(7) ミリ波振動可視化レーダーを用いたトンネル切羽モニタリング

岩城　英朗[1]・西　琢郎[2]・多田　浩幸[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三丁目 4-17）
E-mail: iwakih@shimz.co.jp

[2]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三丁目 4-17）
E-mail: nishi_t@shimz.co.jp, tada_h@shimz.co.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，著者らは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トンネル切羽モニタリングシステムの開発を行っている．

システムを構成する計測機器としてミリ波振動可視化レーダーに着目し，これまで計測精度および面的計測性能の検証を基本試験等を通じて行い，いずれも良好な結果を得た．本報では，実際の山岳トンネル施工現場において，本システムの適用試験を行った．

建機の影響を受けない連絡坑貫通時の計測では，切羽の大きな変状の発生の事前に，レーダーの計測値から得られる速度が大きく変化する傾向があり，切羽の前面に建機などが稼働する通常の山岳トンネル施工サイクルにおける切羽穿孔時で発生した小規模剥落時の計測結果においても同様の傾向が認められた．

Key Words: *tunnel face monitoring, safety assessment, millimeter wave, vibration 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である．

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計測方法が必要である．

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，これらを計測原理にしたレーザー距離計などが実用化，商品化されている．さらに，レーザー光を計測対象に照射し，送信波と，計測対象からの反射波・散乱波との波長差から，計測対象の移動速度を検知することができるレーザードップラ速度計（LDV）を用いると，計測対象の微小な振動現象やその変化を捉えることができる．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範囲の変化のみを捉える形となるため，本報で計測対象とする切羽のような広い範囲から，変状が発生した位置やその変化量を捉えることは難しい．

そこで著者らは，対象物の微小な変位や振動を面的かつ遠隔・非接触で捉えることができる計測手法があれば，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，この計測機器開発を含むトンネル切羽モニタリングシステムの開発に取り組んできた．

既報[1)2)]で，近年自動車の自動運転などの分野で適用されている周波数約 80GHz の電波（ミリ波）を，計測対象で照射し，その散乱波を複数のアンテナ（アンテナアレイ）で同時に受信して解析することを通じて，計測対象の微小な変位や振動分布を画像として捉えることができるレーダー（ミリ波振動可視化レーダー）を試作し，その基本性能の確認と計測値の確からしさ，および計測値に含まれる誤差の評価を行った結果を示した．

また，このレーダーを用いた計測において，計測対象の微細な形状および位置を精緻に把握することができるよう，3D-Lidar を用いた 3 次元点群取得機能を付加し，広がりがある複数の計測対象の，それぞれの微小変位および振動変化を一括して捉えられる結果を併せて示した．

本報では，これらの結果を踏まえて，ミリ波振動可視化レーダーを，実際の山岳トンネル施工現場に試適用し，その結果からシステムの有用性，すなわち切羽の微小な変位あるいは振動の変化を早期に捉え，肌落ち・落石等を未然に検知する可能性について検討を行う．

2. トンネル切羽モニタリングシステムの概要と実際の施工現場に適用する際の課題

(1) システムの概要

本システムで用いるミリ波振動可視化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．このレーダーはトンネル切羽など面的に拡がりを持つ対象に対して周波数 78[GHz]のミリ波を計測対象に照射し，計測対象から反射・散乱する散乱波を複数のアンテナ（アンテナアレイ）で同時に捉え，受信信号をリアルタイムで合成処理することで対象物の位置や動き（振動）を面的かつ高速で，散乱波の強さと位相を複素振幅値（SLC: Single Look Complex データ）として併せ持った画像として捉えることができる新たなレーダーである．

レーダーで受信した散乱波から，散乱波を画像化した際の一画素（ピクセル）すなわち計測点における変位を算出するためには，計測開始時の初期位相 φ_0 と，計測時の散乱波の位相の差（位相差）φ に波長を乗じた式(1)で求めることが出来る．しかし，位相差 φ は $\pm\pi$ の範囲に重畳（ラップ）されているため，この範囲を超える値，すなわち波長の 1/2 を超える変位が計測対象に生じる場合，位相差 φ（時系列データ φ_i）に対して式(2)に示す一次元アンラップ処理[3]を行ったアンラップ位相差 φ^u_i を用いて変位を求める．

