

トンネル坑内環境一元管理自動制御システム (TD-Green) の開発

トンネル坑内作業環境の最適化に関する計画と現場適用結果に関する考察

DEVELOPMENT OF THE TUNNEL GALLERY ENVIRONMENT UNITARY MANAGEMENT
AUTOMATIC CONTROL SYSTEM

Consideration about plan and the spot application result about the optimization of the tunnel gallery work environment

小林由委*¹, 田中徹*²

Yoshitsugu KOBAYASHI and Tooru TANAKA

Because the air environment of the gallery in mountains tunnel construction undertaking construction is an item connected directly with security of prevention of construction disaster, the security of the worker and the work environment about the hygiene side and prevention of global warming measures (CO₂ emission reduction), what I always optimize gallery environment and maintain is important.

I measured it by the sensor which installed data about various gallery environment such as the poisonous gases density of dust density or methane, the gallery wind velocity or the temperature in the gallery automatically and developed a technique to automatically control ventilation equipment in the range of the standard value that I set beforehand.

I in this way report it here because I was able to confirm that I can plan efficiency of the regular improvement and management work of the labor circumstances of the gallery worker, minimization of the consumption electricity by the application in the real tunnel spot.

Keywords : Tunnel Gallery Ventilation , Automatic Control, Fan, Dust Collecting Machine

トンネル坑内換気, 自動制御, 送風機, 集塵機

1. はじめに

施工中の山岳トンネル工事における坑内の空気環境は、労働災害防止、労働者の安全と衛生面に関する作業環境の確保および地球温暖化抑制（CO₂ 排出量削減）に直結する項目であることから、これらを一元管理できるシステムを構築することで、坑内環境を常に最適化して維持できる手法を開発した。一元管理システムは、トンネル換気機器を自動制御することにより坑内環境に影響を与える粉じんや有害ガスの濃度、坑内温度ならびに坑内風速を管理基準値以内に最適化しつつ、これを作業中連続保持できることを目的とするものである。また、その結果として坑内環境を適切に確保することは、粉じん等の坑外への排出を減少させ、外部環境（近隣住宅地や自然環境保護物件等）への負荷を低減することにもなる。

これらの目的を達成するために、環境測定値と換気機器との連動性の管理技術ならびに運転制御技術の内容を紹介するとともに、実際のトンネル工事における現場適用で確認した本技術の環境面(坑内環境, 国立公園内の坑口周辺環境, CO₂ 削減=省電力化)に与える効果について紹介する。

2. 開発の背景

山岳トンネル工事においては、安衛法に定められた『作業開始前の坑内作業環境測定（以降、法的規制）』・『ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン（以降、ガイドライン）』に則り、坑

内作業環境測定が義務付けられており、さらに遵守すべき環境管理基準値や望ましい推奨値が示されている。これらの環境測定は、作業開始前の定時や定められた期間内での随時の測定であり、可燃性ガス等の有害ガスが常時発生する場合の自動観測監視を除き、測定時以降の連続的な監視や測定値に瞬時に反応する換気手法は標準化されていない。

トンネル工事では、作業の内容や機械設備稼働状況さらには外部環境の影響によって、坑内の作業環境が刻々と変化する。このため、坑内労働環境の向上を目的にトンネル工事施工中の坑内作業環境を管理基準値以内でさらなる良好な状態に常時確保するためには、作業サイクルに応じて変化する坑内環境指標を常に把握し、これに対応した換気対策を講じることにより最適な坑内環境を保持することが重要である。なお、換気技術に対しては『新版 ずい道等建設工事における換気技術指針《換気技術の設計及び粉じん等の測定》 建設業労働災害防止協会平成 24 年 3 月 15 日（以降、換気指針）』¹⁾を標準とする。

2.1 遵守すべき基準等

法令や指針等で示される遵守すべき各種の基準値や推奨値を以降に示す。

(1) 法的規制値

安衛法、安衛則、酸欠側等の関係法令で、就業禁止等に規制されている値を以下の表 - 1 に示す。

*1 戸田建設株式会社土木技術営業部 (工学修士)

Engineering Works Technology Sales Dept. TODA CORPORATION, M.Eng.

*2 戸田建設備働価値創造推進室 (工学修士)

Promotion Office for Value Creation, TODA CORPORATION, M.Eng.

表 - 1 法的規制値一覧表

項目	規制値	条項
酸素濃度	18%以上	安衛則第585条（立入禁止等）
硫化水素濃度	10ppm以下	
二酸化炭素濃度	1.5%以下	
坑内温度	37℃以下	安衛則第611条（坑内の気温）
可燃性ガス	爆発下限界の30%未満 《メタン：爆発下限界5.0%×30%=1.5%》	安衛則第389条の8 （退避及び立入禁止措置）

(2) 許容濃度

法令上の規制値ではないが人体への影響を考慮した（衛生専門家会議）が勧告している許容濃度を表 - 2 に示す。うえて、日本産業衛生医学会および ACGIH（米国産業

表 - 2 許容濃度一覧表

種類	許容濃度	準拠元	備考
一酸化炭素 (CO)	50ppm	日本産業衛生学会	
一酸化窒素 (NO)	25ppm	ACGIH	NOとNO ₂ を総称してNO _x （燃焼起源）として取扱い、換気計算ではNOを換気対象ガスとする
二酸化窒素 (NO ₂)	25ppm	ACGIH	
硫化水素 (H ₂ S)	5ppm	日本産業衛生学会	法規制値より厳しい
二酸化炭素 (CO ₂)	5000ppm (0.5%)	日本産業衛生学会	〃

(3) ガイドライン

「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」で明記されている、目標粉じん濃度を表 - 3 に示す。

表 - 3 粉じん濃度

種類	目標濃度	備考
坑内粉じん	3mg/m ³ 以下	切羽から50m程度後方の位置における断面で、床上50cm以上150cm以下の同じ高さで、それぞれの側壁から1m以上離れた点及び中央の点の3点での濃度

(4) 換気指針

換気設計を行う場合において、良好な坑内環境を維持するうえて検討すべき有害ガスや環境指標等についての種別や発生源ならびに許容濃度や推奨値等をまとめており、以下の表 - 4 に示す。

表 - 4 管理項目等一覧表

管理項目	主な発生原因	許容濃度等	換気の考え方	備考
メタンガス (CH ₄)	自然発生ガス：可燃性	1.5%<	希釈・排出 (爆発性を考慮)	メタン逆流阻止：風速 0.5m/s> メタンア消去：風速 1m/s>
硫化水素 (H ₂ S)	自然発生ガス	5ppm<	希釈・排出	
一酸化炭素 (CO)	発破後ガス・排気ガス	50ppm<	希釈・排出	
窒素酸化物 (NO _x)	発破後ガス・排気ガス	25ppm<	希釈・排出	
粉じん	発破・機械掘削・ずり積込み、運搬・吹付け・クラッシュャ、篩分け	3mg/m ³ <	捕集・希釈・排出	溶接ヒュームもある
坑内温度	岩盤温度・機械発熱・外気温	28℃< (37℃<)	風速冷感 外気冷却	28℃は望ましい坑内温度
熱中症 (WBGT)	高温	WBGT25℃<	〃	
坑内風速	設備等の障害物で低下	0.3m/s>	換気風量	坑内どこでも必要な風速
坑外粉じん (SPM)	坑口からの漏出	0.2mg/m ³ < (1時間値)	除じん	環境基準 1時間値の1日平均値 0.1mg/m ³ <
大気汚染物質	有害ガス	各種		各種環境基準

2.2 基準等を達成するための手段

(1) 現状のトンネル換気

トンネル工事における坑内の換気手法は、送風機と集塵機ならびに風管を用いた強制換気方式が一般的である。極端に延長の短いトンネルでは、送風機のみを用いた【拡散希釈方式】が採用されるが、その他は送風機と集塵機を組み合わせた【希釈封じ込め方式】や【吸引捕集方式】が採用される。また、送風機の使用方法としては、『送気式』と『排気式』があり、局所換気ファンを補助的に用いる場合もある。いずれにしても、工事条件（延長、断面積、使用機械、目標坑内環境指標値、周辺環境等）や発注者の設計・積算基準等により、各種の組合せが存在することから、換気計画段階においては最適な換気方法を検討したうえで選択することになる。なお、工事場所や路線において断面

積に大きな変化がない新幹線のトンネルでは、施工延長に応じた標準的な換気設備を積算標準²⁾に定めており、参考として表-5に紹介する。

(2) 標準的な換気設計手法

通常のトンネル換気設計は、断面形状や延長等の施工条件、使用機械の規格や台数、さらには作業人員数や作業所独自の管理値の設定により、各現場毎に個々に実施している。ここでは、標準的な換気設計の手順と計算手法を実例現場の現地条件に合わせた内容で紹介する。なお、換気設計にあたり、現地条件と施工計画立案段階での事前確定項目を表-6に示すとともに、表-6の条件をもとに、換気指針の設計手順¹⁾に則り実施した所要換気量の計算結果を表-7と図-1に示す。

