

( 1 ) 実施機関名：

立命館大学

( 2 ) 研究課題(または観測項目)名：

南アフリカ大深度金鉱山における準備期・直前期の地震破壊域近傍の岩盤挙動の観測

( 3 ) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

( 3 ) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

( 3-1 ) 地震発生先行過程

ア．観測データによる先行現象の評価

( 4 ) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

( 2 ) 地震・火山噴火に至る準備過程

( 2-1 ) 地震準備過程

イ．非地震性滑りの時空間変化とアスペリティの相互作用

( 3 ) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

( 3-1 ) 地震発生先行過程

イ．先行現象の発生機構の解明

( 4 ) 地震発生・火山噴火素過程

ウ．摩擦・破壊現象の規模依存性

( 5 ) 本課題の 5 か年の到達目標：

震源核形成過程は、理論的・実験的に存在することが確認されている地震の直前過程の核心部分であり、それが実際に観測可能かどうかということが、短期的な予知の実現へ向けて解明すべき最重要課題であると考えられる。しかし、通常の自然地震を対象にする限り、大地震は滅多に発生しない。また、中小地震の震源から至近距離で観測することは難しい。したがって、南ア金鉱山における半制御地震発生実験によって、観測事例を増やすこと、および、より詳細像を得ることは非常に重要である。本課題では、主に高感度・広ダイナミック・レンジの石井式歪計の連続収録によって地震発生準備期の歪変化の詳細を観測する。次の 5 ケ年の目標は、観測周波数帯域において、また、観測ダイナミック・レンジで盲点がより少ない観測をより多くのサイトで行うことである。

( 6 ) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21 年度では下記の活動を行う。

Mponeng 金鉱山地下 3.5km のサイト付近での採掘があと数ヶ月間続く予定で、この間は地震活動が比較的活発であり続けると予想される。AE・歪観測を継続しより多くの事例の解析を行う。

水没金鉱山 ( Buffelsfontein 鉱山地下 2km と ERPM 鉱山地下 2.5 ~ 3.5km ) の歪・地震観測を継続する。ERPM 鉱山は閉山したため、採掘活動がない場合の比較的 Dry な領域と Wet な領域の地震活動を比較できると期待される。

石井式歪計 2 台と複数の加速度計とによる観測を、複数の鉱山で新たに始める準備を行う。候補の鉱山は South Deep 金鉱山, Driefontein 金鉱山, Kloof 金鉱山である。三次元配置でより多くの石井式歪計、AE センサー、加速度計などからなる総合観測網を、2 ~ 3 年の間に  $M > 2$  の地震の発生が予測されている既存の断層の周囲に展開する準備を行う。候補の鉱山は Moab Khotsong 鉱山である。

平成 22 年度は、既存の観測を継続しつつ、新しい総合観測網の構築を開始する。

平成 23 年度は、既存の観測を継続しつつ、年度の前半には新しい観測網の構築を完了し、データ解析を始める。

平成 24 年度までには、新しい観測網の中で 2 ~ 3 個の  $M2$  級の地震発生を至近距離で収録できると予想され、その詳細を解析する。

平成 25 年度は、成果をまとめる。

#### ( 7 ) 平成 22 年度成果の概要 :

平成 22 年度も計画通りに研究が進んだ。

これまで、震源の至近距離でしか得られない南アフリカ金鉱山の歪変化を報告してきたが、本年度は、鉱山の地震観測網よりも検知能力と震源決定精度が高い JAGUARS グループ ( 代表者 : 中谷 ) の AE データや、鉱山会社の岩盤工学応用研究部門の応力モデリングの結果と比較することによって、次に述べる新たな知見が得られた ( 桂・他、2010 ; 桂、立命館大学大学院修士論文、審査中 ) 。歪計は、Mponeng 金鉱山地下 3.3km にある P & G ダイク ( 北西 - 南東走向 ; 厚さ約 30m ) の中と外に、約 22 m の間隔で埋設されたものである。南東に約 20 度で傾斜する薄板状の金鉱脈が、歪計の直上約 90m に位置し、ダイクに過度な応力が集中しないように、このダイクの周辺は dyke dipping pillar として掘り残すように計画されていた。解析データは、両歪計から 20 m 以内で発生した  $Mw1.9$  ( 2007 年 12 月 27 日 ) の地震 ( Event0 ) および 100 m 以内で発生した  $Mw2.3$  ( 2008 年 8 月 21 日 ) の地震 ( Event1 ) 、6-20 m で発生した  $Mw0.3$  ( 2008 年 10 月 9 日 ) の地震 ( Event4 ) に関連するものである。

