

# 山岳トンネル工事の エネルギーマネジメントシステム TUNNEL EYE

白石 雅嗣・畠中 健・澤目 俊男

山岳トンネル工事では、施工機械や工事照明、換気ファンなどの多くの電気機器を用いるため、省エネルギー化が求められる。筆者らは、トンネル現場内にIoTのネットワークを構築して、入坑者位置や作業環境濃度を常時監視するとともに、作業状態を把握できるように施工機械の電力量などの情報を計測・分析し、安全性の向上を図ったうえで、工事照明と換気ファンを自動で省エネ制御するエネルギーマネジメントシステムを開発した。本稿では、システムを実際の山岳トンネル現場で試験導入し、安全性の向上と、省エネルギー化を両立させた手法について報告する。

キーワード：山岳トンネル、IoT、安全、作業環境、省エネルギー化、工事照明、換気ファン

## 1. はじめに

近年のIoT技術の進展は、建設現場での生産性向上や、省力化にもつながると考えられている。

筆者らは、山岳トンネル工事現場の施工機械や電気機器、坑内情報をモニタリングするセンサーをインターネットにつなぎ、保存、分析や自動制御を行い、トンネル坑内の安全、作業環境の向上と、省エネルギー化による環境負荷削減（CO<sub>2</sub>削減）に寄与するシステムを開発した。また、本システム「TUNNEL EYE」を、高松自動車道 志度トンネル工事現場に試験導入して、坑内の安全の「見える化」と、工事照明や換気ファ

ンの自動制御（以下、省エネ制御）を行った。

本稿では、システム機能の概略と、志度トンネル工事での安全性の向上と、省エネルギー化を行った取り組みについて報告する。

## 2. 技術の概要

本システムは、トンネル内に複数の組込型制御端末（以下、制御端末）を配置して、入坑者と工事車両の位置や、作業環境濃度、施工機械の電流値などの情報をセンシングし、インターネット経由で、遠隔地域のサーバーで保存、分析して、安全の「見える化」や、

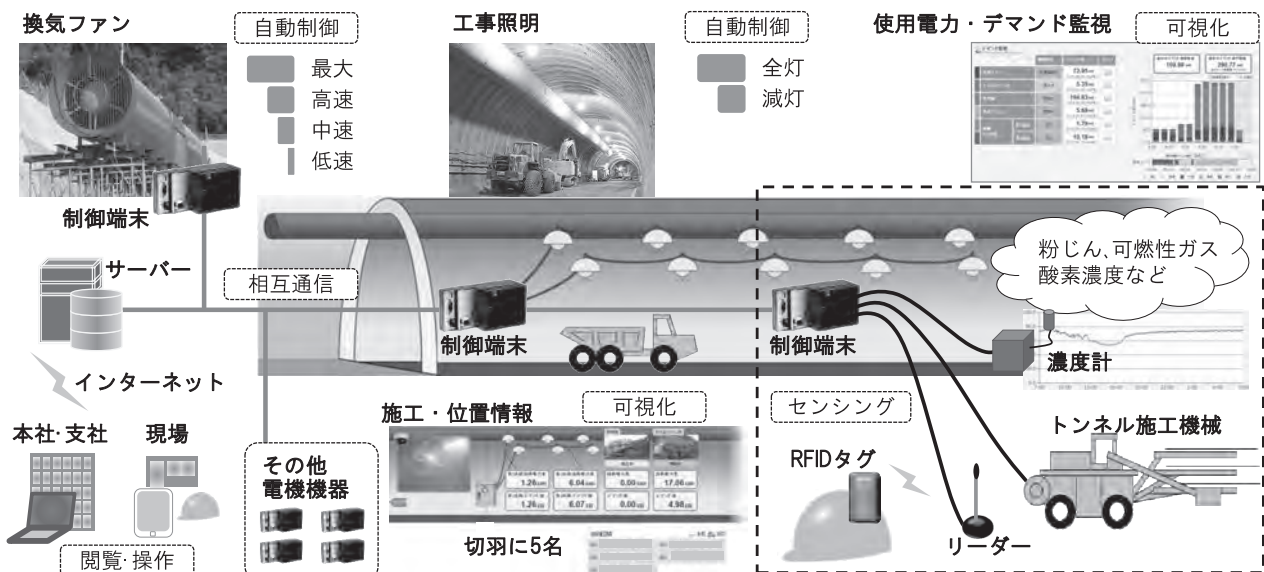


図-1 本システム概略図

工事照明や換気ファンを作業工程に応じて省エネ制御するものである。システム概略図を図-1に示す。ここで、安全の「見える化」とは、Web画面で情報を閲覧するなどの以下の機能を示す。

