

# 山岳トンネルにおける切羽落石検知システムの開発と運用

大成建設株式会社	技術センター	正会員	古賀快尚, 谷卓也
大成建設株式会社	土木本部	正会員	高市一馬
日興電気通信株式会社	システム事業部		早坂翼

## 1. はじめに

山岳トンネルの施工において、多くの作業で機械化が進められているが、掘削作業における爆薬の装薬作業では、依然切羽直下に立入り作業を行う必要がある(図-1)。危険個所である切羽直下で作業を行うため、爆薬の装薬作業では、図-2に示すように、①鏡吹付けコンクリートによる防護、②防護マットの設置、③切羽監視人の配置、など災害を無くすために数多くの対策が取られている。しかしながら、これらの対策を行ったとしても、地山の状況によっては、切羽直近での落石や鏡吹付けコンクリートの剥落・落下といった肌落ち災害を完全に根絶することができないのが現状である。

肌落ち災害の特徴として、6%が死亡し、42%が休業1か月以上となっており、発生した場合の重篤度が高いことが挙げられる<sup>1)</sup>。このような状況や近年の災害発生事情をふまえ、切羽における労働災害の防止を図るため、厚生労働省により肌落ち災害防止に係るガイドラインが策定された(2016年12月策定, 2018年1月改定)。このガイドラインでは専任の切羽監視人の配置することが明記され、山岳トンネル工事における肌落ち災害を防止するために、更なる切羽作業での安全に対する取組みが求められている<sup>2)~3)</sup>。

そこで筆者らは、切羽監視人の役割を補助する機械の目により、落石・剥落の兆候を瞬時に捉えて作業員の待避を迅速に促す落石検知システムの開発を行った。このシステムは、約1cm程度の落石を発生してから0.1秒以内に警報を発することができる点と、誤警報がほとんどないことを特徴とする(切羽から約5mの位置に設置することを前提としている)。

本論文では落石検知システムの概要と検知精度向上に対する取組みに加え、トンネル現場における検証試験および運用状況について述べる。



図-1 爆薬の装薬作業

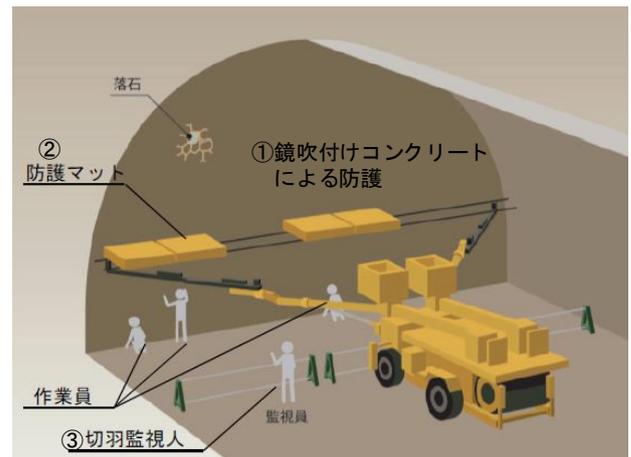


図-2 切羽作業における安全確保への取組み

## 2. 落石検知システムの概要

図-3に落石検知装置の構成、図-4に検知装置の外観を示す。本システムは検出部と警報部に大別され、前者は照明を備えた高速度カメラと、取得した画像を処理して落石を検出する高性能小型PC、後者は警報を鳴らすサイレンとフラッシュで構成される。表-1に高性能小型PCの仕様を示す。検出部について、近赤外線照明を採用し、作業員が照明により眩惑されることなく、また重機や車両の照明の影響を受けないように工夫した。高性能小型PCは、撮影された画像をリアルタイムで処理し、落石を検知した場

キーワード 山岳トンネル, 切羽, 落石検知, 画像認識

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1 TEL 045-814-7217

合に警報を発する制御を行う。また撮影した画像を保存する機能も有しており、落石の原因やその傾向を分析することができる。警報部について、複数の重機や車両が作動する切羽近傍では、サイレンのみでは作業員が聞き取れない可能性がある。そこでサイレンに加え、フラッシュによる警報機能を兼備し、二重の対策を施した。

落石の検知方法について、本システムでは背景差分法をベースとした画像処理・認識を採用した。背景差分法とは、連続撮影で得られた画像に対し、前後画像の差分を抽出する手法であり、本システムでは鉛直下向きの挙動を落石と判定している。検出部の高速度カメラにより、毎秒 40 枚 (0.025 秒/枚, 40fps) の画像を撮影し、連続する 3 枚の画像を用いて落石を検知することで、発生から 0.1 秒以内に警報を発することを可能とする。鉛直下向きの挙動を落石と判定するため、鏡面の押し出し変位が生じ、徐々に崩壊する脆弱な地山よりも、浮石や亀裂由来のキーブロックによる落石・崩壊に代表される、急速に生じる事象を検知することを得意とする。一般的に大規模な崩落が発生する前に、予兆として小規模の落石 (1cm 程度) を検知することができ、0.1 秒以内に警報を発することで、人に当たるはずだった落石から待避できる可能性がある。これは重篤な災害をより軽微なものにできるとも考えられる。