表-5 換気設備内容一覧表²⁾（新幹線トンネルN.A.T.M：発破タイヤ方式の場合）

適用トンネル 片押し延長 (L)	切羽位置	送風機・集塵機の種類	換気方式	設備	風管	
				台数	種別	布設長
500m まで	500m まで	送風機 2,000m ³ /min (可変) 75kw×1 台組	拡散希釈方式 (送気式)	1 台	ビニル 径 1,600mm	L-50m
1,500m まで	500m まで	送風機 2,000m ³ /min (可変) 75kw×1 台組	拡散希釈方式 (送気式)	1 台	ビニル 径 1,600mm	L-50m
	1,500m まで	送風機 1,500m ³ /min (可変) 80kw×2 台組	吸引捕集方式 (送気式)	1 台		
		集塵機 2,400m ³ /min (フィルタ式) 160kw			1 台	伸縮ダクト 径 1,500mm
2,500m まで	500m まで	送風機 2,000m ³ /min (可変) 75kw×1 台組	拡散希釈方式 (送気式)	1 台	ビニル 径 1,600mm	L-50m
	1,500m まで	送風機 1,500m ³ /min (可変) 80kw×2 台組	吸引捕集方式 (送気式)	1 台		
	2,500m まで	送風機 2,000m ³ /min (可変) 110kw×2 台組		1 台		
	500m から 2,500m まで	集塵機 2,400m ³ /min (フィルタ式) 160kw		1 台		
3,000m まで	500m まで	送風機 2,000m ³ /min (可変) 75kw×1 台組	拡散希釈方式 (送気式)	1 台	ビニル 径 1,800mm	L-50m
	1,500m まで	送風機 1,500m ³ /min (可変) 80kw×2 台組	吸引捕集方式 (送気式)	1 台		
	3,000m まで	送風機 2,000m ³ /min (可変) 110kw×2 台組		1 台		
	500m から 3,000m まで	集塵機 2,400m ³ /min (フィルタ式) 160kw		1 台		

(注) 表中の(可変)とは、可変風量型ファンである。

表-6 現場条件(例)一覧表

現地条件	トンネル延長	L=588m
	掘削断面積	A=55.5m ²
	掘削方式	発破掘削、補助ベンチ付全断面掘削工法
	ずり出し方式	タイヤ方式
	周辺環境	国立公園(特別環境保護地区)
事前確定計画内容	換気方式	吸引捕集方式
	送風機	送気式
	集塵機	フィルター式
	伸縮式風管	20m~120m
	粉じん管理目標濃度	2.5mg/m ³
	風管径	トンネル断面積と使用機械から施工性を考慮して決定

表 - 7 換気計算にあたっての条件等と所要換気量 (Qa) 計算結果一覧表¹⁾

記号	内容	条件等		換気量 (m ³ /min)
		管理目標濃度等	入力値・入力条件	
Qp	坑内作業員に対する換気量	3m ³ /(min・人)	17人	51
Q1	地山から発生する有害ガスに対する換気量 (Q1a, Q1c)	メタン: 0.25% O ₂ : 20%	Q1a 可燃性ガス湧出量: 0 m ³ /min Q1c 酸素欠乏空気湧出量: 0 m ³ /min	0
Q2a	発破の後ガスに対する換気量	CO: 50ppm NOx: 25ppm	含水爆薬, 火薬使用量 0.8kg/m ³ 1 発破進行長 1.2m, 所要換気時間 20min	213
Q2b	発破の粉じんに対する換気量	粉じん: 2.5mg/m ³	同上+火薬 1kg 当たりの粉じん発生量 2,000mg/kg	877
Q3	機械・車両の排出ガスに対する換気量	NO: 25ppm CO: 50ppm	実出力当たりの換気量: 第2次基準 同時稼働機械: サイドダンプ, バックホウ, ブレーカ, 10t ダンプ 3 台, ボンプ車, 覆工用生コン車	1,253
Q4	吹付作業の粉じんに対する換気量	粉じん: 2.5mg/m ³	定格吐出量 20m ³ /h, 粉じん低減剤	2,222
Q5	発熱源に対する換気量	坑内温度: 28℃以下	機械類の動力 132kw, 吐出空気温度 25℃	1,100
Q6	坑内風速から求めた換気量	坑内風速: 0.3m/s 以上	坑内風速 0.3m/s	999
Qa	所要換気量	図-1 のフロー図により決定		1,304

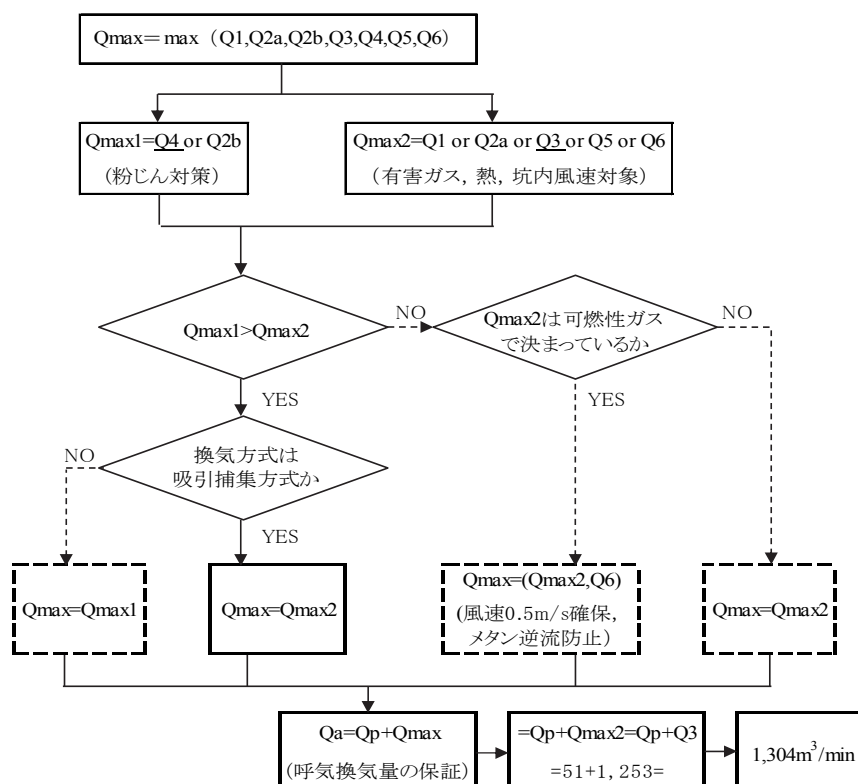


図-1 所要換気量の設定フロー¹⁾

以上の表 - 7 と図 - 1 により決定された所要換気量 (Qa) の考え方は、次のように解釈できる。

- ① トンネル工事においては有害物質を発生させる作業は重複することがないので、Q1~Q6 の換気量の最大値であればその他の項目についての換気量についても満足できる。
- ② 坑内の作業員に対する換気量 Qp は、作業員の呼気と環境維持に必要な換気量で、作業状況に関わらず最低限確保しなければならない。

③ 所要換気量 (Qa) は、①と②の合算により定めるが、換気方式による判定条件を加えた図 - 1 のフローにより決定する。

$$\ll Qa = (Q_1 \sim Q_6 \text{ の最大値}) + Qp \gg$$

次に、所要換気量 (Qa) を満足させる送風機の選定は、①風管の圧力損失、②漏風を考慮した送風機の風量と圧力、③送風機の実動力を求め、この値をもとに適切な機種を選定する。集塵機についても同様に採用する方式 (本例では吸引捕集方式) の集塵機容量を算

出し、適切な機種を選定する。以下の図 - 2 に送風機の選定フロー、図 - 3 に集塵機の選定フローを示すとともに、表 - 8 に選定に用いる現場条件を加味した入力値と出力値を示す。さらに、表-8 の出力値をもとに、これ

