

# 山岳トンネル施工管理システム 「Hi-Res」の開発

副島 幸也<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (株) 安藤・間 建設本部 機電部

建設業は人口減少と少子高齢化を背景とした労働力不足が問題となっており、ITやDXを活用した生産性向上が強く求められている。また、経済・社会・環境に多大な影響を及ぼす建設業はSDGsに積極的に取り組む必要がある。開発した山岳トンネル施工管理システム「Hi-Res」は、トンネル現場の重機機械・プラントの稼働状況を把握し、作業工種を判別し、効率的な設備稼働を支援する。Hi-Resは生産性向上と省エネルギー化を実現するシステムであり、その機能と効果について紹介する。

キーワード：Hi-Res、山岳トンネル、生産性向上、省エネルギー、換気設備制御

## 1. はじめに

現在、日本は人口減少と少子高齢化を背景に労働力不足が顕在化しつつある。建設業においても深刻な問題となっており、女性労働者や外国人労働者の増強による改善が図られているが、労働者不足はますます深刻化することが予想されている。これらの対策として、ITやDXを活用した生産性向上が強く求められている。

また、2015年国連サミットにおいて全会一致で採択された2030アジェンダにおいて、その中核をなすのが「持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals：SDGs）」である。経済・社会・環境に多大な影響を及ぼす建設分野は、持続可能な社会の構築のために大きな責任を担っている。特に省エネ・CO<sub>2</sub>の削減は、工事現場のそれぞれで取り組まなければならない課題である。

これらの課題解決方法の一つとして、トンネル現場の重機機械・プラントの稼働状況を把握し、作業工種を判別することで生産性向上支援と省エネルギー化を実現する、山岳トンネル施工管理システム「Hi-Res」を紹介する。

## 2. 山岳トンネル工事の課題

### (1) 生産性向上に関する課題

山岳トンネル工事の代表的な工法であるNATMでは、掘削→ずり出し→（鋼製支保工建込み）→吹付けコンクリート→ロックボルト→掘削と、一定の手順を繰り返しながら掘り進めることになる。繰り返しの作業をサイクルと呼び、繰り返し作業を行う場合の一工程に要する時間をサイクルタイムと呼ぶ。

山岳トンネルにおいては、サイクルの各種作業を効率良く実施し、サイクルタイムを短くすることが生産性向

上に大きく寄与する。そのため、作業員が手書きする日報などからサイクルタイムを分析し作業の最適化を図ってきたが、より精度良く効率的な情報収集技術が求められていた。近年ではトンネル切羽に設置したカメラ映像から作業状況を解析するなどの新技術導入も進んでいるが、教師データ作成の手間や、精度の面で課題が残されていた。

### (2) 省エネに関する課題

トンネル工事で最も大きな電力消費を伴う設備が換気設備である。作業員の健康に影響する重要な設備であり、「ずい道等建設工事における換気技術指針」では、建設機械の排ガスやコンクリート吹付に伴うセメント粉塵など、サイクルの各種作業に合わせて必要な換気量を設計しているが、現実の設備管理においては状況に合わせた細かな制御を行うことは難しく、高出力での換気設備稼働を継続している場合が多い。

また、既存の換気設備出力調整事例として、粉塵計測結果によるフィードバック制御がある。これは坑内の粉塵濃度が高まった場合に集塵機の出力を上げる機能であるが、その際には既に坑内環境が悪化した状態での事後処理となっている。

## 3. Hi-Resの概要

我々は、作業員の手を介さず、トンネル工事の作業状況・サイクルタイムを簡易に知る手法として、各種重機・設備の稼働時に生じる電気信号を利用し作業種別を自動で判定する方法を検討した。山岳トンネル工事におけるサイクルの各種作業では、例えば吹付作業においてはコンプレッサーが必ず稼働する、といった具合にそれ

それぞれ特有の建設機械の動作が存在するため、それを判定基準(トリガー)として、どんな作業を施工中なのかを判定することとした。作業判定の一例を表-1に示す。

この方法によるシステムを菅機械工業(株)と共同で開発し、ICTを活用した高機能な遠隔システムという意味を含め、「Hi-Res (High-grade ICT Remote-System)」と命名した。Hi-Resは、機械のon/offにより状態を判定する

