

# 山岳トンネル切羽崩壊検知システム「ロックフォールファインダー®」の開発

藤岡大輔 中岡健一

## Development of Mountain Tunnel Face Collapse Detection System Using Background Subtraction Method

Daisuke Fujioka Kenichi Nakaoka

### Abstract

Tunnel face monitoring is essential in preventing labor accidents due to rock fall events. However, it is difficult to visually comprehend all changes in a tunnel face. Therefore, we develop a face collapse detection system that can detect falling rocks in real time and operate it along with visual monitoring by face observers. By applying the face collapse detection system at three sites to monitor the rock face constantly, it is observed that no rockfall occurred. Because a drop of spring water that behaves like a rockfall is detectable, it is suggested that it can be detected normally even when during a rockfall.

### 概要

山岳トンネル工事では、切羽作業の安全確保のため、切羽崩落の予兆を常に監視する必要がある。厚生労働省が平成30年1月18日に通達した「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止に係わるガイドライン」においても、掘削断面積が50m<sup>2</sup>以上のトンネルには切羽監視員の配置が義務付けられている。しかし、切羽で生じる予兆を、目視で全て確認することは困難であった。そこで、画像処理技術「背景差分法」に着目し、切羽崩落検知システム「ロックフォールファインダー®」を開発した。本システムは切羽監視員の目視監視と併わせて運用し、切羽作業の安全性向上を図るものである。本報では、切羽計測技術の選定、本システムの概要、背景差分法による落石検出方法と監視領域等の設定方法を述べたのち、山岳トンネル工事3現場への適用事例を示す。

## 1. はじめに

山岳トンネル工事では、岩盤掘削面である切羽に作業員が接近して装薬作業などを行う。このような切羽作業時には切羽の変状を常時監視する必要があり、岩石が落下して作業員が被災する「肌落ち労働災害」を防止しなければならない。厚生労働省から平成30年1月18日に通達された「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止に係わるガイドライン<sup>1)</sup>」では、掘削断面積が50m<sup>2</sup>以上のトンネルでは専任の切羽監視員を配置することが義務付けられている。

肌落ちの予兆は数十mmの微小な落石として現れることが多いが、複数の重機や人が混在する中で、切羽の一部で生じる微小な変化を目視で全て確認することは困難であった。

そこで筆者らは、微小な落石などを見逃さないようにするためには、面的に切羽を監視する技術を、切羽監視員の目視による監視と併用して運用することが効果的であると考えた。そこで、リアルタイムに解析が可能な画像処理技術である「背景差分法」を活用した切羽崩落検知システム「ロックフォールファインダー®」の開発を行った<sup>2,3)</sup>。本報では、ロックフォールファインダーの開発の経緯、背景差分法による落石検知技術の概要、その適用事例を述べる。

## 2. 切羽計測技術の選定

切羽崩落検知システムに適用する計測技術を、Table 1に示す技術から選定した。いずれの候補も、面的に切羽形状や変状を計測可能な技術である。

レーザースキャナーや多視点画像計測は一般的な三次元形状計測であり、様々な状況で変状計測に適用されている<sup>例えば4,5)</sup>。高精度で切羽全体の三次元形状や変位を計測できるが、計測に時間がかかるためリアルタイムに切羽を監視できない。特徴点追跡手法は、動画の第1フレームにおいて切羽の岩の角などを特徴点として検出し、第2フレーム以降において、その特徴点の追跡を行うものである。フレーム毎の特徴点の移動量を変位とすれば変状計測が可能であるが、特徴点を見失う可能性などがあり

