

3次元流体解析による 多点・多頻度粉じん濃度測定のプロ案

掛谷 幸士朗¹・林 久資²・進士 正人³

¹学生会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: b012ve@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 山口大学大学院 助教 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

³フェロー会員 山口大学大学院 教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

山岳トンネルの建設現場では、浮遊粉じんの少ないより良好な施工環境の構築のため、多様な換気システムが提案されている。そのため、トンネル坑内の浮遊粉じんの濃度分布は多様化に対応し、粉じん障害防止規則及び労働安全衛生規則の一部の改正が予定されている。本研究では、流体解析によりトンネル建設中の坑内の気流・粉じん濃度分布の3次元数値シミュレーションを実施し、換気方式の違いによる粉じん濃度分布の差異を明らかにする。そして、著者らが開発した小型で安価な粉じん測定器を用いたトンネル坑内における多点かつ多頻度の粉じん濃度測定を提案する。

Key Words: floating dust, tunnel ventilation, numerical analysis, tunnel worker safety

1. はじめに

山岳トンネルの建設時に発生する浮遊粉じんには掘削作業、ずり積み・ずり運搬作業などから発生する地山発生源の掘削粉じんや、コンクリートの吹付け作業から発生する吹付けコンクリート粉じん、ダンプトラックなどの内燃機関エンジンから発生する排気粉じんなどがある。これらの発生粉じんの多くは気管支の粘膜で覆われた線毛に付着し、線毛運動により体外に排出される。しかし、 $10\mu\text{m}$ 以下の粉じんは排出されず、特に $4\mu\text{m}$ 以下の吸入性粉じんは肺胞内に滞留し、やがて肺胞を充填する。そのため、場合によっては、じん肺症を引き起こす原因物質とし、非常に問題視されている。そこで、厚生労働省では平成12年に「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」を改正し、管理者に対し、換気装置等による換気の実施や、粉じん濃度の測定を義務づけている¹⁾。

従来のガイドラインに準拠したトンネル坑内の粉じん濃度測定は、切羽から坑口に向かって50m程度離れた断面において半月以内ごとに1回、粉じん濃度目標レベル $3\text{mg}/\text{m}^3$ を超えるか否かで評価が行われてきた。しかし、図-1に示すように、現在では山岳トンネル建設時に

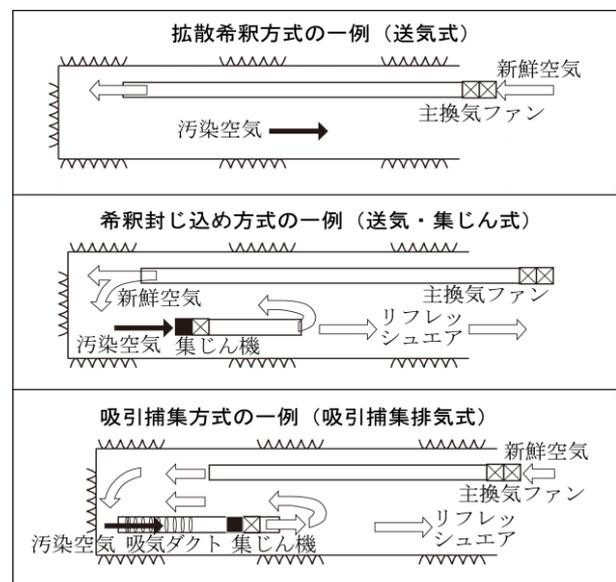


図-1 代表的な坑内換気方式²⁾

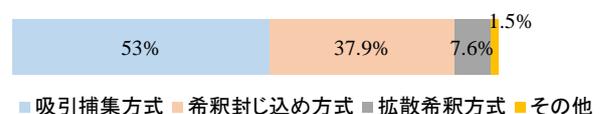


図-2 換気方式の採用率³⁾

おける換気には様々な換気方式が提案されており、特に、集じん機と吸引ダクトを組合せた吸引捕集方式が主流になりつつある（図-2参照）。そのため、トンネル坑内の高濃度粉じん箇所は換気方式により異なる可能性がある²⁾。

換気方式の多様化に合わせて、多様化した換気方式への考慮や粉じん濃度目標レベルの適切な設定のため、粉じん濃度を適切に測定・評価し、安全な労働環境を整備していくことが重要であり、そうした中で、粉じん障害防止規則及び労働安全衛生規則の一部の改正が行われ、令和3年4月1日より施行されることとなった。この改正により、粉じん濃度目標レベルは $3\text{mg}/\text{m}^3$ から $2\text{mg}/\text{m}^3$ とより厳格になり、粉じん濃度測定は以下に示すいずれかの方法により、半月以内に1回定期に行うとされた。

- ① 定点測定（3断面トンネル両側、計6点）
- ② 個人サンプリングによる測定
- ③ 車両系機械を用いた測定
- ④ 複数の測定の組合せ

これらの測定に対応するために、トンネル建設中の粉じん濃度を多点多頻度で測定し、濃度分布を把握することができれば、効率の良い換気手法の選定や、換気装置の小規模化ならびに運転時間の短縮となり、トンネル施工時の省エネルギー化にも寄与できる可能性が考えられる。そこで、著者らは各換気方式により坑内の気流や高濃度粉じん箇所が異なることを流体解析ソフト（ANSYS Fluent）による数値シミュレーションで明らかにし、多点測定の有効性について検証した。また、多点測定を実現するための測定方法の一つとして簡易測定器を開発し、その適用性と安定性について検討した。

2. 解析的手法による換気方式ごとのトンネル坑内の粉じん挙動の解明

この章では、山岳トンネル建設に伴い切羽から発生する粉じんと、換気システムによってトンネル坑内に生じる空気の流れに注目し、換気方式ごとの違いを流体解析による3次元数値シミュレーションで明らかにする。

(1) 流体解析の概要

a) 解析対象モデルについて

山岳トンネルの建設時には、掘削作業、コンクリート吹付けやダンプトラックの排気ガスなどの作業から、性質・形・粒径の異なる多様な粉じん粒子が発生する。このうち、粒径が $10\mu\text{m}$ 以下の粒子が咽頭通過性粉じん、 $4\mu\text{m}$ 以下の粒子が吸入性粉じんと定義される。そして、この粒子径の違いによって空気中での振る舞い（対流、拡散、衝突）も異なり、坑内の風の流れや障害物の影響

