

電気集じん機を用いた坑内集じんシステムの開発

浜田 元* 萩森健治** 阿久津秋秀***
茂木正史**** 畑山栄一*****

1. はじめに

山岳トンネルや立坑の施工では、発破の後ガス、削岩時やコンクリート吹付け時の粉じん、工事用車両から排出される煤じんによって坑内の空気が汚染される。坑内労働者の健康障害防止を図るため、坑内の作業環境を改善し、より良好な状態とすることが重要な課題である¹⁾。また、最近では、環境保全への意識が高まる中、坑内の粉じんや煤じんを含む空気（含じん空気）を坑外へ排出しない対策の必要性も増加している。

平成12年12月には、粉じん障害防止対策の一層の充実を図ることを目的として、旧労働省により、“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”²⁾（以下、ガイドラインと呼ぶ）が策定された。本ガイドラインでは、粉じん対策に関する実施事項、粉じん濃度の計測位置・時間・方法なども具体的に示された。また、粉じん濃度目標レベルを $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下にすることが規定され、目標レベルを超える場合には改善措置を講じることが必要とされている。

作業環境の改善措置として、換気設備を大型化し換気風量を増加する方法が考えられるが、設備費、電力費、維持管理費などのコストが増大し、経済性の面で問題がある。また、含じん空気を坑外へ排出することになるため、坑口周辺環境に対する負荷が懸念される。

そこで、筆者らは、供用中のトンネルで実績のある電気集じん技術³⁾に着目し、この技術を応用したトンネル工事用電気集じん機を開発した⁴⁾。トンネル工事用電気集じん機は処理風量 $2,000\text{m}^3/\text{min}$ で4t車に搭載可能であり、軽量・コンパクトな大風量機器である。また、

移動やメンテナンスが容易で、消費電力も比較的小さく、高い集じん性能を有す。

本稿では、まず、開発したトンネル工事用電気集じん機の概要を述べる。次に、導入現場で実施した集じん効果の検証と切羽近傍での集じん試験について結果を報告する。

2. トンネル工事用電気集じん機

2.1 集じん原理

電気集じん機の集じん原理を図-1に示す。同図の集じん機に吸引される空気中の粉じんや煤じんが帯電して集じん極板に付着する。

帯電部では放電線に高電圧を印加し、コロナ放電空間を形成する。含じん空気がこの空間を通過する時に空気中の粉じんや煤じんが帯電する。次の集じん部では荷電極板に高電圧を印加し、荷電極板と集じん極板との間に電界空間を形成する。帯電した粉じんや煤じんはクーロン力を受けて集じん極板上に捕集される。

2.2 構造と特長

電気集じん機の構造を図-2に示す。帯電部と集じん部が独立した2段方式で、帯電部では放電線と接地極板が、集じん部では荷電極板と集じん極板が、空気の流れに対し垂直面上にそれぞれ交互に一定間隔で配置されている。