- ①アクティブRFIDタグで坑内作業管理（入坑者と工事車両の位置，行動・運行履歴把握）
- ②作業環境濃度のリアルタイム監視（定置式濃度計による計測，管理値超過時のメール通知等）

また、省エネ制御するための作業工程の判断は、アクティブRFIDタグ（以下、RFIDタグ）による入坑者と工事車両の位置情報（以下、入坑情報）と、施工機械（ドリルジャンボと吹付機など）の電流値を測定することで、①穿孔・ロックボルト、②装薬・発破、③ずり出し、④吹付、⑤支保工建込などに分けて、サーバーで分析して自動で行う。

### 3. 試験導入現場の工事概要

工事名：高松自動車道志度トンネル工事  
 工事場所：香川県さぬき市鴨部～志度  
 発注者：西日本高速道路(株)四国支社  
 トンネル：NATM工法（発破）

延長 L = 564 m 断面積 A = 65.1 ~ 69.2 m<sup>2</sup>

### 4. 安全性の向上と省エネルギー化

#### (1) 安全性の向上

安全を「見える化」した状態で、省エネルギー化が可能な仕組みの構築を目指した。具体的な安全に関する機能は前節2.で記載した内容であり、以下、試験導入した事例を報告する。

本工事では、関係者全員が坑内の安全を「見える化」できるように、坑口にモニターを設置した。モニターにはメイン画面（図-2）を表示させ、リアルタイムの入坑情報と作業環境濃度および、施工機械の稼働状態が閲覧できる。また、パソコンやタブレット型端末でも情報閲覧が可能である。

入坑情報は、入坑者全員が、RFIDタグ（写真-1）を携帯し、坑内に100m毎に設置してあるリーダーで検知されることで、入坑の有無や位置および行動履歴を把握するものである。また、坑内に入入りする主要な工事車両（ダンプトラックや生コン車、モルタルポンプ車など）にも設置して、運行状況を把握する。なお、リーダーがRFIDタグを検知する範囲が約75m程度であるため、100m毎に設置してあるリーダー2箇所を用いて、50m毎に入坑情報を表示させ

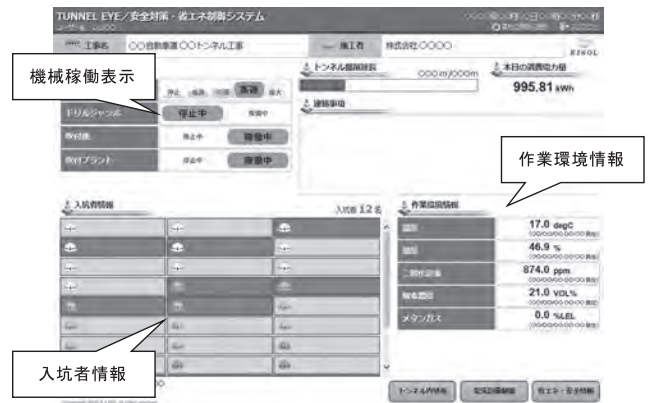


図-2 メイン画面



写真-1 RFID タグ

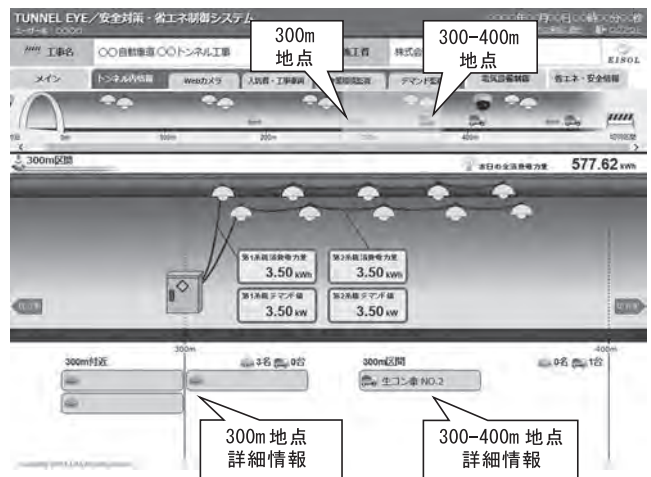


図-3 入坑情報画面

る（図-3）。

作業環境濃度の計測は、定置式濃度計を用いてリアルタイムの測定を行った。測定位置は切羽後方50mとし、測定項目は温度、湿度、CO<sub>2</sub>、CO、O<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、粉塵、風速の8項目を選定した。また、定められた作業環境の管理値を超えた場合、職員のパソコンや、携帯に警報メールを送信し、工事関係者にはパトライトで周知できるようにした。

