

工場等の開放空間に適用可能な 「T-トルネード排気ユニット[®]」の開発

秋山 和也^{*1}・八田 良行^{*2}

Keywords : local exhaust, swirl flow, tornado, open spaces, oil mist, capture efficiency

局所排気, 旋回流, トルネード, 開放空間, オイルミスト, 捕集率

1. はじめに

オイルミスト等が発生する生産機器を有する工場では、室内の空気環境の悪化による作業者の健康リスクや火災のリスクを低減させるため、汚染物質の室内への拡散を抑える対策が求められている。その対策として、生産機器に直接ダクトを接続する方法や、生産機器の近傍に排気フードを設置し、局所的に排気を行う方法が用いられているが、一方で作業空間の確保や生産機器のレイアウト変更に対応するため、排気方法のフレキシブル性も求められている。

そこで、本研究では、開放空間を有する工場等の新築およびリニューアルにおける環境改善とフレキシブル性の両立に向け、トルネード(旋回流)を応用した局所排気ユニット「T-トルネード排気ユニット」(以下、本ユニット)を開発した。

本報では本ユニットの開発にあたり、試作機を用いた実験および CFD によるシミュレーションと、その結果をもとに製作した実機による実大実験を行い、トルネード排気の有効性を検証した結果を報告する。

2. 一般的な局所排気方法と課題

生産機器を対象とした一般的な局所排気方法として、先ず、図-1 に示すように排気フードを設置し、生産機器の近傍から排気を行う方法が挙げられる。この方法は、生産機器から排気される汚染物質が吸込口付近に到達して初めて吸込まれるため、捕集率が低くなる点

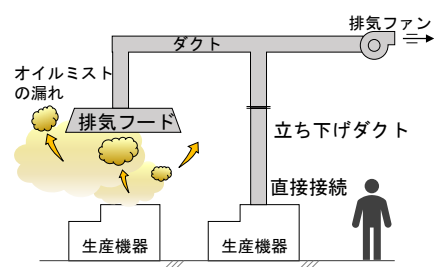


図-1 局所排気方法の例
(排気フードおよび生産機器に直接接続)

Fig.1 Example of local exhaust method
(Direct connection to exhaust hood and production equipment)

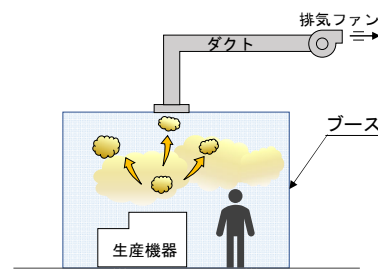


図-2 ブースを利用した局所排気方法の例

Fig.2 Example of local exhaust method covering production equipment

が課題となる。また、生産機器本体にダクトを直接接続する場合は、レイアウト変更のたびに立下げダクトの新設が必要になり、フレキシブル性に欠ける。次に、図-2 の生産機器をブースで囲う方法では、汚染物質が外部に漏れることなく排気されるが、作業空間はブース内に制限されてしまう点が課題となる。

なお、トルネードを利用した既往の研究や技術として、喫煙室内を対象とした研究¹⁾や病院の病床を対象

* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 空間研究室

* 2 設計本部 設備設計第三部

とした排気技術²⁾があるが、周囲の壁やカーテンが気流のガイドとなることでトルネードが発生しており、本研究で対象とするような、周囲に壁がない開放された空間への適用は難しい。

そこで、本研究では、これらの課題を解決すべく開発した本ユニットについて、開放空間におけるトルネードの発生の有無や、汚染物質の捕集率を求めることで、その有効性を検証する。

3. 給排気一体型制気口の概要

図-3 に本ユニットの本体である給排気一体型制気口(600φ)の内部構造を示す。給気は、側面から取り入れ、内部で回転させながら室内へ吹出す。吹出口は、下面に円周上に配置し、さらに吹出ガイドを設置する。吸入口は、下面の中央に配置し、トルネードにより周囲に拡散せずに上昇してきた空気を捕集する。なお、給気ファンと排気ファンは別置で設置する。

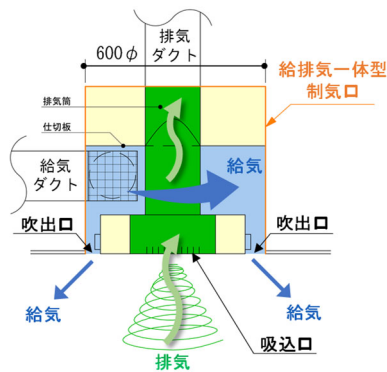


図-3 給排気一体型制気口の内部構造

Fig.3 Internal structure of supply / exhaust integrated air diffuser

4. 試作機実験による評価

4.1 実験概要

本ユニットの給気風量(以下、SA)と排気風量(以下、EA)を検討する。実験は、図-4に示すように本ユニットの下部に煙発生器を設置し、床面から煙を発生させ、トルネードの発生状況を可視化する。評価は、トルネードの発生の有無や安定性に基づき、表-1に示すように5段階の基準を設定し、目視で評価する。

