

## コーダ波を用いた坑道検出の試み —南アフリカ Cooke4 鉱山観測サイト

今川祥太・川方裕則(立命館大)・土井一生(京大防災研)・吉光奈奈(東大院情報学環/地震研)・村上理(立命館大)・中谷正生・直井 誠(東大地震研)・Joachim Philipp (GMuG)・Anthony Ward・Gilbert Morema (Seismogen)・Vlok Visser・Sifiso Khambule・Thabang Masakale (OHMS)・Alex Milev・Ray Durrheim (CSIR)・Luiz Ribeiro (Gold One)・Mike Ward (Seismogen)・小笠原 宏(立命館大)

地殻内部の短波長不均質を考える手法として、コーダ波を用いた散乱波解析が用いられる。一般に散乱波解析では、散乱体の候補の位置を散乱波の走時のみから確率論的に推定するため、観測サイトや震源の偏りによっては推定される強度分布に虚像が現れる可能性がある。局所的に散乱強度の高い場所があると期待される場合には、一次散乱を仮定して推定された散乱強度の高い場所が M7 クラスの地震の余震域の一部と一致することが示唆されている(松本・他, 1999)。このように、局所的に分布する強い散乱体があると考えられる場合に、一次散乱を仮定してその分布を推定することが適切であるか否か、直接観察できる実構造を参照して調べられることが望ましい。南アフリカの Cooke4 鉱山では採掘の影響で極微小地震が頻発しており、近地観測ができる上、坑道配置図や地質図により直接的に実構造を把握することが可能である。坑道や堅坑、採掘領域などは配置が正確に分かっている空洞(散乱源)であり、散乱波解析による検出能力を検討するのに適した強い不均質構造であると考えられる。ただし、地震波観測点は期待される散乱体分布に比べて密集しており、また、採掘の影響による極微小地震をターゲットとする為、震源の分布にも偏りがある。このような偏った震源と観測点の分布は、自然地震を用いて解析をおこなう場合においても散見される。そこで本研究では、このような条件下において Cooke4 鉱山で収録された加速度波形の S 波コーダ部分を用いて一次散乱を仮定した散乱波解析を行い、散乱強度の高い場所と、実際の空洞構造との関係を調べた。さらに、様々な震源、観測点分布を仮定した合成データを用いて、観測点・震源分布による結果の依存性を検討した。

南アフリカの Cooke4 鉱山の地表から深さ約 1000 m に埋設された 6 点のボアホール型 3 成分加速度波形記録を用いた。サンプリング周波数は 500 kHz、データ長は 6.6 ms である。2011 年 10 月 31 日に発生したイベントのうち、直井・他(2012)によって精密に震源が決定されたイベントのなかから、明瞭な S コーダ波が記録されている 561 イベント(1137 トレース)を使用した。波形には、坑道の幅(2-4 m)に対応する 800-1600 Hz の帯域通過フィルターを施した。震源、観測点の分布とデータ長を考慮して、散乱体を検出する範囲を  $300 \times 300 \times 260 \text{ m}^3$  の空間に設定し、坑道の大きさに合わせて一辺 4 m の立方体ブロックに分割した。一般に S 波走時の 2 倍以降の時刻において、コーダ波の振幅は震源-観測点間の距離、初動の大きさによらず、同一の地震に対しては同じような振幅で指数関数的に減衰する(Sato *et al.*, 2012)。地震波の伝播経路上に局所的に強い散乱体があると、対応する時刻で大きな振幅が現れる。そこでまず、S コーダ波のエンベロープを指数関数で近似し、エンベロープをその指数関数で規格化した。規格化されたエンベロープが 1 を超えるものを強い散乱体の候補とみなし、その時刻に対応するブロックを散乱体の候補として、散乱体候補

を空間スタックし、散乱強度の三次元分布のイメージ(図)を推定した。散乱強度の三次元分布イメージと実構造である坑道配置図を比較した結果、深さ方向に関しては拘束できていないものの、検出された散乱体は平面的に堅坑・換気堅坑及びその周辺の坑道などの空洞部分(図の四角で囲んだ箇所)とよい一致を見せた。しかし、同時にそれ以外の位置、特に観測点に対して鏡像となる位置に強い虚像が確認された(図)。そこで虚像の原因を観測サイトや震源の分布の偏りと考え、散乱体を1箇所のみ仮定したモデルを用いて合成された波形で同様の解析をおこなった。その結果、震源が一様に分布している場合には、観測サイトが密集しているにもかかわらず虚像が見られないことがわかった(図)。一方、震源に偏りがある場合、本サイトのように観測点が密集していると虚像が見られた。震源分布の様な広がりには実際の自然地震観測では期待できないため、観測点の広がりが十分でない場合には、推定される散乱体を考察する際に、注意が必要であることが分かった。

