

論文内容の要旨

論文題目

南アフリカ大深度金鉱山で発生した M2 地震震源近傍での
アコースティック・エミッション観測

Acoustic Emission Measurements in the Vicinity of a M2 Earthquake Rupture
in a Deep Gold Mine in South Africa

氏名 直井 誠

巨視的な地震に関連して起こる小さな破壊を研究するために、採掘による応力集中で最大 M3 級の地震が多発する南アフリカ金鉱山地下 3600 m 深に、8 台の AE センサ (< 200kHz), 1 台の加速度計 (<25kHz), 2 台の歪計を用いた AE 観測網を構築した。観測網周辺では、ほぼ南北走向の厚み 30 m ほどのダイクがほぼ鉛直に貫入しており、数 km にわたって大規模な地質境界を形成している。この西側境界面をとり囲むように差し渡し 50 m 程度の広がりを持つ AE 観測網を展開した。

2007 年 12 月 27 日、観測網の中心から 30m 上方で M2 の地震 (以下、クリスマスイベント) が発生した。同 AE 観測網では、150 時間以内に 25000 個以上の大量の余震データが得られた。一方、鉱山会社が展開している定常観測網 (検知限界 $M_w \sim -1$) では、同時間内に 37 個の余震しか観測されなかった。M2 級の地震に伴う余震を観測した先行研究ではせいぜい数十個の余震しか観測されなかったが、それは単に観測限界の問題であり、M2 の地震でも非常に多くの余震を伴うことがわかった。

この余震データに対して震源決定・ M_w 推定を行ったところ、観測網中心から 100 m 以内の領域では、本震より 6 小さい $M_w -4$ までの地震がほぼ漏れなく観測できていたことがわかった。AE センサでしか記録されていない地震が多かったので、AE センサの記録から M_w を決定する方法を新たに開発し、加速度計の記録のあるイベントを用いて、手法の較正をおこなった。観測できた最も小さい地震の規模は $M_w -5.3$ で、ストレスドロップ 1 MPa を仮定すると、これは約 20 cm の破壊に対応する。また、観測網近傍 40 m 以内の震源決定精度は 1 m 以下であった。本震断層サイズは約 100m と推定され、観測点

近傍では本震断層サイズの 1%の精度で震源が求まっていることになる。本震に対する相対的分解能という点で今回のデータは自然地震で最も詳細に調べられている例に匹敵する。

クリスマスイベントの余震空間分布では、余震が発生した場所としなかった場所を明瞭に区別することができ、5つの余震クラスタを定義することができた。これらのクラスタでの余震活動はそれぞれが $p = 1.3$ の改良大森公式に従う時間減衰を示した。この5つのクラスタのうちの1つは、クリスマスイベントの CMT 解と同じ Dip, Strike を持つ、80 x 100 m の広がり二次元的な分布を示した（以下、メインクラスタ）。このクラスタの余震群は本震破壊面を描き出したと考えられる。震源決定誤差を考慮したシミュレーションにより、この分布の真の厚みは 1 m 以下だと推定された。これは断層サイズの 1%以下にあたる。また、それ以外の4つのクラスタはクリスマスイベントの発生前から地震が集中して起こっていた場所にあり、そのうち3つのクラスタは人工的な空洞の端に位置していた。

各クラスタの規模別頻度分布からは以下のことがわかった。4つのクラスタはおおむね 1 前後の b 値を示したが、メインクラスタは $b = 1.4$ と非常に大きな b 値を示した。また、各クラスタに含まれる最大イベントサイズが大きく異なっており、とくに観測網から約 200 m 遠方にあったクラスタに、大きな余震 ($M_w > -1$) が集中していた。この傾向は、鉦山地震観測網（検知限界 $M_w \sim -1$ ）で観測された余震のほとんどが、このクラスタに含まれていることから確認できた。これは観測網の検知限界に依存して、余震の見え方が全く違うケースであったことを意味する。

メインクラスタの主要部分はダイク内部に Dip 60 度の面構造を描き出していた。これは、クリスマスイベントは物質境界ではなくダイク内部を壊した地震であったことを示す。鉦山会社は地震が誘発されやすい地質断層や物質境界の位置を把握するために、多くのボアホールを掘って地質調査を行っている。クリスマスイベントの断層面に対応するような既存弱面は確認されておらず、この付近で発生した M2 級以上の地震もクリスマスイベントの前には確認されていないことから、今回の M2 地震は特に巨視的弱面をもたない岩盤を 100 m 一気に破壊したものだと考えられる。

本震発生後にクリスマスイベントの主断層面を貫通するように掘ったボアホールの破損状況の観察からは、鉛直圧縮の絶対応力場を示唆するボアホールブレイクアウトが観察された。鉛直圧縮応力場で Dip60 度の面が形成されたことは、室内三軸圧縮試験で見られるような古典的クーロン破壊によってクリスマスイベントが説明できることを意味する。また、メインクラスタの発生した場所と重なるような前震活動が、少なくともクリスマスイベント発生の 6 ヶ月前から確認されている。室内岩石破壊実験では、このような前震活動が巨視的破壊の準備過程として発生することがよく知られており、この点でもクリスマスイベントと室内岩石破壊実験との類似性が認められる。

また、メインクラスタの余震空間分布からは本震破壊面のより詳細な構造が確認できた。ダイク境界近傍では bending や主破壊とわかれてコンタクトそのものを壊したと思われる分岐が、破壊開始点付近では副次断層の存在を示唆する余震の並びがそれぞれ確認された。

本観測で見られたような、本震破壊面を描き出すような余震（以下 FBA）は、M7 級の自然地震に対してもしばしば観測される。しかし単純に考えると、断層直近は CFF が減少する領域であり地震が誘発されることはない筈である。その矛盾を解決するために、断層破壊面近傍の統計的短波長応力擾乱による FBA の発生というメカニズムが提唱されている [Helmstetter and Shaw, 2006]。このような統計

的短波長応力擾乱によって FBA が発生するならば、FBA には以下のような特徴があらわれる可能性がある。1) off-fault 余震やバックグラウンド地震活動とは異なる b 値を示す、2) 断層面近傍応力擾乱の不均質性のアップーフラクタルリミットを反映する特徴的サイズ (M_{max}) が規模別頻度分布に現れる。3) 破壊面近傍に非常に狭く集中した分布を示す、4) 断層法線方向の FBA の個数分布は短波長応力擾乱の統計的性質を反映する。5) FBA の b 値は断層面に近いほど大きくなる。これらの特徴をクリスマスイベントの FBA に対して調べたところ、1), 2), 3), 5) の性質が確認でき、観測結果は統計的短波長応力擾乱による FBA が発生するという仮説を支持することがわかった。