

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

酒井 健二¹・岸田 展明²・中村 憲司³・大塚 輝人⁴・進士 正人⁵

¹(株)エムシーエム 北陸センター (〒939-0121 富山県高岡市福岡町下老子43番地2)

E-mail: s-kenji@mcmcm.jp

²中電技術コンサルタント株式会社 (〒734-8510 広島県 広島市南区出汐2-3-30)

E-mail: nkishida@cecnet.co.jp

³(独)労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所 作業環境研究グループ (〒214-858 神奈川県川崎市多摩区長尾6-21-1)

E-mail: nakamuk@h.jniosh.johas.go.jp

⁴(独)労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所 化学安全研究グループ (〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6)

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

⁵正会員 国立大学法人山口大学 大学院創成科学研究科 社会建設工学分野 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

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

トンネル掘削工事で発生する粉じんの換気について、高さ2 m、幅1.8 m、長さ27 mの中規模トンネル内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。実験結果から、高さの5倍以上の切羽から離れた位置からでは、換気による風が切羽付近まで届かず粉じんが滞留すること、また、換気による風は切羽方向から坑口方向へ、途中で方向を変えるがその方向転換が緩やかである方が気流が安定し、効率よく粉じんを除去できることが分かった。

Key Words : NATM, ventilation, AC dust

1. 緒言

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、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、高さ2 mの模擬トンネルを用いた実験結果から、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⁾に反映されて、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、換気風管の位置がトンネル高さの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。この状況を確認するため、メタンガス拡散を模した乱流モデルを使った数値計算を行った結果からは、反対に切羽付近での拡散を過大に評価し

てしまい、既存のモデルでは切羽付近での滞留を再現できず、モデルの修正が必要になっている³⁾。

一方、粉じんについては、集じん設備の充実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。先に挙げた実験と計算はともにメタン模擬ガスについて行われており、流れが引き起こす乱流混合を考慮しつつガスの拡散を評価したものである。したがって、ガスに特化したものであるため、粉じんに関する情報はあまり考慮されていない。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。著者らは、粉じん拡散評価のための基礎データを得る実験⁴⁾を行っているが、実規模への適用には、参考文献1)のような現実を模した実験結

果が必要である。そこで粉じんの場合に、実際のトンネル形状下でどのように換気が評価されるべきかを基礎実験として確認し、以後の大規模実験への準備とするため、本報では高さ2mのビニールハウスを連結し全長27mの模擬トンネルを作成し、粉じん発生装置によって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を計測したので報告する。

2. 実験方法

本研究では参考文献1)の結果を検証をしつつ、粉じん環境外からの計測が容易であることを満たし、かつ、ある意味実規模をカバーするサイズとして図-1に示す模擬トンネルを用いた。粉じん発生にはドイツPalas社製RBG-1000エアロゾルジェネレーターを用いた。RBG-1000はシリンダー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、上部ブラシによってシリンダー上端から押し出された粉じんをかき出し、コンプレッサー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。換気は、スイデン社製の電気送風機からフレキシブルダクトで模擬トンネル外から導入した新鮮空気を送ることで行った。切羽方向から見た風管の設置位置を図-2に示す。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。この風速は実規模での参考文献2)の

推奨坑内平均断面風速0.3 m/sに対して、参考文献1) で記された相似則を踏まえた風速とほぼ同等である。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-2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。粉じんの分散は、コンプレッサから粉じん分散装置へ供給される空気圧によって空気流量を制御することができ、本実験では0.15 MPaで53 L/min相当の空気によって粉じんを噴出させた。粉じんは、内径φ28のシリンダを100 mm/hで上昇させてブラシ部分で空気と混合される。したがって、1 cm³/minの粉が供給されており、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。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が、吹き出し時の粉じん濃度は、18 g/m³の濃度で噴出される。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。粉じん濃度は柴田科学製LD-5Rを用いた。当該粉じん計は16,000 CPM(Count Per Minute)程度に計測限界があり、およそその変換係数が1 μg/m³CPMであることから、先の計算によって噴出される粉じん濃度は計測限界以上の濃度を持っている。計測位置は、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

