

## トンネル切羽モニタリングに向けたミリ波高速イメージングレーダーの性能確認

清水建設（株） 正会員 ○岩城 英朗，多田 浩幸，青野 泰久  
アルウェットテクノロジー（株） 正会員 能美 仁，非会員 白井 郁夫，能美 陽

## 1. はじめに

著者らは、山岳トンネル工事における肌落ち・落石による死傷災害の防止対策として、切羽に対する非接触かつ面的なモニタリングを可能とする電波を用いた空間連続計測の開発に取り組んでいる。既報<sup>1)2)</sup>では、実際のトンネル施工現場において高速イメージングレーダーを用いた試計測を行い、同手法の有用性を示したが、同レーダーの受信アンテナは大型であり、現場での連続計測に課題があることが分かった。そこで本報では、より高い周波数の電波（ミリ波）を用いることでアンテナを小型化し高性能を実現したミリ波高速イメージングレーダーを、トンネル切羽モニタリングに適用するために基本性能の確認試験を行った結果を示す。

## 2. ミリ波高速イメージングレーダーの概要

トンネル切羽など面的に拡がりを持った対象において、センサやターゲットなどの機器や部材の設置を行うことなく非接触で、かつ変位や振動の分布計測、すなわち空間連続計測を行うためには、電磁波（電波および光波）を用いた計測法が有用である<sup>1)</sup>。電磁波を用いた非接触計測には様々な方式があるが、著者らは電波を対象物に向け照射し、その反射波（散乱波）を、複数のアンテナ（アンテナアレイ）で同時に捉え、それらの受信信号を合成処理することで、対象物の変化を面的にかつ高速で捉えることができる高速イメージングレーダーを用いた変位・振動の計測に取り組んできた<sup>2)</sup>。しかし既報<sup>2)</sup>のレーダーは、周波数 17GHz 帯のマイクロ波を用いており、受信アンテナアレイの全幅が約 2m と大型であるためにトンネル内での設置運用が困難であった。さらに表-1 に示すように、複数の対象物を見分ける性能（空間分解能）が 50cm 程度と比較的粗いことが課題であった。そこで本報では、アルウェットテクノロジー社が試作した、周波数 79GHz 帯のミリ波を用いるミリ波高速イメージングレーダー（以下、ミリ波レーダーと記す）に着目し、同レーダーを用いたトンネル切羽の面的変位・振動計測に向けた基本性能の確認を行った。同レーダーの外観および性能諸元は図-1 および表-2 に示す通りであり、トンネル切羽など建設現場においても容易に設置が可能で、かつ高い距離分解能を実現している。

表-1 マイクロ波レーダー諸元

周波数帯	17GHz 帯
観測範囲	100m
受信アンテナ全幅	2m (64 素子)
距離分解能	0.5m
方位分解能	0.25°
計測間隔	0.001 秒

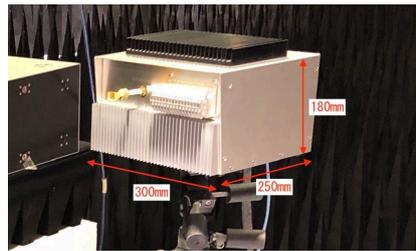


図-1 ミリ波レーダー外観

表-2 ミリ波レーダー諸元

周波数帯	79GHz 帯
観測範囲	3.5m
受信アンテナ全幅	0.11m (16 素子)
距離分解能	0.038m
方位分解能	1.94°
計測間隔	0.0005 秒

## 3. ミリ波高速イメージングレーダーの基本性能の確認

図-1 のミリ波レーダーを、外部の雑音などの影響を避けるため電波無響室内にトンネル切羽を想定したコンクリート試験体、およびトンネル切羽で運用するドリルジャンボなどの建設機械を想定した金属試験体と併せ、トンネル切羽付近での機器配置を想定した図-2 のように設置した。これらの試験体に、表-3 に示すように変位あるいは振動を加え、約 10m 離れた位置で計測を行った。また、レーザードップラー速度計（LDV：ポリテック社 RSV-150）および、従来のマイクロ波高速イメージングレーダー（アルウェットテクノロジー社 VirA）（以下マイクロ波レーダーと記す）で同時に計測を行い、計測値の比較を行った。

