

山岳トンネルの安全対策・省エネ制御システム「TUNNEL EYE」の開発

Development of “TUNNEL EYE” system for mountain tunnel construction,
simultaneously achieving safety management and energy conservation

白石雅嗣*1 笠水上光博*2 安部 剛*3 星野毅志*4

概 要

山岳トンネルの施工では、より一層の安全管理の向上に加え、昼夜を通じて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ている。

そこで、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し、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センシングして安全管理の向上を図ったうえで、これらのデータを活用することで、工事照明と換気ファンを自動で省エネ制御するシステム「TUNNEL EYE」（トンネルアイ）を開発した。

本報では、システムを実際の山岳トンネル現場で試験導入し、安全管理を向上させた事例と、省エネルギー化を両立させた手法について報告する。

key words : 山岳トンネル、安全対策、作業環境、省エネ、工事照明、換気ファン

1. はじめに

近年、IoT技術が急速に拡大し、建設現場においても、生産性の向上や省力化に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で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管理、作業環境向上と、省エネによる環境負荷の低減（CO₂削減）に寄与するシステムを開発した。

当システム「TUNNEL EYE」は、実際の現場である高松自動車道 志度トンネル工事現場（トンネル延長L=564m、NATM、発破掘削）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を行ってきた。

本報では、システムの機能などの概略説明と、志度トンネル工事における①安全管理の向上、②工事照明と換気ファンの省エネ制御事例について報告する。

2. 技術の概要

TUNNEL EYEのシステム概略図を図-1に示す。

本システムは、トンネル現場に配置した複数の組込型制御端末を使用し、入坑者の位置や、作業環境濃度、作業工程監視（施工機械や電気機器の電流値測定）などの

情報をセンシングし、その情報を遠隔地域のサーバーで保存、分析して、安全を「見える化」とともに、工事照明や換気ファンなどを作業に適した状態に自動制御するものである。

安全の「見える化」は、Web画面で情報を閲覧、メール通知などを行うことができる。

① アクティブRFIDタグで坑内作業管理

- ・入坑位置把握（100m毎にリーダー）
- ・工事車両（ダンプ、生コン車）運行把握
- ・入坑者、工事車両位置の履歴把握

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リアルタイム測定
- ・濃度上昇時の警報メール通知

また、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と、トンネル施工機械（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、作業工程を、①穿孔・ロックボルト、②装薬・発破、③ざり出し、④吹付、⑤支保工建込などに分けて、サーバーで分析して判断できる。作業工程を判断することにより、工事照明や換気ファンを、作業に適した状態に自動制御することが可能になり、坑内作業環境向上につながられる（特許出願中）。

