

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 振動計測性能の向上

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

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¹⁾²⁾では、従前用いていたマイクロ波（周波数 17GHz）レーダーに代わり、近年自動運転における障害物の早期検知など様々な分野で適用が行われているミリ波（周波数約 80GHz）を用いることで小型化、可搬化した高速イメージングレーダーを試作して種々の計測を行い、電波を用いる空間連続計測の有用性を示した。本報では、これらのレーダーを実際のトンネル切羽モニタリングに適用する際の課題であった、受信信号のリアルタイム処理を可能とし、さらに計測対象の位置同定を簡便に行う機構を追加した新たなミリ波レーダーに対して、改めて基本性能を確認する試験を実施し、計測値の確からしさと振動計測性能の向上を確認する。

2. ミリ波高速イメージングレーダーの概要

本報で用いる高速イメージングレーダーは、トンネル切羽など面的に拡がりを持つ対象に対して電波を照射し、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。既報¹⁾²⁾では、アンテナアレイで捉えた受信信号を計測対象からの散乱波の強さと微小な変位を示す複素振幅データに変換（画像化）する処理を信号受信と同時に行うことが困難であり、実現場適用に対する課題となっていたが、**図-1** および**表-1**に外観および諸元を示すレーダーは、この処理を信号受信と同時にリアルタイムで行うことができるよう、デジタル信号処理プロセッサ（DSP）を含む信号処理機構を新たに備えた。さらに、同レーダーに 3D Lidar を追加し、これを用いて取得した計測対象の点群から画像化範囲を設定することを可能とした。この結果、計測データと観測対象の位置（座標）を容易に同定できるようになった。



図-1 レーダー外観

表-1 レーダー主要諸元

使用周波数	78GHz 帯
計測範囲	±15°
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	0.001 秒(1kHz)

3. 計測値の確からしさ

図-1 のレーダーの計測データの確からしさを確認するために、一辺 10cm のアルミ平板を電波無響室内に設置した卓上振動台に固定し、一定の振幅で振動を付加した場合の変位および振動を計測した。**図-2** は 3D Lidar で取得したレーダー前面の点群を用いてレーダーの計測範囲、すなわち画像化範囲を設定して計測した結果（散乱波強度画像）であり、壁面およびレーダーの送信波に応じて強い散乱波を生じる卓上振動台と試験体が容易に区別できる。**図-3** は**図-2** で同定した試験体の位置における計測結果（変位および変位計測値を微分して得る移動速度、さらに 1 秒毎の速度 RMS 値）と、同時に計測したレーザードップラー速度計（LDV）との比較例であり、レーダーで取得した変位計測値から得た試験体の移動速度が、受信信号そのものに起因する位相ノイズの影響により、LDV で取得した速度計測値より大きい結果となっているが、変位および速度 RMS 値においては、両者の計測値はほぼ等しいといえる。

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 TEL 03-3820-5504

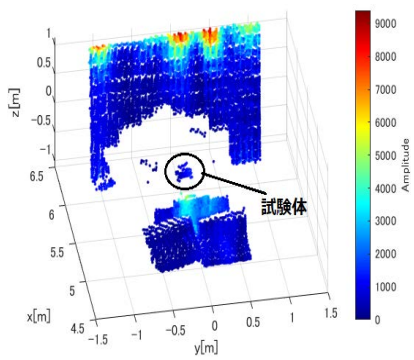
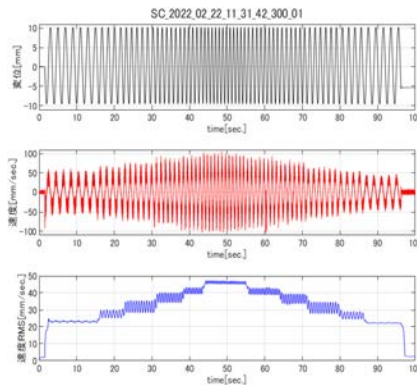
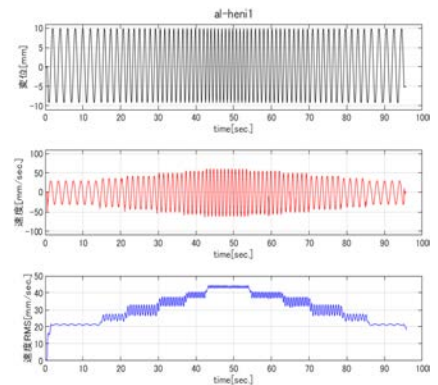


