課題番号:1423

(1)実施機関名:

東京大学地震研究所

- (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断層破壊面極近傍の精細な動力学的破壊過程の推定
- (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
 - (3-2) 地震破壊過程と強震動
 - ア.断層面の不均質性と動的破壊特性
- (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
 - (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
 - 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:

大きな地震ほど破壊成長抵抗(Gc)が大きいことが震源インバージョンなどから示唆されているが, 室内実験からはGcはスケールに依存しない物性値であることが示されている.自然地震から示唆さ れているGcのスケール依存性が,マルチスケールな不均質場の中で破壊が動的に成長することで現 れるのか,あるいは,既存断層中のダメージゾーン等の成熟度の差によって場の固定的な性質として 現れるのかは,地震のサイズ予見性にも関わる根本的な問題である.前者では地震破壊は常に停まる か停まらないかのぎりぎりのところで進行していることになり,後者では地震はその地震にとっての 断層全面を壊すまで途中で停まることはないということになる.

本課題では,-3 < M < 3までの活発な地震活動が起こっている南アフリカ大深度金鉱山(以下,南 ア金鉱山)において,M3クラスのラプチャーが予想される大規模な地質弱面(ダイク境界面や地質断 層)の超至近距離に地震計アレイ(以下,on-fault地震観測網)を構築し,100-200m級のラプチャーを 破壊面から数メートル以内の複数点で観測し,地震破壊の動的成長過程を直接観測することを一つの 目標とする.

断層至近距離で観測される地動の長周期成分からは断層滑りの時間履歴が高い確度で得られ,地震 の成長途上での断層構成則や破壊成長抵抗が得られる.また,媒質の影響をほとんど受けずに観測され る短周期地震波からは,その成長過程における破壊の複雑さの程度と素性が分かるだろう.これらの 情報からより大きな地震の破壊過程に内包されるより小スケールの部分破壊の役割を明らかにし,冒 頭で述べた破壊のスケーリングの問題に対して実証的な立場からのモデルを提示することが本課題の 最大の到達目標である.

また,計画している on-fault 地震観測網は予想される最大級の地震ラプチャーの数割を覆う程度の 大きさであるが,これによって最大級の地震ラプチャーの最中を観察するだけでなく,同じ場所で起 こるより小規模な地震の開始や停止を間近で観察することも期待でき,-3 < M < 3までの幅広いス ケールの破壊を,高い分解能で観察することができる.

本課題は,南ア金鉱山で展開される関連課題と有機的に最大限連携し,同一サイトで多項目の観測 を行い,観測網,計器設置作業,データなどを共有することで,費用対効果の向上を目指す.各関連 課題の主たる観測目的は異なるが,現地調査や計器の設置などで効率化が図れる上,互いに異なる周 波数帯を対象とした観測が同一サイトで展開されるため,地震発生場の理解に対して相補的な役割を 果たすことが期待される.

(6)本課題の5か年計画の概要:

平成21年度は,現行観測の維持,現行観測で得られたデータの初期解析,及び多項目の観測を行 うための観測網の構築準備の期間と位置付ける.現在観測が実施されているサイトの維持に努めると ともに,得られた波形データの初期解析を行い,比較的遠方で発生した地震記録を用いて解析に使用 する全地震計の方位・極性の確認,較正を行う.また,新規に展開する観測サイトの候補地を現地調 査し,サイトの構築に向けての準備を始める.

平成22年度は,波形データの初期解析及び方位補正を継続的に行うとともに、新規に展開する観 測サイトの構築を開始する.

平成23年度は,前半に新規に展開する観測サイトの構築を完了し,後半にデータの解析に着手する. 平成24年度は,新規サイトにおけるデータの解析を実施し,幅広いスケールの震源過程を高分解 能で抽出する.

平成25年度は,地震発生場の理解に向けて,断層破壊面極近傍の精細な動力学的破壊過程の推定 の観点から,研究課題の取りまとめを行う.

