

## 合成開口レーダを用いたトンネル切羽監視システムの開発

安藤ハザマ 土木技術統括部 正会員○中谷匡志, 正会員 井ノ口拓郎, 正会員 山本浩之  
東北大学 秋山裕也, 佐藤源之

## 1. はじめに

施工中の山岳トンネルにおいて、切羽面の変位量を把握することは、安全管理の面で特に重要である。切羽面の変位計測は、レーザ距離計による事例が多く報告されているが、多数の計測点を配置した場合でも、離散的な計測であるため、変状の見逃しが考えられる。そこで、このような課題に対して、筆者らは、面的な計測が可能である地上設置型合成開口レーダ（Ground Based - Synthetic Aperture Radar 以下、GB-SAR と呼ぶ）による切羽監視システムの開発を進めている<sup>1)</sup>。

今回、GB-SAR による計測特性を検証するため、実際のトンネル切羽を想定した計測配置による基礎実験を実施した。本稿では、システムの概要と実験結果について報告する。

## 2. トンネル切羽監視レーダについて

本システムを構成する MIMO (Multiple Input Multiple Output) 型 GB-SAR は、複数のアンテナ素子を平面的に配置し、各アンテナの送受信を電氣的に制御することで、1 回/秒以内の頻度で変位計測が可能である。図-1 に計測概念図、写真-1 にシステム外観、表-1 にシステム諸元を示す。

図-1 に示すように、送信アンテナから放射された電波は、切羽面で反射した後、異なる経路で伝搬し、各受信アンテナで取得される。これにより、実装される受信アンテナ数よりも多くの受信アンテナを仮想的に作り出すことができ、精度の高い計測が可能となる。また、干渉 SAR と呼ばれる解析手法を用いることで、複数回の計測結果を比較し、十分な反射強度が得られる場合には、反射波の位相差から変位量を算出することが可能である。なお、一般的に GB-SAR のクロスレンジ方向とレンジ方向（図-1 参照）の空間分解能は、電波の伝播速度  $c$ 、周波数帯域  $B$ 、電波の照射角  $\theta$ （正面の場合は  $90^\circ$ ）、波長  $\lambda$ 、計測距離  $R$ 、アンテナ開口長  $D$  から以下の式で求められる。

$$\text{クロスレンジ方向} : \Delta X = \lambda R / D \quad (1)$$

$$\text{レンジ方向} : \Delta Y = c / 2B \sin \theta \quad (2)$$

両式より、周波数帯域およびアンテナ開口長を大きくすることで、空間分解能は向上することがわかる。しかしながら、これらの諸条件については、計測性能だけでなく実用性を考慮して決定する必要がある。そこで、今後のシステム設計の検討データを得るため、実際のトンネル坑内での計測配置を想定した基礎実験を行った。

キーワード：GB-SAR, 切羽計測, 肌落ち

連絡先：〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目 1 番 20 号 TEL:03-6234-3670 FAX:03-6234-3704

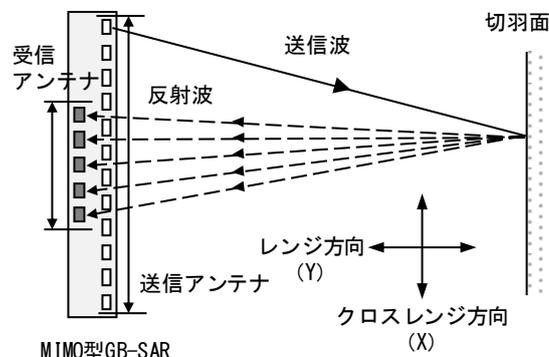


図-1 MIMO 型 GB-SAR 計測概念

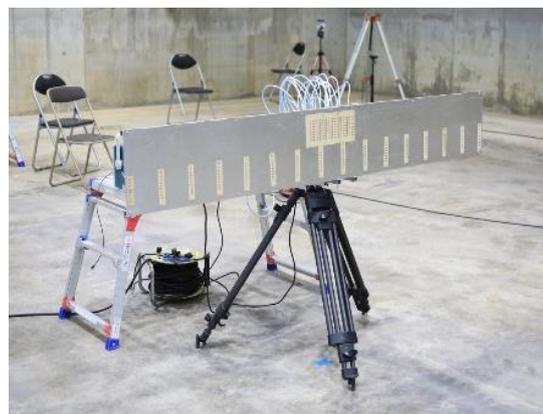


写真-1 システム外観

表-1 システム諸元

中心周波数 $f_c$	17.1 GHz
周波数帯域 $B$	200 MHz
波長 $\lambda$	17.5 mm
アンテナ開口長 $D$	1.5 m

### 3. 基礎実験

実験は、屋内施設において、実際のトンネル工事を想定した幅 12.7m、高さ 1.8m の模擬切羽を木製パネルで構築した。また模擬切羽面には、2.5m 間隔で変位発生点

(ターゲット No.1~5) を配置した。各ターゲットは、模擬切羽の背面に設置した可動架台に固定し、ハンドル操作により、1mm 単位でターゲットのみを前面に押し出すことができる。なお、架台を操作する際は、ダイヤルゲージをターゲットに設置し、変位量を直接確認した。

