槻憲四郎, T. Kgarume, G. Morema, S. Khambule, T. Masakale, 宮川幸治, 渡邊篤志, 森谷祐一, 村上理, 矢部康男, 川方裕則, 吉光奈奈, T. Ward, R. Durrheim, 小笠原宏, 南アフリカ金鉱山における微小破壊 ($-3.7 \leq M_w \leq 1.3$) の規模別頻度分布と採掘発破前後の b 値の安定性, 日本地震学会 2012 年秋季大会講演予稿集, P1-50, 函館市民会館, 2012 年 10 月 17 日.
 - 13) 今川祥太, 川方裕則, 土井一生, 吉光奈奈, 村上理, 中谷正生, 直井誠, J. Philipp, T. Ward, G. Morema, V. Visser, S. Khambule, T. Masakale, A. Milev, R. Durrheim, L. Ribeiro, M. Ward, 小笠原宏, コーダ波を用いた坑道検出の試み-南アフリカ Ezulwini 金鉱山観測サイト-, 日本地震学会 2012 年秋季大会講演予稿集, P1-16, 函館市民会館, 2012 年 10 月 17 日.
 - 14) 小笠原宏, G. Hofmann, 加藤春實, C. Stander, G. Morema, T. Clements, P. Piper, 南アフリカ金鉱山 M1.5 地震極近傍の応力測定, 日本地球惑星科学連合大会, SSS28-P20, 千葉, 2013 年 5 月 23 日.
 - 15) 村上理, 川方裕則, 吉光奈奈, 中谷正生, 直井誠, J. Philipp, T. Masakale, T. Kgarume, L. Ribeiro, 森谷祐一, 矢部康男, A. Ward, R. Durrheim, 小笠原宏, 能動震源を用いた南アフリカ金鉱山微小破壊観測網のセンサー特性の時間変化の推定, 日本地震学会 2013 年秋季大会講演予稿集, P1-04, 神奈川県民ホール, 横浜, 2013 年 10 月 7 日.
 - 16) 今川祥太, 川方裕則, 土井一生, 吉光奈奈, 村上理, 中谷正生, 直井誠, J. Philipp, A. Ward, G. Morema, V. Visser, S. Khambule, T. Masakale, A. Milev, R. Durrheim, L. Ribeiro, M. Ward, 小笠原宏, 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, 日本地震学会 2013 年秋季大会講演予稿集, P1-07, 神奈川県民ホール, 横浜, 2013 年 10 月 7 日.
 - 17) Milev, A., R. Durrheim, and H. Ogasawara, Rock mass response to strong ground motion generated by mining induced seismic events and blasting observed at the surface of the excavations in deep level gold mines in South Africa, EGU2014-3817, Vienna, Austria, 29 April 2014.
 - 18) 小笠原宏, 桂泰史, G. Hofmann, 中谷正生, 矢部康男, 石井紘, 中尾茂, 大久保慎人, A. Ward, J. Wienand, P. Leneghan, 川方裕則, 村上理, 内浦大海, 南アフリカ金鉱山での地震発生場での歪連続観測に基づく応力時間発展の理解, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, SCG65-P01, 横浜, 2014 年 5 月 2 日.
 - 19) Okubo, M., Ogasawara, H., Nakao, S., Murakami, O. and Ishii, H., Dynamic Strain in a South African Gold Mine by the 2011 Tohoku Earthquake, Int. Symp. Geodesy

- Earthq. Natural Hazards, Matsushima, 23 July 2014.
- 20) Yabe, Y., H. Ogasawara, T. Satoh, M. Nakatani, M. Naoi, R. Durrheim, H. Yilmaz, G. Hofmann, D. Robert, Stress State around a Source Fault of Mw2.2 Earthquake in a Deep Gold Mine in South Africa, Int. Symp. Geodesy Earthq. Natural Hazards, Matsushima, 23 July 2014.
 - 21) 村上理, 川方裕則, 佐々木裕哉, 直井誠, 中谷正生, J. Philipp, T. Masakale, T. Kgarume, L. Ribeiro, 矢部康男, 森谷祐一, A. Ward, R. Durrheim, 小笠原宏, コーダ波スペクトル比法を用いた南アフリカ Ezulwini 鉱山採掘前線における微小破壊の応力降下量推定, 日本地震学会 2014 年秋季大会講演予稿集, S08-P16.
 - 22) Kawakata, H., N. Yoshimitsu, M. Nakatani, J. Philipp, M. Naoi, A. Ward, I. Doi, T. Masakale, R.J. Durrheim, L. Ribeiro, S. Morema, H. Ogasawara, Active monitoring of a fault with seismogenic potential using an ultrasonic transmission at 1 km deep in the Ezulwini Mine, South Africa, AGU 2014 Fall Meeting, T11D-4597, 15 December 2014.
 - 23) Yabe, Y., M. Nakatani, M. Naoi, J. Philipp, C. Janssen, H. Kawakata, G.H. Dresen, H. Ogasawara, Nucleation process of an M2 earthquake in a deep gold mine in South Africa inferred from on-fault foreshock activity, AGU 2014 Fall Meeting, S23B-4493, 16 December 2014.
 - 24) Ogasawara, H., G. Hofmann, H. Kato, C. Stander, T. Clements, P. Piper, D. Roberts, Y. Yabe, M. Naoi, M. Nakatani, The stress and strength at hypocenters at Tau Tona and Mponeng gold mines, South Africa, AGU 2014 Fall Meeting, T33A-4643, 17 December 2014.
 - 25) Milev, A.M., P.E. Share, R.J. Durrheim, M. Naoi, Y. Yabe, H. Ogasawara, M. Nakatani, Characterization of Mining Induced Seismic Events Around Deep Level Mining Excavations in South Africa Using High-Precision Underground Monitoring, AGU 2014 Fall Meeting, S51A-4382, 19 December 2014.
 - 26) Ogasawara, H., D. Birch, A. Cichowicz, S. Horiuchi, M. Okubo, O. Murakami, G. Hofmann, L. Scheepers, H. Kato, Y. Yabe, M. Nakatani, M. Naoi, R. Durrheim, and SATREPS research group, Stress and strength at seismic event hypocenters in deep South African gold mines and the M5.5 Orkney Earthquake, AGIS Induced Seismicity Workshop, Davos, 11-13 March 2015.
 - 27) Ogasawara, H., R. Durrheim, and A. Cichowicz, Challenges in Science and Technology and Human Resource Development, Mitigation of Seismic Risks in South African Mines Deepest in the World, the 4th Annual Global Research Council, Tokyo, Japan, 27 May 2015.