(7)計画期間中(平成 21 年度~25 年度)の成果の概要:

断層帯は複雑な構造をもつが,個々の地震がおこす食い違い変位のほとんどは,センチメートルスケー ルの薄い主滑り面でまかなわれることが,断層の観察からしられている.主滑り面は,断層帯や破砕 帯といったゾーンではなく,破壊面としてみてよいほどくっきりしたものであるが,その形状はさま ざまなスケールの不規則性をもっており,地震時の断層運動を支配する破壊成長抵抗は,主滑り面の もつ不規則形状,そして,その食い違いが起す短波長大振幅の応力擾乱に強い影響を受けると考えら れる (Dieterich and Smith, 2009). しかし,天然の断層においては,クリープしているプレート境界面 でおこるリピーターを除いては,主滑り面での微小地震活動が認めらる例はほとんどない(Hauksson, 2010; Powers and Jordan, 2010). 本震滑り面の巨視的形状を描き出す程度には活動の集中がみられる余 震ですら,よくみると,むしろ主滑り面をとりまくダ メージゾーン中に雲状に分布するようにおこって おり (Liu et al., 2003), その活動は, 主滑り面の属性を得るといった観点で使われることはなく, せい ぜい,本震の巨視的な滑りの分布による長波長の周辺応力分布の変化としての解釈にとどまっている. 本課題では,百メートルスケールの断層面全域にわたって,センチメートルスケールの多数の微小破 壊を観察し,精密に震源決定をすることによって,余震 (Naoi et al., 2011) でも定常活動 (課題 2402)で も,まさに主破壊面そのものをくっきり描き出しているとおもわれる極度に薄い微小破壊の面的な集 合を,圧倒的な密度コントラストをもって描き出すことに成功した.これらの微小破壊集合は,余震 のケースで b = 1.4, 定常活動のケースで b = 1.4-2 程度と,小さなイベントが極端に卓越しており,通 常の地震観測で主滑り面に対応する活動が見いだされないのは,このせいとも考えられる.個々の断 層面で b 値は異っており,また,ほとんどの破壊が10 cm 程度のサイズであることを考えると,面状 に集中した破壊の活動は,個々の断層面のそのオーダーの波長における粗さを反映している可能性が

高い.

また,われわれの微小破壊観測網では,既存断層でおこるもの以外に,採掘域前方の高応力下にある インタクトな岩盤中におこる多数の微小破壊も観測しており,これらの b 値は 1.2 であった (Naoi et al., 2013). いままで, このような活動は雲状の体積的な分布をしていると考えていたが, 本年度, こ れら,採掘域周辺の活動に対して相対震源決定を行ったところ,実は,ほとんどの微小破壊は,厚さ 3 m , さしわたし数十メートルの板状のゾーン内 (図 1) でおこっており (Moriya et al., 2013) , 採掘域が 前進してゆくにつれ,古いゾーンの活動がおさまり,さらに前方に同様の活動ゾーンが新たにできる というパターンが確認できた.活動ゾーンの走向は採掘前線と平行であり,最大剪断面に近い65度程 度の傾斜をもっている.活動ゾーンのあいだの部分は,採掘前線が接近-通過していく全過程におい てほとんど微小破壊をおこさないままである.断層面上の AE 活動とは違って,板状ゾーンの活動は, イベント密度が非常に高いにもかかわらず,連続性のある長いトレースがみられず,また,ゾーンの 大きさに匹敵するような地震(M=0程度)もおこっていないので,大きな破壊面はいまだ存在してい ないとおもわれる.ひとつの採掘前線だけでなく,多数の採掘前線や断層を含む鉱山全体での地震活 動をみると,この鉱山も,他の南アの大深度鉱山や自然地震と同じくb値はほぼ1であり,採掘前線 での b = 1.2 という, 広域活動と断層面上の活動の b 値の中間的な値は, 採掘前線前方が, 新たな二次 元的な破壊面ができかかっている領域であるということを示唆しているのかもしれない.解釈はとも かく,微小破壊が巨視的な面に強く集中している状況ほど b 値が高いという傾向 (Nakatani, 2013) は 確かであり,大きな地震の主滑り面の性質に関する情報は,極端に小さな破壊の活動にこそ反映され ることになる.これは,大地震においてS波速度を超える超高速で地震破壊が伝播した,断層形状の 単純なセグメント上では , (観測できるサイズの) 余震がすっぽり抜けているという観測事実 (Bouchon and Karabulut, 2008) とも符号している.