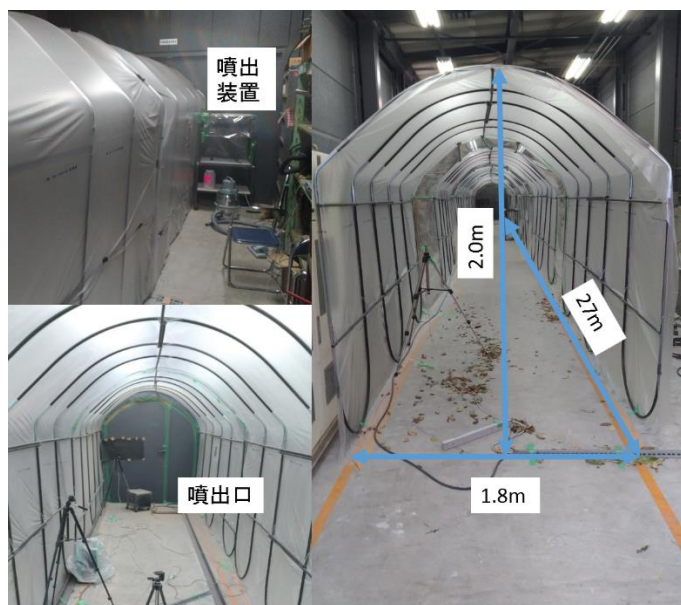


図-1 模擬トンネル(断面積 32m²)

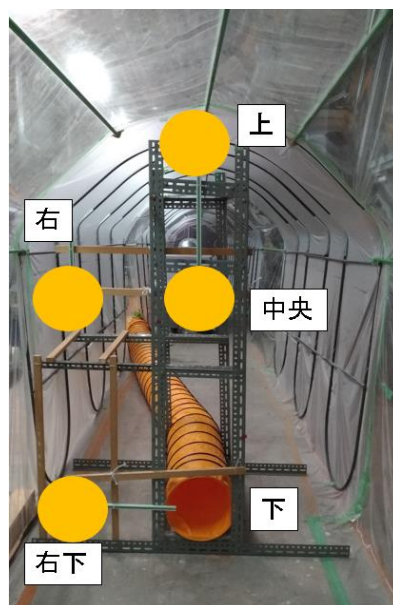


図-2 切羽から見た風管位置(左右は坑口から、風管径φ320、風管中心位置は高さ:上1.8 m、中央1.0 m、下0.2 m、右:壁から0.3 m)

がって図-2に示した換気配管吹き出し口の反対側に、図-1に見られる三脚によって、なるべく壁面に寄せるよう設置計測した。5 m位置では、0.57 mの高さでの計測も併せて行い、高さによる粉じん濃度の違いも見られるようにした。また、分散させる粉じんにはISO12103-1, A1に規定されるACダストのUltra Fineを用いた。

3. 実験結果と考察

図-3, 4, 5に風管の出口(吐出)位置を切羽から8, 10, 12 mの距離で、図-2の各々の配置に設置した場合の粉じん濃度計の計測結果を示した。図-5の中央からの実験を除いた全ての実験において、風管位置から十分に離れた25 m位置での計測結果はほぼ2,000 CPMを記録しており、立ち上がりの遅れは、坑内平均風速によって粉じんが運