まず、地震発生域の歪の長期変動メカニズムについて以下のことがわかった。観測された長期的歪変化は、歪計の成分のうち最も大きいもので、約半年間で  $6 \times 10^{-4}$  におよんだ。この歪変化量は、弾性変形であれば数十 MPa の応力変化に相当する。Event0 の発生前の期間は、両歪計で観測された歪変化のトレンドが互いによく似ていており、最大主圧縮応力軸に近い成分は縮みであった。Event0 発生後の期間は、ダイク外の歪計のトレンドが反転し、ダイク内の歪計は最大主圧縮応力軸に近い成分だけが伸びのトレンドに転じた。歪の長期変動のこのような特徴と 3 次元境界要素法による応力モデリングの結果と比較した。このモデリングでは、等方均質無限弾性体の中に、弾性定数の異なるダイクを仮定し、空洞は仮想力ブロックで、また、断層や薄板状の採掘跡は変位不連続面で表現して、応力や歪の分布を計算した。断層に強度特性が与えられた場合は、応力場と静的に釣り合う断層すべりが計算される。また、変位不連続面には強制変位を任意に与えることもできる。この計算結果との比較により、観測された長期的歪変化は、採掘域が広がることによる新たな空洞の形成による歪変化と、採掘終了直後の空洞の非弾性的な閉塞による歪変化と調和的であった。そして、前者の応力再配分によって生じる弾性歪変形に比べ、後者の影響は数倍大きいことがわかった。なお、後者の影響は、応力モデリングにおいて該当箇所を強制的に閉塞させることによって評価した。また、Event0 の断層上に強度を超えると断層がすべる条件で解析をしても、Event0 の前後の期間に観測された長期的歪変化の大きさとトレンドを説明することができなかった。

Event1 が発生したのは、Event0 の震源域に隣接する領域のうち、Event0 が発生した直後に応力集中が顕著でなかった領域であった。しかし、応力モデリングから、新しい採掘の影響によって Event1 の領域により応力が集中し、その後 Event1 が発生していたことがわかった。Event1 の際に観測された coseismic な歪変化は最大で約  $2 \times 10^{-5}$  であったが、余震 AE 分布から推定される震源断層で、応力モ

デリングから期待される応力場に釣り合うすべりが地震時に発生したとすれば、観測された coseismic な歪変化がほぼ説明できた。なお、鉱山の地震観測網で決定された震源は、余震 AE 分布から推定した断層の位置と数十 m ずれていたが、前者の付近数十 m をグリッドサーチしても、応力モデリングから期待されるすべりや観測された歪変化と調和的な断層モデルを見出すことはできなかった。

Event1 の直後約 70 分間に、最大で約  $3 \times 10^{-6}$  の余効変動が観測された。このトレンドは付近の新しい採掘跡の閉塞では説明できず、変動が顕著な時期は、AE の活動が平均以上に盛んな時期とほぼ一致していた。しかし、個々の AE クラスタにおける活動の消長を、観測された歪変化の諸フェーズに対応づけるにはデータが十分ではなかった。

昨年度、Event4 の発生する 6.5 時間前から歪変化のトレンドが明瞭に変化したことを報告した。図はその一例である。変化した後のトレンドは、coseismic な歪変化の極性と一致しているため、この先行変化は、天然の地質構造の中で発生した地震の前駆すべりが、世界で初めて明瞭に捉えられた例である可能性がある。6.5 時間の間には Mw0.2 の地震が発生したが、歪変化のトレンドはあまり変化しなかった。Mw0.2 の歪ステップを除くと、先行歪変化は、最も大きな成分で約  $4 \times 10^{-7}$  に達した。Event4 の coseismic な歪ステップで最も大きかった観測歪量は約  $4 \times 10^{-6}$  であり、coseismic step の約 10 分の 1 ~ 数分の 1 の歪変化が Event4 に先行して観測されたことになる。この時期は AE データが観測されていなかった。また、このように小さな地震の震源は、鉱山の地震観測網で精度よく決定されていない。このため、Event4 の震源断層を正確に推定することはできない。しかし、観測された coseismic な歪変化が、この規模の地震としては非常に大きいので、Event4 の震源が歪計のごく近くにあることは確かである。実際、過去の AE 活動データで確認された、歪計に最も近い AE クラスタ (約  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ) 付近に震源断層があると仮定して、この断層に 0.1 mm の正断層すべりをあたえたところ、coseismic な歪変化を概ね説明できた。

