

# ミリ波レーダーを用いたトンネル切羽崩落モニタリングシステムの開発

岩城 英朗 多田 浩幸

(技術研究所)

(技術研究所)

## Tunnel Face Monitoring System Applying 79GHz Vibration Imaging Radar

Hideaki Iwaki and Hiroyuki Tada

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を防止するために、ミリ波レーダーを用いたトンネル切羽崩落モニタリングシステムの開発を行っている。本報告ではまず、パネル試験体に変位および振動を加えた基本試験および分布振動試験を通じて、切羽の肌落ち・落石を招く微小な動きや振動数の変化を、ミリ波レーダーを用いて捉える可能性を検証した。さらに、実トンネルにレーダーを適用する際に計測値を切羽に投影する簡易な座標変換法を提案し、これら一連の成果を実トンネルにおける計測実験を通じて検証した。

In order to prevent fatal accidents caused by falling concrete and rocks in tunnel construction, the tunnel face monitoring system applying 79GHz vibration imaging radar was developed. The feasibility of using the radar to detect small movements and changes in vibration frequency that cause skin fall and rock fall was verified through basic tests and distributed vibration tests in which displacement and vibration were applied to a panel test section. Also, we proposed a simple coordinate transformation method for projecting the radar coordinates onto the tunnel face when applying the radar. And the method was confirmed by trial measurement to an actual tunnel face.

### 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が急務である。これらの災害のほとんどが切羽における装薬、削孔や支保工建込みといった切羽に作業者が立ち入る有人作業中に発生している<sup>1)</sup>。

これらの災害を防止あるいは低減するためには、切羽から離れた位置、すなわち遠隔・非接触で切羽の孕み出しなどの異常な変位や、削孔作業等などに伴う切羽表面の微小な振動の変化を早期に捉え、その事象の発生位置を含めて切羽の肌落ち・落石などの崩落の兆候として作業者に知らせる手法が有用であり、それを可能とする計測手法の開発が必要と考えられる。

そこで、遠隔・非接触で計測対象である切羽の動き(変位)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対象物からの反射波を捉え、その往復時間や送信波と受信波の差から対象物の変位を捉える方法がまず考えられる。

この方法に基づき実用化されたレーザー距離計は、その計測精度や使用の簡便さから、広い分野で用いられており、切羽に対するモニタリングも横田ら<sup>2)</sup>により行われている。これによると、レーザー距離計を用いて切羽の微小な変位を計測すると共に、その微分値である速度の変化が、切羽崩落の指標として考えられるのではないかと述べている。しかし、レーザー距離計のレーザー光の照射範囲が概ね数 cm であることから、切羽のごく限られた範囲のみの計測に留まる。

このようなレーザー距離計を用いた方法に対して、計測対象の広い範囲にレーザー光を照射し、その反射光を面的かつ連続的に捉えることにより、計測対象の形状あるいは変位の分布を点群として取得できるレーザー扫描仪や LiDAR などの機器が近年実用化されている。これらの機器を切羽に対して用いることで、切羽の微小な変位を面的に捉えることができる可能性がある<sup>3)</sup>。しかし、これらの機器の計測間隔、すなわちサンプリング速度は低く、削孔作業などに伴う切羽の振動を捉えることは難しい。

一方、遠隔・非接触で計測対象の振動を捉えるためには、計測対象に送信した光波や電波などの電磁波と、その反射、散乱される波の波長差、あるいは位相差を高速に処理して、対象物の速度や微小な変位を捉える方法が考えられる。この方法に基づき開発されたレーザードップラー速度計(LDV)などの機器が既に商品化されており、宮下ら<sup>4)</sup>により橋梁主桁の振動を離れた場所から計測した事例などがある。

また上半ら<sup>5)</sup>は、LDVを用いて斜面岩塊の崩落検知に向けた検討を行っており、岩塊を模擬した試験体を用いた実験では、試験体表面の卓越周波数が、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 で計測した結果から示している。しかし、LDV は上述のレーザードップラーと同様に、レーザ光の照射範囲は 1cm 程度で限られた範囲の計測に留まることから、切羽全域の振動を捉えることは困難である。

これらの既往の研究を踏まえて筆者らはまず、光波を用いた遠隔・非接触計測機器を実トンネル現場で試用<sup>6)</sup>した。その結果、計測間隔 0.1 秒の LiDAR(Velodyne 社 VLP-16)を用いて、切羽に発生した小規模な落石をその発生箇所の変位が変化したことにより計測(検知)することが出来たが、落石が発生する前の変化を捉えることはできなかった。そこで、計測対象(切羽)の広い範囲に波長が短い電波を照射し、電波を照射した全ての範囲から反射あるいは散乱する電波を同時にかつ高速に捉え解析することで、計測対象の微小な変位や振動を面的に捉えることができる可能性がある新たな非接触計測機器の高速イメージングレーダーに着目し、同機器を用いるトンネル切羽崩落モニタリングシステムの開発に取り組んできた。

