

トンネル工事における換気効率化のための検討

大塚 輝人*1, 中村 憲司*2, 酒井 健二*3, 板垣 晴彦*1

トンネル建設工事に際して、粉じんの発生は避けられない。発生した粉じんをいかに効率よく除去するかは、換気システムをどのように配置するかにかかっている。本研究では、アリゾナ砂漠のけい砂を分級して作成された標準粉じんを用いて定量的な粉じん分散系を模擬トンネル内に設定し、換気システムの評価方法を検討した。その結果、切羽面から、トンネル高さの6倍離れた位置からの換気によって、切羽付近で粉じんが滞留する現象を確認した。また、微小粒子状物質による大気汚染の簡易計測を目的とした装置のトンネル掘削工事への適用性について、標準的な相対粉じん濃度計 LD-5R との比較を検討した結果、簡易な相対濃度計として使用できる可能性が示された。

キーワード: NATM, 換気, 標準粉じん, 粉じん分散装置

1. はじめに

NATM(New Austrian Tunneling Method)に代表される山岳トンネル工事において、ガスの噴出や、発破・コンクリート吹き付けによる粉じんの発生は不可避である。1980年、労働省産業安全研究所において産業安全研究所特別研究「トンネル建設工事におけるガス爆発等に対する総合安全対策」¹⁾が行われ、基礎的な換気方法に対する可燃性ガスの滞留状態が調べられた。その結果は「ずい道等建設工事における換気技術指針」²⁾に反映され、現在でもトンネル工事換気に大いに資している。前出特別研究は、メタンガスを模した混合ガスについての実験をとおして、換気風管の位置が切羽からトンネル高さの5倍の距離を超える場合に、送気した空気が届かず、混合が進まない状況が示された。行われた実験はいずれも模擬ガスによるものであり、粉じんについての考察を行うことはできなかった。粉じんについては、集じん設備の普及と個人保護具の発達を受けて人体への影響は低減していると言えるが、その効率性についての議論は未だ必要とされている³⁾。粉じん対策は「第8次粉じん障害防止総合対策」に見られるとおり重点事項であり、その中で「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に基づく対策の徹底」を受けて、効果を検証することは急務である。特に、「粉じん濃度測定の実施及びその結果に応じた換気装置の風量の増加その他必要な措置の実施」については、発生量の把握とともに、発生量に応じた換気システムが求められている。

著者らは、粉じんに関する換気評価のため、標準粉じんを用いた、K値測定、沈降拡散評価、高さ2mのビニールハウスを連結した全長27mの模擬トンネルを使っ

た換気風速測定、それに加えて時間当たり定量を発生させることのできる粉じん分散装置を使い切羽付近を模擬した位置から粉じんを定速で分散させた場合の換気位置による粉じんの滞留状況の計測の一連の実験を行った。また、風速の評価については数値計算との比較も行った。さらに、市販の簡易粉じん計と、作業環境の計測に標準的に用いられている粉じん計との比較も行い、トンネル掘削工事における簡易粉じん計の可用性についても調査した。以上を通した検討結果をここに報告する。

2. 実験方法

2.1 標準粉じんの基礎的性質

実験に際し空中に分散させる粉じんとして、アリゾナ砂漠のけい砂を分級して作成された標準粉じん(ISO12103-1 A1 Ultra FINE TEST DUST(模擬トンネルでの粉じん分散実験のみ)、A2 FINE TEST DUST(他全て))を用いた。また、相対濃度計として一般的に作業環境測定に利用される柴田科学製 LD-5Rを採用した。特に記載のない粉じん濃度計測は、全て LD-5R によるものである。

2.1.1 K値の測定

本研究を通して扱う粉じんである、標準粉じんと、LD-5R で得られる相対濃度計と、質量濃度との換算係数 K 値を得るため、高さ 2 m, 幅 1.8 m, 奥行 3.3 m の自立式ビニールハウスを用いて、粉じんの分散時の漏洩性、ビニールハウス壁面への吸着性を確認しつつ、粉じんを分散させる実験を行った。図 1 に実験の状況の写真を示した。上はビニールハウス外から撮影した写真で、左手前に見える三脚に円盤を設置して、その円盤上に 1 g の標準粉じんを置いて、圧縮空気で一括して分散させる方法で実験を開始している。LD-5R 単体での計測に併せて、分粒装置の有無による相対濃度測定の違いを検討するために、併行測定実験を行った。図 1 下の写真では、4 μm 50 % のカット特性を有した質量濃度測定用のサンプラー(NWPS-254型)と粉じん計吸引口に取り付けた分粒装置(Dorr-Oliver 10 mm Nylon Cyclone, 1.7 L/min)

*1 労働安全衛生総合研究所 化学安全研究グループ。

*2 労働安全衛生総合研究所 環境計測研究グループ

*3 (株) エムシーエム。

連絡先: 〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6

労働安全衛生総合研究所 大塚輝人

E-mail: ohtsuka@s.jniosh.johas.go.jp

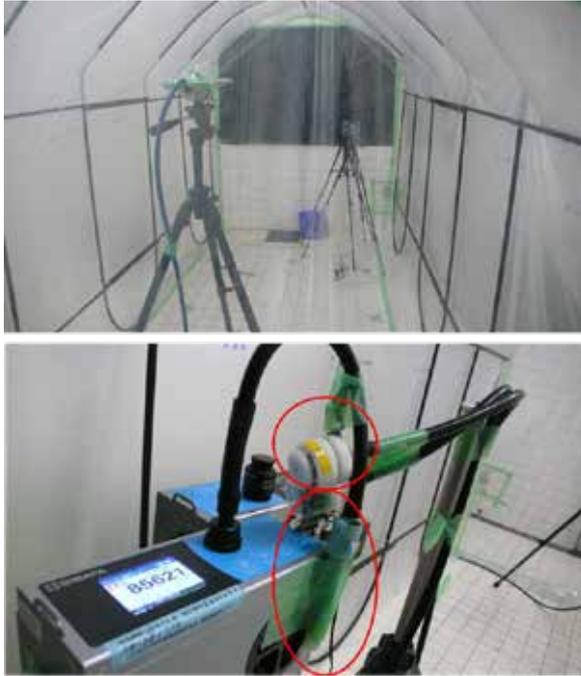


図1 K値計測

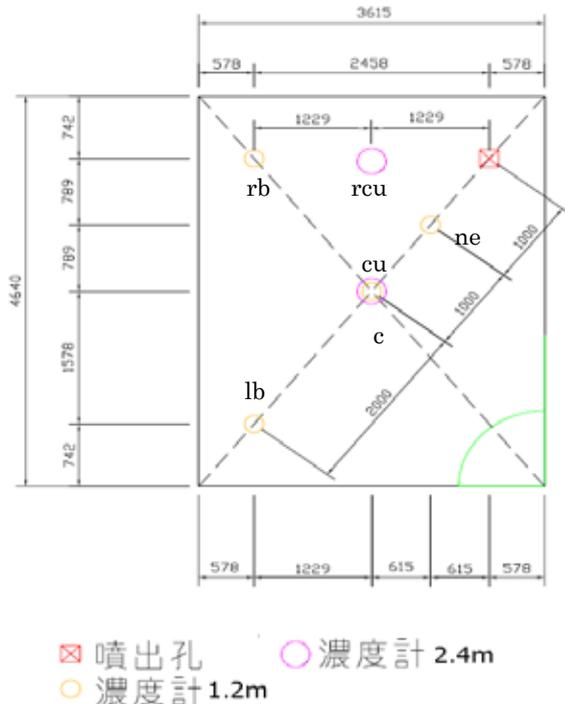


図2 粉じん分散実験のセンサ配置図

(c, rb, lb, cu, ne, rcu はセンサに付与した略号で, cu と rcu のみ高さ 2.4m に設置)