(5) 報道

① マスコミ(新聞, TV等)報道

2009 年 10 月 31 日(土), 「南アとの共同予知研究」, 読売新聞朝刊。
 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。
 2010 年 4 月 2 日, Mining Weekly.com, "South Africa, Japan collaborate on seismic event studies", <http://www.miningweekly.com/article/south-africa-japan-collaborate-on-seismic-events-studies-2010-04-02>
 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ー地下 3000 メートル超震源断層に迫る」
 2011 年 2 月 18 日, Mining Weekly.com, "South African researchers agree that technology can alleviate seismic effects" <http://www.miningweekly.com/print-version/south->

african-researchers-agree-that-seismic-events-are-unpredictable-but-technology-can-mitigate-effects-2011-02-18

2011 年 4 月 1 日, Mining Weekly.com, “Japan, SA research project to mitigate seismic risks in local mining industry”, <http://www.miningweekly.com/article/new-research-project-to-assist-in-seismic-risk-mitigation-2011-03-14>

2011 年 7 月 8 日, Mining Weekly.com, “SA mines continue to assist seismic research”, <http://www.miningweekly.com/article/sa-mines-continue-assisting-seismic-research-2011-07-08>

2012 年 3 月 5 日, China Business News, “South African gold mines continue to assist seismic research”, <http://cnbusinessnews.com/south-african-gold-mines-continue-to-assist-seismic-research/#axzz2HB0XefOo>

2013 年 8 月 26 日, 朝日新聞, 科学面, 「鉦山地震 震源直近, 動き探る」

2014 年 5 月, Ferreira, K. Seismicity research into deep impacts. Mining Mirror, vol. 26, no.11, p.29-30.

2014 年 9 月 26 日, Campbell, K. Japan working with South Africa to reduce risks in deep-level mines. Mining Weekly.

② その他

- 1) 立命館大学 Headline News, 「小笠原宏, 理工学部教授 南アフリカ共和国と共同で, 地震予知のための観測プロジェクトを開始しました。」, http://www.ritsumei.jp/news/detail_j/topics/6508/year/2010, 2010 年 8 月 6 日。
- 2) 立命館大学校友会報 りつめい, 「小笠原宏, 理工学部教授 南アフリカ共和国と共同で, 地震予知のための観測計画を開始」, <http://alumni.ritsumei.jp/report/pdf/242.pdf>, 2010 年 9 月。
- 4) “South African mines used as test beds to help understand earthquakes” Council for Scientific and Industrial Research Annual Report 2010/11, p.20.
http://www.csir.co.za/publications/pdfs/annualreport_2012/CSIR%20ANNUAL%20REPORT%202011-12%20FINAL.pdf
- 5) SATREPS サイエンスの力で「地球規模課題」を解決する新しい国際協力プログラムが進められています。日経サイエンス 2013 年 9 月号。
- 6) Department of Science and Technology and Embassy of Japan, Overcoming seismic risk for sustainable, safe South African deep gold reserves, in “South Africa - Japan Cooperation in Science and Technology (ISBN: 978-0-620-63188-4)”, pp.33-37, 2014.
- 7) J-DESC, 日本主導の ICDP プロジェクト, ICDP 国際陸上科学掘削計画パンフレット, 2015.

(7)成果展開事例

①実用化に向けての展開

- ・ 震源で予想できるレベルの岩盤応力でも確実に短時間に測定できる技術が南アにはなかった。これが可能な日本の方法を, 世界最大級の鉦山会社アングロゴールド・アシャンティ社に技術移転し, これらは自力運用され始めた。南アの土木コンサル会社グラウンドワーク社にも技術移転し, 自力運用され始めている。グラウンドワーク社を通じて南ア最大の金鉦山会社(深部延長のための最深部の測定、高応力の残柱)や, 白金鉦山会社(2015 年 8 月現在2つ)で測定が行われている。
- ・ 既存の鉦山の坑内地震観測網では描き出すことができない, 弱面を検知できる微小破壊観測システムが, 鉦山の自立運用できる形でアングロゴールド・アシャンティに導入された。シバニエ・ゴールド社の相談にも乗っている。

- ・ P 波と S 波の到来時刻を高精度で自動的に読み取るアルゴリズムが、Council for Geoscience の南ア国立地震観測網で用いられ始めた。南アの鉱山地区の地震観測史上最大の地震が 2014 年 8 月 5 日に発生した。当時、一人の波形処理担当者が手動処理するシステムしか稼働しておらず多数の余震を処理するのに何十日も要していたが、このアルゴリズムを導入することによって短時間で自動処理できるようになった。
- ・ 山口ら(2010)が開発した地殻変動データベースシステムを搭載した小型 PC を、南アフリカの最も大きな3つの鉱山会社に設置し、各社の LAN 内で運用を始めた。準リアルタイム監視、解析がより容易にできるようになった。

② 社会実装(研究成果の社会還元)への展開活動

- ・ 2013 年以降、鉱山技術者や労働者も対象にした SATREPS セミナーを毎年南アフリカで開催し、成果を共有した。
- ・ 2013 年に東京で開催された、J-SUMIT(アフリカ資源ビジネスフォーラム;約 80 の講演、59 の展示、主催者発表で参加者約 2000 名)でブース展示と講演を行い、アフリカ大陸の他国や日本に成果を発信した。南ア資源相と日本の経産相の懇談の場では進捗のよいプロジェクトとして紹介された。2015 年 5 月には J-SUMIT2(アフリカ 16 カ国の資源大臣などの代表者、主催者発表で 32 カ国、30 企業、2000 名以上が参加)が開催され、ブース展示を行った。終了後、チリ・コデルコ銅山の副総裁から JOGMEC を通じて間接的な打診があった。J-SUMIT2ではまた、Witwatersrand 大鉱山学部長の講演のなかで本プロジェクトの成果と意義が紹介された。
- ・ 世界各国の諸学会、研究集会で成果を報告。招待講演を行った国は、日本、カナダ、スイス、スウェーデン、インド、中国、オーストラリア、チリなど。
- ・ 2014 年に、南アフリカ岩盤工学協会から、SATREPS の成功を祝福し、SATREPS の延長を求める公式書簡を得た。
- ・ 2015 年 6 月 12 日 Mine Health and Safety Council が主催する「2008 年鉱山保健安全大統領監査の第一章の提言に関わる南ア国立地震観測網と鉱山会社地震観測データベースとの統合」に関するワークショップで SATREPS の成果を Council for Geoscience と共に発表した。
- ・ SATREPS の成果をまとめた、南アフリカ鉱山局に提言書を提出する(予定)。
- ・ J-SUMIT2 を通じ、伊藤忠商事がプラチナ鉱山開発情報と、本鉱山プロジェクトの成果を共有することができ、2015 年 7 月 27 日に在南ア大使館において、日本の学生の南ア実習の進め方について同社と懇談を行い、同年9月に実習を行った。