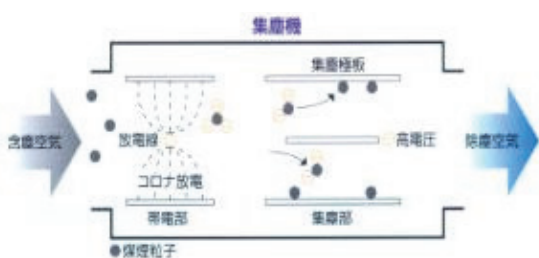


図-1 集じん原理

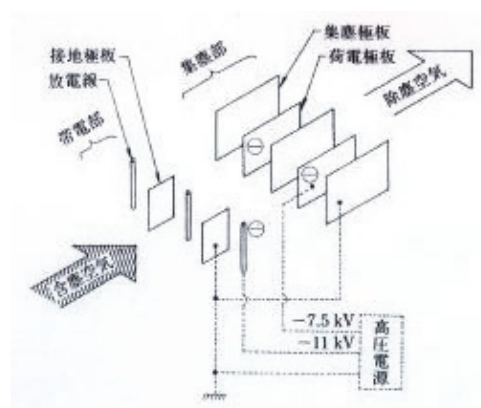


図-2 電気集じん機の構造

*地盤研究室 **本社土木部 ***技術開発部 ****環境研究室 *****機電研究室

電気集じん機は、内部の極板が平行平板構造であるため空気の流れがスムーズであり、圧力損失が小さく風速が9～10m/sec と非常に大きくても高い集じん効率が維持されることが特長である。また、粒径7～10 μ m以下の浮遊粒子（煤じん）に対し集じん効率が高いことも特長の一つである。

2.3 車載型電気集じん機

電気集じん機の外形図を図-3に、諸元を表-1に示す。電気集じん機は処理風量が2,000m³/minであり、4tトラック（ロングボディ）に搭載可能な大きさと質量である。集じん機本体、送風機（ファン）、高圧発生盤、制御盤、ダクトなどで構成され、除電フィルタ、サイレンサ、自動洗浄ノズルなどが標準装備されている。

除電フィルタは、電気集じん機から吐出される除じん空気の電荷を除去し静電気による悪影響を防止する。帯電した空気中の粉じんが二次覆工などに付着し汚れを生じることが懸念されたが、除電フィルタによりこの影響を防止できる。

電気集じん機は、極板および放電線により粉じんを帯電・捕集するため、極板などの定期的な洗浄が必要となる。洗浄は機能保持のため1日1回程度が必要となり、洗浄時間は洗浄後の乾燥も含めて約50分である。なお、洗浄はボタン操作による自動洗浄機能で行う。洗浄水には外部からの供給水を使用し、洗浄後の排水は電気集じん機下部の排水口より機外に排出し、坑外の濁水処理設備で処理する。

2.4 電気雷管への影響

電気集じん機の現場適用に際し、人体に帯電する静電気や漏洩電流によって電気雷管が誤爆することが心配された。静電気ハンドブック⁵⁾によれば、作業者の帯電量は最大で静電容量160pFであり帯電電位は約10kV程度とされている。一方、電気雷管はJIS規格⁶⁾により2,000pFのコンデンサーに8kVで蓄えた電荷を一斉に放電しても爆発せず、またDC100Vで0.25Aの電流を30秒間流しても爆発しないよう設計されている。したがって、電気集じん機の適用で人体に静電気が帯電しても電気雷管が爆発することはない。また、漏洩電流に対しては、ドリルジャンボや吹付け機などと同様、確実に接地し漏電遮断器を設けることで安全性を確保できる。

3. 集じん効果の現場検証

3.1 現場概要と換気方法

電気集じん機を導入したトンネル現場は延長1,499m、掘削断面積60～83m²の2車線道路トンネルである。発破掘削によるNATMで施工されており、地質は新第三紀中新世の玄武岩、粗面岩が主体で構成されている。

同トンネルは、坑口周辺に民家が密集し、茶畑が比較的近くに存在することから、粉じんを含む汚染空気を坑

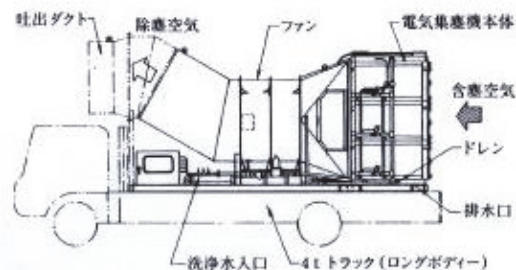


図-3 トンネル工事用電気集じん機

表-1 電気集じん機の諸元

処理風量	2,000m ³ /min
全幅 W	2,285mm
全長 L	6,000mm
全高 H	2,650mm
重量	約5,700kg
電源容量 (50/60Hz)	3相 3線 400V系
消費電力	42Kw
送風機仕様	1段軸流式
集塵機仕様	2段式電気集塵 (放電線式)
洗 浄	洗浄頻度: 1日1回
	洗浄時間: 約50分/回
	必要水量: 約2m ³ /回 供給圧力: 0.5～0.9MPa
付属機器	除電フィルタ、サイレンサ他

