

南アフリカの Ezulwini 鉱山における断層透過波モニタリングで 観測された透過弾性波の変化について

川方 裕則 (立命館大学)・吉光 奈奈・中谷 正生 (東京大学)・Joachim Philipp (GMuG)・
土井 一生・直井 誠 (京都大学)・Anthony Ward・Luiz Ribeiro (Seismogen CC)・
Vlok Visser・Thabang Masakale・Sifiso Khambule (OHMS)・
Thabang Kgarume・Raymond Durrheim (CSIR)・小笠原 宏 (立命館大学)

地震の発生が危惧される断層において、断層を透過する弾性波を継続的に集録し、振幅や弾性波速度などモニターをすることにより、断層の降伏などの地震発生過程に関する重要な情報を得ることができると期待される。室内実験においては、動的破壊発生に先行して透過弾性波の伝播速度が低下し（例えば、Lockner et al., 1977; Yoshimitsu et al., 2009）、減衰が強くなる（Yoshimitsu and Kawakata, 2011）ことが報告されている。一方、自然地震断層においては、地震が発生する深度において、断層スケールに対応した波長の波を用いた能動的弾性波透過試験を繰り返しおこなうことは困難であり、計測事例は少ない。南アフリカ共和国では、地下1～数km程度に展開されている鉱山において採掘がおこなわれており、採掘にともなう地震活動が記録されている。これらの地震は、採掘活動を原因として発生するため、採掘計画と断層の配置を参考にすると、地震の発生が危惧される断層をあらかじめ同定することができる。さらに、地下の坑道からボアホールを掘削できるため、地震発生層と同レベルの深度において透過弾性波源や地震計を埋設することができ、岩盤中に測線を設けることができる。そこで我々は、南アフリカ・イズルウィニ金鉱山において、M～2程度の地震の発生が予想される断層を対象とした透過弾性波モニタリングを2011年度より開始した（川方・ほか，2011 散乱集会）。

地下約1 kmの坑道からボアホールを掘り、圧電型のトランスミッター（透過弾性波源）を断層の上盤側約20 mの位置に埋設した。受振器には1 Hzから10 kHzの範囲で応答特性が±3 dB以内の3成分加速度計を用い、上盤側に1点（TR0209；断層から約7 m手前）、下盤側に2点（TRxc01；断層から約7 m奥、TRxc02；断層から約13 m奥）の3台をほぼ一直線上に埋設した（図1）。測線長は全部で約33 mである。発破のおこなわれていない毎日深夜0時から5ないし10分間、0.05～0.1秒間隔で弾性波を透過させ続け、毎日5000個以上の波形データを記録している。波形は、近傍に埋設されているAEセンサー7つの信号も含めて全16ch分、400 kpspsで集録されている。

S/Nを向上させるために1000個分の波形をスタックして解析に用いるが、スタック前後の波形のスペクトルを比較したところ、信号強度は3～10kHzで強いと推定されたため、この範囲でバンドパスフィルターを施した。2011年の計測開始当初は、数か月間にわたって極めて酷似した波形記録が得られ続け（図2）、推定された V_p 、 V_s は断層を含まない部分において約5850m/sと3550m/sであった。長期のストライキや電気系のトラブルによる欠測をとめないながらも、計測は継続中である。

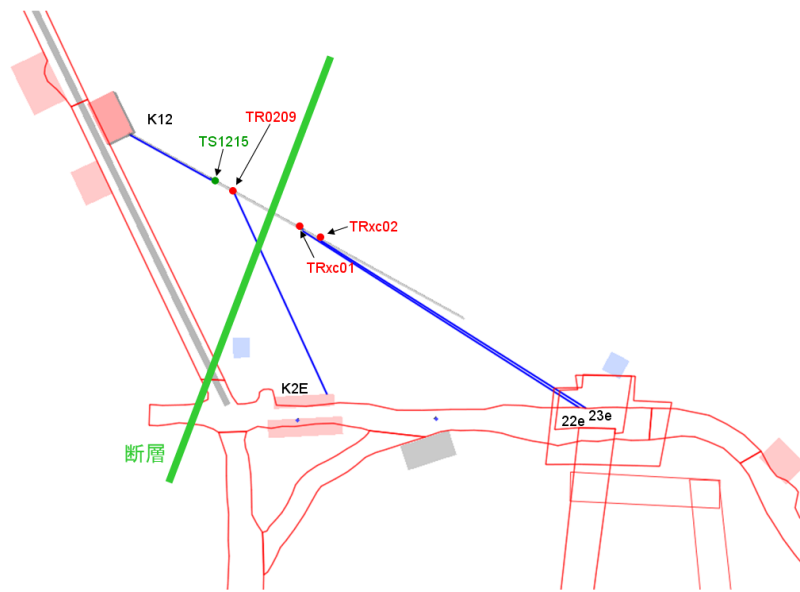


図1. イズルウィニ金鉱山の計器配置を水平面に投影したもの。赤線で縁取られたものは坑道、薄い赤の矩形は計器埋設用の小部屋 (Cubby)、青線はボアホール、赤点は加速度計、緑点はトランスミッターを各々表している。緑の線は加速度計埋設深

