

# IoT の活用による山岳トンネル工事の安全管理と作業環境改善

## 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。そこで、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、坑内の電気機器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「TUNNEL EYE」（以下「本システム」という）（NETIS登録番号：KT-160070-A）を開発した。

本稿では、システムの機能の中で、安全管理に関する取り組み事例や、伸縮ダクトと換気装置（換気ファンと集塵機）の自動制御により作業環境改善に役立てた内容について報告する。

キーワード：山岳トンネル, IoT, 安全, 作業環境, 換気ファン, 集塵機, 伸縮ダクト

### 1. はじめに

本システムは、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である。

本稿では、本システムを奈川渡2号トンネル（その1）工事に導入し、安全管理と作業環境改善に役立てた内容として、RFIDタグによる入坑管理や、換気装置の中で伸縮ダクトの自動伸縮および、集塵機と換気ファン（以下、換気装置）運転の自動制御により作業環境を改善した事例について報告する。

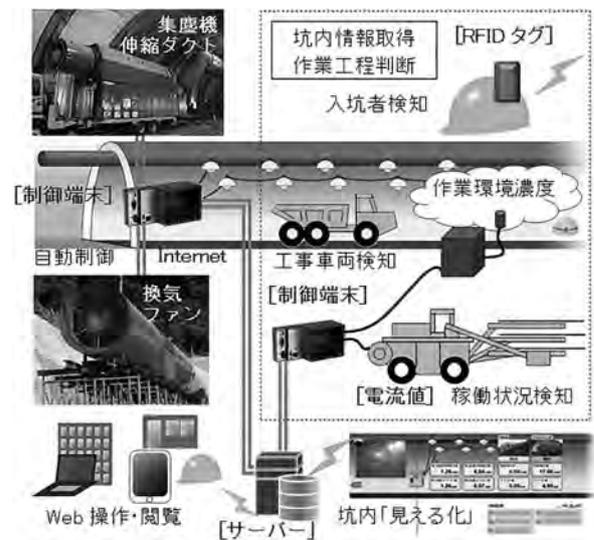


図-1 本システム概略図

### 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、坑内の電気機器を作業工程に応じて省エネ制御するものである（図-1参照）。本システムは、開発以来、バージョンアップを重ねており、奈川渡2号トンネル（その1）工事においては、表-1の機能を備えている。

表-1 本システム機能一覧

| 分類     | 項目       | 内容                                     |
|--------|----------|--|
| 安全管理   | 入坑管理     | RFIDタグによる入坑・位置情報把握                     |
|        | 作業環境管理   | 作業環境濃度のリアルタイム計測・<br>閾値を超過時にバトライトやメール通知 |
| 省エネ    | 自動制御     | 換気ファン、集塵機等の自動制御                        |
|        | 使用電力量の監視 | 主要電気機器の使用電力を個別に計測                      |
|        | デマンド監視   | デマンド超過予測時、警告メール通知                      |
|        | 遠隔制御     | 電気機器をタブレット等で手動制御                       |
| 作業環境改善 | 作業工程での換気 | 作業工程毎に、換気装置を自動制御                       |
|        | 伸縮ダクト自動化 | 作業工程毎に、伸縮ダクトを自動伸縮                      |
| その他    | 施工管理情報通信 | 約50m毎にWiFiを設置                          |
|        | Webカメラ   | 仮設ヤード、坑内等をWebカメラで監視                    |

■ 新機能（奈川渡2号トンネル（その1）工事で初適用）

### 3. 導入現場の工事概要

工 事 名：奈川渡2号トンネル（その1）工事  
 工事場所：長野県松本市安曇地先  
 発 注 者：国土交通省 関東地方整備局  
 トンネル：NATM工法（発破）延長 L = 797 m  
 断面積 A = 81 m<sup>2</sup>

### 4. 安全管理

本システムでは、工事関係者が坑内の安全を「見える化」できるようにしている。導入現場では、坑口にモニターを設置しており、モニターにはメイン画面(図一2)を表示させ、リアルタイムの入坑情報や作業環境情報および、施工機械の稼働状態を閲覧できるようにしている。また、遠隔地のパソコン等でも確認できる。

入坑情報とは、入坑者全員が、RFID タグを携帯し、坑内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、坑内に入出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、運行状況を把握できる。

