

(40) 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向上

岩城 英朗¹・多田 浩幸¹・能美 仁²

¹正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)
E-mail: iwakih@shimz.co.jp, tada_h@shimz.co.jp

²正会員 アルウェットテクノロジー株式会社 (〒181-0013 東京都三鷹市下連雀 3-2-24)
E-mail: h-nohmi@altek.jp

山岳トンネル工事における肌落ち・落石等による死傷災害の防止対策のために、切羽の変状を面的かつ遠隔・非接触で捉えることが可能なミリ波高速イメージングレーダーに着目し開発を行っている。

著者らは、切羽の肌落ち・落石等の前兆を、削孔作業等に伴う切羽表面の微小な動きや振動数の変化と考え、これらをレーダーで捉える可能性を、パネル試験体を用いた基本試験および切羽を模擬した壁面を計測対象とした試験を通じて検証した。なお、本報で示すレーダーは、計測結果をリアルタイムで可視化解析することができ、さらに計測対象の形状および位置を3次元で取得し、それらをレーダー座標系に変換することで計測対象をより精緻に捉えることを併せて可能とした。これらレーダーの性能向上に対する検証を、計測値の確からしさとばらつき(誤差)と併せて示し、実際のトンネル切羽への適用に向けた課題などを整理する。

Key Words: tunnel face monitoring, safety assessment, millimeter wave, high speed imaging radar

1. はじめに

山岳トンネル工事における肌落ち・落石等による死傷災害の防止対策は急務であり、そのためには、切羽のどの範囲で変状の徴候が発生しているかを早期に検知できる計測手法の適用が有用と考えられる。

しかし、切羽に対して何らかのセンサや機器を設置することは困難であるため、遠隔・非接触で微小な変化を捉える方法が必須となる。

遠隔・非接触で計測対象の微小な変化を捉えるためには、レーザー光などの光波や、波長が短い電波、すなわち電磁波を計測対象に照射して計測対象から反射・散乱する電磁波を捉え、その往復時間から計測対象の変位を捉える TOF 法や、照射した電磁波(送信波)と反射・散乱した電磁波(受信波)の位相差から、TOF 法よりも微小な変位を捉える位相差法などがあり、これらの手法を基にしたレーザー距離計などが実用化、商品化されている、しかし、これらの機器を用いる場合、計測対象のごく限られた箇所の変化を捉える形となるため、本報で計測対象とする切羽の全体から、変状が発生した位置やその変化を捉えることは難しい。

同様に、計測対象の形状や変化を面的に取得できるよ

う開発されたレーザーस्कヤナなどは、計測間隔が比較的 low、岩城ら¹⁾が示した通りドリルジャンボなどを用いた削孔に伴う切羽の振動を捉えることは難しい。

上半ら²⁾は、レーザー光を計測対象に照射し、その光の波長と、計測対象からの反射波との波長差から、計測対象の移動速度を検知することができるレーザー Doppler 速度計(LDV)を用いて、斜面岩塊の崩落を早期に検知する検討を行っており、岩塊を模擬した試験体を用いた実験では、試験体表面の振動数が、試験体が崩落する直前に、数百から数十 Hz まで低下することを LDV の計測結果から示している。切羽のモニタリングにおいても同程度の振動数を捉えられる計測が必要と考えられる。

そこで著者らは、波長が短い電波を計測対象に広く照射し、その全ての範囲から反射・散乱する電波を複数のアンテナ(アンテナアレイ)で同時に捉えて解析した結果から、対象物の微小な変位や振動を面的に捉えることができるレーダー(イメージングレーダー)を用いれば、切羽の変状の兆候や発生箇所が早期に検知できると考え、同レーダーを用いたトンネル切羽モニタリングの開発に取り組んできた。