を各々上下の○で示した。粉じん濃度計による相対濃度と, NWPS-254 型で捕集された粉じん量の計測から, 濃度の換算係数 (K 値) を得る。また, 衝突板に捕集された粉じん量より総粉じんに対する吸入性粉じんの割合を得る。

2.1.2 粉じんの沈降拡散評価

分散した粉じんが沈降する際の拡散係数と終端速度を得るため, 沈降拡散の評価を行った。実験は, 奥行 3.6 m, 幅 4.6 m, 高さ 4m の実験室を目張りして締め切り, 粉じん分散装置から帯電防止ホースで粉じんを導き, LD-5R とともに図 2 のように配置した。分散装置として, 柴田科学 DF-3 ダストフィーダーと, ドイツ Palas 社製 RBG-1000 エアロゾルジェネレーターを用いた。

粉じんの噴出方向は鉛直上方である。一つ目の DF-3 は, 円盤の縁に定量の穴が複数穿たれたところへ, 漏斗から粉体をバイブレータの振動を利用して落とし, 円盤の回転に伴って穴の上部ですりきることで定量を自動的に供給する形式を取っている。予備実験として行った小麦粉での分散試験では湿度の影響もあり塊となった粉体が漏斗からスムーズに落ちないことや, すりきり部分でも塊が邪魔をして定量とならないことから, 定量の自動供給が難しく, 標準粉じんでの実験への適用は断念した。

二つ目の RBG-1000 は, シリンダ内に充填された粉じんを設定した速度のピストンで持ち上げつつ, シリンダ上端から押し出された粉じんを上部ブラシによってかき出し, コンプレッサからの空気と混合することで, 安定して粉じんを分散させることができる。この方式が, 定量性の得られる分散方法であったため, 実験にはこちらを用いた。

実験は内径 28 φ の円筒容器につめた標準粉じんを, 40 mm/h の速度で上昇させて粉じんを供給し, 5 mm 上昇した約 8 分後に供給を停止して, その後の粉じん濃度推移を計測した。供給された粉じんは 3 cm³ に相当し, 見かけの密度が 1 g/cm³ であることから, 3 g の粉じんを供給した実験になる。ブラシによるかき出しは順調であり, 粉じんの時間当たりの供給量は, 空気供給量と回転数によらずシリンダ径とその上昇速度にのみ依存する。

2.2 模擬トンネルにおける風速計測

参考文献 1) のトンネルとほぼ同等なトンネルにおける風速分布を計測するため, 図 3 のとおり模擬トンネルを作成した。図 3 には換気配管の設置, 及び風速計の設置の概略も示した。この模擬トンネルでは, 送風機を模擬トンネルの外に設置し, 320φ の風管を接続して模擬トンネル側部から風管を導入することによって, 任意の場所に吹き出し口を設置できる。

実験では, 風管からの吹き出しによって換気を行い, 吹き出し位置は, 高さを風管中心位置で 1.8 m に固定し, 切羽からの距離としてはトンネル高さの 4 倍 (=8.0 m) と 6 倍 (=12.0 m) の 2 ケースを行った。

風速の計測には無指向性の微風速計 WGT-10 を用いた。トンネル切羽方向に対して垂直面の同一面で, 風速計はトンネル中央に高さ 0.5, 1.0, 1.5 m, 切羽に向かって左側に壁面から 0.3 m, 高さ 1 m で図 3(c) のように設置した。各吹き出し距離で, 風速計の設置断面を切羽から 1, 3, 5 m と変え, 計 6 ケースを 4 台の風速計で同時計測を行った。風速は 0.4 秒毎の瞬時値が, WGT-10 内で 10 秒間平均され, その平均値が PC へ転送されて時

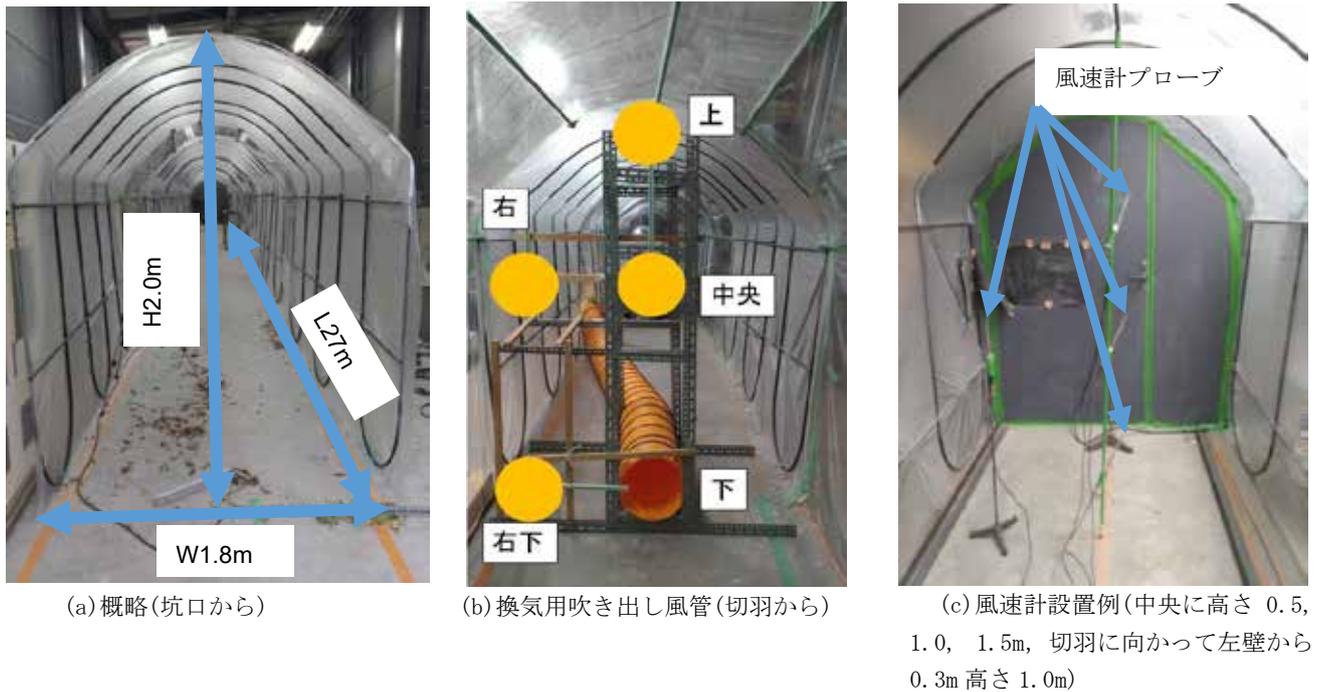


図3 模擬トンネル

刻とともに記録される。実験では各条件6分間程度の連続計測を目安とした。欠損データがある場合でも同一のPCによって取り込んでいることから、各風速計は同一の時系列の下に記録される。換気の吹き出し風速は、別途風速計によって計測した結果約5.4 m/sであった。吹き出し口の径が320φであり、トンネル断面積がおよそ3.2 m²であることから、坑内平均風速0.14 m/sとなる。この値は参考文献1)に示される相似則に基づいた数値より若干低いが、用いた送風機と風管によって実験を行った時に設定できた最大値である。

2.3 模擬トンネルでの粉じん分散実験

粉じんの分散実験についても、風速計測と同じく図3に示す模擬トンネルを用いた。風速は風管出口風速で6 m/sを目安に送風機吸込み側に設けたダンパーによって調節した。用いた風管はφ320であるため、風量は29 m³/minとなる。坑内断面における平均風速としては、およそ0.15 m/sとなる。