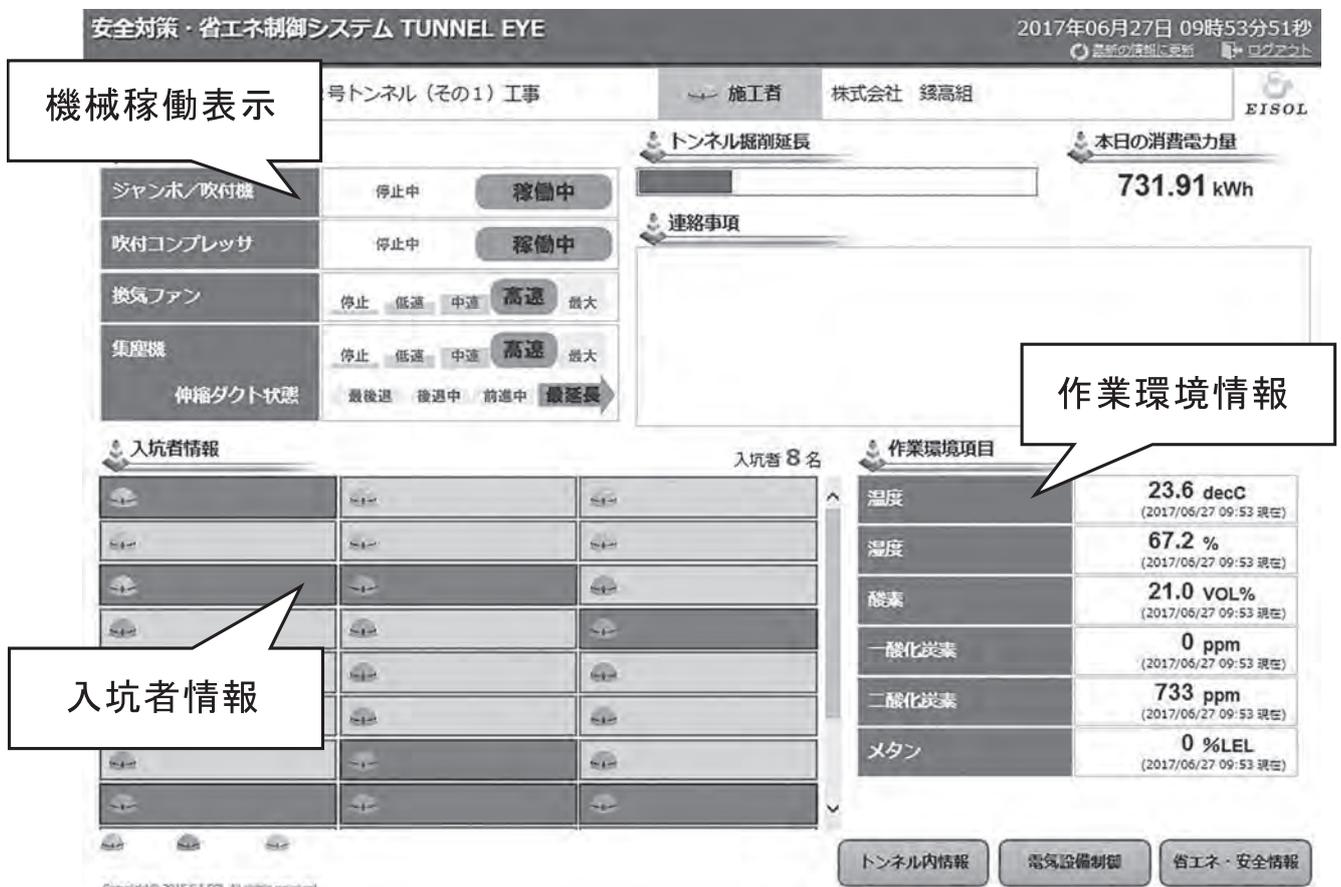
作業環境情報の計測は、定置式濃度計を用いてリアルタイムの測定を行っている。測定項目は温度、湿度、CO<sub>2</sub>、CO、O<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、粉塵、風速の8項目を選定している。測定位置は、伸縮ダクト先端において粉塵量を測定し、その他の項目は、集塵機後方の電源台車において測定している。また、定められた作業環境の管理値を超えた場合、職員のパソコンや、携帯に警報メールを送信し、工事関係者にはパトライトで周知できるようにしている。