「工種判定ユニット」、収集したデータにより換気設備の制御を行う「操作ユニット」、現場の使用電力などを計測する「計測ユニット」などで構成される。

また Hi-Res は判定した作業種別に応じた換気設備の出力設定により、常に最適な換気設備制御を実施することが可能である。図-1に、Hi-Resの全体構成を示す。

表-1 作業判定一覧(例)

工種	機種	判定方法
掘削	ツインヘッド	ACC電源on/off
ズリ出し	サイドダンプ	ACC電源on/off
吹付	吹付機	コンプレッサon/off
建込	吹付機	油圧パックon/off
ロックボルト	ジャンボ	油圧パックon/off
待機	-	信号無し

#### 4. Hi-Resの機能説明

##### (1) サイクルタイムチャート表示機能

前述の手法で取得したサイクルタイムをタイムチャート図として表示する機能である。図-2にサイクルタイムチャートを示す。重機・設備の稼働状況で判別し、平行作業なども正確に把握する。

電気信号のon/offによりサイクルの帯が小間切れとなっても、視覚で感覚的にサイクルを把握することができるため、非常にわかりやすい。

また、本機能では判定に用いるトリガーが電気信号であれば良いので、特定の建設機械に依存しない。サイク

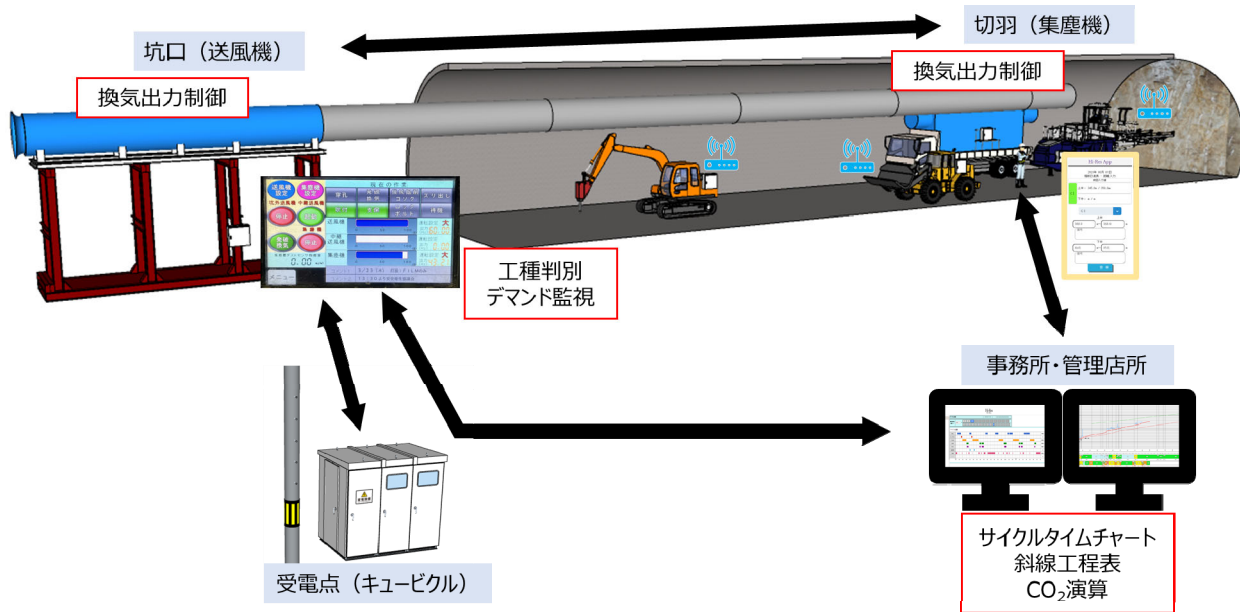


図-1 Hi-Res全体構成

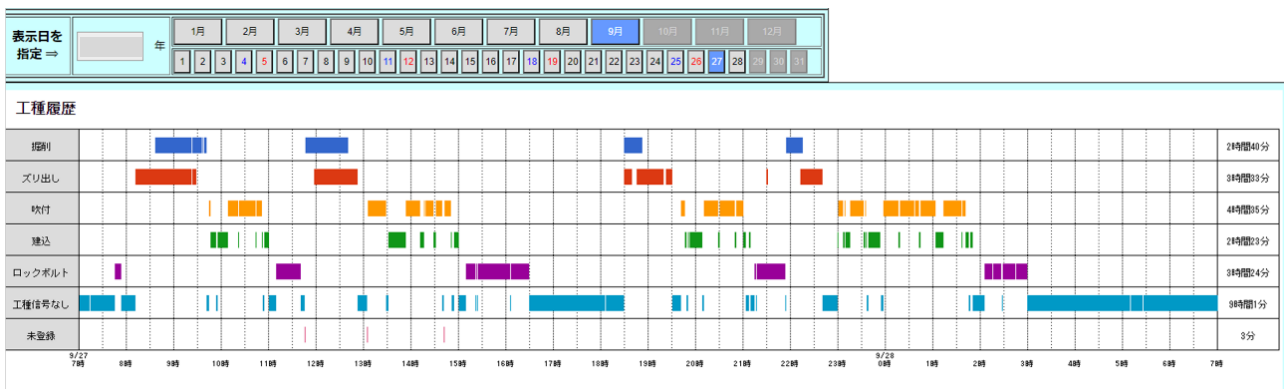


図-2 サイクルタイムチャート

ルタイムに直接影響のない、インバート作業や覆工作业でも、関連する設備の稼働をトリガーとすれば、把握することが可能である。