本報告では、トンネル切羽崩落モニタリングに用いる機器として、新たに用いた周波数 79GHz の高速イメージングレーダーの諸元を示し、その性能を、小型試験体を用いた基本試験および大型パネルを用いた分布計測試験を通じて確認した結果を示す。

さらに、実トンネルに対してレーダーを適用する際は、レーダー計測の結果を表す画像から、切羽の位置および範囲を同定する必要があり、従前は計測の際に同時に測量を行い、その成果を用いて双方の変換を行っていたが、本報告では双方の相対位置を用いる簡易な座標変換を提案する。

加えて、実トンネル切羽に対するレーダーの試適用を行い、提案した簡易な座標変換方法を検証

するとともに、切羽の微小変位あるいは振動数の変化を面的に捉える可能性を検討した結果を示す。

## 2. トンネル切羽崩落モニタリングシステムに用いるミリ波レーダーの概要

筆者らは本報告に先立ち、使用する電波の波長 18mm、周波数 17GHz のマイクロ波を用いる高速イメージングレーダーを実トンネル現場で試用<sup>7)</sup>し、上記と同様に小規模な落石を捉えることができたが、このレーダーは、受信アンテナの全幅が約 2m の大型機器であるため、トンネル施工現場、特に切羽近傍で常時用いることが難しい。

そこで、近年自動車の衝突検知や運転支援システム、さらに介護施設等における入居者の見守りデバイスなど、様々な分野での適用が進んでいる波長約 3.8mm、周波数 79GHz のミリ波を用いるミリ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(株)社が試作)を新たに用いることとした。

図-1 および表-1 に、ミリ波高速イメージングレーダー(以下本論文では「ミリ波レーダー」と略記する)の外観および諸元を示す。

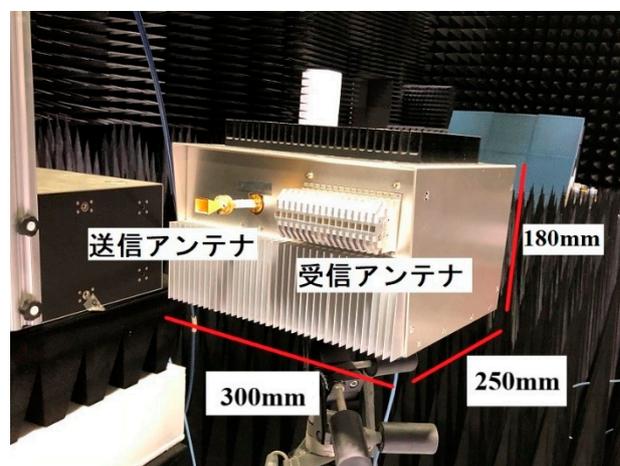


図-1 ミリ波レーダーの外観

表-1 ミリ波レーダーの諸元

|             |                        |
|-------------|------------------------|
| 使用周波数帯      | 79GHz 帯                |
| アンテナ画角(観測幅) | (水平) ±17°<br>(垂直) ±20° |
| 観測距離        | (最小) 2m ~ (最大) 100m    |
| 距離分解能       | 0.037m                 |
| 方位分解能       | 1.95° (0.034rad)       |
| 計測間隔        | 0.0005 秒 (最高)          |

ミリ波レーダー前面の送信アンテナから、計測対象に向けて送信（照射）した電波は、計測対象に到達した際に多くは表面で反射するが、その一部は対象物の材質あるいは表面の状態により送信電波の照射方向と逆の方向に散乱（後方散乱）する。

この電波（散乱波）を、機器前面に配置した複数の受信アンテナ（アンテナアレイ）で同時に受信し、各々のアンテナの受信信号をデジタル・ビーム・フォーミング（DBF）と呼ばれる合成処理<sup>7)</sup>をすることにより、対象物からの散乱波の強さ（散乱波強度）と位相を画像として可視化する、すなわち計測対象の変化を分布計測することができる<sup>8)</sup>。

### 3. ミリ波レーダーの性能確認

#### 3.1 性能確認の概要と目的

ミリ波レーダーを用いて切羽の肌落ちや落石の兆候を早期に捉えるためには、まず、レーダーを用いて得られる計測値の確からしさを確認する必要がある。そこで切羽および切羽から崩落する落石や岩塊を模した小型の試験体が、ミリ波レーダーで視認できるかを検証し、さらに同試験体の変位や振動が正しく取得できるかを併せて確認する必要がある。

さらに、切羽のように面的に広がりを持つ計測対象の一部に変状が生じた場合に、その位置や変化を捉えることが出来るかを確認することも併せて必要である。そこで、以下の試験を通じてミリ波レーダーの基本性能を確認した。また、一連の試験の過程と計測結果から、実トンネル切羽に適用する際の課題抽出を目指した。