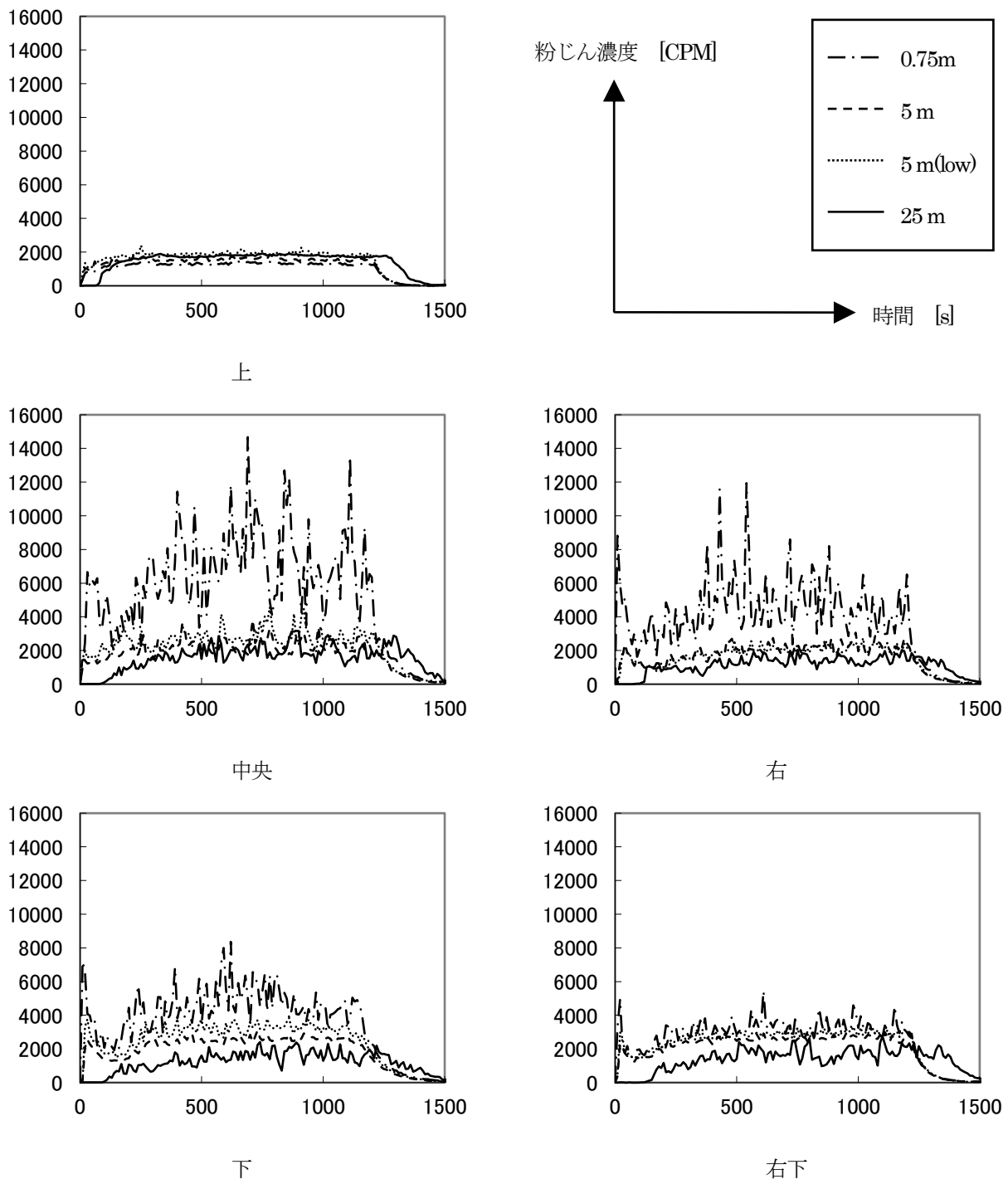


図-3 風管位置を切羽から8mにした場合の粉じん濃度

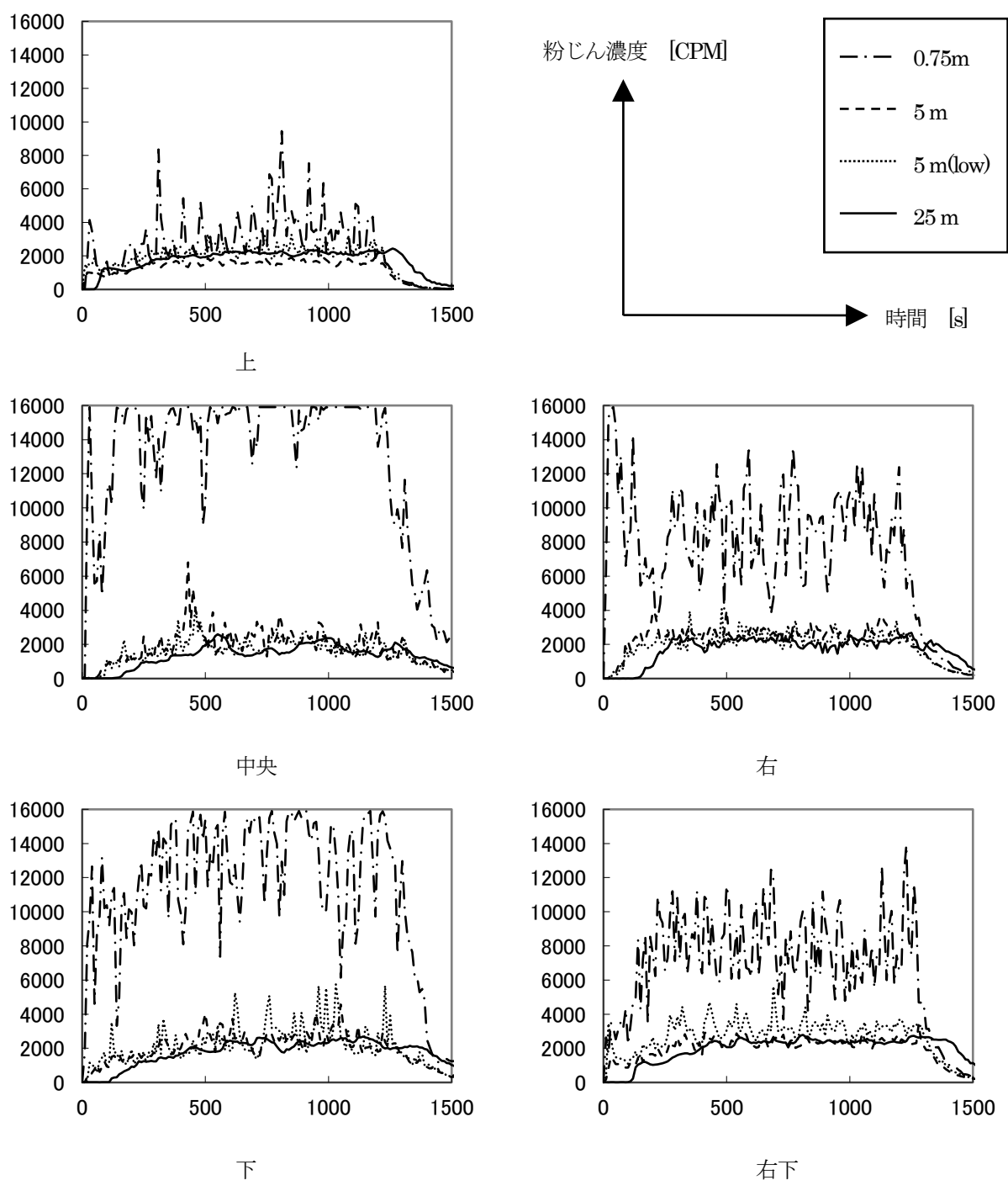


図-4 風管位置を切羽から 10mにした場合の粉じん濃度

ばれる時間を反映している。図-3の中で比較すると、上に風管を設置した場合に比べて、他のケースでは濃度が安定せず、大きくふらついている。これは風管の設置位置によって、風の流が安定していないことを示している。その中でも右下に設置した場合は、上に続いて濃度のばらつきが小さく、比較的安定している。右下からの換気は、面内の対向する辺から最も長い距離が取れる位置であるため、切羽へ向かう風と帰ってくる風が安定しやすい。下、あるいは右下からの換気では、床に沈降し

た粉じんが再度吹き上げられることになるため、より濃度の高い状況が作られ、5 mでの測定で低い位置に設置の方がスケール則に則った風速で高い値を記録している。中央からの換気では、風が切羽に当たった後に、いずれの方向へ向かってでも1mで側壁に再度当たることになるため、流速が落ちやすく、中央の切羽へ向かう風と逆方向への流れが安定しない原因となり得る。その結果、切羽での濃度が上昇したものである。

