

# 地球規模課題対応国際科学技術協力

(防災研究分野「開発途上国のニーズを踏まえた防災科学技術」領域)

## 鉱山での地震被害低減のための観測研究

(南アフリカ)

平成 23 年度実施報告書

代表者：小笠原 宏

立命館大学 理工学部・教授

<平成 21 年度採択>

## 1. プロジェクト全体の実施の概要

ねらいと概要： 自然大地震や、鉱山採掘などに伴って発生する誘発被害地震について、その発生予測や強震動予測の精度を高めることが世界で強く望まれている。本研究では、南アフリカ(以下南ア)の地下約1~3kmの大深度金鉱山において、震源の至近距離における高感度・高精度の微小破壊(AE)や歪、および、強震の観測などに基づいて、地震の準備と発生の様子を詳しく観察し、その理解を深める。この様な試みを行うことができるのは、2~3年の間にM2級の地震(100mサイズの断層破壊)が発生する場所を事前に特定することができる、南ア金鉱山のみである。また、鉱山地域の地表においては南ア国立地震観測網を増強する。これらに基づき、地震発生と強震動の予測を高度化する。

平成22年度：平成22年8月に5ヶ年計画の本事業が始まった。新燃岳噴火や東日本大震災の影響などで当初計画からの変更が専門家派遣にあったが、延べ14名の短期専門家が延べ約90週にわたり現地活動を行った。50台を超える供与機材を南アに届け、坑内地震観測のための計器設置と観測準備を行った。これらの結果、イズルウィニ鉱山では、一部の観測項目のデータ収録も始まった。

平成23年度の進捗状況：延べ60を超える供与機材の本邦調達がすべて完了した。残る現地調達の供与機材も手続きが進んだ。延べ10名の短期専門家が、延べ約40週にわたって現地活動を行った。イズルウィニ鉱山はごく一部を除くほぼすべての観測が始まった。ドリーフォンテイン鉱山は、日本主導の観測項目のセンサ設置が完了し、平成24年1月にデータ収録も始まった。モアプ・コツォン鉱山では応力測定が実施され、一部のセンサの設置が始まった。南ア国立地震観測網は、観測予定地点のバックグラウンド・ノイズレベル実測調査、および、10観測点のVaultの建設が平成24年3月に建設が完了した。

今後の見通し：来年度中には、モアプ・コツォン鉱山の観測も始まり、CSIR 主導の傾斜、採掘閉塞計、坑内強震計の観測も始まる見込みである。我々のサイト近傍の地震活動は、まず、イズルウィニ鉱山で活発化し、ドリーフォンテイン鉱山とモアプ・コツォン鉱山が続くと見られ、データ蓄積が本格的に始まる見込みである。

## 2. 研究グループ別の実施内容

### (1) 震源の岩盤変形グループ

#### ① 研究のねらい

震源での応力蓄積・緩和を監視し、地震リスク評価の精度を向上させる。

#### ② 研究実施方法

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

#### ③ 当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

イズルウィニ鉱山では2台の歪計のデータが約1年間蓄積した。2011年5月から観測サイトに歪が顕著に蓄積し始め、現在は地震活動が活発化しつつある。この状況は、鉱山の岩盤工学部とも定期的に連絡・議論を行い、応力モデリングと比較するための準備も始まった。

ドリーフォンテイン鉱山では、3台の歪計の埋設が完了し、観測が始まった。モアプ・コツォン鉱山では3台の歪計の埋設孔の掘削が完了した。同じゴールド・フィールズ社系のクルーフ鉱山の、地震が活発化すると予想される鉱柱に、2台の歪計を埋設することが決まり、2つの埋設孔の仕様が固まった。

カウンターパートの傾斜計の埋設孔の仕様(口径117mm;深さ10m)が確定し、3本の掘削が完了した。

来年度には残りの孔の掘削の後、計器が埋設されて観測が始まる見込みである。

日本で実用化されている応力測定方法(円錐孔底法)を、より小さい口径で、より容易に行うことができるようにした応力測定をモアプ・コツオン鉱山で行った。最初の試みでは失敗したが、南アの悪いドリリン条件でも成功するために改良を加えた結果、成功することができた。