#### 3.2 小型試験体を用いた微小変位および振動計測

トンネル切羽の一部、および肌落ちおよび落石が発生した場合を想定した板状のコンクリート吹きつけ小型試験体(0.9m×0.9m)を製作した。この試験体とミリ波レーダーを、外部の雑音などの影響を避けるための施設である電波無響室内に、双方の離間を約11mとって図-2のように設置した。この試験体に対して変位、および打撃振動を加えた際の試験体の変化をミリ波レーダーで計測し、得られた値（変位）を、併設したLDVの計測値と比較した<sup>9)</sup>。

図-3は試験体が静止している状態で、レーダーから試験体に対してミリ波を照射した際に試験体などから散乱する電波（散乱波）の強さを示す画像（散乱波強度画像）であり、試験体はミリ波レーダーの前面から約10.8mの距離（レンジ距離）、かつ受信アンテナの中心軸線から約2.2m離れた距離（アジ

マス距離）の位置の散乱波強度が高い赤色部として視認することができる。なお、図-3の一面素の大きさは（縦軸）レンジ方向が0.037m、（横軸）アジマス方向が0.05mである。

試験体に対して約70mmの変位（試験体背面からの押し出し）を加えた結果、図-4の通りLDVの計測値との差は1mm未満であり、計測を通じてほぼ一致していることが分かった。

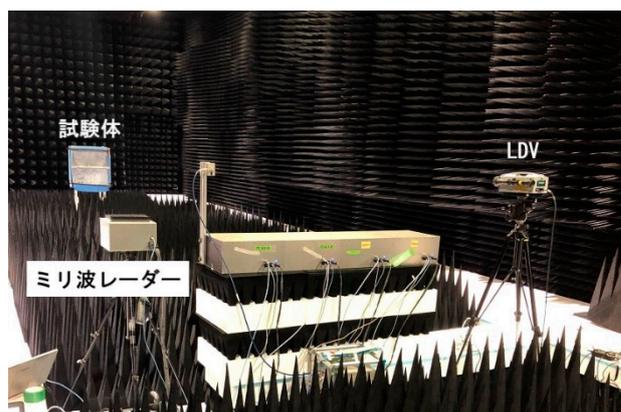


図-2 電波無響室内における試験実施状況  
小型試験体（散乱波強度）

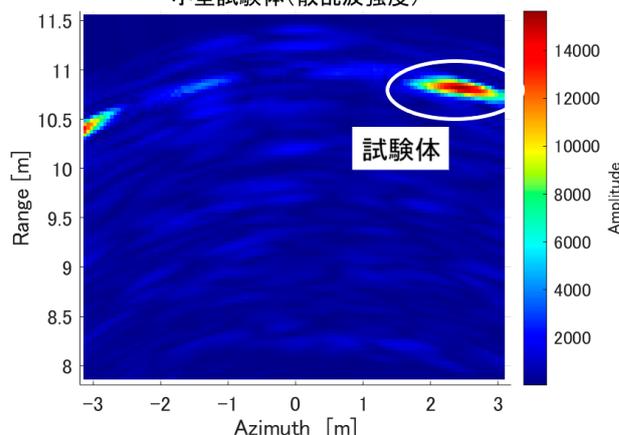


図-3 ミリ波レーダーの計測値（散乱波強度画像）

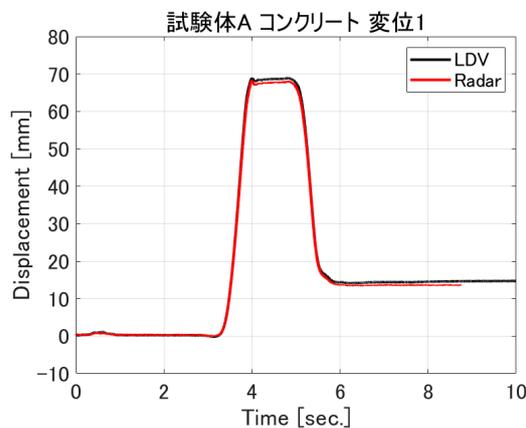


図-4 変位計測結果（LDV との比較）

なお、ミリ波レーダーの受信アンテナで取得した散乱波の位相差  $\varphi$  から計測対象の変位  $d$  を求めるためには、送信波の波長  $\lambda$  と以下の式(1)を用いる。ただし、波長  $\lambda$  の  $1/2$ 、すなわち約  $2\text{mm}$  を超える変位が計測対象に生じる場合、位相差は  $\pm\pi$  の範囲の値しかとらないため、式(1)では正しい変位が得られない恐れがある。そこで、位相差  $\varphi$  に対して  $\pm 2\pi$  の補正を適切に行うアンラップ処理<sup>10)</sup>で正しい変位を得る必要がある。すなわち、計測間隔（サンプリング間隔）毎に得られる位相差を時系列に並べた場合の差分を  $\Delta\varphi$  とすると、アンラップ処理後の位相差  $\varphi^u$  および変位  $d^u$  は式(2)のように示すことができる。