*1 Masatsugu SHIRAIISHI 技術本部技術研究所 主任研究員

*2 Mitsuhiro KASAMIZUKAMI 技術本部技術研究所 主席研究員

*3 Takeshi ABE 技術本部技術研究所 主任研究員

*4 Takeshi HOSHINO 大阪支社土木統轄部 作業所長

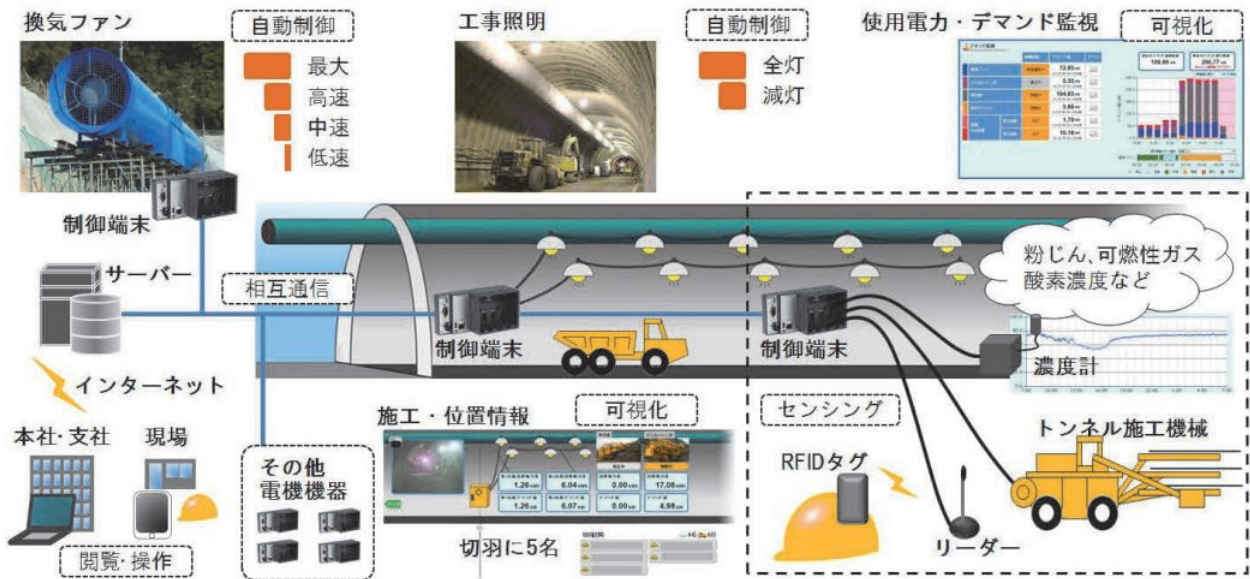


図-1 TUNNEL EYE のシステム概略図

従来手法と異なることは、作業工程を判断して電気機器を制御することであり、特に換気ファン制御は、粉塵量などが多い作業工程と判断した場合、センサーにより高い濃度を感知する前に風量を強めておくことができる。

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：西日本高速道路株式会社四国支社
 トンネル：NATM 工法（発破） L=564m
 掘削断面：A=65.1～69.2m²

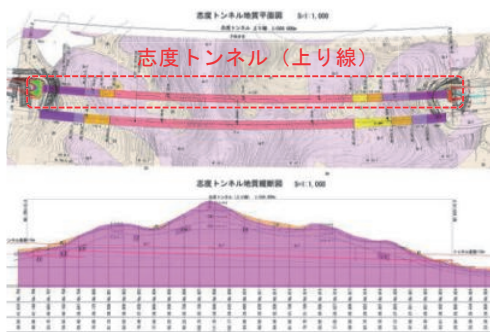


図-2 平面図・地質縦断図



写真-1 志度トンネル坑口

4. システムの機能と導入事例

4.1 安全管理の向上

(1) 坑口モニター設置

志度トンネル工事では、工事関係者全員が坑内の情報を「見える化」できるように、坑口モニター（写真-2）を設置した。この画面で、本システムのメイン画面を閲覧できる。メイン画面は、リアルタイムの入坑情報と作業環境濃度一覧および施工機械の稼働状態が表示される。モニター表示内容を図-3 に示す。



写真-2 坑口モニター



図-3 モニター表示内容(メイン画面)

(2)遠隔地での閲覧・操作

インターネットを経由することで、遠隔地の現場事務所において、パソコンやタブレット型端末で閲覧や操作・確認を行っている。システム閲覧状況を写真-3に示す。また、坑内の施工状況を監視カメラで確認できる。

(3)入坑管理と工事車両の運行把握手法

入坑者全員が、RFIDタグ(写真-4)を携帯し、坑内に100m毎に設置してあるリーダー(写真-5)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している。RFIDタグは、発注者から協力会社まで工事関係者全員に配布している。また、トンネル坑内に入り出す主要な工事車両(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(写真-6)して、運行状況を把握している。

リーダーで検知される入坑および運行情報は、サーバーへ送信して保存される。これらの情報は、坑口モニターに表示される。また、パソコンやタブレット型端末を用いて、サーバーへアクセスして閲覧することができる。

また、リーダーがトンネル坑内でRFIDタグを検知できる範囲が約75m程度であるため、100m毎に設置して

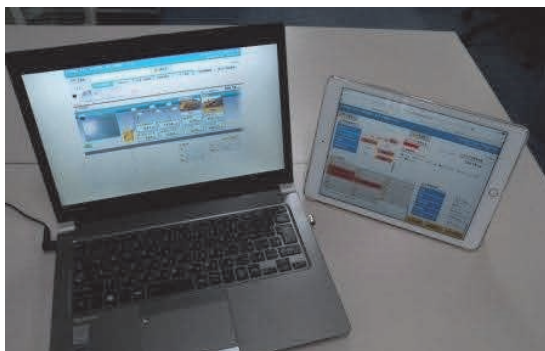


写真-3 システム閲覧状況



(チョッキ裏に取付)