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

CSIR、アングロゴールド・アシャンティ社岩盤工学応用研究部、ゴールド・フィールズ社地震部門・岩盤工学部門、および、イズルウィニ鉱山岩盤工学部門と、現有データの Back Analysis の結果や、各鉱山の計画の詳細を共有した。

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

応力は、安全な採掘にとって非常に重要な基本情報であるが、場所による違いが大きいことや、測定には熟練の技術や、長い現場作業時間、高額な費用を要することなどから、必ずしも数多く行われていない。今回南ア金鉱山で成功した応力測定法は、必ずしも熟練していないドリラーや技師でも行うことができるように簡便化されたものであるため、成功後、7つ以上の鉱山から測定ができないか打診があった。日本人技術者が南ア渡航しなくても、現地の人間だけで応力測定を行えるようになるための体制作りが課題であるが、実現に向けてキーパーソン探しを始めることにした。

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

(2) 震源の微小破壊グループ

①研究のねらい

本震断層の詳細な形状を特定し、地震発生リスク評価精度を向上させる。

②研究実施方法

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

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

イズルウィニ鉱山における観測を継続しつつ、微小破壊観測用の二十数台のセンサ埋設を完了した。月に 20 万個を超えるイベントが収録されることもあり、予備解析が始まった。微小破壊の震源位置自動解析プログラムの性能をイズルウィニ鉱山のデータに対して評価し、震源位置カタログ作成の具体的流れを決定した。モアプ・コツオン鉱山において、微小破壊観測用のセンサの埋設がはじまった。

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

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

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

特になし。

(3) 震源の動的破壊過程グループ

①研究のねらい

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

## ②研究実施方法

震源断層極近傍(数 m 以内)で、破壊前線の通過に伴う動的応力変化と断層変位を計測し、採掘現場や地表で観測される強震動記録と比較議論し、研究のねらいを達成させる。

## ③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

イズルウィニ鉱山における 3 点での観測を継続した。ドリーフオンテイン鉱山において、計器埋設孔の掘削コア試料及び孔内カメラによる孔壁の観察にもとづいて、掘削孔と断層の交差部を特定し、断層直近に4台の動的応力変化計を埋設し、平成 24 年 1 月から観測が始まった。これで、予定していた動的応力変化計の観測がすべて始まった。

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

イズルウィニ鉱山で観測対象とした断層周辺で活発化しはじめた M=1~2 級の地震活動について情報共有を行った。

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

## (4) 坑内観測地震高度解析グループ

## ①研究のねらい

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

## ②研究実施方法

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

## ③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

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

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

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

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

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

## (5) 震源の岩石分析グループ

## ①研究のねらい

震源の岩石の性質を明らかにする。

## ②研究実施方法

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

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

昨年度、イズルウィニ鉱山、および、モアブ・コツオン鉱山において、観測のターゲットとなる断層の位置を特定するための探査ドリリングの岩石コア試料と孔内の観察が行われ、ターゲットとする断層の位置決定や応力集中域の推定が行われた。今年度は、ドリーフォンテイン鉱山において、観測のターゲットとなる断層の位置を特定するための探査ドリリングの岩石コア試料と孔内観察を行い、断層の位置決定を行った。

ムポネン鉱山において、2007年にM2.1の地震が発生した断層を貫通する掘削によりえられた岩石コア試料の物性解析のため、岩石コア試料を同鉱山から搬出するための諸手続きが完了し、平成24年4月4日に南アフリカから出港することになった。

岩石コア試料の室内実験において封圧を制御するためのシリンジポンプを昨年度導入し、今年度は、2007年にM2.1の地震が発生したムポネン鉱山のダイクから採取した岩石試料を用いて三軸圧縮破壊試験を行い、弾性波速度およびアコースティック・エミッションの計測を行った。