ただしこのアンラップ処理は、計測間隔が長い（サンプリング周期が低い）機器を用いる場合、実際に生じた変位に対する位相差の補正量が  $\pm 2\pi$  では不足し、正しい変位が得られない結果（アンラップエラー）となる恐れがある。そのため、計測対象の変化（変位および速度）より十分に高速なサンプリング周期で計測を実施するよう、留意する必要がある。

$$d = \frac{\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

$$\varphi^u = \begin{cases} \varphi + 2\pi & (\Delta\varphi < -\pi) \\ \varphi & (-\pi \leq \Delta\varphi \leq \pi) \\ \varphi - 2\pi & (\Delta\varphi > \pi) \end{cases} \quad (2)$$

$$d^u = \frac{\varphi^u}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2}$$

次に、試験体の背面からハンマー打撃を与えた場合の変位計測結果を図-5に示す。この結果では、ミリ波レーダーとLDVの変位計測値に最大で  $0.2\text{mm}$  程度の振幅差が生じているが、各々の減衰振動の周期を求めたところ、ミリ波レーダーの計測値から求めた周期  $0.24$  秒に対してLDVの計測値から求めた周期が  $0.22$  秒と概ね等しい結果となった。この変位計測値の差は、試験体に対するハンマー打撃の際に、LDVが計測している位置が僅かにずれた影響と、ミリ波レーダーとLDVの設置位置（角度）の違いによると考えられる。

これらの結果から、ミリ波レーダーの変位計測値は妥当であり、試験体の振動も捉える能力を有すると考えられる。

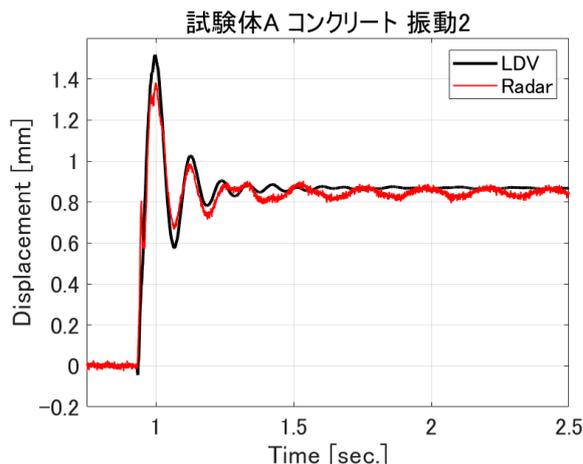


図-5 振動計測結果（LDV との比較）

### 3.3 壁面試験体を用いた分布計測

小型試験体を用いた計測試験の結果を踏まえて、切羽のように広がりを持った計測対象の微小な変位および振動を面的に捉える分布計測の性能を確認する。図-6および図-7に示すように、実トンネルを模擬した試験施設内に、切羽を模擬した縦6枚、横8枚の計48枚のコンクリート吹きつけパネル（約  $0.6\text{m} \times 0.6\text{m}$ ）を壁状に配置した壁面試験体とミリ波レーダーを設置した。試験体とミリ波レーダーの離間は約  $15\text{m}$  であり、各々のパネルの背面や枠部に対して押し出しやハンマー打撃を加え、その結果生じる変位や振動を計測した<sup>11)</sup>。なお、本試験においても計測値の比較のためにLDVを用いた計測を併せて行った。

図-8は試験体などからミリ波レーダーが受信した散乱波の強さを示す散乱波強度画像である。同図の散乱波強度が比較的高い範囲から、壁面試験体のおおまかな位置が確認できる。

図-9は、壁面試験体の中央部のパネル20の背面からハンマーで5回押し出しを行った変位計測値であり、LDVの計測値との間に約  $4\text{mm}$  あるいは約  $2\text{mm}$  の差が認められる。この差はまず前述のアンラップエラーが生じた可能性がある。また、図-8の散乱波強度が強い箇所から同定したパネル20の位置と、LDVが計測対象とした位置との間に違いが生じたことにより、それぞれの計測結果に差が生じた可能性がある。

図-10は、壁面試験体のパネル間の枠（位置A、位置B）に対して背面からハンマー打撃を与えた場合の、試験体左側面（パネル17）、中央部（パネル20）、および右側面（パネル24）の変位計測結果である。

位置 A、位置 B からのハンマー打撃のいずれにおいても各々のパネルでの振動が検知できる。また、位置 A の打撃においては最も近接する左側面（パネル 17）の振幅が最も大きく、位置 B の打撃においては近接する中央部（パネル 20）の振幅が最も大きい。

