

## トンネル切羽における合成開口レーダを用いた変状検知システムの開発

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  
日本システムウェア (株) プロダクトソリューション事業本部 石川英嗣, 渡邊光  
東北大学 佐藤源之

## 1. はじめに

施工中の山岳トンネルにおいて, 切羽の変状をリアルタイムで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報告されているものの, 多数の計測点を配置した場合でも, 結果は離散的となり, 変状の見逃しの可能性がある. このような課題に対して, 筆者らは, 切羽全面の監視が可能となる地上設置型合成開口レーダ(以下 GB-SAR) による変状検知システムの開発を進めている<sup>1)</sup>.

今回, 開発システムの確認試験として, 変位量を算出可能な計測距離と空間分解能を把握する検証実験を実施した. 本稿では, システムの概要と得られた結果について報告する.

## 2. 変状検知システムについて

本システムのレーダアンテナは, 複数のアンテナ素子を直線的に配置した MIMO (Multiple Input Multiple Output) 型 GB-SAR で構成され, 各アンテナの送受信を電氣的に制御することで, 1 秒程度の間隔で計測が可能となる. 図-1 に計測概念図, 写真-1 にレーダアンテナ外観, 表-1 にシステム諸元を示す.

図-1 に示すように, 放射された電波は, 切羽面で反射した後, 異なる複数の経路で伝搬し, 全ての受信アンテナで取得される. また, 取得された反射波データを合成開口処理することで, 切羽面の変状を高精度で計測することが可能となる. さらに, 干渉 SAR と呼ばれる解析手法により, 複数回の計測で検知される反射波の位相差から, 切羽面の変位量を算出する. 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.

$$\text{クロスレンジ方向} : \Delta X = \lambda R / D \quad (1) \quad \text{レンジ方向} : \Delta Y = c / 2B \sin \theta \quad (2)$$

ここで, 干渉 SAR による変位量の算出は, 観測対象から十分な反射強度を取得する必要がある. また, 電波はレーダアンテナから放射状に照射されるため, 計測距離や電波の入射角度により得られる反射強度は変化するものと考えられる. そこで, 実際のトンネル坑内における計測を想定した観測範囲において, 得られる反射強度や空間分解能などの計測特性を把握するための基礎的な検証実験を行った.

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

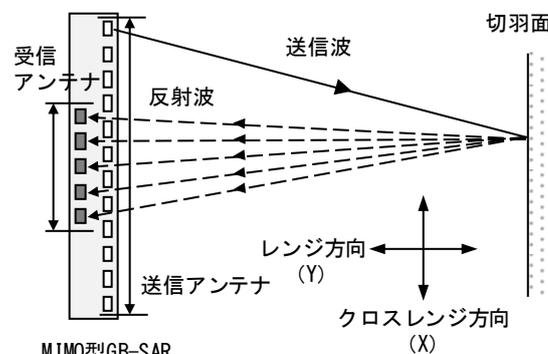


図-1 MIMO 型 GB-SAR 計測概念



写真-1 レーダアンテナ外観

表-1 システム諸元

中心周波数	24GHz
波長 $\lambda$	12.4mm
差分の算出限界 $\lambda / 4$	3.1mm
計測時間	1秒程度
アンテナユニット寸法	100×20×20cm 約10kg