写真-4 RFIDタグの携帯



電源台車

写真-5 リーダーの設置(切羽付近の検知用)

あるリーダー2箇所を用いて、およそ50m毎に入坑および運行情報を閲覧画面に表示させることができる。本情報を確認するための、入坑および運行情報画面を図-4に示す。

(4)作業環境濃度のリアルタイム監視

①定置式濃度計による測定

リアルタイムの作業環境情報画面を図-5に示す。測定位置は切羽後方50mとし、測定項目は温度、湿度、CO₂、CO、O₂、CH₄、粉塵、風速の8項目を選定し、計測した(写真-7)。

②濃度上昇時の警報通知

作業環境の測定対象項目と管理基準値を表-1に示す。管理基準値を超えた場合、職員に対してパソコンや、携帯に警報メールを送信する機能を採用した。また、坑内には作業環境状態を工事関係者に周知できるよう、パトライトを設置した。警報メールとパトライトを図-6に示す。



写真-6 ダンプトラックのRFIDタグ設置

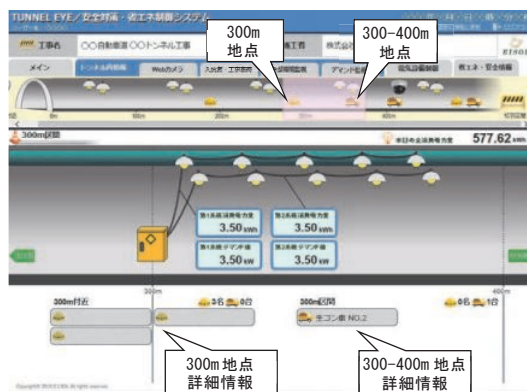


図-4 入坑および運行情報画面



図-5 作業環境情報画面

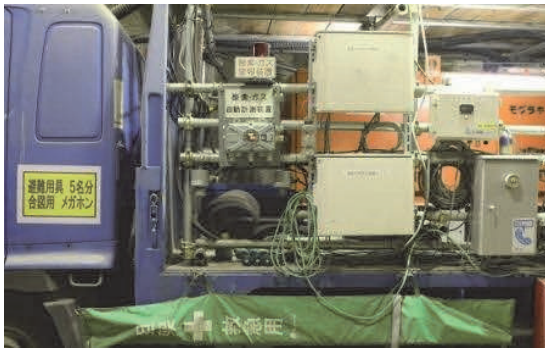


写真-7 定置式濃度計の設置状況



写真-8 照度の向上

表-1 作業環境の測定対象項目と管理基準値

項目	測定機器	単位	管理値	備考
温度	TR-76Ui-H	℃	28	ずい道換気技術指針
湿度	TR-76Ui-H	%RH	—	—
CO ₂	TR-76Ui-H	ppm	5,000	日本産業衛生学会
CO	TL-1(KD-5D)	ppm	50	日本産業衛生学会
O ₂	TL-1(KD-5O)	VOL%	18	安衛則
CH ₄	TL-1(KD-5B)	%LEL	10	安衛則
粉塵	LD3K2	mg/m ³	3.0	ずい道換気技術指針
風速	6332	m/s	0.30	ずい道換気技術指針



写真-9 電流測定箇所



図-6 警告メールとパトライト



写真-10 電流計

(5) 工事照明の照度向上

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¹⁾であると示されている。一般に照度の計算は下式が用いられる²⁾。

$$N = E \cdot A / (F \cdot U \cdot M)$$

N: ランプ個数、E: 所要照度 (ルクス)、
 A: トンネル幅×器具間隔、照明面積 m²、
 F: ランプ光束、U: 照明率、M: 保守率

志度トンネル工事では、坑内通路区間での、ダンプトラックなどの大型車両との接触災害の防止を目的に、照度の計算式により必要となるランプ (水銀灯 750W) 個数を通常より多い 10m 毎に点灯させた。その結果、最も明るい箇所でも 50 ルクス以上、最暗部でも 30 ルクス以上の照度の向上 (写真-8) となった。