§ 6 プロジェクト期間中の主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

① ワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等

年月日	名称	場所 (開催国)	参加人数 (相手国参加者数)	概要
2009/6/09	6/10 キックオフ 会議事前打合せ(非公開)	成田エアポート レストハウス会議 室	6(2)	6/10 のキックオフ会議の議題等打ち合わせ、観測計画に関する情報交換。
2009/6/10	「鉱山での地震 被害低減のための 研究観測」キ ックオフ会議	東京大学地震 研究所	30	JST-JICA 事業に関する説明、計画サイトの説明、新しく開発した応力計の紹介など。

2009/6/15-19	研究打合せ(非公開)	ISS International社、CSIR、CGS、ドリーフオンテイン鉱山、モアプ・コツオン鉱山(南ア)	延 60 名・回以上	研究計画内容の議論と観測候補地現場視察。
2009/6/24	南ア鉱山地震軽減科学技術協力のマスタープランに関する打合せ(非公開)	JICA 新宿本部	10	小笠原より 6/13-22 南ア渡航報告、JICA マスタープランについて議論、最終原案を完成させた。
2009/7/4-6	南ア鉱山におけるAE観測に関する研究打合せ(非公開)	東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知センター	7(1)	GMuG社とAEセンサーに関する情報交換、観測網設計の具体的手順の確認、新たな発振子の開発依頼の必要際の確認など。
2009/7/27	地球規模課題事業の今後の予定に関する打合せ(非公開)	東京大学地震研究所	4	矢部の南ア渡航報告、研究うちあわせ。
2009/7/28	地球規模課題事業の今後の予定に関する打合せ(非公開)	JICA 新宿本部	5	JST-JICA 事業で得られ他国でも普及すると期待される技術・成果、VISAについてなど。
2009/8/10-21	研究打合せ(非公開)	ムポネン鉱山、モアプ・コツオン鉱山、ドリーフオンテイン鉱山、イズルウィニ鉱山(南ア)	延 40 人・回以上	研究計画内容の議論と観測候補地現場視察。
2009/8/29-9/2	8/31 ワークショップ事前・事後検討会議(非公開)	東京大学地震研究所	8(3)	8/31 ワークショップ事前準備会議、事後フォローアップ会議、予算検討会議。
2009/8/31	南ア3氏を交えた国際ワークショップ	東京大学地震研究所	20(3)	JICAと南ア調印前の研究の進捗状況、地震観測網に関する講演、参加者の研究発表。
2009/9/4	JST-JICA 南ア3氏との研究打ち合わせ会議(非公開)	JICA 新宿本部	12(3)	両国研究者が合意した研究概要の紹介と質問討議。詳細計画策定調査中のカウンターパート研究者の役割の確認。

2009/9/16	詳細計画策定 調査対処方針 会議(非公開)	JICA 新宿本部	8	小笠原よりプロジェクト概要説明が行われたあと、配布した対処方針案に沿って説明を行ない、その後質疑応答を行なった。
2009/10/23-24	南アワークショップ(非公開)	立命館大学	11(2)	南ア金鉱山における半制御地震発生実験に関する研究発表、議論と検討を行なった。
2009/11/7-15	研究打合せ(非公開)	観測候補各鉱山(南ア)	延 40 名・回以上	ドリリング計画について議論。
2009/12/27-28	年末会議(非公開)	東京大学地震研究所	4	矢部の渡航を受け、ドリリングレイアウトの検討、内容の打ち合わせ。
2010/1/13-23	研究打合せ(非公開)	観測候補各鉱山(南ア)	延40名・回以上	断層形状地質調査・ドリリング計画について議論。
2010/3/12-20	研究打合せ(非公開)	相手国研究機関、JICA、観測候補各鉱山(南ア)	延30名・回以上	MoU 調印後のスケジュールの確認。ドリリング進捗状況視察。AE 観測環境視察。
2010/3/25	研究打合せ(非公開)	JICA 東京本部	7	JICA プレトリアオフィスと事業の進め方について議論。
2010/3/29-30	本年度総括集会(非公開)	立命館大学	25名	本年度の総括と来年度のスケジュールの確認。
2010/7/26	JICA での業務調整員との打ち合わせ会議(非公開)	麹町 JICA 本部	10 名 (0)	宮良業務調整員、南ア着任前の打ち合わせ。
2010/8/10	JICA での業務調整員・コアメンバー会議(非公開)	JICA 南ア事務所(南ア)	10 名 (3)	8 月 6 日に宮良業務調整員着任がしたことをもって本プロジェクトが始まったことを報告、今年度と全体の計画を説明。意見交換。
2010/8/10	在南ア 日本大使館表敬訪問(非公開)	日本大使館(南ア)	10 名	同上
2010/8/11	CSIR 研究担当者会議(非公開)	CSIR(南ア)	9 名 (5)	CSIR の研究担当者と宮良業務調整員の顔合わせ。
2010/9/23	JST 岡谷参事役の CGS、CSIR 訪問(非公開)	CSIR(南ア)	延べ 26 名 (延べ 22 名)	JST 岡谷参事役に C/P の研究機関を紹介。C/P の研究者と