実験は、給排気一体型制気口のみ設置した条件で行う。給排気風量としてSAとEAは、それぞれ400~900m³/hの範囲で50m³/h刻みに可変させた全121ケース実施する。

本ユニットの設置高さは、床面から給排気一体型制

気口の下端まで2.0mとする。

4.2 目視による評価結果

表-2に、給排気一体型制気口のみ設置した条件での目視評価結果を示す。給排気風量として、SA:700~750m³/h、EA:450~500m³/hの範囲で「4」と高い目視評価になる傾向がみられた。また、全体としてEAよりSAが大きい場合にトルネードが発生する傾向がみられた。しかし、給排気一体型制気口のみでは、安定したトルネードの発生となる「5」の評価は得られなかった。

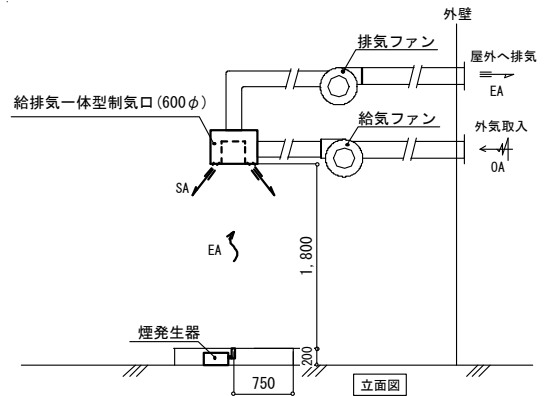


図-4 煙発生器を用いた実験システム

Fig.4 Experimental system using smoke generator

表-1 トルネードの目視評価基準

Table 1 Visual evaluation criteria for tornado

評価	備考
1	トルネードが発生せず、煙が上昇しない
2	トルネードが発生し、煙は上昇するが給気と混合する
3	トルネードが発生し、緩やかに煙が回転しながら上昇
4	トルネードが発生し、煙が早く回転しながら上昇
5	安定したトルネードが発生し、煙が回転して上昇

表-2 トルネードの目視評価結果
(給排気一体型制気口のみ)

Table 2 Visual evaluation result of tornado
(supply / exhaust integrated air diffuser)

評価結果	給気風量 SA[m ³ /h]											
	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	
排気風量 EA [m ³ /h]	400	2	2	3	4	4	4	2	4	1	2	2
	450	1	1	1	2	3	3	4	4	1	3	1
	500	1	1	1	1	2	3	4	4	3	4	2
	550	1	1	1	1	1	1	1	3	4	1	1
	600	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1	1
	650	1	2	1	1	1	1	1	1	3	1	1
	700	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	750	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1
	800	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
	850	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
900	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	

5. 改良型試作機の評価

5.1 実験概要

周囲に壁を設けることなくトルネードを安定させるため、試作機の改良型として、給排気一体型制気口に図-5に示すように外周給気フード(□1,500, 1,500φ)や

排気フード(300φ)を設置した場合について目視評価を行う。

給排気風量は、代表として表-2 で高い評価が得られた SA : 700m³/h, EA : 450m³/h とする。

設置高さは、床面からフード下端まで 1.5m または 2.0m とし、実験を行う。

5.2 目視による評価結果

表-3 に、外周給気フードおよび排気フードの有無による 5 段階の目視評価結果を示す。設置高さ 1.5m において、排気フードのみ設置した場合では評価は「4」となり、給排気一体型制気口のみと同じ結果となった。同様に、設置高さ 1.5m で外周給気フードを設置した場合、角形はトルネードが発生せず「1」となったが、丸形は安定したトルネードの発生となる「5」の評価が得られた。次に、設置高さを 2.0m とした場合、丸形の外周給気フードのみを設置してもトルネードが不安定となり、その評価は「3」に低下した。しかし、外周給気フードと排気フードの両方を設置することで、評価は「5」となり、写真-1 に示すように安定したトルネードが得られた。しかし、トルネードに揺らぎが生じることで、筒状の排気フードに煙が捕集されない状況が確認できたため、捕集率の向上には、その形状の検討が必要であることがわかった。

6. シミュレーションによる評価

6.1 シミュレーションモデル

実測は目視評価のみであったが、定量的な評価を行うため、CFD によるシミュレーションを実施する。図-6 にシミュレーションモデルを示す。シミュレーションは、まずは 4 章において試作機で目視評価を行った給排気一体型制気口(600φ)のみ設置したパターンで行う。次に、5 章の改良型試作機で課題を得た排気フード形状の検討のため、外周給気フード(1,500φ)および排気フードを設置したパターンについても行う。