キーワード トンネル切羽，モニタリング，非接触計測，ミリ波，高速イメージングレーダー

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設（株）技術研究所 TEL03-3820-6512

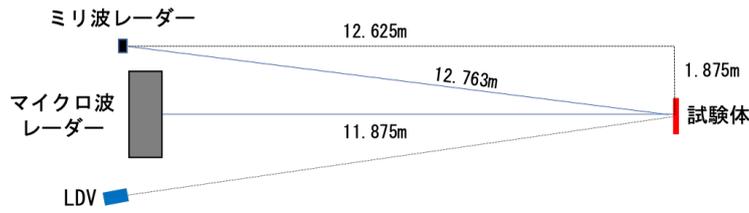


図-2 電波無響室内の機器および試験体配置図

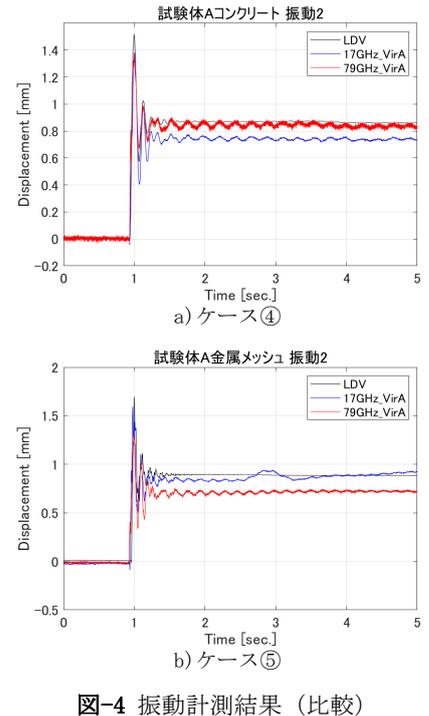
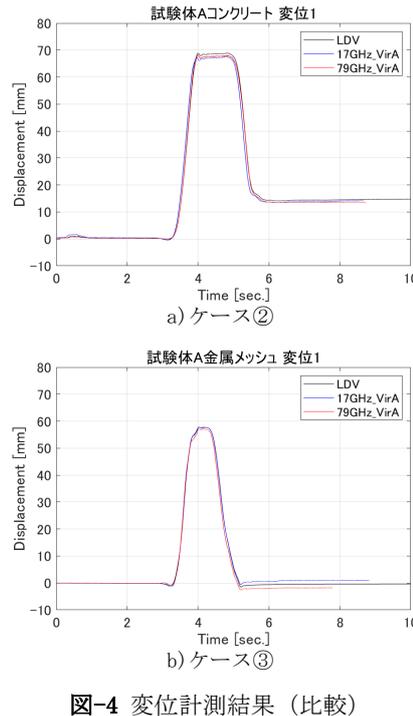
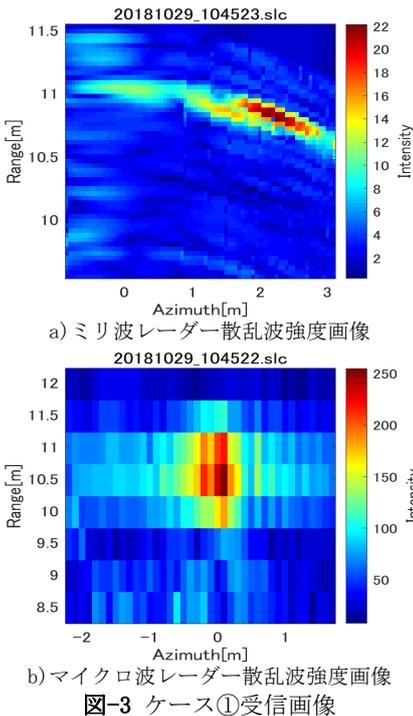
表-3 実験ケース

	試験体材質	設置方法	加力方法
①	コンクリート	直立	静止状態
②			変位 (動かす)
③	金属メッシュ		振動 (叩く)
④	コンクリート	45度傾斜	変位 (動かす)
⑤	金属メッシュ		
⑥	コンクリート		
⑦	金属メッシュ		

4. 結果

表-3 のケース①におけるミリ波レーダー、および従来のマイクロ波レーダーの受信波を散乱波強度で画像化した結果を図-3 に示す。ミリ波レーダーの散乱波強度画像の一画素（ピクセル）のサイズは約 3.7cm×5cm で、マイクロ波レーダーの 50cm×10cm と比べ高精細に試験体の位置を認識できる。実験ケース②③における計測結果は図-4 に示す通りであり、試験体を 70mm 程度動かした際のミリ波レーダーの計測値（変位）と、マイクロ波レーダーおよび LDV の計測値との差が 1mm 以内であり、両者はほぼ等しいといえる。

一方で、実験ケース④⑤において、試験体の背面からハンマーで叩いた結果、図-5 に示す通り各々の計測値に差が生じた。これは、試験体の変位が 1mm 未満と微小であり、各々の計測位置が微妙にずれていることが起因していると考えられる。しかし、同ケースで減衰振動の周期を求めたところ、ケース④はミリ波レーダー 0.24 秒に対してマイクロ波レーダーおよび LDV が 0.22 秒、ケース⑤ではミリ波レーダー 0.17 秒に対してマイクロ波レーダーおよび LDV が 0.16 秒と概ね等しい結果となった。また、実験ケース⑥⑦も同様の結果が得られた。



5. まとめ

本報のミリ波レーダーは、従来のマイクロ波レーダーおよび LDV と同等な計測精度を有することを確認できた。トンネル建設工事中の切羽変位・振動を面的かつ連続的に捉えるためには、同レーダーの高い空間分解能が有用である。今後は同レーダーを、法面や建物壁面など面的に拡がりを持つ対象や、実際のトンネル切羽へ適用し連続計測を行い、切羽周辺における災害防止に寄与する計測法の開発に取り組む所存である。

参考文献

- 1) 岩城英朗ほか: 光波を用いた非接触計測に基づく切羽変位の面的計測に関する検討, 土木学会第 73 回年次学術講演会, 2018. 08
- 2) 多田浩幸ほか: 高速イメージングレーダーによる切羽変位の面的計測に関する検討, 土木学会第 73 回年次学術講演会, 2018. 08