4.2 省エネルギー化

(1) 作業工程の自動判断

入坑管理および工事車両の運行情報 (4.1(3)) と、トンネル施工機械の電流量を用いて、作業工程を自動判断する。トンネル施工機械であるドリルジャンボと吹付機の電流測定は、電源台車に設置してある電源供給用コネクターにそれぞれ電流計を設置して計測した。電源測定箇所と電流計を写真-9, 10 に示す。また、ドリルジャンボおよび吹付機については電流量の閾値を設定し、その電流量を基準として稼働/非稼働を判断した。例えばドリルジャンボは停止中でも照明を点灯している場合は電流を使用するため、ゴンドラやドリルのアームを稼働させる油圧バックが起動した電流量 (閾値 50kW 以上) で稼働と判断した。また、吹付機の場合は、吹付用のコンプレッサーを作動させた電流量 (閾値 100kW 以上) で稼働と判断した。

次に、作業工程の判断条件を表-2 に示す。判断条件は 14 種類を設定している。

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100m毎に設置されたリーダーで検知された場合である。検知区間を判断に反映させることで、判断精度を高めている。例えば、切羽から遠く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する。また、トンネル特殊工は、切羽作業を行う作業員であり、条件判断に反映させる入坑者をRFIDタグのIDで特定することができる。上記の各種設定は、サーバーの管理者画面で、様々な現場条件を想定して、管理者が設定できるようにした。

これらの判断を行うための組込型制御端末を写真-11に示す。写真中の白囲いの機器が組込型制御端末(以下、制御端末)である。これは、後述する図-7に示す電源台車に設置している制御端末である。

表-2 作業工程の判断条件

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・装薬・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	○	○	○	○	○	
7	ずり出し	○	○	○	○	○	
8	作業無し	●	●	●	○	●	
9	穿孔・装薬・ロックボルト	○	●	○	○	○	
10	発破	○	○	○	○	○	
11	作業中断	●	●	●	●	○	
12	作業中断	●	●	●	○	○	
13	吹付	○	○	○	○	○	予備
14	ずり出し	○	○	○	○	○	予備

○: 検知/稼働 ●: 非検知/非稼働



写真-12 サーバー



写真-13 工事照明の制御端末 (@100m で設置)