(2) 作業工程の判断

安全性を確保したうえで省エネ実施の可否判断をできるように、作業工程を自動判断する仕組みを構築した。自動判断は、RFID タグによる入坑情報と、施工機械の電流値を用いるため、ドリルジャンボと吹付機の電流測定を、電源台車に設置してある電源供給用コネクタに、各々電流計を設置して実施した。また、使用する電流値の閾値を基準として稼働／非稼働を判断した。例えばドリルジャンボは停止中でも前照灯を使用する場合があるため、ドリルのアームなどを稼働させる油圧パック起動時の電流値 (50 kW 以上) で稼働と判断した。また、吹付機は、吹付用のコンプレッサ作動時の電流値 (100 kW 以上) で稼働と判断した。

作業工程の判断条件の例を表一 1 に示す。表中の RFID タグ検知において、切羽区間とは、切羽付近に設置したリーダーで検知された場合であり、その他区間は、切羽後方の 100 m 毎に設置されたリーダーで検知された場合である。検知区間を判断条件に反映させることで判断精度を高めた。ここでは、切羽から離れた後方で生コン車が停車している場合、吹付作業と誤って判断されないようにした。また、切羽で作業を行う入坑者を RFID タグの ID で特定できるようにした。以上の各種設定は、サーバーの管理者画面で、現場条件に応じて管理者が設定できるようにした。データ取得や省エネ制御などに用いる制御端末は、電気機器の近傍や、坑内に 100 m 毎および、電源台車に設置している。制御端末は、ドリルジャンボと吹付機の電流データ、入坑情報などの作業条件判断に必要なデータや、作業環境濃度の計測値を収集する。また、データの一時保管や、送信する時間間隔の設定などを

行う。データは、サーバーへ送信され、作成した制御プログラムにより、作業工程を判断し、その際の命令信号を制御対象の電気機器 (工事照明と換気ファン) に設置された制御端末に送信することで、工事照明と換気ファンの省エネ制御が行われる。

(3) 工事照明の省エネ制御

工事照明は、土木学会トンネル標準示方書に、切羽作業 70 ルクス以上、通路の最暗部 20 ルクス程度が望ましい照度であると示されている<sup>1)</sup>。システムでは、通路の照度を対象として省エネ制御を実施した。作業工程の判断条件は表一 1 を利用し、表一 2 の制御パターンで照度制御を行った。工事照明は 750 W の水銀灯を 10 m 毎に設置した。省エネの減灯時には間引くことで 20 m 毎の点灯となる。但し、減灯時には坑内の通路照度 20 ルクスを確保することと、風管の影響で影となることを防ぐために、安全通路の壁面に蛍光灯 (40 W) を 20 m に 3 箇所ずつ配置した。これにより、間引くことでも通路の必要照度が確保される。また、全灯時には最暗部の照度が 30 ルクス以上、場所によっては 50 ルクス以上の照度となり、照度の向上効果 (安全性の向上) が得られた。

以上の工事照明の機器配置図を図一 4 に示す。ここで、間引きができるように水銀灯を第 1 系統と第 2 系統の 2 系統に設置し、減灯時には第 2 系統の電源を OFF することとした。全灯制御時の作業例は、坑内でダンプトラックが頻繁に往来する「ずり出し」などがあり、減灯時は、主に切羽で作業を行う「吹付」、「穿孔」などが挙げられる。工事照明の省エネ制御の状態を写真一 2 に示す。本手法により、工事照明の全灯

表一 1 作業工程の判断条件 (例)

CASE	作業工程 (施工サイクル)	RFID タグ検知			電気機器の稼働		備考	
		切羽区間		その他区 間	ドリル ジャンボ	吹付機		
		トンネル 特殊工	ダンプ 生コン車	トンネル 特殊工				
1	穿孔・装葉・ロックボルト・支保工組立	○	●	○	○	●		
2	発破・こそく・インバート施工	○	●	○	●	●		
3	ずり出し	○	○	○	●	●		
4	吹付	○	○	○	●	○		
5	作業中断	●	●	●	●	●		
6	吹付	ドリルジャンボ 整備中	○	○	○	○		
7	ずり出し		○	○	○	●		
8	作業無し		●	●	●	○	●	
9	穿孔・装葉・ロックボルト	吹付機整備中	○	●	○	○	○	
10	発破		○	●	○	●	○	
11	作業中断		●	●	●	●	○	
12	作業中断	ドリルジャンボ・吹付機整備中	●	●	●	○	○	

