

室内風洞施設によるトンネル掘削中の粉じん捕集効率の向上に関する基礎実験

谷 純平¹・酒井 健二²・進士 正人³

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

E-mail:s020vf@yamaguchi-u.ac.jp

²(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43-2)

E-mail: s-kenji@mcmcm.jp

³正会員 山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

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

トンネル工事の坑内環境は、高濃度の粉じんの暴露環境にあるため、濃度低減のための換気対策が必要不可欠である。現在、新たな換気方式である「送気吸引捕集式換気法」が注目され、様々なトンネル建設現場で採用されている。「送気吸引捕集式換気法」はエアカーテンと呼ばれる空気の流れの壁を形成する事で大きな粉じん低減効果を発揮する事が期待されているが、その確認に関してはあまりされていない。本研究では、実構造物と同じ換気状況の再現が可能なトンネル模型を使って風洞実験を行い、エアカーテンの形成条件の把握を試みた。そして、捕集効率のさらなる向上の可能性について検討を行った。

Key Words : wind tunnel experiment, ventilation, dust catcher, air curtain, visualization of smoke

1. はじめに

掘削中の山岳トンネル内には多量の粉じんが切羽付近に発生する。掘削時の発じん源としては、発破や重機による掘削、ずり処理、山岳トンネル工法のコンクリートの吹付作業などがある。これらの作業から生じる高濃度の粉じんによるトンネル内の汚染空気は、作業効率の低下はもとより、じん肺の原因となるなど作業者の健康面から非常に問題となっている。坑内の粉じん濃度を低減する対策として、これまで図-1 に示すようにトンネル外から新鮮な空気を切羽近傍に送気し、汚染空気を希釈しながら坑外に排出する「送気式換気法」が一般的であった。しかし、昨今のトンネル断面の大型化による粉じん量の増大、さらにトンネルの長大化により粉じんを伴った汚染空気がトンネル外に排出されず、坑内に滞留するといった問題から、「送気式換気法」は十分な効果を発揮できなくなっており、今まで以上に効率的で質の高い換気技術が求められている。

そのような背景から、2012 年 3 月に全面改定された『ずい道等建設工事における換気技術指針』において新たに提言された「送気吸引捕集式換気法」¹⁾が、現在多くの現場で採用されつつある。この「送気吸引捕集式換

気法」は、図-2 に示すように主換気ファンを坑外に設置し新鮮な空気を送気し、切羽付近には伸縮可能な吸引ダクトを装備した集じん機を設置する。また、トンネル断面全体に切羽方向への新鮮な空気の流れの壁(以下“エアカーテン”と略称する)を形成させ、粉じんの後方への拡散を防止し、切羽周辺に集まった粉じんを吸引ダクトより直接捕集し除じんする方法である。

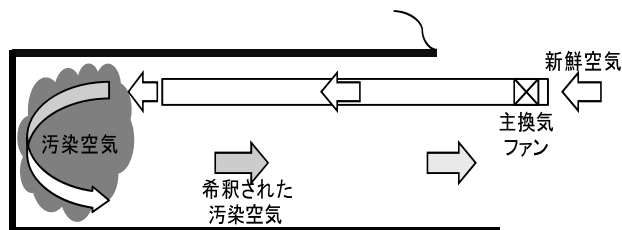


図-1 送気式換気法

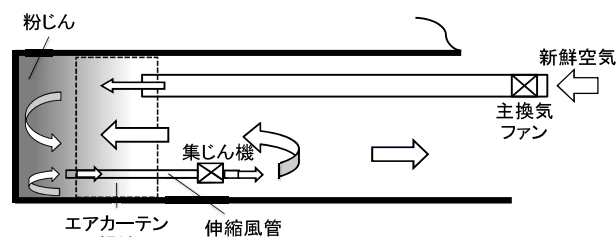


図-2 送気吸引捕集式換気法

「送気吸引捕集式換気法」は、エアカーテンの形成の有無により、集じん機の集じん効率が大きく左右されると言われている。しかしながら、エアカーテンの形成に関する検討はいまだ十分とはいえない。本研究では、トンネル模型を作製して、風洞実験を行い、エアカーテンの形成特性の把握を試みた。また、その結果から集じん捕集効率のさらなる向上の可能性について検討を行った。