				懇談。
2010/9/28	南ア科学技術省表敬訪問(非公開)	科学技術省(南ア)	7名(5)	表敬訪問。本プロジェクトが始まったことを報告、今年度と全体の計画を説明。意見交換。
2010/10/1以降 6名の坑内作業技師を雇用し、短期専門家延べ14名が南ア渡航した際に、毎週に2～3回以上の頻度でほぼ定期的に行われた。	各鉱山作業会議(非公開)	各鉱山およびその周辺(南ア)	短期専門家・鉱山関係者・技師ら最低数人(最低2～3人)	すでに掘り上がっている計器設置孔に関するボアホール観察、コア整理、資材地下搬入、計器埋設、観測セットアップ、データ転送について、一つ一つの工程の詳細が入念に打ち合わせされている。
2010/10/1-2011/3/31の間に代表者渡航の際に3回	JICA プレトリア事務所との打ち合わせ(非公開)	JICA 南ア事務所(南ア)	数名	坑内作業技師の雇用契約や JICA 在外事業強化費などの運用方法、JCC の準備の進め方などに関する打ち合わせ。
2011/3/1	CSIR 関連、JCC 関連打ち合わせ(非公開)	CSIR(南ア)	5(3)	CSIR 関連の研究と調達の進め方、および、JCC の準備の仕方について打ち合わせ。
2011/4/1～2012/3/31の間に短期専門家が延べ10名、延べ約40週にわたり南アに滞在した際に、毎週2～3回の頻度でほぼ定期的に行われた。	各鉱山作業会議(非公開)	各鉱山およびその周辺(南ア)	短期専門家・鉱山関係者・技師ら最低数人(最低2～3人)	すでに掘り上がっている計器設置孔に関するボアホール観察、コア整理、資材地下搬入、計器埋設、観測セットアップ、データ転送について、一つ一つの工程の詳細が入念に打ち合わせされている。
2011/4/19	JCC(非公開)	科学技術省(南ア)	21名(8)	
2011/4/19	日本大使館表敬訪問(非公開)	日本大使館(南ア)	8名	活動報告
2011/4/20	SATREPS Seminar	CSIR, CMI(南ア)	約30名(二十数名)	SATREPS の紹介(高松本部長ら)、南ア鉱山地震学研究100年の歴史(Durrheimら)、本事業の報告(小笠原・中谷)
2011/11/09	南ア大使館マソカ公使 立命館大学来訪懇談(非公開)	立命館大学	十数名(2)	立命館副総長・中島淳教授(水理工学)・南ア計画担当教員・学生・事務担当と懇

				談
2011/12/20	南ア大使館公使と懇談(非公開)	東京	5(3)	大使の離任 Reception にてマソカ公使および JST 高橋氏と懇談
2011/1/13	南ア大使館公使と懇談(非公開)	JICA 南ア事務所(南ア)	6(4)	学生の相互交流について懇談。
2011/3/9	研究打ち合わせおよび第二回 JCC 準備会議(非公開)	CSIR, CMI(南ア)	5(3)	残りの機材調達と研究進捗状況について情報を共有。第二回 JCC 開催日を 5 月 9 日に決定。関連する準備スケジュールを議論・確認。
2012/4/1～ 2012/12/22 の間に短期専門家が延べ 6 名、延べ約 20 週にわたり南アに滞在した際に、毎週 2～3 回の頻度でほぼ定常的に行われた。	各鉱山作業会議(非公開)	各鉱山およびその周辺(南ア)	短期専門家・鉱山関係者・技師ら最低数人(最低 2～3 人)	計器埋設、観測セットアップ、データ転送、既存の地震監視システムとの連携について、一つ一つの工程の詳細が入念に打ち合わされた。
2012/5/3	岩石実験共同研究打合せ(非公開)	University of Witwatersrand(南ア)	5(2)	観測サイトの地質調査および計器埋設のための掘削孔より回収した岩石試料を用いた断層周辺岩石の物性測定試験について打合せを行なった。
2012/5/8	本プロジェクトで増強された CGS 南ア国立地震観測網を披露する会(非公開)	CGS(南ア)	約 20(約 15)	南ア DST、日本大使館、JICA 南ア事務所、JST からの方々を迎え、本プロジェクトで増強された国立地震観測網を CGS が披露した。
2012/5/9	JCC(非公開)	科学技術省(南ア)	21(9)	
2012/5/14-18	応力測定技術移転のための技術会議(非公開)	シンポジウム会場、サウス・ディープ鉱山、Ground Work 社等(南ア)	計十数名(約 10)	南半球岩盤工学国際シンポジウムにおいて、日本の技術で応力測定を南アで成功した事例を報告。日本の応力測定技術者に関心を持った鉱山関係者などで技術移転のための技術打ち合わせを行った。
2012/7/18	宮良業務調整員離任に伴う業務引継ぎ会議	JICA 南ア事務所(南ア)	6(3)	日本人コアメンバー、南ア研究コアメンバーと JICA 南ア事務所の

	(非公開)			方々との業務引継。
2012/8/12	業務調整員帰国報告会(非公開)	TV 会議(JICA 本部+立命館大学+JICA 南ア事務所+JICA タンザニア事務所)	11 (0)	宮良業務調整員帰国報告。
2012/9/7	業務調整員着任前打合せ(非公開)	TV 会議(JICA 研究所+立命館大学)	5 (0)	高島業務調整員着任前の打合せ。
2012/10/23	JICA, JST, 業務調整員、コアメンバー会議(非公開)	麹町 JICA 本部	8	高島業務調整員着任前の打ち合わせと中間評価準備。
2012/10/29	ムポネン鉱山掘削コア試料配分集会(非公開)	東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター	8	ムポネン鉱山で発生した M2 地震震源域で採取した掘削コア試料を用いた室内実験の研究計画の交換と実験に必要な試料の配分を行った。
2012/11/4-23	AE 解析作業会議・セミナー(非公開)	東京大学地震研究所・東北大学	計 8 名 (2)	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聘し、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。
2012/11/13	南アフリカ金鉱山での地震活動に関するセミナー	東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター	10(2)	南アフリカ金鉱山における、地震活動評価に基づいた危険度評価の試みとその問題点について東北大学の研究者に紹介するとともに意見交換を行った。
2012/11/11-19	高島業務調整員着任に関わる諸打ち合わせ(非公開)	JICA 南ア、日本大使館、DST、CGS、CSIR、関連鉱山(南ア)	計数十名 (数十名)	関連諸機関にて新任調整員を紹介するとともに中間評価に向けた準備打ち合わせを行った。
2012/12/11	岩石物性測定の実験研究および学生派遣に関する打ち合わせ(非公開)	University of Witwatersrand (南ア)	6 (3)	ムポネン鉱山の震源断層貫通掘削で採取した岩石試料の強度試験について打ち合わせを行った。また、封圧下での AE 計測技術移転のための南ア博士学生の日本への派