震源の位置が不確かな地震のケース以外では、地震の発生や採掘に関連して観測された歪変化が、モデル計算で推定されたものと調和的であることを確認した。また、紙面の制約から詳細は省くが、採掘発破がない週末に、2 台の歪計で記録された潮汐変化が互いに類似するなど、歪計の動作や岩盤とのカップリングが安定していることも確認された。これらは地味な確認であるが、「Mw0.3 に先行する歪変化を確かに捉えた」という主張の重要な補強材料となろう。ただし、この先行歪変化が、時間的に偶然に発生した本震発生と無関係な現象であったのか、本震発生につながる不可逆過程であったのかについては、さらに詳しい議論が必要である。

本年度はまた、課題 1215 や 1420, 1423, 1427, 2402 と連携して、三次元配置でより多くの石井式歪計、傾斜計、空洞閉塞計、AE センサー、加速度計、破壊前線動的応力変化観測システム、断層透過波試験システム、などからなる総合観測網を、2~3 年の間に  $M > 2$  の地震の発生が予測されている既存の断層の周囲に展開する準備を行った (Durrheim et al, 2010; 小笠原・他, 2010)。断層位置同定と計器埋設のために、数十本のドリリングが行われ、総延長は 1.9 km を超えている。一部の鉱山では計器埋設も始まり、歪計は 2 台を埋設し、観測が始まった。0.1 Hz よりも高周波数帯域では歪計よりも感度が高く、DC 帯では低感度の傾斜計としても使える広帯域加速度計をこれらの歪計に隣接して埋設する予定である。Mponeng 鉱山で課題であった、レコーダーの動作に同期した歪記録のノイズの問題も解決し、スローイベント等も再び議論できるようになる。複数の観測サイトにおいて、準備期・直前期の地震破壊域近傍の岩盤挙動を、多面的に観測する準備ができた。

南アフリカの水没鉱山の誘発地震活動の研究については、2011 年 3 月にインドで開催される ICDP Konya ダム誘発地震 Workshop において、紹介し、今後の連携などの可能性を探る予定である。

- (8) 平成 22 年度の成果に関連の深いもので、平成 22 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :
- Durrheim, R. J., A. M. Milev, H. Ogasawara, H. Kawakata, M. Nakatani, Y. Yabe, A. Cichowicz, H. Moriya, and the SATREPS research group, 2010, Observational study to mitigate seismic risks in mines: a new Japanese - South African collaborative project, The proceedings of the fifth International Seminar on Deep and High Stress Mining, 6-8 October, Santiago, Chile, Australian Centre for Geomechanics,

215-226.

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, 2010, 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.

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・Research Group of SATREPS, 2010, 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.

( 9 ) 平成 23 年度実施計画の概要 :

既存の観測を継続しつつ、年度内には新しい観測網の構築を完了し、観測・解析を始める。

( 10 ) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

立命館大学総合理工学研究機構 小笠原宏・川方裕則

他機関との共同研究の有無 : 有

東濃地震科学研究所 石井 紘・大久保慎人

東京大学地震研究所 中谷正生

東北大学大学院理学研究科 矢部康男・大槻憲四郎

鹿児島大学大学院理工学研究科 中尾 茂

京都大学防災研究所 飯尾能久

( 11 ) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 立命館大学 研究部 理工リサーチオフィス

電話 : 077-561-2802

e-mail : liaisonb@st.ritsumei.ac.jp

URL : [http://www.ritsumei.jp/research/c05\\_03\\_14\\_j.html](http://www.ritsumei.jp/research/c05_03_14_j.html)

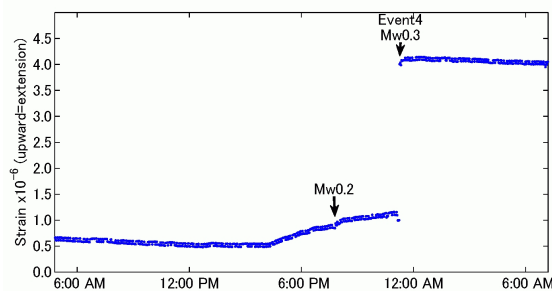


図 Event4 前後の、合わせて約 1 日間の歪変化の例。データは桂 (立命館大学修士論文 ; 審査中) による。