表-1 計算条件

構造	トンネル断面積	54m ²	
	トンネル全長	100m	
	風管直径	1.7m	
物性値	流体(空気)物性		発生粒子物性
	密度	1.2kg/m ³	粒径
	比熱	1006J/kgK	粒子密度
	粘度	$1.8208 \times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$	初期速度
	温度	293K	温度
	圧力	$1.013 \times 10^5\text{Pa}$	流量
境界条件	壁面	速度 粒子の扱い	0m/s 反射
	坑口	ゲージ圧力 逆流の乱流運動エネルギー 逆流の乱流消失率 粒子の扱い	0Pa $1\text{m}^2/\text{s}^2$ $1\text{m}^2/\text{s}^3$ 除外
	送気口	Z方向速度 乱流強度 水力直径	7.34m/s 5% 1.7m
	吸気口	Z方向速度 乱流強度 水力直径 粒子の扱い	-14.68m/s 5% 1.7m 除外
	排気口	Z方向速度 乱流強度 水力直径	-14.68m/s 5% 1.7m

を受け、飛散する距離が異なることが指摘されている⁴⁾。ここでは流体解析を用いて、現在現場で広く採用されている代表的な換気方式ごとに粒子の挙動や坑内の風の流れを示す。モデル化する粉じん粒子の粒径は人体への影響が顕著となる $10\mu\text{m}$ と限定し、トンネル形状や粉じん粒子、換気設備などのモデルや、表-1に示す計算条件は実構造・実現象に対して理想化されたものを用いた。

解析対象・比較対象とした換気方式は、図-1、図-2に示す従来の代表的な換気方式である拡散希釈方式、希釈封じ込め方式、吸引捕集方式である。拡散希釈方式は切羽に向けて新鮮な空気を送気し、希釈することで換気を行うため、坑道全体が汚染空気の通り道となってトンネル全体に粉じんが拡散される可能性がある。そのため、坑内に集じん機を追加し、送気される空気・吸気する空気・排気される空気のバランスから汚染空気を封じ込め、効率よく集じんする希釈封じ込め方式が提案された。さらに、粉じん濃度を効率よく捕集する方式として集じん機に吸引ダクトを付け、切羽付近に吸気口を設ける吸引捕集方式が提案されている。このように現在代表的な換気方式に対して粉じん濃度の分布はそれぞれ異なることが想定されているが、実験や解析などでトンネル坑内の風の流れや粉じんの動きを検討した例は少ない⁵⁾。

b) トンネル構造の数値解析モデルについて

解析で用いた各換気方式のモデルを図-3に示す。切羽-送気口間距離を 30m、風管直径を 1.7m とし、トンネル全長を 100m とした。希釈封じ込め方式では、切羽-吸気

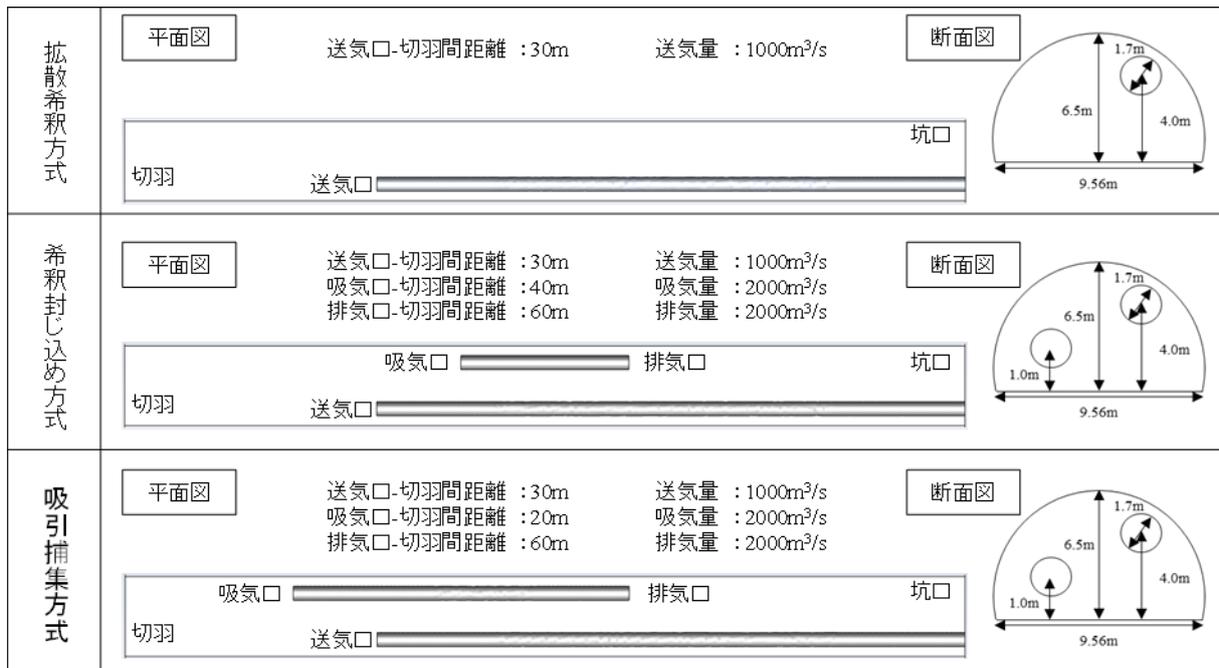


図-3 換気方式のモデル化

口間距離を40m, 切羽-排気口間距離を60m, 吸引捕集方式では切羽-吸気口間距離を20m, 切羽-排気口間距離を60mとした。また, 各換気方式における送気流量・吸気流量・排気流量は, 現状のトンネル建設工事における粉じん濃度, 換気装置の能力や低吹付粉じん添加剤等の取り入れ状況等を調査したアンケート³⁾を参考に設定した(送気流量1000m³/min, 吸気流量2000m³/min, 排気流量2000m³/min)。実現象を再現するために厳密な解析を行う場合, トンネル坑内における障害物の影響は無視できないため, 集じん機本体のモデル化が必要となるが, 本解析の目的は換気方式ごとの粉じんの飛散状態を概ねに把握することであるため, 集じん機本体のモデル化は簡略し, 吸気口に粒子を捕集する境界条件を与え, 風管のみで集じん効果を再現した。計算モデルの要素数・節点数はそれぞれ, 換気方式により異なるが, 要素数約21万, 節点数約5万である。