### 3. 画像認識による検知精度の向上

本システムの開発において、落下物以外に誤検知しないことを重要課題と考え、検知精度の向上に努めた。それは落石以外の動きに反応してしまうと、作業員が警報に慣れてしまい、危険時に適切な待避行動が取れなくなるためである。通常背景差分法による画像処理のみでは、重機や人に代表される移動体の鉛直下向きの動きに反応するため、本システムでは複数の画像認識技術を取り入れ、検知精度の向上を図っている。ここでは先に挙げた移動体に対して、誤検知を回避するための画像認識技術について、2つの主要な処理について説明する。落石そのものについての判定処理については、谷らの文献<sup>4)</sup>を参照されたい。

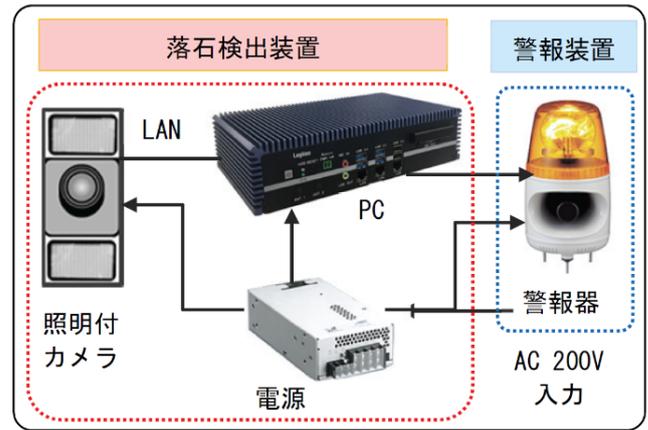


図-3 落石検知システムの構成

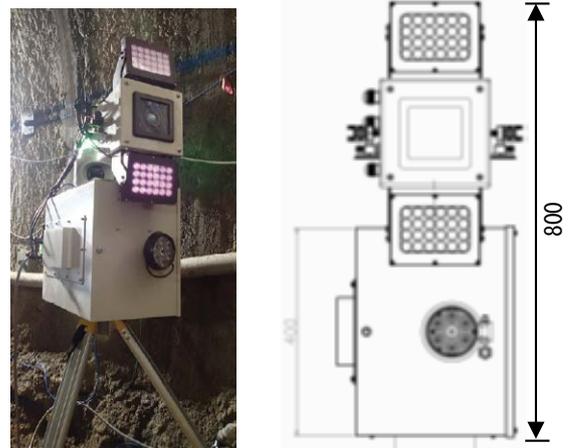


図-4 落石検知装置の外観

表-1 高性能小型PCの仕様

筐体	BOX型
	外部寸法 W264.2×D156.2×H66.5mm
	拡張ベイ 2.5型ベイ×1 (内部1)
電源電圧	DC入力 9-36V
質量	約3kg
CPU	Intel Core i7-6700TE (2.4GHz 8M C4/T8LGA1151)
メモリ	PC4-17000 (DDR4-2133) SO-DIMM8GB
SDD	SSD2.5インチ MLC120GB
使用環境	温度0~50℃ 湿度10~80% (40℃)

誤検知を回避する手法については、移動体を画像認識して落石検出除外領域をリアルタイムで算出し、この領域外を落石検出領域として鉛直下向きの挙動に対して検知を行う。移動体の認識方法を図-5に示す。過去 N フレーム分の画像に対して、時系列で連続した 2 つのフレームの差分画像を生成し、閾値による 2 値化処理を行うことで各々の差分画像から移

