

地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS)

研究課題別終了時評価報告書

1. 研究課題名

鉱山での地震被害軽減のための観測研究 (2010年8月～2015年8月)

2. 研究代表者

2. 1. 日本側研究代表者：小笠原 宏 (立命館大学 教授)

2. 2. 相手側研究代表者：Raymond J Durrheim

(Fellow, Council for Scientific and Industrial Research)

3. 研究概要

自然大地震や、鉱山採掘などに誘発されて発生する被害地震について、地震発生や強震動被害の予測の高度化が世界で強く望まれている。本研究は、南アフリカの地下1～3kmの大深度金鉱山において、震源の至近距離における高感度・高精度の微小地震(AE: Acoustic Emission)、歪、傾斜、および強震観測などに基づいて、地震の準備と発生の様子を詳しく観察し、理解を深め、2～3年の間にM2級の地震(100mサイズの断層破壊)が発生する場所を特定しその至近距離に観測網を展開することにより、既存の南アフリカ金鉱山内の地震リスク管理スキームを高度化するものである。プロジェクト実施期間の後半では、得られる知見に基づき「予測モデル」の高度化をめざす。また、鉱山地域の地表の南ア国立地震観測網を根本的に増強する。これらに基づき、地震発生と被害の予測を高度化する。

4. 評価結果

総合評価 (A+：所期の計画をやや上回る取り組みが行われ、大きな成果が得られた。)

金鉱山の坑内に高感度観測機器を設置することによって膨大な量の微小破壊(AE)、ひずみ、傾斜データの取得に成功した。これらのデータの詳細な解析により、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に成功したほか、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も成功している。また、応力と地震の規模別頻度分布の関係など、通常の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ている。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にも成功している。このように、地震発生に至る具体的プロセスの理解向上への貢献は大きい。これらの研究の集大成として、至近距離に想定されていたM2級

の地震に伴う諸現象の発見に大きな期待がかかっていたものの、このような地震が発生しないままに研究期間が終了したことは残念ではあるが、自然現象を対象とした実験研究であるがゆえにやむを得ないと言わざるを得ない。安全な採掘を設計するという観点からは、震源の応力の実測を可能とし、応力モデリングを高度化することに貢献している。微小破壊観測について、これまで未着手の高応力の残柱の採掘に鉦山が使い始めている。歪変化モニタリング結果も準リアルタイム表示され、地震活動とリアルタイムに比較できるようになっている。このように、既存の地下坑内地震観測網では捉えることのできないもの（微小破壊・絶対応力・歪変化・弾性波変化・強震動）を捉え、地震の準備と発生をよりよく理解することにより、より安全な採掘を設計したいという南アフリカ側の非常に強い要望にかなりの程度応えるものとなっている。

特筆すべきは、2014年8月5日に調査地域近傍でマグニチュード(M) 5.5の自然地震が発生したことから国際陸上科学掘削計画(International Continental Scientific Drilling Program; ICDP)においてさらなる研究計画を議論するためのワークショップが開催される運びとなってきたことであり、本プロジェクトの研究活動と成果が国際的に高く評価されたことを示すものである。

4-1. 地球規模課題解決への貢献

【課題の重要性とプロジェクトの成果が課題解決に与える科学的・技術的インパクト】

震源の至近距離での地震観測により、地震発生予測の手法確立を狙うという試みは重要であり、その実現のためのサイトを南アフリカの金鉦山という深部掘削現場に求めた本研究は非常にユニークであり、科学的・技術的なインパクトは高い。具体的には、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したほか、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も成功している。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ている。

一方、プロジェクト期間内に予想した地震は発生せず、地震発生プロセスに関する実験研究がいかに困難であるかを裏付ける結果となった。

【国際社会における認知、活用の見通し】

国際地震学コミュニティにおける本プロジェクトの認知度は極めて高く、地震発生メカニズム解明のための基礎的研究としてその成果に大きな期待が寄せられてきた。とくに、ICDPワークショップの採択は、本プロジェクトチームの取り組みの学術的な価値が世界水準からみても高いことを示している。