なお，式(2)に示す定数 n は，計測間隔が計測対象の移動速度より十分に大きい場合 n=1 と定めることができるが，それ以外の場合 n は不定数となり正しい変位を求めることが困難となる．さらに，散乱波に混入する位相雑音が大きい場合，式(2)の φ^u_i を求める際に不要なアンラップ処理を行う恐れがある．その場合は，受信した散乱波を複数回積分（加算）を行い平滑化した上でアンラップ処理および変位算出を行う必要がある．

$$d = \frac{\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} \tag{1}$$

$$\varphi_i^u = \begin{cases} \varphi_i - \varphi_{i-1} + 2n\pi & (\varphi_i - \varphi_{i-1} \le -\pi) \\ \varphi_i - \varphi_{i-1} & (-\pi < \varphi_i - \varphi_{i-1} < \pi) \\ \varphi_i - \varphi_{i-1} - 2n\pi & (\varphi_i - \varphi_{i-1} > \pi) \end{cases}$$

$$n = 1 \tag{2}$$

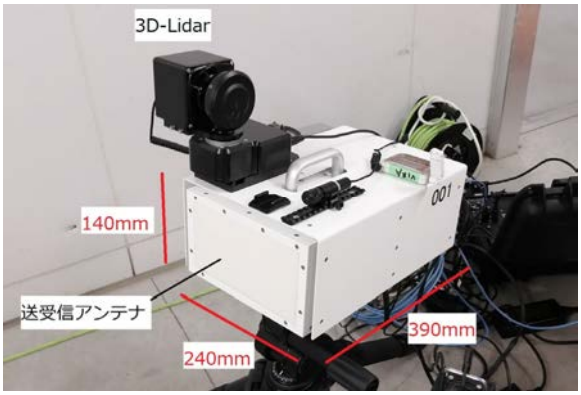


図-1 トンネル切羽モニタリングに用いるレーダーの外観

表-1 レーダーの主要諸元

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	最小 0.038m
方位分解能	約 2 度
計測間隔	0.001 秒(1KHz)

トンネル切羽モニタリングシステムは，このレーダーに加えて，レーダーと切羽との距離および角度を面的に 3D 点群の形式で取得する 3D-LiDAR，さらにこれらの機器を制御し計測結果を表示するためのタブレット端末で構成されている．レーダーは小型で三脚を用いて切羽近傍の路盤等に設置でき，さらにシステムはバッテリ駆動できるため，AC 電源の敷設は必ずしも要しない．そのため本システムは，従来の計測機器と比較して現場での運用性が大きく向上しており，後述の現場適用試験においては，切羽近傍にシステムを設置した後に計測開始に要する時間は 5 分程度である．

(2) 実現場に適用する際の課題

実際のトンネル切羽モニタリングにこのレーダーを適用する際にはまず，切羽とレーダーとの距離および設置角度に留意する必要がある．**表-1** および既報[2]の通り，レーダーの計測範囲は±15° に限られるため，レーダーと切羽の距離 D に対する観測幅 w は式(3)の通り表すことができ，例えば全幅 10[m]の切羽全域を計測するために必要な距離 D=約 17.4[m]と求められる．

$$w = D \cdot \tan 30° \tag{3}$$

また，レーダーは計測対象との距離に対して最小で約 3.8[cm]の高い分解能（距離分解能）を持つが，レーダーの高さ方向，すなわちレーダー前面の受信アンテナアレイと直交する方向の分解能は有しない．そのため，レー

ダーを路盤など設置する際には適切な上向き角（仰角）を設定して，切羽の高さ方向でレーダーとの距離が等しい点（等距離点）が複数存在することが無いようにする必要がある．

3. 山岳トンネル工事における試適用（連絡坑貫通時の計測）

これらの課題を踏まえて，山岳トンネル（T トンネル施工現場）の避難坑と本坑を接続する連絡坑の切羽（高さ約 5[m]，幅約 7[m]）の貫通前後の変化を捉えるために，連絡坑切羽の正面，距離約 17[m]の位置にレーダーを設置して計測を行った．なお，掘削するブレーカーは計測対象の切羽の背面で作業するため，レーダーと切羽の間に計測の支障となる大きな障害物は無い．