Table 1 計測技術の候補一覧  
List of Measurement Candidate Technologies

| 計測技術                   | 計測概要   | 計測時間        | 計測精度                    | 計測範囲      | 評価                    |
|------------------------|--|-------------|-------------------------|-----------|-----------------------|
| レーザースキャナーによる三次元形状計測    | 切羽全体の三次元点群データを面的に取得。<br>2回計測し、変位を計算。             | ×<br>数秒～数分  | ○<br>数mm程度              | ○<br>切羽全体 | ×<br>点群の取得と比較に時間がかかる。 |
| 多視点画像計測(SfM)による三次元形状計測 | 切羽を複数枚撮影し、画像解析により三次元点群データを面的に取得。<br>2回計測し、変位を計算。 | ×<br>数秒～数分  | ○<br>数mm程度              | ○<br>切羽全体 | ×<br>点群の取得と比較に時間がかかる。 |
| 特徴点追跡手法による変状計測         | 切羽の特徴点を追跡し、フレーム毎の移動量を変位とする。                      | ○<br>0.5秒以内 | △<br>追跡する特徴点を見失う可能性がある。 | ○<br>切羽全体 | ×<br>落石の検知精度が低い。      |
| 背景差分法による変状計測           | 映像の輝度変化を取得し、差が一定の値を超えたものを変状とする。                  | ○<br>0.5秒以内 | ○<br>10mm程度の落石が検出できる。   | ○<br>切羽全体 | ○<br>落石を発生直後に検出できる。   |

課題が多い<sup>6)</sup>。背景差分法は、各フレームの輝度変化を取得し、差が一定値を超えたものを移動物体として検出する手法である。トンネル内の照度でも計測が可能で、画像処理に伴う計算量が少なく落石などの変状を瞬時に検知し、リアルタイムに切羽を監視できることから<sup>7)</sup>、背景差分法を切羽崩落検知システムに適用することにした。

### 3. ロックフォールファインダーの概要

#### 3.1 機器の構成と落石検知の流れ

Fig. 1に切羽崩落検知システム「ロックフォールファインダー」の構成、Fig. 2に落石検知の流れを示す。本システムはウェブカメラとタブレット端末、警告灯、ノートパソコンによって構成され、切羽から10m程度離れたドリルジャンボなどに設置する。これらの機器は、タブレット端末を除きドリルジャンボなどから電源が供給される。撮影された画像はリアルタイムでノートパソコンに転送され、画像処理とデータ保存の後、モニタリング結果が表示される。画像処理で閾値以上の幅の落石が検知された場合、ランプや音で警告を発し、作業員に切羽からの退避を促す。小片の落下から警告までの所要時間は0.5秒程度である。切羽監視員はタブレット端末でモニタリング状況を確認できる。また、これらの機器は全て市販品を用いているため、安価かつ容易に導入することができる。

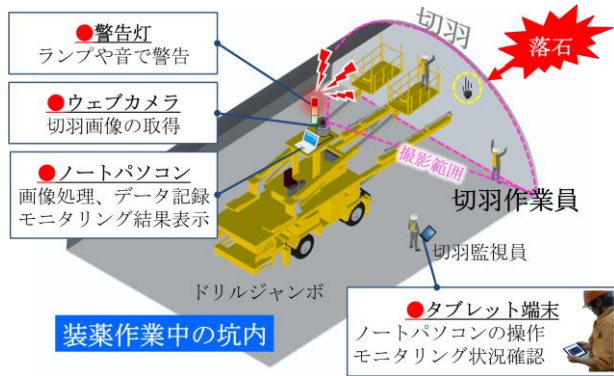


Fig. 1 ロックフォールファインダーの構成  
Composition of Rock Fall Finder

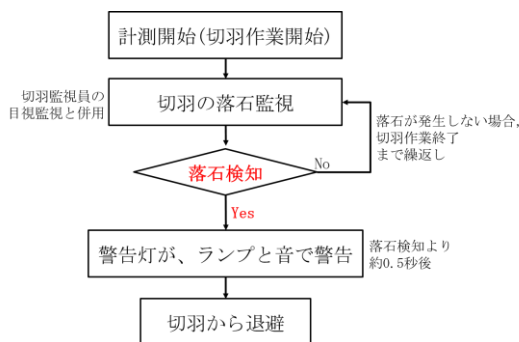


Fig. 2 ロックフォールファインダーによる落石検知の流れ  
Flow of Rock Fall detection by Rock Fall Finder

#### 3.2 監視の対象とする作業

Table 2に、作業員が切羽に接近する作業工程を示す。その中で、特に切羽に接近し、かつ切羽の状態を把握できない姿勢で作業に集中するため肌落ち災害が多い工程である「鋼製支保工建込み」・「補助工法」・「装薬」において運用する。