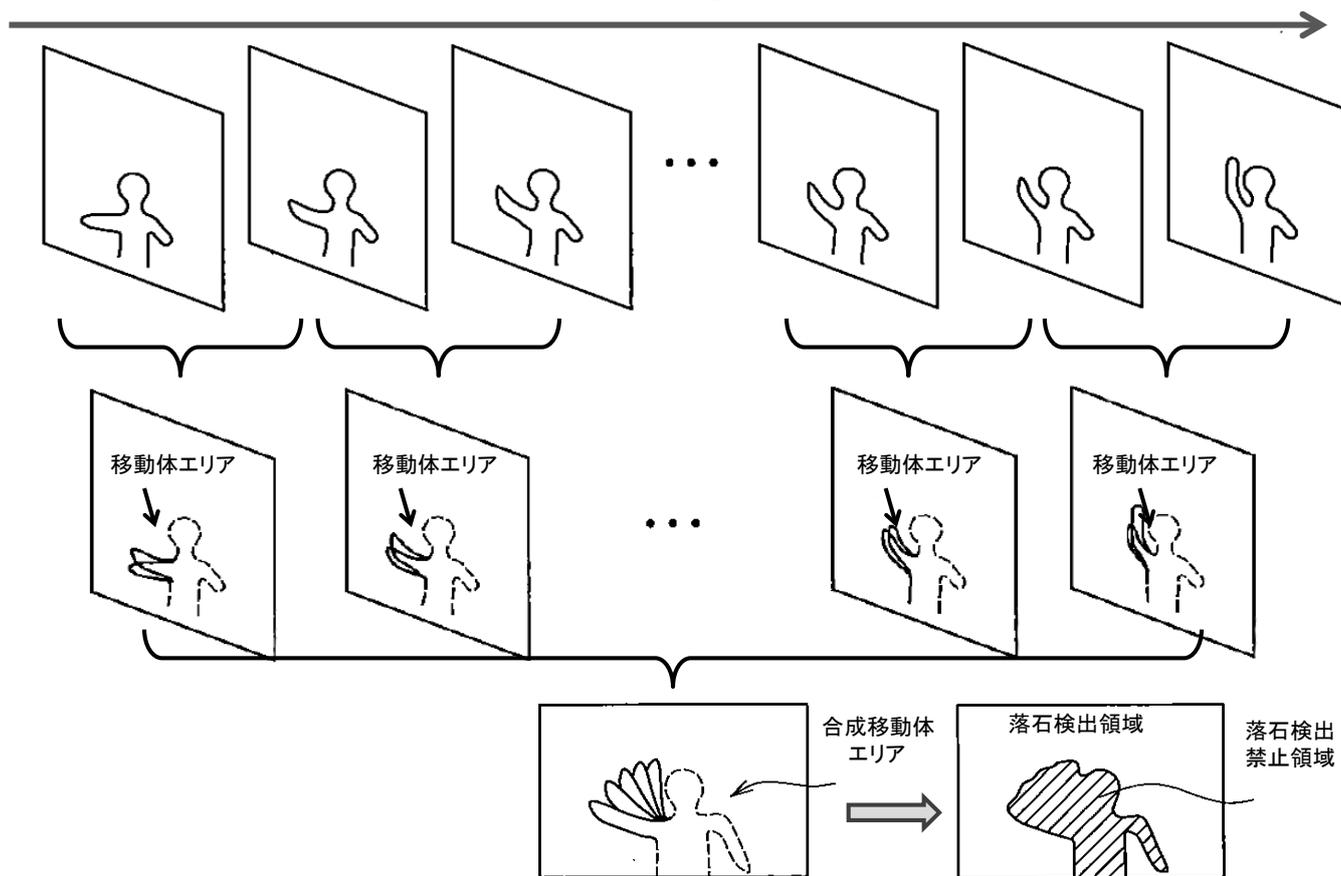


図-5 移動体の認識方法

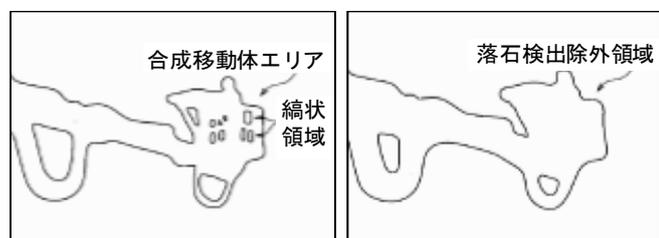


図-6 合成移動体エリアの膨張処理  
(左：処理前、右：処理後)

移動体の領域を抽出する。図-5では、人間が一方の腕を上げる様子を示しており、移動体エリアとしては、主に挙げた腕（動きのある箇所）の領域が抽出される。この移動体エリアの集合させた合成移動体エリアを求め、これが落石検出除外領域のベースとなる。この合成移動体エリアに次に述べる膨張処理を施して、最終的な落石検出除外領域を生成する。図-6に膨張処理のイメージを示す。膨張処理とは、合成移動体エリアに対して移動体の隙間部分や過去のフレームにおいて、たまたま動かなかったために移動体として検出しなかった部分を補完する処理で

ある。図-6左のように本来は落石検出領域となる島状の領域を、図-6右のように、膨張処理により落石検出禁止領域とすることで、処理能力の向上と落石の誤検知を抑制することができる。この膨張処理の程度については、画像処理プログラム上のパラメータにより、現場環境に応じた値を与えることができる。

