

山岳トンネル施工管理システム「Hi-Res」の展開

サイクルタイム取得と電力管理により現場施工の効率化に貢献

涌井 遼平

建設業は人口減少と少子高齢化を背景として労働力不足が問題となっており、これを補うため、DXを活用した生産性向上が強く求められている。また、建設業は経済・社会・環境に多大な影響を及ぼすことから、社会的使命を果たすべく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、山岳トンネル工事の重機・設備の稼働状況を電氣的信号で把握することで工種を判別し、効率的な設備稼働を支援するもので、生産性向上と省エネルギー化を実現する。本稿ではその機能と効果について紹介する。

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

1. はじめに

現在、我が国では人口減少と少子高齢化を背景として産業界における労働力不足が顕在化しつつある。建設業においても例外なく深刻な問題であり、女性労働者や外国人労働者の増強による改善策が図られているが、堅調な建設投資が続くと予想される中、継続的な人口減に伴う就業労働者数の大幅な減少により、労働力不足はますます深刻化すると予想されている。従って、このような状況を打開するため、建設生産プロセスを改変する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業は、持続可能な社会の構築のため大きな責任を担っている。特に環境への対応として、脱炭素社会実現に向けた省エネルギーへの取組やCO₂排出量の削減は、工事現場それぞれで率先して取り組まなければならない課題である。

本稿では、上記課題の解決方法として開発した、掘削サイクル時の工種判別と換気設備の効率的運用を目指す山岳トンネル施工管理システム「Hi-Res」（以下「本システム」という）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

山岳トンネル工事にて代表的な工法であるNATMでは、掘削→ズリ出し→（鋼製支保工建込み）→吹付コンクリート→ロックボルト→掘削と、一定の作業（工種）を繰り返しながら掘り進めることになる。この繰り返しの作業（工種）を掘削サイクルと呼び、掘削1サイクルに要する時間をサイクルタイムと呼ぶ。

掘削サイクル内の各工種を効率良く実施し、サイクルタイムを短縮化することは、山岳トンネル工事の生産性向上に大きく寄与する。そのため、作業員が簡易的に手書きする日報（図-1）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、より精度良く且つ効率的にサイクルタイムを取得する情報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し、掘削サイクル（工種）を判断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、判定精度の面での課題がある。

サイクルタイム	掘削区分			
	16	17	18	19
掘削準備				
(削孔・ブレイカー)				
装薬・発破				
ズリ出し				
浮石除去・当取り				
一次吹付				
支保工建込				
二次吹付				
三次吹付				
ロックボルト				

図-1 手書きでの作業日報

(2) 省エネルギーに関する課題

山岳トンネル工事は、掘削サイクル中に稼働する建設機械（ドリルジャンボ・吹付機他）や坑内環境を維持する換気設備（送風機、集塵機）の動力源を電力に依存し、その消費電力量も多いことから省エネルギー化が期待されるものである。これら機械・設備の内、最も消費電力量を伴うものは換気設備であり、現場の条件により異なるが、その総電力量に占める割合は一般に20%～30%程度と高い。

換気設備の仕様計画時には、「ずい道等建設工事における換気技術指針」に従い、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、各工種にて生じる想定粉塵量を希釈するために必要な所用換気量の計算を行う。例えば、穿孔時と吹付時に要求される所要換気風量は、作業環境が異なるため差が生じる（表一）。一方で、現実における換気設備の管理では、掘削サイクルに応じて細やかな出力制御を行うことは難しく、所要換気風量を満たす出力設定で稼働を継続している場合が多い。