口から排出することには問題があった。また、坑内では、覆工コンクリート作業が掘削作業と同時に並行で行われるため、覆工コンクリートの作業環境を良好な状態とすることが課題となった。そこで、同トンネルでは電気集じん機が導入され、上記課題の解決が図られた。

同トンネルでは、坑内換気に風管換気法による送気式が採用された。換気設備は、送風量1,500m³/minのコントラファンと直径1,300mmの風管が使用された。風管はトンネル右肩部に配置され、吹出口が切羽後方40～50mを確保するよう切羽の進行に応じて延伸された。電気集じん機は処理風量2,000m³/minの車載型が導入された。トンネル左側に配置され、吸込口を切羽側とし、切羽後方70～100mの位置を確保するよう切羽の進行に応じて移動された。なお、文中の左右は切羽を臨む状態での表記である。

3.2 計測の概要

電気集じん機による集じん効果の検証を目的に、同トンネルで風向風速、粉じん濃度および集じん効率に関する計測を実施した。

風向風速および粉じん濃度は、トンネル軸方向に中央・左右の3測線を設け5～10m間隔を基本に計測した。なお、左右の測線は中央からの離隔が2.5mと設定した。

風向風速の計測は施工中の実施が難しいため休工日に実施した。計測は掘削路盤を基準に高さ1mと3mで行

い、計測時間は各々の計測点で 30 秒間とした。計測機器は 3 次元超音波式風向風速計 (KAIJO 製マイクロソニック WA-590) を使用した。

粉じん濃度の計測はコンクリート吹付け時を対象に実施した。計測は掘削路盤を基準に高さ 1m で行い、各計測点での 1 回の計測時間は 1 分間、各計測点の計測回数は 3~4 回とした。計測機器は光散乱式デジタル粉じん計 (柴田科学製 P-5L2 型) を使用した。なお、デジタル粉じん計 P-5L2 型はガイドラインで指定の機器である。

集じん効率は電気集じん機の吸込口とダクト吐出口で計測された粉じん濃度をもとに次式により算出する。計測機器には光散乱式デジタル粉じん計 (柴田科学製 AP-632T 型) を使用し、計測はコンクリート吹付け作業中、連続して行った。

集じん効率 (%)

$$= [1 - \text{吐出側粉じん濃度} / \text{吸込口粉じん濃度}] \times 100$$

3.3 計測結果および考察

a. 風向風速

集じん機稼動時の風向風速分布を図-4 に示す。同図は高さ 3m と 1m の水平断面での分布であり、集じん機は切羽後方 110m 地点に配置している。

同図から、いずれの高さでも集じん機周辺では切羽側に向う空気の流れが確認でき、最大風速は約 2.0~3.0m/sec である。集じん機を基点とした渦流が形成されていると考えられ、渦流の形成範囲は概ね集じん機の前方 20m から後方 40m の区間と思われる。

渦流の形成により、集じん機に吸引されず通過した含じん空気や除じん空気の一部が切羽側へ戻り、再度集じん機に吸引されると考えられる。この効果により、粉じんの捕集効率が高まるものと思われ、また渦流が一種のバリアとなり含じん空気が坑口側へ流れるのを防止すると考えられる。

b. 粉じん濃度

コンクリート吹付け時の粉じん濃度分布を図-5 に示す。集じん機は切羽後方 100m 地点に配置している。同図には、集じん機稼動時の結果と換気ファンをみの結果をあわせて示した。

粉じん濃度は、計測断面ごとの平均濃度であり、相対濃度で示された計測値に質量濃度変換係数を乗じて算出した。なお、質量濃度変換係数はガイドラインで規定された数値 (K=0.04) を用いた。