実験では、コンプレッサからの空気によって噴流が発生することを考慮して、粉じんの分散位置は切羽からの床中心から坑口側に0.75 m、高さ0.18 m上向きで固定し、主に風管の位置を、切羽からの距離と、トンネル断面内で図3(b)のとおり変化させた。参考文献1)の結果を踏まえて、切羽からの距離はトンネル高さを単位に、4, 5, 6倍に相当する8, 10, 12 mの位置に設定した。粉じんは、内径φ28のシリンダを100 mm/hで上昇させて分散させた。1 cm³/minの粉じんが供給されており、見かけのかさ密度1 g/cm³であることから、1 g/minが供給されることになる。分散された粉じんのうち粒径の

大きなものは比較的速く沈降するため、すべての粉じんが濃度計に観測されるわけではない。

いずれの実験も換気風速の安定を待った後、20 minを目安に粉じんの分散を行い、粉じん分散の停止後十分に粉じん濃度が下がるまで換気風量は保ったままで計測を行った。粉じん濃度の計測は、1.14 mの高さで、切羽から0.75 m, 5 m, 25 m位置で、切羽に向かって左側、したがって図2に示した換気配管吹き出し口の反対側に、三脚によって、なるべく壁面に寄せるよう設置して行った。

2.4 簡易粉じん計測装置との比較

近年、微小粒子状物質による大気汚染の簡易計測⁶⁾を目的とした装置が開発されている。本研究では、坑内環境を多点で計測することや、作業者個人に携行してもらうことを想定して、簡易粉じん計測装置とLD-5Rの併行測定を行った。

実験では、2.1.1のK値測定と同じサイズの自立するビニールハウス内で、自作したRBG-1000と同等の装置によって粉じんを噴出させ、粉じん濃度の均一化を図るため扇風機によって内部を攪拌しつつ、計測を行った。LD-5Rでの計測値が2000 CPM(Count Per Minute)に達した後、粉じん分散装置を停止し、簡易粉じん計測装置としてヤグチ電子製のPocketPM2.5⁷⁾を用いた計測を開始した。PocketPM2.5は、LD-5Rの吸入位置と高さをそろえ、高さ1 mの台に並べて設置して計測した。PocketPM2.5については、6台同時計測を行い、個体差についても調べた。機器設置位置による違いを避けるために、扇風機での攪拌は継続した。また、粒径の影響を

見るためリオン社製パーティクルカウンタ KC-52 での計測も同時に行った。

3. 実験結果とその評価

3.1 標準粉じんの基礎的性質

3.1.1 K 値測定

分粒装置無しで予備の実験を行い、使用した 2 台の粉じん計に機差がないことを確認したのち、実験を実施した。図 4 に分粒装置を付けた状態での粉じん計の計測結果と、フィルタによるサンプリングを行った時間を示した。図 4 に見られるとおり、分散直後は 2 台の粉じん計の相対濃度に大きな差が見られ、分粒装置を付けた粉じん計の相対濃度は付けていない粉じん計の相対濃度の 70%程度であった。その後時間の経過とともに差が小さくなり、2 時間後にはほぼ一致した。これは時間とともに粒径の大きな粉じんが沈降することによって、分粒装置の効果が小さくなったためと考えられる。表 1 に吸引式ポンプと衝突板による各々の時刻の計測結果を示した。質量測定に用いた NWPS-254 型の衝突板の質量から総粉じん (T) に対する吸入性粉じん (R) の割合 (R/T 比) を概算したところ、飛散直後は全体のおよそ 4 割が吸入

性粉じんで残りの 6 割がそれよりも大きな粉じんであったが、2 時間後はほぼ全ての粉じんが吸入性粉じんであった。このように、粗大粒子の割合が多い環境下では、分粒装置の効果により相対濃度に差が生じるため、質量濃度変換係数に差が出るのがわかる。

図 5 に R/T 比と K 値の関係、並びに相対濃度と吸入性粉じん濃度との関係を示す。図 5(a)から、分粒装置なしの方が、ばらつきは少なく K 値が安定している。また、図 5 右図から各々の回帰線の係数から、K 値が分粒装置有りの場合で $1.5\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{CPM}$ 、無しの場合で $1.2\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{CPM}$ であることがわかる。

3.1.2 粉じんの沈降拡散評価

図 6 に得られた粉じんの濃度の時間変化の一例を示した。噴出により上方に粉じん雲を形成するため、噴出開始直後から上部 2.4 m の高さに設置したセンサ cu と rcu が高濃度を記録するが、60 分ほどで噴出口直近のセンサ ne が示す濃度がピークを迎え、全てのセンサに対して最も高い濃度のまま、沈降による濃度減少を記録している。反対に噴出口から最も遠い lb センサは、低い濃度のまま沈降による濃度減少を記録している。

得られた結果から拡散性評価に必要なパラメータを得るため、沈降についての解析を行った。図 7 に粉じんの

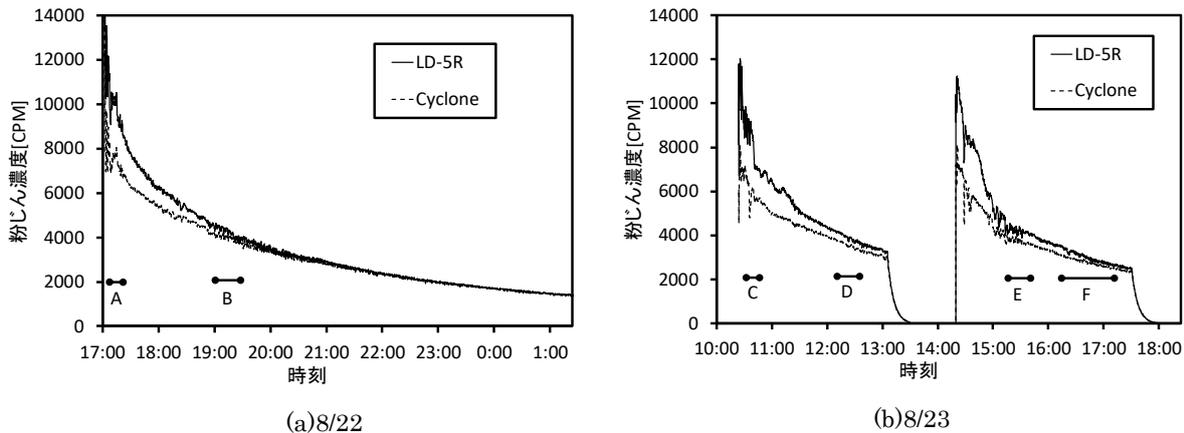


図 4 粉じん計による濃度計測と吸引式ポンプと衝突板による捕集時刻

表 1 K 値計測結果

測定日時	捕集空気量 [L]	吸入性粉じん捕集量 [mg]	粗大粉じん捕集量 [mg]	総粉じん量 [mg]	吸入性粉じんの割合 [-]	吸入性粉じん濃度 [mg/m ³]	総粉じん濃度 [mg/m ³]	平均濃度		K 値	
								Cyclone	LD-5R	Cyclone	LD-5R
								[CPM]	[CPM]	[mg/m ³ /CPM]	[mg/m ³ /CPM]
A	24.97	0.2894	0.44	0.73	0.40	11.59	29	7643.8	10353	1.516	1.119
B	49.98	0.2467	0.01	0.26	0.96	4.94	5.1	4030.9	4364	1.225	1.131
C	24.98	0.2704	0.24	0.51	0.53	10.82	20	6194.8	8803	1.747	1.230
D	50.00	0.2195	0.02	0.24	0.92	4.39	4.8	3345.4	3662	1.312	1.199
E	74.95	0.3900	0.06	0.45	0.87	5.20	6.0	3664.5	4100	1.420	1.269
F	150.00	0.5111	0.02	0.53	0.96	3.41	3.5	2699.5	2902	1.262	1.174