### 5. 伸縮ダクトと換気装置の自動制御

#### (1) 作業工程の判断

伸縮ダクトと換気装置の自動制御は、作業工程を自動判断して、その作業工程に応じて行う仕組みである。自動判断は、サーバーで、RFID タグによる入坑位置と ID 情報、施工機械の電流値（ドリルジャンボ／吹付機、吹付用コンプレッサー）、発破センサー（風圧検知）の情報に基づき行う。

作業工程の判断条件の例を表一2に示す。表中のRFID タグ検知では、切羽で作業を行う入坑者を



図一2 本システムメイン画面

表一 2 作業工程の判断条件 (例)

| CASE | 作業工程      | RFID タグ検知 |              | 電流値              |                  | 発破<br>センサー |
|------|-----------|-----------|--------------|------------------|------------------|------------|
|      |           | 入坑者       | 重ダンプ<br>生コン車 | ジャンボ / 吹付機<br>稼働 | 吹付用<br>コンプレッサー稼働 |            |
| 1    | 穿孔        | ●         |              | ●                |                  |            |
| 2    | 装薬        | ●         |              | ●                |                  | ●          |
| 3    | ロックボルト    | ●         | ●            | ●                |                  |            |
| 4    | 支保工建込     | ●         | ●            | ●                |                  | ●          |
| 5    |           |           | ●            | ●                |                  |            |
| 6    |           |           | ●            | ●                |                  | ●          |
| 7    |           |           |              | ●                |                  |            |
| 8    |           |           |              | ●                |                  | ●          |
| 9    | 発破        |           |              |                  |                  | ●          |
| 10   | 検知後, 所定時間 |           |              |                  | ●                | ●          |
| 11   |           | ●         |              |                  |                  | ●          |
| 12   |           | ●         |              |                  | ●                | ●          |
| 13   |           | ●         | ●            |                  |                  | ●          |
| 14   |           | ●         | ●            |                  | ●                | ●          |
| 15   | ずり出し・吹付準備 | ●         | ●            |                  |                  |            |
| 16   |           | ●         | ●            |                  | ●                |            |
| 17   |           |           | ●            |                  | ●                |            |
| 18   |           |           | ●            |                  | ●                | ●          |
| 19   | 吹付コンクリート  | ●         | ●            | ●                | ●                |            |
| 20   |           | ●         | ●            | ●                | ●                | ●          |
| 21   |           |           | ●            | ●                | ●                |            |
| 22   |           |           | ●            | ●                | ●                | ●          |
| 23   |           |           |              | ●                | ●                |            |
| 24   |           |           |              | ●                | ●                | ●          |
| 25   |           | ●         |              | ●                | ●                |            |
| 26   |           | ●         |              | ●                | ●                | ●          |
| 27   | 作業準備      |           |              |                  |                  |            |
| 28   | 中断        |           |              |                  | ●                |            |
| 29   | 場内整備他     | ●         |              |                  |                  |            |
| 30   |           | ●         |              |                  | ●                |            |
| 31   |           |           | ●            |                  |                  |            |
| 32   |           |           | ●            |                  |                  | ●          |

●: 検知 / 稼働

RFID タグの ID で特定できるようにしている。電流値の情報においては、一例として吹付用コンプレッサーは、待機状態 (約 100 kWh) は非稼働と判断し、実際に吹付作業を開始する 140 kWh 以上で稼働していると判断している。なお、表一 2 の判断条件は一例であり、実際の現場状況を確認しながら、作業工程を正確に判断できるように条件の組合せ等を適宜見直す必要がある。以上の各種設定は、サーバーで管理者が設定できるようにしている。

データ取得や自動制御等に用いる制御端末は、制御する電気機器の近傍や、坑内に 100 ~ 200 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などの電流値や、入坑情報などの作業条件判断に必要なデータおよび、作業環境濃度の計測値を収集している。また、データの一時保存や送信する時間間隔の設定などを行うものである。さらに、データをサーバーへ送信し、サーバーで作成した制御プログラムによる作業工程判断に基づき、その命令信号を受け、対象の電気機器 (伸縮ダクトと換気装置等) に送信することで自動制御を行う。