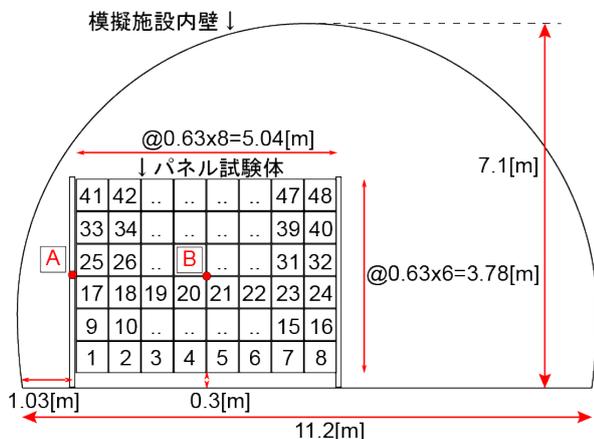


図-6 切羽を模擬した壁面試験体の配置



図-7 分布計測試験の実施状況

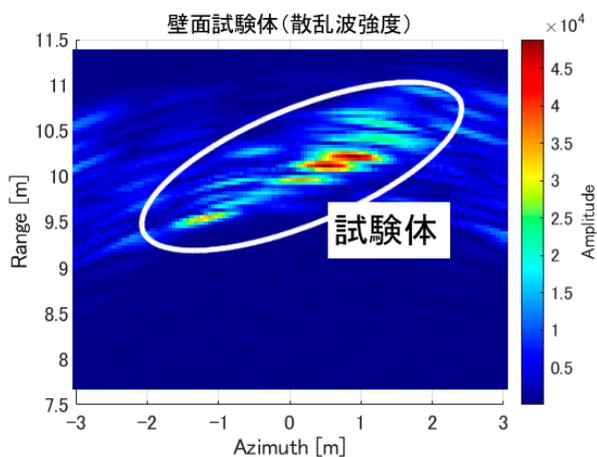


図-8 壁面試験体のレーダー計測結果  
(散乱波強度)

この結果、ミリ波レーダーが計測位置に沿った振動の違い、すなわち振動の分布を面的に計測できる可能性がある。また、3つのパネルの変位計測値の振幅の差から振動発生源の大きな推定ができる可能性がある。

#### 4. 実トンネル切羽への試適用

##### 4.1 トンネル切羽への適用における課題

前章の基本性能試験の結果を踏まえて、図-11に示すように、実トンネル施工中の切羽近傍にミリ波レーダーを設置し、削孔作業中の計測を試行した。

ミリ波レーダーは、切羽の直近で作業中のドリルジャンボ等の建機や車輛等を避けてトンネル左側壁近傍に三脚を用いて設置し、切羽との離間を約19m

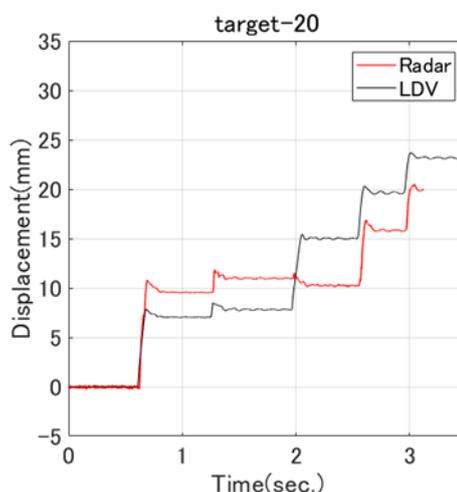


図-9 中央部パネル 20 の変位計測結果  
(LDV との比較)

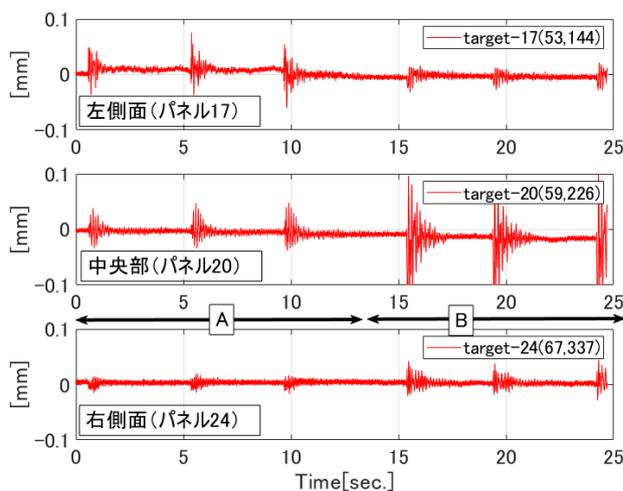


図-10 分布振動計測結果

確保した上で、受信アンテナの中心軸線を切羽の中央部に向けた。

この計測で取得した散乱波強度画像を図-12に示す。同図から、切羽の直近で作業中の建機（ドリルジャンボ）の強い散乱波（赤色部分）を受信していることは確認できる。しかし、強い散乱波の位置と切羽の位置の対照は容易ではなく、さらに建機の移動によって生じる散乱波が低い箇所、すなわちレーダー計測における影となる位置や、振動の発生範囲を抽出することは困難である。