同図より、集じん機稼動時の粉じん濃度は集じん機後方で 1.0~1.5mg/m³ となっている。また、換気ファンのみと比べて 1.5~3.0mg/m³ ほど低い濃度を示し、集じん機の稼動により 25~50% の濃度にまで低減されたと考えられる。

c. 集じん効率

集じん効率の計測結果を図-6 に示す。同図はコンクリート吹付け時間中の連続計測の結果で、計測時間は約

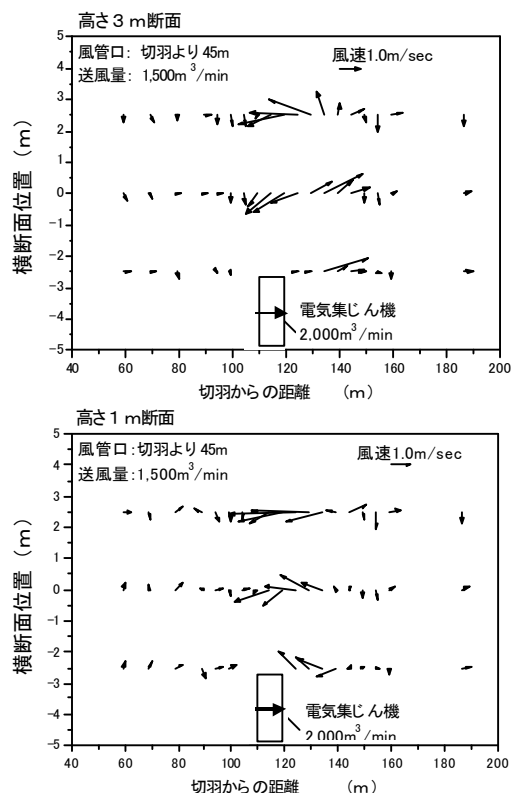


図-4 風向風速の計測結果

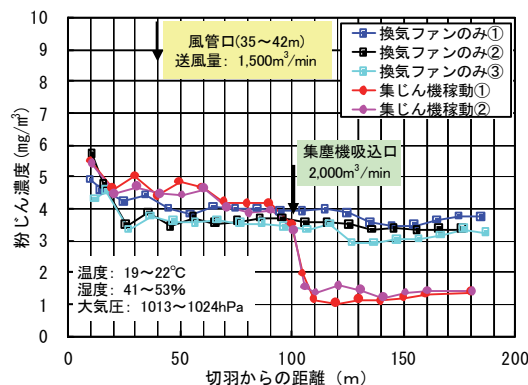


図-5 粉じん濃度の計測結果

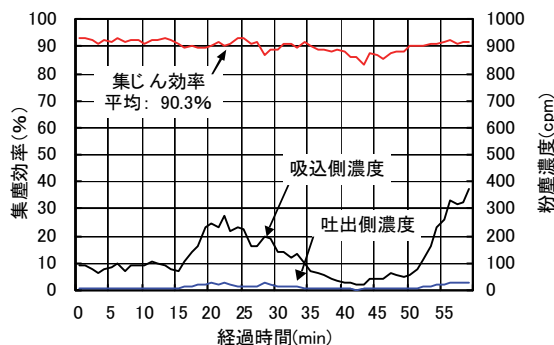


図-6 集じん効率の計測結果

60 分間である。同図より、集じん効率は平均で約 90% であり、集じん機器として高い性能を有することを確認した。

4. 切羽近傍での集じん試験

4.1 概要

坑内労働者の粉じん障害防止対策を一層充実するためには、粉じん発生源近くでの効果的な希釈や集じん方法、粉じん発生量のさらなる抑制方法の開発が望まれる。

トンネル工用電気集じん機は先述のとおり、粉じんを効果的に捕集できることが実証できた。また、同集じん機は、大風量機器でありながら軽量・コンパクトな車載型であるため、坑内の占有領域が比較的小さく、移動も比較的容易であるといった特長を有している。そこで、発生源近くでの効果的な集じんに同集じん機が適用できるのではないかと考え、その可能性を現場試験（切羽近傍集じん試験）により検討した。

