

合成開口レーダによるトンネル切羽計測の可視化手法の検討

安藤ハザマ 土木技術統括部 正会員○井ノ口拓郎 正会員 中谷匡志 正会員 山本浩之
北陸支店土木部柏崎トンネル作業所 三沢良太 栗田将和
東北大学 秋山祐也 佐藤源之

1. はじめに

施工中の山岳トンネルにおいて、切羽の変状を把握することは、安全管理の面で特に重要である。合理的な切羽の監視には、切羽の面的な計測が可能であることや、リアルタイムでの可視化が求められる。ここで、地上設置型合成開口レーダ（以下、GB-SAR）は、電波を送受信するアンテナの位置を変えながら計測することで、高精度での変位検知が可能である。また、トンネル切羽における計測では、小型でメンテナンスが容易なシステムが求められる。そこで、実用的な切羽計測システムとして、MIMO (multiple-input and multiple-output) 型 GB-SAR による切羽監視システムを開発した。本稿では、開発したシステムの概要と、変位分布を可視化する手法について行った検討について報告する。

2. システム概要

MIMO 型 GB-SAR は、複数のアンテナを平面的に配置し、各アンテナの送受信を電氣的に制御しながら計測するレーダである。複数回計測することで、トンネル切羽からの反射波の位相情報を比較し、切羽の変位量を高精度で算出することが可能である。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。

一般的にレーダアンテナは、アンテナの数が多いほど精度が向上するものの、サイズが大きくなるため実用性が低下する。本システムは、今後の検証のため、精度が保証される送信アンテナ 8 基および受信アンテナ 16 基の構成とした。また、これらのアンテナと制御用の回路は、アルミ製のフレームに固定し、アンテナ前面には樹脂製の保護カバーを装着した。なお、保護カバーの塗装には、含有する金属による計測への影響を考慮し、金属含有量が少ない塗料を採用した。さらに、切羽に計測範囲を明示するため、アンテナユニットの端部の 4 箇所にガイドレーザを設置した。

ここで、従来の GB-SAR は、自動的な機械可動によりアンテナ位置を移動していた。そのため、計測には数十秒～数分程度の時間を要し、突発的に発生する肌落ちを検知することは困難であると考えられた。これに対し、本システムは、計測間隔が従来の 1/10 以下程度となる 0.5～1 秒での計測が可能であり、様々な地質状況を有する切羽においても、適用が可能であると考えられる。

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

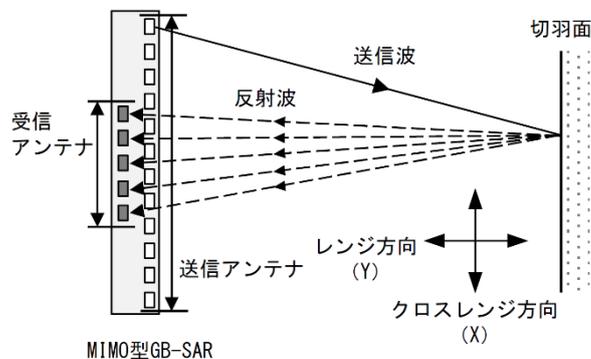


図-1 MIMO 型 GB-SAR 計測概念



写真-1 アンテナユニット外観

表 1-システム諸元

中心周波数	24GHz
波長	12.4mm
計測間隔	0.5～1秒
アンテナユニット 寸法	幅1m、高さ20cm 奥行き20cm 重量約10kg

3. レーダ画像について

図-2 に施工中のトンネル切羽（掘削断面幅 13m，高さ 7.5m）における計測例，図-3 に計測時のシステム配置および XYZ 成分の定義を示す．図-2 に示すように，レーダ画像は，レーダ位置（ $X=0, Y=0$ ）を基準とした 2 次元画像として出力される．ここで，クロスレンジ方向は， X 方向に対し約 15° の角度があるが，トンネルの規模から誤差の範囲とし X 成分と同等とし，レンジ方向は，計測時の Y および Z の合成成分とした（図-3 参照）．このため，切羽全面を計測する場合，レーダ画像上における切羽形状は実際の形状とは異なり，変位発生位置を正確に特定することは困難となる．この課題に対し，切羽における変位分布を可視化し，施工中における日々の安全管理に活用可能な手法を検討した．

4. 計測結果の可視化について

レーダ画像を切羽面における変位分布図としてイメージングする手法を検討した．まず，レーダ位置を基準とし，切羽面の a, b, c の 3 点に対する距離と角度を測量する（図-3 参照）．これにより，レーダ画像中の a, b, c の各点を特定し，実際の切羽形状に再構築することが可能となる（図-2 参照）．なお，再構築の際には，データ配列は等間隔とし，データの補完などは行わないものとした．