c) 流体(空気)の計算方法および条件

標準k-ε乱流モデル(Launder and Spalding, 1974)から得られる基礎方程式を, 有限体積法に基づく流体解析ソフトANSYS FLUENTを用いて数値解析した。計算条件を表-1に示す。トンネル坑内の気流について標準k-ε乱流モデルを用いた解析例は多数報告されており, 解析領域の大部分では妥当な結果を与えることがわかっている⁹⁾。少なくとも, 本報告で検討する気流の流れを再現する場合に, 定性的には十分妥当な情報が得られると考えられる。流体(空気)は以下に示す, 標準k-ε乱流モデルの輸送方程式(乱流運動エネルギー方程式と乱流エネルギー消失率方程式(式(1), (2))⁷⁾によって計算した。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_m + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{\epsilon 3} G_b) + C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (2)$$

ここで, k : 乱流の運動エネルギー, ϵ : 乱流消失率, $i, j=1, 2, 3$ (但し x_1 : トンネル断面水平方向 x , x_2 : トンネル断面垂直方向 y , x_3 : トンネル軸方向 z), u_i : 速度成分, μ_t : 乱流粘性係数, ρ : 空気密度, G_k : 平均速度勾配による乱流運動エネルギー, G_b : 浮力による乱流運動エネルギー, Y_m : 全体の消失率に対する圧縮性乱流の変動する膨張の寄与度, $\sigma_k, \sigma_\epsilon$: 乱流プラントル数, S_k, S_ϵ : ユーザー定義関数(本解析では使用せず)である。また渦粘性係数 μ_t は乱流運動エネルギー k と乱流消失率 ϵ から式(3)⁷⁾のように求めた。

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

上記式中のモデル定数には, 標準値 ($C_\mu = 0.09$, $C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2} = 1.92$, $C_{\epsilon 3} = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$)を用いた。空気の物性値は常温, 常圧(293K, 大気圧)時のものとし, トンネル内温度は一様とした。

d) 粉じん粒子の計算方法および条件

粉じん粒子をオイラー・ラグランジュ法に基づくDiscrete Phase Model“DPM”(分散相モデル)で, 第1相の連続相を空気, 第2相の分散相を粉じん粒子と定義し, 流

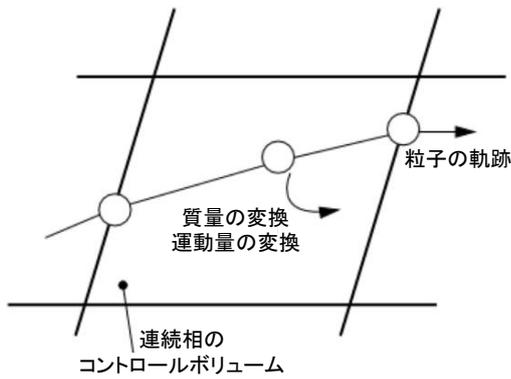


図4 連続相分散相間の質量・運動量の変換
(Two-way coupling model)⁷⁾

体（空気）と同時に計算を行った。オイラー・ラグランジュ法は連続相の中で粒子をラグランジュ的に追跡し、粒子の容積分率が10~12%以下の分散相の場合有効となるモデルである⁸⁾。

粉じんは、建設労働災害防止協会による推定発生量(1.2g~4g/min)⁹⁾を参考にして、切羽面に対応するすべての分割要素から連続的に3g/minの粉じんを発生させた（粒径：10 μ m, 総粒子個数：372個）。発生粒子の物性を表-1に示す。

粉じん粒子の軌跡は粒子に働く力のつり合いから計算される。力のつり合いは、粒子の慣性と粒子に作用する力を等しいと考え、以下の式(4)⁷⁾から計算した。

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (4)$$

ここで、 \vec{u} ：流体の速度成分、 \vec{u}_p ：粒子の速度成分、 \vec{g} ：重力成分、 ρ ：流体密度、 ρ_p ：粒子密度である。 $F_D(\vec{u} - \vec{u}_p)$ は粒子に作用する流体抗力成分を表し、 F_D は式(5)⁷⁾のように定義される。 \vec{F} は追加の加速項であり、本解析では考慮していない。

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \times \frac{C_D Re}{24} \quad (5)$$

ここで、 μ ：粘性係数、 d_p ：粒子直径を表し、 Re は粒子レイノルズ数であり、粒子と流体の相対速度を代表速度として式(6)⁷⁾のように定義される。

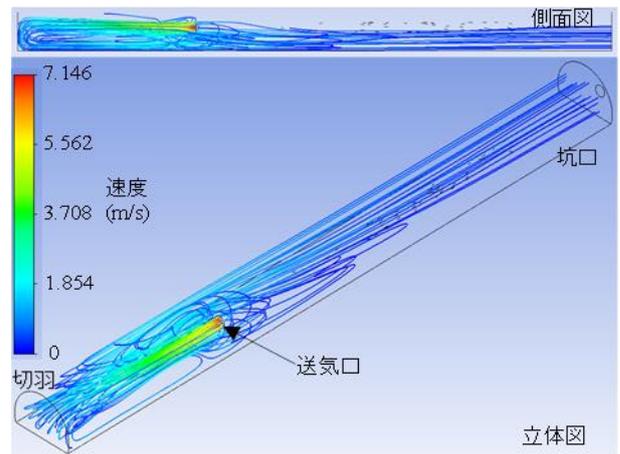
$$Re = \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (6)$$