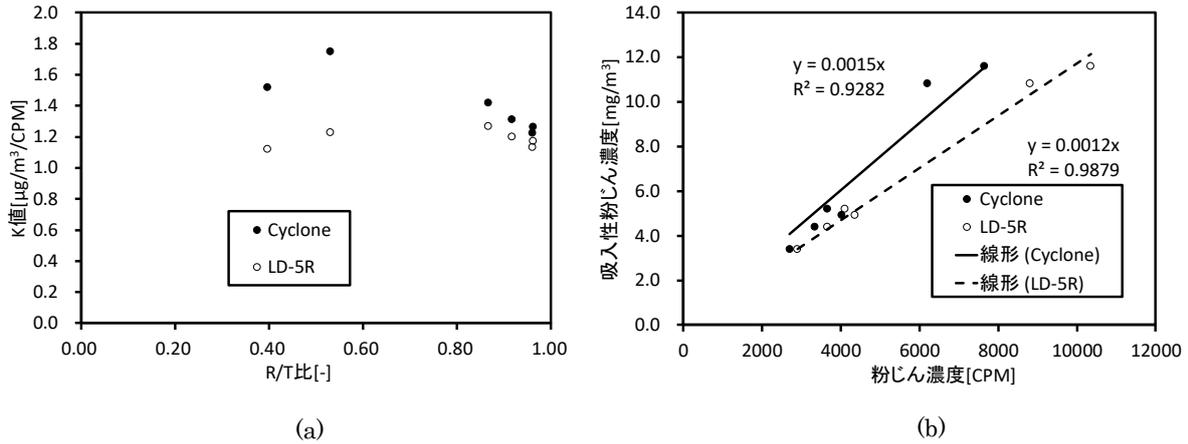


図5 K値計測結果

沈降モデルの概略を示した。図7は天井から鉛直下方向に高さ軸 h を取り，粉じん雲が重力に従って沈降していく状況を表している。この粉じんの沈降モデルについて，解析は式(1)に基づいて行った。

$$\frac{\partial q}{\partial t} = D \frac{\partial^2 q}{\partial h^2} - w \frac{\partial q}{\partial h} \quad (1)$$

ここで q , t , D , w は粉じん濃度，時間，拡散係数，粉じんの終端速度である。この式は一般に移流拡散方程式と呼ばれ，解析解を有する^{8),9),10)}。ただし，初期条件と境界条件によって解の形が異なるため，ここでは実験結果への適用の容易さから，初期条件および境界条件は，実験と乖離せず，単項式解によって表すことができるものとして以下の条件を選択した。

$$q(t, 0) = \begin{cases} q_0 & (t = 0) \\ 0 & (t > 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$q(0, h) = q_0 \quad (3)$$

式(2)は境界条件，式(3)は初期条件を示している。また，床は無限遠として，床からの拡散や，床での吸着は無視した。得られる方程式の解は(4)となる。

$$q(t, h) = q_0 - \frac{1}{2} q_0 \exp\left(\frac{wh}{2\sqrt{Dt}}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{wh}{2\sqrt{Dt}}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h}{2\sqrt{Dt}} - \frac{w\sqrt{t}}{2\sqrt{D}}\right) + \exp\left(\frac{wh}{2\sqrt{Dt}}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h}{2\sqrt{Dt}} + \frac{w\sqrt{t}}{2\sqrt{D}}\right) \right\} \quad (4)$$

式中の $\operatorname{erfc}()$ は誤差関数である。得られた実験結果のうち，空間的に一様に分布した状態(= q_0) を初期状態とみなせるものを選んで，粉じん計の設置位置 h に応じてフィッティングを行った結果が図8である。

得られた値は， w について 1.70×10^{-4} m/s， D について 2.86×10^{-4} m²/s である。 1.70×10^{-4} m/s の終端速度は，カニングム補正¹¹⁾を行ったストークス式によると $1.4 \mu\text{m}$ の粒径に対応する。初期値 4583 CPM は，質量濃度との換算値である K 値が $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{CPM}$ であるため，分散を行った部屋の体積 66 m^3 との積から 0.45 g が分散していたことを示している。分散装置から噴出した粉じんは 3 g であることから，その 85% が比較的早い段階で落ちたと考えられる。標準粉じんの粒径分布から累積体積百分率の 10% の直径は $1.4 \mu\text{m}$ であり，解析結果との対応は良好であるといえる。ただし，得られた拡散係数の値は，通常の気体状分子より 1 桁大きい。乱流による混

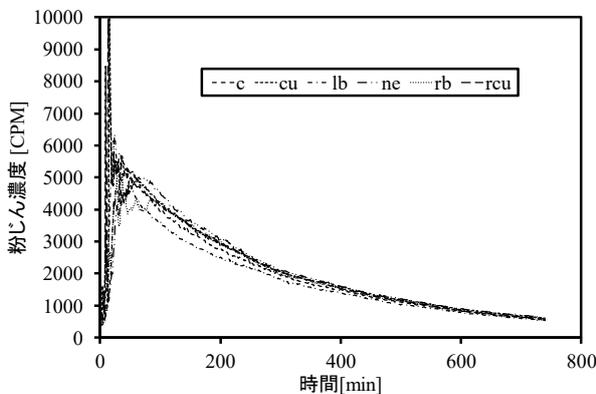


図6 粉じん分散実験結果

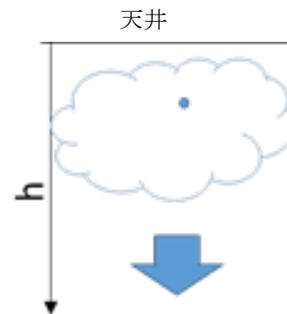


図7 粉じん沈降の概略図

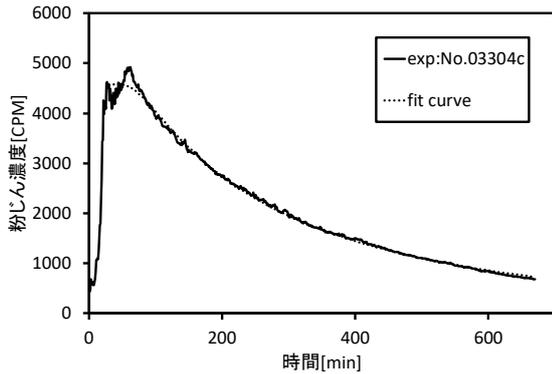


図8 粉じん分散実験結果

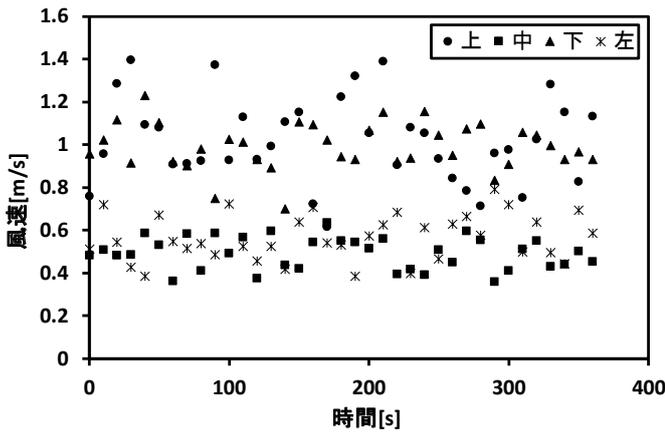
合促進の効果を考えれば、この1桁の違いを説明できるが、分散状況から乱流は考え難く、課題として残る。