				遣について打合せを行った。
2013/1/23	応力測定 短期集中コース(非公開)	アングロゴールド・アシャンティ岩盤工学部(南ア)	10(8)	2013 年 1-2 月の鉱山主導の応力測定を前に、技術移転のための技術講習。1 鉱山、1 親会社、3 コンサル社参加
2013/2/23-3/15	JICA 中間評価インタビュー時の諸会議(非公開)	関連機関各所(南ア)	延べ数十名以上(延べ数十名以上)	カウンターパート研究機関、関連政府機関、協力鉱山会社および関連会社にて、JICA 委託コンサルタントがインタビューを行う際に、様々な情報交換と議論。
2013/2/27	微小破壊の鉱山の自力観測支援のための技術会議(非公開)	アングロゴールド・アシャンティ岩盤工学部(南ア)	7(4)	ムポネン鉱山、アングロゴールド・アシャンティ社、Seismogen 社、GMuG 社らと観測計画の打ち合わせ。
2013/3/11	SATREPS seminar	West Wits Conference Centre (南ア)	約 80 (約 70)	研究者・協力機関が参加し、進捗状況を報告・議論。カウンターパート諸協力機関(3 鉱山、4 関連会社)からコメント。
2013/3/13	第三回 JCC(非公開)	科学技術省(南ア)	21(7)	JICA 調査団が中間レビュー報告。今後の体制・予定等の更新を審議の上承認。
2013/5/7	研究打合せ(非公開)	シバニエ・ゴールド地震監視部(南ア)	4(3)	ドリーフォンテイン鉱山の観測や最新の採掘計画について情報共有。
2013/5/9	応力測定会議(非公開)	アングロゴールド・アシャンティ岩盤工学部(南ア)	7(6)	2013 年の応力測定計画の情報共有。
2013/6/9	技師死亡事故会議(非公開)	事故のあった鉱山(南ア)	約 30 名	事実関係の確認と再発防止策を議論。代表者・業務調整員・南ア側研究者も参加。
2013/6/18	安全会議(非公開)	事故のあった鉱山および OHMS(南ア)	約 30 名	我々が雇用している技師や、プロジェクトに関係する鉱山雇用者と事故再発防止策を議論。
2013/6/19	事故のあった鉱山の親会社の副社長と会議	事故のあった鉱山の親会社(南ア)	2(1)	代表者が経過報告。引きつづきプロジェクトに協力を頂けること

	(非公開)			を確認。
2013/8/22	研究打合せ (非公開)	東北大学大学 理学研究科 地震・噴火予知 研究観測センタ ー	8(1)	クック・フォー鉱山で 観測された微小破壊 の震源分布を3次元 表示装置で観察。
2013/9/19 2013/9/26 2013/10/22	南ア資源省によ る Fatal Inquiry (非公開)	事故のあった鉱 山(南ア)	20-30 名	事故関係者から事実 確認・事情聴取。業 務調整員は毎回参 加。代表者は 10/22 に参加。
2013/11/19	歪観測会議(非 公開)	サウス・ディープ 鉱山(南ア)	6(5)	同鉱山の歪データを 解析した Wits 大修士 論文の報告。新たに 埋設された歪計記録 について議論。
2013/1/23	アングロゴール ド・アシャンティ 岩盤工学部 Feedback 会議 (非公開)	アングロゴール ド・アシャンティ 岩盤工学部(南 ア)	7(6)	応力測定に関わる研 究の進捗状況を共有 し、諸問題と今後の計 画について情報共有 と議論。
2014/2/13	新岩盤工学部 長との研究打ち 合わせ(非公 開)	ドリフフォンティ ン鉱山(南ア)	6(4)	南ア代表者も交え、こ れまでの経過を報告 し今後の協力を依 頼。鉱山の応力モデ リングや、部長の修士 論文執筆に協力する ことを確認。
2014/2/13	Stress measurement mini-workshop	イズルウィニ鉱 山(南ア)	20(18)	BX 円錐孔底ひずみ 法による応力測定 の到達点と課題につ いて議論・共有
2014/3/17-18	震源の岩盤変 形グループ研究 会議 (非公開)	東濃地震科学 研究所	6(0)	岩盤変形データ解 析・公開について議 論
2014/5/8	SATREPS Seminar	ウエスト・ヴィツ 会議センター (南ア)	約 60(約 50)	この一年の成果を、 SATREPS 関係者(研 究者・技術者)で共 有。
2014/6/23	岩石室内試験、 CT スキャン講習 (非公開)	東北大学環境 科学研究科	4(0)	立命院生への岩石試 験、CT スキャン講習
2014/7/28-29	震源の岩盤変 形グループ研究 会議(非公開)	仙台駅前貸し会 議室	4(0)	岩盤変形データ解 析・公開について議 論
2014/7/31	SATREPS J-DESC 南ア金 鉱山応力多点 観測ワークショップ	立命館大学東 京キャンパス	19(南ア 2 米 国 1)	南ア金鉱山での応力 多点測定を ICDP に 提案するにあたり、微 小破壊観測等の最新 の知見を共有。在日

				南ア大使館公使も出席。
2014/8/7 (M5.5 発生 2 日目)	M5.5 会議(非公開)	モアブ・コツオン 鉱山	7(5)	M5.5 地震について鉱山の地震データ情報を共有。
2014/8/8	M5.5 会議(非公開)	アングロゴールド・アシャンティ 岩盤工学部(南ア)	5(3)	M5.5 について余震活動状況などの更新情報を共有。
2014/8/11	M5.5 会議(対アングロゴールド・アシャンティ) (非公開)	アングロゴールド・アシャンティ 岩盤工学部(南ア)	8(4)	M5.5 について余震活動状況などの更新情報を共有。
2014/8/11	M5.5 会議(対 CGS) (非公開)	アングロゴールド・アシャンティ 岩盤工学部(南ア)	8(4)	M5.5 について余震活動状況などの更新情報を共有。
2014/8/12	歪観測解析支援システム講習会(非公開)	ヴァーエンホイス・ゲスト・ハウス (南ア)	34(30)	日本の地殻変動統合解析システムの使用法の講習会。
2014/8/18	CSIR M5.5 セミナー	CSIR プレトリア (南ア)	約 50+2(約 50)	M5.5 の最新の知見を共有するためのメディアを含む一般向けのセミナー。
2014/8/20	M5.5 地震解析打ち合わせ(非公開)	CGS(南ア)	6(3)	地震解析打ち合わせ。
2014/8/27	Wits 大 Geoscience セミナー	Wits 大(南ア)	(数十名)	学生や教職員を中心としメディアも含む聴衆と M5.5 の最新の知見を共有。
2014/8/28	M5.5 地震解析打合せ(非公開)	CGS(南ア)	約 10	M5.5 の最新の情報を共有。磁気異常図と比較。
2014/10/7	応力多点測定打ち合わせ(非公開)	立命館大学東京キャンパス	9(0)	M5.5 情報を共有し、応力多点測定計画のターゲットに M5.5 を加えることを議論。
2014/12/1	地表地震観測サブグループ会議(非公開)	東大地震研	4(1)	CGS と Skype しながら M5.5 情報を共有し、CGS データ解析について打ち合わせ。
2015/3/3	M5.5 地震解析打合せ(非公開)	東大地震研究所	8	地震データ概要と波形処理の進め方を議論。
2015/3/16	SATREPS コアメンバー会議(非公開)	立命館大学東京キャンパス	6	JST 最終報告書作成準備打ち合わせ。
2015/5/28	JSPS-南ア大使館共催 Global Research	東京	数十名(約半数)	アフリカの教育と研究力高度化に関する懇談会にて成果をポス