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

カウンターパートの実験室を訪問して使用可能な機材についての情報交換をするとともに、日本と南アフリカで行う実験の分担について協議した。

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

(6) 地表地震観測グループ

①研究のねらい

地表に被害を与える規模の地震による地表の強震動評価精度を向上させる。

②研究実施方法

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

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

南アフリカ政府の予算によって、閉山して水没した金鉱山地域の地震観測網がCGSによって展開されつつあり、臨時観測も始まっている。さらなる予算でクラークスドープ地区の地震観測が増強されることが昨年度決まった。これと同じ仕様の地表観測網を、SATREPSの坑内観測も行われるファー・ウェスト地区に増強させる。そのための調達書類手続きを進め、観測予定地点のバックグラウンド・ノイズレベル実測調査が完了した。

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

⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況(あれば)上に記した国の予算による他の鉱山地区の地震観測の増強(平成22年度)。

なお、上記の説明はJST暫定計画書のグループ構成に準拠したものである。上記のグループと、JICA-南ア

DST の MoU に記載された成果 (Output) との対応は下表の通りである。

JST 全体計画におけるグループ	対応する JICA-南ア DST MoU における成果
①震源の岩盤変形	成果2、3
②震源の微小破壊	成果2、3
③震源の動的破壊過程	成果4
④坑内観測地震高度解析	成果3
⑤震源の岩石分析	成果1
⑥地表地震観測	成果4、5

成果 1: 震源の岩石の性質が明らかになる、

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、

成果 3: 金鉱山内地震の発生を予測する精度が向上する、

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、

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。

### 3. 成果発表等

#### (1) 原著論文発表

- ① 本年度発表総数 (国内 0 件、国際 3 件)
- ② 本プロジェクト期間累積件数 (国内 1 件、海外 7 件)
- ③ 論文詳細情報 (著者名、発表論文タイトル、掲載誌 (誌名、巻、号、発表年) などを発行日順に記載)。なお、同一の論文は一報として記載)。

【招待論文】小笠原宏, 川方裕則, 石井 紘, 中谷正生, 矢部康男, 飯尾能久, 南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験国際共同研究グループ, 南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験—至近距離観測による地震発生過程の解明に向けて—, 地震 2 (日本地震学会 60 周年記念特集号), 第 61 巻, S563-S573, 2009.

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

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

Yabe, Y., J. Philipp, M. Nakatani, G. Morema, M. Naoi, H. Kawakata, T. Igarashi, G. Dresen, H. Ogasawara, and JAGUARS, Observation of numerous aftershocks of an Mw 1.9 earthquake with an AE network installed in a deep gold mine in South Africa, Earth Planets Space, 61, e49-e52, 2009.

Durrheim, R.J., H. Ogasawara, M. Nakatani, Y. Yabe, A.M. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, H. Moriya, and SATREPS Research Group, Observational studies to mitigate seismic risks in mines: a new Japanese - South African collaborative research project, The proceedings of the fifth International Seminar on Deep

and High Stress Mining, 6–8 October 2010, Santiago, Chile, Australian Centre for Geomechanics, 215–226, 2010.

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

Naoi, M., M. Nakatani, Y. Yabe, G. Kwiatak, T. Igarashi, and K. Plenkens, Twenty thousand aftershocks of a very small (M2) earthquake and their relation to the mainshock rupture and geological structures, Bulletin of the Seismological Society of America, 101 (5), 2399–2407, 2011, doi: 10.1785/0120100346.

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.

## (2) 特許出願

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

## 4. プロジェクト実施体制

### (1) 「震源の岩盤変形」グループ

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

震源での応力蓄積・緩和を監視し、地震リスク評価の精度を向上させる。

### (2) 「震源の微小破壊」グループ

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

本震断層の詳細な形状を特定し、地震発生リスク評価精度を向上させる。

### (3) 「震源の動的破壊過程」グループ

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

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

### (4) 坑内観測地震高度解析グループ

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

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

(5) 震源の岩石分析グループ

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

② 研究項目

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

(6) 地表地震観測グループ

① 研究グループリーダー：小笠原 宏（立命館大学・教授）

② 研究項目

地表に被害を与える規模の地震による地表の強震動評価精度を向上させる。

以上