謝辞: 本研究は JST/JICA, SATREPS、MEXT/JSPP 科研費 (21224012, 21246134)、ならびに MEXT による「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の助成を受けた。

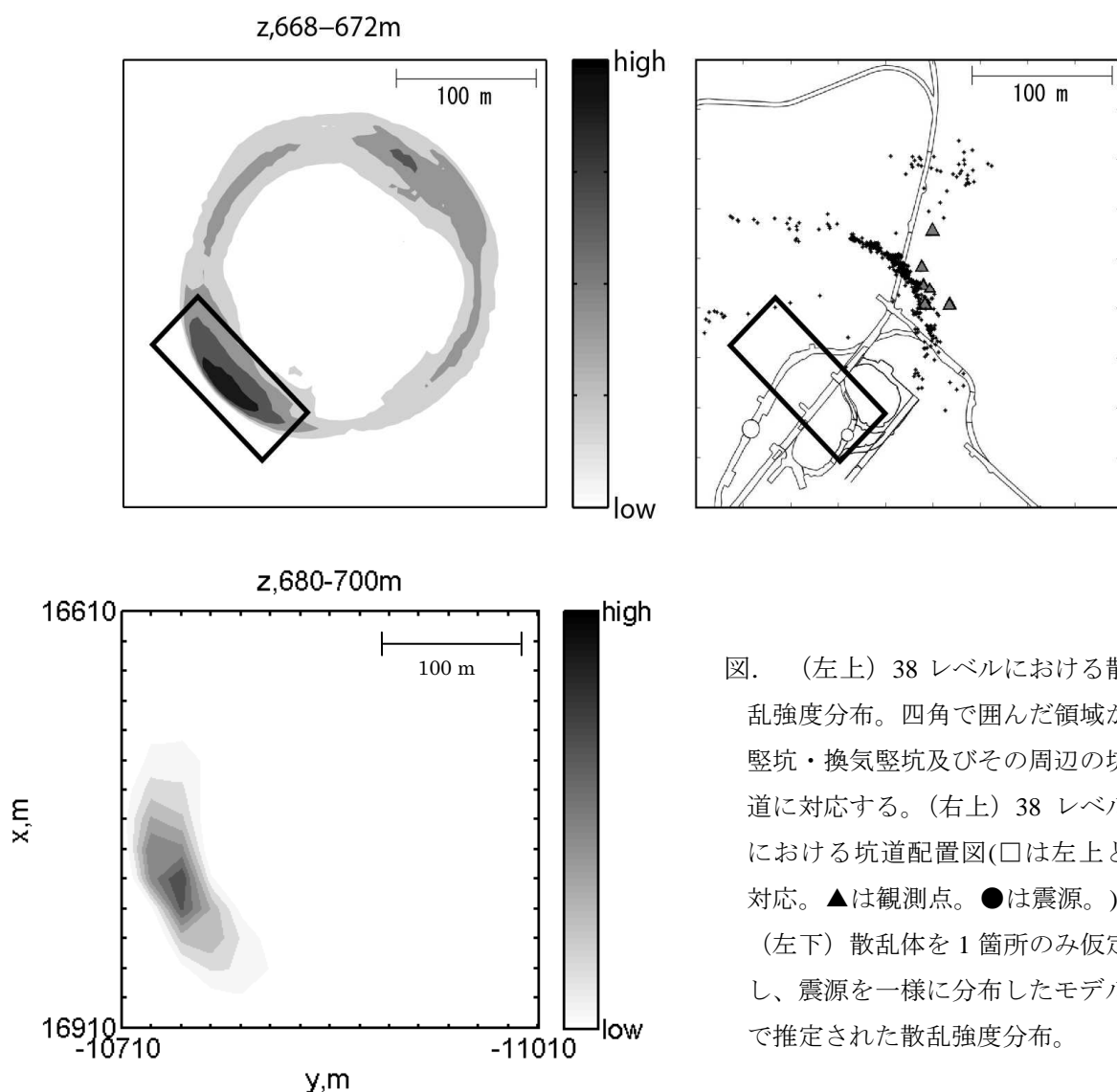


図. (左上) 38 レベルにおける散乱強度分布。四角で囲んだ領域が堅坑・換気堅坑及びその周辺の坑道に対応する。(右上) 38 レベルにおける坑道配置図(□は左上と対応。▲は観測点。●は震源。)。 (左下) 散乱体を1箇所のみ仮定し、震源を一様に分布したモデルで推定された散乱強度分布。