を満足できる送風機と集塵機の仕様・規格から具体的な型式選定を実施する。その結果として、決定した換気設備の一覧表を表 - 9 に示す。

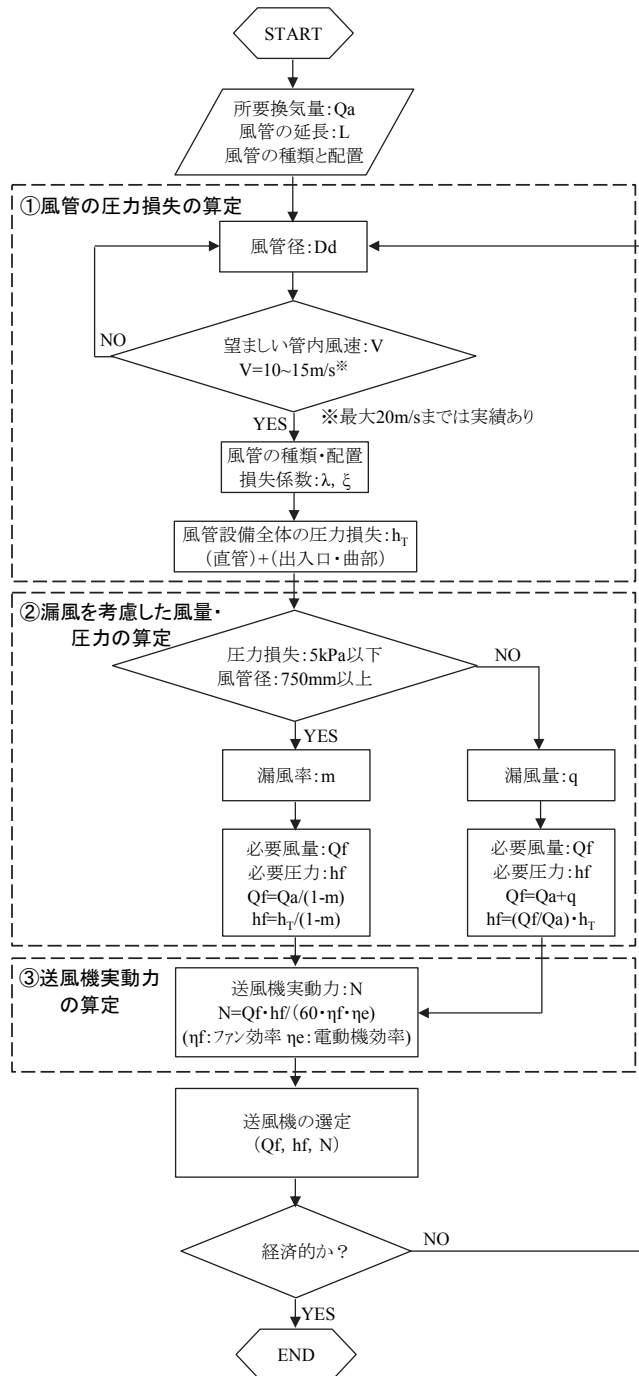


図-2 送風機の選定フロー図

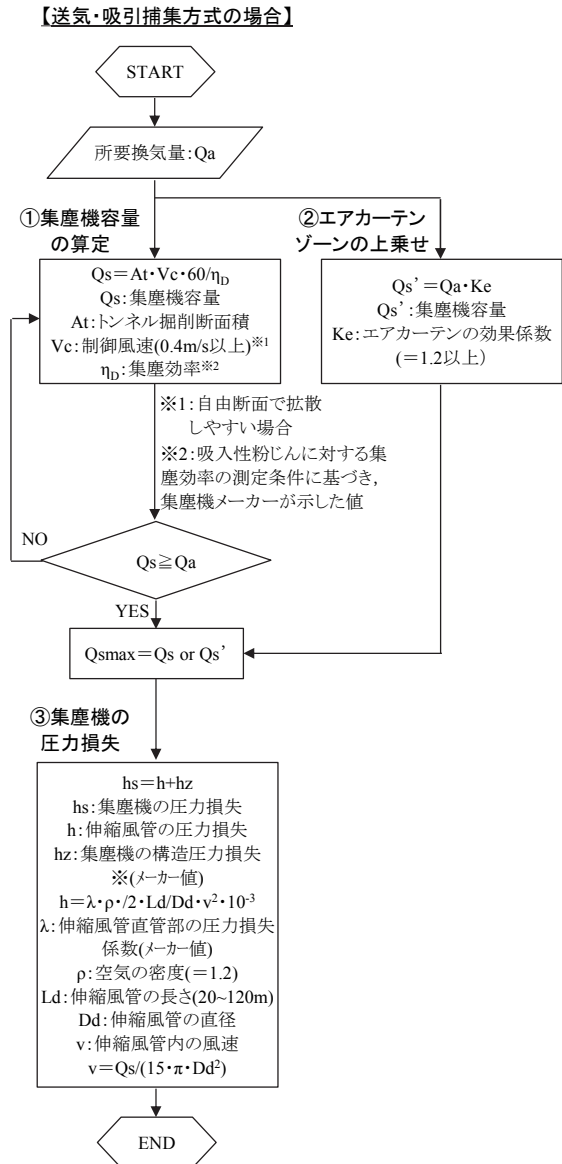


図-3 集塵機の選定方法フロー図

表 - 8 換気設備検討条件及び検討結果一覧表

換気機器	入力条件			出力値
	名称	項目	仕様・規格	
送風機	風管	設置延長	L=558m	送風機の所要能力 送風量 Qf : 1,423m ³ /min 以上 送風圧力 hf : 1.88kPa 以上 送風機動力 N : 81kw 以上
		材質	PVC ターボリン	
		1本の長さ	10m/本	
		直径	φ1.3m ^{**}	
	風管の仕様・規格による定数	λ : 直管部の圧力損失係数	0.025	
		ξ : 入口,出口,曲り部等の圧力損失係数	0.17	
		m : 風管全長での漏風率	0.0837	
送風機特性値	η f : ファン効率	0.65		
	η e : 電動機効率	0.85		
集塵機	制御風速 : Vc	0.4m/s以上	集塵機の所要能力 集塵機容量 Qs : 1,565m ³ /min 以上 集塵機圧力 hs : 3.10kPa 以上	
	集塵効率 : η D	0.99 (メーカー値)		
	エアカーテン効果係数 : Ke	1.2以上		
	伸縮風管	φ1.4m ^{**} , L=120m		
	集塵機構造圧力損失 : hz	1.48 (メーカー値)		
	伸縮風管の圧力損失 : h	1.62 (メーカー値 λ =0.11)		

※坑内の機械稼働スペースより選定

表 - 9 換気設備一覧表

種別	内容	仕様・規格	備考
送風機	型式	RE-120IW55	二重反転式
	性能	1500m ³ /min、3.4kPa	騒音値 : 78dB(A)
	動力	AC400/440V、3φ、55kw×2	インバーター制御
	風管	φ1.3m	PVC ターボリン
集塵機 (フィルター式)	型式	RE-2000P2	メンテナンスフリー型
	性能	定格2400m ³ /min (最大2650m ³ /min)	吐口清浄度 : 0.1mg/m ³ 以下
	動力	AC400/440V、3φ、80kw×2	インバーター制御
	風管	φ1.4m、伸縮風管 (20~120m)	オーバーハングノズル付

2.3 坑内換気管理の問題点

実際の現場での換気は、選定した換気機器類を稼働させ、ガイドラインに準拠した半月以内毎に1回の「換気の実施等の効果を確認するための粉じん濃度等の測定」や労働安全衛生法に定められた「作業開始前の坑内環境測定」等を実施することにより坑内環境を管理することになる。ここでは、坑内換気に関する発注者側の標準的な考え方と現場において一般的に実施されている管理方法から現状の問題点を抽出する。

(1) 発注者の積算基準による換気機器稼働方法と時間

発注者における換気機器の稼働方法は、換気設計で選定した送風機や集塵機を定格動力で運転することとしている(積算基準より)。また、換気機器の運転時間も積算基準に定められており、トンネル掘削作業昼夜2方における国交省の場合を以下に示す。

【送風機】1日当りの運転時間は17hを標準とする。

【集塵機】掘削作業を行う実作業時間(7h/方、14h/日)とほぼ同等時間としている(詳細は積算基準参照)。

(2) 現場における一般的な管理方法

- ・粉じん濃度や坑内環境項目の測定は、主として切羽近傍に限定された一定頻度の手動測定である。
- ・換気機器の運転切替は、作業内容や測定値に応じて職員が手動で切替を行う。

- ・覆工やインバート工に伴う切羽後方作業における環境項目監視は、切羽作業に比べて粗である。さらに、換気計画は切羽作業を重視して計画されているため、切羽後方での作業に対する換気風量等の改善がスムーズに行われない。

(3) 現状での問題点

- ・積算基準の稼働方法と稼働時間は、掘削や支保工の作業内容で変化する粉じんや発破ならびに排ガス等の有害ガスの濃度の変化に関わらず一定風量での送風や吸引捕集を行っている。このため、環境負荷低減のための電気量(CO₂)の削減などの技術開発の要求が高まっている³⁾。さらには、粉じんや有害ガスが発生しないロックボルト工等の施工時においては、以前から「風量が大きくて寒い」という切羽作業員からの苦情³⁾もたびたび報告されている。
- ・坑内環境項目の測定は、主として切羽近傍である。
- ・換気機器の運転切替は、職員がその都度行う。
- ・坑内粉じんが坑外に漏れ出すことによる坑外周辺環境に対する影響は、通常考慮しない。