### (2) 負荷設備制御機能

Hi-Resで判別された作業の内容に応じ、換気設備の出力を調整する。作業開始時点から換気設備の出力調整が行われるため粉塵の拡散を予防し、従来の粉塵濃度計によるフィードバック制御と比較して、作業環境が良好な状態を保持しやすい。粉塵濃度計とのリンクも可能で、坑内環境が悪化した場合には強制換気を行う。

制御信号の入力が可能な換気設備であれば、どのメーカーの換気設備でも適用することが可能だが、共同開発先となる菅機械工業の換気設備では、作業種別による出力制御に加え、トンネルの掘削距離に応じた圧力損失を考慮した出力調整を行うことができる。

またHi-Resはデマンド監視を行っており、設定したデマンド値を優先した出力調整を行う。「注意」「警報」

の2段階の報信号を出力することができ、これを利用して換気設備の他、状況に応じて他の負荷設備の運転制御を行うことが可能である。

### (3) 電子ホワイトボード機能

山岳トンネル工事では工事の進捗管理のため、毎朝の作業開始時に切羽の様子を確認し、進捗を記録して現場事務所でも共有することが一般的である。野帳等に記録し、事務所ホワイトボードに書き写すことが多いが、現場での対応で時間を要すと、事務所での情報共有が遅れてしまう。

Hi-Resでは、工事進捗を切羽付近でスマートフォンにより入力すると、クラウドを通じて事務所に設置された電子ホワイトボードでタイムリーに共有することができる。写真-1にスマートフォンによる工事進捗の入力状況と入力画面を示す。また、写真-2に事務所に設置した電子ホワイトボードを示す。