(2) 自動制御による作業環境改善

集塵機の伸縮ダクトは、通常、手動のリモコン操作により、粉塵が発生しない場合には、作業に支障が出ないように、または破損させないように切羽後方まで後退させ、粉塵が発生する作業の場合は、粉塵吸引のために切羽まで前進させる。同時に、粉塵が発生する作業の場合は、集塵機の吸引量を高め、換気ファンは吸引量よりも低い風量で送風し、切羽後方への粉塵の充満を抑制する風量調整を行う必要がある。なお、これらの調整は作業が変わる都度行う必要があり、伸縮ダクトの操作時期や、換気装置の運転調整のタイミングが遅れると、粉塵などが切羽後方のトンネル坑内へ充満することがある。また、発破直後は粉塵・後ガスが充満することや、見通しが悪いため、伸縮ダクトのリモコン操作を直ぐに行うことができない等の課題がある。

そこで、上述の作業工程判断に応じて、伸縮ダクトを含む換気装置を全自動で最適な状態に制御できる仕組みを構築した。作業工程に応じた自動制御パターンを表一 3 に示す。なお、各種濃度計・センサーによる風量調整機能も加えており、定置式濃度計等を用い

表一 3 制御パターン (例)

| CASE | 作業工程                        | 換気ファン | 集塵機 | 伸縮ダクト |
|------|-----------------------------|-------|-----|-------|
| 1    | 穿孔<br>装薬<br>ロックボルト<br>支保工建込 | 中速    | 低速  | 後退    |
| 2    |                             | 中速    | 低速  | 後退    |
| 3    |                             | 中速    | 低速  | 後退    |
| 4    |                             | 中速    | 低速  | 後退    |
| 5    |                             | 中速    | 低速  | 後退    |
| 6    |                             | 中速    | 低速  | 後退    |
| 7    |                             | 中速    | 低速  | 後退    |
| 8    |                             | 中速    | 低速  | 後退    |
| 9    | 発破<br>検知後、所定時間              | 低速    | 高速  | 前進    |
| 10   |                             | 低速    | 高速  | 前進    |
| 11   |                             | 低速    | 高速  | 前進    |
| 12   |                             | 低速    | 高速  | 前進    |
| 13   |                             | 低速    | 高速  | 前進    |
| 14   |                             | 低速    | 高速  | 前進    |
| 15   | ずり出し・吹付準備                   | 高速    | 中速  | 後退    |
| 16   |                             | 高速    | 中速  | 後退    |
| 17   |                             | 高速    | 中速  | 後退    |
| 18   |                             | 高速    | 中速  | 後退    |
| 19   | 吹付コンクリート                    | 中速    | 高速  | 前進    |
| 20   |                             | 中速    | 高速  | 前進    |
| 21   |                             | 中速    | 高速  | 前進    |
| 22   |                             | 中速    | 高速  | 前進    |
| 23   |                             | 中速    | 高速  | 前進    |
| 24   |                             | 中速    | 高速  | 前進    |
| 25   |                             | 中速    | 高速  | 前進    |
| 26   |                             | 中速    | 高速  | 前進    |
| 27   | 作業準備<br>中断<br>場内整備他         | 低速    | 停止  | 後退    |
| 28   |                             | 低速    | 停止  | 後退    |
| 29   |                             | 低速    | 停止  | 後退    |
| 30   |                             | 低速    | 停止  | 後退    |
| 31   |                             | 低速    | 停止  | 後退    |
| 32   |                             | 低速    | 停止  | 後退    |

て、作業環境管理の閾値以上の濃度となった場合 (表一 4) に伸縮ダクトを前進させることや、換気装置の風量や吸引量を強める自動制御も加えており、換気機能の確実性を高めている。

実施例として、作業開始前に換気ファンの運転ボタンを押した後、換気装置と伸縮ダクト全ての自動制御が開始される。そして、発破センサーが発破を検知すると、自動で伸縮ダクトが切羽まで前進し、集塵機が高速運転で発破粉塵の吸引を開始する。その際、粉塵を吸引しやすいように、換気ファンは自動で適した風量 (集塵機の吸引量よりも少ない風量) で運転する。次に、発破後の所定時間経過後の粉塵濃度が下がった時期に、自動で集塵機が停止し、伸縮ダクトが後退する。同時に、発破で破碎したずりを搬出する作業工程を判断し、坑内全域の排出ガスなどを換気できる風量を送風するために換気ファンは自動で高速運転を開始する。その他、吹付けコンクリート作業中も含め、図一 3 に伸縮ダクトと換気装置の自動制御概略図を示す。