ここでは、切羽近傍集じん試験の結果をもとに、ガイドラインの管理目標レベルが達成できるのか、切羽近傍の環境が改善できるのかという観点から、適用の可能性を評価した。

4.2 気流解析による予測

a. 気流解析の概要

現場試験に際し、切羽近傍集じんの際の風向風速分布および粉じん濃度分布を予測するため、気流解析を行い、集じん効果を検討した。

気流解析には汎用熱流体解析プログラム Stream Ver. 2.9（ソフトウェアアクレイド社製）を用いた。先述の適用現場を対象に解析モデルを設定し、電気集じん機の設置地点をパラメータとして解析を行った。

解析モデルを図-7 に示す。解析モデルは切羽近傍集じんの効果が把握しやすいようできるだけ簡素化した。モデル化では、坑内にある重機類は考慮せず、また集じん効率は 100% とした。

解析モデルは、断面積 64m²、延長 200m のトンネル対象領域を総数 217,672 要素で構成した。物性には、空気密度 1.2kg/m³、粘性係数 1.86kg/m、粉じん拡散係数 1.0×10⁻¹⁰m²/sec を用い、K-ε モデルによる非定常解析を行った。

解析では、切羽から 0.5m 後方までの空間を粉じん発生源の領域と仮定し、粉じん発生量はコンクリート吹付け時を想定して 10mg/m³・sec と設定した。コンクリート吹付け時の粉じん濃度は、数現場での計測結果によれば、換気ファンから新鮮空気が切羽に供給される場合でも、切羽付近で 5~10mg/m³ 程度である。解析で用いた粉じん発生量はこの計測値を参考に設定した。

