

山岳トンネル用の自動ズリ積込み機

AI 機能搭載のズリ積込み機「AI ロックローダ」の開発

浅沼 廉樹・山田 照之・松尾 陽介

㈱フジタでは、山岳トンネルにおける自動ズリ積込み機「AI ロックローダ」を㈱三井三池製作所と共同開発。本機は、ズリをかき寄せる「掘削ブーム」・機械後方へズリを排出し、ベルトコンベアや重ダンプなどに積込みする「排土ベルコン」・機械運転席前方に配置した「センシング機」から構成され、AIによりズリのかき込みから積込みまでの一連の作業がオペレータ不要となり、省力化・省人化を実現した。また、発破後の掘削ズリを迅速に処理することで、切羽作業エリアを早期解放し、速やかに次工程（支保工作業）へ移行できるため、トンネル掘削のサイクル効率化が可能となった。

キーワード：AI, 省人化, 省力化, サイクルアップ, 早期開放, ズリ積込み

1. はじめに

近年におけるトンネルの技術開発は、穿孔位置誘導から穿孔作業までを可能とした「全自動ジャンボ¹⁾」、穿孔した装薬孔に装薬を行う「遠隔装填装置²⁾」、支保工建込みを行う「完全自動鋼製支保工建込みロボット³⁾」等、トンネル切羽近傍での技術開発が主流となっている（図-1 参照）。

これに対してずり出し作業は、掘削直後のトンネル素掘り面での作業となる事や運搬設備である重ダンプの台数、坑内外への運行サイクル等の制約条件から技術開発が遅れていた。この対策として、長距離トンネルのずり運搬方式では、重ダンプによるタイヤ方式から連続ベルトコンベア方式に変更する等の対策が取られ、ずり出しの効率化を図っていたが、これらの方式でも依然として次工程の支保工作業までのサイクル時間が長くかかり、積込み機械（ホイールローダやバックホウ）オペレータの切羽での長時間拘束や掘削ずり運搬待ちによるサイクルロスが発生していた。

2. AI ロックローダの開発

AI ロックローダ（以下、本機）は、鉱山用ロックロー

ダ（㈱三井三池製作所製）を山岳トンネル向けに再設計した機体であり、機体の各軸やジャッキにはセンサを装備する事で作業時の重機挙動を取得できる ICT 建機となっている。本機にセンシング機器（LiDAR、画像センサ、各種センサ等）を搭載することで自動運転を可能とし、合わせて AI を搭載することにより、ずりの掻き寄せから積込みまでの一連の作業がオペレータ不要でずり出し作業における省力化・効率化の向上を目的としている。

(1) システムの概要

本機は、機体前方に仮置きしたずりを掻き寄せるためのバケットが付いた掘削ブームと、掻き寄せたずりを重ダンプや連続ベルトコンベア等に積込むための排土ベルコンで構成される。本体仕様と全景を表-1、図-2 に示す。

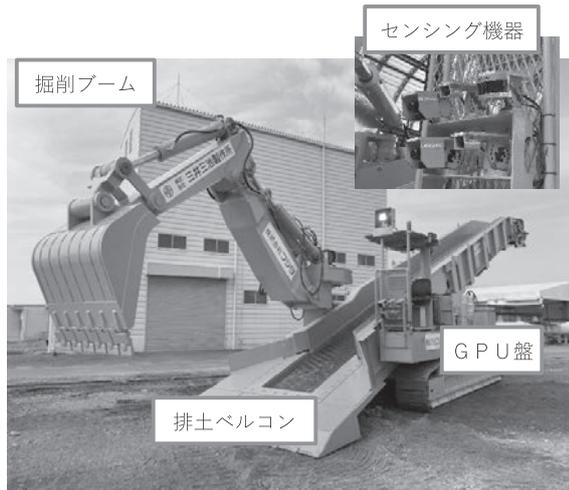
また、機体各軸や油圧ジャッキにセンサを装備する事で作業時の重機動作情報を取得可能とし、機械運転席前方に配置した、ずり計測を行う各センシング機器（LiDAR：三次元点群センサや超音波センサ、画像センサ）から検出したセンサデータを用いる事で、マシンコントロール可能な ICT 建機となっている。このセンサデータを機体後部に配置した GPU 盤（AI 自動