2. 実験装置と実験条件

エアカーテンの形成特性を把握するための実験装置として、写真-1に示すように、実構造物と同じ換気状況を再現することが可能であるトンネル室内模型を作製した。以下にその模型の概要について示す。

(1) トンネル模型

検討対象とした構造物は、山岳トンネル工法で施工の断面積 80m^2 の2車線道路トンネルを想定した。トンネル模型は、アーチ部に帯電防止加工を施した透明なアクリル板で、下部をベニヤ板と木材で組み立てて作成し、切羽部となる先端は閉じている。縮尺は1/10、寸法は幅 1250mm ×高さ 600mm ×奥行き 6300mm である。送風機に関しては、図-3に示すように、送風2台、吸引1台の3台を稼働させ、トンネル上部の送気風管と集じん機の吹き出し部から風を送風、集じん機の吸込み部から風を吸引して、模型内の流れ場を作った。送風機はインバータにて $0\sim 20\text{m/sec}$ の風量をそれぞれ制御することが可能である。また、風管直径を縮尺1/10として 150mm とした。

(2) 相似条件

実構造物と模型の相似条件は、レイノルズ数(以下“Re数”と略称する)を両者で一致させることが基本である²⁾が、一般的には完全に一致させるのは困難であるため、条件の緩和について検討した。実構造物と模型の風管内とトンネル空洞内の2つの流れ場における代表的なRe数を試算した。その結果を表-1に示す。円管内流れの臨界Re数は 2000 であり、それを超えると乱流域に

入る³⁾ので、実構造物と模型にはともに乱流域に十分に達するほど、大きなRe数が確保されている事が分かる。このように、両者のRe数が支配的で十分に乱れた場である場合は近似相似則により、Re数の一致条件は除外されると言われている⁴⁾。以上より、実構造物と模型の相似条件は満たしていると考えられる。

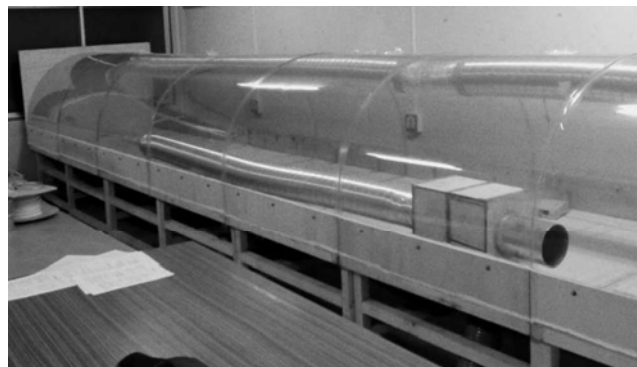


写真-1 トンネル模型画像

表-1 実構造物とトンネル模型のRe数結果

空気 (20°C)	比重 ρ (kg/m^3)	1.205
	粘度 μ ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)	1.822×10^{-5}
	動粘性係数 ν (m^2/s)	1.512×10^{-5}

実構造物	
送風量(m^3/min)	1000
送風量(m^3/s)	16.7
風管直径 $D(\text{m})$	1.5
風速 $v_1(\text{m}/\text{s})$	9.43
Re1(風管流れ) $v_1 \cdot D / \nu$	9.36×10^5
切羽からの位置 $L(\text{m})$	30.0
Re2(空洞内流れ) $v_1 \cdot L / \nu$	1.87×10^7
トンネル模型	
送風量(m^3/min)	10
送風量(m^3/s)	0.167
風管直径 $D(\text{m})$	0.15
風速 $v_2(\text{m}/\text{s})$	9.43
Re1(風管流れ) $v_2 \cdot D / \nu$	9.36×10^4
切羽からの位置 $L(\text{m})$	3.0
Re2(空洞内流れ) $v_2 \cdot L / \nu$	1.87×10^6