既報³⁾では、周波数約 80GHz の電波(ミリ波)を計測対象に 1 ミリ秒以下の間隔で照射し、その散乱波を解析、

画像として得ることで計測対象の微小な変位や振動分布を捉えることができるレーダー（ミリ波高速イメージングレーダー）を試作し、その性能確認を行うと共に、トンネル切羽モニタリングへの適用可能性、すなわち切羽の微小な変位あるいは振動の変化を捉える可能性に対する一連の検討結果を示した。

本報ではこのレーダーが受信する電波の解析部に改良を加え、さらに計測対象の形状および位置を精緻に把握することができるよう、3次元空間情報取得機能を加えた性能向上を行った。この性能向上に対して改めて基本性能の確認試験を実施し、計測値の確からしさと、誤差を検証した結果を示す。さらに、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に大きな課題となると思われるレーダー設置位置などによる計測範囲の制限と分解能を整理する。

2. ミリ波高速イメージングレーダーの性能向上

本報で用いたミリ波高速イメージングレーダーの外観および主要諸元を図-1および表-1に示す。

このレーダーは、既報³⁾で示したレーダーが使用する電波の周波数帯を79GHz帯から78GHz帯に変更した以外に大きな差は無く、片手で運搬できる大きさと重さで、三脚等を用いて切羽近傍に容易に設置できる。

(1) 受信信号のリアルタイム処理

これまでは、複数の受信アンテナ（受信アンテナレイ）のアンテナ素子ごとに捉えた受信信号を、散乱波

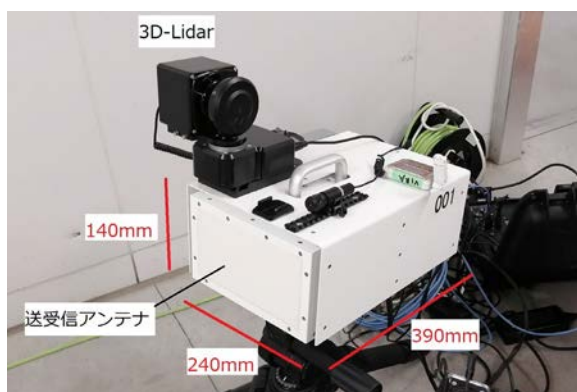


図-1 レーダーの外観

表-1 レーダーの主要諸元

使用周波数帯	78GHz帯
アンテナ画角	(水平・垂直) ±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° (0.034rad)
計測間隔	0.001秒 (1kHz)

の位置、強さ（散乱波強度）と位相差、すなわち対象物の微小な変位を併せ示す複素振幅データを複数の画素（ピクセル）の集合として画像の形に変換する処理（画像化処理）を、散乱波を受信した後にソフトウェアで行っていたため、リアルタイム処理が困難であった。この処理遅れが、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最も大きな課題となっていた。

そこで本報では、既報³⁾のレーダーにデジタル信号処理プロセッサ（DSP）を含むハードウェア信号処理機構を新たに追加し、この機構で画像化処理を行うことで、散乱波のリアルタイム表示と解析を実現した。

(2) 空間情報の取得とレーダー座標系への変換

さらに、これまでの受信信号の画像化処理は、図-2のように、レーダーからの距離（レンジ：Range）とレーダーの受信アンテナ中心線からの距離（アジマス：Azimuth）で表される2次元直交座標系（レーダー座標系）で行われていたが、その結果（画像）から計測対象の位置同定や変位把握は必ずしも容易ではなかった。

そこで本報のレーダーは、計測を行う前、すなわち散乱波の受信および画像化処理を開始する前に、図-1のレーダー上部に設置した3D-Lidarを用いて周囲の3次元空間情報（点群）を取得し、この点群をもとに、計測対象の位置や形状を大まかに把握すると共に、画像化処理を行う範囲を任意に設定することを可能にした。

なお、画像化処理する範囲の中の3次元直交座標系 (x, y, z) で示される点群（計測点）を、前述の信号処理機構で処理するためには、これまで用いていたレーダー座標系 (R, A) に変換する必要がある。