また、抗力係数 C_D は Re の関数として、以下のように近似した¹⁰⁾。

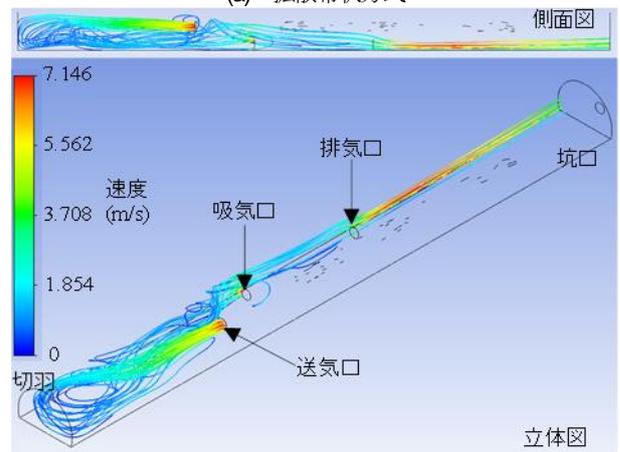
$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (7)$$

但し、 $a_1 \sim a_3$ は平滑な粒子に関して Re の関数として与えられる係数である。

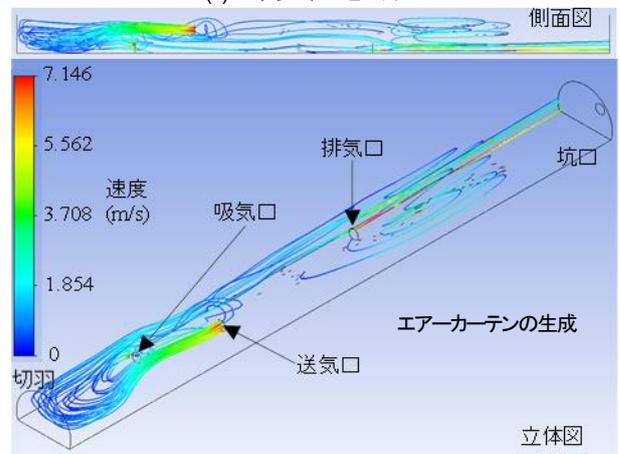
切羽から発生させた粉じんは、同時に計算を行っている流体（空気）の影響を受け、モデル化したトンネル坑内を飛散していく。粒子の飛散によって獲得または失



(a) 拡散希釈方式



(b) 希釈封じ込め方式



(c) 吸引捕集方式

図5 各換気方式の流線

われた質量と運動量を追跡し、これらの量を後続の連続相の計算に組み込み、図-4に示すように、分散相の方程式（粒子）と連続相の方程式（流体（空気））を交互に解いた。このとき分散相から連続相への質量と運動量の変換はそれぞれ式(8)、(9)⁷⁾から計算した。

$$M = \frac{\Delta m_p}{m_{p,0}} \dot{m}_p, 0. \quad (8)$$

$$F = \sum \left(\frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} (u_p - u) + F_{other} \right) \dot{m}_p \Delta t \quad (9)$$

ここで、 \dot{m}_p : 粒子の質量流量, $m_{p,0}$: 粒子の初期質量, $\dot{m}_{p,0}$: 粒子の初期質量流量, Δt : タイムステップ, F_{other} : その他の相互作用力である。

粉じん粒子に関するトンネル壁面の境界条件として、切羽面、側壁、底面を完全反射壁とし、集じん機の吸気口で捕集、あるいは坑口で除外されるまでの粒子運動を解析した。実際には、濡れや表面状態によりトンネル壁面や底面に沈着し、再飛散しない粒子も予想されるが、本解析では沈着する粒子は考慮しない理想化した場合を検討した。

(2) 解析結果および考察

a) 換気方式の違いによる比較

図-5(a)~(c)に、それぞれ、(a)拡散希釈方式、(b)希釈封じ込め方式、(c)吸引捕集方式の送気口を始点とした流線を示す。拡散希釈方式では送気口から切羽に向けて送り出された空気が切羽から跳ね返り、坑口に向かう流れであることがわかる。希釈封じ込め方式と吸引捕集方式では、送気口から送り出された空気が切羽から跳ね返り、吸気される空気と坑口へ向かう空気に分かれていることが確認できる。また、吸引捕集方式では、排気口付近に渦が発生しており、エアーカーテンの発生が確認できる。これらの結果より、換気方式によってトンネル坑内の風の流れは変化することがわかった。

図-6 に各換気方式の高さ 1.5m における断面の粉じん濃度を平面図で示す。粉じん濃度は以下に示す式から計算した。

$$DPM \text{ Concentration} = \frac{m_p \times t_i \times M_p}{m_{tp} \times V} \quad (10)$$

ここで、 m_p : 要素内の平均粒子質量, t_i : 滞留時間, M_p : 全流量, m_{tp} : 流線内の単一粒子の質量, V : 要素の体積である。

この図から、拡散希釈方式では坑口に向かう空気の流れにより切羽から発生した粉じん粒子が飛散し、坑口付近で濃度が高くなる傾向が確認できる。これは、切羽で発生した粉じんが捕集されず坑口まで飛散すること、そして切羽付近は風速が早く、坑口に向かうほど風速が遅くなるのが要因であると考えられる。それに対し、希釈封じ込め方式では、拡散希釈方式に比べ、切羽付近の濃度が高いことが確認できる。これは、送気される空気に加えて、吸気される空気と排気される空気の気流が増えたことで坑内にエアーカーテンを形成し、粉じん粒子を切羽付近に封じ込める効果によるものであると考えられる。一方、吸引封じ込め方式では希釈封じ込め方式よりも吸引ダクトの長さが長く、切羽付近で吸気することから粉じん粒子が集中する箇所を限定することができていることが確認できる。ただし、粒子の一部は捕集さ