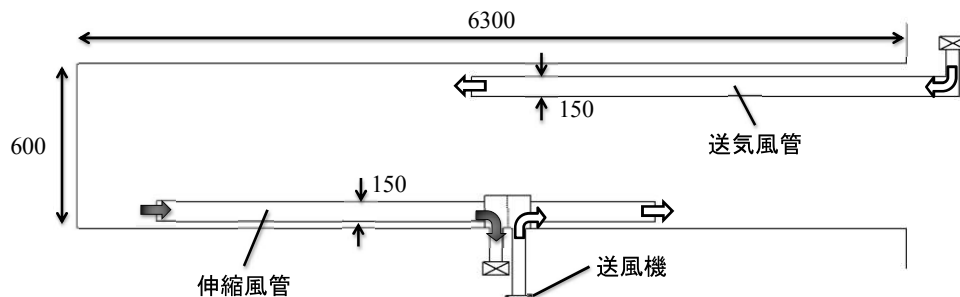


図-3 トンネル模型縦断面図

3. 模型内の流れ場の可視化実験

(1) 目的

「送気吸引捕集式換気法」は、坑内風が切羽方向へ流れ、エアカーテンが形成されることで、高い粉じん捕集効果が期待されている。そこで、はじめに模型内の流れ場の可視化を行い、実際に切羽方向へ風が流れ、エアカーテンが形成されているのかを確認する実験を行うこととした。また、以下の2項目の影響によって、風向がどのように変化するかを把握することとした。

- ①送気風量と集じん機風量のバランスによる影響
- ②送気風管の送気口と集じん機の吐出し口の位置関係による影響

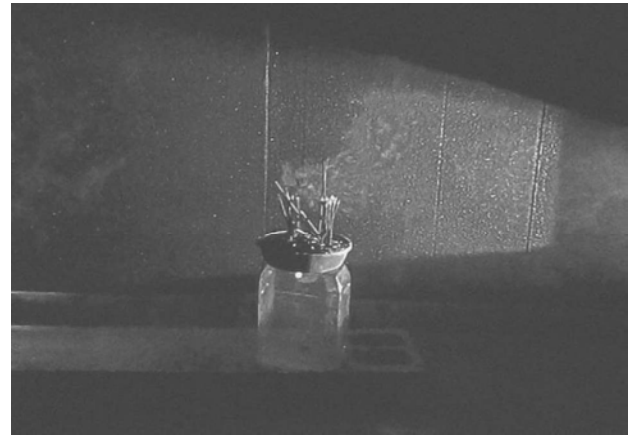


写真-2 可視化実験風景

(2) 実験方法

暗所の模型内において、図-4のように、着火した線香を切羽から0.5m間隔で4か所配置し、煙を発生させた。プロジェクタの光を線香の煙に当て、煙の挙動が鮮明に見えるようにして、流れ場の可視化を行った。そして、煙の挙動をビデオにて撮影しながら、風向の観察を行った。写真-2に実験風景を示す。

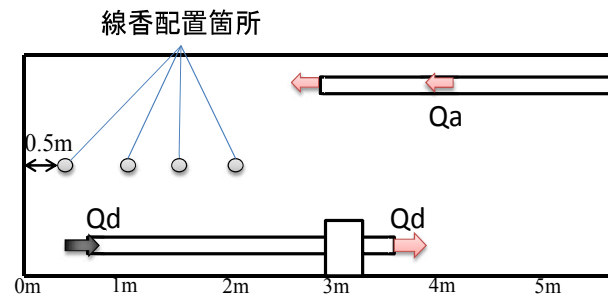


図-4 線香配置箇所

(3) エアカーテン形成の判断基準

エアカーテン領域とは、トンネル断面全体に、ほぼ均一の風速で切羽にゆっくりと流れている区間であり、送気口と集じん機の吸引口の間に形成されると言われている⁵⁾。そこで、今回の可視化実験において、エアカーテン形成の判断基準として、設置した4つの線香の煙のうち、2つ以上切羽方向に乱れを生じずに流れている場合をエアカーテンが形成されているとする。