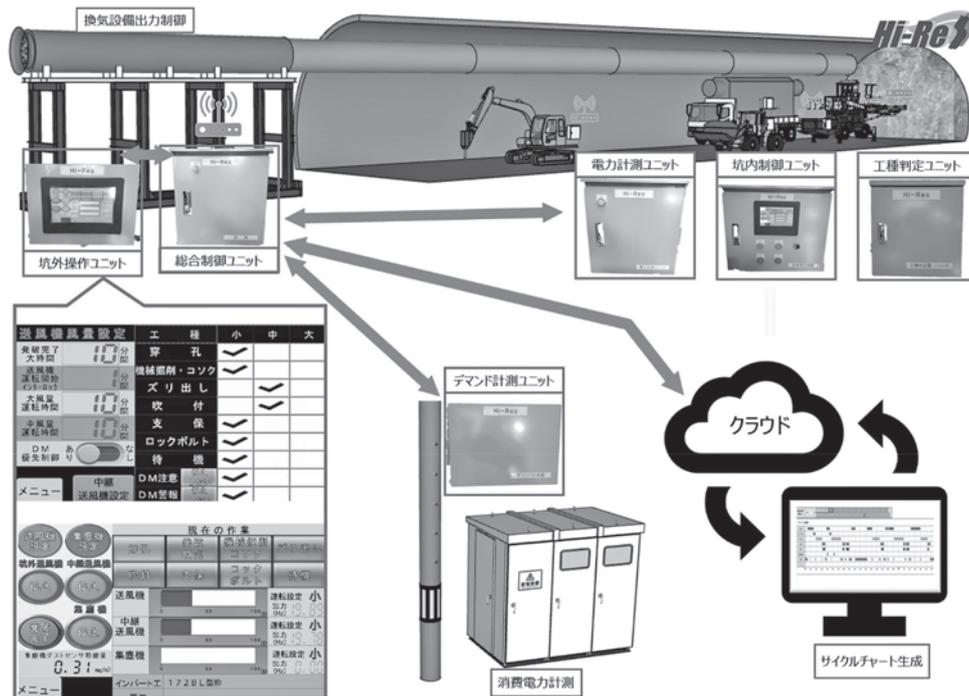
表一 換気指針に基づく発破掘削における所要換気風量の計算（例）

工種	所用換気風量 [m ³ /min]
穿孔	1,118
ズリ出し	1,887
支保工建込	1,184
吹付	2,041

また、既存換気設備（集塵機）の出力調整を自動的に行う一般的な機能として、設備に付帯したダストセンサー（粉塵計測）を用いてのフィードバック制御がある。これは粉塵濃度に応じて集塵機の出力（処理風量）を自動制御するものであるが、集塵機はトンネル切羽から距離があるため、トンネル切羽近傍で発生する粉塵が集塵機に到達するまで一定時間を要す。例として吹付時では、ダストセンサーが反応し集塵機の出力が増加するまでにタイムラグがあり、作業員に適した作業環境を担保することが出来ない。

3. 本システムの全体概要

本システムの全体概要を図一に示す。本システムは、トンネル切羽付近の建設機械に設置し稼働状態を把握する「工種判定ユニット」、現場全体及び各設備の消費電力量を計測する「デマンド計測ユニット」「電力計測ユニット」、各種データの収集と換気設備の集中管理を行う「統合制御ユニット」「坑内・外操作ユニット」で構成される。これらユニットにより工種を判別しサイクルタイムを取得すると同時に、工種に応じた換気設備の出力調整を行うものである。また、取得した各種データはクラウド上に記録され、事務所等にて状況確認を行うことができる。



図一 本システムの全体構成

4. 本システムの機能説明

(1) サイクルタイムチャート表示機能

本システムにおける機能のベースは工種判定にある。山岳トンネル工事の掘削サイクルにおける各工種は稼働する建設機械に依存する。そこで、各建設機械が稼働時に生じる電気信号を利用して工種を自動で判別する方法を検討した。例えば、穿孔時はドリルジャンボ単体が稼働するため、その油圧が稼働した際を工種判定のトリガーとすればよい。このように各工種と特徴的な建設機械を紐付けし、それぞれ稼働をトリガーとして工種を判別する。工種判定の一例を表一2に示す。

判別した工種はクラウド上に1分毎に記録され、チャート図形式で表示される(図一3)。電気信号のon/offや通信の細切れによりサイクルの帯が小間切れとなることもあるが、視覚的にサイクルの全体像を把握することができる。

(2) 換気設備(送風機, 集塵機)制御機能

前述に示す方法で工種を判別するが、工種毎に予め定めた出力設定(周波数の可変)にて換気設備を自動的に調整する。表一3にその一例を示す。換気設備の出力設定は、送風機・集塵機毎に大・中・小の3段階で行うことが出来る(周波数の設定)。

また、集塵機では前述の制御方法に加え、従来通りのダストセンサーによる制御方法を並行して行う。なお、安全面を考慮し、工種判定とダストセンサーの出力設定を比較し大きい方を選択する。

表一2 工種と建設機械・信号の関係

工種	建設機械	信号(トリガー)
掘削(穿孔)	ドリルジャンボ	ドリフター稼働
ズリ出し	サイドダンプ	エンジン稼働
支保工建込	エレクター付き吹付機	エレクター稼働
吹付	コンプレッサー	コンプレッサー稼働
ロックボルト	ドリルジャンボ	ドリフター稼働 角度センサー
待機	-	信号なし

表一3 工種毎の風量設定(例)