○：検知 / 稼働 ●：非検知 / 非稼働



表-2 制御パターン (例)

CASE	作業工程 (施工サイクル)	照明パターン	換気パターン	備考
1	穿孔・装薬・ロックボルト・支保工組立	減灯	低速	
2	発破・こそく・インパート施工	全灯	中速	
3	ずり出し	全灯	中速	
4	吹付	減灯	高速	
5	作業中断	減灯	低速	
6	吹付	ドリルジャンボ 整備中	高速	
7	ずり出し		中速	
8	作業無し		低速	
9	穿孔・装薬・ロックボルト	吹付機整備中	低速	
10	発破		中速	
11	作業中断		低速	
12	作業中断 ドリルジャンボ・吹付機整備中	減灯	低速	

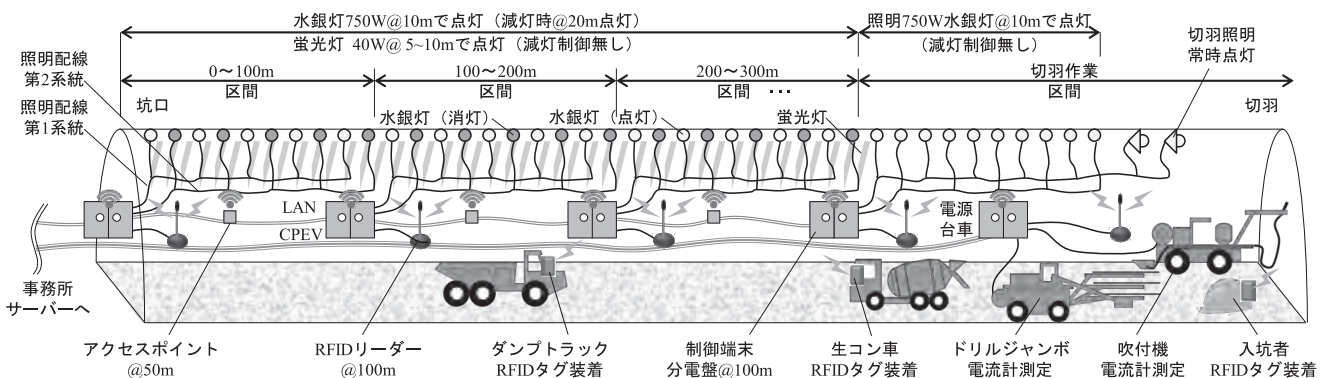


図-4 工事照明の機器配置図



写真-2 工事照明の省エネ制御 (減灯・全灯)

時の照度向上と、減灯時の節電を両立させた。

(4) 換気ファンの省エネ制御

換気ファンは、高濃度の粉塵やガスなどが坑内に充満しないように、作業内容に応じて最大となる粉塵量やガス量を推定し、希釈するために必要な風量を得るための電気容量で運転する。また、多くの電力を使用することから、電力量削減のため、各種センサー（粉塵計やガス検知器）を用いて、濃度に応じて自動的に風量を調整する手法が用いられる場合がある。