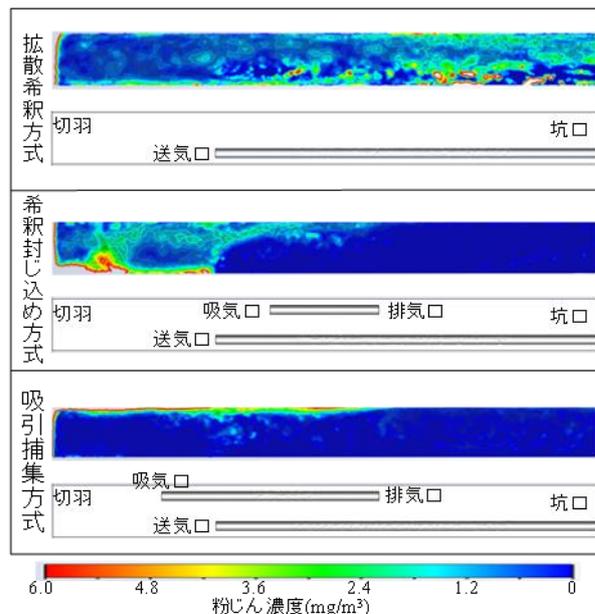


図-6 各換気方式の粉じん濃度

れず、壁面に沿って坑口へ流れていくものも確認できる。これは吸引捕集方式における換気条件（吸引ダクト長さや風量）に依存していると考えられる。

これらの3次元シミュレーションにより、換気方式によってトンネル坑内の気流や高濃度粉じんとなる箇所は変化することがわかった。また同じ換気方式であっても、換気条件が異なれば、トンネル坑内の風の流れや粉じん濃度の分布は変化することが想定される。

以上より、トンネル坑内における粉じん評価を適切に行うには、換気方式に対応したうえで、多点で測定することが有効的であると考えられる。

3. 簡易測定器の多点測定への適用

前章で有効性を示した多点測定を実際のトンネル建設現場で実現するため、この章では、これまで著者らが提案しているトンネル粉じん簡易測定器（以下「簡易測定器」と称す）の概要（センサの測定原理と測定器の構成、粉じん濃度の測定方法）についてまとめる。

(1) 簡易測定器の概要

山岳トンネル建設工事で粉じん測定に使用されているデジタル粉じん計は測定装置内に導入された空気に光を照射した際の散乱光量から相対濃度を求める光散乱方式¹²⁾が用いられている。それに対して著者らが使用する簡易測定器のセンサ（シャープ製 GP2Y1010AU0F）も、同様の測定原理によるものである。図-7に示すように、センサは受光部と発光部から構成され、発光部から赤外発光ダイオードが検出領域に入った粒子に照射されるこ

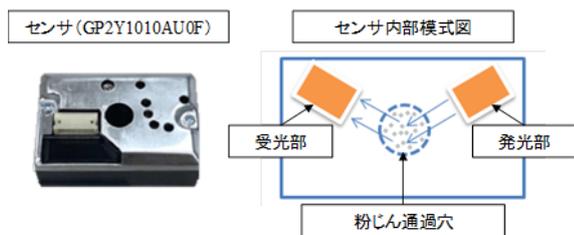


図-7 センサ模式図¹³⁾

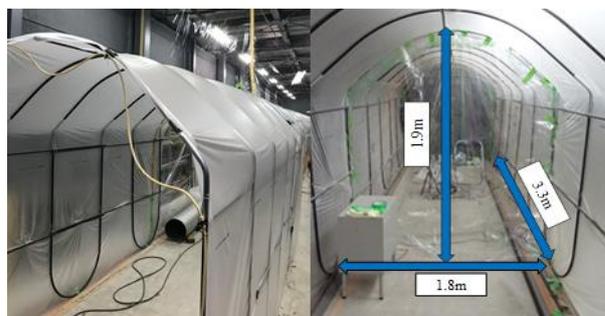


写真-1 中規模室内トンネル施設

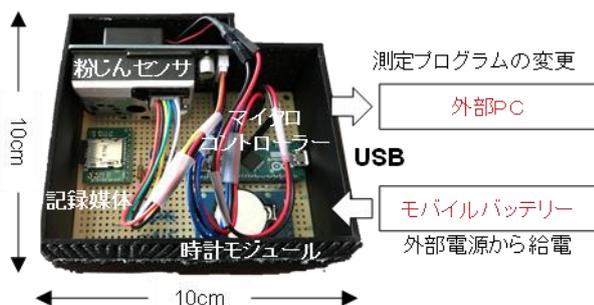
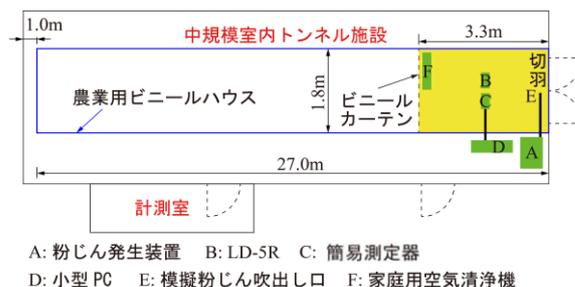


図-8 簡易測定器の構成図



A: 粉じん発生装置 B: LD-5R C: 簡易測定器
D: 小型PC E: 模擬粉じん吹出し口 F: 家庭用空気清浄機

図-9 中規模室内トンネル施設 (平面図)

とで浮遊粉じんによる散乱光が生じ、この散乱光を受光部で受光する。これにより、受光した光量に応じた電圧値が出力される。出力された電圧を、仕様書記載の感度、またはキャリブレーションにより求めた換算式で粉じん濃度に換算することで、粉じん濃度を測定することが可能となる¹³⁾。図-8に示すように、簡易測定器は粉じんを感知するセンサ部、センサを制御するマイクロコントローラ部 (Arduino micro 5V)、データ取得時間を得るための時計モジュール、データを保存する記録媒体などの部品から構成される。電源の供給は外部電源 (モバイルバッテリーなど) から行い、データの取得、プログラムの書き換えは、外部コンピュータから USB 接続で行う。測定器は粉じんによる影響を少なくするためにケース

(10cm×10cm×3cm) 内に収納した。測定器に用いたセンサは、主に一般家庭での花粉やほこりを検出することを想定し販売されているもので、すでに家庭用空気清浄機などに広く採用されている。そのため、残念ながらセンサ本来の使用用途として高濃度下での使用は想定されていない。そこで、著者らは回路内に抵抗を追加し、センサ発光部から照射される光量を低下させ、散乱光の光量を減少させる手法をとった。筆者らが行った既往実験¹⁴⁾にて、10kΩの抵抗を追加した改良後の測定値は10mg/m³まで測定が可能であることがわかっているため、本報告で用いた簡易測定器には10kΩの抵抗を挿入して実験に用いた。