以上の問題点等を解決するとともに、さらなる生産性向上を目的として開発した「坑内環境一元管理システム」を次章以降に紹介する。

3. 坑内環境一元管理システムの開発

3.1 目標方針

ガイドラインと労働安全衛生法に定められた「半月に1回の粉じん測定」と「作業開始前の坑内環境測定」は標準案として遵守することとし、これに加えて坑内作業者への労働衛生環境の向上、周辺環境への配慮、CO₂排出量削減の観点から目標とする開発技術の内容を以下に示す。

- ① 切羽近傍に特定せず、坑内全域の環境指標値を満足する換気量の自動制御を行う（坑内作業の快適化）。
- ② 坑内環境指標値の連続測定結果から、即時に換気機器類の運転切替えを行う（対応の迅速化）。
- ③ 坑内から坑外への粉じん^④拡散抑制措置を追加する（周辺環境負荷抑制）

④ 現場職員の坑内環境監視・計測と換気機器運転調整作業の負担を軽減する（省力化、省電力）。

3.2 環境指標値と具体的な実施計画

(1) 環境指標値の設定と測定手法および機器移動方法

当社の一般的なトンネル現場（標準案）をもとに、本開発で採用した環境指標値とトンネル規模（延長や施工方法等）を考慮した測定位置ならびに各種機器類の配置位置を表-10と図-4に示す。ただし、有害ガスについては計画策定時の現地条件を鑑みて選択を行っているため、必要に応じてガスセンサを追加すれば任意に指標値を追加・変更できるものとしている。

表 - 10 環境指標値と開発実施内容

環境項目	適用場所	測定位置と測定手法（記号区分：◎自動、△手動）											
		標準案（換気指針に準拠）					開発実施内容						
		測定位置	頻度	機器	手法	制御方法	測定位置	頻度	機器	手法	制御方法		
i	粉じん濃度： 2.5mg/m ³	切羽50m から全線	切羽+50m	1回半 月以内	デジタル 粉じん計	送風機、集塵 機のオーバー 手動切替	△	切羽+50m 伸縮風管 先端	常時	デジタル 粉じん計	◎	送風機、集塵 機のオーバー 自動制御 (出力調整)	
ii	坑内風速： 0.3m/s	坑内全線	切羽+50m	1回半 月以内	熱線風速 計			シート台車		熱線風速 計			
iii	坑内温度： 28℃		粉じん濃度 と同位置	粉じん 濃度と 同頻度	デジタル 温湿度計			切羽+50m		デジタル 温湿度計			
iv	メタン濃度： 1.5%		発生の恐れ のある場所	適宜	ガス 測定器					◎			ガス 測定器
v	CO：50ppm		作業密度が 高い場所	作業密度 高い時期									
vi	NOx：25ppm												
vii	浮遊粒子状 物質(SPM) 1時間値： 0.2mg/m ³	坑外	坑口	適宜	デジタル 粉じん計	なし	坑口	デジタル 粉じん計	◎	除じんミスト 自動作動			
viii	送気外気温： 28℃				熱線風速 計			熱線風速 計	◎	トンネルクーラー 自動作動			

開発での見える化手法		標準案に対して当開発により向上を目指す内容
【一覧表示(連続)データ】 ・環境項目測定値 ・送風機稼働データ ・集塵機稼働データ	【設置場所】 ・事務所 PC ・詰所 PC ・携帯端末	① i～viiiのトンネル掘削に伴う坑内および坑外環境の管理目標値を漏れなく満足 ② 坑内作業環境改善 ③ 対応の迅速化 ④ 坑外周辺環境負荷低減 ⑤ 換気調整作業の省力化 ⑥ 省電力

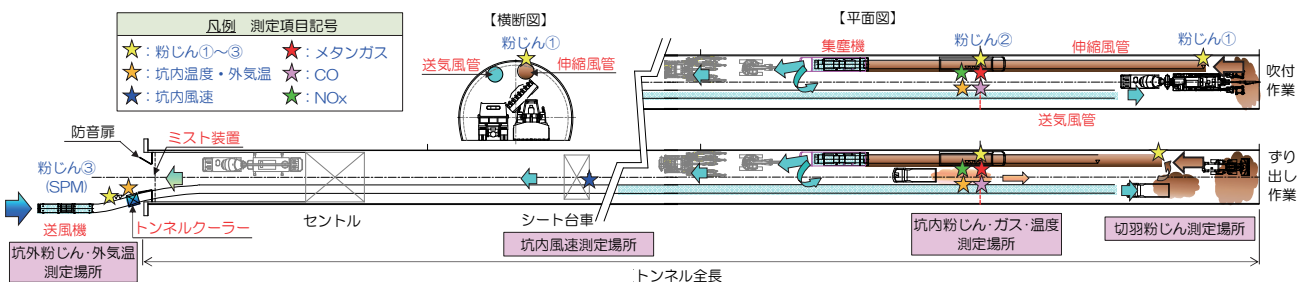


図 - 4 測定機器・換気機器配置図

(2) 環境管理項目別の具体的な換気手段と管理区分別の換気装置の運転内容

環境項目別にこれらを捕集除去、希釈排出、風速保持、空気冷却するための主たる換気機器を定めて、管

理基準値を限界として環境項目毎に4段階の管理区分を設定する。設定した管理区分毎の閾値を処理できる換気機器の運転は、インバーターによる出力調整により実施する。その具体的な内容を表-11、表-12に示す。

表 - 11 開発による環境管理項目と換気装置の運転内容

環境管理項目と坑内環境最適化対策								
測定場所	管理項目	主な発生原因	坑内環境最適化対策					
			手法	管理基準値	管理区分の設定	管理区分別の運転内容	運転機器	運転制御方法
切羽	粉じん	発破	集塵機と伸縮風管での吸引捕集	2.5mg/m ³	管理基準値を限界値として、I~IVの管理区分を設定	管理区分(I~IV)に対応して、集塵機と送風機の運転区分を4段階に設定 ・全力運転:100% ・高速運転:90% ・中速、低速運転:80~30%	送風機 集塵機	インバーターで4段階の運転自動制御
		ずり積込み・運搬						
		コックによる岩石破砕						
		吹付コンクリート						
切羽後方	粉じん	車両走行による巻上げ	集塵機吸引捕集 送風機希釈排出	2.5mg/m ³				
	メタンガス	自然由来		1.5%				
	CO	発破後ガス・排気ガス	送風機希釈排出	50ppm				
	NOx	発破後ガス・排気ガス		25ppm				
	坑内温度	機械類発熱・外気温	送風冷却効果 外気冷却	28℃				
	風速	設備等の障害物	望ましい風速以上を保持	0.3m/s以上				
坑口	浮遊粒子状物質	坑口からの漏出し	坑口ミスト捕集で除じん	0.2mg/m ³	管理区分に対応したON・OFF運転	除じん ミスト クーラー	ON・OFF 制御	
	送気温度	高温外気	トンネルクーラーで外気冷却	28℃				

表 - 12 管理区分別の閾値と換気機器の運転内容

測定場所	管理項目	単位	管理区分 (制御パラメータの閾値)				対応換気機器	管理区分別の運転内容				運転制御方法
			IV	III	II	I		IV	III	II	I	
切羽	粉じん	mg/m ³	2.5以上	2.5~2	2~1	1未満	集塵機	全力吸引	高速	中速	低速	インバーター 制御
切羽後方	粉じん	mg/m ³	2.5以上	2.5~2	2~1	1未満	送風機	全力送気	高速	中速	低速	
	メタンガス	%	1.5以上	1.5~1	1~0.25	0.25未満		全力送気	高速	中速	低速	
	CO	ppm	50以上	50~40	40~15	15未満		全力送気	高速	中速	低速	
	NOx	ppm	25以上	25~20	20~1	1未満		全力送気	高速	中速	低速	
	坑内温度	℃	28以上	28~27	27~25	25未満		全力送気	高速	中速	低速	
	風速	m/s	0.1未満	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3以上		全力送気	高速	中速	低速	
坑口	浮遊粒子状物質	mg/m ³	0.2以上	0.2~0.1	0.1未満	—	ミスト装置	ON・坑内散水	ON	OFF	—	ON・OFF 制御
	送気温度	℃	28以上	27以下	—	—	クーラー	ON	OFF	—	—	

集塵機	全力吸引	高速	中速	低速
(運転区分)	100%	90%	70%	30%
送風機	全力吸引	高速	中速	低速
(運転区分)	100%	90%	80%	70%

(3) 自動制御方法の考え方

送風機は、環境指標値の管理区分毎に風管等の圧力損失を考慮して、必要な吐出口での風量(所要換気量:Qa)を確保できるファンの送風量を算出する。この吐出口での風量を上回るインバーター制御による運転管理区分(全力、高速、中速、低速)を定めて、この運転管理区分のもとでの吐出口からの風量(稼働換気量)