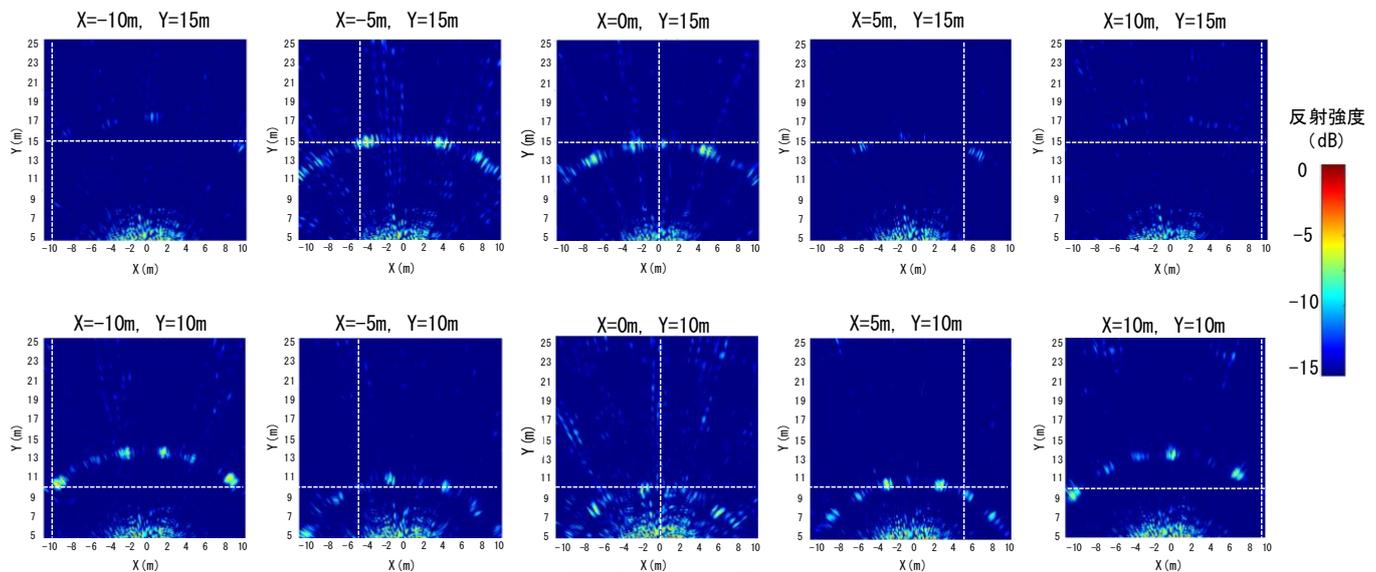


図-2 計測結果例

### 3. 検証実験

検証は、周辺からの反射がない屋外において実施し、金属板で製作したコーナーリフレクタ（一辺50cm）の設置位置と、検知される反射強度画像を比較した。また、検証範囲は、実際の切羽観測を想定し、クロスレンジ方向  $X=-10\sim 10\text{m}$ 、レンジ方向  $Y=5\sim 25\text{m}$  とした。実験状況を写真-2 に示す。

### 4. 実験結果

計測結果の例として、 $X=-10\sim 10\text{m}$ 、 $Y=10$  および  $15\text{m}$  における反射強度画像を図-2 に示す。図中、レーダアンテナは、 $X=0$ 、 $Y=0$  に位置し、観測範囲における反射強度（ $0\sim -15\text{dB}$ ）をカラーマップで描画した。また、白点線の交差箇所がコーナーリフレクタの設置位置を示しており、反射強度が大きいものを赤系色、小さいものを青系色で示している。

各図より、最大反射強度は設置位置と概ね合致した結果が得られたことから、コーナーリフレクタの一辺である50cm程度の空間分解能を有しているものと考えられる。しかしながら、異なる位置においても、比較的大きな反射強度が確認される。これらについては、レーダアンテナから照射する電波のサイドローブによる虚像と考えられ、メインローブと同等の反射強度を示している場合もあった。なお、これらの虚像については、変位量を算出する解析で、合成開口処理により影響は小さくなるものと考えられる。

ここで、計測距離  $Y=10\text{m}$  では、変位算出の条件となる明瞭な反射強度が得られたのに対し、 $Y=15\text{m}$  では  $X=-10$  および  $10\text{m}$  では十分な反射強度が得られなかった。このことから、計測距離が15mを超えた場合、切羽面からの反射強度が小さくなることが考えられる。そのため、実際の切羽監視では、切羽面から10~15m程度後方の位置にレーダアンテナを配置することで、精度の高い観測が行えるものと考えられる。

### 5. おわりに

今回、MIMO型GB-SARによる変状検知システムを開発し、システムの確認試験を実施した結果、現場適用に求められる計測距離と空間分解能を有することを確認した。今後は、実際のトンネル工事における計測データを蓄積し、切羽面における変状の検知精度の検証を進める計画である。

参考文献 1)中谷匡志・井ノ口拓郎・山本浩之・秋山裕也・佐藤源之：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，土木学会第75回年次学術講演会講演概要集，VI-1005，2020。

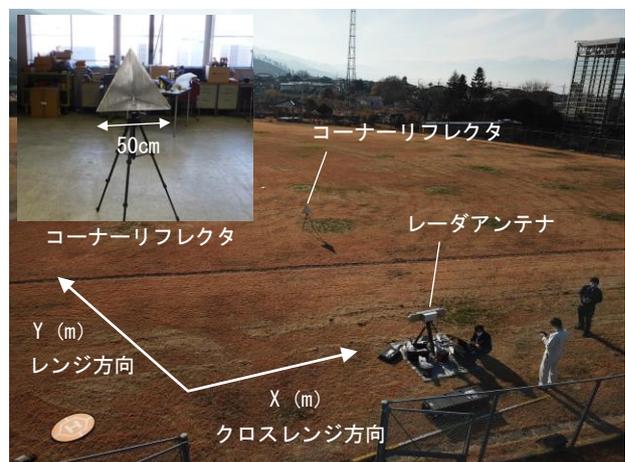


写真-2 実験状況