3D-Lidarの座標原点と受信アンテナアレイの中心が等しく、かつ受信アンテナアレイの並び面と、3D-Lidarの xy 平面の角度差が無い（ゼロ）である場合、以下の式(1)を用いればよい。ただし、 r は3D-Lidarの原点から計測対象までの距離、 θ は受信アンテナアレイ中心からの軸線（ $=x$ 軸）からの角度であり、式(2)のように示される。

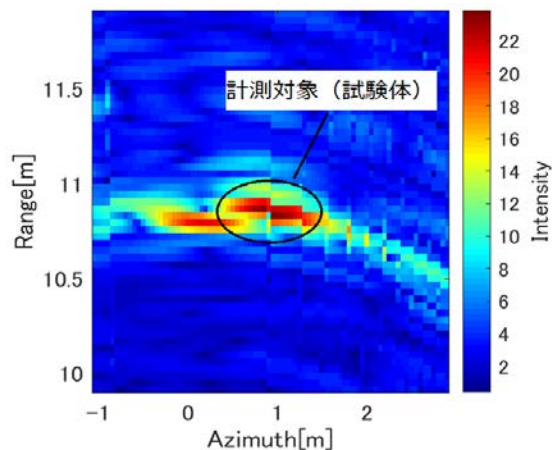


図-2 これまでのレーダーの計測結果（散乱波強度画像）

$$\begin{aligned} R_y &= r \cdot \cos \theta \\ A_z &= r \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \theta &= \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

3. 基本試験の結果（性能向上の確認）

(1) 計測値の確からしさと計測対象の位置把握

レーダーの性能向上と計測値の確からしさを確認するために、電波無響室内に一边 10cm のアルミ平板試験体を設置し、卓上振動台を用いて一定の振幅で試験体に振動を付加した際の変位および振動（速度）をレーダーおよび LDV で計測した。双方の計測結果を図-3 に示す。

変位計測値は LDV の計測値とほぼ等しい一方、速度計測値は変位計測値を微分処理する際に高周波雑音の影響を受け、LDV の計測値と差が生じている。しかし、双方の 1 秒間 RMS 値はほぼ等しいことから、微分処理の際に適切なフィルタ処理を施せばこれらは等しい値となると考えられる。

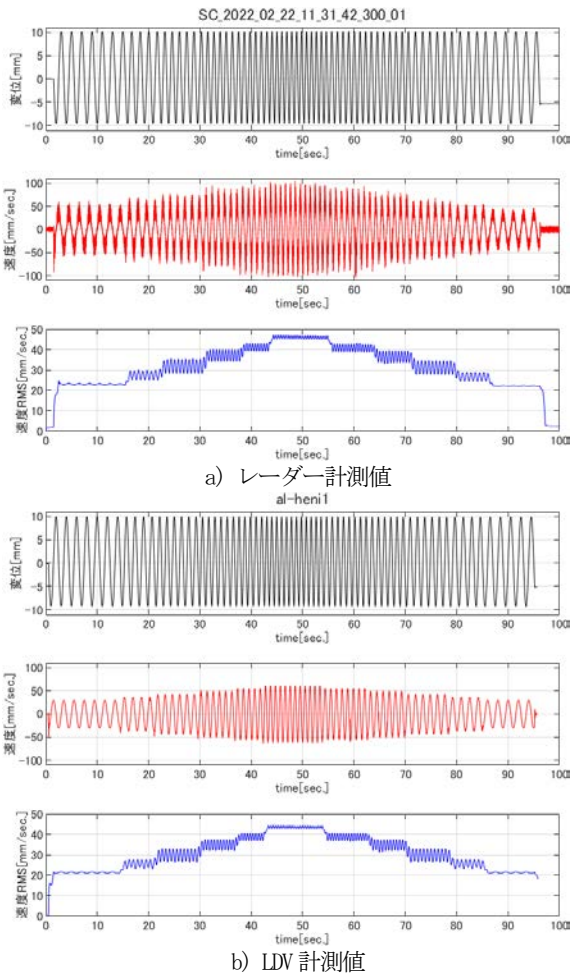


図-3 基本試験の計測値比較（振幅±10mm）

図-4 は、この試験の事前に3次元点群を取得して、その点群から画像化範囲を設定して前述の画像化処理を行った結果（散乱波強度画像）である。試験体からの散乱波強度が周囲の壁面等と殆ど変わらないが、試験体の周囲に計測点が設定されず周囲との区別ができるため、図-2 と比較して、試験体の位置の把握が容易にできる。