そのため、切羽の変化とその発生位置を精緻に捉えるためには、図-12のようなレンジ距離とアジマス距離（Rg軸とAz軸）を用いて画像化したレーダー計測値を、鉛直方向と水平方向で示す直交座標系を用いる切羽に投影変換する必要がある。

これまでは、計測対象とレーダーの間の相対位置および設置角度を測量などの方法で取得し、双方の座標の変換行列を作成して投影変換を行う方法が用いられてきた<sup>12)</sup>。しかし、作業中の切羽の近傍での

測量実施は困難であるため、計測の毎に変換行列を作成する方法は容易ではない。

そこで本報告では、ミリ波レーダーと切羽の距離と、設置角度を用いた簡易的な座標変換の方法を以下の通り提案する。

図-13に示すように、ミリ波レーダーを切羽から距離 $D$ の左側壁面の接した箇所に、切羽の中央（左右壁面からの距離 $a$ が等しい部分）に向けて設置し、レーダーの受信アンテナ中心と切羽の中央を結ぶ軸線長 $D_r$ に対する入射角 $\theta$ の余弦長（ベースライン長）を $D_b$ とすると、レーダー座標系（横軸（Az軸） $A$ 、縦軸（Rg軸） $R$ ）で表される計測値は、以下の式(3)で切羽面を示す直交座標系（（水平方向） $x$ 軸、（鉛直方向） $y$ 軸）に投影変換できる。なお $sf$ は、レーダー計測値（画像）のゆがみを補正するために用いる関数（参照関数）である。

この方法を用いると、ミリ波レーダーを切羽に設置する際 $D$ 、 $D_r$ および $\theta$ をレーザー距離計および傾斜計などの簡易な機器を用いて測るだけでよい。

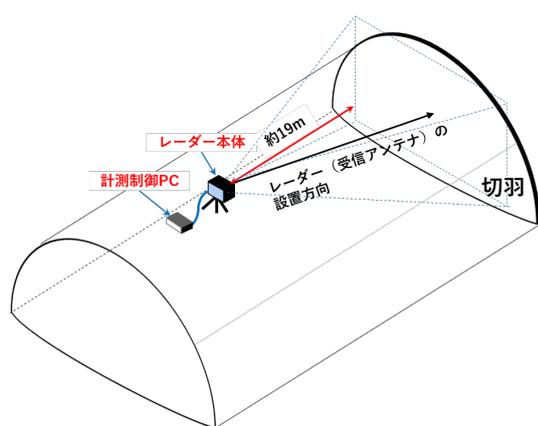


図-11 切羽近傍のレーダーの設置概要

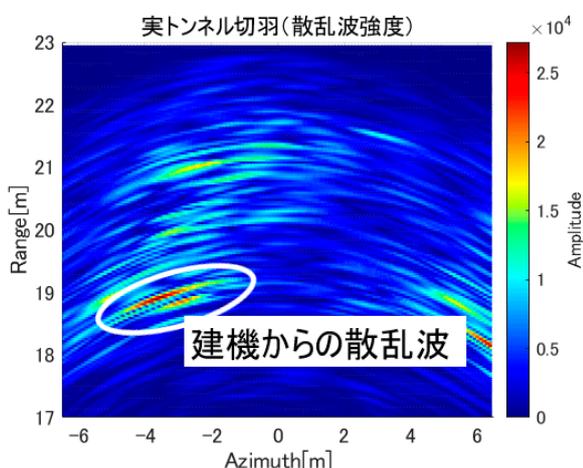


図-12 切羽のレーダー計測画像（散乱波強度）

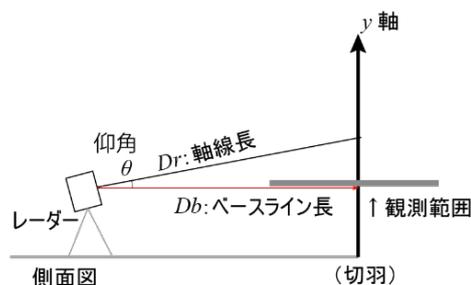
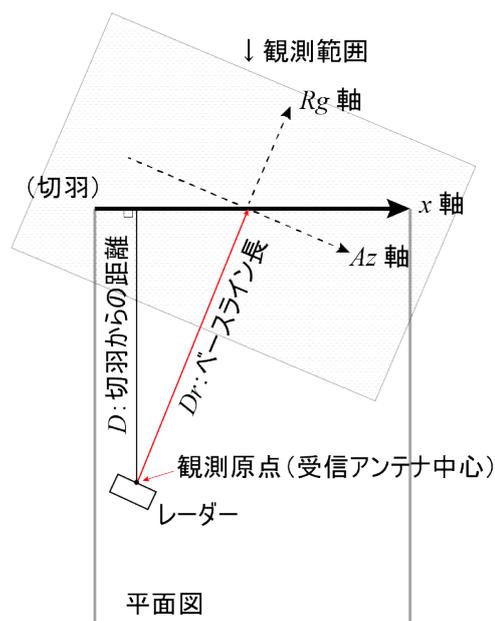