を決定する。また、集塵機の場合も同様に所要吸引風量と稼働吸引風量を決定する。算出例として、送風機の運転においてはディーゼル Nox, 集塵機の運転では粉じんについて、表-13に示す。

表 - 13 必要風量と運転風量の対比表（ディーゼルNOx、粉じん）

種別	換気機器	管理区分	管理基準値 ① (ppm)	管理区分値の濃度を希釈・排出できる送気風量 ②=①での換気計算値 (m³/min)	送風機 <換気計算値>			インバーター制御運転内容					備考						
					運転出力状態	吐出口での風量 ③ (m³/min)	ファンでの風量 ④=③+損失 (m³/min)	吐出口風量の適切性 ③>②	運転区分	周波数 (Hz)	動力 (kw/h)	吐出口での風量 ⑤ (m³/min)		ファンでの風量 ⑥=⑤+損失 (m³/min)	吐出口風量の適切性 ⑤>②				
																全力	高速	中速	低速
																90%	80%	70%	ok
ディーゼルNOx	送風機	IV	25 以上	1,253 以上	全力	1,558	1,700	ok	全力	50	110	1,558	1,700	ok	性能曲線より				
		III	25~20	1,253 =Q3(表-7)	90%	1,304 =Qa(表-7)	1,423	ok	高速	45 =50*0.9	80	1,400	1,530	ok					
		II	20~1	1,015	80%	1,159	1,265	ok	中速	40 =50*0.8	56	1,245	1,360	ok					
		I	1 未満	41	70%	1,014	1,107	ok	低速	35 =50*0.7	38	1,080	1,190	ok					

種別	換気機器	管理区分	管理基準値 ① (m³/min)	管理区分値の濃度を捕集できる吸引量 ②=①での換気計算値 (m³/min)	集塵機 <換気計算値>			インバーター制御運転内容				備考					
					運転出力状態	吸引風量 ③ (m³/min)	吸引風量の適切性 ③>②	運転区分	周波数 (Hz)	動力 (kw/h)	吸引風量 ④ (m³/min)		吸引風量の適切性 ④>②				
														全力	高速	中速	低速
														90%	70%	30%	ok
粉じん(集塵機より前)	集塵機	IV	2.5 以上	1,565 以上	全力	1,800	ok	全力	60	160	1,800	ok	性能曲線より				
		III	2.5~2.0	1,565	90%	1,565 =表-8 集塵機	ok	高速	55	123	1,650	ok					
		II	2.0~1.0	1,037	70%	1,260	ok	中速	42	55	1,260	ok					
		I	1.0 未満	513	30%	540	ok	低速	20	6	600	ok					

※伸縮風管の漏風率は考慮しないため、圧力損失は0としている

(4) 自動制御マトリックス

前項の換気機器の運転制御およびその他の機器類を用いて、坑内環境を最適化するための管理区分、管理基準値、機器類の運転区分、作業基準をマトリックス表示して表-14の(1)～(3)に示す。

表 - 14 自動制御マトリックス表 (1)

管理区分	管理項目											
	粉じん DS1 (吸引捕集)				粉じん DS2 (希釈拡散)				メタンガス			
	基準値				基準値				基準値			
	換気機器	運転レベル	運転区分	作業基準	換気機器	運転レベル	運転区分	作業基準	換気機器	運転レベル	運転区分	作業基準
IV	2.5mg/m³ 以上				2.5mg/m³ 以上				1.5%以上			
	集塵機	全力	自動	作業停止	送風機	全力	自動	作業停止	送風機	全力	自動	坑内電源遮断
III	2.5~2.0mg/m³				2.5~2.0mg/m³				1.5~1.0%			
	集塵機	高速	自動	平常作業	送風機	高速	自動	平常作業	送風機	高速	自動	作業停止回避準備
II	2.0~1.0mg/m³				2.0~1.0mg/m³				1.0~0.25%			
	集塵機	中速	自動	平常作業	送風機	中速	自動	平常作業	送風機	中速	自動	火気禁止
I	1.0mg/m³ 以下				1.0mg/m³ 以下				0.25%以下			
	集塵機	低速	自動	平常作業	送風機	低速	自動	平常作業	送風機	低速	自動	平常作業

表 - 14 自動制御マトリックス表 (2)

管理区分	管理項目															
	発破 CO				発破 NOx				ディーゼル CO				ディーゼル NOx			
	基準値				基準値				基準値				基準値			
換気機器	運転レベル	運転区分	作業基準	換気機器	運転レベル	運転区分	作業基準	換気機器	運転レベル	運転区分	作業基準	換気機器	運転レベル	運転区分	作業基準	
IV	50ppm 以上				25PPm 以上				50ppm 以上				25PPm 以上			
	送風機	全力	自動	全員退避	送風機	全力	自動	全員退避	送風機	全力	自動	全員退避	送風機	全力	自動	全員退避
III	50~40ppm				25~20ppm				50~40ppm				25~20ppm			
	送風機	高速	自動	退避準備	送風機	高速	自動	退避準備	送風機	高速	自動	退避準備	送風機	高速	自動	退避準備
II	40~15ppm				20~1ppm				40~15ppm				20~1ppm			
	送風機	中速	自動	平常作業	送風機	中速	自動	平常作業	送風機	中速	自動	平常作業	送風機	中速	自動	平常作業
I	15ppm 以下				1ppm 以下				15ppm 以下				1ppm 以下			
	送風機	低速	自動	平常作業	送風機	低速	自動	平常作業	送風機	低速	自動	平常作業	送風機	低速	自動	平常作業

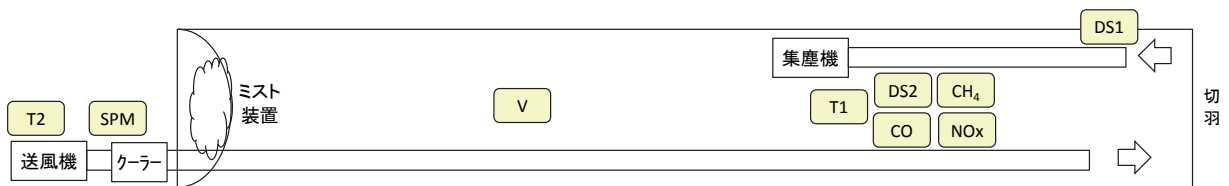
表 - 14 自動制御マトリックス表 (3)

管理区分	管理項目															
	風速				坑内温度				外気温				坑外 SPM			
	基準値				基準値				基準値				基準値			
換気機器	運転レベル	運転区分	作業基準	換気機器	運転レベル	運転区分	作業基準	換気機器	運転レベル	運転区分	作業基準	換気機器	運転レベル	運転区分	作業基準	
IV	0.1m/s 以下				28℃ 以上								0.2mg/m ³ 以上			
	送風機	全力	自動	作業停止	送風機	全力	自動	作業停止					坑口ミスト 坑内散水	ON —	自動 手動	作業 停止
III	0.1~0.2m/s				28~27℃				28℃ 以上				0.2~0.1mg/m ³ (1時間値)			
	送風機	高速	自動	平常作業	送風機	高速	自動	平常作業	クーラー	ON	自動	平常作業	坑口ミスト	ON	自動	平常作業
II	0.2~0.3m/s				27~25℃				27℃ 未満				0.1mg/m ³ 以下 (1時間値)			
	送風機	中速	自動	平常作業	送風機	中速	自動	平常作業	クーラー	OFF	自動	平常作業	坑口ミスト	OFF	自動	平常作業
I	0.3m/s 以上				25℃ 以下											
	送風機	低速	自動	平常作業	送風機	低速	自動	平常作業								

(5) 機器制御フロー

換気機器とセンサの配置位置ならびに環境管理項目毎のセンサ測定値に対する閾値の一覧表、さらに閾値

に対応する送風機と集塵機の運転制御フローチャートを以下の図-5~図-7に示す。



運転レベル	記号	DS		G			V	T		SPM
		DS1	DS2	CH4	CO	NOx		T1	T2	
		切羽粉じん (mg/m ³)	坑内粉じん (mg/m ³)	メタン (vol%)	一酸化炭素 (ppm)	窒素酸化物 (ppm)	坑内風速 (m/s)	坑内温度 (°C)	外気温 (°C)	浮遊粒子状物質 (mg/m ³)
全力運転	HH	2.5 以上	2.5 以上	1.5 以上	50 以上	25 以上	0.1 未満	28 以上	運転 28 以上	運転 0.2 以上
高速運転	H	2.5~2.0	2.5~2.0	1.5~1.0	50~40	25~20	0.1~0.2	28~27	停止 27 以下	運転 0.2~0.1
中速運転	L	2.0~1.0	2.0~1.0	1.0~0.25	40~15	20~1	0.2~0.3	27~25		停止 0.1 未満
低速運転	LL	1.0 未満	1.0 未満	0.25 未満	15 未満	1 未満	0.3 以上	25 未満		