3.2 模擬トンネルにおける風速計測

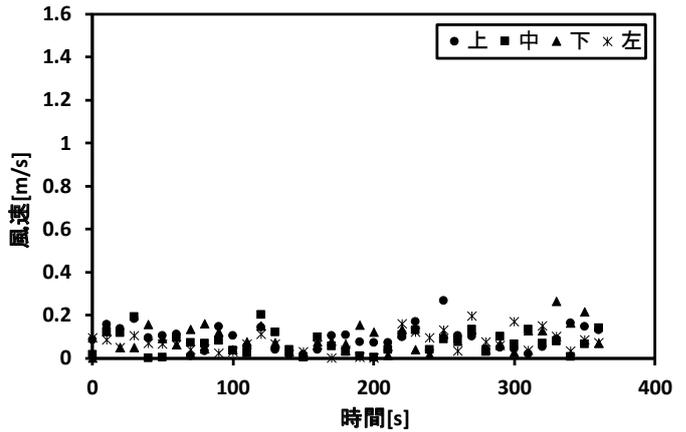
図9に記録された風速の例を示す。いずれのデータも吹き出し風速自体に揺らぎがあること、また、ビニールハウスによる模擬トンネルであるために壁面が風自体によって揺らぐこともあり、計測された風速自体も大きく

変動している。基本的には上から切羽に向かった風が、下から帰ってくる形で流れを作るため、切羽から8mでの換気吹き出し時に計測した図9(a)では上,下の風速が中,左の風速よりも大きく記録されており、この位置でガス又は粉じんが発生したとしても、速やかに新鮮空気と入れ替わるものと思われる。図9(b)には、風速計測位置を図9(a)と同じにしたまま、換気の吹き出し位置を12mに変更した結果を示した。図から、この条件では換気の風がほとんど届いていないことが分かる。WGT-10の仕様上、校正時の誤差として0.05m/sがあるとされており、図9(b)に記録された値自体は、この誤差とほぼ同程度であることから有意とは言えないが、図9(a)と比較して、風速が大きく下がっていることは明確である。

表2は、各条件における平均風速を標準偏差とともにまとめた表である。平均風速が大きい条件の方が、標準偏差も大きくなっており、また、上と下を比較した場合、換気の吹き出しを直接受ける上の方が、標準偏差は大きく、揺らぎが大きい傾向がある。表2には、揺らぎの大きさを相対化する意味で、標準偏差を平均風速で割った値も載せた。吹き出し位置が8mの場合には標準偏差が概ね2割程度であるものの、12mの吹き出し位置で



(a) 吹き出し位置 8m, 風速計測位置 1m



(b) 吹き出し位置 12m, 風速計測位置 1m

図9 風速計測結果

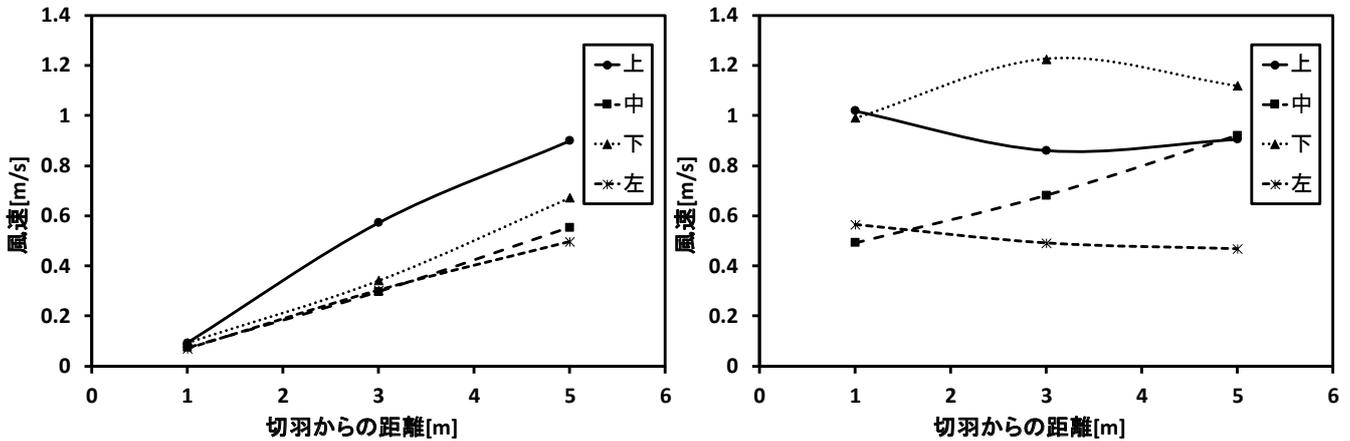
表2 平均風速と標準偏差

吹き出し位置[m]	風速計位置[m]	平均風速 [m/s]				標準偏差 [m/s]				標準偏差/平均風速[-]			
		上	中	下	左	上	中	下	左	上	中	下	左
8	1	1.02	0.49	0.99	0.56	0.20	0.07	0.11	0.11	0.19	0.15	0.11	0.19
	3	0.86	0.68	1.23	0.49	0.17	0.10	0.10	0.09	0.19	0.14	0.08	0.19
	5	0.91	0.92	1.12	0.47	0.16	0.08	0.09	0.15	0.18	0.09	0.08	0.32
12	1	0.09	0.07	0.09	0.07	0.06	0.05	0.06	0.05	0.60	0.71	0.63	0.68
	3	0.57	0.30	0.34	0.30	0.19	0.07	0.10	0.09	0.34	0.22	0.29	0.30
	5	0.90	0.55	0.67	0.50	0.24	0.10	0.12	0.09	0.26	0.18	0.18	0.19

は、標準偏差の割合が大きくなっており、吹き出し位置 12m で風速計位置 1m の値では、標準偏差が 7 割を超えているものもあった。これは、微風速計自体の誤差が本来の流れとして記録されるべき風速に比して無視できなくなっていることを受けている。ただし、この傾向は規模を大きくした場合を考えると、相似側を踏まえて風速が大きくなることから、縮小すると考えられる。行った実験の平均風速をプロットしたのが図 10 である。図 10(a)によって、切羽から 12m の換気風管吹き出し位置からの風が、切羽に近づくとともに減衰していくことが分かる。ここでは先の表に現れたとおり、平均風速は誤差と同等であり、ここから風速が加速する要因が無いことから、切羽 1m 以内ではほぼ無風の状態となることが推測される。以上の結果は、ガスの拡散実験¹⁾による高さの 5 倍超の吹き出し位置での切羽でのガスの滞留をよく説明できる。

図 10(b)は換気風管吹き出し位置が切羽から 8m の場合であり、したがって 1m での値は吹き出し位置から 7m に相当する。図 10(a)の切羽から 5m の位置も同じく、12m の吹き出し位置から 7m に相当しており、図 10(b)では切羽が 1m と近い切羽の影響があるものと思われるが、図 10(a)5m と図 10(b)1m の風速は比較的良好一致をみている。

以上得られた計測の結果を検証するために、数値計算も併せて行った。図 11 に計算モデルを示した。計算には ANSYS-CFX Ver.17.1 を用いた。モデルでは、計算時間を短縮するため、かつ、代表的な流れを示す場所での流れを安定させるため、中央に対称面を設定して、坑口から切羽に向かって右半分を計算対象とした。計算は、 $k-\epsilon$ モデルを用いて 25℃ 1 気圧の定常計算とした。また、坑口は差圧なしの等圧面として設定した。換気は、実験と同様に風速 5.4 m/s で直径 320 mm の風管から噴出させ、風管吹き出し面の中心が高さ 1.8 m、切