図-2 に示す連絡坑貫通時における散乱波から，変位の微分値，すなわち切羽の速度分布は**図-3** に，貫通前後の変位と速度（1秒間RMS値）の時系列変化は**図-4**のように得られた．掘削を開始した直後から，目視での認識は難しい切羽の微小な変化（変位）が貫通部に生じており，それに伴う比較的大きな速度変化も見られる．さらに，貫通時に切羽で岩塊の崩落が生じる約 20 秒前から大きな速度変化が生じていることがわかる．

4. 山岳トンネル工事における試適用（切羽穿孔作業時における計測）

次に，山岳トンネル工事（M トンネル施工現場）における切羽施工サイクルを通じた計測を，発破装薬前の切羽穿孔時を中心に行った．切羽の全幅は約 11[m]であり，切羽全体を計測範囲に収めるために必要なレーダーとの離間は式(3)から約 19[m]と求めることが出来る．

この計測ではまず，切羽からの散乱波の強さの面的分布と，その際の位相雑音の大きさを把握するために，作業を行っていない静穏時にシステムを設置し，切羽からの散乱波を一定時間受信した．

この計測で得られた切羽上の計測点数は約 5,500 点あり，これら全ての計測点の散乱波強度の平均値と，変位のばらつき（標準偏差 σ）を**図-5** のように得た．この結果は，切羽からの散乱波の強度が 160 から 1,600[a.u.]であれば，変位計測の精度は 0.1[mm]以下であることを期待できることを表している．その一方で，作業時の計測でこの範囲を外れた散乱波を受信した場合は，当該の計測点が建機の影などで死角となっているか，建機からの強い散乱波を受信していると考えることができる．

次に，**図-6** に示すように，レーダーをトンネル左側面近くの路盤に設置し，ドリルジャンボを用いた切羽穿孔時に計測を行った．この計測では，レーダーと切羽の間に建機が稼働しており，建機や作業員の動きなどによりレーダーが切羽から受信する散乱波の強度が低下し，計測値の誤差が増大する恐れがある．特に，式(1)の位相差から算出する切羽の変位計測値にその影響は大きい．

そのため散乱波の位相差から切羽の変位を算出する際のアンラップ処理を行う式(2)に例外処理を設け，異常な変位を算出することを防ぐことを目指した．すなわち，**図-5**のような静穏時の計測で切羽から得られる散乱波 A_i は A_{min} から A_{max} の範囲であると仮定し，作業時の計測ではこの範囲内で散乱波を受信した場合のみ式(2)のアンラップ処理を行うこととした．この例外処理を含んだアンラップ処理を式(4)に改めて整理する．

$$\varphi_i^u = \begin{cases} \varphi_i - \varphi_{i-1} + 2n\pi & (\varphi_i - \varphi_{i-1} \le -\pi) \\ \varphi_i - \varphi_{i-1} & (-\pi < \varphi_i - \varphi_{i-1} < \pi) \\ \varphi_i - \varphi_{i-1} - 2n\pi & (\varphi_i - \varphi_{i-1} > \pi) \end{cases}$$

$$n = \begin{cases} 1 & (A_{min} \le A_i \le A_{max}) \\ 0 & (A_i < A_{min} \text{ 或いは } A_i > A_{max}) \end{cases} \quad (4)$$



図-2 貫通時の切羽の状況

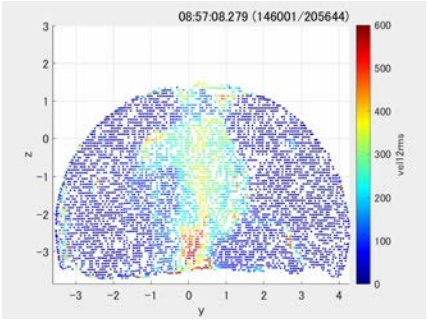


図-3 貫通時の計測結果（速度分布）

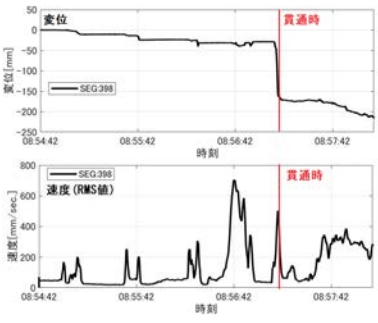
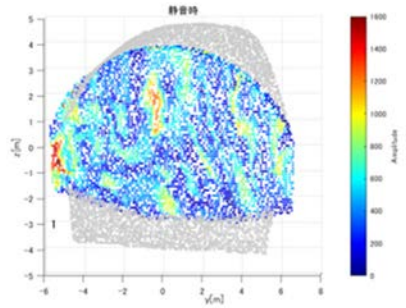
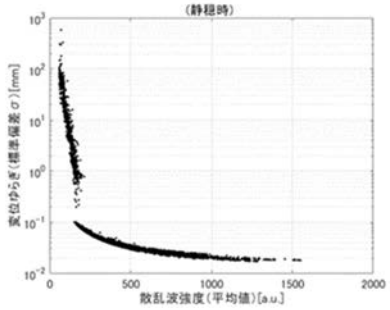