工種	送風機	集塵機
掘削(穿孔)	中	中
発破換気	大	大
ズリ出し	大	大
支保工建込	中	中
吹付	大	大
ロックボルト	中	中
待機	小	小→最小*

*集塵機の小設定は、一定時間経過後に停止(最小)

(3) 掘削サイクル時CO₂排出量推定機能

現場全体や各設備の消費電力量、または燃料系重機の稼働時間と時間当たりの消費燃料(建設機械損料やカタログ値を引用)からCO₂排出量を推定する機能である(図一4)。

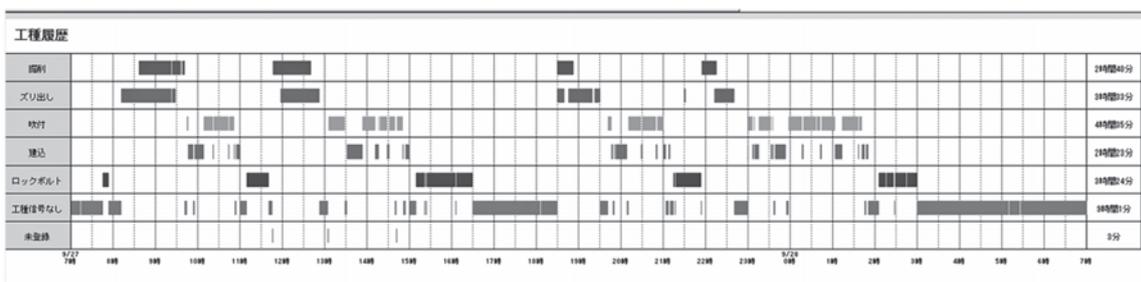
この機能により日・月・年間でのCO₂排出量が集計した結果がクラウド画面上に表示されるが、「数値の見える化」により職員等の環境意識が高まると考える。また、これら数字を分析することで本システムの稼働によるCO₂発生量への低減効果を正確に評価することが出来ることで環境対策強化に繋がる。

(4) 工程管理(斜線工程)機能

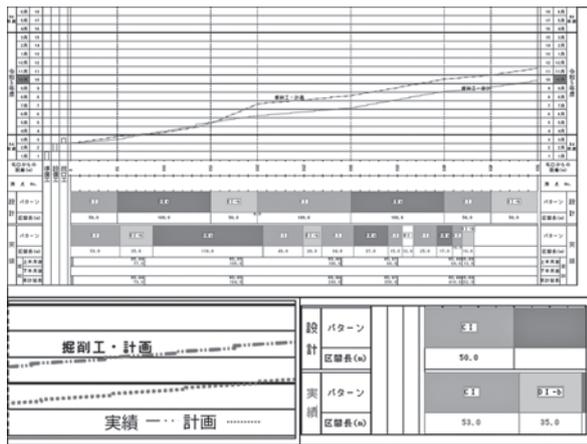
山岳トンネル工事において、進捗を管理するため斜線工程表を用いることが一般的であるが、本システムのクラウド管理画面でその作成支援を行うことが出来る(図一5)。予め設計データを入力した上で、日々実績データを入力すると自動的に斜線工程が更新され

工種名称	稼働時間	消費電力	消費燃料	CO ₂ 排出量
穿孔	5時間16分	736.17 kWh		383.54 kg
ロックボルト	1時間21分	124.88 kWh	149.00 L	65.08 kg
ズリ出し	4時間56分			
掘削交換工	2時間29分	135.59 kWh		70.84 kg
吹付コンクリート	3時間52分	387.44 kWh		201.85 kg
待機	0分			
待機	5時間56分			
待機	1分			
送風機	23時間49分	1,624.24 kWh		846.23 kg
送風機	20時間38分	1,356.12 kWh		706.54 kg
送風機_2	19時間39分	1,309.09 kWh		682.04 kg
合計		5,673.52 kWh	149.00 L	3,346.14 kg
総消費電力		6,861.18 kWh		3,574.67 kg

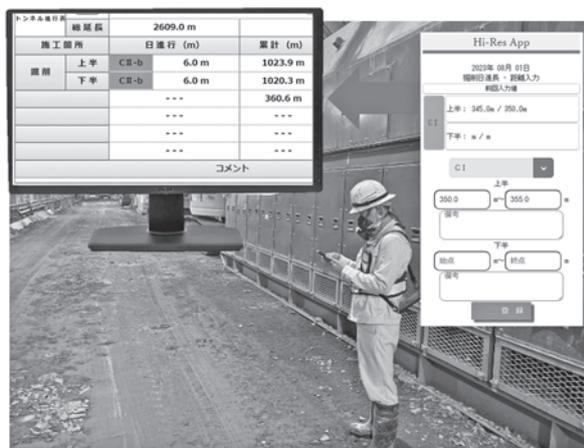
図一4 掘削サイクル時CO₂排出量演算機能



図一3 サイクルタイムチャート図



図—5 斜線工程表作成支援機能



写真—1 実績データ入力状況

る。実績の更新にはクラウド管理画面はもとよりスマートフォンの専用アプリを用いる。導入した現場では、朝にトンネル切羽での進捗を確認した上でアプリへ入力を行うことが慣例となった。また、この記録は事務所に設置したモニター画面に表示され（ホワイトボード機能）、職員間でトンネル切羽の進捗情報を適時共有することが出来る（写真—1）。