1.発破作業			2.ずり出し作業		3.吹付・支保工建込作業	
穿孔	装薬	発破	ずり出し	支保工 建込	吹付 コンクリート	ロックボルト

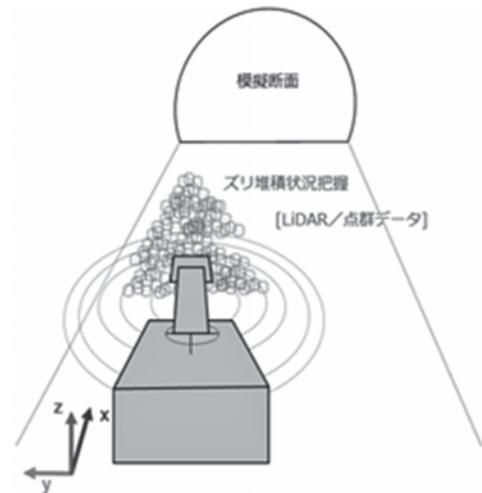
図-1 トンネル施工サイクル

表-1 本体仕様

全長	18.5	m	総重量	50	t
全幅	3.0	m	電圧	AC400 V	
全高	6.1	m	搬送能力	510	m ³ /h



図一2 本機全景



図一3 自動運転レベル1 (L1)

表一2 センサ機器一覧

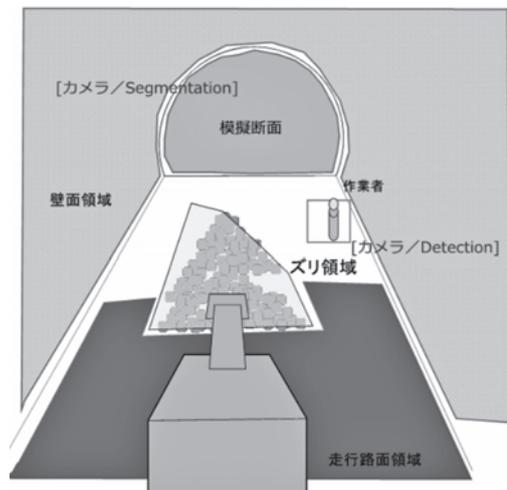
種別	メーカー	型番
ズリ計測用3次元点群センサ LiDAR	Velodyne	VPL-16
ズリ認識用可視光カメラ 車載カメラ	Leopard	AR0231-GMSL
ズリ認識用赤外線カメラ サーマルカメラ	FLIR	BOSON ADK-VGA
傾斜・姿勢検出 IMU	多摩川精機	TAG264

運転盤)にて解析・判断する事で、AIによる自動運転も可能としている。また、手動運転にも対応しており、緊急時や本機配置場所までの移動など、通常操作を行うことも可能となっている。搭載したセンシング機器を表一2に示す。

(2) 自動運転概要

自動運転に関しては、「自動認識レベル」に区分した機能が実装されており、現場実証では各レベルの組み合わせによる動作検証を実施した。

- ・自動運転レベル0 (L0)
バケットの動作を固定し、自動的に繰り返すことでずり積みを行う。
- ・自動運転レベル1 (L1) (図一3参照)
三次元点群計測センサ (LiDAR) から得られる点群データを基にバケットの移動先 (ずり位置) を動的に判断し、自動積みを行う。
- ・自動運転レベル2 (L2) (図一4, 5参照)
本体に取り付けたカメラ映像から画像認識機能により、ずりやトンネル壁面・重機・現場作業員などの対象物を認識し、これらの計測データをGPU盤に集約してAIによりずりの認識を行い、的確な動作



図一4 自動運転レベル2 (L2)



図一5 AI解析画面

パターンを解析・実行する事で切羽ずりの効率的な積み作業を行う。

3. 現場運用

(1) 自動運転 (AI) 教師データ取得

AIによる自動運転を行うためには、多くの写真データ (教師データ) の取得が必要なため、あらかじめ施工中の山岳トンネル2現場にて、カメラからトンネル

坑内画像やズリ画像を約 1,700 枚取得した。その後、学習データにのみ過剰に反応し、未知のデータに対応できない“過学習”に注意しながら学習を行った。AIでの学習後の動作結果を以下に示す。

- ・ 図一六では、切羽面を側壁と一部誤認識しているが、その他は正確に検知していることが確認された。
- ・ 図一七では、重機と作業員を誤認識なく検知していることが分かる。