換気ファンの送風量および集じん機の処理風量は対象現場と同様、1,500m³/min および 2,000m³/min とした。

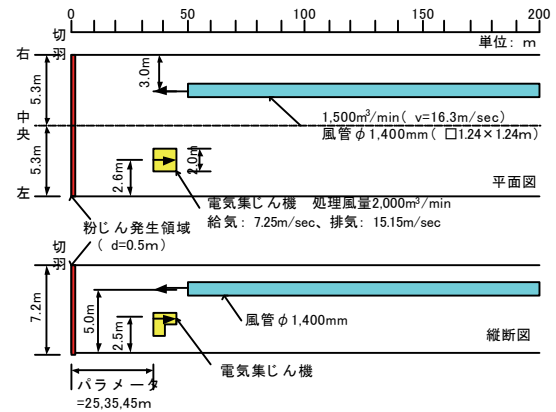


図-7 解析モデル

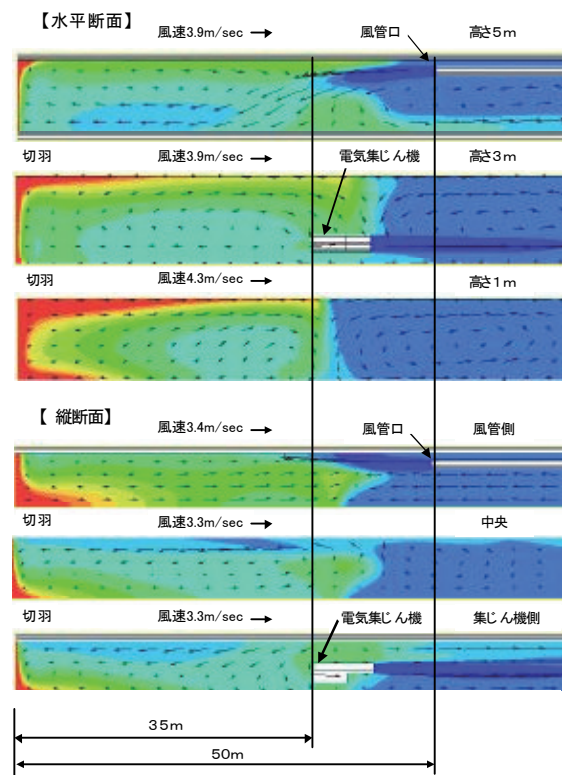


図-8 風向風速の解析結果

解析における風量の設定は風管吹出口、集じん機吸入口・吐出口の風速で規定し、坑口部分は自然流入・流出の条件とした。

b. 解析結果および考察

(a) 風向風速

風向風速分布の解析例を図-8 に示す。同図には集じん機を切羽後方 35m 地点で稼働した際の結果を示した。同図は水平断面（高さ 5m、3m、1m）と縦断面（中央と左右）の結果である。

同図より、風管から吹出した新鮮空気が左側（集じん機側）に引き寄せられ切羽へ流れる様子がみられる。切羽に到達した空気は切羽で右下向きに流れを変え、右側

(風管側)で坑口方向に向かい流れている。また、空気の流れは集じん機を境に異なる分布を示している。高さ1mの水平断面や中央の縦断面などの結果では、集じん機の前後で相対する空気の流れがみられ、集じん機を基点とした8の字型循環流の形成が推察される。

8の字型循環流の形成により、切羽からの含じん空気が集じん機に吸込まれ処理されるとともに、風管からの新鮮空気と集じん機後方から戻る除じん空気により粉じんが希釈され、切羽近傍の粉じん濃度が低減すると予想される。また、切羽からの含じん空気が坑口側へ流れることを防ぐ効果も期待できるとされる。

(b) 粉じん濃度

粉じん濃度分布の解析結果を図-9に示す。同図は集じん機を切羽後方25m、35m、45m地点で稼動した際の結果であり、換気ファンのみ結果もあわせて示した。なお、同図の粉じん濃度は横断面ごとの平均濃度である。

同図より、集じん機稼動時の粉じん濃度はいずれの場合も換気ファンのみと比べ低い値となった。集じん機稼動時の粉じん濃度は集じん機後方の50m地点で $1.0\text{mg}/\text{m}^3$ 以下である。換気ファンのみと比べて $2.0\text{mg}/\text{m}^3$ ~ $2.5\text{mg}/\text{m}^3$ ほど低い濃度を示し、集じん機の稼動により20~30%の濃度にまで低減されることが予想される。

集じん機前方の20m地点において、集じん機稼動時の粉じん濃度は $2.0\text{mg}/\text{m}^3$ 前後である。換気ファンのみと比べて $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ ほど低い濃度を示し、集じん機の稼動により約70%の濃度にまで低減されることが予想される。

気流解析を用いて切羽近傍集じんの際の風向風速分布と粉じん濃度分布を予測し効果を検討した結果、切羽近傍集じんが粉じん濃度の低減に効果的に寄与する可能性が示された。

4.3 試験方法

切羽近傍集じん試験は、先述の集じん効果の現場計測後、同トンネルで引続き行った。切羽近傍集じん試験は集じん機を切羽後方20~35m地点のトンネル左側に配置し吸込口を切羽側として実施した。換気条件は先に記載の条件と同様であり、送風量は $1,500\text{m}^3/\text{min}$ 、風管の吹出口は切羽後方40m前後であった。

切羽近傍集じん試験はコンクリート吹付け時を対象に実施した。試験時の計測は風向風速、粉じん濃度について行い、計測方法や計測機器は集じん効果の計測時に準じた。試験状況を写真-1に示す。