設置高さは、図-6(1)に示すように給排気一体型制気口のみの場合、床面から給排気一体型制気口の下端まで 2.0m とする。また、外周給気フードおよび排気フードを設置した場合の床面からフード下端までの設置高さは 2.1m、フード高さは 0.5m(床面から給排気一体型制気口の下端まで 2.6m)とする。給気は、図-6(2)に示す給排気一体型制気口の下面の外周部に設置した吹出口から行い、排気は下面の中央部に設置した吸込口から行う。

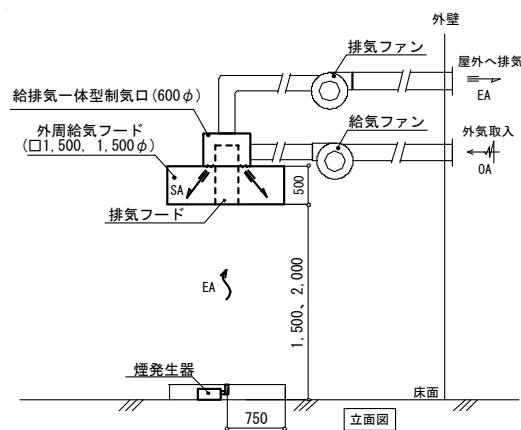


図-5 改良型試作機の実験システム
Fig.5 Experimental system for improved prototype

表-3 フード設置の有無による目視評価結果

Table 3 Visual evaluation results depending on the presence or absence of a hood is installed

No.	設置高さ (フード 下端まで)	外周 給気 フード	排気 フード	評価 結果
	m			
1	1.5	無	無	4
2	1.5	無	有	4
3	1.5	有(角形)	無	1
4	1.5	有(丸形)	無	5
5	2	有(丸形)	無	3
6	2	有(丸形)	有	5

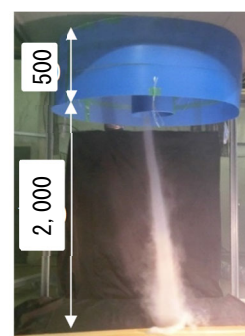
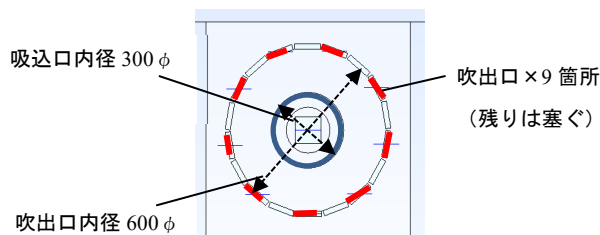
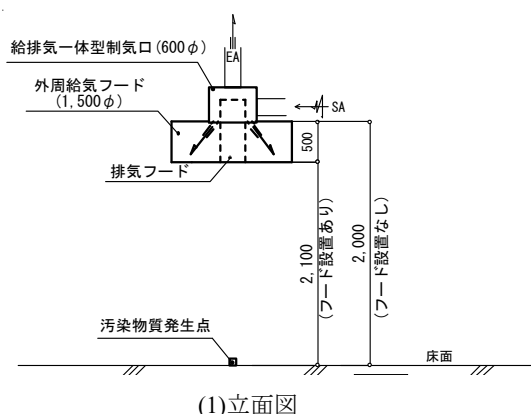


写真-1 トルネードの発生状況
Photo.1 The appearance of tornado



(2)平面図(給排気一体型制気口の下面)

図-6 シミュレーションモデル
Fig.6 Simulation model

6.2 シミュレーション条件と評価方法

CFD の解析条件を表-4 に示す。給排気一体型制気口のみの場合、SA と EA はそれぞれ 400m³/h~700m³/h の範囲で 100m³/h 刻みとする。フード設置時は、給排気一体型制気口の設置高さが 30% 高いため、フード未設置時で最も高い捕集率となった風量を 30% 増加させた風量とする。

排気フード形状は、表-5 に示すように未設置、筒型、ベルマウス型、円錐型の 4 パターン実施する。また、計算時間は 5 分とする。

評価は、平均捕集率 η を算出し行う。 η は、式(1)に示すように計算時間中に吸込口から排気した汚染物質量 M_c を、発生した汚染物質量 M で除した値とする。

6.3 給排気一体型制気口の評価

表-6 に、給排気一体型制気口のみ設置したケースでの平均捕集率を示す。平均捕集率は、SA : 600m³/h, EA : 700m³/h とした場合が最も高く、42.6% となった。表-2 で高い評価が得られたケース(SA : 700m³/h, EA : 450m³/h)に近いの風量となる SA : 700m³/h, EA : 400m³/h および EA : 500m³/h をみると、平均捕集率は約 30% であり、高い評価は得られなかった。また、給排気風量と評価結果の関係として、シミュレーションでは SA に対し、EA が大きい場合に平均捕集率が高い傾向となり、実測での目視評価とは逆の結果となった。