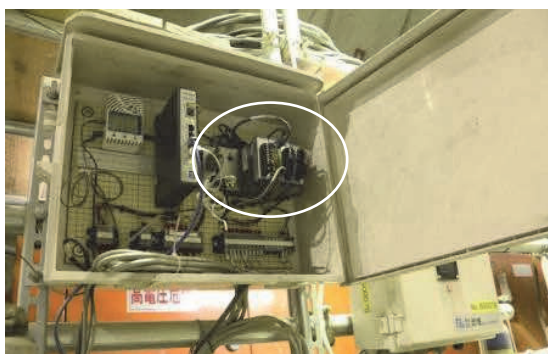


写真-11 組込型制御端末

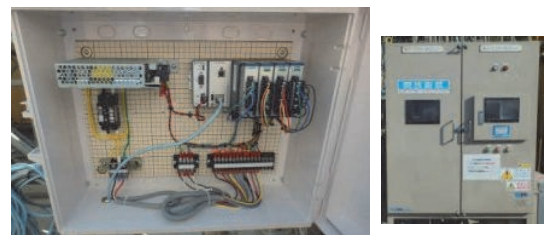


写真-14 換気ファンの制御端末

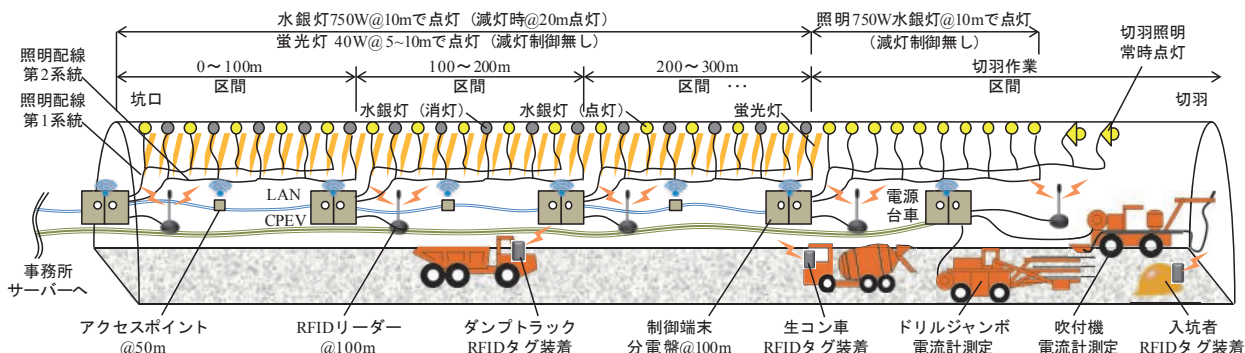


図-7 工事照明の自動制御の機器配置図

表-3 作業工程に応じた制御パターン

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・インバート施工	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	減灯	高速	
7	ずり出し	全灯	中速	ドリルジャンボ 整備中
8	作業無し	減灯	低速	
9	穿孔・装薬・ロックボルト	減灯	低速	吹付機整備中
10	発破	全灯	中速	
11	作業中断	減灯	低速	
12	作業中断	減灯	低速	ドリルジャンボ・吹付機整備中
13	吹付	減灯	高速	
14	ずり出し	全灯	中速	



写真-15 照明自動制御時の状態 (左：減灯、右：全灯)

(2) 工事照明の自動制御

前述 (4.1(4)) の工事照明の照度向上において記載したとおり、750Wの水銀灯を10m毎に設置している。また、減灯時の照度確保と、風管の影となることを防ぐために、蛍光灯 (40W) を20mに3箇所ずつ配置した。その上で、省エネの節電を行うために、間引きにより水銀灯を減灯することとした。工事照明の自動制御の機器配置図を、前項の図-7に示す。ここでは、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。

自動の省エネ制御は、表-2に示した作業工程の判断条件に応じた表-3の制御パターンで制御される。例えば、ずり出し中や発破時、およびインバート施工中以外は、通路照度を従来の20ルクスを確保できる程度に間引きで減灯 (照明配線の第2系統電源をOFF) する制御パターンとなる。照明自動制御時の状態を写真-15に示す。本手法により、工事照明の照度向上と減灯による節電を両立させた。

(3) 換気ファンの自動制御

トンネル工事では、高濃度の粉塵やガスなどが坑内に充満しないように換気ファンなどを設けて坑内作業環境を保持している。通常、換気ファンは、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容量で運転する。しかし、換気ファンは、多くの電力を使用することから、その電力量削減のため、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。

本システムでは、上記センサーを用いた自動の風量調整機能に加え、作業工程をリアルタイムに判断する機能を利用し、作業工程に応じて自動の風量調整することでの省エネ化と坑内環境改善を目指した。換気ファンの自動制御の概略図を図-8に示す。また、制御パターンは、工事照明と同様に表-3とした。例えば、吹付作業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、事前に換気ファンの出力を高め (風量レベル：高速)、風量を強めておくことで、粉塵などを効率的に希釈できる。さらに、作業工程に限らず、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-4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。また、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ている。

表-4 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 ₂	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 ₂	VOL%	20.0以上	19.0～20.0	18.0～19.0	18.0未満
CH ₄	%LEL	—	—	—	検出
粉塵	mg/m ³	1.0未満	1.0～2.0	2.0～3.0	3.0以上
風速①※1	m/s	0.17以上	0.17未満	0.17未満	0.17未満
風速②※2	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