作業環境の改善効果としては、これまで、粉塵計の濃度測定値が高くなると集塵機の吸引量を高めるなどの制御が行われていたが、本システムでは、「粉塵濃度が高くなる作業工程」を判断して制御するため、粉塵濃度が高まる前に集塵機の吸引量を高め、伸縮ダクトを前進させておくことができる。また、操作を無人で自動化することで、人為的な操作ミスや、操作遅れによる作業環境悪化を防ぐことができる。

作業環境の改善に関する具体例として、図一 4 に

表一 4 作業環境管理の閾値の制御パターン (例)

| ■換気ファン     |                        |                  |                        |                         |                         |            |        |   |                             |
|------------|------------------------|------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|--------|---|-----------------------------|
| 作業管理       | CO <sub>2</sub><br>ppm | CO<br>ppm        | O <sub>2</sub><br>VOL% | CH <sub>4</sub><br>VOL% | 粉塵<br>mg/m <sup>3</sup> | 制御<br>パターン |        |   | 設定風量<br>m <sup>3</sup> /min |
| 管理<br>閾値   | 5,000 以上               | 500 以上           | 18.0 未満                | 1.0                     | -                       | 最大         |        |   | 2,000                       |
|            | 5,000 未満<br>3,000 以上   | 500 未満<br>300 以上 | 18.0 以上<br>19.0 未満     | -                       |                         | 高速         |        |   | 1,900                       |
|            | 3,000 未満<br>2,000 以上   | 300 未満<br>200 以上 | 19.0 以上<br>20.0 未満     | -                       |                         | 中速         |        |   | 1,500                       |
|            | 2,000 未満               | 200 未満           | 20.0 以上                | -                       |                         | 低速         |        |   | 1,100                       |
| ■集塵機・伸縮ダクト |                        |                  |                        |                         |                         |            |        |   |                             |
| 作業管理       | -                      | -                | -                      | -                       | 粉塵<br>mg/m <sup>3</sup> | -          | 制御パターン |   | 設定風量<br>m <sup>3</sup> /min |
| 管理<br>閾値   |                        |                  |                        |                         | 3.0 以上                  | -          | 最大     | 伸 | 2,300                       |
|            |                        |                  |                        |                         | 3.0 未満<br>2.0 以上        |            | 高速     | 伸 | 2,200                       |
|            |                        |                  |                        |                         | 2.0 未満<br>0.5 以上        |            | 中速     | 縮 | 1,600                       |
|            |                        |                  |                        |                         | 0.5 未満<br>0.25 以上       |            | 低速     | 縮 | 800                         |
|            |                        |                  |                        |                         | 0.25 未満                 |            | 停止     | 縮 | -                           |