図-13 レーダー座標から切羽への投影変換（平面図および側面図）

$$x = \frac{D_b}{D} A$$

$$y = \sqrt{\left(\frac{R}{sf}\right)^2 - D^2 - \left(\frac{D_b}{D} A + a\right)^2} \quad (3)$$

$$sf = \sqrt{\frac{D^2 + \left(\frac{D_b}{D} A + a\right)^2}{D^2 + \left(\frac{D_b}{D} A + a\right)^2 + A^2}}$$

## 4.2 計測結果

前節で示した簡易的な座標変換法を用いると、図-12で示したレーダー計測値は、図-14のように切羽に投影した画像として表すことができる。なおこの変換に用いた値は、 $D=19\text{m}$ 、 $D_b=20\text{m}$ 、 $R=5.6\text{m}$ である。

さらに同図から抽出した天端付近の散乱波強度と位相差から、式(2)を用いて求めた変位は図-15のように求めることが出来る。

本計測のおよそ11分間の間に、 $0.2\text{m}$ を超える大きな値(変位)を示しているが、実際は同値のような孕み出しのような現象は発生していない。この過大な変位が位相差から求められた原因は、切羽における作業中に、ミリ波レーダーと切羽との間に建機の一部が横切り、切羽からの散乱波が受信できない(不可視となる)時間が生じた影響と考えられる。

一方、ミリ波レーダーで受信した散乱波の位相差に対して、0.5秒毎に短時間フーリエ変換を用いて求めたスペクトログラムと、その各々のフーリエ振幅スペクトルの最大値を示す周波数は図-16のように求めることが出来るが、これらは建機の横切りや影などから生じる散乱波強度の変動に影響されず、大きな変化はほとんど見られない。

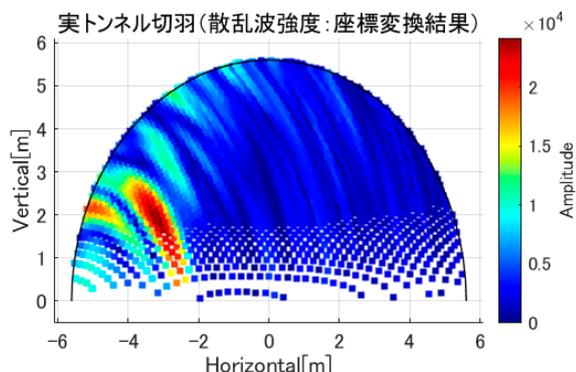


図-14 実トンネル切羽の散乱波強度分布  
(レーダー座標系から切羽に座標変換した結果)

すなわち、削孔作業などの建機の影響に因らずに切羽の微小な変位を正しく捉え、肌落ち・落石の兆候を見いだすためには、これまで既往の研究などで検討されてきた切羽の微小な動き(変位)の変動に加え、その微分値である速度の変化や、周波数の変化などにも着目することが有用となる可能性がある。

## 5. まとめ

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崩落モニタリングシステムの開発において、小型試験体および複数のパネルを用いた壁面試験体を用いた性能確認試験を行い、ミリ波レーダーの計測値の確からしさおよび面的計測の可能性の検証を行った。