一方、地震発生予測という究極的観点からは具体的手法の確立にまでは至っておらず、鉦山での大幅な地震被害低減という目的で本研究の成果が広範に活用される見込みは限定

的ともいえる。

【他国、他地域への波及】

本研究の遂行過程で開発されたコンパクトな岩盤応力測定装置は、鉱山における採掘の安全性向上という観点からは、南米などの採掘現場への波及が期待される。地震学基礎研究という観点からは、今後のデータ解析結果を取りまとめた論文発表にもよるが、ICDPを含め欧米の地震学研究への波及効果は高い。

【国内外の類似研究と比較したレベル】

国の内外を問わず、地震発生至近距離における類似研究は見られず、本研究は極めて独創的である。実験室における岩石破壊実験との対比という観点からは、国内の主要な研究者を網羅した研究であり、レベルは極めて高い。

4-2. 相手国ニーズの充足

【課題の重要性とプロジェクトの成果が相手国ニーズの充足に与えるインパクト】

相手国側の主たるニーズは、採掘活動の安全性向上にある。理想的には採掘に伴う地震発生の事前予測手法の確立であるが、ターゲットとしていた想定地震がプロジェクト期間内に発生しなかったため、非常に大きなインパクトには至っていない。応力測定技術に関しては、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、ルーチンのように応力測定ができることを実証している。この技術の移転により、計算機による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ており、採掘における安全性向上にある程度の寄与は認められる。なお、採掘鉱山近郊の一般住民に対する M5 クラスの被害地震については、地表地震観測網の強化によって情報が得られる状況になっている。

【課題解決、社会実装の見通し】

地震発生予測に確実につながるような研究成果は現時点では得られているとは言えないが、この問題への解決に向けた基礎的研究成果は認められる。社会実装に関しては、微小破壊観測について、これまで未着手の高応力の残柱の採掘に鉱山が使い始めており、採掘活動安全性向上に寄与していると言える。ただし、坑内の地震被害の大幅な軽減という観点では成果は限定的である。

【継続的発展の見通し（人材育成、組織、機材の整備等）】

ある程度の人材育成は行われたものの、相手国の大学等の研究者を広く巻き込んだ課題となっていないために、当面の継続は可能であるが、相手国全体の底上げとまでは至らな

かったように見える。また、鉱山会社の人材育成については会社の将来方針に依存するが、現時点では継続的發展にやや不安なところがある。整備した機材については、ICDP のワークショップで議論された今後の国際共同研究等で有効に活用されることが期待される。

【成果を基とした研究・利用活動が持続的に発展していく見込み（政策等への反映、成果物の利用など）】

多くの機材が供与されており、相手国側技術者は今後もある程度のレベルでの研究を継続するものと考えられる。とくに、本プロジェクトで設置した観測装置で地震発生を捉え、多くのデータが得られれば、成果を元とした研究利用活動の持続的發展も見込まれる。ただし、本事業の目指した基礎研究の分野で、現地研究者が国際的なレベルで独立して活躍していけるという段階までには達しておらず、国際共同研究プロジェクト等に引き継がれる中でさらに発展を目指すことが現実的であろう。

4-3. 付随的成果

【日本政府、社会、産業への貢献】

我が国の主要な課題である地震発生予測に向けた基礎研究の重要な部分を担うものであり、この意味での我が国への貢献は著しいが、現段階では社会、産業への貢献までには至っていない。

【科学技術の発展】

地震発生プロセスの解明は地震災害予測及び事前地震防災において極めて重要であり、地震発生予測研究に関する基礎的データを提供したという点で、本プロジェクトは地震科学の発展に大きく寄与することは疑いない。想定されていた至近距離での地震がプロジェクト期間中に発生しなかったとはいえ、地震発生に向けた断層面への応力集中の発見などは極めて重要である。