5. 本システム導入による効果

(1) 生産性貢献支援

本システムのクラウド画面に表示されるサイクルタイムチャートは、分単位で自動更新される。そのため、作業開始前にクラウド画面を参照すると、職員が常駐していない夜勤の作業状況を視覚的に把握することが出来る。

また、サイクルタイムチャートにより、従来の手書き日報では反映することが出来なかった掘削サイクルの時間配分を正しく把握することで、掘削サイクル以外の付帯作業における工程や進捗予想を組立し易くな

る。ズリ出しの土砂運搬で用いる連続ベルトコンベヤの延伸作業を、掘削サイクルのどの合間に入れるかサイクルタイムチャートを基に検討を行い、よりロスのない計画工程としたことは、本システムを活用した事例の1つである。

工程管理（斜線工程）機能では、日頃発注者との打合せなどで多忙な職員同士が、クラウド画面を通じて負荷なくトンネル切羽の進捗情報を共有することが出来、導入現場において非常に好評である。

(2) 省エネルギーへの効果

本システムの導入を行った2現場の山岳トンネル工事における1年間（2022年8月～2023年7月）の換気設備消費電力量 [kWh] の実績値と、従来の運転方法による推定値（班の交代時間のみ出力を抑制、それ以外は一定出力で管理）を比較した結果、換気設備全体で平均約50%の削減効果があった（表—4）。

これだけ大きな削減効果を得られる理由は、換気設備はインバータによる周波数制御を行っており、理論上消費電力量は周波数と3乗倍の関係にあるためである。つまり、本システムにより所用換気風量を必要としない工種部分の出力を抑制することで、大きく消費電力量を削減することが出来る。

表—4 本システムと従来手法の消費電力量比較

2022/8～ 2023/7	(a)本システム(実績値)		(b)従来手法(推定値)		割合 a/b (%)
	消費電力量 [kWh]				
	送風機	集塵機	送風機	集塵機	
Aトンネル	256,608	115,948	453,199	237,540	54
Bトンネル	187,321	249,166	343,496	549,346	49

6. 今後の技術展開

各種機能を有し多くの副次的な効果を得るICT技術は有効なものであるが、現場にとって「面倒なもの」となるとは、機能を最大限に生かすことが出来ない。その上で本システムは、基本的に導入後の手間を要しないことが特徴である。ただし、現場での導入効果を確認する中で、いくつかの改善点が挙がっている。

例として、工種判定の基礎となるトリガー（工種判定ユニット）の安定性にある。工種判定情報の取得が安定的に行える状態を維持することが本システムの機能を担保する上で重要であるが、作業員により工種判定ユニットを取り外されていた、切羽付近でのWi-Fi通信が途絶えた、などが原因で長期間工種判定がされなかった事象があった。このような外的要因の影響を

排除し、確実にトリガー判定を行える手法を検討することが有効と考える。

今後も様々な現場の実証データを検証することで、よりよい効果的なシステムへ発展していく。

7. おわりに

本システムは、掘削サイクルにおける施工管理（サイクルタイムの取得や職員間の情報伝達）を容易にし、且つ工種に応じて適切な換気風量の自動制御を行う事で、省エネルギー化（電力削減効果）を得ることが出来る。特に電力削減効果は、適切な運用・管理を行う事でその削減率を向上させる。

最後に、SDGsの達成に向けて企業の貢献による社会的価値を創生していくことは非常に重要である。本システムにより工事現場の生産性向上や省エネルギー化を実現することで、社会的価値を享受することが出

来ると考えており、今後も引き続き山岳トンネル工事での導入を促進していく。

謝 辞

本稿は、菅機械工業(株)との共同開発における成果を報告するものである。各種現場検証や効果検証に対してご協力を頂いた。この場を借りて深く感謝申し上げます。

JCMA

【筆者紹介】

涌井 遼平（わくい りょうへい）
（株）安藤・間
建設本部 機電部
主任