#### 3.3 背景差分法による落石検出

ロックフォールファインダーは、画像処理技術「背景差分法<sup>8)</sup>」を用いて落石の検出を行っている。背景差分法は、直前の画像と現在の画像において、同一画素における輝度の変化を求めることで移動物体を検出する手法である。背景差分法による落石検出の流れを、Fig. 3と次に示す。

Table 2 作業員が切羽に接近する作業  
Work in which Worker Approaches the Face

| 作業順序 | 掘削サイクル                 | 作業員が切羽に接近する作業工程 | 崩落検知システムと目視監視の併用が効果的な作業工程           | 使用機械                         |
|------|------------------------|-----------------|-------------------------------------|------------------------------|
| 1    | 機械掘削<br>(機械掘削時のみ)      | ×               | —                                   | ロードヘッダー<br>ブレーカー等            |
|      | 発破<br>(発破掘削のみ)         | ×               | —                                   | —                            |
| 2    | ずり出し<br>(掘削土搬出)        | ×               | —                                   | ホイールローダー<br>重ダンプ等            |
| 3    | 浮石落し                   | ○               | 浮石を探すため、作業員は切羽の状態を常に確認する            | ブレーカー<br>バックホウ等              |
| 4    | 一次吹付けコンクリート/鏡吹付けコンクリート | ×               | —                                   | 吹付け機                         |
| 5    | 鋼製支保工建込み               | ○               | 作業に集中し、切羽に背を向けることがある。               | 吹付け機(エレクター付き)<br>もしくはドリルジャンボ |
| 6    | 二次吹付けコンクリート            | ×               | —                                   | 吹付け機                         |
| 7    | ロックボルト削孔・挿入            | ○               | 切羽から1m程度離れて作業し切羽中央に入らない。            | ドリルジャンボ                      |
| 8    | 補助工法<br>(注入式長尺先受工法等)   | ○               | 注入圧により、吹付けコンクリートが想定外の位置で剝離する可能性がある。 | ドリルジャンボ                      |
| 9    | 装薬孔削孔                  | ×               | —                                   | ドリルジャンボ                      |
| 10   | 装薬                     | ○               | 作業に集中し、屈んで作業することがある。                | ドリルジャンボ                      |

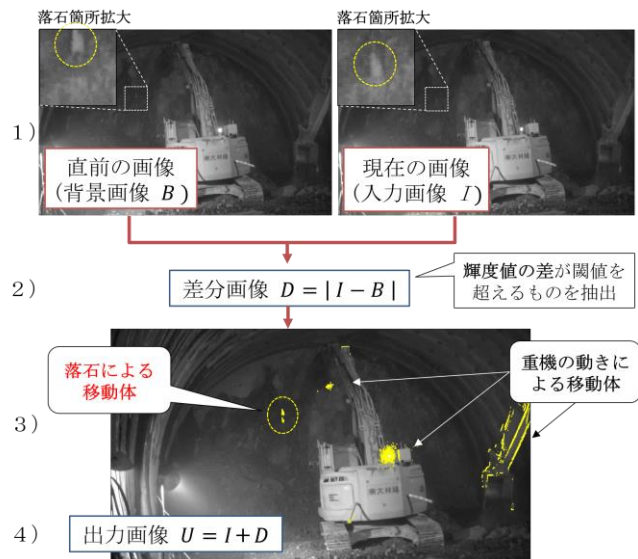


Fig. 3 背景差分法による落石検出の流れ  
Flow of Rock Fall Detection by Background Subtraction Method

- 1) カメラから取得した現在の画像(入力画像 $I$ )と直前に撮影した画像(背景画像 $B$ )を取得する。
- 2) 背景画像 $B$ と入力画像 $I$ との輝度差を計算し、予め設置した閾値を超える画素を「移動体」として抽出する。
- 3) 粉塵やカメラのブレによって生じる移動体を除外するため、「移動体の面積(画素数)」・「移動体の上限数(個)」・「移動体の幅(画素)」に範囲を設定し、全ての項目が範囲内となった移動体のみ落石として検出する。
- 4) 出力画像 $U$ として、抽出された移動体(黄色で描写)を入力画像 $I$ に重ねて表示する。