【世界で活躍できる日本人人材の育成（若手、グローバル化対応）】

数名の中堅、若手クラスの研究者にとっては非常によい機会になり、極めてアクティブな研究者の養成につながったと考えられる。一方で、発表論文の著者リストから判断する限り、一部の研究者に偏っており、幅広い人材育成ができているかどうかについては疑問が残る。ただ、大学院生を現地に滞在させるなど、ある程度の努力はみられる。

【その他の具体的成果物（提言書、論文、プログラム、試作品、マニュアル、データなど）】

具体的成果としては学術論文が主体となる。現時点においてもレベルの高い論文発表がみられるものの、全体としては期待したところまでには至っていない。ただし、膨大なデ

一タが得られており、現段階においてもなお解析処理が追いつかない状況に鑑みると、プロジェクト終了後の論文の増産が期待できそうである。

【技術および人的ネットワークの構築（相手国を含む）】

ローカルなジャーナルではあるが、相手国の研究者の論文投稿が多くみられることから、プロジェクト期間内での相手国研究者とのある程度の人的ネットワークは構築されてきていると判断される。この人的ネットワークが今後の国際共同研究プロジェクト等に活用できるかどうか、今後のさらなるネットワーク拡充の鍵となるであろう。

4-4. プロジェクトの運営

【プロジェクト推進体制の構築（他のプロジェクト、機関などとの連携も含む）】

SATREPS のみならず、長年にわたって地震予知計画のプロジェクトとしても認知され、科研費も獲得するなど、プロジェクトを推進する体制構築は非常に優れている。また、採掘現場における安全性確保を担当する鉱山技術者との連携は素晴らしく、相互信頼に基づいたプロジェクト推進体制が構築できていた。一方、社会実装の観点からは、政府機関等との連携が十分であったとは言えず、成果は限定的となっている。

【プロジェクト管理および状況変化への対処（研究チームの体制・遂行状況や研究代表者のリーダーシップ）】

研究のスタイルとしてわが国の若い研究者が基礎研究を進め、チームリーダーが社会実装に向けた取り組み、普及への取り込みを受け持っていた構図がうかがえる。こうした体制は本プロジェクトにおいては適切であったと思われる。プロジェクト管理においては、研究代表者はその高いエフォート率に示されるように、優れたリーダーシップを発揮し、プロジェクトの順調な遂行に貢献したほか、いくつかの極めて困難な問題に対しても適切に対処してきたことが本プロジェクト成功の大きな要素であったことは疑いない。

【成果の活用に向けた活動】

科学的成果の活用という観点では、国際シンポジウム等における成果発表を活発に行い、ICDP による国際ワークショップの開催につなげたことは高く評価できる。また、鉱山安全性向上での成果については、アフリカ南部や南米における鉱山掘削等に活用されることが期待される。一方、鉱山近郊社会への貢献という観点では、比較的規模の大きい自然地震の震源決定精度向上が図れたものの、実社会に向けた活用は認めにくい。

【情報発信（論文、講演、シンポジウム、セミナー、マスメディアなど）】

南アフリカの鉱山街で SATREPS セミナーを毎年開催し、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の参加を得ている。その他、研究者を対象としたシンポジウム等も十分に開催されており、基礎研究という点では問題ない。情報発信については比較的よく行われているが、成果の論文発表という点においては、獲得した貴重なデータをまだ十分にまとめきれていない感があり、今後の論文としての公表が期待される。

本プロジェクトの南アフリカ側研究代表者は、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フリカ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おり、本プロジェクトの認知度向上に貢献してきた。また、南アフリカにおいては、SATREPS 事業が大臣レベルにアピールできている点も評価できる。