#### 4. 現場における検証

本システムを東北地方の道路トンネル現場に試験導入し、落石検知の検証を行った結果について述べる。図-7にドリルジャンボのブームの先の作業架台（マンゲージ）に乗った作業員と、移動中のブーム等を認識している画像を示す。図-8において、移動中のブームを囲う白線が合成移動体エリアで、緑色の線で囲われた箇所が膨張処理後の落石検出除外領域に相当する。この図およびキャプチャー元の画像からブームと作業員の他、ランダムに落下してくる湧水に対して、誤検知していないことが確認できている。特に湧水に関しては、主に膨張処理を行うこ



図-7 移動体の認識状況

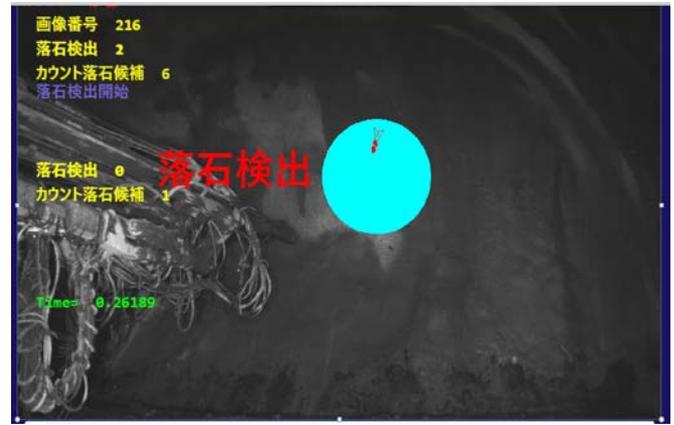


図-8 落石の検出状況

とで落石検知除外領域を生成し、連続する落下物に対して誤検知を防いでいる。また落石検出除外領域は、遅延なく移動体の動きに追従し、落石検出領域に支障がないことを確認した。図-7に落石の検出状況を示す。これは、切羽後方（坑口側）から切羽に向かって小石を投げた時の映像のキャプチャー画像である。小石は放物線を描いて切羽に当たり、その後落下し始めた直後、落石と検出されており、落石を正しく認識できていることを確認した。なお、ドリルジャンボは停止しており、全く動かないことから、ここでは移動体と認識されていない。

## 5. 現場における運用

現在、本システムを断面が約 20m<sup>2</sup> の山岳トンネル工事において運用している。装置は切羽から 5～7m 離れた位置に 1 台設置され、切羽全体を監視している。検知できる落石の大きさは、レンズ（画角）と切羽からの距離、画像処理プログラム内で設定するパラメータの値で決まるが、ここでは 1cm 程度としている。本稿の執筆時点（2018 年 9 月）では、切羽面への吹付けコンクリートを含め、作業員が切羽近傍で作業している時間内での落石は発生しておらず、警報も発せられていない状況である。なお、作業前には小石を切羽近傍に向かって投げることで、システムの稼働を確認している。

この運用現場においては、トンネルの断面が小さいことから、設置スペースが限られることがわかり、作業性の向上の観点から、現在、照明付きカメラと警報機を切羽近傍に、電源や PC といった本体部を切羽 50m までの後方に移設できる、分離可能な機器についても開発中であり、まもなく稼働する予定である。

## 6. まとめ

山岳トンネルの切羽における肌落ち災害に対して、更なる安全への取組みの 1 つとして切羽落石検知システムを開発した。また開発したシステムを道路トンネル現場に試験導入し、落石に対して確実に検知すること、重機や人等の動きに対し誤警報を発しないことを確認した。現在稼働中の現場の他、今後も他のトンネル現場に順次稼働させていく予定である。現行のシステムは、初号機<sup>5)</sup>の約 3 分の 1 の大きさとなっているが、運用状況や現場実験データの分析等による知見からさらに小型化を進める他、切羽における危険個所の表示、可視化する機能についても付加し、切羽作業のさらなる安全性向上に努めていく所存である。

## 参考文献

- 1) 一般社団法人日本トンネル専門工事業協会アンケート（平成 24 年 3 月公表より）
- 2) 肌落ちガイドライン, 2016.12
- 3) 肌落ちガイドライン改定版, 2018.1
- 4) 谷卓也, 古賀快尚, 青木智之, 高市一馬: 落石を予知・警報する切羽監視システム「T-iAlert®Tunnel」の開発, 大成建設技術センター報 第 51 号, 2018 (投稿中)
- 5) 古賀快尚, 谷卓也, 須藤敏明, 早坂翼, 本間直樹: トンネル切羽における落石を瞬時に検知・警報する装置の開発, 土木学会第 73 回年次学術講演会, VI-019, 2018