1)～4)を0.5秒より短い間隔で繰り返すことにより、リアルタイムな切羽監視が可能となる。しかし、3)で設定した移動体の面積や個数による変状判定だけでは、人や重機、電気雷管の脚線の動きを全て除去できず、落石として誤検知することが多い。そのため、このような切羽前面で生じる動きを監視対象から外すため、監視領域から除外する領域(マスク領域)を設定している。

### 3.4 監視領域とマスク領域の設定方法

監視領域の設定とマスク領域の設定のフローをFig. 4に示す。各作業は全てタブレットPCによって自動的に行われる。詳細は以下の通りである。

**3.4.1 監視領域の設定** 監視計測を開始する前に、切羽を含む領域を監視領域として設定する。トンネルの掘削形状や作業状況に応じて、矩形あるいは自由形状が選択可能である (Fig. 5)。

**3.4.2 マスク領域の設定 1：事前移動体除去** 最初に数秒間、背景差分法による移動体抽出を行い、監視領域内で動く人や揺れる脚線等の位置を特定する。抽出された移動体周辺をマスク領域として設定し、監視領域から除外する (Fig. 6)。

**3.4.3 マスク領域の設定 2：領域侵入物除去** 監視領域外において抽出された人や重機による移動体周辺を

常にマスク領域として設定しておき、それらが監視領域に侵入する時は、マスク領域に覆われた状態を維持させることにより、監視対象から除去する (Fig. 7)。

**3.4.4 マスク領域の更新** 一度設定されたマスク領域は人や重機が退去しても残っているため、一定時間経過後にマスク領域をリセットし、マスク領域の設定1から再開してマスク領域を更新する。更新されたマスク領域は、アプリケーション画面で確認できる。

## 4. ロックフォールファインダーの試行事例

### 4.1 Aトンネル

Aトンネルは掘削断面積約140m<sup>2</sup>の二車線道路トンネルである。ここでは、落石検出技術としての有効性を確認するため、録画した機械掘削作業にロックフォールファインダーを適用した。撮影条件と背景差分法の条件をTable 3に示す。

試行結果として、切羽監視状況および抽出した移動体(落石)、移動体のサイズをPhoto 1に示す。監視領域は切羽全域を指定した。計測開始後5秒間待機して「事前移動体除去」を行うことで切羽の右側で作業していた重機の周辺がマスク領域となった(青色領域)。その後、作業に伴い、人と重機が最初に設定した監視領域に侵入してくるが、「領域侵入物除去」により、それらは全てマスク領域に覆われ、監視に影響を与えることはなかった。こ



Fig. 5 監視領域の設定  
Setting Monitoring Area

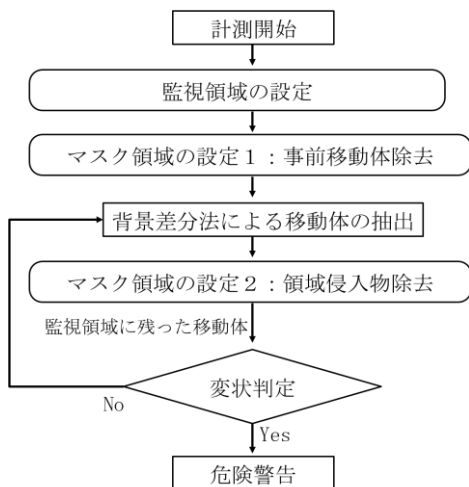


Fig. 4 背景差分法による切羽監視のフロー  
Flow of Tunnel Face Monitoring by Background Subtraction Method