(a) 換気風管吹き出し位置 12m

(b) 換気風管吹き出し位置 8m

図 10 各条件での平均風速

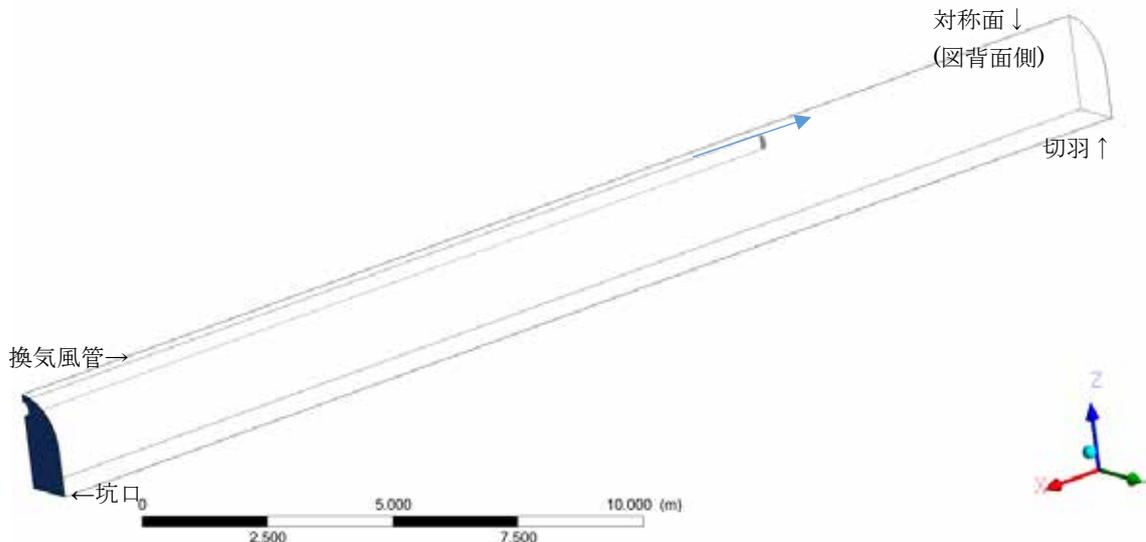


図 11 計算に用いた形状モデル(吹出 8m の場合でノード数 150420, 要素数 556987)

羽へ鉛直に向かうよう設定した。吹き出し位置は切羽から 8 m, 12 m の位置で変更した。トンネル管体と床は Non-slip wall とし、トンネル管体には振動を考慮して、壁面粗さとして 0.1 m の値を採用した。

図 12 に数値計算の結果として、対称面(トンネル中央面)での風速に関する等速線を示した。風による等速線から、8 m の吹き出しでは切羽までの流れが見られ、切羽付近の攪拌混合が促進されることが推測できる。

図 13 は同対称面の高さ 1.5 m 位置での風速を、切羽からの距離を横軸にプロットしたものである。絶対値としては差があるものの、傾向は類似している。実験結果での特徴として挙げた二つの条件で吹き出し位置から 7 m((a)の 5 m, (b)の 1 m)での風速が数値計算でもほぼ一致しており、切羽付近で風速が下がり滞留する可能性も示唆される。数値計算によって閾値を決定することは難しいが、傾向を把握することは可能である。

3.3 模擬トンネルでの粉じん分散実験

本実験項目に関しては、参考文献 12) にて報告しているため、ここでは概略のみ記載する。図 14 に換気風管の吹き出し高さを 1.8 m として、切羽から 8, 10, 12 m の距離にした場合の粉じん濃度の計測の結果を示し

た。(a)は切羽から 0.75 m 位置での計測結果であり、(b)は 25 m 位置での計測結果である。いずれの実験も粉じんの噴出速度は同じであり、25 m 位置での計測結果は、ほぼ一定であることから、粉じん分散が正しくコントロールされていることがわかる。それに対して 0.75 m での計測結果は、換気風管の吹き出し位置に大きく依存し、切羽から離れることによって、切羽付近の粉じん濃度は大きく上昇する。切羽から離れた位置からの換気風管の風は、3.2 の風速計測でみたとおり、切羽までは届かない。その結果、高濃度の部分と換気風による混合というよりも、高濃度部分と風が向きを変える境界まわりの拡散によって、坑口へ向かう流れに粉じんが乗ったものが 25 m まで届いている。風との混合よりも前記拡散が遅いことから、切羽付近が高濃度を長い時間保つ時間分、坑口付近でも粉じん濃度が長時間記録される。切羽から十分離れた位置での粉じん濃度が、換気風管位置に大きく依存しないのは、拡散によって減少する量と、粉じん分散装置によって供給される量が釣り合うまで切羽付近の濃度が上昇するためである。風速の実験で見られたとおり、切羽には十分な風が届いていないことから、粉じんを封じ込める状態となっている。可燃性ガスの場

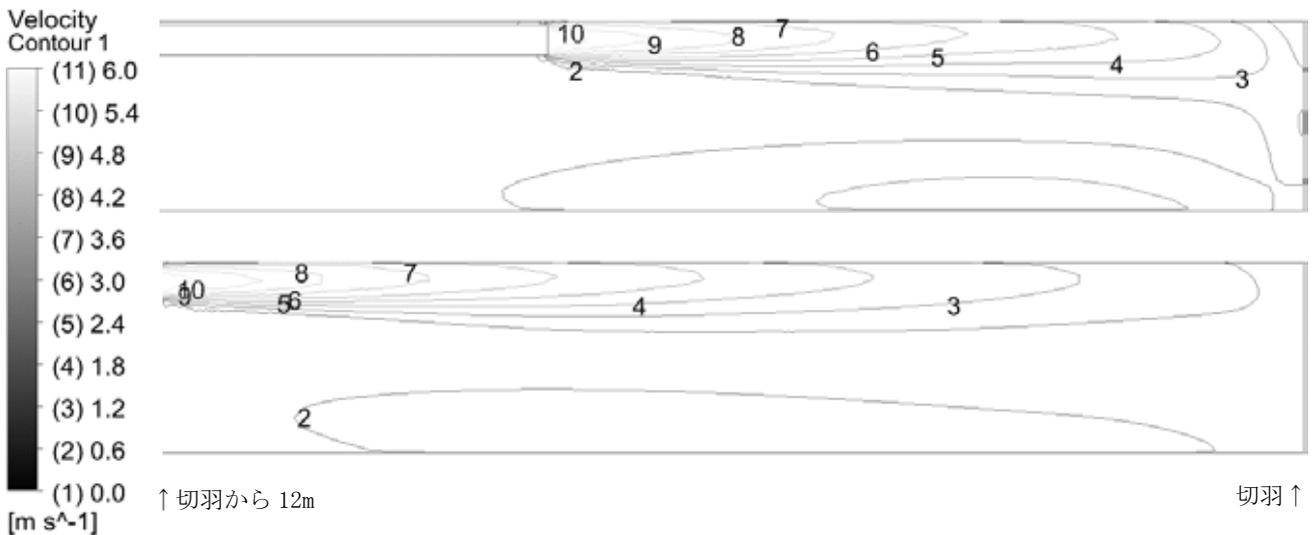


図 12 風速に関する等速線(上から吹き出し位置 8 m, 下 12 m)