4. 簡易測定器のトンネル坑内における測定有効性の検証実験

この章では、開発した簡易測定器がトンネル坑内 (実現場) での計測に適したのか否かを模擬トンネル実験で検証するとともに、高濃度粉じん環境下における継続測定により、センサ内部に付着する粒子 (汚れ) の影響と簡易測定器の個体差などの簡易測定器の長期安定性について検証する。

(1) 模擬トンネル実験施設におけるトンネル粉じん簡易測定器の検証

a) 実験概要

模擬トンネル実験は、写真-1に示す (独) 労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所、清瀬地区の中規模室内トンネル施設を用いた。本施設は、実験施設に農業用ビニールハウスを組み立て、高さ1.9m、幅1.8m、奥行き27mの密室閉鎖空間を製作し「中規模室内トンネル施設」と称している。図-9に中規模室内トンネル施設の平面図を示す。図からわかるように、閉鎖空間内での大気中の粉じん量の変化を調べるために、中規模室内トンネル施設のうち切羽面に見立てた前方の3.3mをビニールシートで閉鎖し、実験を行った。粉じん計測地点は、トンネル奥行きおよび幅の中間地点の奥行き1.7m地点、幅方向で中央に設置し、高さは0.5mとした。

山岳トンネル建設時の粉じん計測に一般に用いられるデジタル粉じん計LD-5Rを検証機器として用い、本研究

で開発した簡易測定器によるトンネル坑内での粉じん測定の可能性を検証した。

模擬粉じんには、AC ダスト (ISO12103-1, A2, FINE) を用いた。この AC ダストは 176 μm 以下の粉じんが全体の 100%, 124.5 μm 以下が 100%, 88 μm 以下が 98.9%, 44 μm 以下が 91.5%, 22 μm 以下が 76%, 11 μm 以下が 59.5%, 5.50 μm 以下が 42.5%, 2.75 μm 以下が 23.3%, 1.38 μm 以下が 9.5%, 0.97 μm 以下が 5.5% の特性を持つ性能を有することがわかっている¹⁵⁾。

簡易測定器のトンネル坑内における粉じん測定に対する適用性を、実験で実験環境内に配置した簡易測定器と LD-5R の各測定値を比較することで検証した。簡易測定器は粉じん濃度に対して電圧値(mV)を測定値として出力し、LD-5R は粉じん濃度に対して相対濃度(CPM)を測定値として出力する。実験は同様の測定器・測定配置の下、粉じん噴出の程度を変化させ 3 回行った。

- I. 1 回目噴出：1 度に高濃度の粉じんを噴出
- II. 2 回目噴出：数回に分けて粉じんを噴出
- III. 3 回目噴出：1 度に粉じんを噴出

b) 実験結果

粉じんを発生させた時の各測定値の比較結果を図-10 に示す。図-10 は横軸を経過時間とし、縦軸の第 1 軸にデジタル粉じん計 LD-5R の測定値 (相対濃度) を、縦軸の第 2 軸に簡易測定器の測定値 (電圧値) としている。粉じんの 3 回の噴出に対して、グラフでは、3 つの領域 (0~3(h), 3~5(h), 5~8(h)) で測定値の増減が確認できる。この図から明らかなように、高濃度環境下においても簡易測定器はデジタル粉じん計とほぼ同傾向の測定結果を得ることがわかる。すなわち、簡易測定器は短期間であれば、デジタル粉じん計とほぼ同等の性能を有することから、トンネル坑内での測定は十分可能である。

次に、相対濃度と電圧値のキャリブレーションを行うため、各粉じんの噴出に対して縦軸に相対濃度(CPM)、横軸に電圧値(mV)とし、各噴出の相関関係を図-11 にまとめた。

- I. 1 回目噴出： $y = 5.4698x - 859.18$ (1)
 - II. 2 回目噴出： $y = 2.8477x - 247.27$ (2)
 - III. 3 回目噴出： $y = 4.3075x - 482.75$ (3)
- x ：簡易測定器から得られた電圧値 (mV)
 y ：LD-5R より得られた相対濃度 (CPM)

上記 3 つの式は、順に 1 回目、2 回目、3 回目噴上げの電圧値(mV)と相対濃度(CPM)の相関関係を示している。電圧値(x)の係数が噴出を繰り返すごとに減少する傾向が見られた。これは、粉じん粒子がセンサの内部機構に付着し、測定感度に影響を与えることが原因と考えられる。

2 回目の係数が 3 回目の係数よりも小さくなったのは、2 回目は数回に分けて粉じんを噴出したため、3 回目に

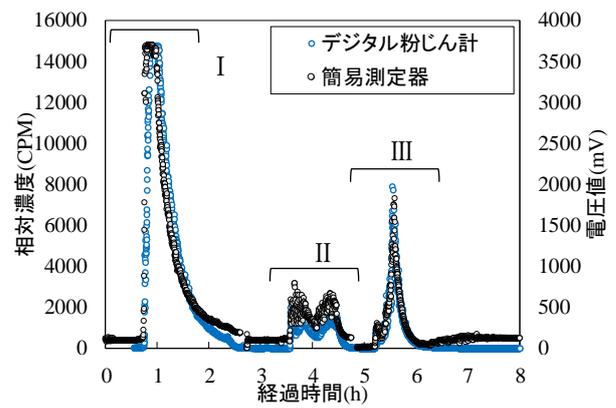


図-10 各測定値の比較

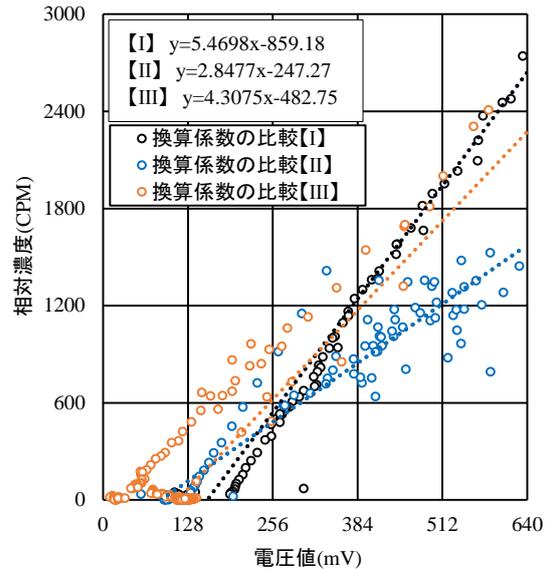


図-11 噴出ごとの相関関係

比べ、測定粒子の形状や粒径に偏りが生じたことが原因であると予想される。光散乱現象を測定原理とする測定法では、測定感度は測定する粒子の形状や粒径に大きく依存することがわかっている¹⁶⁾。