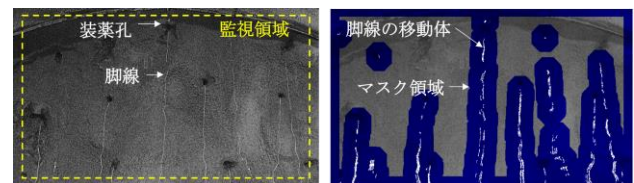


Fig. 6 事前移動体除去  
(左：マスク前、右：マスク後)  
Prior Moving Object Removal

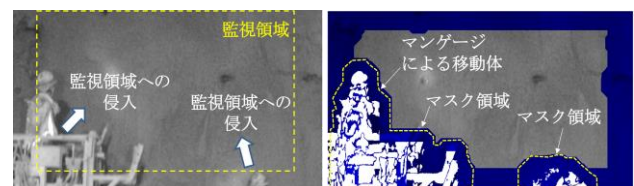


Fig. 7 領域侵入物除去  
(左：マスク前、右：マスク後)  
Area Intruder Removal



では、約100mmの落石が1回発生した。その時、以下の理由により移動体は2個抽出された。

- 1) 背景画像：落下直前の落石が、ある高さで映る。
- 2) 入力画像：落石が数cm下方に移動した位置で映る。
- 3) 1)と2)の差分をとると、落下直前の落石と落下直後の落石が移動体として2個抽出される。

移動体の面積はいずれも10~300画素の範囲に入っていた。移動体の幅は閾値の80mmを越えていたため、これらを落石として検知でき、落石検知技術としての有効性を確認することができた。

#### 4.2 Bトンネル

Bトンネルは掘削断面積が約80m<sup>2</sup>の二車線道路トンネルである。本トンネルにおいて、切羽における装薬作業の常時監視として、ロックフォールファインダーを長期間適用した。カメラ等はドリルジャンボに設置した(Photo 2)。ウェブカメラは運転席を落石等から保護するヘッドガードから吊下げて設置した。ここではFig. 1のノートパソコンとタブレット端末を兼ねてタブレットPCを導入した。タブレットPCや警告灯はヘッドガードの支柱付近にまとめて設置した。これらの機器は常時設置しておくことができるため、掘削サイクル毎に据付け直

Table 3 撮影条件と背景差分法の条件  
Shooting and Background Subtraction Conditions

|               |                          |
|---------------|--------------------------|
| 掘削工法          | 機械掘削, 掘削幅約15m            |
| 地山状態          | 砂岩頁岩互層, 切羽は安定            |
| 適用した作業工程      | 掘削                       |
| 撮影距離          | 約20m                     |
| 画素数           | 1920×1080画素              |
| 輝度差閾値         | 10                       |
| 事前移動体探索時間     | 5秒                       |
| マスク領域更新間隔     | 60秒                      |
| 移動体面積の範囲(画素数) | 10~300画素の移動体を抽出          |
| 移動体上限数        | 10個以上同時発生で変状判定なし         |
| 移動体幅閾値        | 10画素以上(直径80mm)の移動体を変状と認識 |

す必要はない。また、タブレットPCを1回押下するだけで計測が開始され、煩雑な入力操作は不要である。計測終了後、検知した落石の大きさや発生時刻が記録される。合わせて、撮影した動画も保存されるため、落石発生後に、その発生状況等を再度確認できる。

4.2.1 撮影条件と背景差分法の条件 撮影条件と背景差分法の条件をTable 4に示す。計測を開始する前に、切羽で模擬的な落石を発生させ、設定された閾値等において、それを正しく検知できるか確認した。模擬落石として、岩石(最小径30mm, 最大径80mm, 平均径55mm)を

Table 4 撮影条件と背景差分法の条件  
Shooting and Background Subtraction Conditions

|               |                      |
|---------------|----------------------|
| 掘削工法          | 発破掘削, 掘削幅約12m        |
| 地山状態          | 凝灰角礫岩, 切羽は安定, 坑内湧水多い |
| 適用した作業工程      | 装薬                   |
| システムの操作担当     | ドリルジャンボオペレーター        |
| 実施期間          | 8か月                  |
| 撮影距離          | 約8m                  |
| 画素数           | 1920×1080 画素         |
| 輝度差閾値         | 20                   |
| 事前移動体探索時間     | 5秒                   |
| マスク領域更新間隔     | 60秒                  |
| 移動体面積の範囲(画素数) | 10~300画素             |
| 移動体上限数        | 10個                  |
| 移動体幅閾値        | 5画素(直径30mm)          |