写真-1 スマートフォンによる進捗管理

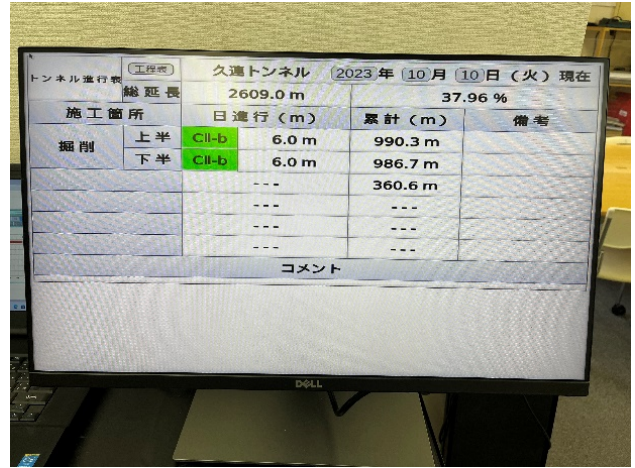


写真-2 電子ホワイトボード

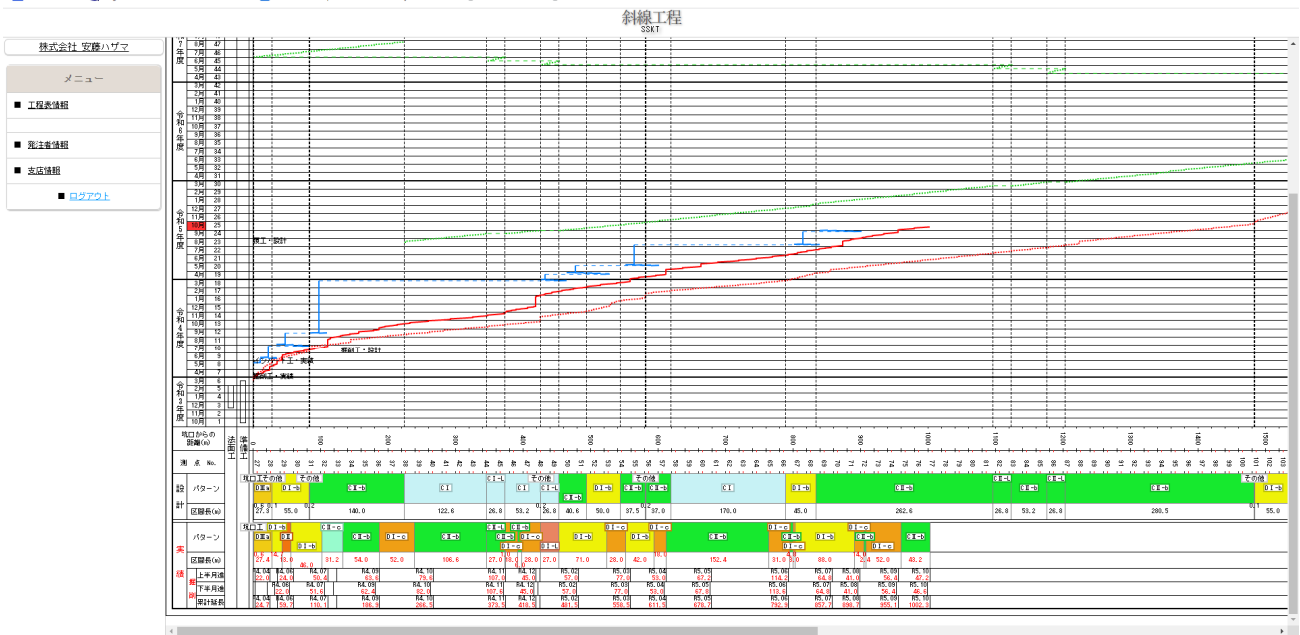


図-3 斜線工程表

#### (4) 工程管理（斜線工程作成）機能

トンネル進捗を管理するツールの一つが斜線工程表である。Hi-Res では日々の進捗を電子ホワイトボードで共有すると同時に、WEB 上に斜線工程表を自動作成する。斜線工程表には、2 種類の計画工程と日々更新される実績工程が表示できる。計画工程は受注時の設計工程と現場で計画する実施工程等に使い分けことができ、それぞれが実績工程と比較することが可能となる。

職員が日々の実績を工程表に転記する負担を軽減し、また常に最新の斜線工程表で管理することが出来る。図-3に斜線工程表を示す。

#### (5) CO<sub>2</sub>演算機能

CO<sub>2</sub> 排出量を抑制するためには、それぞれの作業でどのくらいの CO<sub>2</sub> が排出されているのかを把握することは重要である。Hi-Res では作業ごとの CO<sub>2</sub> 発生量を簡易的に計算する機能を持つ。また換気設備は稼働時間と出力から CO<sub>2</sub> の発生量を計算する。これらは年度毎に実績を集計することができる。

日々の排出量を日常的に把握できるため、CO<sub>2</sub> 排出に関する意識付けの効果も高く、環境管理を容易とする。図-4に CO<sub>2</sub> 演算機能の画面を示す。

### 5. 運用効果

#### (1) 生産性向上支援

Hi-Res が表示するサイクルタイムチャートは常に最新の状況が取り込まれている。そのため、朝一番に現場へ向かう前にシステムを参照すると、昨晚の作業の状況が把握でき、またカメラで確認された切羽作業がどの程度の時間を経過しているのか等、より詳細に把握できるため、現場へ到着してから測量作業のために待機するようなロスタイムを防止できるようになった。

実態を正しく把握できるため、作業計画が具体化しやすく、例えば連続ベルトコンベヤ工法におけるコンベヤの延伸など、サイクルの合間の作業について、よりロスのない計画を行うことが出来るようになった事例もある。