【人材、機材、予算の活用（効率、効果）】

本プロジェクト費用だけでなく、やや大型の科学研究費も併せて獲得することにより、研究費及び機材の投入を効果的に行っており、効率の面でも優れた運営となっている。投入機材は多数に及び、現地技術者が利用していくための研修もなされて効率を高めている。一方で、現地研究者による論文はローカルなジャーナルに偏っており、ある程度の人材養成はなされているものの、国際的レベルにまで達しているとは考えにくい。また、機材のより有効な利用の観点からは検討すべき課題が残されている。

5. 今後の研究に向けての要改善点および要望事項

SATREPS プロジェクトとしては終了となったが、設置した観測装置が稼働している限り、現在も科学研究費で行っているように、何らかの予算を獲得して継続研究を行ってもらいたい。特に、ICDP のワークショップで議論される国際共同研究プロジェクトにおいては中心的役割を果たすことが想定され、本プロジェクト研究者主導によるさらなる展開に期待したい。その上で、大きな目標である地震発生予測の高度化の推進に期待する。

本プロジェクトは基礎研究の色彩が強いために、研究体制も実質そうした研究者のみで構成され、日本側の限られた数の研究者の研究に依存する形となっている。SATREPS 事業の性格を考えると、応用や社会実装に向けた取り組みは重要な視点であり、そのための研究者構成も考慮される必要があったのではないか。

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	地震発生子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探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2。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(配信予定)、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ワークショップが条件付き採択。掘削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。

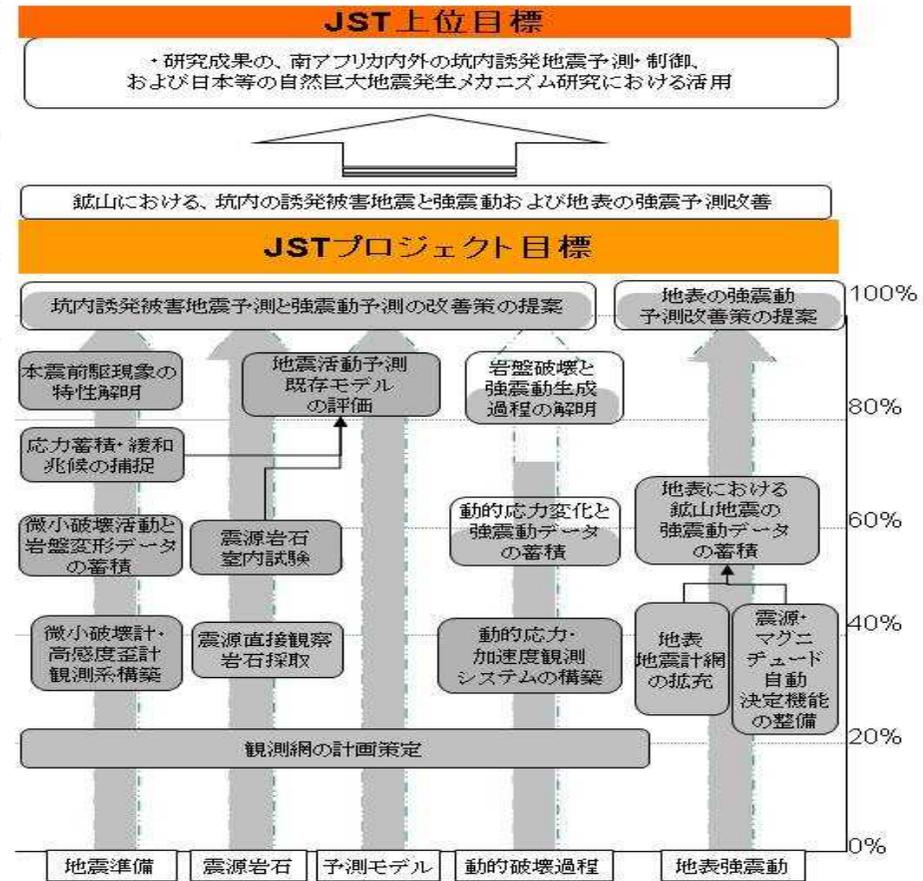


図1 成果目標シートと達成状況 (2015年3月時点)