※閾値の設定については、一元管理用 PC の「制御設定画面」により容易に変更できるものとしている。

図 - 5 換気機器およびセンサ類配置概要図と閾値一覧表

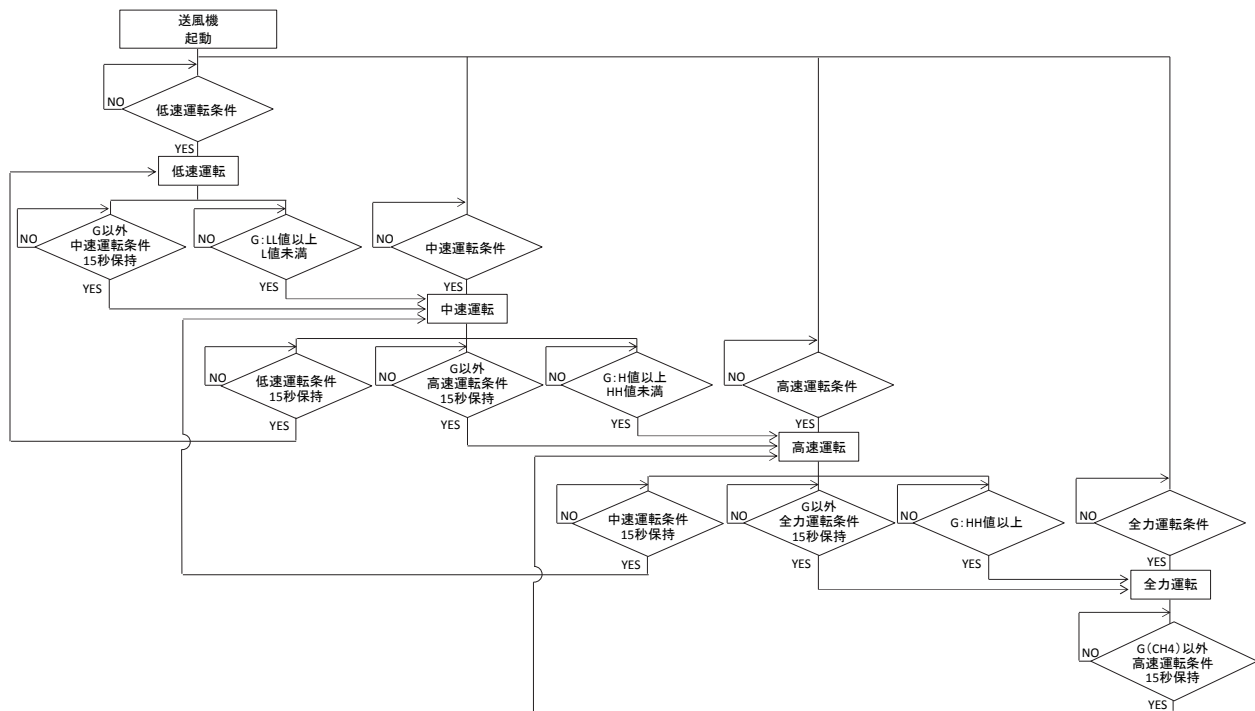


図 - 6 送風機フローチャート

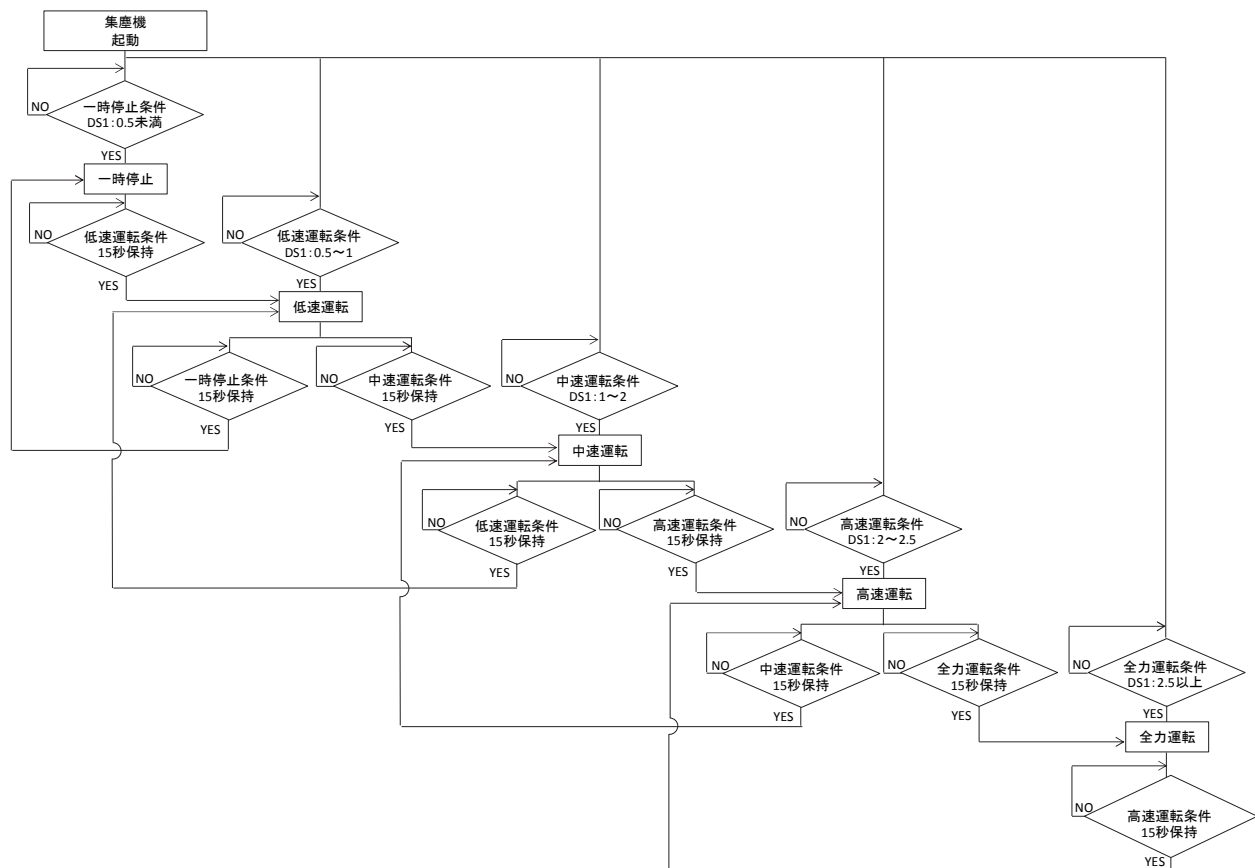


図 - 7 集塵機フローチャート

4. 実証施工と適用結果

当開発技術の実証現場として、当社施工の長野県発注 上高地トンネルを選定し、実施工に適用した結果を以降に示す。

4.1 実証現場での稼働状況

実証トンネル現場 (L=588m、A=55.5m²) での稼働

状況として、換気機器やセンサ類の配置状況ならびに管理用PCの操作状況を写真-1～写真-6に示す。さらに、トンネル坑口から切羽までのシステム全体を鳥瞰図として描いたものを図-8に示す。



写真-1 集塵機自動稼働状況



写真-2 送風機自動稼働状況 (H26. 8)



写真-3 送風機自動稼働状況 (H27. 3)



写真-4 自動計測状況 (計測機器全景)