6.4 排気フード形状の評価

排気フード形状の評価にあたり、給排気風量は、6.3 で最も捕集率が高い SA : 600m³/h, EA : 700m³/h から 30% 増加させた風量となる SA : 800m³/h, EA : 900m³/h とする。

図-8 に、排気フード未設置時の静圧分布とトルネードの可視化状況を示す。給気が旋回しながら床面まで到達し、外周給気フードの下部が周囲より負圧となることでトルネードが形成されるものと推察する。

排気フード形状ごとの汚染物質の垂直断面濃度分布を図-9 に示す。同図より、排気フード未設置は、周囲への拡散は少ないが、他の排気フード設置時と比べて濃度が高い範囲が多い。排気フード形状については、筒型とベルマウス型は床面付近で広範囲にわたり 0.009g/m³ 以上となり、円錐型が最も汚染物質の拡散が抑えられていることがわかった。

表-7 に、排気フード形状ごとの汚染物質の平均捕集率を示す。排気フード未設置時の平均捕集率 35.3% に対し、筒型の排気フードは 42.1% となり、排気フードを設置することで約 7% 向上した。また、排気フード形状は円錐型が最も平均捕集率が良く、58.3% となった。

表-4 CFD 解析条件
Table 4 CFD analysis conditions

項目	内容
解析ソフト	STREAM ver.14
解析領域	8m (X) × 8m (Y) × 3.1m (Z)
乱流モデル	標準k-εモデル
流入条件・流出条件	給気風量・排気風量：各ケースごとに設定 自由流出境界でエアバランスを確保
汚染物質発生量	10 ⁻³ g / s 排気口直下の床面に配置した 0.1m角立方体から発生

表-5 排気フード形状の条件
Table 5 Exhaust hood shape conditions

	未設置	筒型	ベルマウス型	円錐型
排気フード形状				
	外周給気フード	排気フード		

$$\eta = M_c / M \times 100 \quad (1)$$

η [%] : 平均捕集率

M [g] : 発生した汚染物質量

M_c [g] : 吸込口から排気した汚染物質量

表-6 平均捕集率の算出結果(給排気一体型制気口のみ)
Table 6 Calculation result of average capture efficiency (supply / exhaust integrated air diffuser)

平均捕集率[%]		給気風量 SA [m ³ /h]			
		400	500	600	700
排気風量 EA [m ³ /h]	400	41.9	33.1	30.0	27.2
	500	40.7	37.9	37.2	32.1
	600	31.1	37.4	40.0	37.4
	700	33.2	40.5	42.6	41.3

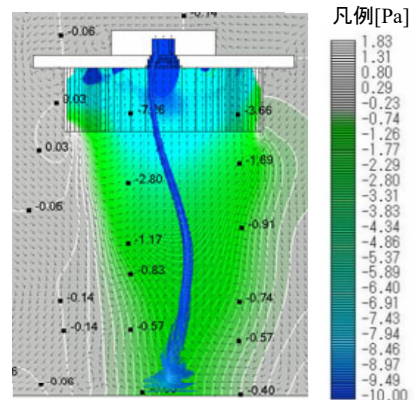


図-8 静圧分布とトルネードの可視化 (排気フード未設置)

Fig.8 Static pressure distribution and visualization of tornado (Exhaust hood not installed)

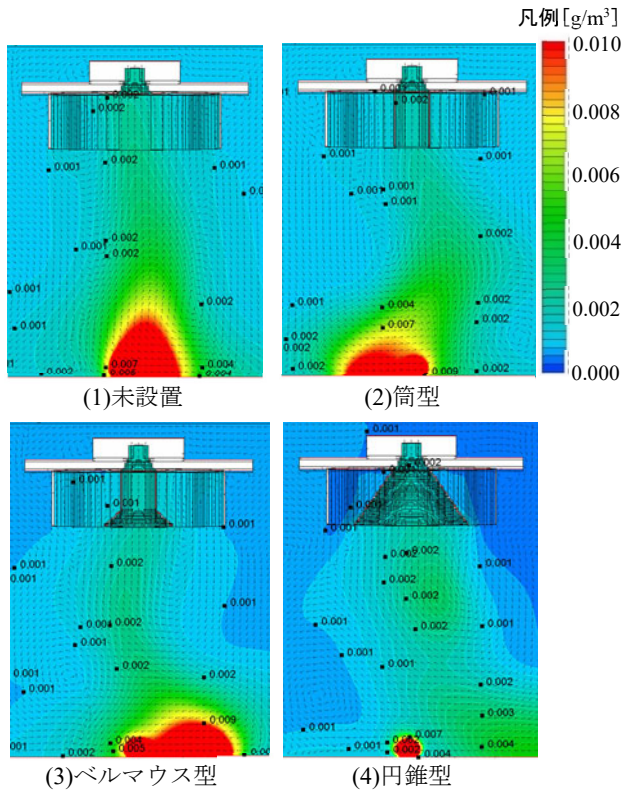


図-9 排気フード形状ごとの汚染物質の垂直濃度分布
Fig.9 Vertical concentration distribution of contaminants by exhaust hood shape