(2) センサ内部に付着する粒子の影響と簡易測定器の個体差についての検証

a) センサ内部に付着する粒子の影響

模擬トンネル実験施設における検証で、センサ内部に付着する粒子が測定感度に影響を与える可能性があることがわかった。写真-2 に粉じん測定後-洗浄前と粉じん測定後-洗浄後のセンサ内部の写真を示す。粉じん測定後-洗浄前の内部には、目に見えるサイズの粒形の粒子が付着していることが確認できる。このような内部に付着した粒子の影響を確認するため、粉じんを測定する前後の測定値 (汚れの影響を考慮) とセンサ内部をエアダスターで洗浄した後の測定値 (洗浄の効果を考慮) の比較を行った。図-12 に、それぞれの段階におけるセンサから出力される電圧値の平均値を示す。この実験の測定値はすべて、低粉じん環境下である研究室内で測定し

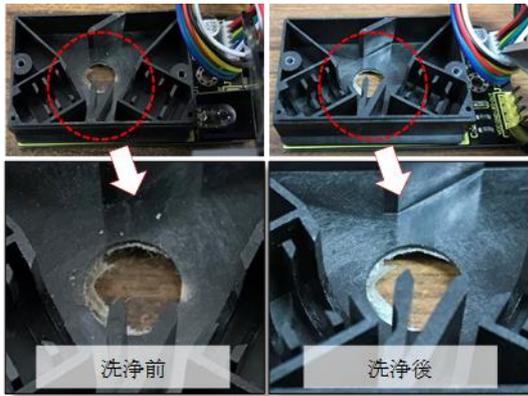


写真2 センサ内部の比較

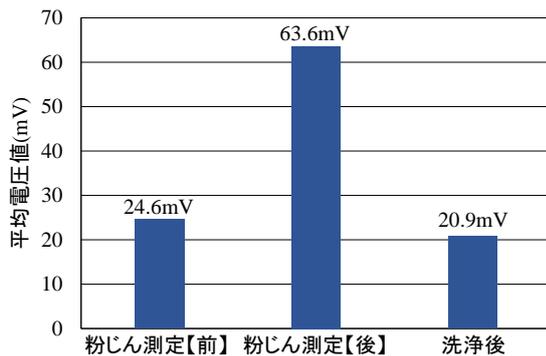


図-12 粉じん粒子による汚れの影響に関する比較

た結果である。粉じん測定前後のデータを比較すると、粉じん測定後のデータが測定前のデータに比べて増加することがわかる。つまり粉じんが浮遊している環境での測定では、センサ内部に粒子が付着し、感度に変化し測定に影響を与えることが確認できた。また、粉じん測定後にセンサ内部を洗浄した後のデータに注目すると、測定値は感度が元に戻ることもわかる。これらのことから、長期間粉じん測定を実施すると、センサ内部に汚れが付着し、測定に影響を与えるものの、洗浄することで改善できることが確認できた。これは光散乱方式を測定原理とする場合、必然的に生じる問題であると考えられ、粉じんを測定する際にはセンサ付近の汚れの影響に注意する必要がある。

b) 簡易測定器の個体差についての検証

トンネル坑内での粉じんの多点測定を実施し、適切な評価するためには、粉じん測定に用いる簡易測定器の個体差の把握が重要である。そこで、無じん時に出力される電圧値を比較することで、本研究で開発した簡易測定器 6 台の個体差について考察した。その結果を図-13 に、各測定器が測定した電圧値の平均値を図-14 に示す。これらの結果から、簡易測定器は、無塵時の平均電圧値が最大で約 30mV の差が生じていることがわかった。これはセンサの最大出力値が 3750mV であり、3750mV に対する粉じん濃度を 10mg/m³、と考える場合、30mV の電圧

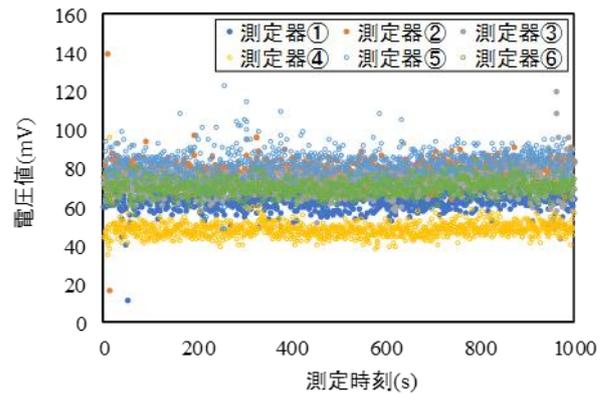


図-13 無塵時に測定した電圧値の比較

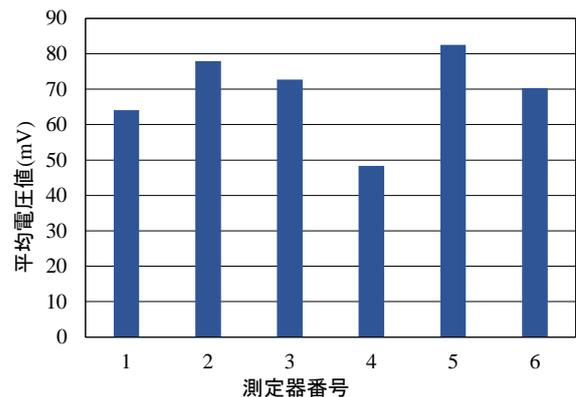


図-14 無塵時に測定した電圧値の平均値

差は約 0.1mg/m³ の粉じん濃度差が生じることになる。粉じん濃度目標レベル 2mg/m³ を超えるか否かの評価に用いる際に 0.1mg/m³ の差は測定値に大きく影響しないと考えられる。しかし多点測定を実施する際には、各測定器の持つ個体差に注意したキャリブレーションが重要であることがわかった。