(4) 実験結果

a) 送気風量と集じん機風量のバランスによる影響

はじめに、送気風量 Q_a と集じん機風量 Q_d のバランスによる風向の変化について検証を行った。表-2に実験モデル（ケース①）を示す。また、送気・吸込みともに

表-2 風量バランスによる影響実験モデル

実験ケース	①
送気風量 $Q_a(\text{m}^3/\text{min})$	5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20
送気口位置 (m)	3.0
集じん機風量 $Q_d(\text{m}^3/\text{min})$	5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20
集じん機 吸引口位置 (m)	0.8
集じん機 吹出口位置 (m)	3.8

表-3 風量バランスによる、切羽から1.5mの地点における風向測定結果

		集じん機の吸引風量 $Q_d (\text{m}^3/\text{min})$					
		5	7.5	10	12.5	15	20
送気風管 からの風量 Q_a (m^3/min)	5	上に弱く	上に弱く	切羽方向に弱く	切羽方向に弱く	切羽方向に	切羽方向に
	7.5	坑口方向斜め上に弱く	左右の斜め上両方に乱れて	切羽方向斜め上に弱く	切羽方向斜め上に弱く	切羽方向に弱く	切羽方向に
	10	上に若干乱れながら	坑口方向斜め上に乱れて	左右に乱れて	左右の斜め上両方に乱れて	切羽方向に	切羽方向に
	12.5	坑口方向斜め上に乱れて	左右の斜め上両方に乱れて	左右の斜め上両方に乱れて	切羽方向に	切羽方向に	切羽方向に
	15	坑口方向に	左右の斜め上両方に乱れて	左右の斜め上両方に乱れて	左右の斜め上両方に乱れて	切羽方向に	左右の斜め上両方に乱れて
	20	坑口方向に	坑口方向に	左右の斜め上両方に乱れて	左右の斜め上両方に乱れて	左右の斜め上両方に乱れて	左右の斜め上両方に乱れて

6つの風量の組み合わせにおける、切羽から1.5mの地点の線香の煙の風向をまとめたものを表-3に示す。 $Q_a < Q_d$ に風量を設定した際に、坑内風は切羽方向に流れた。また、 $Q_a > Q_d$ に設定した際には、坑口方向への流れもしくは乱流となり、エアカーテンが形成されないことが分かった。また、送気風量が $15\text{m}^3/\text{min}$ 以上の場合は切羽から跳ね返ってくる風が強く影響して、 $Q_a < Q_d$ の場合においても乱流になる事が分かった。

b) 送気風管の送気口と集じん機の吐出し口の位置関係による影響

次に、送気風管の送気口と集じん機の吐出し口の位置関係による風向の変化について検証を行った。実験モデルを表-4に示す。従来の伸縮風管を用いない送気集じん機モデル（ケース②）と、集じん機の吸引口を切羽から0.8mの地点で固定し、集じん機の吐出し口と送気口の位置をそれぞれ変化させたモデル（ケース③～⑦）で実験を行った⁵⁾。また、ケース②のみ切羽から4, 4.5, 5mの地点の風向の確認を行った。実験ケースにおける風向測定結果を図-5に示す。

今回の実験から得られた結果を以下に示す。

- ・ケース②の従来の送気集じん機モデルは、今回の送気風量と集じん機風量の組み合わせでは、坑内風が坑口方向に流れるため、エアカーテンの形成が確認できない。
- ・ケース③と④は送気口と切羽の距離が近すぎ、切羽から跳ね返ってくる風の影響を受け、風向がうまく整流されておらず、エアカーテンの形成が確認できない。
- ・ケース⑤は、⑥と比較すると、集じん機の吸引口と吐出し口の距離が近すぎるため、風向が整流されておらず、エアカーテンの形成が確認できない。
- ・ケース⑥において、坑内風が切羽方向へ整流されており、エアカーテンが形成されている。