表-7 シミュレーションによる平均捕集率の比較
Table 7 Comparison of average capture efficiency by simulation

排気フード形状	未設置	筒型	ベルマウス型	円錐型
平均捕集率	35.3%	42.1%	48.7%	58.3%

7. 実大実験による評価

前章までは、試作機を用いた目視評価と、捕集率を指標としたシミュレーションによる検討を行った。その結果、トルネードを安定して発生させるためには、本ユニットは給排気一体型制気口と外周給気フード、排気フードによる構成が良く、排気フードの形状は、シミュレーションによって円錐型が最も捕集率が高くなる知見を得た。しかし、実測では目視評価に留まり、定量的な評価について課題があった。

そこで本章以降では、実機を製作し、実大実験で捕集率の評価を行い、本ユニットの有効性を検証する。

7.1 実大実験の概要

7.1.1 実機の概要

実機は写真-2 に示すように、給排気一体型制気口(600φ)、外周給気フード(1,500φ)、排気フード(円錐型、フード下部：1,000φ、吸込口接続部：300φ)を用い、給排気一体型制気口に外周給気フードと排気フードを接続することで構成する。

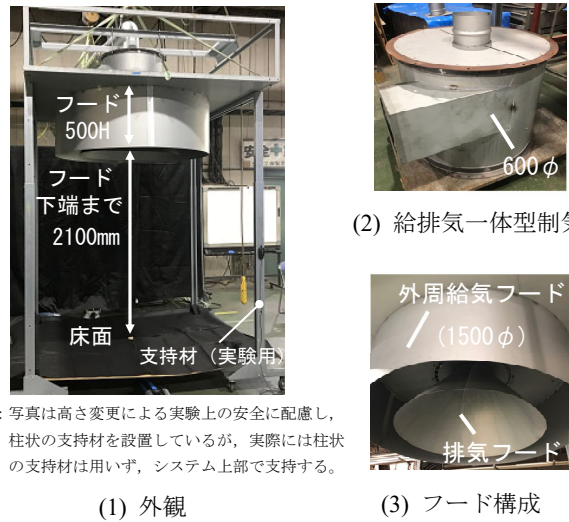


写真-2 T-トルネード排気ユニット
Photo.2 T - Tornado exhaust unit

7.1.2 システム概要

実験は、本ユニットを某工場の開放空間に設置して行う。そのシステムの概要を図-10 に示す。本ユニットの設置高さは、床面からフード下端までを 2,100mm とする。吹出口からの給気角度は 15° とする。給気および排気は、それぞれにファンを設置し、インバータを用いて風量設定を可能とする。また、給気は外気から取入れ、排気は外気へ放出する。

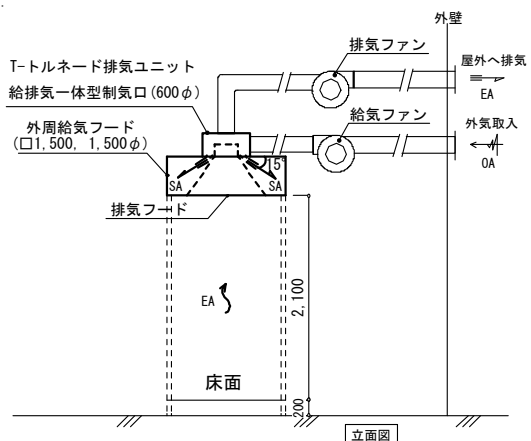
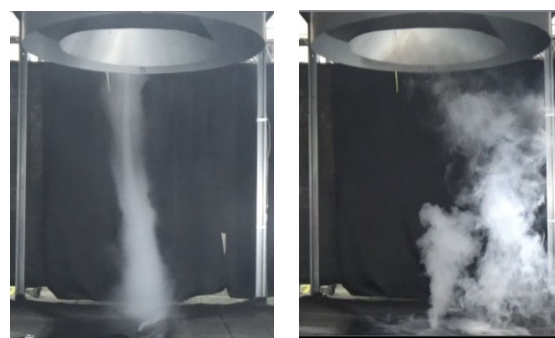


図-10 T-トルネード排気ユニットの概要
Fig.10 Overview of T - Tornado exhaust unit

7.2 評価方法

7.2.1 トルネードの目視評価

定量的な評価を行う前段として、本ユニットでトルネードの発生状況を確認するため、トルネードの目視評価を行う。目視評価は、煙発生器を使用し、床面から煙を発生させ、写真-3 に示すようにトルネードの発生の有無を評価する。給排気風量は、6章のシミュレーションで行ったSA : 800m³/h, EA : 900m³/hを基準とし、基準からの風量の大小を水準として、SA は 500～950m³/h, EA は 800～1,100m³/h の範囲で 50m³/h 刻みで全 70 ケース実施する。