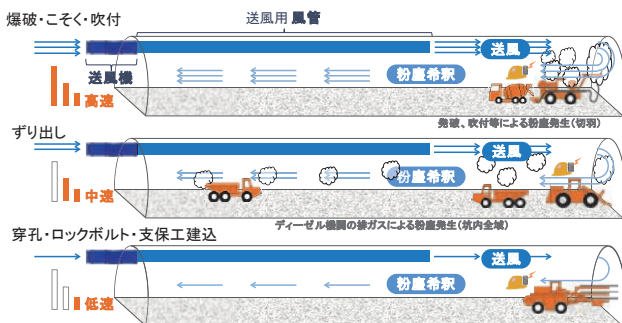


図-8 換気ファンの自動制御の概略図

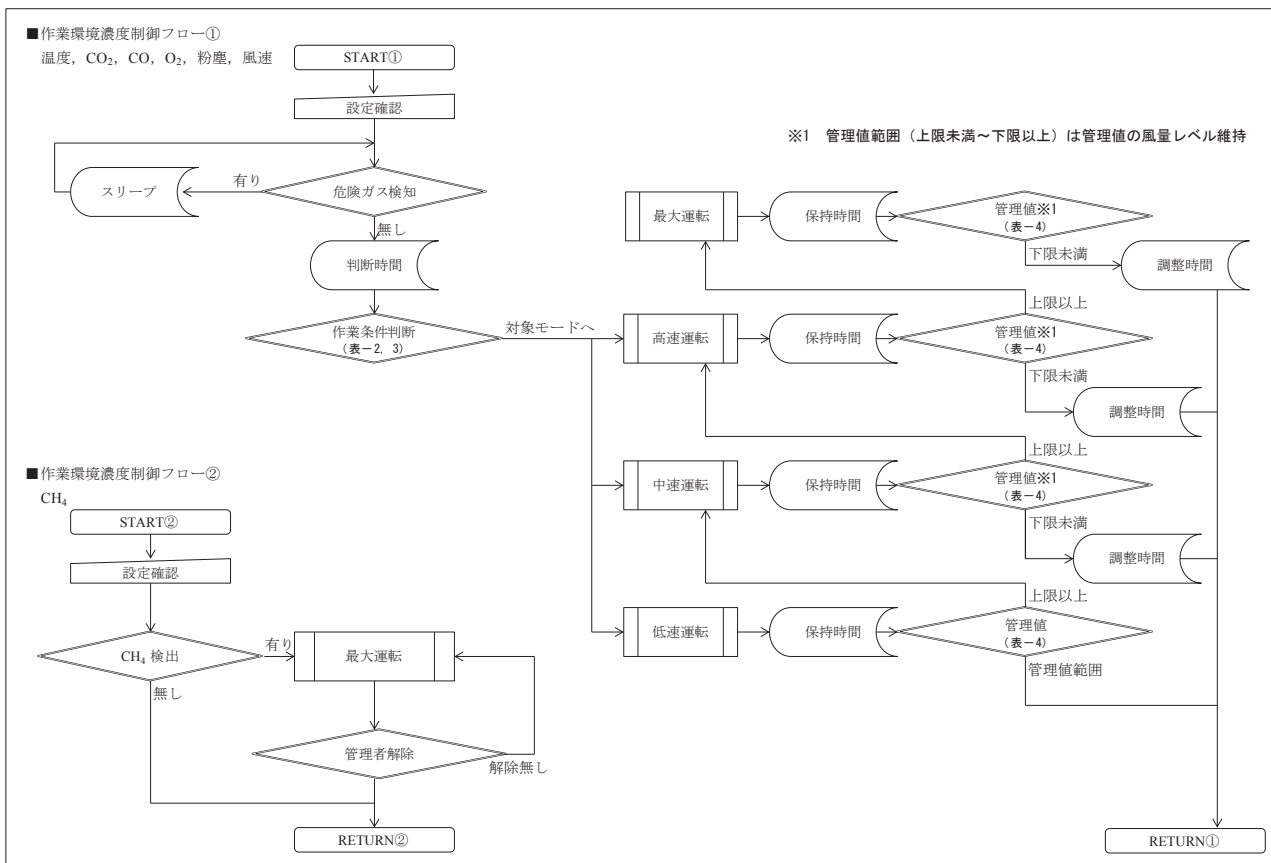


図-9 換気ファンの自動制御フロー



図-10 管理者画面の例

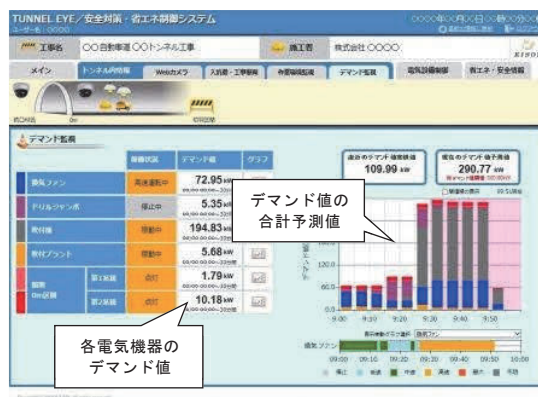


図-11 デマンド監視画面

以上の内容を、換気ファンの自動制御フローである図-9を用いて、サーバーにてプログラム処理を行っている。ここで、危険性の高いメタン (CH₄) については、検出時に最大運転になるように制御される。