(2) 計測値のばらつき（誤差）

計測対象の表面の凸凹や、レーダーと計測対象の距離、相対角度の違いにより、計測対象から受信する散乱波の強さ（散乱波強度）には差が生じる。

散乱波強度が低下すると、計測値のばらつき（誤差）が増大する結果となり、低い散乱波強度しか得られない計測では、変位発生位置や変化の把握が困難となる。

散乱波強度が計測値のばらつき（誤差）に及ぼす影響を把握するために、実際のトンネルを模擬した施設の内部に、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一边 90cm の壁面試験体をレーダーからの距離 20m の位置に設置して、試験体が静止している状態で計測を行った。

図-5 は試験体上の複数の計測点における散乱波強度の 1 分間 RMS 値と、同じ点の変位計測値の標準偏差 σ を整理した結果で、散乱波強度が強い場合には変位計測値のばらつき（誤差）も小さい。

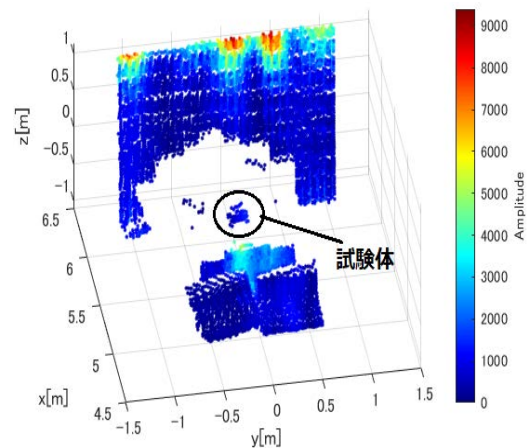


図-4 基本試験（室内）の計測結果（散乱波強度画像）

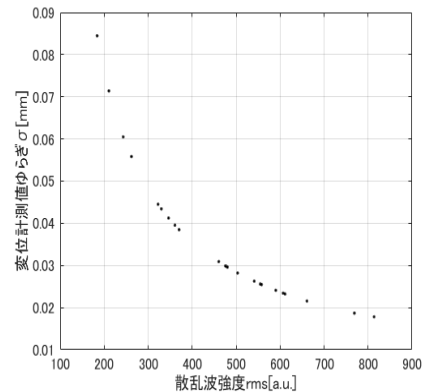


図-5 散乱波強度と変位計測値のばらつきの関係

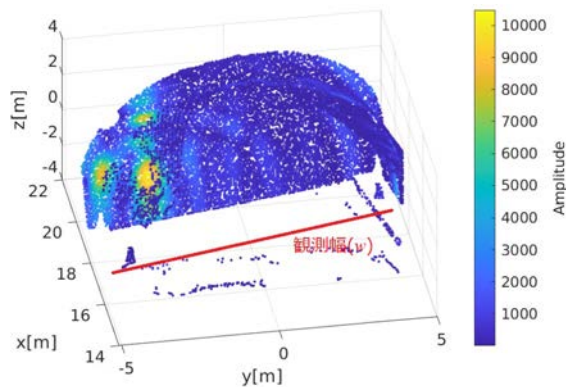


図-6 切羽を模した壁面に対する計測結果（散乱波強度）

図-5の結果から、このレーダーを用いる計測では、散乱波強度が300[au.]以上得られれば、変位計測値のばらつき（誤差）は0.05mm未満と考えることが出来る。

なお、図-5で示す散乱波強度の値は、個々のレーダーに固有の値で、一般的な電波の強さ（電力・エネルギー）に換算するためには、照射される電波に対する散乱の度合いが既知の基準散乱試験体などを用いた計測を行って校正係数を求め、その係数を用いた補正を個々のレーダーの散乱波強度の値に対して行う必要がある。