4.4 試験結果

a. 風向風速

風向風速分布の計測例を図-10に示す。同図には集じん機を切羽後方35m地点で稼動した際の結果を示した。同図は高さ3mと1mの水平断面での分布である。

同図より、切羽近傍の風向風速は著しい変化を示し複雑な分布となった。風管からの吹出風と集じん機が形成

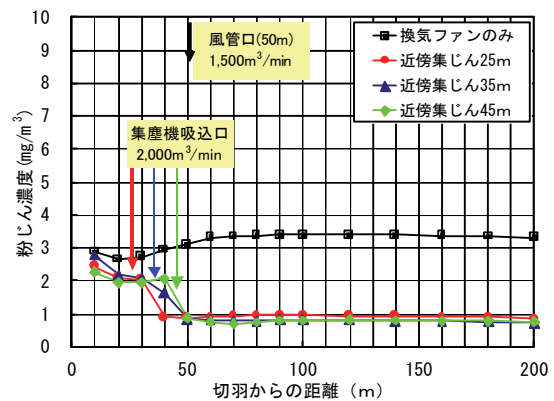


図-9 粉じん濃度の解析結果



写真-1 試験状況

する風が互いに影響し複雑な分布になったと考えられる。切羽から後方20m付近までの区間では左側に向う空気の流れが支配的で最大風速は約 $2.5\text{m}/\text{sec}$ である。切羽後方20m付近から55m付近(集じん機後方約10m)までの区間では、切羽側と坑口側に向う空気の流れが混在し隣接地点で風向の逆転がみられる。また、風速も 0.3 ~ $6.0\text{m}/\text{sec}$ の範囲で著しく変化する。

同図より、気流解析でみられた8の字型循環流状の特徴的な風向風速分布は認められない。切羽近傍集じんでは、切羽、風管、集じん機のそれぞれの位置関係や送風量、集じん処理風量の関係など、いくつかの要因が関係して風向風速は複雑な分布を示し、気流解析のような特徴的な分布とはならなかったと思われる。

b. 粉じん濃度

コンクリート吹付け時の粉じん濃度分布を図-11に示す。同図は集じん機を切羽後方36m地点で稼動した際の結果である。また、同図には換気ファンのみ結果もあわせて示した。

同図の粉じん濃度は計測断面ごとの平均濃度である。計測値にガイドラインで規定の質量濃度変換係数($K=0.04$)を乗じて算出した。

同図より、集じん機稼動時の粉じん濃度は換気ファンのみと比べ低い値となった。集じん機稼動時の粉じん

濃度は集じん機後方の 50m 地点で $2.0\text{mg}/\text{m}^3$ 以下となった。換気ファンのみと比べて $2.0\text{mg}/\text{m}^3$ ほど低い濃度を示し、集じん機の稼動により約 50%の濃度にまで低減されたと考えられる。切羽近傍集じんにより、ガイドラインの目標レベル ($3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下) を達成できることが確認できた。

集じん機前方の 25m 付近において、集じん機稼動時の粉じん濃度は約 $2.5\text{mg}/\text{m}^3$ である。換気ファンのみと比べて $1.0\text{mg}/\text{m}^3$ ほど低い濃度を示し、集じん機の稼動により約 70%の濃度にまで低減されたと考えられる。また、切羽から 25m までの区間では、集じん機を稼動した方が粉じん濃度の低下勾配が大きくなった。切羽近傍集じんにより、集じん機前方の切羽側でも粉じん濃度の低減がみられ、切羽近傍における電気集じん機の有効性が確認できた。しかし、切羽に最も近い 10m 地点では、集じん機を稼動しても換気ファンのみとほぼ同値 ($6.0\text{mg}/\text{m}^3$ 前後) の粉じん濃度となり、今後課題が残された。

同図の粉じん濃度を気流解析と比較したところ、粉じん濃度の値自体は多少異なるものの、分布傾向は比較的類似すると思われる。風向風速の計測結果は解析結果のような特徴的な分布とはならず、今後課題が残るものの、気流解析は効果的な坑内換気・集じん方法のシステム化を図るうえで有効な手法であることが示された。