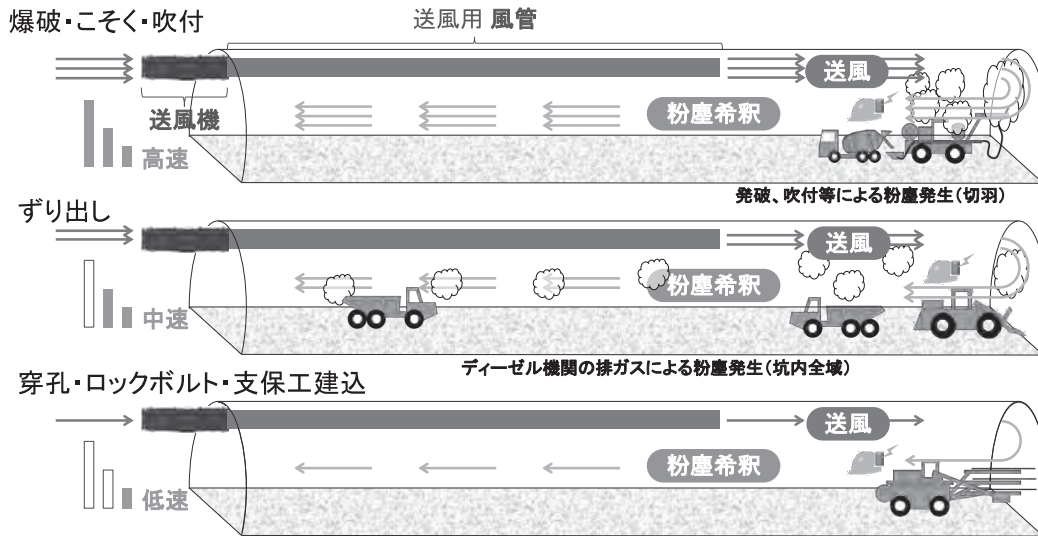
本システムでは、上記センサーでの風量調整に加え、作業工程の自動判断により風量調整を行う機能を加えた。換気ファンの省エネ制御の概略図を図-5に

示す。また、制御パターンは、工事照明と同様に表-2とした。例えば、「吹付」が始まると判断された場合、実吹付により濃度が高まる前に、事前に風量（風量レベル：高速）を強めておくことで、粉塵などを希釈できる。さらに、センサーによる風量調整機能もあり、切羽後方50mの電源台車に設置した粉塵計やガス検知器で、管理値の上限以上の濃度となった場合に風量を強めることにより、換気機能の確実性を高めた。

風量レベルは4段階に設定し、レベル毎の作業環境の自主管理値は表-3のとおり設定した。管理値の上限以上の場合、風量レベルが1段階上昇し、濃度計の値が管理値の下限未満の場合は、作業工程で判断される風量レベルまで低下する。風量レベルを低下させる際には、高濃度の粉塵やガスが坑外へ排出されるまで、一定時間は低下させない調整時間を加えた。

(5) デマンド監視とその他の機能

省エネルギー化のために、電気料金の基本料金を算定する基準となる30分の最大需用電力（デマンド値）を監視した。監視対象の電気機器は①ドリルジャンボ、②吹付機、③換気ファン、④工事照明、⑤吹付プラントとした。各電気機器に電流計を取り付けて稼働状況を確認できるようにし、合計のデマンド値を5分

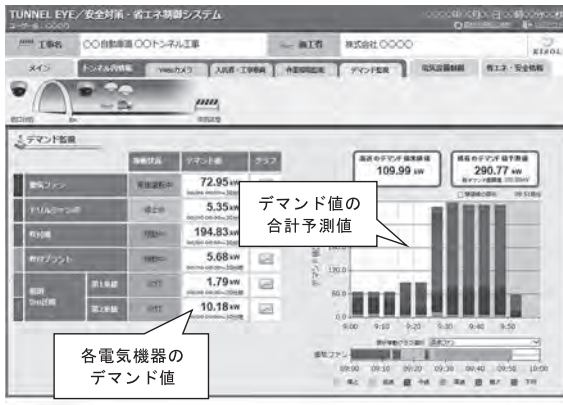


図—5 換気ファンの省エネ制御概略図

表—3 作業環境の自主管理値 (例)

項目	単位	風量レベル			
		低速	中速	高速	最大
温度	℃	25.0 未満	25.0 ~ 27.0	27.0 ~ 28.0	28.0 以上
CO <sub>2</sub>	ppm	1,000 未満	1,000 ~ 2,000	2,000 ~ 5,000	5,000 以上
CO	ppm	20.0 未満	20.0 ~ 40.0	40.0 ~ 50.0	50.0 以上
O <sub>2</sub>	VOL%	20.0 以上	19.0 ~ 20.0	18.0 ~ 19.0	18.0 未満
CH <sub>4</sub>	% LEL	-	-	-	検出
粉塵	mg/m <sup>3</sup>	1.0 未満	1.0 ~ 2.0	2.0 ~ 3.0	3.0 以上
風速① <sup>※1</sup>	m/s	0.17 以上	0.17 未満	0.17 未満	0.17 未満
風速② <sup>※2</sup>	m/s	-	0.30 以上	0.30 未満	0.30 未満