写真-5 一元管理PC操作状況



写真-6 PC画面

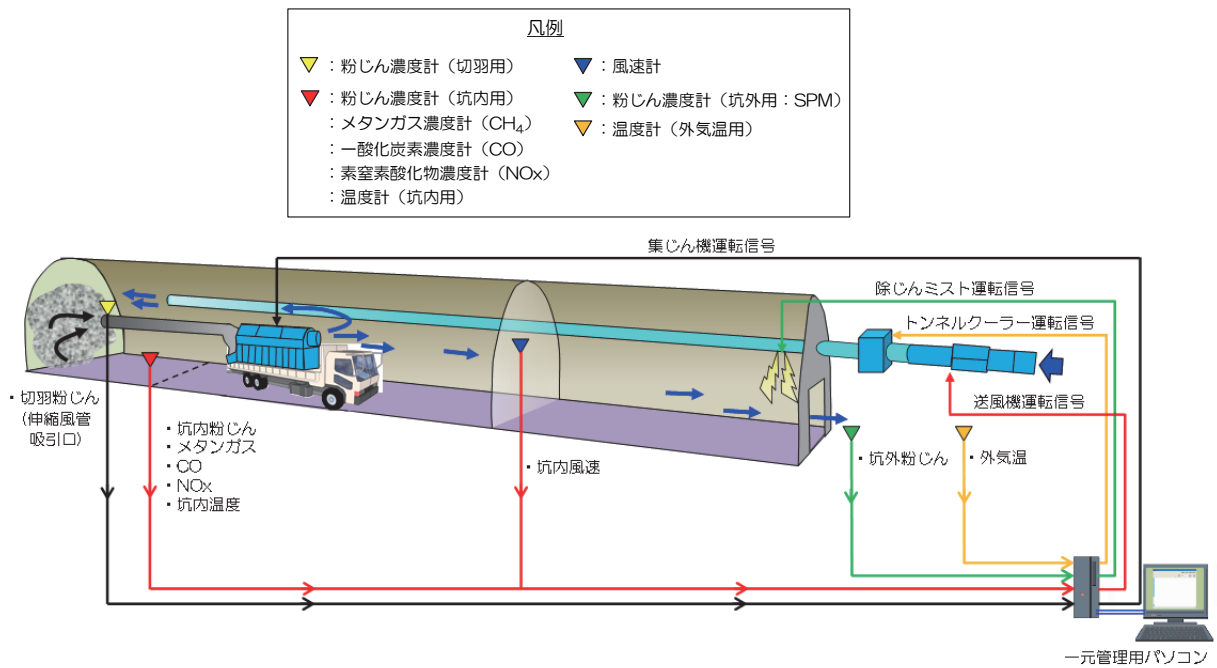


図 - 8 システム全体鳥瞰図

4.2 環境管理項目測定結果とシステム機器稼働状況

実証現場において得られた 1 サイクルの管理データの代表例 (2015 年 3 月) を、管理項目別に以下に示す。なお、管理 PC には 1 分間に 190 回 (0.3 秒毎) の連続データが csv 形式で保存されており、これを 1 分毎の

データに抽出したもので図化している (図-9~図-17 参照)。

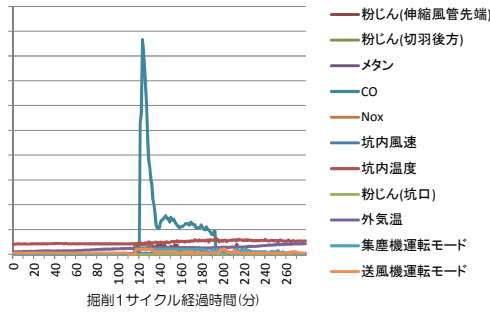


図-9 全管理項目の取得データ

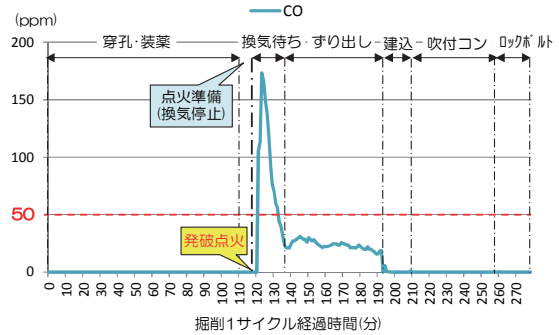


図-13 一酸化炭素 (CO) 濃度経時変化

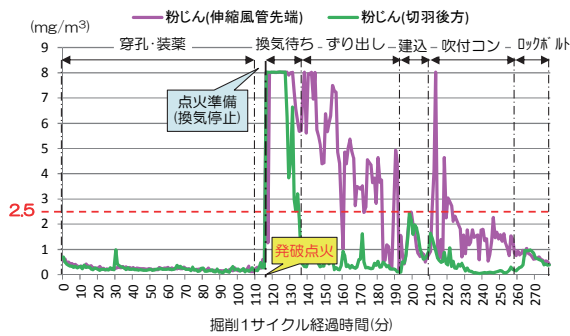


図-10 粉じん濃度経時変化 (切羽・切羽後方)

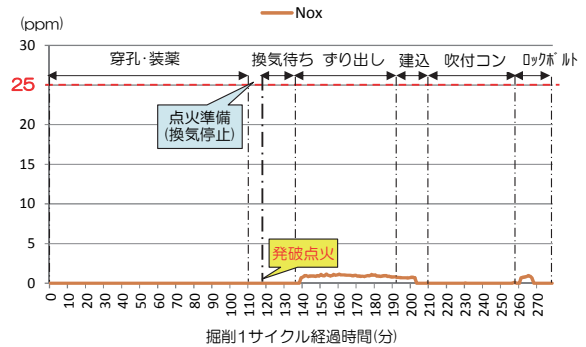


図-14 窒素酸化物 (NOx) 濃度経時変化

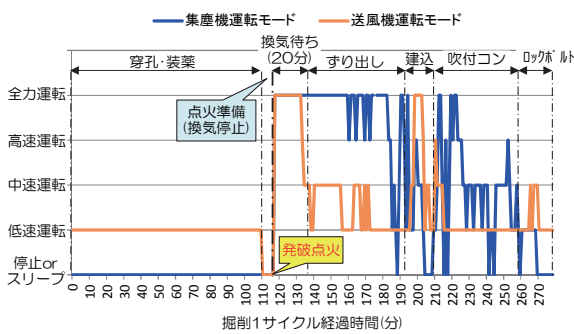


図-11 集塵機・送風機運転状態経時変化

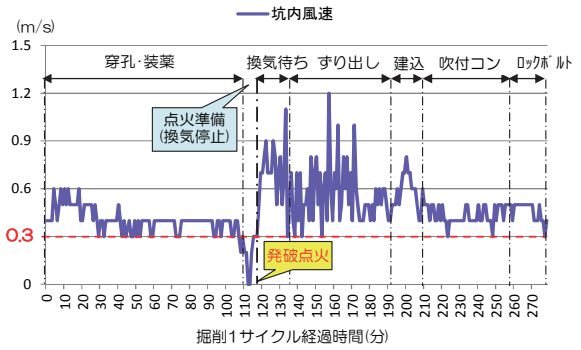


図-15 坑内風速経時変化

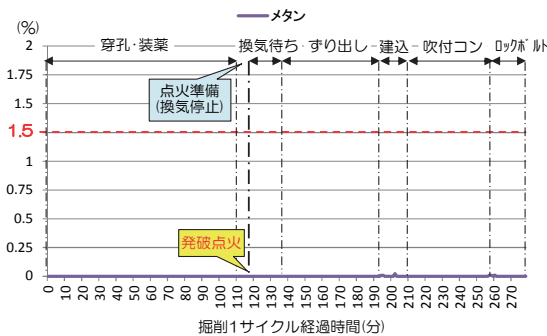


図-12 メタンガス (CH₄) 濃度経時変化

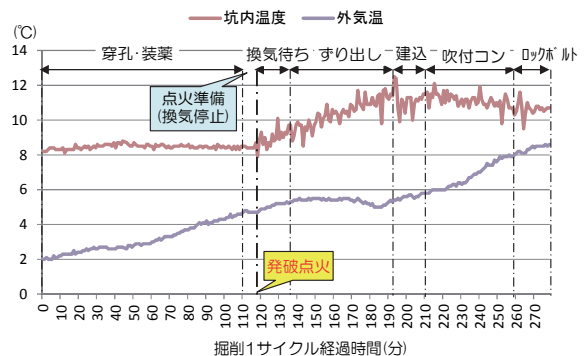


図-16 坑内温度・外気温経時変化

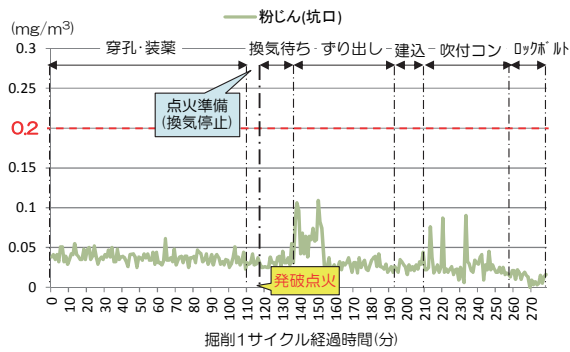


図-17 坑外粉じん濃度経時変化

4.3 当換気技術により得られた知見と坑内作業環境改善への効果

前節の各種データにより、発破掘削とタイヤ方式のずり出しを採用した場合における坑内作業環境に係る知見と開発技術の効果について以下に述べる。

(1) 知見

- 図-10の伸縮風管先端の粉じん濃度変化より、1サイクルの作業内容別に粉じんの発生状態を把握できる。
 - 発破点火後とずり出し前半および吹付コンクリート作業時に大量の粉じんが発生する。
- メタンガス（可燃性ガス）については、工事施工計画策定時のセーフティアセスメントによって発生しないであろうと想定していたが、予測通り発生は認められなかった。
 - セーフティアセスメントにより発生しないと想定されても、日々の作業開始前の測定では監視項目となる。これに加えて、当技術を採用することにより常時監視することができる。
- COは、発破の後ガスで大量に発生するとともに、排気ガスでも継続的に発生する。
 - 点火直後のCO濃度は許容濃度を超過するため、いわゆる「15分～20分程度の換気待ち」が重要である。つまり、労働者の衛生面から考えると進捗を