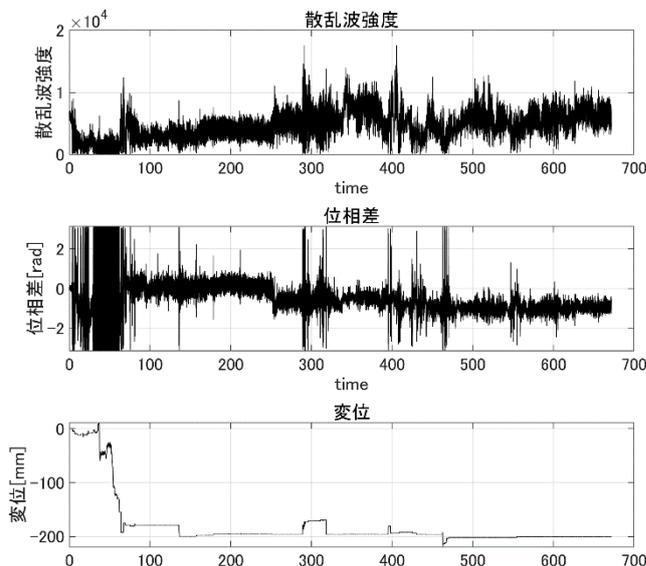


図-15 切羽天端におけるレーダー計測結果

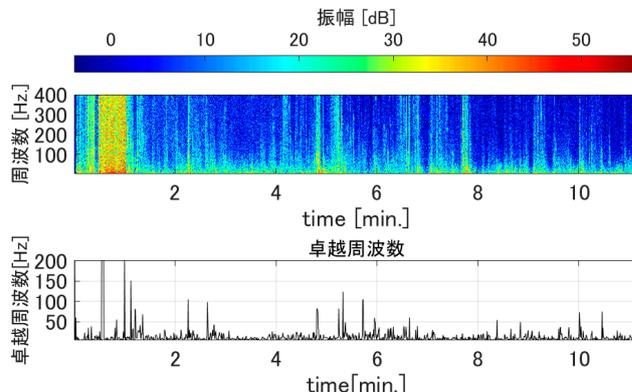


図-16 切羽天端におけるレーダー計測結果  
(位相差から求めた卓越周波数の変化)

小型試験体に対する変位計測の結果および振動計測の結果ともに比較のために用いた LDV の計測値と同等の良好な結果を得ることができた。壁面試験体を用いた分布計測試験では、計測値の散乱波強度の差から計測対象を同定した位置と、LDV の計測位置の違いに起因すると思われる計測値の差が生じ、計測値から得た位相差から微小変位に換算する際のアンラップ処理のエラーと思われる差が生じた。その一方で切羽のように面的に拡がりを持つ計測対象で、振動発生源の違いに伴う変位振幅の違いを複数箇所ですべて同時に捉えることができた。これらは、ミリ波レーダーによる面的分布計測の可能性と、さらに振動発生源の位置が推定できる可能性を示すことができたと考えられる。

さらに、実トンネル切羽へのミリ波レーダーの適用に際しては、計測値を切羽に投影する際に必要となる座標変換において従来用いられていた測量成果から作成した変換行列を用いた投影変換手法に対して、ミリ波レーダーの設置位置および設置角度のみを用いた簡易な投影変換法を提案し、その方法を用いて切羽の建機の位置（作業を行っている位置）および変位発生位置の大まかな推定を可能とした。

切羽に対する試適用の結果、変位の計測値には建機の動きや、削孔作業などに影響したと思われる過大な変位を示す一方で、位相差を周波数変換して求めた卓越周波数は建機の動きに過大な影響を受けることなく概ね一定の範囲で変動していることが分かった。

この結果から、切羽の肌落ちや落石の兆候を早期に捉えるためには、建機の動きの影響を受ける変位計測値に着目する従来の検討に加えて、建機の影響を受けづらい卓越周波数など振動特性の変化にも注目することが有用と思われる。

今後は、上記に加えて散乱波の強さや位相振幅の変化などを含めた総合的な解析を行い、さらに実トンネル切羽に対する計測の蓄積や解析を通じて、切羽の肌落ち・落石等を早期に検知するための指標および閾値の導出を行い、本手法の有用性の提示と実用化を目指す所存である。

## 謝辞

本システムの開発、実験および現場計測の実施において、アルウェットテクノロジー（株）能美仁氏、能美陽氏、白井郁夫氏には多大なる協力をいただいた。ここに記し謝意を表す。

## <参考文献>

- 1) 厚生労働省：“山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止に係るガイドライン”，  
<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000149309.html> (2020年10月20日参照)
- 2) 横田泰弘，山本拓治：“多点式レーザー距離計によるトンネル切羽変位計測”，第47回地盤工学研究発表会，pp.1271-1272，2012
- 3) 二瓶貴広，溝口知広：“高速3Dスキャナによるトンネル切羽の突発的変位のリアルタイム検出性能評価”，精密工学会東北支部講演会，2017
- 4) 宮下剛，藤野陽三：“レーザードップラー速度計を用いた三次元多点振動計測システムの開発”，土木学会論文集A，Vol.63，No.4，pp.561-575，2007
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 多田浩幸，岩城英朗，青野泰久[他]：“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，VI-050，pp.99-100，2018
- 8) Alfonso Farina：“Antenna-based signal processing techniques for radar systems”，Norwood, MA., Artech House, 1992
- 9) 能美仁：“干渉型振動観測装置、振動観測プログラムおよび振動観測方法”，WO Patent App. PCT/JP2014/005, 006, 2016
- 10) 岩城英朗，多田浩幸，青野泰久[他]：“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，CS9-22，pp.CS9-22，2019
- 11) Oppenheim A. V., Schaffer R. W.：“Digital Signal Processing”，Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1975
- 12) 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，CS9-44，pp.CS9-44，2020
- 13) Iwaki, H., Nohmi, H., Nohmi, A., Shirai, I., Tamura, K., “Vibration Monitoring of a Tall Building applying DBF based imaging Radar, “VirA””, Proc. SPIE 10598, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, 2018