このデータを用いて事前学習を行うことで、トンネル現場導入時の AI 教師データの作成期間の短縮を図る。

(2) 模擬トンネルでの検証

本機開発にあたり、(株)三井三池製作所大牟田工場内に模擬トンネル(写真一参照)を構築し、本機の動作確認や各自動運転の検証及び改良を実施した。模



図一六 データ取得後の認識結果①



図一七 データ取得後の認識結果②



写真一 模擬トンネル全景

表一三 作業効率比較 (模擬トンネル)

操作方法	作業効率		備考
手動	100	%	降車位置で操作
レベル0	90	%	
レベル1	41	%	近距離優先
レベル2	検知のみ確認		

擬トンネルは、高さ 6 m、幅 12 m、内空断面積約 55 m² の大きさであり、山岳トンネルを想定して遮光カーテンを用いて坑内照度の調整を行った。

各自動運転による効率比較を表一三に示す。効率の比較については、本機を手動で操作した際、ダンプ 1 台分へ所要時間を 100% とした。また、自動運転では、ズリ掻き込み動作の優先度を本機から遠距離としていたが、ズリをうまく掻けなかった事から、近距離動作優先に変更した。

検証結果として、以下の結果となった。

- ・ L0 動作に関しては、固定動作での掻き込みとなる為、手動と同等の効率となるが取りこぼし量も多く見受けられたが、効率比較の差は 10% のみとなった。
- ・ L1 動作に関しては、掻き込み動作毎にセンシングを行う為、待機時間が長く感じられたが、1 回当たりの掻き込み量は多く、取りこぼし量も少なく感じられた。
- ・ L2 動作に関しては、掘削ズリと路盤との判断ができず掘削ズリの認識確認のみとなった。

(3) トンネル坑内での現場実証

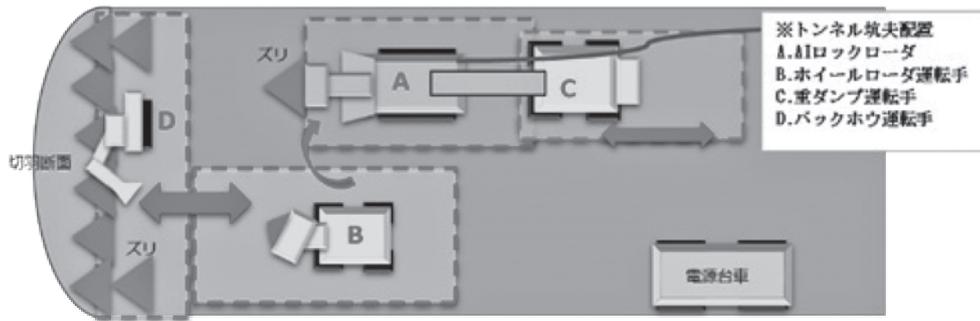
模擬トンネルでの自動運転調整と AI 教師データ更新を行った事から、次に山岳工法の発破掘削により施工する二車線道路トンネル(内空断面積 78.8 m²)において導入し、現場実証および実用化を行った。

運用方法としては、発破後のズリを切羽後方に配置した本機前方仮置き場に投入し、AIによる運搬機械(重ダンプ)への自動ずり積込みを行う。現場実証時のトンネル坑内レイアウトを図一八、写真二に示す。

作業の流れとしては、トンネル発破後に、下記サイクルでずり出し作業を行った。

- ①本機(A)を切羽より約 30 m 後方にセット。
- ②発破後のズリをホイールローダ(B)にて本機前方に積込・運搬を繰り返し実施。
- ③ずり搬送用重ダンプ(C)を排土バルコン後方に配置し、AIによる運転開始。
- ④重ダンプ入替え時、積込みを自動停止して入替え後にAIによる積込み再開。

これらのサイクルを繰り返す事で現場実証を行った。



図一八 坑内運用レイアウト



写真一 二 坑内運用状況

(4) トンネル運用結果

トンネル運用結果としては、事前教師データの作成や模擬トンネルでの検証を導入前に行った事で、実トンネルでの導入準備期間の短縮が可能となり、自動運転は正常なことを確認したが、運用を続けて行く中で様々なトラブルが発生したため、以下の改良改善を行った。

- ・ AIによるずり認識について、ずり性状（色味や湿潤等）が変化した場合に AI 認識不良発生。
⇒切羽ずりの再教師データも追加し対応。
- ・ 掻き込み時にブームがスタックしずり出し停止。
⇒バケット動作モニタプログラム（キャンセル動作）を追加。
- ・ ダンプ誘導位置とズリ積み込み状況がわからず重ダンプ入替えにサイクルロス発生。
⇒排土ベルコン下部にライトとセンサを設置し、重ダンプオペレータに明示。