Photo 2 ロックフォールファインダーの設置状況 (Bトンネル, 左は重機右側, 右は運転席から撮影)  
Rock Fall Finder Installation Example (B Tunnel)

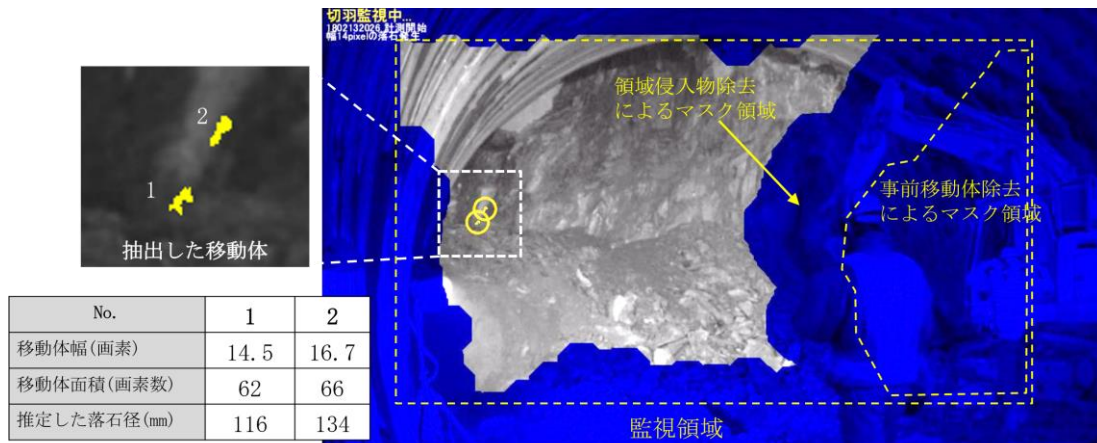


Photo 1 切羽監視状況の一例(Aトンネル)  
An example of the Face Monitoring Situation (A Tunnel)

竿と紐で吊るし、切羽近くで落下させた(Photo 3)。その結果、この岩石は直径40~50mmとして検知することができ、Table 4に示した条件であれば50mm程度の落石を検知可能であることを確認した。

**4.2.2 試行結果** 切羽監視状況をPhoto 4に示す。監視領域は切羽全域を指定した。計測開始後に「事前移動体除去」を行うことで、風で揺らぐ脚線の周囲がマスク領域となった。切羽中央下部にある削孔機のブームはほとんど動いていないためマスク領域として設定されていない。切羽監視中にマンゲージが領域外から監視領域へ侵入してきたが「領域侵入物除去」により適切にマスク領域で隠すことができた。

約8か月適用した結果は、以下の通りであった。

- 切羽監視員と併用して切羽を監視した。
- ジャンボのオペレーターが操作を行うことで、掘削サイクルの作業手順に組込むことができた。
- 地山は安定しており、鏡吹付けコンクリートが確実に施工できていたため、監視期間中に落石は発生しなかった。
- 落石以外を検出した結果の約8割は落石と同じように静止状態から鉛直に落下する湧水の滴水を検出したものであった(Photo 5)。その頻度の平均値は、1サイクル(Table 2に示した作業手順1~10)当たり1.9回であった。
- 湧水が多い区間では誤検知が多くなるため、目視監

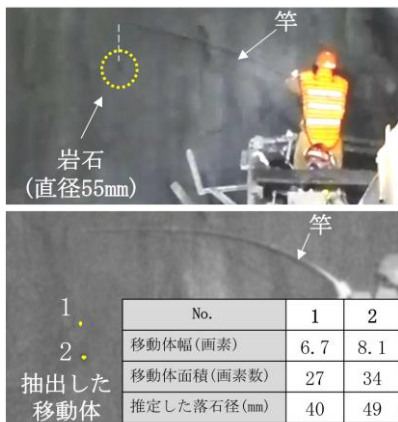


Photo 3 模擬落石実験の実施状況(上)と抽出された移動体(下)

Implementation Situation of Simulated Rockfall Experiment (Upper) and Extracted Moving Object (Under)