5. まとめおよび今後の研究課題

本報告では、換気方式ごとに坑内の気流や高濃度粉じん箇所が異なることを流体解析ソフト (ANSYS Fluent) による数値シミュレーションで明らかにし、多点・多頻度の粉じん測定の有効性について検証するとともに、多点測定を実現する方法の一つとして著者が提案している簡易測定器の適用性と安定性 (汚れ・個体差) についてまとめた。その結果を以下に述べる。

(1) ANSYS Fluent による数値シミュレーション結果から、換気方式ごとにトンネル坑内の気流や高濃度粉じん箇所は異なり多様であることがわかった。トンネル坑内を多点測定することが有効であると考えられる。

(2) 開発した簡易測定器はデジタル粉じん計とほぼ同傾向の測定が行えることがわかった。しかしながら、高濃度下で測定を継続して行くと、センサ内部に粉じん粒

子が付着し、測定に影響を及ぼすことがわかった。

(3) センサに付着する粒子の影響で測定値が増加するが、エアダスターなどで内部を洗浄することで、感度をもとに戻すことができることが確認できた。また、無じん状態における各簡易測定器の個体差は測定に影響はしない程度であることがわかった。

今後の研究としては、トンネル建設現場の作業者の意見を取り入れつつ、実トンネル計測のための簡易測定器の改良を行いたい。また、数値シミュレーションによるトンネル坑内の流体解析についても以下に示す項目を検討していきたい。

- ① 現場測定結果の妥当性評価のための解析
- ② より適切な換気条件の設定のための解析
- ③ トンネル坑内の気流・粉じんの再現解析

最終的には、上記の現場測定・数値解析について検討し、簡易測定器で測定した多点測定結果に数値解析による解析結果を併せることで、効果的で、経済的な換気方式や換気条件を提案したい。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 18K04635 助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 厚生労働省：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，p.3，2011.
- 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（換気技術の設計及び粉じん等の測定），pp.64-71，2012.
- 3) 厚生労働省：トンネル建設工事における粉じん濃度、換気能力等に係るアンケート調査の分析結果，令和元年度第 3 回トンネル建設工事の切羽付近における作業環境等の改善のための技術的事項に関する検討会資料 2，2020.

- 4) 金岡千嘉男，古内正美，因幡淳一，大亦和代．明星敏彦：山岳トンネルにおける切羽近傍の換気気流と粉じん濃度の解析，土木学会論文集，2002 巻，714 号，p.43-52，2002.
- 5) 酒井健二，小林大輝，谷純平，森本真吾，進士正人：室内風洞実験によるトンネル建設時の粉じん捕集効率の向上に関する研究，土木学会論文集 F1（トンネル工学），第 74 巻，2 号，p.15-24，2018
- 6) Zhiyong Zhou, Pei Hu, Chongchong Qi, Tianpei Niu, Ming Li, Long Tian, The Influence of Ventilation Arrangement on the Mechanism of Dust Distribution in Woxi Pithead, Shock and Vibration, Volume 2018, 2018.
- 7) ANSYS, FLUENT Theory Guide, ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA, 2013.
- 8) 岡新一：FLUENT の混相流モデル 機能紹介，混相流，15 巻，4 号，2001.
- 9) (社)トンネル技術協会：トンネル内吹付けコンクリート施工時の坑内作業環境に関する調査研究報告書，1985.
- 10) Fluent Inc. : Chapter 19. Discrete Phase Models, 2001.
- 11) Application Guide for Sharp GP2Y1014AU0F Dust Sensor, <https://github.com/sharpsensoruser/sharp-sensor-demo/wiki/Application-Guide-for-Sharp-GP2Y1014AU0F-Dust-Sensor>, 2019.
- 12) 高橋克行，山田丸，藤谷雄二：連載エアロゾル学基礎講座-計測-，エアロゾル研究，Vol.31，No.4，pp.298-305，2016.
- 13) SHARP：GP2Y1010AU0F 小型光学ほこりセンサ，http://www.sharp.co.jp/products/device/doc/opto/gp2y1010au_j.pdf，2020
- 14) 掛谷幸士朗，林久資，大塚輝人，中村憲司，進士正人：簡易粉じん測定器のトンネル建設現場への適用に関する研究，土木学会論文集 F1（トンネル）特集号，第 75 巻，2 号，p. I_12-I_19，2019.
- 15) (一社)日本粉体工業技術協会：APPIE 標準粉体・ACダスト説明書，pp.6-7，2015.
- 16) 金川昭：光散乱による浮遊粉じん測定上の問題点，粉体工学研究会誌，第 11 巻，3 号，p. 141-148，1974.

(2020. 8. 7 受付)

PROPOSAL OF MULTI-POINT AND MULTI-FREQUENCY DUST CONCENTRATION MEASUREMENT IN TUNNEL CONSTRUCTION SITE BY FLUID ANALYSIS

Koshiro KAKEYA, Hisashi HAYASHI and Masato SHINJI

At the tunnel construction site, various ventilation systems have been proposed in order to build a good construction environment with less suspended dust. It is expected that the dust distribution in the tunnel will be diversified. In this study, we developed a compact and inexpensive dust sensor (Simple Dust Sensor). We propose a multi-point and multi-frequency measurement of dust concentration in tunnel by conducting a simulation test and examining the diversity of air flow and dust distribution by numerical simulation. As a result, it was found that the simple measuring device can perform measurement almost equivalent to the conventional sensor. And it was confirmed by numerical simulation that the airflow and dust distribution differed depending on the ventilation system and ventilation conditions.