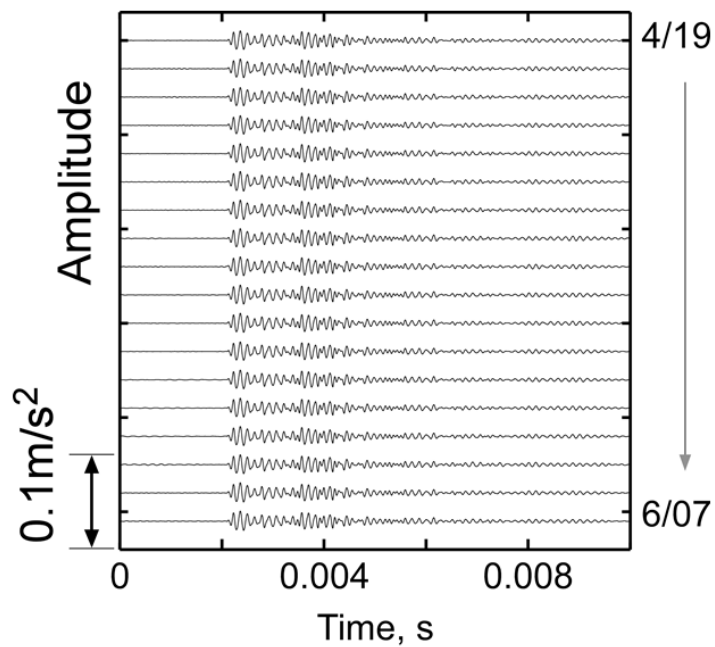


図2. 断層通過前の上盤側観測点 (TR0209) で 2011/4/19 から 2011/6/7 の期間に観測された波形をスタックしたもののラディアル成分。

図3にTR0209観測点において2011年11月、2012年4月、2013年9月に収録されたスタック波形を示す。特に透過信号が見られないノイズ部分において顕著に高周波成分が減衰していることがわかる。この原因としては、伝搬経路上の物性の変化以外に、加速度計とグラウトのカップリングの低下、加速度計の経年劣化など、いくつか考えられ、原因の特定やこれらの影響の分離は困難であるため、伝搬速度についてのみ検討することとする。

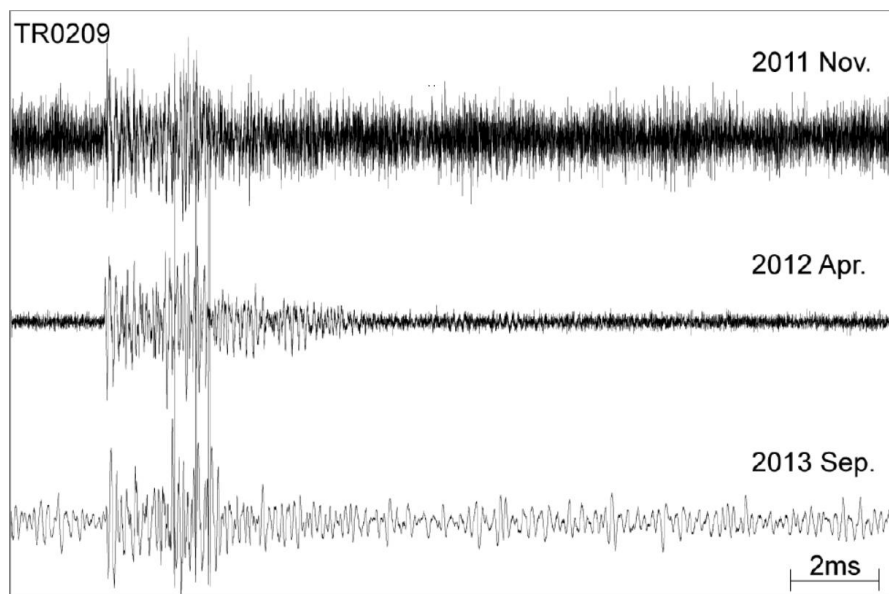


図3. TR0209観測点において2011年11月、2012年4月、2013年9月に収録されたスタック波形。いずれもラディアル成分。

P波速度の変化は、日々得られるスタック波形と基準スタック波形のP波部分について相互相関関数を計算し、最大相関を示す遅延時間から推定した。なお、基準スタック波形を2012年の中ごろに集録されたものとした場合、解析期間を通じて相互相関は、最も低い観測点(TRxc01)でもほぼ0.78以上であり、上盤側のTR0209観測点においては、ほぼ0.9以上であった。

2012年5月には、3観測点すべてにおいて遅延時間の増加、すなわち弾性波速度の低下が検出された。ただし、3観測点のいずれにおいても遅延時間は5~10マイクロ秒程度であり、断層に限定された速度低下ではないと推定された。この後に、長期のストライキと電気系のトラブルがあり、100日程度と300日程度の欠測を挟むこととなったが、計測再開後の2013年9月には遅延時間の増加が確認された。この時には、上盤側のTR0209観測点で20マイクロ秒程度であった一方、下盤側すなわち断層透過後の2観測点では60マイクロ秒程度であった。この差が断層部分の物性変化によるものと考え、断層の厚さを5m程度と仮定すると、およそ8%の速度低下が検出されたこととなる。なお、現時点では、対象断層において大規模な地震の発生は確認されていない。