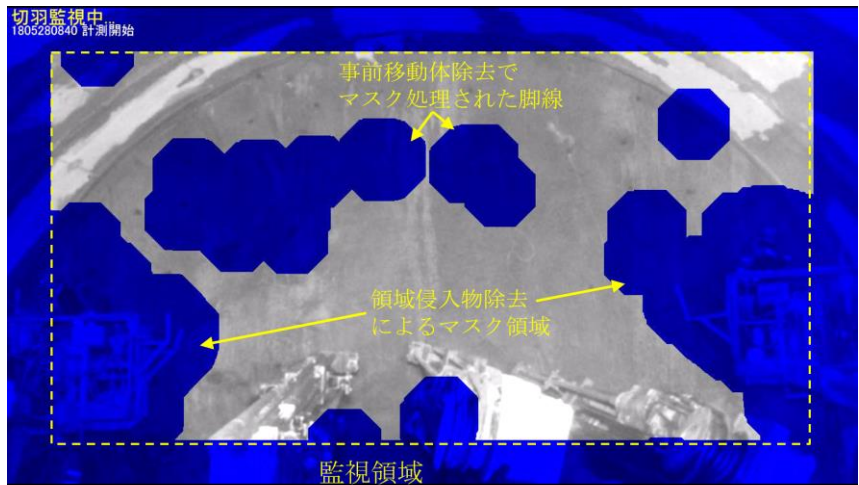


Photo 4 切羽監視状況の一例(Bトンネル)  
An example of the Face Monitoring Situation (B Tunnel)

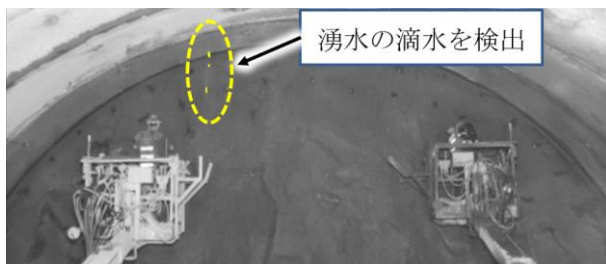


Photo 5 湧水の滴水を検出した例  
Example of Detecting a Dripping Water from Spring Water

視を重点的に実施したほうがよい。今後、落石と滴水を識別するための適切な閾値を検討する必要がある。

### 4.3 道路トンネルC

Cトンネルは掘削断面積が約80m<sup>2</sup>の二車線道路トンネルである。本トンネルでは、鋼製支保工建込みと補助工法施工を監視するために、其々の作業に対して一台ずつ、ロックフォールファインダーを長期間適用した。カメラやタブレットPCなどを吹付け機等のヘッドガードに設置した状況をPhoto 6に示す。

**4.3.1 撮影条件と背景差分法の条件** 各条件のうち、Bトンネルと異なる条件をTable 5を示す。Bトンネルと同様に、計測開始前に最小径30mmの岩石を用いて模擬落石実験を行い、それを検知できることを確認した。

**4.3.2 試行結果** 約12か月適用した結果は、以下の通りであった。

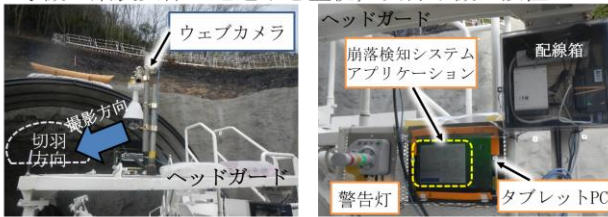
- 2台設置し、切羽監視員と併用して切羽を監視した。
- 切羽監視員が操作を行うことで、掘削サイクルの作業手順に組込むことができた。
- 補助工法や鏡吹付けコンクリートといった切羽安定対策が十分に取られていたことから、監視期間中に落石は発生しなかった。
- 鋼製支保工建込み時に、落石以外を検出した結果の約7割はエレクター等のブームの動きを検知したも