5. おわりに

トンネル工事用電気集じん機は、坑内の作業環境の改善および坑口周辺環境への負荷低減に有効であることが確認できた。また、粉じん発生源近くにおける効果的な集じん方法として、トンネル工事用電気集じん機を適用できることがわかり、ガイドラインの粉じん濃度目標レベルを達成できることを確認した。また、集じん機前方の切羽側でも粉じん濃度を低減できることを確認した。今後は、現場展開をさらに進め、効率的な集じん方法のシステム化や適用場面の拡充、集じん性能の一層の向上など、残された課題の解決に努めたい。なお、本開発は松下精工(株)、(株)エムシーエムとの共同研究の成果である。最後に、本開発にあたり終始ご指導いただいた(株)コンテクの定塚正行社長、ならびに現場試験にご協力をいただいた工事所の関係各位に感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1) 建設業労働災害防止協会、「ずい道工事等における換気技術指針（設計及び保守管理）」、1997. 6
- 2) 厚生労働省環境改善室・建設業労働災害防止協会、「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の解説」、2001. 3
- 3) 井伊谷鋼一、「集じん装置の性能」、産業技術セン

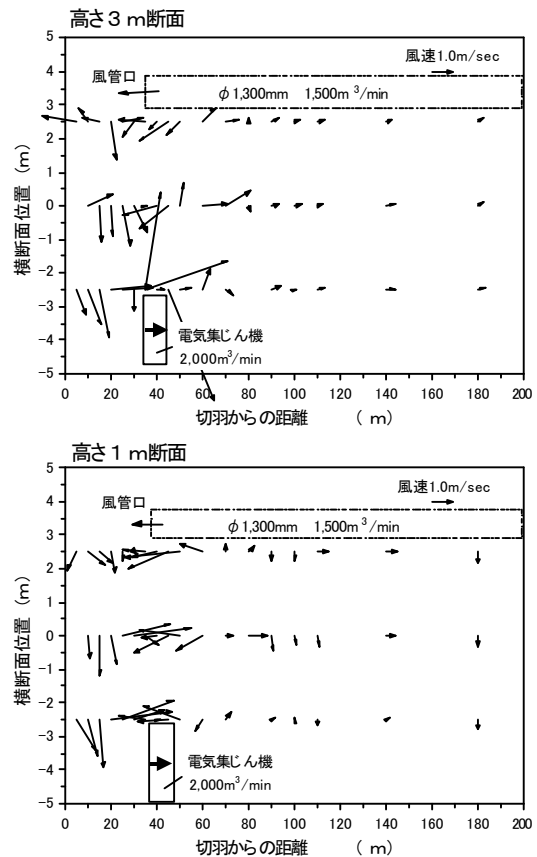


図-10 風向風速の計測結果

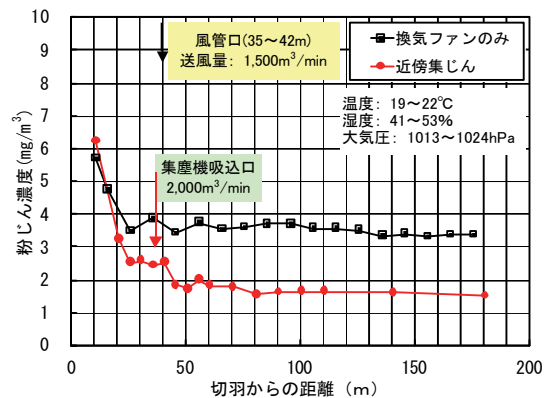


図-11 粉じん濃度の計測結果

ター、1976. 10

- 4) 萩森健治・酒井喜久雄・片谷篤史・村中浩昭、「車載型電気集じん機を用いたトンネル工事換気システムの開発」、建設の機械化 No. 608、pp. 21～27、2000. 10
- 5) 静電気学会編、「静電気ハンドブック」、オーム社、1998. 11
- 6) J I S K 4807、電気雷管