図-4に示した、切羽から10 m離れた場所からの換気で

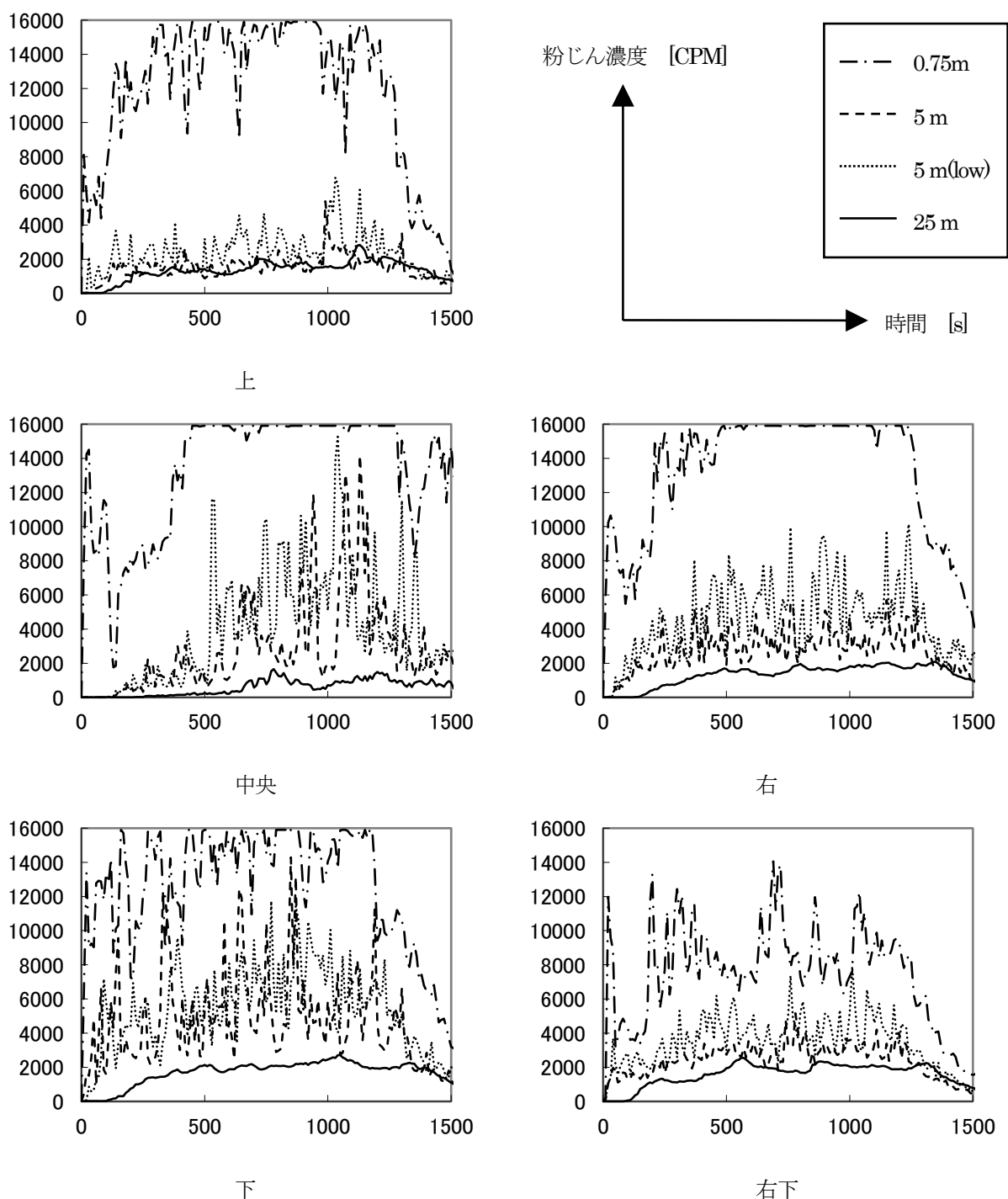


図-5 風管位置を切羽から12mにした場合の粉じん濃度

は、どの場合も8 mからの換気に比べて切羽付近で濃度は高くなっており、換気の吐出位置が切羽から離れた分だけ、換気の気流が届きにくくなっていることが見て取れる。特に中央と下からの換気では粉じん濃度計が計測値の限界を超えている状況が見られる。ただし、十分に風が届いている範囲と考えられる5 m位置の濃度計測値を見ると、8 mからの換気の場合に比べて、若干高い値が出ているものの、大きくは変わらず、5 m位置で十分