ここで、電波の反射強度は、反射面周辺の誘電率に影響するため、専用の樹脂製架台を製作し、模擬切羽の組み立てには樹脂製ボルトを用いた。さらに、ターゲットを含む模擬切羽面には、十分な反射強度を得るため、屋内用のクロス材を張り付けた。写真-2 に実験状況、写真-3 に模擬切羽背面のターゲットの設置状況を示す。

計測条件については、ターゲットのサイズは 5, 10, 20, 40cm の正方形、変位量は 1~20mm (押し出し方向)、計測距離は 5, 10, 15m とし、各条件における実際の変位量と計測結果を比較した。

### 4. 実験結果

図-2 に、計測結果の例として、ターゲット No.1~5 の変位量が 5mm (ターゲットサイズ 20cm、計測距離 10m) の場合を示す。図は、レーダ位置 (X=0, Y=0) を基準とし、変位として算出可能な反射波の  $\lambda/2$  に相当する、-4~4mm をカラーマップで描画している。なお、空白領域は十分な反射強度が得られなかった箇所である。

各ターゲットについては、実際の変位量と概ね合致した結果が得られていることがわかる。さらに詳細な比較のため、図-3 に同様の条件における、各変位量での結果を示す。ターゲット No.1~4 については、概ね実際と合致した結果が得られているものの、No.5 については 3mm 以上の場合で得られていない。これは、電波の照射角  $\theta$  が小さくなることで、十分な反射強度が得られなかったためと考えられる。

### 5. おわりに

今回、MIMO型GB-SARによる模擬切羽を用いた基礎実験を実施した。その結果、工事の安全管理として有効なデータが得られるものと判断された。今後は、実際のトンネル工事で適用し、精度の検証を進める計画である。

**参考文献** 1)井ノ口ほか, GB-SARを用いたトンネル切羽肌落ちの監視について, 日本応用地質学会令和元年度研究発表会講演論文集, 72, pp.139-140, 2019

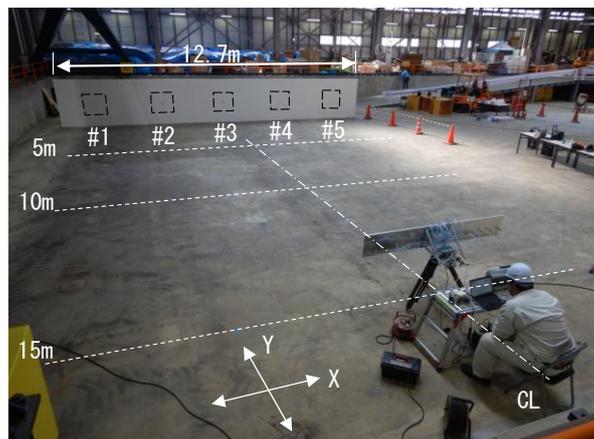


写真-2 実験状況

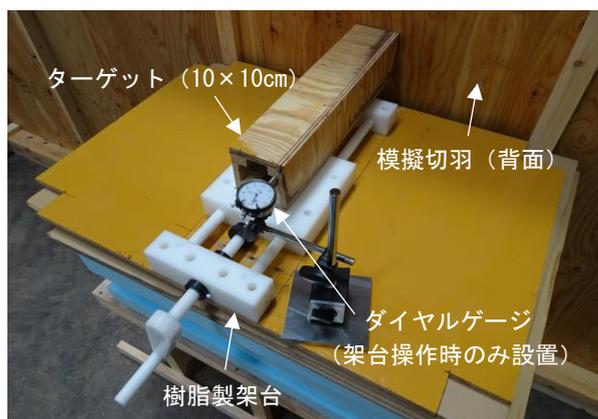


写真-3 ターゲットの設置状況

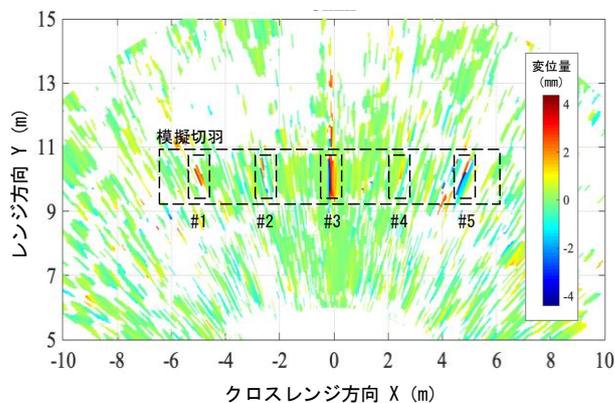


図-2 変位検知結果 (変位量 5mm)

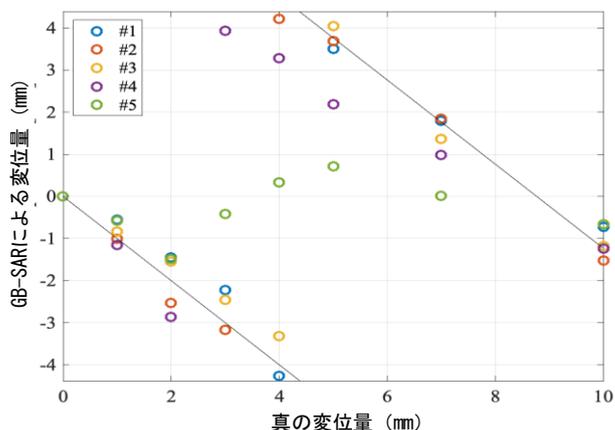


図-3 各ターゲットの計測結果