図-2 試験体の位置



a) レーダー計測値



b) LDV 計測値

図-3 計測結果の比較例 (振幅±10mm のケース)

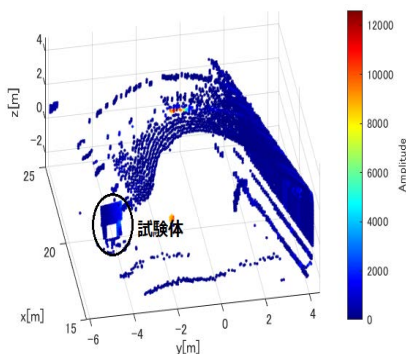


図-4 壁面試験体の位置

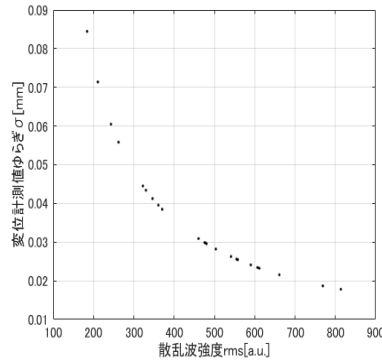


図-5 静止時の計測誤差

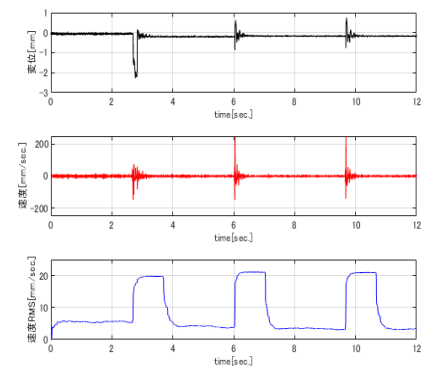


図-6 振動計測結果

4. 振動計測性能の向上

次に、トンネル切羽の鏡吹きつけコンクリート面を模してベニヤ板にモルタルを塗布した壁面試験体（一辺90cm）を、実大トンネルを模擬した施設内で実現場適用を想定した距離（約20m）に設置し、試験体背面からハンマー打撃を与えた際の振動を計測した。図-4に示すようにトンネル壁面近傍に設置した試験体が、木脚部を含め容易に確認できる。図-5はレーダーに対して正対して設置した試験体にハンマー打撃を与える以前、すなわち静止時の変位計測結果を散乱波強度で整理した結果であり、壁面試験体表面の凸凹に起因する散乱波強度のばらつきがあるが、そのすべてにおいて変位計測値の標準偏差 σ は0.1mm未満である。図-6はハンマー打撃を与えた場合の計測例であり、ハンマー打撃に伴う振幅1mm未満の振動および減衰を捉えることができ、さらに速度および速度RMS値も試験体の動きを捉えている。なお既報¹⁾²⁾ではレーダーが用いる電波の半波長（約2mm）を超過する変位が生じた場合などに、その超過分を加算することが出来ない誤差（アンラップ誤差）が生じるケースがあったが、本計測ではこのようなケースは殆ど見られない。

5. まとめ

本報で用いたレーダーは、離れた計測対象の振動の分布、すなわち面的振動計測がリアルタイムで可能であり、その変位計測値はLDVとの比較において等しいといえる。加えて、静止時の変位計測値から、距離20m離れた計測対象の0.1mmの微小変位および振幅1mm未満の振動が計測できることを確認した。今後は、同レーダーを実際のトンネル切羽へ適用して連続計測を行うことを通じて、切羽の異常を早期に検出する因子の抽出、ひいては切羽周辺における災害防止に寄与する計測法の開発に引き続き取り組む所存である。

参考文献

- 1) 岩城英朗ほか：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，土木学会第74回年次学術講演会，2019.09
- 2) 岩城英朗ほか：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面的振動計測性能の確認，土木学会第75回年次学術講演会，2020.09