混合が進んでいることがわかる。

図-5に示した、切羽から12 m離れた場所からの換気では、さらに切羽付近での濃度は高くなっている。中央に風管を設置した場合のみ、25 m位置での濃度が他の実験よりも低くなっている。粉じんは高濃度の状態でトンネル切羽付近に保持されており、この高濃度の状態が、粉じんの分散が終わった後も続き、減衰が緩やかであることから、換気の空気が切羽付近にほとんど届いておら

ず、粉じんが閉じ込められている状況を示している。結果的に高濃度の部分と換気の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での、拡散によって坑口へむかう流れに粉じんが乗ったものが25 mまで届いているものである。風との混合よりも前記拡散が遅いことから低濃度の流れとして25 m位置で記録されているが、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。また、5 mでも高濃度の粉じんが検出されており、高濃度の区間がこの位置まで広がっている。

8, 10, 12 mのいずれの場合でも、右下からの換気は同一距離の中央、下、右からの換気と比べて、切羽付近で低濃度の結果を得た。トンネル断面内で対向する辺から最も長い距離が取れる位置から吹いていることで、切羽方向への風と、切羽から戻る風とが安定した結果右下からの方が切羽付近の粉じんを効率良く除去できているものと考えられる。

4. 結言

高さ2 m, 幅1.8 m, 長さ27 mの中規模トンネル内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、換気評価を行った結果以下の結論を得た。

1. 高さの5倍以上の距離から換気を行った場合、ガスの場合と同様に切羽付近に換気気流が届かず、粉じんが滞留する現象が見られた。これは、切羽近くで換気吐出口を設けられない場合に切羽付近に粉じん

を留めてしまい、作業員へ悪影響を及ぼす可能性があることを示唆している。

2. トンネル断面中央からの換気気流の吐出は、側壁までの距離が短くなるため、今回の比較の中では最も粉じんの除去効率が悪い。
3. 中央の場合と反対に、対向する辺までの距離を一番大きく取れる、右下からの換気は、今回の比較の中では次善の方法となった。ただし、床上においた場合、沈降した粉じんが再度吹き上げられる効果があるため、切羽までの距離が短い場合に上からの換気に劣る。

参考文献

- 1) 佐藤吉信, 糸川壮一, 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) 大塚輝人: トンネル工事における通風換気システムのシミュレーション, 第 49 回安全工学研究発表会予稿集, pp. 41-42, 2016.
- 4) Otsuka, T., Nakamura, K. and Itagaki, H.: Evaluation of dispersibility of standard dust, *Proc. of Asia Pacific Symposium on Safety (APSS) 2017*, PS-46, 2017.
- 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.

(2018. 8. 10 受付)

MEDIUM SCALE EXPERIMENT FOR EVALUATION OF VENTILATION SYSTEM IN TUNNEL CONSTRUCTION

Kenji SAKAI, Nobuaki KISHIDA, Kenji NAKAMURA, Teruhito OTSUKA
and Masato SHINJI

For evaluation of ventilation of dust generated by tunnel excavation work, it was employed that a medium-sized tunnel having a height of 2 m, a width of 1.8 m, and a length of 27 m. Air outlets for ventilation at a wind speed conforming to the scale law and was evaluated with changing the position. Experimental results show that the ventilation wind could not reach the tunnel working face when it is away from more than 5 times the height. Therefore, the dust stays around the tunnel face. The wind direction would be changed from toward the tunnel working face to the entrance. It was found that the more gentle the direction change gives the more stable the airflow and the more efficient removal of dust.