(1)トルネード発生有り (2)トルネード発生無し

写真-3 目視評価

Photo.3 Visual evaluation

7.2.2 定量的な評価方法の検討

本ユニットの定量的な評価にあたり、実験上適用可能な評価方法を検討する。排気性能の評価について、代表として挙げられるのは、空気齢を測定する方法や、発生させたパーティクル等の捕集率を測定する方法がある。

まず、空気齢を測定する方法は、換気効率が求められるが、既往研究³⁾のように室内空間全体にトレーサーガスを一定量散布させる必要があるため、本報のように開放空間で実験を行う場合は、適用が難しい。

次に、捕集率を測定する方法については、実験場所がクリーンルーム等の清浄度の高い空間ではないため、パーティクルの捕集による測定は難しい。捕集率を測定する他の方法として、既往研究⁴⁾では、局所排気フードを対象にトレーサーガスの発生箇所を変え、濃度比較を行うことで捕集率を算出しており、本報の実験場所にも適用可能と考えられる。

よって、本報では、定量的な評価方法としてトレーサーガスを用いた捕集率の測定を行うこととする。

7.2.3 捕集率の評価方法の概要

捕集率の評価は、既往研究⁴⁾で用いられているトレーサーガスを用いた測定法と同様の手法とし、7.2.1 でトルネードが発生した風量パターンでのみ行う。図-11 に捕集率の測定を行うシステムの概要を示す。トレーサーガスは CO₂ を用いる。CO₂ の計測は、排気ダクト内に CO₂ センサ(図-11 中、A 点)を設置し、その濃度を測定する。なお、計測された CO₂ 濃度から測定開始前のバックグラウンド CO₂ 濃度を差し引いたものを測定濃度とする。CO₂ 濃度の測定時間は 10 分間とし、開始後および終了前の 1 分間を除く 8 分間で平均捕集率を算出する。なお、実験は非空調空間で実施し、測定終了時に室内と排気ダクト内の十分な換気を行う。

捕集率は、図-12 に示すように、発生させた CO₂ が全て捕集される位置(図-11 中、B 点)に発生源を置いた時

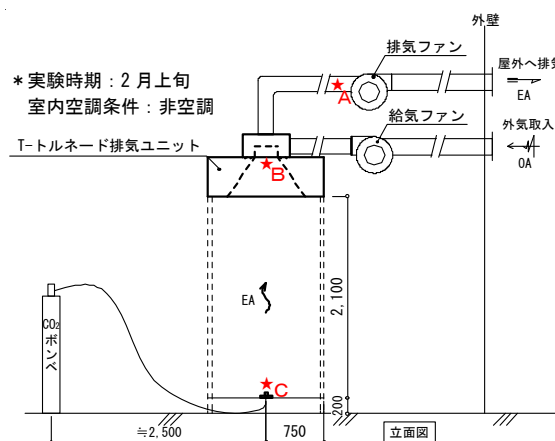


図-11 捕集率測定の実験システム

Fig.11 Experimental system for measuring capture efficiency

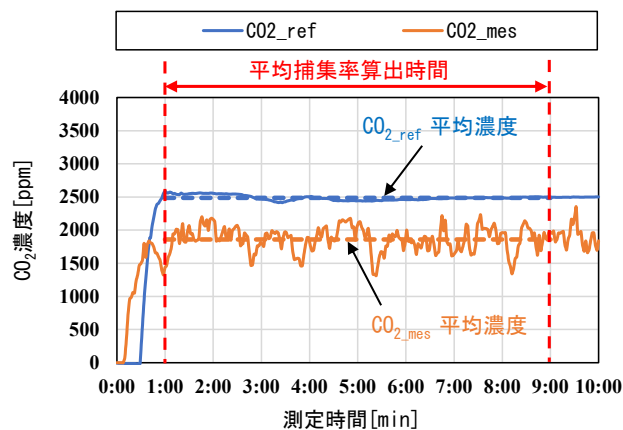


図-12 CO₂ 濃度の推移と平均 CO₂ 濃度

Fig.12 Transition of CO₂ concentration and average CO₂ concentration

に排気ダクト内で測定される CO₂ 濃度である CO_{2_ref} と、CO₂ 発生源を床面(図-11 中、C 点)に置いた時に排気ダクト内で測定される CO₂ 濃度である CO_{2_mes} の平均濃度を比較し、式(2)を用いて求める。なお、濃度により捕集率を算出するため、CO_{2_ref} と CO_{2_mes} の排気風量は同一とする。

捕集率の測定は、先ず基本形として本ユニットの下部に障害物がない状態で行う。その後、捕集率の結果をもとに決めた測定風量パターンについては、写真-4に示す机上での作業を想定し、障害物を設置した場合についても行う。

$$\text{捕集率}[\%] = \text{CO}_2\text{_{mes}}[\text{ppm}] / \text{CO}_2\text{_{ref}}[\text{ppm}] \times 100 \quad (2)$$