優先するあまり点火後ただちに、ずり出し作業に入ってはいけないことが検証された。

- NOxは、発破の後ガスでは想定した濃度よりも少ないが、ずり出し作業に伴う排気ガスの増加により上昇する。
 - 実証現場のずり出しダンプは、坑口から仮置き場までの区間で公道を横断するため、ナンバー付車両を採用していることが、低濃度に影響していると考えられる。重ダンプを使用する場合やダンプ台数が大幅に増加する場合は注意が必要である。
 - 坑内風速は、発破点火時の換気停止時期を除いて、所要風速0.3m/s以上を確保できている。
 - 坑内温度は、機械の稼働頻度の増加に伴い上昇傾向を示すことが確認された。
 - 坑口での粉じん濃度は、管理目標値よりも十分に小さいが、切羽後方で粉じん濃度のトレンドと相似関係が見られる。
 - 図-11の集塵機と送風機の稼働状態（スリーブを含めた5段階運転）は、フローチャートに示した制御に従っていることを確認できた。
- #### (2) 開発技術の効果
- 今回定めた環境管理項目の全てにおいて、管理目標値を満足することができた。これにより、当技術開発あたって実施した検討内容や機器制御手法が根本的に有効であることを証明できた。
 - 国立公園特別保護地区内でのトンネル工事であることから、周辺環境の保全に対して配慮を行う必要があり、大気環境の面から坑外粉じん濃度を制御できたことで環境保全に寄与できた。
 - 図-11に示した掘削1サイクルにおいて、集塵機と送風機の消費電力がどの程度削減できるものであるかの試算結果を以下に示す（表-15～表-18参照）。
 - 掘削1000サイクル（1000m級トンネル）を想定した電力使用料金の低減予測とCO₂削減量予測を表-19、-20に示す。

表-15 実績データ（図-11）による集塵機と送風機の実績稼働区分と消費電力

運転状態	集塵機			送風機			機器合計
	稼働時間	稼働動力	消費電力	稼働時間	稼働動力	消費電力	消費電力
	(分)	(kw)	(kw・h)	(分)	(kw)	(kw・h)	(kw・h)
	①	②	③=①/60×②	④	⑤	⑥=④/60×⑤	③+⑥
全力運転	70	160	187	21	110	39	225
高速運転	15	123	31	3	80	4	35
中速運転	29	55	27	38	56	35	62
低速運転	27	6	3	209	38	132	135
停止	137	0	0	7	0	0	0
合計	278		247	278		210	457

表-16 常時全力運転における消費電力

運転状態	集塵機			送風機			機器合計
	稼働時間	稼働動力	消費電力	稼働時間	稼働動力	消費電力	消費電力
	(分)	(kw)	(kw・h)	(分)	(kw)	(kw・h)	(kw・h)
	①	②	③=①/60×②	④	⑤	⑥=④/60×⑤	③+⑥
全力運転	278	160	741	278	110	510	1,251
高速運転	0	123	0	0	80	0	0
中速運転	0	55	0	0	56	0	0
低速運転	0	6	0	0	38	0	0
停止	0	0	0	0	0	0	0
合計	278		741	278		510	1,251

表-17 作業別に手動で運転状態を切替えた場合における消費電力

運転状態	集塵機			送風機			機器合計	
	稼働時間	稼働動力	消費電力	稼働時間	稼働動力	消費電力	消費電力	
	(分)	(kw)	(kw・h)	(分)	(kw)	(kw・h)	(kw・h)	
	①	②	③=①/60×②	④	⑤	⑥=④/60×⑤	③+⑥	
全力運転	123	160	328	123	110	226	554	換気待ち・ずり出し・吹付け
高速運転	0	123	0	0	80	0	0	
中速運転	18	55	17	18	56	17	33	建込
低速運転	130	6	13	130	38	82	95	穿孔装薬・ロックボルト
停止	7	0	0	7	0	0	0	点火前停止
合計	278		358	278		325	682	

表-18 運転管理状態別の消費電力の比較

運転内容	比較Ⅰ		比較Ⅱ	
	集塵機+送風機 (kw・h)	消費電力 比率	送風機のみ (kw・h)	消費電力 比率
新技術	457	1.0	210	1.0
常時全力運転	1,251	2.7	510	2.4
作業別運転	682	1.5	325	1.5

表-19 1000m級トンネルを想定した場合の電力使用料金の低減予測
1000m級のトンネルを施工した場合の電力料金（使用料金）の比較：1000サイクルとする

運転内容 (集塵機+送風機)	1サイクル当りの消費電力	1000サイクル当りの消費電力	使用料金単価	電気料金	低減額
	(kw・h)	(kw・h)	(円/kw・h)	(円)	(百万円)
	①	②=①×1000	③	②×③	-
新技術	457	457,033	16	7,312,533	0
常時全力運転	1,251	1,251,000	16	20,016,000	13
作業別運転	682	682,133	16	10,914,133	4

表-20 1000m級トンネルを想定した場合のCO₂削減量の予測

運転内容 (集塵機+送風機)	1サイクル当りの消費電力	1000サイクル当りの消費電力	電力換算係数	CO ₂ 排出量	削減量
	(kw・h)	(kw・h)	(t-CO ₂ /kw・h)	(t-CO ₂)	(t-CO ₂)
	①	②=①×1000	③	②×③	-
新技術	457	457,033	0.00057	261	0
常時全力運転	1,251	1,251,000	0.00057	713	453
作業別運転	682	682,133	0.00057	389	128

5. おわりに

山岳トンネルの施工では、地山掘削作業や吹付コンクリートの吹付作業、ずり出しダンプの往来等によって多くの粉じんが発生するとともに、有害ガスの発生や坑内温度の上昇に伴う熱中症のリスクなど、坑内環境の管理が重要となる。通常、これらの管理は現場職員が日常管理として定期的に各種計測機器を使用して計測し、その結果をもとに送風機や集塵機等の作動設定を変更することから、多くの時間と労力が必要になるとともに、刻一刻と変化する坑内環境の中で対応の遅れによる環境悪化の危険性も発生する。

これに対する対策の一つとして粉じん濃度や有害ガス濃度、坑内温度等の各種坑内環境に関するデータを坑内に設置したセンサによってリアルタイムに自動計測し、あらかじめ設定した基準値の範囲に自動制御することが可能な「坑内環境一元管理自動制御システム」を紹介した。これは以下に示す特徴を持つものである。

● 坑内環境項目の任意設定

- ▶ 環境管理項目として、粉じん濃度、坑内風速、坑内温度、メタン濃度等の有害ガス、坑外へ漏出する浮遊粒子状物質など、坑内環境の管理として必要な項目を任意に設定可能である。
- 坑内環境項目の計測と制御の自動化
 - ▶ 環境管理項目に対応した計測機器を坑内各所（切羽付近や坑口付近など）に設置し、自動計測を行う。計測した値があらかじめ設定した基準値の範囲内になるように、送風機や集塵機等を設定した数段階のレベルに自動稼働させることで坑内環境を制御する。
- 坑内環境の一元管理
 - ▶ これら一連の作業はすべて一元化された自動制御により、迅速な対応によって坑内環境悪化を回避し、日常管理作業の効率化を図る。
- 坑内環境のリアルタイムモニタリング
 - ▶ 坑内環境の状況は、現場事務所や本支店及びシステムメーカーでモニタリング可能で、情報を共有す

ることで、計測・制御機器の不具合に対して速やかに対応できる。

その結果、本システムの適用によって、坑内作業員の労働環境の常時改善や職員の管理業務の効率化、また消費電力の低減や健康リスク軽減も期待できることを実証トンネル現場において確認できた。

さらなる改善としては、トンネル延長が長くなればなるほど切羽後方の作業場所（インバートや覆工）において発生する粉じんや、ダンプと生コン車の走行に伴う巻き上げ粉じんが坑口側へ広範囲にわたって拡散していくことに対する対策も必要であると考える。このように切羽より遙か後方で発生した粉じんは通常、送風機の希釈・排出の機能により除去しているが局所集塵機を発生源近傍に追加配備し、一元管理システムによって制御運転することで効率的に捕集除去できると考える。

参考文献

- 1) 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」 2012.3
- 2) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 「土木関係積算標準・積算要領 6-3(開削・トンネル編)平成 26 年度版」 2014.8.27
- 3) (社)日本建設業連合会 鉄道工事委員会 「山岳トンネルの換気設備に関する調査検討報告書」 2012.4