	Council Round Table			ター展示。南ア大使に成果を報告。
2015/5/29	南ア資源省次官らと懇談	東京	9(8)	SATREPS の成果を報告。資源省に政府としての活動を継続する取り組み求めたが、逆に我々の活動の継続を求められた。
2015/6/5	SATREPS 最終セミナー	West Wits Conference Centre (南ア)	約 70(約 50)	JICA 終了時評価団も迎え、SATREPS の成果を共有
2015/7/17	業務調整員に感謝をする会	CGS など	延べ約 20 (約 10)	JICA 南ア事務所長、南ア側研究グループリーダー、日本研究代表者・グループリーダーらにより、業務調整員の労に対して皆が感謝を述べた。
2015/7/16-27	南アフリカでの諸会議	Council for Geoscience, 3 鉱山、1 鉱山会社、Wits 大、2 関連企業(南ア)	延べ約 40 (約 30)	ICDP 地震断層掘削計画ワークショップの条件付き採択を受け、本採択とワークショップ開催に向け、諸課題を議論。
2015/7/27	伊藤忠商事のプラチナ鉱山開発に関する懇談	在南アフリカ日本大使館	3(0)	伊藤忠商事のプラチナ鉱山開発と本計画の成果の情報を共有し、伊藤忠商事の日本人学生実習に本計画の人脈や関連企業が生かせないかを懇談。

② 合同調整委員会開催記録

2011 年 4 月 19 日	総出席者 22 名。内訳:南ア科技省 5 名、南ア側研究者 3 名、JICA(中村南ア事務所長含 4 名)、日本側研究者 2 名、JST(本蔵東工大教授・JSTPO 含む 4 名)、日本大使館(坂本公使含む 3 名)、その他 1 名。議長 Mashimbye (DST), 副議長 Durrheim (CSIR/Wits Univ; 南ア研究代表者), 副議長小笠原(立命大; 日本研究代表者)。	プロジェクトの実施計画の検討、プロジェクトに参加する研究者の確認、プロジェクトの評価方法について	実施計画については、サブ・グループで検討され、進捗確認、方向性の確認が行われた。研究者リストのアップデートが行われた。評価の方法については、次回の JCC までに研究者で検討することになった。
-----------------------	--	--	--

2012 年 5 月 9 日	総出席者 21 名。内訳:南ア科技省 5 名、南ア側研究者 4 名、JICA(中村南ア事務所長含 5 名、日本側研究者 3 名、JST 月岡主任調査員、日本大使館(岡庭公使含む 3 名)。議長 :Simpson (DST), 副議長: Durrheim(CSIR/Wits Univ; 南ア研究代表者)・小笠原(立命大; 日本研究代表者)。	本プロジェクト概略説明、プロジェクトの進捗と方向性の確認、調達実施状況の説明	実施計画については、進捗確認、方向性の確認が行われた。研究者リストのアップデートが行われた。評価方法については、中間評価までにさらに研究者の間で検討が必要ということが確認された。
2013 年 3 月 13 日	総出席者 23 名。内訳:南ア科技省 5 名、南ア側研究者 4 名、JICA(中村南ア事務所長、宮本参事を含む 8 名)、日本側研究者 3 名、JST1 名、日本大使館(内藤参事官含 2 名)。奥田(適材適所; 中間レビューコンサルタント)。議長: Simpson (DST), 副議長: Durrheim (CSIR/Wits Univ; 南ア研究代表者), 小笠原(立命大; 日本研究代表者)。	プロジェクトの進捗と今後の実施計画の検討、中間評価を通じた報告とPDMの提示	実施計画については、進捗確認、今後の方向性がPDMの提示などを通じて行われた。研究者リストのアップデートが行われた。中間評価については、本プロジェクトとして好ましい評価結果となることが示唆された。
2014 年 5 月 9 日	総出席者 19 名。内訳:南ア科技省 4 名、南ア側研究者 3 名、JICA(木野本南ア事務所長含 3 名)、日本側研究者 7 名、日本大使館(朝妻公使含 2 名)。議長:Du Toit (DST), 副議長: Durrheim (CSIR/Wits Univ)・小笠原(立命大; 日本研究代表者)。	プロジェクトの進捗と今後の実施計画の検討、供与機材情報の共有、モレマ氏への追悼と遺族への補償問題。	実施計画については、進捗の確認と最終年度の活動について検討された。研究者リストのアップデートが行われた。供与機材の情報をまとめていくことを確認、式典の可能性が南ア側から示唆された。モレマ氏のご遺族の補償問題につき、DSTからも労働省機関に問い合わせするなど対応があったことについて日本側から謝意が表された。
2015 年 6 月 9 日	総出席者 19 名。内訳:南ア科技省 4 名、南ア側研究者 3 名、JICA(木野本南ア事務所長含 7 名)、日本側研究者 7 名、日本大使館(一等書記官 1 名)。議長:Du Toit (DST), 副議長: Durrheim (CSIR/Wits Univ)・小笠原(立命大; 日本研究代表者)。	JICA 終了時評価レポートの議論と承認。	研究者側から成果報告。JICA 終了時評価団から評価報告。妥当性:やや高、有効性:やや高、効率性:高、インパクト:高、持続性:中。