電子ホワイトボードによる進捗管理や斜線工程表作成

では、日頃発注者との打合せなどで多忙な職員同士が、負荷なく最新情報の共有ができるようになっており、非常に好評である。

坑口などに設置された操作ユニットは、把握した作業状況を表示しているため、作業員が状況把握のために行っていた移動や連絡調整などの時間短縮にも役立っている。

機械の入替時間等、従来の手書きの日報では表記されない詳細なデータを得ることが出来るため、生産性向上のための課題抽出・検討のための支援システムとして活用されている。

#### (2) 省エネルギー化

Hi-Res導入済の当社複数トンネル現場における2023年3月度の換気設備消費電力を計測し、従来の運転方法と比較した結果、最大68%削減、平均61%削減の省電力効果を確認した。

換気設備はインバータ制御を行っており周波数の削減率の3乗に比例して省エネ効果が得られる。図-2に示したサイクルタイムチャートでは、表-2に示す設定で運転を行っていたが、換気設備を最大出力で稼働させるべき作業の時間は合計で約8時間であった。残りの16時間では、半分の出力（周波数）で運転すれば、インバータの効果により1日あたりで60%の節電が出来ていることとなる。

これらから、一部の作業で出力を抑制するだけでも大きな効果があり、従来は見逃されていた「工種信号無し（作業の入替）」の時間帯をしっかりと換気制御し、余剰な稼働を抑制していることが大きな省エネ効果を生んでいると考えられる。

### 6. 今後の展開

Hi-Resは導入さえ行ってしまうと、ほとんど手間をかける必要が無い、メンテナンスフリーなシステムである。Hi-Resを活用は、現場職員が効率的に業務を行うための一助となっている。また坑内環境を良好に保ちつつ省エネ効果を生むことが出来ている。

工種名称	稼働時間	消費電力	消費燃料	CO2排出量
穿孔	4時間42分	652.83 kWh		340.12 kg
ロックボルト	2時間58分	197.33 kWh		102.81 kg
ズリ出し	3時間27分		73.50 L	
鋼製支保工	7時間38分	416.78 kWh		217.14 kg
吹付コンクリート	4時間27分	445.89 kWh		232.31 kg
発破換気	10分			
待機	6時間37分			
-----	0分			
集塵機	23時間39分	1,539.46 kWh		802.06 kg
送風機	20時間15分	1,365.12 kWh		711.23 kg
送風機_2	19時間45分	1,297.09 kWh		675.77 kg
合計		5,914.47 kWh	73.50 L	3,273.94 kg
総消費電力		6,949.00 kWh		3,620.43 kg

図-4 CO<sub>2</sub>演算機能

表-2 作業工種による換気設備の出力制御設定

工種	従来		Hi-Res	
	送風機	集塵機	送風機	集塵機
掘削	大	大	中	中
ズリ出し	大	大	大	大
吹付	大	大	大	大
建込	大	大	中	中
ロックボルト	大	大	中	小
待機	小	小	小	最小

一方で、作業判定としてのトリガーをしっかりと理解していないと、データの収集、換気の制御が難しくなる。一例として、サイドダンプの稼働をシガーソケットへの給電で判定させていた際、システムを理解していないオペレータが、自身の都合でソケットを外してしまう、というような事があった。また、作業を行っていないにも関わらず、アイドル状態のまま待機していた建機が「作業中」と判定されてしまう事例もあった。今後は作業の判定を確実にを行うためのトリガー選定を更に検討していくことが重要だと考えている。

また、Hi-Resはクラウドを活用したデータの蓄積・共有を行うことを前提としている。今後も様々なデータを一元化していくことで、生産性向上・省エネルギー化に

より効果的なシステムへと発展させていく予定である。

## 7. おわりに

Hi-Resは省エネ効果が大きいことから導入メリットも大きく、当社で施工している山岳トンネル工事のほとんどでHi-Resを導入している。SDGsへの取り組み、また数値では見えない職員負荷軽減などを考慮し、今後も当社は積極的にHi-Resを現場導入していく予定である。

建設業における課題解決のためには、このようなシステムが広く採用されることが重要であり、菅機械工業ではHi-Resの外販を行っている。今後も山岳トンネル工事の多くで本システムが導入されることで、生産性向上・省エネルギー化が更に進むことを期待する。