表-4 送気風管と集じん機の位置関係による影響実験モデル

実験ケース	②	③	④	⑤	⑥	⑦
送気風量 $Q_a(\text{m}^3/\text{min})$	10	10	10	10	10	10
送気口位置 (m)	3.0	1.1	1.1	3.0	3.0	4.5
集じん機風量 $Q_d(\text{m}^3/\text{min})$	14	14	14	14	14	14
集じん機 吸引口位置 (m)	4.5	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
集じん機 吐出口位置 (m)	5.2	1.6	3.8	1.6	3.8	5.2

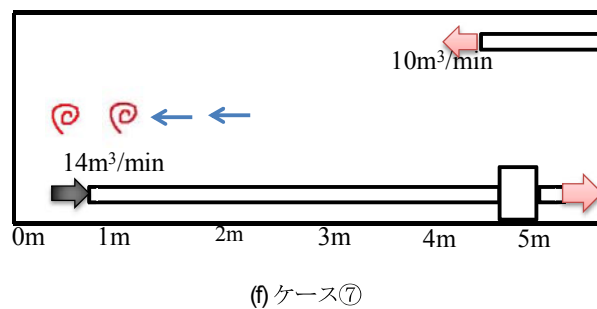
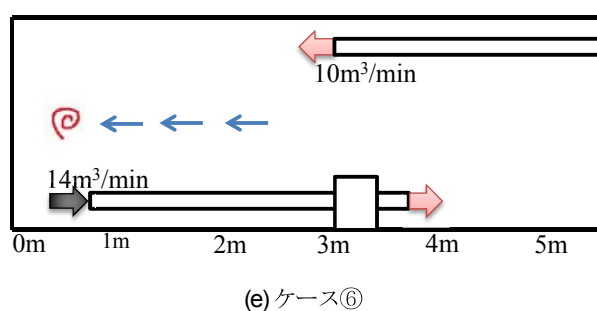
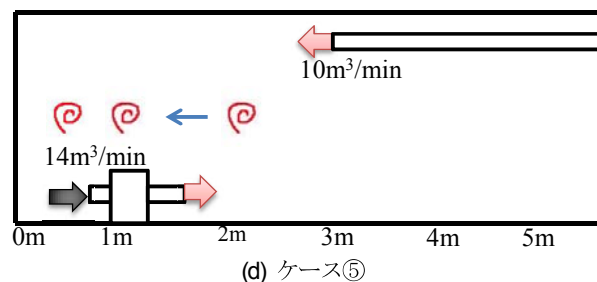
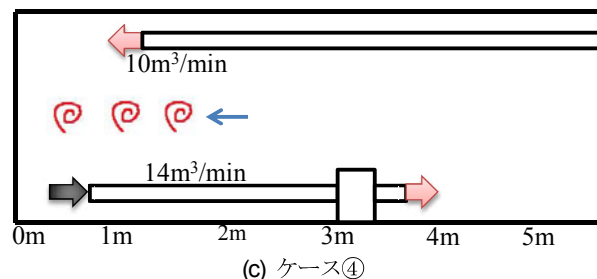
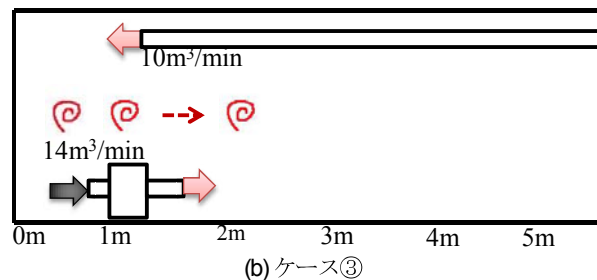
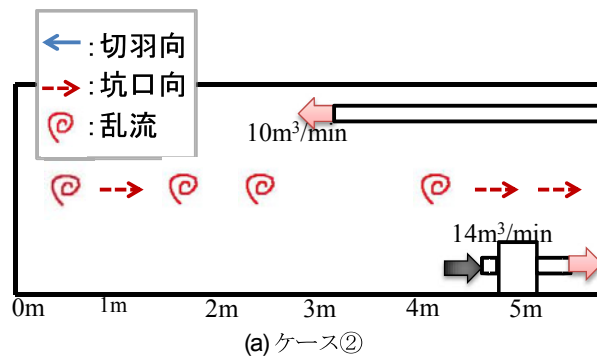