CO₂_{ref}[ppm] : 図-11 中、発生源 B 点時の排気ダクト内の CO₂ 濃度
 CO₂_{mes}[ppm] : 図-11 中、発生源 C 点時の排気ダクト内の CO₂ 濃度

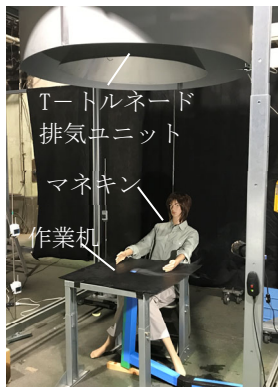


写真-4 障害物ありの測定
 Photo.4 Measurement with obstacles

7.3 実大実験の結果および考察

7.3.1 トルネードの目視評価の結果

トルネードの目視評価の結果を表-8に示す。6.4のシミュレーションでのSA : 800m³/h, EA : 900m³/hは、トルネードが発生しなかった。これは、室内条件がシミュレーションと異なるためと考えられる。トルネードが発生した中で最も風量の小さいパターンは、SA : 500m³/h, EA : 800m³/h となったが、トルネード形状が不安定で持続性がなかった。トルネードの発生は、SA : 700~900m³/h, EA : 1,000~1,100m³/h の範囲が良好な結果となった。

7.3.2 CO₂_{mes} の測定結果

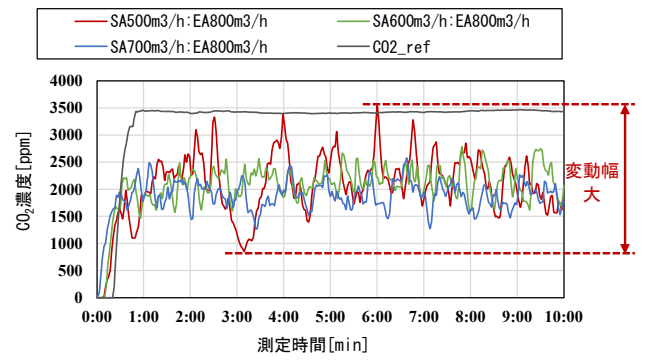
図-13(1)~(3)に、排気ダクト内におけるCO₂濃度の推移を排気風量ごとに示す。トルネードが発生した中で最も風量の小さい、SA : 500m³/h, EA : 800m³/h は、CO₂濃度の変動が大きくなった。その後、SAにもよるが、EA : 1,000m³/h と増加に伴い、CO₂濃度の変動幅も小さくなった。さらにEAを増加させたEA : 1,100m³/h(SA : 750m³/h)は、EA : 1,000m³/h(SA : 800m³/h)と比べて、変動幅が大きくなった。よって、CO₂濃度の変動幅が小さいほど、トルネードが安定していると推察する。

表-8 目視評価の結果

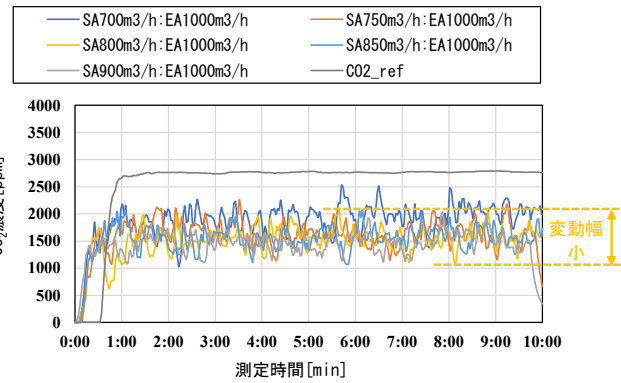
Table 8 Visual evaluation results

○ : トルネード発生

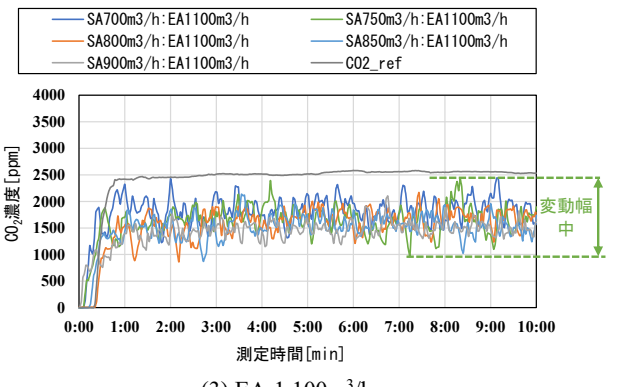
風量	排気風量EA[m ³ /h]						
	800	850	900	950	1000	1050	1100
給気風量 SA [m ³ /h]	500	○					
	550						
	600	○		○			
	650						○
	700	○		○		○	○
	750				○	○	○
	800				○	○	○
	850				○	○	○
	900					○	○
	950						○