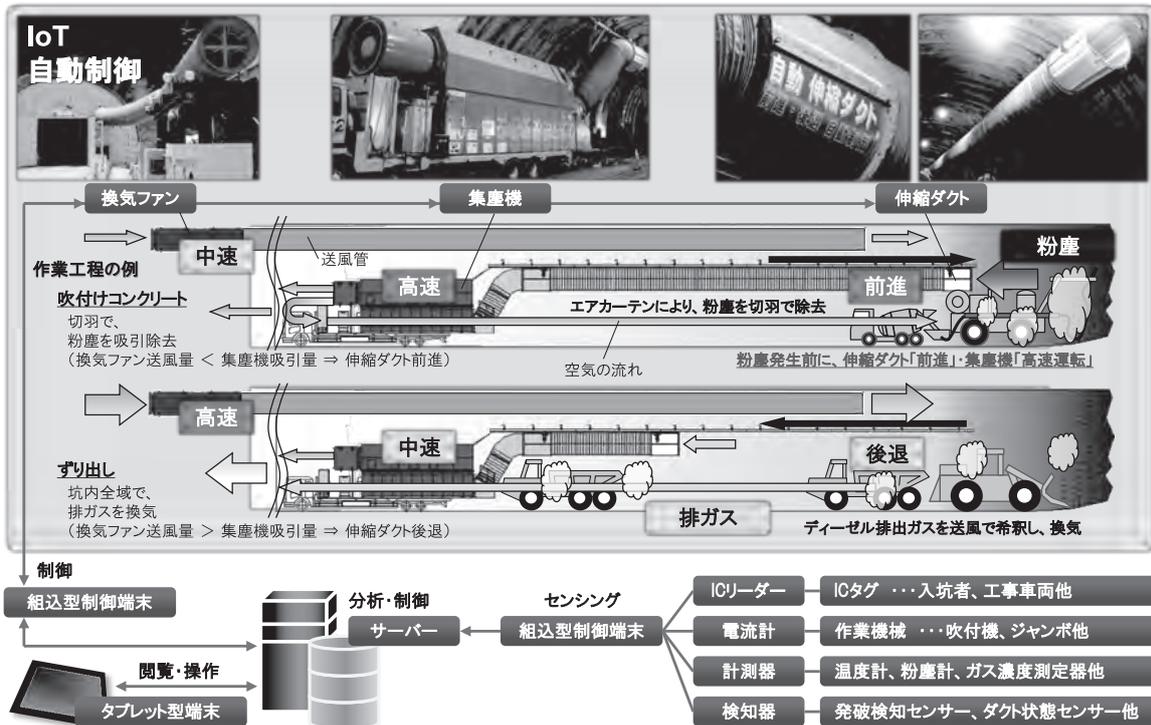


図-3 本システム概略図

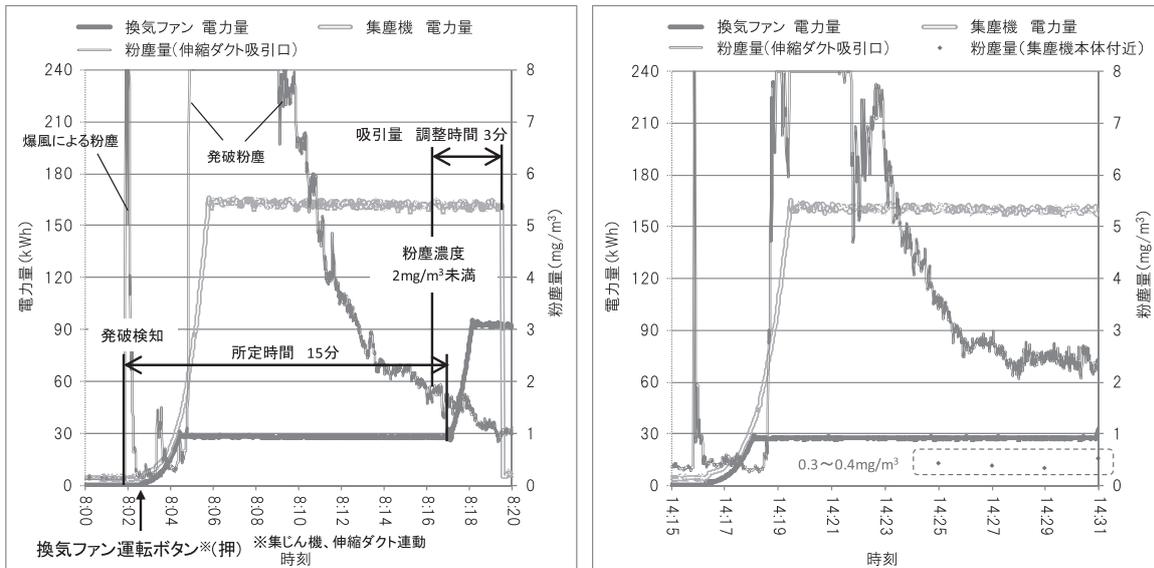


図-4 発破直後の換気装置の電力量と粉塵量の関係

発破直後の換気装置の電力量と粉塵量の関係を示す。図-4の左図においては、時刻8:02直前に発破が行われ、発破センサーが発破を検知し、サーバーで発破状態を記録している。その後、坑外の換気ファンの操作盤で、換気ファンの運転ボタンを押すことで、換気ファンが自動で低速運転、集塵機が高速運転を開始している。この際、グラフには表示されていないが、連動して伸縮ダクトが自動で切羽付近へ前進している。また、サーバーで発破状態が記録されているため、所定時間15分(設定変更可)は発破による粉塵を吸引