図-4 貫通部の計測結果（変位・速度 RMS 値）



a) 散乱波強度分布



b) 変位のばらつき σ

図-5 静穏時の計測結果



図-6 切羽穿孔作業中のシステム設置状況



図-7 小規模剥落発生時の状況

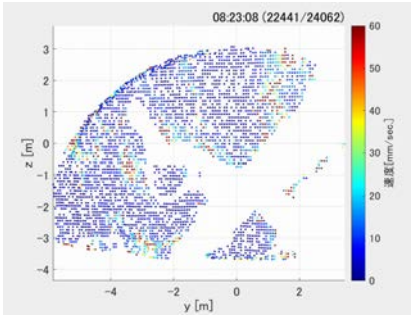


図-8 小規模剥落発生時の計測記録（速度（1秒間 RMS 値）分布）

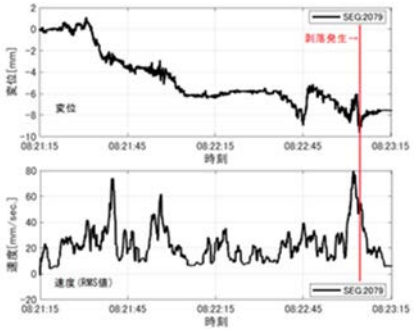


図-9 小規模剥落発生前後の計測記録（変位・速度（1秒間 RMS 値））

本計測では，たとえば**図-7** に示すように，穿孔作業中のドリル口元近傍においてごく小規模な剥落が数例見られた．いずれも施工に不具合がもたらされるようなケースではないが，目視では実際に剥落が発生するまで切羽の変化を認識することは困難であった．**図-8** は同例における切羽の速度分布であるが，剥落発生箇所の周囲の速度（1秒間 RMS 値）が，他の箇所に比べ増大していることがわかる．さらにこの箇所の周囲の変位および速度(1秒間 RMS 値)の時系列変化は**図-9** に示す通りであり，小規模な剥落が発生する以前から，微小な変位の増大と共に比較的大きい速度変化が認められ，剥落発生直前においてその傾向は顕著であった．

5. おわりに

ミリ波振動可視化レーダーを用いたトンネル切羽モニタリングシステムを実際の山岳トンネル工事に適用した．

建機の影響を受けない連絡坑貫通時の計測では，切羽の微小な変位が捉えられると共に，貫通の約 20 秒前から大きな速度変化がみられることを確認できた．

さらに，切羽近傍で建機が稼働している状況での計測においては，受信散乱波から変位を算出する際に例外処理を設けることで切羽の微小な変化を面的かつリアルタイムで可視化することができ，小規模な剥落が発生する以前から，切羽の急激な速度変化が認められた．

これらは，本システムを用いることでトンネル切羽における肌落ち・落石を発生位置を含めて事前に検知できる可能性を示したといえる．

今後は，本システムを用いた山岳トンネル施工現場における連続計測の実施などを通じてデータを蓄積し，本報で示した速度変化に加えた切羽の変状を早期に検出する因子の抽出を進めるとともに，これらの因子および閾値を実装した警報発報システムの開発，ひいては本システムを用いた切羽周辺における災害防止に向け引き続き取り組む所存である．

謝辞：本システムの開発および現場適用における改良・カスタマイズにあたっては，アルウェットテクノロジー株式会社の能美仁氏，能美陽氏，白井郁夫氏から多大な協力をいただいた．ここに記し謝意を表する．

参考文献

1) 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.
2) 岩城英朗,多田浩幸,能美仁：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,第 47 回土木情報学シンポジウム講演集,pp.157-160,2022.
3) Oppenheim A. V., Schafer R. W. : Digital Signal Processing,Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1975.