※1 換気パターンが低速モードの場合  
 ※2 換気パターンが中速モード以上の場合



図—6 デマンド監視画面

毎に予測し、上限とするデマンド値 (閾値) を超えると警報メールを職員に送信するようにした。警告を受けた職員は、グラフにより可視化された電気機器の稼働状況を確認し、無駄な電気の利用の有無を調査し、節電を実施する。デマンド監視画面を図—6に示す。

また、手動制御による節電も可能としているが、省エネ制御において、通信不良や誤作動などの予防対策を行う必要があり、対策として、以下の内容をシステ

ム機能に加えた。

- ・システムを利用せず、制御盤で直接手動により電気機器を操作した場合に、手動側を優先する。
- ・システム通信不良時に電気設備へ影響させない。
- ・通信不良時にシステム側から指示が無い場合、換気ファンは最大運転し、工事照明は全灯する。
- ・制御盤で換気ファンを直接手動停止した場合は、停止状態を維持する。

なお、換気ファンのインバータ制御盤には「機側／遠方」の切替えのダイヤルが有り、遠方側ではシステムの遠隔操作や省エネ制御が可能となるが、機側にしている場合は、システム側で操作できない。省エネ制御しない場合や、換気ファンの風管を取りつけるなど、停止状態を続ける場合には、システム操作を無効にするために機側とする。

### 5. 省エネルギー効果の試算

本システム利用時の、省エネ効果を表—4に示す。表中の値は、志度トンネル工事で用いた電気機器を利

表-4 省エネ効果の試算値

施工サイクル	作業割合	換気ファン			750 W 水銀灯		40 W 蛍光灯		合計
		制御モード	風量 m <sup>3</sup> /min	容量 kW	制御モード	容量 kW	制御モード	容量 kW	
		定格	2,400	160.0	定格	14.0	定格	2.0	
削岩準備	3%	低速	901	8.5	減灯 (0.75 倍)	10.5	全灯	2.0	
穿孔	17%								
装薬	6%								
爆破・換気等	4%	高速	1,996	92.0	全灯 (1.5 倍)	21.0			
こそく	4%								
ずり出し準備	1%								
ずり出し	21%	中速	1,553	43.4	減灯 (0.75 倍)	10.5			
跡片付け	1%								
測量	1%								
吹付準備	3%	高速	1,996	92.0	減灯 (0.75 倍)	10.5			
吹付	7%								
跡片付け	3%								
ロックボルト準備	3%	低速	901	8.5	減灯 (0.75 倍)	10.5			
穿孔	15%								
跡片付け	3%								
金網設置	2%								
支保工準備	2%								
支保工建込	4%								
TUNNEL EYE 電気容量 (kW)		平均値		34.8	平均値	13.6	平均値	2.0	50.4
従来技術 電気容量 (kW)		高速運転時の値		92.0	定格値	14.0	-		106.0
								削減量 (kW)	55.6

用した場合に、施工サイクルの作業割合と省エネ効果は参考文献<sup>2)</sup>の積算例をもとに試算したものである。また、表中の750 W水銀灯の容量に対する倍数（増灯（1.5倍）・減灯時（0.75倍））は従来手法（15 m毎に750 W水銀灯を設置した場合）の容量に対する比である。

これにより、換気ファンの使用電力量の削減が大きく寄与し、工事照明は、安全性向上のため、1.5倍に照明を増加させているものの、節電（0.75倍）すると、ほぼ同等の電力量となる。その結果、換気ファンと工事照明では55.6 kW（約52%）の電気容量の削減になる。

## 6. おわりに

本システムの導入により、安全を「見える化」し、IoTの仕組みにより電気機器（工事照明と換気ファン）を自動制御することで省エネルギー化が可能となった。今後も、山岳トンネル工事での積極的な活用により、安全性の向上と、省エネルギー化による環境負荷削減を目指す。



### 【参考文献】

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書 [共通編]・同解説 / [山岳工法編]・同解説, p.216, 2016.
- 2) 財団法人経済調査会, NATM 積算研究会編：新・NATMの施工と積算, pp.426-434, 2009.

### 【筆者紹介】



白石 雅嗣 (しらいし まさつぐ)  
 ㈱銭高組  
 技術本部 技術研究所  
 主任研究員



畠中 健 (はたなか たけし)  
 ㈱イー・アイ・ソル  
 開発1本部 開発部  
 副部長



澤目 俊男 (さわめ としお)  
 ㈱流機エンジニアリング  
 建設営業部 商品企画営業グループ  
 グループ長