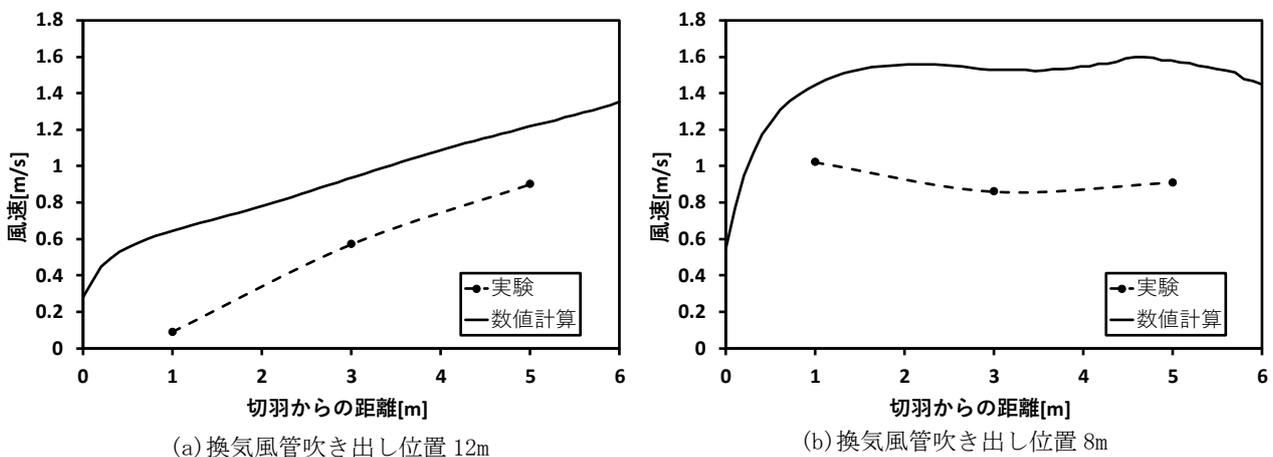


図 13 風速の比較

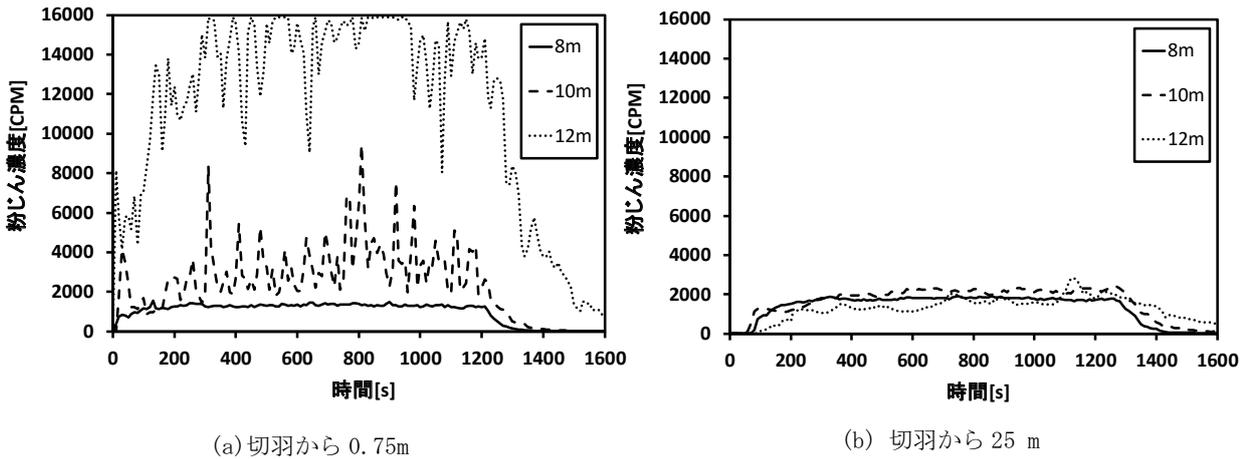


図 14 粉じん分散実験の結果

合には、希釈して排出する以外の対処方法は無いが、粉じんの場合は集じん機によって粉じんを除去できる。集じん機を有効に利用するためには、発生源近くの高濃度部分から吸引する必要があるが、本実験結果の封じ込めによって、有意な濃度差を取って作成することで、集じんによる捕集の効率化を期待できる。

3.4 簡易粉じん計測装置との比較

図 15 と 16 に得られた結果を示した。LD-5R と KC-52 については、10 秒ごとの記録を行ったが、

PocketPM2.5 センサは 1 秒ごとの記録に対して欠損データが発生したため、全てのデータを 30 秒ごとの平均値として算出してプロットしてある。KC-52 については、2.83 L/min の吸引量に対する、各粒径についての累積値を 10 秒積算しているため、得られた値は、 $2.83 \text{ L/min} \times 10 \text{ sec} = 0.471 \text{ L}$ 内の粒子数に相当する。したがって、得られた値を 0.471 L で除し、1000 倍することで、 1 m^3 当たりの粒子個数濃度に換算できる。KC-52 は $140,000,000 \text{ 個/m}^3$ が最大粒子個数濃度であることから、

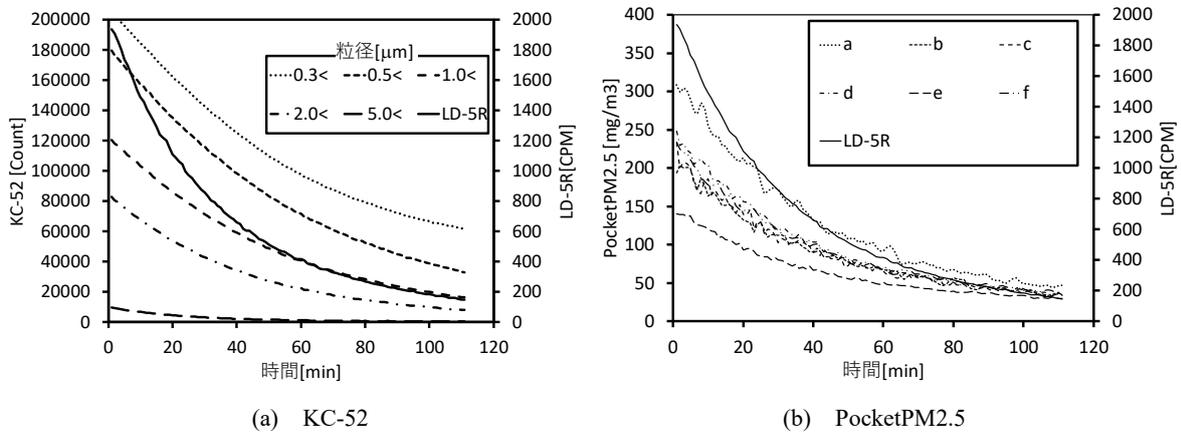


図 15 簡易センサ計測実験結果(時間経過に対する応答)

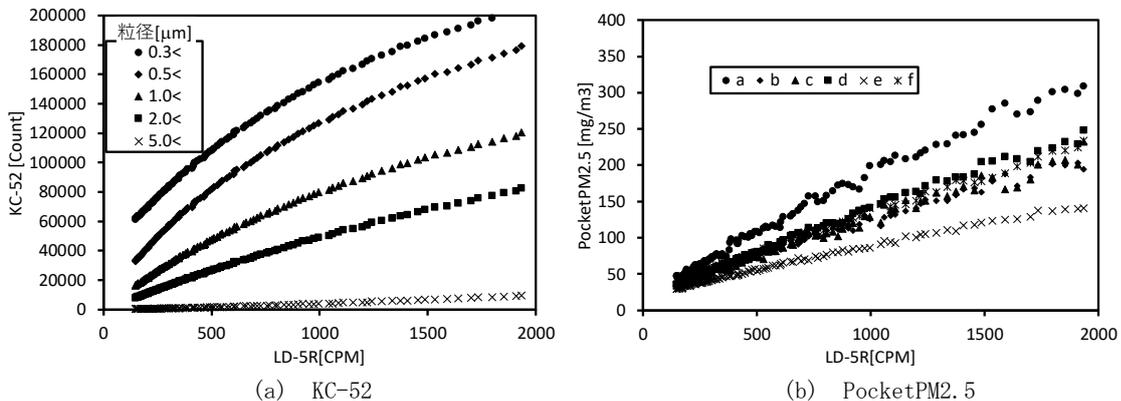


図 16 簡易センサ計測実験結果(LD-5R との相関)