また、実際施工のサイクルの中、ずりを切羽後方に

仮置きする事で切羽の早期開放し、エレクター吹付け機を切羽へ早期に移動することができるようになったため、ずり搬出作業と支保工作業を同時作業可能となった。切羽の早期開放時の運用状況を写真一三に示す。

これにより現場運用結果として、

- ・ AIによるズリ積み込み作業において 60 m³/h の作業能力を確認。
- ・ ずり出し時の切羽早期開放による次工程への移行が可能となった。
⇒（10%のサイクルアップ達成）（図一九参照）
- ・ 積み込み作業のオペレータが次作業の支保工作業に従事する事で生産性向上。
⇒約 20%の省人化（班編成：5人→4人に変更）以上のことが可能となった。



写真一 三 切羽の早期開放（支保工作业）

	1.発破作業			2.ずり出し作業		3.吹付・支保工建込作業				
従来	穿孔	装薬	発破	ずり出し		一次吹付 コンクリート	支保工 建込	二次吹付 コンクリート	ロックボルト	
AIロックローダ	穿孔	装薬	発破	ずり出し(仮置き)	一次吹付 コンクリート	支保工 建込	二次吹付 コンクリート	ロックボルト	10%削減	

AIロックローダによるずり出し

図一 九 1 サイクル当たりの作業時間比較

4. おわりに

ズリ運搬方式にこだわらない新たな手法として「AI ロックローダ」をトンネル坑内へ導入することにより、重ダンプや連続ベルトコンベアの運行サイクルに制約を受けずに切羽のズリを迅速に撤去でき、トンネル発破後の切羽作業エリアの早期解放による次工程の支保工作業へ円滑に移行が可能となった。以下の本機の特徴と今後の展開を述べる。

(1) 本機の特長

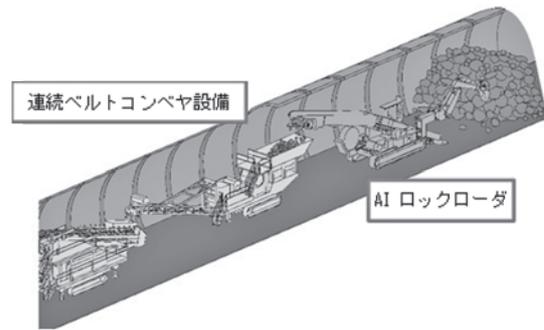
本機は、切羽でのズリ運搬作業の待ち時間が減少することでトンネル工事による施工サイクルタイムを改善するために開発された機械であり、

- ①生産性向上…ズリを後方に仮置きすることで切羽作業エリアの早期開放が可能
 - ②省力・省人化…AI 自動運転によるズリの掻き込み・積み込みが可能
 - ③安全性向上…AI センシングにより人の検知・積み込み機械の自動停止が可能
- という特徴が挙げられる。

(2) 今後の展開

今回の実証運用・検証では、回数を重ねるにつれて各自動運転レベルの作業効率は上昇した。今後も写真データの収集を継続し、AI による追加学習を行い。ダンプ運搬方式の安全性向上や生産性向上など、自動運転の発展に努めていく。また、今回とはズリ運搬方法が異なる連続ベルトコンベア運搬（図—10 参照）への導入も進めていく所存である。

JCMA



図—10 連続ベルトコンベア運搬方式

《参考文献》

- 1) 永田常雄・大村修一・岩田文吾：削孔支援システム搭載型ドリルジャンボによる発破掘削，土木学会第 54 回年次学術講演会，VI-198，1999.
- 2) 小笠原裕介・坂下誠・浅井秀明・水谷和彦・五味春香・鈴木麟太郎：自動装薬システムにおける装薬孔位置検出システムの開発，土木学会第 78 回年次学術講演会，VI-957，2023.
- 3) 遠亮太・水谷和彦・坂下誠・浅井秀明：完全自動鋼製支保工建込みロボットの開発，土木学会第 76 回年次学術講演会，VI-914，2021.

【筆者紹介】



浅沼 廉樹（あさぬま なおき）
 ㈱フジタ
 土木本部 土木エンジニアリングセンター 機械部
 上級主席コンサルタント



山田 照之（やまだ てるゆき）
 ㈱三井三池製作所
 技術開発部
 部長



松尾 陽介（まつお ようすけ）
 ㈱三井三池製作所
 産業機械技術部 産業機械設計グループ
 アシスタントリーダー