一方で,断層破壊の不均質が強震動生成に及ぼす影響を直接的に調べるために,大容量(500G),高速応答(25 kHz)の三成分加速度計を開発して,南アフリカのクック4金鉱山(旧称イズルイーニ金鉱山)の深さ約1 km とドリーフォンテイン金鉱山の深さ約3.2 km にある断層のごく近傍に埋設した. いずれの断層も,坑道壁の調査にくわえて複数の掘削を行い,コア試料やボアホールカメラの映像から,連続性や平面性が高いことが確かめられており,センチメートル精度でその位置をとらえることができている.また,いずれの断層においても,採掘に伴う載荷により,M2程度の地震の発生が期待されているが,まだそのような地震は発生していない.一方,観測網の周辺ではM1-2の地震がいくつか起きているので,本年度は,このような地震に伴って観測された加速度波形の簡単な解析を行った.

図2は,クック4金鉱山で発生した M1.3の地震の際に観測された波形の例である.加速度の両振幅は,震源距離88mで51.6m/s²,震源距離149mで26.3m/s²ときわめて大きなものであった.スペクトル解析からは,この地震のコーナー周波数は約30Hzであり,円形クラックを仮定した場合の半径は約40mである.M1.3の地震の標準的な地震モーメント(1.1E11Nm)を用いれば,応力降下量は約0.6 MPaと推定される.これらのパラメータを用いて,HaskelモデルやSato&Hirasawaの円形クラックモデルのようななめらかな震源モデルから期待される加速度の最大振幅は10-30m/s²であり, 観測値をおおむね説明する.このことは,今回観測された最大加速度の生成には断層破壊の不均質性があまり寄与していないことを示唆する.

- (8)平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):
 Moriya, H, M. Naoi, M. Nakatani, O. Murakami, T. Kgarume, A. K. Ward, R. Durrheim, J. Philipp, Y. Yabe, H. Kawakata and H. Ogasawara, 2013, Detection of mining-induced fractures associated with stress perturbation around a stope in Ezulwini gold mine, South Africa, by using AE events. Proc. 6th International Symposium on In-Situ Rock Stress, 598-603.
 - Nakatani, M., 2013, Microfractures on natural faults stressed by mining (invited), 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.

- 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, H. Ogasawara, 2013, Frequency-Magnitude Distribution of -3.7 .LE. MW .LE. 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.
- (9) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

東京大学地震研究所 三宅弘恵・中谷正生・五十嵐俊博 他機関との共同研究の有無:有 東京大学大学院理学系研究科 井出哲 立命館大学総合理工学研究機構 川方裕則・小笠原宏 東北大学大学院理学研究科 矢部康男・大槻憲四郎 京都大学防災研究所 飯尾能久

- (10)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:東京大学地震研究所地震・火山噴火予知協議会 電話:03-5841-5712
 e-mail:yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp
 URL: http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/
- (11)この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名:三宅弘恵 所属:東京大学地震研究所



図1.南アフリカ金鉱山の採掘前線付近で観測された微小破壊の震源分布.

地下1kmの採掘前線の走向方向にそってみた鉛直断面図.視線方向50cmに含まれるイベントだけを図示してある.2ヶ月の観測期間中に採掘域は左へ10mほど延伸.採掘前線の前方のインタクトな岩盤中に順次生成した微小破壊活動の板状の集中域(1,2)は,3m程度の厚さのゾーンとなっており,既存断層面上の活動(3)が,デシメートルスケールの薄さの連続的かつ極端に密度コントラストの高い分布を示しているとのとは,明らかに様相が異る.活動域1-3の走向はいずれも採掘前線に平行.視線方向50cmに含まれるイベントだけを図示してあるので,活動域1,2のもつ3m程度のみかけの厚味は走向方向の曲りのせいではない.



図 2.クック4 金鉱山で発生した M1.3 の地震の際に観測された加速度波形の例. 上図は,震源距離 88 m で観測されたもので,30 Hz-2 kHz のバンドパスフィルターをかけている.下図は,震源 距離 149 m で観測されたもので,5 Hz-1 kHz のバンドパスフィルターをかけている.