10 秒積算値としての上限は 66,000 個程度になる。KC-52 で、この上限を超えている部分については、参考値として考えるべきであろう。LD-5R での計測では 1.7 L/min での吸引であることから CPM から 1m³ 当たりの粒子個数濃度への変換には、1.7 で除して 1000 倍する必要がある。図 15(a) に示した KC-52 と LD-5R 相互の濃度を粒子個数濃度に変換することは前述のとおり可能であるものの、各々の機材の粒径に対する感度が異なることから、相互の値は整合しない。LD-5R については作業環境の標準的な計測方法として確立されていることから、ここでは換算は行わず、そのままの値として表示してある。図 16(a) には横軸に LD-5R の値を、縦軸に KC-52 の値をプロットしてある。実験を行ったビニールハウスは、これまでも同様の実験を繰り返したものであり、KC-52 での計測を開始すると、粉じんの分散が無い状況でもサブμm のサイズについてはバックグラウンドが計測される。また、先に述べたとおり、66000 以上の値は最大個数濃度を超過しており、あくまでも参考値であり、サブμm については、必ずしも LD-5R との対応も直線的にはなっていない。しかしながら、吸入性の粉じん径としてしばしば参照される 2.5 μm に近い、2 μm 超の値は比較的 LD-5R との対応も良い。このことは粉じんの沈降実験の解析結果から得られた粉じん径の推測値 1.4 μm とも合致する。

図 15(b) に示した PocketPM2.5 については、スマートフォン上のアプリケーションに表示される単位のままプロットしており、単位上は計測時間の長さの影響は受けない。PocketPM2.5 は、ファンによって導入された雰囲気へ光を当てた際の散乱光強度を計測している。この値は、LD-5R の標準粉じんについての質量濃度換算値と整合しないものの、図 16(b) に示したとおり、ほぼ線形の相関を持っている。すなわち、各々のセンサ感度は異なるが、高濃度下で簡単な校正を施せば、3 mg/m³(標準粉じん 2000CPM) の環境下での利用は可能であると考えられる。

4. 実験結果のまとめ

標準粉じんを用いたトンネル工事における粉じん換気を効率化に必要な検討として、K 値測定、沈降評価、高さ 2 m のビニールハウスを連結した全長 27 m の模擬トンネルを使った換気風速測定、それに加えて時間当たり定量を発生させることのできる粉じん分散装置を使い切羽付近を模擬した位置から粉じんを定速で分散させた場合の換気位置による粉じんの滞留状況の計測の一連の実験を行った結果以下の結論を得た。

- 1) ISO12103-1 標準粉じんの質量濃度を LD-5R と併行測定を行った結果、その変換係数である K 値 1.5 μg/m³/CPM を得た。
- 2) 沈降拡散の実験結果を移流拡散方程式に当てはめた結果、沈降の終端速度 1.70×10⁻⁴ m/s と拡散係数

2.86×10⁻⁴ m²/s を得た。その終端速度は、ストークス式によると 1.4 μm の粒径に対応する。

- 3) 高さ 2 m、幅 1.8 m、長さ 27 m の模擬トンネル内で換気風速を計測した結果は、既報のガスの滞留を説明でき、数値計算との比較も傾向としては一致する。
- 4) 換気風速の計測と同じ模擬トンネルで、粉じんの分散を行い、スケール則に則った風速で換気のための空気吐出口位置を変化させて粉じん濃度を調べることで、換気評価を行った結果、高さの 6 倍の距離から換気を行った場合、粉じんが滞留する現象が見られた。
- 5) 大気汚染計測用の市販装置を用いて、0~3 mg/m³ の計測を行った結果、LD-5R との相関は高く、簡易な相対濃度計として使用できる可能性がある。

5. おわりに

本研究で用いたビニールハウスの限界として、壁面が固定されておらず振動することや、ビニール自体への粉じんの付着性が、通常のトンネル掘削時の壁面状況とは大きく異なることがあげられる。したがって今回は気体の主流における濃度の傾向が把握できたに過ぎない。それでも、換気位置を適切に設定することで、粉じんを封じ込めることが可能であることを示せた。安価な簡易粉じん計によって切羽付近の常時モニタを行えば、作業員の配置に応じた封じ込めと、それによって形成される高濃度位置からの集じんを適切に設定することが可能となる。

また、吸入性粉じんが沈降するには数時間かかることから、現在推奨されている 0.3m/s と合わせて切羽から km 単位で離れた場所でも粉じんが存在しうる可能性が示唆される。すなわち粉じんの高濃度発生源となる、発破、ずりだし、吹き付け等々の際には、その発生源直近の作業員だけではなく、坑内全域で粉じん濃度を評価することが望ましい。そのような要求にも、簡易粉じん計を用いれば、点ではなく、空間全体の濃度把握を進めることが可能であると考えられる。

謝 辞

山口大学進士正人教授、林久資助教には、データ検討で有意義なご意見を多数頂戴いたしました。また、片谷アツシ技研片谷篤史様には、実験へ多大なご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 佐藤吉信, 桑川壮一, 杉本旭, 深谷潔: トンネル建設工事における通風換気システムの改善に関する研究, 産業安全研究所特別研究 SRR80-1, pp.7-43, 1980.

- 2) 建設業労働災害防止協会：ずい道等建設工事における換気技術指針，2012.
- 3) 西村章，進化するトンネル換気技術，日本建設機械化協会，建設の施工企画（727），pp.47-53,, 2010
- 4) 高橋克行，山田丸，藤谷雄二，質量濃度測定，エアロゾル研究 31(4), pp.298-305, 2016
- 5) 中村憲司，大塚輝人：光散乱方式による吸入性粉じんの相対濃度測定に対する分粒装置の効果の基礎的検討，第91回日本産業衛生学会，産業衛生学雑誌，第60巻，臨時増刊号，P498，2018.
- 6) 例えば松見豊，小型で精度の高い大気中の微粒子（PM2.5）計測器の開発と実用化，名古屋大学プレスリリース，<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/jpn/topics/2015/08/PM25-20150805.html>
- 7) ヤグチ電子，<http://radiation-watch.sakuraweb.com/pm25/>
- 8) 齋藤大作，星清，移流拡散方程式の解析解(1)，開発土木研究所月報，No. 533, pp. 13-19, 1997.
- 9) 齋藤大作，星清，移流拡散方程式の解析解(2)，開発土木研究所月報，No. 541, pp. 64-73, 1998.
- 10) C.N. Davies, " The sedimentation and diffusion of small particles ", Proc.Roy.Soc.,A200, pp. 100-113, 1949.
- 11) 宗像健, Cunningham の補正係数について，粉体工学会誌, Vol. 27, No.2, pp. 91-97, 1990.
- 12) 酒井 健二，岸田 展明，中村 憲司，大塚 輝人，進士 正人，トンネル工事における通風換気システム評価のための中規模実験，土木学会トンネル工学委員会，トンネル工学研究発表会講演集 28, pp. 1-6, 2018.