(1) EA:800m³/h



(2) EA:1,000m³/h



(3) EA:1,100m³/h

図-13 排気ダクト内のCO₂濃度の推移

Fig.13 Transition of CO₂ concentration in the exhaust duct

7.3.3 捕集率の評価

図-14に式(2)を用いて算出した、各風量パターンでの捕集率の測定結果を示す。全体をみると、捕集率は概ね60%以上となり、6章のシミュレーションで算出した捕集率である58.3%と同等以上であった。また、SA:750m³/h, EA:1,100m³/hのとき、捕集率は82%と最も良い結果となった。よって、本実験における設置条件の場合、風量設定は図-13(1)~(3)の結果も考慮すると、SA:750~850m³/h, EA:950~1,100m³/hの範囲が妥当と考えられる。なお、参考としてSA:0m³/h, EA:950m³/hの排気のみパターンでも測定を行ったが、その捕集率は約9%であることから、トルネードによる排気を行うことで、効率よく汚染物質が捕集できたとと言える。

図-15に、SA:800m³/h, EA:1,000m³/hとし、写真-4に示す障害物の有無による捕集率の比較を示す。障害物ありとなしともに、3回の測定結果は概ね同様となった。障害物がある場合は障害物なしの場合に対して、

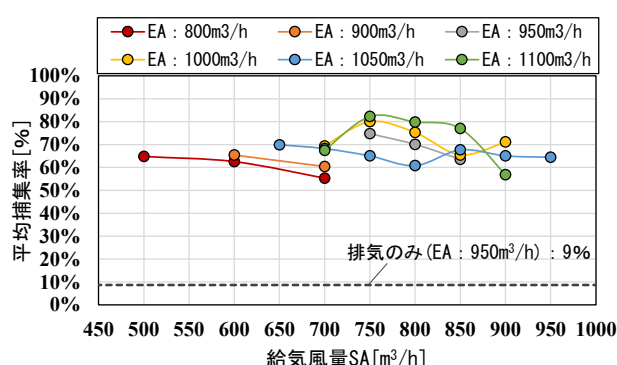


図-14 各風量パターンにおける平均捕集率
Fig.14 Average capture efficiency for each air volume

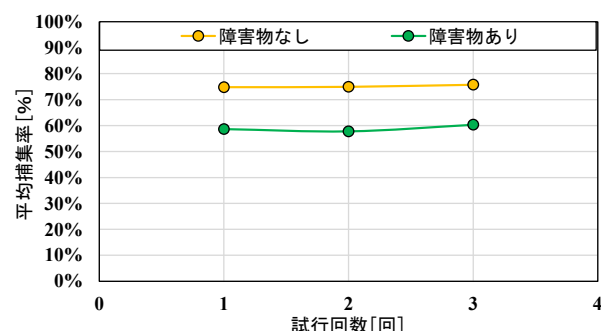


図-15 障害物の有無における平均捕集率の比較
(SA:800m³/h, EA:1,000m³/h)
Fig.15 Comparison of average capture efficiency based on the presence or absence of obstacles
(SA:800m³/h, EA:1,000m³/h)

捕集率は約15%低下したが、それでも約60%は確保できていることから、トルネードは高い捕集効果があると言える。

8. まとめ

本研究において、試作機を用いた目視評価とシミュレーションによる検証を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 給排気一体型ユニットに外周給気フードと排気フードを設置することで、トルネードが安定した。
- 2) 排気フードの形状は、円錐型が最も平均捕集率が良く、58.3%となった。
- 3) 捕集率は、排気のみが約9%であったが、本ユニットを用いることで、障害物なしでは60~80%程度と高い捕集率が得られた。
- 4) 障害物ありでは、約60%の捕集率となった。

以上より、設定条件を適切に定めた場合は、本ユニットにより、高い捕集効果が得られることを検証できた。よって、オイルミスト等の作業空間への拡散を抑制できることから、環境改善に貢献できることがわかった。

謝辞

本研究は、クリフ(株)との共同研究による成果であり、実験場所の提供や計測に協力頂いたクリフ(株)の関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 遠藤智行, 倉淵隆: 高効率換気システムの導入による喫煙室内空気環境の改善に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第83巻, 第745号, pp.285-292, 2018年3月
- 2) 小川大州, 武藤佳武, 森正夫, 木下裕登: 病院におけるトルネード局所換気システムの開発と評価 (第4報) 低風量での性能向上および換気効率の数値化に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (鹿児島), pp.145-148, 2016年9月
- 3) 加藤美好, 三宅伸幸, 樋渡潔, 齋藤正文, 張本和芳: 天井吹出型パーソナル空調システムの研究 その5 外気高効率供給タイプ空調機の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.931-932, 2009年8月
- 4) 小嶋純: トレーサーガスをを用いた局所排気フードの捕集能力評価, 産業衛生学雑誌, 49巻, pp.209-215, 2007年