図-4 に，具体的な処理フローを示す．切羽形状に再構築されたレーダ画像については，上述のように X 成分と YZ 合成成分の 2 次元画像となる．一方で，デジタルカメラで撮影した，2 枚以上の切羽の写真データと切羽の実寸法から切羽面の点群データ（ X', Y', Z' ）を生成する．この際，点群の間隔はレーダ画像の解像度より多くなるよう留意する．次に，レーダ画像の各データ配列に，一致する点群データの Z' 値を追加する．以上より，レーダ画像を 3 次元的にイメージングし，切羽面の凹凸形状を含めた変位分布図とすることが可能である．

図-5 に，上述の方法によるイメージング例を示す．図は，変位量に対応したヒートマップであり，レーダから遠ざかる変位は赤，近づく場合は青で表示した．なお， Y 成分のマッピング頻度は， X 成分に比べ疎となるが，実際の切羽寸法から 25cm 程度であり，切羽の安定性を評価するうえで，十分な空間分解能を有すものと考えられる．

5. おわりに

MIMO 型 GB-SAR によるトンネル切羽の計測から得られる 2 次元のレーダ画像を，実際の切羽形状に再構築する手法について検討した．この手法により，日々の施工管理の中で，切羽の安定性をリアルタイムでの評価が可能である．今後は，本システムの運用方法を検討するため，現場でのデータ収集を行い，精度の検証を進める予定である．

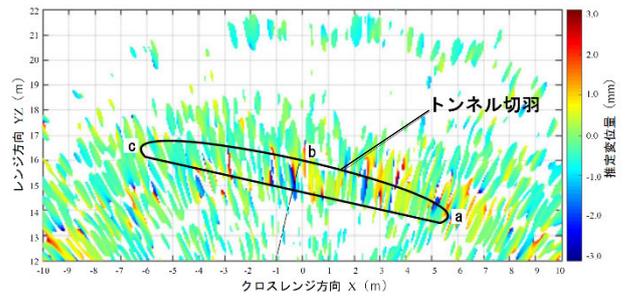


図-2 変位分布のレーダ画像

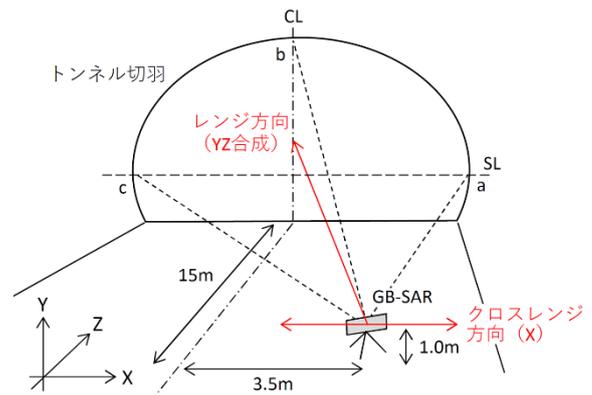


図-3 トンネル切羽における GB-SAR 配置概要

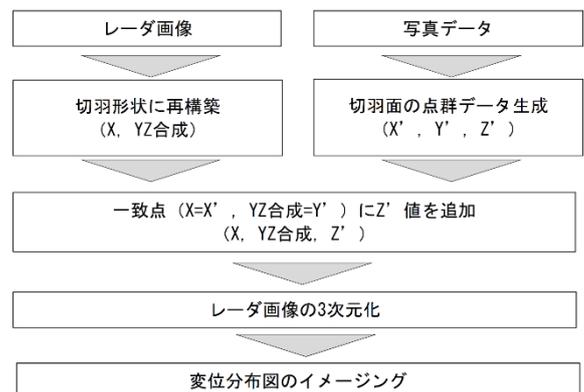


図-4 可視化処理フロー

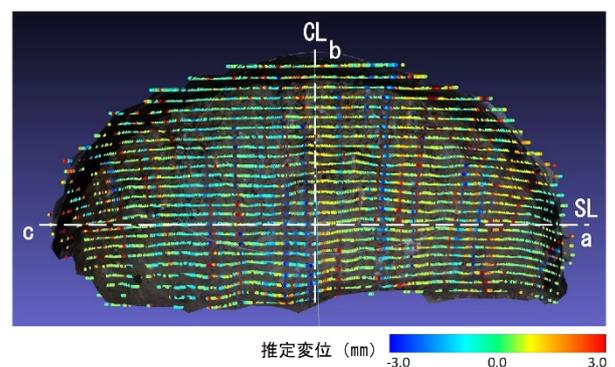


図-5 3D イメージング結果