§ 7国際共同研究実施上の課題とそれを克服するための工夫、教訓など

(1) 共同研究全体

・ 2013 年 6 月 5 日 本プロジェクトのための入坑中に、Seismogen 社技術者 Gilbert Morema 氏が亡くなるという非常に悲しい出来事があった。享年 51 歳であった。Morema 氏の日本との共同研究に対する貢献は、本プロジェクト以前から長年にわたり非常に大きく、本プロジェクトでは南アの若手に対して指導的な役割も果たしており、日本の南ア金鉱山での研究には欠くことのできない非常に重要な人物であった。また、日本と南アの双方の研究者から敬愛された人物でもあった。我々にとって非常に大きなものを失ってしまった。

鉱山内部、および、南ア資源省による事故調査委員会が開催され、事故の事実関係、原因、対策について徹底した調査と議論が行われた。研究代表者は、事故の4日後に南ア入りし、業務調整員と協力して事故の事実関係や遺族対応等の情報を収集し、できる限りの対応をした。遺族にはできる限りの誠意をもって対応している。JICA 南ア事務所は、南ア科技省を通じて労災給付の事務処理が迅速に進む様、南ア労働省に働きかけて下さっている。研究者や坑内技術者側でも安全会議を行い、再発防止を図った。

鉱山の多くの関係者が、何日も Fatal Inquiry に拘束される等、鉱山にとって負の影響が大きかったが、プロジェクトの重要性を鑑み、事故後も鉱山はプロジェクトに協力し続けてきている。

カウンターパートの一部の公的研究機関は、給与や研究活動費の原資が外部研究資金というスキームである。南ア科学技術省は、本プロジェクトのための特別措置として、年間約 200 万円の予算をカウンターパートに用意してくれることになったが十分ではない。このため、この機関の研究者は、獲得済みの他の研究ファンドから費用を捻出したり、スぺアタイムを使ったりして本プロジェクトに参画することなどが必要で、活動に困難が生じており、問題解決の路を模索している。

このようなことが起こっている原因は、かつては岩盤工学や鉱山地震学の研究に多額の予算支援をしていた Mine Health and Safety Council (政府・労働組合・鉱山会社からなる研究支援共同組織) が最近数年の間に方針を大きく転換し、AIDS や鉱山職病などの保健衛生分野の研究・事業に予算を手厚く配分するようになったからである。かつては岩盤工学の研究で世界を大きくリードしていた南アであったが、その中核研究機関である CSIR の岩盤工学部門は人員を 75 名から 9 名に大幅削減せざるを得なくなった。2014 年 4 月からは、岩盤力学部門が他の近い分野に吸収されることになってしまった。我々のプロジェクトで岩盤工学や鉱山地震の研究が鉱山の安全に非常に重要であることを南ア政府や MHSC に再認識させねばならない。

JICA 予算・調達関係の課題：

- ・プロジェクト開始当初、在外強化費の年度別予算配分案が、活動の実体に見合っていない部分があることがわかり、平成 23 年度以降については調整することができた。
- ・南アにおける機器調達は、時間がかかるため、本邦調達に切り替えられるものについては、そのようにして調達時間を短くできるようにした。ただし、南アにおける調達しかできないものについては、調達時間の長さは課題である。
- ・小額品の購入にも複数の見積もりが必要など、在外事業強化費による調達手続きが煩雑で、研究活動の時間が奪われがちである。一部については、立命契約の中で「現地活動費」という項目で比較的フレキシブルに対処できるようになった。
- ・短期専門家の移動手段として、運転手付き借上車両の使用が短期専門家の現地の活動実態と合っていなかったため、JICA プレトリア事務所と相談の上、使用ルールを定めた上でレンタカーを使用することとした。
- ・本プロジェクトの課題を遂行するためには、南アの金鉱山において観測実績がある、カウンターパートが製作している観測計器が最適であったが、JICA の調達手続き規定の制約のため、供与機材として調達を行うことができず支障をきたしていた。日本の他予算を充てる等の措置で、この困難を回避した。

- ・日本人日本学術振興会特別研究員1名(本プロジェクト期間中に博士号取得)も、我々と本プロジェクトの研究活動とともにすることもあった。しかしこの研究員の研究課題は本プロジェクトと接点はあるが独立なものであり、特別研究員制度の専念義務のため、当該研究員の活動や成果を本プロジェクトのものと記載することはできなかった。
- ・大学院生の現地での単独行動は SATREPS プロジェクト下ではできないため、SATREPS 本プロジェクト以外の予算で、立命館大学海外インターンシップというスキームの中で、単独滞在させカウンターパートや鉱山関係者と共同研究を行った。

上記以外について、研究グループ毎に挙げるべき課題は特になかった。これまで二十年近い研究交流が我々と鉱山との間にあったからであろう。

§ 8 結び

ウィットワータースランド大のニコライセン教授が、南ア金鉱山を地震の実験場として承認するよう1991年にIASPEIに提案した。その承認を受けてニコライセン教授が1992年来日し、日本地震学会に共同研究を訴えた。それ以後、学術振興会科学研究補助金や地震予知計画、地震・火山噴火予知のための観測計画などによってユニークな研究を進めることができていた。しかし、投じることができた物的・人的資源や時間が限られており、成果の社会実装には至っていなかった。

本プロジェクトでは、桁違いの物的・人的資源や時間を投入することができ、新しい学術的な成果だけでなく、これまで不可能であった社会実装も取り組むことができ、南アに貢献し続ける観測資源と技術、そして、それを使うことの出来る人材を残すことができたとして自己評価したい。

採掘計画の変更などによってターゲット地震が起こらなかった観測サイトがあり、成果を得ることに困難が生じた観測項目もあるが、その可能性も考慮に入れてリスクを分散させ、複数の鉱山に複数の主観測サイトを展開したことが功を奏した。

本プロジェクトの期間中、困難や、非常に悔やまれる犠牲があったが、両国の研究機関・鉱山・サービス会社・政府機関の研究者や技術者、事務担当者がとても良く協力しあうことができた。

さらなる投資でさらなる成果も期待されるため、それに向かって努力をせねばならない。

ICDP ワークショップ提案が採択され開催できたことは、我々の取り組みの学術的な価値が世界水準で見てユニークで貴重であることの証明となる。2015年6月の条件付き採択時には、正式採択されるためには、米国主導の過去のICDP南ア金鉱山計画との違いの説明、日本と南ア以外の第三国(欧米)や、本課題の研究対象外の地球微生物研究者を含むことが条件として課されたが、補足説明を8月に提出すると異例の速さで正式採択が実現した。