除去する工程として、換気ファンの風量と集塵機の吸引量の状態を維持している。所定時間経過後は、換気ファンはその時点の作業工程である「ずり出し中」を判断し、高速運転を開始し、集塵機は粉塵濃度が $2\text{ mg/m}^3$ (設定変更可)以下になった時点をサーバーで記録し、直ぐに吸引量を低下させず(粉塵が再び上昇しないように)、調整時間3分間を経過した時点で吸引量を低下させている(この際に、伸縮ダクトも自動で後退する)。図-4の右図は、異なる時刻の発破直後における換気・集じんを行った際に、集塵機本体

付近で手動により粉塵量を測定した値（4点）を記したものである。粉塵量は、 $0.3 \sim 0.5 \text{ mg/m}^3$ を示しているため、切羽における高濃度の発破粉塵が、集塵機本体付近まで充満していないことが分かる。

次の具体例として、吹付けコンクリート施工時の作業機械と集塵機の電力量および粉塵量の関係を図—5に示す。ここで、図中の粉塵量は1分間の平均値を表示している。最初に、時刻14:05を過ぎた頃に粉塵量が $0.5 \text{ mg/m}^3$ を上回ったため、集塵機が中速運転を開始している。次に、14:09に吹付用コンプレッサー稼働（生コン車等も検知）したため、吹付けコンクリートの施工が始まったとして、集塵機が高速運転を開始（伸縮ダクトも切羽に前進）している。ここで、粉塵量は伸縮ダクト先端で14:10頃から徐々に上昇しているが、既に集塵機は高速運転し、伸縮ダクトも前進しているため、集じんの遅れを防ぐことができている。さらに、その後、集塵機は伸縮ダクト先端で粉塵量が $2.0 \text{ mg/m}^3$ や $3.0 \text{ mg/m}^3$ を上回った場合は、それぞれ高速運転、最大運転と追従して変化することや、吸引量を維持するため、作業工程が変化しても適した吸引量となっている。その結果、集塵機本体付近で計測し

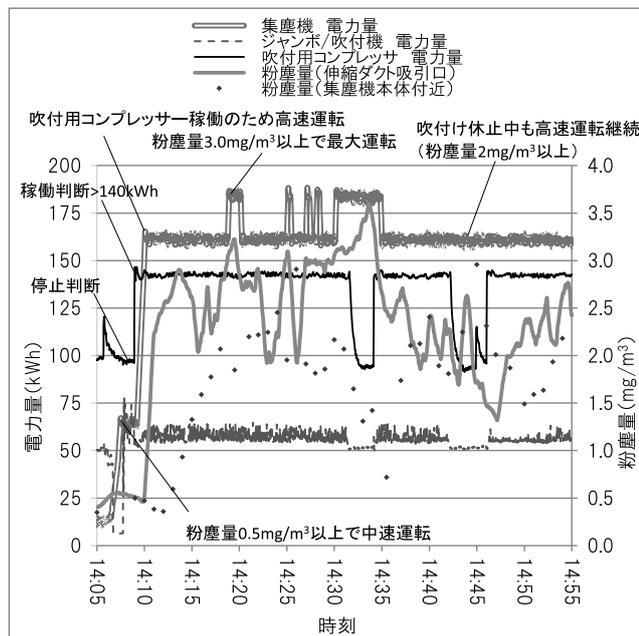
ている粉塵量（1分間測定）は、一部例外があるものの、高い濃度でも $2.0 \sim 2.5 \text{ mg/m}^3$  ( $< 3.0 \text{ mg/m}^3$ )となり、切羽後方への粉塵の充満が抑制できる結果となっている。

## 6. おわりに

本システム TUNNEL EYE の導入により、これまで手動で行っていた入坑管理や作業環境濃度測定、伸縮ダクトや換気装置の操作等が自動で行うことが可能になった。入坑管理や作業環境濃度測定については、安全確保のために、従来の手動による管理と併用して実施しており、本システム導入の成果では、24時間の時系列で、入坑者や作業環境の状態をリアルタイムに管理できる利点が得られている。また、伸縮ダクトと換気装置の操作では、手動操作での課題であった操作遅れなどによる作業環境悪化を防ぐことが可能になった。

今後も、山岳トンネル工事での活用を通じて、機能の拡充も視野に入れながら、安全管理の充実を図っていく。

JICMA



図—5 作業機械と集塵機の電力量および粉塵量の関係

### 【筆者紹介】

白石 雅嗣 (しらいし まさつぐ)  
 (株)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)  
 (株)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)  
 (株)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