図-5 風向測定結果

- ・ ケース⑦は、坑内風が切羽方向へ流れており、エアカーテンができています。しかし、⑥と比較すると、送気口の位置が切羽から遠く、さらに良質なエアカーテンの形成には送気口を切羽に近づける必要がある。

以上のことより、切羽と送気風管の送気口の距離、さらに集じん機の吐出し口と吸引口の位置関係が、エアカーテンの形成において非常に重要であることが分かった。具体的には切羽と送気口の距離が3m程度あれば、切羽近傍においても、坑内風は切羽方向への風が吹き、エアカーテンが形成されることが明らかになった。また、集じん機の吐出し口と吸引口の距離が近すぎると、乱流になりやすく、ある程度距離をとる必要があることが明らかになった。

4. 結論

今回の坑内流れ場の可視化基礎実験の結果から以下の事が確認できた。

- ・ 送気風量 $Q_a < \text{集じん機風量} Q_d$ に設定した際に、坑内風は切羽方向に流れることを確認した。
- ・ Q_a が $15\text{m}^3/\text{min}$ 以上の場合、切羽から跳ね返ってくる風が強く影響し、 $Q_a < Q_d$ に設定した場合においても乱流となった。
- ・ 集じん機の吸引口と吐出し口の距離が近すぎると乱流となりやすいため、距離をとる必要がある。
- ・ 空気の流れを整流するために切羽と送気口の距離を3m程度離す必要がある。

今回の実験では、吸引口を切羽近傍に設置することにより、切羽方向への風が生じ、エアカーテンが形成されることが分かった。しかし、これは定性的な観察結果でしかないため、実際に粉じん濃度が集じん機前後で低減しているという定量的な事実によって、エアカーテンの形成を明らかにする必要がある。そこで、今後は数量的な室内実験を実施していく予定である。

謝辞：トンネル模型の作成に多大なるご協力を頂いた株式会社エムシーエム酒井喜久雄氏、林考宗氏、また研究の進展に対し、様々な助言をいただきました山口大学大学院理工学研究科望月信介教授、朝位孝二准教授に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 建設労働災害防止協会:新版ずい道等建設工事における換気技術指針,pp.64-69,2012.
- 2) 江守 一郎, 関本 孝三, 斉藤 孝三: 模型実験の理論と応用, pp.110-119, 2000.
- 3) 及川正行, 柏木正, 伊賀啓太, 市川香, 柳哲夫: 地球環境を学ぶための流体力学, pp.158-159, 2006.
- 4) 劉康, 山中俊夫, 甲谷寿史, 東本文明: 置換換気室内の汚染物濃度分布予測における模型実験法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2001.
- 5) 独立行政法人土木研究所: 山岳トンネル工事における機械掘削時の粉じん低減に関する研究 共同研究報告書, pp.126, 2009.

(2013. 9. 2 受付)

WIND TUNNEL EXPERIMENTS ON DUST COLLECTION EFFICIENCY OF A TUNNEL UNDER CONSTRUCTION

Jumpei TANI, Kenji SAKAI and Masato SHINJI

Ventilation for reducing the dust concentration is essential in order to be exposed so much dust in a mountain tunnel under construction. Now, a new ventilation method “the system of air supply and dust suction” is accepted at various sites. It is known that this method shows large dust reduction by forming the wall of air flow “Air curtain”. We investigated the formation characteristic of “Air curtain” by the wind tunnel experiment. And, we examined possibility of further improvement of dust collection efficiency.