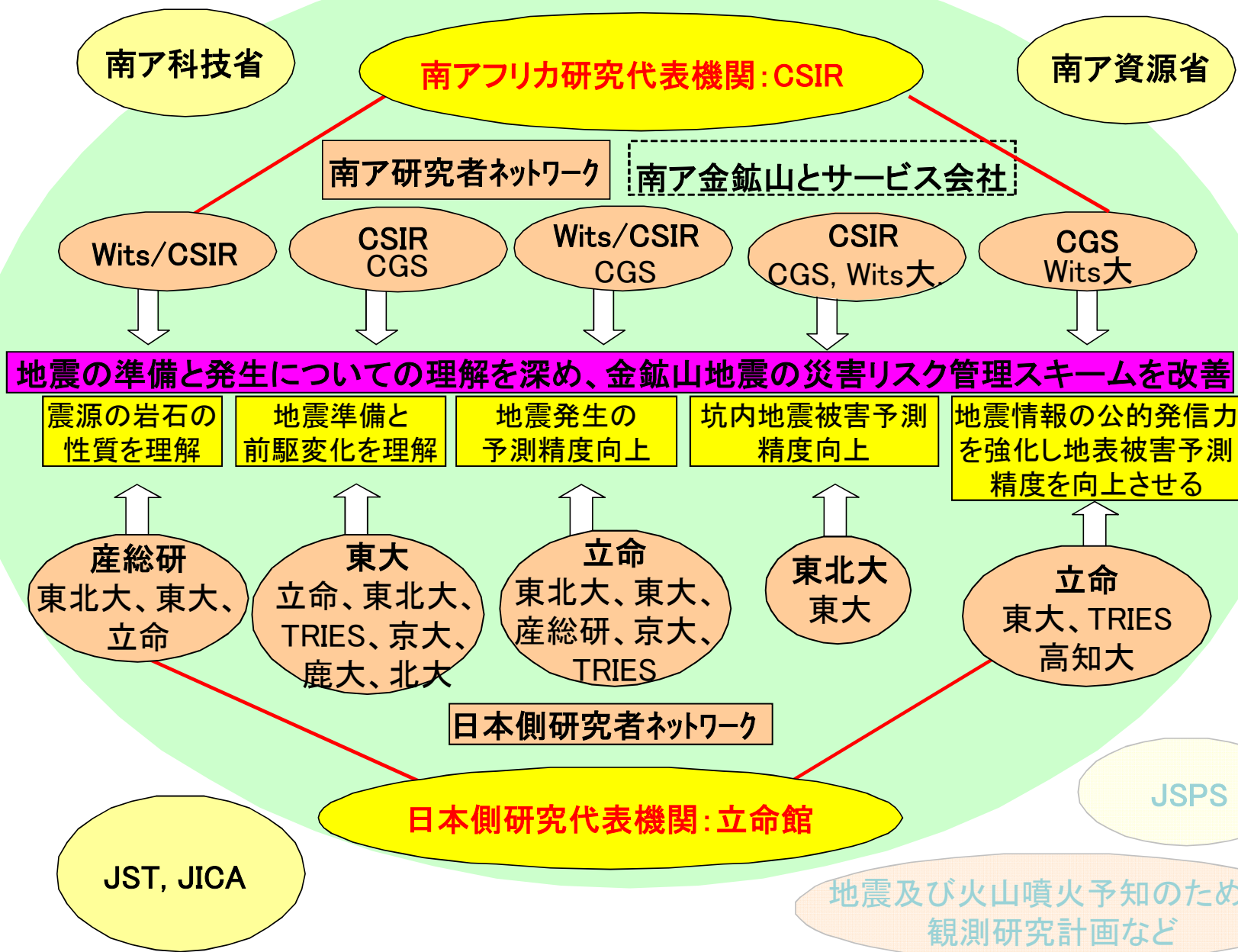
なお、本 SATREPS プロジェクト単体では、今回の取り組みをスムーズに行い、ここに報告した成果を得ることはできなかった。今回幸運であったのは、SATREPSがそのポリシー上不可能な部分をカバーできる他の研究費があったことである。しかし、最も残念であったのは、外部資金で給与を主にまかなうというスキームの相手国代表研究機関に対して、SATREPSの支援ポリシーは、相手国の持続発展を実現するために必ずしも効果的ではなく、相手国代表機関の研究者は、給与を他のプロジェクトで得つつ、スペア・タイムを SATREPS に割くという形でしか参加できなかった時期があった。我々が資金獲得のために南ア政府や金産業界へアプローチを試みたが限界があり、SATREPS 期間中、若手を含む研究者が相手国代表機関から離れて行くのを食い止めることができなかった。

この問題は、南アで安全な採掘を持続させるために、南ア政府がもっと解決に力を入れねばならない。この様な訴えを南ア政府や関連機関に対しても行った。何らかの形で身を結ぶことを願っている。

以上

研究実施体制の模式図 南アフリカ「鉱山での地震被害低減のための観測研究」

南ア側研究者約二十名
鉱山関係者百名以上



日本側研究者約三十名

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

日本政府、社会、産業への貢献	地震発生予測高度化のための重要な知見。白金族の安定供給。
科学技術の発展	微小破壊観測。地震発生場レベルの応力測定技術の確立。地震発生場レベルの応力モデリングの高度化。
知財の獲得、国際標準化の推進、生物資源へのアクセス等	世界最深の南アフリカ金鉱山における未着手の深度や応力レベルでの採掘の安全性向上に貢献する安全管理スキーム構築に貢献。欧米を含む他国への波及も期待される。
世界で活躍できる日本人人材の育成	若手については助教採用1。中堅層は教授昇進1、准教授昇進3。
成果物(提言書、論文、プログラム、マニュアル、データなど)	南ア関係組織への提言書(作成予定)、論文(別紙参照)。南ア金鉱山でしか得られない貴重な震源至近距離観測データ。M5.5関係については、ICDP計画が認められれば欧米とも成果やデータを共有できると期待される。

JST上位目標

・研究成果の、南アフリカ内外の坑内誘発地震予測・制御、および日本等の自然巨大地震発生メカニズム研究における活用

鉱山における、坑内の誘発被害地震と強震動および地表の強震予測改善

JSTプロジェクト目標