4. 実際のトンネル切羽への適用における課題

前章(2)の試験に併せて、トンネル切羽を模した壁面に対してレーダーを設置して、風などによる壁面の揺れを計測した。図-6に計測結果（散乱波強度）を示す。

本試験では壁面のほぼ全域が観測範囲の中にあり、一定以上の強度の散乱波が示されている。式(3)は切羽とレーダーの間の距離 d に対するレーダーの水平方向の観測幅 w の関係を示しており、 w がトンネル全幅より大きい場合にレーダーの観測範囲（ $\pm 15^\circ$ ）の中に切羽の全域を含むことができる。この式(3)を用いると、適用対象のトンネルの全幅が14mの場合、切羽の全体を観測範囲内に含めるためには $d \approx 24\text{m}$ が必要である。

$$w = d \cdot \tan 30^\circ \quad (3)$$

一方、三脚などを用いてレーダーをトンネルの路盤に設置して計測を行う場合、レーダーと切羽の天端との間の距離と、同じく下端との距離の差が大きい場合に、鉛直方向の高い分解能での計測が期待できる。

切羽の天端までの高さ h と切羽とレーダーの間の距離 d に対して天端と下端の距離差 R は、式(4)で求められる。

$$R = \sqrt{d^2 + h^2} - d \quad (4)$$

式(4)を用いると、切羽の全高 $h=7\text{m}$ で $d=20\text{m}$ の場合、距離差 $R \approx 1.2\text{m}$ と求めることができる。レーダーの距離分解能は表-1に示す通り0.038mであるから、この値を用いると鉛直方向の分解能は約30画素（ピクセル）となる。同様に $d=10\text{m}$ の場合の分解能は約60画素と求められる。すなわち、切羽とレーダーの距離が近い方が、鉛直方向では有利（高い分解能が期待できる）といえる。

ただし実際のトンネル切羽の計測では、上述の設置位置を適切に設定する以外に、切羽の近傍でドリルジャンボなどの建機や作業車輛などが稼働、停車していることにより、観測範囲の中にこれらによる死角が生じることも併せて留意する必要がある。

5. まとめ

本報では、既報³⁾で示したミリ波高速イメージングレーダーに対して、計測結果をリアルタイムで表示・解析できる演算処理機構と、計測対象の形状および位置の把握と適切な画像化範囲の設定に用いる空間情報取得機構を追加したレーダーを新たに製作し、これらの機能追加による影響の有無と性能向上の確認を行った。

この結果、機能追加による悪影響は認めれず、小型試験体の微小な変位や振動が正しく計測されていることが確認できた。また、レーダーが受信する散乱波強度の変化に伴う計測値のばらつき（誤差）への影響について実験的に検討した結果、十分な散乱波強度が得られる状況では、このレーダーは0.05mm未満の変位計測精度が期待できることが分かった。

さらに、このレーダーを実際のトンネル切羽モニタリング適用する際には、切羽とレーダーの相対位置により、計測範囲の制限や、鉛直方向の分解能に差が生じることを簡単な関係式で示した。

今後はこれらの知見を通じこのレーダーを実際のトンネル切羽に適用し、トンネル切羽の肌落ち・崩落の予兆因子の抽出および分析を進める所存である。

参考文献

- 1) 岩城英朗, 鶴山尚大, 多田浩幸: 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, VI-051, pp. 101-102, 2018.
- 2) 上半文昭, 太田岳洋, 石原朋和[他]: 非接触振動計測による岩塊崩落危険度の定量評価手法の検討, 鉄道総研報告, 26(8), pp. 47-52, 2012.
- 3) 岩城英朗, 多田浩幸, 能美仁: ミリ波高速イメージングレーダーを用いたトンネル切羽モニタリング, 土木学論文集F3, 77(2), pp. II_16-II_22, 2021.