なお、サーバー内の制御フローの設定内容である表-2~4は、システムの管理者によって、現場に適した状態に変更設定することができる。設定するための管理者画面の例を図-10に示す。本設定画面では、管理基準値を満たす作業環境を維持するために、管理者が各項目の自主管理値を設定できる。また、本設定画面は、粉塵濃度の内容を設定する画面であるが、この他にシステムを利用するためのRFIDタグの入坑者登録や、閲覧するためのユーザー登録、パスワード設定、電気設備の登録などの各種情報を設定することができる。

(4) その他の省エネ機能 (デマンド監視)

1) デマンド監視

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主要な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、個別に計測することで利用状況を確認できるようにしている。各電流値を用いて、合計のデマンド値を5分毎に予測し、任意の5分毎に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使用状況を確認し、同時に使用する必要のない電気機器の使用状況の有無や、無駄な電気を利用していないかを調査し、現場での節電を実施す

る。デマンド監視画面を図-11に示す。

2) 電気機器の遠隔制御

自動制御対象とした電気機器の工事照明と換気ファンは、図-12の電気機器制御画面により遠隔操作できる。また、制御画面では自動と手動モードの切り替えを行うことができる。例えば、表-2、3では判断できない作業を行う際は、手動モードに切り替える。

ただし、このようなシステムを利用する際には、システムの通信不良や誤作動などの予防対策を行う必要がある。これらの予防のため、以下の構成としている。

- ・システムを利用せず、現場の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になる。また、照明は全灯する。
- ・制御盤で直接手動停止した際は、停止を維持する。

換気ファンのインバータ制御盤を写真-16に示す。制御盤には機側/遠方のダイヤルが有り、遠方側ではシステムの遠隔操作や自動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。自動制御しない場合や、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。

以上のように、安全確認の上で、現場との連携によって、タブレット型端末などを用いて、遠隔操作で容易に電気機器を制御することができる。

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-5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用し、施工サイクルの作業割合と省エネ効果は参考文献³⁾の積算例をもとに試算した値である。また、表中の750W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55.6kW(約52%)の電気容量の削減になる。

6. まとめ

本システムの導入により、坑内の安全を「見える化」し、IoTの仕組みで「モノ」である電気機器(工事照明と換気ファン)を自動制御することで、省エネ可能な仕組みを構築した。今後も引き続き、省エネ効果を確認するとともに、本システム利用方法を水平展開し、山岳トンネル工事での積極的な活用を通じて、安全管理の向上と省エネによる環境負荷削減(CO₂)に貢献する。



図-12 電気機器制御画面

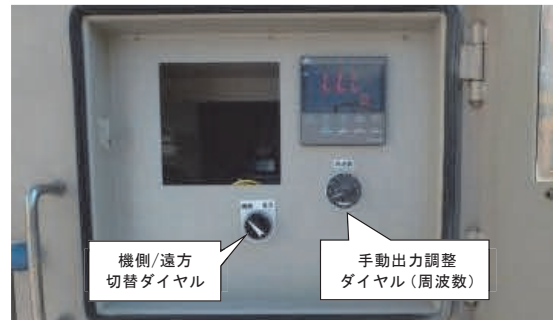


写真-16 換気ファンのインバータ制御盤

表-5 省エネ試算(電気容量の削減)

施工サイクル	作業割合	換気ファン		750W水銀灯		40W蛍光灯		合計			
		制御モード	風量 m ³ /min	容量 kW	制御モード	容量 kW	制御モード		容量 kW		
削岩準備	3%										
穿孔	17%	低速	901	8.5	減灯(0.75倍)	10.5					
装薬	6%										
爆破・換気等	4%	高速	1,996	92.0							
こそく	4%										
ずり出し準備	1%										
ずり出し	21%	中速	1,553	43.4	全灯(1.5倍)	21.0					
跡片付け	1%										
測量	1%										
吹付準備	3%										
吹付	7%	高速	1,996	92.0							
跡片付け	3%										
ロックボルト準備	3%										
穿孔	15%	低速	901	8.5	減灯(0.75倍)	10.5					
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

最後に、本システム導入にあたりご協力を頂きました共同開発の(株)イー・アイ・ソルと、技術協力の(株)流機エンジニアリングの関係各位に謝意を表します。

【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) 建設業労働災害防止協会：新版ずい道等建設工事における換気技術指針, pp. 250-252, 2012.
- 3) 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.