Table 5 撮影条件と背景差分法の条件  
Shooting and Background Subtraction Conditions

|           |  |
|-----------|--|
| 掘削工法      | 機械掘削, トンネル掘削幅約12m  |
| 地山状態      | 土石流堆積物主体, 切羽安定, 湧水なし                                     |
| 適用した作業工程  | 1号機→鋼製支保工建込み<br>2号機→鏡吹付けコンクリート施工後,<br>補助工法(注入式長尺先受工法)施工時 |
| システムの操作担当 | 切羽監視員  |
| 実施期間      | 12か月   |



1号機：鋼製支保工建込みを監視，吹付け機に設置



2号機：補助工法施工時を監視，ドリルジャンボに設置



Photo 6 ロックフォールファインダーの設置状況 (Cトンネル，左は重機後方，右は運転席から撮影)  
Rock Fall Finder Installation Example (C Tunnel)

のであり(Photo 7)，1サイクル当りの頻度の平均値は1.9回であった。

- 「事前移動体除去」機能により動きが大きい動作は監視対象から除外されるが，鋼製支保工を微調整する動作や屈んでいた作業員が上を向く動作等は除外されにくく，落石として検出されることがあった。
- 補助工法施工時は，誤検知はなかった。

微小な動きを誤検知する対策として，鋼製支保工建込み時の作業員の切羽への接近は脚部が多いため，監視領域を作業員の上部のみに限定して設定することが有効と考えられる。今後，吹付け機の姿勢やエレクターの位置，作業員の位置等を考慮し，最適な監視領域を自動設定する手法の開発や，ブーム等の移動体除去の精度をさらに向上させることが望まれる。

## 5. まとめ

ロックフォールファインダーは，背景差分法を基本とし，事前移動体除去，領域侵入物除去といった手法を組み合わせるにより，切羽作業中でも人や重機を監視領域から除外しながらリアルタイムに切羽監視が可能な技術である。現場に導入する前に，切羽で模擬落石実験を行い，閾値等を調整することで，落石を検知できるようになる。ただし，切羽監視員の代替となる技術ではない。切羽作業の安全性向上を目的として，目視による監視と組み合わせて運用することが必要である。

長期試行として2現場において合計20か月間，目視監視と併用して崩落検知システムを切羽常時監視に適用した。落石は発生しなかったが，切羽監視員の負担を低減することができた。また，落石と同じように挙動する滴水を検出できたことから，落石も正常に検知できる可能性が高い。引き続き，滴水と落石の識別や最適な監視領域設定



Photo 7 エレクターと作業員を検出した例  
Example of Detecting the Erector and the Worker

について改良を行い，切羽における肌落ち災害の低減に努めていきたいと考えている。

## 謝辞

本研究の実施にあたり，岡山大学の西山哲教授より貴重なご意見を賜りました。ここにお礼を申し上げます。

## 参考文献

- 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対策に係るガイドライン」  
<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000149309.html> (参照 2020-06-03)
- 藤岡大輔，中村隆史，西山哲，中岡健一：画像処理技術を利用したリアルタイム切羽監視システムの開発，第45回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp. 55-60，2017.1
- 藤岡大輔，中岡健一，西山哲：背景差分法を活用したトンネル切羽の崩落検知システムの開発，土木学会第73回年次学術講演集，VI-018，pp. 35-36，2018.8
- 池田廉，三浦悟，黒沼出，近藤啓二，伊達健介，西川元気，畝田篤志，田中政芳，山本智英：山岳トンネルにおける定点追尾システムを利用した3Dスキャナ変位計測，土木学会第68回年次学術講演会講演概要集，VI-406，pp. 811-812，2013.9
- 内山庄一郎，井上公，鈴木比奈子：SfMを用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究，防災科学技術研究報告第81号，pp. 37-60，2014.2
- 藤岡大輔，畑浩二，西山哲：特徴点追跡手法を用いた岩盤構造物の変状モニタリングに関する研究，土木学会第72回年次学術講演会講演概要集，III-381，pp. 761-762，2017.9
- 中村隆史，藤岡大輔，沖西将弥，西山哲：背景差分法を用いたトンネル切羽の変状モニタリングに関する研究，第42回土木情報学シンポジウム講演集，pp. 113-116，2017.9
- 松阪喜幸：デジタル画像処理[改訂新版]，画像情報教育振興協会，pp. 286-289，2015